令和３年度

低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業
地下空洞型処分調査技術高度化開発

報　告　書

令和4年３月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

東電設計株式会社

本報告書は、以下の構成でとりまとめています。

第１章～第７章

なお、以下の資料を合わせて添付します。

添付資料－１～添付資料－４

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター並びに東電設計株式会社が実施した令和３年度低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業（地下空洞型処分調査技術高度化開発）の成果をとりまとめたものです。

はじめに

地下 70m 以深の大断面の地下空洞に構築されたコンクリートの処分ピットと、その周囲を覆うベントナイトの緩衝材等から構成される地下空洞型処分施設は、低レベル放射性廃棄物に区分される発電所廃棄物や TRU 廃棄物（地層処分相当の廃棄物を除く）の処分施設として、各種の検討がなされている。地下空洞型処分施設は、低レベル放射性廃棄物のうち、比較的放射能レベルの高い廃棄物を対象としていることや、地下 70m 以深の地下空洞に建設する処分施設であるため、これまでに実績のある浅地中処分施設とは異なる調査・計測・計画・設計・施工技術が必要とされている。

平成 19 年度から平成 26 年度まで経済産業省資源エネルギー庁からの低レベル放射性廃棄物の処分に関する委託事業として、地下空洞型処分施設を模擬した実規模施設において施工試験を実施し、その施工技術を実証的に整備してきた。また、平成 27 年度から平成 31 年度までの委託事業では、施設の安全性確認のためのモニタリングを研究テーマとして、施設機能確認のための考え方・手法・技術を整備した。ただし、地下空洞型処分においては、規制基準の動向を踏まえると、更なる技術開発や研究開発が望まれる課題も残されている。

本事業である「地下空洞型処分調査技術高度化開発」は、こうした状況を踏まえ、地下空洞型処分施設を対象とし、大規模な坑道や地下空洞型処分施設などを建設する上で必要となる、岩盤にかかる初期地圧の三次元的な分布を測定する技術の開発を始めとした中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化開発を行うと共に、最適な施設設計を支援するための手法の検討を始めとした中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化開発を行うものである。

本事業の成果は、同様の処分施設形態が検討されている TRU 廃棄物の地層処分についても、共通の基盤技術として幅広く反映可能であり、また、将来の処分施設の機能確認に対して極めて重要な情報を提供するものである。

5 ヵ年にわたる本事業の 2 年目となる令和 3 年度は、上記の状況を十分踏まえた上で、いずれの研究開発テーマについても初年度に策定した事業の全体計画に基づき、具体的な技術開発や研究開発を進めた。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施するものである。

目　次

第 1 章 全体概要 1-1
1.1 本事業の背景と目的 1-1
1.1.1 本事業の背景 1-1
1.1.2 本事業の目的 1-1
1.2 本事業の概要 1-3
1.2.1 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化 1-3
(1) 初期地圧測定技術の高度化開発 1-3
(2) 地下水流動評価技術の調査 1-4
(3) 地震時影響評価技術の検討及び地震動観測 1-4
1.2.2 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化 1-4
(1) 既往検討成果の調査と技術オプションの検討 1-4
(2) ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究 1-4
1.2.3 情報収集及び委員会の設置・運営 1-5
(1) 情報収集 1-5
(2) 委員会の設置・運営 1-5
1.3 令和 3 年度の実施概要 1-5
1.3.1 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化 1-6
(1) 初期地圧測定技術の高度化開発 1-6
(2) 地下水流動評価技術の調査 1-9
(3) 地震時影響評価技術の検討及び地震動観測 1-10
1.3.2 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化 1-12
(1) 既往検討成果の調査と技術オプションの検討 1-12
(2) ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究 1-14
1.3.3 情報収集及び委員会の設置・運営 1-16
(1) 情報収集 1-16
(2) 委員会の設置・運営 1-16
第 1 章の参考文献 1-18

第 2 章 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化の内、初期地圧測定技術の高度化開発 2-1
2.1 試験装置の基本設計 2-1
2.1.1 方法決定の背景 2-1
2.1.2 測定手順の検討と技術課題の整理 2-4
(1) 測定深度以浅までの掘削 2-5

(2) パイロットボーリング及び孔底整形 2-6
(3) ひずみ計設置 2-7
(4) オーバーコアリング及びコア回収 2-8
(5) 感度試験 2-9
2.1.3 解析方法の検討と技術課題の整理 2-11
2.1.4 技術課題の検討 2-12
(1) 孔形状及びひずみ計の最適配置の検討 2-12
(2) 接着方法及び接着剤の検討 2-17
(3) 接着方法及び接着剤の検討のための基礎試験 2-22
(4) 接着方法及び接着剤の検討のための岩石ブロックを利用した試験 2-27
(5) ストレインセルの検討 2-48
(6) データロガーの検討 2-48
(7) 掘削ツールスの検討 2-51
(8) 孔内状況確認方法の検討 2-53
(9) 感度試験方法の検討 2-55
2.1.5 今後の技術課題の整理 2-57
2.1.6 今後の検証試験内容と設計製作計画の検討 2-58
(1) 室内での検証試験 2-58
(2) 現場での検証試験 2-59
2.1.7 開発工程と実績 2-60
2.1 節の参考文献 2-63
2.2 初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討 2-64
2.2.1 検討概要 2-64
(1) 全体計画 2-64
(2) 選定した解析手法 2-66
(3) 本年度の検討内容 2-70
2.2.2 解析手法の適用性検討 2-72
(1) 検討の目的 2-72
(2) DEM 解析について 2-72
(3) 三軸圧縮試験の再現解析 2-72
(4) 水圧破砕法試験の再現解析 2-75
(5) まとめ 2-77
2.2.3 初期地圧測定装置の仕様の検討 2-78
(1) 検討の目的 2-78
(2) 円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの 3D-FEM 解析 2-78
(3) 円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの 3D-DEM 解析 2-100

2.2.4 まとめ 2-118
2.2 節の参考文献 2-121

第 3 章 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化の内、地下水流動評価技術の調査 3-1
3.1 調査の目的と検討項目 3-1
3.1.1 調査の目的 3-1
3.1.2 調査の概要 3-1
(1) 令和 2 年度（前年度） 3-1
(2) 令和 3 年度 3-1
3.1.3 実施スケジュール 3-2
(1) 実施スケジュール 3-2
(2) 全体検討フロー 3-2
3.2 文献調査結果 3-3
3.2.1 第二種廃棄物中深度処分の規制基準等における検討状況と要求事項の調査・整理 3-3
(1) 骨子 3-3
(2) 検討概要 3-3
(3) 検討結果 3-4
3.2.2 放射性廃棄物処分に係る地下水流動調査・評価技術に関する文献情報の調査・整理 3-7
(1) 土木学会　エネルギー委員会：「余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオを用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方」、土木学会エネルギー委員会・低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会報告書、平成 20 年 6 月． 3-7
(2) 原子力環境整備促進・資金管理センター：「地下水流動を説明するための調査システムフローの評価－RWMC と NDA の共同研究報告書―」、2010 年 2 月． 3-7
(3) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構：「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－」、2005 年 9 月． 3-8
(4) 原子力発電環境整備機構：「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築－、レビュー版　概要編」、NUMO-TR-18-02、2018 年 11 月． 3-8
3.2.3 不均質性を考慮した地質環境モデル及び水理地質構造モデルのモデル化手法に関する文献調査 3-13
(1) 骨子 3-13
(2) 調査結果 3-14
3.2.4 中深度処分に係る地下水流動の調査・評価の方法論と技術に関する文献調査 3-16

(1) 事業展開の段階ごとの調査・評価スケールと地質環境モデルの構築－高レベル廃棄物処分の段階的なサイト選定調査に係る検討事例－ 3-16
(2) 水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造モデルの構築 3-21
(3) 中深度処分の安全評価等における地下水移行シナリオの評価に係る地下水流動の調査・評価の技術・方法論に関する検討事例の整理 3-23
3.2.5 中深度処分事業展開と規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価の実施項目及び技術的要件等の検討 3-36
(1) 低レベル放射性廃棄物（LLW）中深度処分の概念 3-36
(2) LLW 中深度処分事業の段階的な展開の考え方と各段階における地下水流動の調査・評価に係る要求事項の整理 3-36
3.2.6 地下水流動調査・評価に関する今後の技術課題の抽出と技術開発の方向性の概略検討 3-45
(1) 中深度処分事業展開における地下水流動・調査評価の全体像 3-45
(2) 事業段階と適用部位を考慮した地下水流動の調査・評価の調査項目と今後の技術課題の抽出 3-47
3.3 今後の主な技術の高度化開発課題の概略検討（骨子案） 3-47
3.3.1 地質環境モデルの不均質性及び地下水流動解析評価の不確実性に関する評価方法の体系化 3-48
(1) 地層処分研究開発における地下水流動解析評価に技術課題の骨子 3-48
(2) 課題への対応方策の方向性案 3-48
3.3.2 事業段階と規制要求を考慮した地下水等モニタリング統合化システムの構築 3-50
(1) 技術高度化開発課題の骨子 3-50
(2) 課題への対応方策の方向性案 3-50
(3) 課題対応のための高度化技術が必要な個別技術候補課題の抽出 3-51
3.4 中深度処分の事業展開・規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価技術の主な技術課題の抽出と論点整理 3-54
3.4.1 中深度処分規制要求への対応を考慮した技術課題の抽出と論点整理 3-54
(1) 中深度処分に係る埋設地における放射性物質の漏えい監視と定期的な評価 3-55
(2) 監視測定設備の要件とそれへの対応事項の整理 3-55
(3) 中深度処分の事業展開と規制要求を考慮した今後の技術課題の抽出 3-57
3.4.2 中深度処分における不確実性への対処に関す規制の考え方と技術課題の整理 3-58
(1) 廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に係る規制要求の考え方 3-58
(2) 被ばく線量評価におけるパラメータ（天然バリア、人工バリア）の変動範囲と不確実性を考慮した設定の考え方 3-60
(3) 状態設定の不確実性を考慮した設計オプションとパラメータ設定の考え方 3-63

3.4.3 高レベル放射性廃棄物地層処分の包括的技術報告書(NUMO)における不確実性への対処の検討事例 3-65
(1) 高レベル廃棄物処分における段階的なサイト選定における不確実性への対処の考え方 3-65
(2) 高レベル廃棄物処分における段階的なサイト選定における不確実性への対処の考え方 3-66
(3) 地質環境の調査・評価におけるデータ及び地質環境モデルの不確実性への対処 3-67
(4) 処分場の設計・建設・操業・閉鎖に関する不確実性への対処 3-67
(5) 安全評価に関わる不確実性への対処 3-68
(6) 不確実性評価方法体系の構築概念の JAEA の検討例 : 地質環境モデルの不均質性・地下水流動解析評価の総合的な品質マネジメント 3-70
3.5 今後の主要な技術課題の抽出と検討の方向性（まとめ） 3-71
(1) 中深度処分事業展開の各段階の地質地下水環境状態変化の把握 3-72
(2) 中深度処分における地下水流動評価の不確実性評価・品質確認方法の体系化整備 3-72
(3) 中深度処分の地下水環境・バリア性能に係る監視モニタリング技術と監視・管理方法の体系化整備 3-74
第 3 章の参考文献 3-81

第 4 章 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、地震時影響評価技術の検討及び地震動観測 4-1
4.1 地震時影響評価技術の検討 4-1
4.1.1 検討概要 4-1
(1) 検討目的 4-1
(2) 既往検討の成果 4-1
(3) 今年度の検討概要 4-3
(4) 検討フロー 4-3
(5) 検討工程 4-5
4.1.2 緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討 4-6
(1) 概要 4-6
(2) 観測地震動の分析評価 4-7
(3) 解析手法による緩み領域等の影響検討 4-32
4.1.3 地下及び地上の観測地震動の整合性の確認 4-54
(1) 概要 4-54
(2) 検討ケース 4-54

(3) 解析条件 4-54
(4) 解析結果と観測結果の比較分析 4-54
4.1.4 引戻し解析手法の改良項目の選定 4-56
(1) 減衰定数の周波数依存性の考慮 4-56
(2) 逆解析による地盤物性の同定 4-59
4.1.5 まとめ 4-63
4.1 節の参考文献 4-64
4.2 地震動観測 4-65
4.2.1 検討概要 4-65
4.2.2 地震計設置状況 4-65
(1) 計測システムの仕様 4-65
(2) 地震計の設置状況 4-66
4.2.3 地震計メンテナンス・計測データ回収 4-70
(1) メンテナンス方法 4-70
(2) データ回収方法 4-71
(3) データ整理方法 4-72
(4) 地震動データ取得一覧 4-73
(5) 地震動データ 4-76
(6) 計測坑 C の地震動データ 4-113
4.2.4 地下の地震計測システムの見直し 4-125
(1) 計測坑 C の地震観測の状況 4-125
4.2.5 地表面の地震計設置 4-128
(1) 実施概要 4-128
(2) 地震計の設置方法 4-128
(3) 地震計の設置場所 4-130
(4) 設置場所の地耐力の確認 4-133
(5) 地震計の設置方向 4-135
(6) 地震計の設置場所の座標と高さ 4-136
(7) 地表面と地下の地震計の位置関係 4-138
(8) 地震計の機器選定 4-139
(9) 計測小屋の設置 4-139
(10) 太陽光発電の設置 4-140
(11) 地表面の地震計設置のまとめ 4-142

第 5 章 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、既往検討成果の調査と技術オプションの検討 5-1

5.1 既往検討成果の調査 5-1
5.1.1 調査の目的及び調査対象 5-1
5.1.2 中深度処分の規制に関する調査・整理 5-1
(1) 規制内容 5-2
(2) 中深度処分の規制に関する調査・整理のまとめ 5-15
5.1 節の参考文献 5-16
5.2 技術オプションの検討 5-17
5.2.1 検討フローの策定及び検討条件の設定 5-17
(1) はじめに 5-17
(2) 検討条件の設定 5-20
(3) 検討フローの策定 5-21
5.2.2 長期安全性に係る感度解析 5-22
(1) 感度解析の検討方針と概要 5-22
(2) 解析条件の設定 5-24
(3) 感度解析結果 5-34
(4) 感度解析結果の考察と課題の抽出 5-52
5.2.3 オプション抽出 5-73
(1) オプション抽出に関する考え方の整理 5-73
(2) 部材厚を増大する場合の考え方 5-75
(3) 部材厚を低減する場合の考え方 5-76
(4) 岩盤特性に応じたオプションの抽出 5-93
5.2.4 オプションの絞り込み手法の検討 5-103
(1) 処分方式の検討における評価項目の設定及びその考え方 5-103
(2) 処分場の概略検討における評価項目の設定及び考え方 5-111
(3) 設計オプションに対する評価の試行 5-111
5.2.5 まとめと技術課題の整理 5-120
(1) 令和 3 年度のまとめ 5-120
(2) 技術課題の整理と今後の方針 5-121
5.2 節の参考文献 5-125

第 6 章 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究 6-1
6.1 研究の背景と目的 6-1
6.2 年度計画及び実施内容 6-2
6.2.1 令和 3 年度の実施計画と実施工程 6-2
6.2.2 令和 3 年度の実施内容 6-3

(1) ベントナイト系材料の透水特性データの取得 6-3
6.3 実験結果 6-12
6.3.1 ベントナイト系材料の透水特性データの取得 6-12
(1) 室内締固め～透水試験（実験 A,B） 6-12
(2) 実体顕微鏡及び SEM による構造観察（実験 C） 6-17
(3) 中性子イメージング実験（実験 D） 6-19
6.3.2 ベントナイト系材料の透水特性メカニズムに関する評価・検討 6-24
(1) 室内締固め～透水試験結果を用いた透水特性メカニズムの評価 6-24
(2) 構造観察結果に関する考察 6-39
(3) 中性子イメージング実験結果に基づく透水特性メカニズムの検討 6-47
(4) 現時点での技術的課題と今後の方策 6-54
6.4 まとめ 6-59
第 6 章の参考文献 6-68

第 7 章 まとめ 7-1
7.1 本事業のまとめ 7-1
7.1.1 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化 7-1
(1) 初期地圧測定技術の高度化開発 7-1
(2) 地下水流動評価技術の調査 7-2
(3) 地震時影響評価技術の検討及び地震動観測 7-2
7.1.2 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化 7-3
(1) 既往検討成果の調査と技術オプションの検討 7-3
(2) ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究 7-3

添付資料-1 六ヶ所の軽石凝灰岩ブロックの試料採取（第 2 章 2.1 2.1.4 (4) 1）参照）に係る現場写真

添付資料-2 地下水流動評価技術の調査（第 3 章）の付録

添付資料-3 セメント系材料の熱影響に関する調査・整理

添付資料-4 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究（第 6 章）に係る実験データ集

図目次

図 1.1-1　中深度処分の廃棄物埋設施設のイメージ 1-2
図 1.2-1　本事業の全体フロー 1-3
図 1.3-1　各条件（接着剤、養生時間）での接着状態 1-7
図 1.3-2　応力-ひずみ曲線と微視クラック発生数（cb=65,fric=0.3） 1-9
図 1.3-3　中深度処分の今後の重要な技術課題の抽出と今後の高度化・開発の方向性 1-10
図 1.3-4　2 次元地震応答解析モデル 1-11
図 1.3-5　フーリエスペクトル比（①/④）の解析結果と観測結果の比較 1-11
図 1.3-6　感度解析結果（低拡散層の部材厚） 1-12
図 1.3-7　母岩 A に対するオプションの相関関係（左：対数軸、右：線形軸） 1-14
図 1.3-8　ベントナイト系材料の透水特性データの取得と研究のフレームワーク 1-16
図 1.3-9　λk・εk 実験（実験 B）の結果（ベントナイト混合土） 1-16

図 2.1-1　円錐孔壁ひずみ法の概念図 2-3
図 2.1-2　円錐孔壁ひずみ法の測定の流れ 2-4
図 2.1-3　円錐孔壁ひずみ法手順①　測定深度以浅までの掘削 2-5
図 2.1-4　円錐孔壁ひずみ法手順②　パイロットボーリングの掘削 2-6
図 2.1-5　円錐孔壁ひずみ法手順③　ひずみ計設置 2-7
図 2.1-6　円錐孔壁ひずみ法手順④　オーバーコアリング及びコア回収 2-8
図 2.1-7　円錐孔壁ひずみ法手順⑤　感度試験 2-10
図 2.1-8　ゲージ位置 r0 及び頂角 ω による cii の変化 2-13
図 2.1-9　パイロット孔の長さ h によるひずみ感度係数の変化（εθ） 2-14
図 2.1-10　パイロット孔の長さ h によるひずみ感度係数の変化（ερ） 2-15
図 2.1-11　パイロット孔の長さ h によるひずみ感度係数の変化（εφ） 2-16
図 2.1-12　接着方法案①　ピストン型（接着剤注入・貼付装置の一体型） 2-18
図 2.1-13　接着方法案②　ピストン型（接着剤注入・貼付装置の一体型） 2-18
図 2.1-14　接着方法案③　どぶづけ型 その１（接着剤注入・貼付装置の分離型） 2-20
図 2.1-15　接着方法案④　どぶづけ型 その２（接着剤注入・貼付装置の分離型） 2-20
図 2.1-16　接着方法案⑤　直接塗布型（ダイビングベル方式） 2-21
図 2.1-17　接着剤の硬化前の状態 2-22
図 2.1-18　直接塗布型を想定した接着試験状況 2-23
図 2.1-19　どぶづけ型を想定した接着試験状況 2-23
図 2.1-20　各条件（接着剤、養生時間）での接着状態 2-24
図 2.1-21　各接着剤の接着状態と結果の評価 2-25
図 2.1-22　一軸圧縮試験による接着剤の感度比較試験の実施状況 2-26

図 2.1-23　一軸圧縮試験による接着剤の感度比較試験結果 2-26
図 2.1-24　ブロック試料の採取の流れ 2-27
図 2.1-25　ブロック試料の採取位置の概要 2-27
図 2.1-26　ブロック試料の採取位置 2-28
図 2.1-27　計測坑 B 入口付近発電機設置位置 2-29
図 2.1-28　発電機の配置とブロック試料採取作業位置の概要 2-30
図 2.1-29　採取区間の路盤面の清掃(岩盤出し) 2-30
図 2.1-30　ブロック試料の採取概要図 2-31
図 2.1-31　ブロック試料採取の進行と埋戻し 2-32
図 2.1-32　ブロック試料採取位置 2-33
図 2.1-33　ブロック試料の状況（試料 1） 2-34
図 2.1-34　ブロック試料の状況（試料 2） 2-35
図 2.1-35　ブロック試料の状況（試料 3） 2-36
図 2.1-36　ブロック試料の状況（試料 4） 2-37
図 2.1-37　ブロック試料の状況（試料 5） 2-38
図 2.1-38　ブロック試料の状況（試料 6） 2-39
図 2.1-39　大谷石ブロックへのストレインセルの貼付 2-40
図 2.1-40　大谷石ブロックを用いた二軸載荷試験 2-40
図 2.1-41　HIC 接着剤（混合前の硬化剤と樹脂） 2-41
図 2.1-42　大谷石を対象とした二軸載荷試験のひずみゲージの配置と載荷パターン 2-41
図 2.1-43　大谷石を対象とした二軸載荷試験の x 軸載荷圧力とひずみの関係 2-43
図 2.1-44　大谷石を対象とした二軸載荷試験後のストレインセルと周辺岩盤の切断面 .. 2-44
図 2.1-45　軽石凝灰岩を対象とした二軸載荷試験状況 2-45
図 2.1-46　軽石凝灰岩を対象とした二軸載荷試験の x 軸載荷圧力とひずみの関係（試料 4）
..... 2-45
図 2.1-47　軽石凝灰岩を対象とした二軸載荷試験の x 軸載荷圧力とひずみの関係（試料 3）
..... 2-46
図 2.1-48　二軸載荷試験後に取り出した直後のブロック試料の各面の状況（試料４） .. 2-47
図 2.1-49　今後製作予定の室内検証試験用ストレインセルの寸法図 2-48
図 2.1-50　ひずみ計孔内設置時のデータロガーの設置状況模式図 2-50
図 2.1-51　過去に開発されたデータロガーの例と構成の説明 2-50
図 2.1-52　パイロットボーリング及び孔底整形用の掘削ツールス（室内試験用） 2-51
図 2.1-53　大谷石ブロックを用いた掘削試験状況 2-52
図 2.1-54　軽石凝灰岩ブロックを用いた掘削試験状況 2-52
図 2.1-55　孔内撮影用カメラによる主な観察対象 2-53
図 2.1-56　OBI2 ボアホールカメラ 2-54

図 2.1-57　OBI2 ボアホールカメラ適用性確認試験状況 2-54
図 2.1-58　OBI2 ボアホールカメラ適用性確認試験結果 2-55
図 2.1-59　感度試験の概念図 2-56
図 2.1-60　適用可能な二軸感度試験機の例 2-56
図 2.1-61　無負荷状態での室内オーバーコアリング試験方法 2-58
図 2.1-62　二軸載荷状態での室内オーバーコアリング試験方法 2-59
図 2.1-63　二重解放コア変形法の概念 2-60
図 2.2-1　円錐孔壁ひずみ法 2-65
図 2.2-2　「初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討」の全体検討フロー 2-66
図 2.2-3　軟岩の応力－ひずみ曲線と破壊形態 2-67
図 2.2-4　応力-ひずみ関係 2-68
図 2.2-5　破壊時の供試体の形態 2-68
図 2.2-6　軟岩の破壊規準 2-69
図 2.2-7　オーバーコアリング時に発生した亀裂 2-69
図 2.2-8　本年度の検討概要 2-70
図 2.2-9　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線（砂質軽石凝灰岩、深度 95.15m～96.15m）
..... 2-72
図 2.2-10　三軸圧縮試験の解析モデル 2-73
図 2.2-11　破壊形状の比較 2-74
図 2.2-12　三軸圧縮試験シミュレーションによるフィッティング結果 2-74
図 2.2-13　水圧破砕法試験結果経時変化図（砂質軽石凝灰岩、深度 95.1m） 2-75
図 2.2-14　水圧破砕シミュレーションのモデル 2-76
図 2.2-15　水圧破砕シミュレーションによるクラック発生の様子 2-76
図 2.2-16　水圧破砕法試験結果（側圧比と標高の関係） 2-79
図 2.2-17　PS 検層結果（土被りと速度の関係） 2-80
図 2.2-18　圧密圧力と軸差強度の関係 2-81
図 2.2-19　岩盤強度 2-82
図 2.2-20　解析モデルで考慮する測定装置周辺の寸法 2-83
図 2.2-21　解析モデル（全体） 2-84
図 2.2-22　解析モデル（ボーリング箇所詳細） 2-84
図 2.2-23　解析ステップ 2-85
図 2.2-24　パラメータスタディの対象 2-87
図 2.2-25　ケース別モデル寸法 2-87
図 2.2-26　局所安全率分布（レファレンスケース） 2-88
図 2.2-27　局所安全率 fs の定義 2-89
図 2.2-28　岩盤応力状態 2-89

図 2.2-29　ひずみゲージの配置 2-90
図 2.2-30　ひずみゲージの測定方向 2-90
図 2.2-31　解放ひずみ（レファレンスケースの解析結果と既往測定結果） 2-92
図 2.2-32　ストレインセル角度 2-93
図 2.2-33　ひずみゲージの配置 2-93
図 2.2-34　ストレインセル角度の影響の比較 2-94
図 2.2-35　薄肉部厚 2-95
図 2.2-36　オーバーコアリング終了時の局所安全率（薄肉部厚の影響の比較） 2-96
図 2.2-37　薄肉部鉛直長 2-97
図 2.2-38　オーバーコアリング終了時の局所安全率（薄肉部鉛直長の影響の比較） 2-98
図 2.2-39　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線(P1） 2-101
図 2.2-40　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線(P2） 2-101
図 2.2-41　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線(P3） 2-101
図 2.2-42　3 軸圧縮試験の圧密圧力と軸差強度 2-102
図 2.2-43　応力-ひずみ曲線（拘束圧 1.1MPa） 2-102
図 2.2-44　検討モデル（粒子でモデル化) 2-103
図 2.2-45　各ケースの応力-ひずみ曲線 2-104
図 2.2-46　cb=80 fric=0.20 の変位ベクトル図（ひずみ 16%時） 2-104
図 2.2-47　粒子形状：クランプ（非円形粒子） 2-105
図 2.2-48　応力―ひずみ曲線の比較（粒子形状：クランプ） 2-106
図 2.2-49　応力-ひずみ曲線と微視クラック発生数（cb=65,fric=0.3） 2-107
図 2.2-50　変位ベクトル（粒子形状：クランプ（非円形粒子)） 2-107
図 2.2-51　解析モデル 2-108
図 2.2-52　解析領域（詳細着目領域） 2-109
図 2.2-53　解析領域（全体） 2-109
図 2.2-54　各掘削ステップでの解析モデル 2-110
図 2.2-55　微視クラック分布（ストレインセル部）断面図 2-111
図 2.2-56　微視クラック分布図（オーバーコアリング開始前の累積微視クラック） 2-112
図 2.2-57　微視クラック分布図（オーバーコアリング時の増分微視クラック） 2-113
図 2.2-58　微視クラック発生数（オーバーコアリング時） 2-114
図 2.2-59　微視クラック累積数（オーバーコアリング時） 2-115
図 2.2-60　微視クラック抽出領域 2-115
図 2.2-61　三軸圧縮シミュレーションのクラック発生密度 2-116

図 3.1-1　本調査研究の全体検討フロー 3-3
図 3.2-1　処分場の設計フロー 3-10

図 3.2-2　調査スケールと空間スケールの関係（三枝、NUMO） 3-17
図 3.2-3　地質環境・地質環境特性・地質環境モデル（SDM）（三枝、NUMO） 3-18
図 3.2-4　地質環境モデルの構築（空間スケールに応じたモデル化手法）（三枝、NUMO） 3-18
図 3.2-5　地質環境モデルの例（深成岩類）（三枝、NUMO） 3-19
図 3.2-6　地質環境モデルの例（新第三紀堆積岩類）（三枝、NUMO） 3-19
図 3.2-7　解析適用事例（深成岩類の処分場スケールにおける地下水流動解析）（三枝、NUMO） 3-20
図 3.2-8　地質環境モデルの例（地質環境モデルの活用例）（三枝、NUMO） 3-21
図 3.2-9　水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造モデル構築の流れ（三枝 他、JAEA） 3-22
図 3.2-10　水理地質構造モデル構築及び地下水流動解析の流れ（三枝 他、JAEA） 3-22
図 3.2-11　割れ目と水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル構築の方法論（三枝 他、JAEA） 3-23
図 3.2-12　地下水シナリオで用いる主な核種移行評価パラメータ（土木学会） 3-24
図 3.2-13　天然バリアに係る核種移行評価パラメータ設定のフロー（例）（土木学会） 3-25
図 3.2-14　調査から水理地質モデルの作成までのフロー（例）（土木学会） 3-27
図 3.2-15　高透水部・低透水部の抽出からモデル化までの作業フロー（例）（土木学会） 3-29
図 3.2-16　地下水流動解析による核種移行評価パラメータの評価・設定フロー（例）（土木学会） 3-32
図 3.2-17　地下水流動解析モデル確証の検討フロー（例）（土木学会） 3-33
図 3.2-18　地球化学的手法を用いた地下水調査体系化、地下水流動評価項目と調査手法 3-35
図 3.2-19　中深度処分施設の設計概念について 3-36
図 3.2-20　中深度処分事業の基本的な段階的プロセス 3-37
図 3.2-21　LLW 中深度処分事業展開と地下水流動の調査評価に係る 3-46
図 3.3-1　地質環境モデルの不均質性・地下水流動解析評価の品質マネジメント・不確実性評価手法の体系化構築概念図 3-49
図 3.3-2　ドローン技術を活用した地表・坑道内の管理モニタリング統合化システム構築概念図 3-52
図 3.3-3　地下水等モニタリング統合化システム構築の概念図 3-53
図 3.4-1　中深度処分の段階ごとの規制の考え方 3-54
図 3.4-2　中深度処分の埋設地での放射性物質漏えいの監視と定期的な評価 3-55
図 3.4-3　中深度処分の事業展開と規制要求を考慮した今後の技術課題の抽出 3-57
図 3.4-4　中深度処分廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基

準」に係る規制要求の考え方（前半） 3-59
図 3.4-5　中深度処分廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に係る規制要求の考え方（後半） 3-60
図 3.4-6　中深度処分埋設施設の被ばく線量評価におけるパラメータ（天然バリア、人工バリア）の変動範囲と不確実性を考慮した設定の考え方 3-62
図 3.4-7　設計オプションからの最終的な設計の選定における状態設定の不確実性を考慮した設計オプションとパラメータ設定の考え方 3-64
図 3.4-8　HLW 地層処分における段階的なサイト選定における不確実性への対処の考え方 3-66
図 3.5-1　中深度処分の今後の重要な技術課題の抽出と今後の高度化・開発の方向性 3-71
図 3.5-2　中深度処分事業展開の各段階の地質地下水環境状態変化の把握と対応の方向性 3-72
図 3.5-3　中深度処分における地下水流動評価の不確実性評価・品質確認方法の体系化整備 3-73
図 3.5-4　地質環境モデルの不均質性・地下水流動解析評価の総合的な品質マネジメントに関する調査研究事例（三枝 他(JAEA)、2015） 3-73
図 3.5-5　中深度処分の地下水環境・バリア性能に係る監視モニタリング技術と監視・管理方法の体系化整備の考え方 3-75
図 3.5-6　中深度処分の事業展開と地下水等監視モニタリング展開の考え方 3-76
図 3.5-7　中深度処分における地下水等監視モニタリング概念の全体構成イメージ 3-77
図 3.5-8　監視測定設備の概念事例（スイス NAGRA の地層処分場計画での検討例） ... 3-78
図 3.5-9　事業段階と規制要求を考慮した地下水等監視モニタリング統合化システムの構築案(1/2) 3-79
図 3.5-10　事業段階と規制要求を考慮した地下水等監視モニタリング統合化システムの構築案(2/2) 3-80

図 4.1-1　解析結果と観測結果の乖離に関する想定原因の抽出及び対応策の概要 4-2
図 4.1-2　5 ヶ年実施計画のフロー（案）における令和 3 年度の検討内容の位置づけ 4-4
図 4.1-3　試験空洞掘削前後の各計測結果の比較（インバート部の横断面図） 4-6
図 4.1-4　緩み領域の影響のイメージ 4-6
図 4.1-5　緩み領域における増幅のイメージ 4-31
図 4.1-6　モデル対象位置 4-32
図 4.1-7　検討ケース 4-32
図 4.1-8　ひずみ依存特性（Tpt） 4-34
図 4.1-9　フーリエスペクトル 4-37
図 4.1-10　フーリエスペクトル比 4-37

図 4.1-11　解析モデル 4-38
図 4.1-12　インバート下部の緩み領域なし（ケース 1） 4-38
図 4.1-13　インバート下部の緩み領域あり（ケース 2） 4-39
図 4.1-14　地震応答解析モデル（全体） 4-39
図 4.1-15　地震応答解析モデル（試験空洞） 4-40
図 4.1-16　試験空洞近傍の地質構造（試験空洞縦断面） 4-40
図 4.1-17　地層分割図 4-43
図 4.1-18　引戻し解析モデル 4-45
図 4.1-19　地表面の地震計⑤のデータ（2021 年 12 月 6 日、上：水平方向、下：鉛直方向） 4-47
図 4.1-20　入力地震動（上：水平方向、下：鉛直方向)） 4-47
図 4.1-21　2021 年 12 月 6 日の観測地震動と類似する観測地震動の抽出 4-53
図 4.1-22　フーリエスペクトル比（①/④）の解析結果と観測結果の比較 4-53
図 4.1-23　1 次元モデルによる引戻し解析 4-57
図 4.1-24　SHAKE における減衰の周波数依存の模式図 4-57
図 4.1-25　鉛直アレー観測システムの概要 4-60
図 4.1-26　PS 検層結果と遺伝的アルゴリズムによる同定結果 4-60
図 4.1-27　地震計⑤（地表）と地震計④（地下）の平面位置の関係 4-61
図 4.1-28　地震計⑤と地震計④の位置の 1 次元モデル（案） 4-62
図 4.2-1　地震計の設置位置平面図（全体）と設置状況 4-67
図 4.2-2　地震計の設置位置（試験施設） 4-68
図 4.2-3　計測設備の配置 4-69
図 4.2-4　 RWMC 現場計測室　機器設置のネットワーク図 4-69
図 4.2-5　KiK-net 六ヶ所のデータの方位補正 4-72
図 4.2-6　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-76
図 4.2-7　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-76
図 4.2-8　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-77
図 4.2-9　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-77
図 4.2-10　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-78
図 4.2-11　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-78
図 4.2-12　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-79
図 4.2-13　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-79
図 4.2-14　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-80
図 4.2-15　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-80
図 4.2-16　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-81
図 4.2-17　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-81

図 4.2-18　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-82
図 4.2-19　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-82
図 4.2-20　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-83
図 4.2-21　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-83
図 4.2-22　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-84
図 4.2-23　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-84
図 4.2-24　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-85
図 4.2-25　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-85
図 4.2-26　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-86
図 4.2-27　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-86
図 4.2-28　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-87
図 4.2-29　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-87
図 4.2-30　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-88
図 4.2-31　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-88
図 4.2-32　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-89
図 4.2-33　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-89
図 4.2-34　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-90
図 4.2-35　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-90
図 4.2-36　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-91
図 4.2-37　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-91
図 4.2-38　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-92
図 4.2-39　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-92
図 4.2-40　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-93
図 4.2-41　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-93
図 4.2-42　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-94
図 4.2-43　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-94
図 4.2-44　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-95
図 4.2-45　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-95
図 4.2-46　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-96
図 4.2-47　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-96
図 4.2-48　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-97
図 4.2-49　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-97
図 4.2-50　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-98
図 4.2-51　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-98
図 4.2-52　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-99
図 4.2-53　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-99

図 4.2-54　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-100
図 4.2-55　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-100
図 4.2-56　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-101
図 4.2-57　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-101
図 4.2-58　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-102
図 4.2-59　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-103
図 4.2-60　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-103
図 4.2-61　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-104
図 4.2-62　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-104
図 4.2-63　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-105
図 4.2-64　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-106
図 4.2-65　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-106
図 4.2-66　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-107
図 4.2-67　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-107
図 4.2-68　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-108
図 4.2-69　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-108
図 4.2-70　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-109
図 4.2-71　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ 4-109
図 4.2-72　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-110
図 4.2-73　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-110
図 4.2-74　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-111
図 4.2-75　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-111
図 4.2-76　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-112
図 4.2-77　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-112
図 4.2-78　計測坑 C　地震動取得データ 4-113
図 4.2-79　計測坑 C　地震動取得データ 4-113
図 4.2-80　計測坑 C　地震動取得データ 4-114
図 4.2-81　計測坑 C　地震動取得データ 4-114
図 4.2-82　計測坑 C　地震動取得データ 4-115
図 4.2-83　計測坑 C　地震動取得データ 4-115
図 4.2-84　計測坑 C　地震動取得データ 4-116
図 4.2-85　計測坑 C　地震動取得データ 4-116
図 4.2-86　計測坑 C　地震動取得データ 4-117
図 4.2-87　計測坑 C　地震動取得データ 4-117
図 4.2-88　計測坑 C　地震動取得データ 4-118
図 4.2-89　計測坑 C　地震動取得データ 4-118

図 4.2-90　計測坑 C　地震動取得データ 4-119
図 4.2-91　計測坑 C　地震動取得データ（過去分） 4-120
図 4.2-92　計測坑 C　地震動取得データ（過去分） 4-121
図 4.2-93　計測坑 C　地震動取得データ（過去分） 4-121
図 4.2-94　計測坑 C　地震動取得データ（過去分） 4-122
図 4.2-95　計測坑 C　地震動取得データ（過去分） 4-122
図 4.2-96　計測坑 C　地震動取得データ（過去分） 4-123
図 4.2-97　計測坑 C　地震動取得データ（過去分） 4-123
図 4.2-98　計測坑 C　地震動取得データ（過去分） 4-124
図 4.2-99　地震計設置位置平面図（計測坑 C） 4-125
図 4.2-100　JNFL 現場計測室　既存計器の機器設置のネットワーク図 4-126
図 4.2-101　地震計の設置状況（計測坑 C） 4-127
図 4.2-102　地震計基礎の埋設の条件と構造図（気象庁基準） 4-129
図 4.2-103　地震計基礎の施工状況 4-129
図 4.2-104　地震計の設置状況 4-130
図 4.2-105　地震計の設置場所と地下の調査坑の全体図 4-130
図 4.2-106　段差の角度が急な場合の設置場所の適切な範囲（気象庁基準） 4-131
図 4.2-107　地震計の設置可能な範囲（拡大図） 4-132
図 4.2-108　地震計と土のう階段の設置場所（拡大図） 4-133
図 4.2-109　土のう階段の設置状況 4-133
図 4.2-110　調査位置図 4-134
図 4.2-111　地表面と地下の地震計の設置方向 4-135
図 4.2-112　測量杭の位置図 4-137
図 4.2-113　地表面と地下の地震計の位置関係 4-138
図 4.2-114　計測小屋（ヨド物置　積雪型　LMDS1818） 4-139
図 4.2-115　計測小屋設置状況 4-140
図 4.2-116　地表面の太陽光発電及び地震計測システムの配線 4-140
図 4.2-117　ソーラーパネルの設置状況 4-141
図 4.2-118　地震計基礎の構造図 4-142
図 4.2-119　地表面の全体平面図 4-143
図 4.2-120　地表面の全体断面図 4-144

図 5.2-1　想定される設計フロー 5-17
図 5.2-2　規制の考え方を踏襲した組合せ選定の考え方 5-19
図 5.2-3　本検討で整理した組合せ選定の考え方 5-19
図 5.2-4　基本とする処分概念及び人工バリア構成 5-20

図 5.2-5　基本とする廃棄体仕様 5-21
図 5.2-6　本検討における絞り込みフロー 5-21
図 5.2-7　母岩の透水係数を変動した場合の放出フラックス 5-23
図 5.2-8　解析モデルの概要 5-25
図 5.2-9　放出フラックス（線量換算）と母岩透水係数の関係 5-27
図 5.2-10　解析ケース 1-1 核種移行解析結果 5-35
図 5.2-11　解析ケース 2-1 核種移行解析結果 5-36
図 5.2-12　解析ケース 3-1 核種移行解析結果 5-37
図 5.2-13　解析ケース 4-1 核種移行解析結果 5-38
図 5.2-14　解析ケース 5-1 核種移行解析結果 5-39
図 5.2-15　解析ケース 1-2 核種移行解析結果 5-40
図 5.2-16　解析ケース 2-2 核種移行解析結果 5-41
図 5.2-17　解析ケース 3-2 核種移行解析結果 5-42
図 5.2-18　解析ケース 4-2 核種移行解析結果 5-43
図 5.2-19　解析ケース 5-2 核種移行解析結果 5-44
図 5.2-20　解析ケース 1-3 核種移行解析結果 5-45
図 5.2-21　解析ケース 2-3 核種移行解析結果 5-46
図 5.2-22　解析ケース 3-3 核種移行解析結果 5-47
図 5.2-23　解析ケース 4-3 核種移行解析結果 5-48
図 5.2-24　解析ケース 5-3 核種移行解析結果 5-49
図 5.2-25　低拡散層の厚さと線量の関係 5-53
図 5.2-26　低透水層の厚さと線量の関係 5-55
図 5.2-27　断面あたりの廃棄体数と線量の関係 5-57
図 5.2-28　低透水層の厚さと人工バリアからの放出率の低減率（短半減期核種） 5-60
図 5.2-29　低透水層の厚さと人工バリアからの放出率の低減率（中半減期核種） 5-61
図 5.2-30　低透水層の厚さと人工バリアからの放出率の低減率（長半減期核種） 5-62
図 5.2-31　低拡散層の厚さと人工バリアからの放出率の低減率（短半減期核種） 5-63
図 5.2-32　3 次元流動評価における形状モデル 5-65
図 5.2-33　流向の変化と高透水ゾーン内の水頭分布 5-66
図 5.2-34　高透水ゾーン内のダルシー流速 5-67
図 5.2-35　低拡散層中の透水係数を変化させた場合の線量の時間変化 5-70
図 5.2-36　感度解析結果（低拡散層の部材厚） 5-73
図 5.2-37　感度解析結果（低透水層の部材厚） 5-73
図 5.2-38　感度解析結果（断面当たりの廃棄体数） 5-74
図 5.2-39　ベースオプション 5-75
図 5.2-40　低拡散層の感度解析結果に 100μSv/y の考え方を適用した場合 5-76

図 5.2-41　低透水層の感度解析結果に 100μSv/y の考え方を適用した場合 5-76
図 5.2-42　地下空洞型処分施設の概念の例 5-77
図 5.2-43　処分空洞内での建設・操業工程（1/2） 5-80
図 5.2-44　処分空洞内での建設・操業工程（2/2） 5-81
図 5.2-45　底部低拡散層の施工フロー 5-83
図 5.2-46　底部低拡散材打設時の概念図 5-84
図 5.2-47　コンクリートピット施工フロー 5-84
図 5.2-48　型枠組立状況（左：前景、右：近景） 5-85
図 5.2-49　側部低拡散層の施工フロー 5-86
図 5.2-50　モルタル打設時の締固め有無 5-86
図 5.2-51　上部低拡散層の施工フロー 5-87
図 5.2-52　底部低透水層の施工フロー 5-88
図 5.2-53　低透水層の現場施工フロー 5-89
図 5.2-54　敷均し状況図（左：機械敷均し、右：人力敷均し） 5-90
図 5.2-55　小型振動ローラによる転圧の状況（左：機体幅 850mm、右：機体幅 610mm） 5-90
図 5.2-56　人力転圧の状況（左：エンジン式ランマー、右：電動ランマー） 5-90
図 5.2-57　ロボットによる吹付け 5-91
図 5.2-58　人力による吹付け 5-91
図 5.2-59　ロボット吊り下げ時の姿勢保持と移動の方法 5-92
図 5.2-60　オプション A-1 の断面図 5-94
図 5.2-61　オプション A-2 の断面図 5-95
図 5.2-62　オプション A-3 の断面図 5-95
図 5.2-63　オプション A-4 の断面図 5-96
図 5.2-64　オプション A-5 の断面図 5-96
図 5.2-65　オプション A-6 の断面図 5-97
図 5.2-66　オプション B-1 の断面図 5-98
図 5.2-67　オプション B-2 の断面図 5-98
図 5.2-68　オプション B-3 の断面図 5-99
図 5.2-69　オプション B-4 の断面図 5-99
図 5.2-70　オプション B-5 の断面図 5-100
図 5.2-71　オプション B-6 の断面図 5-100
図 5.2-72　オプション B-7 の断面図 5-101
図 5.2-73　オプション B-8 の断面図 5-101
図 5.2-74　オプション B-9 の断面図 5-102
図 5.2-75　SKB の絞り込み評価手法 5-103

図 5.2-76　設計フロー（再掲）..... 5-103
図 5.2-77　岩種に応じた処分坑道の断面形状..... 5-105
図 5.2-78　岩種に応じた高レベル放射性廃棄物処分場の処分区画の形状..... 5-105
図 5.2-79　天然バリオプションの条件を取り込む際の考え方..... 5-109
図 5.2-80　被ばく線量と事業費相関関係イメージ.....5-112
図 5.2-81　核種移行解析結果.....5-113
図 5.2-82　母岩 A に対するオプションの被ばく線量比率.....5-114
図 5.2-83　母岩 B に対するオプションの被ばく線量比率.....5-114
図 5.2-84　母岩 A に対するオプションの費用対効果.....5-117
図 5.2-85　母岩 B に対するオプションの費用対効果.....5-117
図 5.2-86　費用対効果の高いオプション（左：A-6、右：A-2、再掲）.....5-118
図 5.2-87　費用対効果の高いオプション（左：B-4、右：B-7、再掲）.....5-118
図 5.2-88　母岩 A に対するオプションの相関関係（左：対数軸、右：線形軸）.....5-119
図 5.2-89　母岩 B に対するオプションの相関関係（左：対数軸、右：線形軸）.....5-119
図 5.2-90　既往検討における熱影響評価モデル（一部拡大）..... 5-123
図 5.2-91　既往検討における熱影響評価モデル..... 5-124

図 6.2-1　ベントナイト系材料の透水特性データの取得と研究のフレームワーク..... 6-3
図 6.2-2　λk・εk 実験の供試体条件及びデータ整理方法..... 6-4
図 6.2-3　段階的実験手法と本年度の着手範囲（シリーズ A～C）..... 6-5
図 6.2-4　本年度の実験に用いた供試土の粒度特性..... 6-5
図 6.2-5　前年度実施の室内締固め～透水試験結果(1Ec)..... 6-6
図 6.2-6　実験結果の整理方法..... 6-7
図 6.2-7　中性子イメージング実験装置（青森県量子科学センター）..... 6-8
図 6.2-8　供試体箱及び中性子照射部屋（青森県量子科学センター）..... 6-9
図 6.2-9　前年度の撮像例（ガラス玉 2 ㎜に通水。不均一浸透状況が可視化されている）
..... 6-9
図 6.2-10　透水係数とは何か、何に依存するのか..... 6-10
図 6.2-11　締固め～透水試験.....6-11
図 6.2-12　土の間隙の状態と透水係数..... 6-12
図 6.3-1　購入砂、珪砂粉末、購入砂＋珪砂粉末混合土(9:1)の粒径加積曲線..... 6-13
図 6.3-2　締固めエネルギーを変えた各試料の試験結果..... 6-14
図 6.3-3　透水試験を実施した各試料における乾燥密度と含水比・飽和度..... 6-15
図 6.3-4　実体顕微鏡（Nikon SMZ18）..... 6-17
図 6.3-5　走査型電子顕微鏡（日本電子 JSM-6010PLUS/LA）..... 6-17
図 6.3-6　構造観察を実施した各試料における乾燥密度と含水比・飽和度..... 6-18

図 6.3-7　実体顕微鏡及び SEM による構造観察結果の一例 6-18
図 6.3-8　供試体設置状況と中性子イメージング結果の一例..... 6-20
図 6.3-9　アルミ製供試体箱の概略形状図..... 6-21
図 6.3-10　アルミ製供試体箱前面板の形状図 6-21
図 6.3-11　アルミ製供試体箱の写真（奥行き 6mm、8mm、10mm） 6-22
図 6.3-12　使用したガラス球（2mm、4mm）と珪砂 2 号 6-22
図 6.3-13　ガラス球 4mm の中性子イメージング試験結果（奥行 6mm、8mm） 6-23
図 6.3-14　ガラス球 2mm の中性子イメージング試験結果（奥行 6mm、8mm） 6-23
図 6.3-15　珪砂 2 号の中性子イメージング試験結果（奥行 6mm、8mm、10mm） 6-23
図 6.3-16　1Ec 締固め～透水試験結果（実験 A）の再掲（令和 2 年度実施） 6-25
図 6.3-17　最小透水係数 kmin.発現メカニズム説明のための仮説（実験 B を実施した理由）
..... 6-26
図 6.3-18　λk・εk 実験（実験 B）の想定結果..... 6-27
図 6.3-19　λk・εk 実験の供試体条件..... 6-29
図 6.3-20　λk・εk 実験（実験 B）の結果（購入砂及び購入砂＋珪砂粉） 6-30
図 6.3-21　λk・εk 実験（実験 B）の結果（ベントナイト混合土） 6-32
図 6.3-22　ベントナイト混合量の違いが εk に及ぼす影響..... 6-32
図 6.3-23　λk・εk 実験（実験 B）の結果総括（4 供試土重ね書き） 6-32
図 6.3-24　重回帰分析による評価値と実測値の比較..... 6-34
図 6.3-25　λk・εk 実験結果による kmin.発現現象の再現（購入砂、珪砂粉混合材） 6-37
図 6.3-26　購入砂の粒度比較（令和 2 年度及び令和 3 年度購入） 6-37
図 6.3-27　λk・εk 実験（実験 B）結果による kmin.発現現象の再現（ベントナイト混合土）
..... 6-38
図 6.3-28　ベントナイト混合率と締固め度を変えた実験事例（工藤ら） 6-38
図 6.3-29　実体顕微鏡による構造観察の目的と位置づけ..... 6-39
図 6.3-30　構造観察に供したベントナイト混合土供試体の条件と透水係数(JGS0312) .. 6-40
図 6.3-31　構造観察に用いた供試体及び実験の実施状況..... 6-41
図 6.3-32　ベントナイト混合土（10%)の顕微鏡撮影結果..... 6-43
図 6.3-33　ベントナイト混合土(30%)の顕微鏡撮影結果 6-44
図 6.3-34　締固め時含水比と混合率の違いの影響（実体顕微鏡） 6-44
図 6.3-35　締固め時含水比と混合率の違いの影響（SEM） 6-45
図 6.3-36　購入砂＋珪砂粉 10%供試土の構造観察方法と供試体条件 6-46
図 6.3-37　購入砂＋珪砂粉 10%供試土の構造観察結果とダム遮水材との比較 6-47
図 6.3-38　中性子実験で検討中の供試土（1 号～3 号珪砂） 6-49
図 6.3-39　珪砂 1 号＋珪砂 3 号（9:1）模擬土の締固め含水比の違い 6-50
図 6.3-40　珪砂 1 号＋クニゲル V1 混合模擬土の不飽和映像 6-51

図 6.3-41　珪砂 1 号＋珪砂 3 号混合模擬土(7:3)における粒子配列状態の変化 6-52
図 6.3-42　珪砂 1 号＋珪砂 3 号混合模擬土(9:1)における締固め含水比と重水浸透面の関係 6-52
図 6.3-43　珪砂 1 号＋クニゲル混合模擬土(9:1)における重水浸透状況(均一/不均一混合) 6-53
図 6.3-44　珪砂 1 号＋クニゲル混合模擬土(貧配合)における重水浸透状況..... 6-53
図 6.3-45　珪砂 1 号＋クニゲル混合模擬土における配合比と重水浸透状況の関係..... 6-54
図 6.3-46　研究のフロー（ローリング後） 6-59
図 6.4-1　材料の混合方法・手順の影響に関する検討のイメージ..... 6-61
図 6.4-2　段階的解明実験の現状 6-62
図 6.4-3　龍岡及び Mitchell による最小透水係数に関する実験結果..... 6-63
図 6.4-4　本研究の実験結果と御母衣事例の比較 6-63
図 6.4-5　今後のターゲット粒度例 6-64
図 6.4-6　田中・戸井田による礫混入実験例（1） 6-65
図 6.4-7　田中・戸井田による礫混入実験例（2） 6-65
図 6.4-8　中性子イメージング実験結果とメニスカスのモデル化（建山） 6-66
図 6.4-9　締固め現象のモデル化（建山）と DEM 解析（LS-DYNA） 6-67

表目次

表 1.3-1　令和 3 年度の実施工程表 1-6
表 1.3-2　接着試験の結果..... 1-7
表 1.3-3　感度解析対象パラメータの範囲..... 1-12
表 1.3-4　母岩 A に対して抽出したオプションの仕様 1-13
表 1.3-5　母岩 A に対するオプションの被ばく線量比率..... 1-14
表 1.3-6　母岩 A に対するオプションの事業費比率..... 1-14
表 1.3-7　令和 3 年度検討委員会実施経緯..... 1-17

表 2.1-1　接着剤候補と試験条件..... 2-22
表 2.1-2　接着試験の結果..... 2-24
表 2.1-3　ブロック試料の採取等に使用する主な用具類..... 2-32
表 2.1-4　令和 3 年度開発工程 2-61
表 2.1-5　開発の 5 ヵ年計画..... 2-62
表 2.2-1　拘束圧と応力－ひずみ関係、破壊形態 2-70
表 2.2-2　令和 3 年度の工程..... 2-71
表 2.2-3　三軸圧縮試験条件..... 2-72

表 2.2-4　DEM 粒子パラメータ 2-73
表 2.2-5　水圧破砕法試験結果（水平面内主応力） 2-75
表 2.2-6　「参照データの取得」における水圧破砕法試験結果 2-78
表 2.2-7　弾性係数の設定値 2-80
表 2.2-8　割裂引張試験結果 2-81
表 2.2-9　FEM 解析の解析用物性値 2-82
表 2.2-10　ひずみ測定・応力解析に影響を及ぼす事象、課題及びパラメータ 2-86
表 2.2-11　解析ケース 2-86
表 2.2-12　解析パラメータ 2-103
表 2.2-13　解析パラメータ（粒子形状：クランプ） 2-106
表 2.2-14　オーバーコアリング掘削解析　解析パラメータ 2-108
表 2.2-15　「解析手法の適用性検討」の検討結果 2-118

表 3.1-1　実施スケジュール（令和 2～3 年度） 3-2
表 3.2-1　高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係 3-12
表 3.2-2　TRU 等廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係 3-13
表 3.2-3　主な調査項目・手法と地下水流動概念モデルの設定に有効な情報（例）（土木学会） 3-26
表 3.2-4　水理地質モデルの作成に必要な情報及び調査手法（土木学会） 3-28
表 3.2-5　地下水流動に関連する主な地質的特徴（土木学会） 3-29
表 3.2-6　水理地質モデルの作成における主な検討内容と留意点（土木学会） 3-30
表 3.2-7　巨視的水理特性の設定に必要な情報と調査（土木学会） 3-31
表 3.2-8　地下水年代測定に活用される放射性核種と放射性壊変希ガスの代表例とその測定範囲（馬原、1994）（土木学会） 3-34
表 3.2-9　中深度処分事業展開と規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価の実施項目の整理 3-43
表 3.2-10　各事業段階における地下水流動調査・評価項目と主な適用技術 3-47
表 3.4-1　各調査段階における不確実性とそれへの対処の考え方(NUMO 包括的技術報告書より) 3-66
表 3.4-2　地質環境の調査・評価に関する不確実性への対処 3-67
表 3.4-3　処分場の設計・建設・操業・閉鎖に関する不確実性への対処 3-68
表 3.4-4　安全評価のシナリオにおける不確実性への対処 3-69
表 3.4-5　安全評価の各種モデルにおける不確実性への対処 3-69
表 3.4-6　安全評価におけるデータの不確実性への対処とセーフティーケースへの統合 3-70

表 4.1-1　令和 3 年度の工程 4-5
表 4.1-2　分析の対象とした観測地震動の一覧 4-7
表 4.1-3　時刻歴波形（2014 年 8 月 10 日、x 方向） 4-8
表 4.1-4　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 8 月 10 日、x 方向） ... 4-8
表 4.1-5　時刻歴波形（2014 年 8 月 10 日、y 方向） 4-9
表 4.1-6　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 8 月 10 日、y 方向） ... 4-9
表 4.1-7　時刻歴波形（2014 年 8 月 10 日、z 方向） 4-10
表 4.1-8　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 8 月 10 日、z 方向） . 4-10
表 4.1-9　時刻歴波形（2014 年 10 月 27 日、x 方向） 4-11
表 4.1-10　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 10 月 27 日、x 方向）
.....4-11
表 4.1-11　時刻歴波形（2014 年 10 月 27 日、y 方向） 4-12
表 4.1-12　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 10 月 27 日、y 方向）
..... 4-12
表 4.1-13　時刻歴波形（2014 年 10 月 27 日、z 方向） 4-13
表 4.1-14　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 10 月 27 日、z 方向）
..... 4-13
表 4.1-15　時刻歴波形（2016 年 1 月 14 日、x 方向） 4-14
表 4.1-16　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2016 年 1 月 14 日、x 方向）
..... 4-14
表 4.1-17　時刻歴波形（2016 年 1 月 14 日、y 方向） 4-15
表 4.1-18　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2016 年 1 月 14 日、y 方向）
..... 4-15
表 4.1-19　時刻歴波形（2016 年 1 月 14 日、z 方向） 4-16
表 4.1-20　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2016 年 1 月 14 日、z 方向）
..... 4-16
表 4.1-21　時刻歴波形（2017 年 9 月 27 日、x 方向） 4-17
表 4.1-22　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2017 年 9 月 27 日、x 方向）
..... 4-17
表 4.1-23　時刻歴波形（2017 年 9 月 27 日、y 方向） 4-18
表 4.1-24　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2017 年 9 月 27 日、y 方向）
..... 4-18
表 4.1-25　時刻歴波形（2017 年 9 月 27 日、z 方向） 4-19
表 4.1-26　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2017 年 9 月 27 日、z 方向）
..... 4-19
表 4.1-27　時刻歴波形（2018 年 1 月 24 日、x 方向） 4-20

表 4.1-28　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2018 年 1 月 24 日、x 方向）
..... 4-20
表 4.1-29　時刻歴波形（2018 年 1 月 24 日、y 方向）..... 4-21
表 4.1-30　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2018 年 1 月 24 日、y 方向）
..... 4-21
表 4.1-31　時刻歴波形（2018 年 1 月 24 日、z 方向）..... 4-22
表 4.1-32　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2018 年 1 月 24 日、z 方向）
..... 4-22
表 4.1-33　時刻歴波形（2019 年 8 月 15 日、x 方向）..... 4-23
表 4.1-34　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 8 月 15 日、x 方向）
..... 4-23
表 4.1-35　時刻歴波形（2019 年 8 月 15 日、y 方向）..... 4-24
表 4.1-36　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 8 月 15 日、y 方向）
..... 4-24
表 4.1-37　時刻歴波形（2019 年 8 月 15 日、z 方向）..... 4-25
表 4.1-38　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 8 月 15 日、z 方向）
..... 4-25
表 4.1-39　時刻歴波形（2019 年 12 月 19 日、x 方向）..... 4-26
表 4.1-40　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 12 月 19 日、x 方向）
..... 4-26
表 4.1-41　時刻歴波形（2019 年 12 月 19 日、y 方向）..... 4-27
表 4.1-42　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 12 月 19 日、y 方向）
..... 4-27
表 4.1-43　時刻歴波形（2019 年 12 月 19 日、z 方向）..... 4-28
表 4.1-44　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 12 月 19 日、z 方向）
..... 4-28
表 4.1-45　フーリエスペクトル比の集約 4-30
表 4.1-46　当該サイト付近の地盤物性値 4-33
表 4.1-47　1 次元解析モデル（ケース 1（緩み領域なし））..... 4-34
表 4.1-48　1 次元解析モデル（ケース 2（緩み領域あり））..... 4-34
表 4.1-49　入力地震動（2019 年 8 月 15 日、y 方向）..... 4-35
表 4.1-50　応答加速度..... 4-37
表 4.1-51　解析物性値一覧..... 4-41
表 4.1-52　地盤物性値（修正 R-O モデルのパラメータ）..... 4-43
表 4.1-53　地震応答解析に用いる地盤物性値 4-43
表 4.1-54　支保工の諸元及び物性値 4-44

表 4.1-55　解析に用いる支保工の物性値 4-44
表 4.1-56　均しコンクリートの物性値 4-44
表 4.1-57　今年度の観測で取得した地震動データの一覧 4-46
表 4.1-58　解析結果（地震計①、水平方向） 4-48
表 4.1-59　解析結果（地震計①、鉛直方向） 4-48
表 4.1-60　解析結果（地震計④、水平方向） 4-49
表 4.1-61　解析結果（地震計④、鉛直方向） 4-49
表 4.1-62　解析結果（地震計①～地震計④、水平方向） 4-51
表 4.1-63　解析結果（地震計①～地震計④、鉛直方向） 4-52
表 4.1-64　解析結果と観測結果の比較（地震計①、水平方向） 4-55
表 4.1-65　解析結果と観測結果の比較（地震計①、鉛直方向） 4-55
表 4.1-66　解析プログラム（SHAKE、FDEL、DYNEQ）の特徴 4-58
表 4.1-67　地震計⑤と地震計④位置の地質断面図 4-61
表 4.2-1　地震観測のための計測システム 4-65
表 4.2-2　地震計（加速度センサ）の仕様 4-66
表 4.2-3　回収データの仕様 4-71
表 4.2-4　データ取得した地震の諸元 4-73
表 4.2-5　各地震計のデータ取得の有無 4-74
表 4.2-6　過去年度における計測坑 C の地震動データ 4-120
表 4.2-7　地震計（東京測振製）の仕様（計測坑 C） 4-126
表 4.2-8　各地点の貫入深度及び土質区分深度(GL.-m) 4-134
表 4.2-9　スウェーデン式サウンディング試験結果のまとめ 4-134
表 4.2-10　現地の測量杭の座標と高さ 4-136
表 4.2-11　地震計（東京測振製）の仕様（地表面） 4-139
表 4.2-12　地表面に設置する地震計 4-142

表 5.1-1　第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈　新旧対応表 5-2
表 5.2-1　廃棄物埋設施設の各部位の要求される主要な機能（例） 5-18
表 5.2-2　感度解析のケース一覧 5-22
表 5.2-3 感度解析対象パラメータの範囲 5-26
表 5.2-4　データセット（その 1） 5-28
表 5.2-5　データセット（その 2） 5-28
表 5.2-6　インベントリー設定値 5-29
表 5.2-7　分配係数設定値 5-30
表 5.2-8　線量換算係数設定値 5-31

表 5.2-9　灌漑土壌に対する分配係数設定値 5-32
表 5.2-10　解析ケース 5-33
表 5.2-11　低拡散層の厚さと線量の関係 5-50
表 5.2-12　低透水層の厚さと線量の関係 5-51
表 5.2-13　断面あたりの廃棄体数と線量の関係 5-51
表 5.2-14　低拡散層厚さと最大線量及び支配核種 5-53
表 5.2-15　低透水層厚さと最大線量及び支配核種 5-55
表 5.2-16　評価対象とする核種とその半減期 5-59
表 5.2-17　モルタルに対する透水係数 5-68
表 5.2-18　低拡散層の要求機能と技術要件 5-78
表 5.2-19　低拡散層及び低透水層の部材厚設定にあたり検討する必要がある事項 5-83
表 5.2-20　検討事項に応じた最小部材厚 5-93
表 5.2-21　母岩 A に対して抽出したオプションの仕様 5-93
表 5.2-22　母岩 B に対して抽出したオプションの仕様 5-97
表 5.2-23　SKB の評価項目 5-104
表 5.2-24　処分方式の絞り込みに対する評価項目一覧 5-111
表 5.2-25　工事種別のマクロ単価比率 5-115
表 5.2-26　第二種最終処分業務に必要な費用の算定結果 5-116
表 5.2-27　母岩 A に対するオプションの事業費比率 5-116
表 5.2-28　母岩 B に対するオプションの事業費比率 5-116
表 5.2-29　地下施設の各部位に要求される主要な機能 5-121
表 5.2-30　廃棄物埋設施設の各部位の要求される主要な機能 5-122

表 6.2-1　令和 3 年度の実施計画と実施工程 6-2
表 6.2-2　実施した室内締固め～透水試験のケース一覧 6-6
表 6.2-3　試験ケース一覧 6-9
表 6.3-1　実験に用いた試料の物理試験結果一覧 6-13
表 6.3-2　追加実施した締固め試験（JIS A 1210）のケース一覧 6-14
表 6.3-3　実施した透水試験のケース一覧 6-15
表 6.3-4　透水試験結果一覧 6-16
表 6.3-5　実体顕微鏡及び SEM による構造観察を実施した試料一覧 6-17
表 6.3-6　中性子イメージングの実施ケース一覧 6-20
表 6.3-7　重回帰分析結果一覧 6-34
表 6.3-8　研究の現状と今後の方向性 6-58

第１章　全体概要

第1章　全体概要

1.1　本事業の背景と目的

1.1.1　本事業の背景

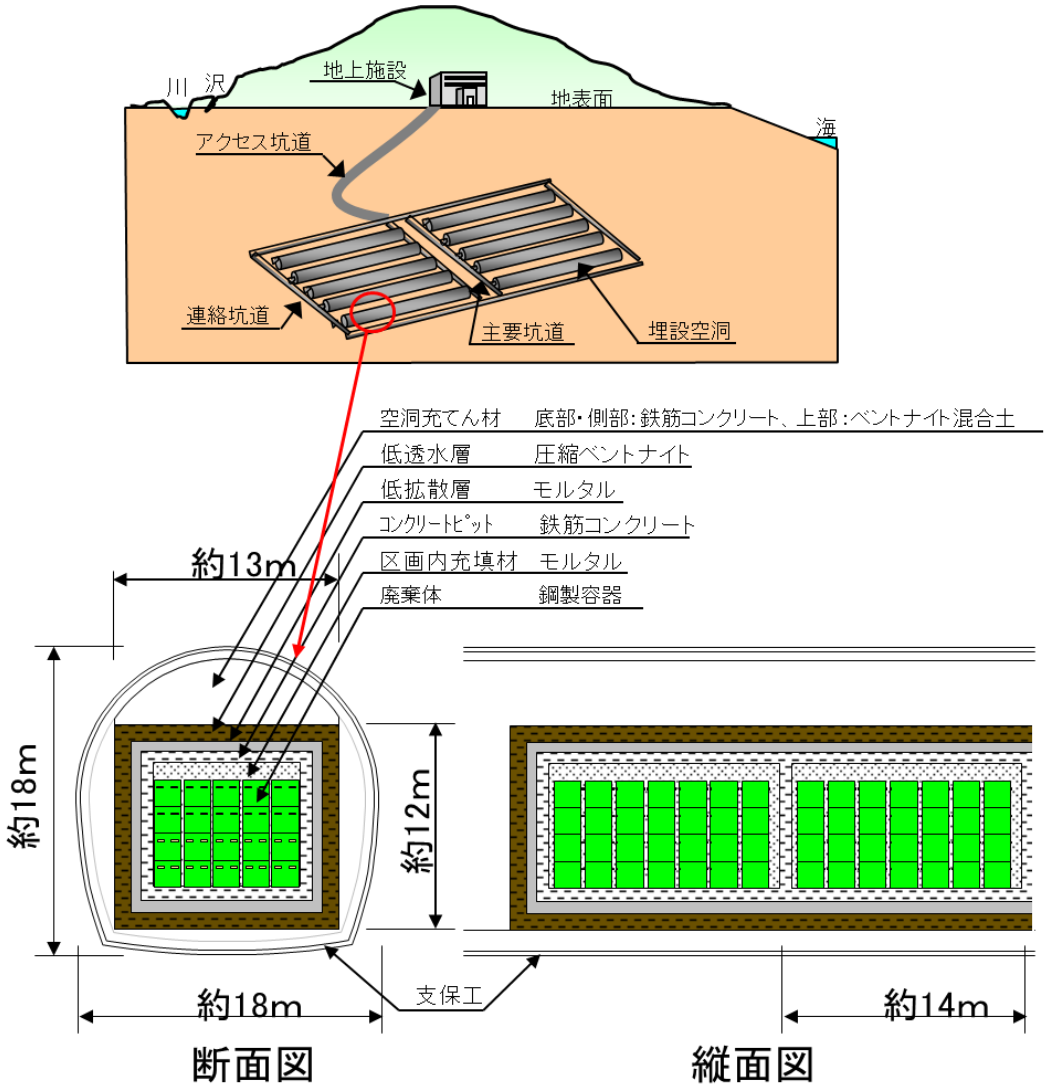
我が国においては、これまでの原子力発電の利用に伴って既に多種多様な放射性廃棄物が発生しており、その処分対策を着実に進める必要がある。このうち、原子炉施設や再処理施設等の運転と解体から発生する低レベル放射性廃棄物の一部には、長期にわたり比較的高い放射能が残存し、既存の浅地中処分に適さないものが存在する。これら低レベル放射性廃棄物については、大断面の地下空洞型処分施設に処分する方法（以下、「中深度処分」という。）で処分の事業化が検討されてきている[1]。

また、中深度処分の安全規制は整備途上であるが、処分施設は、侵食等を考慮しても、10 万年後の将来にわたって地表から 70 メートル以上の設置深度が確保できること、また、設置深度の地下水流動等も考慮し、複数の技術オプションの中から最適な組合せを選択して施設設計することが求められる方向にある。

これら検討状況を踏まえると、大断面の地下空洞の掘削可能性を評価するため、初期の設置深度として地表から 100 メートル程度までを想定し、設置深度毎の初期地圧を極力、場を乱すことなく、かつ、効率的に測定できる基盤技術の開発等、地下環境を把握するための技術整備が必須となる。また、掘削可能な地下空洞の形状・寸法、地下環境、人工バリアの長期的な安全性等を考慮し、複数の技術オプション（多様な選択肢）の実効性を確認することが必要である。

1.1.2　本事業の目的

本事業では、これらの中深度処分固有の課題を踏まえ、令和 2 年度から 5 ヵ年程度の期間で、大規模な坑道や地下空洞型処分施設などを建設する上で必要となる、岩盤にかかる初期地圧の三次元的な分布を測定する技術の開発を始めとした中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化開発を行うと共に、最適な施設設計を支援するための手法の検討を始めとした中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化開発を行う。



第 2 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合（平成 27 年 2 月 12 日）資料 2-1「原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について（電気事業連合会）」[1]より抜粋

図 1.1-1　中深度処分の廃棄物埋設施設のイメージ

1.2　本事業の概要

本事業は、中深度処分で求められる調査技術の高度化を狙いとして実施するもので、次の二つの大項目を掲げることとする。

Ⅰ　中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化

Ⅱ　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化

この大項目の下で、複数の研究開発テーマを設け、開発を進めることとした。本事業の全体フローを図 1.2-1 に掲載するとともに、各研究開発テーマと目的を以下に示す。

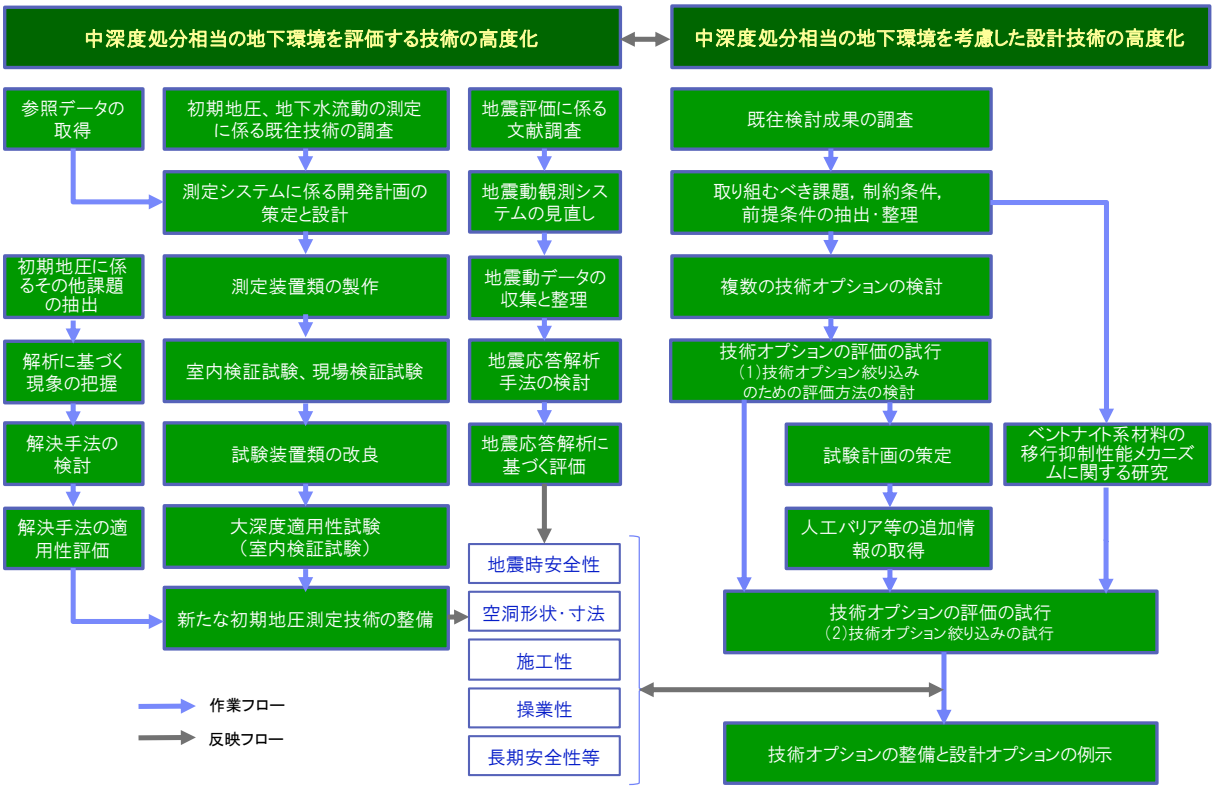


図 1.2-1　本事業の全体フロー

1.2.1　中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化

(1) 初期地圧測定技術の高度化開発

堆積軟岩を対象として、鉛直ボーリングにより、応力解放法により 3 次元初期地圧を測定できる装置の試作・実証を行うことを最終目標とする。そのため、前年度に実施した概念設計に基づき、試験装置の基本設計を行う。基本設計では、接着剤、ひずみ計・計器、掘削ツール、ひずみ計挿入・設置ツール、孔内洗浄方法、孔内状況確認方法、感度試験装置を対象に設計検討を実施するとともに、必要に応じて計器等の試作及び基礎実験を行う。

また、将来実施する予定の室内検証試験及び現場検証試験に向けて、手順の具体化について検討するとともに、必要に応じて試験に用いる岩石（ブロック試料）の採取等を行う。

(2) 地下水流動評価技術の調査

地下水流動評価技術（計測・測定及び解析技術）について、既往技術の調査を行い、中深度処分への適用を想定した場合の課題を整理する。

(3) 地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

現場試験フィールドでは、これまでも地震動観測が行われ、取得した観測地震動により作成した解析用入力地震動を用いて、試験空洞及び周辺地盤を対象とした地震応答解析が実施されてきた[2]。その結果、地下空洞施設の増幅特性や周波数特性等の定性的な評価は可能となったものの、加速度及びスペクトル分布等の定量的な評価には課題が残されていることがわかった。今年度は、前年度の検討結果を受けて、地震計の移設・新設の計画を具体化し、地震動観測システムの見直しとして、地表面への地震計の設置を行い、地震動観測を開始する。また、地下の計測坑 C にて別研究の既存計器で観測している地震動データを活用する。整備した地震動観測システムで得られて地震動データを用いて、観測データの分析及び解析結果と観測結果の整合性の確認等の検討を実施する。

1.2.2 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化

(1) 既往検討成果の調査と技術オプションの検討

原子力規制委員会が要求する BAT に基づく複数の設計の選定のためには、空洞の形状寸法を規定する技術の整備に加えて、人工バリアに係るオプションを整備する必要がある。また、複数の設計オプションが抽出された後には、どのような過程で処分システムを絞り込んでいくのか、各段階で何をどの程度評価すれば絞り込みは可能なのかといった手法の整備が求められる。このような地下環境等を考慮した技術オプションの整備を目指し、安全評価に係る感度解析を実施し、その結果を参照して設計オプションを抽出するとともに絞り込みにおける評価項目について検討した上で、設計オプションの絞り込みを試行する。

なお、前年度調査結果を踏まえて更なる調査が必要と考えられる場合や、その後新たに公開されたものが認められた場合には、設計の考え方等に係る既往検討成果の調査を今年度も継続して実施する。

(2) ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

人工バリアに係る技術オプションを検討する上で未知の領域が大きいベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムを知ることは、長期の性能評価の説明性向上及び設計の合理化に大いに貢献する。そこで、今年度は、前年度に策定した研究の 5 ヵ年計画に従い、ベントナイト系材料を対象に、透水特性データを取得する。透水特性データの取得は、締固め－透水

試験、乾燥密度－飽和度パラメータ透水試験、実体顕微鏡による土粒子構造観察、透水時挙動の可視化実験により実施する。

さらに、実施した各種試験結果の考察を行うとともに、それらを組み合わせて、ベントナイト系材料の透水特性メカニズムについて評価・検討を行う。

1.2.3 情報収集及び委員会の設置・運営

(1) 情報収集

本事業の実施に当たり、国内外の関係機関や大学等との間で情報交換等を実施し、関連技術について最新情報を入手するとともに、成果の普及等を積極的に行う。

(2) 委員会の設置・運営

本事業に係る外部の専門家・有識者等で構成される委員会を設置し、研究計画、実施方法、結果の評価等に関する審議・検討を年３回程度行い、成果報告書を取りまとめる。

1.3 令和３年度の実施概要

令和３年度の実施工程を表 1.3-1 に示す。中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化として、初期地圧測定技術の高度化開発、地下水流動評価技術の調査、地震時影響評価技術の検討及び地震動観測を実施した。また、中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化として、既往検討成果の調査と技術オプションの検討、ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究を実施した。令和３年度は、いずれの研究開発テーマについても前年度に策定した事業の全体計画に基づき、具体的な技術開発や研究開発を進めた。

以下に、令和３年度の成果の概要を示す。

表 1.3-1　令和 3 年度の実施工程表

実施項目等	令和3年度											
	第1四半期			第 2 四半期			第 3 四半期			第 4 四半期		
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(1) 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化												
1)初期地圧測定技術の高度化開発	初期地圧測定装置の開発に向けた試験装置の基本設計											
	初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討											
2)地下水流動評価技術の調査	既往技術の調査、技術開発課題の抽出・実施方策の検討											
3)地震時影響評価技術の検討及び地震動観測	地震時影響評価技術の検討											
	地震動観測			地震計の追加設置 ▼			メンテナンス ▼			▼		
(2) 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化												
1)既往検討成果の調査と技術オプションの検討	既往検討成果の追加調査											
	技術オプションの検討（感度解析、オプション抽出、比較検討・絞り込み）											
2)ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究	実験詳細計画			各種実験の実施、データの取得・整理・評価								
(3) 情報収集及び委員会の設置･運営												
1)情報収集及び委員会の設置･運営	情報収集、委員会の設置・運営			委員会 ▼			委員会 ▼			委員会 ▼		

1.3.1　中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化

(1) 初期地圧測定技術の高度化開発

中深度処分施設の地下空洞の断面形状寸法は、設置深度での 3 次元の初期地圧に依存すること、地下空洞の断面形状寸法は、人工バリア、支保工や処分坑道配置等の設計に影響を与えることから、初期地圧の情報は中深度処分施設の最適な設計を目指すために必須であり、特に施設設置深度での 3 次元の初期地圧は重要である。そこで、中深度処分施設の設置深度に応じた 3 次元の初期地圧を極力、場を乱すことなく、かつ、効率的に測定できる方法として、応力解放法に着目し、我が国に広く分布する堆積軟岩へ適用可能な新たな測定技術を開

発することとした。その新たな手法を「円錐孔壁ひずみ法」と呼称し、前年度に実施した概念設計に基づき、今年度は基本設計を行った。

基本設計では、まず、測定深度以浅までの掘削、パイロットボーリング及び孔底整形、ひずみ計設置、オーバーコアリング及びコア回収、感度試験という測定手順毎に技術課題を整理した。その上で、以下に示す試験や検討を通じて課題解決を図った。

- 孔形状及びひずみ計の最適配置の検討
- 接着方法及び接着剤の検討
- 接着方法及び接着剤の検討のための基礎試験
- 接着方法及び接着剤の検討のための岩石ブロックを利用した試験
- ストレインセルの検討
- データロガーの検討
- 掘削ツールスの検討
- 孔内状況確認方法の検討
- 感度試験方法の検討

検討結果の一例として、接着試験結果を紹介する。表 1.3-2 は候補とした 7 つの接着剤に対する試験結果の一覧、図 1.3-1 は接着状態の写真である。良好な接着状況が確認された HIC 接着剤を最有力候補とすることとし、次段階の検討として、試験フィールドから採取した岩石ブロック試料を用いた接着試験及び二軸載荷試験を実施し、その適用性を確認した。

表 1.3-2　接着試験の結果

No.	接着剤名	メーカー	粘度 (cP)	比重	可使時間 (時間)	硬化時間 (日)	接着時間（時間）	
							ケースA 直接塗布想定	ケースB どぶづけ想定
1	Eセット	コニシ	30,000	1.10	1.5	1	中止※	中止
2	水中エポキシ	セメダイン	パテ状	1.08	1	1	2	不実施
3	ロンジーパテF-197N	スリーボンド	パテ状	1.60	1	1	2	不実施
4	アルファテック841（骨材なし）	アルファ工業	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	18	18
5	アクアスケーピンググルー	アズージャパン	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	1	中止
6	ゼリー状接着剤	神畑養魚	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	1	不実施
7	HIC接着剤	Earth sciences	記載なし	記載なし	0.3～0.5	0.7 (16h)	22	22

※2時間で硬化せず

図 1.3-1　各条件（接着剤、養生時間）での接着状態

更に、次年度に計画している詳細設計に向けての技術課題を整理するとともに、今後の検証試験内容と装置の設計製作計画について検討した。

次に、初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討では、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法の適用性検討と、初期地圧測定装置の仕様の検討を実施した。

はじめに、DEM 解析を用いて、三軸圧縮試験、水圧破砕法試験のシミュレーションを行った。三軸圧縮試験のシミュレーションでは、試験結果と解析結果を比較して、コアのせん断面や、破壊前の応力－ひずみ曲線が概ね整合することを確認した。水圧破砕法のシミュレーションでは、破砕圧（応力レベル）が試験結果と異なる結果となったが、最大主応力方向のクラックの発生を再現できた。以上より、水圧破砕法を再現するための再解析の実施が課題としてあるが、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法として、DEM 解析に適用性があることを確認できた。

次に、初期地圧測定装置の仕様設定に資するため、FEM 解析及び DEM 解析を用いて円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングのシミュレーションを実施した。

初期地圧測定装置の寸法、形状等をパラメータとした 3D - FEM 解析を行った結果、ひずみの傾向は、既往調査坑内からの円錐孔底ひずみ法の結果と類似する結果となった。また、ストレインセルの角度や薄肉部鉛直長を変えた解析を行い、円錐孔壁ひずみ法の現行仕様を計画値とする結果となった。ただし、今回の初期地圧、岩盤物性値を用いた線形 FEM 弾性解析においては、レファレンスケースの薄肉部で破壊に近い応力状態にあるため、DEM 解析による非線形、破壊を考慮した解析を実施することとした。

現行仕様の円錐孔壁ひずみ法に対して、DEM 解析を用いた詳細検討を行い、オーバーコアリング時の薄肉部の塑性化・破壊を検討した。検討の結果、以下の知見を得た。

- 三軸圧縮試験のシミュレーションにおいて、粒子形状をクランプとすることで、三軸圧縮試験のピークから残留強度までの挙動を再現できることを確認した。
- 応力－ひずみ曲線において非線形性が現れる軸ひずみ付近で微視クラックが発生しており、DEM 解析により、軟岩のピーク強度に至る非線形挙動を評価できることが明らかとなった（図 1.3-2）。
- 三軸圧縮試験シミュレーションで設定したパラメータを用いて、オーバーコアリングの DEM 解析を実施した結果、微視クラックが連結して薄肉部を貫通するようなクラックが発生しないことがわかった。
- 微視クラックは、ストレインセルの上端・下端で多く発生することから、ひずみゲージは、上下端部を覗く位置で設置する計画とした。
- 薄肉部の応力状態を評価した結果、ひずみゲージ設置位置近傍では、マクロ的に概ね弾性挙動となっていて、現行仕様により、現場に適用できる可能性がある見通しを得た。
- 今後、水圧破砕の再現解析を含め、室内検証試験、現場検証試験のシミュレーションにより、詳細な検討を実施する。

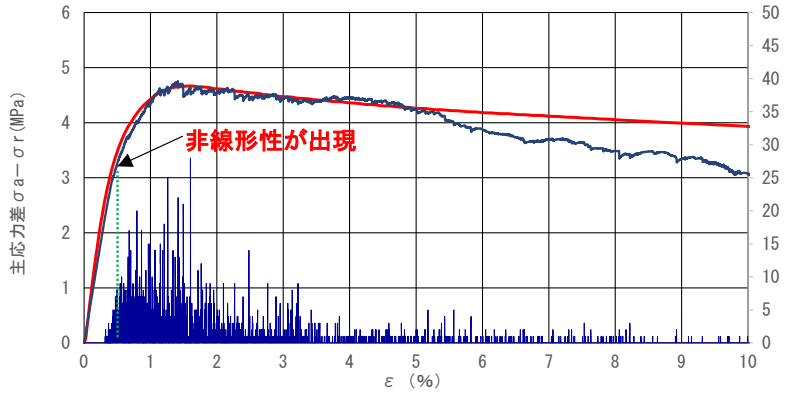


図 1.3-2　応力-ひずみ曲線と微視クラック発生数（cb=65,fric=0.3）

(2) 地下水流動評価技術の調査

地下水流動評価技術（計測・測定及び解析技術）について、国内外の低レベル及び高レベルの放射性廃棄物処分に係る既往の関連技術の調査を行い、我が国における中深度処分への適用を考慮した場合の現状分析と課題の抽出・整理を行った。実施にあたっては、原子力規制委員会により整備が進められている第二種廃棄物埋設事業の規制基準（特に中深度処分(L1)）における要求事項と原子力学会の学会標準や土木学会の技術検討の既往成果を十分に考慮し、さらには高レベル廃棄物地層処分に向けての関連技術等も参考にして、目的、想定される調査目標並びに処分事業の時間的変遷と測定・計測・解析の必要箇所・エリア等を想定し、それらへ適用可能な現状技術を分類・整理するとともに、適用に向けての技術課題等を考察した。

令和３年度の検討においては、前年度に実施した調査結果を踏まえ、まず、地下水流動評価技術（計測/測定及び解析技術）について既往技術の更なる調査を行った。既往技術の調査では、規制要求の最新動向をレビューした上で、不均質性や不確実性の取り扱い等に重点を置き、中深度処分だけでなく地層処分に係る文献等も対象とした。その上で、中深度処分に係る想定される事業展開とその各段階に対応して新しく改訂された規制基準・規則における規制要求への対応が必要となる事項を総合的に整理し、今後に向けてさらなる技術の高度化・開発や確証をしていくことが必要な技術課題について検討・整理を行い、それらの中で特に重要と思われる課題として次の２つの課題を抽出した。

（抽出課題-1）：調査～パラメータ設定～設計～評価における不確実性の低減と評価

（抽出課題-2）：事業展開に応じた地下水等監視モニタリング技術の高度化と統合化整備

この２つの課題をさらにつなげる意味でも重要なものとして、サイト選定調査段階からその後の各段階に応じた地質地下水環境状態変化の把握のための調査・評価技術の高度化・確証や放射性物質の漏えい監視や人工バリアの安全機能等を合理的に監視・確認する技術に関しても地下水の監視とともに重要な技術として位置付けることとし、今後の主要な技術課題として４項目に分類して整理・集約した（図 1.3-3）。

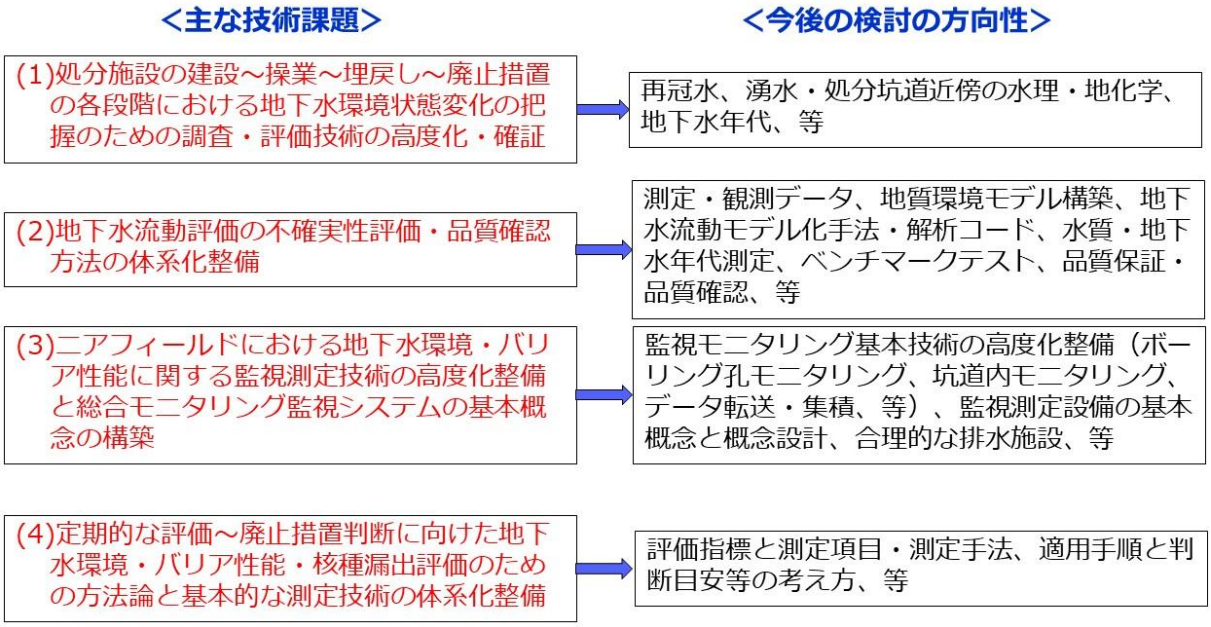


図 1.3-3　中深度処分の今後の重要な技術課題の抽出と今後の高度化・開発の方向性

(3) 地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

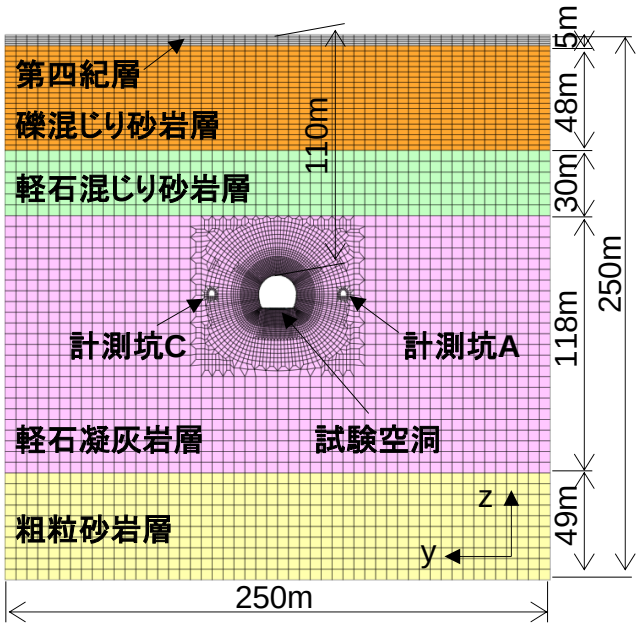
地震時影響評価技術の検討として、今年度地表面に設置した地震計⑤の観測データや、過去に取得された地震計①～④の観測データを用いて、以下の検討を実施した。

緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討では、1 次元及び 2 次元モデル（図 1.3-4）による緩み領域を模擬した解析検討により、評価対象の振動数帯（0～20Hz の範囲）では、空洞のインバート部に生じている緩み領域の影響は認められず、緩み領域が観測地震動に与える影響は小さいことがわかった。一方、空洞の規模の影響については、図 1.3-5 に示すように試験空洞の地震計①と計測坑 C の地震計④のフーリエスペクトル比の分析により、観測地震動には空洞規模の影響が含まれている可能性が示唆された。

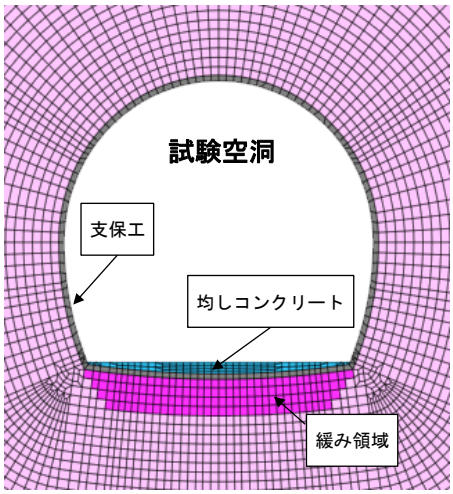
地下及び地上の観測地震動の整合性の確認では、地表の地震計⑤の観測結果を用いて入力地震動を作成し、2 次元地震応答解析を実施した。試験空洞底盤位置の応答加速度を、解析結果と観測結果で比較すると、両者の結果は乖離した。乖離の要因の一つとして、解析で用いている入力地震動が精度よく設定できていない可能性が考えられた。

現状の入力地震動作成のための引戻し解析における改良項目として、文献調査の結果を踏まえて「減衰定数の周波数依存性の考慮」と「逆解析による地盤物性の同定」が候補として挙げられ、次年度検討を進める予定である。

地震動観測については、今年度新規に地表面に地震計⑤を設置した。また、地震計①～③については、従来のシステムにより継続観測を行うとともに、地震観測システムのメンテナンスを実施した。地震計④については、別研究で観測している地震動データを活用した。

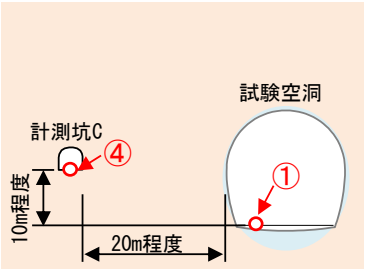


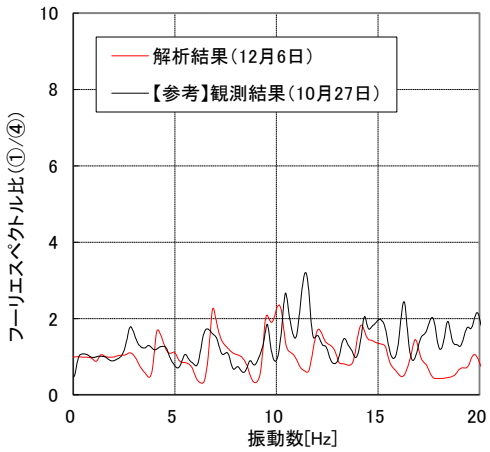
(1)全体



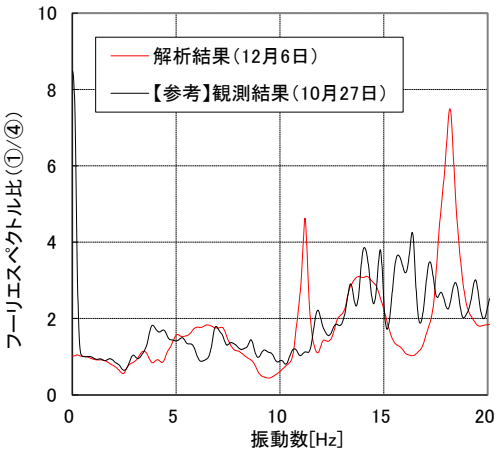
(2)試験空洞位置の拡大

図 1.3-4　2 次元地震応答解析モデル





(1)水平方向



(2)鉛直方向

図 1.3-5　フーリエスペクトル比（①/④）の解析結果と観測結果の比較

1.3.2　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化

(1) 既往検討成果の調査と技術オプションの検討

中深度処分に係る規則等の改正及び審査ガイドの策定に関する新たな情報が原子力規制委員会より示されたことを受けて、前年度に引き続き既往検討成果の追加調査を行い、技術オプションの検討に資することとした。調査では「設計の選定プロセス」に重点を置き、本検討を行う上での考え方を整理した。

その考え方を参考にして、技術オプションの検討では、長期安全性に係る感度解析を実施し、そこで得られた人工バリア仕様の違いが線量評価結果に及ぼす影響度を参考に設計オプションを抽出した上で、設計オプションの絞り込みを試行した。

長期安全性に係る感度解析は、表 1.3-3 に示すように低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、及び断面あたりの廃棄体数に加えて、岩盤の透水係数を変動パラメータとした核種移行解析として実施した。数値解析モデルは GoldSim で作成した。なお、水理解析（各領域の流量の算出）は 2 次元の多重円筒モデルの解析解を用いた。感度解析結果の一例として、低拡散層の部材厚と被ばく線量との関係を図 1.3-6 に示す。

表 1.3-3　感度解析対象パラメータの範囲

データセット名	設定範囲
低拡散層（セメントの利用を想定）の厚さ	0～3m
低透水層（粘土系土質材料を想定）の厚さ	0～3m
断面当たりの廃棄体数	6、12、20、30、42

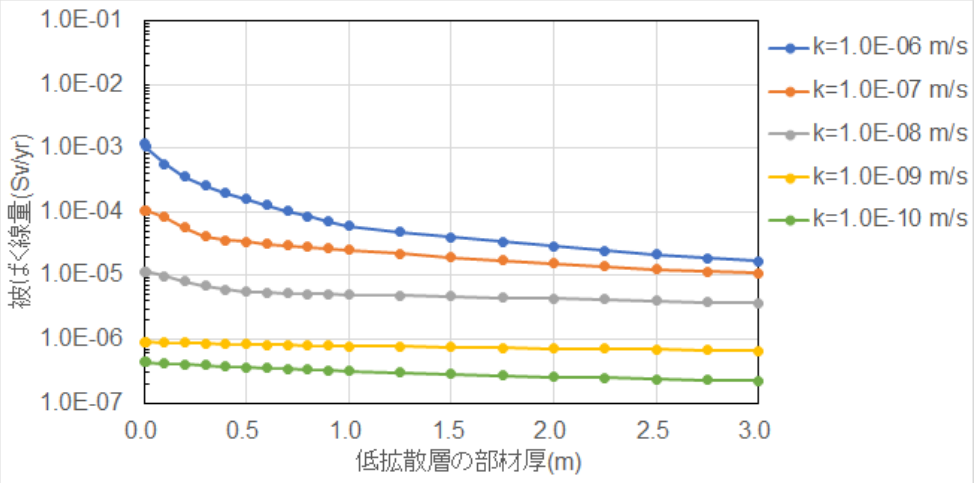


図 1.3-6　感度解析結果（低拡散層の部材厚）

長期安全性に係る感度解析結果より、以下の知見が得られた。

- 低拡散層の部材厚は、1×10^{-8}m/s 以下の透水係数を有する岩盤では被ばく線量にほとんど影響しない。その一方で、1×10^{-7}m/s 以上の透水係数を有する岩盤では、部材厚の低減に伴って被ばく線量が増加する。

・ 低透水層の部材厚は、岩盤の透水係数によらず被ばく線量への影響度は小さい。しかしながら、岩盤の透水係数が 1×10^{-7}m/s 以上の場合では、部材厚が 0cm になると被ばく線量は大きく増加する。
・ 断面当たりの廃棄体数が変動しても、被ばく線量はほとんど変動せず、その傾向は岩盤の透水係数によらない。

天然バリアに係るオプションとして 2 種類の岩盤（母岩 A（透水係数：1×10^{-6}m/s)、母岩 B（透水係数：1×10^{-8}m/s)）を設定し、上記で得られた知見を参考にしてそれぞれの岩盤に対して人工バリアオプションを設定することで、岩盤の特性を考慮した設計オプションのバリエーションを抽出した。母岩 A に対して抽出したオプションの仕様を表 1.3-4 に示す。

表 1.3-4　母岩 A に対して抽出したオプションの仕様

		母岩 A（1×10^{-6}m/s）						
オプション		A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
低透水層 (mm)	上部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
	側部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	700
	底部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
低拡散層 (mm)	上部	600	900	1400	600	600	900	900
	側部	600	900	1400	600	600	900	900
	底部	600	900	1400	600	600	900	900
廃棄体数		5×4	4×3	4×3	4×3	4×3	4×3	5×4

オプションの絞り込み手法に関しては、諸外国での検討事例等も参考に、その考え方と評価項目について検討した。評価項目として考えられるのは、設計の実現性、建設・操業性、閉鎖後長期の安全性、閉鎖前の安全性、環境保全、回収可能性、費用・経済性である。今回の比較対象とした設計オプションの範囲では、それら以外の項目は大差ないと考え、閉鎖後長期の安全性と費用･経済性の二つを評価項目として設計オプションの絞り込みを試行した。閉鎖後長期の安全性については、個々の設計オプションに対して核種移行解析を実施して被ばく線量を算出した。費用・経済性については、工事種別のマクロ単価に物量を乗じることにより算出した処分施設の建設費に基づき、廃棄体一体当たりの事業費として評価した。母岩 A に対して得られた結果を一例として、表 1.3-5 及び表 1.3-6 に示す。図 1.3-7 は、これらを相関関係図としてグラフ化したものである。定性的ではあるが、グラフの下方かつ左方に位置するものが望ましい設計オプションとなる。

一連の検討を通じて、このような評価手法が、設計オプションの絞り込みや最適化に向けた有効な手段の一つになることが確認された。

表 1.3-5　母岩 A に対するオプションの被ばく線量比率

オプション	A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
線量（Sv/y）	1.22E-04	7.44E-05	4.40E-05	1.06E-04	9.23E-05	6.17E-05	8.35E-05
$\lvert\log_{10}$(線量)$\rvert$	3.91	4.13	4.36	3.97	4.03	4.21	4.08
対数比率	1.00	1.06	1.11	1.02	1.03	1.08	1.04

表 1.3-6　母岩 A に対するオプションの事業費比率

オプション	A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
比率	1.00	1.09	1.15	1.10	1.15	1.15	0.98

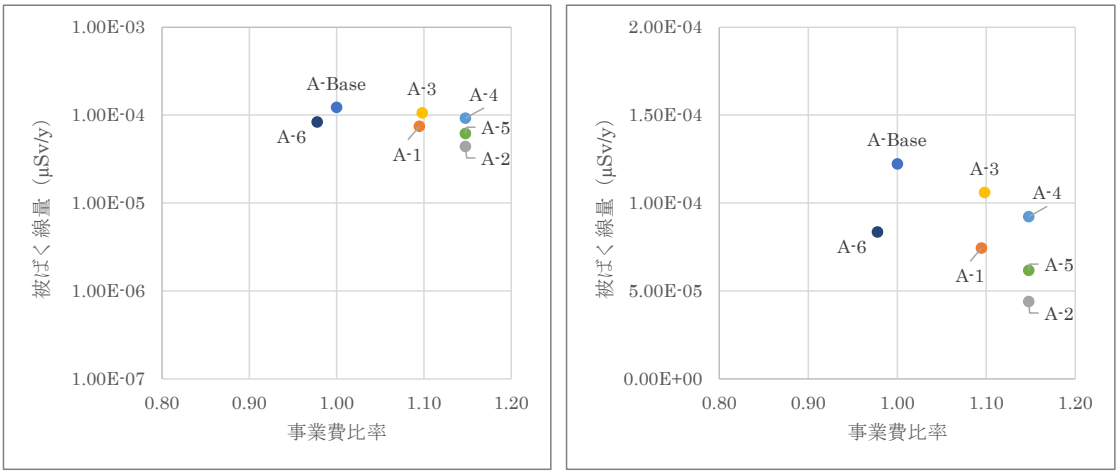


図 1.3-7　母岩 A に対するオプションの相関関係（左：対数軸、右：線形軸）

(2) ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

中深度処分施設や低レベル放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト系材料による人工バリアの重要な機能として、放射性物質の移行抑制機能が挙げられる。移行抑制機能として、低透水性及び収着性を期待しており、特に低透水性については重要な設計要件となっている。また、処分場の人工バリアの設計には長期的な評価が求められ、これは初期性能（施工完了時の性能）に対し、物理的あるいは化学的な作用による経年劣化を評価するものであるが、その評価は保守的であり、必ずしも合理的であるとは言えない。合理的な設計を行うためには、先ずは初期(施工時)の性能を正確に評価し、さらにその設計に基づいた施工時の品質管理が肝要となる。しかしながら、施工段階において透水係数を直接測定することは困難であり、低レベル放射性廃棄物処分では、締固めエネルギー、乾燥密度（モンモリロナイト湿潤密度)、含水比を代替指標として品質管理を実施する計画となっている。その代替指標は、室内試験や現場試験でそれぞれの関係性を精査し決定されるが、試験や材料のばらつき及び不確実性などを考慮し、その管理値もまた、保守的な設定となっている。これらの技術的課題を解決するためにはまず、「そもそも締固められた土の遮水性はどのようなメカニズムで発現するのか」を明確にする必要がある。本研究は、土粒子の間隙とその間隙を通る水のメカニズム解明を最初の着眼点として、最終的にはベントナイト系材料の透水特性を支配する要因について科学的合理性を持ってその設定値の保守性を説明することにより、中深度処分施

設等における人工バリアの初期性能及び長期性能の最適化設計を行う上で有効な知見を得ることを目的としている。

前年度の研究では、この研究意図を再確認する事を目的とし、文献調査・有識者ヒアリング・ベントナイト混合土の基本的な締固めー透水特性の確認、及び上記「土粒子の間隙とその間隙を通る水のメカニズム」を検証するための実験手法の模索を試みた。この検証手法としては、従来のマクロな室内締固めー透水試験に加えて電子顕微鏡による土粒子間隙構造の可視化、通水時の水の浸透状況を把握するための中性子イメージング実験等にチャレンジし、実験手法の最適化に着手している。また、これらの結果を総括し、遮水性発揮メカニズムの評価手法とそのための組合せ実験方法、ベントナイト系材料以外の土も対象とした段階的実験手法に関する 5 年にわたる研究構想と具体的な計画を立案した。

令和 3 年度は、その 5 ヵ年計画に従いベントナイト系及び通常の土質材料の透水特性に関するデータの取得、及びメカニズムの評価を進めた。図 1.3-8 は、前年度に構築したベントナイト系材料の透水係数発現メカニズム解明のための研究のフレームワークである。実験 A は最も基本的な情報を得るための室内 1Ec 締固めー透水試験であり、前年度に実施済である。令和 3 年度は、これに引き続き実験 B、実験 C、実験 D を実施した。

実験 B「室内締固めー透水実験」は、締固め土の透水係数が締固め時の乾燥密度と飽和度の関数として表現できるものと仮定し、それを確認するために以下２つのシリーズの実験を実施した。

①λ_k実験：飽和度一定で乾燥密度を数種類変更した供試体の透水係数を計測

②ε_k実験：乾燥密度一定で飽和度（含水比）を数種類変更した供試体の透水係数を計測

実験 C「電子顕微鏡による締固め土の構造観察」は、λ_k及びε_kライン上で締固め土の粒子間隙構造がどのように変化しているか（あるいは変化しないのか）を確認する目的で、顕微鏡撮影（実体顕微鏡及び SEM）を実施した。ベントナイト混合土については、長期透水試験（JGS0312）に用いた供試体の試験終了後（十分に飽和・膨潤後）に取り出した供試体を観察することにより行った。

実験 D「中性子イメージング実験」は、土粒子間隙構造の可視化、通水時の浸透状況の可視化を試みるものであり、締固め時の含水比の違いが土粒子空隙構造や通水性状の違いにどの程度の影響を及ぼすのか、それがどこまで可視化できるのか、といった基礎的な検討を実施した。

試験結果の一例として、ベントナイト混合土を対象に行った実験 B から得られた結果を図 1.3-9 に示す。

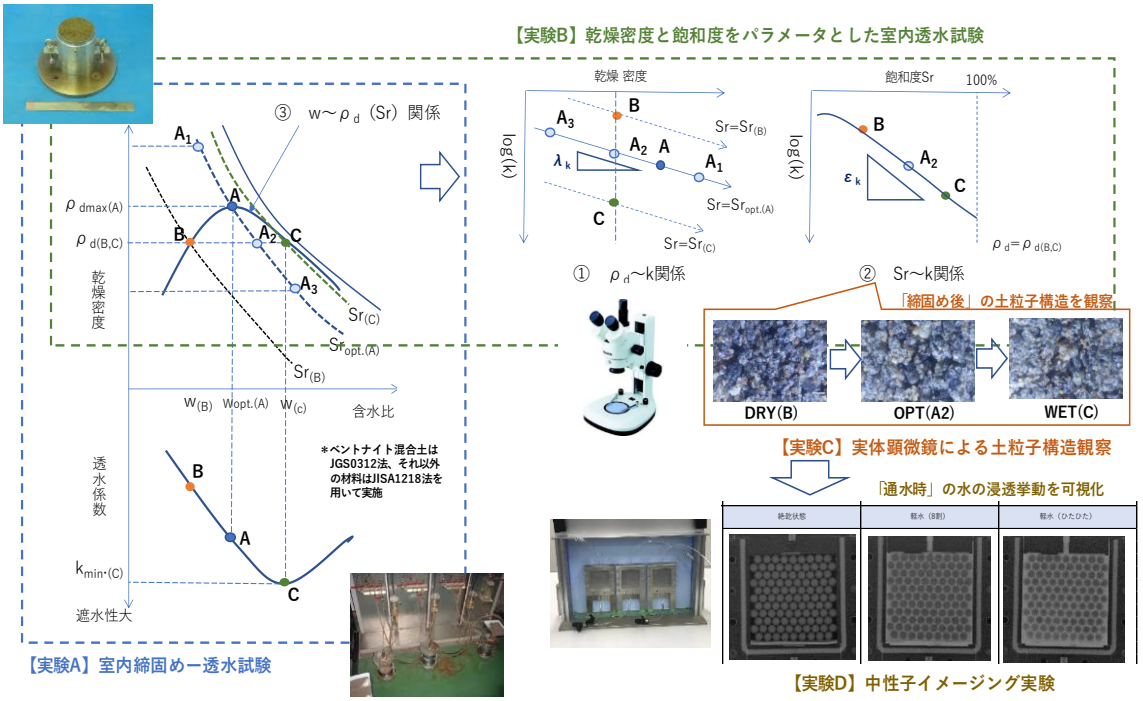


図 1.3-8　ベントナイト系材料の透水特性データの取得と研究のフレームワーク

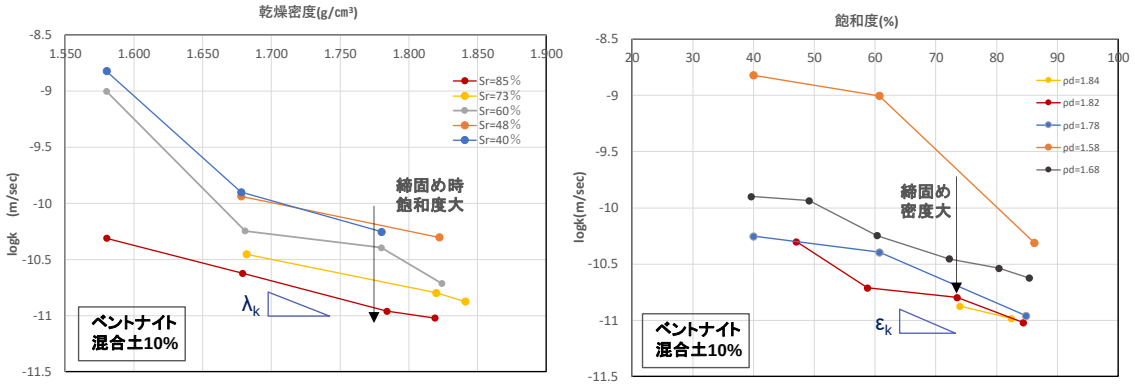


図 1.3-9　λk・εk 実験（実験 B）の結果（ベントナイト混合土）

1.3.3　情報収集及び委員会の設置・運営

(1) 情報収集

本事業の実施に当たっては、国内外の関係機関や大学等との間で情報交換及びヒアリング等を実施し、関連技術について最新情報を入手することに努めた。成果の一部を論文化するなど、成果の普及に向けた取り組みも積極的に行った。

(2) 委員会の設置・運営

本事業の実施に当たっては、学識経験者等からなる「地下空洞型処分調査技術高度化開発検討委員会」を設け、専門的立場からの助言を伺いつつ検討を進めた。同委員会における令和

3 年度の検討の経緯を表 1.3 1 に示す。

表 1.3-7　令和 3 年度検討委員会実施経緯

開　催　日	場　　所	審　議　内　容
第 1 回 令和 3 年 7 月 20 日	（web 会議）	● 令和３年度実施計画のレビュー ・初期地圧測定技術の高度化開発 ・地下水流動評価技術の調査 ・地震時影響評価技術の検討及び地震動観測 ・既往検討成果の追加調査と技術オプションの検討 ・ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究
第 2 回 令和 3 年 11 月 11 日	（web 会議）	● 令和３年度中間成果のレビュー ・初期地圧測定技術の高度化開発 ・地下水流動評価技術の調査 ・地震時影響評価技術の検討及び地震動観測 ・既往検討成果の追加調査と技術オプションの検討 ・ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究
第 3 回 令和 4 年 2 月 18 日	（web 会議）	● 令和３年度最終成果のレビュー ・初期地圧測定技術の高度化開発 ・地下水流動評価技術の調査 ・地震時影響評価技術の検討及び地震動観測 ・既往検討成果の追加調査と技術オプションの検討 ・ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

第 1 章の参考文献

[1] 電気事業連合会：第 2 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合 資料 2-1「原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について、平成 27 年 2 月 12 日.

[2] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 27 年度～平成 31 年度 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分施設機能確認試験 5 ヵ年とりまとめ報告書、2020.

第 2 章　中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化の内、初期地圧測定技術の高度化開発

第2章　中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化の内、初期地圧測定技術の高度化開発

2.1　試験装置の基本設計

2.1.1　方法決定の背景

前年度実施した概念設計で検討を進め、方法の概要を決定している。検討した内容は以下のとおりである。

初期地圧の情報は以下の点で中深度処分施設の最適な設計を目指すために必須であり、特に設置深度での 3 次元の初期地圧は重要である。

① 中深度処分施設の地下空洞の断面形状寸法は、設置深度での 3 次元の初期地圧に依存すること

② 地下空洞の断面形状寸法は、人工バリア、支保工や処分坑道配置等の設計に影響を与えること

開発する初期地圧測定装置に求められる要件は以下のとおりである。

① 天然バリアへのダメージを極力抑える（できるだけ少ない掘削本数で多くの情報が得られる、地上からの 1 本の鉛直ボーリングだけで 3 次元の初期地圧測定を高い精度で行える）

② 堆積軟岩に適用する場合でも高い精度で測定できる

③ 地表からの深さ 200m 程度の環境（離隔、水圧、温度）でも高い精度で測定できる

現存の測定方法で適用可能な測定手法は存在しないが、上記①の条件に合致するのは応力解放法であり、現存する応力解放法の主要な方法を対象に、課題を整理して上記条件における適用性を検討し、開発の方向性を決定することにした。

応力解放法のうち、孔壁ひずみ法（「CSIRO 法」、「Borre プローブ」等）は大深度での適用では先行しているが、軟岩を対象とした場合の計器設置やオーバーコアリングで解決すべき課題が多い。一方、孔底ひずみ法（「円錐孔底ひずみ法」）は計器の設置原理がシンプルであり測定点数も多数とすることができるが、計器接着面の洗浄などの課題があり大深度での適用は進んでいない。だが、これらの手法が既往測定法の中では課題解決に近い位置にあると言える。

そこで、孔壁ひずみ法と円錐孔底ひずみ法を応用して、課題解決を目指す方向で開発を行うこととした。その現在開発を進めている新たな手法を「円錐孔壁ひずみ法」と呼称し、その概念設計内容は以下のとおりである（図 2.1-1 参照）。

(1) 孔壁の一部を円錐形状にすることで、円錐孔底ひずみ法のように押し付けただけで所定の径の位置にひずみゲージが設置できるようにする。孔壁ひずみ法では孔底や孔壁の反力を利用して機械仕掛けでひずみゲージを設置する方法が多いが、軟岩対象では岩盤部の破壊のリスクがあるため、このような方法を避ける。

(2) 円錐形でも通常の円錐孔底ひずみ法と異なり鉛直に近い角度とすることで、孔壁へのスラ

イム付着を生じにくくする。

(3) 円錐部から連続して孔底方向に小口径孔を設けることによりスライム溜まりとする。このように全体構造は、孔壁ひずみ法と同様である。

(4) オーバーコアリング径を大きくすることで上部の薄肉部の厚さを確保し、割れにくくする。軟岩が対象であるため、掘削径が大きくなっても硬岩に比べるとコスト増加は少ない。しかし、既往の手法である埋設ひずみ法のようにコア径 200mm まで大きくするとコストが大きく増加する。そこで、一般的なボーリング調査にも使用される孔径 116mm（コア径 92mm）とする。この場合は上部の薄肉部の厚さは 18mm である。

(5) ひずみゲージは円錐孔底ひずみ法と同様に 24 個（3 成分を 8 箇所）を配置する。これは、一般的に使用されている孔壁ひずみ法より多いひずみゲージ数となり, 応力評価の精度向上を目指すとともに、岩盤の不均質性等の影響で一部に異常値が出ても応力評価精度が極端に低下しないようにする。

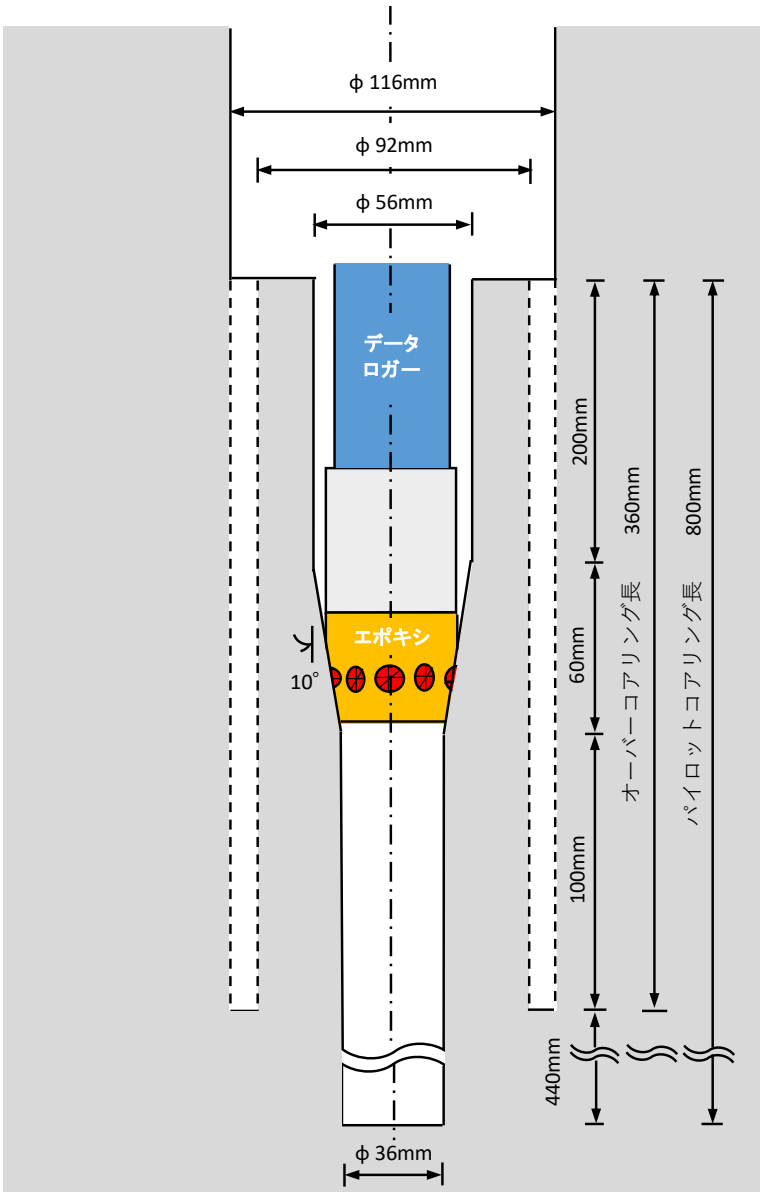


図 2.1-1　円錐孔壁ひずみ法の概念図

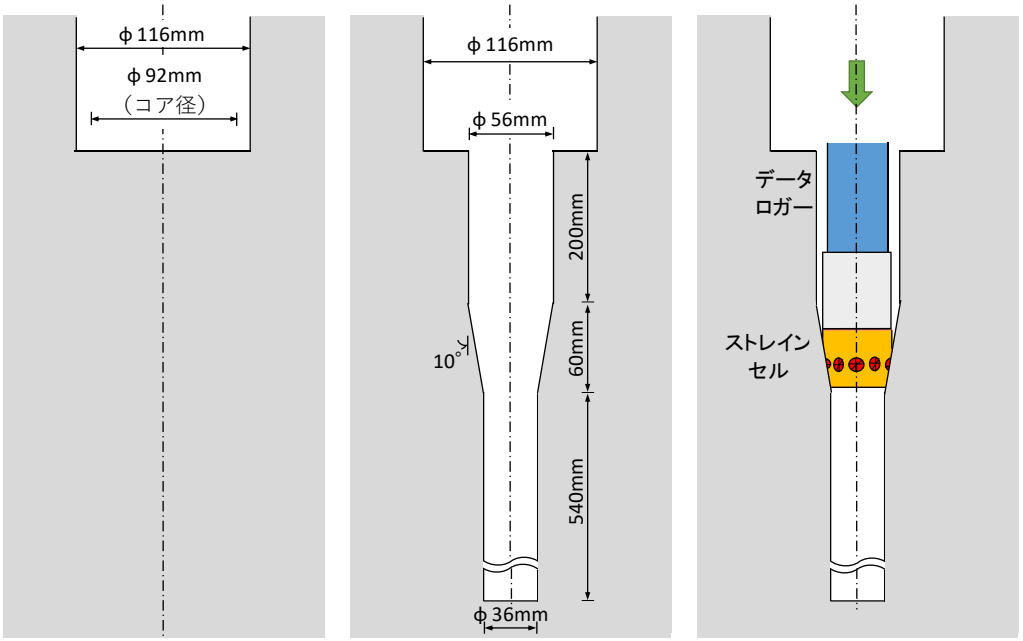
2.1.2　測定手順の検討と技術課題の整理

円錐孔壁ひずみ法の測定手順を図 2.1-2 に示す。各過程における技術課題を以下に述べる。

(1) 測定深度以浅までの掘削（カットボーリング）

(2) パイロットボーリング、孔底整形

(3) ひずみ計設置



(4) オーバーコアリング、コア回収

(5) 感度試験

回収コアの全周から圧力をかけてひずみを測定し、ひずみ感度を求める。

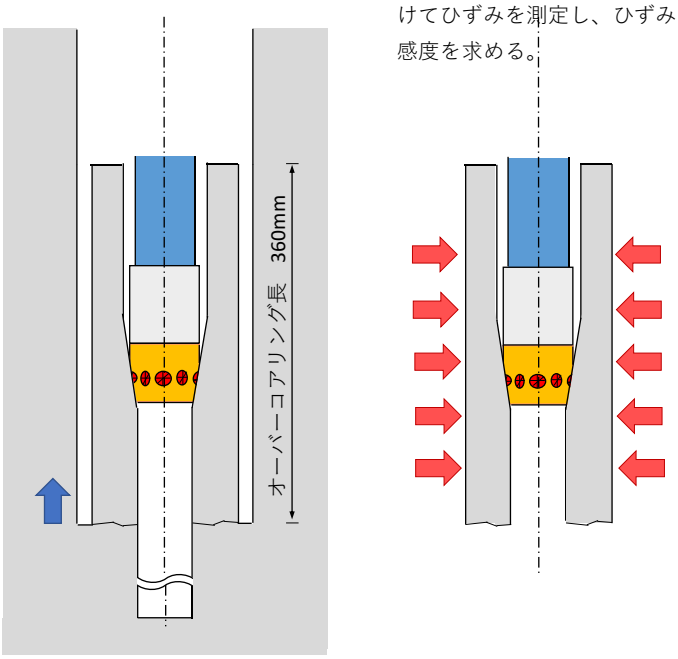


図 2.1-2　円錐孔壁ひずみ法の測定の流れ

(1) 測定深度以浅までの掘削

カットボーリング時に孔径が拡大すると、その後のボーリングのセンタリングの精度に影響するため、芯ぶれがないように掘削する必要がある。また、孔曲がりも少なくする必要がある。コアチューブはリーマの配置などに注意して使用し、セジメントなども用いて、孔曲がりが少ない掘削となるようにする。剛性の高いロッドを使用することとし、ロッドの中間に取り付ける回転式のセンタライザ（外径 116mm）を用いた掘進は、孔径拡大の原因となる場合があり実施しない。

湧水が多い場所を測定対象とすると、ストレインセルの接着が失敗するリスクが高まる。予定深度までの掘進中は、湧水状況（孔内水位変化）を確認しながら進めていき、ストレインセル接着困難な位置を避ける。

カットボーリング終了後は、初期地圧の解析や湧水状況の把握のため、パッカー式の間隙水圧計（既存の機器）を用いて孔底付近の間隙水圧を測定する。

φ116mm 孔掘進後の孔底に残コアがある場合、正確な深度把握が難しくなりストレインセル接着時の失敗の原因となるリスクが高まるとともに、パイロットボーリングやオーバーコアリング時にコアが割れるリスクが高まる。そこで、フラットビットによりφ116mm 孔の孔底整形を行う。この際、近接してセジメントチューブを配置する構成とし、スライムの回収を行う（図 2.1-3 参照）。このフラットビットタイプの掘削ツールは新たに設計・製作する必要がある。

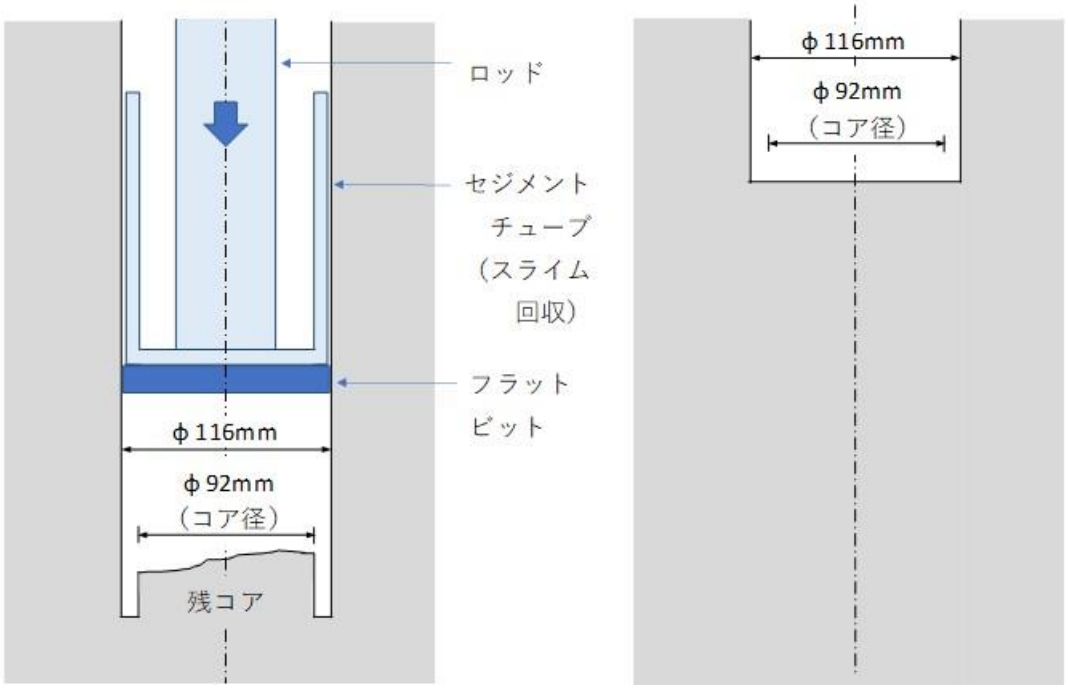


図 2.1-3　円錐孔壁ひずみ法手順①　測定深度以浅までの掘削
（左：残コア部の掘削除去、右：残コア部除去後の孔底）

(2) パイロットボーリング及び孔底整形

φ116mm 孔に対してφ56mm 孔のセンタリングが不良だと、オーバーコアリング時に中空コアが破壊する原因となるほか、所定の形状に整形されず、測定精度にも影響する。そこで、φ116mm 孔にセンタリングガイドを挿入してφ56mm 孔を掘削する（図 2.1-4 左図参照)。

φ56mm～円錐部～φ36mm の部分は一度に掘削することで所定の形状（図 2.1-4 右図参照）に仕上げる。φ36mm 孔の部分はダブルコアチューブまたは UC ビットタイプのシングルコアチューブでオールコアボーリングとして、試験位置周辺の岩盤状態を確認できるようにする。スライムの排出性能も重視したツールとし、掘進終了後に十分に孔内洗浄を実施する。

掘削ツールはまず試作品での掘削試験（後述 2.1.4 項(4)）を行い、その結果をふまえて現場試験用ツールの製作を行う。

孔底より上部になるほど掘進による孔径拡大の可能性が高いため、センタリングガイドは孔底付近でセンタリングを行う構造とする。なお、φ116mm 部分も含めた一体型のビット・コアチューブの開発も検討したが、掘進性能やスライムの排出性能で課題が大きく所定の形状に仕上げられない可能性があると判断し、開発対象外とした。

ひずみゲージを接着する場所にスライムが付着していると、接着失敗のリスクが高まる。また、該当位置の岩盤が不均質であると、測定精度が低下する。そこで、掘削・洗浄後にセンタリングガイド内に孔内カメラを挿入し、岩盤の状態を目視確認する。そのために鉛直下方向まで十分な解像度で撮影可能なカメラを用意する。本報告では、既往のカメラを用いて検討した結果を 2.1.4 項(8)で述べる。

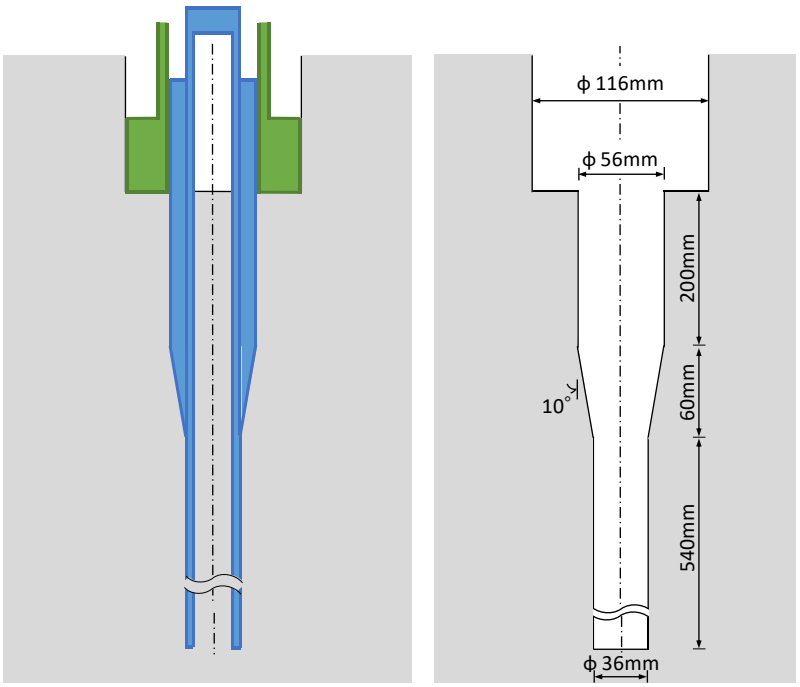


図 2.1-4　円錐孔壁ひずみ法手順②　パイロットボーリングの掘削
（左：センタリングガイドによる掘削、右：掘削後の孔形）

(3) ひずみ計設置

環境（水中、軟岩、温度）に対して接着剤が適さない場合、ストレインセルの接着不良、剥離、測定感度の低下が生じて、岩盤に発生するひずみを測定できない。そこで、接着剤メーカーへの聞き取り等を行い、候補となる接着剤を選定し、基礎試験（前年度採取したボーリングコアも利用）を実施して接着剤を選定した（後述 2.1.4 項(2)、(3)参照）。また、岩石ブロック試料を採取し、円錐孔壁を整形してストレインセルの接着、二軸載荷試験を実施し、接着状態を調査した（後述 2.1.4 項(4)参照）。

次の課題として、ストレインセルを円錐孔壁部に設置する際（図 2.1-5 参照）に接着剤がストレインセル表面に十分に存在しない状態になってしまうと接着不良が生じる。また、設置圧や設置深度を適正に管理できなければ計器損傷の可能性も生じる。そこで、選定した接着剤とひずみ計（ストレインセル及びデータロガー）の形状に最適なひずみ計挿入・接着ツールを製作することとする。国内外の既往例を参考に各手法の比較検討を行い、設計を行っている（後述 2.1.4 項(2)参照）。今後は詳細設計を行う。

また、ストレインセルのエポキシ部の剛性が、孔内の水圧・温度環境のもとで対象岩盤の剛性に対して過大な剛性になるとひずみの測定精度が低下する。一方で、エポキシ部の剛性が小さすぎるとデータロガーの重量のもとで過大な変形が生じてひずみの測定精度が低下する。そのため、データロガーの重量、対象岩盤の剛性を考慮して測定に最適な材質を選定することとする。室内試験用のストレインセルを、材質を変えて製作して比較検討を行う。

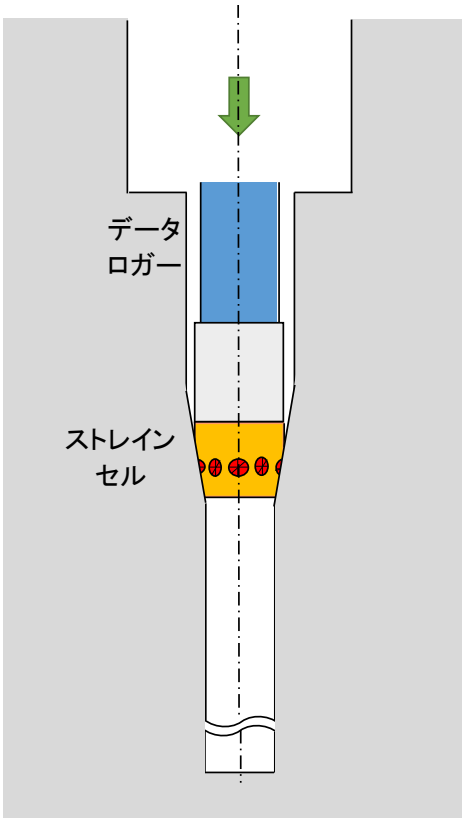


図 2.1-5　円錐孔壁ひずみ法手順③　ひずみ計設置

データロガーは作業性を考慮して地上までの有線式ではなく、メモリ内蔵式とする。孔内挿入後は途中でデータ確認はできないため、測定全期間にわたりひずみ・方位・温度データを確実に収録できる仕様とする必要がある（24 時間稼働可能）。また、データロガーの重量が大きいと、初期状態のひずみが大きくなり測定精度が低下する。今年度にデータロガーの仕様を設定しており、引き続き設計の検討を進め、次年度は製作に移行する（後述 2.1.4 項(6)参照）。

また、ひずみゲージの位置によっては孔壁崩壊等による所定コア形状との相違により測定精度が低下するリスクがある。そのため、ひずみゲージの位置は理論上の測定精度だけでなく実作業上の影響因子が少ない位置を選定した（後述 2.1.4 項(1)参照）。

(4) オーバーコアリング及びコア回収

オーバーコアリング（図 2.1-6 参照）の際は、コアの破断が生じないように芯ぶれがないように掘削する必要がある。また、1 回目の測定を実施した深度より更に深部で 2 回目以降の測定を行うため、オーバーコアリング時に孔径が拡大すると、その後のボーリングのセンタリングの精度に影響する。そのためにも、芯ぶれや孔曲がりを抑えた掘削にする必要がある。そのため、コアチューブはリーマの配置などに注意して使用し、セジメントなども用いて、ぶれが少ない掘削となるようにする。また、剛性の高いロッドを使用することとし、ロッドの中間に取り付ける回転式のセンタライザ（外径 116mm）を用いた掘進は、孔径拡大の原因となる場合があり実施しない。これらの作業では、既存の機器の使用で対応可能である。

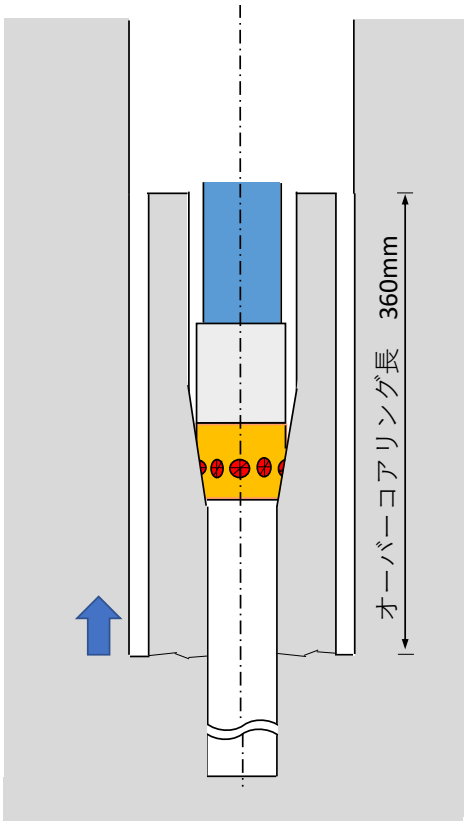


図 2.1-6　円錐孔壁ひずみ法手順④　オーバーコアリング及びコア回収

次に、オーバーコアリング終了後は、ひずみの安定状態で確実にデータを取得する必要がある。そこで、オーバーコアリング終了後は、しばらく孔内洗浄を継続し、スライムの排出を行う。その後は、水の循環を一時停止しデータ取得時間を設ける。

φ36mm 孔の孔底まで接着剤で固まってしまっている場合は、コア回収の際に、接着剤の部分が分断されずに、オーバーコアリング下端でコアを切断できず、浅い位置で割れてしまうリスクがある。そこで、接着剤はφ36mm の孔底まで流下しない設計を基本とするが、室内及び現場浅深度でのひずみ計挿入・接着ツールを用いた事前試験により流下するリスクが高いことが想定される場合は、φ36mm 孔孔底深度までオーバーコアリングを実施する手順で統一する。コアチューブはデータロガー長を考慮した長さのものを用いる。

回収コアの水圧下でのひずみと孔口まで引き上げた水圧が作用しない状態のひずみの差は解析で用いることを想定しており、地上に回収するまで連続的に確実にデータを取得する必要がある。この際、温度変化によるひずみ測定値の変化が懸念されるため、ストレインセルには温度ゲージも組み込み、ひずみ変化が水温による影響か水圧による影響か判別できるようにする。

(5) 感度試験

回収したコアに対しては図 2.1-7 に示すような形で、コア外周から圧力をかけて感度試験を実施しひずみ感度を測定する。

この際、オーバーコアリングにより得られたデータが岩盤の不均質性や割れ目発生の影響を受けている可能性がある。その影響を判別できるように、回収されたコアの状態について目視等で確認する手順を事前に確立しておく。

また、オーバーコアリング時またはコア回収時にコアが破損して所定の長さ・形状のコアを得られず、感度試験を実施できない場合がある。そのため、状況に応じたコアの取り扱い手順を事前に確立しておく必要がある。コアにはストレインセル及びデータロガーが接着された状態であるため、通常のコア取り扱い方法以上の注意が必要になる。

感度試験の際にコアを横向きに置いておくと、ストレインセル部分に曲げ応力が発生して本来の感度を得られないリスクがある。また、コアが破損するリスクがある。そのため、感度試験はコアを鉛直に立てたまま実施することとし、実現可能な感度試験装置の準備を進める（後述 2.1.4 項(9)参照）。

感度試験において応力とひずみの関係が載荷速度の影響を受ける可能性があるため、孔内の状態に近い感度試験方法となるように、事前試験などで載荷速度等の試験条件の影響を検討する。

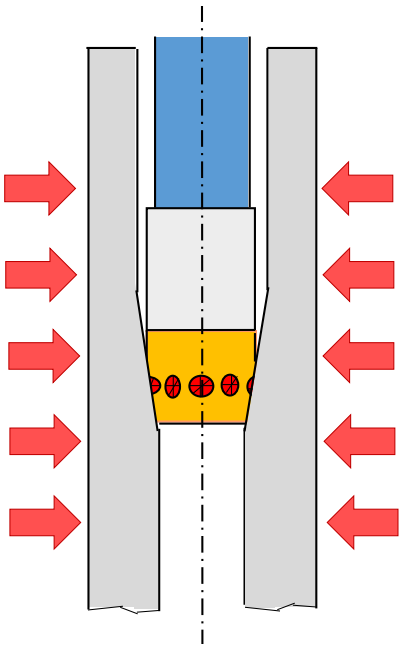


図 2.1-7　円錐孔壁ひずみ法手順⑤　感度試験

2.1.3　解析方法の検討と技術課題の整理

初期応力{σ}の観測方程式は次のようにマトリクス表示される。

$$[A]\cdot\{\sigma\}=E\cdot\{\beta\} \qquad \text{（式 2.1.1）}$$

ここで、{β}は、ひずみの測定値（ひずみゲージの数：n=24 成分（$\varepsilon_\rho,\varepsilon_\theta,\varepsilon_\Phi$の 3 方向×8 箇所）の予定）、$E$ は岩盤のヤング率、［A］は n×6 の係数マトリクス（ポアソン比 ν及び孔壁形状とゲージ位置により決まる）とする。

接着状況による感度低下を考慮する必要がない場合は、この観測方程式に基づき初期応力の計算を行う。

式 2.1.1 に用いる岩盤のヤング率E は、原位置岩盤がオーバーコアリングの際に示す挙動を表す物性値である。そのため、排水条件や載荷速度について対象岩盤に応じて適切に設定する必要があり、この点は事前の検証試験においても検討することにする。

また、測定されるひずみ{β}は、岩盤骨格の応力解放に伴うひずみと、間隙水圧から孔内水圧への水圧変化により発生するひずみからなると考えることもできる。このように考える場合は、観測方程式（式 2.1.1）の左辺を岩盤骨格の応力解放に伴うひずみから算出される応力と水圧変化により発生するひずみから算出される応力の 2 つに分けて考えることが適当である可能性がある。この場合、水圧変化によるひずみの感度はコアを孔口まで上げてくるときのひずみ変化データを利用して決定する方法が考えられる。これらの点について、今後、有識者の意見を確認し方針を決定する。

岩盤が塑性化しひずみが弾性的挙動を示さないと上記の観測方程式から乖離が生じる。室内でのオーバーコアリングを伴う検証試験でこれらの検討を実施していく。

また、実際のオーバーコアリングに伴う解放ひずみの測定時は、測定結果の精度を保証する目的で、オーバーコアリング時の解放ひずみが弾性的挙動を示していることを確認するためのプロセスシミュレーションを実施する方針とする。

式 2.1.1 の観測方程式に対し、接着状況や岩盤の不均質性の影響で、ひずみゲージの位置毎に測定されるひずみが影響を受けていると考え、ゲージ位置毎に感度変化を表す係数{$r_1,r_2,\cdots,r_8$}を設定する場合は、観測方程式は以下のように表すことができる。

$$[A]\cdot\{\sigma\}=E\cdot\{r_1\varepsilon_{1\rho},r_1\varepsilon_{1\theta},r_1\varepsilon_{1\Phi},r_2\varepsilon_{2\rho},r_2\varepsilon_{2\theta},r_2\varepsilon_{2\Phi},\cdots,r_8\varepsilon_{8\Phi}\}^{\mathrm{T}} \qquad \text{（式 2.1.2）}$$

このゲージ位置毎の感度変化を表す係数{$r_1,r_2,\cdots,r_8$}は、オーバーコアリング時のデータからは算出できないが、周圧を作用させる感度試験（2.1.2(5)参照）のデータからは算定することができる。

周圧をP とすると観測方程式は次のように表示される。

$$\{K_\rho,K_\theta,K_\Phi\}\cdot P=E\cdot r_1\cdot\{\varepsilon_{i\rho},\varepsilon_{i\theta},\varepsilon_{i\Phi}\}^T \qquad \text{（式 2.1.3）}$$

K_ρ,K_θ,K_Φは、ポアソン比 ν及び周圧による感度試験時のコア形状とゲージ位置により決まる係数であり、数値解析により設定することができる。したがって、式 2.1.3 より、$E\cdot r_i$（ i =1,2,・・・,8） を算定できるので、式 2.1.2 から初期応力の計算が可能である。

以上の方法について、有識者の意見を確認し今後方針を決定する。

2.1.4　技術課題の検討

(1) 孔形状及びひずみ計の最適配置の検討

先述のとおり、初期応力$\{\sigma\}$の観測方程式は式 2.1.1 のようにマトリクス表示される。ここで初期応力$\{\sigma\}$の最確値を$\{\bar{\sigma}\}$と表すと$\{\bar{\sigma}\}$は、式 2.1.1 から最小二乗法により求められる。すなわち次の正規化された観測方程式を解いて得ることができる。

$$[B]\cdot\{\sigma\} = E\cdot\{\bar{\beta}\} \qquad (式\ 2.1.4)$$

ここに、$[B] = [A]^T\cdot[A]$、$\{\bar{\beta}\} = [A]^T\cdot\{\beta\}$である。

したがって$[B]$の逆行列を$[C]$とすると、$\{\bar{\sigma}\}$は以下の式のとおり求められる。

$$\{\bar{\sigma}\} = E\cdot[C]\cdot\{\bar{\beta}\} \qquad (式\ 2.1.5)$$

また、初期応力の最確値$\{\bar{\sigma}\}$の分散$\{{\xi_\sigma}^2\} = \{{\xi_1}^2, {\xi_2}^2, {\xi_3}^2, {\xi_4}^2, {\xi_5}^2, {\xi_6}^2\}$は、測定値$\beta_i$の分散を${\xi_m}^2$とすると、最小二乗法の性質により、

$${\xi_i}^2 = c_{ii}\cdot E^2\cdot {\xi_m}^2 \qquad (式\ 2.1.5)$$

で与えられる。ここに、c_{ii}はマトリックス$[C]$の対角成分である。

ここで、一般的に最小二乗法により求められた解は分散が小さい方が解析の精度が良いと考えられる。マトリックス$[C]$の基となるマトリックス$[A]$は、ポアソン比 ν及び孔壁形状とゲージ位置により決まる。E、 νは岩盤に特有の値であり、測定値の分散${\xi_m}^2$を一定であると仮定すると、初期応力の測定精度はc_{ii}の最大値c_{max}の大きさから分析できると考えられる。すなわち、c_{max}の値が小さいほど測定精度は良いと考えられる。そこで以下では、孔壁形状とゲージ位置をパラメータとして、具体的にマトリックス$[C]$を計算し、その対角成分c_{ii}を比較して応力測定精度に対する孔壁の形状及びゲージ位置の影響を分析し、円錐部分の加工の作業性も考慮して、最適な孔壁形状とゲージ位置を決定することとする。

図 2.1-8 に、ゲージ位置r_0及び頂角ωをパラメータとするc_{ii}の変化の様子を示す。なお、ここではパイロット孔の半径$R = 23mm$、スライム溜まり孔の半径$R_0 = 15mm$として計算した。図に示すように、円錐孔壁部分の任意の位置での半径r_0について$r_0 \le 0.95R$の範囲ではc_{33}が常に最大、つまり$c_{max} = c_{33}$である。c_{33}はr_0/Rを大きくするほど小さくなり、円錐の頂角ωを小さくするほど小さくなる。したがって、頂角ωを可能な限り小さくし、r_0/Rを大きく（測定円半径r_0を大きく）すれば測定精度は向上する。以上、測定技術や作業性の観点から$\omega = 20^\circ$と決定した。また、r_0は、円錐底面の半径 R=28mm に対し、ゲージ位置の半径 r_0 が大きいほど理論上の測定精度は向上する傾向になるが、ゲージ位置が円錐底面（形状変化点）に近いと実際に整形された孔壁の形状の乱れの影響を受けやすくなり、近づけすぎない方がよい。そこで、ひずみゲージ位置は r_0/R=0.75 となる r_0=21mm と決定した[1]。

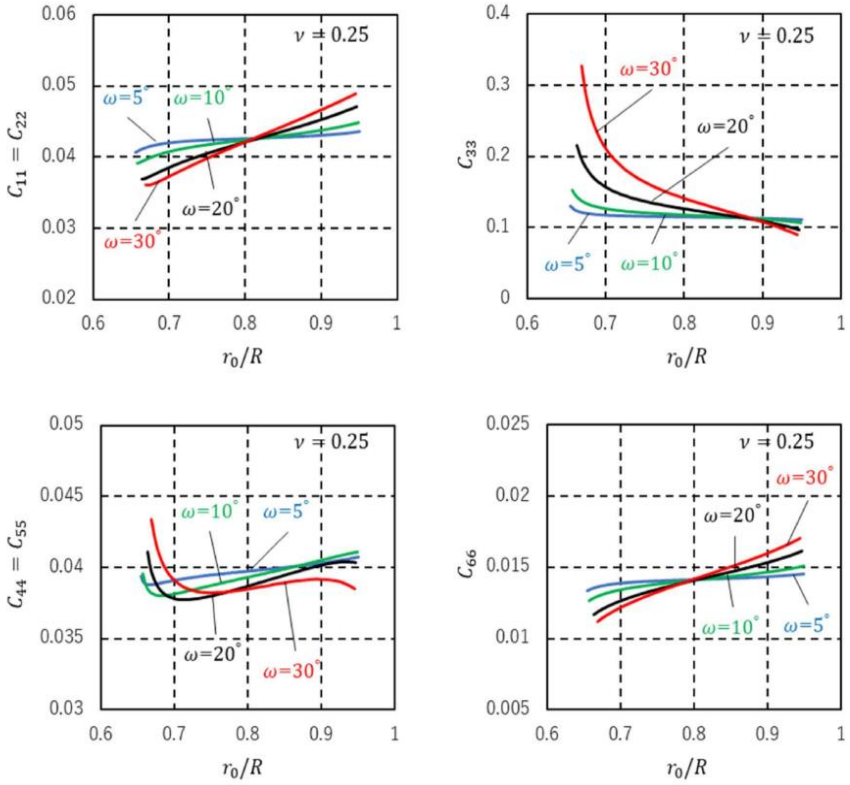


図 2.1-8　ゲージ位置 r_0 及び頂角 ω による c_{ij} の変化[1]

次に、ϕ116mm 孔の孔底から円錐部上部までの長さ（ϕ56mm の円周が確保されている区間）の鉛直長（パイロット孔の長さh）は、円錐孔壁部に発生する応力集中具合に大きな影響を与える。一定の鉛直長が確保されればその影響は小さいものの、一定の長さ以下だと円錐孔壁部に発生する応力集中に与える感度は非常に鋭敏となり、結果的に測定結果に大きな誤差を生じかねない。そこで、数値解析により定量的な評価を行った。なお、ここではパイロット孔の半径$R = 23mm$、スライム溜まり孔の半径$R_0 = 18mm$として計算した。図 2.1-9～図 2.1-11 に$h = 100$mm（赤線）、$h = 200$mm（黒線）、$h = 300$mm（紫線）、$h = 400$mm（緑線）、$h = \infty$mm（青線）として解析した結果を示す。図 2.1-9 のA_{11}、A_{12}、C_{11}、D_{11}はε_θに関するひずみ感度係数、図 2.1-10 のA_{21}、A_{22}、C_{22}、D_{22}はε_ρに関するひずみ感度係数、図 2.1-11 のA_{31}、A_{32}、A_{33}、C_{33}、D_{31}、D_{32}はε_φに関するひずみ感度係数である[1]。図より、ひずみ感度係数によって若干の差はあるものの、$h \geq 200$mmの範囲で$h = \infty$mmのひずみ感度係数との誤差はA_{11}～D_{32}の全てのひずみ感度係数で 5.3%程度以内であった。したがって$h \geq 200$mmにすれば、hの長さによるひずみ感度係数への影響は概ね無視できるものと考えられる。

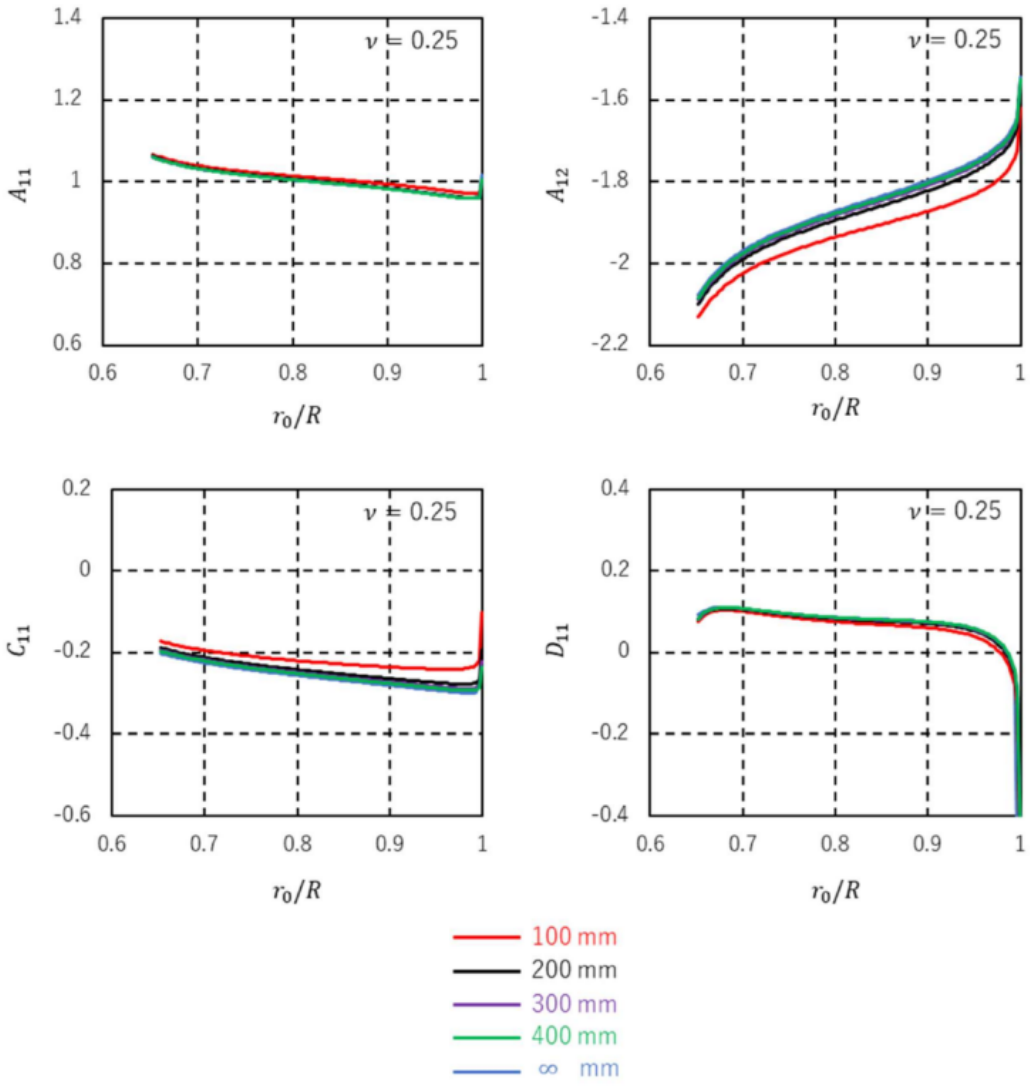


図 2.1-9　パイロット孔の長さ h によるひずみ感度係数の変化（ε_θ）[1]

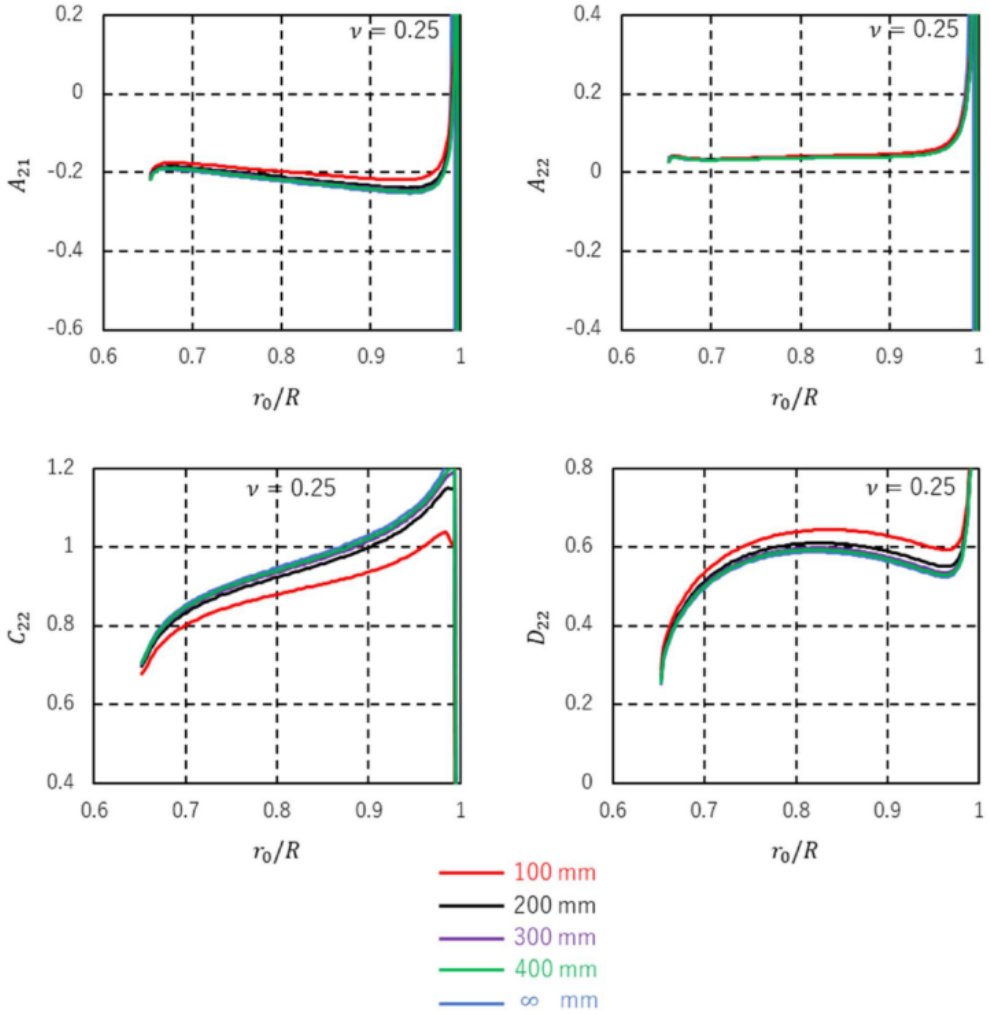


図 2.1-10　パイロット孔の長さ h によるひずみ感度係数の変化（ε_ρ）[1]

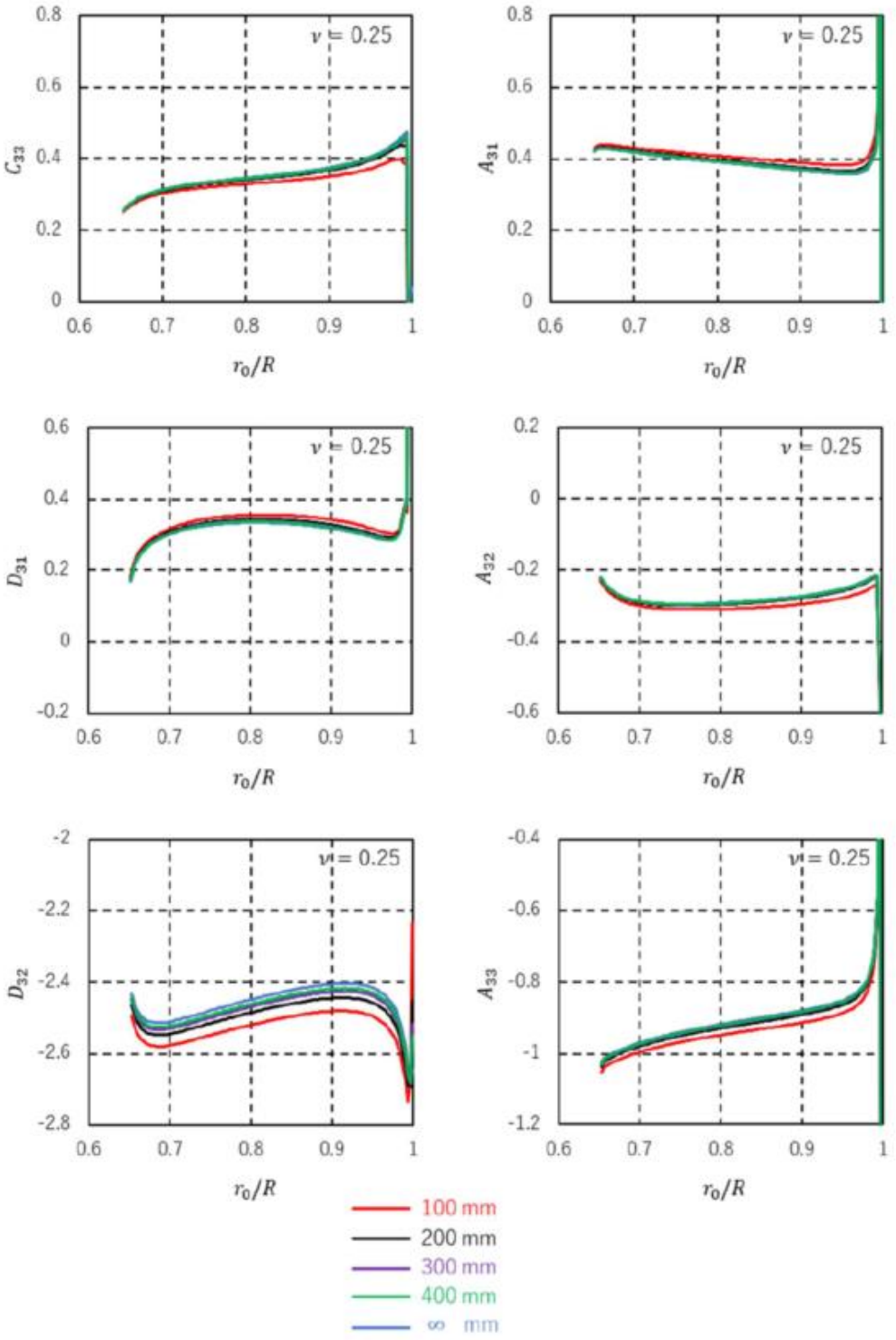


図 2.1-11　パイロット孔の長さ h によるひずみ感度係数の変化（ε_ϕ）[1]

(2) 接着方法及び接着剤の検討

1) 接着剤に関する検討

接着剤メーカー各社に問合せを行い、以下の条件を満たす接着剤を調査した。

- 水中（温度 15℃～25℃）で接着可能
- 可使時間が 1 時間程度であること：15 分以上であれば短くても可
- 比重が 1 以上（水中で浮かないように）
- 硬化後、塑性体でなく弾性体であり、物性変化が小さいこと
- 硬化後、電気絶縁であること（測定に影響を与えないように）

候補となる接着剤を複数見つけ、それらの接着剤を用いて、水中での軽石凝灰岩に対する接着試験を実施した（後述の本項(3)参照）。接着試験での接着剤選定のポイントは、以下のとおりである。

- 接着剤の種類（エポキシ系、シアノアクリレート系）の選択
- シアノアクリレート系の場合、水中での可使時間を把握
- エポキシ系の場合、感度の時間依存性を把握

2) 接着方法に関する検討

円錐孔壁ひずみ法の接着方法の候補として、以下の方法が挙げられる。

- ピストン型（CSIRO 型）
- ポッド型（Borre 型）
- 直接塗布型（円錐孔底ひずみ法）ダイビングベル方式も含む
- どぶづけ型（先に接着剤溜まりをつくり、ストレインセルを上から圧入）

具体的な接着方法案を以下に示す。

- 接着方法案①　ピストン型（接着剤注入・貼付装置の一体型、図 2.1-12 参照）

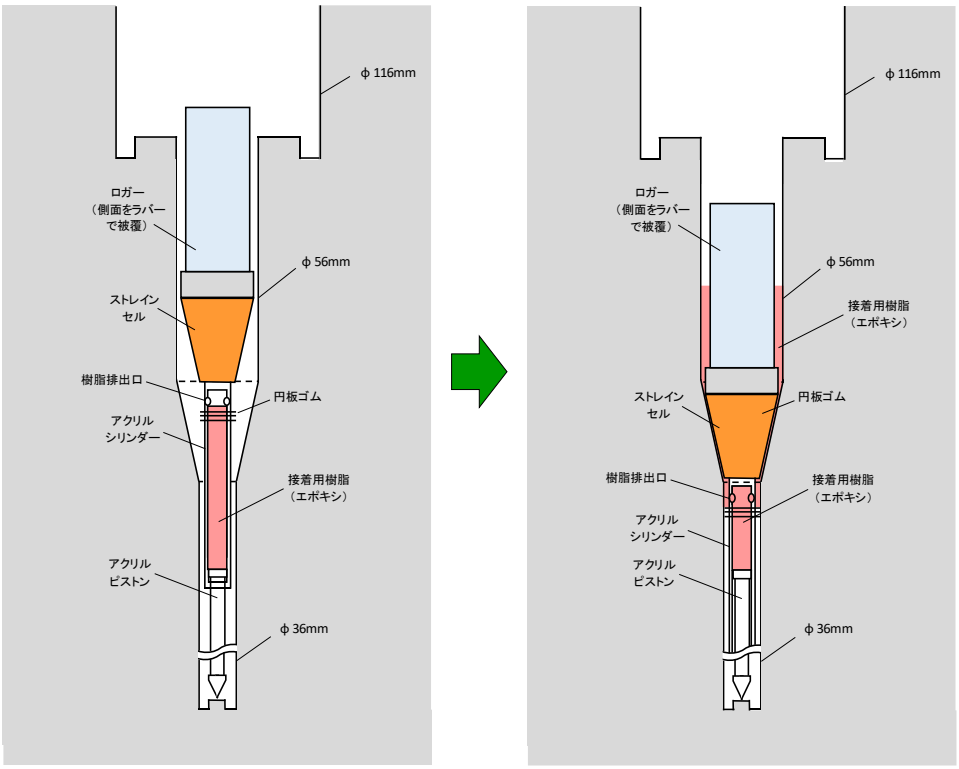
メリット：1 回の挿入作業でストレインセルの接着が可能である。

デメリット：孔底に至る途中で、接着剤が漏れ出てしまうリスクがある。ピストンがスライム溜まりを乱して、スライムが接着面に浮遊するリスクがある。スライムが大量に沈殿している場合、所定の深度に到達する前に接着剤が排出されてしまう。

- 接着方法案②　ポッド型（接着剤注入・貼付装置の一体型、図 2.1-13 参照）

メリット：ストレインセル挿入・接着が連続的に行えるため、接着剤の可使時間の制約を受けない。

デメリット：装置構造が複雑なため設置作業時にトラブルが起きやすい。



（1）降下後の接着剤排出前　　（2）接着剤排出後の完了状態

図 2.1-12　接着方法案①　ピストン型（接着剤注入・貼付装置の一体型）

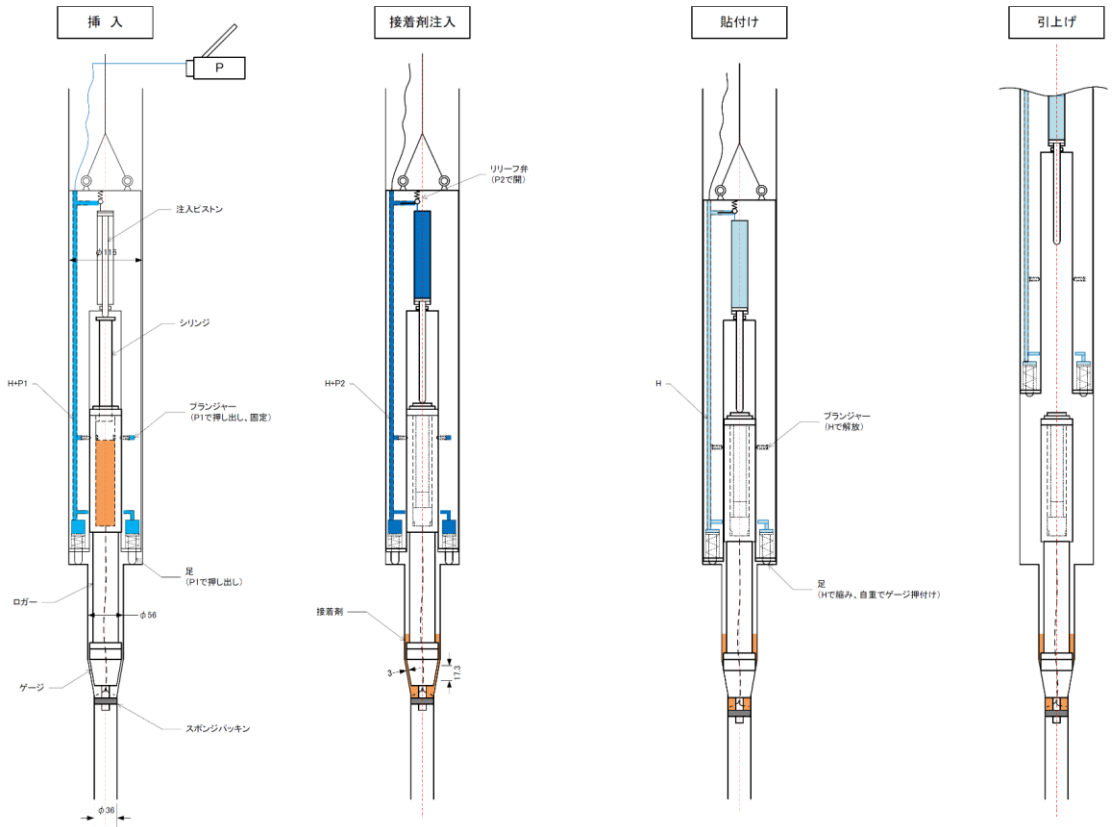


図 2.1-13　接着方法案②　ピストン型（接着剤注入・貼付装置の一体型）

・　接着方法案③　どぶづけ型 その 1（接着剤注入・貼付装置の分離型、図 2.1-14 参照）

メリット：装置の構造がシンプルなため、設計・製作が比較的容易である。設置作業の失敗リスクが小さい。

デメリット：接着剤注入後に装置を回収し、再度、貼付装置を下ろすため時間がかかり接着剤には長い可使時間が要求される。

採用可能だが、降下時の通水断面積の確保やセンタリング機構の検討が必要である。

・　接着方法案④　どぶづけ型 その 2（接着剤注入・貼付装置の分離型、図 2.1-15 参照）

メリット：装置の構造が極めてシンプルである。設置作業の失敗リスクが小さい。

デメリット：下降時の接着剤漏のリスクがあるが、そのリスクは小さい。

この方法を優先して検討するが、接着剤押出し時のシリンダ抵抗とゴムパッカーの支持力との関係の検討が必要な場合はゴムパッカーに代わる機構の検討が必要である。水分と反応して硬化するシアノアクリレート系や粘性がかなり高い接着剤の場合は使用が困難である。

・　接着方法案⑤　直接塗布型（ダイビングベル方式、図 2.1-16 参照）

メリット：接着剤をストレインセル表面に直接塗布して貼付装置を孔底まで下ろして接着できるため、トラブルが少ない。接着直前まで接着剤が水に触れないため、シアノアクリレート系接着剤でも使用可能である。

デメリット:ストレインセルのみが接着され、上部のデータロガー部分の固定ができない。

水分と反応して硬化するシアノアクリート系や粘性が高くどぶづけ型が適さない接着剤にも適するため選択肢として残す。

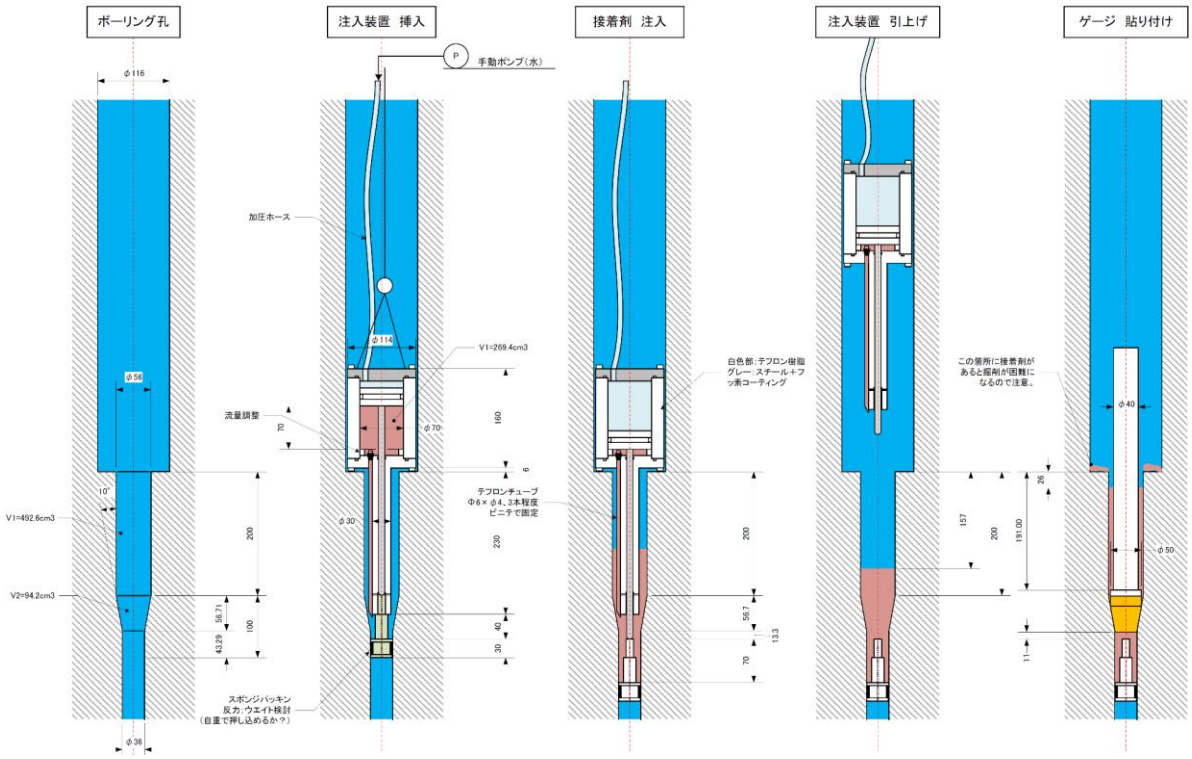


図 2.1-14　接着方法案③　どぶづけ型 その１（接着剤注入・貼付装置の分離型）

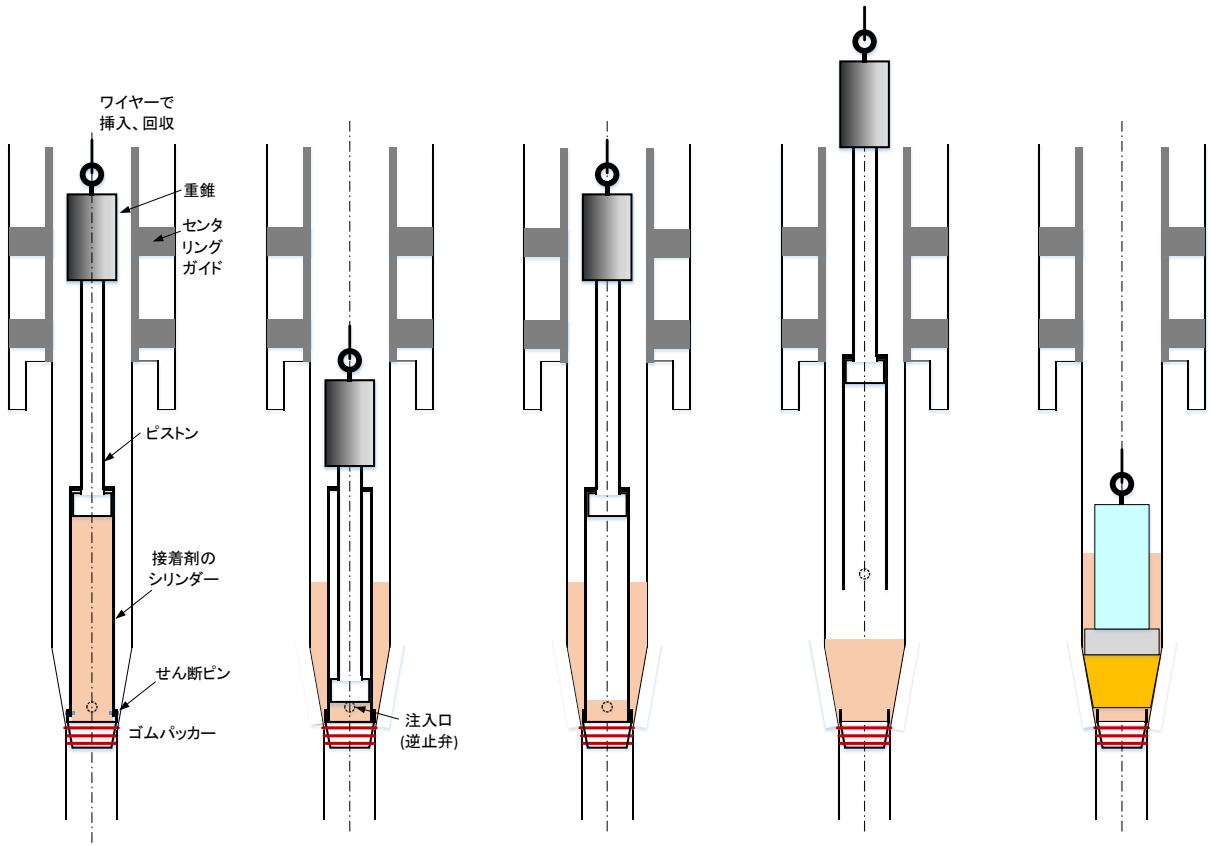


図 2.1-15　接着方法案④　どぶづけ型 その２（接着剤注入・貼付装置の分離型）

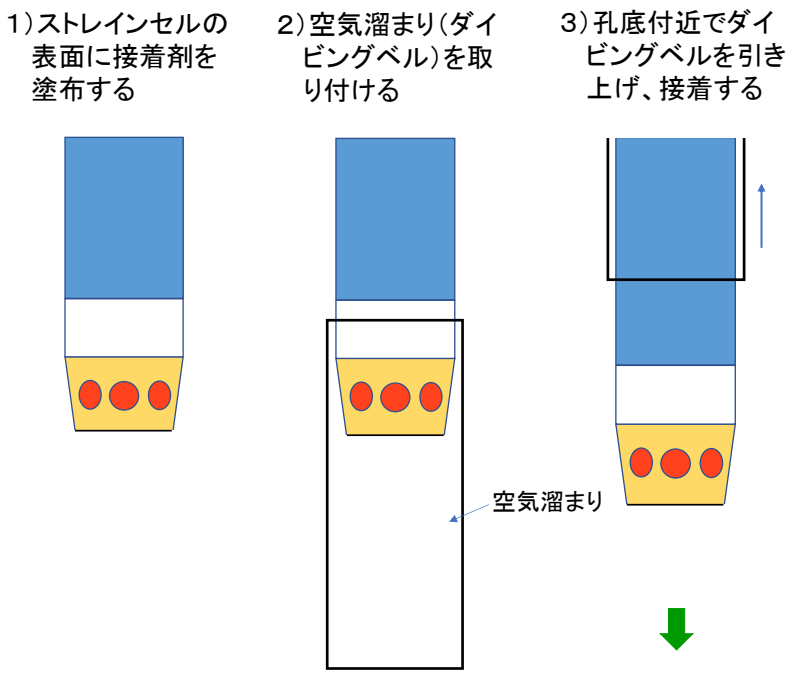


図 2.1-16　接着方法案⑤　直接塗布型（ダイビングベル方式）

(3) 接着方法及び接着剤の検討のための基礎試験

各種の接着剤の性能を確認し、現場試験に適した接着剤を選定することを目的として、基礎試験を実施した。接着剤の候補と試験条件の一覧を表 2.1-1、図 2.1-17 に示す。

前述した接着方法のうち、有力な候補である直接塗布型とどぶづけ型を想定した接着実験を図 2.1-18、図 2.1-19 に示す手順で行った。

なお、HIC 接着剤のみは別の日に試験を実施した。

表 2.1-1　接着剤候補と試験条件

No.	接着剤名	販売業者	粘度 (cP)	比重	可使時間 (時間)	硬化時間 (日)	養生時間（時間） ケースA	ケースB	
1	Eセット	コニシ	30,000	1.10	1.5	1	1, 2, 18	1, 2, 18	エポキシ樹脂系（硬化剤混合型）
2	水中エポキシ	セメダイン	パテ状	1.08	1	1	1, 2, 18	不実施	
3	ロンジーパテF-197N	スリーボンド	パテ状	1.60	1	1	1, 2, 18	不実施	
4	アルファテック841	アルファ工業	20,000	1.80	0.5	7	1, 2, 18	1, 2, 18	
5	アクアスケーピンググルー	アズージャパン	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	1, 2, 18	18	シアノアクリレート系
6	ゼリー状接着剤	神畑養魚	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	1, 2, 18	不実施	
7	HIC接着剤 CSIROで使用	Earth sciences	記載なし	記載なし	0.3～0.5	0.7 (16h)	22	22	→ エポキシ樹脂系（硬化剤混合型）

実験時の温度　No.1～6：16～21℃、No.7：14～20℃　　直接塗布想定　どぶづけ想定

図 2.1-17　接着剤の硬化前の状態

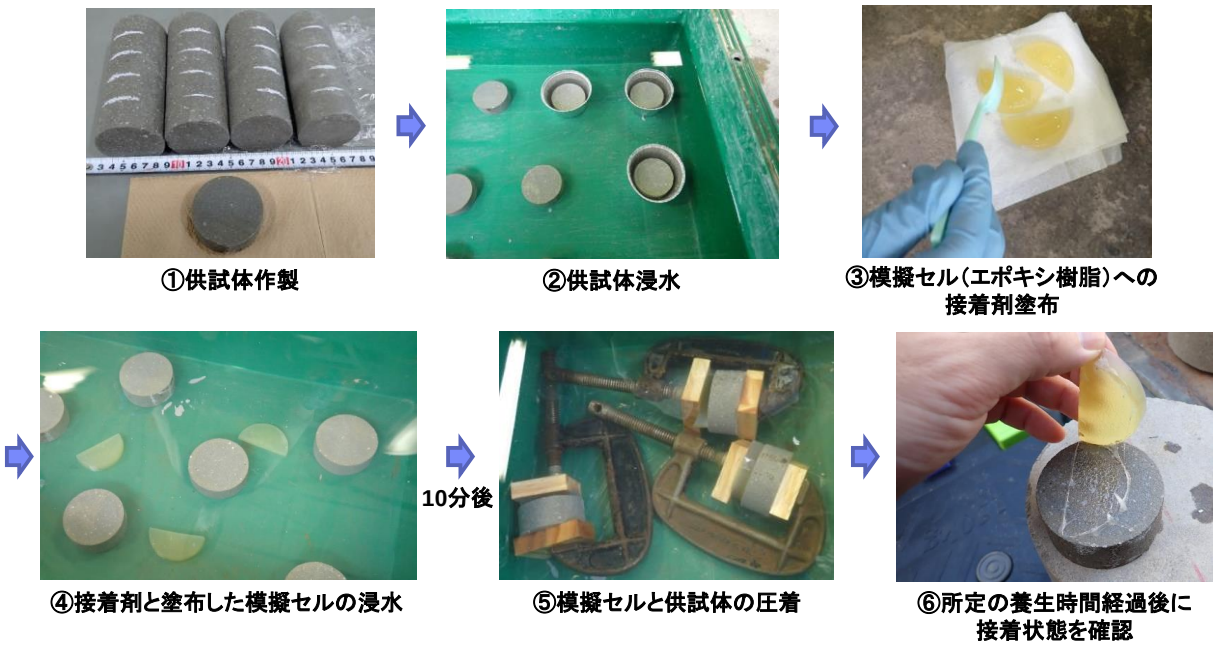


図 2.1-18　直接塗布型を想定した接着試験状況

図 2.1-19　どぶづけ型を想定した接着試験状況

接着試験結果の一覧を、表 2.1-2 と図 2.1-20 に示す。

E セット（注入直後、図 2.1-21(a)参照）は、注入した際、均質に沈殿しないため、どぶづけ型の対象として不適であった。直接塗布型としても、水中で表面に被膜が生じること、2 時間経過の時点で硬化の様子がなかったこと、粘性が高く取り扱いが困難であったことから不適と判断した。

水中エポキシ（養生 18 時間後、図 2.1-21(b)参照）は、接着面を剥がす際に岩石表面を薄く剥がれる程度に接着したが、接着層の厚さのムラが生じやすいため、不適と判断した。ロンジーパテも同様であった。

アルファテック 841（養生 18 時間後、図 2.1-21(c)参照）は、ダイヤモンドカッターで切断しないと剥がせないほど強固に接着していた。どぶづけ型の有力候補とし、直接塗布型でも利用可能と判断した。ただし、硬化に伴い比較的高い熱が発生したため、下段の 3 つの接着剤よりは優先順位が低いと判断した。

ゼリー状接着剤、アクアスケーピンググルー（養生 18 時間後、図 2.1-21(d)参照）は、水中での接着を確認できた。粘性が比較的低く塗布が容易で、硬化時間が短い。直接塗布型の有力候補と考えたが、どぶづけ型では利用不可と判断した。

HIC 接着剤（養生 22 時間後、図 2.1-21(e)参照）は、ダイヤモンドカッターで切断しないと剥がせないほど強固に接着していた。良好に接着されており、どぶづけ型の有力候補と判断した。ケース A の実験でも同様に良い接着状態であり、直接塗布型でも適用可能である。

表 2.1-2　接着試験の結果

No.	接着剤名	メーカー	粘度 (cP)	比重	可使時間 (時間)	硬化時間 (日)	接着時間（時間）	
							ケースA 直接塗布想定	ケースB どぶづけ想定
1	Eセット	コニシ	30,000	1.10	1.5	1	中止※	中止
2	水中エポキシ	セメダイン	パテ状	1.08	1	1	2	不実施
3	ロンジーパテF-197N	スリーボンド	パテ状	1.60	1	1	2	不実施
4	アルファテック841（骨材なし）	アルファ工業	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	18	18
5	アクアスケーピンググルー	アズージャパン	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	1	中止
6	ゼリー状接着剤	神畑養魚	記載なし	記載なし	記載なし	記載なし	1	不実施
7	HIC接着剤	Earth sciences	記載なし	記載なし	0.3～0.5	0.7 (16h)	22	22

※2時間で硬化せず

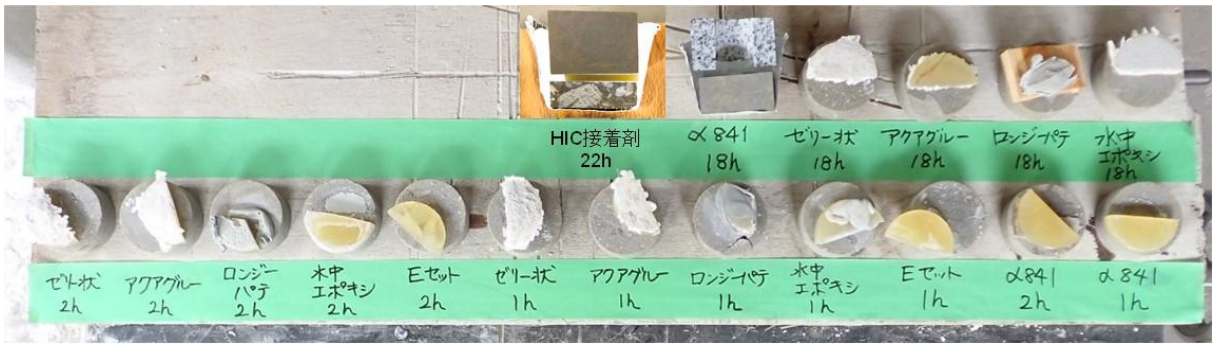


図 2.1-20　各条件（接着剤、養生時間）での接着状態

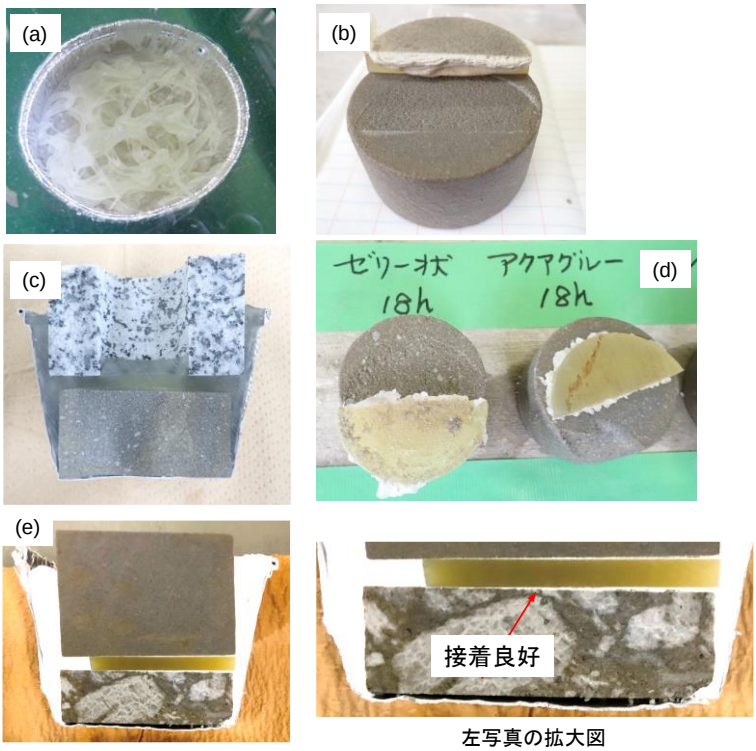


図 2.1-21　各接着剤の接着状態と結果の評価

（a：E セット（注入直後）、b：水中エポキシ（養生 18 時間後）、c：アルファテック 841（養生 18 時間後）、d：ゼリー状接着剤(写真左)、アクアスケーピンググルー(写真右)（養生 18 時間後）、e：HIC 接着剤（養生 22 時間後））

次に、有力と考えた各接着剤を用いてひずみゲージ（縦・横のクロス）を岩石供試体に貼り付け、応力ひずみ曲線を求め各接着剤の感度を比較した（図 2.1-22 参照）。硬岩では一般的に使用されるアロンアルファは、軟岩での接着及びひずみ測定には難があるが比較のために使用した。

湿潤させた軽石凝灰岩の供試体にひずみゲージを直接接着可能な接着剤は、アクアスケーピンググルー、ゼリー状接着剤、HIC 接着剤、アロンアルファの 4 種類であった。なお、アルファテック 841 はこのときは接着ができなかったが、再度試験を行い検討したいと考えている。

測定されるひずみが大きいほど岩石の変形に追随し、ひずみ感度が良いと考えられるが、HIC 接着剤＞アクアスケーピンググルー＞アロンアルファの順にひずみが大きかった（図 2.1-23 参照）。なお、ゼリー状接着剤は HIC 接着剤塗布後の試験では剥離したためデータがない。

これらの結果から、どぶづけ型、直接塗布型のどちらでも使用可能な HIC 接着剤を最有力候補として検討を進めることとする。次段階として、感度の時間依存性などについて調査を行う。

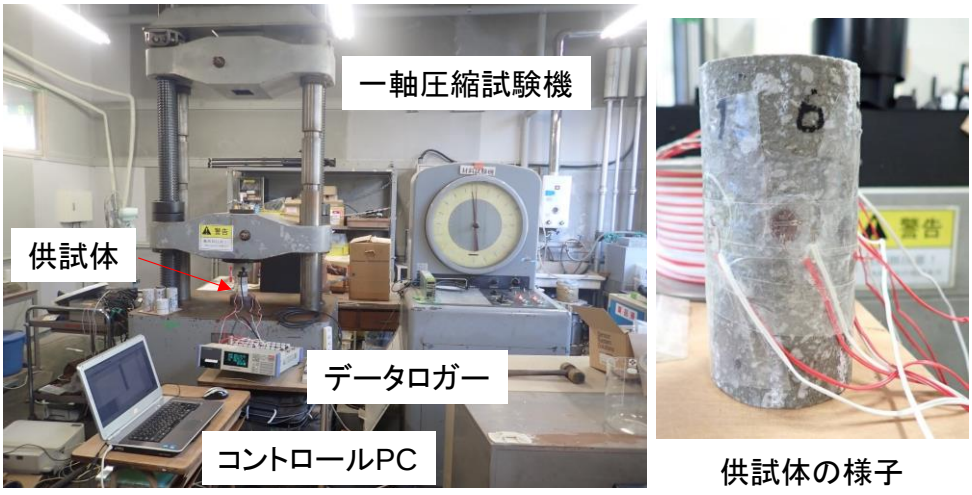


図 2.1-22　一軸圧縮試験による接着剤の感度比較試験の実施状況

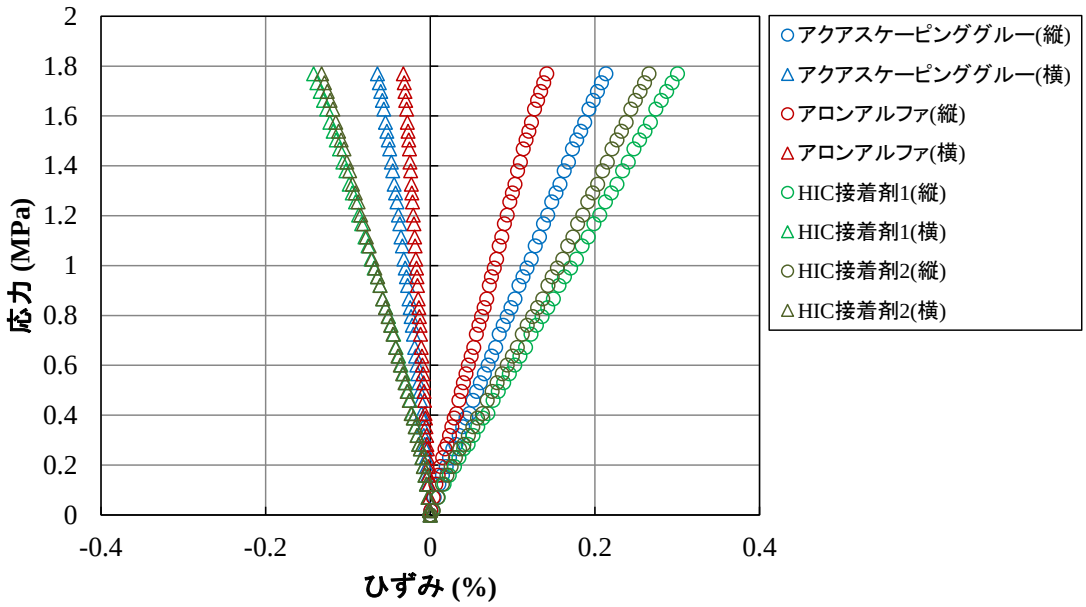


図 2.1-23　一軸圧縮試験による接着剤の感度比較試験結果

(4) 接着方法及び接着剤の検討のための岩石ブロックを利用した試験

1) 六ヶ所の軽石凝灰岩ブロックの試料採取

a. ブロック試料の採取方法

現場検証試験予定位置周辺の坑内で、今後の各種室内検証試験に用いる軽石凝灰岩（ブロック試料）の採取を行った。ブロック試料の採取の仕様は以下のとおりである。

- ブロック試料形状：縦 30cm×横 30cm×高 30cm（30cm 立方体）
- ブロック試料数量：6 試料

ブロック試料採取の流れを図 2.1-24 に示す。

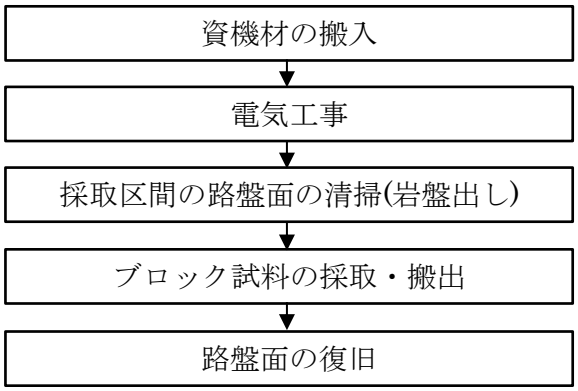
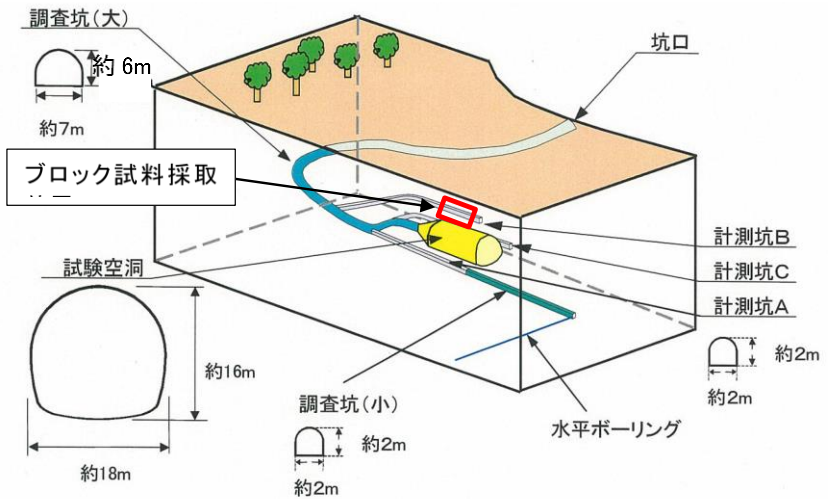


図 2.1-24 ブロック試料の採取の流れ

(a) ブロック試料採取位置

軽石凝灰岩層のうち比較的軽石の含有が少ない区間からブロック試料の採取を行った。採取可能な箇所として計測坑 B の孔口より支保工 No.150～No.157（約 180m～190m）の区間を対象とした。

図 2.1-25 及び図 2.1-26 にブロック試料の採取位置の概要を示す。



（低レベル放射性廃棄物の次期埋設に関する本格調査結果について、2006 年 9 月に加筆）

図 2.1-25 ブロック試料の採取位置の概要

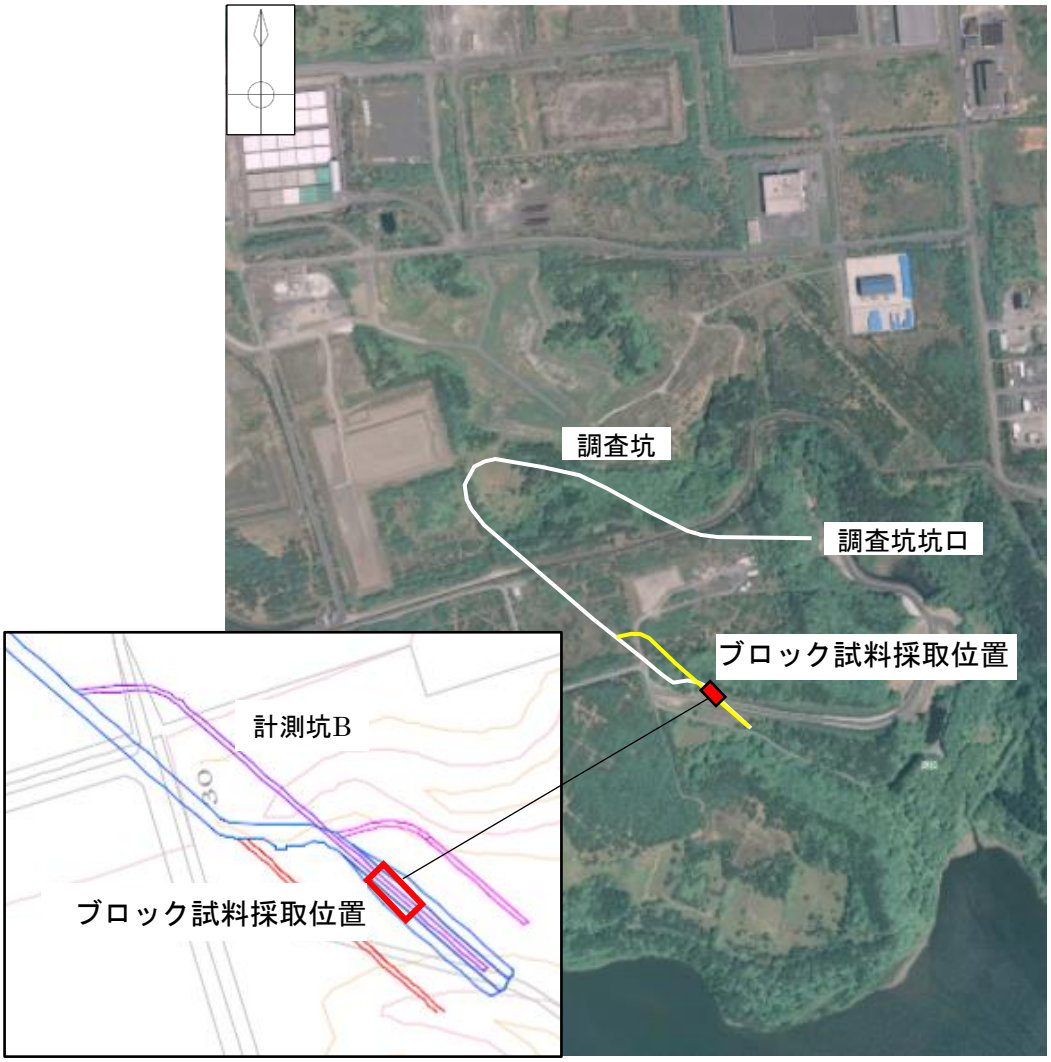


図 2.1-26　ブロック試料の採取位置

(b) 資機材の搬入

資機材の搬入は、計測坑 B 入口までは車両（ディーゼル車）により運搬し、計測坑 B 内の採取作業箇所までは二輪台車を使用して資機材を運搬した。安全に運搬するために、通路には障害物がないことを確認してから通行し、重量物を運搬する場合は、複数人で行った。

また、油圧チェーンソー用油圧モーターを駆動させるための油圧ユニットへ給電するディーゼル発電機を搬入した。発電機の搬入では、小型ユニッククレーンが付属しているトラックで計測坑 B 入口まで運搬し、小型ユニッククレーンで発電機を吊り上げてから計測坑 B 入口の所定の位置に設置した。発電機の設置位置については、排気ガスが作業員に悪影響を及ぼさないように、空気の流れの下流側に設置した（図 2.1-27 参照）。

小型ユニッククレーンで油圧ユニットを計測坑 B の入口に運び、そこから人力により運搬し、ブロック試料採取地点付近に設置した。

(c) 電気工事

計測坑 B の入り口に設置した発電機から油圧モーターまでの電気工事については、35kVA（油圧モーターの容量）以上の電源ケーブルを試料採取区間付近まで配線し、分電盤を設置した（図 2.1-27、図 2.1-28 参照）。電源ケーブルは、地這設置とならないよう支保工に抱き合わせた。

なお、配線については有資格者が行った。

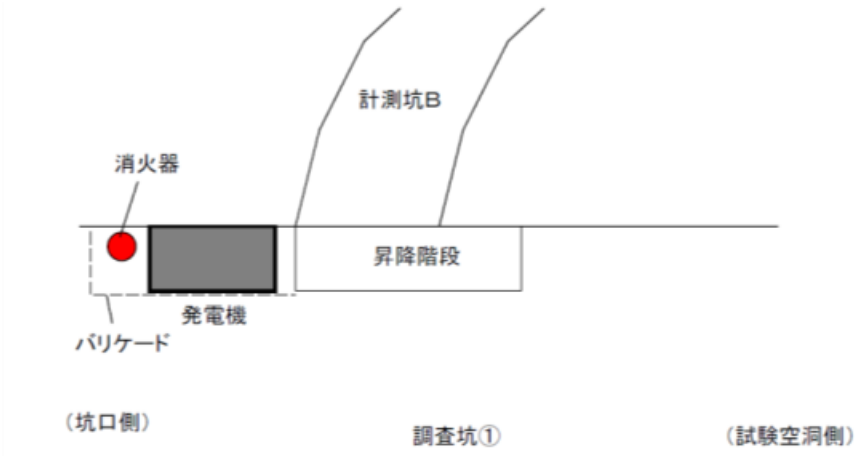


図 2.1-27　計測坑 B 入口付近発電機設置位置

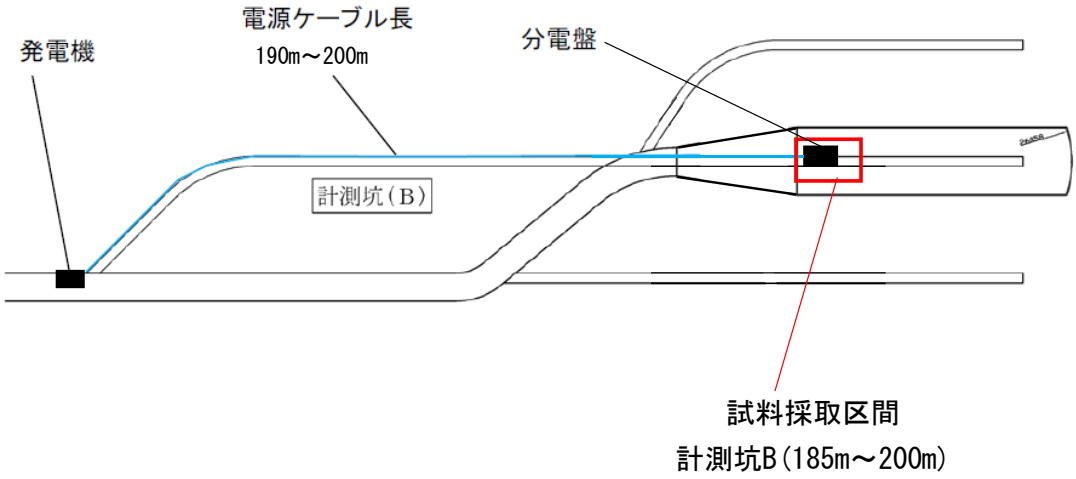


図 2.1-28　発電機の配置とブロック試料採取作業位置の概要

(d) 採取区間の路盤面の清掃(岩盤出し)

岩盤の表面を覆っている通路の敷石を、ハンマードリル、スコップ及びじょれん等を使用して除去し岩盤を露出させた。除去した敷石は、試料採取作業及び通行の妨げにならないように作業範囲外（坑道の奥側）に仮置きした。なお、岩盤を露出させた再に、岩盤表面に軟質部や浮き等が確認された場合はこれも除去した。

通路の敷石等を除去する範囲を図 2.1-29 に示す。除去においての支保工の根元は、安全に配慮し、側壁から 60cm 程度は確保した。

また、岩盤の軟質部や浮きを除去した後に、岩盤表面の凹凸をねじり鎌を用いて平滑に整形した。

最後に、整形後の岩盤表面の清掃を行い、割れ目の状況を確認して、試料採取位置を選定した。

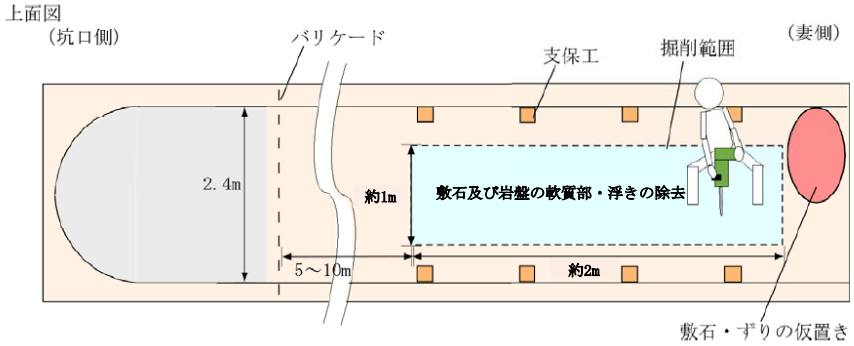


図 2.1-29　採取区間の路盤面の清掃(岩盤出し)

(e) ブロック試料の採取・搬出

ブロック試料は、油圧チェーンソーを使用して岩盤を切断して採取した。作業の概略図

を図 2.1-30、図 2.1-31 に示し、ブロック試料の採取に使用する用具類を表 2.1-3 に示す。

油圧チェーンソーを使用するときには、作業中に部外者が立ち入らないように、作業区間の手前側に立入禁止のカラーコーンバリケードを設置した。また、油圧チェーンソーで岩盤を切断しているときには、刃先に冷却水が通水していることを確認しながら使用した。

採取試料は、含水状態の変化を少なくするように、速やかにポリエチレンフィルムで巻き、運搬時の試料を保護するため木箱で梱包して、不意の衝撃及び振動から保護した。

試料の運搬については、試料の重さが 40kg 程度になることから、採取作業場で二輪台車に積載して計測坑内は人力による台車で搬出した。計測坑 B 入り口の階段は人力（2 名以上）で慎重に運搬した。更に、計測坑 B から搬出した後、車の荷台に積み込み、調査坑外に運搬した。

なお、採取試料が割れ・亀裂発生等により不足となった場合は、主に計測坑の奥側を追加掘削して試料を確保した。

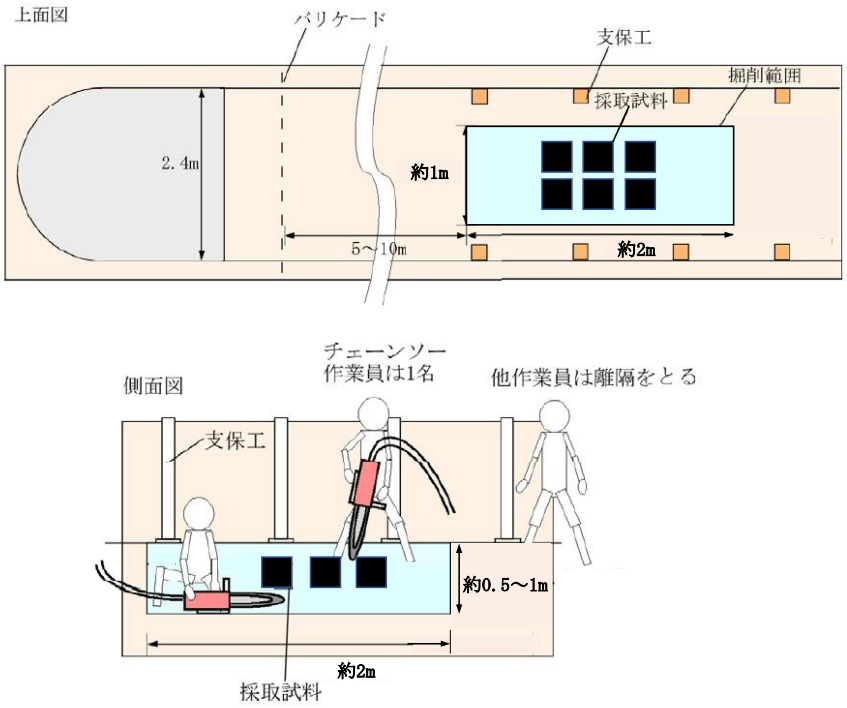


図 2.1-30　ブロック試料の採取概要図

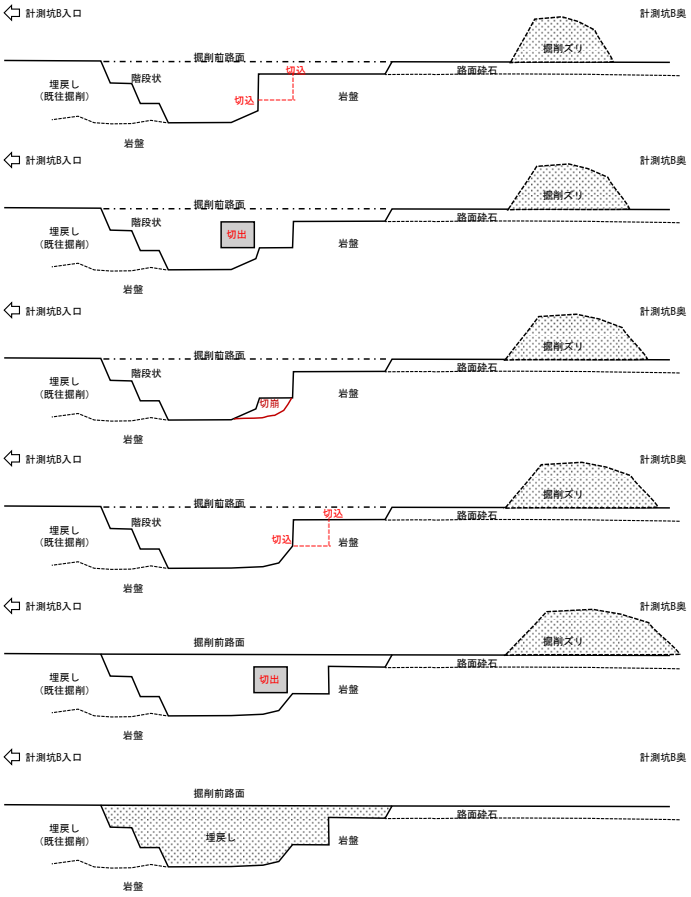


図 2.1-31　ブロック試料採取の進行と埋戻し

表 2.1-3　ブロック試料の採取等に使用する主な用具類

名称	動力	備考
油圧チェーンソー	油圧	電動油圧ユニットで駆動
グラインダ	電気	
ハンマードリル	電気	
スコップ	人力	
じょれん	人力	
つるはし	人力	
ねじり鎌	人力	岩盤清掃
のこぎり	人力	試料成形等
カッター	人力	ロープ、エアキャップ等の切断

(f) 路面の復旧

試料採取後の路盤面の復旧では、仮置きした掘削土・岩ズリ及び敷石により埋戻しを行った。

b. ブロック試料の採取結果

当初、計測坑 B の支保工 No.151～No.152 においてブロック試料の採取を試みたが、

この付近は割れ目が多く、30cm 立方体のブロック試料の採取が困難であったことから、計測坑 B の更に奥側の支保工 No.155～No.157（約 186m～190m）区間を新たに採取範囲とした。ブロックの採取位置を図 2.1-32 に示す。

図 2.1-32 に示すように、ブロック試料の採取は、支保工 No.156 付近から計測坑 B の奥側に向かい実施した。

路面の敷石及び風化軟質部を除去後、軽石凝灰岩層が分布していることを確認した。更に、割れ目のないことを確認した後に 30cm 立方体のブロック試料を採取した。図 2.1-32 に示すとおり、試料番号 1 から順に切出し・採取を行ったが、試料 5 まで採取を行った時点で低角度の割れ目が出現し、試料 5 の右側及び奥側の岩盤に割れ目が連続して確認されたため、支保工 No.157 より奥側からブロック試料は採取できなかった（ブロック試料を切り出したものの割れ目で分離するなどの状態あり）。また、支保工 No.155 から入口側の岩盤にも割れ目が確認されたため、No.155 から入口側からの採取は不可能と判断した。

採取地点周囲の割れ目の状況を再確認し、最終的にブロック試料 3 の左側から試料 6 を採取することで、合計 6 試料を採取した。

採取した各ブロック試料の状況を図 2.1-33～図 2.1-38 に示す。

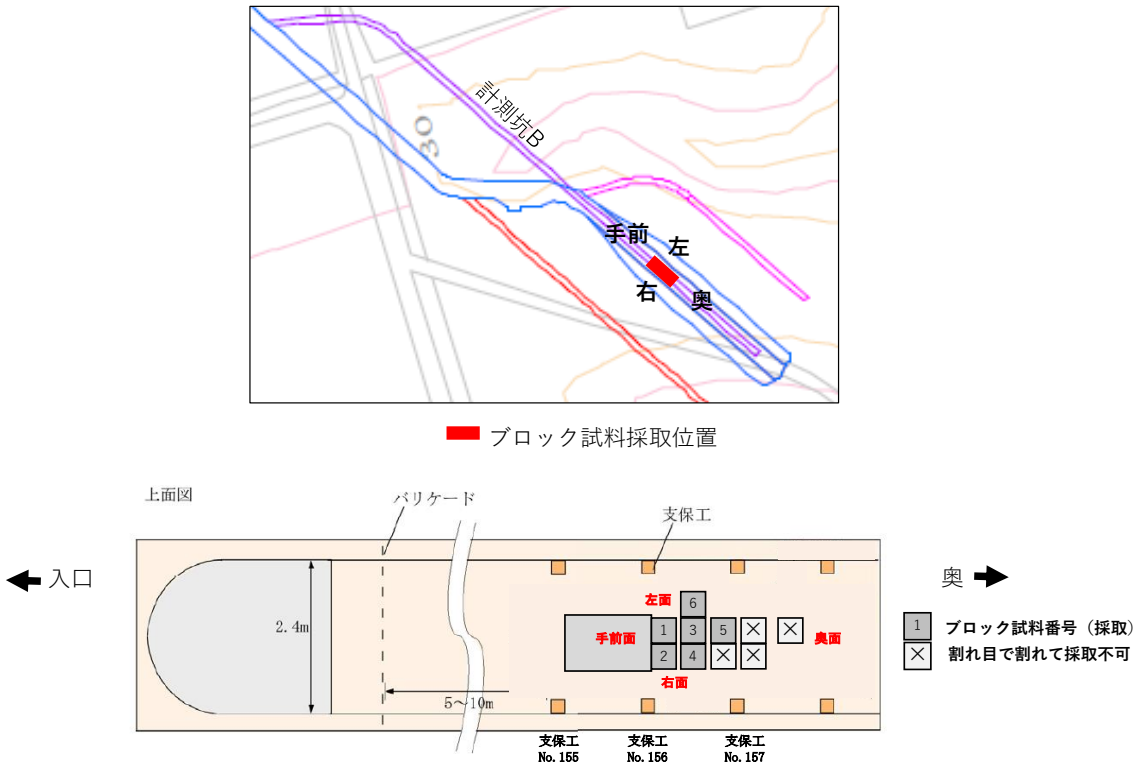


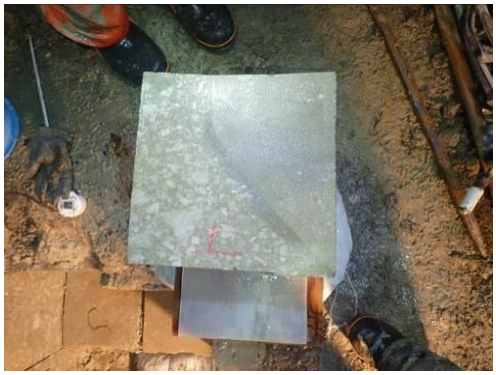
図 2.1-32　ブロック試料採取位置

<table>
<tr><td>
試料 1 上面</td><td>
試料 1 手前面</td></tr>
<tr><td>
試料 1 左面</td><td>
試料 1 奥面</td></tr>
<tr><td>
試料 1-右面</td><td></td></tr>
</table>

＊計測坑 B の奥を見て、左面・右面、手前面・奥面

＊試料 2~試料 6 に比べて試料が赤味を帯びているが、これは坑内に設置したアイランプの影響であり、実際は試料 2~試料 6 と同様の色を呈している。試料 2 以降は白色光のランプを使用して撮影している。

図 2.1-33　ブロック試料の状況（試料 1）



試料 2 上面

試料 2 手前面

試料 2 左面

試料 2 奥面

試料 2 右面

＊計測坑 B の奥を見て、左面・右面、手前面・奥面

図 2.1-34　ブロック試料の状況（試料 2）

試料 3 上面

試料 3 手前面

試料 3 左面

試料 3 奥面

試料 3 右面

＊計測坑 B の奥を見て、左面・右面、手前面・奥面

図 2.1-35　ブロック試料の状況（試料 3）

試料 4 上面

試料 4 手前面

試料 4 左面

試料 4 奥面

試料 4 右面

＊計測坑 B の奥を見て、左面・右面、手前面・奥面

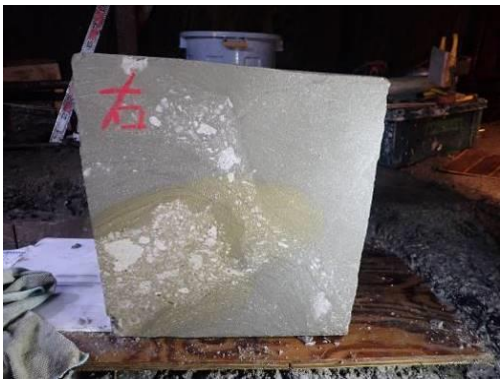
図 2.1-36　ブロック試料の状況（試料 4）

試料 5 上面

試料 5 手前面

試料 5 左面

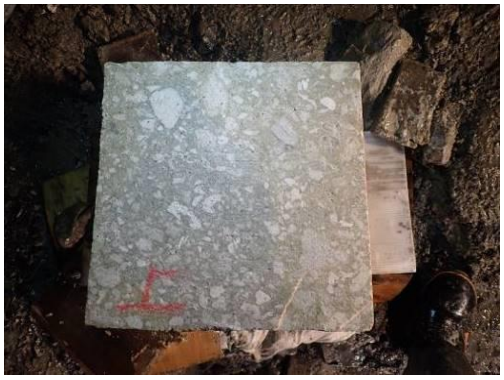
試料 5 奥面



試料 5 右面

＊計測坑 B の奥を見て、左面・右面、手前面・奥面

図 2.1-37　ブロック試料の状況（試料 5）



試料 6 上面

試料 6 手前面

試料 6 左面

試料 6 奥面

試料 6 右面

＊計測坑 B の奥を見て、左面・右面、手前面・奥面

図 2.1-38　ブロック試料の状況（試料 6）

2）大谷石ブロックを用いた接着試験及び二軸載荷試験

岩石ブロックを用いた試験として、はじめに、購入した一辺 30cm の立方体の大谷石ブロックを対象とした試験を実施した（図 2.1-39 参照)。後述する掘削ツールスの掘削試験とあわせて、ストレインセルを接着できてひずみの測定が可能かについて調査を行った（図 2.1-40 参照)。

ストレインセルの接着には本項(3)で前述した HIC 接着剤を用いた。本接着剤の使用方法は、樹脂の入った容器（図 2.1-41 参照）に硬化剤を注ぎ、その容器のキャップを閉めて約 4 分間揉んで樹脂と硬化剤の二液を混合する。なお、混合途中でキャップを緩めて容器内の空気を除去する必要がある。混合後、掘削孔に接着剤を注ぐ際は空気が混入しないように掘削孔の内壁に向けて注いだ方が良い。

二軸載荷試験のひずみゲージの配置と載荷パターンを図 2.1-42 に示す。

図 2.1-39　大谷石ブロックへのストレインセルの貼付

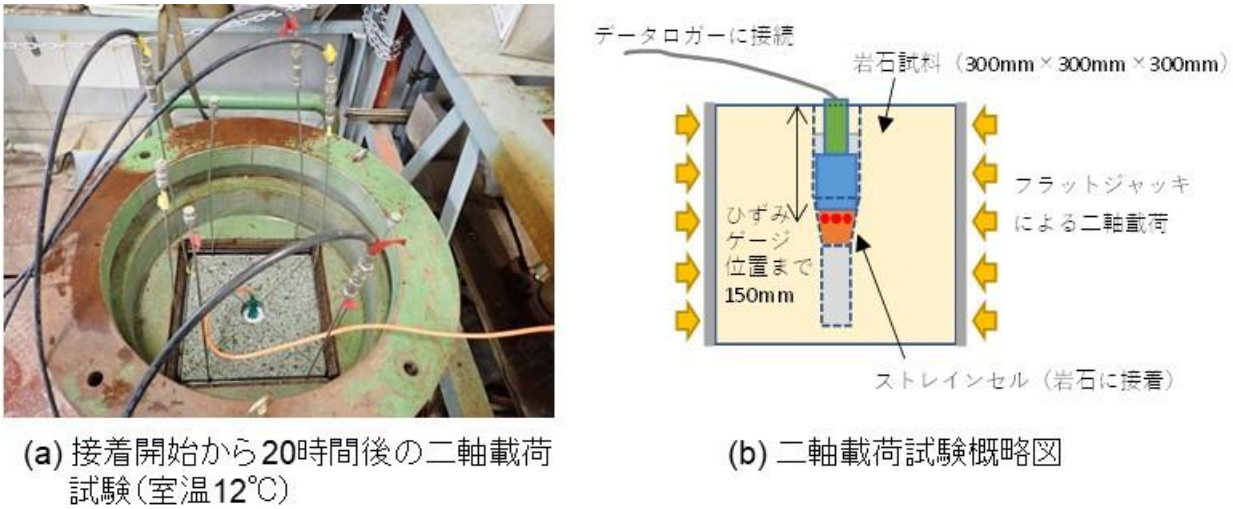


図 2.1-40　大谷石ブロックを用いた二軸載荷試験

図 2.1-41　HIC 接着剤（混合前の硬化剤と樹脂）

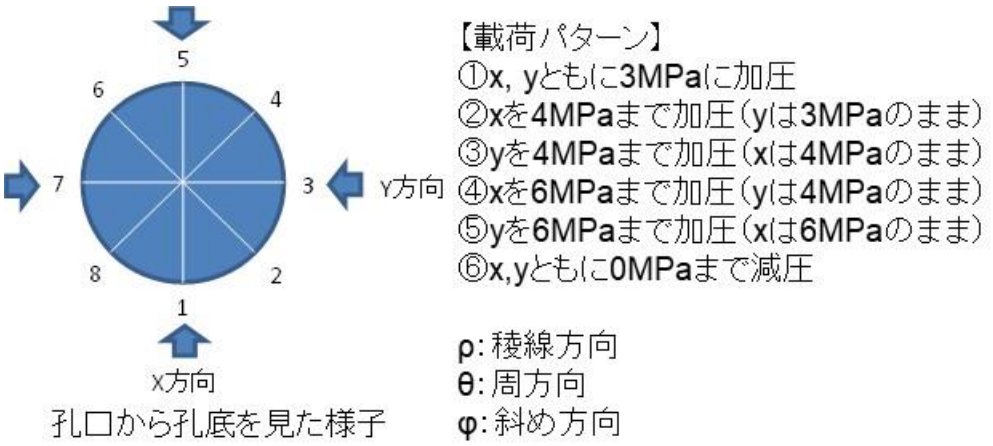


図 2.1-42　大谷石を対象とした二軸載荷試験のひずみゲージの配置と載荷パターン

大谷石を対象とした二軸載荷試験結果（接着から 20 時間後、図 2.1-43 参照）より、以下のことがわかった。

- Y 方向よりも X 方向に大きい圧力をかけると、Y 方向の周方向ひずみは圧縮方向に、X 方向の周方向ひずみは引張り方向にそれぞれ変化し、方向性としては適切に測定されていることが確認できた。
- ひずみ量が小さい主な原因は、ひずみゲージ表面に製作の過程で使用した薄い両面テープが残っていてそのまま接着してしまったためである。
- 測定値が不安定となった原因は、ストレインセル（室内検証試験用）に上部接続部分

から水が浸入したことによる絶縁低下と考えられる。

また、二軸載荷試験後のストレインセルと周辺岩盤の切断面（図 2.1-44 参照）より、以下のことが言える。

- ストレインセルと円錐孔壁の間は接着剤が十分に薄い状態でしっかりと接着されており、どぶづけ型でも問題なくストレインセルを接着できることを確認した。
- ストレインセルの底部に空隙が見られるが、接着時にストレインセルを接着剤中に押し込む際に空気が混入した可能性や、接着剤の製作時及び岩石ブロックへの注入時に接着剤に空気が混入した可能性がある。今後の室内試験では、空気や孔内水の混入を阻止または軽減する方法について検討していく必要がある。

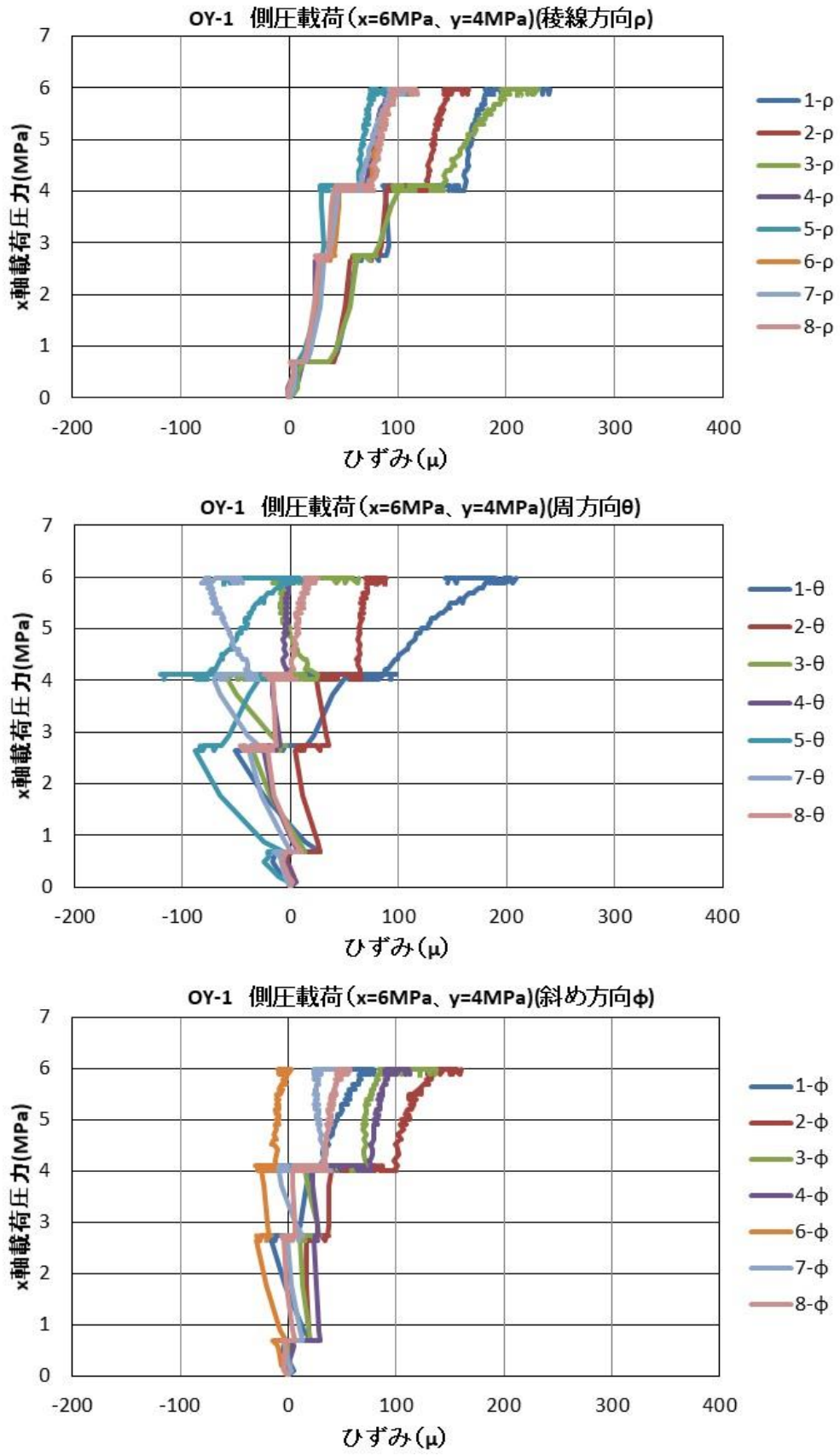


図 2.1-43　大谷石を対象とした二軸載荷試験の x 軸載荷圧力とひずみの関係

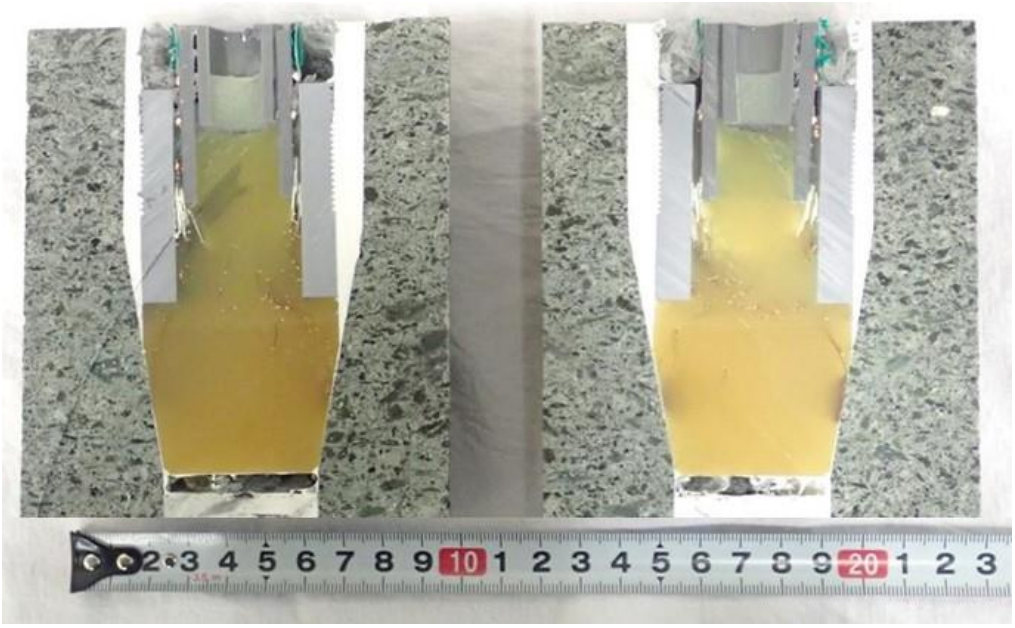


図 2.1-44　大谷石を対象とした二軸載荷試験後のストレインセルと周辺岩盤の切断面

3）六ヶ所の軽石凝灰岩ブロックを用いた接着試験及び二軸載荷試験

図 2.1-45 に示すように、HIC 接着剤を用いて軽石凝灰岩ブロック試料にストレインセルを接着した。接着開始から 16 時間後まで 21℃で養生した（HIC 接着剤の仕様上の硬化時間は 16 時間）。なお、本試験に用いた軽石凝灰岩ブロックは前述の試料 3、4 とした。

試料 4 を用いた二軸載荷試験結果（接着から 24 時間後と 45 時間後の比較）を図 2.1-46 に示す。①2MPa まで二軸を等圧で載荷し、②X 方向のみ 3MPa まで加圧した。接着から 24h 後と 45h 後のひずみ量を比較すると若干ではあるがひずみが減少している。この原因が、接着剤の時間依存性なのか、亀裂の発生や塑性化の影響なのかについての検討が今後必要である。

接着から 22 時間後の試料 3 を対象とした試験（図 2.1-47 参照）では、載荷途中にひずみが不連続な変化を示した。また、円周方向 θ において引張ひずみが発生している。この原因として、岩石の破壊やゲージの接着不良の影響が考えられる。今回の試験では鉛直方向は載荷を行っておらず、鉛直方向に発生する引張応力が岩石の弾性領域の限界付近となり降伏間近で限界ひずみに近い可能性があることに注意する必要がある。今後の検証試験では二軸載荷の場合は載荷方法の見直しを行う。

試験後の試料（図 2.1-48 参照）はブロックの端部が所々欠けていた。また、下面を見ようとブロックを傾けたところ、下面にクラックが入った。ブロック表面はある程度は湿っていたが、脆くなっていたと思われ、この点についても今後の検証試験では対策を考える。

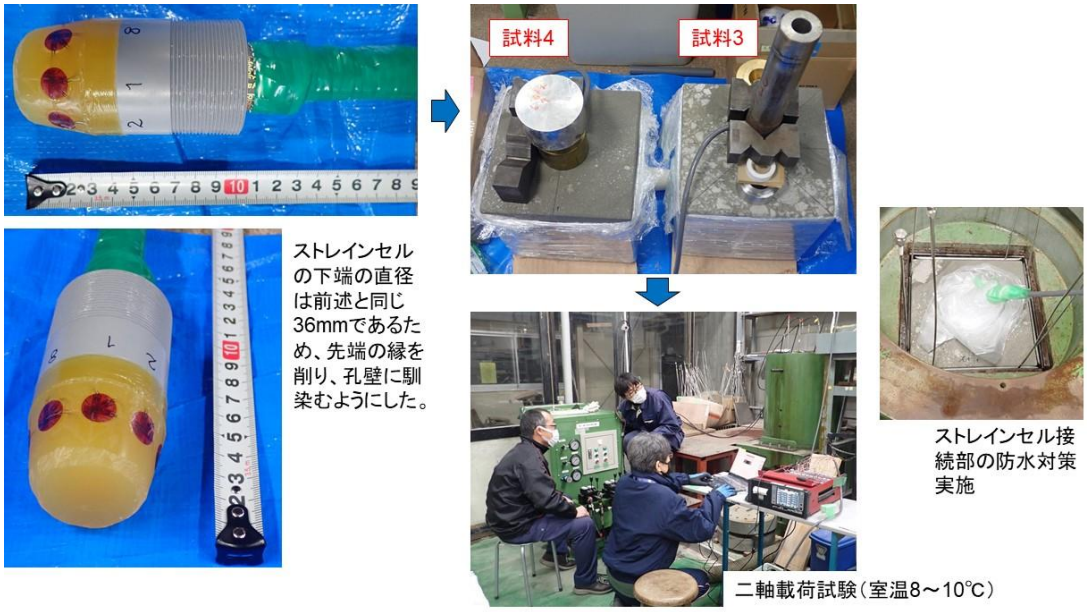


図 2.1-45　軽石凝灰岩を対象とした二軸載荷試験状況

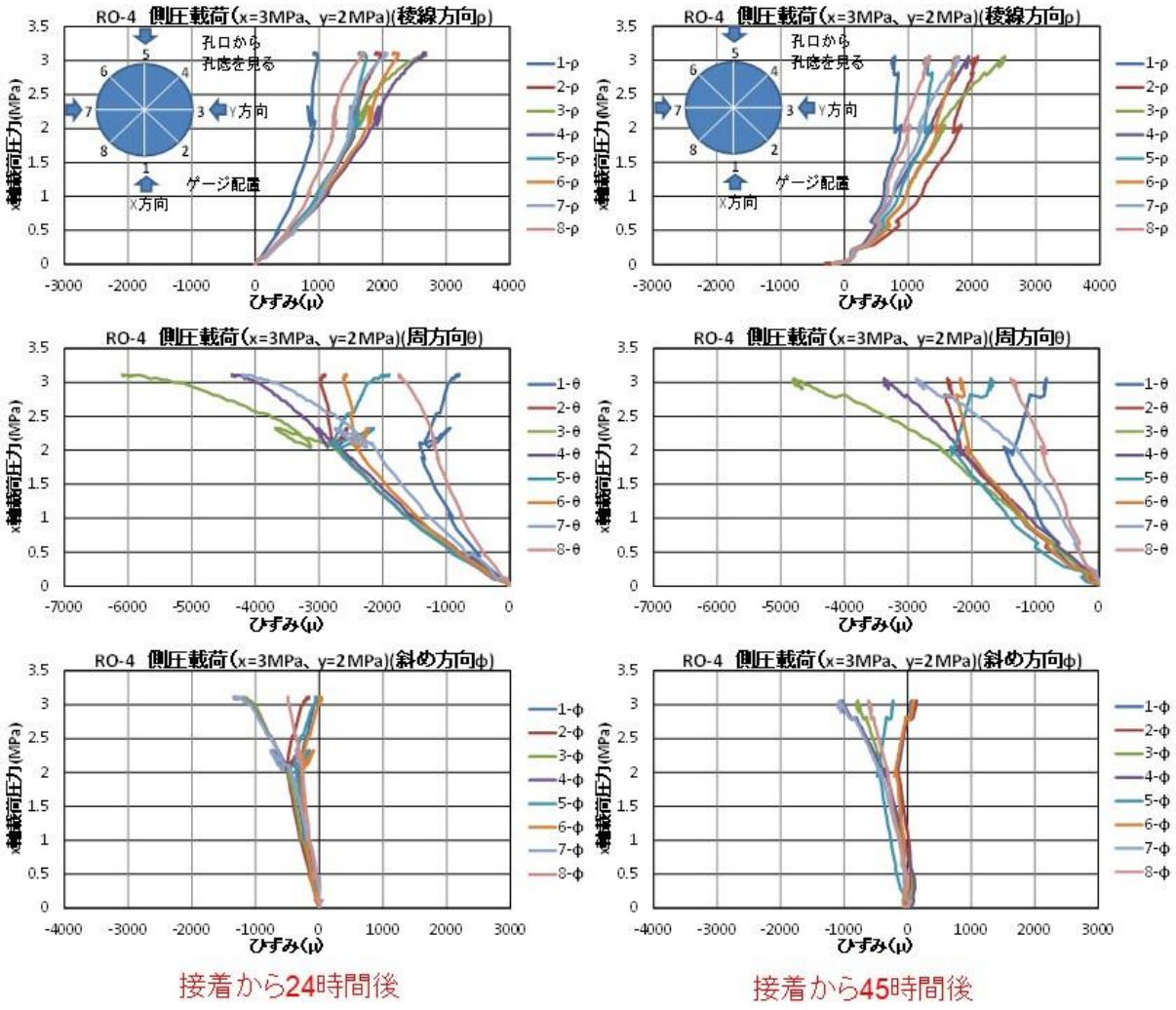
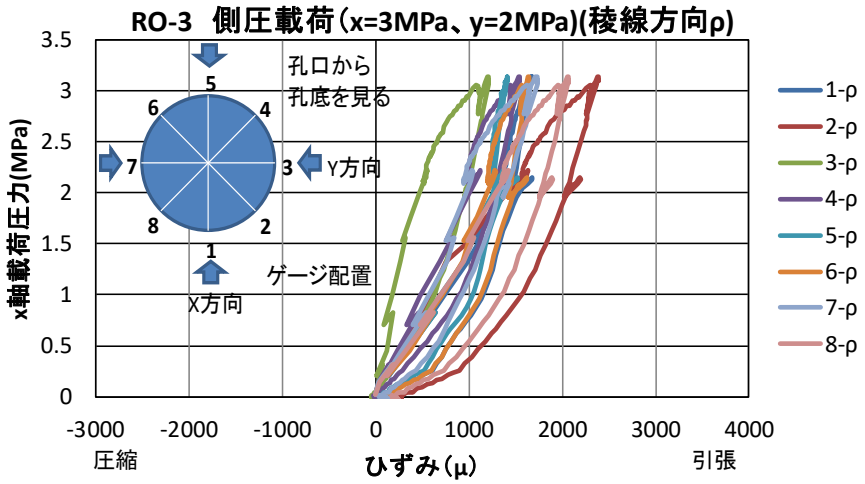
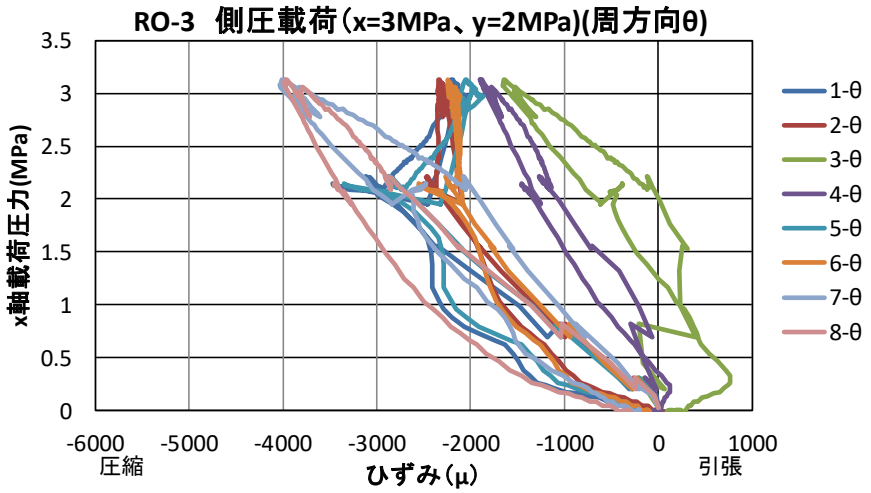
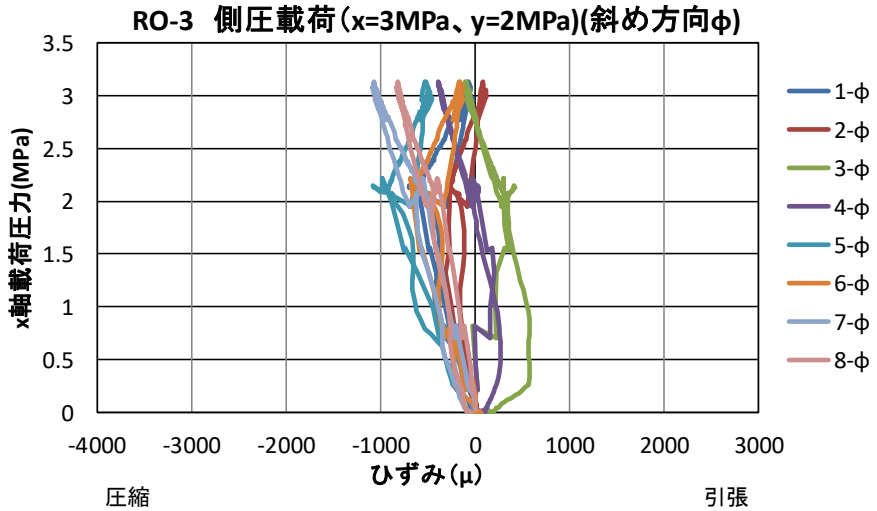


図 2.1-46　軽石凝灰岩を対象とした二軸載荷試験の x 軸載荷圧力とひずみの関係（試料 4）







接着から22時間後

図 2.1-47　軽石凝灰岩を対象とした二軸載荷試験の x 軸載荷圧力とひずみの関係（試料 3）

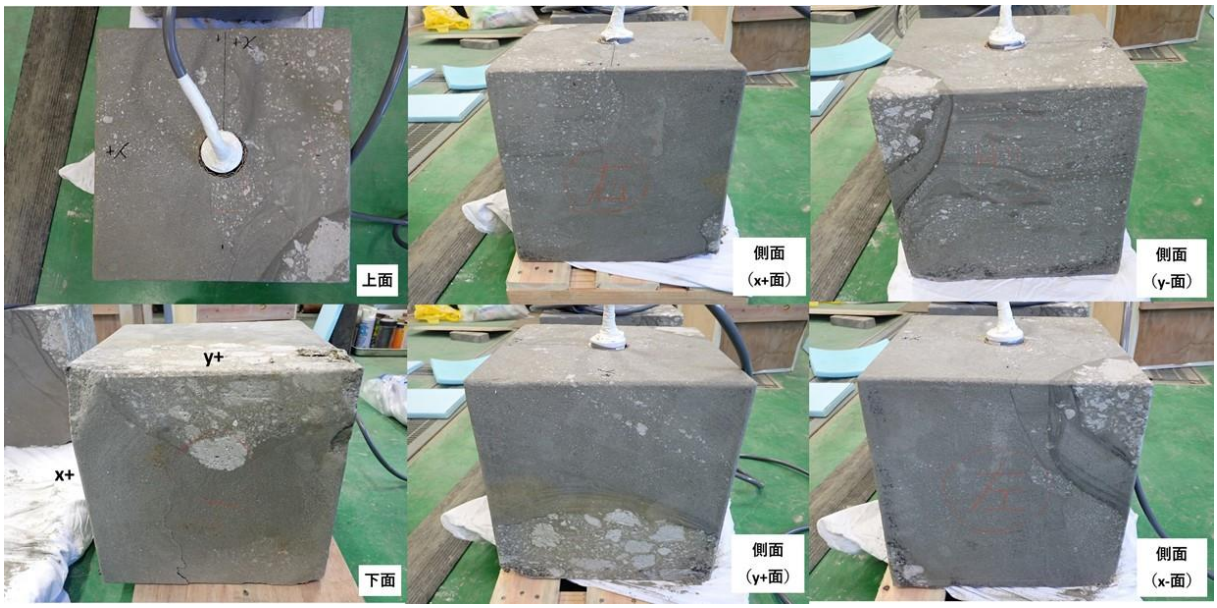


図 2.1-48　二軸載荷試験後に取り出した直後のブロック試料の各面の状況（試料４）

(5) ストレインセルの検討

ストレインセルのエポキシ部は、円錐孔底ひずみ法で使用している素材を基本として、以下の仕様で製作を行う（図 2.1-49 参照）。

・ 弾性体であること
・ 対象岩より軟らかいこと

ただし、軟らか過ぎると接着で押し付ける際に変形が大きくなるリスクがあるため、配合を変えた複数種類のエポキシを用意し比較検討を行って使用する素材を決定する。

周辺温度の変化の影響を検討できるように、温度ゲージを内蔵させ、ひずみゲージの配線はリード線の温度影響を避けるため 1 ゲージ 3 線式とする。

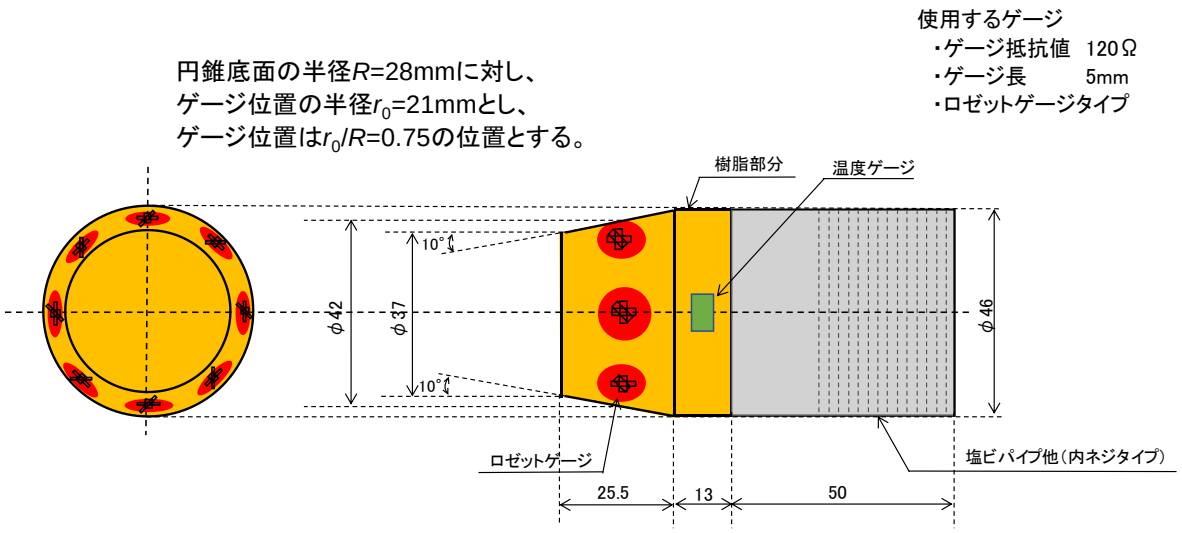


図 2.1-49 今後製作予定の室内検証試験用ストレインセルの寸法図

(6) データロガーの検討

データロガーの仕様（案）は、以下のとおりとする（図 2.1-50 参照）。

＜筐体＞

・ 耐圧：3MPa 以上（深さ 200m 以内で使用）、防水仕様
・ 形状：円筒形（外径 50mm、長さ 300～600mm（検討中））
・ ひずみ計との接続：標準プラグに防水カバーをつけて耐水圧構造とする
・ 材質：ステンレスを予定、接着剤が剥がれやすい被膜を検討（または収納管交換）

＜本体＞

・ 外部入力チャンネル数：26（外部入力：ひずみ 24＋温度 1＋圧力 1）

圧力は現時点では本ロガーでは測定しない方針だが、機能としては入力可能とする

・ 搭載センサー：方位角、ロール角、ピッチ角
・ フラッシュメモリ搭載

・ クロックタイマー搭載
・ 計測間隔：プログラマブル（ソフト変更）

例： 10 秒を 1 時間（孔内挿入・設置）、
1 分を 20 時間（養生＝接着剤の硬化時間）、
5 秒を 1 時間（オーバーコアリング）、
30 秒を 1 時間（コア回収等）、
5 秒を 1 時間（地上での感度試験）

・ バッテリー駆動時間：24 時間
耐圧、振動、周囲温度、過充電、過放電での火災爆発の危険を避けるためリチウムイオン電池は非採用とし、一次電池であるリチウム電池を使用
・ 電圧ドロップ抑制電源回路搭載
・ データ取り出し：専用プラグから PC への接続
・ ひずみ計との接続：防水プラグ（標準プラグの外側をＯリングで耐水圧確保）

具体的な設計製作においては、過去に開発された「サイクロン・孔内用小型データロガー」（図 2.1-51 参照）をベースに開発を行う。その際、以下の点を改良する。

・ 消費電力を抑えるため、回路構成を変更する（※IC の入手も課題）
・ センサーと制御回路系の接続ライン（センサーケーブル中継基板）の構成を検討し小型化する
・ 搭載容積（バッテリー室の容量）はできるだけ小さくする

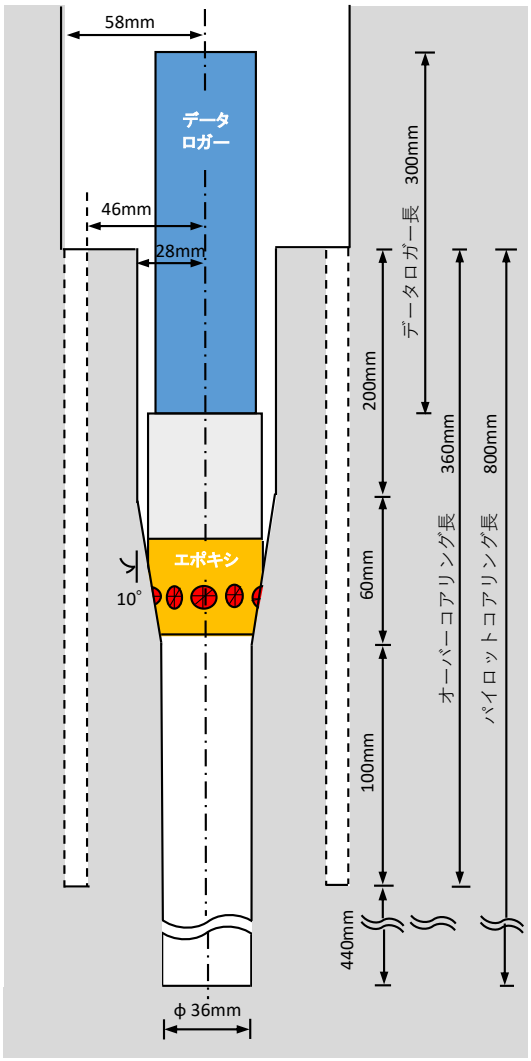


図 2.1-50　ひずみ計孔内設置時のデータロガーの設置状況模式図

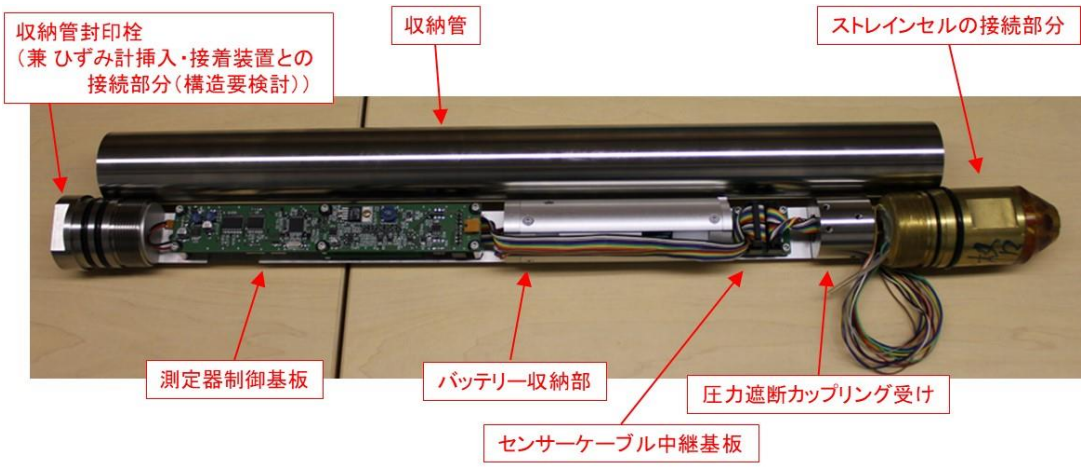


図 2.1-51　過去に開発されたデータロガーの例と構成の説明

(7) 掘削ツールスの検討

1) 室内試験用掘削ツールスの設計・製作

パイロットボーリング及び孔底整形の掘削ツールスの試作として、室内試験用に図 2.1-52 左図のツールスを設計・製作した。図 2.1-52 左図の拡径リーマの部分をサーフェイス（粗削り用)、インプリ（仕上げ用）の材質のもので順に掘削することで、孔壁を滑らか仕上げる設計とした。

このツールスで室内での軟岩を対象とした掘削テストを行った。その結果を以下に記す。これらの結果をもとに原位置試験用のツールス設計を行う。また、次年度は現場試験用ツールの製作に進むとともに、孔内洗浄方法も検討する。

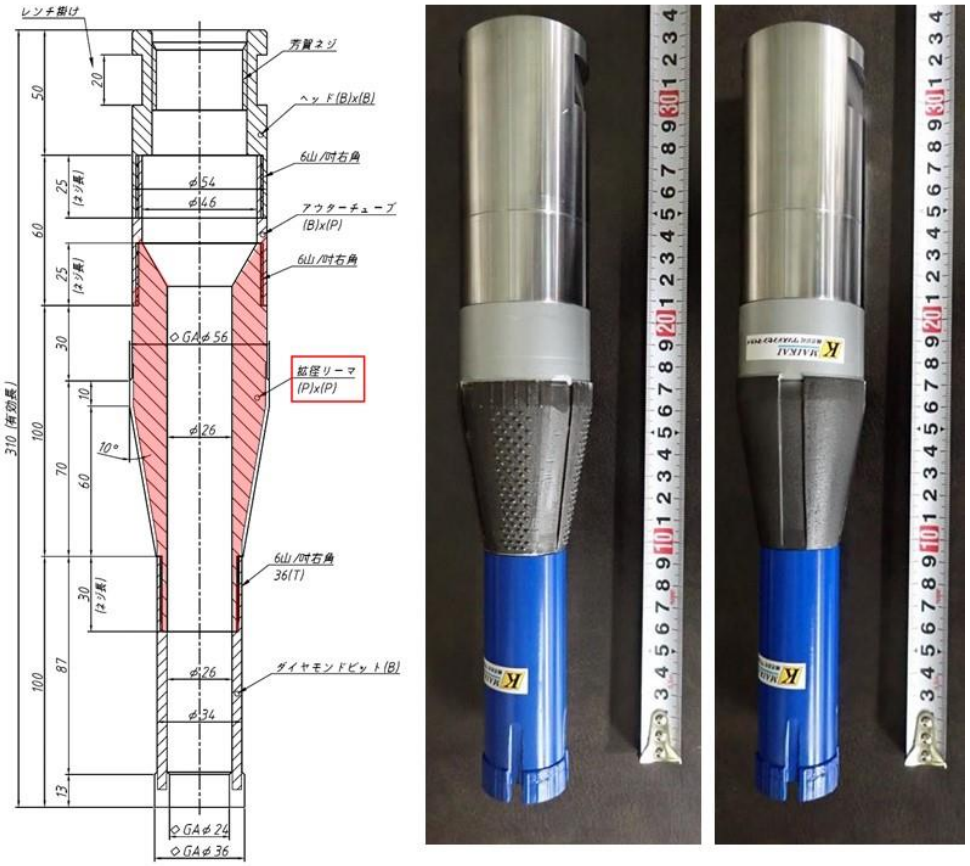


図 2.1-52　パイロットボーリング及び孔底整形用の掘削ツールス（室内試験用）
（左：設計図面、中央：サーフェイスビットのセット、右：インプリビットのセット）

2) 大谷石ブロックを用いた円錐孔壁掘削試験

サーフェイスビットで掘削したところ、孔壁に掘削痕が見られた（図 2.1-53 参照)。掘削痕を軽減するために、今後の製作においてはダイヤの配置を千鳥状に変更する。

インプリビットで掘削したところ、孔壁は凹凸がほとんどない滑らかな面であった。また、インプリビットだけでも掘削可能であった。

3）六ヶ所の軽石凝灰岩ブロックを用いた円錐孔壁掘削試験

試料 3、4 のブロックを対象にそれぞれ長さ 28cm を掘削し、コアを折って回収した。掘削速度は、1～2cm/min 程度とし、インプリビットだけでも問題なく掘進できることを確認した。円錐部の形状も問題はなかった（図 2.1-54 参照）。

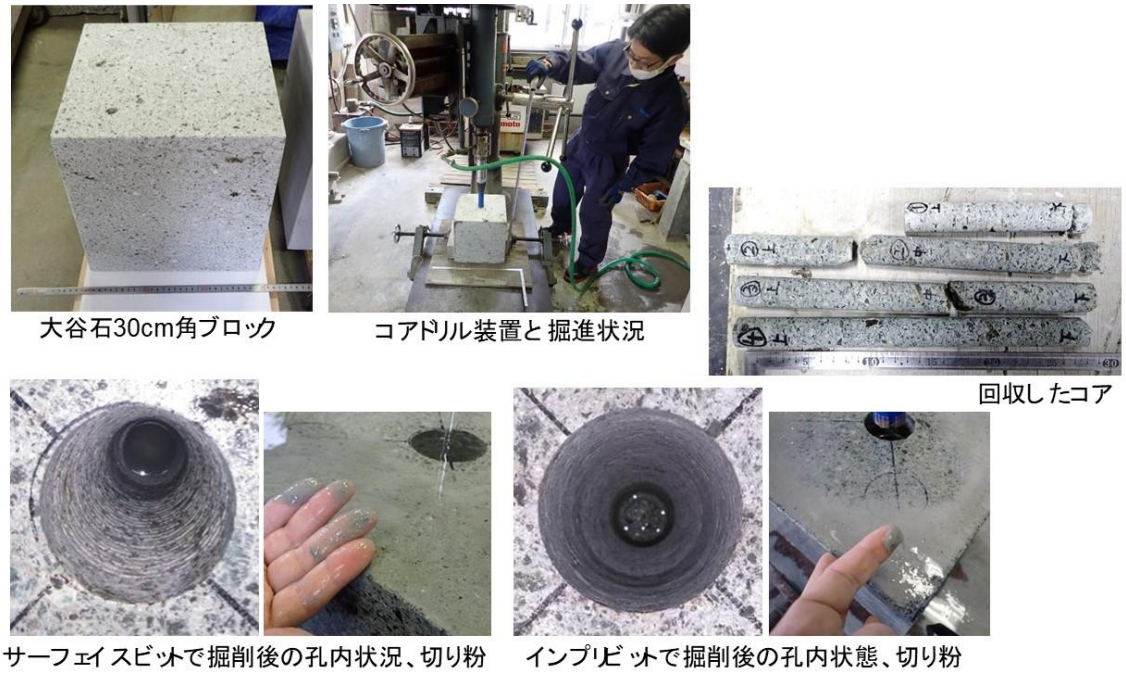


図 2.1-53　大谷石ブロックを用いた掘削試験状況

図 2.1-54　軽石凝灰岩ブロックを用いた掘削試験状況

(8) 孔内状況確認方法の検討

孔内撮影用カメラに求める仕様は、以下のとおりである。

- ストレインセルを接着する円錐形状の孔壁をカラーで鮮明に観察でき、割れ目や不均質性、掘り屑の付着程度を評価可能であること（図 2.1-55 参照）。
- 最長 200m の深度でも使用可能であること。
- ウインチ及びケーブルで昇降可能であること。
- 径が 116mm から 56mm に小さくなる深度の 116mm の孔底面に対しても適用可能であることが望ましい。

利用を検討する既存の装置として、以下のものを選定した。

- 製品名：OBI2 ボアホールカメラ（図 2.1-56 参照）

特徴や仕様は以下のとおりである。

- 高角撮影が可能な魚眼レンズを使用したカメラのため、側面から斜め下を撮影可能。
- 装置外径 46mm、適用最大孔径 230mm、測定最大深度 450m。
- 120 万画素で鮮明な撮影が可能。撮影映像をモニタリング可能。
- 4 芯アーマードケーブル使用、電源は DC12V。

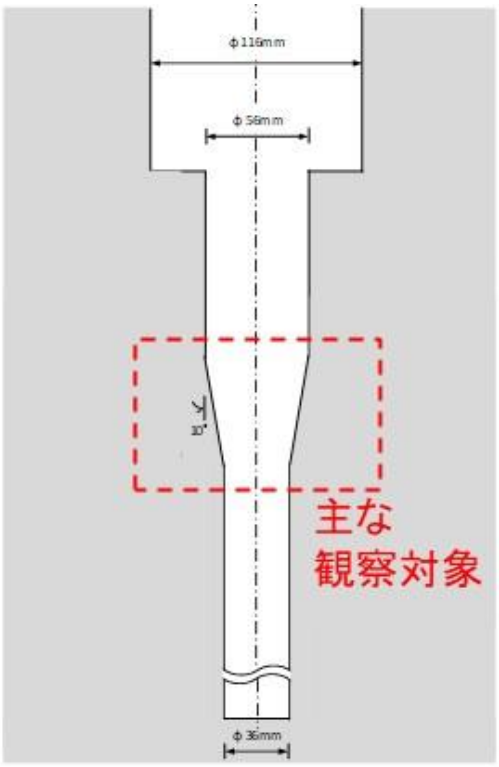


図 2.1-55　孔内撮影用カメラによる主な観察対象

この OBI2 ボアホールカメラについて適用性を確認するため、先端部の構造を変えて撮影結果の比較を実施した。その状況と結果を図 2.1-57 と図 2.1-58 に示す。

試験の結果、アクリルキャップがある場合は、通常の OBI カメラでは見えない孔底を観察できるが、カメラからアクリルキャップ先端の長さが 8cm 程度あるため、段落とし部分に近接できず、よく見えないことがわかった。

一方、キャップ無しの場合、VU50 管の下端直近までカメラを挿入できるので、段落とし部分を詳しく観察できた。カメラの直下に装着可能なドーム型のアクリルキャップを製作し、キャップ無しに近い見え方になるか今後確認試験を行う。

図 2.1-56　OBI2 ボアホールカメラ

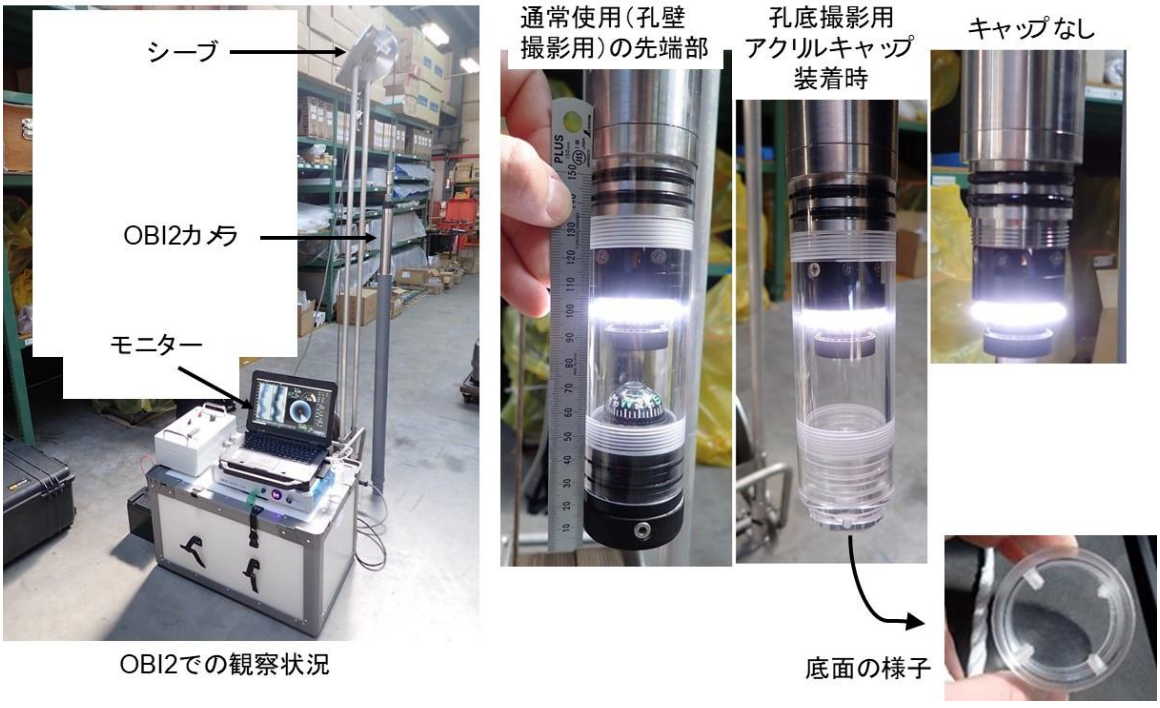


図 2.1-57　OBI2 ボアホールカメラ適用性確認試験状況

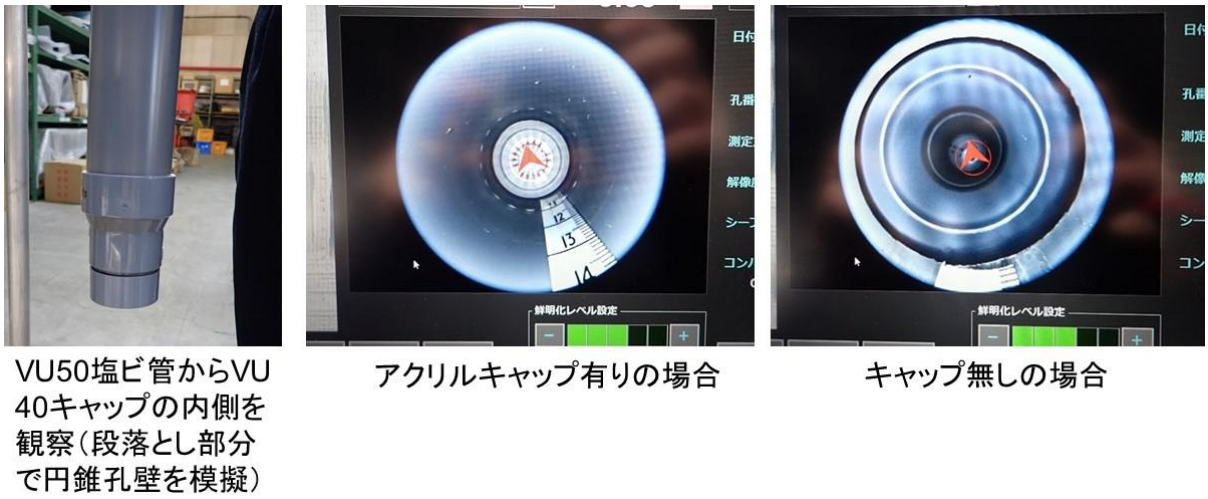


図 2.1-58　OBI2 ボアホールカメラ適用性確認試験結果

(9) 感度試験方法の検討

ストレインセルの接着状態によって応力に対するひずみの測定感度が変化してしまうため、回収したコアを用いた感度試験の実施が不可欠である。

試験方法としては、供試体の全周から圧力をかけ、載荷圧力とひずみ 24 成分の関係を取得する方法とする。得られた関係には、岩石の剛性の影響や測定位置・形状の影響のほかに、接着による測定感度の変化の影響も含まれる。

