令和４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5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－３

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４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 3 年目となる令和 4 年度は、上記の状況を十分に考慮した上で、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、前年度までの検討結果を踏まえて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 1-5
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 4 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 1-7
(1) 初期地圧測定技術の高度化開発 1-7
(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 1-11
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 1-17
1.3.3 情報収集及び委員会の設置・運営 1-20
(1) 情報収集 1-20
(2) 委員会の設置・運営 1-20
第 1 章の参考文献 1-21

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 試験装置の詳細設計 2-1
2.1.1 実施概要 2-1
(1) 目的と概要 2-1
(2) 実績工程 2-3

2.1.2 室内検証試験と装置の設計検討 2-4
(1) 基本設計の内容 2-4
(2) 室内検証試験によるストレインセルの接着に関する検討 2-9
(3) 湧水対策方法の検討 2-60
2.1.3 浅深度現場検証試験と装置の設計検討 2-63
(1) 現場検証試験の概要 2-63
(2) 現場検証試験の方法 2-68
(3) ボーリング掘削結果 2-79
(4) 掘削技術に関する検討と課題 2-90
(5) 孔内洗浄及び孔内観察に関する検討と課題 2-95
(6) ストレインセルの接着に関する検討と課題 2-98
(7) オーバーコアリングコア及び感度試験に関する検討と課題 2-104
2.1.4 試験装置の設計・製作 2-109
(1) ひずみ測定器 2-109
(2) 感度試験装置 2-112
2.1.5 今後の開発計画 2-114
(1) 技術課題及び対策の整理 2-114
(2) 検証試験の計画 2-115
(3) 装置の設計・製作 2-118
2.1 節の参考文献 2-120
2.2 初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討 2-121
2.2.1 検討概要 2-121
(1) 全体計画 2-121
(2) 本年度の検討内容 2-122
2.2.2 原位置試験のシミュレーション 2-124
(1) 検討の目的、課題と対応策 2-124
(2) 三軸圧縮試験のシミュレーション 2-125
(3) 水圧破砕法シミュレーション 2-127
(4) まとめ 2-134
2.2.3 室内検証試験のシミュレーション 2-136
(1) 検討の目的 2-136
(2) オーバーコアリングのシミュレーション 2-137
(3) まとめ 2-152
2.2.4 水圧破砕試験と室内検証試験のシミュレーションの課題と対応策 2-153
(1) 水圧破砕法試験の応力履歴 2-153
(2) オーバーコアリングの応力履歴 2-154

(3) 応力履歴を模擬した試験 2-156
2.2 節の参考文献 2-160

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 調査の経緯と概要 3-1
(1) 令和 2 年度 3-1
(2) 令和 3 年度 3-1
(3) 令和 4 年度 3-2
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 3-4
3.2 令和 4 年度の検討結果 3-5
3.2.1 中深度処分の新規制基準における地下水流動評価に係る要求事項の再整理とそれらへの対応に必要な重要技術項目の抽出及び今後の技術的課題の検討・整理 3-5
(1) 検討の骨子 3-5
(2) 中深度処分の新しい規制基準における事業段階等を考慮した地下水流動評価に関連する要求事項の要点整理 3-5
(3) 中深度処分事業段階と規制要求への対応を想定した主要個別課題検討例（監視測定設備） 3-8
3.2.2 中深度処分の事業展開を考慮した地下水流動・地下水環境特性の調査・評価の重要項目の抽出 3-9
(1) 検討の骨子 3-9
(2) 本調査検討の主旨 3-10
(3) 長期の地質環境・処分場環境の変遷に伴う地下水流動・地下水環境の変化に係る調査・解析評価や不確実性評価 3-10
(4) 本調査検討において抽出した重要項目と事業展開の中での位置づけの全体像イメージ 3-11
3.3 地下水流動評価に関わる重要項目に関する既往技術の調査検討と課題の整理 3-12
3.3.1 地下施設レイアウトの設計に関わる地下水流動評価 3-13
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-13
(2) 代表的な参考事例の概要 3-13
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-13
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-14

(2) 代表的な参考事例の概要 3-14
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-15
3.3.2 坑道の掘削影響～埋戻し・再冠水による地下水流動状況の変遷影響評価 3-16
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-16
(2) 代表的な参考事例の概要 3-16
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-16
3.3.3 地下水年代測定を考慮した地下水流動評価の高度化・確証 3-17
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-17
(2) 代表的な参考検討事例の概要 3-17
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-18
3.3.4 地質地下水環境長期変動と不確実性の評価 3-19
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-19
(2) 代表的な参考検討事例の概要 3-19
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-21
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-22
(2) 代表的な参考検討事例の概要 3-22
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-27
3.3.5 地形・地質及び地下水流動の長期的状態変化等による不確実性を考慮した長期安全性の信頼性確保の考え方の整理 3-27
3.4 規制基準への対応を考慮した監視測定設備と監視測定モニタリングに関する調査検討 3-28
3.4.1 監視測定設備に関わる規制要求と課題の整理 3-28
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-28
(2) 代表的な参考検討事例の概要 3-29
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-30
3.4.2 監視測定設備を用いた監視測定モニタリング等による安全性確認の考え方と課題 3-30
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-30
(2) 代表的な参考検討事例の概要 3-30
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-31
3.4.3 監視測定設備の概念検討 3-32
(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等） 3-32
(2) 代表的な参考検討事例の概要と課題の整理 3-32
(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例 3-34
3.5 技術マップの概略的取りまとめ 3-35
3.5.1 主旨と経緯 3-35

3.5.2 技術マップの主要なポイント 3-35
(1) 技術マップで抽出した主要な技術項目 3-35
(2) 抽出した重要技術項目における主な技術要素と課題 3-38
3.6 まとめ（令和 4 年度までの調査検討結果と技術課題の整理） 3-43
第 3 章の参考文献 3-45

第 4 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 入力地震動設定の検討 4-6
(1) 概要 4-6
(2) 減衰定数の周波数依存性の考慮 4-9
(3) 逆解析による地盤物性の同定 4-16
(4) 加速度振幅の補正による入力地震動設定方法の検討 4-36
4.1.3 まとめ 4-77
4.1 節の参考文献 4-78
4.2 地震動観測 4-79
4.2.1 検討概要 4-79
4.2.2 地下の地震計計測システム 4-79
4.2.3 地表面の地震計計測システム 4-84
4.2.4 地震計メンテナンス・計測データ回収 4-87
(1) メンテナンス方法 4-87
(2) データ回収方法 4-89
(3) データ整理方法 4-90
(4) 地震動データ取得一覧 4-91
(5) 地震動データ 4-93
(6) 計測坑 C の地震動データ 4-128
(7) 地表と地下の最大加速度の比較 4-134
(8) 周波数特性の分析 4-135

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 規制等の追加調査 5-1
5.2 設計プロセスにおける人工バリアの設計に係る選択肢に関する検討 5-5
5.2.1 検討の背景と目的 5-5
5.2.2 検討フローの策定 5-5
5.2.3 安全機能の整理 5-10
(1) 既往検討の調査 5-10
(2) 安全機能の相関作成 5-10
5.2.4 人工バリアの設計等に係る選択肢の設定に関する検討 5-11
(1) 検討方法 5-11
(2) 天然バリア、人工バリアに係る代表的因子の抽出 5-12
(3) 感度解析 5-18
(4) 安全機能の相関関係の再整理 5-36
(5) 人工バリアの設計等に係る選択肢の設定 5-40
5.2.5 まとめ 5-41
5.1 節、5.2 節の参考文献 5-42
5.3 長期安全性の観点からの技術オプションの整理と感度解析モデルの作成 5-43
5.3.1 長期安全性の観点からの技術オプション 5-43
(1) 処分場設計に係る手順 5-43
(2) 安全評価の観点からの技術オプションの定義案 5-45
(3) 安全規制の方針から予想される技術オプション 5-48
(4) 線量を低減させる設計条件 5-60
(5) 地質環境への対応 5-62
5.3.2 感度解析モデルの開発 5-63
(1) モデル構築の目的 5-63
(2) 核種インベントリーと評価対象核種 5-64
(3) 施設浸透水量の具体化 5-69
5.3.3 まとめ 5-95
5.3 節の参考文献 5-96

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 6-3

6.2.1 令和 4 年度の実施計画と実施工程 6-3
6.2.2 令和 4 年度の実施内容 6-6
(1) ベントナイト系材料の透水特性データの取得 6-6
(2) 室内締固め-透水実験（実験 A 及び実験 B） 6-7
(3) 実体顕微鏡撮影による締固め土の微視的（粒子間隙）構造観察（実験 C） 6-11
(4) 中性子イメージング実験(実験 D) 6-12
(5) 遮水性発現メカニズム解明のための力学試験及び化学実験（実験 E） 6-14
6.3 実験結果 6-17
6.3.1 ベントナイト系材料の透水特性データの取得 6-17
(1) 室内締固め～透水試験（実験 A,B） 6-17
(2) 実体顕微鏡による土粒子間隙構造観察（実験 C） 6-34
(3) 中性子イメージング実験（実験 D） 6-37
(4) 遮水性発現メカニズム解明のための力学・化学実験（実験 E） 6-45
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 6-54
(1) 締固め土の透水係数評価式の構築と影響因子の分析（実験 A,B） 6-55
(2) 実体顕微鏡観察結果に対する画像解析及び透水特性との関係性検討(実験 C) 6-64
(3) 中性子イメージング実験結果によるメカニズムの解釈(実験 D) 6-69
(4) 他の力学・化学実験によるメカニズムの確認(実験 E) 6-76
(5) ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する現時点での仮説 6-79
6.4 現時点での技術的課題と今後の方策（研究計画の見直しと修正） 6-81
6.4.1 これまでに得られた知見と技術的課題 6-81
6.4.2 研究の現状と今後の方向性について 6-84
6.5 まとめ 6-89
(1) 【実験 A】 6-89
(2) 【実験 B】 6-89
(3) 【実験 C】 6-89
(4) 【実験 D】 6-89
(5) 【遮水性発現メカニズムの評価】 6-90
第 6 章の参考文献 6-91

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 室内検証試験と装置の設計検討（第２章 2.1.2 参照）に係る試験データ

添付資料-2 浅深度現場検証試験と装置の設計検討（第２章 2.1.3 参照）に係るボーリング調査結果

添付資料-3 浅深度現場検証試験と装置の設計検討（第２章 2.1.3 参照）に係る現場記録写真

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　円錐孔壁ひずみ法の概要図 1-7
図 1.3-2　接着剤注入装置による円錐孔壁への接着剤の注入手順 1-8
図 1.3-3　オーバーコアリング時のひずみ経時変化の比較 1-9
図 1.3-4　事業展開と規制要求を考慮した地下水流動評価に係る重要事項の抽出・展開イメージ 1-10
図 1.3-5　地震計①における解析結果と観測結果の比較 1-12
図 1.3-6　感度解析のモデルの考え方 1-13
図 1.3-7　感度解析結果の一例 1-13
図 1.3-8　処分場の設計に係る作業フロー案 1-15
図 1.3-9　坑道の区画分離とモデル化の概念 1-17
図 1.3-10　実験 A（1Ec 締固め-透水試験）の結果 1-19
図 1.3-11　画像解析の手順 1-20

図 2.1-1　円錐孔壁ひずみ法の概要図 2-2
図 2.1-2　実績工程 2-3
図 2.1-3 円錐孔壁ひずみ法の測定手順（その 1） 2-4
図 2.1-4 円錐孔壁ひずみ法の測定手順（その 2） 2-5
図 2.1-5　室内試験用ストレインセルの設計図 2-10
図 2.1-6　室内試験用ストレインセル 2-10
図 2.1-7　接着剤注入装置による円錐孔壁への接着剤の注入手順 2-11
図 2.1-8　接着剤注入装置の設計図 2-12
図 2.1-9　接着剤注入装置とその性能確認試験状況 2-12
図 2.1-10　接着剤注入装置の孔内への挿入及び本体と栓の分離に必要な荷重の確認試験結果 2-13
図 2.1-11　接着剤注入装置下端の栓の挿入・引き抜きに必要な荷重の確認試験結果 2-13
図 2.1-12　 HIC 接着剤供試体 2-15
図 2.1-13　HIC 接着剤供試体の非破壊一軸圧縮試験によるヤング率とポアソン比の経時変化 2-15
図 2.1-14　配合比の異なるエポキシ樹脂接着剤供試体 2-16
図 2.1-15　複数配合のエポキシ樹脂接着剤供試体の一軸圧縮試験で求めたヤング率 2-16

図 2.1-16　大谷石の円錐孔へのストレインセル接着後の断面（HIC 接着剤） 2-17
図 2.1-17　軽石凝灰岩の接着部分を露出させ表面をコーティングした状況（HIC 接着剤）
..... 2-18
図 2.1-18　水中でのストレインセルの接着状況..... 2-18
図 2.1-19　ストレインセル接着時のひずみ変化（軽石凝灰岩 RO-6、HIC 接着剤）2-19
図 2.1-20　大谷石の接着部分を露出させた状況（エポキシ樹脂接着剤） 2-20
図 2.1-21　軽石凝灰岩の接着部分を露出させた状況（エポキシ樹脂接着剤） 2-21
図 2.1-22　三軸載荷試験の様子と概念図 2-22
図 2.1-23　養生開始 1 日後の三軸載荷試験結果（HIC 接着剤と軽石凝灰岩 RO-6 を使
用） 2-24
図 2.1-24　軽石凝灰岩ブロック RO-6 の様子（載荷前） 2-25
図 2.1-25　三軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と軽石凝灰岩 RO-
6 を使用） 2-25
図 2.1-26　RO-6 の孔内に接着したストレインセルの傾き具合 2-26
図 2.1-27　HIC 接着剤を用いた試験に使用した大谷石ブロックの様子（載荷前）. 2-26
図 2.1-28　養生開始 1 日後の二軸載荷試験結果（HIC 接着剤と大谷石を使用） 2-27
図 2.1-29　二軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と大谷石を使用）
..... 2-28
図 2.1-30　養生開始 1 日後の三軸載荷試験結果（HIC 接着剤と本小松を使用） 2-29
図 2.1-31　本小松ブロックの様子（載荷前） 2-30
図 2.1-32　三軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と本小松を使用）
..... 2-30
図 2.1-33　軽石凝灰岩ブロック RO-1 の様子（載荷前） 2-31
図 2.1-34　養生開始 1 日後の三軸載荷試験結果（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩 RO-
1 を使用） 2-32
図 2.1-35　三軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝
灰岩を使用） 2-33
図 2.1-36　 エポキシ樹脂接着剤を用いた試験に使用した大谷石ブロックの様子（載荷
前） 2-34
図 2.1-37　養生開始 4 日後の三軸載荷試験結果（エポキシ樹脂接着剤と大谷石を使用）
..... 2-35
図 2.1-38　三軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（エポキシ樹脂接着剤と大谷石
を使用） 2-36
図 2.1-39　ストレインセルの貼付状況の観察結果 2-36
図 2.1-40　ストレインセルを接着した岩石ブロックのオーバーコアリング状況 2-37
図 2.1-41　室内でのオーバーコアリングに用いた掘削ツールス一覧..... 2-38

図 2.1-42　RO-6 ブロックからオーバーコアリングしたコア（HIC 接着剤使用） .. 2-38
図 2.1-43　応力解放時のひずみ変化(HIC 接着剤と軽石凝灰岩 RO-6、養生開始 2 日後) 2-39
図 2.1-44　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と RO-6 を使用） 2-40
図 2.1-45　応力解放時のひずみ変化（HIC 接着剤と大谷石、養生開始 23 日後） .. 2-41
図 2.1-46　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と大谷石を使用） 2-42
図 2.1-47　本小松ブロックからオーバーコアリングしたコア（HIC 接着剤使用） . 2-43
図 2.1-48　応力解放時のひずみ変化（HIC 接着剤と本小松、養生開始 21 日後） .. 2-44
図 2.1-49　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と本小松を使用） 2-45
図 2.1-50　RO-1 ブロックからオーバーコアリングしたコア（エポキシ樹脂接着剤使用） 2-45
図 2.1-51　応力解放時のひずみ変化（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩 RO-1、養生開始 2 日後） 2-46
図 2.1-52　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩 RO-1 を使用） 2-47
図 2.1-53　大谷石ブロックからオーバーコアリングしたコア（エポキシ樹脂接着剤使用） 2-47
図 2.1-54　応力解放時のひずみ変化(エポキシ樹脂接着剤と大谷石、養生開始 19 日後) 2-48
図 2.1-55　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（エポキシ樹脂接着剤と大谷石を使用） 2-49
図 2.1-56　感度試験状況..... 2-50
図 2.1-57　感度試験の概念図..... 2-50
図 2.1-58　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力－ひずみ測定結果（HIC 接着剤と軽石凝灰岩 RO-6 を使用、養生開始 3 日後） 2-53
図 2.1-59　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力－ひずみ測定結果（HIC 接着剤と大谷石を使用、養生開始 23 日後） 2-54
図 2.1-60　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力－ひずみ測定結果（HIC 接着剤と本小松を使用、養生開始 21 日後） 2-55
図 2.1-61　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力－ひずみ測定結果（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩 RO-1 を使用、養生開始 2 日後） 2-56
図 2.1-62　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力－ひずみ測定結果（エポキシ樹脂接着剤と大谷石を使用、養生開始 19 日後） 2-57
図 2.1-63　湧水影響確認試験の概要図..... 2-60
図 2.1-64　湧水影響確認試験の実施状況 2-61
図 2.1-65　円錐孔底の状態（接着剤注入前） 2-61

図 2.1-66　湧水を模擬した環境下での接着剤の様子 2-62
図 2.1-67　調査坑と試験孔掘削位置の概要..... 2-65
図 2.1-68　試験孔掘削位置図..... 2-66
図 2.1-69　第 3 拡幅部における試験孔掘削位置図..... 2-67
図 2.1-70　資材荷降ろし概要図 2-68
図 2.1-71　足場及びやぐらの仮設概要図（単管パイプ三脚やぐら） 2-69
図 2.1-72　ボーリング作業時のボーリング足場、資材及びトラックの配置 2-70
図 2.1-73　地下水の湧水圧の確認概要..... 2-70
図 2.1-74　現場試験の作業手順 2-71
図 2.1-75　削孔の概要 2-72
図 2.1-76　ハイドロリックフィード型ボーリングマシン 2-73
図 2.1-77　φ116mm 削孔器具（コアチューブ）の概要..... 2-73
図 2.1-78　パイロットボーリング用コアバレル（コアチューブ）の概要..... 2-74
図 2.1-79　試験孔掘削作業の流れ..... 2-75
図 2.1-80　ボーリングコア箱の整理方法の例..... 2-76
図 2.1-81　孔閉塞の計画..... 2-78
図 2.1-82　試験孔掘削位置の概要..... 2-79
図 2.1-83　試験孔掘削位置（地質平面図） 2-80
図 2.1-84　試験孔掘削位置（調査坑地質断面図第 3 拡幅部付近） 2-80
図 2.1-85　試験孔掘削位置及び地質断面図..... 2-83
図 2.1-86　TI1-500(1)孔　ボーリングコア写真（深度 0.00m~6.00m） 2-84
図 2.1-87　TI1-500(2)孔　ボーリングコア写真（深度 0.00m~10.00m） 2-85
図 2.1-88　試験孔の掘削に伴う孔内水位の変化状況 2-87
図 2.1-89　試験孔の孔閉塞構造図..... 2-88
図 2.1-90　φ116mm 孔掘削用フラットビットの設計図..... 2-90
図 2.1-91　製作した φ116mm 孔掘削用のフラットビットとセジメントチューブ ... 2-91
図 2.1-92　φ116mm 孔の孔底状況（深度 4.80m） 2-91
図 2.1-93　φ116mm 孔用センタリングガイドケーシングの設計図 2-92
図 2.1-94　φ116mm 孔用センタリングガイド..... 2-92
図 2.1-95　孔径 56mm 孔掘削用リーマの設計図..... 2-93
図 2.1-96　試験孔掘削ツールス 2-93
図 2.1-97　パイロットボーリング掘削ツールスの設計図 2-94
図 2.1-98　孔内カメラによる円錐孔壁観察結果（赤矢印の先は北方向を指す） 2-96
図 2.1-99　OBI2 ボアホールカメラ 2-96
図 2.1-100　孔内観察用カメラの先端パーツ..... 2-97
図 2.1-101　円錐孔壁のモニタリング画像の例..... 2-97

図 2.1-102　現場試験で使用した接着剤注入装置（錘を装置上端に接続） 2-98
図 2.1-103　接着剤注入装置の孔内挿入状況..... 2-98
図 2.1-104　浅深度現場検証試験用ひずみ計貼付装置の設計図 2-101
図 2.1-105　浅深度現場検証試験用ひずみ計貼付装置..... 2-102
図 2.1-106　切り離し部とシェアピン 2-102
図 2.1-107　1 深度目のストレインセルの接着状況..... 2-103
図 2.1-108　2 深度目のストレインセルの接着状況..... 2-103
図 2.1-109　試験時の孔内状況とオーバーコアリングした掘削コア（1 深度目） .. 2-105
図 2.1-110　試験時の孔内状況とオーバーコアリングした掘削コア（2 深度目） .. 2-106
図 2.1-111　感度試験の実施状況..... 2-107
図 2.1-112　2 深度目でオーバーコアリングしたコアを用いた感度試験結果（養生開始 2 日後） 2-108
図 2.1-113　ひずみ測定器の設計図..... 2-109
図 2.1-114　ひずみ測定器の内部写真 2-110
図 2.1-115　ひずみ出力確認に用いた回路の概要.....2-111
図 2.1-116　ひずみ計の動作チェック状況 2-112
図 2.1-117　感度試験装置全体（左図）と周圧載荷装置（右図） 2-113
図 2.1-118　感度試験の概念図.....2-113
図 2.1-119　二重解放コア変形法の概念.....2-118
図 2.1-120　新たなひずみ計貼付装置の設計図 2-119
図 2.2-1　円錐孔壁ひずみ法..... 2-121
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.. 2-122
図 2.2-3　水圧破砕法試験結果 2-124
図 2.2-4　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 2-124
図 2.2-5　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） 2-125
図 2.2-6　三軸圧縮試験シミュレーションの解析モデル（3 次元） 2-126
図 2.2-7　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 2-126
図 2.2-8　破壊形状の比較 2-127
図 2.2-9　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)..... 2-128
図 2.2-10　発生クラック 2-128
図 2.2-11　水圧破砕法試験シミュレーションのモデル概要 2-129
図 2.2-12　解析モデル（3 次元） 2-129
図 2.2-13　水圧破砕シミュレーション結果（破砕圧） 2-131
図 2.2-14　水圧破砕シミュレーション結果（クラック分布（cb＝400N） 2-132
図 2.2-15　水圧破砕シミュレーション結果（クラック分布（cb＝340N） 2-133

図 2.2-16　圧裂引張試験結果（参照データの取得、軽石凝灰岩） 2-135
図 2.2-17　三軸シミュレーションの発生クラック密度（令和 3 年度検討結果） ... 2-136
図 2.2-18　岩盤ブロックとオーバーコアリング試験の概要..... 2-137
図 2.2-19　解析モデル（全体図） 2-138
図 2.2-20　解析モデル（平面図） 2-138
図 2.2-21　解析モデル（断面図） 2-138
図 2.2-22　岩石ブロック試験での載荷状態推移..... 2-139
図 2.2-23　微視クラック発生分布（断面図） 2-141
図 2.2-24　微視クラック発生分布（横断面図／オーバーコアリング開始前） 2-142
図 2.2-25　微視クラック発生分布（横断面図／オーバーコアリング終了時） 2-143
図 2.2-26　微視クラック累積数（オーバーコアリング時） 2-144
図 2.2-27　微視クラック発生数（オーバーコアリング時） 2-144
図 2.2-28　微視クラック抽出領域..... 2-145
図 2.2-29　三軸圧縮シミュレーションのクラック発生密度..... 2-146
図 2.2-30　球領域で出力..... 2-147
図 2.2-31　ひずみ・応力抽出位置..... 2-149
図 2.2-32　オーバーコアリング時のひずみ経時変化の比較..... 2-149
図 2.2-33　周方向応力 σθ（シミュレーション結果） 2-150
図 2.2-34　応力履歴模式図（水圧破砕法試験） 2-154
図 2.2-35　応力履歴模式図（モール円表示、水圧破砕法試験） 2-154
図 2.2-36　応力履歴模式図（オーバーコアリング） 2-155
図 2.2-37　応力履歴模式図（モール円表示、オーバーコアリング） 2-155
図 2.2-38　オーバーコアリングシミュレーションでの応力履歴..... 2-156
図 2.2-39　応力経路模擬試験（三軸圧縮試験）の応力経路（冨田他、2007） 2-157
図 2.2-40　軟岩の破壊規準 2-158
図 2.2-41　試験結果と破壊規準（冨田、2007） 2-159

図 3.1-1　本調査研究の全体検討フロー 3-4
図 3.2-1　監視測定設備に関する規制要求の考え方の要点整理..... 3-8
図 3.2-2　事業展開と規制要求を考慮した地下水流動評価に係る重要事項の抽出・展開イメージ..... 3-12
図 3.3-1　地下施設設置可能領域の設定に関わる地下水流動解析の検討事例(NUMO) 3-14
図 3.3-2　処分坑道の方向の決定に関わる地下水流動解析の検討事例(NUMO） 3-15
図 3.3-3　再冠水試験～坑道埋め戻しに伴う地下水環境の回復挙動の予測解析例 (JAEA) 3-17

図 3.3-4　地下水年代を考慮した地下水流動・物質移行の解析と広域地下水流動評価（JAEA／電中研） 3-18
図 3.3-5　隆起・侵食に係る調査・評価フローの検討例（NUMO） 3-21
図 3.3-6a　サイト選定調査段階における不確実性の検討のフローと種類の考え方（NUMO） 3-23
図 3.3-7　地下水流動状態の長期変動性評価（JAEA） 3-24
図 3.3-8a　地下水流動状態の長期変動性評価に関する統合化データフロー（JAEA、2018） 3-26
図 3.3-9　事業展開と不確実性評価を考慮した長期的な安全確保の確認方法の考え方 3-28
図 3.4-1　監視測定設備に関する規制要求事項と監視測定モニタリングの構成 3-30
図 3.4-2　事業展開に応じた監視測定設備による監視測定モニタリングの反映先の考え方（案） 3-31
図 3.4-3　監視測定設備の設置イメージと監視測定モニタリングの概念例 3-33
図 3.4-4　監視測定モニタリング技術の高度化案の例（光ファイバー技術の高度化適用） 3-33

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 4 年度の検討内容の位置づけ 4-4
図 4.1-3　地震計の設置位置..... 4-6
図 4.1-4　地震応答解析の流れ（粘性境界を※で追記する） 4-7
図 4.1-5　地震計①における解析結果（2 次元地震応答解析）と観測結果の比較 4-7
図 4.1-6　引戻し解析手法の改良項目（案） 4-8
図 4.1-7　1 次元モデルによる引戻し解析 4-10
図 4.1-8　SHAKE における減衰の周波数依存の模式図..... 4-10
図 4.1-9　1 次元モデルによる引戻し解析 4-12
図 4.1-10　地表面の観測データ（2021 年 12 月 6 日、y 方向） 4-12
図 4.1-11　引戻し波形の比較（1.0 倍） 4-14
図 4.1-12　表層（PH 層）のせん断ひずみレベル（1.0 倍） 4-14
図 4.1-13　引戻し波形の比較（100 倍） 4-15
図 4.1-14　表層（PH 層）のせん断ひずみレベル（100 倍） 4-15
図 4.1-15　地表に設置した地震計⑤の設置環境..... 4-17
図 4.1-16　初期せん断剛性と最大加速度の深度分布（2021 年 12 月 6 日） 4-18
図 4.1-17　表層の初期せん断剛性をパラメータとした最大加速度の深度分布..... 4-18
図 4.1-18　地震計基礎の埋設の条件と構造図（気象庁基準） 4-20

図 4.1-19　地震計⑤（地表面、2022 年 3 月 16 日） 4-21
図 4.1-20　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後、2022 年 3 月 16 日） 4-21
図 4.1-21　地震計⑤（地表）と地震計④（地下）の平面位置の関係..... 4-22
図 4.1-22　地震計⑤と地震計④の位置の 1 次元モデル..... 4-23
図 4.1-23　地震計⑤ラインのモデルによるモデルの一本化について..... 4-25
図 4.1-24　地層境界間の伝達関数..... 4-30
図 4.1-25　表層の初期せん断剛性をパラメータとした引戻し解析 4-31
図 4.1-26　地震計⑤の加速度振幅を調整した引戻し解析の流れ..... 4-38
図 4.1-27　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/2/17） .. 4-41
図 4.1-28　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/2/17） .. 4-42
図 4.1-29　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/2/17） .. 4-43
図 4.1-30　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/2/17） .. 4-44
図 4.1-31　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/3/16） .. 4-46
図 4.1-32　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/3/16） .. 4-47
図 4.1-33　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/3/16） .. 4-48
図 4.1-34　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/3/16） .. 4-49
図 4.1-35　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/3/18） .. 4-51
図 4.1-36　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/3/18） .. 4-52
図 4.1-37　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/3/18） .. 4-53
図 4.1-38　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/3/18） .. 4-54
図 4.1-39　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/4/28） .. 4-56
図 4.1-40　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/4/28） .. 4-57
図 4.1-41　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/4/28） .. 4-58
図 4.1-42　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/4/28） .. 4-59
図 4.1-43　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/5/23） .. 4-61
図 4.1-44　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/5/23） .. 4-62
図 4.1-45　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/5/23） .. 4-63
図 4.1-46　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/5/23） .. 4-64
図 4.1-47　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/6/10） .. 4-66
図 4.1-48　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/6/10） .. 4-67
図 4.1-49　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/6/10） .. 4-68
図 4.1-50　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/6/10） .. 4-69
図 4.1-51　解析結果と観測結果（α=1.0～0.5）の最大加速度の比較..... 4-70
図 4.1-52　観測結果に対する解析結果の最大加速度の比率..... 4-71
図 4.1-53　比率（解析結果／観測結果）と補正値 α の関係..... 4-71
図 4.1-54　伝達関数（地震計⑤/地震計④、y 方向） 4-72

図 4.1-55　地震応答解析の流れ 4-73
図 4.1-56　解析結果と観測結果の比較（地震計①位置、2022/3/16） 4-76
図 4.2-1　地下の地震計の設置位置平面図（全体）と設置状況..... 4-80
図 4.2-2　地震計の設置位置（試験施設） 4-81
図 4.2-3　計測設備の配置 4-83
図 4.2-4　RWMC 現場計測室　機器設置のネットワーク図 4-83
図 4.2-5　地震計の設置位置平面図（地表面）と設置状況 4-84
図 4.2-6　ソーラーパネルの設置状況（地表面） 4-85
図 4.2-7　メンテナンス時の草刈りと除雪の範囲 4-88
図 4.2-8　KiK-net 六ヶ所のデータの方位補正..... 4-90
図 4.2-9　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-93
図 4.2-10　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-93
図 4.2-11　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-94
図 4.2-12　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-94
図 4.2-13　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ..... 4-95
図 4.2-14　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-95
図 4.2-15　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-96
図 4.2-16　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-96
図 4.2-17　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-97
図 4.2-18　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-97
図 4.2-19　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ..... 4-98
図 4.2-20　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-98
図 4.2-21　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-99
図 4.2-22　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-99
図 4.2-23　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-100
図 4.2-24　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-100
図 4.2-25　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ..... 4-101
図 4.2-26　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-101
図 4.2-27　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-102
図 4.2-28　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-102
図 4.2-29　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-103
図 4.2-30　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-103
図 4.2-31　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ..... 4-104
図 4.2-32　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ 4-104
図 4.2-33　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-105
図 4.2-34　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ 4-105

図 4.2-35　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-106
図 4.2-36　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-106
図 4.2-37　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ..... 4-107
図 4.2-38　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ..... 4-107
図 4.2-39　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-108
図 4.2-40　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ..... 4-108
図 4.2-41　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-109
図 4.2-42　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-109
図 4.2-43　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ.....4-110
図 4.2-44　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ.....4-110
図 4.2-45　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-111
図 4.2-46　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 4.2-47　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ.....4-112
図 4.2-48　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-112
図 4.2-49　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ.....4-113
図 4.2-50　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ.....4-113
図 4.2-51　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-114
図 4.2-52　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ.....4-114
図 4.2-53　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ.....4-115
図 4.2-54　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-115
図 4.2-55　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ.....4-116
図 4.2-56　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ.....4-116
図 4.2-57　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-117
図 4.2-58　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ.....4-117
図 4.2-59　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ.....4-118
図 4.2-60　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-118
図 4.2-61　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ.....4-119
図 4.2-62　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ.....4-119
図 4.2-63　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-120
図 4.2-64　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ..... 4-120
図 4.2-65　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-121
図 4.2-66　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-121
図 4.2-67　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ..... 4-122
図 4.2-68　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ..... 4-122
図 4.2-69　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-123
図 4.2-70　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ..... 4-123

図 4.2-71　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-124
図 4.2-72　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-124
図 4.2-73　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ..... 4-125
図 4.2-74　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ..... 4-125
図 4.2-75　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ 4-126
図 4.2-76　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ..... 4-126
図 4.2-77　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ 4-127
図 4.2-78　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ 4-127
図 4.2-79　計測坑 C　地震動データ 4-128
図 4.2-80　計測坑 C　地震動データ 4-128
図 4.2-81　計測坑 C　地震動データ 4-129
図 4.2-82　計測坑 C　地震動データ 4-129
図 4.2-83　計測坑 C　地震動データ 4-130
図 4.2-84　計測坑 C　地震動データ 4-130
図 4.2-85　計測坑 C　地震動データ 4-131
図 4.2-86　計測坑 C　地震動データ 4-131
図 4.2-87　計測坑 C　地震動データ 4-132
図 4.2-88　計測坑 C　地震動データ 4-132
図 4.2-89　計測坑 C　地震動データ 4-133
図 4.2-90　計測坑 C　地震動データ 4-133
図 4.2-91　六ヶ所村尾駮の震度２以上の地震の震央位置 4-135
図 4.2-92　各地震の周波数特性 4-136
図 4.2-93　No.4 の地震の周波数特性..... 4-137
図 4.2-94　No.9 と No.10 の地震の震央の断面図 4-137

図 5.1-1　中深度処分の廃棄物埋設施設のイメージ 5-2
図 5.2-1　設計プロセス..... 5-6
図 5.2-2　段階的な検討のイメージ..... 5-8
図 5.2-3　バリア構成導出の考え方 5-9
図 5.2-4　設計プロセスにおける人工バリアの設計等に係る選択肢に関する検討フロー
..... 5-9
図 5.2-5　コロイドろ過能を発揮する緩衝材密度とケイ砂混合率の関係..... 5-15

図 5.2-6　自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度と緩衝材厚さの関係
..... 5-15
図 5.2-7　ガス透過後の透水係数の変化率と有効粘土密度の関係 5-16

図 5.2-8　核種の移行経路の考え方 5-23
図 5.2-9　領域①の移行距離における感度解析結果（ケース①） 5-24
図 5.2-10　領域①の透水係数における感度解析結果（ケース①） 5-25
図 5.2-11　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-12（m^2/s））における感度解析結果（ケース①） 5-25
図 5.2-12　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-9（m^2/s））における感度解析結果（ケース①） 5-26
図 5.2-13　人工バリアの厚さにおける感度解析結果（ケース①） 5-26
図 5.2-14　領域①の移行距離における感度解析結果（ケース②） 5-27
図 5.2-15　領域①の透水係数における感度解析結果（ケース②） 5-28
図 5.2-16　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-12（m^2/s））における感度解析結果（ケース②） 5-28
図 5.2-17　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-9（m^2/s））における感度解析結果（ケース②） 5-29
図 5.2-18　人工バリアの厚さにおける感度解析結果（ケース②） 5-29
図 5.2-19　領域①の移行距離における感度解析結果（ケース③） 5-30
図 5.2-20　領域①の透水係数における感度解析結果（ケース③） 5-30
図 5.2-21　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-12（m^2/s））における感度解析結果（ケース③） 5-31
図 5.2-22　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-9（m^2/s））における感度解析結果（ケース③） 5-31
図 5.2-23　人工バリアの厚さにおける感度解析結果（ケース③） 5-32
図 5.2-24　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-10m/s）（ケース④） 5-33
図 5.2-25　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-9m/s）（ケース④） 5-34
図 5.2-26　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-8m/s）（ケース④） 5-34
図 5.2-27　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-7m/s）（ケース④） 5-35
図 5.2-28　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-6m/s）（ケース④） 5-35
図 5.2-29　高透水性母岩で想定される人工バリア構成のイメージ 5-40
図 5.2-30　低透水性母岩で想定される人工バリア構成のイメージ 5-40
図 5.3-1　処分場の設計に係る作業フロー案 5-44
図 5.3-2　処分場開発のプロセス 5-46

図 5.3-3　令和 2 年度の検討例 5-47
図 5.3-4　BWR 運転廃棄物（放射化金属）及び解体廃棄物の放射化計算フロー 5-65
図 5.3-5　総インベントリーの比較（1） 5-66
図 5.3-6　総インベントリーの比較（2） 5-67
図 5.3-7　総インベントリーの比較（3） 5-68
図 5.3-8　水理モデルと核種移行モデルのリンク 5-69
図 5.3-9　解析形状（人工バリア部分、1/4 の形状で表示） 5-70
図 5.3-10　PLOTRAN における形状モデル 5-71
図 5.3-11　数値解析における構造格子グリッド 5-72
図 5.3-12　水頭分布の解析結果の比較 5-73
図 5.3-13　流速（X 成分）の比較 5-74
図 5.3-14　物質移行モデル、解析メッシュ数の相違による比較 5-77
図 5.3-15　分散長の変化による数値解と解析解の比較 5-79
図 5.3-16　物質移行モデル、分配係数の相違による比較 5-81
図 5.3-17　物質移行モデル、分散長を考慮した場合の分配係数の相違による比較 .. 5-82
図 5.3-18　止水プラグの効果確認のための解析例 5-84
図 5.3-19　坑道の区画分離とモデル化の概念 5-85
図 5.3-20　多重球モデルの解析解と水頭解析結果例 5-86
図 5.3-21　止水プラグを想定した解析モデル 5-87
図 5.3-22　数値解による水理解析結果例 5-89
図 5.3-23　区間を区切った場合の水頭分布（Case1,坑道高さ 16m） 5-90
図 5.3-24　坑道内部のダルシー流速（坑道中央部、全ケース） 5-91
図 5.3-25　数値解と解析解による施設浸透水量の比較 5-93

図 6.2-1　1Ec 締固め-透水及び λ_k/ε_k 実験の供試体条件とデータ整理方法 6-8
図 6.2-2　段階的・実務ターゲット実験手法と令和 4 年度の着手範囲（シリーズ A～C） 6-9
図 6.2-3　材料準備・混合・締固め過程における母材とベントナイトの存在形態の追跡 6-11
図 6.2-4　令和 3 年度実施の中性子イメージング実験結果（ガラス玉）の画像解析例 6-14
図 6.2-5　締固め含水比を変えたベントナイト混合土の一面せん断試験（模式図） 6-16
図 6.3-1　実験 A・実験 B に用いた供試土の粒度特性と細粒分の塑性指数 6-19
図 6.3-2　実験 A（1Ec 締固め-透水試験）の結果 6-20
図 6.3-3　実験 B（λ_k/ε_k 実験）の供試体条件（①、②） 6-23

図 6.3-4　実験 B（λ_k/ε_k 実験）の供試体条件（③、④） 6-23
図 6.3-5　実験 B（λ_k/ε_k 実験）の供試体条件：粒度調整材（⑤） 6-24
図 6.3-6　実験 B（λ_k/ε_k 実験）の供試体条件（⑥、⑦） 6-24
図 6.3-7　実験 B（λ_k/ε_k 実験）結果：購入砂（単体） 6-25
図 6.3-8　実験 B（λ_k/ε_k 実験）結果：購入砂＋珪砂粉 10% 6-26
図 6.3-9　実験 B（λ_k/ε_k 実験）結果：購入砂＋10%木節粘土 6-27
図 6.3-10　実験 B（λ_k/ε_k 実験）結果：購入砂＋10%微粉カオリン 6-28
図 6.3-11　実験 B（λ_k/ε_k 実験）結果：粒度調整材 6-29
図 6.3-12　実験 B（λ_k/ε_k 実験）結果：購入砂＋クニゲル 10% 6-30
図 6.3-13　実験 B（λ_k/ε_k 実験）結果：購入砂＋クニゲル 30% 6-31
図 6.3-14　実験 B（λ_k 実験）の間隙比整理結果 6-32
図 6.3-15　実験 B（λ_k 実験）の総括：全データ併記 6-33
図 6.3-16　実験 B（ε_k 実験）の総括：全データ併記 6-33
図 6.3-17　締固め～透水試験実施位置 6-34
図 6.3-18　実体顕微鏡（Nikon SMZ18） 6-35
図 6.3-19　実体顕微鏡により撮影した供試体の一例（購入砂＋ベントナイト 9：1） 6-35
図 6.3-20　実体顕微鏡により撮影した供試体の一例（購入砂＋ベントナイト 7：3） 6-36
図 6.3-21　画像解析の手順 6-36
図 6.3-22　実体顕微鏡画像の処理結果（購入砂＋ベントナイト 9：1） 6-37
図 6.3-23　実体顕微鏡画像の処理結果（購入砂＋ベントナイト 7：3） 6-37
図 6.3-24　NRT 装置（青森県量子科学センター）の概要 6-38
図 6.3-25　中性子イメージング結果（第 1 回） 6-40
図 6.3-26　中性子イメージング結果（第 2 回） 6-41
図 6.3-27　中性子イメージング結果（第 3 回） 6-42
図 6.3-28　中性子イメージング画像の輝度補正 6-43
図 6.3-29　供試体箱フレームの輝度取得位置 6-43
図 6.3-30　供試体箱フレームの輝度分布（第 1 回試験） 6-44
図 6.3-31　供試体箱フレームの輝度分布（第 2 回試験） 6-44
図 6.3-32　供試体箱フレームの輝度分布（第 3 回試験） 6-44
図 6.3-33　一面せん断試験の供試体条件（10%及び 30%ベントナイト混合土） 6-45
図 6.3-34　ベントナイト混合土（10%）の一面せん断特性と顕微鏡写真 6-47
図 6.3-35　ベントナイト混合土（30%）の一面せん断特性と顕微鏡写真 6-47
図 6.3-36　ベントナイト混合土の一面せん断特性に及ぼす混合率の影響 6-48
図 6.3-37　単体ベントナイトのミニコーン貫入試験の実施状況と供試体条件 6-49

図 6.3-38　ミニコーン貫入試験結果 6-49
図 6.3-39　示差熱・重量分析計 6-50
図 6.3-40　クニゲル不飽和試料 DTA 6-51
図 6.3-41　クニゲル飽和試料 DTA 6-51
図 6.3-42　クニボンド飽和試料 DTA 6-51
図 6.3-43　カオリン飽和試料 DTA 6-51
図 6.3-44　ゼータ電位計 6-52
図 6.3-45　ゼータ電位測定結果 6-53
図 6.3-46　遮水性発現メカニズム説明のための各種実験とその組み合わせ 6-54
図 6.3-47　締固めたベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの検討フロー 6-55
図 6.3-48　重回帰分析による評価精度 6-58
図 6.3-49　重回帰分析の係数 λ、ε と定数項 γ 6-59
図 6.3-50　透水係数の実測値と回帰式による予測値の比較 6-60
図 6.3-51　広範囲な度実材料と透水係数レンジにおける実測値と回帰式の比較結果 6-61
図 6.3-52　締固め曲線の違いが透水係数に及ぼす影響（全材料） 6-62
図 6.3-53　締固め曲線の違いが透水係数に及ぼす影響（全材料） 6-63
図 6.3-54　λ_k と ε_k ライン上での供試体の土粒子間隙構造の観察 6-64
図 6.3-55　実体顕微鏡撮影の供試体条件（10%,30%ベントナイト混合土） 6-65
図 6.3-56　顕微鏡写真の画像解析結果と間隙面積のヒストグラム（10%ベントナイト混合土） 6-65
図 6.3-57　顕微鏡写真の画像解析結果と間隙面積のヒストグラム（30%ベントナイト混合土） 6-66
図 6.3-58　実体顕微鏡写真の画像解析結果と透水係数との関係 6-66
図 6.3-59　締固め土の土粒子間隙構造（龍岡[4)]） 6-67
図 6.3-60　λ_k ライン沿い供試体の顕微鏡写真と画像解析結果 6-67
図 6.3-61　材料混合加水⇒ゆる詰め⇒締固め過程における土粒子間隙構造の変化 6-69
図 6.3-62　飽和度一定・乾燥密度一定供試体の重水浸透状況の変化と輝度差分のヒストグラム 6-71
図 6.3-63　λ_k/ε_k ライン沿いを模擬した供試体の重水浸透時挙動の違い 6-71
図 6.3-64　ベントナイト混合量とベントナイト特性の違いの影響 6-72
図 6.3-65　ベントナイト混合量と輝度差分平均の関係 6-73
図 6.3-66　締固め過程における含水比分布の変化の追跡結果 6-74
図 6.3-67　締固め過程における含水比分布の画像解析結果 6-75
図 6.3-68　締固めたベントナイト混合土の一面せん断試験結果（10%混合土） 6-77
図 6.3-69　3 試料の ζ 電位比較 6-77

図 6.3-70　不飽和・飽和クニゲルの DTA 試験結果..... 6-78
図 6.3-71　ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する現時点での仮説.. 6-80

表目次

表 1.3-1　令和 4 年度の実施工程表 1-6
表 1.3-2　浅深度現場検証試験における現場調査数量 1-8
表 1.3-3　要求される機能とそれを担保するための構成要素（天然バリアの透水係数が 1×10^{-8} m/s 以上の場合） 1-14
表 1.3-4　線量低減のための設計での対応案 1-16
表 1.3-5　令和 4 年度までに実施した室内試験一覧（実験 A、実験 B、実験 C） 1-18
表 1.3-6　令和 4 年度検討委員会実施経緯 1-20

表 2.1-1　室内検証試験によるストレインセルの接着に関する検討状況 2-59
表 2.1-2　現場検証試験における現場調査数量 2-63
表 2.1-3　現場試験孔掘削の仕様 2-64
表 2.1-4　主な機械器具一覧 2-68
表 2.1-5　試験孔掘削の概要 2-79
表 2.1-6　TI1-500(1)孔　埋め戻し深度確認表 2-89
表 2.1-7　TI1-500(2)孔　埋め戻し深度確認表 2-89
表 2.1-8　ひずみ測定器の仕様一覧 2-110
表 2.2-1　令和 4 年度の工程 2-123
表 2.2-2　三軸圧縮試験条件 2-125
表 2.2-3　パラメータ 2-126
表 2.2-4　水圧破砕法試験結果（水平面内主応力） 2-128
表 2.2-5　水圧破砕法試験シミュレーションのパラメータ 2-130
表 2.2-6　三軸圧縮試験と水圧破砕法試験の比較 2-134
表 2.2-7　拘束圧条件 2-139
表 2.2-8　オーバーコアリング掘削解析パラメータ 2-139
表 2.2-9　オーバーコアリング前後の応力 2-150

表 3.1-1　実施スケジュール（令和 2～4 年度） 3-3
表 3.2-1　中深度処分の新規制基準における事業段階等を考慮した地下水流動評価に関連する要求事項の要点の再整理 3-7
表 3.3-1　地形・地質モデルにおける不確実性の整理（JAEA、2017） 3-24
表 3.3-2　地下水流動状態の長期変動性評価に内在する不確実性（JAEA,2017） ... 3-25
表 3.5-1　中深度処分の新規制基準への対応を考慮した地下水流動評価に関わる技術項目の抽出・整理と今後の技術課題（技術マップの概略取りまとめ）（1/2）-地下水流動の調査・解析・評価技術－ 3-36

表 4.1-1　令和 4 年度の工程..... 4-5
表 4.1-2　解析プログラム（SHAKE、FDEL、DYNEQ）の特徴.....4-11
表 4.1-3　解析用地盤物性値..... 4-13
表 4.1-4　固有周期及び固有振動数の概算..... 4-20
表 4.1-5　地震計⑤と地震計④位置の地質断面図..... 4-23
表 4.1-6　各標高における地震計④位置の結果との整合性確認（12/6）..... 4-26
表 4.1-7　各標高における地震計④位置の結果との整合性確認（3/16）..... 4-27
表 4.1-8　各標高における地震計④位置の結果との整合性確認（3/18）..... 4-28
表 4.1-9　各標高における地震計④位置の結果との整合性確認（4/28）..... 4-29
表 4.1-10　各ケースの表層の初期せん断剛性の組合せ（各層の剛性の倍率）..... 4-31
表 4.1-11　地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（2021/12/6）..... 4-33
表 4.1-12　地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（2022/3/16）..... 4-34
表 4.1-13　伝達関数に用いた地震動の諸元..... 4-37
表 4.1-14　伝達関数のまとめ（地震計⑤/地震計④）..... 4-37
表 4.1-15　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/2/17）..... 4-40
表 4.1-16　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/2/17）..... 4-40
表 4.1-17　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/3/16）..... 4-45
表 4.1-18　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/3/16）..... 4-45
表 4.1-19　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/3/18）..... 4-50
表 4.1-20　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/3/18）..... 4-50
表 4.1-21　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/4/28）..... 4-55
表 4.1-22　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/4/28）..... 4-55
表 4.1-23　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/5/23）..... 4-60
表 4.1-24　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/5/23）..... 4-60
表 4.1-25　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/6/10）..... 4-65
表 4.1-26　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/6/10）..... 4-65
表 4.1-27　材料モデル..... 4-74
表 4.1-28　解析物性値一覧..... 4-75
表 4.2-1　地震観測のための計測システム（地下）..... 4-82
表 4.2-2　地震計の仕様（地下）..... 4-82
表 4.2-3　地震観測のための計測システム（地表面）..... 4-86
表 4.2-4　地震計の仕様（地表面）..... 4-86
表 4.2-5　回収データの仕様..... 4-89
表 4.2-6　データ取得した地震の諸元..... 4-91
表 4.2-7　各地震計のデータ取得の有無..... 4-92

表 4.2-8　地表と地下の最大加速度の比較 4-134
表 4.2-9　六ヶ所村尾駮の震度２以上の地震の一覧 4-135

表 5.1-1　「主要な事項」が異なる例 5-4
表 5.2-1　安全機能と構成要素の関係 5-10
表 5.2-2　中深度処分における安全確保に求められる性能（規制期間終了後） 5-11
表 5.2-3　核種収着性における重要度の高いパラメータ 5-12
表 5.2-4　低拡散性における重要度の高いパラメータ 5-13
表 5.2-5　低透水性における重要度の高いパラメータ 5-14
表 5.2-6　低透水性における重要度の高いパラメータ 5-14
表 5.2-7　人工バリアの機能及び代表的因子 5-17
表 5.2-8　人工バリアの代表的因子に係るパラメータ設定に資する条件 5-17
表 5.2-9　天然バリアの機能及び代表的因子 5-18
表 5.2-10　可能性の高い状態における処分システムの設定パラメータ 5-18
表 5.2-11　可能性のある変動状態における処分システムの設定パラメータ 5-19
表 5.2-12　感度解析ケース一覧 5-19
表 5.2-13　感度解析ケース①のパラメータ 5-20
表 5.2-14　感度解析ケース②のパラメータ 5-21
表 5.2-15　感度解析ケース③のパラメータ 5-22
表 5.2-16　感度解析ケース④のパラメータ 5-23
表 5.2-17　安全機能と構成要素の関係（再掲） 5-36
表 5.2-18　感度解析結果を反映した安全機能と構成要素の関係（高透水性母岩） .. 5-38
表 5.2-19　感度解析結果を反映した安全機能と構成要素の関係（低透水性母岩） .. 5-39
表 5.3-1　長期安全性における安全機能 5-45
表 5.3-2　規制における方針；断層等 5-49
表 5.3-3　規制における方針；火山 5-50
表 5.3-4　規制における方針；侵食を考慮した深度の確保 5-51
表 5.3-5　規制における方針；鉱物資源 5-52
表 5.3-6　規制における方針；地震 5-52
表 5.3-7　規制における方針；安全機能を有する施設の維持 5-53
表 5.3-8　規制における方針；放射性廃棄物の回収 5-53
表 5.3-9　規制における方針；人工バリア 5-53
表 5.3-10　規制における方針；監視測定設備 5-54
表 5.3-11　規制における方針；排水設備 5-55
表 5.3-12　規制における方針；長半減期核種の濃度制限に関する要求(1/2) 5-56
表 5.3-13　規制における方針；長半減期核種の濃度制限に関する要求(2/2) 5-57

表 5.3-14　規制における方針；ボーリングシナリオ(1/2) 5-58
表 5.3-15　規制における方針；ボーリングシナリオ(2/2) 5-59
表 5.3-16　規制に対応可能と予想される設計の条件（長期安全性） 5-60
表 5.3-17　線量低減のための設計での対応案 5-61
表 5.3-18　比較計算における透水係数の設定 5-71
表 5.3-19　基本物性の設定値（数値解で利用） 5-71
表 5.3-20　物質移行モデルでのパラメータ設定 5-76
表 5.3-21　メッシュ数とペクレ数の関係 5-76
表 5.3-22　分散長とペクレ数の関係 5-78
表 5.3-23　坑道内流量の感度解析パラメータ 5-88

表 6.2-1　研究の全体 5 ヵ年計画（見直しと修正後） 6-5
表 6.2-2　令和 4 年度の実施計画と実施工程 6-6
表 6.2-3　段階的解明実験及び実務ターゲット実験の計画の見直しと修正状況 6-10
表 6.2-4　中性子イメージング実験の目的と実験条件 6-12
表 6.2-5　令和 4 年度までに実施した室内試験一覧（中性子イメージング実験を除く）
..... 6-17
表 6.3-1　中性子イメージング試験の実施ケース一覧 6-39
表 6.3-2　実験 B の重回帰分析結果 6-58
表 6.4-1　研究の現状と今後の方向性 6-87
表 6.4-2　令和 5 年度と令和 6 年度のロードマップ 6-88

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

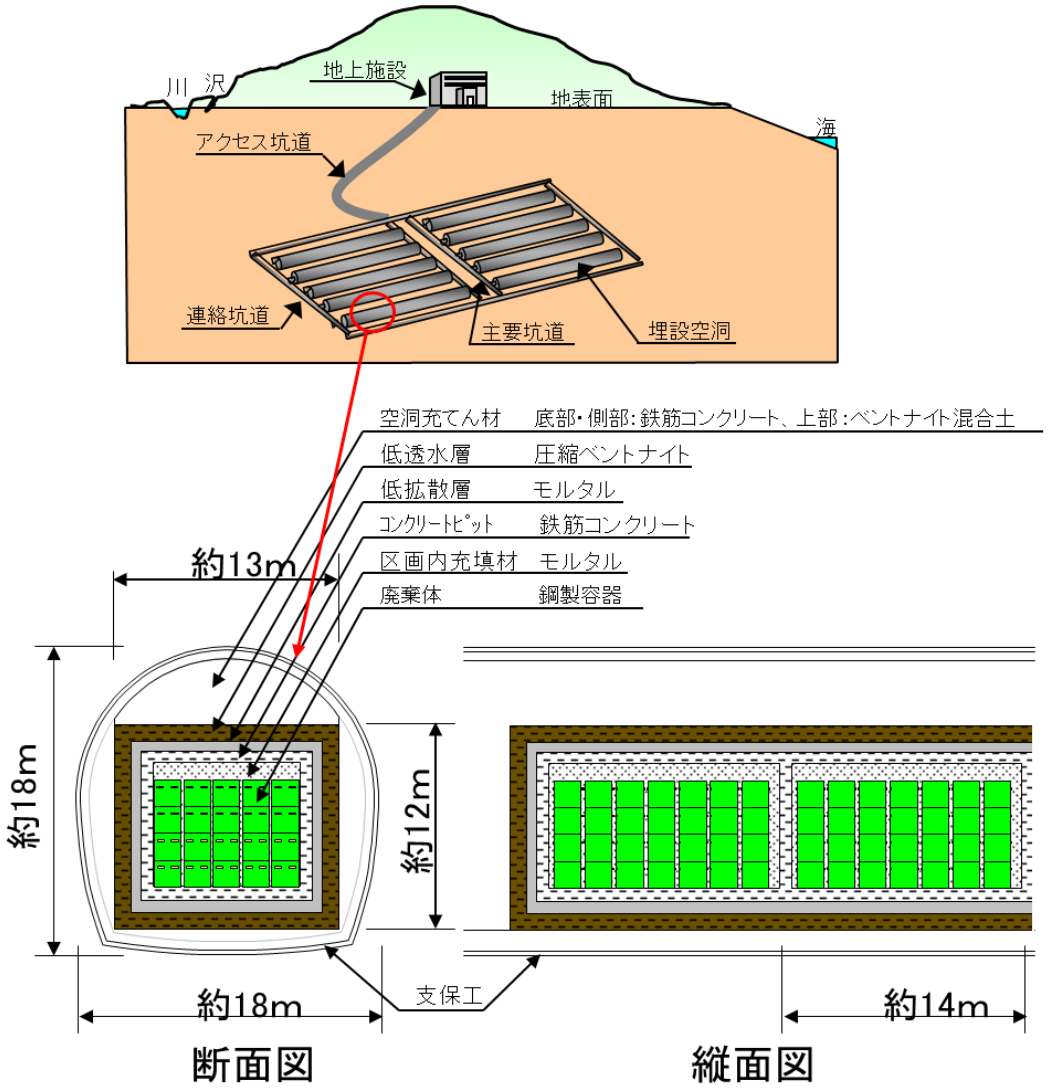
我が国においては、これまでの原子力発電の利用に伴って既に多種多様な放射性廃棄物が発生しており、その処分対策を着実に進める必要がある。このうち、原子炉施設や再処理施設等の運転と解体から発生する低レベル放射性廃棄物の一部には、長期にわたり比較的高い放射能が残存し、既存の浅地中処分に適さないものが存在する。これら低レベル放射性廃棄物については、大断面の地下空洞型処分施設に処分する方法（以下、「中深度処分」という。）で処分の事業化が検討されてきている[1]。

また、中深度処分に関する規制基準が整備されつつあり、その中で、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、複数の人工バリア案と複数の配置案との組み合わせを選定した上で最終的な処分システムを選定するという設計プロセスを示すことが要求されている[2]。

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 3 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ともに、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。

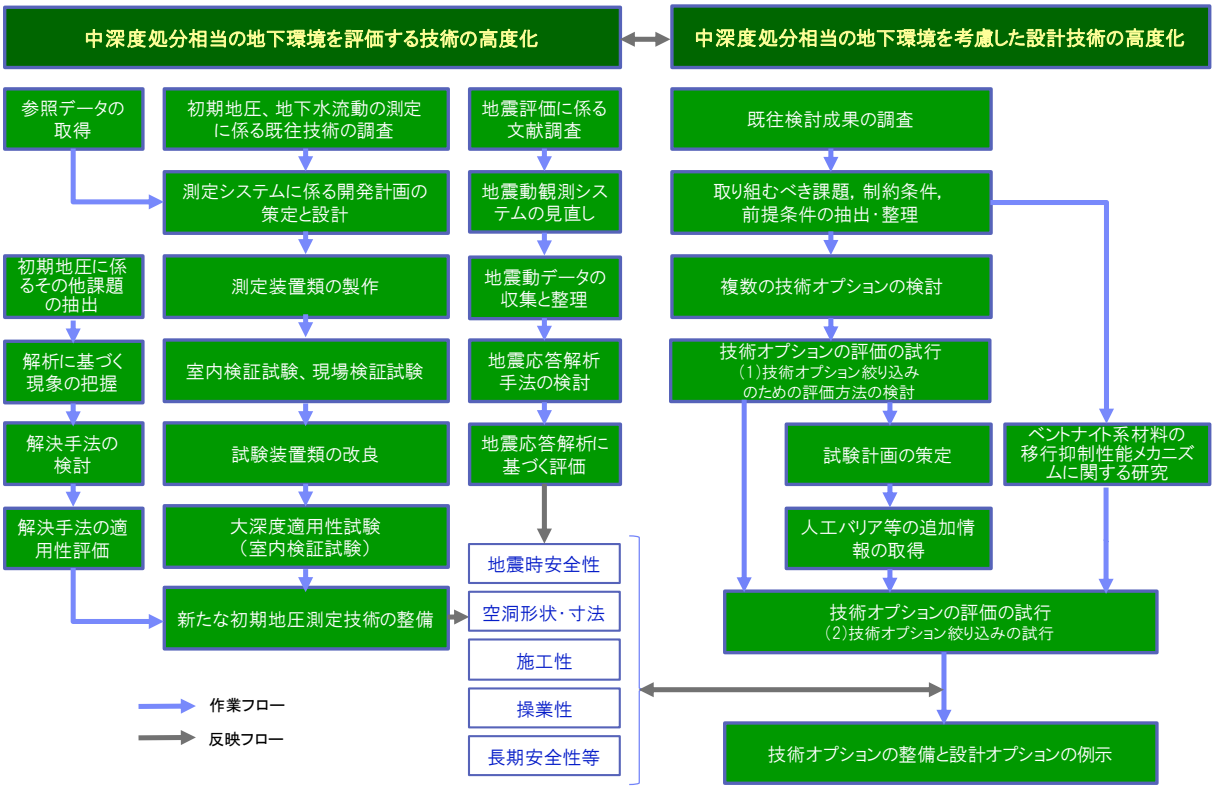


図 1.2-1　本事業の全体フロー

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

堆積軟岩を対象に、鉛直孔（深度－200m 程度まで）で、3 次元初期地圧を測定することを目的として、応力解放法の一種である孔壁ひずみ法と円錐孔底ひずみ法を応用した「円錐孔壁ひずみ法」の開発を進めている。今年度は、測定方法を確立することを目的として、候補となる材料や装置を用いて室内検証試験を行う。また、掘削方法を中心とする課題を把握するために、現場検証試験を行う。更に、次年度の検証試験で試験装置の妥当性を検討でき

るよう、試験装置各種の詳細設計と製作を進める。

加えて、初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討として、現場検証試験と室内検証試験を対象としてシミュレーション解析を実施する。

(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、国内外における放射性廃棄物処分に係る既往の関連技術に関して、特に中・低レベル放射性廃棄物分野を中心として調査を行い、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・整理等の調査・検討を行う。検討にあたっては、原子力規制委員会により整備されてきた第二種廃棄物埋設事業の規制基準（特に中深度処分(L1)）における要求事項等を考慮し、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) 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[3]。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、前年度までに整備され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（Best Available Technique）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、その結果等を参照して設計オプションを抽出する考え方について検討、整理する。

また、前年度までの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、初年度に策定した研究の 5 ヵ年計画に従い、前年度に引き続き、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等により実施する。

更に、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 4 年度の実施概要

令和 4 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 4 年度は、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、前年度までの検討結果を踏まえて具体的な技術開発や研究開発を進めた。

以下に、令和 4 年度の成果の概要を示す。

表 1.3-1　令和 4 年度の実施工程表

実施項目等	令和 4 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詳細設計、試験装置の製作、検証試験											
	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、技術開発課題の整理											
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 ▼			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（モデル化、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

堆積軟岩を対象に、鉛直孔（深度－200m 程度まで）で、3 次元初期地圧を測定することを目的として、応力解放法の一種である孔壁ひずみ法と円錐孔底ひずみ法を応用した「円錐孔壁ひずみ法」（図 1.3-1 参照）の開発を進めている。

今年度はまず、円錐孔壁ひずみ法の測定手順①～⑨について検討を進め、各ステップの方法や留意点を整理した上で、試験装置の詳細設計と製作を行った。

① 測定深度以浅までの掘削
② センタリングガイドケーシングの挿入
③ パイロットボーリング
④ 孔内洗浄
⑤ 孔内観察
⑥ 接着剤注入
⑦ 貼付装置挿入、ストレインセルの設置
⑧ 接着後貼付装置回収、オーバーコアリング
⑨ コア回収、感度試験

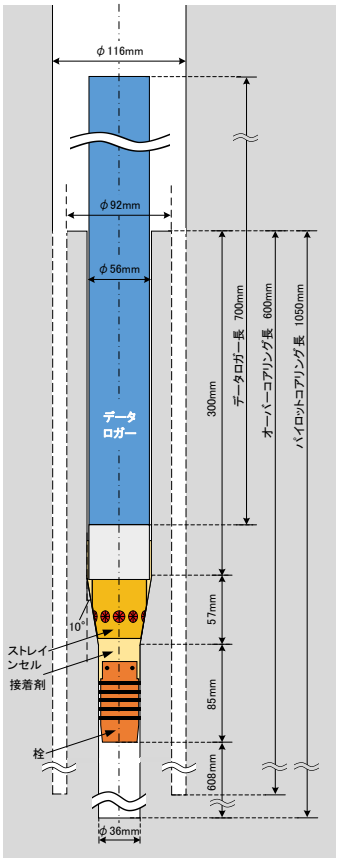


図 1.3-1　円錐孔壁ひずみ法の概要図

円錐孔壁ひずみ法を実用化するにあたり最も重要な項目の一つとなるストレインセルの接着に関しては、ストレインセルの接着性能や接着方法について室内検証試験により検討を進めた。接着剤注入装置を設計、試作した上で、図 1.3-2 に示す接着剤注入装置による円錐孔壁への接着剤の注入手順をトレースし、動作性に問題が無いことを確認した。併せて、接着剤候補として 2 種類（HIC 接着剤、エポキシ樹脂接着剤）を選定し、経時的な物性変化等を室内試験により検討した。両者ともそれぞれ優れた特徴を有していることから、次年度の追加検討により最終選定を行うこととした。

更に、青森県六ヶ所村の現場フィールドにて、初期地圧測定に係る一連の作業性の確認を主目的とした浅深度現場検証試験を実施した。浅深度現場検証試験における現場調査数量は、表 1.3-2 に示すとおりである。設計・製作を進めている測定装置とその測定方法・手順に大きな問題はなく開発の方向性が妥当であることが確認されるとともに、改良点を明らかにすることができた。

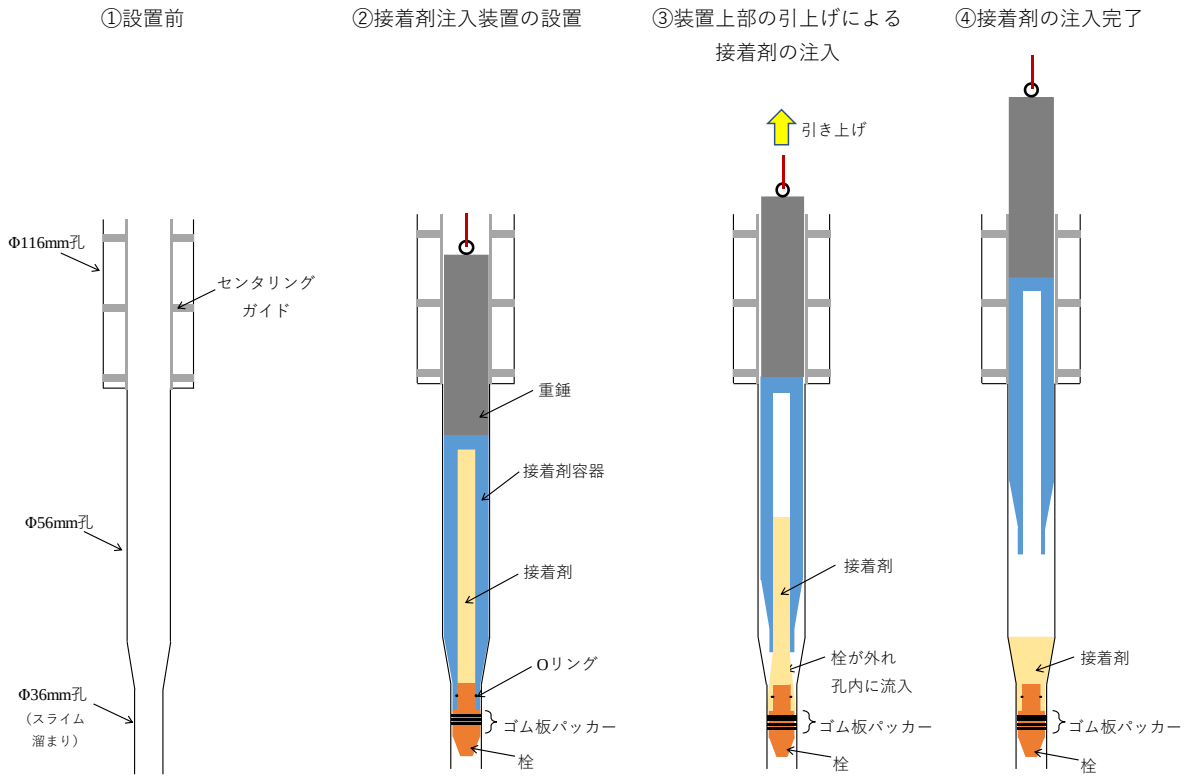


図 1.3-2　接着剤注入装置による円錐孔壁への接着剤の注入手順

表 1.3-2　浅深度現場検証試験における現場調査数量

項　　目	数量	
	現場試験孔 （φ116mm）	湧水圧確認孔 （φ66mm）
ボーリング掘削	6m	10m
コア観察、柱状図	6m	10m
ボーリング孔閉塞	6m	10m
現場試験・感度試験試料採取	2 箇所	―
湧水圧確認（最大）	―	1 回

初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討では、原位置試験と室内検証試験のシミュレーションを実施した。

はじめに、原位置試験のシミュレーションでは、令和 3 年度に実施した水圧破砕法試験シミュレーションの再検討を実施し、DEM 解析による応力レベルの再現性向上を検討した。まず、三軸圧縮試験結果に対して、岩盤にクランプ形状を採用し、3 次元モデルを用いたシミュレーションを実施した結果、応力 - ひずみ曲線を精度良く再現する結果を得た。このときのパラメータを用いて、水圧破砕法試験の 3 次元モデルによるシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果、破砕圧は、原位置試験結果を超過し、微視クラックについても、原位置試験では 1 条の割れ目であるのに対して、シミュレーションでは全方位的に微視クラックが拡大し、原位置試験と異なる結果となった。三軸圧縮試験と水圧破砕法試験での

荷重状態や破壊挙動が異なることが原因の可能性があるため、今後、破壊規準も含めて、破壊プロセス・形式に適したパラメータ設定や解析モデルの検討を行う必要がある。

次に、室内検証試験のシミュレーションでは、令和 3 年度の要素試験シミュレーションに引き続き、室内検証試験を模擬したシミュレーションを実施し、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法（DEM 解析）の適用性を検討した。DEM 解析は、非連続体の解析手法であり、応力・ひずみは、直接得られないが、破壊・塑性化のような工学的な問題を考える際、応力・ひずみを評価できることが必要である。そこで、体積を持った領域に着目して、平均化処理を行うことで、マイクロスケールの物理量（接触力等）から連続体量である応力・ひずみに移行することを今年度検討の目的とした。岩盤ブロックを用いた室内オーバーコアリング試験のシミュレーションを実施し、薄肉部岩盤の応力・ひずみを直接評価する方法を検討し、抽出したひずみを分析した結果、オーバーコアリングの掘進に伴うひずみ挙動が、ブロック試験結果と傾向が類似することがわかった（図 1.3-3 参照）。

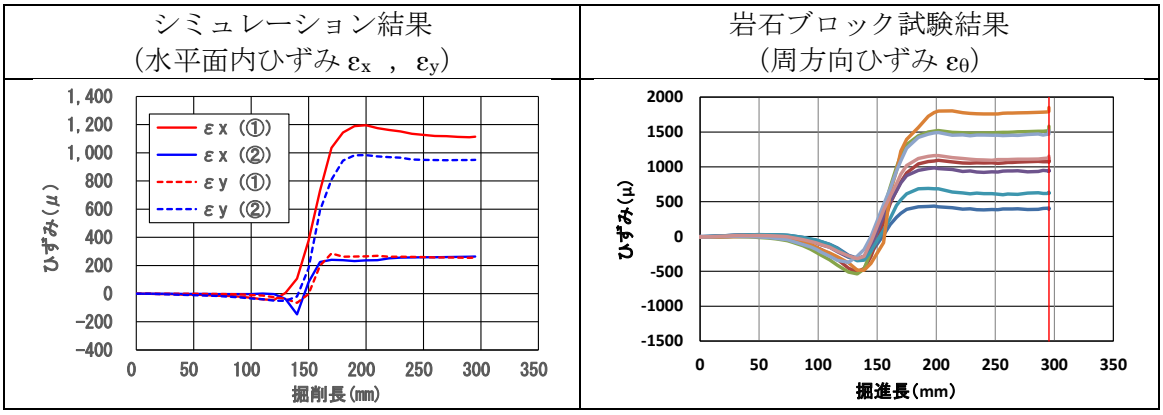


図 1.3-3　オーバーコアリング時のひずみ経時変化の比較

応力についても別途抽出することができ、応力・ひずみを直接評価する方法の妥当性を確認した。今後、計画されている原位置オーバーコアリング試験のシミュレーションを実施し、DEM 解析手法の適用性検討を行う予定である。また、水圧破砕法試験と合わせて、破壊規準も含めたパラメータ設定、解析モデルの検討を考えている。

(2) 地下水流動評価技術の調査

前年度までに実施した調査検討結果を踏まえ、低レベル放射性廃棄物の中深度処分に関わる規制基準が近年改訂整備されたことを受けて、それらに対応するために必要な技術のうち、特に地下水流動評価技術（計測/測定及び解析技術）について、地下水流動評価に係る要求事項の再整理とそれらへの対応に必要な重要技術項目の抽出、現状での技術開発状況の調査・整理並びに今後の技術的課題の検討・整理を行った。具体的な項目は次のとおりである。

- 長期の地質環境の変動・処分場環境の変遷に伴う地下水流動・地下水環境の変化に関わる調査・解析・評価手法や不確実性評価
- 地下水等モニタリング・放射線監視モニタリングに関わる地下水環境の監視測定モニタ

リング技術

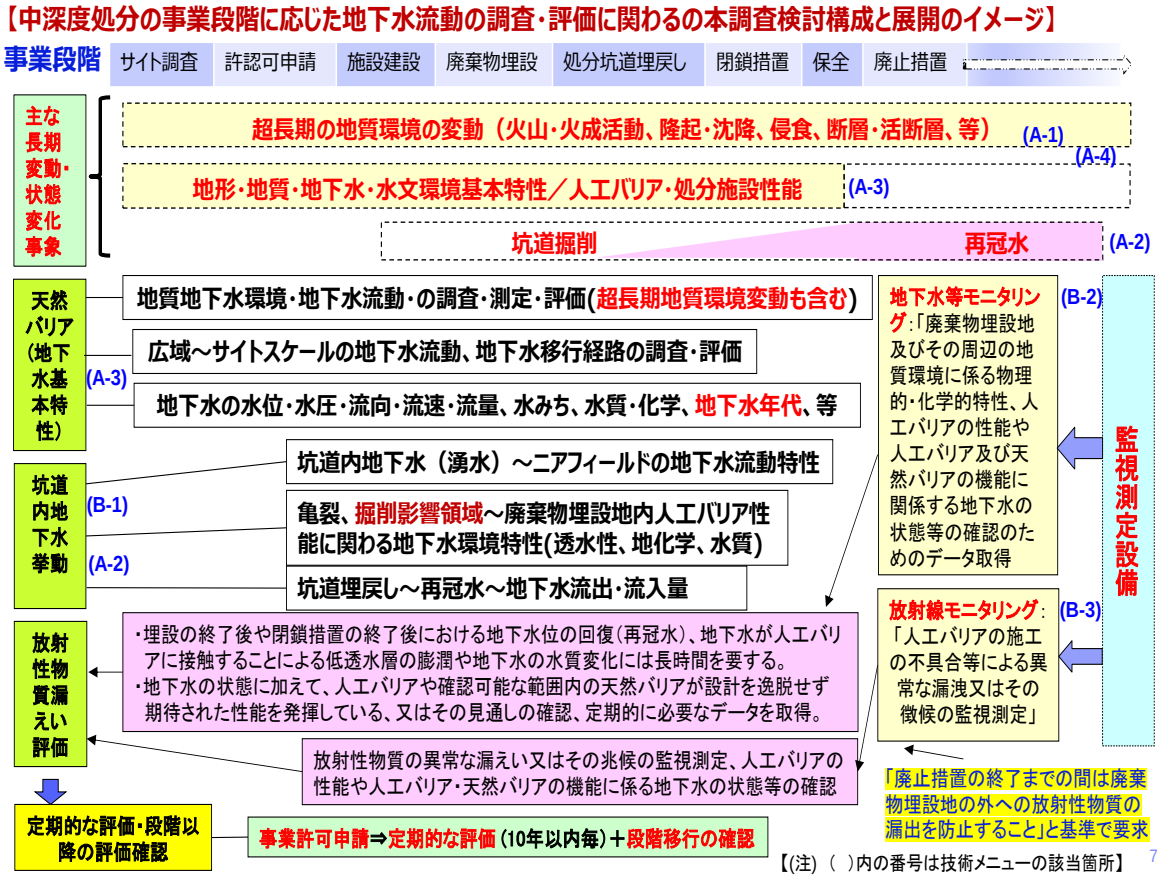


図 1.3-4　事業展開と規制要求を考慮した地下水流動評価に係る重要事項の抽出・展開イメージ

また、それらの調査結果をもとに、図 1.3-4 に示すように、中深度処分の新規制基準における地下水流動評価に関連する要求事項への対応を処分事業の段階的展開も考慮して実施するために求められる地下水流動・流況の調査・解析・評価や、地下水環境の監視・測定モニタリングに必要な調査・測定・試験・解析及び評価技術を体系的に整理するとともに、それらを“技術マップ”として概略的な取りまとめ作成を行った。この技術マップでは、地下水流動の調査・解析・評価と地下水等の監視測定モニタリングという技術分類毎に、大項目、目的、抽出した技術項目、対象場所、適用時期、関連規制基準、現状技術の具体例・技術情報、出典、今後の技術課題の項目にて表形式にとりまとめた。

本調査研究の結果、今後に向けての主要な技術課題として次のものが抽出された。

・　地下水流動の調査評価について、地質地下水環境の基本特性の調査・解析・評価技術とともに、地下施設の設計と安全評価に関わる地下施設レイアウト設定方法並びに地下水年代測定や塩水影響を考慮した地下水流動の調査・解析評価手法の高度化やデータ整備が地層処分研究等で進んではいるが、今後は地層処分対象の深い深度に比べて浅地中～中深度での複雑な地質・地下水環境条件にも十分に適用可能な手法・技術と

して高度化・確証を図っていくことが求められる。

- 掘削影響～埋戻し・再冠水による坑道・廃棄物埋設等の処分環境への影響については、JAEA 瑞浪超深地層研究所における貴重な研究事例等を踏まえ、調査と解析による評価が有効であることが示されているが、今後、中深度処分で想定される対象岩種、地質地下水環境や処分施設の設計・埋戻し方法等に対応した方法論を、調査・試験・解析による検討を更に充実させて確立していくことが重要である。
- 長期の地質環境の変動（隆起・沈降・侵食・海水準変動、等）とそれに伴う地下水流動状態の変遷は超長期にわたる事象であり、様々な不確実性も伴う。そのため、事業許可申請～処分実施段階～廃止措置までの事業実施の各段階を通じて、調査・観測によるデータの拡充と解析・評価等の検討を繰り返し実施していくことにより、不確実性を低減し、安全性確保に係る評価結果の信頼性をより確かなものとしていく必要がある。今後、中深度処分特有の条件を想定して、品質保証的な観点も含めて不確実性の評価手法の方法論として適用性の確立が重要である。
- 地下水等モニタリング及び放射線モニタリングの実施は、非常に長期にわたる期間が想定されるため、処分事業の進展に対応して、処分施設の坑道内、廃棄物埋設地やその周辺の地質地下水環境、処分施設・人工バリアの状態、地下水の流動・放射性物質の漏えいやその徴候等の監視・測定を適切にかつ合理的に実施可能とするため、方法論と適用技術を早期に確立することにより、今後の中深度処分事業の安全確保への信頼性向上と円滑な推進につなげていくことが課題である。
- 地下水等モニタリングを合理的に実施可能とするために、監視測定設備の具体的な概念を明確にするとともに、地下水等モニタリングとして必要なデータを事業段階ごとに変化する処分場環境に対応した形で長期的かつ安定的に取得できる技術を高度化・開発することが求められる。

(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については、前年度構築した地震計測システムで取得した地震動データを活用して、引戻し解析手法の改良（入力地震動設定）に関する検討を実施した。

入力地震動設定の検討においては、解析用地盤物性値の減衰定数の周波数依存性の影響及び逆解析による物性値の同定について分析を行ったが、現状の問題となっている地表と地下における解析結果と観測結果の不整合の改善までには結びつかなかった。

そこで、現地に設置した地震計の地表と地下での伝達関数の特徴を分析し、引戻す前の観測地震動に対して、あらかじめ加速度振幅に補正値 α を乗じたデータを 1 次元の引戻し解析に入力する方法を提案した。この方法は、限定的な地点（当該サイトのみ）かつ限定的な地震動（低周波数帯で増幅が小さい地震動）のみでの適用にはなるが、地表の観測地震動の加速度振幅を 0.7 倍程度にして引戻すことで、図 1.3-5 に示すように空洞底盤における加速度レベルを再現できることがわかった。また、当該サイトの観測地震動データは、地形効果及び斜め入射の影響を殆ど受けておらず、地質構造及び地盤物性（初期せん断剛性 G_0）の精

度向上を図ることで、1 次元の引戻し解析により入力地震動を設定できる見通しが得られたものと考えられる。

今後は、引き続き地質構造及び地盤物性の精度向上を図り、また、追加される地震動データを用いて上記手法の適用性の精査を行う。更に、空洞内の試験施設に設置している地震計を利用して、地震時の施設挙動の再現性についても検討を進める予定である。

地震動観測については、前年度構築した地震計測システムにより記録された地震動データの回収及びシステムのメンテナンスを実施し、現在 5 台全ての地震計が稼働している。次年度も継続して地震計測システムを運用する予定である。

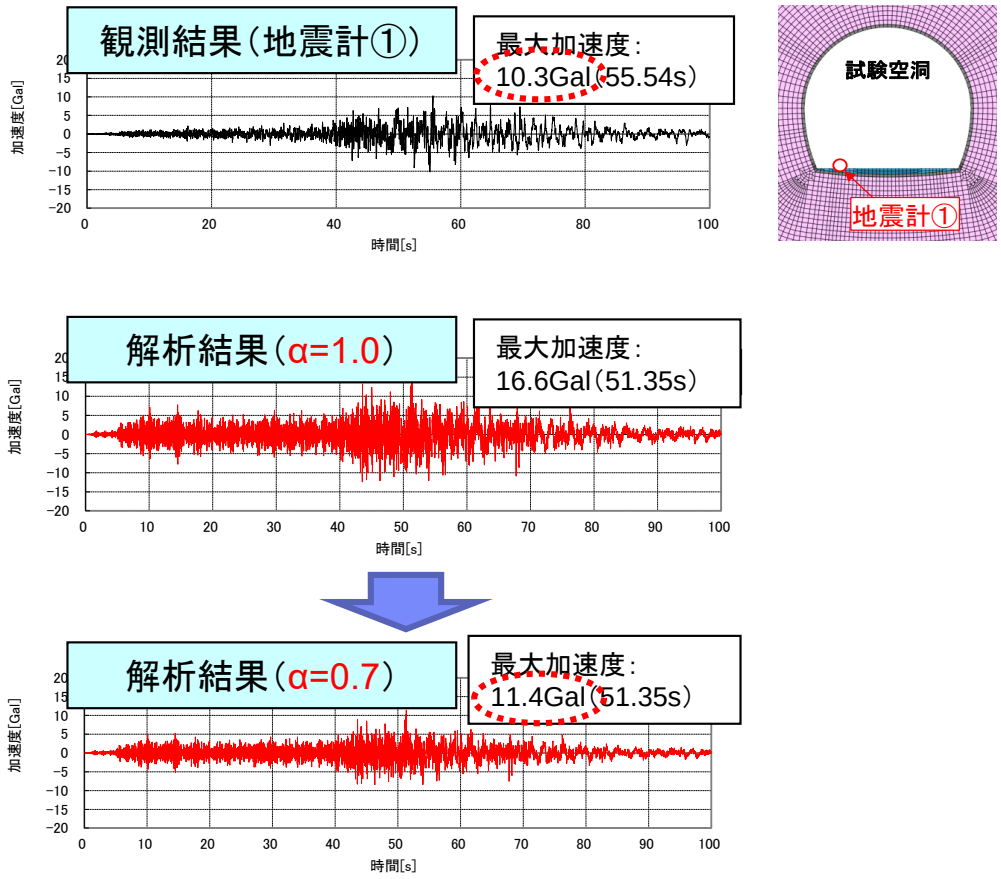


図 1.3-5　地震計①における解析結果と観測結果の比較

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

1) 設計プロセスにおける人工バリアの設計等に係る選択肢に関する検討

規制基準における設計プロセスに係る要求を念頭に置き、その中で特に人工バリアの設計について検討し、それをできるだけ具体化した形で示すことにより、人工バリアの設計等に係る選択肢をどのように設定するかについての一つの考え方を提案した。なお、

最終的な設計の選定のためには、複数の人工バリア案と複数の配置案の組み合わせによる複数の処分システムを選定した上でそれらを比較検討することが求められているが、中深度処分についてはサイトが未選定であることから、天然バリア性能を 3 水準仮設定することで対処することとし、人工バリアの設計に係る選択肢の部分に比重を置いた。

検討ではまず、安全機能の整理として中深度処分事業における段階を閉鎖措置前と閉鎖措置後に大別した上で要求される機能を整理し、細分化した機能とそれを担保する構成要素（廃棄体容器／人工バリア／天然バリア）を対応付けた。

並行して、天然バリアと人工バリアの代表的因子を明らかにし、長期の安全確保（被ばく線量）の観点からその成立条件を評価するために、感度解析を実施した。感度解析のモデルの考え方を図 1.3-6 に示す。また、感度解析結果の一例として、人工バリアの透水係数の違いが被ばく線量に及ぼす影響をケース②（天然バリアの透水係数が比較的低い）とケース③（天然バリアの透水係数が比較的高い）の比較で示したものを図 1.3-7 に示す。なお、感度解析では、人工バリアの劣化を考慮し、人工バリア性能に時間変化を与えたケースも含めた。

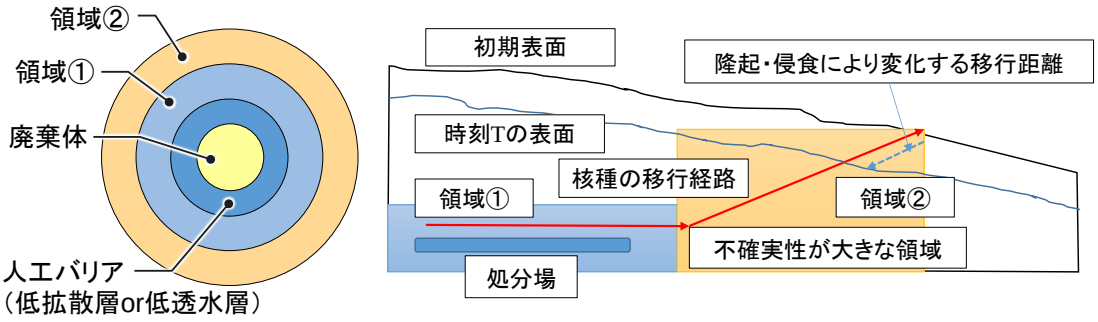


図 1.3-6　感度解析のモデルの考え方

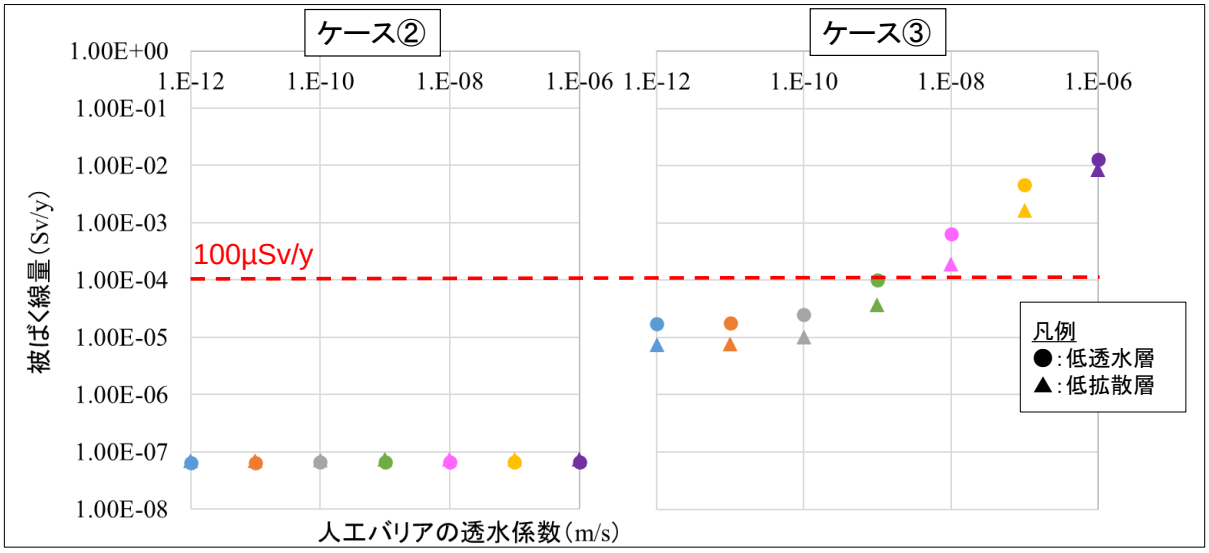


図 1.3-7　感度解析結果の一例

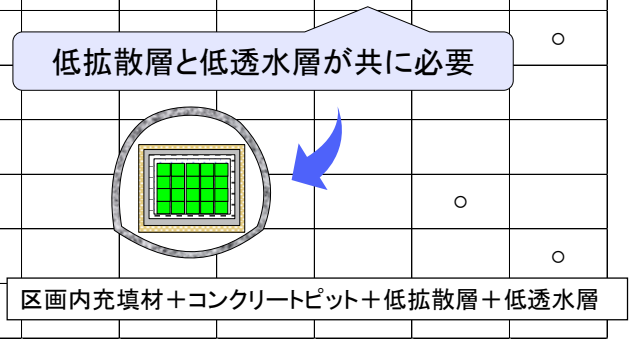
閉鎖措置前については、特に建設・操業時の安全確保には、地震対応を含めて多段に定置された廃棄体の傾き・倒れへの備え及び建設・操業時の作業性を確保するための高空間線量の低減の観点から構造体としてのコンクリートピットの設置が有効であることを示した。閉鎖措置後については、一連の感度解析結果に基づき、天然バリア性能の差異に応じて必要となる人工バリア構成を明らかにした。

これらの結果に基づき、要求される機能と構成要素を再整理することにより、天然バリア性能に応じた人工バリアの設計等に係る選択肢を設定した。一例として、天然バリアの透水係数が 1×10^{-8} m/s 以上のケースを対象に、機能と構成要素の相関を再整理した結果を表 1.3-3 に示す。

以上のアプローチを通じて、人工バリアの設計等に係る選択肢をどのように設定するかについての考え方を示した。

表 1.3-3　要求される機能とそれを担保するための構成要素（天然バリアの透水係数が 1×10^{-8} m/s 以上の場合）

段階	機能		構成要素							
			廃棄体容器	岩盤 透水係数: 1E-8以上	区画内充填材	コンクリートピット	低拡散層	低透水層	空洞	空洞内充填材
閉鎖措置前	閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏洩の防止	○			○		○		
	遮蔽	放射線の遮蔽	○		○	○	○			
	操業安全	空間・力学的安定性の確保				○				
閉鎖措置後	移行抑制	放射性物質の収着（核種収着性）		○			○	○		
		拡散による移行を抑制（低拡散性）		△			○	※ 低透水層による拡散場維持		
		処分施設を通過する地下水流量を抑制（低透水性）		△				○		
		卓越した移行経路の防止								○
	溶出抑制	溶出の抑制	○							
		廃棄体と地下水の接触の防止	○							
	離隔	離隔距離の確保		○					○	
		容易な人間侵入の抑制		○						○
		自然現象からの著しい影響からの防護		○						



2）長期安全性の観点からの技術オプションの整理と感度解析モデルの作成

処分場の概念の設計から安全審査における設計に至るまでの長期安全性の評価を念頭に、性能の評価による概略設計、詳細な状態設定を含む順解析的な評価までの図 1.3-8 に示すような作業フロー案を検討した。その中で、詳細な設計条件を決定する前段階として、長期安全性に関する情報を技術オプションの選定に役立てるための感度解析の実施を提案した。

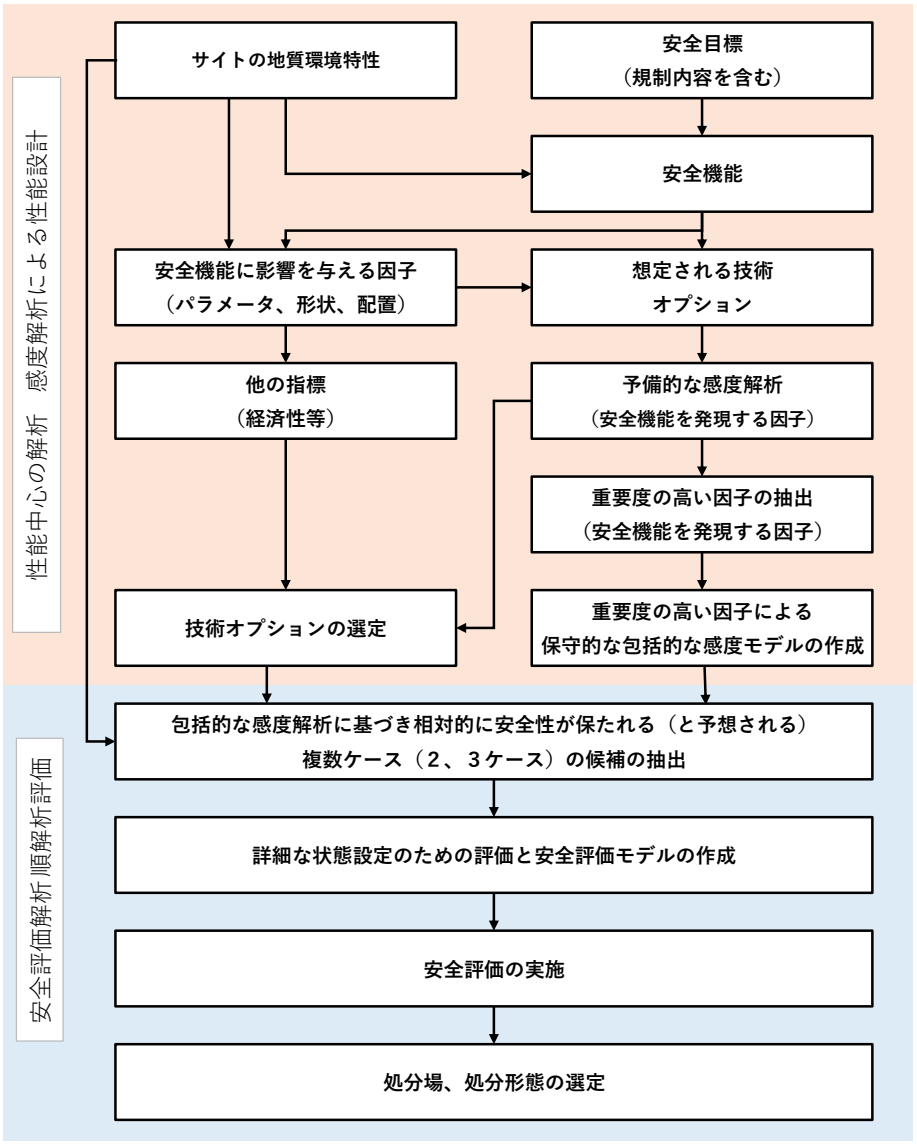


図 1.3-8　処分場の設計に係る作業フロー案

感度解析においては、原子力規制委員会によって提示された資料[2]に基づき、表 1.3-4 に示す設計条件を抽出し、この設計条件に基づき、包括的な感度解析モデルに取り込むべきパラメータを抽出し、これに対応する感度解析モデルに組み込むための検討を行った。

表 1.3-4　線量低減のための設計での対応案

	前提となる条件	対応する設計条件	設計条件の線量解析への反映
廃棄体仕様	処分容器の寸法･材質･遮蔽厚さ	廃棄体製作	容器の気密性維持期間の想定
	放射能濃度	空洞体積、空洞断面積、区画大きさ	廃棄体と他の領域の比率、廃棄体の濃度分布の想
	放射能量	空洞体積、処分密度	（与条件）
	廃棄体の物理特性･化学特性･熱特性	廃棄体性状	廃棄体の種類と浸出率の想定
	全体物量	空洞の総体積、空洞形状、空洞配置	（与条件）
地質環境	地質･地質構造	処分深度	地点、地質条件の選択
	岩盤の力学特性	処分深度、空洞形状	地点、地質条件の選択
	岩盤の熱特性	処分深度、空洞配置	地点、地質条件の選択
	地温勾配	処分深度、空洞配置	地点、地質条件の選択
	地下水流動特性 （生活圏までの距離）	地下施設配置位置、配置方向	地点、地質条件の選択、坑道の配置方向
	地化学環境 （収着性、移行形態）	処分深度、人工バリア構造	地点、地質条件の選択
	物質移行特性（収着性、移行挙動）	処分深度、人工バリア構造	地点、地質条件の選択
	地理・地形	地下施設の配置位置・処分深度	地点、地質条件の選択
	地震･断層活動	地上地下施設の配置位置と構造	地点、地質条件の選択
	火山･火成活動	地下施設の配置位置	地点、地質条件の選択
	隆起･浸食	地下施設の配置位置・処分深度	地点、地質条件の選択
	天然資源	地下施設の配置位置・処分深度	地点、地質条件の選択
	気候・海水準変動	地下施設の配置位置・処分深度	地点、地質条件の選択
	洪水･津波	地上施設の配置位置と構造	地上施設の位置
人工バリア仕様	人工バリア設計の概念	空洞の形状	空洞形状、放射能濃度
	人工バリア設計の概念	バリア材料の選定	収着性、拡散性、施設浸透水量
	人工バリア設計の概念	バリア機能の配置、組み合わせ	廃棄体部での収着体積、施設浸透水量
	人工バリア設計の概念	バリア材料の構造	バリア厚さ、体積、施設浸透水量
	人工バリア設計の概念	地質環境（流動特性）との関係	施設浸透水量

この結果、感度解析モデルとしては設計条件に対応するものとして、以下の内容を考慮することとした。

- 複数のバリアの構成と順序、形状の考慮
- 人工バリア材質の多様性を考慮（分配係数等の多様性や不確実性に考慮）
- バリア材料の時間的変遷を考慮
- 坑道の設計条件に応じた施設浸透水量の適用

この中で、施設浸透水量については、これまでの坑道に直交する流れに基づく施設浸透水量を拡張し、3 次元の多重球の解析解を導出し、処分区画の分割に対応できるようにモデル化を行い、数値解[4]との比較を実施し検証を行った。

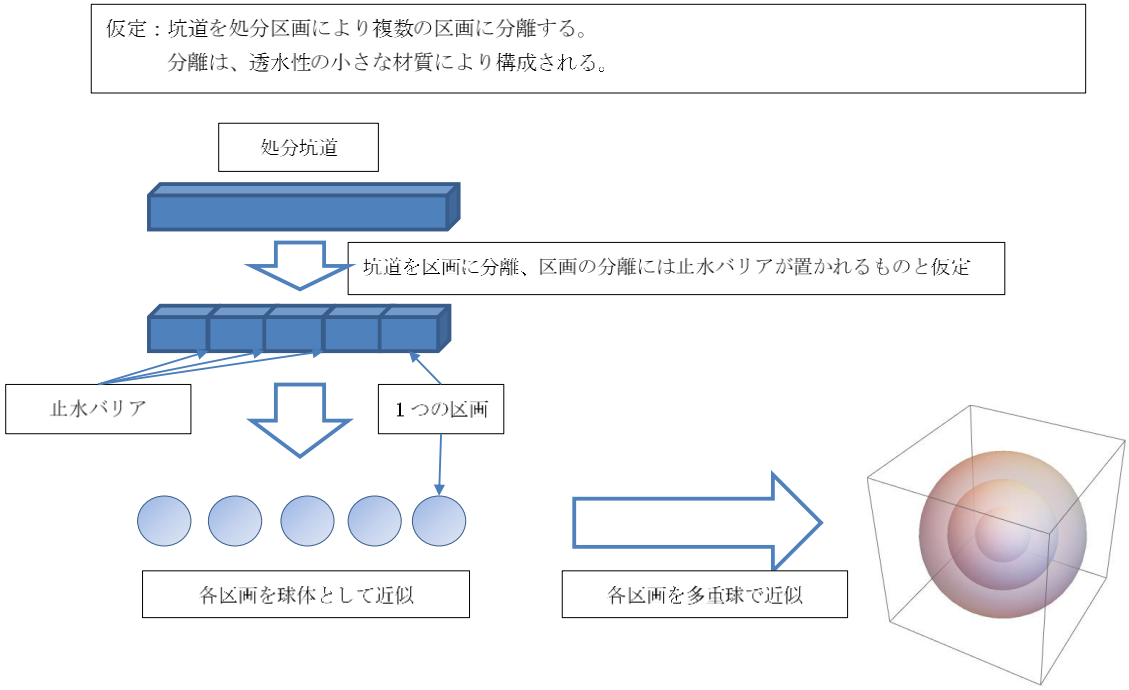


図 1.3-9　坑道の区画分離とモデル化の概念

(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、初年度に策定した 5 ヵ年計画に従い、実験 A～実験 D を通じて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。実験 A は、最も基本的な情報を得るための室内締固め－透水試験である。実験 B 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の実験である。実験 C は電子顕微鏡による締固め土の構造観察、実験 D は中性子イメージング実験となる。

実験 A からは母材に混合した細粒土（珪砂粉、木節粘土、カオリン、ベントナイト）の種類や混合率の違い等が締固め特性と透水特性に及ぼす影響が、実験 B からは締固め時の乾燥密度と飽和度の違いが透水特性に及ぼす影響が、実験データとして取得された。また、実験 C と実験 D からは透水特性を規定する主要な因子の一つと考えられている空隙構造に係る画像データを得た。表 1.3-5 に令和 4 年度までに実施した室内試験の一覧を示す（実験 D は除く）。前年度までに取得したものを含めて、これまでに取得したデータを整理・分析した。一例として、実験 A のうち、1Ec 締固め試料を対象とした透水試験結果を整理したものを図 1.3-10 に示す。同図上の締固め試験結果を見ると、母材に細粒土（珪砂粉、木節粘土、カオリン、ベントナイト）を混合した場合は締固め密度がいずれも増加しているが、非膨潤性の材料を添加した場合に比べ、膨潤性のベント

ナイトを混合した場合、乾燥密度の増加量が少なく、ベントナイト混合率が大きいとその傾向がより顕著になっている。同図下の透水試験結果を見ると、母材⇒非塑性細粒土混合⇒高塑性細粒土混合⇒膨潤性細粒土混合⇒その混合率の増加、の順に、透水係数がそのオーダーを変えながら変化している様子を確認できる。また、同じ母材であっても粒度調整材は乾燥密度に対応した高い遮水性を発揮していることも見て取れる。全ての材料で、透水係数は乾燥側よりも湿潤側のほうが小さくなっており、本研究の端緒である「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」傾向も、さほど顕著ではないものの概ね確認できる。木節粘土やカオリンを混合した材料では、他に比べて乾燥側と湿潤側の透水係数の差がより大きくなっており、その傾向は膨潤性ベントナイトを混合すると再び顕著でなくなることなども図より判別できる。

表 1.3-5　令和 4 年度までに実施した室内試験一覧（実験 A、実験 B、実験 C）

実験種別	供試土	実験条件	数量	摘要
段階的解明実験（実施済）	A.購入砂（単粒母材）	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
	B.購入砂＋10%珪砂粉	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
段階的解明実験（今年度実施）	D.購入砂＋10%カオリン	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
	E.購入砂＋10%木節粘土	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
	F.粒度調整母材	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
実務ターゲット実験（実施済）	C.購入砂＋10%ベントナイト	0.1Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	12	評価には1Ec締固め6点含む
実務ターゲット実験（今年度実施）	G.購入砂＋30%ベントナイト	0.1Ec,4.5Ec締固め試験	12	1Ec6点は既実施
		λk・εk実験	12	評価には既実施の1Ec締固め6点含む
力学試験	D.購入砂＋10%カオリン	一次元圧縮（圧密）試験	6	含水比3水準×２（不飽和・飽和）
	F.粒度調整材(ダムコア＜2㎜)		6	
	C.購入砂＋10%ベントナイト	定圧一面せん断試験	6	含水比3水準×混合率２水準
化学試験	ベントナイト（Na型・Ca型）・カオリン	TG-DTA(熱分析）計測	3	3供試体×含水比変化
		ζ電位計測	3	
顕微鏡観察（長期透水試験後）	C.購入砂＋10%ベントナイト	JGS0312λ_k実験終了供試体	6	昨年度実施済供試体
	G.購入砂＋30%ベントナイト	JGS0312λ_k・ε_k実験終了供試体	12	今年度終了次第実施
顕微鏡観察（材料混合・締固め過程）	C.購入砂＋10%ベントナイト	混合・加水・練混ぜ・静的締固めの各過程で顕微鏡観察	適宜	・含水比を乾燥⇒最適⇒湿潤で変化 ・混合（団粒化）の観察と撮影 ・締固め前⇒締固め後の撮影 ・混合順序の違いの影響も検討
	G.購入砂＋30%ベントナイト			
	D.購入砂＋10%カオリン			

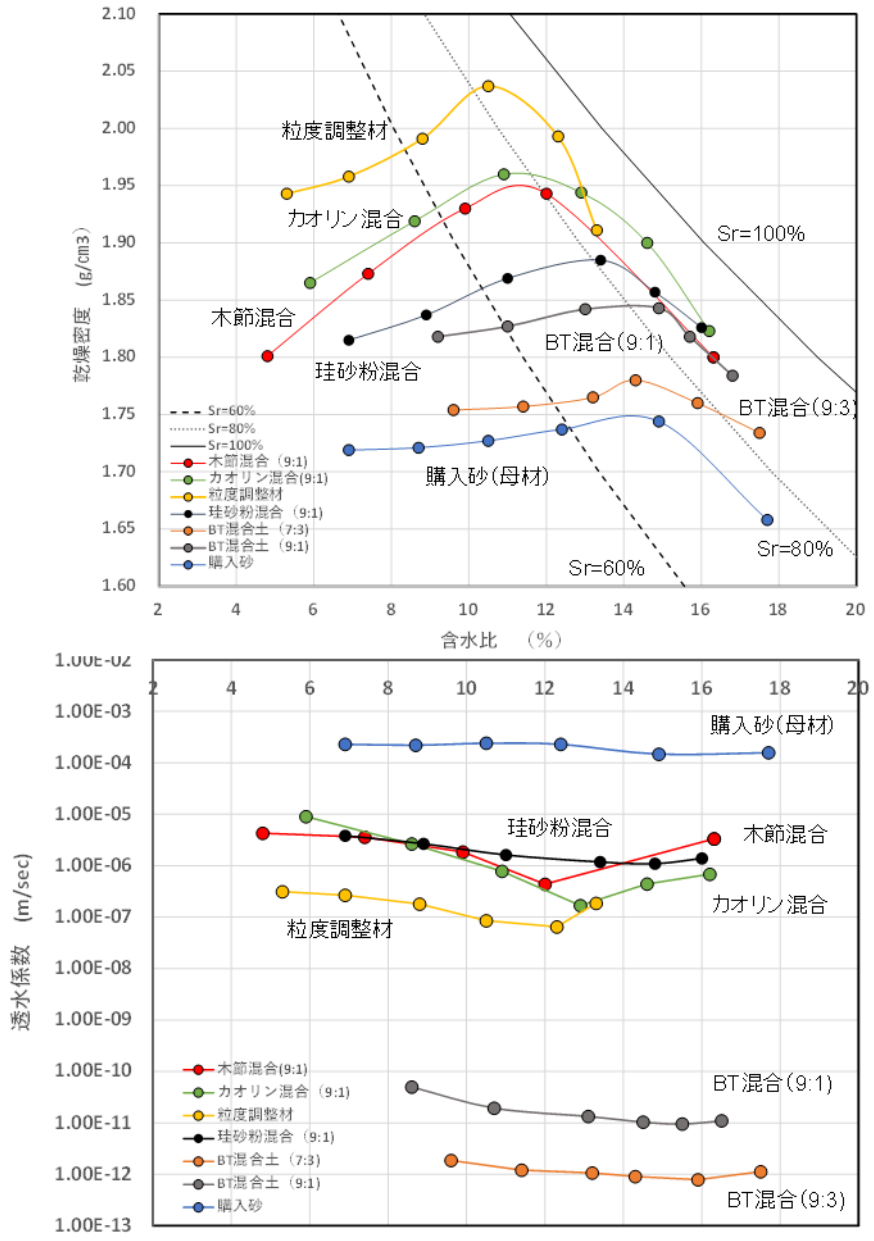
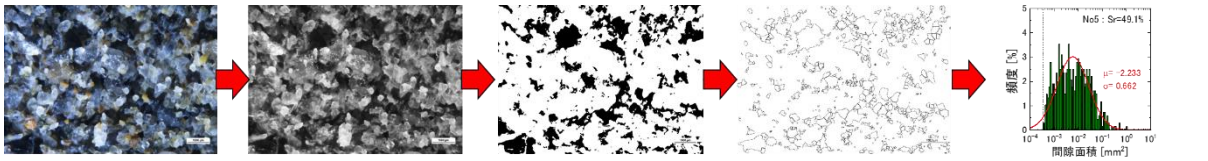


図 1.3-10　実験 A（1Ec 締固め-透水試験）の結果

顕微鏡画像で観察された間隙構造の違いは、間隙の大きさや形状、数やばらつきとして現れると考えられることから、実体顕微鏡による土粒子間隙構造観察（実験 C）で得られた顕微鏡画像に対して画像解析を実施し、間隙の大きさをヒストグラムで表すことで間隙構造の違いの定量的な評価を試みた。画像解析では元画像をグレースケールに変換し、閾値 70 にて二値化処理を実施、黒い部分を間隙相当であると設定し面積分布のヒストグラムを作成した。図 1.3-11 に画像解析の手順を示す。

実験 A～D の結果を用いてのベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの説明手順について検討し、最初の仮説を提示した。次年度にその検証を行うこととした。



① 元画像　② グレースケール画像　③ 二値化処理画像　④ 間隙面積分析　⑤ 間隙面積ヒストグラム

図 1.3-11　画像解析の手順

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 4 年度の検討の経緯を表 1.3-6 に示す。

表 1.3-6　令和 4 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 4 年 7 月 26 日	(web 会議)	● 令和 4 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 4 年 11 月 2 日	(web 会議)	● 令和 4 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 5 年 2 月 15 日	(web 会議)	● 令和 4 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] 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.