感度試験装置の仕様は以下のとおりとする（図 2.1-59 参照）。

- コア径：92mm
- 載荷面：ゲージの貼付中心位置±100mm（全長 200mm）
- コアを鉛直に立てた状態で試験実施

　→原位置の状態と同じであり、直接塗布型（ストレインセル部分のみの接着）になった場合でもストレインセル部分に曲げ応力が作用しない。

適用可能な二軸感度試験機の例を図 2.1-60 に示す。

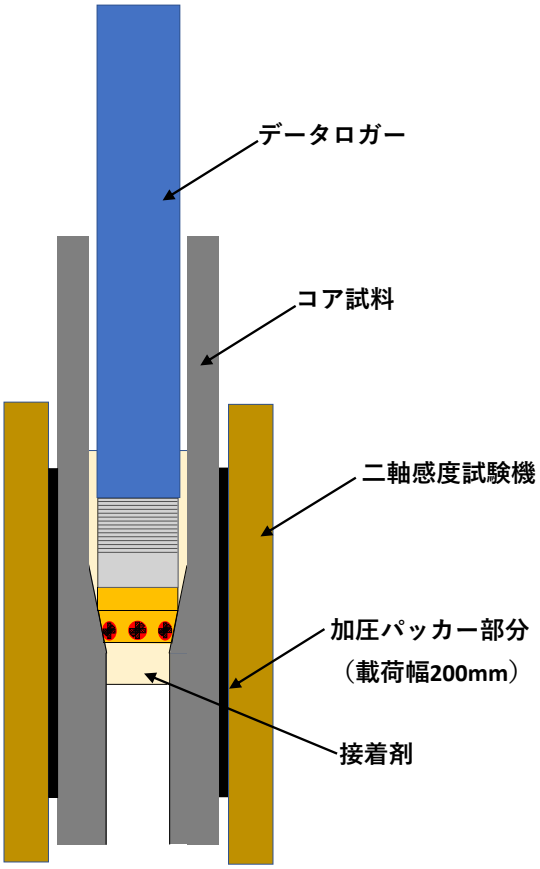


図 2.1-59　感度試験の概念図

- 金属容器の内側のパッカーをポンプで膨らましてコアの外周に加圧する
- 92±2mmのコアに適用可能なサイズ
- 載荷可能な外圧は0～40MPa
- 載荷幅は20cm

図 2.1-60　適用可能な二軸感度試験機の例

（Earth sciences 社の製品パンフレットより引用）

2.1.5 今後の技術課題の整理

今後検討すべき課題を以下に挙げる。

- 接着剤の性能把握のための試験（継続）
  - 測定感度に及ぼす諸条件の影響把握
  - 孔壁にスライムが付着する場合の影響把握
  - オーバーコアリング時の挙動把握
- データロガーの詳細設計、製作、性能確認
- ストレインセルの材質決定
- 現場用ストレインセルの設計・製作
  - ストレインセルとデータロガーの取り付け部分の設計
- 掘削ツールスの現場での性能確認と孔内洗浄方法の検討
- 孔内状況確認方法の詳細検討と装置改良
- ひずみ計挿入接着ツールの設計、製作、性能確認
- 感度試験装置の製作
- 感度試験の実施方法・試験条件・解析方法の決定
- 測定手順の詳細検討
  - オーバーコアリング長の決定（接着剤部分での切断を避ける）
  - 湧水圧が大きい場合の対応方法
  - コアが折れた場合の感度試験方法

2.1.6　今後の検証試験内容と設計製作計画の検討

(1) 室内での検証試験

室内の検証試験では以下の内容の検討を進める。

- 接着剤の性能把握のための試験（継続）
  - 測定感度に及ぼす諸条件の影響把握
  - 孔壁にスライムが付着する場合の影響把握
  - 孔内を水没させた状態での接着試験
  - オーバーコアリング時の挙動把握（図 2.1-61、図 2.1-62 参照）
- ストレインセルの材質決定
- データロガーの性能確認
- 孔内状況確認方法の詳細検討と装置改良
- ひずみ計挿入接着ツールの設計・製作
- 感度試験の実施方法・試験条件・解析方法の決定
  - 載荷速度依存性、繰返し載荷の影響、排水条件
- 測定手順の詳細検討
  - オーバーコアリング長の決定（接着剤部分での切断を避ける）
  - コアが折れた場合の感度試験方法

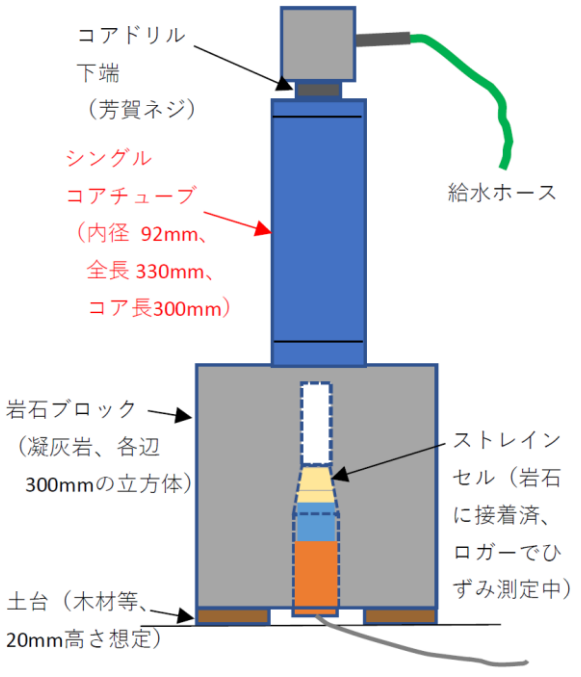


図 2.1-61　無負荷状態での室内オーバーコアリング試験方法

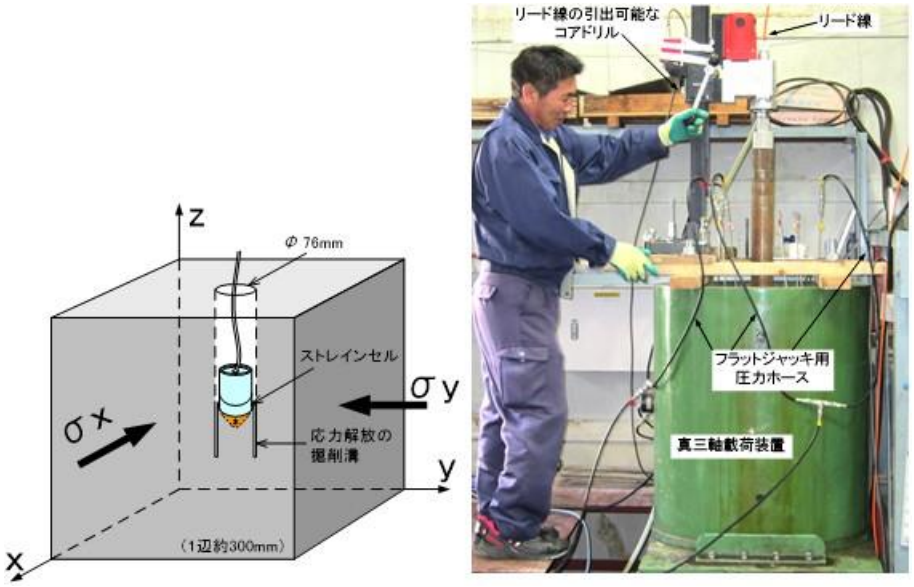


図 2.1-62　二軸載荷状態での室内オーバーコアリング試験方法[2]

(2) 現場での検証試験

現場での検証試験では以下の内容の検討を進める。

1) 浅深度での基礎検証試験

各検討項目の検証試験を浅い深度で実施し、装置の開発・改良を進める。

- 掘削ツールスの現場での性能確認と孔内洗浄方法の検討
  - 回収コアの損傷有無確認（X 線 CT）
- 孔内状況確認方法の詳細検討と装置改良
- ひずみ計挿入接着ツールの性能確認
- 測定手順の詳細検討
  - 湧水圧が大きい場合の対応方法

2) 地下空洞周辺での現場検証試験

現場に適用して諸課題の検証を行うとともに、他手法と比較して測定値の妥当性を検討する。

- 対象岩相は軽石凝灰岩 Tpt2 とする。
- 試験の実施は令和 6 年度を予定する。
- 実験では 2 箇所でそれぞれ鉛直下方向と水平方向のボーリングを実施し、原位置での初期地圧測定を実施する。
- 2 箇所の測定位置ができるだけ近くなるよう配置を検討する。

＜実施内容案＞　ボーリング 2 本

(A) 試験空洞に近い調査坑の拡幅部（試験空洞より高い孔口標高）で鉛直下方ボーリング

- 孔径 116mm の鉛直ボーリングを実施し、新しく開発した初期地圧測定法「円錐孔壁ひずみ法」を実施する。

・ 孔径 116mm の孔底から孔径 76mm のボーリングを行い、水圧破砕法による初期地圧測定（水平面内 2 次元）を行い、比較データとする。
・ 孔径 116mm の孔底から HQ（98mm）のボーリングを行い、最近開発された初期地圧測定法である二重解放コア変形法（水平面内 2 次元、図 2.1-63 参照）を行い、比較データとする。
・ 採取コアを用いたコア法による初期地圧測定も実施し比較データとする。

(B) 試験空洞から上記ボーリング実施方向に水平ボーリング

試験空洞から上記ボーリング実施方向に向け水平ボーリング（水平上向き 5 度）を行い、地盤工学会基準があり信頼性が高いとされる応力解放法の一つである円錐孔底ひずみ法（JGS3751-2012「円錐孔底ひずみ法による初期地圧の測定方法」）で 3 次元応力評価を行い、比較データとする。

これらの取得データをもとに「円錐孔壁ひずみ法」の実用性を検証するとともに、課題の抽出等を行い、装置の改良につなげる。

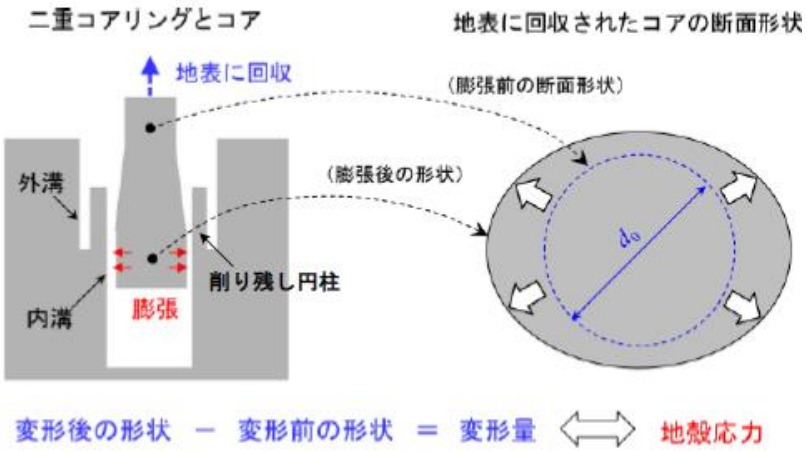


図 2.1-63　二重解放コア変形法の概念[3]

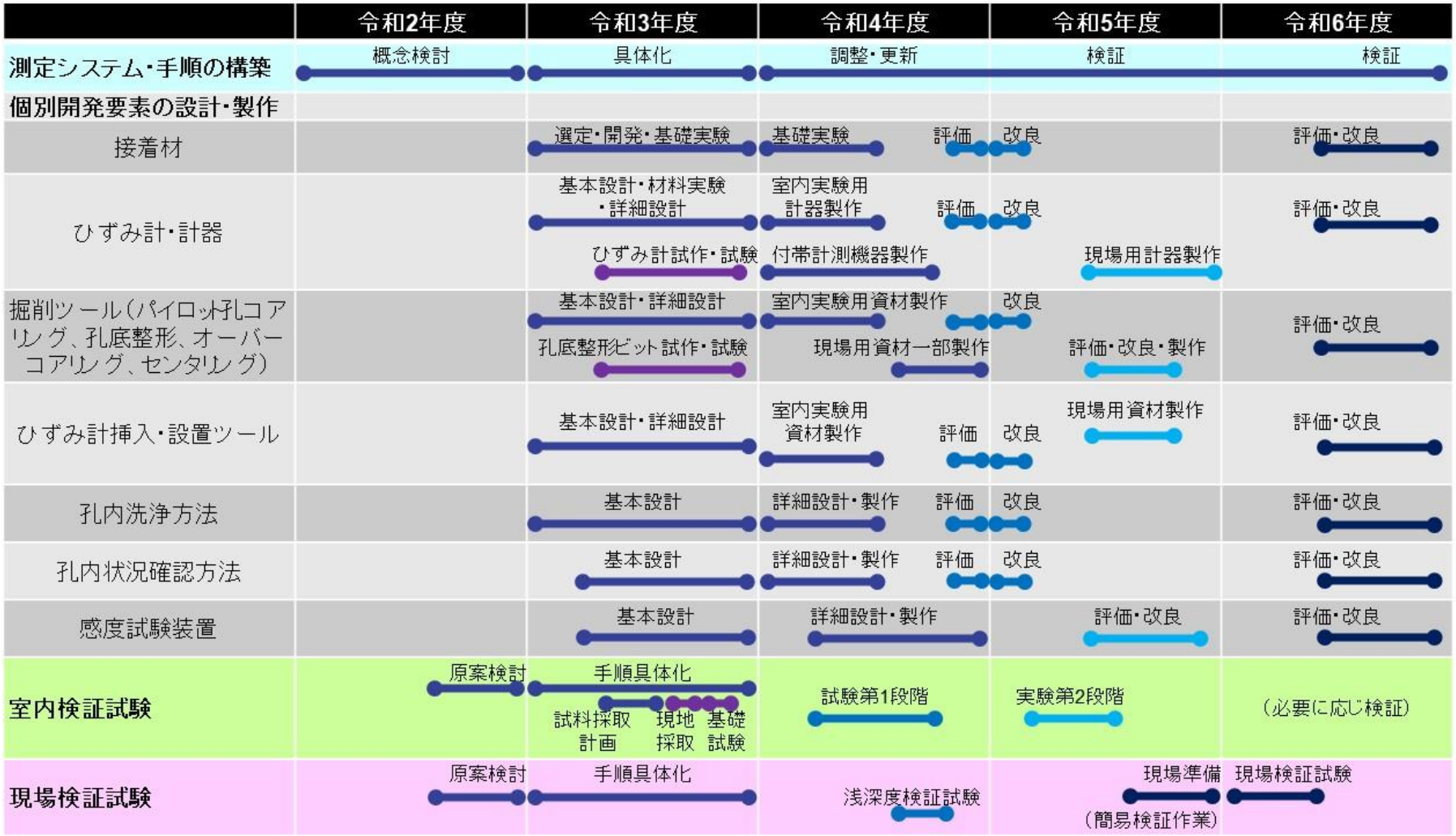
2.1.7　開発工程と実績

令和 3 年度の開発工程を表 2.1-4 に、実績を含めた開発の 5 ヵ年計画を表 2.1-5 に示す。

表 2.1-4　令和 3 年度開発工程

区分	項目	項目詳細
既往検討成果の調査		既往検討成果の調査の追加と開発計画への反映
試験装置の基本設計	接着剤	開発計画の詳細化
		選定・開発
		実験用材料の準備
		基礎実験（水中・軟岩での接着）
	ひずみ計（ストレインセル、データロガー）	基本設計（装置構成・要求性能）
		開発計画の詳細化、材料等選定
		ストレインセル試作、基礎実験
		詳細設計
	掘削ツールス（パイロット孔コアリング、孔底整形、オーバーコアリング、センタリング）	基本設計（装置構成・要求性能）
		開発計画の詳細化
		詳細設計
		孔底整形ビット試作、基礎実験
		ブロック掘削試験
	ひずみ計挿入・設置ツール	基本設計（装置構成・要求性能）
		開発計画の詳細化
		詳細設計
	孔内洗浄方法	基本設計，開発計画の詳細化
	孔内状況確認方法	基本設計，開発計画の詳細化
	感度試験装置	基本設計，開発計画の詳細化
検証試験の具体化検討	手順の具体化検討	室内及び現場検証試験の手順の具体化
	試験用岩石の採取	試料採取計画作成・協議
		ブロック試料採取、類似試料購入

表 2.1-5　開発の 5 ヵ年計画



2.1 節の参考文献

[1] 岩山晃大：堆積軟岩体の水没鉛直井における高精度地圧測定法の開発. 東北大学大学院環境科学研究科修士論文, 79, 2022

[2] 横山幸也・坂口清敏・板本昌治: 円錐孔底ひずみ法での感度補正の試み. 資源・素材 2012（春季大会）, 2012

[3] 手塚和彦, 小川浩司, 横山幸也, 船戸明雄, 伊藤高敏: 二重解放コア変形原理による地殻応力測定法のための特殊コアビットの開発と実証. 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 2021

2.2　初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討

本事業では、中深度処分で想定される深度の堆積軟岩を対象として 3 次元の初期地圧測定手法を検討するために、測定装置の開発を実施する計画としている。本節は、初期地圧測定装置の開発に資するために、実環境での測定における技術課題を抽出し、その課題解決方策について検討するものである。

本年度は、前年度に選定した初期地圧測定時の岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明するための解析手法を用いて、室内・原位置試験のシミュレーションを行って、同手法の適用性を検討するとともに、解析的アプローチにより開発する測定装置の仕様に関する検討を実施した。

2.2.1　検討概要

(1) 全体計画

「初期地圧測定技術の高度化開発」において開発する初期地圧測定装置の開発コンセプトは以下のとおりである。

- 地上からの鉛直ボーリングを利用した装置であること
- 3 次元の初期地圧測定が可能であること
- 測定対象とする地盤は軟岩であること
- 地表からの深さ 200m 程度を目標とすること

上記のコンセプトに対して、図 2.2-1 に示す既存の孔壁ひずみ法と円錐孔底ひずみ法を応用した測定装置「円錐孔壁ひずみ法」を開発する方針としている。

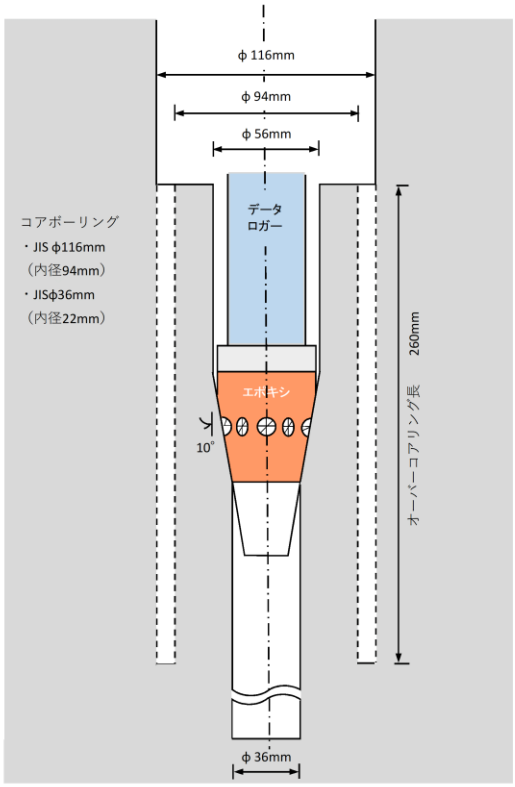


図 2.2-1　円錐孔壁ひずみ法

本節では、ハード開発で対応する以外の課題で主に解析的アプローチで解決できる課題を「初期地圧測定の開発に付随した技術課題」として検討する。

後述するように、初期地圧測定は、岩盤を弾性体と仮定して測定･評価を行うものである。しかし、測定する場所の初期地圧の大きさや岩盤物性によっては、パイロット孔とオーバーコアリングの間の薄肉部が破壊･塑性化することも考えられる。測定装置の仕様を検討するに当たっては、どこまでが適用限界であるかを評価できることが求められ、破壊･塑性化を考慮した解析の適用が必要となる。また、応力測定値と、破壊･塑性化を考慮した解析手法によるシミュレーション結果を比較することで測定値の妥当性が明らかとなることが期待できる。

以上より、本節では岩盤の破壊･塑性化を考慮できる解析手法を適用することを前提に検討を進めることとした。

「初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討」の全体検討フローを図 2.2-2 に示す。

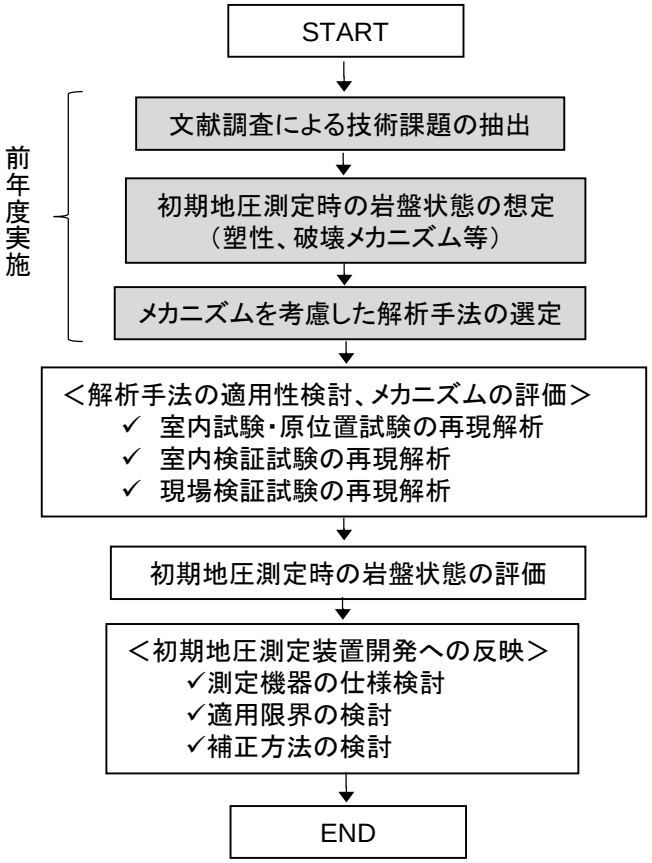


図 2.2-2 「初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討」の全体検討フロー

(2) 選定した解析手法

1) 前年度の検討経緯

前年度、文献調査に基づく技術課題の抽出を実施した結果、岩盤の破壊のメカニズムは亀裂の発生・進展であるとした。考慮すべき破壊モードとして、「亀裂の発生･進展」、「ひずみの局所化」、「塑性化」がある。

「ひずみの局所化」、「塑性化」は、FEM（有限要素法）、DEM（個別要素法）双方で表現可能であるが、「亀裂の発生･進展」は、FEM では難しいことが想定される。したがって、「初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討」においては、DEM を主な解析手法として適用し、目的に応じて FEM を補助的に採用する方針とした。

上記手法を初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討に適用することで、開発する初期地圧測定技術の仕様検討に反映することや、原位置測定での適用限界の想定、今後行う検証試験結果の妥当性検討に資することが可能である。

2) 亀裂の発生・進展の初期地圧測定結果への影響

堆積軟岩においては、三軸圧縮試験の荷重載荷に伴い、岩石内部の粒子間の空隙に圧縮が

生じる。その後、最終的に破壊に至る過程では、拘束圧が先行履歴応力より大きいと延性的な挙動（ひずみ硬化挙動）を、拘束圧が先行履歴応力より小さいと脆性的な挙動（ひずみ軟化挙動）を示し、後者の場合は、供試体にせん断面が形成される。このせん断面は、微視的な亀裂が発生、進展して、亀裂が繋がることによって形成されると考えられる。

軟岩における地圧測定のオーバーコアリング時の既往測定事例では、薄肉部（図 2.2-1 中のストレインセルとオーバーコアリングの間の岩盤）で亀裂が発生しており、この現象は、室内試験と同様に微子亀裂が発生、進展した可能性が考えられる。

地圧測定技術を適用する軟岩の深度は 200m を目標としていることから、先行履歴応力は大きく、固結度が高いものと想定される。オーバーコアリング時には、薄肉部で応力が解放されるため、拘束圧が低下し、薄肉部が薄い場合には応力集中が生じて、室内試験の供試体のように薄肉部にせん断面が形成される可能性があり、微子亀裂の発生、進展が生じると測定結果に影響を与えることが懸念される。

軟岩に荷重を作用させたときの応力－ひずみ曲線の種類として、延性的な挙動（ひずみ硬化挙動）、脆性的な挙動（ひずみ軟化挙動）、その中間的な挙動がある。応力－ひずみ曲線が延性的な挙動を示す場合は、樽型の破壊（圧縮破壊）、脆性的な挙動を示す場合は、せん断面が形成される破壊（せん断破壊）となる（図 2.2-3 参照）。

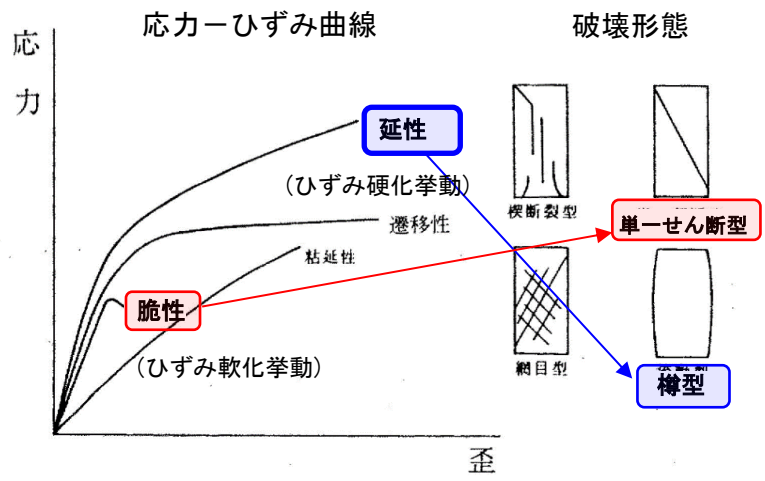


図 2.2-3　軟岩の応力－ひずみ曲線と破壊形態（[1]を加筆修正）

文献[1]に示されている三軸圧縮試験の応力－ひずみ曲線を図 2.2-4 に示す。三軸圧縮試験は、間隙率が大きい（固結度が低い）岩盤（タイプ A）と、間隙率が小さい（固結度が高い）岩盤（タイプ B）で実施している。これらの試験結果は、以下のような傾向を示している。

間隙率が大きい（固結度が低い）岩盤（タイプ A）では、拘束圧が先行履歴応力（文献[1]では圧密降伏応力）より大きいとひずみ硬化挙動、拘束圧が先行履歴応力より小さいとひずみ軟化挙動を示している。また、間隙率が小さい（固結度が高い）岩盤（タイプ B）では、

試験した全ての拘束圧において、拘束圧が先行履歴応力より小さく、ひずみ軟化挙動を示している。以上より、拘束圧と先行履歴応力の大小によって応力－ひずみ曲線が変わることが示唆される。

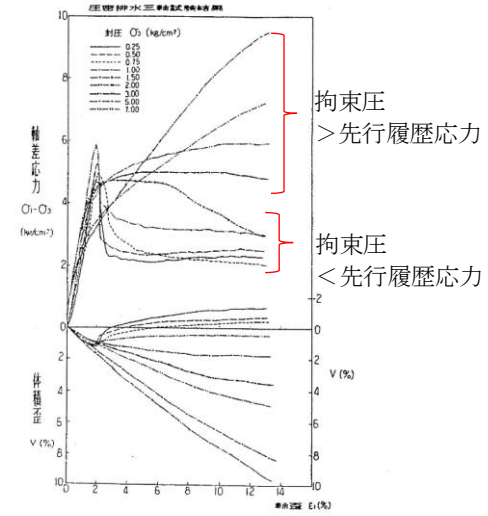


図- 9 -(1) 三軸圧縮試験（CD）応力～軸歪～体積歪関係
（安田層）

タイプ A（固結度が低い場合）

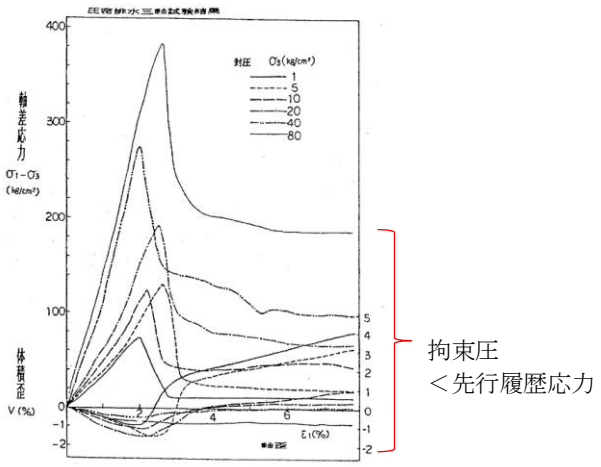


図- 9 -(6) 三軸圧縮試験（CD）応力～軸歪～体積歪関係
（大淀互層）

タイプ B（固結度が高い場合）

図 2.2-4 応力-ひずみ関係（[1]に加筆）

足立ほか[2]では、三軸圧縮試験の供試体の破壊形態を示している（図 2.2-5 参照）。拘束圧が小さい供試体では、明確なせん断面が形成され、拘束圧が大きい供試体では、せん断面が形成されない完全な樽型変形となっている。

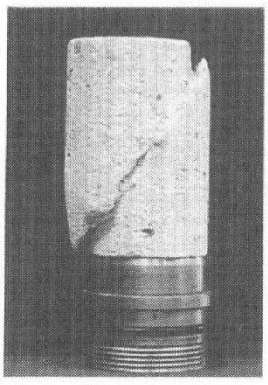


写真-1 拘束圧 0.392MPa

明確なせん断面が形成

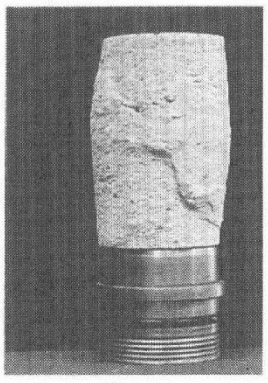


写真-2 拘束圧 1.96MPa

せん断面も入りながら樽型に膨らむ

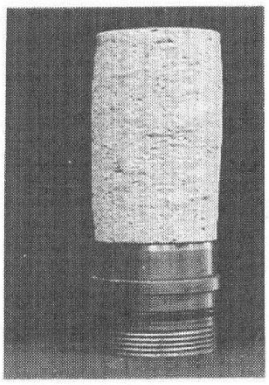


写真-3 拘束圧 4.91MPa

せん断面が形成されない完全な樽型変形

図 2.2-5 破壊時の供試体の形態[2]

足立ほか[3]は、先行履歴応力と拘束圧の関係による破壊挙動を、軟岩の破壊基準を用いて説明している。図 2.2-6 の点 A が先行履歴応力であり、これより拘束圧が大きいと、ピーク

強度と残留強度が等しい延性的な破壊挙動となる。一方、拘束圧が点 A の先行履歴応力より小さいとひずみ軟化挙動を示し、応力は、ピーク強度から残留強度に低下する。

地圧測定のオーバーコアリングにおいて、薄肉部（ストレインセルとオーバーコアリングの間の岩盤）で応力が解放されるため、拘束圧が低下し、薄肉部が薄い場合には応力集中が生じて、脆性的な破壊挙動（ひずみ軟化、せん断面の形成）を呈する可能性がある。

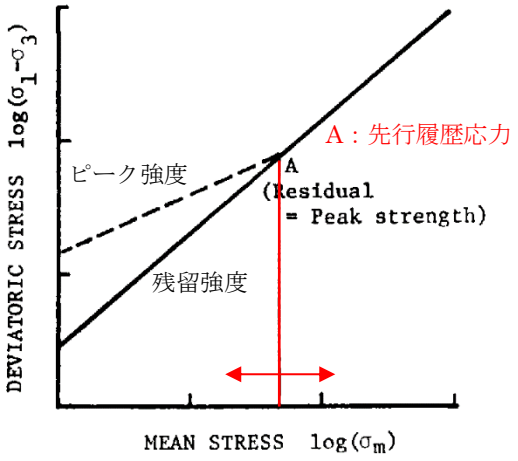


図 2.2-6　軟岩の破壊規準（[3]に加筆）

既往文献[4]では、円錐孔底ひずみ法のオーバーコアリング時に薄肉部に亀裂が発生した事例を報告している（図 2.2-7 参照）。亀裂発生時のオーバーコアリング径はφ110mm であり、φ220mm に変更後、亀裂は発生しなかった。このことから、薄肉部の厚さによっては、応力集中の度合いが変わって亀裂が発生する可能性があることを示している。

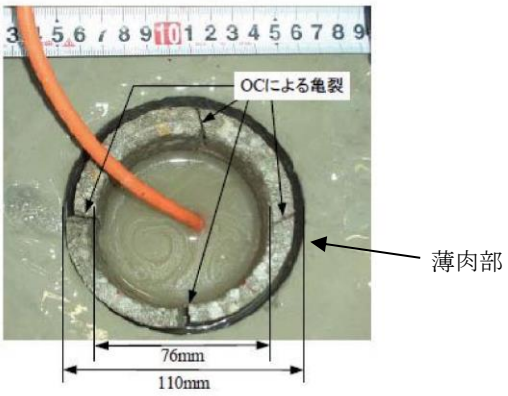


図 2.2-7　オーバーコアリング時に発生した亀裂[4]

以上をまとめると、表 2.2-1 のようになる。このうち、タイプ②（拘束圧＜先行履歴応力）のせん断破壊の場合、そのせん断面は、微子亀裂が発生、進展して、亀裂が繋がることによ

って形成されるものと考えられる。

一般に、深度が深いと先行履歴応力が大きく、固結度は高い状態にあり、そこでオーバーコアリングを行うと、薄肉部では、応力解放に伴い拘束圧が低下するため、微視亀裂の発生、進展、せん断面の形成が起こりやすいと考えられる。

表 2.2-1　拘束圧と応力－ひずみ関係、破壊形態

タイプ	拘束圧	応力-ひずみ関係	破壊形態
①	拘束圧＞先行履歴応力	延性 （ひずみ硬化）	樽型破壊 （圧縮破壊）
②	拘束圧＜先行履歴応力	脆性 （ひずみ軟化）	せん断破壊

(3) 本年度の検討内容

本年度は、前年度に選定した初期地圧測定時の岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明するための解析手法を用いて、室内試験（三軸圧縮試験）・原位置試験（水圧破砕法試験）のシミュレーションを行って、解析手法の適用性を検討するとともに、前年度に抽出した技術課題を踏まえて解析的アプローチにより、開発する測定装置の仕様に関する検討を実施した。

本年度の検討概要を図 2.2-8 に、令和 3 年度の工程を表 2.2-2 に示す。

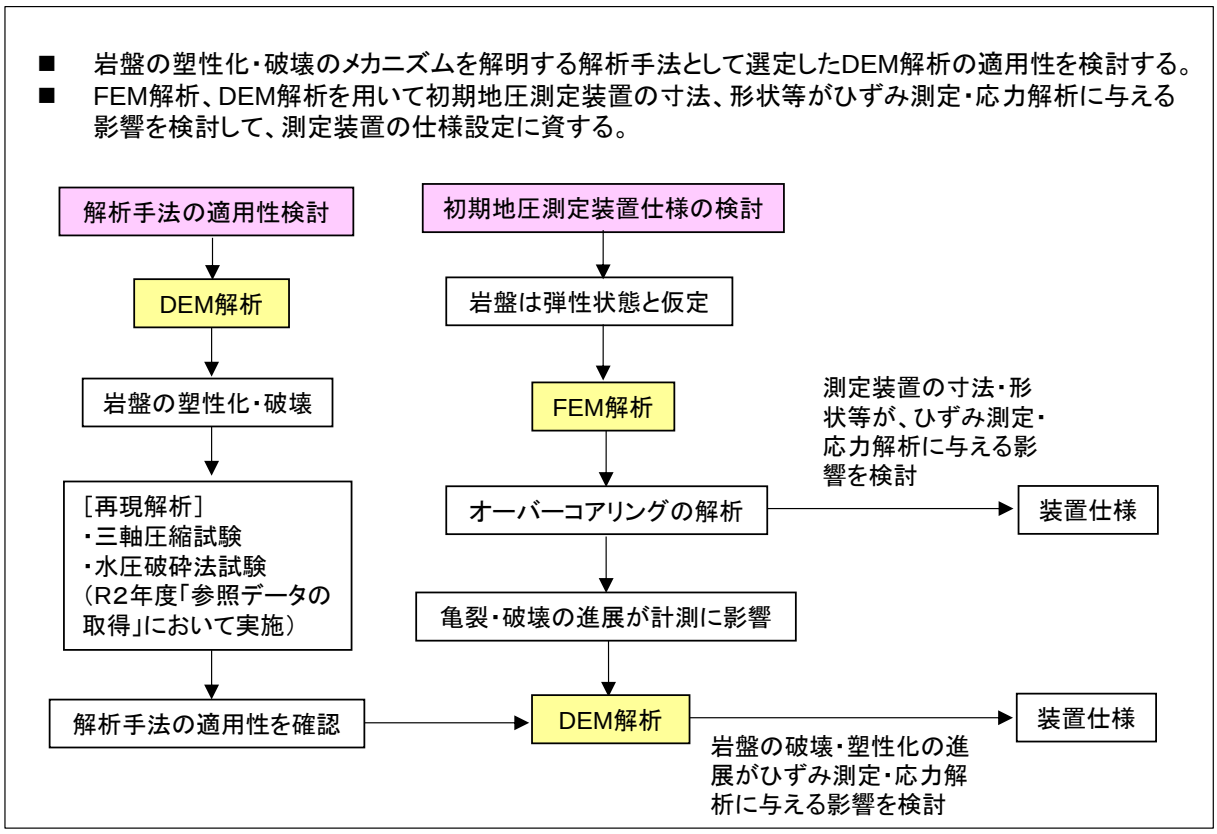


図 2.2-8　本年度の検討概要

表 2.2-2　令和 3 年度の工程

実施項目	2021								2022		
	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
(1)解析手法の適用性検討 ①三軸圧縮試験の再現解析											
②水圧破砕法試験の再現解析											
(2)初期地圧測定装置の仕様の検討 ①3D-FEM解析											
②3D-DEM解析											
委員会			▼ 第1回				▼ 第2回			▼ 第3回	
報告書ドラフトの作成											
報告書の作成											

2.2.2　解析手法の適用性検討

(1) 検討の目的

令和 2 年度「参照データの取得」で実施した三軸圧縮試験、水圧破砕法試験の再現解析を行い、試験結果と比較することで、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法としての DEM 解析の適用性を検討した。

(2) DEM 解析について

個別要素法（DEM 解析）においては各要素を剛体と考え、要素の変形は、別の要素間の接触点のみで生じるものとし、この接触点を通して粒子間の力の伝達が行われるものとする。

岩盤は、粒子をボンド（接着）させることにより表現する。

(3) 三軸圧縮試験の再現解析

1) 解析条件

再現解析に用いる三軸圧縮試験結果は、砂質軽石凝灰岩の深度 95.15m～96.15m の供試体の試験結果を用いた。応力―ひずみ曲線を図 2.2-9 に、三軸圧縮試験の試験条件を表 2.2-3 に示す。

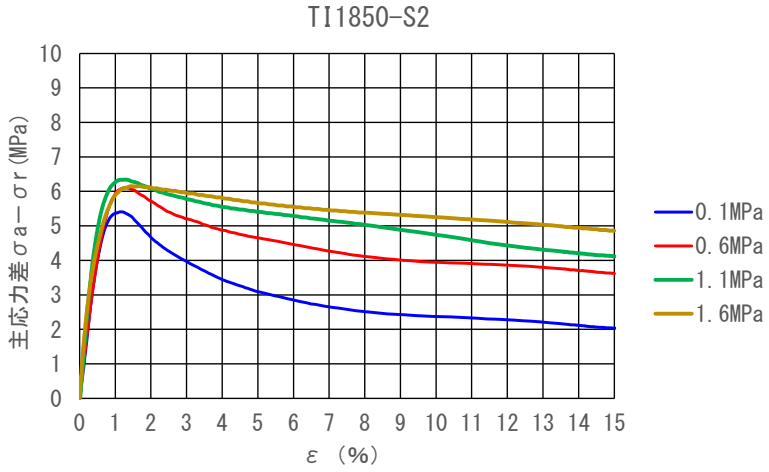


図 2.2-9　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線（砂質軽石凝灰岩、深度 95.15m～96.15m）

表 2.2-3　三軸圧縮試験条件

内　容		単位	値
供試体寸法	高さ	mm	100
	径	mm	50
載荷方法		―	ひずみ制御法
ひずみ速度		%/min	0.01
拘束圧		MPa	0.1, 0.6, 1.1, 1.6

2) 解析結果

三軸圧縮試験のシミュレーションを実施し、試験結果の応力―ひずみ曲線とフィッティングさせて、水圧破砕試験の再現解析に用いる DEM 粒子パラメータを設定した。

三軸圧縮試験シミュレーションに用いた解析モデルを図 2.2-10 に、決定した粒子パラメータを表 2.2-4 に示す。

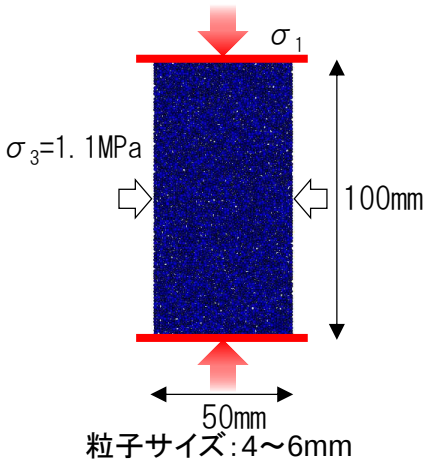
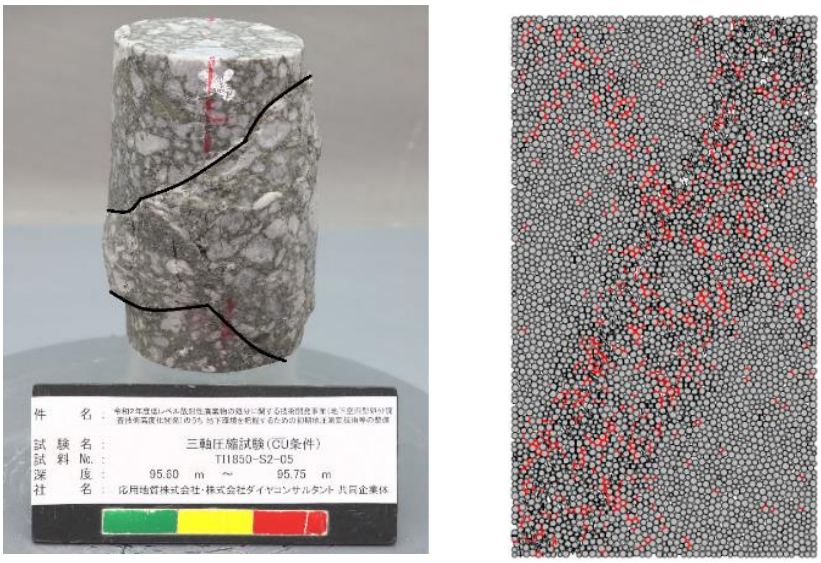


図 2.2-10　三軸圧縮試験の解析モデル

表 2.2-4　DEM 粒子パラメータ

Parameter		Note
R_{min}	0.4e-2(m)	Minimum ball radium
R_{max}/R_{min}	1.66	Ball size ratio R_{max}/R_{min}
ρ	1.68(g/cm^3)	Ball density
Ec	1.3e3(MPa)	Ball-ball contact modulus
kn/ks	1.0	Ball stifnrss ratio
μ	1.0	Ball friction coefficient
σ_c	2.5(MPa)	Contact-bond mean normal strength
σ_s	5.0(MPa)	Contact-bond mean shear strength

三軸圧縮試験での破壊後の供試体写真と、DEM によるシミュレーションによる破壊状況を図 2.2-11 に示す。シミュレーション結果の破壊状況は、三軸圧縮試験後のコアと同様のクラックの発生を確認できた。



a）三軸試験後のコア　　b）シミュレーション後

図 2.2-11　破壊形状の比較

三軸圧縮試験シミュレーションによるフィッティング結果を図 2.2-12 に示す。応力ーひずみ曲線における破壊直前の非線形性が再現できていないが、非線形が現れる軸ひずみ 3%付近でクラックの発生を確認できた。また、破壊後の挙動についても再現できていない。三軸圧縮試験が延性的な挙動であるのに対して、シミュレーション結果は、破壊後の応力低下が大きく、ひずみ軟化挙動を示している。

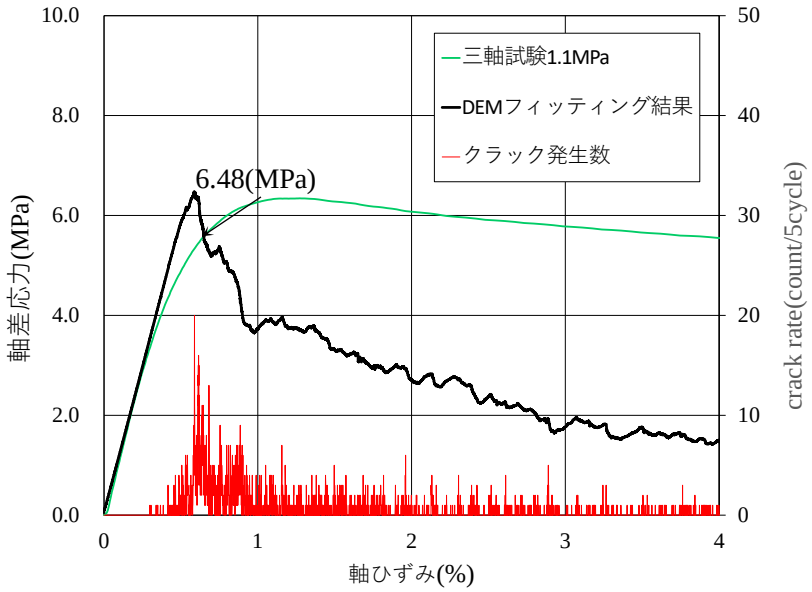


図 2.2-12　三軸圧縮試験シミュレーションによるフィッティング結果

(4) 水圧破砕法試験の再現解析

1) 解析条件

再現解析に用いる水圧破砕法試験結果は、深度 95.1m、砂質軽石凝灰岩の結果を用いた。水圧破砕法試験結果の経時変化を図 2.2-13 に、水平面内の主応力を表 2.2-5 に示す。

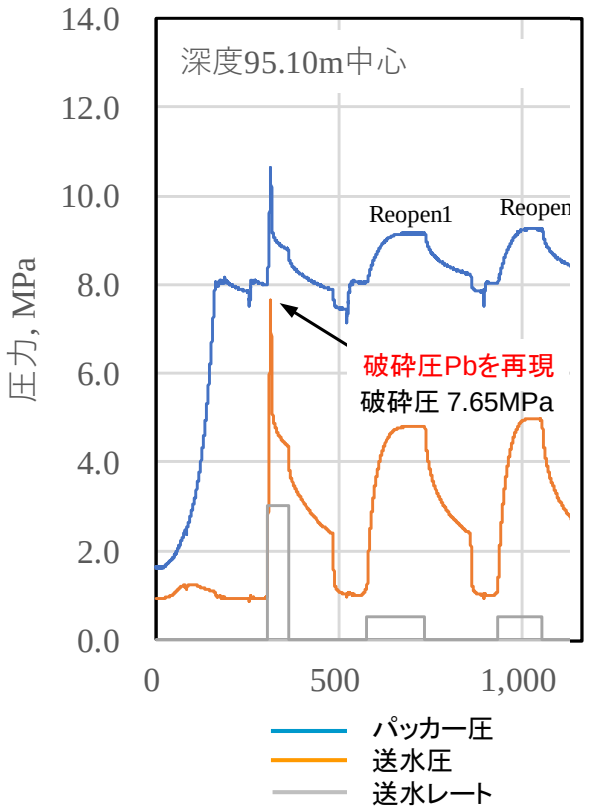


図 2.2-13　水圧破砕法試験結果経時変化図（砂質軽石凝灰岩、深度 95.1m）

表 2.2-5　水圧破砕法試験結果（水平面内主応力）

最大主応力 S_H（MPa）	最小主応力 S_h(MPa)	最大主応力方位（°）
5.79	3.89	N40E

2) 解析結果

三軸圧縮試験シミュレーションで設定したパラメータを用いて、水圧破砕試験のシミュレーションを実施した。解析モデルを図 2.2-14 に示す。

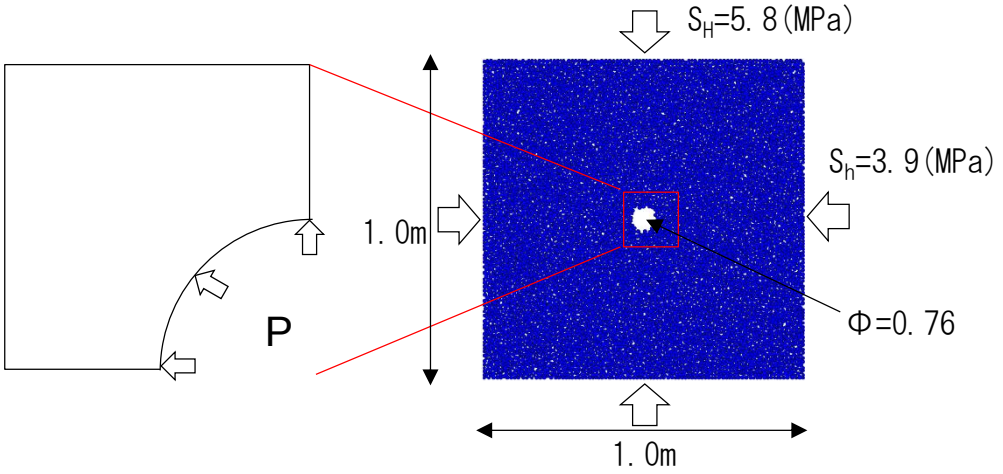
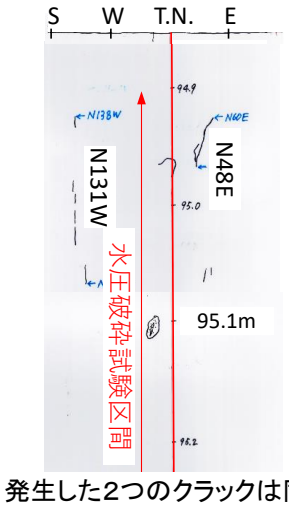


図 2.2-14　水圧破砕シミュレーションのモデル

水圧破砕法シミュレーションによるクラック発生状況を図 2.2-15 に示す。三軸圧縮試験シミュレーションにより設定したパラメータを用いて、水圧破砕法試験のシミュレーションを行った結果、最大主応力方向のクラックの発生を確認できた。

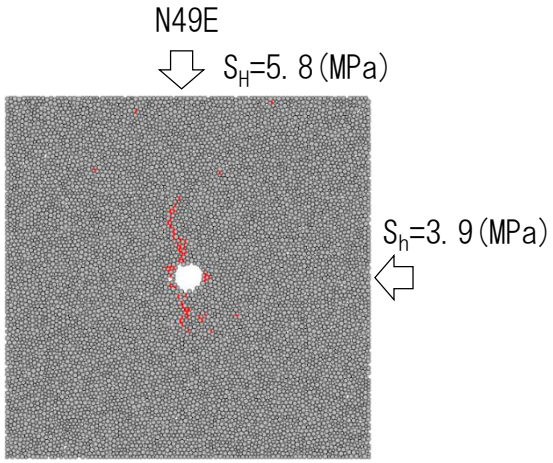
しかしながら、水圧破砕法試験で得られた破砕圧 7.65MPa では、最大主応力方向に卓越したクラックを確認することはできなかった。

今回、ミクロ物性は、三軸圧縮試験に基づいて設定したが、水圧破砕によるクラック発生の再現においては、割裂引張試験のシミュレーションによりミクロ物性を評価することが考えられる。



発生した2つのクラックは同一方向であり、最大主応力の方向はN49Eとした。

水圧破砕法試験のクラックの型取り結果



DEM解析のクラック発生状況

図 2.2-15　水圧破砕シミュレーションによるクラック発生の様子

(5) まとめ

解析手法の適用性検討の検討結果をまとめると以下のようになる。

- DEM 解析による三軸圧縮試験のシミュレーションの結果、試験時のコアと同様のせん断面の形成が確認できた。応力－ひずみ曲線においては、破壊直前の非線形性並びに、破壊後の挙動を再現できていないが、非線形性が現れる軸ひずみ（0.3%）付近で微視クラックが発生することが認められた。
- 三軸圧縮試験のシミュレーションで設定したパラメータを用いて、水圧破砕法のシミュレーションを行った結果、最大主応力方向のクラックの発生を再現できた。しかし、破砕圧（応力レベル）を再現できなかった。水圧破砕による破砕圧を再現する方法として、三軸圧縮試験シミュレーションの再現性の向上や、圧裂引張試験のシミュレーションによるパラメータ設定等が考えられる。

以上より、課題として、水圧破砕法を再現するための再解析の実施があるが、DEM 解析は、円錐孔底ひずみ法に対する適用性があることを確認できた。

2.2.3　初期地圧測定装置の仕様の検討

(1) 検討の目的

FEM 解析、DEM 解析を用いて円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリング掘削のシミュレーションを実施し、初期地圧測定装置の仕様設定に資する。

まず、FEM 解析を用いた概略検討により、初期地圧測定装置の寸法、形状等をパラメータとした解析を行い、それらが解放ひずみに与える影響や、オーバーコアリング時の薄肉部の岩盤応力状態を検討した。次に、DEM 解析を用いた詳細検討により、オーバーコアリング時の薄肉部の塑性化・破壊の有無を検討した。

(2) 円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの 3D-FEM 解析

1) 検討条件

a. 解析の対象とする地質と深度

解析の対象とする地質は、軽石凝灰岩とし、深度は、前年度「参照データの取得」で実施した水圧破砕法試験の軽石凝灰岩データのうち、最も深い地点のデータを用いることとした。選定理由は下記のとおりである。

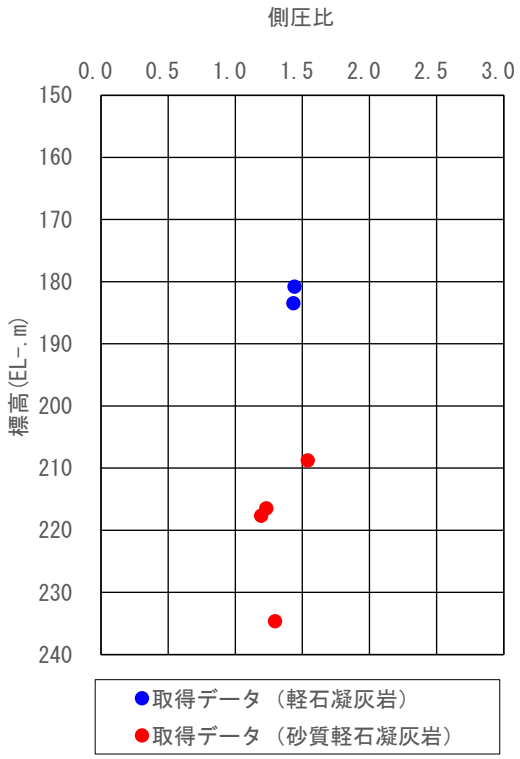
- 初期地圧測定装置の開発で目標とする土被り 200m に概ね近い深度の測定結果である。
- 現場検証試験を予定している試験空洞での既往初期地圧測定結果と側圧係数が同じ値で、かつ試験空洞周辺岩盤と同じ地質であることから、現場検証試験のシミュレーションを行う際の参考となる。

「参照データの取得」による水圧破砕法試験結果を表 2.2-6 に、側圧比と深度の関係を図 2.2-16 に示す。

表 2.2-6　「参照データの取得」における水圧破砕法試験結果

測定番号	深度 (m)	標高 (EL.−m)	土被り(m)	対象岩種	算出値		計算結果			側圧係数	側圧係数 岩種別 平均値	多軸ひずみ法の平均値
					P_s (MPa)	P_r (MPa)	S_H (MPa)	S_h (MPa)	S_V (MPa)			
9	67.10	-141.78	180.78	Tpt2 軽石凝灰岩	3.04	2.16	4.80	3.04	3.33	1.44	1.44	1.43
8	69.80	-144.48	183.48		3.03	2.13	4.83	3.03	3.37	1.43		
5	95.10	-169.78	208.78	Tspt2 砂質軽石凝灰岩	3.89	2.94	5.79	3.89	3.76	1.54	1.31	−
4	102.80	-177.48	216.48		3.39	2.69	4.79	3.39	3.89	1.23		
3	104.00	-178.68	217.68		3.29	2.61	4.65	3.29	3.90	1.19		
2	120.95	-195.63	234.63		3.61	2.70	5.43	3.61	4.19	1.30		
1	124.60	-199.28	238.28	Tpps2 軽石質砂岩	3.34	2.78	4.46	3.34	4.27	1.04	1.04	−

□ 円錐孔壁ひずみ法対象地圧



円錐孔壁ひずみ法対象地圧

S_H＝4.83MPa　水平面内最大主応力

S_h＝3.03MPa　水平面内最小主応力

S_v=3.37MPa　鉛直応力

（側圧係数 λ＝1.43）

図 2.2-16　水圧破砕法試験結果（側圧比と標高の関係）

b．岩盤物性

解析用岩盤物性値は、「参照データの取得」で実施した原位置試験及び室内岩石試験結果に基づいて設定した。

(a) 弾性係数

弾性係数は、PS 検層結果（軽石凝灰岩）を用いて設定した。弾性係数の設定に用いた式を以下に示す。

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 \quad \cdots\cdots \text{式(1)}$$

$$\nu_d = \frac{1-2(V_s/V_p)^2}{2-2(V_s/V_p)^2} \quad \cdots \text{式(2)}$$

$$E_d = 2G_0(1+\nu_d) \quad \cdots \text{式(3)}$$

ここに、G_0：せん断弾性係数、γ_t：単位体積重量、g：重力加速度、ν_d：動ポアソン比、Ed：動弾性係数

上式を用いて算出した結果、弾性係数は、E=3,800MPa とした。

表 2.2-7　弾性係数の設定値

土被り(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	γ_t(t/m^3)	G_0(MPa)	ν_d	E_0(MPa)
183.48	2,076	939	1.6	1,411	0.3713	3,800

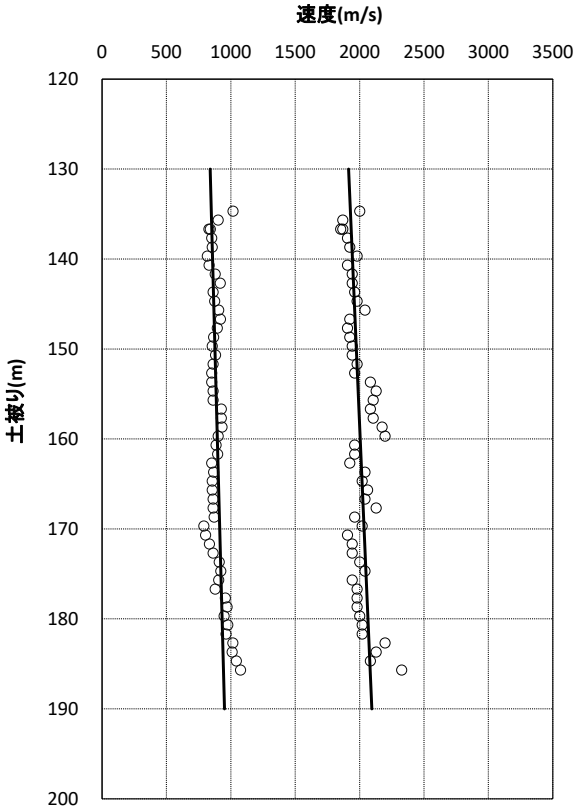


図 2.2-17　PS 検層結果（土被りと速度の関係）

(b) ポアソン比

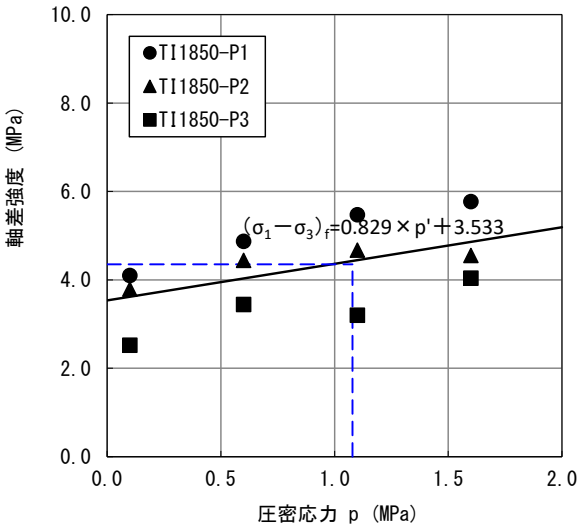
ポアソン比は、既往の文献[5]における軽石凝灰岩の値を採用し、ν＝0.47 とした。

(c) 岩盤強度

三軸圧縮試験の圧密圧力と軸差強度の関係から、当該深度における圧密圧力の Cu 強度を求めて、τ＝Cu とする。三軸圧縮試験の試験条件は下記のとおりである。

- 深度　　：183.48m
- 湿潤密度：1.6t/m^3
- 有効土被り圧：1.08MPa

三軸圧縮試験結果の圧密圧力と軸差強度の関係を図 2.2-18 に示す。圧密圧力～軸差強度関係から Cu 強度を求めて、Cu=2.2MPa とした。



	土被り(m)	183.48
	有効土被り圧p'（MPa）	1.08
平均値	（σ1－σ3）f（MPa）	4.43
	Cu（MPa）	2.2

図 2.2-18　圧密圧力と軸差強度の関係

引張強度は、割裂引張試験結果に基づいて設定した。割裂引張試験結果を表 2.2-8 に示す。試験結果の平均値 0.27MPa より、引張強度は、0.2MPa に設定した。

表 2.2-8　割裂引張試験結果

ボーリング孔	供試体番号	供試体中心標高	湿潤密度	引張強度
			ρ_t	σ_t
		(EL m)	g/cm^3	MPa
TI1-850	TI1850-P1-03	-112.0	1.69	0.35
	TI1850-P2-02	-126.6	1.65	0.20
	TI1850-P3-01	-129.9	1.58	0.25
	平均値		1.64	0.27
	標準偏差		0.06	0.08

以上より設定した解析用岩盤強度は、図 2.2-19 に示すとおりである。

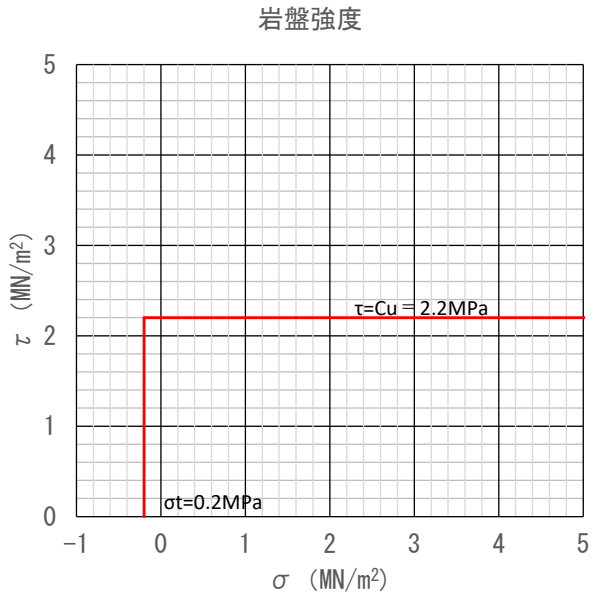


図 2.2-19　岩盤強度

c. 解析用物性値

FEM 解析の解析用物性値を表 2.2-9 に示す。

表 2.2-9　FEM 解析の解析用物性値

項目	単位	値
弾性係数 E	MPa	3,800
ポアソン比 ν	－	0.47
岩盤強度 Cu	MPa	2.2
引張強度 σt	MPa	0.2
初期地圧	S_H＝4.83MPa　水平面内最大主応力 S_h＝3.03MPa　水平面内最小主応力 S_v=3.37MPa　鉛直応力 （側圧係数 λ＝1.43）	

岩種：軽石凝灰岩、土被り：183m

2) 解析手法

シミュレーションに用いる解析手法と解析コードは下記のとおりである。

- 解析手法
  3 次元 FEM 弾性解析
- FEM 解析コード
  midas GTS NX　　MIDAS IT 社製

3) 解析モデル

FEM 解析モデルで考慮する初期地圧測定装置の寸法を図 2.2-20 に、解析モデルを図 2.2-21、図 2.2-22 に示す。

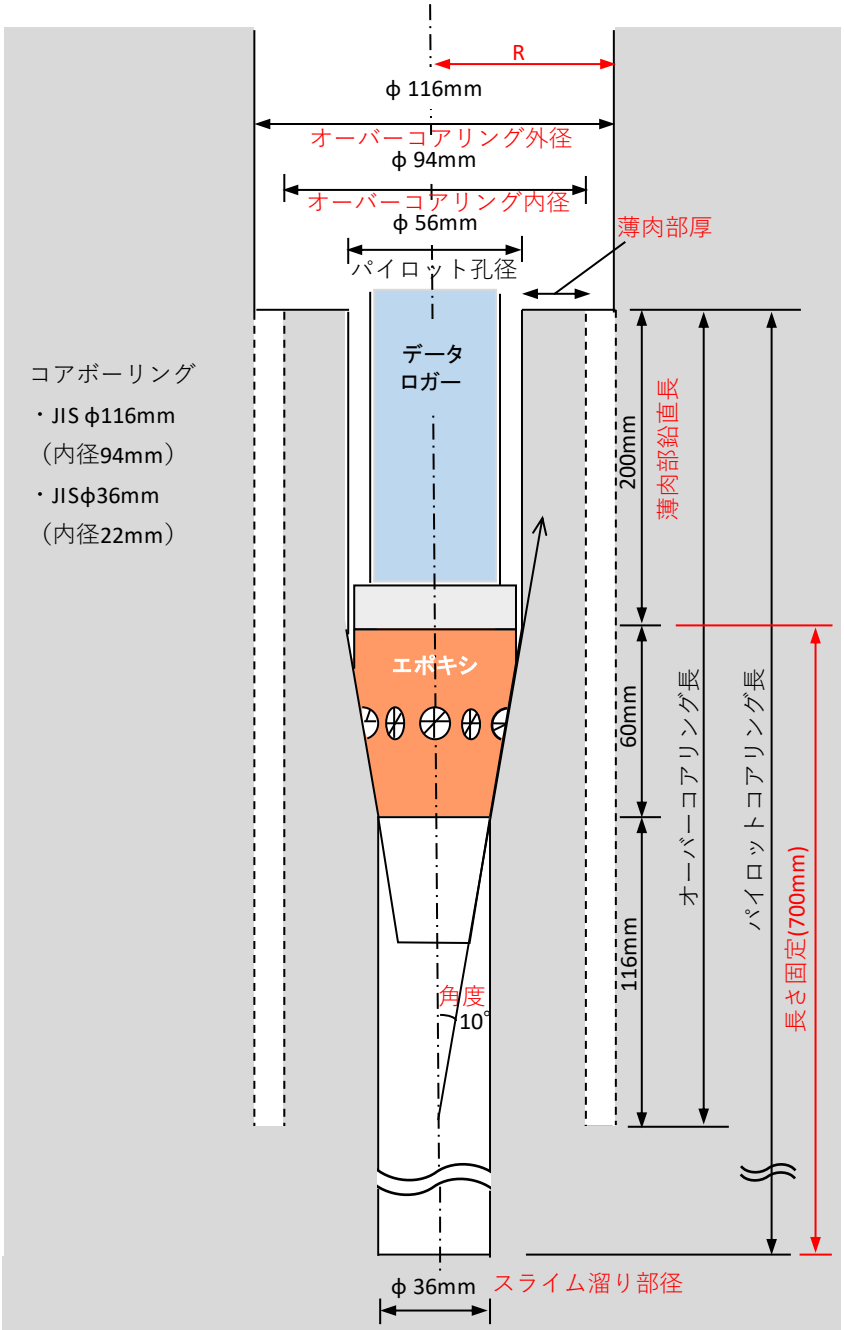


図 2.2-20　解析モデルで考慮する測定装置周辺の寸法

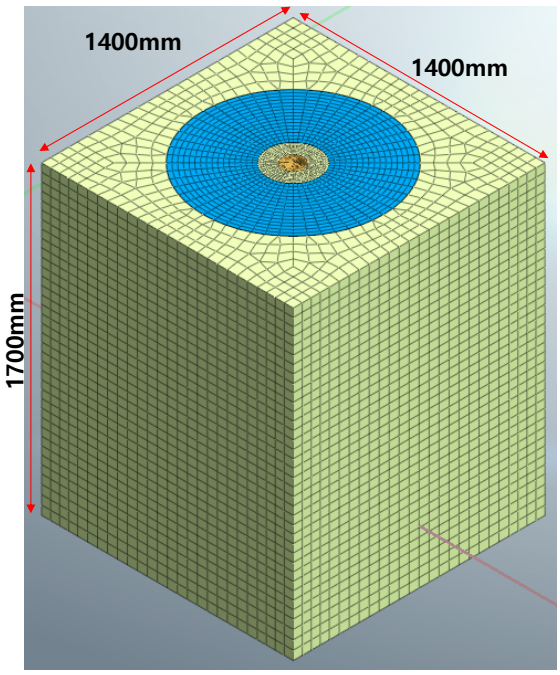


図 2.2-21　解析モデル（全体）

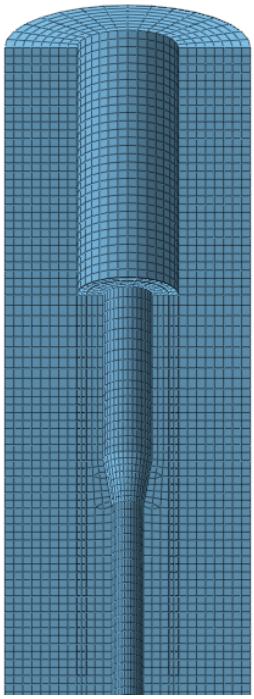


図 2.2-22　解析モデル（ボーリング箇所詳細）

解析では、初期地圧測定の各段階を解析ステップとして考慮した。解析ステップを図 2.2-23 に示す。

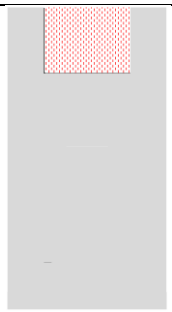
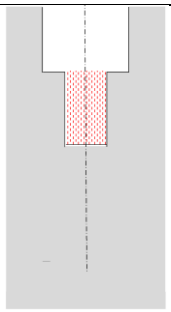
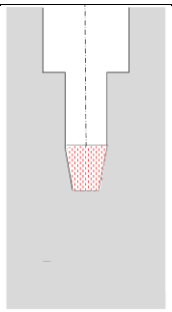
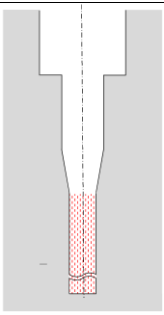
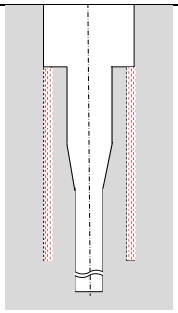
(1) カットボーリング掘削	(2) パイロット孔掘削	(3) ストレインセル部掘削
		
(4) スライム溜まり掘削	(5) オーバーコアリング	
		

図 2.2-23　解析ステップ

4) 解析パラメータ

初期地圧測定装置のひずみ測定･応力解析に影響を与える可能性があるパラメータ（仕様）を抽出して、感度解析を実施し、測定装置の仕様設定に資することとした。

パラメータは、前年度の成果を踏まえて、ひずみ・応力測定への影響事象と課題に基づいて抽出した。影響事象、課題及びパラメータを表 2.2-10 に示す。

表 2.2-10　ひずみ測定・応力解析に影響を及ぼす事象、課題及びパラメータ

影響事象	課　題	考慮するパラメータ
岩盤の破壊・塑性化	薄肉部の岩盤が破壊・塑性化することで、ひずみ感度試験の応力-ひずみ関係に著しい非弾性挙動が伴い、応力の解析結果に誤差が生じる可能性がある	薄肉部厚（パイロット孔径/オーバーコアリング径） 薄肉部鉛直長
亀裂の発生・進展	薄肉部が薄いと亀裂発生に影響を与える可能性がある	
ひずみゲージの感度	ストレインセルの角度によって測定ひずみの感度に影響を与える可能性がある	ストレインセルの角度

5) 解析ケース

解析ケースを表 2.2-11 に、パラメータスタディの対象を図 2.2-24 に示す。レファレンスケースは、case1-2 である。ストレインセルの角度、薄肉部厚さ、薄肉部鉛直長をパラメータとして 7 ケースを実施した。パラメータスタディを実施するため、解析モデルは、レファレンスケースのほか、図 2.2-25 に示すようにストイレインセルの角度が 0°、20° の場合を別途作成した。

表 2.2-11　解析ケース　　**case1-2：レファレンスケース（現行の円錐孔壁ひずみ法仕様）**

	角度 ※1	オーバーコアリング外形(内径) ※2	パイロット孔径	薄肉部厚	薄肉部鉛直長
	(°)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
case1-1	0	116（94）	56	19	200
case1-2	10	116（94）	56	19	200
case1-3	20	116（94）	56	19	200
case2-1	10	154（132）	56	38	200
case2-2	10	192（170）	56	57	200
case3-1	10	116（94）	56	19	100

※1　ストレインセルの高さは 60mm とし、スライム溜り部径を変化させたモデルとする。
※2　オーバーコアリング内径 ＝2 × 薄肉部厚 ＋ パイロット孔径
パラメータスタディ
パラメータの変更に伴い変わる数値

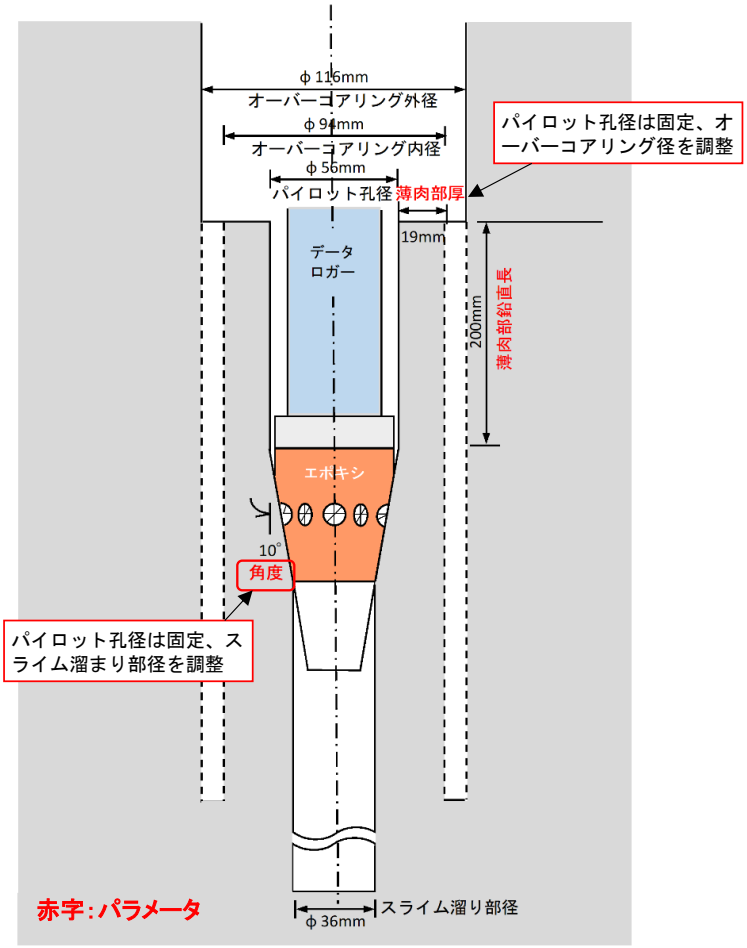


図 2.2-24　パラメータスタディの対象

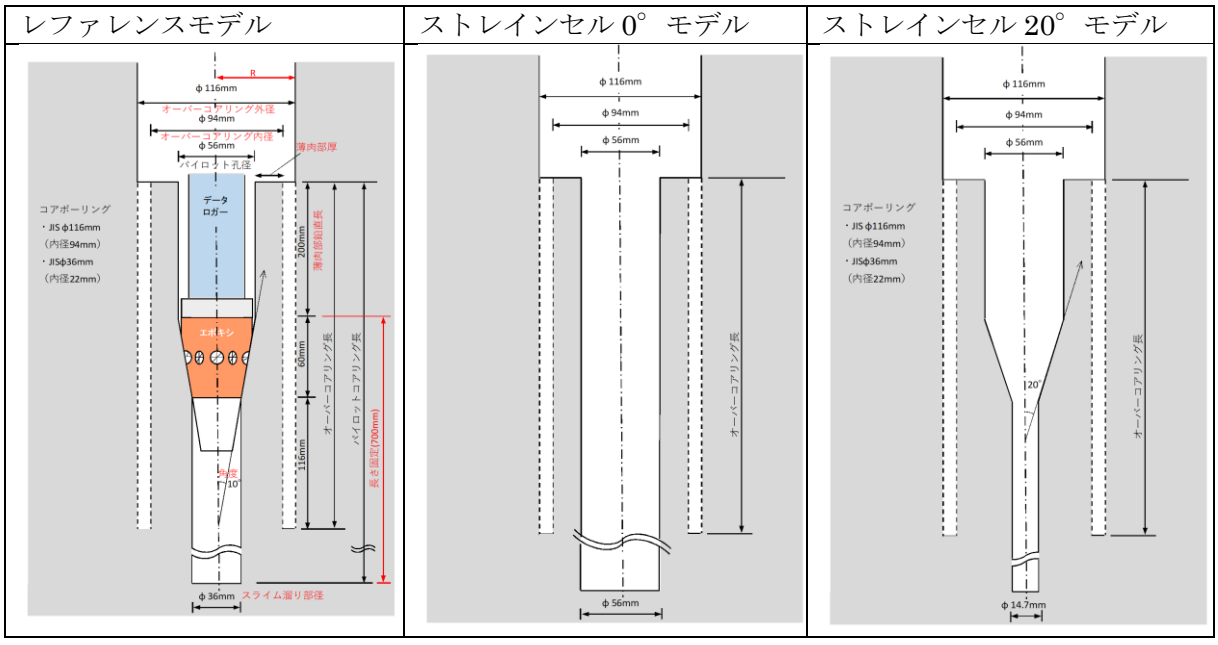


図 2.2-25　ケース別モデル寸法

6) 解析結果

a. レファレンスケース

(a) 岩盤応力の状態

レファレンスケース(case1-2)における局所安全率分布を図 2.2-26 に示す。解析ステップは、ストレインセル掘削終了時とオーバーコアリング終了時である。局所安全率は、図 2.2-27 に示すようにせん断破壊と引張破壊を考慮し、厳しい方で算定している。

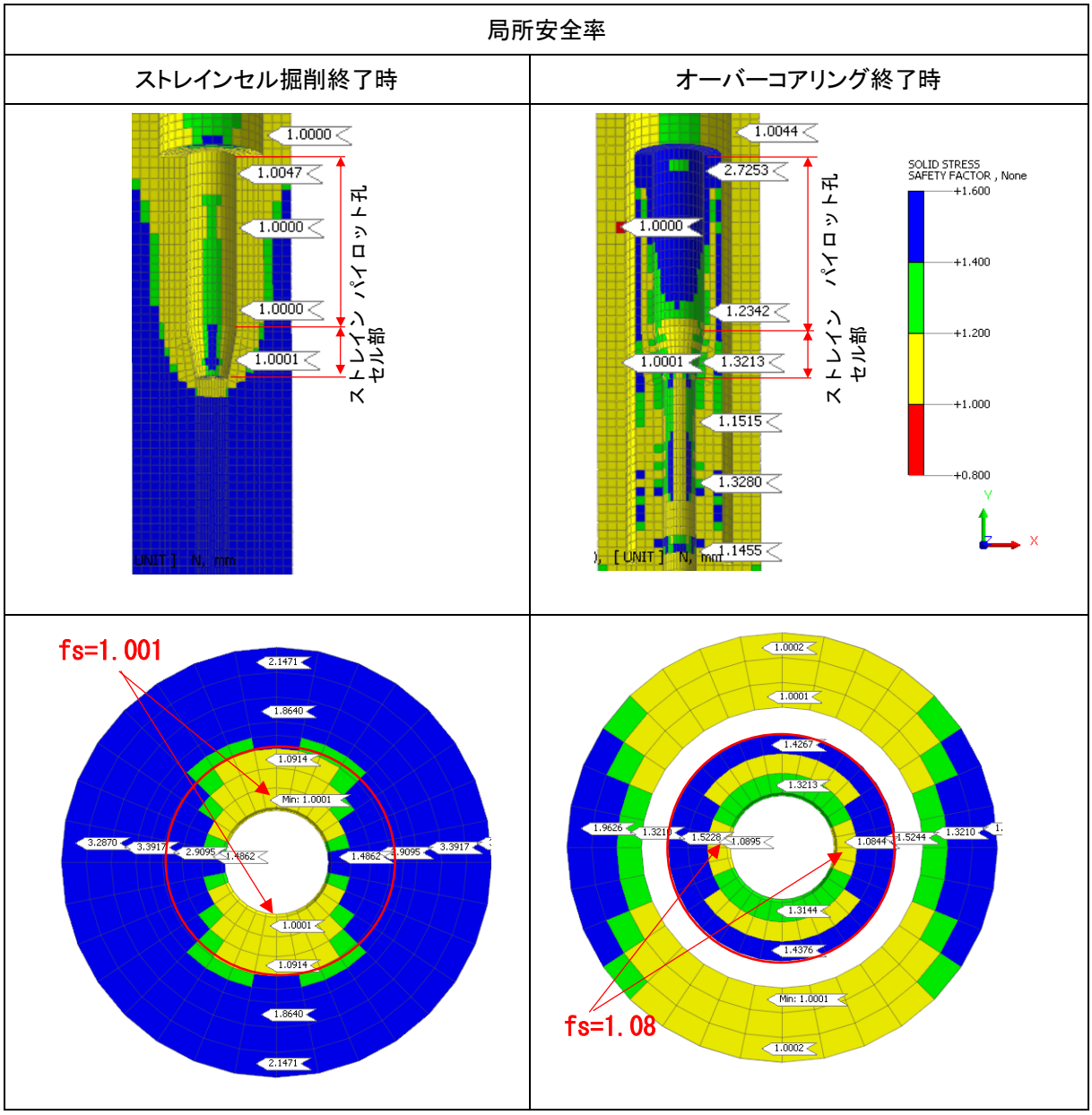
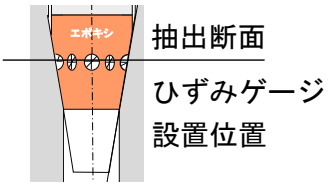


図 2.2-26 局所安全率分布（レファレンスケース）



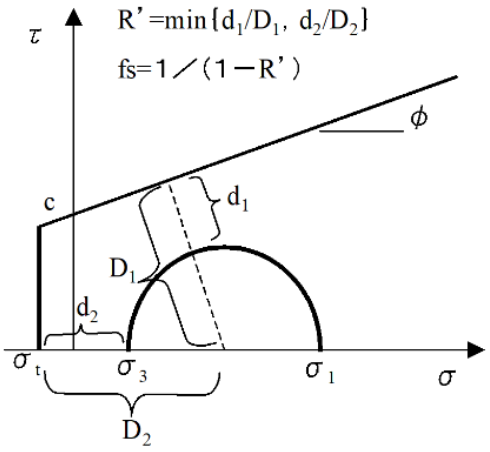


図 2.2-27　局所安全率 fs の定義

ストレインセル掘削時とオーバーコアリング終了時の岩盤応力の状態は、図 2.2-28 のようである。

ストレインセル掘削終了時では、せん断強度に近い応力状態(fs≒1)になっている。また、オーバーコアリング終了時では、応力の除荷によって引張側に応力がシフトし、ストレインセル位置近傍で、引張強度に近い応力状態(fs≒1)となっている。

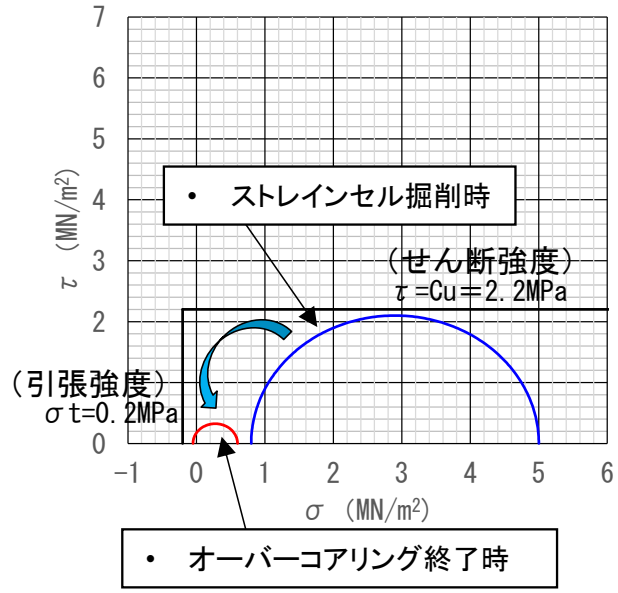


図 2.2-28　岩盤応力状態

(b) 解放ひずみ

ひずみゲージは、図 2.2-29 に示すようにストレインセルの 8 か所に配置し、各位置で 3 成分の測定を行うことを想定した。ひずみゲージ 3 成分の測定方向を図 2.2-30 に示す。

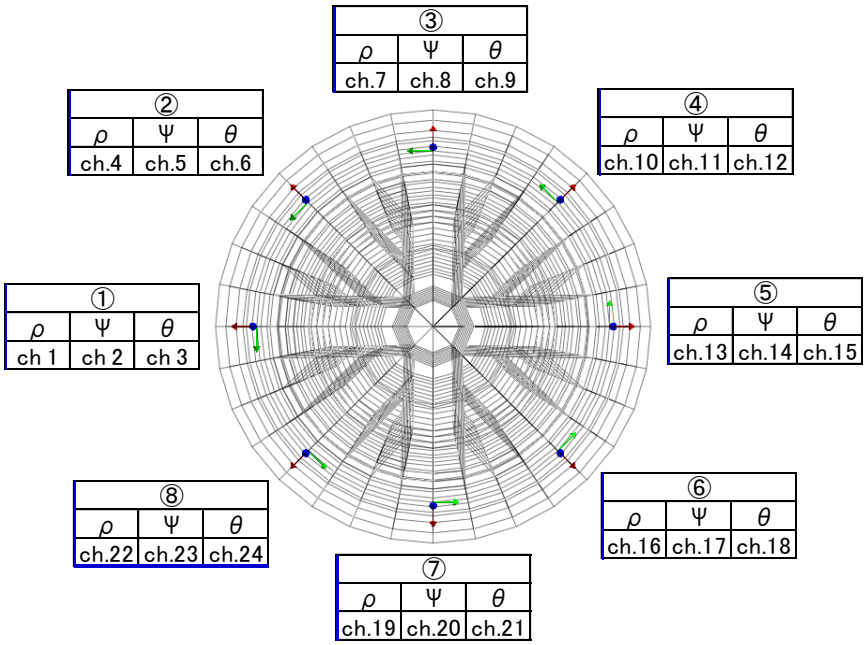


図 2.2-29　ひずみゲージの配置

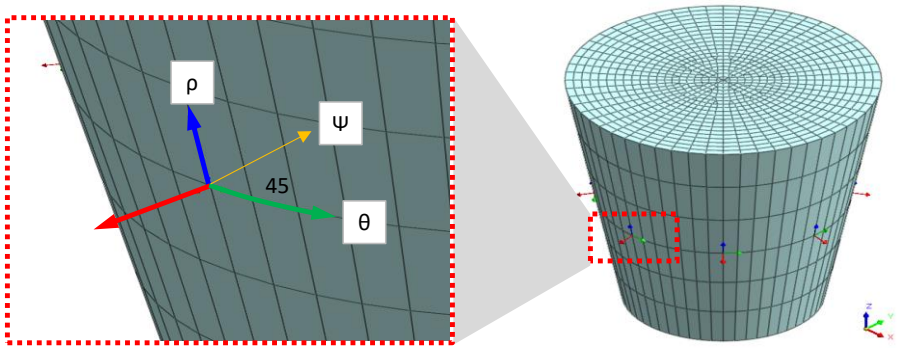


図 2.2-30　ひずみゲージの測定方向

レファレンスケースの解析結果での解放ひずみを図 2.2-31 に示す。図には、調査坑からの水平ボーリングで、円錐孔底ひずみ法で実施した既往の初期地圧測定結果[6]を併示した。測定箇所の岩種は軽石質の凝灰岩である。

レファレンスケースの解析結果によるひずみ発生傾向は、既往の円錐孔底ひずみ法測定結果と類似している。

図には解放ひずみの値を示している。レファレンスケースの解放ひずみは、既往測定結果の 1.1～1.5 倍である。一方、土被りは、既往測定が 100m、解析が 183m であり、その比率は 0.54(＝100/183)である。既往測定の土被りを基準とすると、両者の解放ひずみの比率は、

0.6～0.8 となる。土被り（初期地圧）を同一としたとき、既往測定結果より解析結果のひずみの方が小さいこととなる。

本解析の弾性係数は、PS 検層による動弾性係数を採用した。その理由は以下のとおりである。

既往測定結果にあるように、円錐孔底ひずみ法によるオーバーコアリング時のひずみは、400～800μ程度で 10^{-4} のオーダーである。これから、オーバーコアリング時の薄肉部の岩盤で発生するひずみは、微小ひずみレベルにあると想定し、PS 検層の動弾性係数を採用した。

しかし、上記のとおり、解放ひずみを比較した結果によれば、解析で設定した弾性係数を大きく見積もった可能性がある。

弾性係数の設定については、今後実施する室内検証試験、現場検証試験でシミュレーションを実施して検討する必要がある。

また、ポアソン比については、「参照データの取得」で取得していないため、既往文献[5]の軽石凝灰岩の値 0.47 を採用した。円錐孔壁ひずみ法は、3 方向成分のひずみを測定するが、ポアソン比の設定値によって、各ひずみ成分の比率が変わることが想定される。したがって、解析で使うポアソン比についても今後、検討する必要がある。

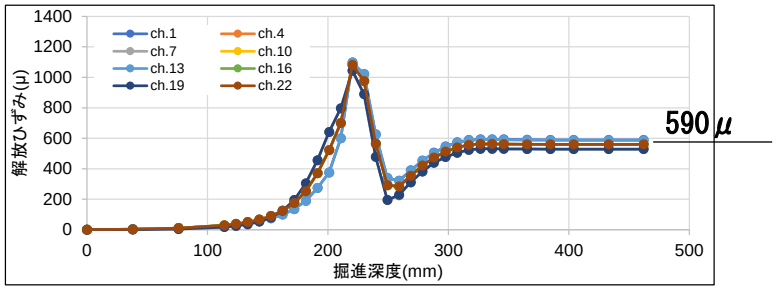
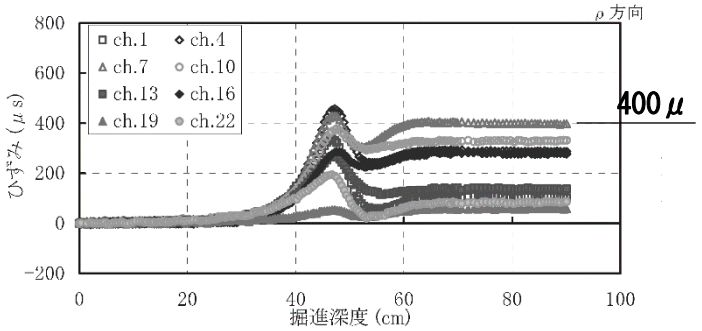
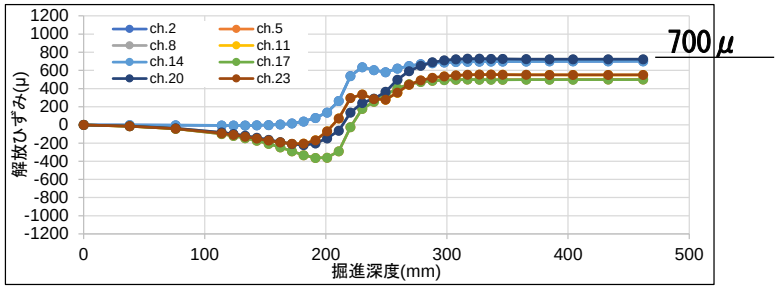
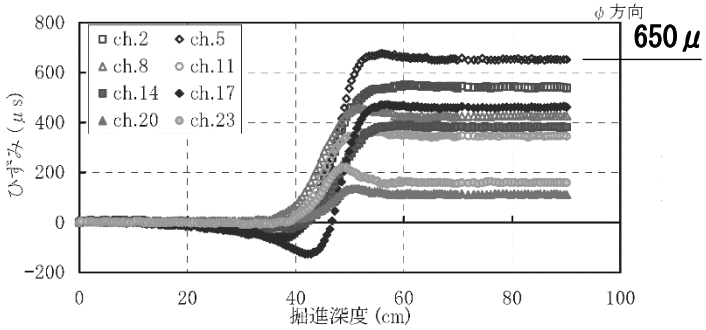
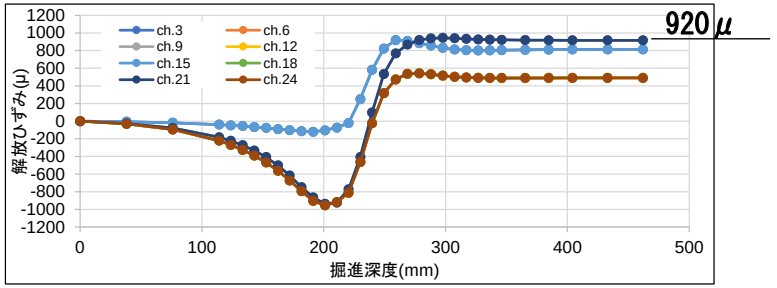
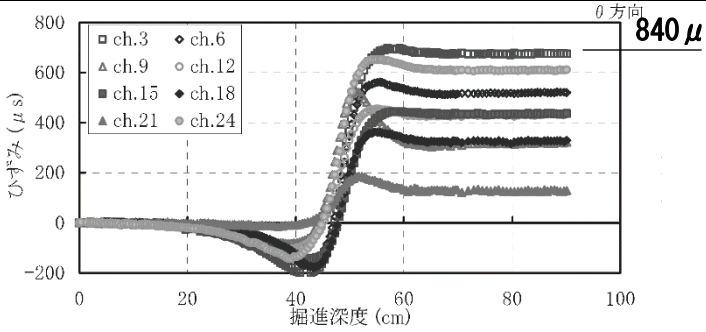
	解析結果（レファレンスケース）	既往測定結果
ρ方向		
φ方向		
θ方向		

図 2.2-31　解放ひずみ（レファレンスケースの解析結果と既往測定結果）

既往測定
測定方法：円錐孔底ひずみ法
岩種：軽石室の凝灰岩
土被り：100m（調査坑からの水平ボーリング孔）

b. パラメータの比較

以下では、ストレインセル角度、薄肉部厚、薄肉部鉛直長の各影響を解析結果に基づいて比較した。

(a) ストレインセル角度の影響の比較

ストトレインセル角度は、レファレンスケースの角度 10° に対して、パイロット孔やスライム溜まり部の孔径の制約を考慮して、0° 、20° を追加して比較した（図 2.2-32 参照)。

ストレインセル角度が 0° 、10° 、20° の場合の解放ひずみの比較を図 2.2-34 に示す。図では、ρ 方向、ϕ 方向、θ 方向のひずみを図 2.2-33 に示すひずみ抽出位置①及び③について整理した。

3 ケースを比較すると、以下のとおりである。

ρ 方向ひずみにおいては、ストレインセル角度が小さい方が感度は高くなる。θ 方向ひずみにおいては、初期地圧に異方性がある場合、ひずみゲージ設置位置によってひずみへの角度の影響が異なる。以上から、ρ 方向ひずみの感度と θ 方向ひずみの異方性を考慮して、今回の検討条件下においては、角度 10° を計画値とすることとした。

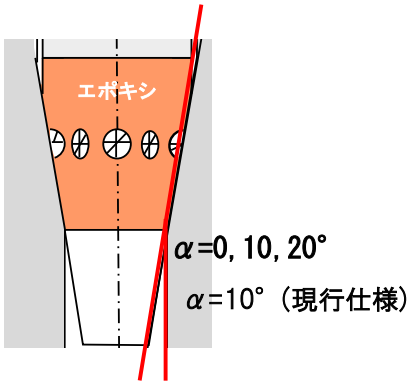


図 2.2-32　ストレインセル角度

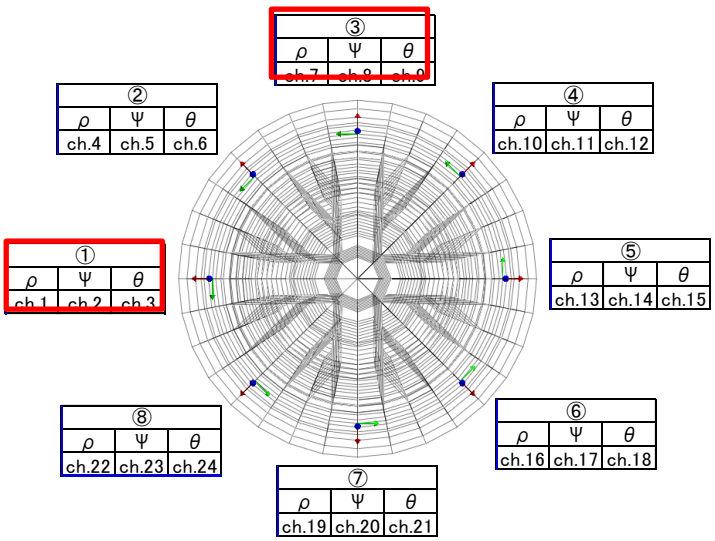


図 2.2-33　ひずみゲージの配置

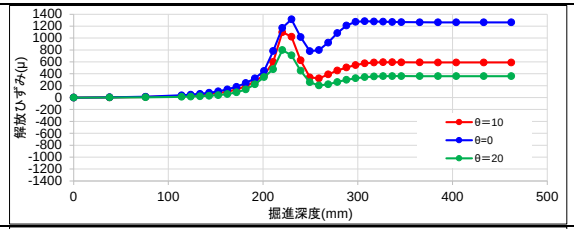
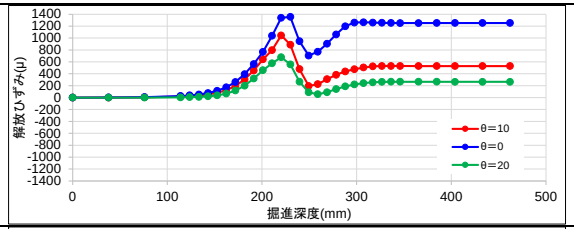
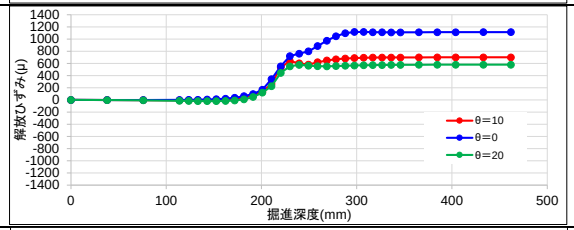
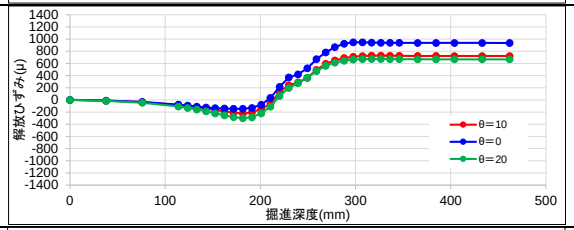
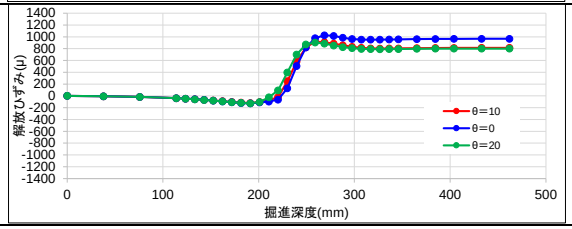
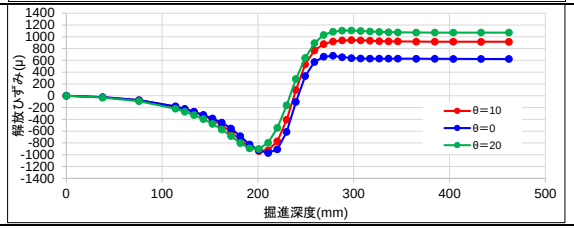
	ひずみ抽出位置①	ひずみ抽出位置③
ρ 方向		
ϕ 方向		
θ 方向		

図 2.2-34　ストレインセル角度の影響の比較

(b) 薄肉部厚の影響の比較

薄肉部厚は、レファレンスケース 19 ㎜に対して、厚さを増やして 38 ㎜、57 ㎜で比較した（図 2.2-35 参照）。

オーバーコアリング終了時の局所安全率分布を薄肉部厚で比較した結果を図 2.2-36 に示す。局所安全率を抽出した断面は、ひずみゲージ設置位置である。

薄肉部厚の影響は、ストレインセル近傍の局所安全率に認められ、薄肉部厚が大きくなるにしたがって局所安全率は大きくなっている。レファレンスケースでは、局所安全率 fs≒1 に近い状態である。

今回の初期地圧、岩盤物性値を用いた線形 FEM 弾性解析においては、レファレンスケースの薄肉部で破壊に近い応力状態にあることがわかった。そこで、DEM による非線形、破壊を考慮した解析を「(3) 円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの 3D-DEM 解析」において実施して、薄肉部の応力状態を評価することとした。

なお、薄肉部の岩盤応力状態の評価は、次年度以降において実施予定である室内検証試験・現場検証試験や、それら検証試験のシミュレーションの結果を踏まえて、詳細な検討を行う必要がある。

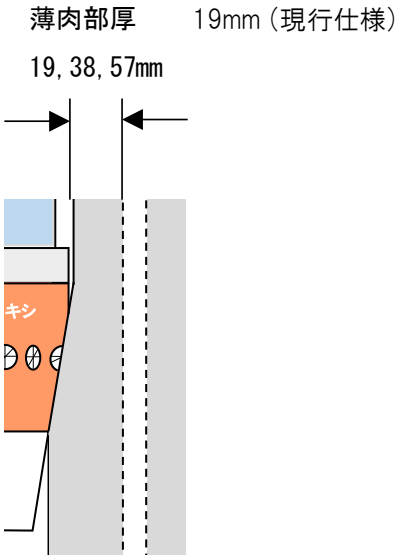


図 2.2-35　薄肉部厚

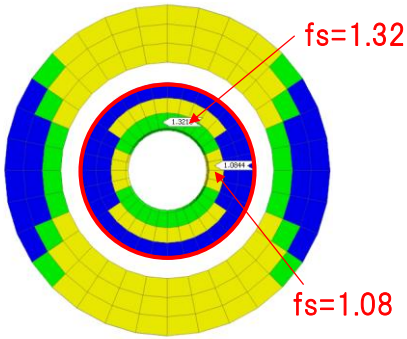
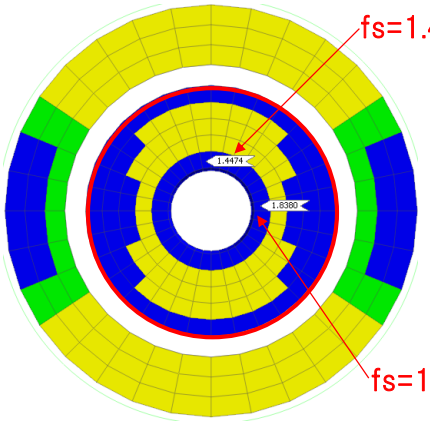
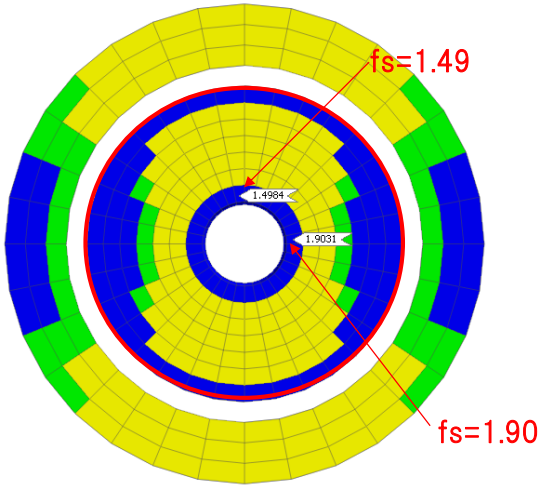
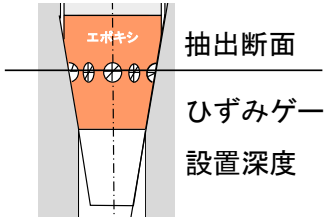
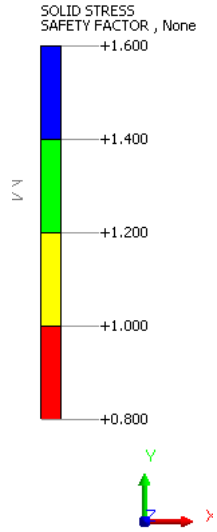
薄肉部厚 19 ㎜(case1-2) （オーバーコアリング径 116mm） レファレンスケース	薄肉部厚 38 ㎜(case2-1) （オーバーコアリング径 154mm）	薄肉部厚 57 ㎜(case2-2) （オーバーコアリング径 192mm）
		

図 2.2-36　オーバーコアリング終了時の局所安全率（薄肉部厚の影響の比較）





(c) 薄肉部鉛直長の影響の比較

薄肉部鉛直長は、レファレンスケース 200 ㎜に対して、100 ㎜とした場合を比較した（図 2.2-37 参照）。

オーバーコアリング終了時の局所安全率分布を比較した結果を図 2.2-38 に示す。局所安全率を抽出した断面は、ひずみゲージ設置深度である。

薄肉部鉛直長(100mm、200mm)の違いで薄肉部の局所安全率には、明瞭な差は認められないが、ストレインセル近傍で破壊に近い応力状態にあるため、薄肉部鉛直長は余裕をみて 200mm（現行仕様）としておくことが望ましい。

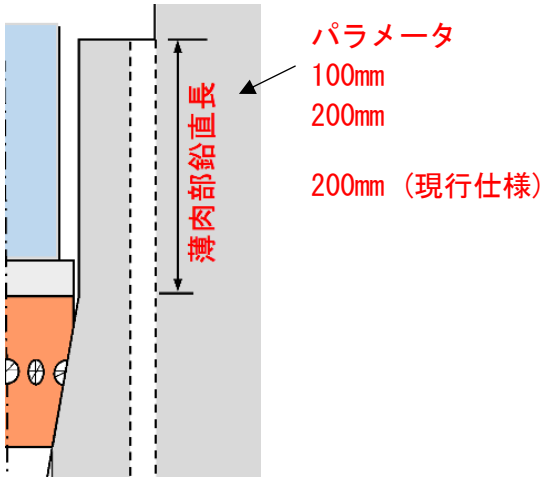


図 2.2-37　薄肉部鉛直長

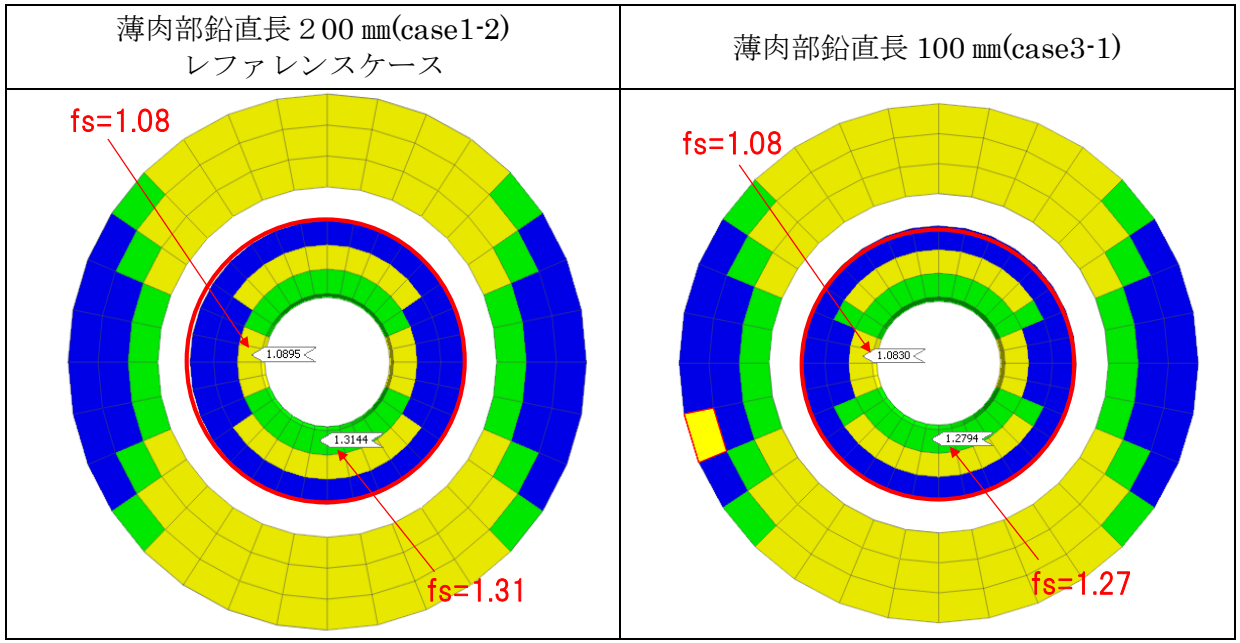
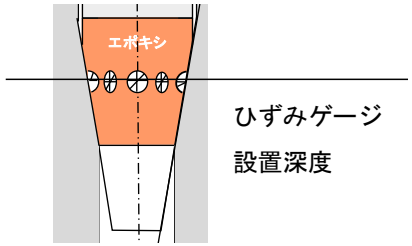


図 2.2-38　オーバーコアリング終了時の局所安全率（薄肉部鉛直長の影響の比較）



7) まとめ

以上、3D-FEM 解析による円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの検討結果をまとめると以下のようになる。

- ひずみの発生傾向は、既往調査坑内からの円錐孔底ひずみ法測定結果と類似している。
- 角度の影響検討は、スライム溜まり部とパイロット孔による寸法の制約があるため、0°～20°の範囲で検討を実施した。ρ 方向ひずみ（孔軸方向ひずみ）においては、ストレインセル角度が小さい方が感度は高くなる。θ 方向ひずみ（周方向ひずみ）においては、初期地圧に異方性がある場合、ひずみゲージ設置位置によってひずみへの角度の影響が異なる。ρ 方向ひずみの感度と θ 方向ひずみの異方性を考慮して、今回の検討条件下においては、角度 10°を計画値とする。
- 今回の初期地圧、岩盤物性値を用いた線形 FEM 弾性解析においては、レファレンスケースの薄肉部で破壊に近い応力状態にあるため、DEM による非線形、破壊を考慮した解析を「(2) 円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの 3D-DEM 解析」において実施する。また、今後、室内検証試験・現場検証試験やシミュレーションの結果を踏まえて、詳細な検討を行う必要がある。
- 薄肉部鉛直長(100mm、200mm)の違いで薄肉部の局所安全率には、明瞭な差は認められないが、ストレインセル近傍で破壊に近い応力状態にあるため、薄肉部鉛直長は余裕をみて 200mm（現行仕様）としておくことが望ましい。
- 3D-FEM 解析で用いた弾性係数は、オーバーコアリング時の周辺岩盤が微小ひずみレベルと想定し、PS 検層結果を用いて算出した動弾性係数を採用したが、既往調査結果のひずみと比較すると、過大に評価した可能性がある。また、ポアソン比は、「参照データの取得」で取得していないため、既往文献の値を用いたものである。弾性係数、ポアソン比については、室内検証試験・現場検証試験の再現解析を行い、適切な値を求めることが重要である。

(3) 円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの 3D-DEM 解析

1) 検討条件

DEM 解析によるシミュレーションで対象とする地質、深度及び岩盤物性は、「(2) 円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの 3D-FEM 解析」と同じ条件で実施した。

2) 解析手法

ITASCA 社製の PFC3D を使用して、3 次元 DEM 解析を実施した。

3) 三軸圧縮試験の再現解析によるパラメータの設定

三軸圧縮試験結果の応力-ひずみ関係を DEM 解析のシミュレーションでフィッティングし、ミクロ物性取得の検討を実施した。

a. 3 次元 DEM 解析での応力-ひずみ曲線

再現解析で用いる応力-ひずみ曲線について以下に記す。

軽石凝灰岩の 3 軸圧縮試験は、3 供試体で実施しているが、いずれも、水圧破砕法試験深度(183m)より浅い深度のコアを用いている。

P1：152m、P2：166m、P3：173m

各供試体の応力-ひずみ曲線を図 2.2-39～図 2.2-41 に示す。

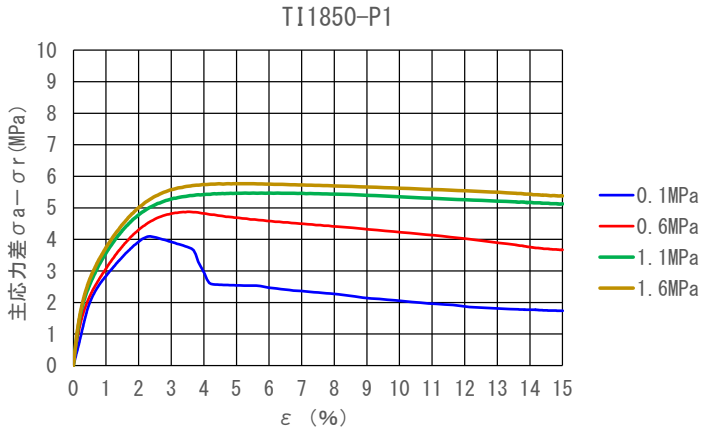


図 2.2-39　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線(P1)

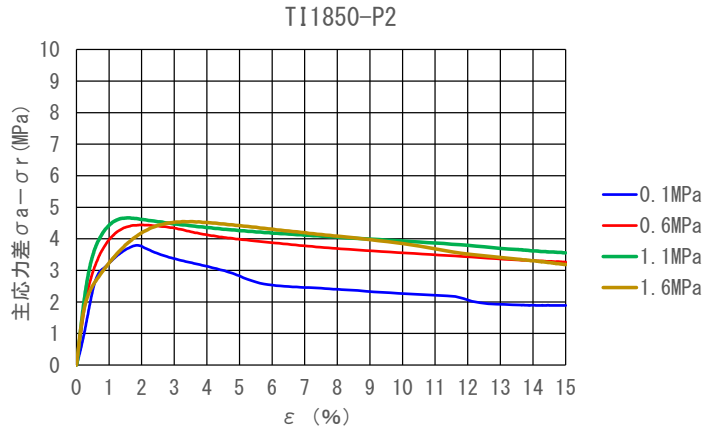


図 2.2-40　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線(P2)

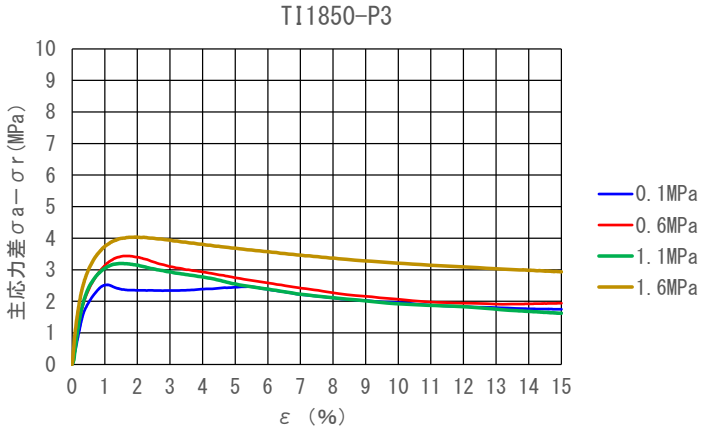


図 2.2-41　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線(P3)

水圧破砕法試験を実施した深度における有効土被り圧は 1.08MPa であることから、拘束圧 1.1MPa の試験結果をシミュレーションに適用する。

ここで、3 供試体のうちどの試験結果をシミュレーションに適用するかについて以下に考察した。

3 次元 FEM 解析における局所安全率算定のための岩盤強度（粘着力 c）は、図 2.2-42 に示す 3 供試体の圧密圧力～軸差強度の関係での回帰式より、拘束圧 1.08MPa での軸差強度を用いて設定した。

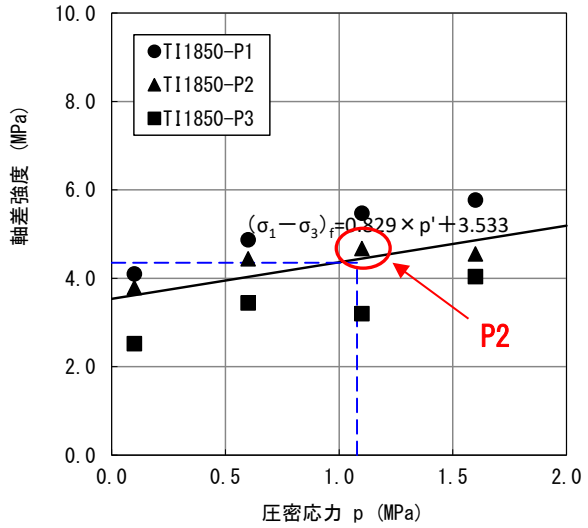


図 2.2-42　3 軸圧縮試験の圧密圧力と軸差強度

そこで、DEM 解析でミクロ物性設定に用いる応力-ひずみ曲線は、FEM 解析の岩盤強度との整合を踏まえて、供試体 P2 の試験結果を適用することとする。

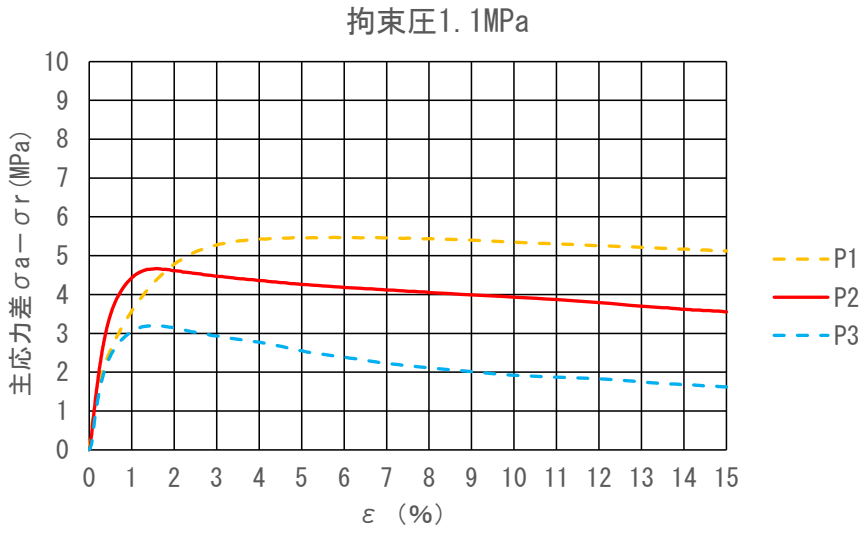


図 2.2-43　応力-ひずみ曲線（拘束圧 1.1MPa）

b．解析モデル

三軸圧縮試験の解析モデルの寸法は、φ50mm×H100mm 、粒径は、5 ㎜とした。フィッティングに使用したモデルを図 2.2-44 に示す。粒子形状は、円形である。

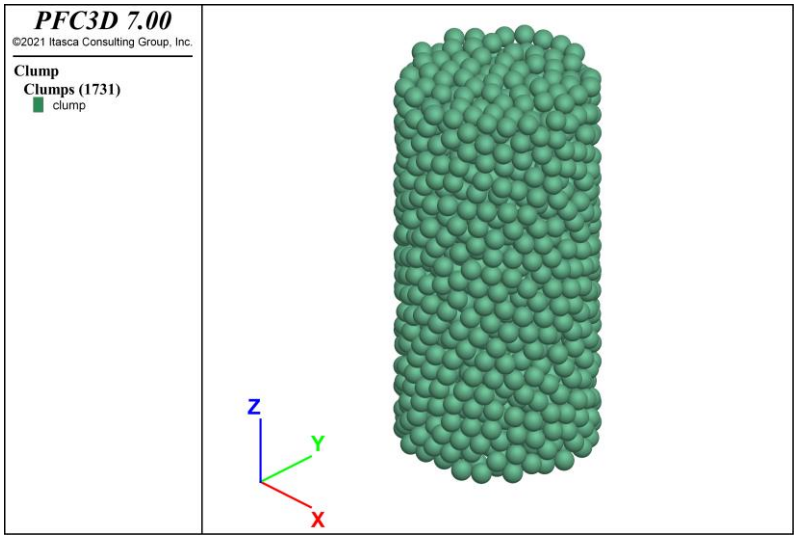


図 2.2-44　検討モデル（粒子でモデル化）

c．解析パラメータ

フィッティングにおいて用いた解析パラメータを表 2.2-12 に示す。

表 2.2-12　解析パラメータ

パラメータ	単位	値
粒径 d	m	0.005
法線方向ばね係数 kn	N/m	3.5e6
接線方向ばね係数 ks	N/m	3.5e6
摩擦係数 fric	-	0.1, 0.2, 0.4
粒子間結合接触力 cb（=contact bond）	N	70, 80

d. 解析結果

(a) 粒子形状：円形の解析結果

三軸圧縮試験の拘束圧 1.1MPa の結果を目標としてフィッティングを実施した。応力―ひずみ曲線を図 2.2-45 に、cb=80 fric=0.20 の変位ベクトル図（ひずみ 16%時）を図 2.2-46 に示す。解析結果の応力-ひずみ曲線は、いずれのケースにおいても、破壊前の非線形性や、破壊後の挙動を再現できていない結果である。

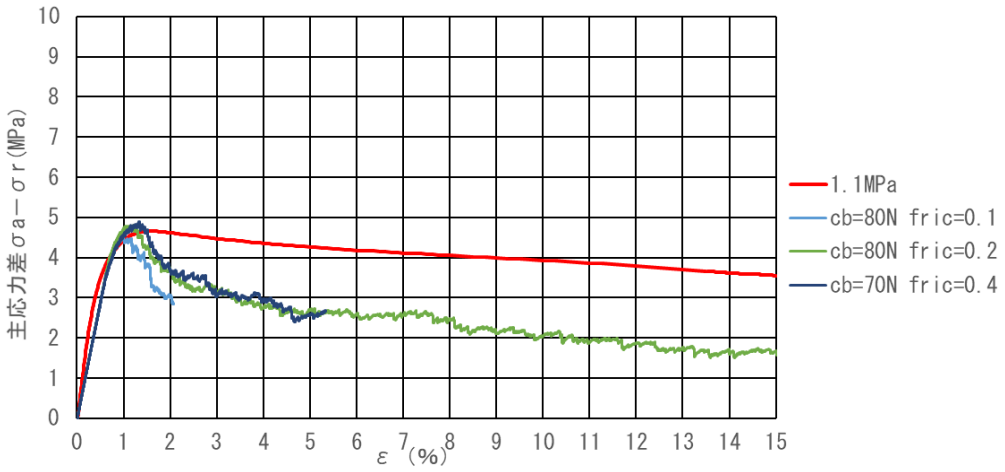


図 2.2-45　各ケースの応力-ひずみ曲線

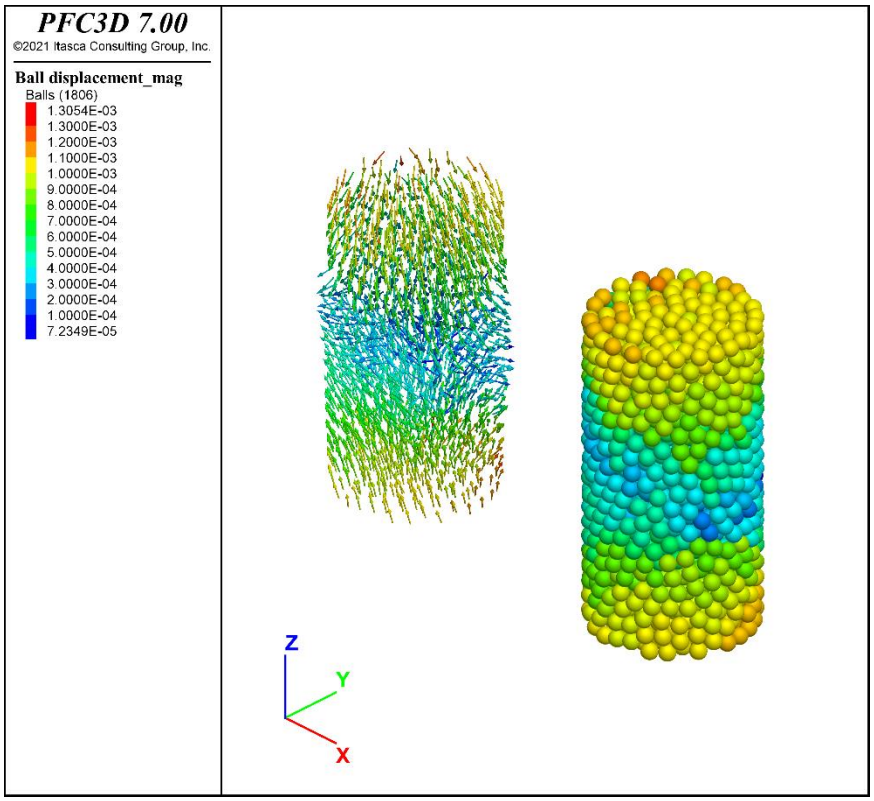


図 2.2-46　cb=80 fric=0.20 の変位ベクトル図（ひずみ 16%時）

(b) 粒子形状の変更

先に示した粒子形状が円形の場合、転がり摩擦のような回転抵抗を全くもたない。そのために、破壊後の延性的な挙動を再現できていないものと考えられる。

そこで、図 2.2-47 に示す非円形粒子であるクランプを粒子形状に適用することとした。クランプでは、凹凸の引っ掛かりが生じるため、回転抵抗が働き、破壊後の挙動を延性的にすることが期待できる。

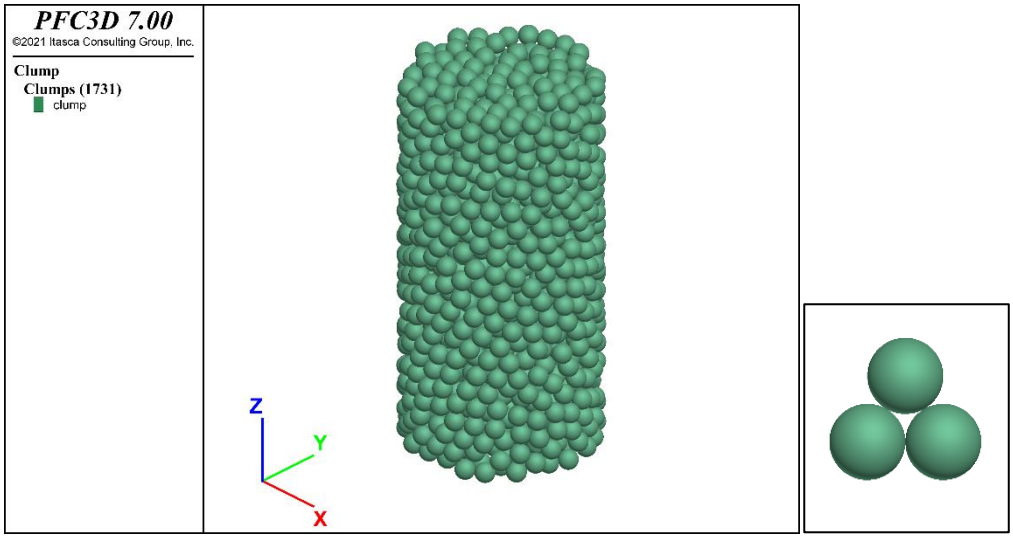


図 2.2-47　粒子形状：クランプ（非円形粒子）

粒子形状をクランプとしたときのパラメータ別応力 - ひずみ曲線を図 2.2-48 に示す。

摩擦係数 fric を 0.3 で一定とし、cb を 60N、65N、70N で比較した。

cb を大きくすることでクランプ同士の固着が強くなるのでピーク時の応力が大きくなる傾向がある。一方、破壊後においては、クランプ同士の摩擦しか効かなくなるので、摩擦係数が同じであれば cb が多少変わっても破壊後の挙動には大きな影響がない。

- ✓ Cb＝65 の応力―ひずみ曲線におけるピーク強度や、ピーク強度に到達するまでの曲線は、cb＝60 と 70 の中間となる。
- ✓ Cb=65 のピーク強度が試験結果と最もフィットする。

以上より、オーバーコアリングの DEM 解析に用いるパラメータは、cb=65,fic=0.3 を用いることとした。

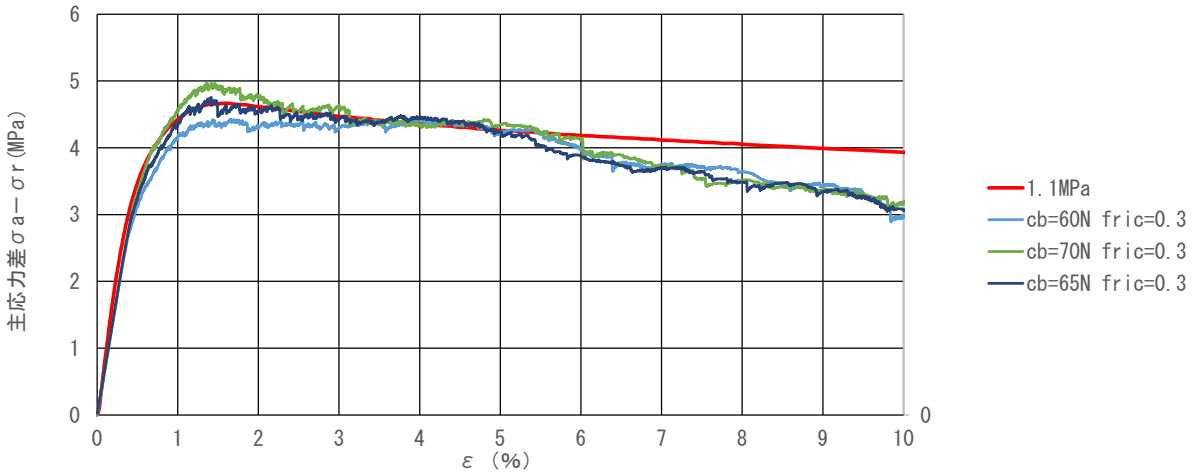


図 2.2-48　応力―ひずみ曲線の比較（粒子形状：クランプ）

粒子形状をクランプとした場合の解析パラメータを表 2.2-13 に示す。

表 2.2-13　解析パラメータ（粒子形状：クランプ）

パラメータ	単位	値
粒径 d	m	0.005
法線方向ばね係数 kn	N/m	3.5e6
接線方向ばね係数 ks	N/m	3.5e6
摩擦係数 fric	-	0.3
粒子間結合接触力 cb	N	65

応力―ひずみ曲線と微視クラック発生数を図 2.2-49 に、変位ベクトルを図 2.2-50 に示す。

粒子形状にクランプを適用することで、三軸圧縮試験の非線形挙動、ピーク強度及び破壊後の挙動を再現できることが明らかとなった。

また、非線形性が現れる付近から、微視クラックの発生が認められる。これより、微視クラックの発生により、線形・非線形の挙動を評価することが可能と考えられる。

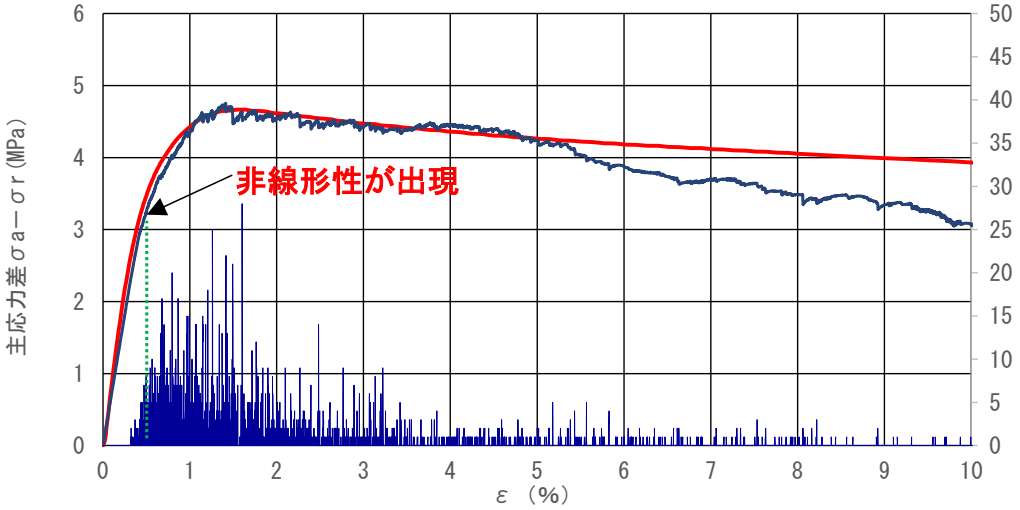


図 2.2-49　応力-ひずみ曲線と微視クラック発生数（cb=65,fric=0.3）

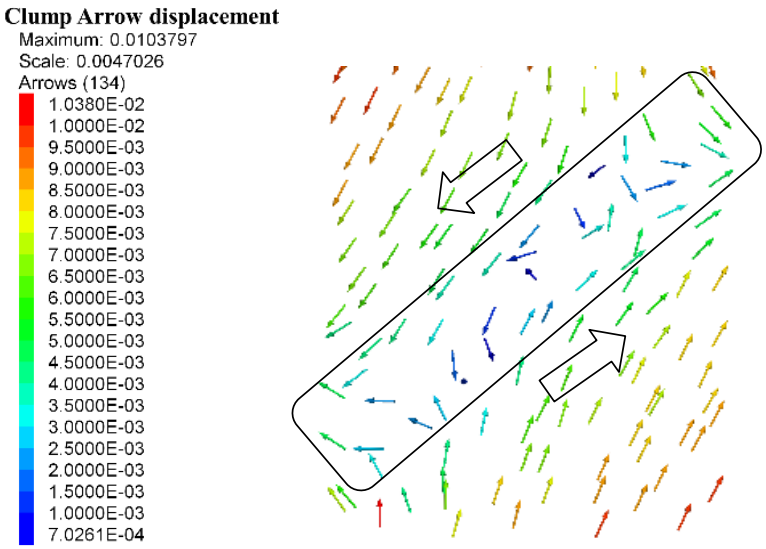


図 2.2-50　変位ベクトル（粒子形状：クランプ（非円形粒子））

4) オーバーコアリングの 3D-DEM 解析

a．解析条件

(a) 初期地圧測定装置の寸法

DEM 解析の解析で考慮する初期地圧測定装置の寸法は、FEM 解析のレファレンスケース(case1-2)の寸法で実施した。

(b) 初期地圧

DEM 解析で考慮する初期地圧は、FEM 解析と同様に軽石凝灰岩で実施した水圧破砕法の最深部の値を適用した。

(c) 物性値

DEM 解析の物性値は、三軸圧縮試験シミュレーションで設定した表 2.2-14 に示すマクロ物性を採用した。

表 2.2-14　オーバーコアリング掘削解析　解析パラメータ

パラメータ	単位	値 詳細着目領域	値 着目領域外
粒径 d	m	0.005	0.0125
法線方向ばね係数 kn	N/m	3.0e6	8.5e6
接線方向ばね係数 ks	N/m	3.0e6	8.5e6
摩擦係数 fric	-	0.3	0.3
粒子間結合接触力 cb	N	65	450

b．解析モデル

解析モデルを図 2.2-51 に示す。

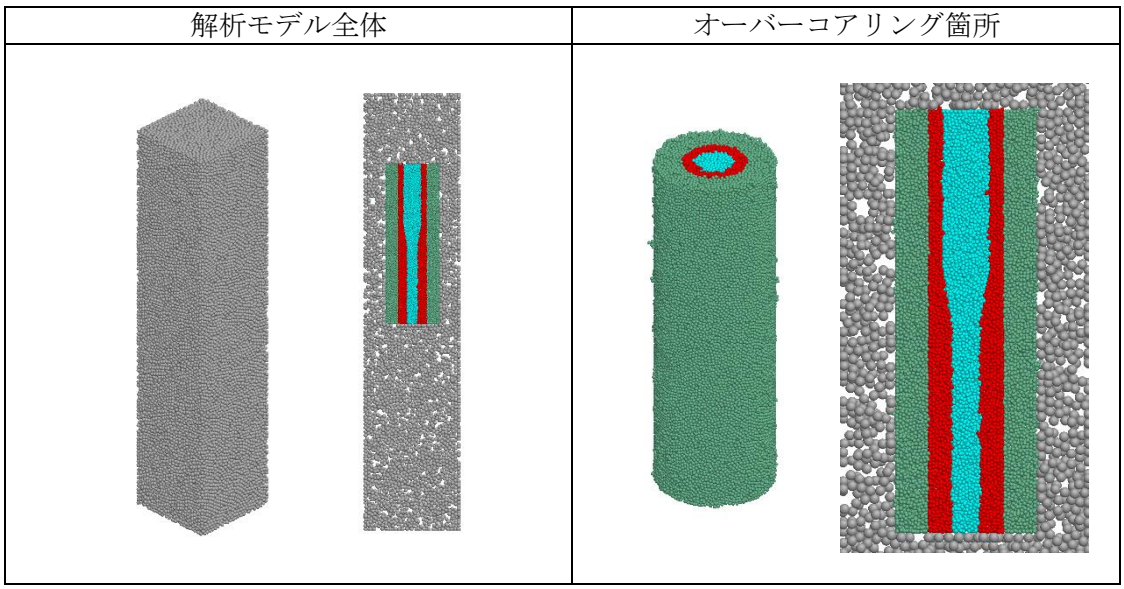


図 2.2-51　解析モデル

c. 初期状態の構築と初期地圧の設定

まず、詳細着目領域と同じ形状の壁要素を設け壁で覆われた領域内に粒子を生成させ、収束計算を実施する。そして、詳細着目領域周りの壁要素を削除し、詳細着目領域外も同様に壁要素を設けた後に粒子を生成し、収束計算を実施する。

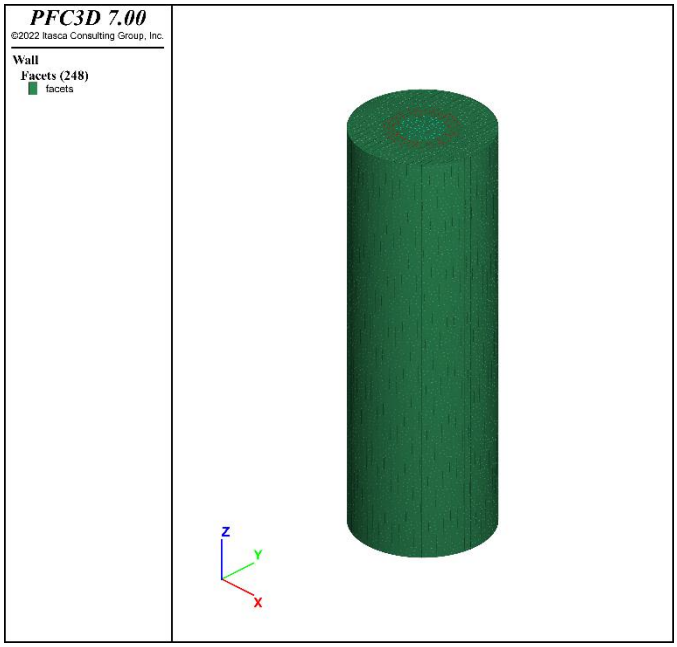


図 2.2-52　解析領域（詳細着目領域）

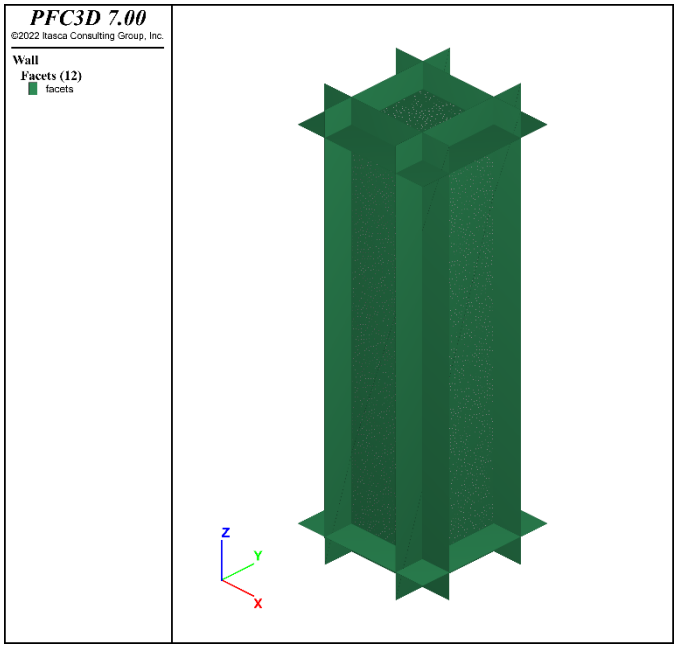


図 2.2-53　解析領域（全体）

一連の収束計算後、モデル側方より拘束圧を載荷する。設定する数値は以下のとおりである。

水平方向（y 方向）：4.83 MPa

水平方向（x 方向）：3.03 MPa

また、鉛直方向の壁要素は固定とし、鉛直方向（z 方向）の拘束圧は目標の 3.37 MPa と同等となるように調節した。本検討での鉛直方向の拘束圧は 3.53 MPa であった。

d. 解析ステップ

各掘削ステップでの解析モデルを図 2.2-54 に示す。

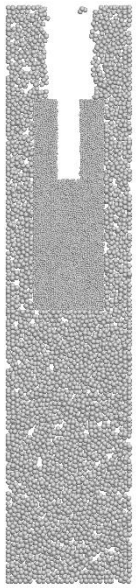
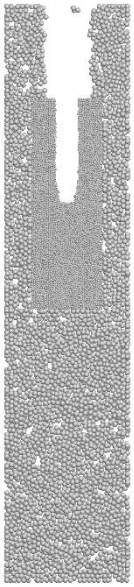
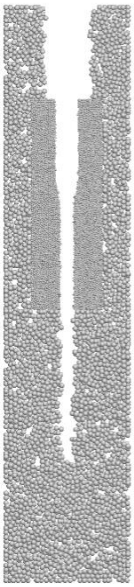
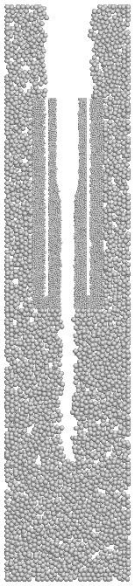
パイロット孔掘削	ストレインセル部掘削	スライム溜まり部掘削	オーバーコアリング
			

図 2.2-54　各掘削ステップでの解析モデル

e. 解析結果

(a) クラック発生状況

微視クラックの発生数に関する図を図 2.2-55、図 2.2-56 及び図 2.2-57 に示す。

オーバーコアリング開始前の段階で、微視クラックが多く発生していることがわかる。しかし、法線方向に薄肉部を貫通するような、明瞭な微視クラックは分布していない。

ストレインセル部の上端・下端で微視クラックの発生が多い。これは、孔壁面隅角部の応力集中によるものと考えられる。したがって、ひずみ測定は、現行仕様のとおり応力集中する可能性があるストレインセル上端・下端近傍を避けることが望ましい。

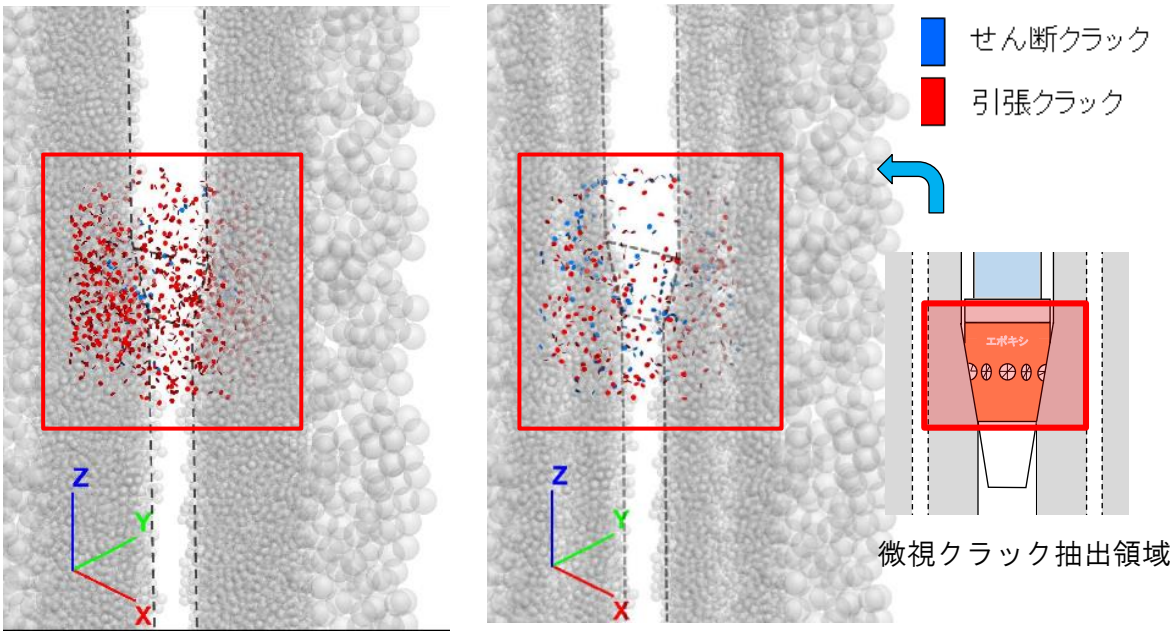
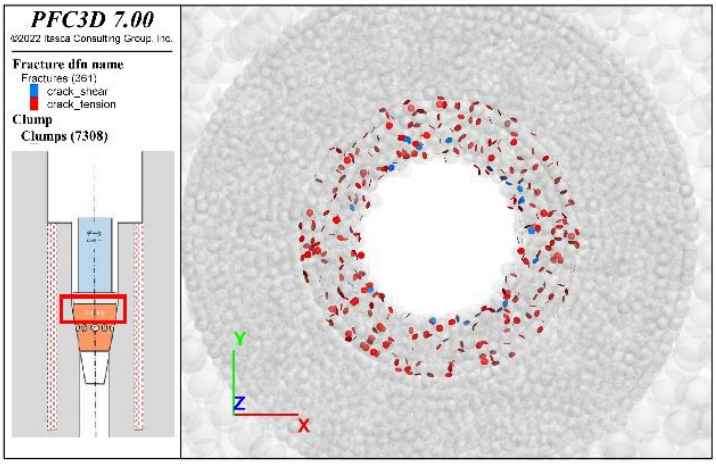
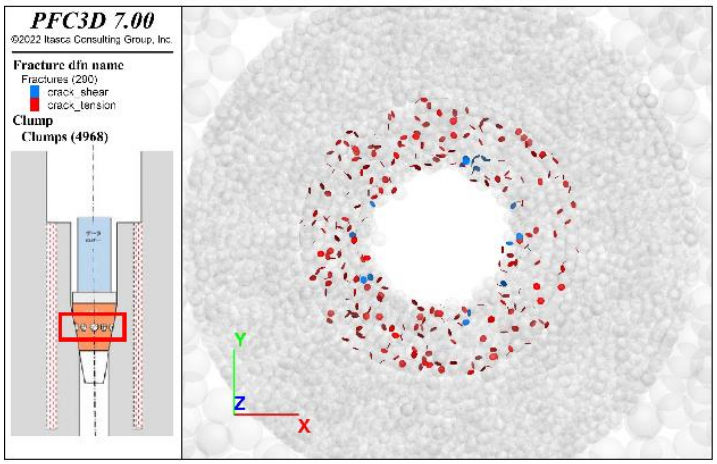


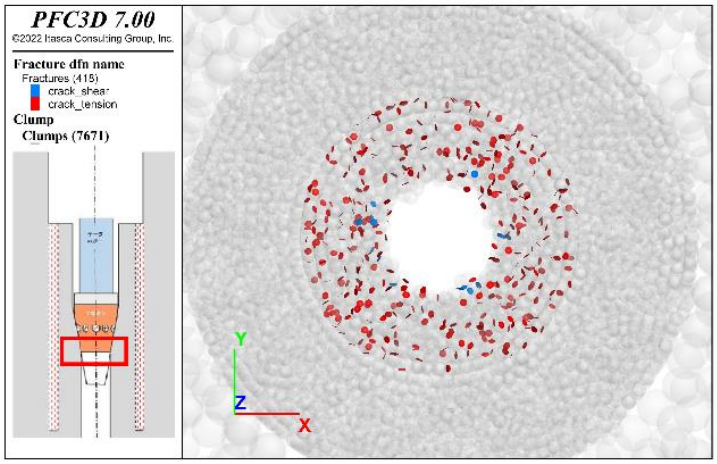
図 2.2-55　微視クラック分布（ストレインセル部）断面図



微視クラック分布図_オーバーコアリング開始前（上端）

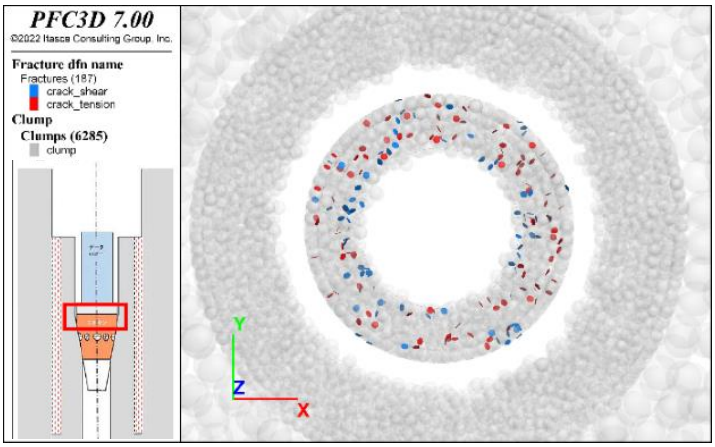


微視クラック分布図_ オーバーコアリング開始前（中央）ひずみゲージ設置位置

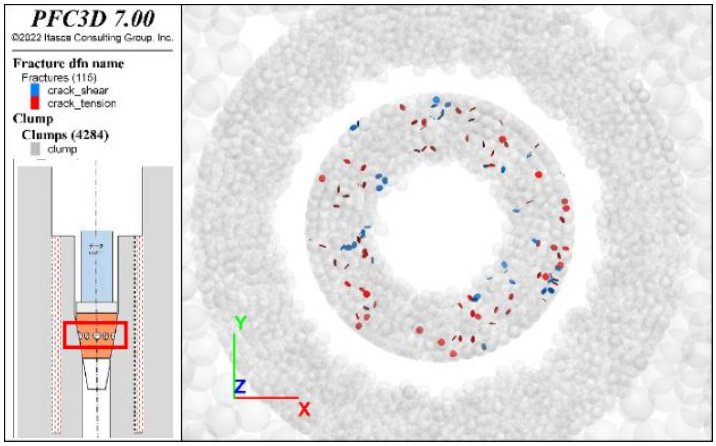


微視クラック分布図_ オーバーコアリング開始前（下端）

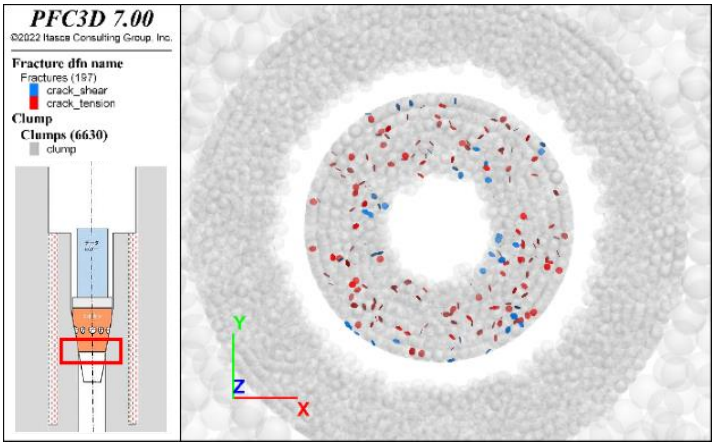
図 2.2-56　微視クラック分布図（オーバーコアリング開始前の累積微視クラック）



微視クラック分布図_ オーバーコアリング時増分（上端）



微視クラック分布図_オーバーコアリング時増分（中央）ひずみゲージ設置位置



微視クラック分布図_ オーバーコアリング時増分（下端）

図 2.2-57　微視クラック分布図（オーバーコアリング時の増分微視クラック）

(b) 微視クラック発生率に基づく応力状態の評価

ここでは、薄肉部に発生した微視クラック発生数に基づいて、薄肉部の応力レベル、非線形性を推定することを試みた。

図 2.2-58 は、オーバーコアリング時に掘削に伴い発生した微視クラック数を示している。この微視クラック発生数は、図 2.2-55 に示す微視クラック抽出領域に発生したものを示している。

ひずみゲージ設置深度付近で微視クラックが多く発生しており、ひずみゲージ設置深度から 10 ㎜程度掘削が進展したところでピークとなり、その後減少している。

微視クラック累積数を図 2.2-59 に示す。同図では、オーバーコアリング開始前の段階で発生した微視クラック数を加算している。

- オーバーコアリング開始時：1,070 個
- オーバーコアリング時　　：　500 個
- オーバーコアリング終了時：1,570 個

オーバーコアリング開始時において、7 割程度の微視クラックが発生している。

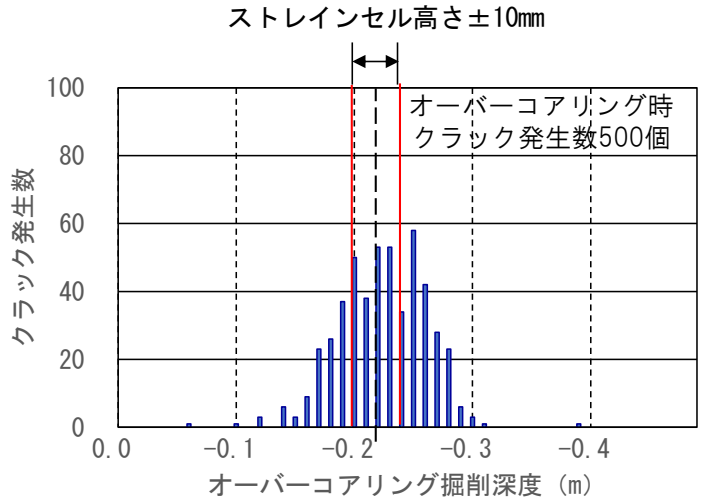


図 2.2-58　微視クラック発生数（オーバーコアリング時）

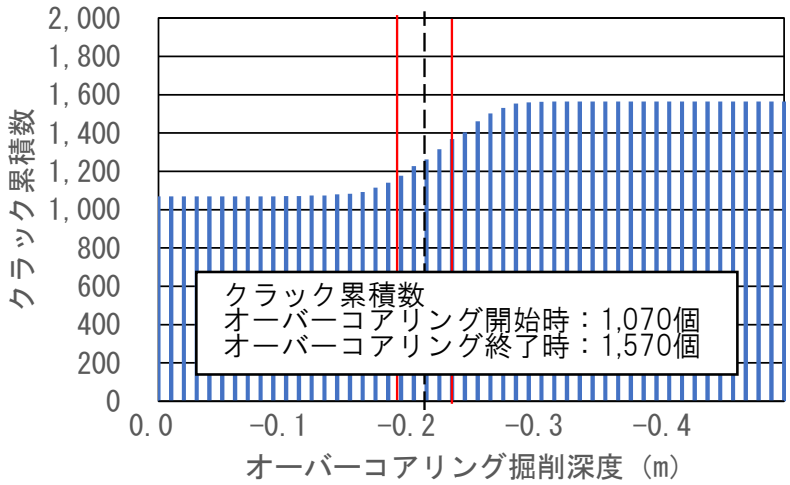


図 2.2-59　微視クラック累積数（オーバーコアリング時）

オーバーコアリング時の薄肉部の応力レベル、非線形性を評価するには、三軸圧縮試験シミュレーションの応力ーひずみ曲線と微視クラックの発生を関連付ける必要がある。

ここでは、微視クラック累積数を正規化して微視クラック発生率と定義し、微視クラック発生率、三軸圧縮試験の応力ーひずみ曲線を用いて応力レベルを評価することとした。クラック発生率は、図 2.2-60 に示す微視クラック抽出領域の体積($2.03\times10^{6}mm^{3}$)で微視クラック累積数を除した値（微視クラック発生密度）をクラック発生率とした。

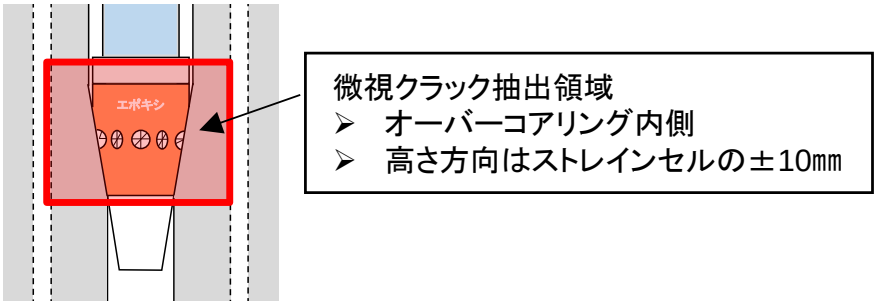


図 2.2-60　微視クラック抽出領域

＜微視クラック発生率の定義＞

微視クラック累積数を正規化したものを微視クラック発生率と定義する。ここでは、微視クラック抽出領域の体積($2.03\times10^{6}mm^{3}$)で微視クラック累積数を除した値を微視クラック発生率とした。

微視クラック発生率（微視クラック発生密度）は、下記のとおりである。

- オーバーコアリング開始前：5.2×10^4 個／m^3（ε ＝0.46%）
- オーバーコアリング終了時：7.7×10^4 個／m^3（ε ＝0.49%）

三軸圧縮試験シミュレーションでのクラック発生密度を応力ーひずみ曲線と合わせて表示したものを図 2.2-61 に示す。三軸圧縮試験シミュレーションのクラック発生密度の曲線上に、オーバーコアリングでの微視クラック発生密度をプロットし、微視クラック発生密度に対応する応力レベルをみると、マクロ的には概ね弾性挙動の範囲内となっていることがわかった。したがって、円錐孔壁ひずみ法は、現行仕様により、堆積軟岩の現地に適用できる可能性がある見通しを得た。

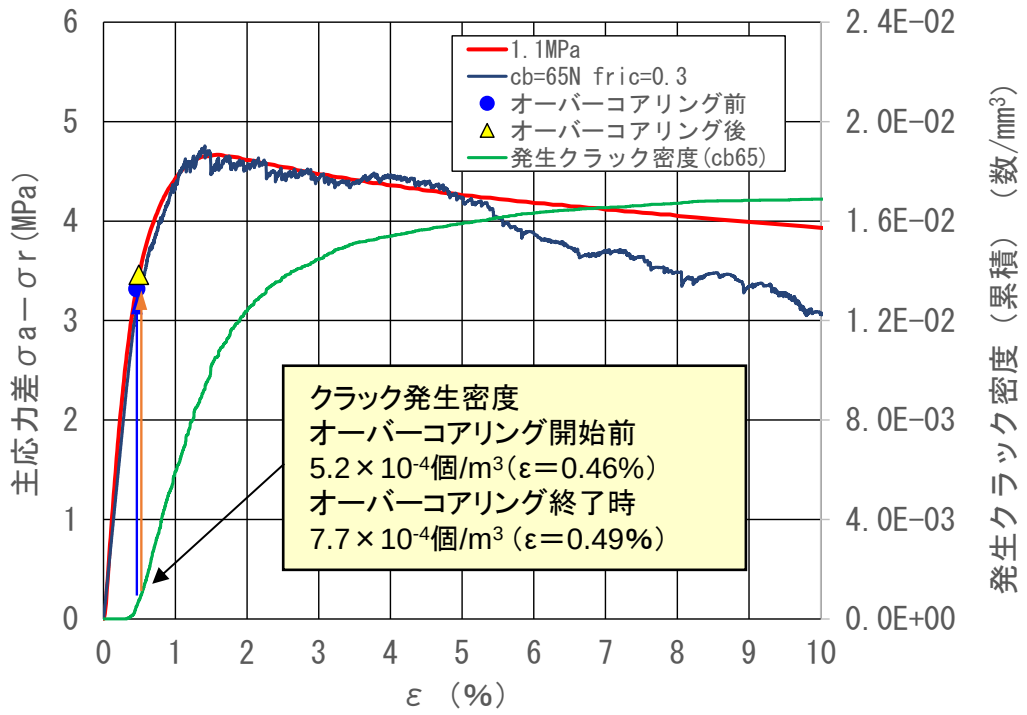


図 2.2-61　三軸圧縮シミュレーションのクラック発生密度

5) まとめ

以上、3D-DEM 解析による円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリングの検討結果をまとめると以下のようになる。

- DEM 解析で実施した三軸圧縮試験シミュレーションにより、非線形性が現れる応力レベルで微視クラックが発生することがわかった。これから、DEM 解析により、軟岩のピーク強度に至る非線形挙動を評価できることが明らかとなった。
- 三軸圧縮試験シミュレーションにおいて、粒子形状をクランプとした DEM 解析を行うことで、三軸圧縮試験のピークから残留強度まで挙動を再現できることを確認した。
- 三軸圧縮試験シミュレーションで設定したパラメータを用いて、オーバーコアリングの DEM 解析を実施した結果、微視クラックが連結して薄肉部を貫通するようなクラックが発生しないことがわかった。
- 微視クラックは、ストレインセルの上端・下端で多く発生することから、ひずみゲージは、現行仕様のとおり、応力集中する可能性があるストレインセル上端・下端近傍を避けることが望ましい。
- 薄肉部の応力状態を評価した結果、ひずみゲージ設置位置近傍では、マクロ的に概ね弾性挙動となっていることから、現行仕様により、現場に適用できる可能性がある見通しを得た。
- 初期地圧測定の開発で対象とする岩盤は、堆積軟岩である。そのため、間隙水の影響も考えることが望ましい。
- 今後、水圧破砕の再現解析を含め、室内検証試験、現場検証試験のシミュレーションにより、詳細な検討を実施する。

2.2.4 まとめ

本年度、初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討では、解析手法の適用性検討と、初期地圧測定装置の仕様の検討を実施した。

解析手法の適用性検討では、令和 2 年度「参照データの取得」で実施した三軸圧縮試験、水圧破砕法試験の再現解析を行い、試験結果と比較することで、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法としての DEM 解析の適用性を検討した。

初期地圧測定装置の仕様の検討では、初期地圧測定装置の仕様設定に資するため、FEM 解析、DEM 解析を用いて円錐孔壁ひずみ法によるオーバーコアリング掘削のシミュレーションを実施した。

【得られた成果】

得られた成果は、以下のとおりである。

＜解析手法の適用性検討＞

検討結果を表 2.2-15 に示す。水圧破砕法シミュレーションにおける破砕圧の再現が課題として残るが、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法として、DEM 解析が適用可能であることが確認できた。

表 2.2-15 「解析手法の適用性検討」の検討結果

シミュレーション対象	成果	内　容
三軸圧縮試験	○	試験時コアと同様のせん断面の形成を確認した。
	○	破壊直前の非線形性や、破壊後の挙動は、仕様検討の 3D-DEM 解析により再現した。
	○	非線形性が現れる軸ひずみ(0.3%)付近で微視クラックが発生することが認められた。
水圧破砕法	○	最大主応力方向のクラックの発生を再現できた。
	×	破砕圧（応力レベル）を再現できていない。

＜初期地圧測定装置の仕様の検討＞

3D-FEM 解析による概略検討で実施したストレインセル角度、薄肉部厚、薄肉部鉛直長のパラメータスタディ解析の結果、以下の知見を得た。

- FEM 解析のひずみの発生傾向は、既往調査坑内からの円錐孔底ひずみ法測定結果と類似していることから、本解析結果は妥当と考えられる。
- スライム溜まり部とパイロット孔による寸法の制約があるため、ストレインセル角度を 0°～20° の範囲で検討した結果、ρ 方向ひずみ（孔軸方向ひずみ）においては、ストレインセル角度が小さい方が感度は高くなる。θ 方向ひずみ（周方向ひずみ）においては、初期地圧に異方性がある場合、ひずみゲージ設置位置によってひずみへの角度の影響が異なることがわかった。これより、ρ 方向ひずみの感度と θ 方向ひずみの異方性を考慮して、今回の検討

条件下においては、角度 10°を計画値とする。

- 今回の初期地圧、岩盤物性値を用いた線形 FEM 弾性解析においては、レファレンスケースの薄肉部で破壊に近い応力状態にあることがわかった。詳細な検討は、DEM 解析で確認することとした。
- 薄肉部鉛直長(100mm、200mm)の違いで薄肉部の局所安全率には、明瞭な差は認められないが、ストレインセル近傍で破壊に近い応力状態にあるため、薄肉部鉛直長は余裕をみて 200mm（現行仕様）としておくことが望ましい。
- 3D-FEM 解析で用いた弾性係数は、オーバーコアリング時の周辺岩盤が微小ひずみレベルと想定し、PS 検層結果を用いて算出した動弾性係数を採用したが、既往調査結果のひずみと比較すると、過大に評価した可能性がある。

円錐孔壁ひずみ法の現行仕様に対して、3D-DEM 解析によるオーバーコアリングのシミュレーションを実施した結果をまとめると以下のようになる。

- DEM 解析で実施した三軸圧縮試験シミュレーションにより、非線形性が現れる応力レベルで微視クラックが発生することがわかった。これから、DEM 解析により、軟岩のピーク強度に至る非線形挙動を評価できることが明らかとなった。
- 三軸圧縮試験シミュレーションにおいて、粒子形状をクランプとした DEM 解析を行うことで、三軸圧縮試験のピークから残留強度まで挙動を再現できることを確認した。
- 三軸圧縮試験シミュレーションで設定したパラメータを用いて、オーバーコアリングの DEM 解析を実施した結果、微視クラックが連結して薄肉部を貫通するようなクラックが発生しないことがわかった。
- 微視クラックは、ストレインセルの上端・下端で多く発生することから、ひずみゲージは、現行仕様のとおり、応力集中する可能性があるストレインセル上端・下端近傍を避けることが望ましい。
- 薄肉部の応力状態を評価した結果、ひずみゲージ設置位置近傍では、マクロ的に概ね弾性挙動となっていることがわかった

以上のように、3D-FEM 解析及び 3D-DEM 解析によるシミュレーションを実施した結果、円錐孔壁ひずみ法の現行仕様により、現場に適用できる可能性がある見通しを得た。

【課題】

本検討結果から抽出した課題を以下に記す。

- 水圧破砕法の再現解析で、応力レベルを合わせることができず、再現性の向上が課題として残った。水圧破砕による破砕圧を再現する方法として、三軸圧縮試験シミュレーションの再現性の向上や、圧裂引張試験のシミュレーションによるパラメータ設定等が考えられる。
- 解析に用いる弾性係数、ポアソン比は、解放ひずみの各成分（ρ 方向、ϕ 方向、」 θ 方向）の

大きさに影響を与えることから、適切な値を設定することが重要である。

- 今後計画されている室内検証試験、現場検証試験の再現解析を行って、解析手法の適用性を確認するための詳細な検討を実施し、上記課題の解決や、岩盤メカニズムの評価を実施する必要がある。

2.2 節の参考文献

[1] 清水昭男：泥質堆積物の圧密と固化作用（その１）－物理的，力学的性質からみた圧密固化－．応用地質 30 巻 1 号 1989

[2] 足立紀尚　他：軟岩の変形・加配挙動に及ぼす拘束圧の効果とひずみ軟化型弾塑性構成式．土木学会論文集．No.666/Ⅲ-53, pp.117-126, 2000.12

[3] 足立紀尚　他：堆積軟岩の力学特性と破壊規準．土木学会論文報告集，第 295 号 1980 年 3 月

[4] 白鷺卓　他：堆積軟岩における湧水のある下向きボアホールでの円錐孔底ひずみ法の適用．資源素材学会秋季大会，2006

[5] 冨田敦紀　他：余裕深度処分埋設施設本格調査のうち試験空洞の支保設計および挙動．NO.325，電力土木，2006

[6] 冨田敦紀　他：軟岩地盤における円錐孔底ひずみ法の現場適用性に関する一考察．第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，2005

第 3 章　中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化の内、地下水流動評価技術の調査

第3章　中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化の内、地下水流動評価技術の調査

3.1　調査の目的と検討項目

3.1.1　調査の目的

地下水流動評価技術（計測・測定及び解析技術）について、国内外の低レベル及び高レベルの放射性廃棄物処分に係る既往の関連技術の調査を行い、我が国における中深度処分への適用を考慮した場合の現状分析と課題の抽出・整理を行う。実施にあたっては、原子力規制委員会により整備が進められている第二種廃棄物埋設事業の規制基準（特に中深度処分(L1)）における要求事項と原子力学会の学会標準や土木学会の技術検討の既往成果を十分に考慮し、更には高レベル廃棄物地層処分に向けての関連技術等も参考にして、目的、想定される調査目標並びに処分事業の時間的変遷と測定・計測・解析の必要箇所・エリア等を想定し、それらへ適用可能な現状技術を分類・整理するとともに、適用に向けての技術課題等を考察する。

3.1.2　調査の概要

(1) 令和 2 年度（前年度）

令和 2 年度の検討においては、下記の項目について、概略的な調査検討を行い、重要項目の課題を抽出した。

1) 第二種廃棄物中深度処分の規制基準等における検討状況と要求事項の調査・整理
2) 放射性廃棄物処分に係る地下水流動調査・評価技術に関する文献情報の収集・分類・整理
3) 不均質性を考慮した地質環境モデル及び水理地質構造モデルのモデル化手法に関する文献調査中深度処分に係る地下水流動の調査・評価の方法論と技術に関する調査・検討
4) 中深度処分に係る地下水流動の調査・評価の方法論と技術に関する調査・検討
5) 中深度処分事業展開と規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価の実施項目及び技術的要件等の検討
6) 地下水流動調査・評価に関する今後の技術課題の抽出と技術開発の方向性の概略検討

(2) 令和 3 年度

前年度に実施した調査結果を踏まえ、地下水流動評価技術（計測/測定及び解析技術）について既往技術の更なる調査を行い、また中深度処分への適用を想定した場合の現状技術と課

題を整理した。具体的には下記の項目である。

1) 中深度処分の事業展開・規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価技術の主な技術課題の抽出と論点整理

2) 中深度処分に係る地下水流動の調査・評価技術における特に重要な技術開発課題に関する技術の高度化実証や体系化に向けての具体策検討

- 地下水流動の調査・評価における不確実性の考慮に係る重要事項整理
- 地下水等モニタリング統合化システムの概念検討(監視測定設備等を含む)

3.1.3 実施スケジュール

(1) 実施スケジュール

令和 2～3 年度の実施項目とスケジュールを表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 実施スケジュール（令和 2～3 年度）

調査検討項目	2020 年度	2021 年度	2022 年度
① 第二種廃棄物・中深度処分の規制要求の調査	←→		
② 放射性廃棄物処分に係る地下水流動・調査・評価技術の調査	←→		
③ 不均質性を考慮した水理地質構造モデル化手法の現状技術・方法論の調査	←→		
④ 中深度処分における地下水流動調査・評価技術の調査	←→		
⑤ 中深度処分事業展開と規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価の技術的要件等の検討	←→		
⑥ 今後の技術課題の抽出と技術高度化開発の方向性の検討	←→		
⑦ 中深度処分の事業展開・規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価技術の主な技術課題の抽出と論点整理		←→	
⑧ 中深度処分に係る地下水流動の調査・評価技術における特に重要な技術開発課題に関する技術の高度化実証や体系化に向けての具体案検討 1) 地下水流動の調査・評価における不確実性の考慮に係る重要事項の整理 2) 地下水等モニタリング統合化システムの概念検討（監視測定設備等を含む）		←→ ◀--▶ ◀--▶	
報告書	中間 ▽	最終 ▽	

(2) 全体検討フロー

本調査研究の全体的な検討フローを図 3.1-1 に示す。

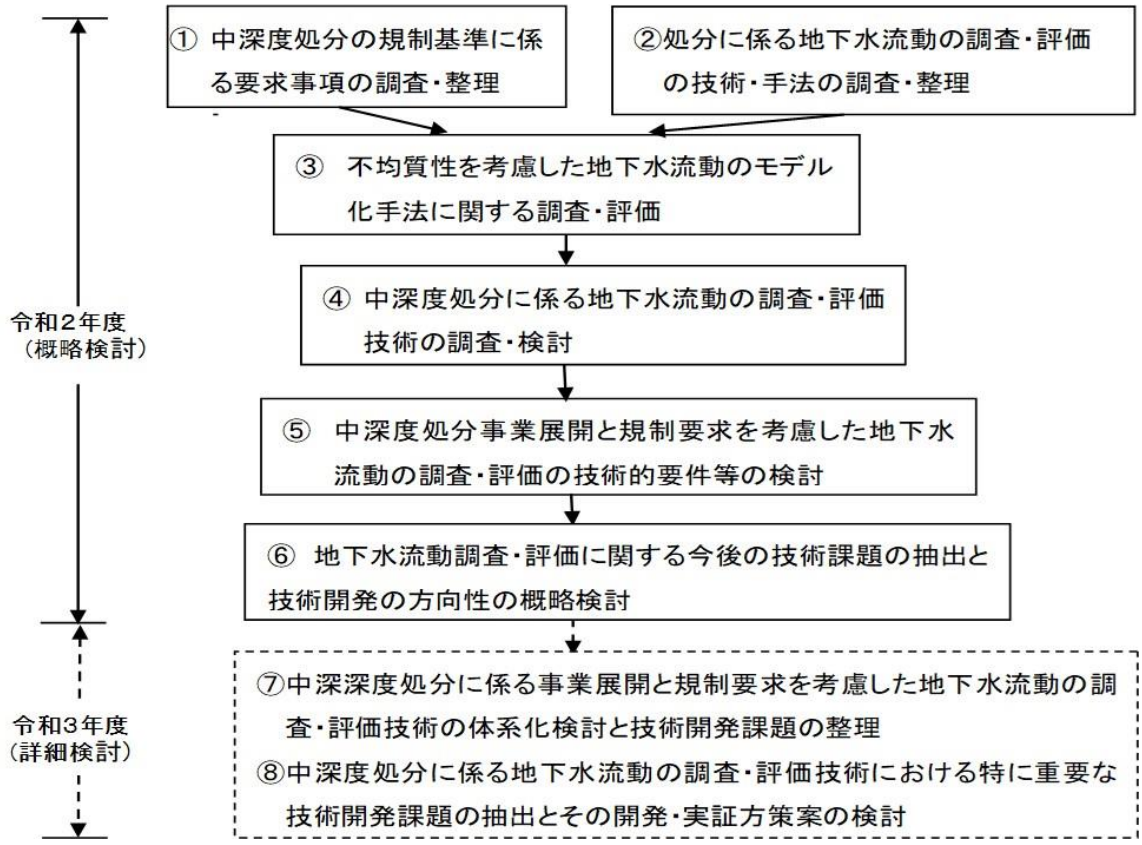


図 3.1-1　本調査研究の全体検討フロー

3.2　文献調査結果

3.2.1　第二種廃棄物中深度処分の規制基準等における検討状況と要求事項の調査・整理

(1) 骨子

中深度処分に関する原子力規制委員会による新規制基準策定状況を調査・整理・分析し、規制の要求事項の地下水流動の調査・評価にあたっての考慮すべき事項を抽出・整理した。

(2) 検討概要

第二種廃棄物中深度処分に関する原子力規制委員会による新規制基準の整備状況を調査・分析し、規制要求事項を分類・整理し、地下水流動の調査・評価における考慮事項を検討・整理する。特に、モニタリング設備に関する規制要求の中で、天然バリア・人工バリアが設計を逸脱することなく性能を発揮していることを確認するために定期的な評価等を行うことを求めており、そのために必要なデータ取得のために、地質環境の物理・化学特性、人工バリア性能、人工・天然バリア機能に課関係する地下水状態等のデータ取得（地下水等モニタリング）をするための設備の設置あるいは模擬環境下で代替できる原位置・室内試験等の実施を要求している。これらへの対応を考慮して、地下水流動調査・評価の考え方を検討・整

理した。

(3) 検討結果

中深度処分に関する規制委員会による最近までに検討公表されているものの中で、地下水流動の調査・評価に直接的あるいは間接的に重要な要求項目等が示されているものとして、次の公表されている参考文献を抽出し、これらに基づき検討・整理した。

1) 原子力規制委員会：「炉内等の廃棄物の埋設に係る規制の考え方」、平成 28 年 8 月 31 日　原規技発第 1608312 号　原子力規制委員会決定、2016 年 8 月 31 日.

：炉内等廃棄物の埋設に係る規制基準等の整備の前段階として、規制の考え方が整理されている。ただし、この考え方は規制基準等の基礎となるものであるが、前提を置いた上での施設設計等に係る規制要求の考え方を示したものであり、検討の途中であるという位置づけとされている[1]。

- 長期の安全確保のための規制要求の考え方（規制期間中、規制期間終了後）
- 廃棄物埋設施設の安全確保のための設計に関する要求の考え方
  - 規制期間中の安全確保のための規制要求の考え方
  - 規制期間終了後の安全確保のための設計要求の考え方（自然事象；廃棄物埋設地の位置、長半減期核種の濃度制限、放射性核種の閉じ込め（人工バリア、天然バリア、モニタリング設備）／人間侵入；人間侵入の発生防止、人間侵入の影響低減）
- 第二種廃棄物埋設事業の後続規制に必要な管理要求
  - 規制期間中の安全確保
  - 規制期間終了後の安全性確認（放射性核種の閉じ込め機能の確認／定期的な評価等／坑道の埋め戻し／異常時の措置／規制期間の終了）

2) 原子力規制委員会：「中深度処分における廃棄物埋設地の設計プロセス及び線量評価に係る審査ガイドの骨子案」、平成 29 年度第 27 回原子力規制委員会　臨時会議、資料 5（“廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合“の検討を踏まえて取りまとめた資料、平成 29 年 7 月 31 日.

：本規制基準に係る原子力規制基準に係る委員会資料においては、主に下記のような内容についての記載がなされている。第二種廃棄物埋設の事業許可基準規則における廃棄物埋設地に対する要求及び基準について、特に中深度処分の案に関して、規則の骨子案、その解釈及び“中深度処分における廃棄物埋設地の位置に係る審査ガイドの骨子案での扱いについて、更には規制期間終了後の放射性防護基準の適用の考え方などについて総括的な取りまとめがなされている[2]。

3) 原子力規制委員会：第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案」、平成 29 年度第 27 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合、資料 27-1、平成 29 年

11 月 2 日.

：本資料は、上述の検討を踏まえて、中深度処分に係る許可基準規則及びその解釈の制定並びに関連する第二種事業規則の改正について、条文の構成及び条文ごとの要求事項についての骨子案について、検討取りまとめがなされている[3]。

この中で、地下水に関係の大きい項目としては、主に以下のようなものが示されている。

- （人工バリア）廃棄物埋設地に係る規定のうちの、人工バリアに係る要求として、放射性核種の漏出抑制のため、頑健性を確保するため単一の機能に頼らず、例えば廃棄物埋設地に浸入する地下水量を低減する機能や、放射性核種の物理的及び化学的性質に応じた、放射性核種の移行を抑制する機能等を有していることが要求されている。
- （天然バリア）放射性核種の地下水等を介した生活圏への移行に関しては、天然バリアによって抑制することを要求している。
- （ALARA の考え方の取り入れ）廃棄物埋設地の設計の妥当性を確認するための評価期間も長期に及ぶため、評価結果には大きな不確実性が伴う。このため、設計の妥当性を確認するという方法は長期にわたる防護の実効性を求める観点からは必ずしも十分でないので対策に意を尽くす必要性を求めている。
- （技術選択における指標の例と留意点）評価において使用する天然バリアに係るモデルやパラメータ等に関して、事業許可後の建設段階においても可能な範囲でできるだけ確認が行えるよう、掘削等に際して得られる情報から確認又は検証できると考えられることやその方法の見通しについて、事業許可申請の段階において示すことを求めている。なお、建設段階における坑道や廃棄物埋設地を設置する際の掘削時に得られた天然バリアに係る情報を踏まえて、透水性に高い場所を避ける等、廃棄物埋設地の配置等について軽微な変更を行うことは、ALARA の観点から妨げるものでないとしている。
- （許可基準規則の解釈）“埋設終了後において、廃棄物埋設地の外への放射性物質の異常な漏えいを防止する機能を有するものでなければならない”ということとは、廃棄物埋設地を設置する天然バリアの水理地質構造や地球化学環境が人工バリアの機能を損なうことのないものである、また坑道を設置する天然バリアは、設計時点における合理的に利用可能な掘削技術や埋戻し技術を踏まえて、放射性物質が移行しやすい経路が生じないよう坑道の閉鎖を行うことができる見通しがあること等が求められている。更に、上記のように廃棄物埋設地から漏出した放射性物質の移行の評価において使用する天然バリアに係るモデルやパラメータ等に関して、廃棄物埋設地の掘削等に際して合理的な範囲で得られる情報から確認又は検証できるものの種類及びその方法の見通しが示されていることが求められている。
- 地下水の水位等の監視設備に係る規定＜モニタリング設備に係る要求＞では、地下水の状態に加えて、廃棄物埋設地の埋め戻し終了後における人工バリアや天然バリアが設計を逸脱することなく性能を発揮しつつあることを事業者が確認し、定期的な評価等に必要なデータを取得するため、廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地及びその周辺の地質環境に係る物理的・化学的特性、人工バリアの性能や人工バリア及び天然バ

リアの機能に関係する地下水の状態等の確認のためのデータを取得（以下「地下水等モニタリング」という。）を行うための設備を設置することを要求するとしている。

- 放射線モニタリング及び地下水等モニタリング設備の設計にあたっては、廃棄物の埋設段階、坑道の埋戻し段階及び保全段階における廃棄物埋設地周辺の環境や測定期間に適応して実用上必要な精度で監視・測定ができる性能を有する設備を用いることを要求するとしている。この際、モニタリング設備の設置により、漏出抑制機能を担保する人工バリアの劣化や酸化還元雰囲気の擾乱など、放射性核種の移行の促進をもたらすことがないよう、最適な設計を講じることを要求するとしている。このため、地下水等モニタリングの対象のうち人工バリアの性能については、実際の環境と同等の条件を模擬した環境下での原位置試験又はそれを補完する室内試験等の間接的な方法により確認することが可能であれば、そのような設備の設置によって代替いても良いとしている。
- （閉鎖措置以降の地下水等モニタリングの具体的な方法について）この段階での地下水等モニタリングについては、閉鎖措置計画において、事業者がその時点での最新技術も踏まえて詳細な方法を示し、その妥当性について原子力規制委員会が閉鎖措置計画の認可審査で判断するのが適切としている。

4）原子力規制委員会：「第二種廃棄物埋設の事業許可基準規則における廃棄物埋設地における廃棄物埋設地に対する要求及び基準について(1)中深度処分」、平成 29 年度第 28 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合、資料 28-1、平成 30 年 3 月 20 日.

：中深度処分を含む第二種廃棄物埋設の事業許可基準規則における廃棄物埋設地に対する要求及び基準について、基本的な考え方の骨子がまとめられている。その後、原子力規制委員会では、これらをもとに、事業許可基準規則策定に向けての公衆からも意見募集を行い[4]、それらの意見に対して原子力規制委員会からの回答がなされるとともに、それに伴う関連基準規則の条文案の改訂案も示された[5]。

5）原子力規制委員会：「中深度処分における廃棄物埋設地の廃止措置後の保全に関する措置を必要としないための設計プロセス及び公衆の被ばく線量評価に係る審査ガイドの骨子案」、平成 29 年度第 28 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合、資料 28-2、平成 30 年 3 月 20 日.

：本審査ガイドの案においては、中深度処分に係る事業許可の審査において、近く策定される事業許可基準規則の規定の中で、廃止措置後の保全に関する措置を必要としないための設計プロセス及び公衆の被ばく線量評価の妥当性を審査するために活用することを目的とした審査ガイドと検討されている骨子案であり、各事業段階における地下水流動等に対する要求事項と、それに対する人工バリアと天然バリアを組み合わせた処分システムの選定から、設計、安全評価、更には管理等に関する考慮事項等が整理されている[6]。

上記の参考文献[5]及び[6]で整理されている中深度処分における規制の観点での要求事項に対応して、本報告では第 4 章においては中深度処分事業展開と規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価の実施項目及び技術的要件等の検討を行った結果を取りまとめているが、その前提となる規制要求事項の基本的な考え方については、主としてこれらを参考としている。

3.2.2 放射性廃棄物処分に係る地下水流動調査・評価技術に関する文献情報の調査・整理

低レベル及び高レベルの放射性廃棄物施設、並びに TRU 廃棄物の処分に関するサイト特性調査、設計・安全評価、建設・操業段階における地下水流動の調査・評価に資するための地下水流動の調査・評価技術に関して、下記の観点から、国内を中心とする既往の文献情報を調査し、それらの中より、主要なものとして本年度は下記の観点より抽出、分析と課題の抽出を行うこととする。

(1) 土木学会　エネルギー委員会：「余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオを用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方」、土木学会エネルギー委員会・低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会報告書、平成 20 年 6 月.

：低レベル放射性廃棄物余裕深度処分（現在の中深度処分）の安全評価における地下水シナリオで用いる核種移行評価パラメータに関して、主として土木工学的な観点を中心に、関連する技術的知見を整理し、核種移行評価パラメータの設定の考え方について 2 つのワーキンググループ(WG)を設置して下記のような検討結果を取りまとめている[7]。

1) （天然バリア・空洞 WG）　天然バリアに係る核種移行評価パラメータの設定手順を提示し、施設予定地周辺の調査から地下水シナリオに影響を及ぼす長期変動事象及び人工バリアとの境界になるニアフィールドの影響も考慮した地下水流動解析までの体系化を図り、天然バリアに係る核種移行評価パラメータの設定の考え方について検討している。

2) （人工バリア WG）　既公表の余裕深度処分施設の人工バリア構成の概念案を参考として仮想的な人工バリア構成を設定し、人工バリアの設計の考え方、施工方法について検討している。更に、建設・操業段階と埋戻し後における人工バリアの状態に影響を及ぼす可能性のある要因を土木工学的な観点から抽出し、それぞれについて既往技術の知見に照らして適用可能な評価手法と関連する情報を整理・検討し、人工バリアに係る核種移行評価パラメータの設定の考え方について検討している。

(2) 原子力環境整備促進・資金管理センター：「地下水流動を説明するための調査システム

フローの評価－RWMC と NDA の共同研究報告書―」、2010 年 2 月.

: RWMC と NIREX（NDA）との共同研究として実施された、放射性廃棄物建設候補地選定に関する地質環境の特性調査に必要な種々の調査の相互的関連性を視覚的に表示したシステム（「調査システムフロー」“SIFD”と表記）に関する協同研究を実施し、英国の中レベル放射性廃棄物の処分候補地サイトで実施された調査の情報に基づいて、当該地区の地下水流動を理解するために必要な地質地下水調査を表すフローダイヤグラムをそれぞれ作成し、相互評価を行ってその有効性を確認し合った結果がとりまとめられている[8]。

(3) 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構:「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－」、2005 年 9 月.

: TRU 廃棄物処分事業並びに制度化等の検討に資するため、最新の廃棄体情報とその見通しを踏まえて、幅広い我が国の地質環境を対象とした TRU 廃棄物地層処分概念の詳細化・合理化及び安全性の信頼性向上を図るとともに、TRU 廃棄物を対象とした浅地中処分及び余裕深度処分の安全性の見通しを示すことを目的に、それまでの最新の関連研究開発成果を集約して取りまとめている。地下水流動評価に関連しては、ニアフィールドの水理条件が地下水を移行媒体とした核種移行はもとより、地下水化学環境、人工バリア変質等に対して重要な環境条件の一つとしている。処分施設内における地下水の流速や処分施設周辺の掘削影響領域における地下水流量の評価、あるいは再冠水期間の核種移行に及ぼす影響の評価などについて検討結果と課題が取りまとめられている。更には、地下水シナリオに係る評価・解析においては、シナリオや用いるモデル・パラメータについて、決定論的な解析評価の検討を行うともとに、不確実性を考慮した検討も行われている[9]。

(4) 原子力発電環境整備機構 :「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築－、レビュー版　概要編」、NUMO-TR-18-02、2018 年 11 月.

: 国が 2017 年 7 月に、日本全国を四種類の地域に分けた科学特性マップを公表したのを受けて、そこでの審議、並びに工学的対策や安全評価などにかかわる JNC（現 JAEA）による第 2 次 HLW 技術報告書以降の技術開発成果も踏まえた技術基盤を統合して、地層処分の実施主体として、我が国の地質環境に対して安全な地層処分を実現するための方法を説明し、技術的な取り組みの最新状況を示すことを目的とした包括的な技術報告書を取りまとめたものである。概要編、本編及び付属書からなるが、ここでは概要編を参考として特に地下水流動評価に関連する部分について焦点を当て、主として第 3 章“地層処分に適した地質環境の選定及びモデル化”あるいは第 4 章“処分場の設計と工学技術”の中での検討において関連する基本技術として種々の観点から述べられているので、それらを以下のように抽出した[10]。

1)　第 3 章では地質環境モデルの構築の基本的な進め方として、それまでに蓄積された我

が国の地質環境に係る最新の科学的知見に基づき、地質環境情報の分野間での整合的な解釈・統合を通じて、処分場の設計及び安全評価に係る取り組みの基盤となる地質環境モデルを構築する方法論等を示している。具体的には、地下深部の地質環境の特徴を考慮し、岩体や地層の規模、地下深部において認められる断層・割れ目の卓越方位、長さ、分布密度に加え、岩盤中の基質及び断層・割れ目の透水係数などをパラメータとして、階層的な空間スケール及び調査段階ごとに取得する地質環境情報の質・量が異なることを踏まえ、広域スケールでは主として全国規模で収集した地質環境情報を用い、処分場の設計及び安全評価に係る検討の場となる処分場スケールから、パネルスケールでは地下深部の地質環境特性に係るデータが整合的かつ体系的に取得されている個別の地域の地質環境情報を可能な限り活用し、詳細度を変えて地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築した。その際、より詳細な検討を行う領域の空間スケールを設定するために、全国を対象として実施された地下水流動解析の結果などを参考に、保守的な動水勾配(0.05)になるように水頭境界を設定したうえで地下水流動解析等を実施している。なお、地質環境モデルは、隆起・侵食や気候・海水準変動などに伴う地形や地質構造、表層から地下深部までの地質環境特性などの時間的・空間的な変遷についても表現する必要があるが、これらはサイトの条件に強く依存するため、対象となるサイトが特定されていない現段階でこれらを考慮することは困難であることから、この報告書では地層処分の観点から好ましい地質環境特性が長期的に維持されるという前提での地質環境モデルを構築し検討している。
更に、地質構造及び水理地質構造のモデル化に際しては、深成岩類と新第三紀堆積岩類の岩種によって異なる割れ目特性について、また広域スケール、処分場スケール、パネルスケールの各空間スケールの大きさに応じて、断層特性等について決定論的あるいは確率論的な取り扱い方の組合せを考慮してのモデル化を行い、透水係数パラメータ等の設定を行う考え方とそれに基づく検討例を取りまとめている。

2) 第 4 章においては、処分場の設計フローの中で、地質環境モデルにおいて提示される地質環境特性に関する情報・データに関わる不確実性を考慮して、安全性に裕度をもたせることが原則であり、また安全裕度は実現性を確保できるよう合理的に設定されることが必要であり、設計の過程で低減すべき不確実性は地質環境調査・評価の作業にフィードバックする必要があるとしている（図 3.2-1 参照)。これらの一連の検討に基づき設計された処分場に対し、処分場の閉鎖前及び閉鎖後長期の安全評価を実施し、所要の安全性の確保が困難と判断されれば、地質環境の調査・評価において追加的に情報を取得することや処分場の設計の見直しなどにフィードバックする考え方が示されている。

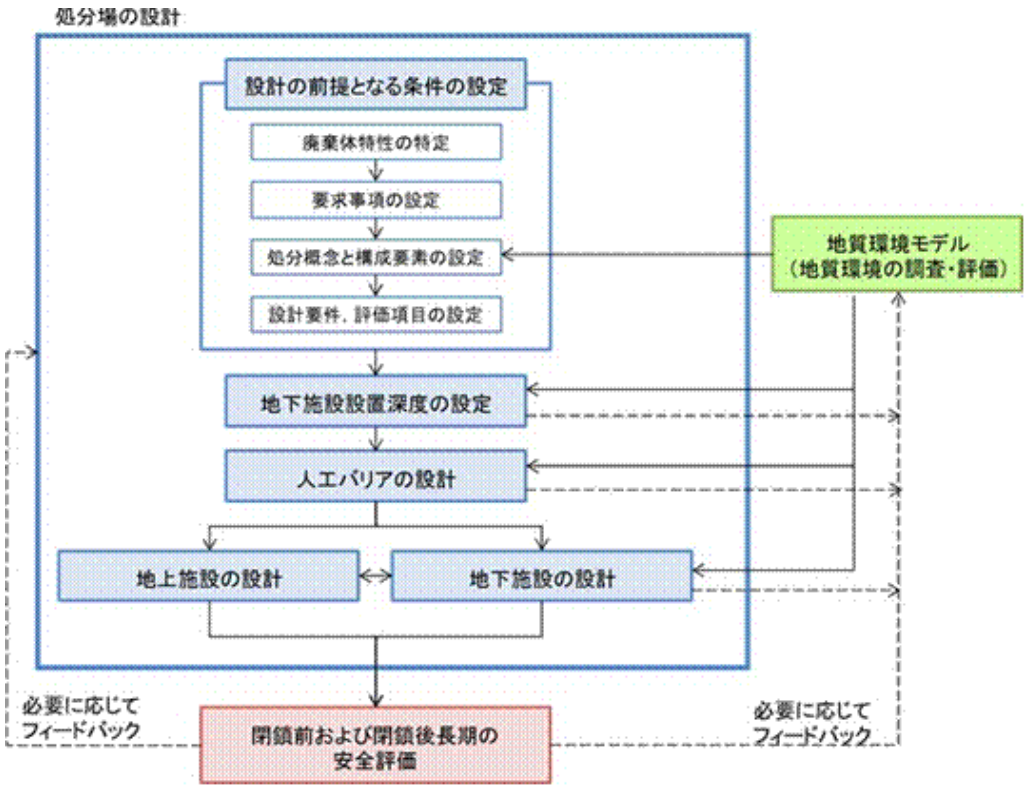


図 3.2-1　処分場の設計フロー

なお、閉鎖後長期の安全確保のための各構成要素に期待する安全機能に関しては、下記のように整理・記述がなされている。本報告では、特に地下水流動の調査・評価が重要となるものを下線で示しておく。

＜閉鎖後長期の安全確保のために各構成要素に期待する安全機能＞

閉鎖後長期の処分場に求められる安全機能に関しては、次のように処分場の構成要素に関連付けて具体化し、多重バリアシステムとして所要の性能が満たされるように設計するとしている。

a. 高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア

(a) 高レベル放射性廃棄物については、ガラス固化体をオーバーパックに封入することで、ガラス固化体に地下水が接触することを防止し、地下水への放射性物質の溶出を抑制する。

(b) オーバーパックの機能が喪失しても、ガラス固化体の水に溶けにくいという特性により、放射性物質の地下水への溶出を抑制する。

(c) 緩衝材は地下水と接触することによって膨潤し、オーバーパックへの力学的な擾乱に対する緩衝機能をもつ。また、地下水の流れを抑制するとともに、地下水中に溶出した放射性物質を収着することでその移行を遅延させ、その間に放射性物質の放射能が減衰す

ることによって大半の放射性物質を人工バリア内にとどめ、周辺の母岩への移行を抑える。更にコロイドによる放射性物質の移行を妨げる。

b. TRU 等廃棄物処分場の人工バリア

(a) TRU 等廃棄物の廃棄体は、ドラム缶などにセメント系材料とともに固形化、あるいは金属性容器に封入されており、処分場閉鎖後もある程度、放射性物質が地下水へ溶出するのを抑制するとともに、廃棄体中で地下水に溶出した放射性物質は充填されているセメント系材料に収着することを期待することは可能と考えられるが、廃棄体の製造においては、こうした閉鎖後の機能が明示的に考慮されているものではない。

(b) 廃棄体パッケージは、複数の廃棄体を廃棄体パッケージ内充填材とともに、金属製の廃棄体パッケージ容器に地下への搬送・埋設のための形態として一体化したものである。したがって廃棄体パッケージには、操業期間中の放射性物質の漏えいの防止を安全機能として期待するとともに、処分場閉鎖後についても、廃棄体パッケージ容器や廃棄体パッケージ内充填材により地下水の浸入を抑制するとともに、廃棄体パッケージ内で地下水に溶出した放射性物質が廃棄体パッケージ内充填材に収着することによって、放射性物質の溶出を抑制する機能を期待する。

(c) 廃棄体パッケージ内に地下水が浸透し、放射性物質が地下水に溶出しても、放射性物質は、廃棄体に充填されているセメント系材料や廃棄体パッケージ内及び廃棄体パッケージ間充填材に収着するなどして移行が遅延される。

(d) 廃棄体パッケージを定置するために設ける構造躯体の外側に緩衝材を設置する場合には、地下水に溶出した放射性物質は緩衝材中で収着され、周辺の母岩への移行は抑制される。

c. 埋め戻し材・止水プラグ

処分場の操業のために建設した坑道は、閉鎖後に放射性物質の移行経路とならないように低透水性の材料で埋め戻すとともに、閉鎖を確実にするため止水プラグを設置する。

d. 地質環境

地下深部の処分場と人間の生活圏の間には広大な地質媒体が存在しており、処分場に埋設された放射性物質は人間の生活環境から物理的に隔離される。放射性物質の一部が人工バリア周辺の岩盤中に移行したとしても、処分場が設置されるような地下深部では地下水の流れが極めて遅く、化学環境が還元性であることから、放射性物質の地下水への溶解は低く制限される。また、溶出した放射性物質は岩盤に収着されて生活圏に到達するまでに長い時間を要し、その間に放射能は減衰する。

以上述べた高レベル放射性廃棄物及び TRU 等廃棄物の処分場に求められる閉鎖後長期の安全機能と構成要素の関係が表 3.2-1 及び表 3.2-2 に示されているが、表中において、地下水流動の調査・評価が各構成要素の安全機能の確認等に重要となる項目を下線により区別し

ておく。

表 3.2-1　高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能		構成要素
隔離	自然現象の著しい影響からの防護		地質環境
	人の接近の抑制		
閉じ込め	放射性物質の溶出の抑制	ガラスマトリクスによる溶出の抑制	ガラス固化体
		廃棄体と地下水の接触の防止	オーバーパック
	放射性物質の移行の抑制	放射性物質の溶解の抑制	地質環境
		遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制	地質環境
		放射性物質の移流による移行の抑制	緩衝材
		コロイド移行の抑制	緩衝材
		放射性物質の収着	緩衝材
			地質環境
		放射性物質の分散	地質環境
		坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制	止水プラグ、埋め戻し材

【注】下線：地下水流動の調査・評価が重要となる項目であることを示す。

表 3.2-2　TRU 等廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能		廃棄体グループ					構成要素
			1	2	3	4L	4H	
隔離	自然現象の著しい影響からの防護		✓	✓	✓	✓	✓	地質環境
	人間の接近の抑制		✓	✓	✓	✓	✓	
閉じ込め	放射性物質の溶出の抑制		✓	✓※3	✓	✓	✓※3	廃棄体※1 廃棄体パッケージ※2
	放射性物質の移行の抑制	放射性物質の溶解の抑制	✓	✓	✓	✓	✓	地質環境
		遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制	✓	✓	✓	✓	✓	地質環境
		放射性物質の移流による移行の抑制	✓	✓			✓	緩衝材
		コロイド移行の抑制	✓	✓			✓	
		放射性物質の収着	✓	✓			✓	
			✓	✓※3	✓	✓	✓※3	廃棄体パッケージ間充填材
			✓	✓	✓	✓	✓	地質環境
		放射性物質の分散	✓	✓	✓	✓	✓	
	坑道及びその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制		✓	✓	✓	✓	✓	止水プラグ埋め戻し材

【注】✓：各廃棄体グループで安全機能を確保する構成要素、

下線：地下水流動の調査・評価が重要となる項目であることを示す。

3.2.3　不均質性を考慮した地質環境モデル及び水理地質構造モデルのモデル化手法に関する文献調査

(1) 骨子

割れ目等に起因する水理特性の不均質性を考慮した地質環境及び水理地質構造のモデル化手法の構築により、地下水の調査・解析評価における不均質性や不確実性を考慮してより精度の良い地下水流動の調査・解析・評価手法の確立を目指した検討・報告の事例を以下に掲げる。

(2) 調査結果

1) 三枝・尾上・石橋・田中・鐙・橋本・P.Bruines：「割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法開発に関わる検討」、JAEA－Research 2015-011、2015 年 10 月.

：岩盤中の割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法を構築することを目的に、割れ目ネットワークモデルを適用した数十m四方程度の領域における三次元地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築するとともに、それに基づき水理特性の空間的不均質性を考慮した連続体モデルを用いた数 km 四方程度の領域における水理地質構造モデルを構築した。この研究の実施に際しては、瑞浪超深地層研究所計画のうち、適用できる手法や特徴の異なる地上からの調査研究段階と、坑道の掘削を伴う調査研究段階の 2 種類のデータを用いて、それぞれの調査研究段階で取得されたデータを用いた検討が行われた。それらの検討を通じて、調査データの種類や量に応じた割れ目ネットワークモデルを適用した地質構造モデルや水理地質構造モデルを構築するための方法論や、水理特性の空間的不均質性を考慮した連続体モデルによる水理地質構造モデルを構築するための方法論が提示された[11]。

2) 竹内竜史：「地下水長期モニタリングによる地下水流動特性の評価に関する研究」、岡山大学大学院環境生命科学研究科　博士論文、2016 年 3 月.

：高レベル放射性廃棄物の地層処分事業等の大深度空間を利用したプロジェクトで取得されるモニタリングデータを用いた地下水流動特性の評価技術の構築を目的として、対のような課題について研究成果が取りまとめられている。

- （地下深部での空洞掘削や構造物の建設に伴いボーリング孔で観測される地下水圧の変化を利用した水理地質構造の評価）地下施設の建設中に観測された地下水圧の応答異常に着目した分析や、不規則な地下水圧の変動を大規模な揚水試験とみなした観測データの整理を行い、施設建設中の水圧モニタリング結果が、地下深部の水理地質構造が推定する上で有効なデータになり得ること等が示された[12]。
- （地下施設建設に伴う地表の微小な傾斜変化を利用した水理地質構造の評価）既往の手法の課題を解決するための解析手法の改良を行うとともに、改良した手法の原位置試験への適用性を確認し、本手法がボーリング孔間の空間情報を補完する効果的な手法であることを示した。
- （天然現象の一つである地震に伴う地下水圧の変化が地下水流動特性の長期安定性に与える影響の評価）観測された事例を基に、地震直後の地下水圧変化の要因の推定及びその後の地下水圧変化が地下水流動特性の長期安定性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、地震直後の地下水圧変化は岩盤の体積歪の変化と整合的であることを確認した。また、地下水流動特性の長期安定性に与える影響の評価に対しては、地下水圧の変化を地下水流動方向に沿った動水勾配の変化として整理し、解釈することが有効である

ことを示した。

更に、上記の研究の知見を踏まえ、地層処分事業におけるモニタリングの考え方及びモニタリング手法について検討を行い、調査段階に応じた地下水モニタリングの考え方が整理されている。

3）三枝博光：「NUMO セーフティーケースにおける地質環境モデルの構築」、土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料、2018 年 10 月.

：我が国における多様な地質環境に適用可能な、地層処分に適した地質環境の選定に係る基本的な考え方や実践的な方法論、調査・評価の技術基盤の整備について、第 2 次取りまとめ以降の着実な進展が提示され、段階的に取得される地質環境情報を地質環境モデルとして整合的に解釈・統合する技術を保有し、これを展開することが可能であり、提示された地質環境モデルは文献調査の段階以降の基本形となる考えを示すとともに、国の審議会等から提示された技術的課題を 3 つの分類のもとに整理して、概要調査の的確な実施に向けて高度化を進めて行くとしている。この中で地下水流動の調査・評価に関しては、分類 2（地質環境特性とその長期変遷に係る今後の取り組み）において、次の実施項目が挙げられている[13]。

- 水みちの水理・物質移行特性の評価技術の整備
- 沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備
- 地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化ボーリング孔における体系的な調査・モニタリング・閉塞技術の整備

更に分類 3（サイト調査のための技術基盤の強化に係る今後の取り組み）の中では

- 地質環境調査・評価技術に係る技術的知見の拡充
- 品質マネジメントシステムの拡充

などが挙げられている。

4）尾上博則：「瑞浪超深地層研究所における亀裂性岩盤の研究事例(1) 亀裂ネットワークモデルの構築」、土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料、2018 年 10 月.

：結晶質岩を対象とした深地層の科学的研究（超深地層研究所計画）の一環として、坑道スケールにおける地下水流動及び物質移行特性を評価する上で重要となる亀裂特性の空間分布の推定手法やモデル化手法の構築に関する検討が行われた。この中で、亀裂の地質学的特徴に基づき透水性亀裂の区分と分類を行うとともに、ボーリング孔内において透水性亀裂からの湧水状況をデジタルカメラ(Web)での確認を行い、透水性亀裂の特徴に基づく特性評価の概念を構築し、更にそれに基づく水理学的パラメータの推定、DFN モデルの構築事例や離散割れ目ネットワークモデル化手法として HydroDFN モデルの適用・妥当性確認を行っている[14]。

5）尾崎裕介：「瑞浪超深地層研究所における亀裂性岩盤の研究事例　(2)H-M-C 連成挙動の推定」、土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料、2018 年 10 月.

：坑道掘削から坑道閉塞に至る、水理・力学・化学挙動の把握を目的として、再冠水試験が実施され、試験坑道周辺の岩盤内でデータの取得が行われ、そのデータを用いて、Decovalex 2019 プロジェクトでは各国機関が異なるアプローチで再冠水試験の再現解析を実施した。また、そこにおいて適用された DFN モデルモデリングアプローチ等による適用結果例が紹介された[15]。

3.2.4　中深度処分に係る地下水流動の調査・評価の方法論と技術に関する文献調査

上述したような文献調査結果をもとに、以下においては、特に中深度処分の事業展開と規制要求を想定し、地下水流動の調査・評価の観点より、それらに対応するために必要な実施項目及びその技術的要件について分析・整理した結果を述べる。

(1)　事業展開の段階ごとの調査・評価スケールと地質環境モデルの構築－高レベル廃棄物処分の段階的なサイト選定調査に係る検討事例－

1）高レベル放射性廃棄物地層処分の段階的なサイト選定調査の各調査段階での調査範囲の考え方

我が国における高レベル放射性廃棄物処分のサイト選定は、これから文献調査に入ろうとしている段階であり、その後に概要調査→精密調査→施設建設地選定へと進められることとなっており、包括的技術報告書などにおいて図 3.2-2 に示すような考え方が示されている[13]。

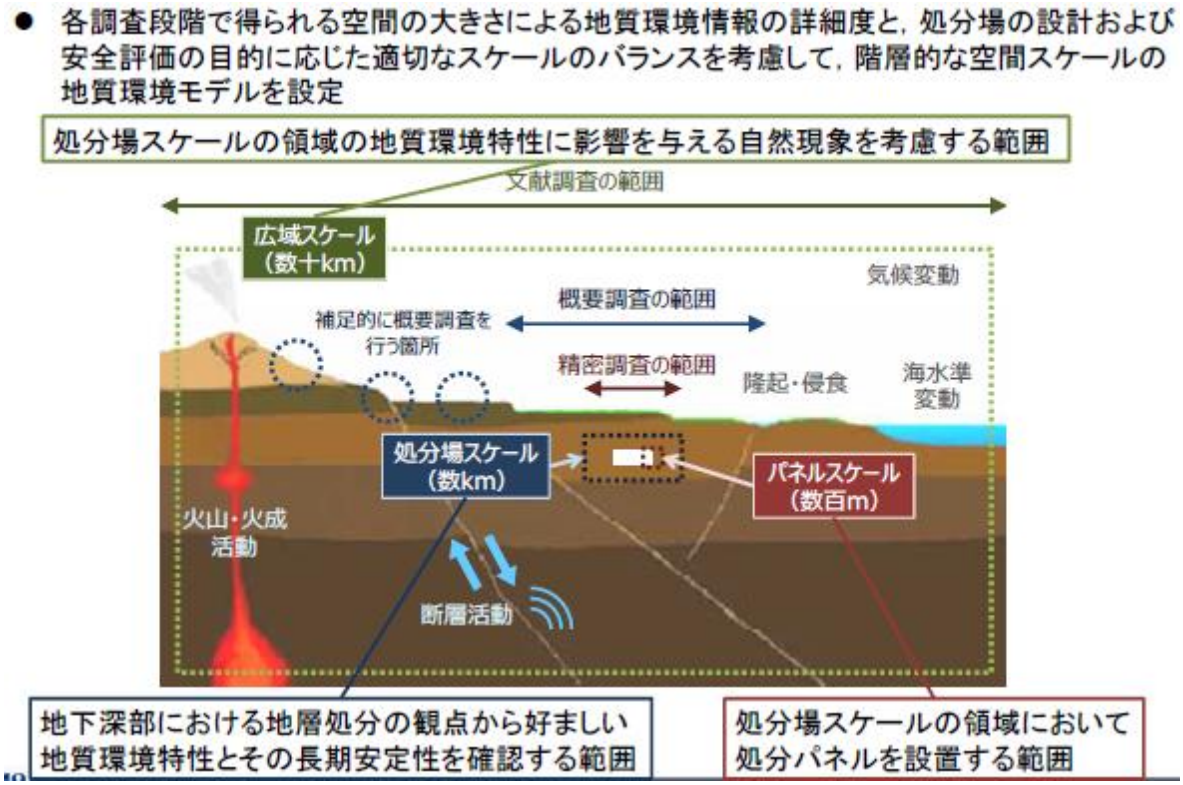
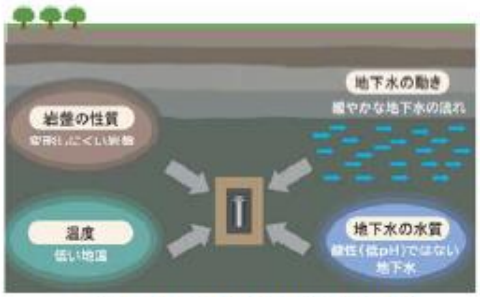


図 3.2-2　調査スケールと空間スケールの関係（三枝、NUMO）

2）地質環境モデル及び水理地質モデル設定の基本的な考え方

また、地下水流動の調査・評価において重要となる地質環境モデル及び水理地質構造モデルの設定の基本的な考え方は、図 3.2-3 のように示されている[13]。

- 地質環境は，地層処分の観点から見た地下の環境であり，岩盤とそこに含まれる地下水などから構成
- 地質環境特性は，地質・地質構造，岩盤の熱的・力学的な性質，地下水の地球化学的な性質，地下水の流動や物質の移行などの性質の総称
- 地質環境モデル（Site Descriptive Model）は，調査で得られた地質環境の情報・データに基づいて，サイトの地質構造や熱・力学・水理・化学的な特性の空間的な分布や時間的な変化を表現したもの



好ましい地下深部の地質環境

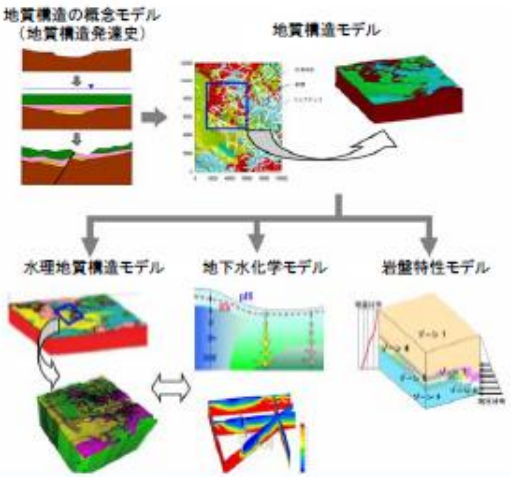


図 3.2-3　地質環境・地質環境特性・地質環境モデル（SDM）（三枝、NUMO）

地質環境モデルの構築においては、空間スケールに応じたモデル化手法に基づく、図 3.2-4 のような考え方が示されている[13]。

- 地下水流動場に影響を与える断層の分布はDFNモデル，断層・岩相の違いによる透水不均質性は連続体モデルを適用し，入れ子構造になるようにモデル化

	深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類
広域スケール	➢ 断層（>1km）分布：確率論的DFN ➢ 水理地質構造：連続体	➢ 断層（>1km）分布：確率論＋決定論的DFN ➢ 岩相分布：連続体 ➢ 水理地質構造：連続体	➢ 断層（>10km）分布：決定論的DFN ➢ 断層（1~10km）分布：確率論＋決定論的DFN ➢ 岩相分布：連続体 ➢ 水理地質構造：連続体
処分場スケール	➢ 断層（1~10km）分布：決定論的DFN ➢ 断層・割れ目（<1km）分布：確率論的DFN ➢ 水理地質構造：連続体	➢ 断層（1~10km）分布：決定論的DFN ➢ 岩相分布：連続体 ➢ 水理地質構造：連続体	➢ 断層（1~10km）分布：確率論＋決定論的DFN ➢ 岩相の分布：連続体 ➢ 水理地質構造：連続体
パネルスケール	➢ 断層・割れ目（<1km）分布：確率論的DFN ➢ 水理地質構造：確率論的DFN	➢ 断層・割れ目（<1km）分布：確率論的DFN ➢ 水理地質構造：連続体	➢ 断層・割れ目（<1km）分布：確率論的DFN ➢ 水理地質構造：確率論的DFN

図 3.2-4　地質環境モデルの構築（空間スケールに応じたモデル化手法）（三枝、NUMO）

更に、地質環境モデルの設定例として、深成岩類、新第三紀堆積岩類及び先新第三紀堆積岩類の三種類を対象として検討がなされているが、ここでは図 3.2-5 及び図 3.2-6 に示すように深成岩類と新第三紀堆積岩類の 2 ケースを事例として掲げておく。

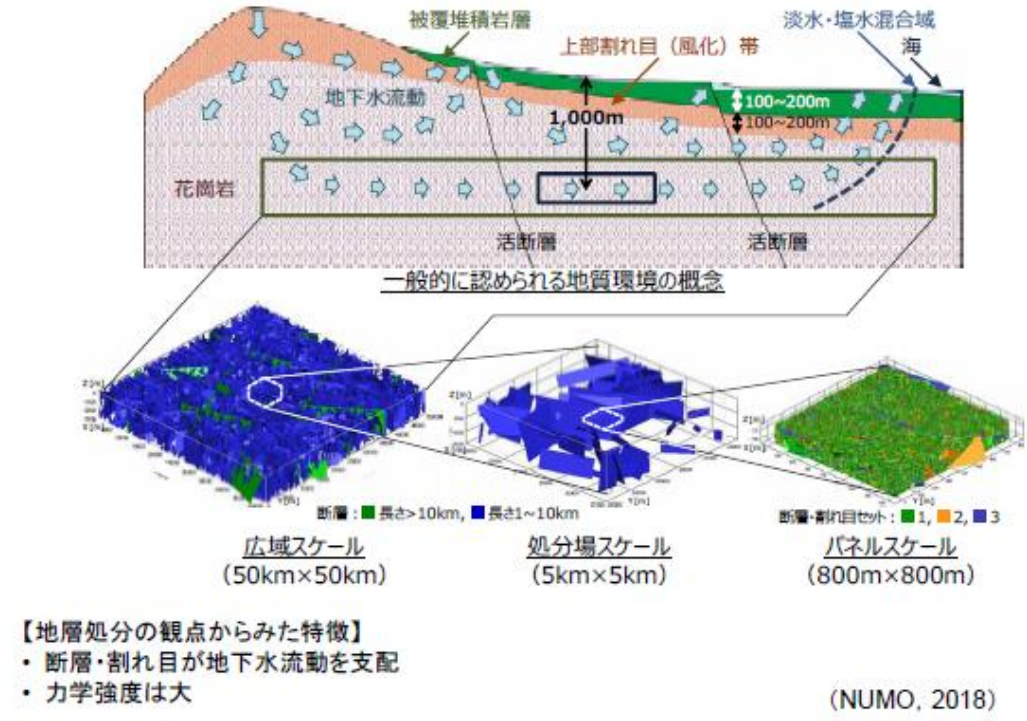


図 3.2-5　地質環境モデルの例（深成岩類）（三枝、NUMO）

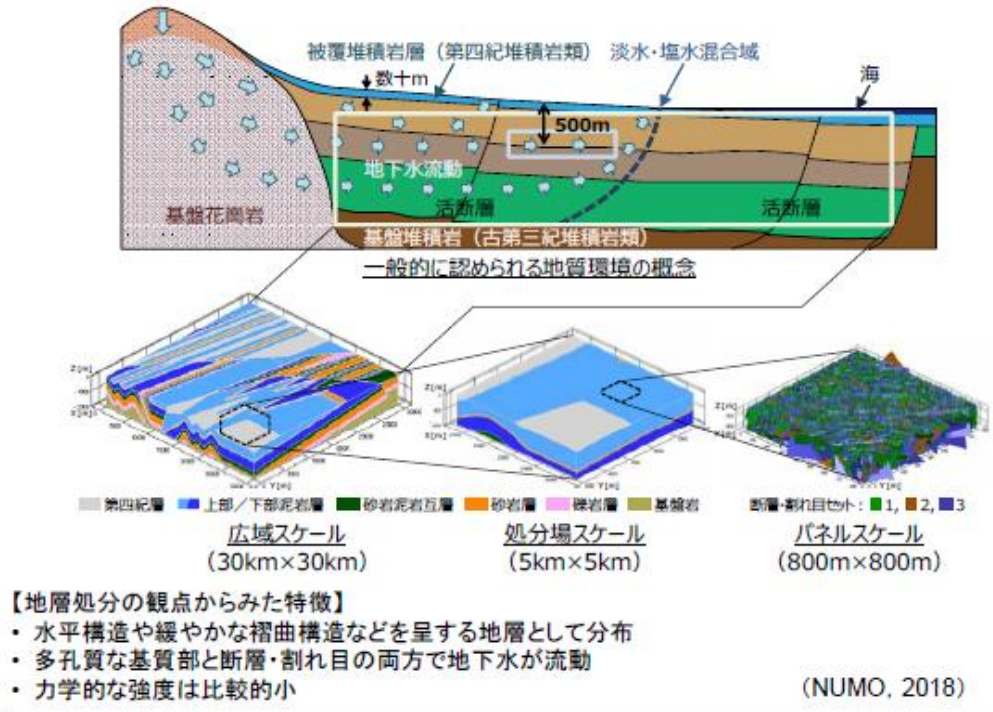


図 3.2-6　地質環境モデルの例（新第三紀堆積岩類）（三枝、NUMO）

上記の地質環境モデルに基づいて水理地質構造モデルを作成し、それらに基づいて地下水流動解析が行われることになるが、その解析適用事例として2つの例を図 3.2-7及び図 3.2-8に掲げる[13]。

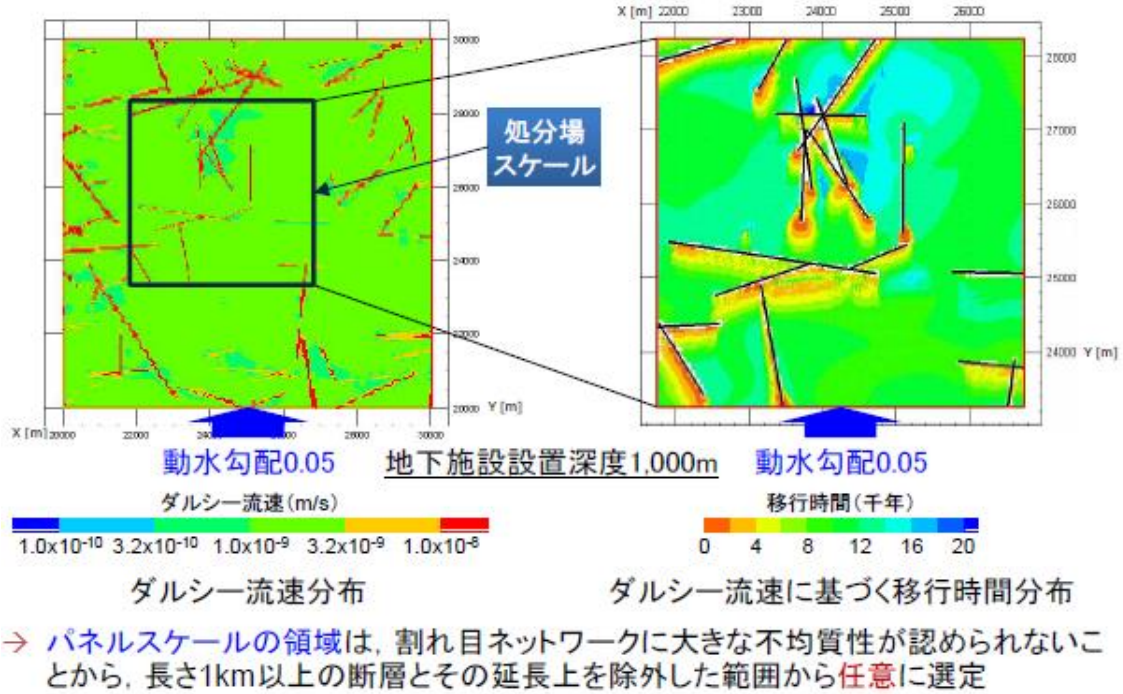


図 3.2-7　解析適用事例（深成岩類の処分場スケールにおける地下水流動解析）（三枝、NUMO）

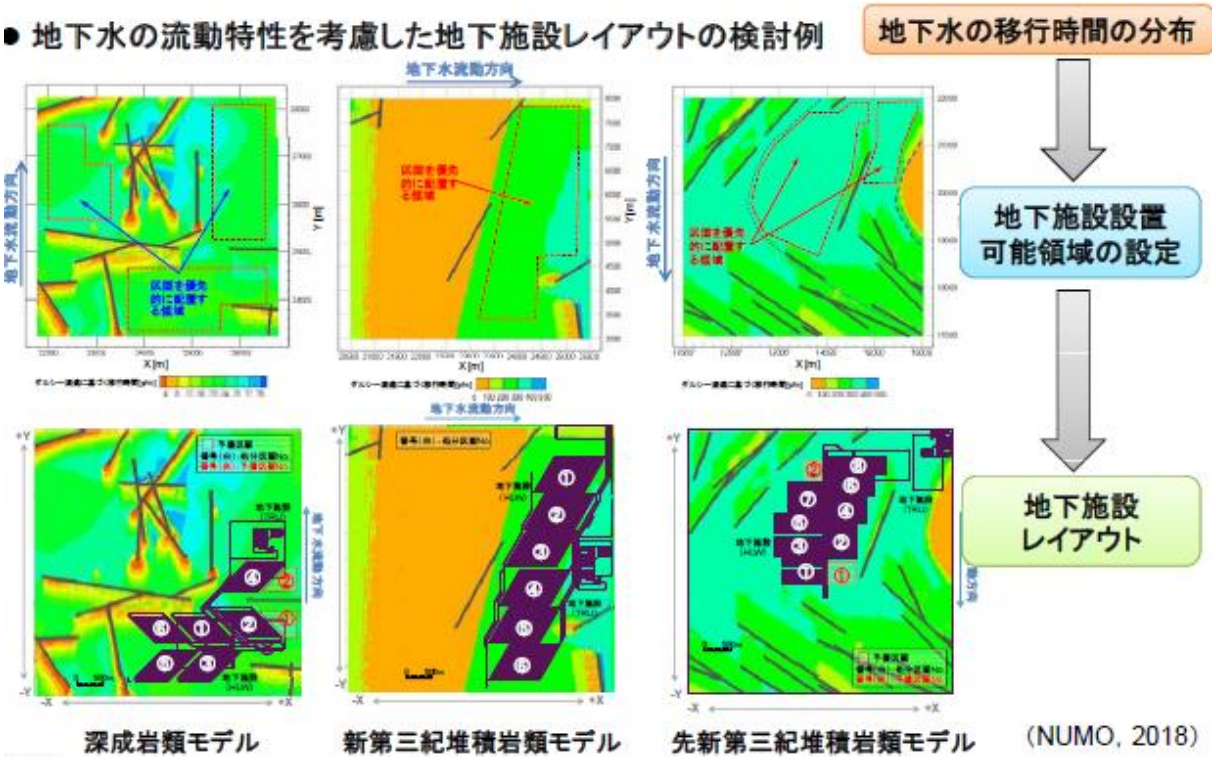


図 3.2-8　地質環境モデルの例（地質環境モデルの活用例）（三枝、NUMO）

(2) 水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造モデルの構築

日本原子力研究開発機構（JAEA）瑞浪超深地層研究所においては、結晶質岩に代表される割れ目系岩盤を対象とした高レベル放射性廃棄物の地層処分における地下水移行シナリオに基づく安全評価にあたっては、数十 m 四方から数 km 四方といった様々な空間スケールにおける地下水流動特性の評価が重要であるという考えのもと、数十 m 四方程度の領域における地下水流動特性を評価するうえでは、地下水流動の卓越経路となる割れ目やその水理特性の空間分布を推定する必要があり、また数 km 四方程度の領域においては割れ目に起因した巨視的な水理特性の不均質性を推定する必要がある。更には、これらの空間スケールのモデルは水理学的に整合している必要があるという認識のもと、岩盤中の割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法の構築を目的に、割れ目ネットワークモデルを適用した数十 m 四方程度の領域のブロックスケール及び数 km 四方程度の領域を対象としたサイトスケールの水理地質構造モデルの構築を行った。特に、適用できる手法や特徴の異なる地上からの調査研究段階と、坑道の掘削を伴う調査研究段階の 2 種類のデータを用いて、それぞれの調査研究段階で取得されたデータを用いた検討を実施し、それらを通じて、調査データの種類や量に応じた割れ目ネットワークモデルを適用した地質構造モデルや水理地質構造モデルを構築するための方法論や、水理特性の空間的不均質性を考慮した連続体モデルによる水理地質構造モデルを構築するための方法論を提示した。その検討の流れが図 3.2-9 に示されている[11]。

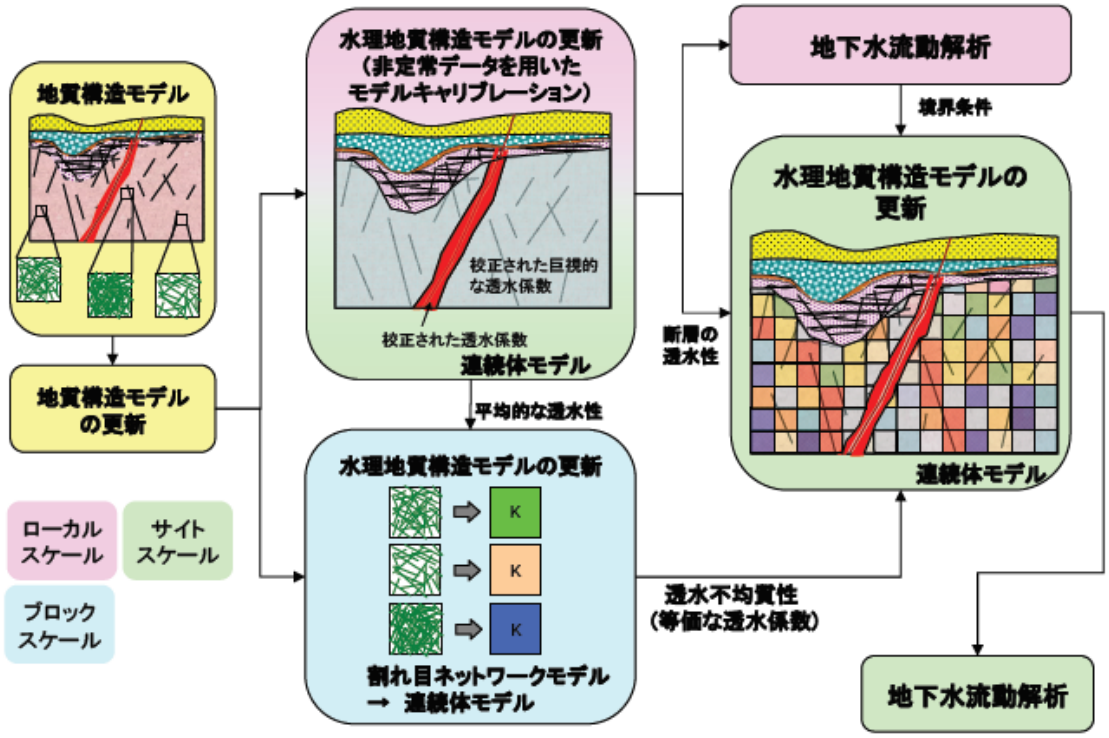


図 3.2-9　水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造モデル構築の流れ（三枝 他、JAEA）

また、更に水理地質構造モデルの構築も含めた検討フローが図 3.2-10 のように示されている[11]。

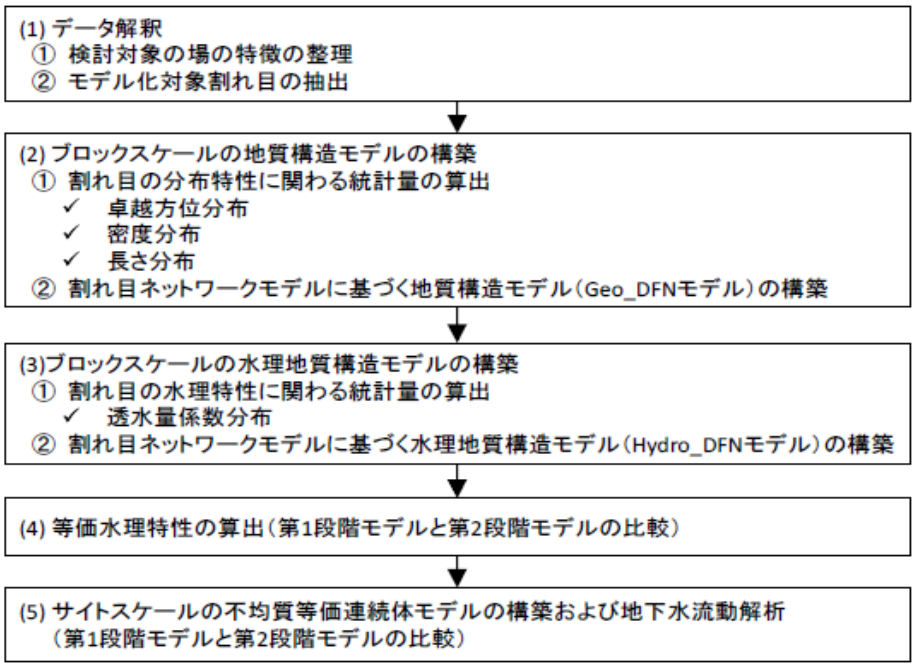


図 3.2-10　水理地質構造モデル構築及び地下水流動解析の流れ（三枝 他、JAEA）

更に、尾上や尾崎らの報告においては[14][15]、亀裂性岩盤では亀裂が物質の選択的な移動経路となるため、坑道スケール(数 m～数百 m 程度の領域)の地下水流動や物質移行をより詳細に評価するためには、個々の亀裂を陽に扱う亀裂ネットワークモデル(Discrete Fracture Network Model: DFN model)の適用ということが解析事例も交えて示されている。この中では、亀裂の地質学的特徴に基づき、透水性亀裂の概念をその周辺の母岩の変質の有無で 2 つに分類し、更に亀裂充填物の種類に基づいて 2 つに区分して分類する概念を提案するとともに、それらの考え方に基づく、調査・解析の事例とともに、割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデルを構築するための方法論をフロー図としてまとめている（図 3.2-11 参照）[11]。

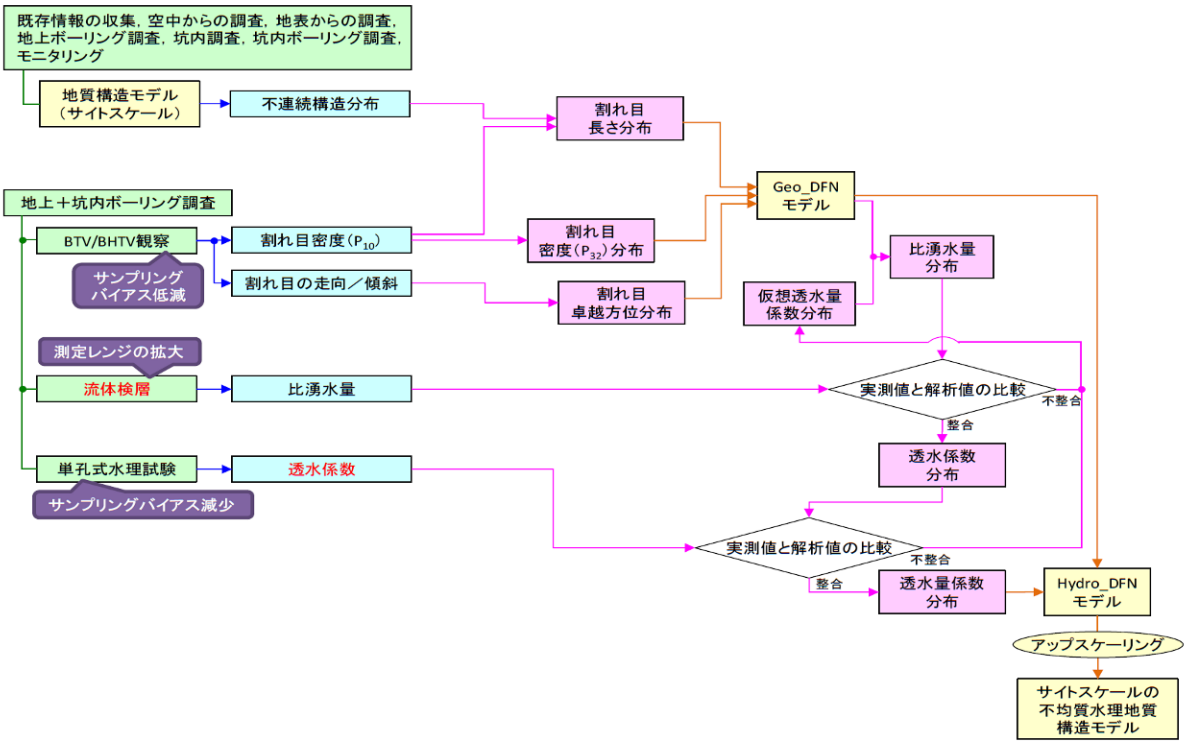


図 3.2-11　割れ目と水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル構築の方法論（三枝 他、JAEA）

(3) 中深度処分の安全評価等における地下水移行シナリオの評価に係る地下水流動の調査・評価の技術・方法論に関する検討事例の整理

土木学会においては、余裕深度処分（現在の、中深度処分）の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータに関する検討の中で地下水流動の調査・評価に関する検討を多方面から行い、取りまとめている。ここでは、その成果より、本検討における重要な参考となるものを以下に抽出・整理する。

先ず、地下水シナリオで用いる主な核種移行パラメータの被ばく線量評価への関連付けの

考え方は図 3.2-12 のように示され、またその中で天然バリアに係る核種移行評価パラメータ設定の基本的なフローの例が図 3.2-13 のように示されている[7]。

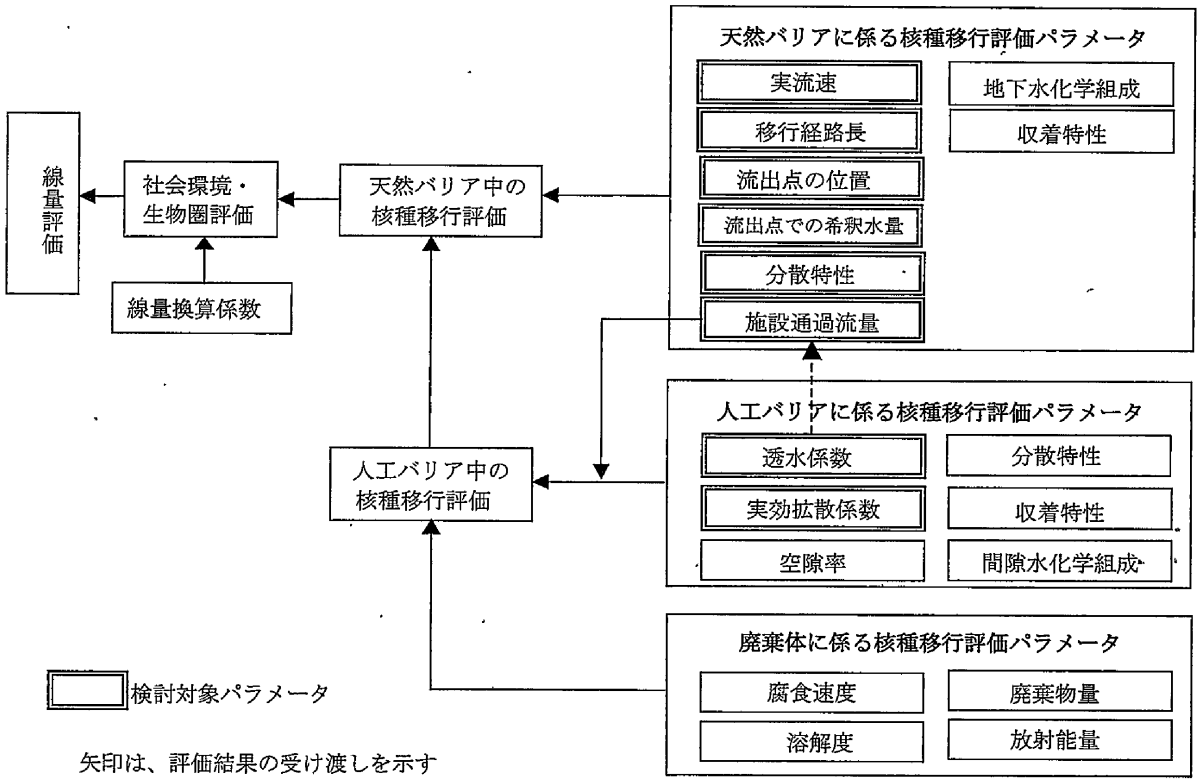


図 3.2-12　地下水シナリオで用いる主な核種移行評価パラメータ（土木学会）

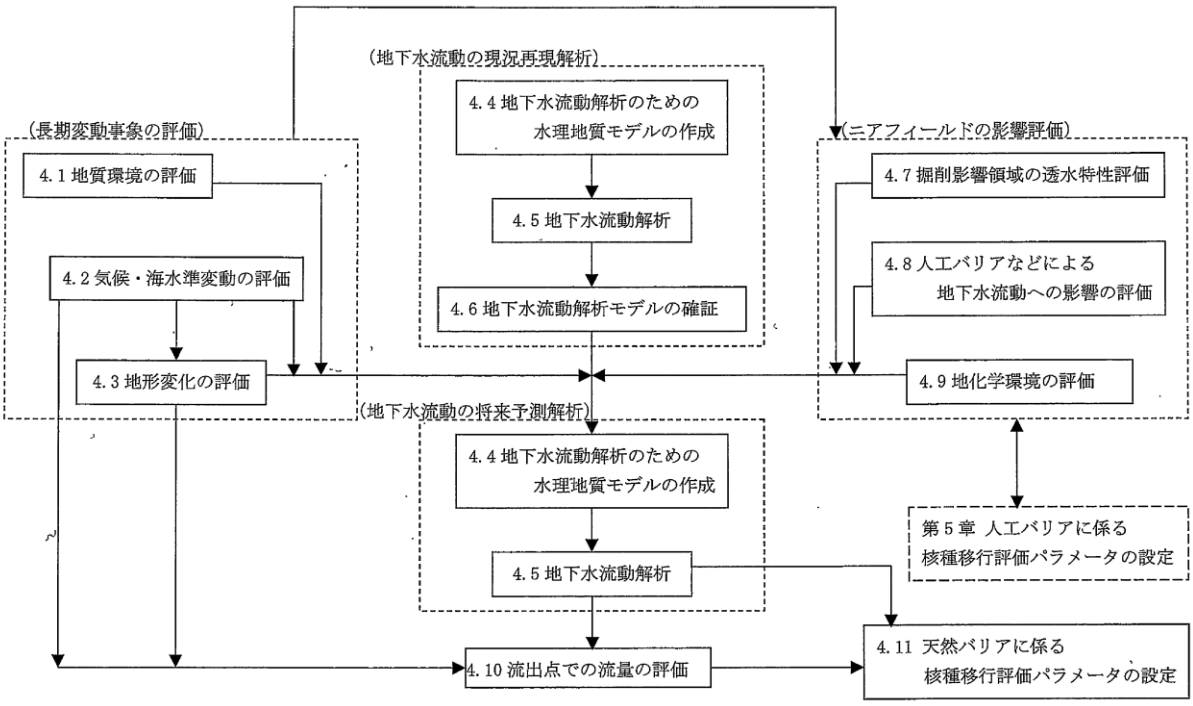


図 3.2-13　天然バリアに係る核種移行評価パラメータ設定のフロー（例）（土木学会）

この中で、地下水流動の調査・評価は主として天然バリアに係る評価に必要なパラメータであるとともに、人工バリアにおいても核種移行評価のための透水性、拡散・溶出や収着等の特性の評価に関連して重要なパラメータとなることが分かる。

一方、地下水流動の評価に関する主な調査の項目や手法・技術及び地下水流動の概念構築に有効と考えられる情報の検討例が表 3.2-3 のようにまとめられており、それらに基づいての調査から水理地質モデルの作成に至る検討手順の考え方の例も図 3.2-14 に示されている[7]。

表 3.2-3　主な調査項目・手法と地下水流動概念モデルの設定に有効な情報（例）（土木学会）

調査項目	調査手法	流動概念モデルの設定に有効な情報の種類				情報の利用方法など
		割れ目の幾何学特性	割れ目の水理特性	基質部の水理特性	割れ目と基質部の流量比	
地質調査	コア観察	○	△	○	△	割れ目頻度、地下水流動経路の検討
	BTV 観察	◎	○	△	－	割れ目頻度・方向・開口幅・開口率
	地質観察（掘削面、坑道壁面）	◎	○	○	○	割れ目頻度・方向・大きさ・開口幅・開口率、地下水流動経路の検討
透水試験	室内透水試験	－	－	◎	－	基質部の透水係数
	単孔式透水試験	－	◎	◎	○	割れ目の透水量係数、基質部の透水係数
	孔間透水試験	○	◎	◎	◎	割れ目の透水量係数、基質部の透水係数、割れ目の連続性
その他水理試験関係	流向流速測定	－	△	△	○	割れ目・基質部の自然状態におけるダルシー流速
	トレーサ希釈試験	－	△	△	○	割れ目・基質部の自然状態におけるダルシー流速
	フローメータ検層	－	○	△	○	高透水割れ目の検知、割れ目・基質部の概略水理特性
	湧水量測定	－	○	○	◎	全体湧水量に占める割れ目からの湧水量割合
	間隙水圧測定	－	△	△	△	高透水割れ目や低透水層の有無
	地化学調査	－	△	△	△	地下水流動経路の検討
	割れ目トレーサ試験	◎	◎	△	△	割れ目の連続性
	室内トレーサ試験	－	－	◎	－	基質部の有効間隙率
	室内間隙率測定	－	－	◎	－	基質部の間隙率
その他	反射法地震探査	△	－	－	－	大規模構造の有無

◎：極めて有効な調査手法、○：有効な調査手法、△：参考になる調査手法あるいは場合によっては有効な調査手法

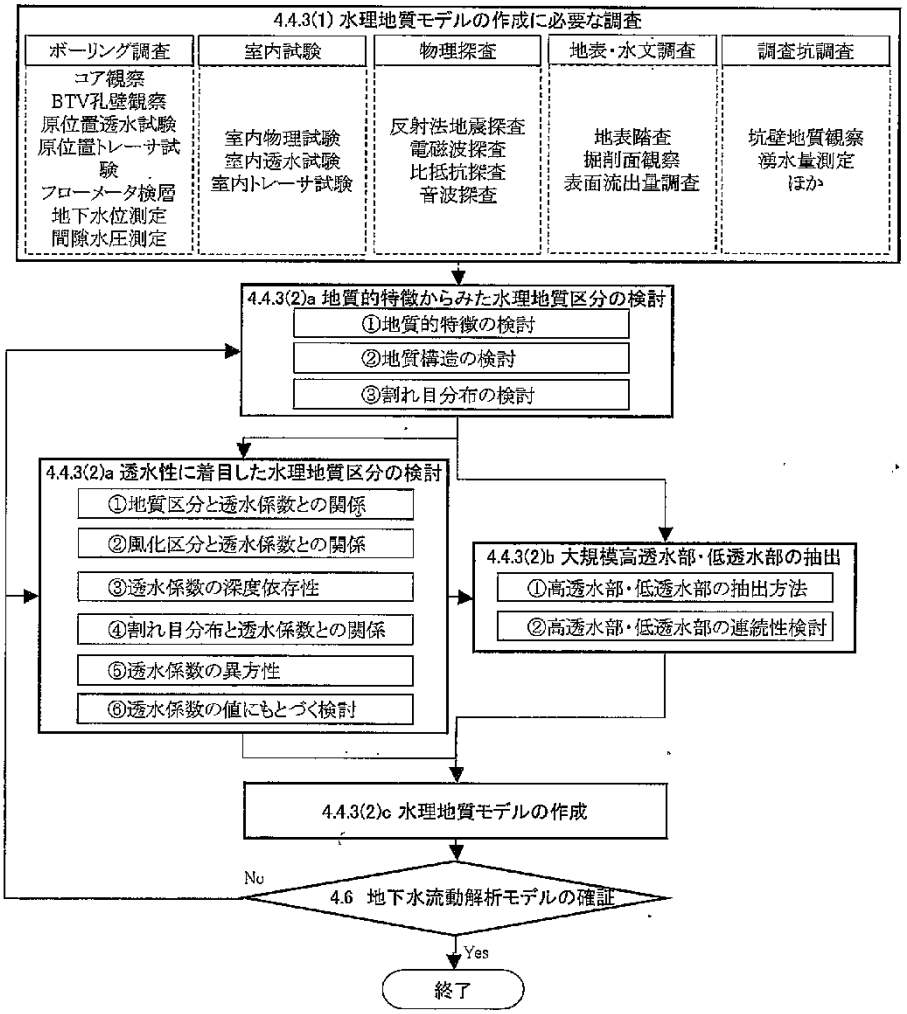


図 3.2-14　調査から水理地質モデルの作成までのフロー（例）（土木学会）

更に、水理地質モデルの作成に必要となる情報や調査手法に関しても表 3.2-4 に検討結果が、地質・地質構造、透水特性、間隙水圧分布、地化学環境の観点に分類されて取りまとめられている。特に、地下水流動に関連する主として地質的特徴に関わる調査項目については、表 3.2-5 のように取りまとめられている[7]。

表 3.2-4　水理地質モデルの作成に必要な情報及び調査手法（土木学会）

必要な情報	調査および試験		規格・基準	主な調査手法の目的
【地質・地質構造】 地質分布 断層分布 割れ目分布 風化分布 【透水特性】 透水係数 透水異方性 有効間隙率 【間隙水圧分布】 地下水位 表面流出量 間隙水圧 【地化学環境】 地下水水質分布	ボーリング調査	コア観察		・ボーリングは、対象領域の地質・地下水データ取得を目的としてデータの偏りがないようなグリッド配置を基本とする。 ・原位置透水試験は、各地層の透水性把握および高透水部抽出を目的とする。 ・トレーサ試験は、割れ目の連続性把握を目的として必要に応じて実施する。 ・流向流速測定およびフローメータ検層は、高透水部の把握を目的として、必要に応じて実施する。 ・水質分析は、地下水流動把握について物質移行の観点から知見を得ることを目的とする。 ・間隙水圧は、主に水理地質区分の妥当性確認、精度向上を目的とする。特に水圧変化点に着目して高透水部・ 低透水部の抽出を行う。
		BTV観察		
		注水式透水試験	JGS1322-2003	
		揚水式透水試験		
		孔間透水試験		
		トレーサ試験		
		流向流速測定		
		フローメータ検層		
		地下水水質分析	JISK0101-1998 ほか	
		地下水位測定	JGS1311-2003	
		間隙水圧測定		
	室内試験	室内物理試験	ISRM指針ほか	・室内トレーサ試験は、主に実流速とダルシー流速との比較から、地下水流動に関係する間隙率の把握を目的とする。
		室内透水試験	JISA1218-1998	
		室内トレーサ試験	JGS0311-2000	
	物理探査	反射法地震探査		・反射法地震探査は、高透水部・低透水部の分布に関連する断層などの構造把握を目的とし、ボーリング孔間の補完データとして用いる。 ・比抵抗探査は、地下深部の塩水分布を把握することを目的とする。 ・音波探査は、海域や湖沼などの地下地質構造を把握することを目的とする。
		比抵抗探査		
		音波探査		
	地表調査	地表踏査		・地表踏査および掘削面観察は、地質分布のほか、特に透水性に関係する割れ目のトレース長（の分布）を把握することを目的とする。
		掘削面観察		
	水文調査	表面流出量調査	水文観測業務規定	・気象観測データと合わせて河川流量、涵養量などの水文状況を把握することを目的とする。
	調査坑調査	坑壁地質観察		・坑道調査は、対象となる深度の地質を直接、面的に確認できることから、割れ目トレース長（の分布）の取得、透水試験、水質分析などの妥当性確認に有効である。 ・湧水量測定は、水理地質モデルおよび設定値の妥当性確認を目的する。
		湧水量測定		
		地下水水質分析	JISK0101-1998 ほか	

表 3.2-5　地下水流動に関連する主な地質的特徴（土木学会）

項　目	地　質　的　特　徴
透水性	・ 地質（粒径分布、間隙率、間隙径分布、間隙構造など） ・ 割れ目分布 ・ 風化・変質状況（充填・粘土化など）
透水異方性	・ 層理、葉理などの堆積構造 ・ 成層構造（砂岩泥岩互層などの透水係数が異なる地層の繰り返し）
有効間隙率（実流速補正係数）	・ 地質（特に間隙率、間隙径分布、間隙構造） ・ 割れ目密度、割れ目の大きさ分布、開口幅
高透水部 低透水部	・ 断層（破砕帯） ・ 割れ目の分布域、頻度、連結性 ・ 連続する薄層（凝灰岩で代表される降下堆積物、基底礫岩など）
広がり（分布）	・ 褶曲構造、断層などの地質構造 ・ 高透水、低透水な地層の連続性（キャップロック）

また、ボーリング孔を利用した調査や原位置試験により、岩盤の高透水部と低透水部の分布を特定し、モデル化する作業フローの例を図 3.2-15 のように示している[7]。

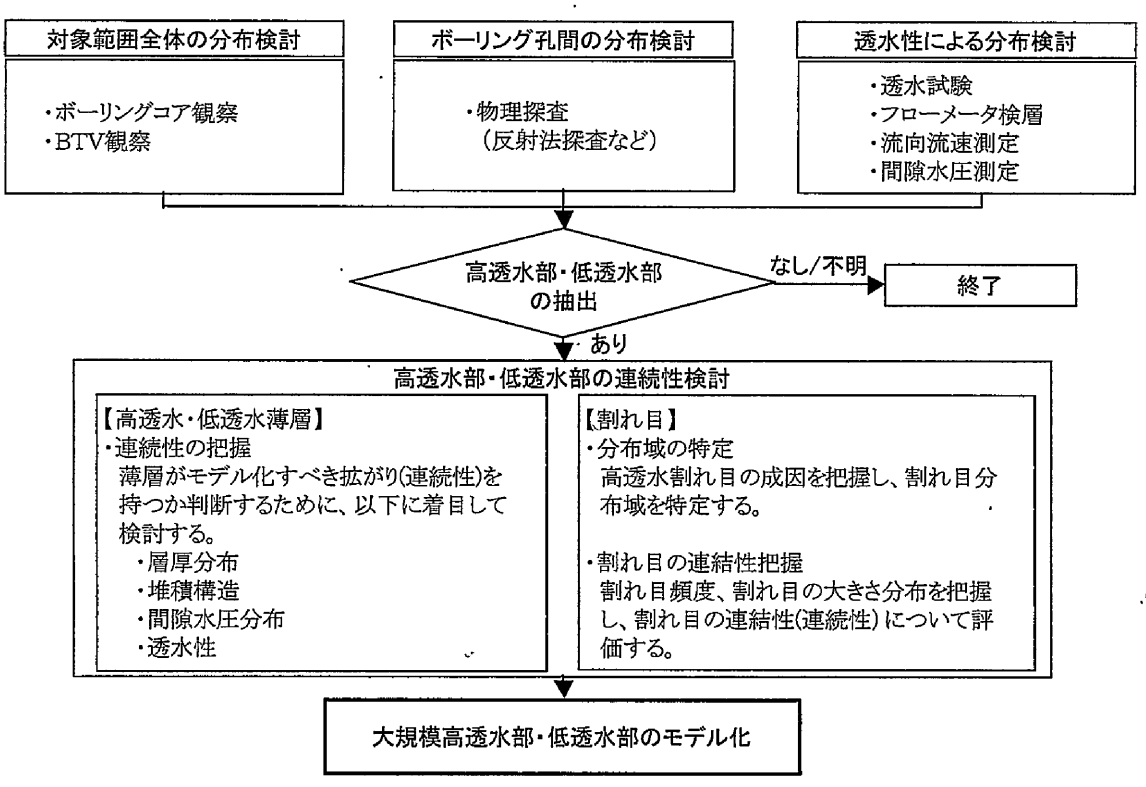


図 3.2-15　高透水部・低透水部の抽出からモデル化までの作業フロー（例）（土木学会）

表 3.2-6 においては、上記のような水理地質モデルの作成に関する主な検討内容と留意点が整理されており、このほか、表 3.2-7 のように巨視的な水理特性の設定に必要な情報や設定のフローなどについても検討がなされている[7]。

表 3.2-6　水理地質モデルの作成における主な検討内容と留意点（土木学会）

モデル	項　　目		検討内容と留意点
地質モデル	地層分布 断層分布		地表踏査、ボーリング調査に基づき地質層序、地質分布を把握する。 三次元反射法地震探査などの物理探査を用いて孔間の地質情報を補完することが有効な場合がある。
水理地質モデル	水理地質区分		地質的特徴にもとづく地質区分を基本に、透水特性との関連を検討して水理地質区分を行う。 区分の際には、透水係数のほかに、割れ目分布、風化分布、地層の連続性、堆積構造などを考慮する必要がある。 また、間隙水圧の変化部に着目することが有効である。
	大規模高透水部	断層	断層近傍には、透水性の高い割れ目が連続し、高透水部となっている場合がある。ただし、断層の成因（構造性断層／堆積時断層）によっては高透水部とならない場合がある。したがって、断層については地質的性状から、成因についても検討する必要がある。
		高透水薄層	試験区間長の関係から、周辺岩盤の透水性が高い場合、原位置透水試験で必ず確認できるとは限らない。 透水試験で得られた透水係数が大きい場合は、区間中の割れ目のほかに、区間中の岩質と構造に着目して、割れ目以外に高透水の要因となり得るものを抽出し、室内透水試験などで透水係数を把握する。
		高透水割れ目	高透水割れ目の分布域を特定するためには、割れ目の成因（応力変化、岩盤物性の差など）に着目して検討する。
	大規模低透水部	低透水薄層	低透水部としては、断層部、堆積岩中の薄層などが挙げられる。 原位置透水試験の場合、試験区間長が長いと透水試験による低透水薄層の検出は困難である。 地質観察から、低透水となりうる地質（粘土層や凝灰岩薄層など）を抽出し、室内透水試験などで透水係数を把握する。

表 3.2-7　巨視的水理特性の設定に必要な情報と調査（土木学会）

巨視的水理特性の設定に必要な情報	左欄の情報を得るためのデータ整理方法	調査項目
基質部の 透水係数分布	透水試験結果（透水係数）の頻度分布図（割れ目を含まない区間で取りまとめたもの）	室内および原位置透水試験 BTV 観察 ボーリングコア観察
基質部の 有効間隙率分布	有効間隙率の頻度分布図	室内トレーサ試験
割れ目の密度	割れ目密度（割れ目数/観察長さ） 割れ目密度（割れ目数/観察壁面面積）	BTV 観察 ボーリングコア観察 地質壁面観察
割れ目の中心座標	地質スケッチ（割れ目分布状態が表現されたもの）	地質壁面観察
割れ目の方向分布	割れ目の走向傾斜分布（BTV 観察、ボーリングコア観察による） 割れ目の走向傾斜分布（地質壁面観察による）	BTV 観察 （ボーリングコア観察） 地質壁面観察
割れ目の大きさ分布	地質壁面で観察された割れ目のトレース長分布	地質壁面観察
割れ目の 透水量係数分布	透水試験結果（透水係数）の頻度分布図（割れ目を含む区間で取りまとめたもの）	透水試験 BTV 観察 ボーリングコア観察

天然バリア性能に係る地下水流動のパラメータ設定にあたっては、地下水流動解析は有効な手法の一つであり、複雑な水理地質構造、地下施設などの影響を考慮すること等ができる。

図 3.2-16 においては地下水流動解析による核種移行評価パラメータの評価・設定フローの検討例が示されている[7]。

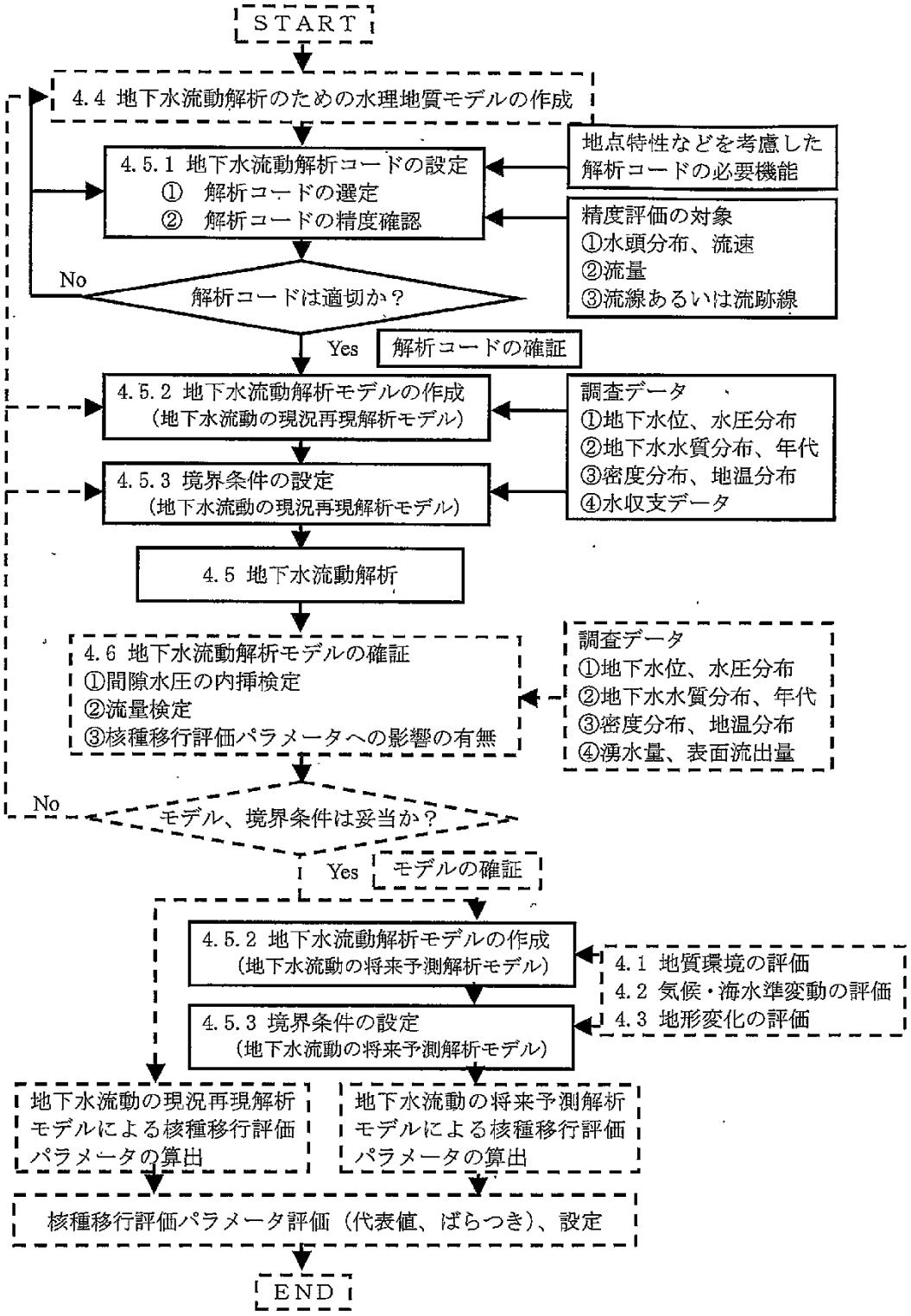


図 3.2-16　地下水流動解析による核種移行評価パラメータの評価・設定フロー（例）（土木学会）

また図 3.2-17 においては構築した解析モデルに基づく地下水流動解析により核種移行評価パラメータ（実流速、核種移行経路長、流出点の位置、施設通過流量など）を十分な精度で推定できることを確認するための検討フローの例が示されている[7]。

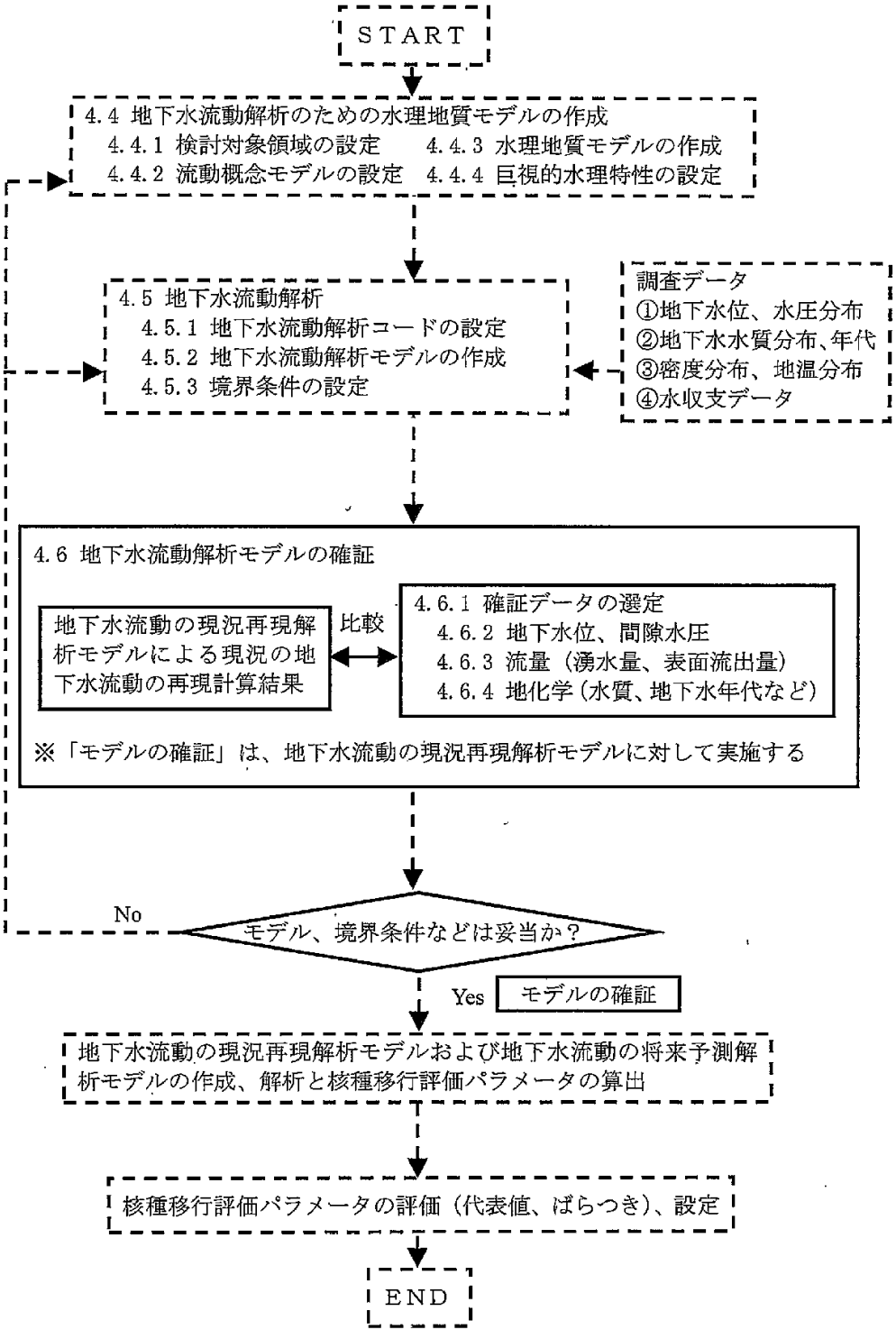


図 3.2-17　地下水流動解析モデル確証の検討フロー（例）（土木学会）

更に、地下水年代手法は、地下水の滞留時間を求め、滞留時間をもとに地下水の流動状況に関する情報を得る手法であり、地下深部における基本的に遅い地下水流動場を広範囲に検討する上で有効な手法である。地下水年代測定に用いられている放射性核種と放射壊変起源の希ガスの代表例と測定範囲が表 3.2-8 に、またそれらの地球化学的手法を用いた地下水調査の体系化のための地下水流動評価項目と調査手法が図 3.2-18 のようにまとめられている[7]。

表 3.2-8　地下水年代測定に活用される放射性核種と放射性壊変希ガスの代表例とその測定範囲（馬原、1994）（土木学会）

測定法	放射性核種	半減期(年)	降水中初期濃度	地下水年代測定範囲(年)	測定に必要な採水量(ml)	実測例	分析方法	参考文献
大気起源の放射性核種を用いた測定	^{85}Kr	10.7	10^{-8}dpm 以下（但し 1950 年前）	1～40	1.2×10^{5} ～3.6×10^{5}	ポーランドの Crakow の地下について 10～40 年という結果を考えている。	・溶存ガス抽出後、アルゴン分離精製後、比例計数管にてβ線測定	K.Rozanski,Isotope Hydrology.1978,Vol.2, 949-961(IAEA)(1979)
	^{3}H	12.3	3.6(dpm/l)（但し 1954 年前）	1～60	1000	例えば、六甲山の地下水循環系について調査し、六甲トンネル内の地下水の年代は 40 年で流速は 0～17m/y である。	・電解濃縮後、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンターによるβ線計測	北岡、吉岡、日本地下水学会誌 Vol.26, 131-146(1984)
	^{39}Ar	270	4×10^{-5}(dpm/l)	50～2000	7×10^{6} ～9×10^{6}	^{3}H 法で測定して 50 年以上と判定された Zurzach の温泉水の年代を測定し、70 年以下との結果を得た。	・多重遮蔽付の低バックグラウンド気体計測管を用いてβ線計測	Loosli.H.H.et al.,Isotope hydrology,1978,Vol.2, 931-947(IAEA)(1979)
	^{14}C	5,730	2×10^{-1}(dpm/l)	500～2000	2×10^{5}	例えば、熊本平野の地下水に対し、^{3}H,^{14}C,$^{234}U/^{238}U$ で調査し、地下水は主に最近の降水と非常に古い滞留時間（3～4 万年）を持つ地下水によって形成されていることを明らかにした。	・液体シンチレーションカウンター、あるいは気体計測管でβ線計測（地下水より $BaCO_3$ として炭素を捕取後、炭素を分離） ・タンデム型加速器質量分析（元素状の炭素として）	木村、農業土木試験場報告第 25 号(1986)
	^{81}Kr	210,000	7×10^{-4}(dpm/l)	10^{5}～10^{6}	10^{6}（RIS による分析）*2 10^{8}～10^{9}（通常の放射能測定）	カナダ、マニトバ州のミルキー・リバー帯水層地下水で 1.4×10^{6} 年を得た。	溶存ガス抽出分離精製後、加速器質量分析	Lehmann. B. E.et al, Applied Geochemistry 6, 419-423 (1991)
	^{36}Cl	301,000	1×10^{-5} ～2×10^{-4}(dpm/l)	5×10^{4}～2×10^{6}	1000-5000（タンデム加速器分析） 10^{5}～10^{6}（通常の放射能測定）	オーストリアの Great Artesian Basin の地下水は 10^{5}～10^{6} 年との結果を得た。また、カナダ、ミルキー・リバーの地下水に対し、6×10^{5}～1.6×10^{6} 年を得た。	タンデム型加速器質量分析（Cl を AgCl として抽出精製）	Bently,W.H.,et al Water Resources Reseach, Vol.22, 1991-2001(1986) Nolte.B.et al.Applied Geo-chemistry 6,435-445(1991)
地下水に蓄積される希ガスを用いた測定	^{3}He	安定核種	～10^{-14}ccSTP/g*1（バックグラウンドとして）	1～80（^{3}H と組み合わせて）	＞15	・三島溶岩流内および周辺の地下水に対し、10 年～15 年。 ・庄川流域の地下水に対し、1～20 年。	質量分析（希ガス分離後）	馬原：地下水学会誌 35, 201-215(1993) 高岡：Earth Planetary Science letters.(1987)
	^{4}He	安定核種	～10^{-8}ccSTP/g（バックグラウンドとして）	10^{4}～10^{7}（ウラン、トリウムと組み合わせて）	＞15	サバンナ・リバー周辺の地下水に対し、年代を測定し、8.4×10^{5} 年、これを基に地下水流速は、0.06m/y と推定した。	質量分析（希ガス分離後）	Marine,Water Resources Research,Vol.15,1130-1136 (1979)
	^{222}Rn	0.01	―	0.03 以下	1000	Glatt(スイス)河流域で地表水からの地下水の涵養を評価した。その結果、地下水の平均的な流速は 4.6m/day との結果を得た。	トルエン抽出後、液体シンチレーションカウンターによるα線計測	Hoehn E et al., Water Resources Research Vol.25,1795-1803(1989)

*1:帯水層の水に溶解している気体の量を標準状態(0℃1気圧)の下での体積で表したもの

*2:レーザーパルスを用いて量子状態に選択的に原子をイオン化し、小型の質量分析器と組み合わせることによって高精度な分析が可能となり、ヘリウム、ネオンを除く希ガスを原子単位で計測できる。

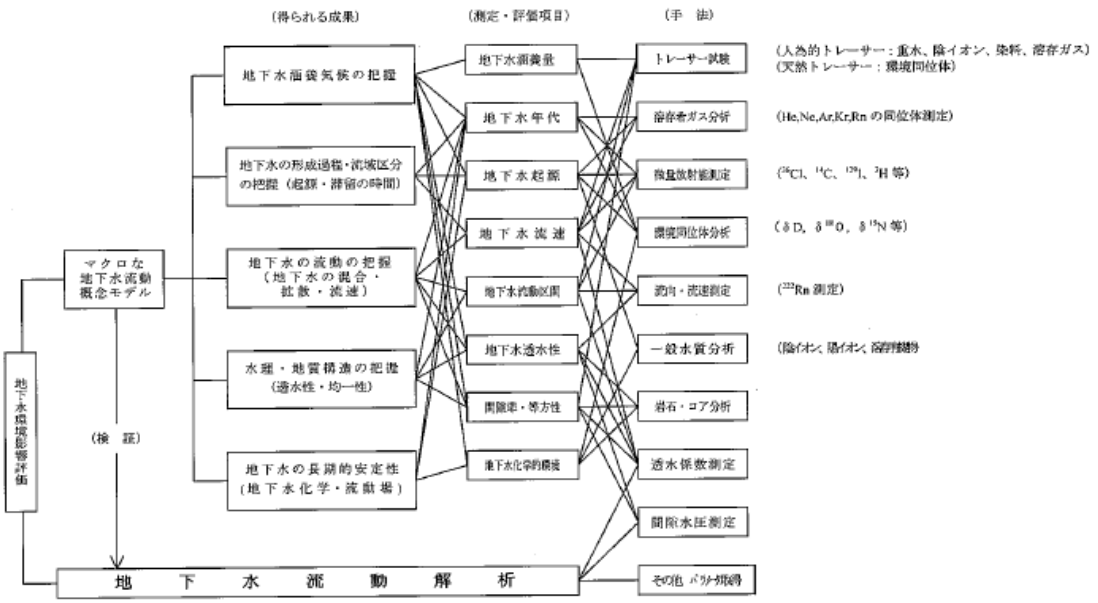


図 3.2-18　地球化学的手法を用いた地下水調査体系化、地下水流動評価項目と調査手法
（馬原 他、1996）

3.2.5　中深度処分事業展開と規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価の実施項目及び技術的要件等の検討

上述したような、低レベル放射性廃棄物中深度処分おける、地下水流動評価に関連する事業推進や新しい規制基準の整備状況を考慮して、規制要求に対応していくための最近における技術動向の文献調査結果をもとに、今後の事業許可申請から設計、施工、操業、閉鎖に至る各段階において、特に地下水流動の調査・評価の観点より、技術的な高度化・開発が必要となる課題の抽出・整理を行った結果を以下に述べる。

(1) 低レベル放射性廃棄物（LLW）中深度処分の概念

新しい規制の考え方においては、廃棄物埋設地の設置深度として、約 10 万年後においても 70m 以上の深度が確保されることを要求している、また ALARA の考え方（合理的に達成可能な限り被ばく線量を最小限に抑えること）にしたがって、設計プロセスを確認すること等が求められている[16] (図 3.2-19 参照)。

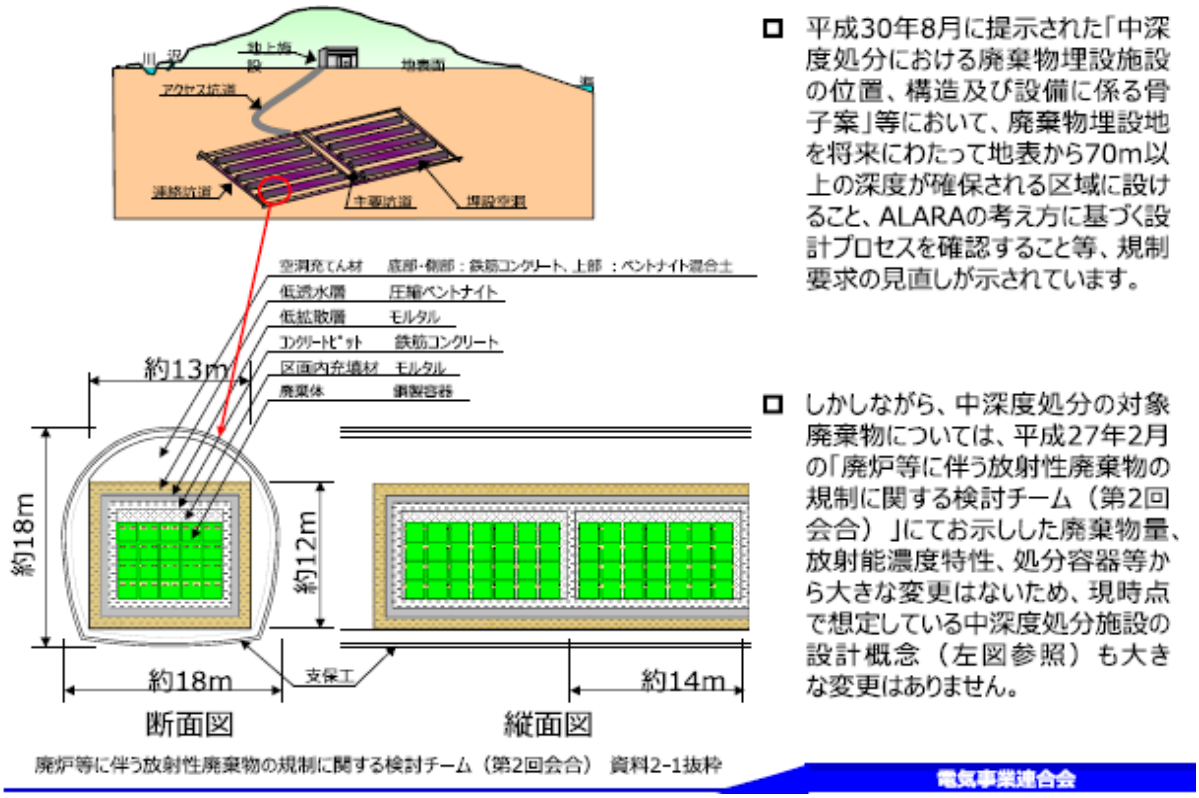


図 3.2-19　中深度処分施設の設計概念について

(2) LLW 中深度処分事業の段階的な展開の考え方と各段階における地下水流動の調査・評価に係る要求事項の整理

1）廃炉に伴い発生する炉内構造物の埋設に係る規制基準等の整備の前段階として、炉内構造物を中深度処分する基本的考え方が原子力規制委員会により定められている[1]。（原子力規制委員会：「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」、平成 28 年 8 月）

新しい規制の考え方における中深度処分事業の展開は基本的に図 3.2-20 に示すような段階的なプロセスによるとされている。

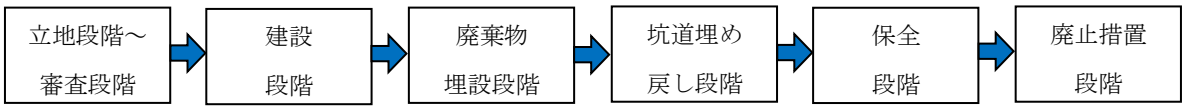


図 3.2-20　中深度処分事業の基本的な段階的プロセス

a．各段階における特に地下水流動に関連する規制要求の考え方の要点は下記のように規定されている。

(a) 審査段階

建設段階に先立つ事業申請の審査段階において、事業者は、規制期間中のみならず規制期間終了後に想定される事象に伴うリスクを低減するための廃棄物埋設施設の設計について、適切な位置の選定を含む離隔の確保、閉じ込め及び遮蔽のための対策等を示し、原子力規制委員会による事業許可を受ける。

(b) 建設段階

事業の許可を受けた廃棄物埋設施設の建設が行われ、事業者は設計どおりに建設されていることについて原子力規制委員会に対し確認の申請を行う。

(c) 廃棄物の埋設段階

事業者は埋設しようとする放射性廃棄物及びこれに関する保安のための措置について原子力規制委員会が定める技術上の基準に適合することについて確認の申請を行い、その確認を受ける。

廃棄物の埋設が一定区画ごとに行われた後、当該区画の埋戻しが行われ、原子力規制委員会は建設段階同様に技術上の基準に適合することについて確認を実施する。

事業者は、廃棄物埋設作業等に係る保安のための活動や、埋設の開始後に実際に閉じ込め等が確保されていることの確認のためのモニタリングに加え、設計や管理の方法の妥当性の再評価を定期的に行うことなどの管理（以下「能動的管理」という。）を行う。原子力規制委員会は、保安規定やその他事業者の定める規定に基づき適切に実施されていることを確認するため、事業者に対し保安規定の遵守状況の検査を行う。当該検査は、坑道の埋戻し段階、保全段階、廃止措置段階についても、それぞれの段階の状況に応じて事業者が定め、原子力規制委員会が認可した保安規定に基づき実施される。

(d) 坑道の埋戻し段階

事業者は、坑道の埋戻し及びその保安のための措置が原子力規制委員会の定める技術上の基準に適合することについて確認の申請を行い、原子力規制委員会は、設計どおりに埋戻されていること等について、原子力規制委員会が定める技術上の基準に適合することの確認を行う。

(e) 保全段階

事業者は、廃棄物埋設地の保全に係る保安のための活動を始めとする能動的管理を行う。原子力規制委員会は、事業者による能動的管理が適切に実施されていることについて確認する。

(f) 廃止措置段階

事業の廃止に向け、事業者は地上に残された附属施設の解体、モニタリング孔の閉鎖等を定めた廃止措置計画を原子力規制委員会に申請し、原子力規制委員会は原子力規制委員会の定める基準の適合性について審査を行い、廃止措置計画の認可を行う。事業者は認可された廃止措置計画に基づき廃止措置を実施し、廃止措置が終了したときは、基準に適合していることについて原子力規制委員会の確認を受ける。

なお、事業許可の基準となる廃棄物埋設施設の基本的な設計に関する規制要求（以下「設計要求」という。）については、許可基準規則及びその解釈において規定される。また、事業許可後の後続規制として、廃棄物埋設施設や放射性廃棄物の確認に係る技術上の基準を含む規制要求及び事業者が行う能動的管理に関する規制要求（これらをまとめて「管理要求」という。）があり、これらについては事業規則において規定される。

b. 規制期間前の原子力規制委員会の関与

事業申請前の立地段階において、事業申請を予定している者は一般に、廃棄物埋設地から生活圏へ至る天然バリアの情報を取得するため、ボーリングやトンネル掘削等の調査（以下「立地段階ボーリング等調査」という。）を実施する。

立地段階ボーリング等調査は天然バリアに対する擾乱を伴う行為であり、放射性核種の移行の促進につながる場の形成や地下水の流動特性の変化など、地質環境に対する影響が想定されることから、この点に留意して当該調査を進める必要がある。

原子力規制委員会は、事業許可の審査段階において、立地段階ボーリング等調査による地質環境への影響を確認し、審査上の判断を行う必要があるとしている。

更に、それをより確かなものとするため、透明性の確保を前提として、調査方法や調査内容、品質保証等について、廃棄物の処分を検討している者等から、事業許可の申請の前において、審査上の判断に有効な情報の収集を行うことの検討を行う必要があるとしている。

c．長期の安全確保のための規制要求について（特に、地下水流動に関わるもの）

(a) 設計要求の関連

・　自然事象／廃棄物埋設地の位置に係る要求:　立地段階や建設段階において確認された断層に加えて、事業者が調査を行った範囲では確認されなかった断層を含めた周辺の断層の活動に伴い、水理特性の変化により卓越した水みちが発生する等の可能性があることから、発生が合理的に想定できる範囲内の自然事象として考えられるシナリオの一つとして、廃棄物埋設地周辺から地表に至る地下水流動場が変化することを考慮した評価を行うことを要求する。

・　放射性核種の閉じ込めに係る要求

＜人工バリアに係る要求＞:　人工バリアには漏出抑制機能が求めるとしており、具体的には、少なくとも廃止措置の開始までの期間は、人工バリアによって廃棄物埋設地からの放射性核種の漏出を抑制することを要求し、人工バリアの漏出抑制のための機能については、頑健性を確保するため単一の機能に頼らず、例えば廃棄物埋設地に浸入する地下水量を低減する機能や、放射性核種の物理的及び化学的性質に応じた、放射性核種の移行を抑制する機能等を有していることを要求している。

＜天然バリアに係る要求＞:　人工バリアから漏出した放射性核種の地下水等を介した生活圏への移行については、天然バリアによって抑制することを要求する。具体的には、廃棄物埋設地を設置した場所における長期の地質環境の状態について、プレート運動や気候変動に起因する事象も考慮して設定し、人工バリアからの放射性核種の漏出及び天然バリア中の移行挙動を評価し、自然事象に係るシナリオに対し、公衆の線量が規制期間終了後の自然事象に係るシナリオの基準に適合していることを要求する。

＜モニタリング設備に係る要求＞:　人工バリアによって少なくとも廃止措置の開始までの期間は廃棄物埋設地からの放射性核種の漏出が抑制されていることを確認するため、人工バリアの設計上の問題や施工の不具合等による異常な漏えいの監視・測定（以下「放射線モニタリング」という。）を行うための設備を設置することを要求する。

また、地下水の状態に加えて、廃棄物埋設地の埋戻し終了後における人工バリアや天然バリアが設計を逸脱することなく性能を発揮しつつあることを事業者が確認し、後述の定期的な評価等に必要なデータを取得するため、廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地及びその周辺の地質環境に係る物理的・化学的特性、人工バリアの性能や人工バリア及び天然バリアの機能に関係する地下水の状態等の確認のためのデータ取得（以下「地下水等モニタリング」という。）を行うための設備を設置することを要求する。

放射線モニタリング及び地下水等モニタリング設備の設計に当たっては、廃棄物の埋設段階、坑道の埋戻し段階及び保全段階における廃棄物埋設地周辺の環境や測定期間に適応して実用上必要な精度で監視・測定ができる性能を有する設備を用いることを要求する。この際、モニタリング設備の設置により、漏出抑制機能を担保する人工バリアの劣化や酸化還元雰囲気の擾乱など、放射性核種の移行の促進をもたらすことがないよう、最適な設計を講じることを要求する。このため、地下水等モニタリングの対象のうち人工バリアの性能については、実際の環境と同等の条件を模擬した環境下での原位置試験又はそれを補完する室内試験等の間接的な方法により確認することが可能であれば、このような設備の設置によって代替することを妨げるものではないとしている。

(b) 管理要求の関連

a) 規制期間中の安全確保のための管理要求

- 中深度処分の場合は浅地中処分に比べて高い放射能濃度の廃棄物を取り扱うことから、放射線分解によって水素ガスが発生する廃棄物については、ガス発生を考慮した対策を講じることを要求し、また、坑道の埋戻しが終了するまでの間は、湧水等によって廃棄物埋設地や坑道に蓄積する水を放射線障害防止の観点から適切に排除する措置を講ずることを要求している。

b) 規制期間終了後の安全性確認に関する管理要求

- （放射性核種閉じ込め機能の確認に係る要求）廃止措置の開始までの間において放射線モニタリングを行い、人工バリアの設計上の問題や施工の不具合等による放射性核種の異常な漏えいの徴候がないことを確認することを要求するとともに、地下水等モニタリングを行い、地下水の状態に加えて、廃棄物埋設地の埋戻し終了後における人工バリアや天然バリアが設計を逸脱することなく漏出抑制や移行抑制に係る性能を発揮しつつあることの確認に必要なデータを取得することを要求している。なお、放射線モニタリングや地下水等モニタリングの方法については、後述する定期的な評価の結果を踏まえて、適切と考えられる方法に適宜変更することが可能となるよう、柔軟性のある要求内容としておくことが適当である。
- （定期的な評価等に係る要求）廃止措置の開始までの期間において、10 年を超えない期間ごと及び廃棄物の埋設段階や保全段階など次の段階に移行する前に、最新の技術的知見を踏まえた定期的な評価を事業者が行うことや、定期的な評価の結果を踏まえて廃棄物埋設施設の保全のために必要な措置を事業者が講じることが既往の事業規則で要求されている。中深度処分においては、最新の技術的知見を踏まえてもなお離隔に係る設計が基準に適合しているかどうかを事業者が確認するため、少なくとも 10 万年間は火山活動及び断層活動、侵食作用が著しい影響を及ぼすおそれのない場所が廃棄物埋設地として選定されていることや、侵食作用を考慮しても廃棄物埋設地が地表から 70m 以上の深度にとどまることの見通しに影響を及ぼす要素や徴候がないことを確認することを要求されている。また、閉じ込めに

係る設計についても、地下水等モニタリング結果も反映し、人工バリアの漏出抑制機能の健全性を確認することに加え、人工バリアからの放射性核種の漏出及び天然バリア中の移行挙動を評価し、自然事象に係るシナリオの基準に適合していることを確認することを要求している。定期的な評価の結果、上記の廃棄物埋設地の離隔に係る見通しが得られない場合や、閉じ込めに影響を及ぼす要素や徴候が確認された場合は、それぞれの状況に応じた必要な対策を講じることを要求している。

- （坑道の埋戻しに係る要求）坑道の埋戻しにあたっては、人が容易に立ち入れないようにすることを要求するとともに、埋戻した領域が放射性核種の卓越した移行経路とならないようにすることを要求している。また、坑道の埋戻し後は、放射線モニタリングの精度や異常時の補修等の容易性が大幅に低下することが考えられる。このため、事業者が坑道の埋戻し段階に移行しようとする場合は、放射線モニタリングの方法、異常時の補修等の方法を適切に見直すことを要求している。
- （異常時の措置に係る要求）中深度処分においては、廃止措置の開始までの期間モニタリングを行い、廃棄物埋設地からの放射性核種の異常な漏えいの徴候が確認された場合、漏出箇所の確認や補修等の必要な対策を採ることを要求している。また、補修等の有効な措置がとれない場合は、廃棄物の一部又は全部の回収を要求することもあり得る。
- （異常時の措置に係る要求）事業者が放射線モニタリングを行った結果、万一異常な漏えいが確認された場合、既往の事業規則では、放射性物質の異常な漏えいを防止するために必要な措置を講ずることが要求されている。具体的には、漏出箇所の確認や補修等の必要な対策を採ることを要求する。中深度処分においては、廃止措置の開始までの期間モニタリングを行い、廃棄物埋設地からの放射性核種の異常な漏えいの徴候が確認された場合、漏出箇所の確認や補修等の必要な対策を採ることを要求する。
- （規制期間終了の要件）規制期間終了後は、事業者によるモニタリングや万一の際の補修等の能動的管理が行われることは期待できない。したがって、規制終了時点においては、坑道の埋戻し後の放射線モニタリングによって放射性核種の異常な漏えいが発生していないこと、安全確保に必要な離隔や閉じ込めの措置が完了し、その後の定期的な評価等によってそれらの措置に問題がないことが確認され、能動的管理を要することなく長期にわたってリスクが低く保たれ、防護上の問題を生じるような状態に至ることは合理的に想定し得ないことについて、事業者に必要なデータを提出させ原子力規制委員会が最終的な確認を行う必要がある。このため、以下を要求するとしている※1。

  ［※1) 廃止措置計画の認可の条件として要求し、廃止措置の終了確認において確認する］

- 廃止措置の開始までの間の放射線モニタリングによって、廃棄物埋設地からの放射性核種の異常な漏えい等の徴候が確認されていないこと。
- 廃止措置の開始までの間に実施した最新の定期的な評価によって、廃棄物埋設地の

離隔に係る措置に問題がないこと、閉じ込めに影響を及ぼす要素や徴候が確認されていないこと、自然事象に係るシナリオの評価結果が線量基準に適合していることが確認されていること。

- 廃止措置の終了確認までの間にモニタリング用に設置した観測孔が、水みちが生じないように適切に埋戻されていること。

上記のような各事業段階において、特に地下水流動の調査・評価に係る規制からの要求事項[4]及び「中深度処分における廃棄物埋設地の設計プロセス及び線量評価に係る審査ガイドの骨子案[2]等を参考に、それらを考慮した地下水流動の調査・評価の実施項目に関する検討結果を表 3.2-9 に整理した[1][6]。

この表を含め、新規制基準の考え方の整理にあたっては、令和 2 年度の本調査報告で整理した内容に関して次のように見直し改訂を図っている。すなわち、令和 3 年において第二種廃棄物埋設に係る基準規則の特に中深度処分関連に係るものの改定案に対して原子力規制委員会による一般からの意見募集が行われ、それらの意見への回答も取りまとめるとともに、それに伴う関連基準規則の一部追加改訂もなされ[22]、更にその後、第二種廃棄物埋設の事業に関する規則の改正に係る総理府令が令和 3 年 10 月 21 日に施行されている[22]。そこで、令和 3 年度の本報告書においては、この時点までの原子力規制委員会において決定された考え方をできるだけ反映させて、できるだけそれらを反映した内容にするよう見直し改訂を行ったものである。

特に大きな変更点は、廃棄物の埋設段階においては、放射性物質の漏えい監視の対象区域が廃棄物埋設の中の更に限定された区域からの漏出を防止すると規定されていたものが、中深度処分の場合には規制期間終了まで廃棄埋設地からの漏出防止が規定されたことから不要となり、削除されたことなどが挙げられる。

表 3.2-9　中深度処分事業展開と規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価の実施項目の整理

事業段階	対象区域ごとの規制要求事項の要点		地下水流動の調査・評価において必要な実施項目の整理
	廃棄物埋設地内	廃棄物埋設施設内	
立地段階～審査段階	・(設計プロセスの確認)処分システム構成要素の中の人工バリア（低透水層、低拡散層、等）に割り当てられた機能（埋設地への地下水浸入抑制、放射性物質の閉じ込め及び移行遅延、コロイドろ過、ひび割れ自己修復等）の性能(埋設地への地下水浸入率、透水係数、拡散係数、収着分配係数、地下水流速等)の定量的な評価がなされていること。 ・(人工バリアの性能評価に係る水理影響) 埋設地近傍の水理（地下水の流速、流向等の地下水流向）は人工バリアからの放射性物質の漏出条件の設定等に影響する。埋設地周辺の動水勾配、地下水流動、表流水の流動等。	・ (地下水移動の設定)埋設地から生活圏へ至る地下水の移動経路を考慮し、主要な放射性物質の移動を抑制する性能(天然バリア性能)が優れていると考えられる埋設地設置場所を選定すること(通常想定される現象を考慮した評価により)。 ・坑道を設置する天然バリアは、放射性物質が移動しやすい経路が生じないよう坑道の閉鎖を行える見通しを有すること。	・ 地質地下水調査(全般)において、廃棄物埋設地の設置場所の選定(人間侵入対応の考慮から 10 万年後で 70m 確保；地下水の移動経路と流速場での十分な性能を確保)が適切に行えること。 ・坑道設置やモニタリング設備等の付属施設設置において、後段の坑道埋戻し・閉鎖や定期的な評価等へ十分に対応できる見通しを示すこと(地下水流動、湧水、核種移動等)。
建設段階	・(廃棄物埋設地掘削に際して合理的に可能な範囲で得られる情報)埋設地から漏出した放射性物質の移動の評価において使用する天然バリアに係るモデル、パラメータ等(地質、断層の位置、透水係数、亀裂密度、水質等)について、建設段階に行われる先進ボーリング調査、空洞の掘削時の測定、側壁観察等によって合理的に取得可能な情報によって確認・検証できる調査方法の確認と取得可能な情報の関係が整理されていること。 ・特に、廃棄物埋設地となる予定の処分坑道エリアは、埋設地内から漏出した放射性物質の移動が十分に抑制された区域に設置されることが必要であり、そのことを確認できる情報が整理されていること。		・坑道内の地下水湧出水、岩盤の安定性維持、EDZ 対策など、創業時の作業安全及び地下水・核種移動上での十分な配慮を施すこと。 ・先進ボーリング・坑道掘削等の建設の初期段階における調査・観察・試験等の結果により。審査段階での調査評価の妥当性確認や後段の処分坑道・エリアのレイアウト計画あるいは定期的評価に資する情報として適切に取得・整理されること。
廃棄物埋設段階	・人工バリアの設計等に係る選択肢の設定 :(廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する) 人工バリアの設置等により、放射性廃棄物の受入れ開始から廃止措置の終了までの間、地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まって、廃棄物埋設地から放射性物質が漏えいしない状況（工学的に有意な漏えいがない状況）を達成すること。 ・廃棄物埋設地の設置場所に係る選択肢の設定 ：廃棄物埋設地を合理的に設置可能な場所において、天然バリアによる廃棄物埋設地から生活環境への主要な放射性物質の移動を抑制する機能が優れていると考えられる複数の選択肢に関する技術的根拠を含む設定のプロセスを事業許可申請の段階絵示すことを要求。	・廃棄物埋設地は、埋設地内から漏出した放射性物質の移動が十分に抑制された区域に設置されること。	・廃棄物は埋設するパネルの建設設置と廃棄物の定置をパネル一定区画ごとに行い・埋め戻す作業が並行して進められるのでその作業安全の確保とともに、湧出水対策、地下水等のモニタリングを適切に実施し情報の整理・分析を合理的に実施すること。 ・閉じ込め等が確保されていることの確認のためのモニタリングに加え、設計や管理の方法の妥当性の再評価を定期的に行うことなどの管理(能動的管理という) を行うこと。
坑道埋め戻し段階	・廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止すること。 ・埋戻しにあたっては、人が容易に立ち入れないように措置されていること。 ・埋戻した領域が放射性核種の卓越した移動経路とならないよう措置されていること。	・廃棄物埋設地は、埋設地内から漏出した放射性物質の移動が十分に抑制された区域に設置されること。	・計画とおりに埋め戻しがなされていることを示す(人間侵入、地下水移動経路への対処が適切になされていること等)を示す情報・データを取得・整理すること。 ・廃棄物埋設地から周辺区域への核種漏出と移動が十分に抑えられていることを確認するデータ・情報の取得と整理すること

保全段階	・廃棄物埋設地から周辺区域への核種漏出と移動が十分に抑えられていることを確認すること等。 ・埋戻し後の坑道の水みちとなる可能性や人間侵入への対策が適切に機能していること。 ・人工バリアへの想定される影響要因を考慮して、埋設地の状態を踏まえ、廃棄体からの主要な放射性物質の移行が、構成要素の性能の変化状態の予測精度の高いこと等、及び埋設地に隣接する岩盤中の放射性物質の地下水中濃度が十分に低いことを確認すること等。		・廃棄物埋設地から周辺区域への核種漏出と移動が十分に抑えられていることを確認するデータ・情報の取得と整理をすること。 ・埋設地の周辺及び坑道における地下水による核種移動が設計を逸脱することなく性能を発揮していることの確認。
廃止措置段階	―	・地下水等の放射性線モニタリングによって、埋設地からの核種の異常な漏洩等の兆候のないことの確認。 ・その時点での最初の定期的な評価により、埋設地の離隔に係る措置に問題のないこと。 ・閉じ込めに影響を及ぼす要素や兆候がないこと。 ・自然事象に係るシナリオの評価結果が線量基準に適合していること。 ・モニタリング用に設置した観測孔が水みちを生じないよう適切に埋戻しがなされていること。	・この段階以降は、事業者によるモニタリングや万一の際の補修等の能動的管理が期待できないことから、埋設地周辺及び周辺監視区域における地下水等及び放射線モニタリングなどによる放射性核種の異常な漏出や移動状況がないことを確認し、万一異常が認められた際には補修等の対策が適切にとれるようにする。

【注】1)【参考文献】原子力規制委員会決定：炉内構造物の埋設に係る規制の考え方について、原規制技発第 1608312 号、平成 28 年 8 月 31 日.

2)「廃棄物埋設地」とは、放射性廃棄物を埋設する場所（人工バリアを含む）のことをいう.

3)「廃棄物埋設施設」とは、廃棄物埋設地及びその附属施設のことをいう。 （附属施設：廃棄物埋設地へ放射性廃棄物を埋設するために設置される設備（地上の廃棄物受入れのための設備、搬送設備、放射線管理設備等）、坑道（地上から廃棄物埋設地に至る放射性廃棄物の搬入通路等）等）.

4)「限定された区域」とは、放射性廃棄物を取り扱う区域、室等をいう。

＜令和 3 年第 35 回原子力規制委員会（令和 3 年 9 月 29 日）の第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規制等の改正案に対する意見と回答（資料 2 の別紙 1）においては、許可基準規則第 12 条第 1 項第 4 号における、【放射性物質の漏出防止】に係る要求事項の内容が一部変更され、「埋設する放射性廃棄物の受入れ開始後において廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏えいを防止する機能を有すること」を要求することとされた。この変更は、「埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了まで」の「限定された区画からの放射性物質の漏出の防止」に係る要求は不要と考え、限定された区画からの漏出に関する要求事項は許可基準規則に反映されないこととなった。

更に、【廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出の防止を求める期間】に関しては、中深度処分の廃棄物埋設地については、許可基準規則第 2 条第 2 項におおいて、廃止措置の終了後における廃棄物埋設地の外への放射性物質の移動を十分に抑制することができる設計を要求している。＞

3.2.6 地下水流動調査・評価に関する今後の技術課題の抽出と技術開発の方向性の概略検討

(1) 中深度処分事業展開における地下水流動・調査評価の全体像

上述した、規制要求事項等の調査結果を踏まえると、中深度処分の事業展開を考慮した地下水流動の調査・評価技術等に関して、各段階において重要となる実施項目のポイントは概ね下記のようにまとめられる。

- 立地～安全審査～建設までの事業開始前の期間においては、事業許可申請に向けてあるいは埋設処分施設の詳細な設計のための水理地質構造や地下水流動特性等を考慮した詳細な処分坑道パネルレイアウトの設定
- 建設から操業中の期間においては、湧水対策や地下水等モニタリング等の設備による監視
- 坑道埋戻し段階においては、埋め戻しされた坑道が新たな地下水移行経路あるいは人間侵入に対して長期的な観点での安全確保の対策が講じられていること
- 事業開始から廃止措置段階に至る全期間を通じて、少なくとも 10 年ごとに要求される定期的な評価において、要求されている人工バリアや廃棄物埋設地からの放射性核種の閉じ込め、天然バリア中の核種移行抑制の機能が安全審査において想定されていた性能を十分に満たしていることの確認

なお、上記の事項は、審査の段階においてもその十分に実施し得ることの見通しを示すことも要求されており、それらの技術的可能性を示す技術の高度化と集大成が重要となる。

以上のような整理結果の概要を図 3.2-21 に示しておく。

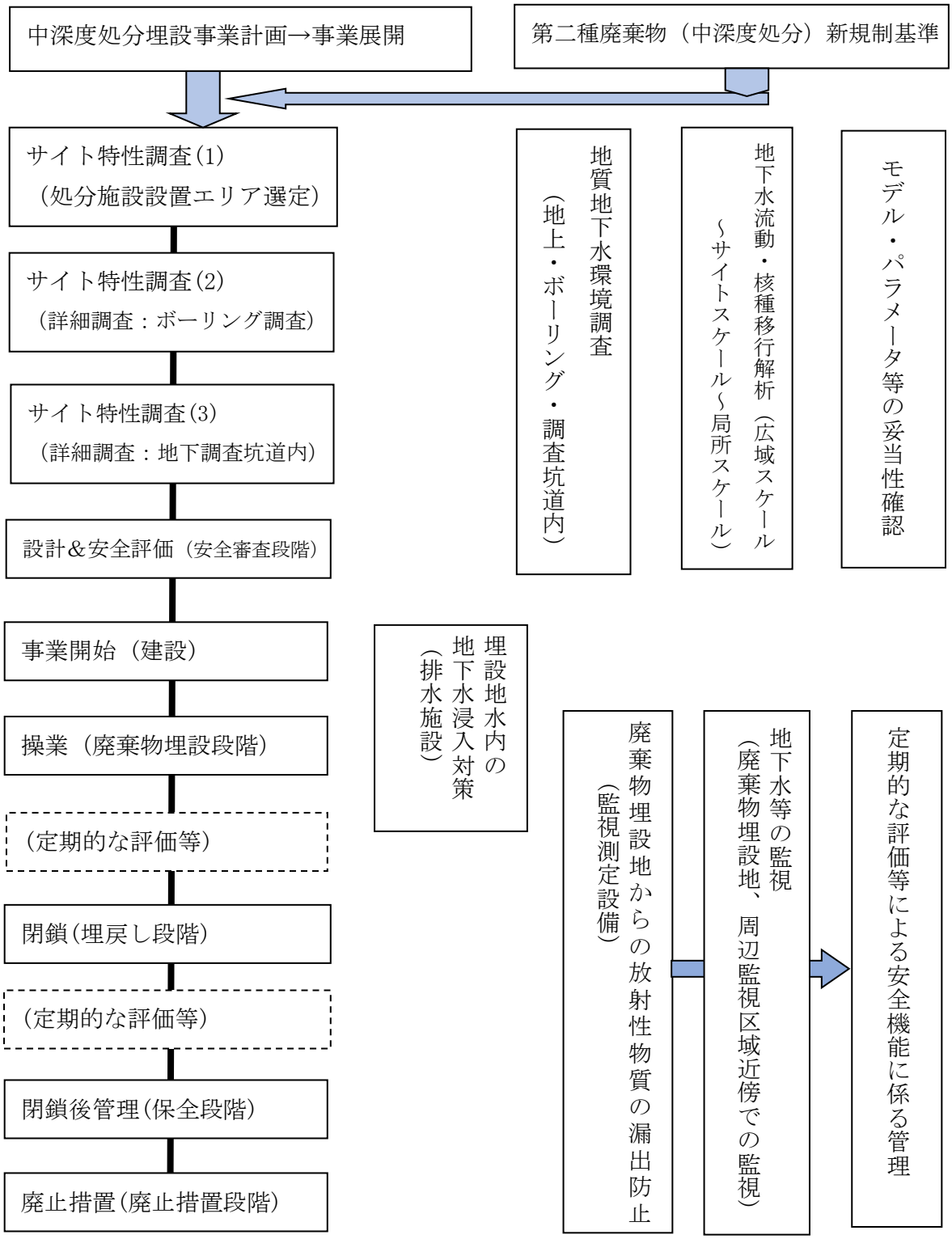


図 3.2-21　LLW 中深度処分事業展開と地下水流動の調査評価に係る
主な対応関係事項のイメージ

(2) 事業段階と適用部位を考慮した地下水流動の調査・評価の調査項目と今後の技術課題の抽出

表 3.2-10 において、各事業段階で適用が想定される主な地下水流動の調査・評価技術の関係を整理するとともに、今後の技術課題として重要と思われる候補案を抽出した。

表 3.2-10 各事業段階における地下水流動調査・評価項目と主な適用技術

	主な調査項目	必要な事業段階	適用部位＜目的＞	今後の主な技術課題候補の抽出
地質調査	コア観察、BTV 観察、地質観察(掘削面、坑道壁面)、物理探査、地形・水文調査	① ② (③)	埋設施設予定サイト、埋設地調査坑道内等(埋設地区域選定、設計、事業許可申請)	①②亀裂特性の不均質性の測定・データ化・モデル化手法の構築、地下水流速場の合理的な測定・モデル化手法の体系化
透水特性	室内透水試験、単孔試験、孔間試験	① ② (③)	埋設施設予定サイト、埋設地調査坑道内等(埋設地区域選定、設計、事業許可申請)	
水理試験	フローメータ検層、流向流速測定、湧水量測定、間隙水圧測定、一般水質測定、地化学調査、トレーサー希釈試験、割れ目トレーサー試験、室内トレーサー試験、室内吸着特性試験	① ② ③ (一部) ④ (一部) ⑤ (一部)	①②：埋設施設予定サイト、埋設地調査坑道内(設計、事業許可申請) ③：棄物埋設地近傍、埋設地処分坑道内(地下水等モニタリング、定期的評価) ④：廃棄物埋設地近傍、埋設地処分坑道内(地下水等モニタリング、定期的評価) ⑤：廃棄物埋設地近傍、埋設地処分坑道→アクセス坑道(地下水等モニタリング、定期的評価)	①②③坑道掘削時の合理的な地下空洞壁観察・データ化システム構築(亀裂分布特性、湧水状況等) ③④⑤地下水、水質、人工バリア性能等のモニタリングの合理化統合管理システムの構築(センサー、データ集積、送信～長期耐久性、小型・省エネ化等の高度化)
地下水解析	・広域スケール、サイトスケール、パネルスケール、ブロックスケール ・決定論的解析、確率論的解析～不均質性、等	① ② ③ ④ ⑤	①②：広域スケール、サイトスケール(地下水移行シナリオ、天然事象シナリオ)／パネルスケール、ブロックスケール(バリア性能評価) ③④⑤：サイトスケール、パネルスケール(地下水等モニタリング、定期的評価)	・不均質性、不確実性の評価 ・解析モデル、データ等の品質保証の体系化と信頼性構築

【注】①立地段階～審査段階、②建設段階、③廃棄物埋設段階、④坑道埋め戻し段階、⑤保全段階、⑥廃止措置段階

3.3 今後の主な技術の高度化開発課題の概略検討(骨子案)

令和 2 年度においては、上述のように抽出した技術の高度化開発課題に関して、現状における関連既往技術と今後の技術の高度化開発の方向性の概要について骨子案を検討したが、それらの結果は以下のとおりである。

3.3.1 地質環境モデルの不均質性及び地下水流動解析評価の不確実性に関する評価方法の体系化

(1) 地層処分研究開発における地下水流動解析評価に技術課題の骨子

日本原力研究開発機構（JAEA）においては、瑞浪超深地層研究所において、高レベル放射性廃棄物地層処分に係る結晶質岩を対象とした地層科学研究を長年実施してきた。その一環として、不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法開発や亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査･評価手法に関する研究成果を数多く報告している[11][13][14][15]。また、地盤工学会における“亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム”(2001 年)においては、「水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価」をテーマとして、複数機関による JAEA 瑞浪サイトにおける原位置試験・調査データに対して各機関が保有している解析モデル化手法を適用した結果が報告されている。

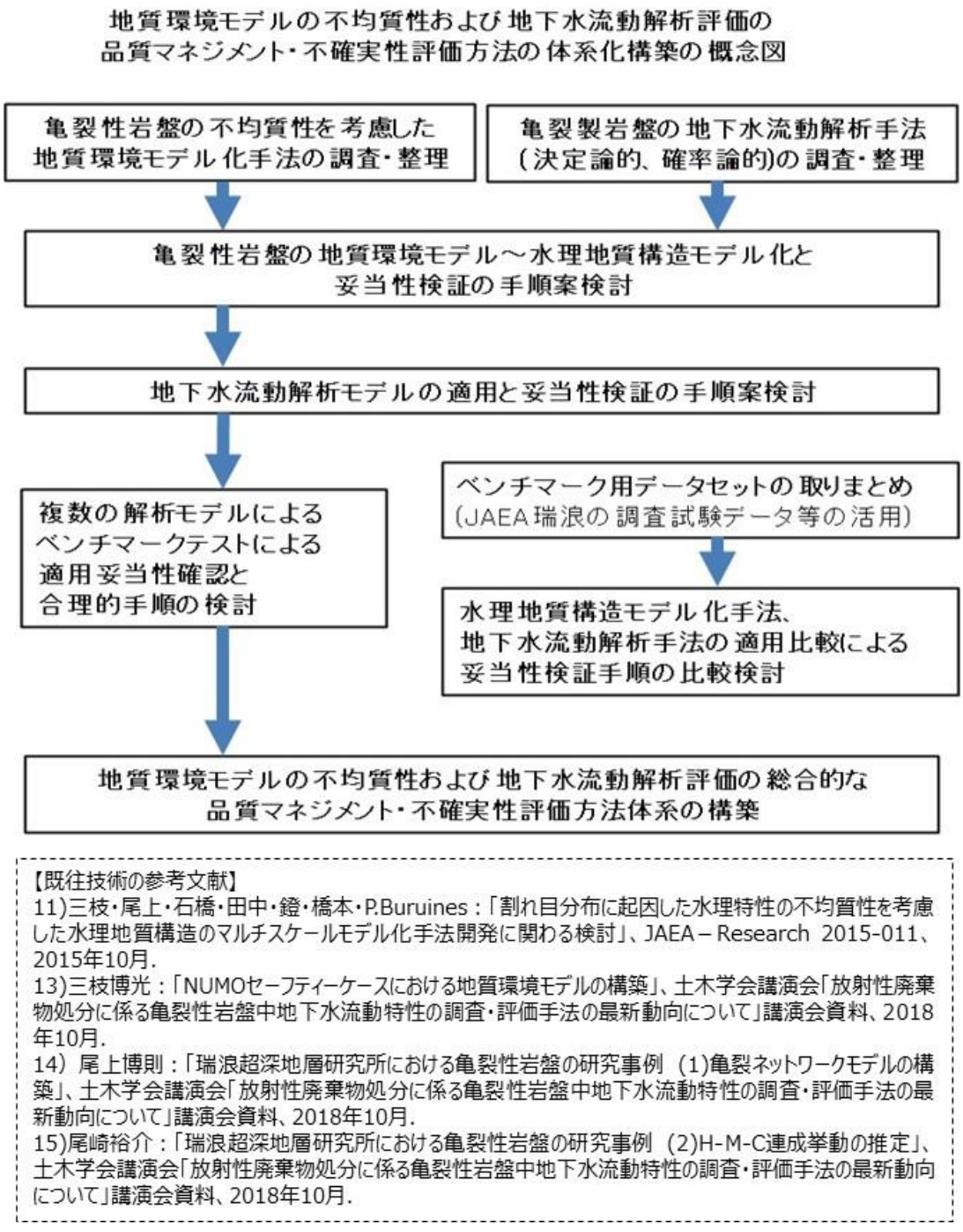
このように、地下水流動解析においては解析手法の高度化がなされてきているものの、亀裂特性など地質環境の不均質性は卓越した亀裂が複雑に介在する可能性の多い結晶質岩と比較的少ない堆積岩系とでは地下水解析における扱い方などで考慮の仕方も異なること、あるいは解析のベースとなる地質地下水調査データと解析モデル・計算プログラム等の品質保証的な適用性検証と不確実性の評価については、今後の安全審査や定期的な評価などへの適用に向けて、その方法論を体系的に整備し、適用制度面での妥当性についてあらかじめ確認・評価しておくことが必要である。

(2) 課題への対応方策の方向性案

上記のような課題認識に対して対応するための技術の高度化開発の方向性の素案として下記の項目のものを挙げておく。

1) 亀裂性岩盤の不均質性を考慮した水理地質構造モデル化手法・地下水流動解析手法の既往の手法の調査・比較検討（基本計算アルゴリズム、次元と計算メッシュ制限、計算精度確認、マニュアル整備等）
2) 亀裂性岩盤の地質環境モデル～水理地質構造モデル化と妥当性検証の手順案の比較検討
3) 地下水流動解析モデルの適用と妥当性検証の手順案検討
4) 複数の解析モデルによるベンチマークテストによる適用妥当性の比較確認
   ・ベンチマークテスト用データセットの取りまとめ（JAEA 瑞浪での公表されている調査試験データ等を活用）
   ・水理地質構造モデル化手法、地下水流動解析手法の適用比較による妥当性検証手順の比較検討
5) それぞれの妥当性検証手順案の妥当性確認を踏まえて総合的な品質マネジメント・不確実性評価体系の構築

上述の体系化構築の概念を図 3.3-1 に示す。



【既往技術の参考文献】
11)三枝・尾上・石橋・田中・鐙・橋本・P.Buruines：「割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法開発に関わる検討」、JAEA－Research 2015-011、2015年10月.
13)三枝博光：「NUMOセーフティーケースにおける地質環境モデルの構築」、土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料、2018年10月.
14) 尾上博則：「瑞浪超深地層研究所における亀裂性岩盤の研究事例 (1)亀裂ネットワークモデルの構築」、土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料、2018年10月.
15)尾崎裕介：「瑞浪超深地層研究所における亀裂性岩盤の研究事例 (2)H-M-C連成挙動の推定」、土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料、2018年10月.

図 3.3-1　地質環境モデルの不均質性・地下水流動解析評価の品質マネジメント・不確実性評価手法の体系化構築概念図

3.3.2　事業段階と規制要求を考慮した地下水等モニタリング統合化システムの構築

事業段階の進展に応じて、規制からの要求として、特に地下水に関連するものを中心としては、審査段階での要求事項では人工バリアの設計、性能評価（閉じ込め性能等）、天然バリア性能の評価（地下水移行経路の設定や移行抑制）及び放射性廃棄物埋設地の状態設定、漏出量評価、埋設地配置選定あるいは核種移行抑制機能の評価などに関するものがある。

更に、管理要求としては、処分事業開始前後の建設～廃棄物埋設～坑道埋戻し～保全段階～廃止措置段階移行という各段階に応じて、規制期間中の安全確保のための管理要求及び規制期間終了後の安全確認のための管理要求としてそれぞれに考え方が検討されている。それらの概要は、3.2.5(2)-c((b)において概説したとおりである。また、それらに対応するための技術課題として考えられる主なものも合わせて図 3.2-17、表 3.2-8 及び表 3.2-9 にまとめている。

これらを踏まえて、地下水流動の調査・評価に関するものを中心とする技術の観点から、それらの想定される事業展開に沿っての安全確保あるいは安全確認のための規制要求に対して、ALARA の考え方あるいは処分技術の頑健性を確保することも念頭に答えていくための技術課題として、地下水等のモニタリング統合化システムの構築を候補案として提案しておくことし、その概要を以下に述べる。

(1) 技術高度化開発課題の骨子

事業開始から廃止措置に至るまでの各事業段階の進展に応じた規制要求、すなわち審査段階での人工バリア及び放射性廃棄物埋設地の設計や性能評価への規制要求対応、並びに規制期間の中安全確保のための管理要求及び規制期間終了後の安全確認のための管理要求に対応するため、基本的に重要である地下水等のモニタリングによる確認・監視を合理的にかつ規制要求に十分に適合するように長期的に実施することができる“地下水等モニタリング統合化システムの構築”が必要と考える。

(2) 課題への対応方策の方向性案

上記のような課題認識に対して対応するための技術の高度化開発の方向性の素案として下記の項目のものを挙げておく。

1) 地下水等モニタリング技術の規制要求への対応を考慮して、適用すべきモニタリング技術の適用部位、適用段階、適用要件等の分類・整理
2) 全体的な地下水等モニタリングシステムとしての統合化の概念検討
3) 個々の高度化対象の地下水等モニタリン技術に関して、事業段階と規制要求への対応を考慮して、適用する部位、目的、必要な精度、要件の整理と整備計画の作成
4) 個々の高度化対象の地下水等モニタリン技術の制作と性能確認
5) 地下水等モニタリング統合化システム構築の基本設計

(3) 課題対応のための高度化技術が必要な個別技術候補課題の抽出

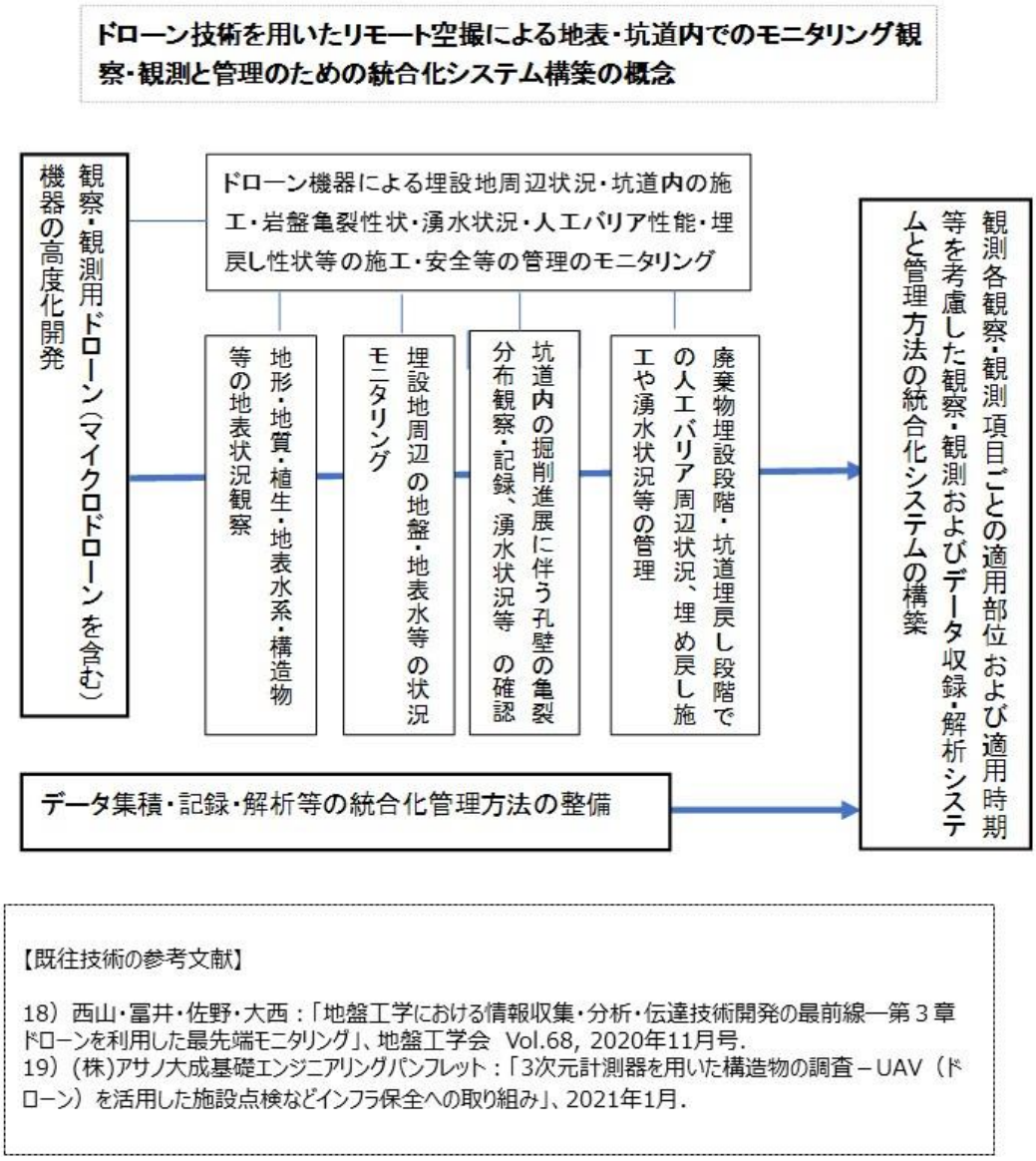
前項で抽出整理した課題への対応をするために更に高度化開発が必要と考えられる個別課題として、高度化開発の対象として考えられる個別の候補技術案として 2 つの事例を下記のように抽出した。

1) （高度化技術候補案-1）:ドローン技術を用いた空撮技術による、地表・坑道内でのモニタリング計測への適用

事業段階における特に建設、操業、坑道埋戻しの段階において、アクセス坑道あるいは処分坑道の掘削時における坑道壁の亀裂性状や湧水の観察と性状記録や安全管理、埋設地における人工バリアの設置や坑道内の埋め戻し時等における施工状況の観察・観測をドローンあるいはマイクロドローンによる空撮技術を用いることにより、リモートでの施工状況の観察・計測や安全管理など多方面での合理的な活用方策を構築し、技術の高度化により坑道内での施工や埋設状況の観察と安全性確認等を合理的に行うための統合型管理システムの構築を図る。

また、地上においても、廃棄物埋設地あるいはその周辺の埋設施設サイト全域における、地形、植生、表面水の状況など、地形・地質・水文などサイト全域における状況観察から地形地質モデルの確認、あるいは管理の合理的な実施に反映させるための総合的な活用方策とそのシステム化を図り、試作機を制作して、その適用性を確認する。

以上のようなドローン技術をベースとするリモート空撮技術を用いて、事業段階の展開に応じて、地表及び坑道内の各部位において、各種の目的に対応した活用が考えられ、それを総合的にモニタリング観察・観測した画像情報を集積・記録・分析することにより各種の安全・施工・性能等の管理等を機動的に実施できる総合化システムの構築に係る概念図案を図 3.3-2 に示す。



【既往技術の参考文献】

18）西山・冨井・佐野・大西：「地盤工学における情報収集・分析・伝達技術開発の最前線―第３章 ドローンを利用した最先端モニタリング」、地盤工学会 Vol.68, 2020年11月号.
19）(株)アサノ大成基礎エンジニアリングパンフレット：「3次元計測器を用いた構造物の調査－UAV（ドローン）を活用した施設点検などインフラ保全への取り組み」、2021年1月.

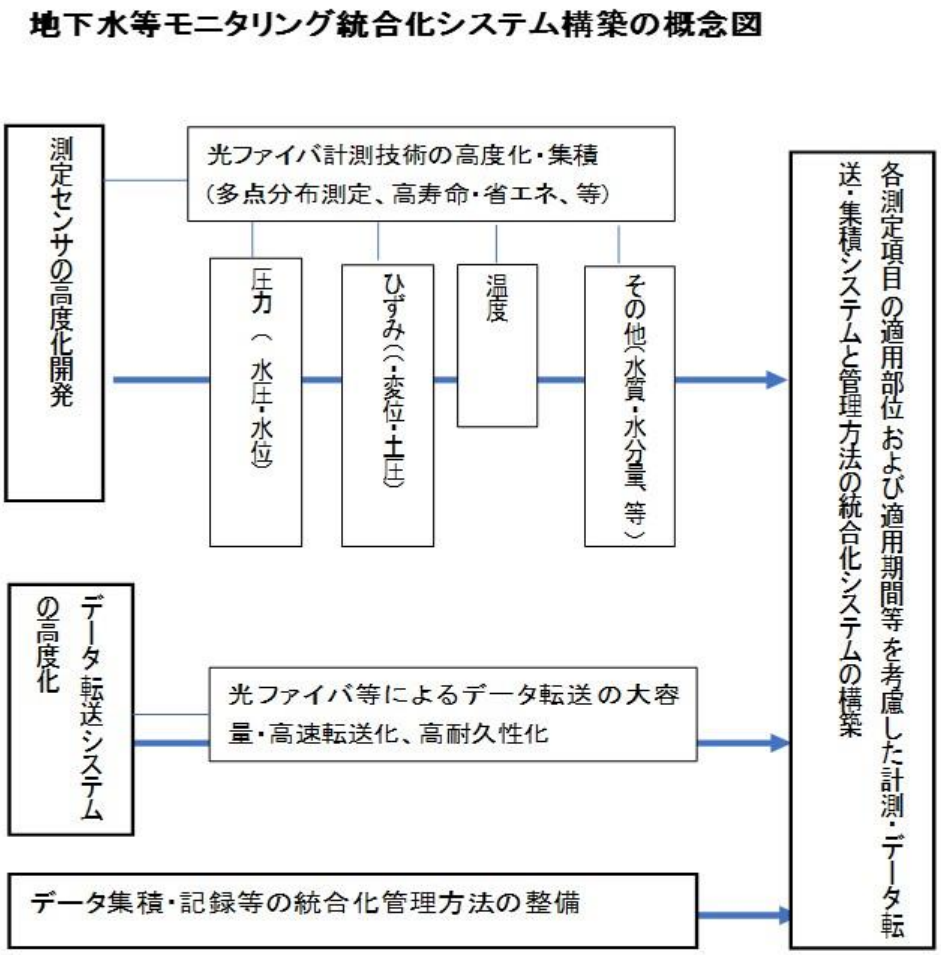
図 3.3-2　ドローン技術を活用した地表・坑道内の管理モニタリング統合化システム構築概念図

2）（高度化技術候補案-1）:光ファイバ技術の適用先の拡大と耐久性向上と多目的計測用等に高度化：

測定技術としては水圧（間隙水圧や地盤圧力）、ひずみ、温度等の計測のほか、データ送信など多用途に活用されつつある。

光ファイバは、上記測定センサーとして、また通信・データ送信などでも、電気式に比べて雷等の影響も受けにくく、腐食にも強いため、長期耐久性を要求される地下水等モニタリングには適しており、多点測定にも優れているなど今後も応用範囲の拡大が期待されているが、ここでは、地下水等モニタリングで必要となる水質などの多目的センサーとしての複合型センサーの開発など、応用範囲の拡大を図るとともに、耐久性や省エネ・小サイズ化などの高度化を図る。上述したような地下水等モニタリングの統合化システム構築の概念を図

3.3-3 に示す。



【既往技術の参考文献】

20) 川端・永谷・今井：「地盤工学における情報収集・分析・伝達技術開発の最前線―第４章 高速・高精度の分布型光ファイバ計測技術を活用した地盤モニタリングについて」、地盤工学会 Vol.68, 2020年12月号.
21) 永谷・川端・今井：「分光型光ファイバセンサを用いた地中変位計測技術」、地盤工学会 Vol.69, 2021年1月号.

図 3.3-3　地下水等モニタリング統合化システム構築の概念図

3.4　中深度処分の事業展開・規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価技術の主な技術課題の抽出と論点整理

令和 3 年度においては、令和 2 年度において調査検討した中深度処分の事業展開・規制要求を考慮した地下水流動の調査・評価技術内容に関する概略調査結果をもとに[1][6]、原子力規制委員会によるその後の関連規則の改定された内容も考慮して[5]、技術課題とその対応方策の方向性について更に詳細な検討を行った結果を以下に述べる。

3.4.1　中深度処分規制要求への対応を考慮した技術課題の抽出と論点整理

原子力規制委員会においては、中深度処分に係る規制基準の改正検討にあたっては、事業許可申請から始まって、事業の終了、更にはその後の廃止措置終了後に至るまでの各段階における規制のあり方に係る基本的な考え方が図 3.4-1 のように示されており、操業～閉鎖措置～閉鎖措置後の管理機関～廃止措置に至るまでの間、安全な処分が行われていることを技術的に可能な範囲でモニタリング等を継続的に行い、それらの情報等をもとに定期的な評価等で確認していくという考え方が明示された。モニタリングでは放射性物質の漏えい監視が重要であるが、その主な移動媒体となる地下水や漏えいの徴候を検知できるトレーサーや、人工バリア・天然バリアの安全機能に係る測定・解析等が重要となることが示されている。

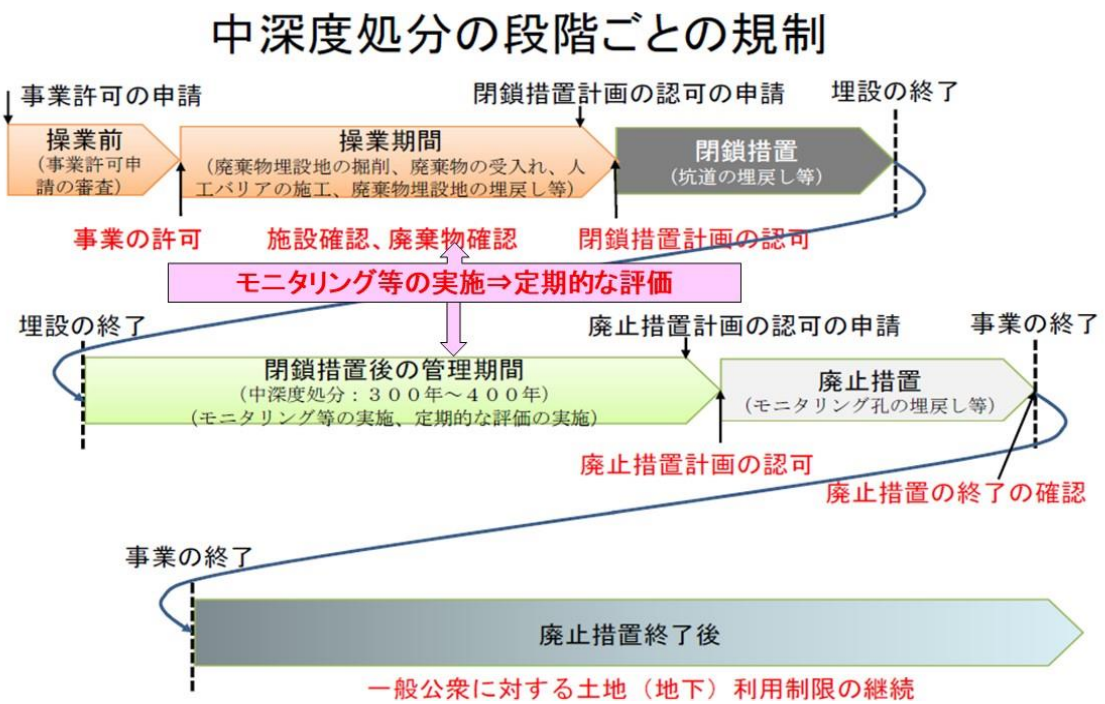


図 3.4-1　中深度処分の段階ごとの規制の考え方

以下では、中深度処分に関する新しい規制基準における要求事項とそれらへの対応を考慮しての技術課題の抽出と論点整理を行った結果を述べる。

(1) 中深度処分に係る埋設地における放射性物質の漏えい監視と定期的な評価

第二種廃棄物埋設施設の中で中深度処分施設に係る技術上の基準や定期的な合評価等に関する考え方が事業規則の中で規定されている[23]。

これらの中で、地下水流動の評価に深く関わるものの例として、廃棄物埋設での設備の点検と漏出の防止に必要な措置、埋設外への漏えいの監視、更には定期的な評価等が述べられており、図 3.4-2 にその内容の骨子を整理して示す。

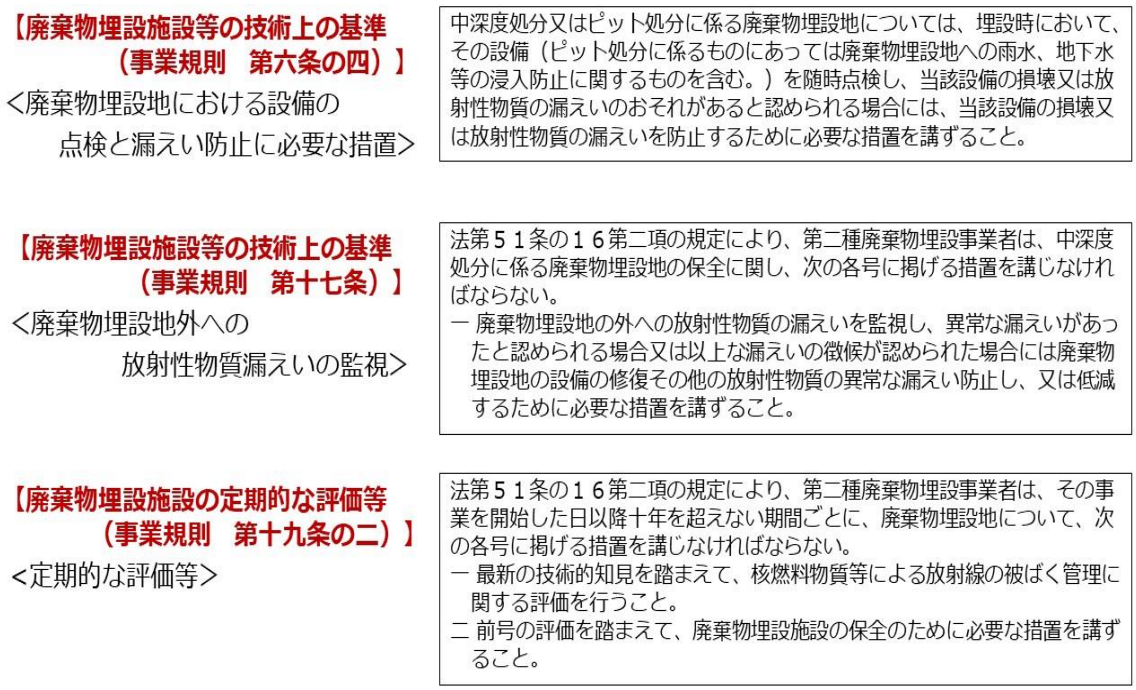


図 3.4-2　中深度処分の埋設地での放射性物質漏えいの監視と定期的な評価

(2) 監視測定設備の要件とそれへの対応事項の整理

監視測定設備に関する要件は原子力規制委員会における許可基準規則に係る一部改正案の中で規定されており[24]、またそれらの主要なものへの対応が必要な事項も示されており、それらの骨子を次に整理する。

1) 監視測定設備の主な要件

中深度処分に係る廃棄物埋設施設は、廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度又は廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質を監視及び測定できる設計であること。更に、次の要件を満たすこと。

a. 対象期間：放射性廃棄物の受け入れの開始から廃止措置の開始まで。

b. 対象期間と使用環境に適応して、実用上必要な精度で監視及び測定ができる性能を有

し、かつ人工バリア及び天然バリアの機能を著しく損なわないこと。

c. 廃止措置の開始以降、設備を設置した場所を経由した放射性物質の異常な漏えいのおそれがある場合は、異常な漏えいが生じないよう当該設備の解体及び埋戻しができること。

d. 「廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質」とは、設置した人工バリアの破損等に伴い著しい変化が生じる地下水の成分、人工バリアの異常な劣化を検知するために用いるトレーサーをいう。

e. 「事業所及びその境界付近における放射性物質の濃度及び線量」を監視し、及び測定できる設備は、対象期間の間、廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による周辺環境における放射線量並びに操業に伴い周辺環境に放出される放射性物質の濃度等を監視・測定できる設計であること。

f. 「地下水の水位その他の廃棄物埋設地及びその周囲の状況」を監視し、及び測定できる設備」とは、定期的な評価等に必要なデータを取得するため、人工バリア及び天然バリアの機能並びにこれらに影響を及ぼす地下水の状況等の監視及び測定の項目を選定し、対象期間の間、監視及び測定できる設計であること。

g. ただし、実際の環境と類似した環境下での原位置試験等の間接的な方法により人工バリア及び天然バリアの機能並びにこれらに影響を及ぼす地下水の状況等のデータを取得できる場合は、これらの方法によることができる。

2）今後の対応が必要な事項の整理

上記の各要件に対応するため、廃棄物埋設地からの漏えいする放射性物質の監視（濃度若しくは漏えいの徴候を示す物質を監視測定できる）が必要であり、上記の各要件に対応して次のように整理される。

a. 実施期間は廃棄物の受入れ開始～廃止措置の開始まで

b. 必要な精度で監視・測定が可能で、人工バリア・天然バリアの機能を著しく損なわない方法

c. 設備を設置した場所を経由しての放射性物質の異常な漏えいのおそれがある場合は、それが生じないよう当該設備の解体・埋戻しが可能

d. 漏えいの徴候を示す物質とは、人工バリアの破損等に伴い著しい変化が生じる地下水の成分や人工バリアの異常な劣化を検知するためのトレーサー等
（⇒漏えいの徴候を示す物質・方法・判断基準などの確立が必要）

e. （周辺監視区域等での監視測定設備の設計について解説されている）

f. 「地下水の水位、廃棄物埋設地及びその周囲の状況」を監視・測定できる設備」は、定期的な評価等に必要なデータを取得するため、人工バリア・天然バリアの機能やこれらに影響を及ぼす地下水の状況等の監視・測定の項目を選定し、対象期間の間、監視及び測定できる設計とする

g. 廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいを監視する設備の設置場所・方法は、厳密に

該当場所での実施に限らずに、実際の環境と類似した環境下での原位置試験等の間接的な方法によりバリア機能やそれらに影響を及ぼす地下水の状況等のデータを取得できる場合は、これらの方法によることもできる。

（⇒廃棄物の埋設段階～処分坑道の埋戻し完了までの段階～廃止措置の開始までの段階に応じて、廃棄物埋設地からの漏出監視・測定が可能／処分坑道の連絡坑道～アクセス坑道の間で、類似の地質環境の場所あるいは埋設施設サイト内の類似地質環境での原位置実証試験等による可能な代替方法の検討）

(3) 中深度処分の事業展開と規制要求を考慮した今後の技術課題の抽出

中深度処分の事業展開と各段階での規制要求への対応事項に関して整理し、そこから今後の重要な技術課題として、特に放射性物質の漏出・移動に大きく関係する地下水流動の評価に係るものとしては図 3.4-3 に示すように 2 つの課題に集約して抽出した。

（抽出課題-1）：調査～パラメータ設定～設計～評価における不確実性の低減と評価

（抽出課題-2）：事業展開に応じた地下水等監視モニタリング技術の高度化と統合化整備

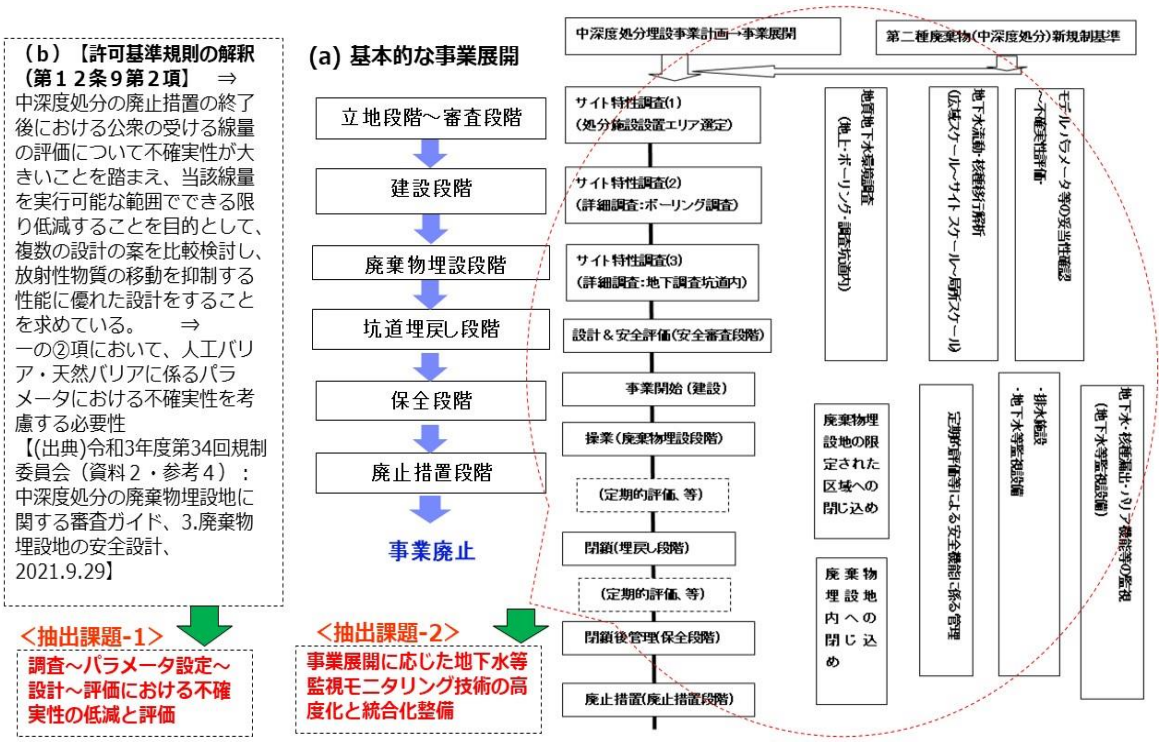


図 3.4-3 中深度処分の事業展開と規制要求を考慮した今後の技術課題の抽出

3.4.2　中深度処分における不確実性への対処に関す規制の考え方と技術課題の整理

地下水流動評価に関連する不確実性への対処に関する技術課題について、中深度処分の規制要求の考え方や高レベル放射性廃棄物処分に関する技術検討報告書より不確実性評価への対処に係る考え方の最近の検討事例について調査・整理した結果を以下にまとめる。

(1) 廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に係る規制要求の考え方

中深度処分に係る廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に関する規制要求の考え方においては、いろいろな観点からの不確実性を考慮する必要性が示されており、それらの主要なものを整理して示す[26][27]。

１．設計プロセスについて

中深度処分では、数万年を超える長期間にわたって放射性廃棄物を起因とする放射線による影響から公衆と生活環境を防護する必要がある。このため設計段階で行う公衆の線量評価も長期に及ぶことから、そこで用いられる長期のシナリオ、関連する現象、パラメータ、将来の公衆の生活様式等には大きな不確実性があり、これらの設定の如何によって線量評価結果も大きな不確実性を伴う。

したがって、埋設した放射性廃棄物に起因する将来の周辺の公衆全体の被ばくの可能性及び線量を合理的な範囲でできる限り低減するための最新の知見・技術による措置の検討及びそれを実現するための設計上の対策とともに当該設計に関する詳細な説明を埋設事業者に求め、そのプロセスの妥当性の確認に重点を置くこととする。

即ち、埋設事業者は、埋設する放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質※1 に応じて、規制期間終了後にわたる安全確保のための廃棄物埋設地※2 の位置、構造及び設備に係る設計に関して、次に示す（１）人工バリアの設計等に係る選択肢の設定、（２）廃棄物埋設地の設置場所に係る選択肢の設定及び（３）設計オプションからの最終的な設計の選定に係るプロセス（これらをまとめて「設計プロセス」という。）を示すこととし、原子力規制委員会はこれら設計プロセスの妥当性を確認する。

⇩

（１）人工バリアの設計等に係る選択肢の設定

廃棄物埋設地の構造及び設備に関しては、人工バリアの設計が、材料管理及び施工管理の方法の見通しも含め、設置される環境において技術的に施工可能なものであることに加えて、以下の安全機能の観点から優れていると考えられるものとして挙げられる複数の選択肢（特定の設計が最も優れていることが明らかな場合は当該設計のみでよい）に関する技術的根拠を含む設定のプロセスを示すこと。

＜なお、「放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了までの間、廃棄物埋設地の限定された区域からの主要な放射性物質の漏出を防止する機能」に関する要求事項については、令和 3 年度第 35 回規制委員会資料 2 において、許可基準規則第 12 条第 1 項第 4 号における【放射性物質の漏出防止】の内容を変更し、中深度処分の埋設地の場合はピット処分とは異なり、次の条項が規定されているので不要となり、削除された。＞

－埋設の終了から規制期間終了までの間、廃棄物埋設地の外への主要な放射性物質の漏出を防止する機能

－規制期間終了後において、廃棄物埋設地の外への主要な放射性物質の漏出を防止する機能又は低減する機能

図 3.4-4　中深度処分廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に係る規制要求の考え方（前半）

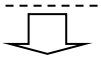
図 3.4-4 の点線枠内記載事項

「５第１項第４号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する」とは、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の終了までの間、地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まって、廃棄物埋設地から放射性物質が漏えいしない状況（工学的に有意な漏えいがない状況）を達成することをいう。」（令和３年度第 35 回規制委員会の資料２における許可基準規則の解釈第 12 条第１項第５号への追加説明）

（２）廃棄物埋設地の設置場所に係る選択肢の設定

－廃棄物埋設地の設置場所に関しては、廃棄物埋設施設※3 の敷地の範囲を考慮し、廃棄物埋設地を合理的に設置可能と考えられる場所において、以下の機能の観点から優れていると考えられるものとして挙げられる複数の選択肢（特定の場所が最も優れていることが明らかな場合は当該位置のみでよい）に関する技術的根拠を含む設定のプロセスを示すこと。

－天然バリアによる廃棄物埋設地から生活環境への主要な放射性物質の移動を抑制する機能



－このプロセスにおいては、廃棄物埋設地の周辺の水理地質構造、地球化学環境、河川及び断層の位置等を踏まえて、廃棄物埋設地から生活環境に至る地下水の移動経路を考慮し、優れていると考えられるものを挙げることとする。

－天然バリアの機能については、立地調査の結果を踏まえた設定の根拠に加えて、事業許可後の施設確認において可能な範囲でできるだけ確認が行えるよう、掘削等に際して得られる情報から確認又は検証が可能と考えられる情報及びその方法の見通しについても、事業許可申請の段階において示すこととする。

図 3.4-5　中深度処分廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に係る規制要求の考え方（後半）

(2) 被ばく線量評価におけるパラメータ（天然バリア、人工バリア）の変動範囲と不確実性を考慮した設定の考え方

自然事象シナリオの被ばく線量評価に関しては、ピット処分及びトレンチ処分と同様に中深度処分においても、上述の設計プロセスを経て選定された「生活環境への主要な放射性物質の移動抑制機能に係る性能が最も優れている」設計について、自然事象シナリオに基づいて行うこととされており、中深度処分施設に係る被ばく線量評価におけるパラメータ（天然バリア、人工バリア）の変動範囲と不確実性を考慮した設定の考え方が図 3.4-6 のように示されている[28]。この中で、放射性物質の移動抑制機能に関するパラメータ設定に関しては、

パラメータの変動範囲も考慮して合理的に保守的な設定がなされていることを判断できるように立地段階や坑道掘削段階等における調査データの取得・評価・設定が必要とされている。

２．自然事象シナリオとその線量基準について

規制期間終了後において保全のための措置を講じる必要のない状態に移行する見通しの確認の一環として、自然現象に伴い公衆の受ける線量が一定の水準以下となる見通しであることについての確認も埋設事業者に求めることとする。これは中深度処分に限らず浅地中処分（ピット処分及びトレンチ処分）においても同様である。

線量の算出は、上述の設計プロセスを経て選定した「生活環境への主要な放射性物質の移動抑制機能に係る性能が最も優れている」設計について、自然事象シナリオに基づいて行うこととする。

－「被ばくに至る経路」は、科学的に合理的と考えられる範囲において最も厳しいと考えられるものを選定する。

－「人工バリア及び天然バリアの状態」に係るパラメータは、科学的に合理的と考えられる範囲の組み合わせのうち最も厳しい設定とする。

－「生活様式等」は、そのサイトにおいて一般的と考えられる河川水利用及び土地利用等、並びに食物及び飲料水の年間摂取量、被ばく換算係数を設定する。

⇩

■「最も厳しい設定」は、・・・・・・・「通常の状態において保守的な設定」を超えるような状態が発生する可能性まで考慮して設定することとするが、「科学的に合理的と考えられる範囲」を超えると考えられるものを考慮する必要はない（注 2）。

■⇒（注 2）

－例えば、廃棄物埋設地の周囲や比較的近い領域の天然バリアについての放射性物質の移動抑制機能に係るパラメータについては、立地段階におけるボーリングやトンネル掘削等の調査（以下「立地段階ボーリング等調査」という。）で得られた水理地質構造や地球化学環境データ等の情報及び統計学的手法等に基づいて、パラメータの変動範囲を定め、その範囲内で保守的な設定を行うこととする。

この際、保守的な設定を超えるような亀裂等が、調査を行った範囲では確認されなかった可能性まで考慮してパラメータの設定を行う必要はない。一方、廃棄物埋設地から生活環境に至る経路のうち、廃棄物埋設地から比較的離れた領域のように、立地段階ボーリング等調査による十分なデータを得ることが難しく水理地質構造等に係る不確実性が大きい領域における天然バリアの機能に係るパラメータについては、前述の亀裂の存在等、想定しうる最も保守的な設定、即ち「科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい設定」を行うこととする。

－また、例えば人工バリアのある機能について、評価期間によって評価の不確実性が大きく異なる場合は、それぞれの期間に応じて、「パラメータの変動範囲内での保守的な設定」又は「科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい設定」を選定することとする。“

図 3.4-6　中深度処分埋設施設の被ばく線量評価におけるパラメータ（天然バリア、人工バリア）の変動範囲と不確実性を考慮した設定の考え方

(3) 状態設定の不確実性を考慮した設計オプションとパラメータ設定の考え方

中深度処分廃棄物埋設地の設計オプションからの最終な設計の選定に際しては、上述の(1)及び(2)のプロセスを経たそれぞれの選択肢の組み合わせによる廃棄物埋設地の位置、構造及び設備の候補（以下「設計オプション」という）のうち、図 3.4-7 に示すように、①の条件を満たすものの中から②の方法によって最終的な廃棄物埋設地の設計を選定するプロセスを示すこととされている[27]。

① 設計オプションに求められる性能の水準

規制期間終了後における「廃棄物埋設地の外への主要な放射性物質の漏出を防止する機能又は低減する機能」及び「生活環境への主要な放射性物質の移動を抑制する機能」に係る総合的な性能が一定の水準に達している設計オプションの中から選定することとする。

自然現象による主要な放射性物質の廃棄物埋設地からの漏出、天然バリア中の移動、河川等への移行及び生活様式等（廃棄物埋設地の掘削を伴うものを除く。）を考慮したシナリオに基づいて行うこととする。

－「被ばくに至る経路」は、廃棄体中の主要な放射性物質が人工バリアを介して廃棄物埋設地から漏出し、天然バリア中を移動して生活環境に至るまでの経路及び生活環境において公衆が被ばくするまでの主要な放射性物質の移動経路として、最も可能性が高いと考えられるものを選定する（保守的と考えられるものを選定してもよい）。

－「人工バリア及び天然バリアの状態」に係るパラメータは、十分な科学的・技術的知見に基づいて不確実性を考慮した上で通常起こりうると考えられる範囲（この範囲内の状態を「通常の状態」という。）を定め、通常の状態において保守的な設定とする。この際、保守的な設定を超えるような状態が発生する可能性まで考慮してパラメータの設定を行う必要はない（注 2）。ただし、不確実性が大きく、通常の状態を設定できない場合は、科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい設定とする。（以上、一部抜粋）

② 最終的な設計の選定

① を満足する設計オプションの中から、「通常の状態において最も可能性が高い
と考えられる設定」において、生活環境への主要な放射性物質の移動抑制機能に係る性能が最も優れているものを選定する。い設定とする。

－「被ばくに至る経路」は、最も可能性が高いと考えられものを選定する。

－「人工バリア及び天然バリアの状態」に係るパラメータは、通常の状態において最も可能性が高い設定とする。ただし、線量ピークが現れるまでの期間にわたって「最も可能性が高い」設定を行うことが困難な場合は、設定可能な期間における設定を外挿することとする。

－「生活様式等」は、そのサイトにおいて一般的と考えられる河川水利用及び土地利用等、並びに食物及び飲料水の年間摂取量、被ばく換算係数を設定する。

（以上、一部抜粋）

⇩

最終的な設計の選定は線量の比較によることが基本であるが、それにも拘わらず線量評価結果で劣後する設計オプションを選択しようとする場合は、例えば処分システムの頑健性がより高いと考えられる設計や、評価の不確実性がより小さいと考えられる設計等の観点で最も優れていると考える設計オプションを選定することとし、埋設事業者はその合理性を説明することとする。

図 3.4-7　設計オプションからの最終的な設計の選定における状態設定の不確実性を考慮した設計オプションとパラメータ設定の考え方

3.4.3 高レベル放射性廃棄物地層処分の包括的技術報告書(NUMO)における不確実性への対処の検討事例

原子力発電環境整備機構（NUMO）においては、地層処分の安全性を確保するうえでは、不均質な特性を有し、かつ広大な地下空間を対象とすることに起因する地質環境のデータや概念化などに関する不確実性や、数万年以上の長期にわたる地層処分システムの状態変遷の理解に関する不確実性など、さまざまな不確実性を適切に考慮することが必要であるとの考えのもと、2021 年に NUMO が取りまとめ公表した包括的技術報告書の中で、それらの不確実性への対処の考え方についての検討結果等が報告されている[29]。不確実性への対処に関しては、中深度処分の場合ともかなりの部分が共通的に参考とすることができると考えられるので、本項においてはそれらの主な要点を参考として以下に整理する。

(1) 高レベル廃棄物処分における段階的なサイト選定における不確実性への対処の考え方

NUMO における「包括的技術報告書－わが国における安全な地層処分の実現」(2021)の中で、段階的なサイト選定における不確実性への対応の考え方が取りまとめられており、その要点を整理して図 3.4-8 に示す。

この中で、サイト選定では調査の進展に応じてサイトの地質環境情報を段階的に詳細化し、この詳細度に応じて処分場の設計や工学技術の具体化を行い、安全評価を実施するとの基本的な進め方が述べられている。

また、地質環境の調査・評価では、取得した情報の種類や量、地質環境の理解度、不確実性の種類、要因や程度などを把握して、不確実性に関連性の高い地質環境に係る因子（例えば、断層の空間分布や水理学的特性など）を抽出するとともに、この不確実性に係る情報を地質環境モデルや付随するデータセットと併せて、処分場の設計及び安全評価に提供するとしている[29]。

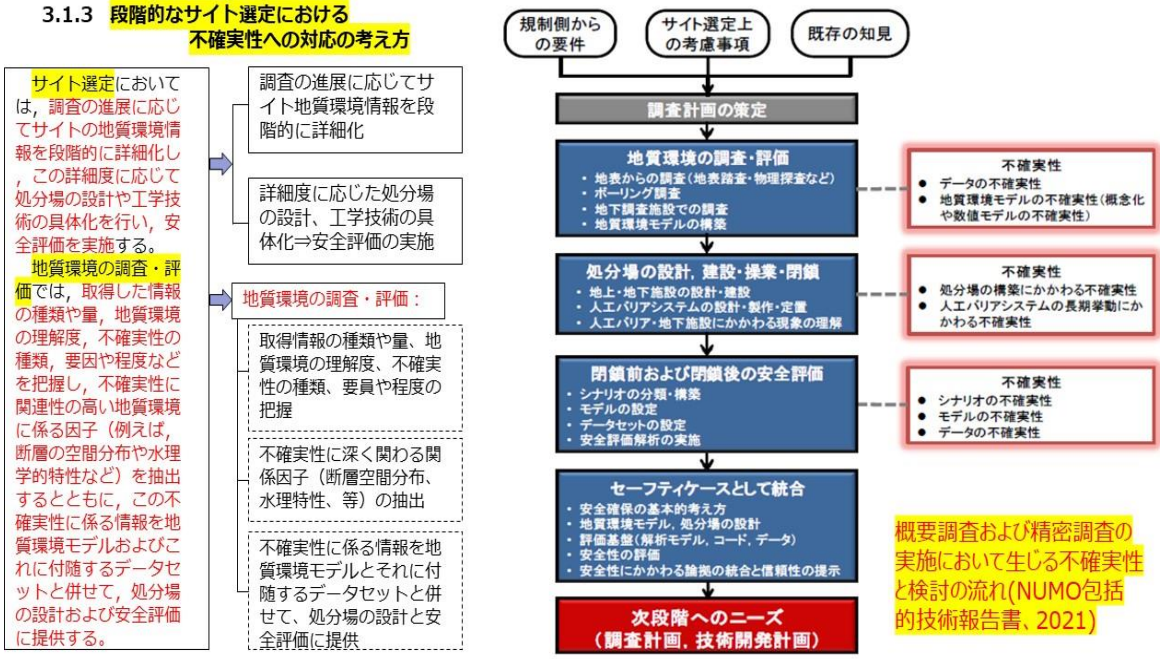


図 3.4-8　HLW 地層処分における段階的なサイト選定における不確実性への対処の考え方

(2) 高レベル廃棄物処分における段階的なサイト選定における不確実性への対処の考え方

NUMO の包括的技術報告書における付属書 2-8 においては、「不確実性への対処」に関するより詳細な検討結果のとりまとめが個別にとりまとめ報告されており、サイト選定の各調査段階における不確実性への対処に関しても、具体的な進め方や方法論について取りまとめ報告されている[30]。表 3.4-1 はそれらの要点を抽出・整理したものである。

表 3.4-1　各調査段階における不確実性とそれへの対処の考え方(NUMO 包括的技術報告書より)

■ 文献調査段階：　第四紀火山や活断層の分布と活動性，隆起・侵食の傾向，鉱物資源の有無などを調査し，概要調査地区としての適格性が明らかに劣る地域を除外する 。文献調査で取得できる情報は限定的であり，地質環境情報に関するデータや 知識は不確実性が大きい。このため，処分場の設計で は 既往検討に基づく 処分 場 概念の例示 ，安全評価では定性的な安全性の考察 を行い この段階において把握できない情報や判断が困難な項目は次の概要調査の段階にて検討する 。 また，安全性に影響する重要な不確実性の因子を特定し，概要調査計画や技術開発計画に反映する 。

■ 概要調査段階：　地表からの調査（地表踏査・物理探査など）およびボーリング調査によって地質環境情報を取得し，隆起・侵食などの地質環境の時間変遷を含めて 地質環境モデルに統合／本段階で得られる地質 環境 情報のデータ量や知見の制約を考慮しながら，性能に 余裕をもたせ て 人工バリアや地上施設・地下施設の概念的な設計を実施／安全評価では，地質環境モデルに統合された 不確実性を含む 情報および処分場の設計結果を踏まえて，地層処分システムにおいて生起 し得る さまざまな状態変遷を想定し，安全評価シナリオ の設定に反映→ このシナリオに沿って放射線学的影響を解析する安全評価 モデル，核種移行デ ータなど を 十分 に 保守性を 考慮して 設定／処分場の設計および安全評価の検討結果に基づき，処分施設の工学的実現性および安全性に大きな影響を及ぼすと考えられる地質環境に係る因子を特定し，これらにかかわる不確実性の低減などの観点から，次の段階における調査・評価の対象とその優先順位を明確化／この段階において把握できない情報や判断が困難な項目は，次の精密調査の段階にて検討。これらを 精密調査計画や技術開発計画に反映。

■ 精密調査段階：　処分場の設計および安全評価からの要求事項を踏まえて，前半に地表からの調査を継続して地質環境 情報を拡充する。後半には地下調査施設を設置し，地下深部における母岩の詳細な情報や，工学的な実証試験を通じて人工バリアの品質などにかかわる情報 を取得する 。本段階で得られるより詳細な地質環境情報 や実証試験結果など をもとに，性能に余裕をもたせて人工バリアや地上施設・地下施設の基本設計を実施する。安全評価では更新された地質環境モデルの情報および詳細化された処分場の設計結果や操業方法など を踏まえて，安全評価シナリオ， 評価 モデル，核種移行データなどを十分な保守性をもって設定し， 閉鎖前および 閉鎖後長期の 安全評価の結果が規制 要件 を満たすことを確認する。安全性を満たさない場合，あるいは評価結果の不確実性が大きく信頼性の向上が必要と判断される場合については， 保守性に余裕を持たせた 処分場の設計への見直し，あるいは 不確実性の低減に向けた地質環境情報の追加取得などを 行い，安全評価のやり直しを行う。以上のように段階的なサイト選定プロセスにおいて，地質環境の調査・評価，処分場の設計，安全評価を連携させながら不確実性をできるだけ回避または 低減 しつつ，それでも残る不確実性を安全評価で考慮 し，安全性を確保する。 各段階では，安全性に影響する重要な不確実性の因子を特定し，次の調査計画や技術開発計画に反映する。

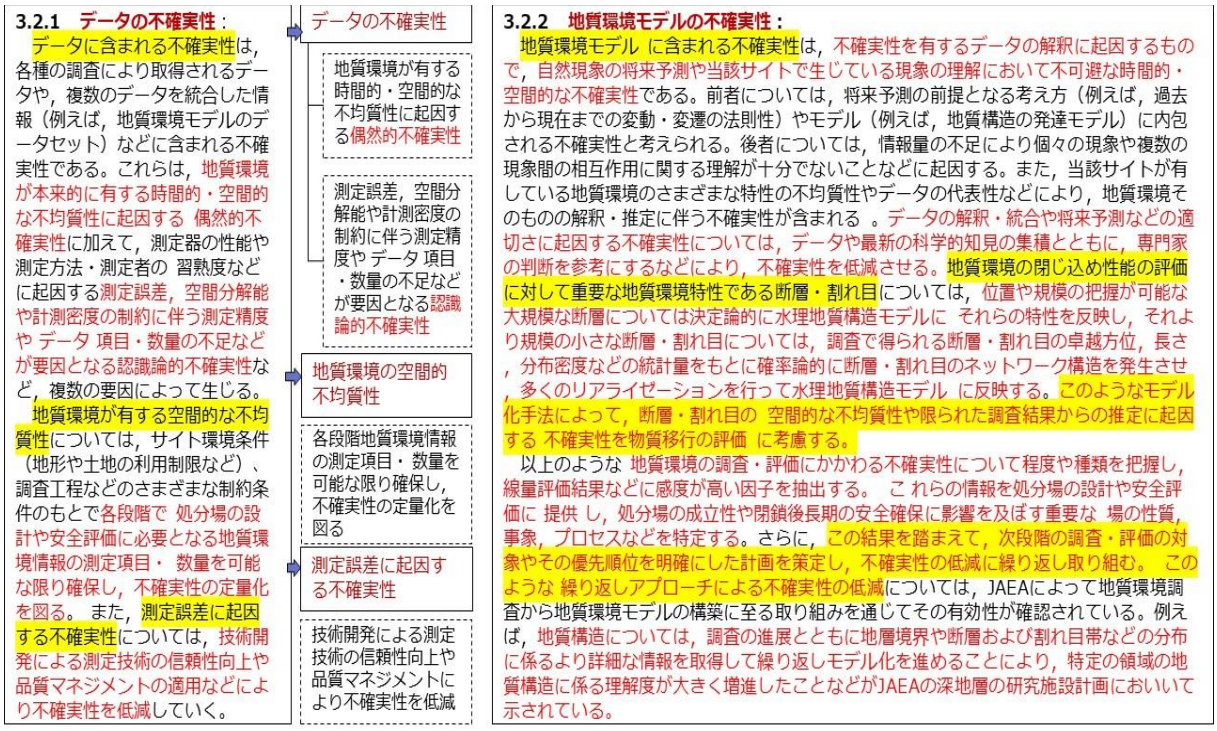
⇒（全体的な流れ）：
段階的な調査を行ってサイトを選定し，規制機関による審査を経て事業認可を取得した以降，処分場の建設・操業の段階へと進む。建設時の坑道掘削において は， 地下深部の地質環境特性に関するさらに詳細な情報が取得できる。操業期間中は，最新の知見を踏まえて放射線安全に関する定期的な評価が求められており，最新の地質環境情報や科学的知見の蓄積，実際に埋設する廃棄体インベントリの情報なども踏まえて，安全評価を定期的に更新すると想定される。また，操業期間中はモニタリングを実施することによって， 安全評価で想定した個別の現象（例えば，再冠水による緩衝材の飽和現象）が実際に起こっているかを確認することなどを行う。

(3) 地質環境の調査・評価におけるデータ及び地質環境モデルの不確実性への対処

NUMO 包括的技術報告書の付属書 2-8（不確実性の対処の考え方）においては、地質環境の調査、評価におけるデータに含まれる不確実性、あるいは地質環境モデルに含まれる不確実性について、それぞれどのようなものを検討する必要があるかということ、及びそれらへの対処の考え方等について検討取りまとめがなされており[29]、その骨子的なものを表 3.4-2 に示す。

表 3.4-2　地質環境の調査・評価に関する不確実性への対処

（NUMO 包括的技術報告書・付属書 2-8 より）



(4) 処分場の設計・建設・操業・閉鎖に関する不確実性への対処

NUMO 包括的技術報告書の付属書 2-8（不確実性の対処の考え方）においては、処分場の設計・建設・操業・閉鎖の各段階におけるデータ、製品の品質、モデル、施工品質などに含まれるばらつき、誤差などの不確実性、あるいは人工バリアシステムおける長期挙動に関わる不確実性など、考慮する必要のあるものを抽出し、それらへの対処の考え方について取りまとめられている[30]。その骨子的なものを表 3.4-3 に示す。

表 3.4-3　処分場の設計・建設・操業・閉鎖に関する不確実性への対処

（NUMO 包括的技術報告書・付属書 2-8 より）

3.3.1処分場の構築にかかわる不確実性： 処分場の設計では，地質環境モデルとそれにかかわるデータセットに含まれる不確実性を考慮し，地質環境特性が想定し得る範囲で変化したとしても，処分場の要求機能が満足できるように人工バリアや地下施設の仕様を余裕をもって設定する。設計の過程では，一般の土木・建築やほかの原子力施設で用いられているさまざまな設計理論や設計式などを適用するが，例えば経験的な設計式と最新の数値解析を用いた構造計算などを併用して設計検討を行う場合などはそれぞれの設計検討が内包する不確実性の違いについても考慮して，全体としての設計の信頼性を担保する。 処分施設の建設，人工バリア材の製造や原位置での定置の過程で施工誤差や品質のばらつきなどが生じる。これらについては，実証試験などにおいて人バリア材の製造品質，原位置での施工誤差や品質のばらつきの程度を把握し，これを踏まえて要求水準に対して余裕をもった管理値を設定するなど，品質保証活動により要求品質を満足するよう管理を徹底することを基本とする。そのうえで，安全評価において，これらの不確実性が安全性に及ぼす影響について検討を行う。	処分場の設計： ・地質環境モデルと関連データセットの不確実性を考慮⇒地質環境特性が想定範囲内で変化したとしても要求機能が満足できるように人工バリアや地下施設の仕様を余裕をもって設計。設計検討のプロセスにおいて内包される不確実性の違いも考慮し、全体としての設計の信頼性を担保する 処分施設の建設、人工バリアの製造・原位置での定置の過程⇒施工誤差や品質のばらつき ⇒実証試験などで人バリア材の製造品質，原位置での施工誤差や品質のばらつきの程度を把握⇒要求水準に対して余裕をもった管理値の設定等の品質保証活動により要求品質を満足するよう管理を徹底することを基本 ⇒その上で，安全評価でこれらの不確実性が安全性に及ぼす影響について検討	**3.3.2　人工バリアシステムの長期挙動にかかわる不確実性：** 現象に関する科学的な理解があり，将来挙動を予測するための実験データや検証された予測モデルなどが存在するなど，一定の信頼度をもって予測可能な人工バリアシステムの長期的な挙動（例えば，オーバーパックの長期腐食挙動や緩衝材のクリープ変形，鉄材料やセメント系材料との相互作用による緩衝材の長期的な変質の程度など）については人工バリアシステムの設計において考慮する。この際，実験データのばらつきや複数の解析モデルの存在などに起因する不確実性を考慮し，所要の安全機能が確保できるように保守性をもった設計を行う。 処分場の施工品質の不良にかかわる不確実性，あるいは対象とする期間が数万年を超える長期にわたる現象など その時点での科学技術的な知見では 確実な将来予測ができないことに起因して発生する不確実性については，科学技術的に想定可能な範囲において，安全上有意な影響がある可能性のあるものを抽出し，安全評価において考慮する。	**人工バリアシステムの長期挙動の不確実性：** ・現象に関する 科学的な理解があり，将来挙動を予測するための実験データや検証された予測モデルなどが存在するなど，一定の信頼度をもって予測可能な人工バリアシステムの長期的な挙動(オーバーパックの腐食、緩衝材のクリープ変形、鉄・セメント材料と緩衝材との相互作用による長期変質などは設計で考慮) ⇒・人工バリアシステムの設計の際、実験データのばらつきや複数の解析モデルを用いるなどにより不確実性を考慮⇒安全機能を確保できるよう保守性をもった設計 ・処分場の施工品質の不良にによる不確実性，対象とする期間が数万年を超える長期にわたる現象など 科学技術的な知見では確実な将来予測ができないことに起因する不確実性 ⇒想定可能な範囲内で安全上より有意な影響の可能性があるものを抽出し、安全評価で考慮

（5）安全評価に関わる不確実性への対処

地層処分の安全評価においても様々な不確実性を考慮する必要があり、シナリオの設定、各種のモデル、データなどに含まれる不確実性があり、セーフティーケースでは、それらの作成段階における不確実性を特定し、次段階に向けてどのように回避・低減していくかの方針を明確に示すことが必要であるとしている。

本項では、安全評価に関わるシナリオ、モデル、データにおける不確実性への対処について、またそれらの特定を踏まえてセーフティーケースにどのように統合化していくかという考え方について、NUMO 包括的技術報告書の付属書 2-8 に取りまとめられた結果より、それらの骨子を表 3.4-4～表 3.4-6 に整理して示す[30]。

表 3.4-4　安全評価のシナリオにおける不確実性への対処

（NUMO 包括的技術報告書・付属書 2-8 より）

3.4.1　シナリオの不確実性：

シナリオの不確実性は，地層処分システムにおいて緩慢に進行する人工バリア材の劣化や，地下水による放射性物質の移行といった現象の時間的推移に関する不確実性，地質環境の 長期 安定性に影響する自然現象の発生時期や頻度に関する不確実性など，地層処分システムにかかわる現象やプロセスに 対する理解や知識の不足に起因 して 生ずる。

処分場閉鎖前の安全評価については，何らかの自然事象や人為事象を起因として ，処分施設の安全対策が正常に作用せずに放射性物質の漏えいを引き起こすような 異常状態に至る シナリオを設定する。これにより，安全対策の設計において想定した起因事象の不確実性などを考慮する。安全確保上重要なシナリオの見落としがないよう，国内外の知見を集約して施設に影響を与えるハザードのデータベースなどを整備し，網羅的なシナリオ設定ができるようにするなどの対処を行う。

閉鎖後長期の安全評価については，地層処分システムで生起するさまざまな現象の解析や，処分場の各要素において想定される特性(Feature)、特性に影響を与える事象(Event），処分場の時間的変遷の過程(Process）を記述したFEPを活用した分析に基づき，地層処分システムの長期的なふるまい（熱的，水理学的，力学的，化学的な状態の変遷）を記述し，安全評価上のシナリオとして設定する。これらシナリオの記述にかかわる事象のうち，自然過程における事象の不確実性については，現状の科学的知見に基づき，生起することが最も確からしいと想定されるシナリオ（基本シナリオ）に対して，科学的知見に基づいて合理的に設定できる不確実性を考慮したシナリオ（変動シナリオ）や，発生可能性が極めて小さい事象を想定したシナリオ（稀頻度事象シナリオ）を分類して設定することで，地層処分システムの安全性にかかわる不確実性の影響を安全評価に合理的に反映する。

シナリオの設定においては，国内外の最新知見を踏まえてFEPの拡充や現象解析の信頼性向上を行うこと，また専門家の意見を参考にすることなどにより，シナリオの選定や記述における不確実の低減を図る。

なお，本報告書では，科学的知識に基づいて地層処分システムにおいて生起する事象の確からしに応じて基本シナリオ，変動シナリオを分類しているが，基本シナリオとして取り上げた事象におけるデータのばらつきといった不確実性は，変動シナリオの解析ケースの設定において考慮した。また，稀頻度事象シナリオは，事象の発生頻度が極めて低いためシナリオ設定に参考となる科学的知識が少ないことから，実際には科学的に考えにくいような事象をあえて設定し，それでも人間の生活環境に著しい影響を与えないかを確認するためのシナリオとして設定することで，事象に対する知識の不足に起因する不確実性に対処する。一方，現状の科学的知見や感度解析などに基づき，地層処分システムの安全性に与える影響が極めて小さいか無関係と判断される不確実性，あるいは発生可能性そのものが極めて小さく無視できると考えられる不確実性，また地層処分システムの安全性を向上させるよう作用する不確実性については，シナリオの設定において検討対象としない。

将来の人間活動に関しては，その不確実性を評価することは困難であるため，前述したとおり国際的に議論されている考え方に基づき，現在の人間活動に基づいて様式化されたシナリオ（人間侵入シナリオ）を構築する。また，生活圏評価における将来の人間の生活様式と地表環境の設定についても，不確実性を評価することが困難であるため，様式化したシナリオを設定する。このような様式化したシナリオの妥当性については，専門家の意見などを参考に検討する。

表 3.4-5　安全評価の各種モデルにおける不確実性への対処

（NUMO 包括的技術報告書・付属書 2-8 より）

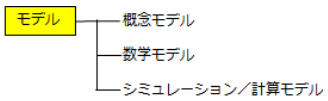
3.4.2　モデルの不確実性：

モデルには、場や現象を概念化した表現したモデル （概念モデル）、その 概念を 支配方程式などによって 数学的 に 表現 したモデル （数学モデル）、数学モデルの解を計算 機 によって求めるためにプログラムに変換したモデル(シミュレーションモデルあるいは計算モデル)がある。 計算機によってシミュレーションを実行する ツールのことを解析コード ともいう 。

モデルの不確実性は、 構築したモデルが真の事象をどの程度正しく表現しているのかわからない状態を意味 しており、具体的な要因としては、モデルの形を過度に単純化すること で事象の表現に必要となる重要なプロセスやパラメータを取り入れないこと、限定された条件下で設定されたモデルを条件外まで適用することなどが挙げられる。

概念モデルの不確実性について は、地層処分システムで生じる現象をどの程度理解しているかとともに、理解した現象をモデルとして適切に表現しているか、もしくはどのような現象を表現 していないかを把握しているかが影響する。 数学モデル の不確実性については、 作成の際 に適切な数学表現ができているか など が影響する。また、三次元的な現象を一次元モデルで表現するなど過度に簡略化し てモデル化することも影響する。 概念モデルや数学モデルには、現象を理論的に考察して構築したモデルや、現象を経験的に表現したモデルなどがあり、その信頼性は根拠となる科学的知見に依存する。 これらの不確実性については、最新の科学的知見を反映しつつ、専門家の意見などを参照してモデルの適切さ や モデルが表現している事象の範囲を把握するとともに 、適用できる事象の範囲にモデルの使用を限定す ることなどで対処する。また 安全性への影響が過小評価されないようにするため、例えば期待されるバリア機能の一部を無視する、自然現象の著しい影響があえて生じることを想定した モデルを用いるなど の 保守的な評価も 併せて行う。また、必要に応じてモデルを複数準備し、これらを併用して評価を行う こと などによって 、モデルの不確実性が評価結果に及ぼす影響を把握する。

シミュレーションモデルの不確実性については、数学モデルに対応する解析 コードを 適切に作成できていないこ となどから生じる 。 こ の不確実性 については、 付属書 2 9 に示すように理論解による検証（Verification）および 室内実験や 現場実証試験 により取得した データとの比較などによる妥当性確認（Validation ）によって信頼性を検証した解析コード を適用するとともに、必要に応じて同じ数学モデルに基づく解析コードを複数適用し、 このうちの 保守的な結果を採用するなどの対処を行う。



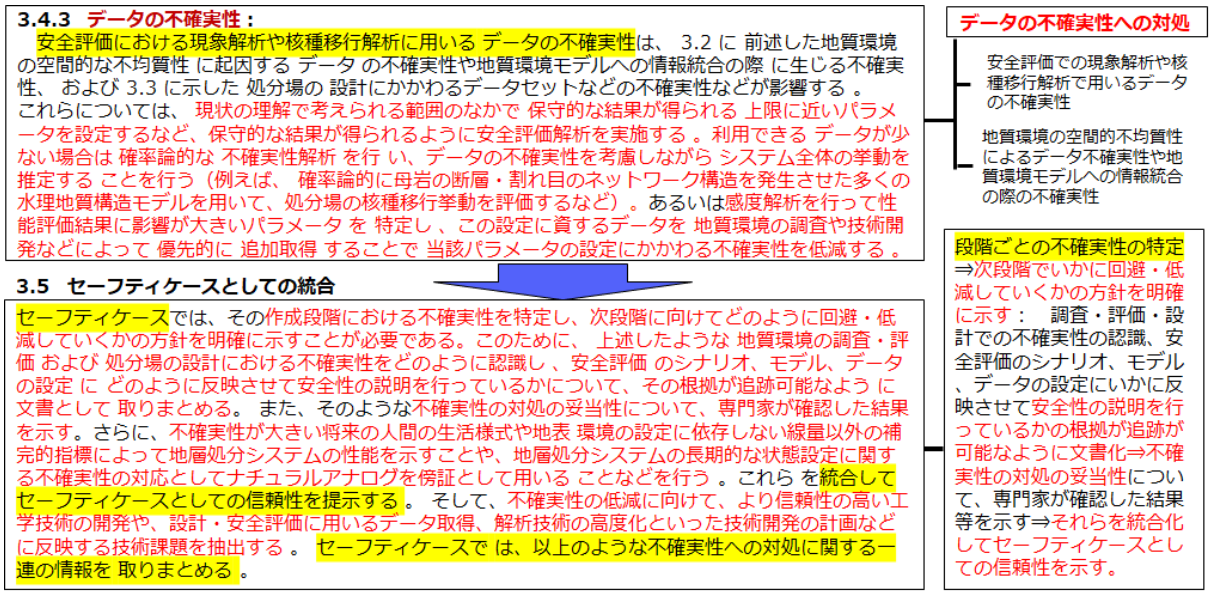
モデルの不確実性：　モデルを過度に単純化して設定／事象の重要なプロセスやパラメータが取り入れられない、限定された条件下での設定されたモデルを条件外まで適用、等

概念モデルの不確実性：　地層処分システムで生じる現象をどの程度理解しているか、モデルとして適切に表現しているか／どのような現象を表現していないかの把握が影響

数学モデルの不確実性：　適切な数学表現ができているか、3次元的な現象を1次元モデルで表現するなど過度な簡略化したモデル化などが影響⇒その信頼性は根拠となる科学的知見に依存⇒これらの不確実性は、最新の科学的知見を反映しつつ、専門家の意見などを参照してモデルの適切さやモデル表現対象事象の範囲を把握し適用できる範囲に限定してモデルを使用すること等で対処

シミュレーションモデルの不確実性：　数学モデルに対応する解析コードを適切に作成できていないことにより生じる。⇒理論解による検証、室内実験や現場実証試験データとの比較などによる妥当性確認による信頼性を検証した解析コードを適用。必要によって、複数の解析コードを適用して保守的な結果の方を採用、等

表 3.4-6　安全評価におけるデータの不確実性への対処とセーフティーケースへの統合
（NUMO 包括的技術報告書・付属書 2-8 より）



(6) 不確実性評価方法体系の構築概念の JAEA の検討例 : 地質環境モデルの不均質性・地下水流動解析評価の総合的な品質マネジメント

NUMO の包括的技術報告書の取りまとめの中でも数多くの JAEA による検討成果が参考とされており、それらの一つとして不確実性評価方法の体系化に向けての、地質環境モデルの不均質性及び地下水流動解析評価の総合的な品質マネジメントの方法論が検討事例として 3.2.4 (2) における図 3.2-4 のように示されている[11][29]。

3.5　今後の主要な技術課題の抽出と検討の方向性（まとめ）

上述のように、中深度処分に係る想定される事業展開とその各段階に対応して新しく改訂された規制基準・規則における規制要求への対応が必要となる事項を総合的に整理し、今後に向けてさらなる技術の高度化・開発や確証をしていくことが必要な技術課題について検討・整理を行い、それらの中で特に重要と思われる課題として 3.4.1　(3) において、次の 2 つの課題を抽出した。

（抽出課題-1）：調査～パラメータ設定～設計～評価における不確実性の低減と評価

（抽出課題-2）：事業展開に応じた地下水等監視モニタリング技術の高度化と統合化整備

本項においては、今後に向けての重要となる技術課題に関して、更に今後の具体的な対応検討の方向性を含めて総括的に検討整理した結果を以下にまとめる。

上記のように、3.4.1　(3) では不確実性の評価と地下水等の監視モニタリング 2 つの課題を主要課題として抽出したが、更にそれらにつなげる意味でも重要なものとしてサイト選定調査段階からその後の各段階に応じて地質地下水環境状態変化の把握のための調査・評価技術の高度化・確証や放射性物質の漏えい監視や人工バリアの安全機能等を合理的に監視・確認する技術に関しても地下水の監視とともに重要な技術として位置付けることとし図 3.5-1 に示すように今後の主要な技術課題として 4 項目に分類して整理・集約した。

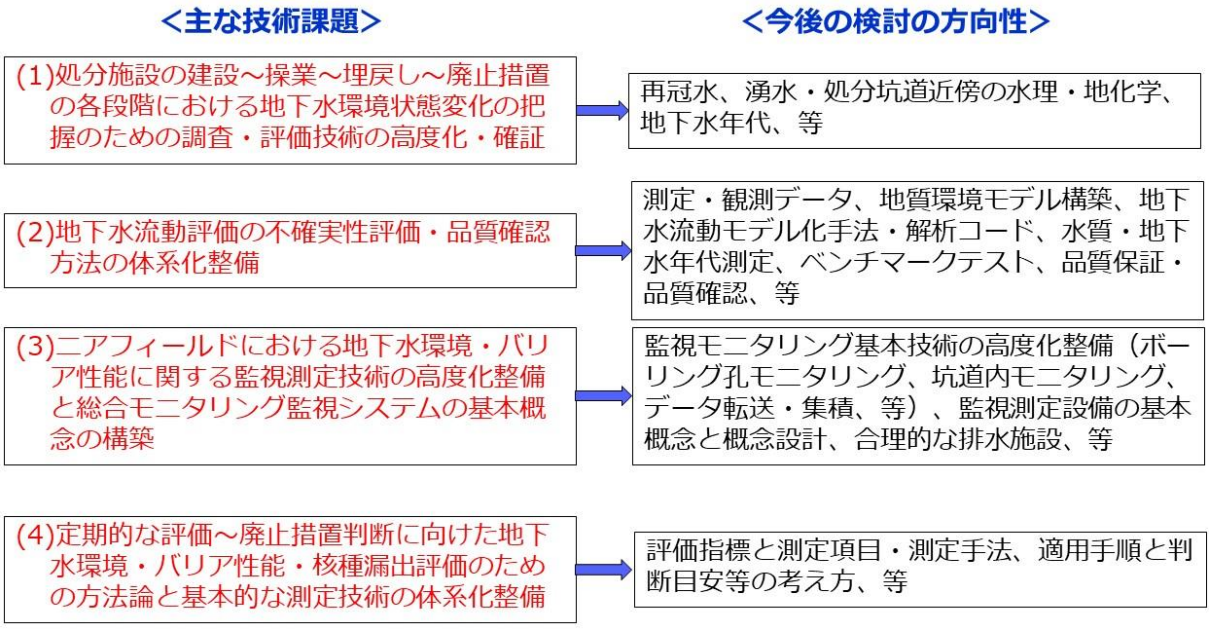


図 3.5-1　中深度処分の今後の重要な技術課題の抽出と今後の高度化・開発の方向性

以下では、それぞれの課題について、更に補足的な今後の方向性や具体的な検討事例などの情報を整理して示す。

(1) 中深度処分事業展開の各段階の地質地下水環境状態変化の把握

この技術課題に関しては、図 3.5-2 に示すようにサイト選定調査段階に続いて、処分施設の建設～操業～坑道埋戻し～廃止措置の各段階における地質地下水環境の状態変化の把握をするための調査・評価技術の高度化を目指すものであり、既往の技術の高度化と最近の技術との組み合わせなどで、より長期の廃棄物埋設地周辺の状態変遷を合理的に把握できるようにすることを目指すことが重要となる。

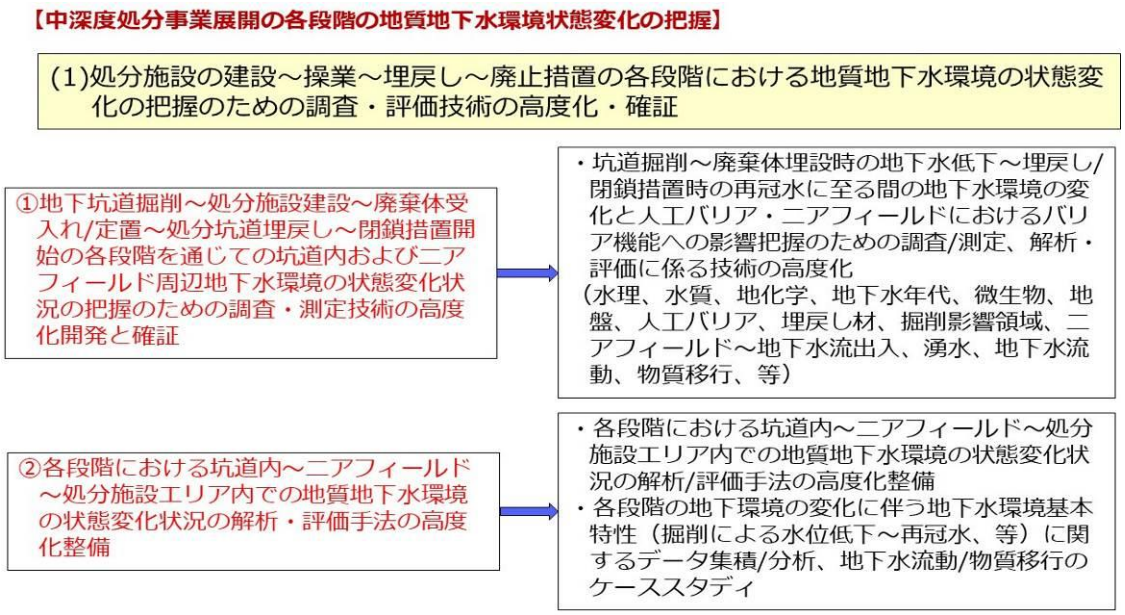


図 3.5-2　中深度処分事業展開の各段階の地質地下水環境状態変化の把握と対応の方向性

(2) 中深度処分における地下水流動評価の不確実性評価・品質確認方法の体系化整備

地下水流動評価に係る不確実性評価・品質確認方法の体系化整備については、3.4.2　で述べた検討・整理の結果に基づき、具体的な個別な検討対応の方向性の概要案を図 3.5-3 のように示した。例えば、我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術に係る地下研究施設の一つである瑞浪超深地層研究所地下研究施設等での地質地下水等の調査研究による情報・データを活用して、関係機関が保有する解析コード等を適用してベンチマークテストを実施するなど、学協会等の協力なども得て不確実性の低減や評価に関する方法論等を整備すること整備することなども有効なアプローチの一つになると考えられ、中深度処分においても共通的な重要な参考情報として活用することが可能と考える。

一方、地下水流動の調査・評価における不確実性の評価に関しては、上記のような地下水流動に関する調査やモデリングによるもののほかに、隆起・侵食等の万年～10 万年にわたる閉鎖後超長期の地形・地質環境の評価に係る不確実性の評価の方法も重要な課題として検討する必要がある。

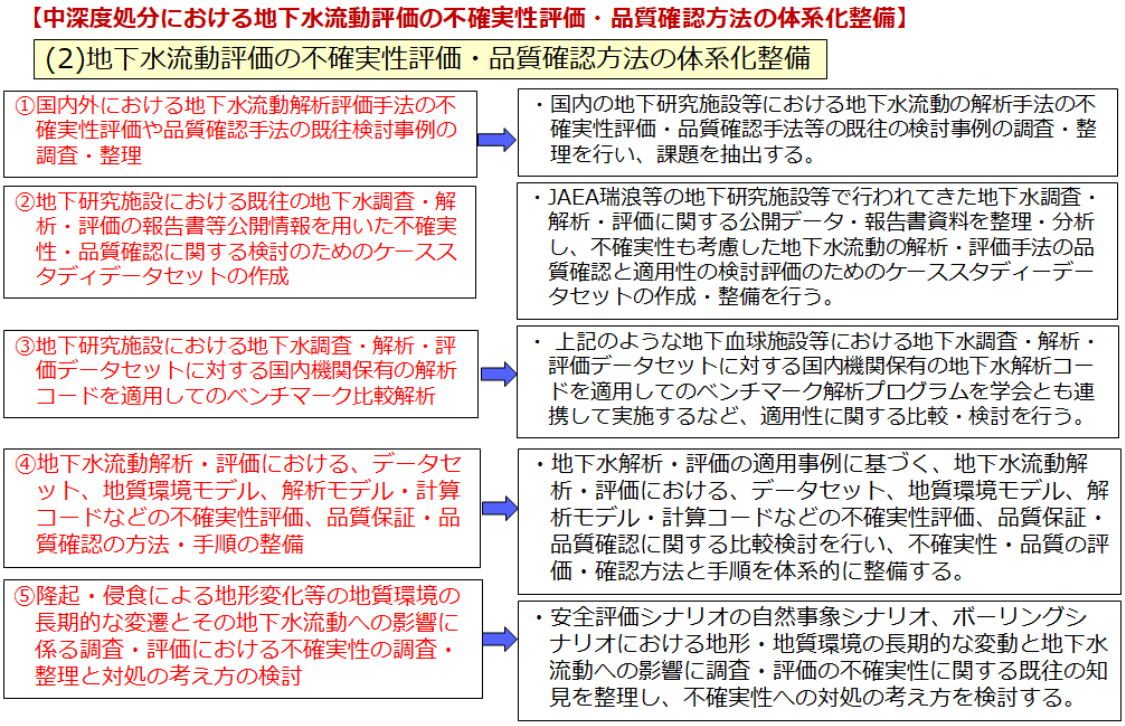


図 3.5-3　中深度処分における地下水流動評価の不確実性評価・品質確認方法の体系化整備

また、図 3.5-4 は JAEA における地質環境モデルの不均質性・地下水流動解析評価の総合的な品質マネジメントに関する研究成果の事例である。

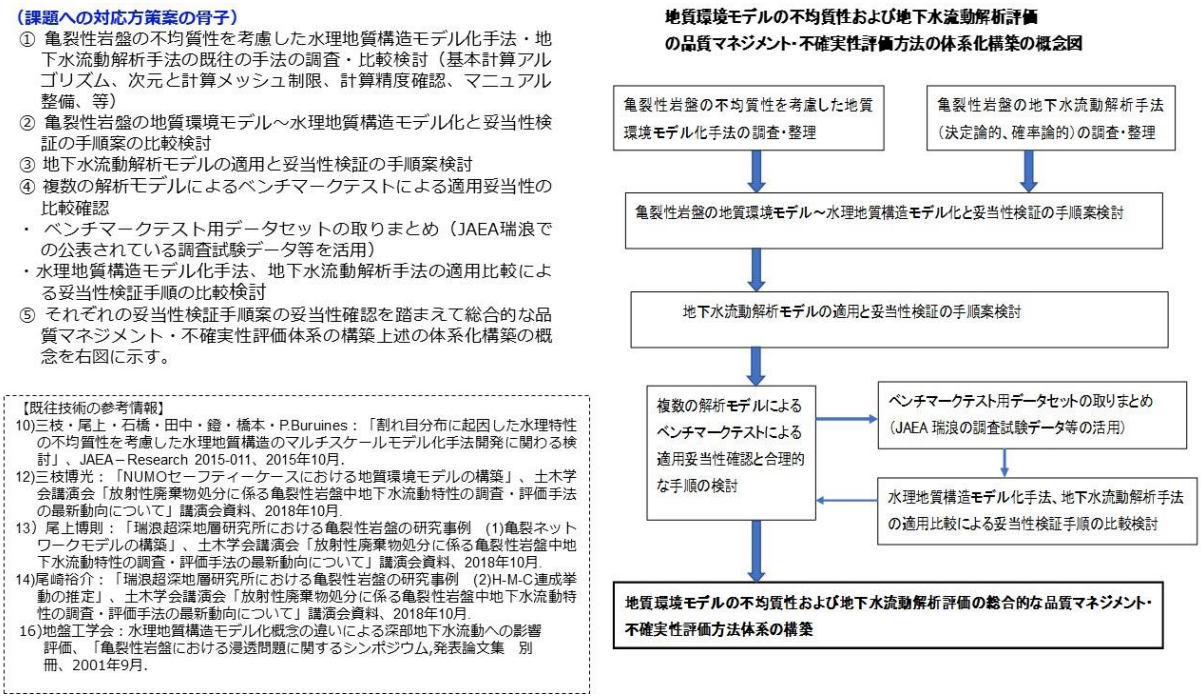


図 3.5-4　地質環境モデルの不均質性・地下水流動解析評価の総合的な品質マネジメントに関する調査研究事例（三枝 他(JAEA)、2015）

(3) 中深度処分の地下水環境・バリア性能に係る監視モニタリング技術と監視・管理方法の体系化整備

図 3.5-5 に示す技術課題の対応の方向性は、3.3.2 における調査検討結果に基づき、中深度処分施設の廃棄物埋設地やニアフィールドにおける地下水環境・バリア性能に関する監視測定技術の高度化整備と体系的なモニタリング監視・管理方法の基本概念の構築と体系化整備の方向性についての考え方の案を示したものである。

また、それらの検討整理した結果に基づき、今後さらなる検討・整備を進める上で重要となる技術検討項目や事例調査項目などの具体的な課題を次のように集約しておく。

- 中深度処分の地下水環境・バリア性能に係る監視モニタリング技術と監視・管理方法の体系化整備の考え方（図 3.5-5）
- 中深度処分の事業展開と地下水等監視モニタリング展開の考え方（図 3.5-6）
- 中深度処分における地下水等監視モニタリング概念の全体構成イメージ（図 3.5-7）
- 監視測定設備の概念事例（スイス NAGRA の地層処分場計画での検討例）（図 3.5-8）
- 事業段階と規制要求を考慮した地下水等監視モニタリング統合化システムの構築案(1/2)、(2/2)（図 3.5-9、図 3.5-10）

以下においては、上述の各項目に関する今後の検討の方向性として重要と考えられる高度化開発目標の概略案を示しておく。

1) 中深度処分の地下水環境・バリア性能に係る監視モニタリング技術と監視・管理方法の体系化整備の考え方

3.2.5 で述べたように、低レベル放射性廃棄物の中深度処分に係る新しい基準規則においては、事業許可の審査段階～建設段階～廃棄物埋設段階～坑道埋戻し段階～保全段階～廃止措置段階を経て事業廃止に至るまでの各段階において、放射性廃棄物の埋設処分施設の安全性が十分に確保されていることを確認するために、安全確保上で重要な監視対象となる放射性物質の漏洩と放射性物質の基本的な移動媒体となる地下水の埋設地への流出入と移動状況並びに放射性物質の漏出防止と移動抑制に大きく関わる人工バリアと天然バリアのバリア機能が有効に機能していることを監視・確認していくことを要求している。そのために、事業許可申請段階からそれ以降の事業の各段階を通じて、中深度処分施設の廃棄物埋設地とそのニアフィールドにおける地質地下水環境と人工バリア・天然バリアのバリア性能等の安全機能が安全確保上で想定した範囲内に十分に達成されていることを確認するための測定や評価が合理的に実施し得るように地下水の監視モニタリングを含む監視測定設備等の設置と合理的な運用が重要となる。このような観点から、地下水環境とバリア性能に関する監視測定技術の高度化整備と体系的なモニタリング監視・管理方法の整備に関する基本概念の構築手順の考え方を図 3.5-5 に示すように集約・整理した。

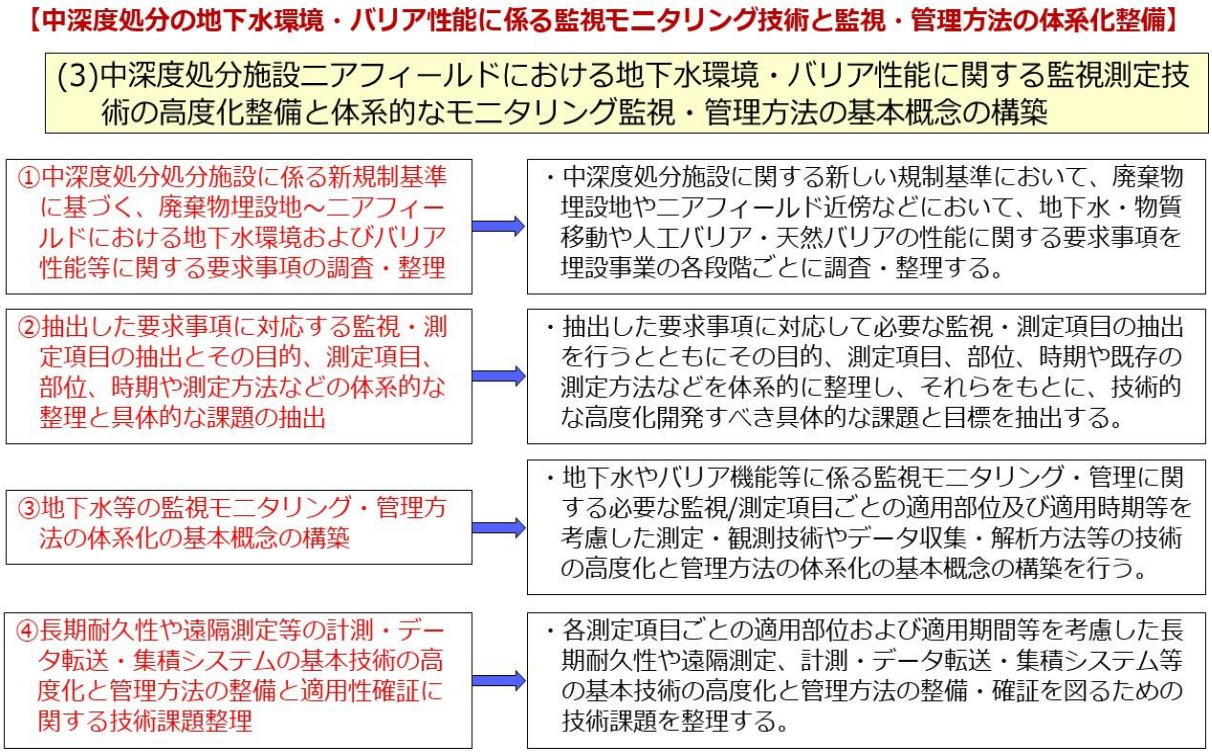


図 3.5-5　中深度処分の地下水環境・バリア性能に係る監視モニタリング技術と監視・管理方法の体系化整備の考え方

2）中深度処分の事業展開と地下水等監視モニタリング展開の考え方

図 3.5-6 は、上述したような地下水等の監視モニタリングを中深度処分の事業段階の進展を考慮して展開していく考え方を示したものである。すなわち、規制基準の要求に適切に対応するように事業展開に応じた目的の設定と実施項目の設定を行った上で、それを合理的に実施していくための監視・測定等の実施に適用する技術・方法の整備・高度化を図るものであり、この図では、現時点での候補となるような技術の例を示している。それらの測定・監視データ等は事業段階と場所に応じた地下水流動等の調査・評価を含む地下水・廃棄物埋設地の監視の規制要求への合理的な対応に供されるとともに、定期的な評価における安全確認の実証的なデータ・情報としても有効に活用することが期待される。

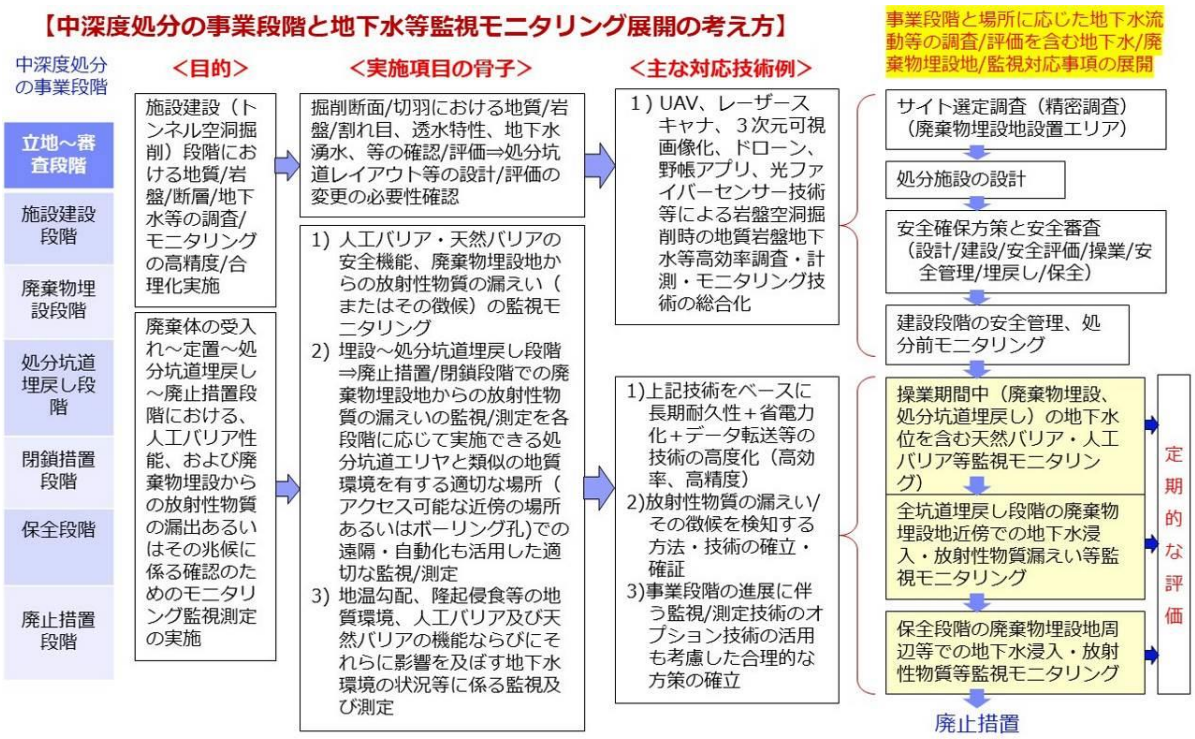


図 3.5-6　中深度処分の事業展開と地下水等監視モニタリング展開の考え方

3）中深度処分における地下水等監視モニタリング概念の全体構成イメージ

一方、図 3.5-7 においては、中深度処分の地下水等監視モニタリングの概念に関する全体構成を考える上で重要な事業展開に応じての具体的な技術展開の概念検討例を図示したものである。

中深度処分施設の建設から廃棄物埋設の段階までは坑道が掘削されて、その間の坑道内における廃棄体の埋設をバリア機能への影響を及ぼさないように円滑に進める必要から地下水の排水管理等を適切に行う必要がある。埋設が完了して坑道の埋戻しが開始されてからは徐々に坑道内への地下水の冠水が始まり、坑道埋戻しが完了して、保全段階を経て廃止措置段階に至る 300～400 年程度と考えられている長期間の間まで冠水は進行し続ける可能性があるなど、廃棄物埋設地やその周辺のニアフィールド～天然バリアに至る区域の地下水環境の状態変遷は人工バリアや廃棄物埋設地、更には天然バリアの放射性物質の漏出防止や核種移動抑制機能へも影響する因子ともなるので、それらの地下水環境等の監視モニタリングは安全確保上での重要な役割を担う。また、廃棄体埋設段階から廃止措置の開始に至る段階まで、各段階の廃棄物埋設地の環境条件に応じて合理的に実施できる適切な方法により放射性物質の漏えいの監視、それに大きく関わる周辺地下水環境の状態変化、人工バリアや廃棄物埋設地の安全機能の状態変化をモニタリング監視することが重要となる。図 3.5-7 は、事業段階と対象部位に応じて想定される主な測定・監視項目と必要な測定技術、並びに今後の高度化開発が望まれる機能など（長期の維持・管理、遠隔・自動化対応、データ転送の高信頼性と効率化（無線、有線)、給電・省エネ化、等）等を体系的に整備する概念として検討した

例を示したものである。

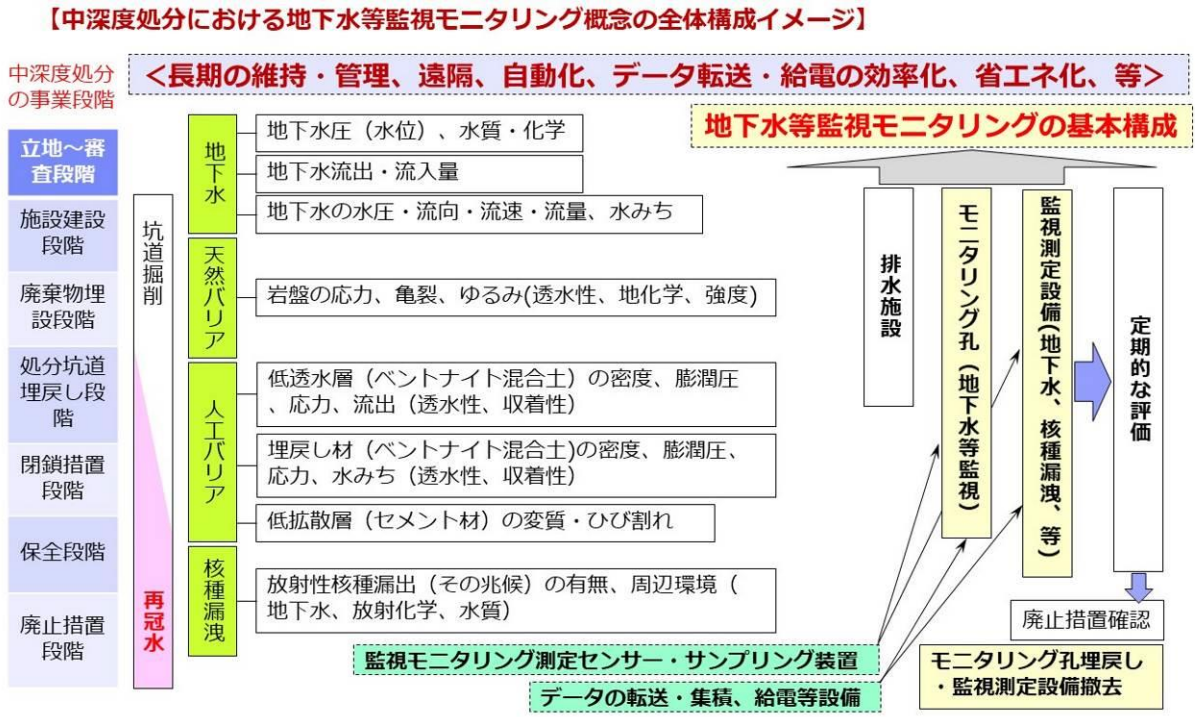


図 3.5-7　中深度処分における地下水等監視モニタリング概念の全体構成イメージ

4）監視測定設備の概念事例（スイス NAGRA の地層処分場計画での検討例）

一方、新しい規制基準においては、監視測定設備の設置が要求されており、3.4.1 (2)において監視測定設備の要件とそれへの対応が必要な事項の整理結果を示した。しかしながら、監視測定設備については、具体的な技術的な方策はまだ確立されていない。特に、監視測定設備は廃棄物埋設段階、埋戻し段階から廃止措置の開始までという状態の大きな変化を伴う長期にわたり、廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいを監視し、更に埋設地やその周辺の地下水や人工バリア・天然バリアの安全機能に係る状態変化を把握・確認し、定期的な評価にも必要なデータ・情報を提供するという、安全確保方策の中でも重要な役割を担うこととなる。したがって、規制要求への対応のみならず、事業に向けての一般の理解を得る上でも、監視測定設備の具体的な方法論や技術的な方策を早期に確立して、信頼性確保にも資することが重要と考える。図 3.5-8 は、国外の事例として、スイスの放射性廃棄物処分の実施主体である NAGRA により処分施設概念の一つとして提案されている高レベル放射性廃棄物と低中レベル放射性廃棄物を併置処分する概念の中で、それぞれの処分施設の区域に近接して監視付き長期地層処分の概念に基づくパイロット施設（実際の廃棄物を使用）の設置する概念を参考として示したものである[30]。新しい規制基準においては、それぞれの立地条件や放射性廃棄物埋設地の設置状況、あるいは対象期間などの使用条件に応じて、監視測定設備の設置場所は、必ずしも人工バリアや廃棄物埋設地に近接する場所だけでなく、坑道の途中や地上付近、あるいは地上の試験設備であっても合理的に監視測定に対応する十分な実証的な

確認が実施できる見込みであれば可能としており、我が国での規制要求に見合う合理的に達成可能な具体的な技術方策の選択肢と方法論と適用技術を体系的に整備・確立することが必要と考える。

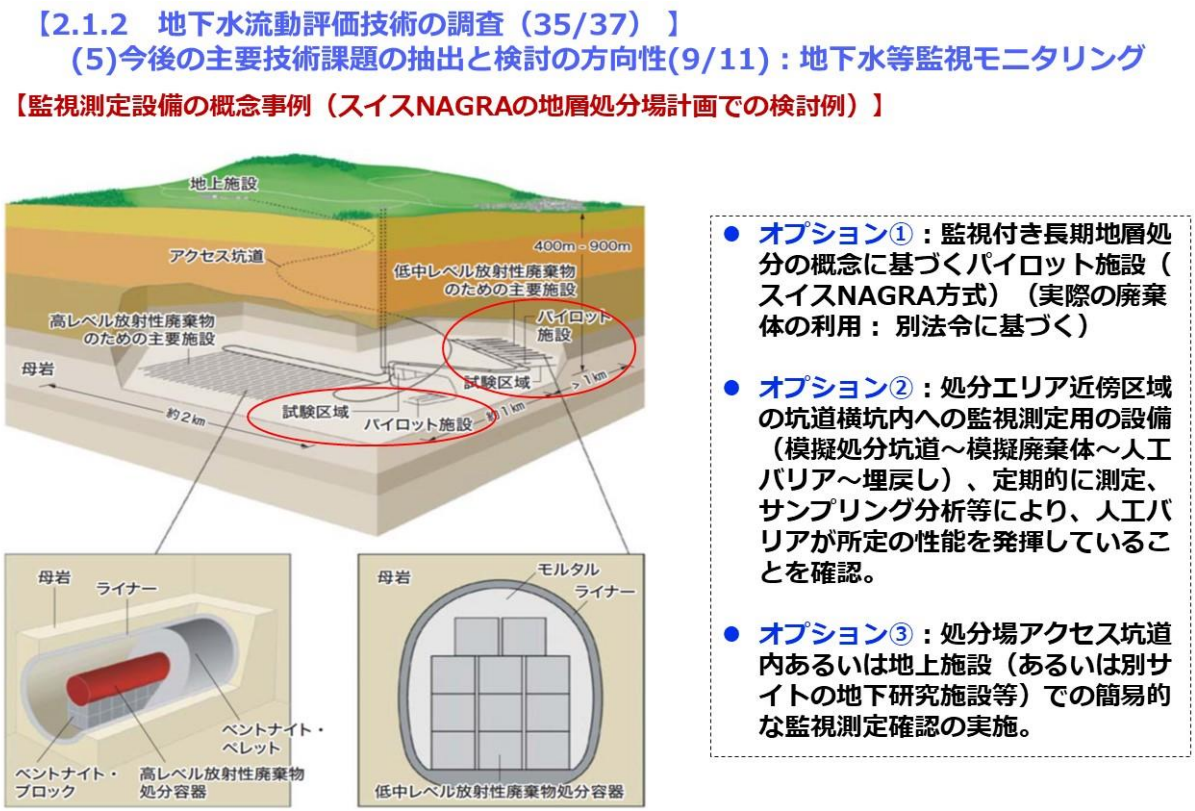


図 3.5-8　監視測定設備の概念事例（スイス NAGRA の地層処分場計画での検討例）

5)　事業段階と規制要求を考慮した地下水等監視モニタリング統合化システムの構築案

上述したような中深度処分に係る地下水等監視モニタリング技術の統合化整備に関して重要と考えられる検討項目について技術課題を整理した結果に基づき、中深度処分の想定される事業段階の展開と規制要求に対応しつつ安全確保を十分に考慮して長期にわたる中深度処分が合理的に達成できていることを確認・評価するために重要となる地下水等の監視モニタリング統合化システムの構築に関する技術的な構想案の例を図 3.5-9 及び図 3.5-10 に示す。

図 3.5-9 は、建設～廃棄物埋設～坑道埋戻しの各段階を通じて、坑道壁面の観察、特に地質・岩盤や亀裂性状、地下水湧出状況等を近年特に技術的に進化しているドローン技術や種々のセンサー技術等を用いた先進的な計測技術を応用し、また自動化や 3D 可視化観測なども導入して、坑道内での諸制約条件にも対応しつつ、より詳細かつ合理的なデータ取得、記録、解析等が可能な統合化されたシステムとして構築を図る考え方の案である。

一方、図 3.5-10 は、中深度処分の長期にわたる事業段階と規制要求を考慮して、地下水等の監視モニタリングを統合的に実施していくための技術的な構築案を事例的に示したもので

ある。光ファイバーなど、最近の進歩が著しい測定センサー技術、無線あるいは有線での大容量、高速なデータ転送や給電ができるような技術の高度化開発を図ることにより、中深度処分における各段階の環境条件や規制要求にも十分に対応した監視測定設備、地下水環境と人工バリア・天然バリアのバリア性能の状態変化の状況を統合的に監視・モニタリングする技術・方法論を体系的に構築・整備することを主眼としている。これにより、長期にわたる処分事業段階の展開に応じた安全確保状況の確認と定期的な評価にも有機的に活用していくことが期待できると考えられる。

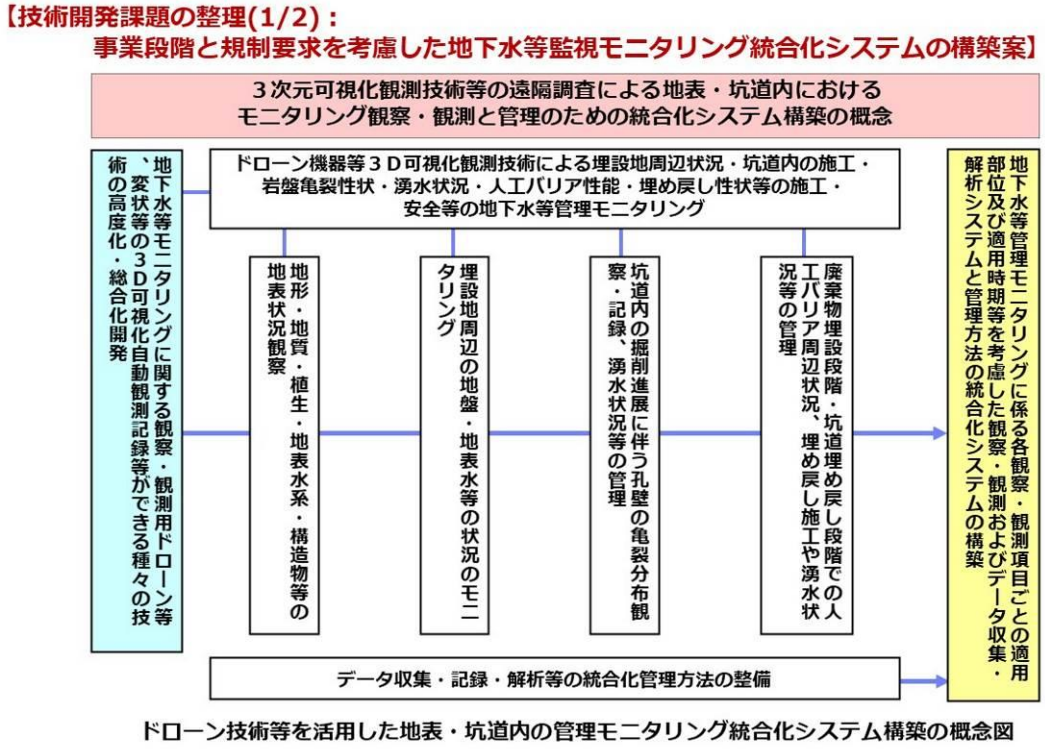


図 3.5-9　事業段階と規制要求を考慮した地下水等監視モニタリング統合化システムの構築案(1/2)

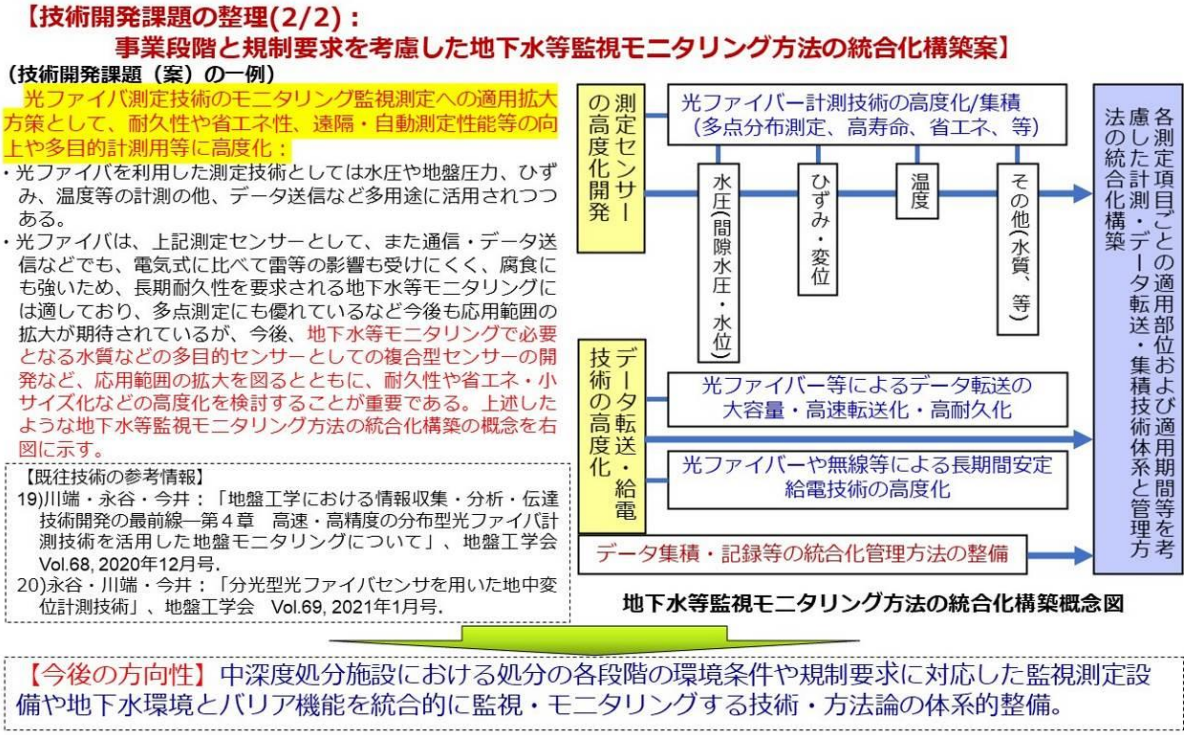


図 3.5-10　事業段階と規制要求を考慮した地下水等監視モニタリング統合化システムの構築案 (2/2)

以上、本節においては、地下水流動の今後の技術課題として考えられる主なものを抽出するとともに、今後の検討の方向性について概略的に整理し、2 年間の検討のまとめとした。

なお、今後の検討を進めるにあたっての参考として、高レベル放射性廃棄物処分の研究開発においては、経済産業省資源エネルギー庁の主管による現行の「地層処分研究開発調整会議」が、平成 30 年より最終処分関係閣僚会議の方針に基づき、NUMO がよりリーダーシップを発揮して JAEA 等の国内における主要研究開発機関や処分関連機関をメンバーとする調整会議体に改組され、我が国の地層処分研究の全体計画の策定、連携・成果の体系化・重複排除等の調整を図りつつ、全体を俯瞰して総合的、計画的かつ効率的な研究開発の円滑な推進を図られている。

それらの地層処分研究開発の実施内容や成果も中心深度処分と共通的に活用できるものが多くあると考えられることから、それらの取組み動向を十分に把握して、積極的に参考にする一方で重複はできるだけ避けるように十分に留意し、重要性や緊急性等の優先度を考慮した課題のさらなる絞り込みを図って、より詳細で具体的な今後の研究開発目標の絞り込みと効率的な研究開発推進を図って行くことが重要と考える。

第 3 章の参考文献

[1] 原子力規制委員会：「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」，原規技発第 1608312 号　原子力規制委員会決定, 2016 年 8 月 31 日.

[2] 原子力規制委員会:「中深度処分における廃棄物埋設地の設計プロセス及び線量評価に係る審査ガイドの骨子案」，平成 29 年度第 27 回原子力規制委員会　臨時会議, 資料 5（“廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合“の検討を踏まえて取りまとめた資料, 平成 29 年 7 月 31 日.

[3] 原子力規制委員会：第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案」，平成 29 年度第 27 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合, 資料 27-1, 平成 29 年 11 月 2 日.

[4] 原子力規制委員会:「第二種廃棄物埋設の事業許可基準規則における廃棄物埋設地における廃棄物埋設地に対する要求及び基準について(1)中深度処分」，平成 29 年度第 28 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合, 資料 28-1, 平成 30 年 3 月 20 日.

[5] 原子力規制委員会：「第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規制等の改正案に関する回答」，令和 3 年第 35 回原子力規制委員会, 資料 2, 2021 年 9 月.

[6] 原子力規制委員会:「中深度処分における廃棄物埋設地の廃止措置後の保全に関する措置を必要としないための設計プロセス及び公衆の被ばく線量評価に係る審査ガイドの骨子案」，平成 29 年度第 28 回廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合, 資料 28-2, 平成 30 年 3 月 20 日.

[7] 土木学会 エネルギー委員会：「余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオを用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方」，土木学会エネルギー委員会・低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会報告書, 平成 20 年 6 月.

[8] 原子力環境整備促進・資金管理センター:「地下水流動を説明するための調査システムフローの評価－RWMC と NDA の共同研究報告書―」,2010 年 2 月.

[9] 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構:「TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－」,2005 年 9 月.

[10] 原子力発電環境整備機構:「包括的技術報告：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築－,レビュー版 概要編」, NUMO-TR-18-02,2018 年 11 月.

[11] 三枝博光, 尾上博則, 石橋正祐紀, 田中達也, 鐙顕正, 橋本秀爾, P.Bruines:「割れ目分布に起因した水理特性の不均質性を考慮した水理地質構造のマルチスケールモデル化手法開発に関わる検討」,JAEA－Research 2015-011,2015 年 10 月.

[12] 竹内竜史:「地下水長期モニタリングによる地下水流動特性の評価に関する研究」，岡山大学大学院環境生命科学研究科 博士論文, 2016 年 3 月.

[13] 三枝博光:「NUMO セーフティーケースにおける地質環境モデルの構築」,土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料, 2018 年 10 月.

[14] 尾上博則：「瑞浪超深地層研究所における亀裂性岩盤の研究事例 (1)亀裂ネットワークモデルの構築」，土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料, 2018 年 10 月.

[15] 尾崎裕介:「瑞浪超深地層研究所における亀裂性岩盤の研究事例　(2)H-M-C 連成挙動の推定」，土木学会講演会「放射性廃棄物処分に係る亀裂性岩盤中地下水流動特性の調査・評価手法の最新動向について」講演会資料, 2018 年 10 月.

[16] 原子力規制委員会:「中深度処分に係る規制基準等の策定について　－電気事業連合会からの意見聴取の結果を踏まえて方針案－」,令和元年度第 52 回原子力規制委員会, F14SC40 参考資料-3（資料 4）, 2020 年 1 月 15 日.

[17] 地盤工学会：水理地質構造モデル化概念の違いによる深部地下水流動への影響評価，「亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム，発表論文集 別冊, 2001 年 9 月.

[18] 西山哲，冨井隆春，佐野ひかる，大西有三：「地盤工学における情報収集・分析・伝達技術開発の最前線―第 3 章　ドローンを利用した最先端モニタリング」，地盤工学会 Vol.68, 2020 年 11 月号.

[19] (株)アサノ大成基礎エンジニアリングパンフレット：「3 次元計測器を用いた構造物の調査－UAV（ドローン）を活用した施設点検などインフラ保全への取り組み」, 2021 年 1 月.

[20] 川端淳一，永谷英基，今井道男：「地盤工学における情報収集・分析・伝達技術開発の最前線―第 4 章　高速･高精度の分布型光ファイバ計測技術を活用した地盤モニタリングについて」，地盤工学会, Vol.68, 2020 年 12 月号.

[21] 永谷英基，川端淳一，今井道男：「分光型光ファイバセンサを用いた地中変位計測技術」，地盤工学 Vol.69, 2021 年 1 月号.

[22] 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則（昭和六十三年総理府令第一号）:（令和三年原子力規制委員会規則第三号による改正）, 2021 年 10 月 21 日施行.

[23] 原子力規制委員会：「第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規制等の一部改正案（事業規則)」, 2021 年 6 月.

[24] 原子力規制委員会：「第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規制等の一部改正案（許可基準規則)」, 2021 年 6 月.

[25] 令和 2 年度第 17 回原子力規制委員会：(資料 2)中深度処分に係る規制基準等における要求事項に対する科学的・技術的意見の募集について-（別紙）中深度処分の廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に関する規制要求の考え方, 2020 年 7 月.

[26] 令和 3 年度第 35 回原子力規制委員会：（資料 2）第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る関係規則等の改正及び中深度処分に係る審査ガイドの策定, 2021 年 9 月 29 日.

[27] 令和 2 年度第 17 回原子力規制委員会：（資料 2）中深度処分に係る規制基準等における要求事項に対する科学的･技術的意見の募集について－ (別紙 3)中深度処分の廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に関する規制要求の考え方, 2020 年

7 月 22 日.
[28] 第 17 回原子力規制委員会：(資料 2) 中深度処分に係る規制基準等における要求事項に対する科学的・技術的意見の募集について－ (別紙 3)中深度処分の廃棄物埋設地の「設計プロセス」及び「自然事象シナリオとその線量基準」に関する規制要求の考え方, 2020 年 7 月 22 日.
[29] 原子力発電環境整備機構 (NUMO) :「包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築－」, 2021 年 2 月, 2021 年 4 月 28 日改訂.
[30] 原子力発電環境整備機構 (NUMO) :「包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティーケースの構築－」付属書 2-8, 2021 年 2 月, 2021 年 4 月 28 日改訂.

第４章　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

第4章　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

4.1　地震時影響評価技術の検討

4.1.1　検討概要

(1) 検討目的

これまで、日本原燃株式会社の敷地（青森県上北郡六ヶ所村）内に掘削された試験空洞内において地震動観測が行われ、取得した観測地震動により作成した解析用入力地震動を用いて、試験空洞及び周辺地盤を対象とした地震応答解析を実施してきた。その結果、地下空洞施設の増幅特性や周波数特性等の定性的な評価は可能となったものの、加速度及びスペクトル分布等の定量的な評価には課題が残されていることがわかった。

そこで、本検討では、地下空洞施設の地震時挙動の定量的な評価（再現性の向上）を目的として、地上と地下の地震動観測システムを構築し、取得されるデータを用いて入力地震動の設定について検討する。更に、施設の地震時挙動の精度向上のために、地震応答解析手法の改良等について検討する。

(2) 既往検討の成果

令和2年度の検討[1]では、以下に示す現状の課題を整理した上で、文献調査結果を踏まえた対応策を検討した。

【現状の課題】

- 現在の地震計の配置では、空洞周辺の緩み領域の影響を含んだ地震動を観測している可能性があるが、解析手法でその影響を考慮していない。
- 周辺岩盤では、地震動の周波数に依存した減衰が生じている可能性があるが、解析手法でその影響を考慮していない。
- 2次元解析用の入力地震動作成のための1次元解析では、試験空洞で取得した地震動を入力波として採用してきたが、その妥当性が明確にされていない。

上記の課題に対して、図 4.1-1 に示すように、地震計の配置の見直し及び解析手法の高度化等による対応策が有効であると評価した。

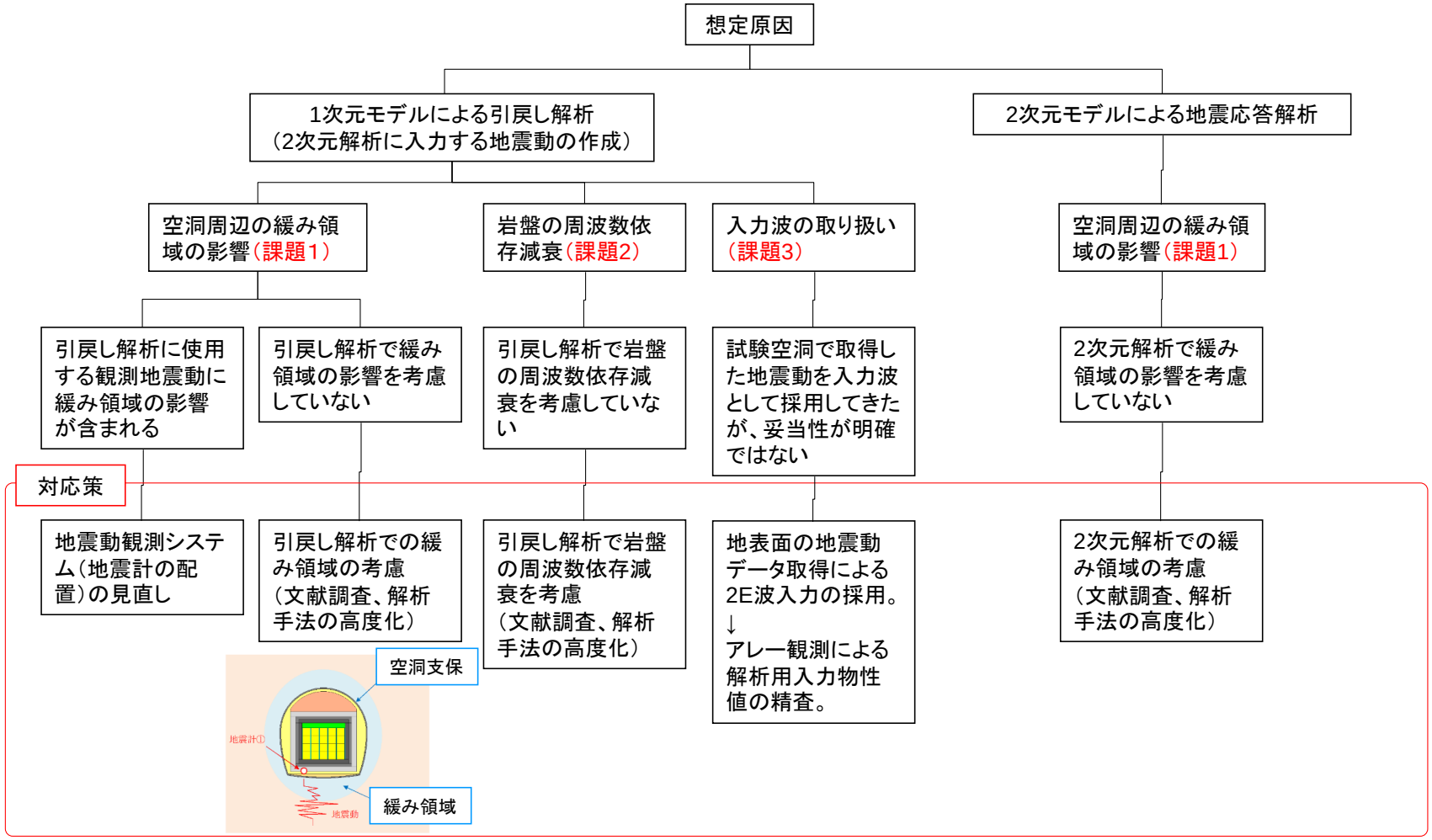


図 4.1-1　解析結果と観測結果の乖離に関する想定原因の抽出及び対応策の概要

(3) 今年度の検討概要

令和 3 年度は、前年度に実施した地震計の配置の見直し結果に基づき、現地での地震計の設置を実施した。また、設置後に得られた観測地震動データや過去に得られた観測地震動データを利用して、以下の項目に関する検討を実施した。

- 緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討
- 地下及び地上の観測地震動の整合性の確認
- 引戻し解析手法の改良項目の選定

(4) 検討フロー

令和 2 年度に立案した 5 ヶ年実施計画のフロー（案）における令和 3 年度の検討内容の位置づけを図 4.1-2 に示す。

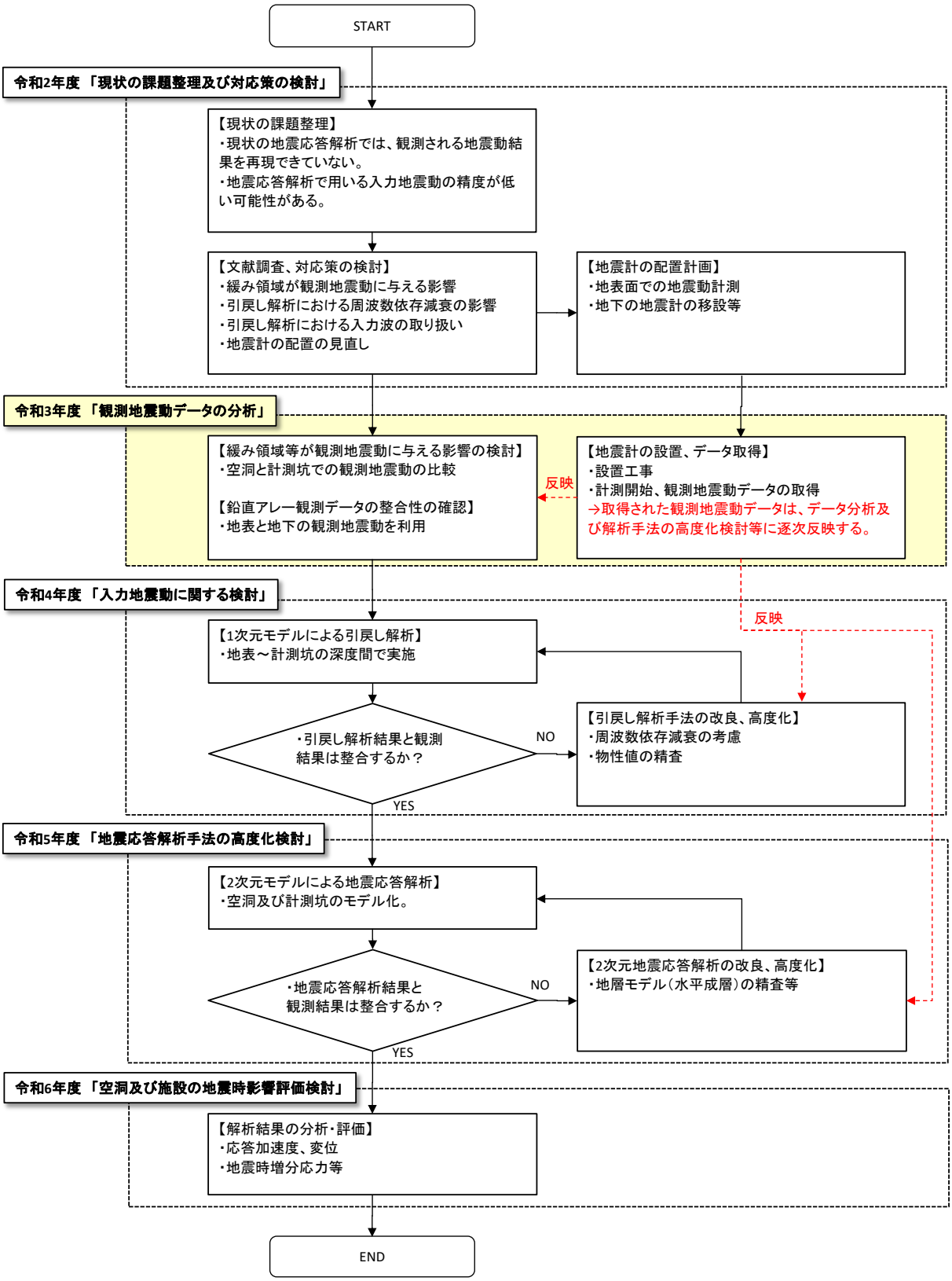
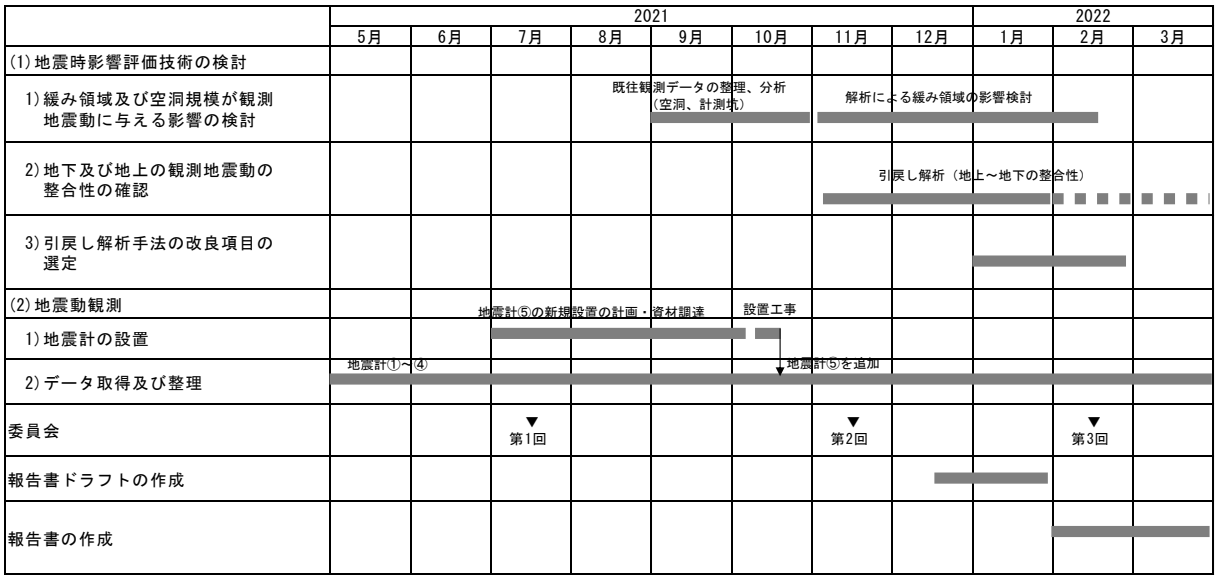


図 4.1-2　5ヶ年実施計画のフロー（案）における令和3年度の検討内容の位置づけ

(5) 検討工程

令和 3 年度の工程を表 4.1-1 に示す。

表 4.1-1　令和 3 年度の工程



4.1.2　緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討

（1）概要

高さ 16m 級の試験空洞の底盤に設置している地震計①の観測データには、空洞掘削時の周辺岩盤の緩み領域の影響や空洞の規模の影響が含まれている可能性がある。

昨年度の既往文献調査より、冨田他[2]では、図 4.1-3 に示すように試験空洞のインバートの深度 2.0m～3.0m の範囲まで掘削前後で変形特性が変化しており、深度 3.0m 程度までは掘削影響領域であると評価している。

そこで、図 4.1-4 に示すように、掘削径が異なる試験空洞（掘削径大）と計測坑 C（掘削径小）で観測される地震動を比較・分析することで、緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響を検討した。

更に、1 次元モデル及び 2 次元モデルを用いた解析的検討により、緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響について検討した。

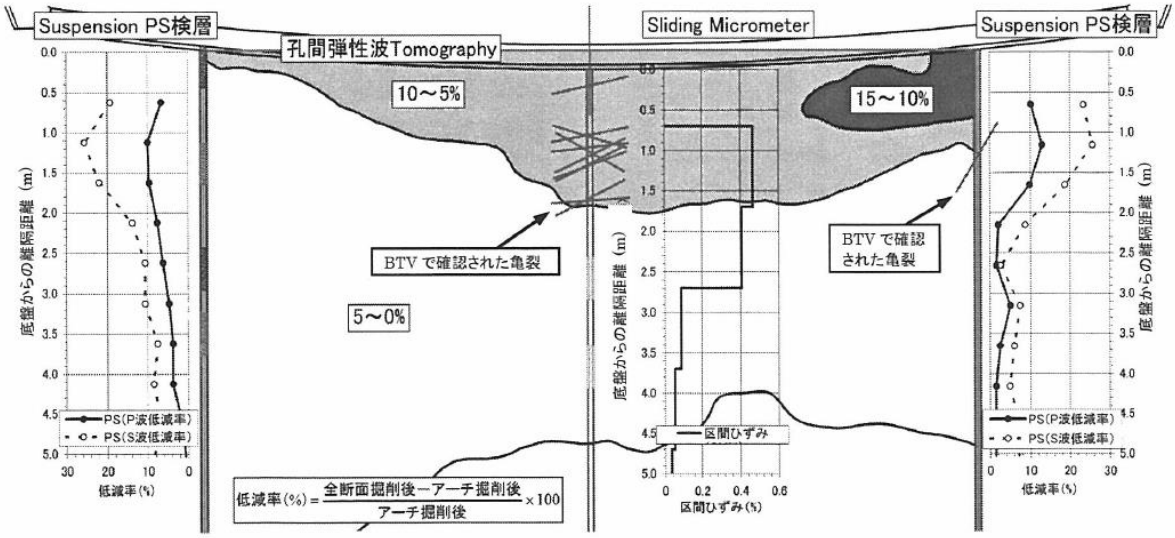


図 4.1-3　試験空洞掘削前後の各計測結果の比較（インバート部の横断面図）[2]

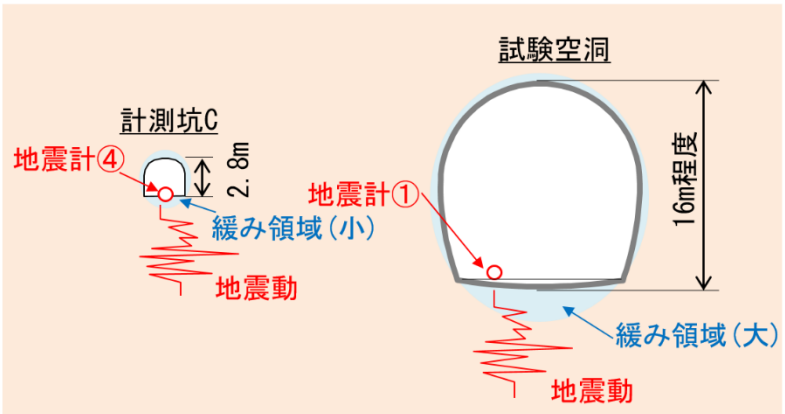


図 4.1-4　緩み領域の影響のイメージ

(2) 観測地震動の分析評価

1) 対象とする地震動データの抽出

過去に地震計①と地震計④で同時に記録した地震動の中から、

- 地震規模が大きい地震動（六ヶ所村尾駮での震度が 3 以上）
- 既往の解析[3]で採用した地震動

を分析の対象として選定した。選定した地震動を表 4.1-2 に示す。

なお、地震計④のデータ（計測坑 C の地震動データ）については、既存計器を用いている別研究のデータ（戸田建設（株）提供）を活用する。

表 4.1-2　分析の対象とした観測地震動の一覧

No.	日付・時刻	震源地	マグニチュード	尾駮の震度	備考
1	2014 年 8 月 10 日 12 時 43 分 18 秒	青森県東方沖	M6.1	3	震度 3 以上 既往解析で採用
2	2014 年 10 月 27 日 13 時 33 分 01 秒	青森県東方沖	M4.3	1	既往解析で採用
3	2016 年 1 月 14 日 12 時 25 分 33 秒	浦河沖	M6.7	3	震度 3 以上
4	2017 年 9 月 27 日 5 時 22 分 11 秒	岩手県沖	M6.1	2	既往解析で採用
5	2018 年 1 月 24 日 19 時 51 分 19 秒	青森県東方沖	M6.3	3	震度 3 以上
6	2019 年 8 月 15 日 14 時 32 分 53 秒	青森県三八上北地方	M5.5	3	震度 3 以上 既往解析で採用
7	2019 年 12 月 19 日 15 時 21 分 33 秒	青森県東方沖	M5.5	3	震度 3 以上

2) 地震動データの整理

表 4.1-2 に示す地震動に対して、地震計①と地震計④の

- 時刻歴波形
- フーリエスペクトル
- フーリエスペクトル比（地震計①／地震計④）

を表 4.1-3～表 4.1-44 に示す。

a. 2014 年 8 月 10 日

(a) x 方向

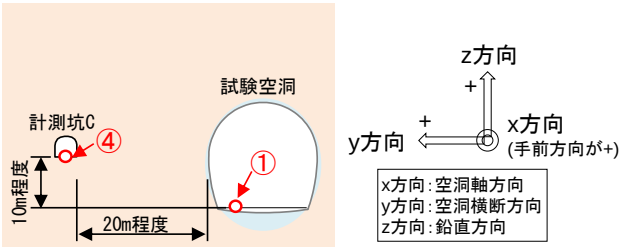


表 4.1-3 時刻歴波形（2014 年 8 月 10 日、x 方向）

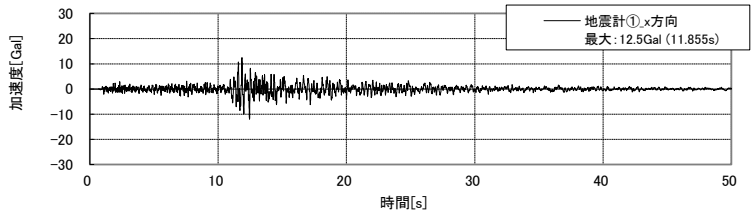
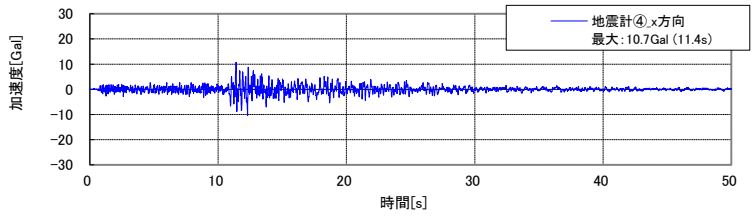
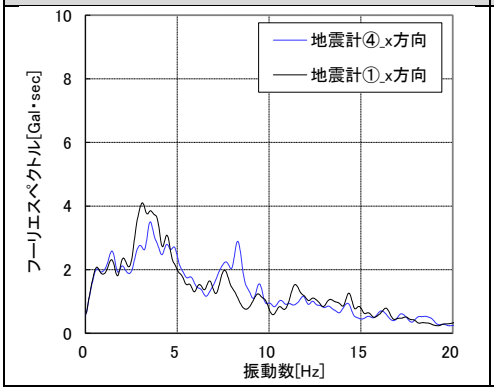
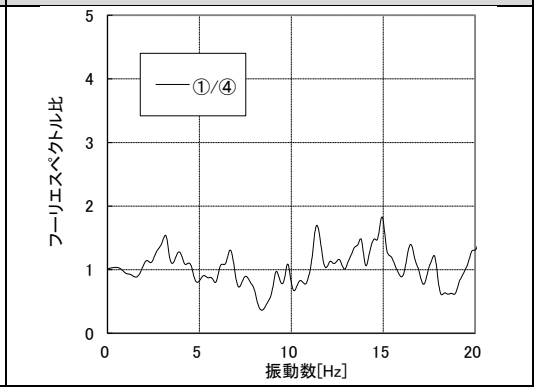
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-4 フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 8 月 10 日、x 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(b) y 方向

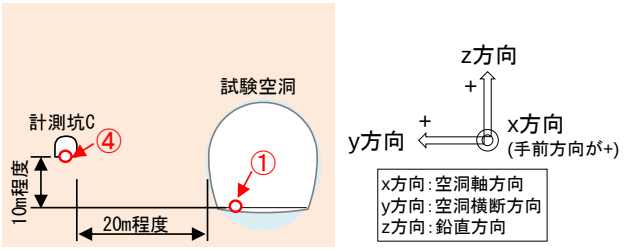


表 4.1-5　時刻歴波形（2014 年 8 月 10 日、y 方向）

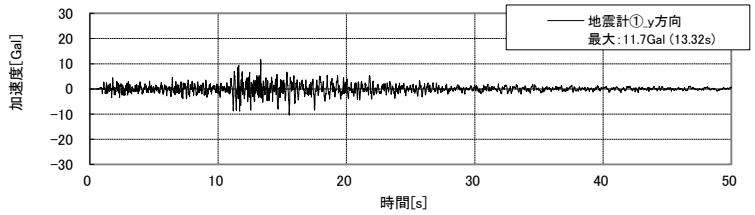
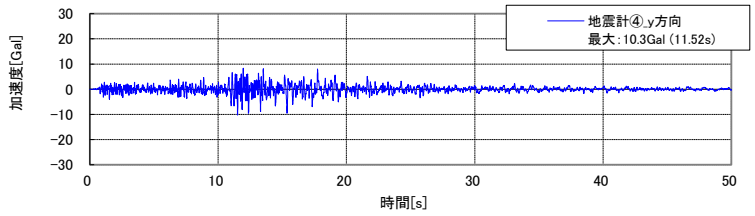
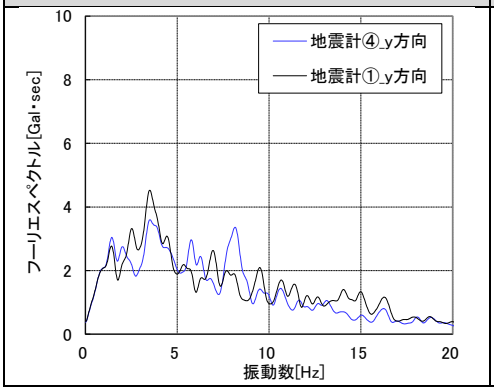
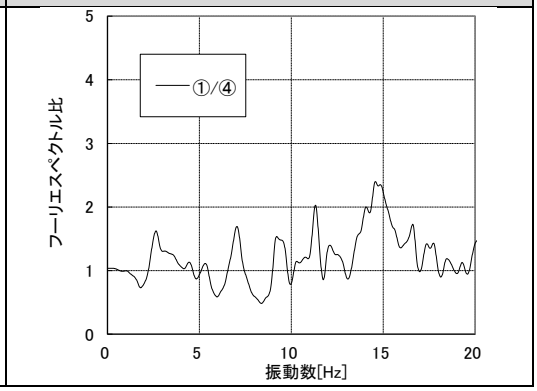
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-6　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 8 月 10 日、y 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(c) z 方向

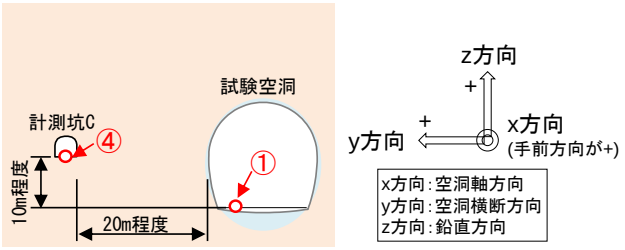


表 4.1-7　時刻歴波形（2014 年 8 月 10 日、z 方向）

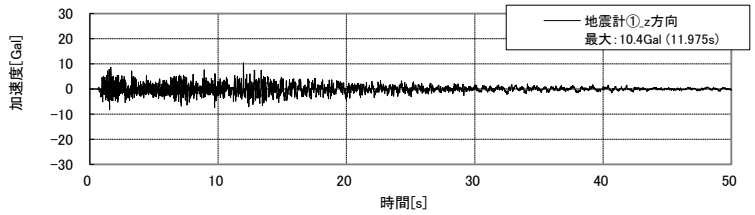
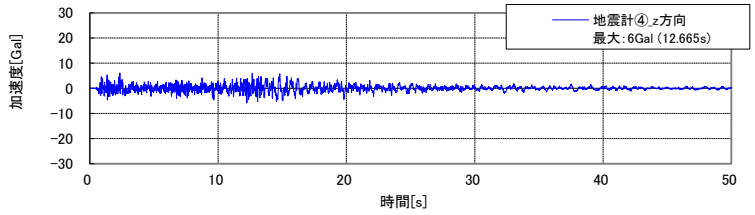
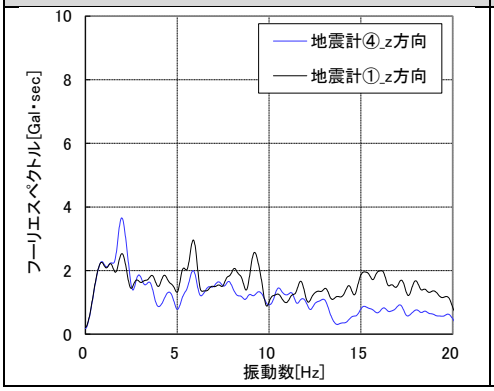
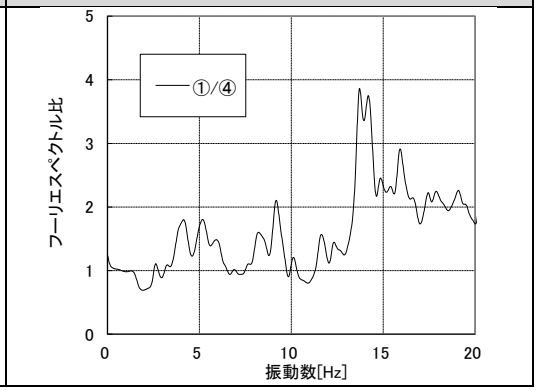
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-8　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 8 月 10 日、z 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

b. 2014 年 10 月 27 日

(a) x 方向

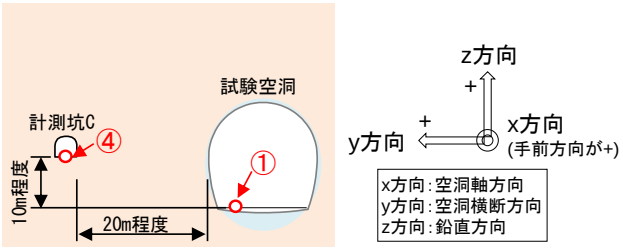


表 4.1-9 時刻歴波形（2014 年 10 月 27 日、x 方向）

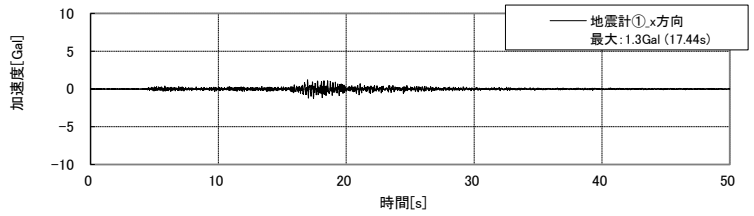
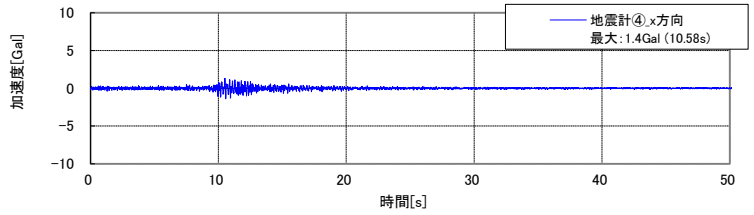
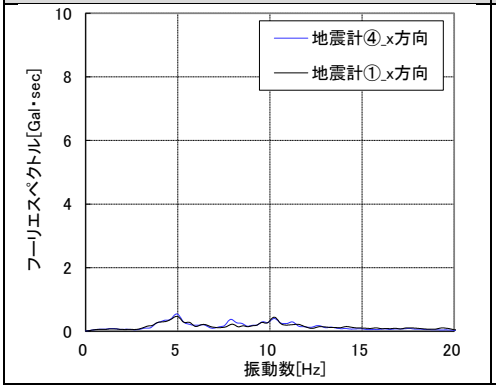
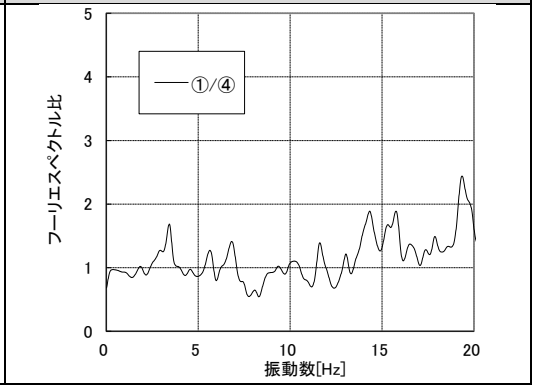
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-10 フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 10 月 27 日、x 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(b) y 方向

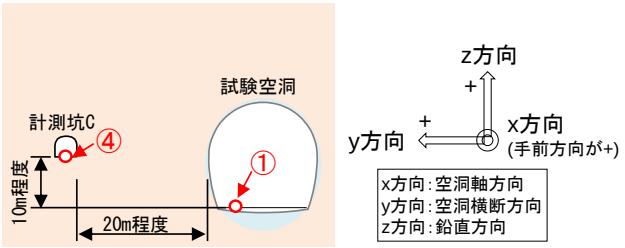


表 4.1-11　時刻歴波形（2014 年 10 月 27 日、y 方向）

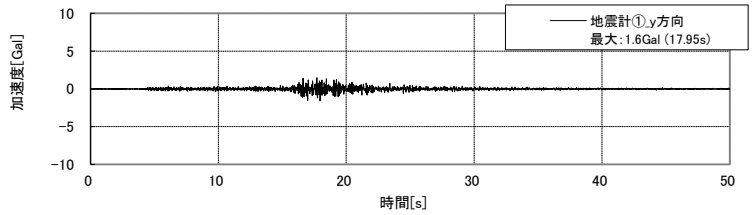
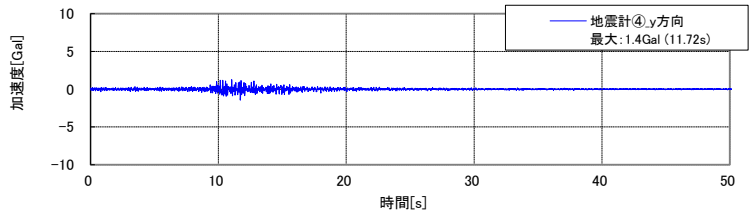
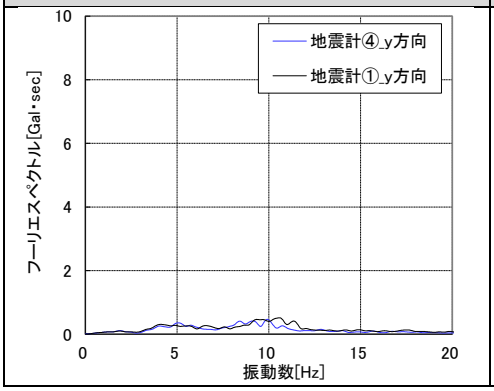
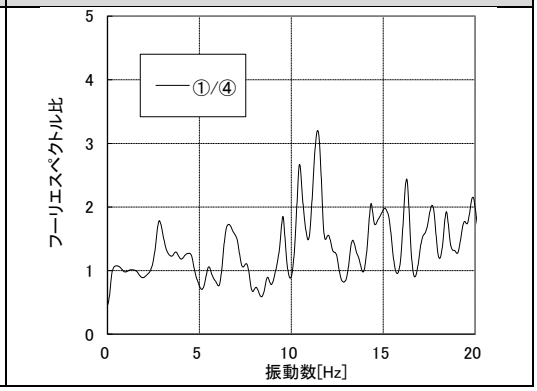
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-12　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 10 月 27 日、y 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(c) z 方向

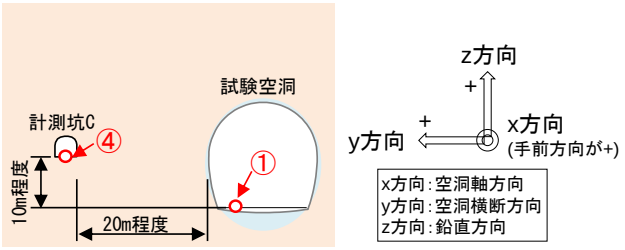


表 4.1-13　時刻歴波形（2014 年 10 月 27 日、z 方向）

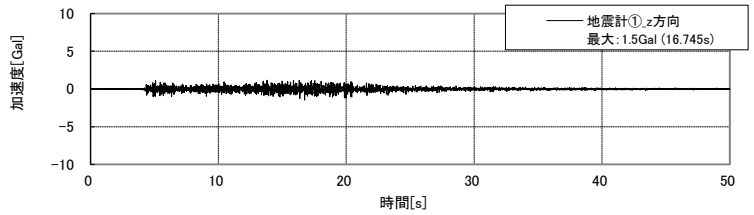
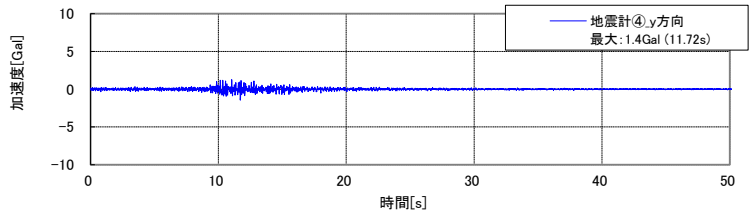
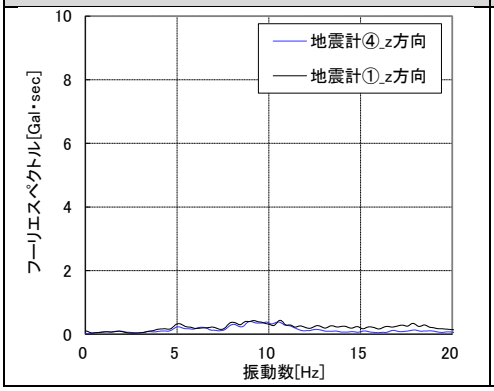
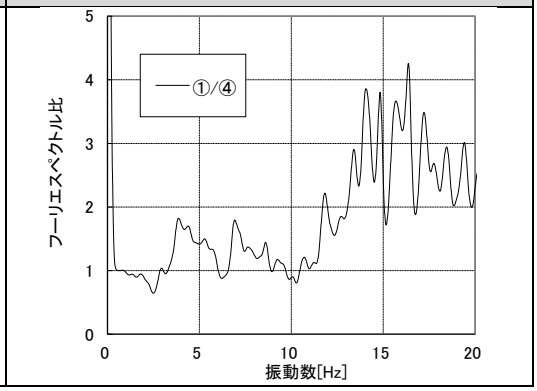
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-14　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2014 年 10 月 27 日、z 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

c．2016 年 1 月 14 日

(a) x 方向

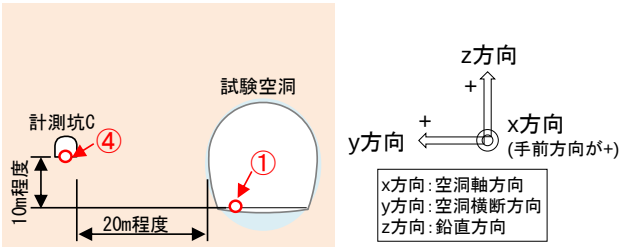


表 4.1-15　時刻歴波形（2016 年 1 月 14 日、x 方向）

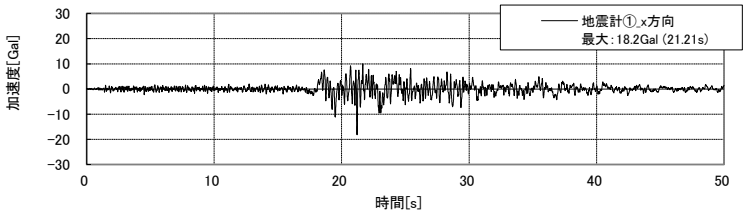
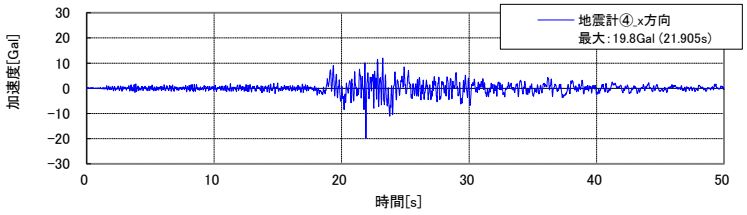
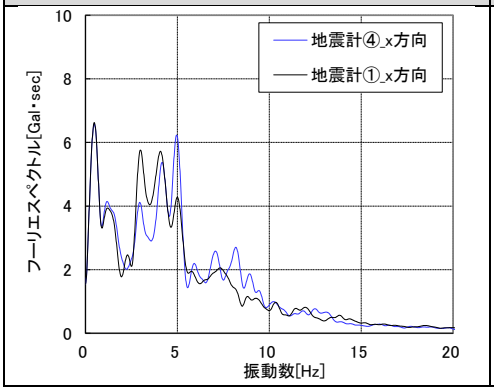
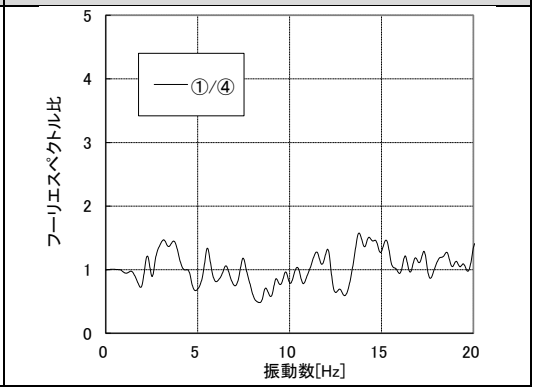
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-16　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2016 年 1 月 14 日、x 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(b) y 方向

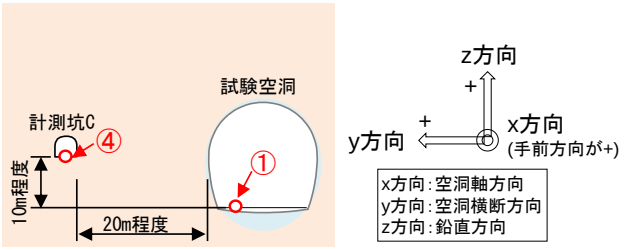


表 4.1-17　時刻歴波形（2016 年 1 月 14 日、y 方向）

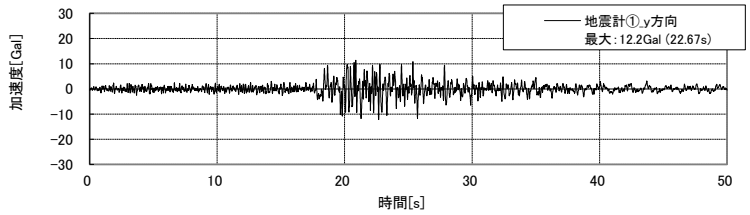
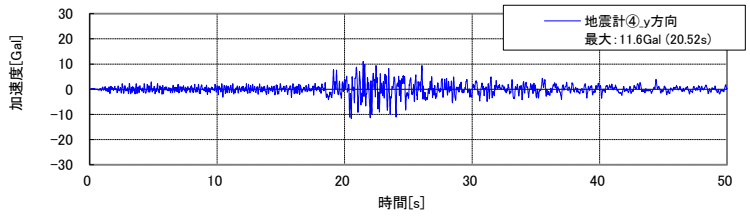
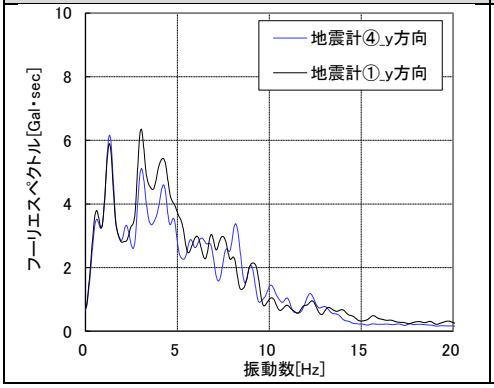
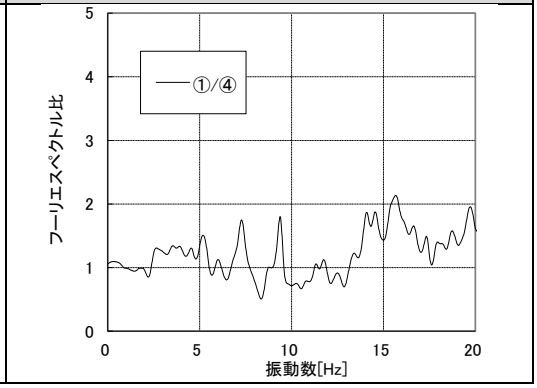
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-18　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2016 年 1 月 14 日、y 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(c) z 方向

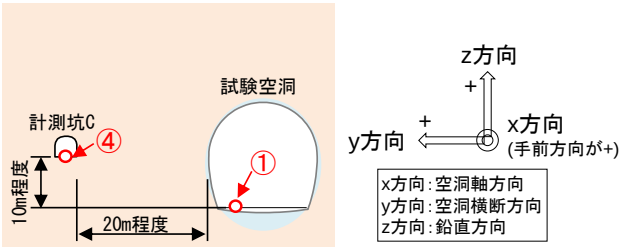


表 4.1-19　時刻歴波形（2016 年 1 月 14 日、z 方向）

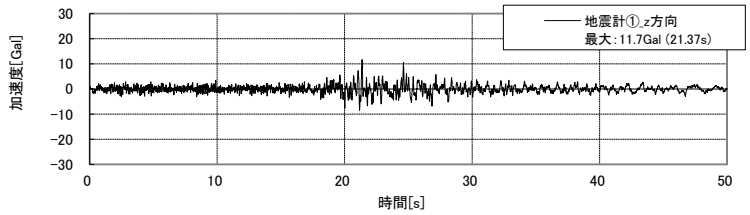
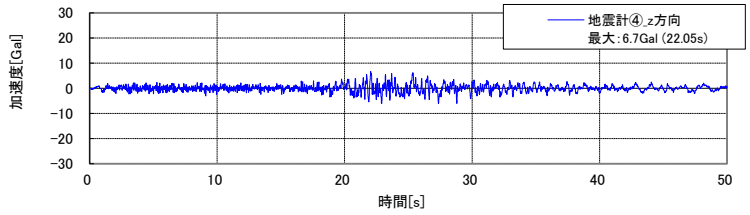
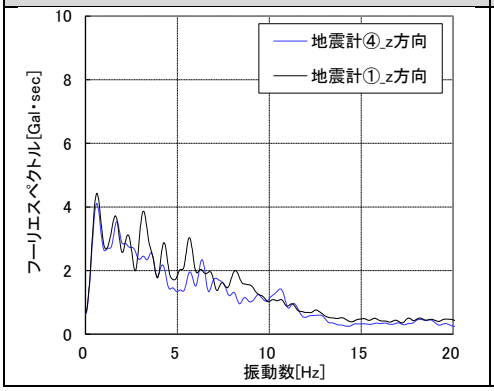
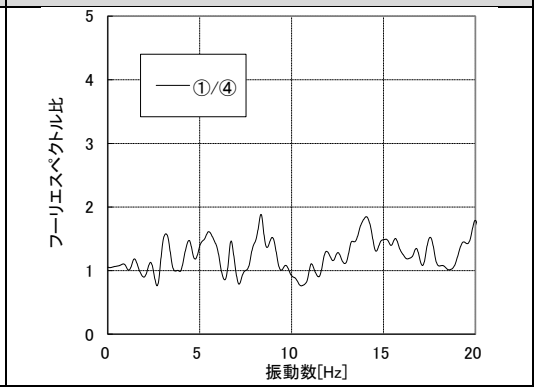
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-20　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2016 年 1 月 14 日、z 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

d. 2017 年 9 月 27 日

(a) x 方向

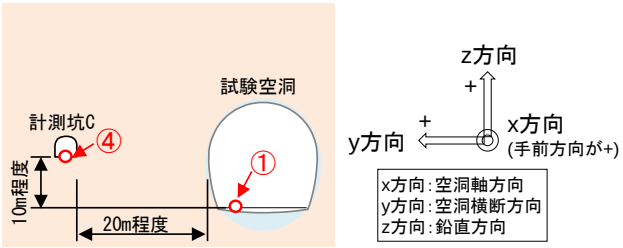


表 4.1-21　時刻歴波形（2017 年 9 月 27 日、x 方向）

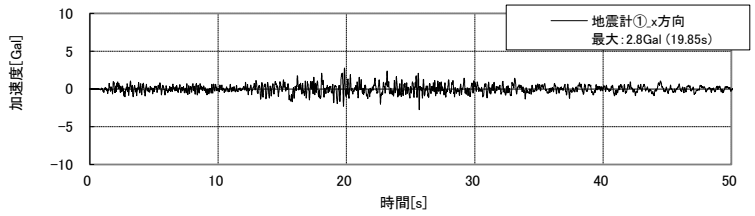
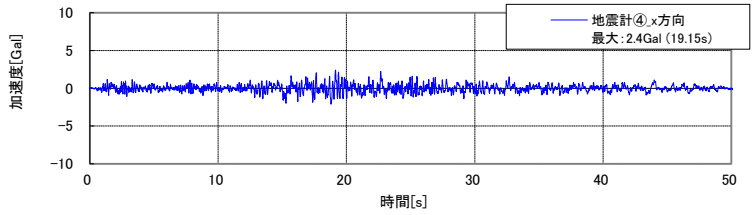
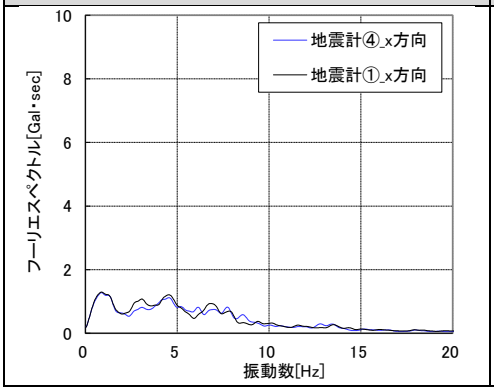
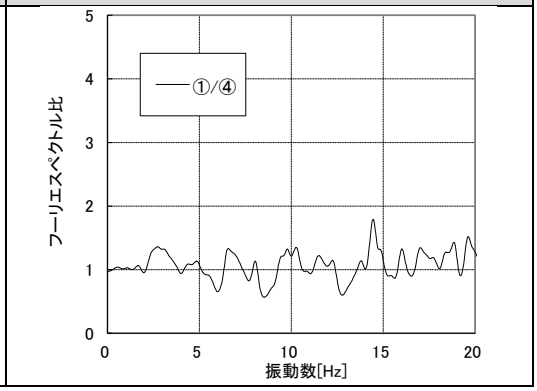
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-22　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2017 年 9 月 27 日、x 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(b) y 方向

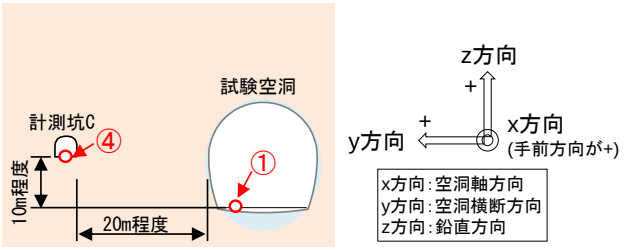


表 4.1-23　時刻歴波形（2017 年 9 月 27 日、y 方向）

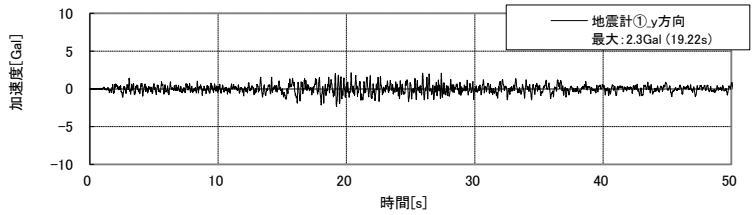
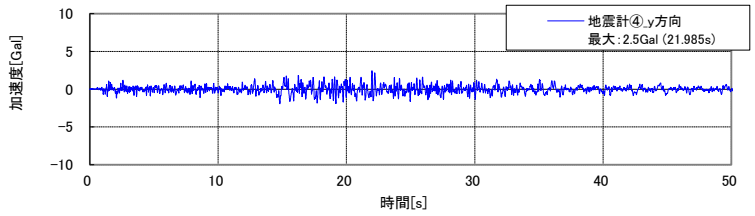
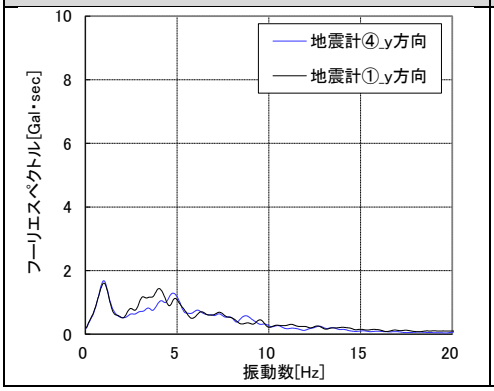
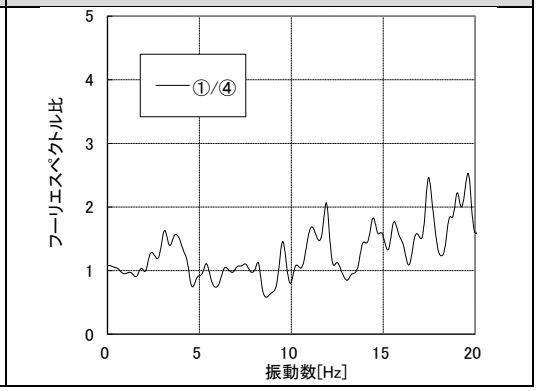
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-24　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2017 年 9 月 27 日、y 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(c) z 方向

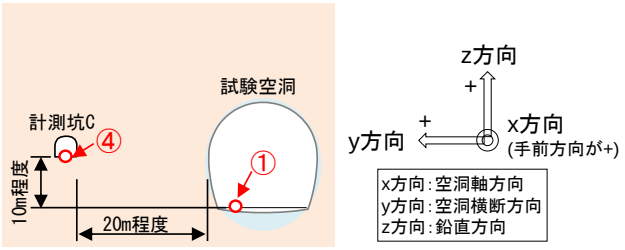


表 4.1-25　時刻歴波形（2017 年 9 月 27 日、z 方向）

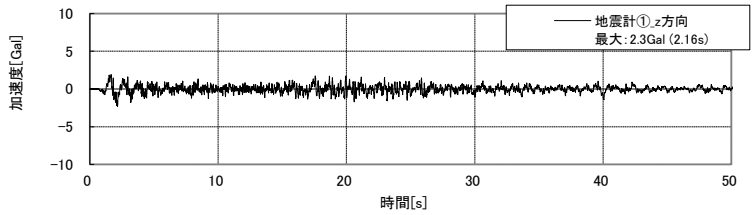
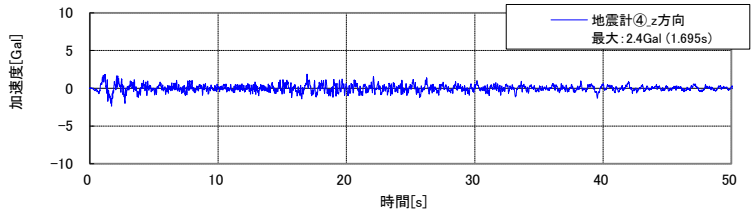
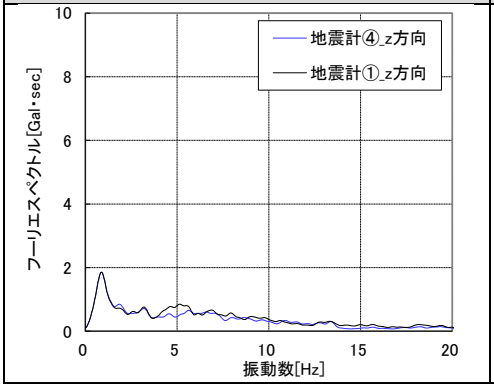
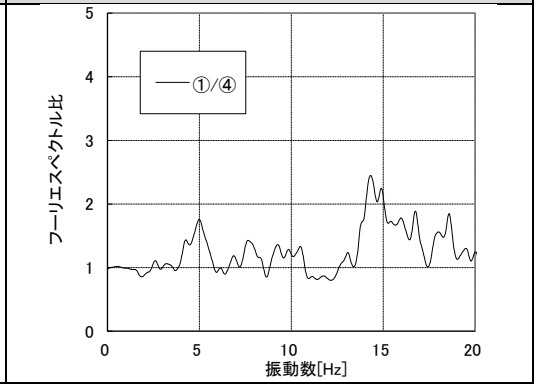
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-26　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2017 年 9 月 27 日、z 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

e. 2018 年 1 月 24 日

(a) x 方向

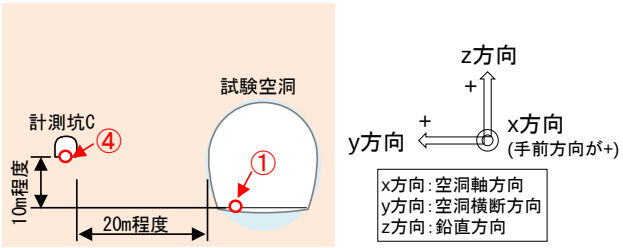


表 4.1-27 時刻歴波形（2018 年 1 月 24 日、x 方向）

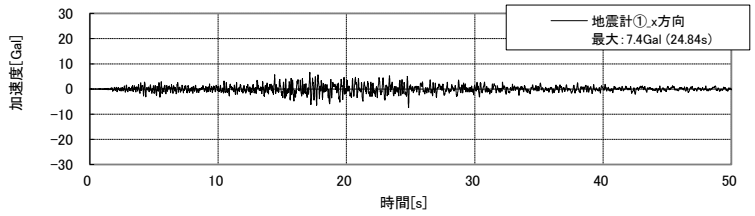
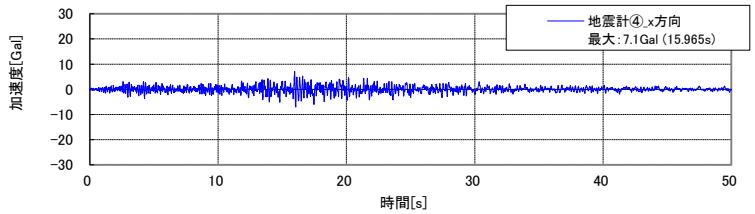
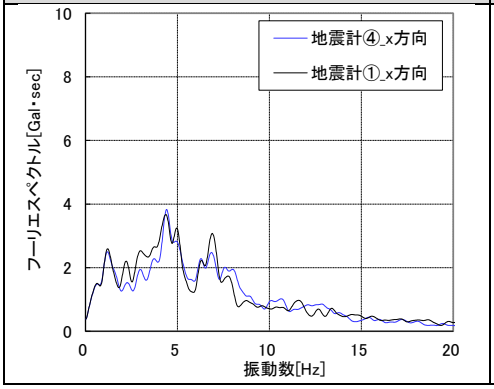
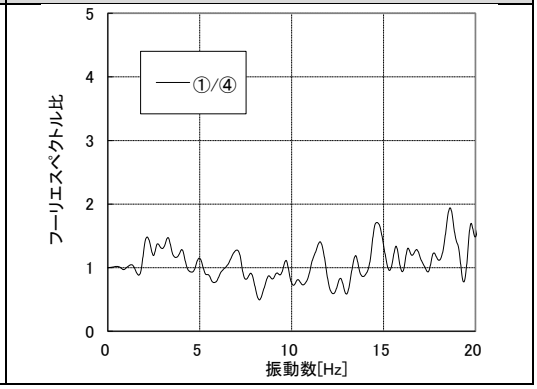
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-28 フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2018 年 1 月 24 日、x 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(b) y 方向

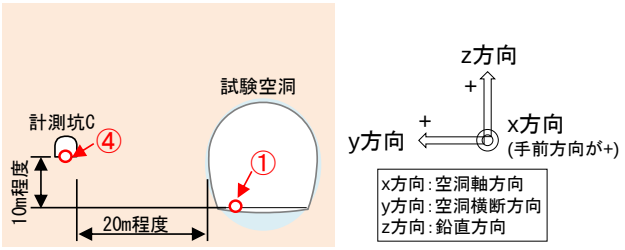


表 4.1-29　時刻歴波形（2018 年 1 月 24 日、y 方向）

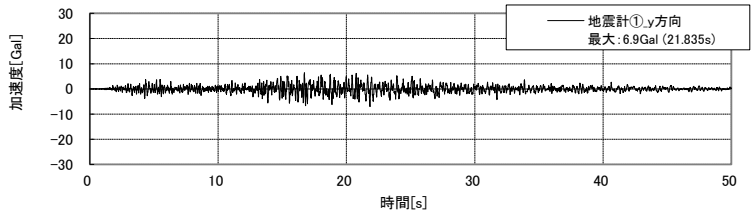
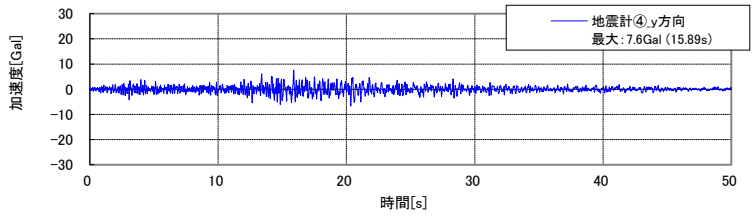
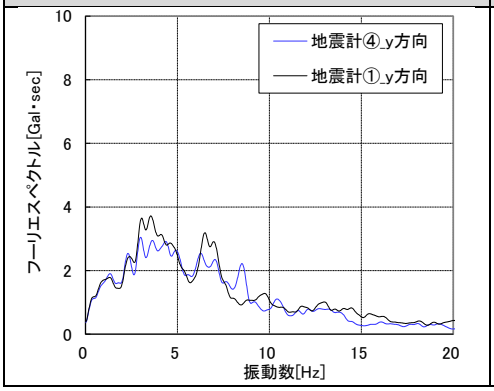
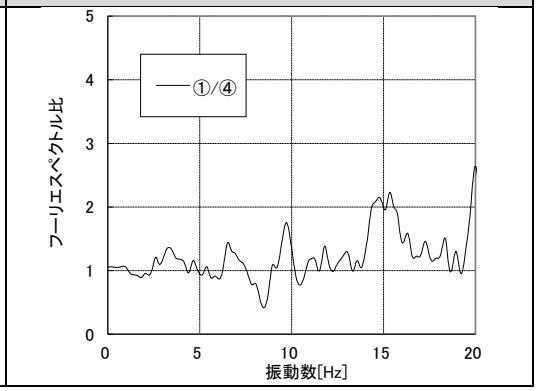
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-30　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2018 年 1 月 24 日、y 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(c) z 方向

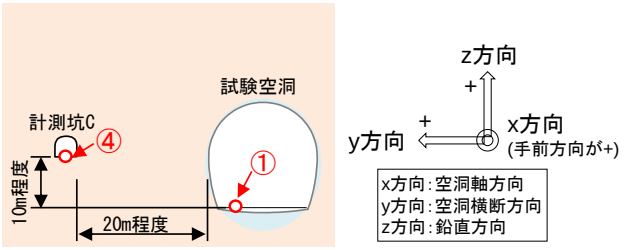


表 4.1-31　時刻歴波形（2018 年 1 月 24 日、z 方向）

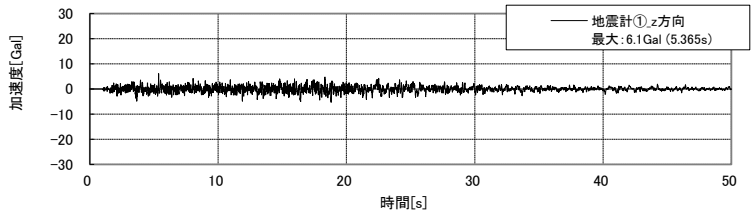
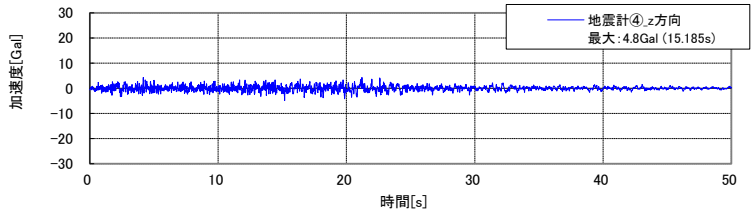
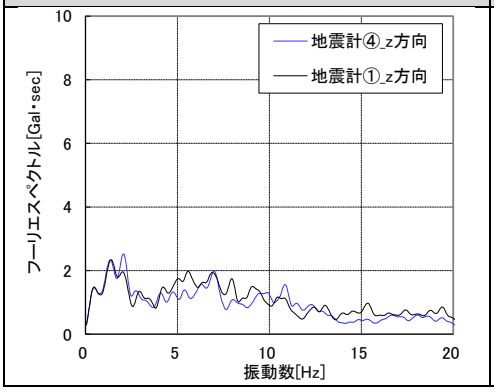
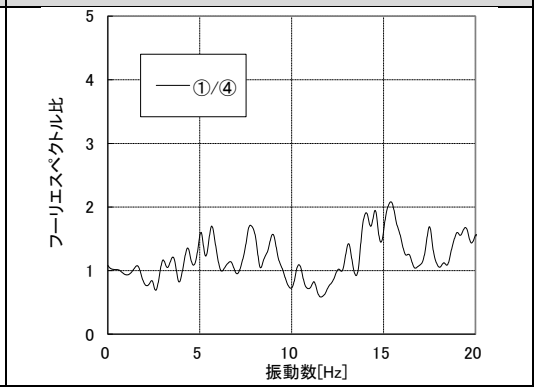
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-32　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2018 年 1 月 24 日、z 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

f．2019 年 8 月 15 日

(a) x 方向

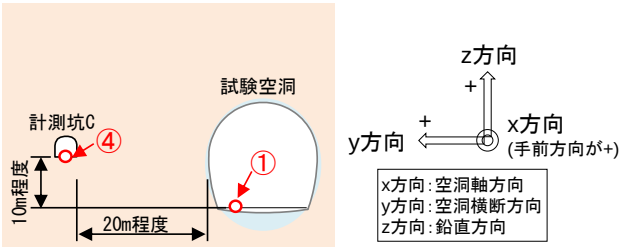


表 4.1-33　時刻歴波形（2019 年 8 月 15 日、x 方向）

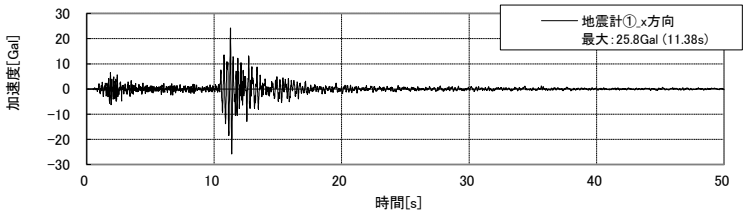
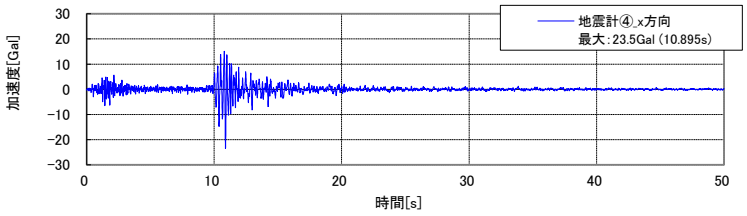
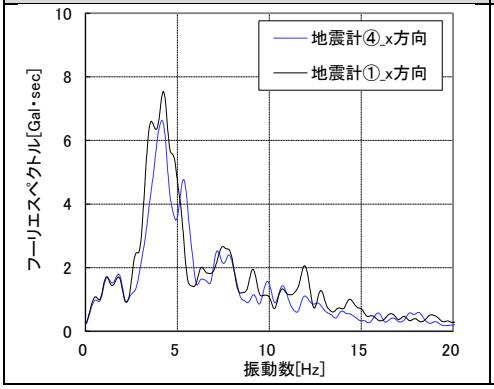
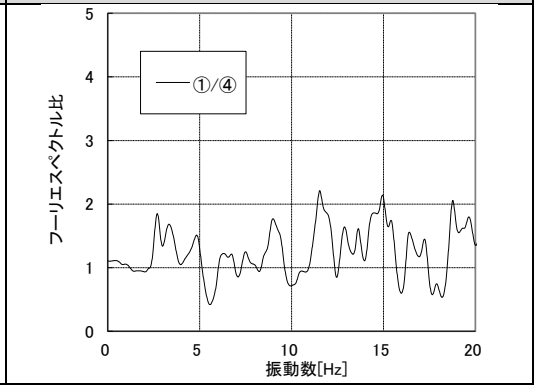
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-34　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 8 月 15 日、x 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(b) y 方向

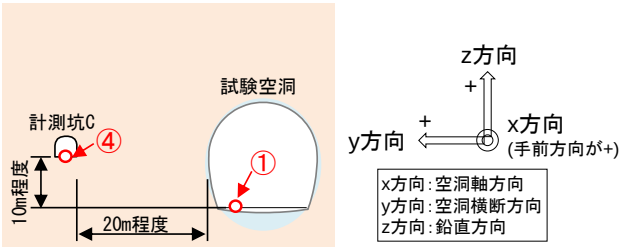


表 4.1-35　時刻歴波形（2019 年 8 月 15 日、y 方向）

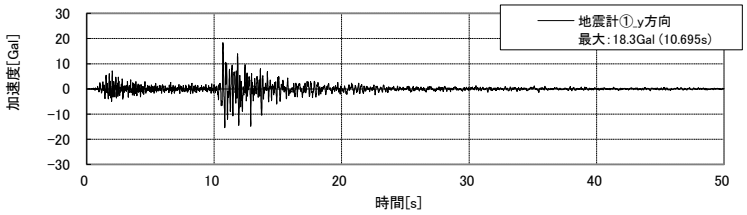
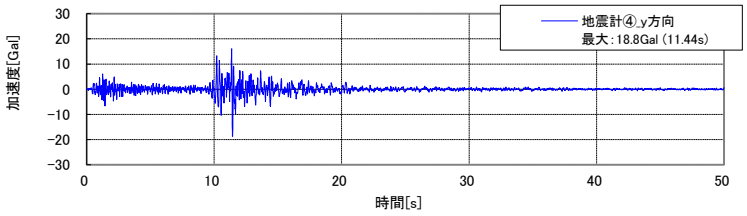
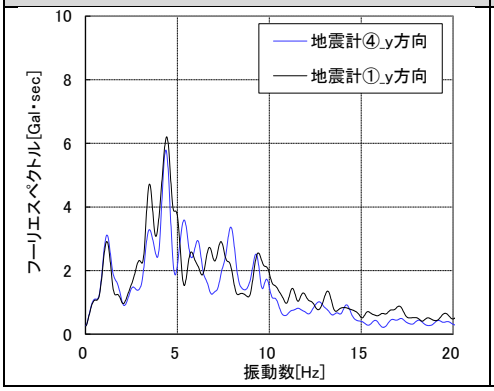
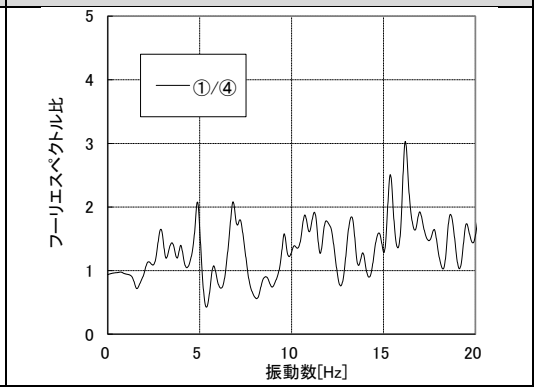
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-36　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 8 月 15 日、y 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(c) z 方向

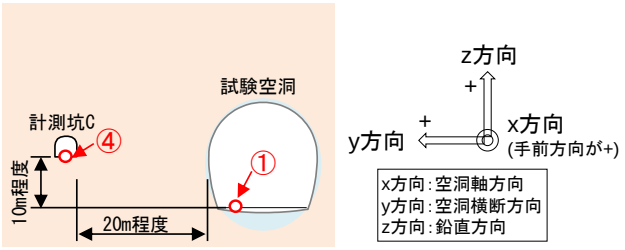


表 4.1-37　時刻歴波形（2019 年 8 月 15 日、z 方向）

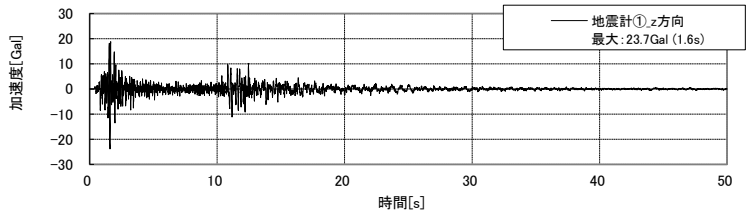
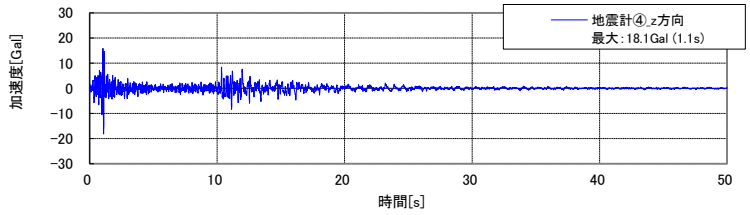
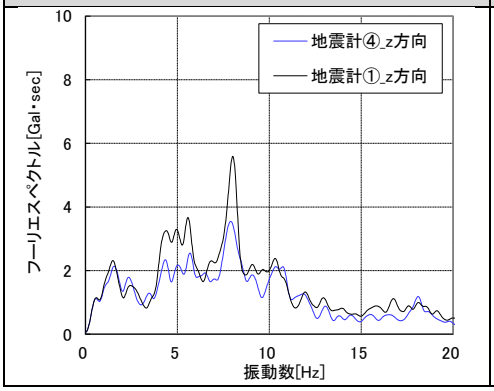
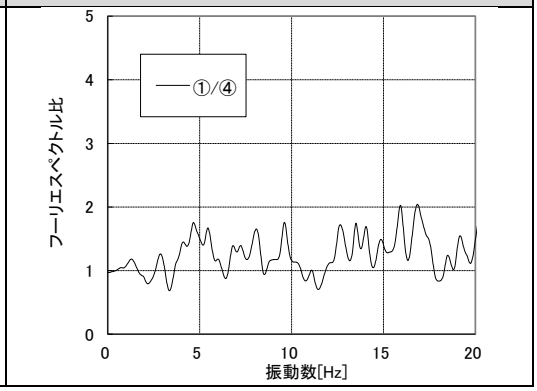
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-38　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 8 月 15 日、z 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

g. 2019 年 12 月 19 日

(a) x 方向

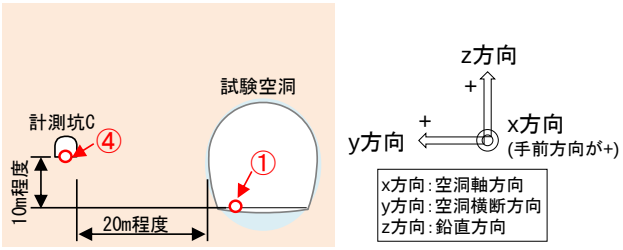


表 4.1-39 時刻歴波形（2019 年 12 月 19 日、x 方向）

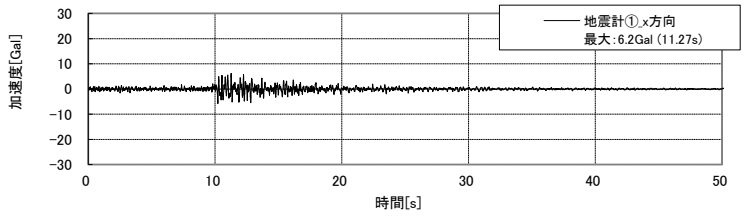
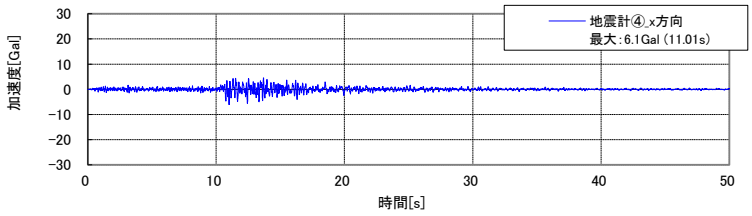
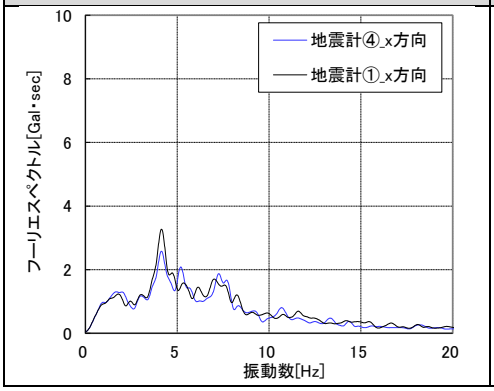
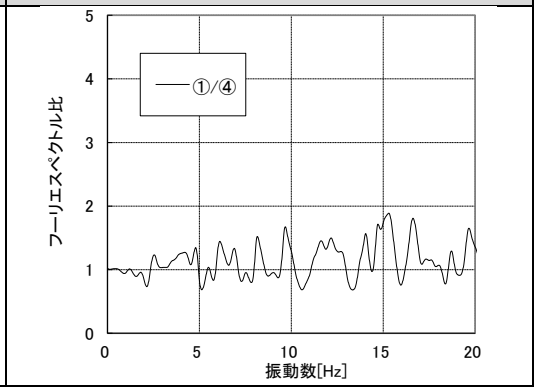
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-40 フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 12 月 19 日、x 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(b) y 方向

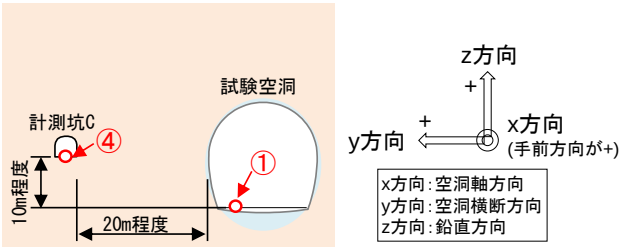


表 4.1-41　時刻歴波形（2019 年 12 月 19 日、y 方向）

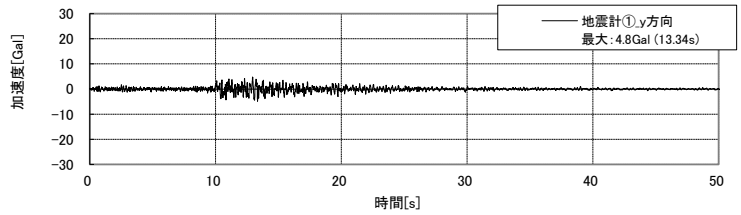
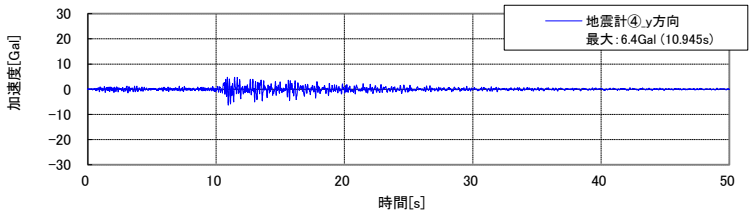
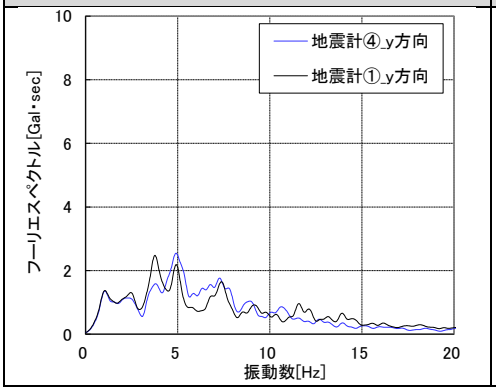
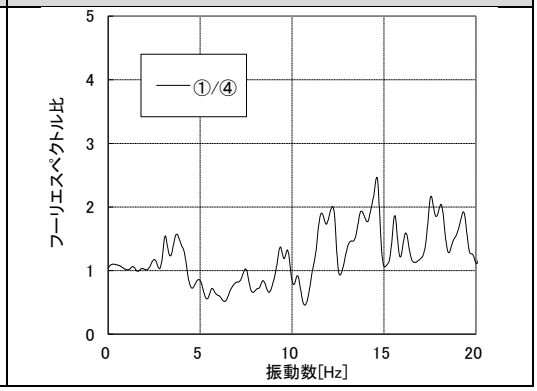
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-42　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 12 月 19 日、y 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

(c) z 方向

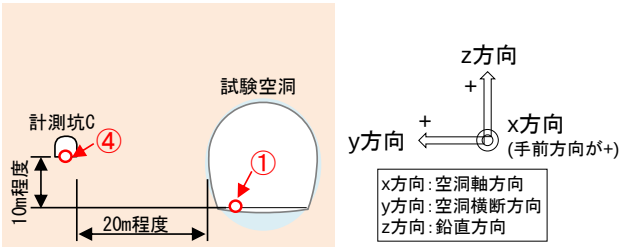


表 4.1-43　時刻歴波形（2019 年 12 月 19 日、z 方向）

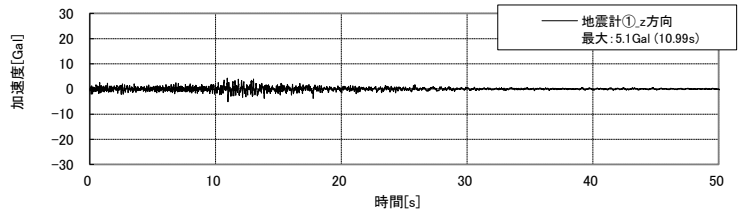
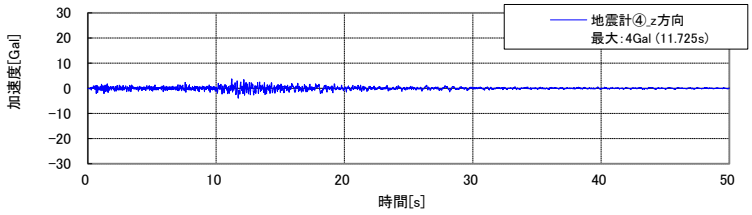
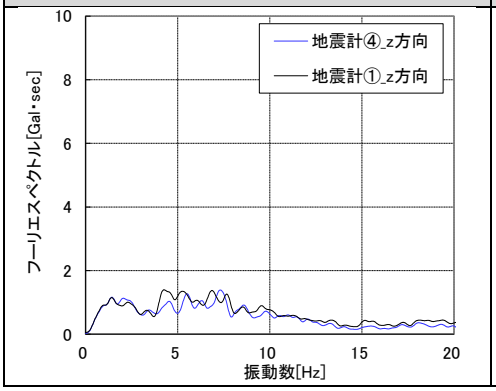
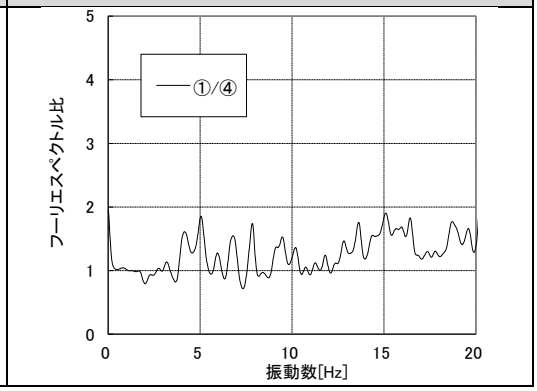
地震計	時刻歴波形
地震計①	
地震計④	

表 4.1-44　フーリエスペクトル、フーリエスペクトル比（2019 年 12 月 19 日、z 方向）

フーリエスペクトル	フーリエスペクトル比
	

3）分析評価

空洞周辺の緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響を確認するために、前述の全7件の観測地震動で得られた地震計①と地震計④のフーリエスペクトル比（①/④）に着目して比較分析した。

7件のフーリエスペクトル比（①/④）を表 4.1-45 に集約した。表 4.1-45 の黒の実線は平均値、黒の点線はスペクトル比が1のラインである。スペクトル比が1より大きいと地震計①の方が地震計④よりもスペクトル成分が大きいことを表す。

表 4.1-45 に示すように、いずれの方向（x、y、z）においても、地震計①のスペクトルの方が地震計④よりも概ね全振動数帯で大きくなる傾向がみられる。この要因の一つとして、図 4.1-5 に示すように、空洞インバート下部の緩み領域と周辺岩盤（非緩み領域）でのインピーダンス（ρ・Vs）の差異が考えられた。そこで、緩み領域と周辺岩盤のインピーダンス比から緩み領域での増幅率を以下の条件で試算した。

【算定条件】

- 緩み領域の密度 ρ_1 と周辺岩盤の密度 ρ_2 は同じと仮定
- 緩み領域のせん断波速度 Vs_1 は、既往の PS 検層結果[2]より、周辺岩盤のせん断波速度の 80%とした。

【算定結果】

緩み領域での増幅率=（$\rho_1 \times Vs_1$）／（$\rho_2 \times Vs_2$）

$=Vs_1 /（Vs_1 \times 0.8）$

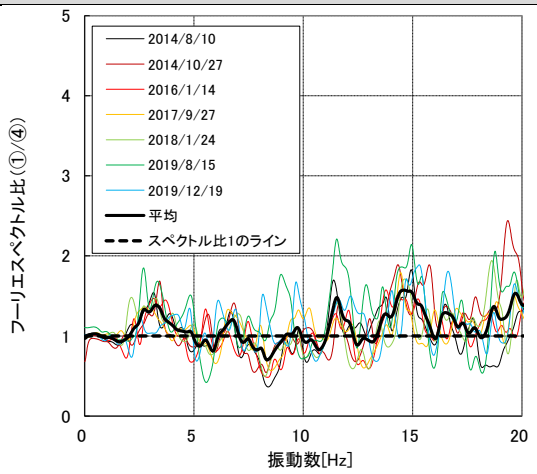
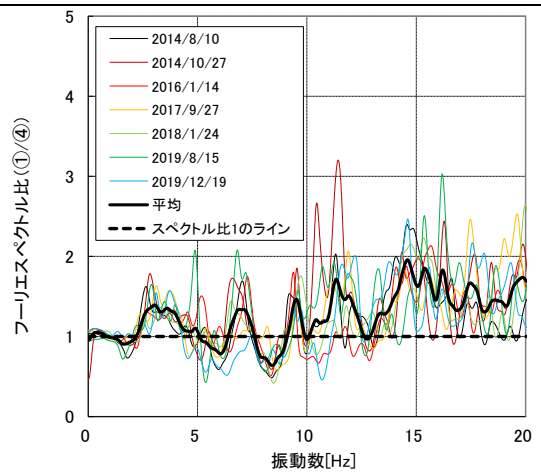
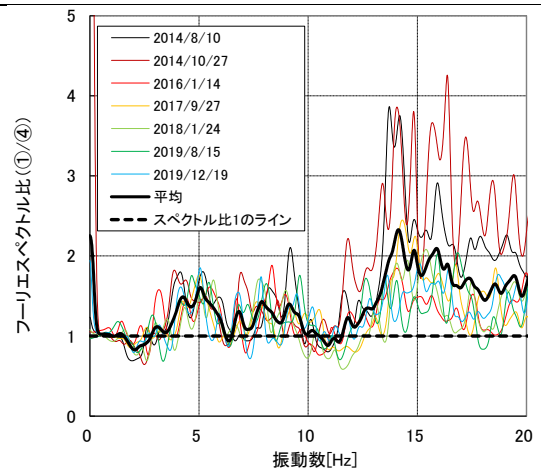
$=1.25$

インピーダンス比から試算した緩み領域での増幅率 1.25 は、表 4.1-45 のフーリエスペクトル比の分布傾向と整合する。

その他に、地震計①のスペクトルの方が地震計④よりも大きくなる要因としては、地震計が設置してある空洞規模の差により、地震計①は地震計④よりも拘束が小さく振動しやすい環境であることも考えられる。

そこで、次項では、緩み領域及び空洞規模の影響について、1次元モデルと 2 次元モデルを用いて解析的に検討した。

表 4.1-45　フーリエスペクトル比の集約

方向	フーリエスペクトル比（①/④）
x 方向	
y 方向	
z 方向	

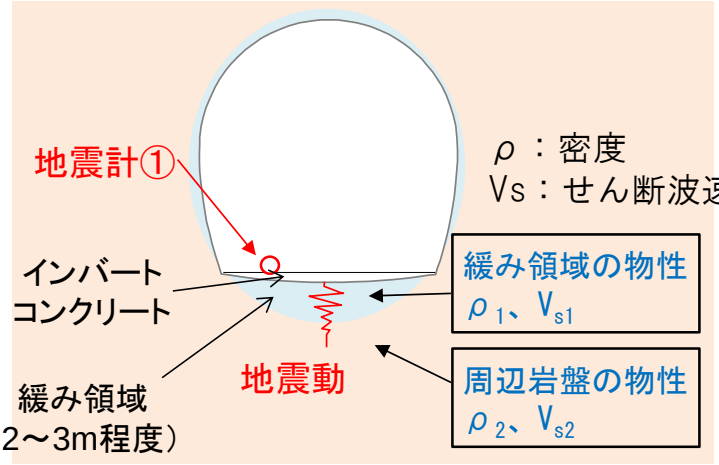


図 4.1-5　緩み領域における増幅のイメージ

(3) 解析手法による緩み領域等の影響検討

1) 1 次元モデルによる検討

a. 概要

既往検討[2]より、試験空洞のインバートの深度 3.0m 程度までは、掘削に伴う緩み領域が生じていると評価されている。ここでは、一次元重複反射理論に基づく解析（SHAKE）を用いて、緩み領域が存在することで、試験空洞で観測される地震動に与える影響を確認する。

b. 検討ケース

検討ケースは、図 4.1-6 及び図 4.1-7 に示すように試験空洞のインバート部分を局所的にモデル化した 2 ケースとする。図 4.1-7 に示すように、ケース 1 は緩み領域をモデル化せず、ケース 2 では上部の 3m の範囲を緩み領域としてモデル化する。両ケースの下端に同一の地震動を入力した場合のモデル上端（地震計①に相当）における応答値を比較分析する。

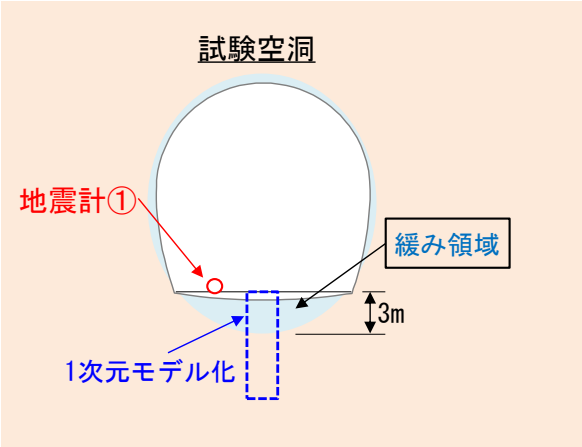
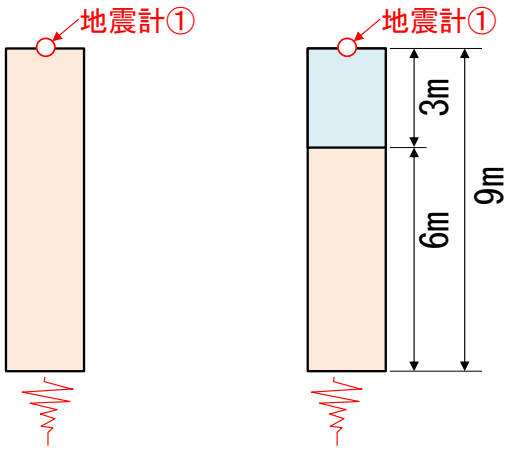


図 4.1-6 モデル対象位置



ケース 1
（緩み領域なし）

ケース 2
（緩み領域あり）

図 4.1-7 検討ケース

c．解析条件

(a) 入力物性値

入力物性値は、表 4.1-46 に示す当該サイト付近の地盤物性値[4]を引用して、試験空洞のインバート付近の物性値を設定する。ケース 1 の解析モデルを表 4.1-47、ケース 2 の解析モデルを表 4.1-48 に示す。また、当該地層（Tpt）のひずみ依存特性を図 4.1-8 に示す。

ケース 2 の入力物性値は、ケース 1 の入力物性値をベースとして、上部の 3m 区間の初期せん断剛性を低下させることで緩み領域を模擬した。緩み領域の初期せん断剛性 G_0 の低下量においては、PS 検層結果[2]より緩み領域のせん断波速度 Vs は非緩み領域よりも 20%低減（0.8 倍）していることから、

$G_0=\rho \times Vs^2$　　（ρ ：密度）

の関係より、緩み領域の G_0 は $0.8^2=0.64$ 倍として設定した。

表 4.1-46　当該サイト付近の地盤物性値[4]

地層	湿潤密度	初期せん断剛性 G_0	動ポアソン比 ν	剛性比 $G/G_0 \sim \gamma$	減衰定数 $h \sim \gamma$
	[g/cm^3]	[MPa]		[γ ：%]	[h, γ ：%]
PH	1.94	139	0.47	$1/(1+8.73 \cdot \gamma^{0.690})$	$14.0 \cdot \gamma^{0.576}+2.05$
Tss	$1.83\text{-}8.10 \times 10^{-4} \cdot z$	$660\text{-}7.72 \cdot z$	$0.44+5.51 \times 10^{-4} \cdot z$	$1/(1+4.41 \cdot \gamma^{0.895})$	$14.7 \cdot \gamma^{0.381}\text{-}1.34$
Tps	$1.65\text{-}1.86 \times 10^{-3} \cdot z$	$927\text{-}2.56 \cdot z$	$0.42+3.28 \times 10^{-4} \cdot z$	$1/(1+6.51 \cdot \gamma^{0.980})$	$10.3 \cdot \gamma^{0.564}+1.63$
Tpt	1.55	$834\text{-}2.56 \cdot z$	$0.41+2.15 \times 10^{-4} \cdot z$	$1/(1+3.93 \cdot \gamma^{0.974})$	$11.5 \cdot \gamma^{0.513}+0.733$
Tcs	2.03	2030	0.37	$1/(1+3.37 \cdot \gamma^{0.663})$	$13.2 \cdot \gamma^{0.260}\text{-}0.945$

※Z は標高（m）を示す

表 4.1-47　1 次元解析モデル（ケース 1（緩み領域なし））

地層	地層番号	単位体積重量 (kN/m³)	層 厚 (m)	G_0 (kN/m²)	備考
Tpt	1	15.20	1.000	1.08E+06	
	2	15.20	1.000	1.08E+06	
	3	15.20	1.000	1.08E+06	
	4	15.20	1.000	1.08E+06	
	5	15.20	1.000	1.08E+06	
	6	15.20	1.000	1.08E+06	
	7	15.20	1.000	1.08E+06	
	8	15.20	1.000	1.08E+06	
	9	15.20	1.000	1.08E+06	

表 4.1-48　1 次元解析モデル（ケース 2（緩み領域あり））

地層	地層番号	単位体積重量 (kN/m³)	層 厚 (m)	G_0 (kN/m²)	備考
Tpt	1	15.20	1.000	6.91E+05	緩み領域
	2	15.20	1.000	6.91E+05	緩み領域
	3	15.20	1.000	6.91E+05	緩み領域
	4	15.20	1.000	1.08E+06	
	5	15.20	1.000	1.08E+06	
	6	15.20	1.000	1.08E+06	
	7	15.20	1.000	1.08E+06	
	8	15.20	1.000	1.08E+06	
	9	15.20	1.000	1.08E+06	

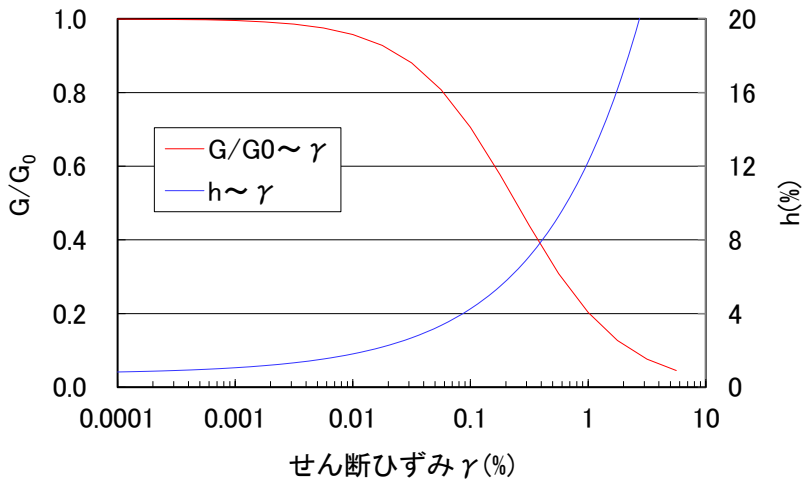
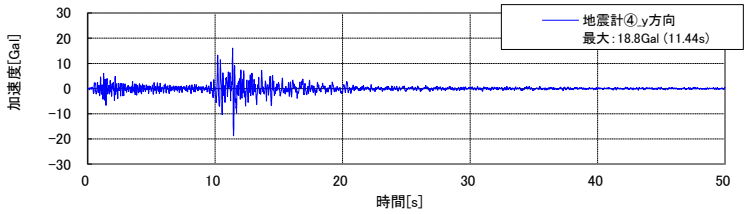


図 4.1-8　ひずみ依存特性（Tpt）

(b) 入力地震動

入力地震動は、前出の表 4.1-2 に示した観測地震動の中から比較的加速度レベルが大きい 2019 年 8 月 15 日に地震計④で得られた地震動（y 方向）を用いた。

表 4.1-49　入力地震動（2019 年 8 月 15 日、y 方向）

地震計	時刻歴波形
地震計④	

d. 解析結果

モデル上端の地震計①の位置における応答加速度を表 4.1-50、フーリエスペクトルを図 4.1-9 に示す。また、フーリエスペクトル比を図 4.1-10 に示す。

表 4.1-50 及び図 4.1-9 に示すように、応答加速度、フーリエスペクトルともに緩み領域の有無の違いはほとんどみられなかった。しかし、図 4.1-10 に示すように、緩み領域の有無のフーリエスペクトル比では、50Hz 程度の高振動数帯でフーリエスペクトル比は最大で 1.24 まで大きくなり、この範囲では緩み領域の影響が出ていると考えられる。

ここで、緩み領域の固有振動数を試算すると以下のように 56(Hz)となり、上記のフーリエスペクトル比が大きくなる振動数と理論的に整合する。

固有振動数 $f_0 = 1/T_0 = 1/(4 \times H/Vs) = 56(Hz)$

ここに、

・T_0：固有周期(s)

・H：緩み領域の高さ 3(m)

・Vs：せん断波速度 674(m/s)

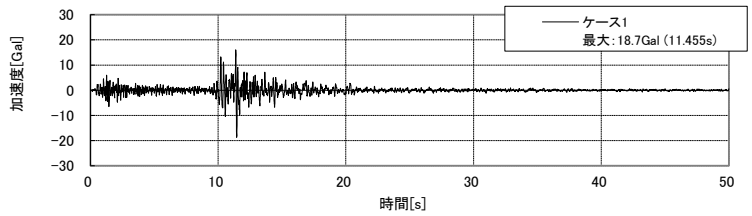
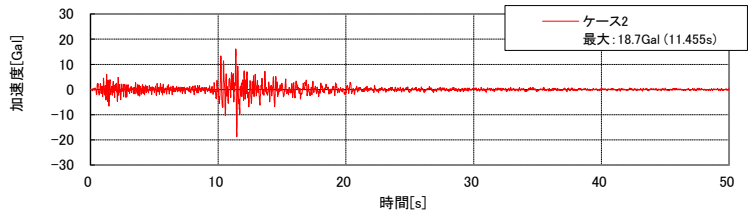
（表 4.1-48 の緩み領域の単位体積重量と G_0 より算出）

また、前述の「4.1.2 (2) 3) 分析評価」において、緩み領域と周辺岩盤のインピーダンス比から算定した緩み領域の増幅率が 1.25 であることも、上記のフーリエスペクトル比の最大値 1.24 と整合する。

よって、1 次元モデルの解析により緩み領域の影響を確認できたが、影響する振動数帯は 50Hz 程度の高振動数帯であり、本検討で評価対象としている振動数帯（0～20Hz）の範囲では緩み領域の影響は認められなかった。

そこで、本検討で評価対象としている振動数帯（0～20Hz）では、空洞規模の影響が含まれる可能性が考えられるため、以降では、空洞をモデル化した 2 次元モデルによる検討を実施する。

表 4.1-50　応答加速度

	時刻歴波形
ケース 1	
ケース 2	

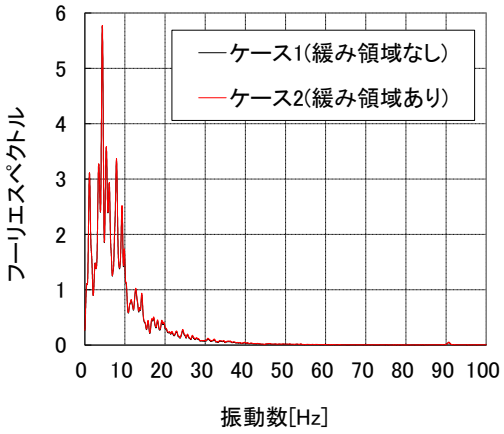


図 4.1-9　フーリエスペクトル

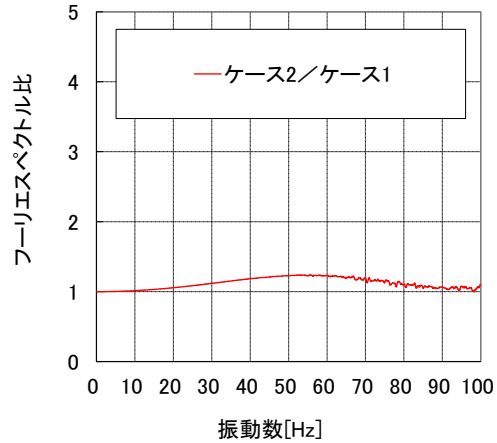


図 4.1-10　フーリエスペクトル比

2）2 次元モデルによる検討

a．概要

図 4.1-11 に示すように、2 次元モデルで試験空洞及び計測坑をモデル化することにより、緩み領域や空洞規模が観測地震動に与える影響について検討した。

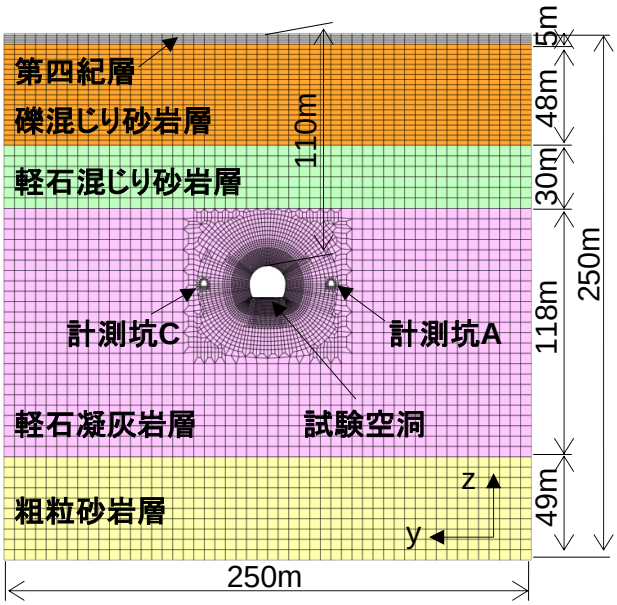


図 4.1-11　解析モデル

b．検討ケース

検討ケースは、図 4.1-12 及び図 4.1-13 に示すように、緩み領域をモデル化しないケース 1 とインバートの下部に緩み領域をモデル化したケース 2 の計 2 ケースとする。ケース 2 では、1 次元モデルの場合と同様に、緩み領域は初期せん断剛性 G_0 を低減させることでモデル化する。

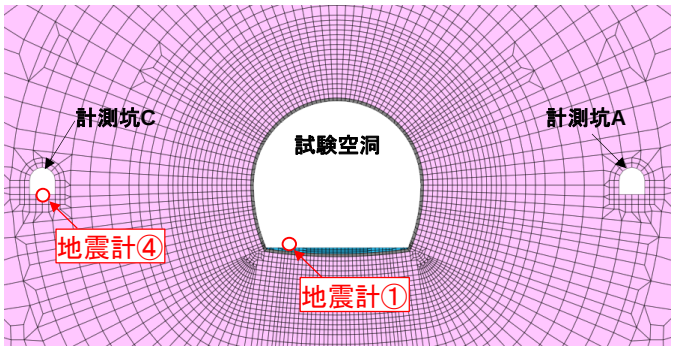


図 4.1-12　インバート下部の緩み領域なし（ケース 1）

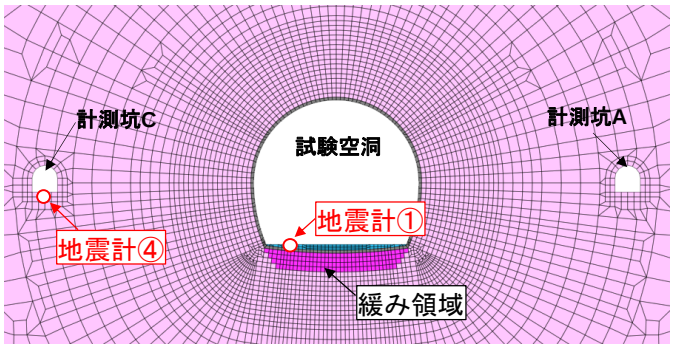


図 4.1-13　インバート下部の緩み領域あり（ケース 2）

c．解析条件

(a) 解析モデル

地震応答解析モデルを図 4.1-14 及び図 4.1-15 に示す。周辺地盤の地層構成については、図 4.1-16 に示す試験空洞縦断面[5]を参考に設定した。

なお、解析には二次元・三次元汎用有限要素解析プログラム（Soil Plus 2019 (Ver.1300)）を用いた。

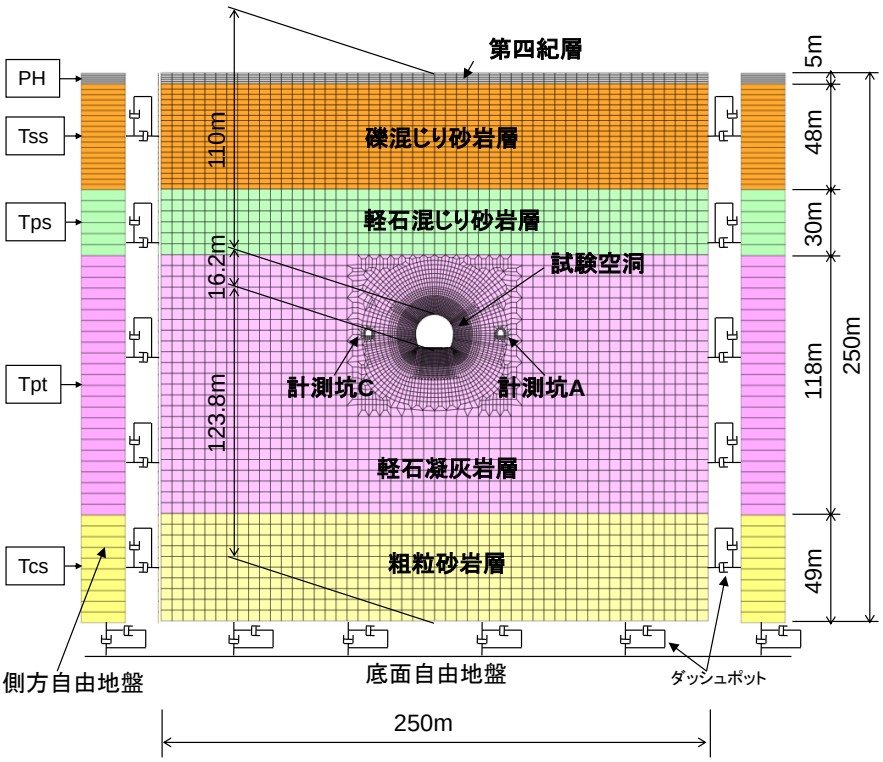


図 4.1-14　地震応答解析モデル（全体）

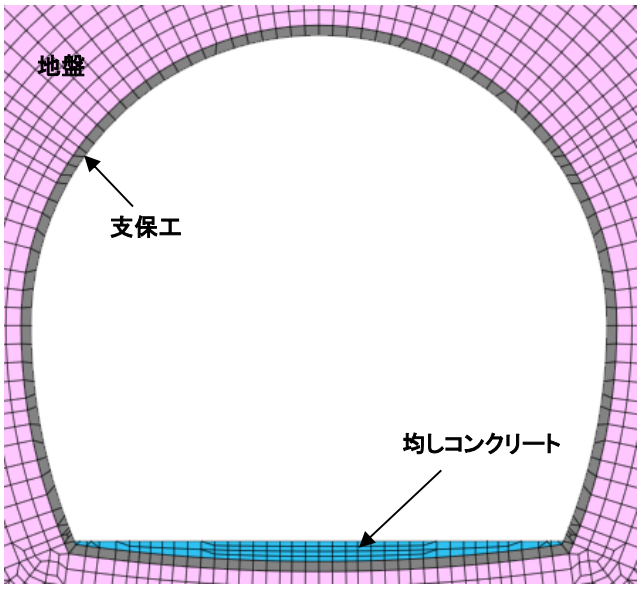


図 4.1-15　地震応答解析モデル（試験空洞）

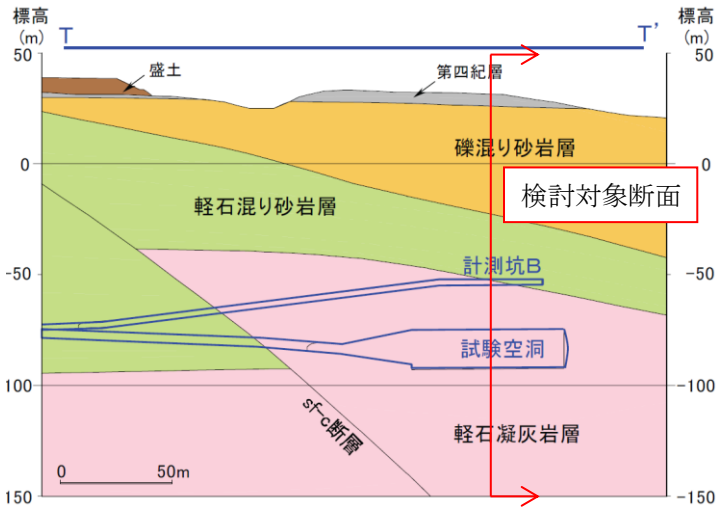


図 4.1-16　試験空洞近傍の地質構造（試験空洞縦断面）[5]

(b) 入力物性値

解析に用いた物性値一覧を表 4.1-51 に示す。設定根拠については後述する。

本解析に用いた構造物の物性値は、既往検討である地下空洞型処分施設性能確証試験及び閉鎖技術確証試験報告書に係わる公開文献等より設定した。また、地盤物性値は、日本原燃再処理施設の物性値[4]を適用した。

表 4.1-51　解析物性値一覧

種類	区分	単位体積重量	ヤング率	初期せん断剛性	ポアソン比	非線形パラメータ			
						正規化せん断弾性係数	減衰定数	修正R-Oパラメータ	
		γ [kN/m^3]	E[MPa]	G_0[MPa]	ν	G/G0～γ	h～γ	α	β
地盤	PH	19.0	409	139	0.47	$1/(1+8.73\cdot\gamma^{0.690})$	$14.0\cdot\gamma^{0.576}+2.05$	1.804	1.851
	Tss①	17.8	1601	552	0.45	$1/(1+4.41\cdot\gamma^{0.895})$	$14.7\cdot\gamma^{0.381}-1.34$	2.191	2.131
	Tss②	18.0	2108	737	0.43				
	Tps	16.8	2882	1,022	0.41	$1/(1+6.51\cdot\gamma^{0.980})$	$10.3\cdot\gamma^{0.564}+1.63$	2.451	2.293
	Tpt①	15.2	2814	1,005	0.40	$1/(1+3.93\cdot\gamma^{0.974})$	$11.5\cdot\gamma^{0.513}+0.733$	2.451	2.293
	Tpt②	15.2	3002	1,080	0.39				
	Tpt②（緩み領域）	15.2	1922	691	0.39				
	Tpt③	15.2	3191	1,156	0.38				
	Tpt④	15.2	3398	1,231	0.38				
	Tcs	19.9	5562	2,030	0.37	$1/(1+3.37\cdot\gamma^{0.663})$	$13.2\cdot\gamma^{0.260}-0.945$	1.727	1.788
構造物	支保工	24.5	27,900	－	0.2	－	－	－	－
	均しコンクリート	23.0	22,000	－	0.2	－	－	－	－

a）地盤

ア）引戻し解析

地震応答解析を実施するにあたり、事前に解析に用いる入力地震動を得るために、地表面で得られた観測地震動を、解析モデルの下端まで引戻す必要がある。この引戻し解析においては、地盤のせん断剛性と減衰特性のひずみ依存性を考慮することとし、その物性値は前出の表 4.1-51 に示すとおり設定した。

イ）地震応答解析

地震応答解析では、地盤のせん断剛性と減衰特性のひずみ依存性を考慮することとし、骨格曲線が次式で定義される修正 R-O モデル[6]を用いた。

$$\gamma = \frac{\tau}{G_0}\left\{1+\alpha\left(\frac{\tau}{\tau_f}\right)^{\beta-1}\right\}$$