[3] 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.

[4] https://www.pflotran.org/. PFLOTRAN Documentation（The current version of PFLOTRAN is 4.0 and was released January 06 2021）. 2021.

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　試験装置の詳細設計

2.1.1　実施概要

(1) 目的と概要

堆積軟岩を対象に、鉛直孔（深度－200m 程度まで）で、3 次元初期地圧を測定することを目的として、応力解放法の一種である孔壁ひずみ法と円錐孔底ひずみ法を応用した「円錐孔壁ひずみ法」（図 2.1-1 参照）の開発を進めている。

今年度は、測定方法を確立することを目的として、候補となる材料や装置を用いて室内検証試験を行った。また、掘削方法を中心とする課題を把握するために、現場検証試験を行った。更に、次年度の検証試験で試験装置の妥当性を検討できるよう、試験装置各種の詳細設計と製作を進めた。

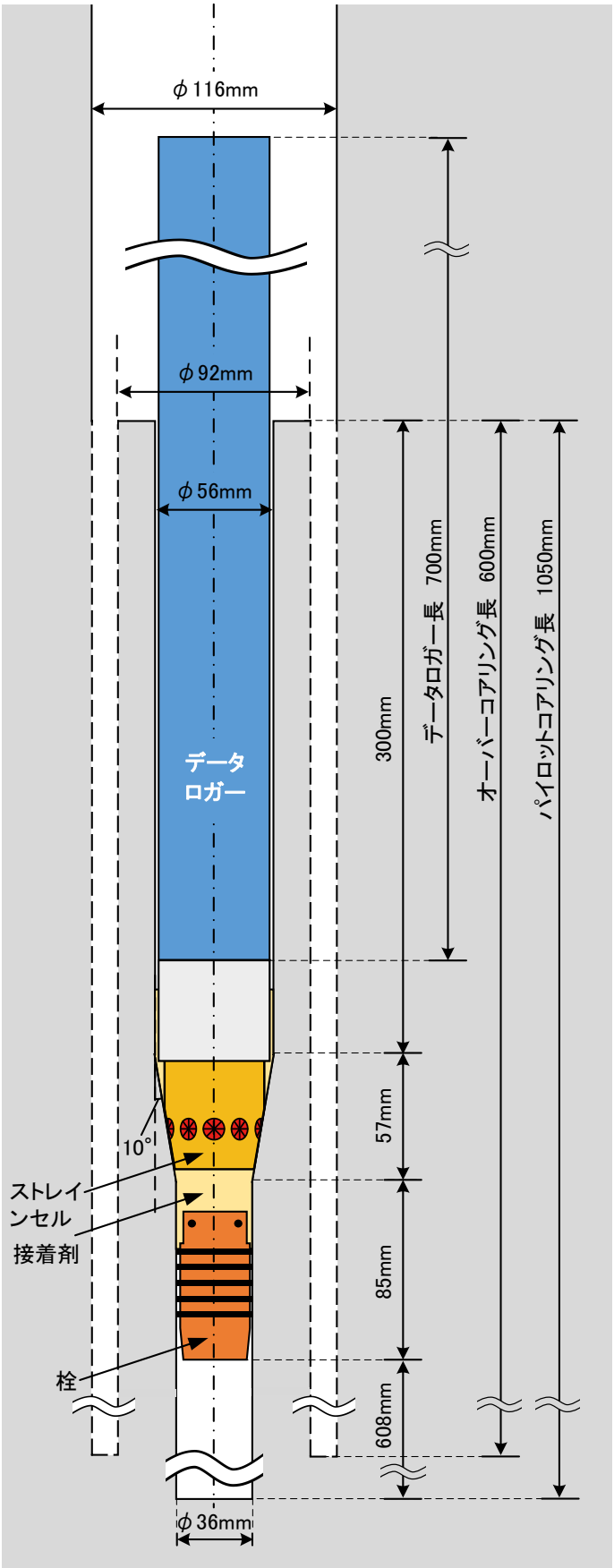


図 2.1-1　円錐孔壁ひずみ法の概要図

(2) 実績工程

実績工程を図 2.1-2 に示す。計画していた各実施項目を工期内に実施した。

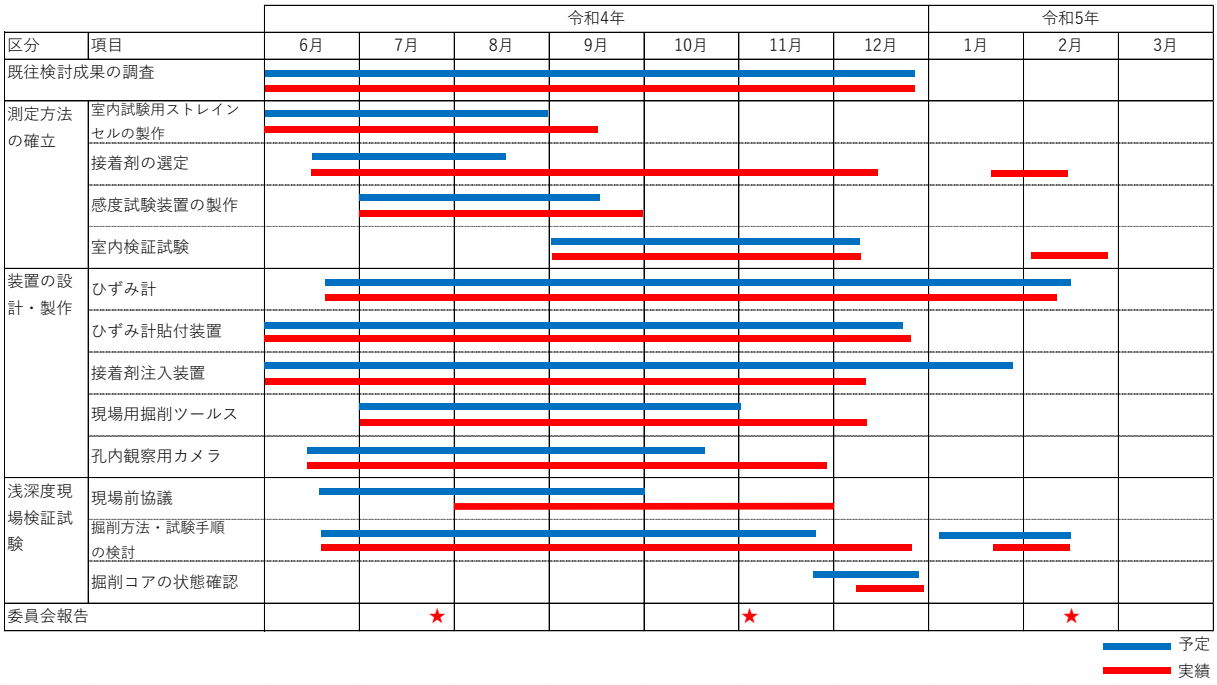


図 2.1-2　実績工程

2.1.2　室内検証試験と装置の設計検討

(1) 基本設計の内容

1）測定手順

a．測定手順の概要

円錐孔壁ひずみ法の測定手順について検討を進め、測定手順を図 2.1-3 及び図 2.1-4 に示すように整理した。図中の①～⑩の各ステップの方法や留意点を以下に記載する。

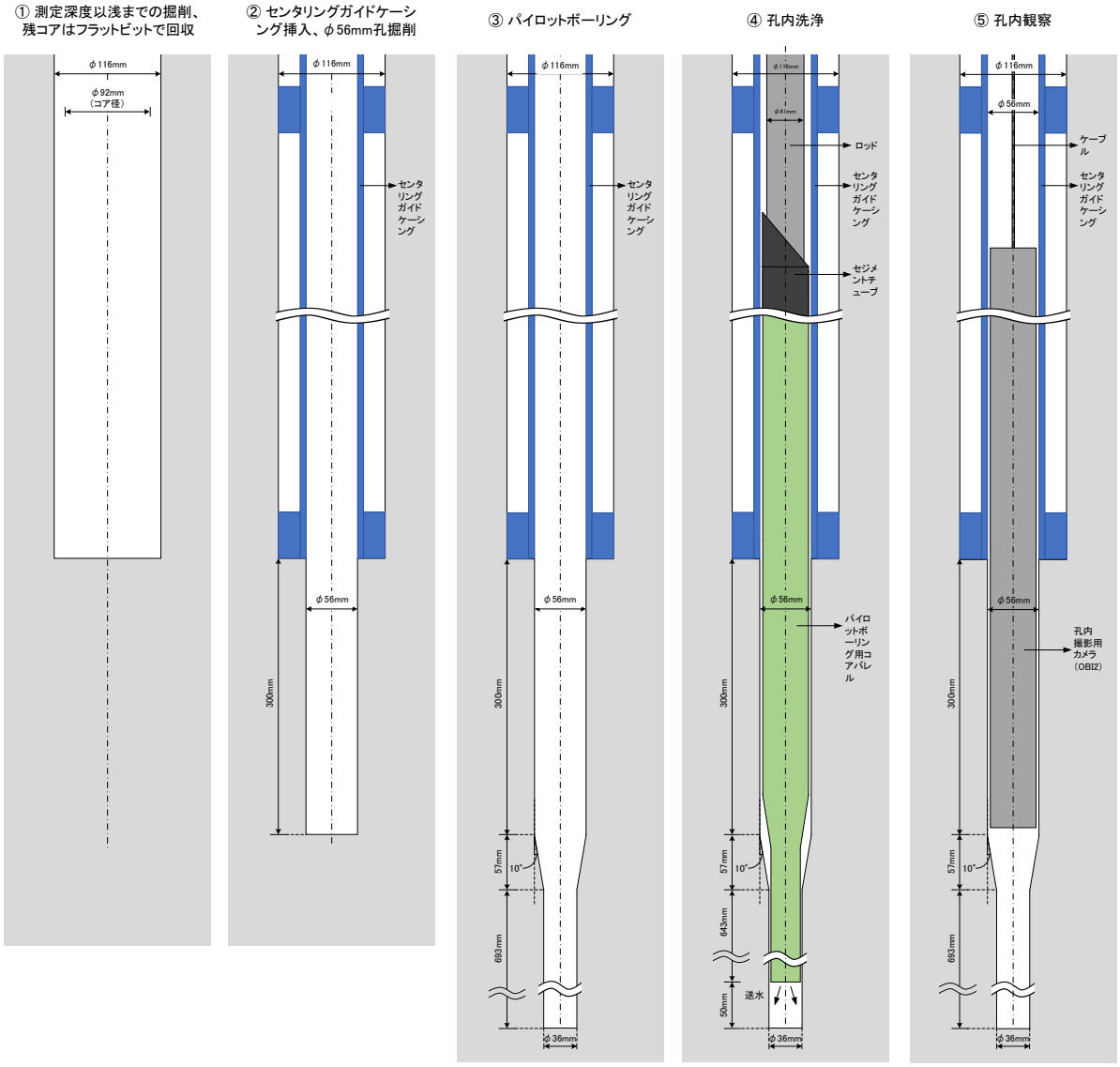


図 2.1-3 円錐孔壁ひずみ法の測定手順（その 1）

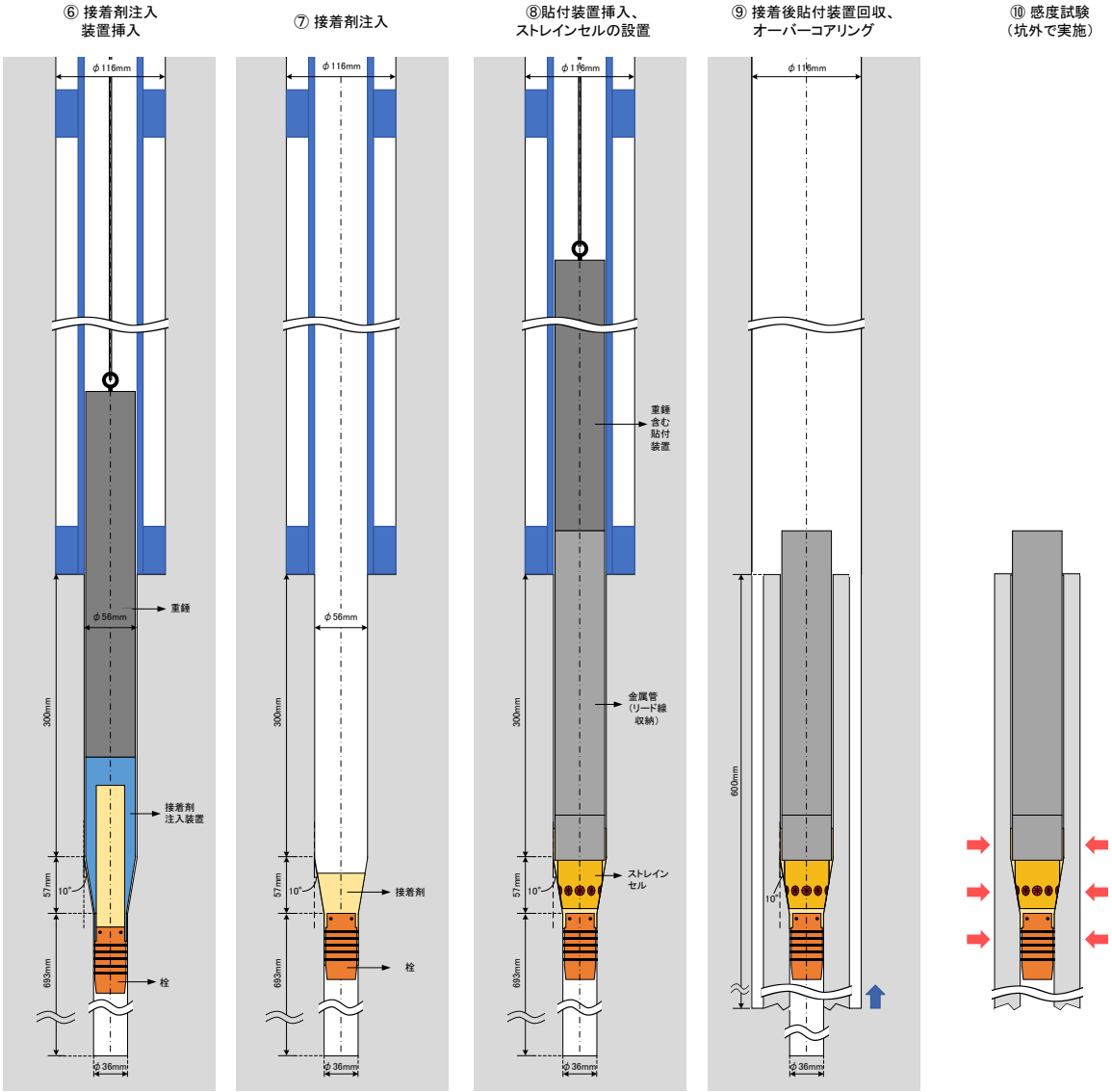


図 2.1-4 円錐孔壁ひずみ法の測定手順（その 2）

b. 測定手順（1）－測定深度以浅までの掘削

図 2.1-3 のステップ①にあたる測定深度以浅までの掘削では、ステップ⑨のオーバーコアリングと同じ孔径（116mm）で掘進を行う。この際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。また、深度が深い場合には、剛性の高いロッドを使用し、芯ぶれや孔曲がりを防ぐ。

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。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、間隙水圧計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り孔底形状に凹凸がある場合、ステップ②で挿

入するセンタリングガイドケーシングの底部で隙間が生じ、掘削時のスライムが流出入しやすくなり、ストレインセルの接着失敗のリスクが高まる。そのため、フラットビットによりφ116mm 孔の孔底整形を行う。この際、セジメントチューブをフラットビットの上に接続する構成とし、スライムの回収を併せて実施する。

c. 測定手順（2）－パイロットボーリング及び孔底整形

図 2.1-3 のステップ②に示すように、φ116mm 孔の孔底中心からストレインセル設置のためのφ56mm 孔を掘削する。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、測定精度に影響する。そこで、φ116mm 孔にセンタリングガイドケーシングを挿入した状態でφ56mm 孔を掘削する。また、孔曲がりや芯ぶれを防止するため、コアバレルの上部やロッドの間にはセンタリングガイドケーシングの内径に適したセンタライザを接続して使用する。φ56mm 孔の掘進長は、ひずみ感度係数への影響を無視でき［1］、かつ掘削による損傷が生じるリスクを抑えられるように 300mm とする。

その後、図 2.1-3 のステップ③に示すように、円錐部及びその下部のφ36mm の部分を一度に掘削することで所定の形状に仕上げる。φ36mm 孔の部分はスライム溜まりとして機能させることを意図している。この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を用いたオールコアボーリングとし、試験位置周辺の岩盤状態を可能な限り確認するようにする。この際も、孔曲がりや芯ぶれを防止するため、コアバレルの上部やロッドの間にはセンタリングガイドケーシングの内径に適したセンタライザを接続して使用する。

掘削終了後は、図 2.1-3 のステップ④に示すように、コアチューブを 1～数 cm 上げた状態で掘削時と同様に清水の送水を実施し、センタリングガイドケーシング内を通って地上に排出される水の透明度が高まるまで十分に孔内洗浄を実施する。

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、図 2.1-3 のステップ⑤に示すように、掘削・洗浄後にはセンタリングガイドケーシング内に孔内カメラ（鉛直下方向を十分な解像度で撮影可能なもの）を挿入し、岩盤及び孔内水の状態を目視確認する。

円錐部の孔壁に割れ目の存在や岩質の不均質性が確認されるなどして、測定に適さないと判断される場合は、状態に応じて、再度、ステップ①～ステップ⑤の手順を実施する。

d. 測定手順（3）－ひずみ測定器の設置

次に、ストレインセルを円錐孔壁部に接着させるため、図 2.1-4 のステップ⑥に示すように、孔内に接着剤注入装置を挿入して接着剤を注入し、ステップ⑦に示すように、円錐孔壁部付近に接着剤が溜まった状態を作り出す。この際、接着剤注入装置先端をφ36mm 孔に押し込んで栓を残すことで、注入装置引き上げ時に接着剤容器が開放され、接着剤が流下する。このφ36mm 孔の栓により、スライムのまき上がりが防止され、孔内に注入す

る接着剤の量が大量にならなくても円錐孔壁部に十分な接着剤がある状態となる。

接着剤注入装置を引き上げた直後には、図 2.1-4 のステップ⑧に示すように、ひずみ計貼付装置を挿入し、接着剤が溜まった円錐孔壁部にストレインセルを押し付けて接着し、ひずみ測定器（ストレインセル及びデータロガー）を設置する。この方法をどぶづけ接着法と呼ぶ。この方法により、水没した孔内の堆積軟岩に対しても簡便かつ確実にストレインセルを接着できる。また、ストレインセルの表面だけでなく周辺も接着剤で固めることでひずみ測定器が固定され、オーバーコアリングの際に測定位置周辺岩盤の損傷を防ぐことができる。

ひずみ測定器の設置の際は、設置圧や設置深度を適正に管理し計器損傷を防止する。設置後は、ひずみ測定器のみを孔内に残して、貼付装置部分は地上に引き上げ回収する。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。

e. 測定手順（4）－オーバーコアリング及びコア回収

接着剤硬化後、図 2.1-4 のステップ⑨に示すように、オーバーコアリングを行い、ひずみ測定器（ストレインセル及びデータロガー）を含むコアを回収する。オーバーコアリングの際は、応力解放時のひずみ変化データを安定して取得すること、コアをできるだけ破断させないようにすること、並びに、回収コアを感度試験に供するためにコアの側面に乱れが生じないようにすることを考慮して掘削を行う。測定深度以浅までの掘削と同様に、コアチューブはリーマの配置などに注意して使用し、セジメントや剛性の高いロッドなども用いて、芯ぶれや孔曲がりを抑え、孔径が拡大しない掘削となるようにする。

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ため、掘進終了後は、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。

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。

f. 測定手順（5）－感度試験

回収したコアに対しては、図 2.1-3 の⑩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。感度試験を実施する前には、回収コアの周面を観察して損傷や割れ目の有無、岩相やその不均質性を確認し、データの解釈の際に考慮する。また、感度試験後も周圧載荷によってコアが損傷していないか確認する。

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り、コアの破損が生じやすい。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状態にならないように、コアの取り扱いは慎重に行う。

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し、ロガーの収録時間等を考慮し可能な限りコア回収後速やかに測定を行う。

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、載荷速度等の試験条件を決定する。

2）解析方法

検討している解析方法は、以下のとおりである。

初期応力$\{\sigma\}$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、$\{\beta\}$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））、$E$ 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。また、式 2.1.1 を解くために必要なひずみ感度係数は、岩山（2022）[1]により求められており、その係数や考え方をもとに後述する室内検証試験での応力解析を行った。

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$\{\beta\}$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。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。

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。

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

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。

(2) 室内検証試験によるストレインセルの接着に関する検討

1）室内用ストレインセルの製作

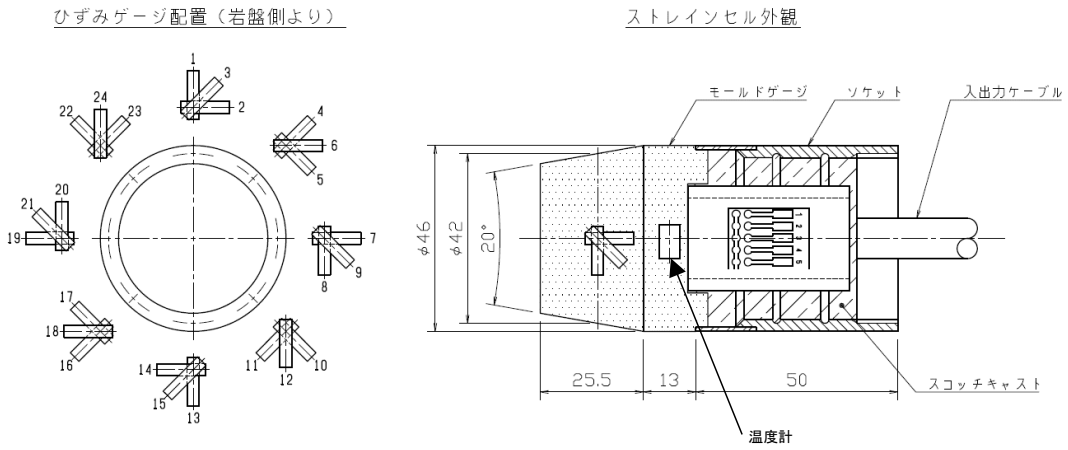
円錐孔壁ひずみ法を実用化するにあたっては、ストレインセルの接着性能や接着方法に関する検討が重要であり、室内検証試験により検討を進めた。室内検証試験実施にあたって、試験に使用するストレインセルを製作した。

ストレインセルによって解放ひずみを精度よくとらえるためには、ストレインセルのヤング率が岩盤のヤング率（1GPa 程度）より十分小さいことが望ましい。一方、ストレインセルが形状を維持することも重要であり、今までの製作実績を考慮して、25MPa と 125MPa の 2 種類のヤング率を有するストレインセルを 5 個ずつ製作した。

製作した室内試験用ストレインセルは、実際に現場で使用する予定のストレインセルと基本的に同じ配置としており、その仕様は以下のとおりである。

・ひずみゲージは 3 成分のロゼットゲージを 8 枚等間隔（45° 間隔）に配置
・ひずみゲージはゲージ長 5mm、抵抗値 120Ω
・温度ゲージはセル表面から 1mm 程度内側に配置
・温度ゲージはゲージ長 3mm、抵抗値 60Ω
・エポキシ樹脂のヤング率は 25MPa と 125MPa の 2 種類
・ソケット部分の外径は 46mm
・リード線は 10m 長

ストレインセルの設計図面を図 2.1-5 に、製作したストレインセルを図 2.1-6 に示す。



（ひずみゲージ 24 成分、温度計 1 成分）

図 2.1-5　室内試験用ストレインセルの設計図

図 2.1-6　室内試験用ストレインセル

2）接着剤注入装置の設計・製作

接着剤の溜まった円錐孔壁部にストレインセルを接着できるように、接着剤注入装置を設計した。具体的な設計内容は、図 2.1-7 に示すように、まず接着剤を内蔵した接着剤注入装置を円錐孔壁に下ろし、装置の自重で 36mm 径の孔に装置下端のゴム板パッカーで栓をし、その後､装置上部を回収することで栓より上部に接着剤を注入するというものである｡また、装置自体の設計図を図 2.1-8 に示す。

以上の設計内容に基づいて製作した接着剤注入装置（図 2.1-9(a)参照）を用いて、円錐孔壁を含む所定の形状に掘削した岩石ブロックの孔内に接着剤を注入し、動作確認を行ったところ、動作性に問題が無いことを確認した（図 2.1-9(b)、(c)参照）。また、①孔径 36mm の孔内への栓の挿入に必要な荷重、②接着剤注入装置本体と栓の分離に必要な引張り荷重、③

栓が引抜けてしまう荷重 をそれぞれ測定した（図 2.1-9(d)参照）。

上記①～③の測定結果は以下のとおりであった。

・①押し込み荷重は 18N～25N（図 2.1-10、図 2.1-11 参照）

・②栓の分離に必要な荷重は 36N（図 2.1-10 参照）

・③栓が孔内から引き抜ける荷重は 122N（図 2.1-11 参照）

以上より、栓が孔内から抜けてしまう荷重は栓が分離する荷重よりが十分に大きく、今の機構で栓が孔から抜けることなく分離できることが示された。原位置で孔径が大きくなる場合に備えて装置や使用方法の検討を進める。

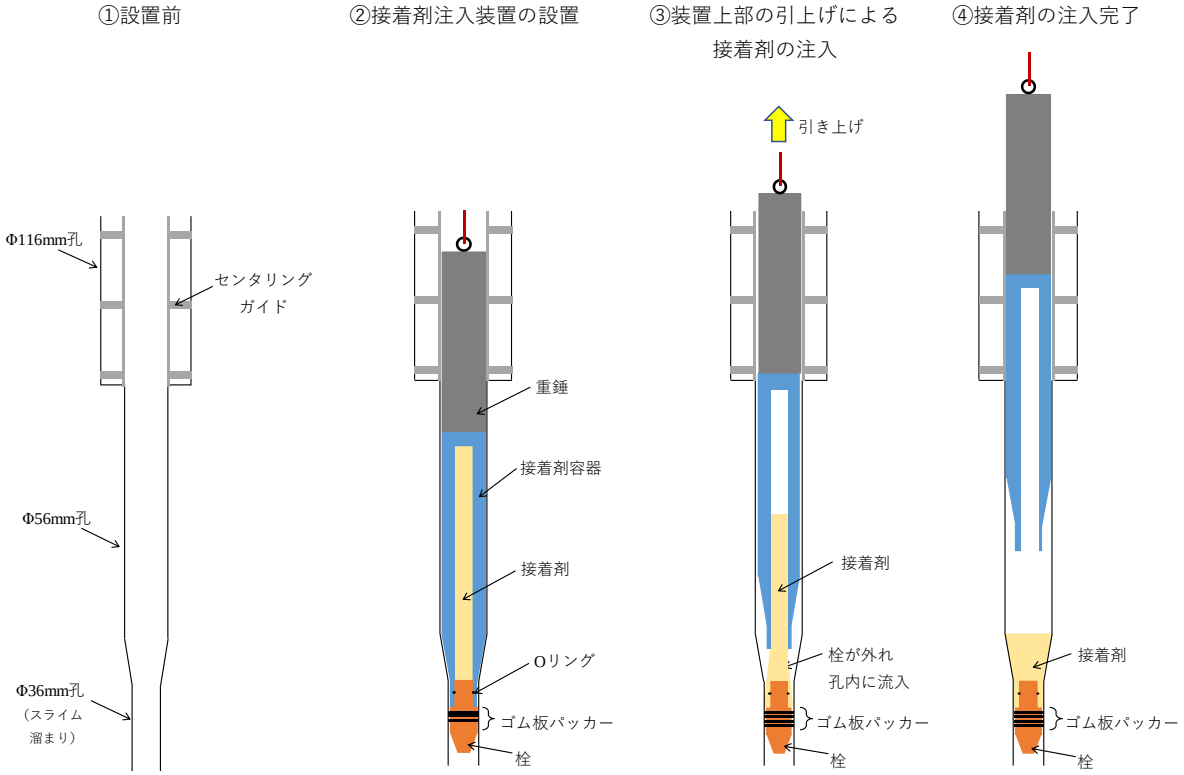


図 2.1-7　接着剤注入装置による円錐孔壁への接着剤の注入手順

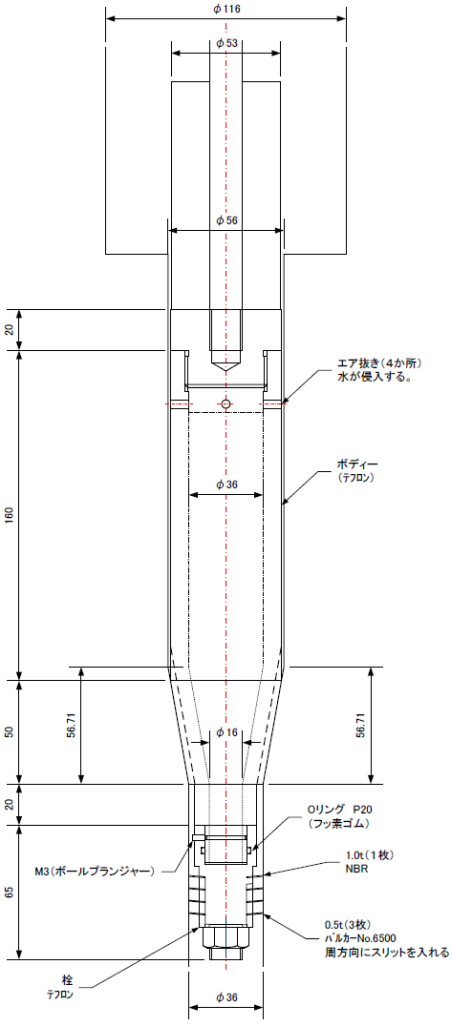
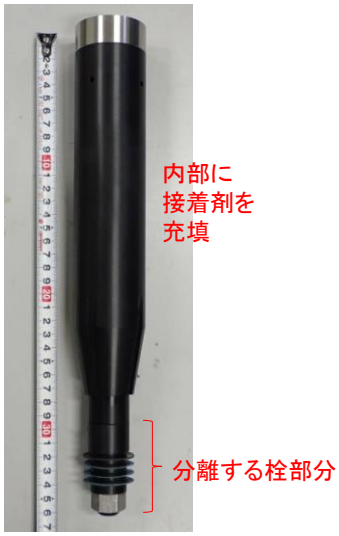
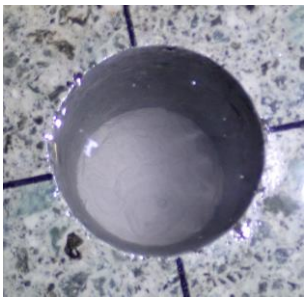


図 2.1-8　接着剤注入装置の設計図



(a) 接着剤注入装置

(b) 接着剤注入装置への
接着剤の充填状況



(c) 注入後の接着剤

(d) 注入装置下端の栓の引き
抜き荷重の確認試験状況

図 2.1-9　接着剤注入装置とその性能確認試験状況

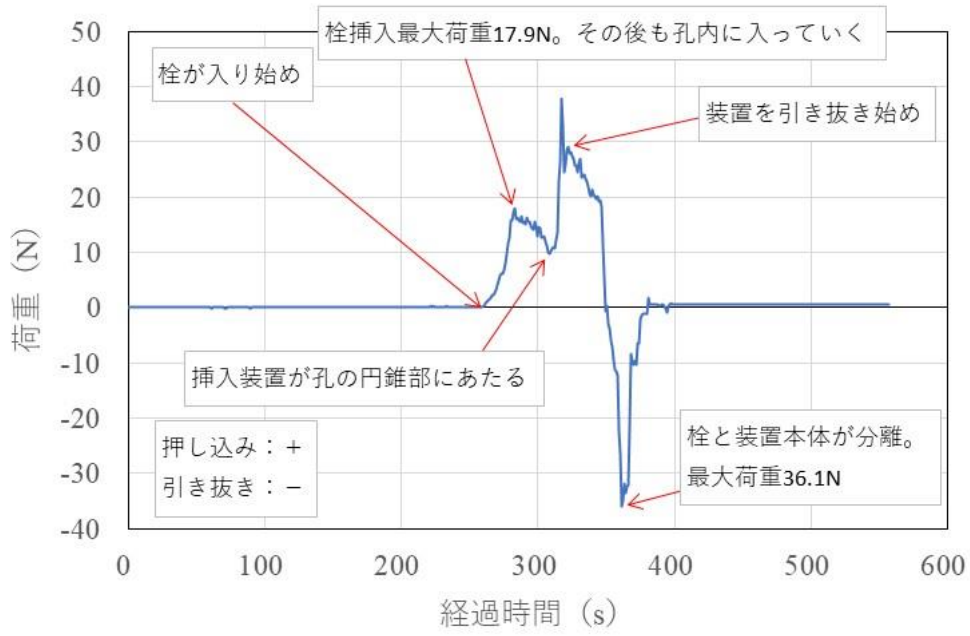


図 2.1-10　接着剤注入装置の孔内への挿入及び本体と栓の分離に必要な荷重の確認試験結果

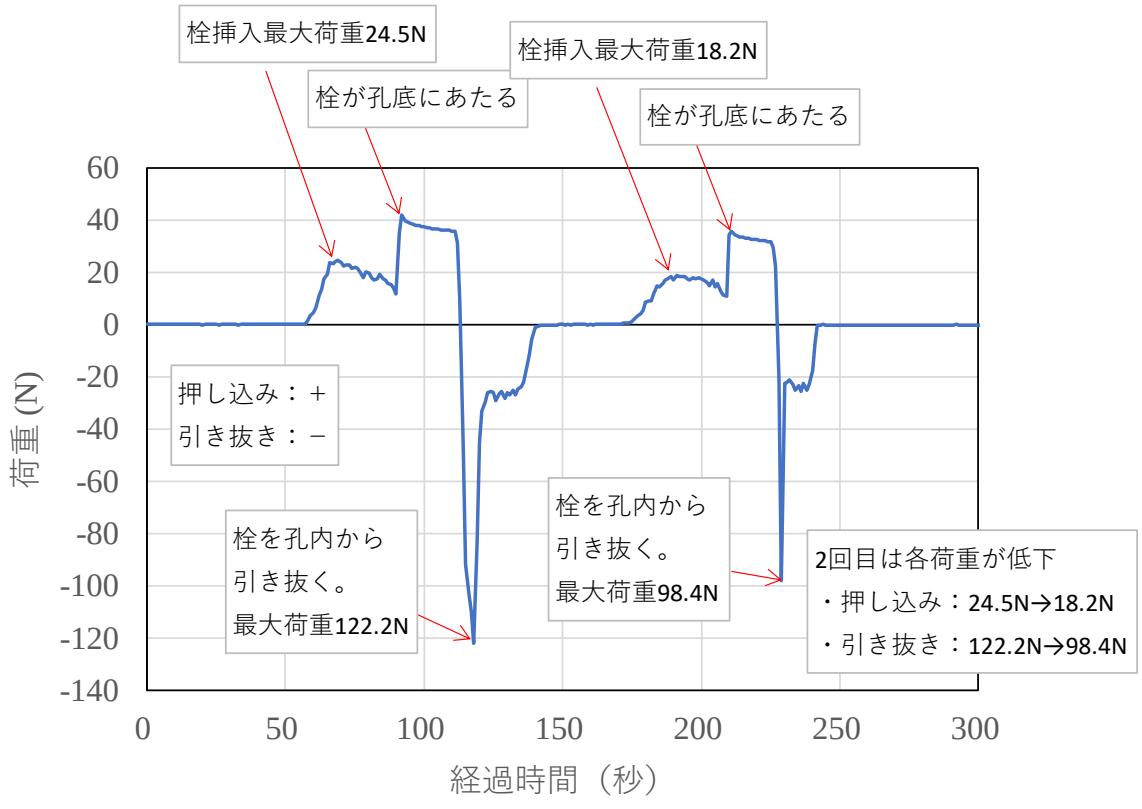


図 2.1-11　接着剤注入装置下端の栓の挿入・引き抜きに必要な荷重の確認試験結果

3）接着剤の物性試験

環境（水中、軟岩、温度）に対して使用する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正確に測定できない。そこで、令和 3 年度業務において、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複数選定し、室内試験により比較検討を行って接着剤を選定した。その結果から、後述する HIC 接着剤を有力な接着剤として選定した。この接着剤の経時的な物性変化を室内試験により検討した。

一方で、今年度に実施した室内検証試験では、HIC 接着剤の弱点が認められた。後述するとおり、HIC 接着剤の硬化後のヤング率が大きいことで、岩石の変形をどぶづけした接着剤が拘束し、ストレインセルで測定されたひずみの値が小さくなる傾向が室内検証試験で認められた。そこで、別の接着剤の候補として、ストレインセルのエポキシ部の製作に用いているエポキシ樹脂接着剤を選定した。この接着剤は配合の仕方により硬化後の剛性を小さくできる。ストレインセルのエポキシ部の剛性については、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岩盤のひずみを拘束し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や貼付装置の重量のもとでストレインセルに過大な変形が生じてひずみの測定位置や方向が設計と変わってしまい測定精度が低下する。そのため、貼付装置等の重量、対象岩盤の剛性を考慮して測定に最適な材質を選定している。この特徴を活かすことで、接着剤としても活用可能と判断した。

上述のとおり、円錐孔壁にストレインセルを貼り付けるために用いる接着剤として、以下の 2 種類を検討した。

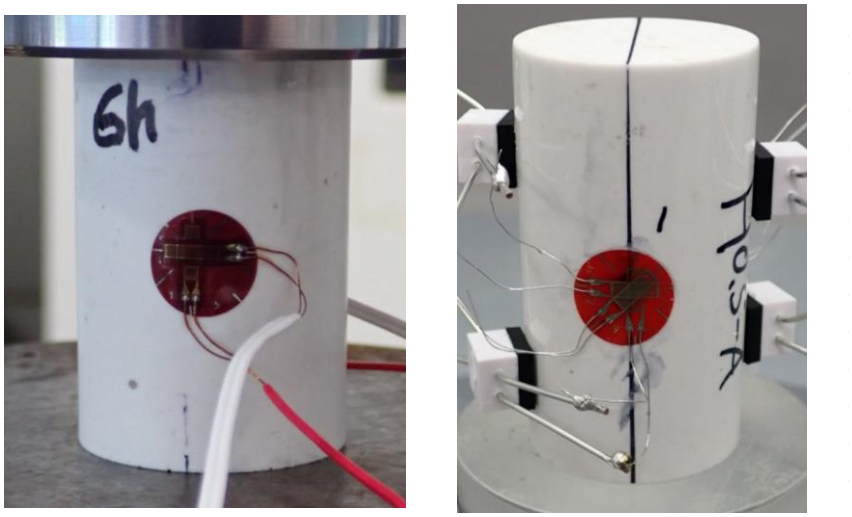
(1) HIC 接着剤　　：硬化後のヤング率 3,180MPa ～ 4,220MPa

(2) エポキシ樹脂接着剤　：硬化後のヤング率　25MPa ～　548MPa

HIC 接着剤（ESS Earth Sciences 社製）は樹脂と硬化剤の 2 液を混ぜ合わせて使用する。また、硬化剤の量を減らすことで可使時間や硬化時間を長くすることができるため、標準配合（樹脂 130g と硬化剤 30g を混合、合計約 100ml）と硬化剤の量を 1/2 にした配合（樹脂 130g と硬化剤 15g を混合）の 2 種類の供試体を作製した（図 2.1-12 参照）。この供試体を用いて、非破壊のまま繰返し一軸圧縮試験を行うことにより、ヤング率とポアソン比の経時変化を確認した。試験は室温 21～26℃のもとで実施した。

接着剤の可使時間は標準配合が 20～30 分、硬化剤 1/2 の配合が約 1 時間と、標準配合は可使時間が比較的短い点に使いにくさがあった。しかし、図 2.1-13 に示すように、標準配合のほうが物性が早く安定し、硬化前の粘性がより低いため、孔内での使用により適していると考えた。そこで、以降の室内検証試験では標準配合の HIC 接着剤を用いた。

一方、エポキシ樹脂接着剤（三菱ケミカル社製）は、ストレインセルの材料としても用いており、主剤である jER871（可撓性タイプ）や jER811（希釈タイプ）と硬化剤の ST12 の 3 液を混ぜ合わせて用いる。養生期間は 7 日間として、硬化剤の割合を 26.5%に固定し、主剤の配合比を変えて複数配合のエポキシ樹脂接着剤の供試体を作製し（図 2.1-14 参照）、一軸圧縮試験を実施した。その結果、図 2.1-15 に示すように、主剤のうち jER811 の割合を高めることで、ヤング率が増加する傾向になることが確認できた。そこで、ストレインセルのヤング率に比べて 2～10 倍程度大きく、かつ岩盤のヤング率よりは小さい 277MPa となる配合比の接着剤を用いて、以降の室内検証試験を実施することにした。



(a) 標準配合　　(b) 硬化剤1/2の配合

図 2.1-12　HIC 接着剤供試体

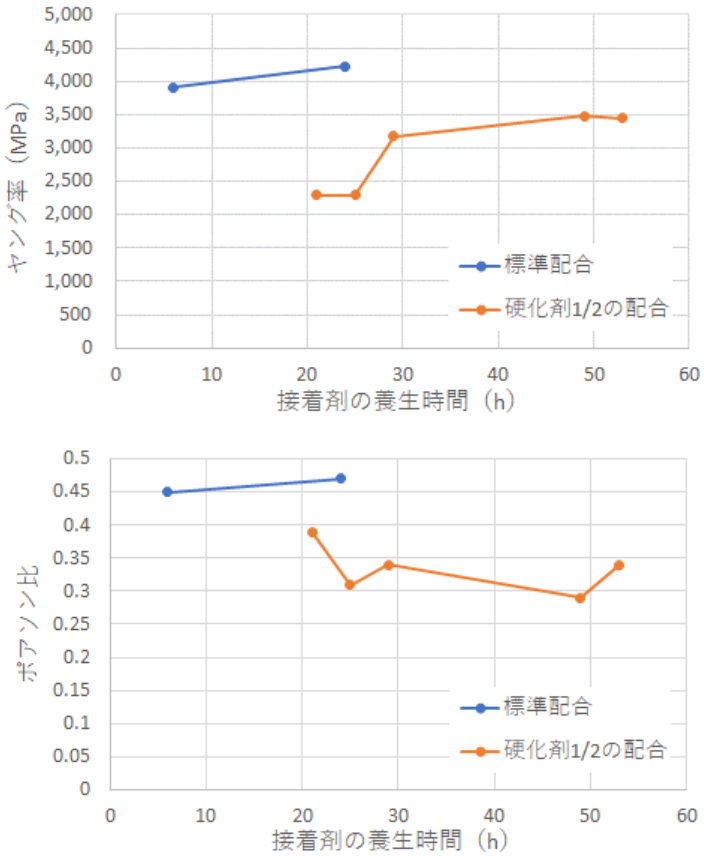


図 2.1-13　HIC 接着剤供試体の非破壊一軸圧縮試験によるヤング率とポアソン比の経時変化

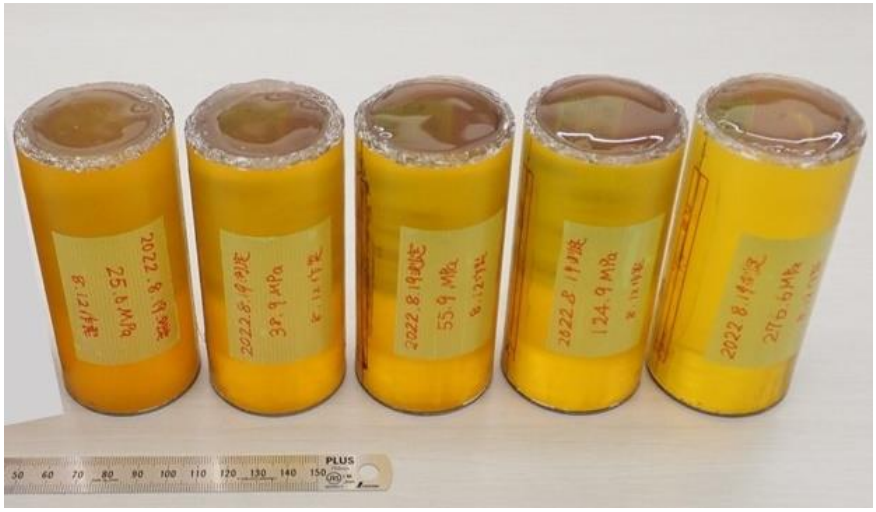


図 2.1-14　配合比の異なるエポキシ樹脂接着剤供試体

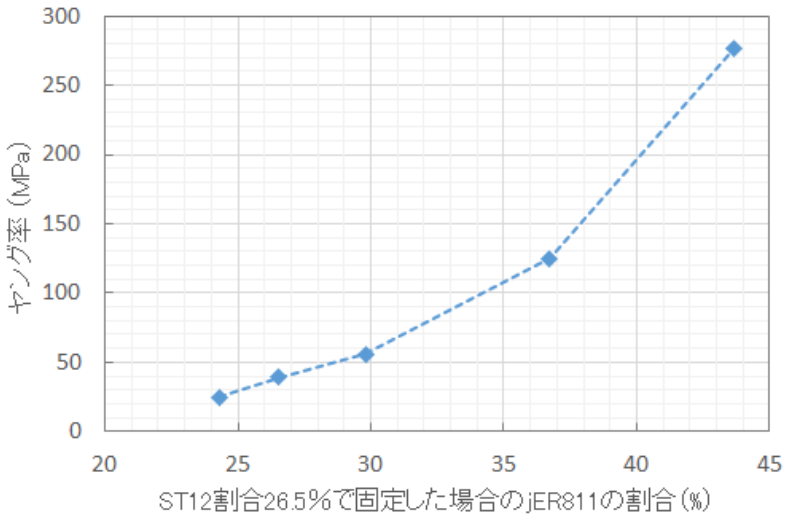


図 2.1-15　複数配合のエポキシ樹脂接着剤供試体の一軸圧縮試験で求めたヤング率

4）水中でのストレインセルの接着試験

HIC 接着剤とエポキシ樹脂接着剤について、水中で岩石にストレインセルを接着する性能を調べるための試験を実施した。

室内検証試験で使用した岩石は以下の 3 種類である。

・青森県六ヶ所村（日本原燃濃埋敷地内）で採取した鷹架層中部層軽石凝灰岩層（T2pt）の軽石凝灰岩（以下、「軽石凝灰岩」と記す）
・購入した大谷石（軽石火山礫凝灰岩）（以下、「大谷石」と記す）
・購入した本小松石（安山岩）（以下、「本小松」と記す）

a. HIC 接着剤を用いた場合

一辺 300mm の立方体の岩石ブロック（軽石凝灰岩、大谷石、本小松の 3 種類）に円錐孔壁を掘削し、孔内を水で満たした。その後、現場を想定した時間配分で孔内に HIC 接着剤を注入して円錐孔壁にストレインセルを圧着した。具体的な手順は以下のとおりである。

① 接着剤 2 液を混合
② 容器に入った状態の接着剤を気中で 5 分間静置
③ 容器に入った状態（容器上部が開いており接着剤と水が触れる状態）の接着剤を水中で 5 分間静置
④ 孔内へ接着剤を注入
⑤ 注入開始から 20 分後にストレインセルを挿入して円錐孔壁部に圧着

いずれの岩種でも水中で HIC 接着剤によりストレインセルを孔壁に貼り付けられることを確認した。岩石に接着した様子を図 2.1-16 と図 2.1-17 に示す。

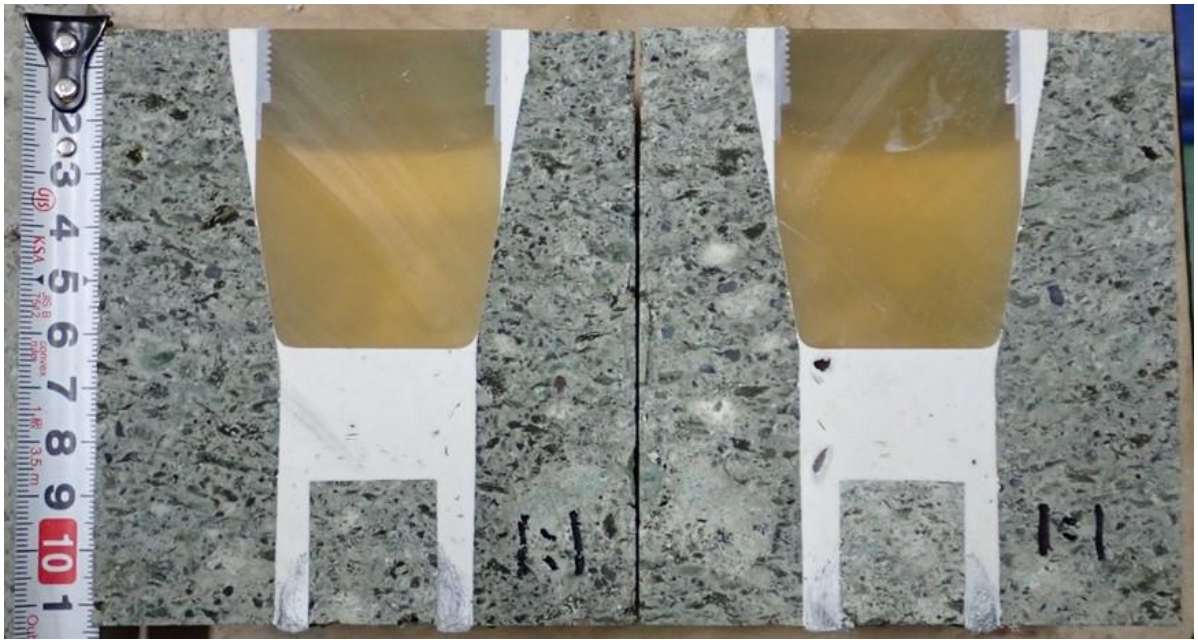


図 2.1-16　大谷石の円錐孔へのストレインセル接着後の断面（HIC 接着剤）

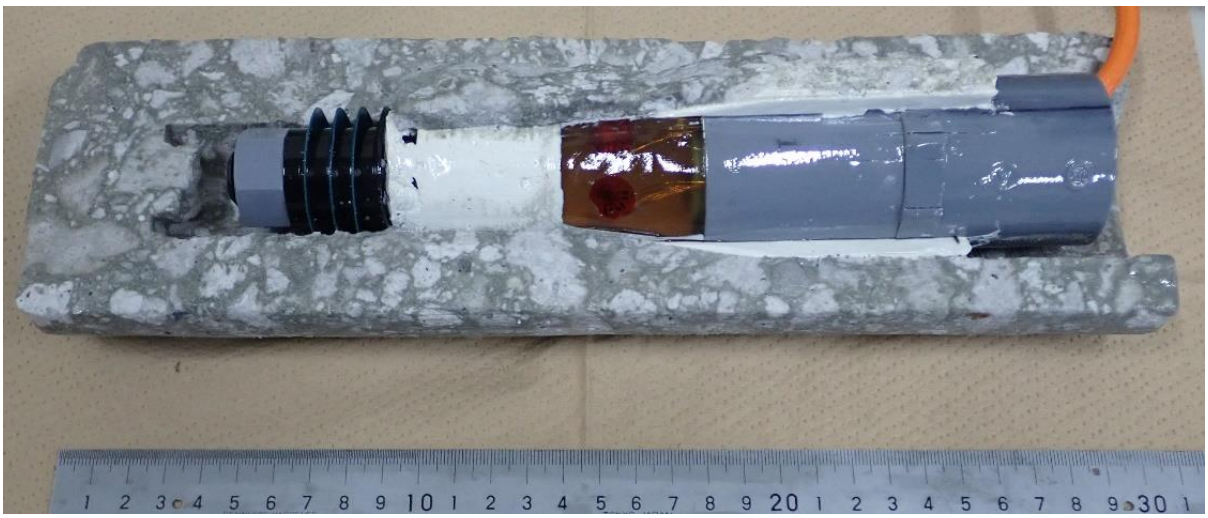


図 2.1-17　軽石凝灰岩の接着部分を露出させ表面をコーティングした状況（HIC 接着剤）

また、圧着に伴うストレインセルのひずみ変化量を観測し、図 2.1-18 に示すように、貼付に適した荷重を検討した。20kg のおもりに対し、最大-1,500～1,000μの範囲でひずみが発生し、-600～700μ程度のひずみで落ち着いた（図 2.1-19 参照）。これは、円錐孔底ひずみ法でのセル設置に伴うひずみ量と同程度である。軽いと接着が不十分となり、重いと孔壁を破壊してしまう恐れがあるため、セル接着時のおもりの質量としては 20kg を基本とすることにした。なお、この試験時の環境は、室温 20～23℃、湿度 70～72%、水温 19～22℃であった。

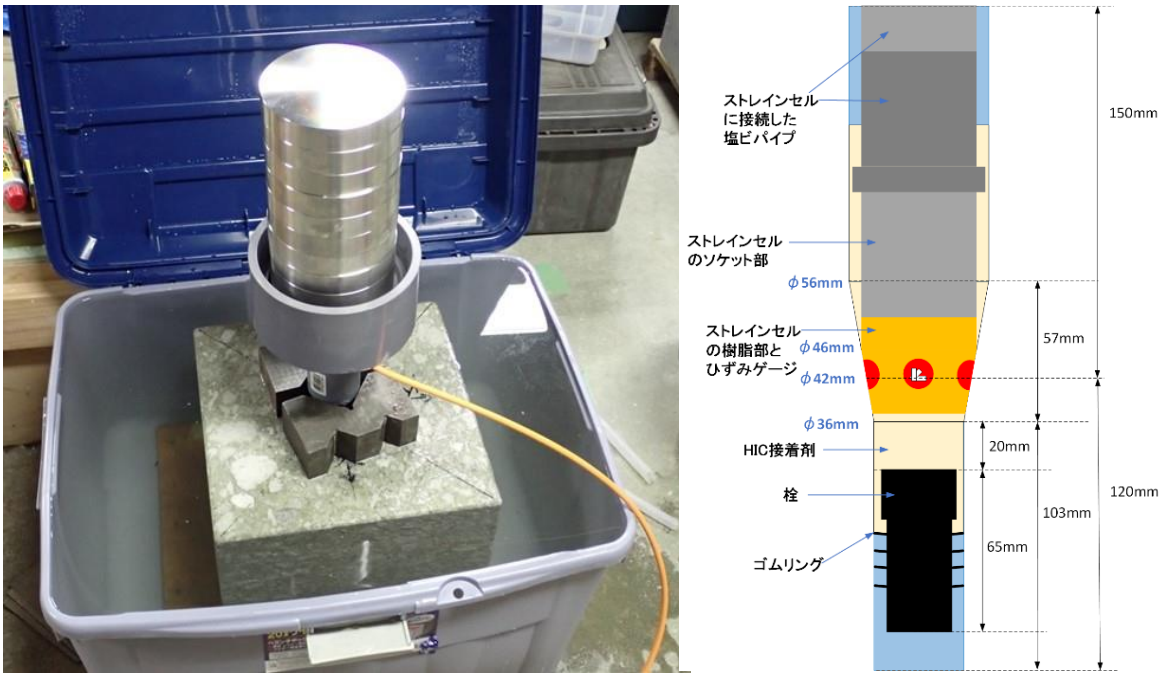
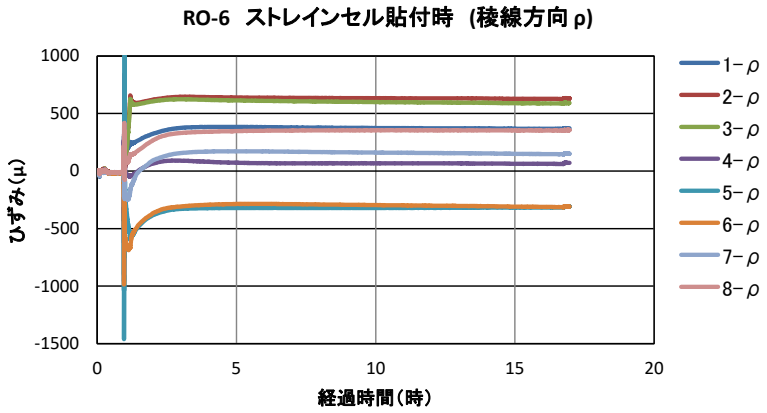
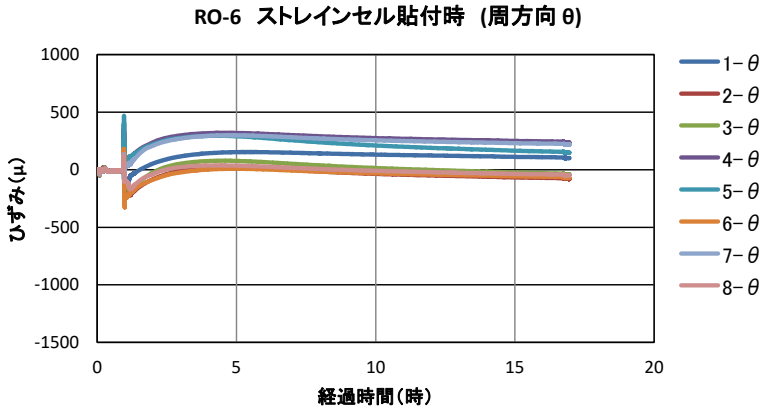
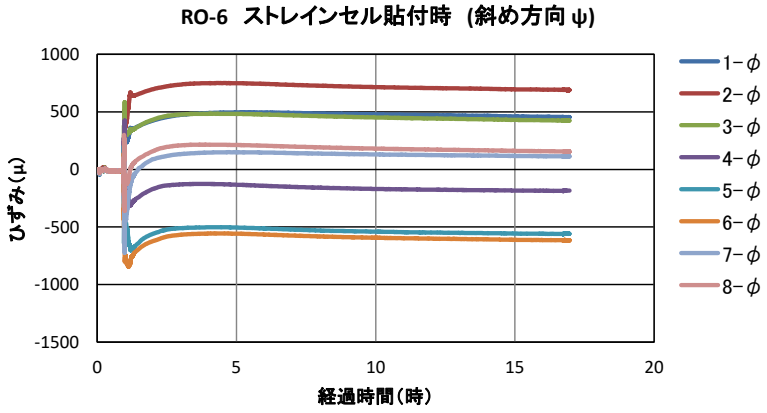
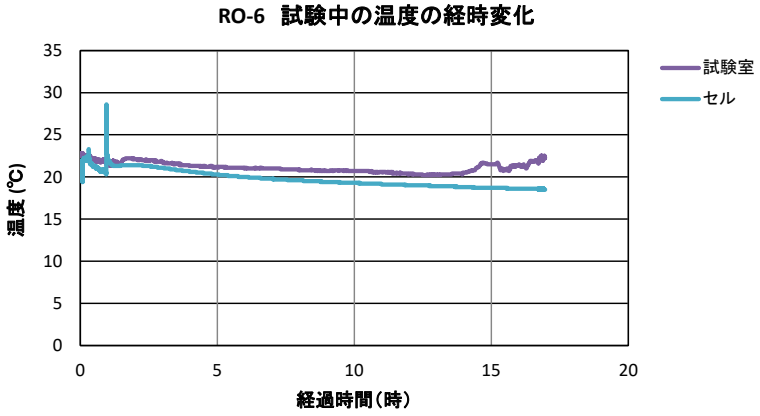


図 2.1-18　水中でのストレインセルの接着状況
（左：実施状況、右：孔内状況）









【ストレインセルのゲージ配置】
ρ:稜線方向
θ:周方向
ϕ:斜め方向

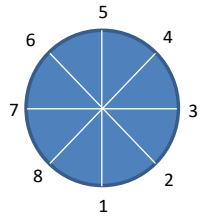


図 孔口から孔底を見たゲージ番号

ひずみ
正:引張
負:圧縮

図 2.1-19 ストレインセル接着時のひずみ変化（軽石凝灰岩 RO-6、HIC 接着剤）

b. エポキシ樹脂接着剤を用いた場合

一辺 300mm 角の岩石ブロック（大谷石、軽石凝灰岩）に円錐孔壁を掘削し、孔内を水で満たし、現場を想定した前述 a.の時間配分で孔内にエポキシ樹脂接着剤を注入して円錐孔壁にストレインセルを圧着させたところ、エポキシ樹脂接着剤でもストレインセルを孔壁に貼り付けられることを確認した（図 2.1-20、図 2.1-21 参照）。

接着剤が十分溜まったところにストレインセルを挿入・接着させるどぶづけ方式であり、ストレインセルは硬化した接着剤によって円錐孔内で固定された。しかし、軽石凝灰岩に貼り付けたストレインセル周辺の接着状況（図 2.1-21 参照）を確認したところ、ストレインセルの上部から上での接着が弱く岩石と接着剤が分離しやすい状態であり、ストレインセルのゲージ部分の接着程度もゲージごとに差が見られた。これについては、接着剤の使用条件や使用方法によって改善される可能性があり、これらの検討は継続して実施する。

図 2.1-20　大谷石の接着部分を露出させた状況（エポキシ樹脂接着剤）

（異なる 2 方向から撮影）

図 2.1-21　軽石凝灰岩の接着部分を露出させた状況（エポキシ樹脂接着剤）

5) ストレインセルを接着した岩石ブロックへの三軸載荷試験

ストレインセルを接着した一辺 300mm 角の岩石ブロックに対して、図 2.1-22 に示すように、鉛直方向及び水平方向直交 2 方向の計 3 方向から独立して載荷し、ストレインセルでひずみ変化を計測した。測定されたひずみと岩石のヤング率及びポアソン比から応力を逆算し、実際に与えた応力と比較して、結果の妥当性を検討した。2 種類の接着剤と 3 種類の岩石ブロックを対象に実施した 5 ケースの試験結果を以下に述べる。

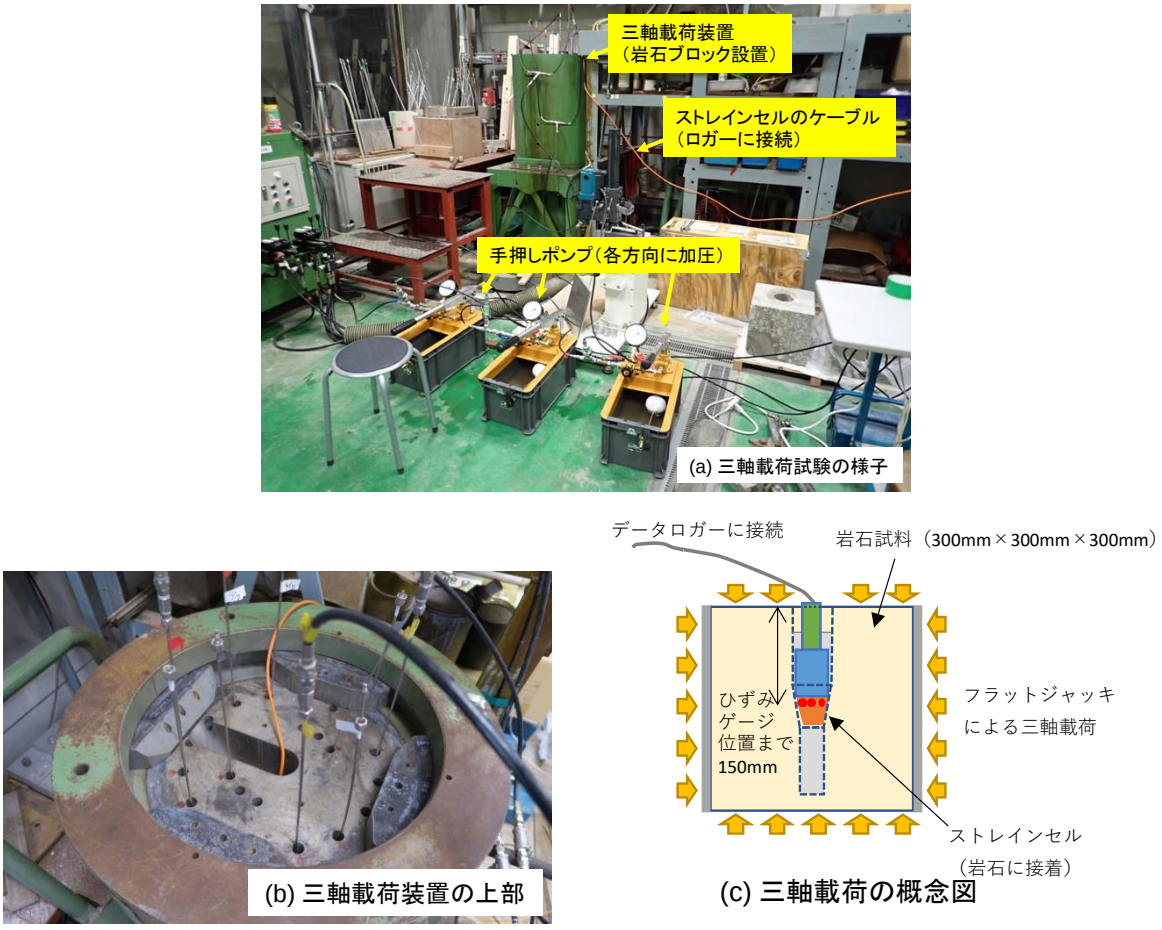


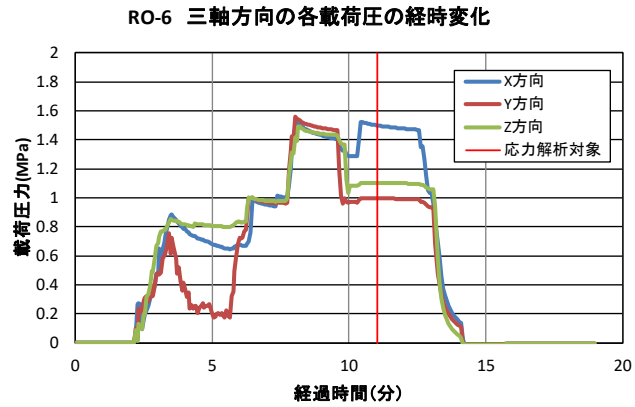
図 2.1-22　三軸載荷試験の様子と概念図

a. HIC 接着剤と軽石凝灰岩ブロックを用いた場合

軽石凝灰岩ブロックに HIC 接着剤でストレインセルを接着し、三軸載荷を実施した。載荷パターンと各方向のひずみ変化を図 2.1-23 に、使用したブロックを図 2.1-24 に示す。図 2.1-23 より、載荷応力に対する各方向のひずみ変化の応答性がよいことがわかる。

また、測定したひずみと一軸繰返し試験（ひずみゲージは HIC 接着剤で貼付、試験のデータシートは添付資料－1 に記載）により求めた軽石凝灰岩供試体のヤング率 996MPa、ポアソン比 0.39 を用いて応力解析を実施したところ、X 方向 1.5MPa、Y 方向 1.0MPa、Z 方向 1.1MPa の載荷圧（実測値）に比べて解析した主応力値（図 2.1-25 参照）は 0.25～0.65 倍小さい傾向がみられた。また、主応力方向は鉛直軸から 30° 傾いた解析結果であった。この試験では、図 2.1-26 に示すように、ストレインセルがやや傾いて接着され

たため、接着状態の影響を受けている可能性がある。また、解析結果の応力が小さい原因については、HIC 接着剤による拘束の影響の可能性が推測された。



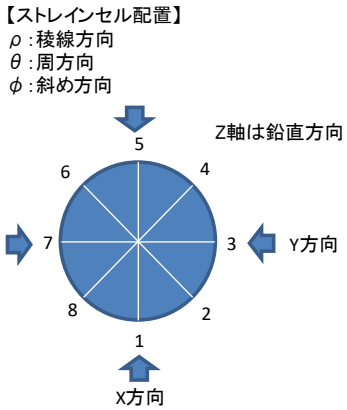
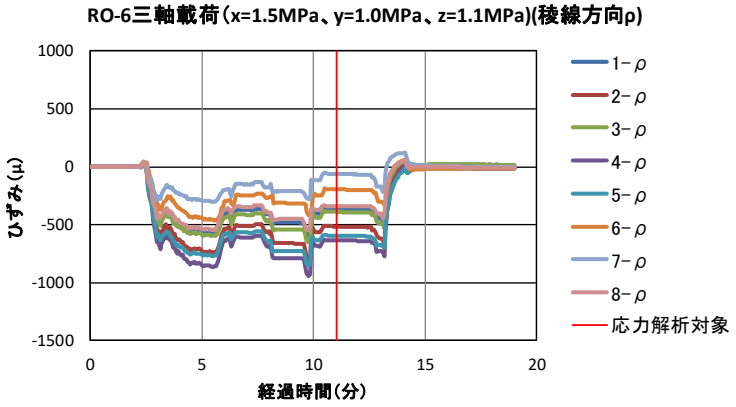
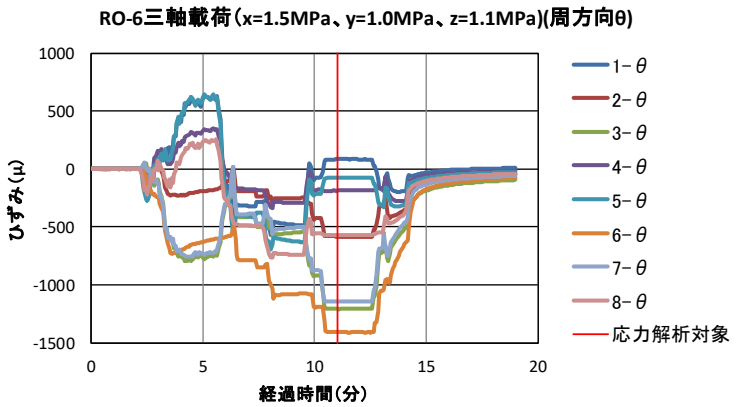


図　孔口から孔底を見たゲージ位置





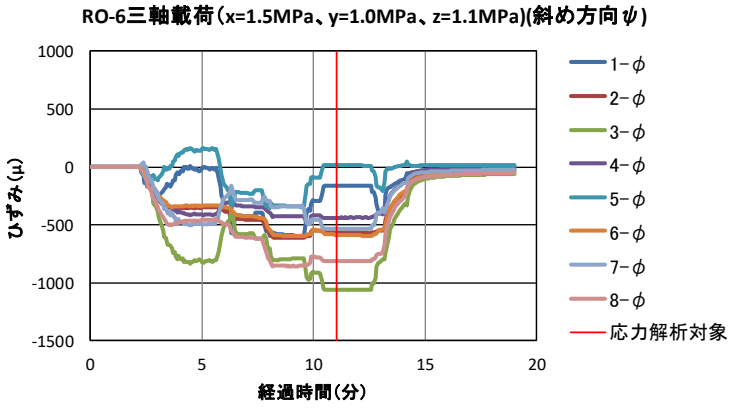


図 2.1-23　養生開始 1 日後の三軸載荷試験結果（HIC 接着剤と軽石凝灰岩 RO-6 を使用）

図 2.1-24　軽石凝灰岩ブロック RO-6 の様子（載荷前）

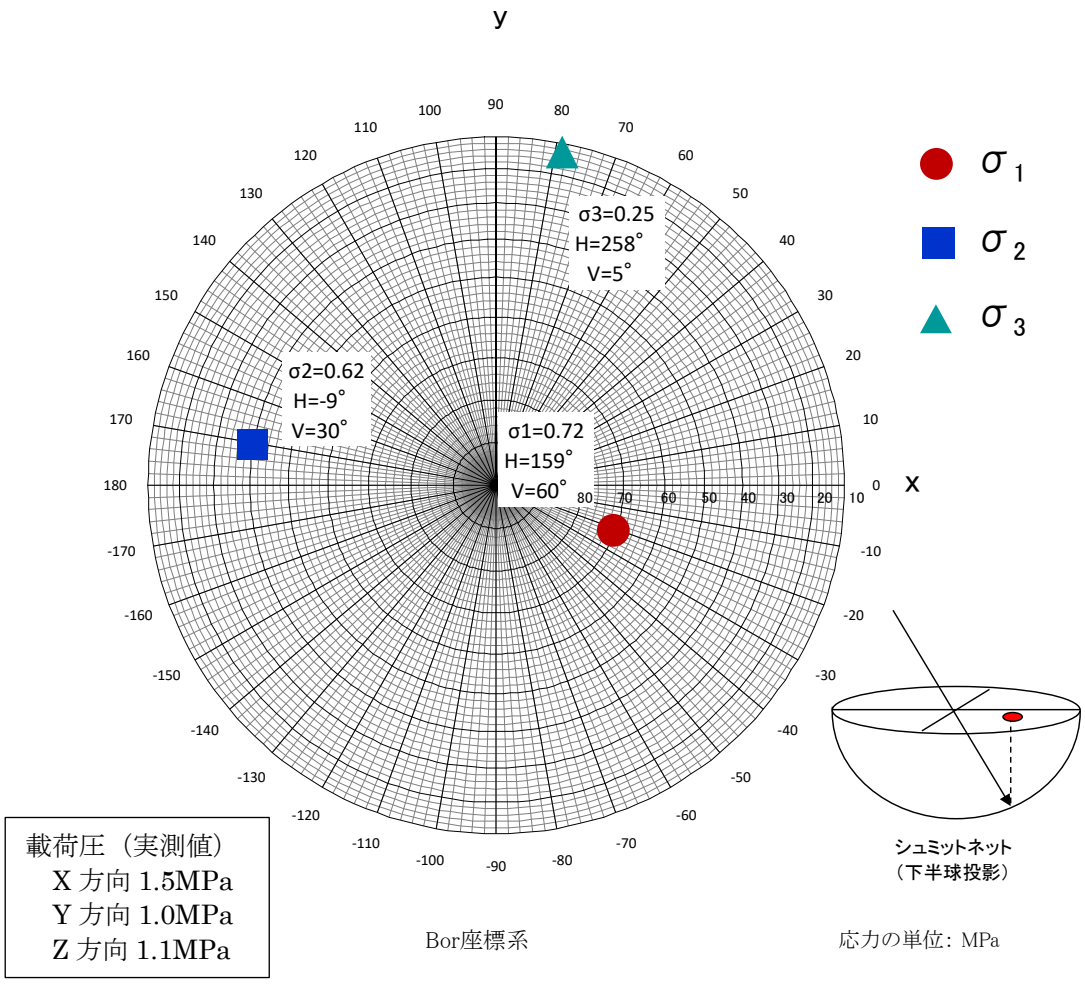


図 2.1-25　三軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と軽石凝灰岩 RO-6 を使用）

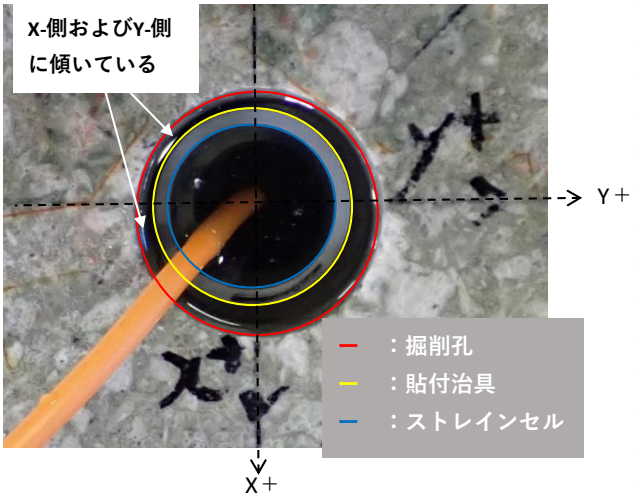


図 2.1-26　RO-6 の孔内に接着したストレインセルの傾き具合

b. HIC 接着剤と大谷石ブロックを用いた場合

大谷石ブロックに HIC 接着剤でストレインセルを接着し、X・Y の 2 方向から二軸での載荷試験を実施した。試験に用いた岩石ブロックを図 2.1-27 に、載荷パターンと各方向のひずみ変化を図 2.1-28 に示す。載荷応力に対するひずみ変化の応答性が良く、また繰り返しの載荷でも再現性が良いことを確認できたが、ひずみは全般に小さかった。

計測したひずみと一軸圧縮試験（試験のデータシートは添付資料－1 に記載）から求めた大谷石供試体のヤング率 3,580MPa、ポアソン比 0.24 から解析した応力状態を示した図 2.1-29 より、載荷応力である X 方向 3.0MPa、Y 方向 2.0MPa に対して、解析値は X 方向の主応力が 0.10 倍、Y 軸方向が 0.03 倍とかなり小さい傾向がみられた。これは HIC 接着剤の拘束によって岩石のひずみが生じにくかったためと考えられる。応力方向に関しては、実測値と解析値で 2 方向ともに 5° 程度の差しかみられなかった。

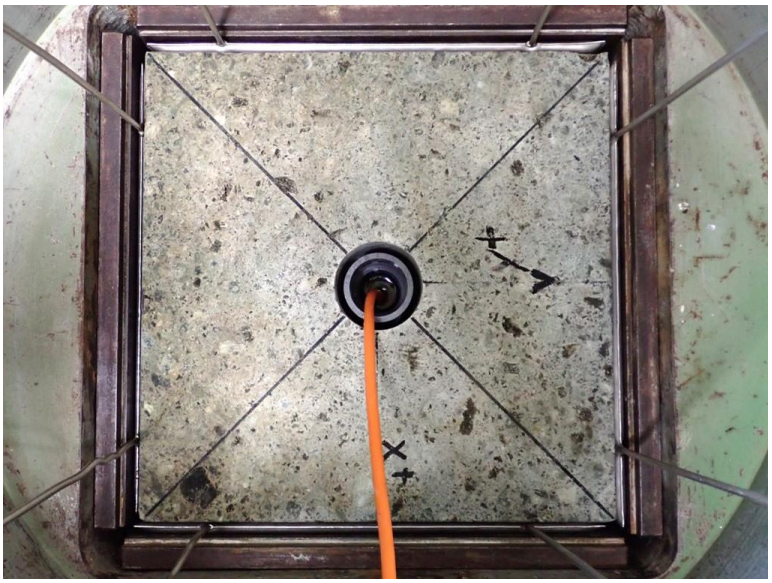
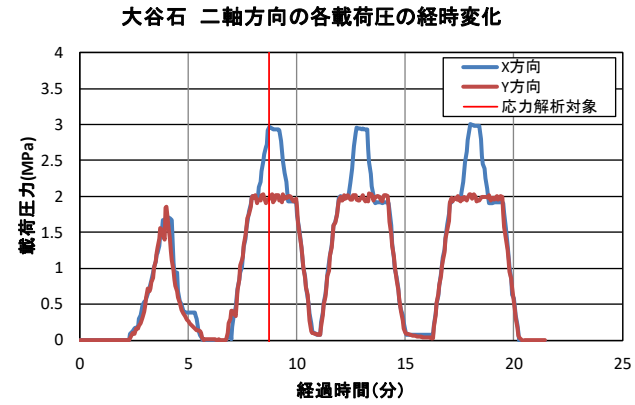


図 2.1-27　HIC 接着剤を用いた試験に使用した大谷石ブロックの様子（載荷前）



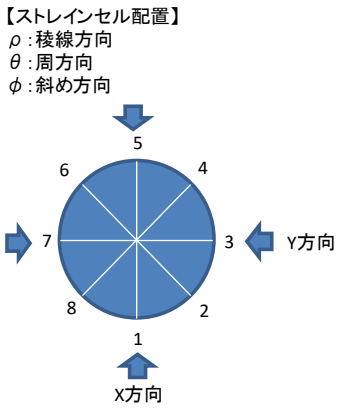
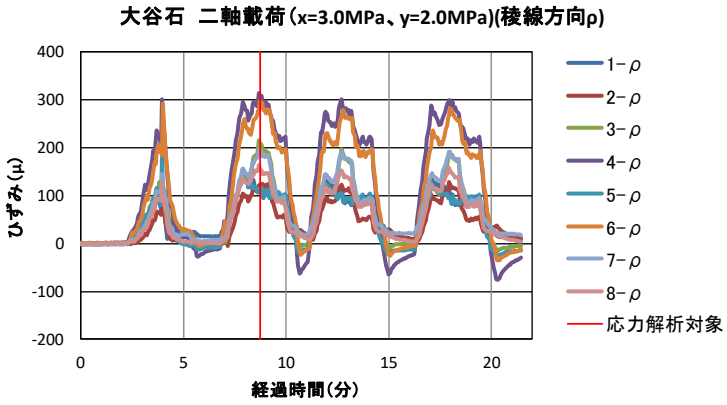
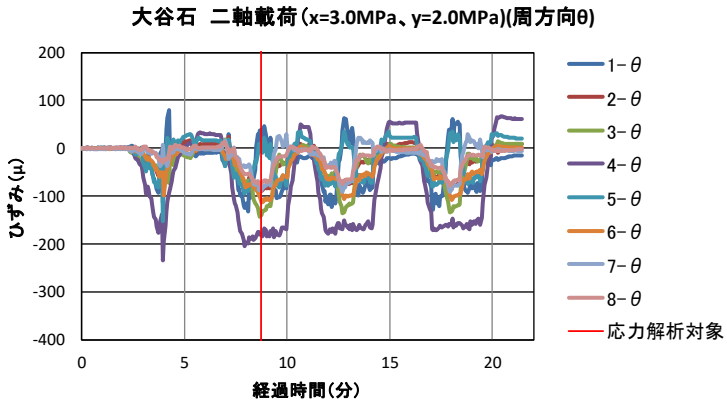


図　孔口から孔底を見たゲージ位置



【ひずみ】
正：引張
負：圧縮



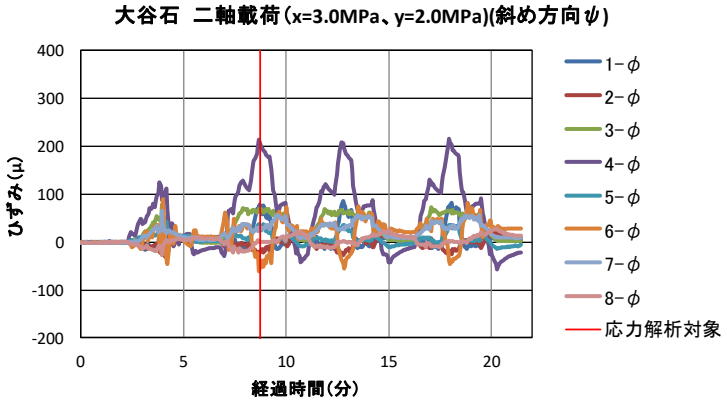


図 2.1-28　養生開始 1 日後の二軸載荷試験結果（HIC 接着剤と大谷石を使用）

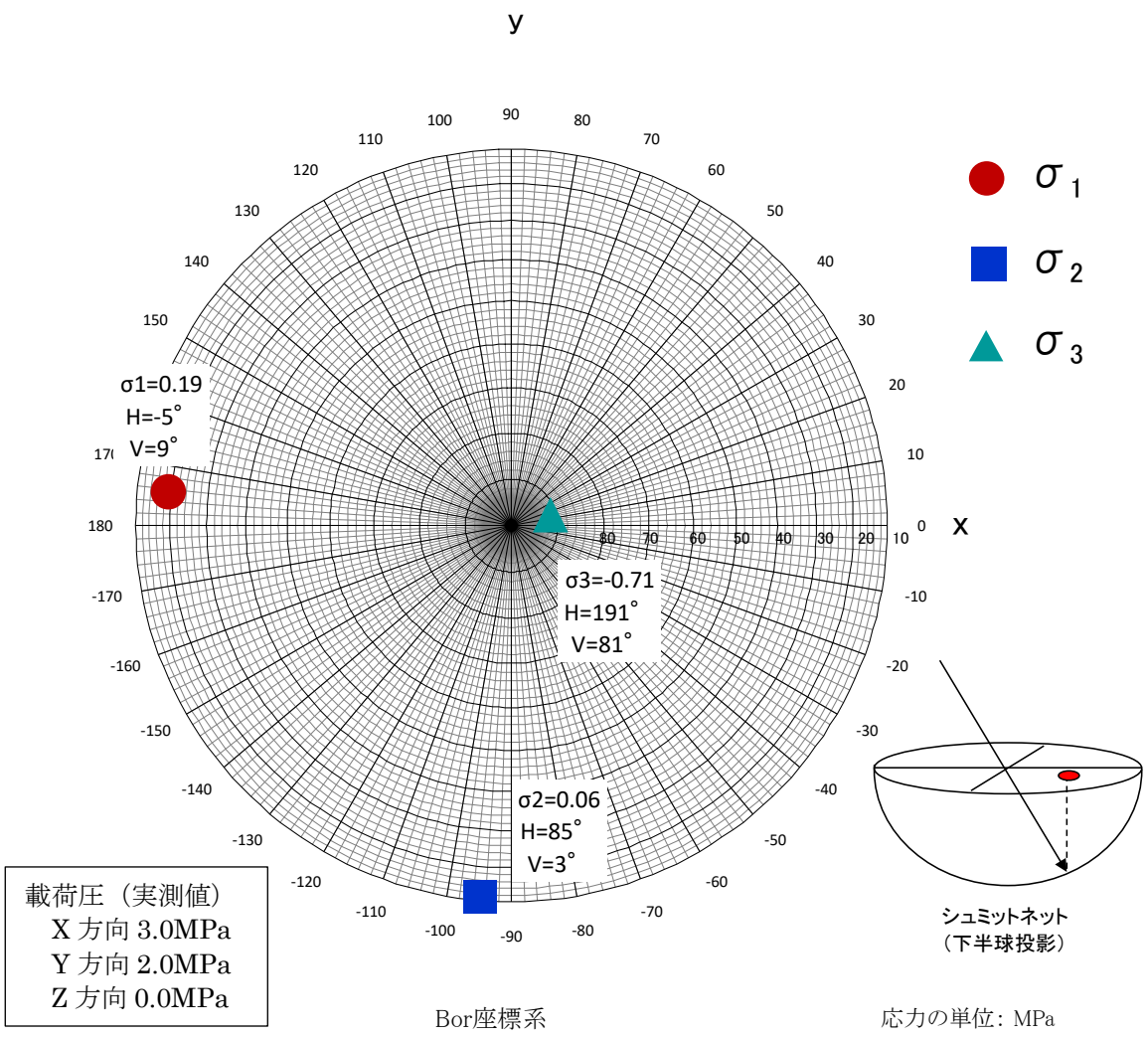


図 2.1-29　二軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と大谷石を使用）

c．HIC 接着剤と本小松ブロックを用いた場合

硬岩である本小松の一辺 300mm のブロックを対象に三軸載荷試験を実施した。ストレインセルは HIC 接着剤で接着した。その試験結果を図 2.1-30 に、試験に用いた岩石ブロックの写真を図 2.1-31 に示す。図 2.1-30 より、X 方向 5.0MPa、Y 方向 4.0MPa、Z 方向 3.0MPa で異なる三軸の応力を載荷したところ、Y 方向の周ひずみである 3 番と 7 番で圧縮ひずみがより大きく、X 方向である 1 番と 5 番の周ひずみがより小さい理想的な応力－ひずみ関係であった。

また、ひずみ値と既往の論文[2]に記載の本小松供試体のヤング率 38,900MPa、ポアソン比 0.18 を用いて解析した主応力状態（図 2.1-32 参照）は主応力方向・主応力値ともに実測値に近い傾向であった。具体的には、各方向の主応力値は実測値の 1.1～1.3 倍の解析値であり、主応力方向は 3 方向とも 3° 以下の違いであった。

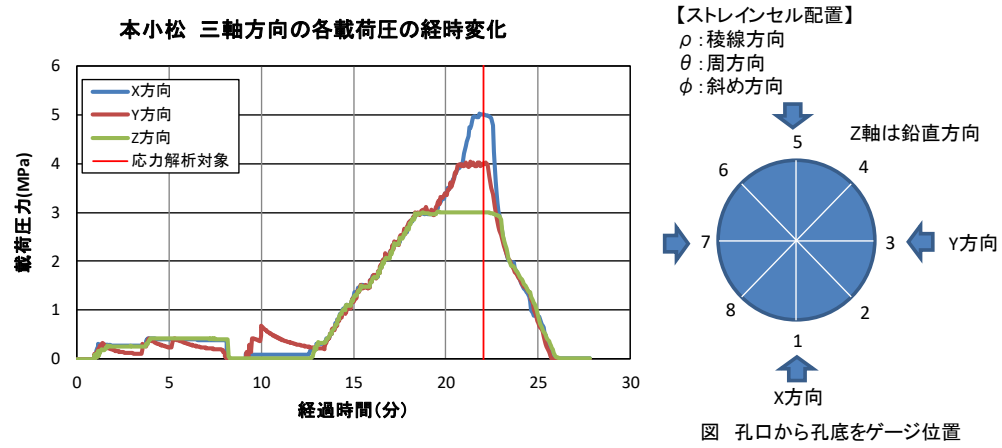
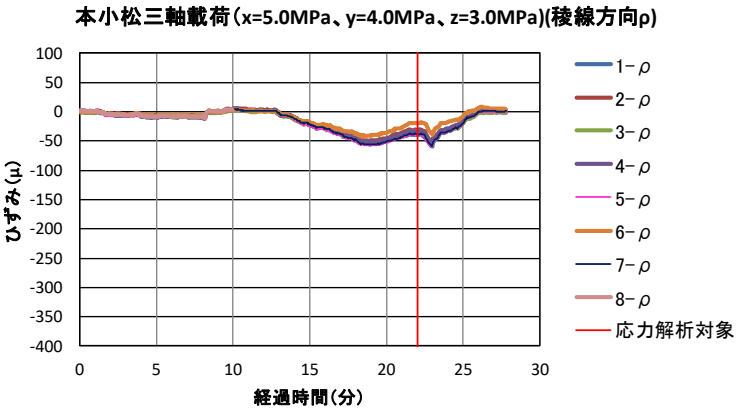
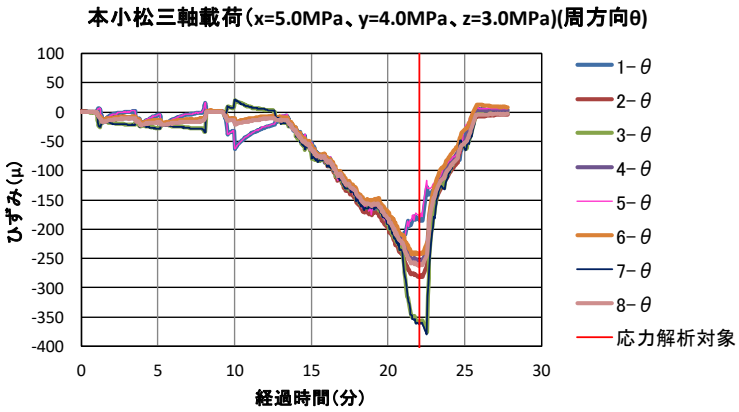


図　孔口から孔底をゲージ位置





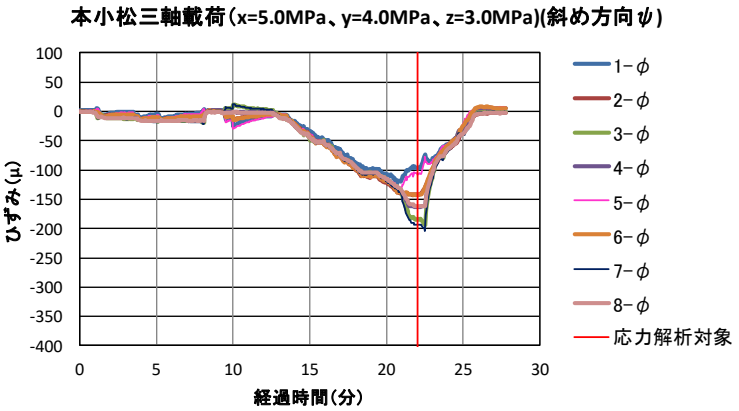


図 2.1-30　養生開始 1 日後の三軸載荷試験結果（HIC 接着剤と本小松を使用）

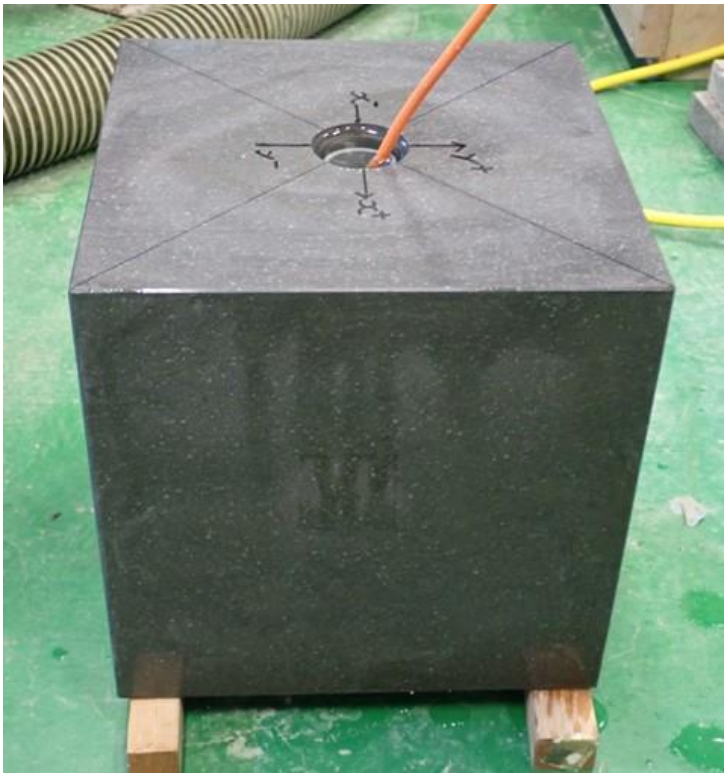


図 2.1-31　本小松ブロックの様子（載荷前）

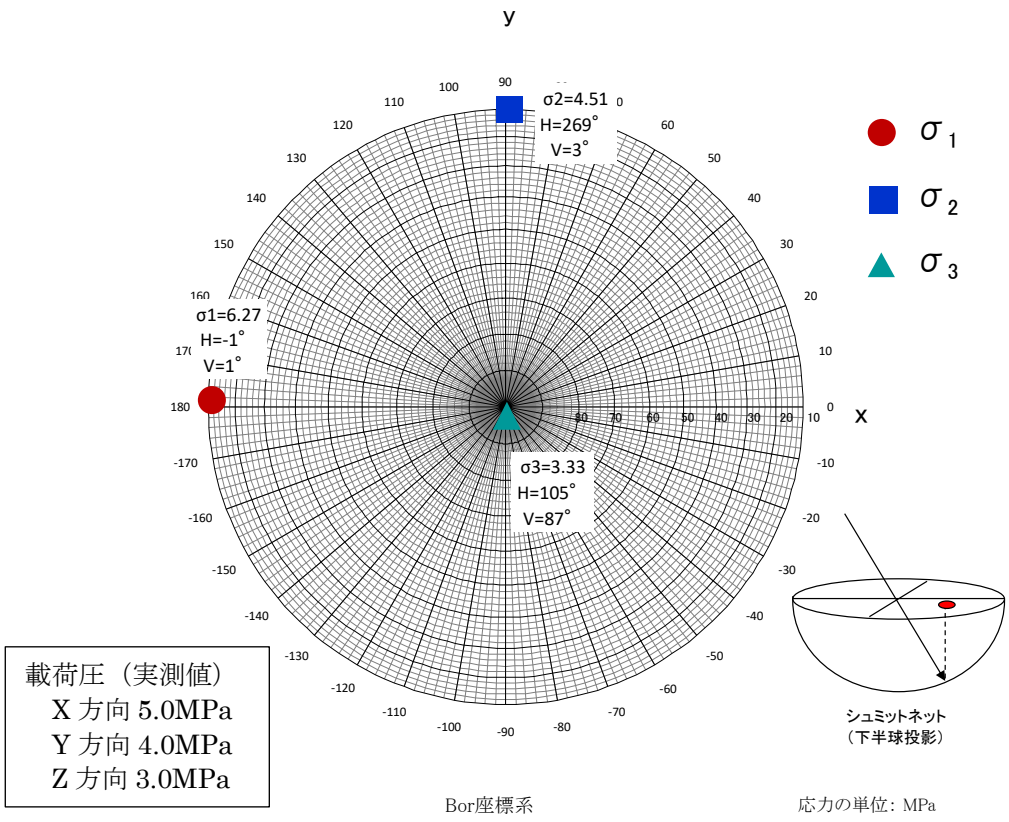


図 2.1-32　三軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と本小松を使用）

d. エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩ブロックを用いた場合

試験に用いた軽石凝灰岩の岩石ブロックの写真を図 2.1-33 に示す。ストレインセルはエポキシ樹脂接着剤で接着した。この岩石ブロックを対象とした三軸載荷試験結果を図 2.1-34 に示す。図 2.1-34 より、三軸載荷時の載荷応力に対して各方向のひずみ変化は発生しているが、稜線方向のひずみが圧縮ではなく、引張として生じているゲージも複数みられる。その結果、図 2.1-35 に示すように、ひずみデータと三軸圧縮試験（CUB、試験のデータシートは添付資料－1 に記載）により求めたヤング率 809MPa、ポアソン比 0.47 を用いて解析した Z 方向の応力は実測値との整合性が悪かった。これは岩石へのエポキシ樹脂による接着力が低いことが影響していると思われる。

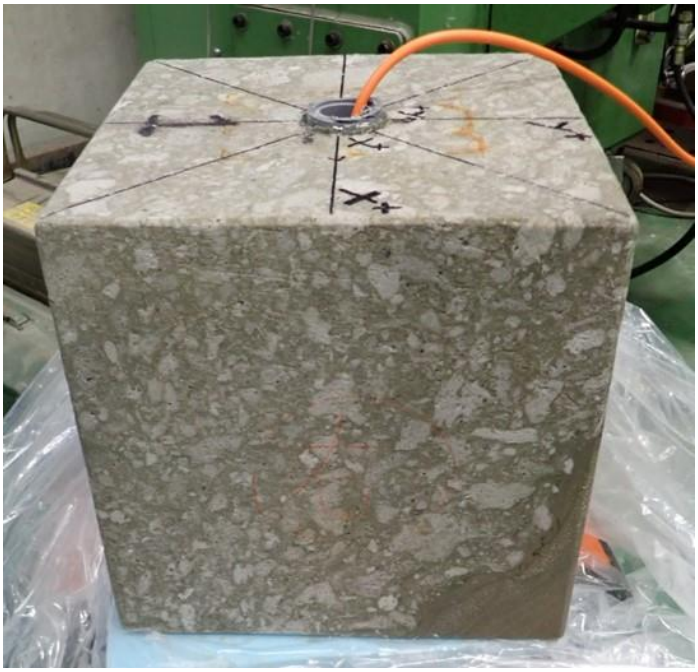


図 2.1-33　軽石凝灰岩ブロック RO-1 の様子（載荷前）

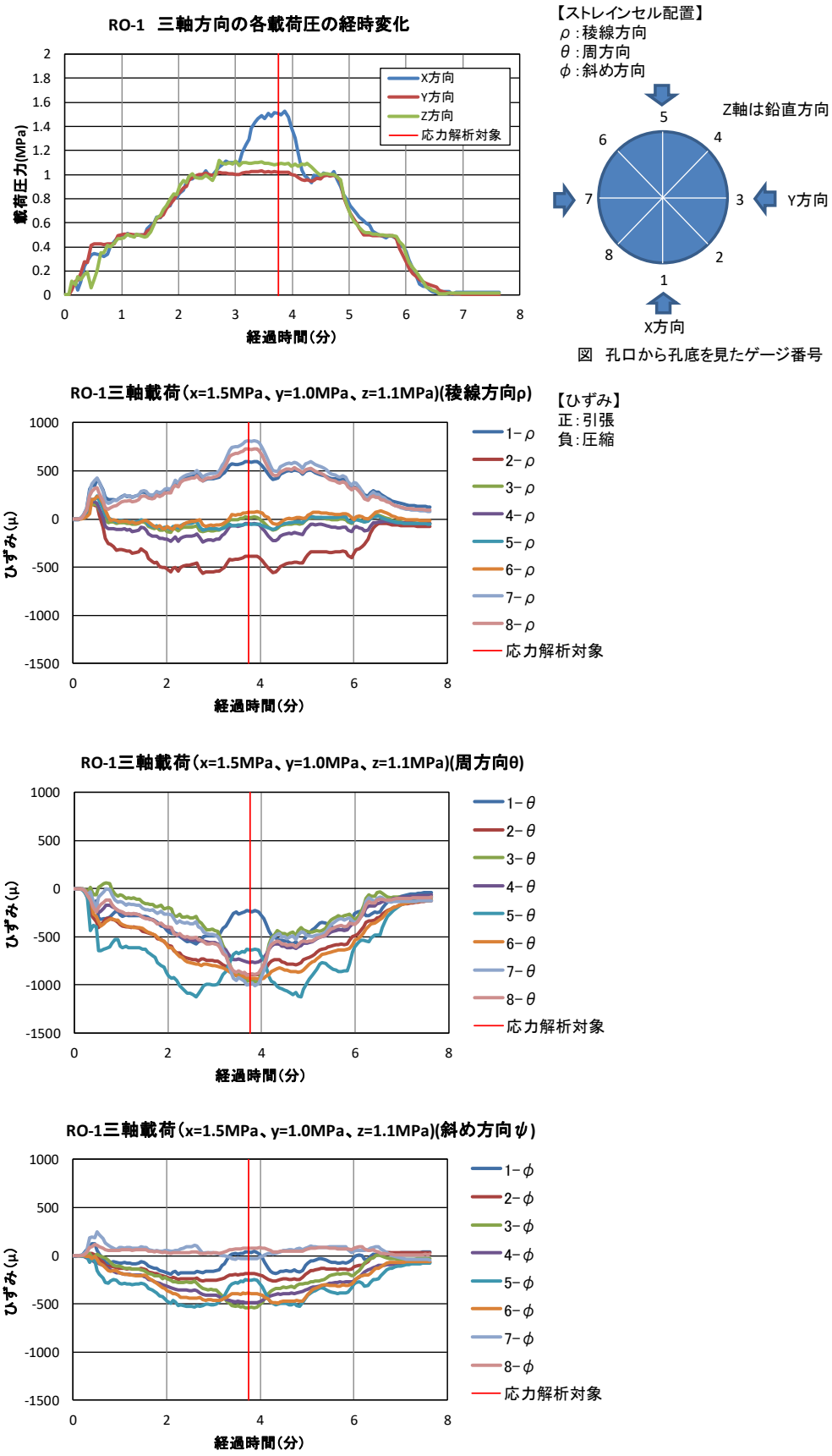


図　孔口から孔底を見たゲージ番号

図 2.1-34　養生開始 1 日後の三軸載荷試験結果（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩 RO-1 を使用）

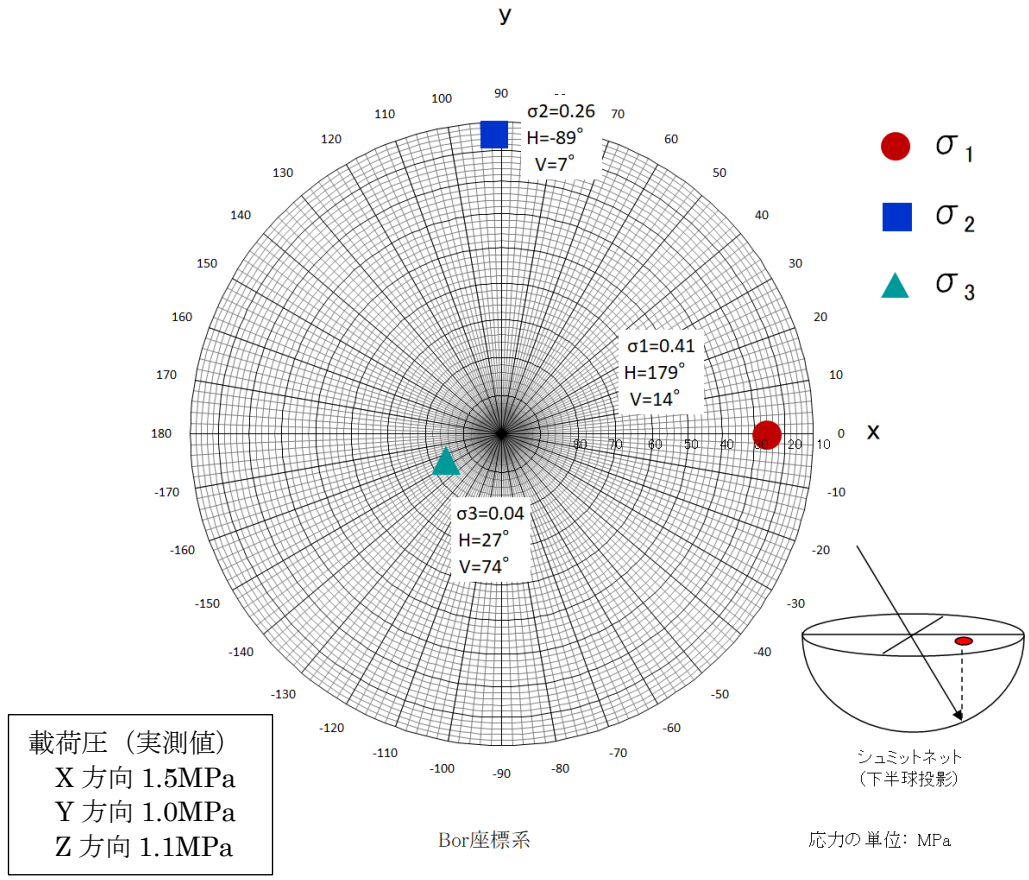


図 2.1-35　三軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩を使用）

e. エポキシ樹脂接着剤と大谷石ブロックを用いた場合

図 2.1-36 に示す大谷石の岩石ブロックを用いて実施した三軸載荷試験結果を図 2.1-37 に示す。ストレインセルはエポキシ樹脂接着剤で接着した。図 2.1-37 より、載荷応力に対するひずみの応答性は良いことがわかる。X 方向 3.0MPa、Y 方向 2.0MPa、Z 方向 1.0MPa の載荷時のひずみ値と一軸圧縮試験による大谷石供試体のヤング率 3,580MPa、ポアソン比 0.24 から求めた解析結果を図 2.1-38 に示す。解析で求めた主応力値は実測値に比べて、X 方向は 0.83 倍、Y 方向は 0.51 倍、Z 方向は 0.36 倍であった。解析で求めた主応力方向は水平面内では X 軸から反時計回りに少し回転し、鉛直面内でも Y-、X-側に少し傾いている。ストレインセルの傾きの有無を観察したところ、図 2.1-39 のように少し傾いており、解析結果と良い相関がみられた。

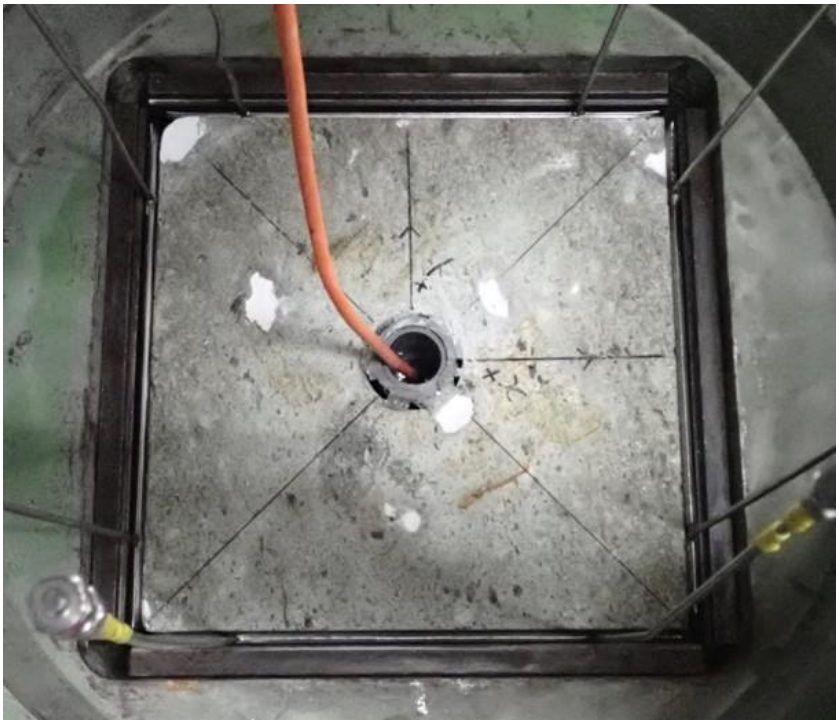


図 2.1-36　エポキシ樹脂接着剤を用いた試験に使用した大谷石ブロックの様子（載荷前）

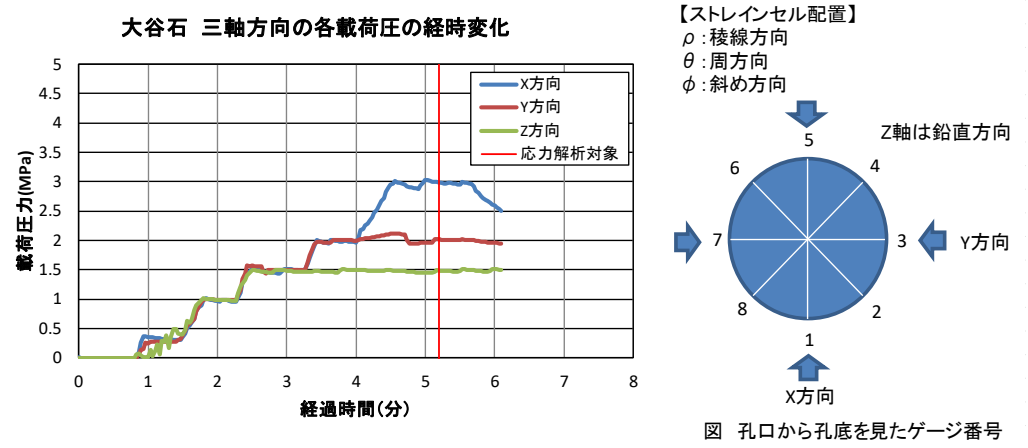
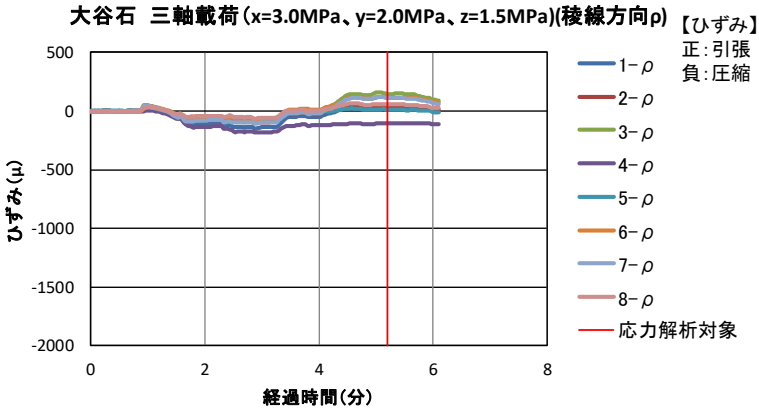
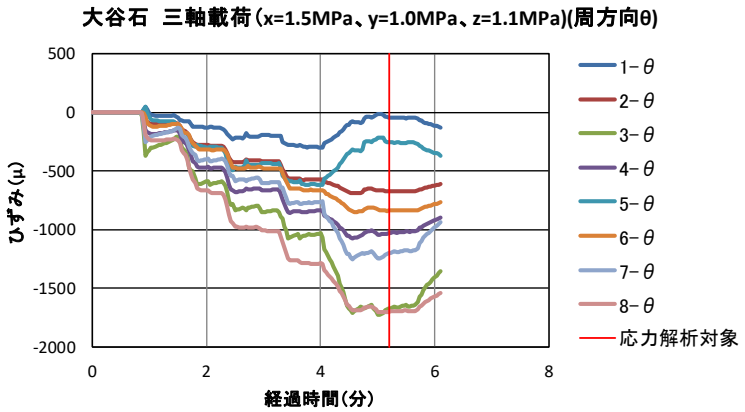


図 孔口から孔底を見たゲージ番号





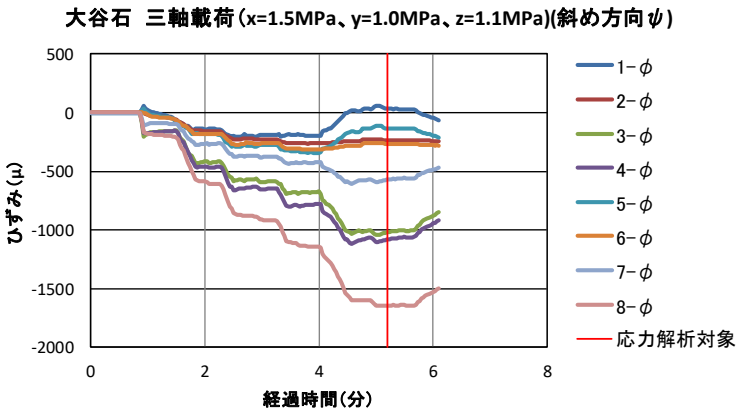


図 2.1-37 養生開始 4 日後の三軸載荷試験結果（エポキシ樹脂接着剤と大谷石を使用）

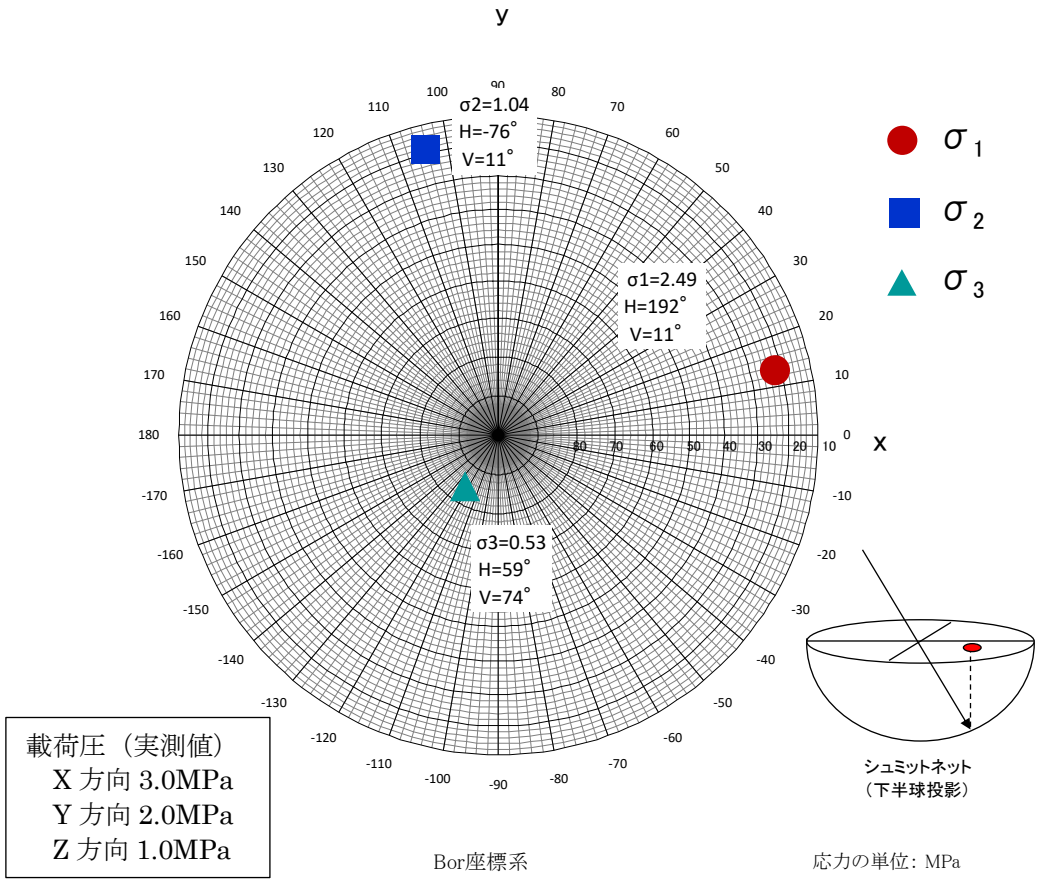


図 2.1-38　三軸載荷時のひずみから求めた 3 次元主応力（エポキシ樹脂接着剤と大谷石を使用）

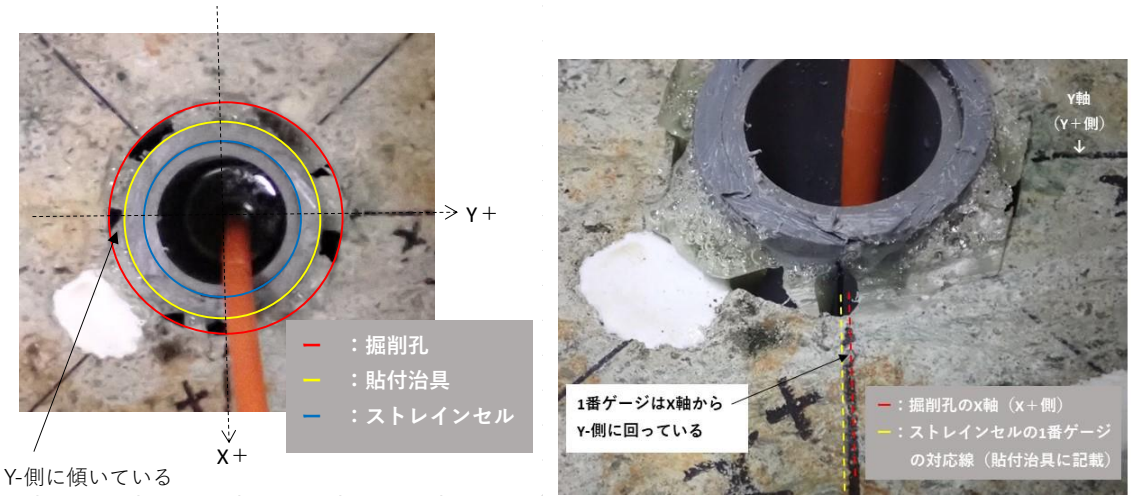


図 2.1-39 ストレインセルの貼付状況の観察結果
（左図：真上から見た様子、右図：斜め上から見た様子）

6）ストレインセルを接着した岩石ブロックのオーバーコアリング

三軸載荷試験を実施した岩石ブロックを対象に、図 2.1-40 に示すように鉛直下向きにストレインセルを接着した円錐孔壁部のオーバーコアリングを実施した。オーバーコアリングは、水平面内の X・Y の 2 方向から岩石ブロックに載荷した状態で行い、オーバーコアリングに伴うひずみ変化を計測した。ストレインセルのケーブルは、コアビット、ロッド、ウォータースイベルの中を通して取り出し、データロガーに接続した。

掘削には、図 2.1-41 に示す掘削ツールスを用いた。初めに図 2.1-41 (1)のシングルコアチューブを用いて掘削を試みたが、コアチューブが厚肉で重いため小型の電動コアドリルを用いた掘削では芯ぶれが大きくオーバーコアリングには適さなかった。そのため、既製品の薄肉（ビットの肉厚 3mm）のコアドリル用ビットである図 2.1-41(2)のビット A を用いてオーバーコアリングを試みたところ芯ぶれが少なくスムーズに掘削できた。そこで、本業務で開発を進めている円錐孔壁ひずみ法で採用するコア径と同じコア径 92mm で薄肉（ビットの肉厚 3mm）のビット B を新たに製作して、その後の試験を進めた。

a. HIC 接着剤と軽石凝灰岩ブロックを用いた場合

HIC 接着剤でストレインセルを接着した軽石凝灰岩ブロックを対象に図 2.1-41 のビット A を用いてオーバーコアリングしたところ、コアは損傷なく回収できた（図 2.1-42 参照）。オーバーコアリングは水平方向から二軸載荷した状態（X 方向 1.5MPa、Y 方向 1.0MPa）で実施し、掘削に伴う応力解放ひずみを計測した（図 2.1-43 参照）。解放ひずみと前述した軽石凝灰岩のヤング率 996MPa、ポアソン比 0.39 から計算した応力を図 2.1-44 に示す。解析で求めた応力値は実測値に比べて X 方向が 0.44 倍、Y 方向が 0.32 倍と小さい傾向がみられた。Z 方向には引張り応力が生じるという解析結果となった。

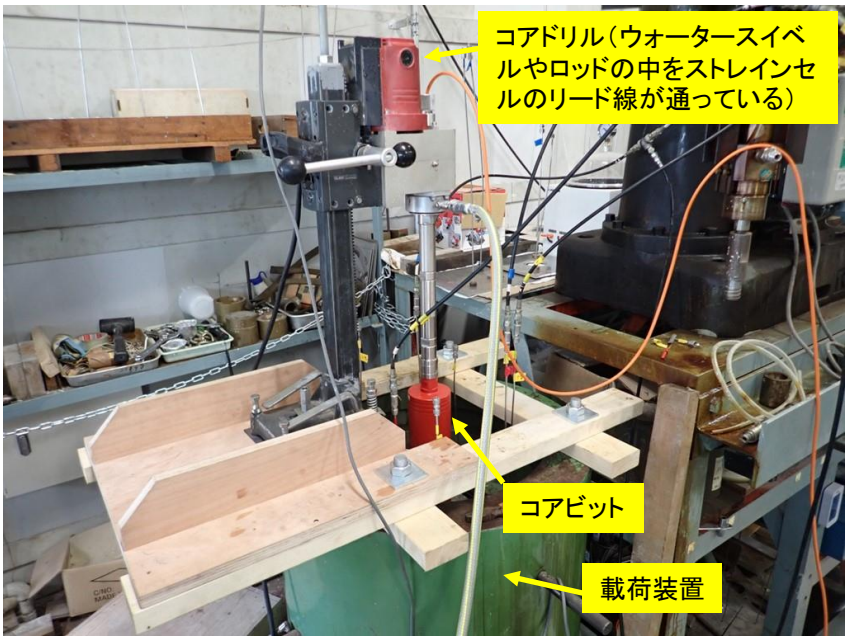
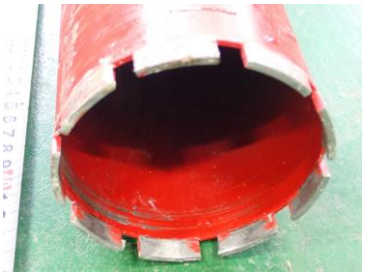


図 2.1-40　ストレインセルを接着した岩石ブロックのオーバーコアリング状況

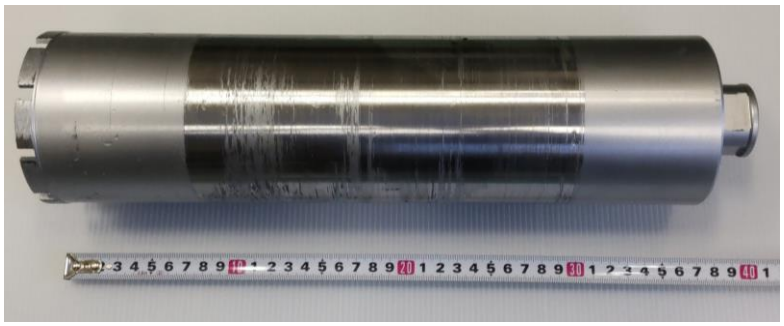
(1) シングルコアチューブ（クリステンセン・マイカイ社製、ビットは内径92mm、外径107mm、最大掘削長310mm）

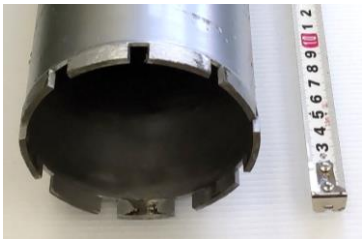
(2) コアドリル用ビットA（コンセック社製、ビットは内径94mm、外径100mm、最大掘削長350mm）



先端部分

(3) コアドリル用ビットB（クリステンセン・マイカイ社製、ビットは内径92mm、外径98mm、最大掘削長350mm）





先端部分

図 2.1-41　室内でのオーバーコアリングに用いた掘削ツールス一覧

図 2.1-42　RO-6 ブロックからオーバーコアリングしたコア（HIC 接着剤使用）

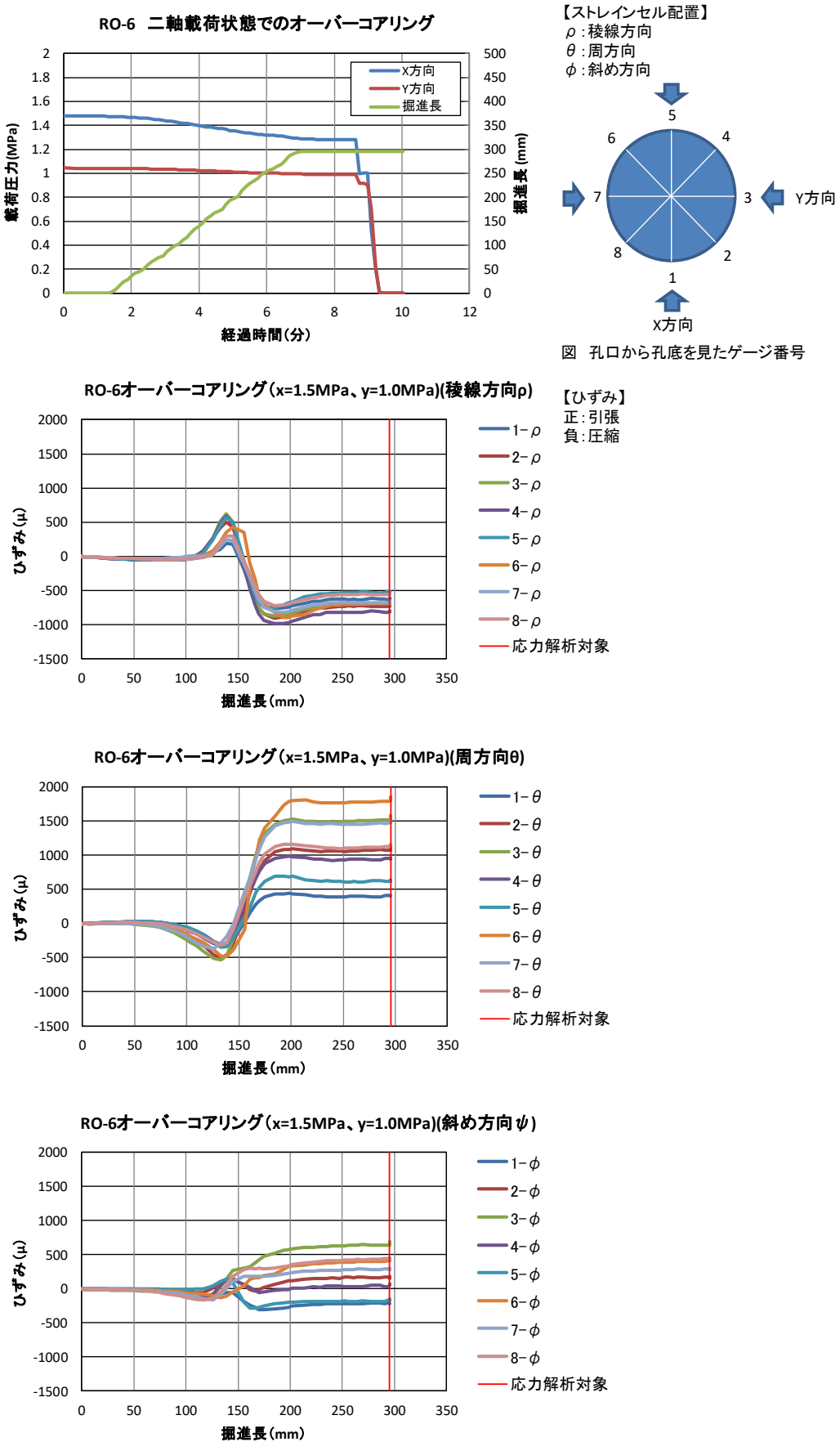


図 2.1-43 応力解放時のひずみ変化（HIC 接着剤と軽石凝灰岩 RO-6、養生開始 2 日後）

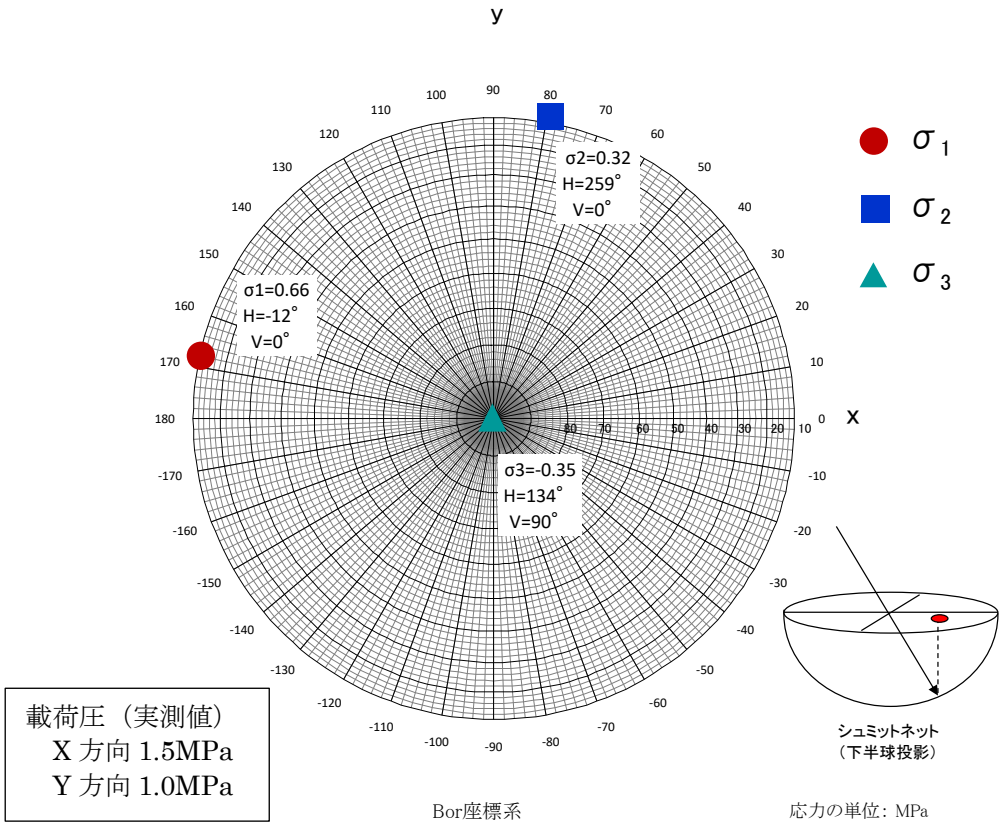
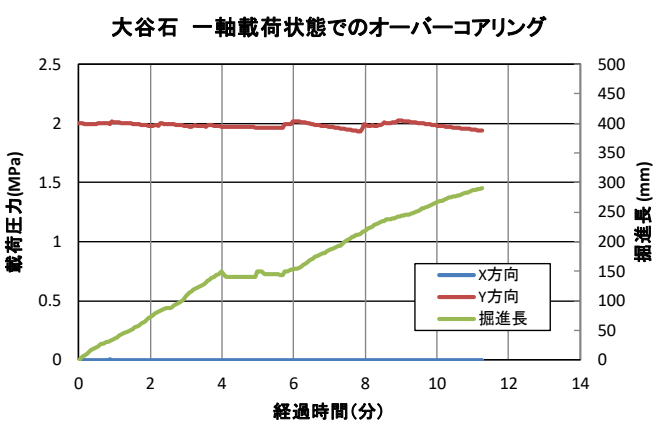


図 2.1-44　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と RO-6 を使用）

b. HIC 接着剤と大谷石ブロックを用いた場合

HIC 接着剤でストレインセルを接着した大谷石ブロックを対象に、水平方向からの一軸載荷状態（Y 方向 2.0MPa）でオーバーコアリングを実施した。ビット A を用いてオーバーコアリングしたところ、コアは損傷なく回収できた。解放に伴うひずみ変化曲線を図 2.1-45 に示す。解放ひずみは全体的に小さく、掘削に伴うひずみの変化が不安定なゲージが複数みられた。

解放ひずみと前述と同じ大谷石のヤング率 3,580MPa、ポアソン比 0.24 から解析で求めた主応力状態を図 2.1-46 に示す。Y 方向 2.0MPa の実測値に対応する方向の解析による主応力値は 0.42MPa（0.21 倍）と小さい結果であった。主応力方向は、実測値と解析値でよく合っていた。



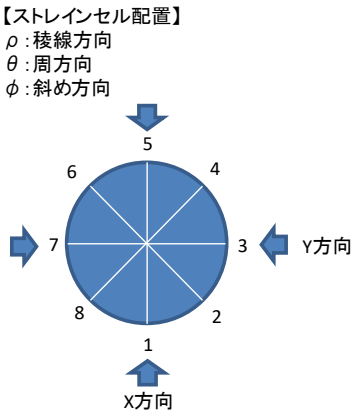
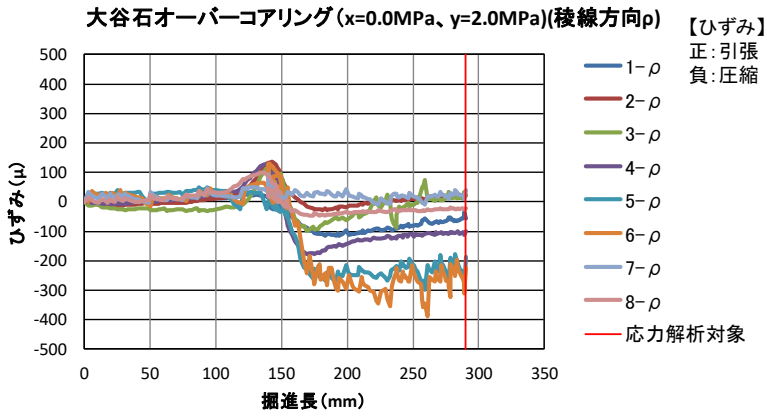
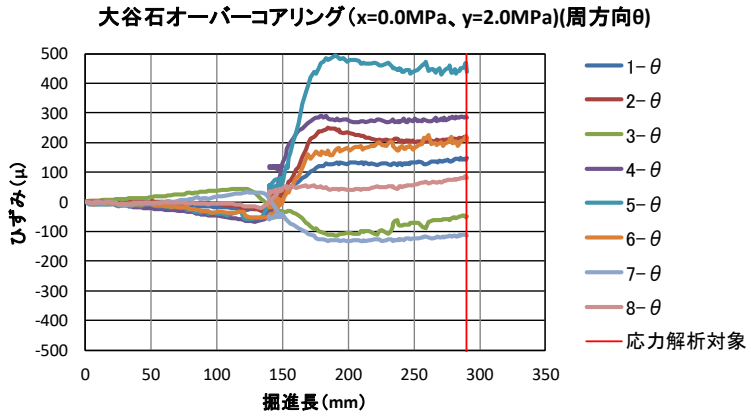


図　孔口から孔底を見たゲージ番号





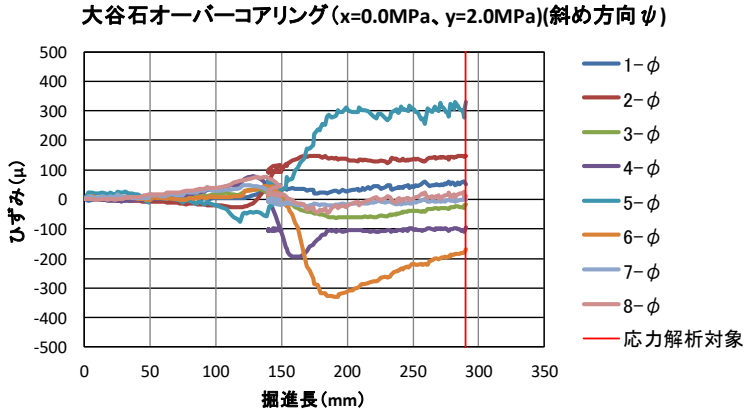


図 2.1-45　応力解放時のひずみ変化（HIC 接着剤と大谷石、養生開始 23 日後）

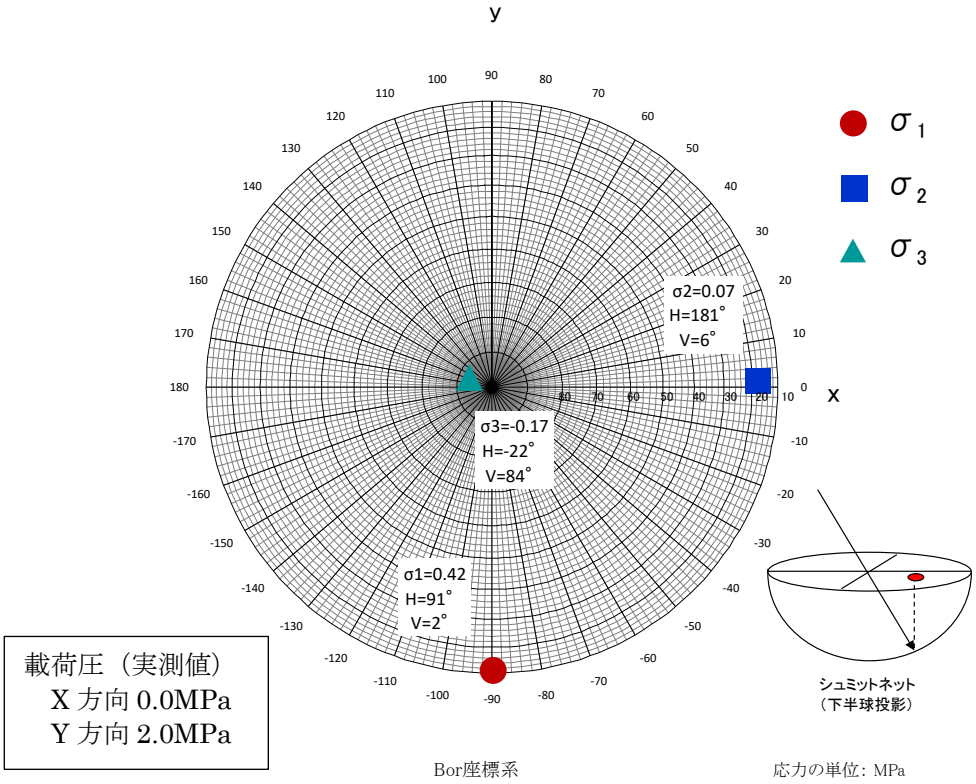


図 2.1-46　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と大谷石を使用）

c．HIC 接着剤と本小松ブロックを用いた場合

HIC 接着剤でストレインセルを接着した本小松ブロックを対象に、水平方向からの二軸載荷状態（X 方向 5.0MPa、Y 方向 3.0MPa）でオーバーコアリングを実施した。図 2.1-41 のビット B を用いてオーバーコアリングしたところ、コアは損傷なく回収できた（図 2.1-47 参照）。応力解放に伴うひずみ変化曲線を図 2.1-48 に示す。同図より、相対するゲージ番号同士（例えば周方向の 3 番と 7 番）で同傾向の変化挙動を示している。応力解放時の発生ひずみと前述の本小松供試体のヤング率 38,900MPa、ポアソン比 0.18 から応力状態を解析したところ、実測値に比べて主応力方向はよく合っているが主応力値は 1.49～1.57 倍と大きな値となった（図 2.1-49 参照）。これは応力評価の際に用いたヤング率やポアソン比が本試験で用いた岩石ブロックの物性値と多少異なることに原因がある可能性がある。

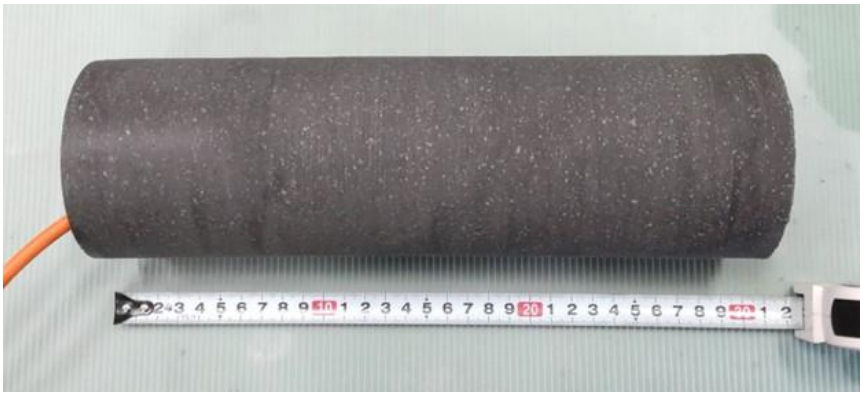


図 2.1-47　本小松ブロックからオーバーコアリングしたコア（HIC 接着剤使用）

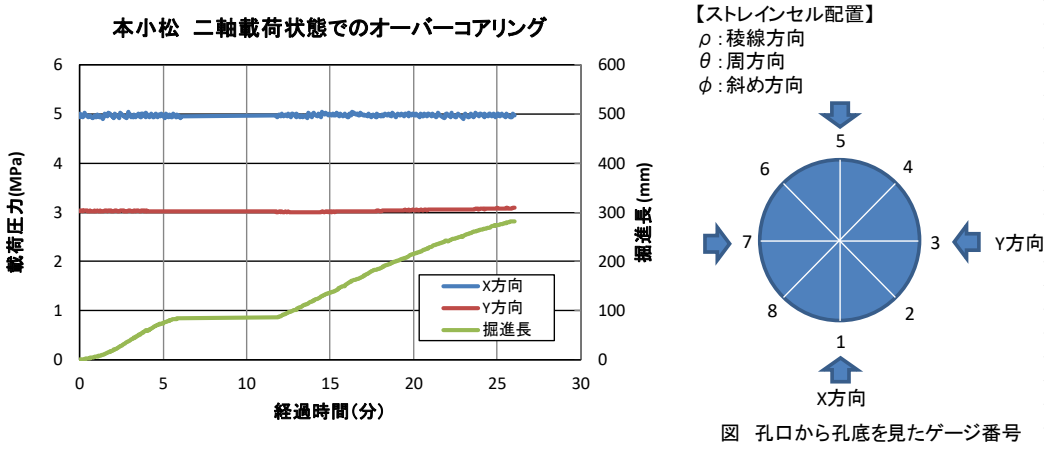
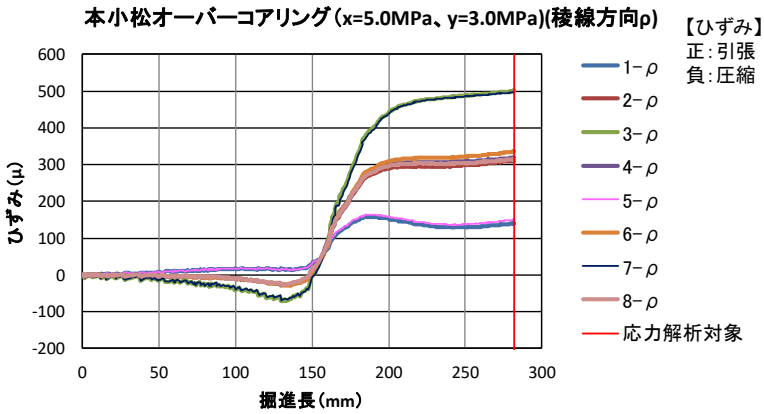
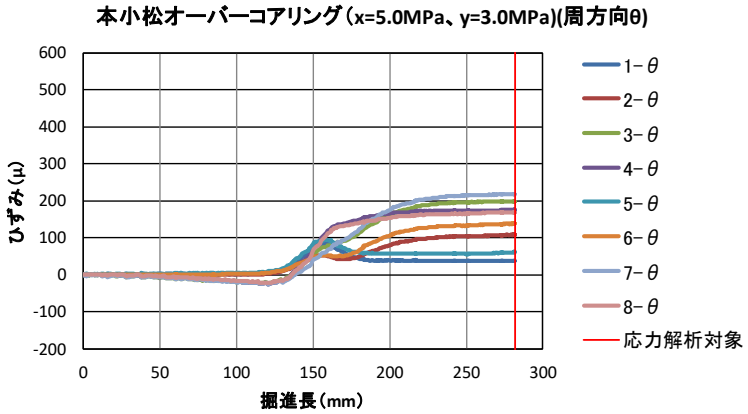


図 孔口から孔底を見たゲージ番号





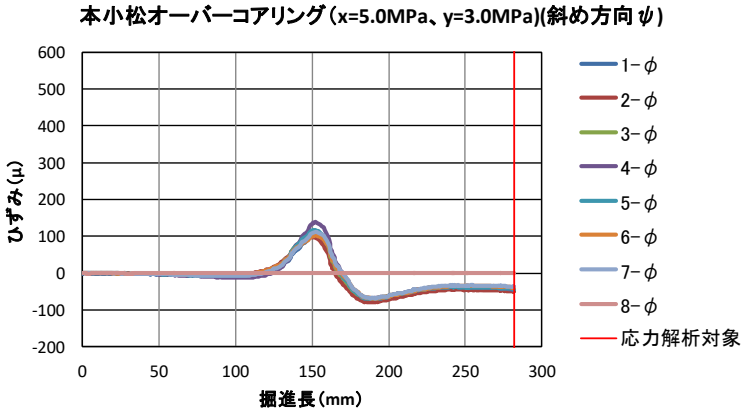


図 2.1-48 応力解放時のひずみ変化（HIC 接着剤と本小松、養生開始 21 日後）

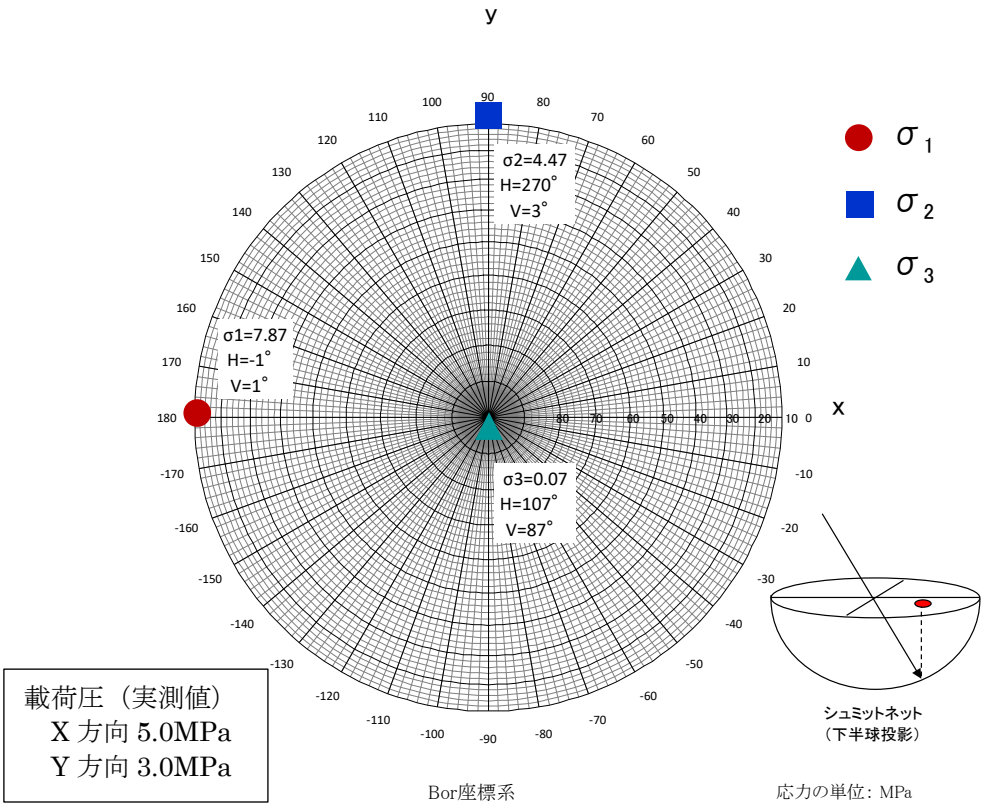


図 2.1-49　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（HIC 接着剤と本小松を使用）

d. エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩を用いた場合

エポキシ樹脂接着剤でストレインセルを接着した軽石凝灰岩ブロックを対象に、水平方向からの二軸載荷状態（X 方向 0.3MPa、Y 方向 0.2MPa）でオーバーコアリングを実施した。ビット B を用いてオーバーコアリングしたところ、掘削コアは図 2.1-50 に示すように損傷なく回収できた。応力解放に伴うひずみ変化曲線を図 2.1-51 に示す。同図より、応力解放による発生ひずみは全体的に小さいことがわかる。ひずみが小さいため、解析（前述した軽石凝灰岩供試体のヤング率 809MPa、ポアソン比 0.47 を使用）から得られた主応力値も小さく、主応力方向も実際の載荷方向とあまり合っていなかった（図 2.1-52 参照）。

図 2.1-50　RO-1 ブロックからオーバーコアリングしたコア（エポキシ樹脂接着剤使用）

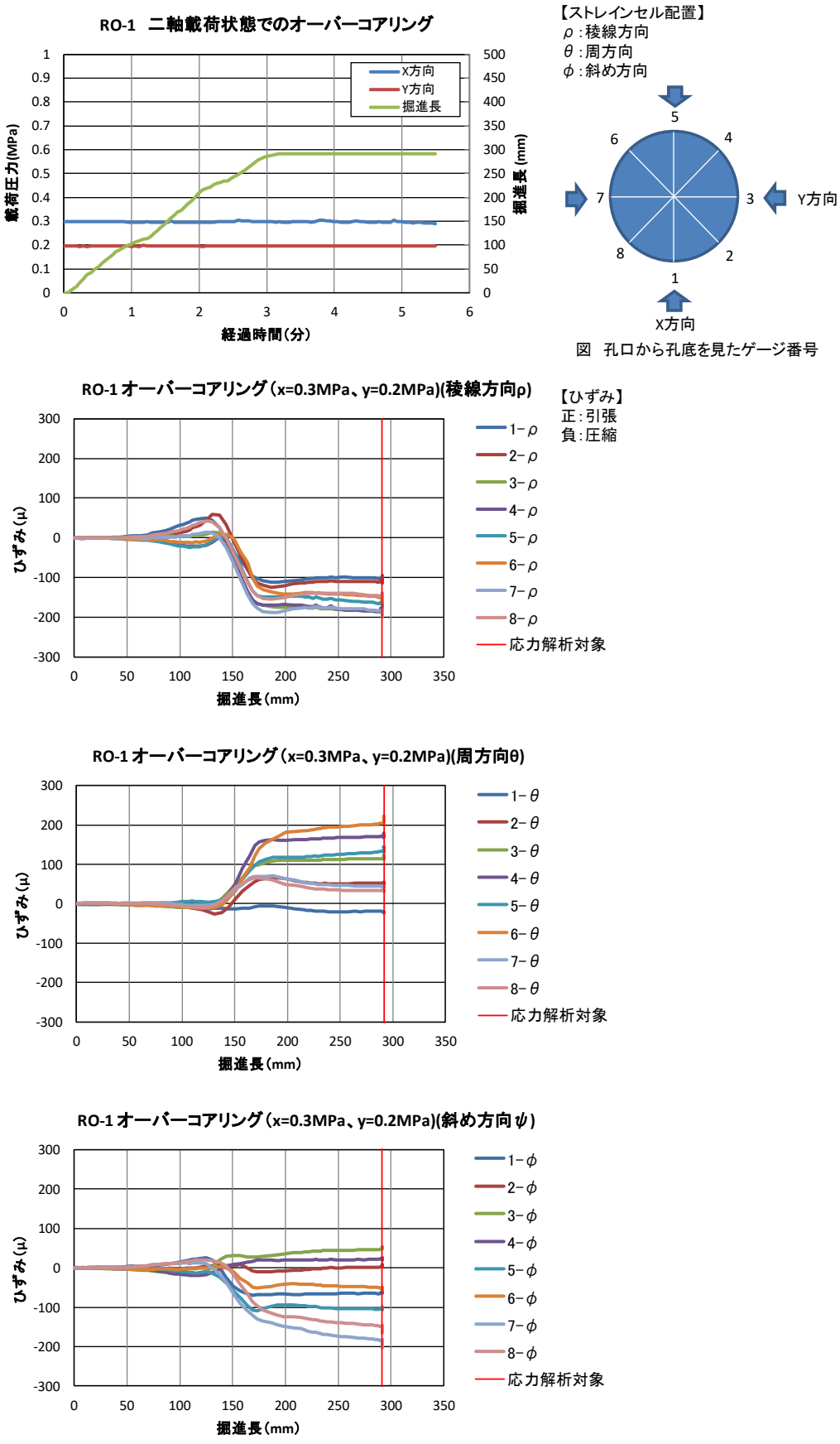
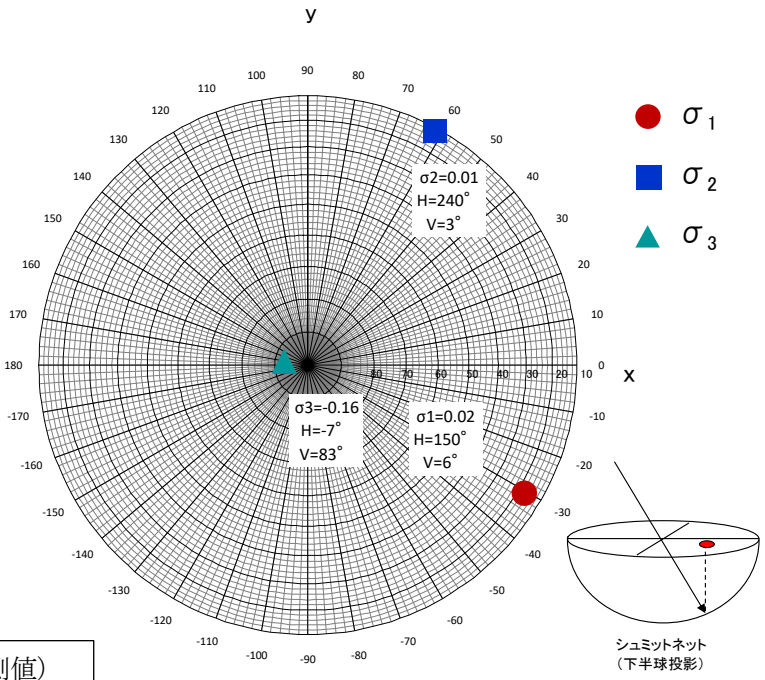


図 孔口から孔底を見たゲージ番号

図 2.1-51 応力解放時のひずみ変化（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩 RO-1、養生開始 2 日後）



載荷圧（実測値）
X 方向 0.3MPa
Y 方向 0.2MPa

図 2.1-52 解放ひずみから求めた 3 次元主応力（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩 RO-1 を使用）

e. エポキシ樹脂接着剤と大谷石を用いた場合

エポキシ樹脂接着剤でストレインセルを接着した大谷石ブロックを対象に、水平方向からの二軸載荷状態（X 方向 2.0MPa、Y 方向 1.0MPa）でオーバーコアリングを実施した。ビット B を用いてオーバーコアリングしたところ、掘削コアは図 2.1-53 に示すように損傷なく回収できた。応力解放に伴うひずみ変化曲線を図 2.1-54 に示す。同図より、相対するゲージは似たひずみ変化を示していることがわかる。また、図 2.1-55 に示す解放ひずみと前述の大谷石供試体のヤング率 3,580MPa、ポアソン比 0.24 から求めた主応力の解析値は、セルの傾きや回転の影響（図 2.1-39 参照）を考慮した実際の応力状態に近い結果であった。

図 2.1-53 大谷石ブロックからオーバーコアリングしたコア（エポキシ樹脂接着剤使用）

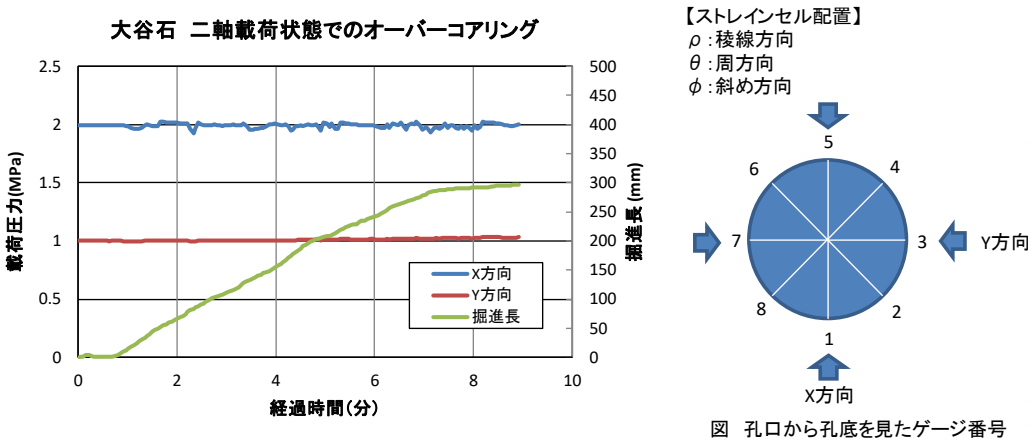
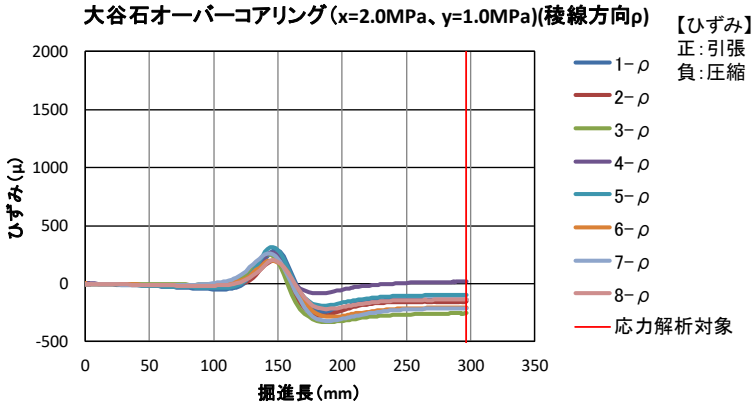
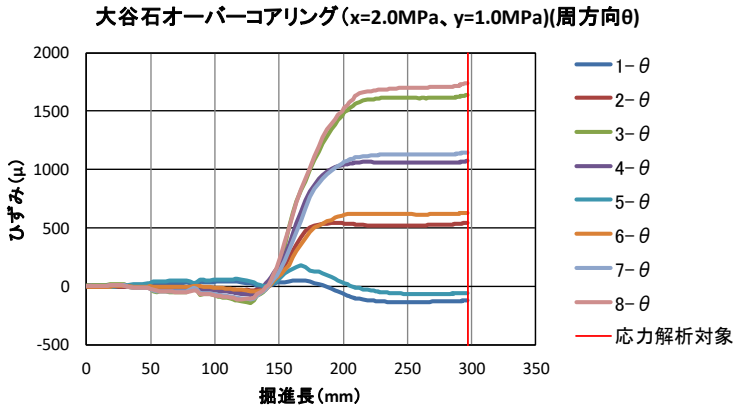


図 孔口から孔底を見たゲージ番号





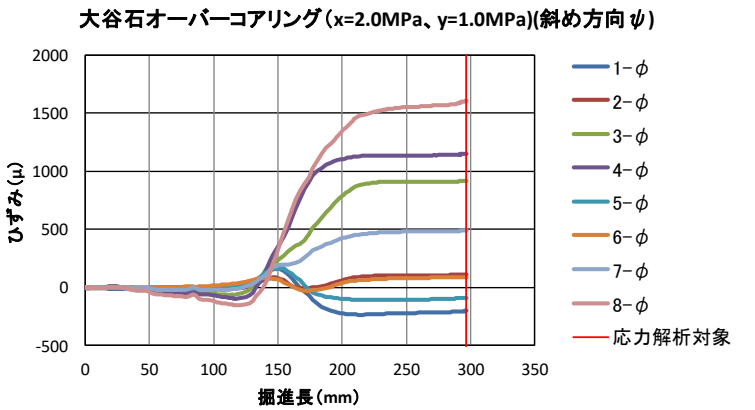


図 2.1-54 応力解放時のひずみ変化（エポキシ樹脂接着剤と大谷石、養生開始 19 日後）

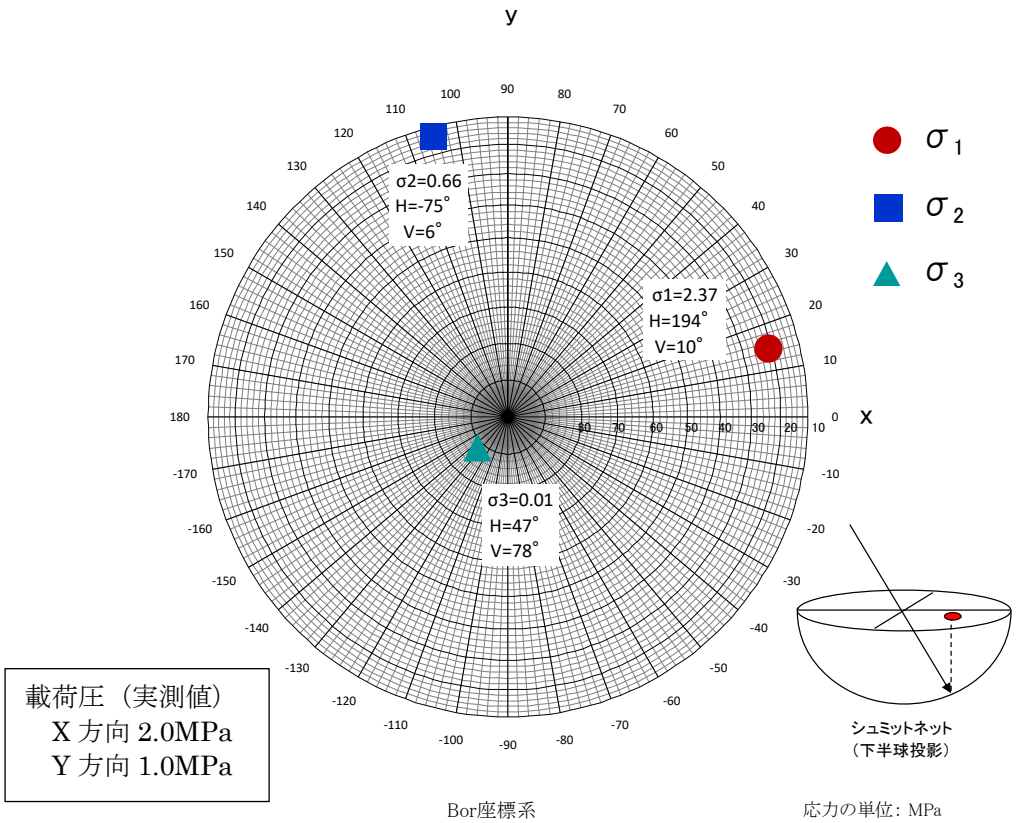


図 2.1-55　解放ひずみから求めた 3 次元主応力（エポキシ樹脂接着剤と大谷石を使用）

7）オーバーコアリングしたコアを用いたひずみ感度試験

感度試験結果を利用した応力解析方法は未完成であるが、先行して感度試験装置は製作し、感度変化の状況を把握可能となっている。この感度試験装置を用いて、室内でオーバーコアリングしたストレインセルが接着されたコアに周圧載荷を行い、圧力とひずみの関係を取得した。感度試験の実施状況を図 2.1-56 に、感度試験の概念図を図 2.1-57 に示す。

図 2.1-56　感度試験状況

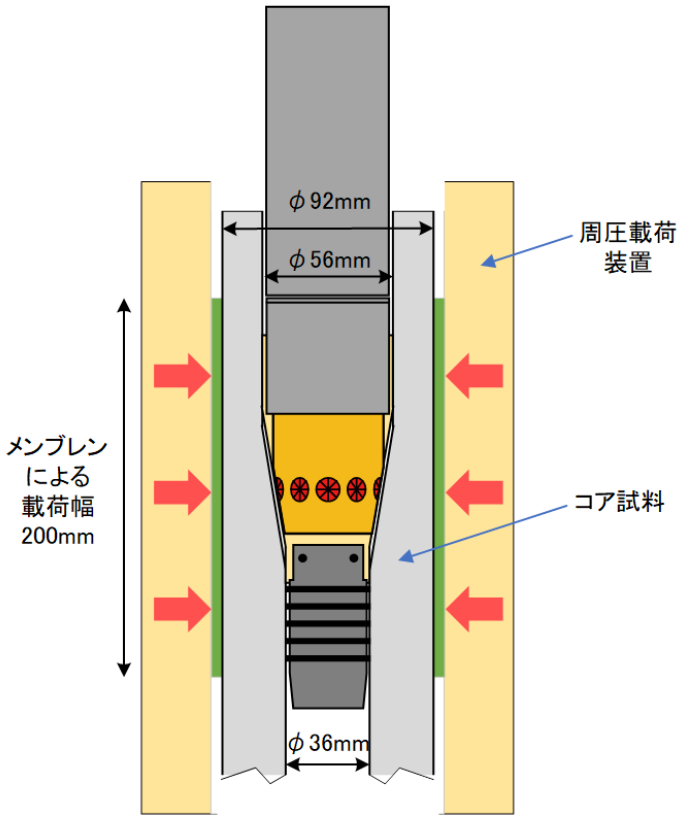


図 2.1-57　感度試験の概念図

a. HIC 接着剤と軽石凝灰岩ブロックを用いた場合

ストレインセルを HIC 接着剤で接着した軽石凝灰岩ブロック RO-6 からオーバーコアリングしたコアは、ビット内径 94mm のビット A（図 2.1-41 参照）で掘削したものであるため、感度試験装置にセットできるように、コア径を 94mm から 92mm まで削り落とした。その後、感度試験器にコアを挿入し、最大載荷圧 0.7MPa と 1.4MPa で周圧を繰返し載荷・除荷を行った。ストレインセルの各ひずみゲージで測定したひずみと載荷応力の関係は、最大載荷圧 0.7MPa の場合において全ゲージで弾性的な挙動を示した（図 2.1-58 参照）。一方、最大載荷圧 1.4MPa ではヒステリシスが大きくなり、一部で塑性変形も認められた。また、全方向一定の周圧載荷であるため、岩石が均質で接着度合の場所的変化も無ければ、稜線方向、周方向、斜め方向のそれぞれではほぼ一定となるはずであるが、今回の試験結果では、ゲージ毎のひずみ量の違いが観測された。この結果から、感度試験結果を用いた応力解析の必要性が改めて認識できた。

b. HIC 接着剤と大谷石ブロックを用いた場合

ストレインセルを HIC 接着剤で接着した大谷石ブロックからオーバーコアリングしたコアも、ビット内径 94mm のビット A で掘削したものであるため、感度試験装置にセットできるように、コア径を 94mm から 92mm まで削り落としてから、感度試験を実施した。図 2.1-59 に示すように、周圧を 0.5MPa、1.0MPa まで段階的に高めて応力－ひずみ関係を観測したところ、全体的にひずみが小さかった。そのため、一軸圧縮試験で求めた大谷石のヤング率 3,580MPa に比べて、本試験の周方向で最もひずみが大きかった 4 番ゲージの応力－ひずみ関係から中空円筒問題と仮定して弾性論により算出したヤング率は 7,100MPa と 2 倍程度大きい推定結果となった。これは、硬化した HIC 接着剤の剛性が大谷石よりも大きいため、岩石のひずみが HIC 接着剤によって拘束されて載荷応力に対する岩石のひずみが抑制されたためと考えられる。

c. HIC 接着剤と本小松ブロックを用いた場合

本試験以降はビット内径 92mm のビット B により掘削したため、コア径を調整するための削り出しを行わずにコアを感度試験器にセットするという標準的な方法で感度試験を行った。ストレインセルを HIC 接着剤で接着した本小松ブロックからオーバーコアリングしたコアでは、図 2.1-60 に示すように、最大載荷圧 5MPa まで繰返し載荷・除荷を行ったところ、全てのゲージで弾性的な挙動を示し、ヒステリシスや残留ひずみも小さかった。また、他の岩種に比べてゲージごとのばらつきも小さい。

d. エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩ブロックを用いた場合

ストレインセルをエポキシ樹脂接着剤で接着した軽石凝灰岩ブロックからオーバーコアリングしたコアに対して、感度試験器によって最大載荷圧 0.2MPa まで繰返し載荷・除荷を行った。ブロック RO-6 からコアリングした軽石凝灰岩（3 供試体）の引張り強さは 0.17～0.25MPa（データシートは添付資料-1 に記載）であったため、岩石の引張り破壊を

避けて感度試験を行うために、載荷圧を低圧にした。試験の結果、応力－ひずみ曲線（図 2.1-61 参照）は低圧部ではひずみがあまり発生せず、全体のひずみも小さくヒステリシスが大きい傾向が見られた。また、ゲージ毎のひずみ量の違いが認められた。接着状態が不均一であった可能性が考えられるが、載荷圧が低圧だったことにより加圧が均等に行われていない可能性も考えられる。この点については今後プレスケールなども用いて検証するとともに、装置や試験方法の改善について引き続き検討を行う。

なお、感度試験器はメンブレンの張力による反力が 0.1MPa あり、岩石表面にメンブレンを設置して岩石に実際に圧力が作用する時点の油圧は 0.1MPa である。そのため、この 0.1MPa については他の 4 ケースも含めて計測した油圧から差し引いて載荷圧力を求めている。

e. エポキシ樹脂接着剤と大谷石ブロックを用いた場合

ストレインセルをエポキシ樹脂接着剤で接着した大谷石ブロックからオーバーコアリングしたコアに対して、感度試験器によって最大載荷圧 2MPa まで繰返し載荷・除荷を行ったところ、図 2.1-62 に示すように応力－ひずみ曲線は各ゲージで弾性的な挙動を示した。しかし、ゲージごとのひずみの大きさにはばらつきが認められ、接着状態が不均一であった可能性が考えられる。

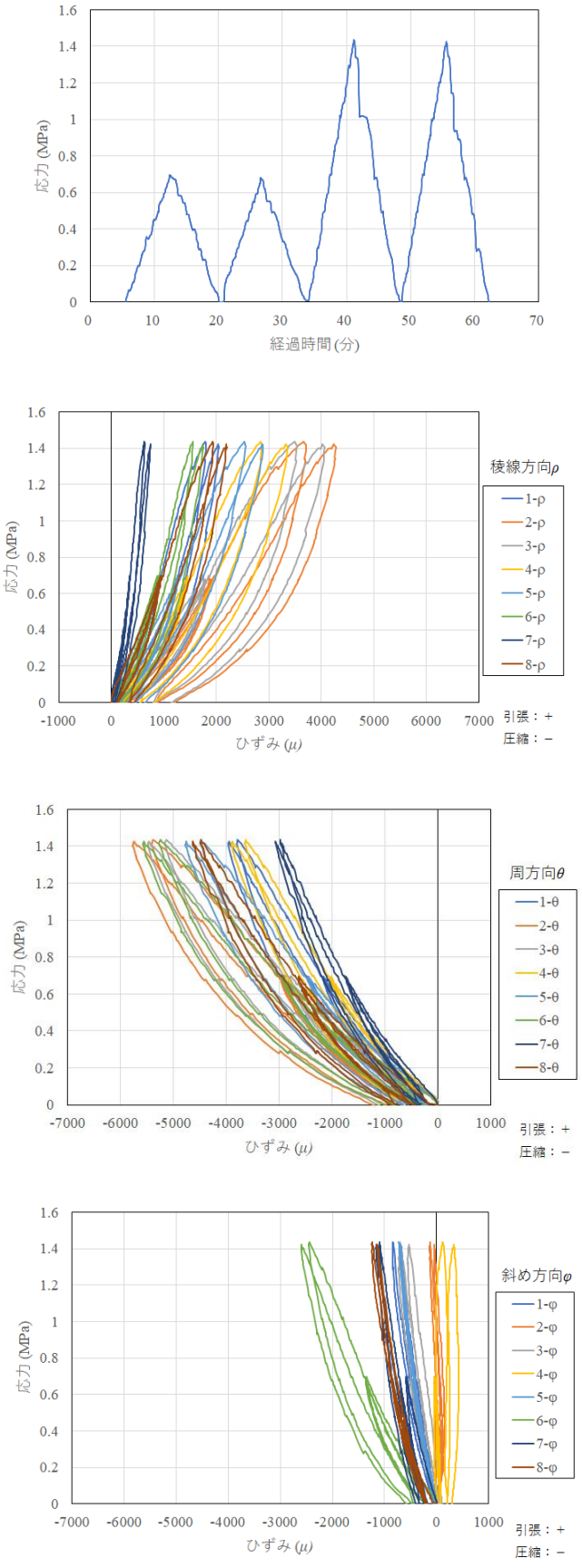


図 2.1-58　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力ーひずみ測定結果（HIC 接着剤と軽石凝灰岩 RO-6 を使用、養生開始 3 日後）

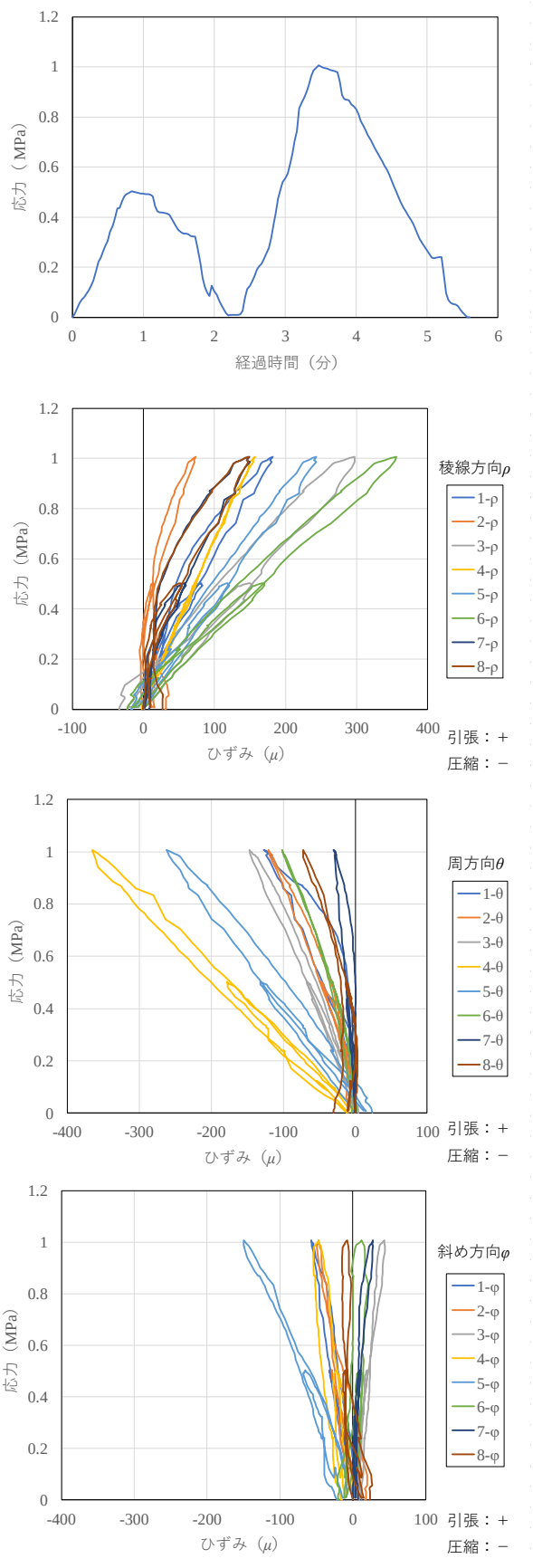


図 2.1-59　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力ーひずみ測定結果（HIC 接着剤と大谷石を使用、養生開始 23 日後）

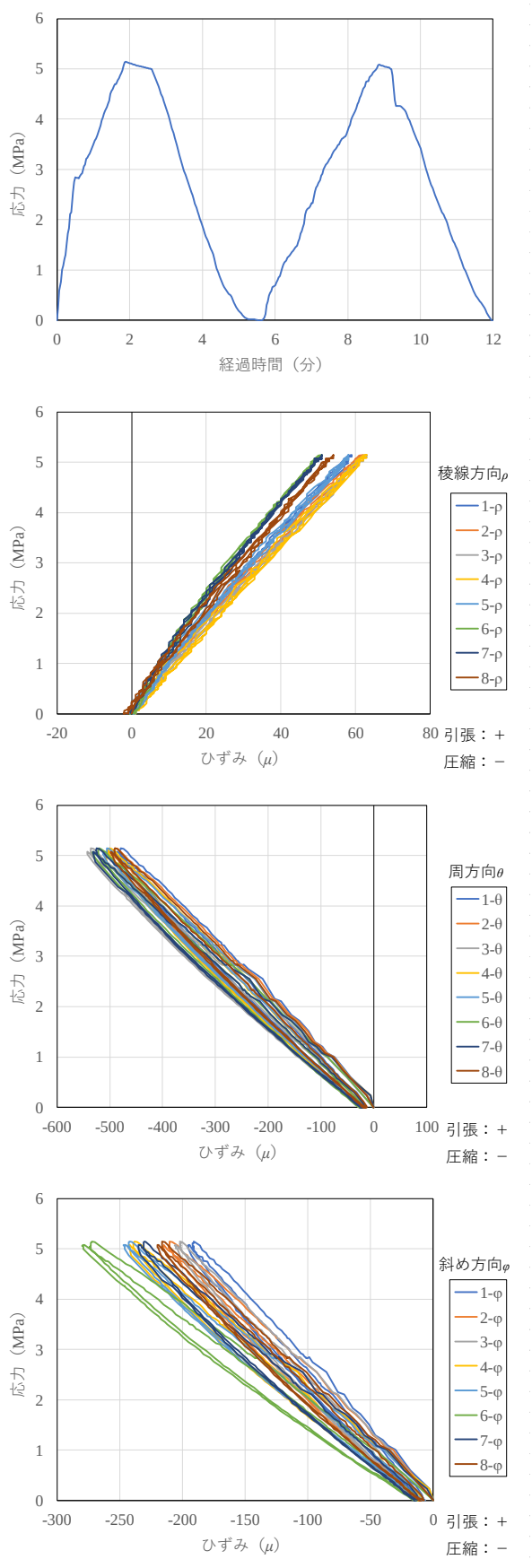


図 2.1-60　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力ーひずみ測定結果（HIC 接着剤と本小松を使用、養生開始 21 日後）

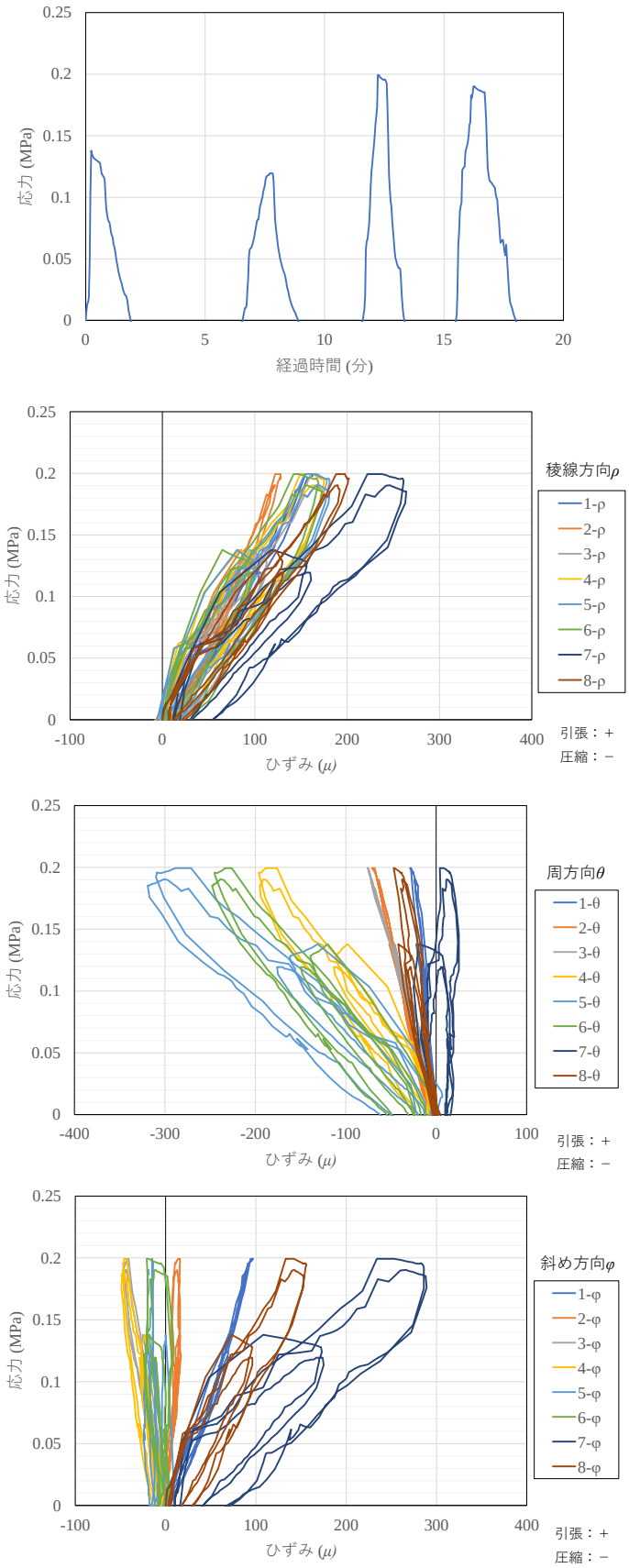


図 2.1-61　感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力ーひずみ測定結果（エポキシ樹脂接着剤と軽石凝灰岩 RO-1 を使用、養生開始 2 日後）