ここに、τ_f はせん断強度で、

$$\tau_f = G_0\gamma_r$$

であり、γ_r は $G/G_0 = 0.5$ となるときのせん断ひずみである。また、α と β は定数で、次式で評価する。

$$\alpha = 2^{\beta-1}$$

$$\beta = \frac{2+\pi h_{\max}}{2-\pi h_{\max}}$$

ここに、h_{max} はせん断剛性 G がゼロとなるときの最大減衰定数である。

これらのパラメータは、G/G_0～γ の関係が室内試験で得られた結果と対応するように設定した。表 4.1-51 に示した地盤物性値を用いて評価したパラメータを表 4.1-52 に示す。なお、単位体積重量、初期せん断剛性、動ポアソン比は公開文献[4]の値を用いるが、標高による設定が必要なため、地層が厚い Tss 層（48m）及び Tpt 層（118m）は図 4.1-17 に示すように、それぞれ 2 分割、4 分割して物性値の設定を行った。採用した物性値を表 4.1-53 に示す。表 4.1-53 には、インバート下部に設定する緩み領域（Tpt②内）の物性値も記載しているが、1 次元モデルの検討と同様に、緩み領域の G_0 を低減してモデル化した。

表 4.1-52　地盤物性値（修正 R-O モデルのパラメータ）

地層	γr	h_{max}	α	β
	[%]	[%]	-	-
PH	4.327×10^{-2}	19	1.804	1.851
Tss	1.905×10^{-1}	23	2.191	2.131
Tps	1.478×10^{-1}	25	2.451	2.293
Tpt	2.453×10^{-1}	25	2.451	2.293
Tcs	1.600×10^{-1}	18	1.727	1.788

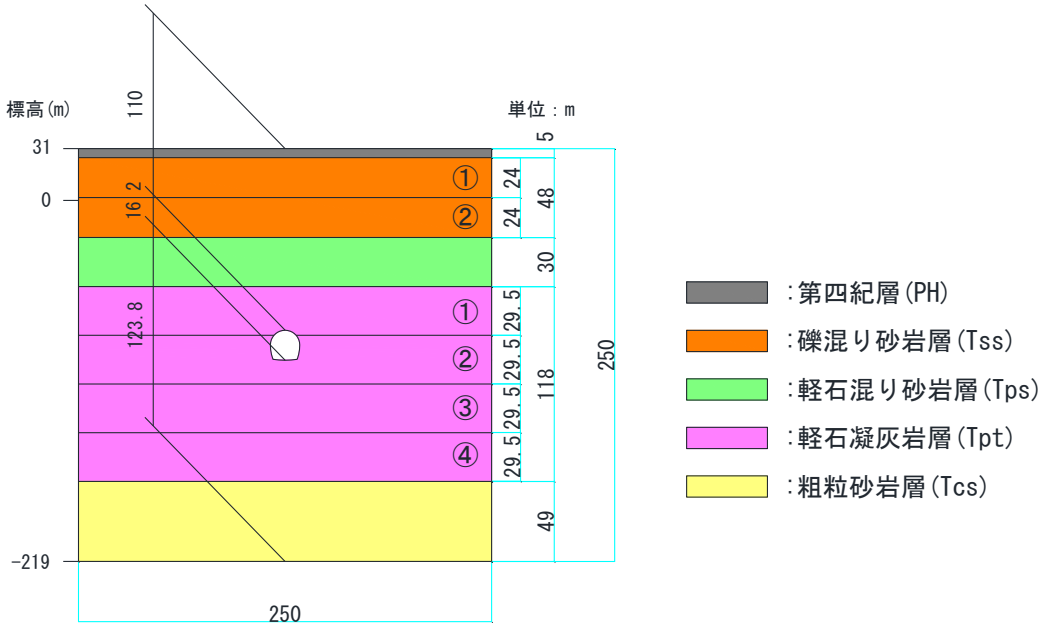


図 4.1-17　地層分割図

表 4.1-53　地震応答解析に用いる地盤物性値

地層	中心標高	単位体積重量	初期せん断剛性 G_0	動ポアソン比 ν
	[m]	[kN/m³]	[MPa]	—
PH	29	19.0	139	0.47
Tss①	14	17.8	552	0.45
Tss②	-10	18.0	737	0.43
Tps	-37	16.8	1022	0.41
Tpt①	-67	15.2	1005	0.40
Tpt②	-96	15.2	1080	0.39
Tpt②（緩み領域）	—	15.2	691	0.39
Tpt③	-126	15.2	1156	0.38
Tpt④	-155	15.2	1231	0.38
Tcs	-195	19.9	2030	0.37

b）1 次支保工

支保工は、吹付けコンクリートと鋼製支保工から構成される。それぞれの物性値と諸元を表 4.1-54 に示す。解析では、吹付けコンクリートと鋼製支保工を合わせて、ソリッド要素でモデル化した。その際の物性値は表 4.1-55 に示すように、それぞれの物性値を断面積比で重み付けして設定した。

表 4.1-54　支保工の諸元及び物性値

解析条件項目			諸元及び物性値	参考文献
吹付けコンクリート	吹付け厚	T(cm)	30	
	設計基準強度	f'ck(MPa)	36	[5]
	単位体積重量	γ c(kN/m³)	23	[5]
	弾性係数	硬化後(MPa)	24,200	[7]
	断面積	Ac(m²)	0.2936	
鋼製支保工	使用鋼材	－	H-250	[7]
	規格	－	SS540	[5]
	降伏点	Fyk(MPa)	400	[5]
	建込間隔	@(m)	1.0	[7]
	単位体積重量	γ s(kN/m³)	77	
	等価断面積	As(m²)	6.35×10^{-3}	
	弾性係数	Es(MPa)	200,000	[7]

表 4.1-55　解析に用いる支保工の物性値

項目	記号	単位	物性値	備考	参考文献
弾性係数	E	kN/mm²	27.9	$E=\dfrac{E_C A_C + E_S A_S}{A}$ A_C ：コンクリートの断面積 A_S ：鋼製支保工の断面積 $A = A_C + A_S$	
単位体積重量	γ	kN/m³	24.5		[8]
ポアソン比	ν	－	0.2		[8]

c）均しコンクリート

均しコンクリートの物性値を表 4.1-56 に示す。

表 4.1-56　均しコンクリートの物性値

項目	記号	単位	物性値	備考	参考文献
弾性係数	E	kN/mm²	22.0		[9]
単位体積重量	γ	kN/m³	23.0		[9]
ポアソン比	ν	－	0.2		[9]

(c) 入力地震動作成

本検討では、今年度の地震動観測において、地表面で得られた地震計⑤のデータを用いて地震応答解析の入力地震動を作成する。Schnabel et al.[10]が開発した一次元重複反射理論に基づく等価線形解析プログラム（SHAKE）を用いて、地震計⑤の設置位置から解析モデルの下端(EL.-219m)まで地震動を引戻した。

a）解析モデル

引戻し解析では、図 4.1-18 に示すように、地震計⑤の設置位置から解析モデルの下端(EL.-219m)までをモデル化した。

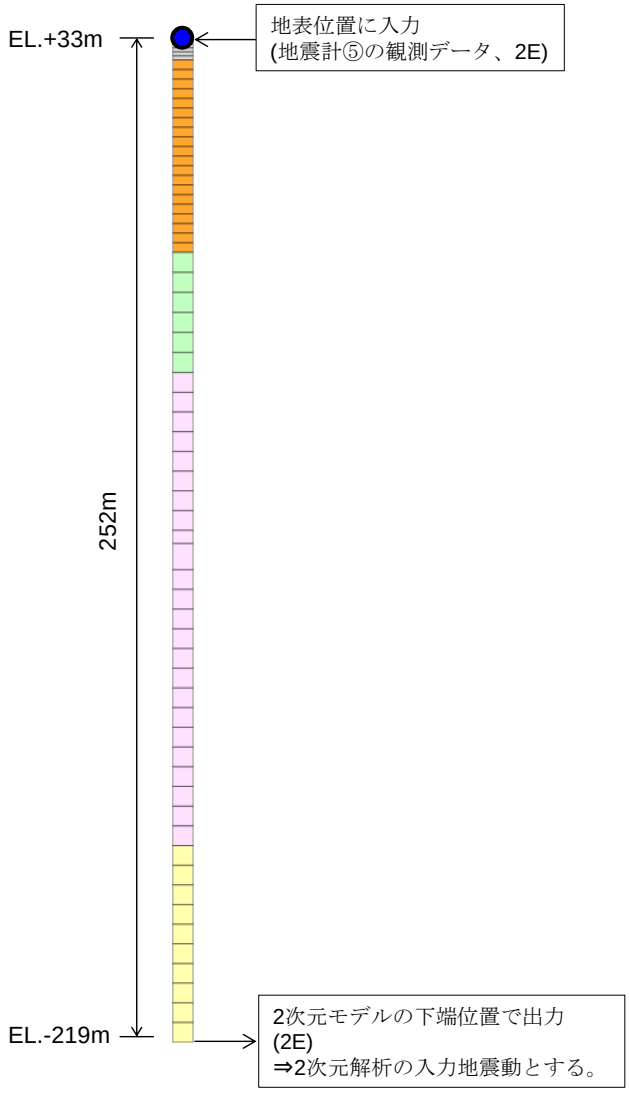


図 4.1-18　引戻し解析モデル

b) 入力地震動

入力地震動作成に用いる地震動は、表 4.1-57 に示す今年度の地震動観測において地表面で得られた地震計⑤のデータのうち、比較的加速度レベルが大きい 2021 年 12 月 6 日の観測データを用いることとした。2021 年 12 月 6 日の地震計⑤の観測データを図 4.1-19 に示す。

また、引戻し解析により、解析モデル下端まで引戻した地震動（入力地震動）を図 4.1-20 に示す。

表 4.1-57　今年度の観測で取得した地震動データの一覧

No.	地震の発生日	震央地名	尾駮の震度	地震計				
				①	②	③	④	⑤
1	2021年2月26日	青森県東方沖	震度2	○	（取得できず）	○	○	設置前→10月19日に設置
2	2021年3月20日	岩手県沖	震度1	○		○	○	
3	2021年3月20日	宮城県沖	震度2	○		○	○	
4	2021年4月1日	青森県東方沖	震度1	○		○	○	
5	2021年4月14日	青森県東方沖	震度1	○		○	○	
6	2021年5月1日	宮城県沖	震度2	○		○	○	
7	2021年5月14日	福島県沖	震度1	○		○	○	
8	2021年6月9日	岩手県沖	震度1	○		○	○	
9	2021年6月9日	岩手県沖	震度1	○		○	○	
10	2021年6月20日	上川地方中部	震度1	○		○	○	
11	2021年7月26日	青森県東方沖	震度3	○		○	○	
12	2021年8月20日	青森県東方沖	震度1	×		×	○	
13	2021年9月29日	日本海中部	震度1	×		×	○	
14	2021年10月6日	岩手県沖	震度3	○	○	○	（取得できず）	
15	2021年10月18日	青森県東方沖	震度1	○	○	○		
16	2021年10月19日	青森県東方沖	震度2	○	○	○		○
17	2021年11月8日	青森県東方沖	震度1	×	×	×		○
18	2021年11月14日	苫小牧沖	震度1	×	×	×		○
19	2021年12月6日	青森県東方沖	震度2	○	○	○		○

○:取得、×:トリガー値未満で未取得

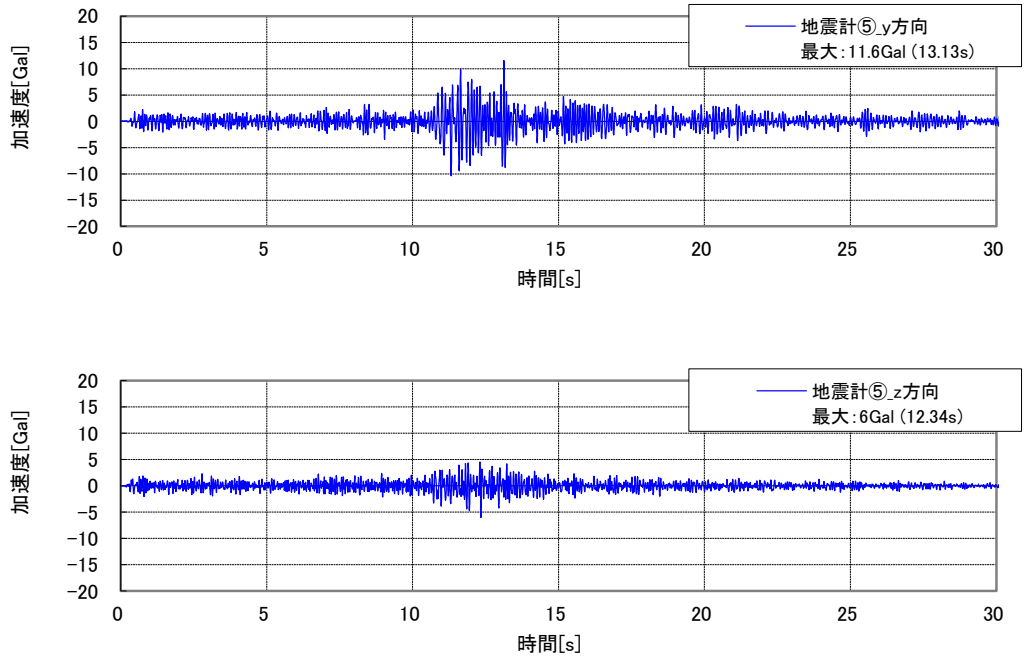


図 4.1-19　地表面の地震計⑤のデータ（2021 年 12 月 6 日、上：水平方向、下：鉛直方向）

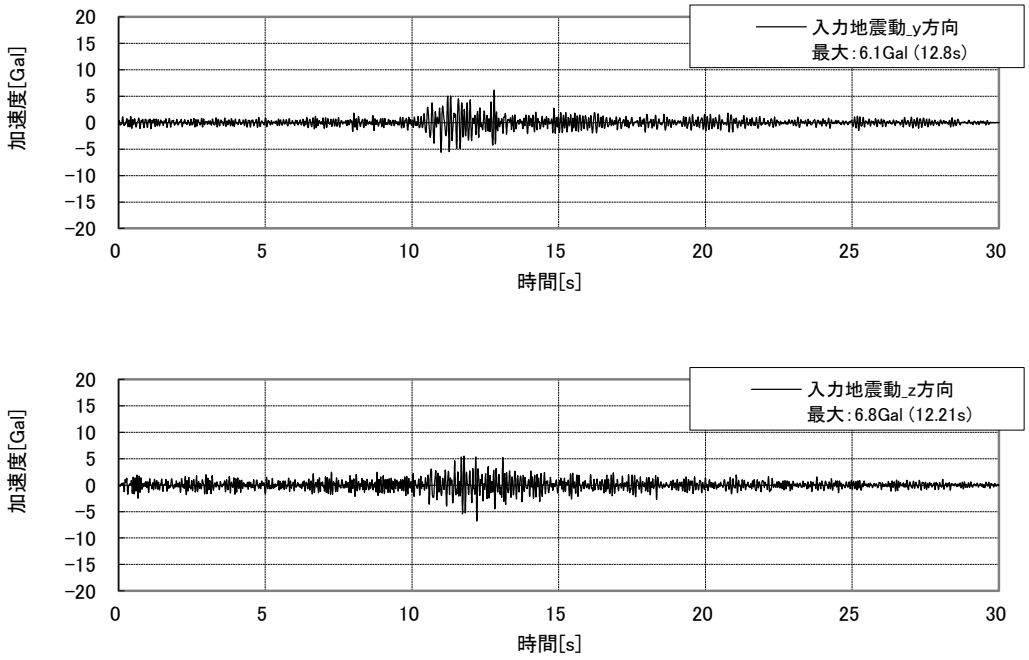


図 4.1-20　入力地震動（上：水平方向、下：鉛直方向））

d. 解析結果

(a) 試験空洞底盤における応答（地震計①の位置）

試験空洞底盤におけるケース 1 とケース 2 の応答加速度（水平方向、鉛直方向）の時刻歴波形及びフーリエスペクトルを表 4.1-58 及び表 4.1-59 に示す。

1 次元モデルによる検討と同様に、2 次元モデルにおいても緩み領域の有無による影響はほぼ認められない。

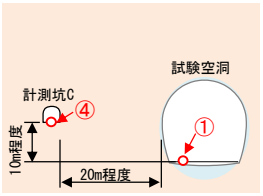


表 4.1-58 解析結果（地震計①、水平方向）

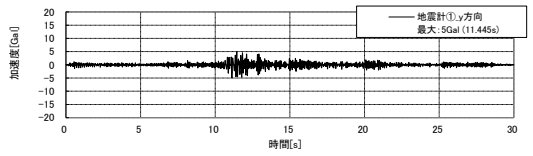
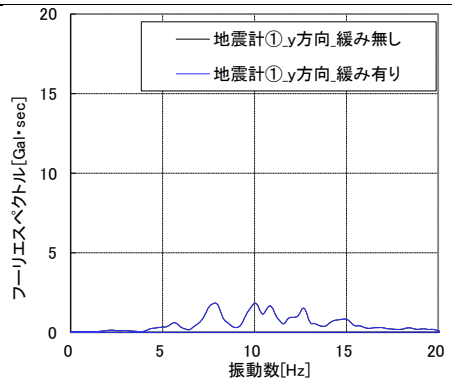
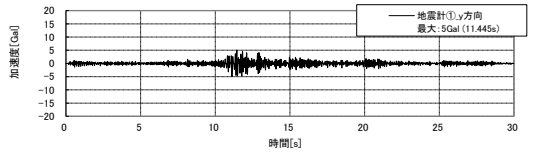
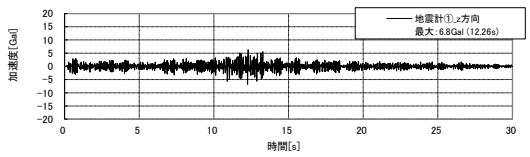
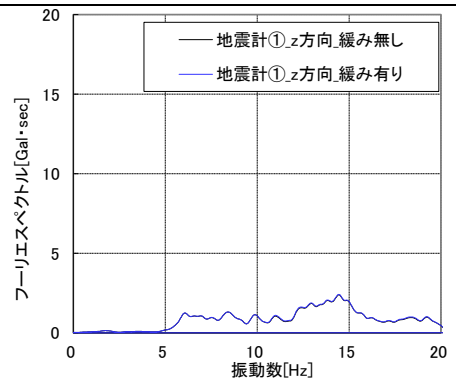
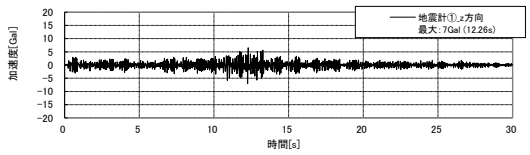
	時刻歴波形	フーリエスペクトル
ケース 1 (緩み領域なし)		
ケース 2 (緩み領域あり)		

表 4.1-59 解析結果（地震計①、鉛直方向）

	時刻歴波形	フーリエスペクトル
ケース 1 (緩み領域なし)		
ケース 2 (緩み領域あり)		

(b) 計測坑底盤における応答（地震計④の位置）

計測坑底盤におけるケース 1 とケース 2 の応答加速度（水平方向、鉛直方向）の時刻歴波形及びフーリエスペクトルを表 4.1-60 及び表 4.1-61 に示す。

前述の地震計①位置での応答と同様に、緩み領域の有無による影響はほぼ認められない。

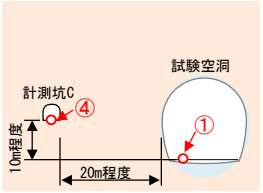


表 4.1-60　解析結果（地震計④、水平方向）

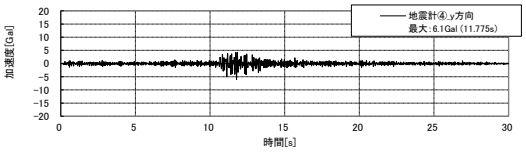
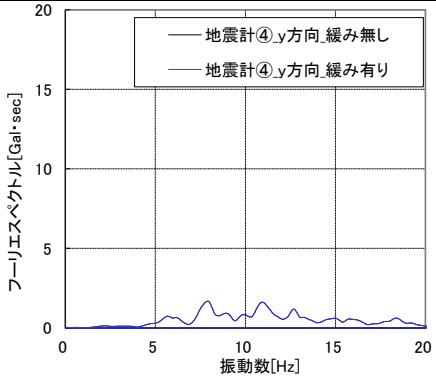
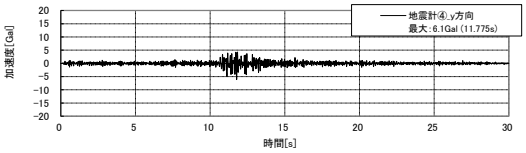
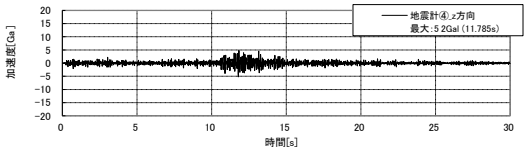
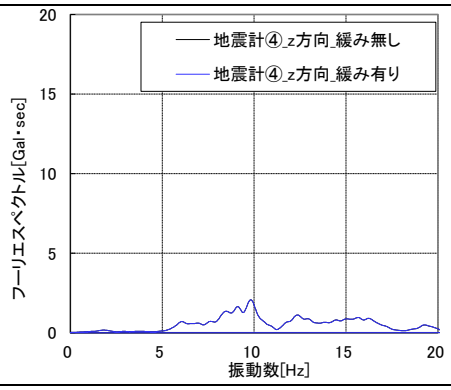
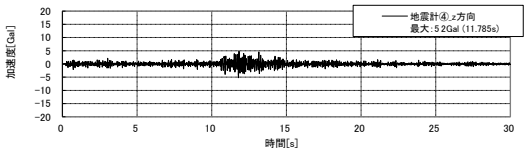
	時刻歴波形	フーリエスペクトル
ケース 1 (緩み領域なし)		
ケース 2 (緩み領域あり)		

表 4.1-61　解析結果（地震計④、鉛直方向）

	時刻歴波形	フーリエスペクトル
ケース 1 (緩み領域なし)		
ケース 2 (緩み領域あり)		

e．分析評価

(a) 緩み領域のモデル化の必要性

前述の表 4.1-58 及び表 4.1-59 に示したように、本検討で評価対象としている振動数帯（0～20Hz）の範囲では、緩み領域の有無によって、試験空洞底盤の応答加速度はほとんど変化しないがわかった。この結果は、1 次元モデルによる検討結果と同様である。

したがって、本検討においては、緩み領域をモデル化する必要性は小さいと考えられる。

(b) 空洞規模が応答加速度に与える影響

試験空洞（地震計①）と計測坑（地震計④）における応答加速度のスペクトル分析により、空洞規模が応答加速度に与える影響を評価する。なお、前述のとおりケース 1（緩み領域なし）とケース 2（緩み領域あり）の解析結果の差異はほとんどないことから、ここでは、ケース 1 の結果を用いて分析する。

地震計①と地震計④での解析結果（水平方向の時刻歴波形、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比）を表 4.1-62 に示す。同様に鉛直方向の解析結果を表 4.1-63 に示す。

解析結果と比較するための観測結果についても地震計①と地震計④で整理することが望まれたが、表 4.1-57 に示したように本解析で用いた 2021 年 12 月 6 日の観測地震動では地震計④のデータを取得することができなかった。そこで、地震計①と地震計④の観測地震動を取得した過去の地震データの中から、2021 年 12 月 6 日の観測地震動と類似する地震動を抽出して、観測結果の代用として使用することとした。検討の結果、図 4.1-21 に示すように、2014 年 10 月 27 日の観測地震動は、2021 年 12 月 6 日の観測地震動と地震計①のフーリエスペクトルで類似傾向がみられた。よって 2014 年 10 月 27 日の観測地震動を 2021 年 12 月 6 日の観測地震動の代用として用いることとした。

地震計①と地震計④のフーリエスペクトル比を図 4.1-22 に示す。図 4.1-22 の解析結果と観測結果は異なる地震動を対象としているため整合とまではいかないが、両者でスペクトル比の分布は類似傾向がみられる。よって、2 次元モデルによる検討により、空洞の規模が観測地震動に影響を与えている可能性が示唆された。すなわち、観測地震動のデータを解析で再現する場合には、2 次元モデル等により空洞を模擬する必要があると考えられる。

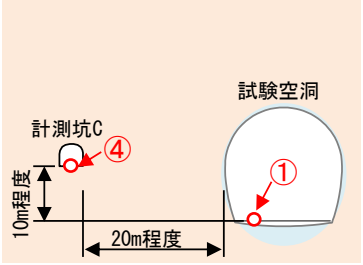
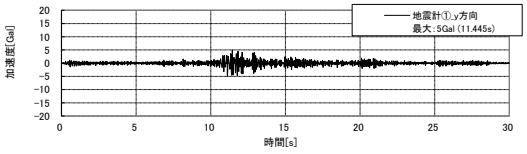
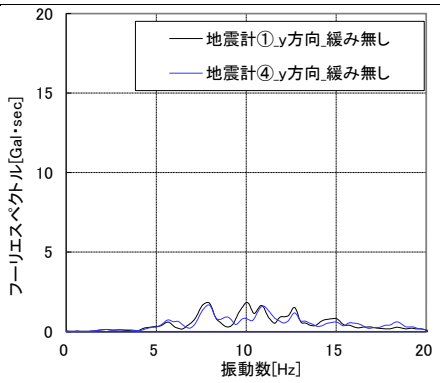
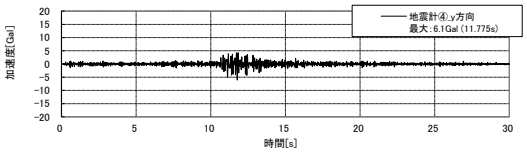
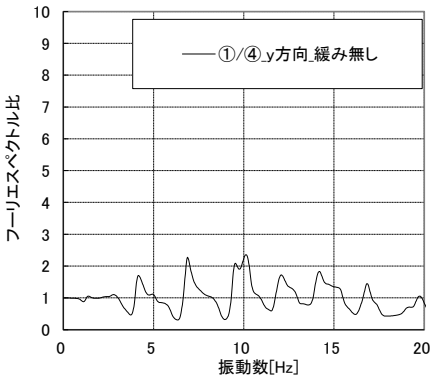


表 4.1-62　解析結果（地震計①～地震計④、水平方向）

	時刻歴波形	フーリエスペクトル
地震計①		 (1) フーリエスペクトル
地震計④		 (2) フーリエスペクトル比

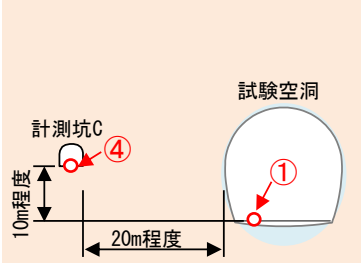
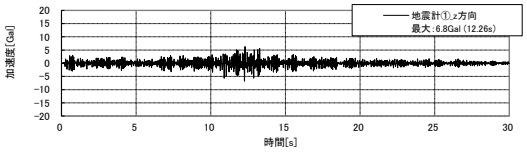
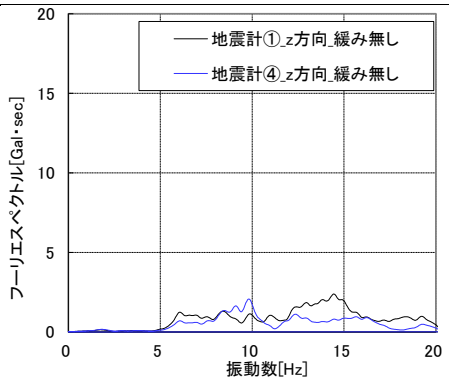
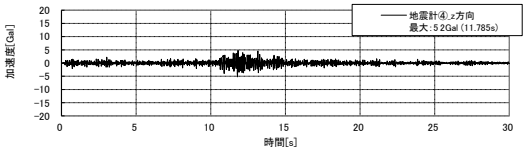
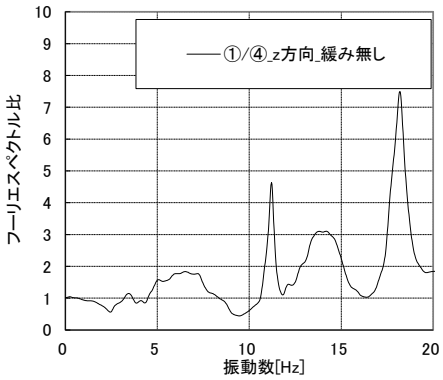


表 4.1-63　解析結果（地震計①～地震計④、鉛直方向）

	時刻歴波形	フーリエスペクトル
地震計①		 (1) フーリエスペクトル
地震計④		 (2) フーリエスペクトル比

入力地震動作成用に使用

	地震の発生日	震央地名	尾駮の震度	地震計 ①	②	③	④	⑤
解析に使用	2021年12月6日	青森県東方沖	震度2	○	○	○	取得できず	○
①④の代用	2014年10月27日	青森県東方沖	震度1	○	○	○	○	未設置

12月6日の観測結果の代用として使用

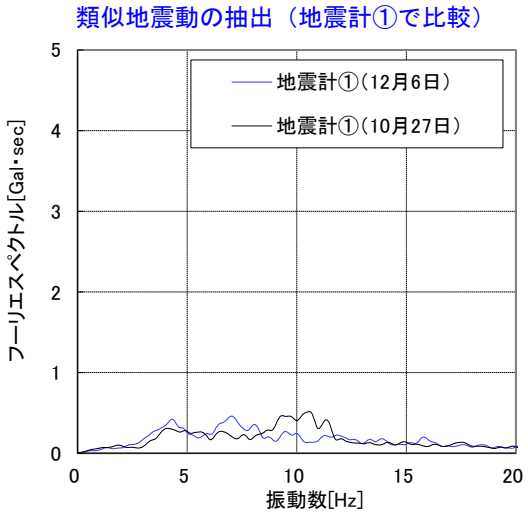
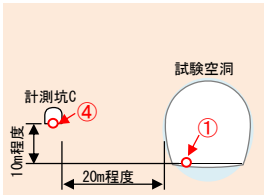
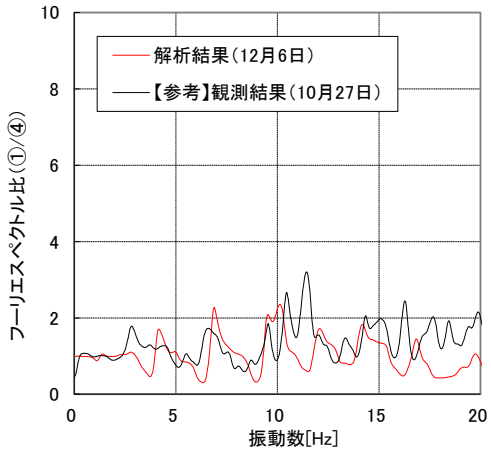
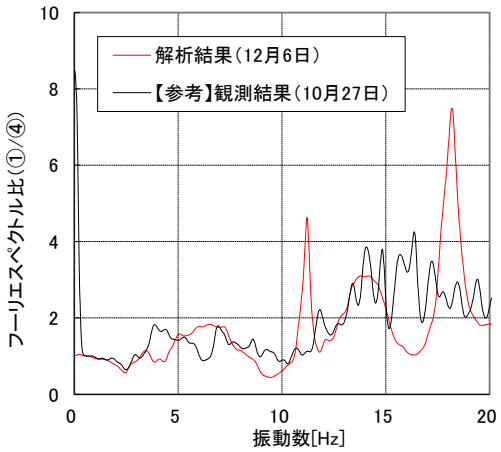


図 4.1-21　2021 年 12 月 6 日の観測地震動と類似する観測地震動の抽出





(1)水平方向



(2)鉛直方向

図 4.1-22　フーリエスペクトル比（①/④）の解析結果と観測結果の比較

4.1.3　地下及び地上の観測地震動の整合性の確認

(1) 概要

前項「4.1.2　緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討」では、緩み領域及び空洞規模の影響を確認するために、地震計①（試験空洞）と地震計④（計測坑 C）でのフーリエスペクトルから両者のフーリエスペクトル比を算出して相対的な分析を実施した。

ここでは、地震計①のみの結果に着目して、前項の 2 次元解析（地表の地震計⑤の観測結果をモデル下端まで引戻して入力地震動を作成）の結果と観測結果を直接的に比較することにより、解析での観測地震動の再現性を評価する。

(2) 検討ケース

検討ケースは、前項の 2 次元解析で実施した緩み領域をモデル化しないケース 1（図 4.1-12）とした。

(3) 解析条件

解析条件は、前項の 2 次元解析と同条件である。

(4) 解析結果と観測結果の比較分析

地震計①の位置における解析結果と観測結果の比較（水平方向、鉛直方向）を表 4.1-64 及び表 4.1-65 に示す。

表 4.1-64 に示すように、水平方向の時刻歴波形の最大加速度は、解析結果で 5.0Gal、観測結果で 2.0Gal となり、解析結果の方が 2.5 倍大きくなっている。また、フーリエスペクトルも、振動数が 3Hz より大きい範囲では、解析結果と観測結果が乖離している。

同様に鉛直方向についても、表 4.1-65 に示すように時刻歴波形の最大加速度は、解析結果で 6.8Gal、観測結果で 1.5Gal となり、解析結果の方が 4.5 倍大きくなっている。また、フーリエスペクトルも、振動数が 5Hz より大きい範囲では、解析結果と観測結果が乖離している。

このように、解析結果と観測結果が乖離する要因の一つとして、解析で用いている入力地震動が精度よく設定できていない可能性が考えられる。すなわち、入力地震動を作成するための引戻し解析において、地表の地震計⑤の観測結果を解析モデル下端まで精度よく引戻しできていないことが考えられる。

解析結果と観測結果が整合するための引戻し解析手法の改良項目について、次項で述べる。

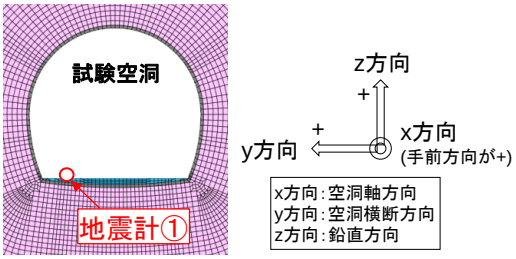


表 4.1-64　解析結果と観測結果の比較（地震計①、水平方向）

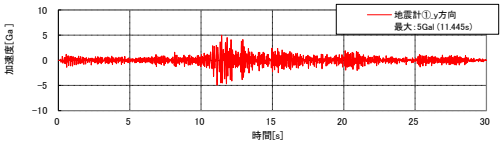
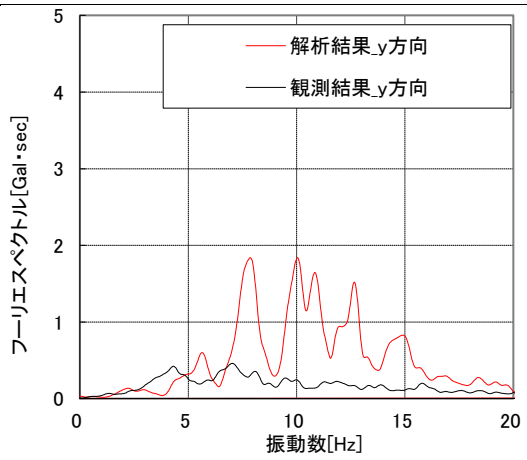
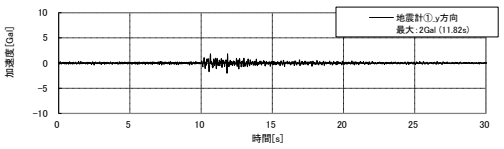
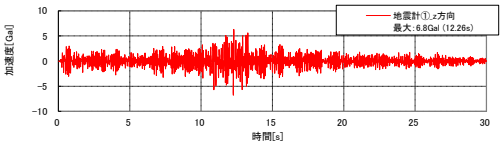
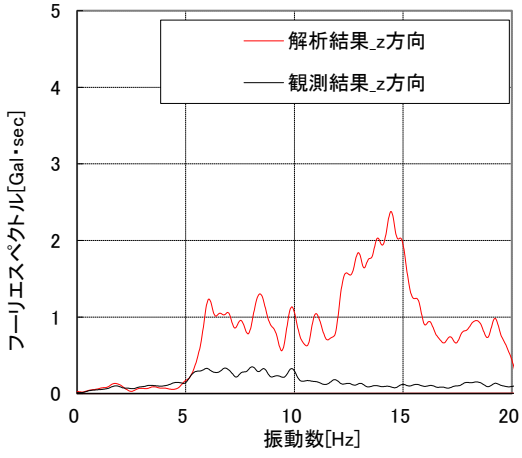
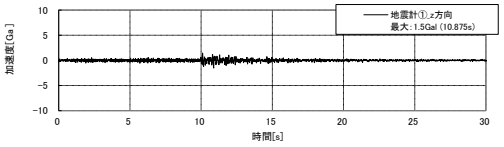
	時刻歴波形	フーリエスペクトル
解析結果		
観測結果		

表 4.1-65　解析結果と観測結果の比較（地震計①、鉛直方向）

	時刻歴波形	フーリエスペクトル
解析結果		
観測結果		

4.1.4 引戻し解析手法の改良項目の選定

上記の検討結果を踏まえて、解析結果と観測結果を整合するための引戻し解析手法の改良項目について検討する。

引戻し解析における改良項目として、昨年度実施した文献調査結果より、「減衰定数の周波数依存性の考慮」と「逆解析による地盤物性の同定」を候補とする予定である。改良項目の内容について以下に記載する。

(1) 減衰定数の周波数依存性の考慮

地震応答解析に使用するための入力地震動は、図 4.1-23 に示すように地表面に設置した地震計⑤の観測データを入力波（2E 波）として、解析モデル下端まで引戻して作成する。現状の引戻し解析手法には、Schnabel et al.[10]が開発した 1 次元重複反射理論に基づく等価線形解析プログラム（SHAKE）を用いている。

SHAKE では、ひずみレベルの大きな解析では、特に高周波数領域において減衰を過大に評価することが一般的に知られている[11]。これは、SHAKE では収束計算で定まるせん断ひずみレベルに応じた減衰定数を、図 4.1-24 の黒線に示すように地震動の周波数に依存せず一律に与えているためである。しかし、実際は図 4.1-24 の青線に示すように、卓越周波数以外ではせん断ひずみレベルが小さくなるため、それに応じて減衰定数も小さくなると考えられる。既往の引戻し解析で用いた地震動の最大加速度は、いずれも 20Gal 以下であり、最大せん断ひずみも 0.01%以下とひずみレベルが非常に小さいため、上述のような問題には該当しないと推察される。一方で、栗田他[12]は、ひずみが非常に小さい領域でも減衰は存在しており、そのメカニズムなどは解明されていないものの、既往の地震動の観測記録の再現性から、減衰の周波数依存性と関連するものであると指摘している。よって、試験施設で発生する小さな地震レベルでの周波数依存減衰を適用すべきかの課題は残るものの、現状の引戻し解析プログラム（SHAKE）では、精度の高い入力地震動を得られていないことから、昨年度の文献調査により、SHAKE の特徴・問題点を整理し、更に SHAKE の問題点を改善するために開発された手法に関して整理した。

末冨他[13]は、SHAKE で適用される有効ひずみ γ_{eff} が周波数に依存した関数になっていないことにより、特に周波数の高いところでは剛性を小さく、減衰を大きく評価してしまうこと、更にそれらの問題を改善するための γ_{eff} に周波数依存性を適用した既往研究について述べている。γ_{eff} が大きく見積もられると、減衰定数 h も大きく見積もってしまい、γ_{eff} は解析で適用される減衰に影響を与えるパラメータである。

表 4.1-66 に末冨他[13]で紹介されている 3 つの解析プログラム（SHAKE、FDEL、DYNEQ）の特徴を整理する。FDEL、DYNEQ は、SHAKE では適用されない周波数依存型の減衰を適用するために開発された解析プログラムである。

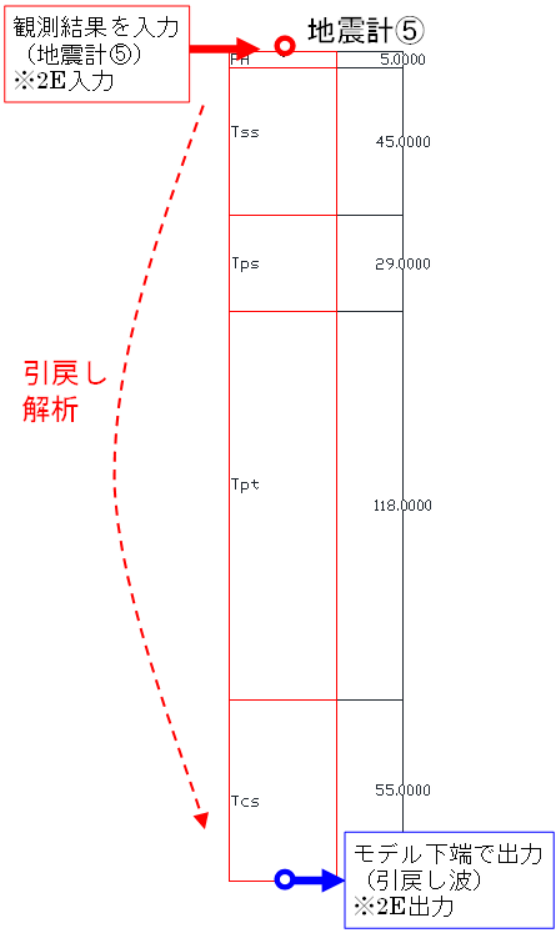


図 4.1-23　1 次元モデルによる引戻し解析

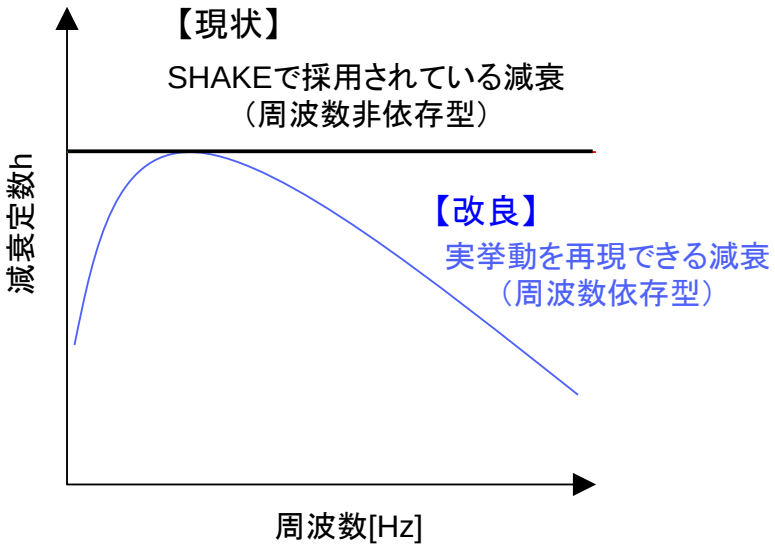


図 4.1-24　SHAKE における減衰の周波数依存の模式図

表 4.1-66　解析プログラム（SHAKE、FDEL、DYNEQ）の特徴

	解析プログラム		
	SHAKE	FDEL	DYNEQ
概要	Schnabel et al.[10]が開発した 1 次元重複反射理論に基づく等価線形解析プログラムである。広く地盤の地震応答解析に用いられている。 重複反射理論は波動方程式の解析解を用いており、入射波と反射波の分離、任意位置（深さ）で入力地震動が設定できるなどの利点は大きいが、非線形性を表現するためには等価線形化法を使わざるを得ないという短所もある。 等価線形化法では、解析の全時間を通じ材料特性は変わらないが、有効ひずみ γ_{eff} で剛性と減衰を評価することにより非線形の効果を考慮している。	杉戸ら[11]により提案されたプログラムであり、SHAKE により有効ひずみを決めると、特に周波数の高いところで剛性を小さく減衰を大きく評価してしまい、増幅を小さめに評価しすぎるとして、ひずみ波形のフーリエスペクトルに着目して、α を周波数の関数として表した方法である。その後、Suetomi et al.[14]で、強震記録での適合性をよくするために、以下の γ_{eff} のようにパラメータを加えて調整しており、剛性及び減衰は周波数の関数となる。	吉田ら[15]により提案されたプログラムであり、FDEL と同様に、有効ひずみ γ_{eff} を周波数の関数として設定する方法であるが、FDEL とは異なる γ_{eff} の関数式としている。
有効ひずみ γ_{eff} の計算方法	$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max}$$ ここで、γ_{max} は最大ひずみ、α は等価線形化のための係数である。α の値は 0.65 が一般的に用いられる。	$$\gamma_{eff} = C \cdot \left(\frac{F_\gamma(f)}{F_{\gamma_{max}}} \right)^p \cdot \gamma_{max}$$ ここで、$F\gamma(f)$ はひずみ波形のフーリエスペクトル、$F\gamma_{max}$ はその最大値である。C=0.65、p=1.0 では、杉戸らが提案する FDEL に一致する。	$$\gamma_{eff} = \gamma_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\}$$ ここで、f_e と m は既往の記録を説明できるように設定したパラメータであり、f_e より高い周波数域では弾性挙動を示すものとする。f_p は、ひずみが最大振幅 γ_{max} となるときの周波数である。なお、f_p より小さい周波数では有効ひずみは γ_{max}、f_e より大きい周波数では有効ひずみは 0 とする。

(2) 逆解析による地盤物性の同定

栗田ら[12]は、図 4.1-25 に示すように、地中と地表における複数の地震動アレー観測結果を用いて、表層地盤の S 波速度と周波数依存性を有する減衰定数を、遺伝的アルゴリズム（GA：Genetic Algorithm[16]）を用いて同定している。図 4.1-26 は S 波速度の PS 検層結果と遺伝的アルゴリズムによる同定結果の比較である。

本検討においても、地表の地震計⑤と地下の地震計④（空洞径の影響を受けにくい計測坑 C での観測結果を選定）によるアレー観測の結果を用いて、地表～地下の物性等の精査が可能になると考えられる。

ここで、地震計⑤（地表）と地震計④（地下）の平面位置の関係は、図 4.1-27 に示すように平面距離で約 82m 離れていることから、表 4.1-67 に示すように、両地震計が設置されている箇所の地質構造も若干異なっている。よって、1 次元モデル作成にあたっては、図 4.1-28 に示すように、地震計⑤と地震計④の位置で個別にモデル化する必要性があると考えられる。

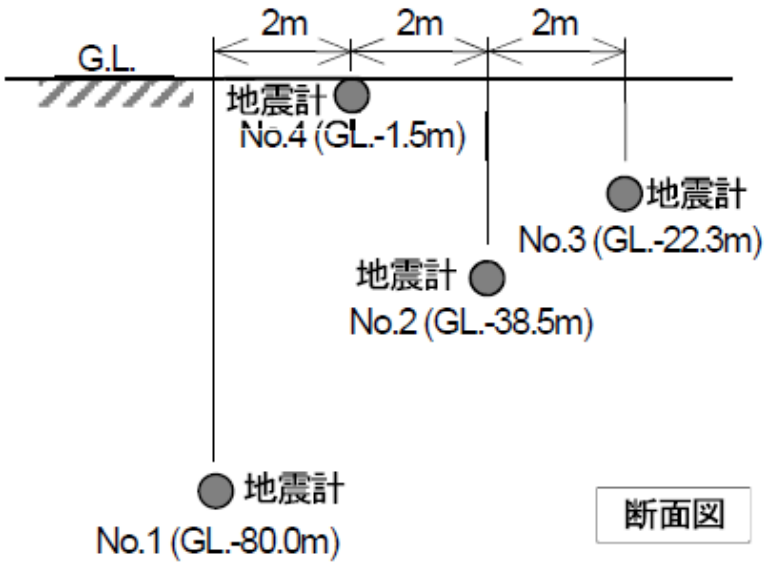


図 4.1-25　鉛直アレー観測システムの概要[12]

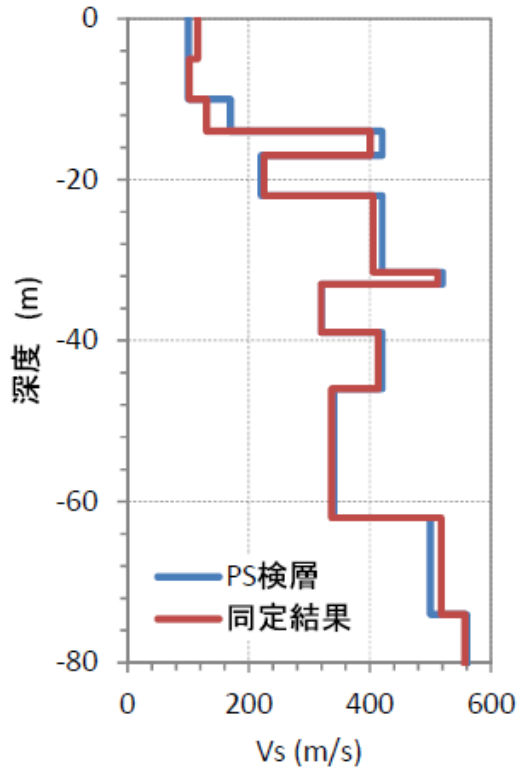


図 4.1-26　PS 検層結果と遺伝的アルゴリズムによる同定結果[12]

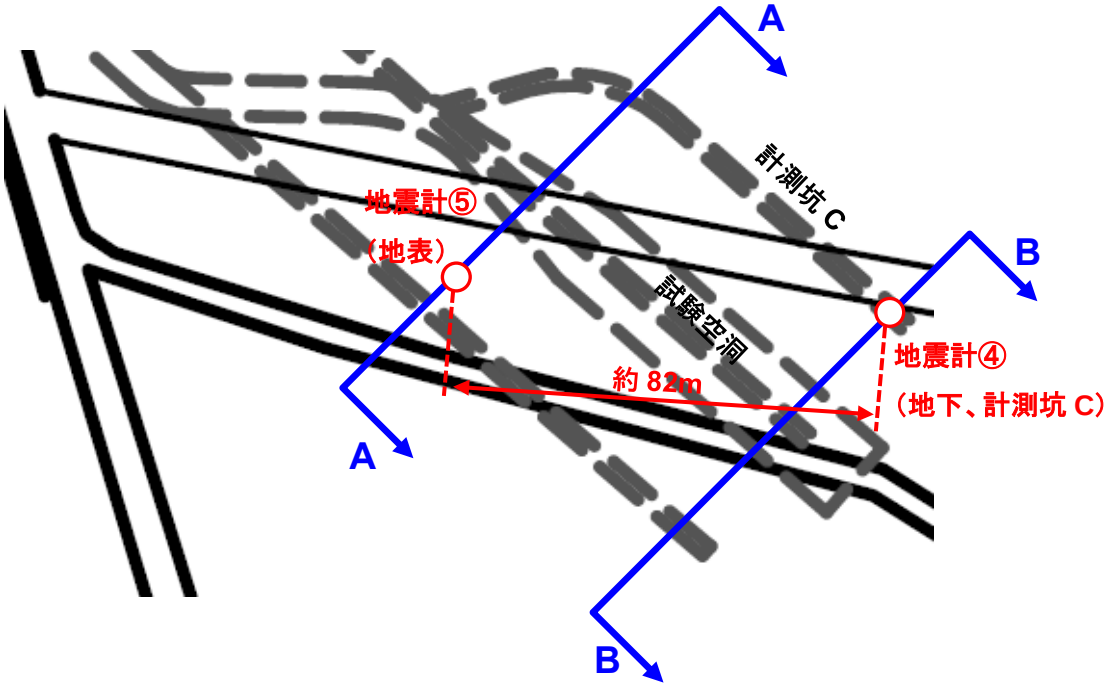
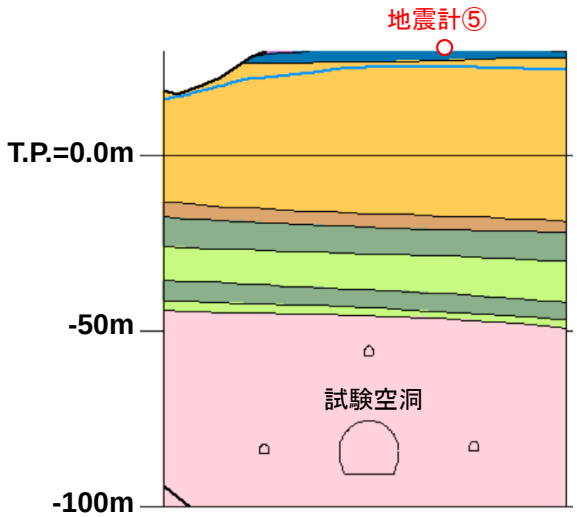
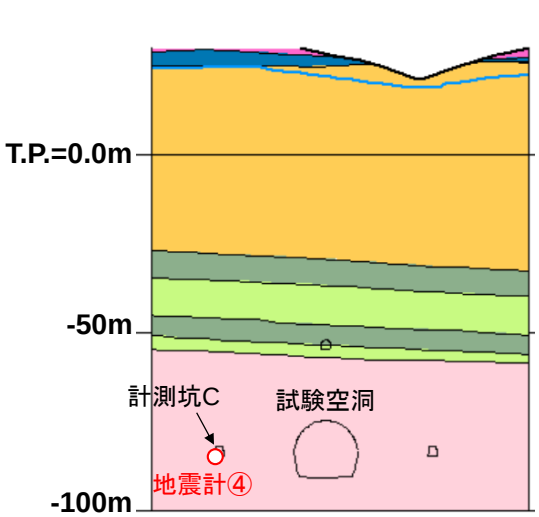


図 4.1-27　地震計⑤（地表）と地震計④（地下）の平面位置の関係

表 4.1-67　地震計⑤と地震計④位置の地質断面図

A-A 断面	B-B 断面
	

※地質断面図は日本原燃（株）提供に加筆

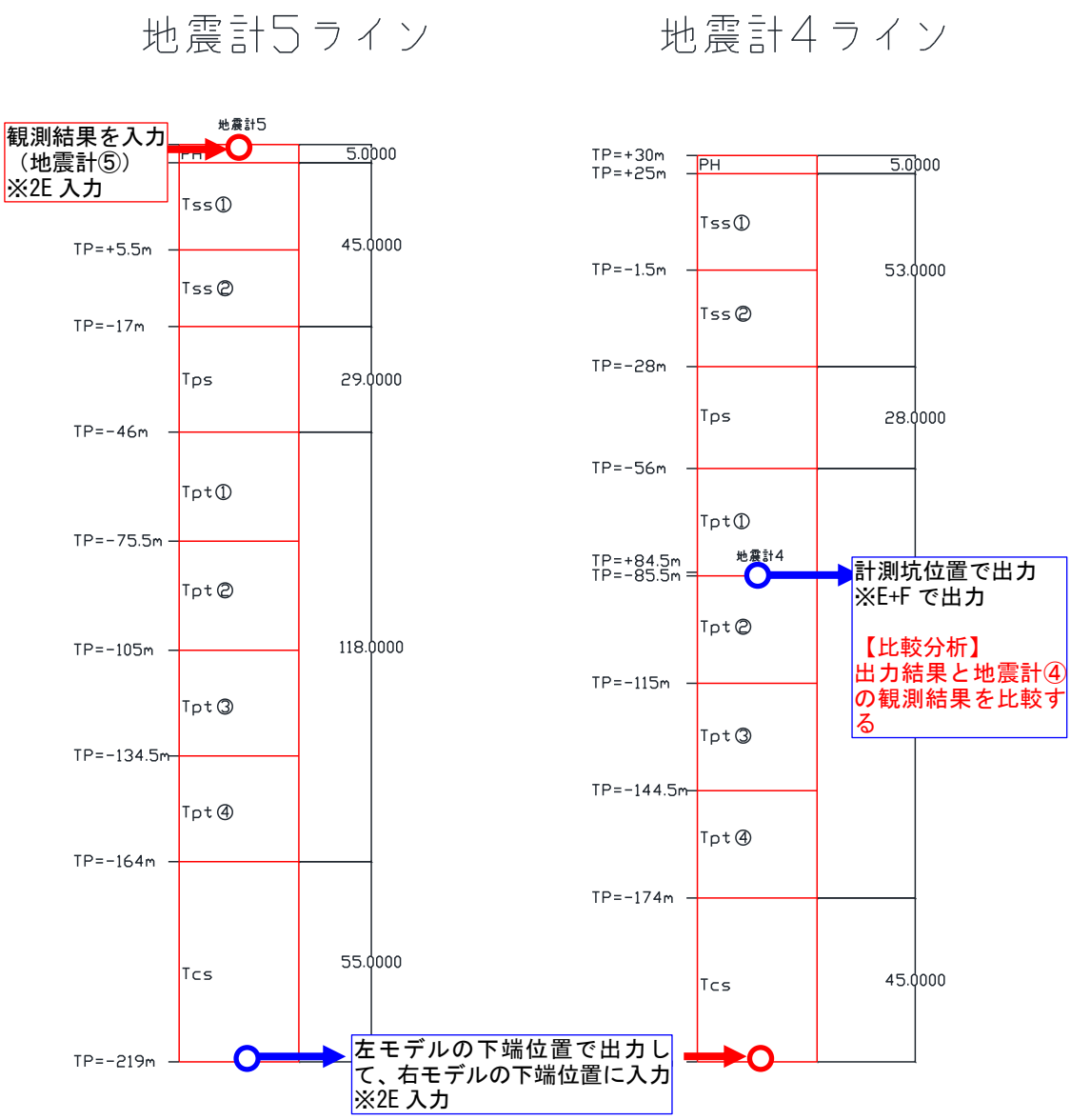


図 4.1-28　地震計⑤と地震計④の位置の 1 次元モデル（案）

4.1.5 まとめ

今年度地表面に設置した地震計⑤の観測データや、過去に得られた地震計①～④の観測データを用いて、以下の項目に関する検討を実施した。

【緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討】
【地下及び地上の観測地震動の整合性の確認】
【引戻し解析手法の改良項目の選定】

検討の結果、各項目について以下のことがわかった。

【緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討】

- 評価対象の振動数帯（0～20Hz の範囲）では、緩み領域の影響は認めらないため、本検討においては、緩み領域をモデル化する必要性は小さいと考えられる。
- 空洞の規模の影響は、観測地震動及び解析結果で認められるため、解析においては、2 次元モデル等により空洞を適切にモデル化する必要があると考えられる。

【地下及び地上の観測地震動の整合性の確認】

- 今年度新規で得られた地表の地震計⑤の観測結果を用いて、引戻し解析により 2 次元モデル下端における入力地震動を作成し、2 次元地震応答解析を実施した。
- 解析結果と観測結果を比較すると、両者の結果は乖離し、その要因の一つとして、解析で用いている入力地震動が精度よく設定できていない可能性が考えられた。

【引戻し解析手法の改良項目の選定】

- 現状の引戻し解析における改良項目として、文献調査の結果を踏まえて「減衰定数の周波数依存性の考慮」と「逆解析による地盤物性の同定」が候補として挙げられ、次年度検討を進める予定である。

4.1 節の参考文献

[1] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター　東電設計株式会社: 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業　地下空洞型処分調査技術高度化開発　報告書, 令和 3 年 3 月

[2] 冨田敦紀 他: 余裕深度廃棄物埋設施設試験空洞の掘削影響領域（EDZ）に関する一考察, 第 54 回地盤工学シンポジウム, 2009 年

[3] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: 低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業　地下空洞型処分施設機能確認試験　報告書, 令和 2 年 3 月

[4] 日本原燃株式会社: 再処理施設及び特定廃棄物管理施設「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の改訂に係る耐震安全性評価報告　コメント回答（基礎地盤の安定性）, 平成 22 年 6 月

[5] 冨田敦紀 他: 余裕深度処分埋設施設本格調査のうち試験空洞の支保設計および挙動, 電力土木, No.325, 2006.9

[6] 地盤工学会: 地盤の動的解析－基礎理論から応用までー, 2007

[7] 冨田敦紀 他: 低拘束圧下における堆積軟岩空洞の破壊現象の考察, 土木学会論文集, Vol.63, 2007

[8] 土木学会: 【2007 年制定】コンクリート標準示方書［設計編］, 2007

[9] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: 管理型処分技術調査等事業　地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験　報告書, 平成 26 年 3 月

[10] Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE - A computer program for earthquake analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972

[11] 杉戸真太 他: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤震動解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/Ⅲ-27, pp.49-58, 1994.6

[12] 栗田哲史 他: 表層地盤減衰の周波数依存性に関する統計的性質, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.71, No.4(地震工学論文集第 34 巻), I_13-I_20, 2015

[13] 末冨岩雄 他: 周波数依存型地盤応答解析におけるパラメータの最適化のための一検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.72, No.4(地震工学論文集第 35 巻), I_177-I_187, 2016.

[14] Suetomi, I. and Yoshida, N.: Damping characteristics of soil deposits during strong ground motions, Proceedings of the Second International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, pp. 765-772, 1998

[15] Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, k.: Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, pp. 205-222, 2002

[16] 栗田哲史: 遺伝的アルゴリズムの構造パラメータ同定問題への適用性に関する検討, 土木学会第 54 会年次学術講演会, 1999

4.2 地震動観測

4.2.1 検討概要

現場試験フィールドでは、これまでも地震動観測が行われ、取得した観測地震動により作成した解析用入力地震動を用いて、試験空洞及び周辺地盤を対象とした地震応答解析を実施してきた。今年度は、従来の地震観測システムによる継続観測、地震観測システムのメンテナンスを実施するとともに、地震動観測システムの見直しとして、地表面への地震計の設置を行い、地震動観測を開始した。また、地下の計測坑 C にて別研究の既存計器で観測している地震動データを活用することとした。

4.2.2 地震計設置状況

(1) 計測システムの仕様

地震観測のための計測システムを表 4.2-1 、地震計（加速度センサ）の仕様を表 4.2-2 に示す。

表 4.2-1 地震観測のための計測システム

項　目		単位	数量	摘　要
地震計（加速度センサ）		台	3	MEMS 応用感振センサ 3 成分計測±1500Gal 防水養生ケースに収納
データ回収用記録器		台	1	コンパクトフラッシュカード：32GB
NTP サーバ（PC）		台	1	ディスクトップ型、液晶モニター
データ回収用 PC		台	1	ノート型
PoE 対応ハブ		台	2	PoE：4 ポート 屋外設置では防水養生ケースに収納
PoE 対応メディアコンバータ		台	2	防水養生ケースに収納
UPS（無停電電源装置）		台	1	常時インバータ給電方式 PC シャットダウンソフト付
機器設定・データ回収ソフト		式	1	地震計、データ回収用記録器の専用ソフト
ケーブル類	光ケーブル	式	1	配線長：約 120m（余裕長を含め 150m）
	屋外配線用 LAN ケーブル	式	1	屋外で地震計、PoE ハブを接続
	屋内配線用 LAN ケーブル	式	1	現場計測室内で PC、記録器、PoE ハブを接続
	電源ケーブル	式	1	

表 4.2-2　地震計（加速度センサ）の仕様

名称	仕　様	機　種
地震計（加速度センサ）	計　測　範　囲：±1.5G 周 波 数 応 答：0.1～50Hz 分　　解　　能：X、Y 軸：0.02Gal Z 軸：0.07Gal ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ周波数：100Hz、200Hz（設定値） 送 信 周 波 数：0.5sec（200Hz） 1.0sec（100Hz） 使　用　条　件：周囲温度：-30℃～60℃ 周囲湿度：95%RH 以下	富士電機(株)製 MEMS 応用感振センサ CPUKSNSP-00（防水・防塵形）

(2) 地震計の設置状況

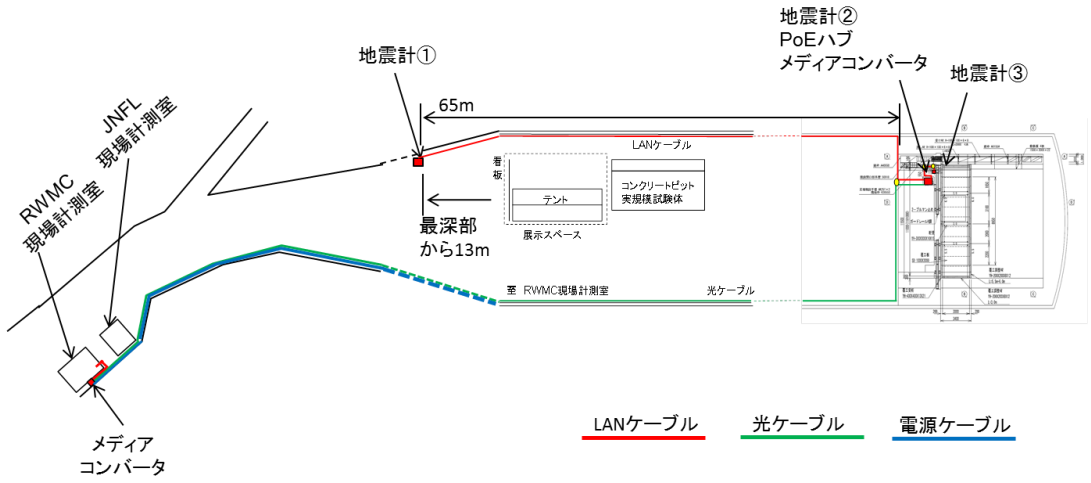
1) 設置位置

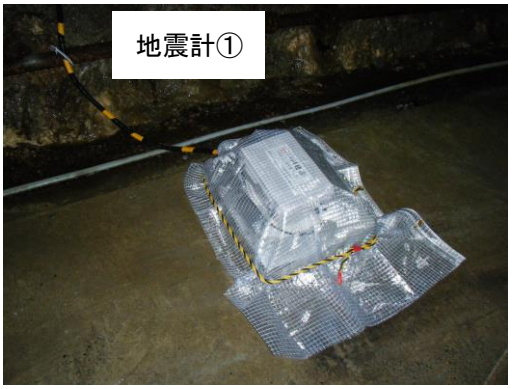
3 台の地震計の設置位置（当初計画）と設置状況を、図 4.2-1 ～ 図 4.2-2 に示す。

① 試験空洞斜路上（入力側）

② 試験施設の底部コンクリートピット上（応答側）

③ 試験施設の手前部コンクリートピットの上部（応答側）





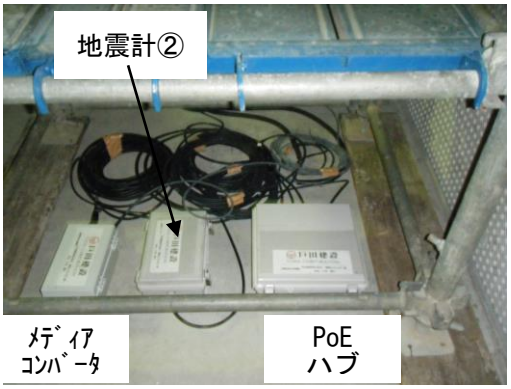


図 4.2-1　地震計の設置位置平面図（全体）と設置状況

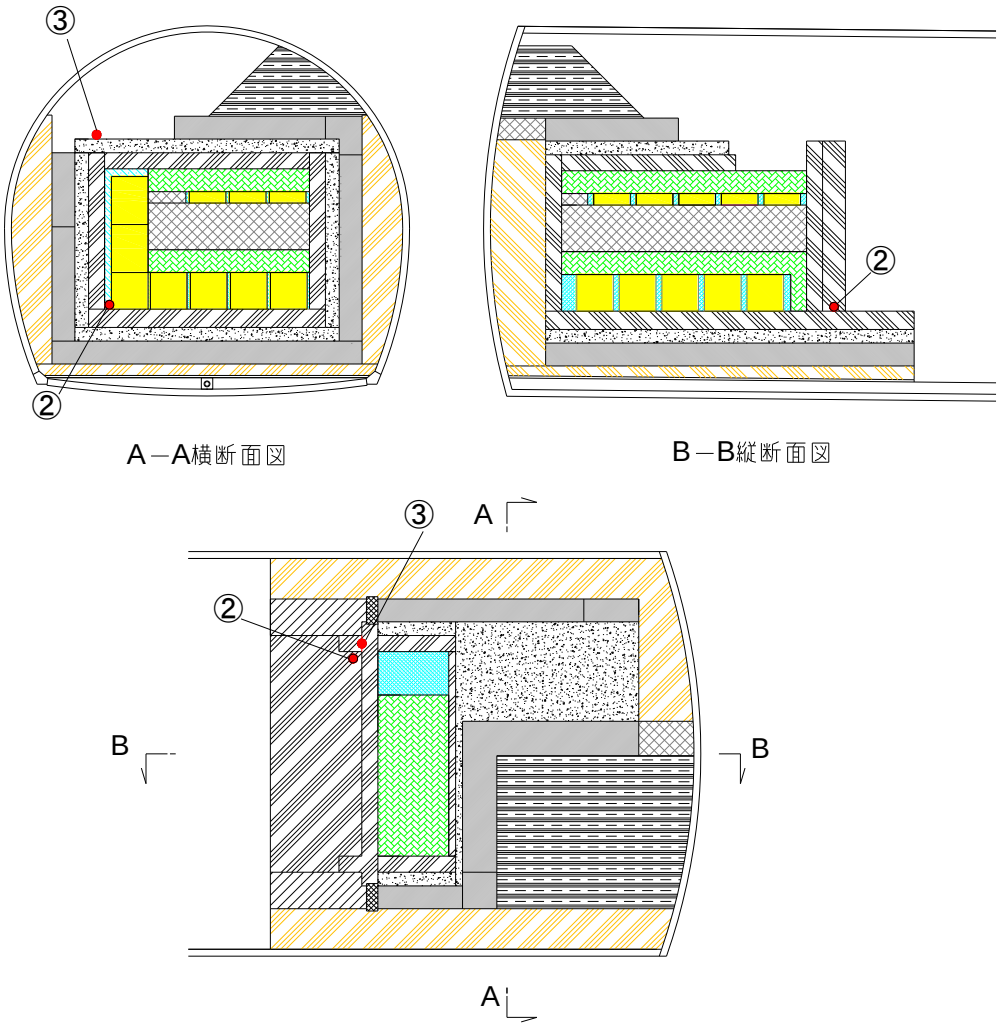


図 4.2-2　地震計の設置位置（試験施設）

2）計測設備の配置

地震計とそれに接続する PoE ハブ、メディアコンバータ、ケーブル類は試験空洞内に設置している。記録器と NTP サーバ（PC）、UPS とそれに接続する PoE ハブ、ケーブル類は RWMC 現場計測室内に設置している。これら計測設備の配置を図 4.2-3 に、RWMC 現場計測室内のネットワーク図を図 4.2-4 に示す。

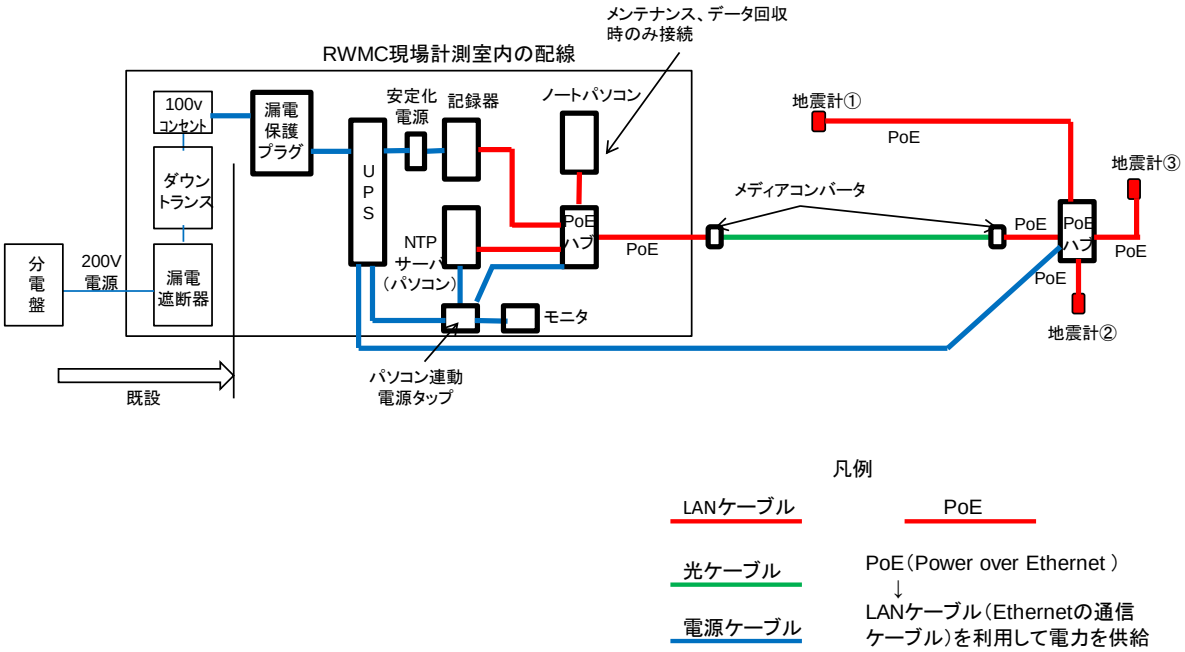


図 4.2-3　計測設備の配置

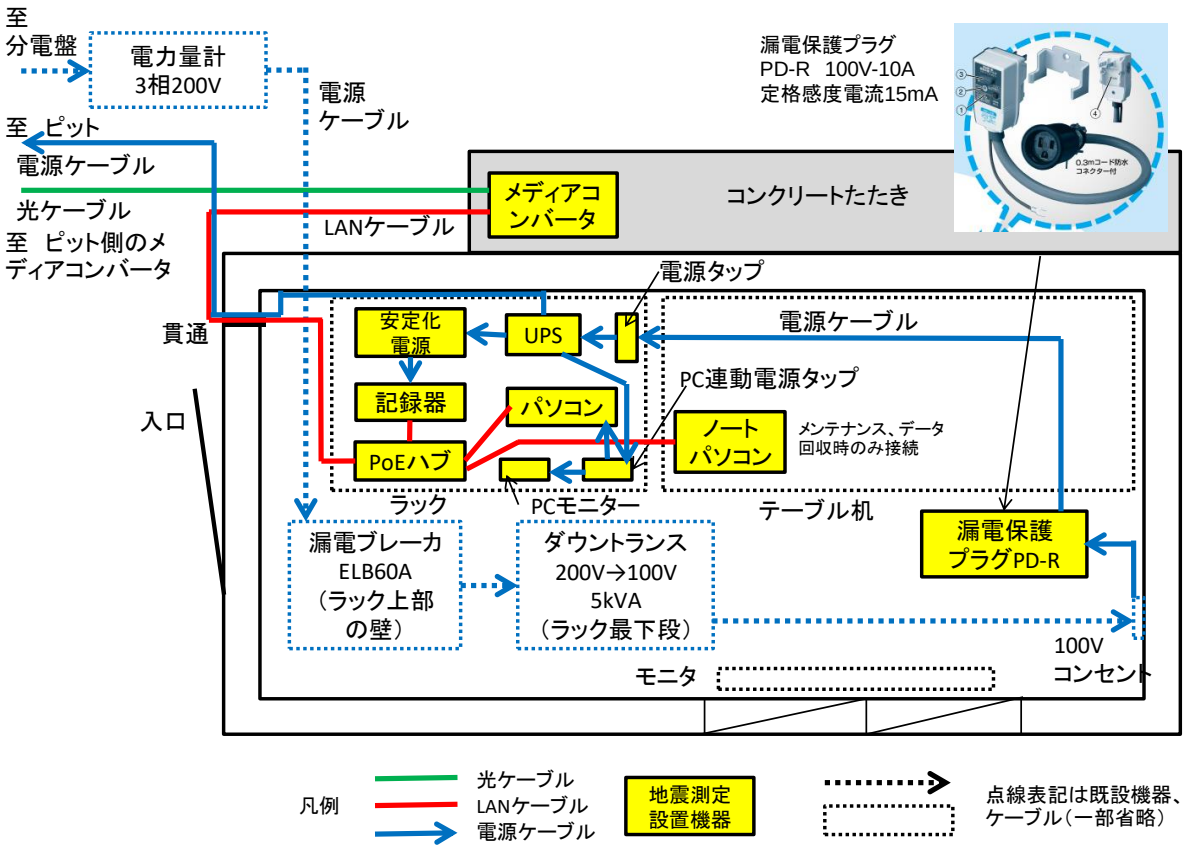


図 4.2-4　RWMC 現場計測室　機器設置のネットワーク図

3）データ回収用 PC 接続

データ回収用の PC は、図 4.2-3 で示したように、LAN ケーブルで RWMC 現場計測室内の PoE ハブの LAN ポートに接続する。

4.2.3　地震計メンテナンス・計測データ回収

本年度は、地震計の計測データの回収と共に地震計のメンテナンスを 2 回実施した。なお、震度 3 以上の地震が発生した情報については、地震速報などを活用し、把握した。

(1) メンテナンス方法

メンテナンスに際してチェックシートを用意し、次の手順で行う。

メンテナンスの手順

①記録器の LED 表示を目視で確認し、システムが正常に動作していることを確認する。

②NTP サーバ（PC）の画面を目視し、時刻が正常であることを確認する。

③データ回収用 PC を PoE ハブに接続し、または NTP サーバ（PC）を用いて、SetupTool で地震計の応答があること、地震計の時刻が正常であることを確認する。

→PC 上で SetupTool を起動

「IP アドレス」の欄に地震計のアドレスを入力

「時刻」の欄の表記が正確な時刻であることを確認（表示される時刻は UTC（世界標準時刻）のため、日本の時刻より 9 時間遅い時刻を表示）

④地震計の動作確認のため、あらかじめ、毎日 22 : 00 に定時測定を行うよう設定しておき、メンテナンス日の前日までデータ取得ができていることを確認する。

⑤メンテナンス時に手動設定により、地震計の動作確認を行い、データ取得ができていることを確認する。

⑥試験空洞内および試験施設に設置している地震計 3 台と PoE ハブ 1 台、メディアコンバータのボックス式 1 台の防水養生ケースをあけ、ケースに損傷がないこと、地震計や機器が移動した形跡がないことなど、物理的な影響が与えられていないことを確認する。

⑦上記の防水養生ケースの中で結露がないことを確認する。また、乾燥剤のインジケータを確認し、寿命を迎えた場合など適切な時期に乾燥剤を交換する。

⑧ケーブル類を全長にわたって目視し、テーピングや結束がはがれていないこと、上部にものが載っていないことなど異常がないことを確認する。

⑨ケーブル類が原因で漏電などの電気関係のトラブルが発生した場合、電気工とともに現場に出向き、確認・復旧作業を行う。

(2) データ回収方法

データの回収は次の 2 つの手順のいずれかで行う。

データの回収は、基本的に手順 1 で地震動のデータを回収したうえで、適宜、手順 2 でコンパクトフラッシュカードを入れ替え、データ容量が蓄積しないようにする。

【手順 1】回収するデータ数が少ない場合

①NTP サーバ（PC）に USB メモリを接続

②データ保存フォルダのデータを USB メモリにコピー

【手順 2】回収するデータ数が多い場合

①記録器のコンパクトフラッシュカードを初期設定済みの予備のカードと交換

②データ回収用 PC にコンパクトフラッシュカードを USB 接続し、読み取り

③各地震計のフォルダのうち、トリガ値を超えたデータを選択して別のフォルダにコピー

④保存したファイルを EXCEL の変換ファイル（専用ソフト）で変換し、CSV 形式のデータファイルを作成

回収データの仕様について、表 4.2-3 に示す。

表 4.2-3　回収データの仕様

項目	仕　様
トリガ条件	マスタとする地震計（地震計①試験空洞底盤上（入力側））で、XYZ のいずれかが 1gal 以上（マスタ・スレーブ方式）と設定
トリガ引き伸ばし時間	地震検知時間幅　10 秒 （設定時間の幅の間で加速度が正負両方向とも 1gal を超えたときに、その振動を地震動として検知し、データ回収を開始）
プレトリガ時間	トリガ検知前の収集時間　10 秒 （最初に 1gal を超えたところから遡ってデータ回収をする時間）
ポストトリガ時間	地震収束判断時間　60 秒 （最後に 1gal を超えたところから以降のデータ回収をする時間）
サンプリング周波数・時間	周波数　200Hz（1 秒間に 200 データを取得） 時間　　最小で 3 分間（180 秒、36,000 データ）
出力形式	データ変換後、CSV ファイル形式 1 列目に取得時刻、2～4 列目に XYZ の加速度データ（gal）

(3) データ整理方法

トリガ値の 1gal を超えている回収データのうち、連続的にデータを取得している場合、地震以外のデータである可能性が高いので、トンネル内で振動の発生する作業を実施していたか、日本原燃殿に確認し、できるだけ原因を特定したうえで、整理するデータのリストから消去する。原因を特定できない場合でも、該当時刻に気象庁発表の地震の発生がない場合、整理するデータのリストから消去する。なお、原因を特定できない場合は、動作確認を改めて行い、地震計に故障がないか、チェックする。

地震動のデータを取得している場合、気象庁 Web の地震情報などを活用し、発生時刻、震源地の位置（座標）、震源深さ、マグニチュード、震源地などを付加情報として整理する。また発生時刻については、取得データの記録と大きなずれがないことを確認する。

地震動のデータについては、地震計ごとに、加速度時刻歴のグラフを XYZ の順に作成する。また同一の地震に対し、KiK-net 六ヶ所の地下 100m および地表の地震動データを参考資料として併記する。

なお、KiK-net 六ヶ所の元データは、N-S 方向、E-W 方向、U-D 方向を 3 軸としているが、本業務では、試験空洞の X 方向（トンネル軸方向）、Y 方向（トンネル軸直角方向）、Z 方向（鉛直方向）を 3 軸としてデータ取得を行う。その際、KiK-net 六ヶ所のデータについては、反時計回りに 54°回転させて角度補正を行う。

以上の方法でデータの整理を行い、報告書に全データを添付する。

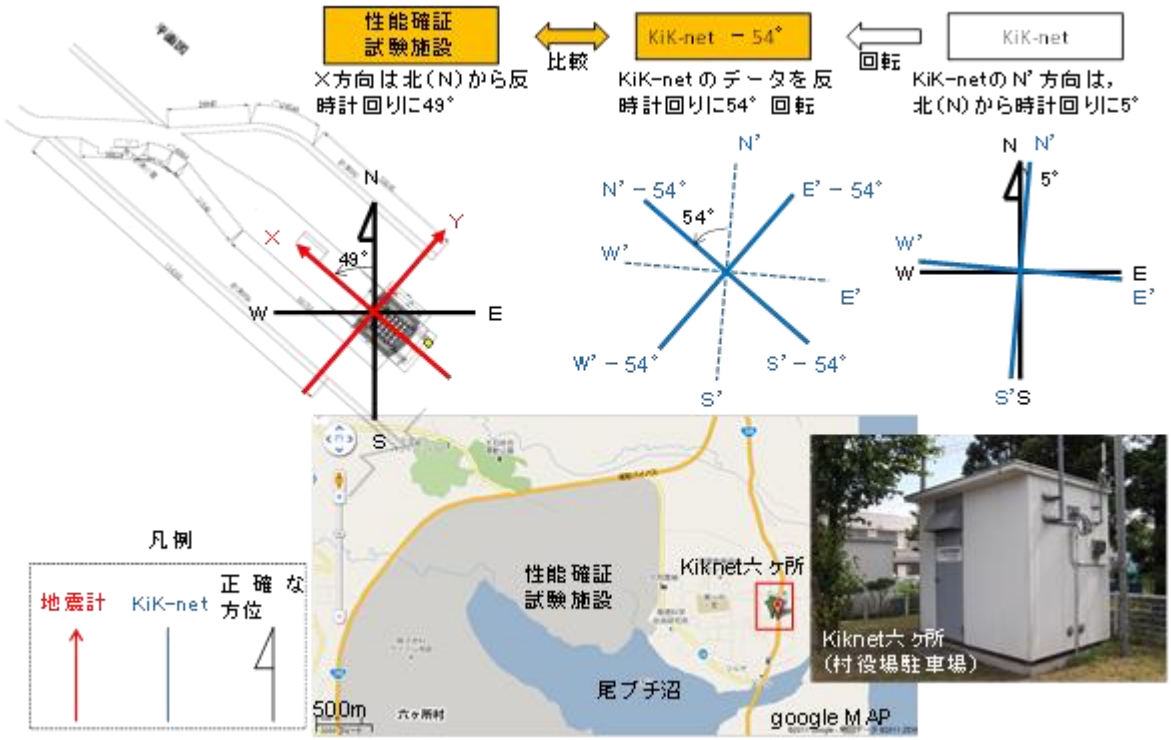


図 4.2-5 KiK-net 六ヶ所のデータの方位補正

(4) 地震動データ取得一覧

試験空洞内に設置した地震計 3 台、地表面に設置した地震計 1 台及び KiK-net 六ヶ所の地震計 2 台（地表、地下）でデータ取得した地震（気象庁発表：尾駮の震度 1 以上）19 件の諸元を表 4.2-4 に示す。各データの取得日を下記に示す。

・No.1～11　2021 年 9 月 2 日にデータ取得

・No.12～19　2021 年 12 月 7 日にデータ取得

表 4.2-4　データ取得した地震の諸元

No.	地震の発生日	地震の発生時刻	震央地名	緯度	経度	深さ	M	最大震度	尾駮の震度
1	2021 年 2 月 26 日	20:31:35	青森県東方沖	41°03.6′N	142°05.2′E	65 km	4.5	震度 3	震度 2
2	2021 年 3 月 20 日	9:26:25	岩手県沖	40°07.6′N	142°24.5′E	39 km	4.8	震度 2	震度 1
3	2021 年 3 月 20 日	18:09:45	宮城県沖	38°28.0′N	141°37.6′E	59 km	6.9	震度 5 強	震度 2
4	2021 年 4 月 1 日	13:30:04	青森県東方沖	41°30.7′N	142°04.7′E	55 km	4.7	震度 3	震度 1
5	2021 年 4 月 14 日	12:27:44	青森県東方沖	41°30.2′N	142°02.4′E	56 km	4.4	震度 3	震度 1
6	2021 年 5 月 1 日	10:27:27	宮城県沖	38°10.4′N	141°44.4′E	51 km	6.8	震度 5 強	震度 2
7	2021 年 5 月 14 日	8:58:14	福島県沖	37°41.9′N	141°45.7′E	46 km	6.3	震度 4	震度 1
8	2021 年 6 月 9 日	7:34:22	岩手県沖	39°51.8′N	142°16.7′E	33 km	4.9	震度 3	震度 1
9	2021 年 6 月 9 日	22:05:55	岩手県沖	40°05.4′N	142°25.7′E	38 km	5	震度 3	震度 1
10	2021 年 6 月 20 日	20:08:24	上川地方中部	43°28.6′N	142°41.0′E	158 km	5.4	震度 3	震度 1
11	2021 年 7 月 26 日	11:16:16	青森県東方沖	41°28.7′N	142°08.2′E	52 km	5.2	震度 4	震度 3
12	2021 年 8 月 20 日	8:30:13	青森県東方沖	41°29.9′N	142°02.9′E	56 km	4	震度 2	震度 1
13	2021 年 9 月 29 日	17:37:05	日本海中部	38°47.8′N	135°39.0′E	394 km	6.1	震度 3	震度 1
14	2021 年 10 月 6 日	2:46:02	岩手県沖	40°00.4′N	142°15.2′E	56 km	5.9	震度 5 強	震度 3
15	2021 年 10 月 18 日	0:49:30	青森県東方沖	40°56.5′N	142°13.0′E	61 km	4.6	震度 3	震度 1
16	2021 年 10 月 19 日	21:36:40	青森県東方沖	41°32.5′N	142°54.3′E	38 km	5.4	震度 3	震度 2

No.	地震の発生日	地震の発生時刻	震央地名	緯度	経度	深さ	M	最大震度	尾駮の震度
17	2021 年 11 月 8 日	4:22:19	青森県東方沖	41°03.0′N	142°02.4′E	57 km	4.3	震度 3	震度 1
18	2021 年 11 月 14 日	22:08:47	苫小牧沖	41°38.2′N	141°31.0′E	85 km	3.9	震度 2	震度 1
19	2021 年 12 月 6 日	23:33:21	青森県東方沖	41°29.5′N	142°03.5′E	55 km	4.3	震度 2	震度 2

各地震に対して、国プロの地震計（試験空洞内：地震計①～③、地表：地震計⑤）、データ提供を受ける地震計（計測坑 C：地震計④）、KIK-net（地表、地下）の地震計のそれぞれでデータ取得の有無の一覧を表 4.2-5 に示す。

表 4.2-5　各地震計のデータ取得の有無

No.	地震の発生日	震央地名	尾駮の震度	国プロ　地震計				提供	KIK-net
				①	②	③	⑤	④	
1	2021 年 2 月 26 日	青森県東方沖	震度 2	○	×*1	○	－	○	○
2	2021 年 3 月 20 日	岩手県沖	震度 1	○	×*1	○	－	○	○
3	2021 年 3 月 20 日	宮城県沖	震度 2	○	×*1	○	－	○	○
4	2021 年 4 月 1 日	青森県東方沖	震度 1	○	×*1	○	－	○	○
5	2021 年 4 月 14 日	青森県東方沖	震度 1	○	×*1	○	－	○	○
6	2021 年 5 月 1 日	宮城県沖	震度 2	○	×*1	○	－	○	○
7	2021 年 5 月 14 日	福島県沖	震度 1	○	×*1	○	－	○	○
8	2021 年 6 月 9 日	岩手県沖	震度 1	○	×*1	○	－	○	○
9	2021 年 6 月 9 日	岩手県沖	震度 1	○	×*1	○	－	○	○
10	2021 年 6 月 20 日	上川地方中部	震度 1	○	×*1	○	－	○	○
11	2021 年 7 月 26 日	青森県東方沖	震度 3	○	×*1	○	－	○	○
12	2021 年 8 月 20 日	青森県東方沖	震度 1	×*2	×*1*2	×*2	－	○	○
13	2021 年 9 月 29 日	日本海中部	震度 1	×*2	×*2	×*2	－	○	○
14	2021 年 10 月 6 日	岩手県沖	震度 3	○	○	○	－	×*3	○

No.	地震の発生日	震央地名	尾駮の震度	国プロ　地震計				提供	KIK-net
				①	②	③	⑤	④	
15	2021 年 10 月 18 日	青森県東方沖	震度 1	○	○	○	－	×*3	○
16	2021 年 10 月 19 日	青森県東方沖	震度 2	○	○	○	○	×*3	○
17	2021 年 11 月 8 日	青森県東方沖	震度 1	×*2	×*2	×*2	○	×*3	○
18	2021 年 11 月 14 日	苫小牧沖	震度 1	×*2	×*2	×*2	○	×*3	×*2
19	2021 年 12 月 6 日	青森県東方沖	震度 2	○	○	○	○	×*3	×*2

凡例　○:データ取得、×：データ未取得、－：地震計未設置（2021 年 10 月 19 日設置）

データ未取得の状況

*1　No.1～11、地震計②　LAN ケーブルの接触不良が原因、2021 年 9 月 2 日に復旧

*2　No.12、13、17、18　地震計①～③、No.18、19　KIK-net　トリガー値未満で記録なし

*3　No.14～19　地震計④　現場計測室内の UPS の故障が原因、2021 年 12 月 7 日に仮復旧（UPS を経由せず直接電源供給、年明けに本復旧の予定）

（5）地震動データ

以下に、本業務で取得した地震動取得データ（地震計①～③、⑤）及び KIK-net（地表、地下）の波形を日付順に示す。

・No.1　2021 年 2 月 26 日

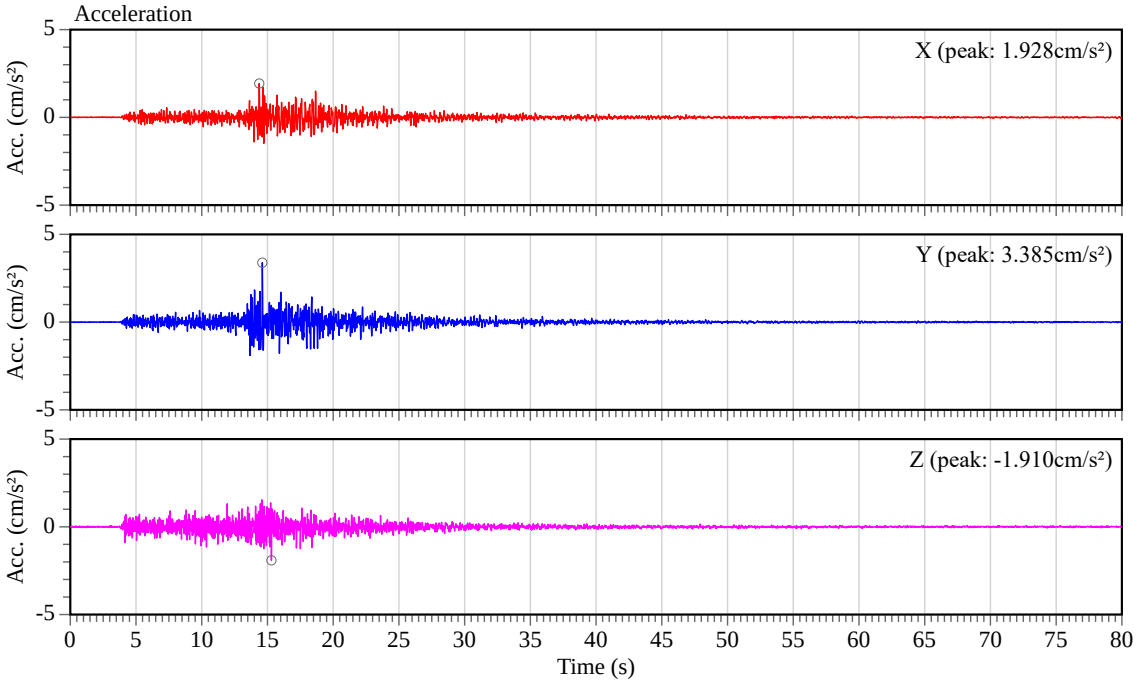


図 4.2-6　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

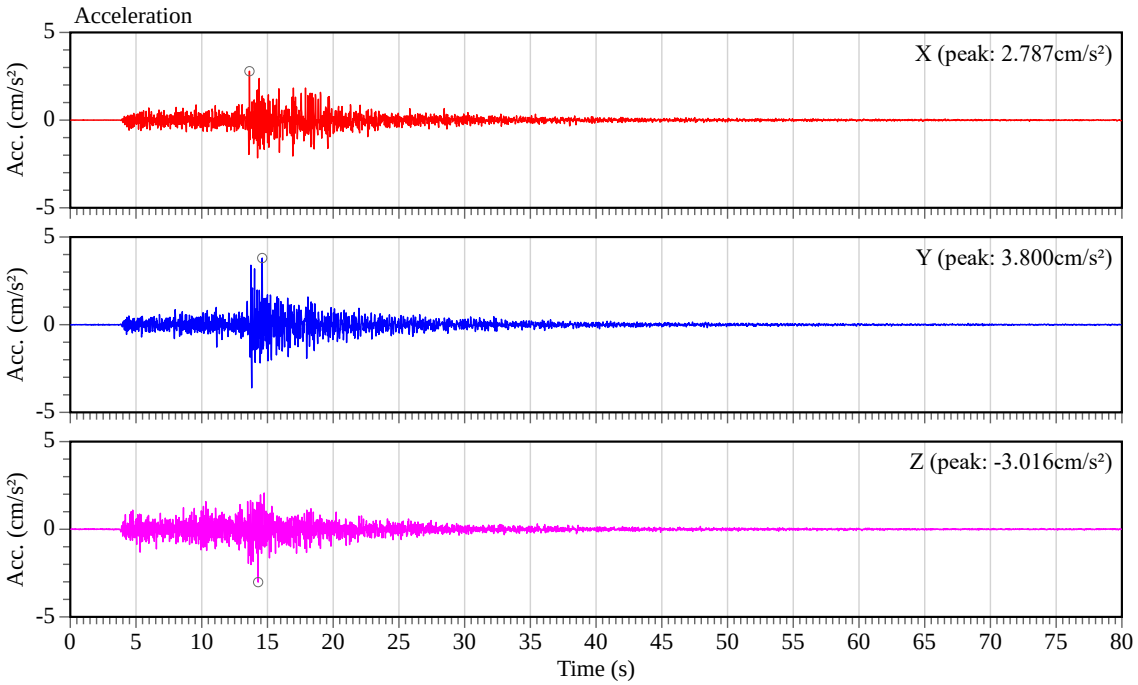


図 4.2-7　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

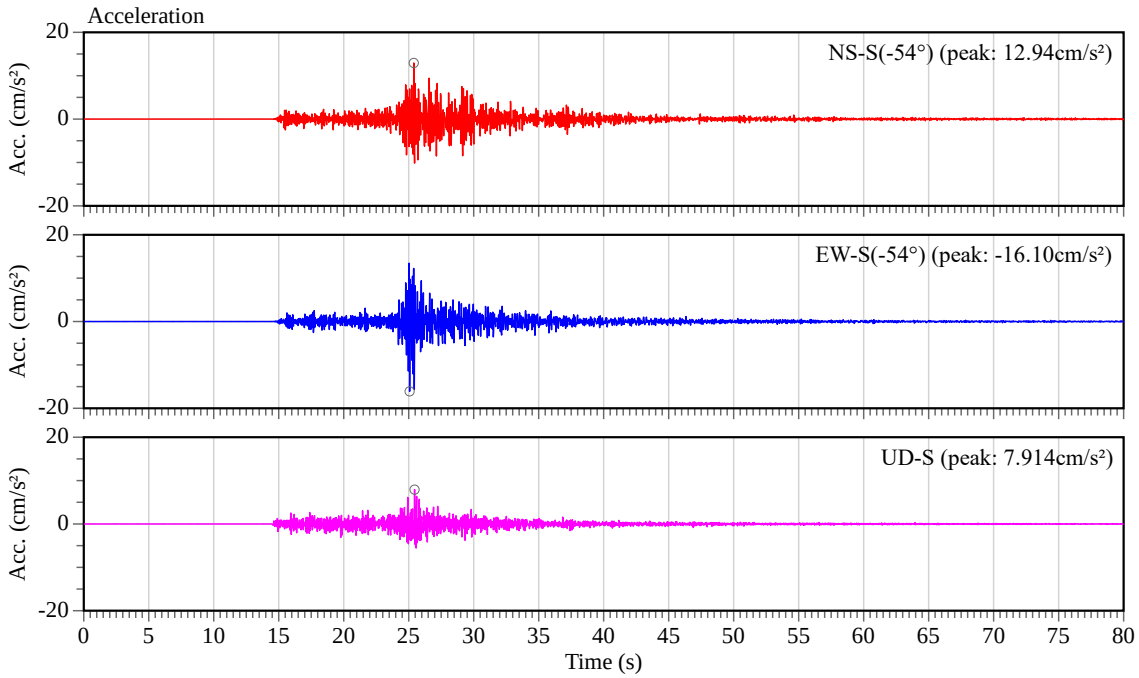


図 4.2-8　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

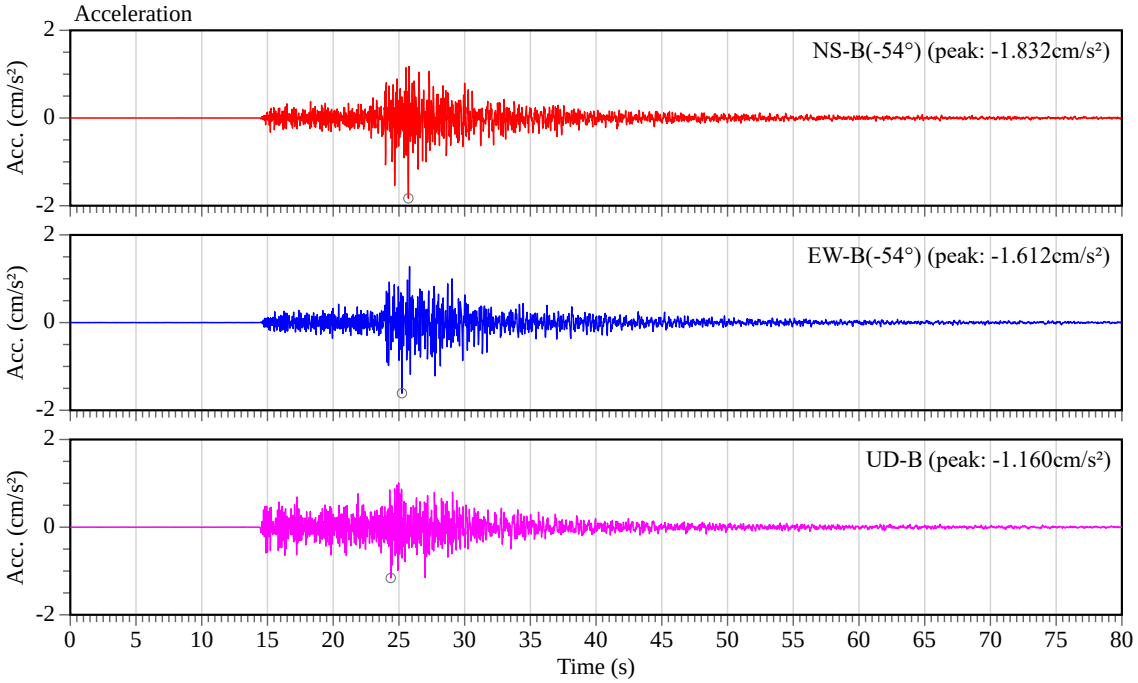


図 4.2-9　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.2　2021 年 3 月 20 日

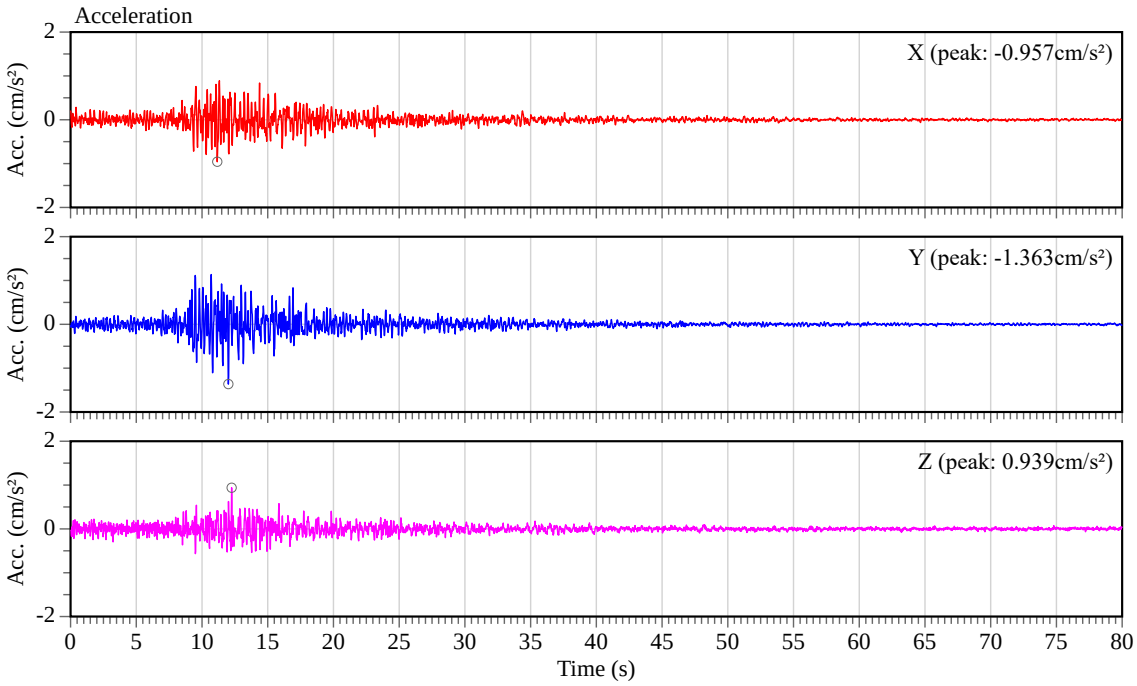


図 4.2-10　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

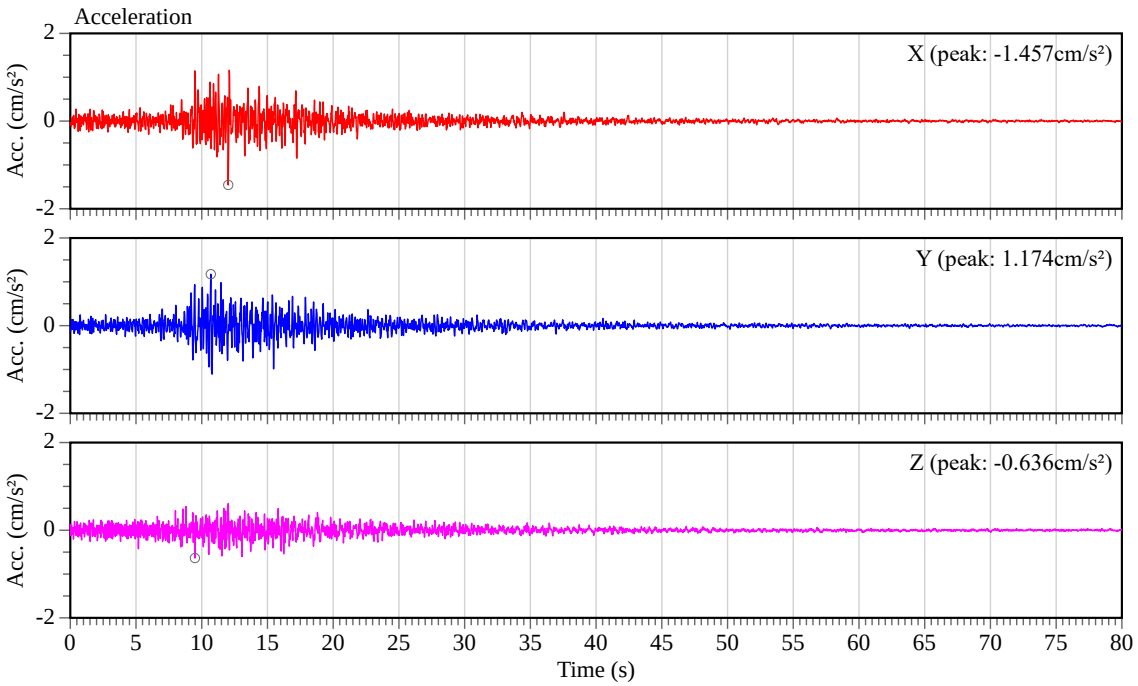


図 4.2-11　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

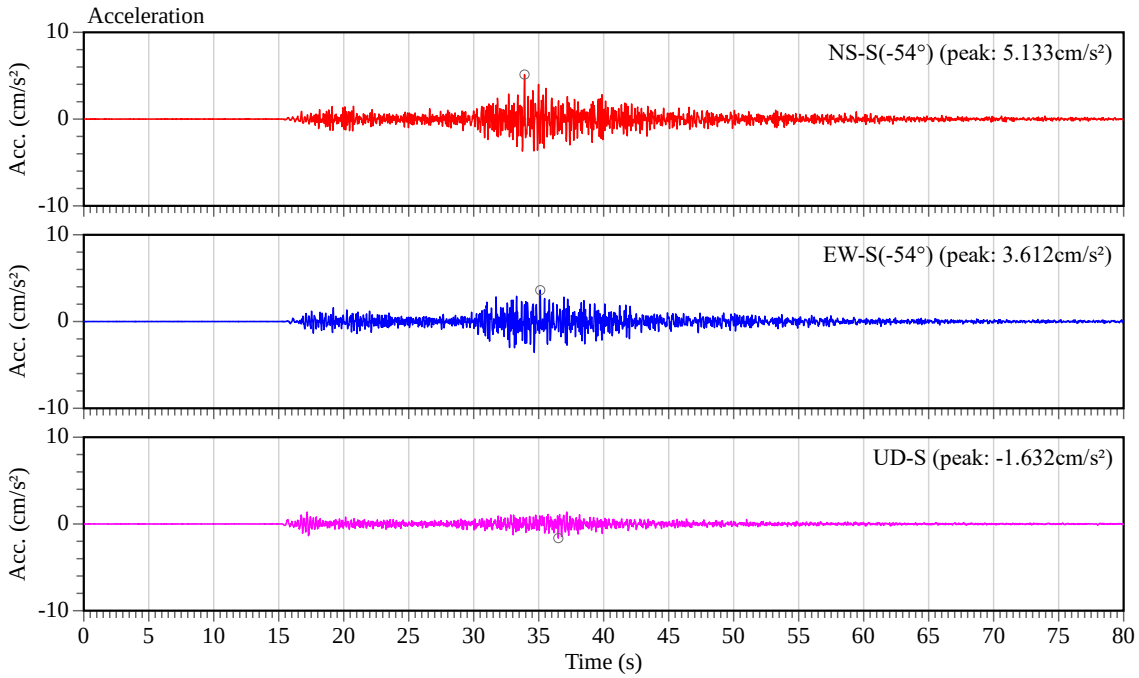


図 4.2-12　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

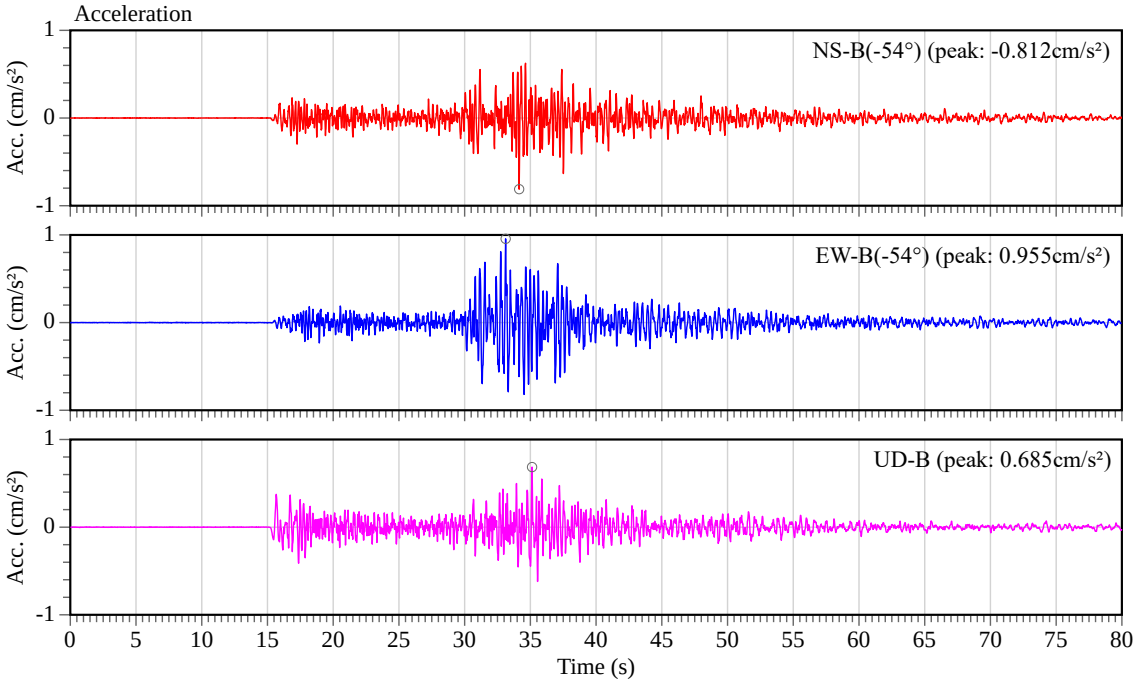


図 4.2-13　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.3　2021 年 3 月 20 日

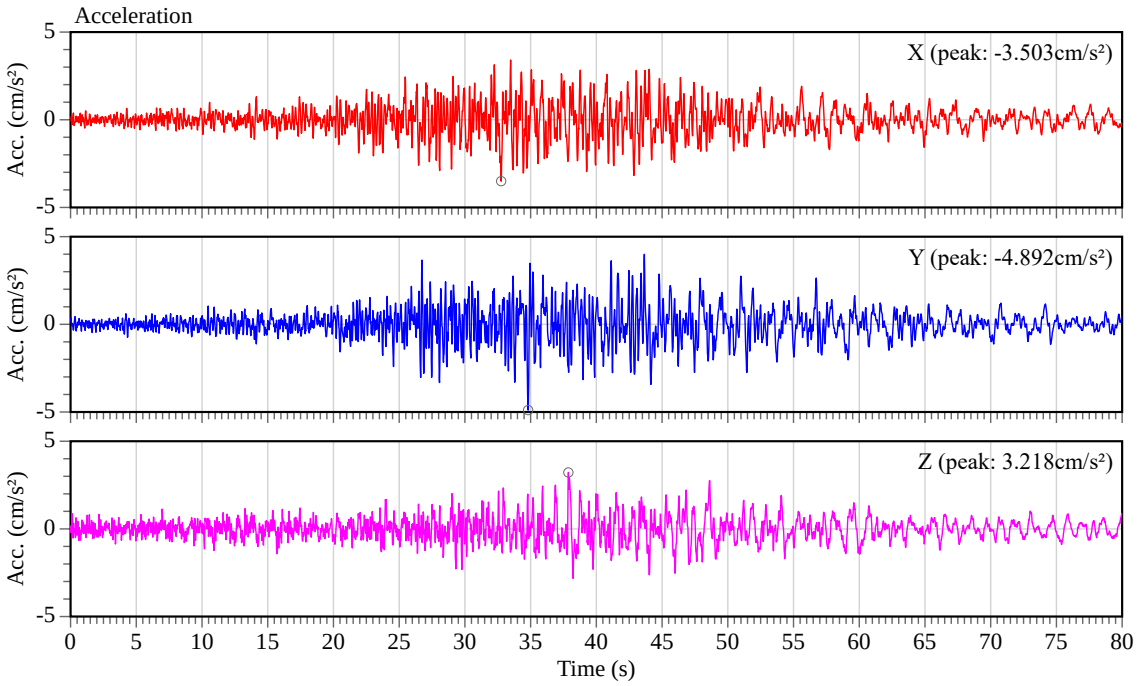


図 4.2-14　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

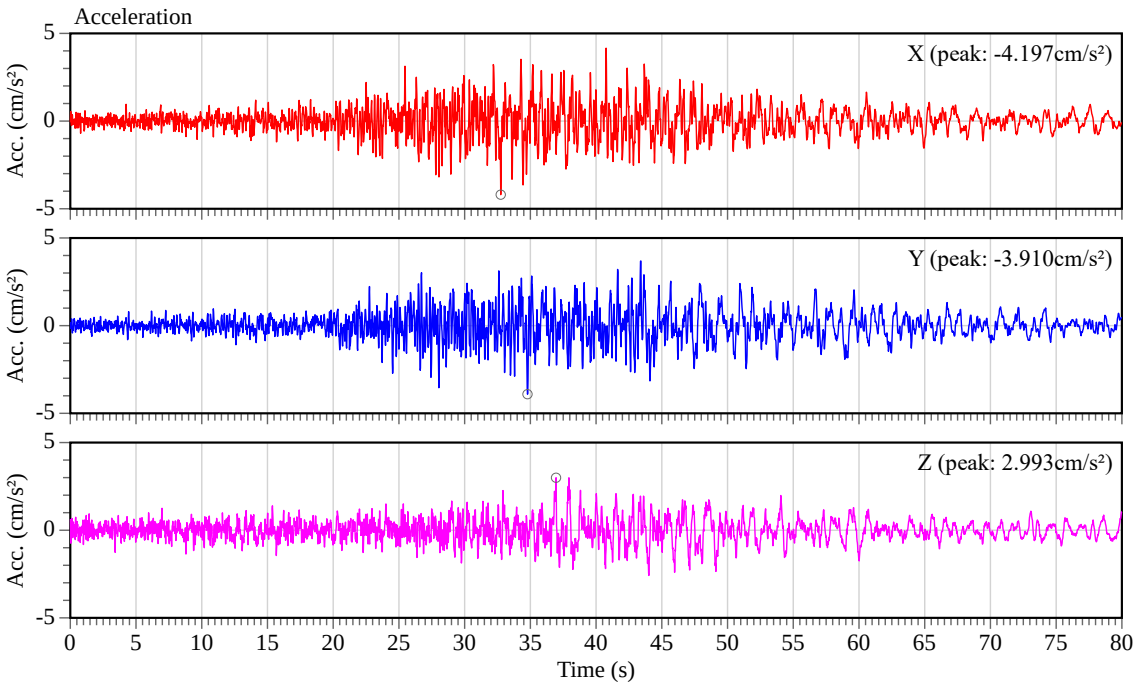


図 4.2-15　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

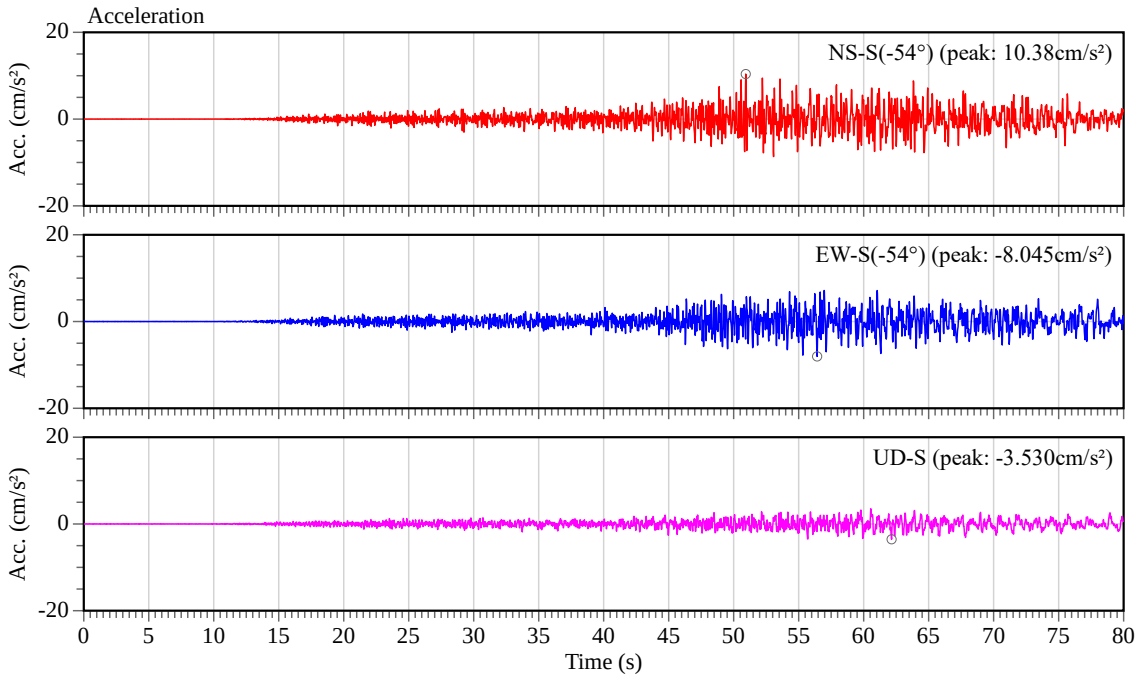


図 4.2-16　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

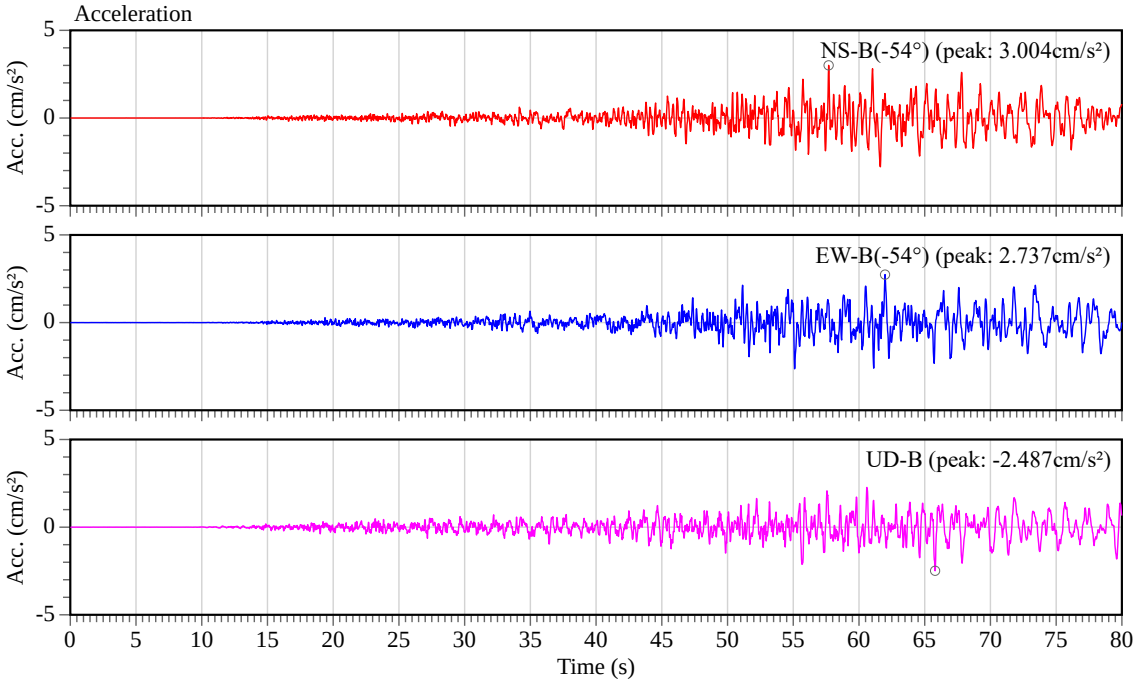


図 4.2-17　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.4　2021 年 4 月 1 日

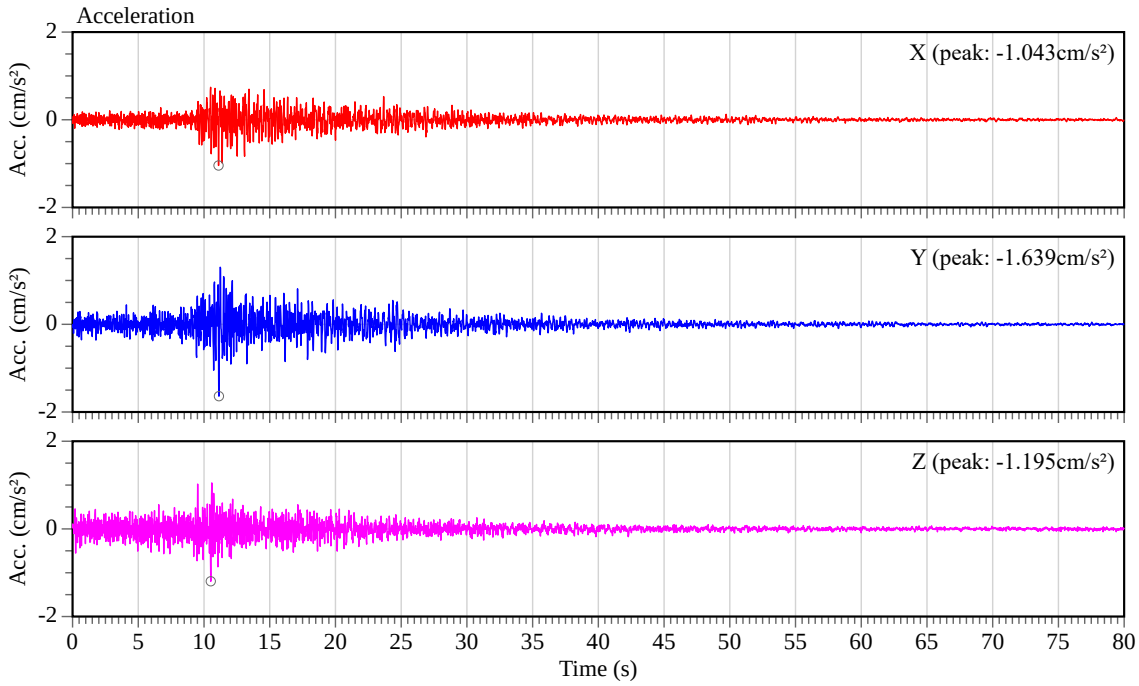


図 4.2-18　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

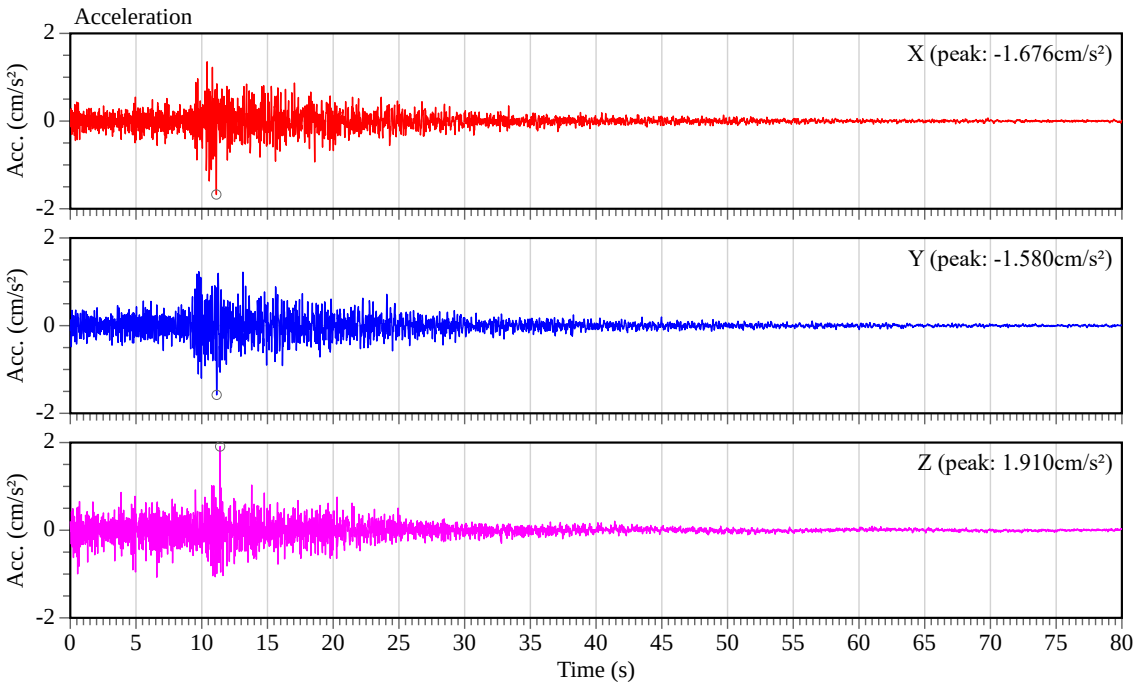


図 4.2-19　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

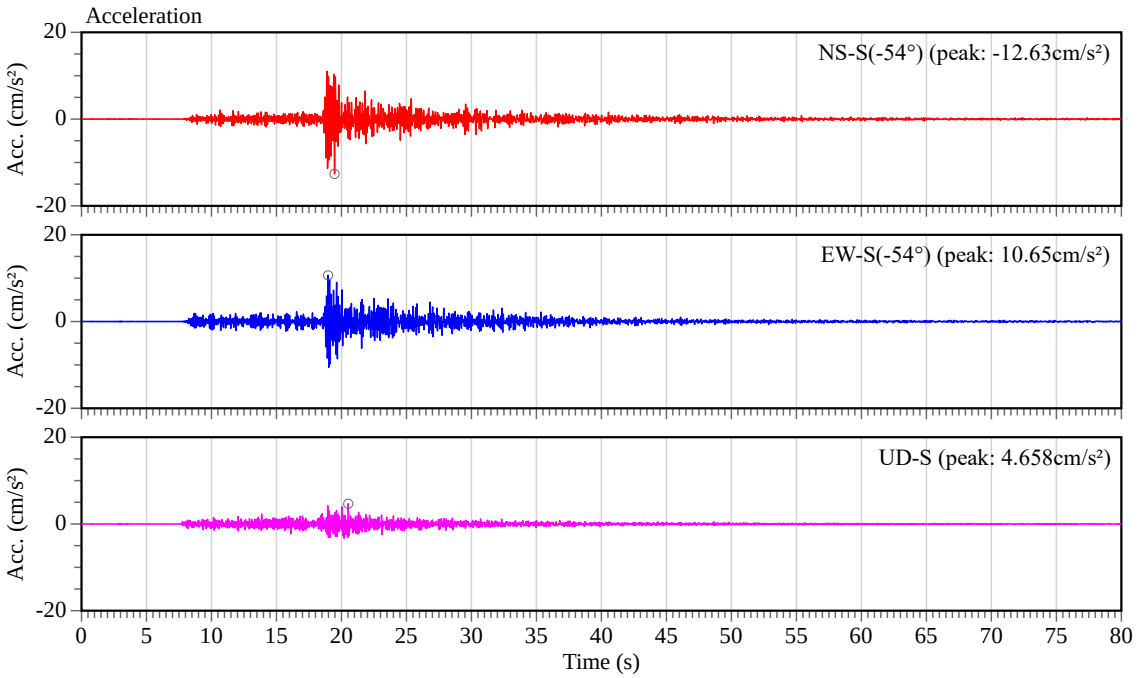


図 4.2-20　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

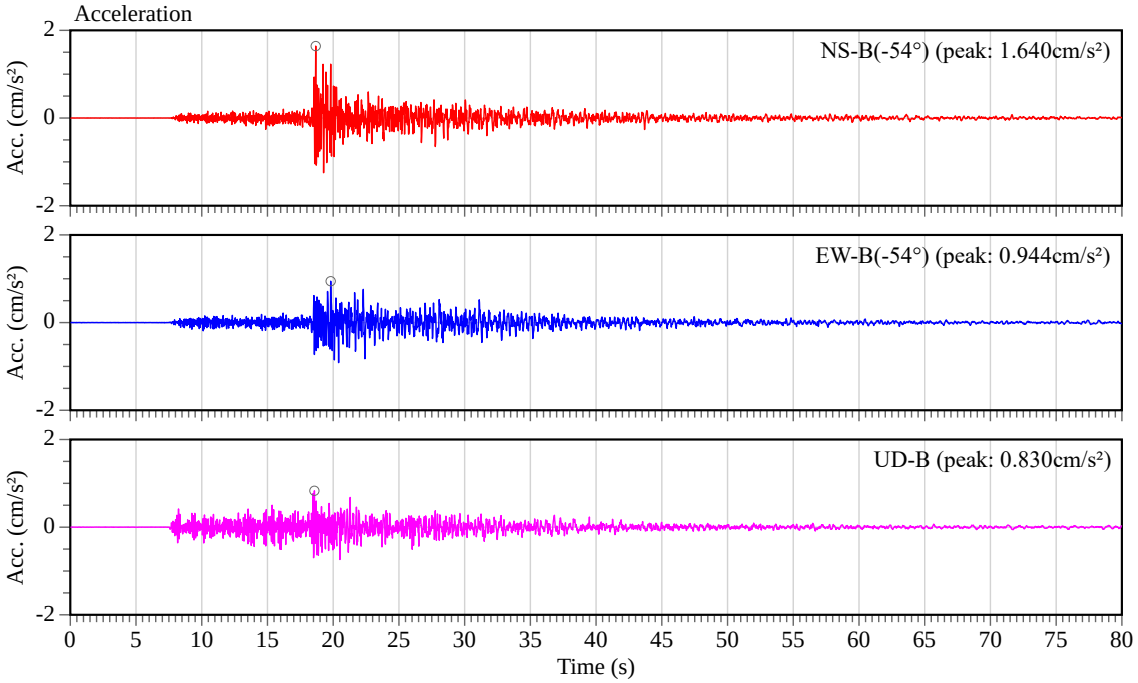


図 4.2-21　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.5　2021 年 4 月 14 日

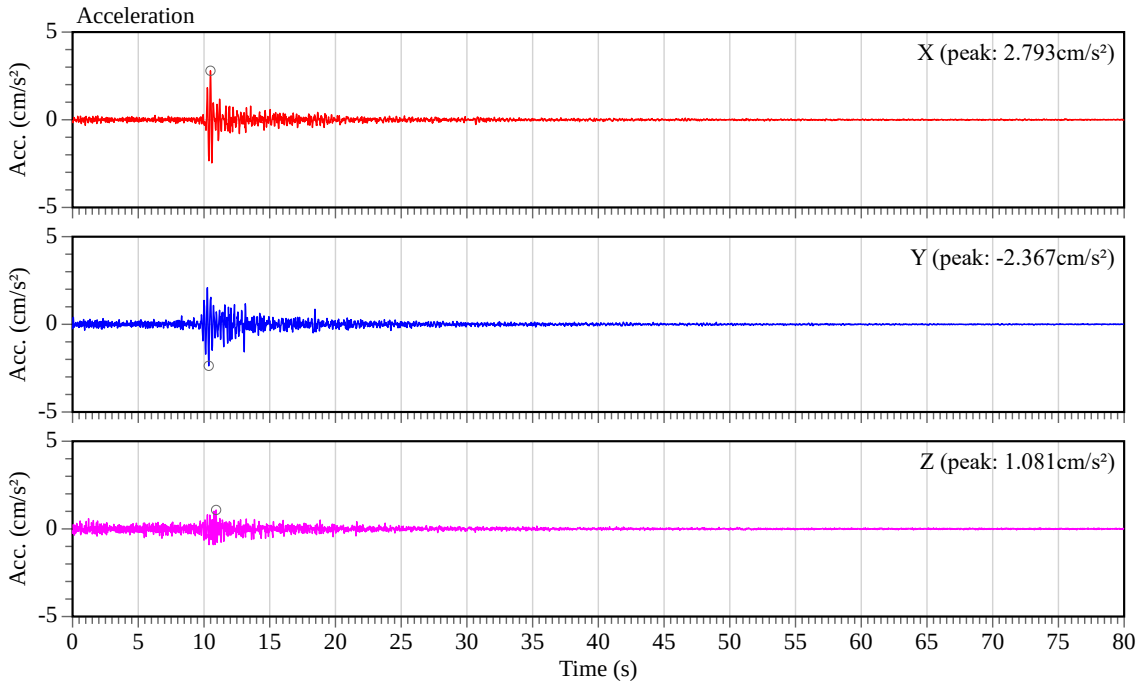


図 4.2-22　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

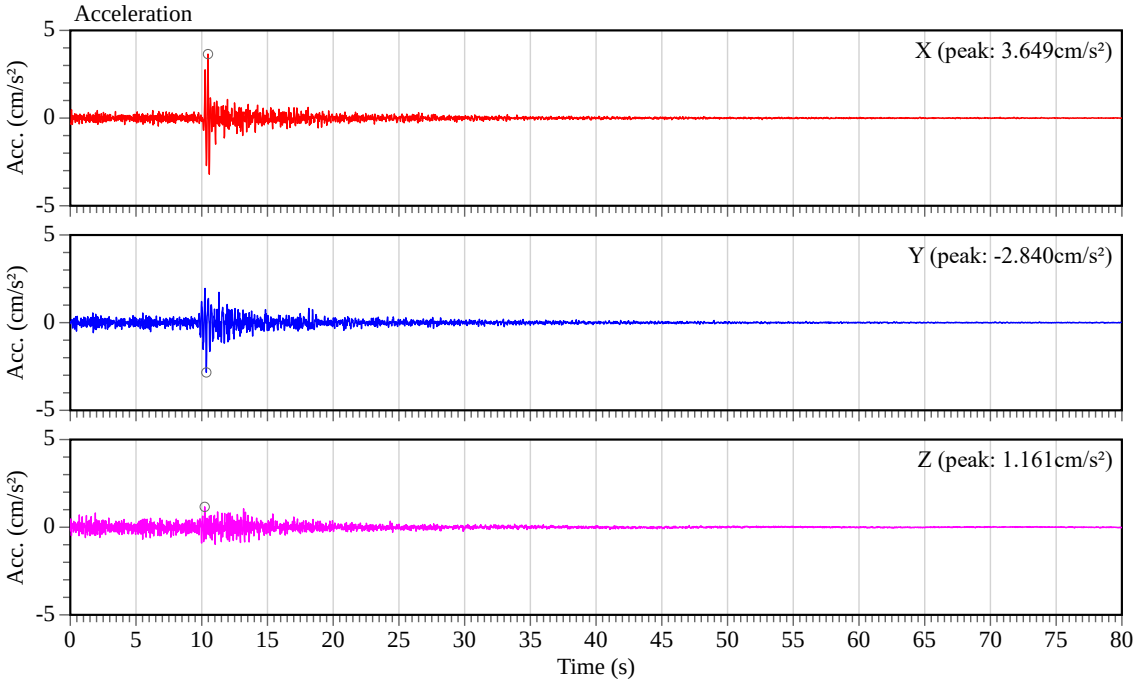


図 4.2-23　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

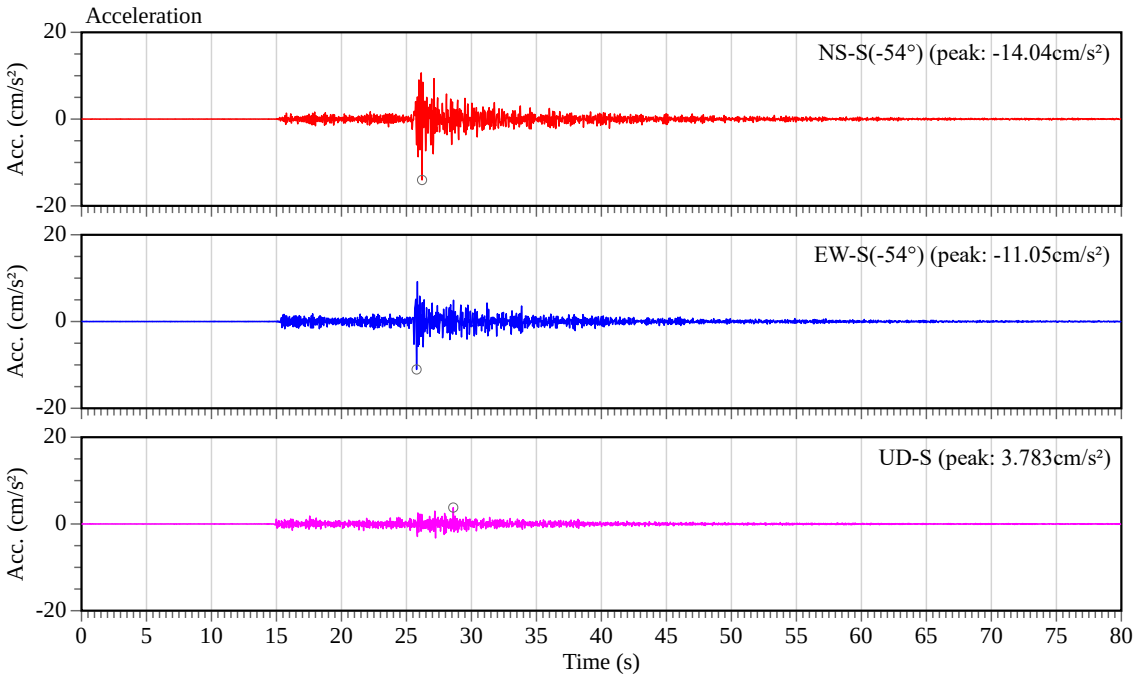


図 4.2-24　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

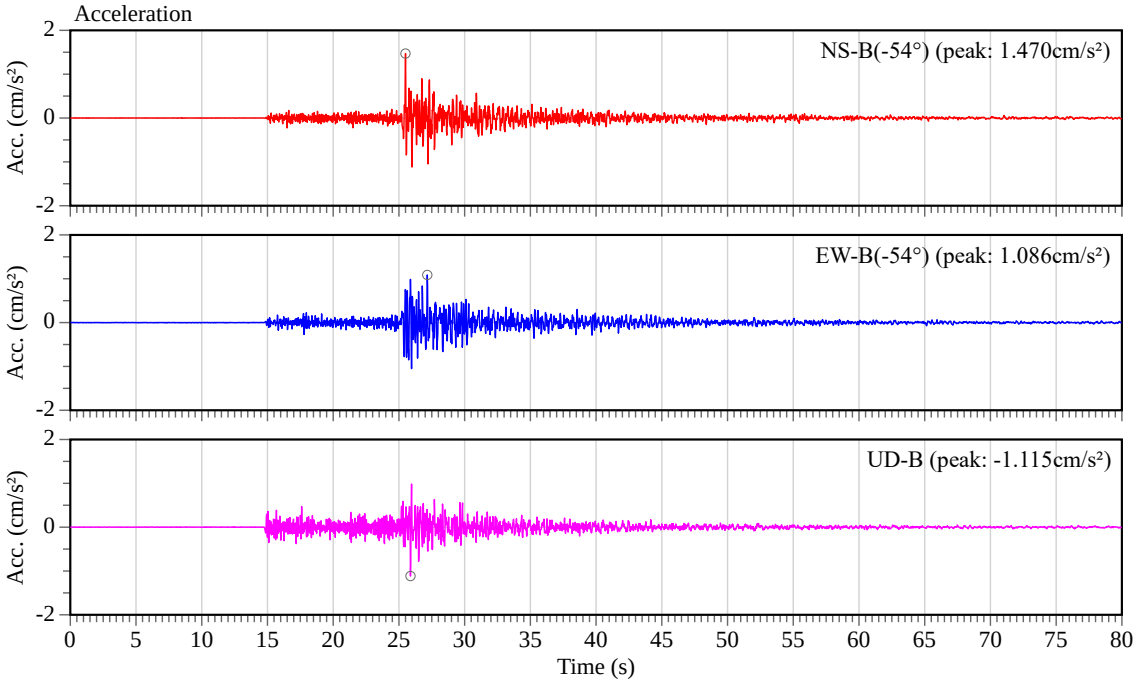


図 4.2-25　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.6　2021 年 5 月 1 日

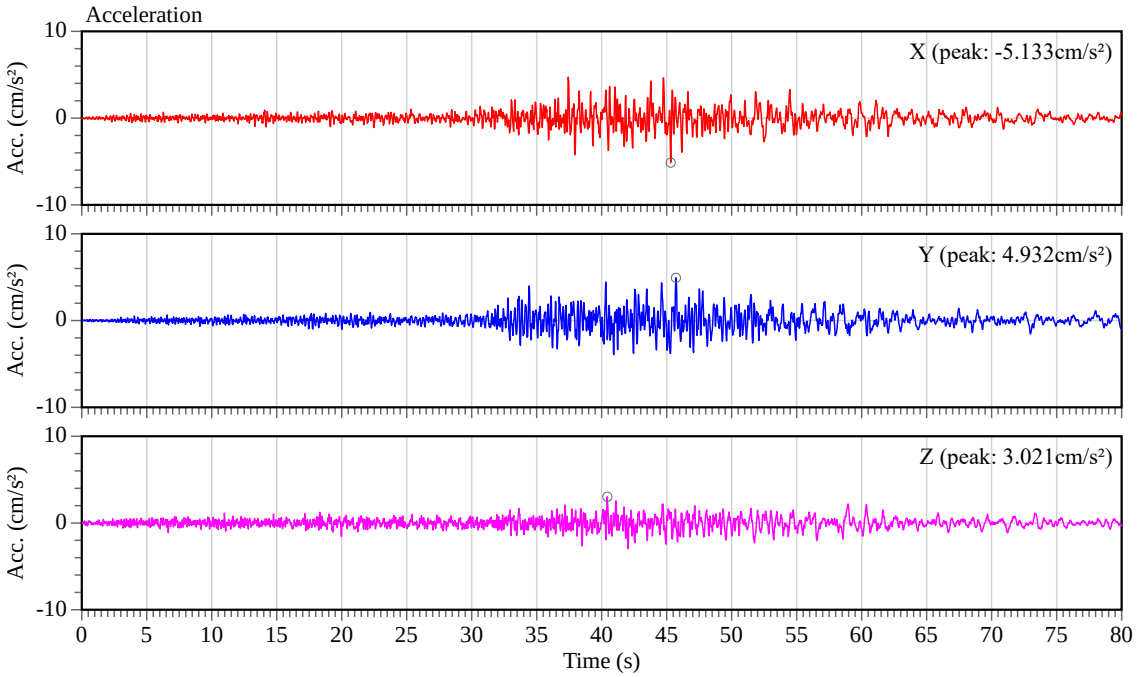


図 4.2-26　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

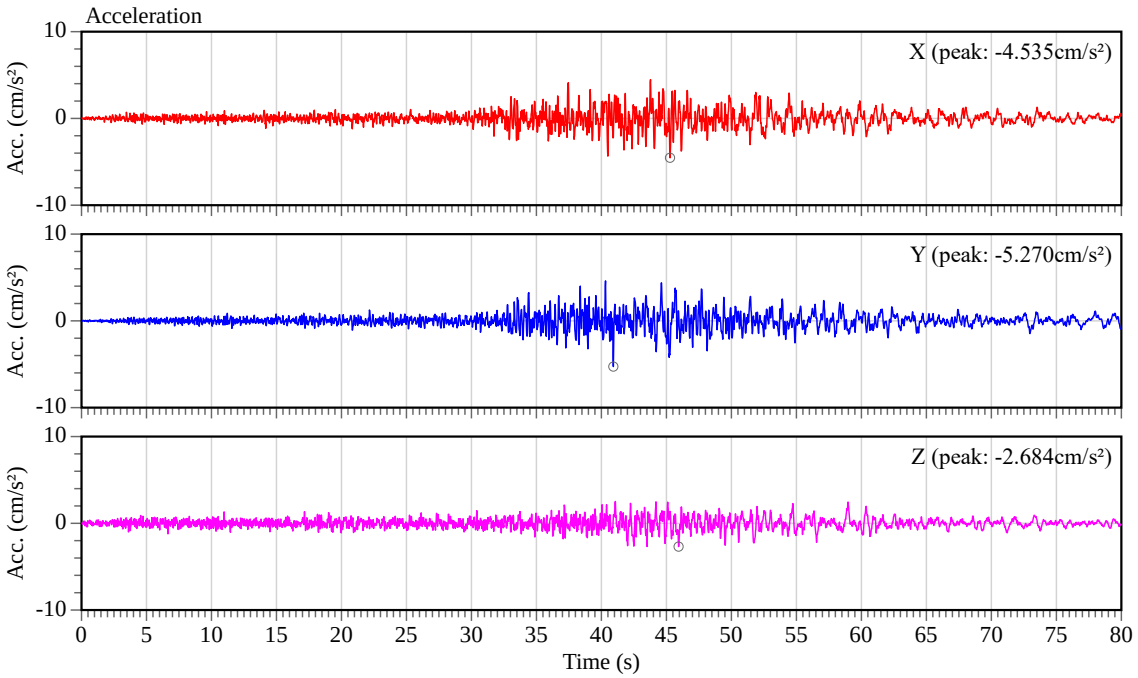


図 4.2-27　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

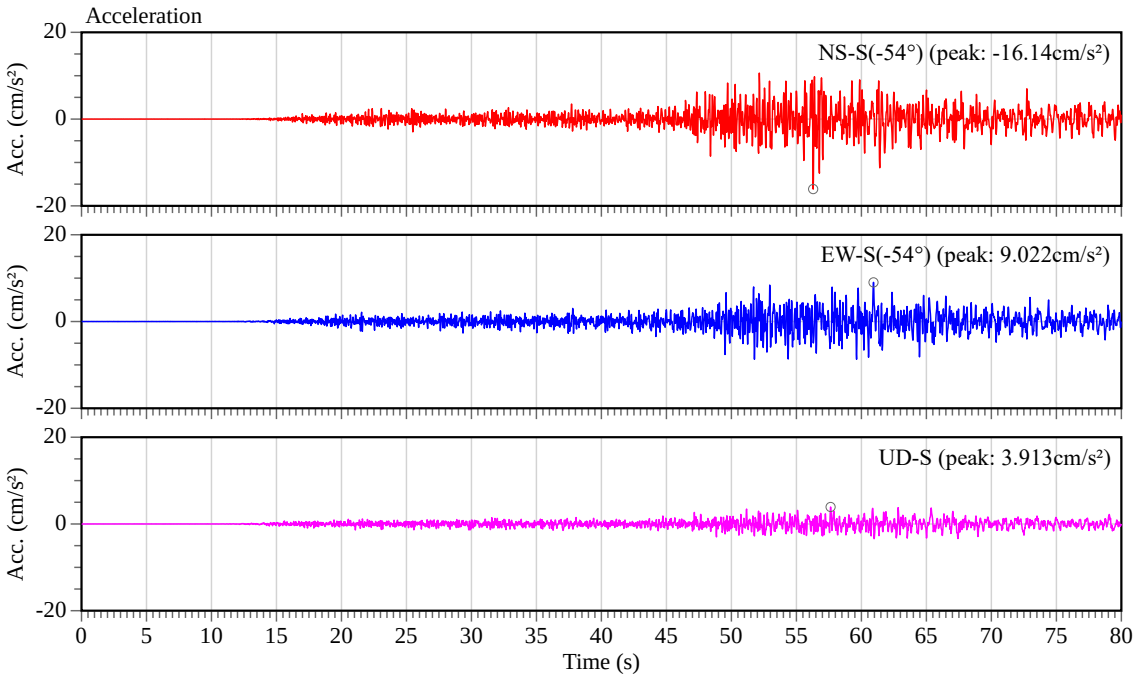


図 4.2-28　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

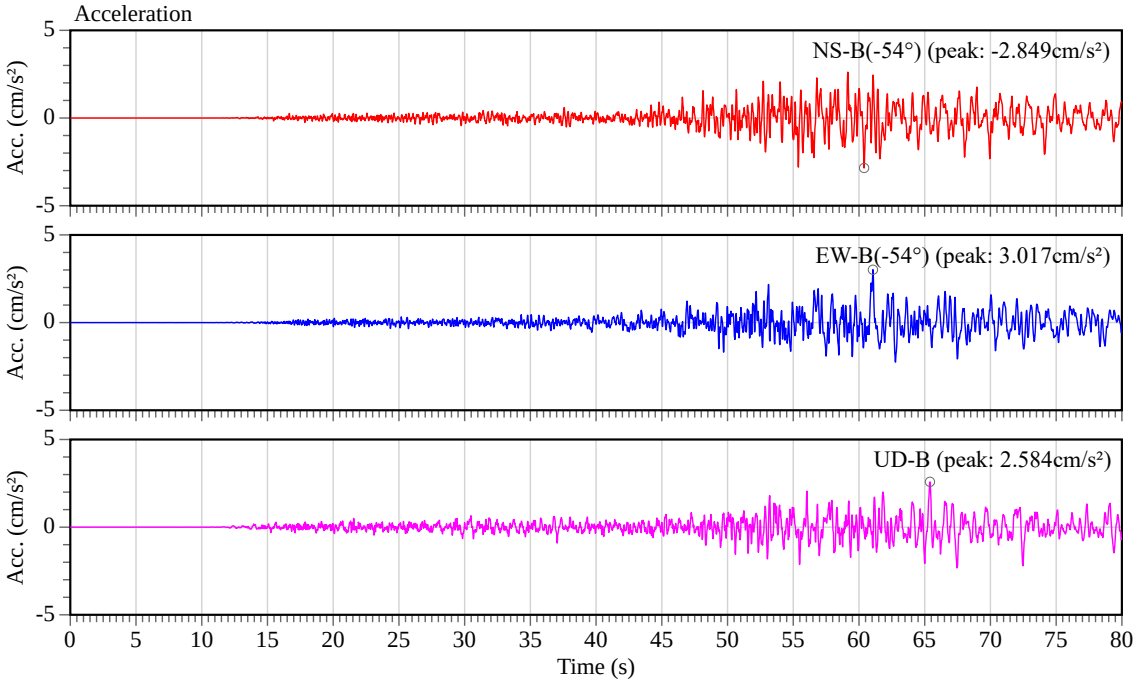


図 4.2-29　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.7　2021 年 5 月 14 日

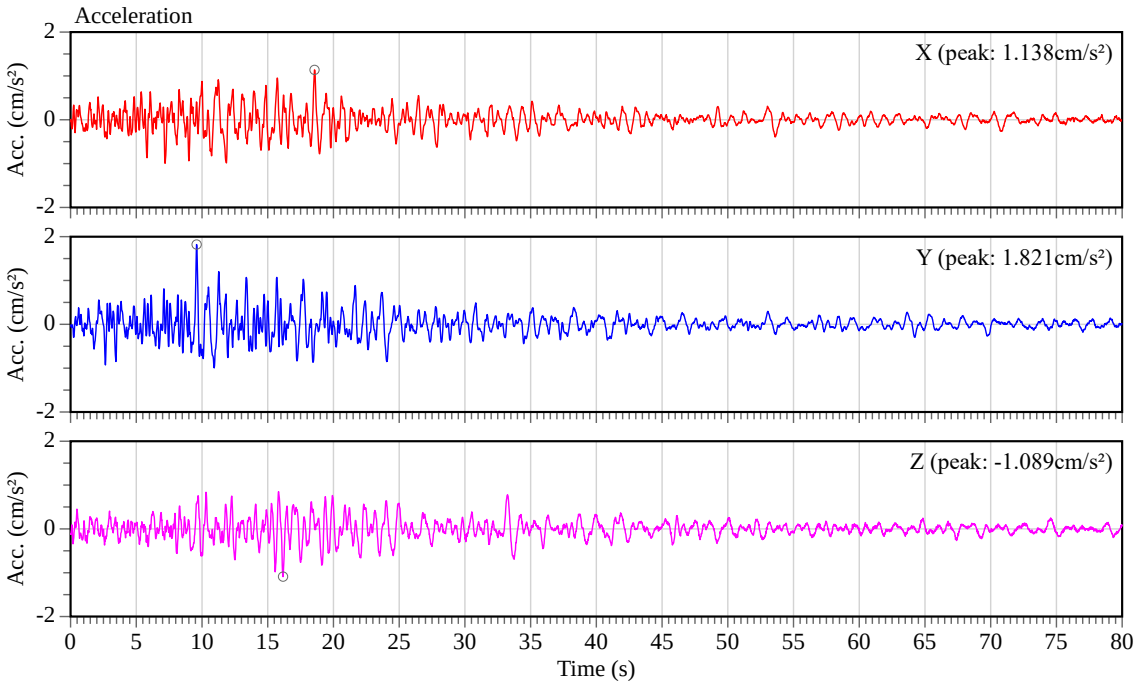


図 4.2-30　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

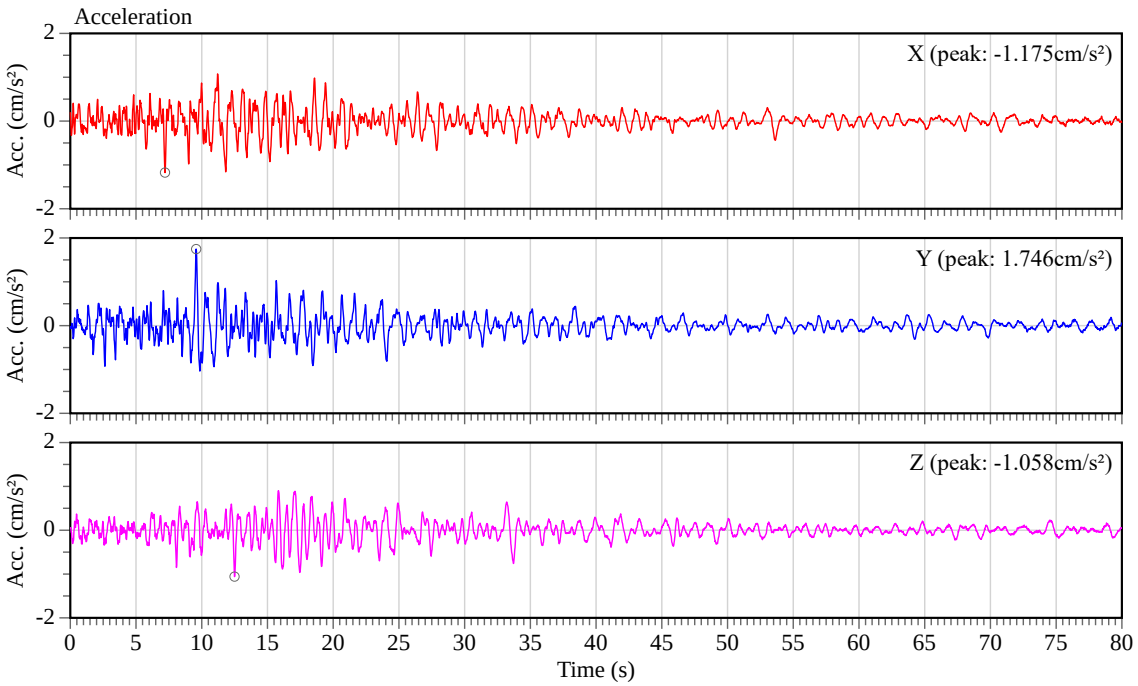


図 4.2-31　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

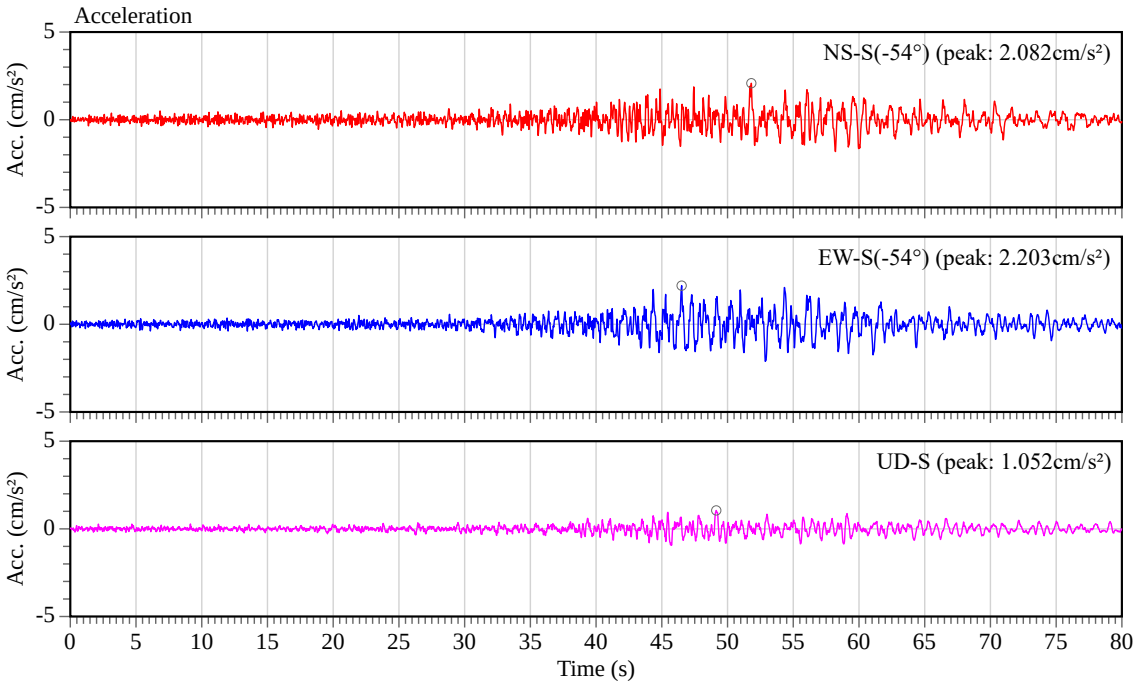


図 4.2-32　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

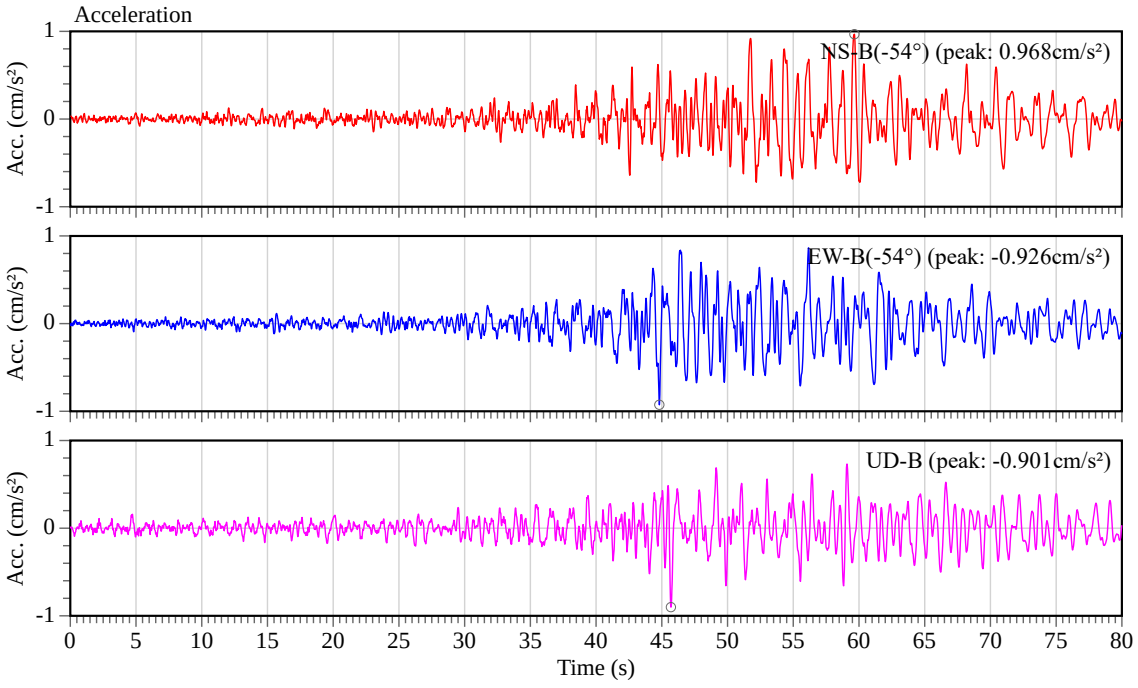


図 4.2-33　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.8　2021 年 6 月 9 日

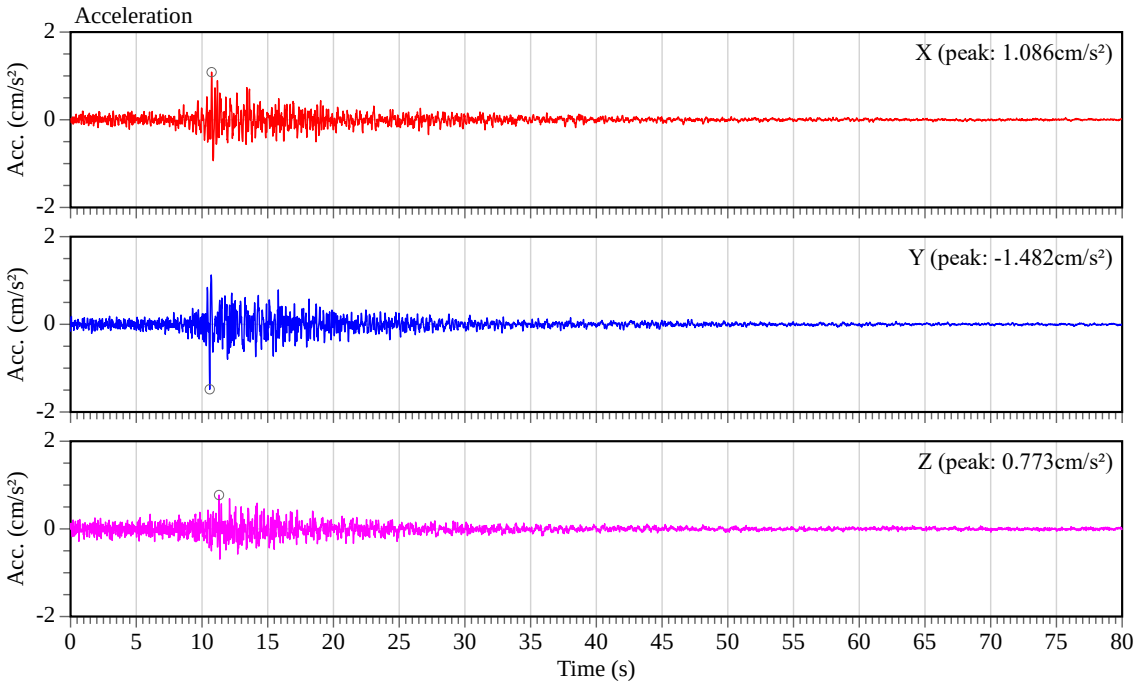


図 4.2-34　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

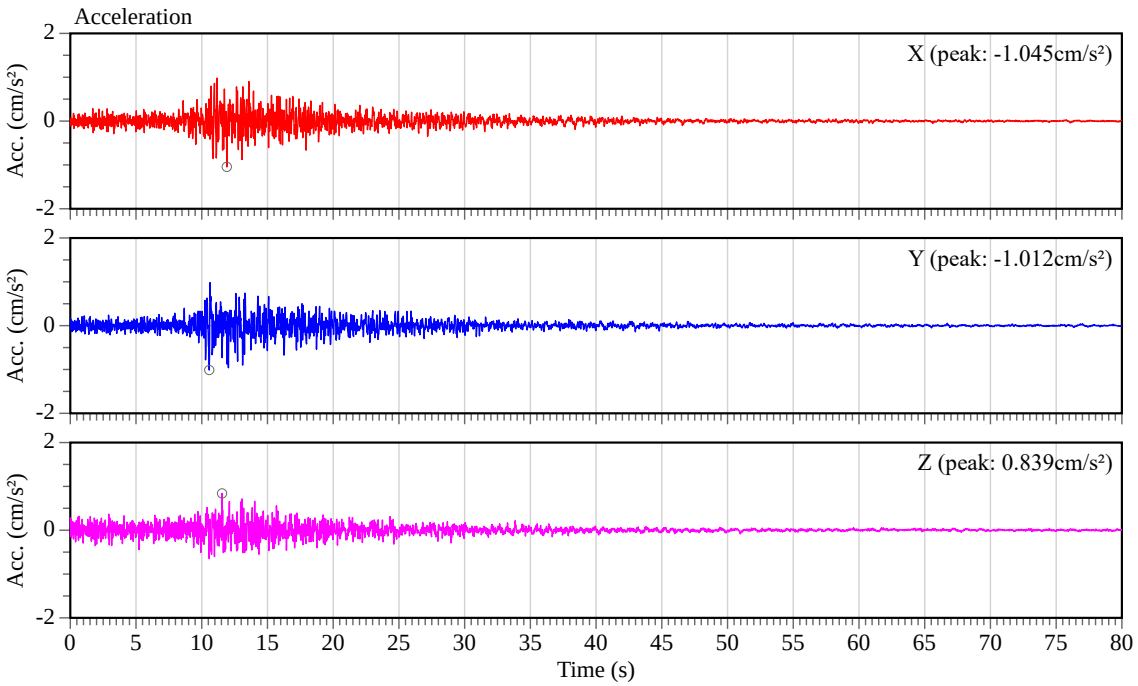


図 4.2-35　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

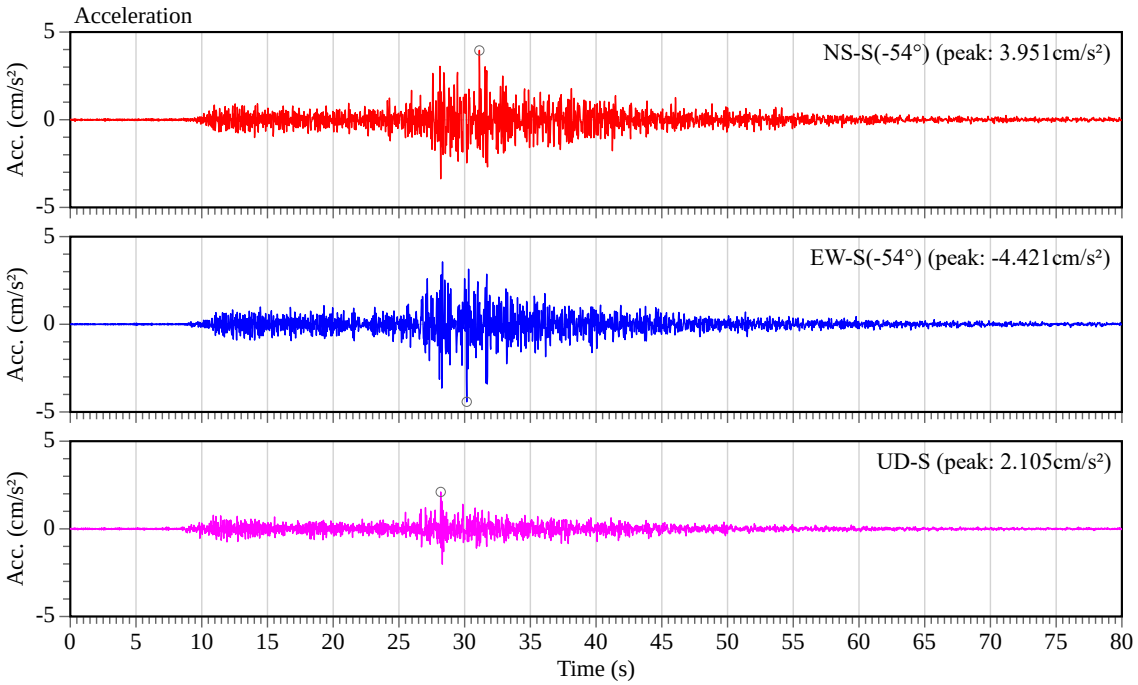


図 4.2-36　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

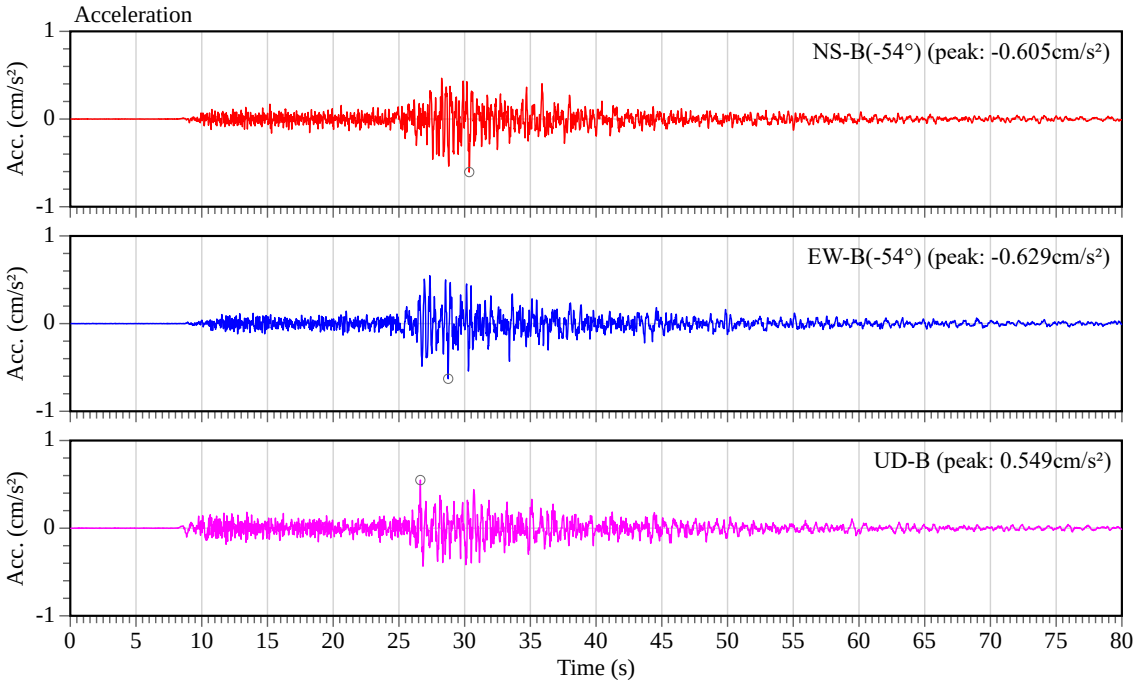


図 4.2-37　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.9　2021 年 6 月 9 日

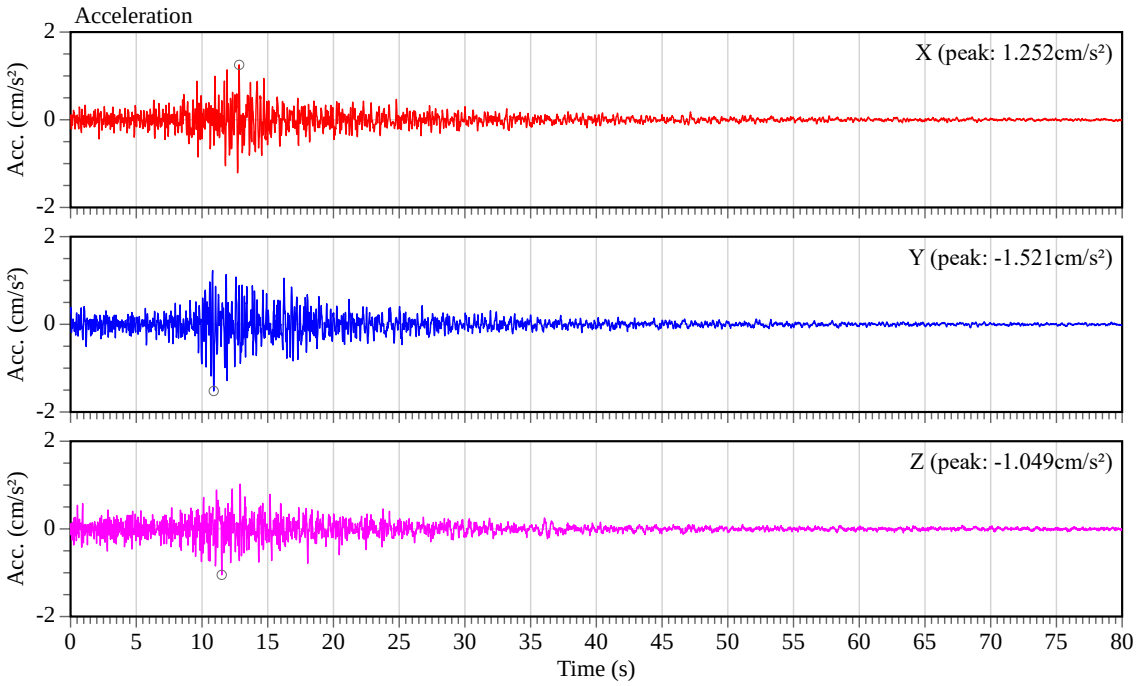


図 4.2-38　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

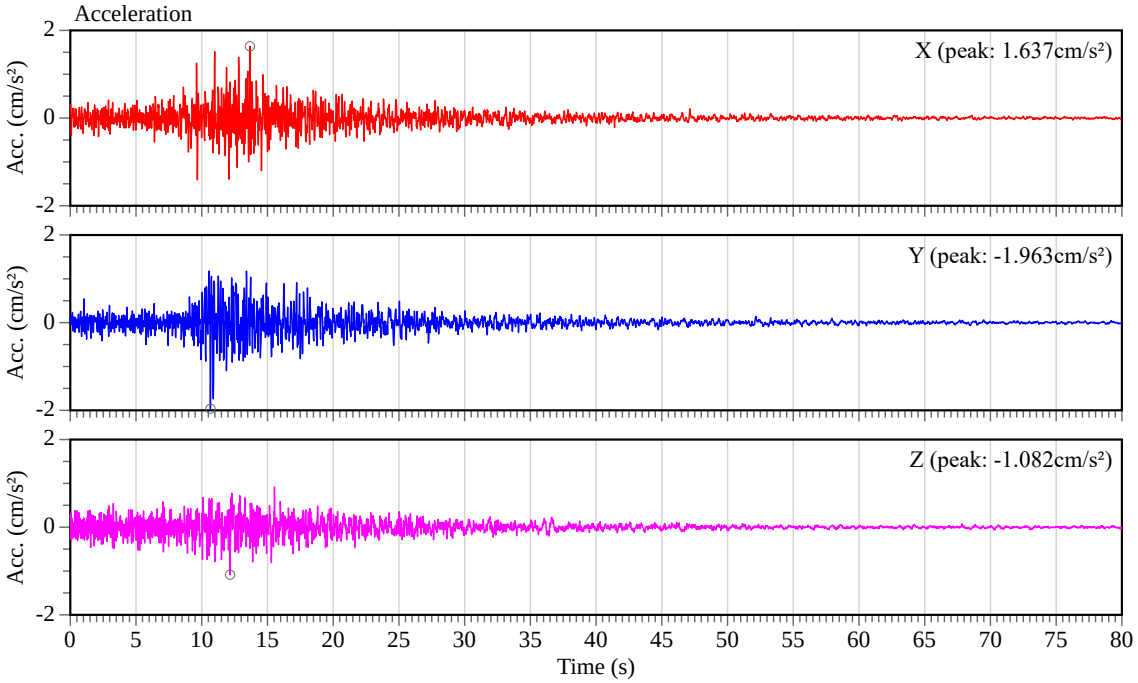


図 4.2-39　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

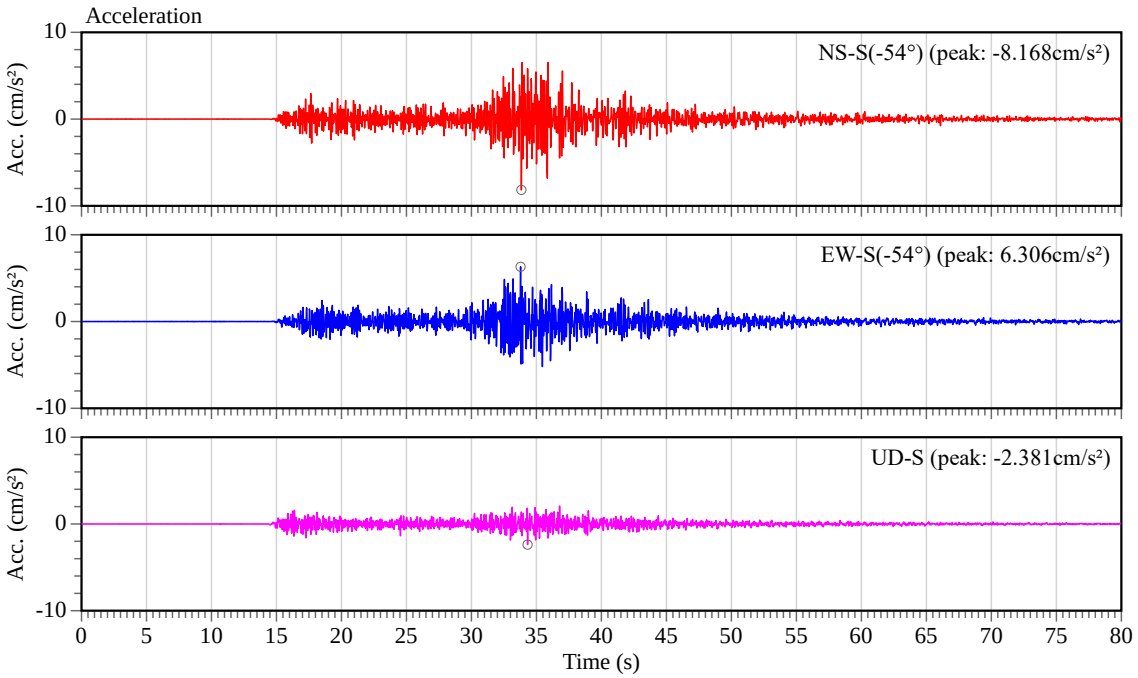


図 4.2-40　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

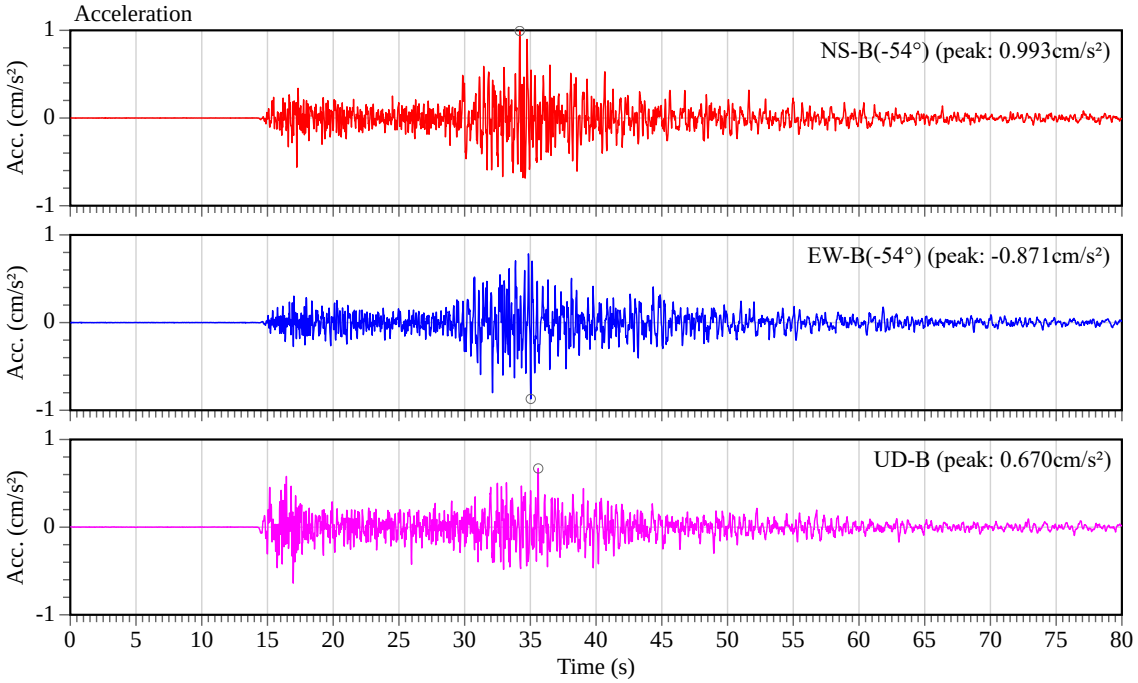


図 4.2-41　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.10　2021 年 6 月 20 日

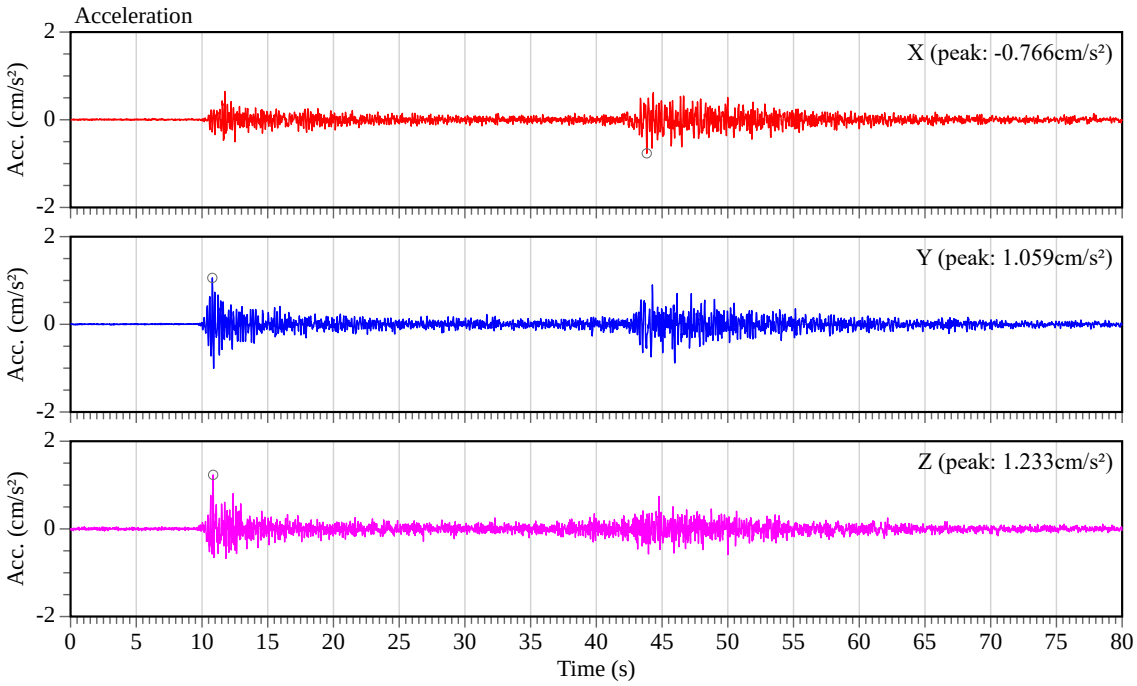


図 4.2-42　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

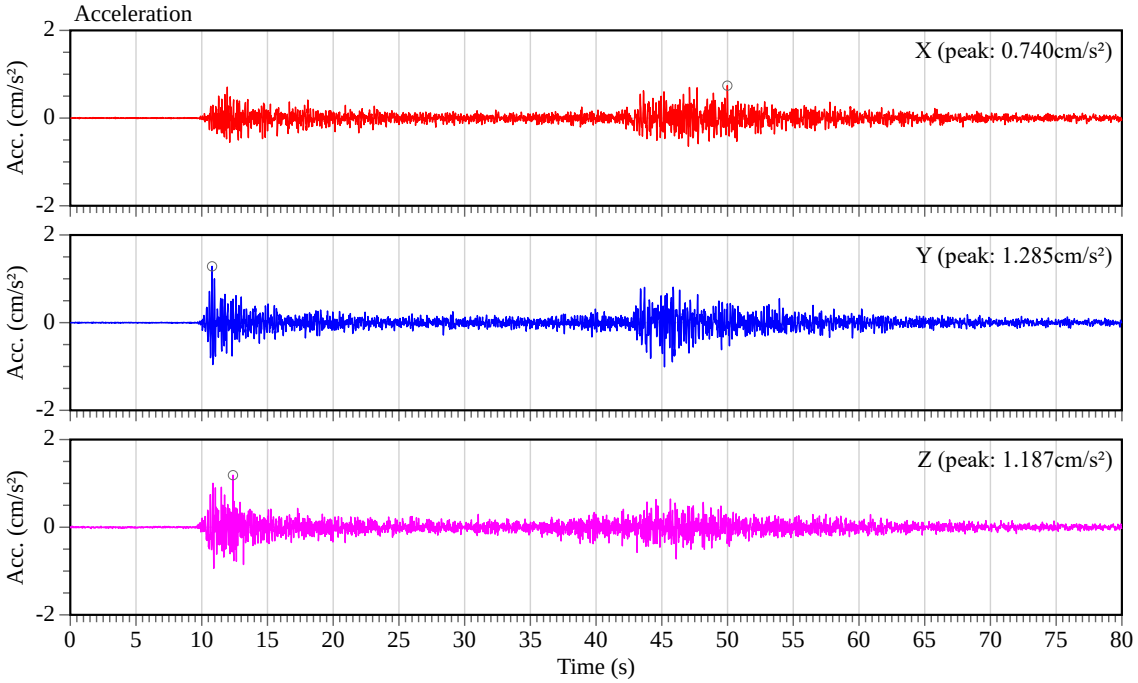


図 4.2-43　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

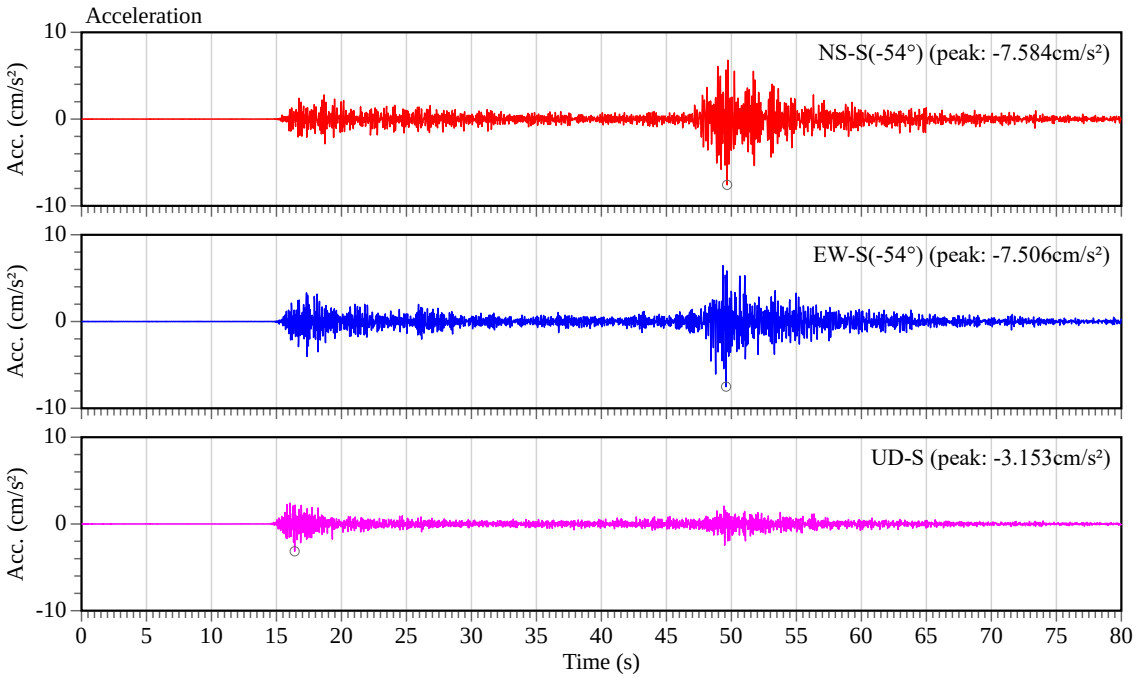


図 4.2-44　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

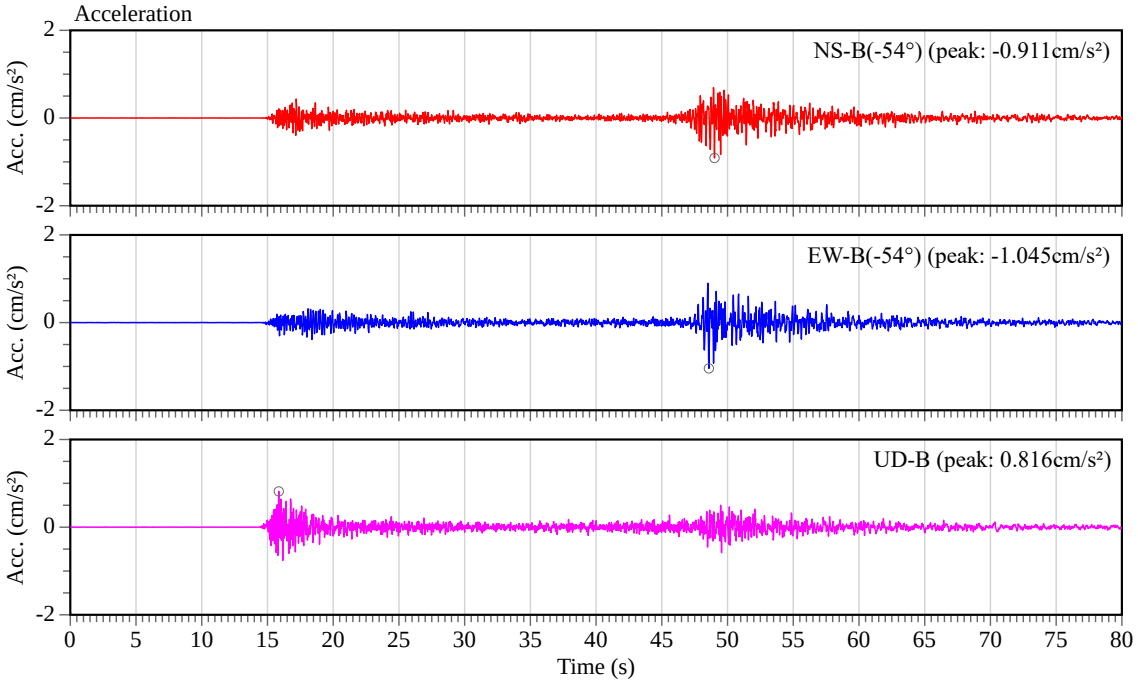


図 4.2-45　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.11　2021 年 7 月 26 日

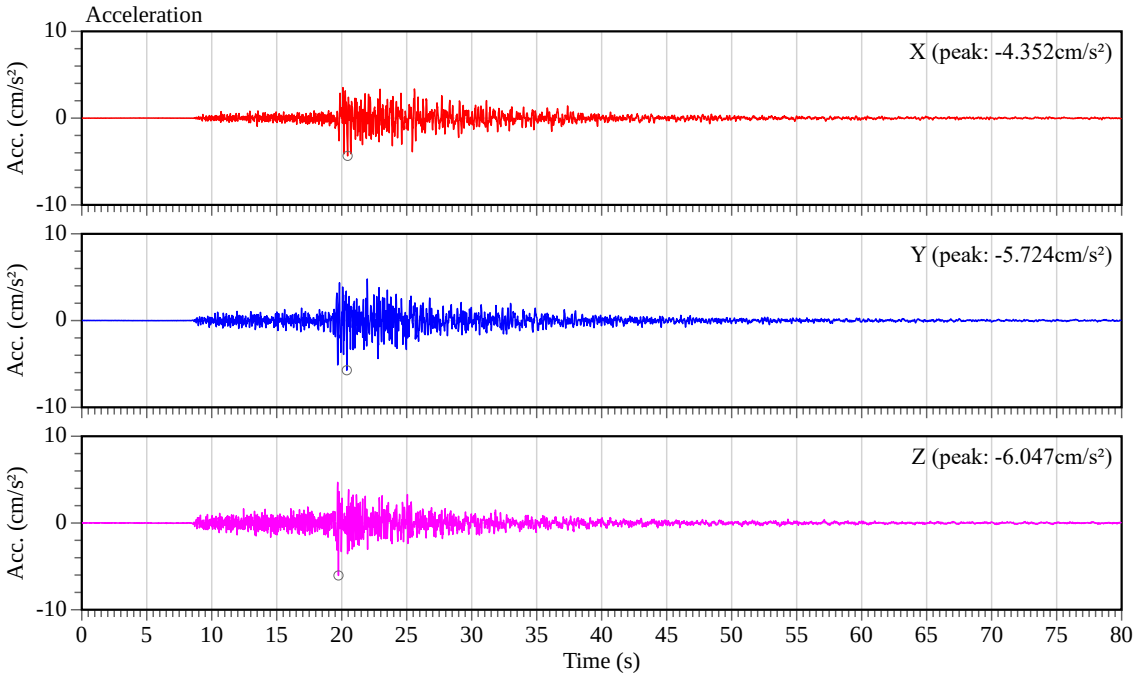


図 4.2-46　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

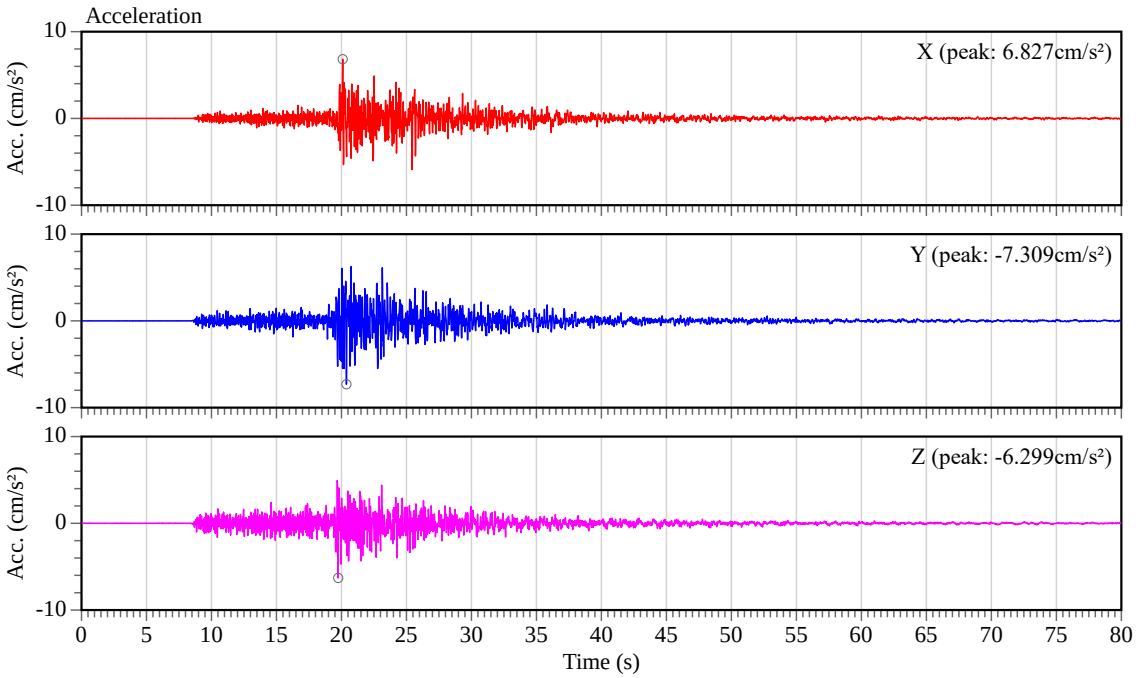


図 4.2-47　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

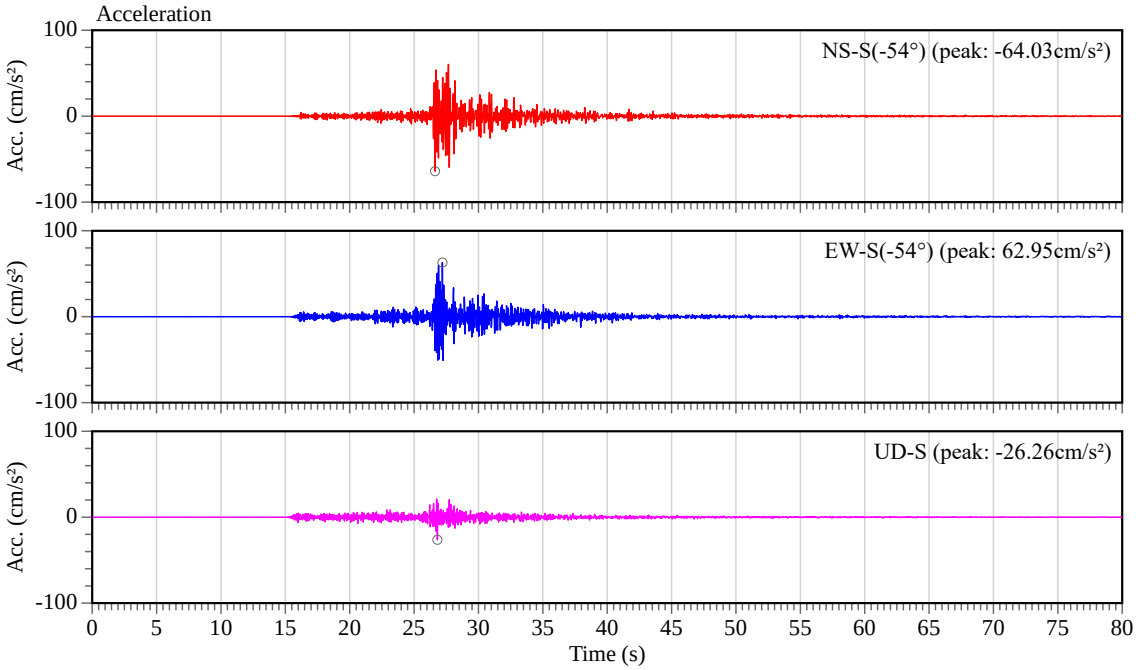


図 4.2-48　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

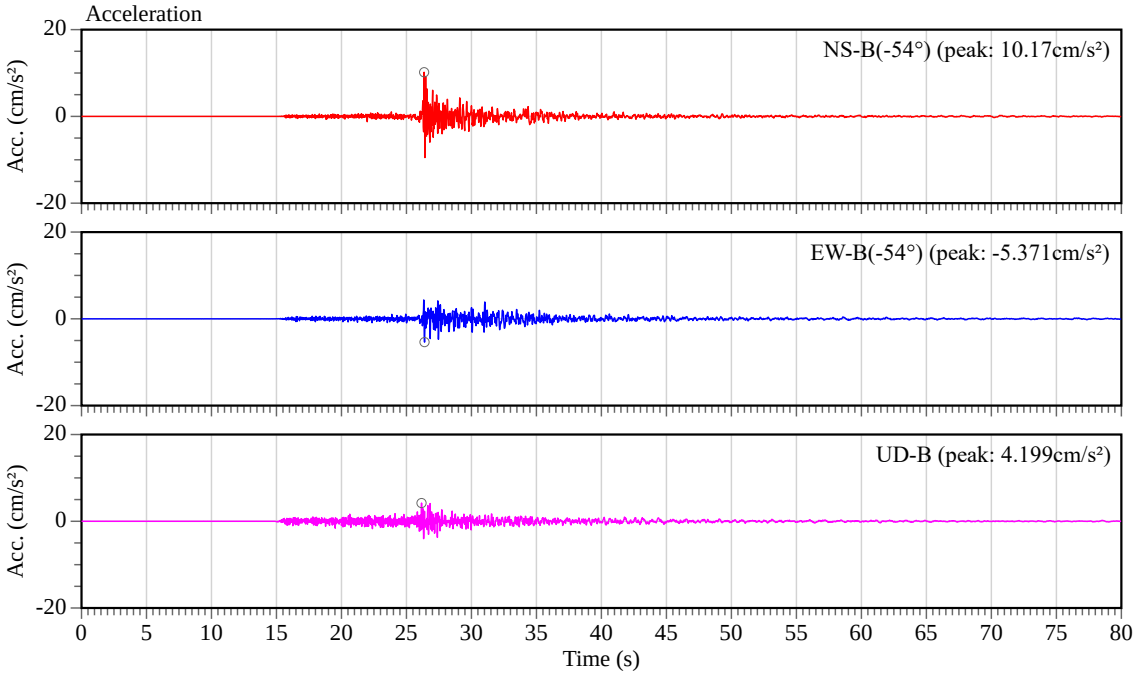


図 4.2-49　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.12　2021 年 8 月 20 日

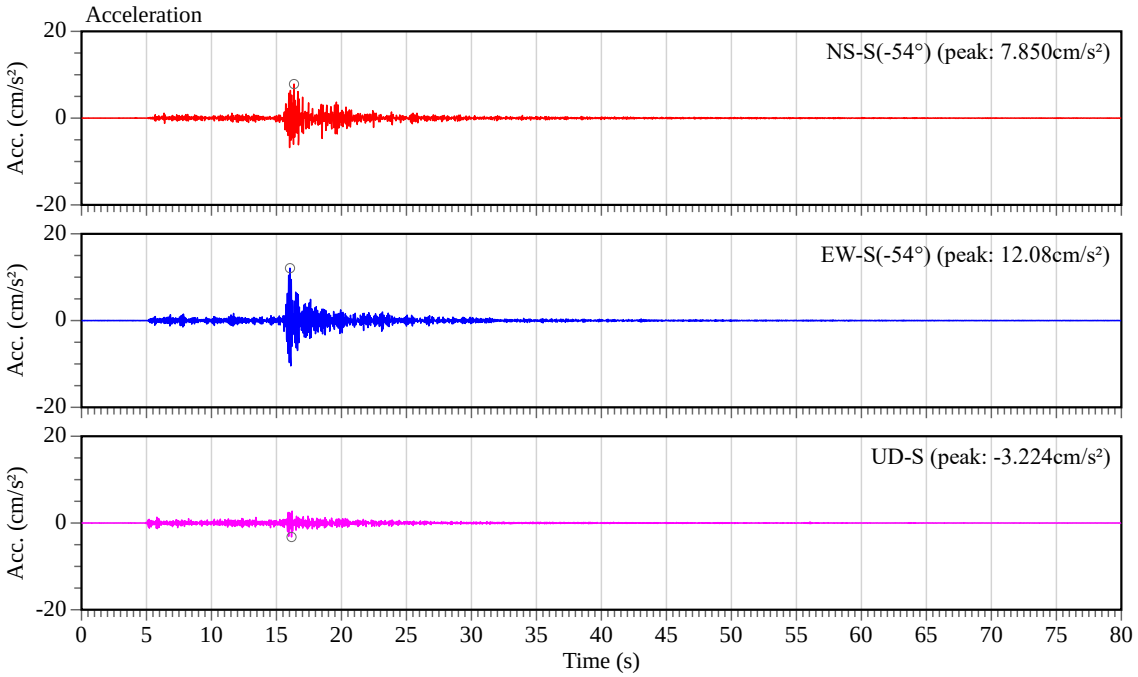


図 4.2-50　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

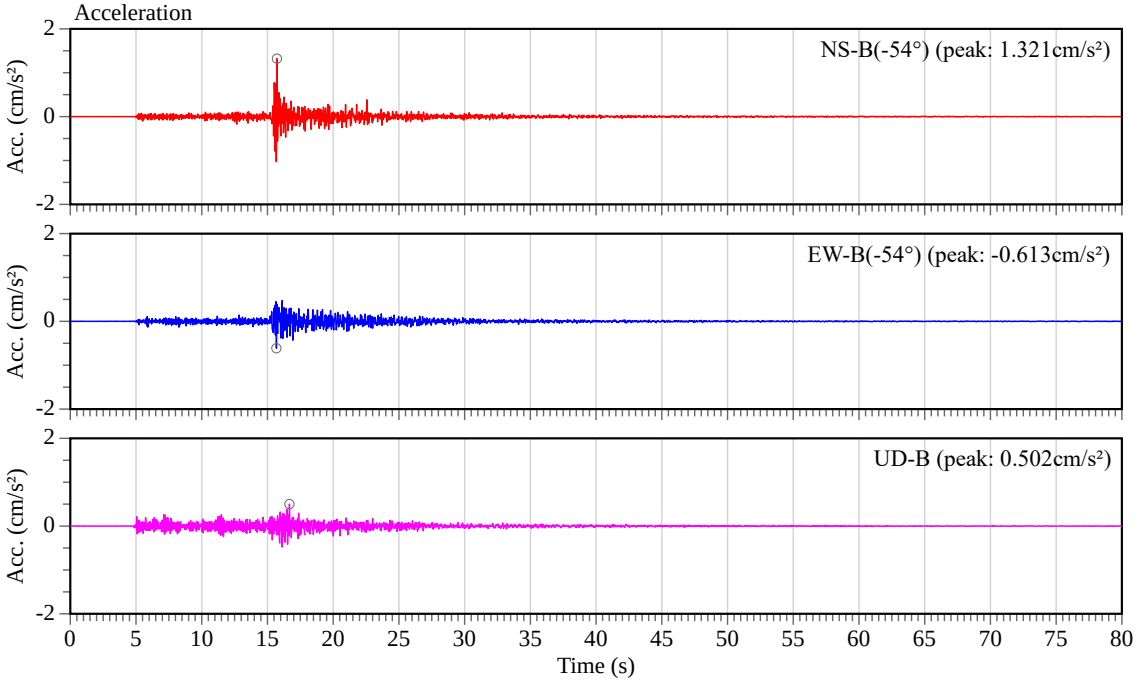


図 4.2-51　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.13　2021 年 9 月 29 日

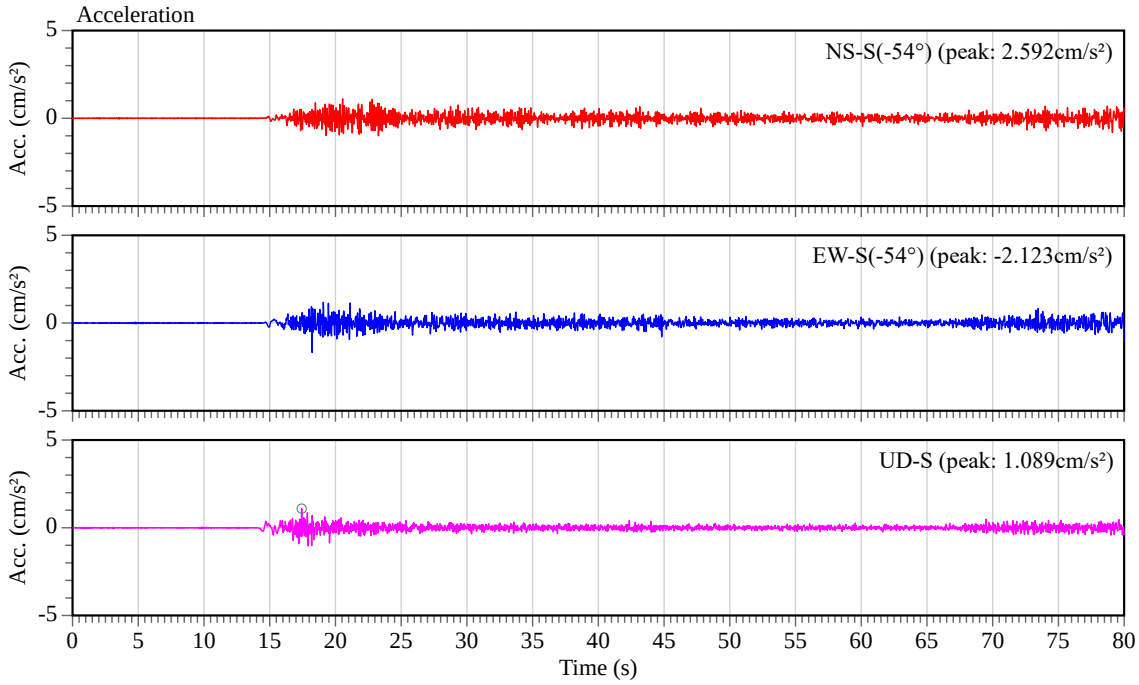


図 4.2-52　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

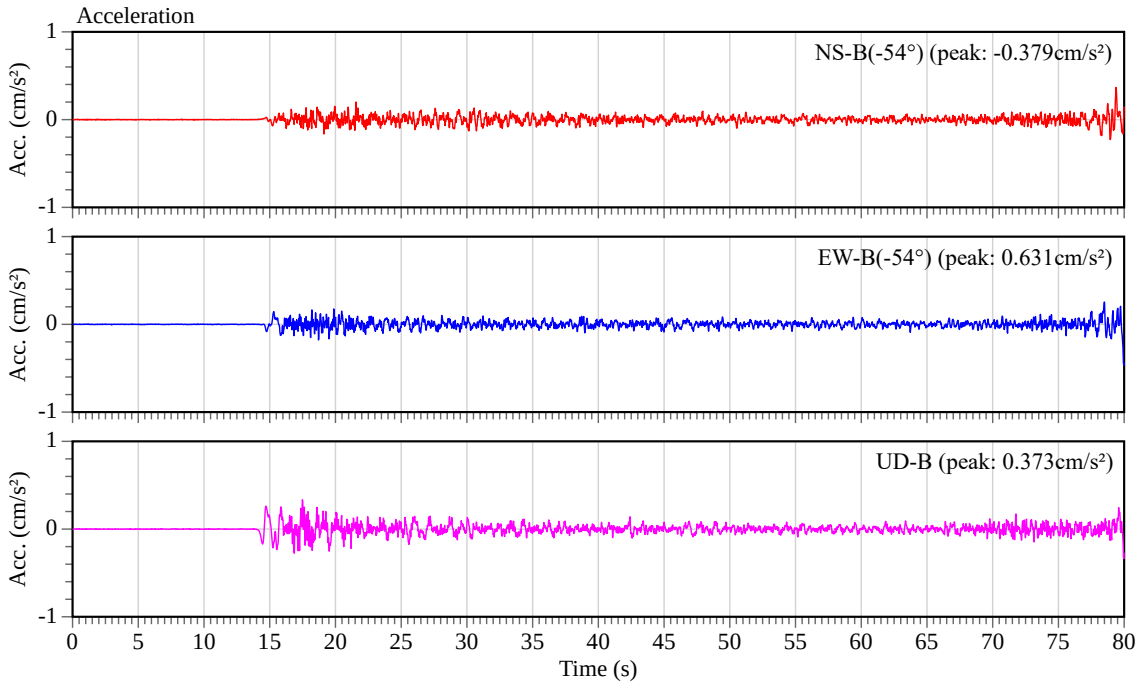


図 4.2-53　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.14　2021 年 10 月 6 日

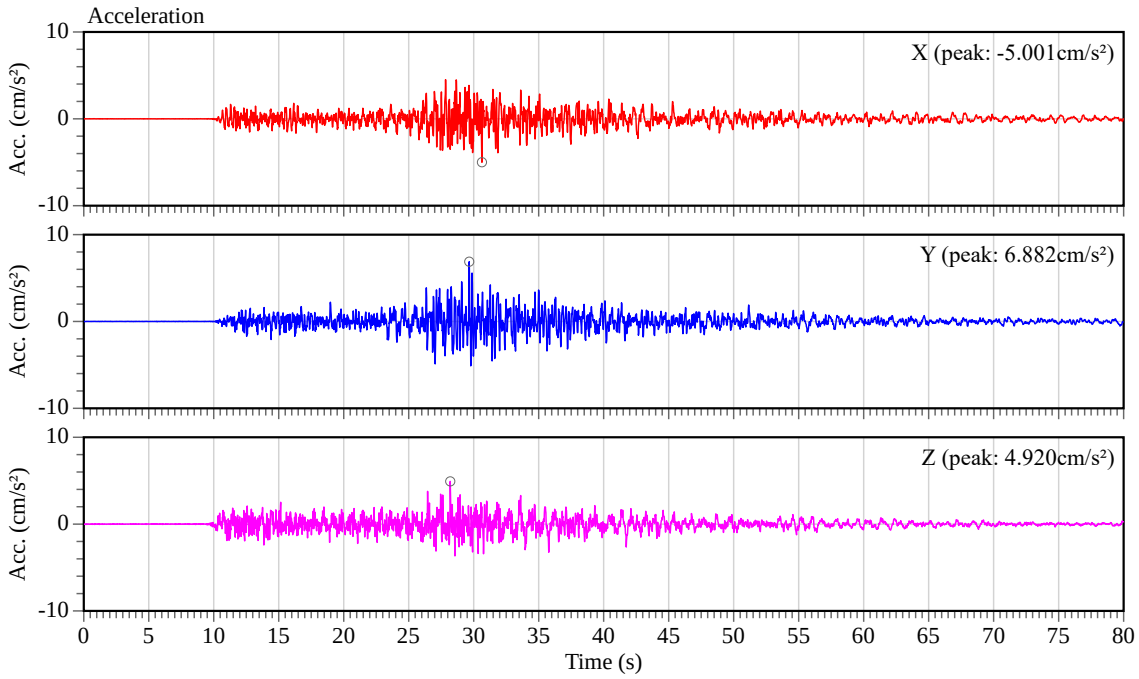


図 4.2-54　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

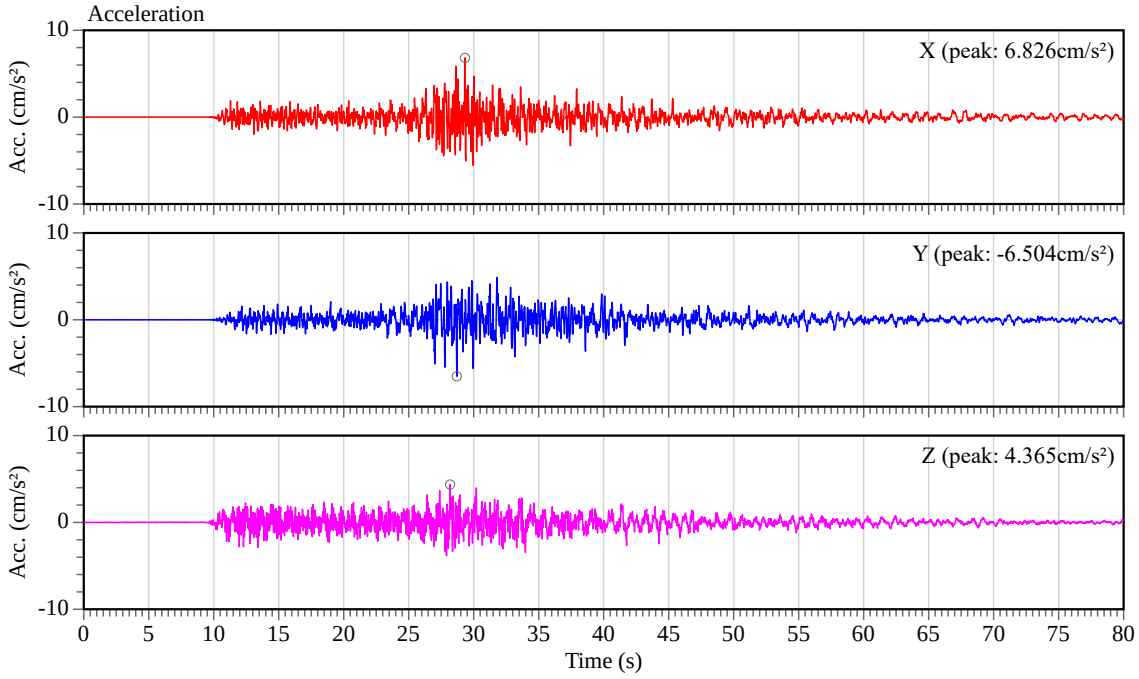


図 4.2-55　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

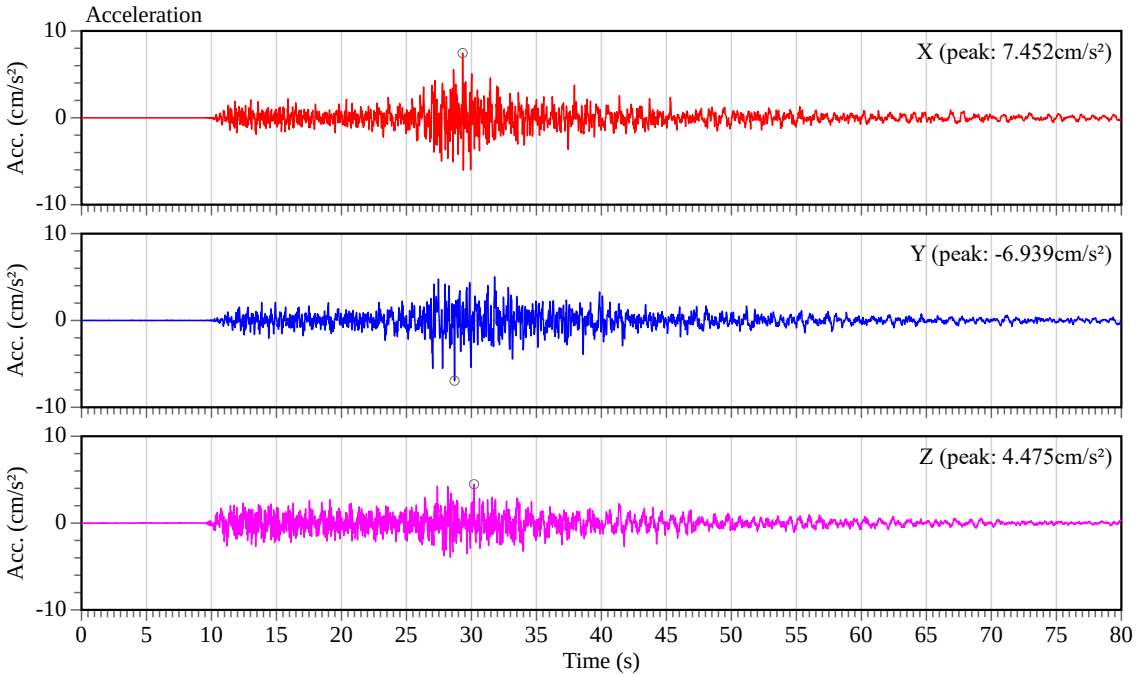


図 4.2-56　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

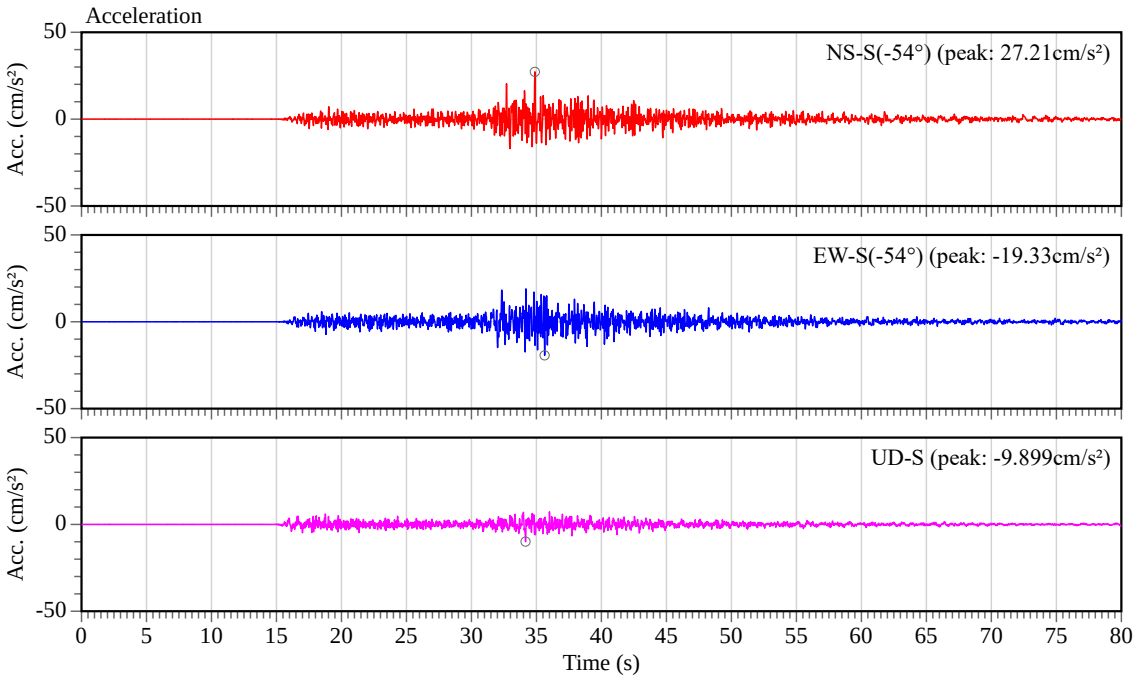


図 4.2-57　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

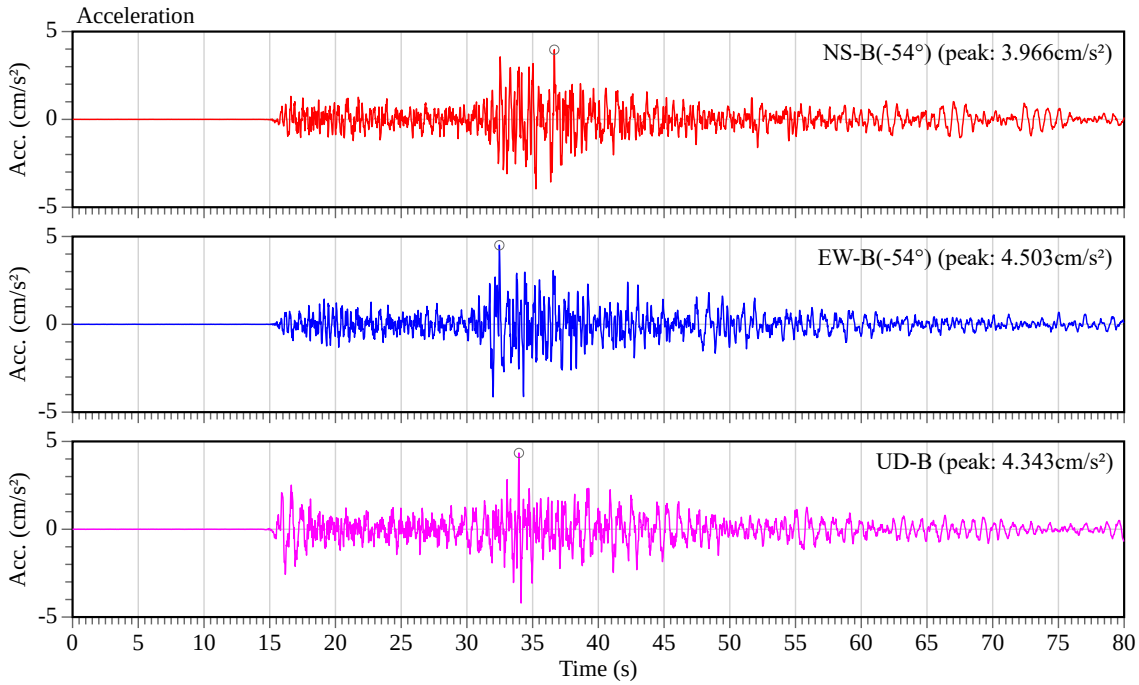


図 4.2-58　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.15　2021 年 10 月 18 日

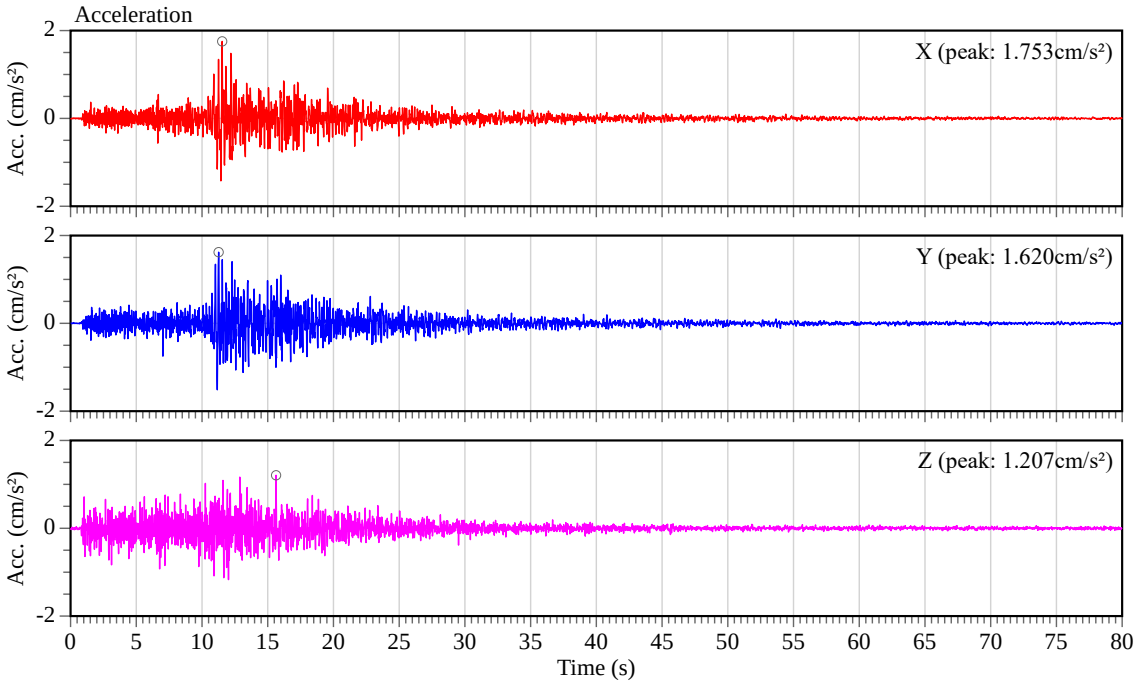


図 4.2-59　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

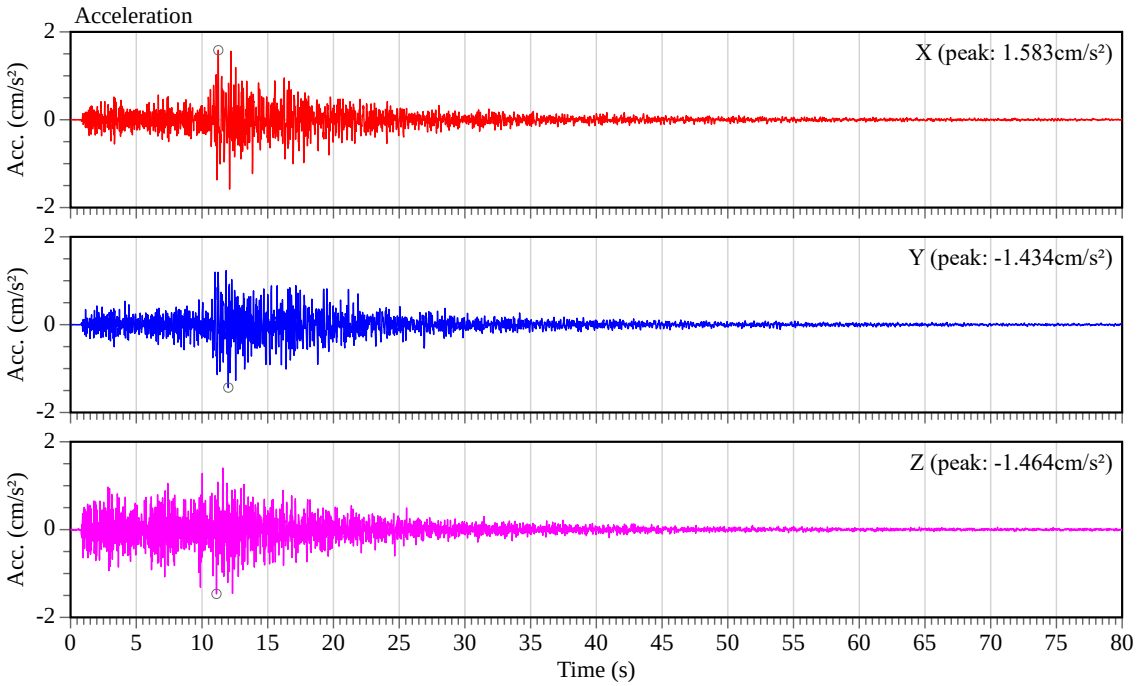


図 4.2-60　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

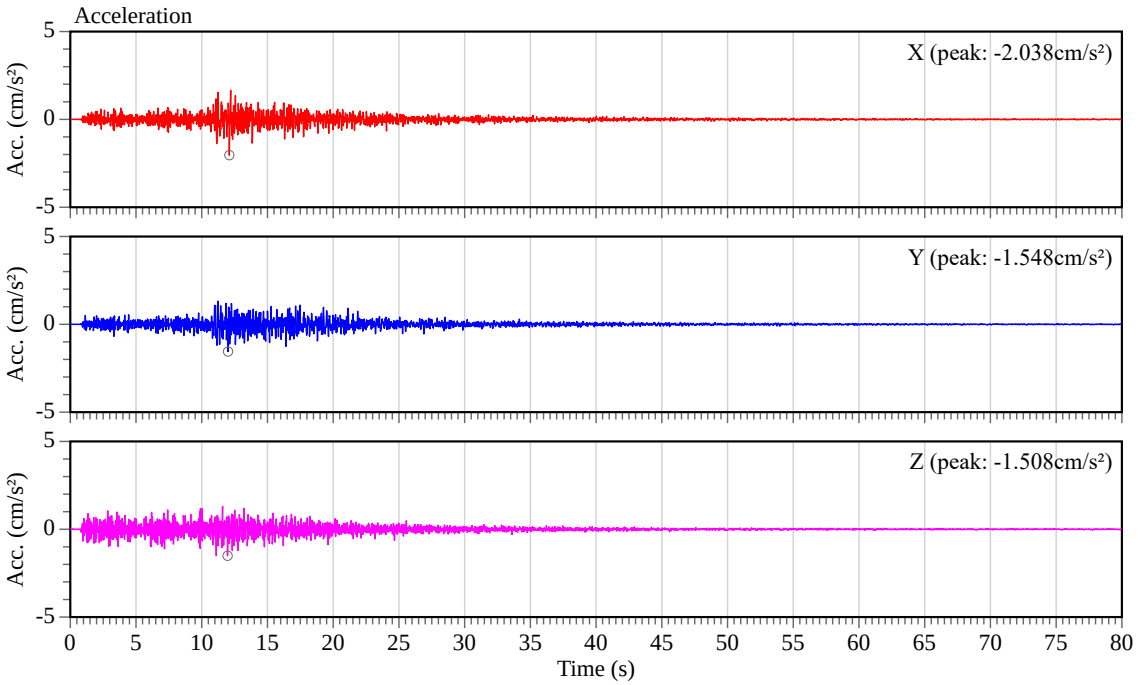


図 4.2-61　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

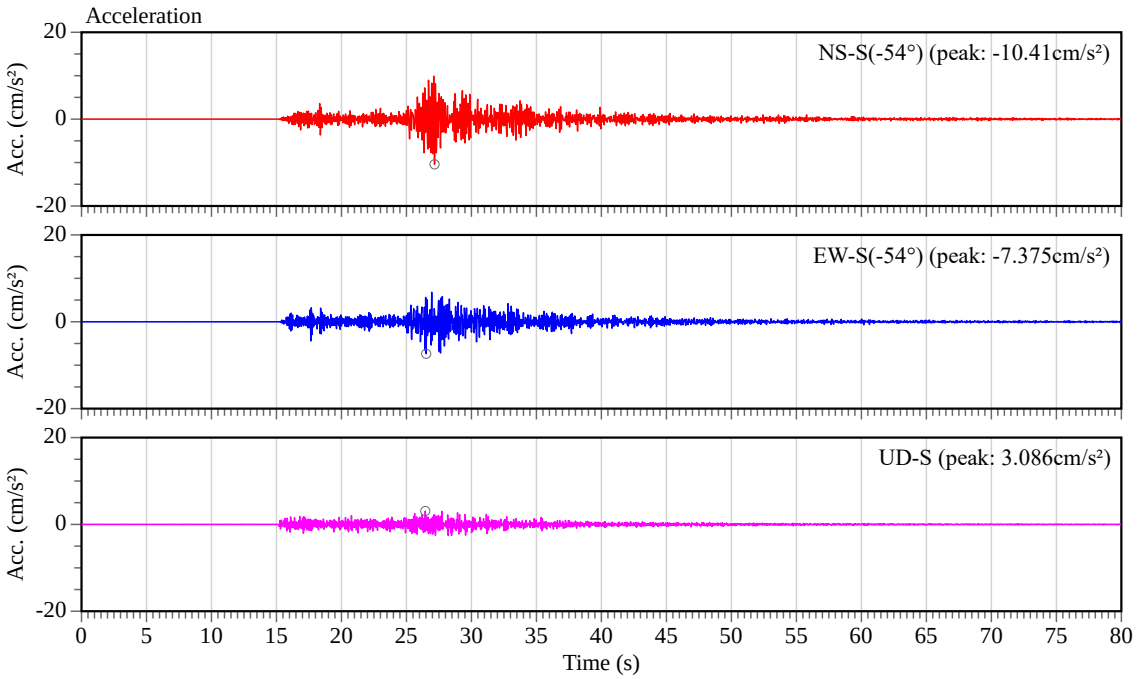


図 4.2-62　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

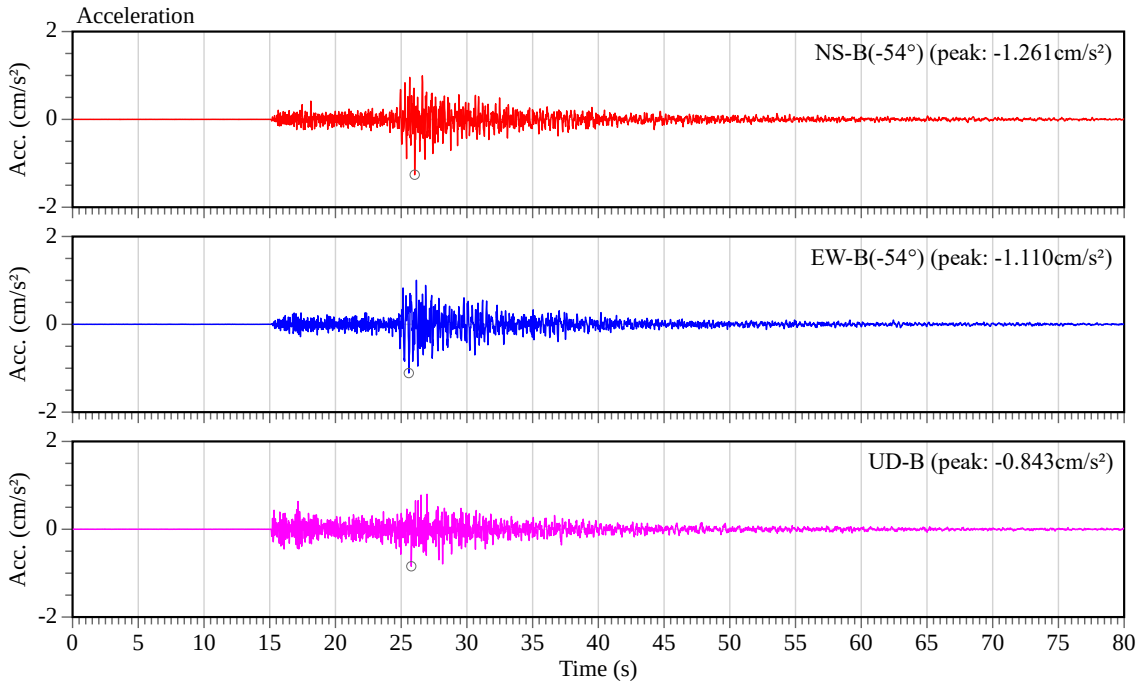


図 4.2-63　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.16　2021 年 10 月 19 日

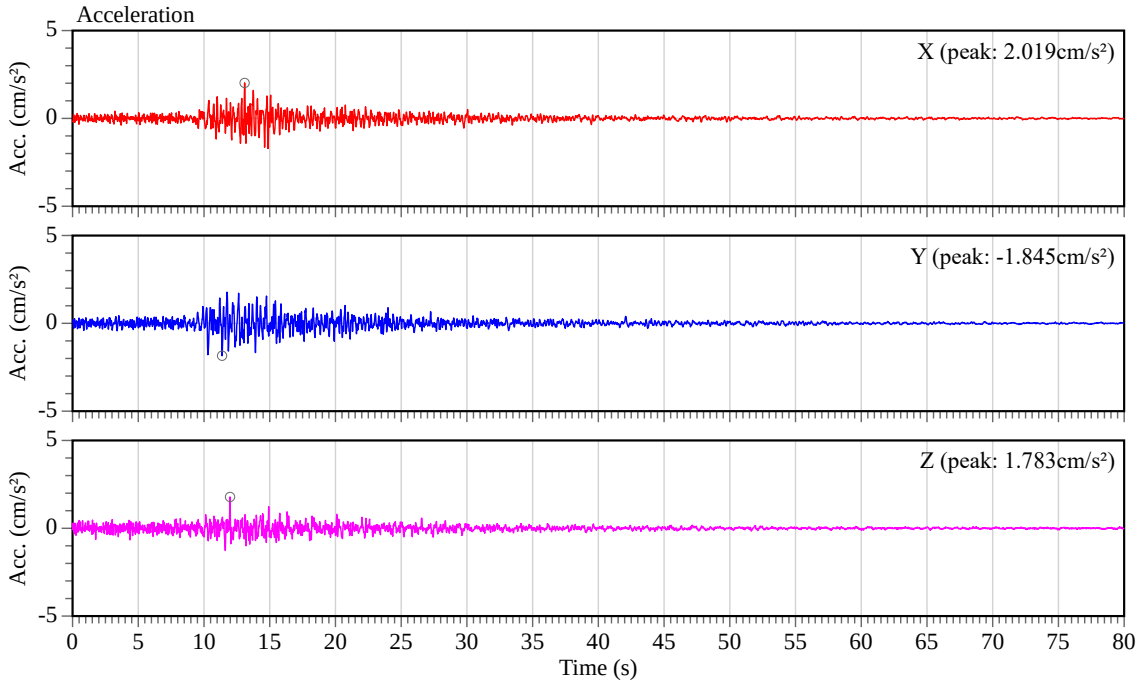


図 4.2-64　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

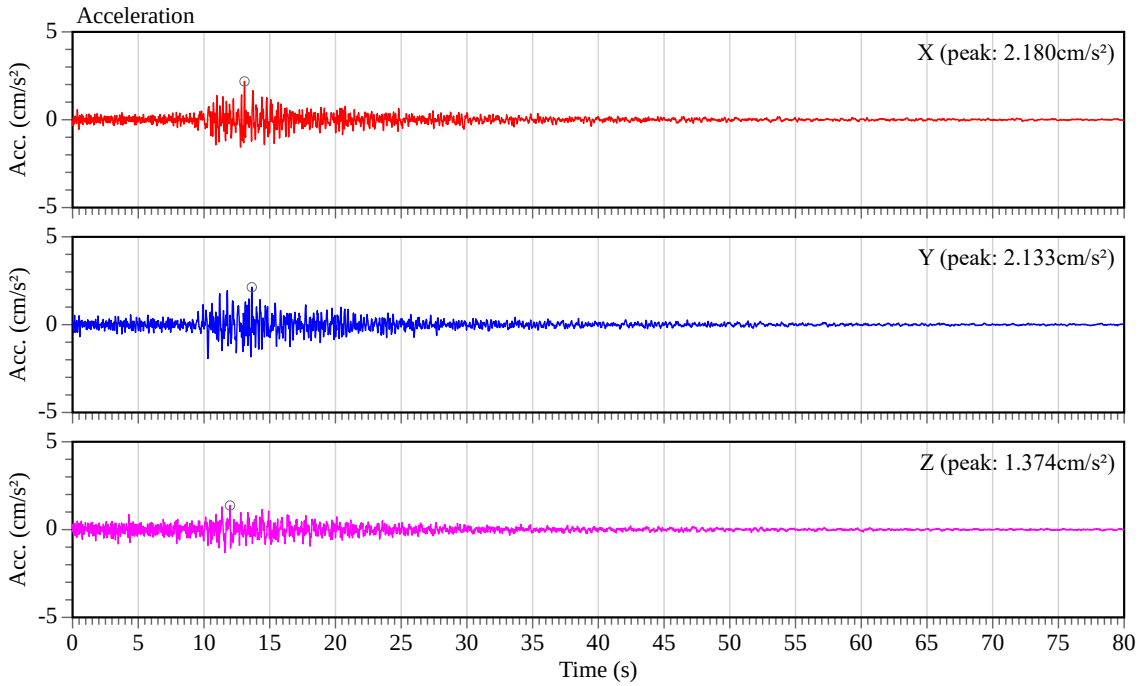


図 4.2-65　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

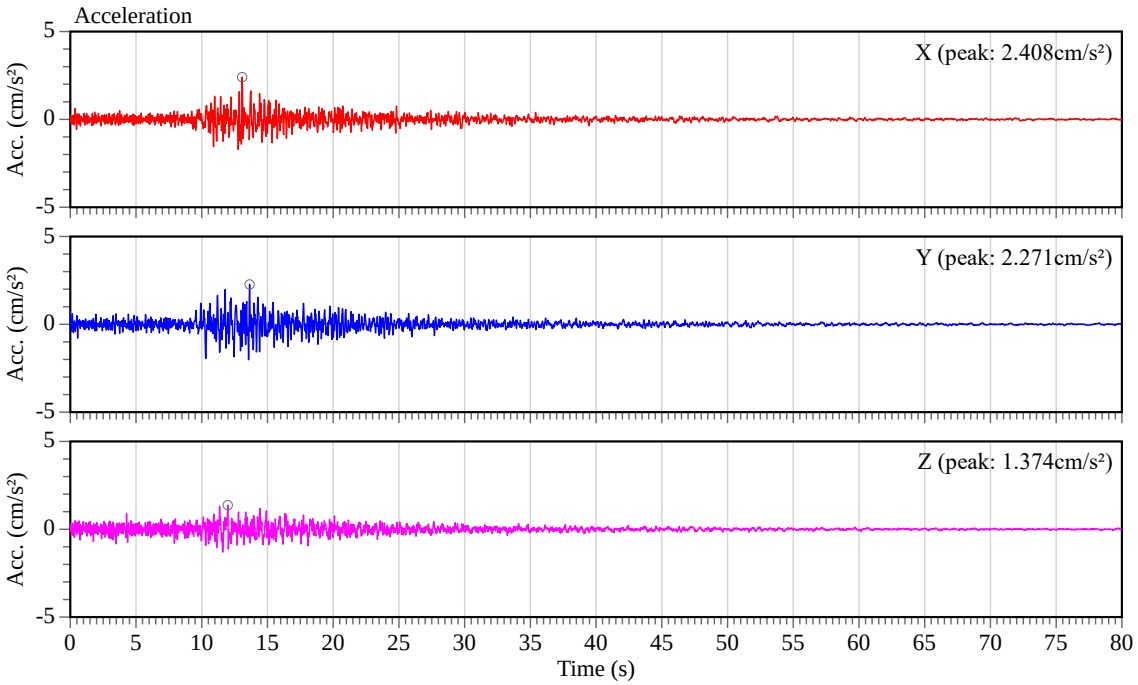


図 4.2-66　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

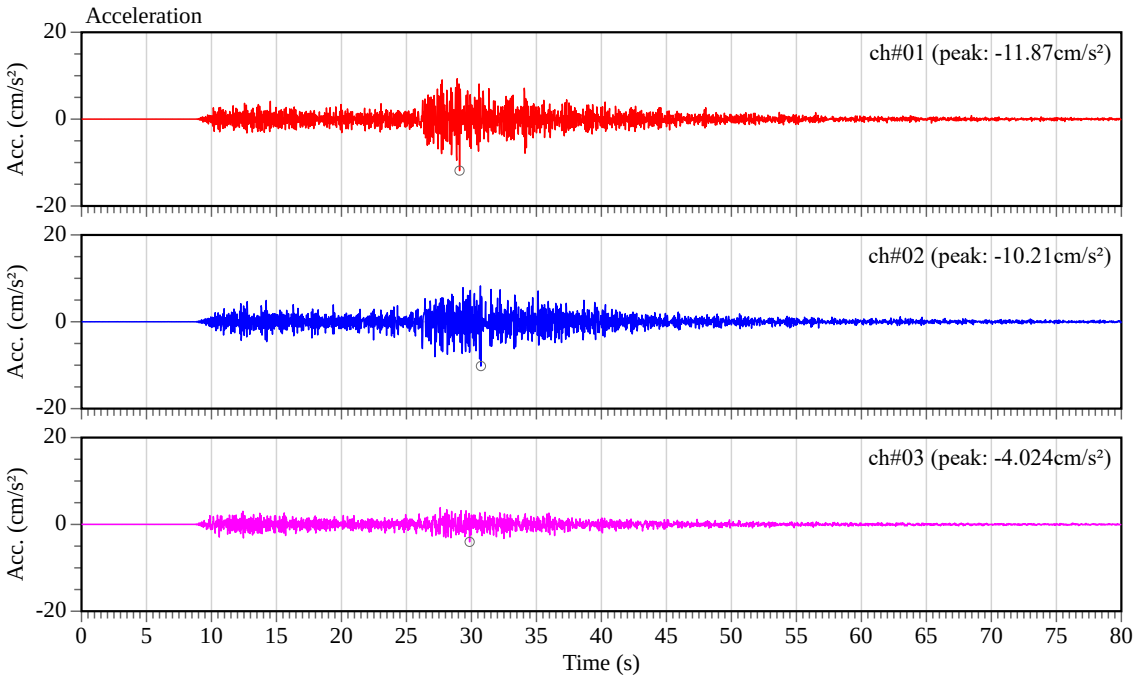


図 4.2-67　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

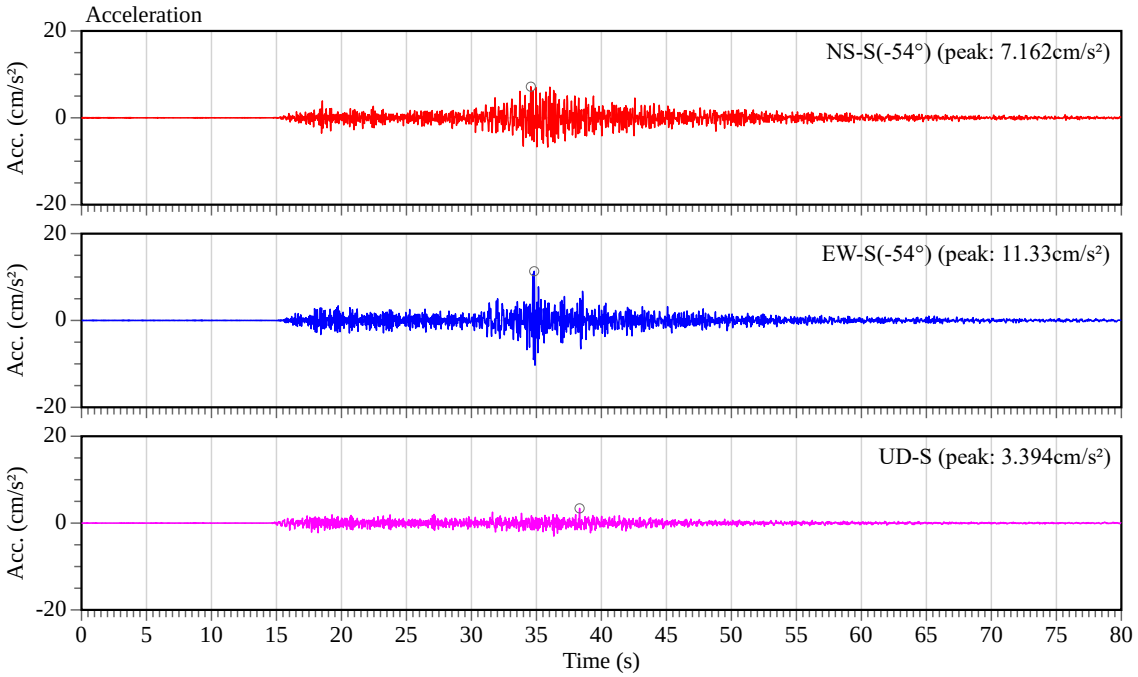


図 4.2-68　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

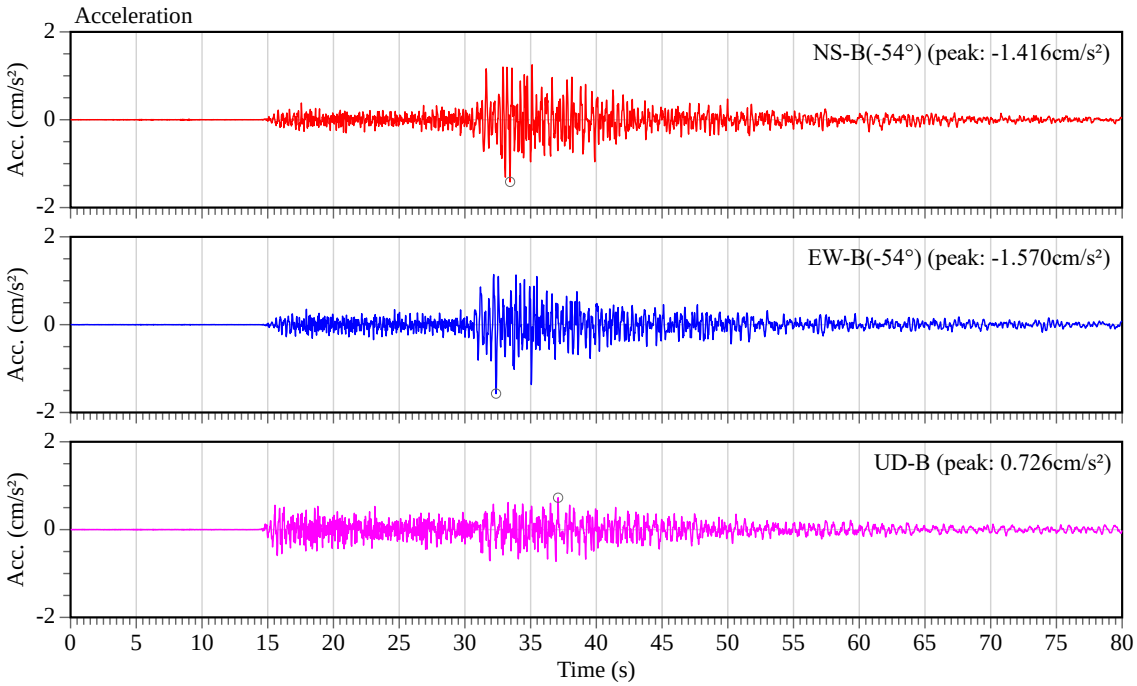


図 4.2-69　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.17　2021 年 11 月 8 日

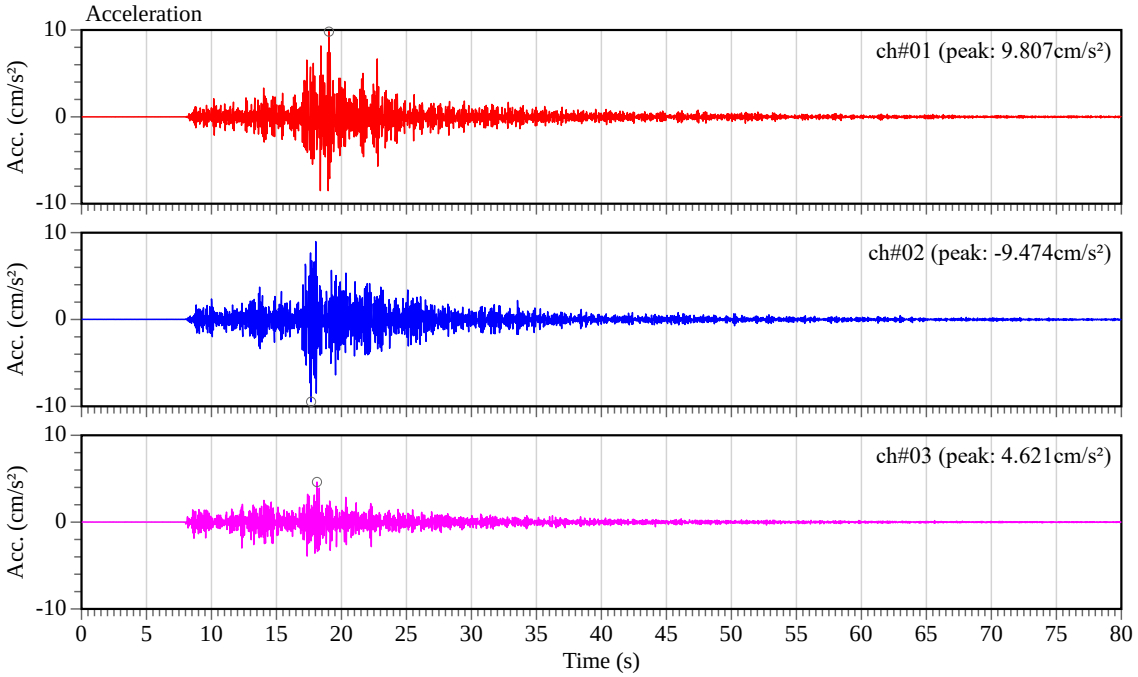


図 4.2-70　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

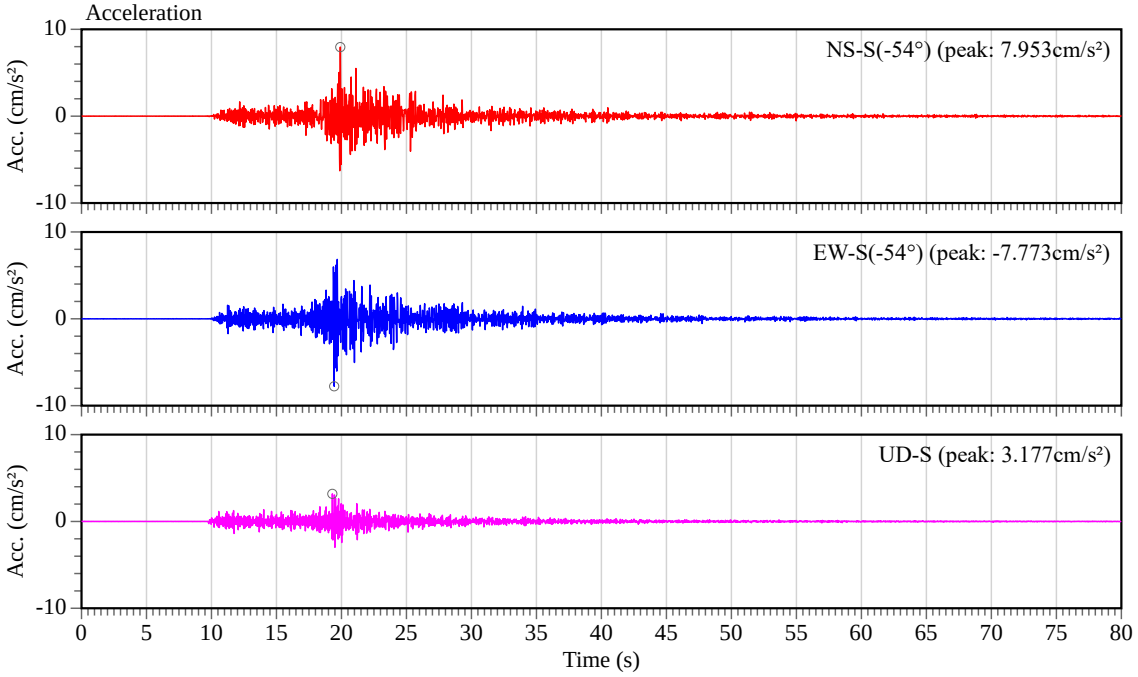


図 4.2-71　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

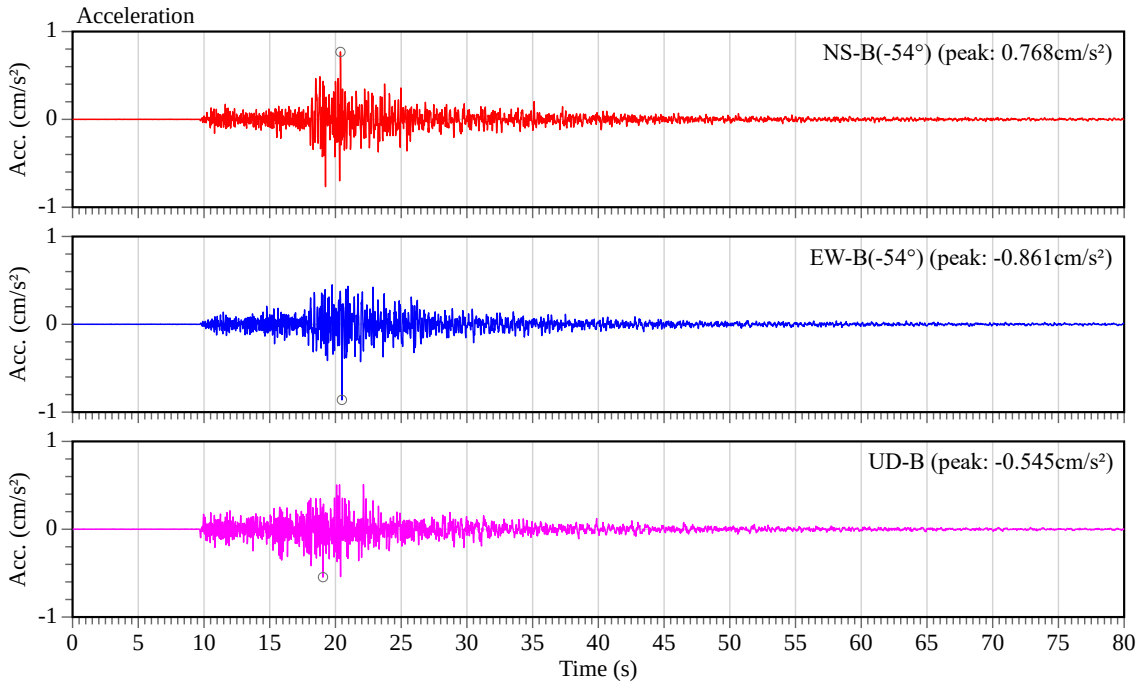


図 4.2-72　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.18　2021 年 11 月 14 日