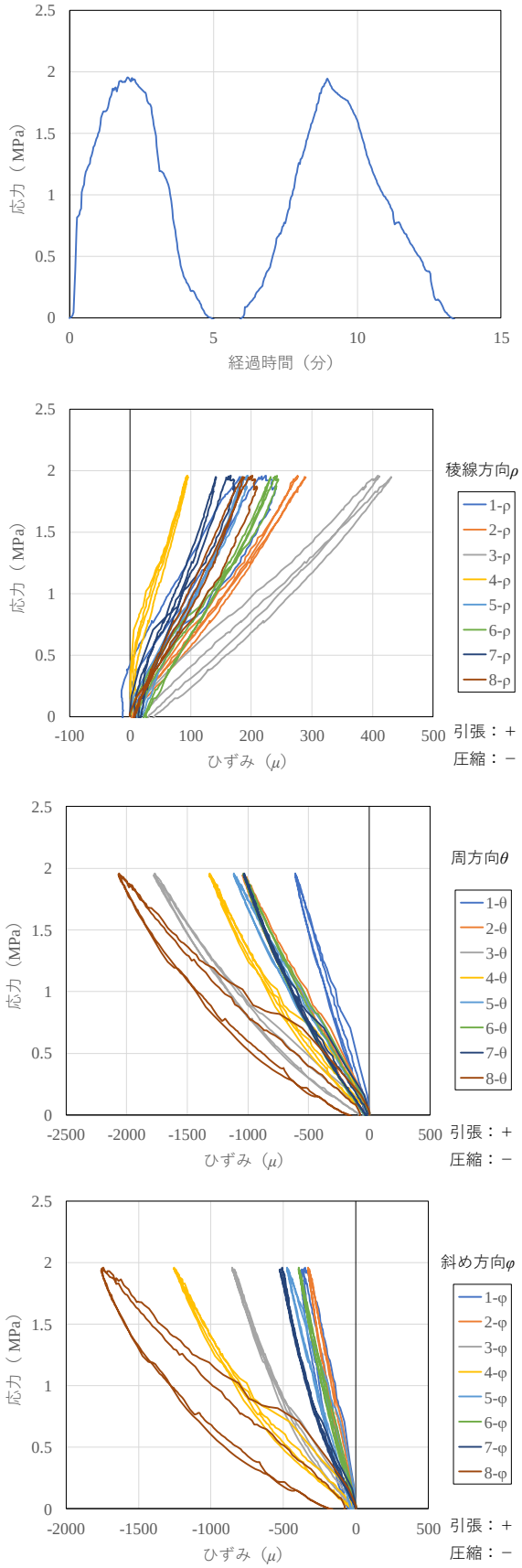


図 2.1-62 感度試験の載荷パターンと各ひずみゲージでの応力－ひずみ測定結果（エポキシ樹脂接着剤と大谷石を使用、養生開始 19 日後）

8）ストレインセルの接着に関する検討と課題

以上のように、軽石凝灰岩、大谷石、本小松の 3 種類の岩石ブロックを対象に、HIC 接着剤またはエポキシ樹脂接着剤を用いてストレインセルを円錐孔壁に接着した後、三軸載荷試験、オーバーコアリング、感度試験を順に実施した。実施した室内試験結果について、各ケースでのストレインセルの接着状態や応力値の妥当性について現段階での評価を行い検討状況として表 2.1-1 に整理した。同表はあくまで現段階（検討途中）での評価であり、感度試験結果を利用した解析も行っていない段階での評価であることに留意されたい。今後、接着剤の配合や養生時間、接着方法などを見直すことで結果の評価が改善される可能性がある。特にエポキシ樹脂接着剤はまだ使用回数が少なく、検討も十分でないため、改善の可能性は十分にあると考えている。

HIC 接着剤でストレインセルを接着した場合、軟岩である軽石凝灰岩や大谷石では解析から求めた主応力値は実際に載荷した応力値よりも小さくなる傾向がみられた。これはどぶづけした接着剤の硬化後のヤング率が大きいため、岩石の変形を接着剤が拘束してしまい、ストレインセルで測定されるひずみの値が小さくなったと考えられる。実際、岩石自体のヤング率が大きい本小松では応力解析結果の整合性は高く、接着剤による拘束の影響が生じていないと考えられる。HIC 接着剤では、応力方向の整合性はいずれの岩種においても良好であった。

一方、エポキシ樹脂の接着剤を用いた場合は、大谷石では HIC 接着剤より実測値と解析値の整合性が良くなった。接着剤のヤング率を小さくしたことによる改善と考えられる。一方、軽石凝灰岩での整合性は良くなかったが、これは軽石凝灰岩へのエポキシ樹脂接着剤の接着力が小さいことが要因の一つと思われるため、接着剤の配合や使用方法の検討を継続して実施していく。

感度試験に関しては、載荷応力に対するひずみの変化量にゲージごとのばらつきがみられるなど、感度試験を利用した応力解析の必要性があらためて認識された。感度試験を利用した解析方法が未完成のため、ここでは個別の評価は実施しないが、この検討も早急に進めることとする。

表 2.1-1 に示すとおり、全般には応力方向は実測と解析結果が整合しており、本手法の適用性は十分に期待できる結果となっている。上述したように、引き続き試験を実施し、それに基づく検討を進めて、接着剤の配合や養生時間、接着方法などの見直しを行うこととする。また、感度試験を利用した応力解析について数値解析を行って係数等を決定し、試験への適用を進めることとする。

表 2.1-1　室内検証試験によるストレインセルの接着に関する検討状況

接着剤	岩種	セルの貼付		三軸載荷試験1回目					三軸載荷試験2回目					三軸載荷試験3回目					オーバーコアリング				
		実施日	接着状態	実施日		載荷圧 (MPa)	解析の整合性		実施日		載荷圧 (MPa)	解析の整合性		実施日		載荷圧 (MPa)	解析の整合性		実施日		載荷圧 (MPa)	解析の整合性	
							応力値再現率	応力方向のずれ				応力値再現率	応力方向のずれ				応力値再現率	応力方向のずれ				応力値再現率	応力方向のずれ
HIC	軽石凝灰岩	9/26	良い	9/27	X	1.5	0.41	9°	9/28	X	1.5	0.37	11°						9/28	X	1.5	0.44	12°
					Y	1.0	0.25	12°		Y	1.0	0.21	12°							Y	1.0	0.32	11°
					Z	1.1	0.65	30°		Z	1.1	0.63	11°							Z	0.0	-	0°
	大谷石	9/28	良い	9/29	X	3.0	0.06	5°	9/30	X	3.0	0.10	2°	10/20	X	3.0	0.13	-20°	10/21	X	0.0	-	1°
					Y	2.0	0.03	5°		Y	2.0	0.08	2°		Y	2.0	0.07	-20°		Y	2.0	0.21	1°
					Z	0.0	-	9°		Z	0.0	-	8°		Z	0.0	-	3°		Z	0.0	-	6°
	本小松	10/18	良い	10/19	X	5.0	1.25	1°	10/20	X	5.0	1.31	-2°	11/7	X	5.0	1.26	0°	11/8	X	5.0	1.57	-1°
					Y	4.0	1.13	1°		Y	4.1	1.20	-7°		Y	4.1	1.19	0°		Y	3.0	1.49	0°
					Z	3.0	1.11	3°		Z	3.0	1.20	8°		Z	3.0	1.10	12°		Z	0.0	-	3°
エポキシ樹脂	軽石凝灰岩	11/29	要改善	11/30	X	1.5	0.27	-1°	12/1	X	1.5	0.21	-4°						12/1	X	0.3	0.07	30°
					Y	1.0	0.25	-1°		Y	1.0	0.19	-6°							Y	0.2	0.05	30°
					Z	1.1	0.04	16°		Z	1.1	0.10	16°							Z	0.0	-	7°
	大谷石	10/21	良い	10/25	X	3.0	0.83	-12°	10/26	X	3.0	0.80	-12°	11/8	X	3.0	0.98	-16°	11/9	X	2.0	1.19	-14°
					Y	2.0	0.51	-14°		Y	2.0	0.49	-14°		Y	2.0	0.61	-17°		Y	1.0	0.66	-15°
					Z	1.5	0.36	16°		Z	1.5	0.32	17°		Z	1.5	0.58	14°		Z	0.0	-	12°

※1　ストレインセルの接着状態を目視観察結果から三段階（右記の3色のとおり）で評価した。

※2　三軸載荷試験及びオーバーコアリングでは、実際の載荷応力に対して、ストレインセルから得られたひずみをもとに解析した応力の値や方向が整合しているかを同じく3段階で評価した。応力解析には（接着剤による感度低下がないと仮定）。ストレインセルで測定したひずみからの算出値÷比較値の比率が0.75～1.25倍のものを○、0.50～0.75倍または1.25～1.50倍を△、0.50倍以下または1.50倍以上を×とした。方向は15°以下のずれを○、16～30°を△、31°以上を×とした。

※3　ストレインセルは、上記5ケースのうち、HIC接着剤を用いた各岩種とエポキシ樹脂接着剤を用いた大谷石ではヤング率25MPaのものを、エポキシ樹脂接着剤を用いた軽石凝灰岩では125MPaのものを使用した。

三段階評価

○　：良い

△　：やや悪い（要改善）

×　：悪い（要改善）

現在の評価として示しているが、感度試験を利用した解析の導入により応力値の再現性は改善されると期待される。

(3) 湧水対策方法の検討

1) 湧水を模擬した室内試験

円錐孔壁ひずみ法が湧水環境下でどの程度の適用性を有するか検討するための簡易試験を実施した。図 2.1-63 のように、円錐孔壁を掘削した軽石凝灰岩の円柱供試体（直径 100mm、高さ 98mm）の底面から湧水を模擬して所定の水圧で送水した状態で、エポキシ樹脂を孔内に注入した際にエポキシ樹脂がどのような挙動をするかを目視確認した。

本試験の実施状況を図 2.1-64 に示す。同図のようにレギュレーターで調整した圧力の空気を水槽内に送って水槽内の水圧を高め、所定の水圧に調整した水を注入装置の底面から岩石に送水した。岩石への送水圧は注入装置の注入口に設置した圧力計とハンディーロガーにより測定した。なお、室温 18℃のもとで試験を実施した。

現場試験の手順や時間を想定して、本試験は以下の手順で実施した。

① エポキシ樹脂接着剤を作製（3 液をプラスチック容器内で 5 分混合）

② プラスチック容器内に接着剤が入った状態で 10 分待機。その間に注入装置下端から水圧 0.1MPa で送水開始

③ 容器から孔内（図 2.1-65 参照）へ接着剤を注入（2 分間）

④ 注入後 18 分間接着剤の挙動を観察・撮影

⑤ 試験後、ウエスやソフトブラシで孔内の接着剤を拭きとって、水圧を 0.2MPa に高めて上記①～④を再度実施

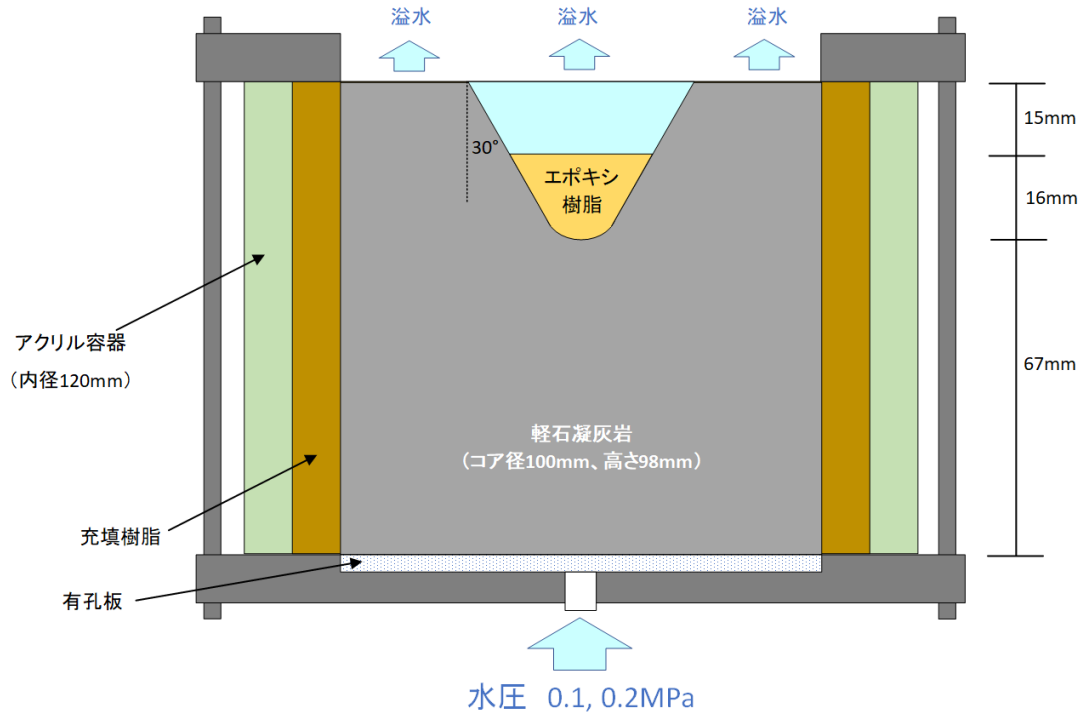


図 2.1-63 湧水影響確認試験の概要図

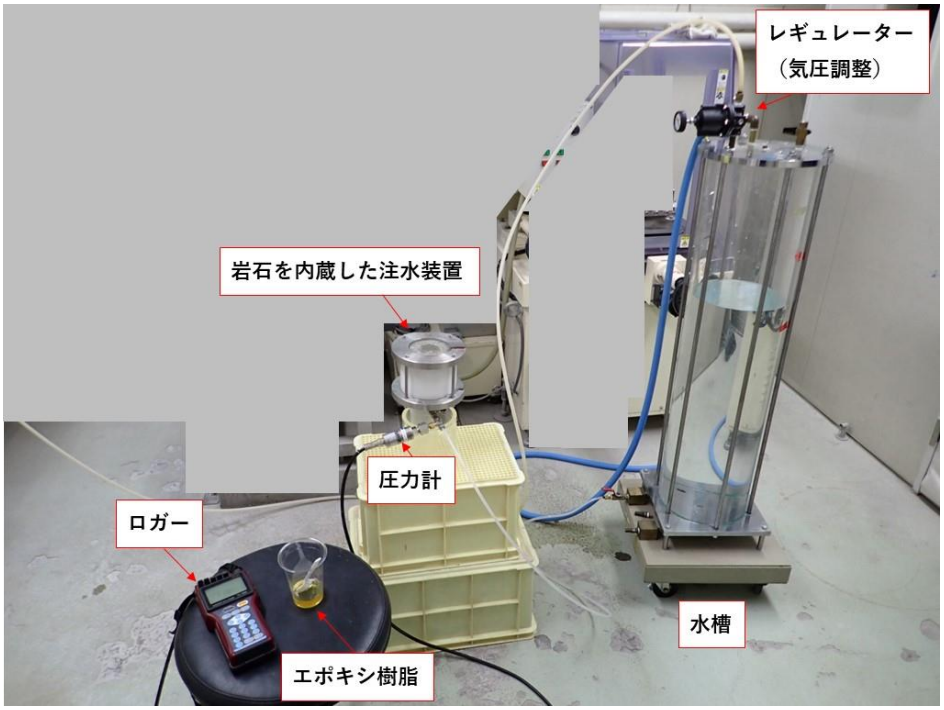


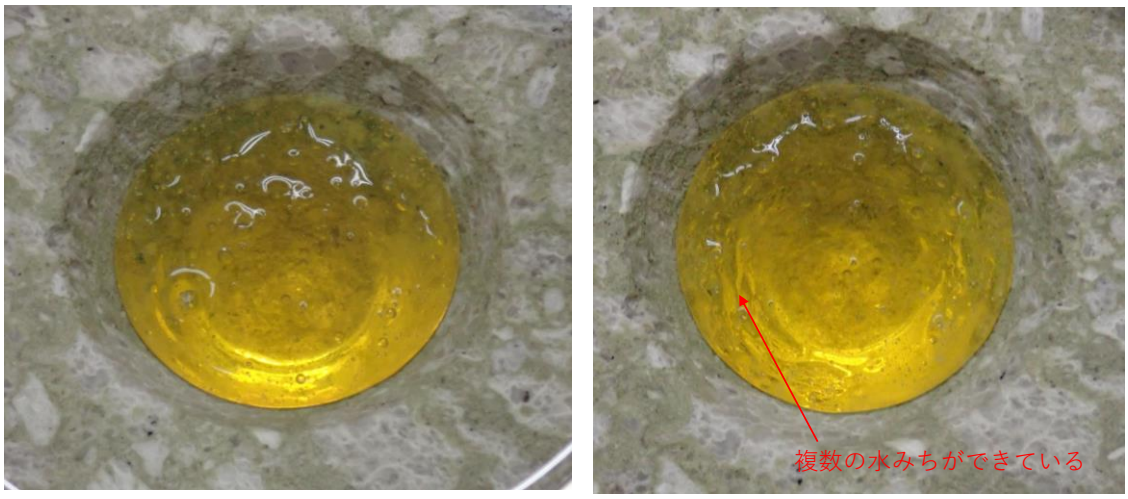
図 2.1-64　湧水影響確認試験の実施状況

図 2.1-65　円錐孔底の状態（接着剤注入前）

本試験の結果は以下のとおりであった（図 2.1-66 参照）。

- 水圧 0.1MPa、送水レート 9mL/min のもとでは、注入した接着剤が浮遊する現象はみられず、孔底に溜まった状態であった。そのため、ストレインセルの接着は問題ないと考えられる。
- 水圧 0.2MPa、送水レート 19mL/min のもとでエポキシ樹脂を注入すると、わずかに接着剤が沈殿せず浮遊したが、大部分は沈殿した。ただし、孔底部と接着剤の間には水みちができていた。水みちの影響によって、ストレインセルの接着に多少のむらが生じる可能性がある。

なお、それより大きな圧力下での試験の実施を試みたが、岩石周囲の充填樹脂の耐圧が不足したため、試験を継続できなかった。



水圧0.1MPaでの様子　　水圧0.2MPaでの様子

図 2.1-66　湧水を模擬した環境下での接着剤の様子

2）湧水対策に関する検討と課題

前述の試験結果から、セルを接着する円錐孔壁部において、水圧 0.1MPa、送水レート 9mL/min 程度の湧水環境では、問題なく、接着剤を注入してストレインセルを接着することができると考えられる。

一方、水圧 0.2MPa、送水レート 19mL/min のもとでは、接着剤の浮遊は小さいものの、岩壁と接着層の間に水みちが生じることによりストレインセルの接着が不十分となる可能性がある。

今回実施した試験は基礎試験であるため、様々な環境を想定した試験を検討し、接着剤の湧水に対する挙動の把握を進める。また、接着剤の配合の検討も今後引き続き行うため、選定した接着剤を用いて再度検討を行う必要がある。

2.1.3　浅深度現場検証試験と装置の設計検討

(1) 現場検証試験の概要

1）内容及び数量

現場検証試験においては、以下の内容を実施した。表 2.1-2 に数量を示す。調査位置は、青森県六ヶ所村（日本原燃濃埋敷地内）である。

・ボーリング掘削

・掘削及びコア採取

（2 箇所　掘削孔径 116mm：掘削長 6m 及び掘削孔径 66mm：掘削長 10m）

・コア観察、柱状図作成

・ボーリング孔閉塞

・試験技術に関する検討

表 2.1-2　現場検証試験における現場調査数量

項　　目	数量	
	現場試験孔（φ116mm）	湧水圧確認孔（φ66mm）
ボーリング掘削	6m	10m
コア観察、柱状図	6m	10m
ボーリング孔閉塞	6m	10m
現場試験・感度試験試料採取	2 箇所	－
湧水圧確認（最大）	－	1 回

2）実施手順

現場検証試験にあたっては、位置選定及び実施計画作成を行い、日本原燃株式会社殿の確認をいただいたのち、実施した。

調査坑内に試験孔を掘削し、深度 1.53～2.63m と深度 4.80~5.94m の 2 深度で、試験深度の掘削、ストレインセルの設置、試験ツールスや作業手順、掘削コアの損傷程度の確認を行った。

試験孔の掘削はボーリングマシンを用いて実施し、試験孔の仕様は表 2.1-3 のとおりである。

試験孔掘削前には、試験孔から 1m 程度離れた地点においてボーリング掘削を実施して、試験地点の地質状況及び対象地層の地下水位（湧水圧）を確認した。

現場検証試験の主な手順は以下のとおりである。

①　孔径 116mm でのオールコアボーリング

②　センタリングガイドケーシング挿入

③　孔底に円錐孔壁掘削（孔径 56mm~36mm）

④　孔内洗浄

⑤　孔内観察用カメラによる孔内観察

⑥　ダミーひずみ計の円錐孔壁への接着

⑦　孔径 116mm でオーバーコアリング

⑧　深度を変えて、上記①～⑦を繰り返す

⑨　現場試験後に、掘削コアを観察し、コアの損傷程度を確認する。

表 2.1-3　現場試験孔掘削の仕様

項目	内容	
掘削孔径	116mm ダミーセルの設置位置は 56mm~36mm で掘削	66mm
掘削角度	鉛直下向き	鉛直下向き
試料の有無	オールコア	オールコア
掘削長	6m	10m
対象地層	鷹架層中部層軽石凝灰岩層（T2pt）	

3）試験孔掘削位置

軽石凝灰岩層(T2pt)を試験対象とした場合、調査坑及び試験空洞の周辺において鉛直下向きに掘削する場合は、調査坑第 3 拡幅部付近と試験空洞での掘削が、最も浅い深度で軽石凝灰岩層(T2pt)が出現する。よって候補として考えられるのは、第 3 拡幅部と試験空洞の 2 地点であるが、試験空洞については、空洞が大きく比較的水平で作業性が良いというメリットがある半面、水圧が高いことが想定されることや試験空洞内での作業行為であること等のデメリットもあり、それらを総合的に評価し、最初の現場試験としては第 3 拡幅部とすることが望ましいと判断した。調査坑と試験孔掘削位置の概要を図 2.1-67 に示し、調査坑における掘削位置を図 2.1-68 に示す。

調査坑第 3 拡幅部での試験孔掘削地点は、調査坑内の車両の通行、日本原燃殿の定置資機材、調査坑設備（照明、風管、排水系）等に支障が生じない地点を選定した。第 3 拡幅部における試験孔掘削位置（ボーリングやぐらと調査坑との関係）を図 2.1-69 に示す。

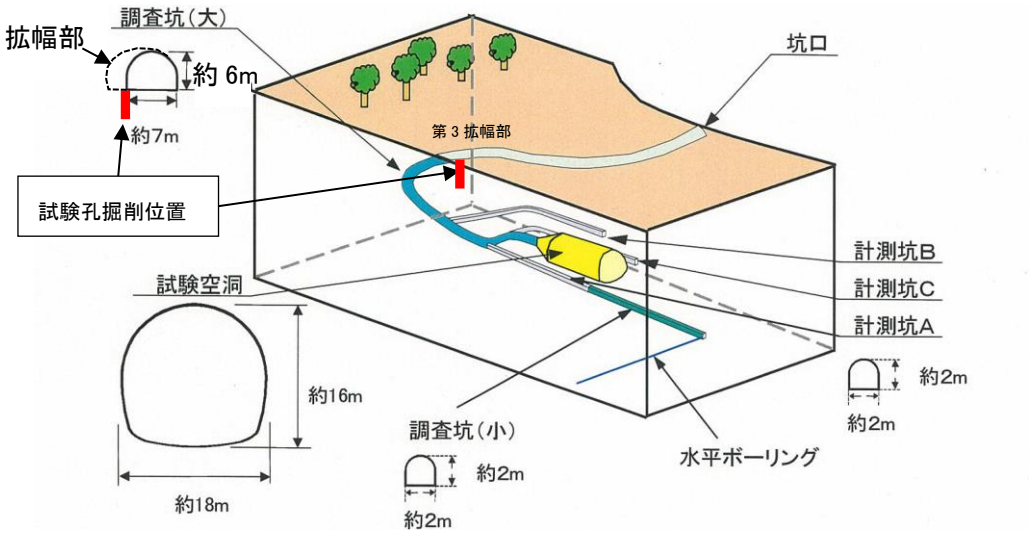


図 2.1-67　調査坑と試験孔掘削位置の概要

（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）

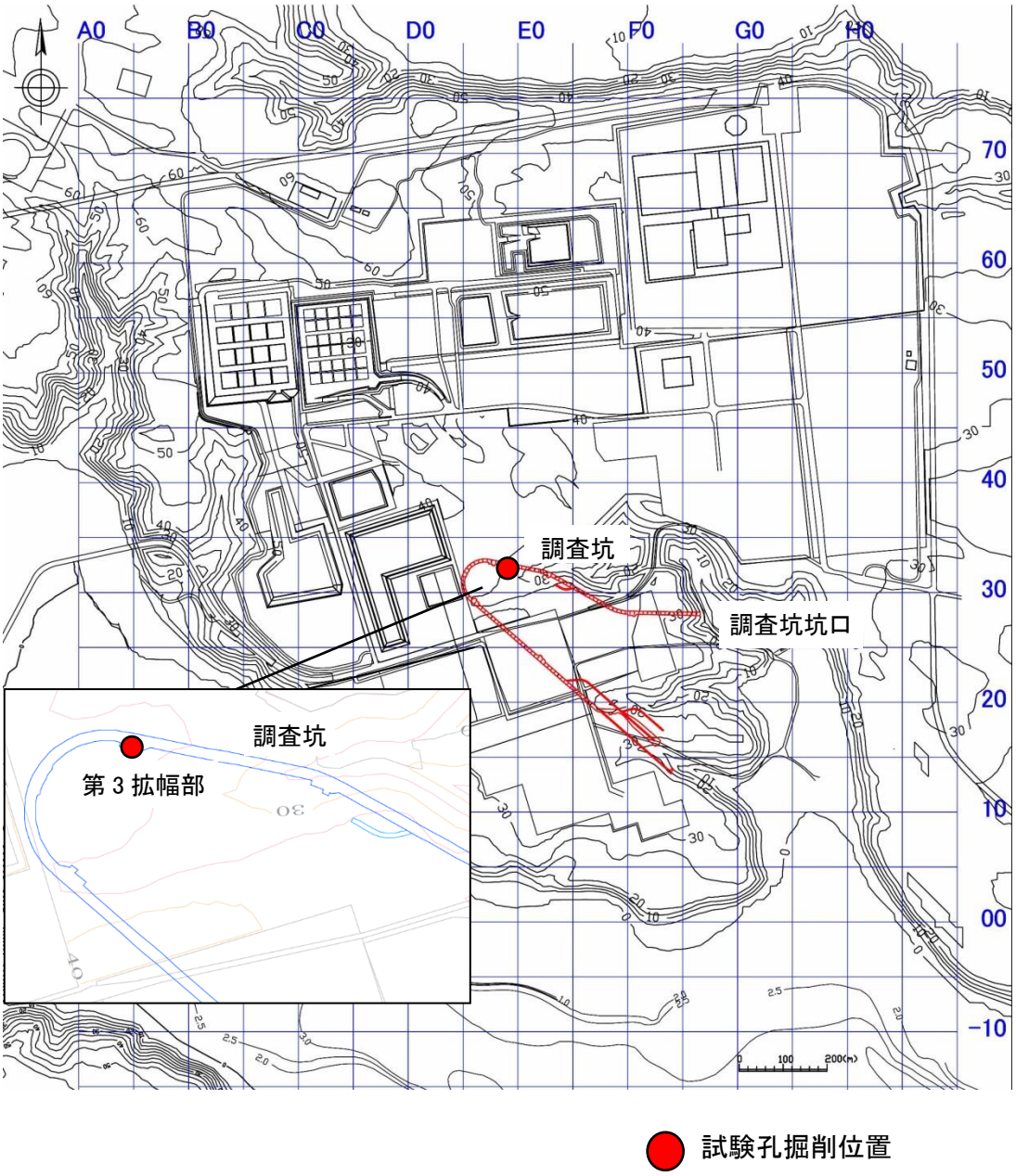
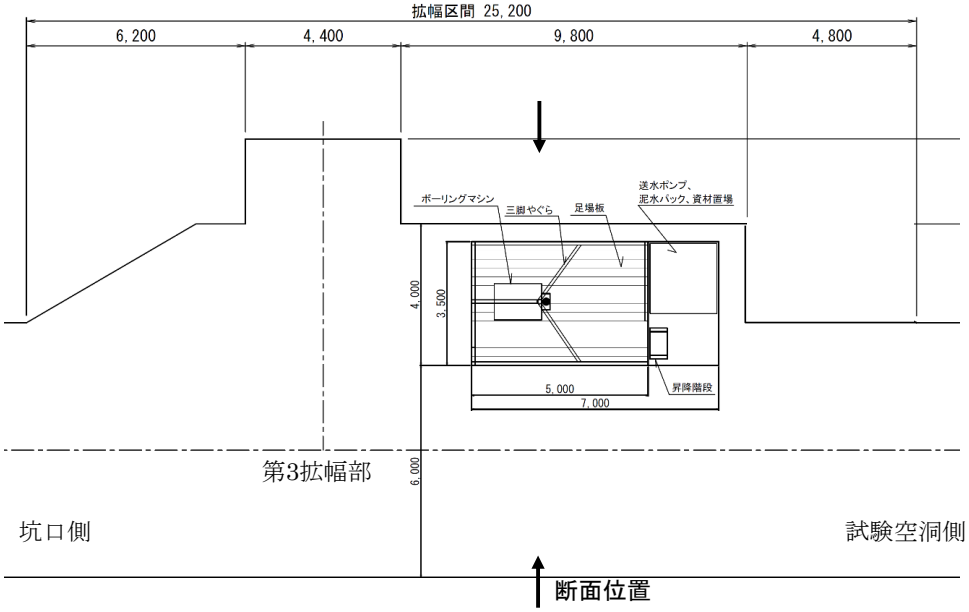


図 2.1-68　試験孔掘削位置図



a)平面図

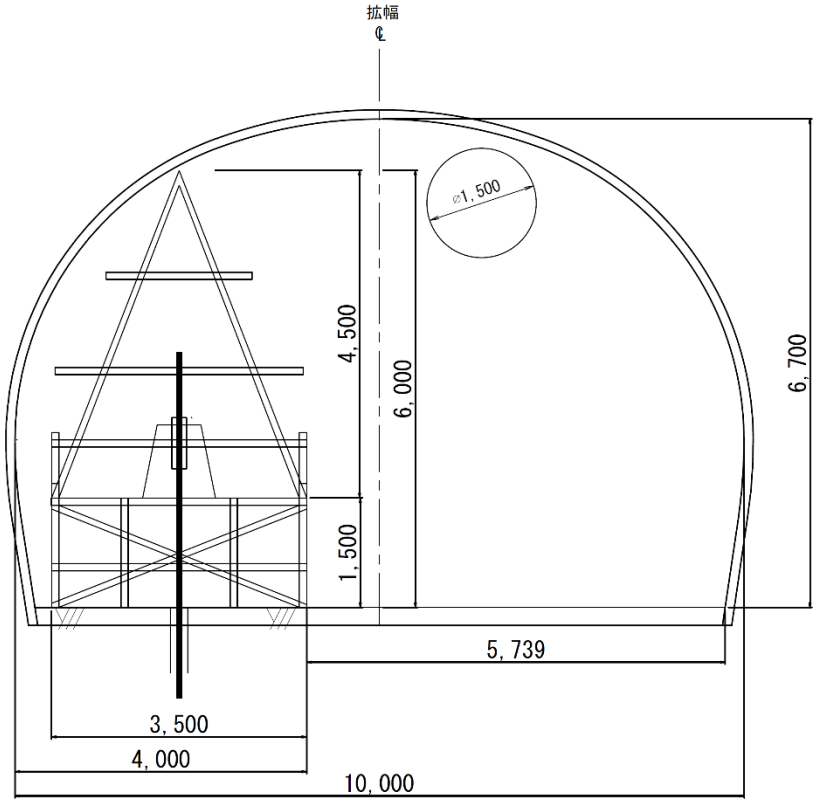


図 2.1-69　第 3 拡幅部における試験孔掘削位置図

(2) 現場検証試験の方法

1) 資機材の搬入

ボーリングマシン等の資機材については、調達箇所（専門施工業者資材置場）から第 3 拡幅部の試験孔掘削地点まで、トラック（ユニック車）を用いて運搬した。

使用するボーリング機材の重量は後述の表 2.1-4 に示すとおりであり、使用した機材の中ではボーリングマシンが最大重量である。ユニック車はボーリング機材の運搬、荷下ろし作業に十分な能力を有しているものを使用した。

掘削に用いた主要な使用機材の一覧を同表 2.1-4 に示す。マシンはハイドロリックフィード型のボーリングマシンを用いた。ボーリングマシンなど使用する機器は、十分目的を達成できる能力を有するものを使用した。

表 2.1-4　主な機械器具一覧

品名	規格	数量	単位	単位重量 (kg)	摘要
ボーリング マシン	東邦 D-1 エンジン ヤンマーNFD11 型	1	台	550	掘進能力 150m
	試錐ポンプ 東邦製 BG-3 型	1	台	100	最大吐出量 30 l/min
コアチューブ	ダブル φ66mm	1	本	45	
〃	トリプル φ116mm	1	本	30	
ロッド	φ40.5mm,L=3.0m	4	本	10	総長 12m 以上
ケーシング	φ140mm,L=1.0m	4	本	21	
〃	φ89mm,L=1.0m	4	本	11	
三又やぐら	L=5.0m	1	式	45	
単管パイプ	φ4.86cm	約 30	本	2.8	

第 3 拡幅部での荷降ろし作業時の状況を図 2.1-70 に示す。風管や孔壁、配線等に接触しないように注意して作業した。また、作業中であることを通行車両の運転者が認識できるように資機材荷降ろし場所にはカラーコーン等で作業区画を明示した。

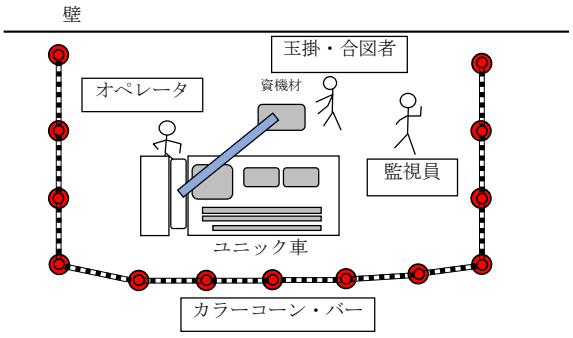


図 2.1-70　資材荷降ろし概要図

2）ボーリングマシン仮設

ボーリング作業構台（足場）は、原則として単管パイプで組立てた架台とし、作業員が安全に作業できる広さを確保した。

架台上には足場板を隙間なく張り、転倒・転落事故を防ぐため、番線等により固縛するとともに、必要な箇所には手すり、昇降用階段等の安全設備を設置した。三脚やぐらは安全ブロックを取り付けてから立ち上げて設置した。

ボーリングマシンは、ボーリング作業構台に据え付けた。給水設備は、エンジン付きポンプ、タンクとこれらを連結するサクションホース等からなり、ボーリング作業構台に隣接して据え付けた。なお、ボーリングマシンを作業構台に据え付ける際は、一時的に通行止を行った。

ボーリングのやぐらは、削孔深度に応じて図 2.1-71 に示すような三脚やぐらを使用した。坑内高さは約 6m程度であり、やぐらを仮設するには問題ない高さであった。

ボーリング作業に使用する水は、坑内の給水地点からボーリング作業箇所に給水し使用した。また、作業に必要な照明や測定機材類等の電力は調査坑内の 200V ケーブルからダウントランスを設置して 100V で供給した。

ボーリング掘削時及び孔内試験時のボーリング足場、資材及びトラックの配置を図 2.1-72 に示す。

ボーリング作業に使用する水は、調査坑内における給水箇所からボーリング掘削地点まで給水した。利用にあたっては、監理員・日本原燃殿の指示に従うとともに、調査坑管理業者と調整を行い使用した。

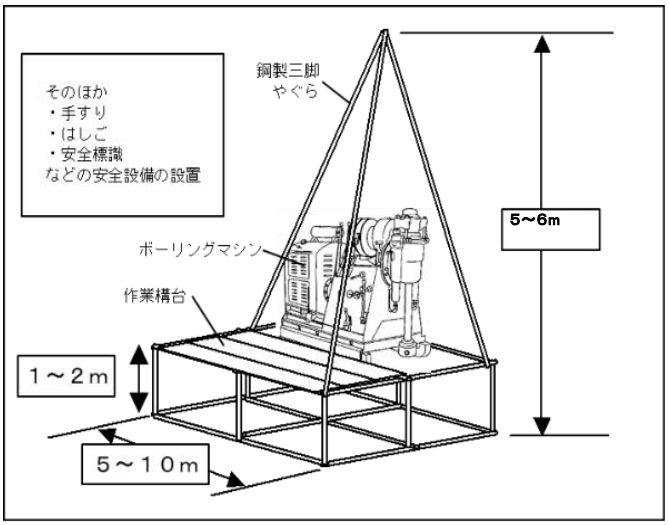


図 2.1-71　足場及びやぐらの仮設概要図（単管パイプ三脚やぐら）

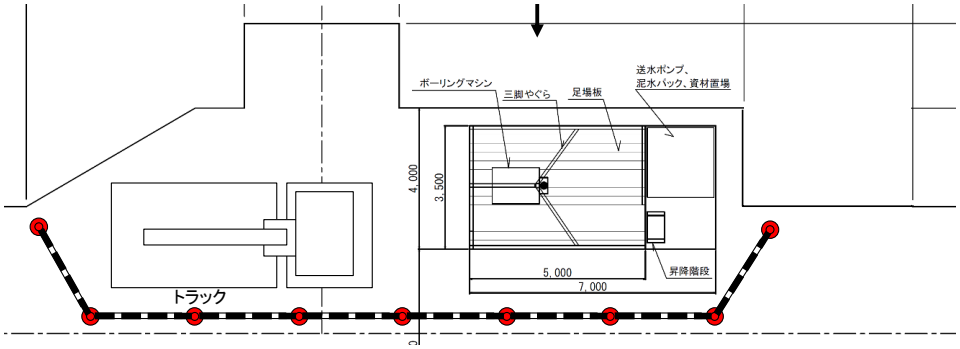


図 2.1-72　ボーリング作業時のボーリング足場、資材及びトラックの配置

3）対象地層の湧水圧の確認

現場試験の事前に試験孔掘削箇所に分布する軽石凝灰岩層（T2pt）の地下水の湧水圧を確認した。試験孔から 1m 程度離れた箇所に試験孔と同深度（10m 程度）のボーリング孔を掘削して、地下水の湧水圧を確認した。

湧水圧の確認概要を図 2.1-73 に示す。

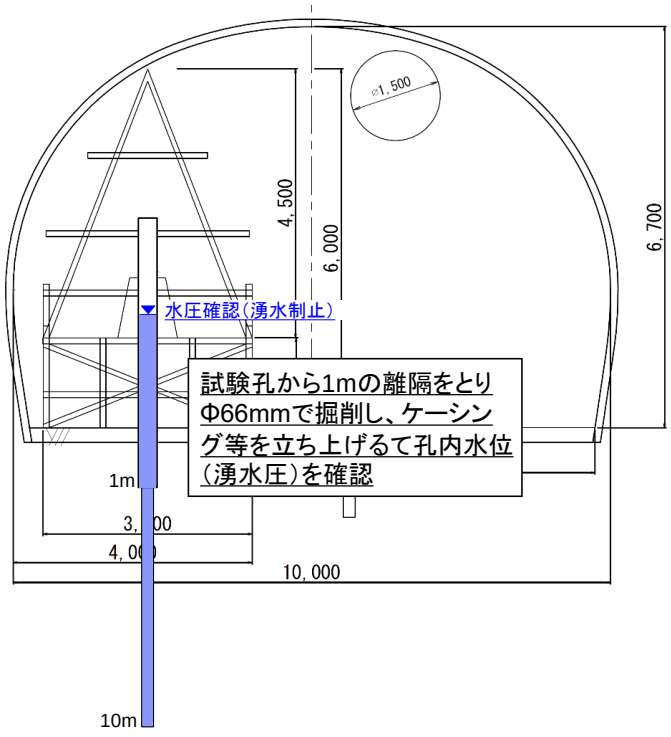


図 2.1-73　地下水の湧水圧の確認概要

4）現場試験

現場試験は、主に測定深度までの掘削、パイロットボーリング（試験孔）掘削、孔内洗浄、孔壁観察、接着剤注入、ストレインセル設置、オーバーコアリング及びストレインセル回収の作業を行った。現場試験の作業手順を図 2.1-74 に示す。

本試験は、深度 2m 付近と深度 5m 付近の 2 回実施した。地質状況を確認して割れ目の無い区間で実施した。

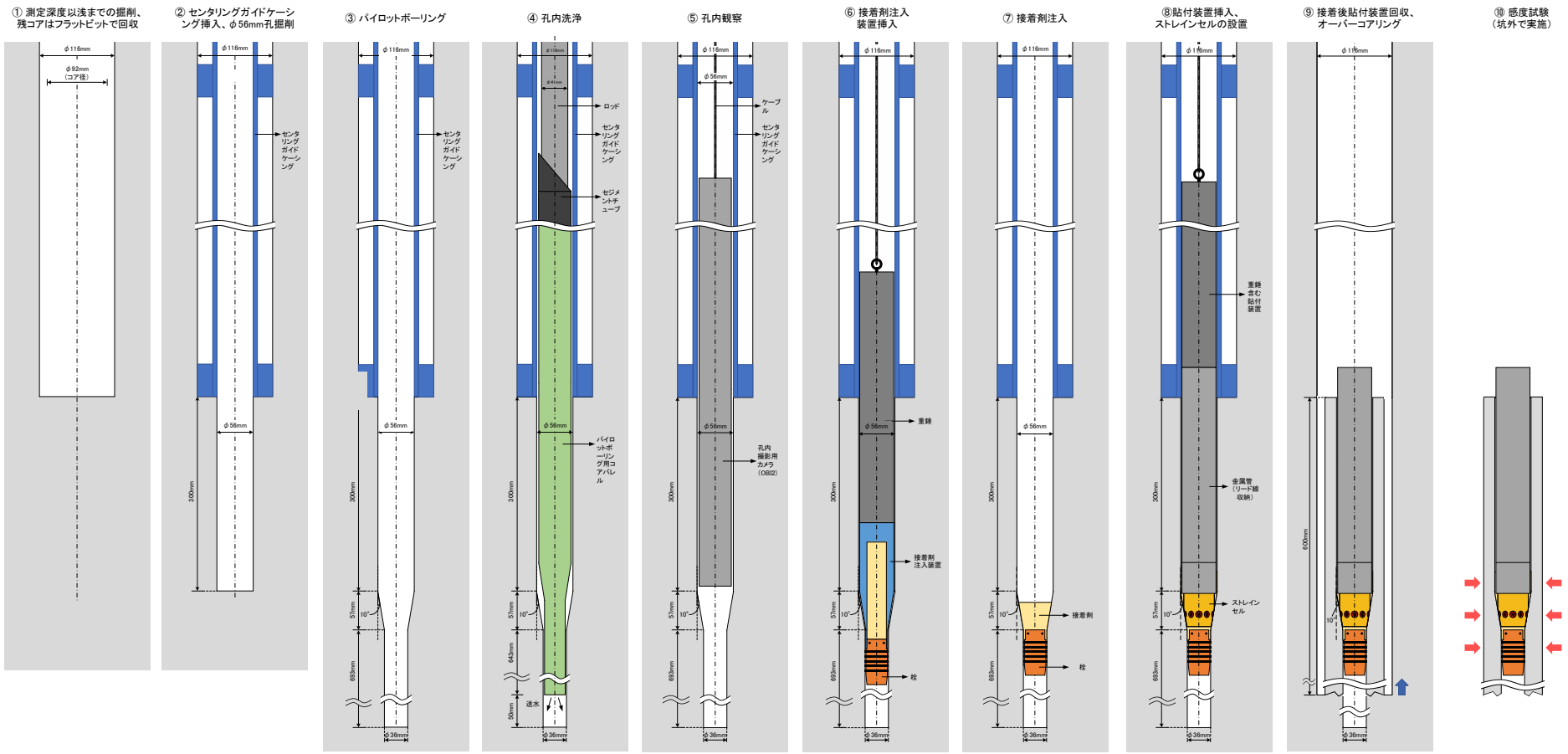


図 2.1-74　現場試験の作業手順

削孔は全て鉛直下方向とし、試験深度の手前までは孔径 116mm の普通工法で行った。削孔に当たっては、図 2.1-75 及び図 2.1-76 に示すハイドロリックフィード型のボーリングマシンを用いた。本ボーリングマシンは、エンジンの動力によってボーリングロッドに回転を与え、油圧によってボーリングロッドに荷重を与えるものである。ボーリングロッドの先端には、図 2.1-77 に示すφ116mm 用の削孔器具（コアチューブ）や、図 2.1-78 に示すコアバレル（コアチューブ）等を装着して、試験孔形状に応じて最善の方法によって掘削・コア採取を実施した。

試験孔掘削作業の流れを図 2.1-79 に示す。

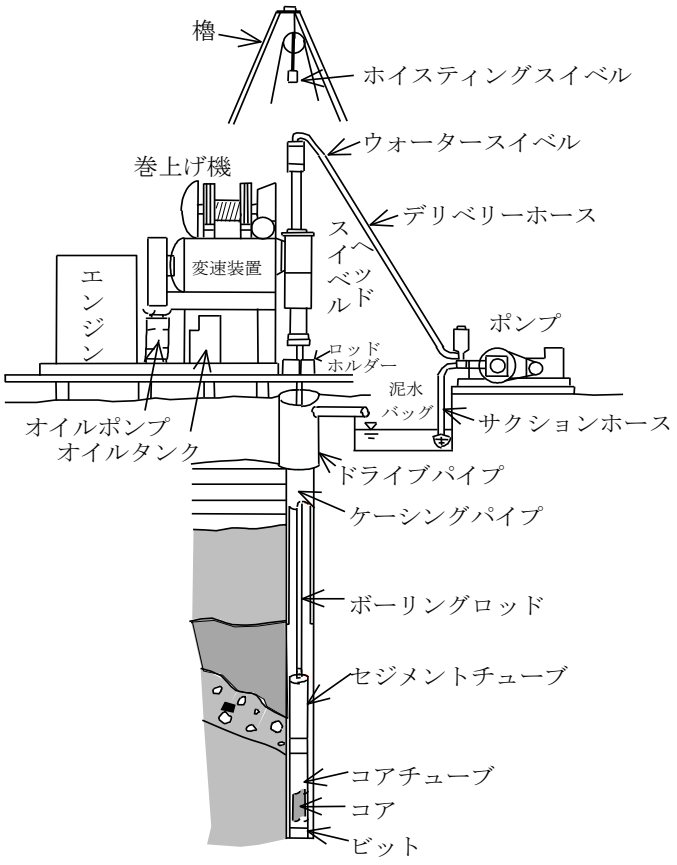


図 2.1-75　削孔の概要

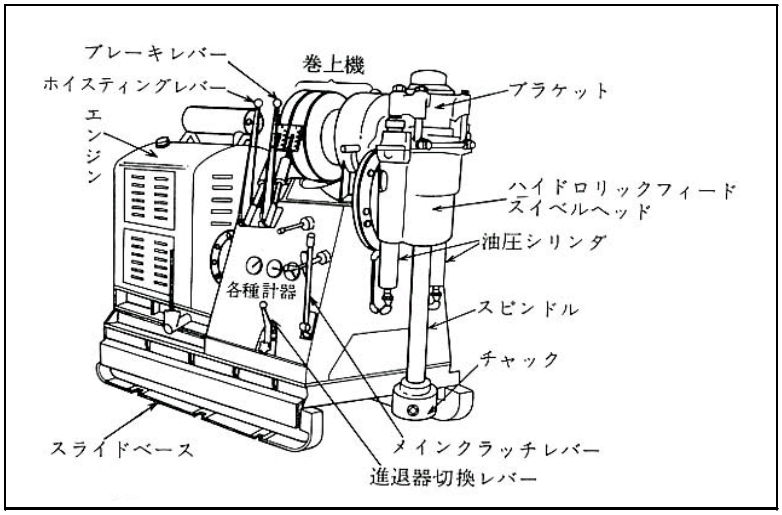


図 2.1-76　ハイドロリックフィード型ボーリングマシン

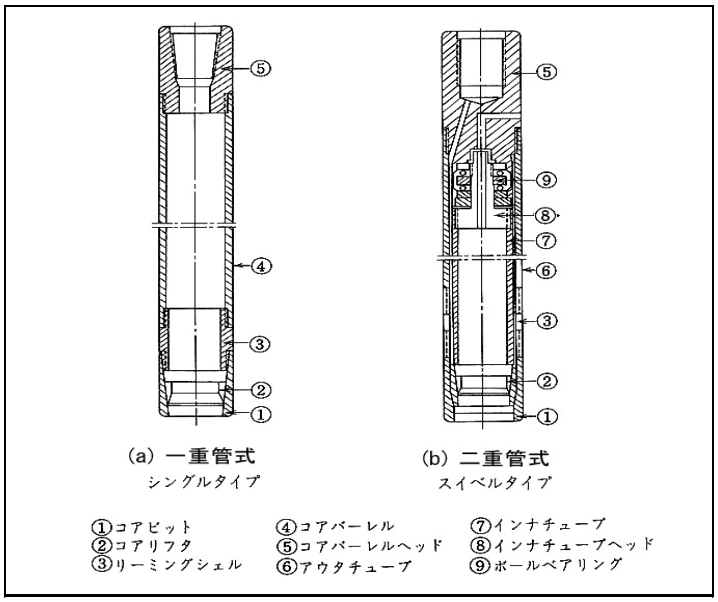


図 2.1-77　φ116mm 削孔器具（コアチューブ）の概要

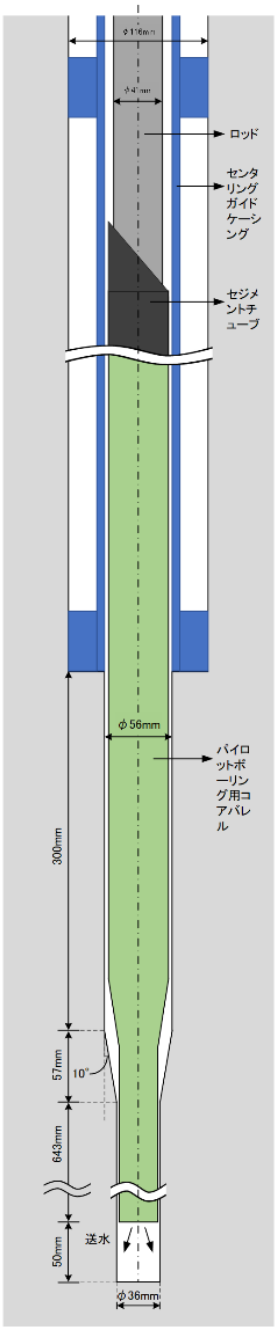


図 2.1-78　パイロットボーリング用コアバレル（コアチューブ）の概要
（φ56mm～φ36mm）

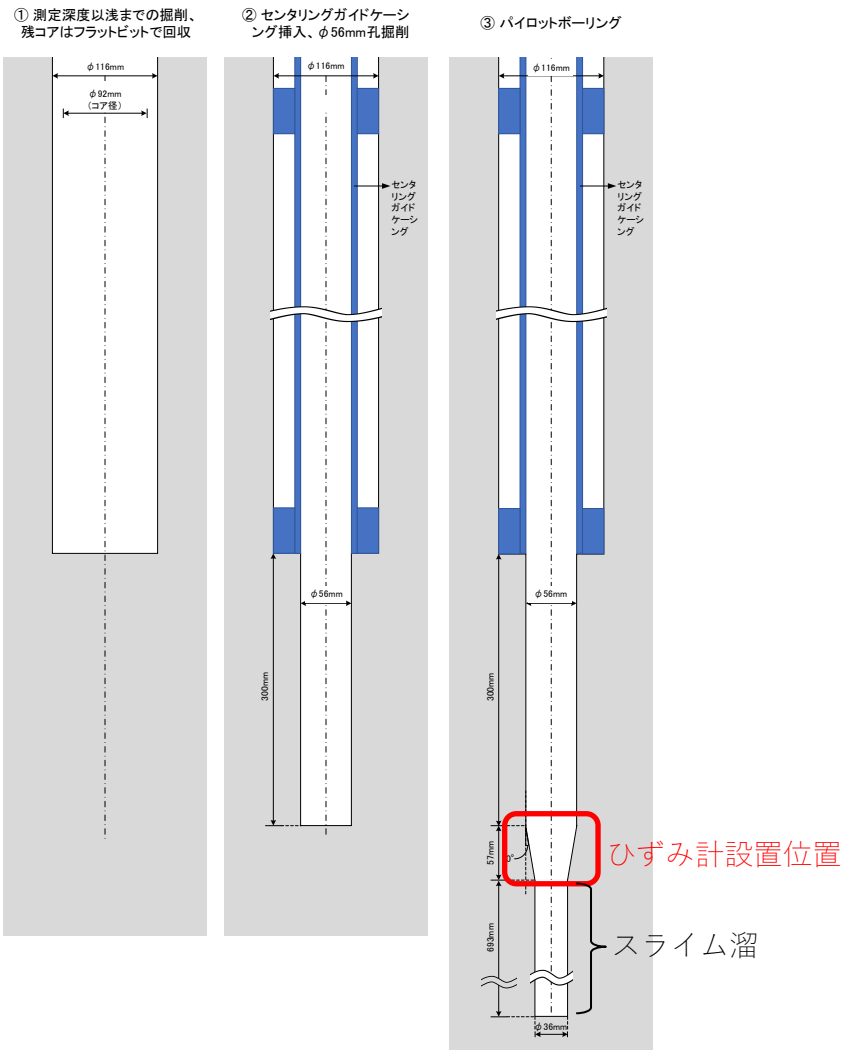


図 2.1-79　試験孔掘削作業の流れ

また、採取したコアは、特にコアチューブから取り出す際に、コアに人為的な割れ目を発生させないよう注意して取扱った。コア箱への収納時は、地質の状態、コアの硬軟等を考慮し、コアの整理・保存に支障の無いような端部整形を施し、長期保存に耐え得るようなコア箱に収納した。また図 2.1-80 に示すとおり、コア箱の外面には、件名、ボーリング孔番及び区間深度を、内面には深度 10cm 毎にマーキングした。

ボーリング削孔中には、送水量と排水量、排水の状態、掘削時間等について測定記録し、地層の変化やボーリング孔内の状況の評価に利用できるようにした。

調査の経過・結果の確認のために、現場状況について写真撮影を行った。現場状況写真としては、機材搬入前（施工前）、調査全景、掘削状況、各種孔内作業、検尺、残尺、機材撤去後（施工後）等の状況などの撮影を行った。

現場状況の写真は、添付資料に整理した。

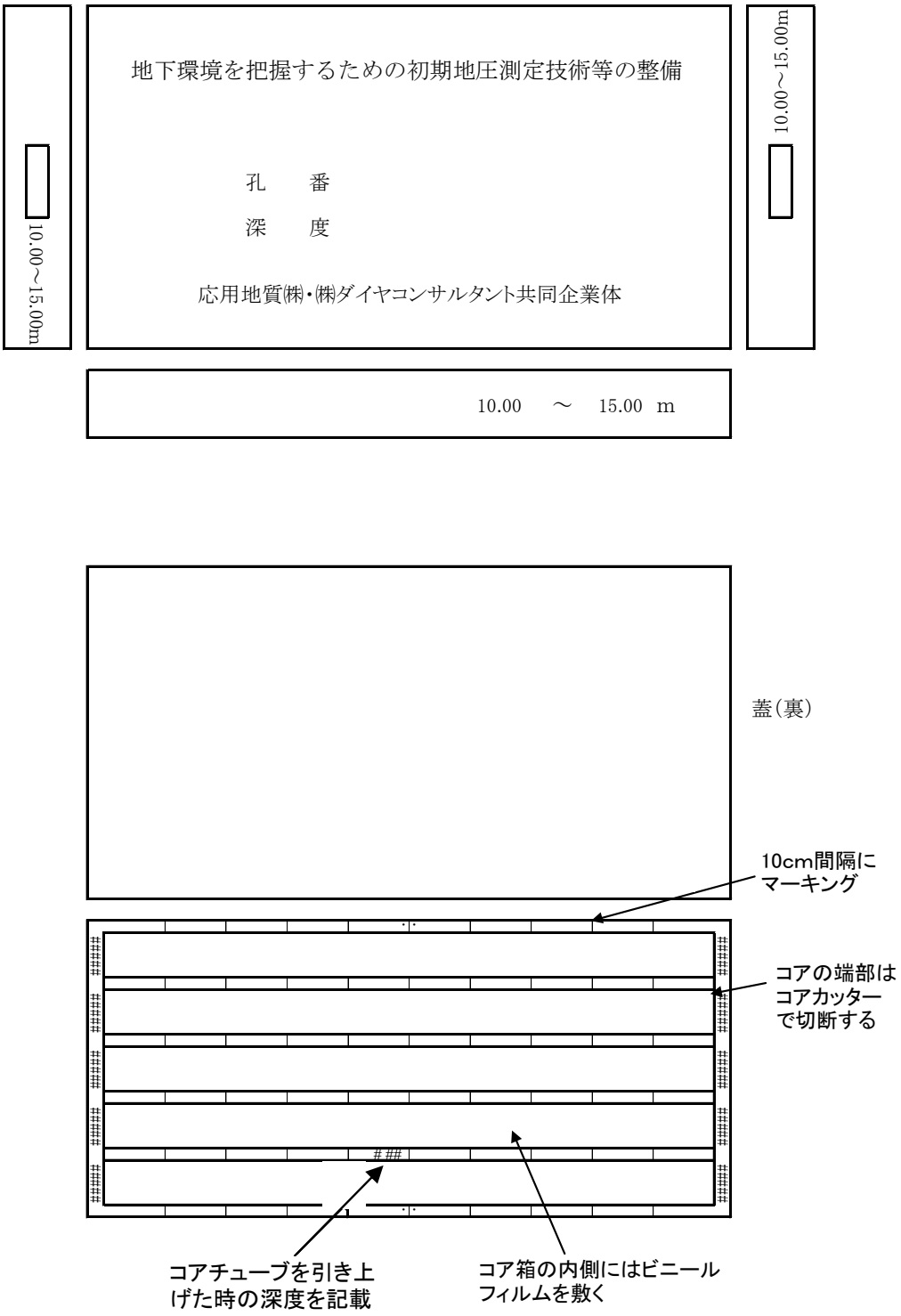


図 2.1-80　ボーリングコア箱の整理方法の例

5）検尺

目的の深度に到達したものと判断された時には、監理員に連絡して検尺を行った。

6）試験終了後の処置

削孔した孔の閉塞は、砂礫とベンドナイト（ペレット）を交互に投入して行い、路面部はセメント系材料で埋め戻して復旧した。閉塞を実施する掘削孔は湧水圧測定孔（深度 10m）と現場試験孔（深度 6m）の 2 孔である。閉塞の方法を以下に示し、閉塞の計画を図 2.1-81 に示す。

令和 2 年度に実施した調査ボーリング孔（TI1-850 孔）と同様に砂礫とベントナイトとを互層状にして埋め戻しを行った。

砂礫（砕石）とベントナイト（ペレット状）が互層となるように埋め戻すことを基本とし、孔口周辺区間は砕石とセメント系材料で埋め戻しを行った。

埋め戻しに使用する材料

・砂礫（7 号砕石：粒径 5mm 程度）
・ベントナイト（ペレット状：ペルプラグ TS-60）
・砕石（孔口付近は粒径 10~20mm 程度）
・セメント系材料（モルタル等）

砂礫とベントナイトの互層は、以下に示す考え方に従い計画した。

① ベントナイト 1m・砂礫 2m の互層を基本とする。
② 地質及び層相境界部については、境界の上方及び下方にそれぞれ 1m のベントナイト層（層厚計 2m）を設ける。
③ 5m 以浅は砂礫 1m・ベントナイト 1m 以上の互層とする。
④ 0.6m 以浅は砕石とモルタルで埋め戻す。

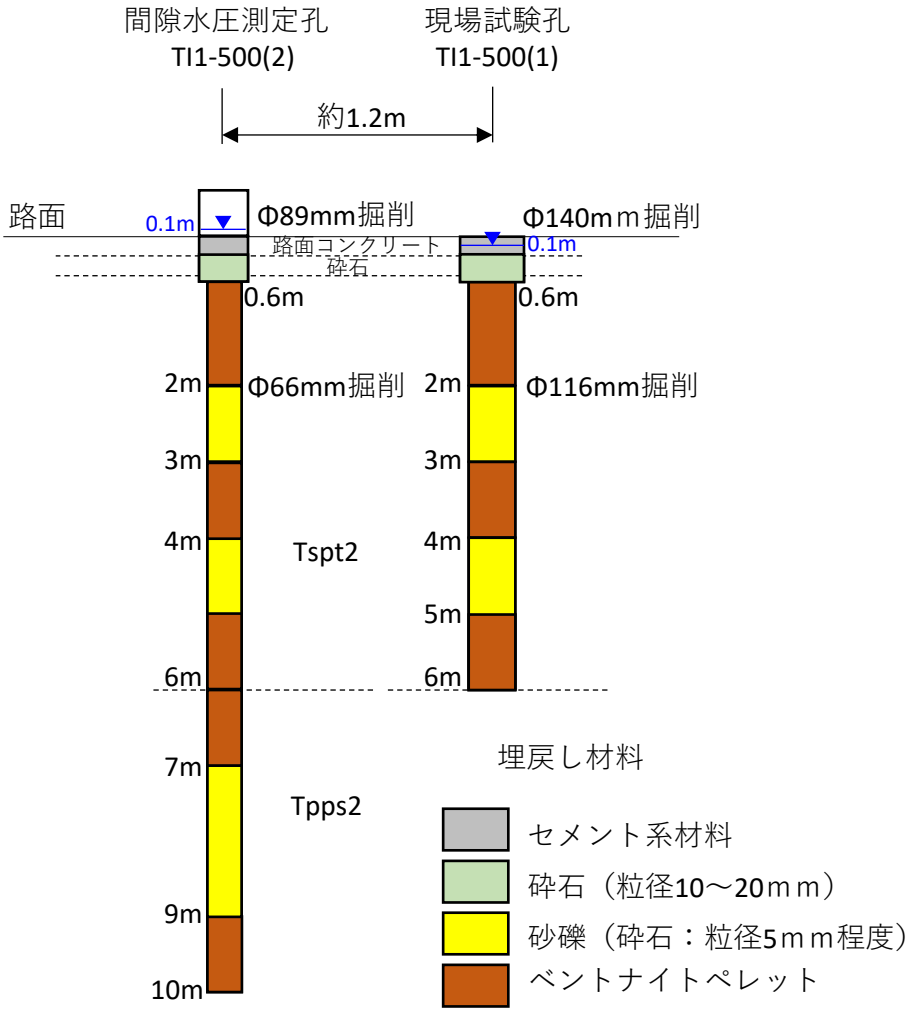


図 2.1-81　孔閉塞の計画

7）コア観察・柱状図作成

調査の結果の確認のために、コア状況についての写真撮影を行った。

コア写真は、削孔後速やかに直射日光を避け、適当な照明設備を備えた撮影装置を用いて垂直方向から１箱毎に撮影した。

また、柱状図の作成にあたっては、掘削中の諸現象の測定及び記録に基づくほか、コアを詳細に観察し、岩石の種類、層序、岩相、岩盤組織、硬軟、割れ目の状況、挟在物の種類と状態、その他について地質学、岩石学及び層位学的に鑑定判断したコア観察カードを作製し、それに基づいて柱状図を作成した。

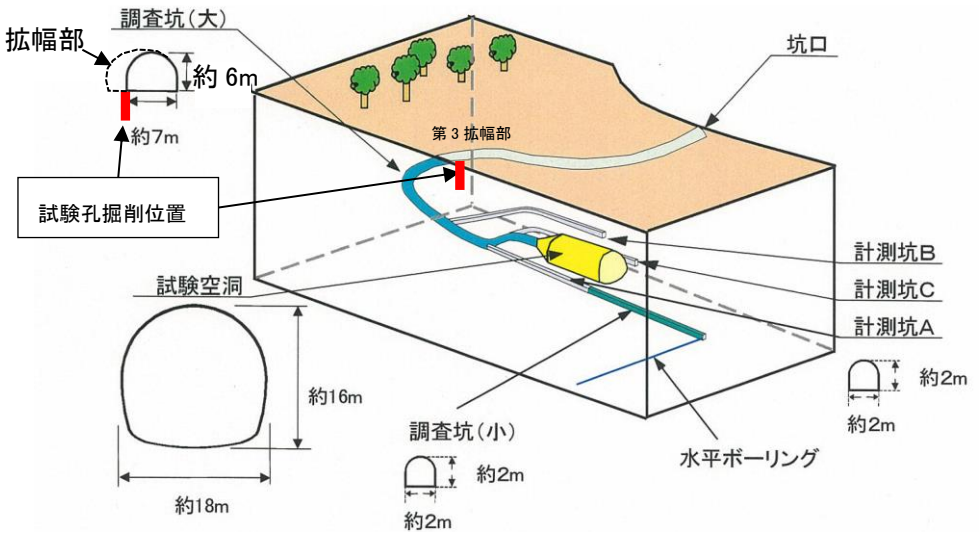
(3) ボーリング掘削結果

1) 現場試験孔掘削の概要

実施したボーリングの孔名、位置、孔口標高、掘削深度等を整理して、表 2.1-5 に示す。また、試験孔掘削位置の概要を図 2.1-82 に示し、試験孔掘削位置を図 2.1-83、図 2.1-84 に示す。

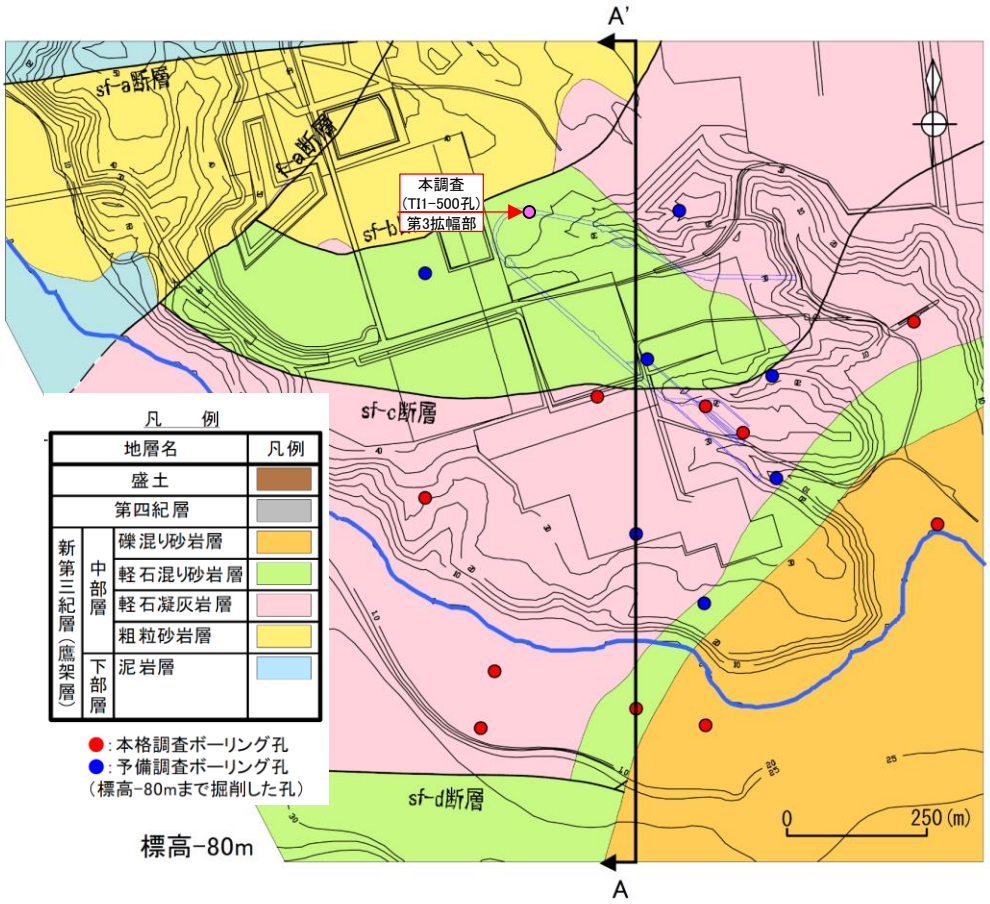
表 2.1-5　試験孔掘削の概要

孔　名	TI1-500(1)	TI1-500(2)
掘削位置	調査坑の坑口から約 500m 地点 (第 3 拡幅部) (X,Y=107604.58,43578.68)	調査坑の坑口から約 500m 地点 (第 3 拡幅部) (X,Y＝107604.35,43579.81)
孔口標高	EL.-42.844m	EL.-42.804m
掘削深度	6m〔EL.-48.844m〕 (第 3 拡幅部の路面を基準)	10m〔EL.-52.084m〕 (第 3 拡幅部の路面を基準)
掘削方向	鉛直下向き	鉛直下向き
掘削地点の 地表面標高	EL.約 36m	EL.約 36m



(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 2.1-82　試験孔掘削位置の概要



注）地質水平断面図に重ねて地表面の地形等高線を記載

図 2.1-83　試験孔掘削位置（地質平面図）

（既往の標高-80m の地質水平断面図を編集・加筆）

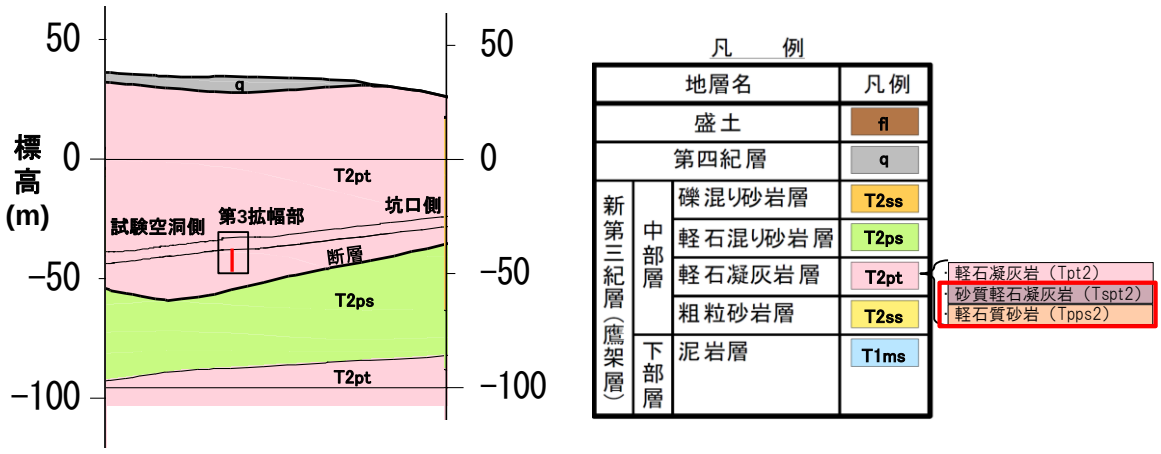


図 2.1-84　試験孔掘削位置（調査坑地質断面図第 3 拡幅部付近）

2）TI1-500 付近の地質状況

TI1-500(1)孔〔掘削 6m〕及び TI1-500(2)孔〔掘削 10m〕において確認した地質は、調査坑の路面から、路面コンクリート、路盤砕石、鷹架層中部層軽石凝灰岩層(T2pt)砂質軽石凝灰岩(Tpst2)及び軽石質砂岩(Tpps2)であった。

各孔の地層について以下に示し、地質断面図を図 2.1-84 に、ボーリングコア写真を図 2.1-86 及び図 2.1-87 に示す。

なお、ボーリング柱状図及びコア写真（拡大版）は添付資料に整理した。

【TI1-500(1)孔〔掘削 6m〕】

○0.00m～0.24m　路面コンクリート

硬質で柱状である。径 10～20mm の角礫骨材（安山岩主体）を含む。

○0.24m～0.50m　路盤砕石

径 10～30mm の安山岩の角礫主体で細礫も含む。

○0.50m～6.00m　砂質軽石凝灰岩(Tspt2)

径 5～20mm の白色軽石片を多く含む。最大径 30mm 程度である。基質は灰色の中粒～粗粒の凝灰岩である。塊状無層理で、所々に径 10mm 程度の暗褐色の泥岩片を含む。

割れ目は無く棒状コアである。全体にハンマー打撃で鈍い金属音を発してハンマーの軽打で砕ける。

・2.60m～5.07m

軽石片の含有は少なく、径 3～5mm の軽石片を主体とする。最大径 10mm 程度である。

・5.07m～6.00m

軽石片の含有はやや多くなり、径 5～10mm の軽石片を主体とする。

1.53m～2.13m と 4.80m～5.32m の深度で感度試験用のダミーセル及び岩石試料を採取した。

【TI1-500(2)孔〔掘削 10m〕】

○0.00m～0.26m　路面コンクリート

硬質で柱状である。径 10～20mm の角礫骨材（安山岩主体）を含む。

○0.26m～0.51m　路盤砕石

径 10～30mm の安山岩の角礫主体で細礫も含む。

○0.51m～5.95m 砂質軽石凝灰岩(Tspt2)

径 5～20mm の白色軽石片を多く含む。最大径 30mm 程度。基質は灰色の中粒～粗粒の凝灰岩。塊状無層理で、所々に径 10mm 程度の暗褐色の泥岩片を含む。

割れ目は無く棒状コアである。全体にハンマー打撃で鈍い金属音を発し、ハンマーの軽打で砕ける。

・1.29m～1.33m

暗褐色の泥岩片。

・2.37m～3.20m

軽石片の含有は少なく、径 3～5mm の軽石片を主体とする。最大径 10mm 程度である。

・3.20m～3.55m

軽石片の含有は多い。

・3.55m～4.80m

軽石片の含有は少なく、径 3～5mm の軽石片を主体とする。最大径 10mm 程度である。

・4.80m～5.95m

軽石片の含有はやや多くなり、径 10～20mm の軽石片を主体とする。

○5.95m～10.00m　軽石質砂岩(Tpps2)

径 1～3mm の白色軽石片を所々に含み､長さ 1～5mm の白色貝化石片(最大 10mm)を含む。基質は暗灰色の中粒～粗粒の凝灰質砂岩である。塊状でほぼ無層理である。

割れ目は 1 条/1～2m 程度あり、棒状~柱状コアを主体とする。全体にハンマー打撃で鈍い金属音を発し、ハンマーの軽打で砕ける。

・6.40m 付近 不明瞭な葉理が認められる。

・7.06m 割れ目　∠55° 割れ目面は分離している。

・8.59m 割れ目　∠30° 割れ目面は分離している。

・9.13m 面なし断層　∠40° 断層面はゆ着している。

・9.25m 割れ目　∠30° 割れ目面は分離している。

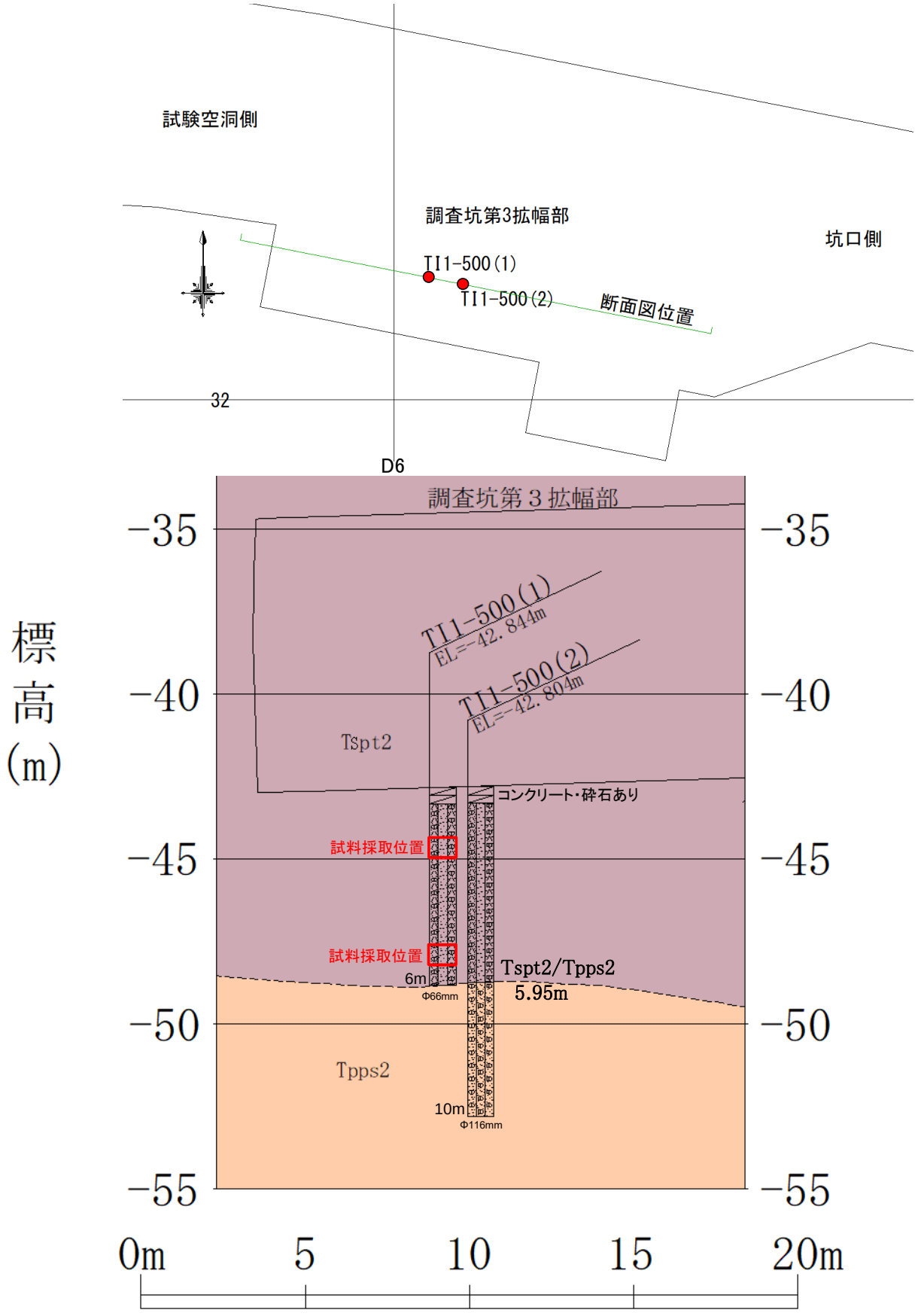
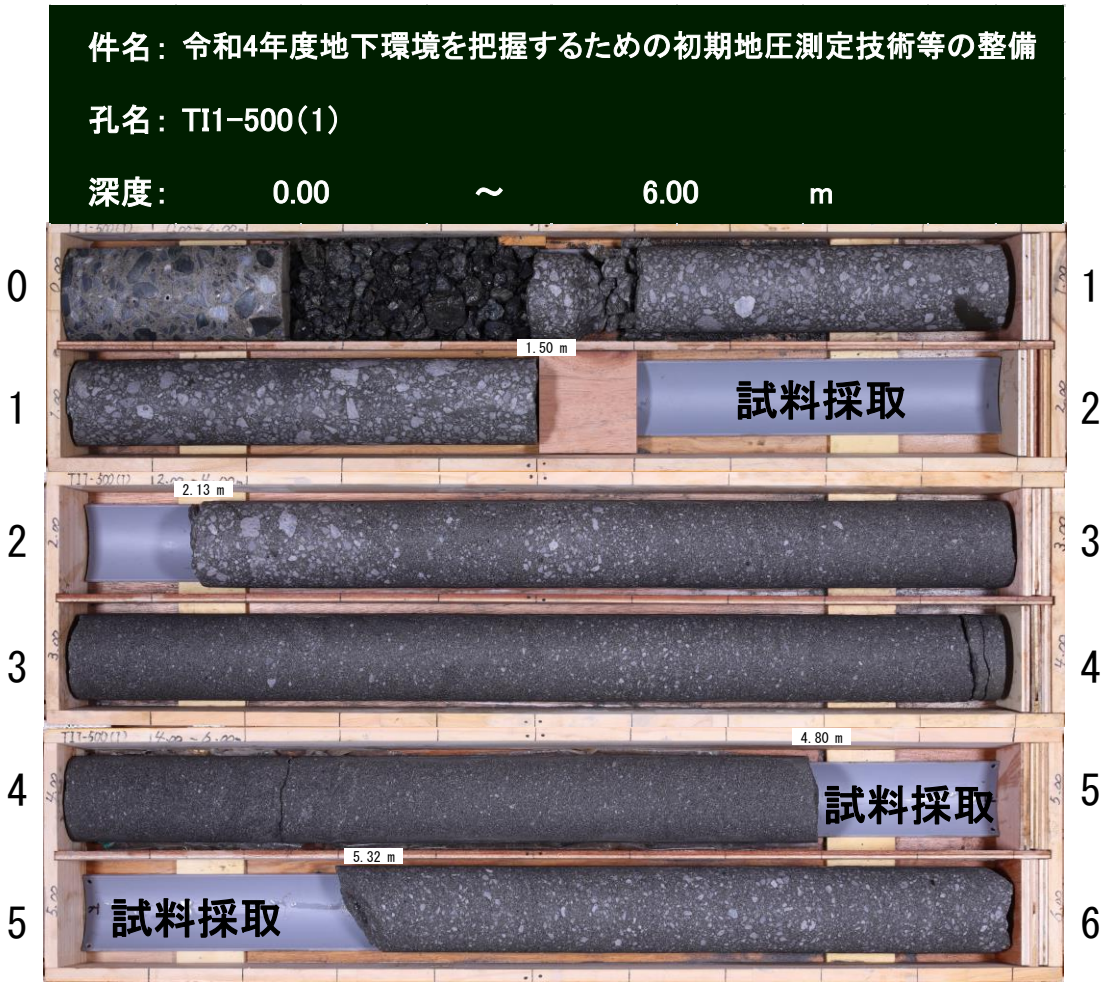
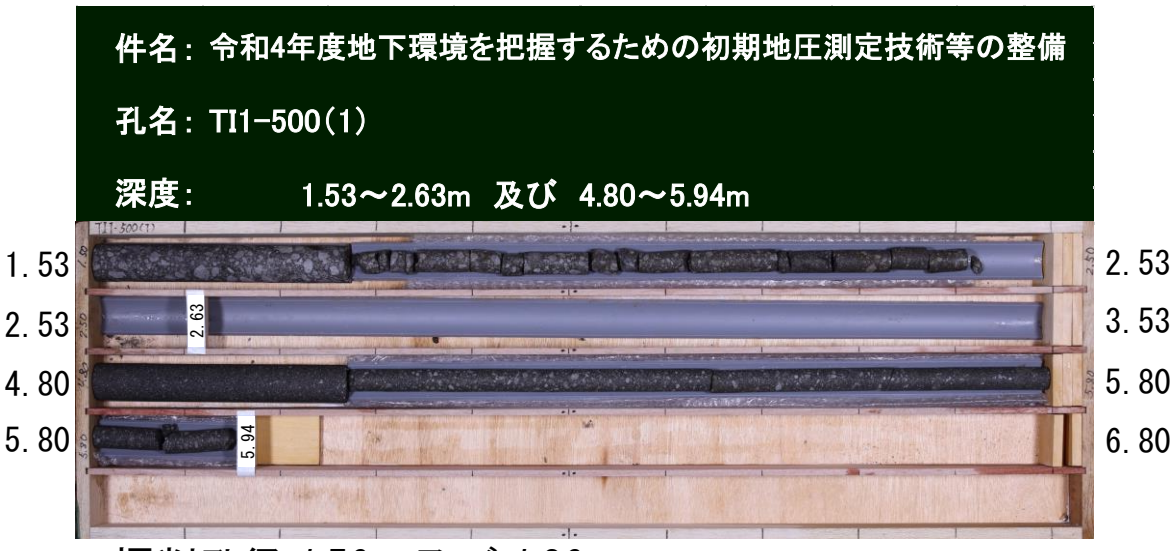


図 2.1-85　試験孔掘削位置及び地質断面図

【TI1-500(1)孔】



＊掘削孔径φ116mm



＊掘削孔径φ56mm及びφ36mm

図 2.1-86　TI1-500(1)孔　ボーリングコア写真（深度 0.00m~6.00m）

【TI1-500(2)孔】

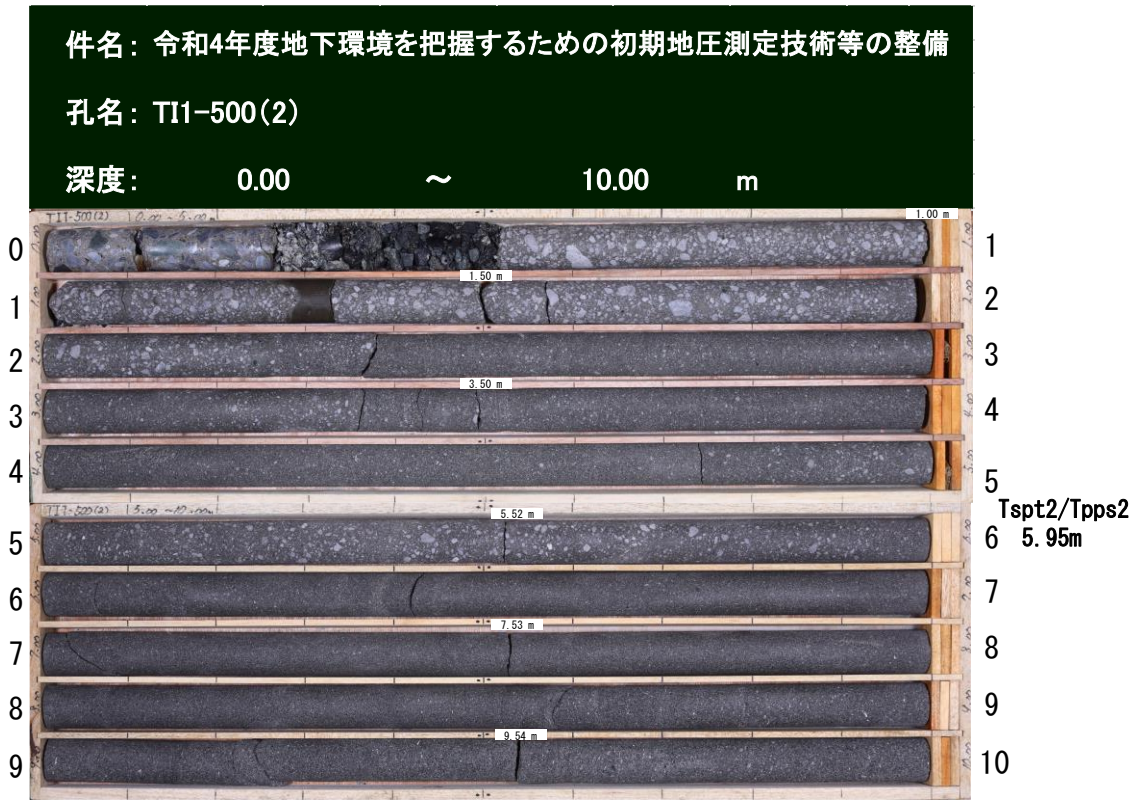


図 2.1-87　TI1-500(2)孔　ボーリングコア写真（深度 0.00m~10.00m）

3）掘削時の孔内水位状況

TI1-500(1)孔及び TI1-500(2)孔で確認した掘削に伴う孔内水位の変化状況を整理して図 2.1-88 に示す。

掘削に伴う孔内水位の変化状況については、本調査では最初に現場検証試験の対象である軽石凝灰岩層（T2pt）の地質確認と湧水圧測定を TI1-500(2)孔にて最初に実施したことから、TI1-500(2)の孔内水位の変化状況から記載する。

TI1-500(2)孔の孔内水位は、12 月 7 日に第 3 拡幅部の路面から深度 10m まで掘削した直後は、GL-1.45m であり、孔内水位は僅かであるが上昇気味であったため、路面からケーシングパイプを GL+1.52m まで立ち上げて作業を終了した。翌朝 12 月 8 日の孔内水位は、GL+1.52m のケーシングパイプの上部先端から水が僅かに漏れ出ている状態（おそらく 1L/min 未満）であったため、ケーシングパイクを 1m 継ぎ足して再度孔内水位（湧水圧）を確認した。同日の午前 10 時頃、最終的に孔内水位は GL+1.69m で安定した。孔内水位（湧水圧）が安定したことにより、現場検証試験の本孔（TI1-500(1)孔）においても同様にケーシングパイプを立ち上げることで流水が抑えられ、現場検証試験が可能と判断し、TI1-500(1)孔の掘削に取りかかった。その後の TI1-500(2)孔の孔内水位は、GL-0.24m（12 月 12 日）、GL-0.19m（12 月 19 日）と GL-0.2m 前後となっている。

一方、12 月 8 日から掘削を開始した TI1-500(1)孔の孔内水位は、掘削中は GL-0.3m 前後となっており、12 月 19 日に GL+0.10m（ケーシングパイプ立上げ GL+0.5m）とわずかに湧水圧が認められた。ケーシング内の地下水面は安定しており、ケーシングの上部先端から地下水が湧水することはなく、孔内の水面に揺らぎもなく孔内水が流動している様子は確認されなかった。最終的に 12 月 21 日には GL-0.32m であった。

また、ダミーセルを設置する箇所の孔内観察（2 回）においても、孔内水が上方へ流動しているような様子（水中浮遊物の上方への動き）は確認されなかった。

なお、TI1-500(2)孔における 12 月 7 日~8 日の孔内水位の上昇（水位：GL+1.69m）については、その原因を特定することは出来ていないが、現段階では掘削水による影響の可能性が高いと推察される。TI1-500(2)孔は、深度 5.95m 付近から砂質軽石凝灰岩(Tspt2)から軽石質砂岩(Tpps2)へ漸移的に変化しており、上位の砂質軽石凝灰岩(Tspt2)には割れ目は無い（掘削による機械割れを除く）が、下位の軽石質砂岩(Tpps2)には、1~2m に 1 条程度の割れ目が認められる。これら割れ目から湧出する地下水により湧水圧が発生した可能性があるが、この場合は一時的ではなく試験期間にわたり湧水圧が発生すると考えられる。

軽石質砂岩(Tpps2)には割れ目があり、掘削中にある程度の水量の掘削水が割れ目に圧入されて一時的に試験孔周辺の地下水圧が上昇し、掘削作業が終了した後に割れ目に圧入された掘削水が逆流して孔内水位を上昇（湧水圧を発生）させ、割れ目からの逆流が終わった段階で孔内水位が低下する方向に変化した可能性も考えられる。

なお、上記の逆流する現象については、ダム基礎岩盤の透水性を把握するために実施するルジオンテスト（透水試験の一種）において割れ目のある軟岩地山で試験を実施した場合に、試験水の注入が終了すると試験区間に注入した水が逆流する現象がしばしば確認される。ルジオンテストでは大きな圧力をかけて割れ目を含む試験区間に注入することから、本調査の掘削水圧程度で割れ目に水が圧入されるかという疑問は残る。

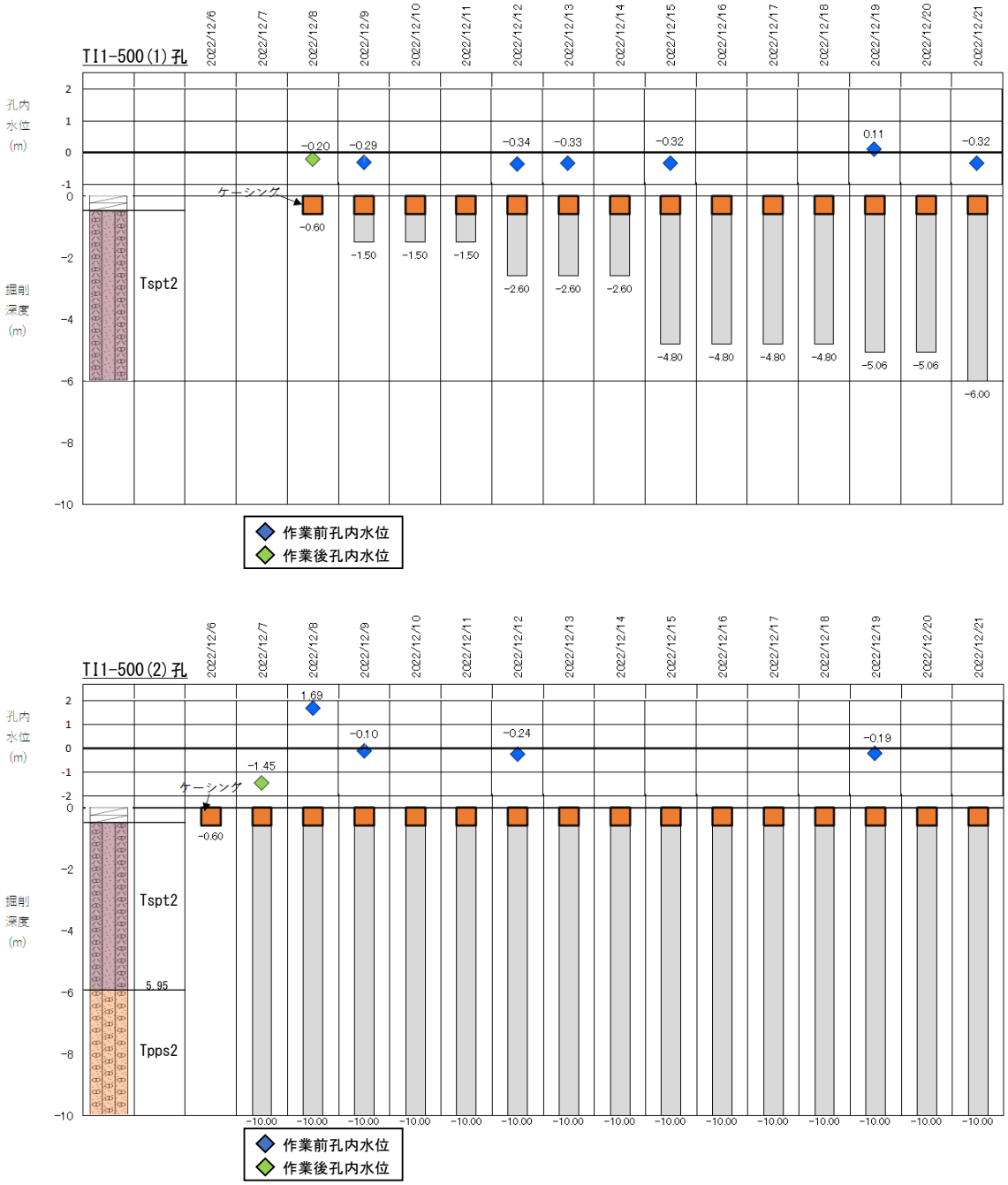


図 2.1-88　試験孔の掘削に伴う孔内水位の変化状況

上：TI1-500(1)孔、下：TI1-500(2)孔

4）試験孔の閉塞

掘削した試験孔の閉塞は、前述したとおり、砂礫とベンドナイト（ペレット）を交互に投入して行い（ベントナイトは 1m 以上を確保）、路面部はセメント系材料で埋め戻して復旧した。また、層相境界部にはベンドナイト層（約 2m）がくるように調整して実施した。試験孔の孔閉塞構造図を図 2.1-89 に示し、試験孔の閉塞実施時の埋め戻し深度確認表を表 2.1-6 及び表 2.1-7 に示す。