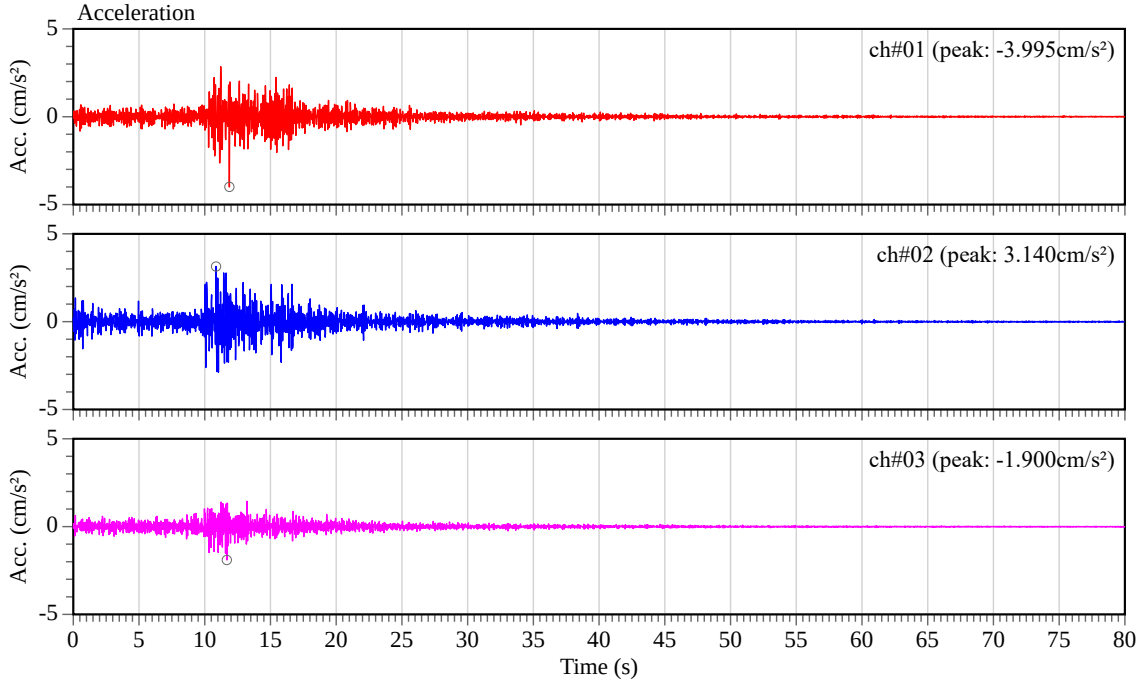


図 4.2-73　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

・No.19　2021 年 12 月 6 日

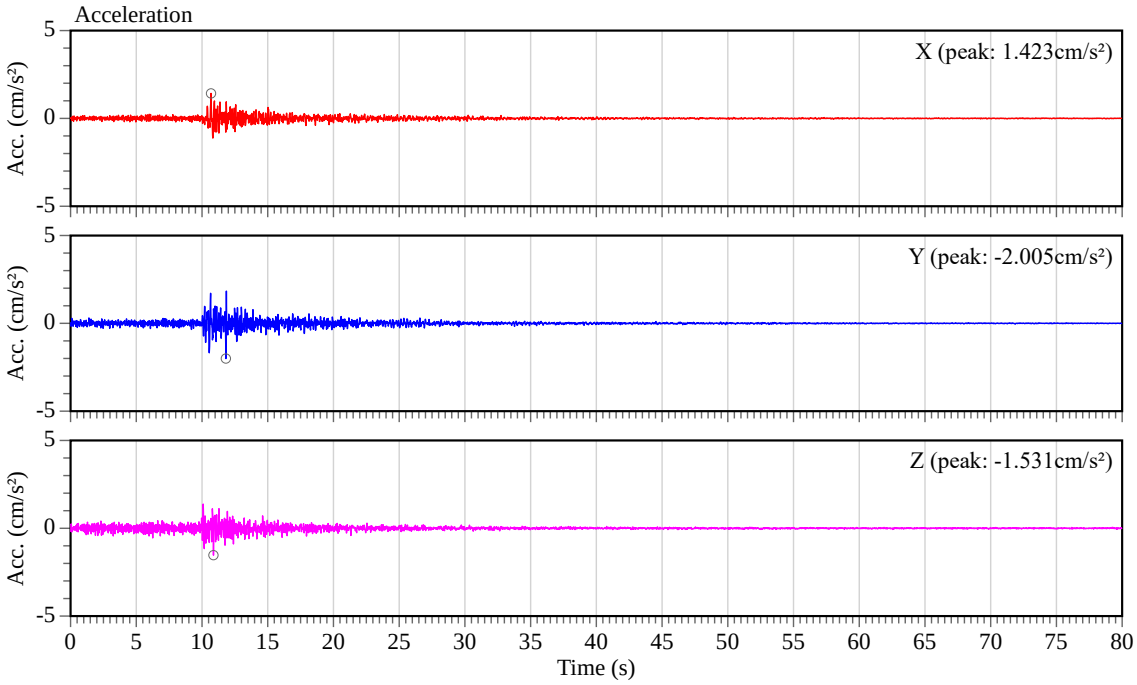


図 4.2-74　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

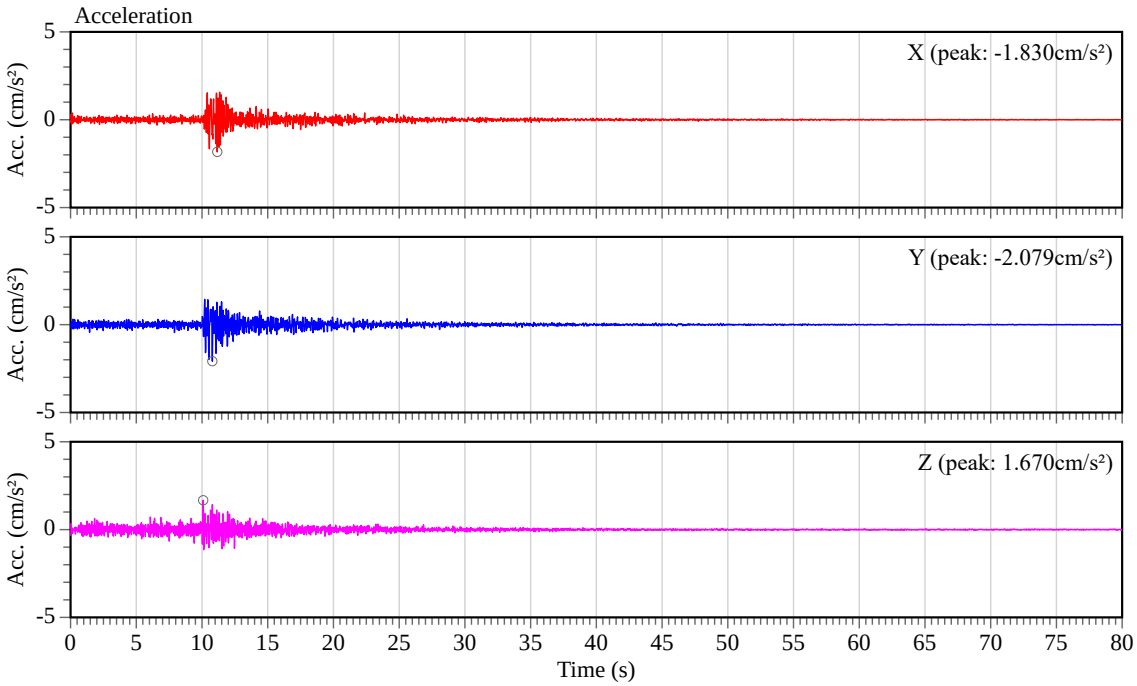


図 4.2-75　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

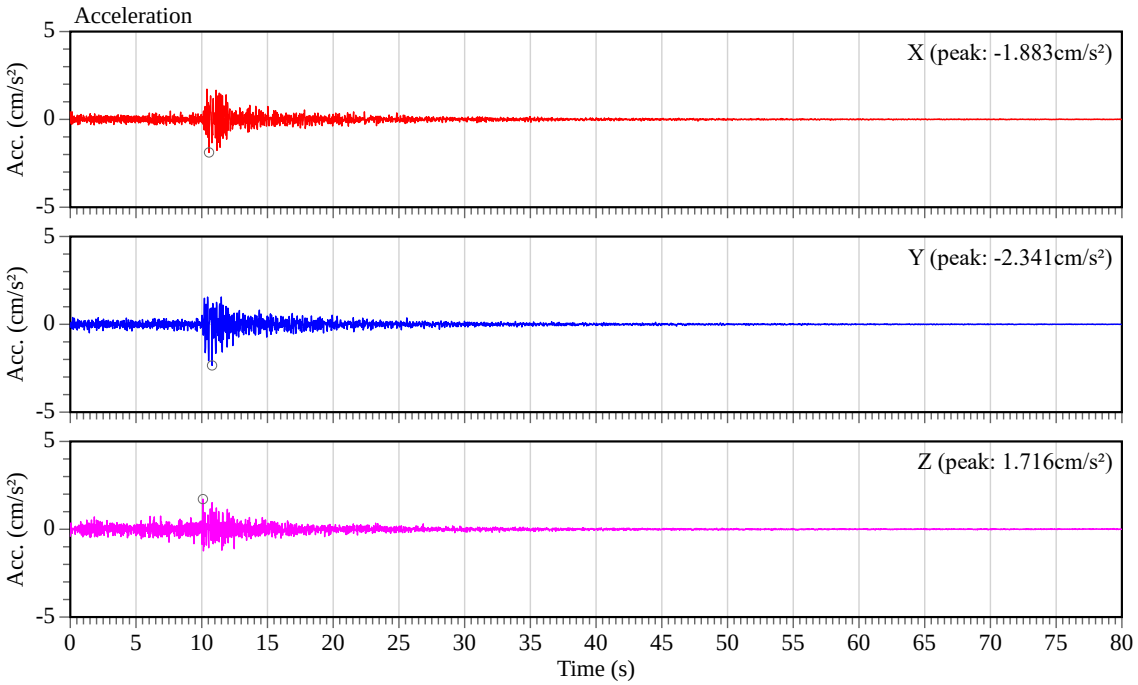


図 4.2-76　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

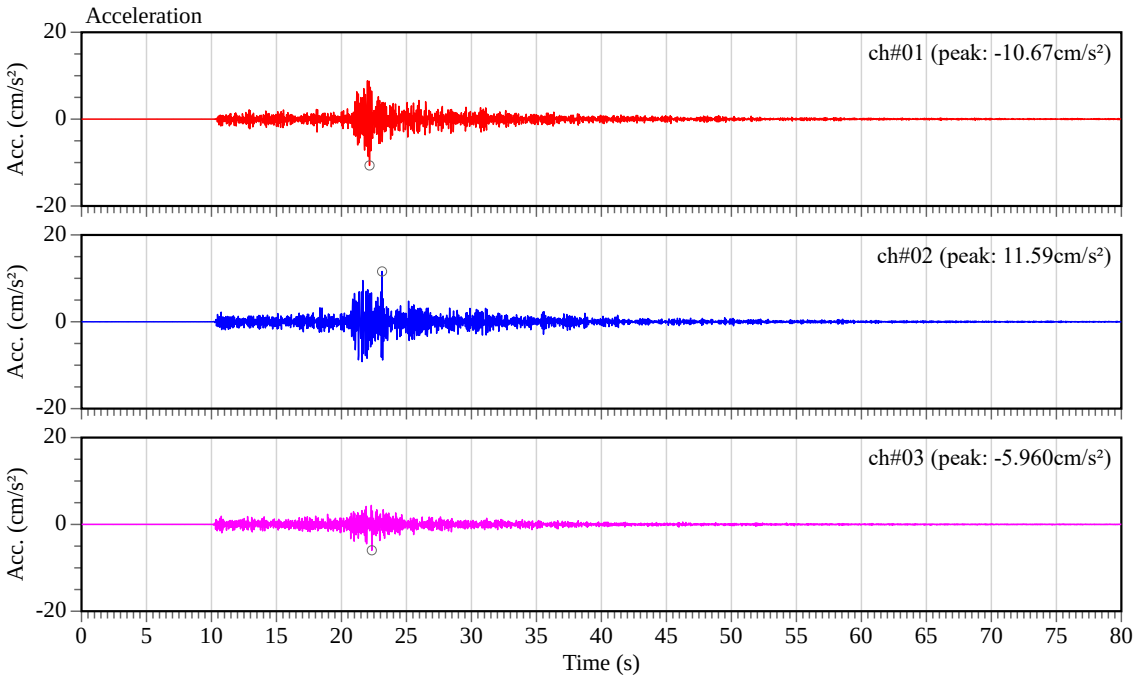


図 4.2-77　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

（6）計測坑 C の地震動データ

計測坑 C の地震動データについては、既存計器を用いている別研究のデータ（戸田建設（株）提供）を活用する。以下に計測坑 C の地震動データの波形を示す。

・No.1　2021 年 2 月 26 日

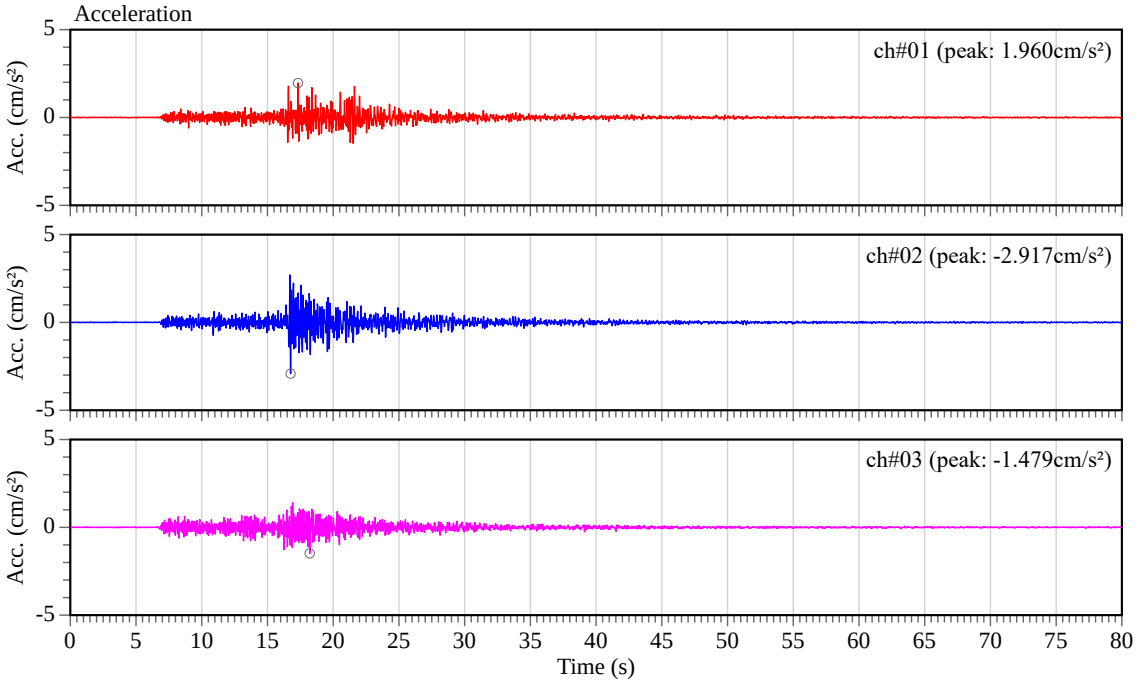


図 4.2-78　計測坑 C　地震動取得データ

・No.2　2021 年 3 月 20 日

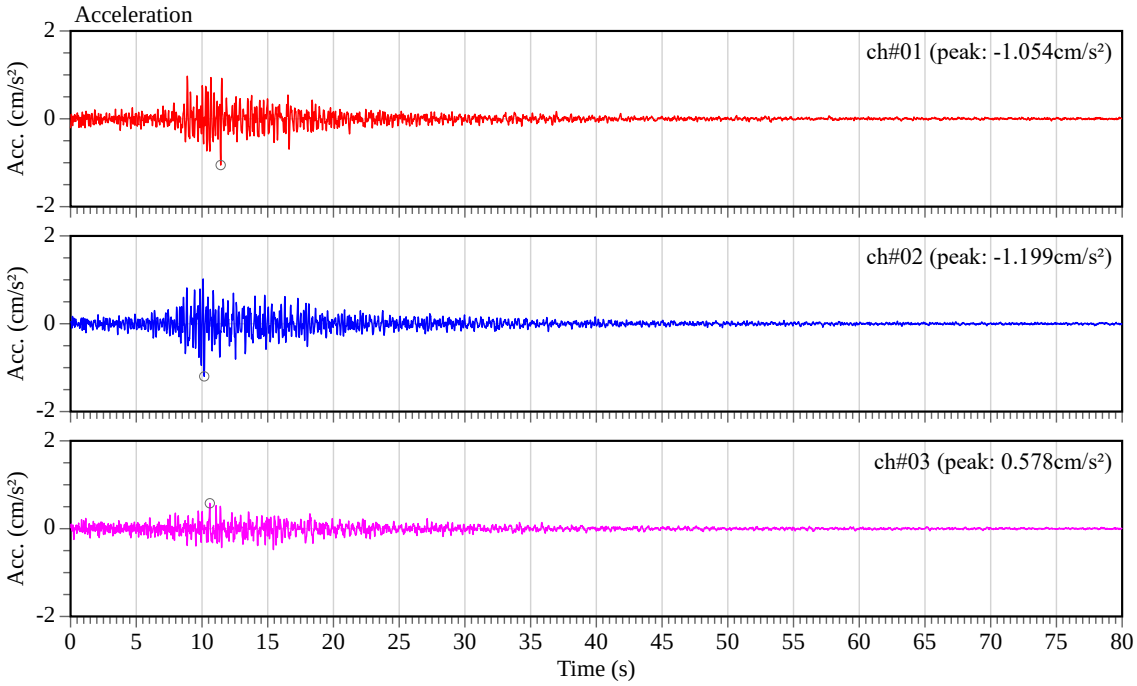


図 4.2-79　計測坑 C　地震動取得データ

・No.3　2021 年 3 月 20 日

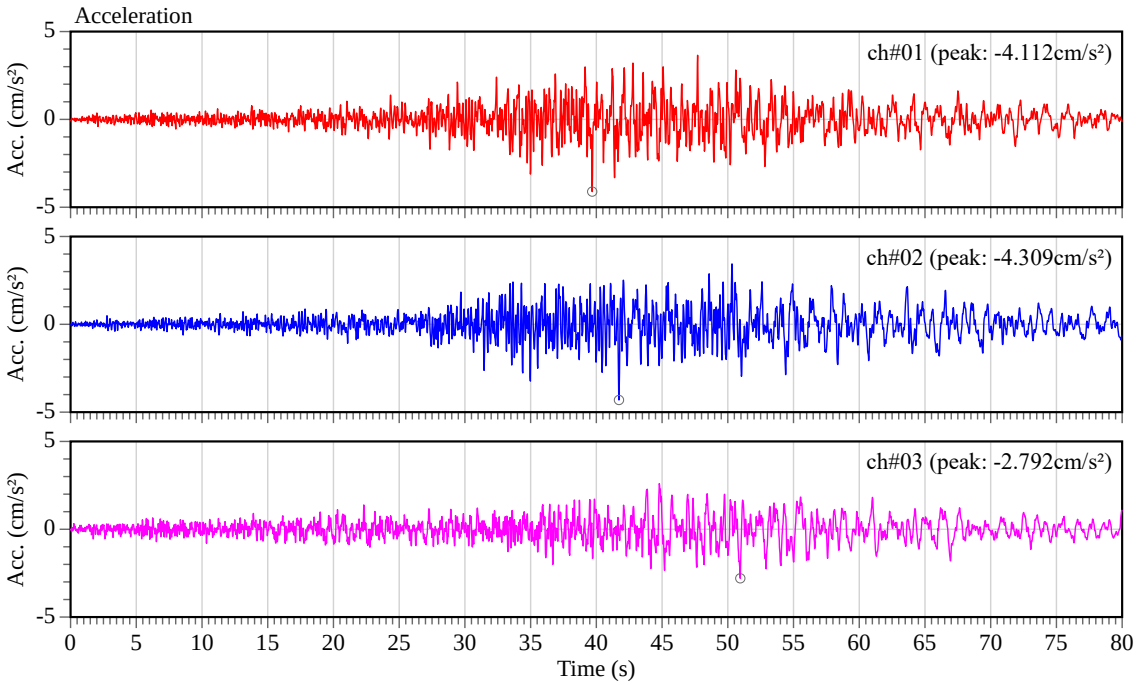


図 4.2-80　計測坑 C　地震動取得データ

・No.4　2021 年 4 月 1 日

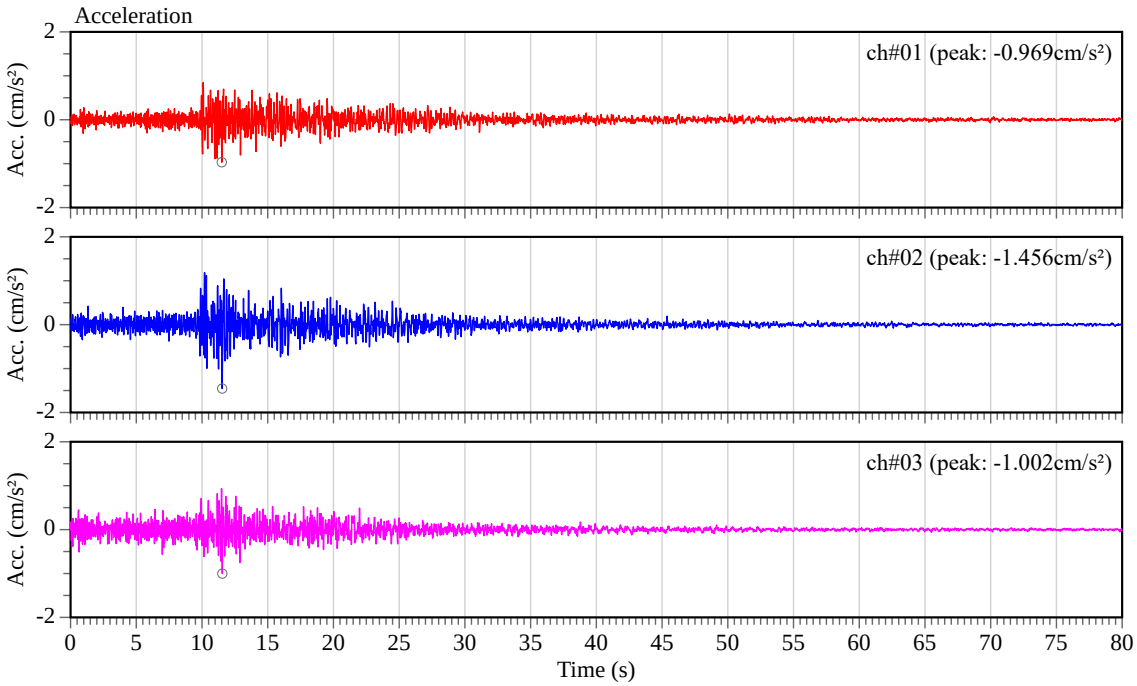


図 4.2-81　計測坑 C　地震動取得データ

・No.5　2021 年 4 月 14 日

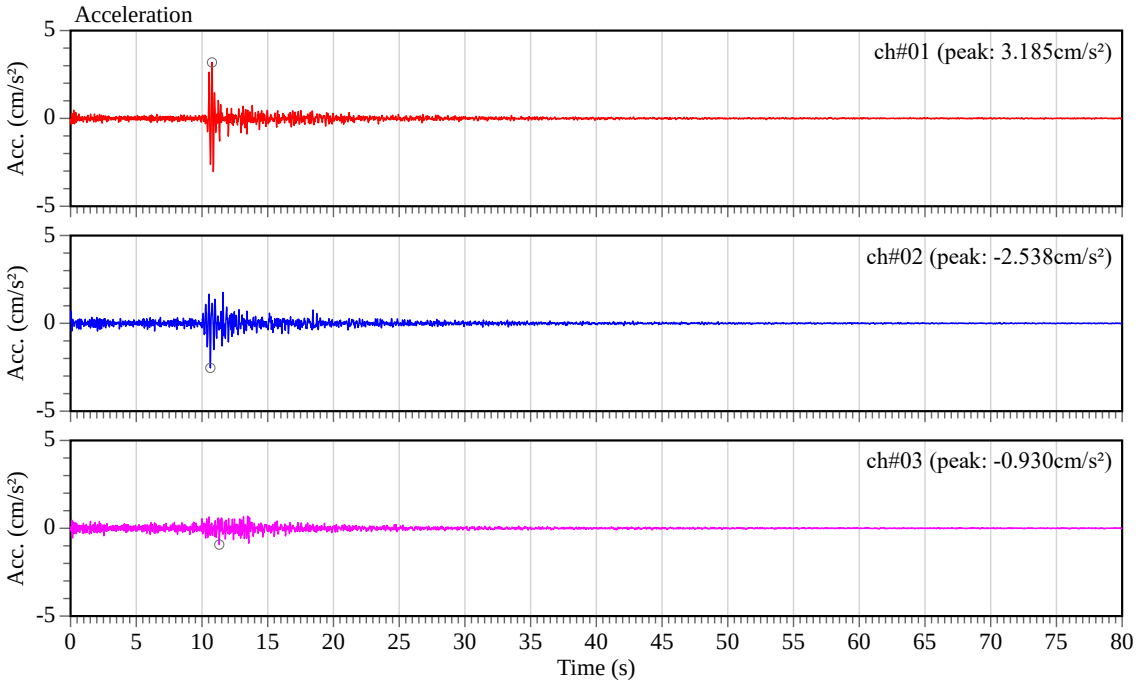


図 4.2-82　計測坑 C　地震動取得データ

・No.6　2021 年 5 月 1 日

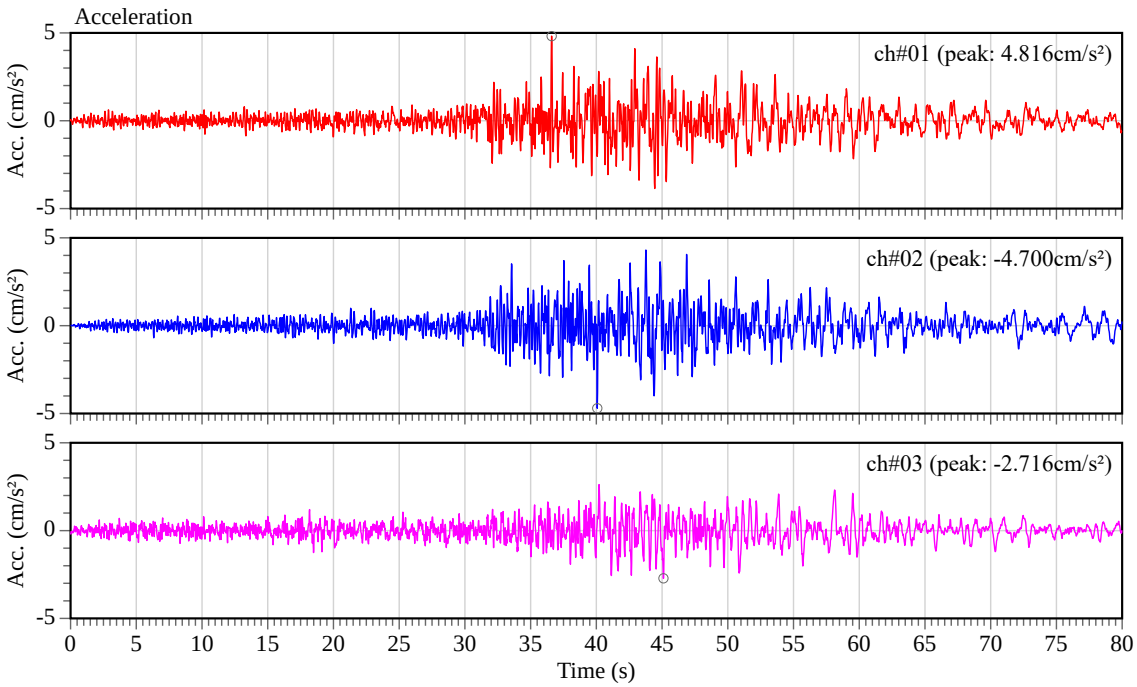


図 4.2-83　計測坑 C　地震動取得データ

・No.7　2021 年 5 月 14 日

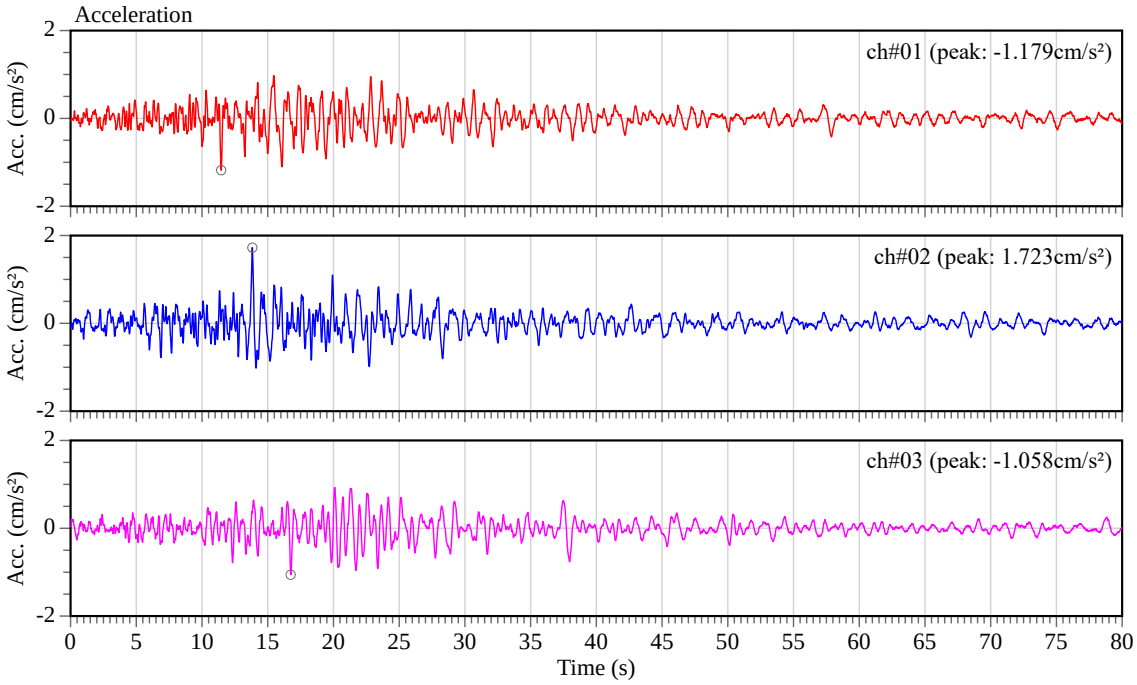


図 4.2-84　計測坑 C　地震動取得データ

・No.8　2021 年 6 月 9 日

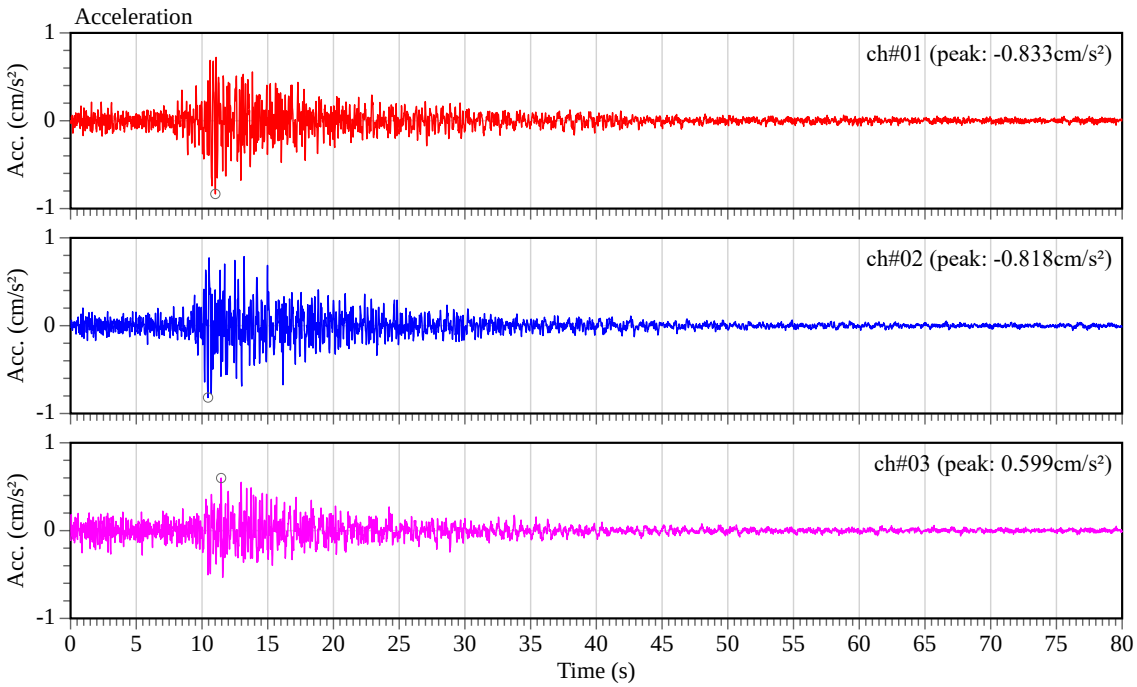


図 4.2-85　計測坑 C　地震動取得データ

・No.9　2021 年 6 月 9 日

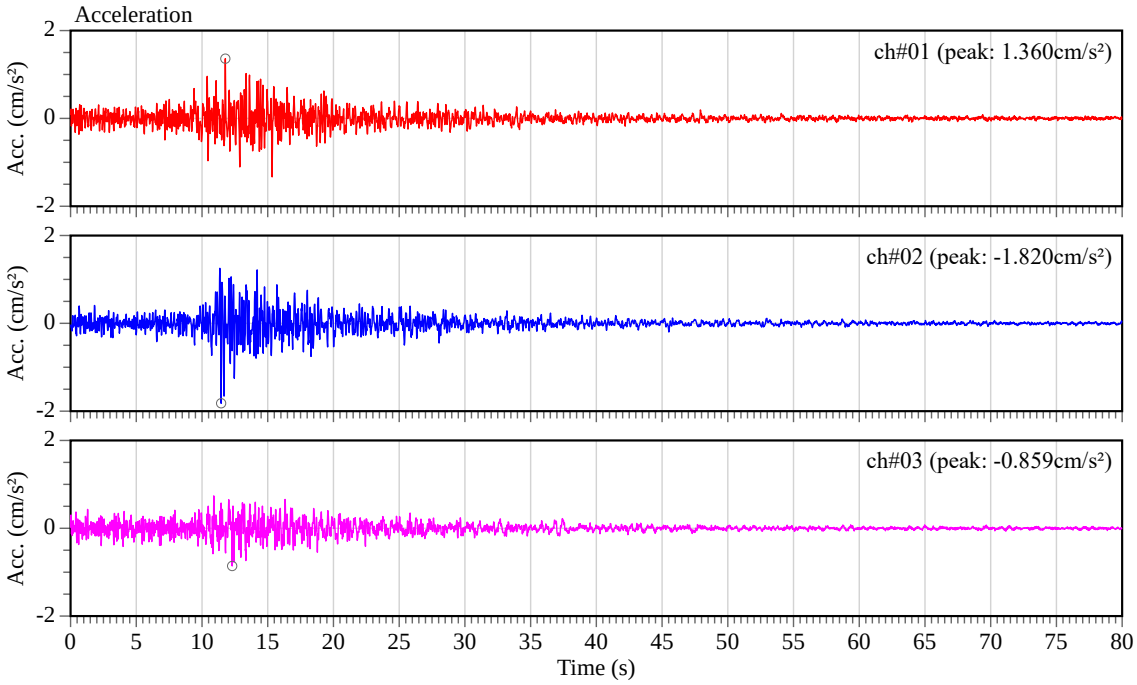


図 4.2-86　計測坑 C　地震動取得データ

・No.10　2021 年 6 月 20 日

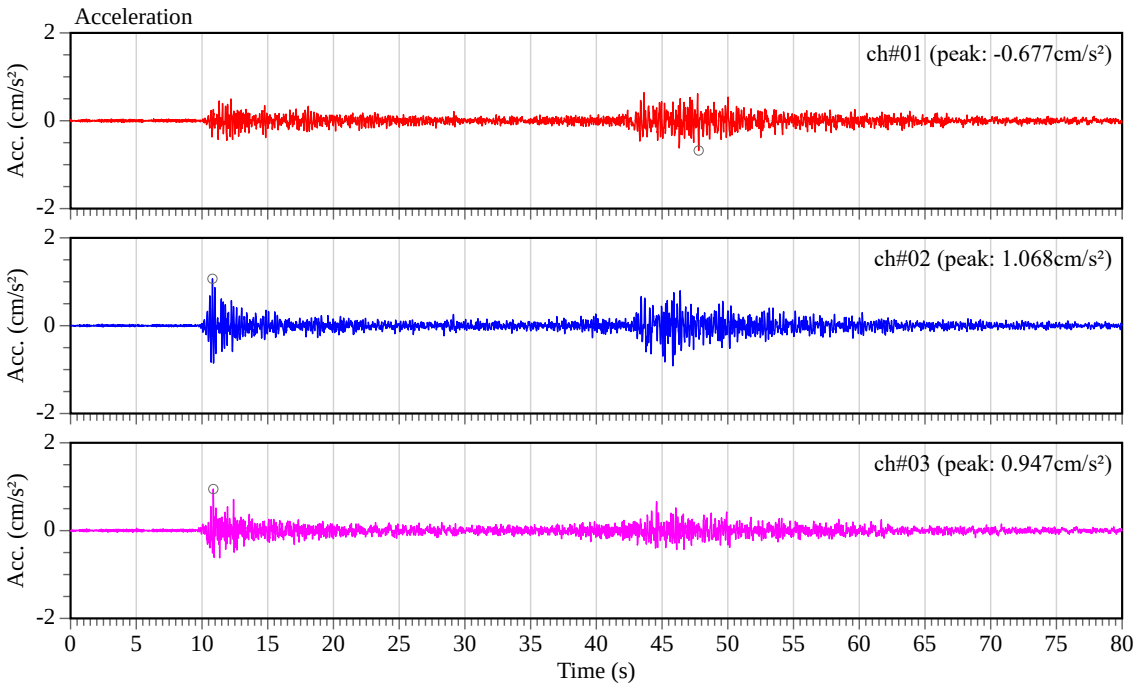


図 4.2-87　計測坑 C　地震動取得データ

・No.11　2021 年 7 月 26 日

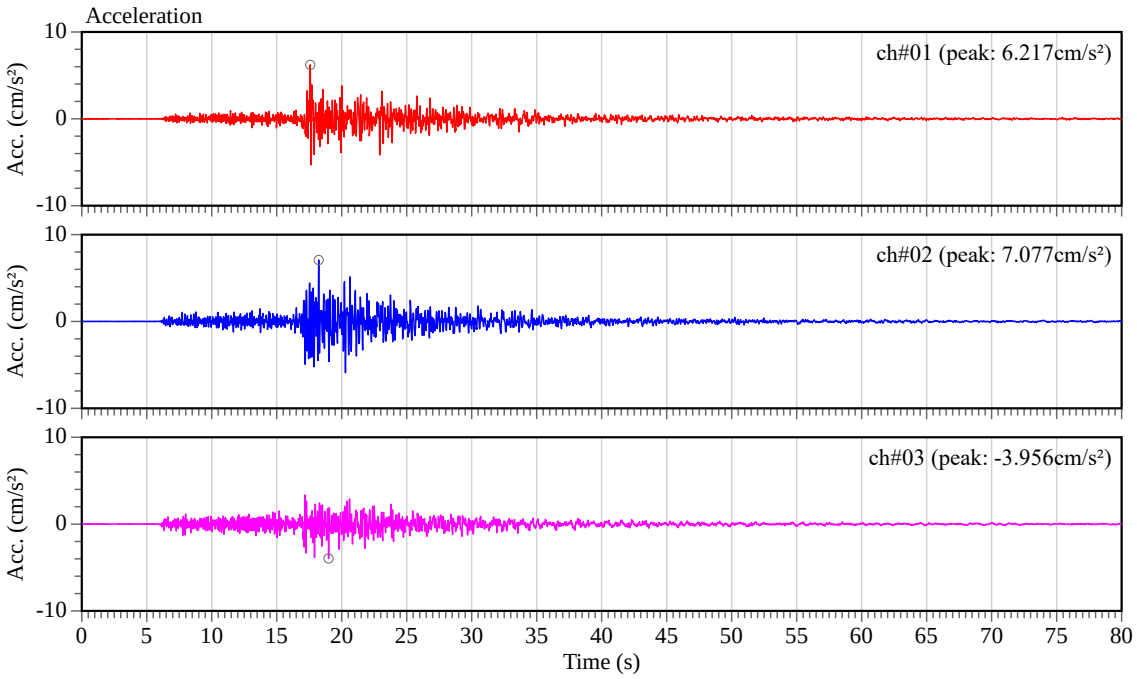


図 4.2-88　計測坑 C　地震動取得データ

・No.12　2021 年 8 月 20 日

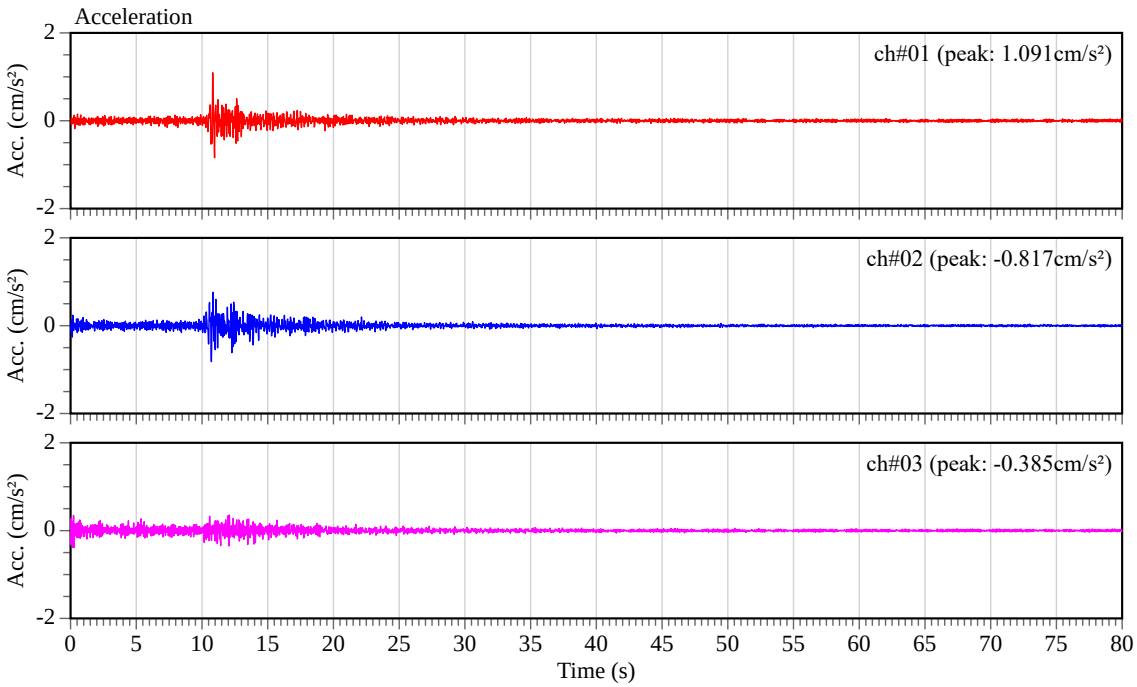


図 4.2-89　計測坑 C　地震動取得データ

・No.13　2021 年 9 月 29 日

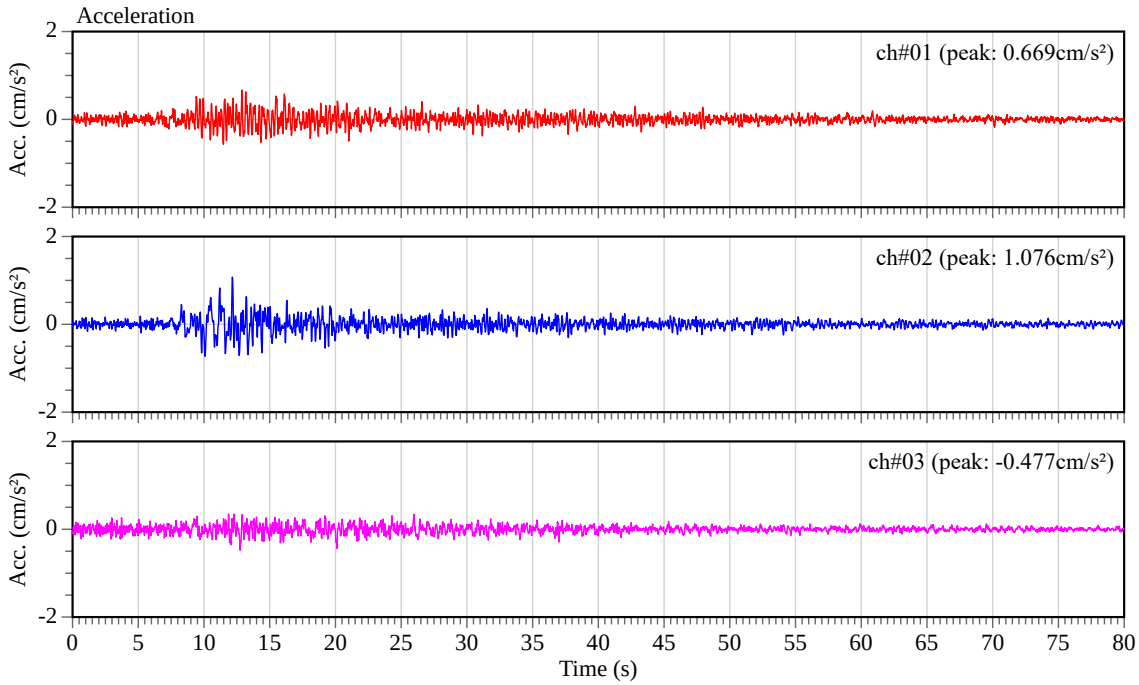


図 4.2-90　計測坑 C　地震動取得データ

計測坑 C のデータについては、今年度取得分に加えて、表 4.2-6 に示す過去年度における別研究のデータ（戸田建設（株）提供）もあわせて活用する。

表 4.2-6　過去年度における計測坑 C の地震動データ

過去 No.	日付・時刻	震源地	M	尾駮の震度
1	2014 年 8 月 10 日 12 時 43 分 18 秒	青森県東方沖	M6.1	3
2	2014 年 10 月 27 日 13 時 33 分 01 秒	青森県東方沖	M4.3	1
3	2016 年 1 月 14 日 12 時 25 分 33 秒	浦河沖	M6.7	3
4	2017 年 9 月 27 日 5 時 22 分 11 秒	岩手県沖	M6.1	2
5	2018 年 1 月 24 日 19 時 51 分 19 秒	青森県東方沖	M6.3	3
6	2018 年 9 月 6 日 3 時 07 分 59 秒	胆振地方中東部	M6.7	3
7	2019 年 8 月 15 日 14 時 32 分 53 秒	青森県三八上北地方	M5.5	3
8	2019 年 12 月 19 日 15 時 21 分 33 秒	青森県東方沖	M5.5	3

・過去 No.1　2014 年 8 月 10 日

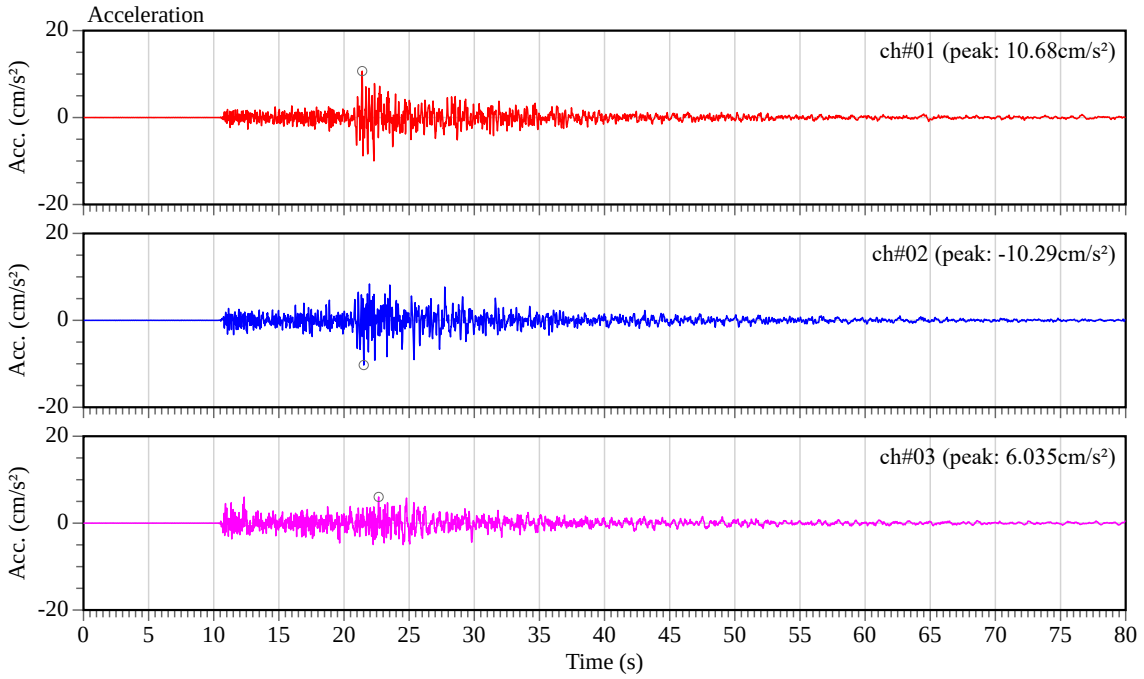


図 4.2-91　計測坑 C　地震動取得データ（過去分）

・過去 No.2　2014 年 10 月 27 日

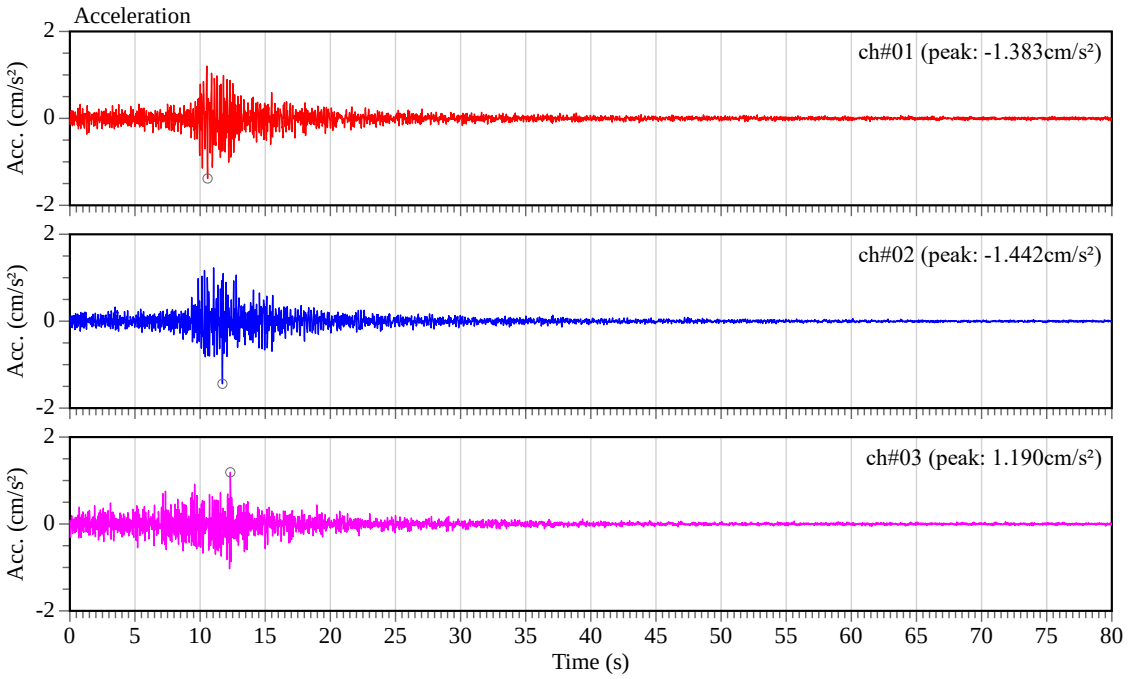


図 4.2-92　計測坑 C　地震動取得データ（過去分）

・過去 No.3　2016 年 1 月 14 日

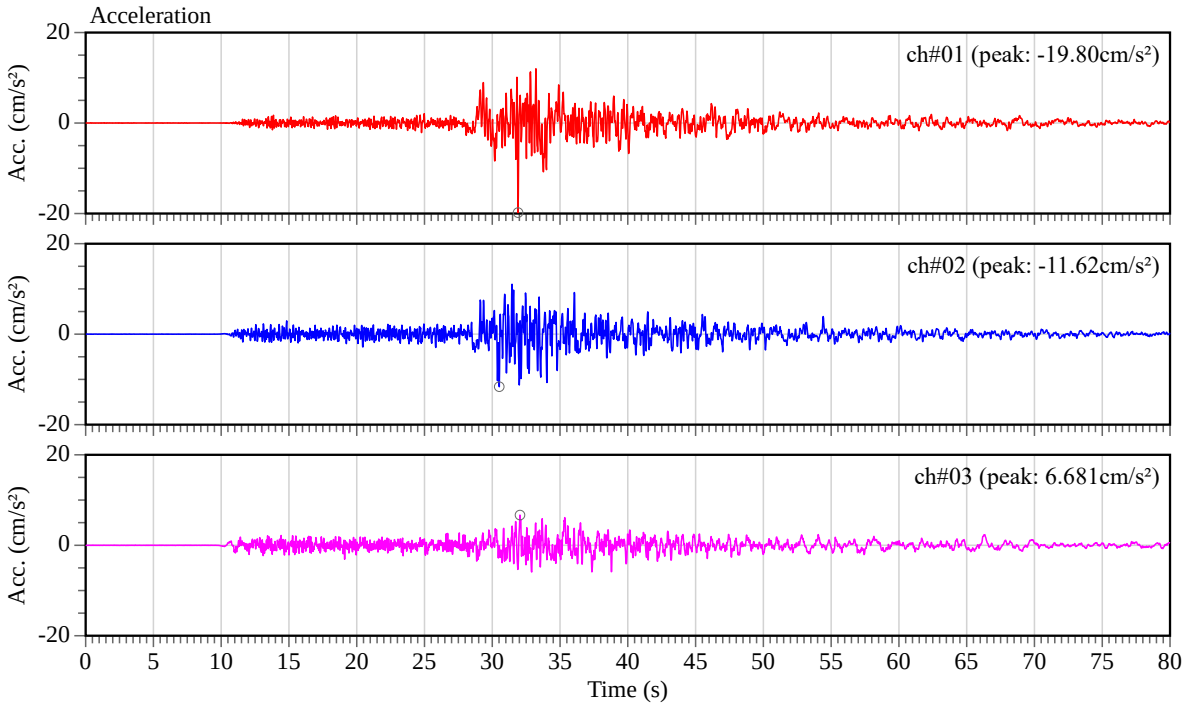


図 4.2-93　計測坑 C　地震動取得データ（過去分）

・過去 No.4　2017 年 9 月 27 日

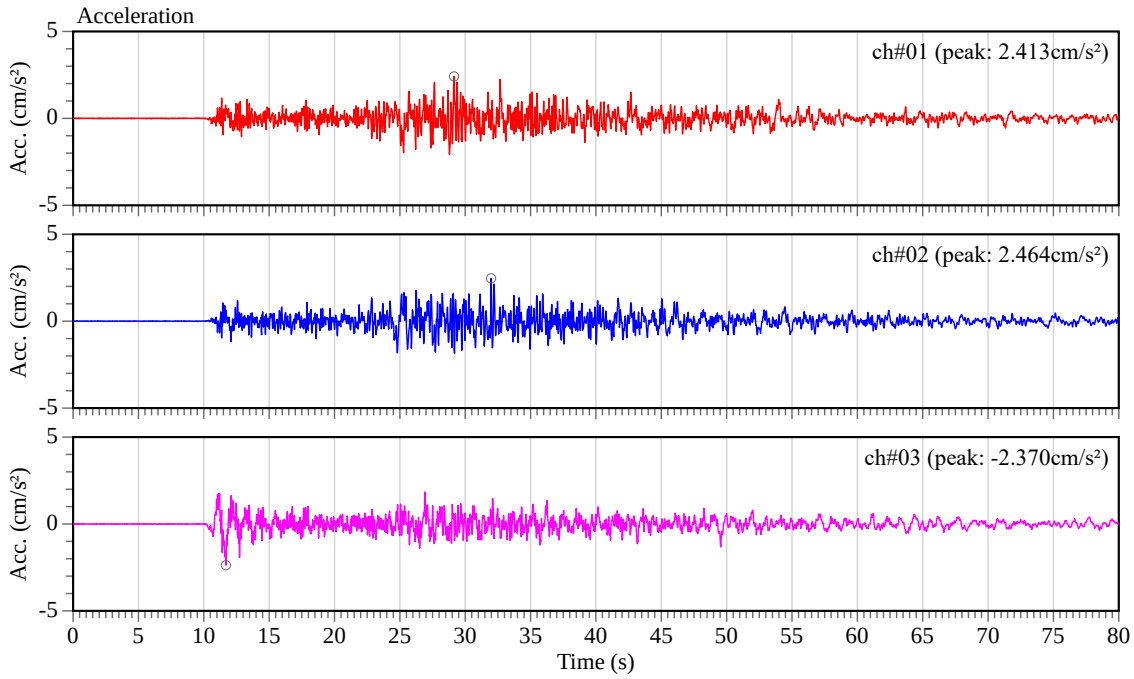


図 4.2-94　計測坑 C　地震動取得データ（過去分）

・過去 No.5　2018 年 1 月 24 日

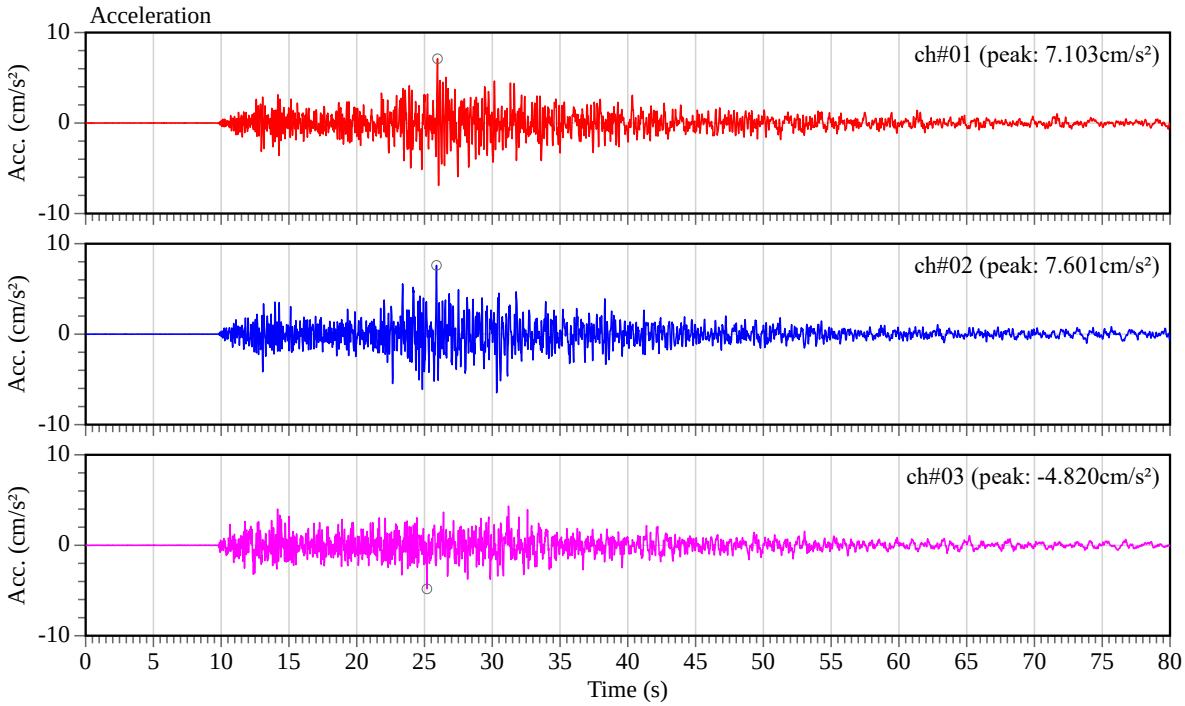


図 4.2-95　計測坑 C　地震動取得データ（過去分）

・過去 No.6　2018 年 9 月 6 日

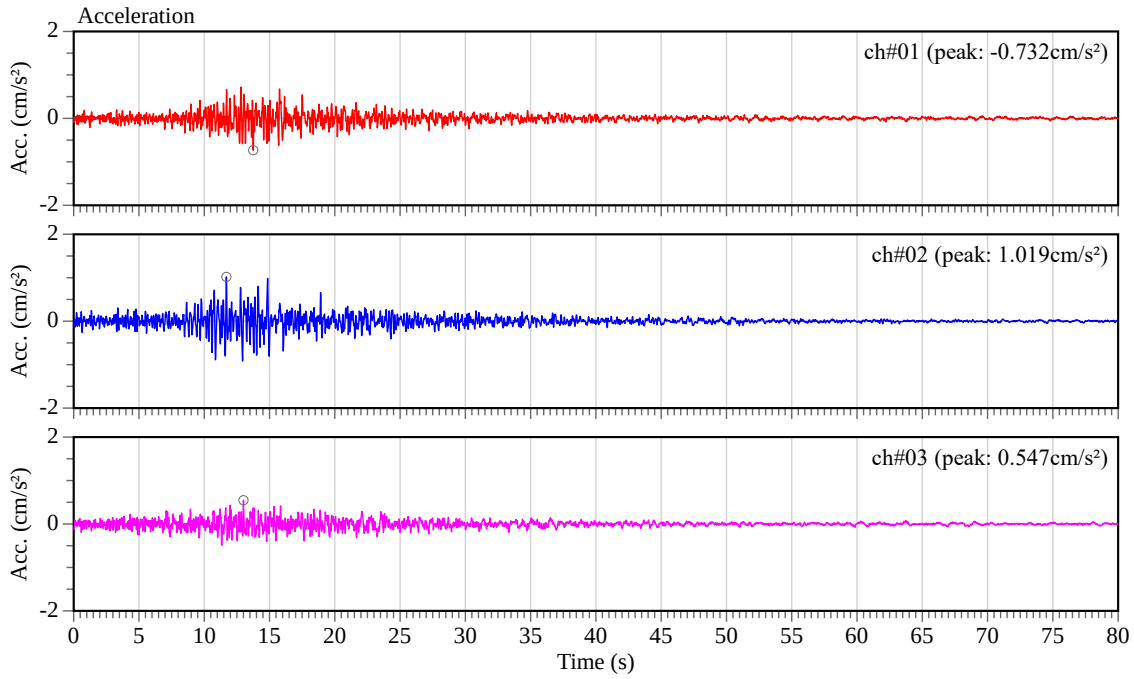


図 4.2-96　計測坑 C　地震動取得データ（過去分）

・過去 No.7　2019 年 8 月 15 日

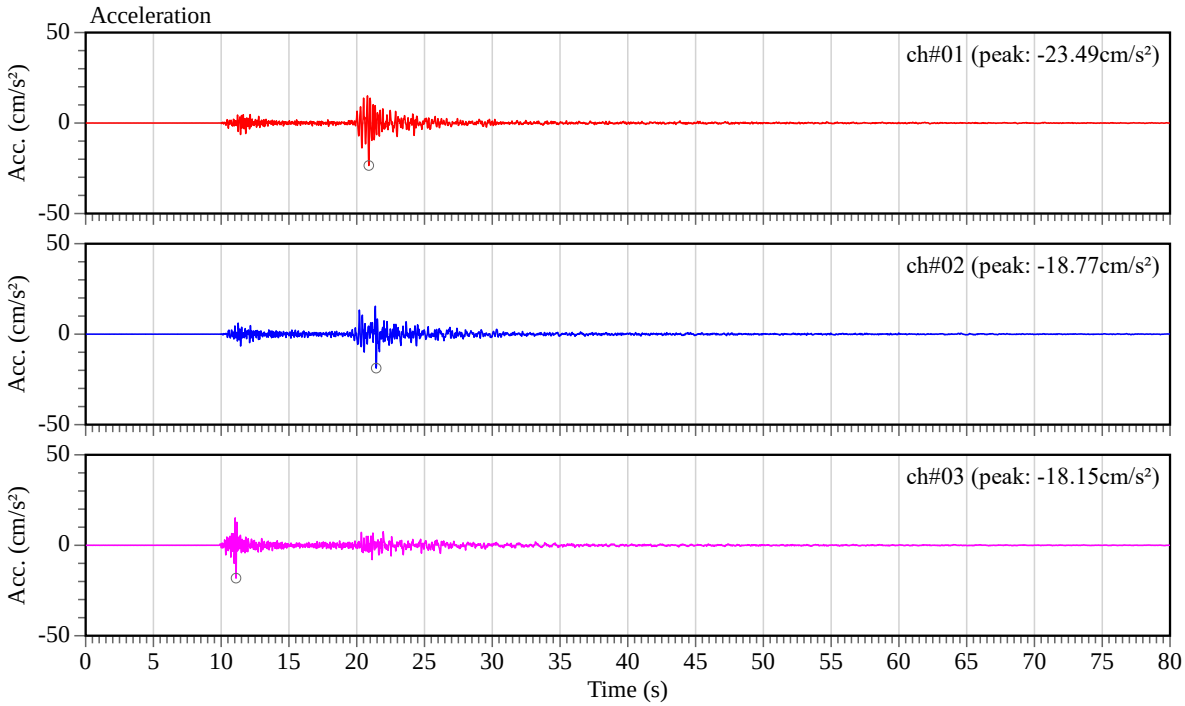


図 4.2-97　計測坑 C　地震動取得データ（過去分）

・過去 No.8　2019 年 12 月 19 日

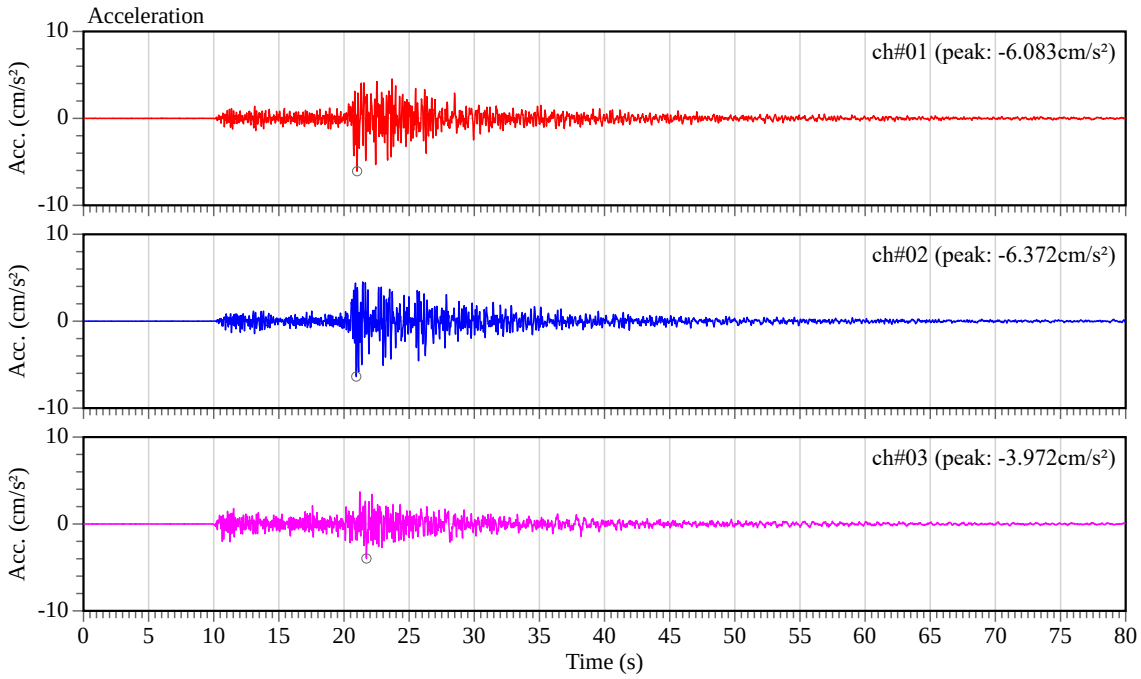


図 4.2-98　計測坑 C　地震動取得データ（過去分）

4.2.4　地下の地震計測システムの見直し

地下の地震観測システムの見直しとして、昨年度の検討を受け、地下の計測坑 C にて別研究の既存計器で観測している地震動データを活用することとした。

（1）計測坑 C の地震観測の状況

計測坑 C に設置している既存の地震計の設置位置を図 4.2-99 に示す。

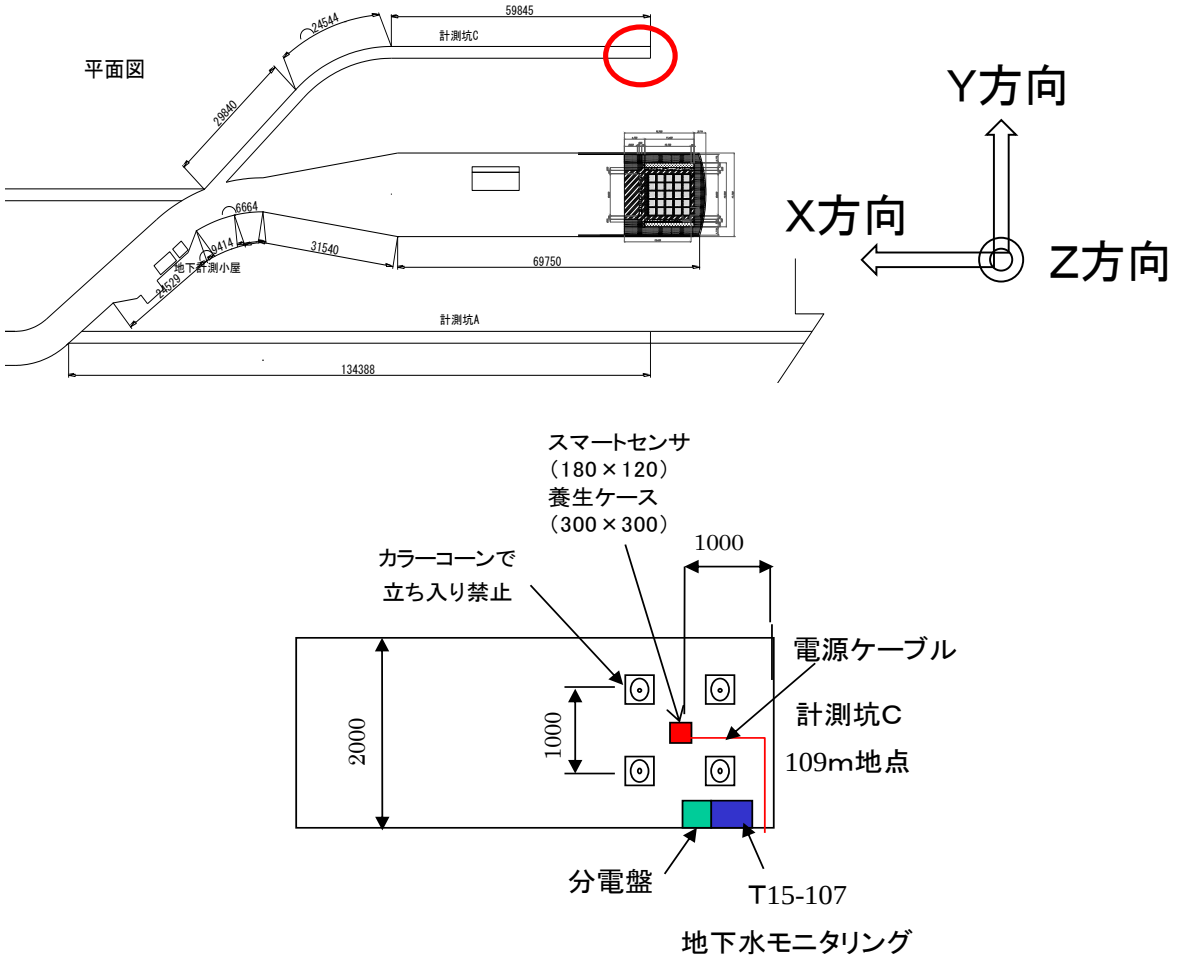


図 4.2-99　地震計設置位置平面図（計測坑 C）

計測孔 C の地震計は LAN ケーブルと光ケーブル、電源ケーブルを通じて JNFL 現場計測室と接続されている。別研究では、この計測孔 C の地震計のほか、下記の 3 台の地震計が設置されており、JNFL 現場計測室と接続されている。

・地震計（東京測振製）　計測孔 C　先端部付近
・地震計（富士電機製）　試験空洞　JNFL 現場計測室の土台コンクリートの上
・地震計（富士電機製）　試験空洞　コンクリートピット上

計測孔 C の地震計（東京測振製）は単独、試験空洞の 2 台の地震計（富士電機製）はネットワークで接続されている。ここで、本検討でデータを活用するのは、計測孔 C の地震計（東京測振製）である。

JNFL 現場計測室の機器配置のネットワーク図を図 4.2-100 に示す。

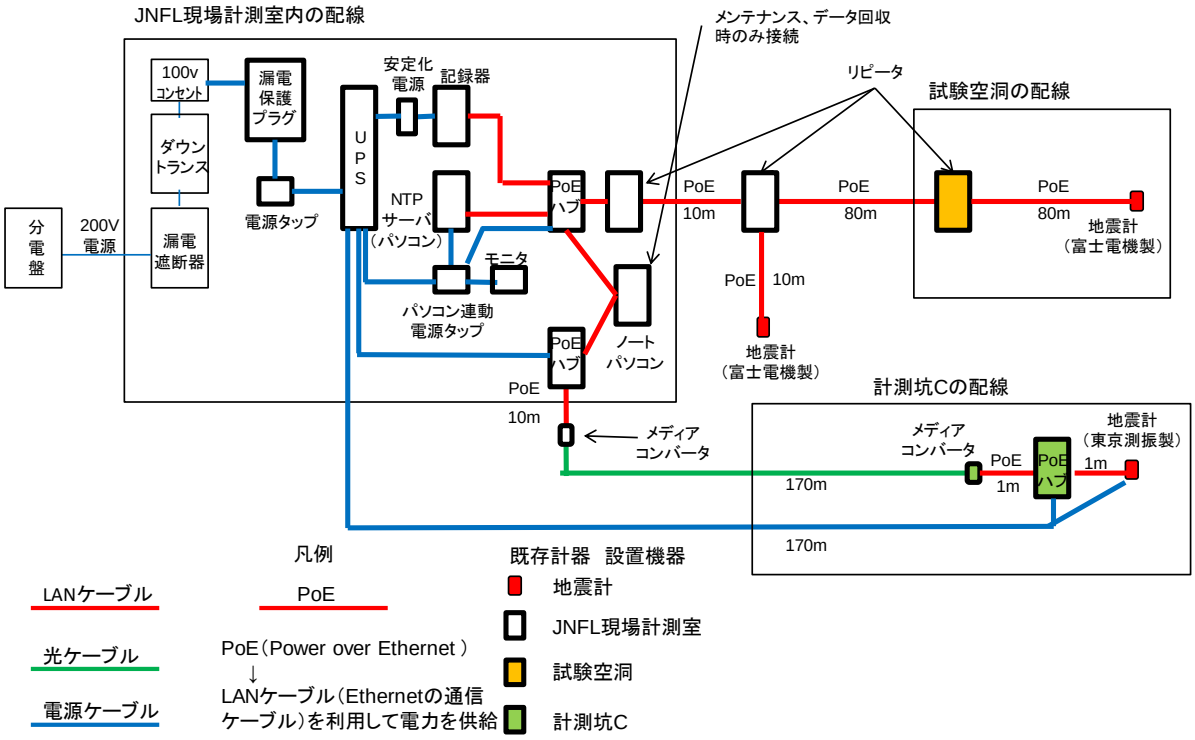
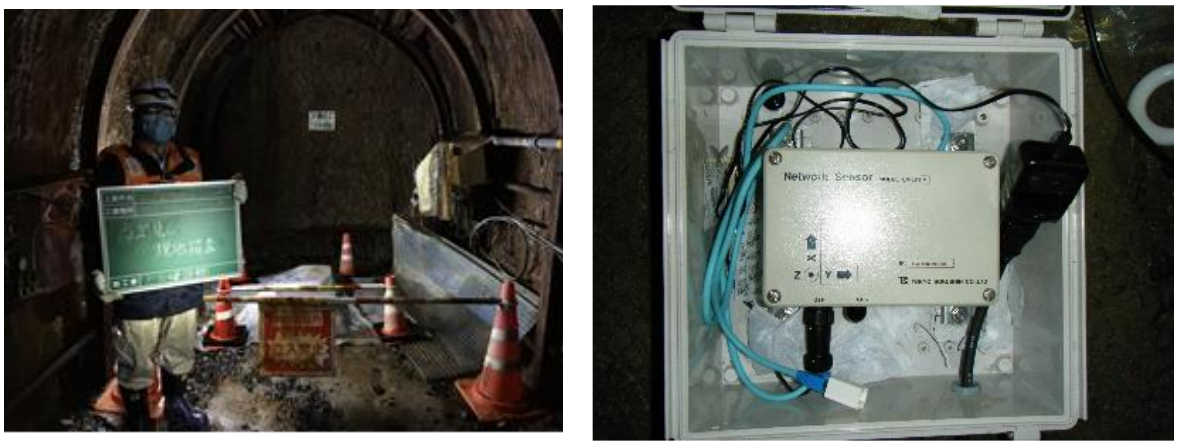


図 4.2-100　JNFL 現場計測室　既存計器の機器設置のネットワーク図

計測坑 C の地震計の仕様を表 4.2-7、地震計の設置状況を図 4.2-101 に示す。

表 4.2-7　地震計（東京測振製）の仕様（計測坑 C）

名称	仕　様	機　種
地震計（小型サーボ型加速度計）	計　測　範　囲：±2.0G 周 波 数 応 答：DC～100Hz 分　　解　　能：10mGalp-p 以下（サンプリング周波数 100Hz、2000Gal フルスケール時） ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ周波数：100Hz、200Hz（設定値） 送 信 周 波 数：0.5sec（200Hz） 1.0sec（100Hz） 使　用　条　件：使用温度範囲：0℃～50℃ 保護等級　　：IP65	東京測振製 ネットワークセンサ CV-374B



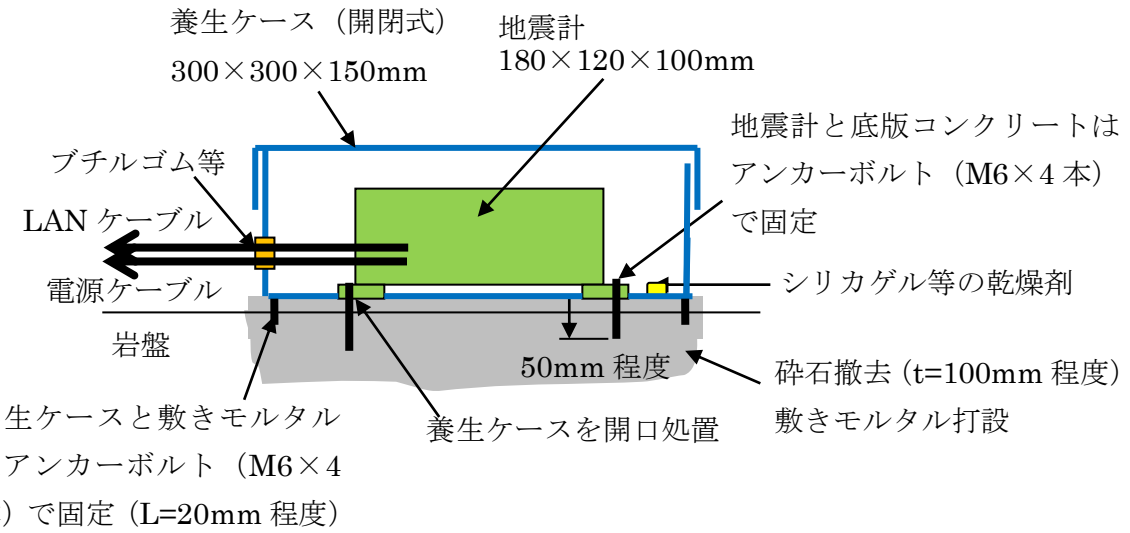


図 4.2-101　地震計の設置状況（計測坑 C）

地震計は、岩盤面に打設したコンクリートの土台上に設置し、プラスチックケースをかぶせて養生している。地震計以外のメディアコンバータ、ハブについては、地震計の直近で別のプラスチックケースに入れて設置している。

データは地震計内部のメモリーカードに保管され、現場計測室のパソコンから遠隔でデータをダウンロードする。

本検討で用いている富士電機製の地震計のデータとデータ形式が異なるため、CSV 形式に変換し、データ分析を行う場合には手動で同期をとる必要がある。

4.2.5　地表面の地震計設置

地震観測システムの見直しとして、地表面への地震計の設置を行い、地震動観測を開始した。地表面の設置場所は、昨年度の検討を受け、試験空洞の直上付近とした。

(1) 実施概要

地表面の地震計は、試験空洞の直上付近に設置する。設置場所の地表面は草地になっているので、重機で整地を行い、計測小屋を設置する。また、地震計稼働の電力確保のため太陽光発電を用いることとし、ソーラーパネルを計測小屋の付近に設置する。

(2) 地震計の設置方法

地震計設置予定位置の表層は火山灰層であり、コンクリートの土台を構築し、土台の上に地震計を設置する。地震計の設置場所、土台の形状については、気象庁の「震度計設置環境基準」及び「正確な震度観測を行うために」（以下、「気象庁基準*」という。）を参考とする。

＊気象庁基準について

「震度計設置環境基準」

初版 平成 21 年 5 月 13 日、改定 平成 21 年 10 月 26 日

「正確な震度観測を行うために」

初版 平成 17 年 8 月、更新 平成 21 年 11 月 30 日、更新 平成 31 年 3 月 1 日

この気象庁基準は、気象庁や地方公共団体等が設置する震度計を新設、移設等を行い、気象庁が発表する地震情報に利用する場合に準拠すべき基準であり、本検討では準拠することが必須ではないが、岩盤面やコンクリートピット上に設置している地下の地震計に比べて、地表面では、火山灰層という不安定な場所に設置することから、参考にすることとした。

気象庁基準で示されている地震計基礎の埋設の条件と構造図を図 4.2-102、今回の地震計基礎の施工状況を図 4.2-103、地震計の設置状況を図 4.2-104 に示す。

コンクリートの土台は、気象庁基準を参考に、周囲の地盤と一体となって震動するように、土台の高さの 2/3 程度以上を埋設させる。またコンクリート土台の形状は、気象庁の震度計台（凸型の鉄筋コンクリート製、上段：一辺 500mm 高さ 500mm、下段：一辺 1,000mm 高さ 600mm）と同様の形状とし、土台の下には荷重分散と沈下防止のため、厚さ 200mm の基礎砕石を敷く。土台に用いるコンクリートは現場打設する。地震計はアンカーボルトでコンクリートの土台にしっかりと固定し、地震計は保護カバーで養生し、湿気予防のため、地震計近傍に乾燥剤を置く。乾燥剤は、メンテナンス時に必要に応じて交換する。また地震計の時刻の制御（ただし、地下の地震計との時刻合わせは行わない）のため屋外に GPS アンテナを設置する。設置場所は積雪時に埋まらないことも考慮し、ソーラーパネルの架台の最上部とする。

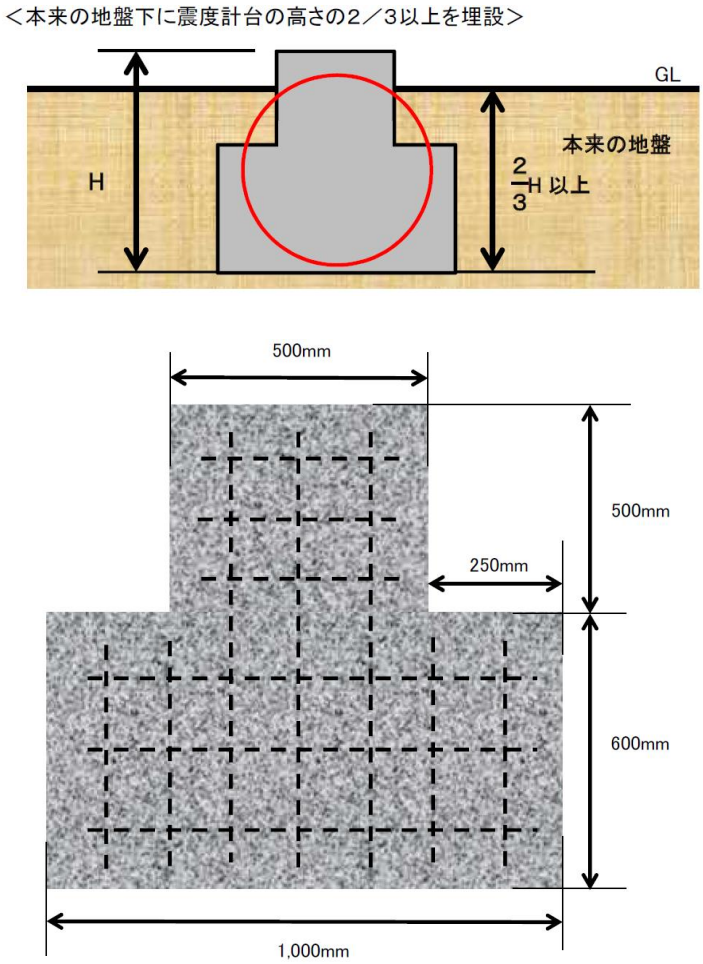


図 4.2-102　地震計基礎の埋設の条件と構造図（気象庁基準）

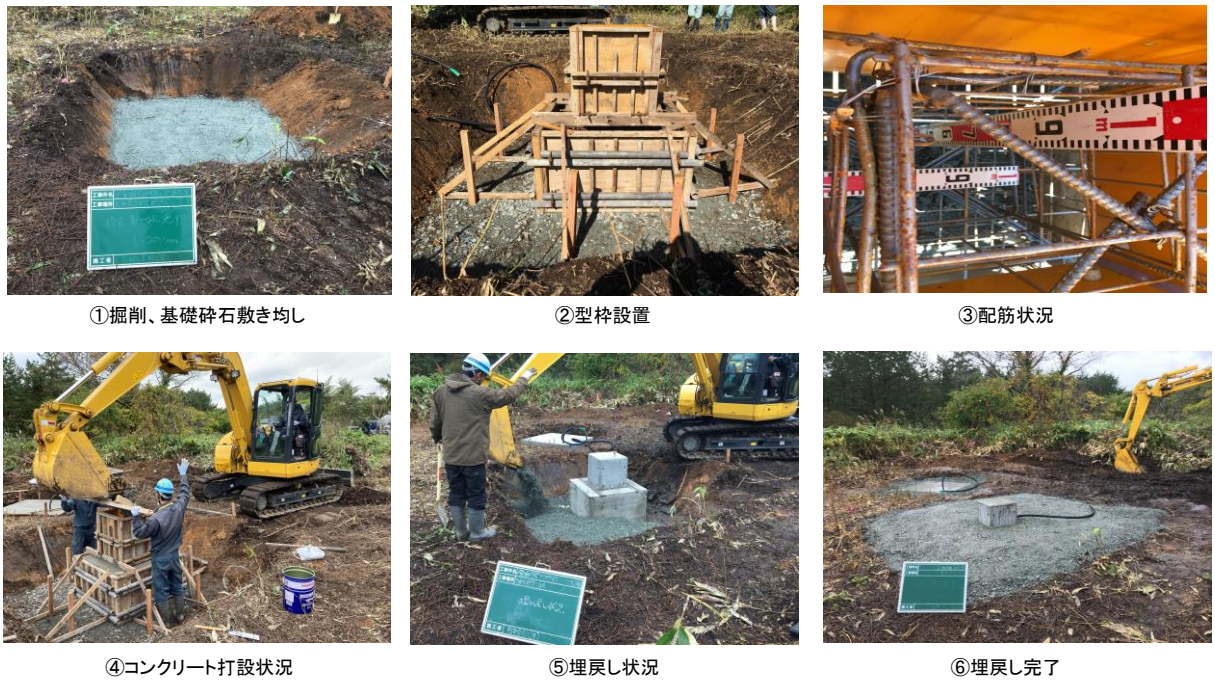


図 4.2-103　地震計基礎の施工状況

図 4.2-104　地震計の設置状況

(3) 地震計の設置場所

地震計の設置可能な範囲（赤枠の範囲）と地下の調査坑の全体図を図 4.2-105 に示す。
地震計を設置する具体的な場所は、次の 3 点を考慮して決定する。

①気象庁基準の崖等の段差付近に関する条件
②地下の試験空洞からの距離
③メンテナンス時のアクセス

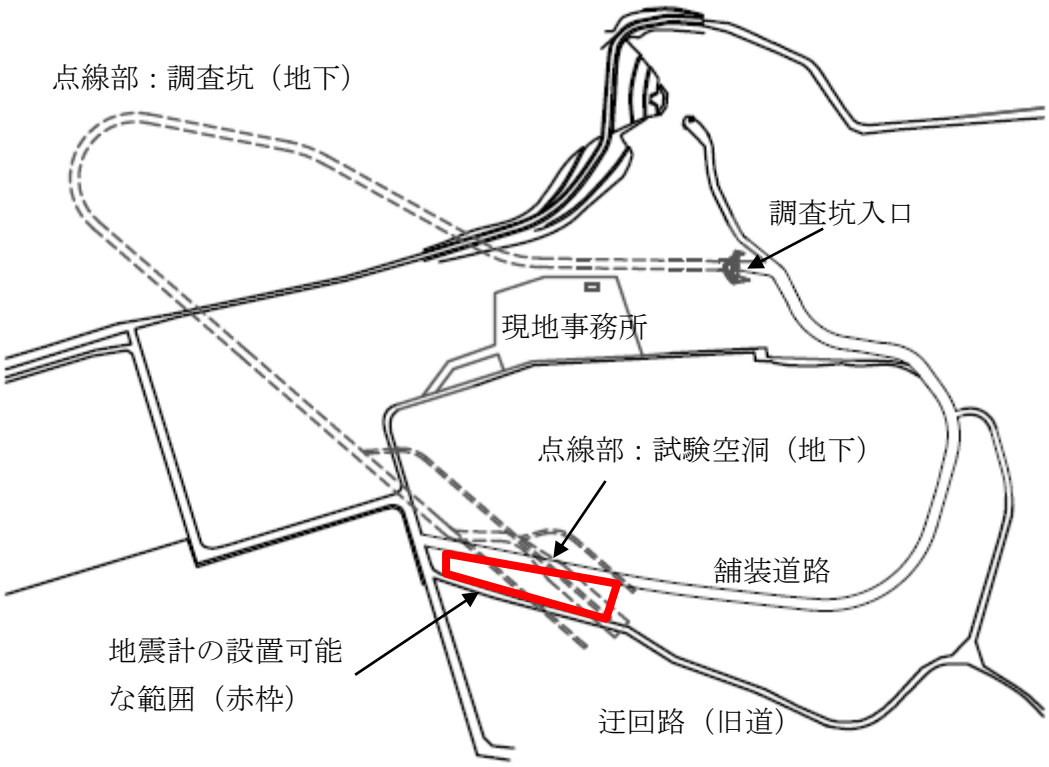


図 4.2-105　地震計の設置場所と地下の調査坑の全体図

①気象庁基準の崖等の段差付近に関する条件

段差の角度が急な場所における地震計の設置場所について、気象庁基準で適切な範囲とされているのは、のり面の高さを H とすると、のり面の下端から水平距離で 3H 以上離れた場所である（図 4.2-106 参照）。

＜段差の角度が急な場合＞

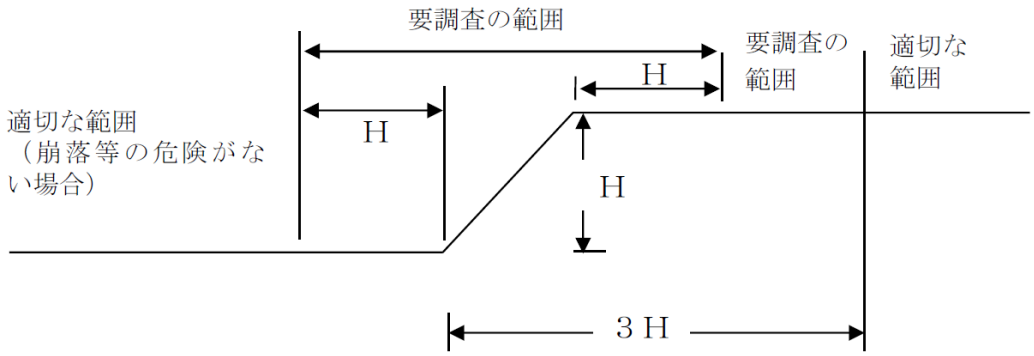


図 4.2-106　段差の角度が急な場合の設置場所の適切な範囲（気象庁基準）

ここで、図 4.2-107 の地震計の設置可能な範囲（赤枠）は、ほぼ平坦な台地の草地であるが、その両脇の舗装道路と迂回路（旧道）は、調査坑の入口の方向（図の右側）に向かって下り勾配となっており、道路面との段差（＝のり面の高さ）が赤枠の左側でほぼゼロとなるに対して、赤枠の右側では 4m以上となっている。

そのため、舗装道路と迂回路（旧道）の両方ののり面の下端から 3H 以上の距離を確保した適切な範囲は、赤枠の右側に行くにしたがって狭くなり、図の青枠の範囲となる。

②地下の試験空洞からの距離

昨年度の検討より、解析を行ううえで、地下の試験空洞からの距離は近い方が望ましい。

図 4.2-107 の赤枠の右側にいくほど地下の試験空洞からの距離は近くなるため有利である。

③メンテナンス時のアクセス

メンテナンス時のアクセスで考慮すべき点は、下記の 2 つである。

・舗装道路からのり面上の段差を上る方法

・平坦な台地の草地上の移動経路の草刈り（春～夏）、除雪（冬）

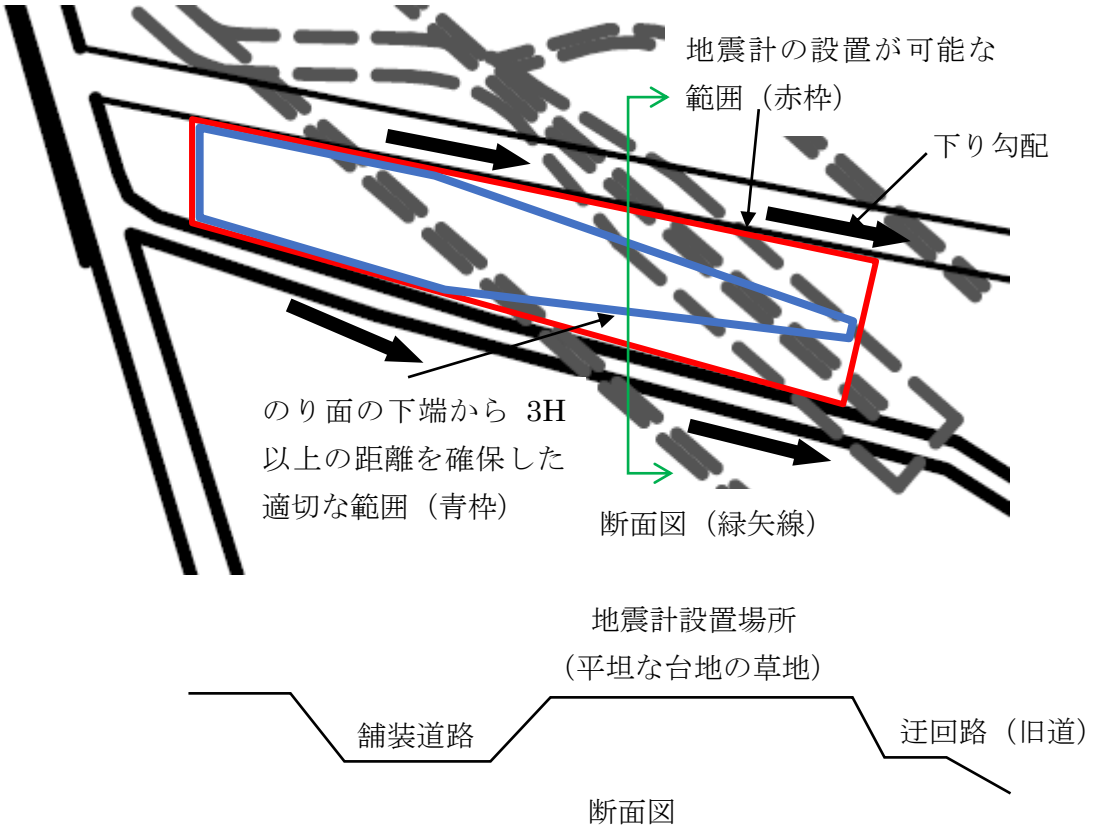


図 4.2-107　地震計の設置可能な範囲（拡大図）

上記②を考慮すると、できるだけ図 4.2-107 の赤枠の右側の方が有利であるが、のり面の勾配は 1：1.2 程度であり、段差が大きくなると昇降設備が必要となる。昇降設備を設置すると、冬場の積雪時の通行に支障が出ることも想定されるので、段差を低く抑えて土のう階段を設置する。

また、土のう階段の設置場所から地震計の設置場所までの移動経路が長くなると、平坦な台地の草地上の通路の草刈り（春～夏）、除雪（冬）の必要な範囲が広くなり、メンテナンス作業の準備に時間がかかる。そのため、土のう階段を設置した場所からできるだけ近い場所が有利となる。

以上より、①の観点では図の赤枠の左側が有利、②の観点では図の赤枠の右側が有利、③の観点では図の左側で土のう階段の近くが有利となる。これらを総合的に判断し、段差が 1.2 m程度となる位置で土のう階段を設置し、その位置の直近で、のり面の下端から十分に距離をとった位置に地震計を設置することとする（図 4.2-108、土のう階段の設置状況は図 4.2-109 参照）。

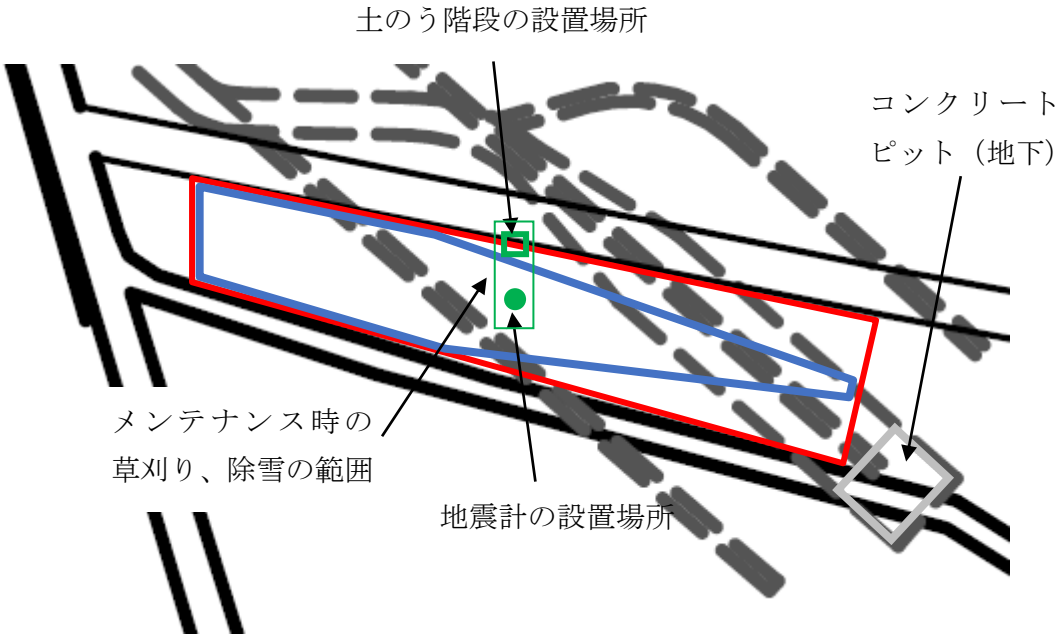


図 4.2-108　地震計と土のう階段の設置場所（拡大図）

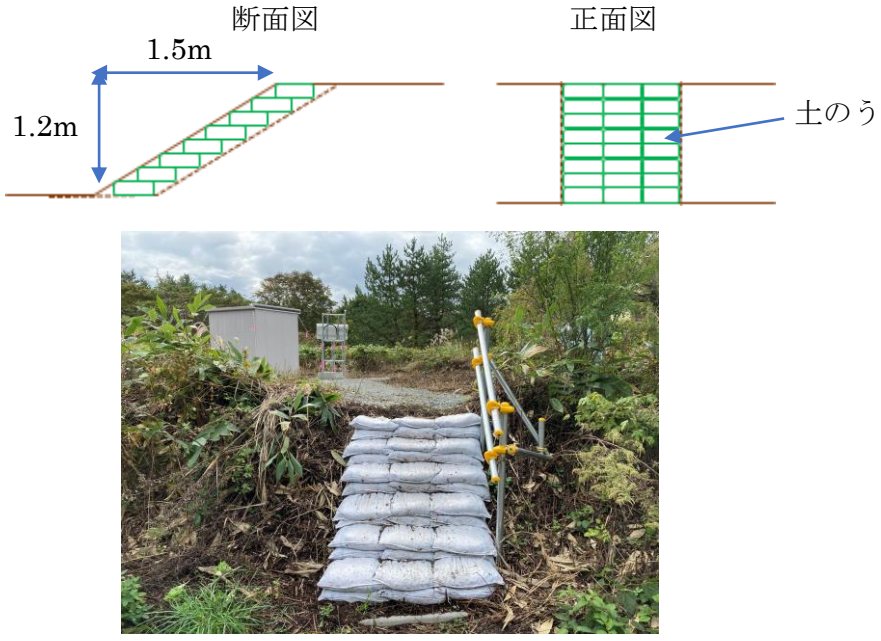


図 4.2-109　土のう階段の設置状況

(4) 設置場所の地耐力の確認

地震計及びソーラーパネルの基礎の設置場所の地耐力を確認するための事前調査として、スウェーデン式サウンディング試験を 3 箇所で行った。その結果として、貫入深度及び土質区分深度を表 4.2-8、調査位置図を図 4.2-110、調査結果のまとめを表 4.2-9 に示す。地耐力試験の結果、地震計及びソーラーパネルの基礎として地耐力を有していることを確認した。

表 4.2-8　各地点の貫入深度及び土質区分深度(GL.-m)

地点名	孔口標高	貫入深度		地層及び土質区分
				ローム層
	EL.m	GL.-m	EL.m	粘性土
SW-1	32.82	3.10	29.72	0.00m-3.10m
SW-2	32.90	3.59	29.31	0.00m-3.59m
SW-3	32.48	2.76	29.72	0.00m-2.76m

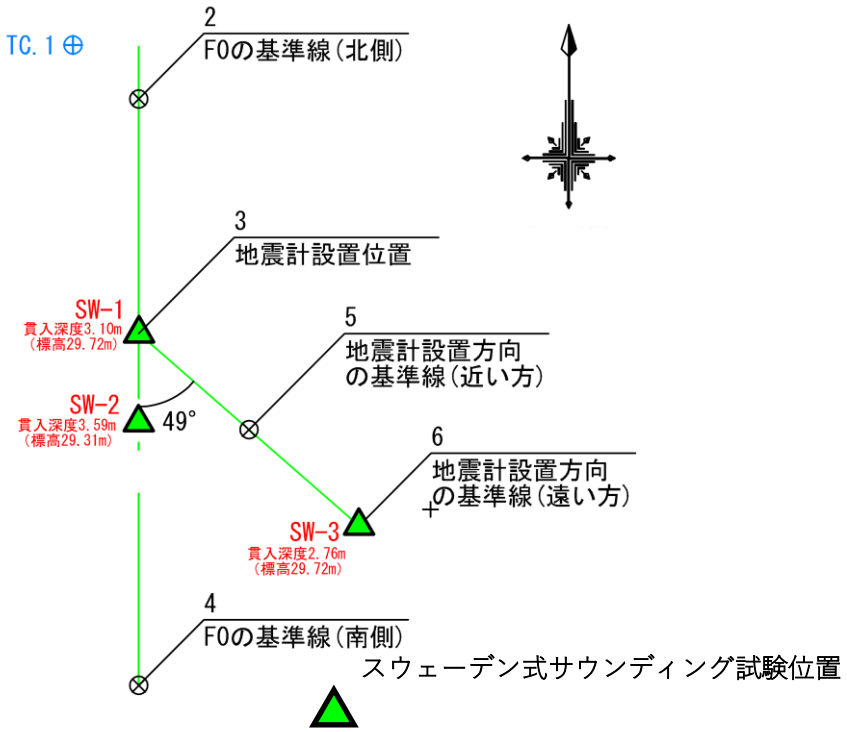


図 4.2-110　調査位置図

表 4.2-9　スウェーデン式サウンディング試験結果のまとめ

地点	地盤標高	貫入深度		土質区分	長期許容支持力		平均換算N値
	(EL.m)	(GL.-m)	(EL.m)		評価深度	qa(kN/m²)	
SW-1	32.82	3.10	29.72	粘性土	0.00～2.00m	41.3	3.6
					0.25～2.25m	42.9	4.1
					0.50～2.50m	54.9	5.1
SW-2	32.90	3.59	29.31	粘性土	0.00～2.00m	44.1	3.6
					0.25～2.25m	46.2	4.4
					0.50～2.50m	49.3	4.6
SW-3	32.84	2.76	29.72	粘性土	0.00～2.00m	38.3	3.4
					0.25～2.25m	39.6	3.7
					0.50～2.50m	45.1	4.1

※長期許容支持力は、各地底において設定した基礎底面からGL.-2.0mを評価範囲とした。

(5) 地震計の設置方向

地震計を設置する方向は、地下の地震計と同じ方向とし、X 方向を北（N）から反時計回りに 49°回転させた方向とする（図 4.2-111 参照）。

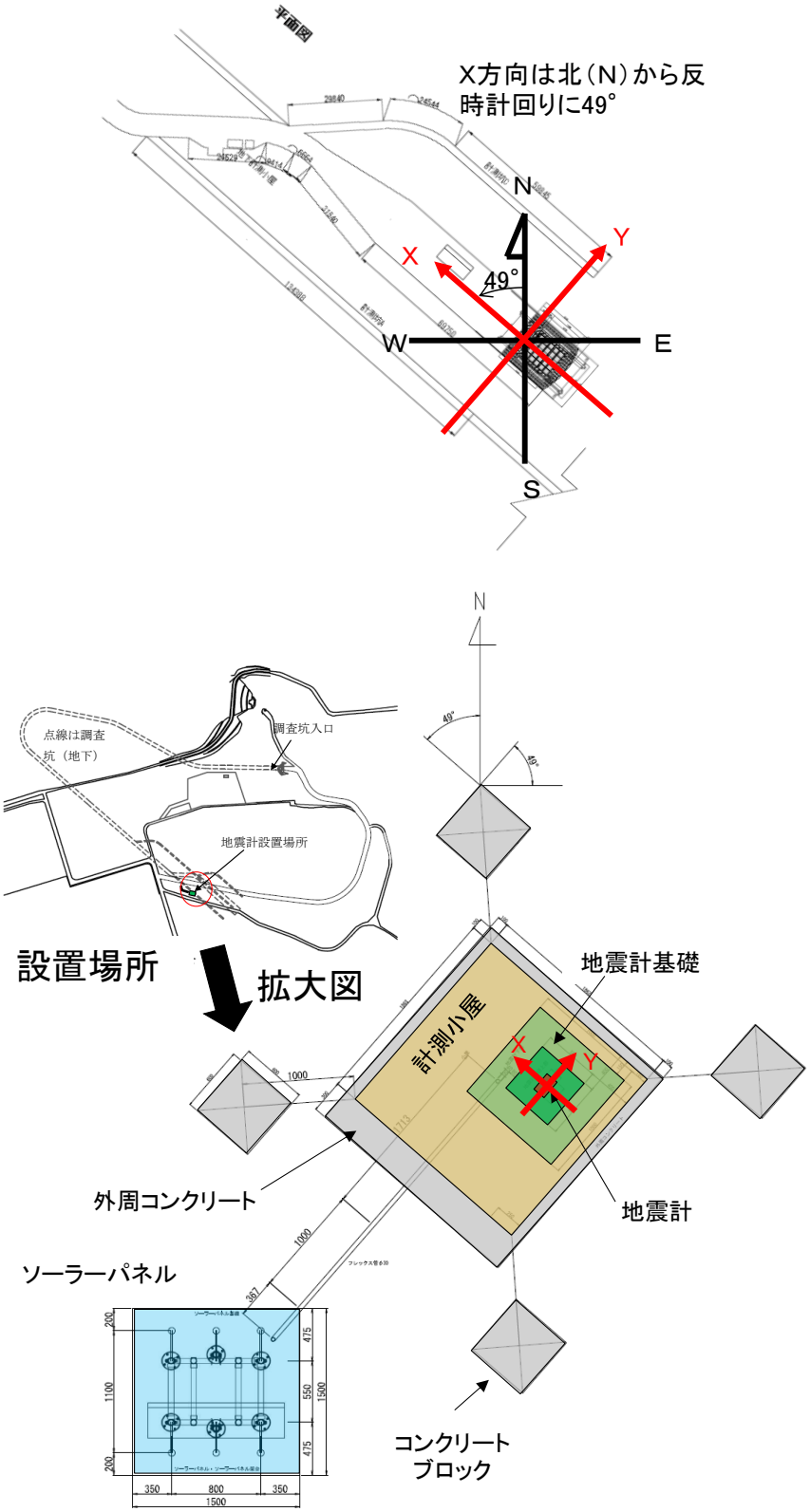


図 4.2-111　地表面と地下の地震計の設置方向

(6) 地震計の設置場所の座標と高さ

日本原燃の濃埋敷地内の既往基準点（No.2,No.A）を用いて、地震計設置場所付近に新基準点を 2 箇所設置（TC.1、TC.2）し、その新基準点から地震計設置場所付近の既往のボーリング孔（F0-17）の南側 30m の位置を地震計の設置場所とした。

地震計設置作業にあたり、ソーラーパネルの設置方向の基準となる南北方向と地震計の設置方向の 2 測線に測量杭を設置した。

地震計の設置場所の座標と高さは、次の通りである。

X座標　43890.000

Y座標　107231.000

設置高さ　EL 32.93

現地の測量杭の座標と高さを表 4.2-10、測量杭の位置図を図 4.2-112 に示す。

表 4.2-10　現地の測量杭の座標と高さ

点名	X座標	Y座標	杭高	地盤高	備考
①F0-17	43890.000	107261.000	-	33.17	既往ボーリング孔
②	43890.000	107239.000	23.977	32.82	F0の基準線(北側)
③	43890.000	107231.000	32.663	32.48	地震計設置位置
④	43890.000	107219.000	32.594	32.42	F0の基準線(南側)
⑤	43893.775	107227.720	32.871	32.64	地震計設置方向の基準線(近い方)
⑥	43897.548	107224.439	32.649	32.48	地震計設置方向の基準線(遠い方

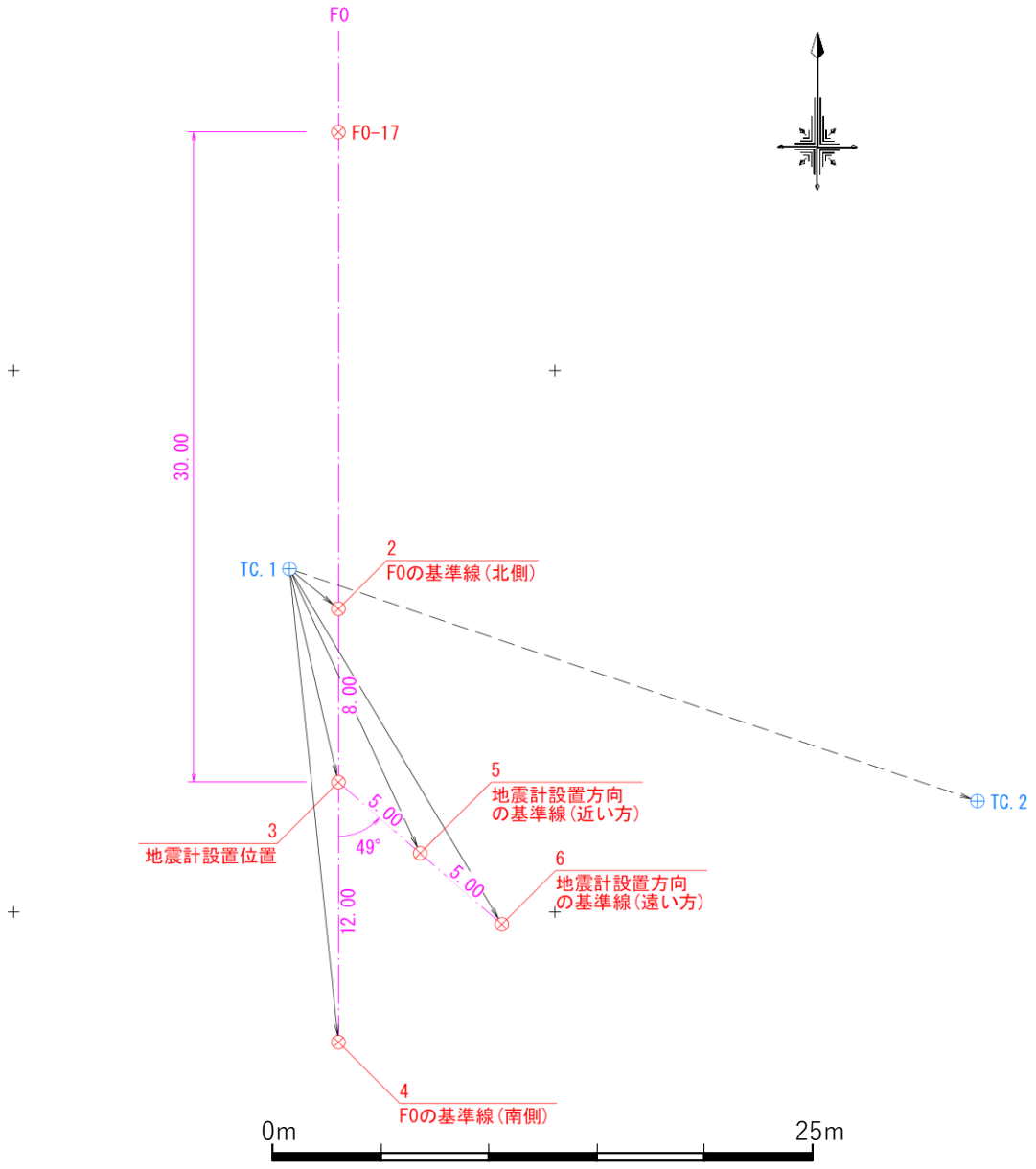
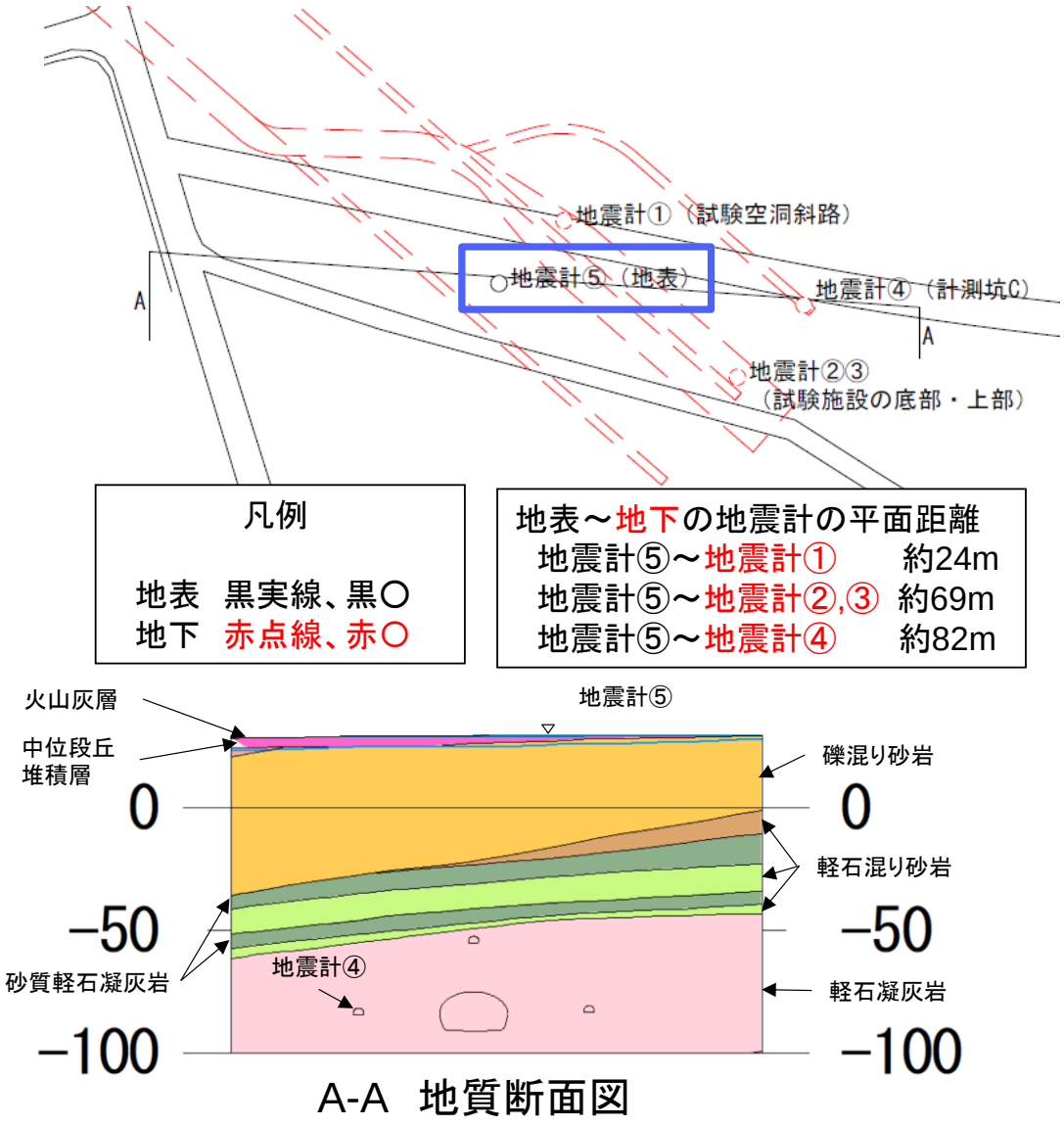


図 4.2-112　測量杭の位置図

(7) 地表面と地下の地震計の位置関係

地表面と地下の地震計の位置関係を図 4.2-113 に示す。



※地質断面図は日本原燃（株）提供に加筆

図 4.2-113　地表面と地下の地震計の位置関係

(8) 地震計の機器選定

地表面に設置する地震計は、昨年度の検討に基づき、計測坑 C の既存計器（東京測振製）と同じ機種の CV-374A（地下の地震計は末尾が B だが、違いは電源の接続方法のみで機器の仕様は全く同じ）とする。

地表面の地震計は、地下の地震計と離れているため、LAN での接続は行わず、単独で測定を行い、データ分析を行う場合には、計測坑 C の地震動データと同様の手順で、手動で同期をとる。地震計の仕様を表 4.2-11 に示す。

表 4.2-11　地震計（東京測振製）の仕様（地表面）

名称	仕　様	機　種
地震計（小型サーボ型加速度計）	計　測　範　囲：±2.0G 周 波 数 応 答：DC～100Hz 分　　解　　能：10mGalp-p 以下（サンプリング周波数 100Hz、2000Gal フルスケール時） ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ周波数：100Hz、200Hz（設定値） 送 信 周 波 数：0.5sec（200Hz） 1.0sec（100Hz） 使　用　条　件：使用温度範囲：0℃～50℃ 保護等級　　：IP65	東京測振製 ネットワークセンサ CV-374A

(9) 計測小屋の設置

計測小屋は、地震計及びソーラーパネルの関連機器を設置する。メンテナンス時のデータ回収、乾燥剤の交換の作業スペースを考慮し、図 4.2-114 に示す形状で、積雪型（屋根の耐荷重で積雪 100cm）とし、地盤面に地震計を設置するため底板に開口部を設ける。計測小屋の下部は、浸水防止のため基礎砕石を敷き詰めて排水性を確保する。また計測小屋は、強風時に転倒しないよう、底部を外付けアンカーで固定し、更に周囲にコンクリートブロックを設置してワイヤーで固定する。また低温対策として断熱材を内面に取り付ける。計測小屋の設置状況を図 4.2-115 に示す。

図 4.2-114　計測小屋（ヨド物置　積雪型　LMDS1818）

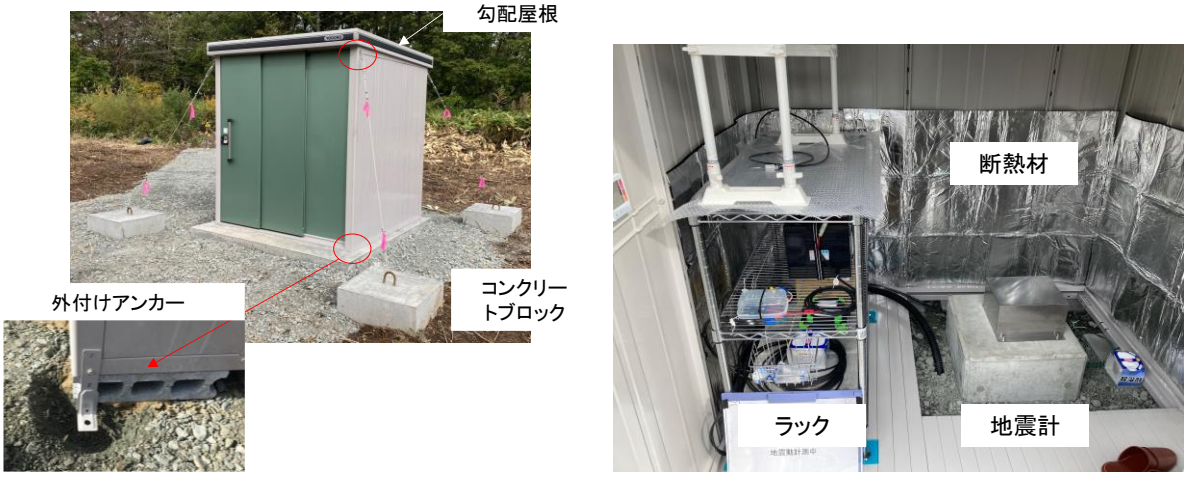


図 4.2-115　計測小屋設置状況

（10）太陽光発電の設置

地震計稼働の電力確保のための電源設備として太陽光発電を用いることとし、ソーラーパネルを計測小屋の付近に設置する。またバッテリー（蓄電池）と充放電コントローラを計測小屋の中に設置する。

太陽光発電の主要な機器は、無日照 10 日で 24 時間稼働の設定で、以下の仕様とする。

・ソーラーパネル：DBG100-12

・充放電コントローラ：SA-BAG10

・バッテリー（蓄電池）：JR55-12

地表面の太陽光発電及び地震計測システムの配線を図 4.2-116 に示す。

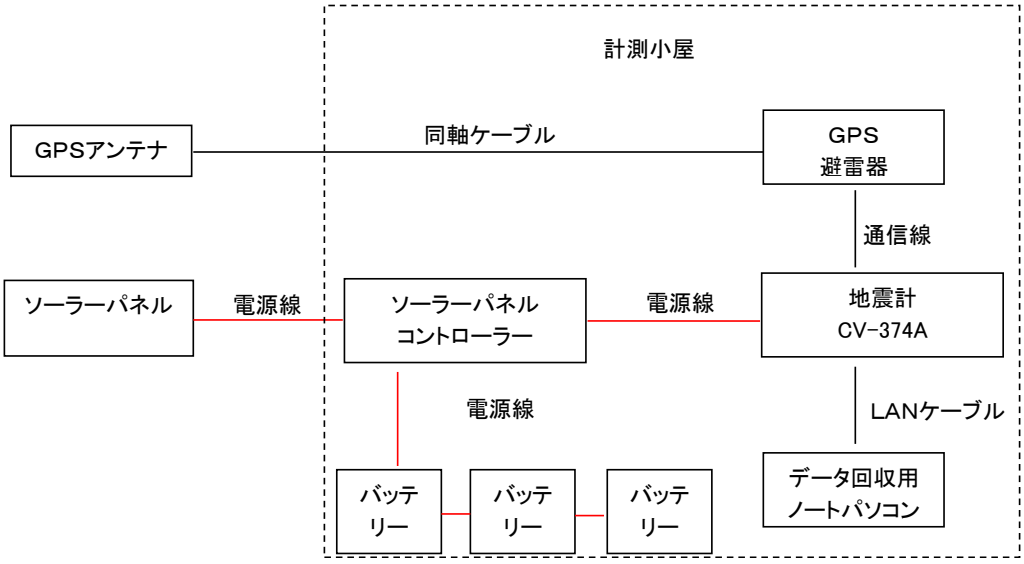
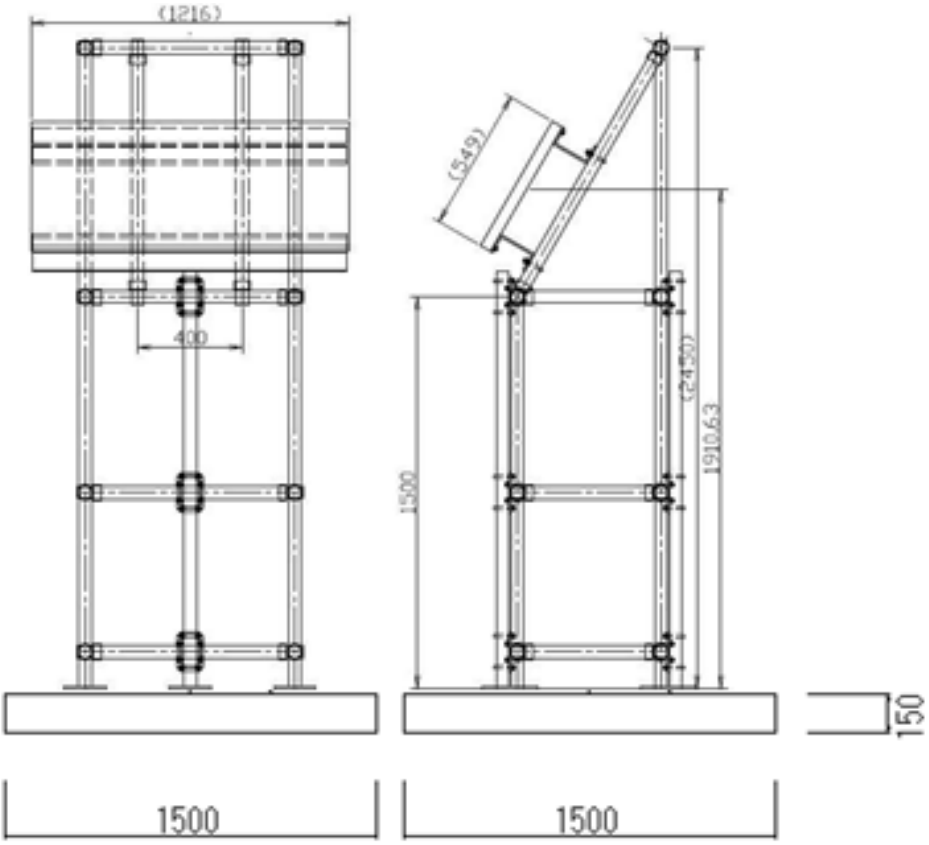
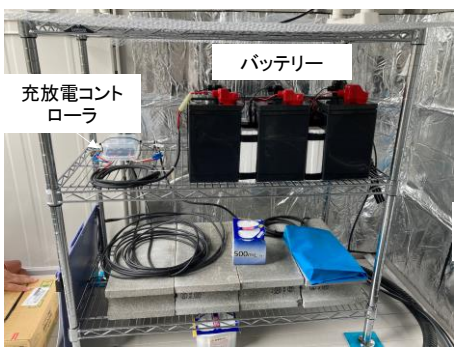


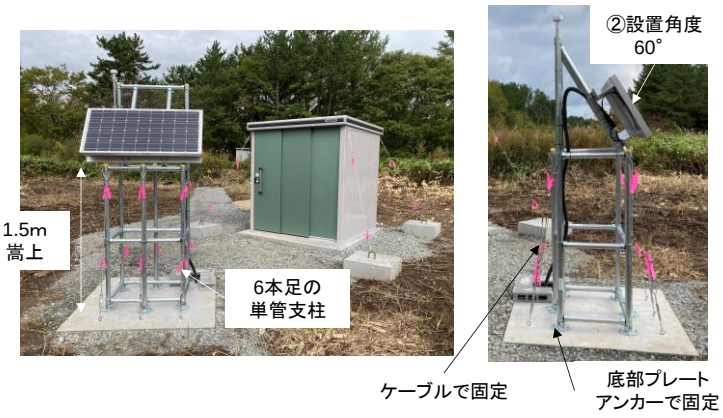
図 4.2-116　地表面の太陽光発電及び地震計測システムの配線

ソーラーパネルは、日照を確保するため、パネルの面を南向けとし、積雪時に埋まらないよう、単管パイプの支柱で架台を組み立て、地表面から約 1.5mの高さに 60°の角度をつけて設置する。ソーラーパネルの架台は、強風時に転倒しないよう、6 本足の単管支柱とし、支柱の底部プレートを土台となるコンクリート基礎にアンカーボルトで固定する。更に単管支柱の中ほどの位置でワイヤーで固定する。また、地震計の時刻制御のための GPS アンテナを、ソーラーパネルの架台に設置する。ソーラーパネルと GPS アンテナの配線は、草刈りや除雪時に誤って切断しないよう、地下（深度 300mm 程度）に埋め込んだ配管の中を通して計測小屋の中と接続する。ソーラーパネルの設置状況を図 4.2-117 に示す。





ソーラーパネル機器（計測小屋内）



ソーラーパネル設置状況

図 4.2-117　ソーラーパネルの設置状況

(11) 地表面の地震計設置のまとめ

地表面に設置する地震計についての整理を表 4.2-12、地震計基礎の構造図を図 4.2-118、全体平面図を図 4.2-119、全体断面図を図 4.2-120 に示す。

表 4.2-12　地表面に設置する地震計

項目	内容
地震計の設置場所	試験空洞の直上付近
地震計の設置方法	地下に高さの 2/3 以上を埋設したコンクリートの土台上に設置 保護カバーをかぶせて養生し乾燥剤を設置
降雨、降雪対策	地震計の設置場所には計測小屋を設置 浸水防止のため、計測小屋内の下部に基礎砕石を敷いて排水性を確保
寒冷地対策	計測小屋内に断熱材を設置
風対策	計測小屋とソーラーパネルの架台は転倒防止の措置
配線ルート	地下の地震計と LAN 接続するための配線はしない
電源確保	太陽光発電：ソーラーパネル、バッテリー（蓄電池）、充放電コントローラ
地震計及び関連機器のリスト	地震計：東京測振製　CV-374A その他の関連機器：GPS アンテナ、LAN ケーブル
データの蓄積場所	地震計内部のメモリカード
地震動計測システムとの連携の方法	単独で計測 （分析評価に用いるデータは CSV データで同期をとる）

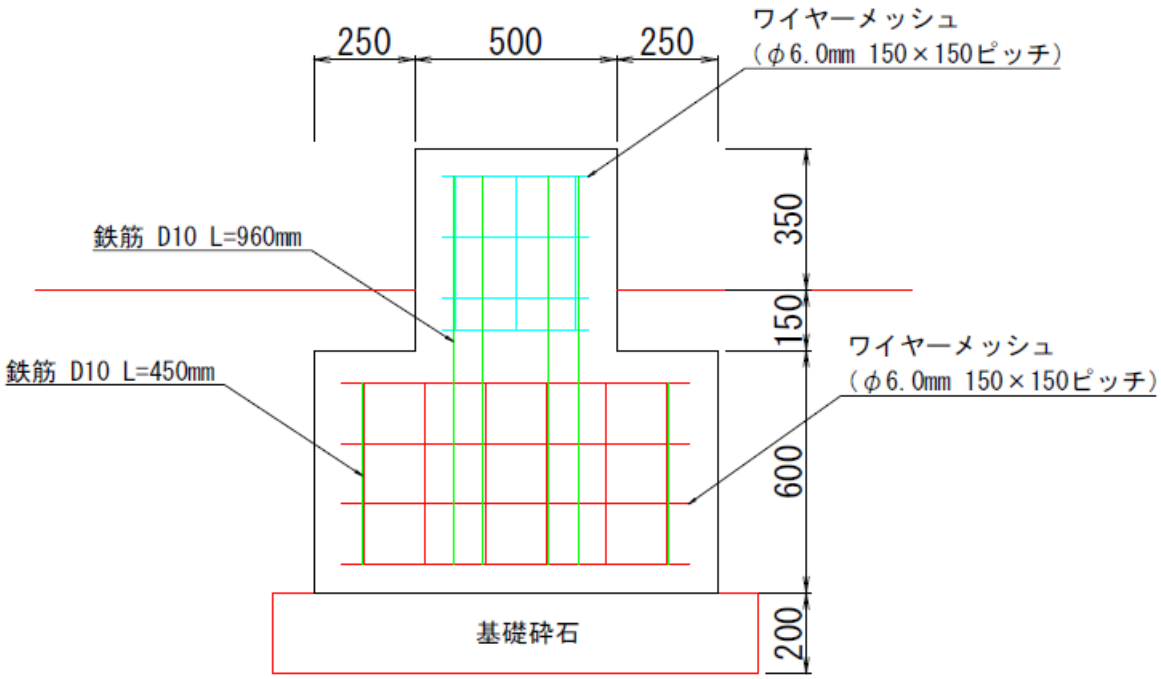


図 4.2-118　地震計基礎の構造図

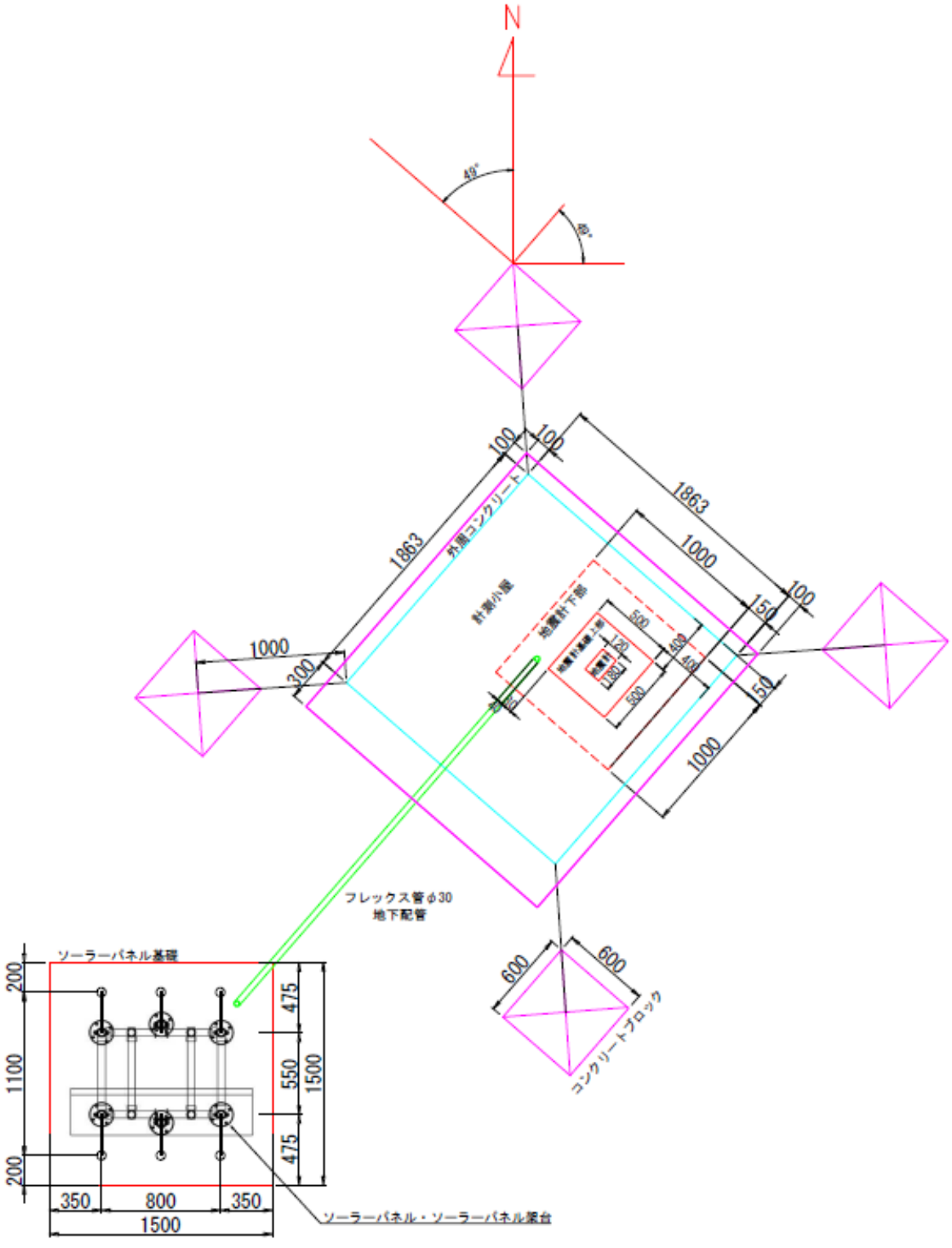


図 4.2-119　地表面の全体平面図

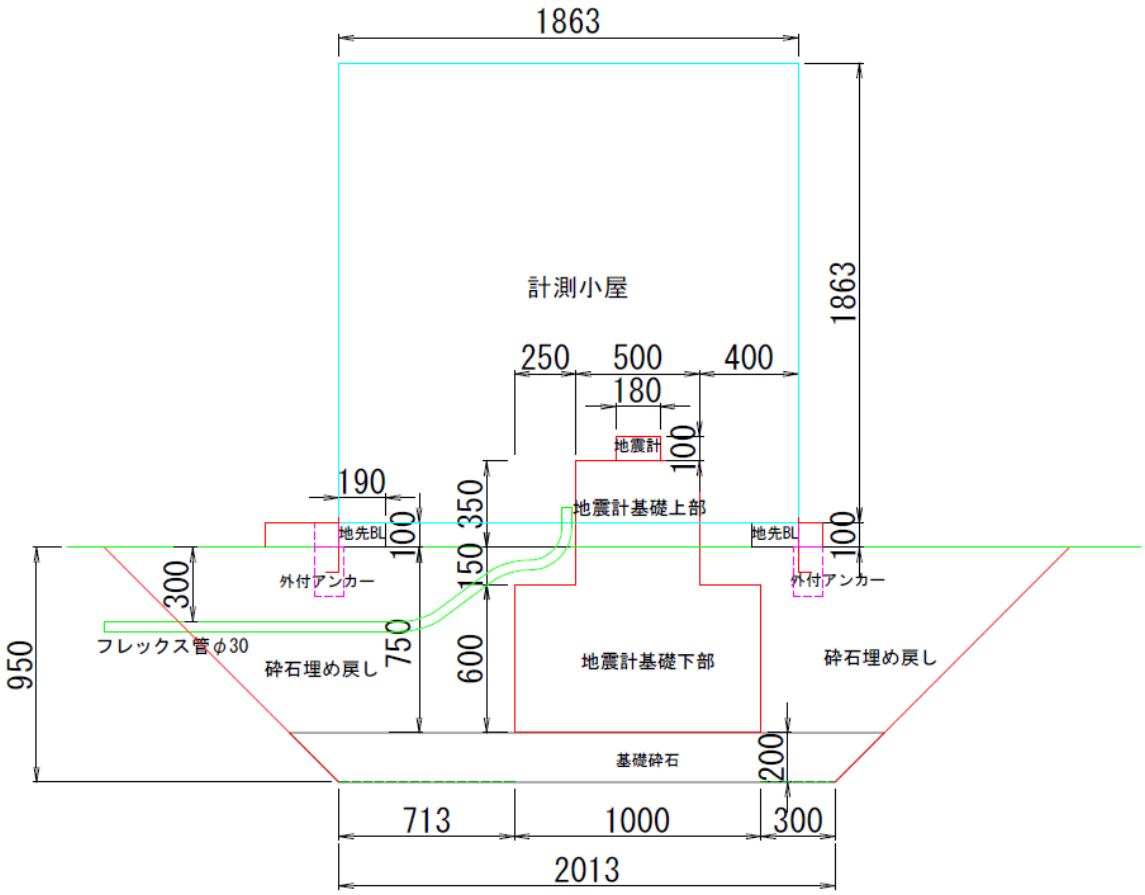


図 4.2-120　地表面の全体断面図

第５章　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、既往検討成果の調査と技術オプションの検討

第5章　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、既往検討成果の調査と技術オプションの検討

5.1　既往検討成果の調査

5.1.1　調査の目的及び調査対象

2021 年 6 月 30 日に原子力規制庁開催の第 17 回原子力規制委員会にて、議題の一部に「第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の改正案」について説明があり、その中で、中深度処分に係る規則等の案が了承された[1]。ここでは、技術オプションの整備業務に資する記載事項について改正・了承された規制内容について調査・整理する。また、同年 7 月 1 日から 30 日間行政手続法に基づく意見募集及び任意の意見募集が実施されており、同年 9 月 29 日にこれらの意見募集に対する回答を取りまとめるとともに、規則等の改正及び審査ガイドの策定に関する情報が規制委員会より示されている[2][3][4]。それぞれ中深度処分に関する記載内容に着目し、改正案及び審査ガイドの内容を以下に示す。

5.1.2　中深度処分の規制に関する調査・整理

中深度処分に関する改正案の主な内容を以下にまとめる。

- 第二種廃棄物埋設の事業規則
  - 中深度処分について、坑道の閉鎖措置計画に関する申請、認可基準及び閉鎖措置の確認に関する申請に必要な事項等を追加
- 第二種廃棄物埋設の許可基準規則とその解釈
  - 中深度処分の埋設地について、以下の事項等を追加
    - ✓ 断層運動、火山現象その他の自然現象による人工バリアの著しい損傷の防止
    - ✓ 侵食を考慮した深度の確保
    - ✓ 設計の選定プロセス
  - 中深度処分について、放射性廃棄物の回収、排水施設、監視測定設備等に係る事項を追加
- 中深度処分の廃棄物埋設地に関する審査ガイド
  - 震源として考慮する活断層の損傷領域の設定の方法、規模が大きい断層の判定方法、火山の活動中心の設定方法等

これらの改正案のうち、本業務の検討に関係する項目は、第二種廃棄物埋設の許可基準規則とその解釈のうち、「設計の選定プロセス」である。本項では、「設計の選定プロセス」に重点を置いて調査し、検討を行う上での考え方を整理する。

（1）規制内容

ここでは、検討を行う上での考え方を整理するにあたって、許可基準規則とその解釈に示される規制内容について調査した結果をまとめる。

まず、第二種廃棄物埋設地の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（原管廃発第1311277 号）の一部が改正されており、改正部分について表 5.1-1 に示す。

表 5.1-1　第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈　新旧対応表 [2]

改正後		改正前	
目次		目次	
条	見出し	条	見出し
第一条	（略）	第一条	（略）
第二条	（略）	第二条	（略）
第三条	（略）	第三条	（略）
第四条	（略）	第四条	（略）
第五条	（略）	第五条	（略）
第六条	（略）	第六条	（略）
第七条	（略）	第七条	（略）
第八条	（略）	第八条	（略）
第九条	安全機能を有する施設の維持	（新設）	
第十条	放射性廃棄物の回収	（新設）	
第十一条	（略）	第九条	（略）
第十二条	中深度処分に係る廃棄物埋設地	（新設）	
第十三条	ピット処分又はトレンチ処分に係る廃棄物埋設地	第十条	廃棄物埋設地
第十四条	（略）	第十一条	（略）
第十五条	（略）	第十二条	（略）
第十六条	排水施設	（新設）	
第十七条	（略）	第十三条	（略）
第十八条	（略）	第十四条	（略）
第十九条	（略）	第十五条	（略）

表 5.1-1 に示される傍線部分が改正された条目である、改正された条目は第四条～第十九条で、中でも、第九条、第十条、第十二条、第十六条は新たに追加された条目である。本規則の本来の位置づけは、L2、L3 廃棄物を対象としたピット及びトレンチ処分に対するものである。今回の改正案を通して、L1 廃棄物の中深度処分に関する事項が追記された形である。ここでは、規則の解釈について、改正された条目を含む第四条以降を整理することとする。また、第十三条はピット処分又はトレンチ処分に係る内容が主であるため、ここでは割愛する。なお、9 月 29 日に示された改正案は、6 月 30 日に示された改正案を修正（修正内容のほとんどが漢字の変換等軽微なもの）したものであり、本検討では、9 月 29 日に示された改正案をまとめる。また、技術オプションの検討にあたって特に考慮すべき記載について抽出し、傍線で示すこととする。

第四条では、廃棄物埋設施設が地震によって受ける損傷を防止するための設計について示されている。

第四条　地震による損傷の防止

1　第１項及び第３項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、ある地震力に対して施設全体としておおむね弾性範囲の設計がなされることをいう。この場合、上記の「弾性範囲の設計」とは、施設を弾性体とみなして応力解析を行い、施設各部の応力を許容限界以下にとどめることをいう。また、この場合、上記の「許容限界」とは、必ずしも厳密な弾性限界ではなく、局部的に弾性限界を超える場合を容認しつつも施設全体としておおむね弾性範囲にとどまり得ることをいう。

2　第２項に規定する「地震の発生によって生ずるおそれがある安全機能を有する施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度」とは、地震により発生するおそれがある安全機能を有する施設の安全機能の喪失（地震に伴って発生するおそれがある津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。）及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から、各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度（以下「耐震重要度」という。）をいう。安全機能を有する施設は、耐震重要度に応じて、以下に掲げるクラスに分類するものとする。

3　第１項及び第３項に規定する「地震力に十分に耐えること」を満たすために、安全機能を有する施設の耐震設計に当たっては、以下の方針によること。

一　静的地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えること。

二　廃棄物埋設地と廃棄物埋設地の附属施設のうち建物・構築物については、常時作用している荷重及び操業中に作用する荷重と静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とし、当該許容範囲を超えないこと。

三　廃棄物埋設地の附属施設のうち機器・配管系については、操業中の荷重と静的地震力を組み合わせ、その結果発生する応力に対して、応答が全体的におおむね弾性状態にとどまること。

4　第２項に規定する「地震力」の算定に当たっては、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（原規技発第１３０６１９３号（平成２５年６月１９日原子力 規制委員会決定））（以下「実用炉設置許可基準解釈」という。）別記２第４条４の方法を準用すること。

5　第３項に規定する「当該廃棄物埋設地等に影響を及ぼすおそれがある地震によって作用する地震力」としては、廃棄物埋設地等の支持構造物等の評価を保守的なものとするため、第１項に規定する安全機 能を有する施設に対して算定される地震力の中で最も厳しいもの（安全機能を有する施設（地上に設置された廃棄物埋設地の附属施設に限る。）に、上記２一のＢクラスに分類されるものがある場合には当該施設に適用される地震力、Ｂクラスに分類されるものがない場合にはＣクラスに分類される施設に適用される地震力とする。）を適用すること。ただし、ある発生した地震により安全機能を有する施設（地上に設置された廃棄物埋設地の附属施設に限る。）に生ずる地震力と、当該地震により当該廃棄物 埋設地等に生ずる地震力との比率を、当該廃棄物埋設地等を設置

する場所から地表面までの地盤構造及び地震動の増幅特性に基づき評価できる場合は、当該比率を考慮した地震力を適用することができる。

第五条では、廃棄物埋設施設が津波によって受ける損傷を防止するための設計について示されている。

第五条　津波による損傷の防止 1　（略） 2　第５条に規定する「安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない」を満たすために、上記１の津波に対する廃棄物埋設施設の設計に当たっては、以下のいずれかの方針によること。 一・二　（略） 3　上記２の遡上波の到達防止に当たっては、実用炉設置許可基準解釈別記３第５条３一②の方針を準用すること。 4　上記２二の津波防護施設及び浸水防止設備並びに津波監視設備を設置する場合には、実用炉設置許可 基準解釈別記３第５条３二及び五から七までの方針を準用すること。この場合において、これら規定中「発電所」とあるのは「廃棄物埋設施設」と読み替えるものとする。

第六条では、廃棄物埋設施設が受ける外部からの衝撃による損傷を防止するための設計について示されている。ここでの外部からの障壁とは、洪水、地すべり、火山等の影響による自然災害や、ダム崩壊等の人為的な事象を指している。

第六条　外部からの衝撃による損傷の防止 1　第１項に規定する「想定される自然現象」とは、廃棄物埋設施設の敷地及びその周辺の自然環境を基に、最新の科学的・技術的知見に基づき、洪水、地すべり、火山の影響等から適用されるものをいう。なお、必要のある場合には、異種の自然現象の重畳を考慮すること。 2　（略） 3　（略）

第七条では、廃棄物埋設施設が火災等によって受ける損傷を防止するための設計について示されている。

第七条　火災等による損傷の防止 1　第１号については、廃棄物埋設施設は、実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計であること。なお、廃棄物埋設施設において可燃性物質を使用する場合又は可燃性ガスが発生するおそれがある場合は、火災・爆発を防止するため、着火源の排除（静電気の帯電防止等）、可燃性ガスの滞留防止、異

常な温度上昇の防止、可燃性物質の漏えい防止及び漏れ込み防止等の措置を講じた設計とすることが必要である。

2　第２号については、廃棄物埋設施設は、火災・爆発の発生を早期に感知し、及び消火するために、必要に応じて、火災・爆発の検知・警報設備、消火設備等が設けられていること。

3　第３号については、廃棄物埋設施設は、火災・爆発の影響を軽減するために、換気設備の分離、防火区画の設置等の措置を講じた設計であること。

第八条では、平常時に公衆が受けるガンマ線及びスカイシャインガンマ線に関する規定について、ALARA の概念を踏襲した考え方を示している。

第八条　遮蔽等

1　第１項に規定する「線量を十分に低減できる」とは、平常時における廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線により公衆の受ける線量が、第１３条第１項第１号及び第２号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出」及び第１７条第１項に規定する「周辺監視区域の外の空気中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質」の放出により公衆の受ける線量を含め、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable（ＡＬＡＲＡ）の考え方の下、実効線量で５０マイクロシーベルト／年以下であることをいう。

2　（略）

3　（略）

4　（略）

第十条は新設された条目であり、放射性廃棄物を回収する際の規定について示されている。本業務では、回収可能性に重点を置いた設計は行わない。しかし、許可基準規則の中で廃棄体を安全に回収又は保管する施設を設置できる技術が要求されていることから、技術オプションを評価する際の評価項目の一つとして考慮する必要があると考えられる。

第十条　放射性廃棄物の回収

1　第１０条に規定する「埋設の終了」とは、廃棄物埋設地に土砂等を充填することによりその埋め戻しが終了することをいう。

2　第１０条に規定する「廃棄体を回収する措置を講ずることができる」とは、廃棄体を安全に回収するための措置を講ずること及び回収した廃棄体を一時的に保管し必要な措置を講ずるための施設を設置することが技術的に可能であることをいう。

第十一条は、旧規則では第九条で定められていたもので、異常が発生した場合の公衆への放射線障害について検討する必要があることを示している。

第十一条　異常時の放射線障害の防止 1　　第１１条に規定する「異常が発生した場合においても事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないもの」とは、以下の異常の発生の可能性を検討し、異常が発生した場合における敷地周辺の公衆への実効線量の評価値が５ミリシーベルト以下であることをいう。 ①　（略） ②　（略） ③　その他機器等の破損、故障、誤動作又は操作員の誤操作等に伴う放射性物質の外部放出等であって、公衆の放射線被ばくの観点から重要な異常

第十二条は新設された条目であり、中深度処分の設計に関することが示されている。本業務の検討を実施する上で考慮すべき重要な記載があり、審査官が適合性を判断する際に参考とするための審査ガイドも公表されている。ここでは、審査ガイド[4]についても記載する。

第十二条第1～3項では、人工バリアを設置する位置について、好ましい地質特性を整理している。例えば、火山や活断層を避け、隆起・浸食を考慮することなどが記載されている。なお、具体的な数値（例：火山の活動中心から 15 キロメートル離す、地温勾配は 100℃/キロメートルを大きく超えない）は審査ガイドにのみ記載されており、規則の解釈では用いられていない。

第4項では、人工バリアの定義に関する記載がされている。その中で、「人工バリアは技術的に施工可能なものであること」とされていることから、オプションを絞り込む段階で、施工実現性について検討する必要がある。また、「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する機能が、当該人工バリアの地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能その他の特性のうち、一つのものに過度に依存しないもの」としており、人工バリアは複数の安全機能を持っている（バリアは単一でないことが望ましいと考えられる）必要がある。

第8項では、廃棄物埋設地の基本設計において、対象とするシナリオに関する説明が記載されている。対象とするシナリオは、自然事象シナリオとボーリングシナリオとなっており、自然事象シナリオにおいては、「人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータは、科学的に合理的と考えられる範囲における組み合わせのうち最も厳しい設定とする」としている。加えて、「当該シナリオについて評価される公衆の受ける線量が、３００マイクロシーベルト／年を超えないこと」とする線量の上限値についても言及されている。

第 9 項では、「中深度処分の廃止措置の終了後における公衆の受ける線量の評価について不確実性が大きいことを踏まえ、当該線量を実行可能な範囲でできる限り低減することを目的として、複数の設計の案を比較検討し、放射性物質の移動を抑制する性能に優れた設計を策定すること」としている。更に、複数の設計案については、「それぞれの設計が廃棄物埋設地を設置する岩盤等の水理地質構造、区画別放射能量、人工バリアの基本的な構造及び仕様において互いに異なる内容を含むこと」と「自然事象シナリオについて次のとおり設定し評価した公衆の受ける線量を十分に低減できること」が要求されている。したがって、オプションの絞り込みは、人工バリア及び天然バリアのそれぞれで異なる案を設定した上で、複数

の設計案が抽出されるような構造になっている必要があると考えられる。また、「公衆の受ける線量を十分に低減できる」の例として、「自然事象シナリオ（解釈第 12 条 8 二イ）について、「被ばくに至る経路」及び「人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータ」を解釈第 12 条 9 一ロ①及び②のとおり設定し評価した公衆の受ける線量が、おおむね 100 マイクロシーベルト／年を超えない」ことを挙げている。

第十二条　中深度処分に係る廃棄物埋設地

1　第１項第１号の規定は、廃棄物埋設地の位置について、次のことを求めている。

一　人工バリアを、次に掲げる断層等を避けて設置すること。

①　後期更新世以降（約１２～１３万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち震源として考慮する活断層

②　上記①の活断層の活動に伴い損傷を受けた領域

③　後期更新世以降（約１２～１３万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち地震活動に伴って永久変位が生じる断層及び変位を及ぼす地すべり面

④　上記①及び③の断層等以外のものであって規模が大きい断層

ここで、後期更新世以降（約１２～１３万年前以降）の活動が否定できない断層等の認定に当たって、後期更新世（約１２～１３万年前）の地形面又は地層が欠如する等、後期更新世以降の活動性が明確に判断できない場合には、中期更新世以降（約４０万年前以降）まで遡って地形、地質・地質構造及び応力場等を総合的に検討した上で活動性を評価すること。なお、活動性の評価に当たって、設置面での確認が困難な場合には、当該断層の延長部で確認される断層等の性状等により、安全側に判断すること。

二　人工バリアは、廃棄物埋設地の建設・施工時において上記③及び④の断層等が発見された場合には、当該断層等を避けて設置するとの方針としていること。

【審査ガイドに記載する内容】

○　後期更新世以降（約１２～１３万年前以降）の活動が否定できない断層等」の調査・評価の方法

・「「後期更新世以降（約１２～１３万年前以降）の活動が否定できない断層等」の認定」（解釈第 12 条１一）に関し行われた調査・評価の方法の妥当性の確認に当たっては、敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド（原管地発第 1306191 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定））を準用する。

○　「活断層の活動に伴い損傷を受けた領域」の設定の方法

・「上記①の活断層の活動に伴い損傷を受けた領域」（解釈第 12 条 1 一②）が、次のいずれかの方法で設定されていることを確認する。

－　震源として考慮する活断層に沿って岩盤等が損傷を受けている領域の調査結果に基づいて設定。

- 震源として考慮する活断層の長さを評価した上で、当該断層面からその長さのおおむね 100 分の 1 以内の領域を設定。

○ 「規模が大きい断層」の判定の方法

・廃棄物埋設地において確認された断層が「上記①及び③の断層等以外のものであって規模が大きい断層」（解釈第 12 条 1 一④）として考慮する必要がないものと判定されている場合は、その判定に当たり、次のいずれかであることが確認されていることを確認する。

- 破砕帯の幅が 20～30 センチメートル程度を越えない。
- 累積の変位量が、おおむね廃棄物埋設地の上端から下端までの長さを超えない。

○ 事業許可における確認の視点

・「後期更新世以降（約１２～１３万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち震源として考慮する活断層」（解釈 12 条 1 一①）及び「上記①の活断層の活動に伴い損傷を受けた領域」（解釈第 12 条 1 一②）に係る調査が事業許可申請までに適切に実施されていること並びに、それらを避けた場所に人工バリアを設置する設計となっていることを確認する。

・「後期更新世以降（約１２～１３万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち地震活動に伴って永久変位が生じる断層及び変位を及ぼす地すべり面」（解釈第 12 条 1 一③）及び「上記①及び③の断層等以外のものであって規模が大きい断層」（解釈第 12 条 1 一④）については、事業許可後の廃棄物埋設地の建設段階においてそれらが廃棄物埋設地の設置場所に確認された場合の対応として、それらを避けて人工バリアを設置する方針であること及びそれが技術的に可能と見込まれることが示されていることを確認する。

三 廃棄物埋設地を、次に掲げる場所を避けて設置すること。

① マグマの貫入による人工バリアの破壊が生ずるような第四紀（現在から約２５８万年前まで）における火山活動に係る火道、岩脈等の履歴が存在する場所

② 第四紀に活動した火山の活動中心からおおむね１５キロメートル以内の場所

【審査ガイドに記載する内容】

○ 火山活動に係る履歴の調査の方法

・「第四紀（現在から約２５８万年前まで）における火山活動に係る火道、岩脈等の履歴」（解釈第 12 条 1 三①）の調査の方法の妥当性の確認に当たっては、原子力発電所の火山影響評価ガイド（原規技発第 1361910 号）の 3.2(1)及び(2)の規定を準用する。

○ 火山の活動中心

・「第四紀に活動した火山の活動中心」（解釈第 12 条 1 三②）については、第四紀における火山活動に係る火道、岩脈等の分布が調査された上で地表における当該分布の幾何学的な中心位置が設定されていることを

確認する。

四　上記一～三までに規定するもののほか、人工バリアに著しい損傷を生じさせるおそれのある自然現象が発生するおそれがないこと。

2　第１項第２号の規定は、廃棄物埋設地の位置について、隆起・沈降及び気候変動による大陸氷床量の増減に起因する海水準変動を考慮した侵食（廃棄物埋設地の近くに、河川がある場合は下刻の進展に伴って谷幅が広がる側方の侵食も考慮し、海岸がある場合は海食による侵食も考慮する）による１０万年間の深度の減少を考慮しても、１０万年後において廃棄物埋設地を鉛直方向に投影した地表面のうち、最も高度の低い地点から廃棄物埋設地の頂部までの距離が７０メートル以上であることを求めている。

【審査ガイドに記載する内容】

○　侵食による深度の減少に係る調査・評価の方法

・「隆起・沈降及び気候変動による大陸氷床量の増減に起因する海水準変動を考慮した侵食（廃棄物埋設地の近くに、河川がある場合は下刻の進展に伴って谷幅が広がる側方の侵食も考慮し、海岸がある場合は海食による侵食も考慮する）」（解釈第 12 条 2））の量（鉛直変位量）について、公的研究機関が取りまとめたデータベース等を活用した文献調査、物理探査、ボーリング調査等により過去に形成された地形面と現在の地形面とのオフセット量の系統的な評価・解析や、氷期－間氷期サイクル１回以上を経た地形面を用いた変動量の評価の結果を踏まえ、設定されていることを確認する。

3　第１項第３号の規定は、廃棄物埋設地の位置について、資源利用のための掘削が行われる可能性がある十分な量及び品位の鉱物資源の鉱床の存在を示す記録が存在しないこと並びに地温勾配が著しく大きくないことを求めている。ここで「鉱物資源」とは、鉱業法（昭和２５年法律第２８９号）第３条第１項に規定されているものをいう。

【審査ガイドに記載する内容】

○　鉱物資源の鉱床の存在を示す記録

・「資源利用のための掘削が行われる可能性がある十分な量及び品位の鉱物資源の鉱床の存在を示す記録が存在しないこと」（解釈第 12 条 3）について、公的研究機関が取りまとめたデータベース等を対象に調査されていることを確認する。

○　発電の用に供する地熱資源の掘採

・「地温勾配が著しく大きくない」（解釈第 12 条 3）について、次のことが確認されていることを確認する。

－　公的研究機関が取りまとめたデータベース等を活用した文献調査の結果を踏まえ、廃棄物埋設地が設置される地点における地温勾配（地下増温率）が 100℃/キロメートルを大きく超える記録が確認されない、又は廃棄物埋設地が設置される地点で測定された地温勾配が 100℃/キロメートルを大きく超えない。

－　廃棄物埋設地の周辺数キロメートルまでの範囲において発電の用に

供する蒸気井が設置されていない。

4　第１項第４号に規定する「人工バリア」とは、次に掲げる要件を満たすものをいう。

一　人工バリアを設置する環境において（材料管理及び施工管理の方法の見通しを含め）技術的に施工可能なものであること。

二　埋設する放射性廃棄物の性状、当該放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質の特性（放射能濃度、放射能量、半減期及び移動に係るものをいう。）及び人工バリアを設置する環境並びに設計時点における国内外の関連技術等を踏まえて、劣化及び損傷に対する抵抗性に優れたものであること。

三　廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する機能が、当該人工バリアの地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能その他の特性のうち、一つのものに過度に依存しないものであること。

5　第１項第４号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する」とは、地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まって、廃棄物埋設地から放射性物質が漏えいしない状況（工学的に有意な漏えいがない状況）を達成することをいう。

6　第１項第５号に規定する「安全機能が損なわれないものであること」とは、放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設され、又は設置された物が含有する可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質その他の化学物質の性質及び量に応じて、廃棄物埋設地の安全機能に有意な影響を及ぼさないよう対策を講じたものであることをいう。

7　第１項第６号については、埋設の終了後３００～４００年以内を目安とし、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるものであること。

8　第１項第６号に規定する「廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるもの」とは、次に掲げる要件を満たすものをいう。

一　廃止措置の開始後から数１０万年を経過するまでの間において海水準変動に伴う侵食の影響を受けるおそれがある場所に廃棄物埋設地を設置する場合には、廃止措置の開始後から１０万年が経過した時点において、放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設され、又は設置された物が混合したものと公衆との接近を仮定した設定に基づき、評価される公衆の受ける線量が２０ミリシーベルト／年を超えないこと。

二　設計時点における知見に基づき、廃棄物埋設地の基本設計について、次に掲げる各シナリオに基づき、埋設した放射性廃棄物が廃止措置の開始後に公衆に及ぼす影響を評価した結果、それぞれの基準を満たすこと。これらの評価は、廃棄物埋設施設の敷地及びその周辺に係る過去の記録や、現地調査等の最新の科学的・技術的知見に基づき行うこと。

イ　自然事象シナリオ

自然現象による放射性物質の廃棄物埋設地の外への漏出、天然バリア

（廃棄物埋設地の外に漏出した放射性物質の移動を抑制する機能を有する岩盤等をいう。以下同じ。）中の移動、河川等への移動及び現在の廃棄物埋設地周辺の人の生活様式等を考慮したシナリオ（廃棄物埋設地の掘削を伴うものを除く。）を対象とする。シナリオの設定等は次のとおりとし、当該シナリオについて評価される公衆の受ける線量が、３００マイクロシーベルト／年を超えないこと。

(1) 被ばくに至る経路、人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータの設定等は次のとおりとする。

① 被ばくに至る経路は、放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質が廃棄物埋設地の外へ移動し、更に天然バリア中を移動して生活環境に至るまでの経路及び生活環境において公衆が被ばくするまでの主要な放射性物質の経路について、科学的に合理的と考えられる範囲において最も厳しいものを選定する。

② 人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータは、科学的に合理的と考えられる範囲における組み合わせのうち最も厳しい設定とする。

(2) 同一の事業所内に複数の廃棄物埋設地の設置が予定される場合は、これらいずれの廃棄物埋設地においても、埋設した放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質が廃棄物埋設地の外へ移動するものとして、線量の評価を行う。

(3) 評価の対象とする期間は、廃止措置の開始後から公衆が受ける線量として評価した値の最大値が出現するまでとする。ただし、上記一に規定する場合においては、廃止措置の開始後から公衆が受ける線量として評価した値の最大値が出現するまで又は１０万年が経過するまでのうちいずれか短い期間とする。

ロ　ボーリングシナリオ

廃止措置の終了直後における一回の鉛直方向のボーリングによって廃棄物埋設地が損傷し、人工バリア及び第１項第４号に規定する機能と同等の機能を有するものにより区画された領域の放射性物質が漏えいすることを仮定した設定に基づき、評価される公衆の受ける線量が２０ミリシーベルト／年を超えないこと。この際、区画別放射能量が最も多くなる区画が損傷するとして評価すること。

9　第２項の規定は、中深度処分の廃止措置の終了後における公衆の受ける線量の評価について不確実性が大きいことを踏まえ、当該線量を実行可能な範囲でできる限り低減することを目的として、複数の設計の案を比較検討し、放射性物質の移動を抑制する性能に優れた設計を策定することを求めている。設計の策定は次に掲げる手順により実施すること。

一　以下を満たす複数の設計の案を策定する。

イ　それぞれの設計が廃棄物埋設地を設置する岩盤等の水理地質構造、区画別放射能量、人工バリアの基本的な構造及び仕様において互い

に異なる内容を含むこと。

ロ　廃止措置の終了後における廃棄物埋設地の外への放射性物質の移動（当該移動した放射性物質の更なる移動を含む。）を十分に抑制することにより、上記８二イの自然事象シナリオについて次のとおり設定し評価した公衆の受ける線量を十分に低減できること。

① 被ばくに至る経路は、放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質が廃棄物埋設地の外へ移動し、更に天然バリア中を移動して生活環境に至るまでの経路及び生活環境において公衆が被ばくするまでの主要な放射性物質の経路について、最も可能性が高い、又は保守的な設定とする。

② 人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータは、不確実性を考慮した上で科学的に通常起こり得ると考えられる範囲（この範囲内の状態を「通常の状態」という。）において保守的な設定とする。ただし、当該範囲を定められない場合は、科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい設定とする。

ハ　法第５１条の二第一項第二号の許可を受けようとする者が実行可能であること。

二　上記一を満たす設計の案の中から、上記一ロについて人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータの設定を通常の状態において最も可能性が高いものとし評価した公衆の受ける線量が最も小さくなる設計又はその他の理由で廃止措置の終了後における当該廃棄物埋設地の外への放射性物質の移動を抑制する性能（当該移動した放射性物質の更なる移動を抑制する性能を含む。）が最も優れた設計を選定する。

【審査ガイドに記載する内容】

○　「公衆の受ける線量を十分に低減できる」

・「公衆の受ける線量を十分に低減できる」（解釈第 12 条 9 一ロ）について、次のような考え方に基づき判定されていることを確認する。

－　自然事象シナリオ（解釈第 12 条 8 二イ）について、「被ばくに至る経路」及び「人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータ」を解釈第 12 条 9 一ロ①及び②のとおり設定し評価した公衆の受ける線量が、おおむね 100 マイクロシーベルト／年を超えない。

第十三条は、ピット処分及びトレンチ処分に係る廃棄物埋設地に関する条目であり、今回の検討では対象としないことから、ここでは割愛する。

第十四条は、放射線を管理するための施設に関する定義について示されている。

第十四条　放射線管理施設

１　　第１４条に規定する「放射線管理施設」とは、放射線被ばくを監視及び管理するため、放射線業務従事者の出入管理、汚染管理、除染等を行う施設並びに放射

線業務従事者等の個人被ばく管理に必要な線量計等の機器をいう。
2　（略）

第十五条では、廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質を監視するための設備について示されている。

第十五条　監視測定設備
1　第１号に規定する「廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度又は廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質」及び「廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度又は線量」を監視し、及び測定できる設備は、次に掲げる要件を満たすものをいう。
一　中深度処分に係る廃棄物埋設施設は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度又は廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質を監視及び測定できる設計であること。
二　（略）
三　（略）
2　上記１の設備は、次に掲げる要件を満たすものをいう。
一　（略）
二　（略）
3　第１号に規定する「廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質」とは、 設置した人工バリアの破損等に伴い著しい変化が生じる地下水の成分、人工バリアの異常な劣化を検知するために用いるトレーサーをいう。
4　（略）
5　（略）

第十六条は新設された条目であり、廃棄物埋設地が水没した場合に安全機能が喪失しないための設備について示されている。

第十六条　排水施設
1　第１６条に規定する「廃棄物埋設地の水没により当該廃棄物埋設地の安全機能が損なわれることを防止するための施設」とは、坑道及び廃棄物埋設地への雨水及び地下水の流入量を踏まえて、外部電源系統からの電気の供給が停止した場合においても使用することができる予備電源（停電等の外部電源系の機能喪失時に、排水設備を少なくとも７日間作動するために十分な容量及び信頼性を有する常設のものをいう。）を設けた排水施設をいう。

第十七条は、廃棄物の保管施設の設計について、ALARA を踏襲した考え方が示されている。

第十七条　廃棄施設

１　　第１項の「周辺監視区域の外の空気中及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質の濃度を十分に低減」については、平常時に周辺環境に対して放出される放射性物質による公衆の受ける線量が、第８条第１項に規定する「廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による事業所周辺の線量」及び第１３条第１項第１号及び第２号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出」により公衆の受ける線量を含め、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、ＡＬＡＲＡの考え方の下、実効線量で５０マイクロシーベルト／年以下であること。

２　　（略）

３　　第１項及び第２項に規定する「保管廃棄する施設」とは、事業規則第２条第１項第２号ヌに規定する廃液槽及び保管廃棄施設をいう。

第十八条では、停電等の外部電源機能喪失時に、設備が作動するための予備電源に関する内容が示されている。

第十八条　予備電源

１　　第１８条に規定する「予備電源」とは、停電等の外部電源系の機能喪失時に、監視、警報、通信連絡等に必要な設備・機器を作動するために十分な容量及び信頼性のある常設の予備電源をいう。なお、予備電源については、廃棄物埋設施設における事故・異常発生時において緊急を要する事態が想定されない場合は、仮設電源（可搬型）によることができる。

第十九条は、通信連絡設備等に関する内容が示されており、中深度処分における、避難時の照明機器や永続的な標識を設けた安全避難通路について記載されている。

第十九条　通信連絡設備等

１　　（略）

２　　（略）

３　　（略）

４　　第３項に規定する「事業所内の人の退避のための設備」とは、次に掲げるものをいう。なお、避難用の照明については、廃棄物埋設施設における異常発生時において緊急時の避難を要する事態が想定されない場合は、可搬型の仮設照明によることができる。

一　中深度処分にあっては、通常の照明用電源喪失時においても機能する避難用の照明及び単純、明確かつ永続的な標識を設けた安全避難通路（異常発生時に避難する者の安全確保策を講ずることができるものに限る。以下同じ。）であって放射性廃棄物の運搬に用いる通路とは別の地下から地上への退避のための通路並びに地下における待避区域及び通常の換気用電源喪失時においても機能する換気設備及び呼吸補助器

二　ピット処分及びトレンチ処分にあっては、通常の照明用電源喪失時においても機能する避難用の照明及び単純、明確かつ永続的な標識を付けた安全避難通路

(2) 中深度処分の規制に関する調査・整理のまとめ

本項では、技術オプションの検討にあたり、原子力規制庁によって改正された中深度処分の規則等を調査・整理した。規則には、廃棄物埋設地の設計に対する様々な要求が記載されており、中でも技術オプションを検討する上で考慮すべきと考えられる記載について以下にまとめる。

- 人工バリアは技術的に施工可能なものであることが要求されており、オプションを絞り込む段階で施工実現性について検討する必要がある。
- 廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する機能について、一つのものに過度に依存しないことが要求されており、オプションは複数のバリア機能を有している必要がある。
- 廃止措置後の線量評価は不確実性が大きいことを踏まえて、複数の設計案に対し比較検討を行うことが要求されており、オプションの絞り込みは複数の設計案を抽出できる構造になっている必要がある。
- 複数の設計案は岩盤等の水理地質構造や人工バリアの構造及び仕様が互いに異なるものであることが要求されており、天然バリアと人工バリアのそれぞれで異なる設計が必要である。
- 自然事象シナリオにおいては、公衆の受ける線量を十分に低減できる目安として100μSv/y が提示されており、オプションの絞り込みにあっては留意する必要がある。

5.1 節の参考文献

[1] 原子力規制委員会：第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の改正案、2021
[2] 原子力規制委員会：第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る関係規則等の改正及び中深度処分に係る審査ガイドの策定、2021
[3] 原子力規制委員会 : 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈、2021
[4] 原子力規制委員会：中深度処分の廃棄物埋設地に関する審査ガイド、2021

5.2　技術オプションの検討

5.2.1　検討フローの策定及び検討条件の設定

(1) はじめに

本検討では、規制要求を鑑みた中深度処分施設の設計最適化に向け、設計オプションを選定する考え方を整理する。また、設計オプションを選定するための手法について検討し、選定手法を試行する。

中深度処分施設を設計する際には、図 5.2-1 に示すような設計フローが想定される。

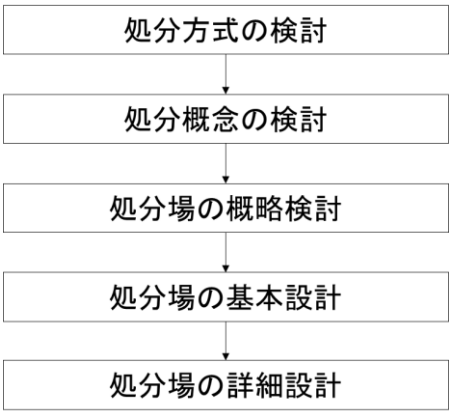


図 5.2-1　想定される設計フロー

処分方式の検討では、例えば、サイロやトンネル等の処分方式の中から、中深度処分に対してより適切なものを選定する。処分概念の検討では、選定した処分方式を基に人工バリアの構成について検討する。原子力規制委員会[1]によると、人工バリアには放射性物質の移行を抑制する機能が要求されている。土木学会の検討[2]によると、廃棄物埋設施設は複数の部材で構成されており、それらの部材は、放射性物質を抑制するための異なる機能を有している（表 5.2-1 参照)。表 5.2-1 に示される通り、移行抑制機能として核種収着性、低拡散性、低透水性等が想定されている。処分概念の検討では、それらの機能を持つ人工バリアから適切な組み合わせを抽出・選定する。

「中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、既往検討成果の調査と技術オプションの検討」の初年度（令和 2 年度）では、処分方式及び処分概念について概略的な検討を行った。そこで、今年度（令和 3 年度）は、次の段階にあたる処分場の概略検討を実施することとした。処分場の概略検討では、基本設計に至る前段階として人工バリアの仕様について検討する。人工バリアの仕様としては、使用材料、材料の配合や寸法が考えられるが、材料に関しては、規制に示される BAT（Best Available Technique）の観点から、最も優れたものを選定すると考えられる。一方で、人工バリアの寸法は、構成される部材の機能によって適切な数値があると考えられる。例えば、低拡散性の機能を持つバリア部材として一般的なセメント系の部材は、部材厚が増大するほど低拡散性も増大する一方で、ひび割

れによる水みち形成のリスクが考えられる。このように、人工バリアの寸法は BAT の観点で設定することが難しいと考えられることから、本検討では、人工バリアの寸法に主眼を置いた検討を行う。

表 5.2-1　廃棄物埋設施設の各部位の要求される主要な機能（例）[2]

			区画内充てん材	コンクリートピット	低拡散層	低透水層	空洞内充てん材	埋戻し材	処分空洞
基本安全機能		閉じ込め	－	●	－	●	－	－	－
		遮へい	●	●	●	－	－	－	－
	移行抑制	核種収着性	●	●	●	－	－	－	－
		低拡散性	－	－	●	－	－	－	－
		低透水性	－	－	－	●	●	－	－
		卓越した移行経路形成の防止	－	－	－	－	－	●	－
	離隔	離隔距離の確保	－	－	－	－	－	－	●
		容易な人間侵入の抑制	－	－	－	－	－	●	－
操業上の機能			－	●	●	●	－	－	●

具体的な検討フローを策定するにあたり、規制の考え方を整理する。規制では、異なる特性を持つ複数の天然バリア候補と、異なる性質を持つ複数の人工バリア候補をそれぞれ組み合わせ、組み合わせに対して比較検討を行うこととしている。比較検討によって抽出された複数の組み合わせに対して被ばく線量評価を行い、そのうち最も線量の低い組み合わせを選定することが要求されている。しかしながら、この手法をそのまま適用し、網羅的な組み合わせに対して被ばく線量評価を行った場合、より線量が低い天然バリアと、より線量が低い人工バリアの組み合わせが選定されることになり、際限のない検討になる恐れがある。例えば図 5.2-2 に示すように、透水性が低い泥岩層と、潤沢なバリア層で覆われた極端な組み合わせが選定される可能性があり、これは規制に示される ALARA（As Low As Reasonably Achievable）の考え方に必ずしも則していないと考えられる。

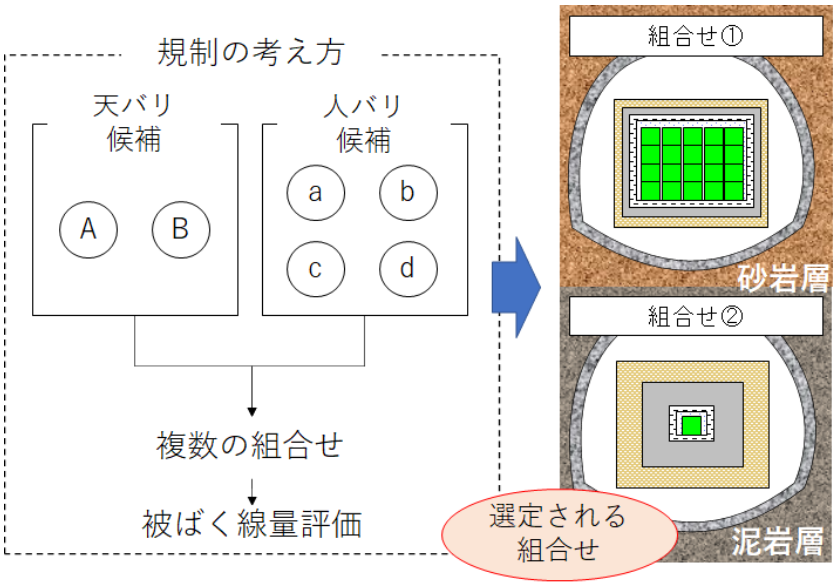


図 5.2-2　規制の考え方を踏襲した組合せ選定の考え方

そこで、本検討では、天然バリアの特性を考慮した上で、最適化した人工バリアの仕様（寸法）を選定する際の考え方を整理した。選定の考え方について、図 5.2-3 に示す。

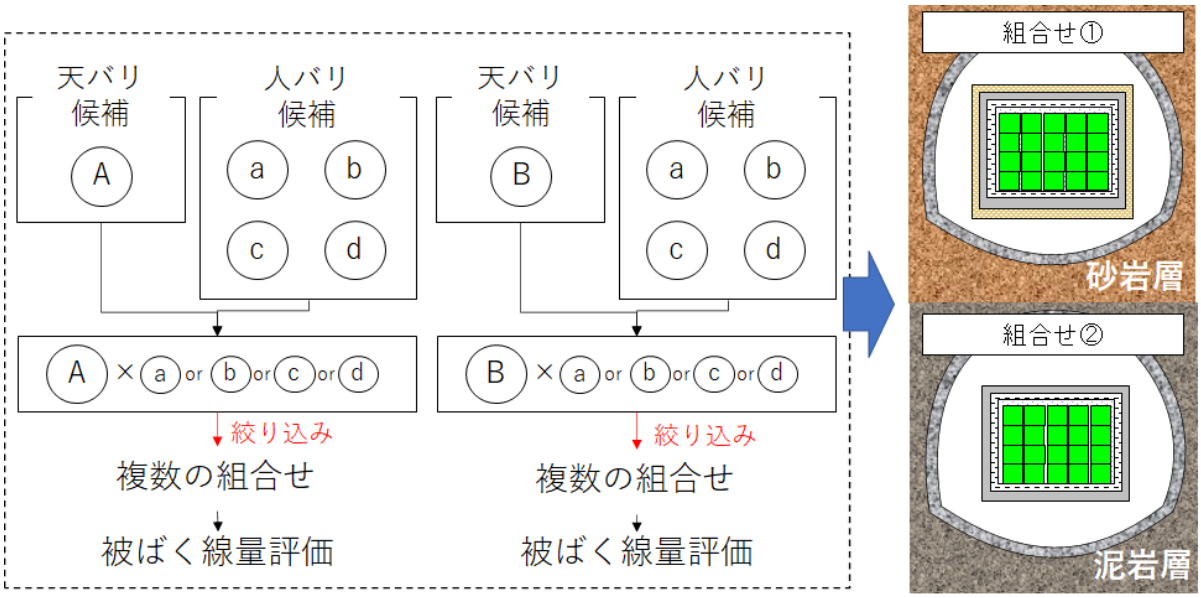


図 5.2-3　本検討で整理した組合せ選定の考え方

図 5.2-3 に示すように、複数の組み合わせを抽出するためには、絞り込みを行う必要がある。そこで、絞り込み手法について検討するにあたり、検討条件を設定する。

(2) 検討条件の設定

5.2.1 (1) でも述べたように、施設閉鎖後長期に亘って人工バリアに要求される主な機能は核種移行抑制である。電事連で検討されている処分概念及び人工バリア構成[3]（図 5.2-4 参照）を基本の考え方とした場合に、核種移行抑制に対する影響が大きいと考えられる要素として以下の 3 つに着目した。

- 低透水層の仕様（寸法）
- 低拡散層の仕様（寸法）
- 断面当たりの廃棄体数

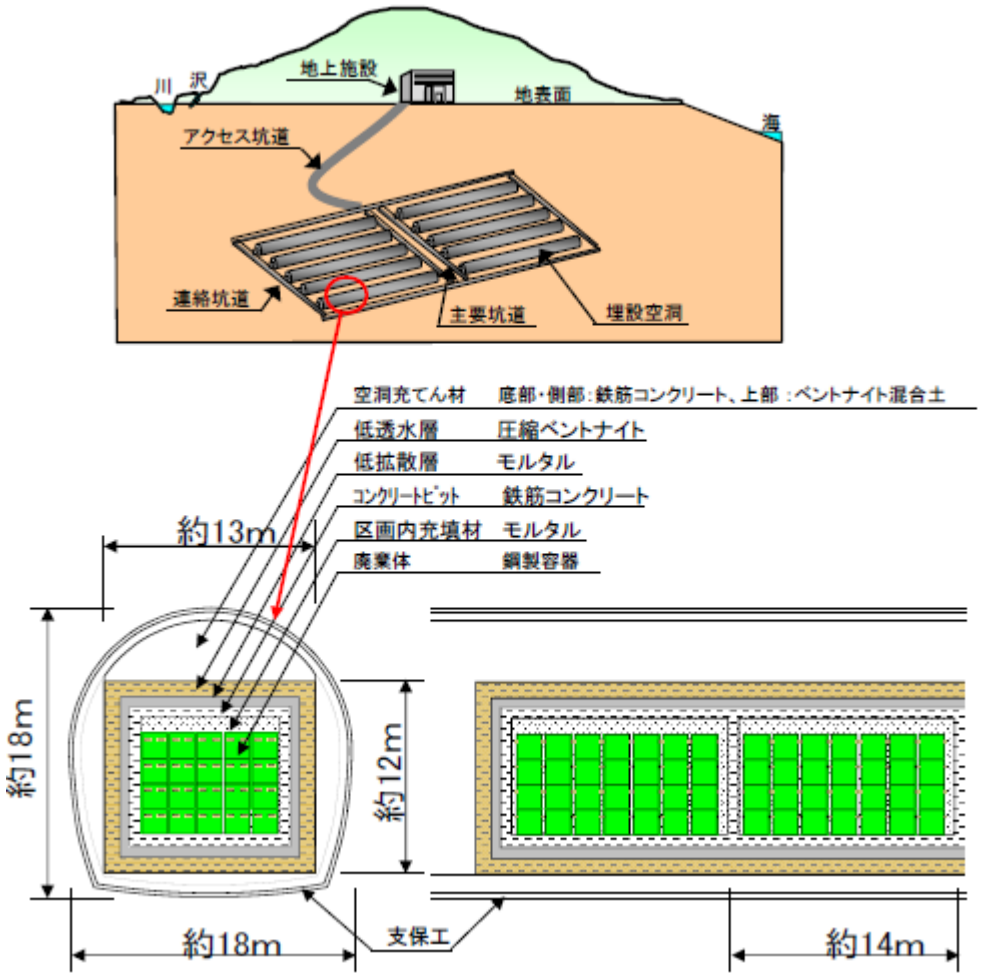


図 5.2-4 基本とする処分概念及び人工バリア構成[3]

処分空洞の寸法は、周辺岩盤の特性を踏まえた力学安定性評価を実施して設定することとなる。しかし、具体的な処分サイトが決定していないため、本検討では、仮想的な地質環境を想定した検討を実施することとし、図 5.2-4 を参考に、想定する地質環境において最大 18m 級の処分空洞を掘削できることを仮定して検討を進める。上述の人工バリアで使用される材料は、BAT の観点から最も性能が優れたものが選定されると考えられる。したがって、人工バリアに使用される材料及び配合の詳細についてここでは言及しないが、低透水層はベント

ナイト系部材、低拡散層及び区画内充てん材はセメント系材料とする。また、廃棄体は電事連で検討されているものを踏襲する[3]（図 5.2-5 参照）。

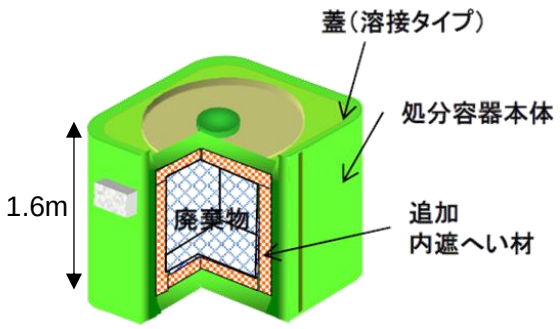


図 5.2-5　基本とする廃棄体仕様（[3]に追記）

(3) 検討フローの策定

5.2.1 (2) で設定した 3 つの要素をそれぞれ展開（低透水層の部材厚を増減、廃棄体数を増減）し、組み合わせることによって複数の人工バリアオプションを抽出する。その際、長期安全性に寄与する要素の組み合わせを把握するために、各要素が長期安全性に与える影響の程度を感度解析によって確認する。感度解析によって安全性に対する 3 つの要素の影響度を把握した上で、天然バリアの特性を考慮した複数の設計オプションを選定する。更に、選定した複数の設計オプションを比較検討することによって、被ばく線量評価に供する複数の設計案に絞り込む。本検討における絞り込みフローを図 5.2-6 に示す。

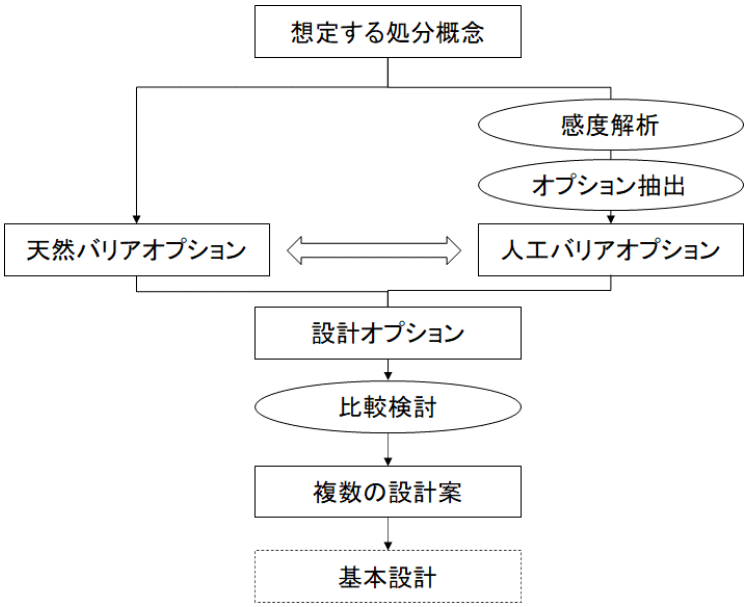


図 5.2-6　本検討における絞り込みフロー

絞り込みフローのうち感度解析、オプション抽出、比較検討について詳述する。

5.2.2　長期安全性に係る感度解析

（1）感度解析の検討方針と概要

本項では、5.2.1 (2) で示した 3 つの要素である低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、及び断面あたりの廃棄体数に加えて、岩盤の透水係数を変動パラメータとした核種移行解析を実施した。感度解析実施にあたり設定した解析ケースを表 5.2-2 に示す。

表 5.2-2　感度解析のケース一覧

岩盤の透水係数（m/s）	廃棄体定置数（体/断面）	低透水層部材厚（cm）	低拡散層部材厚（cm）
1E-6	20（5 列×4 段）	100	0～300
	20（5 列×4 段）	0～300	60
	12（4 列×3 段）	100	60
	20（5 列×4 段）		
	30（6 列×5 段）		
1E-7	20（5 列×4 段）	100	0～300
	20（5 列×4 段）	0～300	60
	12（4 列×3 段）	100	60
	20（5 列×4 段）		
	30（6 列×5 段）		
1E-8	20（5 列×4 段）	100	0～300
	20（5 列×4 段）	0～300	60
	12（4 列×3 段）	100	60
	20（5 列×4 段）		
	30（6 列×5 段）		
1E-9	20（5 列×4 段）	100	0～300
	20（5 列×4 段）	0～300	60
	12（4 列×3 段）	100	60
	20（5 列×4 段）		
	30（6 列×5 段）		
1E-10	20（5 列×4 段）	100	0～300
	20（5 列×4 段）	0～300	60
	12（4 列×3 段）	100	60
	20（5 列×4 段）		
	30（6 列×5 段）		

※ハッチングは変動パラメータを示す

天然バリアの特性を考慮した人工バリアを抽出するにあたって、天然バリア特性を岩盤の透水係数で代表させた。昨年度の検討[4]によると、天然バリアの透水係数は、安全性に対する影響が大きく、人工バリアに要求される安全機能を大きく変化させることが確認されている（図 5.2-7 参照）。

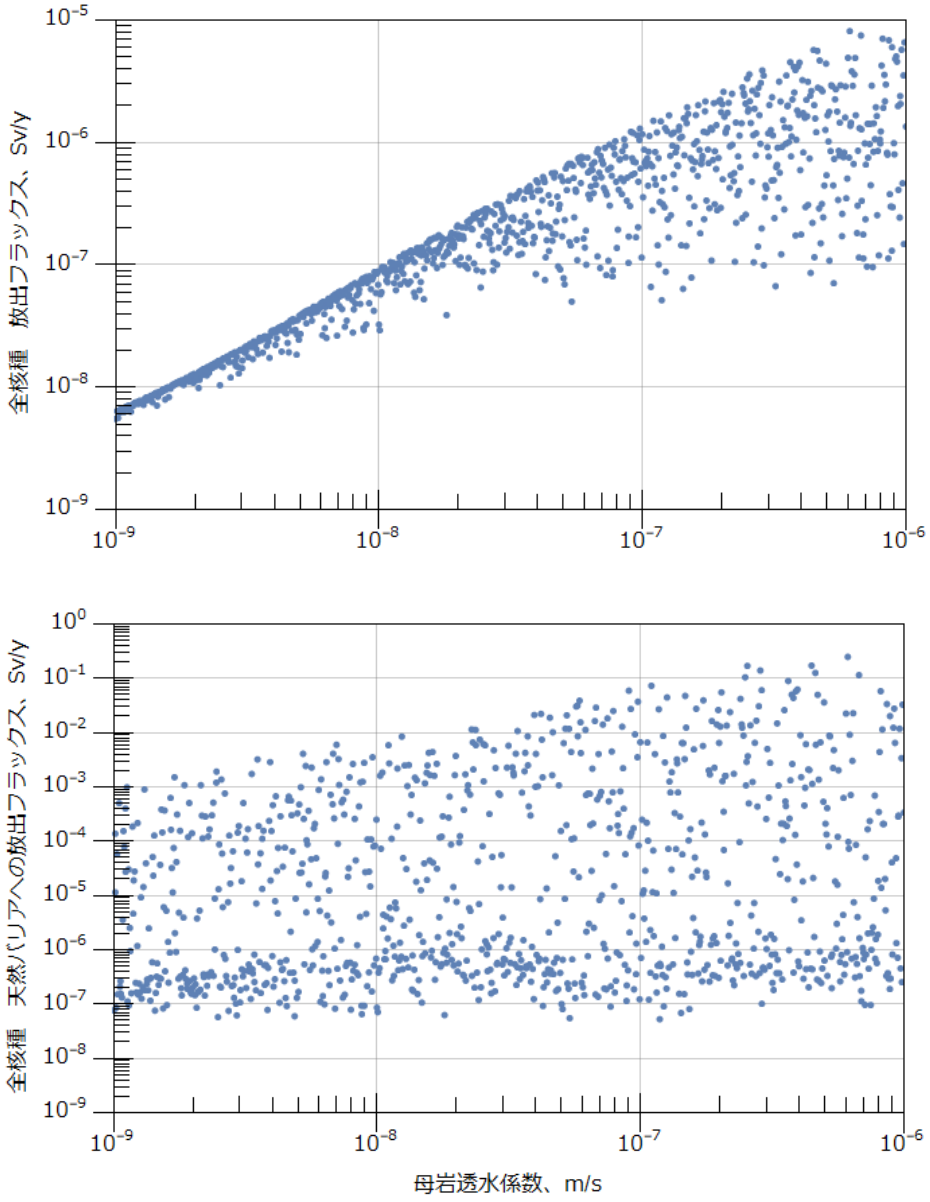


図 5.2-7　母岩の透水係数を変動した場合の放出フラックス[4]

本検討では、上記の検討成果を参考に、岩盤の透水係数を変動パラメータとして設定した。感度解析における解析条件及び解析結果について詳述する。

(2) 解析条件の設定

5.2.1(1)で示したように、検討条件として以下の 3 つの項目に着目した感度解析を実施した。

- 低透水層（粘土系材料）の厚さ
- 低拡散層（セメント系材料を想定）の厚さ
- 断面当たりの廃棄体数

1) 解析モデル

解析モデルの概要を以下に示す。

- 施設内部の地下水流量を多重円筒モデルで算出
  - ✓ 地下水の流向は坑道に直交しているものと仮定した。

- 核種移行モデルは、一次元の核種の移行で表現
  - ✓ 処分坑道の各領域の体積または部材厚さを保存し核種移行モデルを構成。
  - ✓ 部材体積を保存：廃棄体の体積、モルタル部（構造躯体を含む）の体積。
  - ✓ 部材厚さを保存：低拡散層の厚さ、低透水層の厚さ。

- 廃棄体部分は核種移行モデルではモデル化されない、廃棄体中の全核種が 1 年でモルタル層に移行する設定
  - ✓ 金属廃棄物等からの放射性核種の溶出挙動は考慮していない。

- 掘削影響は核種移行モデルではミキシングセルとしてモデル化（下流側への移行は流量と濃度のみに依存）。

- 天然バリア 100m 移行後のフラックスを算出し、被ばく線量に換算
  - ✓ 坑道の長短によらず、放射性核種は同時に 100m 厚さの母岩に移行する。

- 出力は生活圏での線量（毒性度）の時間変化、生活圏でのピーク線量、人工バリアからの核種毎ピーク線量（毒性度）としている。

- 生活圏被ばくモデルにおいて、灌漑利用の経路を追加
  - ✓ 生活圏の被ばくは、河川水の飲用、河川水摂取の畜産物摂取、河川からの水産物摂取、灌漑による農産物摂取、灌漑土壌からの外部・吸入被ばくの 5 種類である。

- 広域の動水勾配を 1/100 とする

数値解析モデルは GoldSim[5]で作成した。感度解析の実施を目的として、低拡散層の厚さ、低透水層の厚さ、断面当たりの廃棄体数が入力パラメータとして取り扱えるように解析モデルの調整を行った。

水理解析（各領域の流量の算出）は 2 次元の多重円筒モデルの解析解[6]を用いた。したがって、領域内の地下水流量は、坑道長手方向に直交する流れを想定している。図 5.2-8 に解析モデルの概要を図示する。

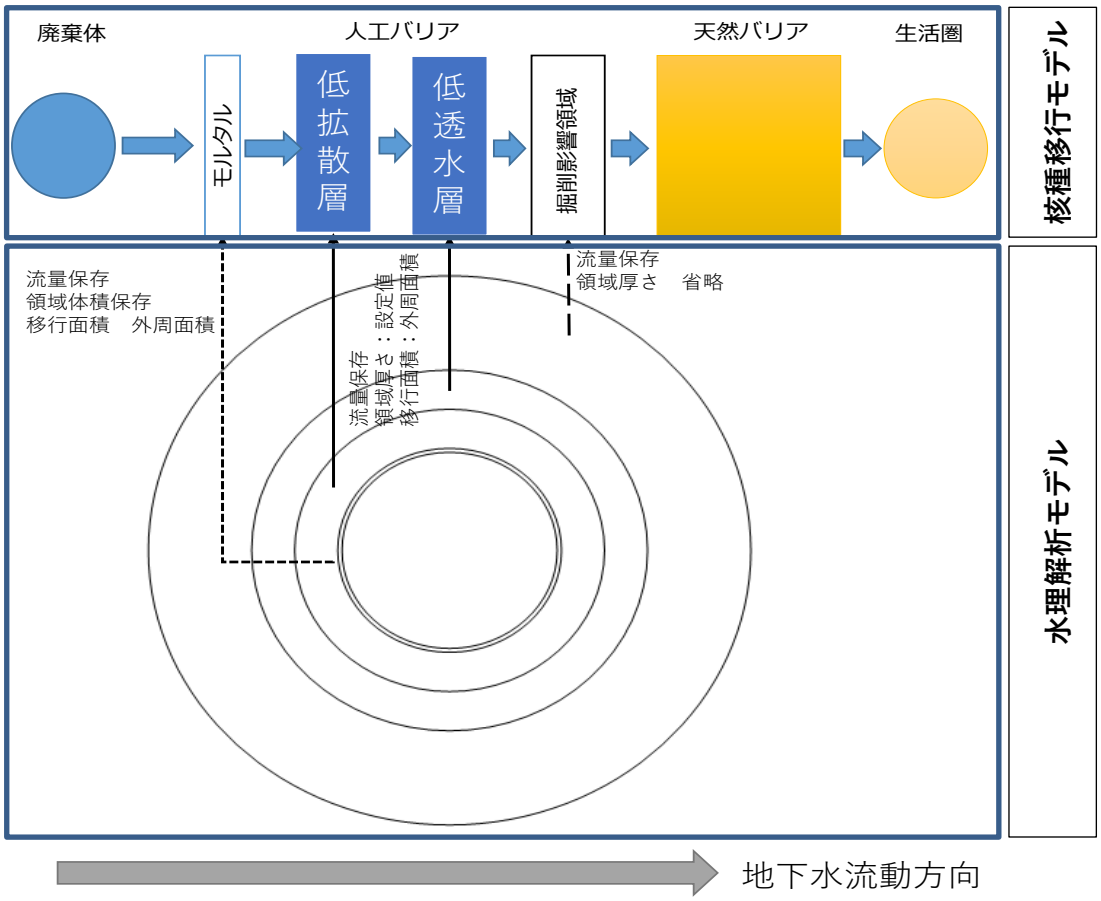


図 5.2-8　解析モデルの概要

2）感度解析におけるデータセット

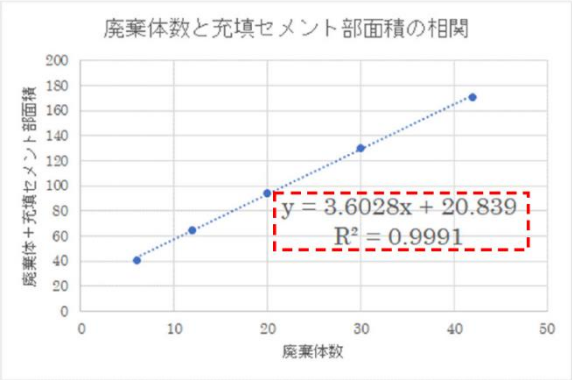
a．感度解析対象データセット

感度解析で対象としたデータセット（パラメータ）は、トンネル型の処分形態を前提として、現状の工学技術において妥当な範囲を選択した。

表 5.2-3 感度解析対象パラメータの範囲

データセット名	設定範囲
低拡散層（セメントの利用を想定）の厚さ	0～3m
低透水層（粘土系土質材料を想定）の厚さ	0～3m
断面当たりの廃棄体数	6、12、20、30、42

なお、断面当たりの廃棄体数に応じてトンネル径及び充填モルタル量が異なることから、設計上の体積（2 次元であることから面積）と廃棄体数の相関を取り入力値とした。

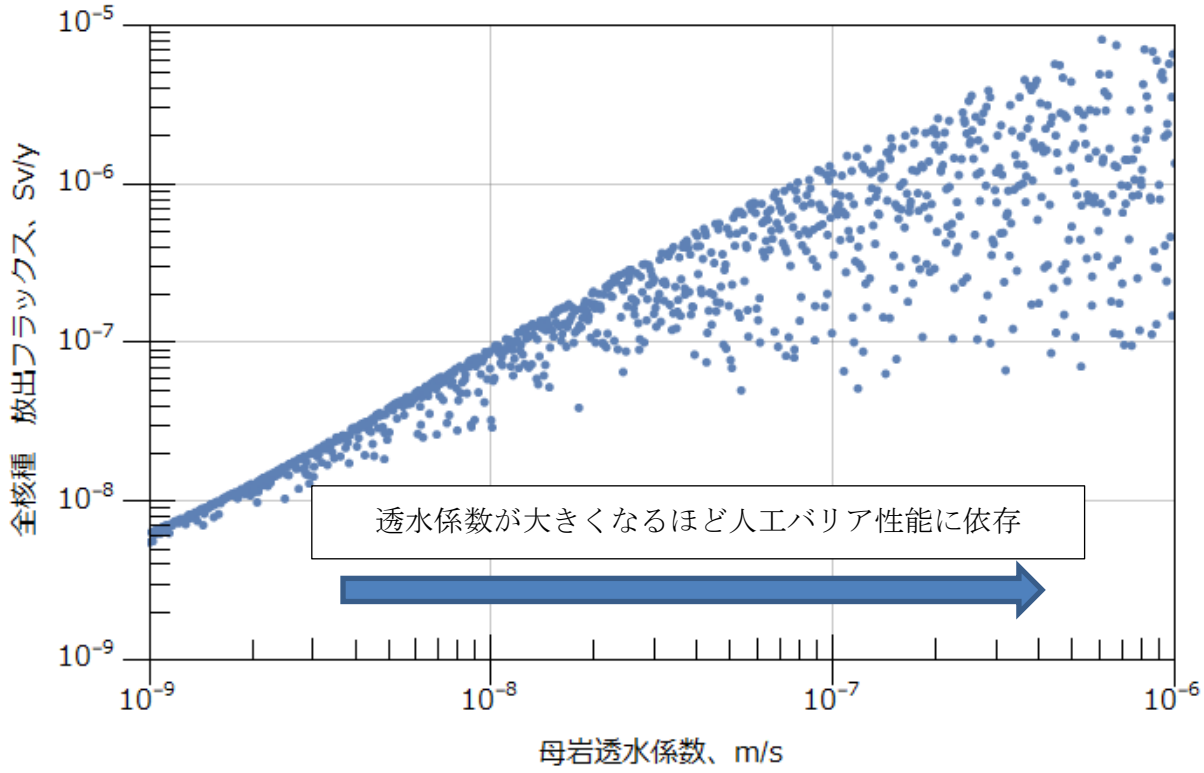


b．固定値として使用したデータセット

解析に利用したデータセット・パラメータ値を表 5.2-4～表 5.2-9 に示す。

部材の分配係数については、同様の化学環境下で取得・検討された浅地中処分の事業許可に係る値[7]を用いることとし、生活圏における線量換算係数については、一般性を持たせるために学会標準[8]の値を採用することとした。

透水係数に関しては、幅広く範囲を設定するとともに、結果のわかりやすさを重視して離散的な設定を行った。図 5.2-9 に 2020 年度の感度解析結果の一部を示す。透水係数の大きさにより、人工バリアの性能の範囲が同じであっても放出フラックの取りえる範囲は大きいことがわかる。天然バリアの性能に依存した適切な人工バリアの構成を考える必要があるものと予想される。そのため、天然バリアの透水性に関しては 1×10^{-10}～1×10^{-6}m/s の幅広い範囲で設定を行った。



2020 年度感度解析の結果より
低透水層の透水係数及び低拡散層の拡散係数、母岩透水係数を変動させた結果

図 5.2-9　放出フラックス（線量換算）と母岩透水係数の関係

表 5.2-4　データセット（その 1）

	実効拡散係数 [8]	間隙率 [8]	分散長割合 [6]	透水係数 [8]
	m^2/s	−	−	m/s
廃棄体層	−	−	−	1.0E-05 （保守値）
セメント 充填部	1.40E-09	0.35	体系長さの 1/10	1.0E-05 （保守値）
低拡散層	2.00E-11 10 万年経過時の設定値	0.2	体系長さの 1/10	1.0E-05 （保守値）
低透水層	陰イオン：4E-11 陽イオン：4E-10 中性：3E-10	0.4	体系長さの 1/10	3.0E-12 10 万年経過時の設定値
掘削影響 領域	−	−	−	母岩の 10 倍
母岩	9.40E-10	0.47	体系長さの 1/10	10^{-10}~10^{-6} m/s 1 桁刻み 6 ケース

表 5.2-5　データセット（その 2）

パラメータ	設定根拠	備考、参照先
インベントリー	[9]（学会標準 2008）	表 5.2-6　インベントリー参照
セメント充填部 分配係数	[7]（事業許可申請書） 基本シナリオ セメント系充填材－埋設施設	表 5.2-7　分配係数設定値参照
低拡散層 分配係数	[7]（事業許可申請書） 基本シナリオ コンクリート	
低透水層 分配係数	[7]（事業許可申請書） 基本シナリオ　難透水性覆土	
母岩分配係数	[7]（事業許可申請書） 基本シナリオ 鷹架層	
線量換算係数	[8]（学会標準 2016） 地表水（河川水）利用：飲用 地表水利用：水産物摂取 地表水利用：畜産物摂取 地表水灌漑利用：吸入＋外部 地表水灌漑利用：農産物摂取	・各被ばく経路の加算値を使用 ・灌漑での土壌濃度は定常解を用いて算出 ・河川流量：$10^7 m^3/y$ ・表 5.2-8　線量換算係数設定値参照 ・土壌中の分配係数は表 5.2-9 灌漑土壌に対する分配係数設定値参照

表 5.2-6　インベントリー設定値

---	原子炉廃棄物　総量 19061t	サイクル廃棄物　総量 178977t	学会標準　加算値
Unit	Bq	Bq	Bq
H-3	1.30E+16	1.52E+15	1.45E+16
C-14	undefined	3.40E+14	3.40E+14
Cl-36	5.91E+13	5.91E+12	6.50E+13
Ca-41	7.24E+12	7.34E+11	7.98E+12
Co-60	4.19E+18	6.44E+17	4.84E+18
Ni-59	2.48E+16	1.36E+15	2.61E+16
Ni-63	3.05E+18	2.15E+17	3.26E+18
Se-79	0.00E+00	5.91E+11	5.91E+11
Sr-90	1.28E+14	1.56E+17	1.56E+17
Zr-93	0.00E+00	1.58E+14	1.58E+14
Nb-93m	0.00E+00	3.76E+10	3.76E+10
Nb-94	1.72E+14	1.20E+14	2.91E+14
Mo-93	0.00E+00	4.47E+12	4.47E+12
Tc-99	1.01E+13	4.30E+13	5.31E+13
Pd-107	0.00E+00	3.76E+10	3.76E+10
Ag-108m	undefined	3.76E+12	3.76E+12
Sn-121m	0.00E+00	6.26E+12	6.26E+12
Sn-126	0.00E+00	2.51E+12	2.51E+12
I-129	1.49E+09	undefined	1.49E+09
Cs-135	0.00E+00	9.66E+11	9.66E+11
Cs-137	3.24E+14	2.15E+17	2.15E+17
Sm-151	0.00E+00	3.58E+14	3.58E+14
Eu-152	7.24E+14	5.73E+11	7.25E+14
Eu-154	3.24E+14	9.13E+15	9.45E+15
Ho-166m	undefined	7.70E+07	7.70E+07

---	原子炉廃棄物　総量 19061t	サイクル廃棄物　総量 178977t	学会標準　加算値
Unit	Bq	Bq	Bq
Pb-210	0.00E+00	1.41E+03	1.41E+03
Ac-227	0.00E+00	2.86E+05	2.86E+05
Th-229	undefined	2.86E+06	2.86E+06
Th-230	0.00E+00	1.27E+07	1.27E+07
Th-232	0.00E+00	1.00E+01	1.00E+01
Pa-231	0.00E+00	1.97E+06	1.97E+06
U-232	0.00E+00	2.51E+10	2.51E+10
U-233	0.00E+00	5.01E+09	5.01E+09
U-234	0.00E+00	1.16E+12	1.16E+12
U-235	0.00E+00	5.37E+10	5.37E+10
U-236	0.00E+00	2.33E+11	2.33E+11
U-238	0.00E+00	2.68E+11	2.68E+11
Np-237	0.00E+00	1.20E+12	1.20E+12
Pu-238	0.00E+00	5.55E+15	5.55E+15
Pu-239	3.05E+12	1.29E+15	1.29E+15
Pu-240	0.00E+00	1.50E+15	1.50E+15
Pu-241	0.00E+00	1.97E+17	1.97E+17
Pu-242	0.00E+00	3.94E+12	3.94E+12
Am-241	undefined	3.04E+15	3.04E+15
Am-242m	0.00E+00	3.76E+13	3.76E+13
Am-243	0.00E+00	1.70E+13	1.70E+13
Cm-242	0.00E+00	6.98E+13	6.98E+13
Cm-243	0.00E+00	1.58E+13	1.58E+13
Cm-244	0.00E+00	1.79E+15	1.79E+15
Cm-245	0.00E+00	2.15E+11	2.15E+11
Cm-246	0.00E+00	5.19E+08	5.19E+08

Undefined-> 0

学会標準（2008）より[9]

表 5.2-7　分配係数設定値

KeyData	廃棄物埋設事業変更許可申請書（2018）			
---	基本シナリオ セメント系充填材－埋設施設	基本シナリオ コンクリート	基本シナリオ 難透水性覆土	基本シナリオ　鷹架層
Unit	m3/kg	m3/kg	m3/kg	m3/kg
H	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Be	2.0E-01	3.0E-03	3.0E-03	1.0E-01
C	5.0E-02	5.0E-02	0.0E+00	1.0E-04
Cl	1.0E-04	1.0E-04	0.0E+00	0.0E+00
Ca	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-01	1.0E-01
Co	2.0E-01	3.0E-03	3.0E-03	1.0E-01
Ni	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Se	2.5E-03	2.5E-03	7.4E-01	1.5E-01
Rb	8.0E-02	1.0E-02	1.0E+00	9.0E-01
Sr	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-01	1.0E-01
Zr	1.0E+00	3.0E-01	5.0E-01	2.0E-02
Nb	1.0E+00	3.0E-01	5.0E-01	2.0E-02
Mo	3.0E-03	1.0E-03	3.0E-04	1.0E-04
Tc	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Pd	1.3E-03	1.3E-03	2.7E-01	5.5E-02
Ag	8.0E-02	1.0E-02	1 8E-01	9.0E-02
Cd	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Sn	2.5E-01	2.5E-01	6.7E-01	1.3E-01
I	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
Cs	8.0E-02	1.0E-02	1.0E+00	9.0E-01
Ba	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-01	1.0E-01
La	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Pm	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Sm	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Eu	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Tb	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Ho	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Pt	1.3E-03	1.3E-03	2.7E-01	5.5E-02
Pb	9.0E-03	1.0E-02	7.0E-02	1.0E-01
Ra	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-01	1.0E-01
Ac	2.0E-02	3.0E-02	6.0E+00	1.0E-01
Th	8.0E-02	2.0E-02	3.0E-02	2.0E-02
Pa	8.0E-02	2.0E-02	3.0E-02	2.0E-02
U	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-03	1.0E-03
Np	0.0E+00	1.0E-03	0.0E+00	9.0E-04
Pu	8.0E-02	2.0E-02	3.0E-02	2.0E-02
Am	2.0E-02	3.0E-02	6.0E+00	1.0E-01
Cm	2.0E-02	3.0E-02	6.0E+00	1.0E-01

浅地中処分の事業許可に係る値[7]

表 5.2-8　線量換算係数設定値

	地表水飲用	水産物摂取(淡水)	地表水利用畜産物摂取	地表水灌漑農産物摂取	地表水灌漑農耕作業(吸入＋外部)
換算元	水中濃度	水中濃度	水中濃度	土壌中濃度	土壌中濃度
Unit	(Sv/yr)/(Bq/m3)	(Sv/yr)/(Bq/m3)	(Sv/yr)/(Bq/m3)	(Sv/yr)/(Bq/kg)	(Sv/yr)/(Bq/kg)
H-3	2.56E-11	4.28E-13	5 09E-12	5.04E-09	8.21E-16
Be-10	6.71E-10	1.02E-09	4 05E-12	5.28E-10	2.41E-11
C-14	3.54E-10	2.73E-07	3 00E-11	4.87E-08	3.86E-13
Cl-36	5.67E-10	8.66E-09	1 85E-10	5.58E-07	6.51E-11
Ca-41	1.16E-10	1.82E-09	5 89E-12	7.98E-09	1.71E-15
Co-60	2.07E-09	4.68E-08	2 33E-10	1.31E-09	3.65E-07
Ni-59	3.84E-11	6.49E-11	7 50E-11	1.97E-10	2.45E-12
Ni-63	9.15E-11	1.55E-10	1 79E-10	4.68E-10	1.41E-14
Se-79	1.77E-09	5.88E-09	3.96E-10	3.48E-08	5.10E-13
Rb-87	9.15E-10	2.93E-08	9 70E-10	3.60E-08	2.06E-12
Sr-90	1.89E-08	3.16E-08	8 77E-10	6.70E-07	8.51E-10
Zr-93	7.32E-10	3.44E-09	9 85E-13	1.44E-10	1.78E-12
Nb-93m	7.32E-11	3.44E-10	8 74E-15	1.44E-10	1.66E-12
Nb-94	1.04E-09	4.88E-09	1 24E-13	2.04E-09	2.35E-07
Mo-93	1.95E-09	3.30E-10	1 27E-10	7.68E-08	1.10E-11
Tc-98	1.22E-09	3.79E-10	3 58E-11	1.51E-07	2.00E-07
Tc-99	3.90E-10	1.21E-10	1.14E-11	4.84E-08	2.67E-12
Pd-107	2.26E-11	1.56E-11	6.44E-14	4.44E-10	1.07E-14
Ag-108m	1.40E-09	1.88E-09	2.10E-11	2.76E-09	2.45E-07
Cd-113m	1.40E-08	9.29E-08	2 80E-09	1.38E-06	3.10E-11
Sn-121m	3.42E-10	1.61E-08	4 88E-12	2.02E-08	5.01E-11
Sn-126	3.11E-09	1.46E-07	4.44E-11	1.84E-07	3.00E-07
I-129	6.71E-08	8.89E-08	8 30E-09	2.64E-07	3.61E-10
Cs-135	1.22E-09	1.86E-07	2 68E-10	1.70E-08	7.12E-13
Cs-137	7.93E-09	1.21E-06	1 74E-09	1.11E-07	8.50E-08
Ba-133	9.15E-10	3.85E-10	5 28E-11	9.00E-09	5.00E-08
La-137	4.94E-11	1.11E-10	1 30E-13	2.92E-11	4.00E-10
Pm-145	6.71E-11	4.25E-11	6 58E-15	9.77E-14	6.00E-10
Pm-146	5.49E-10	1.24E-09	1 56E-12	2.16E-10	1.05E-07
Sm-147	2.99E-08	6.52E-08	7 09E-11	2.35E-08	1.73E-10
Sm-151	5.98E-11	1.30E-10	1.42E-13	4.70E-11	1.20E-13
Eu-150	7.93E-10	2.03E-09	2.18E-12	3.12E-10	2.05E-07
Eu-152	8.54E-10	2.18E-09	2 35E-12	3.36E-10	1.65E-07
Eu-154	1.22E-09	3.12E-09	3 36E-12	4.80E-10	1.80E-07
Tb-157	2.07E-11	4.52E-11	6 61E-14	1.63E-11	3.25E-09
Ho-166m	1.22E-09	2.66E-09	3 89E-12	9.60E-10	2.60E-07
Pt-193	1.89E-11	1.31E-11	1 30E-12	1.86E-09	1.20E-13
Pb-210	4.21E-07	1.98E-06	1 07E-08	3.31E-07	2.22E-10
Ra-226	1.71E-07	2.21E-07	4.45E-09	2.22E-08	2.50E-07
Ac-227	7.32E-07	1.49E-06	2 79E-09	1.44E-07	7.03E-08
Th-229	3.72E-07	8.97E-07	2 00E-09	1.39E-09	4.80E-08
Th-230	1.28E-07	3.09E-07	6 89E-10	4.79E-10	2.97E-10
Th-232	1.40E-07	3.38E-07	7 54E-10	5.24E-10	4.69E-10
Pa-231	4.33E-07	1.43E-07	1 63E-09	8.52E-07	8.02E-09
U-232	2.01E-07	6.67E-08	7 66E-09	4.36E-08	1.72E-10
U-233	3.11E-08	1.03E-08	1.18E-09	6.73E-09	1.07E-10
U-234	2.99E-08	9.90E-09	1.14E-09	6.47E-09	7.65E-11
U-235	2.87E-08	9.49E-09	1 09E-09	6.20E-09	2.56E-08
U-236	2.87E-08	9.49E-09	1 09E-09	6.20E-09	6.41E-11
U-238	2.93E-08	9.70E-09	1.11E-09	6.34E-09	3.80E-09
Np-236	1.06E-08	1.25E-08	6 07E-11	4.80E-09	1.16E-08
Np-237	6.71E-08	7.88E-08	3 83E-10	3.04E-08	3.39E-08
Pu-236	5.31E-08	3.36E-08	5 21E-12	7.73E-11	3.63E-10
Pu-238	1.40E-07	8.88E-08	1 38E-11	2.04E-10	8.31E-10
Pu-239	1.53E-07	9.65E-08	1 50E-11	2.22E-10	9.08E-10
Pu-240	1.53E-07	9.65E-08	1 50E-11	2.22E-10	9.04E-10
Pu-241	2.93E-09	1.85E-09	2 87E-13	4.26E-12	1.69E-11
Pu-242	1.46E-07	9.26E-08	1.44E-11	2.13E-10	8.80E-10
Am-241	1.22E-07	2.75E-07	3 78E-11	4.56E-10	2.51E-09
Am-242m	1.22E-07	2.75E-07	3 78E-11	4.56E-10	3.04E-09
Am-243	1.22E-07	2.75E-07	3 78E-11	4.56E-10	3.17E-08
Cm-242	7.32E-09	1.65E-08	2.90E-11	2.59E-11	9.72E-11
Cm-243	9.15E-08	2.06E-07	3 63E-10	3.24E-10	1.96E-08
Cm-244	7.32E-08	1.65E-07	2.90E-10	2.59E-10	4.91E-10
Cm-245	1.28E-07	2.89E-07	5 08E-10	4.54E-10	1.33E-08
Cm-246	1.28E-07	2.89E-07	5 08E-10	4.54E-10	1.31E-09

学会標準[8]を使用

表 5.2-9　灌漑土壌に対する分配係数設定値

---	基本シナリオ　灌漑農耕土壌
Unit	m3/kg
H	0.0E+00
Be	3.0E+00
C	2.0E-03
Cl	1.5E-03
Ca	1.1E-01
Co	9.9E-01
Ni	1.1E+00
Se	1.8E+00
Rb	6.7E-01
Sr	1.5E-01
Zr	7.3E+00
Nb	2.0E+00
Mo	2.7E-02
Tc	1.5E-03
Pd	6.7E-01
Ag	1.5E+01
Cd	8.1E-01
Sn	1.6E+00
I	2.7E-02
Cs	2.7E-01
Ba	6.0E-02
La	6.5E-01
Pm	1.0E+00
Sm	3.0E+00
Eu	6.5E-01
Tb	6.5E-01
Ho	3.0E+00
Pt	9.0E-02
Pb	2.2E+01
Ra	2.4E+00
Ac	5.4E+00
Th	8.9E+01
Pa	6.6E+00
U	4.0E-01
Np	1.2E+00
Pu	1.8E+00
Am	1.1E+02
Cm	1.2E+01

事業許可申請書[7]を使用

3）解析ケース

解析ケースは、低透水層（粘土系材料）の厚さ、低拡散層（セメント系材料を想定）の厚さ、断面当たりの廃棄体数についての感度が判りやすいように、他のパラメータを固定して、対象とする部材のパラメータを設定した。この設定は、5.2.1(1)の設計案に基づいたものである。解析ケースを表 5.2-10 にまとめる。

表 5.2-10　解析ケース

	岩盤の透水係数	廃棄体定置数	低透水層部材厚	低拡散層部材厚
	m/s	体/断面	m	m
番号	基本ケース	20（5列×4段）	1	0.6
1-1	1E-06	20（5列×4段）	1	**0～3**
1-2		20（5列×4段）	**0～3**	0.6
1-3		**6（3列×2段）～42（7列×6段）**	1	0.6
2-1	1E-07	20（5列×4段）	1	**0～3**
2-2		20（5列×4段）	**0～3**	0.6
2-3		**6（3列×2段）～42（7列×6段）**	1	0.6
3-1	1E-08	20（5列×4段）	1	**0～3**
3-2		20（5列×4段）	**0～3**	0.6
3-3		**6（3列×2段）～42（7列×6段）**	1	0.6
4-1	1E-09	20（5列×4段）	1	**0～3**
4-2		20（5列×4段）	**0～3**	0.6
4-3		**6（3列×2段）～42（7列×6段）**	1	0.6
5-1	1E-10	20（5列×4段）	1	**0～3**
5-2		20（5列×4段）	**0～3**	0.6
5-3		**6（3列×2段）～42（7列×6段）**	1	0.6

なお、ハッチングされた部分が感度解析の対象となる部分であり、厚さに関しては 0m～3m の範囲で乱数を用いてデータを設定し、廃棄体定置数は 6、12、20、30、42 と離散的な設定を行った。

(3) 感度解析結果

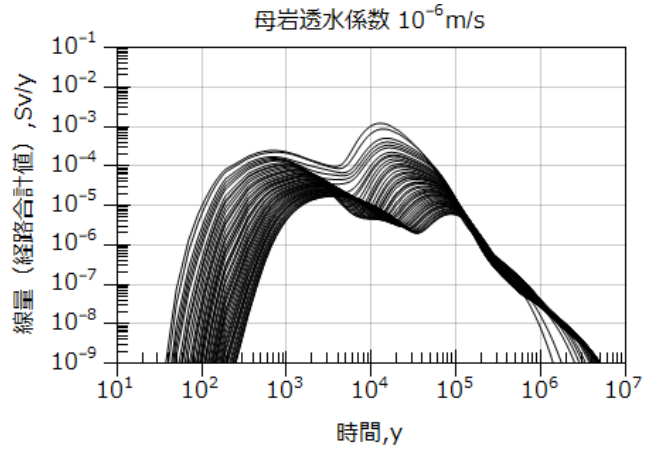
感度解析の結果を図 5.2-10～図 5.2-24 に示す。

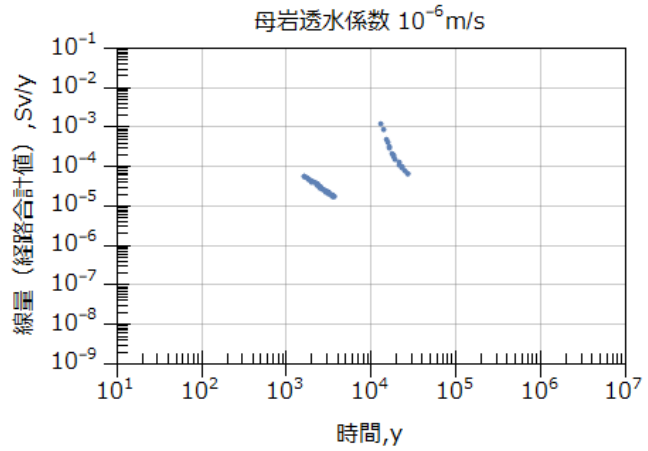
図は、以下の 3 つの表示を行った。

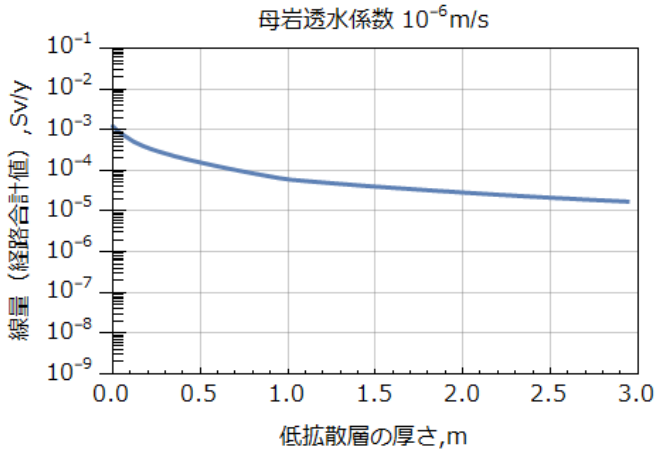
- 生活圏での線量の時間変化（上図）
- 最大線量となる時刻と最大値（中図）
- 感度対象とするパラメータと最大線量の関係（下図）

低拡散層及び低透水層の厚さを変化させたケースにおいては、0～3m の範囲でランダムに厚さを決定しプロットした。厚さ 0m のみは、解析モデルの構成が異なることから、別モデルで算出している。また、ランダムに発生させたケース数は、50 である。

表 5.2-11～表 5.2-13 に最大線量と感度解析対象としたパラメータの関係を示す。厚さのパラメータに関しては、ランダムサンプリングを実施したことから、厚さ 0m を除き、線形補完を実施することにより、表記の厚さの値を求めている。

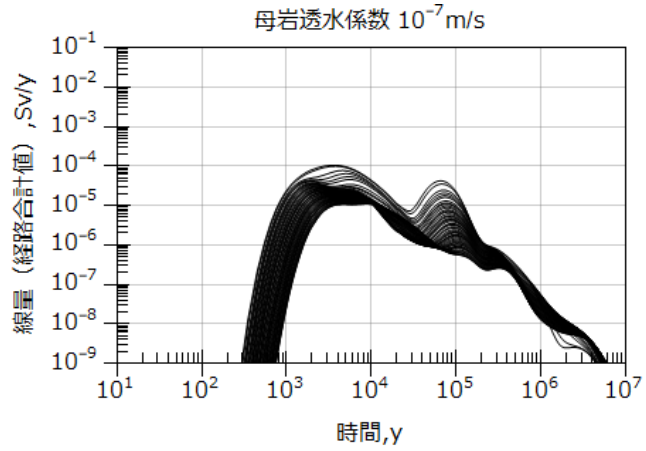


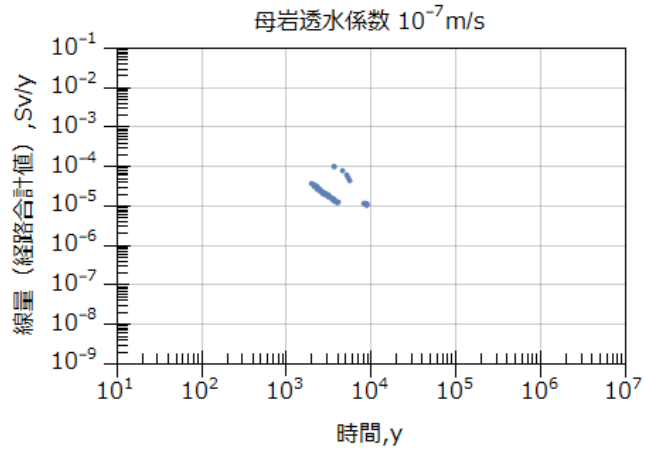


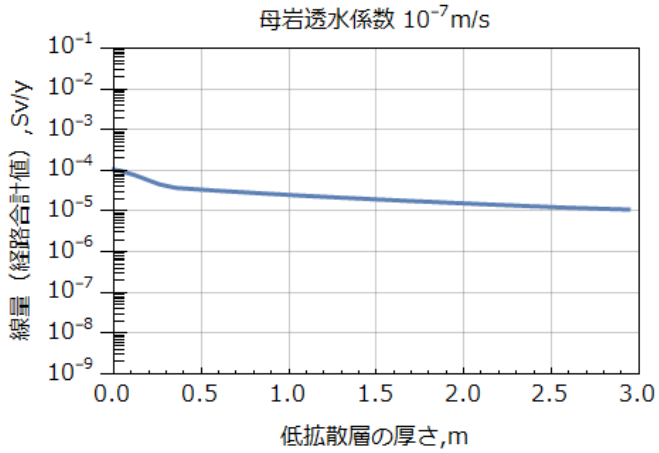


ケース番号		1-1
岩盤の透水係数	m/s	1E-06
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0～3

図 5.2-10　解析ケース 1-1 核種移行解析結果

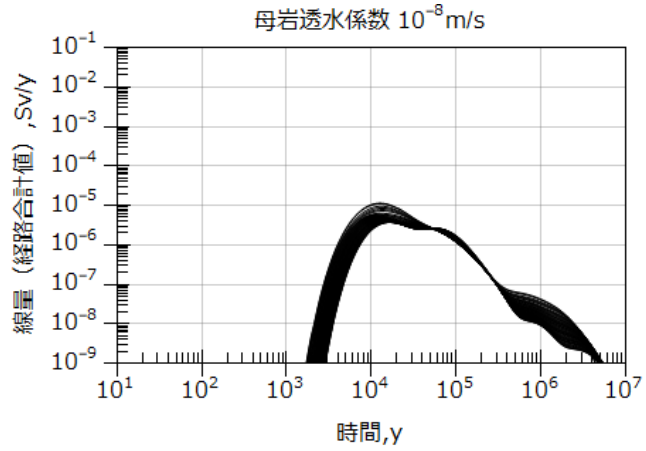


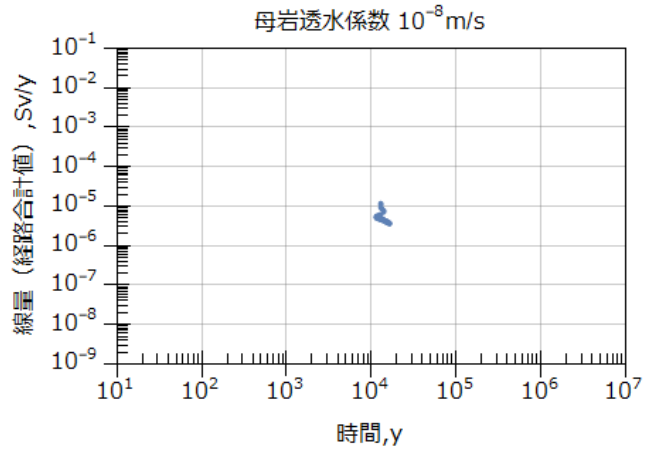


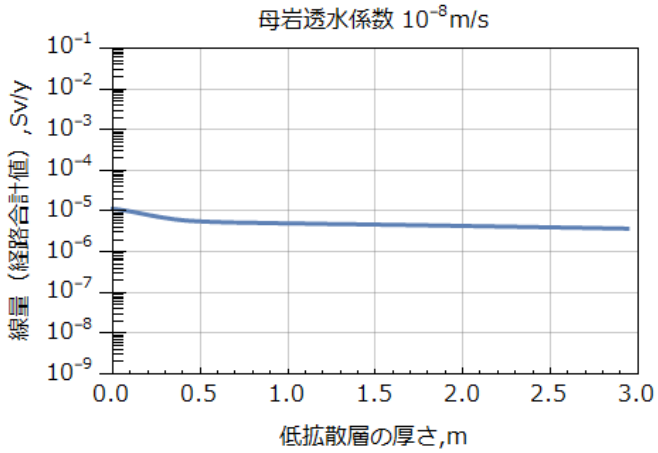


ケース番号		2-1
岩盤の透水係数	m/s	1E-07
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0～3

図 5.2-11　解析ケース 2-1 核種移行解析結果

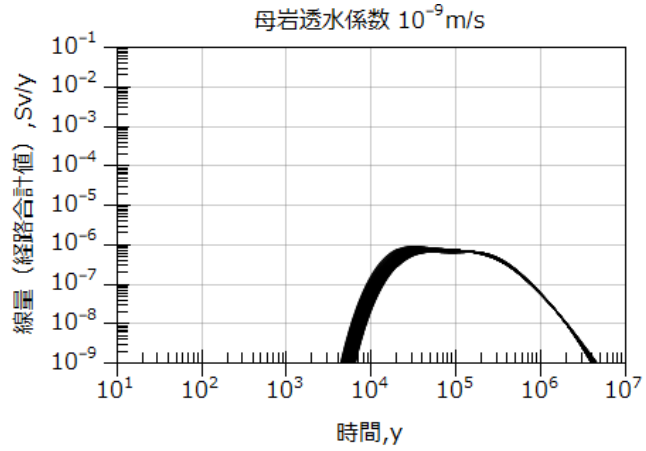


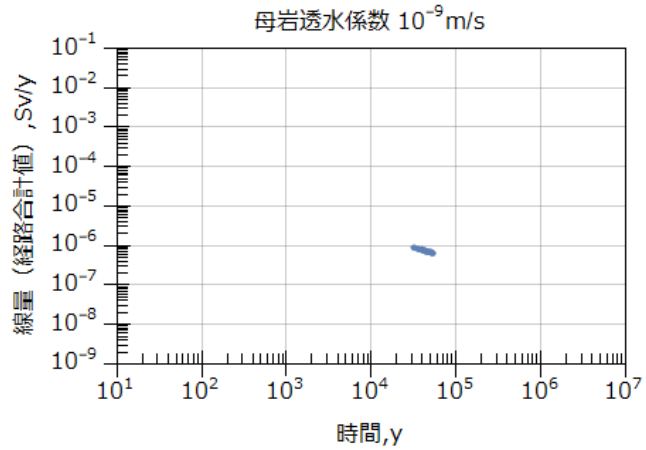


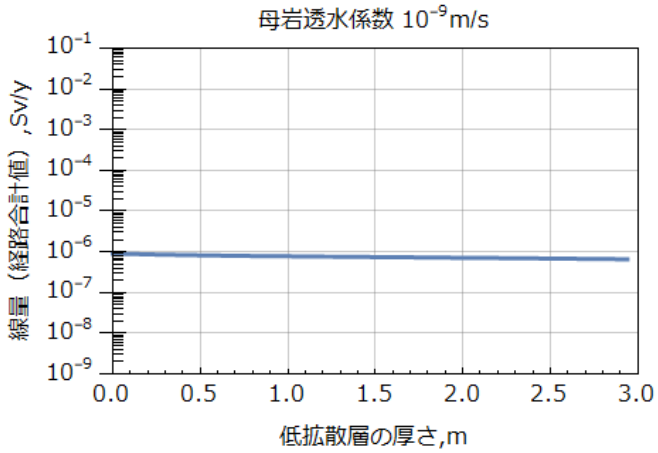


ケース番号		3-1
岩盤の透水係数	m/s	1E-08
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0～3

図 5.2-12　解析ケース 3-1 核種移行解析結果

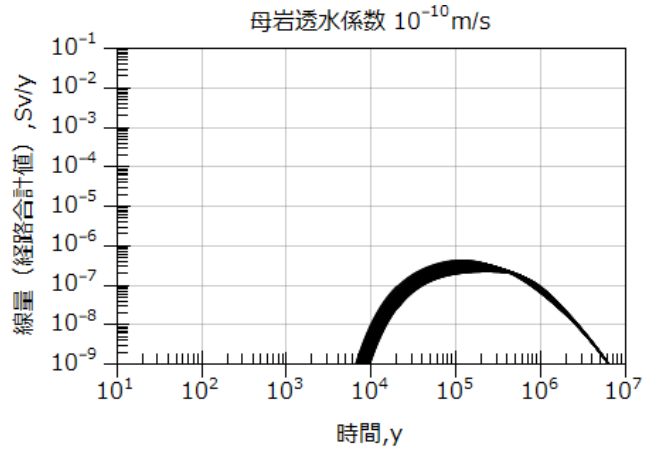


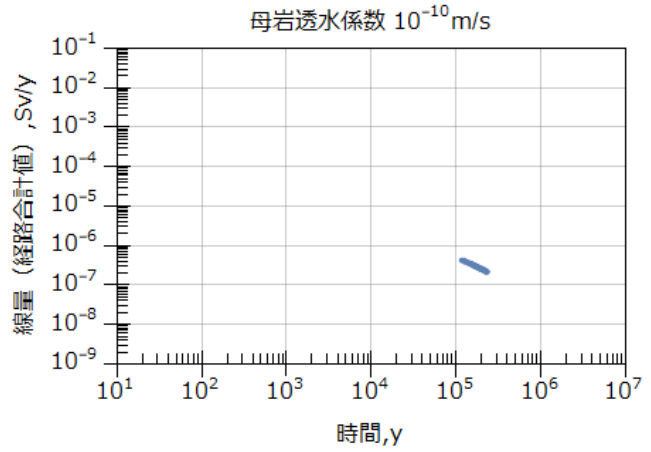


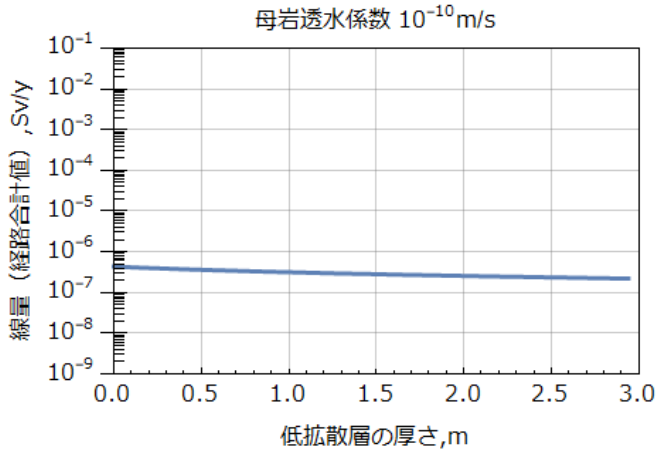


ケース番号		4-1
岩盤の透水係数	m/s	1E-09
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0～3

図 5.2-13　解析ケース 4-1 核種移行解析結果

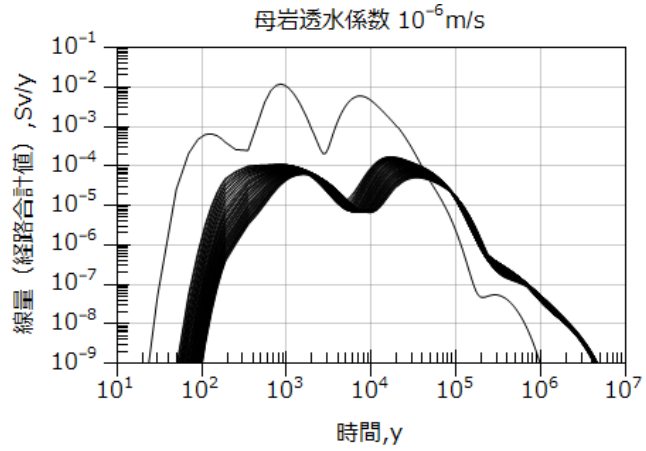


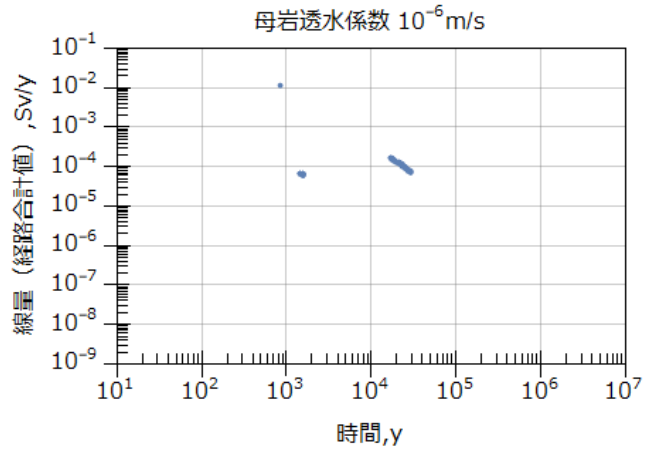


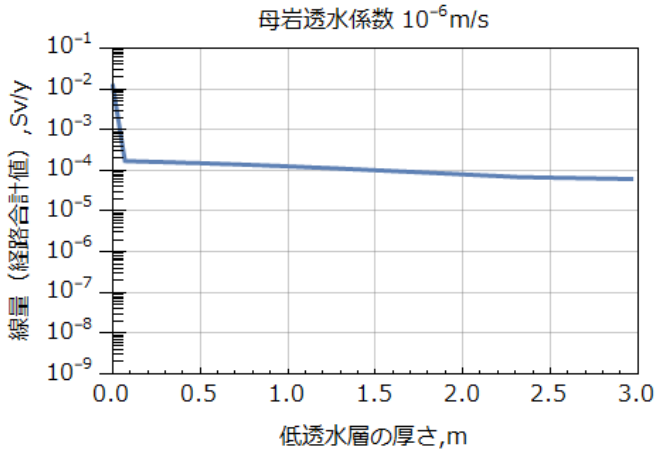


ケース番号		5-1
岩盤の透水係数	m/s	1E-10
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0～3

図 5.2-14　解析ケース 5-1 核種移行解析結果

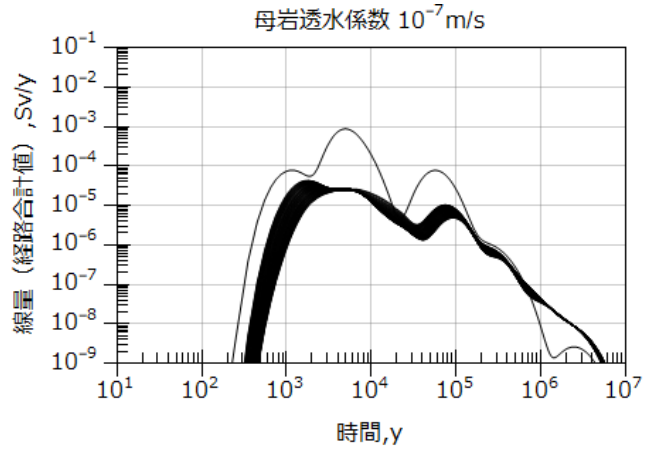


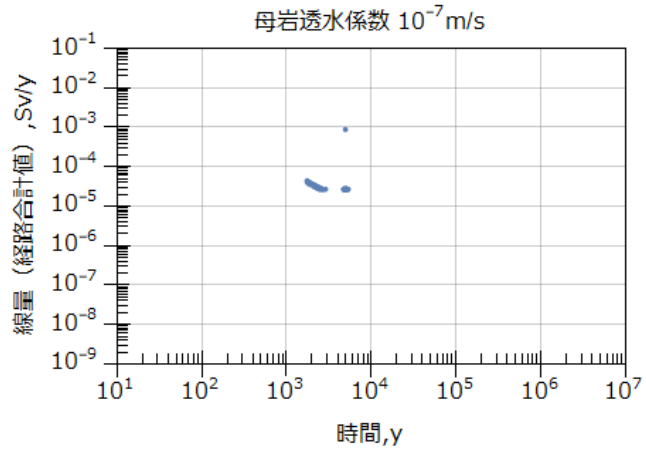


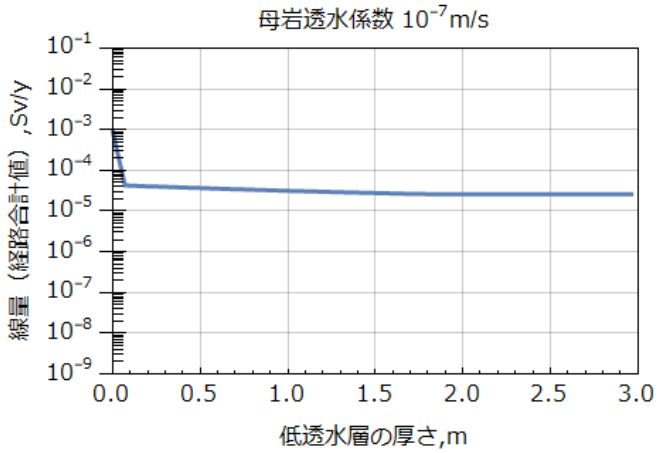


ケース番号		1-2
岩盤の透水係数	m/s	1E-06
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	0～3
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-15　解析ケース 1-2 核種移行解析結果

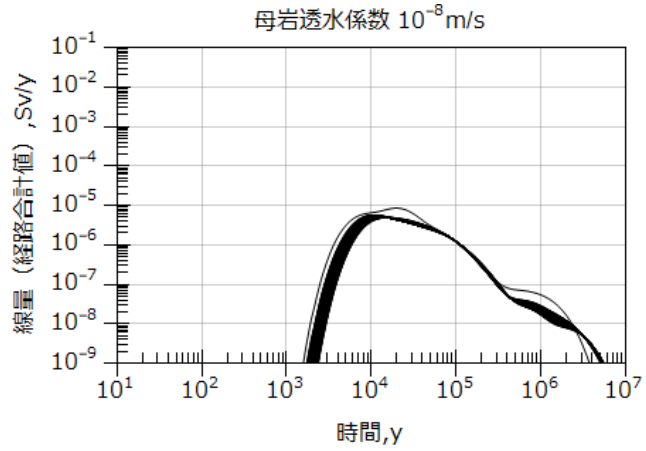


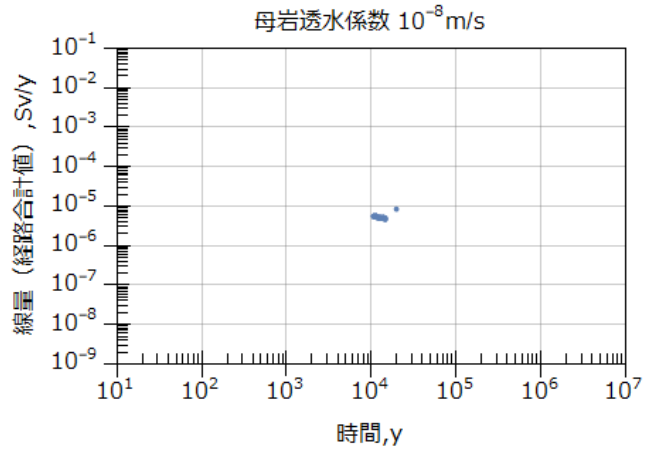


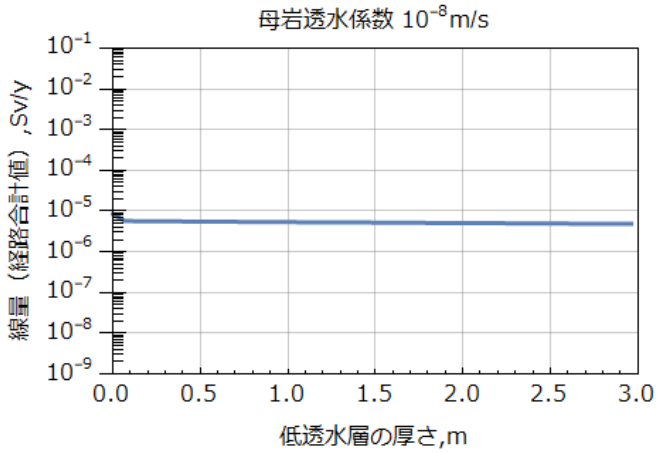


ケース番号		2-2
岩盤の透水係数	m/s	1E-07
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	0～3
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-16　解析ケース 2-2 核種移行解析結果

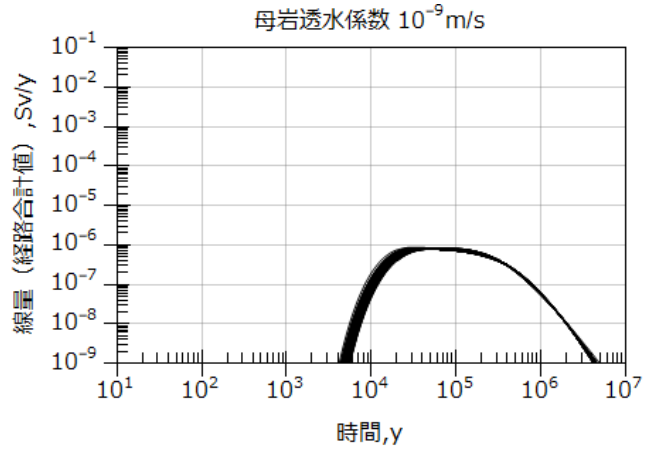


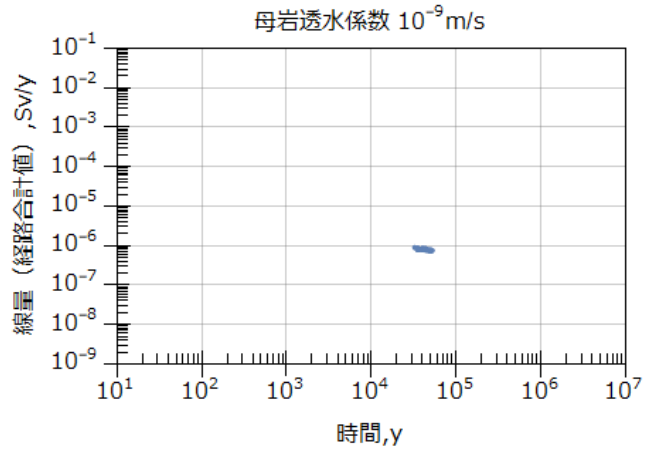


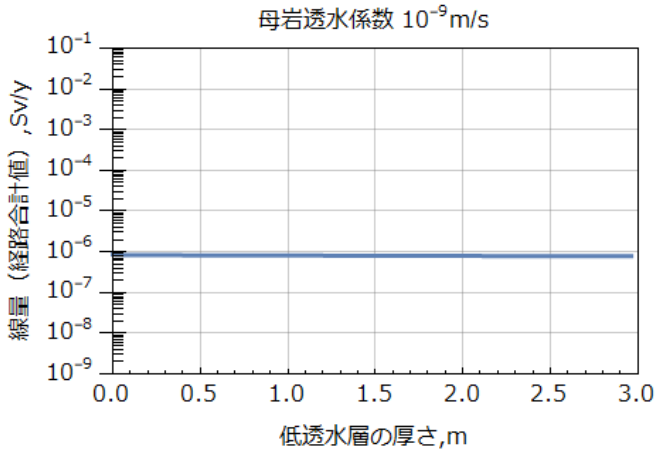


ケース番号		3-2
岩盤の透水係数	m/s	1E-08
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	0～3
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-17　解析ケース 3-2 核種移行解析結果

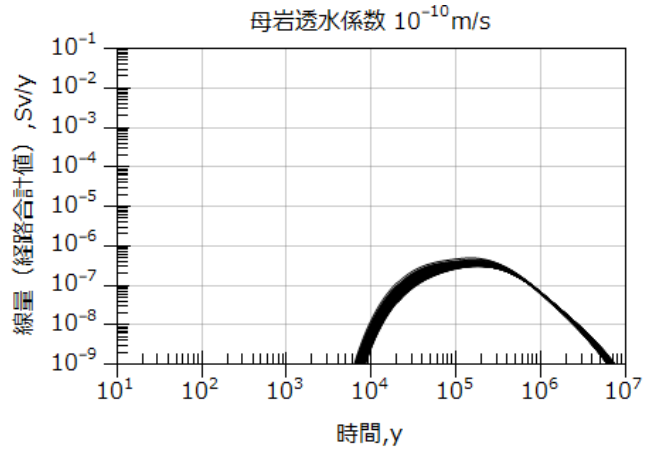


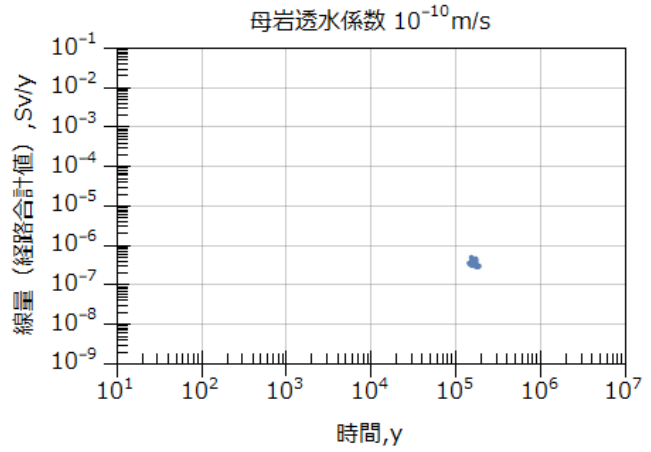


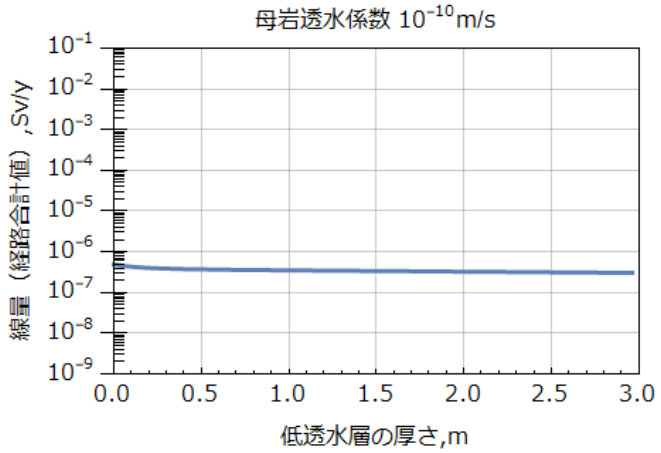


ケース番号		4-2
岩盤の透水係数	m/s	1E-09
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	0～3
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-18　解析ケース 4-2 核種移行解析結果

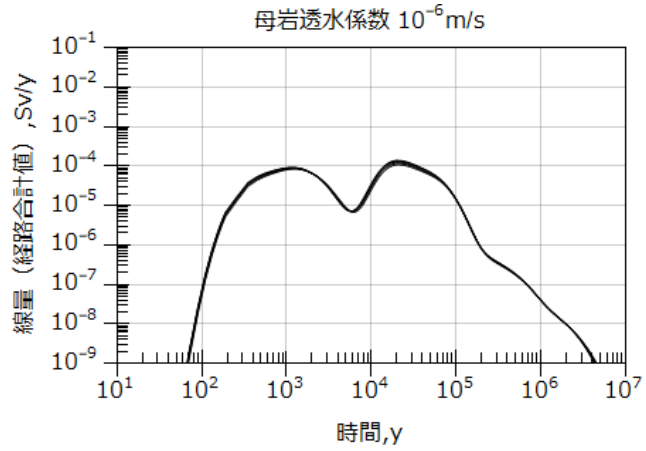


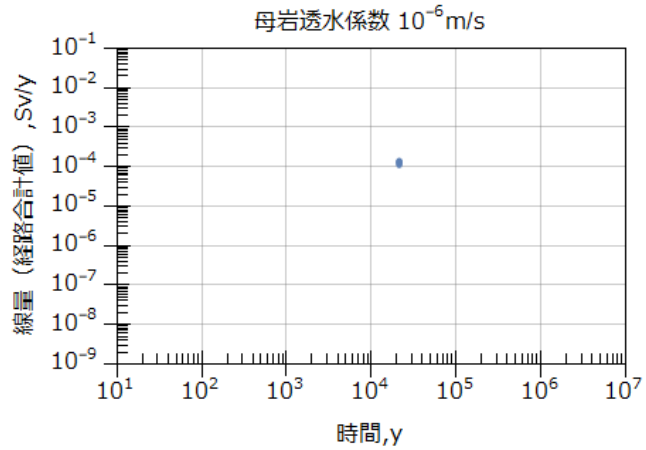


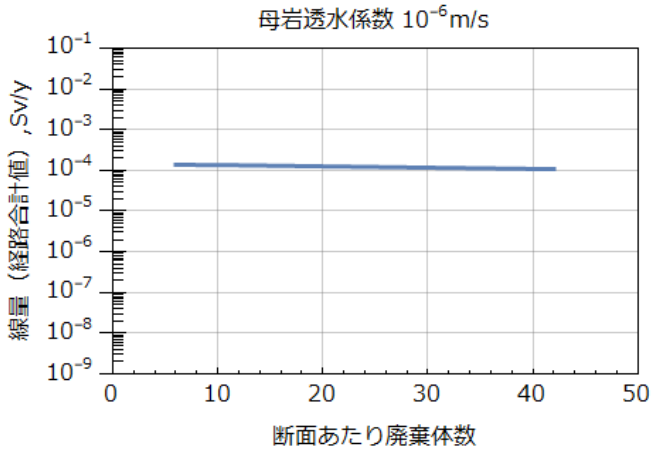


ケース番号		5-2
岩盤の透水係数	m/s	1E-10
廃棄体定置数	体/断面	20（5列×4段）
低透水層部材厚	m	0～3
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-19　解析ケース 5-2 核種移行解析結果

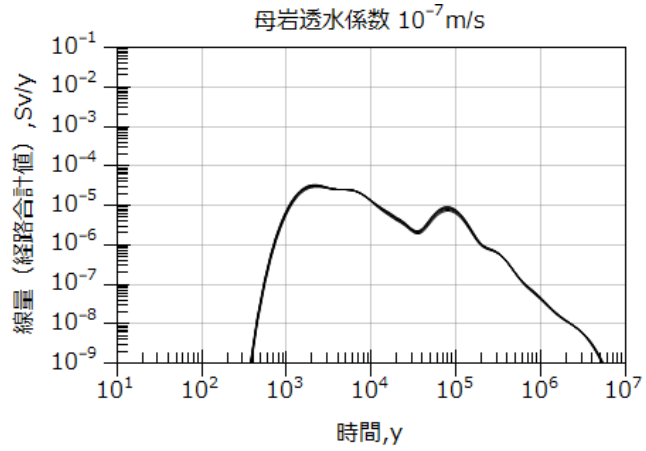


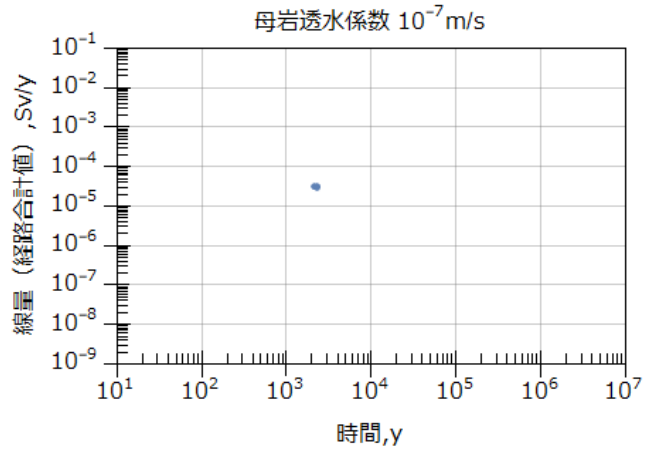


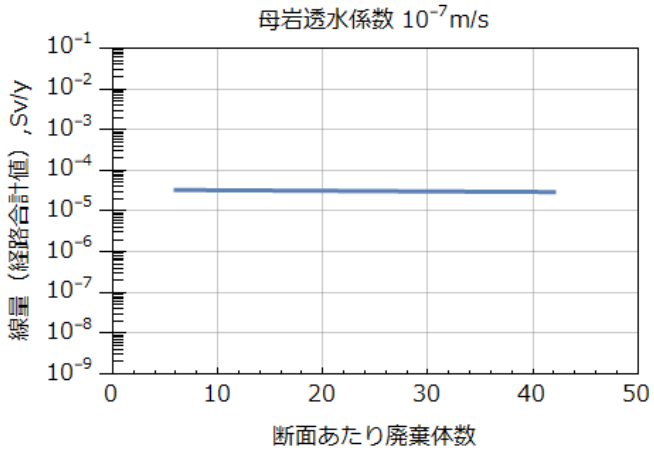


ケース番号		1-3
岩盤の透水係数	m/s	1E-06
廃棄体定置数	体/断面	6（3列×2段）～42（7列×6段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-20　解析ケース 1-3 核種移行解析結果

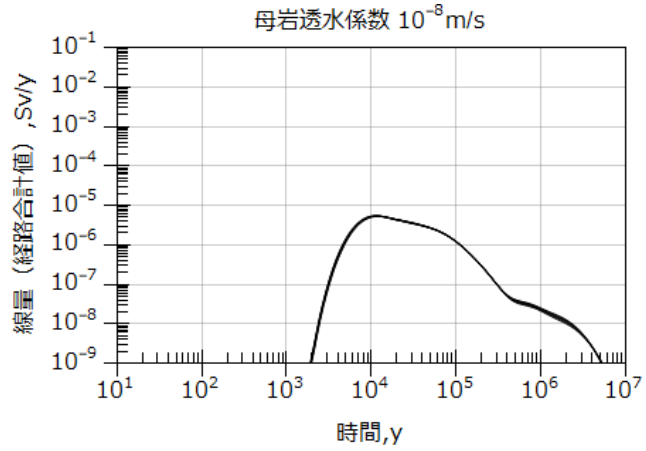


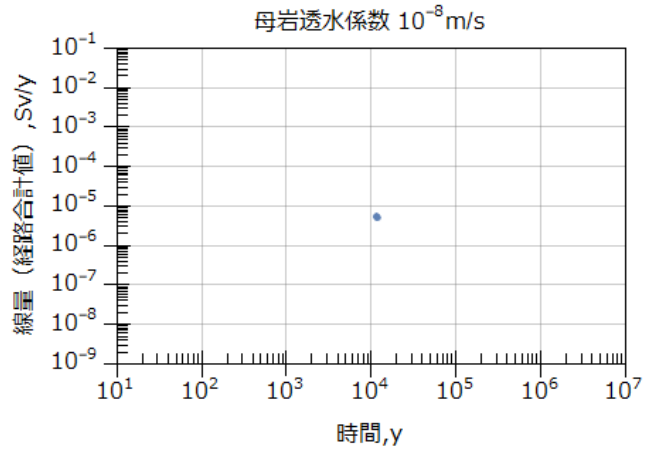


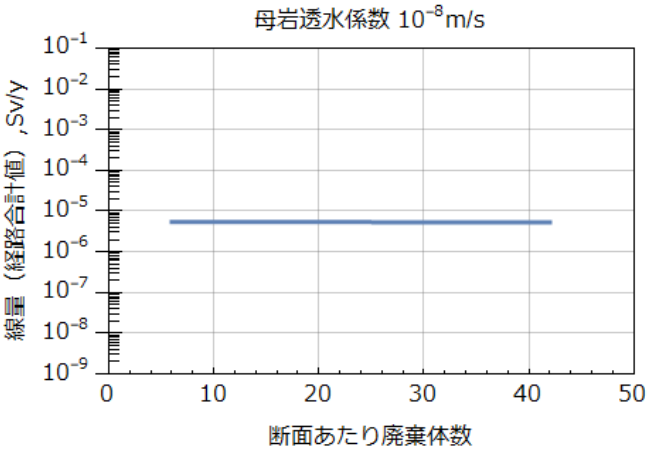


ケース番号		2-3
岩盤の透水係数	m/s	1E-07
廃棄体定置数	体/断面	6（3列×2段）～42（7列×6段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-21　解析ケース 2-3 核種移行解析結果

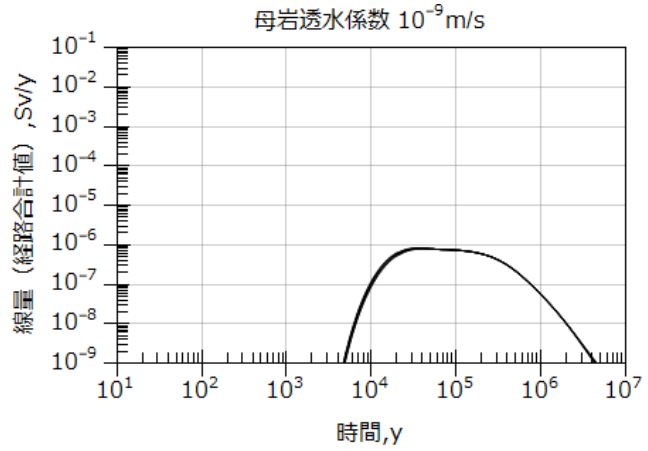


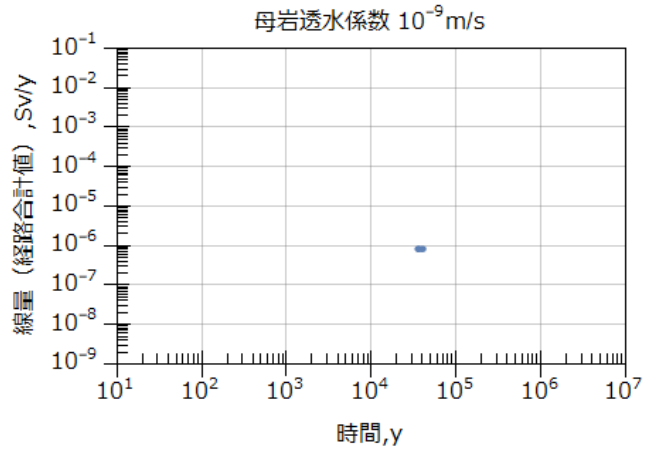


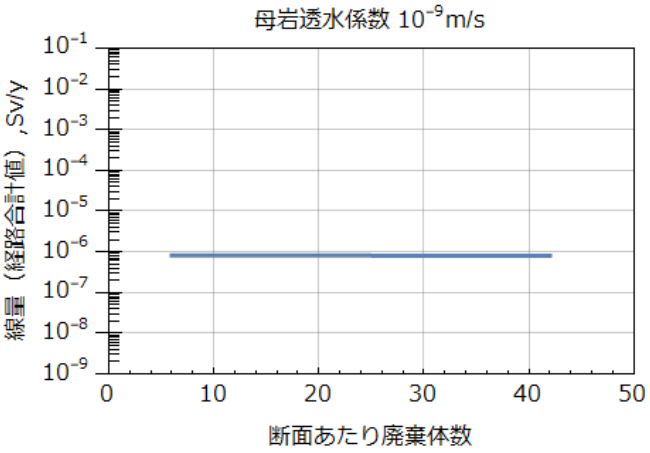


ケース番号		3-3
岩盤の透水係数	m/s	1E-08
廃棄体定置数	体/断面	6（3列×2段）～42（7列×6段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-22　解析ケース 3-3 核種移行解析結果

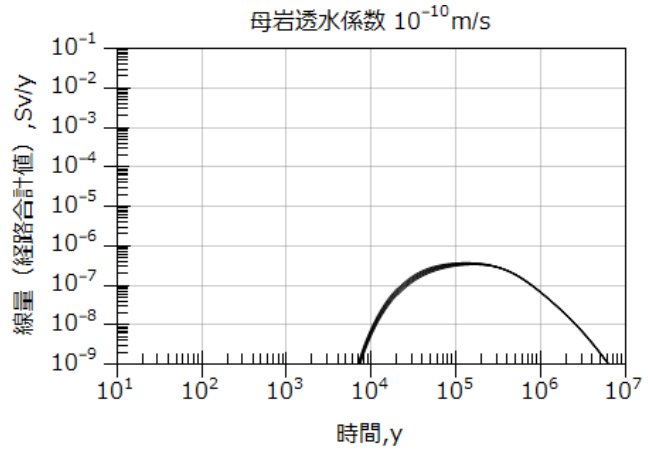


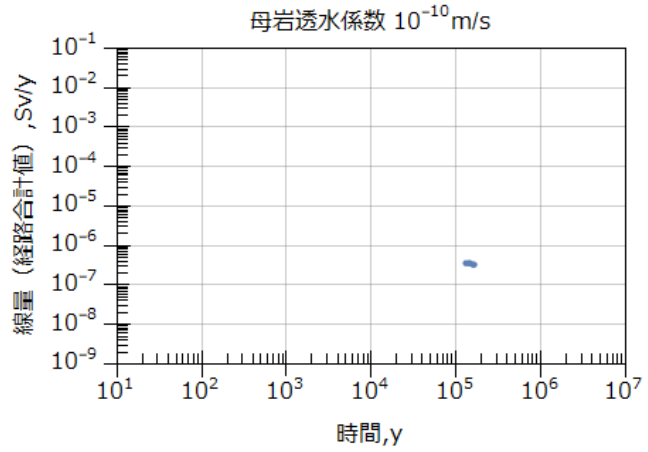


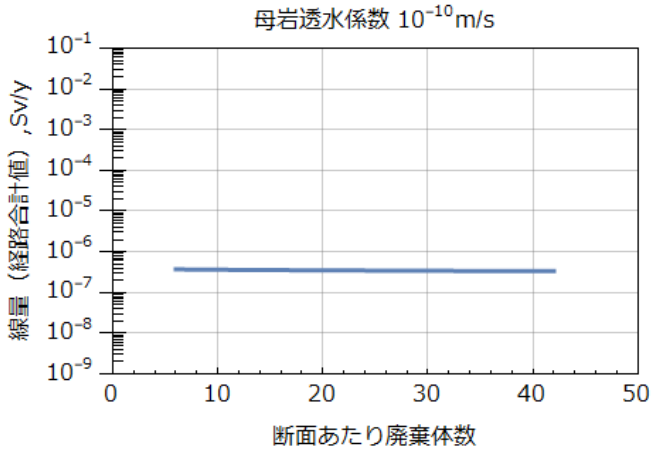


ケース番号		4-3
岩盤の透水係数	m/s	1E-09
廃棄体定置数	体/断面	6（3列×2段）～42（7列×6段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-23　解析ケース 4-3 核種移行解析結果







ケース番号		5-3
岩盤の透水係数	m/s	1E-10
廃棄体定置数	体/断面	6（3列×2段）～42（7列×6段）
低透水層部材厚	m	1
低拡散層部材厚	m	0.6

図 5.2-24　解析ケース 5-3 核種移行解析結果

表 5.2-11　低拡散層の厚さと線量の関係

低拡散層厚さ	母岩透水係数(表内部単位:Sv/yr、または毒性度)				
m	1E-6m/s	1E-7m/s	1E-8m/s	1E-9m/s	1E-10m/s
0.00	1.21E-03	1.05E-04	1.14E-05	9.10E-07	4.36E-07
0.01	1.05E-03	1.05E-04	1.14E-05	9.08E-07	4.33E-07
0.10	5.64E-04	8.20E-05	9.88E-06	8.92E-07	4.18E-07
0.20	3.58E-04	5.68E-05	8.13E-06	8.72E-07	4.02E-07
0.30	2.59E-04	4.09E-05	6.80E-06	8.55E-07	3.88E-07
0.40	1.98E-04	3.60E-05	5.99E-06	8.39E-07	3.76E-07
0.50	1.57E-04	3.38E-05	5.59E-06	8.26E-07	3.64E-07
0.60	1.26E-04	3.16E-05	5.40E-06	8.15E-07	3.53E-07
0.70	1.03E-04	2.98E-05	5.26E-06	8.05E-07	3.43E-07
0.80	8.49E-05	2.80E-05	5.18E-06	7.96E-07	3.34E-07
0.90	7.09E-05	2.65E-05	5.11E-06	7.90E-07	3.25E-07
1.00	6.03E-05	2.51E-05	5.02E-06	7.81E-07	3.17E-07
1.25	4.86E-05	2.20E-05	4.85E-06	7.64E-07	2.99E-07
1.50	4.02E-05	1.95E-05	4.70E-06	7.49E-07	2.84E-07
1.75	3.38E-05	1.74E-05	4.52E-06	7.33E-07	2.70E-07
2.00	2.87E-05	1.56E-05	4.35E-06	7.18E-07	2.57E-07
2.25	2.47E-05	1.40E-05	4.18E-06	7.02E-07	2.46E-07
2.50	2.14E-05	1.26E-05	4.01E-06	6.87E-07	2.36E-07
2.75	1.88E-05	1.16E-05	3.84E-06	6.71E-07	2.27E-07
3.00	1.67E-05	1.08E-05	3.74E-06	6.64E-07	2.22E-07

表 5.2-12　低透水層の厚さと線量の関係

低透水層厚さ	母岩透水係数(表内部単位:Sv/yr、または毒性度)				
m	1E-6m/s	1E-7m/s	1E-8m/s	1E-9m/s	1E-10m/s
0.00	1.19E-02	8.75E-04	8.54E-06	8.67E-07	4.91E-07
0.01	1.74E-04	4.39E-05	5.69E-06	8.44E-07	4.79E-07
0.10	1.69E-04	4.24E-05	5.71E-06	8.41E-07	4.32E-07
0.20	1.64E-04	4.08E-05	5.66E-06	8.35E-07	4.03E-07
0.30	1.60E-04	3.95E-05	5.63E-06	8.33E-07	3.88E-07
0.40	1.55E-04	3.81E-05	5.59E-06	8.29E-07	3.79E-07
0.50	1.51E-04	3.70E-05	5.56E-06	8.27E-07	3.72E-07
0.60	1.46E-04	3.58E-05	5.53E-06	8.24E-07	3.67E-07
0.70	1.41E-04	3.46E-05	5.49E-06	8.22E-07	3.63E-07
0.80	1.36E-04	3.36E-05	5.45E-06	8.19E-07	3.59E-07
0.90	1.31E-04	3.26E-05	5.42E-06	8.17E-07	3.56E-07
1.00	1.26E-04	3.16E-05	5.39E-06	8.15E-07	3.53E-07
1.25	1.14E-04	2.96E-05	5.32E-06	8.10E-07	3.46E-07
1.50	1.01E-04	2.79E-05	5.26E-06	8.06E-07	3.40E-07
1.75	9.01E-05	2.64E-05	5.18E-06	8.01E-07	3.33E-07
2.00	8.01E-05	2.62E-05	5.12E-06	7.97E-07	3.28E-07
2.25	7.10E-05	2.62E-05	5.06E-06	7.93E-07	3.22E-07
2.50	6.65E-05	2.61E-05	4.98E-06	7.87E-07	3.15E-07
2.75	6.38E-05	2.61E-05	4.92E-06	7.83E-07	3.10E-07
3.00	6.10E-05	2.59E-05	4.83E-06	7.76E-07	3.03E-07

表 5.2-13　断面あたりの廃棄体数と線量の関係

断面あたり個数	母岩透水係数(表内部単位:Sv/yr、または毒性度)				
	1E-6m/s	1E-7m/s	1E-8m/s	1E-9m/s	1E-10m/s
6	1.38E-04	3.32E-05	5.47E-06	8.30E-07	3.72E-07
12	1.34E-04	3.25E-05	5.43E-06	8.22E-07	3.62E-07
20	1.26E-04	3.16E-05	5.39E-06	8.15E-07	3.53E-07
30	1.17E-04	3.06E-05	5.35E-06	8.09E-07	3.45E-07
42	1.08E-04	2.95E-05	5.27E-06	7.99E-07	3.36E-07

(4) 感度解析結果の考察と課題の抽出

1) 感度解析結果の考察

a. 低拡散層の厚さを変えたケース

低拡散層の厚さを変えたケースを図 5.2-25 にまとめる。

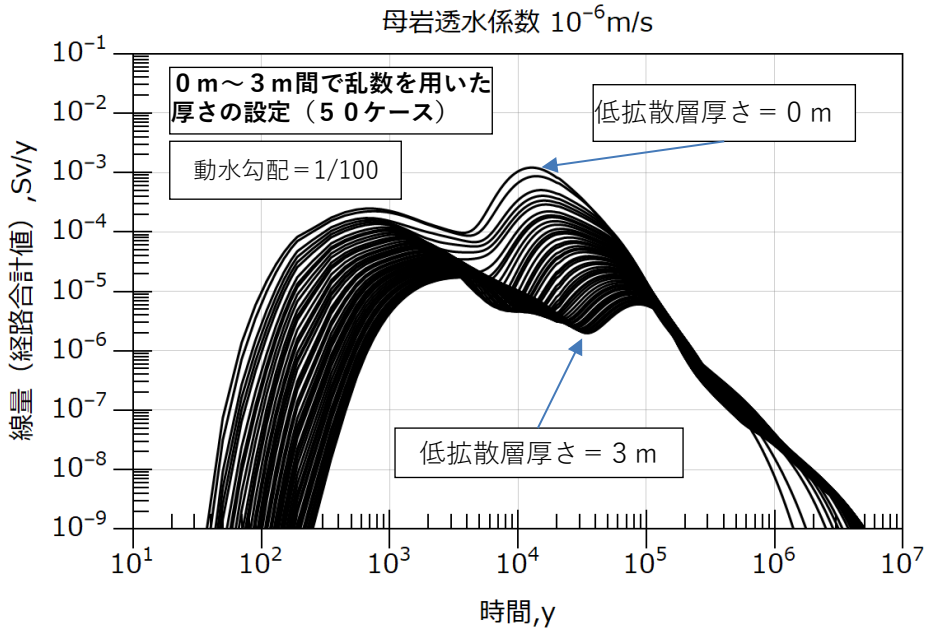
解析結果は、低拡散層を 0～3m の範囲で乱数を用いた厚さを示したものである。ケース数は 50 である。線量（放出率）の時間変化図 5.2-25（上段図）は、最も変化の多い母岩の透水係数が 10^{-6}m/s ケースのみを示した。詳細は、5.2.2 (3) を参照していただきたい。

図 5.2-25（上段図）によれば、低拡散層の厚さが薄い場合は、1 万年以降で最大値を示し、ある程度の厚さとなると千年オーダーで最大値を示す。表 5.2-14 によれば、母岩の透水係数が 10^{-6}m/s のケースでは低拡散層の厚さが 1m を超えるあたりで、最大となる核種は、Pu239→Cl36 に変化していることがわかる。

図 5.2-25（下段図）は、母岩透水係数毎に最大値をまとめたものである。母岩透水係数設定においても Cl36 が最大値となる領域では最大値にほとんど変化は見られない。

一般的な議論によれば、低拡散層の厚さは、人工バリアからの核種放出率に直接影響を与えると考えられ、Pe 数の議論によれば、放出率は、領域の長さに比例する。しかしながら、図 5.2-25（下段図）によれば、その効果は予想より小さいことがわかる。これは、拡散による放出挙動が領域内部（上流）と領域外部（下流）の放射性核種の濃度差にも依存することから、母岩の透水性が小さいほど、内外の濃度差がほとんどなくなり、時間が経過し定常放出に近くなるほど、拡散移行量が抑えられるためと考えられる。

したがって、母岩の透水性が低い場合において、低透水層の厚さは、核種移行の観点からは重要なパラメータとはならないものと考えられる。しかしながら、母岩の不均質性や局所的な流動環境を前提とする場合には、一部の領域で低拡散層の厚さが人工バリアからの核種の放出率に直接寄与すると考えられる。このようなケースにおいては、坑道に配置する低拡散層の厚さを母岩の状態によって変化させることも想定される。



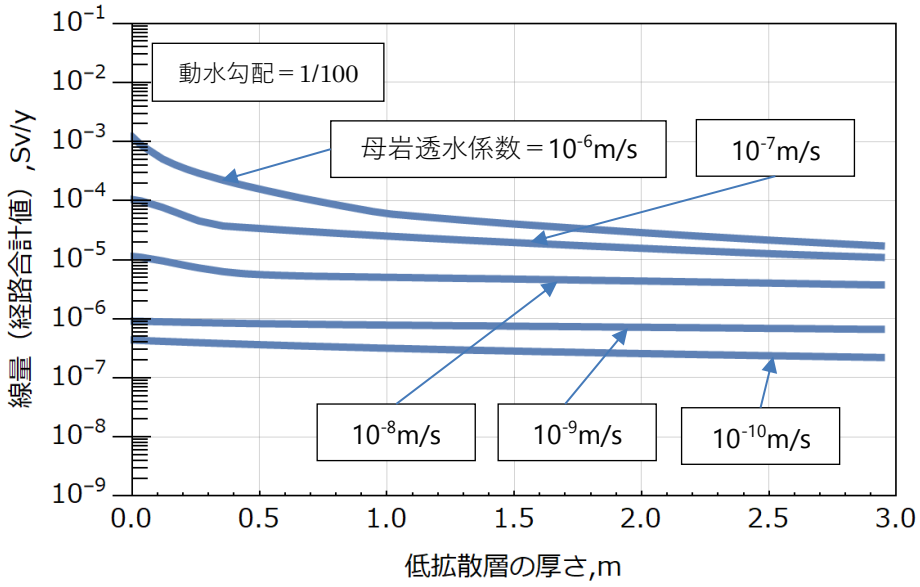


図 5.2-25　低拡散層の厚さと線量の関係

表 5.2-14　低拡散層厚さと最大線量及び支配核種

低拡散層厚さ	母岩透水係数									
m	1E-6m/s		1E-7m/s		1E-8m/s		1E-9m/s		1E-10m/s	
0.00	1.21E-03	Pu239	1.05E-04	C14	1.14E-05	C14	9.10E-07	Cl36	4.36E-07	Cl36
0.04	1.00E+00	Pu239	9.87E-05	C14	1.10E-05	C14	9.04E-07	Cl36	4 29E-07	Cl36
0.52	9.00E+00	Pu239	3.34E-05	Cl36	5.56E-06	Cl36	8.25E-07	Cl36	3.62E-07	Cl36
1.02	1.70E+01	Pu239	2.48E-05	Cl36	5.01E-06	Cl36	7.80E-07	Cl36	3.15E-07	Cl36
1.56	2.60E+01	Cl36	1.89E-05	Cl36	4.65E-06	Cl36	7.45E-07	Cl36	2.80E-07	Cl36
2.01	3.40E+01	Cl36	1.55E-05	Cl36	4.34E-06	Cl36	7.17E-07	Cl36	2.57E-07	Cl36
2.48	4.20E+01	Cl36	1.27E-05	Cl36	4.02E-06	Cl36	6.88E-07	Cl36	2.37E-07	Cl36
2.94	5.00E+01	Cl36	1.09E-05	Cl36	3.73E-06	Cl36	6.61E-07	Cl36	2 21E-07	Cl36

b. 低透水層の厚さを変えたケース

低透水層の厚さを変動させたケースを図 5.2-26 にまとめる。

解析結果は、低透水層を 0～3m の範囲で乱数を用いた厚さを示したものである。ケース数は 50 である。線量（放出率）の時間変化図 5.2-26（上段図）は、最も変化の多い母岩の透水係数が 10^{-6}m/s ケースのみを示した。詳細は、5.2.2 (3) を参照していただきたい。

図 5.2-26（上段図）によれば、低透水層の厚さに対する核種放出率（線量）の感度は、厚さが 0m と最小値（サンプリングの最小値は 7cm）で最も大きい。サンプリングを対数スケール等で実施することにより、この間を精緻化することも可能と考えられるが、工学的にトンネルの大きさに比較して数 cm 程度の厚さの施工の可能性の考慮も必要となることから、この間の精緻化は不要であると判断した。

図 5.2-26（下段図）は、母岩透水係数毎に最大値をまとめたものである。母岩の透水係数が 10^{-8}m/s 以上の場合には、低透水層の有無がもっとも感度が高く、低透水層の厚さに関しては低拡散層と同様に感度は低い結果となっている。

また、本設定では、低透水層の内側（下流）に位置する低透水層に止水性を期待していない。そのため低透水層の有無の感度がより強調されたものと推定される。

低透水層については、厚さよりも低透水層の有無が重要と考えられる。低拡散層の場合と同様に、母岩の不均質性や局所的な流速などの不確実性を考慮するなら、低透水層があることが重要となるものと想定される。その場合、低透水層は、トンネル全体を緻密に囲うことが要求され、工学的な施工技術や長期劣化における変質のほうが厚さよりも重要となる可能性がある。

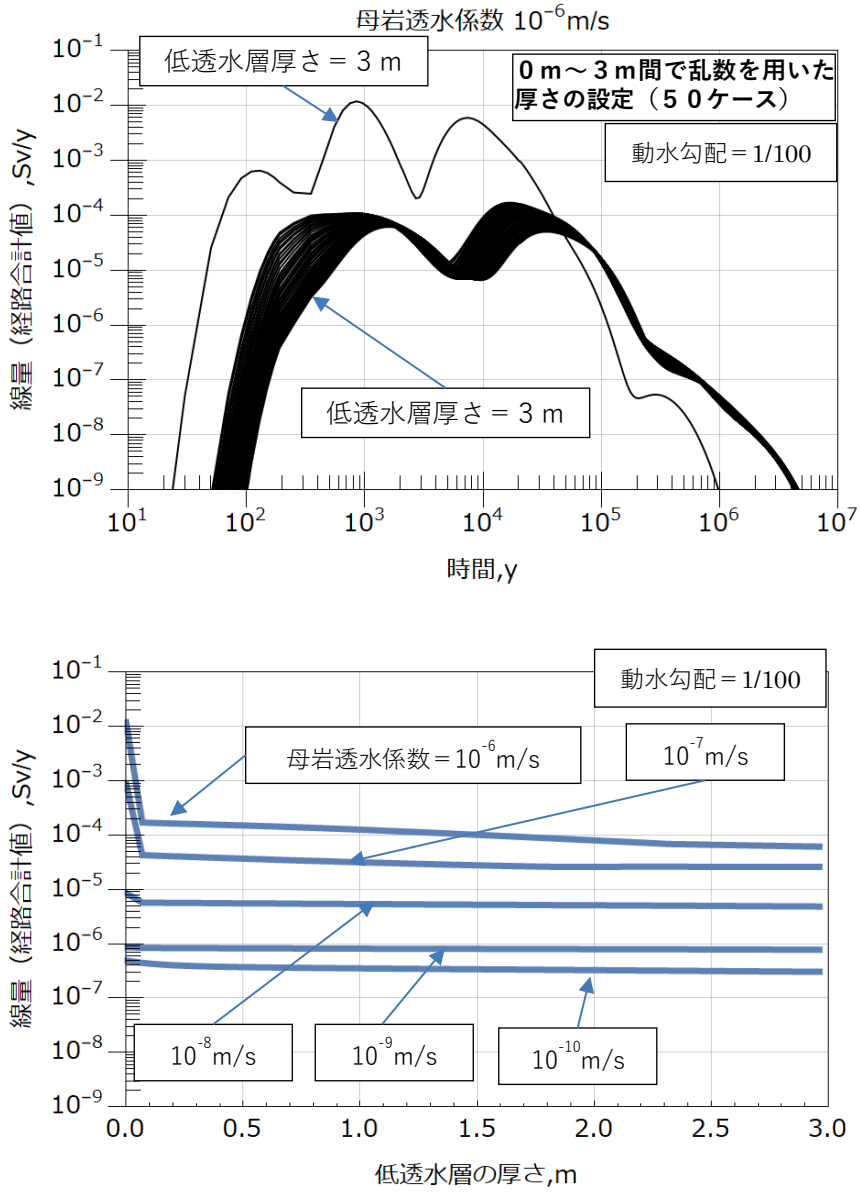


図 5.2-26　低透水層の厚さと線量の関係

表 5.2-15　低透水層厚さと最大線量及び支配核種

低透水層厚さ	母岩透水係数									
m	1E-6m/s		1E-7m/s		1E-8m/s		1E-9m/s		1E-10m/s	
0.00	1.19E-02	C14	8.75E-04	C14	8.54E-06	Cl36	8.67E-07	Cl36	4.91E-07	Cl36
0.07	1.71E-04	Pu239	4.30E-05	Cl36	5.72E-06	Cl36	8.43E-07	Cl36	4.46E-07	Cl36
0.50	1.51E-04	Pu239	3.70E-05	Cl36	5.56E-06	Cl36	8.27E-07	Cl36	3.72E-07	Cl36
1.01	1.26E-04	Pu239	3.15E-05	Cl36	5.39E-06	Cl36	8.15E-07	Cl36	3.53E-07	Cl36
1.52	1.01E-04	Pu239	2.78E-05	Cl36	5.25E-06	Cl36	8.06E-07	Cl36	3.39E-07	Cl36
2.01	7.95E-05	Pu239	2.62E-05	Cl36	5.12E-06	Cl36	7.97E-07	Cl36	3.27E-07	Cl36
2.49	6.66E-05	Pu239	2.62E-05	Cl36	4.98E-06	Cl36	7.87E-07	Cl36	3.16E-07	Cl36
2.96	6.15E-05	Pu239	2.60E-05	Cl36	4.86E-06	Cl36	7.80E-07	Cl36	3.05E-07	Cl36

c．断面あたりの廃棄対数を変えたケース

図 5.2-27 にトンネル断面あたりの廃棄体数を変化させた結果をまとめる。

この結果によれば、トンネル断面あたりの廃棄体数の変化は、ほとんど核種放出率に影響を与えていない。一般的な考察では、人工バリアからの放出率は移行面積に依存する。ただし、これは内側の放射性核種の濃度が一定の場合、すなわち、元素が溶解度に達しているような場合に比例関係となる。

本検討のモデル化においては、元素の溶解度を設定していない（すなわち、可溶性であることを仮定；実際に、坑道系が大きく内部の地下水量と比較して評価対象とする元素の量は少なく、可溶性となる元素が多いものと考えられる)。また、移行面積と充填セメントの体積は比例関係にある。すなわち、移行面積が大きな場合には単位面積あたりの核種濃度は小さくなり、移行面積が小さな場合には単位面積あたりの核種濃度は大きくなる。そのため、断面あたりの廃棄対数が結果として感度を持たないものとなった。

トンネル断面あたりの廃棄体数と核種放出率（線量）の相関は、本検討の結果においては小さく、工学的なトンネル掘削・施工技術の観点からの設定がより重要と考えられる。

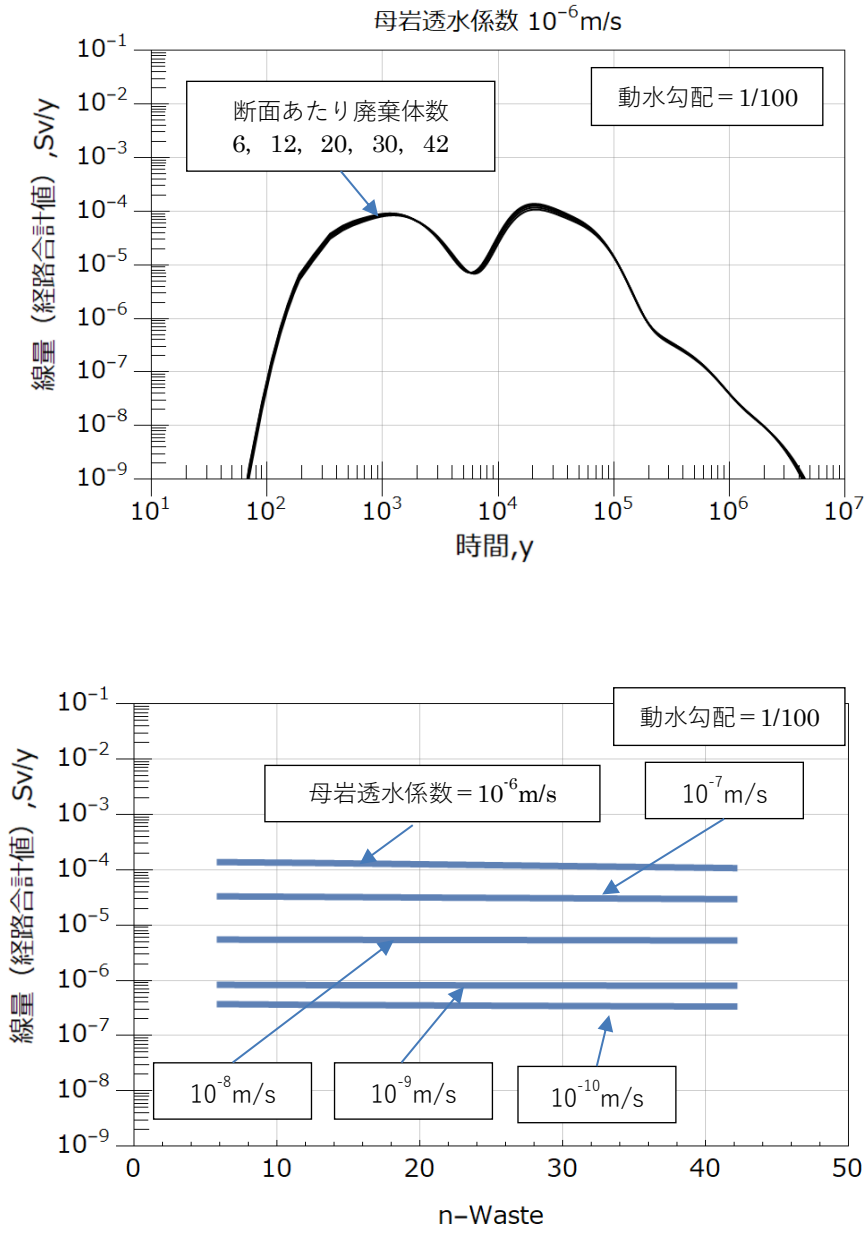


図 5.2-27　断面あたりの廃棄体数と線量の関係

d. 人工バリアからの放出率

放射性廃棄物の処分においては、処分後の将来を完全に予測することができない。そのため、将来的な不確実性の影響を低減することを目的として、処分における要件が定められている。例えば、SSR-5[10]では安全のための設計概念／要件 8：放射性核種の閉じ込めにおいて、以下の記述がなされている。

> 3.40. 放射性核種を定められた期間にわたり廃棄物形態やパッケージングへ閉じ込めて、比較的短寿命の放射性核種の大部分が原位置で減衰することを確保しなければならない。低レベル廃棄物の場合、そのような期間は数百年程度(several hundred years)、高レベル廃棄物の場合は数千年程度(several thousands of years) になるだろう。また、高レベル廃棄物の場合は、処分システムの外部への放射性核種のいかなる移行も、放射性崩壊により発生した熱が十分に減少してから発生するようになることが確保されなければならない。

これは規制における法的な基準ではないが、基本的に規制においてもこれらの考え方が導入されているものと考える。人工バリアからの核種の放出率の評価は、構築された処分場のバリアの多重性やロバスト性を示し、BAT の概念等を示すことの一つとなるものであると考える。

SSR-5 の記載においては「廃棄物形態やパッケージング」の閉じ込めとあるが、人工バリア内で短半減期の核種が効果的に減衰することを含めて考えるものとした。

表 5.2-16 に評価対象とする核種と半減期を示す。U 系列等の系列核種は除いている。なお、短半減期核種は 30 年以下の半減期を有するもの[10]と考えられるがここでは 100 年以下の半減期を持つものを、同じグループで表示した。

図 5.2-28～図 5.2-30 に、低透水層の厚さを変化させたケースを示し、図 5.2-31 に低拡散層の厚さを変化させたケースを示す。

図 5.2-28 及び図 5.2-31 は、短半減期核種に対する部材厚さの効果となる。低層水層厚さ変化ケースは、低拡散層 0.6m、低拡散層厚さのケースは低透水層 1m が加えられた効果となる。

図 5.2-28 によれば、天然バリア出口における線量の変化と同様に、部材の有無の効果が大きく、3 桁程度の効果がみられる。3 桁の低減は 10 半減期の閉じ込め効果に等しい。H3 を除けば、0.5m 程度の低透水層の厚さがあれば、7 桁程度の移行率の低減が期待できる。H3 については、再冠水やパッケージからの移行率等に期待できるものと考えられるが、処分初期のバリア材の性能の高い時期の効果を見込むことが現実的であると予想される。そのため、処分初期の発熱の大きな期間のバリア性能については現実的な評価が必要となるものと考えられる。

図 5.2-29、図 5.2-30 の中・長半減期の評価では、低透水層バリアを厚くしたとしても、大きな効果は見込めない。

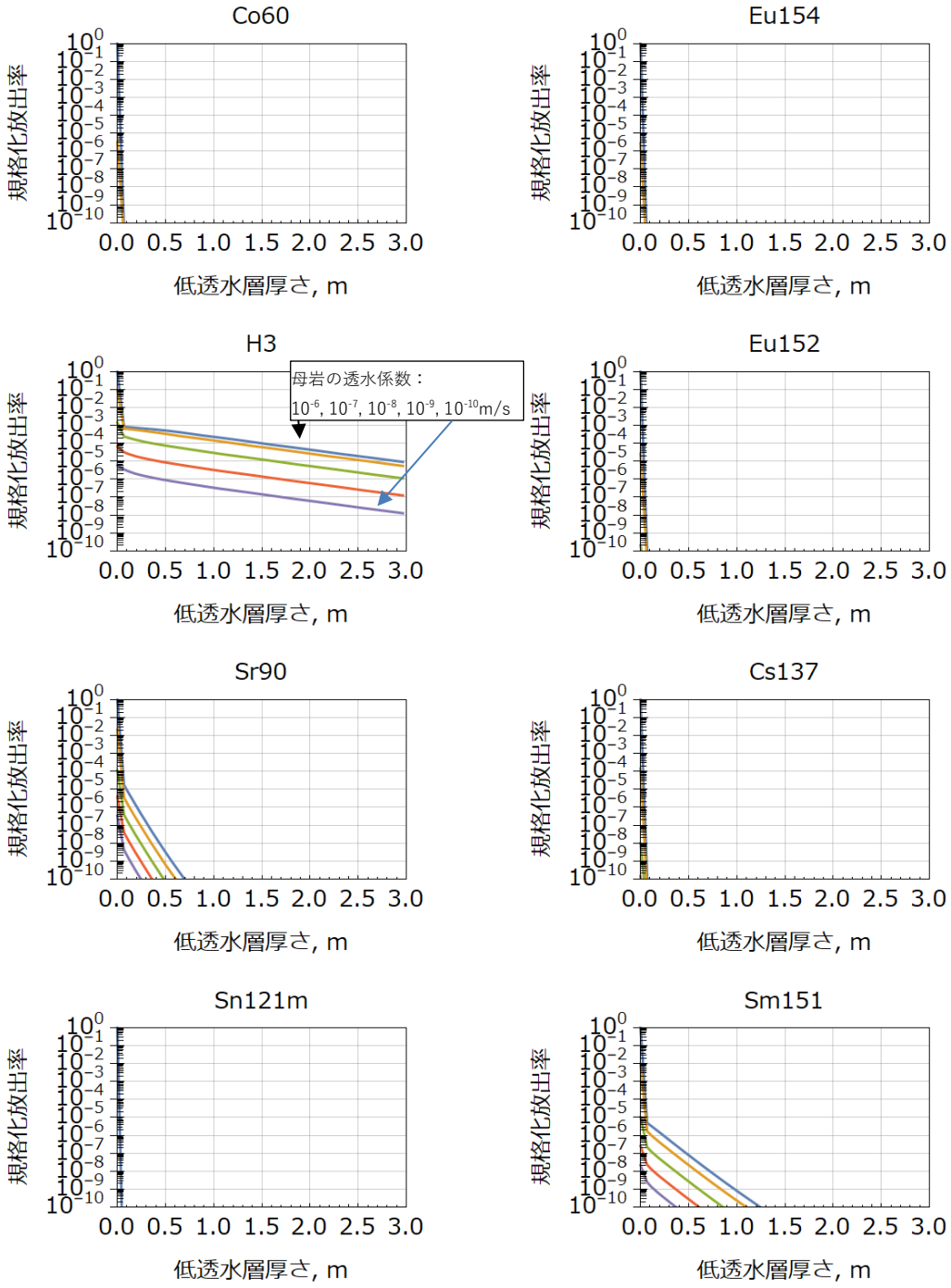
図 5.2-31 の結果からは、低拡散層の場合において、バリアの有無よりバリア厚さを増す方が効果的であることが認められた。

したがって、人工バリアによる効果を狙うならば、低透水層は長期安定性を含めた工学的な成立性の下限値、低拡散層は、長期安定性を含めた工学的に比較的厚いバリア層が望ましいと予想される。

表 5.2-16　評価対象とする核種とその半減期

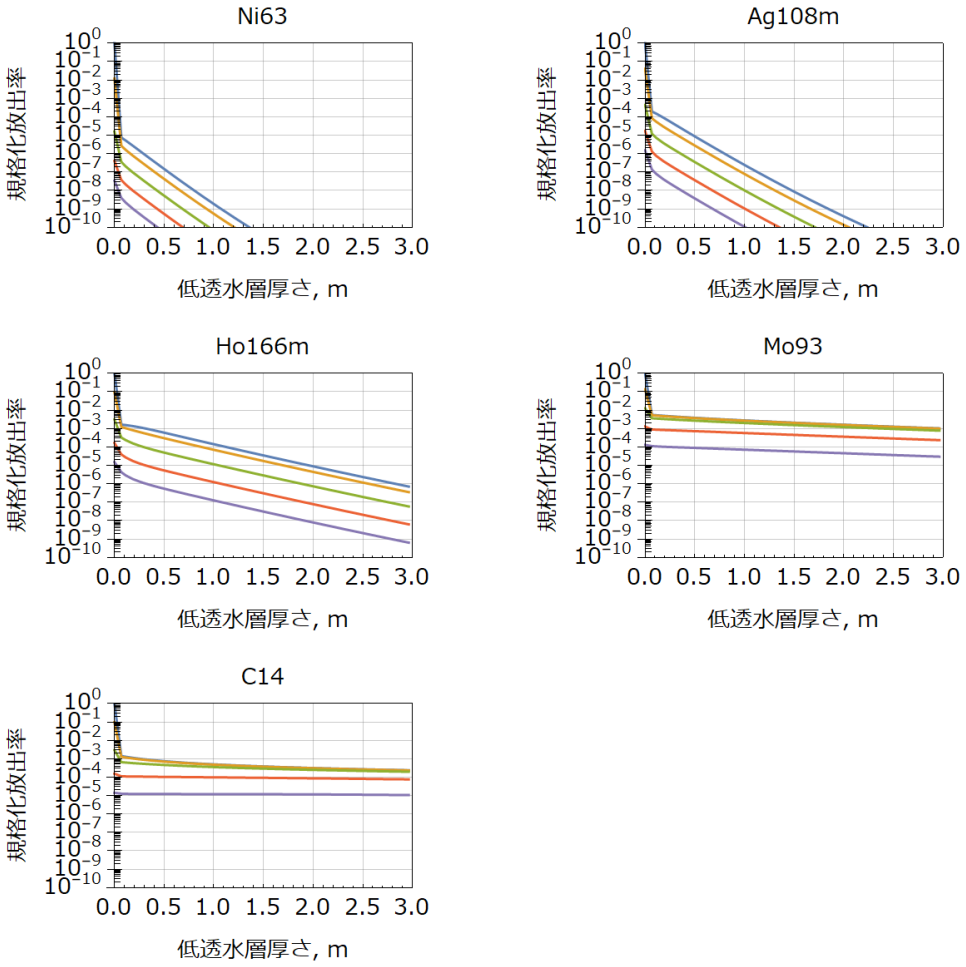
核種名	半減期、年	初期インベントリ
Co60	5.271	4.84E+18
Eu154	8.593	9.45E+15
H3	12.32	1.45E+16
Eu152	13.54	7.25E+14
Nb93m	16.13	3.76E+10
Sr90	28.79	1.56E+17
Cs137	30.17	2.15E+17
Sn121m	43.9	6.26E+12
Sm151	90	3.58E+14
Ni63	100.1	3.26E+18
Ag108m	418	3.76E+12
Ho166m	1200	7.70E+07
Mo93	4000	4.47E+12
C14	5700	3.40E+14
Nb94	2.03E+04	2.91E+14
Ni59	1.01E+05	2.61E+16
Ca41	1.02E+05	7.98E+12
Tc99	2.11E+05	5.31E+13
Sn126	2.30E+05	2.51E+12
Se79	2.95E+05	5.91E+11
Cl36	3.01E+05	6.50E+13
Zr93	1.53E+06	1.58E+14
Cs135	2.30E+06	9.66E+11
Pd107	6.50E+06	3.76E+10
I129	1.57E+07	1.49E+09

TRU 核種等の崩壊連鎖核種は除く



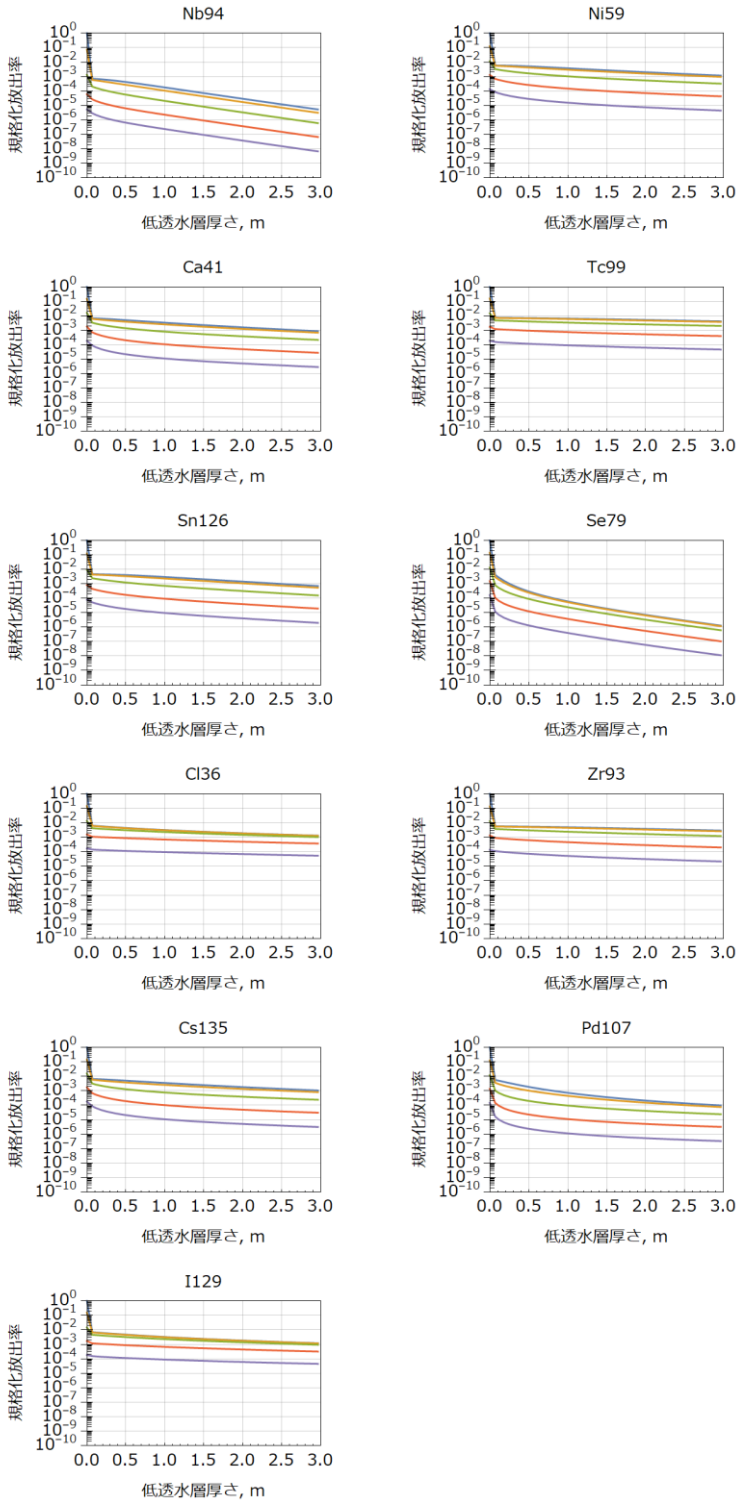
図には外部の母岩の透水係数を 10^{-6},10^{-7},10^{-8},10^{-9},10^{-10}m/s のケースが含まれ、10^{-6}m/s ケースが最も大きい。また、放出率の低減の程度を見るために、10^{-6}m/s ケースで厚さが 0m のケースを 1 とした相対値である。

図 5.2-28　低透水層の厚さと人工バリアからの放出率の低減率（短半減期核種）



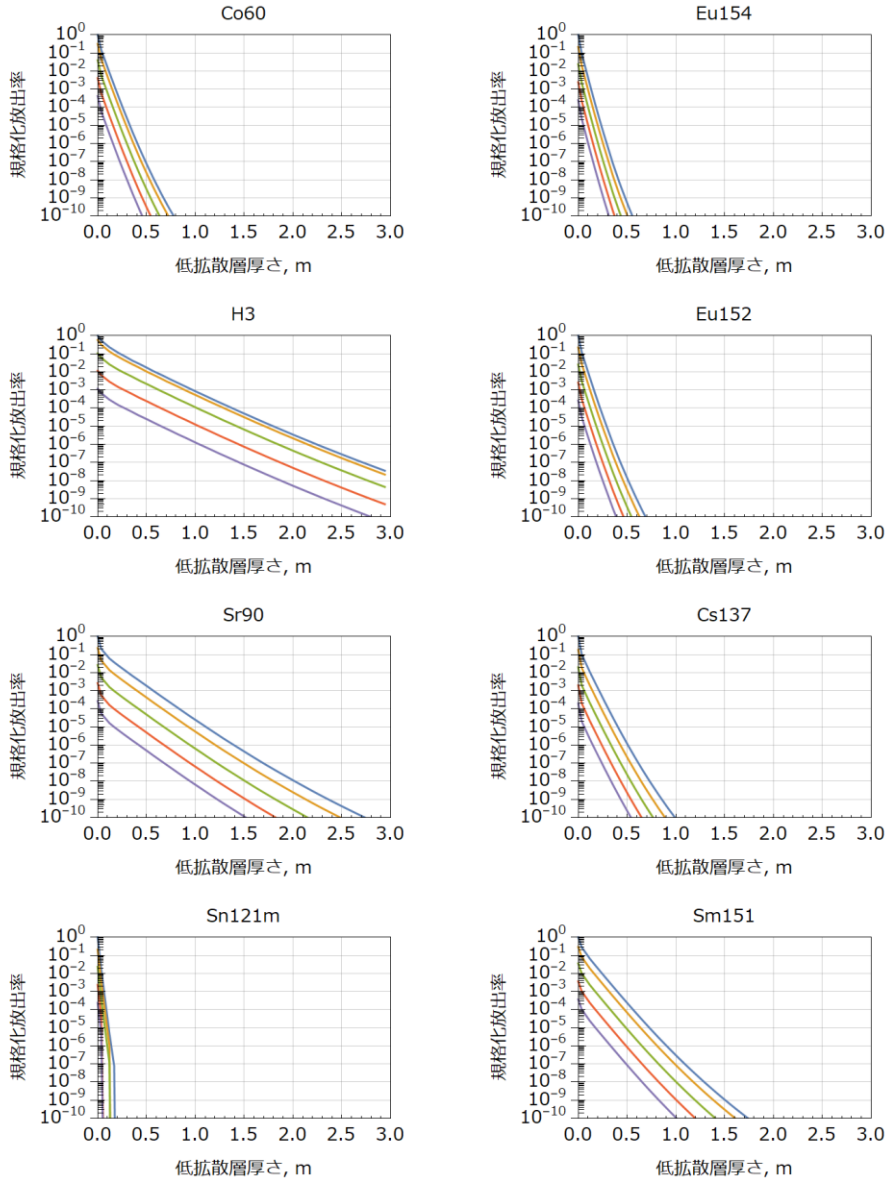
図には外部の母岩の透水係数を 10^{-6},10^{-7},10^{-8},10^{-9},10^{-10}m/s のケースが含まれ、10^{-6}m/s ケースが最も大きい。また、放出率の低減の程度を見るために、10^{-6}m/s ケースで厚さが 0m のケースを 1 とした相対値である。

図 5.2-29　低透水層の厚さと人工バリアからの放出率の低減率（中半減期核種）



図には外部の母岩の透水係数を 10^{-6},10^{-7},10^{-8},10^{-9},10^{-10}m/s のケースが含まれ、10^{-6}m/s ケースが最も大きい。また、放出率の低減の程度を見るために、10^{-6}m/s ケースで厚さが 0m のケースを 1 とした相対値である。

図 5.2-30　低透水層の厚さと人工バリアからの放出率の低減率（長半減期核種）



図には外部の母岩の透水係数を 10^{-6},10^{-7},10^{-8},10^{-9},10^{-10}m/s のケースが含まれ、10^{-6}m/s ケースが最も大きい。また、放出率の低減の程度を見るために、10^{-6}m/s ケースで厚さが 0m のケースを 1 とした相対値である。

図 5.2-31　低拡散層の厚さと人工バリアからの放出率の低減率（短半減期核種）

e．流向の効果に関する予備的解析

本検討における感度解析では坑道に対して垂直な流向を仮定した。この設定における利点は以下の通りである。

・　人工バリア中を流れる地下水流量が解析解により容易に算出可能である
・　評価対象とするパラメータの数が少なく、核種移行モデルの構築が容易であり、一次元モデルで対応可能である

これに対して、坑道長手方向に対して、ある角度を有する流向に関しては、坑道内に敷設される可能性のある止水プラグの有無やその間隔、坑道の長さといった設計上のパラメータが増え、それに伴い坑道内の流速・流量は、坑道の位置により異なるものとなる。そのため、人工バリアからの核種浸出挙動にも空間分布が生じることから、単純な一次元解析の結果を用いることができなくなる。

人工バリア外側で 0 濃度を用いて評価することも考えられる（人工バリアの外側流速が大きいものと仮定する）が、その場合、人工バリア内部（特に廃棄体領域）での流速が小さい（可能であれば、拡散支配の状態である）ことが前提となる。このようなモデル化の是非に関しては、3 次元流動・物質移行解析により確認することが重要と考えるが、その際においても母岩の不均質性の取り扱いを同様にするかを検討することが必要である。

図 5.2-32 に、ラグビーボール型の高透水領域が母岩の中に存在し、その高透水領域で地下水流速がどのように変化するかを把握するための形状モデルを示す。この形状においては解析解が存在し（[11]）、水頭分布を表現することが可能である。解析モデルでは、横幅 100m　高さ 10m、母岩部の透水係数を 10^{-9}m/s、高透水部透水係数を 10^{-7}m/s として、流向を変化させ水頭分布を確認した。

解析結果を図 5.2-33 に示す。流向は、坑道長手方向を X 軸として、0、π/8、π/4、3π/8、π/2 の角度で動水勾配を与えた。図を見てもわかるように、ちょっとした傾きであっても地下水は、高透水領域の内部を軸方向に流れている（外部透水係数と高透水領域の透水係数の比によって異なる、本ケースは 100 倍）。

図 5.2-34 に坑道中央部の軸上の流速を示す。流速は、高透水領域内の軸上で均一であるが、領域・坑道の断面積がだんだん大きくなり、中央部で最大となり、断面積はだんだん小さくなるため、流量は中央部までは増加し、中央から下流では減少する。言い換えれば、中央部まで集水状態となり下流側で排水状態となる。流向によって、流速は大きく異なり 10～20 倍程度の差が生じている。

核種の移動が移流に支配される場合には、集水域と排水域での核種移行挙動は異なることが予想され、これをモデル化する場合の着目点となる。

実際には、不均質性の効果が加わることから、より複雑な核種の放出挙動を示すものと思われる。NUMO 包括的技術報告書[12]では、亀裂性の母岩を対象に坑道からの核種移行率を統計的なモデル作成により把握している。

そのように、岩盤の不均質性を対象とする場合には、実務的には坑道のバリア厚さも均質な設計とはならない可能性もある。

部材の性能とトンネルの配置、その評価方法については今後の課題と考える。

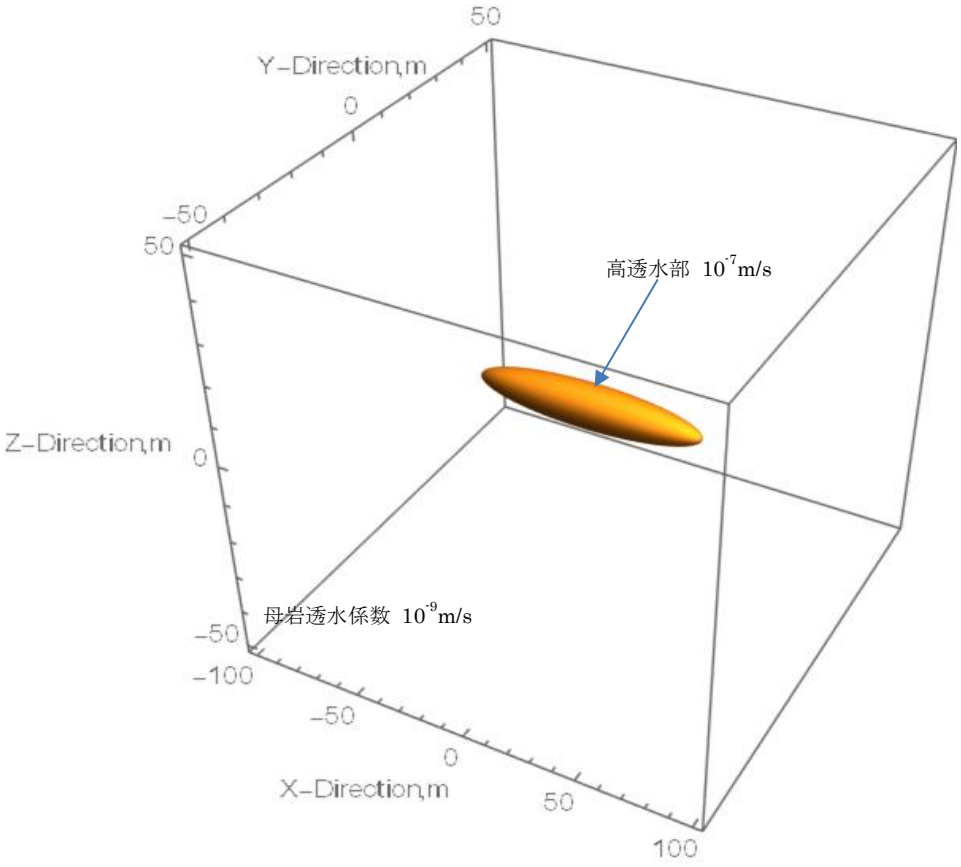


図 5.2-32　3 次元流動評価における形状モデル

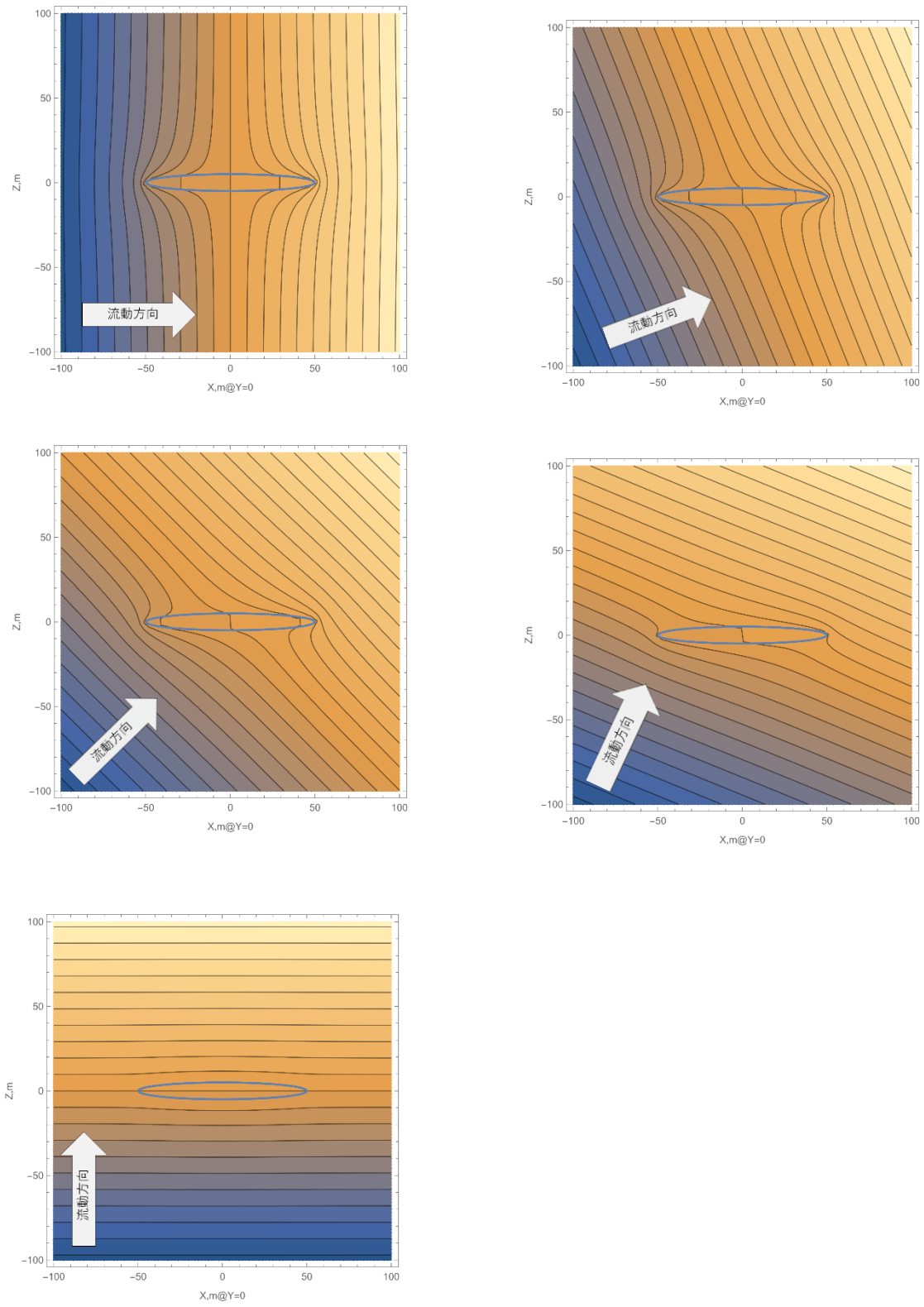


図 5.2-33　流向の変化と高透水ゾーン内の水頭分布

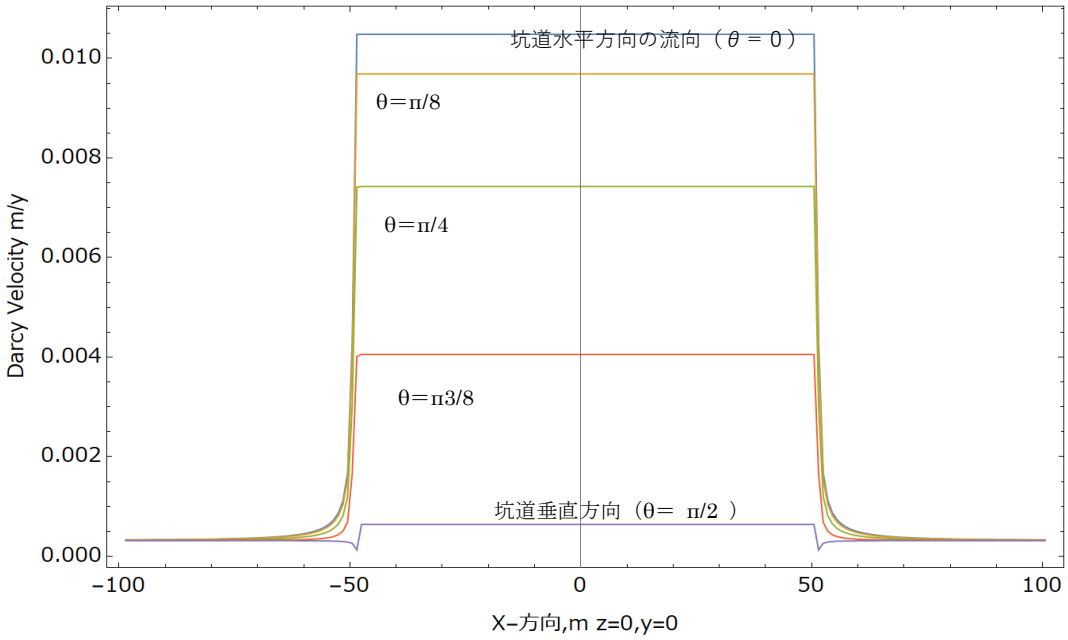


図 5.2-34　高透水ゾーン内のダルシー流速

f．低拡散層の透水係数の時間変化

本検討で用いた感度解析パラメータは、低拡散層において拡散係数は標準的な劣化後の値を設定している。一方で、ひび割れや亀裂の発生を考慮し透水係数については締め固められた砂程度の値（固定値：10^{-5}m/s）を採用している。しかしながら、コンクリート（例示では、モルタル）が健全な期間の透水係数は、岩盤に比較しても小さく低透水性バリアとしての効果が期待される。

表 5.2-17　モルタルに対する透水係数

	セメントモルタルにひび割れの無い場合	セメントモルタルにひび割れがある場合	セメントペーストが溶出したセメントモルタル
間隙率(－)	0.19	0.19	0.46
透水係数(m/s)	5×10^{-11}	4×10^{-6}	10^{-5}

第 2 次 TRU レポートより[6]

反面、コンクリート構造物である低拡散バリアの長期性能は不確実性が大きく、長期に渡り、コンクリートの性能を保証することは難しいものと考えられている（例えば[6]）。また、コンクリート部の劣化は周辺の岩盤の力学状況や地下水化学条件、地下水流動状況により左右されることが容易に予想されることから、固定的な設定（不確実なパラメータの増加）は不確実性が増大する可能性がある。

そのため、ここでは簡単に以下の状態設定を仮定し、線量解析結果に及ぼす影響を比較した。

① 透水係数が長期間小さく保たれるケース

② 透水係数が処分後、変動するケース

③ 透水係数が処分初期から期待できないケース（本感度解析における設定）

母岩の透水係数は、人工バリアの性能が強く反映される 10^{-6}m/s のケースと天然バリアの性能が顕著となる 10^{-8}m/s の 2 つのケースについて解析を実施した。なお、他のパラメータについては、低透水層の厚さを 1m、坑道断面あたりの廃棄体数を 20 としている。

低拡散層の透水係数に対して①～③の条件での解析結果を図 5.2-35 に示す。

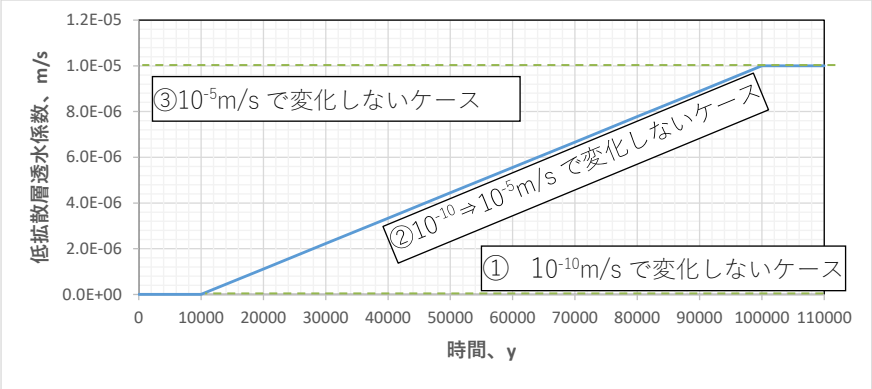
母岩の透水係数が 10^{-6}m/s においては、ピーク値の差は 2 桁程度認められる。そのため、処分初期からの保守的値の想定は、過度に保守的である可能性が高い。しかしながら、1 万年以降、透水性に上昇を仮定するケースにおいては、ピーク値の差は数倍程度にとどまる。本設定における透水性の変化モデルの妥当性にもよるが、低拡散バリアの透水性の変化に対する評価は課題の 1 つとなる。

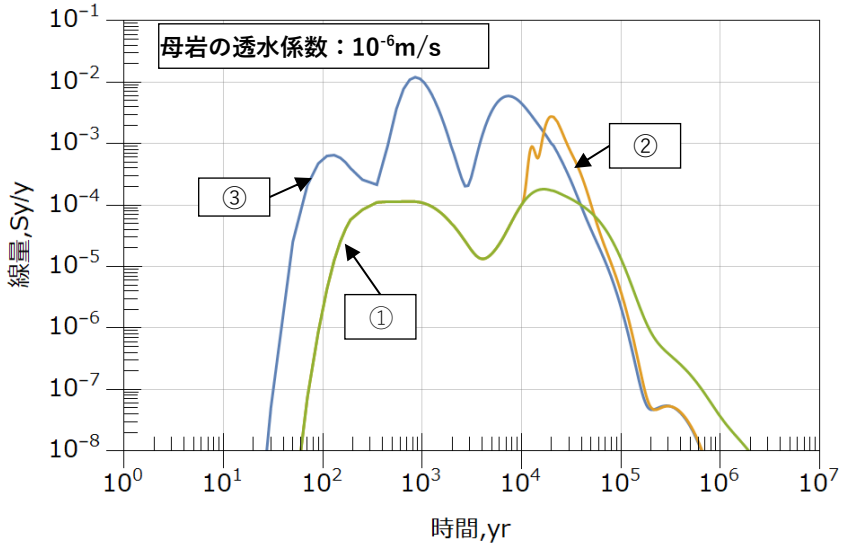
これに対して、母岩の透水係数が 10^{-8}m/s においては、廃棄体部の透水性の影響はほとんど見られなかった。廃棄体部の透水性の取り扱いは、周辺の母岩の性能によって変えることも考えられる。

母岩の透水係数が 10^{-6}m/s における保守値の設定は、線量評価においても保守的な結果となる。母岩の透水係数が 10^{-8}m/s のケースにおいては、低拡散層の変動を詳細に示したとしても効果は小さく、感度解析等で当該のパラメータ（ここでは低拡散層の透水係数）に対す

る線量の感度が低いことを理由（すなわち、重要度が小さい）に、保守値を設定することの妥当性を述べることも可能と考える。

規制側は保守的な設定に対して現実的な部材の変遷を求める可能性がある（5.2.1 参照）が、感度解析等の手法でパラメータに重要度を与えることにより、各パラメータの時間変遷の詳細度を決定することも考えられる。





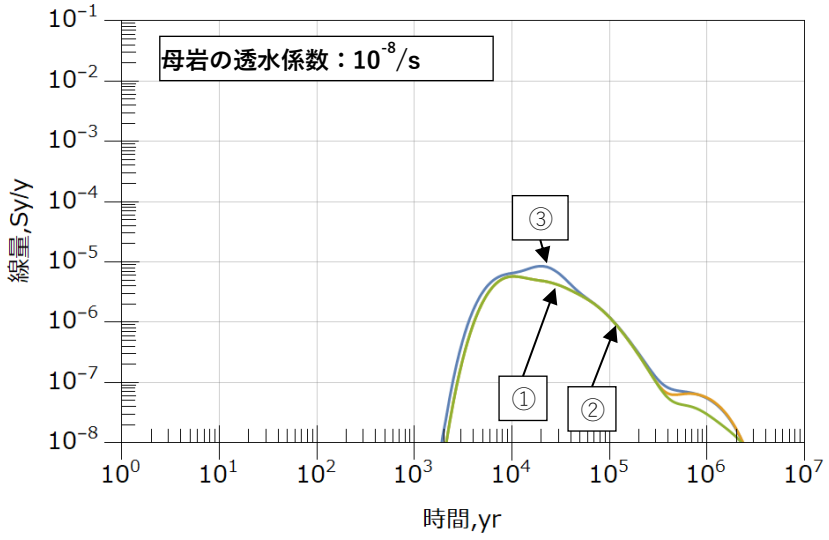


図 5.2-35　低拡散層中の透水係数を変化させた場合の線量の時間変化

2）課題の整理

低透水層及び低拡散層の設計上の厚さを決定することを目的とした感度解析を実施した。具体的な設計のステージとしては、概念設計が終了し、基本設計における人工バリアのオプションが提示された段階と想定している。

安全性に関与するパラメータとして以下のものを想定した。分配係数等のパラメータは地質環境及び地下水化学環境が固定されたものとして固定値として取り扱っている。

① 母岩の透水性
② 低透水層の厚さ
③ 低拡散層の厚さ
④ 坑道断面あたりの廃棄体数

以下に解析の実施の上で課題を述べる。

●廃棄体からの浸出率とインベントリー

処分場の設計オプションとして、①～④以外にも坑道内の充填セメント量や固定値としては含めていない核種の廃棄体からの浸出率によっても②③の効果は異なることが予想される。核種の廃棄体からの浸出率は廃棄体が制作前の現状、どの核種がどのような形態で処分されるか不確実であり、浸出率の観点からインベントリーと浸出率を精緻化する必要がある。

●地下水流向と設計の関係

本検討では、坑道軸方向に直行する流向に固定し評価を実施した。1) e. で示したように、流向の変化は坑道内部の流量に強く影響する。そのため低透水層の役割がより重要となる可能性もある。今回の解析では④にほとんど感度はなかったが、坑道の長さにより外部流量が異なることも考えられ廃棄体の定置密度やトンネル径が感度を持つ可能性がある。

また、流向が変化するケースにおいては、坑道途中に低透水バリアを設ける必要があるかもしれない。処分場の設計の観点から重要な項目となるものと予想される。

●坑道を構成する部材性能の時間変化

1) f. で示したように、部材の劣化挙動が線量に影響を与える可能性がある。また、1) d. で示した、人工バリアからの核種移行率に強く影響を及ぼすものと考えられる。更には、保守的な設定を行わざるを得ない場合においても、具体的な変遷の評価の提示は不可欠なものと考えられる。

●パラメータの重要度の分類

①～④の結果を概括すると、線量ピーク値の変化は、低透水層の有無を除きさほど大きなものではない。そのため、ここで感度対象としなかったパラメータの不確実性を考慮するならば（例えば、分配係数）、ここでの結果は容易に変化する可能性がある。包括的にパラメー

タの重要度に従った結果の取り扱いが必要と考える。なお、パラメータの重要度は、設計の段階により異なるものと考えられ、その定量化方法の課題の一つとなる。

5.2.3　オプション抽出

（1）オプション抽出に関する考え方の整理

長期安全性に係る感度解析の結果を、低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、断面当たりの廃棄体数ごとに図 5.2-36～図 5.2-38 に示す。

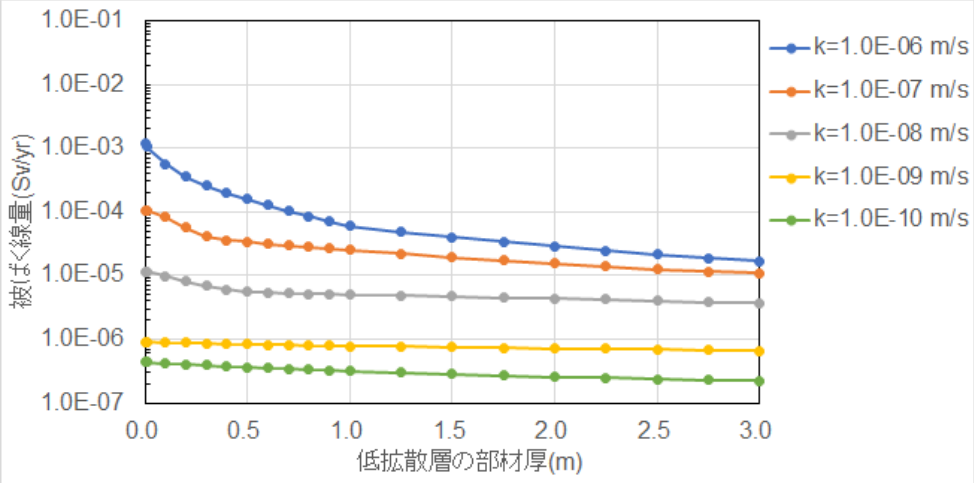


図 5.2-36　感度解析結果（低拡散層の部材厚）

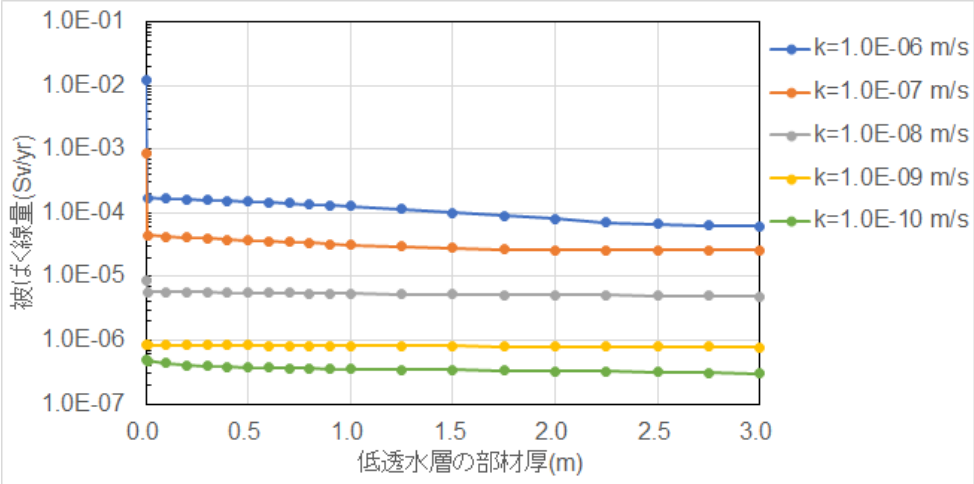


図 5.2-37　感度解析結果（低透水層の部材厚）

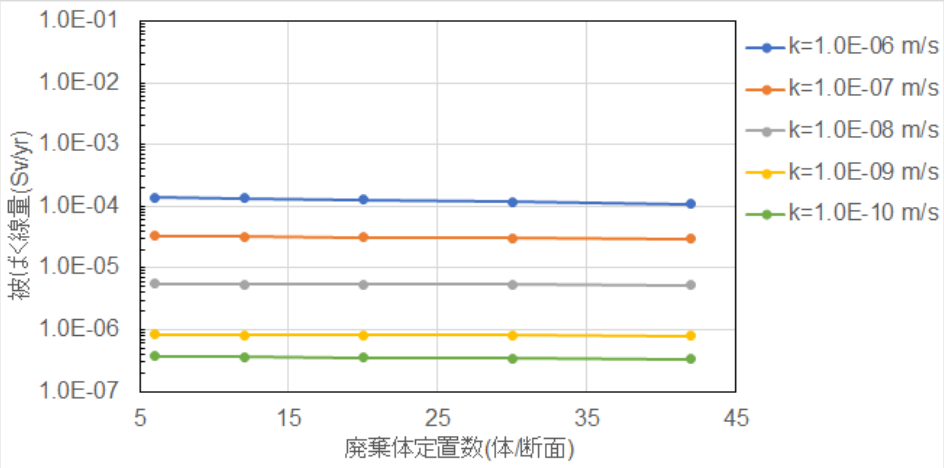


図 5.2-38　感度解析結果（断面当たりの廃棄体数）

長期安全性に係る感度解析結果より、以下の知見が得られた。

- 低拡散層の部材厚は、1×10^{-8}m/s 以下の透水係数を有する岩盤では被ばく線量にほとんど影響しない。その一方で、1×10^{-7}m/s 以上の透水係数を有する岩盤では、部材厚の低減に伴って被ばく線量が増加する。
- 低透水層の部材厚は、岩盤の透水係数によらず被ばく線量への影響度は小さい。しかしながら、岩盤の透水係数が 1×10^{-7}m/s 以上の場合では、部材厚が 0cm になると被ばく線量は大きく増加する。
- 断面当たりの廃棄体数が変動しても、被ばく線量はほとんど変動せず、その傾向は岩盤の透水係数によらない。

感度解析の目的は、人工バリアオプションを抽出するにあたって、長期安全性に対する感度が高い要素（低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、断面当たりの廃棄体数、岩盤の透水係数）を把握することである。得られた知見より、岩盤の透水係数は、低透水層及び低拡散層の部材厚を設定する際に大きく影響すると考えられる。したがって、本検討では、2 種類の岩盤を設定する。一つは、岩盤の透水係数が比較的高い母岩 A（透水係数：1×10^{-6}m/s）、もう一つは、岩盤の透水係数が比較的低い母岩 B（透水係数：1×10^{-8}m/s）である。母岩 A では、低透水層及び低拡散層の部材厚の増大に伴って被ばく線量が低減する傾向が確認されていることから、ベースオプションからそれぞれの部材厚を増大することが考えられる。母岩 B では、低透水層及び低拡散層の部材厚を変動させても被ばく線量はほとんど変動しないことから、部材厚を低減できる可能性があると考えられる。それぞれの岩盤に対して人工バリアオプションを設定することで、岩盤の特性を考慮した設計オプションを抽出する。設計オプションの抽出にあっては、低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、断面当たりの廃棄体数をベースオプションから増減する。ベースオプションの仕様について図 5.2-39 に示す。

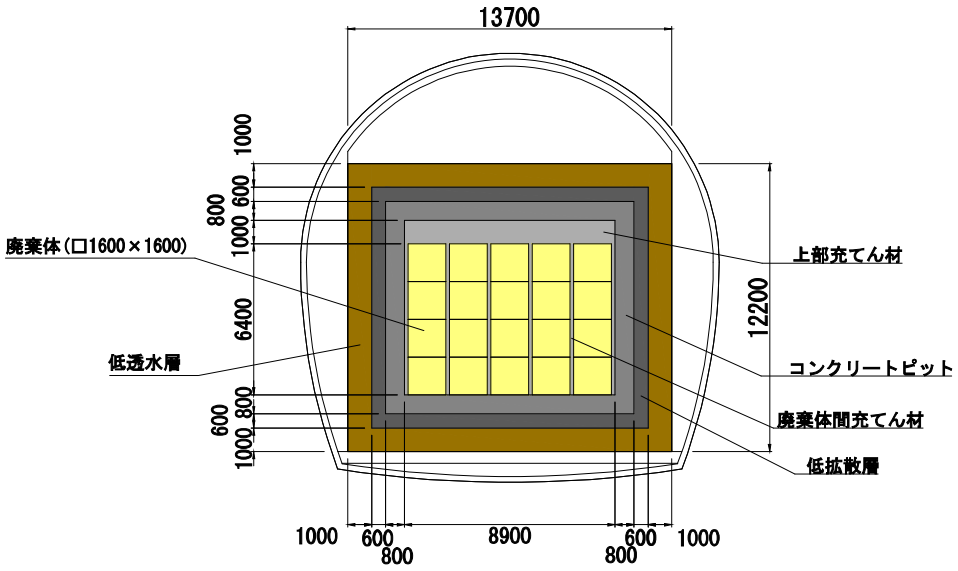


図 5.2-39　ベースオプション

ベースオプションから部材厚を増大するあるいは低減する場合の、ぞれぞれの考え方について整理する。

(2) 部材厚を増大する場合の考え方

本検討では、最大 18m 級の処分空洞を想定しているため、ベースオプションから部材厚を増大する場合、コンクリートピットより内側の空間を小さくする必要がある。また、低拡散層及び低透水層の部材厚、断面当たりの廃棄体数に着目した検討であることから、コンクリートピット、上部充てん材の寸法は固定して検討を進める。以上のことより、部材厚を増大する場合は、断面当たりの廃棄体数を低減する、あるいはもう一方の部材厚を低減する必要があると考えられる。

部材厚の増大にあたって、どの程度まで厚くする必要があるか検討する。原子力規制委員会が公開した中深度処分の廃棄物埋設地に関する審査ガイド[13]によると、「公衆の受ける線量を十分に低減できる」ことの判定に用いる考え方が以下のように示されている。

・　自然事象シナリオ（解釈第 12 条 8 二イ）について、「被ばくに至る経路」及び「人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータ」を解釈第 12 条 9 一ロ①及び②のとおり設定し評価した公衆の受ける線量が、おおむね 100 マイクロシーベルト／年を超えない。

上記の記載にある 100μSv/y を、低拡散層及び低層水層の部材厚をパラメータとした感度解析結果に適用する（図 5.2-40、図 5.2-41 参照）。

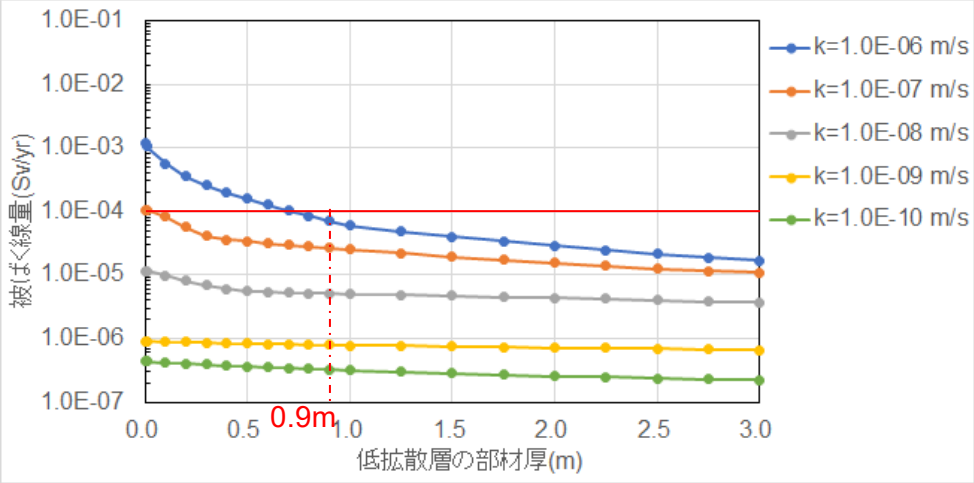


図 5.2-40　低拡散層の感度解析結果に 100μSv/y の考え方を適用した場合

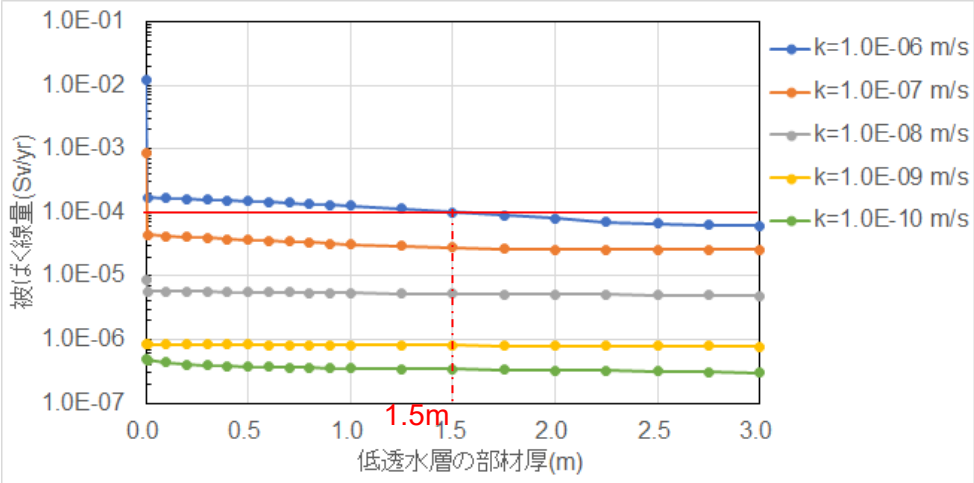


図 5.2-41　低透水層の感度解析結果に 100μSv/y の考え方を適用した場合

図 5.2-40 に示すように、低拡散層の部材厚のみを変動させた感度解析結果に 100μSv/y の考え方を適用した場合、岩盤の透水係数によっては、被ばく線量が 100μSv/y を超えることが確認された。本検討で設定した母岩 A（透水係数：1×10^{-6}m/s）において、被ばく線量が 100μSv/y を下回るためには、低拡散層の部材厚が 0.9m 必要になる。同様の考え方で、図 5.2-41 に示す低透水層の部材厚は、1.5m 必要になる。したがって、低拡散層の部材厚を増大する場合は 0.9m、低透水層の部材厚を増大する場合は 1.5m を一つの目安とする。なお、本検討における感度解析は、様々な仮定のもと実施しており、100μSv/y を適用した必要厚さ 0.9m 及び 1.5m という数値は、あくまで一つの考え方に過ぎないことに十分留意する必要がある。

(3) 部材厚を低減する場合の考え方

岩盤の透水係数が小さい場合に、人工バリアの部材厚を低減できる可能性がある。ここでは、部材厚を低減する場合にどの程度まで低減するかについて検討する。

処分場の長期安全性を確保した上で部材厚を低減する際に考慮すべきこととして、部材に

使用する材料の性能と施工実現性が挙げられる。このうち、使用材料は本検討では言及しないため、既往検討で性能が確立されたものを使用すると仮定する。既往検討として、原子力環境整備促進・資金管理センターの管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設性能確証試験報告書[14][15][16][17][18][19]を参考にする。

確証試験は、平成 19 年度～平成 24 年度で実施されたもので、低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設検討のための試験空洞を活用した、地下空洞型処分施設の原位置における実規模の模擬試験である。試験の目的として、以下が挙げられている。

- 発電所廃棄物の余裕深度処分の建設段階での施工技術、品質管理方法の実現性を確認
- 施工された人工バリアが要求機能を満足することの確認、要求機能と施工方法の関連把握
- 施工中、施工後の施設施設や周辺岩盤の挙動予測と計測方法の妥当性を確認

確証試験では、施工技術と要求機能を満足するか否かの確認が行われている。そこで、確証試験で実証された技術は施工実現性のある技術と判断し、部材厚設定時の考え方に適用する。対象としている処分概念を図 5.2-42 に示す。

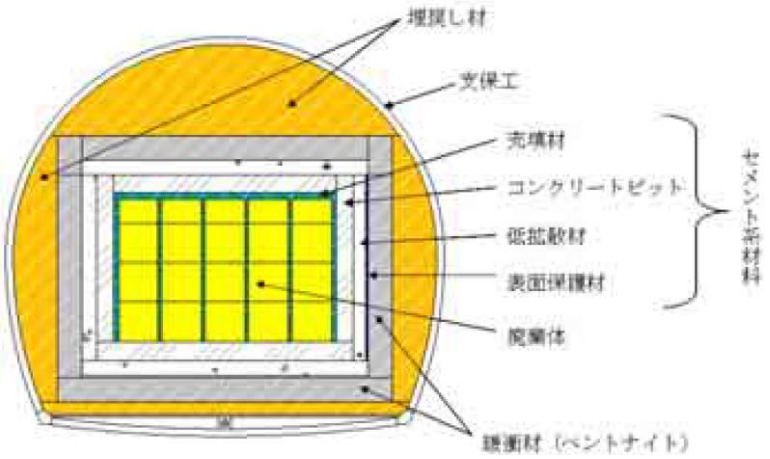


図 5.2-42　地下空洞型処分施設の概念の例[14]

低拡散層及び低透水層の部材厚を変更するにあたり、低拡散層と隣接するコンクリートピットを施工する際に考慮すべき事項を整理する（考慮事項には傍線を引く）。確証試験によると、同じ人工バリアの部材でも、上部、側部、底部のように施工する場所によって施工方法が異なる。したがって、人工バリア部材の部材厚をそれぞれ検討する必要がある。

まず、コンクリートピットに要求される主な機能は、建設操業期間中の空間と力学的安定性を確保することである。コンクリートピットに作用する外力として考えられるのは、操業時の作業荷重、廃棄体荷重、低拡散層の打設圧、充てん材施工時の充てん圧、自重、埋戻し後の排水設備停止に伴うベントナイト（低透水層）の膨張圧である。本検討で設定したベースオプションは、確証試験で示される仕様を参考にしており、コンクリートピットの部材厚は変更しない。コンクリートピットを施工する際は、足場や鉄筋、型枠を組み立てるために、

その作業空間を確保する必要がある。これは側部、底部及び上部のコンクリートピットいずれに対しても同様である。コンクリートピットより内側は、廃棄体定置前のため空間に余裕がある一方で、コンクリートピットより外側は、低拡散層及び低透水層を施工するための空間しか存在しない。したがって、低拡散層及び低透水層の部材厚の決定する際は、コンクリートピットの施工必要幅を考慮する必要がある。また、コンクリートピットの外側に位置する低拡散層についても同様のことが考えられ、低拡散層を施工するための作業スペースが必要になる。確証試験によると、「側部低拡散層は水和熱の低減と硬化体の緻密化を目的として低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを 30%混入した水結合材比 45%の高流動モルタルに膨張材を使用し、型枠組立、現場打込み等を行い、品質及び出来形等の所要の項目についての確認を行い、施工性についての評価・確認を行う」としている。このことから、型枠の組立と打込みのための作業スペースが必要であり、その空間は低拡散層より外側の空間でしか確保することができない。したがって、低透水層の部材厚を決定する際は、低拡散層の施工必要幅を考慮する必要がある。更に、土木学会[2]によると、低拡散層の要求機能として、遮へい性を設定している（表 5.2-18）。

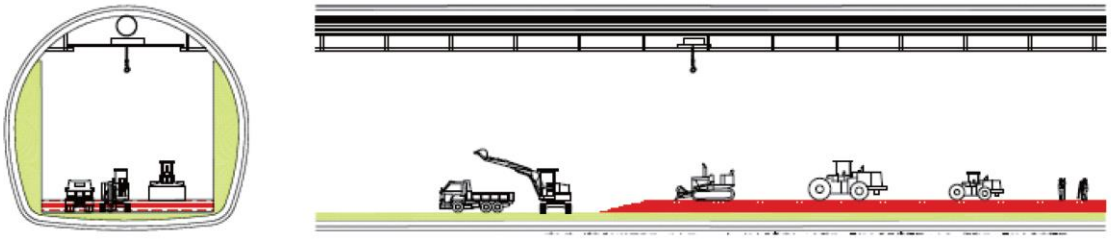
表 5.2-18　低拡散層の要求機能と技術要件[2]

要求機能		段階	機能の内容	機能の要否	技術要件
基本安全機能	閉じ込め	建設・操業	放射性物質の埋設地外の環境への有意な漏出を防止すること	－	－
	遮へい		廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること	●	・放射線の遮へい性能
	移行抑制	埋戻し後	放射性核種の拡散による移行を抑制すること	●	・拡散特性
			放射性核種を収着すること	●	・核種収着性
			低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の低減を行うこと	－	－
			連続した地下水移行経路を形成しないこと	－	－
	離隔		離隔距離を確保すること	－	－
			容易な侵入を防止すること	－	－
操業上の機能		建設・操業	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保されること	●	・力学特性
			坑道の形状を維持すること	－	－

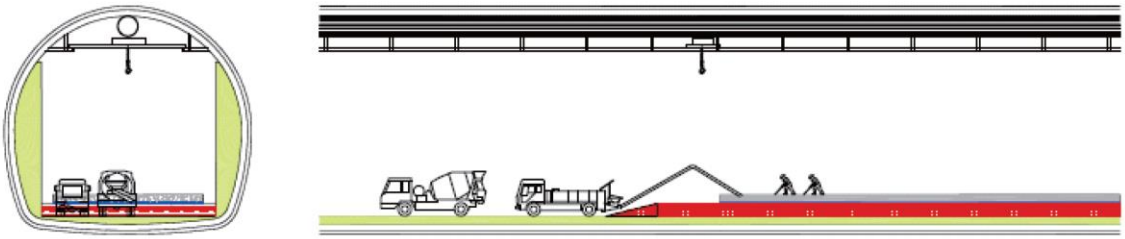
低拡散層における遮へい性は、人間が現場で作業することを想定して設定されている。このことから、低拡散層の部材厚には、放射線遮へいに必要な厚さを考慮する必要がある。更に、力学的安定性を確保するために、力学特性も設定されている。側部低拡散層に要求され

る力学特性とは、コンクリートピットに付着し遮へい体として自立することである。低拡散層の遮へい性については、人工バリアの構築・操業手順によっては、必要ない可能性がある。図 5.2-43 及び図 5.2-44 に、土木学会[2]で示される処分坑道の建設・操業手順を示す。

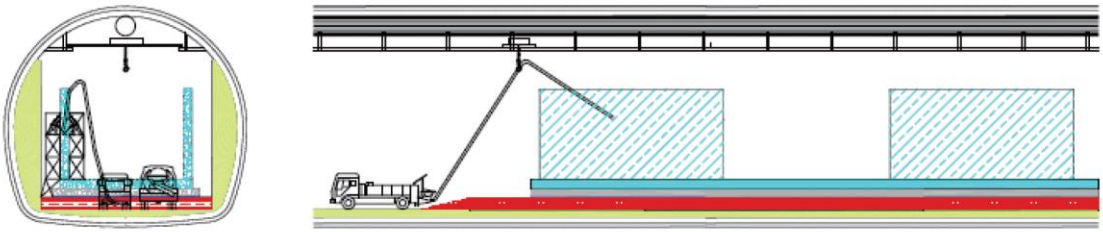
Step.1 底部低透水層施工



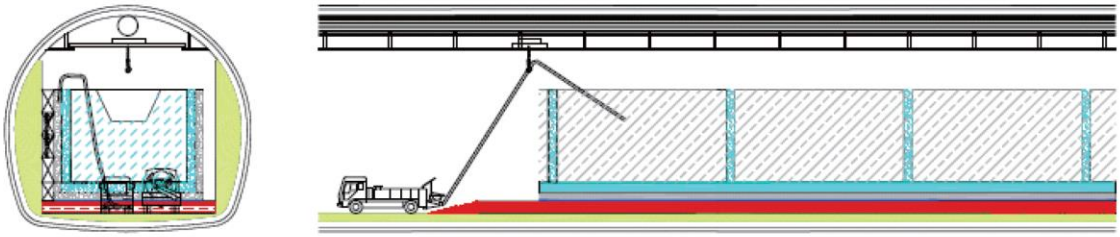
Step.2 底部低拡散層施工



Step.3 底部・側部コンクリートピット施工



Step.4 側部低拡散層施工



Step.5 廃棄体定置［管理区域設定］

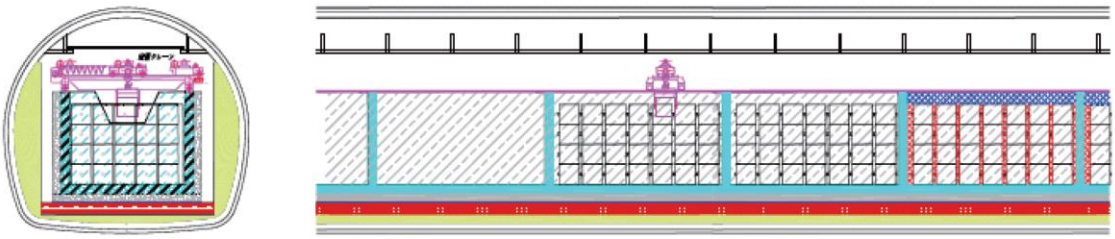
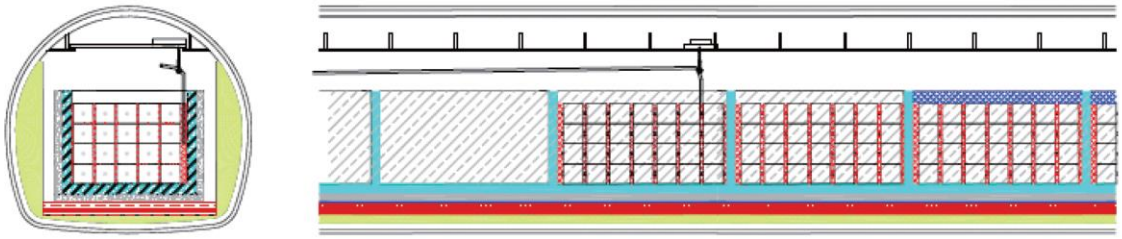
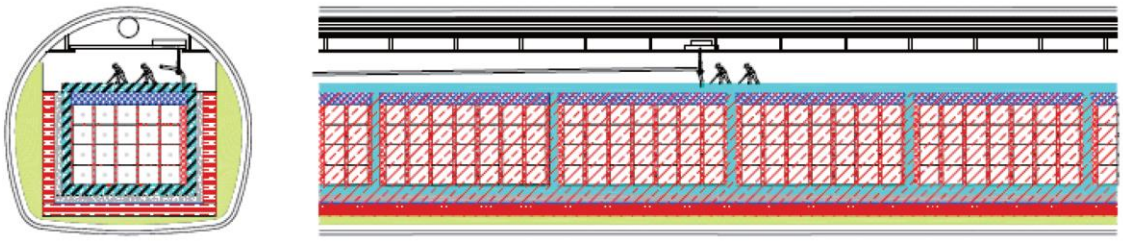


図 5.2-43 処分空洞内での建設・操業工程（1/2）[2]

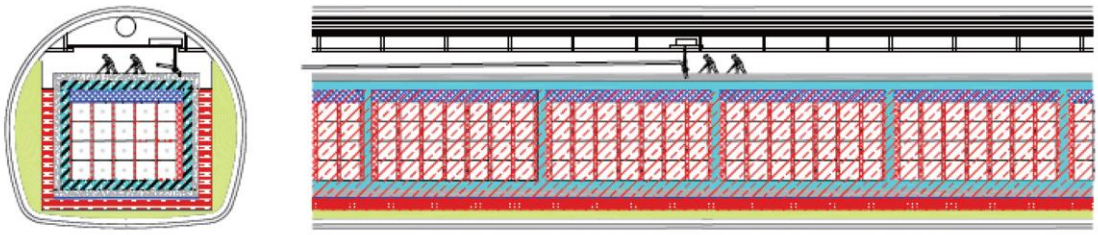
Step.6 区画内充てん材施工［管理区域設定］



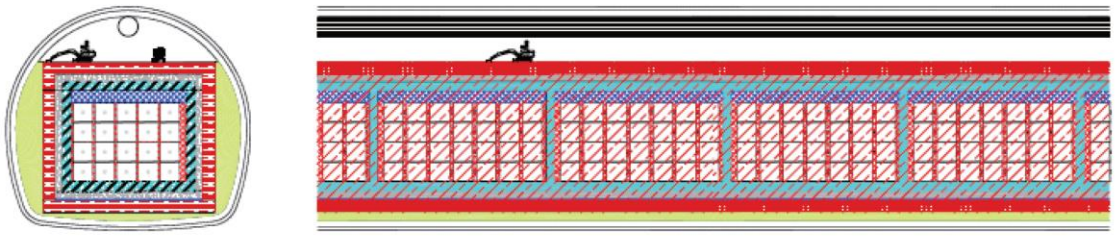
Step.7 上部コンクリートピット施工



Step.8 上部低拡散層施工



Step.9 上部・側部低透水層施工



Step.10 空洞内充てん材施工

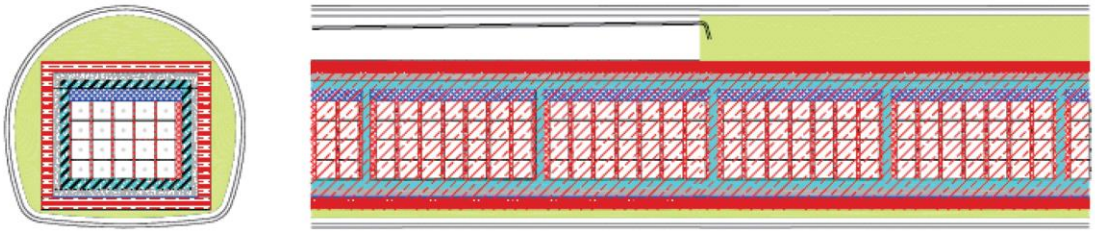


図 5.2-44 処分空洞内での建設・操業工程（2/2）[2]

図 5.2-43 及び図 5.2-44 より、底部の部材の施工が完了すると、側部コンクリートピット、側部低拡散層の順に施工する。その後、廃棄体を定置し、廃棄体間の充てん材を充てんする。Step.5 と Step.6 が管理区域に設定されており、それ以外の作業では放射線の遮へい性が確保されていることが前提になっている。図 5.2-43 及び図 5.2-44 中に Step として示されていないが、Step.6 と Step.7 の間で側部低透水層が施工されており、上部コンクリートピット以降の作業は人力で行われている。その際、Step.4 の後に側部の低透水層を施工してから廃棄体を定置することで、側部の放射線遮へいに必要な厚さを考慮する必要がなくなる。これにより、低拡散層の部材厚さを柔軟に設定できることから、本検討では、低拡散層に遮へい性を必要としない施工手順を想定し、低拡散層の部材厚に放射線遮蔽に必要な厚さを考慮しない。

また、低拡散層の施工性及び初期性能を確保できる部材厚さが必要である。確証試験では 60cm の部材厚で側部低拡散層を施工する際に、人力のバイブレータによる締固めがある場合とない場合の仕上がりを比較している。その結果、高流動のモルタルを使用することで、振動・締固めを行わなくても均一な人工バリアを構築できるとしている。側部コンクリートピットとの打ち継ぎ処理によって自立性を確保することで、力学的安定性が確保されることも確認されている。

次に、側部低透水層は、上部空間と側部低透水層を施工するための空間だけで施工する必要があり、最も狭隘な作業スペースになると考えられる。確証試験における側部低透水層の施工では、小型の振動ローラによる転圧工法と吹付けロボットによる吹付け工法が検討されている。したがって、低透水層の部材厚を決定する際は、転圧工法あるいは吹付け工法を実施する際に用いる装置の寸法や稼働に必要な幅を考慮する必要がある。

底部の部材は、底部コンクリートピット、底部低拡散層、底部低透水層が該当する。先にも述べた通り、コンクリートピットの部材厚は確証試験の値を踏襲する。底部低透水層の施工は、側部及び上部等の低透水層に比較して平面的な余裕を有しており、空頭制限も厳しくないことから大型重機による施工が可能である。一方で、妻部や側部の埋め戻し材近傍の端部などでは大型重機による施工が困難であることから、小型の転圧装置の運用が検討されている。いずれにしても制約条件はほとんどないため、底部低透水層の部材厚は、確証試験に示されている仕上がり厚さを参考に設定する。上部低透水層の部材厚は、底部透水層の考え方と同様とする。底部低拡散層は、底部透水層の上に施工される部材である。低拡散層の施工ではセパレータ等を使用できないことから施工の難易度は高いと考えられるが、低透水層と同様に空頭制限は厳しくないため、制約条件はほとんどない。

以上より、低拡散層及び低透水層の部材厚を設定するにあたって考慮すべき検討事項を表 5.2-19 に整理する。

表 5.2-19　低拡散層及び低透水層の部材厚設定にあたり検討する必要がある事項

		検討事項
低透水層の部材厚	上部	低透水層の要求性能を満たし、施工時の転圧に必要な作業スペース
	側部	低拡散層施工時の足場及び型枠の組立に必要な作業スペース
		低透水層施工時の転圧及び吹付けに必要な作業スペース
	底部	低透水層の要求性能を満たし、施工時の転圧に必要な作業スペース
低拡散層の部材厚	上部	低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打込みに必要な作業スペース
	側部	コンクリートピット施工時の足場及び型枠の組立に必要な作業スペース
		低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打込みに必要な作業スペース
	底部	低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打込みに必要な作業スペース

表 5.2-19 に示した検討事項について、部材ごとに検討する。

1）低拡散層の最小部材厚の検討

まず、底部低拡散層の最小部材厚さについて検討する。底部低拡散層の検討項目は以下である。

・　低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打込みに必要な作業スペース

確証試験で提示されている底部低拡散層の施工フローを図に示す。

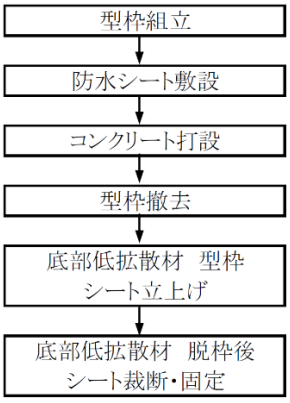


図 5.2-45　底部低拡散層の施工フロー[15]

ここでの防水シートは、側部の部材を施工するにあたって露出したままになる底部低透水層のためのものである。底部低透水層やコンクリートピットを施工する際の養生水や打ち継ぎ目処理水が浸潤することを避けることを目的として敷設される。コンクリートの打設にお

いては、ポンプ車二台で実施されている。打設の概念図を図 5.2-46 に示す。

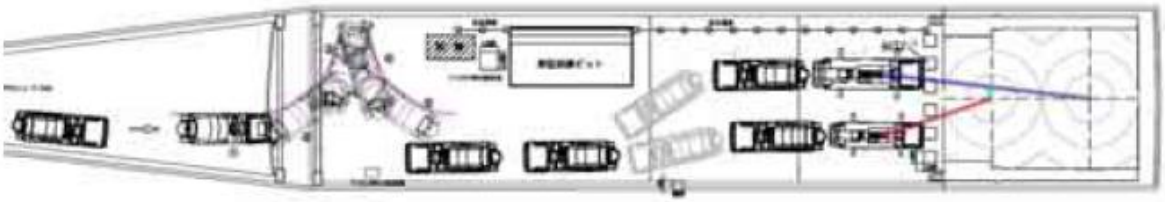


図 5.2-46　底部低拡散材打設時の概念図[15]

図より、空洞軸方向中心線上に手前から 4m と奥部から 4m の二か所で打ち込み箇所を固定し打設している。バイブレータによる締固めも行わない予定であったが、予定していた流動性が確保できず、前面に打ち重ねることが出来なくなったため、ポンプ車の筒先を動かし、バイブレータによって振動させている。1 時間で一回の打ち重ねを行い、計 4 回で仕上げている。

施工方法は側部と底部で大きく変わらず、側部で施工可能な厚さであれば、底部及び上部でも施工が可能であると考えられる。そこで、側部低拡散層の施工厚さを踏襲して、底部低拡散層の最小厚さを 20cm とする。

次に、側部の低拡散層を施工する際委考慮すべき事項について検討する。側部低拡散層施工における検討項目は、以下である。

- 側部コンクリートピット施工時の足場及び型枠の組立に必要な作業スペース
- 低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打ち込みに必要な作業スペース

側部のコンクリートピットを施工する際の施工フローを図 5.2-47 に示す。

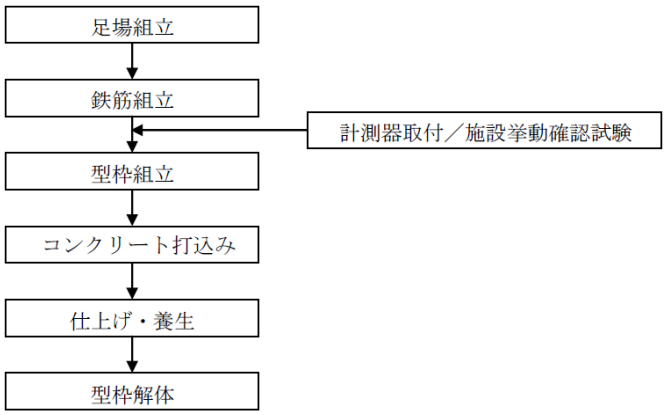


図 5.2-47　コンクリートピット施工フロー[15]

施工フローの中で、低拡散層及び低透水層を施工する空間を利用する作業は、足場組立と型枠組立である。確証試験では、「鉄筋の組立は底部コンクリートピット上に配置した 4.9t ク

ローラークレーンにて底部ピット上に揚重し、人力にて配材・組立を行った。足場間が狭く、上部にクリアランスが無く、上部からの鉄筋の取り込みが困難なため、手前の坑口側から行った」としている。足場及び型枠の組立に必要な幅を、労働安全衛生規則を参考にして設定する。労働安全衛生規則の第五百六十三条では、足場の作業床の幅について以下のように記されている。

労働衛生規則　第五百六十三条　（作業床）
事業者は、足場（一側足場を除く。第三号において同じ。）における高さ二メートル以上の作業場所には、次に定めるところにより、作業床を設けなければならない。
二　つり足場の場合を除き、幅、床材間の隙間及び床材と建地との隙間は、次に定めるところによること。
イ　幅は、四十センチメートル以上とすること。
ロ　床材間の隙間は、三センチメートル以下とすること。
ハ　床材と建地との隙間は、十二センチメートル未満とすること。

規則より、足場に必要な最小幅は 40cm であることから、低拡散層及び低透水層の合計部材厚は 40cm 以上とする必要がある（ただし、両部材が 0cm の場合はこの限りではない）。また、確証試験では「側部コンクリートの型枠材として、内面には樹脂製の半透明型枠を、外面には t=12mm の合板を採用。型枠の鉛直度を確保するために、側部埋戻しコンクリートからパイプサポート、チェーンとターンバックルにて調整。手前部との接続部については打継ぎ面から鉄筋を出さないこととし、機械継手部の内部にコンクリートが入らないようにスポンジを取付けて型枠を取付けた。また、KK シートの凸凹とスポンジの取り合いが煩雑になることから、KK シートを使用せず、フィルムタイプの非硬化材「リタメイト」を設置」としている。型枠組立の様子を図 5.2-48 に示す。

図 5.2-48　型枠組立状況（左：前景、右：近景）[15]

図 5.2-48 を参考にすると、足場及び型枠の組み立て作業では、足場の幅に加えてそれを構築するためのスペースが必要になる。作業スペースも踏まえて、足場及び型枠の組み立てに必要な幅を 60cm として設定する。これは、低透水層と低拡散層の両部材厚の合計厚さの最

小値に等しい。

次に、低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打ち込みに必要な作業スペースを検討する。確証試験で示される側部低拡散層の施工フローを図 5.2-49 に示す。

図 5.2-49　側部低拡散層の施工フロー[16]

一般的に、モルタルの打設時には、締固め性を向上させ所定の力学強度を確保するためにバイブレータによる締固めが行われる。一方で、確証試験における側部低拡散層の施工では、高流動モルタルが使用されている。高流動モルタルの打込み時の流動性を確認する目的で、バイブレータを使用して締固めをした場合とそうでない場合の比較検討が行われている（図 5.2-50 参照）。その結果、打設時のバイブレータの使用の有無はモルタル表面の仕上がりに大きく影響するが、その影響は表面に限定されるものであり、側部低拡散層に高流動モルタルを使用することで、バイブレータによる振動・締固めを行わなくても均一な人工バリアを構築できることが確認されている。

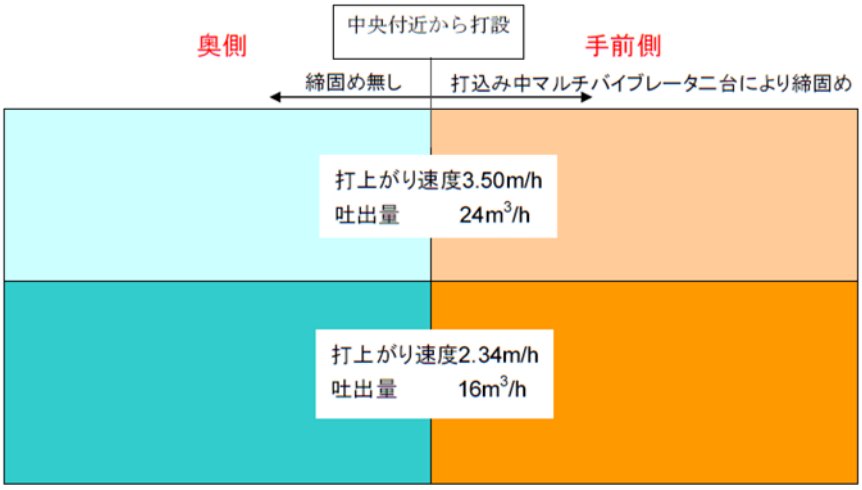


図 5.2-50　モルタル打設時の締固め有無[16]

また、建築現場では厚さ 20cm の RC 壁を打設することがあり、この事例を踏まえると、本検討で参考とした高流動モルタルでのモルタル壁の施工は、20cm でも十分に可能であると考えられる。したがって、側部低拡散層の施工性及び初期性能確保に必要な厚さとして 20cm を設定する。

次に、上部低拡散層に関する検討項目は以下である。

・　低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打込みに必要な作業スペース

確証試験で提示されている上部低拡散層の施工フローを図 5.2-51 に示す。

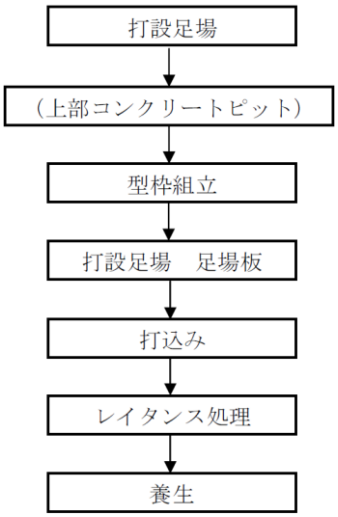


図 5.2-51　上部低拡散層の施工フロー[19]

上部低拡散層の施工は、基本的に底部低拡散層の施工に準じている。そのため、上部低拡散層の部材厚は、後述する底部低拡散層の部材厚に倣うこととする。

2）低透水層の最小部材厚の検討

まず、底部低透水層について検討する。底部低透水層の検討項目は以下である。

・　低透水層の要求性能を満たし、施工時の転圧に必要な作業スペース

確証試験における底部低透水層は、底部埋め戻し材の上でベントナイト材料を原位置にて締固めて厚さ 1m で構築するもの、としている。底部低透水層の施工フローを図 5.2-52 に示す。

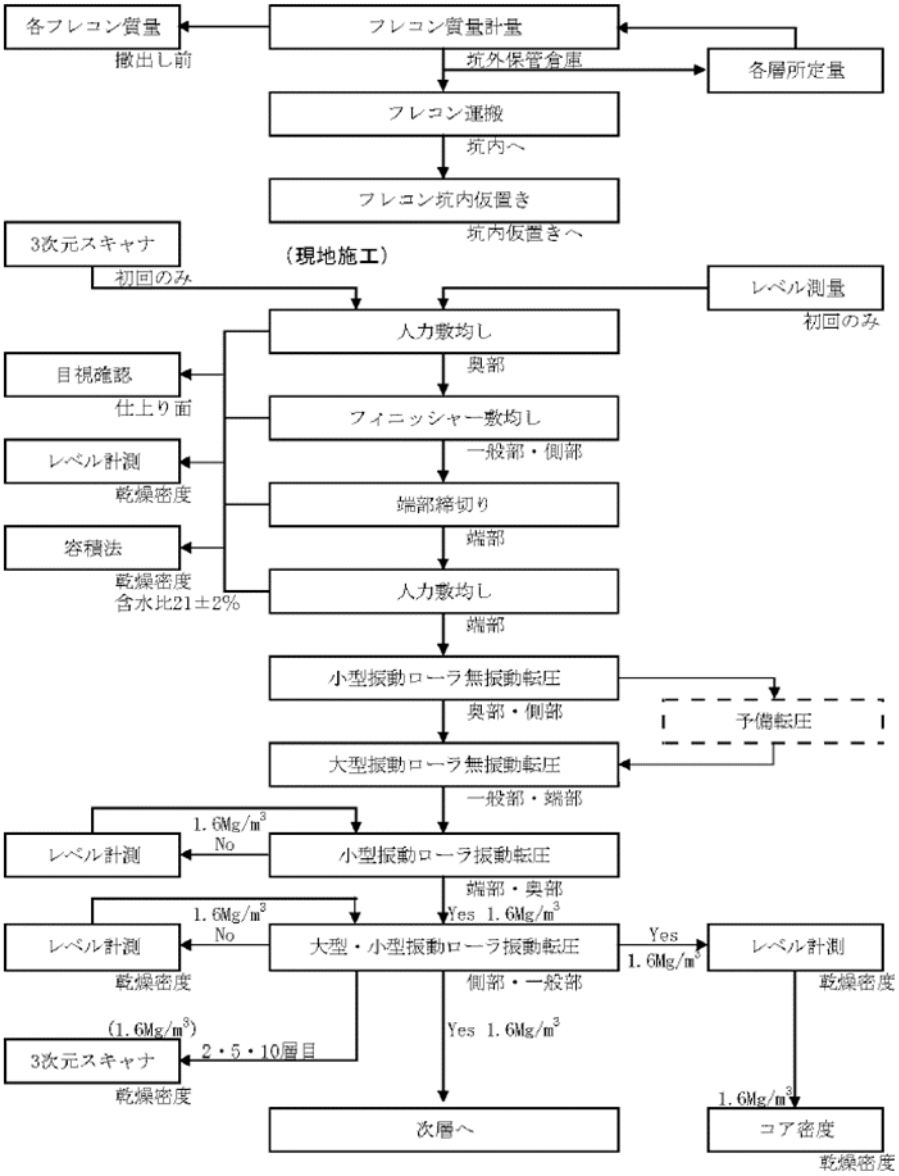


図 5.2-52　底部低透水層の施工フロー[15]

締固め後の 1 層当たり乾燥密度の目標値を 1.6Mg/m³ とし、計 10 層の現場締固めが行われている。材料は、締固め後の 1 層当たりの仕上がり層厚が 100mm となるようにアスファルトフィニッシャーを用いて敷き均しており、奥部や端部で機械による敷き均しが困難な場合は、人力による撒き出しが行われている。結果として、仕上がり層厚 100mm の低透水層は、建設実現性の観点から問題がなく、品質上最も重要な初期乾燥密度も管理目標範囲に収めることができている。一方で、ベントナイトの施工には不陸等の施工上のばらつきに加え、長期的な不確実性を考慮すると、100mm という厚さでは不十分な可能性がある。そこで、本検討における底部低透水層の最小部材厚として 300mm を設定する。

次に、側部低透水層の最小部材厚について検討する。側部低透水層の検討項目は以下である。

・　低拡散層施工時の足場及び型枠の組立に必要な作業スペース

・　低透水層施工時の転圧及び吹付けに必要な作業スペース

低拡散層は無筋モルタル部材で高流動モルタルが用いられる。現場打ち込みにより施工されるため、足場及び型枠の組立・解体の作業スペースが必要になる。確証試験では、狭隘部の施工であることから、足場は一般の枠組足場ではなく、側部埋戻し材のセパレータボルトを利用し、フォームタイにより単管を設置したブラケット足場を設置している。先にも述べたとおり、コンクリートピットを施工する際の足場に必要な幅として 60cm を設定しており、低拡散層の足場に対しても同様の考え方を適用する。また、型枠の組立については、低拡散層の要求性能上、内部に異物を入れることが出来ないため、セパレータ等の支保材を使用出来ず、更に、狭隘部であるため、クレーン等による揚重作業が不可能であり、全て人力での運搬及び組立となった、としている。

転圧及び吹付けに必要な作業スペースについて、それぞれ検討する。まず、確証試験で示されている側部低透水層の施工フローを図 5.2-53 に示す。

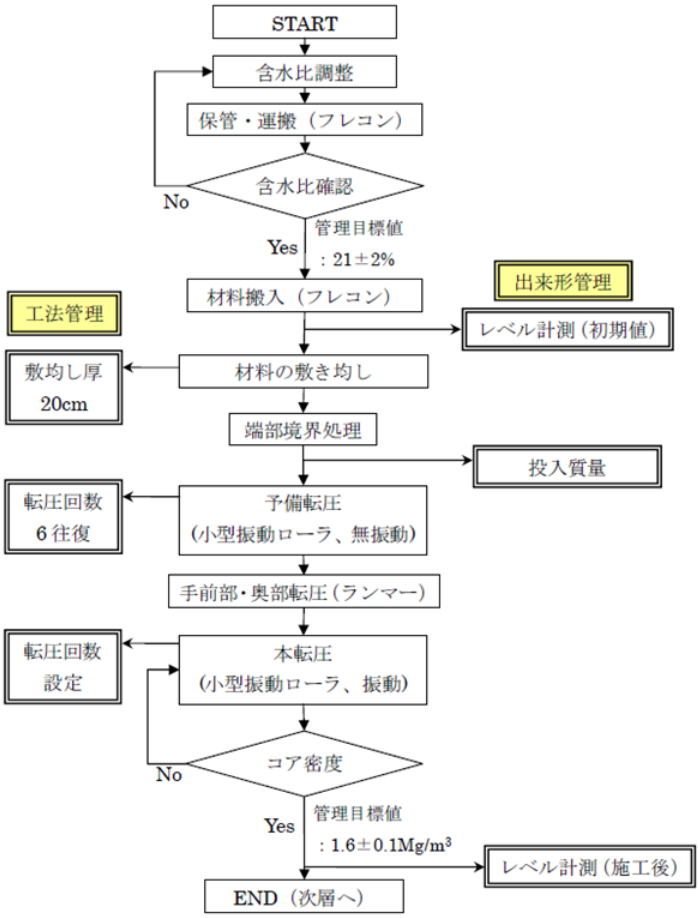


図 5.2-53　低透水層の現場施工フロー[18]

図 5.2-53 に示す施工フローのうち、部材厚の設定に影響すると考えられるのは材料の敷均しと転圧作業である。敷均しは、人力と敷均し機によって行われており、手前側 2.0m 程度は人力である。人力及び敷均し機によるベントナイトの敷均し状況を図 5.2-54 に示す。

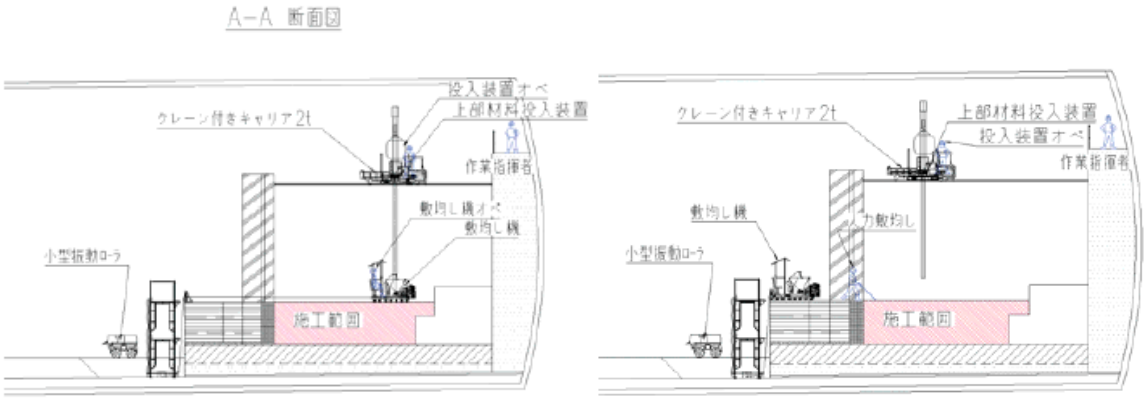


図 5.2-54　敷均し状況図（左：機械敷均し、右：人力敷均し）[17]

ここでは、人力による敷均しが必要であることを踏まえて、人間が作業するために必要な空間として 70cm を設定する。また、転圧作業では、小型振動ローラによる転圧とランマーを用いた人力転圧を行う。基本的な転圧は、小型振動ローラによって実施されるが、場所によっては運用できないことから、一部はランマーによって人力転圧する。小型振動ローラ及びランマーによる施工状況をそれぞれ図 5.2-55 及び図 5.2-56 に示す。

図 5.2-55　小型振動ローラによる転圧の状況（左：機体幅 850mm、右：機体幅 610mm）[17]

図 5.2-56　人力転圧の状況（左：エンジン式ランマー、右：電動ランマー）[17]

小型振動ローラの車輪幅は最小で 610mm である。図 5.2-55 から分かるように、車輪は中央を境に二つに分かれている。したがって、左右どちらかにずらして転圧する必要があり、低透水層の部材厚は小型振動ローラの車輪幅ギリギリに設定することはできない。これを考慮して、小型振動ローラを使用する場合の低透水層の最小部材厚は 700mm とする。また、図 5.2-56 より、使用しているランマーは小型ローラよりも小さく、人間の作業空間とほぼ同等であることが分かる。したがって、ここでは小型振動ローラの運用に必要な幅を低透水層の最小部材厚とする。

吹付け時の装置運用に必要な幅について検討する。確証試験では、側部低透水層はロボット及び人力による水平吹付けによって施工している。また、ノズル操作を機械化することにより、粉塵・騒音が問題となる吹付け時に施工部近辺に人が入る必要が無くなり、労働安全衛生上の問題の解決と併せて、作業人員削減によるコストダウンにもつながる、としており、実際に施工する場合は、将来的にはロボットによる吹付けが採用される可能性が高いと考えられる。ここでは、ロボットによる吹付けが採用された場合を想定して、施工に必要な最小幅を設定する。それぞれの施工方法を図 5.2-57 及び図 5.2-58 に示す。

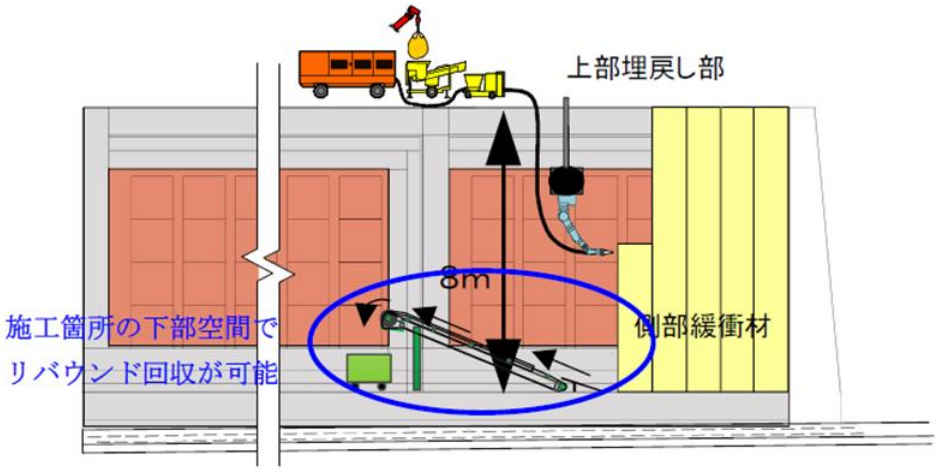


図 5.2-57　ロボットによる吹付け[18]

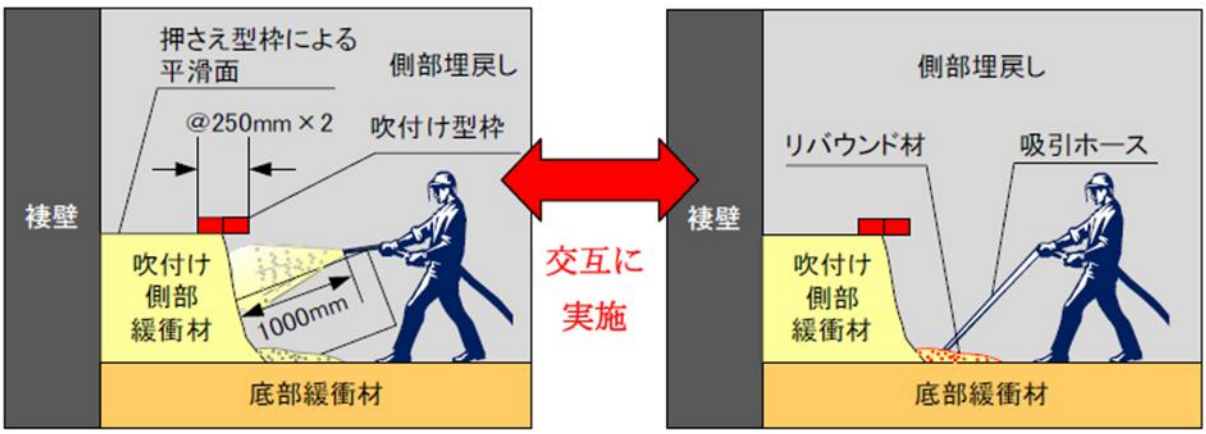


図 5.2-58　人力による吹付け[18]

図 5.2-57 より、水平吹付けは上部より吹付けロボットを吊り下げる必要がある。人間が侵入することは無いため、吹付けロボットの幅が施工の最小幅になると考えられる。ロボット吊り下げ時の姿勢保持と移動の方法を図 5.2-59 に示す。

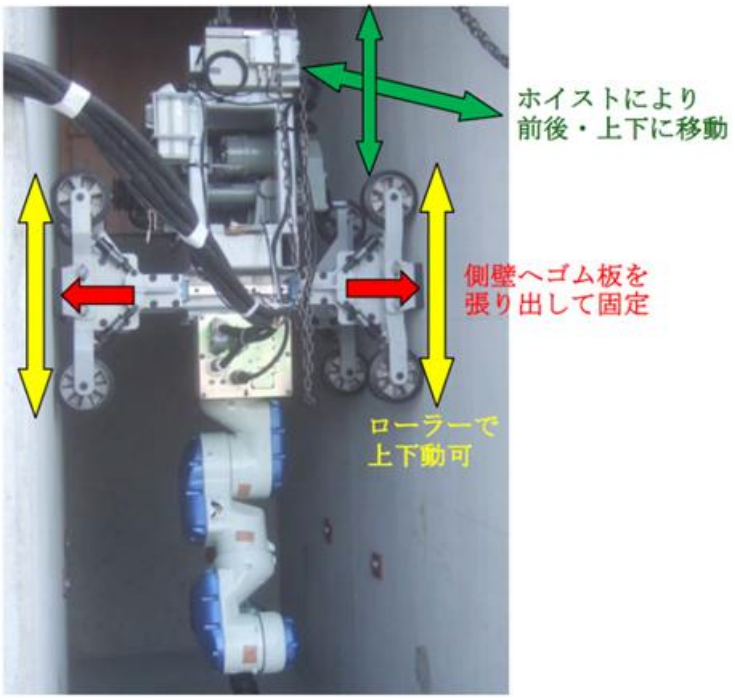


図 5.2-59　ロボット吊り下げ時の姿勢保持と移動の方法[18]

図 5.2-59 から分かるように、ロボットの幅は低透水層の部材厚さに応じて調整できると考えられる。ここでは、振動ローラによる転圧での検討で設定した 700mm を最小部材厚とする。

最後に、上部低透水層に関する検討項目は以下である。

・　低透水層の要求性能を満たし、施工時の転圧に必要な作業スペース

上部低透水層の施工は、底部の施工に準じていることから、上部低透水層の部材厚は、後述する底部低透水層の部材厚に倣うこととする。

以上のことより、低拡散層及び低透水層の最小部材厚を表 5.2-20 のように設定した。

表 5.2-20　検討事項に応じた最小部材厚

		検討事項	厚さ mm（備考）
低透水層の部材厚	上部	低透水層の要求性能を満たし、施工時の転圧に必要な作業スペース	300（100（mm/一層）の仕上がり厚さ＋長期劣化や施工誤差を見込んだ余裕代）
	側部	低拡散層施工時の足場及び型枠の組立に必要な作業スペース	600（安衛則を参考に、足場の最低幅と足場及び型枠の作業スペースの合計を設定）
		低透水層施工時の転圧及び吹付けに必要な作業スペース	700（敷き均し時の人間の作業スペースがクリティカルと想定）
	底部	低透水層の要求性能を満たし、施工時の転圧に必要な作業スペース	300（上部低透水層に同じ）
低拡散層の部材厚	上部	低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打込みに必要な作業スペース	200（建築現場において RC 壁を 200mm で施工した実績を参考に設定）
	側部	コンクリートピット施工時の足場及び型枠の組立に必要な作業スペース	600（安衛則を参考に、足場の最低幅と足場及び型枠の作業スペースの合計を設定。低透水層との合計厚さで対応）
		低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打込みに必要な作業スペース	200（上部低拡散層に同じ）
	底部	低拡散層の要求性能を満たし、施工時の打込みに必要な作業スペース	200（上部低拡散層に同じ）

(4) 岩盤特性に応じたオプションの抽出

部材厚を増大あるいは低減する場合のそれぞれの検討結果を踏まえて、2 種類の岩盤（母岩 A：透水係数 1×10^{-6}m/s、母岩 B：透水係数 1×10^{-8}m/s）に対して人工バリアのオプションを抽出する。

1) 母岩 A の特性に応じた人工バリアオプションの抽出

母岩 A は比較的大きい透水係数を有しており、人工バリア（低透水層及び低拡散層）の安全性への感度が高い。感度解析の結果より、透水係数が 1×10^{-6}m/s の岩盤では、バリアの部材厚によっては被ばく線量が 100μSv/y を超えることが明らかになった。具体的には、ベースオプションから低透水層及び低拡散層の部材厚をいずれか一方を変動させた場合に、低拡散層の部材厚が 900mm、あるいは低透水層の部材厚が 1500mm より小さいオプションの被ばく線量は、100μSv/y を上回る可能性がある。ここでは、低拡散層の部材厚では 900mm、低拡散層では 1500mm を、あくまで部材厚を増大する際の一つの指針として考え、低拡散層あるいは低透水層の少なくともどちらか一方の部材厚を増大する。この考え方を念頭に抽出したオプションの低拡散層及び低透水層の部材厚を表にまとめる。

表 5.2-21　母岩 A に対して抽出したオプションの仕様

		母岩 A（1×10^{-6}m/s）						
オプション		A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
低透水層（mm）	上部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
	側部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	700
	底部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
低拡散層（mm）	上部	600	900	1400	600	600	900	900
	側部	600	900	1400	600	600	900	900
	底部	600	900	1400	600	600	900	900
廃棄体数		5×4	4×3	4×3	4×3	4×3	4×3	5×4

表 5.2-21 中の暖色系のハッチングは、ベースオプションから部材厚あるいは廃棄体数が増大したことを、寒色系のハッチングは低減したことを示している。ハッチングの濃淡は増減の程度である。

それぞれのオプションについて、抽出の考え方と断面図を示す。なお、ベースオプションについては割愛する。

・　オプション A-1

オプション A-1 は、被ばく線量が規制委員会の審査ガイドで示される目安値である 100μSv/y を下回ることを目的として、ベースオプションの寸法から低拡散層を 300mm 増大したものである。処分空洞は 18m 級を最大としていることから、増大したことによって、内空を縮小する必要がある。そのため、断面当たりの廃棄体数を 20 体から 12 体に低減する。図 5.2-60 に断面図を示す。

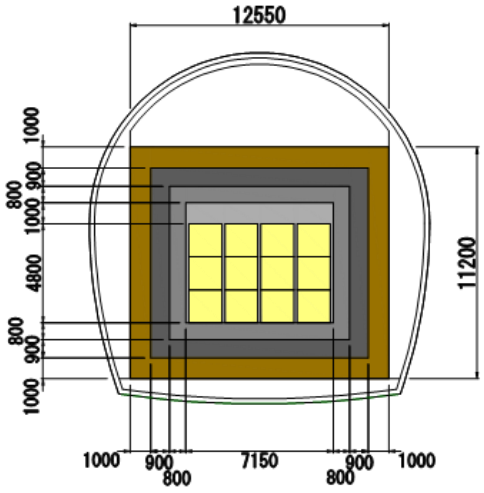


図 5.2-60　オプション A-1 の断面図

・　オプション A-2

オプション A-2 では、オプション A-1 に対して更に低拡散層の部材厚を増大させた。低拡散層の部材厚 900mm は、被ばく線量が 100μSv/y 下回るギリギリの値として設定しているため、余裕代を考慮した。1400mm という値については、廃棄体の寸法を基に設定している。本検討で参考にした電事連検討の廃棄体は、1600mm×1600mm×1600mm の立方体である。ベースオプションから廃棄体を一列一段取り除くと、処分空洞の内空に 1600mm の余裕ができる。この空間を全て低拡散層で埋めたと考え、低拡散層の部材厚をベースオプションより 800mm 増大することとした。図 5.2-61 に断面図を示す。

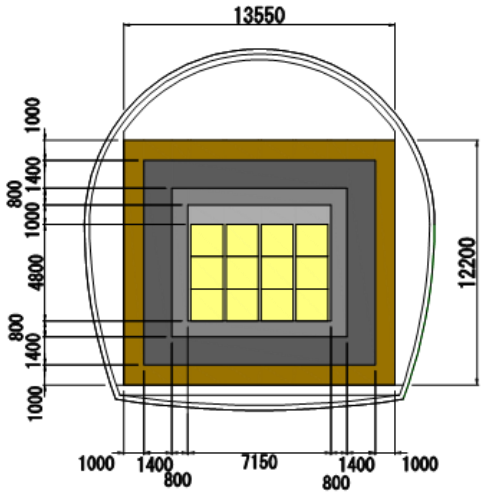


図 5.2-61　オプション A-2 の断面図

・　オプション A-3

オプション A-3 は、被ばく線量が 100μSv/y を下回ることを目的として、ベースオプションの寸法から低透水層を 500mm 増大したものである。処分空洞は 18m 級を最大としていることから、増大したことによって、内空を縮小する必要がある。そのため、断面当たりの廃棄体数を 20 体から 12 体に低減する。図 5.2-62 に断面図を示す。

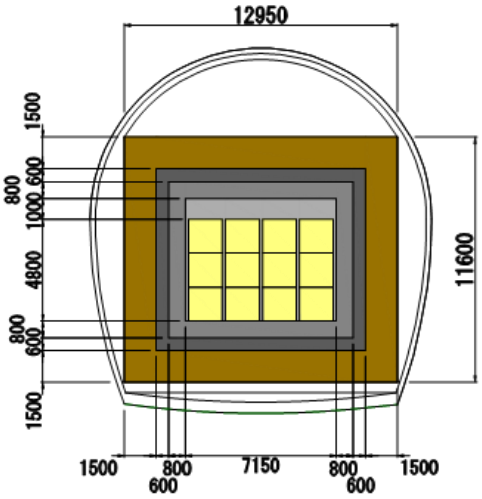


図 5.2-62　オプション A-3 の断面図

・　オプション A-4

オプション A-4 では、オプション A-3 に対して更に低拡散層の部材厚を増大させた。低透水層の部材厚 1500mm は、被ばく線量が 100μSv/y を僅かに下回る値として設定しているため、余裕代を考慮した。1800mm については、廃棄体の寸法を基に設定した。ベースオプションから廃棄体を一列一段取り除いた際に生じる処分空洞の内空を、全て低透水層で埋めたと考え、低透水層の部材厚をベースオプションより 800mm 増大することとした。図 5.2-63

に断面図を示す。

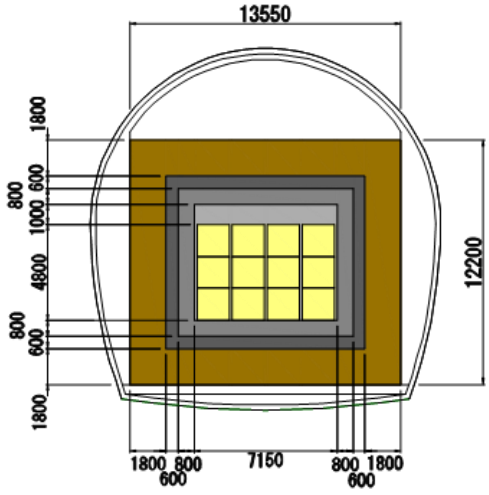


図 5.2-63　オプション A-4 の断面図

・　オプション A-5

オプション A-1～A-4 では、低拡散層及び低透水層の部材厚のいずれか一つを増大させた。オプション A-5 では、両部材ともに増大した場合の傾向を把握することを目的として、低拡散層は 300mm、低透水層は 500mm 増大させた。両部材の増大幅の合計は 1600mm となり、ちょうど廃棄体一体分の値に等しくなる。図 5.2-64 に断面図を示す。

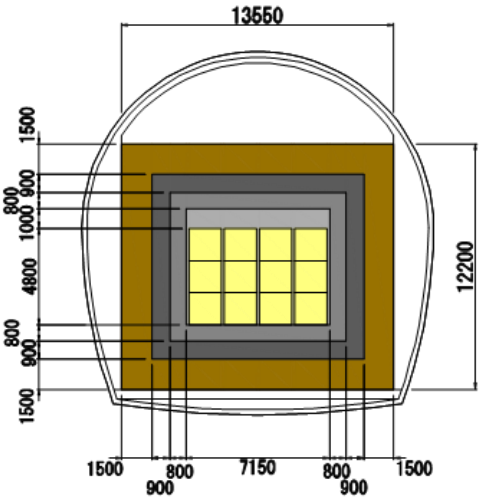


図 5.2-64　オプション A-5 の断面図

・　オプション A-6

母岩 A は透水係数が高く、部材厚を低減すると被ばく線量が 100μSv/y を上回る可能性がある一方で、低透水層の部材厚が被ばく線量に及ぼす影響は小さく、0cm にしなければほとんど変わらない。したがって、低透水層の部材厚を施工実現性の観点から設定した最小部材

厚まで低減した。低透水層の部材厚によって生じた空間は低拡散層で埋めた。

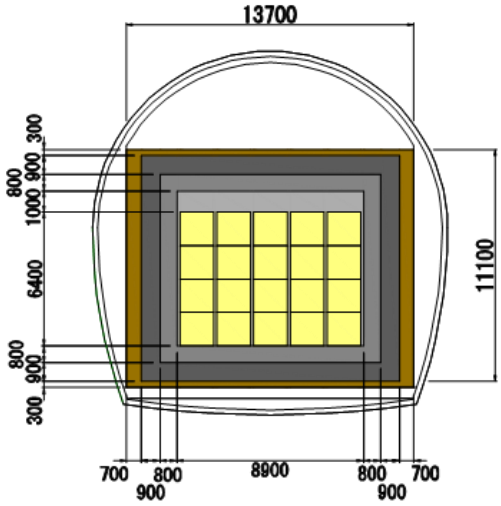


図 5.2-65　オプション A-6 の断面図

2）母岩 B の特性に応じた人工バリアオプションの抽出

母岩 B は比較的小さい透水係数を有しており、人工バリア（低透水層及び低拡散層）の安全性への感度が低い。本検討の感度解析結果では、天然バリアがあれば被ばく線量が 100μSv/y を超える可能性は低いと考えられる。しかしながら、原子力規制委員会の定める規則の解釈で示されるように、廃棄物埋設地の設計は、天然バリアと人工バリアの組み合わせによって構成される必要がある。したがって、オプションは、低拡散層及び低透水層のいずれか一方は残した上で抽出することとする。抽出したオプションの仕様を表 5.2-22 に示す。

表 5.2-22　母岩 B に対して抽出したオプションの仕様

		母岩 B（1×10^{-8}m/s）									
オプション		B-Base	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9
低透水層（mm）	上部	1000	1800	1000	1500	0	300	300	300	1000	1000
	側部	1000	1800	1000	1500	0	700	700	700	1000	1000
	底部	1000	1800	1000	1500	0	300	300	300	1000	1000
低拡散層（mm）	上部	600	600	1400	900	600	0	200	600	0	200
	側部	600	600	1400	900	600	0	200	600	0	200
	底部	600	600	1400	900	600	0	200	600	0	200
廃棄体数		5×4	4×3	4×3	4×3	6×5	6×5	5×4	5×4	5×4	5×4

母岩 A に対するオプションと同様に、それぞれのオプションの考え方と断面図を示す。なお、ベースオプションについては割愛する。

・　オプション B-1

本検討の目的は、母岩の特性に応じた人工バリアオプションを選定する考え方を示すこと

である。5.2.1 (1) でも述べたように、過度に安全な人工バリアと過度に安全な天然バリアの組み合わせた極端な設計オプションを選定することは、ALARA の考え方に適していないと考えられる。本検討における評価手法が、そのようなオプションを選定することがないか確認する必要がある。そこで、より安全性が高くなる（被ばく線量が低くなる）と考えられるオプションとして、低透水層の部材厚を廃棄体一体分増大したオプション B-1 を抽出した。図 5.2-66 に断面図を示す。

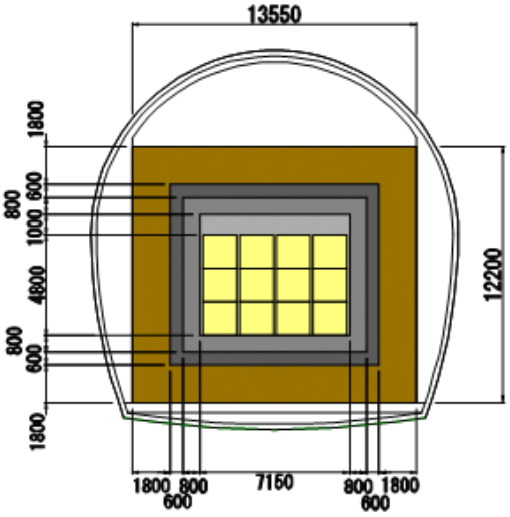


図 5.2-66　オプション B-1 の断面図

・　オプション B-2

オプション B-2 は、オプション B-1 と同様の考え方で、低拡散層の部材厚を増大した。図 5.2-67 に断面図を示す。

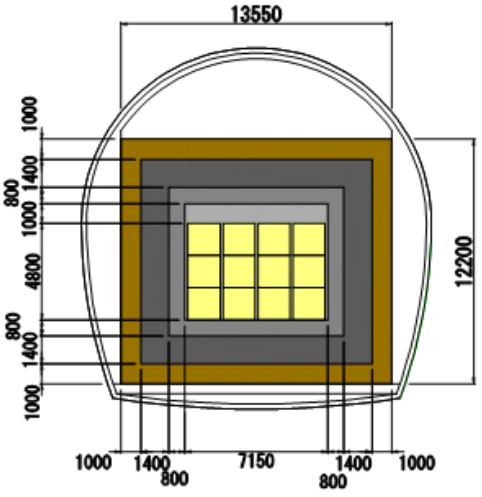


図 5.2-67　オプション B-2 の断面図

・　オプション B-3

オプション B-3 は、オプション B-1、B-2 と同様の考え方で、両部材の部材厚を増大した。

図 5.2-67 に断面図を示す。

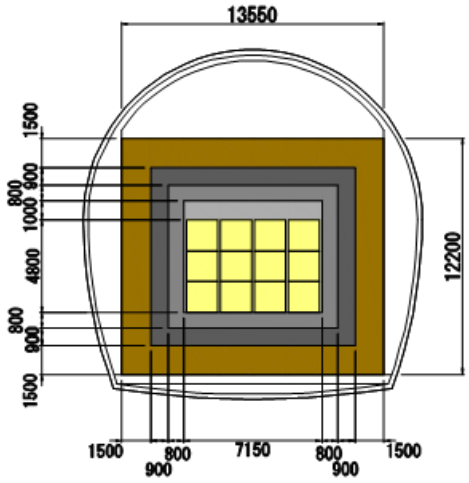


図 5.2-68　オプション B-3 の断面図

・　オプション B-4

オプション B-4 では、低透水層を 0cm とした。感度解析より、低透水層がない場合でも、100μSv/y を下回ることを確認している。低透水層を除去したことで生じた空間を利用して、断面当たりの廃棄体数を 20 体から 30 体に増大させた。処分空洞径はベースオプションのものよりも小さい。図 5.2-69 に断面図を示す。

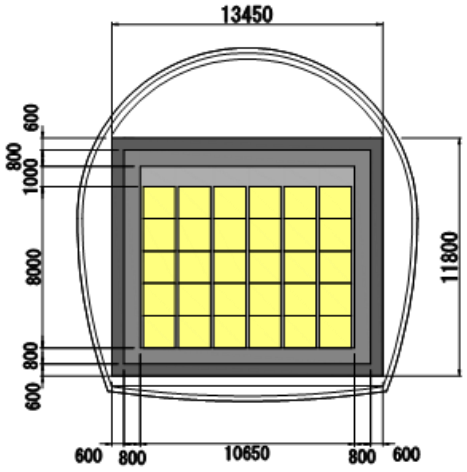


図 5.2-69　オプション B-4 の断面図

・　オプション B-5

オプション B-5 では、低拡散層を 0cm とした。感度解析より、低拡散層がない場合でも試爆戦量が 100μSv/y を下回ることを確認している。更に、低透水層の部材厚を最初部材厚まで低減することで、断面当たりの廃棄体数を増大した。処分空洞径はベースオプションのものよりも小さい。図 5.2-70 に断面図を示す。

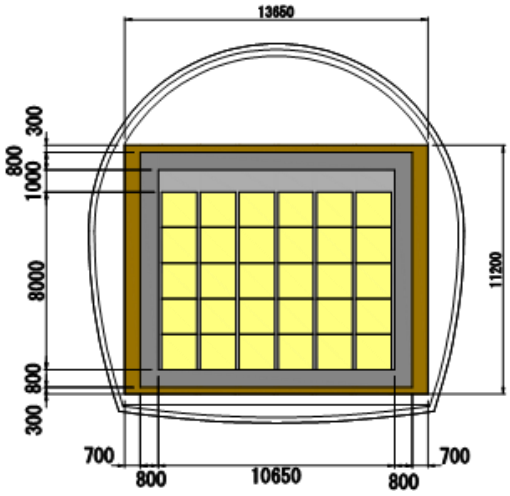


図 5.2-70　オプション B-5 の断面図

・　オプション B-6

オプション B-6 は、両部材ともに最小部材厚まで低減した。感度解析では、両部材を変動させたケースは存在しないが、被ばく線量が 100μSv/y を上回る可能性は低いと考えられる。低減した厚さでは、廃棄体一体分の幅に及ばないため、代わりに処分空洞径を縮小した。図 5.2-71 に断面図を示す。

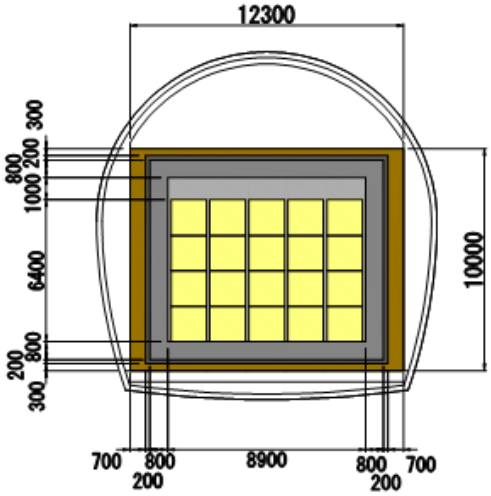


図 5.2-71　オプション B-6 の断面図

・　オプション B-7

感度解析より、低透水層の部材厚を低減した場合でも被ばく線量が 100μSv/y を下回ることが確認されているため、オプション B-7 では、施工実現性も考慮して低透水層の部材厚を最小部材厚まで低減した。図 5.2-72 に断面図を示す。

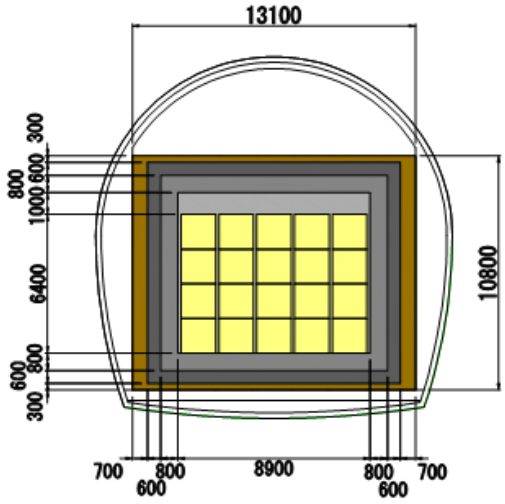


図 5.2-72　オプション B-7 の断面図

・　オプション B-8

オプション B-8 では、低拡散層を 0cm とした。度解析より、低拡散層がない場合でも、被ばく線量が 100μSv/y を下回ることを確認している。処分空洞径はベースオプションのものよりも小さい。図 5.2-73 に断面図を示す。

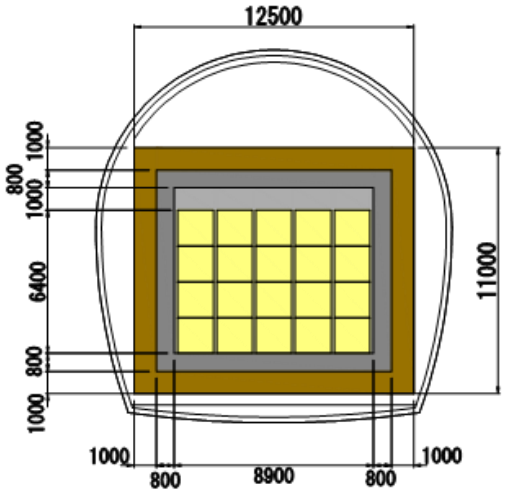


図 5.2-73　オプション B-8 の断面図

・　オプション B-9

感度解析より、低拡散層の部材厚を低減した場合でも被ばく線量が 100μSv/y を下回ることが確認されているため、オプション B-9 では、施工実現性も考慮して、低拡散層の部材厚を最小部材厚まで低減した。図 5.2-74 に断面図を示す。

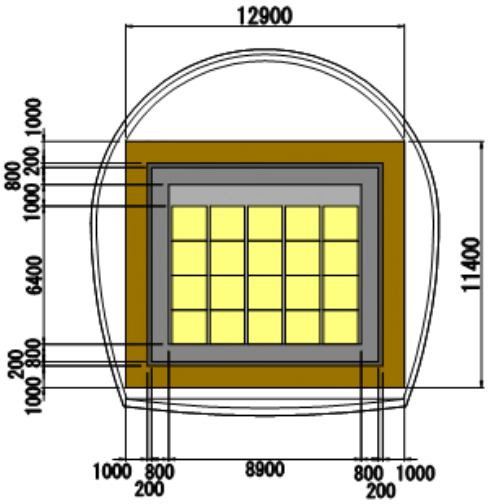


図 5.2-74　オプション B-9 の断面図

以上、母岩 A に対しては 7 種（ベースオプションを含む）、母岩 B に対しては 10 種（ベースオプションを含む）の人工バリアオプションを抽出した。これらのオプションに対して比較検討を行い、オプションの最適化を図る。

5.2.4　オプションの絞り込み手法の検討

（1）処分方式の検討における評価項目の設定及びその考え方

本検討では、人工バリアの仕様のうち、寸法（バリア部材の厚さ及び断面当たりの廃棄体数量）に着目して人工バリアのオプションを抽出した。異なる特性（透水係数）を有する 2 種の岩盤に対して抽出した人工バリアオプションを、天然バリア及び人工バリアを組み合わせた設計オプションとする。原子力規制委員会の規則等を考慮して、本項では設計オプションに対して比較検討を行い、複数の設計案を絞り込む。複数の設計案が過度な安全性を有する設計になることを防ぐために、比較検討では様々な評価項目を設定した上で、オプション間の評価を実施する。評価項目の設定では、既往の検討を参考にする。例えば、放射性廃棄物の処分が日本より進んでいる SKB の既往検討[20]では、段階的な絞り込みが実施されており、設計案が詳細になるに従い、評価項目も詳細になっている（図 5.2-75 参照）。

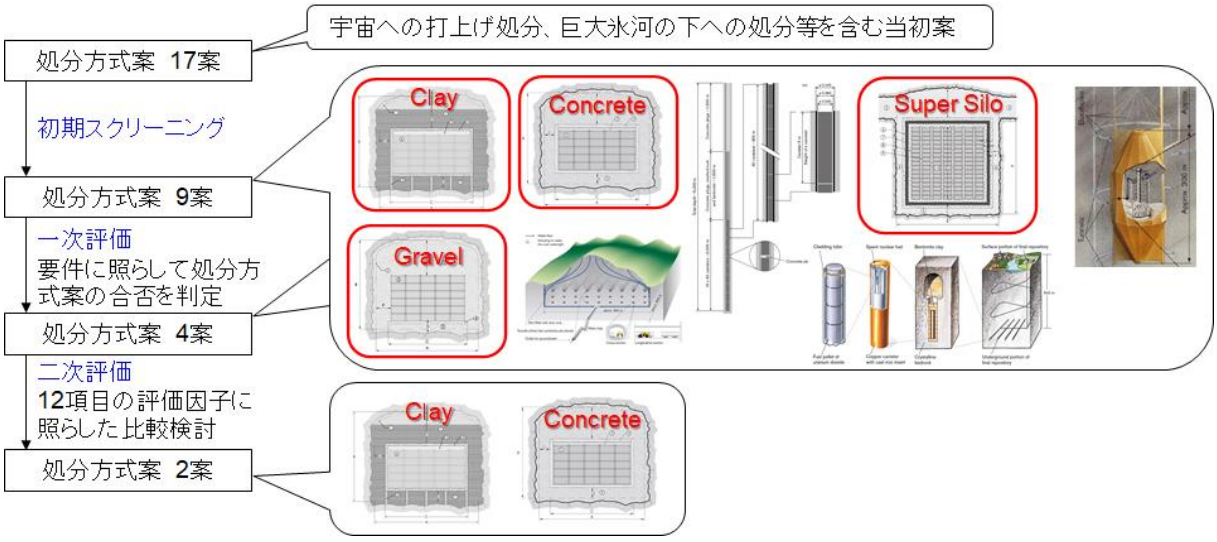


図 5.2-75　SKB の絞り込み評価手法

SKB の絞り込み手法に対して、本検討で想定した中深度処分施設の設計フローを図 5.2-76 に再掲する。

図 5.2-76　設計フロー（再掲）

中深度処分の設計において想定される設計フローも SKB の検討と同様に段階的な絞り込み形式になっている。また、図 5.2-75 に示される SKB の検討のうち、二次評価で 12 の評価項目が設定されおり、その評価項目を表 5.2-23 に示す。

表 5.2-23　SKB の評価項目

評価項目	
大項目	小項目
長期安全性	処分場の初期状態の精密な定義
	バリアの安全機能（材料特性）
環境と社会	人体と環境への操業中の排出物等によるリスク
	原材料やエネルギーの消費量
	社会要求を満足しているか
	閉鎖後の監視・モニタリングの必要性
テクノロジー	操業中の個人の安全と作業環境
	技術の習熟度、設計・施工の簡便さ
	技術・運用方法の実現性
	設計・運用方法の実現性
コストと時間	コスト
	スケジュール通りの実施、遅延のリスク

表 5.2-23 に示す評価項目は、処分方式の絞り込みに対して適用されている。本検討においても、SKB の絞り込み手法を参考に、処分方式を検討する際の評価項目を設定する。より最適化された処分場の設計案を絞り込むために、評価項目は様々な観点から設定する必要があると考えられる。そこで、本検討では、原環センターの検討成果[21]を参考に、評価項目を設定することとした。最適化研究会では、高レベル放射性廃棄物に対する地層処分の最適化を目的として、様々な国際機関や実施主体の検討を参考に、網羅的な評価項目が検討されている。最適化研究会での検討を基に評価項目を設定することで、様々な観点から評価できると考えられる。最適化研究会では、13 の評価項目が設定されており、それぞれに小項目の分類がある。ここでは、大項目を主眼に評価項目を整理し、中深度処分の評価項目として適するか否か検討する。

1）詳細設計への具体化の見通し、設計構築の実現性（建設・施工技術の適用性の見通し）

小項目を以下に示す。

- 設計の詳細化において必要となる知見やデータの十分性（今後の見通し）
- 適用する建設・操業技術の信頼性、開発設備の見通し（適用技術・導入装置の複雑さ、施工品質レベル、工期、適用技術の適用レベル）
- 標準化（建設操業に係る技術・装置や工程等に関する仕様等の単純化・統一化のし易さ）

本検討で実施した感度解析によって、岩盤の透水係数が小さい場合は、バリア部材の部材厚を薄くしても、安全性に対する影響は小さいことが明らかになった。部材厚を小さくするためには、既存の施工技術の改良が必要になる可能性がある。更に、BAT の観点から考えると、革新的な技術あるいは材料が開発された場合、それらの採用を視野に入れる必要がある。このことから、確立された既存の技術と比較して、新規性の高い技術を採用する場合は、その見通しを評価する項目が必要であると考えられる。したがって、適用する建設・操業に係る技術の詳細設計への具体化の見通しを評価項目として設定する。また、標準化については、後述する建設・操業性に包含されると考えられるため、ここでは評価項目として設定しない。

2) 設計のロバスト性・柔軟性

この項目では、母岩の種類、地下環境、設計深度等の天然バリアの条件の多様性に対する柔軟性を評価する、としている。例えば NUMO の包括的技術報告書[22]では、地層処分場の母岩として考えられる岩種を設定し、それぞれの特性を勘案した処分施設を設計している（図 5.2-77、図 5.2-78 参照）。本検討におけるオプション抽出の考え方は、この設計方法に類似しており、天然バリアの特性に応じた人工バリアオプションを抽出している。評価項目の前段階で既に柔軟性を考慮できていると考え、ここでは、評価項目として設定しない。

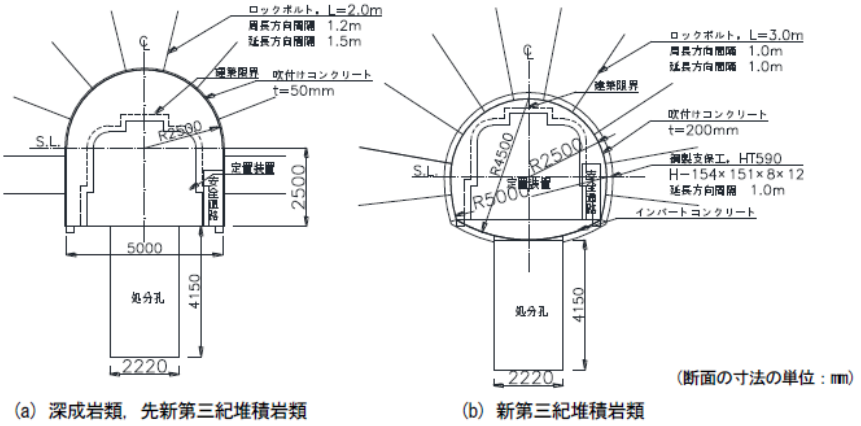


図 5.2-77　岩種に応じた処分坑道の断面形状

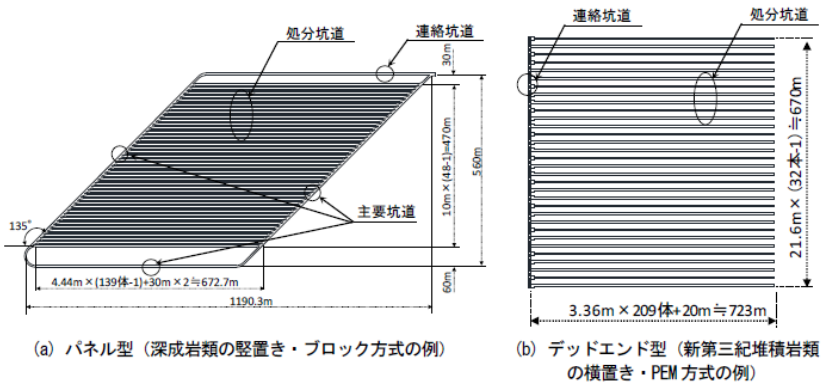


図 5.2-78　岩種に応じた高レベル放射性廃棄物処分場の処分区画の形状

3）建設・操業性

小項目を以下に示す。

・　建設・操業・閉鎖作業の容易性
（適用技術・導入装置の複雑さ、作業手順の合理性、工期に対する裕度）
・　建設・操業期間中の地下構造物の安定性・制御性（管理のし易さ・メンテナンス性）
・　操業の柔軟性（作業環境、操業条件、工程・計画変更）
・　掘削・建設作業の廃棄物定置作業からの分離性
・　区画設定性
・　遠隔操作性、機械化・自動化の導入性
・　事故発生時における全ての場所へのアクセス性、異常時からの復旧性

建設・操業・閉鎖作業の容易性のうち、適用技術・導入装置の複雑さについては、人工バリアの仕様によって差が生じる可能性がある。例えば、低透水層の厚さを施工可能な最小厚さで施工する場合、底部低透水層を構築するための転圧ローラに加えて、側部低透水層を構築するための吹付け装置が必要になる可能性がある。このように、技術的には施工が可能であるが、必要な装置が増えることは十分に考えられるため、ここでは、適用技術・導入装置の複雑さを評価項目として設定する。

建設・操業期間中の地下構造物の安定性・制御性については、人工バリアのバリア部材の構成やレイアウトによっては、管理のし易さが異なると考えられる。地下に建設される構造物は、レイアウトも含めてできるだけ単純な方が好ましい。したがって、建設・操業期間中の地下構造物の管理の容易性を評価項目とする。

地層処分施設における操業の柔軟性は、作業環境や工程が変わった際に柔軟に対応できるかを評価する目的で設定されている。この項目は、前段の地下構造物の管理の容易性が満たされていれば、同様に満たされると考えられる。したがって、建設・操業期間中の地下構造物の管理の容易性に包含されると考え、ここでは評価項目として設定しない。

掘削・建設作業の廃棄物定置作業からの分離性と区画設定性については、放射線管理区域の範囲やそこでの作業量によって評価される。更に、放射線管理区域を最小化できるか、遠隔操作の装置の必要性はあるかなどによっても優劣が変わる。例えば、土木学会[2]では、操業時の管理区域を図のように設定している。これは、区画内充てん材を施工した段階で、廃棄体から十分な遮蔽距離を保つことができるという考えのもと設定されている。しかし、本検討のように、バリア構成やバリア部材の仕様が長期安全性の観点から変更になった際、必要な管理区域は変動すると考えられる。したがって、放射線管理区域での作業性を評価項目とする。

遠隔操作性、機械化・自動化の導入性は、バリア部材の仕様や処分場のレイアウトによってその容易性が変わると考えられる。遠隔操作性は、前段の放射線管理区域での作業性と同様の評価が得られると考えられるため、包含されるものとする。一方で、機械化・自動化については、自動化を導入した設計が必ずしも優れているとは限らないため、その必要性を判

断することが必要だと考えられる。自動化に関する相対評価を行っても一概には優劣を判断することができない可能性があるため、評価項目として設定しない。

事故発生時における全ての場所へのアクセス性については、レイアウトの複雑さによって大きく変動すると考えられるため、評価項目として設定する。

4）品質保証・品質管理のし易さ

ここでの品質管理は、製造・施工に関する初期状態を管理することで、規制要件に鑑みると、中深度処分に対して必要な評価項目であると考えられる。中深度処分に係る規制要件の第１５条では、「中深度処分に係る廃棄物埋設施設は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度又は廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質を監視及び測定できる設計であること」としており、設計に監視できることが担保されている必要がある。したがって、品質保証・品質管理のし易さを評価項目として設定する。

5）閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ

ここでは、施工後、閉鎖段階における状態変遷の把握・予測評価といったモニタリングのし易さを評価する。5.2.4 (1) 4）と同様の理由で、閉鎖認可に係る性能確認の確からしさを評価項目として設定する。

6）閉鎖後長期の性能評価の確からしさ

この項目では、処分場の機能や状態変遷に影響する要因の有無や影響度に関する知見等に留意して、以下に示す小項目が設定されている。

- 予測性、信頼性
- 不確実性の管理のし易さ

閉鎖後長期の性能を評価するためには、様々な不確実性を考慮する必要がある。不確実性に対する予測性は、処分概念に適用する人工バリアの仕様や岩盤の特性等における知見の十分さに依存すると考えられる。この考え方は、設計の実現性における具体化の見通しに共通すると考えられるため、ここでは評価項目として設定しない。

7）閉鎖前の安全性

小項目を以下に示す。

- 予測性、信頼性
- 不確実性の管理のし易さ
- 線量基準に対する安全裕度（平常時、事故時）
- 異常時/事故時の対応のし易さ

ここでの予測性は、例えばイベントツリーやフォールトツリーのような分析を行い、必要

な対策の種類やその複雑さを洗い出すことで、把握することができると考えられる。必要な対策は、処分概念やレイアウトによって大きく異なることが予想されることから、閉鎖前安全性の予測性を評価項目として設定する。

安全規制要件として建設・操業中の閉じ込め性が考えられるが、これは 5.2.4 (1) 3）で示した放射線管理区域における作業性によって評価できると考えられる。したがって、ここでは評価項目として設定しない。

8）閉鎖後長期の安全性

小項目を以下に示す。

- 予測性、信頼性
- 不確実性の管理のし易さ
- 安全規制要件に対する裕度（※基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオ、人間シナリオにおける線量基準の達成を前提）

予測性や不確実性に関する考え方は、5.2.4 (1) 6）で示した通りである。中深度処分関する規制要件では、自然事象シナリオ（自然現象による放射性物質の廃棄物埋設地の外への漏出、天然バリア（廃棄物埋設地の外に漏出した放射性物質の移動を抑制する機能を有する岩盤等をいう。以下同じ。）中の移動、河川等への移動及び現在の廃棄物埋設地周辺の人の生活様式等を考慮したシナリオ）について、不確実性を考慮した上で科学的に通常起こり得る範囲において保守的な設定で、複数の設計案に対し被ばく線量評価を実施する必要性が記載されている。本検討で策定した検討フローでは、安全性に係るパラメータを対象とした検討を複数回設定している。一回目は感度解析、二回目は比較検討、三回目は被ばく線量評価である。感度解析では概略的な被ばく線量、比較検討では自然事象シナリオを対象とした詳細な被ばく線量、被ばく線量評価では自然事象シナリオ以外のシナリオを対象とした被ばく線量を算出することによって、長期安全性の感度が高い処分概念を抽出すると共に、不確実性を考慮している。これらのことから、評価項目として、自然事象シナリオを対象とした長期安全性を設定する。

9）一般労働安全

この項目は、処分形態や処分概念に関わらず、ある基準に基づいて確実に順守すべき項目であり、評価によって優劣をつけるものではないと考えられる。したがって、評価項目として設定しない。

10）環境保全

小項目は以下である。

- 周辺環境への影響の予測性（大気、騒音・振動、河川・地下水、動植物など）

包括的技術報告書[22]によると、環境保全という評価項目は、サイトの地表の地質環境条件や社会条件に関する情報が判明次第、設定するものであるとされている。また、NUMO-

TR-04-01[23]によると、地質構造要素、地形的条件や処分場の深度・規模は前提条件として設定されており、これらは関係法令やサイト環境条件によって規定されるとしている。例えば、長期間にわたって放射性廃棄物を人間の生活圏から安全に遠ざけておくという観点から、処分場の深度を出来るだけ深くすることは重要である。一方で、深度が大きくなることで、処分場の建設技術や地質環境の調査技術などの技術的負担が増すと共に、コスト増の要因になる。NUMO-TR-04-01 では、長期安全性、地質環境の特性、現状における建設技術や調査技術の適用範囲、設計上成立する処分深度の範囲を総合的に検討することで、処分場の深度を決定づけるとしている。本検討で設定した検討フローでは、人工バリアオプションと天然バリアオプションの組み合わせ（設計オプション）に対して様々な評価項目を用いて包括的な評価を実施する。NUMO-TR-04-01 で示される考え方を反映する場合、設計オプションに資する天然バリアオプションを抽出する段階で、総合的な評価を実施する必要がある（下図参照)。したがって、環境保全は、設計オプションに対してのみならず、天然バリアオプションに対して評価する必要があることに留意する。

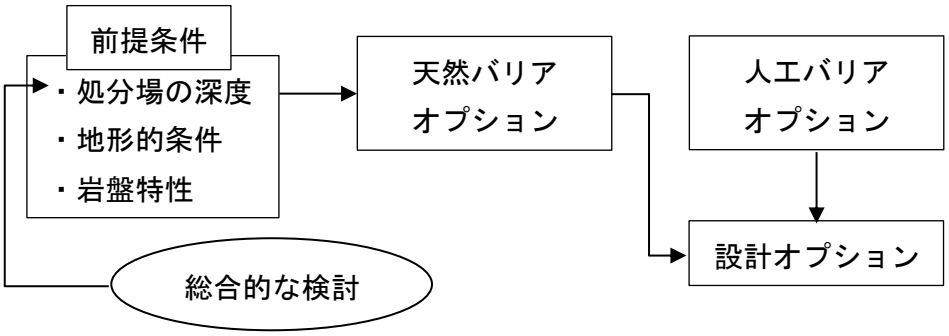


図 5.2-79　天然バリオプションの条件を取り込む際の考え方

11）回収可能性

この項目では、地下の処分場に定置した放射性廃棄物を回収する期間や容易性を評価している。小項目は以下を以下に示す。

- 技術的実現性
- 回収の容易性（回収作業時間・工期）
- 回収可能性を維持できる期間（期間決定に資する影響評価技術の確からしさを含む）

高レベル放射性廃棄物の処分方法として、現段階で最も適性が高いのは地層処分であるが、今後、技術革新が進むことで、より優れた処分方法が見つかる可能性がある。より優れた処分方法が地層処分の操業中に確立された場合、その処分方法で放射性廃棄物を処分するために、地下の処分場に定置した放射性廃棄物を回収することが考えられる。規制委員会の規則の第 10 条では、「廃棄体を回収する措置を講ずることができる」期間を廃棄物埋設地に土砂等を充てんすることによりその埋戻しが終了するまでとしている。したがって、再掘削して回収する必要がない。本検討では、人工バリアオプションの仕様を決定する際に、評価項目

を用いる。したがって、処分概念は同一であり、「回収の技術的実現性」及び「回収可能性を維持できる期間」には差がないと考えられる。一方で、「回収の容易性」については、処分空洞の断面当たりの廃棄体数の変動に応じて処分空洞の奥行長さが変動することから、回収作業時間に差が出る可能性がある。実際には、廃棄物の定置装置の能力に依存し、差がない可能性もある。回収可能性の項目においては、回収の容易性（回収作業時間・工期）を評価項目として採用する。

12）費用（コスト）・経済性

中深度処分事業では、処分場のレイアウトによっては、建設・操業・閉鎖のそれぞれの段階で必要になるコストが大きく異なる可能性がある。そこで、費用・経済性に係る評価項目を以下のように分類する。

- 建設段階に必要な費用
- 操業段階に必要な費用
- 閉鎖段階に必要な費用

13）その他

小項目を以下に示す。

- 線量基準以外の各種規制要件への適合性（制度的管理への非依存性など）
- 社会的要素への適合性（受容性、社会経済学的検討事項）

線量基準以外の各種規制要件への適合性は、この段階で判断されるものではなく、満たすべき前提条件であると考えられるため、ここでは評価項目としない。

社会的要素への適合性は、ここまでに列挙した評価項目を十分に議論しているかに依存すると考えられる。比較検討で設定する評価項目こそが、社会的要求を反映している必要があり、社会的要求は全てに包含された要素であることから、ここでは、評価項目として設定しない。

以上より、設定した評価項目を表 5.2-24 にまとめる。

表 5.2-24　処分方式の絞り込みに対する評価項目一覧

評価項目	
大項目	小項目
設計の実現性	適用する建設・操業に係る技術の詳細設計への具体化の見通し
建設・操業性	適用技術・導入装置の複雑さ
	建設・操業期間中の地下構造物の管理の容易性
	放射線管理区域での作業性
	事故発生時における全ての場所へのアクセス性
閉鎖後長期の安全性	閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ
	自然事象シナリオを対象とした長期安全性
閉鎖前の安全性	品質保証・品質管理のし易さ
	閉鎖前安全性の予測性
環境保全	周辺環境への影響の予測性
回収可能性	回収の容易性
費用・経済性	建設段階に必要な費用
	操業段階に必要な費用
	閉鎖段階に必要な費用

(2) 処分場の概略検討における評価項目の設定及び考え方

本検討では、処分方式及び処分概念は電事連で検討された処分概念が絞り込まれたと想定した。したがって、ここでは、5.2.4 (1) で設定した評価項目によって処分概念が絞り込まれたと仮定して、処分場の概略検討を実施する。処分場の概略検討においても評価項目を設定し、オプション間の絞り込みを実施する。処分場の概略検討では、人工バリアの仕様について検討を進めていることから、人工バリアに重点を置いた評価項目が必要であると考えられる。その際の評価項目は、5.2.4 (1) での検討結果を利用することで、中深度処分の設計に対する適性を考慮できると考えた。

人工バリアの仕様が異なるオプションは、基本的な処分概念は共通している。5.2.4 (1) で設定した評価項目には、処分場建設位置等（場所、岩種、深度）の違いによって大きく評価が変わるものが含まれると考えられる。ここでは、人工バリアの検討に重点を置いていることから、以下を処分場の概略検討における評価項目として設定した。

- 閉鎖後長期の安全性
- 費用・経済性

(3) 設計オプションに対する評価の試行

「閉鎖後長期の安全性」と「費用・経済性」を用いて評価するために、それぞれを定量化する。閉鎖後長期の安全については、被ばく線量を、費用・経済性については、事業費を算出して評価する。それぞれの算出結果から相関関係を取ると、図 5.2-80 に示すようなイメージになると考えられる。

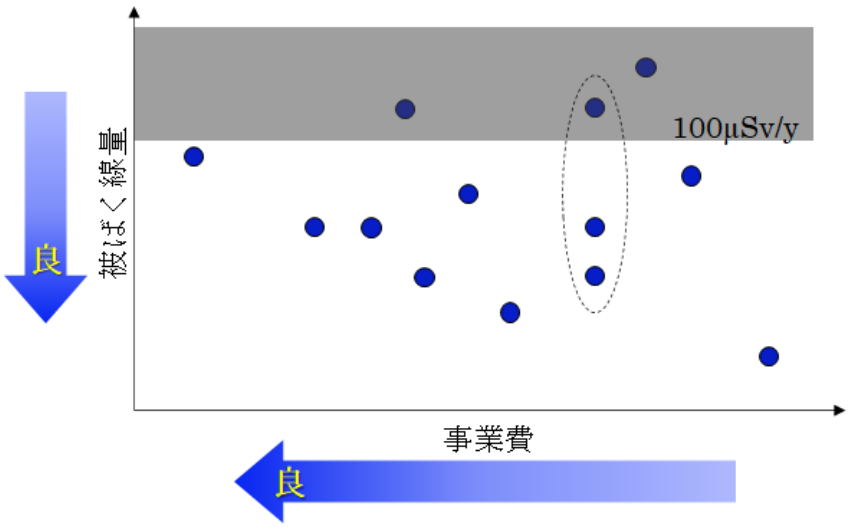


図 5.2-80　被ばく線量と事業費相関関係イメージ

左下に近づくほど長期安全性の面からも経済性の面からも優れた設計オプションである。例えば、破線で囲んだ事業費が同じ 3 つのオプションを比較すると、被ばく線量が最も低いオプションが好ましいことが分かる。しかしながらこのイメージでは、事業費は高いが被ばく線量が低いオプションと、事業費は安いが被ばく線量が高いオプションでは、どちらがより最適化されたオプションか判断できない。そこで、本検討では、最適化されたオプションの傾向を把握するために、費用対効果を算出する。一般的に費用対効果は、費用（Cost）と効果（Benefit）のいずれの単位も費用である。したがって費用対効果（効果/費用）を計算すると、無次元の数値になる。一方で、本検討における Cost は事業費（費用）、Benefit は被ばく線量（μSv/y）であるため、無次元化した数値にならない。そこで、算出した事業費及び被ばく線量の比率を計算し、それぞれの比率に対して費用対効果を求めることで、無次元化した数値に変換する。

1）被ばく線量の算出

ここでは、設定されたオプションに基づき、核種移行解析を実施する。

解析モデル、データセットは 5.2.2　(2) で示したものと同じものを使用する。

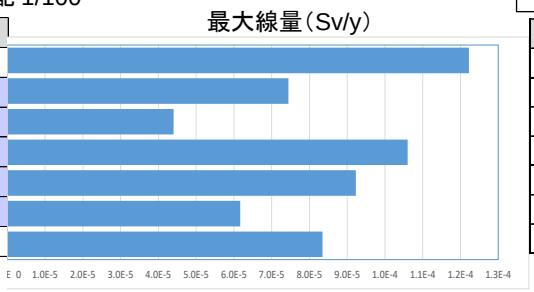
図 5.2-81 に解析結果を示す。結果は、線量として示している。処分オプションの抽出においては、結果の順位や対数値、規格値などに変換されることとなる。

この図では、スケールを線形で表示しているが、対数値で比較するとその他予想される不確実性を考えるとさほど差の無い結果となる。

注:表の線量は表内に示す核種の線量、図の最大線量ではない

母岩A　透水係数10^{-6}m/s　動水勾配 1/100

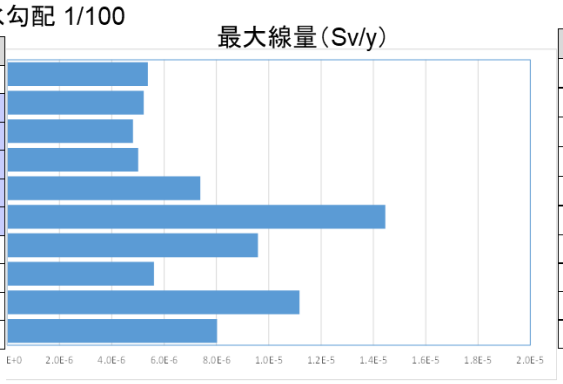
オプション	低透水層	低拡散層	廃棄体数
A-Base	1000	600	5×4
A-1	1000	900	4×3
A-2	1000	1400	4×3
A-3	1500	600	4×3
A-4	1800	600	4×3
A-5	1500	900	4×3
A-6	300	900	5×4



核種	時間,y	線量,Sv/y
Pu239	2.3E+04	9.6E-05
Pu239	2.8E+04	6.2E-05
Pu239	3.7E+04	2.8E-05
Pu239	2.6E+04	8.7E-05
Pu239	2.8E+04	7.7E-05
Pu239	3.1E+04	5.3E-05
Pu239	2.5E+04	6.6E-05

母岩B　透水係数10^{-8}m/s　動水勾配 1/100

オプション	低透水層	低拡散層	廃棄体数
B-Base	1000	600	5×4
B-1	1800	600	4×3
B-2	1000	1400	4×3
B-3	1500	900	4×3
B-4	0	600	6×5
B-5	300	0	6×5
B-6	300	200	5×4
B-7	300	600	5×4
B-8	1000	0	5×4
B-9	1000	200	5×4



核種	時間,y	線量,Sv/y
Cl36	1.1E+04	4.9E-06
Cl36	1.2E+04	4.7E-06
Cl36	1.3E+04	4.5E-06
Cl36	1.2E+04	4.7E-06
Cl36	9.0E+03	5.6E-06
C14	1.4E+04	9.4E-06
Cl36	9.4E+03	5.4E-06
Cl36	1.0E+04	5.2E-06
C14	1.4E+04	6.1E-06
Cl36	1.0E+04	5.2E-06

図 5.2-81　核種移行解析結果

2）閉鎖後長期の安全性に対する評価

算出した被ばく線量をベースオプションの被ばく線量を 1 とした比率に換算する。一般的に、被ばく線量は対数で表現されることが多いため、費用対効果には対数換算した比率を用いる。母岩 A に対するオプションの被ばく線量比率の算出結果を図 5.2-82 に、母岩 B に対するオプションの被ばく線量比率の算出結果を図 5.2-83 にそれぞれ示す。

オプション	A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
線量（Sv/y）	1.22E-04	7.44E-05	4.40E-05	1.06E-04	9.23E-05	6.17E-05	8.35E-05
$\lvert\log_{10}(\text{線量})\rvert$	3.91	4.13	4.36	3.97	4.03	4.21	4.08
対数比率	1.00	1.06	1.11	1.02	1.03	1.08	1.04

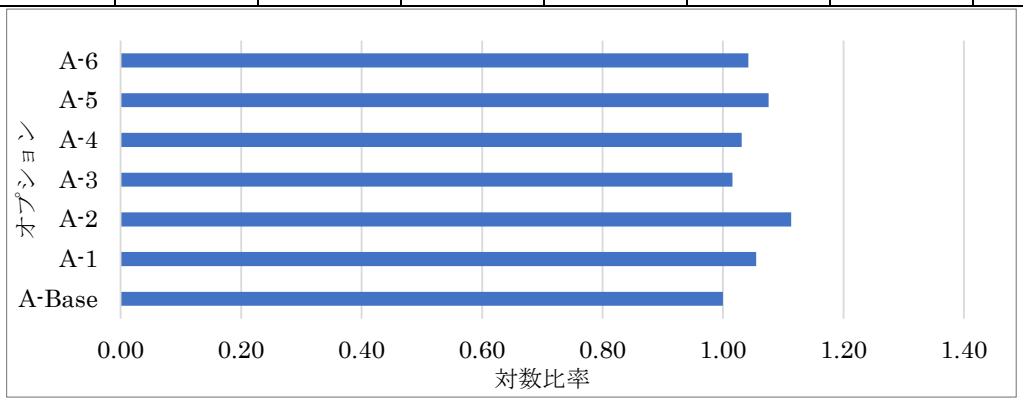


図 5.2-82　母岩 A に対するオプションの被ばく線量比率

オプション	B-Base	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9
線量（Sv/y）	5.38E-06	5.22E-06	4.81E-06	5.01E-06	7.38E-06	1.45E-05	9.58E-06	5.61E-06	1.12E-05	8.02E-06
$\lvert\log_{10}(\text{線量})\rvert$	5.27	5.28	5.32	5.30	5.13	4.84	5.02	5.25	4.95	5.10
対数比率	1.00	1.00	1.01	1.01	0.97	0.92	0.95	1.00	0.94	0.97

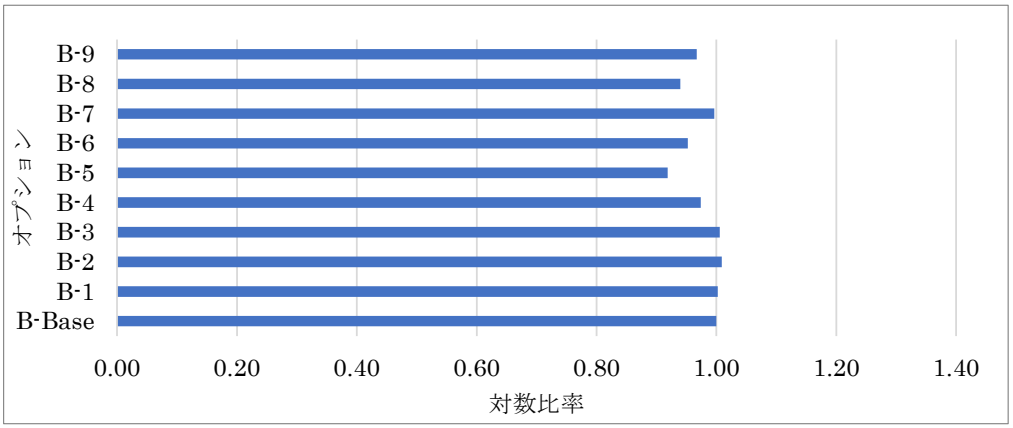


図 5.2-83　母岩 B に対するオプションの被ばく線量比率

比率については、対数に換算することで、被ばく線量が低いほど高くなるように処理した。母岩 A に対するオプションのうち、最も被ばく線量が低いオプションは A-2 である。A-Base と A-3 は、目安となる線量値の 100μSv/y を上回っている。したがって、費用対効果の際は評価の対象外とした。また、母岩 B に対するオプションのうち、最も被ばく線量が低かったのは B-2 である。ベースオプションに比べ、バリア層の部材厚を低減したオプションが多いが、いずれのオプションも 100μSv/y を下回った。

3) 事業費の算出及び経済性に対する評価

廃棄体数や処分場のレイアウトが定まっていないため、廃棄体一体当たりの費用を算出する。事業費を算出するにあたり、まず処分空洞の建設費を算出する。処分空洞の建設費は以下で構成されるものとする。

- 処分空洞掘削費
- 低透水層建設費
- 低拡散層建設費
- コンクリートピット建設費
- モルタル充てん工事費
- 埋戻し工事費

上記費用は、奥行 1m あたりで計算し、廃棄体一体分にあたる奥行長さ 1.6m をかけた後に、断面当たりの廃棄体数で割り戻した。それぞれの建設費用は既往検討を参考に設定した。各工事・建設費用のマクロ単価比率を表 5.2-25 に示す。なお、ここで示すマクロ単価比率は、ベースオプションの空洞径より算出した。

表 5.2-25　工事種別のマクロ単価比率

工事種別	マクロ単価比率
処分空洞掘削費	3.6
低透水層建設費	1.0
低拡散層建設費	1.0
コンクリートピット建設費	1.5
モルタル充てん工事費	0.8
埋戻し工事費	0.5

次に、算出した廃棄体一体当たりの処分坑道建設費を、資源エネルギー庁の資料を参考にして全体の事業費に換算した。資源エネルギー庁では、第二種特定放射性廃棄物の採取処分費用及び単位数量当たりの最終処分業務に必要な金額の算定方法[24]について検討しており、検討によると建設費は全体の事業費のおよそ 20%にあたるとしている（表 5.2-26 参照）。

表 5.2-26　第二種最終処分業務に必要な費用の算定結果（[24]を参考に作成）

	TRU					
	硬岩系（億円）	比率	軟岩系（億円）	比率	平均（億円）	比率
技術開発費	696	9%	710	8%	703	8%
調査費及び用地取得費	943	12%	1,125	13%	1,034	12%
設計及び建設費	1,732	22%	1,740	20%	1,736	21%
操業費	1,520	19%	2,297	26%	1,909	23%
解体及び閉鎖費	105	1%	117	1%	111	1%
モニタリング費	744	10%	756	8%	750	9%
プロジェクト管理費	1,553	20%	1,544	17%	1,549	18%
消費税	529	7%	625	7%	577	7%
合計	7,827	100%	8,919	100%	8,373	100%

それぞれの比率は合計費用とそれぞれの費用から算出した。建設費のほかに設計費が含まれているが、ここでは、建設費は全体の 20%と仮定した。算出した各オプションの事業費を、ベースオプションを 1 とした比率に換算した（表 5.2-27 及び表 5.2-28 参照）。

表 5.2-27　母岩 A に対するオプションの事業費比率

オプション	A-Base	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
比率	1.00	1.09	1.15	1.10	1.15	1.15	0.98

表 5.2-28　母岩 B に対するオプションの事業費比率

オプション	B-Base	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9
比率	1.00	1.15	1.15	1.15	0.91	0.90	0.93	0.96	0.95	0.96

事業費比率は、事業費が高いほど高くなるように、算出の段階で処理した。母岩 A に対するオプションはバリア層の部材厚を増大したものが多いため、ベースオプションに比べ比率が高い傾向にある。一方で、母岩 B に対するオプションでは、バリア層の部材厚を低減したオプションが多いため、比率も小さいものが多い。

以上の被ばく線量比率と事業費比率を基に費用対効果を算出する。

4）費用対効果による人工バリアオプションの絞り込み

被ばく線量比率／事業費比率として、費用対効果を算出した結果をそれぞれ図 5.2-84 及び図 5.2-85 に示す。

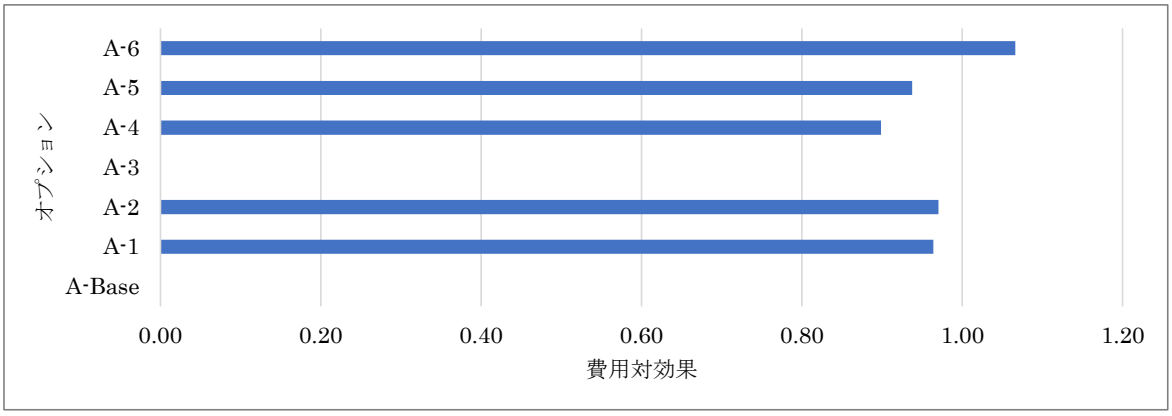


図 5.2-84　母岩 A に対するオプションの費用対効果

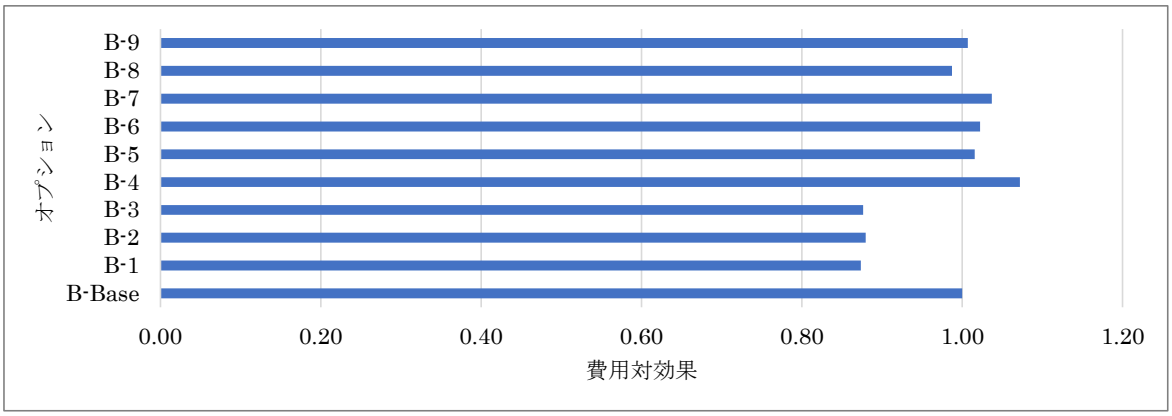


図 5.2-85　母岩 B に対するオプションの費用対効果

グラフは、費用対効果が高いほど、より好ましい（最適化された）オプションであることを示している。5.2.4　(3) 2) でも述べた通り、母岩 A に対するオプションのうち A-Base 及び A-3 は、被ばく線量が 100μSv/y を下回っているため、評価の対象外とした。最も費用対効果が高いオプションは A-6 であり、次点は A-2 である。A-6 は低透水層の部材厚を施工可能な厚さまで低減し、その分低拡散層の部材厚を増大したオプションである。また、A-2 は低透水層の部材厚はそのままで、低拡散層の部材厚を廃棄体の幅一体分増大したオプションである。このことから、本検討における条件では低拡散層の部材厚増大が設計の最適化に寄与したと考えられる。オプション A-6 及び A-2 の断面図を図 5.2-86 に示す。

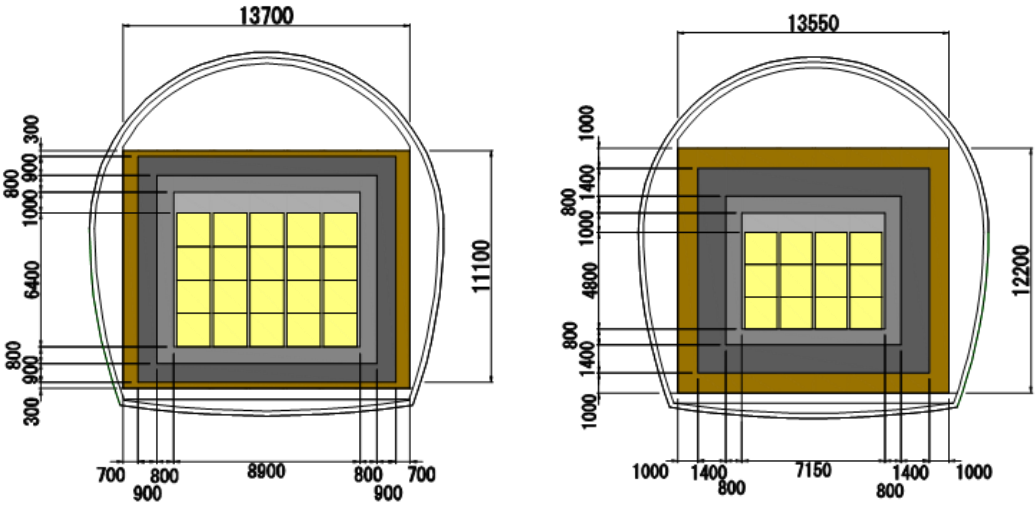


図 5.2-86　費用対効果の高いオプション（左：A-6、右：A-2、再掲）

母岩 B に対するオプションのうち、最も費用対効果が最も高いものは B-4 であり、次点は B-7 である。B-4 は低透水層がなく、その分廃棄体定置数を増大したオプションで、B-7 は低透水層を低減したオプションである。これらの結果から、本検討における条件では、母岩の透水係数が良好な場合における低透水層の部材厚低減が設計の最適化に寄与したと考えられる。オプション B-4 及び B-7 の断面図を図 5.2-87 に示す。

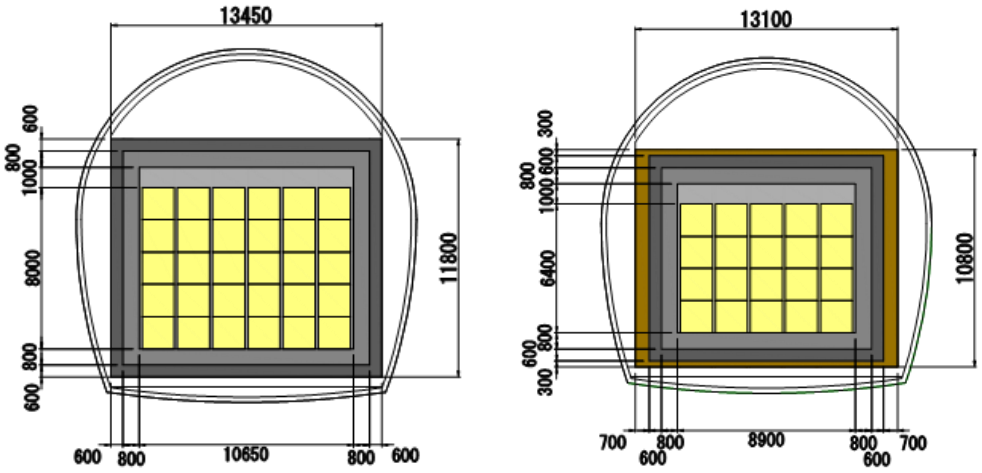


図 5.2-87　費用対効果の高いオプション（左：B-4、右：B-7、再掲）

ここで、最適化されたオプションの傾向を把握するために、母岩 A、B に対するそれぞれのオプションの被ばく線量と事業費比率の相関関係をグラフ化する。図 5.2-88 に母岩 A、図 5.2-89 に母岩 B に対するオプションの相関関係を示す。なお、参考として、被ばく線量を線形軸で表現したグラフについても併記する。

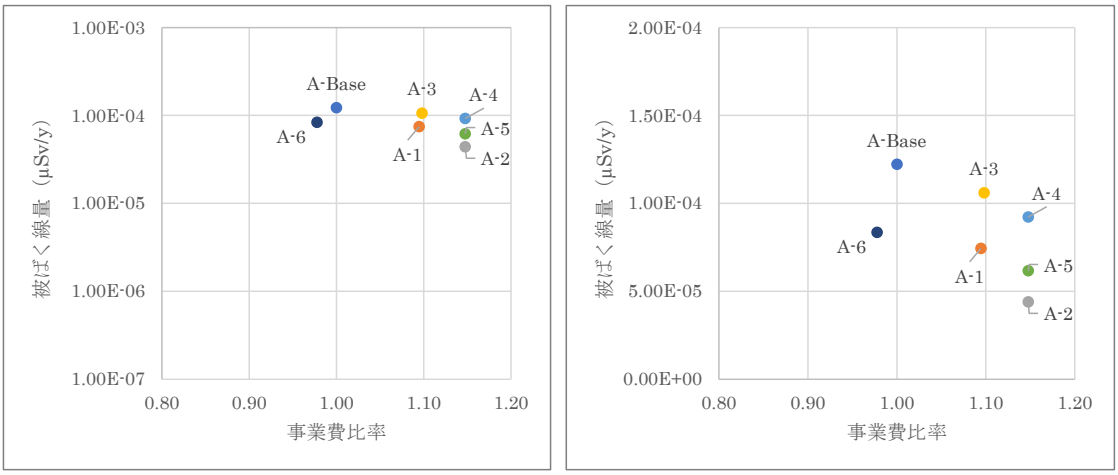


図 5.2-88　母岩 A に対するオプションの相関関係（左：対数軸、右：線形軸）

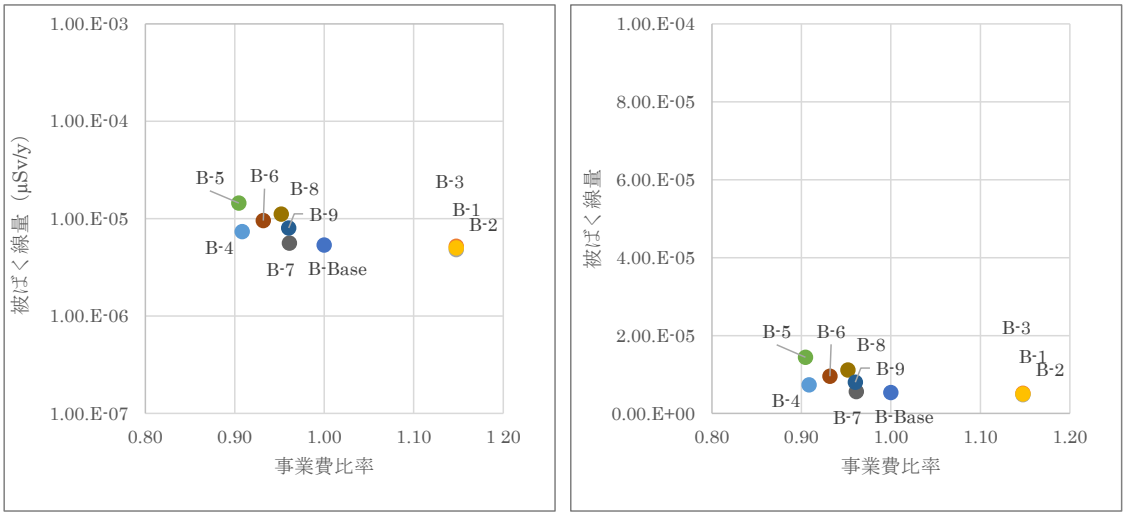


図 5.2-89　母岩 B に対するオプションの相関関係（左：対数軸、右：線形軸）

母岩 A に対するオプションでは、事業費が最も安い A-6 と、被ばく線量が最も低い A-2 の費用対効果が高いことが確認された。相関関係のみでは A-1、A-2、A-6 のいずれのオプションが最適化されたオプションかわからない。しかしながら、相関関係に加えて費用対効果を合わせて確認することで、最適化されたオプションの傾向を把握することができた。

また、母岩 B に対するオプションでは、B-1、B-2、B-3 を除いた 6 種のオプションが近い場所にあり、相関関係のみでは最適化されたオプションを判断できない。しかしながら、費用対効果の結果を踏まえることで、最適化の傾向を把握できる。B-4、B-7 が費用対効果の高いオプションであることから、オプションの最適化は、やみくもに費用を安くする、あるいは被ばく線量を小さくしても成立しないことが確認された。

これらの結果より、複数の評価項目を用いて相関関係及び費用対効果の両面から設計オプションを評価することは、オプションの最適化に向けた有効な手段の一つであるという知見を得た。

5.2.5 まとめと技術課題の整理

(1) 令和 3 年度のまとめ

中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、既往検討成果の調査と技術オプションの検討から得られた知見を以下にまとめる。

- 電事連から示された中深度処分の処分概念を出発点として、人工バリアの仕様を検討する「処分場の概略検討」について検討を実施した。
- 最新の規制基準類について調査・整理し、最適化された複数の設計案を選定するプロセスを念頭に置いた絞り込みフローを策定した。策定した絞り込みフローは、処分場の長期安全性に対する人工バリア仕様の感度を把握した上で、複数の設計オプションを抽出し、それらを比較検討することにより、最適化された設計案を絞り込むことができるものとした。
- 長期安全性に対する人工バリア仕様の感度解析では、低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、断面当たりの廃棄体数を変動パラメータとして設定し、各ケースにおける被ばく線量を算出した。その際、天然バリアの特性に応じた人工バリアオプションを抽出することを目的として、母岩の透水係数も変動パラメータとした。感度解析の結果、母岩の透水係数は被ばく線量への影響が大きいことが確認されたため、設計オプション抽出とその絞り込み手法の検討においては、透水係数の異なる 2 種類の岩盤を設定することとした。
- 設計オプションの抽出は、2 種類の岩盤それぞれに対して実施し、人工バリア部材の部材厚を低減する場合には、長期安全性を確保する観点に加え、人工バリアの施工実現性についても考慮した。
- 国内外の事例も参考にして、抽出した複数の設計オプションを絞り込むための評価項目を検討した。処分場設計のフェーズ（処分方式の検討／処分概念の検討／処分場の概略検討）毎に適切な評価項目が異なると考えられ、人工バリアの部材厚を検討対象とした本検討においては、処分場の長期安全性と経済性に着目した。
- 長期安全性と経済性をそれぞれ被ばく線量と事業費で定量化し、それらの相関関係をプロットしたところ、相関関係のみでは最適化されたオプションを判断できないことが明らかになった。そこで、設計オプションごとに費用対効果を算出し、評価を実施した。その結果、本検討で設定した条件の下では、低拡散層の部材厚を増大することが設計の最適化に寄与することを確認した。
- 費用対効果で確認した最適化されたオプションを相関関係のグラフで確認すると、被ばく線量及び事業費のいずれも小さい設計オプションが選定されていることを確認した。このことから、相対効果による評価は、設計オプションの最適化に向けた有効な手段の一つであるという知見を得た。

(2) 技術課題の整理と今後の方針

ここでは、今年度の検討を通じて抽出された課題と今後の対応方針について記述する。

1) 処分場に求める安全機能と人工バリアの関係

本業務では、電事連から示された中深度処分の概念を出発点として、処分場の長期安全性を確保する上で重要度が高いと考えた人工バリア部材（低透水層、低拡散層）の部材厚を主な検討対象とした。しかしながら、一連の設計プロセスの中では、処分場に要求される安全機能を設定し、安全機能を担保するための人工バリアを設定する必要があると考えられる。その際、単一の人工バリアに過度に依存しないこと、長期安全性の観点だけではなく建設・操業段階における安全機能（力学的安定の担保、操業段階の遮蔽性能、操業期間中の水の侵入防止など）も考慮すること、などが必要となる。

既往検討を紐解くと、中深度処分施設に要求される安全機能を整理した事例がある。表 5.2-29 に示した土木学会の検討例[2]と表 5.2-30 に示した日本原子力学会の検討例[25]では、低透水層に要求する機能に差異が見られる。既往検討の考え方を再整理するとともに、中深度処分を対象に策定された規制基準類への適応も考慮して、処分場に要求される安全機能を設定し、安全機能を満たすための人工バリア構成を検討することが重要である。

表 5.2-29　地下施設の各部位に要求される主要な機能（土木学会の検討事例[2]）

			区画内充てん材	コンクリートピット	低拡散層	低透水層	空洞内充てん材	埋戻し材	処分空洞
基本安全機能		閉じ込め	–	●	–	●	–	–	–
		遮へい	●	●	●	–	–	–	–
	移行抑制	核種収着性	●	●	●	–	–	–	–
		低拡散性	–	–	●	–	–	–	–
		低透水性	–	–	–	●	●	–	–
		卓越した移行経路形成の防止	–	–	–	–	–	●	–
	離隔	離隔距離の確保	–	–	–	–	–	–	●
		容易な人間侵入の抑制	–	–	–	–	–	●	–
操業上の機能			–	●	●	●	–	–	●

表 5.2-30　廃棄物埋設施設の各部位の要求される主要な機能（日本原子力学会の検討例[25]）

項目			廃棄体	廃棄物埋設地						附属施設				
				区画内充てん材	コンクリートピット	低拡散層	低透水層	処分空洞		放射性廃棄物の受入施設	放射性廃棄物の受入施設（クレーン等）	アクセス坑道・周辺坑道		
								空洞（支保・覆工）	空洞内充てん材			坑道	搬送車両	坑道の埋戻し部
基本安全機能	閉じ込め		●（密閉）	－	●（力学的安定性）（定置作業期間の廃棄体と地下水などとの接触防止）	－	●（地下水浸入抑制）	－	－	－	－	－	－	－
	遮へい		●（遮へい）	●（遮へい）	●（遮へい）	●（遮へい）	－	－	－	●（遮へい）	－	－	－	－
	移行抑制	核種収着性	－	●（収着）	●（収着）	●（収着）	●（収着）	－	－	－	－	－	－	－
		低拡散性	－	－	－	●（低拡散）	●（低拡散）	－	－	－	－	－	－	－
		低透水性	－	－	－	－	●（低透水）	－	●（低透水層の拘束）	－	－	－	－	－
		卓越した移行経路形成の防止	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	●（卓越した移行経路の抑制）
	離隔	離隔距離の確保	－	－	－	－	－	●（空洞深度）	－	－	－	－	－	－
		容易な人間侵入の抑制	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	●（坑道の閉そく）
安全評価の前提項目			＊（放射能の総量）	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
【参考】操業において必要な機能			－	－	＊（区画形成）	－	－	＊（空間保持）	－	－	＊（ハンドリング）	＊（空間保持）	＊（搬送）	－

注記　●直接的な機能を要求する部位　＊基本安全機能以外の機能を要求する部位／項目　網掛け部分は，この標準の対象範囲

2）廃棄体発熱の影響評価を考慮した設計プロセスの検討

図 5.2-38 に示したように、断面当たりの廃棄体定置数を変動因子とした感度解析より、断面当たりの廃棄体定置が被ばく線量に与える影響は小さいことが確認された。処分坑道内に廃棄体を集積配置する処分概念では、大断面空洞に多くの廃棄体を配置する方が経済的に有利になると考えられるため、感度解析の結果は、安全性を確保した上で経済的合理性を兼ね備えた設計の成立性を示唆している。実際に、感度解析結果を踏まえて設定した設計オプションの絞り込みを試行した結果、透水係数が比較的小さい母岩 B を対象とした場合には、廃棄体定置数を増やしたオプションが費用対効果の観点で相対的に優れた設計として抽出された。

一方、中深度処分対象廃棄物の一部は核種の崩壊熱により発熱し、人工バリアが熱変質することで施設の性能に影響を及ぼすことが懸念されている[26][27]。断面当たりの廃棄体定置数を増加させることにより人工バリアへの熱影響は大きくなるため、断面当たりの廃棄体定置数の設定においては、廃棄体の発熱影響を考慮する必要がある。しかしながら、令和 2 年度、令和 3 年度の設計プロセスの検討においては、廃棄体の発熱に伴う人工バリアへの影響評価を考慮しておらず、一連の設計プロセスにおいて、どの段階で廃棄体発熱影響を評価すべきかの検討が必要であると考えられる。廃棄体の発熱影響は、廃棄体条件や施設設計がある程度確定した段階でないと精緻な評価が困難である一方、発熱影響を考慮せずに施設設計を確定させた後に発熱影響を評価する場合、設計の手戻りが生じる可能性がある。そのため、設計プロセスの各段階における評価の得失を整理した上で、どのタイミングで熱影響を評価することが望ましいのか体系化することが望まれる。

廃棄体の発熱影響の評価においては、以下のような技術課題も存在する。

既往検討[26][28]では、図 5.2-90、図 5.2-91 に示すように、二次元 FEM モデルによる熱伝導解析を実施して人工バリアへの熱影響を評価している。廃棄体は、奥行方向に離散的に配置されるが、二次元でモデル化した場合には、発熱体が奥行き方向に連続していることになるため、適切に評価できていない可能性がある。これに対しては、二次元モデルと三次元モデルによる評価結果の違いを検証することにより、熱影響に対する評価手法の最適化を図る検討が必要である。

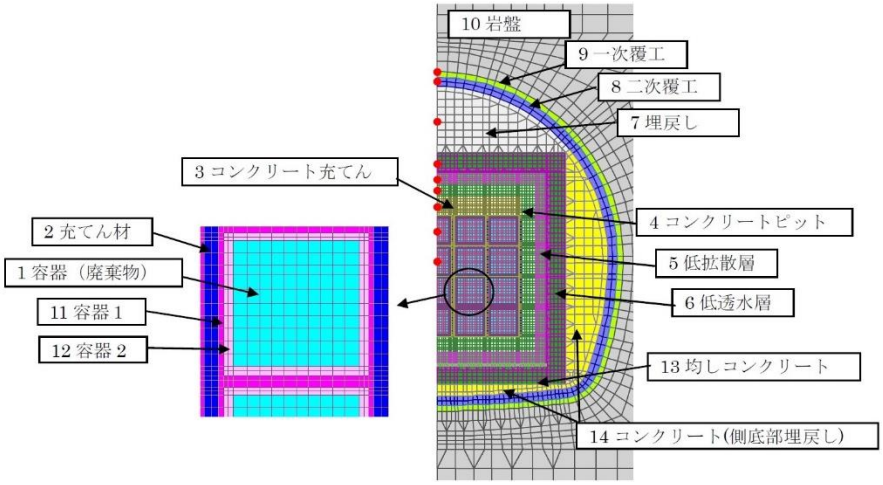


図 5.2-90　既往検討における熱影響評価モデル（一部拡大）[26]

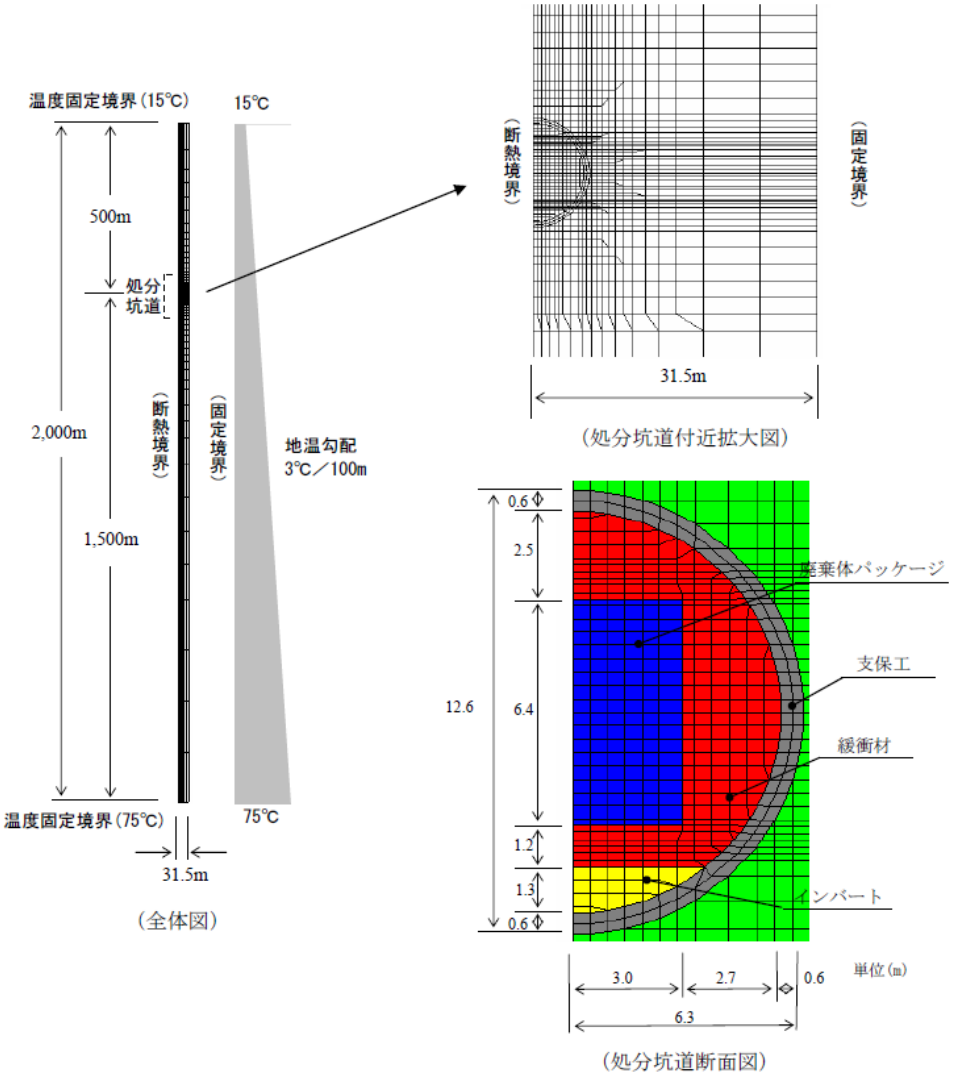


図 5.2-91　既往検討における熱影響評価モデル[28]

また、中深度処分の人工バリアに使用される候補材料であるセメント系材料は、熱変質が生じる温度及び変質の程度が明確になっていない。既往検討では、セメント系材料の制限温度を 60～65℃と設定している事例[26]、80℃と設定している事例[28]などが見られる。本業務で検討対象とした処分概念では、廃棄体の直近にセメント系人工バリアが配置されているため、セメント系材料の制限温度は熱影響の評価において重要な要素となる。これに対しては、実験的な検討により熱変質が生じる温度を解明するアプローチが考えられるものの、使用材料や配合に依存する可能性もある。そこで、既往検討成果を調査し、現状の知見を整理することとした。調査・整理結果は添付資料-3 にまとめた。

5.2 節の参考文献

[1] 原子力規制委員会 : 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の制定について、2021

[2] 社団法人　土木学会　エネルギー委員会　低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方、2009

[3] 電気事業連合会：原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について　資料 2-1、2015

[4] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター、東電設計株式会社 : 令和 2 年度　低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業　地下空洞型処分調査技術高度化開発、2021

[5] GoldSim Technology Group (2018): User's Guide GoldSim: Version 12.1 (June 2018).

[6] 電気事業連合・核燃料サイクル機構. TRU 廃棄物処分技術検討書. 2005.

[7] 日本原燃. 埋計発第 106 号 2018.8.1 変更後における核燃料物質等による放射線被ばく管理及び放射性廃棄物の廃棄に関する説明書 添付書類六. 2018.

[8] 日本原子力学会. 学会標準、浅地中処分の安全評価手法 : 2016　日本原子力学会　AESJ-SC-F026:2016. 2017.

[9] 日本原子力学会標準. 余裕深度処分の安全評価手法：2008.

[10] IAEA. Disposal of Radioactive Waste No.SSR-5. 2011.

[11] JAEGER.J.CandCarslaw.H.S. CONDUCTION of HEAT IN SOLIDS. 1959.

[12] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構. TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ－, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02. 2005.

[13] 原子力規制委員会：中深度処分の廃棄物埋設地に関する審査ガイド、2021

[14] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度管理型処分技術調査等委託費　地下空洞型処分施設性能確証試験報告書、2018

[15] 財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度管理型処分技術調査等委託費　地下空洞型処分施設性能確証試験報告書、2019

[16] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度管理型処分技術調査等委託費　地下空洞型処分施設性能確証試験報告書（第Ⅰ、Ⅱ分冊）、2020

[17] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 22 年度管理型処分技術調査等委託費　地下空洞型処分施設性能確証試験報告書、2021

[18] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度管理型処分技術調査等委託費　地下空洞型処分施設性能確証試験報告書、2022

[19] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度管理型処分技術調査等委託費　地下空洞型処分施設性能確証試験報告書、2023

[20] Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB)：SFL concept study Main report, Technical Report TR-13-14, 2013

[21] 公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター：地層処分施設の設計・操業技術の最適化手法に関する研究、2021
[22] 原子力発電環境整備機構（NUMO）：包括的技術報告書：わが国における安全な地層処分の実現－適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築－本編および付属書、NUMO-TR-20-03、2021
[23] 原子力発電環境整備機構（NUMO）：高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性－「処分場の概要」の説明資料－、NUMO-TR-04-01、2004
[24] 資源エネルギー庁　放射性廃棄物対策課：特定放射性廃棄物の最終処分費用及び拠出金単価の改訂について　参考資料、2020
[24] 資源エネルギー庁　放射性廃棄物対策課：特定放射性廃棄物の最終処分費用及び拠出金単価の改訂について　参考資料、2020
[25] 一般社団法人　日本原子力学会：日本原子力学会標準　余裕深度処分施設の施設検査方法：2010、AESJ-SC-F019:2010、2011 年 5 月
[26] 増田良一、佐々木規行、高村尚、奥津一夫：トンネル型処分施設の施設内温度上昇に対する影響因子、土木学会第 63 回年次学術講演会、CS05-46、平成 20 年 9 月
[27] 廣永道彦、蔵重勲、井元晴丈：電力中央研究所報告　セメント硬化体の熱影響に関する検討―温度 65℃におけるセメント系材料の変質状況について―、研究報告 N04013、平成 16 年 11 月
[28] 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分施術検討書―第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ―、JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02、2005 年 9 月

第６章　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

第6章　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

6.1　研究の背景と目的

中深度処分施設や低レベル放射性廃棄物処分施設におけるベントナイト系材料による人工バリアの重要な機能として、放射性物質の移行抑制機能が挙げられる。移行抑制機能として、低透水性及び収着性を期待しており、特に低透水性については重要な設計要件となっている。また、処分場の人工バリアの設計には長期的な評価が求められ、これは初期性能（施工完了時の性能）に対し、物理的あるいは化学的な作用による経年劣化を評価するものであるが、その評価は保守的であり、必ずしも合理的であるとは言えない。合理的な設計を行うためには、先ずは初期(施工時)の性能を正確に評価し、さらにその設計に基づいた施工時の品質管理が肝要となる。しかしながら、施工段階において透水係数を直接測定することは困難であり、低レベル放射性廃棄物処分では、締固めエネルギー、乾燥密度（モンモリロナイト湿潤密度)、含水比を代替指標として品質管理を実施する計画となっている。その代替指標は、室内試験や現場試験でそれぞれの関係性を精査し決定されるが、試験や材料のばらつき及び不確実性などを考慮し、その管理値もまた、保守的な設定となっている。これらの技術的課題を解決するためにはまず、「そもそも締固められた土の遮水性はどのようなメカニズムで発現するのか」を明確にする必要がある。本研究は、土粒子の間隙とその間隙を通る水のメカニズム解明を最初の着眼点として、最終的にはベントナイト系材料の透水特性を支配する要因について科学的合理性を持ってその設定値の保守性を説明することにより、中深度処分施設等における人工バリアの初期性能及び長期性能の最適化設計を行う上で有効な知見を得ることを目的に実施した。

透水メカニズム解明のための端緒として、「土質材料を締固めた時、最適含水比（最も高い乾燥密度を得られる含水比）より高い含水比(湿潤側)で最小透水係数が得られる」という良く知られた実験事実を取り扱った。この問題を解決する過程で、ベントナイト系材料を含む広範囲な締固め土の遮水性発現メカニズムにメスを入れることを試みた。

前年度（初年度）の研究では、この研究意図を再確認することを目的とし、文献調査・有識者ヒアリング・ベントナイト混合土の基本的な締固め～透水特性の確認、及び上記「土粒子の間隙とその間隙を通る水のメカニズム」を検証するための実験手法の模索を試みた。後半の検証手法としては、従来のマクロな室内締固め～透水試験に加えて電子顕微鏡による土粒子間隙構造の可視化、通水時の水の浸透状況を把握するための中性子イメージング実験等にチャレンジし、実験手法の最適化に着手している。また、これらの結果を総括し、本研究の着地点や研究意義の確認

に加えて、遮水性発揮メカニズムの評価手法（飽和度管理の考え方の援用から試行を開始）とそのための組合せ実験方法、ベントナイト系材料以外の土も対象とした段階的実験手法（材質や材料の組成を徐々に変化させ差分評価を行う手法）に関する以後 4 年間の研究構想と具体的な計画を立案した。

本年度はその初年度に相当し、全 5 ヵ年計画に従いベントナイト系及び通常の土質材料の透水特性に関するデータの取得、及びメカニズムの評価を進めた。本報告書では、これら令和 3 年度の実施結果を報告する。なお 5 ヵ年計画は固定的なものではなく、評価結果を見ながら適宜修正ローリングを行っていく予定である。

6.2 年度計画及び実施内容

6.2.1 令和 3 年度の実施計画と実施工程

令和 3 年度の実施内容と実施工程を表 6.2-1 に示す。実施項目は以下 3 点である。

① ベントナイト系材料の透水特性データの取得
② ベントナイト系材料の透水特性メカニズムに関する評価・検討
③ 報告書の作成

表中には実施計画の概要を示し、詳細な内容は「6.2.2 令和 3 年度の実施内容」に記す。ベントナイト混合土を用いた透水試験は長期透水試験法（JGS0312）を用いるため、前年度同様、長期的な透水係数の収斂を確認して試験終了を決定した（破線で示したが、一部は令和 4 年度にまたがって継続計測中である）。また、前年度よりこの長期透水試験終了後の供試体をそのまま保存し、実体顕微鏡及び SEM 撮像に供している。

表 6.2-1 令和 3 年度の実施計画と実施工程

	実施内容	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
⓪実験詳細計画	各実験の詳細確定と実験準備（供試土・治具・実験条件等の確定）												
①ベントナイト系材料の透水特性データの取得	室内締固め一透水試験、顕微鏡による構造観察、中性子イメージング実験の実施											JGS0312	
②ベントナイト系材料の透水特性メカニズムの評価・検討	飽和度管理の考え方を援用した結果評価の試み。顕微鏡写真による土粒子間隙構造の定量評価の試み。中性子イメージング実験による間隙構造と浸透状況の関連性把握。これら実験結果の統一的評価の試み(第一段階）と研究方針の微修正												
③報告書の作成	本年度の成果とりまとめ。ローリングした研究計画の立案と次年度の研究手法修正案を含む												

6.2.2　令和 3 年度の実施内容

以下に令和 3 年度の研究実施内容を概説する。実験条件等の更なる詳細は、6.3 実施結果の中で各々述べる。

(1) ベントナイト系材料の透水特性データの取得

前年度、ベントナイト系材料の透水係数発現メカニズム解明のための研究のフレームワークを図 6.2-1 のように構築した。実験 A は最も基本的な情報を得るための室内 1Ec 締固め－透水試験であり、前年度実施済である。今年度は、これに引き続き以下に説明する実験 B、実験 C、実験 D を実施した（実験 B,C は前年度、実験手法の詳細を決めるための最適化検討に着手済）。

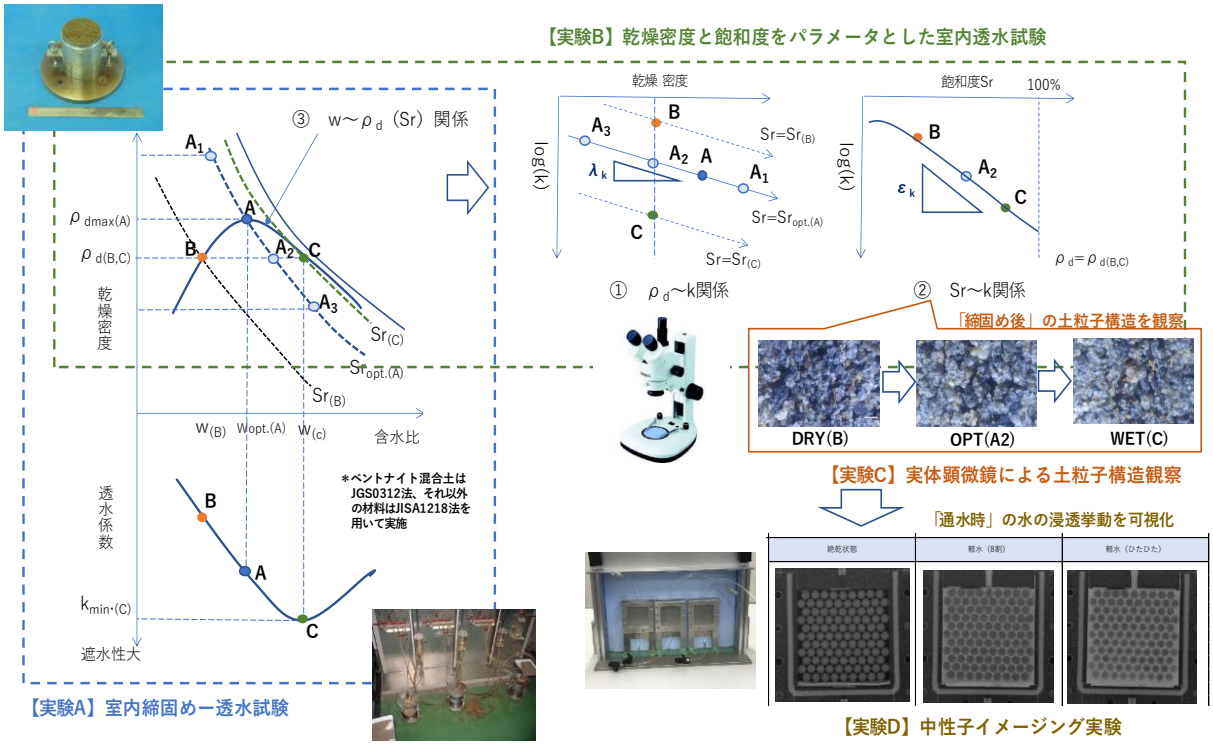


図 6.2-1　ベントナイト系材料の透水特性データの取得と研究のフレームワーク

1)　室内締固め～透水実験：実験 B

図 6.2-2 及び図 6.2-3 に、前年度策定したベントナイト混合土の遮水性発現メカニズム解明のための室内締固め～透水試験方法及び段階的実験方法の考え方を示す。龍岡[1]により提唱されている飽和度管理の考え方を援用し、締固め土の透水係数が締固め時の乾燥密度と飽和度の関数として表現できるものと仮定した。図 6.2-2 に示すように、このために以下 2 つのシリーズの実験を実施した。

①λk 実験：飽和度一定で乾燥密度を数種類変更した供試体の透水係数を計測

②εk 実験：乾燥密度一定で飽和度（含水比）を数種類変更した供試体の透水係数を計測

注）乾燥密度、飽和度共に、「締固め時の値」である（透水試験は飽和通水後に実施するため、その時点での供試体の飽和度は全て 100%である）

また図 6.2-3 には段階的実験のフロー及び供試土と実験手法の組合せを示すが、本年度はその最初のケースとして以下 3 つのシリーズを実施した。

A：砂単体（前年度使用した購入砂）

B：砂＋非塑性細粒土（微粉かつ非塑性の珪砂粉）を重量比 9:1 で A に混合

C：ベントナイト混合土（購入砂＋クニゲル 10%混合：乾燥重量比 9:1）

用いた供試土の粒度特性を図 6.2-4 に、本年度実施した室内試験の一覧を表 6.2-2 に示す（より詳細な実験条件一覧は 6.3 にて詳述）。なお、実験 B を実施するに際しては前年度取得した 1Ec 締固め－透水試験データ（図 6.2-5 等）も有効利用し、その間を補完する形で締固め密度・含水比条件を設定した。供試土の締固め状態の上下限を見定めるために予備的に 4.5Ec 及び 0.1（0.2）Ec 締固め曲線を求め、その範囲内で条件設定を行っている。

取得した実験データは図 6.2-6 に示すように結果を整理し、透水係数を締固め時の乾燥密度と飽和度の関数として定式化することを試みた。ただし、後述するように λk と εk が透水係数方対数図上で必ずしも 1 本の直線とはならなかったため、本年度は締固め時の乾燥密度と飽和度を説明変数、透水係数を目的変数とした重回帰分析を実施して、2 要因の影響度の検討や透水係数発現現象の定量的な再現を試みている。これにより、実験事実に基づいて最小透水係数発現のメカニズムを定量的に検討することを試みている。

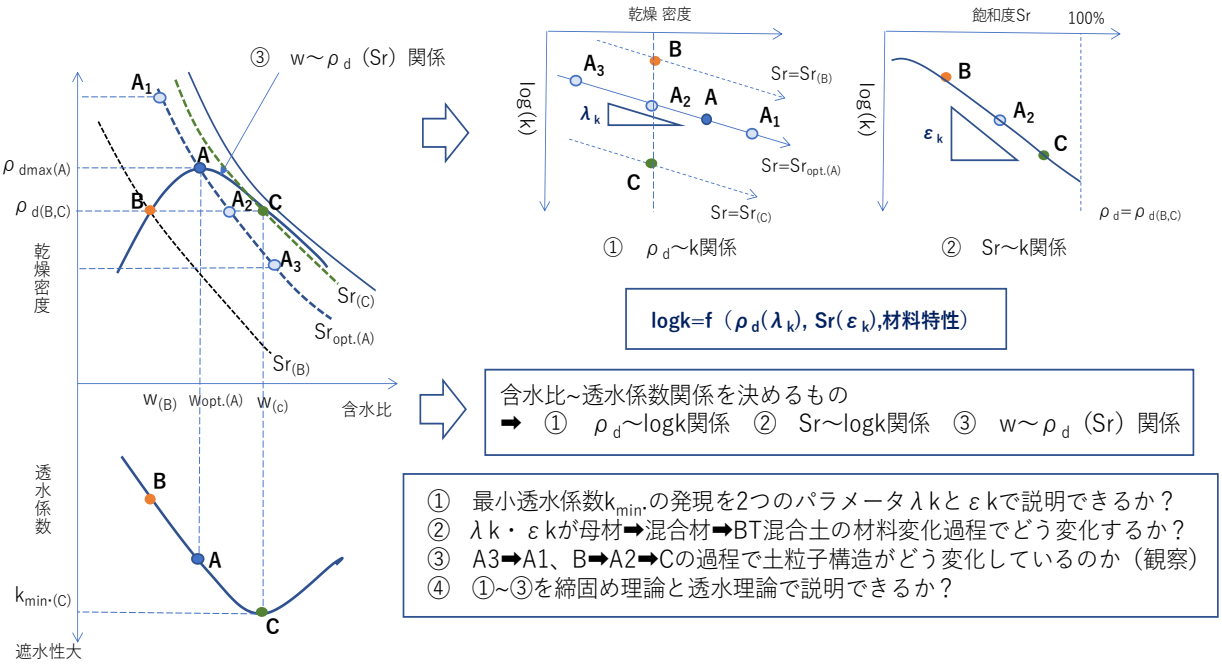


図 6.2-2　λk・εk 実験の供試体条件及びデータ整理方法

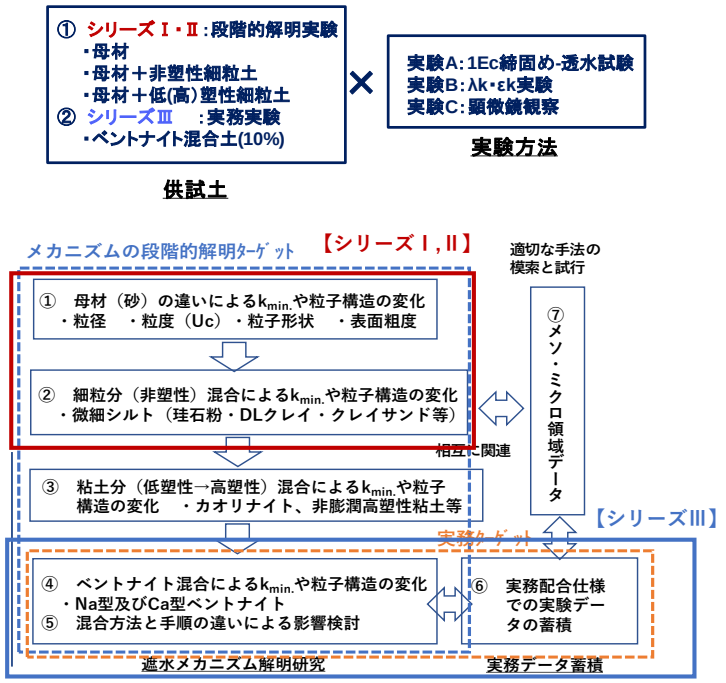


図 6.2-3　段階的実験手法と本年度の着手範囲（シリーズ A～C）

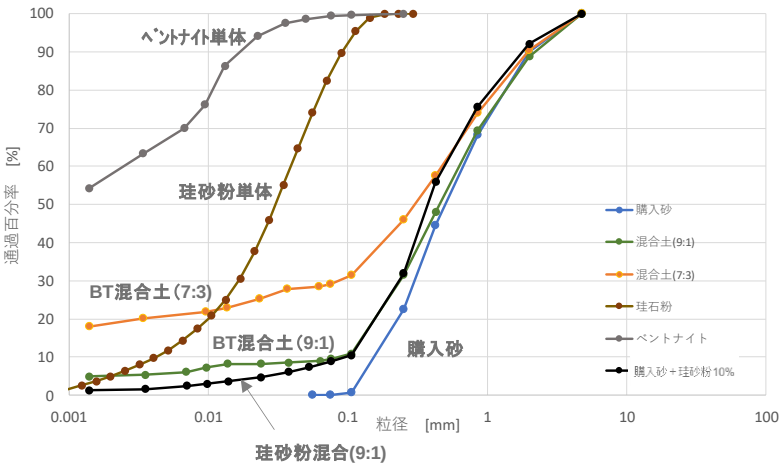


図 6.2-4　本年度の実験に用いた供試土の粒度特性

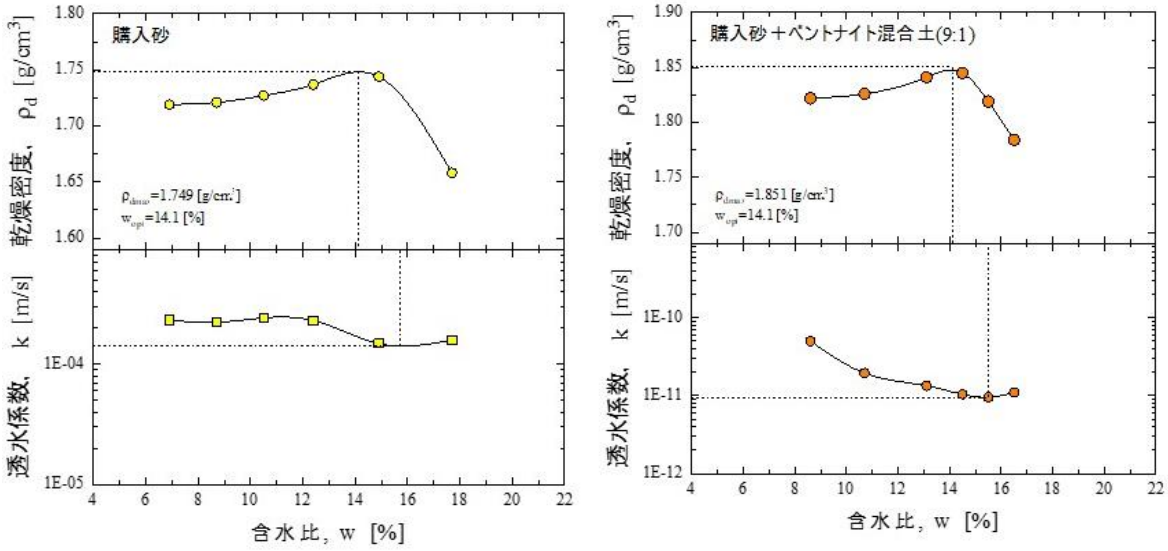
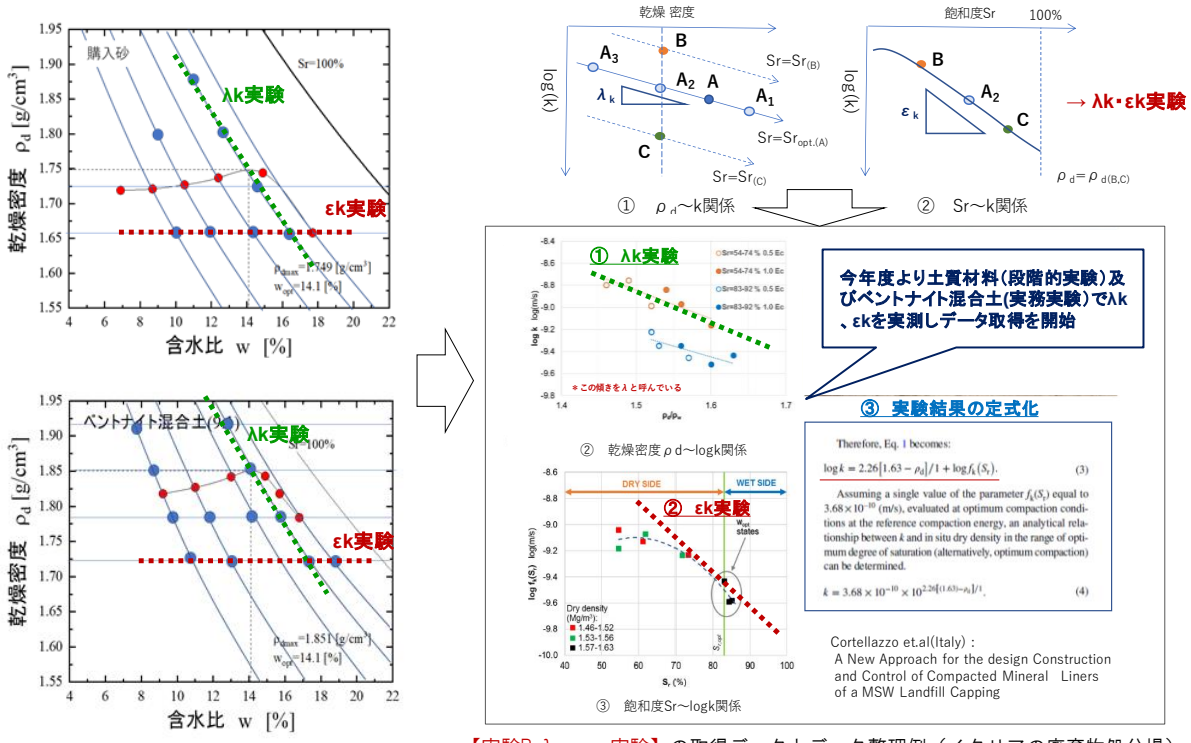


図 6.2-5　前年度実施の室内締固め～透水試験結果(1Ec)

表 6.2-2　実施した室内締固め～透水試験のケース一覧

実験シリーズ	供試土	供試体条件	透水試験方法	数量(個)
A：λk・εk実験（母材）	購入砂	A-1：乾燥密度固定・含水比（飽和度変更）シリーズ	JISA-1218	4
		A-2：飽和度固定（最適飽和度）・乾燥密度変更シリーズ		4
B:λk・εk実験（母材＋非塑性細粒分）	購入砂＋珪砂粉(微粉・非塑性)	B-0：締固め試験・透水シリーズ		6
		B-1：乾燥密度固定・含水比（飽和度変更）シリーズ		5
		B-2：飽和度固定（最適飽和度）・乾燥密度変更シリーズ		5
C：λk・εk実験（ベントナイト混合土10%）	購入砂＋Na型（クニゲル）10%混合	C-1：乾燥密度固定・含水比（飽和度変更）シリーズ	JGS0312	6
		C-2：飽和度固定（最適飽和度）・乾燥密度変更シリーズ		6



【実験B】の供試体条件案（青点の条件で乾燥密度一定＋飽和度一定で供試体作製）

【実験B: λ_k・ε_k実験】の取得データとデータ整理例（イタリアの廃棄物処分場）

8

図 6.2-6　実験結果の整理方法

2)　電子顕微鏡による締固め土の構造観察：実験 C

λk 及び εk ライン上で締固め土の粒子間隙構造がどう変化しているか（あるいは変化しないのか）を確認する目的で、顕微鏡撮影（実体顕微鏡及び SEM）を実施した。ベントナイト混合土 C は長期透水試験（JGS0312）に用いた供試体の試験終了後（十分に飽和・膨潤後）に取り出した供試体を観察した。母材 A 及び珪砂粉混合の B は、別途購入砂と同じように粒度調整したカラーサンドに珪砂粉を混合した供試体を各締固め含水比で作製し、これを炉乾燥して顕微鏡観察に供した。カラーサンドを用いた理由は色調を一定にするため（購入砂は色調が複雑で構造観察に向かない）、炉乾燥した理由は締固め時の水分添加による写真撮影時の光の反射を極力避けるためである。

3)　中性子イメージング実験：実験 D

中性子イメージング実験は、前年度実験治具（アルミ製供試体箱や簡易通水装置）の試作と撮像方法の試行、砂や理想球体を用いた基礎的データの収集を実施した。図 6.2-7～図 6.2-9 に実験装置（青森県量子科学センター：青森 QSC）と前年度の実施結果の一例を示す。前年度は購入砂＋ベントナイト 10%のベントナイト混合土の供試体も試みたが、粒径が細かく、かつ遮水性が高

いために粒子は全く映らず、重水も全く浸透しないなど、実材料では明瞭な撮像は不可能であった（分解能の限界)。一方、粒径の大きな理想球体や砂（珪砂 1 号）等では通水時を含め、ある程度鮮明な画像を得ることができた。本年度は前年度確認したこれらの材料を母材とし、これに細粒砂（珪砂 3 号）を均一に混合し、締固め時の水分（メニスカス）の分散や粒子の配列状況、軽水飽和後の重水の浸潤状況を観察するなど、可視化可能な供試土での実験の試行に移行した。また一部のケースでは重水浸透時の注水時間を計測し、締固め時含水比に違いによる相対的な透水係数の違い（同一注水時間での浸透面の高さの変化）も把握した。さらに、これら大粒径の母材にベントナイトを混合したケースの撮影も試みている。これにより土粒子間隙構造可視化、ベントナイトと非塑性細粒土混合時の挙動の違い等を概略把握することを試行した。表 6.2-3 に、実施した中性子イメージング実験のケース一覧を示す（実験条件詳細は 6.3 で後述する)。

本年度はまず、シリーズ A（実験手法の最適化）を継続実施し、シリーズ B 以降の実験に用いる供試体の選定やアルミ箱の厚み等を確定した。また、珪砂粉のほか、珪砂 3 号などを混合した材料（乾燥側と湿潤側で準備）で撮像を行うことにより、細粒分(3 号)の分布状況（＝粒子配列状況）や重水通水時の浸透状況の可視化、あるいは締固め時の含水比の違いが土粒子空隙構造や通水性状の違いにどの程度の影響を及ぼすのか、それがどこまで可視化できるのか、といった基礎的な検討を実施した。シリーズ A 終了後に確定寸法のアルミ箱を製作すると共に、シリーズ B 以降の実験条件詳細を確定した。なお実験は、前年度実績を鑑み、14 回（7 日間×2 回/日）に分けて撮像を実施した。

図 6.2-7　中性子イメージング実験装置（青森県量子科学センター）

図 6.2-8　供試体箱及び中性子照射部屋（青森県量子科学センター）

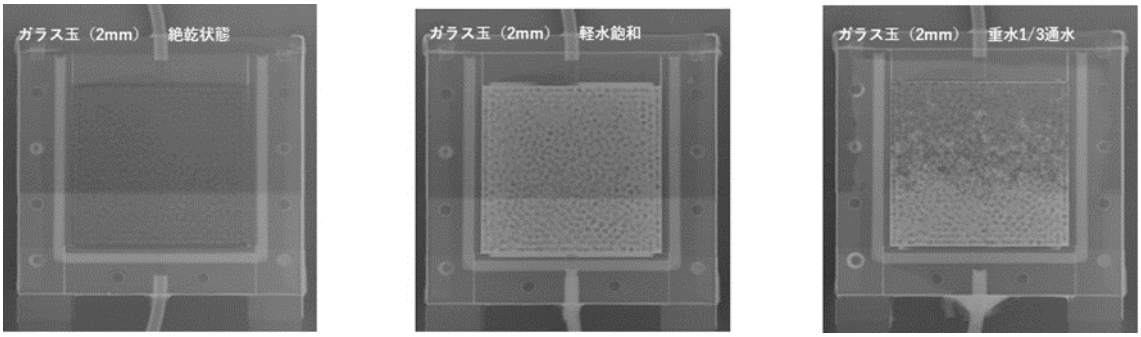


図 6.2-9　前年度の撮像例（ガラス玉２㎜に通水。不均一浸透状況が可視化されている）

表 6.2-3　試験ケース一覧

実験シリーズ	供試土	供試体の均一度および間隙比（締固め密度）の組合せ	通水撮像方法	数量（供試体）
A：実験手法の最適化（母材：理想球体および砂材料）	理想球体（2ケース）、珪砂(1ケース)	緩詰め、均一、供試体厚さ3種類	縦置きと横置き	3
B：供試体間隙構造と浸透状況の関係把握（母材：理想球体）	理想球体＋微粉粒子（珪砂粉等）	緩詰め（dry、wetの1ケース）、均一	軽水飽和⇒重水飽和（1/3,2/3,3/3）	1
C：供試体間隙構造と浸透状況の関係把握（母材：砂材料）	珪砂＋微粉粒子（珪砂粉等）	緩詰め（dry、wetの2ケース）、均一		1
D：ベントナイト混合土に対するチャレンジ	理想球体＋クニゲルV1 珪砂＋クニゲルV1	緩詰め、均一		2

4)　研究のフレームワークに関する補足

図 6.2-1 に示した研究のフレームワーク（実験 A⇒D）について、その考え方の基本と手順について、以下、若干の補足を行う。

a.　透水係数とは何か

「透水」（あるいは浸透）とは、地盤を構成する土の中の間隙（土粒子の間の空隙部分。地下水位以下では間隙水で満たされる）を水が移動する現象である（砂などの土粒子実質部分は密実な鉱物であり、実務的には水は流れないと考える）。透水係数は、この地盤の「透水」の程度（速さ）を示す係数であり、単位動水勾配の下で単位時間内に通過する水の量と定義される。つまり、透水係数は地盤を構成する土の「間隙」の状態に依存して変化する。土の間隙を定義する指標は間隙比であり、間隙比と log 透水係数が線形関係を示すことは従前よりよく知られている（その傾きを λk と呼ぶ。本研究の λk は乾燥密度に対するものであるが、この従来指標を意識している）。

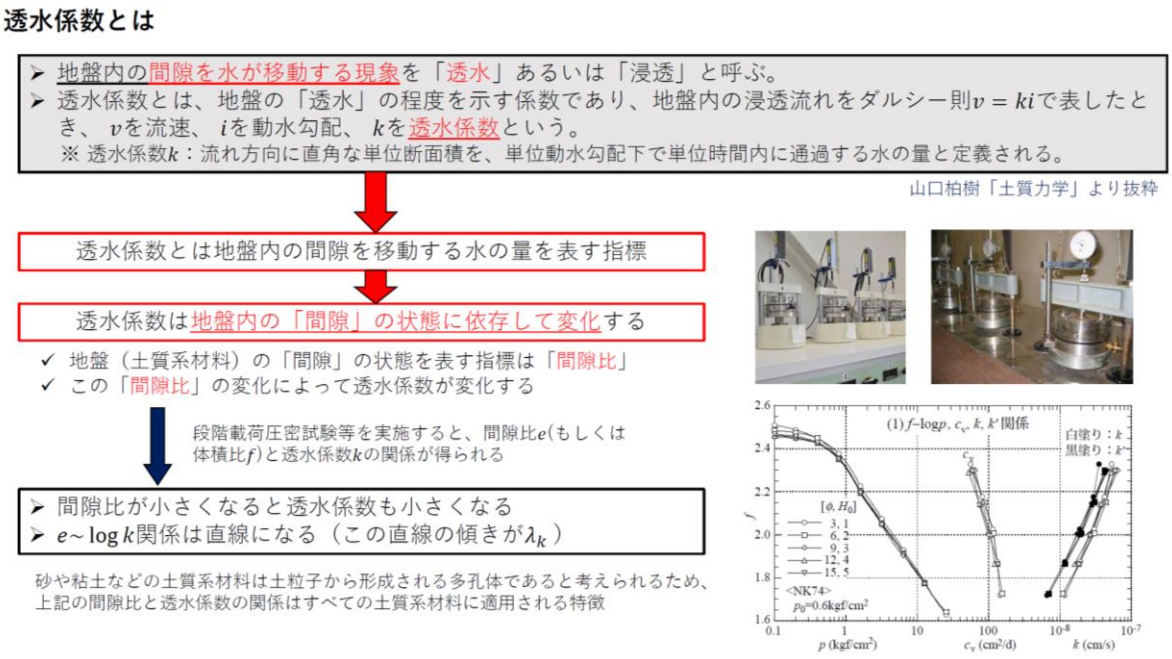


図 6.2-10　透水係数とは何か、何に依存するのか

b.　締固め～透水試験

次に締固めである。本研究の第一課題である「締固め土の透水係数が、乾燥密度が最大となる最適含水比ではなく、そのやや湿潤側で最小となるのは何故か？」。①に述べたように、土の透水係数は第一義的に土の間隙比に依存する。間隙比と乾燥密度は土粒子比重を介して 1:1 に対応するので、これは「乾燥密度に依存する」と言い換えられる。土の締固め曲線は通常、上に凸の曲

線となり、ある最適含水比で乾燥密度が最大となる（そのメカニズムの検討は、本研究とは別枠で進められているが明確な結論はない。しかし、本報告書で記載しているように、与えられた最小透水係数の発現現象は、実は締固め曲線の形や締固め座標：横軸を含水比、縦軸を乾燥密度、にも依存する）。であれば、最適含水比において透水係数が最小となるはずである。締固め供試体を表記する状態量は、締固め後の乾燥密度と締固め時の含水比（両者で計算される飽和度）である。前者の関与が自明であれば、もう一つの指標、締固め時の含水比（飽和度）の違いが、この問題に関与していると考えられる。なお、締固めた後の供試体（締固め土）は土粒子・水・空気の三相からなり（不飽和土）、土粒子体積に対する（水＋空気）の体積比が間隙比 e、土粒子重量に対する水重量の比が含水比である。締固め土を用いた透水試験を行う場合、これを全て飽和させてから通水を始める。したがって、最適含水比であろうがやや湿潤側であろうが、「透水試験時の飽和度は同じく 100%」となっている。従って、間隙比（乾燥密度）以外の要因があるとすれば、締固め過程における含水比（飽和度）の違いと考えるのが妥当である。

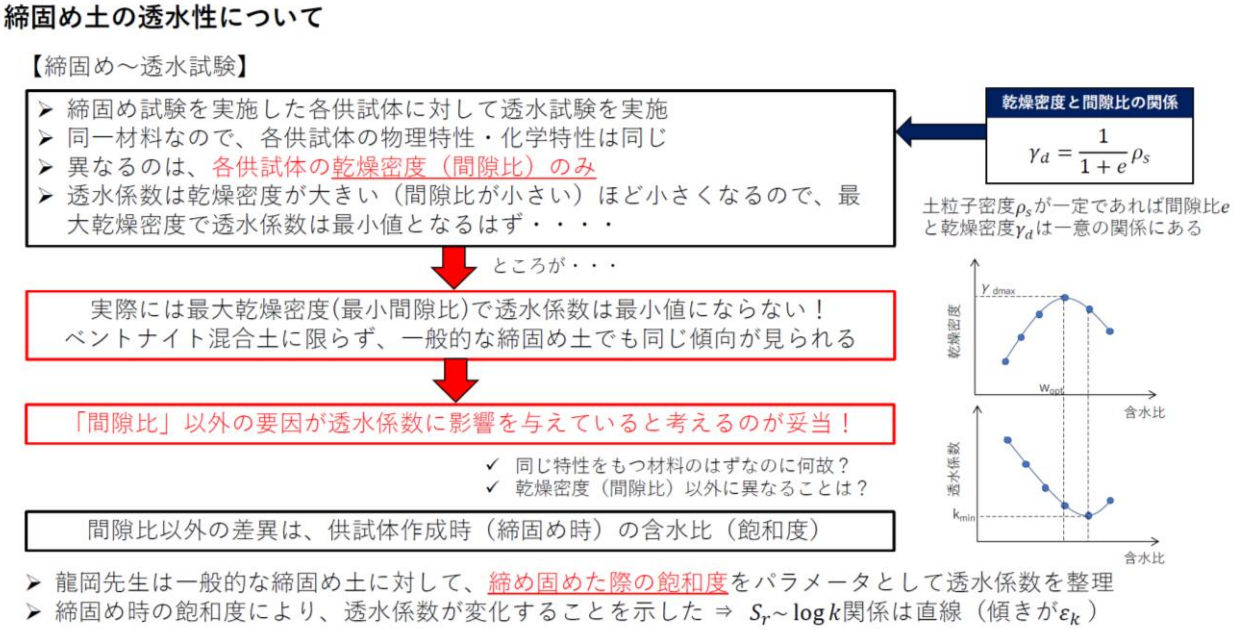


図 6.2-11　締固め～透水試験

実験 B では、この 2 要因（不飽和締固め時の乾燥密度と飽和度）を分離して議論するために λk、εk 実験を実施する。前者は乾燥密度（間隙比）の依存性であるため、透水係数の定義からも自明となる（ただし、その寄与度が土で異なる可能性があり、実験データを取得する）。②に関連して、問題は εk である。与えられた課題にこたえるためには、この εk ライン沿いに「締固め時の間隙比（乾燥密度）は等しいのに、「透水試験時の飽和度は同じく 100%になっているのに」、何故透水係数の違いが生じるのか、を解明する必要がある。

間隙比 e とは、前述したように「土粒子体積に対する（水＋空気）の体積比」である。乾燥密

度（間隙比）一定とは、結局（水＋空気）の合計面積が同じことを意味する。それでもなお透水係数が異なるということは、この「合計」面積だけでは透水係数が決まらない、ことを意味する。従来、この問題に対して微視的構造の違いという観点からの研究や指摘が散見されるのはこの為である。合計面積が同じでも、その分布（間隙径分布）が異なる可能性が従前から指摘されている。ベントナイト混合土に関する同様の議論は崎田・小峯[2]により始まったところであるが、膨潤性ベントナイトの場合、通常の土とは異なった形で土の構造が透水係数に関与している可能性がある。これを定量的に調べるのが実験 B であり、不飽和締固⇒飽和通水⇒水の浸透の過程で連続的にこの現象を可視化しようと試みるのが実験 D である。

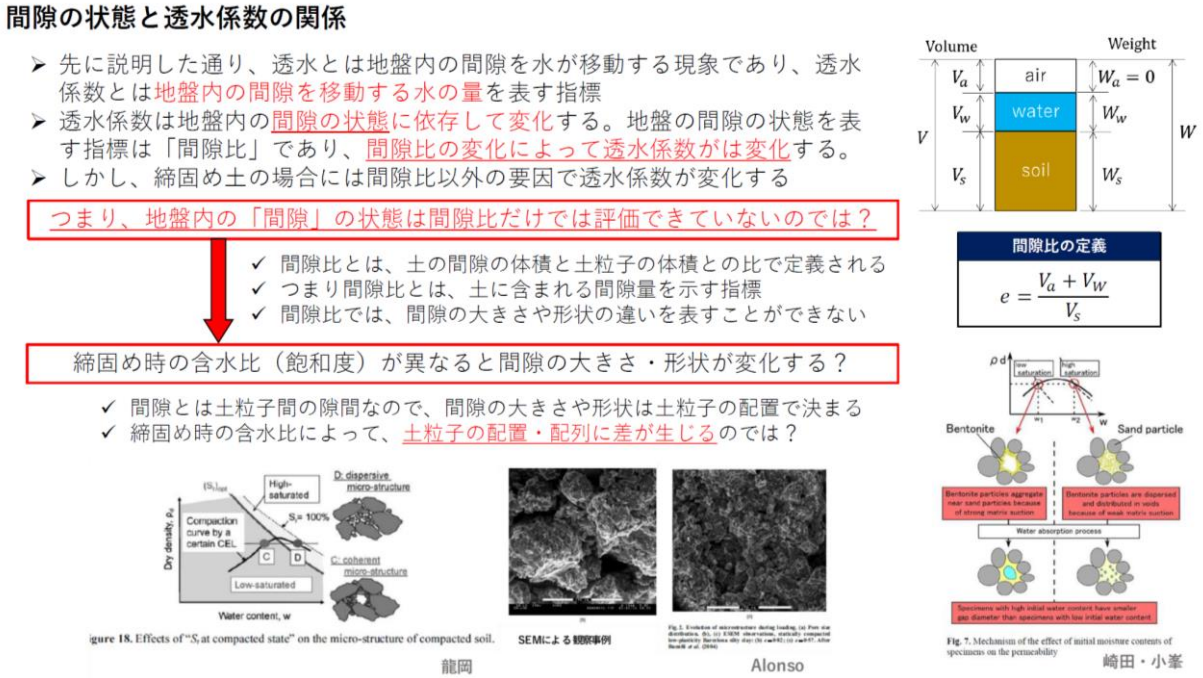


図 6.2-12　土の間隙の状態と透水係数

6.3　実験結果

6.3.1　ベントナイト系材料の透水特性データの取得

（1）室内締固め～透水試験（実験 A,B）

前年度は、1Ec のエネルギーで締め固めた供試体に対する透水試験(実験 A)を実施し、最適含水比よりも湿潤側で透水係数が最小値を取ることを確認した。本年度は、透水係数が締固め時の乾燥密度と飽和度に依存すると考え、乾燥密度と飽和度を調整した締固め供試体に対する透水試験(実験 B)を実施し、その関係性の整理を試みている。透水試験に用いた試料は、購入砂単体、購入砂と珪砂粉末の混合土（混合比率 9:1）、購入砂とベントナイト（クニゲル V1）の混合土（混合比

率 9:1）の 3 種である。珪砂粉末混合土は、ベントナイト混合土と粒度分布が近い非塑性材料として比較する目的で導入している使用した試料の物理試験結果一覧を表 6.3-1、粒径加積曲線を図 6.3-1 に示す。

表 6.3-1　実験に用いた試料の物理試験結果一覧

				購入砂	珪砂粉末	購入砂＋珪砂粉末 (9：1)
土粒子密度		ρ_s	g/cm^3	2.743	2.637	2.727
自然含水比		w_n	%	3.2	0.2	3.0
粒度	石分	(75mm 以上)	%	8.0	0.0	7.9
	礫分	(2～75mm)	%	91.6	2.9	83.3
	砂分	(0.075～2mm)	%	0.1	81.8	6.8
	シルト分	(0.005～0.075mm)	%	0.3	15.3	2.0
	粘土分	(0.005mm 未満)	%	4.75	0.425	4.75
	最大粒径		Mm	2.94	8.13	4.96
	均等係数	Uc		8.0	0.0	7.9
地盤材料の分類名				分級された礫まじり砂	細粒土	細粒分礫まじり砂
分類記号				(SP-G)	(F)	(S-FG)

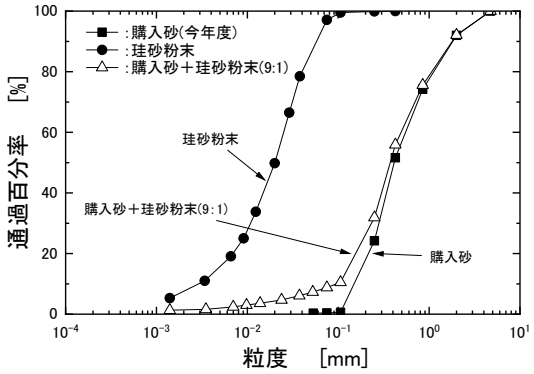
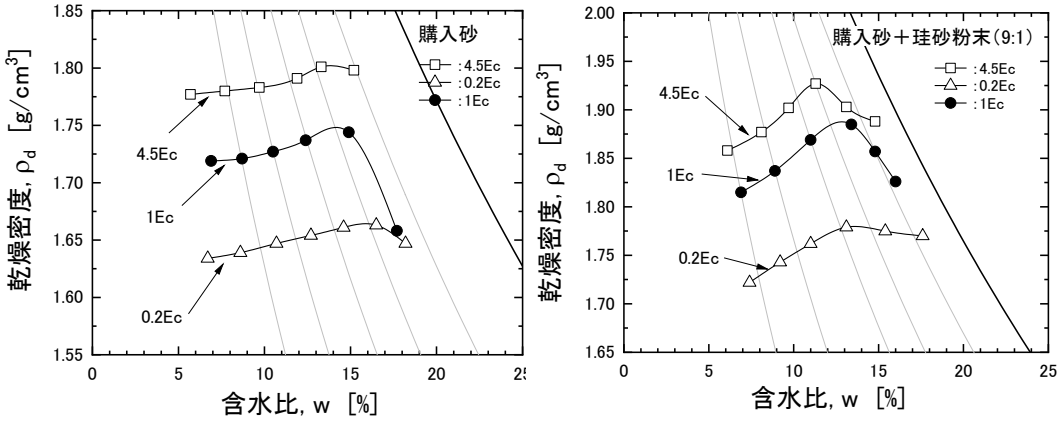


図 6.3-1　購入砂、珪砂粉末、購入砂＋珪砂粉末混合土(9:1)の粒径加積曲線

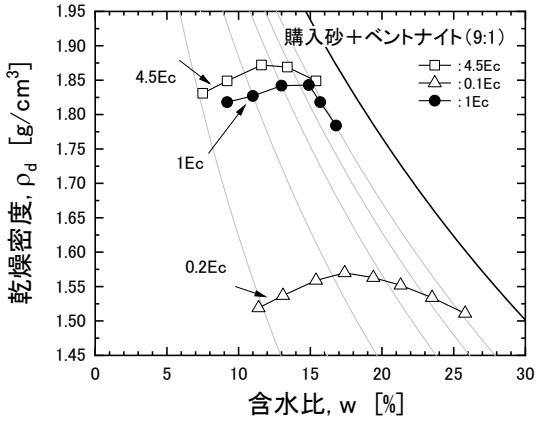
各試料に対して、乾燥密度と飽和度の試験条件を設定するため、締固めエネルギーを 4.5Ec と 0.2（若しくは 0.1）Ec とした締固め試験を実施し、供試体が作成可能な乾燥密度と飽和度の範囲を求めた。表 6.3-2 に実施した締固め試験の条件、図 6.3-2 に各試料の締固め試験結果を示す。

表 6.3-2　追加実施した締固め試験（JIS A 1210）のケース一覧

試料	締固めエネルギー	備考
購入砂	2 水準 (0.2Ec, 4.5Ec)	1Ec の締固めは前年度実施済み
購入砂＋珪砂粉末混合土(9:1)	3 水準 (0.2Ec, 1Ec, 4.5Ec)	1Ec の締固め供試体に対しては透水試験も実施
購入砂＋ベントナイト混合土(9:1)	2 水準 (0.1Ec, 4.5Ec)	1Ec の締固めは前年度実施済み



(a)購入砂　　(b)購入砂＋珪砂粉末（9:1）



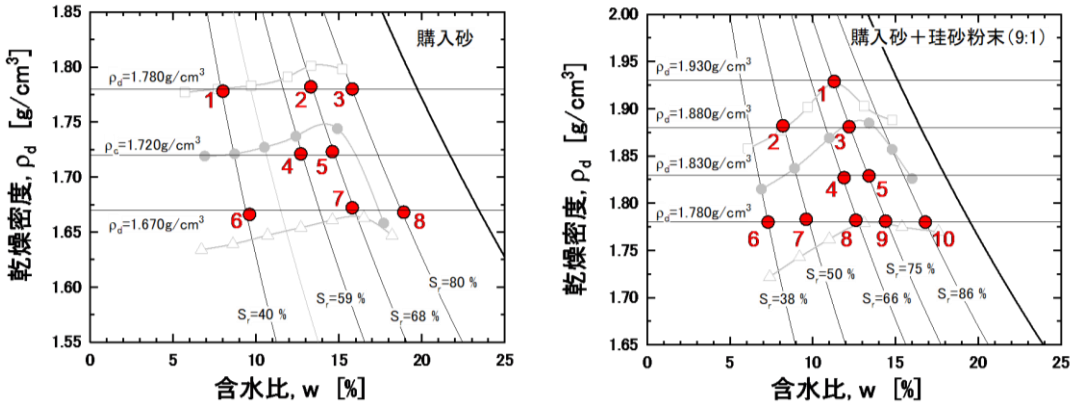
(c)購入砂＋ベントナイト（9:1)

図 6.3-2　締固めエネルギーを変えた各試料の試験結果

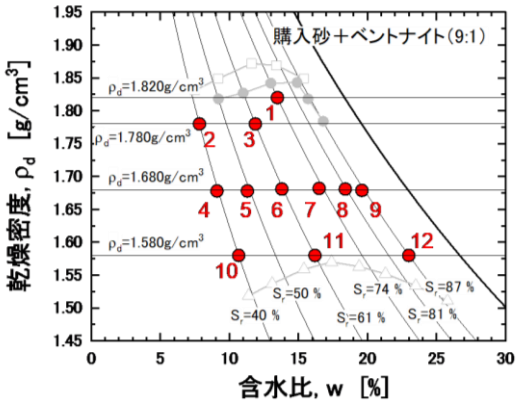
図 6.3-2 に示したエネルギーを変えた締固め曲線の範囲から、透水試験を実施する供試体の乾燥密度と飽和度を図 6.3-3 に示したように設定した。表 6.3-3 に、透水試験の実施ケース数量を示す。図 6.3-3 に設定した。なお、購入砂＋珪砂粉末混合土(9:1)については、1Ec の締固め～透水試験も実施されていなかったため、こちらの透水試験も追加で実施している。

表 6.3-3　実施した透水試験のケース一覧

試料	試験規格	供試体条件	数量
購入砂	土の透水試験 JIS A 1218	飽和度・乾燥密度調整	8
購入砂＋珪砂粉末混合土(9:1)		1Ec 締固め	6
		飽和度・乾燥密度調整	10
購入砂＋ベントナイト混合土(9:1)	低透水性材料の透水試験 JGS 0312	飽和度・乾燥密度調整	12



(a)購入砂　　(b)購入砂＋珪砂粉末（9:1）



(c)購入砂＋ベントナイト（9:1）

図 6.3-3　透水試験を実施した各試料における乾燥密度と含水比・飽和度

表 6.3-4 は実施した透水試験結果の一覧である。なお、乾燥密度や飽和度に対する透水係数の相関性等、試験結果に対する詳細な評価・考察については、次節 6.3.2 にて後述する。

表 6.3-4　透水試験結果一覧

試料	試験結果				
	No.	含水比 [%]	乾燥密度 [g/cm³]	飽和度 [%]	透水係数 [m/s]
購入砂	1	15.8	1.780	80.1	4.60E-05
	2	13.3	1.782	67.7	5.52E-05
	3	8.0	1.778	40.4	6.79E-05
	4	18.9	1.668	80.5	1.33E-04
	5	14.6	1.723	67.6	8.38E-05
	6	12.7	1.721	58.6	1.05E-04
	7	15.8	1.672	67.6	1.84E-04
	8	9.6	1.666	40.8	2.69E-04
購入砂＋珪砂粉末混合土(9:1)	1	11.3	1.929	74.4	6.34E-07
	2	12.2	1.881	73.9	1.26E-06
	3	8.2	1.882	50.0	2.04E-06
	4	13.4	1.829	74.4	1.98E-06
	5	11.9	1.827	65.8	2.25E-06
	6	16.8	1.780	86.1	1.06E-05
	7	14.4	1.781	74.0	1.16E-05
	8	12.6	1.782	64.8	1.20E-05
	9	9.6	1.783	49.5	1.74E-05
	10	7.3	1.780	37.4	2.28E-05
購入砂＋ベントナイト混合土(9:1)	1	13.5	1.820	73.5	1.60E-11
	2	7.8	1.780	40.0	5.60E-11
	3	11.9	1.780	60.7	4.03E-11
	4	9.1	1.678	39.7	1.26E-10
	5	11.3	1.678	49.1	1.16E-10
	6	13.8	1.681	60.3	5.67E-11
	7	16.5	1.682	72.2	3.52E-11
	8	18.4	1.681	80.3	2.91E-11
	9	19.6	1.679	85.6	2.38E-11
	10	10.7	1.580	40.0	1.51E-09
	11	16.2	1.580	60.7	9.91E-10
	12	23.0	1.580	86.2	4.91E-11

(2) 実体顕微鏡及びSEMによる構造観察（実験C）

実体顕微鏡及びSEMによる構造観察は、前述した乾燥密度と飽和度を調整した透水試験（実験B）で用いた供試体を対象とした。実体顕微鏡による観察は、前年度と同様にNIKON製実体顕微鏡SMZ18を使用し（図 6.3-4）、SEM/EDSは、日本電子製走査型電子顕微鏡JSM-6010PLUS/LA（図 6.3-5）を用いた。

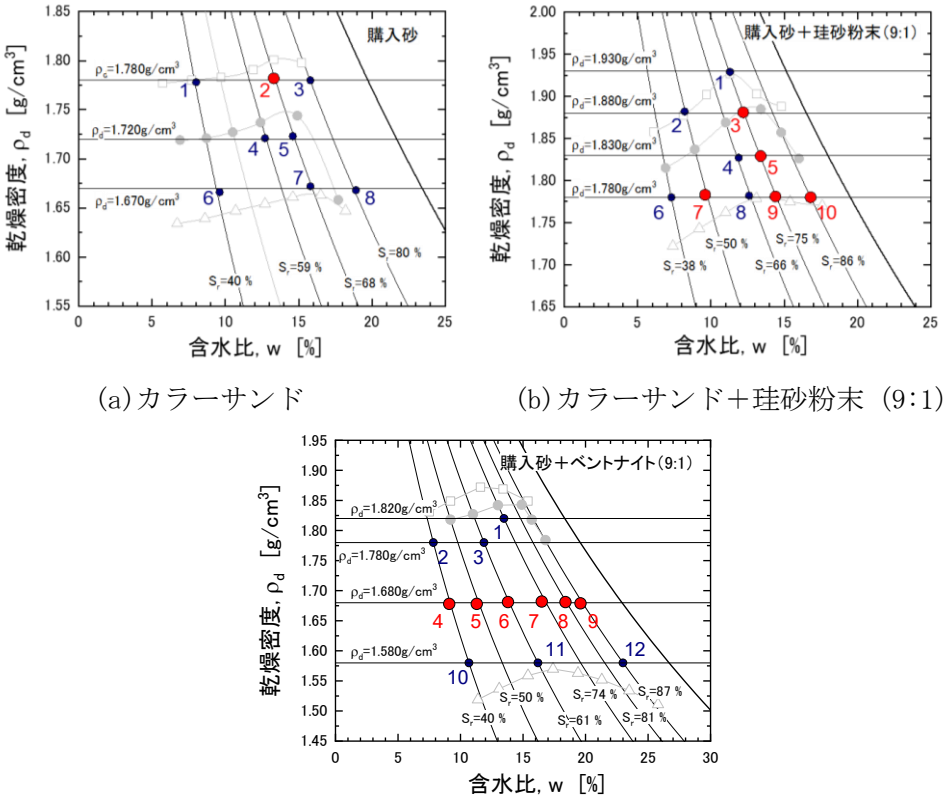
図 6.3-4　実体顕微鏡（Nikon SMZ18）

図 6.3-5　走査型電子顕微鏡（日本電子 JSM-6010PLUS/LA）

構造観測に用いた試料の一覧を表6.3-5に示す。図6.3-6に示したように、構造観察は透水試験（実験B）の代表的な供試体を選定して実施している。なお、購入砂ではさまざまな色相の土粒子が混在しているため、混合した珪砂粉末を確認することが非常に困難であった。そこで、昨年同様に購入砂とほぼ同じ粒度分布となるよう調整したカラーサンドを購入砂の代わりに使用し、乾燥密度と飽和度を同じとなるように調整した供試体を作成し構造観察を実施した。購入砂＋ベントナイト混合土(9:1)については、透水試験（JGS 0312）を実施した後の供試体から削り出し構造観察を実施している。

表 6.3-5　実体顕微鏡及びSEMによる構造観察を実施した試料一覧

試料	項目	数量	備考
カラーサンド	実体顕微鏡	1	
カラーサンド＋珪砂粉末混合土（9:1）	実体顕微鏡	5	購入砂＋珪砂粉末混合土(9:1)で実施した乾燥密度と含水比を再現した供試体
購入砂＋ベントナイト混合土（9:1）	実体顕微鏡	6	低透水材料の透水試験(JGS0312)の試験後供試体
	走査型電子顕微鏡	6	



(a) カラーサンド　　(b) カラーサンド＋珪砂粉末（9:1）

(c)購入砂＋ベントナイト（9:1）

図 6.3-6　構造観察を実施した各試料における乾燥密度と含水比・飽和度

図 6.3-7 に実体顕微鏡及び SEM による構造観察結果の一例を示す。実態顕微鏡による観察では、供試体内のばらつきを考慮して 1 試料に対して 10 枚の撮影を実施している。これらの結果に対する評価・考察については、次節 6.3.2 にて後述する。

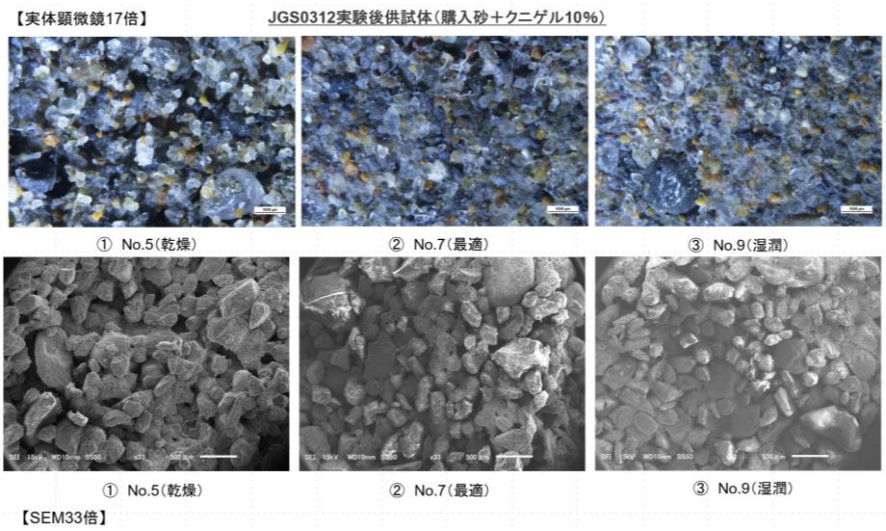


図 6.3-7　実体顕微鏡及び SEM による構造観察結果の一例

(3) 中性子イメージング実験（実験 D）

1) 中性子イメージング試験概要

前年度に引き続き透水試験供試体の水流動性を確認することを目的として、中性子イメージング試験を実施した。中性子イメージングは、中性子が水素を多く含む水を透過しにくい性質を利用した装置で、物質中の水を観察することに優れているとされており、医療分野では毛細血管の観察などにも用いられている。このような特性から、供試体内部の間隙中を流れる水を、中性子イメージング試験装置により可視化することが可能であると考えられる。実験には昨年同様に青森県量子科学センター(QSC)に設置されている NRT 装置（Neutron Radiography Testing）を利用し、中性子ラジオグラフィ撮影を行った。

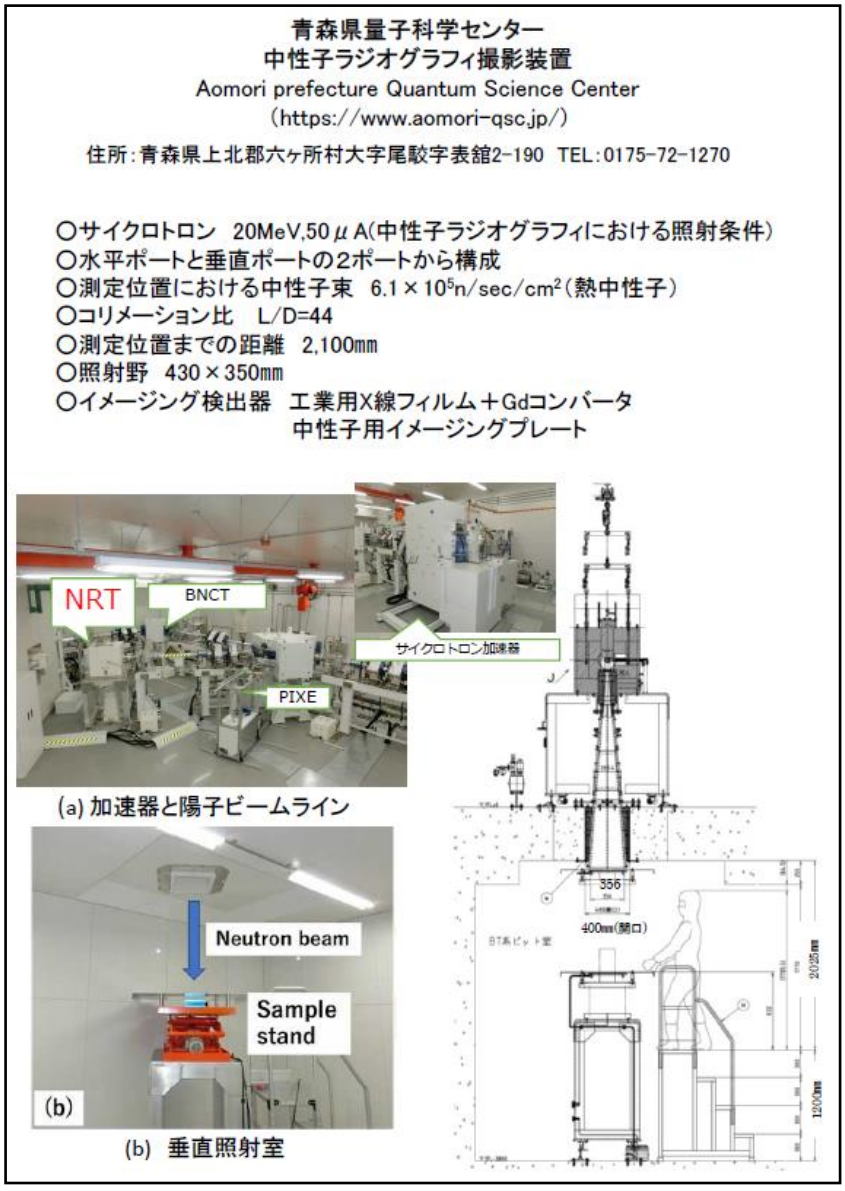


表 6.3-6 に今年度の実施した中性子イメージング実験の一覧を示す。実験は A～D の 4 つのシリーズに分けて行っており、実験シリーズ A では、実験手法の最適化を目的とし、供試体の奥行きや粒径による可視化状況を把握し実験シリーズ B～D の条件設定を行っている。実験シリーズ B、C では、供試体の間隙構造と浸透状況を把握するために、実験シリーズ A で選定した材料・寸法で供試体を作成し、軽水で飽和させたのちに重水を透水することにより、供試体内部の重水の流れをイメージングのコントラストとして可視化する。実験シリーズ D では、実験シリーズ B、C の結果を踏まえてベントナイト混合土に対して水の流れのイメージング画像取得にチャレンジする。このような実験シリーズを計 7 回に分けて実施した。なお、1 回の実験で 4～8 回程度の撮影が可能であり、1 回の撮影でアルミ製の供試体箱（供試体寸法が幅 50mm、高さ 50mm）を 4 個並べている。図 6.3-8 に供試体の設置状況と中性子イメージングによる撮影結果の一例を示す。

表 6.3-6　中性子イメージングの実施ケース一覧

実験シリーズ	供試土	供試体の均一度および間隙比（締固め密度）の組合せ	通水撮像方法	数量（供試体）
A：実験手法の最適化（母材：理想球体および砂材料）	理想球体（2ケース）、珪砂(1ケース)	緩詰め、均一、供試体厚さ3種類	縦置き	3
B：供試体間隙構造と浸透状況の関係把握（母材：理想球体）	理想球体＋微粉粒子（珪砂粉等）	緩詰め（dry、wetの1ケース）、均一	軽水飽和⇒重水飽和（1/3,2/3,3/3）	1
C：供試体間隙構造と浸透状況の関係把握（母材：砂材料）	珪砂＋微粉粒子（珪砂粉等）	緩詰め（dry、wetの2ケース）、均一		1
D：ベントナイト混合土に対するチャレンジ	理想球体＋クニゲルV1 珪砂＋クニゲルV1	緩詰め、均一		2

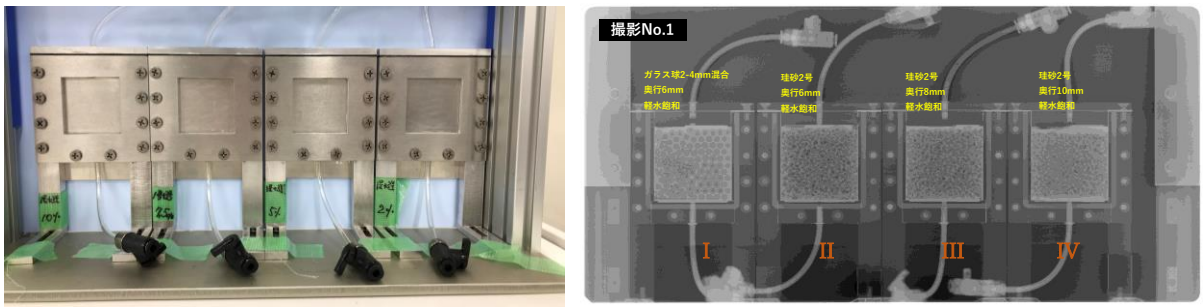


図 6.3-8　供試体設置状況と中性子イメージング結果の一例

2)　供試体に用いる材料の選定と供試体箱の仕様設定

前年度実施した中性子イメージングでは、締固め～透水試験（実験 A）における試料・条件を再現した供試体に対して中性子イメージングを実施したが、試料の粒径や供試体の奥行きの影響により供試体内の間隙を流れる水を中性子イメージングで捉えることが困難であった、そこで本年度は、実験シリーズ A にて実験手法の最適化を目的として、試料の粒径と供試体の奥行きによる中性子イメージングの可視化状況について検討した。図 6.3-9 に使用したアルミ製供試体箱の概略図を示す。基本的な寸法や形には前年度とほぼ同じであるが、前年度の結果を踏まえて止水処理等を加えている。また、図 6.3-10 に示すように、アルミ製の供試体箱の前面板の形状を変えることで、奥行きを 6mm、8mm、10mm の 3 段階に変えることができるように工夫した。図 6.3-11 に、実際に使用したアルミ製供試体箱の写真を示す。また、図 6.3-12 はで使用したガラス球（2mm、4mm）と珪砂 2 号である。これらの 3 種類の材料に対して、奥行きが異なる場合の可視化状況について比較を行った。