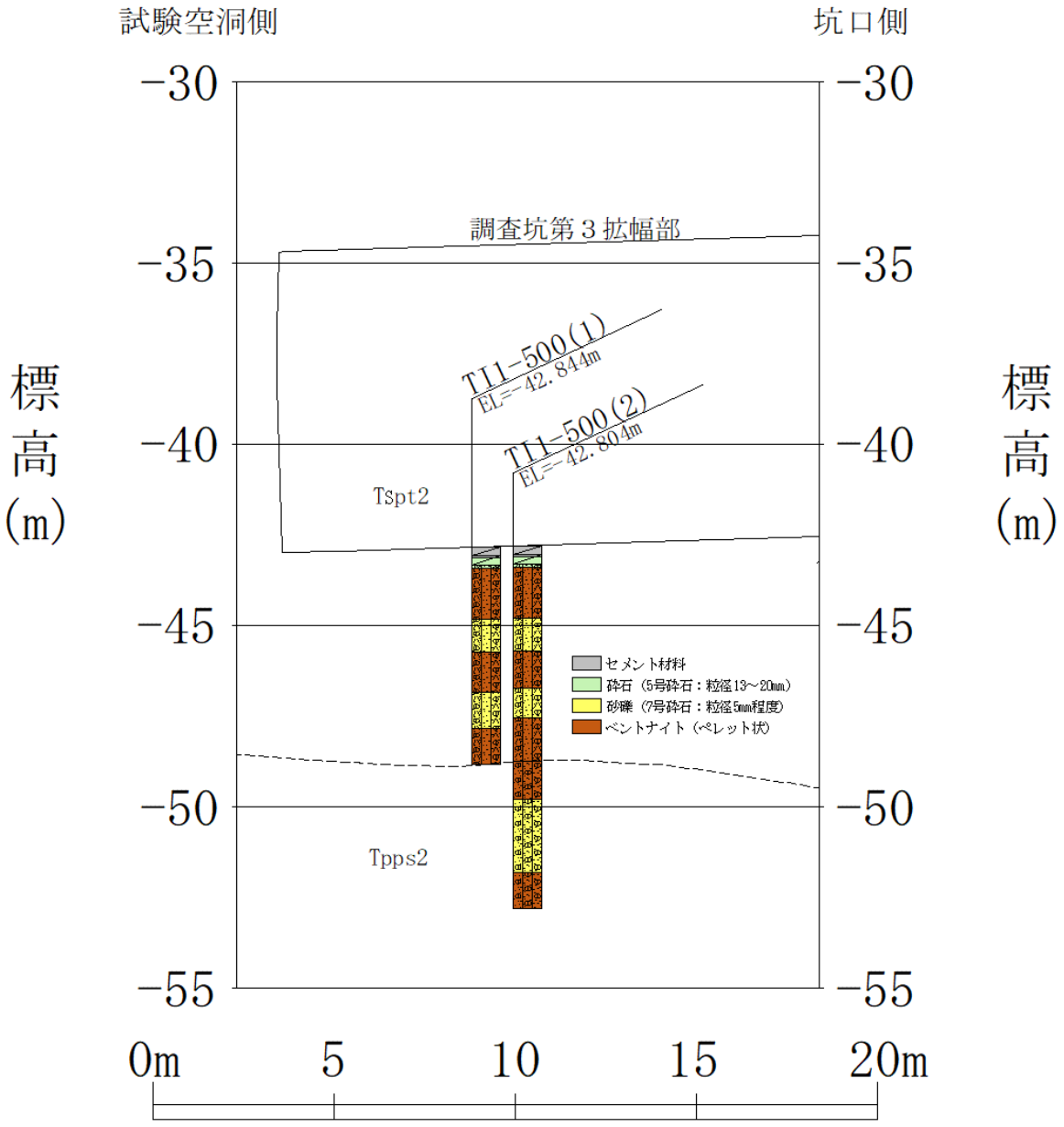


図 2.1-89　試験孔の孔閉塞構造図

表 2.1-6　TI1-500(1)孔　埋め戻し深度確認表

孔　名：　TI1−500(1)　　実施日：2022年12月22日

設計深度（上限深度）(m)	区間長 (m)	孔径 (m)	設計投入量(L)	埋め戻し材料	実投入量 (L)	実測深度 (m)	埋め戻し区間長(m)	投入開始時間	投入終了時間
6.00	−	−	—	—	—		−	−	−
5.00	1.00	0.116	10.6	ベントナイト	10.5	5.00	1.00	8:50	8:52
4.00	1.00	0.116	10.6	砂礫	10.4	4.00	1.00	9:00	9:05
3.00	1.00	0.116	10.6	ベントナイト	10.6	2.90	1.10	9:10	9:13
2.00	1.00	0.116	10.6	砂礫	10.2	2.00	0.90	9:16	9:20
0.60	1.40	0.116	14.8	ベントナイト	15.0	0.60	1.40	9:25	9:28
0.30	0.30	0.140	4.6	砕石	4.9	0.30	0.30	9:30	9:40
道路面 0.00	0.30	0.140	4.6	セメント材料	4.8	0.00	0.30	9:50	10:02

	設計投入量 (L)	合計	実投入量 (L)	合計
セメント材料	4.6	66.3	4.8	66.4
砕石	4.6		4.9	
砂礫	21.1		20.6	
ベントナイト	35.9		36.1	

砂礫：7号砕石（粒径5mm程度）
砕石：5号砕石（粒径13～20mm）

表 2.1-7　TI1-500(2)孔　埋め戻し深度確認表

孔　名：　TI1−500(2)　　実施日：2022年12月22日

設計深度（上限深度）(m)	区間長 (m)	孔径 (m)	設計投入量(L)	埋め戻し材料	実投入量 (L)	実測深度 (m)	埋め戻し区間長(m)	投入開始時間	投入終了時間
10.00	−	−	—	—	—		−	−	−
9.00	1.00	0.066	3.4	ベントナイト	3.5	9.00	1.00	10:15	10:18
7.00	2.00	0.066	6.8	砂礫	6.8	6.99	2.01	10:20	10:23
5.00	2.00	0.066	6.8	ベントナイト	7.0	4.75	2.24	10:25	10:28
4.00	1.00	0.066	3.4	砂礫	3.3	3.92	0.83	10:30	10:33
3.00	1.00	0.066	3.4	ベントナイト	3.3	2.90	1.02	10:35	10:28
2.00	1.00	0.066	3.4	砂礫	3.2	2.00	0.90	10:30	10:33
0.60	1.40	0.066	4.8	ベントナイト	5.0	0.60	1.40	10:35	10:40
0.30	0.30	0.090	1.9	砕石	2.2	0.30	0.30	10:41	10:45
道路面 0.00	0.30	0.090	1.9	セメント材料	2.0	0.00	0.30	10:47	10:55

	設計投入量 (L)	合計	実投入量 (L)	合計
セメント材料	1.9	36.0	2.0	36.3
砕石	1.9		2.2	
砂礫	13.7		13.3	
ベントナイト	18.5		18.8	

砂礫：7号砕石（粒径5mm程度）
砕石：5号砕石（粒径13～20mm）

(4) 掘削技術に関する検討と課題

1) 孔径 116mm の孔底整形

図 2.1-74 の手順①において、φ116mm 孔を通常のコアバレルで掘削した後に孔底をフラットにするために、フラットビットを設計・製作した（図 2.1-90、図 2.1-91 参照）。

設計・製作にあたっては、フラットビットで掘削したスライム（掘削ずり）を回収するために、フラットビットの直上にセジメントチューブ（長さは 0.5m と 1m の 2 種類）を接続できる構造とした。また、φ116mm 孔以深のφ56mm 孔掘削における芯ぶれを抑制するために、フラットビットの先端はφ56mm の凸状にした。

現場での検証試験では、深度 4.80m においてフラットビットを使用した。製作したフラットビットにセジメントチューブを接続して孔底整形を行い、孔底から 5cm 程度ビットを引き上げた状態で孔内洗浄を行い、その後、孔内カメラで孔底を観察した。その結果、図 2.1-92 に示すように平滑に整形できていることを確認でき、今後の深部での使用に際して、この部分の改良は不要と判断した。

また、フラットビットを使用しなかった 1 深度目では、孔内洗浄が不十分な結果となり、センタリングガイドケーシング下端の孔底との隙間からのスライム流入出の可能性が考えられた。そのため、測定深度直前部では孔底をフラットビットで平滑に整形することは、今度の試験でも必ず実施する方針とする。

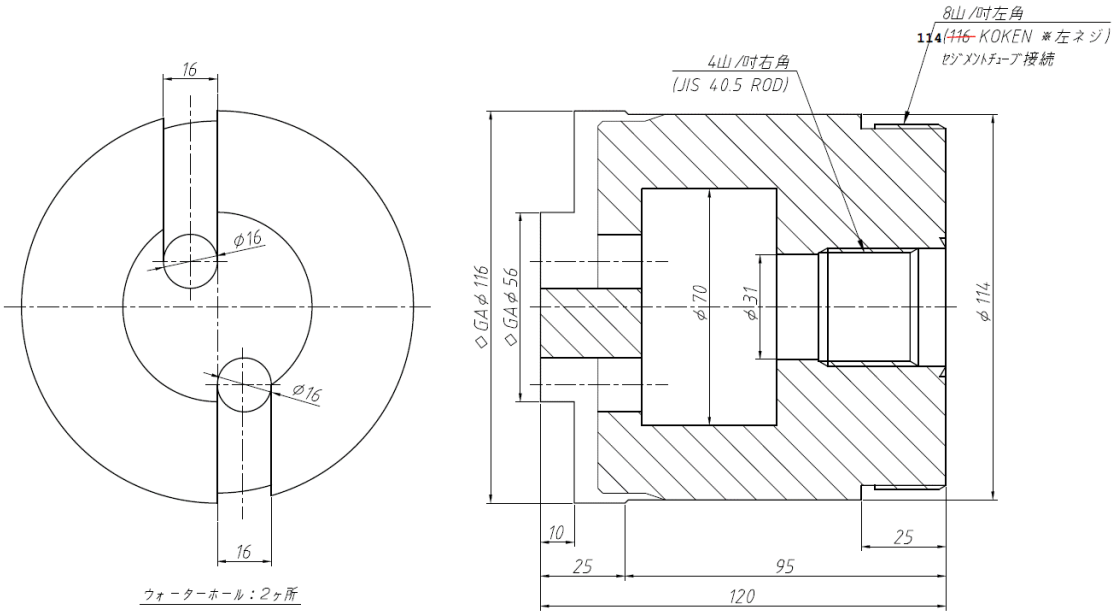


図 2.1-90　φ116mm 孔掘削用フラットビットの設計図

（（株）クリステンセン・マイカイ　116 ノンコア インプリ（2 ステップ））

（浅部）　　セジメントチューブ　　（深部）　　フラットビット

図 2.1-91　製作したφ116mm 孔掘削用のフラットビットとセジメントチューブ

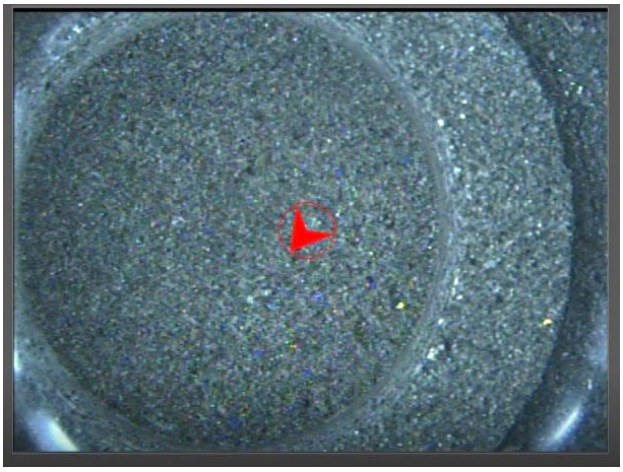


図 2.1-92　φ116mm 孔の孔底状況（深度 4.80m）

2）センタリングガイドケーシング

φ116mm 孔の孔底の中心にφ56mm 孔を掘削するにあたり、φ116mm 孔に挿入するセンタリングガイドケーシングを製作した。設計図と製作したセンタリングガイドケーシングの写真を、図 2.1-93 及び図 2.1-94 に示す。ガイドのリング部分の外径は、φ116mm 孔内で昇降を無理なく実施できるようにφ114mm とした。孔底用のケーシングは長さ 1m の間にリングを 2 つ、それより浅い部分にはリングが 1 つまたはリングを含まないケーシングを接続する編成とした。使用時は、作業性やケーシング荷重の孔底への影響を考え編成を検討する。

今回の浅深度現場検証試験では、センタリングガイドケーシング内での掘削ツールスの昇降時に引っかかりがある場合もあったため、深度が深くなる場合に備え、内径や構造の見直し、ねじ部の削減について検討を行う。また、1 深度目の結果から、掘削や孔内洗浄の際にスライムがケーシングの下端から外側に流出して滞留し、それが作業後に孔内に流入することが懸念されたため、ケーシング先端を孔底に数 cm 掘りこむ構造に改良することも今後検討する。あわせて、センタリングガイドケーシングが上下に動くとスライムがケーシングの下端から孔内に流入するため、固定用のバンドを用意し、センタリングガイドケーシング内での作業時にケーシングが上下に動くことを防止できるようにする。

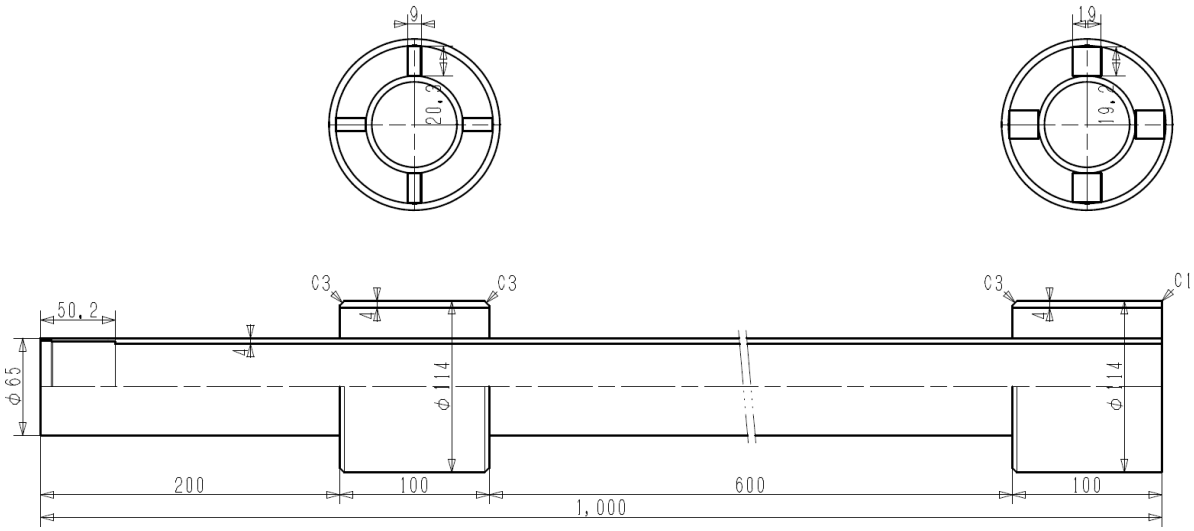


図 2.1-93　φ116mm 孔用センタリングガイドケーシングの設計図
（共栄試錐工業（株）センタリングガイド（孔底用））

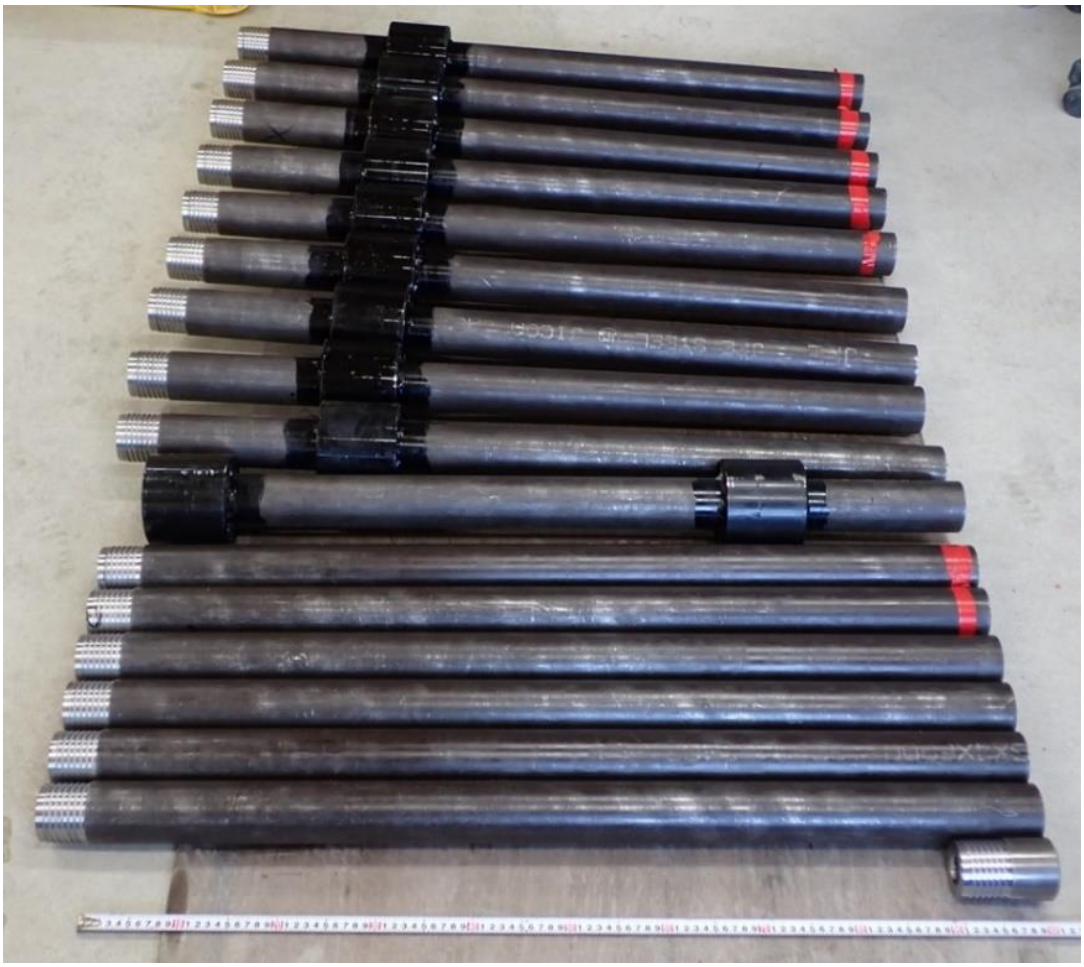


図 2.1-94　φ116mm 孔用センタリングガイド
（上段：リング付、中段：先端用リング付 1 本、下段：リングなし、右下：吊り用コネクター）

3）孔径 56mm 孔の掘削

図 2.1-74 の手順②の孔径 56mm 孔の掘削では、応力解析への影響を避けるため、孔径を拡げないことが必要である。そのため、この掘削の際にビットの上に接続するリーマはビットと同径の外径 56mm として設計した。このリーマの設計図を図 2.1-95 に示す。

製作したφ56mm 孔掘削用のダブルコアチューブを図 2.1-96 の中段に示す。このコアチューブの掘進有効長は 1m とした。また、56mm 孔の掘削時や後述のパイロットボーリング時、並びにそれに付随する孔内洗浄の際にスライム回収に用いるセジメントチューブ（1m、0.5m 長）も図 2.1-96 に示す。

これらについては、検証試験時に使用上の問題は生じず、今後の深部での掘削を念頭に置いた場合も改造は必要ないと判断した。

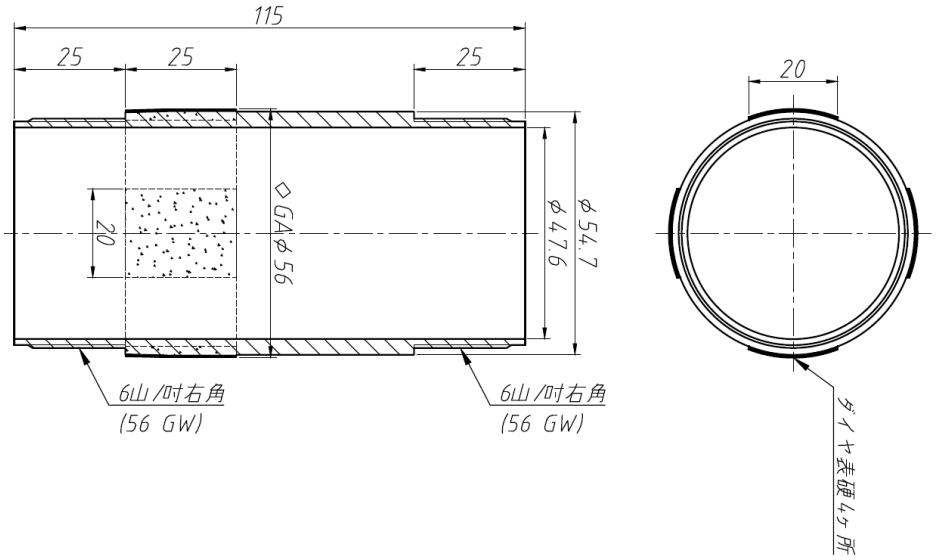


図 2.1-95　孔径 56mm 孔掘削用リーマの設計図
（（株）クリステンセン・マイカイ　56.0 DT ジオリーマ）

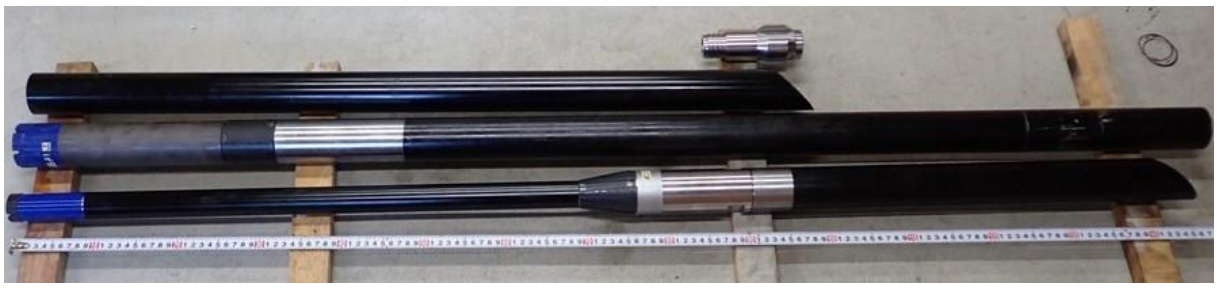


図 2.1-96　試験孔掘削ツールス
（上段からφ40.5 ロッド用のセンタライザ、セジメントチューブ 1m 長、φ56mm 孔掘削用ダブルコアチューブ、φ36mm～円錐孔掘削用コアチューブ及びセジメントチューブ 0.5m 長）

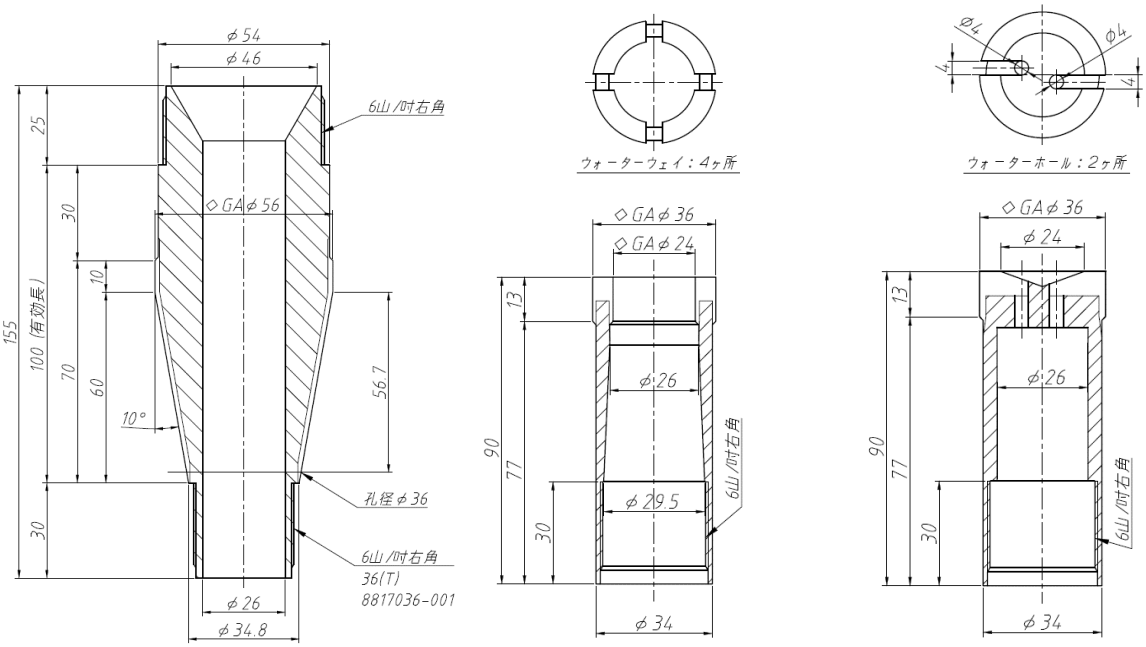
4）パイロットボーリング

図 2.1-74 の手順③のパイロットボーリングについては、円錐孔壁部及びその下部のφ36mm 孔を一度に掘削することが可能なコアチューブを設計・製作した。これは、円錐孔壁部の掘削と 36mm 孔の掘削を 2 回に分けると、センタリングが正確にできない恐れがあったためである。

パイロットボーリング用のツールスの設計図を図 2.1-97 に示す。また、前掲した図 2.1-96 の下段に写真を示す。φ36mm 孔の掘削にはシングルチューブにリフターがついた UC ビットを使用し、同時に実施する円錐部分の整形には室内試験用と同様にインプリの拡張リーマタイプを用いることとした。また、φ36mm 孔の掘削コアが孔内に残った際に残コアを無くす必要が生じる場合に備えて、ノンコアビットを併せて製作した。

現場検証試験では、これらの掘削ツールスにより、コア採取、円錐孔壁研磨ともに大きな問題なく実施できることを確認した。また、UC ビットにすることで岩質によっては割れ目の少ない状態で採取可能であった（図 2.1-86 参照）。

今後の課題として、測定を成功させオーバーコアリングで割れ目のないコアを採取するためには、事前に実施する小口径掘削のコアで機械割れが発生せず割れ目や弱部の予測ができることが望ましい。今回、砂質軽石凝灰岩の中でも軽石が大きいような岩質のところでは、コアが掘削に伴い折れやすい傾向がみられたため、軟質な岩でも良い状態のコアが採取できるようビットの改良を進めることが望ましい。また、円錐形リーマの部分での掘削抵抗が大きいために掘進速度の低下や、円錐孔壁部にスライムが溜まりやすい状態も確認されたため、ウォーターウェイの深さなど設計内容を一部見直すことを検討する。



【円錐孔壁掘削用リーマ】　　【φ36mm 孔 UC ビット】【φ36mm 孔ノンコアビット】

図 2.1-97　パイロットボーリング掘削ツールスの設計図

(5) 孔内洗浄及び孔内観察に関する検討と課題

円錐孔壁部及びφ36mm 孔の掘削後に孔内洗浄を行って円錐孔壁部を孔内観察したところ、図 2.1-98 に示すように、1 深度目では不明瞭であったが 2 深度目では明瞭に観察できた。2 深度目では以下の作業を順に実施しており、これらがストレインセルの貼付箇所である円錐孔壁部の洗浄に効果を発揮したと考えられ、孔壁の割れ目の有無なども観察可能な状態とすることができた。なお、1 深度目では実施せず、2 深度目で実施した内容について、以下①～③に、下線を引いて示している。

① φ116mm 孔の掘削を行った後、スライム回収用のセジメントチューブをつけてノンコアビットで孔底をフラットにし、掘削直後にノンコアビットを孔底から 5cm 程上げて送水して孔内洗浄を実施した。

② センタリングガイドケーシングをφ116mm 孔の孔底まで降ろした後、ケーシングが動かないようにケーシングバンドを用いて地上部でケーシングを固定した。

③ φ56mm 孔、並びに円錐孔壁部及びφ36mm 孔を掘削する際もそれぞれセジメントチューブを接続して掘削を行い、掘削直後にビットを孔底から 5cm 程度上げて長時間送水して孔内を洗浄した。

孔底を平滑にしたうえでケーシングを固定することで、ケーシングがずれにくくなり、センタリングガイドと孔底の隙間も小さくなる。それにより、スライムがケーシング外から流入することを防ぐとともに、φ53mm 孔の孔内洗浄時にケーシング内の上昇流がスムースに形成され、スライムの孔口への搬出やセジメントでの回収が容易になる。

なお、上記手順による掘削・孔内洗浄を実施しても、円錐孔壁部に損傷は見られなかった。

孔内観察用カメラは、OBI2 ボアホールカメラ（応用計測サービス株式会社製、図 2.1-99 参照）の先端パーツを図 2.1-100 に示すように本測定専用に製作した先端パーツ（アクリル製の平面レンズ）に交換したものを用いた。

円錐孔壁観察用先端パーツを装着した OBI2 で撮影した円錐孔壁のモニタリング画像を図 2.1-101 に示す。同図のようにカメラの先端側の画像を深度や方位と合わせてリアルタイムで観察することが可能である。また、読み取った画像をもとに孔壁の展開画像も表示される。

カメラの主な仕様は以下のとおりである。

- プローブ： 装置外径 46mm、全長約 790mm、質量約 4kg。120 万画素、カラー撮影。光源は白色 LED で明るさ調整可。
- ウインチ： 4 芯アーマードケーブル使用、電源は DC12V、ケーブルは 200m。
- 収録装置： ノート PC（OS は Windows 10 Pro）

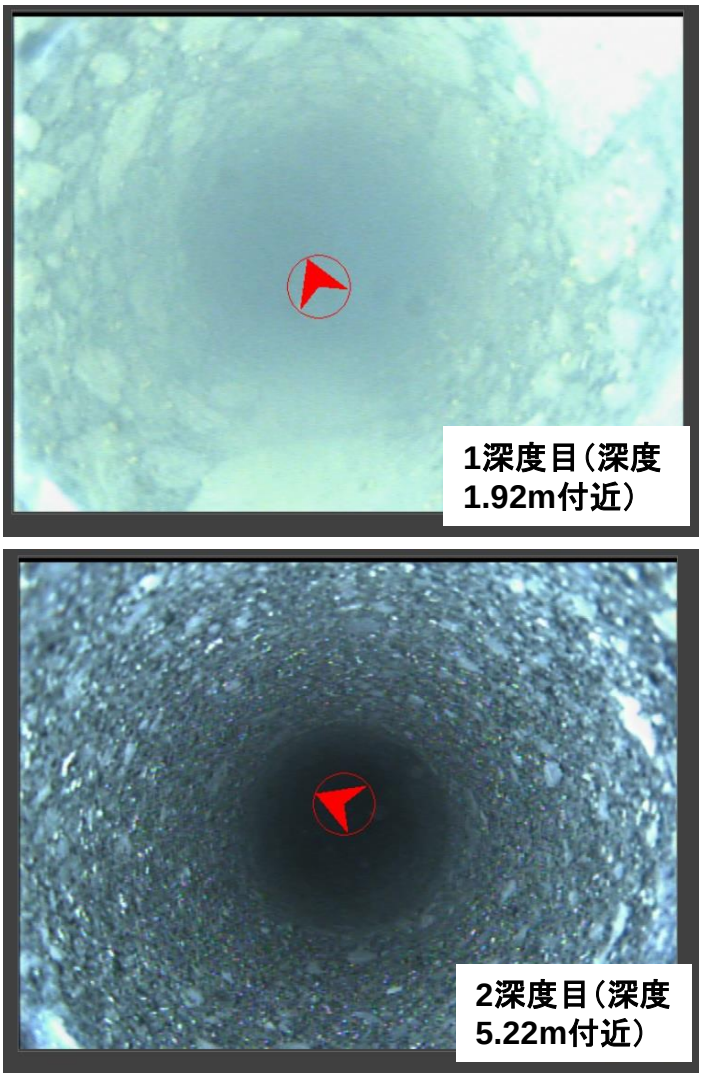


図 2.1-98　孔内カメラによる円錐孔壁観察結果（赤矢印の先は北方向を指す）

図 2.1-99　OBI2 ボアホールカメラ

図 2.1-100　孔内観察用カメラの先端パーツ

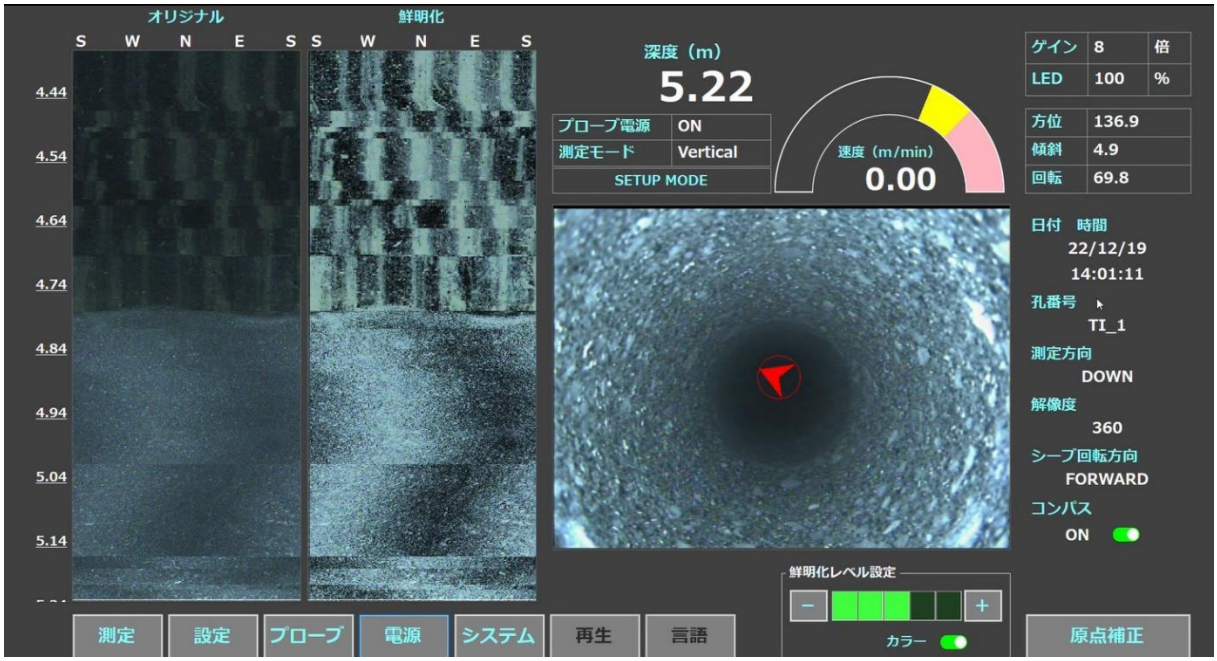


図 2.1-101　円錐孔壁のモニタリング画像の例

(6) ストレインセルの接着に関する検討と課題

1) 接着剤注入装置と接着剤

前述した室内試験と同じ接着剤注入装置を現場試験でも使用した。また、現場試験では図 2.1-102 に示すように、接着剤注入装置の上側に 7kg の錘を 2 本接続し、ワイヤーに接続して孔内に挿入した（図 2.1-103 参照）。

ストレインセルの接着は、室内検証試験と同じヤング率が 277MPa 程度となる配合のエポキシ樹脂接着剤を用いて行った。具体的には、jER871（可撓性タイプ）73g、jER811（希釈タイプ）107g、ST12（硬化剤）65g を順に混ぜ合わせて合計 245g（体積 230mL 程度）の接着剤を作製した。そのうち 200mL 程度を接着剤注入装置の中に注いで蓋をした。後述する手順で接着剤を円錐孔壁部に注入したところ、孔内には 170mL 程度を注入でき、注入後に回収した注入装置内には 30mL 程度の接着剤が残った。

図 2.1-102　現場試験で使用した接着剤注入装置（錘を装置上端に接続）

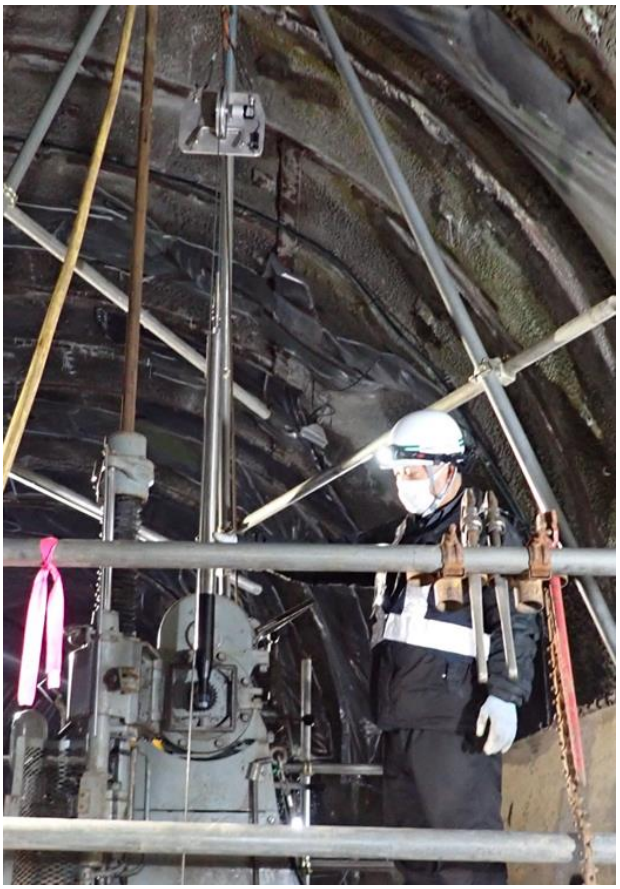


図 2.1-103　接着剤注入装置の孔内挿入状況

2) ストレインセルとひずみ計貼付装置

ストレインセルは、ヤング率 25MPa 程度のエポキシ部分を含む室内試験と同様のものを製作し使用した。現場検証試験時には、データロガーを含むひずみ測定器は未完成であったため、孔内試験時には測定は行わなかった。しかし、オーバーコアリングでコアを回収した後の感度試験で計測ができるように、ひずみゲージやリード線を組み込んだ。リード線の長さは、浅深度現場検証試験用に製作したひずみ計貼付装置の容器内に収納できるように 3m とした。

浅深度現場検証試験用ひずみ計貼付装置の設計図を図 2.1-104 に示す。同図の左側がストレインセルとともに孔内に残す部分、右側が切り離し部とその上部の回収部分を示している。ストレインセルとともに孔内に残す部分は、現場検証試験当時に製作中であったデータロガーのサイズに合わせて製作しており、このサイズのものがストレインセルとともに円錐孔壁上部に設置されることになる。実際に製作した浅深度現場検証試験用ひずみ計貼付装置を図 2.1-105 に示す。

ひずみ計貼付装置の切り離し部は、坂口ら[3]が開発した貼付装置の分離機構を用いた。この機構は、押すことにより連結が解除されるようになっており、シェアピンを差し込むことで意図せぬ接触による分離を防いでいる。孔内挿入後に、貼付装置の上側に接続した錘の荷重が切り離し部の受け台にかかることで、連結が解除されシェアピンも折れて切り離し部で分離する機構になっている。

ストレインセルをひずみ計貼付装置の下側に接続して、リード線はひずみ計貼付装置のステンレス管内に収納した。そして、ひずみ計貼付装置の上側には、室内試験でストレインセルを貼り付ける際に用いた錘 20kg と同程度の重さである、1 本 7kg の錘を 3 本接続した。錘の上にはワイヤーを接続し、ワイヤーによって貼付装置の上げ下ろしを行った。

ストレインセル及びひずみ計貼付装置を孔内に挿入し、ストレインセルが円錐孔壁部に着いたかどうかは、ワイヤーの深度管理とともにワイヤーのたわみの発生の有無により判断した。

3) 実施手順と所要時間

エポキシ樹脂を混合してから接着を開始するまでの手順と所要時間は以下のとおりであった。なお、現場環境は気温が 10～11℃、湿度 86～89%、水温 13℃であった。

【1 深度目：円錐部深度 1.88m～1.94m】

0:00　エポキシ樹脂 3 液混合（5 分）

0:05　注入装置にエポキシ樹脂を充填し孔内挿入準備（10 分）

0:15　注入装置（錘 14kg）の試験深度への挿入（2 分）

0:17　栓を残して装置を 15cm 上げて待機（5 分）

0:22　注入装置回収（5 分）

0:27　貼付装置（錘 21kg）セッティング、試験深度へ挿入（10 分）

0:37　接着開始

【2 深度目：円錐部深度 5.19m～5.25m】

0:00　エポキシ樹脂 3 液混合（5 分）

0:05　注入装置にエポキシ樹脂を充填し孔内挿入準備（4 分）

0:09　注入装置（錘 14kg）の試験深度への挿入（4 分）

0:13　栓を残して装置を 15cm 上げて待機（5 分）

0:18　更に 15cm 上げて待機（1 分）

0:19　注入装置回収（2 分）

0:21　貼付装置（錘 21kg）セッティング、試験深度へ挿入（13 分）

0:34　接着開始

以上のように、接着剤の混合時間は 5 分とし、混合後 30 分程度でストレインセルを円錐孔壁部に接着した。

注入装置の栓の開放動作や接着剤の注入、貼付装置による接着や切り離しなど、装置の動作には問題は生じず、手順としても大きな問題は認められず、方向性に問題は無いことを確認できた。ただし、貼付装置の切り離し部については慎重な取り扱いが求められ、挿入作業には時間を要した。深部では更に時間を要することになるため、今後、深部で使用することを考える場合、貼付装置の切り離し部の機構には改善が必要と判断した。

4) 接着結果

1 深度目のオーバーコアリングしたコアにおけるストレインセルの接着状況を図 2.1-107 に示す。オーバーコアリングしたコアはストレインセルが岩石内に固定された状態で回収できたが、のこぎりとノミで岩石を削り落としてストレインセルの接着状況を確認したところ、スライムが多く接着力が弱いことがわかった。スライムが多いことは孔内を撮影した結果とも整合する。一方、2 深度目では図 2.1-108 に示すように概ね良好な接着状態であった。両者の岩質として、2 深度目の方が砂分が多く接着しやすい岩質と考えられたが、それ以上に、事前に孔内のスライムをしっかり除去することが、ストレインセルを孔壁に接着するためには重要であることが改めて認識できた。また、両深度において、栓より下側には接着剤が流入しておらず、栓が機能していることを確認した。

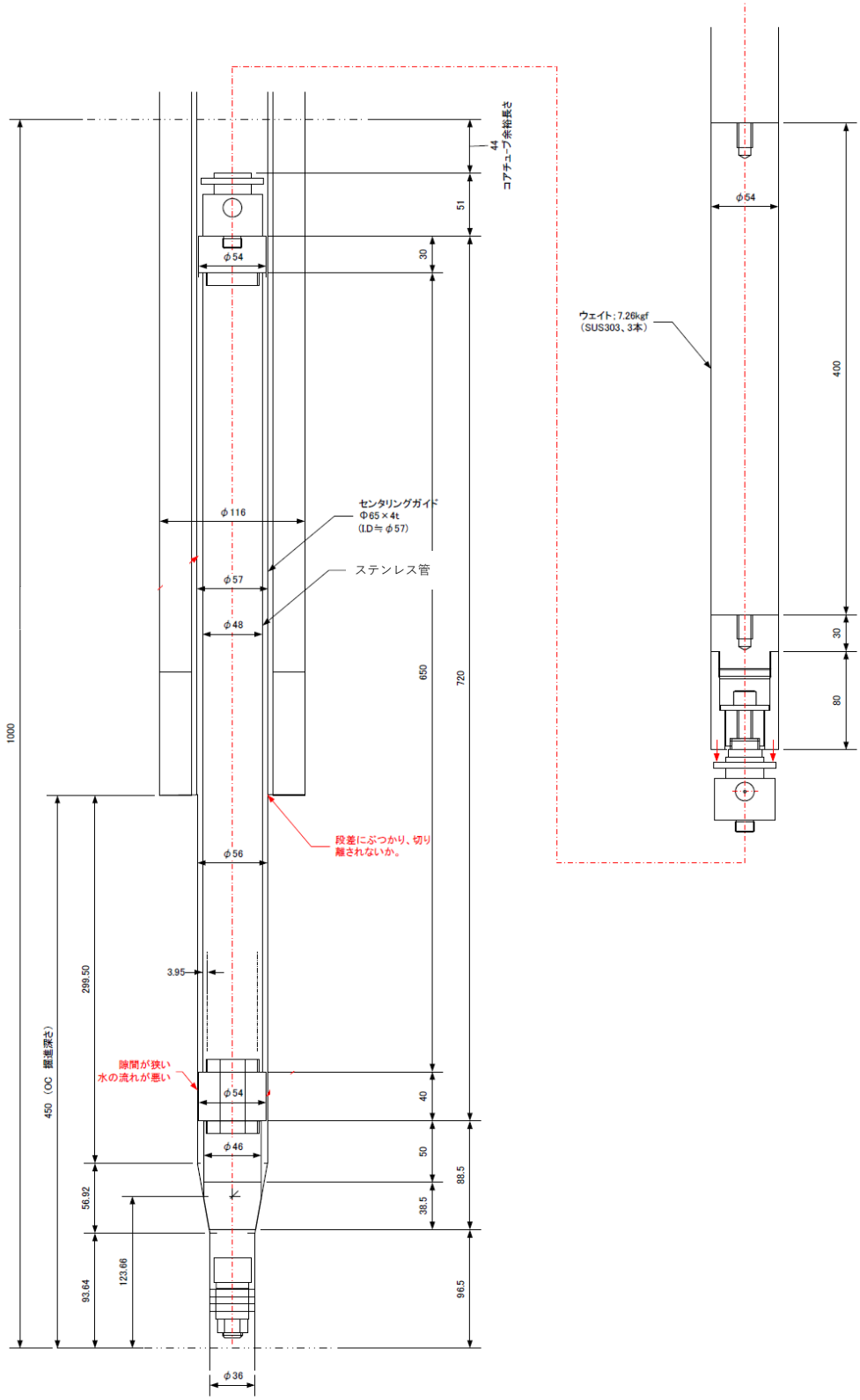
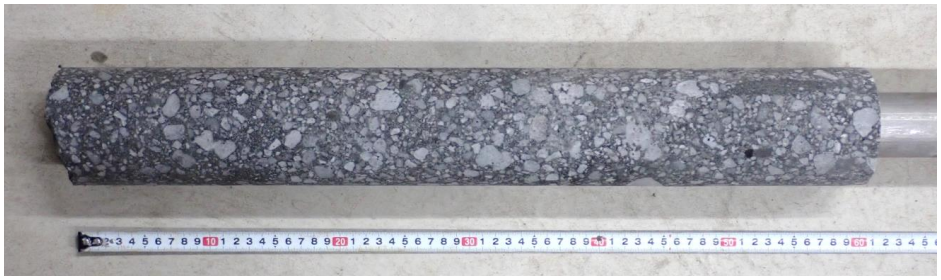


図 2.1-104　浅深度現場検証試験用ひずみ計貼付装置の設計図

図 2.1-105　浅深度現場検証試験用ひずみ計貼付装置
（切り離し部で分かれている）

図 2.1-106　切り離し部とシェアピン

(a) オーバーコアリングしたコア



(b) 岩石部分を削り取った後のストレインセル表面の接着剤

(c) 栓とストレインセルの間の接着状況

(d) ストレインセル表面

図 2.1-107　1 深度目のストレインセルの接着状況

(a) オーバーコアリングしたコア

(b) 岩石部分を削り取った後のストレインセル表面付近の接着状況

(c) ストレインセル表面

図 2.1-108　2 深度目のストレインセルの接着状況

(7) オーバーコアリングコア及び感度試験に関する検討と課題

ストレインセルを円錐孔壁部に貼り付けた後（養生開始 2 日後）、φ116mm でオーバーコアリングを実施した。1 深度目の試験時の孔内状況とオーバーコアリングした掘削コアの写真を、図 2.1-109 に示す。1 深度目は、損傷なくコアを採取することができた。一方、2 深度（図 2.1-110 参照）では、φ116mm 孔の孔底深度 5.5m でリフターがうまく効かずに途中で折れてしまい、孔底付近からコアを回収することができなかった。これは、2 深度目で使用したダブルコアチューブ及びビットが軟質土に適した構造のものだったためで、軟岩用のダブルコアチューブを使用すれば通常のボーリングと同様に問題なく採取は可能である。ただし、感度試験に必要なコア長を考慮すると、コアにひずみ測定装置を含めた長さは 1.0m 以上となり、この長さを確実に採取できるように掘進する場合には、コア採取長 1.2m 以上のコアチューブを使用する必要がある。

また、オーバーコアリングしたコア試料を用いて感度試験を実施した（図 2.1-111 参照）。接着状態が良かった 2 深度目のコアを用いて実施した感度試験の結果を図 2.1-112 に示す。なお、室温 7℃、湿度 50%のもとで実施した。同図より、応力－ひずみ関係は弾性的な挙動を示したが、想定されるひずみ量より小さい傾向がみられた。これは、エポキシ樹脂による接着力が弱いために周圧載荷により発生した岩石のひずみがひずみゲージに感度よく伝わらなかったためと考えられる。この結果からも接着剤の配合や注入方法に関するさらなる検討が必要といえる。しかし、今回の浅深度現場検証試験で、オーバーコアリングに至る円錐孔底ひずみ法の基本的な手順については十分に実現可能であることが確認できた。

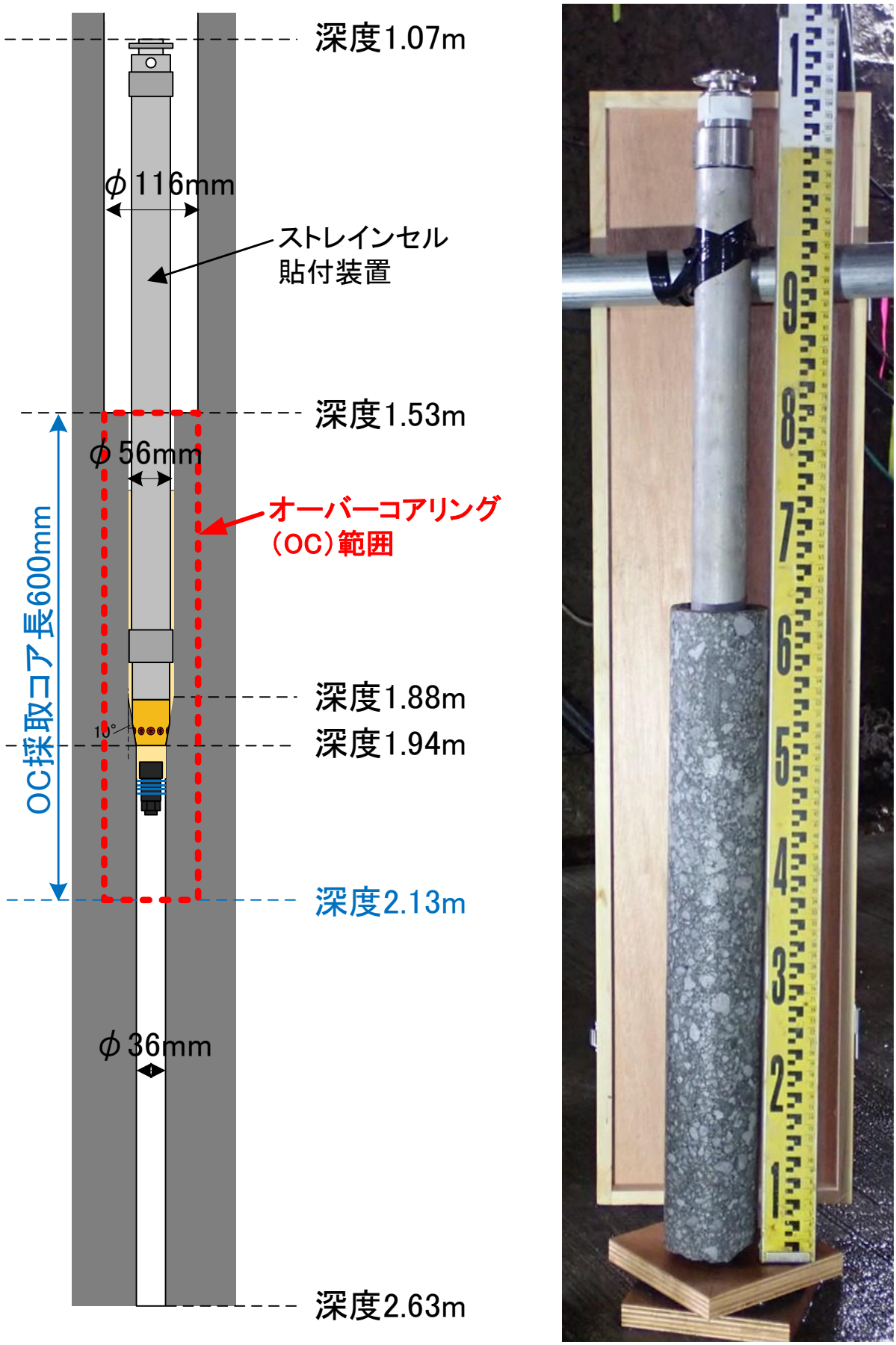


図 2.1-109　試験時の孔内状況とオーバーコアリングした掘削コア（1 深度目）

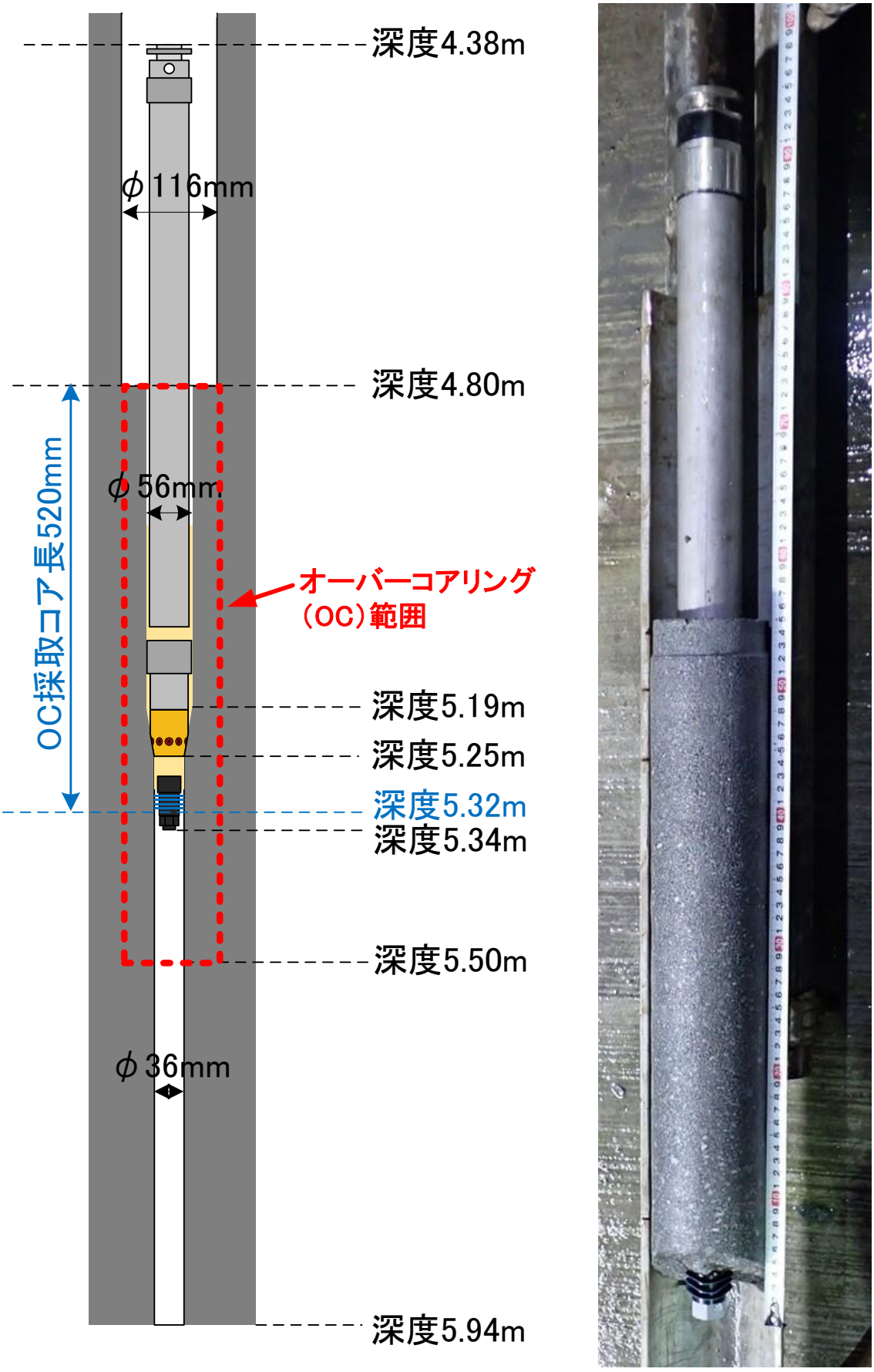


図 2.1-110　試験時の孔内状況とオーバーコアリングした掘削コア（2 深度目）

図 2.1-111　感度試験の実施状況

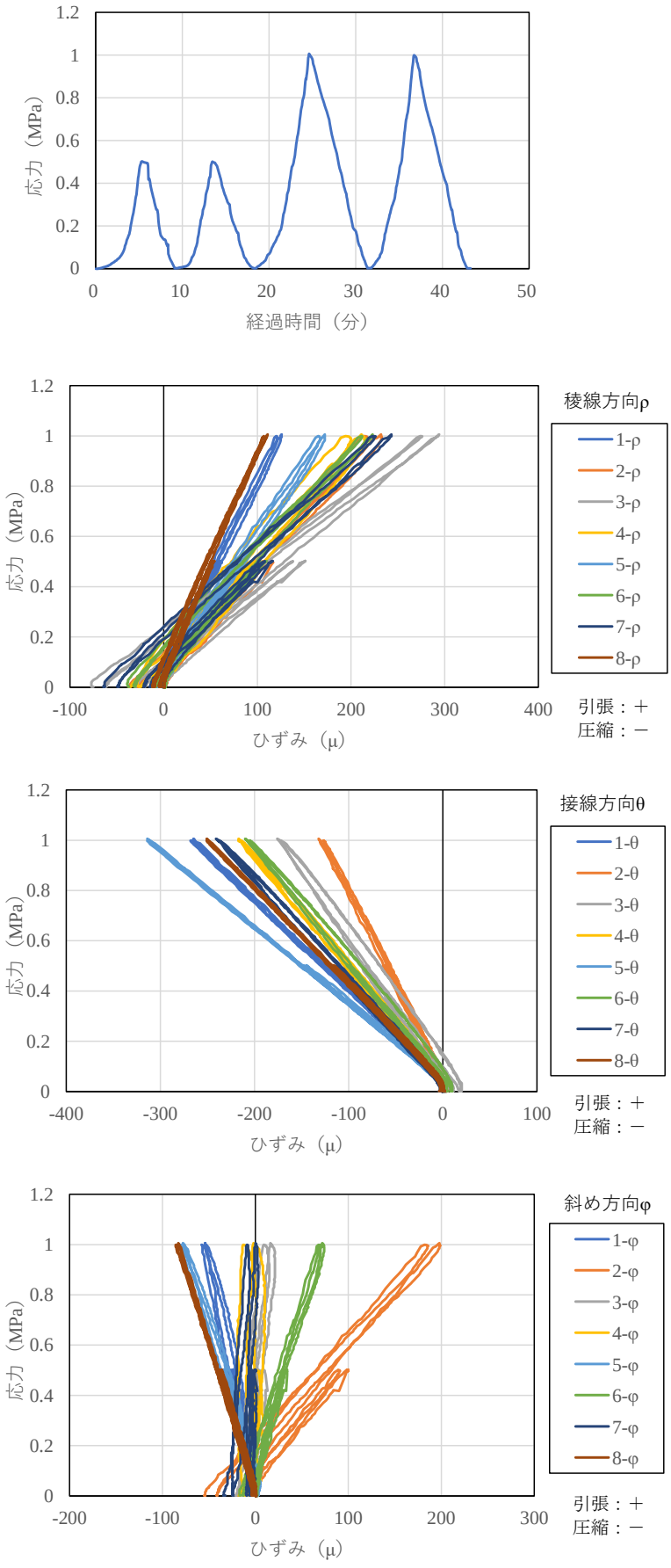


図 2.1-112　2 深度目でオーバーコアリングしたコアを用いた感度試験結果（養生開始 2 日後）

2.1.4　試験装置の設計・製作

(1) ひずみ測定器

次年度以降の現場検証試験ではオーバーコアリング時のひずみ変化を計測することを計画しており、それに向けて円錐孔壁ひずみ法に適したひずみ測定器を設計・製作した。基本設計として、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している。また、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した。

ひずみ測定器の設計図を図 2.1-113 に、ひずみ測定器の写真を図 2.1-114 に、ひずみ測定器の仕様を表 2.1-8 にそれぞれ示す。

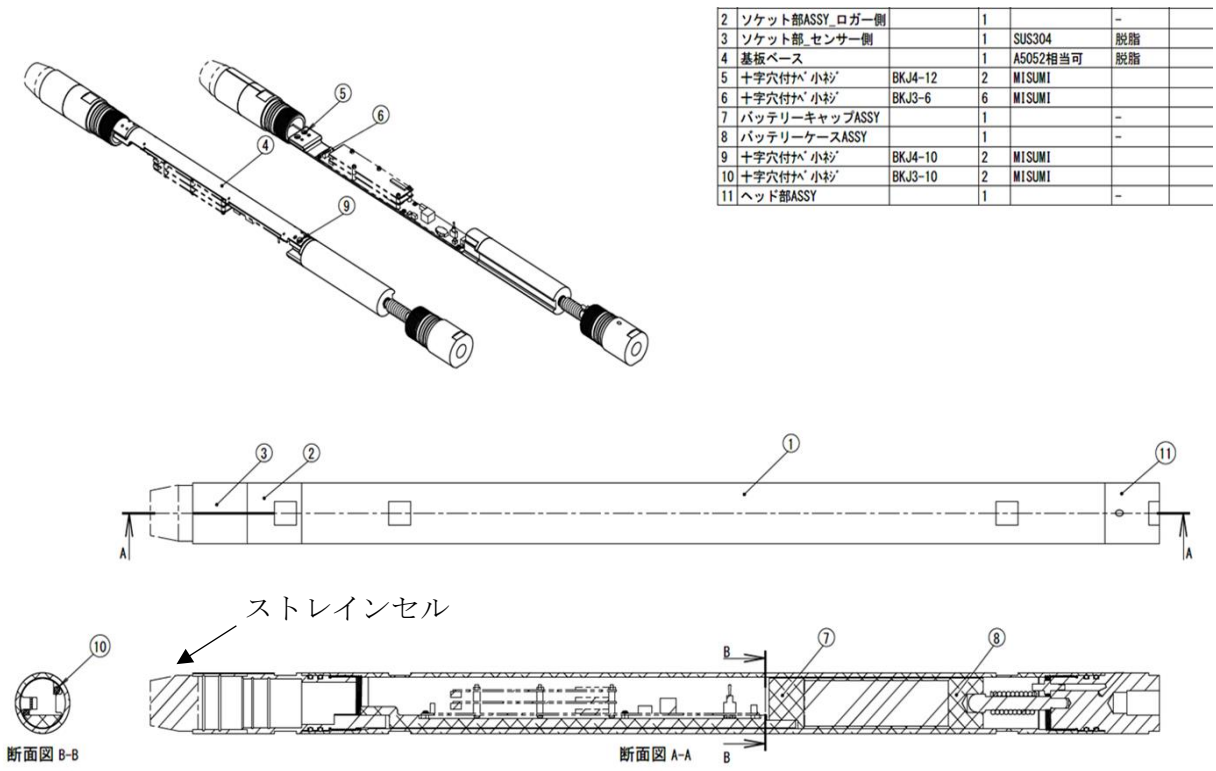


図 2.1-113　ひずみ測定器の設計図

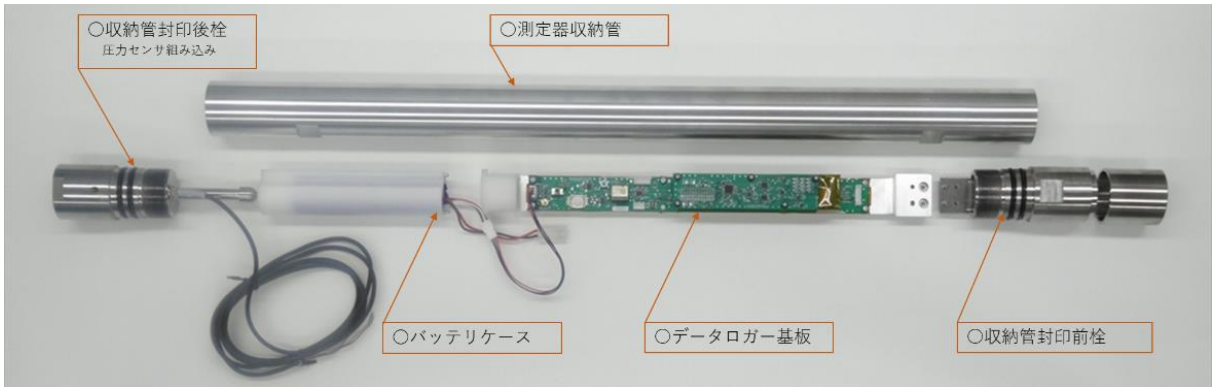


図 2.1-114　ひずみ測定器の内部写真

表 2.1-8　ひずみ測定器の仕様一覧

寸法	直径50mm、長さ926.5mm
耐圧	10MPa
測定方式	1ゲージ法3線式 ひずみゲージ毎の高精度抵抗によるブリッジと省電力管理
A/Dコンバータ	24ビットシグマデルタADコンバータ
フィルタ	2n個のA/D変化値の平均化処理
ひずみゲージ	抵抗値：120Ω、測定範囲：$\varepsilon_{max}=\pm 20{,}000\,\mu$、精度：$\pm 1\,\mu$
温度ゲージ	抵抗値：60Ω、測定範囲：－20～＋200°C、収録精度：±1°C
圧力センサ	定格出力　約2mV／V（$4{,}000\times10^{-6}$ひずみ）
方位傾斜計	方位角、ロール角、ピッチ角、方位精度1°
測定間隔	最小測定間隔：2秒、最大24時間までのインターバル－ 回数テーブル設定、内蔵リアルタイムクロック割り込み
収録データ	経過時刻、ひずみデータ24成分、圧力データ1成分、 温度データ1成分、方位傾斜データ3成分
使用メモリ	フラシュメモリ：64MB、SRAM：256B
電源	7.4V、5200mA リチウムイオン電池
消費電流	記録時：150mA、スタンバイ時：60mA、記録時間24時間以上

ひずみ測定器の動作確認を行うため、使用するひずみゲージの定格抵抗R_g $(=120\Omega)$にシャント抵抗r_pを接続し、疑似的に抵抗変化を模擬し出力されるひずみ値を確認した。この検証用回路の概要を図 2.1-115 に示す。また、動作確認試験の様子を図 2.1-116 に示す。

ひずみゲージの抵抗変化とひずみ値の間には、以下の式(1)が成り立つ。

$$\frac{\Delta R}{R_g} = K \times \varepsilon \qquad (1)$$

ここで、ΔRは抵抗変化量、R_gはひずみゲージの定格抵抗値(120Ω)、Kはひずみゲージに使用する材質によって決定される係数でゲージ率と称され、使用するひずみゲージの材質は銅ニッケル合金であるのでゲージ率は 2 である。 εは抵抗変化により得られるひずみ値である。

シャント抵抗r_pを回路図のように接続するとその合成抵抗 r は以下のように表される。

$$\frac{1}{r_p}+\frac{1}{R_g}=\frac{1}{r} \qquad (2)$$

よって合成抵抗 r は以下のようになる。

$$r=\frac{r_p \times R_g}{R_g+r_p} \qquad (3)$$

ここで式(1)の左辺について整理すると式(4)のようになる。

$$\frac{\Delta R}{R_g}=\frac{R_g-r}{R_g}$$

$$=\frac{R_g-\dfrac{r_p \times R_g}{R_g+r_p}}{R_g}$$

$$=\frac{R_g\left(R_g+r_p\right)-r_p \times R_g}{R_g\left(R_g+r_p\right)}$$

$$=\frac{R_g}{R_g+r_p} \qquad (4)$$

$r_p \gg R_g$より式(4)は以下のようになる。

$$\frac{\Delta R}{R_g} \cong \frac{R_g}{r_p} \qquad (5)$$

式(1)、式(5)及び$R_g=120$、$K=2$より以下の式が成り立つ。

$$\varepsilon=\frac{60}{r_p} \qquad (6)$$

ここで製作したひずみ計を用い、シャント抵抗r_pを 60kΩ、20kΩとしたときのひずみの出力値を確認したところ、それぞれ 0.001 (=1,000 μ)、0.003 (=3,000 μ)であった。この結果は式(6)を満たしており抵抗変化に伴うひずみ値の出力値が正しいことが確認された。

また、温度センサや圧力センサについても、ひずみゲージと同様に動作確認を行い、正常に測定できることを確認した。

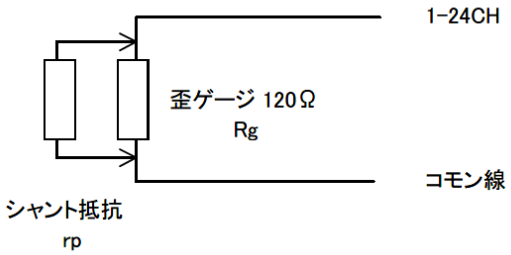


図 2.1-115　ひずみ出力確認に用いた回路の概要

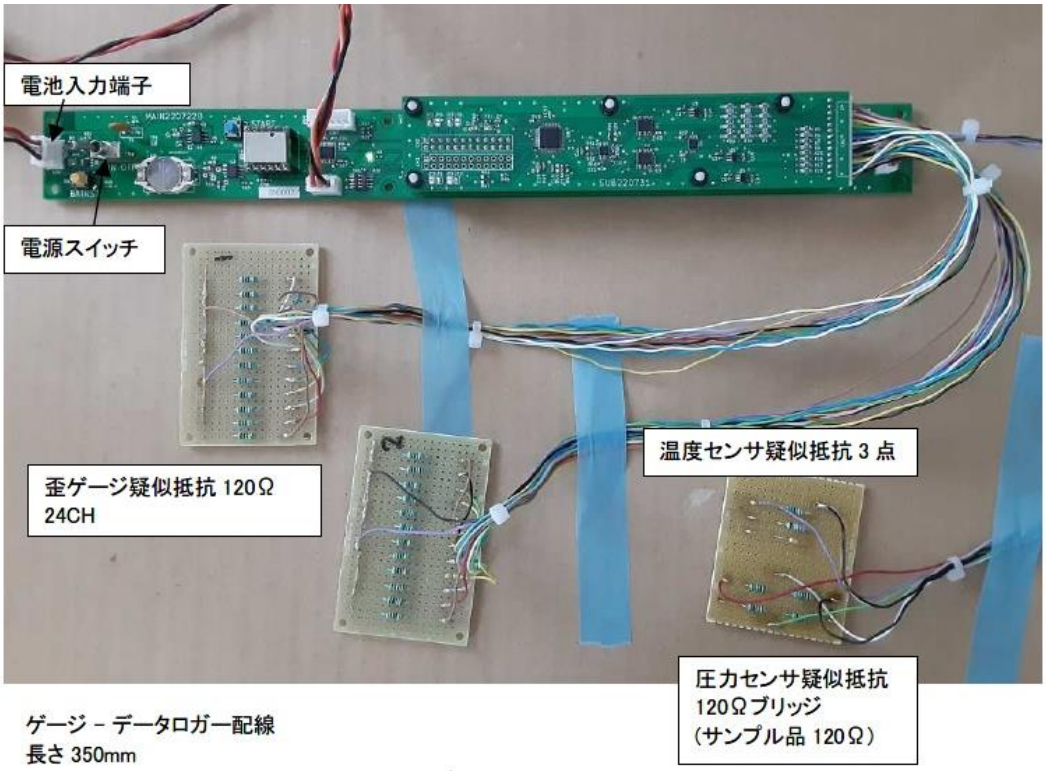


図 2.1-116　ひずみ計の動作チェック状況

(2) 感度試験装置

円錐孔壁ひずみ法では、オーバーコアリングで回収したコアに対して周圧を載荷する感度試験を実施し、周圧と各ひずみゲージで測定されるひずみの関係を求める。この試験で得られるデータにより、接着状況や岩盤の不均質性の影響などによる感度の変化を表す係数を取得する。この試験は堆積軟岩を対象とする試験において重要な意味を持ち、円錐孔壁ひずみ法の特徴の一つと言える。この試験を今年度の試験並びに今後の試験で行えるように、感度試験装置を製作した。感度試験装置の写真を図 2.1-117 に、感度試験の概念図を図 2.1-118 に示す。ハンドポンプにより油圧を発生させ、メンブレンを介してコア周面に載荷を行う。この装置は、ESS Earth Sciences 社製であり、油圧ポンプは Enerpac 社製のものを使用している。

感度試験装置の仕様は、以下のとおりである。

- 試験対象：直径 92mm の円柱コア
- 周圧載荷幅：200mm
- 載荷可能圧：0～40MPa

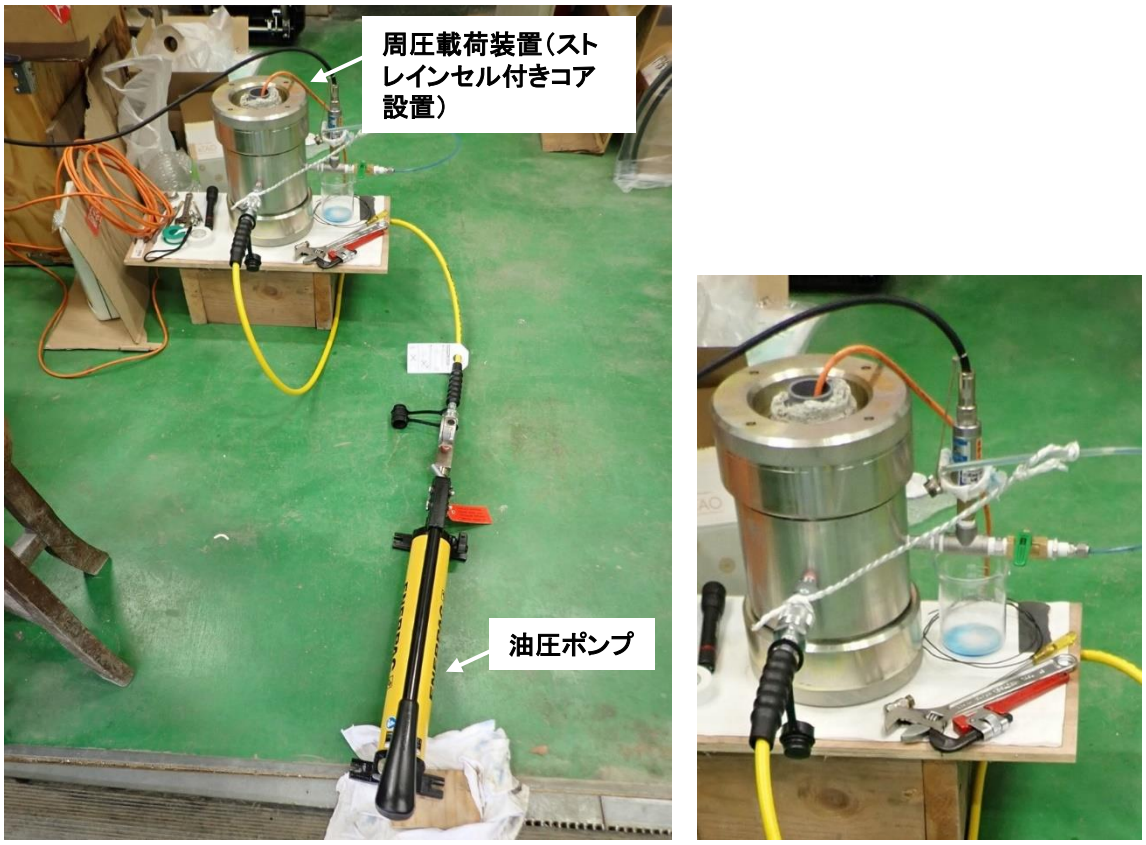


図 2.1-117　感度試験装置全体（左図）と周圧載荷装置（右図）

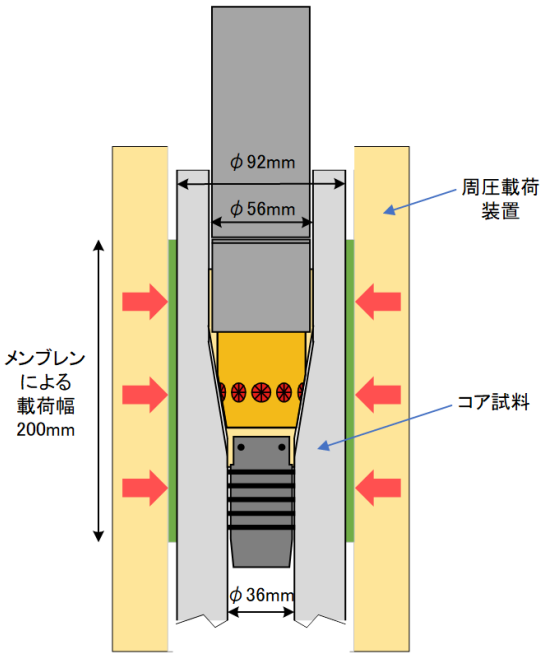


図 2.1-118　感度試験の概念図

2.1.5 今後の開発計画

(1) 技術課題及び対策の整理

今年度に実施した室内検証試験及び現場検証試験で明らかになった課題を以下に整理する。

1) 掘削及び孔内洗浄に関する課題と対策

現地での掘削試験はまだ浅深度しか実施しておらず、深い深度まで実施する際に途中に円錐孔壁ひずみ法の測定を行うことなどで孔径の拡大や孔曲がりが生じ深部での測定に悪影響を与えることがないかなど今後の試験の中で確認をしていくことが望ましい。

今回の浅深度現場検証試験では、センタリングガイドケーシング内での掘削ツールスの昇降時に引っかかりがある場合もあったため、深度が深くなる場合に備え、センタリングガイドケーシングの内径や構造の見直し、ねじ部の削減について検討し改良を行うことが望ましい。また、掘削や孔内洗浄の際にスライムがケーシングの下端から外側に流出して滞留し、それが作業後に孔内に流入する可能性があるため、ケーシング先端を孔底に数 cm 掘りこむ構造に改良することも今後検討する。あわせて、センタリングガイドケーシングの固定についても資材を用意する必要がある。

オーバーコアリングの測定を成功させ割れ目のないコアを採取するためには、事前に実施する小口径掘削のコアで機械割れが発生せず割れ目や弱部の予測ができることが望ましい。現在の UC ビットでは、コアが掘削に伴い折れやすい傾向がみられたため、軟質な岩でも良い状態のコアが採取できるようにビットの改良が可能か検討を進める。また、円錐形リーマの部分での掘削性能の向上を目指した改良についても検討する。

2) ストレインセルの接着に関する課題と対策

ストレインセルの接着に関しては、今年度の試験では、載荷により発生するひずみが想定より小さい結果となっているため、まだ使用する接着剤の決定には至っていない。測定対象とする軟岩に適した接着剤を選定するため、接着剤を変えた二軸載荷試験や三軸載荷試験を複数実施し、応力に応じたひずみの変化やその経時変化について引き続き調査していく必要がある。その検討の中で、接着剤の配合や養生時間、あるいは接着層を薄くするような接着方法の見直しなどを行い、また、配合によって接着剤自体の物性（弾性係数、比重、粘性など）がどう変化するか把握を行う。

一方、接着剤注入装置の動作については現状の設計で概ね問題ないことが確認できた。ただし、接着剤の比重や粘性に応じた実際の流下状況について透明アクリル管内部などの可視化環境で一度は確認しておくことが望ましい。また、今後選定した接着剤の物性に応じて、接着剤注入装置の改良が求められる可能性がある。

ひずみ計貼付装置については、浅深度での動作は問題なかったが、深部での適用については切り離し部の慎重な取り扱いが必要で短時間での作業完了が難しいことから、接着剤可使時間と作業時間の関係を考えると、現状のままでの適用は難しいと考えている。貼付装置の切り離し部の機構を改善するよう設計・製作を進め、現場等で検証を行う必要がある。

今回実施した現場検証試験は水深 10m 以下の環境であった。今後はより深い位置での装置の動作や接着性能について検証を進める必要がある。

また、接着位置の孔壁付近での湧水の影響については十分な検討はできていない。様々な環境を想定した試験を検討し、接着剤の湧水に対する挙動の把握を進める。また、接着剤の配合の検討も今後引き続き行うため、選定した接着剤を用いて湧水影響の検討を再度行う必要がある。また、湧水場所を避ける手順あるいは湧水への積極的な対策についても検討を行う。

3) オーバーコアリング及び感度試験に関する課題と対策

岩質に適した所定のコア径のダブルコアチューブを用いればオーバーコアリングに関しては問題なく実施できると判断している。ただし、コアチューブ長については、測定装置の長さや、コア残りも考慮して設定する掘進長を考慮して適切なものを準備する必要がある。

コア回収時は、岩質によってはコアやストレインセル接着部の損傷の可能性がある。コアチューブからのコア取り出し時は、リフターが噛んだ時に備えて押し込み治具を用意しておくことでコアの損傷を防ぐことが可能となる。

感度試験では、コアの破損が生じた場合もあったため、コアの破損を防ぐ最適な載荷位置や載荷方法の検討を行う必要がある。また、ひずみゲージ位置による値のばらつきや非線形な挙動に関して、その原因は接着状態のばらつきに起因するものだけなのか、それとも等圧載荷になっていないなど試験装置の載荷状態に問題がないのか検討を行うことが望ましい。

新規に製作したデータロガーを含むひずみ測定器はまだ孔内環境では使用していない。接着剤の物性や現場で想定される作業時間をもとに、収録時間や交換パーツの材質などを見直し、室内の模擬孔で動作確認試験を実施した後、現場（水圧環境下）でその動作に問題がないか検証する必要がある。

4) 応力解析に関する課題と対策

応力解析に関しては、感度試験を用いた解析方法の具体化がまだ完了していない状態であるが、今年度の試験からもその必要性は確認できた。周圧による感度試験時のコア形状とゲージ位置に対してポアソン比νによって感度係数がどのように変化するかを数値解析により求め、試験への適用を進める必要がある。

(2) 検証試験の計画

1) 室内での検証試験

室内検証試験では、これまでの試験結果で明らかとなった課題の解決を行い、それを踏まえて決定した方法により、アクリルパイプや岩石ブロックを用いて一連の作業の検証を行う。

今後の室内検証試験で実施すべき内容としては、以下が挙げられる。

a．軽石凝灰岩や砂質軽石凝灰岩といった軟岩に適した接着剤の選定

b．感度試験の試験方法の決定

c．深部を対象とした一連の測定手順の可視環境での確認

具体的には以下の内容を計画したい。

ａ．軽石凝灰岩や砂質軽石凝灰岩といった軟岩に適した接着剤の選定

試験対象としている六ヶ所の軽石凝灰岩や砂質軽石凝灰岩に対するストレインセルの接着に関しては、今年度の試験では、載荷により発生するひずみが想定より小さい結果となっているため、まだ使用する接着剤の決定には至っていない。測定対象とする軟岩に適した接着剤を選定するため、接着剤を変えた二軸載荷試験や三軸載荷試験を複数実施し、応力に応じたひずみの変化やその経時変化について引き続き調査していく必要がある。

はじめに、現在使用してある程度適性が認めれているエポキシ樹脂接着剤について、配合によって接着剤自体の物性（弾性係数、比重、粘性など）がどう変化するか、またその経時変化特性について詳細な把握を行う。同時に、六ヶ所の軽石凝灰岩や砂質軽石凝灰岩と接着剤の付着力試験を実施する。それらの結果から、試験に使用する接着剤を絞り込む。

実際に岩石の円錐孔壁にストレインセルを接着した状態での試験については、同じ条件で数多くの試験が実施できるように、購入する大谷石の岩石ブロックを使用する。この大谷石については、室内試験により透水係数、排水条件及び非排水条件でのヤング率・ポアソン比も把握しておく。

今年度の試験で孔軸方向の感度が想定と異なるケースが複数認められたため、孔軸方向の圧力の影響を検討できるように、三軸載荷試験で比較試験を行う方針で計画する。三軸載荷試験後は、二軸載荷状態でのオーバーコアリングによる解放ひずみ測定、回収コアの感度試験も行う。感度試験後は、切断して接着断面を目視で観察し、接着状態を調べる。

それらの結果から決定した接着剤について、六ヶ所の軽石凝灰岩のブロックでも同様の試験を行い、確認を行う。

また、決定した接着剤については、湧水の影響を検討するため、湧水のある状態にした岩石表面に注入を行い、その挙動について湧水量との関係を調べる。

ｂ．感度試験の試験方法の決定

感度試験では、今年度の試験でその必要性を再確認している。しかし、周圧載荷によるコアの破損が生じた場合もあったため、コアの破損を防ぐ最適な載荷位置や載荷方法の検討を行う必要がある。また、ひずみゲージ位置による値のばらつきや非線形な挙動に関して、その原因は接着状態や岩石の物性のばらつきに起因するものだけなのか、それ以外の原因も含むものなのか調べるため、コア径と同じ外径の円柱（鋼製あるいは樹脂製）を用意し、プレスケールを巻いてセットして周圧載荷し等圧載荷が実施できているか確認する。

並行して、同じ形状で数値解析を実施し、周圧載荷時の形状に関する感度係数を求め、感度試験結果を利用した解析方法を確定させる。

一方で、今後の深部での測定における水圧環境下からコアを回収する際の水圧解放時のひずみ変化を解析に利用することも考え、セル内で水圧を作用させた時のひずみ変化についてもデータを取得することを検討する。

ｃ．深部を対象とした一連の測定手順の可視環境での確認

新規に製作したデータロガーを含むひずみ測定器や今後製作あるいは改良するひずみ計貼付装置について、現場での使用の前に、室内でアクリルパイプなどを利用した模擬孔での試験を実施し、その動作に問題がないか検証したい。模擬孔では、現在計画している形状を実物大で再現し、水中下での接着剤注入、ひずみ測定器設置という手順を確認するとともに、接着剤の比重や粘性に応じた実際の流下状況について可視化で確認する。

2）現場での検証試験

現場での本格的な検証試験の実施は令和 6 年度を予定するが、現地での掘削試験は、まだ浅深度でオーバーコアリング中の測定をしない方法でしか実施しておらず、早い段階で、より深い深度においてオーバーコアリング中も測定する条件で実施すべきと考える。具体的には、今年度と異なる以下の条件での検証試験の実施を次のステップとして計画する。

- 対象は、軽石凝灰岩 Tpt2 や砂質軽石凝灰岩 Tspt2、砂質軽石凝灰岩 Tspt31 など凝灰岩質の部分とする（今年度は砂質軽石凝灰岩 Tspt2 のうち軽石質砂岩 Tpps2 に近い砂分の多い位置で実施）
- 水深 10m 以上の環境で実施する（今年度は水深 5m 程度以下で実施）
- 深部用のひずみ計貼付装置を使用する（今年度は浅深度用に用意した装置で実施）
- 室内試験で再選定した接着剤を使用する（今年度は十分な検討ができていない状態のエポキシ樹脂接着剤を使用）
- 新規に製作したメモリ式データロガーを含むひずみ測定器を用いてオーバーコアリング中の解放ひずみを測定する（今年度はオーバーコアリング中の解放ひずみは測定していない）
- 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（今年度はオーバーコアリング中の解放ひずみは測定していない）
- 水中からコアを回収する際の水圧変化に伴うひずみ変化を測定する（今年度はコア回収時のひずみ測定は実施していない）
- 回収したコアに対し感度試験を実施し、その結果をもとに応力を算出し、解析方法の検証を行う（今年度は感度試験は実施したが、応力解析は実施していない）

掘削にあたっては、今年度の浅深度現場検証試験をもとに改良した掘削ツールス（センタリングガイドケーシングやφ36mm 孔掘削用ビットなど）を使用する。

また、令和 6 年度に実施することを検討する、他手法との比較による測定値の妥当性検討を含めた現場検証試験に向けて、計画・準備を実施する。この試験では以下の実施を目標とする。

- 円錐孔壁ひずみ法の対象岩相は、軽石凝灰岩 Tpt2 あるいは砂質軽石凝灰岩 Tspt2 とし、孔口から深度 20m 以上のボーリング（孔径 116mm）を行い、複数の深度で測定を行う。
- 周辺の実施可能な位置で、水平方向のボーリング（孔径 76mm）による円錐孔底ひずみ

法（地盤工学会基準 JGS3751-2012「円錐孔底ひずみ法による初期地圧の測定方法」）も実施し、すでに確立された 3 次元初期地圧測定法による評価結果と比較する。

・令和 2 年度に既実施の水圧破砕法（JGS3761-2017「水圧破砕法による初期地圧の測定方法」）による初期地圧測定結果（水平面内 2 次元）や新たに実施する水圧破砕法の結果とも比較を行う。

・孔径 116mm の鉛直孔の孔底から HQ（孔径 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 2.1-119 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。

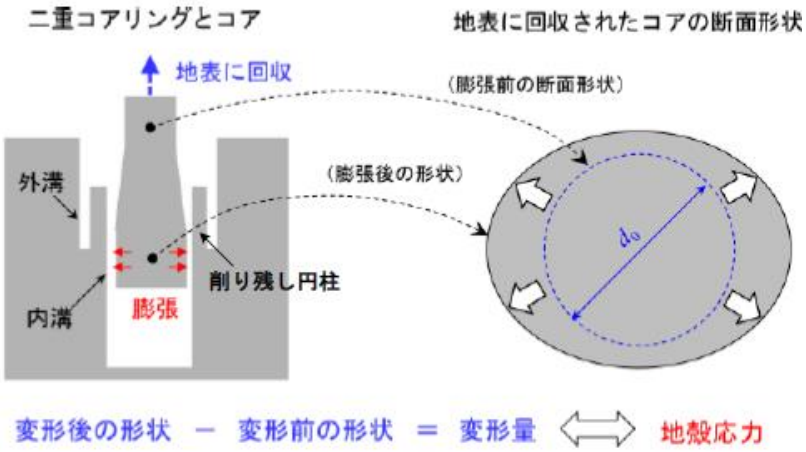


図 2.1-119　二重解放コア変形法の概念[4]

(3) 装置の設計・製作

今年度の成果を受け、今後の装置の設計・製作として以下の内容を計画する。

1）ひずみ計貼付装置

今年度の浅深度現場検証試験で使用したひずみ計貼付装置は、浅深度での切り離し動作は問題なかったものの、切り離し部の慎重な取り扱いが必要であり、短時間での作業完了が難しかった。そのため、接着剤可使時間と作業時間の関係を考えると、現状のままでの深部での適用は難しいと考えている。深い深度でも確実な切り離しを実施するために、ボーリング掘削のワイヤーライン工法で用いられているオーバーショット機構をひずみ計貼付装置の切り離し機構として用いることを計画し設計に着手している。この開発を進めて製作を行い、室内や現場で動作確認を行いたい。開発に着手しているひずみ計貼付装置の設計図を図 2.1-120 に示す。

また、今後選定した接着剤の物性に応じて、接着剤注入装置の改良も必要となる可能性があり、必要に応じ、その設計・製作も行う。

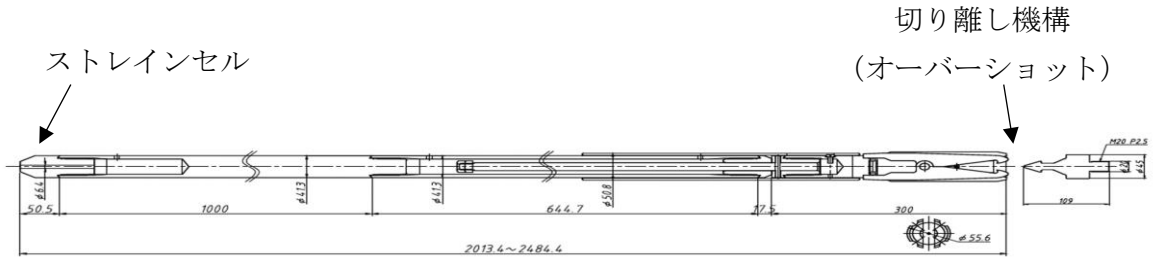


図 2.1-120　新たなひずみ計貼付装置の設計図

2）掘削ツールス

センタリングガイドケーシング内での掘削ツールスの昇降時の引っかかりを防ぐために、内径や構造の見直し、ねじ部の削減について検討を行う。また、ケーシング先端を孔底に数 cm 掘りこむ構造に改良することも今後検討する。あわせて、センタリングガイドケーシング固定用のバンドを用意する。

また、軟質な岩でも良い状態のコアが採取できるようφ36mm 孔掘削ビットの改良を進める。更に、円錐孔壁掘削用のリーマ部分での掘削抵抗が大きいために掘進速度の低下や、円錐孔壁部にスライムが溜まることが生じたため、ウォーターウェイの深さなど設計内容を見直して改良したものを製作する。

3）ひずみ測定器

今後選定する接着剤の物性を踏まえて、必要に応じてデータロガーの収録時間やパーツの材質を見直して現有のひずみ測定器の改良を行う。

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] 坂口清敏・吉田宣生・南将行・原雅人・鈴木康正・松木浩二：深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発と室内実証試験, 資源と素材, 122, 2006.