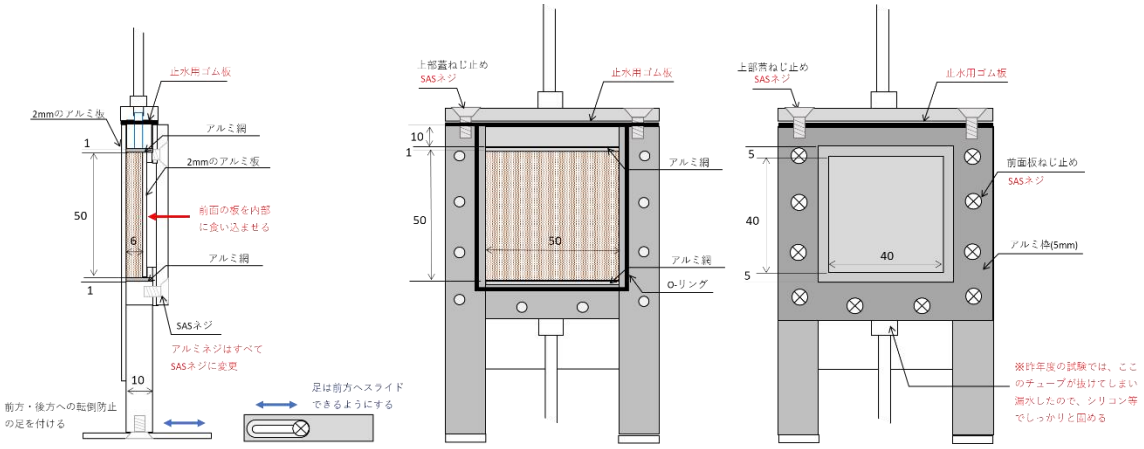


図 6.3-9　アルミ製供試体箱の概略形状図

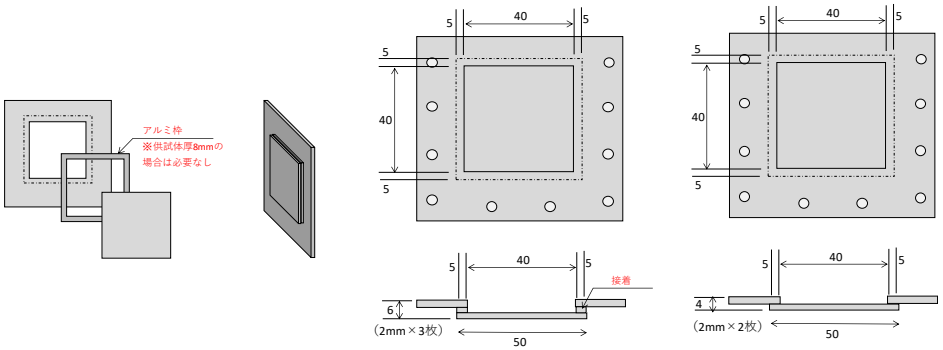


図 6.3-10　アルミ製供試体箱前面板の形状図

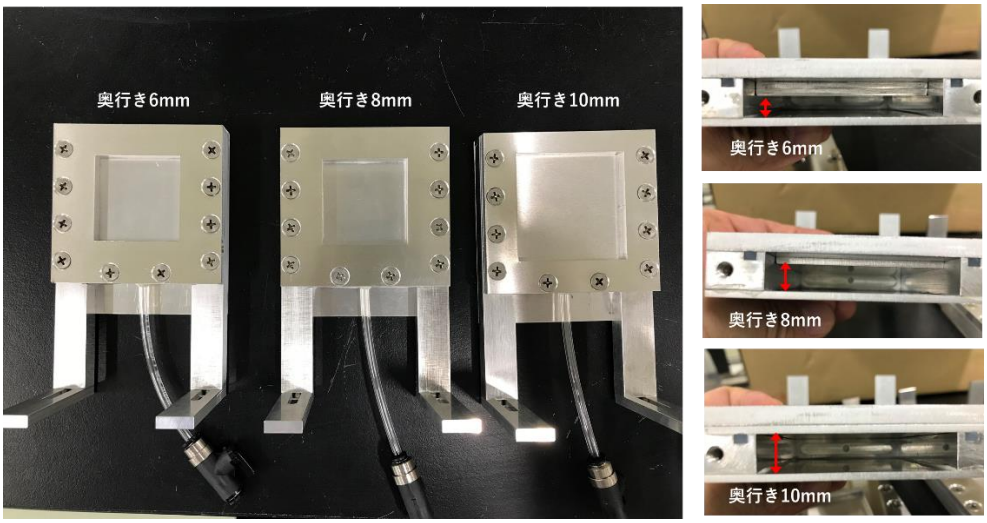


図 6.3-11　アルミ製供試体箱の写真（奥行き 6mm、8mm、10mm）

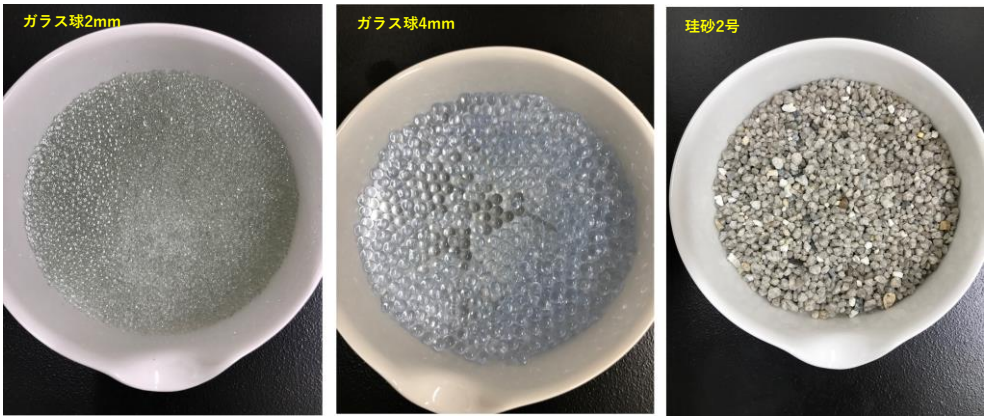


図 6.3-12　使用したガラス球（2mm、4mm）と珪砂 2 号

図 6.3-13 は、ガラス球 4mm における奥行き 6mm と 8mm の中性子イメージング結果である。これらの画像は供試体箱にガラス球を詰め、軽水にて飽和させた後に撮影をしている。この画像を比較すると、奥行き 8mm ではガラス球同士が奥行方向に重なるためガラス球の輪郭・形状がぼやけているのに対し、奥行き 6mm ではガラス球の輪郭・形状が明確に見て取れ、間隙の状況も目視で確認することができる。図 6.3-14 は、ガラス球 2mm における奥行き 6mm と 8mm の中性子イメージング結果である。ガラス球 2mm の場合でも、奥行き 6mm の方がガラス球が明確になっている。但し、粒径が 2mm であるため奥行き方向にガラス球が重なり、輪郭や形状は明瞭ではない。図 6.3-15 は、珪砂 2 号における奥行き 6mm と 8mm、10mm の中性子イメージング結果である。ガラス球と同様に、奥行き 6mm の方が粒子がより明確になっている。このため、実験シリーズ B～D では供試体の奥行きは 6mm に設定した。なお、珪砂 2 号の最大粒径は 3mm 程度であるためは、奥行き 6mm では奥行き方向に粒子同士が重なっている。より明瞭な粒子間隙画像を得るために、実験シリーズ B～D では最大粒径がさらに大きい珪砂 1 号を中心に使用す

ることとした。実験シリーズ B～D の試験結果及び評価・考察については、次節 6.3.2 にて詳細に述べる。

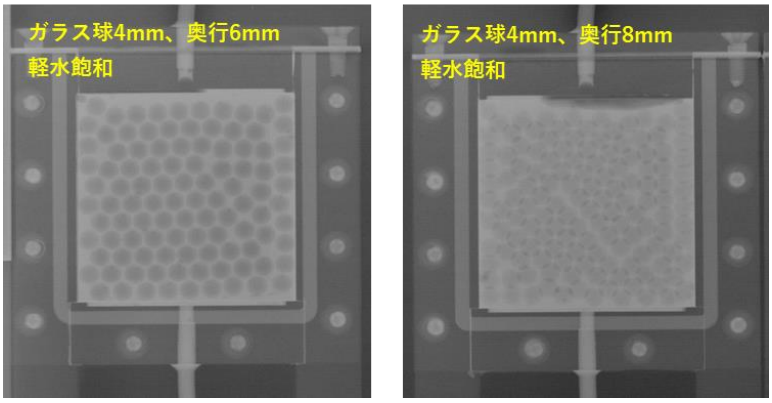


図 6.3-13　ガラス球 4mm の中性子イメージング試験結果（奥行 6mm、8mm）

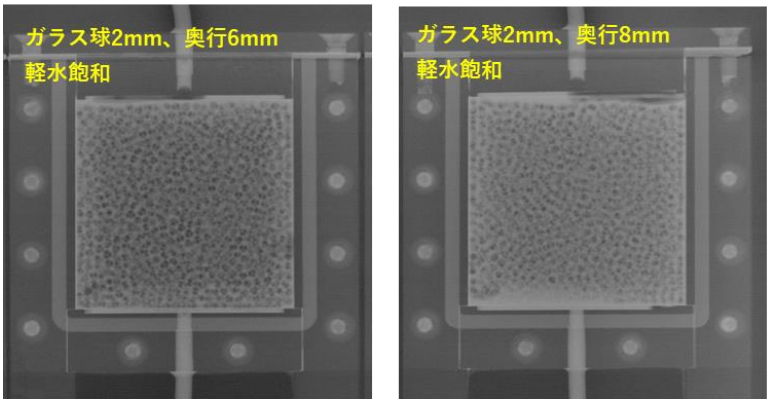


図 6.3-14　ガラス球 2mm の中性子イメージング試験結果（奥行 6mm、8mm）

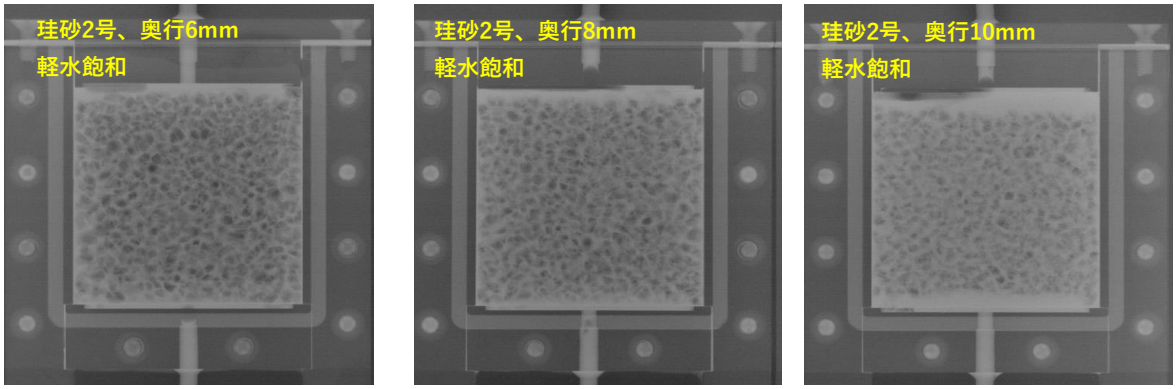


図 6.3-15　珪砂 2 号の中性子イメージング試験結果（奥行 6mm、8mm、10mm）

6.3.2 ベントナイト系材料の透水特性メカニズムに関する評価・検討

以下では実験 B（λk、εk 実験）、実験 C（構造観察）、実験 D（中性子イメージング実験）の順に実験結果の評価・検討結果を報告する。最後に、これらを受けて，現時点での技術的課題と今後の方策をとりまとめた。

(1) 室内締固め～透水試験結果を用いた透水特性メカニズムの評価

1) 実験 B を実施した意図

図 6.3-16 に、前年度実施した実験 A（1Ec 締固め－透水試験）の結果を再掲した。実験 A では 4 種類の供試土（砂,砂＋非塑性粉,砂＋ベントナイト 10%,砂＋ベントナイト 30%：図中に粒度特性を再掲）を用いて室内 1Ec 締固め－透水試験を実施している（ベントナイト混合土は JGS0312 の低透水性土の長期透水試験をそれ以外は JISA1218 に準拠）。これらの実験により本研究の第一検討課題である $k_{min.}$発現現象をチェックした結果、4 供試土全てで最適含水比のやや湿潤側（＋2%付近）での $k_{min.}$の発現を確認している。ただし図中に示したとおり、透水係数の最小値 $k_{min.}$と最適含水比における $k_{opt.}$には大きな違いは見られず、また、締固め～透水試験は通常、締固め含水比を 6 水準程度にとるため、最適含水比と隣の湿潤側含水比の間を密に刻んだデータを取得しているわけでもないことから、正確には「最適含水比の乾燥側ではなく、その付近若しくはやや湿潤側で最小値を取る」といった表現が適切かと考える。なお、乾燥側では締固め含水比（飽和度）が小さいほど透水係数が大となる傾向は明瞭に表れている。図中には透水係数の最大値（最も乾燥側）と最小値（最適若しくはその湿潤側隣の値）の比率を整理しているが、透水係数の最大/最小値の比率は 5 以下となっており、今回の 4 供試土では透水係数の最大最小のレンジはさほど大きくはない（この結果を受けて、今後の供試土を適切に選定していく必要があると考えている。その方向性については(4)現時点での技術的課題と今後の方策にて詳述する）。

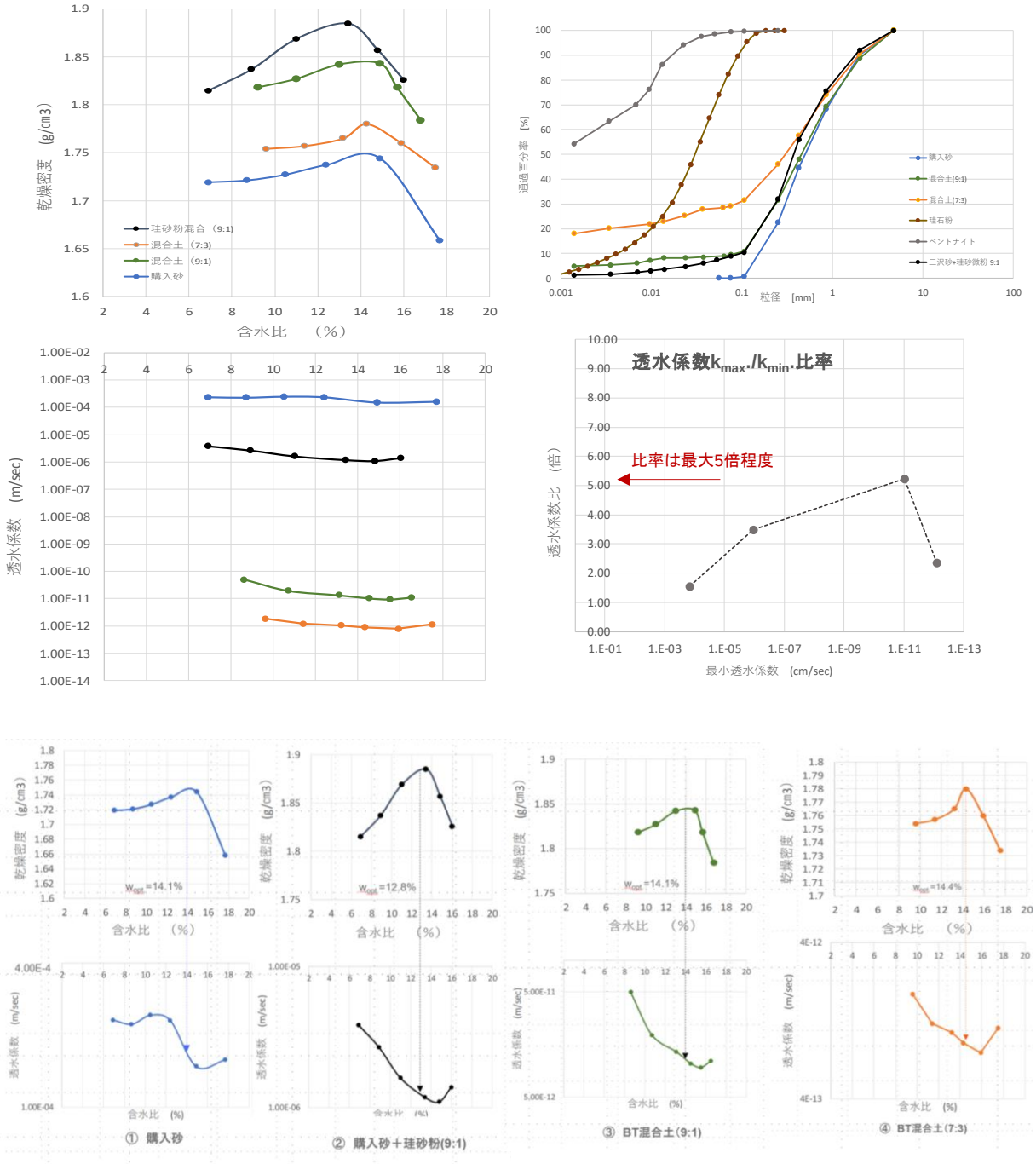


図 6.3-16　1Ec 締固め～透水試験結果（実験 A）の再掲（令和 2 年度実施）

これら実験 A の結果を受けて実施した実験 B の結果報告の前に、実験 B を実施した意図（本研究の第一検討課題である k_{min}.発現現象をいかにして説明するか）について簡単に記載する。

近年、ロックフィルダムの遮水材（コア材）の現場締固め管理を起点として、飽和度管理手法という新しい土の締固め管理手法が提唱され、実現場に導入されつつある（龍岡[1]）。図 6.3-17 にその考え方と上記課題への適用の考え方を取りまとめた。飽和度管理の考え方に従って最小透

水係数 $k_{min.}$発現現象を説明すると、次のようになる。① 締固めた土の透水係数（遮水性）は締固め時の乾燥密度 ρ_d と締固め時の飽和度 Sr の両者の組合せで決まる（要因１と要因２） ② 締固めた時の乾燥密度 ρ_d 及び締固め時飽和度 Sr が大きいほど透水係数は小さくなり遮水性は高まる ③ 最適含水比の点 A に比べてやや湿潤側の点 C は締固め密度は低いが締固め時飽和度は点 A よりも大となる ④ 締固め時飽和度 Sr の影響度が乾燥密度 ρ_d の影響度よりも大（$\varepsilon_k > \lambda_k$）であれば、点 A でなく点 C で透水係数 k が最小値となる。

一般的な土質材料に対するこの既往の知見が、ベントナイト混合土にどの程度適用できるのか、そしてその結果を用いることで、上記のロジックに従って $k_{min.}$発現現象を定量的にも再現できるのか、これらを検証するために実施したのが、今年度の実験 B である。

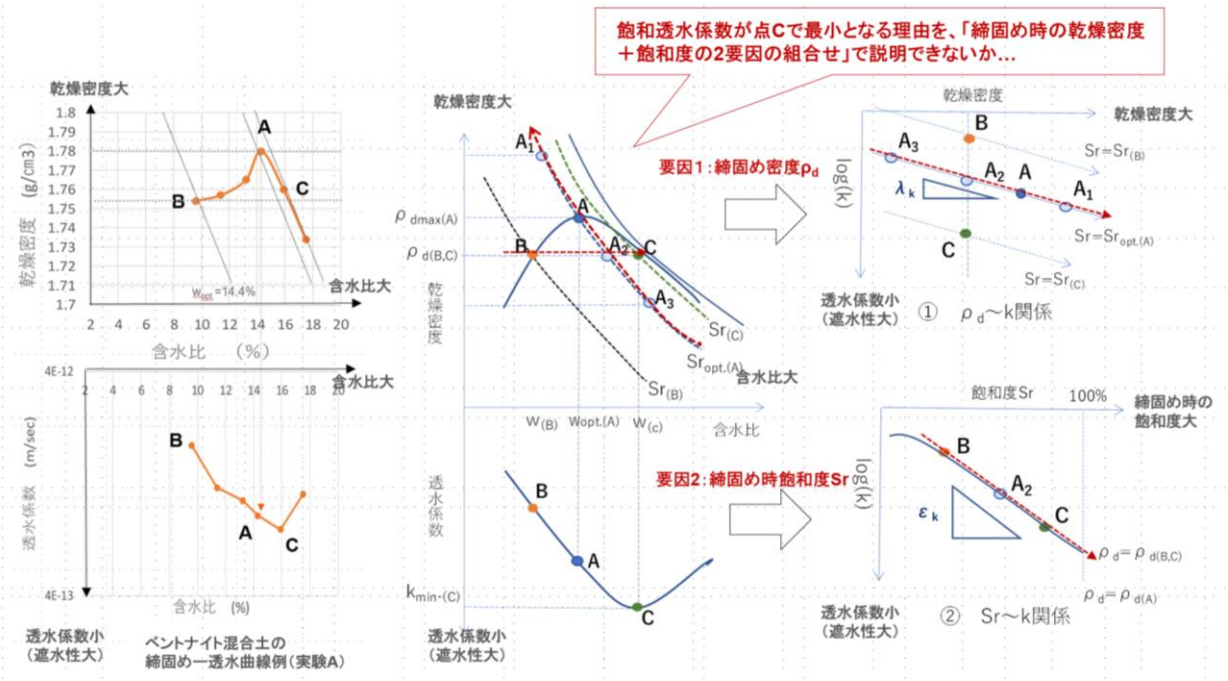


図 6.3-17 最小透水係数 $k_{min.}$発現メカニズム説明のための仮説（実験 B を実施した理由）

2) 実験結果の整理と考察

本年度実施した実験 B の結果を報告する前に、飽和度管理に関する既往の知見（=想定している実験結果の傾向）を定性的に示しておく。図 6.3-18 は、いわば λ_k・ε_k 実験（実験 B）の想定結果を模式的に示したものである。一般土質材料における既往の知見は以下のように整理される。

① 締固め後乾燥密度 ρ_d と透水係数 k の関係：λ_k

同じ締固め時飽和度 S_r であれば締固め後の乾燥密度 ρ_d が大きいほど透水係数 k は小さい（遮水性が高まる）。乾燥密度 ρ_d と透水係数 logk は片対数で概ね直線的な関係を示し、そのラインは締固め時飽和度 S_r が大きいほど下方に移動する。

② 締固め時飽和度 S_r と透水係数 k の関係：ε_k

同じ締固め後乾燥密度 ρ_d であれば締固め時飽和度 S_r が大きいほど透水係数 k は小さい（遮水性が高まる）。締固め時飽和度 S_r と透水係数 logk は片対数で直線的な関係を示し、そのラインは乾燥密度 ρ_d が大きいほど下方に移動する。ただし、ε_k の場合は締固め時飽和度＜50%まではほぼ一定（横ばい）の傾向があり、それ以上の飽和度領域で線形性が生じ始めることが報告されている。

今回の購入砂、購入砂＋10%珪砂粉、購入砂＋10%ベントナイトの 3 供試土（30%ベントナイト混合土は 2022 年度に JGS0312 を実施予定）の実験結果がこれら既往の知見と整合するのか否か。以降、実験結果を示す。

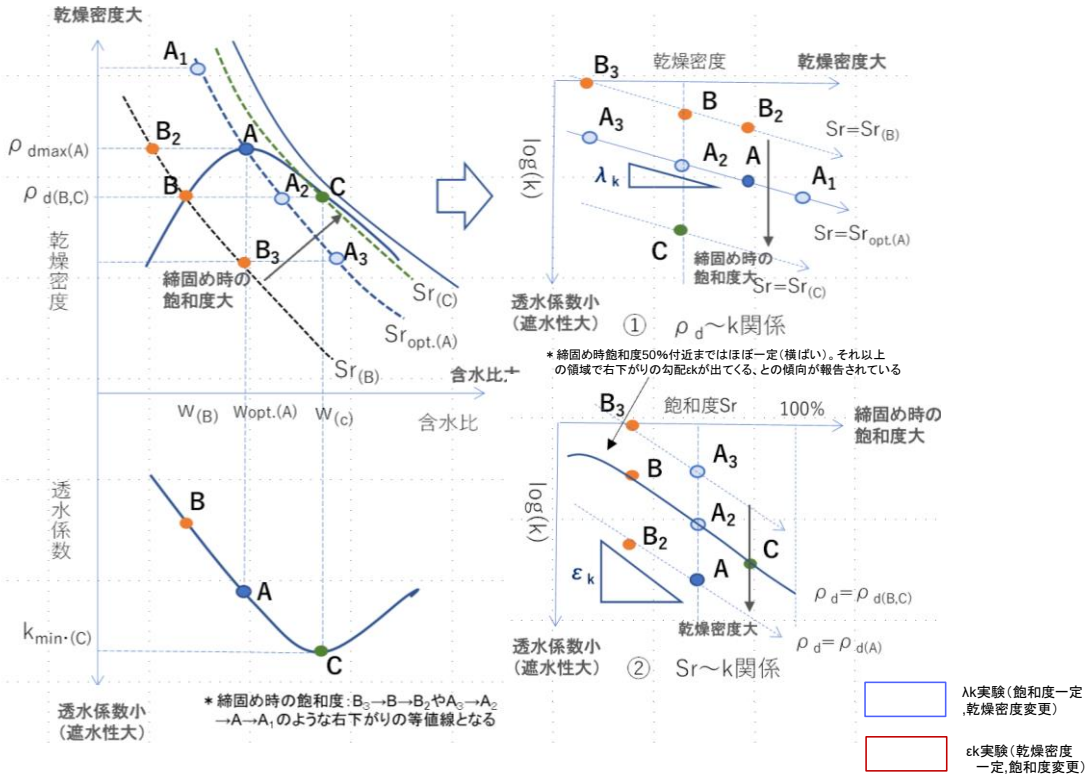


図 6.3-18 λ_k・ε_k 実験（実験 B）の想定結果

実験結果の前に、各供試土の供試体作製条件（締固め密度と含水比（飽和度））を図 6.3-19 に示す。実験は、 ①λ_k 実験（青で囲った一連のプロット）：締固め時飽和度一定で締固め密度を変える、②ε_k 実験（赤で囲った一連のプロット）：締固め密度一定で締固め時飽和度を変える、の 2 つのパターンで供試体を作製し、透水試験に供した。購入砂、購入砂＋珪砂粉(10%) 購入砂＋ベントナイト(10%)の 3 供試土について、前年度実施の実験 A（1Ec 締固め曲線）の結果に加え、締固めエネルギーの上限値として 4.5Ec、下限値として 0.1Ec（購入砂と珪砂粉混合は 0.2Ec）の室内締固め曲線を実際に求めて供試体の締固め条件の上下限範囲を決定した。なお、購入砂及び＋珪

砂粉とベントナイト混合土の下限エネルギーが 0.1Ec と 0.2Ec で異なる理由は、JISA1218 と JGS0312 で用いる供試体の寸法が規約により異なるためであり、特段の理由はない。同じ締固め用ランマ径（5 ㎝）に対し JGS0312（ベントナイト混合土）はモールド径 5 ㎝、そのほかの 2 材料は 10 ㎝であるため、後者では 1 面を締固めるのにランマを複数回に分けて突く必要があり、前者はその必要がないことによる。

今年度は図中に青丸（添え字数字付き）で示した点の締固め密度と含水比（これに相当する飽和度。等飽和度（コンター）は、青の囲みで記したように、乾燥密度と含水比からなる締固め平面上では右下がりの曲線群として表される。以降では、図中の青丸と昨年実施した赤丸（1Ec）のデータを用いて λk と εk の整理を試みる。なお、ベントナイト 30%混合土の実験は次年度に予定しているが、図中に 1Ec 締固めデータの赤枠の中の①、②、③、⑤の 4 点は締固め後の乾燥密度がかなり近い値であることから、これらを使って εk の事前検討を試みた。

これらの締固め供試体を飽和した後、透水試験（JISA1218、JGS0312）に供した。その結果を、前述したように、

① 横軸を締固め後乾燥密度、縦軸を飽和透水係数 k（方対数）に取り、同じ締固め時飽和度毎にプロット：λk 実験

② 横軸を締固め時飽和度、縦軸を飽和透水係数 k（方対数）に取り、同じ締固め後乾燥密度毎にプロット：εk 実験

の 2 つの図に整理した。

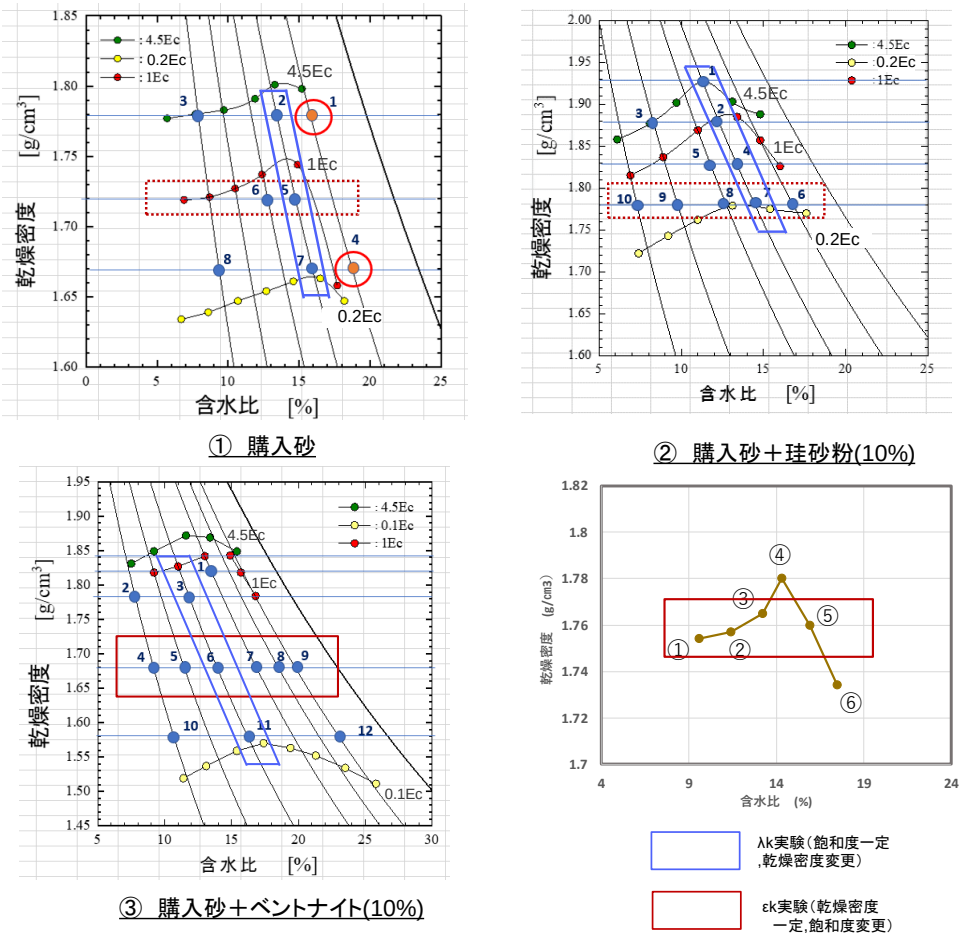


図 6.3-19　λｋ・εｋ実験の供試体条件

図 6.3-20 にはまず、購入砂及び購入砂＋珪砂粉 10%供試土の結果を示す。単粒の購入砂単体の実験結果からは、①片対数上の直線関係（λ_k と ε_k）の傾向、②各ラインの上下変化（2 要因の影響の仕方）も前述の想定どおりであること、③εk は確かに Sr=50%の前後で勾配が異なる傾向が見えること、等が確認できる。ただし、図中に併記した令和 2 年度実施の 1Ec 締固め～透水試験結果と今回のλk、εk 実験結果が整合せず、同じ締固め密度と含水比の組合せにおいて透水係数の乖離が見られる。これは、前年度は変水位法、今年度は定水位法で透水試験を実施しており、その違いの影響と考えられる（実験 B と同一条件での追試を予定）。購入砂は透水係数 10^{-4}m/sec といったかなり高透水レンジでの締固め含水比の違いの影響を追跡していることになるが、このような中では試験法の違いが相対的に透水試験結果を大きく変えてしまう可能性が考えられる。一方購入砂＋珪砂粉 10%のケースでは、①λ_k については片対数上で勾配一定ではなく、低密度領域の挙動が異なること、②ε_k についても片対数上の線形関係は確認できるが、飽和度 50%前後での変化は不鮮明であること、③各ラインの上下変化（2 要因の影響の仕方）は想定どおりであり、締固め時飽和度が大きいほど、また締固め時乾燥密度が大きいほど飽和透水係数が小さく遮水性が向上する、これらの傾向は一貫して生じている。このように、単粒の購入砂や非塑性土粉混合

材でも λk と εk の発現傾向と 2 つの影響要因の効き方が従来の土質材料と本質的には同じであることを確認できた。

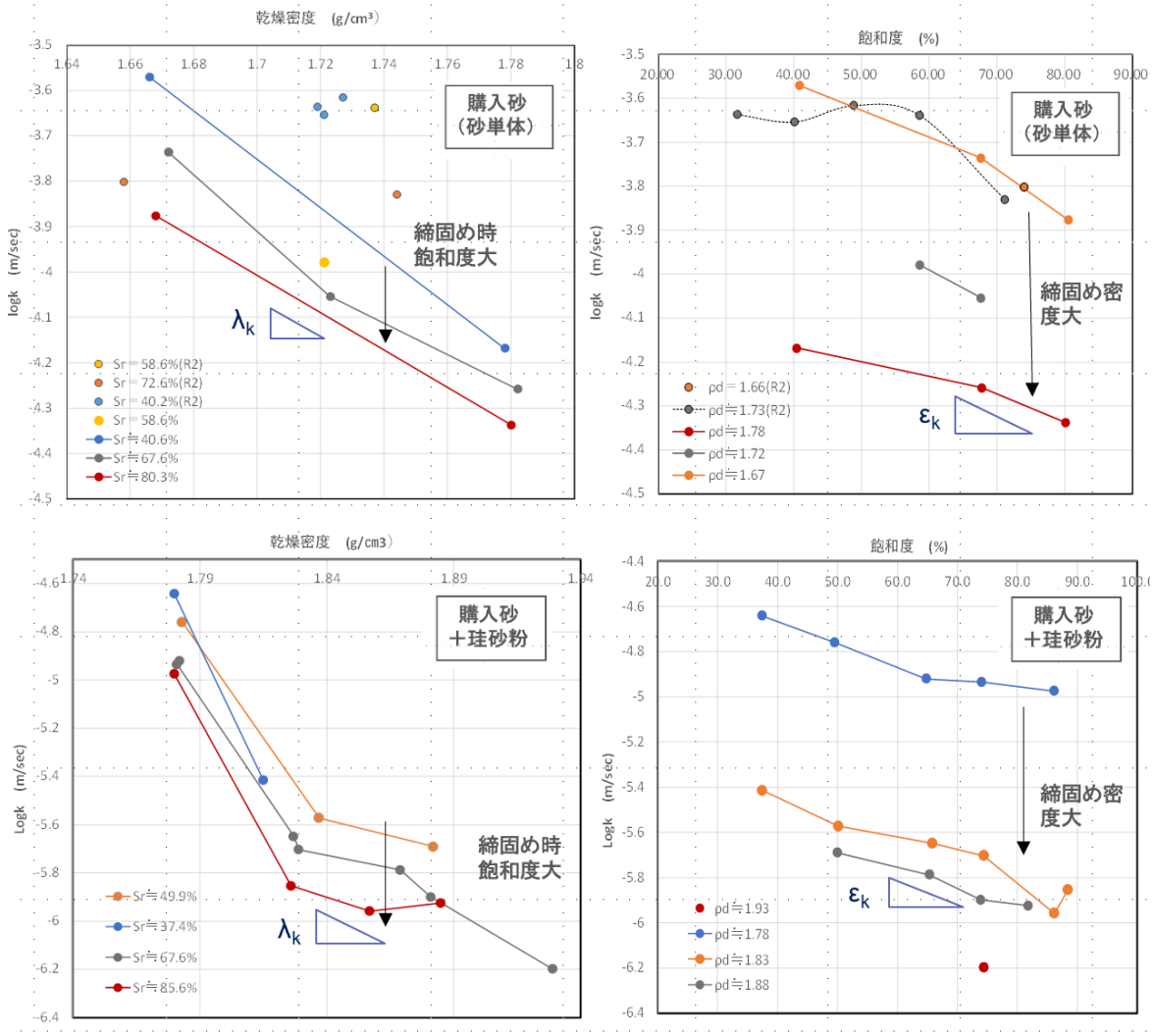


図 6.3-20　λk・εk 実験（実験 B）の結果（購入砂及び購入砂＋珪砂粉）

一方、上記のように、λk や εk の線形性や曲がり点の飽和度等については、土質材料に対する既往結果と異なる傾向も散見される結果となった。前年度の龍岡教授ヒアリング時には「λk や εk が必ずしも同じ傾きを持った直線群にはならない可能性がある。直線でモデル化すると透水係数評価式を作りやすいという実務上の背景もあり、実際はどのような形になるのかには興味がある。また εk が折れ曲がりを生ずる点についても、既往データでは結果的には飽和度 50%付近となっているが実際は変化する可能性がある」とのコメントを頂いており、引き続き供試土の土質特性を変えた実験データを蓄積したうえで、再度龍岡教授の指導を受けたいと考えている。

次に、図 6.3-21 にベントナイト混合土(10%)の実験結果を示す。この図より、ベントナイト混合土においても、①片対数上の直線関係（λk と εk）の傾向、② λk と εk のいずれも一定勾配では

なく低密度領域で傾きが大となる傾向、③各ラインの上下変化（2 要因の影響の仕方）は想定どおりに発現、④ベントナイト混合土の λ_k は一定勾配ではなく、低密度領域では勾配が大となり、珪砂粉混合土と類似の傾向、⑤ベントナイト混合土の ε_k は Sr=50%の前後で勾配が変化する既往実験に類似した傾向、となった。特に ε_k の勾配が低密度領域で大となる傾向はベントナイト混合土において初めて確認された（低乾燥密度×低含水比の組合せ条件下で、その影響が顕著となる）。また、図 6.3-22 からは、⑥ベントナイト 30%混合土の ε_k は同一締固め密度の 10%混合土よりもやや勾配が緩いこと、が見て取れる。なお、この図 6.3-22 は前述したように前年度実施の 1Ec 締固め～透水実験 A の結果(締固め密度が近いデータを便宜的に採用)を用いて描いたものであり、次年度に本格的にデータを取得する予定である。このように、ベントナイト混合土でも単粒砂や非塑性土混合材と類似した λ_k と ε_k の傾向を確認できたが、低密度領域では勾配が変化するなど、一部異なる傾向も見られている。

図 6.3-23 は、ここまでの 3 供試土の実験結果を併記し、前年度策定した「段階的解明実験」の実施状況を概観したものである。図より、①購入砂（単粒）⇒非塑性微粉混合⇒ベントナイト混合 10%⇒ベントナイト混合 30%（暫定）の順に λ_k と ε_k 変化を追跡、②いずれの供試土も右下がりの λ_k（乾燥密度～logk）と ε_k（締固め時飽和度～logk)ラインを確認（従来の知見に整合）、③締固め時飽和度が大きいほど、また締固め密度が大きいほど λ_k と ε_k ラインが下方に移動（従来の知見に整合）、④砂単粒母材からスタートして非塑性微粉混合⇒ベントナイト混合⇒混合率増加の順に両ラインが下方に大きく移動。材料の混入が遮水性を変化させる過程を追跡、⑤ λ_k ラインと ε_k ラインの形状については材料毎に若干異なる傾向も散見される、といった傾向を得ており、次年度以降に採用する材料パラメータ（均等係数など）について検討を行っていく。

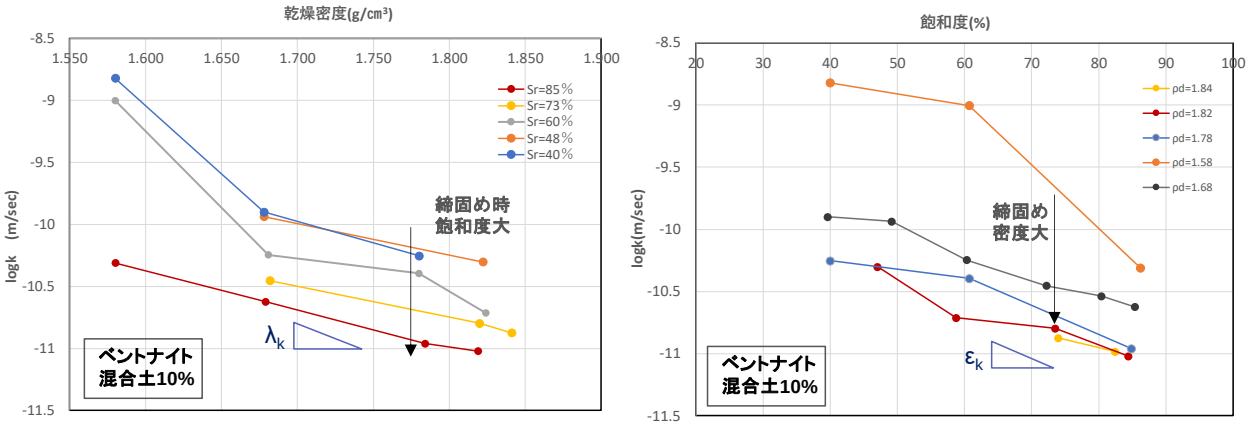


図 6.3-21　λ_k・ε_k実験（実験 B）の結果（ベントナイト混合土）

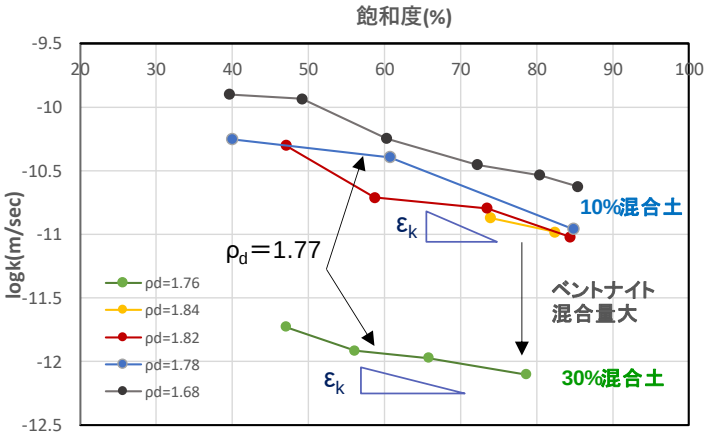


図 6.3-22　ベントナイト混合量の違いがε_kに及ぼす影響

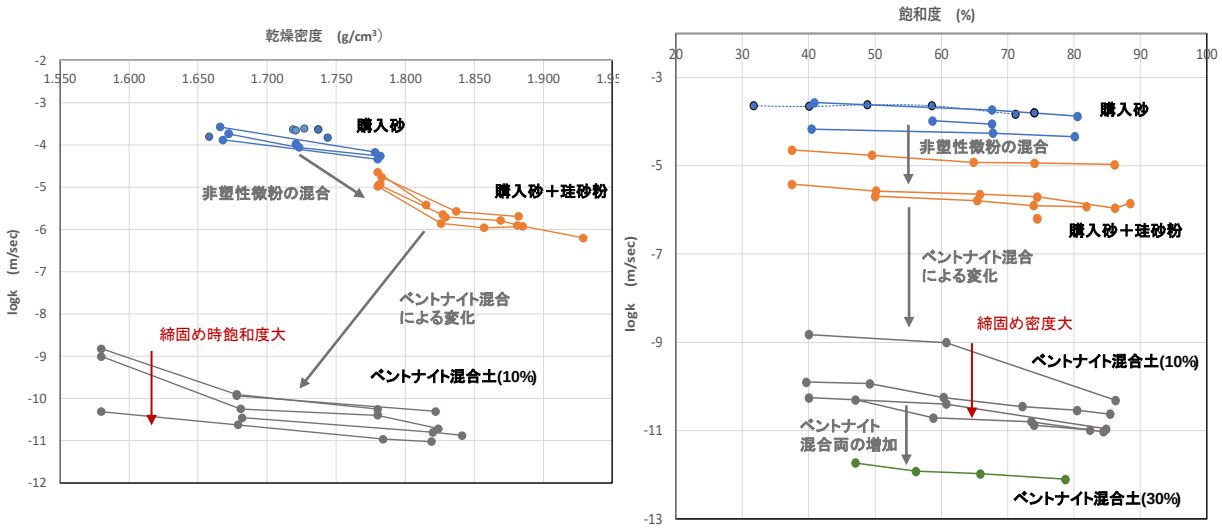


図 6.3-23　λ_k・ε_k実験（実験 B）の結果総括（4 供試土重ね書き）

3)　重回帰分析を用いた定量評価の試み

2)で示したλ_k、ε_k実験の整理結果から、ベントナイト混合土を含めた締固め土の透水係数を、飽和度管理で採用している式(1)の形で表現可能であることが示された。

$$\log k=\lambda\times\rho_d+\varepsilon\times S_r+\text{切片}\quad\cdots(1)$$

一方、前述したようにλ_k・ε_kは必ずしも一定勾配を取る訳ではなく、乾燥密度や含水比の領域毎に異なる傾向も見られたこと等から、これを一定と前提する既往式での表現は困難（精度も下がる）となる。そこで、既往の片対数線形モデルではなく、透水係数（log）を目的変数、締固め後の乾燥密度ρ_dと締固め時飽和度 Sr を説明変数とする重回帰分析を実施し、遮水性の影響要因や発現傾向の確認及びその再現を試みることとした（λ_k やε_k は片対数での線形関係を前提とした係数であるため、以下では、これと区別するためにサフィックスの k を削除している）。

表 6.3-7 に、3 種類の供試土に対する重回帰分析結果を示す。重相関 R は高く、締固め後乾燥密度と締固め時飽和度の 2 因子により遮水性を評価することができる。なお、3 供試土毎の重回帰分析結果も表中に付記したが、重相関 R のみならず、有意 F、t 値、P-値の全てにおいて式 (1) の形や 2 つの影響因子の有意性が確認された。図 6.3-24 は、得られた回帰式による透水係数(log)の値と実測値を比較した結果である。なお、購入砂に関しては前述したように前年度と今年度のデータに乖離が見られたため、重回帰分析は今年度のデータのみを用いて実施した。

表 6.3-7　重回帰分析結果一覧

購入砂（砂単体）

回帰統計	
重相関 R	0.989483
重決定 R2	0.979077
補正 R2	0.970708
標準誤差	0.044913
観測数	8

分散分析表

	自由度	変動	分散	測された分散	有意 F
回帰	2	0.471972	0.235986	116.9876	6.33E-05
残差	5	0.010086	0.002017		
合計	7	0.482058			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
切片	4.499469	0.570605	7.885429	0.000527	3.032681	5.966257	3.032681	5.966257
X 値 1	-4.72863	0.329097	-14.3685	2.94E-05	-5.5746	-3.88265	-5.5746	-3.88265
X 値 2	-0.54955	0.109396	-5.02347	0.004023	-0.83076	-0.26834	-0.83076	-0.26834

購入砂＋珪砂粉

回帰統計	
重相関 R	0.930184
重決定 R2	0.865242
補正 R2	0.84451
標準誤差	0.192394
観測数	16

分散分析表

	自由度	変動	分散	測された分散	有意 F
回帰	2	3.089646	1.544823	41.73459	2.2E-06
残差	13	0.4812	0.037015		
合計	15	3.570846			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
切片	11.1797	1.984071	5.634724	8.14E-05	6.893369	15.46602	6.893369	15.46602
X 値 1	-8.83796	1.103127	-8.01173	2.2E-06	-11.2211	-6.4548	-11.2211	-6.4548
X 値 2	-0.70083	0.304482	-2.30171	0.038537	-1.35862	-0.04303	-1.35862	-0.04303

ベントナイト混合土10%

回帰統計	
重相関 R	0.930892
重決定 R2	0.866561
補正 R2	0.848769
標準誤差	0.240346
観測数	18

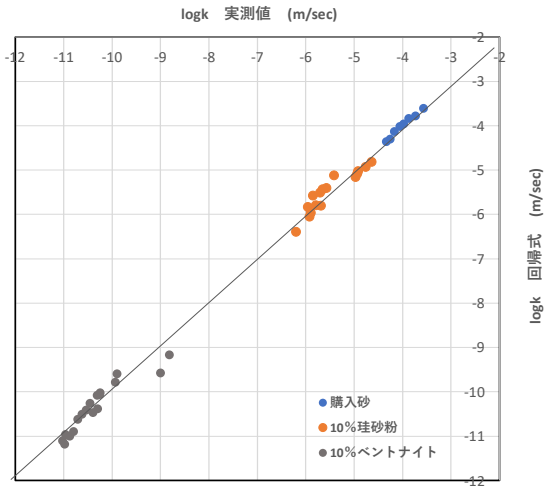
分散分析表

	自由度	変動	分散	測された分散	有意 F
回帰	2	5.627055	2.813527	48.70527	2.75E-07
残差	15	0.866496	0.057766		
合計	17	6.493551			

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%	下限 95.0%	上限 95.0%
切片	-1.34716	1.078433	-1.24918	0.230742	-3.64578	0.951468	-3.64578	0.951468
X 値 1	-4.45443	0.629728	-7.07358	3.79E-06	-5.79667	-3.1122	-5.79667	-3.1122
X 値 2	-1.96618	0.346195	-5.6794	4.37E-05	-2.70408	-1.22828	-2.70408	-1.22828

材料	係数 λ	係数 ε	切片	重相関R
購入砂	-4.729	-0.550	4.499	0.989
購入砂＋珪砂粉10%	-8.838	-0.701	11.180	0.930
ベントナイト混合土(10%)	-4.454	-1.966	-1.347	0.931

$$\log k = \lambda \times \rho_d + \varepsilon \times S_r + 切片$$



重回帰分析による評価値と実測値の比較

図 6.3-24　重回帰分析による評価値と実測値の比較

本結果を用いて、前年度実施した実験 A（1Ec 締固め～透水試験結果）の再現と最小透水係数発現現象の再現を 3 供試土に対して試みた。締固め曲線は実験的に得られているので、その締固め密度と締固め時飽和度の実測値を重回帰式に代入して透水係数の評価値を算定し、これを実測

値と比較する方法を採った。なお、透水係数の実測値（ベントナイト混合土ではJGS0312）は1Ec締固め土のみ取得されているが、前述したように、実験Bの供試体作製条件を決めるために、別途4.5Ecや0.1（0.2）Ecの締固め試験を実施している。これら締固めエネルギーを変えた際の実測値を重回帰式に入力すると、その締固めエネルギーにおける（密詰め時や緩詰め時の）各々の透水係数の値を推定することができる。図中にはその推定値も併記した。

図6.3-25にはまず、購入砂及び購入砂＋珪砂粉の場合の比較結果を示す。前述した手順に従って、締固め～透水試験結果の図の上半分上に1EC、4.5Ec、0.1(0.2)Ec締固め曲線の実測値を、下半分には各々の含水比～透水係数カーブの推定値と1Ec締固め土の実測値を併記して示した。購入砂及び購入砂＋珪砂粉の結果を見ると、1Ec締固め供試体の透水係数（重回帰式による計算値）は締固め曲線の形を反転したそれに近く、実測値も同じ傾向を示す。重回帰分析結果を見ると、ε_k に相当する飽和度項の係数εは、購入砂⇒珪砂粉混合⇒ベントナイト混合の順にマイナス側に増加し、この材料順に締固め含水比や締固め時飽和度の影響が大となっている。締固めエネルギーを1Ecに限定し、かつ締固め含水比の水準がかなり離散的（JIS規格どおり6点程度）な実験Aの実測データのみからは、最適含水比のどの程度湿潤側で（あるいは最適含水比の極近傍なのか）最小透水係数が発現しているかの詳細な定量化が中々難しいことは先に述べたとおりである。実験Bの結果を使うと、締固め後含水比と締固め時飽和度の２つの因子の効き方の違いが定量化されるので、このように「どこで最小になるのか」をより詳細に吟味できる。さらに、図中には4.5Ecと0.2Ec締固め時の透水係数の予測値が併記されており、1Ec締固めに対して4.5Ec締固めでは遮水性が向上、0.2Ecでは相対的に低下する傾向が計算される。このように、締固めエネルギーの違いが透水係数に及ぼす影響を直接評価できると、後々の現場締固め時の評価に際して便利であるが、それだけでなく、締固めエネルギー＝締固め曲線の形状が変化すると、対応する含水比～透水係数関係が異なってくることが図よりよく分かる。1Ec 締固めの場合は最適含水比の極近傍で最小透水係数が発揮されるのに対して、例えば、購入砂の4.5Ecや＋珪砂粉の0.2Ecなどでは、最適含水比よりも湿潤側で含水比の増加に伴い透水係数が一方向に低下する（つまり、湿潤側で締固めるほど遮水性が増加する）傾向を示す。これは、締固め曲線（実測）が一般的な上に凸の形ではなく、湿潤側でもほぼ一定の形状となるため、購入砂や珪砂粉添加土であっても締固め時飽和度の増加に伴って透水係数が低下する現象として理解される。このように、与えられた命題である「最適含水比の湿潤側で最小透水係数が発現する（その右側では再び透水係数が反転して増加し始める）」という現象そのものが、λ_k、ε_k といった特性だけでなく、実は締固めエネルギーの大きさや締固め曲線の形状にも拠っていることを、本結果は裏付けている。なお、購入砂の1Ec締固め土の評価値と実測値に乖離が生じている。これは前述のλ_k、ε_kの整理結果でも述べたとおり、前年度と今年度の試験方法が異なるため結果が微妙に変化した可能性が考えられる。重回帰分析は今年度取得データのみで実施し、これと前年度の実測値とを比較しているため、この乖離は自明である。購入砂では10^{-4}m/secの高透水性領域の中で透水係数の大小関係を議論するため、試験法の違いの影響が大きく反映されたものと考えられる。購入砂は前年度と今年度で同一産地、同一業者より購入したが、購入ロットの違いによる粒度の微妙な変化の可能

性も想定された。図 6.3-26 には、確認のため実施した粒度試験結果を示すが、購入砂の粒度には変化はなく、その影響はないものと言える。

図 6.3-27 にはベントナイト混合土（10%）の場合の比較結果を示す。飽和度項の係数 ε が 3 材料の中で最も大きいため、重回帰式による透水係数の評価値もまた、最適含水比の若干湿潤側で最小値となる（ただし、その差は実測値と同じくあまり顕著ではないが)。この結果は、第一課題に対する一つの定量的な回答を与えるものである。一方、購入砂や珪砂粉添加の場合と同じく、ベントナイト混合土の場合も締固めエネルギー（締固め曲線の形状）の影響が表れてくる。4.5Ec や 0.1Ec 締固めの締固め曲線では、最適含水比より湿潤側での乾燥密度の低下が 1Ec に比べて顕著でなく、一方、締固め時飽和度の影響（ε 項）は大きいため、このケースもまた、湿潤側に向かうほど、透水係数が反転することなく低下する。このように、ベントナイト混合土でも締固めエネルギー（締固め曲線）が異なる場合、最小透水係数の発現の仕方自体が変化する可能性が十分にある。最後の図 6.3-28 には工藤ら「4 によるベントナイト混合土の室内締固め～透水試験結果を示しているが、確かにベントナイトの混合量と締固め度（赤が D 値 95、青が 100）の組合せにより、透水係数そのものだけではなく、最小透水係数の発現位置や含水比～透水係数関係の形が微妙に変化していることが見て取れる。本研究においても、今後、このような締固めエネルギーの視点も導入し、第一課題（最小透水係数が最適含水比のやや湿潤側で生ずる、という仮説）そのものを含めた検討を進めていきたい。

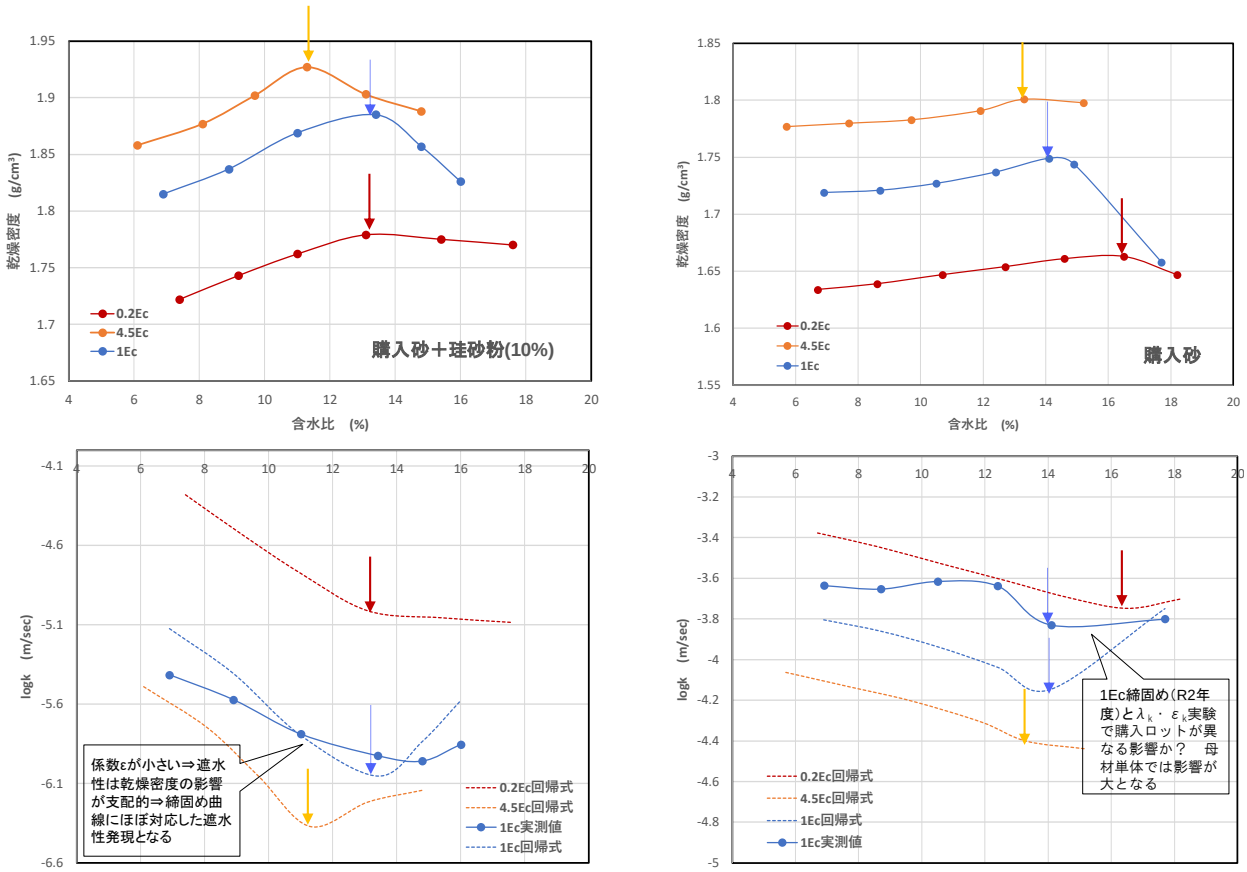


図 6.3-25　λk・εk実験結果による kmin.発現現象の再現（購入砂、珪砂粉混合材）

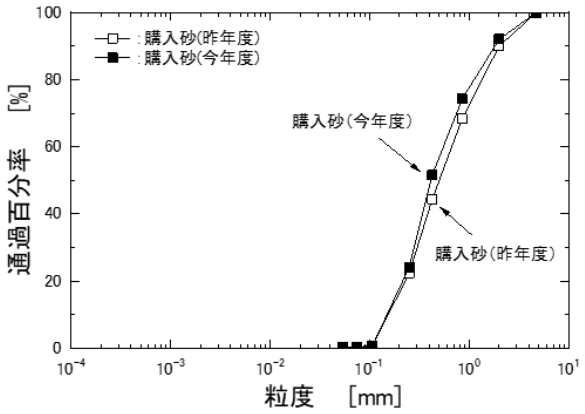


図 6.3-26　購入砂の粒度比較（令和 2 年度及び令和 3 年度購入）

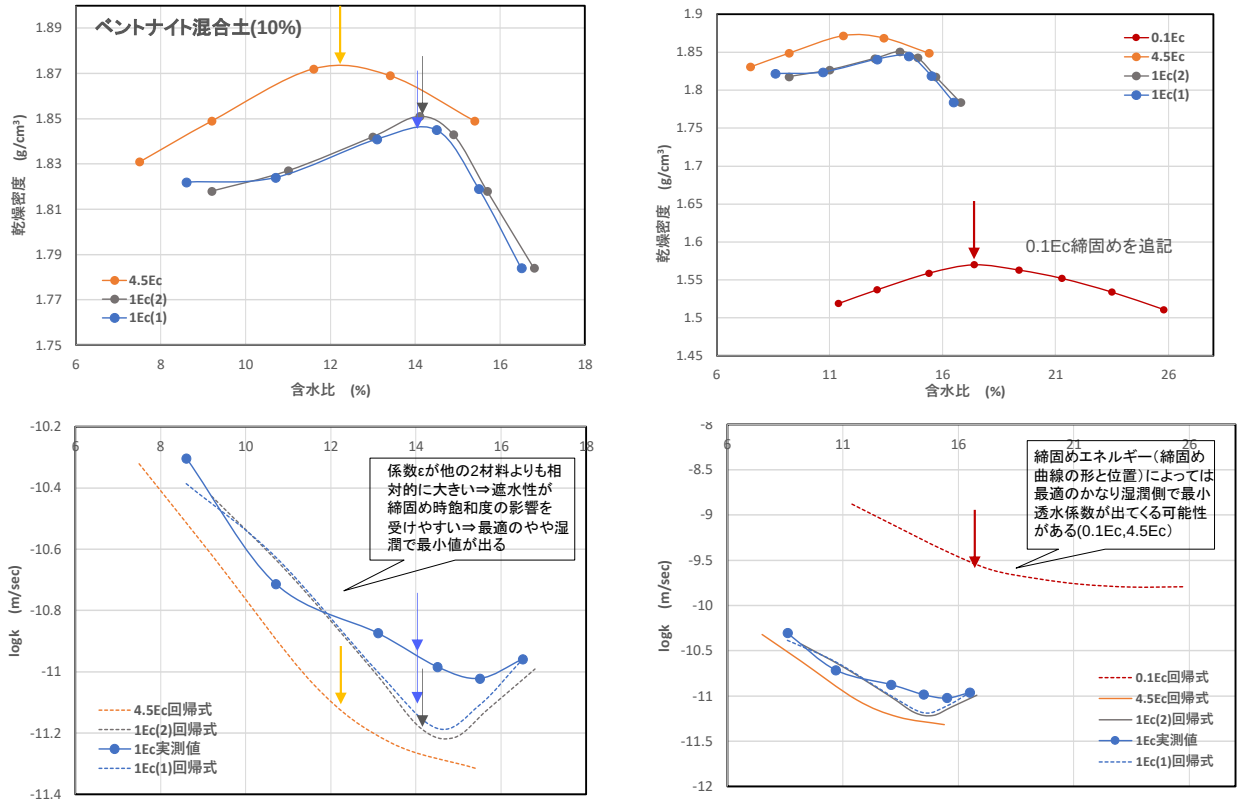


図 6.3-27　λ_k・ε_k実験（実験 B）結果による k_{min}.発現現象の再現（ベントナイト混合土）

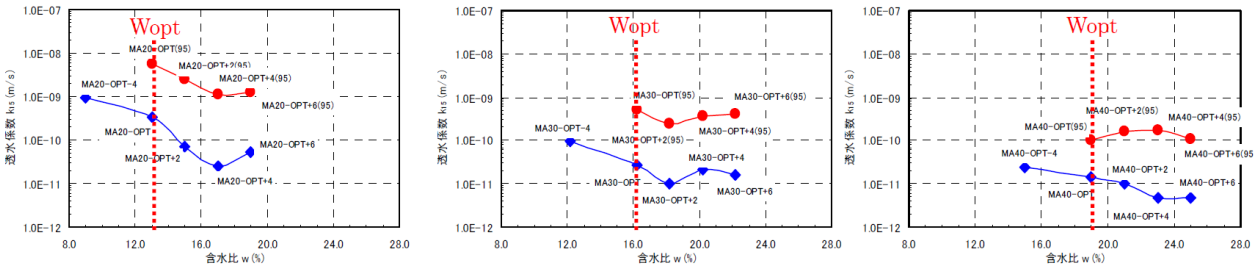


図-1　MA20 シリーズ　　図-2　MA30 シリーズ　　図-3　MA40 シリーズ

図 6.3-28　ベントナイト混合率と締固め度を変えた実験事例（工藤ら）

(2) 構造観察結果に関する考察

実験 B（λk、εk）の結果に対する重回帰分析結果を用いて、ベントナイト混合土（10%）における最小透水係数発現の機構とその要因を概ね説明することができた。しかし、これはあくまで「結果的にそうなった」というものであって「何故」を説明していない。締固め時乾燥密度と透水係数の関係を示す λk については、「透水係数とは、水が浸透可能な土の間隙量（間隙比）に対応する指標である」ことを考えれば自明ともいえるが、締固め時飽和度の違いが飽和透水係数に及ぼす影響については、「締固め時の乾燥密度＝間隙比は同じであるのに」かつ「透水試験時の飽和度は全て同じく 100%になっているのに」、何故生じるのかという疑問が当然残る。以下では、この疑問に答えるべく実施した実験 C（実体顕微鏡及び SEM による構造観察、図 6.3-29 参照）の結果を報告する。

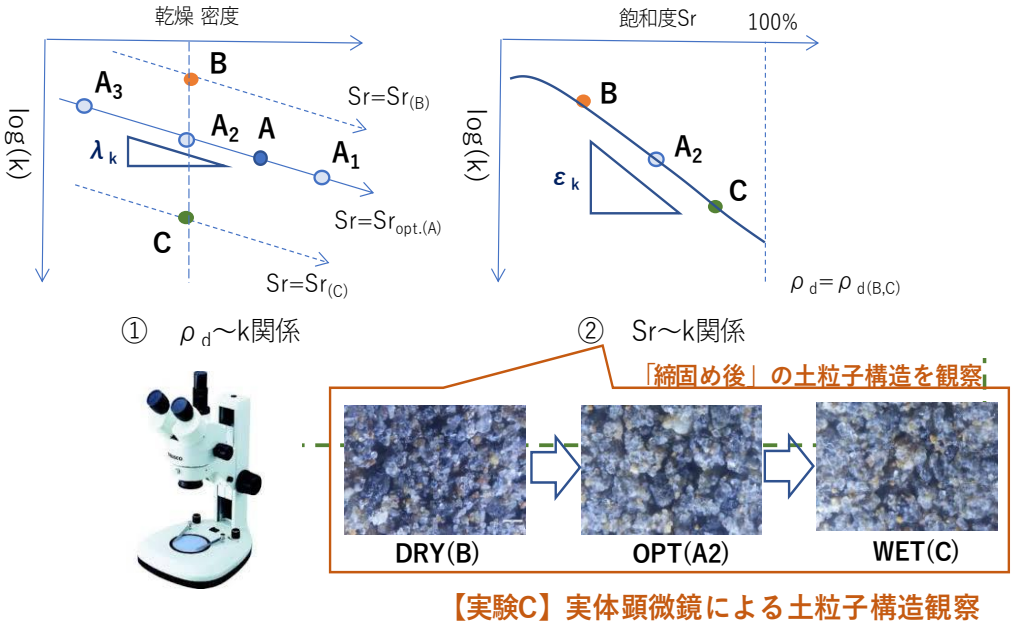


図 6.3-29 実体顕微鏡による構造観察の目的と位置づけ

1) ベントナイト混合土の構造観察結果

低透水性土の長期透水試験（JGS0312）完了後の供試体を用いて実体顕微鏡及び SEM による構造観察を実施した。供試体は JGS0312 試験に従って、締固め後,飽和通水で約 1 か月)、その後の透水試験を加えると合計 4 か月以上通水状態に置かれた後の供試土であり、ベントナイトも十分に膨潤した後と考えて良い。図 6.3-30 に、ベントナイト混合土 10%及び 30%供試体の実験 B（10%）及び実験 A（30%）の締固め～透水試験結果を示している。ここまで述べてきたように、ベントナイト混合土 30%のλk、εk 実験は次年度実施予定であるが、実験 A の中で締固め時含水比が異なり、かつ締固め密度はあまり変わらない 3 つの供試体を選んで構造観察に供した。これにより、締固め時飽和度（含水比）とベントナイト混合量が異なる 6 つの供試体の構造観察を

実施することができた。写真 6.3-31 には構造観察に用いた供試体（JGS0312 供試体：直径 5 ㎝×高さ 5 ㎝）と観察の実施状況を示す。

なお、実体顕微鏡による観察終了後、同一供試体からさらに小さな試験体を削り出し、走査型電子顕微鏡（SEM）に供した。実体顕微鏡では JGS0312 供試体の上面（透水試験時の排水側）を観察したが、この面にはろ紙が敷かれており、これを剥がすことによる影響が懸念された。そのため、別途この供試体を水平方向及び鉛直方法に切り出して、その面を観察することも合わせ実施した。その結果がこの上面の観察結果と同傾向にあったこと、逆にこの切り出す行為そのものが撮影面に不陸を生じ、明瞭な撮影が困難であったことから、上面での撮影に統一した。以下、図 6.3-30 中に記載した

① ベントナイト混合土（10%）：No.5（乾燥側）、No.7（最適付近）、No.9（湿潤側）

② ベントナイト混合土（30%）：No. 1 (乾燥側)、No.3（最適付近）、No.5（湿潤側）

の撮影結果を報告する。図中に示したように 10%混合土の透水係数は 10^{-10}m/sec、30%混合土の透水係数は 10^{-13}m/sec オーダーにあり、ベントナイト混合量と締固め密度の違いによって両者には 1000 倍の透水係数の違いがある。

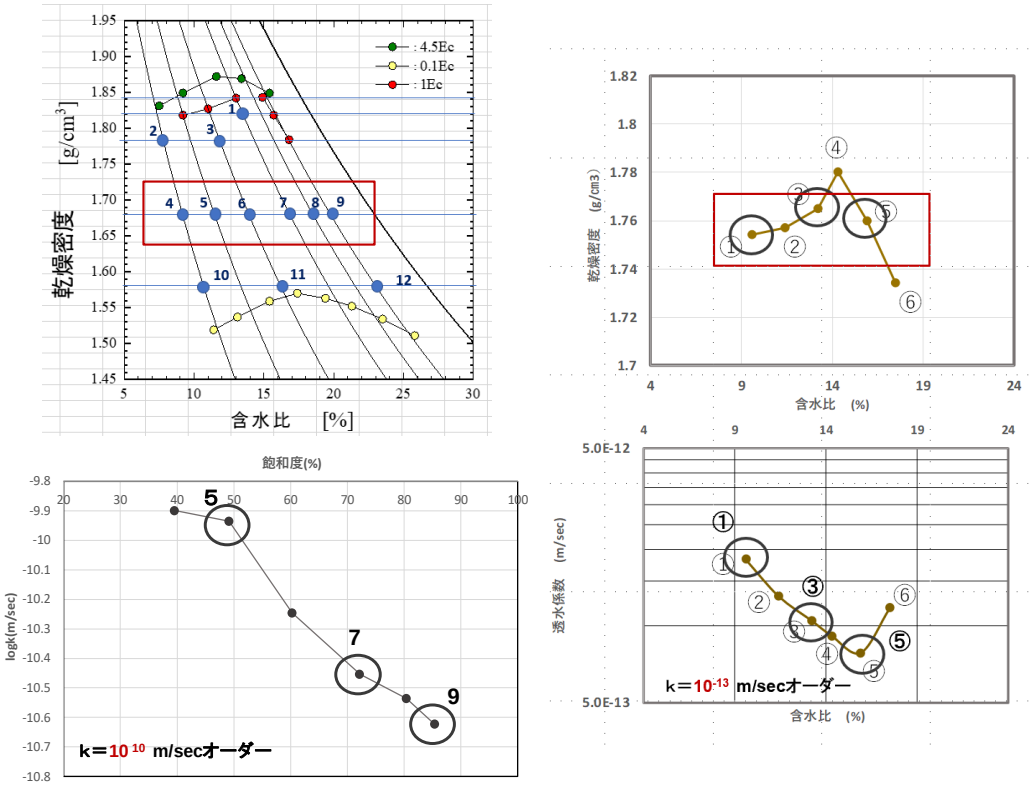


図 6.3-30 構造観察に供したベントナイト混合土供試体の条件と透水係数(JGS0312)

図 6.3-31　構造観察に用いた供試体及び実験の実施状況

図 6.3-32～図 6.3-35 に構造観察の結果を示す。図 6.3-32 はベントナイト混合土 10%(9:1)における実体顕微鏡と対応する SEM の観察結果を、図 6.3-33 はベントナイト混合土 30%(7:3)のそれを示す。また、ベントナイト混合量の違いを見るために、図 6.3-34 は実体顕微鏡同士でこれらを、図 6.3-35 は SEM 像同士でこれらを比較した結果である。なお、実体顕微鏡の撮影は各供試体で 10 枚ずつ実施したが、これらの画像の間に大きな違いはなかったため、代表的な画像を示している（これら全写真は次年度の画像解析に供する）。SEM についても 3 か所計測したが同様であった。これらより、以下の所見を得る。

① 10%混合土では、締固め時含水比（飽和度）が乾燥⇒最適⇒湿潤と変化するにつれてベントナイトが母材（購入砂）の間隙を広範囲に「被膜」し、通水有効間隙を減らしていく始める様子が見て取れる。乾燥側では吸水ベントナイトが膜状の形態ではなく団粒状で母材接点に凝集する。そのため、それ以外のエリアに幾つかのマクロポアが存在する。最適付近から湿潤側に移行するにつれてベントナイトは膜状に広がり、シートのような状態で被覆し始める。SEM 像もまた、同じように間隙が次第に充填されていく様子が見て取れる（SEM は真空脱水後に撮影するため、吸水状態では計測できない）。

② 30%混合土でも①と類似した傾向があるが、ベントナイト添加量が多いため、乾燥側においても既に膜的な存在形態を示している。一方、最適⇒湿潤に向かうにつれて膜がより安定し（厚みが増しているように見える）、湿潤側ではもはや通水有効間隙は目視で確認できない。SEM 像もまた、同様である（SEM は今回最適付近を取得していない。次年度の本格的な ε k 実験完了後の供試体で再度データを取得する予定である）。

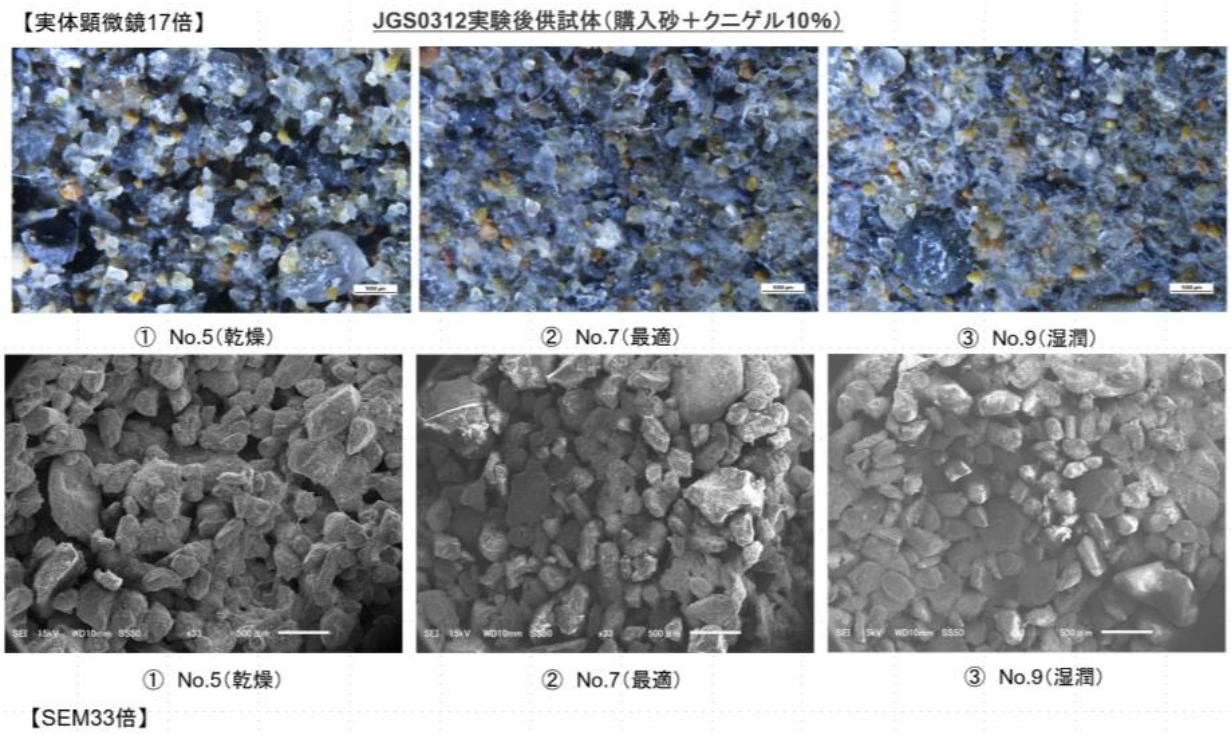
③ 図 6.3-34 及び図 6.3-35 のように整理すると、締固め時含水比とベントナイト混合量の違いにより、土構造が逐次変化していく様子を追跡できる。これにより、締固め時含水比（飽和度）の違いによる吸水ベントナイトの存在形態（乾燥側＝凝集分散的、湿潤側＝拡散被覆的）の違いが締固め時のみならず通水飽和後、そして長期透水試験後も残存していることが示さ

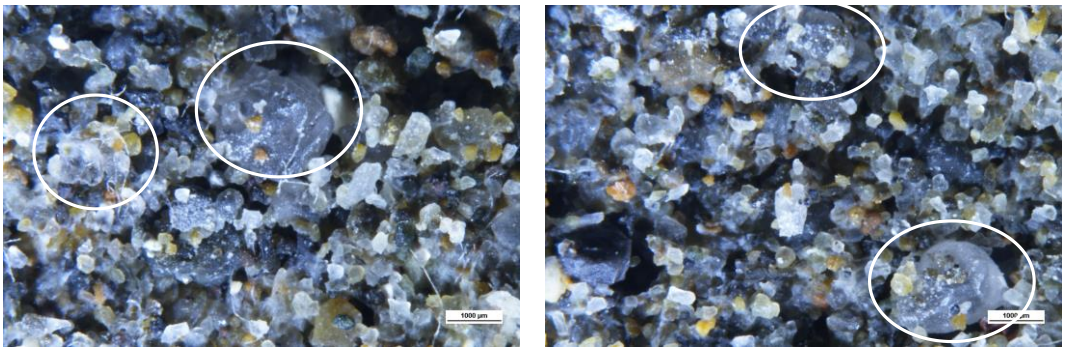
れた。εk 沿いの透水係数の変化は、このような吸水ベントナイトの存在形態とこれに起因する有効通水間隙の変化として説明することが可能である。

これで εk 沿いの透水係数の変化をある程度説明することができそうである。構造変化を定量化するための画像解析を次年度より本格化したい。一方、メカニズムの本質的な説明には、これでも不十分である。「何故、どのようなメカニズムでこのような吸水ベントナイトの存在形態の違いが生じたのか」という問いである。構造観察結果を見たときの直感的な理解は、吸水ベントナイトの存在形態の違いが、

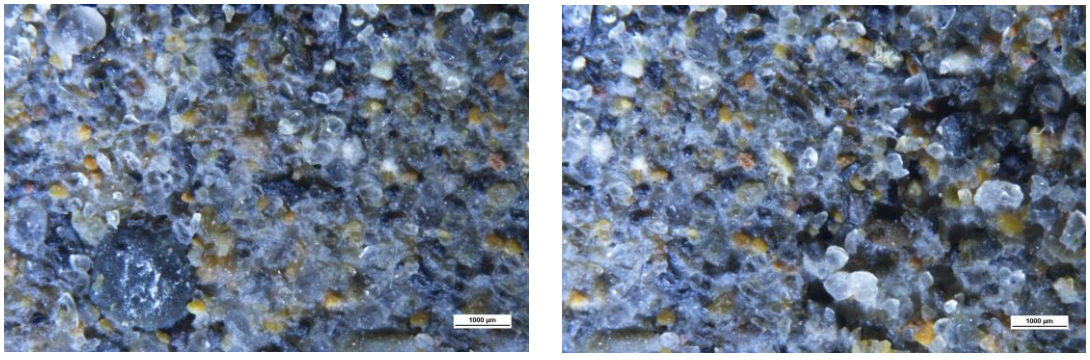
「締固め時含水比(飽和度)の違い⇒ベントナイト吸水量の違い⇒その後の吸水ベントナイトの性状（付着強度や圧延性など）の違い⇒母材への付着や凝集状態の違い⇒締固め後の有効通水面積の違い⇒通水飽和及び透水試験中のベントナイトの更なる膨潤が生じても、この有効通水面積の違いが残存⇒飽和透水係数の違いが発生」

といった連続するメカニズムで生じているように推察されるが、これを明らかにしていくことが次年度以降の課題である。なお、上記の吸水ベントナイトの存在形態がどの工程で生じているのか、も問題であろう。締固めの前の材料混合時に既にこれが生じている可能性があり、そのためには材料準備⇒混合⇒締固めの一連の過程での構造の変化を追跡していくことも必要と考えている。ベントナイト混合土の物性が混合手順、すなわち、「砂＋ベントナイト＋水」なのか「砂＋水＋ベントナイト」なのか「水＋ベントナイト＋砂」なのかによって大きく変動するとの既往の知見が、ヒアリングに際して得られていた。本研究の初年度には、この最後の手順で人工的に作製した不均一供試体の締固め～透水特性が、いちばん最初のオーソドックスな均一供試体のそれと大きく異なることを示している。今後、この混合手順の影響も含めた形でのメカニズム検討に移行したいと考えている。





No.5（乾燥側）試料における吸水ベントナイトの付着状況（白丸部）



No.9（湿潤側）試料における吸水ベントナイトの付着状況

図 6.3-32　ベントナイト混合土（10%)の顕微鏡撮影結果

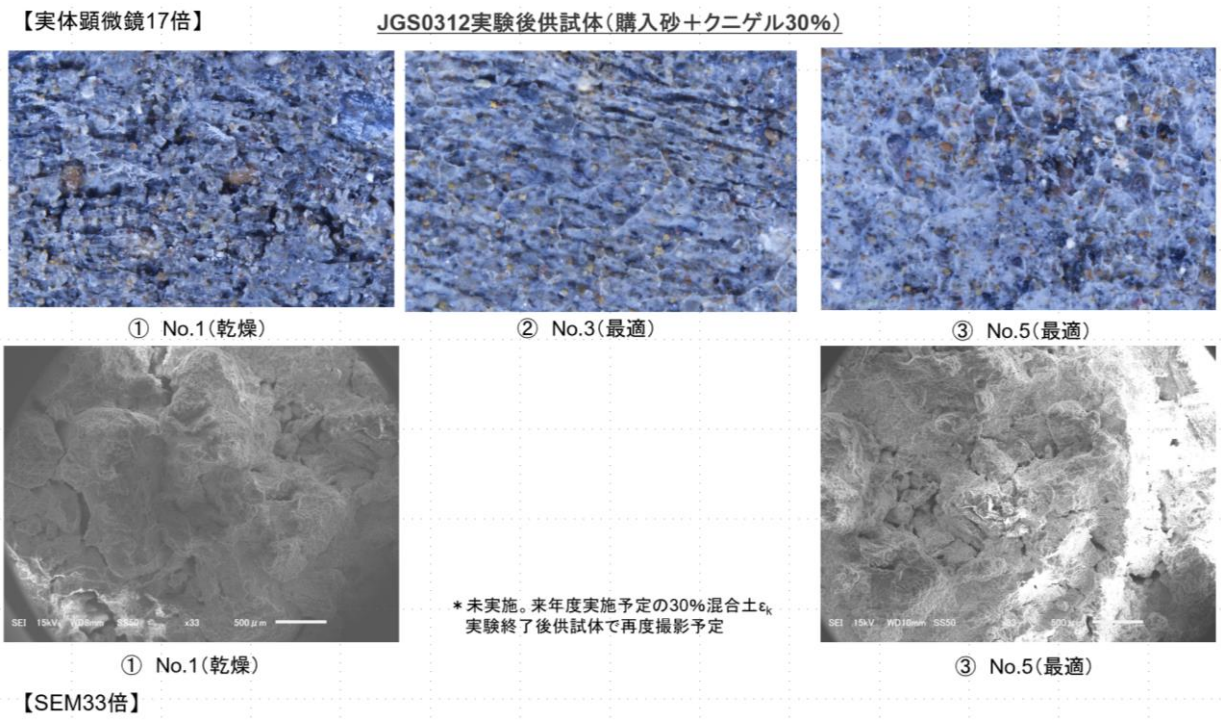


図 6.3-33　ベントナイト混合土(30%)の顕微鏡撮影結果

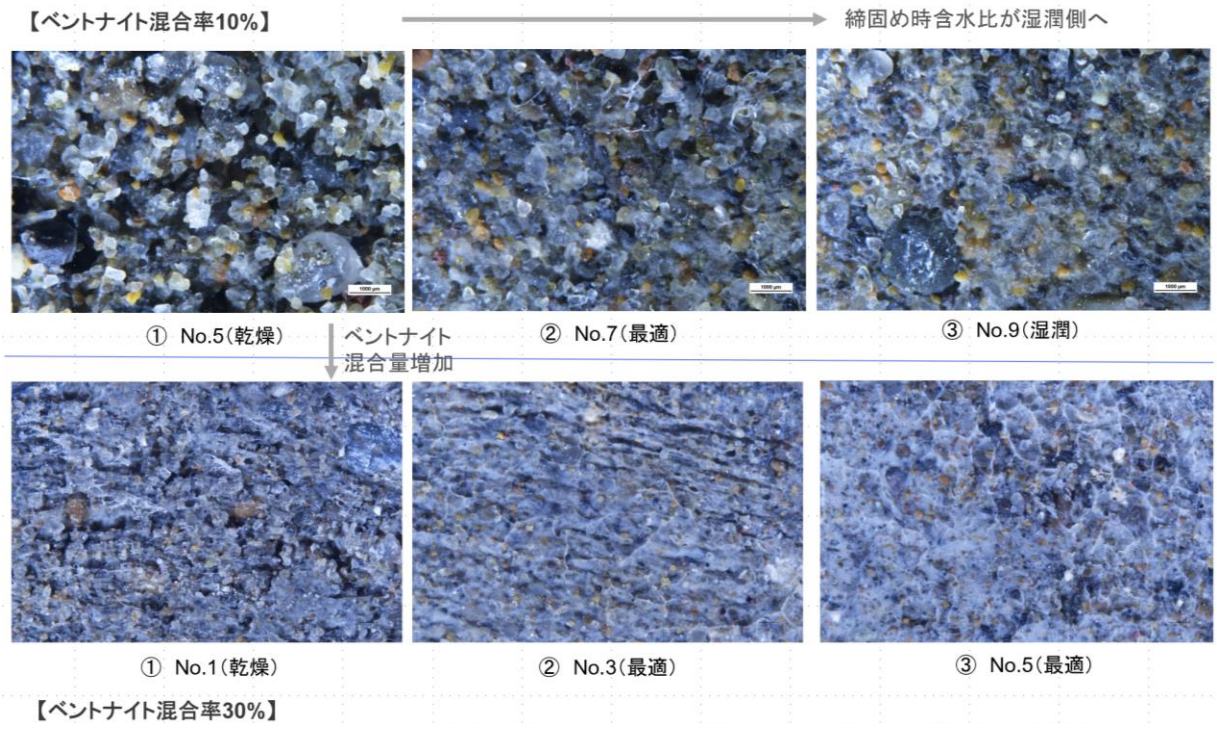


図 6.3-34　締固め時含水比と混合率の違いの影響（実体顕微鏡）

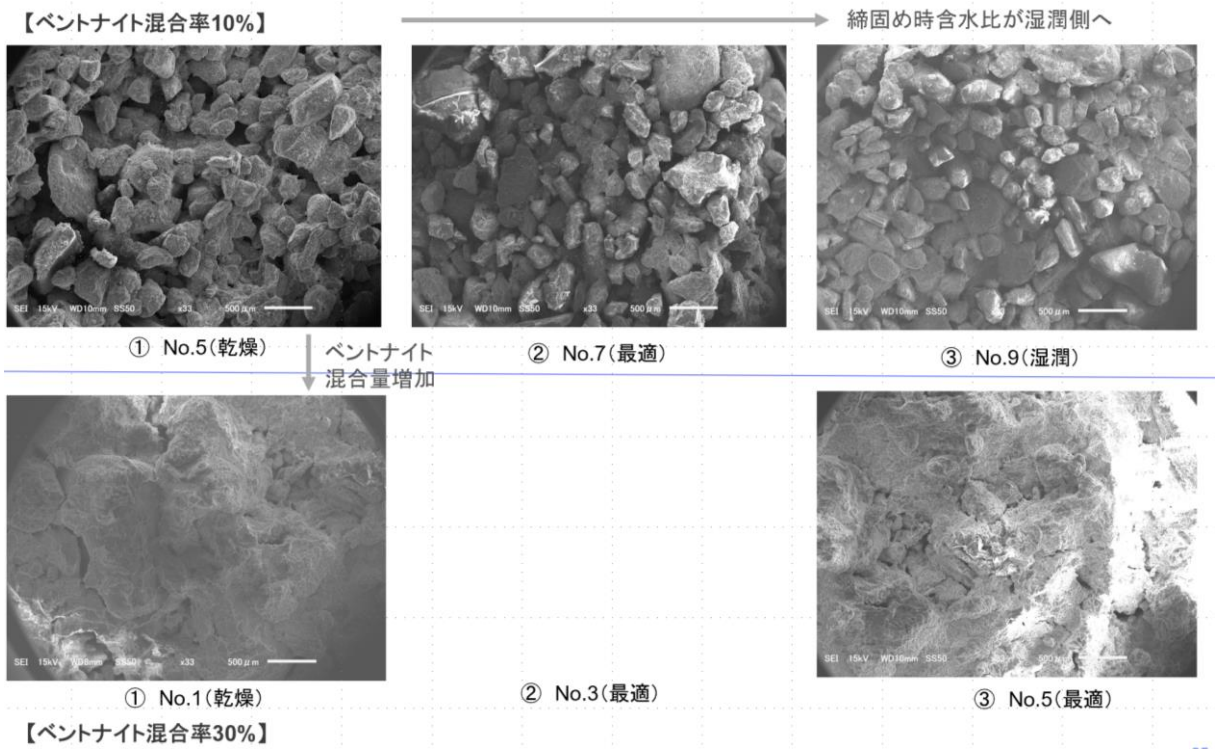


図 6.3-35　締固め時含水比と混合率の違いの影響（SEM）

2)　砂系土質材料の構造観察

ベントナイト混合土に並行して、購入砂や珪砂粉混合土についても同様な構造観察を試行した。購入砂＋珪砂粉 10%混合供試土を対象とした実験手順を以下に示すが、正直、構造観察は存在形態が締固め含水比によって大きく変化し映像に映り込む吸水ベントナイト混合土のほうが容易であり、一般的な土のほうがむしろ難しい。以下は何度かの試行錯誤を重ねて到達した手法であるが、いまだ完全ではなく、またその評価には画像解析の助けを必要とする。

① 購入砂の模擬材料を作成する。色調一定とするためにカラーサンドを購入砂と同一粒度となるように室内調整する

② これに珪砂粉を混合した供試体を作製する。これを ε_k ライン沿いに乾燥・最適・湿潤の含水比で締固め、110 度乾燥炉にて 24 時間炉乾燥し、その表面を観察する

①は様々な色調を持つ購入砂を極力単一の色調とするための工夫であり、②は撮影時の光の反射の影響を極力排除するためである。図 6.3-36 には構造観察に用いた供試体の条件、及び実験用治具と観察面の状況を示す。調整カラーサンドに珪砂粉を混合後、図中の赤で囲った供試体 9,7,6 の 3 種類の含水比に調整してこれらを混合し、同じ乾燥密度に締固めた。これを 24 時間炉乾燥、室温まで冷やした後、実体顕微鏡による観察に供した。

図 6.3-37 に得られた結果を示す（(1) と同じく 10 枚を撮影したが、大差がなかったため代表的な画像を示す)。図より、「購入砂＋珪砂粉」であっても締固め時含水比の違いにより母材と微粉の凝集状況が異なる様子が観察される。湿潤側では母材の周辺に珪砂粉が凝集することで、ベ

ントナイトと似た「微粉の膜」が間隙を埋めている。なお、一番右の写真には凝集した粒子の間に大きなマクロポアが映り込んでいる。供試体作製時の状況から、この間隙は湿潤状態の混合土をプレートで静的に締固め、これを引き離したときに、サクションによって一部の土を一緒に引き離し、剥離させてしまった結果であることがわかっている。実験手順にはさらなる工夫（この剥離をカットする）が必要であり、引き続き次年度も継続していく。図の下半分には、あるロックフィルダムの遮水材の写真を示している（炉乾燥はしていない）が、乾燥側から最適、湿潤に向けての細粒土の凝集状況の変化が、購入砂＋珪砂粉と類似した傾向を示していることが見て取れる。

以上、ベントナイト混合土と同様、砂系の土質材料においても ε_k ライン沿い供試体の構造観察を継続しており、今後、画像解析による定量化を図ると共に、吸水ベントナイトとの構造形成メカニズムの違い（材料依存の ε_k メカニズム）ついて検討を進めていく予定である。

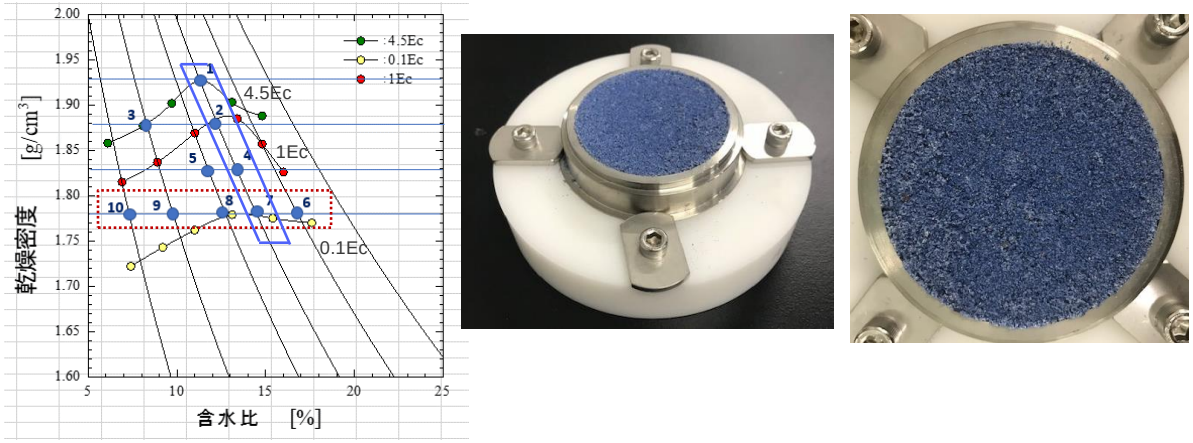


図 6.3-36　購入砂＋珪砂粉 10%供試土の構造観察方法と供試体条件

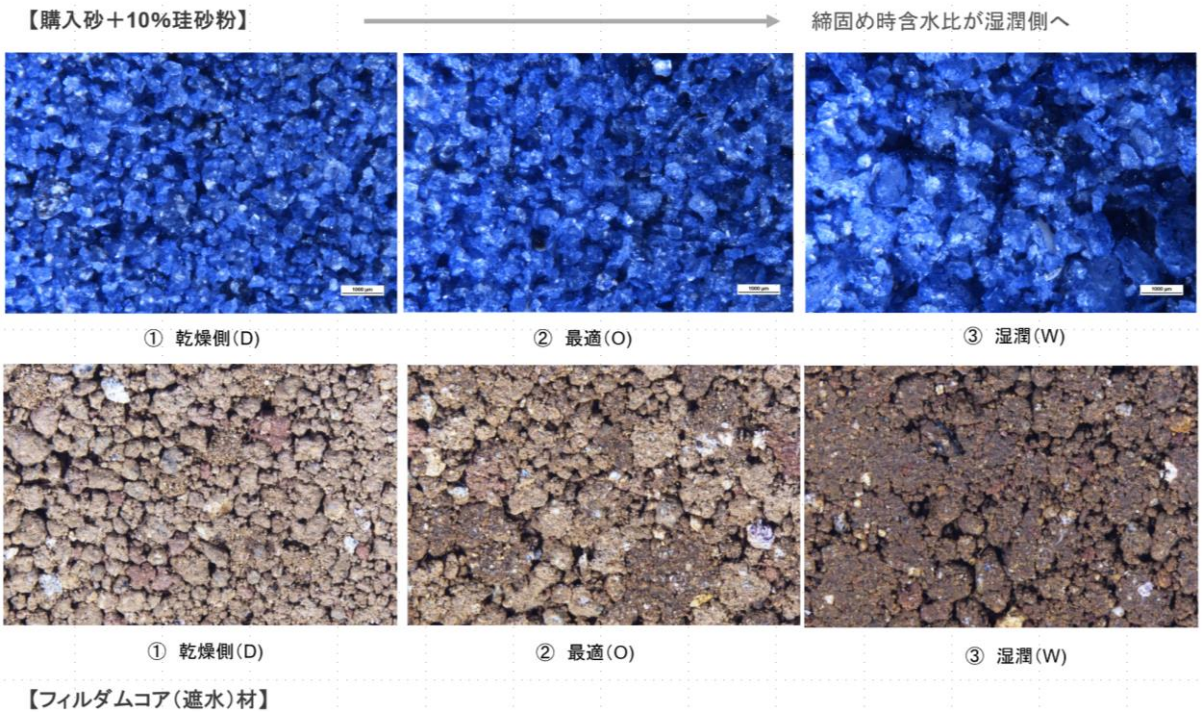


図 6.3-37　購入砂＋珪砂粉 10%供試土の構造観察結果とダム遮水材との比較

(3) 中性子イメージング実験結果に基づく透水特性メカニズムの検討

実験 D（中性子イメージング実験）では今年度、以下に示す幾つかの検討を実施した。

① 実験手法の最適化：可視化可能な供試土寸法及び必要容器厚の決定

② 本実験手法の利点及び本研究における利用方法の摸索と確認

③ 砂系混合模擬土を用い、最小透水係数発現メカニズムを定性的に説明可能なデータを一部取得（継続実施）

④ ベントナイト系材料で可視化可能な模擬土の条件を確定

①についてはアルミ箱の厚みを 6 ㎜に確定すると共に、珪砂 1 号～3 号の供試土が可視化可能範囲であることを確認した。詳細は 6.3.1 を参照されたい。

②については、現時点において、本研究における中性子イメージング実験の利用方法を以下のように考えている。

a. 締固め時の土粒子～水/ベントナイトの存在形態の把握（不飽和状態）

砂系模擬土では、土粒子間メニスカスの発生とこれによる細粒土の凝集原因を確認可能。ベントナイト系模擬土では吸水ベントナイトの母材への付着・分散状況の確認が可能であり、両材料とも、締固め時の土粒子構造の形成状況とそのメカニズムを説明するために利用可能と考えられる。

b. 締固め後の粒子配列状態（軽水飽和時）

砂系模擬土では、細粗の土粒子同士の凝集分散状況や間隙構造（浸透可能面積やその分布）を把握することが可能。吸水ベントナイトは軽水飽和後は間隙水と同じ色調となるため、ベントナイトの配置の確認には利用できない（母材の配置状況は確認可能）。ただし、次の重水浸透時の画像との差分解析を実施して重水の浸透エリアを特定するために、この段階の撮影も必須と考える（ベントナイト系模擬土における重水の浸透は不均一かつ不鮮明なため、画像解析は必須である）。

c. 重水浸透時の水の浸透状況の確認

砂系模擬土では浸透面を確認することで遮水性の定性評価が可能。ベントナイト系模擬土も極貧配合の模擬土では同様の検討が可能であり、さらにベントナイト部を避けて不均一に浸透する状況も確認することができそうである（定量評価には画像解析が必要）。

以下、上記①、②、③の順番に、

① 締固め時の挙動把握（不飽和状態）：砂系及びベントナイト系模擬土の不飽和締固め時の映像

② 締固め後の粒子配列状態：砂系模擬土の軽水飽和時の映像

③ 透水試験時の水の浸透状況：砂系模擬土で締固め含水比の違いが浸透状況に及ぼす影響を調べた映像、及びベントナイト系模擬土（貧配合）で重水浸透状況を調べた映像

を示していく。③、④の結果を受け、次年度には最小透水係数発現メカニズムを「不飽和締固め⇒軽水飽和⇒重水浸透」の過程を連続的に可視化することで定性的な裏付けデータを取得することを本格試行する。そのために、ここまで取得してきた画像データに対する画像解析を本格化する予定である。なお、実験 A,B,C と同一の材料（購入砂やベントナイト混合土）を用いた実験は令和 2 年度にチャレンジしているが、本装置の分解能上、明瞭な可視化は不可能であった。中性子イメージング実験で用いている材料の粒度を図 6.3-38 に示す。購入砂を併記したが、この材料の可視化は難しく、より単粒で粒径の大きな珪砂 1 号～3 号を用いた。また、ベントナイトに関しては同じクニゲル V1 を使用し、これを珪砂に混合して用いた。

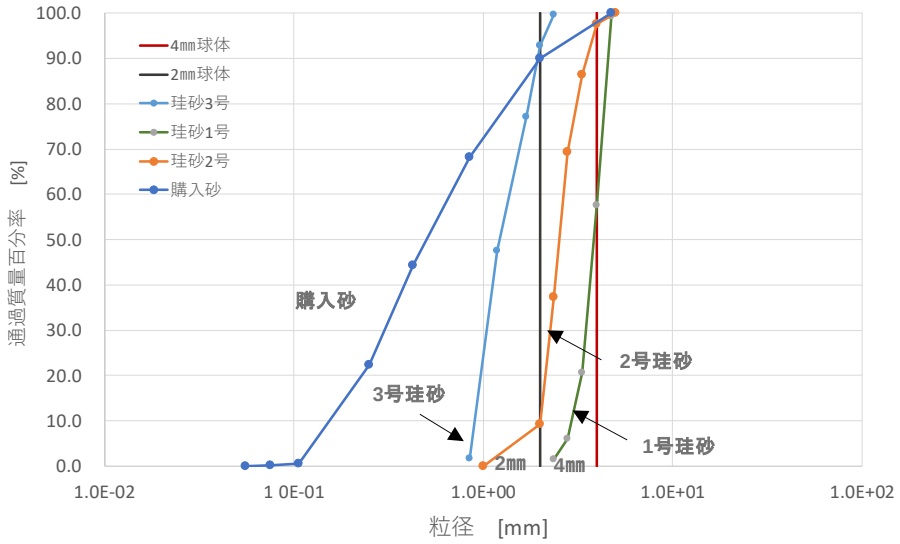


図 6.3-38　中性子実験で検討中の供試土（1 号～3 号珪砂）

図 6.3-39 は、珪砂 1 号＋珪砂 3 号（9:1）模擬土の締固め含水比の違いが不飽和映像にどう映るかを調べた結果である。図中に白く映っているのが粒子間メニスカス（水の吸着）であり、細粒分（3 号）は 1 号よりもメニスカス半径が小さくこれが形成されやすいため、この水の吸着箇所に集中して凝集しやすい。締固め含水比が大きくなると、水分の増加と共にメニスカスの形成範囲が拡大し、細粒分はより広範囲に母材（1 号）の隙間を埋めていくようになる。これにより、乾燥側ではマクロポアが生じやすく、湿潤側では細粒土が均等に間隙を埋めるようになり、遮水性が高まる方向に粒子構造が変化する。

図 6.3-40 は、同じ珪砂 1 号にクニゲル V1 を混合した模擬土における不飽和締固め時の映像であり、こちらはベントナイトの混合率と混合方法の違いの影響を調べている（含水比は 5%に統一）。ここで白く映っているのは吸水したベントナイトである。ベントナイトは珪砂 1 号と乾燥状態で混合した後、霧吹きで加水しているが、この際、母材（1 号）の周りを被覆するものと母材間に付着するものの両方が混在して存在するようになる。ベントナイト混合比が大きいほど画像の白さが増し、母材を被覆する量と母材間を架橋する吸水ベントナイトの量が増加する。このように、不飽和締固め状態では粒子間メニスカスや吸水ベントナイトの存在形態といったものを観察することができ、締固め時の構造に及ぼす影響を検討できそうである。最後の不均一混合（ベントナイトに先に加水してダマを作り、これと母材を混合したもの）では大きなベントナイトダマが散在する一方、母材にはベントナイトが行き渡らない領域が発生し、「ダマと母材」が分離して形成される様子も観察できる。

次に図 6.3-41 は、珪砂 1 号＋珪砂 3 号混合模擬土(7:3)の軽水飽和後の映像である。締固め時含水比の違いによる粒子配列状態の変化を調べている。不飽和締固め時の映像では粒子間メニスカスが観察できるが、粗い砂（1 号）と細粒な砂（3 号）がどのように粒子配列しているかを明瞭に見ることは難しい。このような砂系模擬土では、不飽和時に不鮮明であった細粗粒子同士の間隙

構造が軽水飽和後の映像によってある程度可視化できる。図では締固め含水比が大きいほど、細粒の 3 号が粗粒の 1 号の間隙に広範囲に分布し始める様子が見えるが、正確には画像解析による特定が必要である。ベントナイト系模擬土の場合の画像例も併記したが、この場合は軽水飽和によりベントナイトを含めて間隙部が全て同じ白となるため、母材の配置は認識できるがベントナイトの位置は分からない（これは不飽和映像で特定できるので大きな問題ではなく、むしろ、次の重水浸透時の画像差分解析の初期映像の取得という意味が重要となる）。

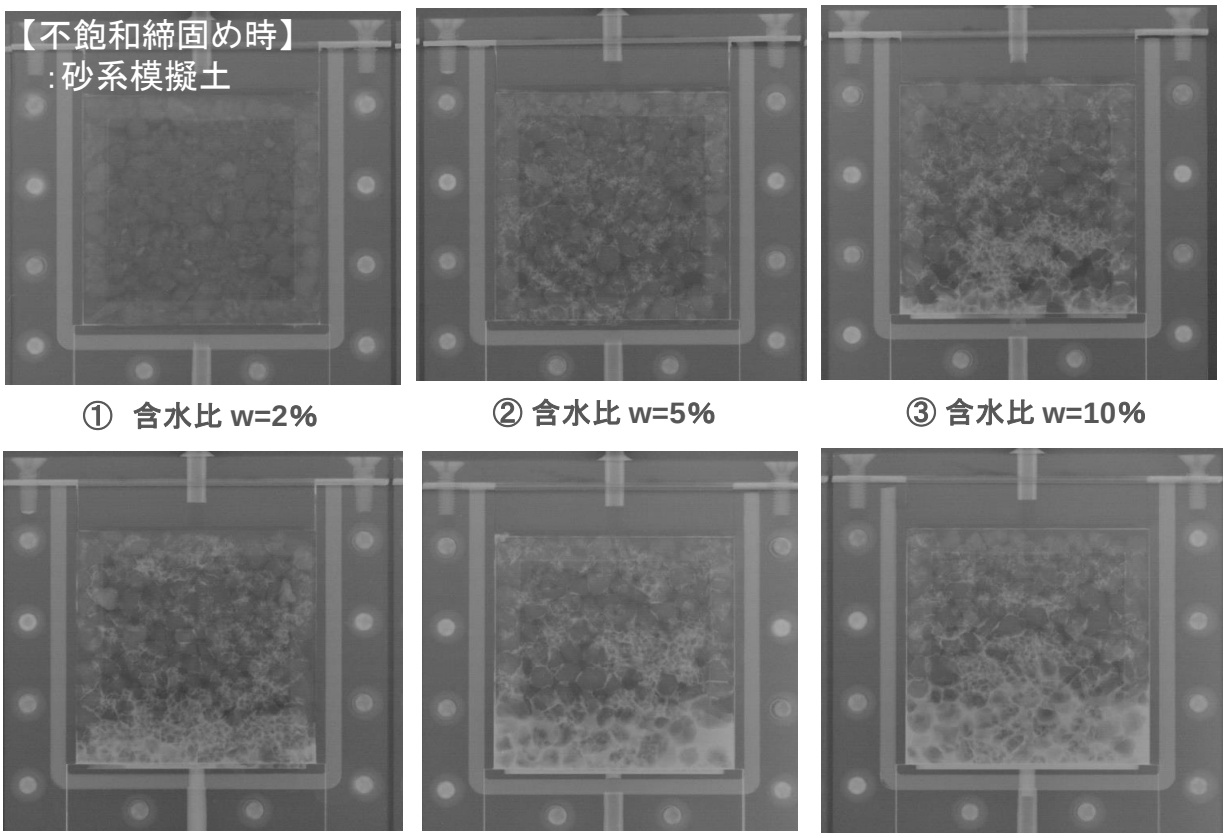


図 6.3-39　珪砂 1 号＋珪砂 3 号（9:1）模擬土の締固め含水比の違い

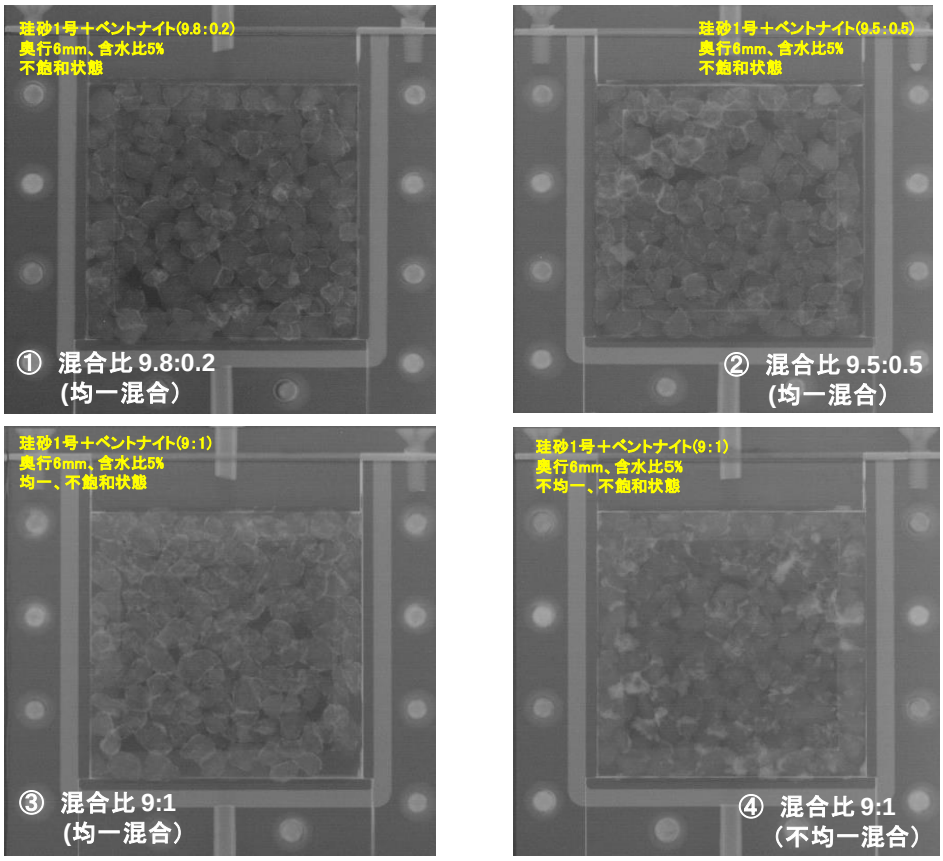


図 6.3-40　珪砂 1 号＋クニゲル V1 混合模擬土の不飽和映像

図 6.3-42 は、珪砂 1 号＋珪砂 3 号混合模擬土(9:1)における締固め含水比と重水浸透面の関係を示す。締固め時含水比の違いにより、軽水飽和後の重水通水時の浸透面（最乾燥側試料で供試体の 1/2 浸透に要する時間を計測し、同じ時間内での重水の浸透面を確認）が変化する様子を示している。上半分の軽水飽和部を見ると、先の図 6.3-41 で述べたように、締固め時含水比の違いによって珪砂 1 号と 3 号の配置状況が異なることも観察できる。図より、湿潤側締固めで透水係数が最小になるメカニズム（締固め時のメニスカス分布⇒砂粒子の配列（間隙構造）⇒透水抵抗の違い）を、定性的にではあるが連続的に説明できそうである。

図 6.3-43 は、珪砂 1 号＋クニゲル混合模擬土(9:1)における重水浸透状況（均一混合と不均一混合も比較）を示す。珪砂 1 号 9:クニゲル 1 の混合比では軽水飽和後の重水浸透は全く生じない（ベントナイトが空隙を完全に充填するため）。一方、同じ混合比でも不均一混合の場合はベントナイトダマの箇所を避けて重水が不均一に浸透する様子が確認できる（軽水飽和時との画像差分解析が必要）。

図 6.3-44 は、珪砂 1 号＋クニゲル混合模擬土においてクニゲルの混合比を変化させた場合の結果であり、図 6.3-45 はこれを混合比に対する変化として示した。ベントナイトの混合比を 9.8:0.2 のように極端に下げると、重水の浸透状況の可視化が可能になる（軽水飽和時との画像差分解析

が必要)。ベントナイト混合比が小さい場合、締固め時にベントナイトが均一に分布せず、結果として重水の浸透状況も不均一になる傾向（浸透面が明瞭でなく、ダマの箇所を避けての浸透になっている）は、前述した 9:1 不均一混合のケースと定性的には同じ現象と捉えることができる。このように、ベントナイト混合土では混合比や混合方法が重水浸透時の挙動を大きく変えており、今後、締固め時含水比の影響に加えて、これら影響因子の効き方についても検討を進めていく予定である。

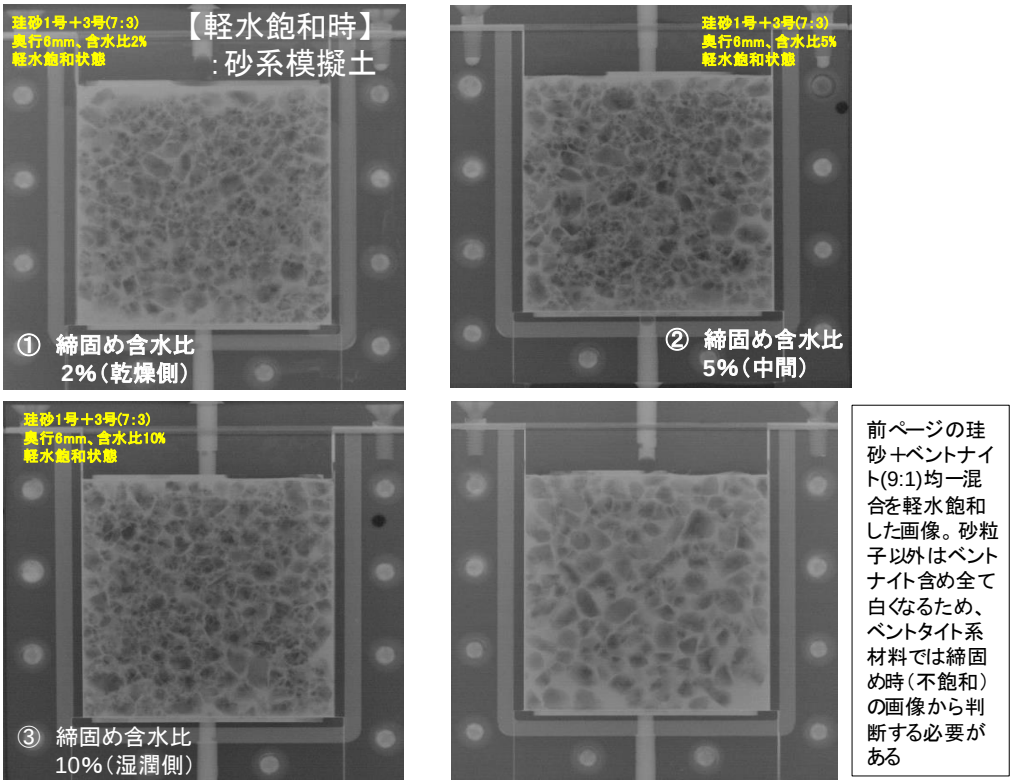


図 6.3-41　珪砂 1 号＋珪砂 3 号混合模擬土(7:3)における粒子配列状態の変化

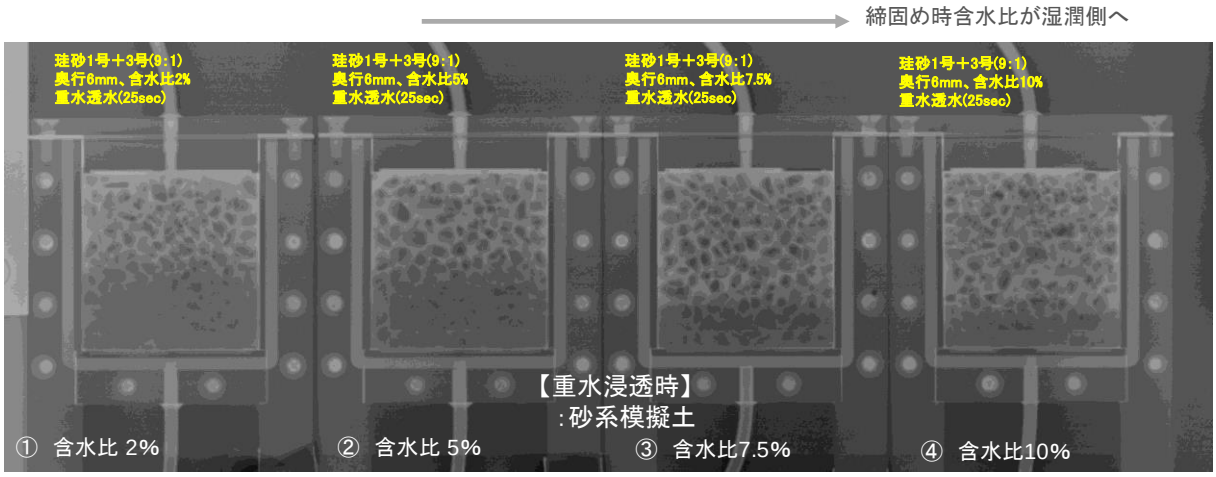
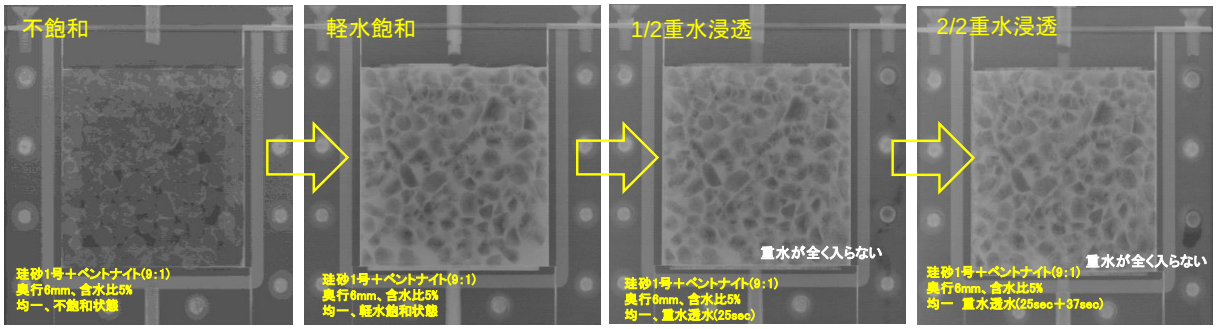
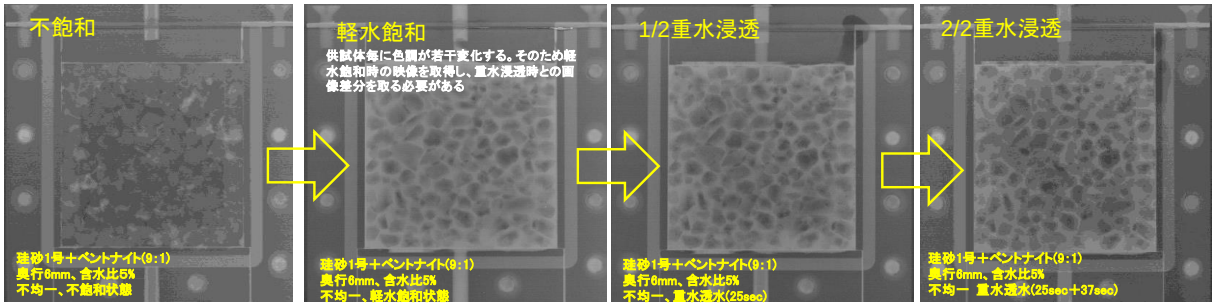


図 6.3-42　珪砂 1 号＋珪砂 3 号混合模擬土(9:1)における締固め含水比と重水浸透面の関係

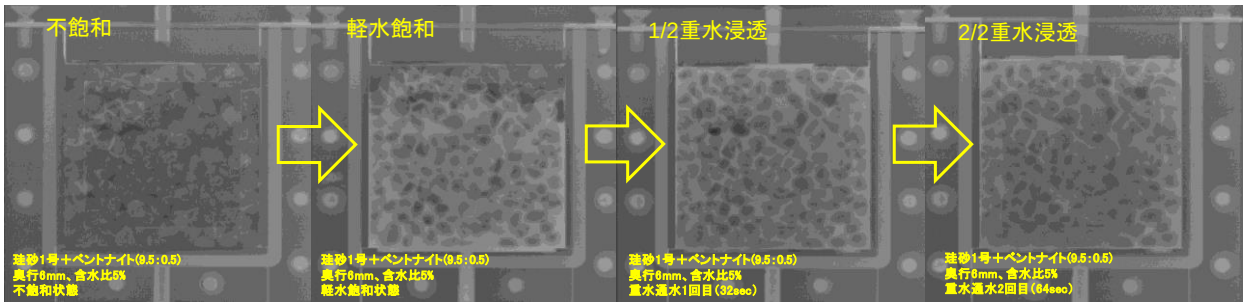


① 珪砂1号＋ベントナイト(9:1)、含水比5%、均一混合



② 珪砂1号＋ベントナイト(9:1)、含水比5%、不均一混合

図 6.3-43　珪砂１号＋クニゲル混合模擬土(9:1)における重水浸透状況(均一/不均一混合)



③ 珪砂1号＋ベントナイト(9.5:0.5)含水比5%、均一混合

5

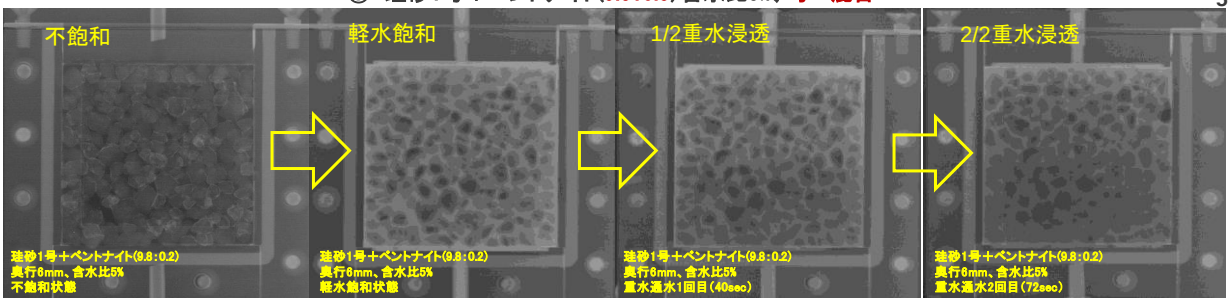
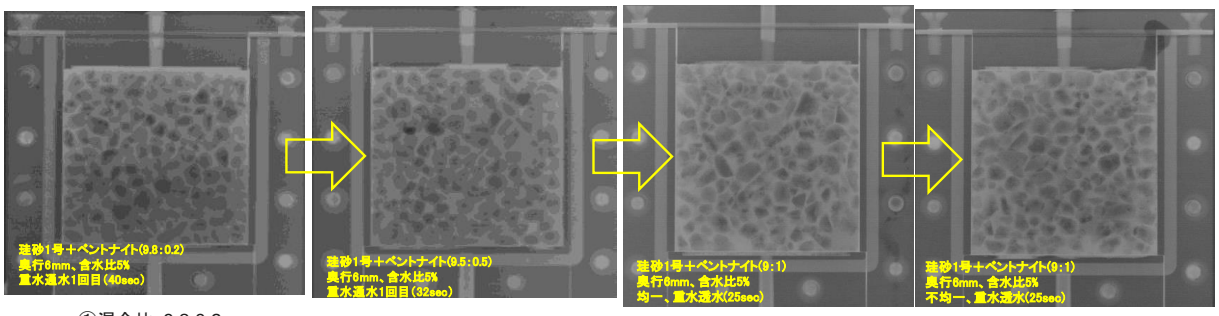


図 6.3-44　珪砂１号＋クニゲル混合模擬土(貧配合)における重水浸透状況



①混合比:9.8:0.2　②混合比:9.5:0.5　④混合率:9:1(不均一混合)

図 6.3-45　珪砂 1 号＋クニゲル混合模擬土における配合比と重水浸透状況の関係

(4) 現時点での技術的課題と今後の方策

1)　これまでに得られた知見と技術的課題

以上報告した様に、現在まで、砂単体（単粒)、砂（単粒）＋非塑性微粉、ベントナイト 10%混合土、30%混合土の 4 種類の供試土を用いて一連の実験 A～実験 D を実施している。ここで、令和 3 年度までの研究で得られている知見（結論ではない）と現時点での技術的課題を実験毎に整理しておきたい。

【実験 A】: 1Ec 締固め～透水試験

① 4 種類の供試土全てにおいて、研究課題である「最小透水係数 $k_{min.}$が最適含水比のやや湿潤側で発現すること」を実験的に確認。

② ＜技術的課題＞:最適含水比における透水係数 $k_{opt.}$と $k_{min.}$の差異はかなり小さく(2 倍以下)、乾燥側供試体の最大値 $k_{max.}$との比率も最大 5 程度であった。このため $k_{opt.}$と $k_{min.}$の違いや原因を定量的に追跡することが難しい（ $k_{max.}$と $k_{min.}$程度の違いがあればまだ議論しやすいが)。

【実験 B】: λ_k、ε_k 実験

① 4 種類の供試土全てにおいて、透水係数 k（片対数）が乾燥密度 ρ_d と締固め時飽和度 Sr に対して直線的な変化傾向（ λ_k、ε_k ライン）を示すことを実験的に確認。ベントナイト混合土も同様の挙動を取り、一般の土と同じ枠組みで議論可能であることを確認(ただしそのメカニズムはベントナイト系と一般土で異なる可能性がありそう：実験 C より)。

② λ_k 及び ε_k ラインが各々締固め時飽和度 Sr と締固め乾燥密度 ρ_d の変化に応じて上下移動すること、すなわち締固め土の透水係数が締固め時の飽和度と締固め密度の「組合せ」により変化することを確認。従来の地盤工学の知見と整合。

③ ＜技術的課題＞：②の傾向は既往実験結果と大枠は合致しながらも、 λ_k 及び ε_k ラインの勾配の一定性や締固め時飽和度 50%前後での ε_k ラインの変化などに関しては、これ

と異なる挙動が幾つか散見され始めている。

④ ＜技術的課題＞：③の従来と異なる挙動は材料粒度（母材の単粒性や細粒分混合による粒度変化、及び吸水ベントナイト添加による変化等）の影響を受けていることが示唆されたが、現時点では体系的な評価には至っていない。

⑤ ベントナイト混合土の λ_k 及び ε_k ラインは砂単体や細粒分混合土のそれと全く異なるものではなさそう。また混合率が増えると ε_k ラインの傾きが変化する可能性が現時点で示唆されており、来年度の 30%添加材料の実験結果を待ちたい。

⑥ ベントナイト 10%混合土の結果を用いて(1)実験 A で得られた「最小透水係数が最適のやや湿潤側で発現」の定量的な再現を試みた。＜技術的課題＞に書いたとおり、 $k_{opt.}$と $k_{min.}$の実測の差異が小さく、かつ実測値をかなり離散的な含水比ポイントで取得しているため中々難しいが、重回帰分析による評価式は実測傾向と概ね整合する結果となった。一方、4.5Ec や 0.1Ec 締固め曲線を用いた透水係数の予測値は、最小透水係数が最適含水比の湿潤側で一方向的に減少する可能性を示唆した（最適含水比の乾燥側で最小となることは少なくともない）。今後の現場施工を考えた時、締固めエネルギーの変動が透水係数に及ぼす影響も視野に入れるべきと考えられる。

【実験 C】：実体顕微鏡及び SEM による構造観察

① JGS0312（低透水長期透水試験）実施後のベントナイト混合土供試体の構造観察を実施した。締固め時の含水比（飽和度）の違いにより,吸水ベントナイトの存在形態（乾燥側＝凝集分散的、湿潤側＝拡散被覆的）の違いが目視レベルでも明瞭に捉えられ、ε_k ライン沿いの透水係数の変化の原因を検証することができた。SEM 像もまた同様な傾向を示した。

② ①の締固め時含水比の違いと共に,ベントナイト混合率の違い(10%と 30%）による混合土構造（吸水ベントナイトの付着・被覆状況）の違いもまた、顕微鏡写真により明瞭に確認できた。今後、画像解析によるベントナイト付着状況の定量化を図っていく。

③ ＜技術的課題＞単粒砂や微粉混合材料での顕微鏡撮影でも、締固め時含水比の違いが構造に及ぼす影響を確認できた。しかしながら、ベントナイト混合土に比べ、供試体の準備方法や撮影結果の評価が難しく、今後も継続的に評価手法をブラッシュアップしていく。

【実験 D】：中性子イメージング実験

① 前年度より実験手法の最適化検討を進めてきた。本装置の分解能から、実験 A～C で用いている実材料では明瞭な撮像は不可能であること、供試土の粒径をかなり大きくし、かつ容器厚も極力薄くする必要を鑑み、「粒径の大きな砂（珪砂）や mm 単位の理想球体を用いて厚み 6mm の容器で撮像すること」が必要との結論に至った。

② ベントナイト混合土についても前年度実験 A,B と同一の材料と混合率で撮像を試みたが、ベントナイトの詳細な付着状況や軽水飽和後の重水の浸透状況を確認することは不可能であった（実験 D では重水は全く浸透しなかった）。

③　②を鑑み、実験 D の位置づけを「実験 A～C の定性的説明用データの取得」に変更。

④　一方、①の条件下であれば、「締固め時の土粒子間メニスカスの発生状況（砂系材料）」や「ベントナイトの母材への付着状況（ベントナイト混合土）」を不飽和状態の撮像により把握可能であること、その次の軽水飽和時の画像から「土粒子の凝集分散状況」を確認できること（砂系材料）、更にその次の「軽水飽和後の重水浸透状況やその浸透面の位置」などを連続的に確認できることが判明した。

⑤　＜技術的課題＞ただし重水浸透時の浸透状況含め、中性子イメージング実験の取得画像に対して、今後画像解析による評価を本格実施することが必要。

⑥　④の結果を受け、まず大小 2 種類の粒径の異なる砂（珪砂）を混合した供試土を用いて締固め時含水比（飽和度）を変えた実験を行った。乾燥側と湿潤側締固め試料での比較から、締固め時の含水比の違いが締固め時の粒子間メニスカスの形成や軽水飽和後の細粒砂の凝集状況（土粒子の配列状況）を変化させ、湿潤側では細粒土が分散構造を形成すること、これにより、その後の重水浸透過程においても、同一時間での重水浸透面（量）が変化し、湿潤側含水比での締固め供試体のほうが相対的に遮水性が高まることを確認した。

⑦　＜技術的課題＞ただし、この供試土では高い遮水性を実現することができないため、重水浸透時の評価は相対的、定性的な把握に留まらざるを得ない。また、メニスカスの形成や細粒砂の凝集状況の定量的評価には画像解析が必要。

⑧　「ベントナイト混合土の挙動を実験 D で検証するための最適化検討」を並行実施した。粒径の大きな珪砂にベントナイトを極貧配合で混合した供試土を用い、締固め後の吸水ベントナイトの付着状況の違いや、②では不可能であった重水浸透中の撮像が可能となることを確認した。次年度、この模擬供試土を用いて、ベントナイト混合土における締固め含水比の違いの影響を調べると共に、ベントナイト混合率や混合方法（これに伴う、母材中での吸水ベントナイトの分散状況の変化）等をパラメータとした実験を実施し、ベントナイト混合土において実験 C（(3)①、②）で確認された事象の定性的な説明（再現）を試みる。

2)　研究の現状と今後の方向性について

1)に基づき、本研究の現状と今後の方向性を以下にまとめる。

＜研究の現状＞

①　実験 A：与えられた課題（最小透水係数発現問題）を実験的に確認。

②　実験 B：メカニズム説明のための仮説と枠組み（ λ_k、ε_k 説）をベントナイト混合土を含めて実験的に確認（ λ_k、ε_k ラインの発現傾向及び影響要因が既往研究と整合することを確認)。

③　実験 C：ベントナイト混合土の長期透水試験後供試体で ε_k ライン沿いの構造観察を実施。遮水性変化との関係（吸水ベントナイト自身の存在形態や母材間への付着・配置状況等）を確認。砂系供試土でも同様の現象を確認したが、本格的なデータ取得は次年度以降に本格実施。

④ 実験 D：実験手法の最適化を終了。中性子イメージング実験装置の分解能上、実験 A～C と同一の供試体では可視化不可能であること、その代替として、可視化可能な粒径の大きな砂や極貧配合のベントナイト混合土模擬供試土の必要条件を絞り込んだ（最適な容器厚の確定含む）。「締固め時のメニスカス形成→飽和時の粒子凝集→重水浸透時の変化を連続的に捉えられる」という本実験装置の利点を明らかにし、2 種類の粒径砂混合土に対して、最小透水係数発現メカニズムを定性的に裏付ける実験データを初めて取得した。

＜今後の方向性＞

① 実験 A：今後追加される供試土で、引き続き「与えられた課題の確認」を継続。

② 実験 B：①と同じく、今後追加される供試土で λ_k、ε_k 説を継続的に確認すると共に、土の粒度（均等係数）や添加する細粒土の性状の違いの影響を体系的に検討していく（当初予定の段階的解明を予定どおり進めていく）。ベントナイト混合土については低透水性長期透水試験装置を用いた λ_k、ε_k 実験データの取得を継続する（当初予定の実務ターゲット実験を予定どおり進めていく）。

③ 実験 C:画像解析による構造の定量化に本格着手する。ベントナイト混合土では令和 3 年度取得データを解析してメカニズムの系統的説明に供する。砂系材料に関しても引き続き実験手法をブラッシュアップしながら画像解析を試みていく。実験 A,B で今後追加される供試土についても並行して継続的にデータを収集していく。

④ 実験 D：③と同じく、画像解析による土粒子構造の定量化に本格着手する。令和 3 年実施の砂系材料の実施データに対する画像解析を行い、上記③と連携した説明に供する。ベントナイト混合土模擬土に関しては絞り込んだ可視化可能な供試土の中でベントナイト混合に関する幾つかの要因を条件とした実験を実施し画像解析に供する。

＜令和 4 年度の実施予定内容＞

① 実験 A
- 砂系材料：母材粒度（均等係数）や添加する細粒土の塑性（非膨潤性粘土などを変えた実験

② 実験 B
- 砂系材料：上記①の追加供試土を用いた λ_k、ε_k 実験（JISA1218）
- ベントナイト混合土：混合率 30%材料の λ_k、ε_k 実験（JGS0312）

③ 実験 C
- 令和 3 年度取得画像（実体顕微鏡）に対する画像解析の実施（定量的評価）
- 砂系材料に対するさらなる試行（画像解析含む）と②の追加供試土に対するデータ取得

④ 実験 D
- 令和 3 年度取得画像（中性子イメージング）に対する画像解析の実施（定量的評価）

- ベントナイト混合土の模擬供試土を用いた不飽和締固め～軽水飽和～重水浸透実験研究課題である締固め時含水比やベントナイト混合量、混合方法等をパラメータとした実験を試行し、画像解析に供する

⑤ 遮水性発揮メカニズムの検討

- 上記①～④を用いたメカニズムの系統的な評価
- ベントナイト混合土：画像解析による定量的評価を加えたうえで、実験 A→D の結果を用いた連続的なメカニズム説明を試行する。令和 4 年度の実験 D の混合条件実験の結果は「実務ターゲット」実験の一環としても位置づけ、得られた定性的成果は現場混合や現場転圧への展開を図っていく
- 砂系材料：追加供試土を用いた実験 B のデータ集積による体系的評価（段階的解明）を進める。上記ベントナイト混合土で仮説したメカニズムを砂系材料にもあてはめることで、材料に依存しない共通（汎用）メカニズムと材料依存メカニズムを分離したうえで議論

以上の整理結果を表 6.3-8 に、図 6.3-46 に、以上を反映した研究の最新フローを示す（フロー中には本報告書最後の提案事項も暫定案として併記しておいた）。

表 6.3-8　研究の現状と今後の方向性

	研究の現状（得られている知見）	研究の今後の方向性	令和4年度実施予定
【実験A】 ：1Ec締固め-透水試験	ベントナイト混合土を含む4種類の供試土で研究課題（最小透水係数k_{min}.発現現象）を実験的に確認した	今後追加される供試土で,引き続き本現象の発現や材料の違いの影響等を継続確認して行く	土質材料：母材粒度（均等係数）や添加する細粒分の添加量,塑性等を変えた実験
【実験B】 ：λ_k, ε_k実験	①k_{min}.発現メカニズム説明のための仮説（λ_k, ε_k説）をベントナイト混合土を含めた３供試土で実験的に確認した ②得られた結果が従来の土質材料と同傾向にある事を確認（異なる点も散見） ③実験結果を基に締固め土の透水係数を定式化し、遮水性発揮メカニズムの説明や影響因子の検討を試行	①今後追加される供試土で λ_k ε_k説を継続的に確認 ②土の粒度（均等係数）や添加する細粒土の性状の違い等の影響を体系的に検討（当初予定の段階的解明実験） ③ベントナイト混合土についても長期透水試験装置を用いて実験データの取得を継続（当初予定の実務ターゲット実験）	①土質材料：実験Aの追加供試土を用いたλ_k, ε_k実験 ②ベントナイト混合土：混合率30%のλ_k, ε_k実験 （JGS0312）
【実験C】 ：土粒子構造観察 （顕微鏡・SEM）	①ベントナイト混合土の長期透水試験後供試体でε_kライン沿いの構造観察を実施。透水係数の変化との関係性（吸水ベントナイトの性状や母材間への付着・配置状態等）を確認 ②砂系供試土でもε_k沿いに構造の違いを観察	①画像解析による土粒子構造の定量化検討に本格着手 ②ベントナイト混合土の令和３年度取得データを解析しメカニズムの系統的説明に供する ③今後追加される供試土についても継続的にデータを収集	①令和3年度取得画像（実体顕微鏡）に対する画像解析の実施（定量的評価） ②砂系材料に対する更なる試行（画像解析含む） ③追加供試土に対するデータ取得と解析
【実験D】 ：中性子イメージング実験	①実験手法の最適化を終了し、可視化が可能な供試土寸法と容器厚を確定 ②「締固め時のメニスカス形成（ベントナイト付着）→飽和時の細粒土の凝集→重水浸透の変化を連続的に把握可能」という本実験装置の有用性や利用方法を確認 ③ 模擬砂供試土を用いて最小透水係数発現メカニズムを定性的に裏付ける実験データを初めて取得 ④本装置で可視化が可能なベントナイト系模擬土の条件を確定	①画像解析による土粒子構造の定量化検討に本格着手 ②ベントナイト混合模擬土を用いて最小透水係数発現メカニズムを裏付ける実験データ取得を目指す（混合率や混合方法等の影響についてもチャレンジ）	①令和3年度取得画像（中性子イメージング）に対する画像解析の実施（定量的評価） ②ベントナイト混合模擬供試土を用いた不飽和締固め－軽水飽和－重水浸透実験。締固め時含水比の他、ベントナイト混合量、混合方法等をパラメータとした実験を試行し、画像解析に供する
【透水メカニズムの評価】	実験A～実験Dに着手しデータの集約を始めているが、各実験結果の吟味(A,B)や実験手法の最適化検討（C,D）の段階にあり、現時点では統合的な評価には至っていない	①ベントナイト混合土（10%）で実験A,B,Cの連携の可能性が見えて来ている。来年度実験Dによる定性的な裏付けデータを取得し、まずベントナイト混合土から総合的な評価を試みる ②①の枠組みをベースにして砂系材料にこれを展開する。ベントナイトと一般の細粒土（非塑性・塑性）混合の場合でのメカニズムの違いを明らかにしながら共通（汎用）メカニズムと材料依存メカニズムを分離して評価する事を目指す	①ベントナイト混合系供試土：画像解析による実験Bの定量的評価とR4年度実験Dの結果を統合しメカニズム説明を試行 ②砂系供試土：追加供試土を用いた実験Bのデータ集積による体系的評価（段階的解明）を進めながら、画像解析による実験Cの評価の可能性を明らかにする

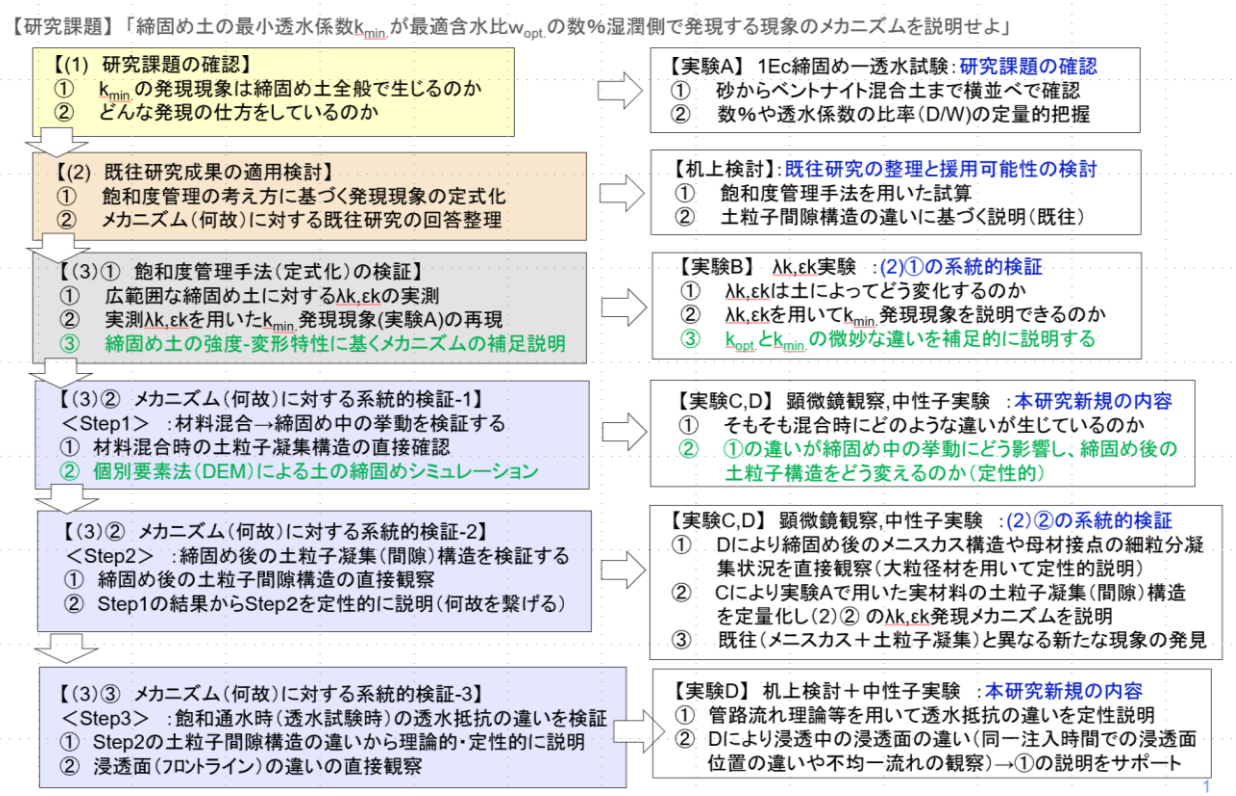


図 6.3-46　研究のフロー（ローリング後）

6.4　まとめ

本研究の現状と今後の方向性を再度以下に取りまとめる。

(1)　【実験 A】

① 研究課題（最小透水係数 $k_{min.}$発現現象）を実験的に確認（ただし現時点では $k_{min.}$と $k_{opt.}$には大きな差異はない）

② 追加される供試土（材料特性を変更）に対して継続的に確認していく

(2)　【実験 B】

① 仮説（λ_k,ε_k 説）をベントナイト混合土を含めた 3 供試土で実験的に確認。従来の知見との結果の整合性も確認。本結果を用いて締固め後の透水係数を定式化し、最小透水係数発現現象の再現や締固め条件の影響検討を試行した

② 追加される供試土で λ_k,ε_k 説を継続的に確認していく

③ 土の粒度や添加する細粒土の性状の違い等の影響を継続的に検討（「段階的解明実験」を予定どおり進める）

④ ベントナイト混合土についても λ_k,ε_k データの取得を継続（「実務ターゲット実験」を予定どおり進める）

(3)　【実験 C】

① ベントナイト混合土の長期透水試験後供試体で εk ライン沿いの構造観察を実施し透水性の変化との関連性を確認
② 砂系供試土でも εk 沿いに構造の違いを観察中。乾燥⇒最適⇒湿潤による構造の違いを確認
③ 今後、画像解析による土粒子構造の定量化検討に本格着手すると共に、追加の供試土で引き続き構造観察を継続

(4) 【実験 D】
① 実験手法の最適化を終了。本実験装置の有用性や本研究への利用方法を確認
② 模擬砂供試土を用いて最小透水係数発現メカニズムを定性的に裏付ける実験データを一部取得（継続実施）
③ 画像解析による土粒子構造の定量化検討に本格着手（次年度）
④ ベントナイト混合模擬土の可視化可能条件を確認。次年度以降にメカニズム検証データの取得にチャレンジ

(5) 【メカニズムの評価】
① 上記実験 A～D の結果を用いて、まずベントナイト混合土の遮水性発揮メカニズムの評価に着手（次年度）
② ①の枠組みを援用して砂系材料に評価を拡張。共通（汎用）及び材料依存メカニズムを分離したうえでの評価を試みる

【現時点での幾つかの新たな提案】

(1) 締固めエネルギーが最小透水係数発現現象に及ぼす影響について：実験 A

今年度の実験 B の結果から、締固めエネルギーが 4.5Ec、0.1Ec 等変化した場合、含水比～透水係数関係や最小透水係数の発現傾向が変化する可能性が示唆された。これらの予測値は既にあるため、次年度以降にその実測値（JGS0312 含む）を取得して整合性を確認することを一つの提案としたい。

(2) ベントナイト混合土の加水混合及び締固め過程における存在形態の追跡：実験 C

ベントナイト混合土を用いた実験 B と実験 C の結果や、珪砂 1 号にベントナイトを添加した実験 D の結果から、締固め含水比の違いがベントナイトの吸水状態や混合時の分散状態、母材との付着状態等に影響を及ぼすことが想定された。実験 B と実験 C の結果のみでは、未だメカニズムの説明を完璧に行ったことにはならない点については前述のとおりであり、材料準備⇒加水混合⇒締固めの過程を通じてベントナイトと母材の存在形態を連続的に追跡することを提案したい(どの過程で土粒子構造が決まるのかも含めて)。図 6.4-1 にその概念図を示す。図に示すように、混合・加水⇒試料作製⇒締固め⇒飽和通水の過程で供試体をサンプリングし、実体顕微鏡による観察を実施する。JGS0312 の長期透水試験終了後の撮影は今年度終了しているので、同

一条件で供試体準備過程を再現し、同一ロットの中から供試体をサンプリングして実体顕微鏡に供する。

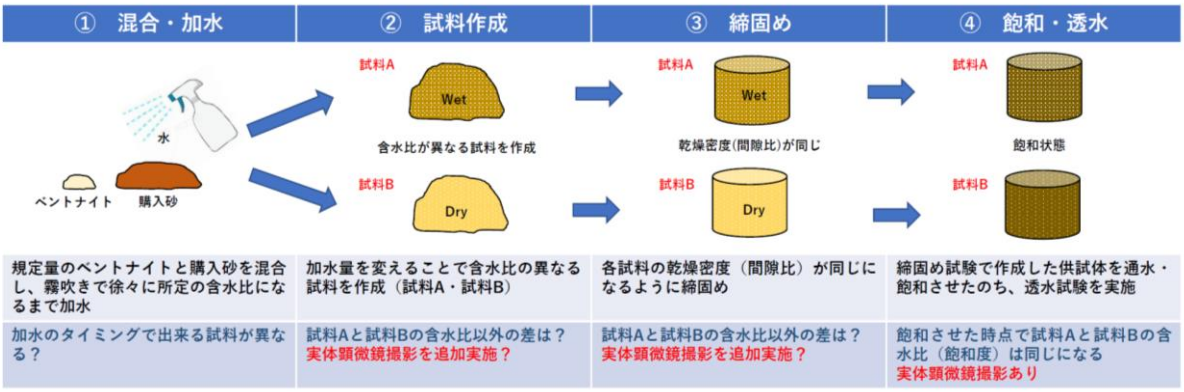


図 6.4-1　材料の混合方法・手順の影響に関する検討のイメージ

(3)　吸水ベントナイトの力学特性と締固め含水比の関係及び飽和による変化の把握

ベントナイト混合土の顕微鏡写真から、締固め時含水比の違いがベントナイト吸水量⇒吸水ベントナイトの物性（強度や延性、粘性など）⇒ベントナイトと母材の付着状態⇒ベントナイト混合土の粒子間隙（有効通水間隙）構造⇒通水飽和及び長期透水実験による再膨潤後もこれが残存、というプロセスで遮水性の違いが生ずることが示唆された。上記(2)はこれを追跡するものであるが、これに並行して、吸水膨張したベントナイト単体の力学特性（残留強度、残留ひずみ、粘性、圧延性など）が、加えた水の量によりどう変化していくかを室内試験で追跡したい。一面せん断試験装置やベーン試験装置を用いた実験等を想定している。また、締固め時含水比の異なるベントナイト単体材料が完全に飽和することにより、これら不飽和時の力学特性がどう変化するのか、も併せ計測しておく。さらに、吸水ベントナイト単体の化学的性質が締固め含水比でどう変化するか、飽和によりどうなるかも同時に抑えておきたい。これは、ベントナイト混合土の締固め含水比による遮水性の変化がベントナイトそのものの遮水性の違いに起因しているのか（あるいは十分に飽和・膨潤した後は化学的には同じなのか）を調べることで、力学要因と化学要因を分離することを目指すものである。

(4)　母材の粒度特性の影響に関して：実験 B の次の供試体条件

前年度実施した実験 A では、研究第一課題である「最小透水係数が最適含水比の湿潤側で発現する」事実を実験的に確認した。ただ、図 6.4-2 に示すように、

① 締固め～透水試験自体が 5，6 点程度の含水比水準で実施されているため、最適含水比の何%湿潤側なのか、といった緻密な議論ができない（感覚的に湿潤側と言っているに過ぎない）

② 得られた実験結果を見ると、乾燥側締固め供試体の透水係数は最適や湿潤側締固め供試体に比べて有意に大きいが、最適含水比における kopt.と最小透水係数 kmin.の違いはほんのわずかに過ぎない（最乾燥側の kmax.と kmin.の比率でも、5 以下に留まる）

最小透水係数の議論は図 6.4-3 の左側に記載した Mitchell[4]の実験から始まっており、この場合、最適含水比における kopt.と最小透水係数 kmin.は 2 オーダー、100 倍の差が見られている。これほどの差は特異かもしれないとの議論はある（龍岡教授ヒアリング時）が、図の右側の御母衣ダムのように、少なくとも数倍から 1 オーダー程度の違いが生じなければ、その差異を議論すること自体にあまり意味がないように思える。①の含水比水準の問題も含めて、改めて第一課題そのものを議論すべきではないかと考える。

では、何を試行すれば良いのか。図 6.4-4 には、本研究の実験結果と御母衣ダムの結果を比較して示した。例えば右側の一連の締固め～透水試験結果（その中の④の供試体の締固め曲線の密度レンジと下段の透水係数のレンジ）を見ると、本研究で得られている締固め曲線の最大最小乾燥密度差や透水係数の変化レンジ幅に比べて、④のそれは格段に大きい。左の図中に④のデータ範囲（概ね）を赤破線で併記したが、一目瞭然である（最乾燥側の kmax.と kmin.の比率は 1000 倍を超える）。この違いをもたらしている要因の一つに、図中に併記した粒度特性があるのでは、と考える。例を示した供試体④は、最も均等、かつ細粒分を多く含む材料である。本研究では現在、母材として購入砂を用いているが、その粒度は図 6.4-5 に示したとおり、かなり均等、すなわち粒径が均一であり、御母衣の粒度群の中には存在しない。段階的解明実験においては、母材粒度に④のような均等粒度を採用し、幅広い乾燥密度や透水係数レンジの中で議論をしてはどうかと考える。

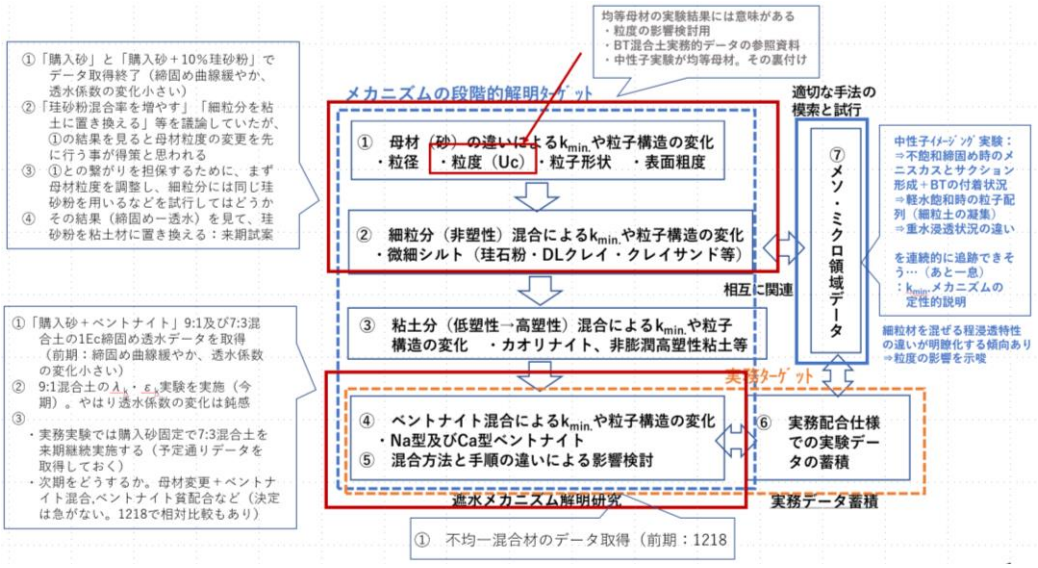


図 6.4-2 段階的解明実験の現状

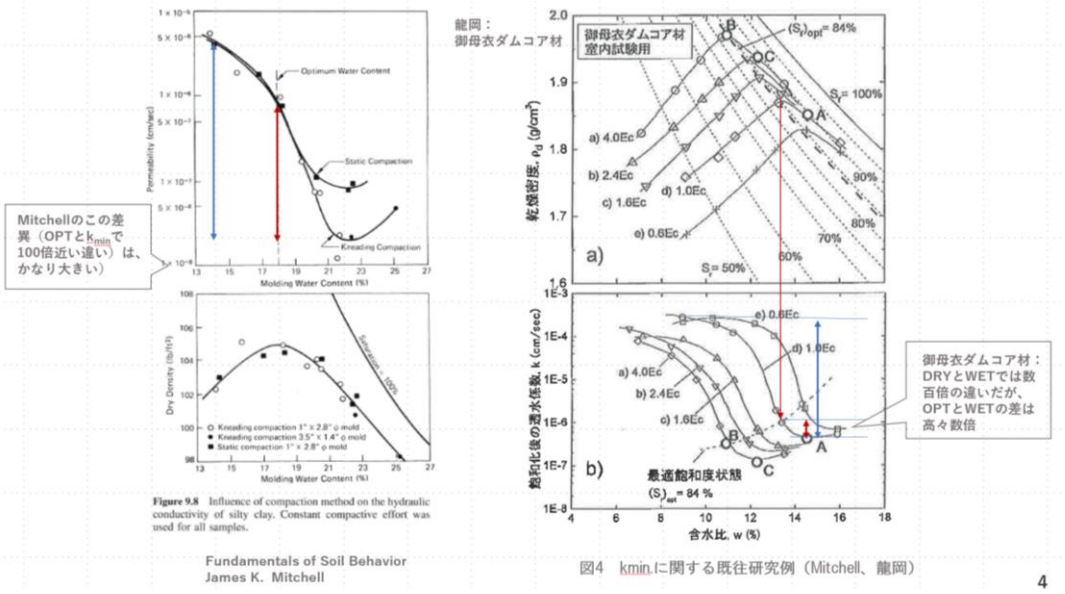


図 6.4-3　龍岡及び Mitchell による最小透水係数に関する実験結果

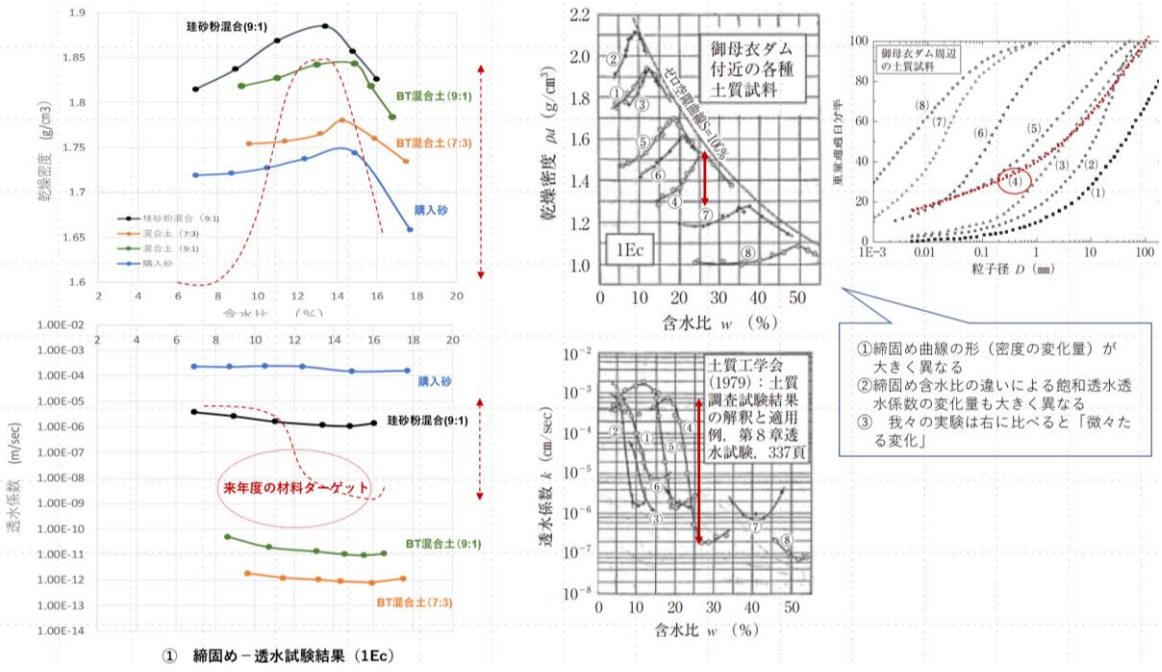


図 6.4-4　本研究の実験結果と御母衣事例の比較

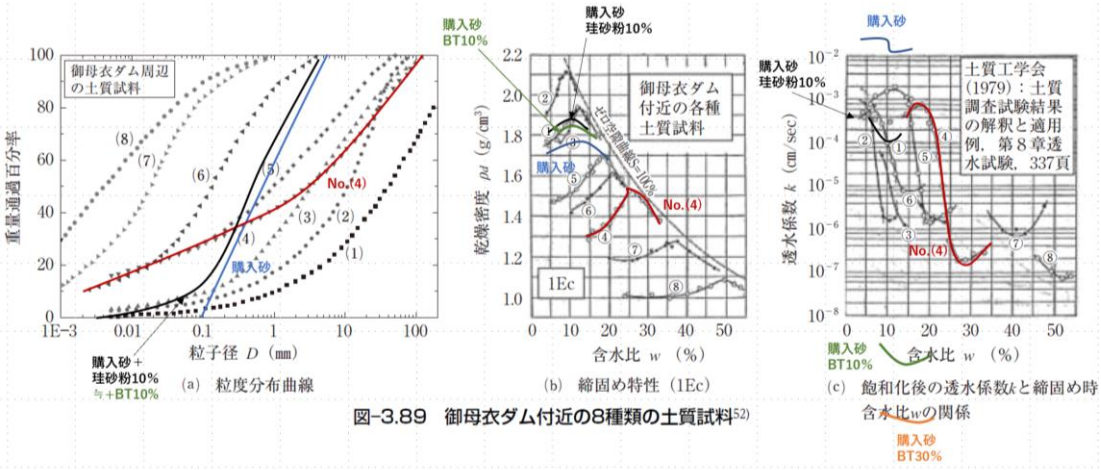
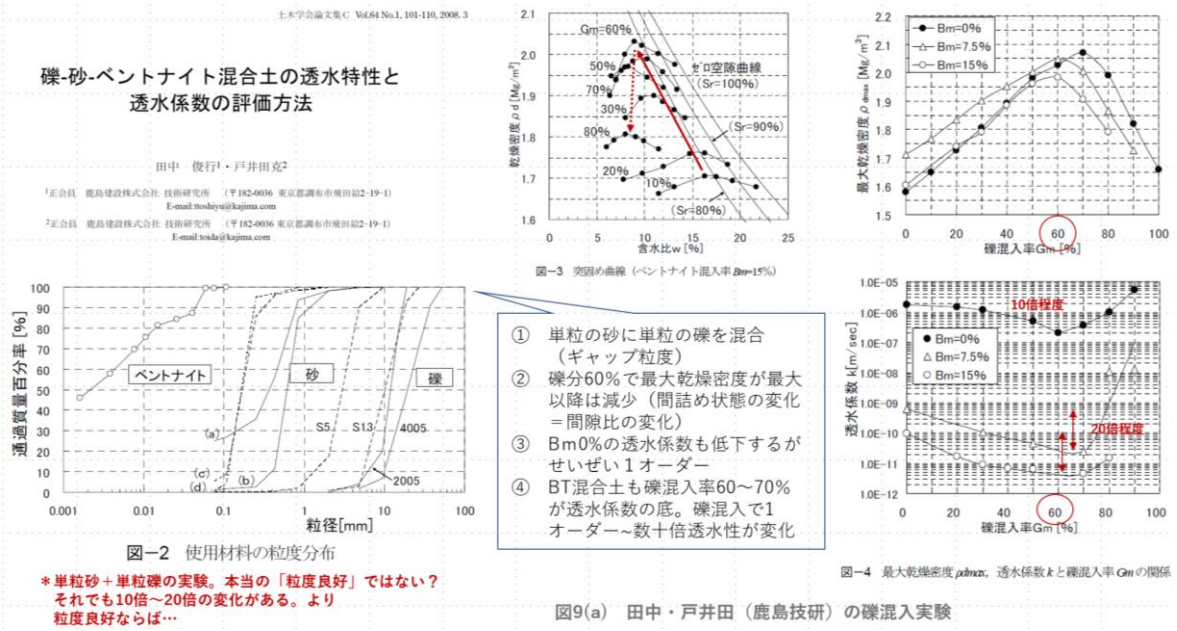


図-3.89 御母衣ダム付近の8種類の土質試料[52]

図 6.4-5 今後のターゲット粒度例

本研究では最乾燥側の kmax.と kmin.の比率は高々5 となっている。これがもし、母材粒度が単粒である影響であるとしたら、これに礫分を混合して粒度を変えた場合、その比率がどの程度になるのか、ベントナイト混合土ではどうなるのか、田中・戸井田[5]の実験結果を参照してみる。図 6.4-6 は単粒の砂に礫とベントナイトを混合して透水係数への影響を調べた事例である。最大乾燥密度を極大化する礫混入率は 60%付近にあり、透水係数もそこで最小値をとる。礫が 0%の場合に比べると、10 倍程度、ベントナイトを混合した場合は 20 倍～数十番程度の（礫分混入による）透水係数の変化が生じている。図 6.4-7 には締固め含水比の違いの影響を示すが、一番右の図（礫混入 50%）を見ると最小透水係数は最適含水比のやや湿潤側で生じ、その後含水比が湿潤側に増加しても透水係数が反転することはなく、ほぼ一定値を示す。図より読み取った kmax.と kmin.の比率は 7～9 倍となり、本研究のベントナイト混合土（母材単粒）の比率（2～5 倍）よりはややましな程度である。ただし、田中・戸井田[5]の実験では単粒の砂に単粒の礫を混合したギャップ粒度で実験を実施しており、前出の御母衣ダム④と比べると、その粒度特性はいまだ単粒に近い。

以上より、今後、均等粒度の母材を用いた実験を試行したいと考える。均等粒度では多様な粒径の粒子同士が数多くの接点で接触し、そこにメニスカスが形成される。その複雑さは、おそらく単粒の場合とは異なった挙動をもたらすのではないかと考える。



図−2 使用材料の粒度分布

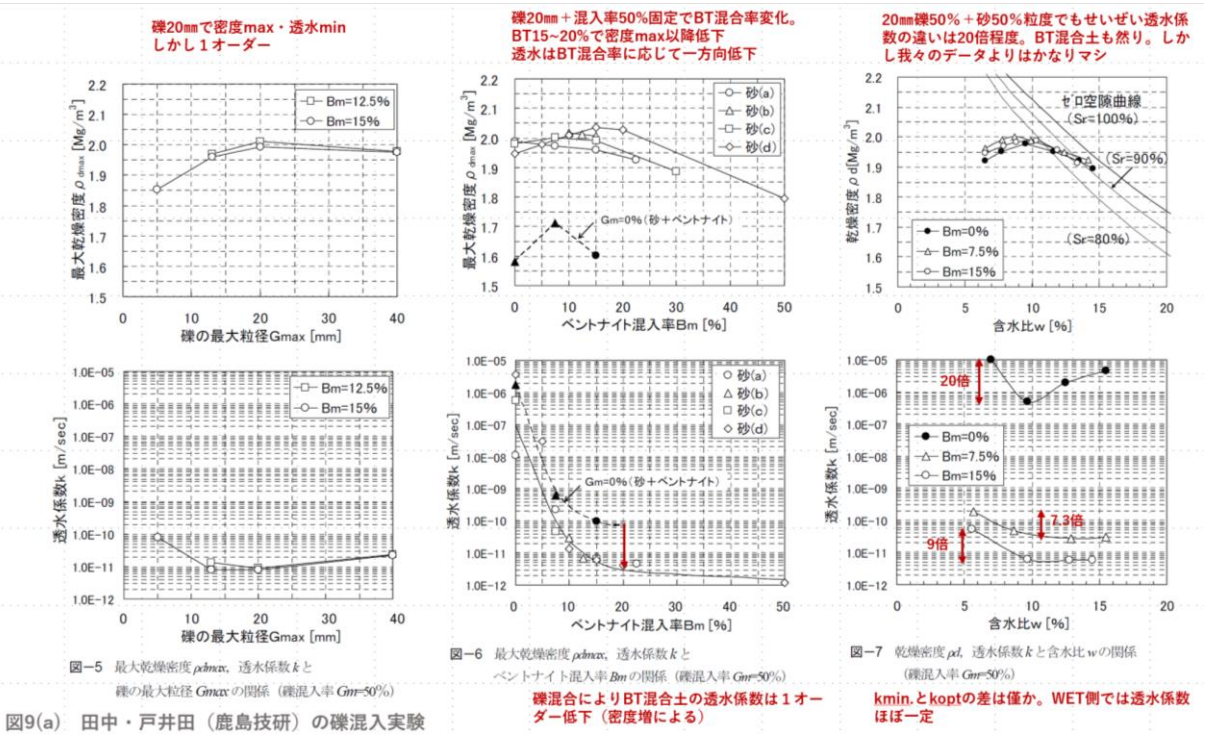
図−3 突固め曲線（ベントナイト混入率 Bm=15%）

図−4 最大乾燥密度 ρdmax，透水係数 k と礫混入率 Gm の関係

＊単粒砂＋単粒礫の実験。本当の「粒度良好」ではない？
それでも10倍～20倍の変化がある。より
粒度良好ならば…

図9(a) 田中・戸井田（鹿島技研）の礫混入実験

図 6.4-6 田中・戸井田による礫混入実験例（1）



図−5 最大乾燥密度 ρdmax，透水係数 k と礫の最大粒径 Gmax の関係（礫混入率 Gm=50%）

図−6 最大乾燥密度 ρdmax，透水係数 k とベントナイト混入率 Bm の関係（礫混入率 Gm=50%）

礫混合によりBT混合土の透水係数は１オーダー低下（密度増による）

図−7 乾燥密度 ρd，透水係数 k と含水比 w の関係（礫混入率 Gm=50%）

kmin.とkoptの差は僅か。WET側では透水係数ほぼ一定

図9(a) 田中・戸井田（鹿島技研）の礫混入実験

図 6.4-7 田中・戸井田による礫混入実験例（2）

(5)　混合・締固め時の土粒子/メニスカス/ベントナイト粒の挙動シミュレーション

上記(3)では、締固め時含水比の違いがベントナイト吸水量⇒吸水ベントナイトの物性（強度や延性、粘性など）⇒ベントナイトと母材の付着状態⇒ベントナイト混合土の粒子間隙（有効通水間隙）構造⇒通水飽和及び長期透水実験による再膨潤後もこれが残存、というプロセスを仮説として述べた。このメカニズムを説明できれば、最小透水係数発現のメカニズムを本質から説明することができる。砂系材料の場合、粗細粒子を凝集させるのは粒子接点に架橋するメニスカスであるが、力学的には粒子同士を結合させる内部拘束力に落とし込めば同じ説明ができる。土の締固めの世界では、「締固め曲線があのように上に凸の形をとるのは何故か」という疑問に答えるべく、締固め中に土粒子に働く内部拘束力を導入する試みが建山[6]などによりなされてきた。図 6.4-8 及び図 6.4-9 には、中性子イメージング実験で捉えられた不飽和締固め時の粒子間メニスカスの形成状況、建山[6]によるメニスカスや内部拘束力のモデル化の事例と締固め曲線再現の事例、個別要素法（DEM）による粒状シミュレーション例を示している。中性子イメージング実験で取得される粒子間メニスカス（砂系模擬土）や吸水ベントナイトの粒子架橋状況、(3)で述べた吸水ベントナイト単体の粘着力などを初期状態及び粒子間特性の入力パラメータとして特定することができれば、最新の DEM 手法を用いた土粒子と吸水ベントナイトの混合⇒締固め中の挙動を可視化し、最小透水係数発現メカニズムの本質を説明することが可能となるかもしれない。

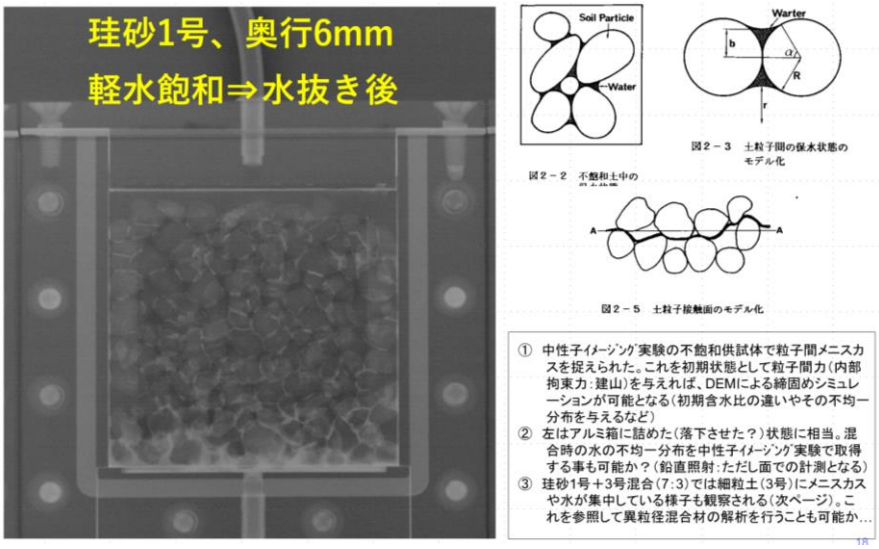


図 6.4-8　中性子イメージング実験結果とメニスカスのモデル化（建山）

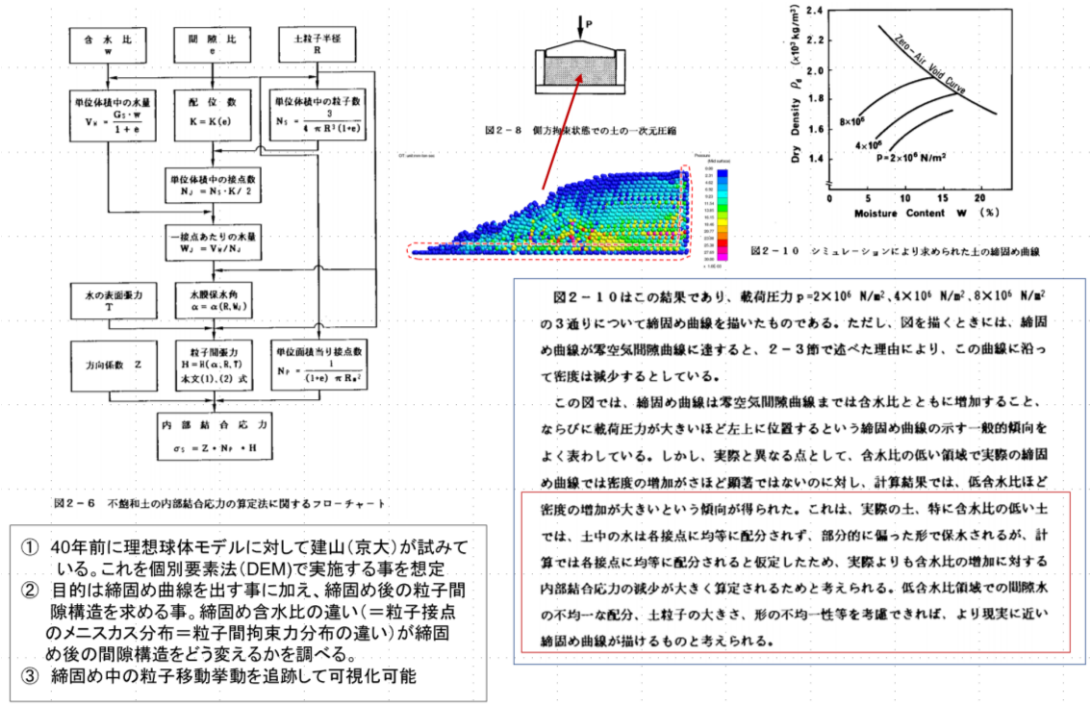


図２－６　不飽和土の内部結合応力の算定法に関するフローチャート

図２－８　側方拘束状態での土の一次元圧縮

図２－１０　シミュレーションにより求められた土の締固め曲線

図２－１０はこの結果であり、載荷圧力 p=2×10⁵ N/m²、4×10⁵ N/m²、8×10⁵ N/m² の３通りについて締固め曲線を描いたものである。ただし、図を描くときには、締固め曲線が零空気間隙曲線に達すると、２－３節で述べた理由により、この曲線に沿って密度は減少するとしている。

この図では、締固め曲線は零空気間隙曲線までは含水比とともに増加すること、ならびに載荷圧力が大きいほど左上に位置するという締固め曲線の示す一般的傾向をよく表わしている。しかし、実際と異なる点として、含水比の低い領域で実際の締固め曲線では密度の増加がさほど顕著ではないのに対し、計算結果では、低含水比ほど密度の増加が大きいという傾向が得られた。これは、実際の土、特に含水比の低い土では、土中の水は各接点に均等に配分されず、部分的に偏った形で保水されるが、計算では各接点に均等に配分されると仮定したため、実際よりも含水比の増加に対する内部結合応力の減少が大きく算定されるためと考えられる。低含水比領域での間隙水の不均一な配分、土粒子の大きさ、形の不均一性等を考慮できれば、より現実に近い締固め曲線が描けるものと考えられる。

① 40年前に理想球体モデルに対して建山(京大)が試みている。これを個別要素法(DEM)で実施する事を想定
② 目的は締固め曲線を出す事に加え、締固め後の粒子間隙構造を求める事。締固め含水比の違い(＝粒子接点のメニスカス分布＝粒子間拘束力分布の違い)が締固め後の間隙構造をどう変えるかを調べる。
③ 締固め中の粒子移動挙動を追跡して可視化可能

図 6.4-9　締固め現象のモデル化（建山）と DEM 解析（LS-DYNA）

図 6.4-9 中には建山[8]の博士論文中のコメントを赤字で囲った。「含水比の低い土では土中の水が各接点に均等に配分されず、部分的に偏った形で保水される」、「低含水比領域での間隙水の不均一な配分、土粒子の大きさ、形の不均一性等を考慮できれば」といった 30 年前の指摘の辺りに、本研究の解明に繋がる何かがありそうである。

第 6 章の参考文献

[1] 龍岡文夫: 土の締固めにおける飽和度管理の重要性, ダム技術, No.354, pp.3-16, 2016.

[2] Tomonori Sakita, Hideo Komine, Atsuo Yamada, Hailong Wang and Shigeru Goto: Influence of bentonite type and producing method on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture, E3S Web of Conferences, 205, 2020.

[3] 工藤淳, 庭瀬一仁, 千々松正和, 木村誠, 矢込吉則: 低レベル放射性廃棄物処理施設における難透水性覆土の透水性評価の一考察, 第 69 回土木学会年次学術講演会, Ⅲ-152, 2014.

[4] James K. Mitchell and Kenichi Soga: Fundamentals of Soil Behavior, Third Edition, ISBN: 978-0-471-46302-3, 2005.

[5] 田中俊行, 戸井田克: 礫-砂-ベントナイト混合土の透水特性と透水係数の評価方法, 土木学会論文集 C,Vol.64, No.1, pp.101-110, 2008.

[6] 建山和由: 土の締固め施工の合理化に関する研究, 京都大学博士論文, 1988.

第７章　まとめ

第7章　まとめ

7.1　本事業のまとめ

7.1.1　中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化

(1) 初期地圧測定技術の高度化開発

中深度処分施設の設置深度に応じた 3 次元の初期地圧を極力、場を乱すことなく、かつ、効率的に測定できる方法として、応力解放法に着目し、我が国に広く分布する堆積軟岩へ適用可能な新たな測定技術を開発することとし、前年度に実施した概念設計に基づき、今年度は試験装置の基本設計を行った。基本設計段階で検討すべき技術課題として以下に示す項目を抽出し、室内試験や解析的検討を通じて課題解決を図り、その検討成果を反映して基本設計としてとりまとめた。

- 孔形状及びひずみ計の最適配置の検討
- 接着方法及び接着剤の検討
- 接着方法及び接着剤の検討のための基礎試験
- 接着方法及び接着剤の検討のための岩石ブロックを利用した試験
- ストレインセルの検討
- データロガーの検討
- 掘削ツールスの検討
- 孔内状況確認方法の検討
- 感度試験方法の検討

初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討では、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法の適用性検討と、初期地圧測定装置の仕様の検討を実施した。

解析手法の適用性検討では、三軸圧縮試験のシミュレーションにより、試験時コアと同様なせん断面の形成を確認した。また、非線形性が現れる軸ひずみ付近で微視クラックが発生することが認められた。水圧破砕法試験の再現解析では、最大主応力方向のクラックの発生を再現できたが、破砕圧（応力レベル）を再現できない結果となった。水圧破砕法シミュレーションにおける破砕圧の再現が課題として残るが、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法として、DEM 解析が適用可能であることが確認できた。

初期地圧測定装置の仕様の検討では、まず 3D - FEM 解析を用いて、寸法、形状等をパラメータとした解析を行い、それらが解放ひずみに与える影響や、オーバーコアリング時の薄肉部の岩盤応力状態を概略的に検討した。その上で、3D-DEM 解析を用いて、現行仕様の円錐孔壁ひずみ法をモデル化した詳細検討を実施し、オーバーコアリング時の薄肉部の岩盤挙動を検討した。その結果、薄肉部を貫通するようなクラックは発生しないこと、ひずみゲージ設置位置近傍の岩盤では、マクロ的に概ね弾性挙動となることがわかった。以上の検討結果を踏まえて、現行仕様により円錐孔壁ひずみ法を堆積軟岩の現場に適用できる可能性があ

る見通しを得た。

(2) 地下水流動評価技術の調査

地下水流動評価技術（計測・測定及び解析技術）について、国内外の低レベル及び高レベル放射性廃棄物処分に係る既往の関連技術の調査を行い、我が国における中深度処分への適用を考慮した場合の現状分析と課題の抽出・整理を行った。実施にあたっては、原子力規制委員会により整備が進められている第二種廃棄物埋設事業の規制基準（特に中深度処分(L1)）における要求事項と原子力学会の学会標準や土木学会の技術検討の既往成果を十分に考慮し、さらには高レベル廃棄物地層処分に向けての関連技術等も参考にして、目的、想定される調査目標並びに処分事業の時間的変遷と測定・計測・解析の必要箇所・エリア等を想定し、それらへ適用可能な現状技術を分類・整理するとともに、適用に向けての技術課題等を考察した。

調査の結果、今後更なる検討が必要な項目として地下水流動評価におけるデータやパラメータに係る不均質性や不確実性の取り扱いが、新しく改訂された規制基準・規則における規制要求へ対応するために技術整備が望まれる項目として地下水等監視モニタリング技術が抽出された。

（抽出課題-1）：調査～パラメータ設定～設計～評価における不確実性の低減と評価

（抽出課題-2）：事業展開に応じた地下水等監視モニタリング技術の高度化と統合化整備

(3) 地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

地震時影響評価技術の検討として、今年度地表面に設置した地震計⑤の観測データや、過去に取得された地震計①～④の観測データを用いて以下の検討を実施した。

緩み領域及び空洞規模が観測地震動に与える影響の検討では、1 次元及び 2 次元モデルによる緩み領域を模擬した解析を実施した。その結果、評価対象の振動数帯（0～20Hz の範囲）では、空洞のインバート部に生じている緩み領域の影響は認められず、緩み領域が観測地震動に与える影響は小さいことがわかった。一方、空洞の規模の影響については、試験空洞の地震計①と計測坑 C の地震計④のフーリエスペクトル比の分析より、観測地震動には空洞規模の影響が含まれている可能性が示唆された。

地下及び地上の観測地震動の整合性の確認では、地表の地震計⑤の観測結果を用いて入力地震動を作成し、2 次元地震応答解析を実施した。その結果、試験空洞底盤位置の応答加速度を、解析結果と観測結果で比較すると、両者の結果は乖離し、その要因の一つとして、解析で用いている入力地震動が精度よく設定できていない可能性が考えられた。

現状の入力地震動作成のための引戻し解析における改良項目として、文献調査の結果を踏まえて「減衰定数の周波数依存性の考慮」と「逆解析による地盤物性の同定」が候補として挙げられ、次年度検討を進める予定である。

地震動観測については、今年度新規に地表面に地震計⑤を設置した。また、地震計①～④については、従来のシステムにより継続観測を行うとともに、地震観測システムのメンテナンスを実施した。

7.1.2　中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化

(1) 既往検討成果の調査と技術オプションの検討

中深度処分に係る規則等の改正及び審査ガイドの策定に関する新たな情報が原子力規制委員会より示されたことを受けて、前年度に引き続き既往検討成果の追加調査を行った。調査では特に「設計の選定プロセス」に重点を置き、本検討を行う上での考え方を整理した。

その考え方を参考にして、技術オプションの検討では、長期安全性に係る感度解析を実施し、そこで得られた人工バリア仕様の違いが線量評価結果に及ぼす影響度を参考に設計オプションを抽出した上で、設計オプションの絞り込みを試行した。

長期安全性に係る感度解析では、低拡散層と低透水層の部材厚をパラメータとして検討した。低拡散層の部材厚は、1×10^{-8}m/s 以下の透水係数を有する岩盤では被ばく線量にほとんど影響しない。その一方で、1×10^{-7}m/s 以上の透水係数を有する岩盤では、低拡散層の部材厚の低減に伴って被ばく線量は、増加する結果となった。また、低透水層の部材厚は、岩盤の透水係数によらず被ばく線量への影響度が小さいものの、岩盤の透水係数が 1×10^{-7}m/s 以上の場合では部材厚が 0cm になると被ばく線量が大きく増加することを明らかにした。

設計オプションの絞り込みでは、まず、天然バリアに係るオプションとして 2 種類の岩盤（母岩 A（透水係数：1×10^{-6}m/s)、母岩 B（透水係数：1×10^{-8}m/s)）を、人工バリアについては上記の長期安全性に係る感度解析で得られた知見を参考にした複数のオプションを設定し、それらを組み合わせることにより設計オプションのバリエーションを抽出した。その上で、閉鎖後長期の安全性と費用・経済性の二つを評価項目として設計オプションの絞り込みを試行した。閉鎖後長期の安全性については、個々の設計オプションに対して核種移行解析を実施して被ばく線量を算出し、費用・経済性については、工事種別のマクロ単価に物量を乗じることにより算出した処分施設の建設費に基づき、廃棄体一体当たりの事業費として評価している。この二つの評価項目を二軸として相関関係図としてグラフ化して示すこと、二つの評価項目を費用対効果という指標にして示すことが、設計オプションの絞り込みや最適化に向けた有効な手段の一つになることを明らかにした。

(2) ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究

土粒子の間隙とその間隙を通る水のメカニズムを解明することを目標に、令和３年度は、前年度に策定した 5 ヵ年計画に従いベントナイト系及び通常の土質材料の透水特性に関するデータの取得、及びメカニズムの評価を進めた。全体計画としての実験シリーズは、実験 A から実験 D により構成されるが、実験 A は最も基本的な情報を得るための室内 1Ec 締固め－透水試験であり、前年度に実施済であるため、令和 3 年度は、透水係数が締固め時の乾燥密度と飽和度に依存すると考え、乾燥密度と飽和度を調整した締固め供試体に対する透水試験（実験 B)、電子顕微鏡による締固め土の構造観察（実験 C）及び土粒子間隙における透水状態を可視化するための中性子イメージング実験（実験 D）を実施した。購入砂＋ベントナイト混合土に加えて、購入砂、購入砂＋珪砂粉末混合土を対象とした一連の実験を通じて計

画していた実験データを取得することができた。

それぞれの実験について結果の整理と考察を行った上で、ベントナイト系材料の透水特性メカニズムに関しての評価を示すとともに、現時点での技術的課題と今後の方策をとりまとめた。

おわりに

発電所廃棄物やTRU廃棄物（地層処分相当の廃棄物を除く）等の低レベル放射性廃棄物の中深度処分施設の計画、設計や円滑な建設及び操業には、より現実的な条件下で、各種の検討や実証試験等の積み重ねが必要となる。本事業は、こうした状況に鑑み、地下空洞型処分に係る調査技術の高度化を行うものである。

本事業では、天然バリア及び人工バリアを対象に、調査・計測、設計、評価に係る広範囲の技術を扱う。このため、事業の推進にあたっては、低レベル放射性廃棄物等の処分施設の計画・設計・施工・安全評価に関わりのある専門家からなる委員会を設け、幅広く関連する知見や意見等を取り入れて検討を進めることとした。

本事業の2年目となる令和3年度は、前年度に策定した事業の全体計画に基づき、具体的な技術開発や研究開発を進めた。

本事業の成果は、同様の処分施設形態が検討されているTRU廃棄物の地層処分についても、共通の基盤技術として幅広く反映可能であり、また、将来の中深度処分事業に対して極めて重要な情報を提供するものである。地下空洞型処分が安全で信頼に足るものとして社会に受け入れられるものとするために本事業の成果が活用され、地下空洞型処分システムが、ステークホルダーにとってより納得のいくものとなることを期待している。

添付資料－１

六ヶ所の軽石凝灰岩ブロックの試料採取

（第２章 2.1.4 (4) 1）参照）に係る現場写真

電気工事状況（計測坑B入口ケーブル設置）

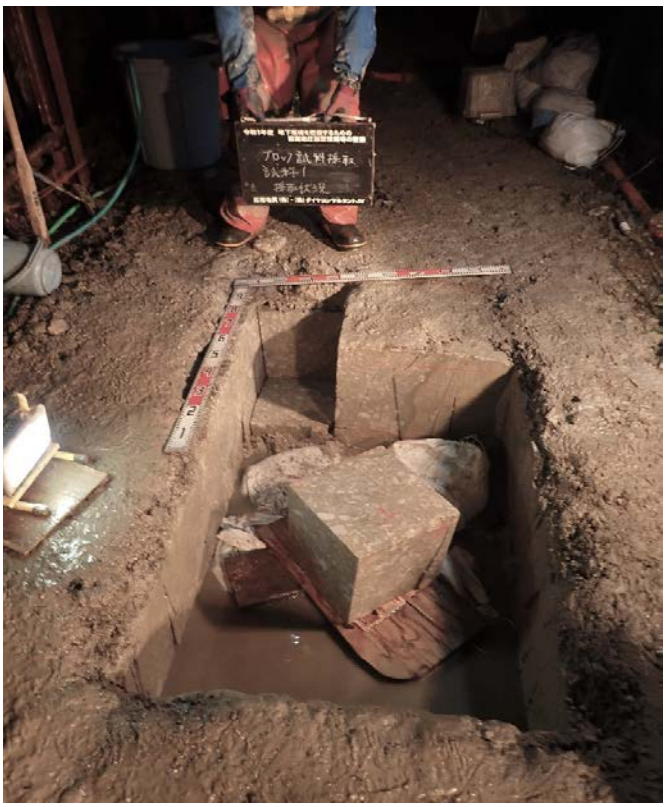
電気工事状況（計測坑B内ケーブル設置）

電気工事状況（発電機設置）

ブロック試料採取前

岩盤清掃・確認

ブロック試料切出し状況



ブロック試料採取状況

ブロック試料採取後・復旧状況

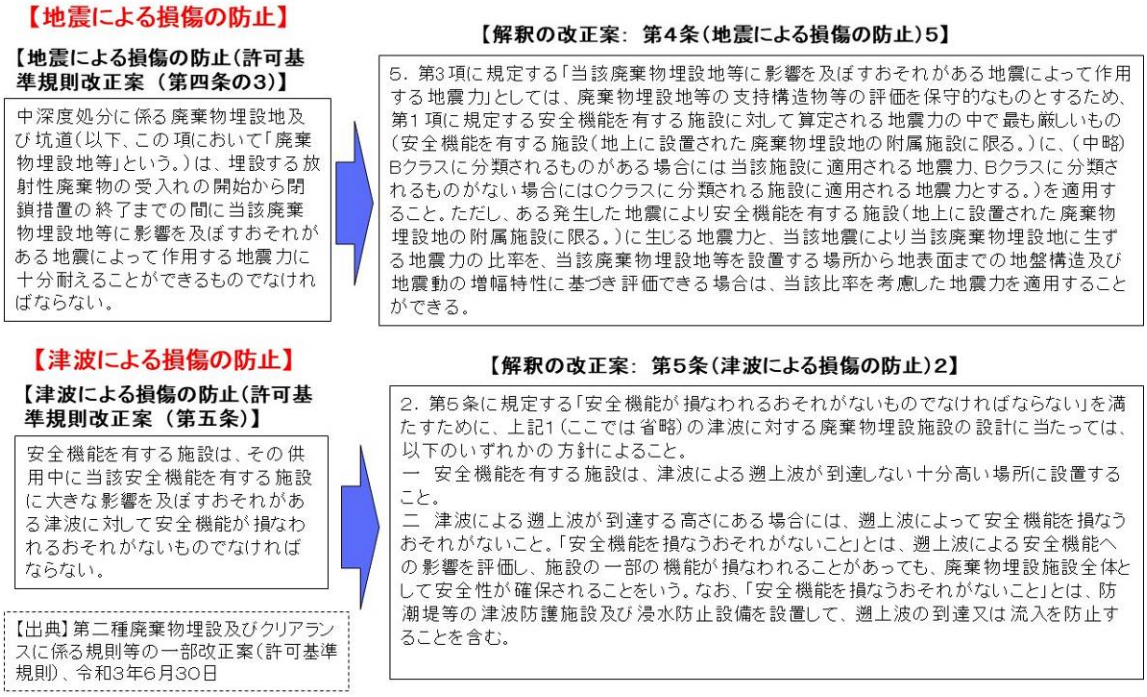
添付資料－２

中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化の内、

地下水流動評価技術の調査（第３章）の付録

（１） 低レベル放射性廃棄物中深度処分の新規制基準における“地下水流動評価技術”に関連する規制要求事項の要点整理

原子力規制委員会による中深度処分に係る新しい関連の基準規則の改正案が公表され、併せて一般への意見募集がなされたが、これらの中で、この経産省資源エネ庁委託事業「低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事象（地下空洞型処分調査技術高度化開発）の令和３年度報告書の中における本編第 3 章「地下水流動評価技術の調査」に関わるものと共に他の章での検討課題にも関係するものも規制の要求事項が示されているので、参考までにそれらの主要なものの要点を以下に整理しておく。



【遮蔽等】

【遮蔽等（許可基準規則改正案（第八条）】

廃棄物埋設地は、当該廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による事業所周辺の線量を十分に低減できるよう、遮蔽その他適切な措置を講じたものでなければならない。
2　廃棄物埋設施設は、放射線障害を防止する必要がある場合には、管理区域その他事業所内の人が立ち入る場所における線量を低減できるよう、遮蔽その他適切な措置を講じたものでなければならない。

【解釈の改正案：第8条（遮蔽等）】

1　第1項に規定する「線量を十分に低減できる」とは、平常時における廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線により公衆の受ける線量が、第13条第1項第1号及び第2号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出」及び第17条第1項に規定する「周辺監視区域の外の空気中の及び周辺監視区域の境界における水中の放射性物質」の放出により公衆の受ける線量を含め、法令に定める線量限度を超えないことはもとより、As Low As Reasonably Achievable（ALARA）の考え方の下、実効線量で50マイクロシーベルト/年以下であることをいう。
2　第2項に規定する「線量を低減できる」とは、次のことをいう。
一　管理区域においては、放射線業務従事者の受ける線量が、放射線業務従事者の線量限度を超えないものであること。
二　管理区域以外の人が立ち入る場所に滞在する者の線量が、公衆の線量限度以下になるようにすること。
3　第1項及び第2項については、ALARAの考え方の下、放射線業務従事者の作業性等を考慮して、遮蔽、機器の配置、遠隔操作、放射性物質の漏えい防止、換気等、所要の放射線防護上の措置を講じた設計がなされていること。

【安全機能を有する施設の維持】

【安全機能を有する施設の維持（第九条）】

中深度処分に係る廃棄物埋設地の附属施設（安全機能を有する施設に限る。）は、当該安全機能を健全に維持するための保守又は修理ができるものでなければならない。

【解釈の改正案】

（なし）

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案（許可基準規則）、令和3年6月30日

【放射性廃棄物の回収】

【放射性廃棄物の回収（第十条）】

中深度処分に係る廃棄物埋設施設は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了までの間において、健全性が損なわれ、又はそのおそれがある廃棄体を回収する措置を講ずることができるものでなければならない。

【解釈の改正案：放射性廃棄物の回収（第10条）】

1　第10条に規定する「廃棄体を回収する措置を講ずることができる」とは、廃棄体を安全に回収するための措置を講ずること及び回収した廃棄体を一時的に保管し必要な措置を講ずるための施設を設置することが技術的に可能であることをいう。

【異常時の放射線障害の防止】

【異常時の放射線障害の防止（第十一条）】

安全機能を有する施設は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、当該安全機能を有する施設に異常が発生した場合においても事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないものでなければならない。

【解釈の改正案：異常時の放射線障害の防止（第11条）】

1　第11条に規定する「異常が発生した場合においても事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないもの」とは、以下の異常の発生の可能性を検討し、異常が発生した場合における敷地周辺の公衆への実効線量の評価値が5ミリシーベルト以下であることをいう。
① 誤操作による放射性廃棄物の落下等に伴う放射性物質の飛散
② 廃棄物埋設施設内の火災及び爆発による影響
③ その他機器等の破損、故障、誤動作又は操作員の誤操作等に伴う放射性物質の外部放出等であって、公衆の放射線被ばくの観点から重要と考えられる異常

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案（許可基準規則）、令和3年6月30日

【中深度処分に係る廃棄物埋設地(1/5)】

【中深度処分に係る廃棄物埋設地（第十二条）】　(1/2)

中深度処分に係る廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。

一 断層運動、火山現象その他の自然現象により人工バリアの著しい損傷が生じるおそれがないものであること。

二 侵食により地表からの深さが七十メートル未満に減少するおそれがないものであること。

三 鉱物資源又は発電の用に供する地熱資源の掘採が行われるおそれがないものであること。

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案（許可基準規則）、令和3年6月30日

【解釈の改正案：中深度処分に係る廃棄物埋設地（第12条）】

第1項第1号の規定は、廃棄物埋設地の位置について、次のことを求めている。
一 人工バリアを、次に掲げる断層等を避けて設置すること。
① 後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち震源として考慮する活断層
② 上記①の活断層の活動に伴い損傷を受けた領域
③ 後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち地震活動に伴って永久変位が生じる断層及び変位を及ぼす地すべり面
④ 上記①及び③の断層等以外のものであって規模が大きい断層
（中略）
二 人工バリアは、廃棄物埋設地の建設・施工時において上記③及び④の断層等が発見された場合には、当該断層等を避けて設置するとの方針としていること。
【審査ガイドに記載する内容】　（本資料では要点のみ一部抜粋）
○「後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等」の調査・評価の方法に関して行われた調査・評価の方法の妥当性の確認にあたっては、敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド（原管地発第1306191 号（平成25 年6 月19 日原子力規制委員会決定））を準用する。
○「活断層の活動に伴い損傷を受けた領域」の設定の方法　（中略）
○事業許可における確認の視点
・上記に係る調査が事業許可申請までに適切に実施されていること並びに、それらを避けた場所に人工バリアを設置する設計となっていることを確認する。
・「後期更新世以降（約12～13万年前以降）の活動が否定できない断層等のうち地震活動に伴って永久変位が生じる断層及び変位を及ぼす地すべり面」（解釈第12 条1 一③）及び「上記①及び③の断層等以外のものであって規模が大きい断層」（解釈第12 条1 一④）については、事業許可後の廃棄物埋設地の建設段階においてそれらが廃棄物埋設地の設置場所に確認された場合の対応として、それらを避けて人工バリアを設置する方針であること及びそれが技術的に可能と見込まれることが示されていることを確認する。
三 廃棄物埋設地を、次に掲げる場所を避けて設置すること。
① マグマの貫入による人工バリアの破壊が生ずるような第四紀（現在から約258万年前まで）における火山活動に係る火道、岩脈等の履歴が存在する場所
② 第四紀に活動した火山の活動中心からおおむね15キロメートル以内の場所

【中深度処分に係る廃棄物埋設地(2/5)】

【中深度処分に係る廃棄物埋設地（第十二条）】　(2/2)

中深度処分に係る廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。

一 断層運動、火山現象その他の自然現象により人工バリアの著しい損傷が生じるおそれがないものであること。

二 侵食により地表からの深さが七十メートル未満に減少するおそれがないものであること。

三 鉱物資源又は発電の用に供する地熱資源の掘採が行われるおそれがないものであること。

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案（許可基準規則）、令和3年6月30日

【解釈の改正案：中深度処分に係る廃棄物埋設地（第12条）】

2 第1項第2号の規定は、廃棄物埋設地の位置について、隆起・沈降及び気候変動による大陸氷床量の増減に起因する海水準変動を考慮した侵食（廃棄物埋設地の近くに、河川がある場合は下刻の進展に伴って谷幅が広がる側方の侵食も考慮し、海岸がある場合は海食による侵食も考慮する）による10万年間の深度の減少を考慮しても、10万年後において廃棄物埋設地を鉛直方向に投影した地表面のうち、最も高度の低い地点から廃棄物埋設地の頂部までの距離が70メートル以上であることを求めている。
【審査ガイドに記載する内容】
○ 侵食による深度の減少に係る調査・評価の方法
・「隆起・沈降及び気候変動による大陸氷床量の増減に起因する海水準変動を考慮した侵食（廃棄物埋設地の近くに、河川がある場合は下刻の進展に伴って谷幅が広がる側方の侵食も考慮し、海岸がある場合は海食による侵食も考慮する）」（解釈第12 条2））の量（鉛直変位量）について公的研究機関が取りまとめたデータベース等を活用した文献調査、物理探査、ボーリング調査等により過去に形成された地形面と現在の地形面とのオフセット量の系統的な評価・解析や、氷期－間氷期サイクル1回以上を経た地形面を用いた変動量の評価の結果を踏まえ、設定されていることを確認する。

3　第1項第3号の規定は、廃棄物埋設地の位置について、資源利用のための掘削が行われる可能性がある十分な量及び品位の鉱物資源の鉱床の存在を示す記録が存在しないこと並びに地温勾配が著しく大きくないことを求めている。ここで「鉱物資源」とは、鉱業法（昭和25年法律第289号）第3条第1項に規定されているものをいう。
【審査ガイドに記載する内容】　（下記の記載があるが、ここでは項目のみ）
○ 鉱物資源の鉱床の存在を示す記録
○ 発電の用に供する地熱資源の採掘

【中深度処分に係る廃棄物埋設地(3/5)】

【中深度処分に係る廃棄物埋設地（第十二条）】

中深度処分に係る廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。

四　人工バリアを設置する方法により、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始後において廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する機能を有するものであること。

五　埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、埋設した放射性廃棄物に含有される化学物質その他の化学物質により廃棄物埋設地の安全機能が損なわれないものであること。

【解釈の改正案：中深度処分に係る廃棄物埋設地（第12条）】

4 第1項第4号に規定する「人工バリア」とは、次に掲げる要件を満たすものをいう。
一 人工バリアを設置する環境において（材料管理及び施工管理の方法の見通しを含め）技術的に施工可能なものであること。
二 埋設する放射性廃棄物の性状、当該放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質の特性（放射能濃度、放射能量、半減期及び移動に係るものをいう。）及び人工バリアを設置する環境並びに設計時点における国内外の関連技術等を踏まえて、劣化及び損傷に対する抵抗性に優れたものであること。
三 廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する機能が、当該人工バリアの地下水の浸入を抑制する機能、放射性物質を収着する機能その他の特性のうち、一つのものに過度に依存しないものであること。

5 第1項第4号に規定する「廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する」とは、地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まって、廃棄物埋設地から放射性物質が漏えいしない状況（工学的に有意な漏えいがない状況）を達成することをいう。

6 第1項第5号に規定する「安全機能が損なわれないものであること」とは、放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設され、又は設置された物が含有する可燃性の化学物質、可燃性ガスを発生する化学物質その他の化学物質の性質及び量に応じて、廃棄物埋設地の安全機能に有意な影響を及ぼさないよう対策を講じたものであることをいう。

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案（許可基準規則）、令和3年6月30日

【中深度処分に係る廃棄物埋設地(4/5)】

【中深度処分に係る廃棄物埋設地（第十二条）】

中深度処分に係る廃棄物埋設地は、次の各号に掲げる要件を満たすものでなければならない。

六 廃止措置の開始までに廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるものであること。

【解釈の改正案：中深度処分に係る廃棄物埋設地（第12条）】

7 第1項第6号については、埋設の終了後300～400年以内を目安とし、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるものであること。
8　第1項第6号に規定する「廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるもの」とは、次に掲げる要件を満たすものをいう。
一 廃止措置の開始後から数10万年を経過するまでの間において海水準変動に伴う侵食の影響を受けるおそれがある場所に廃棄物埋設地を設置する場合には、廃止措置の開始後から10万年が経過した時点において、放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設され、又は設置された物が混合したものと公衆との接近を仮定した設定に基づき、評価される公衆の受ける線量が20ミリシーベルト／年を超えないこと。
【今後検討する審査ガイドに記載する予定の内容】
○「放射性廃棄物、人工バリア、土砂その他の廃棄物埋設地に埋設され、又は設置された物が混合したもの」の設定の方法
○公衆の被ばくに係る評価パラメータの設定の方法

二 設計時点における知見に基づき、廃棄物埋設地の基本設計について、次に掲げる各シナリオに基づき、埋設した放射性廃棄物が廃止措置の開始後に公衆に及ぼす影響を評価した結果、それぞれの基準を満たすこと。
これらの評価は、廃棄物埋設施設の敷地及びその周辺に係る過去の記録や、現地調査等の最新の科学的・技術的知見に基づき行うこと。
（中略（:イ　自然事象シナリオ、ロ　ボーリングシナリオについて記載あり）
【今後検討する審査ガイドに記載する予定の内容】
○「区画別放射能量が最も多くなる区画」の設定の方法
○被ばく経路及び評価パラメータの設定

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案（許可基準規則）、令和3年6月30日

【中深度処分に係る廃棄物埋設地(5/5)】

【中深度処分に係る廃棄物埋設地(第十二条)】

2　中深度処分に係る廃棄物埋設地の安全設計は、廃棄物埋設地の周辺の環境、構造その他の主要な事項において異なる内容を含む複数の案(廃止措置の終了後における当該廃棄物埋設地の外への放射性物質の移動(当該移動した放射性物質の更なる移動を含む。)を十分に抑制することができる設計に限る。)を比較検討した上で、策定されたものでなければならない。

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案(許可基準規則)、令和3年6月30日

【解釈の改正案:中深度処分に係る廃棄物埋設地(第12条)】

9 第2項の規定は、中深度処分の廃止措置の終了後における公衆の受ける線量の評価について不確実性が大きいことを踏まえ、当該線量を実行可能な範囲でできる限り低減することを目的として、複数の設計の案を比較検討し、放射性物質の移動を抑制する性能に優れた設計を策定することを求めている。設計の策定は次に掲げる手順により実施すること。

一 以下を満たす複数の設計の案を策定する。

イ それぞれの設計が廃棄物埋設地を設置する岩盤等の水理地質構造、区画別放射能量、人工バリアの基本的な構造及び仕様において互いに異なる内容を含むこと。

ロ 廃止措置の終了後における廃棄物埋設地の外への放射性物質の移動(当該移動した放射性物質の更なる移動を含む。)を十分に抑制することにより、上記8二イの自然事象シナリオについて次のとおり設定し評価した公衆の受ける線量を十分に低減できること。

① 被ばくに至る経路は、放射性廃棄物に含まれる主要な放射性物質が廃棄物埋設地の外へ移動し、更に天然バリア中を移動して生活環境に至るまでの経路及び生活環境において公衆が被ばくするまでの主要な放射性物質の経路について、最も可能性が高い、又は保守的な設定とする。

② 人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータは、不確実性を考慮した上で科学的に通常起こり得ると考えられる範囲(この範囲内の状態を「通常の状態」という。)において保守的な設定とする。ただし、当該範囲を定められない場合は、科学的に合理的と考えられる範囲で最も厳しい設定とする。

ハ 法第51条の二第一項第二号の許可を受けようとする者が実行可能であること。

【審査ガイドに記載する内容】

○「公衆の受ける線量を十分に低減できる」の例

・「公衆の受ける線量を十分に低減できる」(解釈第12 条9 一ロ)について、次のような考え方に基づき判定されていることを確認する。

－自然事象シナリオ(解釈第12 条8 二イ)について、「被ばくに至る経路」及び「人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータ」を解釈第12 条9 一ロ①及び②のとおり設定し評価した公衆の受ける線量が、おおむね100 マイクロシーベルト／年を超えない。

【今後検討する審査ガイドに記載する予定の内容】

○「複数の設計の案」の比較検討の例

○「公衆の受ける線量」の評価に係る設定

二 上記一を満たす設計の案の中から、上記一ロについて人工バリア及び天然バリアの状態に係るパラメータの設定を通常の状態において最も可能性が高いものとし評価した公衆の受ける線量が最も小さくなる設計又はその他の理由で廃止措置の終了後における当該廃棄物埋設地の外への放射性物質の移動を抑制する性能(当該移動した放射性物質の更なる移動を抑制する性能を含む。)が最も優れた設計を選定する。

【監視測定設備】

【監視測定設備(許可基準規則改正案(第十五条)】

事業所には、次に掲げる事項を監視し、及び測定し、並びに必要な情報(第二号に掲げる事項に係るものに限る。)を適切な場所に表示できる設備を設けなければならない。

一　中深度処分を行う場合にあっては廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度又は廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質の濃度、ピット処分又はトレンチ処分を行う場合にあっては廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度又は線量

二　事業所及びその境界付近における放射性物質の濃度及び線量

三　地下水の水位その他の廃棄物埋設地及びその周囲の状況

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案(許可基準規則)、令和3年6月30日

【解釈の改正案:第15条(監視測定設備)】

1．第1 号に規定する、(中略) 監視、及び測定ができる設備は、次に掲げる要件を満たすものをいう。

一　中深度処分に係る廃棄物埋設施設は、埋設する放射性廃棄物の受け入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地から漏えいする放射性物質の濃度又は廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質を監視及び測定できる設計であること。

2.　上記1の設備は、次に掲げる要件を満たすものをいう。

一　測定期間及び使用環境に適応して実用上必要な精度で監視及び測定ができる性能を有し、かつ人工バリア及び天然バリアの機能を著しく損なわないものであること。

二　廃止措置の開始以降において設備を設置した場所を経由した放射性物質の異常な漏えいが生じるおそれがある場合は、異常な漏えいが生じないよう当該設備の解体及び埋戻しを行うことができるものであること。

3.　第1 号に規定する「廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質」とは、設置した人工バリアの破損等に伴い著しい変化が生じる地下水の成分、人工バリアの異常な劣化を検知するために用いるトレーサーをいう。

4.　第2号に規定する「事業所及びその境界付近における放射性物質の濃度及び線量」を監視し、及び測定できる設備は、埋設する放射性廃棄物の受け入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設施設からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による周辺環境における放射線量並びに操業に伴い周辺環境に放出される放射性物質の濃度等を監視及び測定できる設計であること。

5.　第3号に規定する「地下水の水位その他の廃棄物埋設地及びその周囲の状況」を監視し、及び測定できる設備は、事業規則19条の2に規定する定期的な評価等に必要なデータを取得するため、人工バリア及び天然バリアの機能並びにこれらに影響を及ぼす地下水の状況等の監視及び測定の項目を選定し、埋設する放射性廃棄物の受け入れの開始から廃止措置の開始までの間において、監視及び測定できる設計であること。ただし、実際の環境と類似した環境下での原位置試験等の間接的な方法により人工バリア及び天然バリアの機能並びにこれらに影響を及ぼす地下水の状況等のデータを取得できる場合は、当該方法によることができる。

【排水施設】

【排水施設（第十六条）】

：　中深度処分に係る廃棄物埋設施設には、埋設する放射性廃棄物の受け入れの開始から埋設の終了までの間、廃棄物埋設地の水没により当該廃棄物埋設地の安全機能が損なわれることを防止しするための施設を設けなければならない。

【解釈の改正案：第16条(排水施設】

1．　第16条に規定する、「廃棄物埋設地の水没により当該廃棄物埋設地の安全機能が損なわれることを防止しするための施設」とは、坑道及び廃棄物埋設地への雨水及び地下水の流入量を踏まえて、外部電源系統からのからの電気の供給が停止した場合においても使用することができる予備電源(停電等の外部電源系の機能喪失時に、排水設備を少なくとも7日観作動するために十分な容量イ及び信頼性を有する常設のものをいう。)を設けた排水施設をいう。

【出典】第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規則等の一部改正案(許可基準規則)、令和3年6月30日

（２） 低レベル放射性廃棄物中深度処分の新しい規制基準における“地下水流動評価技術”に関わる規制要求事項の要点と今後の技術的課題と対応案の整理

本編第 3 章「地下水流動評価技術の調査」の 3.2.5(2)において述べたように、令和 3 年において第二種廃棄物埋設に係る基準規則の特に中深度処分関連に係る改定案が原子力規制委員会より公表され、併せてこの改定案に対して一般への意見募集が開始された[23][24]。その後、それらの意見への回答も取りまとめ公表されるとともに、それに伴う関連基準規則の一部追加改訂もなされ [26]、さらにその後、第二種廃棄物埋設の事業に関する規則の改正に係る総理府令が令和 3 年 10 月 21 日に施行されている[22]。その結果、意見募集を経て改正されたものの中で、“地下水流動の評価技術”に関わる規制要求の要点、さらにはそれらに係る技術的課題と対応案について、本編第 3 章「地下水流動評価技術の調査」の表 3.2-9 にまとめたものを以下にも再掲しておく。

なお、この表の中で、一般への意見募集への回答がなされた際に、併せて規則の一部改正がなされており、地下水や放射物質の移行や漏出・漏えいに係る表現は統一的に次のような表現で統一されることとなった。

・廃棄物の埋設段階においては、放射性物質の漏えい監視の対象区域が廃棄物埋設の中のさらに限定された区域からの漏出を防止すると規定されていたものが、中深度処分の場合には規制期間終了まで廃棄埋設地からの漏出防止が規定されたことから不要となり、削除された。

・地下水や放射性物質の“移行”というような言い回しの中での移行は、“移動”という表現を使用する。

・放射性物質の“閉じ込め”というような言い回しのところでは“漏出の防止”（あるいは“漏えい抑制”というような表現を用いる。

以下の表における、上記の用語上の変更点に伴う整理表の変更箇所に下線で区別できるようにしておく。

【中深度処分の事業展開と規制要求を考慮した地下水流動に関わる調査・評価の対応案の整理(1/3)】

事業段階	対象区域ごとの規制要求事項の要点		地下水流動の調査・評価において必要な反映・対応案の整理
	廃棄物埋設地内	廃棄物埋設施設内	
立地段階～審査段階	・(設計プロセスの確認) 処分システム構成要素の中の人工バリア（低透水層、低拡散層、等）に割り当てられた機能（埋設地への地下水浸入抑制、放射性物質の漏出防止及び移行遅延、コロイドろ過、ひび割れ自己修復等）の性能（埋設地への地下水浸入率、透水係数、拡散係数、収着分配係数、地下水流速等）の定量的な評価がなされていること。 ・（人工バリアの性能評価に係る水理影響） 埋設地近傍の水理（地下水の水圧、流速・流向、等）は人工バリアからの放射性物質の流出条件の設定等に影響する。埋設地周辺の動水勾配、地下水流動、表流水の状況、等。	・(地下水移行経路の設定) 埋設地から生活圏へ至る地下水の移動経路を考慮し、主要な放射性物質の移動を抑制する性能(天然バリア性能)が優れていると考えられる埋設地設置場所を選定すること（通常想定される現象を考慮した評価により）。 ・坑道を設置する天然バリアは、放射性物質が移動しやすい経路が生じないよう坑道の閉鎖を行える見通しを有すること。	・地質地下水調査(全般)において、廃棄物埋設地の設置場所の選定（人間侵入対応の考慮から10万年後で70m確保；地下水の移動経路と流速場での十分な性能を確保） が適切に行えること。 ・坑道設置やモニタリング設備等の付属施設設置において、後段の坑道埋戻し・閉鎖や定期的な評価等へ十分に対応できる見通しを示すこと（地下水流動、湧水、核種移動等）。
建設段階	・(廃棄物埋設地掘削に際して合理的に可能な範囲で得られる情報) 埋設地から漏出した放射性物質の移動の評価において使用する天然バリアに係るモデル、パラメータ等（地質、断層の位置、透水係数、亀裂密度、水質等）について、建設段階に行われる先進ボーリング調査、空洞の掘削時の測定、側壁観察等によって合理的に取得可能な情報によって確認・検証できる調査方法の確認と取得可能な情報の関係が整理されていること。 ・特に、廃棄物埋設地となる予定の処分坑道エリアは、埋設地内から漏出した放射性物質の移動が十分に抑制された区域に設置されることが必要であり、そのことを確認できる情報が整理されていること。		・坑道内の地下水湧出水、岩盤の安定性維持、EDZ対策など、操業時の作業安全および地下水・核種移動上での十分な配慮を施すこと。 ・先進ボーリング・坑道掘削等の建設の初期段階における調査・観察・試験等の結果により。審査段階での調査評価の妥当性確認や後段の処分坑道・エリアのレイアウト計画あるいは定期的な評価に資する情報として適切に取得・整理されること。

【中深度処分の事業展開と規制要求を考慮した地下水流動に関わる調査・評価の実施項目の整理(2/3)】

廃棄物 埋設段階	・人工バリアの設計等に係る選択肢の設定 ：（廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止する）人工バリアの設置等により、放射性廃棄物の受入れ開始から廃止措置の終了までの間、地下水の浸入を防止する構造及び放射性物質の漏出を防止する構造が相まって、廃棄物埋設地から放射性物質が漏えいしない状況（工学的に有意な漏えいがない状況）を達成すること ・廃棄物埋設地の設置場所に係る選択肢の設定：廃棄物埋設地を合理的に設置可能な場所において、天然バリアによる廃棄物埋設地から生活環境への主要な放射性物質の移動を抑制する機能が優れていると考えられる複数の選択肢に関する技術的根拠を含む設定のプロセスを事業許可申請の段階絵示すことを要求。	・廃棄物埋設地は、埋設地内から漏出した放射性物質の移動が十分に抑制された区域に設置されること。	・廃棄物は埋設するパネルの建設設置と廃棄物の定置をパネル一定区画ごとに行い、埋め戻す作業が並行して進められるのでその作業安全の確保とともに、湧出水対策、地下水等のモニタリングを適切に実施し情報の 整理・分析を合理的に実施すること。 ・閉じ込め等が確保されていることの確認のためのモニタリングに加え、設計や管理の方法の妥当性の再評価を定期的に行うことなどの管理（能動的管理という） を行うこと。
坑道 埋め戻し 段階	・廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出を防止すること。 ・埋戻しにあたっては、人が容易に立ち入れないように措置されていること。 ・埋戻した領域が放射性核種の卓越した移動経路とならないよう措置されていること。	・廃棄物埋設地は、埋設地内から漏出した放射性物質の移動が十分に抑制された区域に設置されること。	・計画通りに埋め戻しがなされていることを示す（人間侵入、地下水移動経路への対処が適切になされていること等）を示す情報・データを取得・整理すること。 ・廃棄物埋設地から周辺区域への核種漏出と移動が十分に抑えられていることを確認するデータ・情報の取得と整理をすること。

【中深度処分の事業展開と規制要求を考慮した地下水流動に関わる調査・評価の実施項目の整理(3/3)】

保全段階	・廃棄物埋設地から周辺区域への核種漏出と移動が十分に抑えられていることを確認すること等。 ・埋戻し後の坑道の水みちとなる可能性や人間侵入への対策が適切に機能していること。 ・人工バリアへの想定される影響要因を考慮して、埋設地の状態を踏まえ、廃棄体からの主要な放射性物質の移動が、構成要素の性能の変化状態の予測精度の高いこと等、および埋設地に隣接する岩盤中の放射性物質の地下水中濃度が十分に低いことを確認すること等。		・廃棄物埋設地から周辺区域への核種漏出と移行が十分に抑えられていることを確認するデータ・情報の取得と整理をすること。 ・埋設地の周辺および坑道における地下水による核種の移動が設計を逸脱することなく性能を発揮していることの確認。
廃止措置段階		・地下水等の放射性線モニタリングによって、埋設地からの核種の異常な漏えい等の兆候のないことの確認。 ・その時点での最初の定期的な評価により、埋設地の離隔に係る措置に問題のないこと。 ・閉じ込めに影響を及ぼす要素や兆候がないこと。 ・自然事象に係るシナリオの評価結果が線量基準に適合していること。 ・モニタリング用に設置した観測孔が水みちを生じないよう適切に埋戻しされていること。	・この段階以降は、事業者によるモニタリングや万一の際の補修等の能動的管理が期待できないことから、埋設地周辺および周辺監視区域における地下水等および放射線モニタリングなどによる放射性核種の異常な漏出や移動状況がないことを確認し、万一異常が認められた際には補修等の対策が適切にとれるようにする。

【注】
1)【参考文献】　原子力規制委員会決定：炉内構造物の埋設に係る規制の考え方について、原規制技発第1608312号、平成28年8月31日.
2)「廃棄物埋設地」とは、放射性廃棄物を埋設する場所（人工バリアを含む）のことをいう。
3)「廃棄物埋設施設」とは、廃棄物埋設地及びその附属施設のことをいう。（附属施設：廃棄物埋設地へ放射性廃棄物を埋設するために設置される設備（地上の廃棄物受入れのための設備、搬送設備、放射線管理設備等）、坑道（地上から廃棄物埋設地に至る放射性廃棄物の搬入通路等）等）
4)「限定された区域」とは、放射性廃棄物を取り扱う区域、室等をいう。
＜→令和３年第３５回原子力規制委員会（令和３年９月２９日）の第二種廃棄物埋設及びクリアランスに係る規制等の改正案に対する意見と回答（資料２の別紙１）においては、許可基準規則第１２条第１項第４号における、【放射性物質の漏出防止】に係る要求事項の内容が一部変更され、「埋設する放射性廃棄物の受入れ開始後において廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏えいを防止する機能を有すること」を要求することとされた。この変更は、「埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から埋設の終了まで」の「限定された区画からの放射性物質の漏出の防止」に係る要求は不要と考え、限定された区画からの漏出に関する要求事項は許可基準規則に反映されないこととなった。
　さらに、【廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出の防止を求める期間】に関しては、中深度処分の廃棄物埋設地については、許可基準規則第１２条第２項におおいて、廃止措置の終了後における廃棄物埋設地の外への放射性物質の移動を十分に抑制することができる設計を要求している。＞

以上

添付資料－３

セメント系材料の熱影響に関する調査・整理

セメント系材料の熱影響に関する調査・整理

1. 調査対象

セメント系材料の熱影響に関する調査・整理にあたり、本報告書では、「余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方」[1]に基づき、図 1 の人工バリア構成を前提とし、調査対象の絞り込みを行った。図 1 に示した人工バリアの例は、セメント系材料によって核種の移行を抑制する概念となっている。このうち、充填材、コンクリートピット及び低拡散層について、セメント系材料が使用されるものと仮定し、当該人工バリアにおける熱影響についてまとめた。

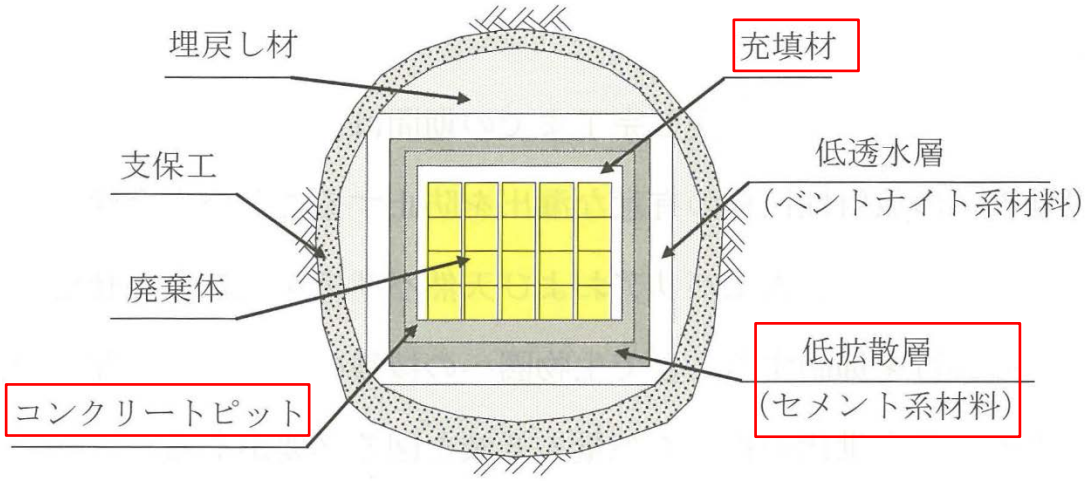


図 1　人工バリアの構成[1]

図 1 に例示した人工バリア構成の場合、放射線障害防止の観点から、表 1 に示す機能が要求される[1]。このうち、先述した 3 部材（区画内充てん材、コンクリートピット及び低拡散層）においては、基本安全機能のうち移行抑制機能である「核種収着性」及び「低拡散性」について、具体的な熱影響を調査することとした（表 1 の赤枠箇所）。

表 1　地下施設の各部位に要求される主要な機能[1]

			区画内充てん材	コンクリートピット	低拡散層	低透水層	空洞内充てん材	埋戻し材	処分空洞
基本安全機能		閉じ込め	–	●	–	●	–	–	–
		遮へい	●	●	●	–	–	–	–
	移行抑制	核種収着性	●	●	●	–	–	–	–
		低拡散性	–	–	●	–	–	–	–
		低透水性	–	–	–	●	●	–	–
		卓越した移行経路形成の防止	–	–	–	–	–	●	–
	離隔	離隔距離の確保	–	–	–	–	–	–	●
		容易な人間侵入の抑制	–	–	–	–	–	●	–
操業上の機能			–	●	●	●	–	–	●

核種収着性や低拡散性といった基本安全機能には、表 2 に示す、長期安全確保のための設計、品質管理及び検査を行ううえで考慮すべき項目が検討されている。そのうち、赤枠で囲んだ低拡散性及び核種収着性においては、それぞれ実効拡散係数及び収着分配係数が重要度の高いパラメータとしてそれぞれ定められている。そこで、これらのパラメータへの熱影響について着目することとし、既往の指針類または研究に関する文献調査・整理を行った。

表 2　長期安全確保のための設計、品質管理及び検査を行ううえで考慮すべき項目について（例）[1]

人工バリア機能	主な対応部位	重要度の高いパラメータ（施工時性能・状態）	性能を支配する主要な物理・化学特性	長期状態評価において考慮すべき主要な現象・反応	左記現象・反応に影響する当該部位の主要な特性（長期状態設定）	考慮すべき特性 ○施工時性能に係る特性 ＊長期性能に係る特性
低透水性	低透水層	○透水係数	モンモリロナイト層間イオン組成	・交換性陽イオンの変化	＊鉱物組成（層間イオン組成） ＊密度（かさ密度）	○ 透水係数 ○ 厚さ ＊ 鉱物組成 ＊ 密度（かさ密度） ＊ 強度・変形係数 ＊ 膨潤圧
			モンモリロナイト含有率	・モンモリロナイトの溶解	＊鉱物組成（モンモリロナイト含有率）	
			乾燥密度	・力学的変形に伴う密度・形状の変化 ・近接部材隙間等へのベントナイト流出	＊強度・変形係数 ＊膨潤圧	
			間隙水の水質	・塩水の影響 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	—	
		○厚さ	厚さ	・力学的変形に伴う密度・形状の変化 ・近接部材隙間等へのベントナイト流出	＊強度・変形係数 ＊膨潤圧	
			短絡経路の有無	・力学的影響による物理的損傷 ・膨潤による自己シール	＊膨潤圧	
	空洞内充てん材	○強度・変形係数（低透水層の拘束）	密度	・鉱物変質	＊鉱物組成	○ 強度・変形係数 ＊ 鉱物組成
低拡散性	低拡散層	○実効拡散係数	基質部の空隙構造	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	＊鉱物組成 ＊実効拡散係数	○＊ 実効拡散係数 ○ ひび割れ開口面積 ○ 厚さ ＊ 鉱物組成 ＊ 圧縮強度
		○ひび割れ開口面積	ひび割れ幅、長さ本数	・二次鉱物の生成によるひび割れ形成 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響 ・微生物活動 ・力学的変形に伴うひび割れの生成、進展 ・低透水層の不等沈下に伴う応力発生によるひび割れ形成	＊鉱物組成 ＊圧縮強度	
		○厚さ	厚さ（健全部）	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	＊鉱物組成	
核種収着性	区画内充てん材 コンクリートピット 低拡散層	○収着分配係数	鉱物組成	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 ・熱変質による鉱物変質	＊鉱物組成	○ 収着分配係数 ○ 収着体積 ＊ 鉱物組成
			間隙水の水質	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 ・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響	—	
		○収着体積	当該部位の体積	・セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成	＊鉱物組成	

2. セメント系材料の制限温度に関する指針類の調査

セメント系材料の制限温度については、日本建築学会により、原子炉格納容器を対象に、コンクリートの温度制限値が設けられている（表 3）[2]。これによると、温度荷重の作用状態が長時間の場合、一般部分におけるコンクリート温度の制限値として、65℃が規定されている。

また、第 2 次 TRU レポートでは、セメント系材料の熱変性による結晶化について指摘されている[3]。同レポートによれば、セメント系材料の熱変性、すなわち温度上昇による C-S-H ゲルの結晶化（トバモライト化）を避けるためには、初期の温度上昇を 80℃以下にするのが望ましいとされており、TRU 処分施設の設計においては、処分場内の最高温度を 80℃に制限することにより、熱変性の影響を抑制することとしている。

表 3　コンクリートの温度制限値（℃）[2]

温度荷重の作用状態	コンクリートの温度	
	一般部分	局　　部
長　時　間	65	90 注 1)
短　時　間	175	350 注 2)

注 1）配管貫通部など、注 2）配管破断による高温のジェット流を受ける

3. セメント系材料の熱変質に関する既往の文献調査・整理

3.1 調査結果一覧

文献検索結果一覧を表 4～表 21 に示す。セメント系材料の熱変質に関する文献検索の結果、281 件が該当した。このうち、本報告書で対象としている人工バリアと類似した条件で熱影響を受ける試験条件のものに着目した結果、49 件（破線太枠）が該当した。更にその中から、低拡散性または核種収着性について書かれているものに着目した。なお、核種収着性を代表する指標としては収着分配係数が挙げられるが、熱影響を受けたセメント系材料の収着分配係数を評価している文献は 0 件であった。そこで、収着分配係数に影響を及ぼすとされる鉱物組成、若しくは細孔構造について着目し、文献検索を実施した。その結果、5 件（実線太枠）の文献が該当した。以降では、これらの文献にて述べられている内容を示す。

表 4　文献調査結果一覧（1）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
1	発熱性セメント固化廃棄体の模擬供試体による圧縮強度の熱影響評価	橋本龍，庭瀬一仁	土木学会北海道支部論文報告集(CD-ROM)	No.75 ,No.G-06 (2019.01)	2019
2	セメント系材料の熱による変質に関する検討	根岸久美，芳賀和子，林大介，大和田仁	日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM)	Vol.2016 ,No.1D15 (2016.08.26)	2016
3	ヨウ素固定化セメントの発熱特性およびスケールアップ―(1)発熱影響による水和鉱物組成およびヨウ素固定相の評価―	桜木智史，山下雄生，菊池茂人，高橋陵太	日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM)	Vol.2015 ,No.H47 (2015.08.21)	2015
4	一定温度加熱に曝された骨構成細胞の熱的耐性	藏田耕作，高松洋	日本伝熱シンポジウム講演論文集(CD-ROM)	Vol.48th ,No.J232 (2011)	2011
5	高温負荷による普通・低熱ポルトランドセメント硬化体の細孔構造変化とイオン拡散性に及ぼす影響	蔵重勲，吉田崇宏，千田太詩，廣永道彦	電力中央研究所地球工学研究所研究報告	No.N07041 Page.29P (2008.07)	2008
6	セメント硬化体の熱影響に関する検討―温度 65℃におけるセメント系材料の変質状況について―	広永道彦，蔵重勲，井元晴丈	電力中央研究所地球工学研究所研究報告	No.N04013 Page.24P (2004.11)	2004
7	セメントロータリーキルンの操業下におけるオーバリティー	末沢匡司，清水敏則，中嶋英一，本多徹	耐火物技術協会セメント用耐火物研究会報告集	Vol.16th Page.79-90 (2000.11.16)	2000
8	鋼管のパイプ・イン・パイプ工法による管路改修技術について(既設管路の改修と耐震化技術の新規開発)	小泉勝，薮口貴啓	JAGREE	No.91 Page.42-49 (2016.05)	2016
9	座屈拘束ブレースの小塑性歪振幅における疲労性能の研究	小谷野一尚，小出秀一，中込忠男, 緑川光正，岩田衛	日本建築学会技術報告集	Vol.22 No.50 Page.115-119 (2016.02.20)	2016
10	鉄筋継手の性能評価に関する調査研究報告―A 級継手性能評価基準(案)の概要―	福島順一	鉄筋継手	Vol.48 No.3 Page.3-7 (2013.10.20)	2013
11	ゾノトライトを主体とする ALC の高温下の力学的性能に関する研究 その 2 各種軽量気泡コンクリートのひび割れ抵抗性 (Study of Mechanical Performance of Xonotlite-based ALC at High Temperature: Part 2: Crack resistance)	佐藤大知，今澤公一，橘高義典，国枝陽一郎，堀口昌利	日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	Vol.2020 ,No.1284 (2020.07.20)	2020
12	アンダーマッチング溶接により組み立てられた超高強度鋼 CFT 部材の構造性能と設計法 その 10 十字形部分架構の正負交番繰返し漸増振幅載荷実験 (Structural Peformance and Design Method of Concrete Filled High Strength Steel Tubular Members Assembled with Undermatching-Weld (Part10: Reverse Cyclic Loading Tests of Cross-shaped Partitial Frame))	神村拓海，酒井勇気，松尾真太朗，村上行夫	日本建築学会研究報告 九州支部(CD-ROM)	No.59 ,No.223 (2020.03.01)	2020
13	高強度鉄筋の溶接性に関する調査研究(その 1):溶接割れによる評価 (A STUDY ON WELDABILITY OF HIGH STRENGTH REINFORCING BARS (PART 1): EVALUATION BY WELD CRACKING)	矢部喜堂，成原弘之，中込忠男	日本建築学会構造系論文集	Vol.85 No.770 Page.455-461(J-STAGE) (2020)	2020
14	浸透探傷試験を用いた熱影響部近傍の微細クラック検出に関する研究 (STUDY ON MICRO CRACK DETECTION NEAR THE HEAT AFFECTED ZONE USING DYE PENETRANT TEST)	吉津利洋	日本建築学会技術報告集(Web)	Vol.26 No.62 Page.61-66(J-STAGE) (2020)	2020
15	火災による熱履歴を受けた鋼コンクリート合成桁の力学特性	高橋佑介，今川雄亮，大山理	複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集(CD-ROM)	Vol.13th ,No.17 (2019.11.14)	2019
16	マルエージング鋼による水冷管を内蔵した金属 3D 造形金型の製作 (Production of 3D-Printing Metallic Mold that has Inner Water-Cooling Channels by Maraging Steel.)	戸羽篤也，鈴木逸人，平野繁樹，長船康裕，葛西勝明，葛西健央	北海道立総合研究機構工業試験場報告	No.318 Page.45-51 (2019.08.31)	2019
17	放射線照射環境下にあるコンクリートの物性変化に関する研究(その 23:放射線照射に対する健全性評価)	紺谷修，澤田祥平，石川俊介，丸山一平，滝沢真之，江藤淳二	日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	Vol.2019 ,No.21623 (2019.07.20)	2019
18	浸透探傷試験を用いた熱影響部近傍の微細クラック検出に関する研究(その 2 太径鉄筋の溶接継手)	岸千優輝，吉津利洋，小川大貴	日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	Vol.2019 ,No.1133 (2019.07.20)	2019

表 5　文献調査結果一覧（2）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
19	ヒート&クールトレンチの地中伝熱数値解析による熱的効果推定法の検討 (Research on the Thermal Effect Estimation Method of a Heat/Cool Trench through Subterranean Heat Transfer Numerical Analysis)	垂水弘夫 , 神保歩未 , 塩谷正樹 , 岩瀬和夫	空気調和・衛生工学会論文集	No.263 Page.11-18 (2019.02.05)	2019
20	火災による熱履歴を受けた鋼橋の力学特性に関する実験的検討	高橋佑介 , 今川雄亮 , 大山理	日本道路会議論文集(CD-ROM)	Vol.33rd ,No.5021 (2019)	2019
21	火災を受けたコンクリート部材から採取したコアの圧縮応力 - 体積ひずみ曲線による変形特異点を用いた火害損傷深さの推定に関する基礎的研究 (A BASIC STUDY ON ESTIMATION OF FIRE-DAMAGED DEPTH OF DEFORMATION SINGULARITY BY COMPRESSIVE STRESS-VOLUME STRAIN CURVE OF CORE SAMPLED FROM FIRE DAMAGE CONCRETE MEMBER)	春畑仁一 , 新井真 , 池田憲一	日本建築学会構造系論文集	Vol.84 No.765 Page.1497-1502(J-STAGE) (2019)	2019
22	ヒート&クールトレンチの熱的効果の実態把握と推定法に関する研究 その 3 熱的効果予測のための地中伝熱数値計算モデルの開発	垂水弘夫 , 神保歩未 , 塩谷正樹	三建設備工業事業開発本部技術報告	No.25 Page.1-6 (2018.12.14)	2018
23	鉄筋組カゴの製作に用いる点溶接が鉄筋に及ぼす影響について	義岡里美 , 白石芳明 , 山本康雄 , 宇治公隆 , 宮川豊章	土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	Vol.73rd ,No.V-464 (2018.08.01)	2018
24	既設 RC 床版取替時のスタッド溶植熱による桁変位に関する一考察	太田翔 , 野口堅冬 , 平塚慶達	土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	Vol.73rd ,No.I-060 (2018.08.01)	2018
25	過酷事故時の溶融デブリによるコンクリートの熱的 劣化とセラミックスの熱耐性に関する実験的研究	奈良林直 , 晴山隆仁 , 千葉豪 , 林司 , 今野隆博 , 山口篤憲	日本保全学会学術講演会要旨集	Vol.15th Page.93-97 (2018.07.10)	2018
26	100℃以下の加熱を受けるコンクリートの水分状態と圧縮強度に関する研究動向 (The Research Trend of Moisture Content and Compressive Strength Change in Concrete Subjected to Long-term Heating up to 100℃)	酒井正樹	コンクリート工学	Vol.56 No.3 Page.251-259 (2018.03.01)	2018
27	ヒート&クールトレンチの熱的効果の実態把握と推定法に関する研究 その 2 トレンチ内ダクト敷設による地中熱・間接利用システムの有効性評価	垂水弘夫 , 神保歩未 , 塩谷正樹	三建設備工業事業開発本部技術報告	No.24 Page.1-4 (2017.10.30)	2017
28	鉄筋継手形状毎の機械的性質と材質変化について	高橋明彦 , 八城勇一 , 久田真 , 鎌田貢 , 大西弘志	土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	Vol.72nd ,No.V-283 (2017.08.01)	2017
29	耐火保護層を有するコンクリートの輻射熱による熱伝導特性に関する実験的検討	新井崇裕 , 丸山宣男 , 山田祐輝 , 藤本哲明	コンクリート工学年次論文集(CD-ROM)	Vol.39 ,No.1178 (2017.06.15)	2017
30	過酷事故を経た鉄筋コンクリート構造体の耐力評価(その 3)縮小模型による耐力試験のシミュレーション解析	肱岡康雄, 正木洋, 斎藤高一, 後藤靖之, 紺谷修 , 石川俊介 , 川角佳嗣 , IRID, 東芝, 日立 GE ニュークリア・エナジー	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2016 ,No.3E12 (2016.08.26)	2016
31	過酷事故を経た鉄筋コンクリート構造体の耐力評価(その 1)コンクリートの高温加熱・水中曝露試験	正木洋, 田中徳彦, 川原田義幸, 斎藤高一, 後藤靖之, 紺谷修 , 石川俊介 , 川角佳嗣 , IRID, 東芝, 日立 GE ニュークリア・エナジー	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2016 ,No.3E10 (2016.08.26)	2016
32	樹脂接着系あと施工アンカーの引抜き工法についての検討	中野秀紀 , 藤井保也 , 富井孝喜 , 谷田部勝博	土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	Vol.71st ,No.VI-605 (2016.08.01)	2016
33	鋼管コンクリート杭の杭頭接合筋の配置方法に関する研究(その 3 施工性確認試験・溶接熱に関する解析的検討)	田口智也 , 金子治 , 中原理揮 , 稲永英治	日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	Vol.2016 ,No.20363 (2016.07.20)	2016
34	素材別に学べる金属材料入門 第 4 回 鉄(後編)	木藤茂	型技術	Vol.31 No.8 Page.126-130 (2016.07.01)	2016
35	研究拠点機能向上のための遠隔技術開発(8)放射化コンクリートの特性評価に向けたレーザー診断技術開発	山田知典 , 大道博行 , 河村弘 , 島田義則	日本原子力学会春の年会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2016 ,No.1M17 (2016.03.16)	2016
36	二葉南港冷凍物流センター	永田貴祐 , 早川紀元	近代建築	Vol.70 No.2 Page.146-149 (2016.02.05)	2016
37	福島第一の廃炉に関する高専での研究と教育の試み(2)福島第一原子力発電所におけるコンクリートの熱分布シミュレーション	林久資 , 緑川猛彦 , 篠木政利 , 佐藤正知	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2015 ,No.M25 (2015.08.21)	2015
38	熱可塑性 CFRP における金型・成形技術の開発動向 事例 3 電鋳金型と炭素繊維強化プラスチック成形	大山寛治	型技術	Vol.30 No.5 Page.044-047 (2015.05.01)	2015

表 6　文献調査結果一覧（3）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
39	コンクリートに埋め込まれた金属系アンカーの引抜き特性に及ぼす高温加熱の影響 (INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE HEATING ON PULL-OUT PROPERTIES OF MECHANICAL ANCHOR EMBEDDED IN CONCRETE)	松沢晃一 , 橘高義典 , 刈田祥彦	日本建築学会構造系論文集	No.707 Page.29-37 (2015.01.30)	2015
40	保水性コンクリート敷設が屋上面に及ぼす熱的影響の解析	柳田加奈子 , 山田宏之 , 青野靖之 , 植山雅仁	日本農業気象学会近畿支部大会講演論文集	No.7 Page.6-7 (2014.11)	2014
41	火災後の建物調査 消防機関の実施する火災調査の課題	北村芳嗣	火災	Vol.64 No.5 Page.2-7 (2014.10.20)	2014
42	過酷事故を経た鉄筋コンクリート物性把握のための基礎試験(その 2)コンクリートの熱影響評価試験	澤田祥平 , 紺谷修 , 中根将士 , 今村祐一郎 , 小林保之	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2014 ,No.E17 (2014.08.22)	2014
43	耐火パネルを取付けた合成桁の加熱実験	柳澤則文 , 長谷亮介 , 大山理 , 栗田章光	鋼構造論文集	Vol.20 No.80 Page.1-10 (2013.12.25)	2013
44	エネルギー関連施設の基礎 世界最大容量の LNG 地下タンク	柏木幹雄	基礎工	Vol.41 No.12 Page.062-065 (2013.12.15)	2013
45	放射線照射環境下にあるコンクリートの物性変化に関する研究―その 5 中性子照射試験の概要―	河野洋介 , 丸山一平 , 紺谷修 , 滝沢真之 , 澤田祥平 , 佐藤理	日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	Vol.2013 ,No.21658 (2013.07.20)	2013
46	高温加熱の影響を受けたコンクリートのひび割れ抵抗性	松沢晃一 , 橘高義典	日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	Vol.2012 ,No.1381 (2012.07.20)	2012
47	住宅基礎コンクリートの耐久性向上に関する基礎的研究(その 6.住宅基礎用弾性塗料の劣化状態の違いによる中性化抑制効果に関する実験)	堀一夫 , 深井公 , 杉山雅	日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	Vol.2012 ,No.1232 (2012.07.20)	2012
48	昭和初期の構造物から採取したコンクリートの性状評価	沢木大介	月刊コンクリートテクノ	Vol.30 No.9 Page.9-16 (2011.09.01)	2011
49	ビーライト量を 70%以上に高めた超低発熱ポルトランドセメントの使用による温度ひび割れ抵抗性向上に関する研究 (Improvement of thermal crack resistance using super low-heat portland cement with a belite content more than 70 percent)	佐々木憲明 , 後藤貴弘 , 高尾昇 , 鳴瀬浩康	三菱マテリアルセメント研究所研究報告(CD-ROM)	No.12 Page.15-29 (2011.01.04)	2011
50	高速増殖実証炉に向けた格納容器設計技術開発(5)SCCV に用いるスタッドのせん断特性に関する実験的検討	根岸和生 , 加藤篤志 , 秋山洋 , 原裕之 , 宮本圭一 , 城台顕	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2010 ,No.P37 (2010.08.27)	2010
51	高速増殖実証炉に向けた格納容器設計技術開発(4)SCCV に用いるスタッドの引張り特性に関する実験的研究	根岸和生 , 加藤篤志 , 秋山洋 , 岩崎幹典 , 高見信嗣 , 梅木克彦	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2010 ,No.P36 (2010.08.27)	2010
52	強震動を受ける CFT 多層骨組の CFT 柱損傷率と H 形鋼梁損傷率 その 6.溶接熱影響を受けた H 形鋼フランジの破断伸び	後藤勝彦	日本建築学会学術講演梗概集 C-1 構造 3	Vol.2010 Page.1251-1252 (2010.07.20)	2010
53	鉄筋継手工事標準仕様書改訂の要点 2.ガス圧接継手工事編	成原弘之	鉄筋継手	Vol.44 No.4 Page.17-18 (2010.01.28)	2010
54	PC 鋼材技術の現状 (Recent Topics on Prestressing Steel)	山田眞人	コンクリート工学	Vol.47 No.11 Page.3-8 (2009.11.01)	2009
55	大正期に施工された鉄筋溶接継手の調査	杉江夏呼	鉄筋継手	Vol.44 No.3 Page.2-5 (2009.10.20)	2009
56	強震動を受ける CFT 多層骨組の CFT 柱損傷率と H 形鋼梁損傷率 その 5.H 形鋼フランジの破断伸びに及ぼす溶接熱影響の実験	後藤勝彦 , 東浩一 , 最相元雄	日本建築学会学術講演梗概集 C-1 構造 3	Vol.2009 Page.1237-1238 (2009.07.20)	2009
57	赤外線画像を用いたコンクリート欠損検出へ及ぼす外部環境の影響評価	山本大祐 , 鈴木哲也 , 青木正雄	農業農村工学会大会講演会講演要旨集	Vol.2009 Page.528-529 (2009.07.15)	2009
58	首都高速道路タンクローリー火災事故と復旧	長谷川和夫	JSSC (Japanese Society of Steel Construction)	No.71 Page.41-43 (2009.01.31)	2009
59	首都高速 5 号池袋線タンクローリー火災事故の復旧工事―首都高史上最大規模の構造物損傷を 73 日間で復旧―	桑野忠生 , 増井隆 , 鈴木寛久 , 依田勝雄	土木学会誌	Vol.93 No.12 Page.30-33 (2008.12.15)	2008

表 7　文献調査結果一覧（4）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
60	ALC パネルの各種強度性状に及ぼす加熱の影響 その 1 加熱後の ALC パネルの曲げ強さ及び X 線回折による ALC 結晶構造の分析 (INFLUENCE OF HEATING ON THE VARIOUS STRENGTH PROPERTIES OF ALC PANEL: Part 1: Bending strength of ALC panel after heating and analysis of ALC crystal structure by X-ray diffraction)	遠藤利二 , 橘高義典	日本建築学会構造系論文集	No.633 Page.1921-1926 (2008.11.30)	2008
61	PC 鋼棒の熱影響による耐力低下に関する検討	玉越隆史 , 春田健作 , 小林寛 , 武田達也 , 古賀友一郎	国土技術政策総合研究所資料	No.487 Page.115P (2008.11)	2008
62	人工バリアの長期挙動の評価(2)経年コンクリートを用いた変質データの取得	坂本浩幸 , 柴田真仁 , 中西博 , 大和田仁	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2008 Page.L36 (2008.08.21)	2008
63	非破壊試験によるコンクリート構造物の熱影響評価に関する研究―室内実験による火害評価の検討― (RESEARCH ON HEAT INFLUENCE EVALUATION OF CONCRETE STRUCTURE BY NONDESTRUCTIVE TESTING EXAMINATION OF FIRE-HARM EVALUATION BY LABORATORY EXPERIMENT)	小林幸一 , 枝広英俊	セメント・コンクリート論文集	No.61 Page.211-218 (2008.02.20)	2008
64	ALC 住宅の室内気候調整能力に関する基礎的研究 (A study on the indoor climate control capability of house with AAC panel)	築山祐子 , 千葉陽輔 , 須永修通	太陽/風力エネルギー講演論文集	Vol.2007 Page.125-128 (2007.10.25)	2007
65	ミクロセル腐食とマクロセル腐食についての一考察	幸英昭	材料と環境討論会講演集	Vol.54th Page.337-340 (2007.10.15)	2007
66	あと施工アンカーの選定と施工上の注意点について「あと施工アンカーの選択」	細川洋治 , 岩渕茂樹 , 戸辺勉 , 佐藤貴志	空衛	Vol.61 No.10 Page.11-23 (2007.10.10)	2007
67	人工バリア長期性能確証試験―(11)経年コンクリートを用いたナチュラルアナログ検討―	坂本浩幸 , 柴田真仁 , 加藤博康 , 下田紗音子 , 大和田仁 , 朝野英一	日本原子力学会秋の大会予稿集 (CD-ROM)	Vol.2007 Page.J44 (2007.09.07)	2007
68	8 電極エレクトロガスアーク溶接工法―外ダイヤフラム形式鋼管柱(EG コラム)の開発―	藤平正一郎 , 橋田知幸 , 沼田俊之	溶接技術	Vol.54 No.7 Page.68-75 (2006.07.01)	2006
69	溶接構造物のリスクベースメンテナンス(1) (Risk Based Maintenance of Welded Structure (1))	馬場秀成 , 弥富政享 , 富士彰夫	溶接学会誌	Vol.75 No.4 Page.234-237 (2006.06.05)	2006
70	空港コンクリート舗装の目地間隔に関する検討	坪川将丈	舗装	Vol.41 No.6 Page.29-33 (2006.06.01)	2006
71	マドリード市ウィンザービル火災調査 その 5 近年の高層ビル火災から学ぶこと	丹羽博則	火災	Vol.55 No.5 Page.31-37 (2005.10.20)	2005
72	マドリード市ウィンザービル火災調査 その 3 部分崩壊の経過	池田憲一	火災	Vol.55 No.5 Page.21-24 (2005.10.20)	2005
73	屋上緑化の実測と都市への熱的効果の試算（その 1）概要および放射特性	野村明子 , 石野久弥 , 永田明寛 , 郡公子 , 一ノ瀬雅之 , 岡村製作所, 東京理大	日本建築学会学術講演梗概集 D-2 環境工学 2	Vol.2005 Page.1261-1262 (2005.07.31)	2005
74	使用済み燃料貯蔵コンクリートキャスクキャニスタ候補材の破壊靭性特性 (Fracture Toughness Properties of Candidate Canister Materials for Spent Fuel Storage by Concrete Cask)	新井拓 , 黛正己 , NIU Libin , 高久啓	鉄と鋼	Vol.91 No.5 Page.493-500 (2005.05.01)	2005
75	基部に極軟鋼を用いた鋼製橋脚の耐震性能に関する研究 (Seismic Resistant Performance Test on Steel Bridge Piers with Low Yield Steel at its Base)	山本亮明 , 青木徹彦 , 鈴木森晶	愛知工業大学研究報告 B 専門関係論文集	No.40 Page.151-157 (2005.03.31)	2005
76	日本大学生産工学部 学術フロンティア・リサーチ・センター 平成 16 年度研究報告書 プロジェクト:地球環境調和型新技術開発を目的とする水の高度利用に関する研究 超臨界水反応装置に関する研究 (Nihon Univ., College of Industrial Technology, Academic frontier research center. Research report in H16 fiscal year, by advanced water utilization project to develop new technology related to global environment harmonization. Study on supercritical water reactor.)	朝比奈敏勝 , 村田守 , 星野和義 , 鈴村暁男 , 塩谷義	日本大学生産工学部学術フロンティア・リサーチ・センター 平成 16 年度研究報告書	Page.29-32 (2005)	2005
77	工事報告 ジェイパーク八広新築工事	夏野道雄	圧接	Vol.39 No.3 Page.7-9 (2004.10.20)	2004

表 8　文献調査結果一覧（5）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
78	気候・風土・建築設備の融合―沖縄特集 沖縄における建築設備維持の特長 (The Characteristic of Maintenance of Building and Facilities in Okinawa)	井上宏 , 原省吾	空気調和・衛生工学	Vol.78 No.9 Page.793-797 (2004.09.05)	2004
79	[ビルもの設計力]鍛錬塾(2)特別編 最新ビルも続々採用!CFT 造[材料×現場]集中講義 第 1 章 基礎編 ここがポイント!CFT 造の基礎知識 基礎編 7 高強度を確実に実現 プレキャスト CFT の活用方法	今村輝武	建築知識	Vol.46 No.7 Page.224-226 (2004.06.01)	2004
80	コンクリートの検査 RC 建造物への赤外線システム適用性の検討 東海道新幹線コンクリート構造物に対する適用性について	小沢弘章	検査技術	Vol.8 No.8 Page.7-10 (2003.08.01)	2003
81	東海道新幹線 RC 橋脚の鋼板巻き耐震補強工の施工	渡辺慎一	日本鉄道施設協会誌	Vol.41 No.5 Page.370-372 (2003.05.01)	2003
82	高周波誘導加熱または溶接により緊結したアンカー筋頂部の力学性状 (MECHANICAL BEHAVIOURS OF TOP ANCHORAGE PORTIONS OF ANCHOR STEEL BARS HEATED AND PRESSED OR WELDED.)	岸本幸泰 , 中島茂寿 , 内藤勤伍 , 今浜義昭	構造工学論文集 B	Vol.49B Page.527-532 (2003.03.20)	2003
83	山須原ダム洪水吐ゲート取替工事に伴う既設部材の材質試験結果について	一番ケ瀬正也	水門鉄管	No.213 Page.77-80 JST COPY SERVICE NOT AVAILABLE (2003.01.10)	2003
84	コンクリート構造物の火災安全性について (Fire Safety to Concrete Structures.)	小野紘一 , 太田義和	コンクリート工学	Vol.40 No.7 Page.10-15 (2002.07.01)	2002
85	コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告	小野紘一 , 太田義和	コンクリート工学年次論文集	Vol.24 No.1 Page.9-18 (2002.06.08)	2002
86	21 世紀に期待されるキーワード ウォータジェット加工	高見邦英	機械技術	Vol.49 No.12 Page.72-73 (2001.11.20)	2001
87	笹路川橋の設計・施工 プレグラウト PC 鋼材を用いた PRC3 径間連続ポータルラーメン中空床版橋	荒川一成 , 竹之熊邦志 , 大久保孝 , 伊達安子	プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	Vol.11th Page.269-274 (2001.10.15)	2001
88	スタッド溶接を応用した鉄筋溶接継手の疲労強度	大西弘志 , 松井繁之 , 野中晴夫 , 阪野雅則 , 西川和一 , 豊岡恒夫	溶接学会全国大会講演概要	No.69 Page.466-467 (2001.09.10)	2001
89	屋上緑化が集合住宅最上階に与える熱的影響	福田淳 , 小楠良雄 , 中村聡 , 加藤信男	日本緑化工学会誌	Vol.27 No.1 Page.209-210 (2001.08.31)	2001
90	道路橋における鉄筋コンクリート床版の防水工に関する研究（その 3）床版防水工と鉄筋コンクリート床版の付着切れが与える影響の検証	野村謙二 , 魚本健人	生産研究	Vol.53 No.5/6 Page.317-320 (2001.05)	2001
91	鋼板コンクリート壁の熱荷重作用下における挙動に関する一考察 (Study on property of Concrete filled steel bearing wall subjected to high temperature.)	関本恒 , 近藤誠	構造工学論文集 B	Vol.47B Page.481-490 (2001.03.20)	2001
92	溶接継手を有する鉄筋コンクリート梁の水中疲労強度 (Fatigue Properties of Submerged Concrete Beams Reinforced by Welded Rebar Mesh.)	菅原亮 , 横田弘 , 秋本孝	港湾技研資料(国土交通省港湾技術研究所)	No.983 Page.17P (2001.03)	2001
93	実大 PCa 梁下端主筋の溶接継手に関する実験的研究 溶接に伴う残留応力の検討	安部弘康 , 桜井徹 , 藤本利昭 , 西原寛	安藤建設技術研究所報	Vol.6 Page.19-24 (2000.10.01)	2000
94	サンドイッチ型複合床版の舗装熱影響について	斉藤浩 , 井沢衛 , 阿部幸夫 , 関口修史	土木学会年次学術講演会講演概要集 第 1 部	Vol.55th 共通セッション Page.546-547 (2000.08.31)	2000
95	プレキャストコンクリート版による高効率電熱融雪システムの実験と考察	堀江隆弘 , 小川満和	土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部	Vol.55th Page.586-587 (2000.08.31)	2000
96	鋼合成桁橋の旧 RC 床版取替え時のジベル切断に伴う熱影響についての一考察	吉田須直 , 勝野寿男 , 日野伸一 , 馬場智	土木学会年次学術講演会講演概要集 第 6 部	Vol.55th Page.228-229 (2000.08.31)	2000
97	鉄筋溶接継手の技術動向 (Technical Trend of Welded Joints in Reinforcing-Steel Bar.)	森三郎 , 原沢秀明 , 武井一夫	コンクリート工学	Vol.38 No.8 Page.13-21 (2000.08.01)	2000
98	地下室の熱性状に関する研究 地表面被覆の影響	若原誠 , 小椋大輔 , 松下敬幸	日本建築学会学術講演梗概集 D-2 環境工学 2	Vol.2000 Page.331-332 (2000.07.31)	2000

表 9　文献調査結果一覧（6）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
99	プレキャスト CFT 柱(PCa - CFT)接合部に関する研究 その 10 溶接熱の鋼管内コンクリートに及ぼす影響(加熱後 3 ケ月までの実験結果)	梶山毅，平弘毅，岡本達雄，大杉文哉	日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工	Vol.2000 Page.889-890 (2000.07.31)	2000
100	プレキャスト CFT 柱(PCa - CFT)接合部に関する研究 その 6 現場溶接による熱影響実験(実験概要)	岡本達雄，大杉文哉，梅沢宣雄，小木茂，田中義治，梶山毅	日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工	Vol.2000 Page.881-882 (2000.07.31)	2000
101	超高強度鉄筋 USD685 のガス圧接継手性能の改善に関する研究(中間報告書) 平成 11 年度（日本圧接協会 S)	日本圧接協	超高強度鉄筋 USD685 のガス圧接継手性能の改善に関する研究(中間報告書) 平成 11 年度 調査研究発表会資料	Page.41P (2000)	2000
102	鉄筋溶接継手の施工方法の検討 現場溶接継手の施工方法の提案 (Steel bars welding joint from of construction work of examination. Site welding joint of construction work a proposal.)	吉津利洋，尾形素臣，和田将敏	建築雑誌	Vol.114 No.1448 Page.89-92 (1999.12.20)	1999
103	プレキャスト CFT 柱(PCa - CFT)接合部に関する研究 その 5 溶接熱の鋼管内コンクリートに及ぼす影響 (A Study on Joints of Precast Concrete Filled Steel Tubular Columns. Part 5. Effect of Welding Heat on Concrete.)	梶山毅，大杉文哉，梅沢宣雄，小木茂，田中義治	日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工	Vol.1999 Page.533-534 (1999.07.30)	1999
104	鉄筋の自動溶接に関する研究 水平鉄筋の溶接技術の確立 (Study on automatic welding for reinforcing steel bars. The art Flat-Welding was firmly established.)	吉津利洋，尾形素臣，白頭浩之	建築雑誌	Vol.114 No.1440 Page.47-50 (1999.06.20)	1999
105	溶接鉄筋網の溶接方法の相違がコンクリート梁の疲労性状に及ぼす影響 (Effect of the Difference of Welding Methods of Welded Steel Bar Mesh on Fatigue Properties of Concrete Beams.)	菅原亮，横田弘，三上晃，秋山哲治	港湾技研資料(運輸省港湾技術研究所)	No.937 Page.13P (1999.06)	1999
106	煙突の FRP パネルライニング工法の開発 (Development of a New FRP Panel Lining Method for Steel Stacks.)	岩田節雄，村上忠輝，米田尚弘，松野進，浜田建一，浜中敏也，辰巳俊雄	日立造船技報	Vol.59 No.3 Page.227-231 (1998.10)	1998
107	壁状マスコンクリートのひび割れ幅算定 (Calculation on crack width of mass concrete wall structure.)	山崎まさ敏	日本建築学会構造系論文集	No.508 Page.17-24 (1998.06)	1998
108	路下火災に対する森小路出路 S - 5 の調査点検と補修 (Investigation inspection and repair of Morikoji exit way S-5 for fire under the road.)	三苫勝利，西岡勉	阪神高速道路公団技術研究発表会論文集	Vol.31st Page.265-270 (1998)	1998
109	修養団ビル新築工事報告 フジタ全天候型ビル自動建設システム「あかつき 21」 (Newly-built construction reports on the "Shuyodan" Building."Akatsuki 21", a full-automatic constsruction system of Fujita all-weather type building.)	吉村茂保，壱岐志次，島田明，荒川宜一郎	サクラダ技報	No.9 Page.76-79 (1997.03)	1997
110	溶接鉄筋の物理試験と溶接鉄筋網を用いたコンクリート梁接合部材の力学特性 (Fundamental Properties of Welded Reinforcement and Loading Test of Concrete Beam with Welded Reinforcement Mesh.)	藤沢孝夫，清宮理	港湾技研資料(運輸省港湾技術研究所)	No.847 Page.56P (1996.09)	1996
111	レジンコンクリートの変性特性への熱影響 (Thermal Effect on the Deformation Property of Resin Concrete.)	林富士男，大島光晴，小柳わたる	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.17 No.1 Page.661-664 (1995.06)	1995
112	高熱帯を掘る 安房トンネル (Excavation in high temperature band.Abou tunnel.)	成瀬清	土木施工	Vol.36 No.7 Page.73-79 (1995.06)	1995
113	パイルスタッド工法を用いた杭頭接合部に関する研究 (Research on pile capital joints using the pile stud method.)	建築研究振興協	COPITA	No.13 Page.18-25 (1994.09)	1994
114	溶射によるコンクリート表面の仕上げ工法 その 1 溶射皮膜の基本特性 (Finishing Concrete by Thermal Spray Method. Part 1. Fundamental Properties of Coatings.)	長尾覚博，小川晴果，青山幹，中根淳	日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集	Vol.1993 Page.21-24 (1993.09)	1993
115	遠心力成形 PC 部材を用いた新躯体システム(SPC 構法)の開発 その 2 溶接熱実験と建方施工実験 (Development of new structural system, "SPC structure" with precast reinforced concrete member molded by centrifugal force. Part 2. Welding thermal effect & structure erection.)	松谷輝雄，石田潤一郎，内海善彦，中出弘光，佃安弘，竹田三夫	鴻池組技術研究報告	Vol.5 Page.11-21 (1992.08)	1992

表 10　文献調査結果一覧（7）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
116	PC 橋架設における精度管理 (Accuracy Control Systems for Prestressed Concrete Bridge Erection.)	田中茂義 , 山村正人 , 内田誠二郎	橋梁と基礎	Vol.26 No.8 Page.65-68 (1992.08)	1992
117	コンクリートへの溶射適用技術の研究(第 1 報) 密着強さに及ぼす溶射条件の影響について (Study of Thermal Sprayed Coating on Concrete(I). On the effect of coating condition on the adhensive strength.)	森田春美 , 清藤純一	鹿児島県工業技術センター研究報告	No.5(1991) Page.53-56 (1992.07)	1992
118	複合構造による新躯体システムの開発 (Development of a new structural system using composite construction.)	石田潤一郎 , 内海善彦 , 中出弘光 , 松藤浩一 , 門田敏克 , 村上秀夫	鴻池組技術研究発表会論文集	Vol.1992 Page.139-166 (1992.06)	1992
119	JPDR の生体遮蔽コンクリートの経年変化に関する研究 (IV) 熱影響試験結果 (Study of aging for biological shielding concrete in JPDR. (IV). Results of heat exposure tests.)	鈴木清孝 , 田中協一 , 畑野肇 , 鎌田裕 , あくつ陽一	日本原子力学会秋の大会予稿集	Vol.1990 Page.398 (1990.09.10)	1990
120	現代左官工事事情 金属溶射仕上げと左官下地工法 アサヒビール吾妻橋ホール・アネックス (Present circumstances of plaster works.Metal spray finish and plaster backing method.Azumabashi Hall Annex, asahi Breweries, Co., Ltd.)	田村悦徳 , 小川晴果	施工	No.295 Page.46-51,44 (1990.05)	1990
121	建築外壁の貫流熱負荷に及ぼす降水の影響について その 2 (Effect of precipitation on percolation thermal load on architecture external walls.2.)	尾崎明仁 , 渡辺俊行 , 須貝高 , 片山忠久	日本伝熱シンポジウム講演論文集	Vol.27th No.Pt 2 Page.772-774 (1990)	1990
122	建築外壁の貫流熱負荷に及ぼす降水の影響について その 1 (Effect of precipitation on percolation thermal load on architecture external walls1.)	渡辺俊行 , 尾崎明仁 , 須貝高 , 片山忠久	日本伝熱シンポジウム講演論文集	Vol.27th No.Pt 2 Page.769-771 (1990)	1990
123	溶射法によるコンクリート表面の改質 (Modification of concrete surfaces by thermal spraying process.)	二俣正美 , 冨士良明 , 中西喜美雄 , 鮎田耕一 , 鴨下泰久	ジョイテック	Vol.5 No.8 Page.27-32 (1989.08)	1989
124	温度ひびわれ制御技術に関する実験的研究 (Experimental study on thermal crack control in concrete.)	山下祐爾 , 鈴木光雄 , 梶原康之 , 佐藤良一	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.11 No.1 Page.463-468 (1989.06)	1989
125	長期間高温加熱を受けたコンクリート部材の強度性状に関する研究 (An experimental study on the strength of concrete subjected by long-term high temperature.)	丸田誠 , 山崎まさ敏	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.11 No.1 Page.523-528 (1989.06)	1989
126	レーザー光線を用いたコンクリートアーチダムの日変位挙動に関する研究 (Studies on deflection of concrete arch dam in a day using a laser diode system.)	上原匠 , 梅原秀哲 , 吉田弥智	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.11 No.1 Page.439-444 (1989.06)	1989
127	頭付きスタッドの疲労強度向上に関する研究(続) 斜め引張力を受けた場合 (Study on fatigue strength improvement of headed stud. (continued) Its effect on strength for diagonal tensile force.)	平城弘一 , 三好栄二 , 宮崎守 , 吉川豊	土木学会関西支部年次学術講演会講演概要	Vol.1989 Page.I.12.1-I.12.2 (1989.05)	1989
128	鉄筋コンクリート構造物の施工荷重に及ぼすクリープおよび温度等の影響 (Effects of creep and temperature on load distribution in multistory reinforced concrete buildings during construction.)	山本俊彦	日本建築学会構造系論文報告集	No.395 Page.1-12 (1989.01)	1989
129	外断熱を施した RC 造建築物の熱特性に関する研究 III (A study on thermal-characteristic of outer insulated R/C building. (Part 3).)	阿部紘巳 , 石橋正義 , 竹内憲一 , 土江堅治	長谷工技報	No.5 Page.21-24 (1988.12)	1988
130	高温下におけるコンクリートの透気性に及ぼす加熱条件の影響 (Effect of heating condition on air permeability of concrete at elevated temperature.)	長滝重義 , 氏家勲	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.10 No.2 Page.243-248 (1988.06)	1988
131	一面加熱を受けるマスコンクリート部材中の強度性状に関する実験研究 一面加熱 65°C を受ける場合 (Experimental study on strength characteristics of massive concrete structures subjected to high temperature from on side. In case of subject to temperature of 65°C from on side.)	仕入豊和 , CHEONG S J	日本建築学会構造系論文報告集	No.387 Page.8-14 (1988.05)	1988
132	コンクリートシリンダー10φ×20cm と 15φ×30cm の圧縮強度の比較について (A comparative study between concrete cylinders 10φ×20cm and concrete cylinders 15φ×30cm on compressive strength.)	松永文夫	西日本工業大学紀要 理工学編	Vol.18 Page.45-49 (1988)	1988

表 11　文献調査結果一覧（8）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
133	構造物の外面処理 III 粘土製品 (External treatment of building. 3. Clay products.)	SIMPSON J W, HORROBIN P J	別冊化学工業	Vol.31 No.15 Page.95-116 (1987.12)	1987
134	高温を受けるコンクリート部材の諸物性に関する研究 (Experimental studies on characteristics of concrete members subjected to high temperature.)	長尾覚博 , 一瀬賢一 , 中根淳	大林組技術研究所報	No.35 Page.81-87 (1987.08.10)	1987
135	蒸気養生がアルカリ硫酸塩を添加したセメントを用いたコンクリートの諸性状に及ぼす影響 (Influence of steam-curing on the properties of concrete using cement added alkali sulphate.)	小倉盛衛 , 小林一輔	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.9 No.1 Page.157-162 (1987.06)	1987
136	熱を受けたコンクリートと鉄筋との付着強度・圧縮強度・ヤング係数 (Bond strength of heated concrete with reinforcing steel.)	横室隆 , 依田彰彦	コンクリート工学年次論文報告集	Vol.9 No.1 Page.169-174 (1987.06)	1987
137	マスコンクリートの水和熱影響下における水和反応と強度発現 (Progress of hydration and increase of strength under influence of heat of hydration in mass-concrete.)	篠崎征夫	石膏と石灰	No.206 Page.45-49 (1987.01)	1987
138	高温下の鉄筋コンクリート部材の挙動に与える軸力・鉄筋比の影響 (Influences of axial forces and areas of reinforcement on mechanical behaviors of reinforced concrete members at elevated temperatures.)	金津努 , 青柳征夫 , 遠藤達み	コンクリート工学年次講演会講演論文集	Vol.8th Page.553-556 (1986.06)	1986
139	加熱を受けたエポキシ樹脂塗装鉄筋の付着特性 (Bond characteristics of epoxy-coated reinforcing bars after being heated.)	岸谷孝一 , 白川潔 , 小山清一	コンクリート工学年次講演会講演論文集	Vol.8th Page.577-580 (1986.06)	1986
140	低温下における鉄筋コンクリート用棒鋼ガス圧接継手の熱影響部のぜい性破壊 (Brittle fracture initiation characteristics in heat-affected zones of gas pressure welds.)	矢部喜堂 , 小早川恵実 , 中辻照幸 , 藤盛紀明	清水建設研究報告	Vol.41 Page.47-56 (1985.04)	1985
141	鉄筋コンクリート用棒鋼のガス圧接継手の熱影響部におけるぜい性破壊発生特性 低温下における鉄筋コンクリート用棒鋼のガス圧接継手のぜい性破壊発生特性に関する実験的研究 2 (Brittle fracture initiation characteristics in heat affected zone of gas pressure welded joints of reinforcing steel bars. Experimental study on brittle fracture initiation characteristics of gas pressure welded joints of reinforcing steel bars at low temperatures. II.)	藤本盛久 , 藤盛紀明 , 中込忠男 , 矢部喜堂	日本建築学会論文報告集	No.346 Page.20-31 (1984.12)	1984
142	樹脂による鉄筋定着に関する実験的研究 II (Experimental study on anchoring of reinforcement by resin. 2)	宗栄一	土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5 部	Vol.39th Page.45-46 (1984.10)	1984
143	プレキャストブロックのオーバレイについて	犬塚雅生	セメント技術年報	No.37 Page.537-540 (1983.12)	1983
144	高温度下におけるプレストレストコンクリートげたの挙動について	柳沼善明 , 関慎吾	日本大学理工学研究所所報	No.59 Page.569-581 (1983.05)	1983
145	鉄筋コンクリート用の棒鋼のガス圧接における強度試験について	古郷佐八郎 , 荻野春之助 , 渋谷康彦 , 坂井洋一	埼玉県鋳物機械工業試験場事業概要	Vol.1980 Page.73-77 (1981.08)	1981
146	動力炉用コンクリートの安全基準に関する研究(その 6)(54)	建築研	原子力平和利用研究成果報告書	Vol.20 Page.24-27 (1981.07)	1981
147	福島第一原子力発電所事故から 10 年―廃炉への化学のかかわり 福島第一原発事故に対して化学者は何ができるか―科研費・基盤研究(S)での研究を通して	池田泰久	化学	Vol.76 No.3 Page.18-21 (2021.03.01)	2021
148	高温の油井セメントに及ぼす赤泥添加の影響 (Effect of red mud addition on oil well cement at high temperatures)	Cheng Xiaowei , Cheng Xiaowei , Yang Xuezheng , Yang Xuezheng , Zhang Chi , Gao Xianshu , Gao Xianshu , Yu Yongjin , Mei Kaiyuan , Mei Kaiyuan , Guo Xiaoyang , Zhang Chunmei	Advances in Cement Research	Vol.33 No.1 Page.28-38 (2021)	2021
149	拡張 BET 理論から得られる異なる温度における第一脱着性状	五十嵐豪 , 丸山一平 , 石田哲也	コンクリート工学年次論文集(CD-ROM)	Vol.42 ,No.1067 (2020.07.15)	2020
150	バイオマスチャーによる NO 還元に及ぼすセメント原料粉の影響 (Effect of Cement Raw Meal on the NO Reduction by Biomass Char)	Li Nan , Cui Su Ping , Wang Ya Li , Ma Xiao Yu , Liu Shi Jie , Zheng Yan	Materials Science Forum	Vol.993 Page.1401-1406 (2020)	2020