[4] 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

2.2.1　検討概要

(1) 全体計画

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。

「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。

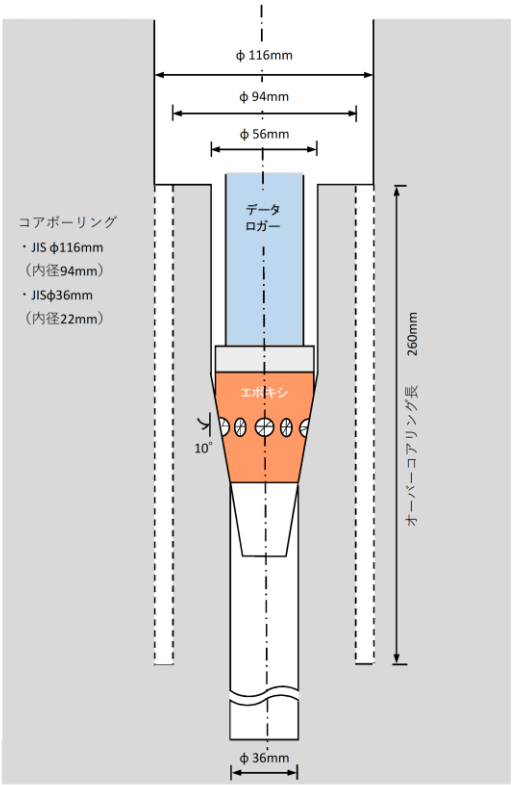


図 2.2-1　円錐孔壁ひずみ法

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。

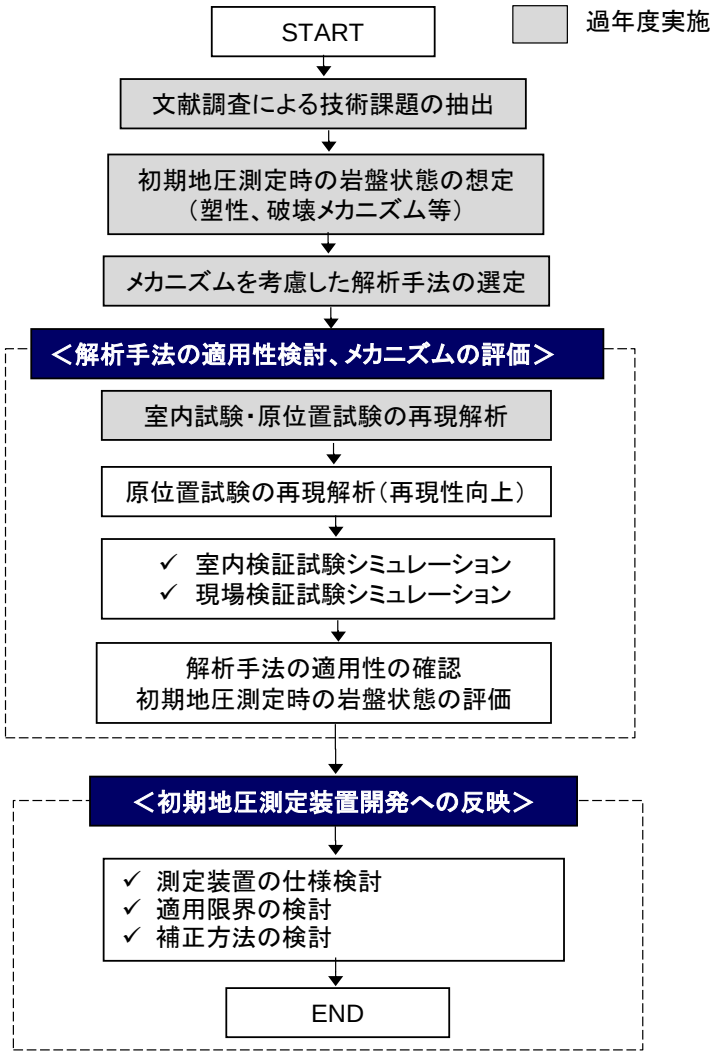


図 2.2-2 「初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討」の全体検討フロー

(2) 本年度の検討内容

本年度は、令和 3 年度に実施した原位置試験のシミュレーションの再現性向上の検討、並びに室内検証試験のシミュレーションによる初期地圧測定時の岩盤状態の評価を実施した。

実施項目は、下記のとおりである。

I. 原位置試験のシミュレーション（水圧破砕法試験の再現性向上）
- 令和 3 年度に実施した水圧破砕法試験シミュレーションの再検討を実施し、DEM 解析による応力レベルの再現性向上を図る。

II. 室内検証試験のシミュレーション（岩盤状態評価手法）
- 令和 3 年度の要素試験シミュレーションに引き続き、室内検証試験を模擬したシミュレーションを実施し、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法（DEM 解析）の適用性を検討する。

本年度の工程を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 令和 4 年度の工程

実施項目	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	備考
(1)原位置試験のシミュレーション（水圧破砕法試験の再現性向上）		モデル・パラメータ検討		水圧破砕法試験シミュレーション								
(2)室内検証試験のシミュレーション（岩盤状態評価手法）				モデル・パラメータ検討		岩盤ブロックのシミュレーション	応力状態評価					
報告書作成												
委員会等			第1回委員会 ▽				第2回委員会 ▽			第3回委員会 ▽		

2.2.2　原位置試験のシミュレーション

(1) 検討の目的、課題と対応策

1) 目的

令和 3 年度に実施した水圧破砕法試験シミュレーションの再検討を実施し、DEM 解析による応力レベルの再現性向上を図ることを目的とする。

2) 課題と対応策

令和 3 年度の水圧破砕法試験シミュレーション[1]では、図 2.2-3 に示すように原位置試験に対して破砕圧を高めに評価する結果となった。

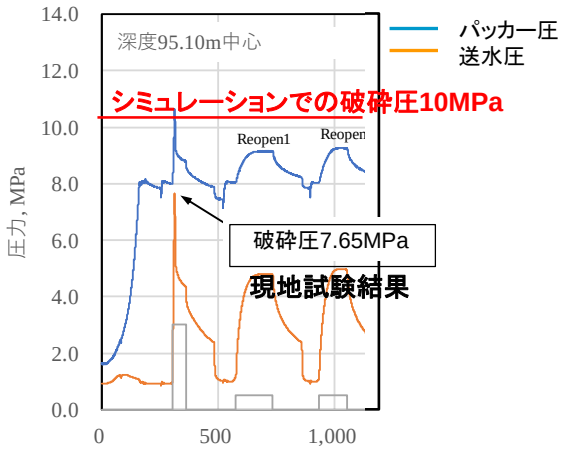


図 2.2-3　水圧破砕法試験結果

令和 3 年度の三軸圧縮試験シミュレーション[1]の結果を図 2.2-4 に示す。

三軸圧縮試験結果では、軸差応力が 4MPa 付近から非線形性が認められるが、シミュレーションでは再現できておらず、クラックの発生も鈍い傾向がある。これから、強度を高く見積もった可能性がある。

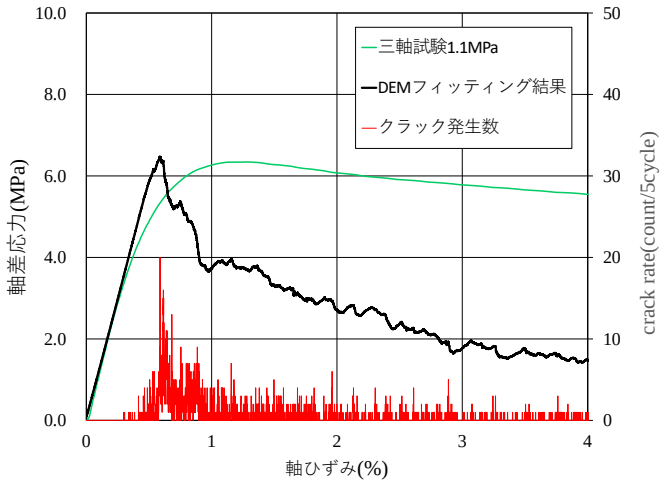


図 2.2-4　三軸圧縮試験シミュレーションによるフィッティング結果

三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線のシミュレーション精度を向上させるため、本年度は、

岩盤にクランプモデルを適用し、3 次元モデルで再現することを試みた。

(2) 三軸圧縮試験のシミュレーション

1) 解析条件

a. 対象とする三軸圧縮試験結果

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である。三軸圧縮試験結果の応力―ひずみ曲線を図 2.2-5 に、三軸圧縮試験の試験条件を表 2.2-2 に示す。ここでは、拘束圧 1.1MPa の曲線をシミュレーションの対象とした。

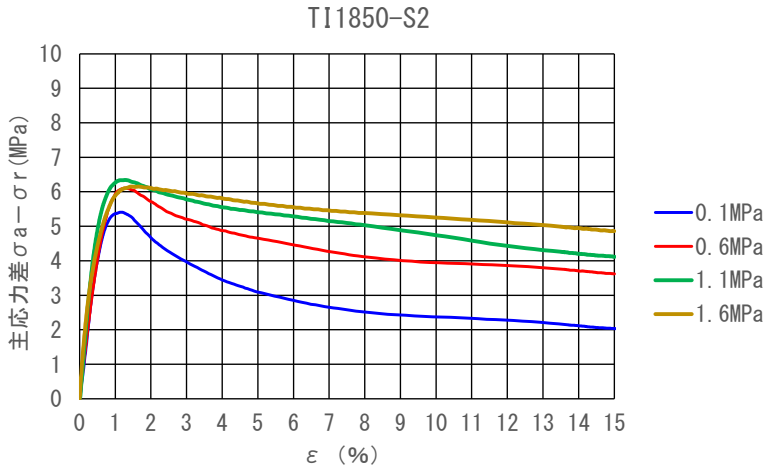


図 2.2-5　三軸圧縮試験の応力―ひずみ曲線（砂質軽石凝灰岩、深度 95.15m～96.15m）

表 2.2-2　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

b. 解析手法

PFC3D Ver.7.0（米国 ITASCA 社開発の個別要素法解析ソフトウェア）を使用した。

c. 解析モデル

三軸圧縮試験シミュレーションに供する解析モデルは 3 次元モデルとし、粒子形状はクランプを採用した。解析モデルを図 2.2-6 に示す。

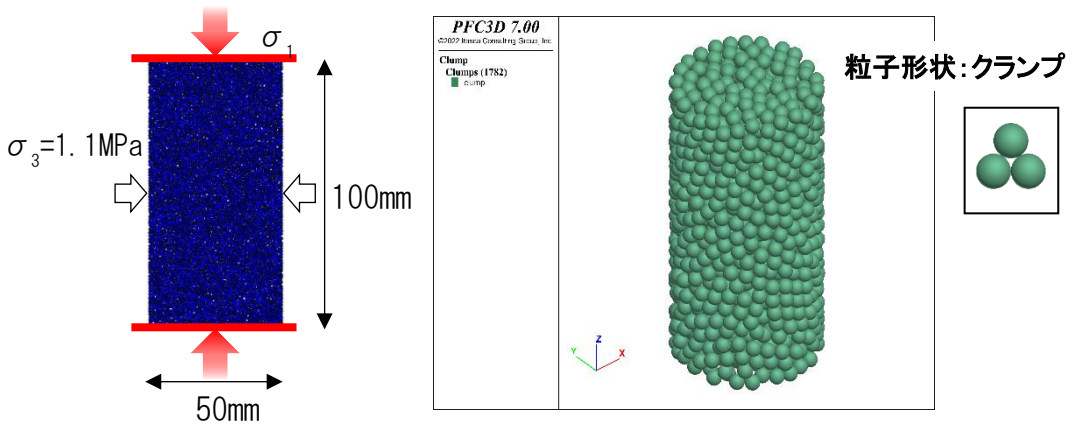


図 2.2-6　三軸圧縮試験シミュレーションの解析モデル（3 次元）

2) 解析結果

三軸圧縮試験結果に対して応力-ひずみ曲線をフィッティングすることでばね係数や摩擦係数、固結強度等の DEM パラメータを決定した。

シミュレーションの結果と三軸圧縮試験結果の応力 - ひずみ曲線の比較を図 2.2-7 に示す。図には、供試体でのクラック発生数を併示した。フィッティング時のパラメータを表 2.2-3 に示す。

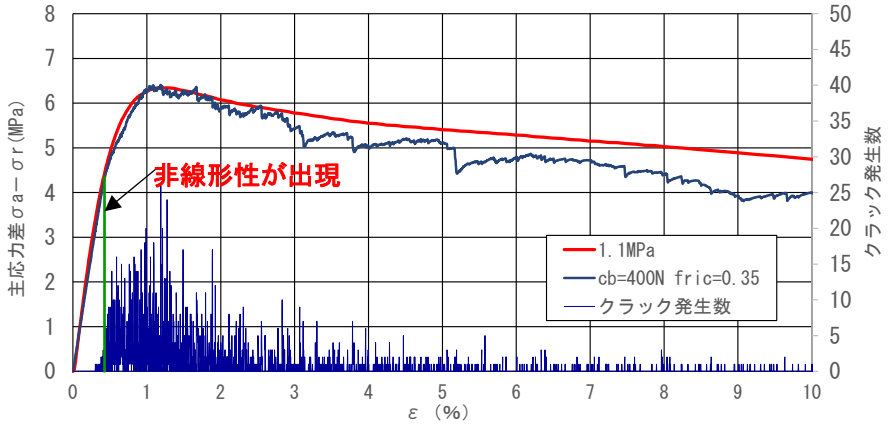


図 2.2-7　三軸圧縮試験シミュレーションによるフィッティング結果

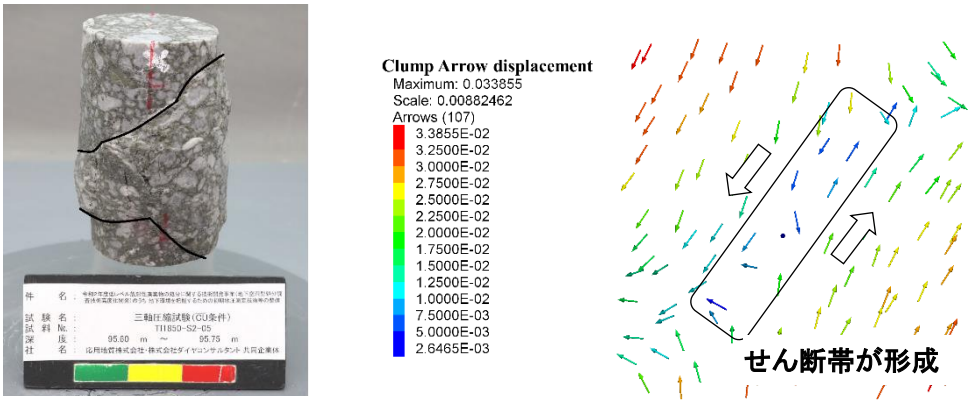
表 2.2-3　パラメータ

パラメータ	単位	値
粒径 d	m	0.01
法線方向ばね係数 kn	N/m	9.0e6
接線方向ばね係数 ks	N/m	9.0e6
摩擦係数 fric	-	0.35
固結強度 cb	N	400

シミュレーションの結果、破壊前の曲線の勾配、破壊強度は試験結果と整合する結果が得

られた。破壊後のひずみ軟化挙動についても概ね傾向が同じ結果を表現できている。

三軸圧縮試験の破壊後の供試体写真とシミュレーションの変位ベクトル図の比較を図 2.2-8 に示す。変位ベクトルが大きい箇所がせん断帯の形成された箇所と考えられ、供試体のせん断破壊と同様の傾向が示されている。



a）三軸試験後のコア　　b）変位ベクトル図

図 2.2-8　破壊形状の比較

以上のように、シミュレーションは、三軸圧縮試験結果を再現できており、表 2.2-3 に示す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実施することとした。

(3) 水圧破砕法シミュレーション

1) 解析条件

a. 適用した水圧破砕法試験

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 2.2-9 に、発生クラックを図 2.2-10 に、水平面内の主応力を表 2.2-4 に示す。

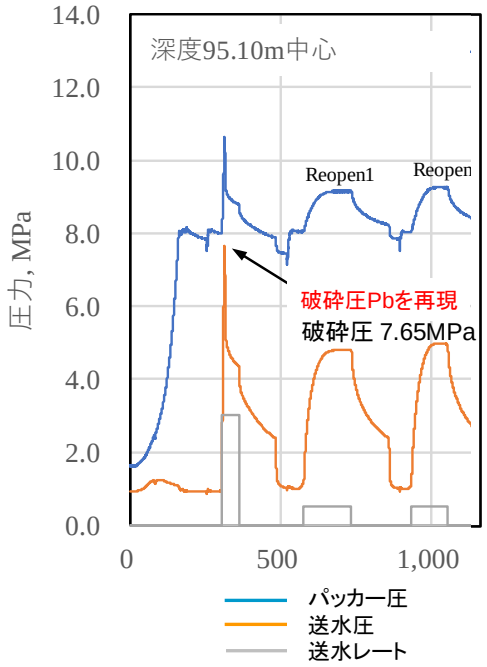
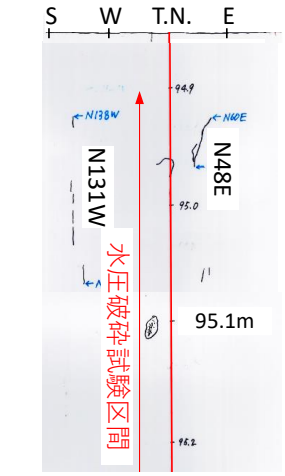


図 2.2-9　水圧破砕法試験結果経時変化図（砂質軽石凝灰岩、深度 95.1m）



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。

図 2.2-10　発生クラック

表 2.2-4　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

b．解析手法

PFC3D Ver.7.0（米国 ITASCA 社開発の個別要素法解析ソフトウェア）を使用した。

c. 解析モデル

水圧破砕法試験シミュレーションで用いる解析モデルのイメージは、図 2.2-11 に示すとおりである。Φ0.76m のボーリング孔に内水圧を作用させる。モデル境界には、水圧破砕法試験結果の初期地圧相当の応力を外圧として作用させる。

解析モデルを図 2.2-12 に示す。解析モデルの奥行き方向の厚さは、三軸圧縮試験シミュレーションの結果より、粒子数と 3D モデルにした効果を得られるように 0.15m とした。

孔壁への荷重載荷方法は、孔壁の内側に粒子を設けて速度を与える設定とした。設けた粒子とクランプ（孔壁）との接触点の方向に速度を載荷する。

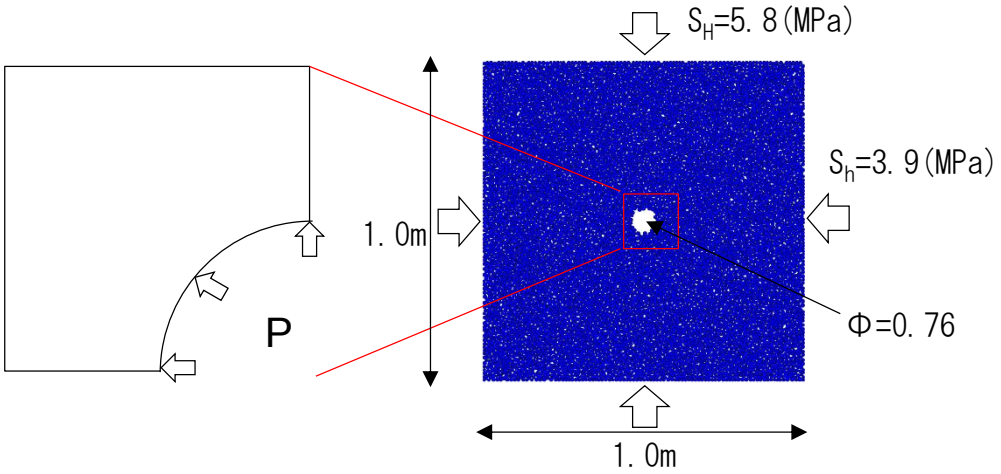


図 2.2-11　水圧破砕法試験シミュレーションのモデル概要

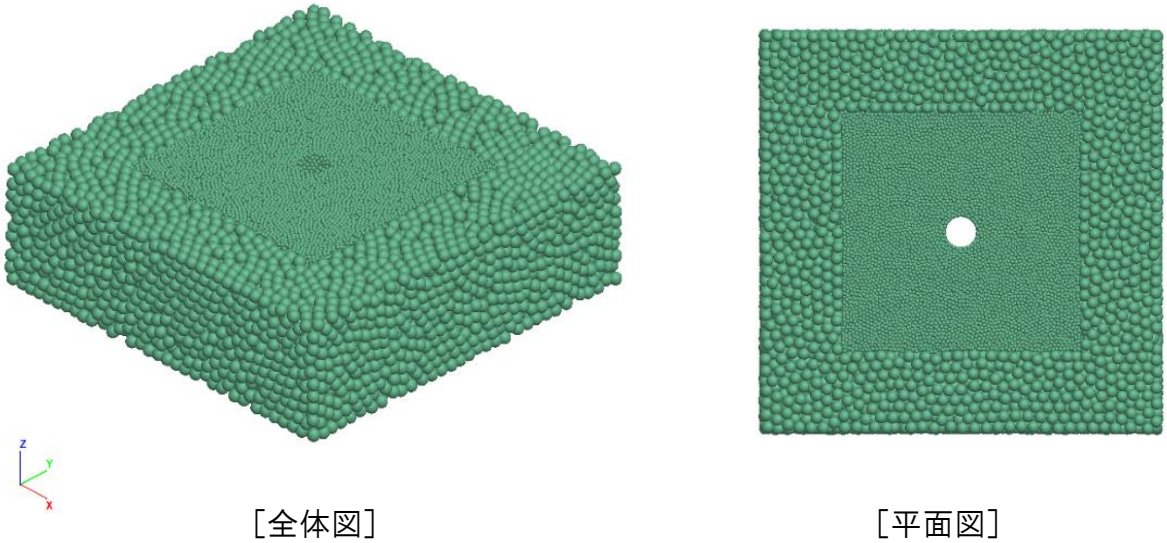


図 2.2-12　解析モデル（3 次元）

水圧破砕法試験シミュレーションで用いたパラメータを表 2.2-5 に示す。パラメータは三軸圧縮試験シミュレーションで設定した値を採用した。但し、固結強度 cb については、三軸

圧縮試験シミュレーションで設定した値 400N の他、340N での解析も実施した。詳細については後述する。

表 2.2-5　水圧破砕法試験シミュレーションのパラメータ

パラメータ	単位	クランプ 詳細着目領域	クランプ 着目領域外
粒径 d	m	0.01	0.03
法線方向ばね係数 kn	N/m	9.0e6	27.0e6
接線方向ばね係数 ks	N/m	9.0e6	27.0e6
摩擦係数 fric	-	0.35	0.3
固結強度 cb	N	400 & 340	4000

2) 解析結果

内水圧の経時変化を図 2.2-13 に示す。三軸圧縮試験シミュレーションで設定したパラメータによる結果が上段である。図に示すように、三軸圧縮試験シミュレーションで設定したパラメータでは、破砕圧が試験値（7.65MPa）を超過し、破砕圧は 9.3MPa となった。

そこで、破砕圧が試験値と同等となる固結強度 cb を求めた結果、cb＝340N とすることで破砕圧は 7.7MPa となり、破砕圧を再現可能となった。

微視クラック分布図を図 2.2-14、図 2.2-15 に示す。微視クラックの発生モードは、cb＝400N、340N で同じ傾向を示している。微視クラックは、初期段階で最大主応力方向に発生するが、次第に周辺に拡大する。微視クラックの発生モードは、原位置試験（1 条の割目が発生）と異なる傾向を示す結果となった。

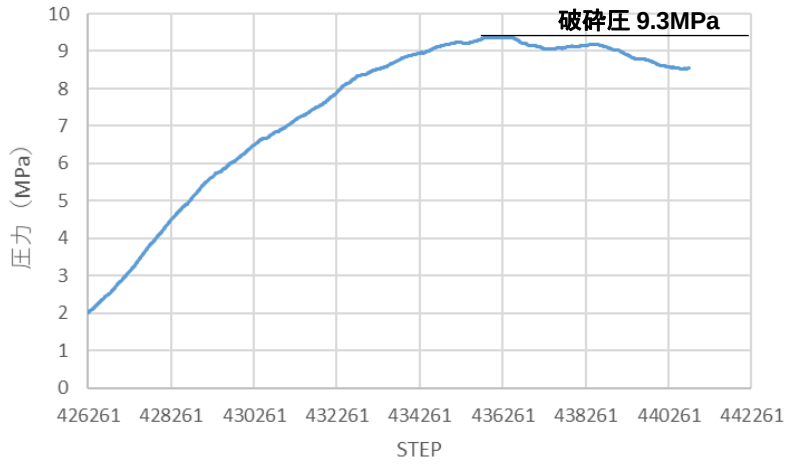
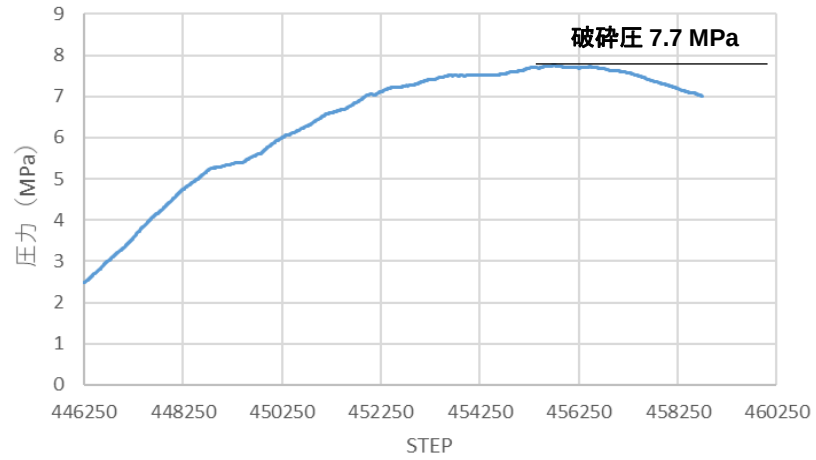
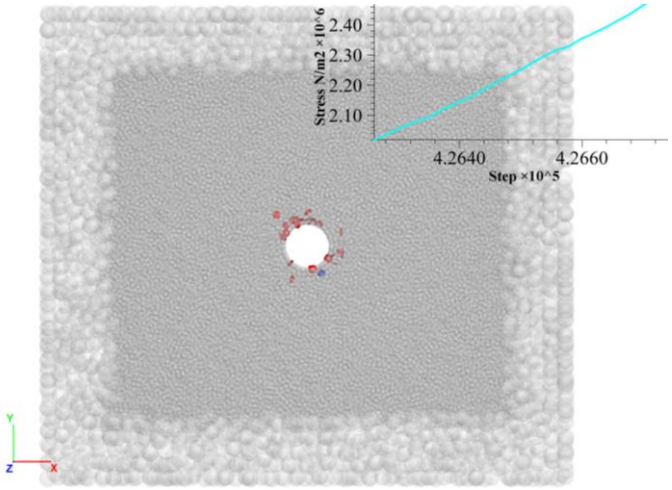
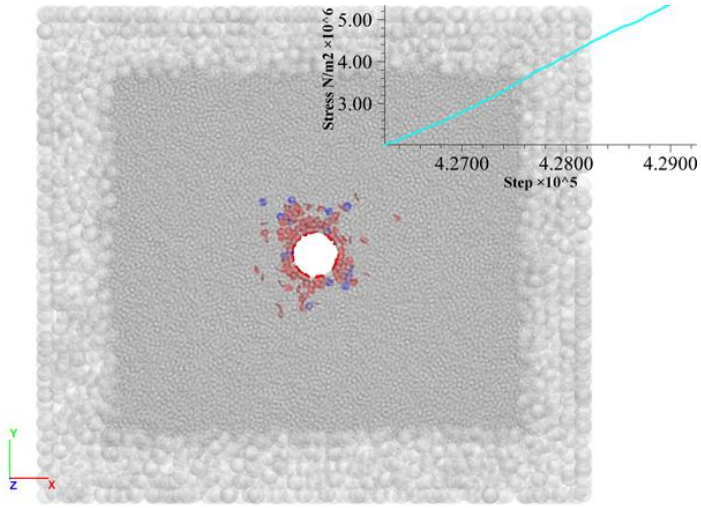
400N 三軸圧縮試験シミュレーション結果	
340N 破砕圧フィッティング結果	

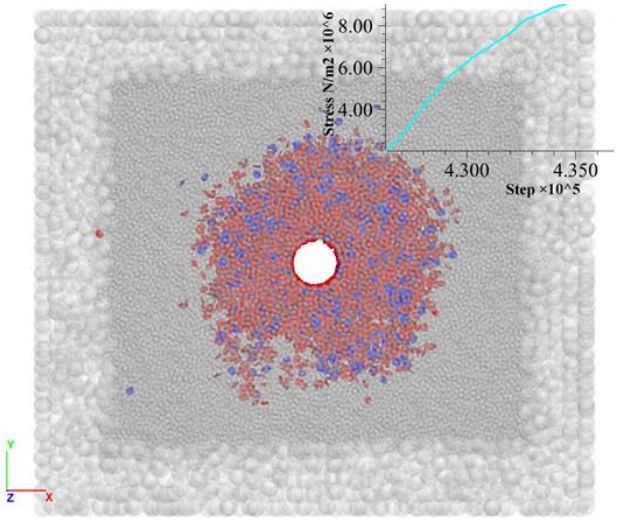
図 2.2-13　水圧破砕シミュレーション結果（破砕圧）



［内水圧 2.5 MPa］

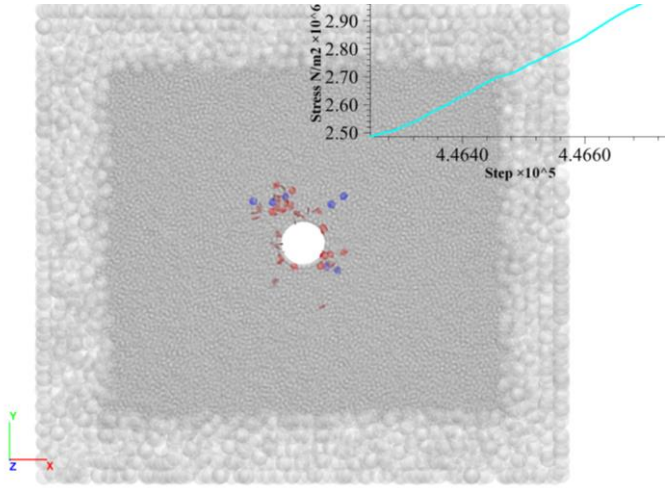


［内水圧 5.5 MPa］

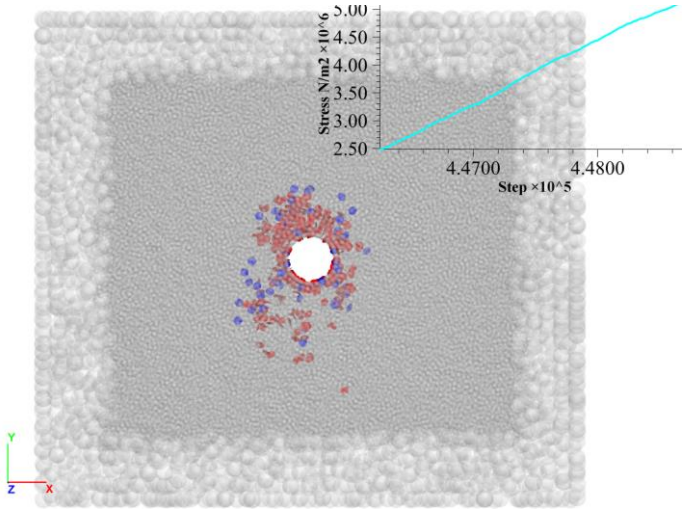


［内水圧 9.5 MPa］

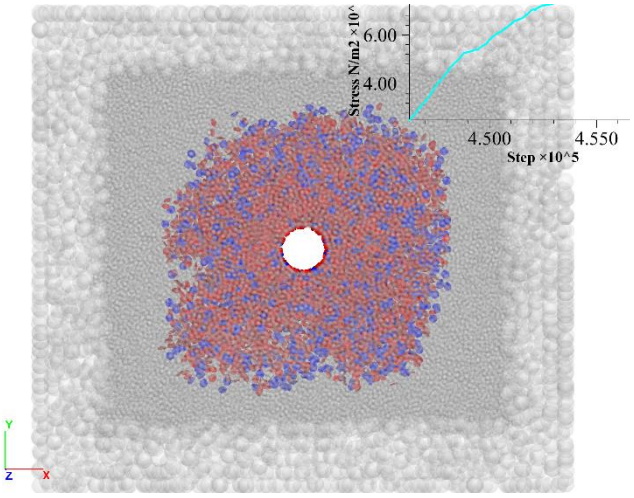
図 2.2-14　水圧破砕シミュレーション結果（クラック分布（cb＝400N）



［内水圧 3.0 MPa］



［内水圧 5.1 MPa］



［内水圧 8.1 MPa］

図 2.2-15　水圧破砕シミュレーション結果（クラック分布（cb＝340N）

(4) まとめ

水圧破砕法試験シミュレーションの検討結果をまとめると以下のようになる。

1) 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（cb=400N）では、破砕圧が試験値（7.65MPa）を超過する。cb=340N で破砕圧を再現できた。
- 微視クラックは、初期段階で最大主応力方向に発生し、次第に周辺に拡大する傾向があり、微視クラックの発生モードが原位置試験（1 条の割目が発生）と異なる。

2) 考察

水圧破砕法試験のシミュレーションに用いるパラメータは、同じ岩種（砂質軽石凝灰岩）で実施した三軸圧縮試験結果のシミュレーションで応力 - ひずみ曲線を再現できるパラメータを採用した。ここで、三軸圧縮試験と水圧破砕法試験での載荷荷重の状態と、岩盤の破壊後挙動の比較を表 2.2-6 に示す。

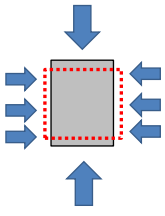
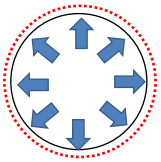
三軸圧縮試験では、供試体に拘束圧を作用させた状態で、軸方向に圧縮力を作用させるもので、供試体は圧縮状態にある。一方、水圧破砕法試験は、ボーリング孔の内側から水圧を作用させることで、孔壁の法線方向に圧縮力が作用するが、接線方向には引張力が作用する。水圧破砕法試験でのクラックは、法線方向に発生することから、破壊に関わる応力は、接線方向応力である。したがって支配的な応力は引張状態であると言える。

次に、破壊後挙動に着目すると、三軸圧縮試験では、緩やかなひずみ軟化挙動であるのに対して、水圧破砕法試験は、引張破壊が支配的であり、圧裂引張試験でみられるように脆性的な破壊挙動を示すものと考えられる。既往検討による圧裂引張試験[2]の荷重 - 変位曲線を図 2.2-16 に示す。

このように、破壊に至るプロセスや、破壊挙動が三軸圧縮試験と水圧破砕法試験で異なることに、シミュレーションが実現象と異なる結果となった原因がある可能性がある。

また、三軸圧縮試験の破壊後の緩やかなひずみ軟化挙動を再現するため、粒子形状としてクランプを採用した。このため、クランプを考慮した粒子通しのかみ合わせが大きくなり、引張破壊したとしても脆性的な挙動を再現できなかった可能性がある。

表 2.2-6　三軸圧縮試験と水圧破砕法試験の比較

試験	載荷荷重の状態	破壊後挙動
三軸圧縮試験	圧縮 	緩やかなひずみ軟化挙動
水圧破砕法試験	引張 	脆性的な挙動

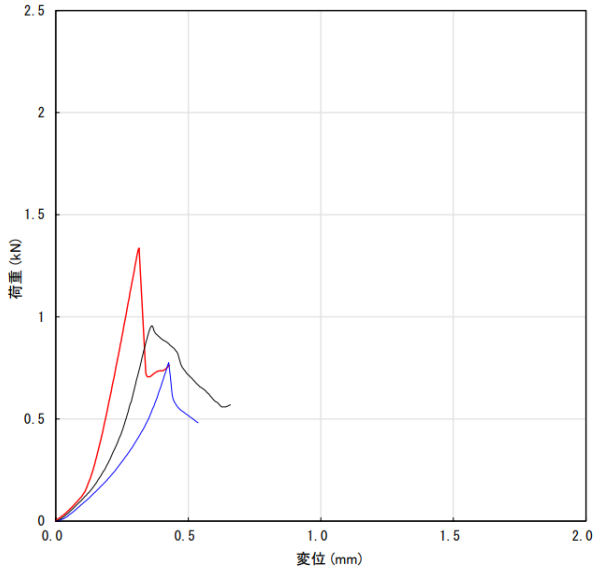


図 2.2-16　圧裂引張試験結果[2]（参照データの取得、軽石凝灰岩）

3) 対応策

以上のように、パラメータ設定に供する三軸圧縮試験と水圧破砕法試験で、破壊に至るプロセスや破壊後の挙動が異なる可能性があることから、破壊規準も含めた分析を行い、破壊プロセスや破壊後の挙動に着目したパラメータ設定や解析モデルを検討して、シミュレーションの精度を向上させる必要がある。

2.2.3　室内検証試験のシミュレーション

(1) 検討の目的

1) 目的

令和 3 年度の要素試験シミュレーションに引き続き、室内検証試験を模擬したシミュレーションを実施し、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法（DEM 解析）の適用性を検討する。

2) 課題と対応策

DEM では、非連続体の解析手法で、粒子に作用する接触力と、粒子の変位のような粒子レベルの情報が計算されるが、応力・ひずみは、直接得られない。

そこで、令和 3 年度の検討[1]では、図 2.2-17 に示すように岩盤の応力状態を、クラック発生数で評価した。

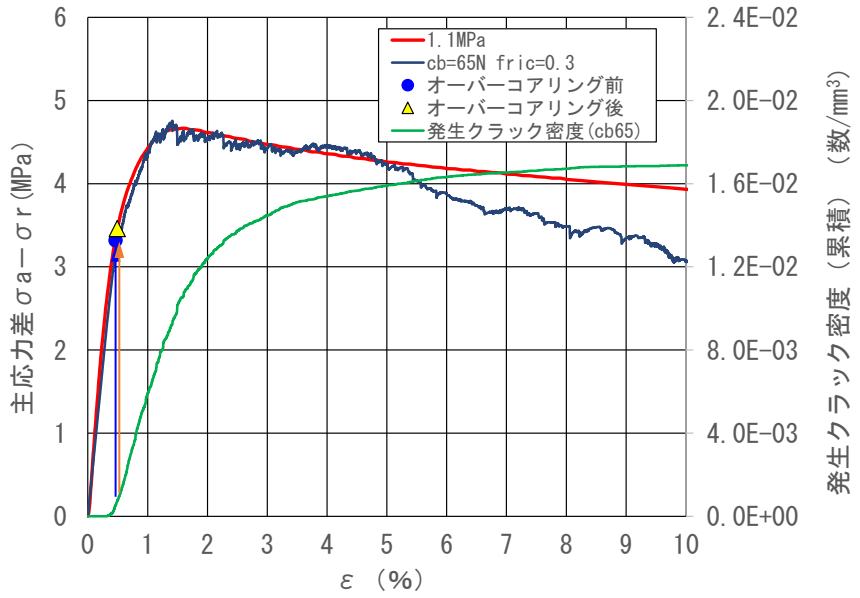


図 2.2-17　三軸シミュレーションの発生クラック密度（令和 3 年度検討結果）

しかし、破壊・塑性化のような工学的な問題を考える際、応力・ひずみを算定する必要がある。

そこで、DEM 解析における体積を持った領域に着目して、平均化処理を行うことで、マイクロスケールの物理量（接触力等）から連続体量である応力・ひずみに移行することを試行する。

(2) オーバーコアリングのシミュレーション

1) 解析条件

a. 対象とする岩盤ブロック試験

初期地圧装置開発で実施した岩盤ブロック試験の概要を図 2.2-18 に示す。岩盤ブロック試験は、三軸載荷試験、二軸載荷によるオーバーコアリング試験及びコア採取後の感度試験を実施している。ここでは、軽石凝灰岩を用いたオーバーコアリング試験を対象としてシミュレーションを実施した。

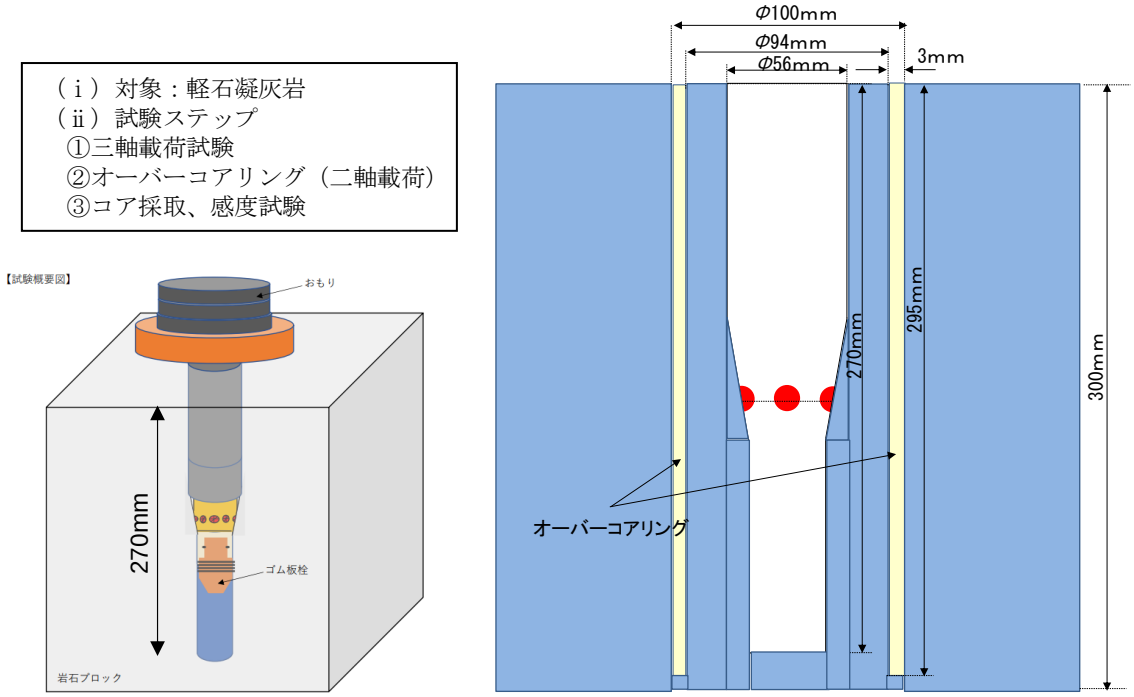


図 2.2-18　岩盤ブロックとオーバーコアリング試験の概要

b. 解析手法

PFC3D Ver.7.0（米国 ITASCA 社開発の個別要素法解析ソフトウェア）を使用した。

c. 解析モデル

オーバーコアリングシミュレーションの解析モデルを図 2.2-19（全体図）、図 2.2-20（平面図）、図 2.2-21（断面図）に示す。岩盤ブロックは一辺 30 cm の立方体である。ボーリング孔の既掘削部は、クランプを設けず空洞としてモデル化した。岩盤ブロックの側面、底面には壁要素を設け、粒子に自重を考慮する。拘束圧条件を表 2.2-7 に示す。

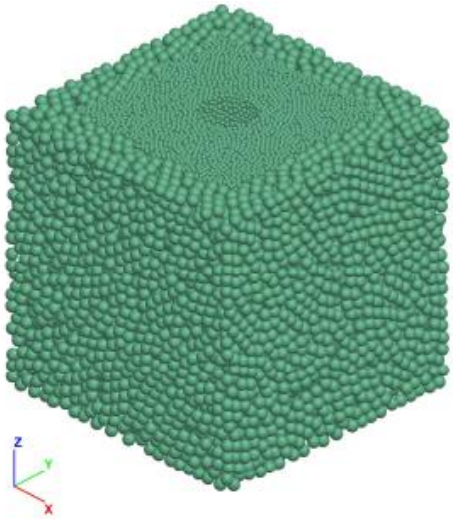


図 2.2-19　解析モデル（全体図）

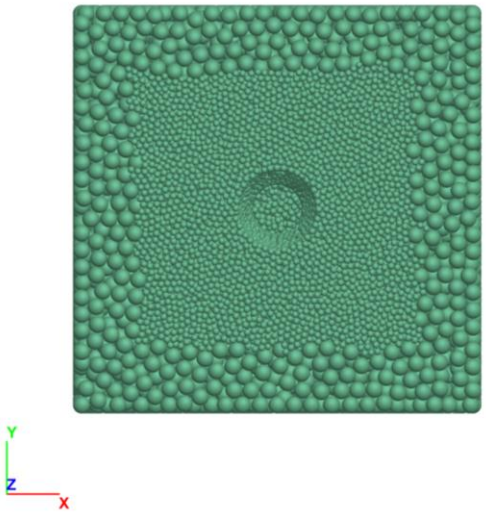


図 2.2-20　解析モデル（平面図）

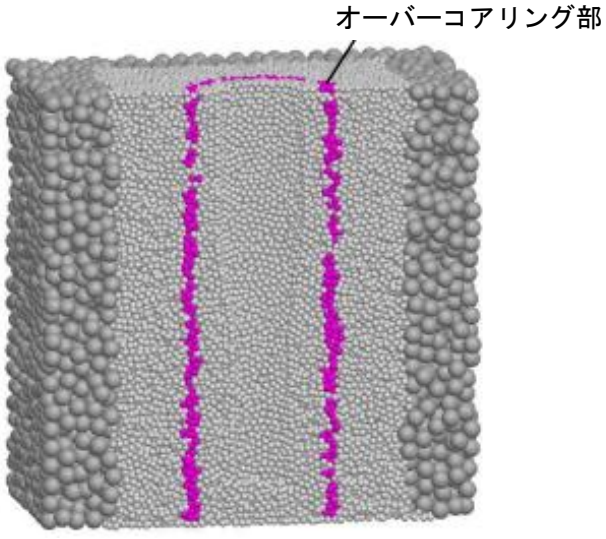


図 2.2-21　解析モデル（断面図）

表 2.2-7　拘束圧条件

項目	値
水平応力（拘束圧）	X＝1.5MPa,　Y=1.0MPa
鉛直応力（拘束圧）	粒子の自重（密度:1.6（g/cm³））

初期地圧装置開発のオーバーコアリング試験は、水平方向から二軸載荷した状態（X 方向 1.5MPa、Y 方向 1.0MPa）でオーバーコアリングを開始したが、図 2.2-22 に示すように X 方向は徐々に載荷圧力が低下している。一方、Y 方向は 1.0MPa で一定である。シミュレーションにおいても、この載荷圧力の変化を考慮した。

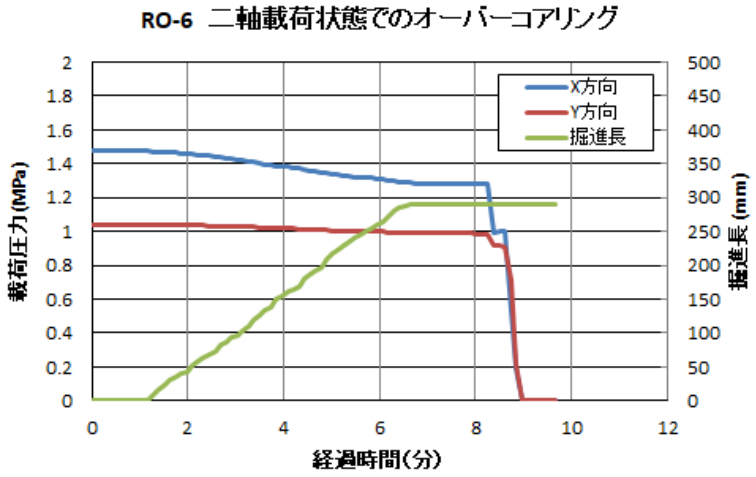


図 2.2-22　岩石ブロック試験での載荷状態推移

d. パラメータ

オーバーコアリングシミュレーションで用いるパラメータは、令和 3 年度の軽石凝灰岩の三軸圧縮試験シミュレーション結果を採用した。パラメータを表 2.2-8 に示す。

表 2.2-8　オーバーコアリング掘削解析パラメータ

パラメータ	単位	クランプ 詳細着目領域	クランプ 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
固着強度 cb	N	65	450
粒子の密度	kg	2600	2600

2) 解析結果

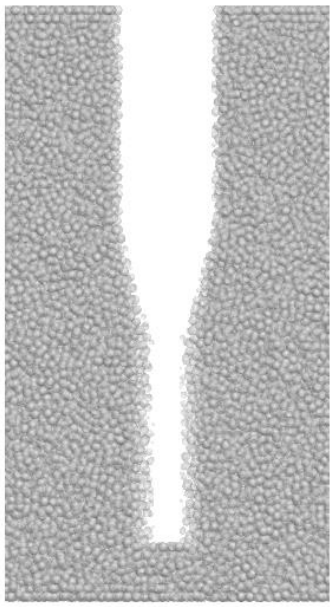
a．微視クラック

オーバーコアリング開始前と終了時の微視クラック発生分布を図 2.2-23、図 2.2-24、及び図 2.2-25 に示す。

微視クラックは、オーバーコアリング開始前に発生していない。オーバーコアリングによって薄肉部でわずかに発生する。今回の岩石ブロック試験シミュレーションで、微視クラックが少ないのは、初期地圧（載荷圧力）が小さいためと考えられる。今回のシミュレーションでの水平面内初期地圧が 1.5/1.0MPa であるのに対して、令和 3 年度の円錐孔壁ひずみ法の初期地圧は 4.8/3.0MPa であった。ストレインセル周辺の岩盤におけるクラック発生数の差は、この違いによるものである。

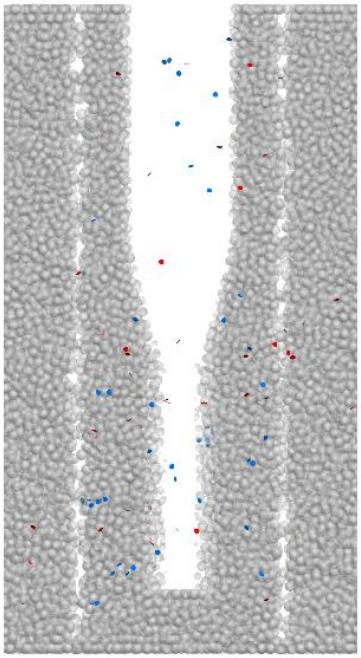
なお、オーバーコアリング後の横断面図では、図 2.2-25 に示すようにオーバーコアリング箇所に粒子が点在して内側と外側で結合しているようにみえるが、実際は図と異なる状態となっている。図のように見えるのは、解析結果の POST 処理において以下のようにしたためである。

当初、オーバーコアリング箇所は、粒子（今回の場合、厳密にはクランプ）が充填した状態でモデル化されている。所定箇所でオーバーコアリング（解析モデル上は岩盤（粒子）を除去）を行うが、残存する粒子も存在する。POST 処理において、横断面図は、紙面の奥行方向（岩盤ブロックの鉛直方向）で厚みをもって可視化するため、奥行き方向の粒子が投影されて表示され、結果として図 2.2-25 のようになった。



青：crack_tension
赤：crack_shear

［オーバーコアリング開始前］



［オーバーコアリング終了時］

図 2.2-23　微視クラック発生分布（断面図）

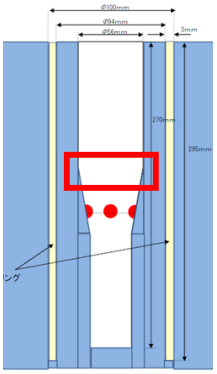
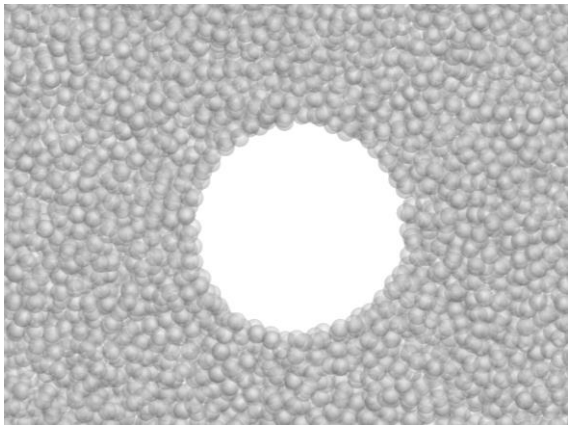
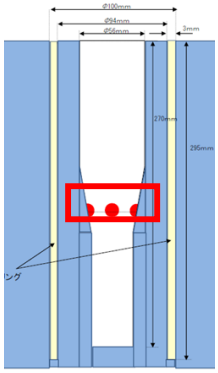
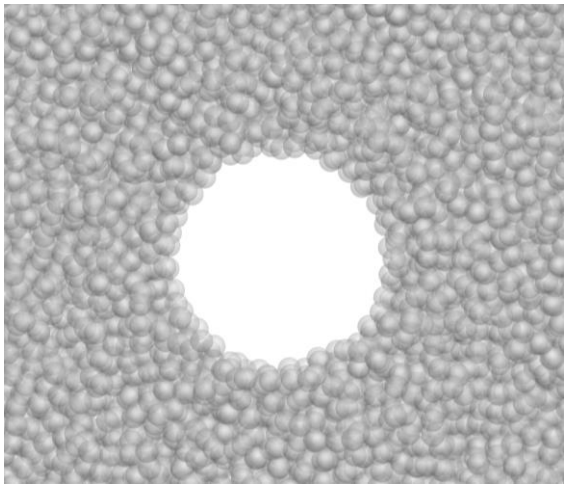
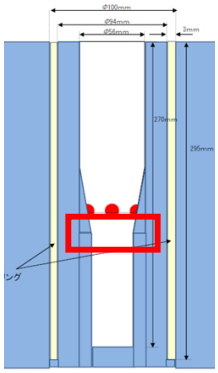
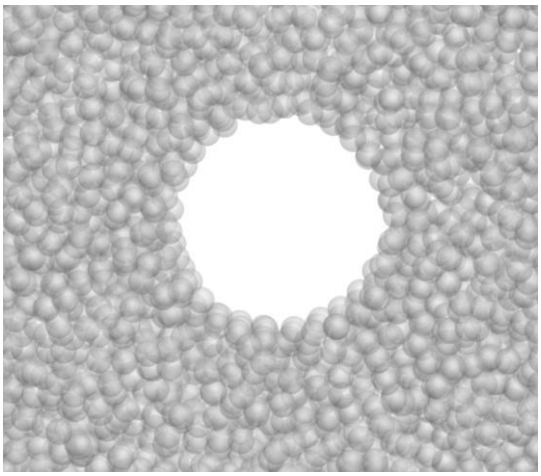
ストレインセル 上端 	
ストレインセル 中央 	
ストレインセル 下端 	

図 2.2-24　微視クラック発生分布（横断面図／オーバーコアリング開始前）

青：crack_tension
赤：crack_shear

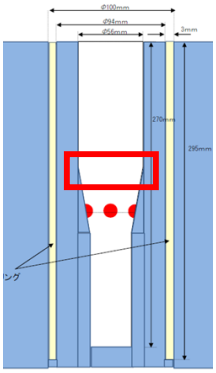
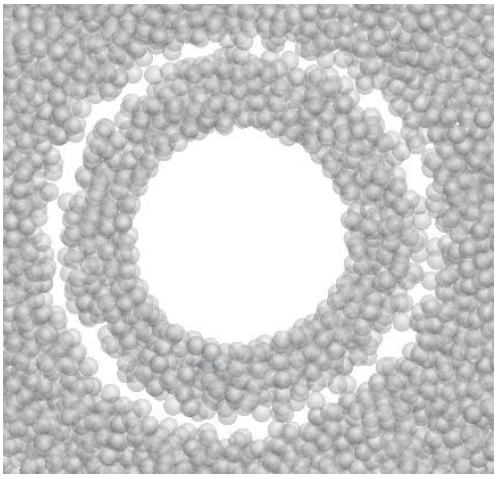
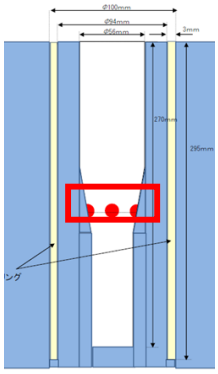
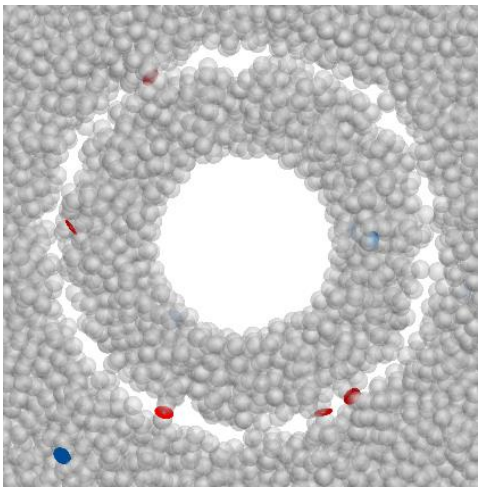
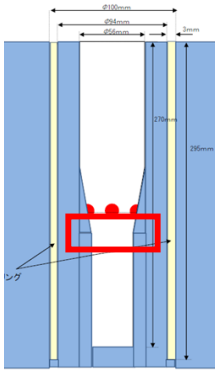
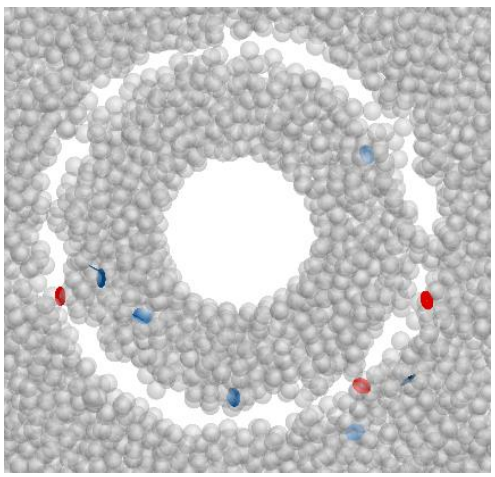
ストレインセル 上端 	
ストレインセル 中央 	
ストレインセル 下端 	

図 2.2-25　微視クラック発生分布（横断面図／オーバーコアリング終了時）

青：crack_tension
赤：crack_shear

b. 微視クラック発生率に基づく応力状態の評価

令和 3 年度の円錐孔壁ひずみ法シミュレーションと同様に、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。

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の累積数を図 2.2-26 に、微視クラックの発生数を図 2.2-27 に示す。微視クラックは、図 2.2-28 に示す領域を抽出範囲とした。

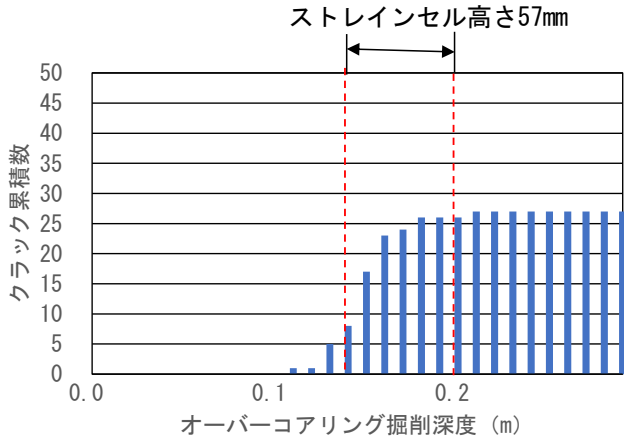


図 2.2-26　微視クラック累積数（オーバーコアリング時）

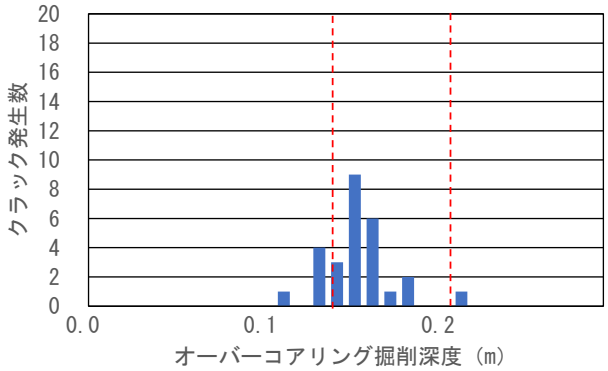


図 2.2-27　微視クラック発生数（オーバーコアリング時）

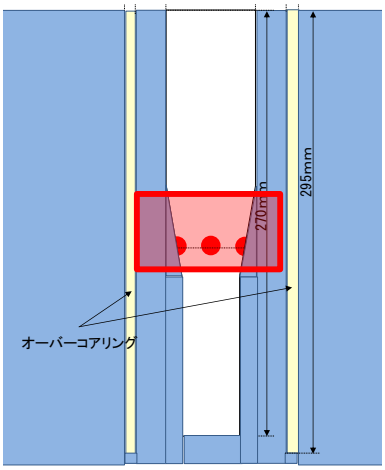


図 2.2-28　微視クラック抽出領域

オーバーコアリング時の薄肉部の応力レベル、非線形性の評価は、三軸圧縮試験シミュレーションの応力－ひずみ曲線と微視クラックの発生を関連付けて行う。

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－ひずみ曲線を用いて応力レベルを評価する。クラック発生率は、図 2.2-28 に示す微視クラック抽出領域の体積($2.99\times10^{5}mm^{3}$)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。

＜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($2.99\times10^{5}mm^{3}$)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。

上述の定義に基づくと微視クラック発生率（微視クラック発生密度）は、オーバーコアリング終了時で 9.2×10^{-5} 個／m^3（ε ＝0.38%）となった。

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 2.2-29 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、マクロ的には弾性挙動の範囲内となっていることがわかる。

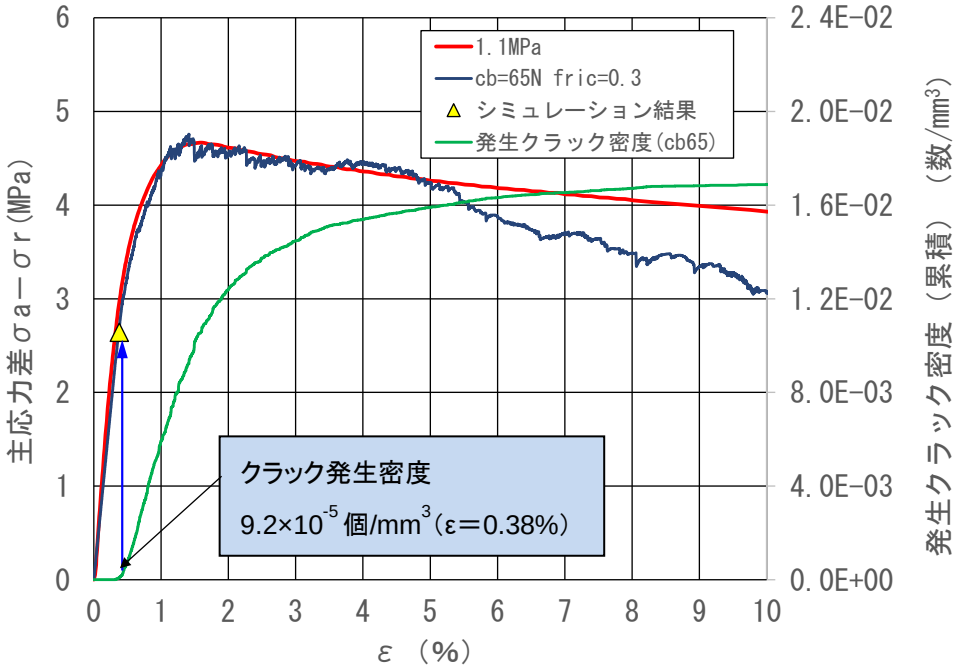


図 2.2-29　三軸圧縮シミュレーションのクラック発生密度

c. 応力・ひずみの抽出

(a) 応力・ひずみ抽出方法

応力とひずみは、Christoffersen（1981）[3]や前田健一（2007）[4]を参考にし、図 2.2-30 のような任意の大きさ・位置で球領域を設け、その領域内で応力及びひずみ速度を計算して抽出した。

応力の計算方法は以下のとおりである。

応力は連続体量であるが、DEM から計算されるのは、粒子レベルの情報で粒子に作用する接触力、体積力及び粒子の変位に関するものである。これらの物理量は、連続体モデルには直接変換することが困難である。このようなマイクロスケールの物理量から連続体に移行するためには、体積を持った領域に着目し、平均化処理が必要である。ある体積 V の測定領域における平均応力$\overline{\sigma}_{ij}$は、次のように計算される。[4]

$$\bar{\sigma} = -\frac{1}{V}\sum_{N_c} F^{(c)} \otimes L^{(c)}$$

ここで、N_cは、測定領域内又はその境界にある接触点の数、$F^{(c)}$は接触力ベクトル、$L^{(c)}$は接触している 2 粒子の中心を結ぶ分岐ベクトル、⊗は外積、圧縮応力が負の値である。

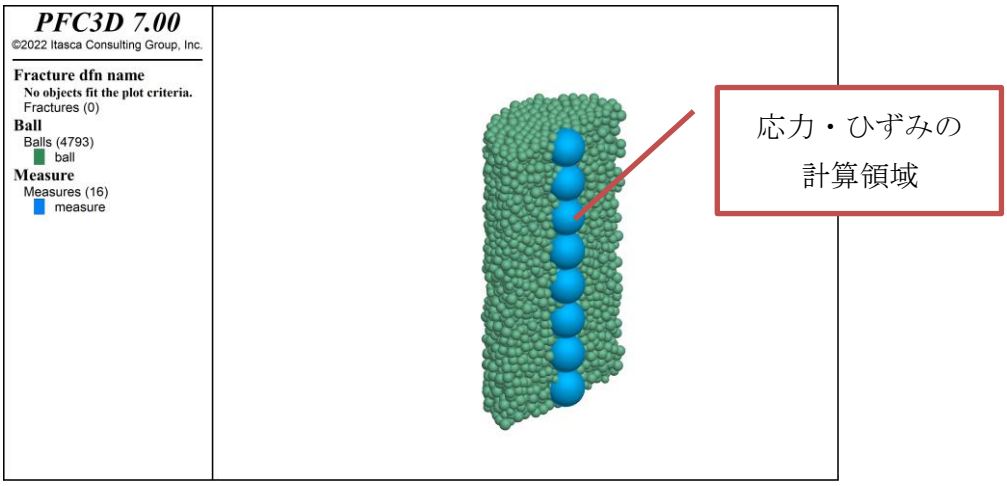


図 2.2-30　球領域で出力

次にひずみの計算について説明する。PFC ではひずみ速度が算出されるため、ひずみ速度を積分することでひずみを算出する。

ここでは、粒子集合体内の局所ひずみ速度を測定する手順について説明する。応力を計算する手順と異なることに留意されたい。測定領域内に中心を持つ粒子の予測速度と実測の速度の誤差を最小にする手法を用いて、ひずみ速度を計算する。測定領域内で一様に変形し変位分布が線形変換に従うものと仮定している。

隣接する 2 点における変位u_iの関係は、変位勾配テンソルα_{ij}を用いて表される。

粒子 P と粒子 P'の位置は、それぞれx_iと$x_i + dx_i$である。この 2 点間の速度の差は以下のように表される。

$$dv_i = v_{i,j}dx_j = \dot{\alpha_{ij}}dx_j$$

変位勾配テンソルα_{ij}は対称テンソルと非対称テンソルに分解され、次のようになる。

$$\dot{\alpha_{ij}} = -\dot{e}_{ij}\dot{\omega_{ij}}$$

ここでそれぞれの変数は以下のとおりである。

$\dot{e_{ij}} = \frac{1}{2}\left(v_{i,j} + v_{j,i}\right)$　微小ひずみテンソル

$\dot{\omega_{ij}} = \frac{1}{2}\left(v_{j,i} + v_{i,j}\right)$　回転テンソル

PFC では、速度勾配テンソル$\dot{\alpha_{ij}}$をひずみ速度テンソルと呼び、以下のように最小二乗法で計算する。ある測定領域で計算された粒子の平均速度$\overline{V_i}$と位置$\overline{x_i}$は次式のとおりである。

$$\overline{V_i} = \frac{\sum_{Np} V_i^{(p)}}{N_p}$$

$$\overline{x_i} = \frac{\sum_{Np} x_i^{(p)}}{N_p}$$

$V_i^{(p)}$は粒子 p の並進速度、$x_i^{(p)}$は粒子 p の中心位置である。実測された相対速度は以下に示される。

$$\tilde{V}_i^{(p)} = V_i^{(p)} - \bar{V}_i$$

また、$\dot{\alpha_{ij}}$に対して予測速度$\tilde{v}_i^{(p)}$は以下に示す。

$$\tilde{v}_i^{(p)} = \dot{\alpha_{ij}}\tilde{x}_j^{(p)}$$

ここで、

$$\tilde{x}_i^{(p)} = x_i^{(p)} - \bar{x}_i$$

これらの誤差は下式に表される。

$$z = \sum_{N_p}\left|\tilde{v}_i^{(p)} - \tilde{V}_i^{(p)}\right|^2$$

z が最小となるようにひずみ増分を算出する。つまり、$\frac{\partial z}{\partial \dot{\alpha}_{ij}} = 0$となり、下式より算出される。

$$\begin{bmatrix} \sum_{N_p}\tilde{x}_1^{(p)}\tilde{x}_1^{(p)} & \sum_{N_p}\tilde{x}_2^{(p)}\tilde{x}_1^{(p)} & \sum_{N_p}\tilde{x}_3^{(p)}\tilde{x}_1^{(p)} \\ \sum_{N_p}\tilde{x}_1^{(p)}\tilde{x}_2^{(p)} & \sum_{N_p}\tilde{x}_2^{(p)}\tilde{x}_2^{(p)} & \sum_{N_p}\tilde{x}_2^{(p)}\tilde{x}_3^{(p)} \\ \sum_{N_p}\tilde{x}_1^{(p)}\tilde{x}_3^{(p)} & \sum_{N_p}\tilde{x}_2^{(p)}\tilde{x}_3^{(p)} & \sum_{N_p}\tilde{x}_3^{(p)}\tilde{x}_3^{(p)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\alpha_{i1}} \\ \dot{\alpha_{i2}} \\ \dot{\alpha_{i3}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{Np}\tilde{V}_i^{(p)}\tilde{x}_1^{(p)} \\ \sum_{Np}\tilde{V}_i^{(p)}\tilde{x}_2^{(p)} \\ \sum_{Np}\tilde{V}_i^{(p)}\tilde{x}_3^{(p)} \end{Bmatrix}$$

(b) ひずみ

上述の方法で、オーバーコアリング時のひずみ・応力を抽出した。

ひずみ・応力の抽出位置を図 2.2-31 に示す。

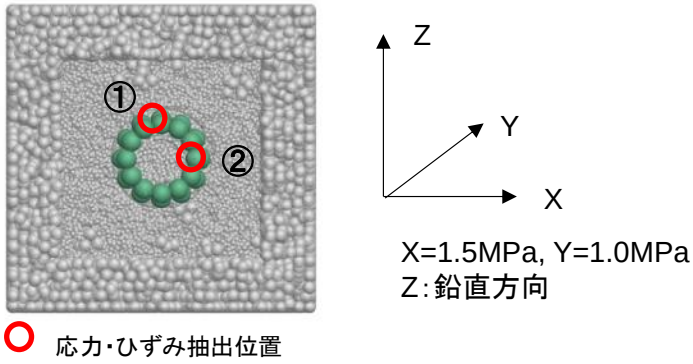


図 2.2-31　ひずみ・応力抽出位置

オーバーコアリング時のひずみ経時変化のシミュレーション結果と岩石ブロック試験結果による比較を図 2.2-32 に示す。シミュレーションのεx、εyは、岩石ブロック試験のεθと、シミュレーションのεzは、岩石ブロック試験のερと比較する。両者を比較すると、シミュレーションでのひずみの出現傾向は、岩石ブロック試験と概ね一致する結果となった。

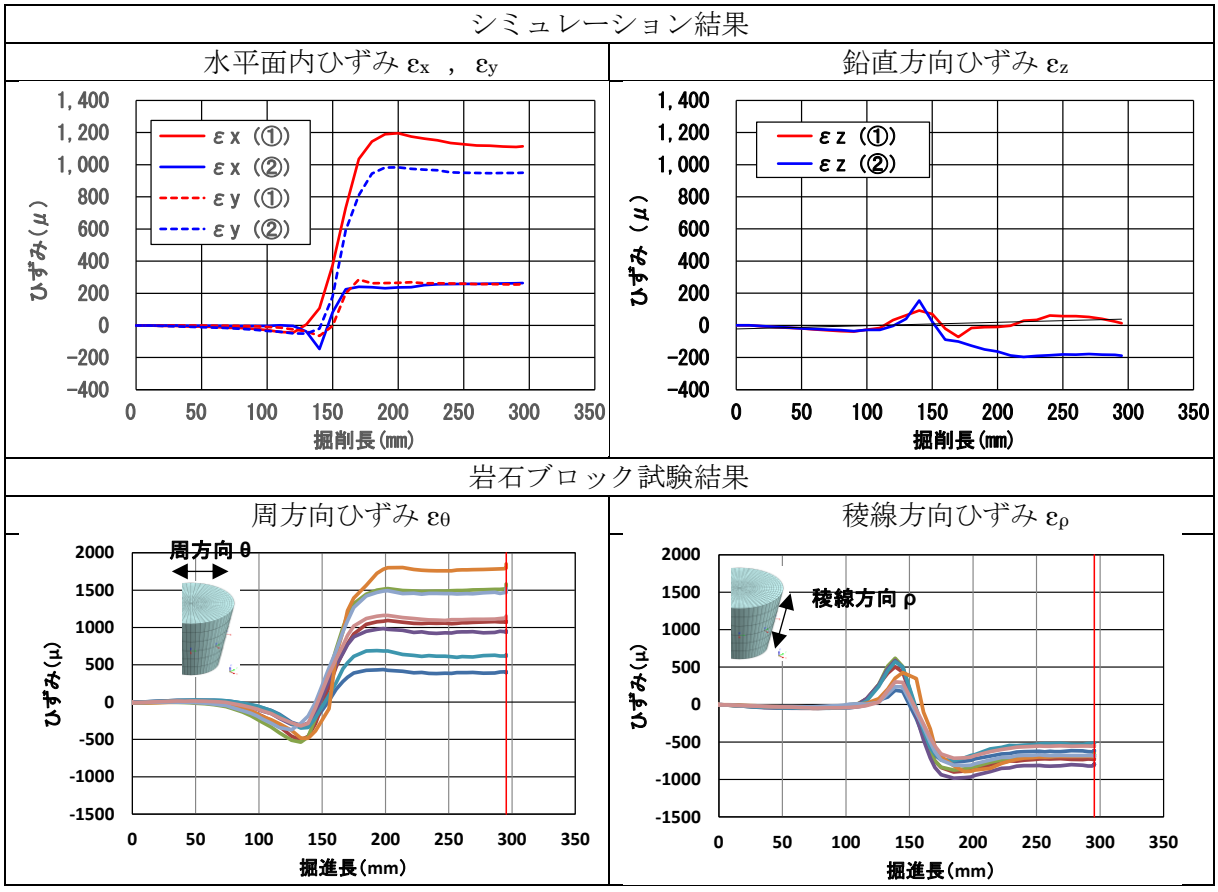


図 2.2-32　オーバーコアリング時のひずみ経時変化の比較

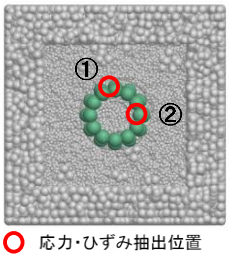
(c) 応力

オーバーコアリング前後での①、②の応力を抽出すると表 2.2-9 のとおりである。

表 2.2-9　オーバーコアリング前後の応力

単位：MPa

抽出時期	抽出位置	σx	σy	σz
オーバーコアリング開始前	①	-2.1	-0.6	-0.1
	②	-0.4	-1.2	0.1
オーバーコアリング終了時	①	-1.0	-0.3	0.0
	②	-0.2	-0.5	0.1



ボーリング孔に対する周方向応力 σ_θ は、①の位置では σ_x、②の位置では σ_y が相当する。これらのオーバーコアリング前後の値を比較すると図 2.2-33 のようになり、下記の傾向が認められる。

- 周方向応力 σ_θ は、最大主応力方向（X 方向）より最小主応力方向（Y=1.0MPa）が大きい。
- オーバーコアリングによる応力解放によって周方向応力 σ_θ は除荷側に推移する。

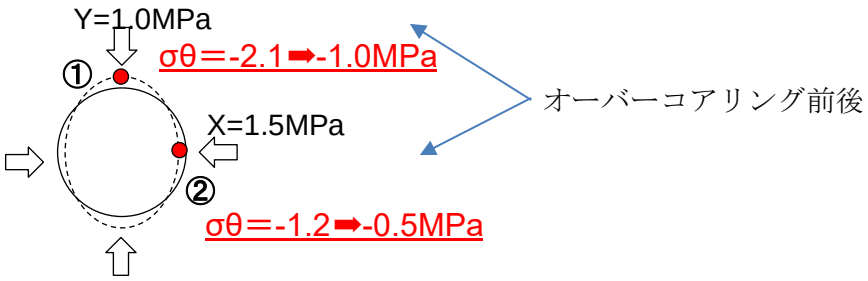
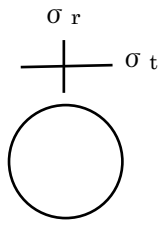


図 2.2-33　周方向応力 σ_θ（シミュレーション結果）

ここで、異方性地圧の理論解（Krish の解）を用いてボーリング孔周辺の応力を抽出し、表 2.2-9 の応力と比較することとした。

$$\sigma_r=\frac{p+q}{2}\left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)+\frac{p-q}{2}\left(1+3\frac{a^4}{r^4}-4\frac{a^2}{r^2}\right)\cos 2\theta$$

$$\sigma_t=\frac{p+q}{2}\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)-\frac{p-q}{2}\left(1+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta$$



σ_t：周方向応力
σ_r：半径方向応力

上式に基づいて、ボーリング孔周辺の応力を抽出すると、以下のようになる。

σ_θ（①）＝σ_x＝3.0 MPa
σ_θ（②）＝σ_y＝1.5MPa

理論解は、壁面での応力なのに対して、DEM 解析は要素中心の応力であるため、絶対値による比較はできないが、載荷圧力が大きい方（②）の応力が小さい傾向が一致する結果となった。

オーバーコアリングによる応力解放で圧縮応力が低下することは明らかであり、シミュレーションで抽出した応力に関しても、妥当な結果であると言える。

(3) まとめ

室内検証試験のシミュレーションの結果は、以下のとおりである。

- オーバーコアリングのシミュレーションの結果、今回の荷重条件においては、微視クラックの発生・進展はほとんどない。
- 微視クラック発生率に対応する応力レベルでみても、マクロ的に弾性挙動の範囲内であると想定される。
- 薄肉部岩盤の応力・ひずみを直接評価する方法を検討し、妥当性確認（オーバーコアリングの掘進に伴うひずみ挙動が、ブロック試験結果と傾向が類似）を行った。
- 今後計画されている原位置オーバーコアリング試験のシミュレーションを実施し、DEM 解析手法の適用性検討を行う。

2.2.4　水圧破砕試験と室内検証試験のシミュレーションの課題と対応策

水圧破砕法試験で、三軸圧縮試験との破壊プロセスや破壊後の挙動が異なることが、シミュレーションと実現象で挙動が異なる原因の可能性があると言及した。ここでは、水圧破砕法試験とオーバーコアリングでの、それぞれの試験のプロセスにおける岩盤挙動の特徴を整理して、今後の課題・対応策について考察した。

(1) 水圧破砕法試験の応力履歴

水圧破砕法試験の応力履歴の模式図を図 2.2-34 に、応力履歴をモール円で表示した模式図を図 2.2-35 に示す。

今回のシミュレーションは、ボーリング孔が掘削された状態を初期状態として行っているが、実現象での応力を正確に記すため、初期地圧状態～ボーリング掘削～水圧作用時の応力を表示した。

まず、ボーリング掘削によって周辺岩盤は、接線方向応力が初期地圧状態から増加する一方、一軸化によって法線方向応力は減少する。前者が最大主応力 σ_1、後者が最小主応力 σ_3 となる。

次に、水圧をボーリング孔壁面に内側から作用すると、壁面での岩盤のひずみは増加するため、接線方向応力は、圧縮側から引張側へと推移し、法線方向応力は圧縮側に増加する。すなわち、水圧破砕法による応力履歴は、最大主応力は減少、最小主応力は増加し、水圧の上昇に伴い、クラックが発生する段階では、主応力が逆転している。

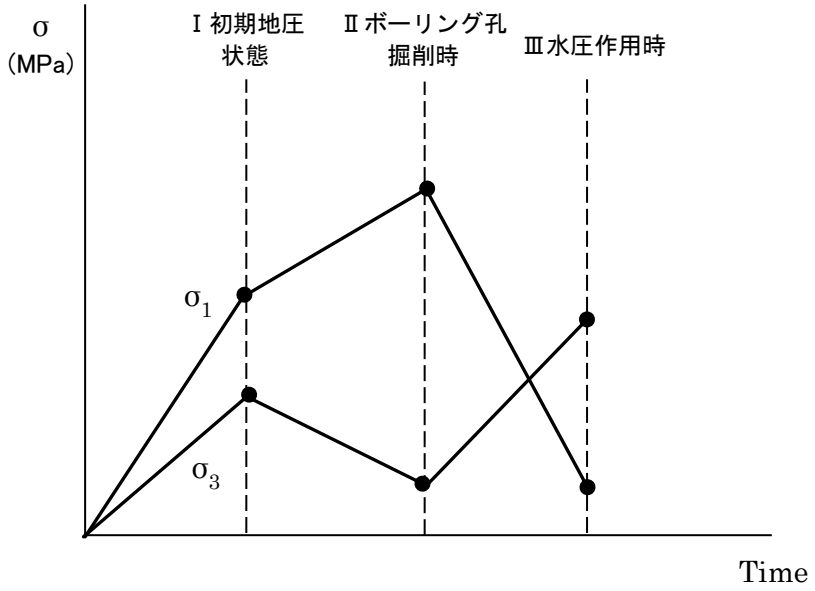


図 2.2-34　応力履歴模式図（水圧破砕法試験）

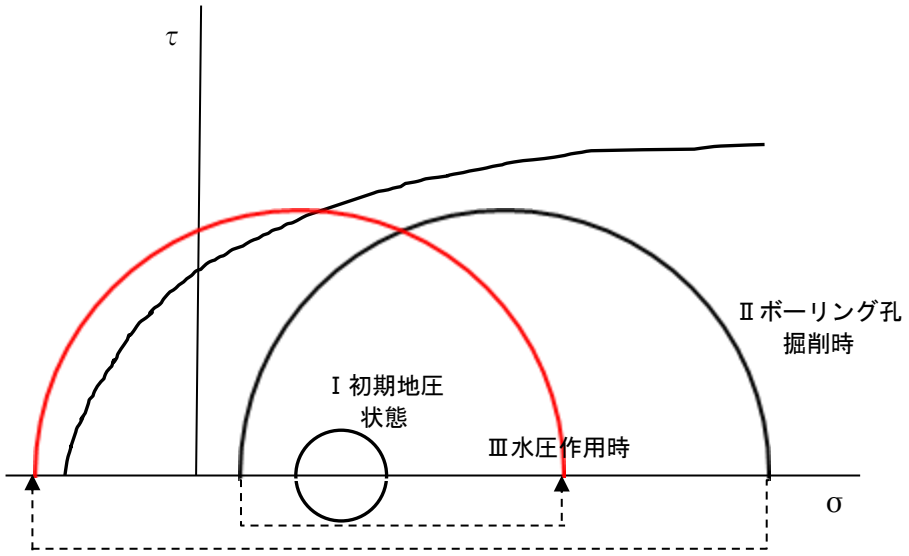


図 2.2-35　応力履歴模式図（モール円表示、水圧破砕法試験）

(2) オーバーコアリングの応力履歴

オーバーコアリングの応力履歴の模式図を図 2.2-36 に、応力履歴をモール円で表示した模式図を図 2.2-37 に示す。ボーリング掘削までは、水圧破砕法試験と同じ応力履歴を示す。

オーバーコアリングにおいては、ボーリング孔周辺の岩盤を、その外側の外側と切り離すため応力が解放される。そのため、最大主応力 σ_1、最小主応力 σ_3 ともに減少する挙動を示す。但し、水圧破砕法試験と違って、最大主応力 σ_1、最小主応力 σ_3 の大きさが逆転することはない。今回のオーバーコアリングのシミュレーション結果から抽出した応力の履歴を図 2.2-38 に示す。図に示すように、最大主応力 σ_1、最小主応力 σ_3 ともに減少しており、これは、図 2.2-36 におけるⅡからⅢにかけての応力履歴に相当する。

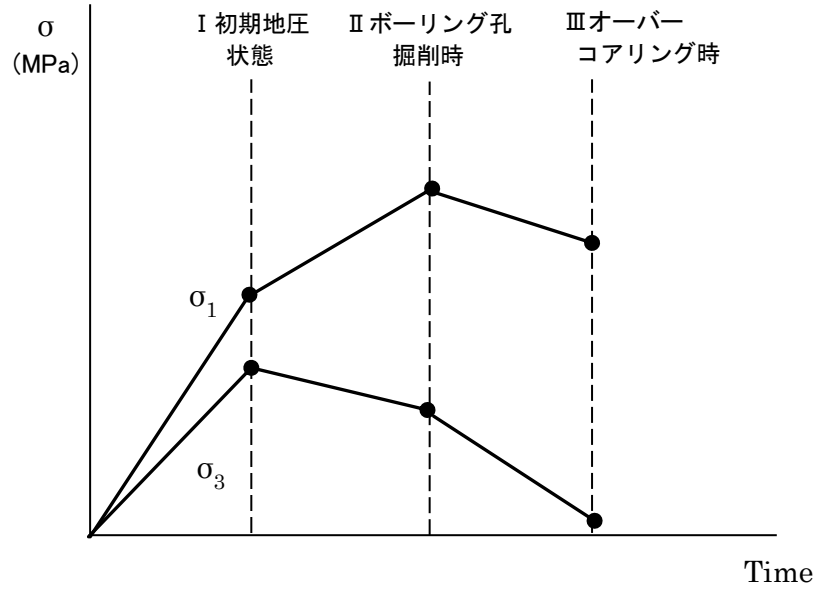


図 2.2-36　応力履歴模式図（オーバーコアリング）

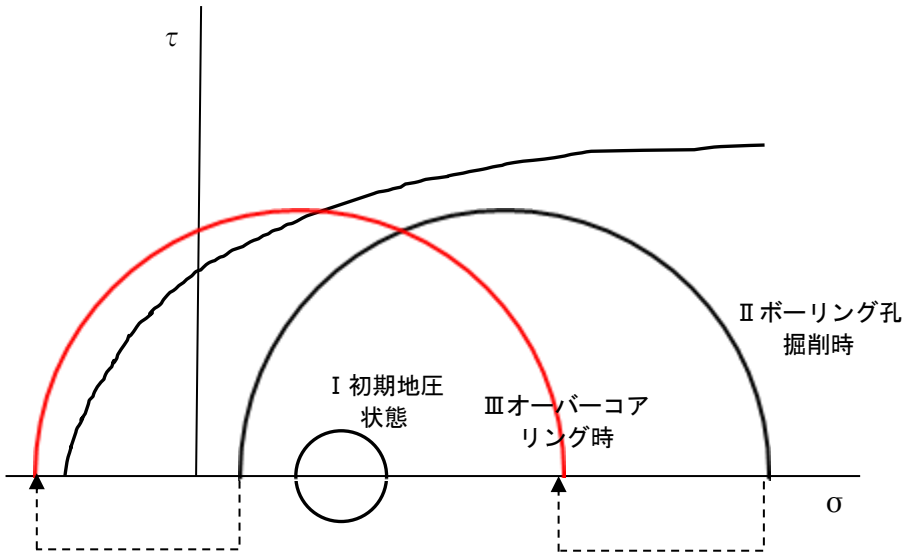


図 2.2-37　応力履歴模式図（モール円表示、オーバーコアリング）

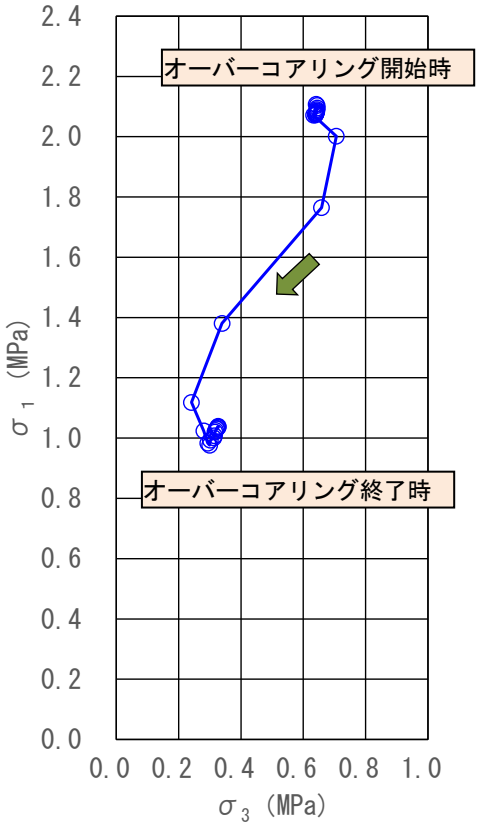


図 2.2-38　オーバーコアリングシミュレーションでの応力履歴

(3) 応力履歴を模擬した試験

冨田他[5]は、トンネル掘削時の剥落や低角度亀裂の現象を模擬するため、応力経路模擬試験（三軸圧縮試験）を実施している。その際の応力経路を図 2.2-39 に示す。本検討においても、このような応力経路を模擬した試験を実施して、DEM 解析によるシミュレーションにより、再現性を検討することが考えられる。

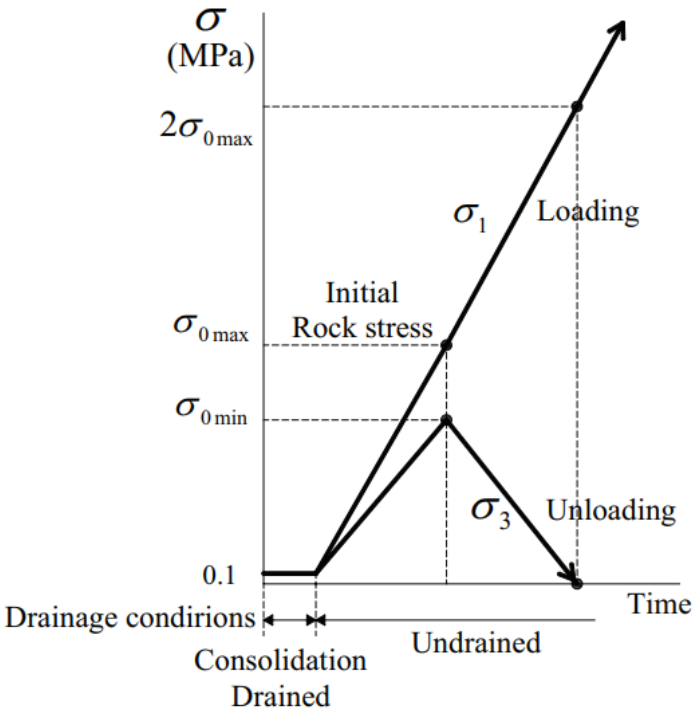


図 2.2-39　応力経路模擬試験（三軸圧縮試験）の応力経路（冨田他、2007）

1) 拘束圧依存性

今回のシミュレーションでは、拘束圧 1.1MPa の三軸圧縮試験結果に基づいてパラメータを設定した。しかし、拘束圧によっては、異なる破壊モードとなる可能性がある。

一般的に、拘束圧が先行履歴応力（過去の最大履歴応力）よりも大きいと、ひずみ硬化挙動（延性的な挙動）となり、小さいとひずみ軟化挙動となる。そのひずみ軟化挙動は、拘束圧が小さいほど脆性的になり、明瞭なせん断面を形成することになる。

足立他[6]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 2.2-40 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としている。

オーバーコアリングによって薄肉部の応力が解放されると拘束圧が低下し、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。

特殊な例としては、図 2.2-41 に示すように、拘束圧が小さい圧縮場においても、せん断破壊ではなく、割裂破壊を呈することもある。

以上を踏まえると、DEM 解析で拘束圧の違いによるピーク強度及び破壊後の挙動について検討する必要がある。

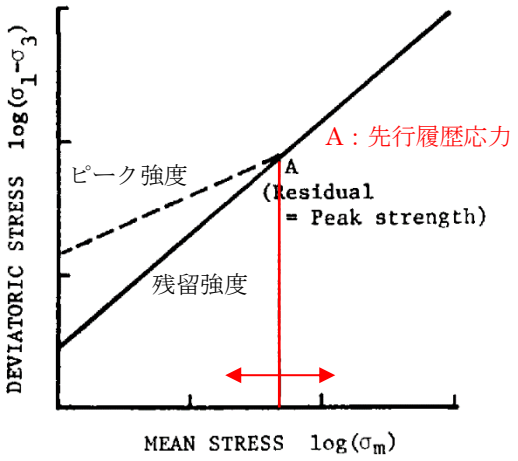


図 2.2-40　軟岩の破壊規準（[6]に加筆）

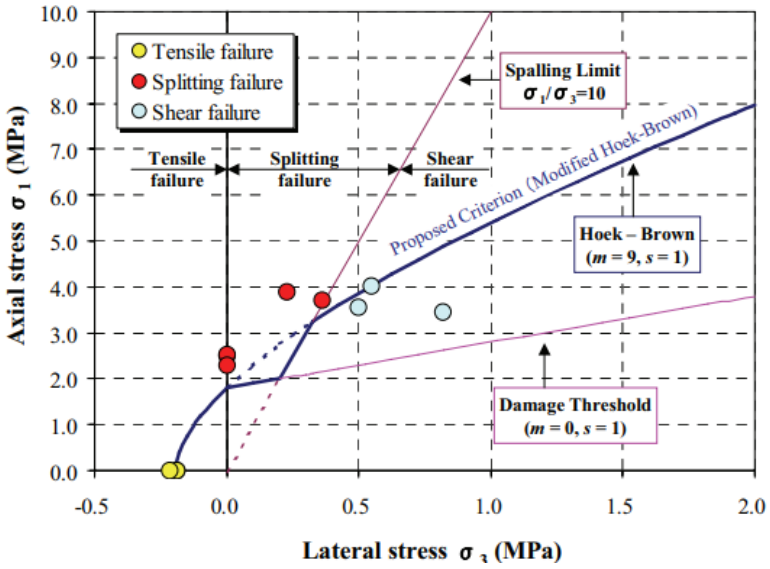


図 2.2-41　試験結果と破壊規準（冨田、2007）

2.2 節の参考文献

[1] 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
[2] 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
[3] Christoffersen, J., M. M. Mehrabadi and S. Nemat-Nasser. :“A micromechanical description of granular material behavior,” J. Appl. Mech., 48, 339-344, 1981
[4] 前田健一：DEM 計算結果の集合体としての見方個別要素法セミナー（2007/11/26）テキスト
[5] 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 C Vol.63 No4, 1054-1064,2007.2
[6] 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

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、国内外における放射性廃棄物処分に係る既往の関連技術に関して、特に中・低レベル放射性廃棄物分野を中心として調査を行い、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・整理等の調査・検討を行う。検討にあたっては、原子力規制委員会により整備されてきた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する。

3.1.2　調査の経緯と概要

(1) 令和 2 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

令和 2 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) 令和 4 年度

令和 2～3 年度に実施した調査検討結果を踏まえ、低レベル放射性廃棄物の中深度処分に関わる規制基準が近年改訂整備されたことを受けて、それらに対応するために必要な技術のうち、特に地下水流動評価技術（計測/測定及び解析技術）について、地下水流動評価に係る要求事項の再整理とそれらへの対応に必要な重要技術項目の抽出、現状での技術開発状況の調査・整理並びに今後の技術的課題の検討・整理を行った。具体的な項目は次のとおりである。

・長期の地質環境の変動・処分場環境の変遷に伴う地下水流動・地下水環境の変化に関わる調査・解析・評価手法や不確実性評価
・地下水等モニタリング・放射線監視モニタリングに関わる地下水環境の監視測定モニタリング技術

また、それらの調査結果をもとに、中深度処分の新規制基準における地下水流動評価に関連する要求事項への対応を処分事業の段階的展開も考慮して実施するために必要な、地下水流動・流況の調査・解析・評価や地下水環境の監視・測定モニタリングに必要な調査・測定・試験・解析、評価技術を体系的に整理するとともに、それらを“技術マップ”として概略的な取りまとめ作成を行った。

3.1.3 実施スケジュール

(1) 実施スケジュール

令和 2～4 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 2～4 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）		←→ ←- -→ ←- -→	
⑨ 中深度処分の新規制基準における地下水流動評価に係る要求事項の再整理とそれらへの対応に必要な重要技術項目の抽出、並びに現状での技術開発状況の調査・整理と今後の技術的課題の検討・整理 1) 長期の地質環境の変動・処分場環境の変遷に伴う地下水流動・地下水環境の変化に関わる調査・解析・評価手法や不確実性評価 2) 地下水等モニタリング・放射線監視モニタリングに関わる地下水環境の監視測定モニタリング技術			←→ ←- -→ ←- -→
⑩ 新規制基準における地下水流動評価に係る要求事項への対応を考慮した、地下水流動・流況の調査・解析・評価及び地下水環境の監視・測定モニタリングに必要な調査・測定・試験・解析、評価技術を体系的に整理し“技術マップ”の概略取りまとめ作成			←→

(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。

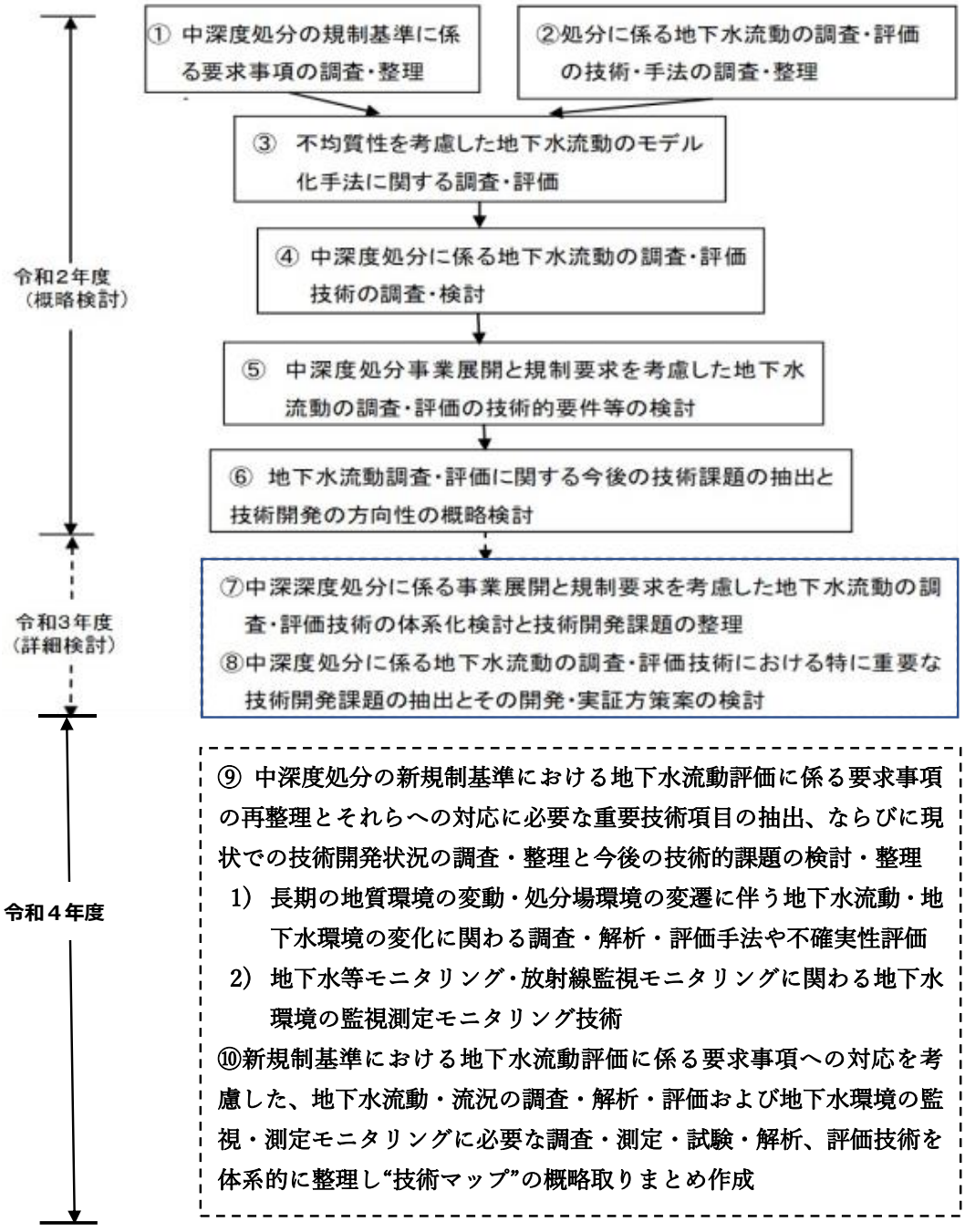


図 3.1-1　本調査研究の全体検討フロー

3.2 令和 4 年度の検討結果

3.2.1 中深度処分の新規制基準における地下水流動評価に係る要求事項の再整理とそれらへの対応に必要な重要技術項目の抽出及び今後の技術的課題の検討・整理

(1) 検討の骨子

本調査研究においては、中深度処分に関わる新規制基準（許可基準規則、事業規則、審査ガイド等）における規制要求への対応を考慮し、特に地下水流動評価技術（調査、計測・測定、解析）に関わる重要事項に関して、最近における関連技術の高度化進展を踏まえて、中深度処分のより安全かつ合理的な実施を期するための課題を抽出・整理することを目的にしている。令和 3 年度までに中深度処分に係る規制基準の改訂整備がほぼなされてきており、本調査研究においては主に事業規則[1]、許可基準規則[2]、またその後に制定された審査ガイド[3] [4]を中心として調査・参照した。さらに、新たに整備されてきたそれらの規制基準の内容に関して、原子力規制庁の NRA 技術ノート“中深度処分の規制基準の背景及び根拠”[5]において詳細な背景・根拠等の解説もなされており、これらを参考とした。以上の経緯を踏まえ、本年度においては、令和 3 年度までに検討整理してきた中深度処分における地下水流動評価に関連する規制基準上の要求事項に関して、補足的にポイントとなる事項を下記に再整理する。