表 12　文献調査結果一覧（9）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
151	交互超高温下で養生したセメントペーストの圧縮強度と微細構造に及ぼす蒸気の影響 (Effects of steam on the compressive strength and microstructure of cement paste cured under alternating ultrahigh temperature)	Zhang Xingguo , Yang Jixiang , Li Kun , Pu Hong , Meng Xiongying , Zhang Hong , Liu Kaiqiaing , Liu Kaiqiaing	Cement & Concrete Composites	Vol.112 Page.Null (2020)	2020
152	低温における熱エネルギー貯蔵用セメント材料の開発 (Development of a cementitious material for thermal energy storage at low temperature)	Ndiaye Khadim , Ndiaye Khadim , Cyr Martin , Ginestet Stephane	Construction and Building Materials	Vol.242 Page.Null (2020)	2020
153	大きな温度差を持つ長い密封断面におけるセメンチングのための四元共重合体リターダの合成とキャラクタリゼーション (Synthesis and characterization of a quaternary copolymer retarder for cementing in a long sealing section with large temperature difference)	Peng Zhigang , Chen Chen, Feng Qian, Zheng Yong, Liu Huan, Yu Chunyang	New Journal of Chemistry	Vol.44 No.9 Page.3771-3776 (2020)	2020
154	300～450°C の高温範囲における NO_x 除去のための赤泥被覆触媒フィルタの開発 (Development of Red Mud Coated Catalytic Filter for NOx Removal in the High Temperature Range of 300-450 °C)	Huangfu Lin , Huangfu Lin , Abubakar Abdullahi , Abubakar Abdullahi , Li Changming , Li Yunjia , Li Yunjia , Wang Chao , Gao Shiqiu , Liu Zhouen , Yu Jian	Catalysis Letters	Vol.150 No.3 Page.702-712 (2020)	2020
155	発熱性セメント固化廃棄体の模擬供試体による高温履歴と圧縮強度及び物質移動抵抗性の関係性評価	酒井大誠 , 庭瀬一仁	土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	Vol.74th ,No.VII-149 (2019.08.01)	2019
156	原子力発電所廃炉サイトでのバイオ・コンソリデーションによる地表砂地盤中での粒子結着による汚染種の拡散の抑止 (Retardation of in-soil or in-concrete diffusional transfer of radioactive species in nuclear decommission site by bioconsolidation/Micro- and mesoscopic aspects in thermal deterioration of cementitious solid materials by day-long exposure to elevated temperature and rehydration effect on its mechanical strength by month-long immersion in water)	車田研一	岩谷直治記念財団研究報告書	Vol.42 Page.29-33 (2019.08.01)	2019
157	長期高温作用を受けたセメント硬化体の窒素および水蒸気の吸脱着特性	蔵重勲	セメント技術大会講演要旨(CD-ROM)	Vol.73rd ,No.1105 (2019.04.30)	2019
158	高温養生したフライアッシュ併用ゼオライト混入セメント固化体の物質移行抵抗性の評価	酒井大誠 , 庭瀬一仁	土木学会北海道支部論文報告集(CD-ROM)	No.75 ,No.G-07 (2019.01)	2019
159	高温で高炉スラグを用いたアルミン酸塩セメントペーストの機械的および熱的性質 (Mechanical and thermal properties of aluminate cement paste with blast furnace slag at high temperatures)	Cheng Xiaowei , Cheng Xiaowei , Dong Qingguang , Ma Yong , Zhang Chi , Gao Xianshu , Yu Yongjin , Wen Zhaijun , Zhang Chunmei , Zhang Chunmei , Guo Xiaoyang	Construction and Building Materials	Vol.228 Page.Null (2019)	2019
160	セメンチング流体損失低減剤としての高分子ミクロスフェアに基づくナノシリカの合成と性能評価 (Synthesis and performance evaluation of a polymer microsphere based nanosilica as a cementing fluid loss reducer)	Zhang Jian , Peng Zhigang , Zou Changjun , Chen Dajun , Zhang Bojian , Jiao Libin	Advances in Cement Research	Vol.31 No.1 Page.13-25 (2019)	2019
161	ポルトランドセメント/GGBFS 混合系における高温での C - S - H の微細構造変化 (The microstructural change of C-S-H at elevated temperature in Portland cement/GGBFS blended system)	Jia Zijian , Chen Chun , Shi Jinjie , Zhang Yamei , Sun Zhengming , Zhang Peigen	Cement and Concrete Research	Vol.123 Page.Null (2019)	2019
162	200°C に曝露された坑井セメントペーストの強度特性と物性の検討 (Study on Strength and Characteristics of Cement Paste for Well Exposed to 200 °C)	浅本晋吾 , 塚原美晴 , 伊藤貴康 , 松井久仁雄	材料	Vol.68 No.6 Page.491-497(J-STAGE) (2019)	2019
163	NH_3 吸着剤と混合した SCR 触媒による複合 NSR - SCR システムにおける高温 NO_x 変換の改善 (Improving high-temperature NOx conversion in the combined NSR-SCR system with an SCR catalyst mixed with an NH3 adsorbent)	Sakai Masatoshi , Hamaguchi Tsuyoshi , Tanaka Toshiyuki	Applied Catalysis. A: General	Vol.582 Page.null (2019)	2019
164	リン酸マグネシウムセメントによる固化セラミック形態の固定化 (Immobilization of solidified ceramic forms with magnesium phosphate cement)	Zhenyu Lai , Yang Hu , Tao Yan , Xin He , Zhongyuan Lu , Shuzhen Lv , Haibin Zhang	Ceramics International	Vol.45 No.10 Page.13164-13170 (2019)	2019

表 13　文献調査結果一覧（10）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
165	石炭脈石,フライアッシュ及び赤泥から誘導したジオポリマの合成及び特性化 (Synthesis and characterization of geopolymers derived from coal gangue, fly ash and red mud)	Koshy Nevin , Dondrob Kunga , Hu Liming , Wen Qingbo , Meegoda Jay N. , Meegoda Jay N.	Construction and Building Materials	Vol.206 Page.287-296 (2019)	2019
166	Sr_3Al_2O_6 の燃焼合成とキャラクタリゼーション (Combustion synthesis and characterization of Sr3Al2O6)	Barbosa Willams T. , Nascimento Imarally V. S. R. , Garcia-Carrodeguas Raul , Fook Marcus V. L. , Rodriguez Miguel A.	International Journal of Applied Ceramic Technology	Vol.16 No.2 Page.595-601 (2019)	2019
167	長期高温作用を受けたセメント硬化体のガス吸着特性	蔵重勲	日本吸着学会研究発表会講演要旨集	Vol.32nd, Page.65 (2018.11.08)	2018
168	湿度変化による乾燥作用を受けたセメントペーストの空隙構造と塩化物イオンの拡散性状の関係に関する基礎的検討	須田裕哉 ，富山潤 ，斎藤豪 ，佐伯竜彦	コンクリート工学年次論文集(CD-ROM)	Vol.40 ,No.1119 (2018.06.15)	2018
169	超構造の自己集合のための配位錯体セメントの種類 (A Kind of Coordination Complex Cement for the Self-Assembly of Superstructure)	Sun Lianshan , Wang Chunli , Wang Chunli , Wang Limin	ACS Nano	Vol.12 No.4 Page.4002-4009 (2018)	2018
170	油井セメント用の新規両性複合材料高温耐性遅延剤の合成と遅延機構研究 (Synthesis and retarder mechanism study of a novel amphoteric composite high temperature-resistant retarder for oil well cement)	Zhigang Peng , Jian Zhang, Qian Feng, Changjun Zou, Yong Zheng, Bojian Zhang, Jinhua Huo	RSC Advances (Web)	Vol.8 No.27 Page.14812-14822 (2018)	2018
171	繊維強化高アルミナセメント複合材料の高温耐久性 (High temperature durability of fiber reinforced high alumina cement composites)	Vejmelkova Eva , Konakova Dana , Scheinherrova Lenka , Dolezelova Magdalena , Keppert Martin , Cerny Robert	Construction and Building Materials	Vol.162 Page.881-891 (2018)	2018
172	高温石油貯留層における水管理のための高分子ゲル系:化学的レビュー (Polymer Gel Systems for Water Management in High-Temperature Petroleum Reservoirs: A Chemical Review)	Zhu Daoyi , Zhu Daoyi , Bai Baojun , Bai Baojun , Bai Baojun , Hou Jirui	Energy & Fuels	Vol.31 No.12 Page.13063-13087 (2017)	2017
173	油井セメントにおける流体損失を制御するための双性イオン共重合体:調製,キャラクタリゼーションおよび作用機構 (Zwitterionic copolymer for controlling fluid loss in Oilwell cementing: Preparation, characterization, and working mechanism)	Xia Xiujian , Feng Yakai , Guo Jintang , Liu Shuoqiong , Jin Jianzhou , Yu Yongjin	Polymer Engineering & Science	Vol.57 No.1 Page.78-88 (2017)	2017
174	CO2 捕集のためのカルシウムルーピング技術:エネルギー統合と吸着材挙動の重要な役割について (The Calcium-Looping technology for CO2 capture: On the important roles of energy integration and sorbent behavior)	Perejon Antonio , Perejon Antonio , Romeo Luis M. , Lara Yolanda , Lisbona Pilar , Martinez Ana , Valverde Jose Manuel	Applied Energy	Vol.162 Page.787-807 (2016.01.15)	2016
175	吸着材としての多孔質メタカオリン基無機ポリマー球の作製と特性化 (Preparation and characterization of porous metakaolin-based inorganic polymer spheres as an adsorbent)	TANG Qing , GE Yuan-yuan , WANG Kai-tuo , HE Yan , CUI Xue-min	Materials & Design	Vol.88 Page.1244-1249 (2015.12.25)	2015
176	油井セメントの強度及び肥厚特性に及ぼすキトサン処理の影響 (Effects of chitosan treatment on strength and thickening properties of oil well cement)	LIU Huajie , BU Yuhuan , SANJAYAN Jay , SHEN Zhonghou	Construction and Building Materials	Vol.75 Page.404-414 (2015.01.30)	2015
177	石炭フライアッシュ系発泡ジオポリマの製造に関する新しい合成方法 (New synthesis method for the production of coal fly ash-based foamed geopolymers)	BOEKE Nuran, BIRCH Grant D., NYALE Sammy M., PETRIK Leslie F., Environmental and Nano Sci. Res. Group, Dep. of Chemistry, Univ. of the Western Cape, 7535 Cape Town, South Africa	Construction and Building Materials	Vol.75 Page.189-199 (2015.01.30)	2015
178	フライアッシュ中のクロム価数に及ぼす固体燃料燃焼技術の影響 (Impact of solid fuel combustion technology on valence speciation of chromium in fly ash)	SWIETLIK Ryszard , TROJANOWSKA Marzena , LOZYNSKA Monika , MOLIK Artur	Fuel	Vol.137 Page.306-312 (2014.12.01)	2014
179	パーベーパレーションによる水脱塩用の天然ゼオライトクリノプチロライト - リン酸塩複合膜 (Natural zeolite clinoptilolite-phosphate composite Membranes for water desalination by pervaporation)	AN W., ZHOU X., LIU X., CHAI P.w., KUZNICKI T., KUZNICKI S.m., Dep. of Chemical & Materials Engineering, Univ. of Alberta, Edmonton, AB, Canada T6G 2V4	Journal of Membrane Science	Vol.470 Page.431-438 (2014.11.15)	2014

表 14　文献調査結果一覧（11）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
180	逆ミセル法の利用による TTCP の合成 (Synthesis of TTCP by using inverse micelle method)	JOKANOVIC Vukoman, COLOVIC Bozana, Inst. of Nuclear Sciences "Vinca", Univ. of Belgrade, Mike Petrovica Alasa 12-14, 11351 Belgrade, Serbia	Materials Chemistry and Physics	Vol.143 No.3 Page.1481-1488 (2014.02.14)	2014
181	CaCl2 溶融塩における高温 CO2 捕獲の調査 (Investigation of High-Temperature CO2 Capture by CaO in CaCl2 Molten Salt)	TOMKUTE Viktorija , SOLHEIM Asbjorn , OLSEN Espen	Energy & Fuels	Vol.27 No.9/10 Page.5373-5379 (2013.09)	2013
182	アルミナベースのモノリシック耐火複合材料の性能改良に用いるナノスケールのアルミン酸カルシウム被覆グラファイト (Nanoscale calcium aluminate coated graphite for improved performance of alumina based monolithic refractory composite)	MUKHOPADHYAY S., Ceramic Engineering Div., Dep. of Chemical Technol., Univ. of Calcutta, 92 APC Road, Kolkata 700 009, IND	Materials Research Bulletin	Vol.48 No.7 Page.2583-2588 (2013.07)	2013
183	C - S - H 構造形成における水和シリケートモノマーの役割—29Si MAS NMR と 2H NMR による考察 (ROLE OF HYDRATED SILICATE MONOMER IN C-S-H STRUCTURAL FORMATION MEASURED BY 29Si MAS NMR AND 2H NMR)	黒澤利仁 , 湊大輔 , 名和豊春 , 服部廉太	セメント・コンクリート論文集	Vol.66 Page.63-70 (2013.02.25)	2013
184	ポリカルボキシレートからなる超可塑剤とセメント成分鉱物の間の界面相互作用 (Interfacial Interaction Between Polycarboxylate-based Superplasticizer and Cement Component Minerals)	YU Yinhui , LIU Jiaping , RAN Qianping , QIAO Min , GAO Nanxiao	Polymers & Polymer Composites	Vol.21 No.5 Page.299-305 (2013)	2013
185	油井セメンチングにおける高温流体損失添加剤としてのフミン酸 - {2 - アクリルアミド - 2 - メチルプロパンスルホン酸ナトリウム - co - N,N - ジメチルアクリルアミド - co - アクリル酸グラフト共重合体の合成,効果,及び作用機構 (Synthesis, Effectiveness, and Working Mechanism of Humic Acid-{Sodium 2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonate-Co-N,N-Dimethyl Acrylamide-Co-Acrylic Acid} Graft Copolymer as High-Temperature Fluid Loss Additive in Oil Well Cementing)	SALAMI Oyewole Taye , PLANK Johann	Journal of Applied Polymer Science	Vol.126 No.4 Page.1449-1460 (2012.11.15)	2012
186	セメント製造施設内の水銀の規制,動態,輸送,変換,および減少:レビュー (Mercury regulation, fate, transport, transformation, and abatement within cement manufacturing facilities: Review)	SIKKEMA Joel K., ALLEMAN James E., KEE ONG Say, WHEELOCK Thomas D., Dep. of Civil, Construction, and Environmental Engineering, Iowa State Univ., Ames, IA, USA, Dep. of Chemical and Biological Engineering, Iowa State Univ., Ames, IA, USA	Science of the Total Environment	Vol.409 No.20 Page.4167-4178 (2011.09.15)	2011
187	熱応答セメントの組み立て (Building of a thermoresponsive cement)	NOEEL Marie-helene, VAN DAMME Henri, HEBRAUD Pascal, FAST, CNRS, UMR7608, Rue du Belvedere, 91405 Orsay Cedex, FRA, LCPC, 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15, FRA, IPCMS CNRS, UMR7504, 23 rue du Loess, 67034 Strasbourg Cedex, FRA	Cement and Concrete Research	Vol.41 No.9 Page.975-980 (2011.09)	2011
188	AMPS 系セメント流体損失重合体の吸着挙動と効力に及ぼす高温の影響と硫酸塩の役割 (Effect of High Temperature and the Role of Sulfate on Adsorption Behavior and Effectiveness of AMPS-Based Cement Fluid Loss Polymers)	LUMMER Nils Recalde , DUGONJIC - BILIC Fatima , PLANK Johann	Journal of Applied Polymer Science	Vol.121 No.2 Page.1086-1095 (2011.07.15)	2011
189	普通ポルトランドセメントを用いたセメント硬化体の比表面積と水和反応に関する基礎的検討 (RELATIONSHIP BETWEEN SPECIFIC SURFACE AREA AND HYDRATION REACTION OF HARDENED CEMENT PASTE)	五十嵐豪 , 丸山一平	セメント・コンクリート論文集	No.64 Page.103-110 (2011.02.25)	2011

表 15　文献調査結果一覧（12）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
190	セメント接合による金損失と金回収回路での熱還元 (Gold losses by cementation and thermal reduction in the gold recovery circuits)	KLEIN B., ALTUN N.e., Norman B. Keevil Inst. of Mining Engineering, Univ. of British Columbia, 6350 Stores Road, Vancouver, BC, Canada ..., Mugla Univ., Dep. of Mining Engineering, 48000, Mugla, TUR	International Journal of Mineral Processing	Vol.98 No.1-2 Page.24-29 (2011.01.17)	2011
191	セメントのロータリキルン用品質が改善されたペリクレーススピネル煉瓦の開発 (РАЗРАБОТКА ПЕРИКЛАЗОШПИНЕЛЬНОГО КИРПИЧА УЛУЧШЕННОГО КАЧЕСТВА ДЛЯ ЦЕМЕНТНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕИ)	МИШРА Б.	Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika	No.9 Page.45-50 (2011)	2011
192	CO2 の高温捕捉のためのアルミン酸カルシウムセメントに担持した CaO ベースペレット (CaO-Based Pellets Supported by Calcium Aluminate Cements for High-Temperature CO2 Capture)	MANOVIC Vasilije , ANTHONY Edward J	Environmental Science & Technology	Vol.43 No.18 Page.7117-7122 (2009.09.15)	2009
193	セメント中における可塑剤と Ca 塩との間の相互作用の熱的証拠 (THERMAL EVIDENCES OF THE INTERACTION BETWEEN PLASTICIZERS AND Ca SALTS IN CEMENT)	EUSEBIO Lidia , FUMAGALLI D. , GRONCHI P.	Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	Vol.97 No.1 Page.33-37 (2009.07)	2009
194	カナダ北西準州の高温硫黄性温泉のひとつである Twitya Spring においてみられる方解石質トラバーチン(温泉沈澱物)中のバライト(重晶石:BaSO4)結晶類の沈澱量のコントロールの状態。 (Controls on the precipitation of barite (BaSO4) crystals in calcite travertine at Twitya Spring, a warm sulphur spring in Canada's Northwest Territories)	BONNY Sandy M. , JONES Brian	Sedimentary Geology	Vol.203 No.1-2 Page.36-53 (2008.01.10)	2008
195	層状複水酸化物,C2AH8 の脱水反応 (Dehydration of a layered double hydroxide-C2AH8)	UKRAINCZYK N. , MATUSINOVIC T. , KURAJICA S. , ZIMMERMANN B. , SIPUSIC J.	Thermochimica Acta	Vol.464 No.1-2 Page.7-15 (2007.11.25)	2007
196	空気浄化ダクトによる大気汚染物質低減技術 通気抵抗の小さい NOx 低減技術の開発	万宇角英 , 生天目泰 , 森川泰成	クリーンテクノロジー	Vol.17 No.1 Page.59-62 (2007.01.01)	2007
197	地球温暖化防止に役立つ省エネルギー技術普及支援調査研究報告書 平成 18 年度	日本プラント協	地球温暖化防止に役立つ省エネルギー技術普及支援調査研究報告書 平成 18 年度	Page.375P (2007)	2007
198	2 種のエージングしたセメントペーストにおける炭酸カルシウムの IR/TG 同時研究 (SIMULTANEOUS IR/TG STUDY OF CALCIUM CARBONATE IN TWO AGED CEMENT PASTES)	STEPKOWSKA Ewa T.	Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	Vol.84 No.1 Page.175-180 (2006)	2006
199	〈7.産業と環境技術〉環境リサイクル製品 床下調湿材「マジカルファイン」 (7) Industries and environmental technology. An environmental recycle product. A humidity controlling agent for under-floor 'Magical-Fine'.)	国西健史 , 片岡智之	JETI	Vol.53 No.14 Page.143-145 (2005.12.30)	2005
200	2 つの時効処理したセメントペーストにおける水和生成物 (HYDRATION PRODUCTS IN TWO AGED CEMENT PASTES)	STEPKOWSKA E. T. , BLANES J. M. , REAL C. , PEREZ - RODRIGUEZ J. L.	Journal of Thermal Analysis and Calorimetry	Vol.82 No.3 Page.731-739 (2005)	2005
201	Q&A MPM(マイクロポーラスマテリアル)について教えてください (Q&A Please teach me about MPM (Micro Porous Material))	－	NTT 技術ジャーナル	Vol.16 No.8 Page.42-43 (2004.08.01)	2004
202	Ni 基 SOFC 陽極 ミクロ構造と電気化学 (Ni-Based SOFC Anodes: Microstructure and Electrochemistry.)	BIEBERLE A , GAUCKLER L J	Zeitschrift fuer Metallkunde	Vol.92 No.7 Page.796-802 (2001.07)	2001
203	油井セメントスラリーのコンシステンシーへのセメントのゼータ電位とスラリーの導電性による効果 (The effect of the cement zeta potential and slurry conductivity on the consistency of oilwell cement slurries.)	HODNE H , SAASEN A	Cement and Concrete Research	Vol.30 No.11 Page.1767-1772 (2000.11)	2000
204	未利用資源を活用した水質浄化材の開発（2）牡蛎殻配合水質浄化材の製造技術（その 2)	一瀬龍太 , 一瀬龍宏 , 阿部久雄	長崎県窯業技術センター研究報告	No.47 Page.15-20 (2000.11)	2000
205	熱化学的に活性化された溶鉱炉スラグ 構造および水力学的活性 (Термохимически активированные доменные шлаки - структура и гидравлическая активность.)	ВЪЛКОВ В, ДЕЛЧЕВ Н	Tsement i Ego Primenenie	No.4 Page.34-36 (1999)	1999

表 16　文献調査結果一覧（13）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
206	高温における水和セメントへのほう酸塩抑制剤の作用機構の分子モデリング (Molecular Modelling of the Mechanism of Action of Borate Retarders on Hydrating Cements at High Temperature.)	BELL I S , COVENEY P V	Molecular Simulation	Vol.20 No.6 Page.331-356,395(1)-395(9) (1998.05)	1998
207	塩分含有油井セメントの水和 (The hydration of saline oil-well cement.)	ZHOU X , LIN X , HUO M , ZHANG Y	Cement and Concrete Research	Vol.26 No.12 Page.1753-1759 (1996.12)	1996
208	種々の合成段階における不均一アルミニウム含有触媒形成の規則性 (Закономерности формирования гетерогенных алюминийсодержащих катализаторов на различных стадиях синтеза.)	ЯКЕРСОН В И, ГОЛОСМАН Е З	Zhurnal Prikladnoj Khimii	Vol.69 No.11 Page.1777-1789 (1996.11)	1996
209	ポルトランドセメント構造におけるエトリンジャイトの遅れ生成機構 (Mechanisms of Delayed Ettringite Formation in Portland Cement Systems.)	FU Y , BEAUDOIN J J	ACI Materials Journal	Vol.93 No.4 Page.327-333 (1996.07)	1996
210	不均一触媒系の設計 新しいセメント含有触媒 (Design of heterogeneous catalytic systems: New cement-containing catalysts.)	YAKERSON V I , GOLOSMAN E Z	Reaction Kinetics and Catalysis Letters	Vol.55 No.2 Page.455-462 (1995.06)	1995
211	高アルミナセメント成分二アルミン酸カルシウムを基本とする吸着剤と担体の調製および性質 (Получение и свойства адсорбента и носителя на основе диалюмината кальция - компонента высокоглиноземистого цемента.)	ЯКЕРСОН В И, ГОЛОСМАН Е З, МАМАЕВА И А, БОЕВСКАЯ Е А, ДЫХ Ж Л, ЧЕРТКОВА С В	Kinetika i Kataliz	Vol.35 No.4 Page.626-630 (1994.07)	1994
212	けい酸三カルシウム水和物による硫酸塩の吸着/脱着に及ぼす温度の影響 (Effect of temperature on sulphate adsorption/desorption by tricalcium silicate hydrates.)	FU Y , XIE P , GU P , BEAUDOIN J J	Cement and Concrete Research	Vol.24 No.8 Page.1428-1432 (1994)	1994
213	高温におけるポルトランドセメント原料バッチの焼結 (Агломерация портландцементных сырьевых шихт при повышенных температурах.)	СУЛИМЕНКО Л М, КУЗНЕЦОВА Т В, БОЛЬШОВ В В, ВЛАДИМИРОВ А Л	Tsement	No.5 Page.16-18 (1989.05)	1989
214	ポリりん元素酸化物セラミックの生成と性質 (Образование и свойства полифосфорэлементоксидной керамики.)	ХИСАМЕЕВ Г Г, СИРОТКИН О С, ХУЗИАХМЕТОВ Р Х, САЙФУЛЛИН Р С	Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Neorganicheskie Materialy	Vol.23 No.12 Page.2074-2077 (1987.12)	1987
215	高温空気中での湿度測定とその必要性 (Humidity measurement in air at high temperature and necessity of it.)	野邑奉弘	製薬工場	Vol.6 No.10 Page.1004-1007 (1986.10)	1986
216	ハロゲン化有機化合物を含む有害廃棄物の管理 (Management of hazardous wastes containing halogenated organics.)	ROECK D R , ANDERSON P H	Proceedings. Annual Meeting of the Air Pollution Control Association	Vol.79 No.Vol.3 Page.86.45.6.1-86.45.6.17 (1986)	1986
217	放射性廃棄物処理におけるゼオライトの応用 (Application of zeolite for the treatment of radioactive waste.)	菅野卓治	粘土科学	Vol.25 No.1 Page.1-10 (1985.05)	1985
218	C2S における豊富な物質の結合性増進の可能性 (Possibilite' s de l'intensification des proprie' te' s liantes des mate' riaux a la base du C2S.)	BOJENOV P I , GRIGORIEV B A , OVTCHARENCO G	7th International Congress on the Chemistry of Cement, 1980, Vol.3	Page.V.197-V.201 (1980)	1980
219	中温,高温,低温におけるアスファルトモルタルの性能に及ぼす無機粉末水和石灰の影響 (Effect of inorganic powder hydrated lime on performance of asphalt mortar at medium, high, and low temperature)	Jia Xiaodong , Jia Xiaodong , Zhao Yang , Zhao Yang , Qin Min , Peng Yiwen , Liang Naixing	Arabian Journal of Geosciences	Vol.14 No.5 Page.353 (2021)	2021
220	使用済み FCC 触媒とアスファルト結合剤の相互作用:レオロジー特性,VOC の放出及び金属の固定化 (Interaction of spent FCC catalyst and asphalt binder: Rheological properties, emission of VOCs and immobilization of metals)	Xue Yongjie , Wei Xintong , Zhao Hui , Wang Teng , Wang Teng , Xiao Yue	Journal of Cleaner Production	Vol.259 Page.Null (2020)	2020
221	可視光活性,秩序化メソ多孔質 SiO_2～ - TiO_2 複合光触媒の調製における高温水熱合成への新たな洞察 (New insights into high temperature hydrothermal synthesis in the preparation of visible-light active, ordered mesoporous SiO2-TiO2 composited photocatalysts)	Wu Qin , Liu Chen, Peng Jinjun, Liu Fujian	RSC Advances (Web)	Vol.7 No.32 Page.19557-19564 (2017)	2017

表 17　文献調査結果一覧（14）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
222	インクジェット印刷によって作製したハイブリッドチタニア - シリカパターンに関する性質と応用展望 (Properties and Application Perspective of Hybrid Titania-Silica Patterns Fabricated by Inkjet Printing)	DZIK Petr , VESELY Michal , KETE Marko , PAVLICA Egon , STANGAR Urska Lavrencic , NEUMANN - SPALLART Michael	ACS Applied Materials & Interfaces	Vol.7 No.30 Page.16177-16190 (2015.08.05)	2015
223	相転移パーライトの予備調査と相転移及び温度制御モルタルの性能評価 (Preparation technology of phase change perlite and performance research of phase change and temperature control mortar)	HE Yan, ZHANG Xiong, ZHANG Yongjuan, Key Lab. of Advanced Civil Engineering Materials of Education Ministry, School of Material Sci. and Technol., Tongji ...	Energy and Buildings	Vol.85 Page.506-514 (2014.12)	2014
224	難燃剤として,及び受動的防火に利用される低グレードの酸化マグネシウムの熱研究 (Thermal study of low-grade magnesium hydroxide used as fire retardant and in passive fire protection)	FORMOSA J. , FORMOSA J. , CHIMENOS J.m. , LACASTA A.m. , HAURIE L.	Thermochimica Acta	Vol.515 No.1-2 Page.43-50 (2011.03.10)	2011
225	スーパーキャパシタ用の含水酸化ルテニウムの固相合成 (Solid state synthesis of hydrous ruthenium oxide for supercapacitors)	LIANG Yan-yu , LI Hu Lin , LI Hu Lin , ZHANG Xiao-gang	Journal of Power Sources	Vol.173 No.1 Page.599-605 (2007.11.08)	2007
226	火災加熱を受ける木質部材の熱水分同時移動解析による力学的性能予測 (Prediction of Mechanical Properties with Heat and Water Transfer Analysis in Wooden Members Exposed to Fire Heating)	鈴木達朗 , 長谷見雄二	日本建築学会大会学術講演梗概集・建築デザイン発表梗概集(CD-ROM)	Vol.2020 ,No.3089 (2020.07.20)	2020
227	分子動力学シミュレーションとレオロジー実験を用いた鉱物充填剤とアスファルト結合剤の間の物理化学的相互作用能力に及ぼす温度と負荷周波数の影響の理解 (Understanding the temperature and loading frequency effects on physicochemical interaction ability between mineral filler and asphalt binder using molecular dynamic simulation and rheological experiments)	Li Fan , Yang Yuyou	Construction and Building Materials	Vol.244 Page.Null (2020)	2020
228	コンクリートの圧縮強度に及ぼす高温の影響 (Effect of elevated temperatures on compressive strength of concrete)	Shen Jiarong , Xu Qianjun	Construction and Building Materials	Vol.229 Page.Null (2019)	2019
229	凍結防止剤中の塩化物イオンの腐食を低減するための Deicer 腐食抑制剤としての MgAl - LDH の調製 (Preparation of MgAlFe-LDHs as a deicer corrosion inhibitor to reduce corrosion of chloride ions in deicing salts)	Wang Dongdong , Zhu Qi , Su Yingying , Li Jian , Wang Aiwen , Xing Zipeng	Ecotoxicology and Environmental Safety	Vol.174 Page.164-174 (2019)	2019
230	急激な高温加熱を受けたコンクリートの細孔構造について	緑川猛彦 , 林久資 , 車田研一	土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	Vol.72nd ,No.V-476 (2017.08.01)	2017
231	アスファルト製造中の PM と揮発性有機化合物の大気排出量を削減するための添加剤としての Ca(OH)2 - II 組み込みゼオライトの新しいナノ複合材料 (A novel nanocomposite of Ca(OH)2-incorporated zeolite as an additive to reduce atmospheric emissions of PM and VOCs during asphalt production)	Sharma Ajit , Lee Byeong-Kyu	Environmental Science: Nano	Vol.4 No.3 Page.613-624 (2017)	2017
232	効率的な太陽駆動光触媒としての 3 次元マクロ - メソポーラス構造を有する自己浮遊両親媒性ブラック TiO_2 フォーム (Self-floating amphiphilic black TiO2 foams with 3D macro-mesoporous architectures as efficient solar-driven photocatalysts)	Zhang Kaifu , Zhou Wei , Zhang Xiangcheng , Sun Bojing , Wang Lei , Pan Kai , Jiang Baojiang , Tian Guohui , Fu Honggang	Applied Catalysis. B: Environmental	Vol.206 Page.336-343 (2017)	2017
233	高温でのコンクリートの連成した熱伝達と水分移動—毛管圧力と吸着水の影響 (COUPLED HEAT AND MOISTURE TRANSPORT IN CONCRETE AT ELEVATED TEMPERATURES—EFFECTS OF CAPILLARY PRESSURE AND ADSORBED WATER)	DAVIE Colin T. , PEARCE Chris J. , BICANIC Nenad	Numerical Heat Transfer Part A. Applications	Vol.49 No.8 Page.733-763 (2006.05)	2006
234	21 世紀の海辺づくり(人工ゼオライトがみらいの海を)	鬼頭誠 , 前田憲一 , 歌津洋一 , 安田昭彦	JIMSTEF NEWS	Vol.7 No.1/2 Page.36-39 (2005.01)	2005
235	高温環境下におけるコンクリート内部の塩化物挙動の把握	蒲原弘二郎 , 石田哲也	土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	Vol.58th No.Disk 2 Page.V-031 (2003.09.01)	2003
236	水の臨界点以上の温度におけるコンクリートの湿温挙動と損傷のモデル化 (Modelling of hygro-thermal behaviour and damage of concrete at temperature above the critical point of water.)	GAWIN D , PESAVENTO F , SCHREFLER B A	International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics	Vol.26 No.6 Page.537-562 (2002.05)	2002

表 18　文献調査結果一覧（15）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
237	高温における HP と UHP コンクリートの損傷とスポーリング (Damage and spalling in HP and UHP concrete at high temperature.)	MAJORANA C E , PESAVENTO F	Damage and Fracture Mechanics 6 - Computer Aided Assessment and Control	Page.105-117 (2000)	2000
238	我が国の知織集約型産業の今後の動行調査研究 昭和 62 年度 新複合材料の先端的技術開発の現状と将来 化学的・生体的機能分野(日本産業技術振興協会 S) (Report for 1987 on future trends in the intelligence-intensive industry in Japan. Present state and future of advanced technology development for new composite materials. Chemical and biological functions.(Sponsor：Japan Industrial Technology Association))	日本産業技術振興協	新複合材料の先端的技術開発の現状と将来 昭和 62 年度 化学的・生体的機能材料分野	Page.255P (1988)	1988
239	金型汚染とその対策 各種ゴムと汚染対策 Ⅰ 天然ゴム(NR 及び IR) (Prevention and counterplan of mold staining. Prevention and counterplan of mold staining on various rubbers. 1. Natural rubber.)	金子秀男	日本ゴム協会誌	Vol.58 No.6 Page.375-379 (1985.06)	1985
240	ウラン尾鉱浸出物バリアとしてのアスファルトおよび粘土ライナの性能 (Performance of asphalt and clay liners as a uranium mill tailings leachate barrier.)	BUELT J , BARNES S	Scientific Basis for Nuclear Waste Management 4	Page.489-496 (1982)	1982
241	固体酸化物燃料電池による収着強化水蒸気バイオマスガス化システムのための Pareto 最適解の生成と選択 (Generation and selection of Pareto-optimal solution for the sorption enhanced steam biomass gasification system with solid oxide fuel cell)	Detchusananard Thanaphorn , Sharma Shivom , Marechal Francois , Arpornwichanop Amornchai	Energy Conversion and Management	Vol.196 Page.1420-1432 (2019)	2019
242	CO2 養生によるセメントブロックの高温性能の向上 (Enhancement of high temperature performance of cement blocks via CO2 curing)	Meng Yazi , Ling Tung-Chai , Mo Kim Hung , Tian Weihao	Science of the Total Environment	Vol.671 Page.827-837 (2019)	2019
243	固体酸化物燃料電池による収着強化水蒸気バイオマスガス化の多目的最適化 (Multi-objective optimization of sorption enhanced steam biomass gasification with solid oxide fuel cell)	Detchusananard Thanaphorn , Sharma Shivom , Marechal Francois , Arpornwichanop Amornchai	Energy Conversion and Management	Vol.182 Page.412-429 (2019)	2019
244	商用 PWR(I)の冷却材フィルタ上に収集した Crud 中の C - 14 の研究 種々のガス雰囲気下での熱分解特性と C - 14 放出挙動 (Investigation of C-14 in the CRUD collected on the coolant filter of commercial PWR (I) - thermal decomposition characteristics and C-14 release behavior under various gas atmospheres)	KINO Kenichiro , SAKASHITA Akira , NAKATA Kotaro , TSUJI Shintaro , WAKI Toshikazu	MRS Advances	Vol.3 No.19 Page.1051-1058 (2018)	2018
245	連続粒子焼成のための高温太陽加熱回転管反応器の設計と実証 (Design and demonstration of a high temperature solar-heated rotary tube reactor for continuous particles calcination)	Abanades Stephane , Andre Laurie	Applied Energy	Vol.212 Page.1310-1320 (2018)	2018
246	CO2 捕捉のためのセメント担体バイオマス活性化カルシウム収着剤の摩耗研究 (Attrition Study of Cement-Supported Biomass-Activated Calcium Sorbents for CO2 Capture)	DUAN Lunbo , DUAN Lunbo , YU Zhijian , ERANS Maria , LI Yingjie , MANOVIC Vasilije , ANTHONY Edward J.	Industrial & Engineering Chemistry Research	Vol.55 No.35 Page.9476-9484 (2016.09.07)	2016
247	高温 CO2 捕獲に用いる押出球形化カーバイドスラグペレットの高い性能 (Enhanced performance of extruded-spheronized carbide slag pellets for high temperature CO2 capture)	Sun Jian , Liu Wenqiang , Hu Yingchao , Wu Jianqun , Li Mingkui , Yang Xinwei , Wang Wenyu , Xu Minghou	Chemical Engineering Journal	Vol.285 Page.293-303 (2016.02.01)	2016
248	バイオマステンプレートアルミン酸カルシウムペレットの CO2 吸収性能に対する SO2 と蒸気の影響 (Effect of SO2 and steam on CO2 capture performance of biomass-templated calcium aluminate pellets)	Erans Maria , Beisheim Theodor, Manovic Vasilije, Jeremias Michal, Patchigolla Kumar, Dieter Heiko, Duan Lunbo, Anthony Edward J.	Faraday Discussions	Vol.192 Page.97-111 (2016)	2016
249	水素製造および CO2 回収のための多形スペーサを組み込んだ新規なカルシウムルーピング吸収剤 (A novel calcium looping absorbent incorporated with polymorphic spacers for hydrogen production and CO2 capture)	ZHAO Ming , ZHAO Ming , SHI Jeffrey , ZHONG Xia , TIAN Sicong , BLAMEY John , JIANG Jianguo , FENNELL Paul S.	Energy & Environmental Science	Vol.7 No.10 Page.3291-3295 (2014.10)	2014
250	CO2 捕捉のための水和によるカルシウムベース収着剤の再活性化 (Reactivation of calcium-based sorbent by water hydration for CO2 capture)	YIN Junjun , ZHANG Cheng , QIN Changlei , LIU Wenqiang , AN Hui , CHEN Gang , FENG Bo	Chemical Engineering Journal	Vol.198-199 Page.38-44 (2012.08.01)	2012

表 19　文献調査結果一覧（16）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
251	高温 CO2 捕捉用の改良石灰系ペレット収着剤: 反応性及び摩砕挙動 (Modified lime-based pellet sorbents for high-temperature CO2 capture: Reactivity and attrition behavior)	WU Yinghai , MANOVIC Vasilije , HE Ian , ANTHONY Edward J.	Fuel	Vol.96 Page.454-461 (2012.06)	2012
252	高温二酸化炭素捕獲のために設計したアルミン酸カルシウムセメントで担持した CaO ベースペレットの硫化性能 (Sulfation Performance of CaO-Based Pellets Supported by Calcium Aluminate Cements Designed for High-Temperature CO2 Capture)	MANOVIC Vasilije , ANTHONY Edward J.	Energy & Fuels	Vol.24 No.Jan/Feb Page.1414-1420 (2010.01)	2010
253	ベントナイトの長期安定性の検討 セメント系材料の影響を受けた地下水中のベントナイト安定性の予備調査 (A study on long term stability of bentonite. The preliminary study on the bentonite stability in the groundwater influenced by cementitious material.)	市毛悟 , 三原守弘 , 大井貴夫	ベントナイトの長期安定性の検討 セメント系材料の影響を受けた地下水中のベントナイト安定性の予備調査（試験報告）平成 14 年	Page.56P (2002)	2002
254	ポルトランドセメントコンクリートの耐久性指数パラメータに及ぼす管理環境条件の影響 (Effect of Controlled Environmental Conditions on Durability Index Parameters of Portland Cement Concretes.)	GRIESEL E J , ALEXANDER M G	Cement, Concrete, and Aggregates	Vol.23 No.1 Page.44-49 (2001.06)	2001
255	燃料サイクル研究 英国 - 日本の順調な協力関係に関する例 (Fuel cycle research: an example of successful Anglo-Japanese collaboration.)	INOUE T , BUSH R P	Nuclear Europe Worldscan	Vol.20 No.11-12 Page.37-38 (2000.11)	2000
256	アルカリ活性化フライアッシュ及び GGBFS 混合モルタルの強度,耐久性及び高温抵抗に及ぼす廃ガラス細骨材の影響 (Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar)	Khan Md. Nabi Newaz , Sarker Prabir Kumar	Construction and Building Materials	Vol.263 Page.Null (2020)	2020
257	耐火キャスタブルと構造用コンクリートの高温における単相混合処方に向けて (Towards a single-phase mixed formulation of refractory castables and structural concrete at high temperatures)	Moreira M.H. , Moreira M.H. , Ausas R.F. , Dal Pont S. , Pelissari P.I. , Luz A.P. , Luz A.P. , Pandolfelli V.C. , Pandolfelli V.C.	International Journal of Heat and Mass Transfer	Vol.171 Page.Null (2021)	2021
258	コンクリートの機械的及び耐久性挙動に及ぼす高温の影響 (Effect of high-temperature on the mechanical and durability behaviour of concrete)	Mathews Mervin Ealiyas , Kiran Tattukolla , Hasa Naidu Vellamaddi Chinmaya , Jeyakumar G. , Anand N.	Materials Today: Proceedings	Vol.42 No.P2 Page.718-725 (2021)	2021
259	C - S - H の硫酸イオン収着性状に及ぼす C/S 比および共存アルカリ種の影響	佐藤賢之介 , 立川大泰 , 齊藤成彦	土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)	Vol.75th ,No.V-159 (2020.08.01)	2020
260	高温を受けるコンクリートの熱的挙動:事例研究 (Thermal behavior of Concrete subjected to elevated temperature: Case Studies)	Shyamala G. , Mahesh V. , Rajesh Kumar K. , Rajasri Reddy I	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	Vol.981 No.3 Page.032068 (8pp) (2020)	2020
261	コンクリート中の天然骨材の代替としての農業廃棄物の生存率:耐久性関連特性に関するレビュー (Viability of agricultural wastes as substitute of natural aggregate in concrete: A review on the durability-related properties)	Mo Kim Hung , Thomas Blessen Skariah , Yap Soon Poh , Abutaha Fuad , Tan Chee Ghuan	Journal of Cleaner Production	Vol.275 Page.Null (2020)	2020
262	高温暴露コンクリートの機械的および耐久性に及ぼす鋼およびガラス繊維の影響 (Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures)	Abdi Moghadam Mehrdad , Izadifard Ramezan Ali	Fire Safety Journal	Vol.113 Page.Null (2020)	2020
263	高温曝露下のメタカオリン - フライアッシュ系ジオポリマコンクリートのスポーリング挙動 (Spalling behavior of metakaolin-fly ash based geopolymer concrete under elevated temperature exposure)	Zhang Hai Yan , Zhang Hai Yan , Qiu Guang Hong , Kodur Venkatesh , Yuan Zhen Sheng	Cement & Concrete Composites	Vol.106 Page.Null (2020)	2020
264	ココナッツ繊維を用いたココナッツ殻コンクリートの耐久性に関する研究 (Study on Durability Properties of Coconut Shell Concrete with Coconut Fiber)	Sekar Anandh, Kandasamy Gunasekaran	Buildings (Web)	Vol.9 No.5 Page.107 (2019)	2019
265	気泡と膨張粘土骨材を含む軽量コンクリートの性能に関する実験的研究 (Experimental research on the performance of lightweight concrete containing foam and expanded clay aggregate)	Ahmad Muhammad Riaz , Ahmad Muhammad Riaz , Ahmad Muhammad Riaz , Chen Bing , Chen Bing	Composites. Part B. Engineering	Vol.171 Page.46-60 (2019)	2019

表 20　文献調査結果一覧（17）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
266	高温を受ける持続可能コンクリートの耐久性―レビュー (Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature - A review)	Memon Shazim Ali , Shah Syed Farasat Ali , Khushnood Rao Arsalan , School of Civil and Environmental Engineering , National University of Sciences and Technology , Baloch Waqas Latif , School of Civil and Environmental Engineering , National University of Sciences and Technology	Construction and Building Materials	Vol.199 Page.435-455 (2019)	2019
267	高温におけるポリプロピレン繊維を用いた反応性粉体コンクリートの性能評価 (Performance evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures)	Hiremath Parameshwar N. , Yaragal Subhash C.	Construction and Building Materials	Vol.169 Page.499-512 (2018)	2018
268	各種粗骨材で準備した材齢 10 年コンクリートの力学的及び移動特性 (Mechanical and transport properties of 10years old concretes prepared with different coarse aggregates)	TORRIJOS M.c. , TORRIJOS M.c. , GIACCIO G. , GIACCIO G. , ZERBINO R. , ZERBINO R.	Construction and Building Materials	Vol.44 Page.706-715 (2013.07)	2013
269	骨材として冶金産業副産物を用いたコンクリートの特性 (Properties of concrete using metallurgical industrial by-products as aggregates)	ETXEBERRIA M. , PACHECO C. , MENESES J.m. , BERRIDI I.	Construction and Building Materials	Vol.24 No.9 Page.1594-1600 (2010.09)	2010
270	木材 - コンクリート合成梁の長期挙動 2:数値解析と簡易評価法 (Long-Term Behavior of Timber-Concrete Composite Beams. II: Numerical Analysis and Simplified Evaluation)	FRAGIACOMO Massimo	Journal of Structural Engineering	Vol.132 No.1 Page.23-33 (2006.01)	2006
271	プレーン及びスラグコンクリートの耐久性指標値に及ぼす初期高温の影響 (The effect of elevated initial temperatures on durability index values of plain and corex slag concretes)	STANISH K , ALEXANDER M G , KELLERMAN J	Materials and Structures	Vol.38 No.282 Page.747-753 (2005.10)	2005
272	補助セメント系材料を混合したショットクリートの強度,水和生成物および微細構造に及ぼす温度の影響（Effect of temperature on the strength, hydration products and microstructure of shotcrete blended with supplementary cementitious materials）	Niu Ditao (College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, China) Niu Ditao (College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, China) , etc	Construction and Building Materials Volume 264, 20 December 2020, 120234		2020
273	発熱性セメント固化廃棄体の模擬供試体による高温履歴と圧縮強度及び物質移動抵抗性の関係性評価	酒井大誠(八戸工高専)、庭瀬一仁(八戸工高専)	土木学会全国大会論文報告集(CD-ROM),	Ⅶ-149 2019 年 9 月	2019
274	異なる温度環境下における膨張モルタルの膨張性能と水和生成物の関係	小林晋吾(岐阜大学大学院)、小澤満津雄(岐阜大学)、栖原健太郎(電気化学工業)、森本博昭(岐阜大学)	セメント・コンクリート論文集,	2011 年 65 巻 1 号 p. 95-102	2011
275	長期高温作用を受けたセメント硬化体の窒素および水蒸気の吸脱着特性	蔵重勲(電中研)	セメント技術大会	73 回、1105，2019	2019
276	長期高温作用を受けたセメント硬化体のガス吸着特性	蔵重勲(電中研)	日本吸着学会研究発表会講演要旨集,	巻： 32nd　ページ： 65 発行年： 2018 年 11 月 08 日	2018
277	長期高温作用が低熱ポルトランドセメント-フライアッシュ系硬化体の諸物性に及ぼす影響	蔵重勲(電中研)、山本武志(電中研)	平成 30 年度土木学会全国大会 第 73 回年次学術講演会、	Ⅴ-088	2018
278	セメント質材料の水分拡散係数に関する基礎的研究（FUNDAMENTAL STUDY ON WATER DIFFUSION COEFFICIENT OF CEMENT BASED MATERIAL）	LIN Mao (Nagoya Univ.), SASANO Hiroshi (Nagoya Univ.), MARUYAMA Ippei (Nagoya Univ.)	コンクリート工学年次論文集,	巻： 35　ページ： ROMBUNNO.1095　発行年： 2013 年 06 月 15 日	2013
279	セメント系硬化体の酸素拡散係数に及ぼす養生温度の影響	上原丈児(群馬大学)、半井健一郎(群馬大学)	コンクリート工学年次論文集,	Vol.33，No.1，2011	2011
280	余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方		社団法人　土木学会　エネルギー委員会　低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会	2008 年 6 月	2008

表 21　文献調査結果一覧（18）

	タイトル	著者名	発行元	巻号ページ（発行年月日）	発行年
281	平成 29 年度　高レベル放射性廃棄物等 の地層処分に関する技術開発事業　TRU 廃棄物処分・処分技術高度化開発　平成 25 年 度～29 年度取りまとめ報告書		(公財)原子力環境整備促進・資金管 理センター	2018 年 3 月	2018

3.2　低拡散性

蔵重ほか（2008）[4]は、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントで作製した各種ペースト試験体（水セメント比：35%及び 55%）について、60℃及び 80℃の温度条件で 12 ヵ月にわたり熱負荷を与え、その際の細孔構造変化とイオン拡散性について実験により評価している。図 2 に示すように、60℃または 80℃での高温負荷を受けた場合、いずれの温度負荷においても 6 ヵ月後の時点で累積細孔量が増加し、実効拡散係数も上昇することが示されている。これは、セメント硬化体の骨格を成す C-S-H が高温負荷によって変質し、物質移動に影響をもたらした可能性があるとされている。

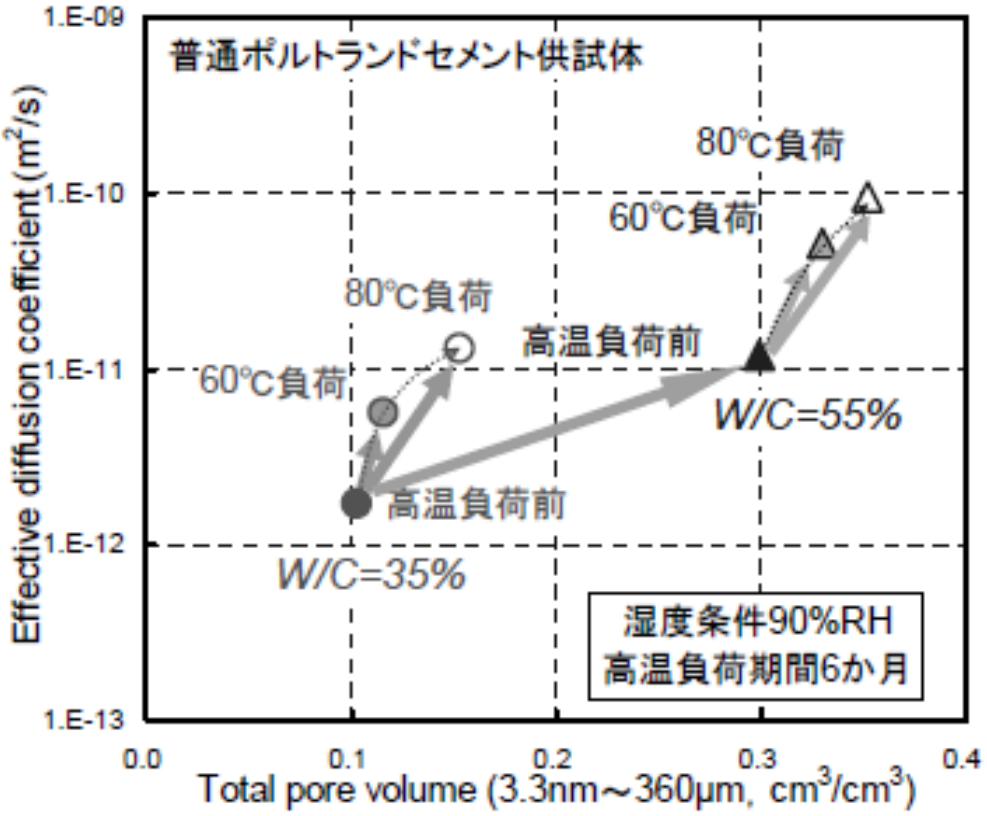


図 2　累積細孔量（直径 3.3nm~360μm）と酢酸イオンの有効拡散係数との関係[4]

また、蔵重ほか（2018）[5]は、低熱ポルトランドセメントを用いた実規模モルタル試験体（水セメント比 45%、材齢 7 年経過）からコアを採取し、20℃、40℃、50℃、60℃及び 80℃のそれぞれの環境下にて、最長 2 年にわたり熱負荷を与えた場合の実効拡散係数を評価いている（図 3）。同図より、負荷期間 2 年のコアにおいては、負荷温度 60℃程度よりも高い温度となった場合に、実効拡散係数に影響を及ぼすと評価している。更に、負荷温度 80℃となると、実効拡散係数への顕著な影響が確認されている。

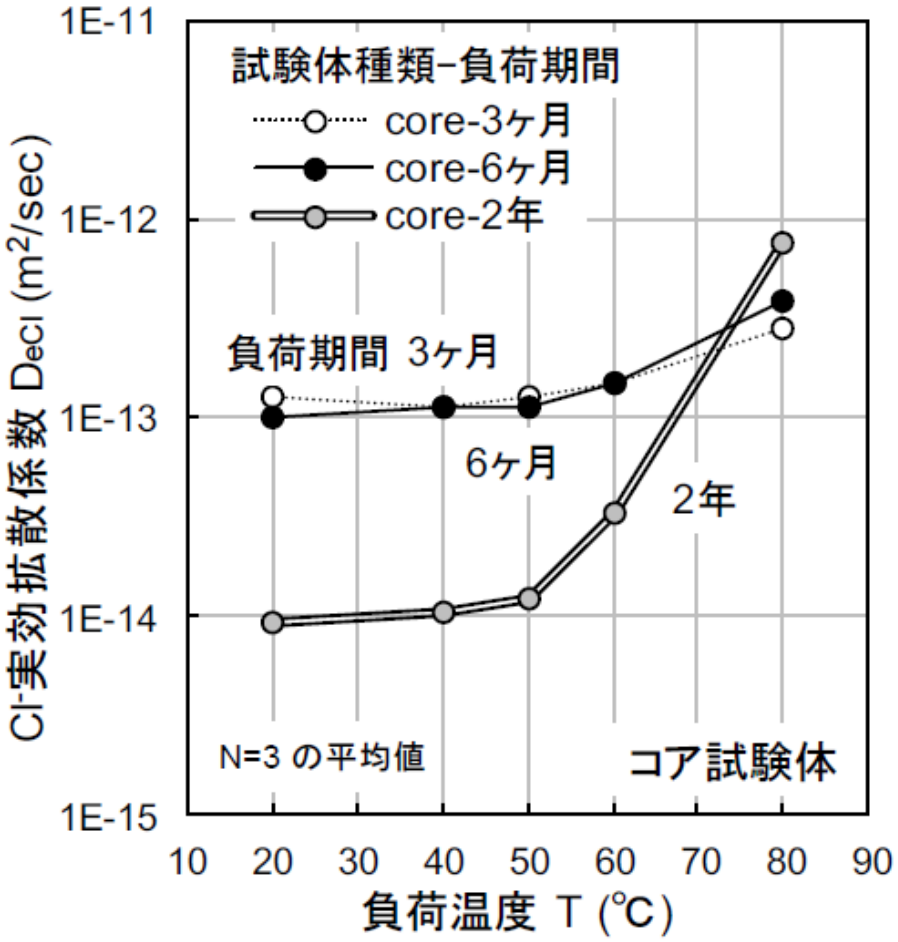


図 3　長期高温作用によるコア試験体の塩化物イオン実行拡散係数の変化[5]

3.3　核種収着性

セメント系材料を用いた人工バリア部材について、核種収着性はセメント水和物の収着分配係数の影響が顕著であり、収着分配係数はその鉱物組成に大きな影響を受ける。Atkins ほか（1991）[6]は、C-S-H の結晶形態の変化によって、核種に対する収着能力が変化する可能性を指摘している。

セメント系材料における C-S-H の再結晶化については、Duerden ほか（1997）[7]が、100℃以下であっても C-S-H の結晶形態が変化する可能性を報告している。また、Atkinson・Hearne（1989）[8]は、図 4 に示すように、C-S-H の様々な Ca/Si 比と温度における安定な水和物との関係を整理しており、概ね 80℃程度以上の温度条件において、C-S-H が結晶化するとされている。

第 2 次 TRU レポートでは、セメント系材料の収着性低下は熱影響による C-S-H（ケイ酸カルシウム水和物）の再結晶化によって生じるとしており、同図を参考として、処分場の温度を 80℃以下に制限することによって、熱変質の影響を抑制するとしている[3]。

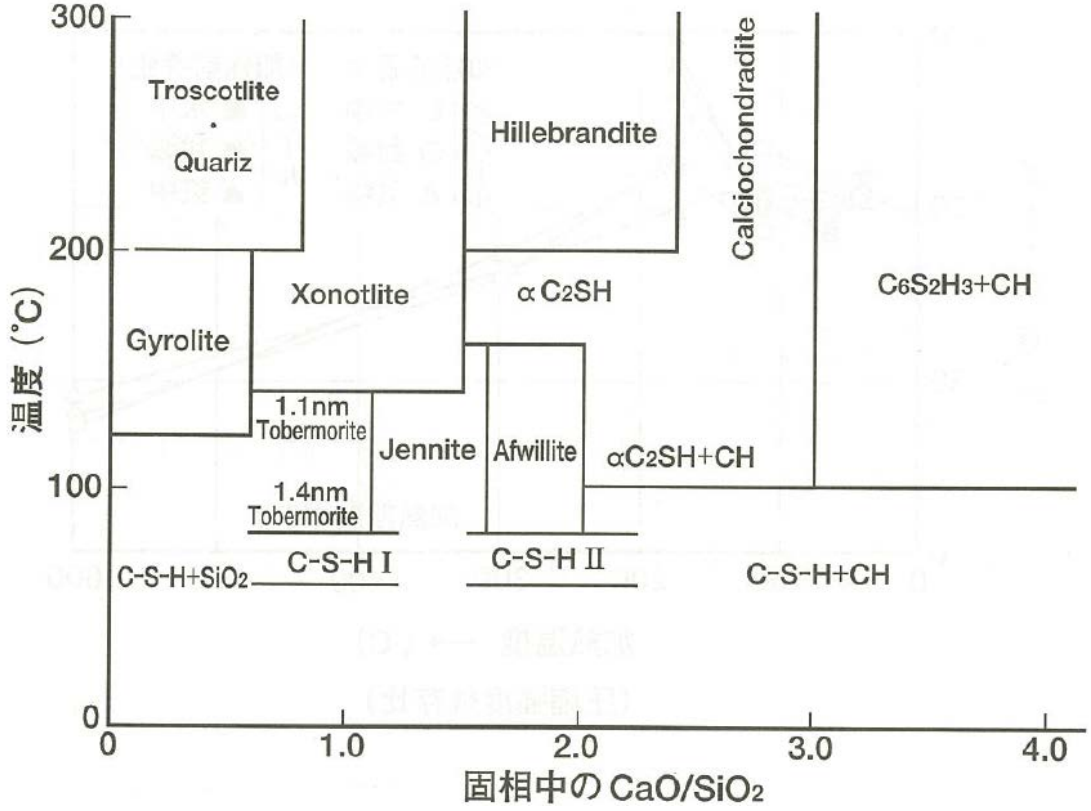


図 4　C-S-H の熱による変化（Atkinson・Hearne、1989）[8]

TRU 廃棄物処分・処分技術高度化開発報告書は、セメント系材料の熱影響による C-S-H 結晶化条件に関する試験を実施している[9]。試験対象は合成 C-S-H（Ca/Si 比：0.83、1.1 及び 1.4）及び合成 C-A-S-H（Cs/(Si+Al)比：0.83、1.1 及び 1.4）であり、それぞれについて 50℃、70℃、80℃及び 90℃における再結晶化条件を考察している。

その結果、図 5 に示す通り、Ca/(Si+Al)比 1.1 では、試験期間 1 年においてジェナイトの生成は確認されたものの、試験期間内での C-S-H の結晶化（トバモライト化）は認められなかったとされている。一方で、Ca/(Si+Al)比が 1.0 程度以下の条件においては、50℃条件下でも、少量ながら C-S-H の結晶化が確認されている。更に、Al を含む C-A-S-H は、Al を含まない C-S-H よりも結晶化しやすい傾向にあることが示されている。また、同報告書には、合成 C-S-H を用いて試験を行った際のトバモライト化の割合も示されており、図 6 に示す通り、温度によって、トバモライト化の割合は異なり、温度条件が高くなるにつれてトバモライト化が進行すると報告されている。

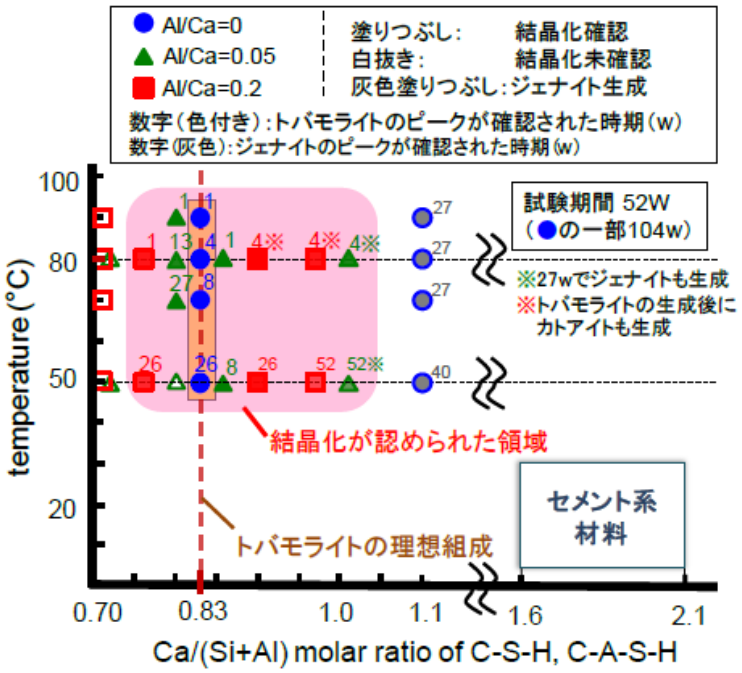


図 5　熱影響による合成 C-S-H 及び合成 C-A-S-H の結晶化条件の整理(概念図)[9]

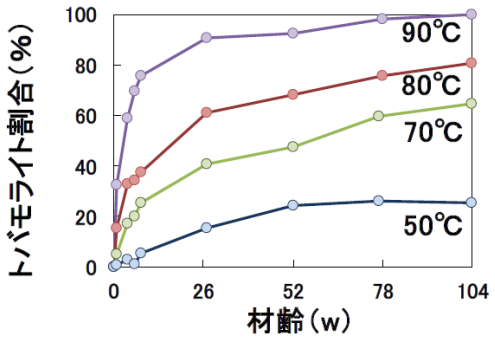


図 6　合成 C-S-H におけるトバモライト化の割合[9]

廣永ら（2004 年）[10]は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 40%のペースト試験体を用いて温度負荷による細孔径分布への影響を研究している。温度負荷条件は 40℃、30%R.H.で 14 週間若しくは 65℃、30%R.H.で８週間である。

結果は、図 7 に示すように、温度負荷による累計細孔容積の変化はほぼ見られないが、細孔径分布に影響が生じることが確認されている。同研究では、SEM による水和物形態も観察しており、65℃高温負荷において、C-S-H ゲルの結晶形態の変化が確認されたことから、細孔径分布に影響を及ぼした可能性があると報告している。

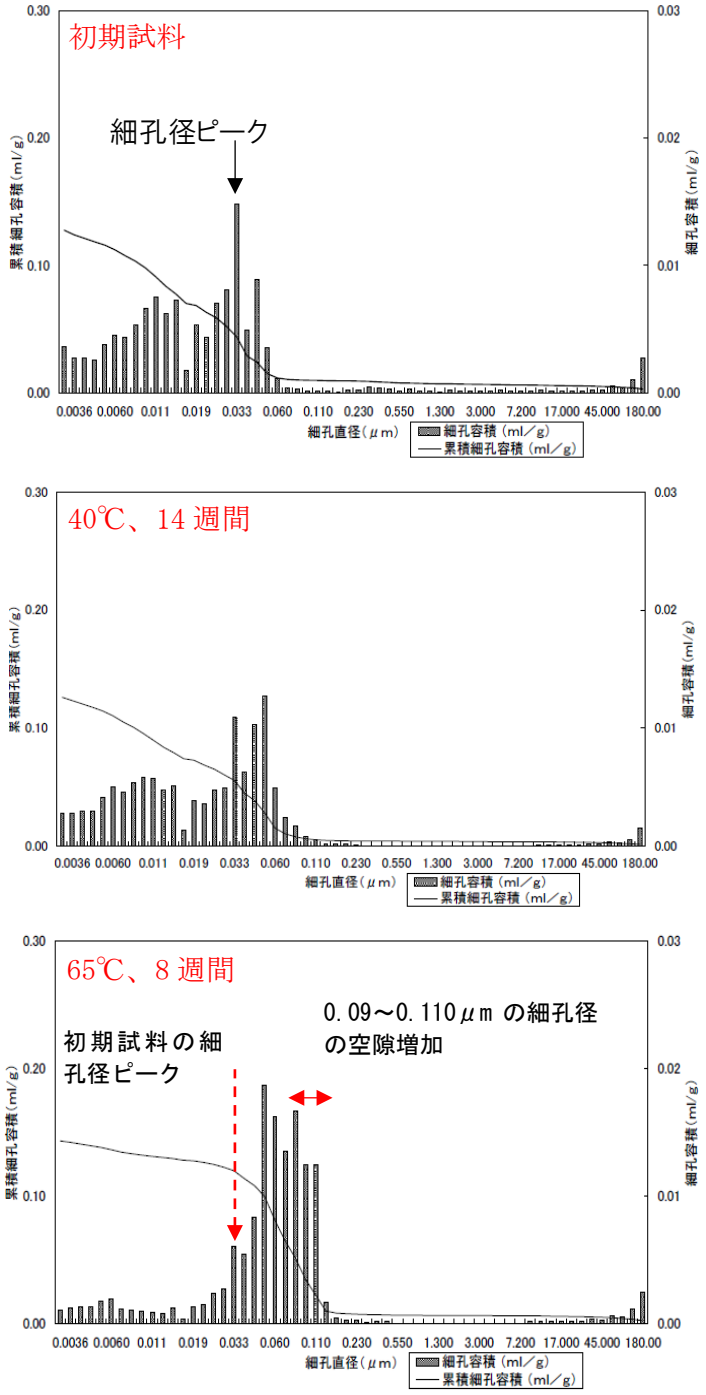


図 7　コンクリート試験体の細孔径分布[10]

3.4　文献調査のまとめと課題

セメント系材料に熱変質をもたらすとされる高温負荷の影響について、低拡散性及び核種収着性の観点から既往の文献調査を行った。結果を以下にまとめる。

【低拡散性】

- 高温負荷 60℃程度から実効拡散係数が上昇し、低拡散性に影響を及ぼす可能性がある。

【核種収着性】

- 高温負荷 50℃条件下においても C-S-H の結晶化（トバモライト化）が確認される。
- C-S-H の結晶化のしやすさは、Al の含有の有無といった C-S-H の組成によって異なる。

一方で、実効拡散係数について、本報告書で取りあげた文献の高温負荷期間は 2 年が最長であり、これ以上に長期的な高温負荷を受けた場合、実効拡散係数にどれ程影響を与えるかは、不明である。また、核種収着性については、C-S-H が高温負荷によって結晶化することが示されていたが、C-S-H の変質が収着性能にどの程度影響を及ぼすかは不明である。

添付資料 3 の参考文献

[1] 社団法人　土木学会エネルギー委員会　低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方、2009 年 7 月

[2] 日本建築学会：原子炉建屋構造設計指針・同解説、1988 年 1 月

[3] 電気事業連合会、核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書－第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ、JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02、2005 年 9 月

[4] 蔵重勲、吉田崇宏、千田太詩、廣永道彦：電力中央研究所報告　高温負荷による普通・低熱ポルトランドセメント硬化体の細孔構造変化とイオン拡散性に及ぼす影響、研究報告 N07041、平成 20 年 7 月

[5] 蔵重勲、山本武志：長期高温作用が低熱ポルトランドセメントーフライアッシュ系硬化体の諸物性に及ぼす影響、平成 30 年度土木学会全国大会　第 73 回年次学術講演会、V-088、2018 年

[6] Atkins, M., Glasser, F. P. and Moroni, L. P.: The Long-Term Properties of Cement and Concretes, Mat.Res.Soc.Symp.Proc., vol.212, pp.373-386, 1991 年

[7] Duerden, S., Glasser, F. P., Goldthorpe, K., Pedersen, J., Quillin, K., Ross, D., Stronach, A. and Tyrer, M.: Chemistry and Performance of Blended Cements and Backfills for Use in Radioactive Waste Disposal, Mat.Res.Soc.Symp.Proc., vol.465, pp.287-294, 1997 年

[8] Atkinson, A. and Hearne, J. A.: The hydrothermal Chemistry of Portland Cement and Its Relevance to Radioactive Waste Disposal, NSS/R 187, 1989 年

[9] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 29 年度　高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業　TRU 廃棄物処分・処分技術高度化開発　平成 25 年度～29 年度取りまとめ報告書、平成 30 年 3 月

[10] 廣永道彦、蔵重勲、井元晴丈：電力中央研究所報告　セメント硬化体の熱影響に関する検討－温度 65℃におけるセメント系材料の変質状況について―、研究報告 N04013、平成 16 年 11 月

添付資料－４

中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化の内、ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究（第６章）に係る実験データ集

土質試験結果データシート(1)

土 質 試 験 結 果 一 覧 表 （基礎地盤）

調査件名　　整理年月日　2021年 8月 4日

整理担当者

	試料番号（深さ）		購入砂	珪砂微粉	購入砂+珪砂微粉10%			
一般	湿潤密度 ρ_t	g/cm³						
	乾燥密度 ρ_d	g/cm³						
	土粒子の密度 ρ_s	g/cm³	2.743	2.637	2.727			
	自然含水比 w_n	%	3.2	0.2	3.0			
	間隙比 e							
	飽和度 S_r	%						
粒度	石分（75mm以上）	%						
	礫分[1]（2~75mm）	%	8.0	0.0	7.9			
	砂分[1]（0.075~2mm）	%	91.6	2.9	83.3			
	シルト分[1]（0.005~0.075mm）	%	0.1	81.8	6.8			
	粘土分[1]（0.005mm未満）	%	0.3	15.3	2.0			
	最大粒径	mm	4.75	0.425	4.75			
	均等係数 U_c		2.94	8.13	4.96			
コンシステンシー特性	液性限界 w_L	%						
	塑性限界 w_p	%						
	塑性指数 I_p							
分類	地盤材料の分類名		分級された礫まじり砂	細粒土	細粒分礫まじり砂			
	分類記号		(SP-G)	(F)	(S-FG)			
圧密	試験方法							
	圧縮指数 C_c							
	圧密降伏応力 p_c	kN/m²						
一軸圧縮	一軸圧縮強さ q_u	kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u	kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u	kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u	kN/m²						
せん断	試験条件							
	全応力	c kN/m²						
		ϕ °						
	有効応力	c' kN/m²						
		ϕ' °						

特記事項

1）石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

JIS A 1202 JGS 0111	土 粒 子 の 密 度 試 験 （測定）	

調査件名 ---------- 試験年月日 2021年 7月 31日

試 験 者

試料番号（深さ）		購入砂			珪砂微粉		
ピクノメーターNo.		475	139	4	499	153	115
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g		170.510	152.135	163.418	162.414	148.577	149.844
m_bをはかったときの内容物の温度 T ℃		26.1	26.1	26.1	26.1	26.1	26.1
T℃における蒸留水の密度 $\rho_w(T)$g/cm³		0.99676	0.99676	0.99676	0.99676	0.99676	0.99676
温度T℃の蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a 1) g		158.277	139.987	151.131	154.271	139.965	140.320
試料の炉乾燥質量	容器No.	475	139	4	499	153	115
	(炉乾燥試料+容器)質量g	88.430	64.594	78.419	75.063	59.289	60.817
	容器質量 g	69.230	45.504	59.106	61.983	45.421	45.513
	m_s g	19.200	19.090	19.313	13.080	13.868	15.304
土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.747	2.741	2.740	2.641	2.630	2.639
平均値 ρ_s g/cm³		2.743			2.637		
試料番号（深さ）		購入砂+珪砂微粉10%					
ピクノメーターNo.		500	199	56			
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g		168.674	154.234	162.843			
m_bをはかったときの内容物の温度 T ℃		26.1	26.1	26.1			
T℃における蒸留水の密度 $\rho_w(T)$g/cm³		0.99676	0.99676	0.99676			
温度T℃の蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a 1) g		155.300	139.987	149.360			
試料の炉乾燥質量	容器No.	500	199	56			
	(炉乾燥試料+容器)質量g	84.629	66.540	75.917			
	容器質量 g	63.544	44.095	54.658			
	m_s g	21.085	22.445	21.259			
土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.726	2.729	2.725			
平均値 ρ_s g/cm³		2.727					
試料番号（深さ）							
ピクノメーターNo.							
(試料+蒸留水+ピクノメーター)の質量 m_b g							
m_bをはかったときの内容物の温度 T ℃							
T℃における蒸留水の密度 $\rho_w(T)$g/cm³							
温度T℃の蒸留水を満たしたときの(蒸留水+ピクノメーター)質量 m_a 1) g							
試料の炉乾燥質量	容器No.						
	(炉乾燥試料+容器)質量g						
	容器質量 g						
	m_s g						
土粒子の密度 ρ_s g/cm³							
平均値 ρ_s g/cm³							

特記事項

1) ピクノメーターの検定結果から求める。

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_s + (m_a - m_b)} \times \rho_w(T)$$

JIS A 1203 JGS 0121	土 の 含 水 比 試 験	

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 31日

試 験 者

試料番号（深さ）	購入砂			珪砂微粉		
容 器 No.	214	170	43	4	128	1
m_a g	55.76	66.70	54.39	41.43	43.83	44.05
m_b g	54.34	64.96	53.02	41.37	43.78	43.99
m_c g	9.79	10.72	9.66	9.33	10.45	10.59
w %	3.2	3.2	3.2	0.2	0.2	0.2
平均値 w %	3.2			0.2		
特 記 事 項						

試料番号（深さ）	購入砂+珪砂微粉10%					
容 器 No.	75	161	119			
m_a g	59.31	56.28	64.36			
m_b g	57.94	54.94	62.77			
m_c g	10.59	10.26	10.20			
w %	2.9	3.0	3.0			
平均値 w %	3.0					
特 記 事 項						

試料番号（深さ）						
容 器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平均値 w %						
特 記 事 項						

試料番号（深さ）						
容 器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平均値 w %						
特 記 事 項						

試料番号（深さ）						
容 器 No.						
m_a g						
m_b g						
m_c g						
w %						
平均値 w %						
特 記 事 項						

$$w = \frac{m_a - m_b}{m_b - m_c} \times 100$$

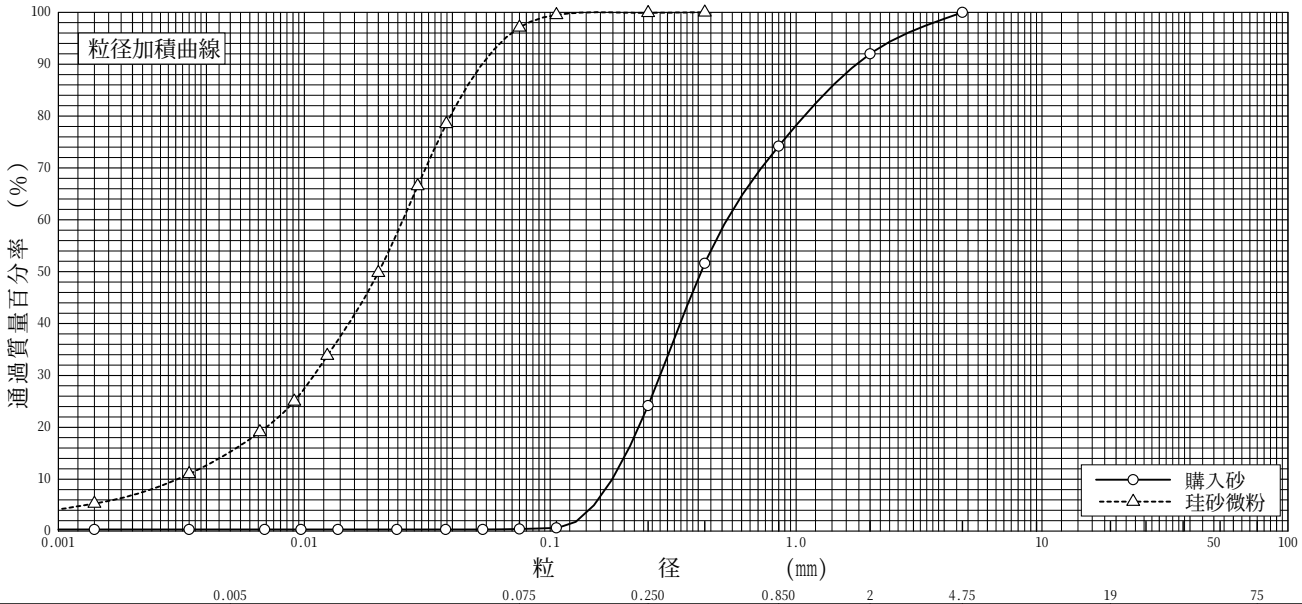
m_a ：(試料＋容器)質量
m_b ：(炉乾燥試料＋容器)質量
m_c ：容器質量

JIS A 1204 JGS 0131	土 の 粒 度 試 験（粒径加積曲線）	

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 31日

試 験 者

試料番号（深 さ）	購入砂		珪砂微粉		試 料 番 号（深 さ）	購入砂	珪砂微粉
ふるい分析	粒 径 mm	通過質量百分率%	粒 径 mm	通過質量百分率%	粗 礫 分 %	-	-
	75		75		中 礫 分 %	-	-
	53		53		細 礫 分 %	8.0	-
	37.5		37.5		粗 砂 分 %	17.8	-
	26.5		26.5		中 砂 分 %	50.0	0.1
	19		19		細 砂 分 %	23.8	2.8
	9.5		9.5		シ ル ト 分 %	0.1	81.8
	4.75	100.0	4.75		粘 土 分 %	0.3	15.3
	2	92.0	2		2mmふるい通過質量百分率 %	92.0	100.0
	0.850	74.2	0.850		425μmふるい通過質量百分率 %	51.6	100.0
	0.425	51.6	0.425	100.0	75μmふるい通過質量百分率 %	0.4	97.1
	0.250	24.2	0.250	99.9	最 大 粒 径 mm	4.75	0.425
	0.106	0.6	0.106	99.5	60 % 粒 径 D_{60} mm	0.5247	0.0252
	0.075	0.4	0.075	97.1	50 % 粒 径 D_{50} mm	0.4123	0.0201
沈降分析	0.0532	0.3	0.0378	78.5	30 % 粒 径 D_{30} mm	0.2805	0.0109
	0.0376	0.3	0.0289	66.5	10 % 粒 径 D_{10} mm	0.1787	0.0031
	0.0238	0.3	0.0200	49.8	均 等 係 数 U_c	2.94	8.13
	0.0137	0.3	0.0124	33.8	曲 率 係 数 U_c'	0.84	1.52
	0.0097	0.3	0.0091	25.0	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743	2.637
	0.0069	0.3	0.0066	19.1	使用した分散剤	ヘキサメタ燐酸ナトリウム	ヘキサメタ燐酸ナトリウム
	0.0034	0.3	0.0034	11.0	溶液濃度，溶液添加量	飽和溶液，10ml	飽和溶液，10ml
	0.0014	0.3	0.0014	5.3	20 % 粒 径 D_{20} mm	0.2291	0.0070



粘 土	シ ル ト	細 砂	中 砂	粗 砂	細 礫	中 礫	粗 礫

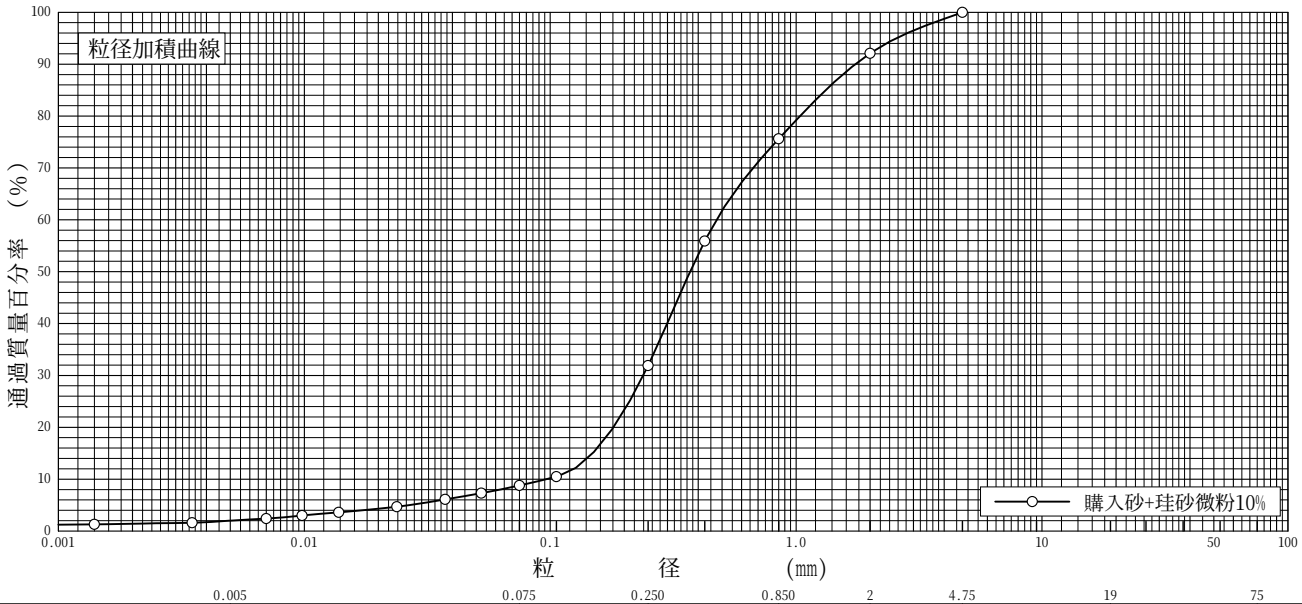
特記事項

JIS A 1204 JGS 0131	土の粒度試験（粒径加積曲線）	

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 31日

試験者

試料番号（深さ）	購入砂+珪砂微粉10%				試料番号（深さ）	購入砂+珪砂微粉10%	
ふるい分析	粒径 mm	通過質量百分率%	粒径 mm	通過質量百分率%	粗礫分 %	-	
	75		75		中礫分 %	-	
	53		53		細礫分 %	7.9	
	37.5		37.5		粗砂分 %	16.5	
	26.5		26.5		中砂分 %	43.7	
	19		19		細砂分 %	23.1	
	9.5		9.5		シルト分 %	6.8	
	4.75	100.0	4.75		粘土分 %	2.0	
	2	92.1	2		2mmふるい通過質量百分率 %	92.1	
	0.850	75.6	0.850		425μmふるい通過質量百分率 %	55.9	
	0.425	55.9	0.425		75μmふるい通過質量百分率 %	8.8	
	0.250	31.9	0.250		最大粒径 mm	4.75	
	0.106	10.5	0.106		60 % 粒径 D_{60} mm	0.4779	
	0.075	8.8	0.075		50 % 粒径 D_{50} mm	0.3717	
沈降分析	0.0525	7.3			30 % 粒径 D_{30} mm	0.2390	
	0.0374	6.1			10 % 粒径 D_{10} mm	0.0964	
	0.0238	4.7			均等係数 U_c	4.96	
	0.0138	3.6			曲率係数 U_c'	1.24	
	0.0098	3.0			土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.727	
	0.0070	2.4			使用した分散剤	ヘキサメタ燐酸ナトリウム	
	0.0035	1.6			溶液濃度，溶液添加量	飽和溶液，10ml	
	0.0014	1.3			20 % 粒径 D_{20} mm	0.1806	



粘土	シルト	細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫

特記事項

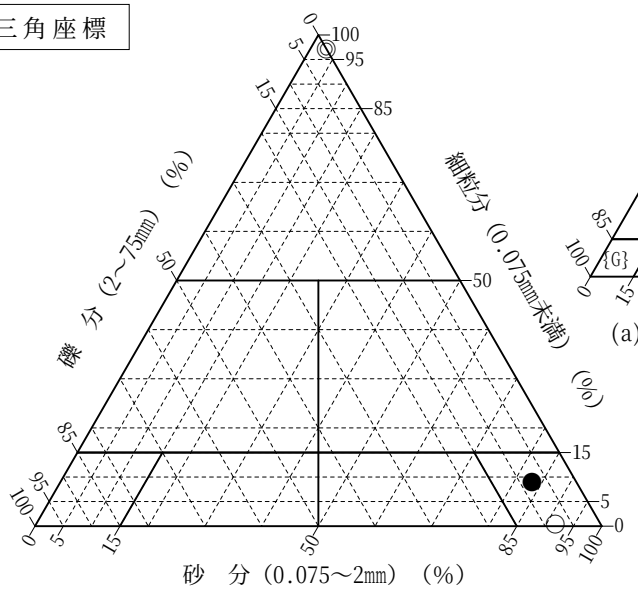
JGS　0051	地盤材料の工学的分類	

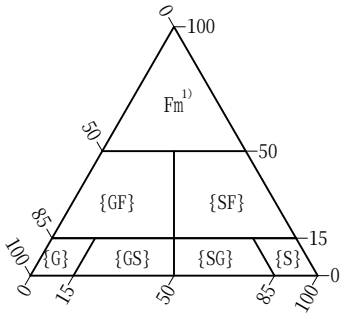
調査件名　　試験年月日　2021年 7月 31日

試　験　者

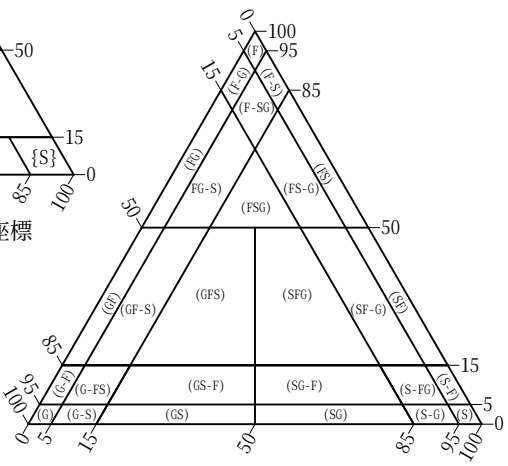
試料番号 （深さ）	購入砂	珪砂微粉	購入砂+珪砂微粉10%			
石　分(75mm以上)　%						
礫　分(2～75mm)　%	8.0	0.0	7.9			
砂　分(0.075～2mm)　%	91.6	2.9	83.3			
細粒分(0.075mm未満)　%	0.4	97.1	8.8			
シルト分(0.005～0.075mm)%	0.1	81.8	6.8			
粘土分(0.005mm未満)　%	0.3	15.3	2.0			
最大粒径　mm	4.75	0.425	4.75			
均等係数 U_c	2.94	8.13	4.96			
液性限界 w_L　%						
塑性限界 w_p　%						
塑性指数 I_p						
地盤材料の分類名	分級された礫まじり砂	細粒土	細粒分礫まじり砂			
分類記号	(SP-G)	(F)	(S-FG)			
凡例記号	○	◎	●			

三角座標



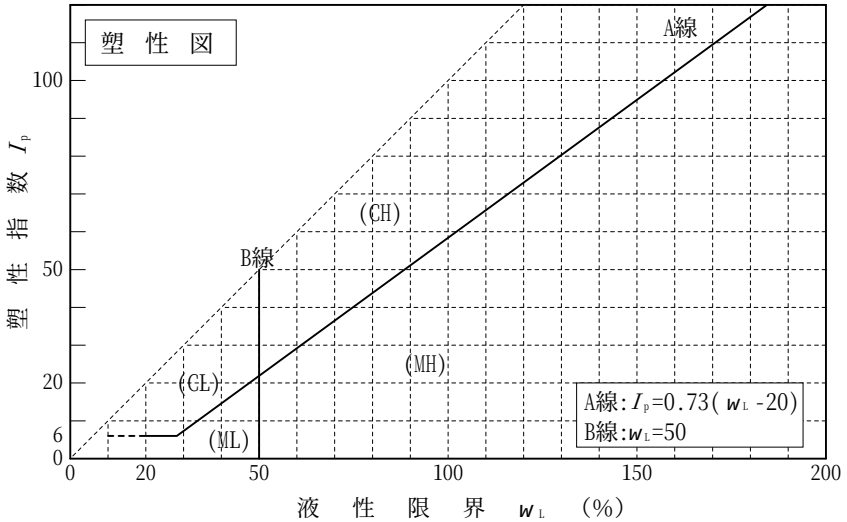


(a) 中分類用三角座標



(b) 粗粒土の小分類および細粒土の細分類用三角座標

塑性図



特記事項　1) 主に観察と塑性図で判別分類

土質試験結果データシート(2)

土 質 試 験 結 果 一 覧 表 （基礎地盤）

調査件名　　整理年月日　2021年 10月 20日

整理担当者

	試料番号（深さ）		砂：ベントナイト=9:1（全粒径）	砂：ベントナイト=7:3（全粒径）				
一般	湿潤密度 ρ_t	g/cm³						
	乾燥密度 ρ_d	g/cm³						
	土粒子の密度 ρ_s	g/cm³						
	自然含水比 w_n	%						
	間隙比 e							
	飽和度 S_r	%						
粒度	石分（75mm以上）	%						
	礫分[1]（2～75mm）	%						
	砂分[1]（0.075~2mm）	%						
	シルト分[1]（0.005~0.075mm）	%						
	粘土分[1]（0.005mm未満）	%						
	最大粒径	mm						
	均等係数 U_c							
コンシステンシー特性	液性限界 w_L	%	26.2	78.3				
	塑性限界 w_p	%	16.0	21.4				
	塑性指数 I_p		10.2	56.9				
分類	地盤材料の分類名							
	分類記号							
圧密	試験方法							
	圧縮指数 C_c							
	圧密降伏応力 p_c	kN/m²						
一軸圧縮	一軸圧縮強さ q_u	kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u	kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u	kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u	kN/m²						
せん断	試験条件							
	全応力	c kN/m²						
		ϕ °						
	有効応力	c' kN/m²						
		ϕ' °						

特記事項

1）石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

［1kN/m²≒0.0102kgf/cm²］

JIS A 1205
JGS 0141

土の液性限界・塑性限界試験（試験結果）

調査件名

試験年月日　2021年 10月 20日

試　験　者

試料番号（深さ）　砂：ベントナイト＝9:1（全粒径）

液性限界試験		塑性限界試験	液性限界 w_L %
落下回数	含水比 w %	含水比 w %	26.2
34	24.5	15.9	塑性限界 w_p %
26	26.1	16.3	16.0
21	27.4	15.7	塑性指数 I_p
17	28.0		10.2
12	29.2		

試料番号（深さ）　砂：ベントナイト＝7:3（全粒径）

液性限界試験		塑性限界試験	液性限界 w_L %
落下回数	含水比 w %	含水比 w %	78.3
44	72.4	21.9	塑性限界 w_p %
33	76.1	21.2	21.4
28	77.7	21.0	塑性指数 I_p
23	79.9		56.9
18	81.4		
14	82.9		

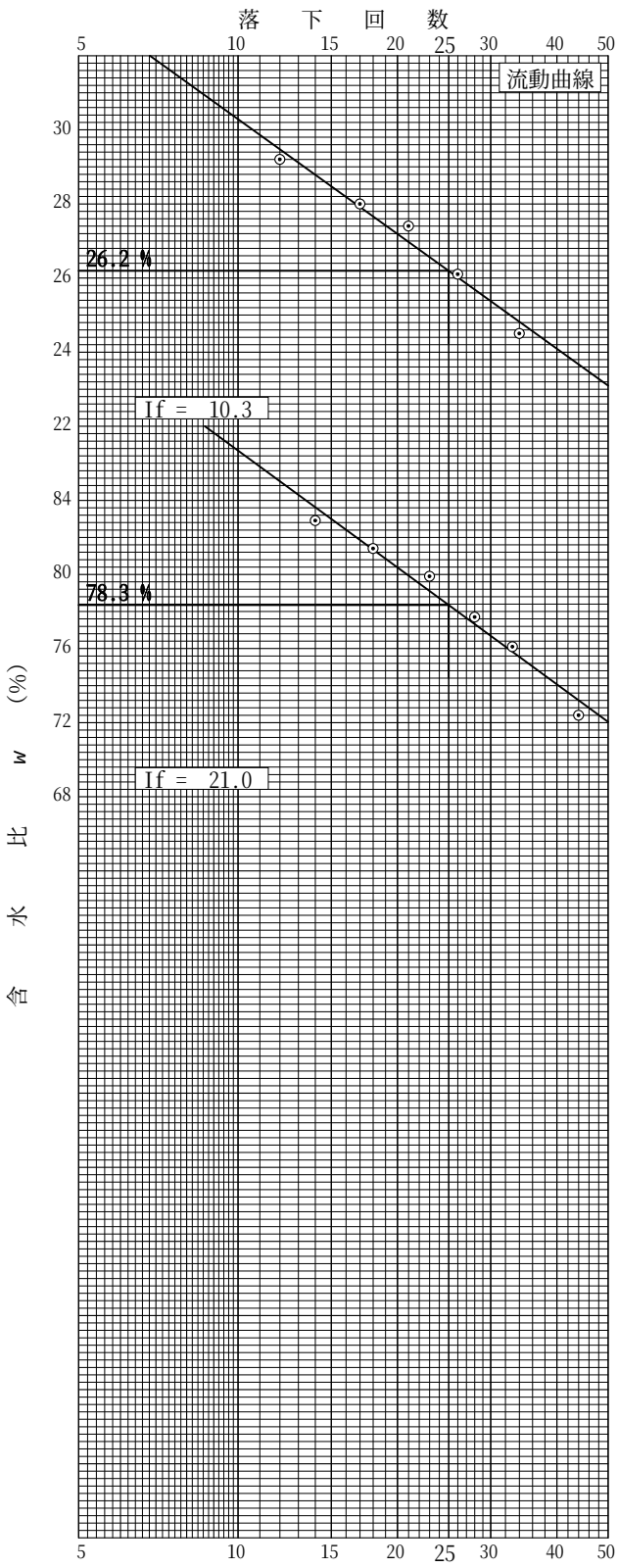
試料番号（深さ）

液性限界試験		塑性限界試験	液性限界 w_L %
落下回数	含水比 w %	含水比 w %	
			塑性限界 w_p %
			塑性指数 I_p

試料番号（深さ）

液性限界試験		塑性限界試験	液性限界 w_L %
落下回数	含水比 w %	含水比 w %	
			塑性限界 w_p %
			塑性指数 I_p

特記事項



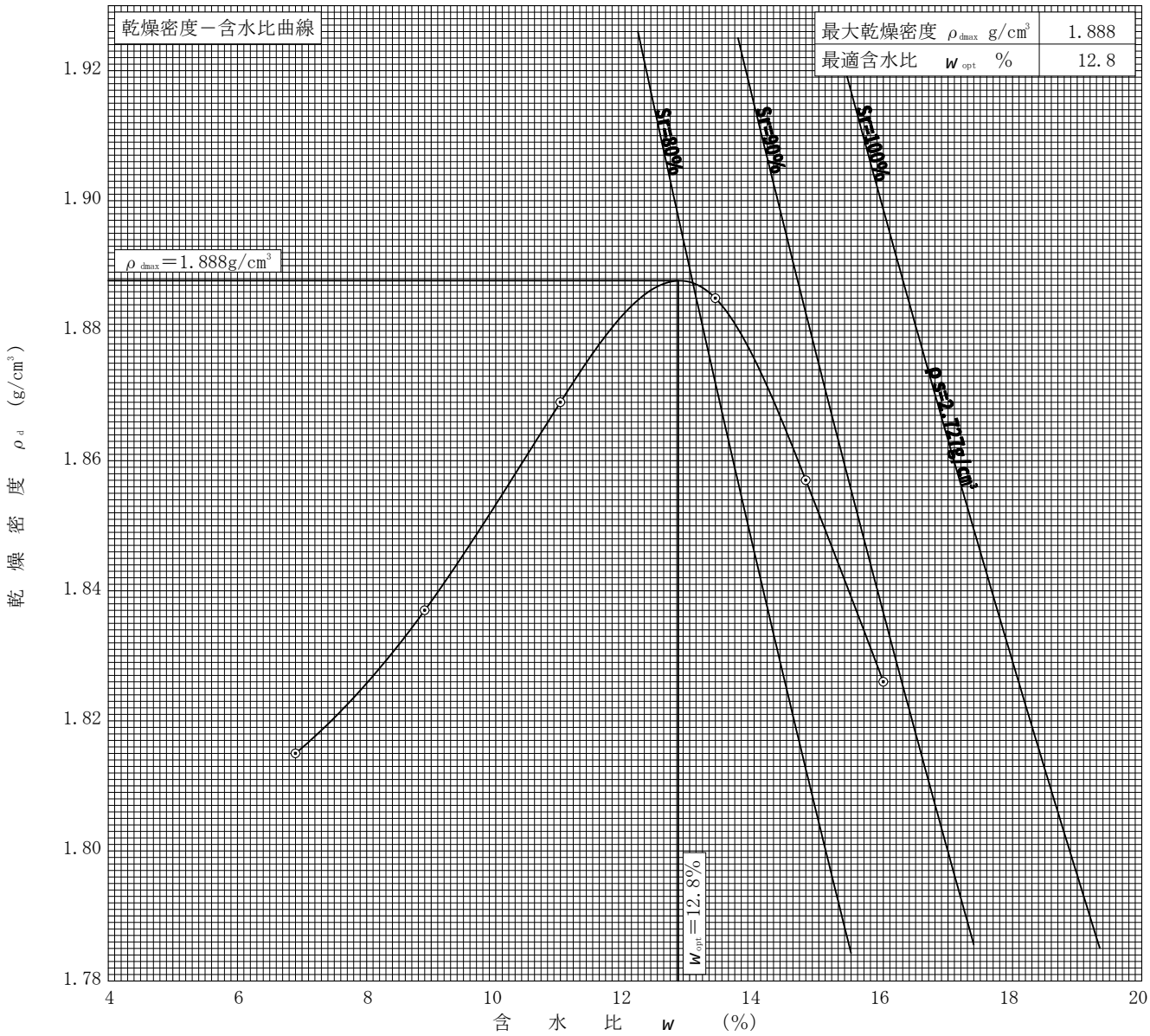
土質試験結果データシート(3)

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）	

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号　（深さ）購入砂+珪砂微粉10%　　試　験　者

試験方法	A－c		土質名称		細粒分礫まじり砂（S-FG）			
試料の準備方法	~~乾燥法~~，湿潤法		ランマー質量 kg		2.5	土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.727
試料の使用方法	~~繰返し法~~，非繰返し法		落下高さ cm		30	試料調製前の最大粒径 mm		4.75
含水比 試料分取後 w_0 %			突固め回数 回/層		25	モールド	内径 cm	10.00
含水比 乾燥処理後 w_1 %			突固め層数 層		3	モールド	高さ[1] cm	12.73
測定 No.	1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 w %	6.9	8.9	11.0	13.4	14.8	16.0		
乾燥密度 ρ_d g/cm³	1.815	1.837	1.869	1.885	1.857	1.826		



特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w/\rho_s + w/100}$$

土質試験結果データシート(4)

土 質 試 験 結 果 一 覧 表 （ 材 料 ）

調査件名　　整理年月日　2021年 9月 29日

整理担当者

	試料番号（深さ）	砂：ベントナイト=9.1 (0.1EC)	砂：ベントナイト=9.1 (4.5EC)	購入砂 (0.2EC)	購入砂 (4.5EC)	砂：+珪砂微粉=9.1 (0.2EC)	砂：+珪砂微粉=9.1 (4.5EC)
一般	湿潤密度 ρ_t g/cm³						
	乾燥密度 ρ_d g/cm³						
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³						
	自然含水比 w_n %						
	間隙比 e						
	飽和度 S_r %						
粒度	石分（75mm以上） %						
	礫分[1]（2～75mm） %						
	砂分[1]（0.075~2mm） %						
	シルト分[1]（0.005~0.075mm） %						
	粘土分[1]（0.005mm未満） %						
	最大粒径 mm						
	均等係数 U_c						
コンシステンシー特性	液性限界 w_L %						
	塑性限界 w_p %						
	塑性指数 I_p						
分類	地盤材料の分類名						
	分類記号						
締固め	試験方法	E－b	E－b	0.2EC	4.5EC	0.2EC	4.5EC
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} g/cm³	1.570	1.873	1.664	1.803	1.780	1.927
	最適含水比 w_{opt} %	17.5	12.2	15.9	14.0	13.6	11.4
CBR	試験方法						
	膨張比 r_e %						
	貫入試験後含水比 w_2 %						
	平均CBR %						
	%修正CBR %						
コーン指数	突固め回数 回/層						
	コーン指数 q_c kN/m²						

特記事項

1）石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

［1kN/m²≒0.0102kgf/cm²］

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（測定）	

調査件名　　試験年月日　2021年 8月 13日

試料番号　（深さ）砂：ベントナイト＝9.1（0.1EC）　　試　験　者

試験方法		E－b	土質名称				
試料の準備方法		乾燥法，~~湿潤法~~	ランマー質量 kg	4.5	モールド	内径 cm	5
試料の使用方法		~~繰返し法~~，非繰返し法	落下高さ cm	45		高さ[1] cm	10
含水比	試料分取後 w_0 %		突固め回数 回/層	92		容量 V cm³	196.35
	乾燥処理後 w_1 %		突固め層数 層	3		質量 m_1[2] g	1810.0

測定 No.		1	2	3	4
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		2142.2	2151.2	2163.2	2171.8
湿潤密度 ρ_t g/cm³		1.692	1.738	1.799	1.843
平均含水比 w %		11.4	13.1	15.4	17.4
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.519	1.537	1.559	1.570
含水比	容器 No.				
	m_a g	416.24	445.85	444.29	468.27
	m_b g	398.75	426.09	420.10	440.57
	m_c g	244.75	275.22	262.56	281.28
	w %	11.4	13.1	15.4	17.4
	容器 No.				
	m_a g				
	m_b g				
	m_c g				
	w %				

測定 No.		5	6	7	8
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		2176.4	2179.6	2182.0	2183.3
湿潤密度 ρ_t g/cm³		1.866	1.882	1.895	1.901
平均含水比 w %		19.4	21.3	23.5	25.8
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.563	1.552	1.534	1.511
含水比	容器 No.				
	m_a g	434.06	488.09	508.64	504.90
	m_b g	403.52	446.46	461.63	456.68
	m_c g	245.99	251.31	261.86	269.65
	w %	19.4	21.3	23.5	25.8
	容器 No.				
	m_a g				
	m_b g				
	m_c g				
	w %				

特記事項

1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
2) モールドの質量は底板を含む。

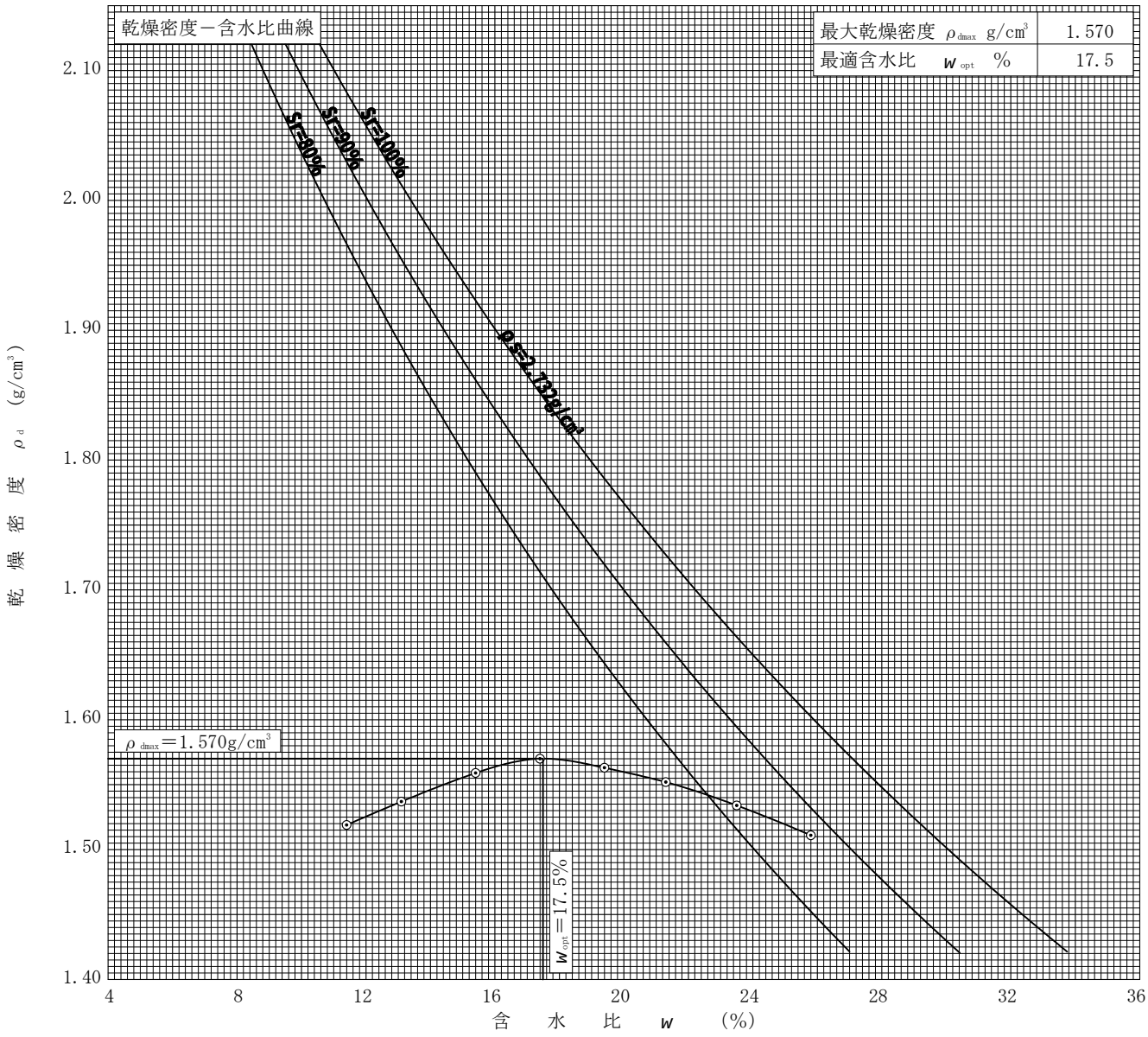
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）	

調査件名　　試験年月日　2021年 8月 13日

試料番号　（深さ）砂：ベントナイト＝9.1（0.1EC）　　試　験　者

試験方法		Ｅ－ｂ		土質名称					
試料の準備方法		乾燥法，~~湿潤法~~		ランマー質量 kg		4.5	土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.732
試料の使用方法		~~繰返し法~~，非繰返し法		落下高さ cm		45	試料調製前の最大粒径 mm		
含水比	試料分取後 w_0 %			突固め回数 回/層		92	モールド	内径 cm	5
	乾燥処理後 w_1 %			突固め層数 層		3		高さ[1] cm	10
測定 No.		1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 w %		11.4	13.1	15.4	17.4	19.4	21.3	23.5	25.8
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.519	1.537	1.559	1.570	1.563	1.552	1.534	1.511



特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w/\rho_s + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（測定）	

調査件名　　試験年月日　2021年 8月 13日

試料番号　（深さ）砂：ベントナイト＝9.1（4.5EC）　　試　験　者

試験方法	E－b	土質名称				
試料の準備方法	乾燥法，~~湿潤法~~	ランマー質量 kg	4.5	モールド	内径 cm	5
試料の使用方法	~~繰返し法~~，非繰返し法	落下高さ cm	45		高さ[1] cm	10
含水比 試料分取後 w_0 %		突固め回数 回/層	92		容量 V cm³	196.35
含水比 乾燥処理後 w_1 %		突固め層数 層	3		質量 m_1[2] g	1810.0

測定 No.		1	2	3	4
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		2196.4	2206.4	2220.2	2226.0
湿潤密度 ρ_t g/cm³		1.968	2.019	2.089	2.119
平均含水比 w %		7.5	9.2	11.6	13.4
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.831	1.849	1.872	1.869
含水比	容器 No.				
	m_a g	467.18	434.35	458.68	465.95
	m_b g	453.64	419.50	437.67	444.47
	m_c g	271.99	258.58	256.54	284.03
	w %	7.5	9.2	11.6	13.4
含水比	容器 No.				
	m_a g				
	m_b g				
	m_c g				
	w %				

測定 No.		5	6	7	8
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		2229.1			
湿潤密度 ρ_t g/cm³		2.134			
平均含水比 w %		15.4			
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.849			
含水比	容器 No.				
	m_a g	450.79			
	m_b g	424.04			
	m_c g	250.11			
	w %	15.4			
含水比	容器 No.				
	m_a g				
	m_b g				
	m_c g				
	w %				

特記事項

1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
2) モールドの質量は底板を含む。

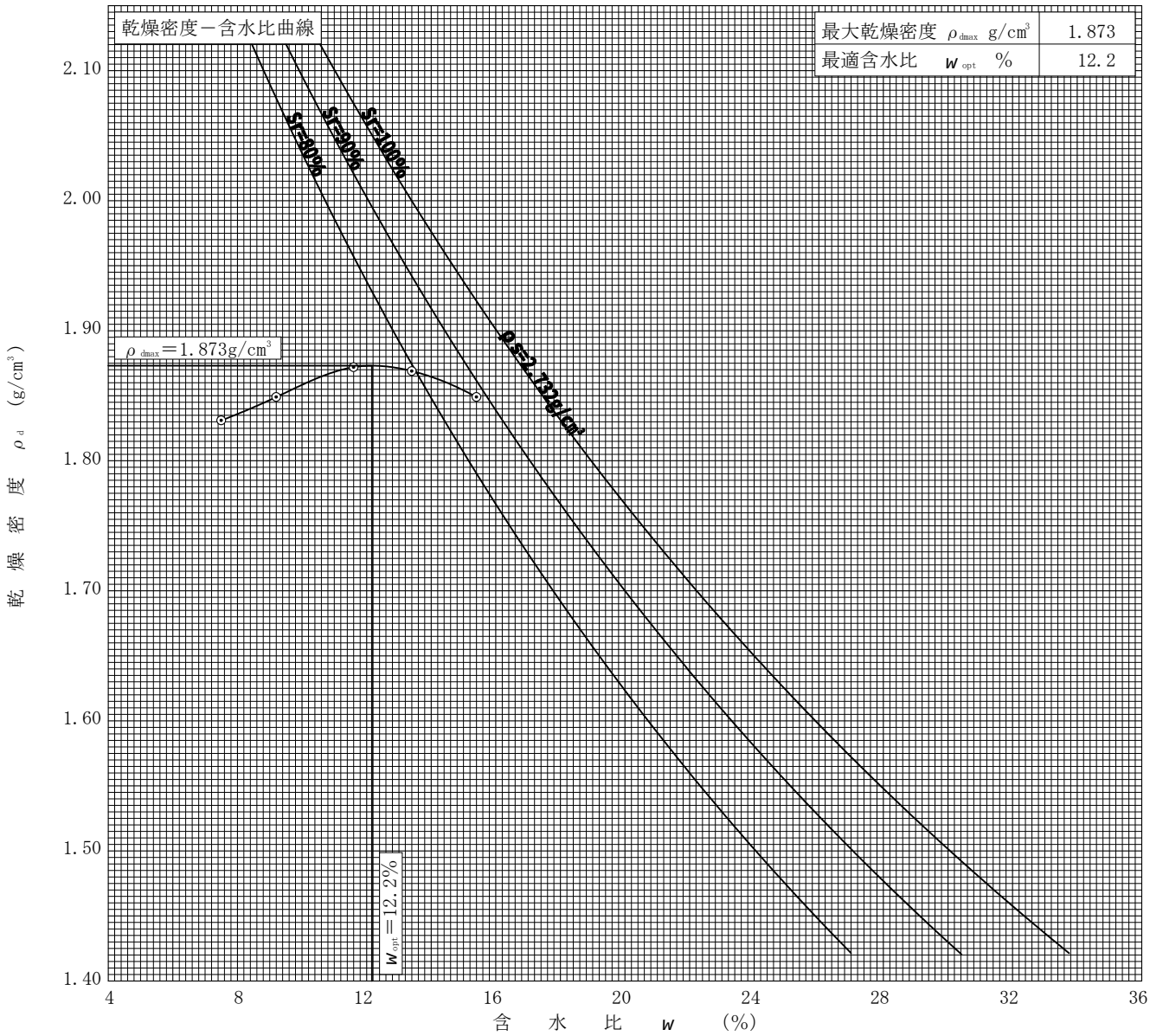
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）	

調査件名　　試験年月日　2021年 8月 13日

試料番号　（深さ）砂：ベントナイト＝9.1（4.5EC）　　試　験　者

試験方法		Ｅ－ｂ		土質名称					
試料の準備方法		乾燥法，~~湿潤法~~		ランマー質量 kg		4.5	土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.732
試料の使用方法		~~繰返し法~~，非繰返し法		落下高さ cm		45	試料調製前の最大粒径 mm		
含水比	試料分取後 w_0 %			突固め回数 回/層		92	モールド	内径 cm	5
	乾燥処理後 w_1 %			突固め層数 層		3		高さ[1] cm	10
測定 No.		1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 w %		7.5	9.2	11.6	13.4	15.4			
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.831	1.849	1.872	1.869	1.849			



特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w/\rho_s + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（測定）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 8日

試料番号　（深さ）購入砂（0.2EC）　　試　験　者

試験方法		0.2EC	土質名称				
試料の準備方法		~~乾燥法~~, 湿潤法	ランマー質量 kg	2.5	モールド	内径 cm	10.00
試料の使用方法		~~繰返し法~~, 非繰返し法	落下高さ cm	30		高さ[1] cm	12.73
含水比	試料分取後 w_0 %		突固め回数 回/層	5		容量 V cm³	1000
	乾燥処理後 w_1 %		突固め層数 層	3		質量 m_1[2] g	4126.8

測定 No.		1	2	3	4
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		5870.1	5906.6	5949.4	5991.0
湿潤密度 ρ_t g/cm³		1.743	1.780	1.823	1.864
平均含水比 w %		6.7	8.6	10.7	12.7
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.634	1.639	1.647	1.654
含水比	容器 No.	2	1	11	70
	m_a g	812.70	848.95	831.54	850.06
	m_b g	773.30	798.08	769.35	776.07
	m_c g	192.31	195.50	194.75	188.73
	w %	6.8	8.4	10.8	12.6
	容器 No.	32	101	21	143
	m_a g	811.83	859.86	849.45	821.55
	m_b g	773.65	806.02	787.57	750.53
	m_c g	197.58	189.87	198.23	194.99
	w %	6.6	8.7	10.5	12.8

測定 No.		5	6	7	8
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		6030.4	6064.1	6073.6	
湿潤密度 ρ_t g/cm³		1.904	1.937	1.947	
平均含水比 w %		14.6	16.5	18.2	
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.661	1.663	1.647	
含水比	容器 No.	131	145	38	
	m_a g	823.32	854.50	906.87	
	m_b g	743.62	760.08	797.50	
	m_c g	199.90	187.89	192.28	
	w %	14.7	16.5	18.1	
	容器 No.	79	44	8	
	m_a g	838.55	864.84	874.75	
	m_b g	757.35	769.05	769.30	
	m_c g	195.42	187.80	189.51	
	w %	14.5	16.5	18.2	

特記事項

1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
2) モールドの質量は底板を含む。

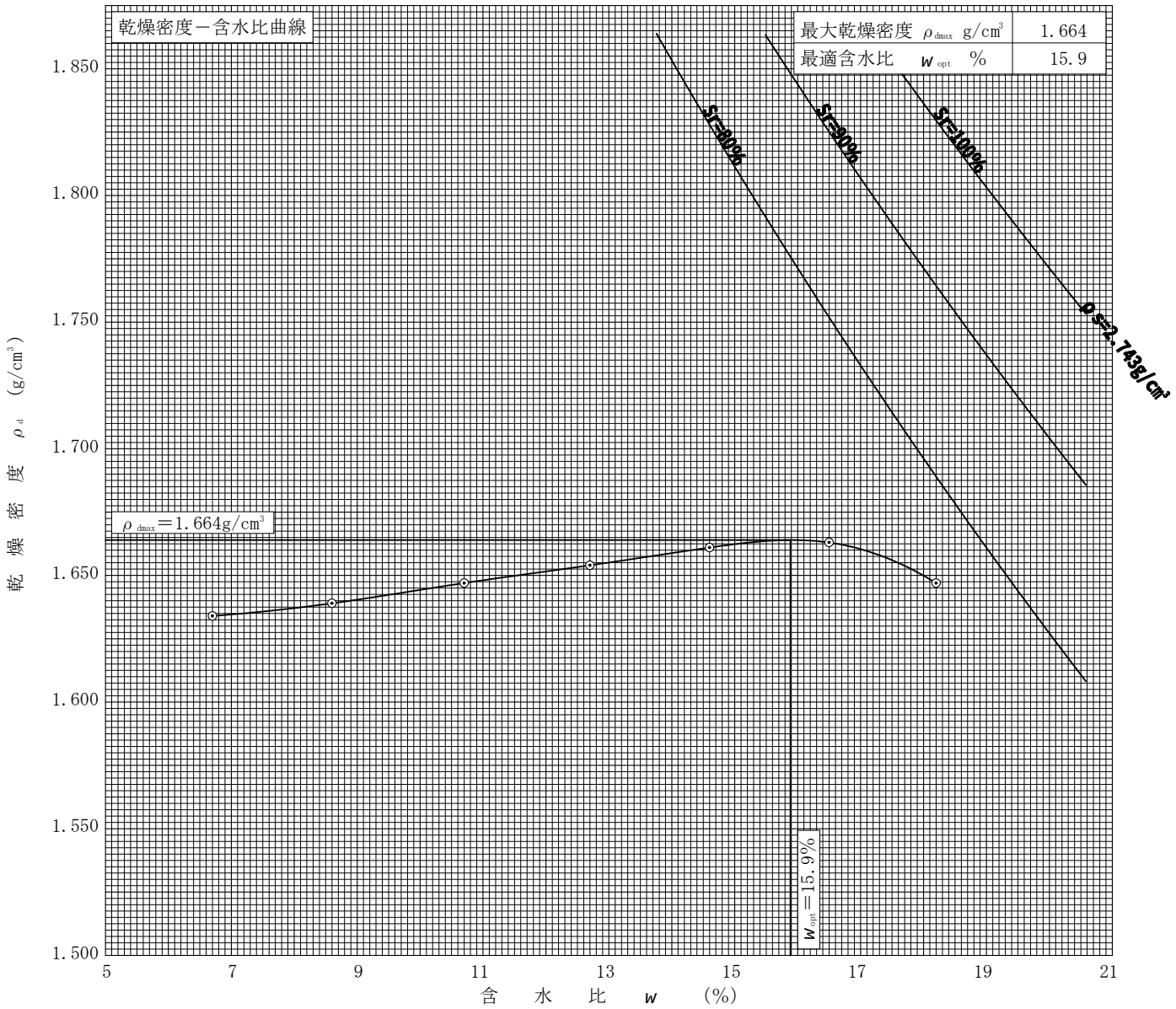
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 8日

試料番号　（深さ）購入砂（0.2EC）　　試　験　者

試験方法		0.2EC		土質名称					
試料の準備方法		~~乾燥法~~，湿潤法		ランマー質量 kg		2.5	土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.743
試料の使用方法		~~繰返し法~~,非繰返し法		落下高さ cm		30	試料調製前の最大粒径 mm		
含水比	試料分取後 w_0 %			突固め回数 回/層		5	モールド	内径 cm	10.00
	乾燥処理後 w_1 %			突固め層数 層		3		高さ[1] cm	12.73
測定 No.		1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 w %		6.7	8.6	10.7	12.7	14.6	16.5	18.2	
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.634	1.639	1.647	1.654	1.661	1.663	1.647	



特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w/\rho_s + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（測定）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 8日

試料番号　（深さ）購入砂（4.5EC）　　試　験　者

試験方法		4.5EC	土質名称				
試料の準備方法		~~乾燥法~~, 湿潤法	ランマー質量 kg	4.5	モールド	内径 cm	10.00
試料の使用方法		~~繰返し法~~, 非繰返し法	落下高さ cm	45		高さ[1] cm	12.73
含水比	試料分取後 w_0 %		突固め回数 回/層	25		容量 V cm³	1000
	乾燥処理後 w_1 %		突固め層数 層	3		質量 m_1[2] g	4130.8

測定 No.		1	2	3	4
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		6008.4	6048.1	6087.1	6134.4
湿潤密度 ρ_t g/cm³		1.878	1.917	1.956	2.004
平均含水比 w %		5.7	7.7	9.7	11.9
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.777	1.780	1.783	1.791
含水比	容器 No.	151	50	117	126
	m_a g	813.84	820.32	816.06	872.93
	m_b g	780.40	775.85	760.92	801.55
	m_c g	200.00	199.97	198.90	189.90
	w %	5.8	7.7	9.8	11.7
	容器 No.	98	28	109	33
	m_a g	830.05	810.64	812.08	903.07
	m_b g	796.24	766.78	757.61	826.28
	m_c g	196.91	199.30	192.13	188.31
	w %	5.6	7.7	9.6	12.0

測定 No.		5	6	7	8
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		6171.0	6201.8		
湿潤密度 ρ_t g/cm³		2.040	2.071		
平均含水比 w %		13.3	15.2		
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.801	1.798		
含水比	容器 No.	86	62		
	m_a g	844.85	852.05		
	m_b g	767.29	764.88		
	m_c g	195.78	198.65		
	w %	13.6	15.4		
	容器 No.	137	104		
	m_a g	834.08	858.71		
	m_b g	760.14	772.57		
	m_c g	187.95	193.69		
	w %	12.9	14.9		

特記事項

1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
2) モールドの質量は底板を含む。

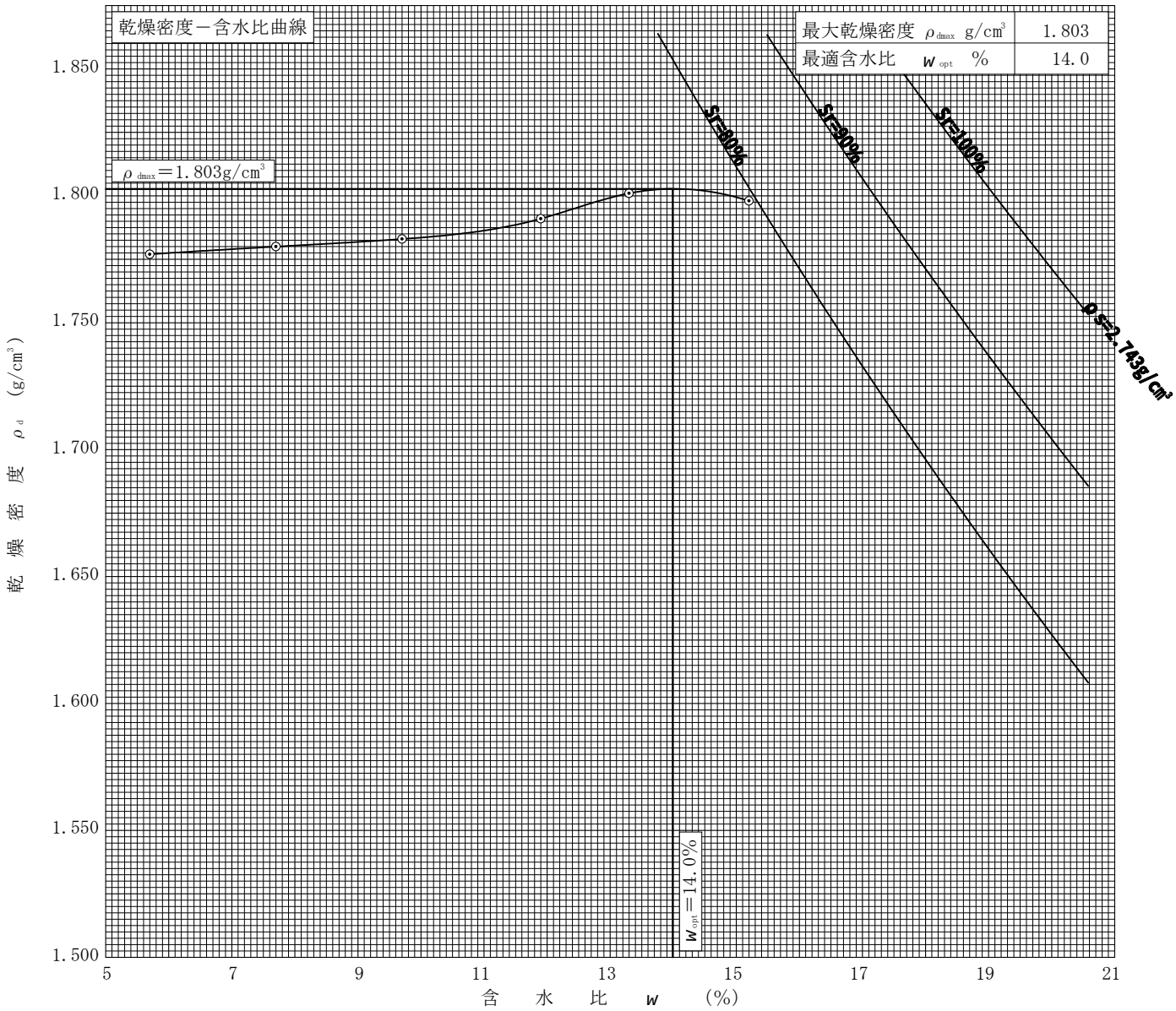
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 8日

試料番号　（深さ）購入砂（4.5EC）　　試　験　者

試験方法		4.5EC		土質名称					
試料の準備方法		~~乾燥法~~，湿潤法		ランマー質量 kg		4.5	土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.743
試料の使用方法		~~繰返し法~~，非繰返し法		落下高さ cm		45	試料調製前の最大粒径 mm		
含水比	試料分取後 w_0 %			突固め回数 回/層		25	モールド	内径 cm	10.00
	乾燥処理後 w_1 %			突固め層数 層		3		高さ[1] cm	12.73
測定 No.		1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 w %		5.7	7.7	9.7	11.9	13.3	15.2		
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.777	1.780	1.783	1.791	1.801	1.798		



特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w/\rho_s + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（測定）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 22日

試料番号　（深さ）砂：+珪砂微粉＝9.1（0.2EC）　　試　験　者

試験方法		0.2EC	土質名称				
試料の準備方法		~~乾燥法~~, 湿潤法	ランマー質量 kg	4.5	モールド	内径 cm	10.00
試料の使用方法		~~繰返し法~~, 非繰返し法	落下高さ cm	45		高さ[1] cm	12.73
含水比	試料分取後 w_0 %		突固め回数 回/層	25		容量 V cm³	1000
	乾燥処理後 w_1 %		突固め層数 層	3		質量 m_1[2] g	4623.3

測定 No.		1	2	3	4
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		6472.1	6526.7	6579.3	6634.8
湿潤密度 ρ_t g/cm³		1.849	1.903	1.956	2.012
平均含水比 w %		7.4	9.2	11.0	13.1
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.722	1.743	1.762	1.779
含水比	容器 No.	79	57	17	42
	m_a g	854.78	870.48	898.18	928.71
	m_b g	809.53	813.04	828.21	845.02
	m_c g	195.42	199.47	197.27	191.69
	w %	7.4	9.4	11.1	12.8
	容器 No.	5	80	49	51
	m_a g	842.08	849.47	880.84	940.74
	m_b g	797.99	795.49	814.08	853.42
	m_c g	199.13	190.36	194.13	199.38
	w %	7.4	8.9	10.8	13.4

測定 No.		5	6	7	8
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		6671.2	6704.6	826.5	
湿潤密度 ρ_t g/cm³		2.048	2.081	-3.797	
平均含水比 w %		15.4	17.6		
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.775	1.770		
含水比	容器 No.	68	169		
	m_a g	894.27	913.82		
	m_b g	802.88	806.26		
	m_c g	193.07	193.47		
	w %	15.0	17.6		
	容器 No.	162	22		
	m_a g	938.12	936.77		
	m_b g	836.44	826.48		
	m_c g	188.44	198.60		
	w %	15.7	17.6		

特記事項

1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
2) モールドの質量は底板を含む。

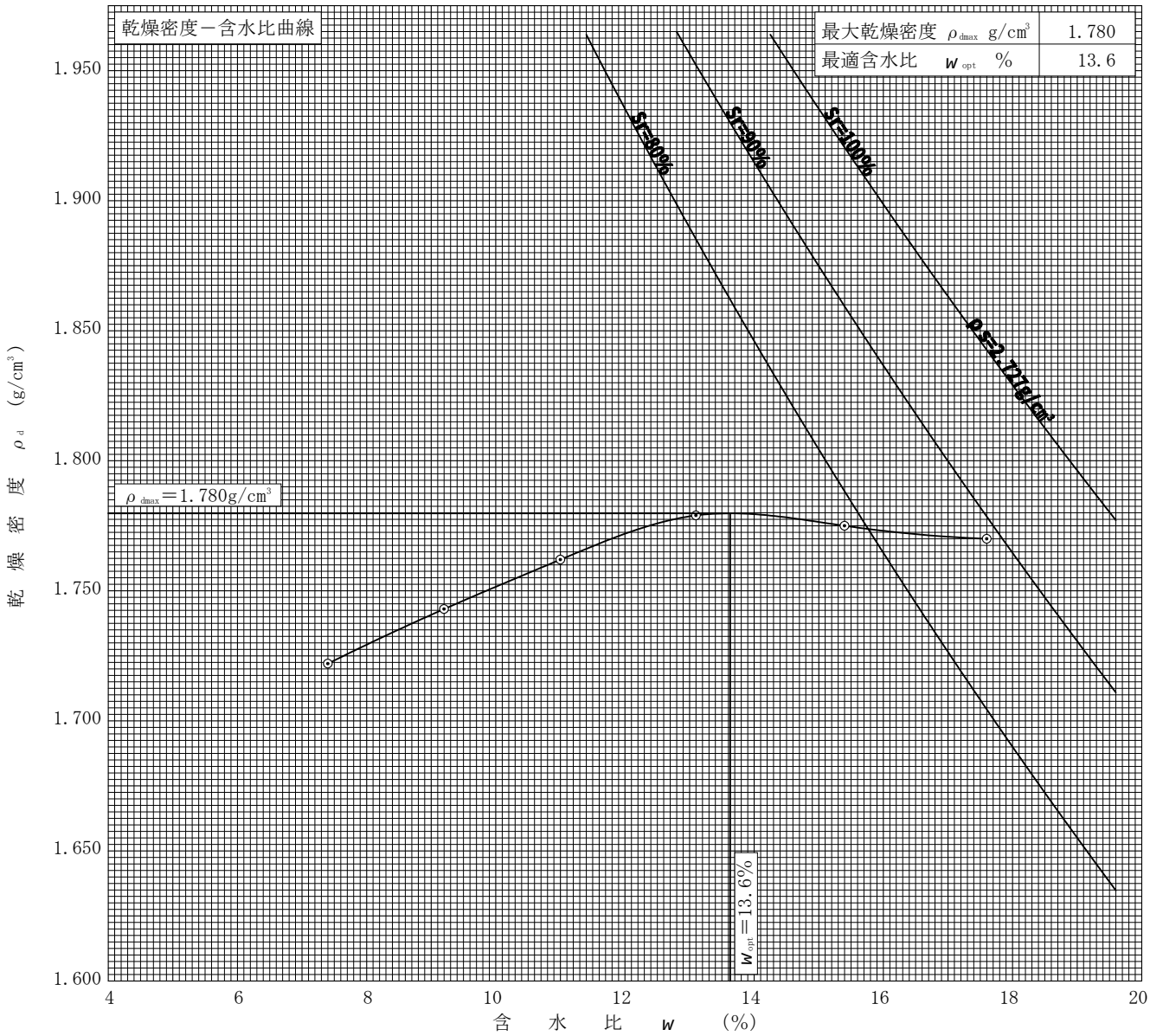
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 22日

試料番号　（深さ）砂：+珪砂微粉＝9.1（0.2EC）　　試　験　者

試験方法		0.2EC		土質名称					
試料の準備方法		~~乾燥法~~，湿潤法		ランマー質量 kg		4.5	土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.727
試料の使用方法		~~繰返し法~~,非繰返し法		落下高さ cm		45	試料調製前の最大粒径 mm		
含水比	試料分取後 w_0 %			突固め回数 回/層		25	モールド	内径 cm	10.00
	乾燥処理後 w_1 %			突固め層数 層		3		高さ[1] cm	12.73
測定 No.		1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 w %		7.4	9.2	11.0	13.1	15.4	17.6		
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.722	1.743	1.762	1.779	1.775	1.770		



特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w/\rho_s + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（測定）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 22日

試料番号　（深さ）砂：+珪砂微粉＝9.1（4.5EC）　　試　験　者

試験方法		4.5EC	土質名称				
試料の準備方法		~~乾燥法~~, 湿潤法	ランマー質量 kg	4.5	モールド	内径 cm	10.00
試料の使用方法		~~繰返し法~~, 非繰返し法	落下高さ cm	45		高さ[1] cm	12.73
含水比	試料分取後 w_0 %		突固め回数 回/層	25		容量 V cm³	1000
	乾燥処理後 w_1 %		突固め層数 層	3		質量 m_1[2] g	4575.6

測定 No.		1	2	3	4
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		6546.5	6604.4	6661.2	6720.9
湿潤密度 ρ_t g/cm³		1.971	2.029	2.086	2.145
平均含水比 w %		6.1	8.1	9.7	11.3
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.858	1.877	1.902	1.927
含水比	容器 No.	96	27	105	163
	m_a g	865.60	848.09	891.37	942.07
	m_b g	827.73	799.92	830.30	865.36
	m_c g	192.36	192.64	190.88	195.17
	w %	6.0	7.9	9.6	11.4
	容器 No.	51	172	9	114
	m_a g	909.93	870.60	932.37	967.75
	m_b g	869.11	820.00	867.51	890.76
	m_c g	199.38	199.48	199.97	195.05
	w %	6.1	8.2	9.7	11.1

測定 No.		5	6	7	8
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		6728.0	6742.3		
湿潤密度 ρ_t g/cm³		2.152	2.167		
平均含水比 w %		13.1	14.8		
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.903	1.888		
含水比	容器 No.	164	177		
	m_a g	889.11	943.24		
	m_b g	810.40	845.56		
	m_c g	191.59	192.22		
	w %	12.7	15.0		
	容器 No.	165	99		
	m_a g	916.13	976.39		
	m_b g	830.29	876.81		
	m_c g	188.35	192.97		
	w %	13.4	14.6		

特記事項

1) 内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
2) モールドの質量は底板を含む。

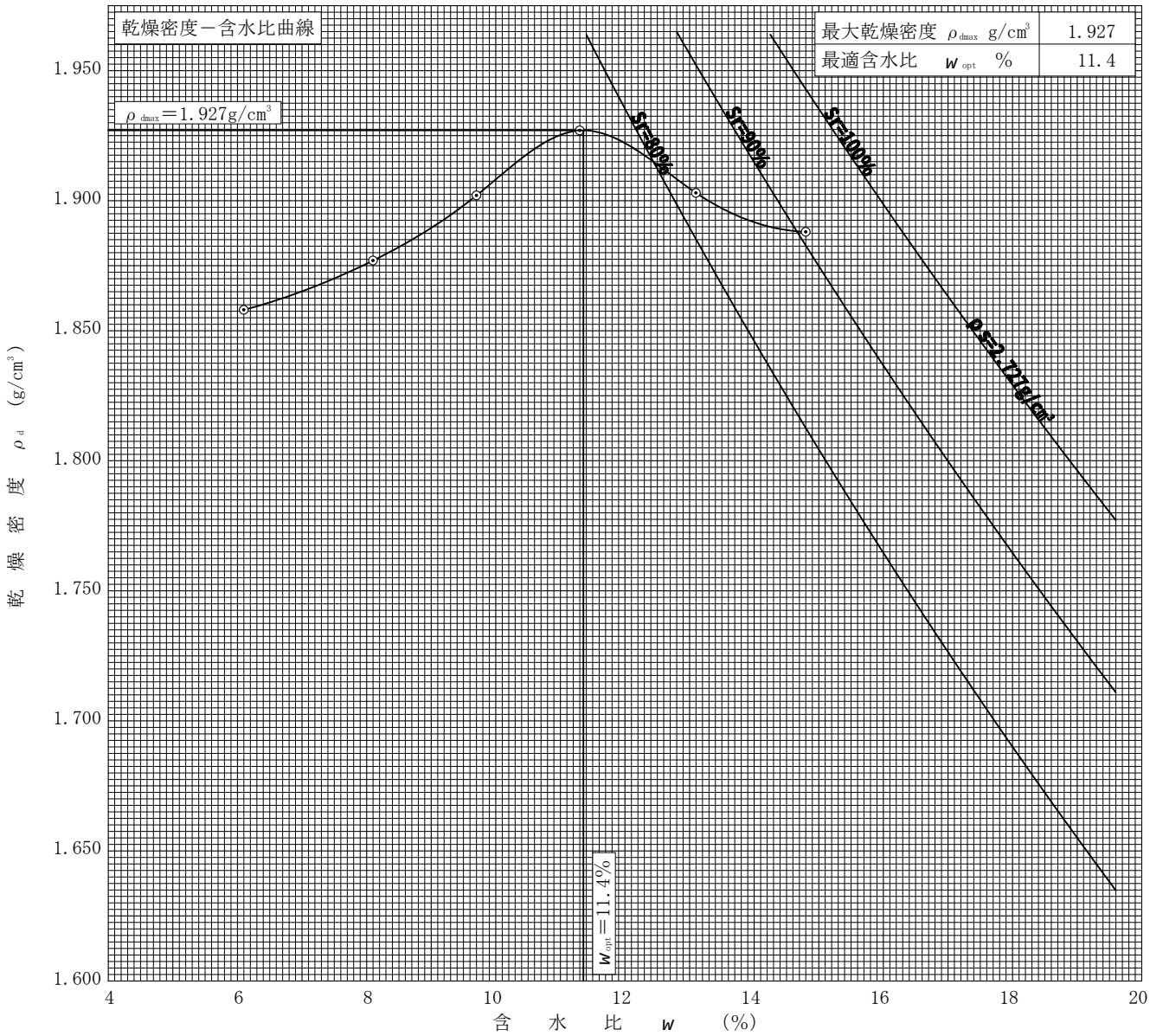
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 22日

試料番号　（深さ）砂：+珪砂微粉＝9.1（4.5EC）　　試　験　者

試験方法		4.5EC		土質名称					
試料の準備方法		~~乾燥法~~，湿潤法		ランマー質量 kg		4.5	土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.727
試料の使用方法		~~繰返し法~~,非繰返し法		落下高さ cm		45	試料調製前の最大粒径 mm		
含水比	試料分取後 w_0 %			突固め回数 回/層		25	モールド	内径 cm	10.00
	乾燥処理後 w_1 %			突固め層数 層		3		高さ[1] cm	12.73
測定 No.		1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 w %		6.1	8.1	9.7	11.3	13.1	14.8		
乾燥密度 ρ_d g/cm³		1.858	1.877	1.902	1.927	1.903	1.888		



特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w/\rho_s + w/100}$$

土質試験結果データシート(5)

土 質 試 験 結 果 一 覧 表 （基礎地盤）

調査件名　　整理年月日　2021年 10月 25日

整理担当者

	試料番号（深さ）	購入砂① (Sr=80、ρd=1.78)	購入砂② (Sr=68、ρd=1.78)	購入砂③ (Sr=40、ρd=1.78)	購入砂④ (Sr=80、ρd=1.67)	購入砂⑤ (Sr=68、ρd=1.72)	購入砂⑥ (Sr=58、ρd=1.72)
一般	湿潤密度 ρ_t g/cm³						
	乾燥密度 ρ_d g/cm³						
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³						
	自然含水比 w_n %						
	間隙比 e						
	飽和度 S_r %						
粒度	石分（75mm以上） %						
	礫分[1]（2～75mm） %						
	砂分[1]（0.075~2mm） %						
	シルト分[1]（0.005~0.075mm） %						
	粘土分[1]（0.005mm未満） %						
	最大粒径 mm						
	均等係数 U_c						
コンシステンシー特性	液性限界 w_L %						
	塑性限界 w_p %						
	塑性指数 I_p						
分類	地盤材料の分類名						
	分類記号						
圧密	試験方法						
	圧縮指数 C_c						
	圧密降伏応力 p_c kN/m²						
一軸圧縮	一軸圧縮強さ q_u kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u kN/m²						
せん断	試験条件						
	全応力 c kN/m²						
	全応力 ϕ °						
	有効応力 c' kN/m²						
	有効応力 ϕ' °						
	透水試験方法	変水位	変水位	変水位	定水位	変水位	変水位
	透水係数 k_{15} m/s	4.60E-5	5.52E-5	6.79E-5	1.33E-4	8.83E-5	1.05E-4

特記事項

1）石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

土 質 試 験 結 果 一 覧 表 （基礎地盤）

調査件名　　整理年月日　2021年 10月 25日

整理担当者

	試料番号（深さ）	購入砂⑦ (Sr=68、ρd=1.67)	購入砂⑧ (Sr=40、ρd=1.67)				
一般	湿潤密度 ρ_t g/cm³						
	乾燥密度 ρ_d g/cm³						
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³						
	自然含水比 w_n %						
	間隙比 e						
	飽和度 S_r %						
粒度	石分（75mm以上） %						
	礫分[1]（2～75mm） %						
	砂分[1]（0.075~2mm） %						
	シルト分[1]（0.005~0.075mm） %						
	粘土分[1]（0.005mm未満） %						
	最大粒径 mm						
	均等係数 U_c						
コンシステンシー特性	液性限界 w_L %						
	塑性限界 w_p %						
	塑性指数 I_p						
分類	地盤材料の分類名						
	分類記号						
圧密	試験方法						
	圧縮指数 C_c						
	圧密降伏応力 p_c kN/m²						
一軸圧縮	一軸圧縮強さ q_u kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u kN/m²						
	一軸圧縮強さ q_u kN/m²						
せん断	試験条件						
	全応力 c kN/m²						
	全応力 ϕ °						
	有効応力 c' kN/m²						
	有効応力 ϕ' °						
	透水試験方法	定水位	定水位				
	透水係数 k_{15} m/s	1.84E-4	2.69E-4				

特記事項

1）石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

JIS A 1218	土の透水試験（~~定水位~~，変水位）	

調査件名 ---------- 試験年月日 2021年 9月 29日

試料番号 （深さ） 購入砂①（Sr=80、 ρ d=1.78） 試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	4056.2
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法：設定密度に締固め，通水飽和

					試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体 No.		供試体の状態			
	直径 D cm	10.00		（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	6117.4	
	断面積 A cm²	78.54		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	2061.2	
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	2.061	
	体積 V cm³	1000		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.780	
				間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.541	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	80.1	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器 No.	23	42	91			
	m_a g	298.88	306.45	298.42			
	m_b g	284.09	290.84	284.29			
	m_c g	189.61	191.69	196.60			
	w, w_f %	15.7	15.7	16.1			
	平均値 %	15.8					

測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30
測定時間 t_2-t_1 s		30	30	30	30	30
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	165.0	165.0	165.0	165.0	165.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	119.7	119.5	119.5	119.4	119.1
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	5.45E-5	5.48E-5	5.48E-5	5.49E-5	5.53E-5
測定時の水温 T ℃		22	22	22	22	22
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		4.57E-5	4.60E-5	4.60E-5	4.61E-5	4.64E-5
代表値 k_{15} m/s		4.60E-5				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると4.60E-3(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\dfrac{L}{h}\cdot\dfrac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\dfrac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\dfrac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\dfrac{h_1}{h_2}\times\dfrac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218

土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 29日

試料番号（深さ）　購入砂②（Sr=68、ρ_d=1.78）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2014.0
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法：設定密度に締固め，通水飽和

					試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体 No.		供試体の状態			
	直径 D cm	10.00		（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	4033.0	
	断面積 A cm²	78.54		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	2019.0	
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	2.019	
	体積 V cm³	1000		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.782	
				間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.539	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	67.7	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器 No.	22	38	158			
	m_a g	304.74	303.83	292.38			
	m_b g	292.43	290.55	280.94			
	m_c g	198.60	192.28	194.19			
	w, w_f %	13.1	13.5	13.2			
	平均値 %	13.3					

測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30
測定時間 t_2-t_1 s		30	30	30	30	30
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	165.0	165.0	165.0	165.0	165.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	111.6	112.1	111.6	112.2	112.5
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	6.64E-5	6.56E-5	6.64E-5	6.55E-5	6.50E-5
測定時の水温 T ℃		22	22	22	22	22
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		5.57E-5	5.50E-5	5.57E-5	5.50E-5	5.45E-5
代表値 k_{15} m/s		5.52E-5				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると5.52E-3(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218

土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名 ---------- 試験年月日 2021年 9月 29日

試料番号 （深さ） 購入砂③（Sr=40、 ρ d=1.78） 試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2014.0
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法：設定密度に締固め，通水飽和

				試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体 No.		供試体の状態		
	直径 D cm	10.00			
	断面積 A cm²	78.54	（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	3934.1	
	長さ L cm	12.73	供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	1920.1	
	体積 V cm³	1000	湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	1.920	
			乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.778	
			間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.543	
			飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	40.4	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器 No.	105	95	134			
	m_a g	298.83	312.33	307.53			
	m_b g	290.92	303.16	299.42			
	m_c g	190.88	190.78	196.44			
	w, w_f %	7.9	8.2	7.9			
	平均値 %	8.0					

測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30
測定時間 t_2-t_1 s		30	30	30	30	30
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	165.0	165.0	165.0	165.0	165.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	102.1	102.4	102.3	102.6	102.7
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	8.15E-5	8.10E-5	8.12E-5	8.07E-5	8.05E-5
測定時の水温 T ℃		22	22	22	22	22
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		6.84E-5	6.80E-5	6.81E-5	6.77E-5	6.75E-5
代表値 k_{15} m/s		6.79E-5				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると6.79E-3(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\dfrac{L}{h}\cdot\dfrac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\dfrac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\dfrac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\dfrac{h_1}{h_2}\times\dfrac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218　土の透水試験（定水位，~~変水位~~）

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 29日

試料番号（深さ）　購入砂④（Sr=80、ρ_d=1.67）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm			質量 m_2[2] g	3568.5
	断面積 a cm²			試験用水	水道水

供試体作製，飽和方法：設定密度に締固め，通水飽和

					試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体 No.		供試体の状態			
	直径 D cm	10.00		（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	5551.8	
	断面積 A cm²	78.54		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	1983.3	
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	1.983	
	体積 V cm³	1000		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.668	
				間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.644	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	80.5	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器 No.	36	11	60			
	m_a g	307.20	296.36	287.93			
	m_b g	288.75	280.06	273.64			
	m_c g	190.21	194.75	198.44			
	w, w_f %	18.7	19.1	19.0			
	平均値 %	18.9					

測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:03:56	00:03:57	00:03:58	00:04:02	00:03:56
測定時間 t_2-t_1 s		236	237	238	242	236
定水位	水位差 h cm	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
	透水量 Q cm³	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s	1.60E-4	1.59E-4	1.58E-4	1.56E-4	1.60E-4
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm					
	時刻t_2における水位差 h_2 cm					
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s					
測定時の水温 T ℃		22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		1.34E-4	1.33E-4	1.33E-4	1.31E-4	1.34E-4
代表値 k_{15} m/s		1.33E-4				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると1.33E-2(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218	土の透水試験（~~定水位~~，変水位）	

調査件名 ---------- 試験年月日 2021年 9月 29日

試料番号 （深さ） 購入砂⑤（Sr=68、 ρ d=1.72） 試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2030.2
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法	設定密度に締固め 通水飽和

					試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体 No.		供試体の状態			
	直径 D cm	10.00		（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	4004.3	
	断面積 A cm²	78.54		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	1974.1	
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	1.974	
	体積 V cm³	1000		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.723	
				間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.592	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	67.6	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器 No.	61	62	77			
	m_a g	299.89	309.51	294.01			
	m_b g	285.49	295.45	280.80			
	m_c g	188.92	198.65	188.68			
	w, w_f %	14.9	14.5	14.3			
	平均値 %	14.6					

測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30
測定時間 t_2-t_1 s		30	30	30	30	30
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	165.0	165.0	165.0	165.0	165.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	87.6	88.3	88.9	89.7	89.4
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	1.08E-4	1.06E-4	1.05E-4	1.03E-4	1.04E-4
測定時の水温 T ℃		22	22	22	22	22
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		9.06E-5	8.89E-5	8.81E-5	8.64E-5	8.73E-5
代表値 k_{15} m/s		8.83E-5				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると8.83E-3(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218	土の透水試験（~~定水位~~，変水位）	

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 29日

試料番号（深さ）　購入砂⑥（Sr=58、ρ d=1.72）　　試験者

試料			透水円筒		
	土質名称			容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2049.0
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法	設定密度に締固め 通水飽和

供試体寸法			供試体の状態		試験前	試験後[3]
	供試体 No.					
供	直径 D cm	10.00	供	（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	3989.0	
試	断面積 A cm²	78.54	試	供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	1940.0	
体	長さ L cm	12.73	体	湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	1.940	
寸	体積 V cm³	1000	の	乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.721	
法			状	間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.594	
			態	飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	58.6	

含水比		試験前			試験後[3]		
	容器 No.	17	109	171			
	m_a g	298.92	300.05	296.30			
	m_b g	287.50	287.56	284.96			
	m_c g	197.27	192.13	193.05			
	w，w_f %	12.7	13.1	12.3			
	平均値 %	12.7					

測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻	t_1	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻	t_2	00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30	00:00:30
測定時間	t_2-t_1 s	30	30	30	30	30
定水位 水位差	h cm					
定水位 透水量	Q cm³					
定水位 T℃に対する透水係数	k_T[4] m/s					
変水位 時刻t_1における水位差	h_1 cm	165.0	165.0	165.0	165.0	165.0
変水位 時刻t_2における水位差	h_2 cm	78.3	78.8	78.8	79.5	80.2
変水位 T℃に対する透水係数	k_T[5] m/s	1.27E-4	1.25E-4	1.25E-4	1.24E-4	1.22E-4
測定時の水温	T ℃	22	22	22	22	22
温度補正係数	η_T/η_{15}	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数	k_{15} m/s	1.07E-4	1.05E-4	1.05E-4	1.04E-4	1.02E-4
代表値	k_{15} m/s	1.05E-4				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると1.05E-2(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\dfrac{L}{h}\cdot\dfrac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\dfrac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\dfrac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\dfrac{h_1}{h_2}\times\dfrac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218

土の透水試験（定水位，~~変水位~~）

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 29日

試料番号（深さ）　購入砂⑦（Sr=68、ρ_d=1.67）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm			質量 m_2[2] g	3565.5
	断面積 a cm²			試験用水	水道水

供試体作製，飽和方法　設定密度に締固め，通水飽和

					試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体 No.		供試体の状態			
	直径 D cm	10.00		（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	5501.0	
	断面積 A cm²	78.54		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	1935.5	
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	1.936	
	体積 V cm³	1000		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.672	
				間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.641	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	67.6	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器 No.	37	33	27			
	m_a g	305.82	308.30	300.72			
	m_b g	290.26	292.09	285.86			
	m_c g	193.25	188.31	192.64			
	w, w_f %	16.0	15.6	15.9			
	平均値 %	15.8					

測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:02:44	00:02:44	00:02:44	00:02:44	00:02:46
測定時間 t_2-t_1 s		164	164	164	164	166
定水位	水位差 h cm	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
	透水量 Q cm³	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s	2.30E-4	2.30E-4	2.30E-4	2.30E-4	2.27E-4
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm					
	時刻t_2における水位差 h_2 cm					
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s					
測定時の水温 T ℃		24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		1.84E-4	1.84E-4	1.84E-4	1.84E-4	1.82E-4
代表値 k_{15} m/s		1.84E-4				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると1.84E-2(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218

土の透水試験（定水位，~~変水位~~）

調査件名　　試験年月日　2021年 9月 29日

試料番号（深さ）　購入砂⑧（Sr=40、ρ_d=1.67）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.743		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm			質量 m_2[2] g	3568.2
	断面積 a cm²			試験用水	水道水

供試体作製，飽和方法：設定密度に締固め，通水飽和

					試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体 No.		供試体の状態			
	直径 D cm	10.00		（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	5394.4	
	断面積 A cm²	78.54		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	1826.2	
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	1.826	
	体積 V cm³	1000		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.666	
				間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.646	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	40.8	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器 No.	36	11	60			
	m_a g	303.71	298.56	299.06			
	m_b g	293.52	289.61	290.31			
	m_c g	190.21	194.75	198.44			
	w, w_f %	9.9	9.4	9.5			
	平均値 %	9.6					

測定 No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:01:49	00:02:02	00:02:04	00:02:05	00:02:04
測定時間 t_2-t_1 s		109	122	124	125	124
定水位	水位差 h cm	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
	透水量 Q cm³	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s	3.46E-4	3.09E-4	3.04E-4	3.02E-4	3.04E-4
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm					
	時刻t_2における水位差 h_2 cm					
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s					
測定時の水温 T ℃		21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.859	0.859	0.859	0.859	0.859
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		2.97E-4	2.65E-4	2.61E-4	2.59E-4	2.61E-4
代表値 k_{15} m/s		2.69E-4				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると2.69E-2(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

土質試験結果データシート(6)

土 質 試 験 結 果 一 覧 表 （ 材 料 ）

調査件名　　整理年月日　2021年 9月 7日

整理担当者

	試料番号（深さ）	購入砂+珪砂微粉10%① (測定No.1)	購入砂+珪砂微粉10%① (測定No.2)	購入砂+珪砂微粉10%① (測定No.3)	購入砂+珪砂微粉10%① (測定No.4)	購入砂+珪砂微粉10%① (測定No.5)	購入砂+珪砂微粉10%① (測定No.6)
一般	湿潤密度 ρ_t g/cm³						
	乾燥密度 ρ_d g/cm³						
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³						
	自然含水比 w_n %						
	間隙比 e						
	飽和度 S_r %						
粒度	石分（75mm以上） %						
	礫分[1]（2～75mm） %						
	砂分[1]（0.075~2mm） %						
	シルト分[1]（0.005~0.075mm） %						
	粘土分[1]（0.005mm未満） %						
	最大粒径 mm						
	均等係数 U_c						
コンシステンシー特性	液性限界 w_L %						
	塑性限界 w_p %						
	塑性指数 I_p						
分類	地盤材料の分類名						
	分類記号						
締固め	試験方法						
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} g/cm³						
	最適含水比 w_{opt} %						
CBR	試験方法						
	膨張比 r_e %						
	貫入試験後含水比 w_2 %						
	平均CBR %						
	%修正CBR %						
コーン指数	突固め回数 回/層						
	コーン指数 q_c kN/m²						
	透水試験方法	変水位	変水位	変水位	変水位	変水位	変水位
	透水係数 k_{15} m/s	3.85E-6	2.68E-6	1.63E-6	1.19E-6	1.10E-6	1.40E-6

特記事項

1）石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

土質試験結果一覧表（材料）

調査件名　　整理年月日　2021年 9月 7日

整理担当者

	試料番号（深さ）	購入砂+珪砂微粉10%					
一般	湿潤密度 ρ_t g/cm³						
	乾燥密度 ρ_d g/cm³						
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.727					
	自然含水比 w_n %	3.0					
	間隙比 e						
	飽和度 S_r %						
粒度	石分（75mm以上） %						
	礫分[1]（2～75mm） %	7.9					
	砂分[1]（0.075~2mm） %	83.3					
	シルト分[1]（0.005~0.075mm） %	6.8					
	粘土分[1]（0.005mm未満） %	2.0					
	最大粒径 mm	4.75					
	均等係数 U_c	4.96					
コンシステンシー特性	液性限界 w_L %						
	塑性限界 w_p %						
	塑性指数 I_p						
分類	地盤材料の分類名	細粒分礫まじり砂					
	分類記号	(S-FG)					
締固め	試験方法	A－c					
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} g/cm³	1.888					
	最適含水比 w_{opt} %	12.8					
CBR	試験方法						
	膨張比 r_e %						
	貫入試験後含水比 w_2 %						
	平均CBR %						
	%修正CBR %						
コーン指数	突固め回数 回/層						
	コーン指数 q_c kN/m²						
	透水試験方法						
	透水係数 k_{15} m/s						

特記事項

1）石分を除いた75mm未満の土質材料に対する百分率で表す。

[1kN/m²≒0.0102kgf/cm²]

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（測定）	

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号　（深さ）購入砂+珪砂微粉10%　　試　験　者

試験方法	A－c	土質名称	細粒分礫まじり砂（S-FG）			
試料の準備方法	~~乾燥法~~，湿潤法	ランマー質量 kg	2.5	モールド	内径 cm	10.00
試料の使用方法	~~繰返し法~~，非繰返し法	落下高さ cm	30		高さ[1] cm	12.73
含水比 試料分取後 w_0 %		突固め回数 回/層	25		容量 V cm^3	1000
含水比 乾燥処理後 w_1 %		突固め層数 層	3		質量 m_1[2] g	

測定 No.		1	2	3	4
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		1939.8	2000.7	2074.9	2137.8
湿潤密度 ρ_t g/cm^3		1.940	2.001	2.075	2.138
平均含水比 w %		6.9	8.9	11.0	13.4
乾燥密度 ρ_d g/cm^3		1.815	1.837	1.869	1.885
含水比	容器 No.	1	100	5	92
	m_a g	692.80	667.86	702.92	711.49
	m_b g	661.09	628.69	652.09	649.16
	m_c g	195.50	191.86	199.13	193.14
	w %	6.8	9.0	11.2	13.7
含水比	容器 No.	167	160	23	128
	m_a g	689.50	654.83	671.64	694.65
	m_b g	657.34	617.21	624.87	636.50
	m_c g	190.42	188.34	189.61	192.57
	w %	6.9	8.8	10.7	13.1

測定 No.		5	6	7	8
(試料+モールド)質量 m_2[2] g		2132.1	2117.8		
湿潤密度 ρ_t g/cm^3		2.132	2.118		
平均含水比 w %		14.8	16.0		
乾燥密度 ρ_d g/cm^3		1.857	1.826		
含水比	容器 No.	174	122		
	m_a g	741.69	756.34		
	m_b g	672.33	677.24		
	m_c g	194.61	190.06		
	w %	14.5	16.2		
含水比	容器 No.	52	109		
	m_a g	721.67	751.02		
	m_b g	652.01	674.56		
	m_c g	190.33	192.13		
	w %	15.1	15.8		

特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。
2）モールドの質量は底板を含む。

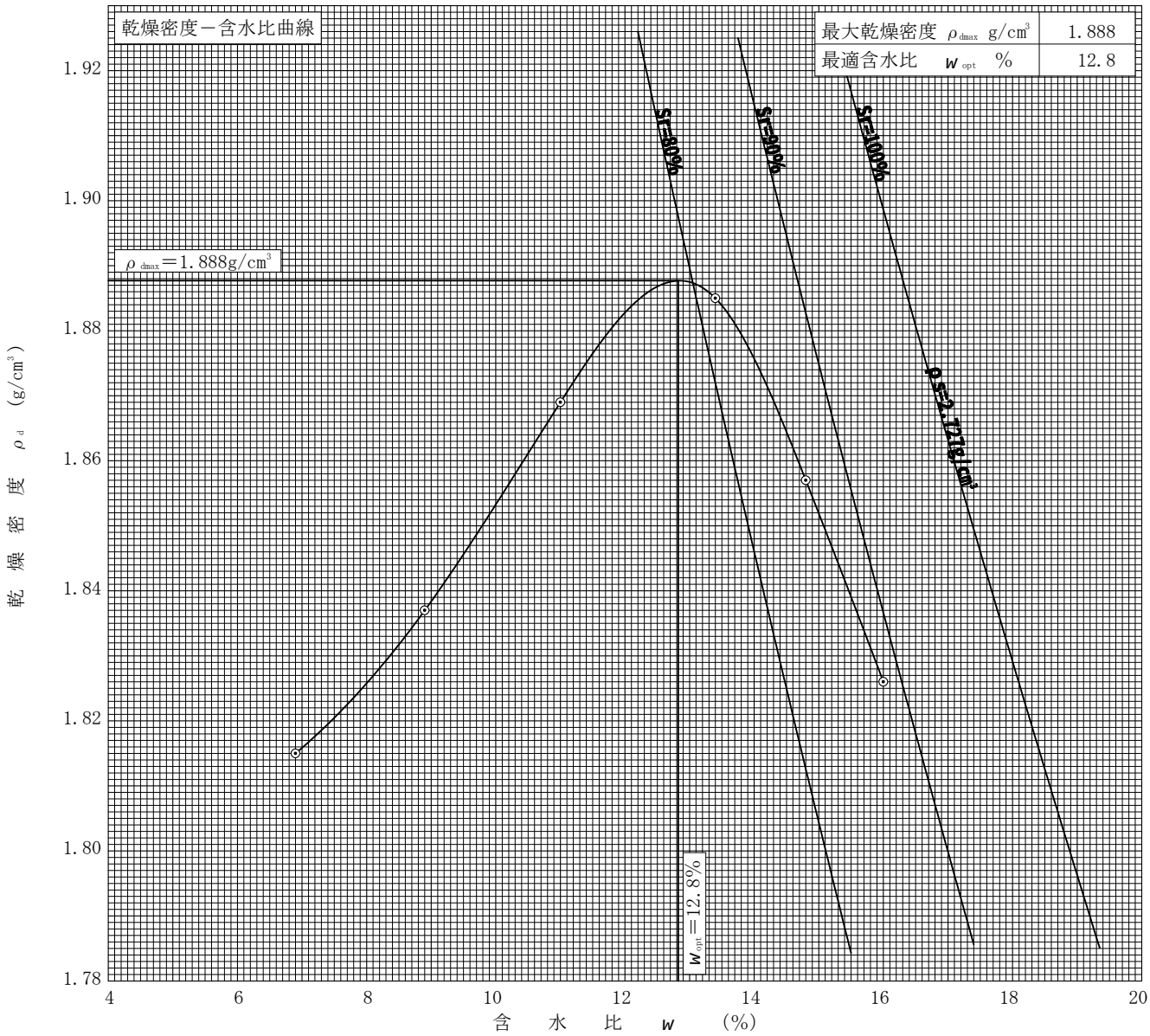
$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + w/100}$$

JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験（締固め特性）	

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号　（深さ）購入砂+珪砂微粉10%　　試　験　者

試験方法	A－c		土質名称		細粒分礫まじり砂（S-FG）			
試料の準備方法	~~乾燥法~~，湿潤法		ランマー質量 kg		2.5	土粒子の密度 ρ_s g/cm³		2.727
試料の使用方法	~~繰返し法~~，非繰返し法		落下高さ cm		30	試料調製前の最大粒径 mm		4.75
含水比 試料分取後 w_0 %			突固め回数 回/層		25	モールド	内径 cm	10.00
含水比 乾燥処理後 w_1 %			突固め層数 層		3		高さ[1] cm	12.73
測定 No.	1	2	3	4	5	6	7	8
平均含水比 w %	6.9	8.9	11.0	13.4	14.8	16.0		
乾燥密度 ρ_d g/cm³	1.815	1.837	1.869	1.885	1.857	1.826		



特記事項

1）内径15cmのモールドの場合はスペーサーディスクの高さを差引く。

ゼロ空気間隙曲線の計算式

$$\rho_{dsat} = \frac{\rho_w}{\rho_w/\rho_s + w/100}$$

JIS A 1218

土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号（深さ）　購入砂+珪砂微粉10%①（測定No.1）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.727		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2013.8
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法：1ECにて締固め，通水飽和

				試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体No.		供試体の状態		
	直径 D cm	10.00			
	断面積 A cm²	78.54	（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	3953.6	
	長さ L cm	12.73	供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	1939.8	
	体積 V cm³	1000	湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	1.940	
			乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.815	
			間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.502	
			飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	37.5	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器No.	1	167				
	m_a g	692.80	689.50				
	m_b g	661.09	657.34				
	m_c g	195.50	190.42				
	w, w_f %	6.8	6.9				
	平均値 %	6.9					

測定No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:05:00	00:05:00	00:05:00	00:05:00	00:05:00
測定時間 t_2-t_1 s		300	300	300	300	300
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	166.0	166.0	166.0	166.0	166.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	128.0	129.9	127.0	127.1	125.5
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	4.41E-6	4.16E-6	4.55E-6	4.53E-6	4.75E-6
測定時の水温 T ℃		21	21	21	21	21
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.859	0.859	0.859	0.859	0.859
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		3.79E-6	3.57E-6	3.91E-6	3.89E-6	4.08E-6
代表値 k_{15} m/s		3.85E-6				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると3.85E-4(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218

土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号（深さ）　購入砂+珪砂微粉10%①（測定No.2）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.727		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2013.0
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法：1ECにて締固め，通水飽和

				試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体No.		供試体の状態		
	直径 D cm	10.00			
	断面積 A cm²	78.54	（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	4013.7	
	長さ L cm	12.73	供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	2000.7	
	体積 V cm³	1000	湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	2.001	
			乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.837	
			間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.484	
			飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	50.1	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器No.	100	160				
	m_a g	667.86	654.83				
	m_b g	628.69	617.21				
	m_c g	191.86	188.34				
	w, w_f %	9.0	8.8				
	平均値 %	8.9					

測定No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:05:00	00:05:00	00:05:00	00:05:00	00:05:00
測定時間 t_2-t_1 s		300	300	300	300	300
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	166.0	166.0	166.0	166.0	166.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	136.5	138.7	136.1	138.5	137.8
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	3.32E-6	3.05E-6	3.37E-6	3.08E-6	3.16E-6
測定時の水温 T ℃		22	22	22	22	22
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		2.79E-6	2.56E-6	2.83E-6	2.58E-6	2.65E-6
代表値 k_{15} m/s		2.68E-6				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると2.68E-4(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218

土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号（深さ）　購入砂+珪砂微粉10%①（測定No.3）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.727		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2049.1
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法：1ECにて締固め，通水飽和

				試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体No.		供試体の状態		
	直径 D cm	10.00			
	断面積 A cm²	78.54	（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	4124.0	
	長さ L cm	12.73	供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	2074.9	
	体積 V cm³	1000	湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	2.075	
			乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.869	
			間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.459	
			飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	65.4	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器No.	5	23				
	m_a g	702.92	671.64				
	m_b g	652.09	624.87				
	m_c g	199.13	189.61				
	w, w_f %	11.2	10.7				
	平均値 %	11.0					

測定No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:10:00	00:10:00	00:10:00	00:10:00	00:10:00
測定時間 t_2-t_1 s		600	600	600	600	600
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	166.0	166.0	166.0	166.0	166.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	133.3	133.8	132.4	131.3	132.6
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	1.86E-6	1.83E-6	1.92E-6	1.99E-6	1.91E-6
測定時の水温 T ℃		21	21	21	21	21
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.859	0.859	0.859	0.859	0.859
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		1.60E-6	1.57E-6	1.65E-6	1.71E-6	1.64E-6
代表値 k_{15} m/s		1.63E-6				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると1.63E-4(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218

土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号（深さ）　購入砂+珪砂微粉10%①（測定No.4）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.727		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2015.2
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法：1ECにて締固め，通水飽和

				試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体No.		供試体の状態		
	直径 D cm	10.00		（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	4153.0	
	断面積 A cm²	78.54		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	2137.8	
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	2.138	
	体積 V cm³	1000		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.885	
				間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.447	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	81.7	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器No.	92	128				
	m_a g	711.49	694.65				
	m_b g	649.16	636.50				
	m_c g	193.14	192.57				
	w, w_f %	13.7	13.1				
	平均値 %	13.4					

測定No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:10:00	00:10:00	00:10:00	00:10:00	00:10:00
測定時間 t_2-t_1 s		600	600	600	600	600
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	166.0	166.0	166.0	166.0	166.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	139.6	140.7	140.8	141.2	139.2
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	1.47E-6	1.40E-6	1.40E-6	1.37E-6	1.49E-6
測定時の水温 T ℃		22	22	22	22	22
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		1.23E-6	1.17E-6	1.17E-6	1.15E-6	1.25E-6
代表値 k_{15} m/s		1.19E-6				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると1.19E-4(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218	土の透水試験（~~定水位~~，変水位）	

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号（深さ）　購入砂+珪砂微粉10%①（測定No.5）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.727		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2048.9
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法	1ECにて締固め 通水飽和

					試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体No.		供試体の状態			
	直径 D cm	10.00		（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	4181.0	
	断面積 A cm²	78.54		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	2132.1	
	長さ L cm	12.73		湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	2.132	
	体積 V cm³	1000		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.857	
				間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.468	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	86.2	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器No.	174	52				
	m_a g	741.69	721.67				
	m_b g	672.33	652.01				
	m_c g	194.61	190.33				
	w, w_f %	14.5	15.1				
	平均値 %	14.8					

測定No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻 t_1		00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻 t_2		00:10:00	00:10:00	00:10:00	00:10:00	00:10:00
測定時間 t_2-t_1 s		600	600	600	600	600
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	166.0	166.0	166.0	166.0	166.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	141.2	142.3	142.6	142.9	142.6
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	1.37E-6	1.31E-6	1.29E-6	1.27E-6	1.29E-6
測定時の水温 T ℃		22	22	22	22	22
温度補正係数 η_T/η_{15}		0.839	0.839	0.839	0.839	0.839
15℃に対する透水係数 k_{15} m/s		1.15E-6	1.10E-6	1.08E-6	1.07E-6	1.08E-6
代表値 k_{15} m/s		1.10E-6				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると1.10E-4(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

JIS A 1218

土の透水試験（~~定水位~~，変水位）

調査件名　　試験年月日　2021年 7月 27日

試料番号（深さ）　購入砂+珪砂微粉10%①（測定No.6）　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m cm	10.00
	土粒子の密度 ρ_s g/cm³	2.727		長さ L_m cm	12.73
スタンドパイプ[1]	内径 cm	2.00		質量 m_2[2] g	2050.7
	断面積 a cm²	3.142		試験用水	脱気水

供試体作製，飽和方法：1ECにて締固め，通水飽和

				試験前	試験後[3]
供試体寸法	供試体No.		供試体の状態		
	直径 D cm	10.00			
	断面積 A cm²	78.54	（供試体＋透水円筒）質量 m_1 g	4168.5	
	長さ L cm	12.73	供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	2117.8	
	体積 V cm³	1000	湿潤密度 $\rho_t=m/V$ g/cm³	2.118	
			乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ g/cm³	1.826	
			間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.493	
			飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	88.5	

		試験前			試験後[3]		
含水比	容器No.	122	109				
	m_a g	756.34	751.02				
	m_b g	677.24	674.56				
	m_c g	190.06	192.13				
	w, w_f %	16.2	15.8				
	平均値 %	16.0					

測定No.		1	2	3	4	5
測定開始時刻	t_1	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00
測定終了時刻	t_2	00:10:00	00:10:00	00:10:00	00:10:00	00:10:00
測定時間	t_2-t_1 s	600	600	600	600	600
定水位	水位差 h cm					
	透水量 Q cm³					
	T℃に対する透水係数 k_T[4] m/s					
変水位	時刻t_1における水位差 h_1 cm	166.0	166.0	166.0	166.0	166.0
	時刻t_2における水位差 h_2 cm	135.1	137.7	136.8	137.9	137.2
	T℃に対する透水係数 k_T[5] m/s	1.75E-6	1.59E-6	1.64E-6	1.57E-6	1.62E-6
測定時の水温	T ℃	21	21	21	21	21
温度補正係数	η_T/η_{15}	0.859	0.859	0.859	0.859	0.859
15℃に対する透水係数	k_{15} m/s	1.50E-6	1.37E-6	1.41E-6	1.35E-6	1.39E-6
代表値	k_{15} m/s	1.40E-6				

特記事項

代表値 k_{15} を旧規格の単位で表記すると1.40E-4(cm/s)

1) 変水位試験の場合
2) 透水円筒，底板，シール材などを含む。
3) 保水性の小さい試料は測定を省いてよい。
4) $k_T=\frac{L}{h}\cdot\frac{Q}{A(t_2-t_1)}\times\frac{1}{100}$
5) $k_T=2.303\frac{aL}{A(t_2-t_1)}\cdot\log\frac{h_1}{h_2}\times\frac{1}{100}$
$k_{15}=k_T\cdot\eta_T/\eta_{15}$

土質試験結果データシート(7)

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(供試体情報)	1/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.4　　試験者

試料			透水円筒		
	土質名称			容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m mm	50.0
	土粒子の密度 ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L_m mm	51.0
試験用水				質量 m_2 g	346.20

供試体作成、飽和方法

供試体寸法			供試体の状態		試験前	試験後
	供試体 No.	1				
	直径 D mm	50.0		(供試体+透水円筒)質量 m_1 g	529.60	552.57
	断面積 A mm^2	1963.5		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	183.40	206.37
	長さ L mm	51.0		湿潤密度 $\rho_t=m/V\times1000$ Mg/m^3	1.831	2.061
	体積 V mm^3	100138.3		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ Mg/m^3	1.678	
	間隙体積 V_v [1] mm^3	38617.9		間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.628	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	39.7	
				空隙量 $V_a=V_v(100-S_r)/10^5$ mL	23.3	

含水比		試験前			試験後		
	容器No.	100					
	m_a g	340.75					
	m_b g	328.87					
	m_c g	198.59					
	$w、w_f$ %	9.1					
	平均値 %	9.1					

特記事項

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(~~変水位~~、背圧負荷型変水位)	2/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.4　試験者

試料	土質名称			供試体	容器 No.		
	最大粒径	mm			断面積 A	mm^2	1963.5
	土粒子の密度	ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L	mm	51.0

ビュレット	容量	流入 V_{bin} mL	10.0	目盛り1mLごとの高さ	流入 h_{in}	mm	31.5
		流出 V_{bout} mL	10.0		流出 h_{out}	mm	31.5
	断面積	流入 a_{in} mm^2	31.8	原点の高さ	流入 h_{0in}	mm	0.0
		流出 a_{out} mm^2	31.8		流出 h_{0out}	mm	0.0

加圧条件	流入側 ΔP_{in} kPa	120	流出側 ΔP_{out} kPa	100	設定動水勾配	40

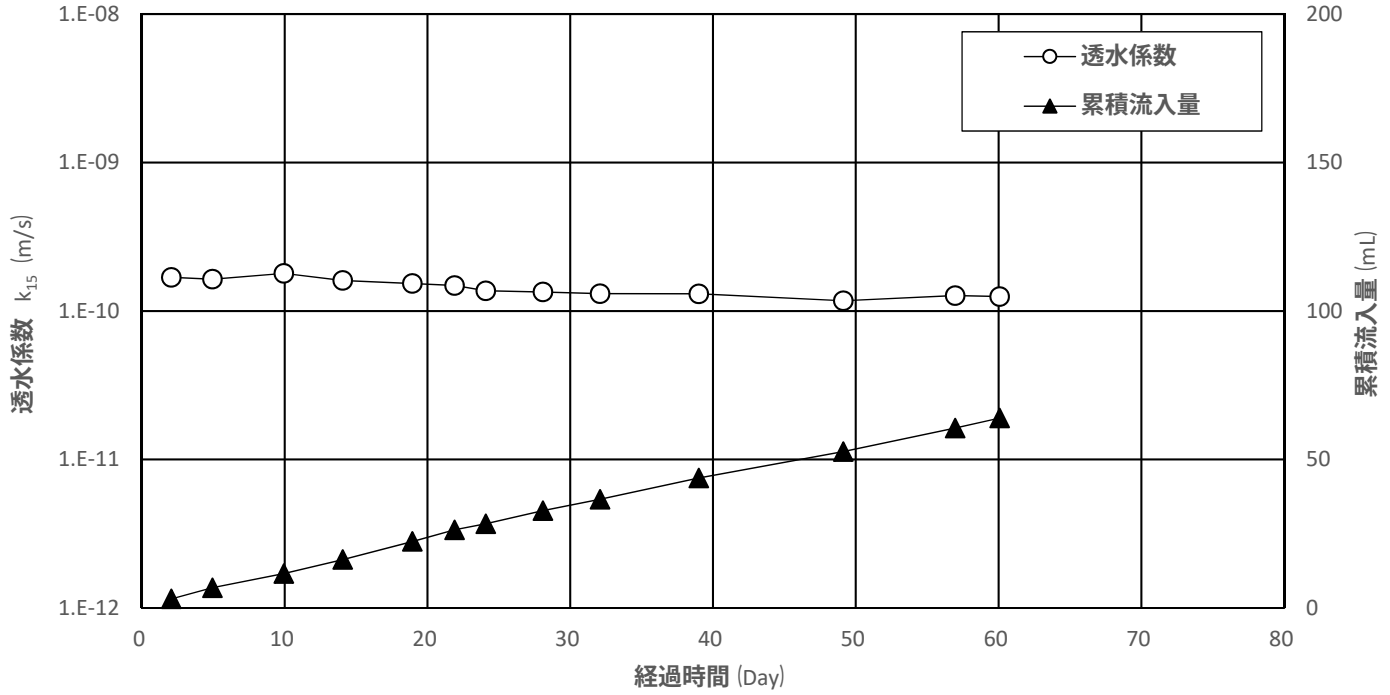
測定 No.			1	2	3	4	5
測定開始時刻	t_1		2021/11/1 13:50	2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50
測定終了時刻	t_2		2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50	2021/12/3 13:50
測定時間	t_2-t_1	s	345600	597600	874800	676800	270000
時刻t_1の流入側ビュレットの値	V_{1in}	mL	4.43	0.03	0.01	0.00	0.02
時刻t_1の流出側ビュレットの値	V_{1out}	mL	4.58	9.04	9.51	9.51	9.50
時刻t_2の流入側ビュレットの値	V_{2in}	mL	8.25	7.18	8.92	7.92	3.38
時刻t_2の流出側ビュレットの値	V_{2out}	mL	0.78	1.91	0.12	1.74	6.25
時刻t_1における水頭差	h_1 [1]	mm	2047.8	2326.9	2342.4	2342.7	2341.7
時刻t_2における水頭差	h_2 [2]	mm	1807.8	1877.1	1765.9	1848.4	2133.5
T℃に対する透水係数	k_t [3]	m/s	1.49E-10	1.48E-10	1.33E-10	1.44E-10	1.42E-10
時刻t_1における動水勾配	h_1/L		40.2	45.6	45.9	45.9	45.9
時刻t_2における動水勾配	h_2/L		35.4	36.8	34.6	36.2	41.8
時刻t_1における水温	T_1	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
時刻t_2における水温	T_2	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
測定期間の水温	$T=(T_1+T_2)/2$	℃	20	20	20	20	20
温度補正係数	η_t/η_{15}		0.880	0.880	0.880	0.880	0.880
15℃に対する透水係数	k_{15} [4]	m/s	1.31E-10	1.30E-10	1.17E-10	1.27E-10	1.25E-10
代表値	k_{15}	m/s	1.26E-10				

特記事項

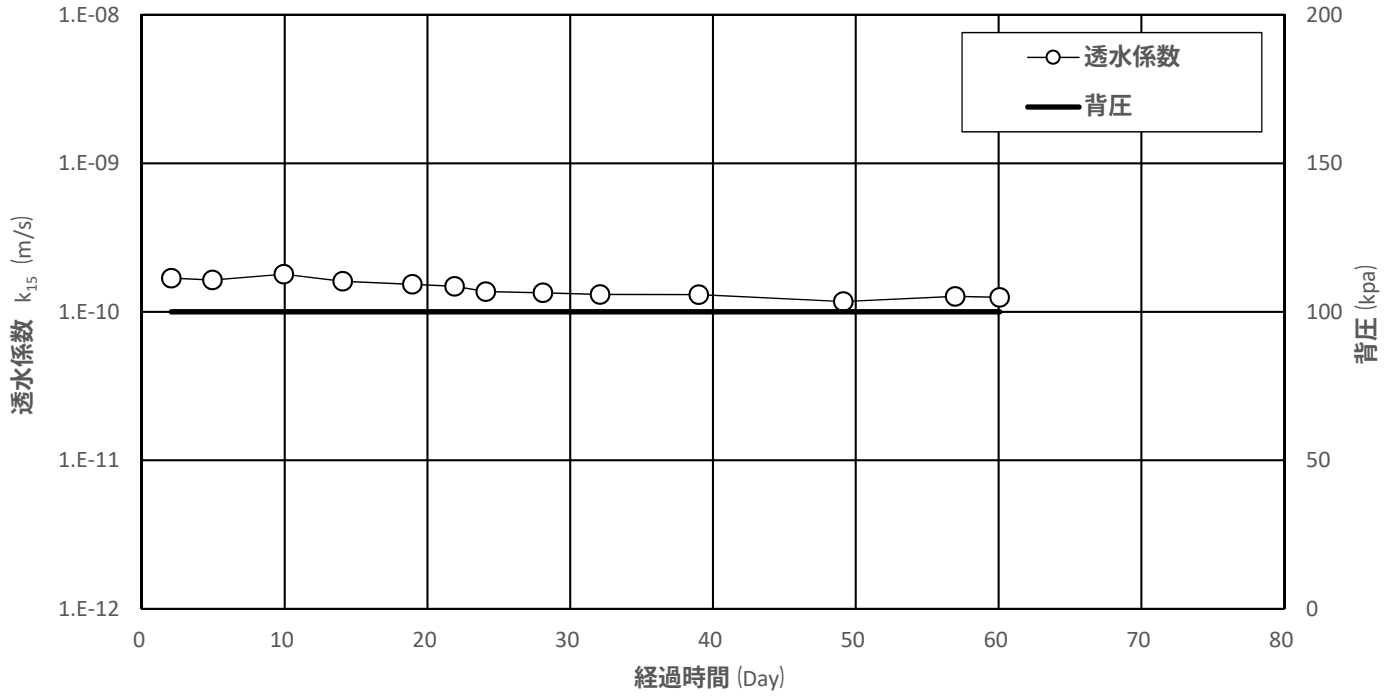
JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.4　試験者



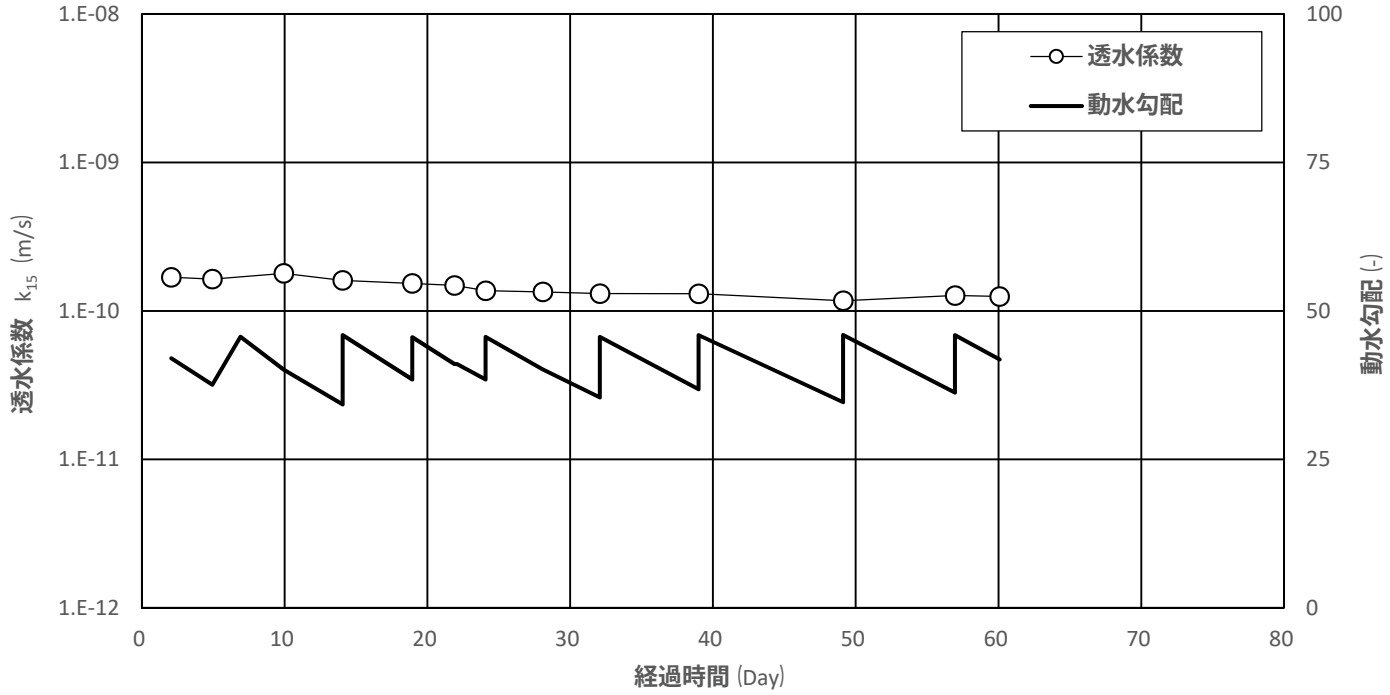
透水係数と累積流入量の経時変化



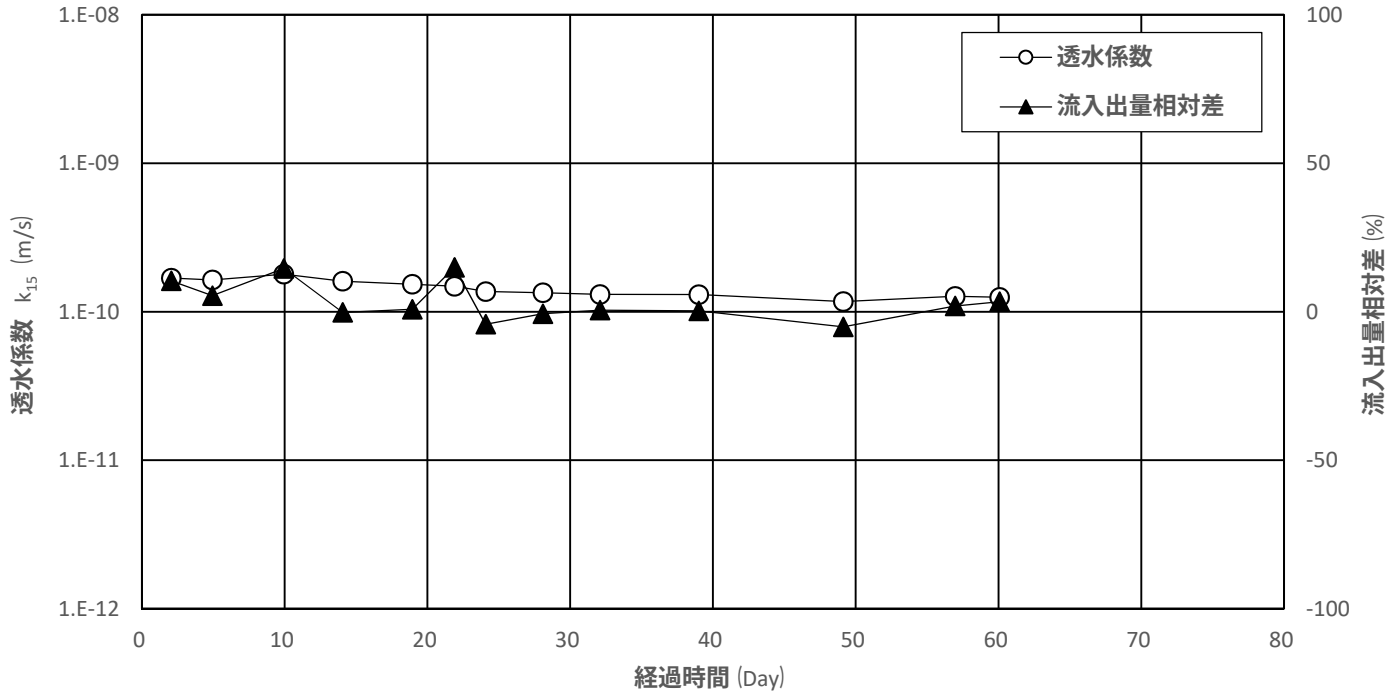
透水係数と背圧の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名		試験年月日	2021年10月4日
試料番号	購入砂:ベントナイト=9:1 No.4	試験者	



透水係数と動水勾配の経時変化



透水係数と流入出量相対差の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(供試体情報)	1/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.5　　試験者

試料	土質名称		透水円筒	容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m mm	50.0
	土粒子の密度 ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L_m mm	51.0
試験用水				質量 m_2 g	346.62

供試体作成、飽和方法

供試体寸法	供試体 No.	1	供試体の状態		試験前	試験後
	直径 D mm	50.0		(供試体+透水円筒)質量 m_1 g	533.65	552.61
	断面積 A mm^2	1963.5		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	187.03	205.99
	長さ L mm	51.0		湿潤密度 $\rho_t=m/V\times1000$ Mg/m^3	1.868	2.057
	体積 V mm^3	100138.3		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ Mg/m^3	1.678	
	間隙体積 V_v 1) mm^3	38626.8		間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.628	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	49.1	
				空隙量 $V_a=V_v(100-S_r)/10^5$ mL	19.6	

		試験前			試験後		
含水比	容器No.	24					
	m_a g	347.66					
	m_b g	332.55					
	m_c g	198.77					
	$w、w_f$ %	11.3					
	平均値 %	11.3					

特記事項

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(~~変水位~~、背圧負荷型変水位)	2/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.5　　試験者

試料	土質名称			供試体	容器 No.		
	最大粒径	mm			断面積 A	mm^2	1963.5
	土粒子の密度	ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L	mm	51.0

ビュレット	容量	流入 V_{bin}	mL	10.0	目盛り1mLごとの高さ	流入 h_{in}	mm	31.5
		流出 V_{bout}	mL	10.0		流出 h_{out}	mm	31.5
	断面積	流入 a_{in}	mm^2	31.8	原点の高さ	流入 h_{0in}	mm	0.0
		流出 a_{out}	mm^2	31.8		流出 h_{0out}	mm	0.0

加圧条件	流入側 ΔP_{in} kPa	120	流出側 ΔP_{out} kPa	100	設定動水勾配	41

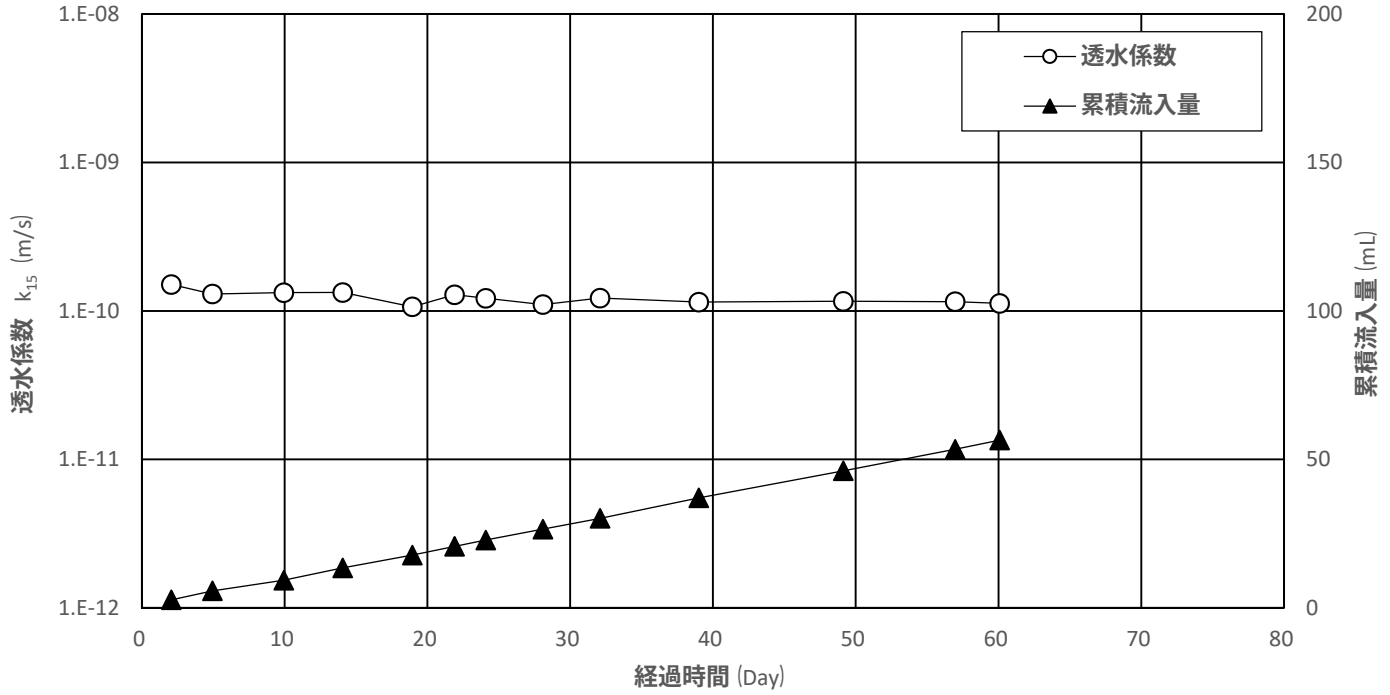
測定 No.			1	2	3	4	5
測定開始時刻	t_1		2021/11/1 13:50	2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50
測定終了時刻	t_2		2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50	2021/12/3 13:50
測定時間	t_2-t_1	s	345600	597600	874800	676800	270000
時刻t_1の流入側ビュレットの値	V_{1in}	mL	3.69	0.02	0.03	0.05	0.01
時刻t_1の流出側ビュレットの値	V_{1out}	mL	5.31	9.02	9.51	9.55	9.49
時刻t_2の流入側ビュレットの値	V_{2in}	mL	7.33	6.93	9.13	7.30	3.10
時刻t_2の流出側ビュレットの値	V_{2out}	mL	1.65	3.22	0.45	2.39	6.61
時刻t_1における水頭差	h_1 [1]	mm	2094.1	2326.6	2341.7	2342.4	2341.7
時刻t_2における水頭差	h_2 [2]	mm	1864.2	1926.2	1769.7	1888.4	2153.7
T℃に対する透水係数	k_t [3]	m/s	1.39E-10	1.30E-10	1.32E-10	1.31E-10	1.28E-10
時刻t_1における動水勾配	h_1/L		41.1	45.6	45.9	45.9	45.9
時刻t_2における動水勾配	h_2/L		36.6	37.8	34.7	37.0	42.2
時刻t_1における水温	T_1	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
時刻t_2における水温	T_2	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
測定期間の水温	$T=(T_1+T_2)/2$	℃	20	20	20	20	20
温度補正係数	η_t/η_{15}		0.880	0.880	0.880	0.880	0.880
15℃に対する透水係数	k_{15} [4]	m/s	1.22E-10	1.15E-10	1.16E-10	1.16E-10	1.13E-10
代表値	k_{15}	m/s	1.16E-10				

特記事項

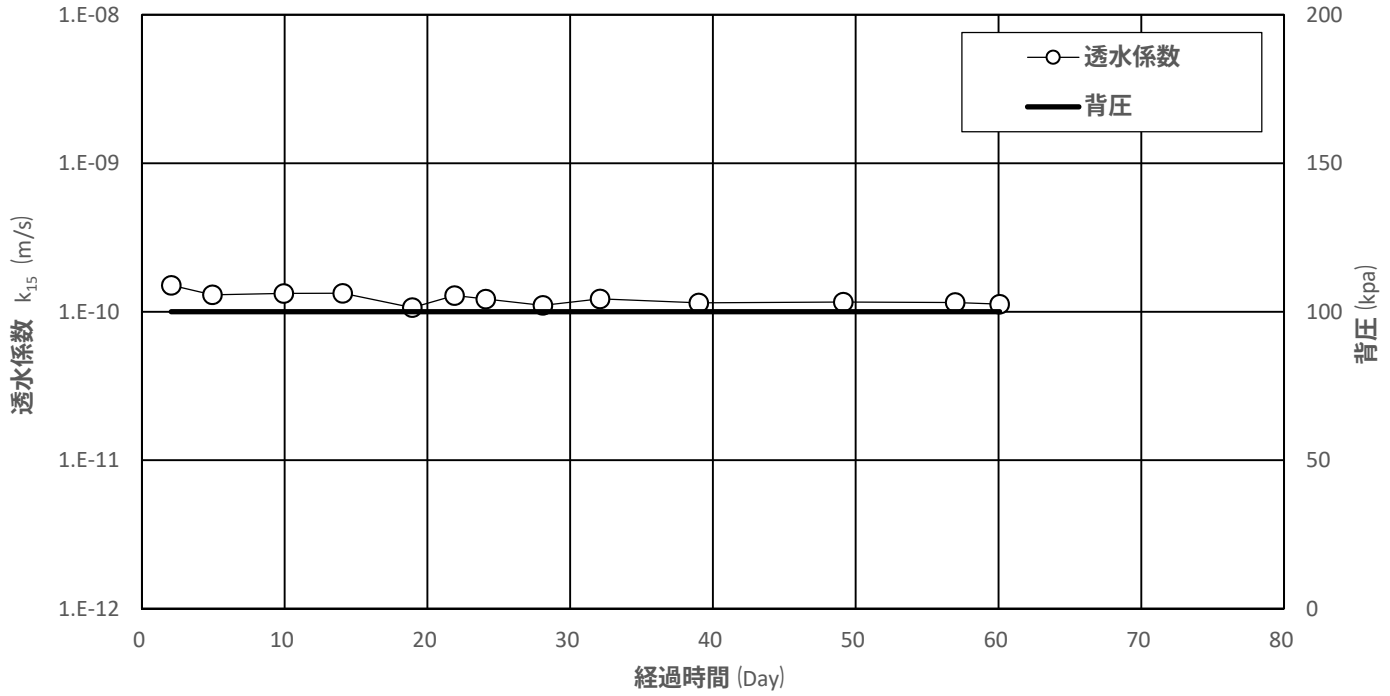
JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト=9:1 No.5　試験者



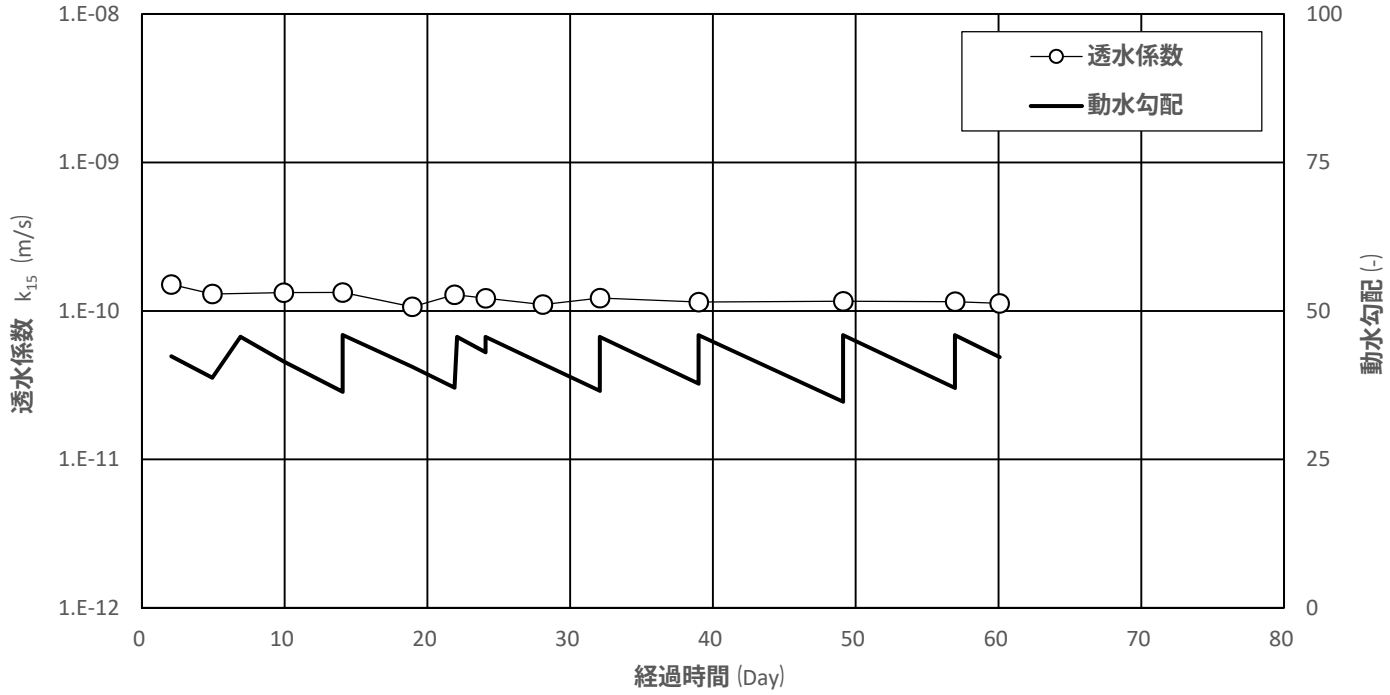
透水係数と累積流入量の経時変化



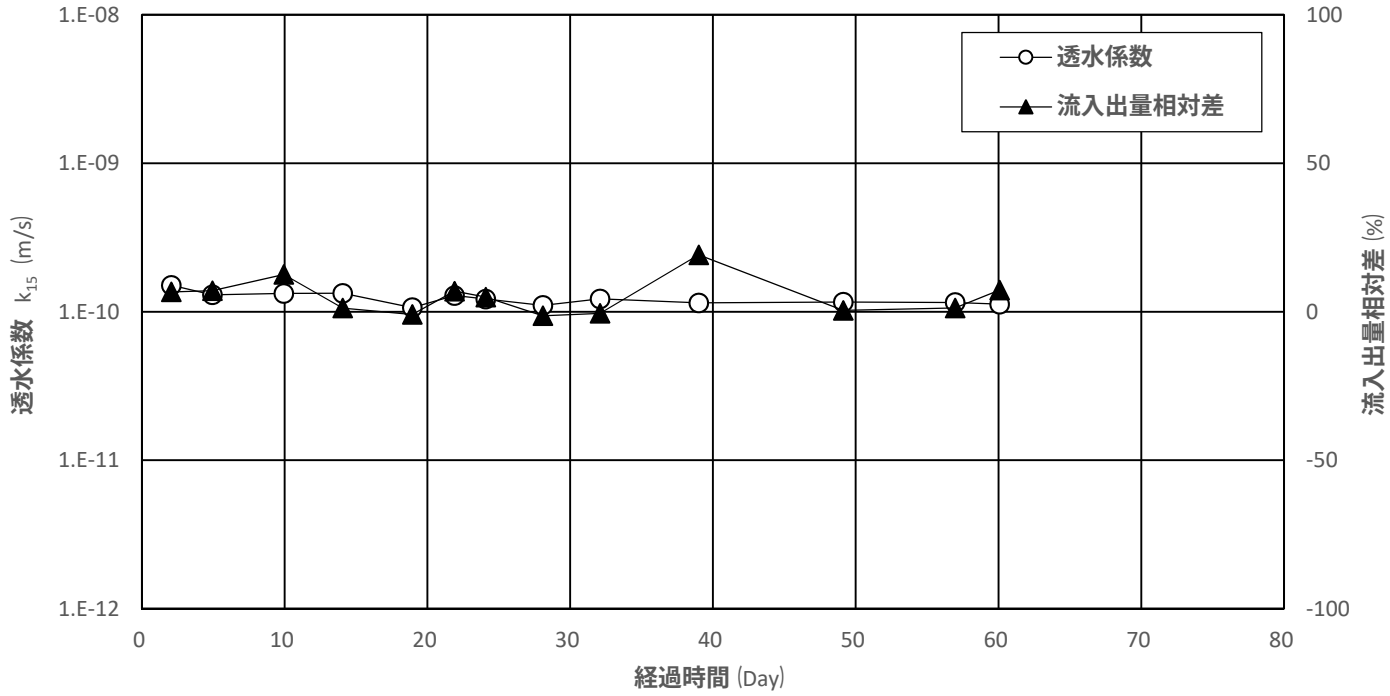
透水係数と背圧の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名		試験年月日	2021年10月4日
試料番号	購入砂:ベントナイト=9:1 No.5	試験者	



透水係数と動水勾配の経時変化



透水係数と流入出量相対差の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(供試体情報)	1/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.6　　試験者

試料			透水円筒		
	土質名称			容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m mm	50.0
	土粒子の密度 ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L_m mm	51.0
試験用水				質量 m_2 g	346.50

供試体作成、飽和方法

供試体寸法			供試体の状態		試験前	試験後
	供試体 No.	1				
	直径 D mm	50.0		(供試体+透水円筒)質量 m_1 g	538.05	552.60
	断面積 A mm^2	1963.5		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	191.55	206.10
	長さ L mm	51.0		湿潤密度 $\rho_t=m/V\times1000$ Mg/m^3	1.913	2.058
	体積 V mm^3	100138.3		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ Mg/m^3	1.681	
	間隙体積 V_v [1] mm^3	38520.8		間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.625	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	60.3	
				空隙量 $V_a=V_v(100-S_r)/10^5$ mL	15.3	

含水比		試験前			試験後		
	容器No.	292					
	m_a g	327.53					
	m_b g	309.35					
	m_c g	177.50					
	w、w_f %	13.8					
	平均値 %	13.8					

特記事項

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(~~変水位~~、背圧負荷型変水位)	2/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト=9:1 No.6　　試験者

試料	土質名称			供試体	容器 No.		
	最大粒径	mm			断面積 A	mm^2	1963.5
	土粒子の密度	ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L	mm	51.0

ビュレット	容量	流入 V_{bin}	mL	10.0	目盛り1mLごとの高さ	流入 h_{in}	mm	31.5
		流出 V_{bout}	mL	10.0		流出 h_{out}	mm	31.5
	断面積	流入 a_{in}	mm^2	31.8	原点の高さ	流入 h_{0in}	mm	0.0
		流出 a_{out}	mm^2	31.8		流出 h_{0out}	mm	0.0

加圧条件	流入側 ΔP_{in} kPa	120	流出側 ΔP_{out} kPa	100	設定動水勾配	43

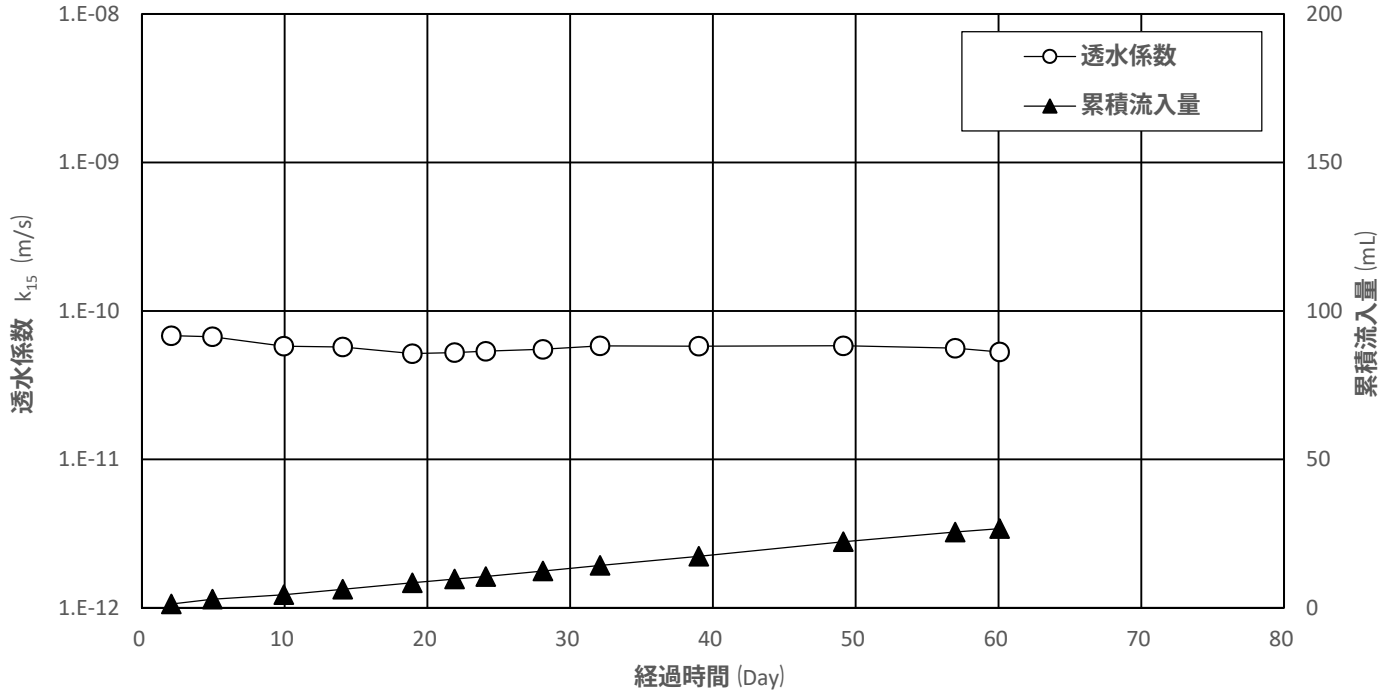
測定 No.			1	2	3	4	5
測定開始時刻	t_1		2021/11/1 13:50	2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50
測定終了時刻	t_2		2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50	2021/12/3 13:50
測定時間	t_2-t_1	s	345600	597600	874800	676800	270000
時刻t_1の流入側ビュレットの値	V_{1in}	mL	1.88	3.77	0.00	4.90	8.16
時刻t_1の流出側ビュレットの値	V_{1out}	mL	7.10	5.21	9.54	4.69	1.52
時刻t_2の流入側ビュレットの値	V_{2in}	mL	3.77	6.85	4.90	8.16	9.32
時刻t_2の流出側ビュレットの値	V_{2out}	mL	5.21	2.26	4.69	1.52	0.43
時刻t_1における水頭差	h_1 [1]	mm	2207.5	2088.5	2343.6	2036.5	1834.0
時刻t_2における水頭差	h_2 [2]	mm	2088.5	1898.5	2036.5	1834.0	1763.1
T℃に対する透水係数	k_t [3]	m/s	6.62E-11	6.58E-11	6.62E-11	6.38E-11	6.02E-11
時刻t_1における動水勾配	h_1/L		43.3	41.0	46.0	39.9	36.0
時刻t_2における動水勾配	h_2/L		41.0	37.2	39.9	36.0	34.6
時刻t_1における水温	T_1	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
時刻t_2における水温	T_2	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
測定期間の水温	$T=(T_1+T_2)/2$	℃	20	20	20	20	20
温度補正係数	η_t/η_{15}		0.880	0.880	0.880	0.880	0.880
15℃に対する透水係数	k_{15} [4]	m/s	5.82E-11	5.79E-11	5.83E-11	5.62E-11	5.30E-11
代表値	k_{15}	m/s	5.67E-11				

特記事項

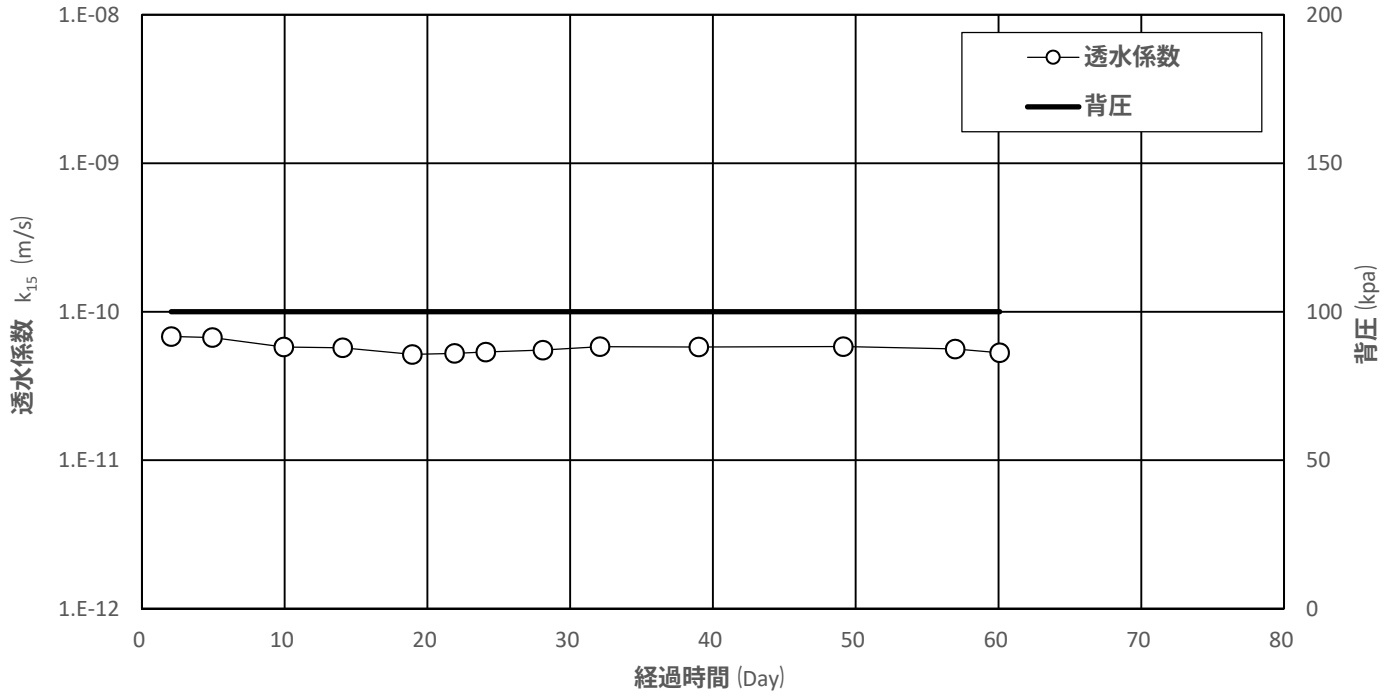
JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト=9:1 No.6　試験者



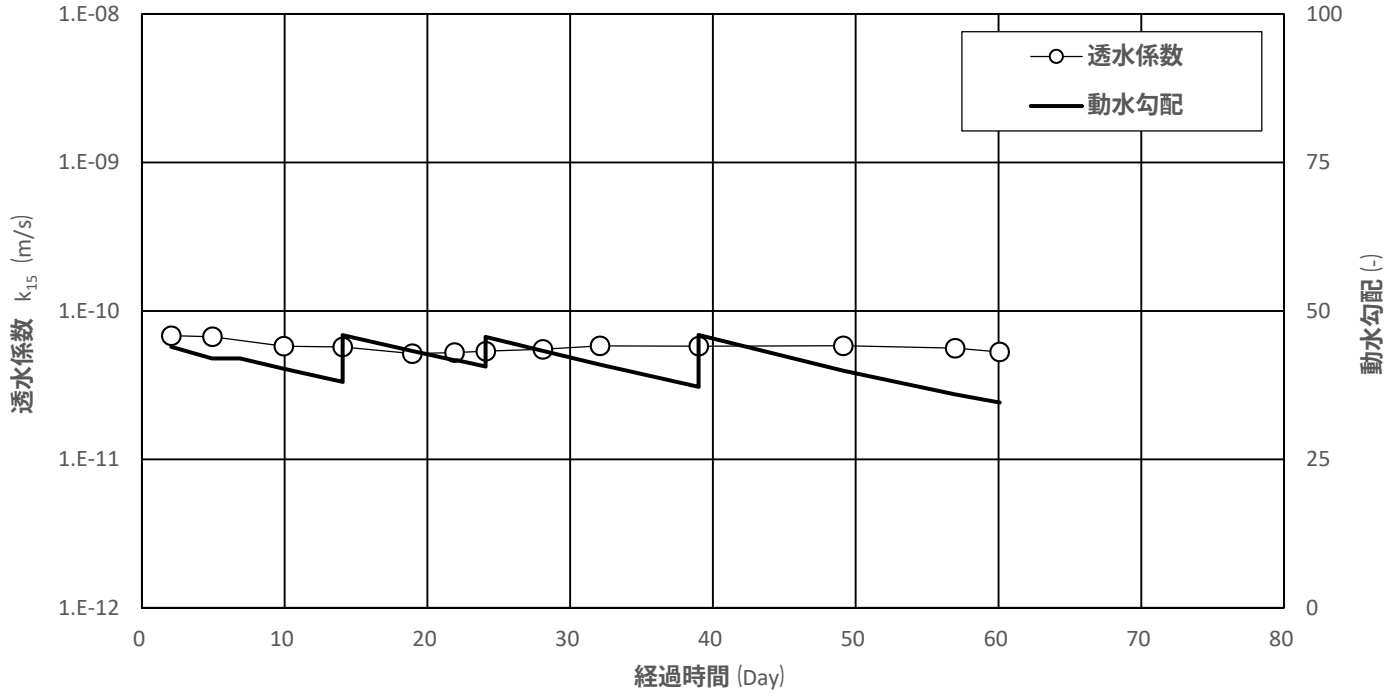
透水係数と累積流入量の経時変化



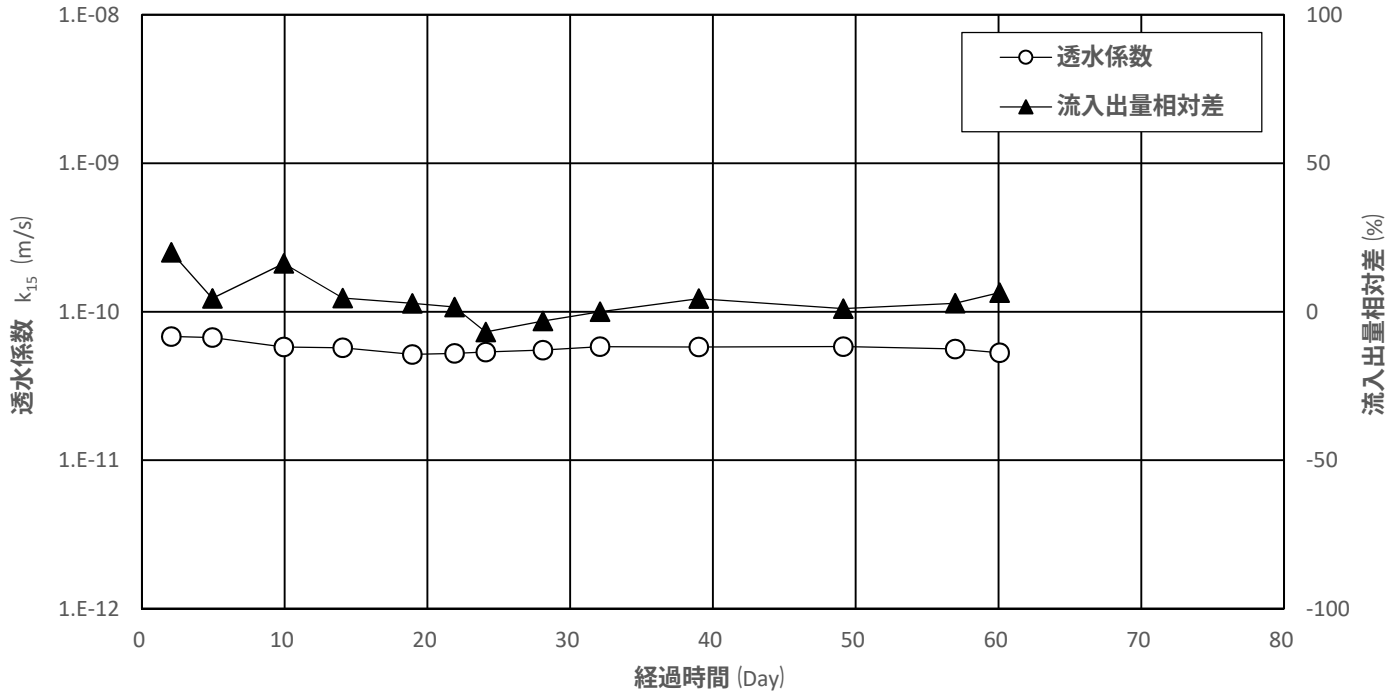
透水係数と背圧の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(~~変水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名		試験年月日	2021年10月4日
試料番号	購入砂:ベントナイト=9:1 No.6	試験者	



透水係数と動水勾配の経時変化



透水係数と流入出量相対差の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(供試体情報)	1/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.7　　試験者

試料			透水円筒		
	土質名称			容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m mm	50.0
	土粒子の密度 ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L_m mm	51.0
試験用水				質量 m_2 g	346.62

供試体作成、飽和方法

供試体寸法			供試体の状態		試験前	試験後
	供試体 No.	1				
	直径 D mm	50.0		(供試体+透水円筒)質量 m_1 g	542.84	553.16
	断面積 A mm^2	1963.5		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	196.22	206.54
	長さ L mm	51.0		湿潤密度 $\rho_t=m/V\times1000$ Mg/m^3	1.959	2.063
	体積 V mm^3	100138.3		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ Mg/m^3	1.682	
	間隙体積 V_v [1] mm^3	38492.5		間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.624	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	72.2	
				空隙量 $V_a=V_v(100-S_r)/10^5$ mL	10.7	

含水比		試験前			試験後		
	容器No.	17					
	m_a g	336.65					
	m_b g	317.11					
	m_c g	198.75					
	$w、w_f$ %	16.5					
	平均値 %	16.5					

特記事項

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(~~変水位~~、背圧負荷型変水位)	2/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.7　　試験者

試料	土質名称			供試体	容器 No.		
	最大粒径	mm			断面積 A	mm^2	1963.5
	土粒子の密度	ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L	mm	51.0

ビュレット	容量	流入	V_{bin} mL	10.0	目盛り1mLごとの高さ	流入	h_{in} mm	31.5
		流出	V_{bout} mL	10.0		流出	h_{out} mm	31.5
	断面積	流入	a_{in} mm^2	31.8	原点の高さ	流入	h_{0in} mm	0.0
		流出	a_{out} mm^2	31.8		流出	h_{0out} mm	0.0

加圧条件	流入側 ΔP_{in} kPa	120	流出側 ΔP_{out} kPa	100	設定動水勾配	44

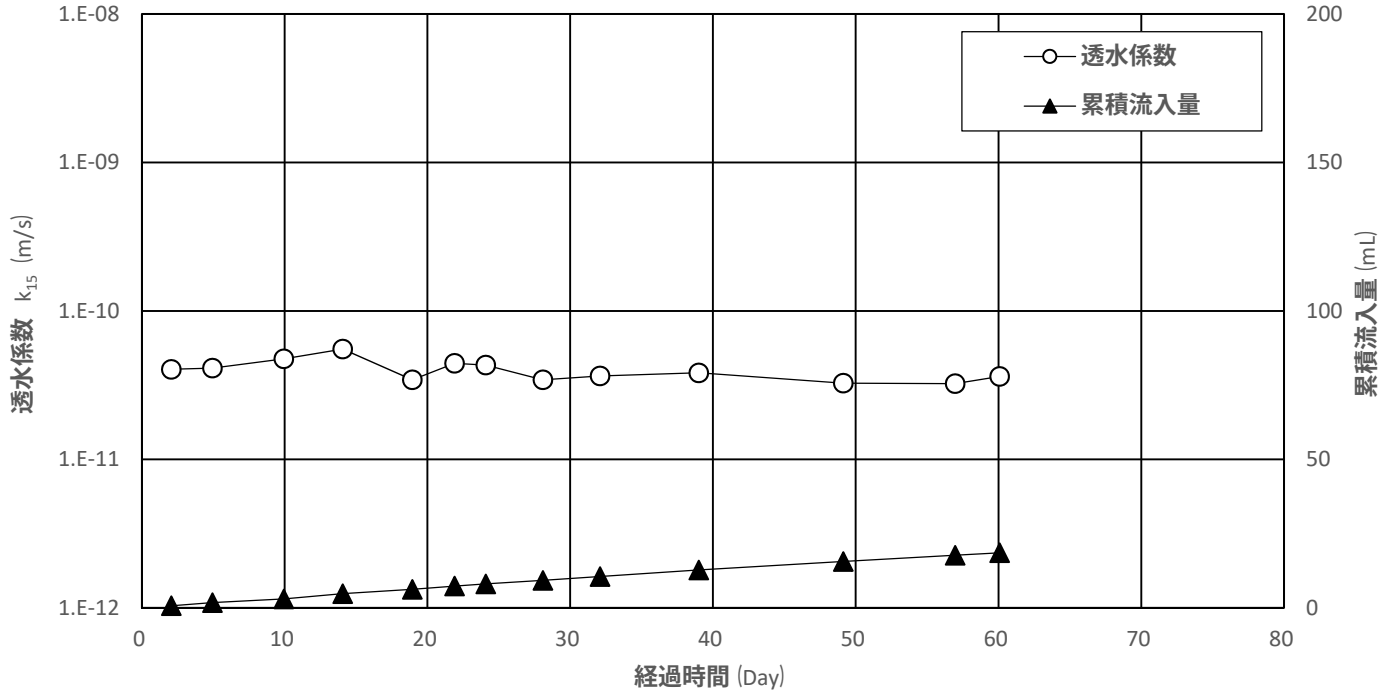
測定 No.			1	2	3	4	5
測定開始時刻	t_1		2021/11/1 13:50	2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50
測定終了時刻	t_2		2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50	2021/12/3 13:50
測定時間	t_2-t_1	s	345600	597600	874800	676800	270000
時刻t_1の流入側ビュレットの値	V_{1in}	mL	1.19	2.48	0.00	2.86	4.94
時刻t_1の流出側ビュレットの値	V_{1out}	mL	7.79	6.64	9.51	6.74	4.79
時刻t_2の流入側ビュレットの値	V_{2in}	mL	2.48	4.69	2.86	4.94	5.80
時刻t_2の流出側ビュレットの値	V_{2out}	mL	6.64	4.63	6.74	4.79	3.93
時刻t_1における水頭差	h_1 [1]	mm	2251.0	2174.2	2342.7	2165.3	2038.4
時刻t_2における水頭差	h_2 [2]	mm	2174.2	2041.2	2165.3	2038.4	1984.2
T℃に対する透水係数	k_t [3]	m/s	4.15E-11	4.35E-11	3.71E-11	3.68E-11	4.11E-11
時刻t_1における動水勾配	h_1/L		44.1	42.6	45.9	42.5	40.0
時刻t_2における動水勾配	h_2/L		42.6	40.0	42.5	40.0	38.9
時刻t_1における水温	T_1	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
時刻t_2における水温	T_2	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
測定期間の水温	$T=(T_1+T_2)/2$	℃	20	20	20	20	20
温度補正係数	η_t/η_{15}		0.880	0.880	0.880	0.880	0.880
15℃に対する透水係数	k_{15} [4]	m/s	3.65E-11	3.83E-11	3.27E-11	3.24E-11	3.62E-11
代表値	k_{15}	m/s	3.52E-11				

特記事項

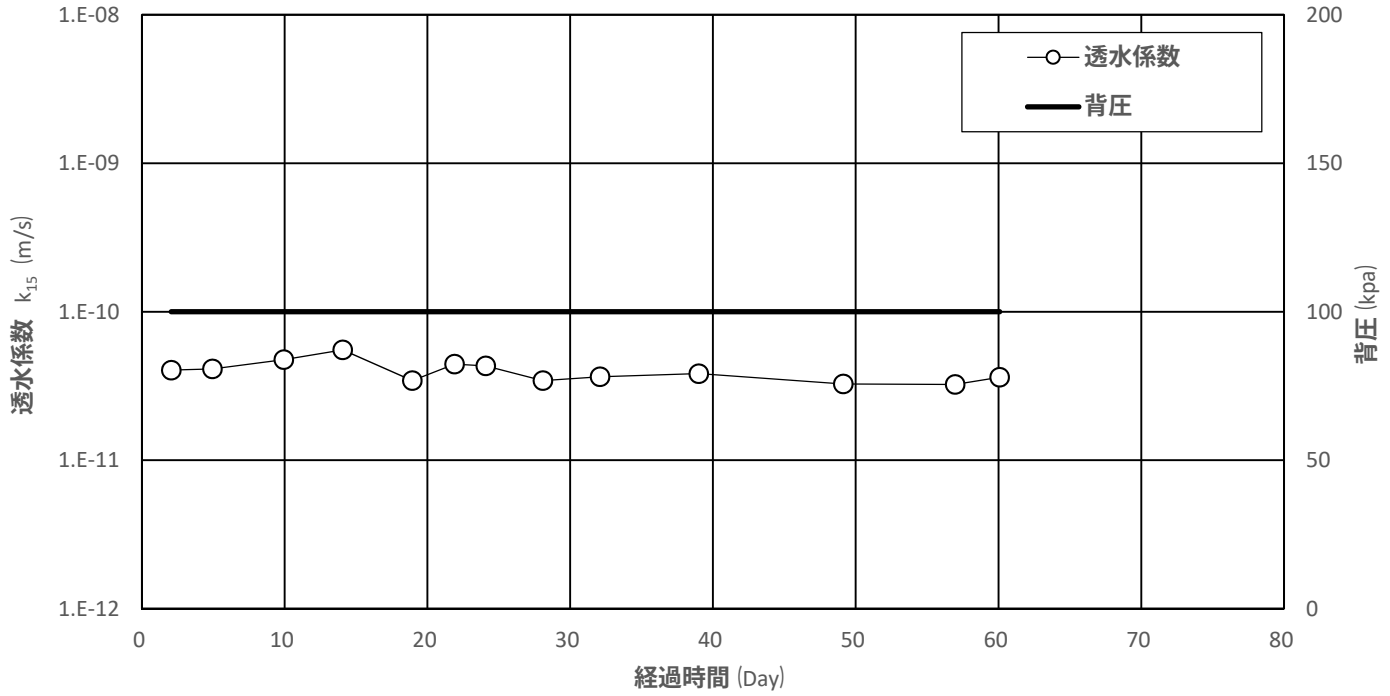
JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト=9:1 No.7　試験者



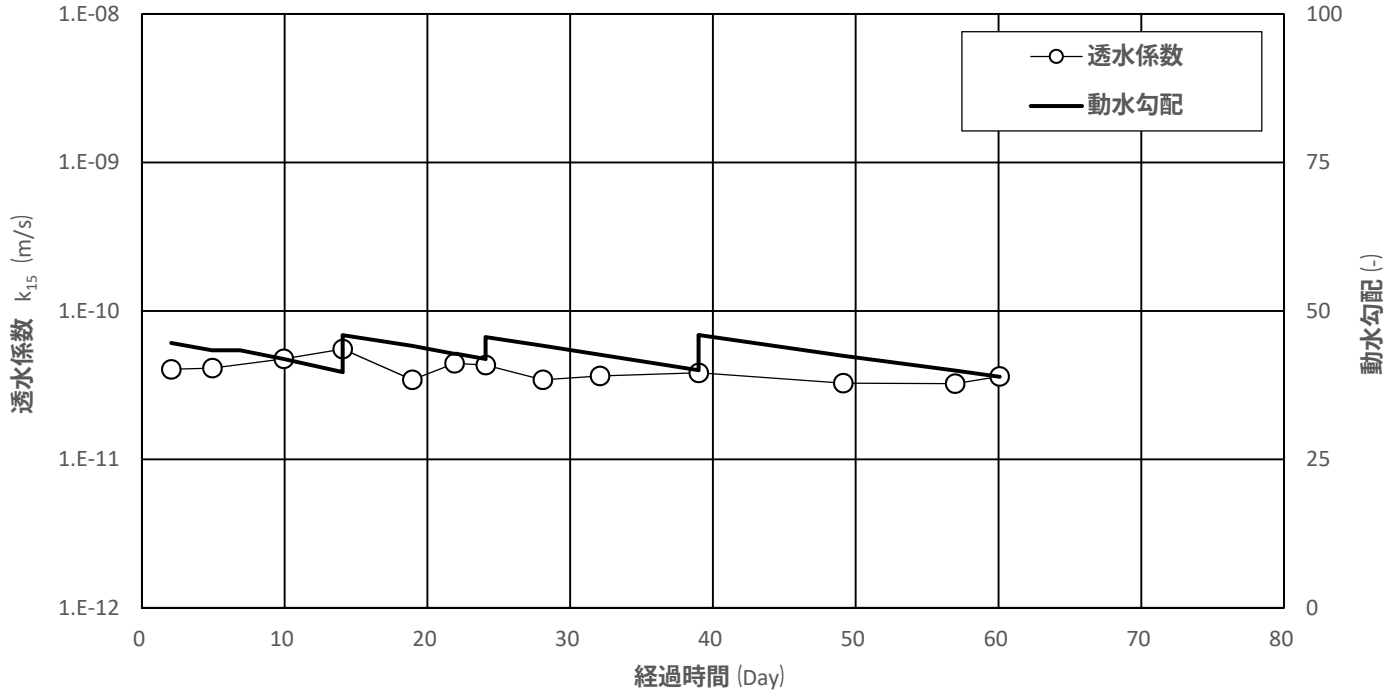
透水係数と累積流入量の経時変化



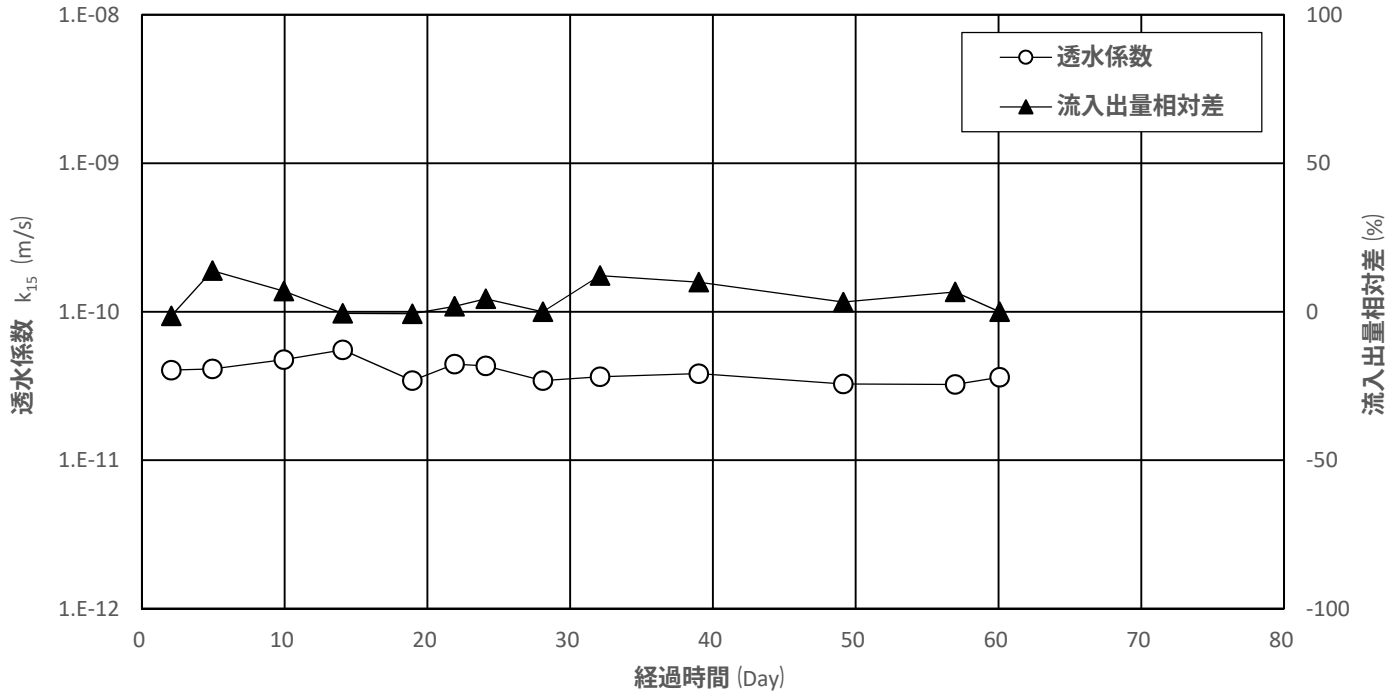
透水係数と背圧の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変水位、背圧負荷型変水位)	

調査件名		試験年月日	2021年10月4日
試料番号	購入砂:ベントナイト=9:1 No.7	試験者	



透水係数と動水勾配の経時変化



透水係数と流入出量相対差の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(供試体情報)	1/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.8　　試験者

試料			透水円筒		
	土質名称			容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m mm	50.0
	土粒子の密度 ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L_m mm	51.0
試験用水				質量 m_2 g	346.62

供試体作成、飽和方法

供試体寸法			供試体の状態		試験前	試験後
	供試体 No.	1				
	直径 D mm	50.0		(供試体+透水円筒)質量 m_1 g	545.93	552.61
	断面積 A mm^2	1963.5		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	199.31	205.99
	長さ L mm	51.0		湿潤密度 $\rho_t=m/V\times1000$ Mg/m^3	1.990	2.057
	体積 V mm^3	100138.3		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ Mg/m^3	1.681	
	間隙体積 V_v [1] mm^3	38507.1		間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.625	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	80.3	
				空隙量 $V_a=V_v(100-S_r)/10^5$ mL	7.6	

含水比		試験前			試験後		
	容器No.	17					
	m_a g	335.30					
	m_b g	310.16					
	m_c g	173.32					
	w、w_f %	18.4					
	平均値 %	18.4					

特記事項

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(~~変水位~~、背圧負荷型変水位)	2/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.8　　試験者

試料	土質名称			供試体	容器 No.		
	最大粒径	mm			断面積 A	mm^2	1963.5
	土粒子の密度	ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L	mm	51.0

ビュレット	容量	流入	V_{bin} mL	10.0	目盛り1mLごとの高さ	流入	h_{in} mm	31.5
		流出	V_{bout} mL	10.0		流出	h_{out} mm	31.5
	断面積	流入	a_{in} mm^2	31.8	原点の高さ	流入	h_{0in} mm	0.0
		流出	a_{out} mm^2	31.8		流出	h_{0out} mm	0.0

加圧条件	流入側 ΔP_{in} kPa	120	流出側 ΔP_{out} kPa	100	設定動水勾配	44

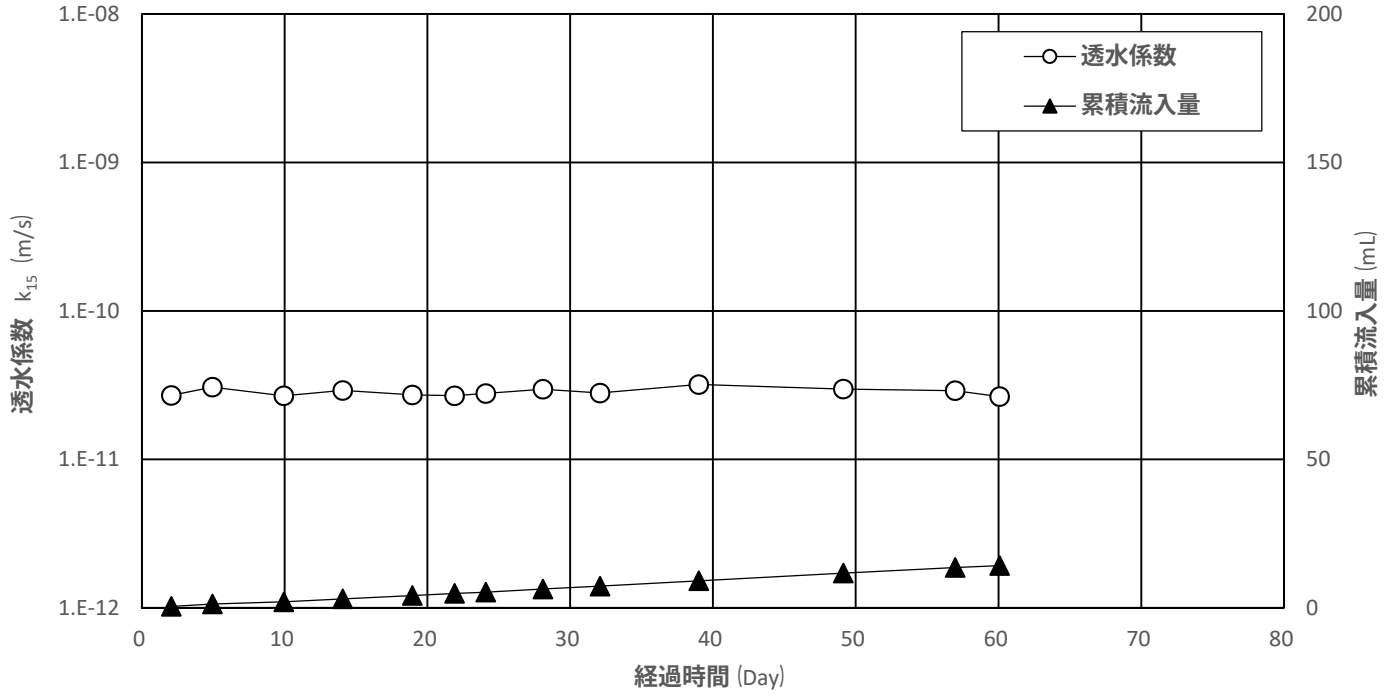
測定 No.			1	2	3	4	5
測定開始時刻	t_1		2021/11/1 13:50	2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50
測定終了時刻	t_2		2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50	2021/12/3 13:50
測定時間	t_2-t_1	s	345600	597600	874800	676800	270000
時刻t_1の流入側ビュレットの値	V_{1in}	mL	1.07	2.03	0.01	2.61	4.49
時刻t_1の流出側ビュレットの値	V_{1out}	mL	7.97	7.04	9.51	6.96	5.19
時刻t_2の流入側ビュレットの値	V_{2in}	mL	2.03	3.83	2.61	4.49	5.13
時刻t_2の流出側ビュレットの値	V_{2out}	mL	7.04	5.26	6.96	5.19	4.55
時刻t_1における水頭差	h_1 [1]	mm	2260.5	2200.9	2342.4	2180.1	2065.2
時刻t_2における水頭差	h_2 [2]	mm	2200.9	2088.2	2180.1	2065.2	2024.8
T℃に対する透水係数	k_t [3]	m/s	3.19E-11	3.63E-11	3.38E-11	3.30E-11	3.01E-11
時刻t_1における動水勾配	h_1/L		44.3	43.2	45.9	42.7	40.5
時刻t_2における動水勾配	h_2/L		43.2	40.9	42.7	40.5	39.7
時刻t_1における水温	T_1	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
時刻t_2における水温	T_2	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
測定期間の水温	$T=(T_1+T_2)/2$	℃	20	20	20	20	20
温度補正係数	η_t/η_{15}		0.880	0.880	0.880	0.880	0.880
15℃に対する透水係数	k_{15} [4]	m/s	2.80E-11	3.19E-11	2.98E-11	2.91E-11	2.65E-11
代表値	k_{15}	m/s	2.91E-11				

特記事項

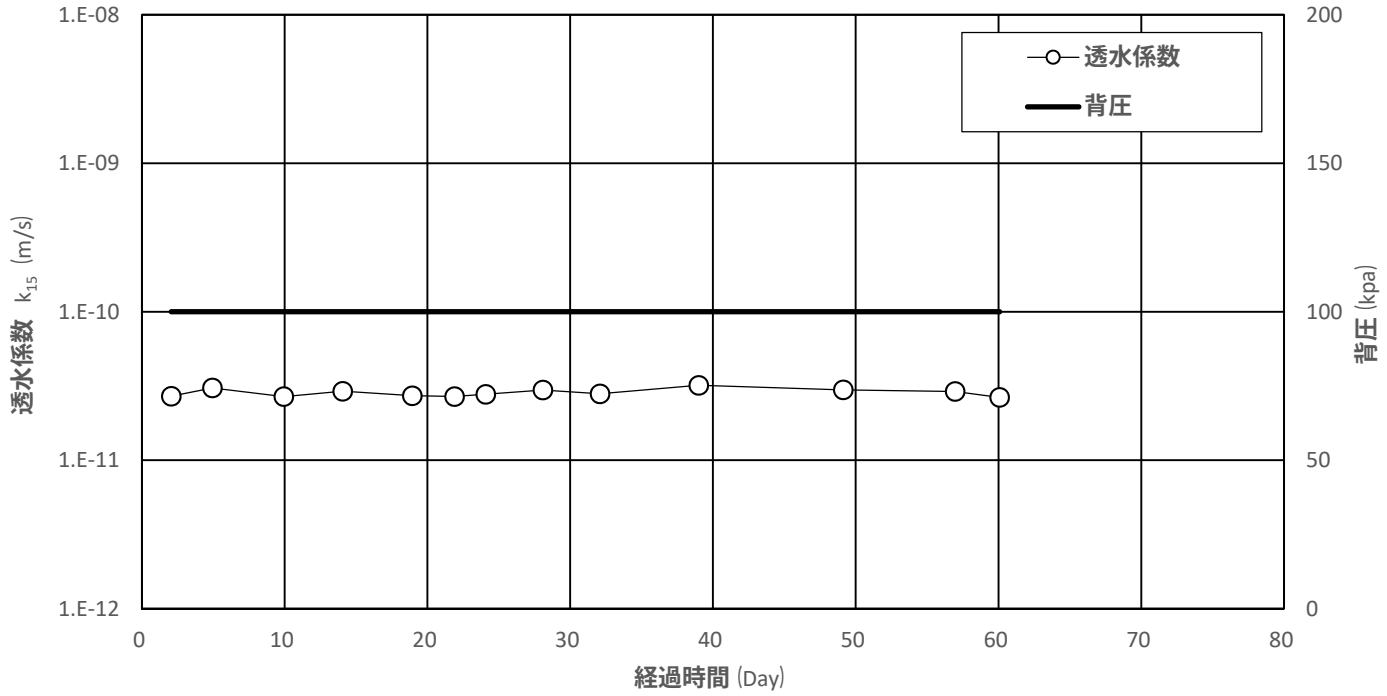
JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト=9:1 No.8　試験者



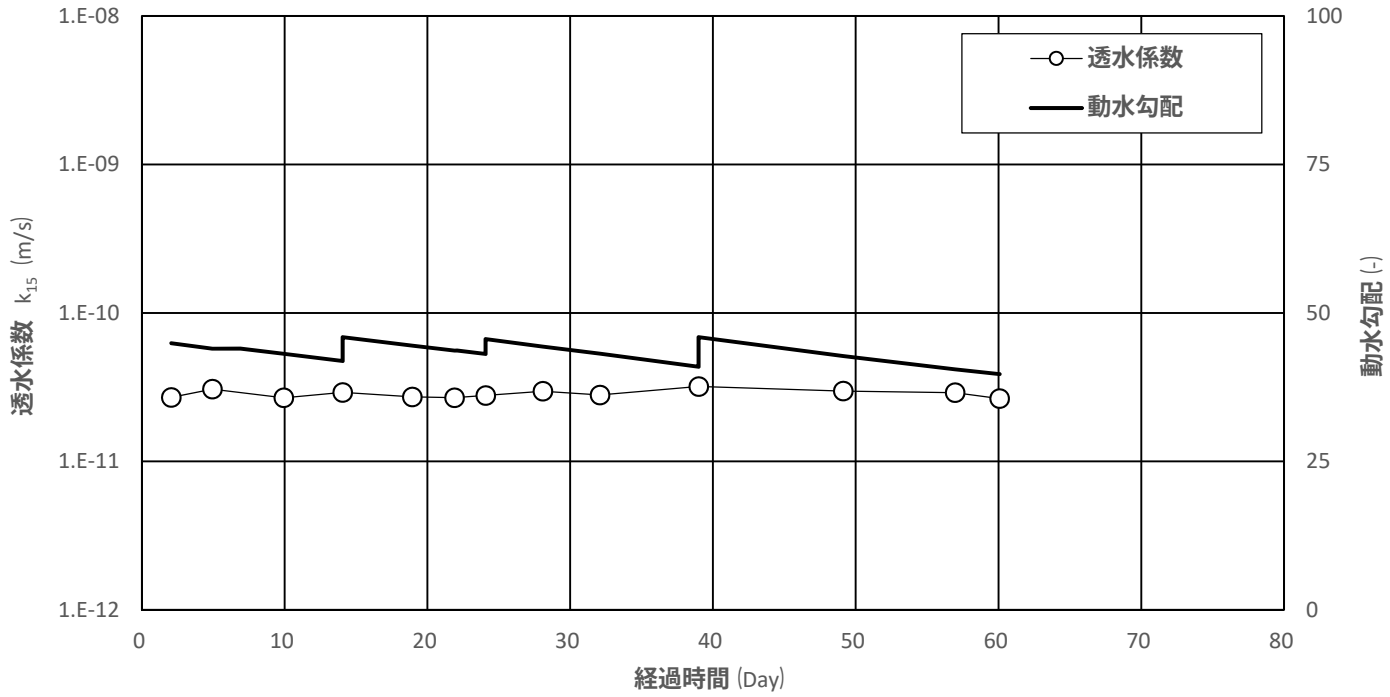
透水係数と累積流入量の経時変化



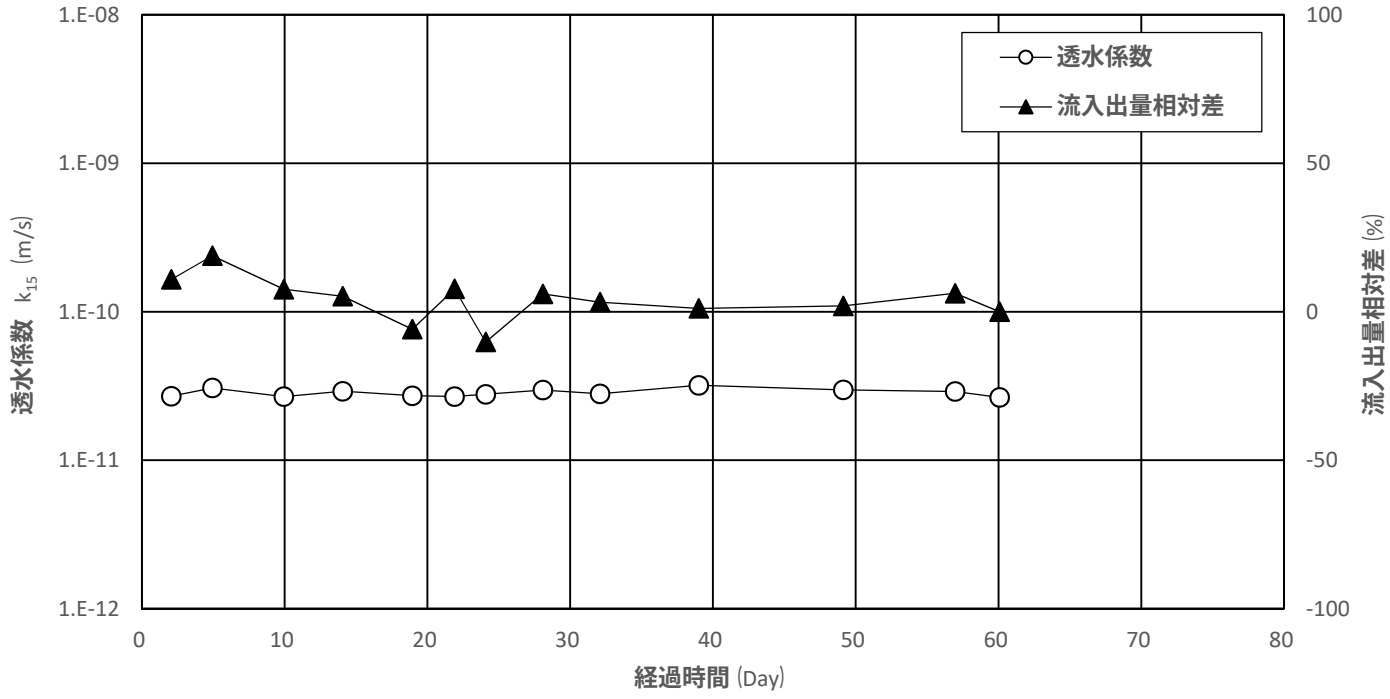
透水係数と背圧の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変水位、背圧負荷型変水位)	

調査件名		試験年月日	2021年10月4日
試料番号	購入砂:ベントナイト=9:1 No.8	試験者	



透水係数と動水勾配の経時変化



透水係数と流入出量相対差の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(供試体情報)	1/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.9　　試験者

試料			透水円筒		
	土質名称			容器 No.	
	最大粒径 mm			内径 D_m mm	50.0
	土粒子の密度 ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L_m mm	51.0
試験用水				質量 m_2 g	345.00

供試体作成、飽和方法

供試体寸法			供試体の状態		試験前	試験後
	供試体 No.	1				
	直径 D mm	50.0		(供試体+透水円筒)質量 m_1 g	546.19	551.94
	断面積 A mm^2	1963.5		供試体質量 $m=m_1-m_2$ g	201.19	206.94
	長さ L mm	51.0		湿潤密度 $\rho_t=m/V\times1000$ Mg/m^3	2.009	2.067
	体積 V mm^3	100138.3		乾燥密度 $\rho_d=\rho_t/(1+w/100)$ Mg/m^3	1.679	
	間隙体積 V_v [1] mm^3	38584.7		間隙比 $e=(\rho_s/\rho_d)-1$	0.627	
				飽和度 $S_r=w\rho_s/(e\rho_w)$ %	85.6	
				空隙量 $V_a=V_v(100-S_r)/10^5$ mL	5.6	

含水比		試験前			試験後		
	容器No.	293					
	m_a g	334.34					
	m_b g	307.69					
	m_c g	171.99					
	$w、w_f$ %	19.6					
	平均値 %	19.6					

特記事項

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(~~変水位~~、背圧負荷型変水位)	2/2

調査件名　　試験年月日　2021年10月4日

試料番号　購入砂:ベントナイト＝9:1 No.9　　試験者

試料	土質名称			供試体	容器 No.		
	最大粒径	mm			断面積 A	mm^2	1963.5
	土粒子の密度	ρ_s Mg/m^3	2.732		長さ L	mm	51.0

ビュレット	容量	流入 V_{bin}	mL	10.0	目盛り1mLごとの高さ	流入 h_{in}	mm 31.5
		流出 V_{bout}	mL	10.0		流出 h_{out}	mm 31.5
	断面積	流入 a_{in}	mm^2	31.8	原点の高さ	流入 h_{0in}	mm 0.0
		流出 a_{out}	mm^2	31.8		流出 h_{0out}	mm 0.0

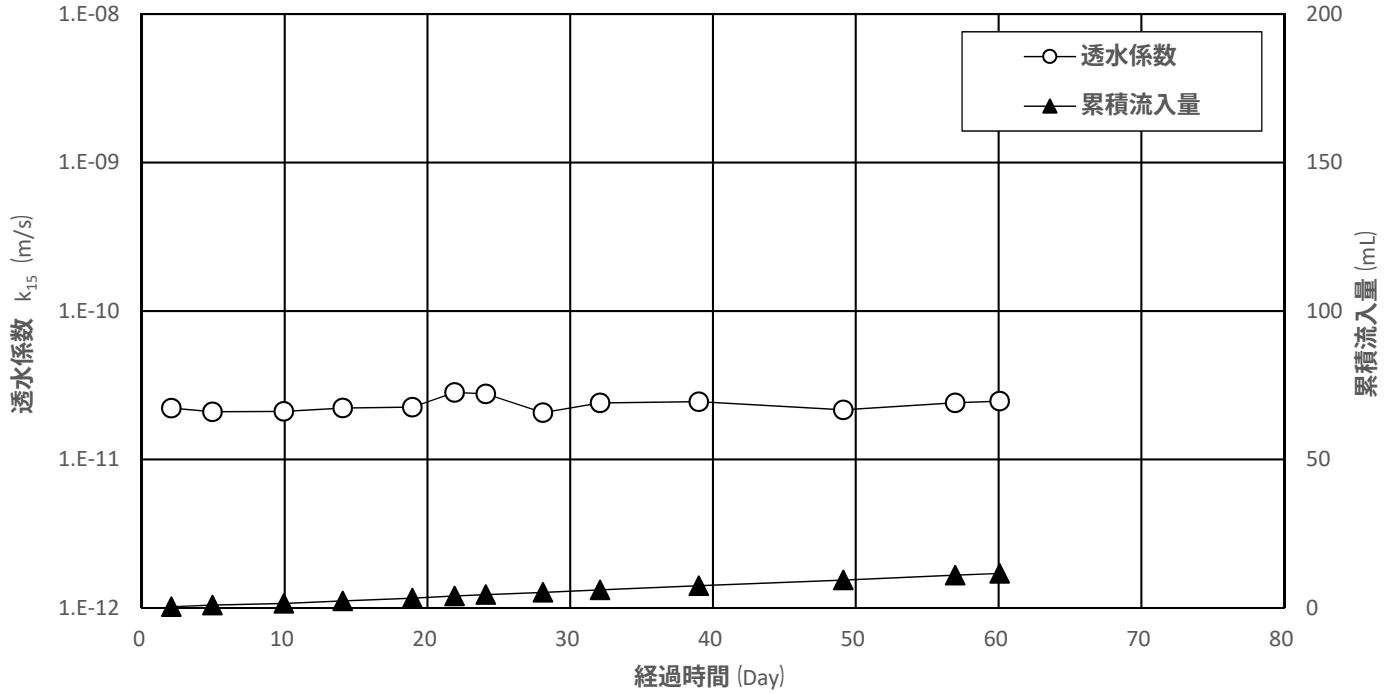
加圧条件	流入側 ΔP_{in} kPa	120	流出側 ΔP_{out} kPa	100	設定動水勾配	45

測定 No.			1	2	3	4	5
測定開始時刻	t_1		2021/11/1 13:50	2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50
測定終了時刻	t_2		2021/11/5 13:50	2021/11/12 11:50	2021/11/22 14:50	2021/11/30 10:50	2021/12/3 13:50
測定時間	t_2-t_1	s	345600	597600	874800	676800	270000
時刻t_1の流入側ビュレットの値	V_{1in}	mL	0.75	1.58	0.01	1.94	3.56
時刻t_1の流出側ビュレットの値	V_{1out}	mL	8.29	7.48	9.48	7.64	6.16
時刻t_2の流入側ビュレットの値	V_{2in}	mL	1.58	2.98	1.94	3.56	4.15
時刻t_2の流出側ビュレットの値	V_{2out}	mL	7.48	6.08	7.64	6.16	5.52
時刻t_1における水頭差	h_1 [1]	mm	2280.6	2229.0	2341.4	2222.7	2125.0
時刻t_2における水頭差	h_2 [2]	mm	2229.0	2140.8	2222.7	2125.0	2086.3
T℃に対する透水係数	k_t [3]	m/s	2.73E-11	2.79E-11	2.45E-11	2.74E-11	2.81E-11
時刻t_1における動水勾配	h_1/L		44.7	43.7	45.9	43.6	41.7
時刻t_2における動水勾配	h_2/L		43.7	42.0	43.6	41.7	40.9
時刻t_1における水温	T_1	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
時刻t_2における水温	T_2	℃	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
測定期間の水温	$T=(T_1+T_2)/2$	℃	20	20	20	20	20
温度補正係数	η_t/η_{15}		0.880	0.880	0.880	0.880	0.880
15℃に対する透水係数	k_{15} [4]	m/s	2.41E-11	2.45E-11	2.16E-11	2.41E-11	2.47E-11
代表値	k_{15}	m/s	2.38E-11				

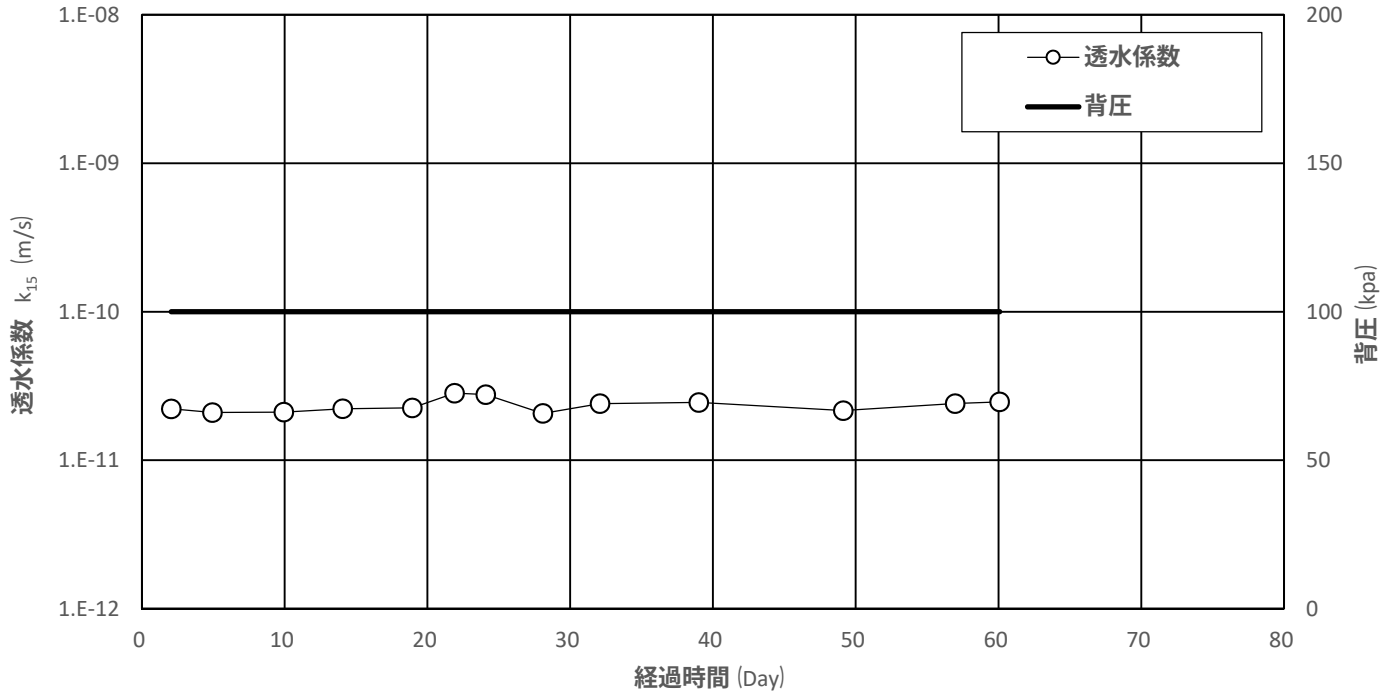
特記事項

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名		試験年月日	2021年10月4日
試料番号	購入砂:ベントナイト=9:1 No.9	試験者	



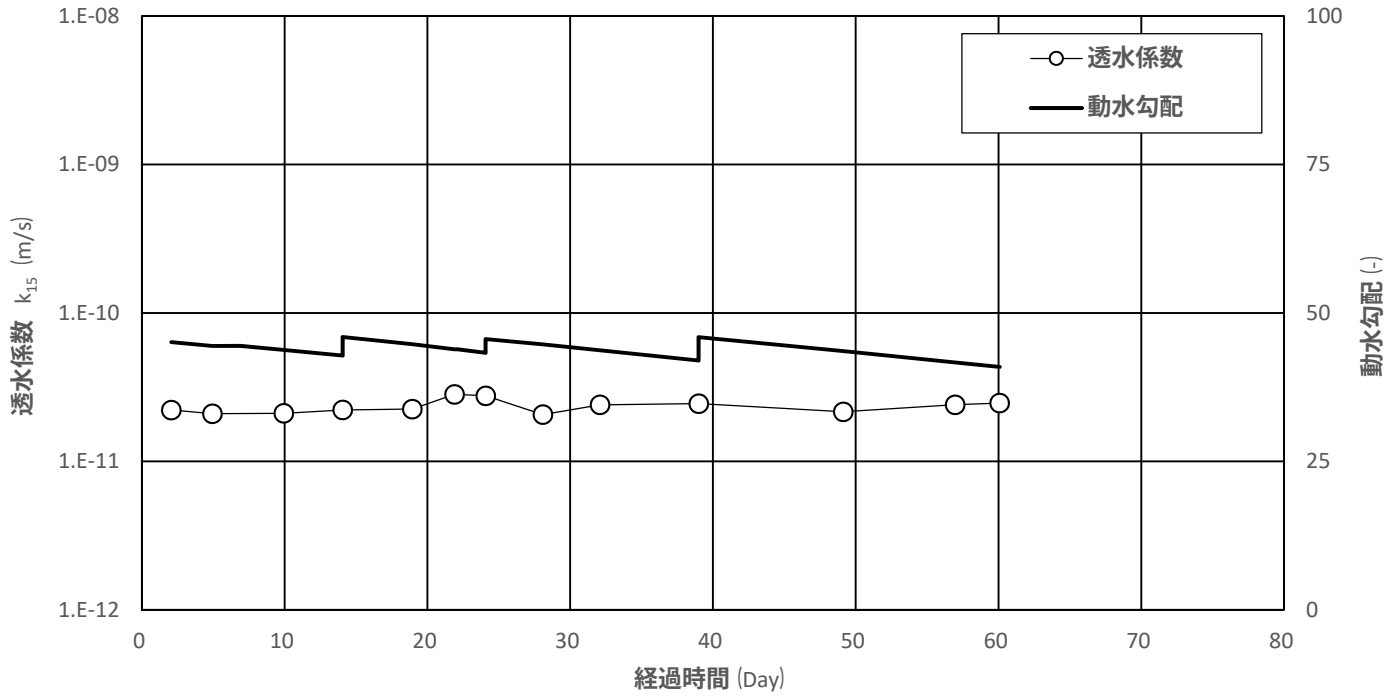
透水係数と累積流入量の経時変化



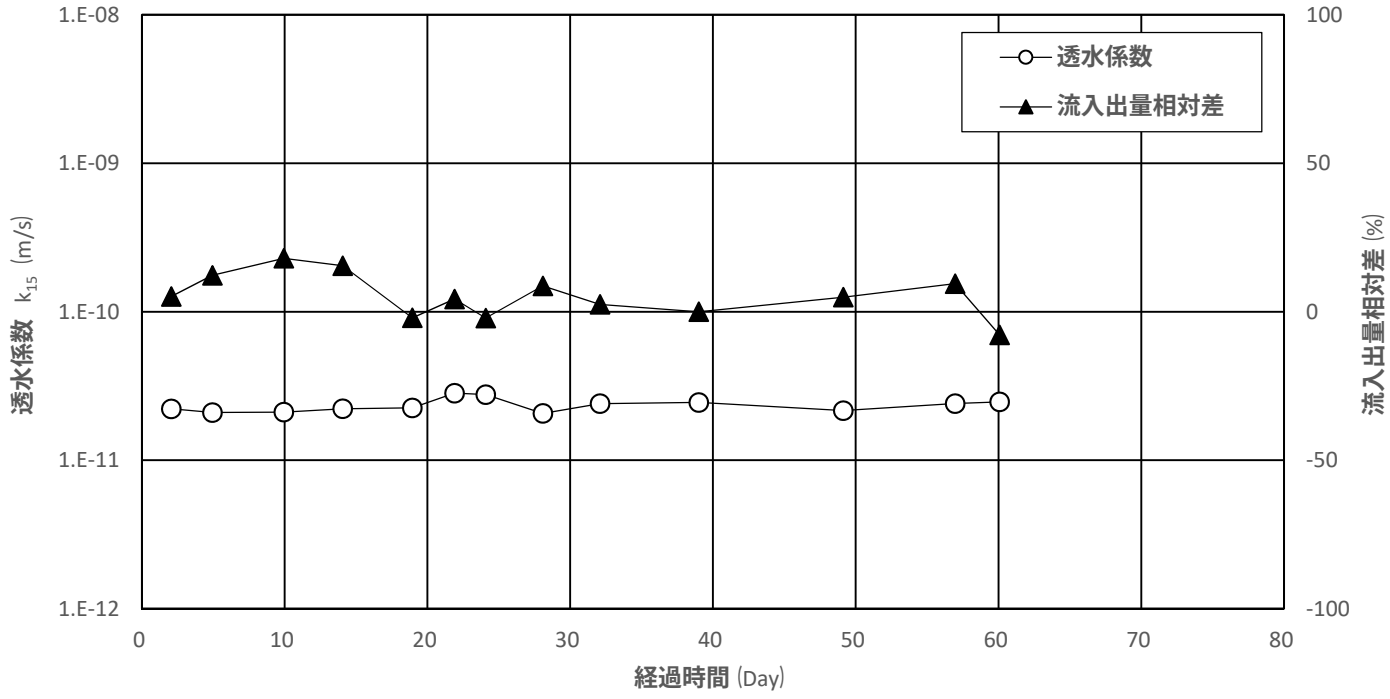
透水係数と背圧の経時変化

JGS 0312	低透水性材料の透水試験(変~~水位~~、背圧負荷型変水位)	

調査件名		試験年月日	2021年10月4日
試料番号	購入砂:ベントナイト=9:1 No.9	試験者	



透水係数と動水勾配の経時変化



透水係数と流入出量相対差の経時変化