(2) 中深度処分の新しい規制基準における事業段階等を考慮した地下水流動評価に関連する要求事項の要点整理

表 3.2-1 の右欄には事業段階の進展に応じた規制基準の考え方を考慮して[3] [4] [5]、特に地下水流動の調査・評価等で考慮する必要となると思われる主な事項を整理した。

1) 立地～事業許可申請段階

- 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；地下水の移行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。(将来的な隆起・侵食を考慮しても維持できること)
- 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）

2) 建設段階

- 坑道内の地下水湧出水、岩盤の安定性維持、EDZ 対策など、操業時の作業安全及び地下水・核種移動に対する十分な対処を施すこと。
- 先進ボーリング・掘削等の建設段階における調査・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埋設坑道・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。

3) 廃棄物埋設段階

- 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ものと考えられるが、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、それらの情報の整理・分析を合理的に実施すること。

・放射性物質の漏出防止等の安全機能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。

4) 坑道埋戻し・閉鎖段階

・計画どおりに埋め戻しがなされていること（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。

表 3.2-1　中深度処分の新規制基準における事業段階等を考慮した地下水流動評価に関連する要求事項の要点の再整理[1] [2] [3] [4] [5]

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（埋設処分サイト）	
立地段階～審査段階	**（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。	・左記に規定する地質地下水調査(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；地下水の移行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。（将来的な隆起・侵食を考慮しても維持できること） ・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、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埋設坑道エリアは、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・掘削等の建設段階における調査・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埋設坑道・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。
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で示すことを要求。	・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。
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。

【参考文献】
1）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、2016 年 8 月 31 日.
2）2021 年 9 月 29 日原子力規制委員会決定：「第二種廃棄物埋設の廃棄物埋設に関する審査ガイド」
3）原子力規制庁長官官房技術基盤グループ（前田・大村・青木・木嶋・田中）：「中深度処分の規制基準の背景及び根拠」、NRA 技術ノート、NTEN-2022-0001、2022 年 8 月
【注】
1）「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。
2）「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）

5) 閉鎖措置段階（保全）

・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・情報を取得、整理をすること。

・埋戻し後の坑道において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の確認。

6) 廃止措置段階

・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、廃止措置開始段階において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。

(3) 中深度処分事業段階と規制要求への対応を想定した主要個別課題検討例（監視測定設備）

上記で整理した新しい中深度処分に係る規制基準の考え方においては、監視測定設備を設置することによる地下水等モニタリングと放射線監視モニタリングを廃止措置の開始までの期間に測定・監視することが要求されている。

中深度処分の安全確保方策が十分に機能し、事業の廃止措置に至る長期間にわたり、当初の安全目標が十分に達成されていることを確認・監視していくことを要求している規制の考え方を改めて図 3.2-1 に再整理しておく [1] [2] [5] 。

【監視測定設備の要件】	【監視測定設備の要件のポイントと今後の対応が必要な事項】
◆ 監視測定設備の主要件： 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。さらに、次の要件を満たすこと。	⇒廃棄物埋設地からの漏えいする放射性物質の監視（濃度もしくは漏えいの徴候を示す物質を監視測定できる）
・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	⇒実施期間は廃棄物の受入れ開始～廃止措置の開始
・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。	⇒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
・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。	⇒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
・「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。	⇒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）
・「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。	⇒（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）
・「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。	⇒「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
・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。	⇒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えいの監視・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）

【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日より

図 3.2-1 監視測定設備に関する規制要求の考え方の要点整理

3.2.2　中深度処分の事業展開を考慮した地下水流動・地下水環境特性の調査・評価の重要項目の抽出

(1) 検討の骨子

低レベル放射性廃棄物の中深度処分に関わる新規制基準（許可基準規則、事業規則、審査ガイド等）における規制要求への対応を考慮し、特に地下水流動評価技術（調査、計測・測定、解析）に関わる重要事項に関して、最近における関連技術の高度化進展を踏まえて、中深度処分のより安全かつ合理的な実施を期するための課題を次のような観点から抽出・整理する。

1) 中深度処分の新規制基準における地下水流動評価に係る要求事項の再整理とそれらへの対応に必要な重要技術項目の抽出、並びに現状での技術開発状況の調査・整理と今後の技術的課題の検討・整理

① 長期の地質環境の変動・処分場環境の変遷に伴う地下水流動・地下水環境の変化に関わる調査・解析・評価手法や不確実性評価：中深度処分施設の長期の安全性確保を確保する上で重要な長期の地質環境の変動や処分場の建設～操業～閉鎖の事業段階の進展に伴う処分場環境の変遷等に伴う地下水シナリオ等の安全評価シナリオへの影響把握に係る地下水流動の調査・解析・評価手法やそれらの不確実性評価に関する重要な事項を抽出し、現状の調査・解析・評価手法の開発状況の調査・整理と今後の技術的課題を検討・整理する。

② 地下水等モニタリング・放射線監視モニタリングに関わる地下水環境の監視測定モニタリング技術：中深度処分事業の各実施段階における安全性確保に係る監視・測定するための監視測定設備による地下水等モニタリングや放射線モニタリングに関わる重要な要求事項の中で、特に地下水流動や地下水環境に関わる調査・測定を適切に行うために必要な調査・測定等の技術開発の現状を調査・整理すると共に、今後への技術開発課題を検討・整理する。

2) 新規制基準における地下水流動評価に係る要求事項への対応を考慮した、地下水流動・流況の調査・解析・評価及び地下水環境の監視・測定モニタリングに必要な調査・測定・試験・解析、評価技術を体系的に整理し“技術マップ”の概略取りまとめ作成

中深度処分に係る地下水流動評価に必要な現状技術と技術的課題の体系化整理（“技術マップ”の概要案の作成）：中深度処分の新規制基準に対応するために、上記のように地下水流動評価が重要となる事項として抽出したものに関して、適用が可能な現状の技術開発状況を調査した結果をもとに、それらの候補技術が処分事業のどの実施段階・適用場所で、どのような目的・目標で適用する特徴を有するか、さらには今後の技術的課題等についてなどを全体的に俯瞰し、体系的に集約・整理した“技術マップ（地下水流動評価を主対象）”としての概略取りまとめ作成を行う。

(2) 本調査検討の主旨

本調査検討の主旨としては、次のような位置づけ、目標、対象範囲及び反映先を想定して検討整理を行うこととした。

1) 調査の位置づけ： 本調査研究は、文献調査による地下水流動評価技術の調査・整理とそれに基づく課題の抽出である。将来的な技術課題として地下水関連のモニタリング技術の統合化システムの構築といったような課題についてもある程度触れる予定であるが、システム開発に関する検討までは本調査の対象としていない。

2) 調査取りまとめの特徴と目標： 中深度処分に係る新しい規制基準への対応を考慮した地下水流動評価技術について、最近の技術の進展と新規制基準への対応を考慮して現状技術と今後への技術課題を調査検討し、取りまとめ整理すること。

3) 技術マップの取りまとめイメージ： 本調査では地下水関連のモニタリング監視を含む地下水流動評価技術に関連する最新知見も考慮して現状技術と課題を整理するものであり、特に、中深度処分に関わる新しい規制基準における安全性確保に関わる規制要求にどのように対応していくかという“目的別”に調査取りまとめ整理を行ったというのが大きな特徴。また、長期の安全性評価に大きく関わる地質地下水環境の長期変動に関する調査・解析・評価の技術やそれらの不確実性評価手法に関しても調査・整理を行う（例えば、掘削影響や再冠水、隆起・沈降・侵食、広域～サイトスケール地下水流動などに関する解析・評価や長期の地下水流動評価技術なども含む)。

4) 主な反映先の想定： 本調査研究の取りまとめ成果の反映先としては、中深度処分事業の実施に向けての新規制基準への対応も考慮した必要な関連技術の開発・整備・適用に関する技術的検討と課題整理を行うことを主眼にしているところから、中深度処分等の放射性廃棄物処分事業に関わる実施主体、電気事業、大学・研究機関や民間企業における技術者・研究者、あるいは規制に関わっている専門家の方々を主な対象として検討・整理を行った。

(3) 長期の地質環境・処分場環境の変遷に伴う地下水流動・地下水環境の変化に係る調査・解析評価や不確実性評価

1) 長期の地質環境・処分場環境の変遷に伴う地下水流動評価に関わる重要項目の抽出にあたっての視点

中深度処分の新規制基準において、事業の進展に伴う長期の地質環境・処分場環境の変遷に伴う安全確保上で重要な要求事項の内、地下水の流動や地下水環境に関わるものの中で、特に規制基準の改訂により新たに規定されたもの、あるいは重要な視点がより明確化された項目で、最近の新しい技術的知見等の導入も視野に入れた技術の高度化が必要なものを以下のように抽出した。

なお、中深度処分のみならず低レベル放射性廃棄物のピット処分や高レベル廃棄物・TRU廃棄物の地層処分の分野などでも研究開発事例が近年出されているので、それらの知見を参考に、中深度処分における調査と課題の整理に対応できそうなものも考慮して、次のような

項目を抽出した。

① 隆起・侵食を考慮した地形・地質環境の変化に伴う長期の地下水流況の評価（接近シナリオに付随して）

② 坑道掘削～廃棄体の受入れ・埋設段階～坑道の閉鎖（埋戻し）段階～坑道の閉鎖終了から廃止措置の開始までの段階（保全段階）の事業の進展に伴う掘削影響等による地下水動態の変化（再冠水を含む）の状況の調査・解析・評価（バリア性能評価への影響）

③ 不確実性の評価（主に地下水流動・物質移行評価等の地下水移行シナリオに係る長期の安全評価に係る不確実性）

2) 監視測定モニタリングの合理的実施方策の概念検討（監視測定設備）[2] [5]

新しい規制基準においては、監視測定設備を設置して、放射性物質の漏えい監視等のために、下記のような監視測定モニタリングの実施を要求しており、その目的達成のための合理的な監視測定モニタリングの方策を確立するための概念構築等の調査検討を行う。

① 地下水等モニタリング：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の取得

② 放射線モニタリング：人工バリアの施工の不具合等による異常な漏えい又はその徴候を監視測定

(4) 本調査検討において抽出した重要項目と事業展開の中での位置づけの全体像イメージ

上記のような観点で抽出した重要項目と事業展開の中で想定される実施時期や目的・位置づけ等の全体像を図 3.2-2 のように整理した。なお、図中の（ ）内の番号は、第 3.5 節で後述する“技術マップ”の概略取りまとめにおいて、今後の新規制基準への対応を考慮した地下水流動の調査評価に関連する今後の技術の高度化整備が必要と思われる技術項目として抽出・整理しており、その中での分類した技術項目番号に対応している。

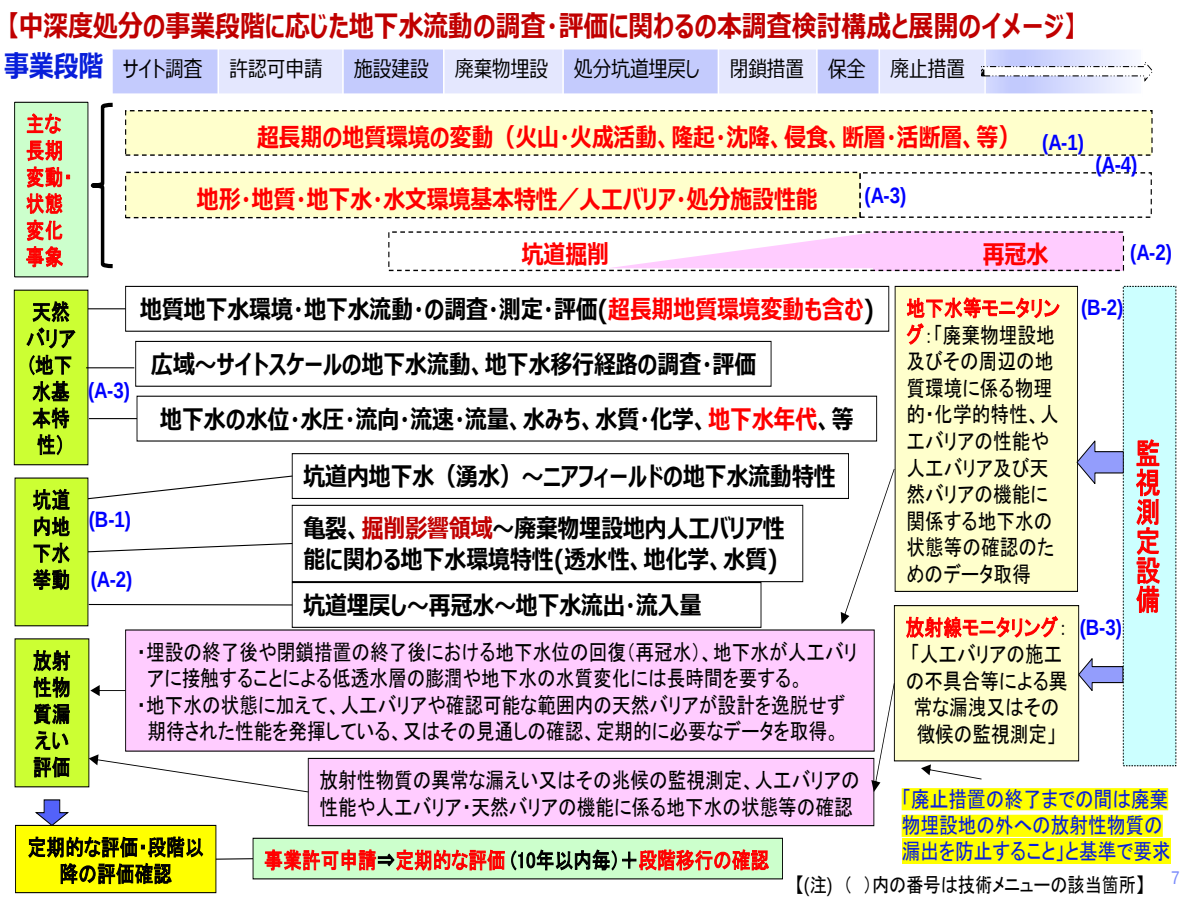


図 3.2-2　事業展開と規制要求を考慮した地下水流動評価に係る重要事項の抽出・展開イメージ

3.3　地下水流動評価に関わる重要項目に関する既往技術の調査検討と課題の整理

第 3.2.3 項で述べたように、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評価に関わる重要事項の具体的な技術項目として、次のような項目を抽出し、既往技術の現状と今後の課題等の整理を行った。

1)　地下施設レイアウトの設計に関わる地下水流動評価
　・地下施設設置可能領域の設定
　・処分坑道の方向の決定
2)　坑道の掘削影響～埋戻し・再冠水の地下水流動状況の変遷影響評価
3)　地下水年代測定を考慮した地下水流動評価の高度化・確証
4)　地質地下水環境長期変動と不確実性の評価
　・隆起・侵食等による地質環境の変化に伴う地下水流動の長期変動の評価
　・地質環境の長期変動・地下水流動の長期変動の評価と不確実性に関する統合的評価

以下に、上記の技術項目に関するそれぞれの現状技術の代表例と課題等の調査・検討結果を述べる。

3.3.1　地下施設レイアウトの設計に関わる地下水流動評価

3.3.1-1　地下施設設置可能領域の設定

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

地下施設のレイアウトの設計はサイト選定調査段階での調査結果に基づいて、事業許可申請段階における地下施設の区画設定等の安全設計に係る重要な要素の一つであり、また坑道掘削を伴う建設段階においては、詳細な地下坑道内における力学的・水理学的な調査・試験データやそれらに基づく解析・評価等に基づき、問題となる断層が走っている区域を回避する必要性の有無、力学や地下水流動等の水理学的な要件を満足しているかなどの安全設計の妥当性確認が重要となる。ここでは、地下水流動評価に関わる事項についての代表的な検討事例を次項に述べる。

(2) 代表的な参考事例の概要

図 3.3-1 は、原子力発電環境整備機構（NUMO）（以下、「NUMO」）による高レベル放射性廃棄物処分に関わる包括的技術報告書（2021）[6]において、“地下施設設置可能領域の設定に関わる地下水流動解析”による解析検討の考え方と検討事例の成果が示されており、その詳細内容が取りまとめられている付属書から要点を示したものである[7]。

本検討では、事業許可申請時の安全設計を行う上での地下水流動解析の検討の視点での考え方が示されているが、事業許可後に坑道掘削と地下施設の建設が進められた段階においては、さらに、その間に得られる地下での力学的、水理学的な調査データ・解析検討等により申請時の安全設計の妥当性確認が行われるものと想定され、高レベル廃棄物処分と同様に中深度処分においても重要な確認事項となるので、これらの方法論は参考になるものと考える。

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

上記の技術項目に関する規制基準における主な関係箇所は次のとおりである。

・許可基準規則の解釈_第 12 条第 9 項第一号イ、ロ及び第二号[2]

【地下施設レイアウト検討に係る解析方法】

■ 処分場スケールの領域内で地下水の流れが相対的に緩慢と考えられる領域に優先的に廃棄体が定置されるように処分坑道を配置する。

■ 上記の考え方に基づき，相対的に地下水移行時間（以下，相対地下水移行時間という）が長い領域に優先的に坑道を配置することとした。ここで，相対地下水移行時間は単位経路長あたりのダルシー流速に基づき算出した地下水移行時間（以下，ダルシー流速に基づく地下水移行時間という）に基づき設定した。

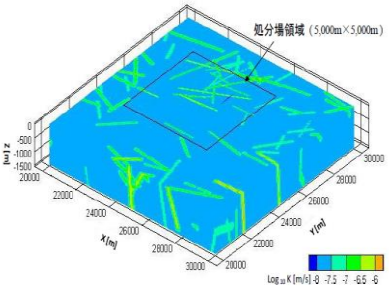


図 1 処分場スケールの地下水流動解析に用いた水理地質構造モデル（深成岩類）

表 1 水理地質構造モデルに適用した透水係数（深成岩類）

水理地質区分	透水係数[m/s]
母岩	2.7×10^{-8}
断層	断層面に平行方向：1.6×10^{-6} 断層面に直交方向：1.3×10^{-9}

深成岩類を対象にした処分場領域を包含する水理地質構造モデルを図 1 に示す。当該モデルは，母岩と断層を連続体モデルにより表現した。また，透水係数は付属書4-2 より表 1 のとおり設定した。

図 1 に示した処分場スケール領域に対して地下水流動解析を実施し，本付属書の2.で記述したとおり，ダルシー流速に基づく地下水移行時間に基づき，地下施設の設置に好ましい領域を選定した（図 2）。さらに，ダルシー流速と断層までのダルシー流速に基づく地下水移行時間の分布も求め，二つの指標と比較してもその領域が地下施設の設置に好ましいことを確認した。ここで，断層までのダルシー流速に基づく地下水移行時間を示す解析結果（図 2 右下図）において白色の領域は，断層と交差する要素のため，粒子を配置しなかった領域である。

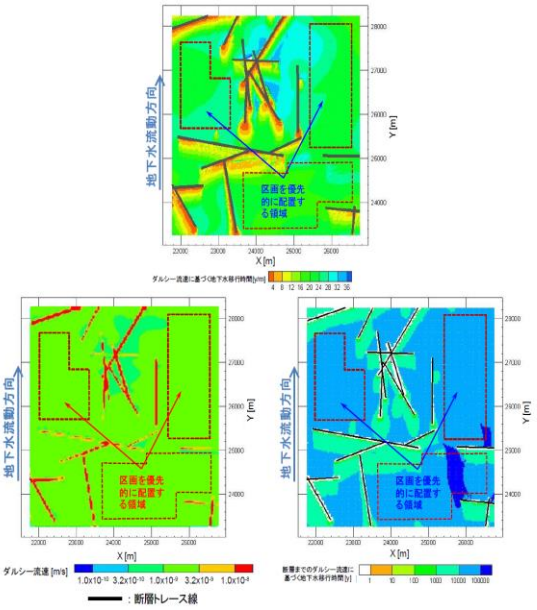


図 2 深成岩類を対象とした地下水流動解析の結果
（地下施設設置深度 1,000 m の水平断面を図示，上図：ダルシー流速に基づく地下水移行時間，左下図：ダルシー流速，右下図：断層までのダルシー流速に基づく地下水移行時間）

【出典 原子力発電環境整備機構(NUMO)：包括的技術報告書_付属書４-49
地下施設設置可能領域の設定に係る地下水流動解析、2021.2】

図 3.3-1 地下施設設置可能領域の設定に関わる地下水流動解析の検討事例(NUMO)［7］

3.3.1-2 処分坑道の方向の決定

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

地下施設のレイアウトの設計において地下水流動に関係する重要項目として、地下施設設置可能領域の設定に係る地下水流動解析に関する調査事例を前項で述べたが、処分坑道の方向の決定の方法についても地下施設設置可能領域の設定にも関連して重要となる。特に、処分坑道の方向については、安全評価等にも関連して、地下施設を通過する地下水流量の評価、すなわち廃棄物埋設地内への地下水通過流量の評価にも直接関係する要素となる。

したがって、処分坑道の方向の決定に係る地下水流動評価は、前項と同じく、サイト選定調査段階での調査結果に基づいて、事業許可申請段階における地下施設の安全設計と安全評価に係る重要な要素として、また坑道掘削を伴う建設段階においても、詳細な地下坑道内における水理学的な観点等での調査・解析に基づき、安全評価内容の妥当性確認で重要となる。

(2) 代表的な参考事例の概要

図 3.3-2 は、前項と同じく、NUMO による高レベル放射性廃棄物処分に関わる包括的技術報告書（2021）［6］における付属書 4-54、“処分坑道の方向の決定”による解析検討の考え方と検討事例の要点を示したものである［8］。

本検討では、処分区画の配置と処分坑道の方向の決定の考え方が整理されており、特に処分坑道の方向の決定においては、次の点を考慮することが重要としている。

・「処分坑道の空洞安定性確保」の観点：水平面内で応力が最大となる方向と処分坑道の軸方向を一致させる方が空洞安定性の確保が容易

・「処分坑道に沿った地下水流動の抑制」の観点：地下水流動方向と処分坑道の軸方向は直交することが好ましい。

また、それぞれの要件を満足する処分坑道の方向が一致しない場合，両者の影響を比較して，処分坑道の方向を総合的に判断する必要があるとしている。

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

前項と同じく、上記の技術項目に関する規制基準における主な関係箇所は次のとおりである。

・許可基準規則の解釈_第 12 条第 9 項第一号イ、ロ及び第二号[2]

【処分区画配置と処分坑道の方向の考え方】

■ 処分区画：処分場スケールの地質構造モデルに対して、断層が分布していない領域および地下水移行時間が相対的に長い領域を処分場設置可能領域として設定し，その領域に収まるように処分区画を配置

■ 処分坑道の方向の決定： 母岩の応力異方性の有無と地下水流動方向を考慮する

・「処分坑道の空洞安定性確保」の観点からは，水平面内で応力が最大となる方向と処分坑道の軸方向を一致させる方が空洞安定性の確保が容易

・「処分坑道に沿った地下水流動の抑制」の観点からは，地下水流動方向と処分坑道の軸方向は直交することが好ましい。

⇒それぞれの要件を満足する処分坑道の方向が一致しない場合，両者の影響を比較して，処分坑道の方向を総合的に判断する必要がある。

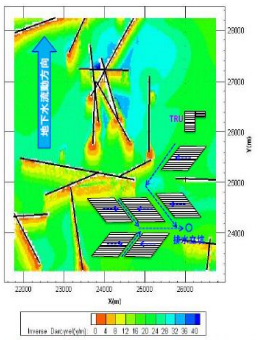


図 1 処分区画の配置（深成岩類；竪置き・ブロック方式）

深成岩類では，深度1,000 m程度において応力異方性が小さいと想定されるので，主要な地下水流動方向に対して，処分坑道が直交するように6つの処分区画を設置した(図 1)。地下施設の排水については，放射線管理区域を通過した湧水が他区画へ移動しない排水経路となるように区画勾配を設定し，立坑に集水できるように配置した。

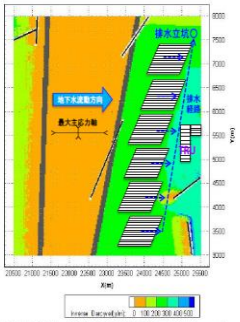


図 4 処分区画の配置（新第三紀堆積岩類；竪置き・ブロック方式）

新第三紀堆積岩類の坑道設計には，概ね等方地圧(側圧係数1.068)を適用した。また，新第三紀堆積岩類の地質構造モデルにおける処分区画の設置可能領域の設定では，背斜軸近傍に処分区画を配置。
このような場では側方地圧が鉛直地圧より大きい，すなわち側圧係数が大きくなる可能性があることから，地圧の異方性が処分坑道の空洞安定性に与える影響を検討した。

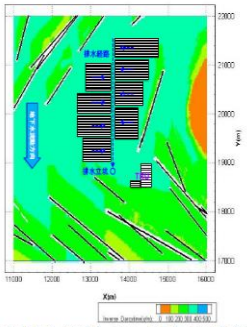


図 5 処分区画の配置（竪置き・ブロック方式，先新第三紀堆積岩類）

先新第三紀堆積岩類の処分区画の配置に際しては，工学的な観点より付加体構成岩盤が中硬岩以上の岩盤に区分されることから十分に高い強度を有すること，およびこの領域の応力異方性は小さいと考えられる。したがって，地下水流動方向(動水勾配)に対して有利となるようこの方向に対して，処分坑道が直角になるように8 区画を設置した。地下施設の排水については，他の岩種のモデルと同様に立坑に集水できる区画勾配を設定した。

【出典 原子力発電環境整備機構(NUMO)：包括的技術報告書_付属書４-54 処分坑道の方向決定、2021.2】

図 3.3-2 処分坑道の方向の決定に関わる地下水流動解析の検討事例(NUMO) [8]

3.3.2 坑道の掘削影響～埋戻し・再冠水による地下水流動状況の変遷影響評価

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

処分事業の展開においては、建設段階における坑道掘削に伴い地下水位が低下し、廃棄物埋設が始まってからの操業段階においては、地下坑道内への地下水の浸入を防ぐための湧水の汲み上げ等により地下施設周辺の地下水の低下状態が続き、廃棄物の埋設が終了以降は処分坑道～周辺坑道・アクセス坑道の埋め戻し・閉鎖の段階へと進むとともに、地下水の再冠水が進むことになる。この再冠水による地下施設周辺の地下水位の回復については、日本原子力研究開発機構（JAEA）（以下、「JAEA」）の瑞浪超深地層研究所における地下研究所閉鎖に伴う、観測データや予測解析等の研究事例[9]等における検討事例があり、地質環境条件や地下施設の規模・構造等の条件などにもよるが、地下水位の回復では 100 年オーダー以上にも及ぶ長期の変遷状態が続く可能性も推定され、また水質環境の変化の回復においては万年オーダーにも及ぶ可能性のある調査検討例もあるとされている。

したがって、中深度処分においても、地質環境条件や地下施設条件等を考慮して、地下施設の掘削～埋め戻し・閉鎖に伴う、地下施設近傍～周辺地域を含む地下水の流動・水理・水質の状況の変遷が地下施設内の地下水流動状況、人工バリア・処分施設の安全機能への影響を調査・観測・解析による確認・評価することが事業段階を通じて合理的に実施していくことが重要であり、そのための技術・方法論の高度化・整備していく必要があると考える。

(2) 代表的な参考事例の概要

図 3.3-3 は、JAEA における、瑞浪超深地層研究所の地下研究所閉鎖にともなう調査研究事例の報告書「岩盤の水理に関する調査研究　再冠水試験・坑道埋め戻しに伴う地下水環境の回復挙動の予測」(2019) [9]における研究成果の概要を整理したものである。この研究では、再冠水試験や坑道埋め戻しによって坑道周辺の地下水の水圧や水質変化等に与える影響を確認する予測解析を行うとともに、物質移動モデル化技術の開発、坑道埋め戻し技術の開発がなされるとともに、2015 年からの再冠水試験、2020 年 3 月末～2021 年 12 月中頃の研究坑道の埋戻し終了から約 10 年経過後の地下水環境の変化（地下水圧、地下水の流向・流速、塩化物イオン濃度分の変化）を予測した結果が 2019 年 8 月に報告されている。

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

上記の技術項目に関する規制基準における主な関係箇所は次のとおりである。

- 事業規則_第 22 条第５項 7（閉鎖措置計画の認可の基準）[1]
- NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠　3.6.3 （坑道の閉鎖措置）、令和 4 年 8 月[5]

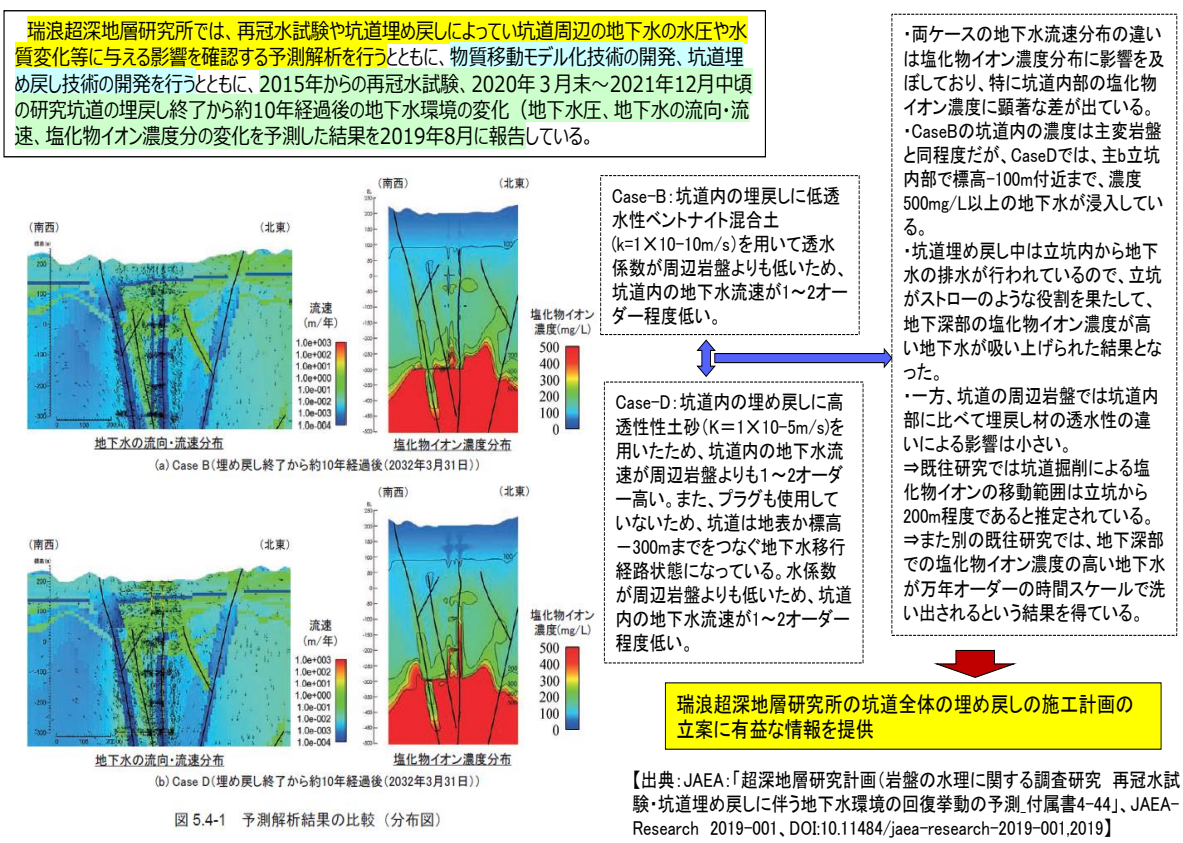


図 3.3-3 再冠水試験～坑道埋め戻しに伴う地下水環境の回復挙動の予測解析例（JAEA）[9]

3.3.3 地下水年代測定を考慮した地下水流動評価の高度化・確証

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

放射性廃棄物の地層処分や中深度処分においては、処分場の設置深度が前者では 300m以深、中深度処分では 70m 以深に処分され、安全評価で重要となる地下水挙動（地下水の流向・流速や流量、支配的な地下水移行経路など）についての調査・解析・評価を処分場・サイトにおける様々なスケールで、処分事業の各実施段階の目的に応じて高精度にかつ合理的に実施することが必要となる。特に、中深度処分では、深地層処分とは異なり、浅地中から中深度特有の、深地層に比べて複雑な地質・地形構造条件を受けた複雑な地下水動態を対象とする必要がある。このため、これまで主に地層処分研究としての研究開発が行われてきた地下水年代測定手法は評価対象年に応じた測定指標の適用性確認が進展してきているが、中深度処分へ適用するにあたっては、上述したような深地層に比べて複雑な地質・地形環境とそれに伴う地下水流動状況を精度よく調査・評価するための手法として適用・整備を図るための高度化・確証が今後重要と考える。

(2) 代表的な参考検討事例の概要

図 3.3-4 は、日本原子力研究開発機構（JAEA）と電力中央研究所（CRIEPI）の共同研究と

して実施された「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_岩盤中地下水流動評価技術高度化開発（令和元年度～令和 3 年度)、2020～2022.」[10]では、地下水年代を考慮した地下水流動・物質移行の解析による広域地下水流動評価の高度化の研究成果事例が報告されており、そこからの成果の要点の概要を整理した。

ここでの研究では、地下深部の低流動域を地上から調査する場合の評価例、地下水年代を考慮した地下水モデルの評価フローや地下水解析のフローが提案され、既往の開発されている地下水年代測定法の種類と適用可能な評価時間スケールも整理されている。また、地下水年代（4He, 14C、等）を考慮することにより、従来の水圧のみのモデル内パラメータの校正や逆解析での降雨涵養量などの推定に比べて誤差が小さく、より適切な評価が実施できる可能性が示されている。中深度処分では地層処分に比べて地表面付近の地下水動態が複雑でより詳細な調査・評価が必要となるので、その条件下での適用拡大の確証が期待される。

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

上記の技術項目に関する規制基準における主な関係箇所は次のとおりである。

・許可基準規則の解釈_第 12 条第 9 項第一号及び第二号[2]

・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠　3.4.2　(設計プロセス)、令和 4 年 8 月[5]

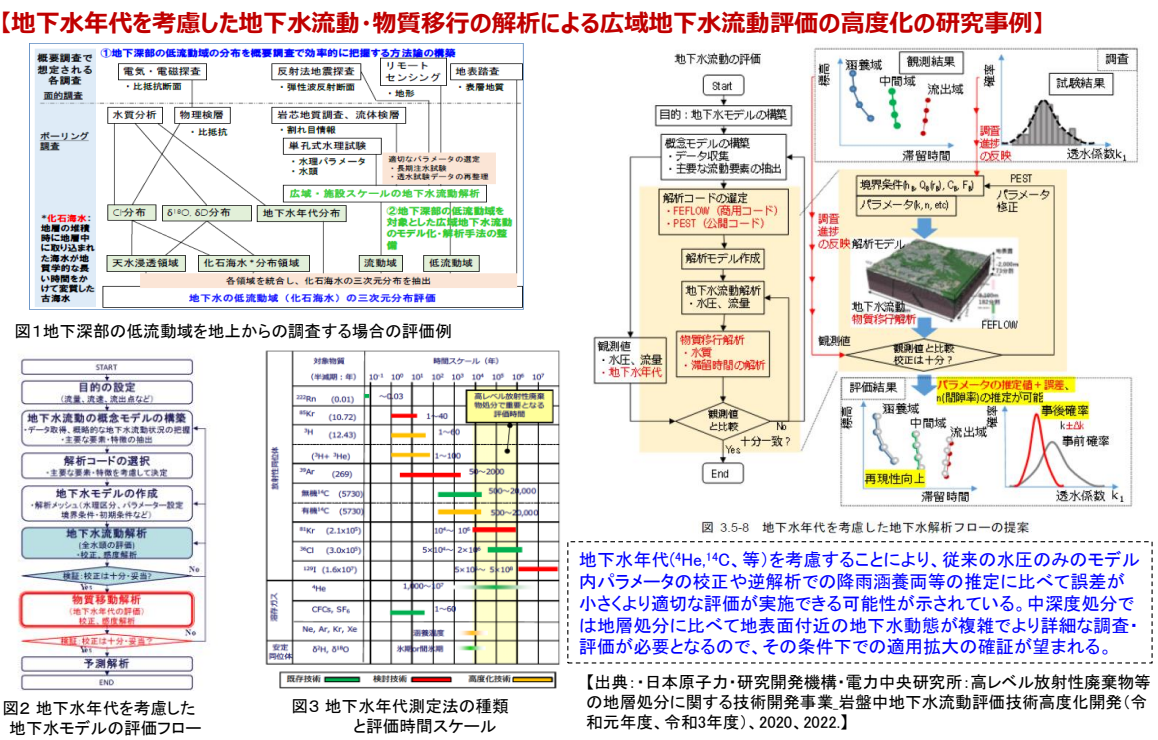


図1地下深部の低流動域を地上からの調査する場合の評価例

図2 地下水年代を考慮した地下水モデルの評価フロー

図3 地下水年代測定法の種類と評価時間スケール

図 3.5-8　地下水年代を考慮した地下水解析フローの提案

地下水年代(4He,14C、等)を考慮することにより、従来の水圧のみのモデル内パラメータの校正や逆解析での降雨涵養両等の推定に比べて誤差が小さくより適切な評価が実施できる可能性が示されている。中深度処分では地層処分に比べて地表面付近の地下水動態が複雑でより詳細な調査・評価が必要となるので、その条件下での適用拡大の確証が望まれる。

【出典：・日本原子力・研究開発機構・電力中央研究所：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_岩盤中地下水流動評価技術高度化開発（令和元年度、令和3年度）、2020、2022.】

図 3.3-4　地下水年代を考慮した地下水流動・物質移行の解析と広域地下水流動評価(JAEA／電中研）[10]

3.3.4　地質地下水環境長期変動と不確実性の評価

3.3.4-1　隆起・侵食等による地質環境の変化に伴う地下水流動の長期変動の評価

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

中深度処分の許可基準規則第 12 条第 1 項第二号においては[2]、「侵食により地表からの深さが 70 メートル未満に減少するおそれがないものであること。」との規定がなされ、またその解釈第 2 項においては[2][3]「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。」と規定し、さらに審査ガイドにおいては[3]、“侵食による深度の減少に係る調査・評価方法”及び“廃棄物埋設地の頂部から地表面までの距離の測定方法”に関わる確認方法についてガイドラインとなる考え方を示している。また、NRA 技術ノートにおいては[5]、それらの考え方の背景となっている既往知見を詳細に解説している。

隆起・侵食等による地質環境の変化に伴う地下水流動の長期変動に関しては、処分施設の閉鎖後における長期安全評価に関して考慮する必要のある地質地下水環境の長期変動に関わる自然事象として重要な項目の一つであり、サイト選定調査段階における調査・解析・評価結果をもとに、事業許可申請段階における処分施設の長期の安全性評価での重要な評価対象の一つとされ、その後の建設～操業～閉鎖措置～廃止措置に至るまで、段階を経るごとに各段階での新しいデータ・情報や知見をもとに、廃止措置以降の 10 万年オーダーの将来を見据えた安全確保の予測・評価の前提条件が満足されていることを確認していくことが必要となる。

このような長期にわたる事象に関しての調査・観測・解析と評価の方法論については高レベル廃棄物処分技術に係る研究開発としても精力的な研究がなされてきており、中深度処分にも共通的に適用が期待されるところから、以下では、それらの代表的な知見を調査・整理する。

(2) 代表的な参考検討事例の概要

隆起・侵食を考慮した地形・地質環境の変化に伴う地下水流況の評価に関する検討事例

高レベル放射性廃棄物処分に係る包括的技術報告書（NUMO）[12]における隆起・侵食に関する調査・評価の検討事例の概要を以下に整理する。

1) 隆起・侵食の影響に係る調査・評価の基本的考え方

① NUMO においては、高レベル放射性廃棄物処分施設の安全確保において、地質環境に期待される安全機能に対して、隆起・侵食が及ぼす影響として、次のようなシナリオ等を想定

・岩盤の厚さの減少に伴う人間の生活環境への廃棄体の接近（接近シナリオ）

・地形や海陸分布の変化に伴う地下水流動経路（地下水移行シナリオ）

・地下水水質の変化、等

② 隆起・沈降運動は、火山・火成活動、地震・断層活動やプレート運動などとも深く関連し、氷床の消長や海水準変動に伴う平衡的な変動によっても生じる。

③ 侵食作用は、隆起・沈降運動及び海水準変動に伴い生じる。したがって 、隆起・沈降量及び 侵食量の分布は、気候・海水準変動やそのほかの自然現象に係る情報と合わせて評価する必要がある 。

2) 隆起・沈降及び侵食量の評価の方法

① 隆起・沈降量については、約 20 km 四方の領域ごとの最近約 10 万年間 の隆起速度を示した全国規模のマップが整備されている（日本地質学会、 2011 ） [13] 。

② 地域ごとの隆起・沈降量の調査・評価手法には地層処分の安全性の評価の時間スケールに対応した調査・評価は、地形学的手法及び地質学的手法が主体となり、必要に応じて測地学的手法を用いる。

③ 一方、将来の侵食量の推定については、現河口・海岸線付近の次の一回の氷期－間氷期サイクルにおける下刻量が、少なくとも隆起地域において想定される隆起量に 100m を加えた値を上回らないと推定されている（幡谷ほか、2016 ）[14]。

④ また、将来の水理場への影響については、氷期－間氷期サイクルにおける最大海面低下量（約 150m）と、地殻変動に伴う海面変化量との合計値を考慮すべきとの考えが示されている（産総研、2007 ） [15] 。それらの知見を参考に、サイトの地形発達状況、特に侵食により形成された地形の分布やその規模など､地質分布状況などについて調査し、侵食量を評価する。

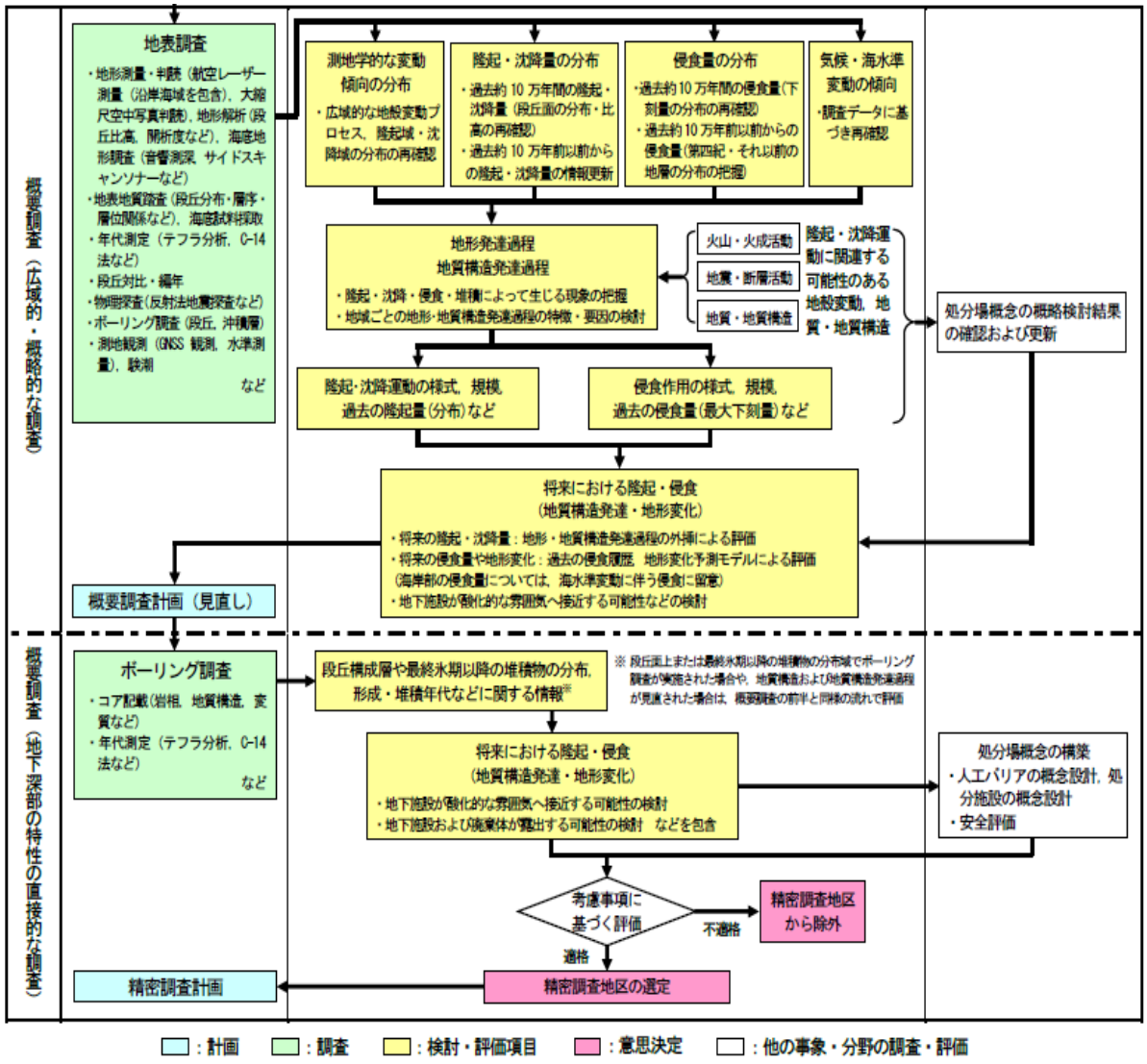


図 3.3-5　隆起・侵食に係る調査・評価フローの検討例（NUMO）[12]

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

上述の隆起・侵食に係る技術項目に関する規制基準における主な関係箇所は次のとおりである。

・許可基準規則第 12 条第 1 項第 1 号と第 2 号、同条第 2 項、及び解釈第 2 項 [2]

・審査ガイド 2.2.1.(廃棄物埋設地と公衆の接近を仮定したシナリオによる評価の実施) [3]

・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠　3.2.3 （侵食を考慮した深度の確保)、令和 4 年 8 月 [5]

3.3.4-2　地質環境の長期変動・地下水流動の長期変動の評価と不確実性に関する統合的評価

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

上記のような隆起・沈降及び侵食を含む、地質環境の長期変動とそれに伴う地下水流動の長期変動は、広域でかつ 10 万年オーダーを超えるような超長期にわたる自然現象を対象とすることになるため、調査・解析・評価においては、どうしても多くの不確実性が伴うこととなる。

そこで、高レベル廃棄物の地層処分においては、文献調査から始まって、概要調査地区選定～精密調査地区選定～最終処分施設建設地選定という三段階のサイト選定調査の過程を経て選定され、事業許可申請を経て、建設、操業、閉鎖へと段階的な事業の展開が進められることとなる。

このような段階的なプロセスを経る毎に、調査や解析によるデータ蓄積と新しい知見を踏まえた評価が繰り返し実施していくアプローチの採用により、不確実性の低減も図られ、妥当性の確認の信頼性向上を図ることが期待されるのがこの繰り返しアプローチの特徴である。

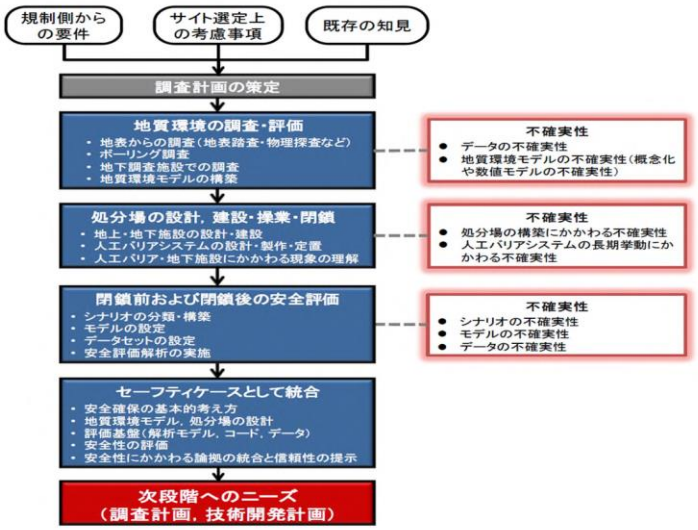
中深度処分の場合においても、サイト選定の後のサイト調査以降の事業展開は地層処分と同じく事業展開の段階ごとに、埋設開始後から 10 年以内毎には、モニタリング等により新たな蓄積されたデータや解析評価等による定期的な評価を継続実施していくことになっており、これらの考え方を踏まえて、不確実性の低減を図りつつ、処分の安全確保が安全評価の前提の範囲内で十分に安全に達成され推移していることをほぼ同様なプロセスで展開していくことが期待されるところから、上述のような地層処分での不確実性の評価に関わる代表的な研究事例を参考として以下に整理する。

(2) 代表的な参考検討事例の概要

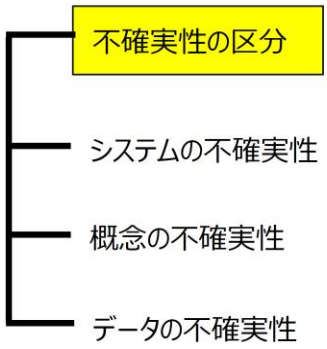
1) サイト選定調査段階における不確実性評価のフロー（NUMO の包括的技術報告書）[16]

図 3.3-6a は原環機構の包括的技術報告書で示されているサイト選定段階における不確実性の検討フローとその中の地形・地質モデル、地下水流動状態の長期変動性評価に内在する不確実性の種類についての考え方を示したものである。

また、図 3.3-は中深度処分の事業展開への反映を考慮して、地下水流動の調査・評価に関わる不確実性に関連する技術内容が検討・記載されている包括的技術報告書・同付属書で参照の対象となり得る検討項目が抽出・整理されている。



(a)概要調査・精密調査における不確実性の検討フロー（MUMO）



(b) 地形・地質モデル、地下水流動状態の長期変動性評価に内在する不確実性の種類

図 3.3-6a　サイト選定調査段階における不確実性の検討のフローと種類の考え方（NUMO）[16]

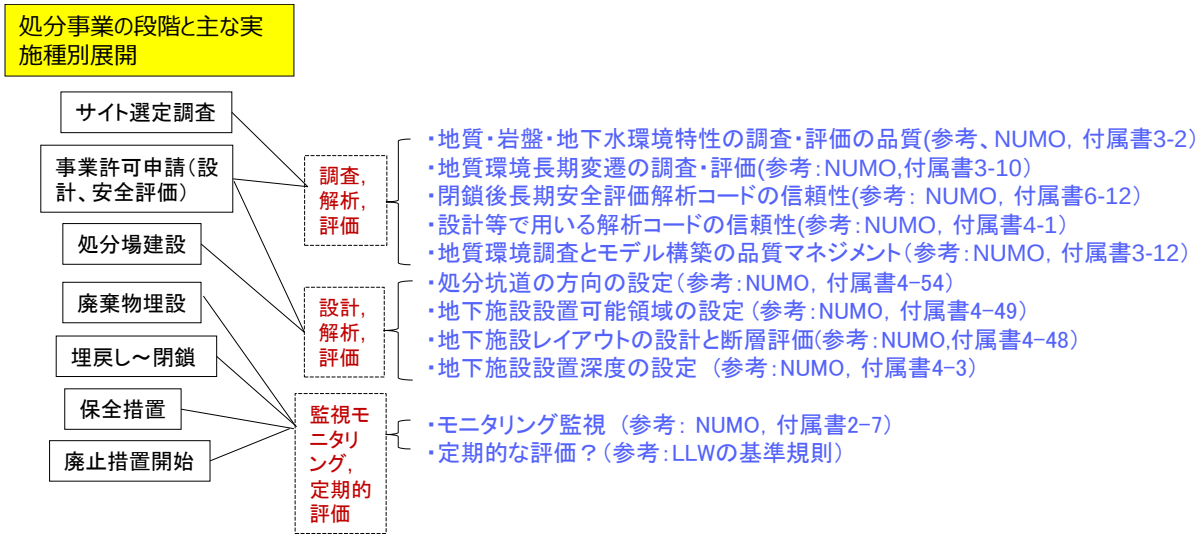


図 3.3-6b　事業展開に伴う不確実性に関わる検討項目の抽出例（NUMO 包括的技術報告書、LLW 規制基準を参考）[1] [2] [3] [16]

2) 地形・地質モデルと地下水流動状態の長期変動性評価の作業フローと不確実性

一方、原子力における不確実性に関わる研究においては、表 3.3-1 に示すように地形・地質モデル構築において検討対象となる不確実性に関して具体的な作業の分類とそれぞれの実施において発生する可能性のある不確実性の種類と内容、また発生の要因等についての検討整理がなされている。また、地下水流動状態の長期変動性評価の作業フローとそこに内在する不確実性についての考え方の例が図 3.3-7 及び表 3.3-2 のように示されている。

表 3.3-1　地形・地質モデルにおける不確実性の整理（JAEA、2017）[17]

作業項目	作業内容	不確実性	不確実性の発生要因	不確実性区分
①情報の収集・整理	既存文献や調査結果に基づいて、地形（陸上，海底）及び地質の分布・形状、海岸線位置の変動範囲（沿岸地域の場合）及びそれらの変化（地史）に関わる情報や着目すべき地形・地質要素を把握するための地下水流動解析結果などの情報を収集・整理する。	地形・地質の分布・形状とその変化に関する情報の精度や解釈の違い	情報の欠如による理解不足や手法の違い（地形学的、地質学的、地球物理学的など）により異なる結果や解釈が得られる可能性がある。	データの不確実性
②FEP解析に基づく考慮すべき事象の抽出	収集・整理した情報に基づいて対象地域におけるFEP解析を実施し、百万年程度の期間で考慮すべき事象を抽出する。	抽出したFEPの適切性	収集した情報の不確実性や情報の欠如による理解不足により、関連するすべての事象が抽出できない（または、除外されたFEPが適切でない）可能性がある。	システムの不確実性／概念の不確実性
③編年表／シナリオの作成	百万年程度の期間を対象に抽出した事象を時系列で整理（気候・地形・地質・テクトニクスなどを時系列で並べた編年表を作成）するとともに、分野間で整合の取れた長期変遷シナリオを作成する。	地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解	編年表に整理する各事象の発生時期や事象間の関連性（シナリオ）には、収集した情報の不確実性や情報の欠如による理解不足による影響が含まれており、複数のシナリオが想定できる可能性がある。	
④モデル化領域の設定	概括的な地形・地質分布に基づいて、評価対象となる領域を通過する地下水流動系を包含しつつ、地下水の分水界となる尾根や河川などを境界とした領域を設定する。	モデル化領域設定の違い	百万年程度の期間では、海水準変動や地殻変動に伴う地形・地質分布の変化によって、地下水の分水界となる尾根や河川などが変化し、評価対象領域を通過する地下水流動系に影響を及ぼす可能性がある。	概念の不確実性
⑤概念モデルの構築	抽出した事象とシナリオに基づいて、考慮すべき事象とその変遷に関して概念的に記述したモデルを作成する。	地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解	各事象に対して収集した情報や編年表・シナリオの不確実性（例えば、事象の時空間分布の解釈の違いなど）により、複数の概念モデルが構築できる可能性がある。	概念の不確実性
⑥数値モデルの構築	概念モデルで表示した各事象に関して、収集した情報に基づき、百万年程度の期間の数値モデルを作成する。	数値モデルの構築方法	数値的なばらつきや異なる解釈がある情報の取り扱い方や単純化の方法、地形・地質の分布・形状の復元プロセスの違いなどによって、複数の数値モデルが構築できる可能性がある。	概念の不確実性／データの不確実性

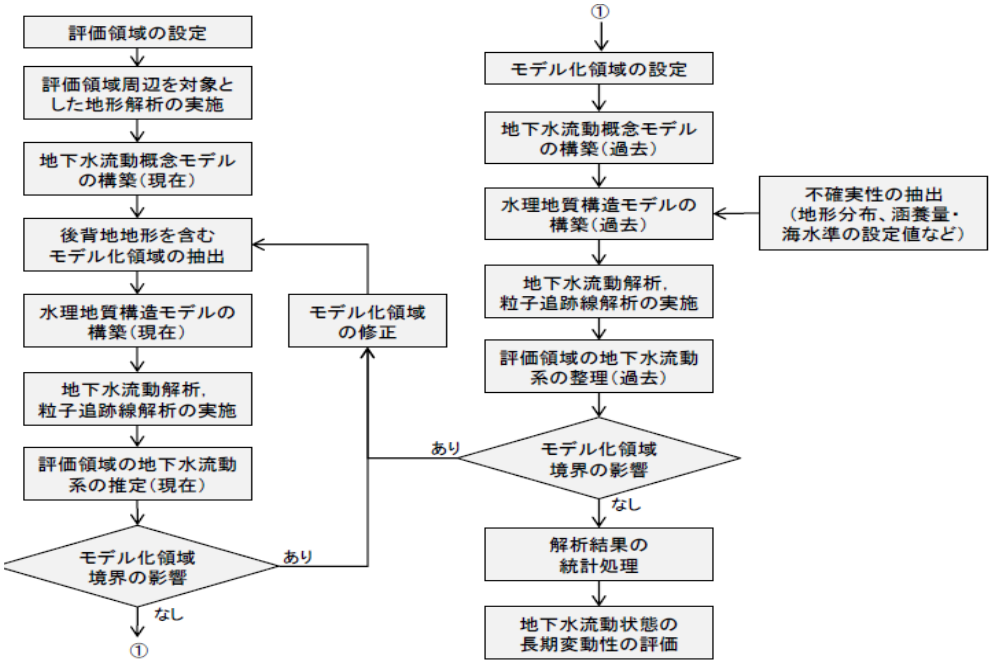


図 3.3-7　地下水流動状態の長期変動性評価（JAEA）[17]

表 3.3-1　地下水流動状態の長期変動性評価に内在する不確実性（JAEA,2017）[17]

不確実性の区分	作業プロセス			
	データ	データの解釈	概念モデル	数値モデル
システムの不確実性			○抽出したFEPの適切性	
概念の不確実性			○地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解 ○モデル化領域設定の違い	○数値モデルの構築方法 ○モデル化手法の違い ○離散化手法の違い
データの不確実性	○地形・地質の分布・形状とその変化に関する情報の精度の違い ○水理特性の設定値やばらつき ○境界条件の設定値やばらつき	○地形・地質の分布・形状とその変化に関する情報の解釈の違い ○水理地質構造区分設定の違い ○境界条件の設定値やばらつき		○数値モデルの構築方法 ○モデル化手法の違い

■:全モデル共通, ■:地形・地質モデル, ■:地表環境モデル, ■:水理モデル

これらの検討では、水理モデルを構築するために必要なデータの種類やモデル化及び解析に至る一連の考え方、地質環境の各モデルで得られた情報との関連性や統合の流れが明示されたが、図 3.3-7 の地下水流動状態の長期変動性評価の作業フローでは、統合化データフローの概念モデルからアウトプットに至る各作業とそれらの流れ、抽出した不確実性の反映方法が整理され（日本原子力研究開発機構, 2018）[17]、表 3.3-2 においては、地下水流動状態の長期変動性評価に内在する不確実性を抽出し、地質環境の各モデルにおける作業プロセスごとに整理されている。

これらの評価手法は東濃地域（山間部）と幌延地域（平野部）に適用することで不確実性を考慮した地下水流動状態の長期変動性の評価が可能であり、それぞれの不確実性が及ぼす影響の程度や違いの定量的な分析、重要な不確実性の抽出が可能であることを具体例として提示している（日本原子力研究開発機構, 2018）［17］。

3) 地形・地質モデルの不確実性を考慮した地下水流動状態の長期変動性評価の統合化フロー（JAEA）

図 3.3-8a は、地形・地質モデルと地下水流動状態の長期変動特性評価を統合的に考慮して安全評価を総合的に行うためにデータを統合的に取り扱う作業の全体的なフローが示されている。

また、図 3.3-8b においては、地形・地質関連で考慮するデータ群～地形変化シミュレーションにおけるデータの解釈・解析に基づく～地形・地質モデルとパラメータ・シナリオ設定～地形・地質の長期的変遷を示す概念モデルを構築し、それに基づいて数値モデルの設定内容の妥当性を設定する統合的データフローの具体的な考え方が示されている。

さらに、図 3.3-8c においては、上記の地形・地質モデルと地下水流動評価の変動性評価における不確実性を考慮したシナリオ、モデルの開発と評価データ・パラメータの設定等を行った上、さらに不確実評価の感度解析等を行うことにより、セーフティーケースの信頼性向上に反映させること等が期待される。

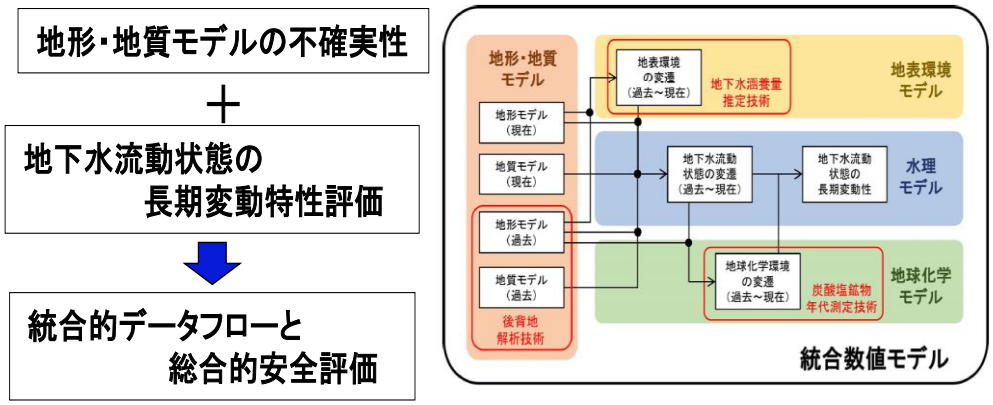


図 3.3-8a　地下水流動状態の長期変動性評価に関する統合化データフロー（JAEA、2018）[17]

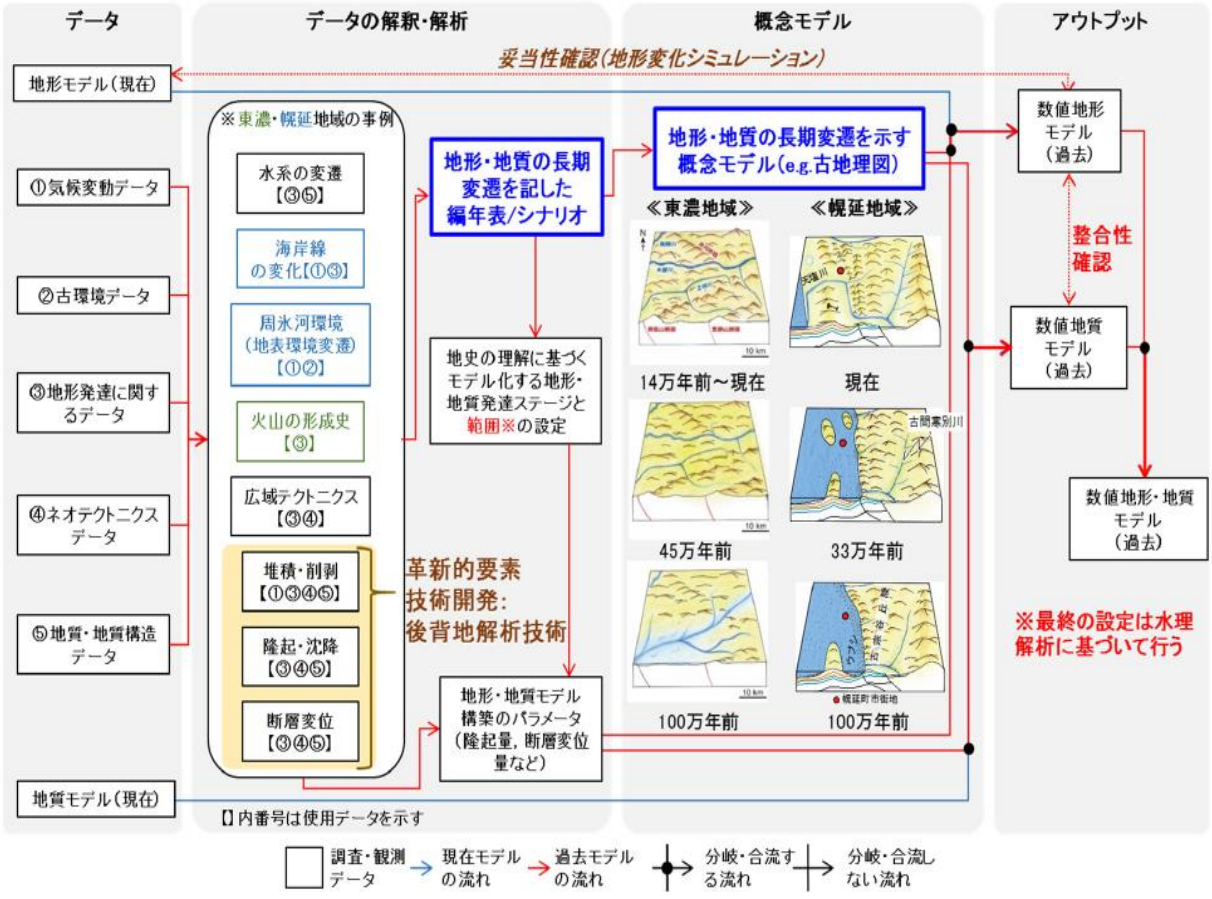


図 3.3-8b　地下水流動状態の長期変動性評価に関する統合化データフロー（地形・地質モデル）（JAEA、2018）[17]

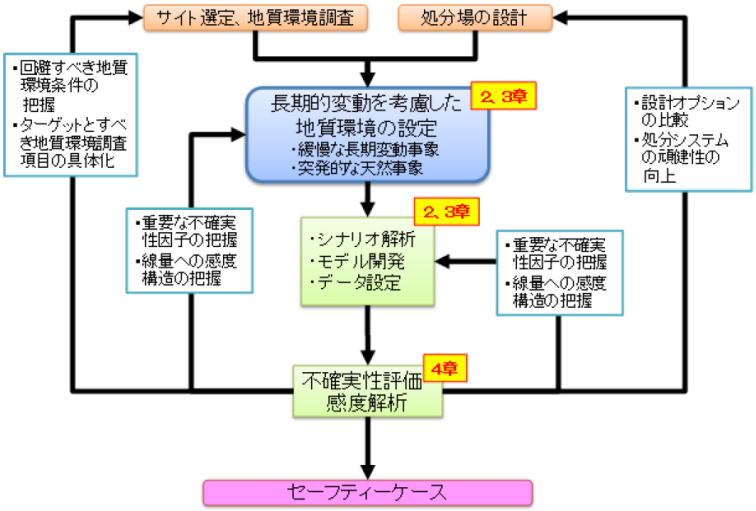


図 3.3-8c　不確実性評価技術を用いた総合的安全評価の流れ
（若杉、2019）[18] [19]

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

上述の隆起・侵食に係る技術項目に関する規制基準における主な関係箇所は次のとおりである。

- 許可基準規則第 12 条第 2 項及び解釈第 9 項第 1 号（人工バリア・天然バリアの状態に係るパラメータの不確実性について）[2]
- NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景及び根拠、3.4.2 設計プロセス、令和 4 年 8 月[5]

3.3.5　地形・地質及び地下水流動の長期的状態変化等による不確実性を考慮した長期安全性の信頼性確保の考え方の整理

図 3.3-9 においては、上述したような中深度処分事業段階的展開に伴う地形・地質と地下水流動の状態変動状況をモニタリング監視等による調査・測定及び解析評価やそれらのデータ・解析評価結果などに基づく定期的な評価等による妥当性確認を廃止措置に至るまで計画的に実施していくことにより、超長期にわたる処分の安全確保が十分に達成されていることをより信頼性をもって確認する考え方として整理しておく。

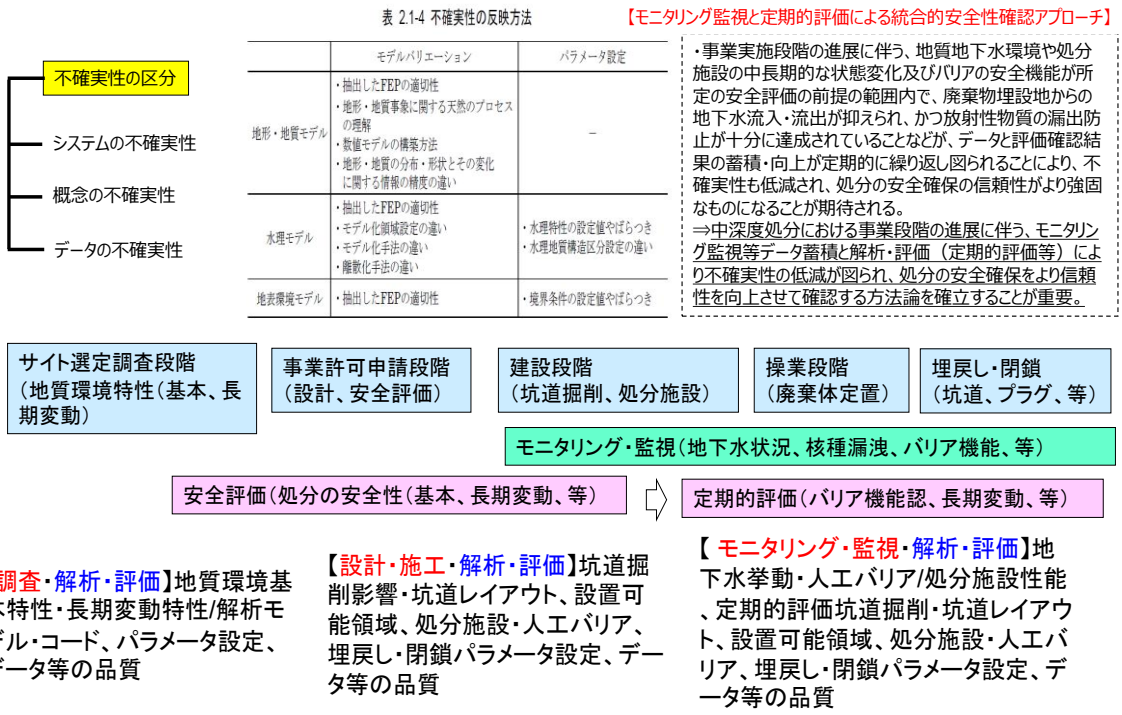


図 3.3-9　事業展開と不確実性評価を考慮した長期的な安全確保の確認方法の考え方

3.4　規制基準への対応を考慮した監視測定設備と監視測定モニタリングに関する調査検討

3.4.1　監視測定設備に関わる規制要求と課題の整理

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

・中深度処分の許可基準規則の第 12 条第 1 項第 4 号においては[2]、「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。」と規定されている。また、その【解釈】第 5 号では「「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。」と規定されている。

・許可基準規則第 15 条第 1 項においては[2]、「次に掲げる事項を監視し、及び測定し、並びに必要な情報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・・・。第 1 号「中深度処分を行う場合にあっては廃棄物埋設地から漏洩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・・・・の濃度又は線量」と規定され、同項第 3 号では｛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｝との規定がある。

一方、その【解釈】第 1 項第 1 号では「中深度処分に係る廃棄物埋設施設は、埋設する放

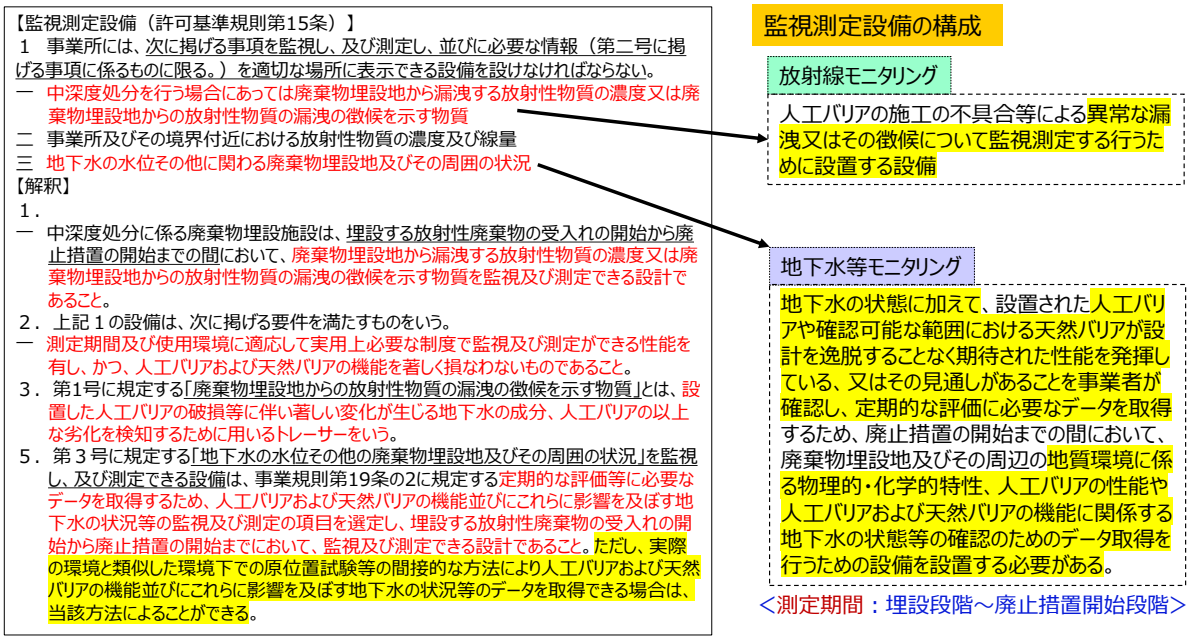
射性廃棄物の受入れの開始から廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地から漏洩する放射性物質の濃度又は廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質を監視及び測定できる設計であること。」と規定され、第3項では「第1号に規定する「廃棄物埋設地からの放射性物質の漏えいの徴候を示す物質」とは、設置した人工バリアの破損等に伴い著しい変化が生じる地下水の成分、人工バリアの異常な劣化を検知するために用いるトレーサーをいう。」と規定されている。さらに、第5項では「第3号に規定する「地下水の水位その他の廃棄物埋設地及びその周囲の状況」を監視し、及び測定できる設備は、事業規則第 19 条の2に規定する定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。」と規定されている。

(2) 代表的な参考検討事例の概要

上述したような規制基準とその解釈で規定されている要求事項に関わる内容と背景等については、NRA 技術ノート（NTEN-2022-0001、2022 年 8 月）において詳しい解説がなされている[5]。

上記のように設置された監視測定設備を用いて、放射線モニタリングと地下水等モニタリングが規制要求に基づいて実施される監視測定モニタリングの重要な項目となるが、その関係について図 3.4-1 に整理した。

測定期間が埋設の開始から廃止措置の開始までの間、監視・測定が可能なものとする必要があると規定されている一方、規制要求で規定されている目的が達成できる監視測定の方法については、直接的な測定だけでなく間接的な方法によることができるとされているので、今後の課題として、事前にそれらの方法・技術を確立し、適用性を確証しておくことも必要であると考える。



【出典：原子力規制庁長官官房技術基盤グループ）：「中深度処分の規制基準の背景及び根拠」、NRA技術ノート、NTEN-2022-0001、2022年8月】

図 3.4-1　監視測定設備に関する規制要求事項と監視測定モニタリングの構成[5]

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

上述の監視測定設備に係る技術項目に関する規制基準における主な関係箇所は次のとおりである。

- 許可基準規則許可基準規則の第 12 条第 1 項第 4 号、同【解釈】第 5 号[2]
- 許可基準規則第 15 条第 1 項第 1 号，第 3 号、同【解釈】第 1 項第 1 号、第 3 項、第 5 号[2]
- 事業規則第 19 条の 2 [1]
- NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠　3.3.5(監視測定設備)、NTEN-2022-000、令和 4 年 8 月 [5]

3.4.2　監視測定設備を用いた監視測定モニタリング等による安全性確認の考え方と課題

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

第 3.3 で述べた処分事業実施段階の進展に応じて、地下水流動の調査・評価が重要となる技術項目に関しては、地質環境の隆起・侵食等の長期変動性に伴う地下水流動の状態の変動、掘削影響～操業中、埋戻し・閉鎖措置段階での再冠水を経て、保全段階～廃止措置段階までの長期期間にわたり、規制要求を踏まえて安全確保の前提を十分に満足する範囲内で処分が安全に実施されていることの確認（定期的な評価、等）のために、監視測定設備を実施しての放射線モニタリング及び地下水等モニタリングによるデータ入手とその解析・評価情報は重要な役割を担うものとなる。

(2) 代表的な参考検討事例の概要

事業段階に応じた監視測定設備による監視測定モニタリング等による安全性確認の反映

先に係る考え方を整理した（図 3.4-2）。これは、前項で述べた監視測定設備を設置しての監視測定モニタリング等による安全性確認の主な項目とその反映先の整理を行った考え方（案）を示すものである。

処分事業の許可申請～建設段階～操業段階の前半においては、処分施設の設計と安全審査、さらには操業中の安全性確認に主眼が置かれ、埋設終了に伴う埋戻し・閉鎖措置段階～保全～廃止措置段階の後半においては、埋戻し・閉鎖段階の廃棄物埋設地周辺の処分坑道からアクセス坑道まで、順次埋戻し閉鎖されていく過程の坑道内への地下水再冠水等に伴う地下水挙動や処分場環境の緩やかな回復状況と放射線・地下水等モニタリングの監視測定による安全性確認を中心に管理が行われることになる。それらの監視測定モニタリングは、廃止措置開始までの長期にわたることになるので、目的に応じた測定が十分に実施可能で適切かつ合理的に行えるようなモニタリング技術の高度化確立が望まれる（長期の測定が可能な耐久性、多点測定や長距離のデータ転送などの合理化、給電、等）。

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

上述の監視測定設備に係る技術項目に関する規制基準における次のように前項とほぼ共通。

- 許可基準規則第 12 条第 1 項第 4 号、同【解釈】第 5 号 [2]
- 許可基準規則第 15 条第 1 項第 1 号～第 3 号、同【解釈】第 1 項～第 5 項 [2]
- 事業規則第 19 条の 2 [1]
- NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠　3.3.5(監視測定設備)、NTEN-2022-000、令和 4 年 8 月 [5]

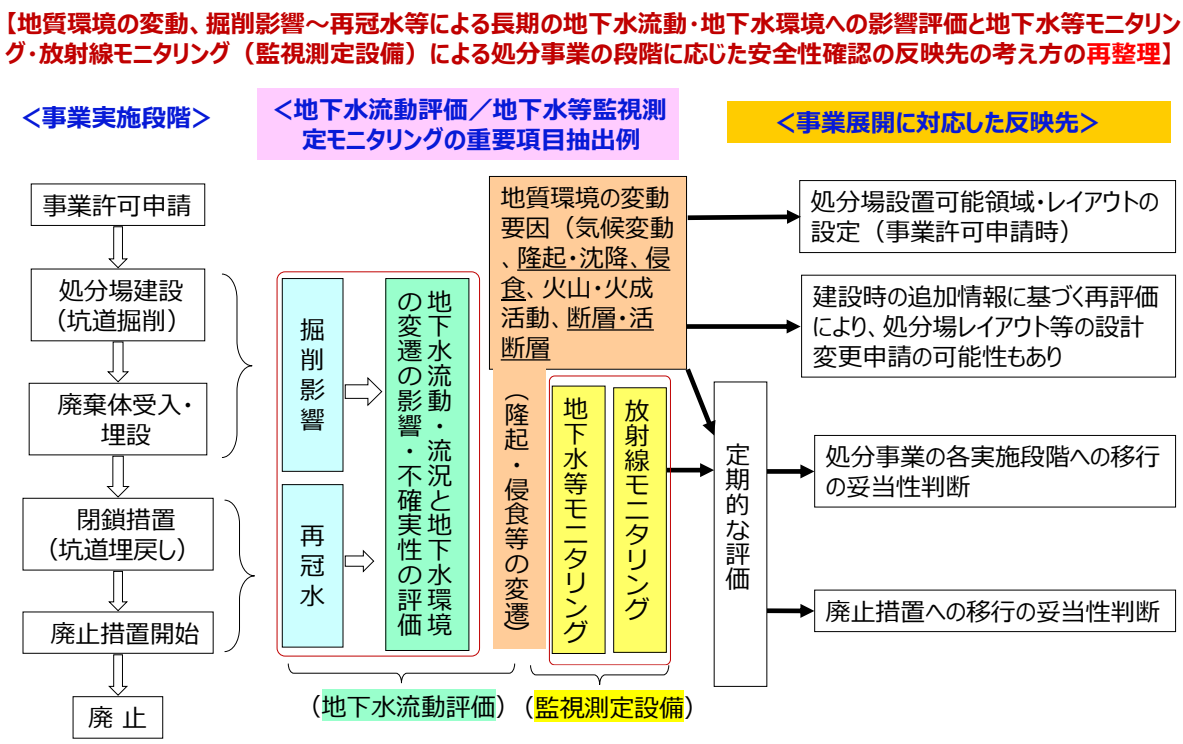


図 3.4-2　事業展開に応じた監視測定設備による監視測定モニタリングの反映先の考え方（案）

3.4.3 監視測定設備の概念検討

(1) 主旨（背景、検討対象時期、目標、等）

図 3.4-3 においては、監視測定設備の基本的な構成と反映先の考え方等の案を前項で示したが、ここでは、監視測定設備の設置イメージの案を検討した事例案を示す。適用時期と場所に関しては、次のような考え方を概略的に想定した。

・埋設開始段階～埋設段階（操業中）～閉鎖措置開始段階＜処分事業の前半＞：

地下施設の廃棄物埋設地近傍まで坑道内でアクセスができる期間を想定し、埋設地付近からの地下水等が集水できる構造、もしくはセンサーによる測定や採水等が可能な場合、それらの機器設置箇所からのデータ等の集積を行うとともに、処分坑道エリア入り口付近の周辺坑道近傍にデータ等集積ユニットを置き、必要に応じて地上などへのデータ転送などを行えるようにする。

・閉鎖措置開始段階～保全段階～廃止措置開始段階＜処分事業後半＞：

廃棄物埋設地近傍からアクセス坑道の埋戻しが進むことになるので、坑道内での監視測定モニタリングは基本的には時間の経過とともに難しくなっていくものと想定。このため、埋設地近傍のトンネル周辺部に、人工バリア・天然バリアの安全機能に影響を与えないことを考慮したボーリング孔によりモニタリング監視ができるような構造を有するボーリングモニタリング監視システムを設置する。前半の坑道内モニタリングが可能な段階の後半時期には並行して測定を行い、モニタリング監視としてのデータの適用性や整合性のチェック確認などが重要となる。

・その他の監視測定モニタリングの可能性について：

許可基準規則第 15 条の【解釈】第 5 項においては、「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。」と規定されており[2]、今後、上記のような直接的な監視測定によらない方法についても今後オプションとして比較検討するなども、今後の課題になると考える。

(2) 代表的な参考検討事例の概要と課題の整理

図 3.4-4 においては、上述したように事業段階と規制要求を考慮した地下水監視モニタリングを、長期にわたり、広範囲な監視・測定モニタリングに適用できる可能性のある技術の高度化が望まれるということを課題として挙げた。近年になって急速に技術の高度化と適用範囲の拡大が進んでいる光ファイバーセンシング技術を適用することにより、多点の分布としての測定が長距離にわたって測定可能で、従来の電気式に比べて耐久性もあり、様々な測定センサーとして、またデータの転送、さらには近年では給電にも適用できる可能性が開発されてきている［20][21][22］。これらの技術の高度化適用をさらに図ることにより、モニタリング監視測定を合理的に実施するためのモニタリング監視技術を総合的に開発・高度化し、モニタリング監視測定方法として体系的に整備していくことは重要な課題の一つと考えられる。

【監視測定設備の概念例：処分実施段階に応じた監視・測定を合理的に実施（適用する技術、時期、場所、等）】

【監視測定設備の構成と目的】

1）地下水等モニタリング：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およ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の取得
2）放射線モニタリング：人工バリアの施工の不具合等による放射性物質の異常な漏えい又はその徴候を監視測定

＜補足事項＞　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とするため、例えば人工バリアの機能の確認を目的とした地下水等モニタリングについては、実際に人工バリアが設置される環境と同等の条件を模擬した環境下での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代替することも考えられる。
【【出典】原子力規制庁長官官房技術基盤グループ）：「中深度処分の規制基準の背景及び根拠」、NRA技術ノート、NTEN-2022-0001、2022年8月)】

【監視測定設備として想定される監視モニタリング設備群の概念のオプション検討素案】
⇒ 処分事業の段階に応じて、必要な監視測定が、適切かつ合理的に実施可能な組合せを考慮して設置展開することが重要

事業段階に応じた監視モニタリング監視の合理的な実施の考え方の例

処分場建設（坑道掘削）
廃棄体受入・埋設
閉鎖措置（坑道埋戻し）
廃止措置開始

②
①

【共通】＜監視モニタリング管理・試験施設＞

【Case-②】処分坑道入口付近の坑道内監視モニタリング設備（廃棄物埋設地内近傍でのセンサー・集水＋処分坑道入口付近でのデータ集積・転送中継ユニット）

【Case-①】近傍ボーリング孔監視モニタリング設備（廃棄物埋設地近傍→地上）

【中深度処分の廃棄物埋設施設と監視測定設備の設置イメージ】

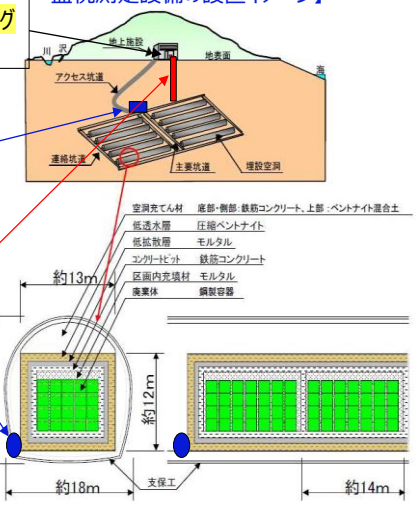


図 3.4-3　監視測定設備の設置イメージと監視測定モニタリングの概念例

【技術開発課題の整理】

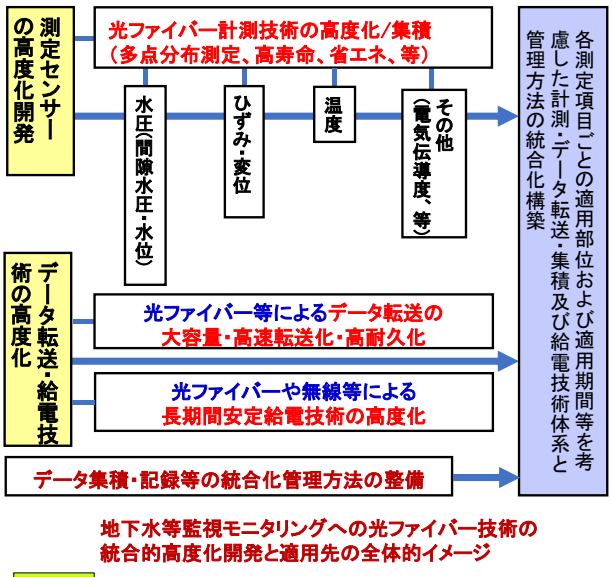
事業段階と規制要求を考慮した地下水等監視モニタリングへの光ファイバー技術の統合的高度化応用方法の考え方】

（技術開発課題（案）の一例）

光ファイバ測定技術のモニタリング監視測定への適用拡大方策として、耐久性や省エネ性、遠隔・自動測定性能等の向上や多目的計測用等に高度化：

・光ファイバを利用した測定技術としては水圧や地盤圧力、ひずみ、温度等の計測の他、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、今後、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検討することが重要である。上述したような地下水等監視モニタリング方法の統合化構築の概念を右図に示す。

【既往技術の参考情報】
1）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.
2）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.
3）・瀬尾・三好・栗原・岩田・竹延・後藤：光ファイバーによる給電・通信機能を有した地下水の物理・化学パラメータ計測装置の開発（その1）（その2）、2022年度土木学会全国大会講演会、2022.



地下水等監視モニタリングへの光ファイバー技術の統合的高度化開発と適用先の全体的イメージ

【今後の方向性】中深度処分施設における処分の各段階の環境条件や規制要求に対応した監視測定設備や地下水環境とバリア機能を統合的に監視・モニタリングする技術・方法論の体系化整備。

図 3.4-4　監視測定モニタリング技術の高度化案の例（光ファイバー技術の高度化適用）

[20][21][22]

(3) 中深度処分の規制基準における該当箇所の例

上述の監視測定設備に係る技術項目に関する規制基準における次のように前項と基本的に共通。

・許可基準規則第 15 条第 1 項、同【解釈】第 1 項～第 5 項[2]

・事業規則第 19 条の 2 [1]

・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠　3.3.5(監視測定設備)、NTEN-2022-000、令和 4 年 8 月 [5]

3.5 技術マップの概略的取りまとめ

3.5.1 主旨と経緯

これまでの本調査研究における検討結果をもとに、中深度処分における地下水流動の調査・解析・評価に関して、新規制基準における要求事項への対応と処分事業の実施段階等も考慮し、重要となる技術項目の概要を概略的に取りまとめ整理したものを表 3.5-1 に示す[5]～[34]。

整理にあたっては、中深度処分の規制基準における規制要求に対応するための、特に地下水流動評価に関わる重要事項として本報告で整理・検討した次のような 2 つの分類に先ず大別した。

(A) 地下水流動の調査・解析・評価

(B) 地下水等監視モニタリング

その上で、上述のように抽出・検討した技術項目において対象とした“目的別”に分類し、それらへの対処を考える上でとなる技術事項と規制基準での対応箇所、その技術の現状技術の例示とその出典、技術の反映時期、そして技術項目ごとに今後の技術課題のポイントを検討・整理することにより、“技術マップ”としての概略取りまとめとした。

なお、本検討の当初においては、“技術メニュー”としての調査取りまとめを行うということで検討を進めていたが、中深度処分に係る新規制基準に対応していくための技術的な必要事項を抽出し、さらにそれらに関わる代表的な現状技術の調査と今後への技術課題を検討・整理することにより、今後に向けて必要な技術の高度化整備に係る方向性を把握するためにというニーズを実現するために必要な技術的課題、要素技術等を”俯瞰“するものという位置づけであることを考慮し、”技術マップ“という用語を用いることとした。

3.5.2 技術マップの主要なポイント

以下では、表 3.5-1 で技術マップとして抽出・整理した技術項目に関して、中深度処分に係る新規制基準に適切に対応することを基本として、安全かつ合理的に中深度処分を実施していく上で必要となるそれぞれの関連する技術要素の高度化整備に向けての主要ポイントをまとめておく。

(1) 技術マップで抽出した主要な技術項目

前述したような中深度処分の新規制基準への対応を念頭に、重要と考えられる技術項目に関して、現状技術の状況や課題等について検討してきた結果に基づき、特に中深度処分に係る新規制基準への対応上、特有でかつ重要な技術課題として抽出した技術項目は次のとおりである。

(A) 地下水流動の調査・解析・評価

A-1) 隆起・沈降・侵食等の地形・地質環境変動影響評価

A-2) 坑道掘削～廃棄体埋設～埋戻し・再冠水の坑道内状況変化に伴う地下水環境影響

A-3) 地質地下水環境基本特性把握

A-4) 地下水流動等の調査・解析・評価に関わる不確実性の評価

表 3.5-1　中深度処分の新規制基準への対応を考慮した地下水流動評価に関わる技術項目の抽出・整理と今後の技術課題（技術マップの概略取りまとめ）（1/2）-地下水流動の調査・解析・評価技術－

中深度処分の新規制基準に対応する上で必要な地下水流動評価に関わる技術項目の抽出、現状技術状況と今後の技術課題の分類・整理（技術マップ）［A：地下水流動の調査・解析・評価技術］									
(a)技術分類	(b)大項目	(c)目的	(d)抽出した技術項目	(e)対象場所	(f)適用時期（主旨）	(g)関連規制基準、等	(h)現状技術の具体例・技術情報	(i)出典（主な引用文献）	(j)今後の技術課題
(A)地下水流動の調査・解析・評価	(A-1)隆起・沈降・侵食等の地形・地質環境変動影響評価 【(注)10 万年以上の超長期の地質環境事象の予測評価を行うため、事業段階ごとにその変遷状況の調査・解析・評価による確認を行う。】	・閉鎖後長期の安全確保に関わる安全評価における地下水・接近シナリオに関わる隆起・沈降・侵食による地形・地質環境変動特性に関して、気候・海水準変動等のその他の自然事象に係る情報と併せて把握するとともに地下水影響の解析・評価等により評価 (設置深度等の地質環境条件が、接近シナリオ、地下水移行シナリオの設定条件を逸脱しない状況の確認)	1) 隆起・侵食量の全国的規模のマップ：地球化学的特徴、河岸段丘、海成段丘、沖積層基底深度等による調査、測地・観測と評価推定 2)隆起・沈降量：段丘の編年・対比に基づく地形学的手法、等 3)気候・海水準変動については、海岸部における海成段丘に基づく隆起量の評価で考慮 3)解析モデルによる将来予測評価	・内陸部、河川、海岸部の段丘 ・その他、河川・沢・湖沼、沿岸部 ・空中(航空測量、ドローン、等) ・サイト内(地上、坑道内での採水・分析)	・サイト選定調査 ・事業許可申請 (以上、サイト選定と安全審査へ反映) ・建設(坑道掘削) (変更申請反映) ・埋設(廃棄体定置) ・閉鎖措置 ・廃止措置 (以上、定期的評価・段階移行へ反映)	・許可基準規則第 12 条第 1 項第 1 号と第 2 号、同条第 2 項 ・審査ガイド 2.2.1（廃棄物埋設地と公衆の接近を仮定したシナリオによる評価の実施） ・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠 3.2.3（侵食を考慮した深度の確保）、令和 4 年 8 月.	①全日規模マップ（日本地質学会）：隆起・沈降量に関する、約 20 km 四方の領域ごとの最近約 10 万年間 の隆起速度を示した全国規模のマップが整備されている（日本地質学会， 2011）。地域ごとの隆起・沈降量の調査・評価手法 ②地域ごとの隆起・沈降量の調査・評価手法：1,000 年から 10 万年オーダーの段丘の編年・対比に基づく地形学的手法（吉山・柳田，1995，）小池・町田， 2001 など ③隆起・侵食による地質・地表環境の長期的変動を考慮した地層処分の安全評価手法の開発、日本原子力学会和文論文誌、Vol.16、No.1、2017.	・原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書、付属書 SC-20-SR3-5 自然現象の影響にかかわる調査・評価(隆起・侵食)、2021. ・日本地質学会：日本列島と地質環境の長期安定性、地質リーフレット 4、地質環境の長期安定性研究委員会、2011. ・吉山、柳田：河成地形面の比高分布からみた地殻変動 地学雑誌 Vol. 10、1995. ・日本原子力研究開発機構(JAEA)：地質環境長期安定性評価確証技術開発 5 か年報告書（平成 25～29 年度）、2018. ・若杉圭一郎、他：隆起・侵食による地質・地表環境の長期的変動を考慮した地層処分の安全評価手法の開発、日本原子力学会和文論文誌、Vol.16、No.1、2017.	・過去から現在までの地表環境の変遷については、超長期の事象に係る調査・解析・評価に伴う不確実性の考慮が重要な課題であり、地表環境を構成する各パラメータを一定の値としてではなく、幅を持った値として合理的に推定、評価することが重要であり、それらの手法の確立を図る必要がある。 ・地質環境の変化を三次元的に表現する地質環境長期変動モデルの開発と、モデルの構築を支える革新的要素技術の開発との相互連携が進められてきており、それらの成果を地質環境長期変動モデルの開発に反映するプロセスの確立が望まれる。今後、適用事例の蓄積や専門家間での相互評価・追試などによりその精度・品質の向上と品質確認方法の体系化整備が必要である。
	(A-2)坑道掘削～廃棄体埋設～埋戻し・再冠水の坑道内状況変化に伴う地下水環境影響（地下水湧水、岩盤割れ目、地下水流況、水質、等）	・各事業段階への移行の妥当性確認（安全評価の設定条件、評価結果等が想定の範囲内であること）	1)坑道の掘削～埋戻しによる坑道壁面、埋戻し材、人工バリアの力学、水理、化学的特性の試験、測定、観測、試料採取分析 2)坑道の掘削～埋戻し～再冠水過程の坑道内外地下水状態変遷状況の解析・評価	・地上(ボーリング孔、等) ・坑道内(ボーリング孔、モニタリング、採水、等) ・廃棄物埋設地内とその近傍(同上)	・事業許可申請 (安全審査での見通し評価) ・建設(坑道掘削) ・埋設(廃棄体定置～処分坑道埋戻し) ・閉鎖措置 (以上、建設～操業段階での作業安全と廃棄物埋設地の安全機能への影響確認、定期的評価へ反映)	・事業規則第 22 条第 5 項 7（閉鎖措置計画の認可の基準） ・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠 3.2.3（侵食を考慮した深度の確保）、令和 4 年 8 月.	①坑道内湧水量の評価 ②合理的な排水施設の設計 ③パイピング現象による緩衝材流出の評価 ④坑道埋戻しに伴う地下水環境回復挙動	・原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書、付属書 SC20-SR4-64 坑内湧水量の評価、2021 ・同上、付属書 SC20-SR4-56 パイピング現象による緩衝材流出の評価、2021. ・日本原子力研究開発機構：超深地層研究所計画（岩盤の水理に関する調査研究）再冠水試験・坑道埋め戻しに伴う地下水環境の回復挙動の予測、JAEA-Research 2019-001, 2019.	・再冠水試験や坑道埋め戻しによって坑道周辺の地下水の水圧や水質変化に与える影響を確認するために、再冠水試験とその予測解析による検討として、坑道の冠水条件の違いに着目した JAEA による解析検討事例がある。さらに、詳細な分析・評価が必要である。 ・坑道周辺岩盤の地下水環境の回復挙動をより適切に評価するためには、異なる冠水条件下での坑道埋め戻し後の再冠水による地下水環境の回復挙動の試験例と予測解析との比較ベンチマーク等を幅広いにより信頼性向上を図ること等が必要である。
	(A-3)地質地下水環境基本特性把握（高透水領域等、岩盤透水性分布、地下水位・水圧分布、地下水流動状況、等）	・放射性物質の漏出防止や地下水の流出入が施設の安全性評価で想定した範囲内であることの確認をするための地下水位の分布状況、地下水流動状況の変化等の確認・監視 ・処分施設設計における処分場レイアウト設定（設置可能領域、設置深度、処分坑道の方向、断層への対処、等） ・地下水移行経路・地下水動態の調査・解析・評価とその妥当性の確証のための地下水流動解析手法と地下水年代測定手法の適用・比較による広域～サイト領域から地下施設スケールの地下水動態の調査・解析・評価 ・塩水影響に関する調査・解析・評価	1)放射性物質の漏えいや廃棄物埋設地への地下水の浸入状況等に係る監視測定を、各事業段階の状況に応じて、適切に実施するための、測定・サンプリング・分析等のモニタリング技術、データ蓄積とそれらの解析・評価手法等の体系化整備 2)地下水年代測定・地下水流動調査・解析による、対象スケール（広域～サイト～埋設坑道）に応じた、地下水流動の調査・解析・評価と妥当性確証 3)塩水影響に関する調査・解析・評価手法高度化と調査データの充実化（塩淡境界、塩分濃度、化石海水 、等）	・地上(ボーリング調査、等) ・坑道内(ボーリング孔、モニタリング、採水、等) ・廃棄物埋設地内(同上) ・サイト周辺地域(広域)～サイト領域～地下施設	・サイト選定調査～ ・事業許可申請 (以上、サイト選定と安全審査へ反映) ・建設(坑道掘削) (変更申請反映) ・埋設(廃棄体定置 ～処分坑道埋戻し ～閉鎖措置開始) (以上、操業段階での廃棄物埋設地の安全機能への影響確認、定期的評価へ反映(監視測定設備を補完～サイト内))	・許可基準規則の解釈第 12 条第 9 項第一号及び第二号	①地上ボーリング調査、等による地質地下水環境基本特性の調査・評価技術 ②坑道内におけるボーリング調査等による調査・試験・観測・採水等に関わる技術 ③廃棄物埋設地内(同上) ④処分場レイアウト設定のための調査・試験・解析技術 ⑤地下水年代測定技術(^{14}C、^{3}H、等を指標) ⑥地下水流動・物質移行解析コード（例えば、FEFLOW(商用コード)、逆解析コード(PEST(公開コード)） ⑦沿岸部における塩水影響（塩淡境界、等)の評価	・原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書、付属書 SC20-C3_第3章(地質環境の選定とモデル化)/SC20-SR3-07_付属書(地質環境特性調査・評価のフロー)/SC20-SR3-08_付属書（地質環境特性調査・評価の進め方/SC20-SR3-09_付属書（地質環境特性調査・評価の調査技術の組合せ/SC20-SR4-49 付属書(地下施設設置可能領域の設定に係る地下水流動解析)、他) ・日本原子力研究開発機構：我が国の沿岸部の地下環境における特性の整理／原環機構：沿岸部の特性を踏まえた地層処分の技術的対応性、第 2 回沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会、2016. ・日本原子力・研究開発機構・電力中央研究所：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_岩盤中地下水流動評価技術高度化開発（令和元年度、令和 3 年度)、2020、2022.	・地質環境特性および長期の地質環境変遷に関わる調査・解析・評価の統合化アプローチの確立を図る必要がある。 ・それらの調査データ、地質モデル構築手法、地下水流動解析・評価手法の品質マネジメント手法の体系的な確立が必要である。 ・品質マネジメントにおいて重要となる、データ、調査・解析手法、評価シナリオ等の各種の不確実性への対処方法の体系化確立が必要である。 ・地下水流動解析（物質移行解析も含む）に関しては、地下水年代測定を考慮し、中深度領域を主対象として、地下水流動と移行経路の評価・設定を適切に行うために適用できる手法・技術として確立するための高度化確証が必要である。 ・沿岸域における塩水影響に係る調査・解析手法の高度化・確立とデ調査データの拡充が必要である。
	(A-4)地下水流動等の調査・解析・評価に関わる不確実性の評価	・事業実施段階の進展に伴って、地質地下水環境や地下水流動の調査・解析・評価が各段階での目的に応じて繰り返し実施し、その進展に伴い、調査・評価の量と共に精度・品質の向上、さらには不確実性の減少と、調査・評価結果の信頼性向上	事業実施段階の進展に伴い、各実施段階の目的に応じて、適用部位に適した調査・試験データとその解析・結果のバラツキの程度等の不確実性に関連する観点での整理・分析を行い、品質と信頼性の向上のための評価を行う。	・地上(ボーリング調査、物理探査、等) ・空中(航空測量、ドローン測定、等) ・坑道内(ボーリング孔、等) ・廃棄物埋設地内(ボーリング孔、等)	・サイト選定調査 ・事業許可申請 (以上、サイト選定と安全審査へ反映) ・建設 (変更申請反映) ・埋設(廃棄体定置) ～処分坑道埋戻し ～閉鎖措置開始) (以上、操業段階での廃棄物埋設地の安全機能への影響確認、定期的評価へ反映(監視測定設備を補完～サイト内))	・許可基準規則第 12 条の解釈第 9 項第二号. ・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景及び根拠、3.4.2 設計プロセス、令和 4 年 8 月.	①地上(ボーリング調査、物理探査、等) ②坑道内(ボーリング孔による調査、等) ③廃棄物埋設地内(ボーリング孔による調査、等) ④地質環境長期変動モデル(統合数値モデル化、モデル検証および副実性検証、等) ⑤地質環境長期変動調査・評価に係る革新的要素技術	・原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書、SC20-SR3-12_付属書(地質環境調査とモデル化構築の品質マネジメント)/SC20-SR3-10_付属書(地質環境特性長期変遷の調査評価)/SC20-SR3-12_付属書(地質環境調査とモデル化構築の品質マネジメント)SC20-SR3-12_付属書(地質環境調査とモデル化構築の品質マネジメント)/SC20-SR2-8_付属書（不確実性対処の考え方)、2021. ・日本原子力研究開発機構(JAEA)：地質環境長期安定性評価確証技術開発 5 か年報告書（平成 25～29 年度)、2018. ・若杉圭一郎、他：隆起・侵食による地質・地表環境の長期的変動を考慮した地層処分の安全評価手法の開発、日本原子力学会和文論文誌、Vol.16、No.1、2017.	・調査・解析・評価の不確実性は、超長期の地質地下水環境の変遷とそれに伴う地下水流動の変動の予測において用いるデータ、地質モデル、地下水流動解析モデル、評価シナリオなどにおける不確実性を扱うため、国内外でのコンセンサス作りが不可欠と考えられる。そのため、それらに関して国内外の機関で検討されている体系的に評価する統合化のアプローチ手法等について、品質保証、品質管理等の品質マネジメント等も考慮して、方法論として方向性のコンセンサスを連携して構築していくことなどが今後必要である。

表 3.5-1　中深度処分の新規制基準への対応を考慮した地下水流動評価に関わる技術項目の抽出・整理と今後の技術課題（技術マップの概略取りまとめ）（2/2）-地下水等監視モニタリング技術－

中深度処分の新規制基準に対応する上で必要な地下水流動評価に関わる技術項目の抽出、現状技術状況と今後の技術課題の分類・整理（技術マップ）［B：地下水等監視測定モニタリング技術］

(a)技術分類	(b)大項目	(c)目的	(d)抽出した技術項目	(e)対象場所	(f)適用時期（主旨）	(g)関連規制基準、等	(h)現状技術の具体例・技術情報	(i)出典（主な引用文献）	(j)今後の技術課題
(B)地下水等の監視測定モニタリング	(B-1)地下水位、地下水流動状況、地下水流出入量、湧水量、等 【監視測定設備、排水施設】	・作業安全（施工、操業）、環境安全、処分施設・人工バリア性能への影響と放射性物質の漏洩に直接的な要因となる湧水量、廃棄物埋設地への地下水浸入量等の確認・監視・管理 ・地下水位の測定、地下水面分布・地下水流動状況の調査・測定・評価	＜建設～埋設段階＞ 1) 湧水箇所・湧水量の調査・観測・予測 2)流量計、堰等による流量測定 3)排水設備（揚水ポンプ、配管、等） 4)地下水位、水質等の監視測定 5)放射性物質の漏えい監視・測定	・坑道内（ボーリング孔、堰、等） ・廃棄物埋設地内（ボーリング孔、等） ・サイト内の廃棄物埋設地近傍ボーリング孔、周辺監視区域のモニタリング孔	・建設（坑道掘削）（事前モニタリング） ・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し） ・閉鎖措置 ・廃止措置 （以上、監視想定モニタリング）	・許可基準規則第 15 条、解釈の第 1 項第 1～5 号. 第 16 条第1項および解釈の第1項 ・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景及び根拠、3.3.5 監視測定設備、3.3.6 排水施設、令和 4 年 8 月. ・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景及び根拠、3.3.5 設計プロセス、令和 4 年 8 月.	①坑道内・廃棄物埋設地内湧水調査・測定（ボーリング調査、壁面観察（視覚、画像撮影・解析）、等）による漏水箇所・亀裂性状観察 ②流量堰、流量計による湧水量測定・観測 ③廃棄物埋設地内における坑道壁面等のボーリング調査（水分状態、等）・測定・観測	・原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書、SC20-SR4-64_付属書（坑内湧水量の評価）/SC20-SR6-12_付属書（閉鎖後長期安全評価解析コードの信頼性確保）、2021 ・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景及び根拠、3.3.5 監視測定設備、3.3.6 排水施設、令和 4 年 8 月. ・日本原子力学会標準：低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法：2016―ピット処分及びトレンチ処分編―、2016.	・地下水湧水は、施工・操業中の作業安全はもとより、安産性や環境安全等の処分施設性能にも影響を及ぼすことが懸念されるため、建設～操業中における壁面からの漏水箇所・漏水量の状況の観察と漏水量の調査・観測・測定が重要である。このため、坑道内壁面の亀裂性状や高透水部の観察と湧水量把握を目的とした観測・測定等を、坑道内の高所個所でも合理的に行えるようにすることも考慮して、例えばドローンによる画像撮影・解析等の技術も組み合わせた最新の調査技術の高度化開発・適用などを図る必要である。
	(B-2)人工バリア・処分施設性能影響に関わる廃棄物埋設地内や坑道内における地下水の水理・水質・化学的な性状等の変化 【監視測定設備】	・人工バリアや廃棄物埋設地内の人工構造物の性能への影響等の判断	＜埋設段階：坑道内の湧水、排水等を主に対象＞ 1)地下水理基本特性（水位、水圧、地下水の流量、等）の測定 2)地下水の水質、化学特性（pH、Eh、電気伝導度、等）の測定 [測定センサーあるいは採水・分析による] ＜閉鎖措置～保全段階： 近傍地下水＞ ・近傍地下水のボーリング孔調査を主として、上記の調査・観測項目中で実施可能なものが対象	・坑道内（ボーリング孔、等） ・廃棄物埋設地内（ボーリング孔、等）	・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し） ・閉鎖措置 ・廃止措置 （以上、監視想定モニタリング）	・許可基準規則第 15 条第 1 項第 1～3 号、解釈の第 1 項第 1～5 号. および解釈の第1項～第 5 項. ・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景及び根拠、3.3.5	①ボーリング調査技術（水位計、水圧計、フローメーター、採水・分析、等） ②採水・分析による水質・化学的特性の調査・測定（pH、Eh、電気伝導度、等） ③光ファイバーによる計測技術（水圧、温度、ひずみ・変位、データ転送、給電、等）	・原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書、SC20-SR2-7_付属書（モニタリングの考え方）、2021. ・土木学会：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、2008. ・原子力学会標準：低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法：2016－ピット処分及びトレンチ処分編－、2016（中深度処分編については、現在、改訂作業中） ・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ー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. ・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. ・瀬尾・三好・栗原・岩田・竹延・後藤：光ファイバーによる給電・通信機能を有した地下水の物理・化学パラメータ計測装置の開発（その1）（その2）、2022 年度土木学会全国大会講演会、2022.	・新しい規制基準においては、“廃止措置の終了までの間は廃棄物埋設地の外への放射性物質が防止されること”とされており、このため監視測定設備を設置して、放射線モニタリング及び地下水等モニタリングに係る監視・測定を廃棄体埋設から廃止措置開始の段階まで実施することが要求されている。 ・廃棄体の埋設から廃止措置の埋設までは、廃棄体の埋設～処分坑道の埋戻し～アクセス坑道等の埋戻し等の閉鎖措置を経て廃止措置の開始に至る段階までは、長期間にわたり、廃棄物埋設地内や坑道内の状態が変化するとともに、建設段階のトンネル坑道の掘削状態から埋め戻し段階以降において地下水が再冠水していくなど、地下処分施設内の状態は大きく変遷し、それに伴って処分施設・人工バリアの安全機能も影響されることになるので、事業の実施段階の状態に応じて、それらに大きく影響する地下水等の状態を適切かつ合理的に監視・確認できる技術・方法論の確立が必要である。 ・特に、非常に長期にわたる監視を、坑道を埋め戻した後もどのように継続して実施していくかの方法の確立が今後の大きな課題となる。 ・例えば、長期にわたって合理的かつ安定的な監視・測定が可能なセンサーとしてだけでなくデータ転送、給電などの機能も併せ持つ測定方法としての使用用途の拡大が進んでいる光ファイバー技術のモニタリング監視への適用拡大など、最近の技術の進化を踏まえたモニタリング監視測定を長期的にかつ合理的に実施するための行う技術の体系化整備が今後の課題と考える。
	(B-3)放射性物質の異常な漏えいまたはその徴候に関する監視・測定 【監視測定設備】	廃棄物埋設地からの放射性物質の異常な漏えいあるいはその徴候の監視	＜埋設段階～坑道埋戻し～閉鎖段階～廃止措置段階＞ ・地下水の浸入、廃棄物埋設地からの放射性物質の異常な漏えいあるいはその徴候を示す状況の監視・測定 ・埋設施設・人工バリアや天然バリアの安全機能への影響に係る指標に係る指標の直接的あるいは間接的な測定、サンプリング・分析、等	・地上（ボーリング孔、等） ・（坑道内（ボーリング孔、等） ・廃棄物埋設地内（ボーリング孔、等）	・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し） ・閉鎖措置 廃止措置 （以上、監視想定モニタリング）	・事業規則第 17 条の第1項第一号 ・NRA 技術ノート：中深度処分の規制基準の背景・及び根拠、3.6.1(廃棄物埋設地の保全)、令和 4 年 8 月.	①ボーリング孔での採水と分析による監視測定（採水・分析による放射性物質漏えい監視対象核種又はその徴候を示すトレーサーを選択して監視・測定）	・馬原：地下水調査に用いられるトレーサー、最近の地下水調査法と計測技術 7.2 環境同位体分析、地下水学会誌、1994.	

［【注】 1）下線：各項目におけるキーに相当する箇所、 2)黄色のハッチング箇所：今後の課題として抽出した中で、特に中深度処分の規制基準への対応の観点から今後の検討の優先度が比較的高いと考えられる課題 3)表 3.5-1 における参考文献番号： ［5］～［34］］

(B)　地下水等の監視測定モニタリング（監視測定設備）

B-1）地下水位、地下水流動状況、地下水流出入量、湧水量、等

B-2）人工バリア・処分施設性能影響に関わる廃棄物埋設地内や坑道内における地下水の水理・水質・化学的な性状等の変化

B-3）放射性物質の異常な漏えいまたはその徴候に関する監視・測定

(2) 抽出した重要技術項目における主な技術要素と課題

表 3.5-1 の技術マップにおいて記載した事項の中における主要な技術要素と技術課題の主要点は次のように整理される。

1) A：　地下水流動の調査・解析・評価

A-1）隆起・沈降・侵食等の地形・地質環境変動影響評価

① 抽出した主な技術要素

・隆起・侵食量の全国的規模のマップ：地球化学的特徴、河岸段丘、海成段丘、沖積層基底深度等による調査、測地・観測と評価推定

・隆起・沈降量：段丘の編年・対比に基づく地形学的手法、等

・気候・海水準変動については、海岸部における海成段丘に基づく隆起量の評価で考慮

・解析モデルによる将来予測評価 A-2）坑道掘削～廃棄体埋設～埋戻し・再冠水の坑道内状況変化に伴う地下水環境影響

② 技術の適用時期（事業段階）＜下線は、重点的に適用が必要な時期＞

・サイト選定調査

・事業許可申請（以上、サイト選定と安全審査へ反映）

・建設（坑道掘削）（変更申請へ反映）

・埋設（廃棄体定置）

・閉鎖措置

・廃止措置

（以上、定期的評価・段階移行判断へ反映）

③ 今後の技術課題

・超長期の事象に係る調査・解析・評価に伴う不確実性の考慮が重要な課題であり、地表環境を構成する各パラメータを一定の値としてではなく、幅を持った値として合理的に推定、評価することが重要であり、それらの手法の確立を図る必要がある。

・今後、適用事例の蓄積や専門家間での相互評価・追試などによりその精度・品質の向上と品質確認方法の体系化整備が必要である。

A-2）坑道掘削～廃棄体埋設～埋戻し・再冠水の坑道内状況変化に伴う地下水環境影響

① 抽出した主な技術要素

・坑道の掘削～埋戻しによる坑道壁面、埋戻し材、人工バリア材の力学、水理、化学的特性の試験、測定、観測、試料採取分析

・坑道の掘削～埋戻し～再冠水過程の坑道内外地下水状態変遷状況の解析・評価

② 技術の適用時期（事業段階）＜下線は、重点的に適用が必要な時期＞

・事業許可申請（安全審査での見通し評価）
・建設（坑道掘削）
・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し）
・閉鎖措置
（以上、建設～操業段階での作業安全と廃棄物埋設地の安全機能への影響確認、定期的評価へ反映）

③ 今後の技術課題
・再冠水試験とその予測解析による検討として、坑道の冠水条件の違いに着目した JAEA による解析検討事例がある。さらに、詳細な分析・評価が必要である。
・異なる冠水条件下での坑道埋め戻し後の再冠水による地下水環境の回復挙動の試験例と予測解析との比較ベンチマーク等による予測解析の信頼性向上を図ること等が必要である。

A-3）地質地下水環境基本特性把握

① 抽出した主な技術要素
・放射性物質の漏えいや廃棄物埋設地への地下水の浸入状況等に係る監視測定を、各事業段階の状況に応じて、適切に実施するための、測定・サンプリング・分析等のモニタリング技術、データ蓄積とそれらの解析・評価手法等の体系化整備
・地下水年代測定・地下水流動調査・解析による、対象スケール（広域～サイト～埋設坑道）に応じた、地下水流動の調査・解析・評価と妥当性確証
・塩水影響に関する調査・解析・評価手法高度化と調査データの充実化（塩淡境界、塩分濃度、化石海水、等）

② 技術の適用時期（事業段階）＜下線は、重点的に適用が必要な時期＞
・サイト選定調査
・事業許可申請
（以上、サイト選定と安全審査へ反映）
・建設（坑道掘削）　（変更申請へ反映）
・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し）
・閉鎖措置
（以上、操業段階での廃棄物埋設地の安全機能への影響確認、定期的評価へ反映（監視測定設備を補完～サイト内））

③ 今後の技術課題
・地質環境特性及び長期の地質環境変遷に関わる調査・解析・評価の統合化アプローチの確立を図る必要がある。
・品質マネジメント手法の体系的な確立が必要であり、品質マネジメントにおいて重要となる、データ、調査・解析手法、評価シナリオ等の各種の不確実性への対処方法の体系化確立が必要である。
・地下水流動解析（物質移行解析も含む）に関しては、地下水年代測定等も考慮し、中深度領域を主対象として、地下水流動と移行経路の評価・設定を適切に行うために適用で

きる手法・技術として確立するための高度化確証が必要である。

・沿岸域における塩水影響に係る調査・解析手法の高度化・確立とデ調査データの拡充が必要である。

A-4）地下水流動等の調査・解析・評価に関わる不確実性の評価

① 抽出した主な技術要素

・事業実施段階の進展に伴い、各実施段階の目的に応じて、適用部位に適した調査・試験データとその解析・結果のバラツキの程度等の不確実性に関連する観点での整理・分析を行い、品質と信頼性の向上のための評価を行う。

② 技術の適用時期（事業段階）＜下線は、重点的に適用が必要な時期＞

・サイト選定調査

・事業許可申請

（以上、サイト選定と安全審査へ反映）

・建設　（変更申請へ反映）

・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し）

・閉鎖措置開始）

（以上、操業段階での廃棄物埋設地の安全機能への影響確認、定期的評価へ反映（監視測定設備を補完～サイト内））

③ 今後の技術課題

・調査・解析・評価の不確実性は、超長期の地質地下水環境の変遷とそれに伴う地下水流動の変動の予測において用いるデータ、地質モデル、地下水流動解析モデル、評価シナリオなどにおける不確実性を扱うため、国内外でのコンセンサス作りが不可欠と考えられる。そのため、それらに関して国内外の機関で検討されている体系的に評価する統合化のアプローチ手法等について、品質保証、品質管理等の品質マネジメント等も考慮して、方法論として方向性のコンセンサスを連携して構築していくことなどが今後必要である。

2）B： 地下水等の監視測定モニタリング（監視測定設備）

B-1）地下水位、地下水流動状況、地下水流出入量、湧水量、等

① 抽出した主な技術要素

＜建設～埋設～閉鎖措置～廃止措置段階＞

・湧水箇所・湧水量の調査・観測・予測

・流量計、堰等による流量測定

・排水設備（揚水ポンプ、配管、等）

・地下水位、水質等の監視測定（周辺監視区域を含む）

・放射性物質の漏えい監視・測定

② 技術の適用時期（事業段階）＜下線は、重点的に適用が必要な時期＞

・建設（坑道掘削）（事前モニタリング）

・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し）

・閉鎖措置
・廃止措置
（以上、監視測定設備による監視測定モニタリング、定期的評価、段階移行判断へ反映）

③ 今後の技術課題

・建設～操業中における壁面からの地下水湧出箇所・湧水状況の観察と湧水量の調査・観測・測定が重要である。このため、坑道内壁面の亀裂性状や高透水部の観察と湧水量把握を目的とした観測・測定等を、坑道内の高所箇所でも合理的に行えるようにすることも考慮して、例えばドローンによる画像撮影・解析等の技術も組み合わせた最新の調査技術の高度化開発・適用などを図ることが必要である。

B-2）人工バリア・処分施設性能影響に関わる廃棄物埋設地内や坑道内における地下水の水理・水質・化学的な性状等の変化

① 抽出した主な技術要素

＜埋設段階：監視測定設備における坑道内の湧水、排水等を主に対象＞

・地下水理基本特性（水位、水圧、地下水の流量、等）の測定
・地下水の水質、化学特性（pH、Eh、電気伝導度、等）の測定
［以上、監視測定設備における測定センサーあるいは採水・分析による］

＜閉鎖措置～保全段階：　近傍地下水＞

・近傍地下水のボーリング孔調査を主として、上記の調査・観測項目中で実施可能なものが対象

② 技術の適用時期（事業段階）＜下線は、重点的に適用が必要な時期＞

・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し）
・閉鎖措置
・廃止措置
（以上、監視測定設備による監視測定モニタリング、定期的評価、段階移行判断へ反映）

③ 今後の技術課題

・廃棄体の埋設～処分坑道の埋戻し～アクセス坑道等の埋戻し等の閉鎖措置を経て廃止措置の開始に至る段階までは、長期間にわたり、廃棄物埋設地内や坑道内の状態が変化するとともに、建設段階のトンネル坑道の掘削状態から埋め戻し段階以降において地下水が再冠水していくなど、地下処分施設内の状態は大きく変遷し、それに伴って処分施設・人工バリアの安全機能も影響されることになるので、事業の実施段階の状態に応じて、バリアの安全機能等に大きく影響する地下水等の状態を適切かつ合理的に監視・確認できる技術・方法論の確立が必要である。
・特に、非常に長期にわたる監視を、坑道を埋め戻した後もどのように安定的に継続実施していくかの方法の確立が今後の大きな課題となる。

B-3）放射性物質の異常な漏えいまたはその徴候に関する監視・測定

① 抽出した主な技術要素

＜埋設段階～坑道埋戻し～閉鎖段階～廃止措置段階＞

・地下水の浸入、廃棄物埋設地からの放射性物質の異常な漏えいあるいはその徴候を示す状況の監視・測定

・埋設施設・人工バリアや天然バリアの安全機能への影響に係る指標の直接的あるいは間接的な測定、サンプリング・分析、等

［以上、監視測定設備における測定センサーあるいは採水・分析による］

＜閉鎖措置～保全段階：　近傍地下水＞

・監視測定設備の内の近傍地下水のボーリング孔調査を主として、上記の調査・観測項目中で実施可能なものが対象とする監視測定モニタリング

② 技術の適用時期（事業段階）＜下線は、重点的に適用が必要な時期＞

・埋設（廃棄体定置～処分坑道埋戻し）

・閉鎖措置

・廃止措置

（以上、監視測定設備による監視測定モニタリング、定期的評価、段階移行判断へ反映）

③ 今後の技術課題

・安全性を確保した上でどのような設備でどの程度の頻度で地下水を採水するかなど、監視・測定方法の具体化が必要である。

以上の取りまとめ整理の中で下線付きで示したものは、重要な技術項目とその適用時期、並びに今後の技術課題のそれぞれの中でもさらに重要度の高い対象になると考え、本調査研究中で一応の区別をしたものである。

3.6 まとめ （令和 4 年度までの調査検討結果と技術課題の整理）

以上、これまでの本調査研究における総合まとめとして、令和 4 年度までの調査検討成果から抽出された今後に向けての主要な技術課題を次のように集約・整理して示す。

(1) 新しい中深度処分の規制基準における要求事項を調査・整理し、特に処分の安全性確保において重要な地下水流動の調査・評価に関わる重要事項を抽出・整理した。

(2) 地下水流動の調査評価に係る重要項目に関する代表的な現状技術の開発状況と課題について検討・整理した。地質地下水環境の基本特性の調査・解析・評価技術とともに、地下施設の設計と安全評価に関わる地下施設レイアウト設定方法（設置可能領域・区画配置・処分坑道の方向・断層への対処・設置深度、等)、並びに地下水年代測定や塩水影響を考慮した地下水流動の調査・解析評価手法（物質移行も含む）の高度化やデータ整備が地層処分研究等で進んでおり、今後は地層処分対象の深い深度に比べて浅地中～中深度での複雑な地質・地下水環境条件にも十分に適用可能な手法・技術として高度化・確証を図っていくことが課題である。

(3) 掘削影響～埋戻し・再冠水による坑道・廃棄物埋設等の処分環境への影響については、JAEA 瑞浪超深地層研究所における貴重な研究事例等を踏まえ、調査と解析による評価が有効であることが示されている。今後、想定される対象岩種、地質地下水環境や処分施設の設計・埋戻し方法等に対応した方法論を、調査・試験・解析による検討をさらに充実させて確立していくことが課題である。

(4) 長期の地質環境の変動（隆起・沈降・侵食・海水準変動、等）とそれに伴う地下水流動状態の変遷は超長期にわたる事象であり、様々な不確実性も伴う。そのため、事業許可申請～処分実施段階～廃止措置までの事業実施の各段階を通じて、調査・観測によるデータの拡充と解析・評価等の検討を繰り返し実施していくことにより、不確実性を低減し、安全性確保に係る評価結果の信頼性をより確かなものとしていく必要があり、これまでにも様々な技術的側面から不確実性を総合的に調査・解析・評価する統合化アプローチ法等が提案されて来ている。今後、中深度処分特有の条件を想定して、品質保証的な観点も含めて不確実性の評価手法の方法論として適用性の確立が重要であり、コンセンサスを得るために国内外が積極的に連携してオーソライズを図っていくなどが課題である。

(5) 地下水等モニタリング及び放射線モニタリングの監視・測定の実施は、監視測定設備を設置して、埋設の開始～廃止措置の開始まで行われる必要があると規制基準で規定されている。非常に長期にわたる期間が想定されるので、処分事業の進展に対応して、処分施設の坑道内、廃棄物埋設地やその周辺の地質地下水環境、処分施設・人工バリアの状態、地下水の流動・放射性物質の漏えいやその徴候等の監視・測定を適切にかつ合理的に実施可能とするため、方法論と適用技術を早期に確立することにより、今後の中深度処分事業の安全確保への信頼性向上と円滑な推進につなげていくことが課題である。

(6) 地下水等モニタリングなどを合理的に実施するための監視測定設備設置の考え方を例示す

るとともに、長期にわたる事業展開の段階の状況に応じて、地下水等モニタリングの関連データ等の収集を合理的かつ安定的に実施するための最近の技術として、様々な測定センサーとしての適用が近年図られてきている光ファイバー技術の高度化開発を統合的に図る考え方を例示した。今後は、(5)で述べた監視測定設備の具体的な概念とともに、事業段階ごとの処分場環境の状態変化に対応して、地下水等モニタリングとして必要なデータ取得の長期的かつ安定的に実施できる最近の技術を高度化・開発を図ることにより、モニタリング監視を合理的に実施する技術の体系的な整備を図ることが課題である。

(7)上記で検討したような、中深度処分で重要な地下水流動等の調査・試験・解析・評価や監視測定設備を設置しての地下水等モニタリング・放射線モニタリング等に関わる重要な技術項目に関して、中深度処分に係る新規制基準への対応との関係や今後への課題について、技術マップとしての概略的な取りまとめ整理を行った。ここでの取りまとめは、初段階の概括的な取りまとめを行ったものであり、今後は、処分事業に係るステークホルダーや学術・研究機関、民間機関等の技術者の方々へのアンケート等を実施することなどにより、必要な技術項目、現状技術の動向、今後の技術課題などについての意見・情報の集約をすることなどを踏まえ、今後の中深度処分の合理的な実施に向けて必要な技術の高度化整備の方向性を全体的に俯瞰することができる技術マップとして一層充実化を図っていくことも今後の大きな課題であると考える。

第 3 章の参考文献

[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制等の一部改正案（事業規則)」，2021 年 6 月.

[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規制等の一部改正案（許可基準規則)」，2021 年 6 月.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ（前田・大村・青木・木嶋・田中)：「中深度処分の規制基準の背景及び根拠」、NRA 技術ノート、NTEN-2022-0001、2022 年 8 月。

[6] 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－」，NUMO-SC20,2021 年 2 月，2021 年 4 月 28 日改訂.

[7] 原子力発電環境整備機構(NUMO) ：「包括的技術報告書_付属書 4-49、地下施設設置可能領域の設定に係る地下水流動解析」、NUMO-SC20-SR4-49、2021.2 月.

[8] 原子力発電環境整備機構(NUMO)：包括的技術報告書_付属書 4-54　処分坑道の方向決定、NUMO-SC20-SR4-49、2021.2

[9] 日本原子力研究開発機構：「超深地層研究計画（岩盤の水理に関する調査研究　再冠水試験・坑道埋め戻しに伴う地下水環境の回復挙動の予測_付属書 4-44」、JAEA-Research 2019-001、DOI:10.11484/jaea-research-2019-001,2019

[10] 日本原子力研究開発機構・電力中央研究所：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_岩盤中地下水流動評価技術高度化開発(令和元年度、令和 3 年度)、2020、2022

[11] 原子力発電環境整備機構(NUMO)：「包括的技術報告書_付属書 3-10　地質環境特性長期変遷の調査評価」,NUMO-SC20-SR3-10、2021.2

[12] 原子力発電環境整備機構(NUMO)：「包括的技術報告書_付属書 3-5　自然現象の影響にかかわる調査・評価(隆起・侵食)」の調査評価,NUMO-SC20-SR3-5,2021.2

[13] 日本地質学会(編)：「日本列島と地質環境の長期安定性」、地質リーフレット 4、地質環境の長期安定性研究委員会、2011.

[14] 幡谷・柳田・鳥越・佐藤：「後期更新世以降の現海岸線付近での下刻」、応用地質、Vol.57, 2016.

[15] 産業技術総合研究所：概要調査の調査・評価項目に関する技術資料－長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方－、産業技術総合研究所　深部地質環境研究センター、地質調査総合研究センター研究資料集、No.459、2007.

[16] 原子力発電環境整備機構(NUMO)：「包括的技術報告書_付属書 2-8　不確実性の対処の考え方」,NUMO-SC20-SR23-8,2021.2

[17] 日本原子力研究開発機構：「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、地質環境長期安定性評価確証技術開発、5か年報告書」、2018.3.
[18] 若杉・山口・小尾・長尾・加藤・鈴木・江橋・梅木・新堀：「隆起・侵食による地質・地質環境の長期的変動を考慮した地層処分の安全評価手法の開発、日本原子力学会和文論文誌、Vol.16, No.1, 2017.
[19] 若杉圭一郎：隆起・侵食に伴う地質環境の長期的変動を考慮した放射性廃棄物地層処分の安全評価手法の開発、東北大学学位論文概要、2019.2.
[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ー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] 瀬尾・三好・栗原・岩田・竹延・後藤：「光ファイバーによる給電・通信機能を有した地下水の物理・化学パラメータ計測装置の開発（その1）（その2)」、2022年度土木学会全国大会講演会、2022.
[23] 吉山、柳田：河成地形面の比高分布からみた地殻変動 地学雑誌 Vol10,1995.
[24] 原子力発電環境整備機構：「包括的技術報告書、付属書 4-64」, SC20‐SR4-64　坑内湧水量の評価,2021.2月.
[25] 原子力発電環境整備機構：「包括的技術報告書、付属書4-56」,SC20-SR4-56,パイピング現象による緩衝材流出の評価2021.
[26] 原子力発電環境整備機構：「包括的技術報告書、付属書SC20-C3_第3章(地質環境の選定とモデル化）),2021.
[27] 原子力発電環境整備機構：「包括的技術報告書、付属書3-07,地質環境特性調査・評価の進め方」, SC20-SR3-07,2021.
[28] 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書、付属書 3-08,地質環境特性調査・評価のフロー」、SC20-SR3-08,2021.
[29] 日本原子力研究開発機構：「我が国の沿岸部の地下環境における特性の整理／原環機構：沿岸部の特性を踏まえた地層処分の技術的対応性」、第2回沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会、2016.
[30] 原子力発電環境整備機構：「包括的技術報告書、付属書3-12,（地質環境調査とモデル化構築の品質マネジメント)」, SC20-SR3-12,2021.
[31] 日本原子力学会標準:「低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る覆土の施工方法及び施設の管理方法：2016―ピット処分及びトレンチ処分編―」,2016.
[32] 原子力発電環境整備機構：包括的技術報告書、付属書 2-7（モニタリングの考え方)」, SC20-SR2-7､2021、
[33] 土木学会:「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」、2008.
[34] 馬原：「地下水調査に用いられるトレーサー、最近の地下水調査法と計測技術　7.2　環

境同位体分析」、地下水学会誌、1994.

第 4 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評価する技術の高度化の内、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。さら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。

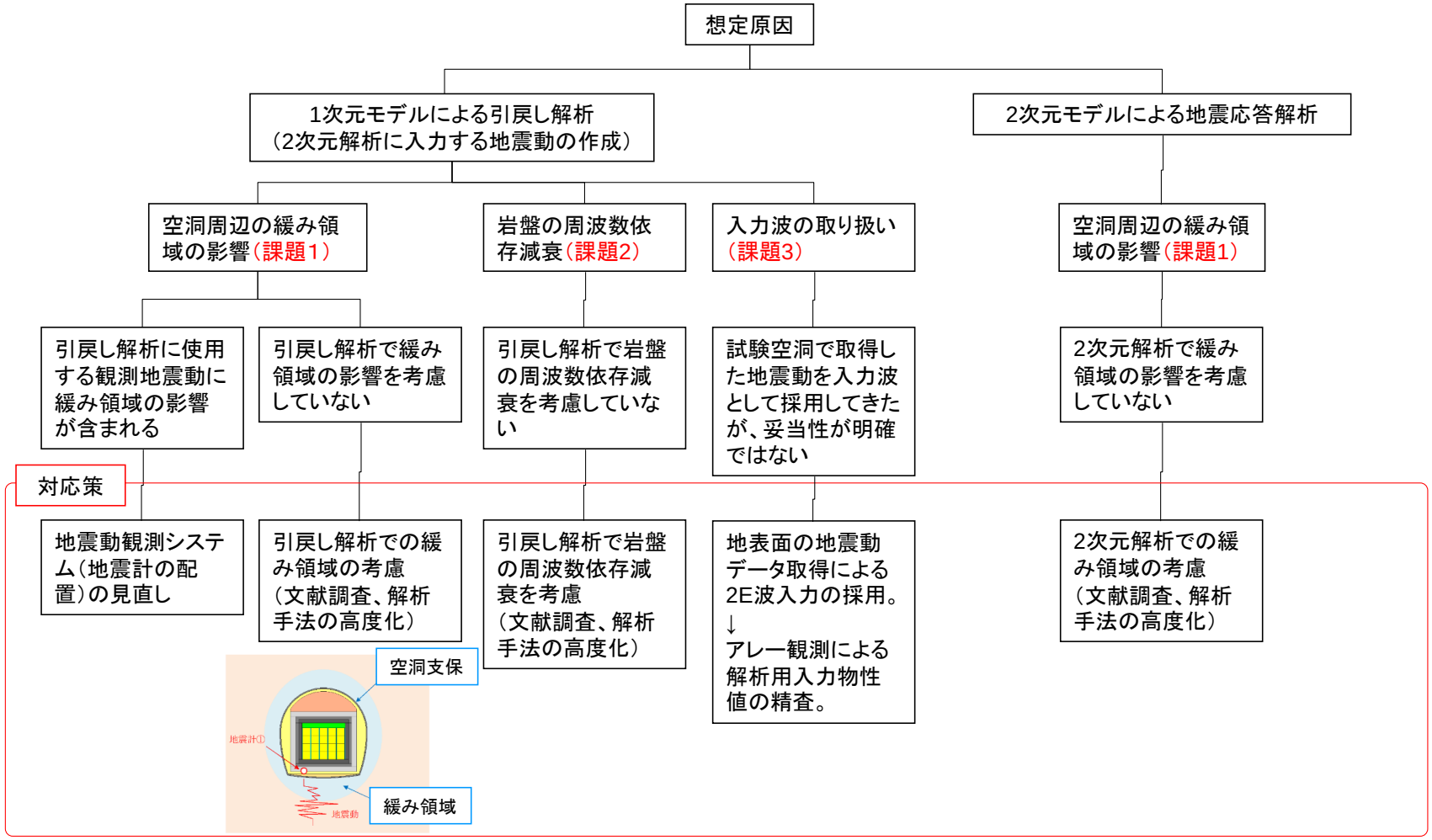


図 4.1-1　解析結果と観測結果の乖離に関する想定原因の抽出及び対応策の概要

また、令和 3 年度の検討[2]では、前年度に実施した地震計の配置の見直し結果に基づき、現地の地表面に地震計を設置した。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、成果及び今後の課題を得た。

【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】

- 観測地震動データを用いた検討の結果、地下施設や周辺岩盤の地震時評価で対象となる振動数帯（0～20(Hz)の範囲）では、緩み領域の影響は認められないことがわかった。

【地下及び地上の観測地震動の整合性の確認】

- 地上で得られた地震動データを用いて 1 次元モデルにより解析用入力地震動を作成し、地下の応答を解析的に求めたが、解析結果と観測結果が整合しなかった。
- 1 次元モデルによる解析用入力地震動設定方法に課題が残った。
- 引戻し解析手法の改良項目として「減衰定数等の周波数依存性の考慮」及び「逆解析による地盤物性の同定」による方法を選定した。

(3) 今年度の検討概要

令和 4 年度は、前年度現地に設置した地震計による地震動データの取得・整理を行うとともに、地震動データを活用して、引戻し解析手法の改良に関する以下の項目について検討した。

- 減衰定数の周波数依存性の考慮
- 逆解析による地盤物性の同定
- 加速度振幅の補正による入力地震動設定方法の検討

(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 4 年度の検討内容の位置づけを図 4.1-2 に示す。

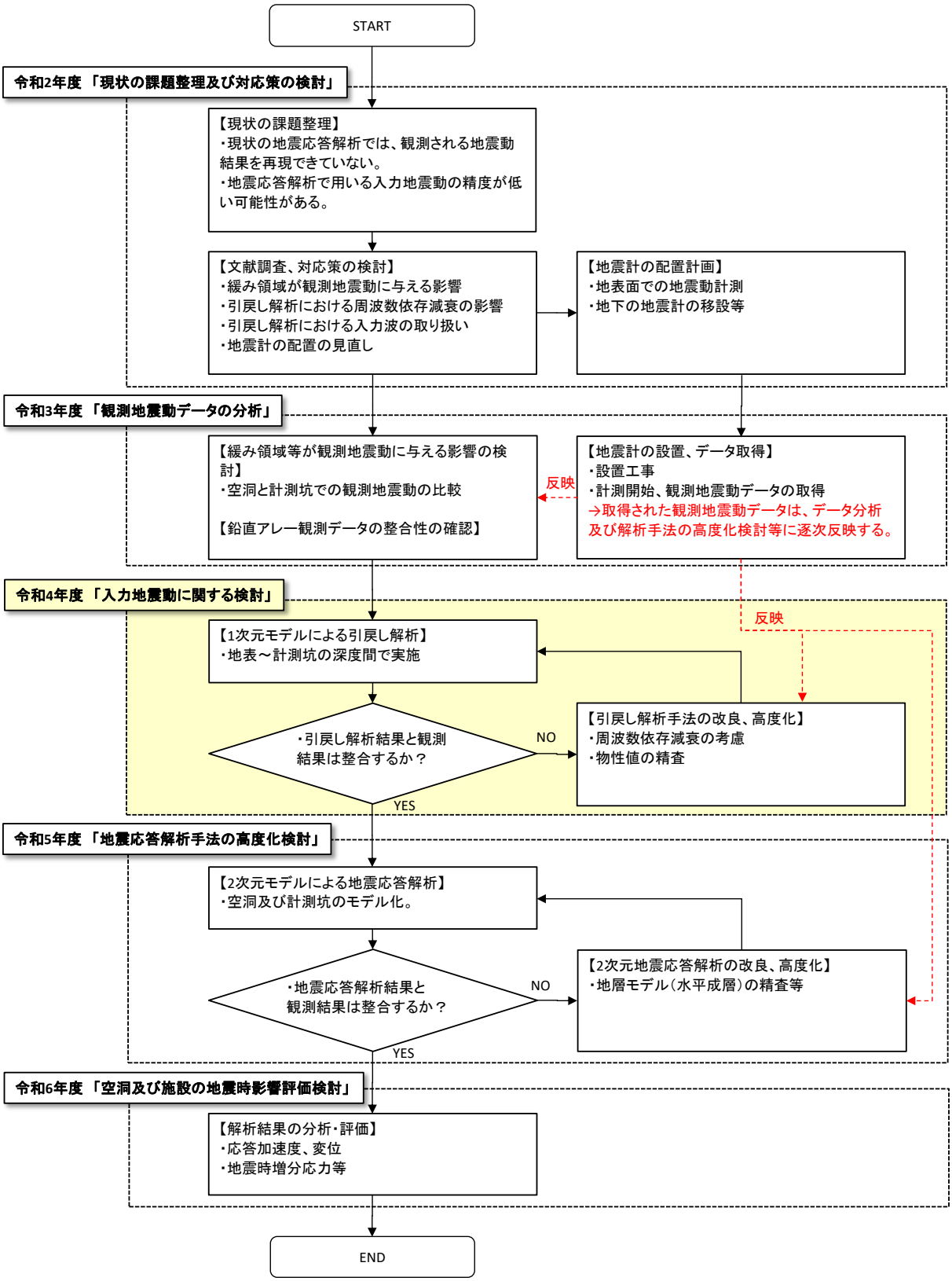
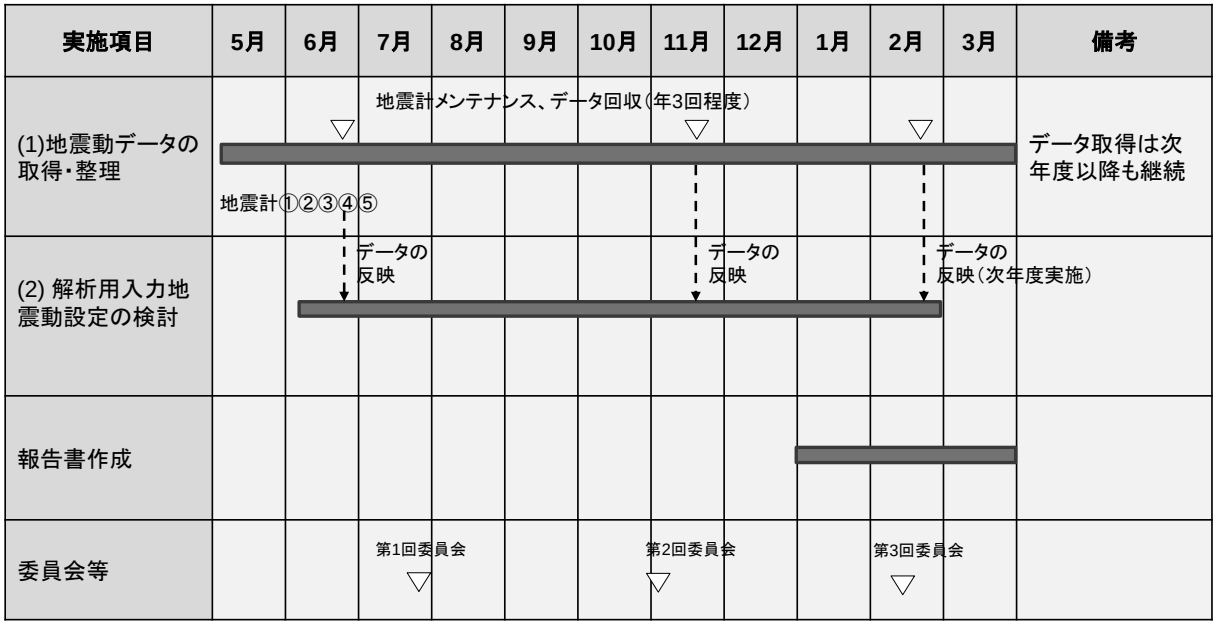


図 4.1-2　5ヶ年実施計画のフロー（案）における令和 4 年度の検討内容の位置づけ

(5) 検討工程

令和 4 年度の工程を表 4.1-1 に示す。

表 4.1-1　令和 4 年度の工程



4.1.2　入力地震動設定の検討

（1）概要

令和 3 年度に地表面に地震計を追加設置し、図 4.1-3 に示すように、現状 5 台（地震計①～⑤）の地震計が稼働している。

観測地震動を利用した地下施設の地震時影響評価の流れ（地震応答解析の流れ）としては、図 4.1-4 に示すように、地表に設置した地震計⑤の観測データを 2 次元モデルの下端深さまで 1 次元モデルで引戻して（2E 出力）、2 次元地震応答解析の入力地震動として用いる（2E 入力）。

しかしながら、現状の 1 次元モデルによる入力地震動の作成方法では、図 4.1-5 に示すように 2 次元モデルの下端に入力した際の地震計①（試験空洞底盤）における解析結果と観測結果の加速度波形（水平方向（y 方向））の最大加速度を比較すると、解析結果の方が 2 倍程度大きくなっている。

1 次元及び 2 次元モデルの地盤物性値には、隣接地域における地盤物性値[3]を類似する地盤物性値として代用していることも上記の応答加速度の不整合に影響を与えていると考えられる。当該位置の地盤物性値の取得については、本検討での実施が難しいことから、本検討では現状設定している地盤物性値をベースとして、図 4.1-6 に示す昨年度改良項目案として選定した「減衰定数等の周波数依存性の考慮」及び「逆解析による地盤物性の同定」について検討することとした。

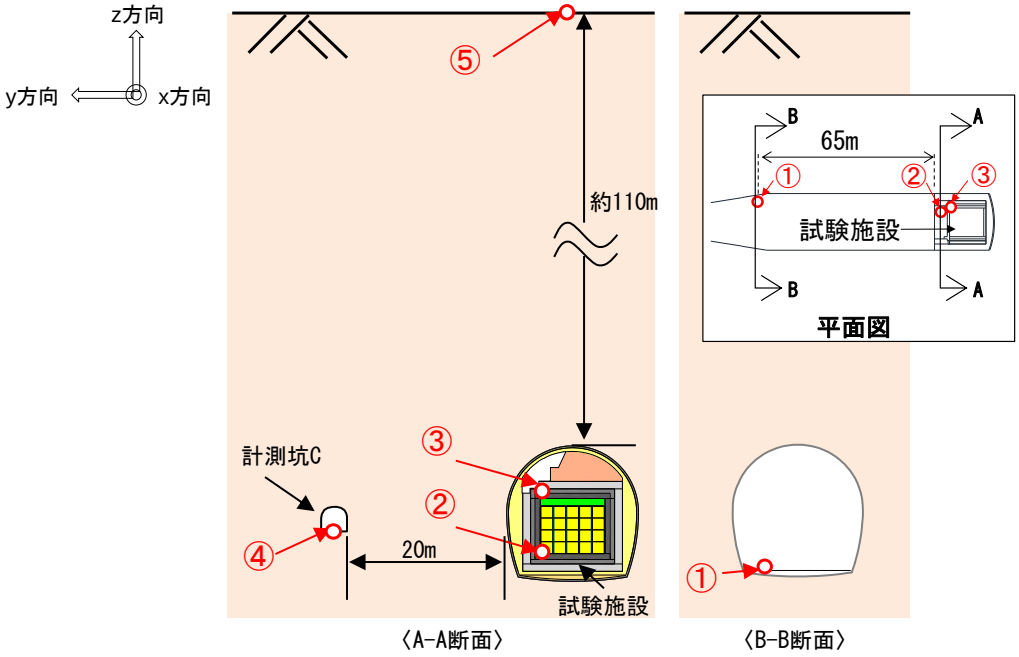


図 4.1-3　地震計の設置位置

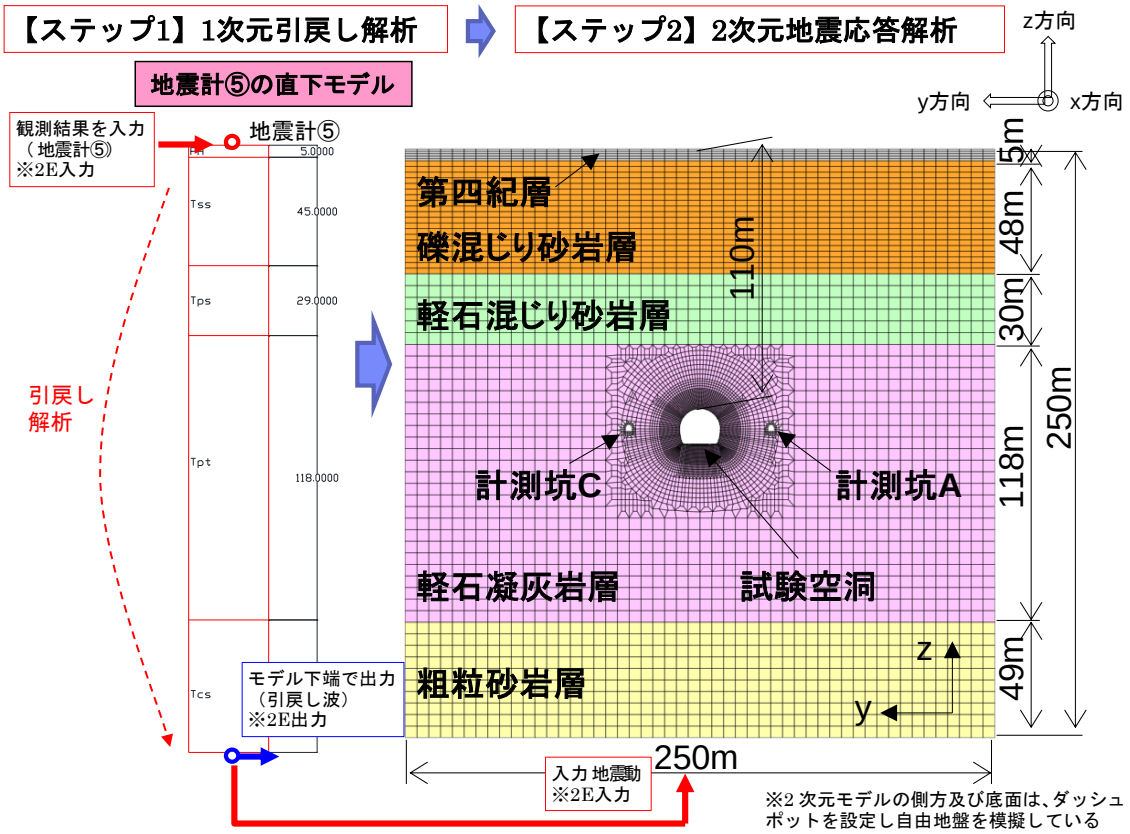


図 4.1-4　地震応答解析の流れ（粘性境界を※で追記する）

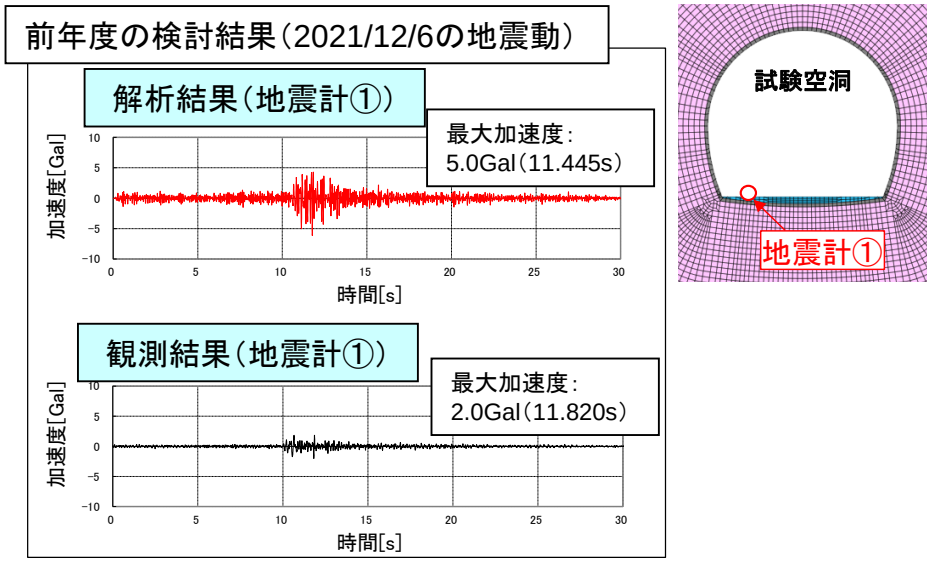


図 4.1-5　地震計①における解析結果（2 次元地震応答解析）と観測結果の比較

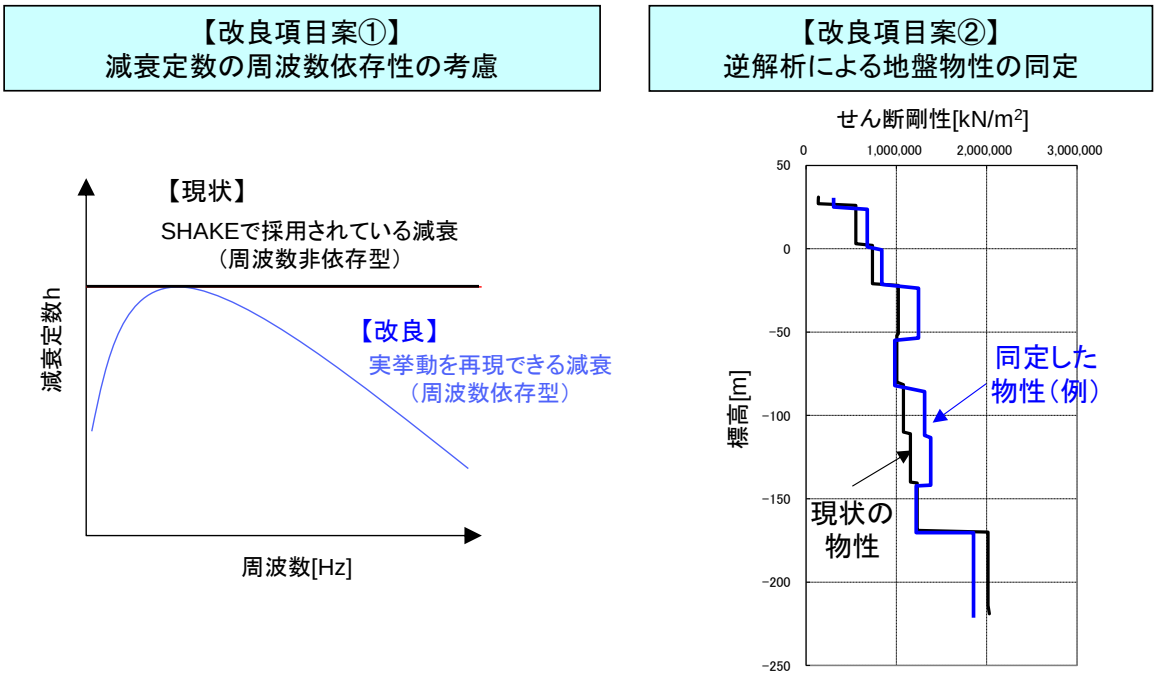


図 4.1-6　引戻し解析手法の改良項目（案）

(2) 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 4.1-7 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.[4]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[5]。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 4.1-8 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 4.1-8 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[6]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、令和 2 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[7]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 4.1-2 に末冨他[7]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。

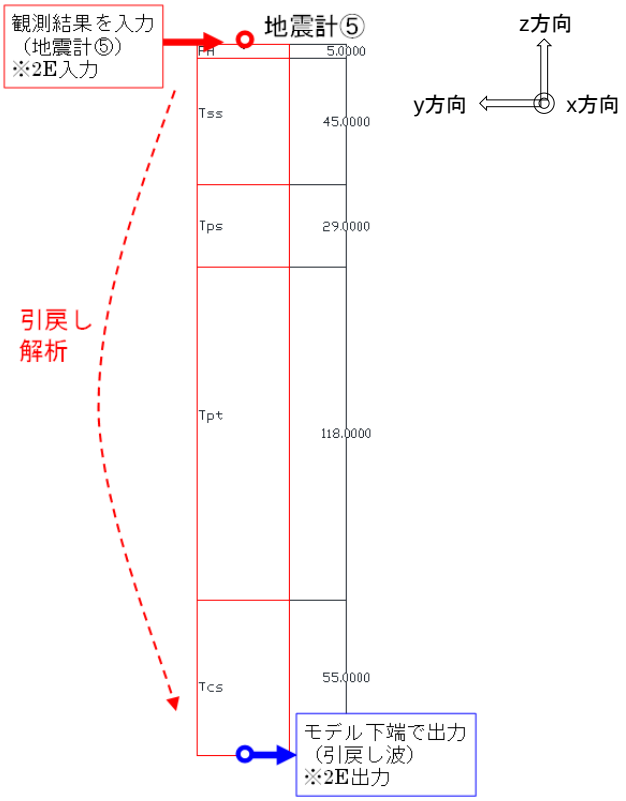


図 4.1-7　1 次元モデルによる引戻し解析

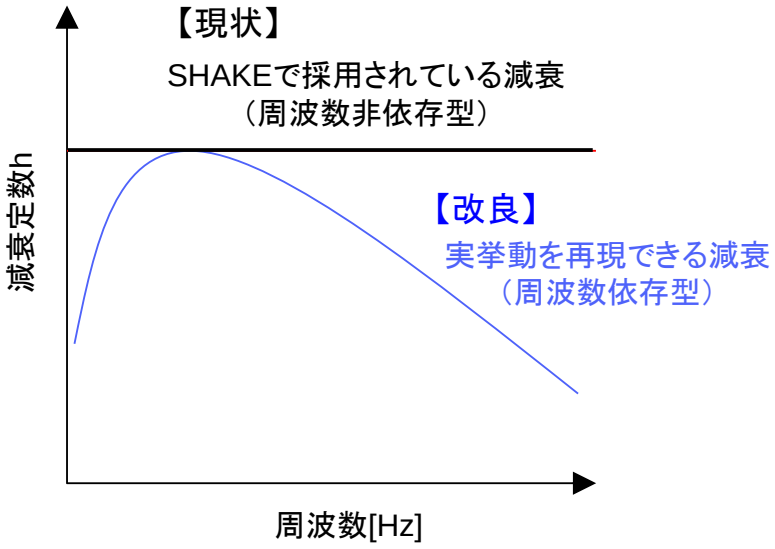


図 4.1-8　SHAKE における減衰の周波数依存の模式図

表 4.1-2　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.[4]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[5]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.[8]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[9]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。

1）解析条件

本検討では、表 4.1-2 の「SHAKE」を用いて現状の減衰定数の周波数依存性を考慮しない場合を、また「FDEL」を用いて減衰定数の周波数依存性を考慮した場合を比較分析した。

解析モデルは、図 4.1-9 に示すように、地表から入力した観測データをモデル下端まで引き戻した。地表に入力する観測データは、図 4.1-10 に示すように 2021 年 12 月 6 日に記録した空洞横断面の水平方向（y 方向）の観測データを用いた。

解析用地盤物性値は、表 4.1-3 に示すように既往報告書[3]に記載されている当該サイト付近の物性値を用いた。

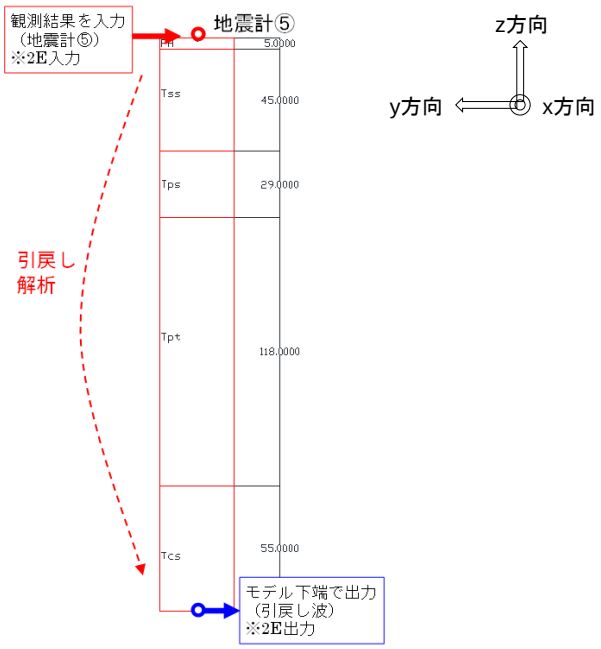


図 4.1-9　1 次元モデルによる引戻し解析

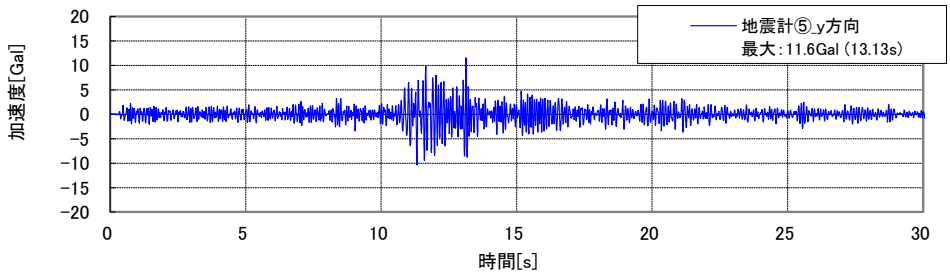


図 4.1-10　地表面の観測データ（2021 年 12 月 6 日、y 方向）

表 4.1-3　解析用地盤物性値[3]

地層	単位体積重量	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	$1.83\text{-}8.10 \times 10^{-4} \cdot z$	$660\text{-}7.72 \cdot z$	$0.44+5.51 \times 10^{-4} \cdot z$	$1/(1+4.41 \cdot \gamma^{0.895})$	$14.7 \cdot \gamma^{0.381}-1.34$
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	$1/(1+3.37 \cdot \gamma^{0.663})$	$13.2 \cdot \gamma^{0.260}-0.945$

2）解析結果

a．観測地震動を等倍（1.0 倍）で入力した場合

まず、図 4.1-10 に示した観測地震動のデータを、そのまま入力した場合の引き戻し波形を図 4.1-11 に示す。図 4.1-11 に示すように、周波数依存減衰の考慮の有無により引き戻し波形には最大加速度を含め、差異はほとんど生じていないことがわかる。このときの表層（PH 層）のせん断ひずみを確認すると、図 4.1-12 に示すようにせん断ひずみは 0.001%以下と小さいことがわかった。ひずみレベルが小さい範囲では、図 4.1-12 に示すように減衰定数の変動も小さいために、周波数依存減衰の考慮の有無の影響はほとんど出なかったものと推察される。

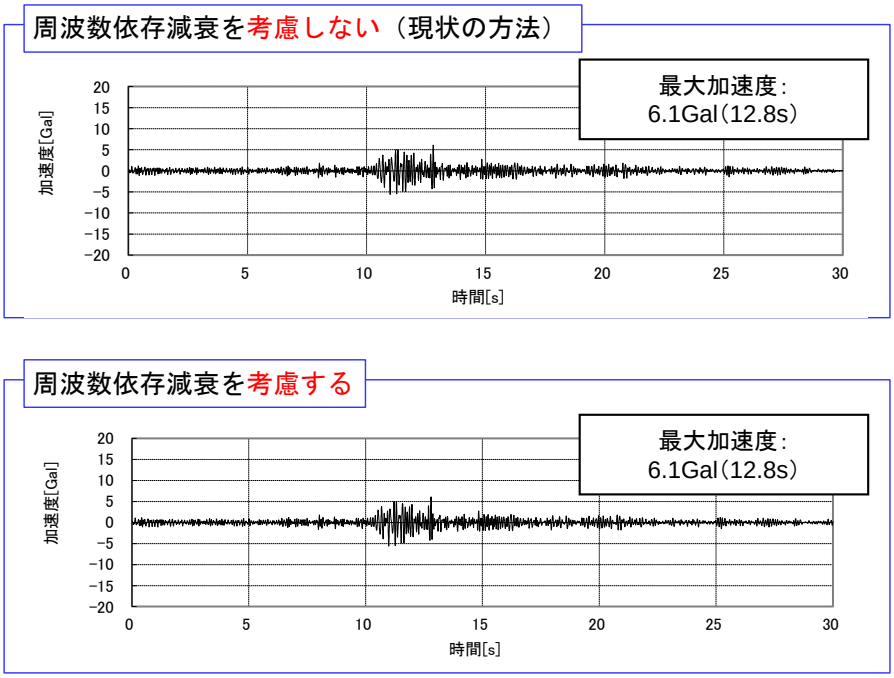


図 4.1-11　引戻し波形の比較（1.0 倍）

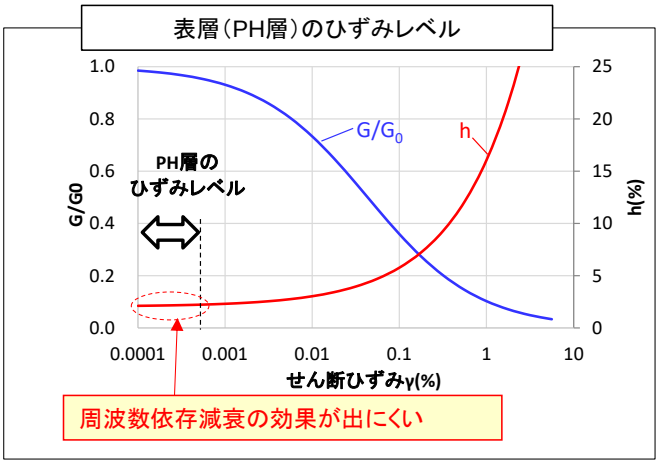


図 4.1-12　表層（PH 層）のせん断ひずみレベル（1.0 倍）

b. 観測地震動の加速度振幅を 100 倍にして入力した場合

次に、せん断ひずみレベルが大きくなった場合に、周波数依存減衰の考慮の有無が応答加速度に与える影響を確認した。

ここでは、図 4.1-10 に示した観測地震動のデータの加速度振幅を 100 倍にして入力することとした。引き戻し波形を図 4.1-13 に示す。図 4.1-13 に示すように、周波数依存減衰を考慮することにより、引き戻し波形の最大加速度は 681gal から 559gal（18%減）となり、周波数依存減衰の効果がみられることがわかった。このときの表層（PH 層）のせん断ひずみを確認すると、図 4.1-14 に示すようにせん断ひずみは 0.1%程度まで大きくなっていることを確認した。せん断ひずみレベルが大きくなると、図 4.1-14 に示すように減衰定数の変動も大きくなるために、周波数依存減衰の考慮の有無の影響が出たものと推察される。

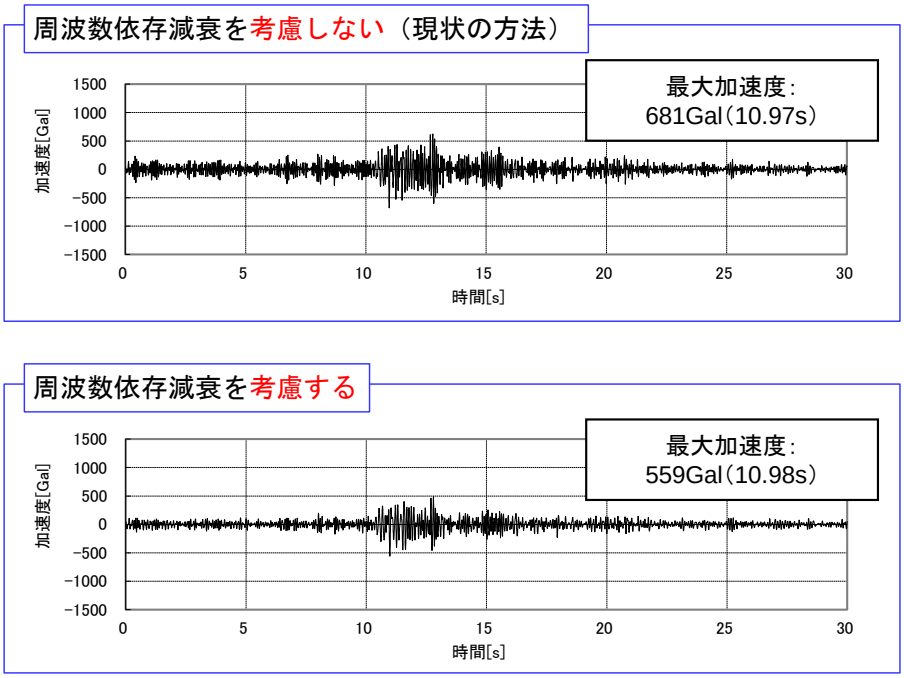


図 4.1-13　引戻し波形の比較（100 倍）

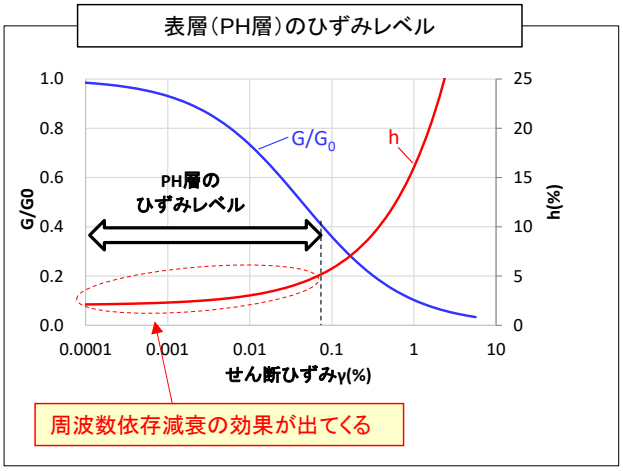


図 4.1-14　表層（PH 層）のせん断ひずみレベル（100 倍）

3）評価

減衰定数の周波数依存性の考慮が応答値に与える影響を比較分析した結果、加速度レベルが比較的大きい数百 Gal の地震動に対しては周波数依存減衰の効果は得られることがわかった。しかし、六ヶ所村で観測される数十 Gal 程度の地震動に対しては、周波数依存減衰の効果はほとんど得られないことがわかった。

(3) 逆解析による地盤物性の同定

1）概要

1 次元モデルで観測地震動を地下に引戻した場合の解析結果と観測結果を整合させる方法の一つとして、逆解析による地盤物性の同定について検討した。

2）表層（PH 層）の物性値の精査

前述の「(2) 減衰定数の周波数依存性の考慮」において検討した、2021 年 12 月 6 日に記録した地震動の引戻し解析における初期せん断剛性と最大加速度の深度分布を図 4.1-16 に示す。図 4.1-16 には、現在 PH 層と設定している表層部分を黄色で示している。PH 層は、そのほかの層と比較して初期せん断剛性 G_0 が小さく、最大加速度（E+F 波）の増幅が大きくなっていることがわかる。すなわち PH 層の物性が加速度応答に与える感度は大きいと考えられる。

現状の PH 層の初期せん断剛性 G_0 は、当該地点付近で取得した物性値を引用して、以下の値としている。

$G_0=139MN/m^2$　（Vs=270m/s 相当）

一方、図 4.1-15 に示すように、地震計⑤を設置した際の表層の地盤調査においては、表層から 3～4m は火山灰層であり、原位置土質試験結果から求めた換算 N 値は 3～5 程度であることがわかっている。このときの N 値から初期せん断剛性 G_0 を推定すると、以下となる。

$G_0=42～70MN/m^2$　（Vs=148～191m/s 相当）
（道路橋示方書　耐震設計編（2012）の推定式より）

よって、現地の表層地盤の G_0 は、現状設定している値の 30～50%程度であると推察される。そこで、現状の PH 層の G_0 を 30～50%に振った場合の引戻し波に与える影響を確認したところ、図 4.1-17 に示すように、現状（$G_0\times1.0$）と比較して、G_0 を 0.3 倍～0.5 倍にした場合の引戻し波（E+F 波）の最大加速度は 0.6～0.7 倍程度に小さくなることがわかった。

現状の PH 層の G_0 を用いた引戻し解析では、解析結果の方が観測結果よりも大きくなる傾向がみられるが、原位置の N 値から換算した G_0 を適用することにより、解析結果が観測結果に近づく傾向が確認できた。よって、PH 層の G_0 は、原位置の N 値から換算した G_0（現

状の G_0 の 0.3 倍～0.5 倍程度）を適用した方がよいと考えられる。具体的には、中間の 0.4 倍を採用し、PH 層の G_0 は以下のように設定することとした。

G_0=55.6MN/m² （Vs=171m/s 相当）

図 4.1-15　地表に設置した地震計⑤の設置環境

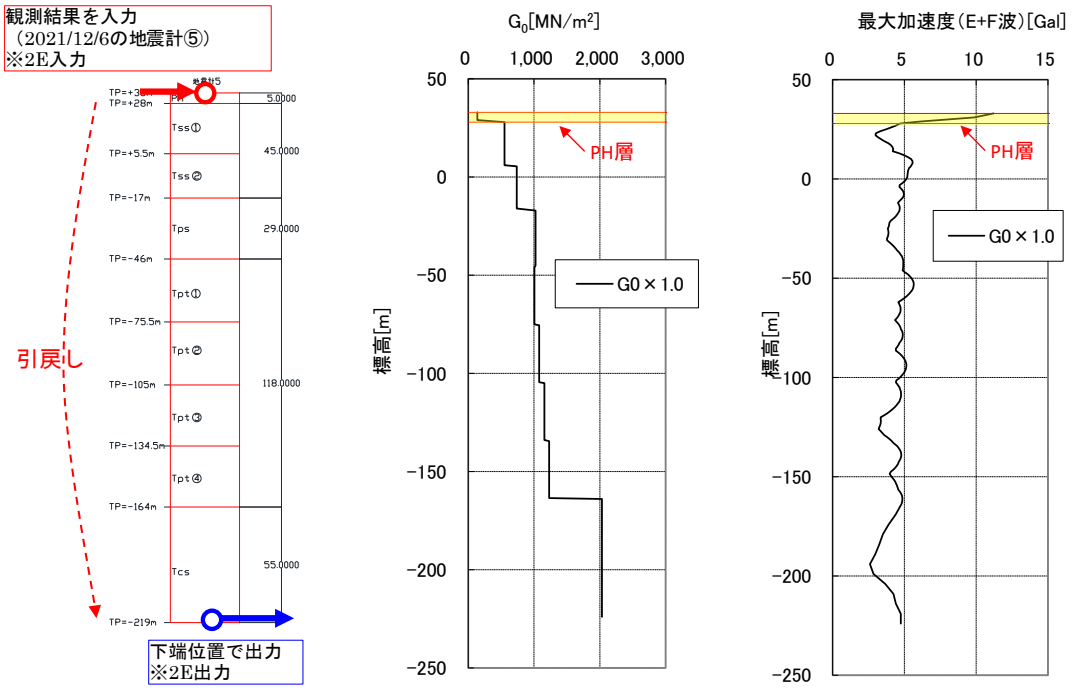


図 4.1-16　初期せん断剛性と最大加速度の深度分布（2021 年 12 月 6 日）

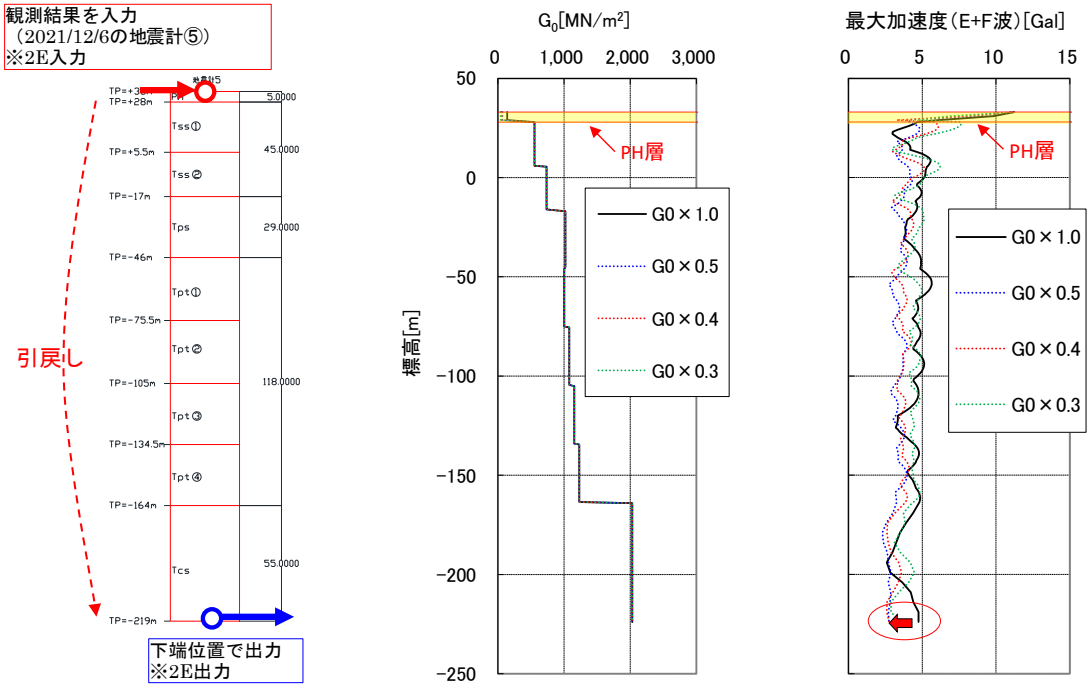


図 4.1-17　表層の初期せん断剛性をパラメータとした最大加速度の深度分布

3）地震計の土台による影響確認

前述の図 4.1-15 に示すように、地震計⑤を設置した箇所の周辺は、表層から 3～4m が火山灰層であり不安定な場所であることから、図 4.1-18 に示すように、コンクリートの土台（土台の下には荷重分散と沈下防止のため、厚さ 200mm の基礎砕石を敷設）を構築し、土台の上に地震計を設置している[1]。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。）を参考としている。

＊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、コンクリートの土台及び下部の基礎砕石が地震計⑤に与える影響について以下に分析した。ここでは、当該材料の固有周期を概算した。

固有周期の算定に必要なせん断波速度については、文献[10][11]を参考として、コンクリートは Vs=2000(m/s)、基礎砕石は Vs=200(m/s)を想定した。また、コンクリートの高さ H=1.1(m)、基礎砕石の高さ H=0.2(m)の条件より計算すると、表 4.1-4 に示すように固有周期は 0.006(s)、固有振動数は 161(Hz)となる。

地下空洞や地下施設の地震時評価で対象としている振動数帯は最大で 20(Hz)程度であり、それに対してコンクリート土台及び基礎砕石の固有振動数は 161(Hz)と大きく離れているため、コンクリート土台及び基礎砕石が、地下空洞や地下施設の評価に与える影響は小さいと考えられる。

また、例として 2022 年 3 月 16 日に観測された地震計⑤の観測データ及び当該エリア付近の KiK-net 六ヶ所（地表）の観測データを図 4.1-19 及び図 4.1-20 に示す。ただし、両者の時間の同期は行っていない。図 4.1-19 及び図 4.1-20 に示すように、観測地点が異なるため加速度振幅は両者で差異はあるものの、主要動の特徴は両者で概ね整合している。このことからも、コンクリート土台及び基礎砕石が地震計⑤の観測データに与える影響は小さいと考えられる。

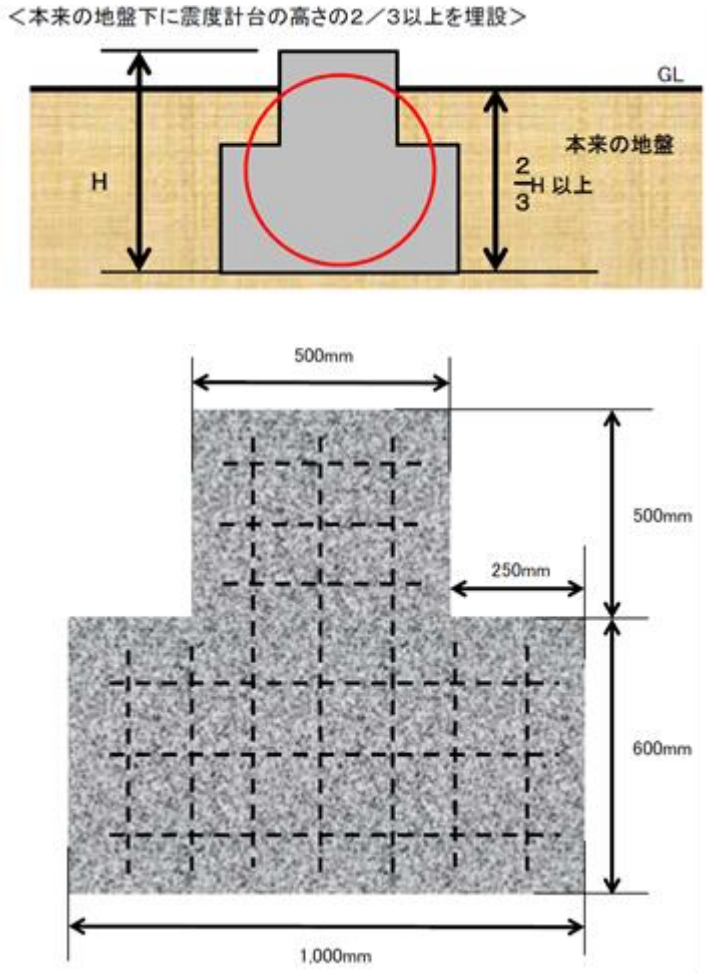


図 4.1-18　地震計基礎の埋設の条件と構造図（気象庁基準）

表 4.1-4　固有周期及び固有振動数の概算

	Vs	H	H/Vs
	(m/s)	(m)	(s)
コンクリート	2000	1.1	0.0006
砕石	200	0.2	0.0010
		計	0.0016

固有周期(s)= 4* Σ(H/Vs)
= **0.006**
固有振動数(Hz)= **161.29**

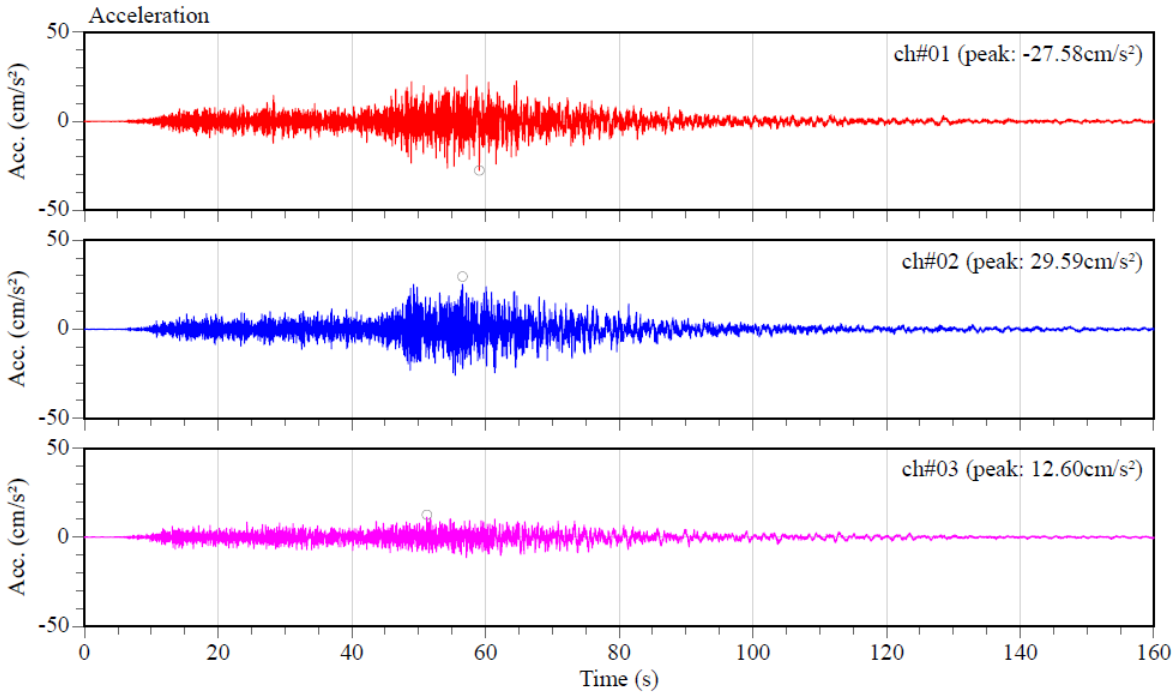


図 4.1-19　地震計⑤（地表面、2022 年 3 月 16 日）

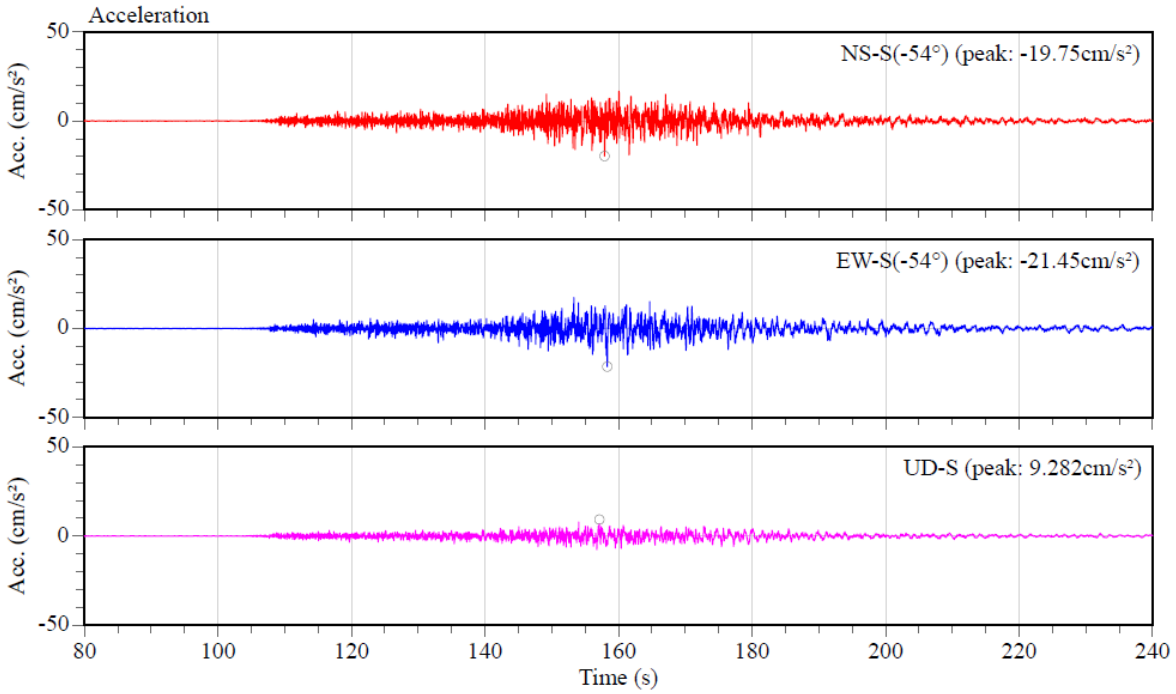


図 4.1-20　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後、2022 年 3 月 16 日）

4）解析モデルの合理化検討

a. 当初計画

地震計⑤（地表）と地震計④（地下）の観測データを利用して、観測データを再現できる 1 次元モデルによる引戻し解析手法を検討するという観点から、地震計⑤（地表）と地震計④（地下）の平面座標は、概ね一致させておくことが望まれたが、地表面における地震計の設置環境及び運用条件等を検討した結果、地震計⑤は図 4.1-21 に示すように、地震計④とは平面距離で約 82m 離れる位置に設置した。地震計⑤及び地震計④の位置を通る試験空洞の横断面方向の地質構造を表 4.1-5 に示す。表 4.1-5 に示すように、両地震計が設置されている箇所の鉛直方向の地質構造も若干異なることから、1 次元モデル作成にあたっては、図 4.1-22 に示すように、地震計⑤と地震計④の鉛直ラインで個別に作成する計画としていた。

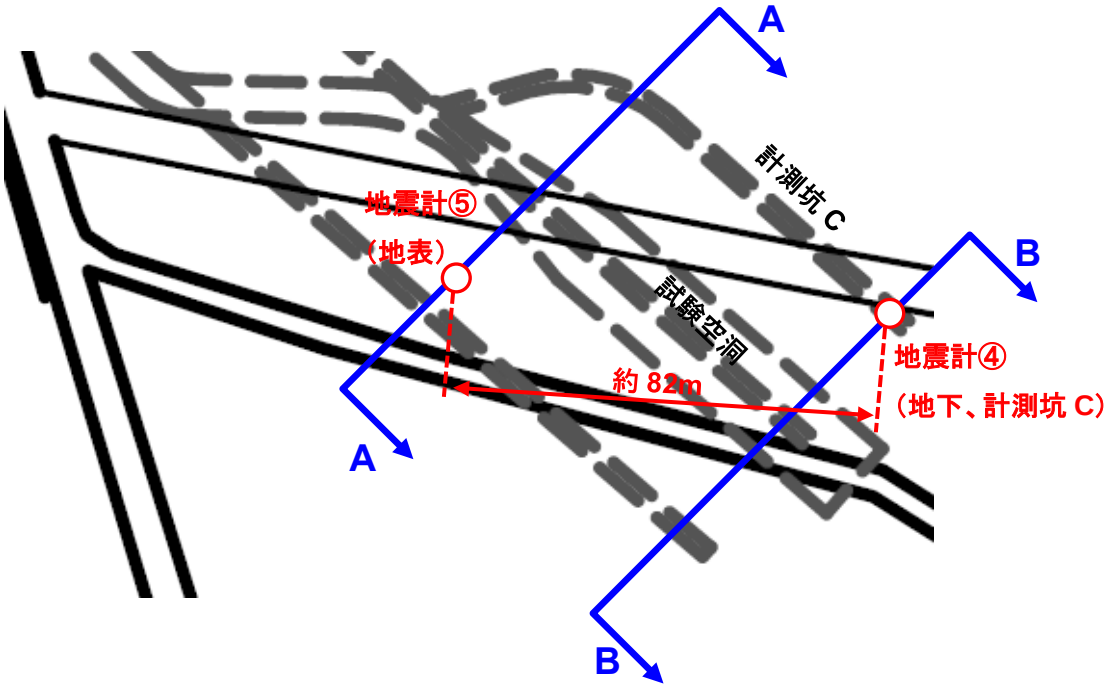
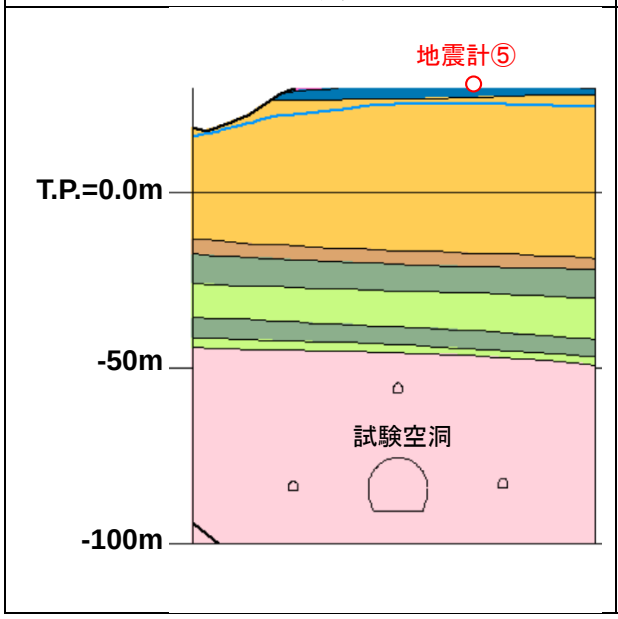
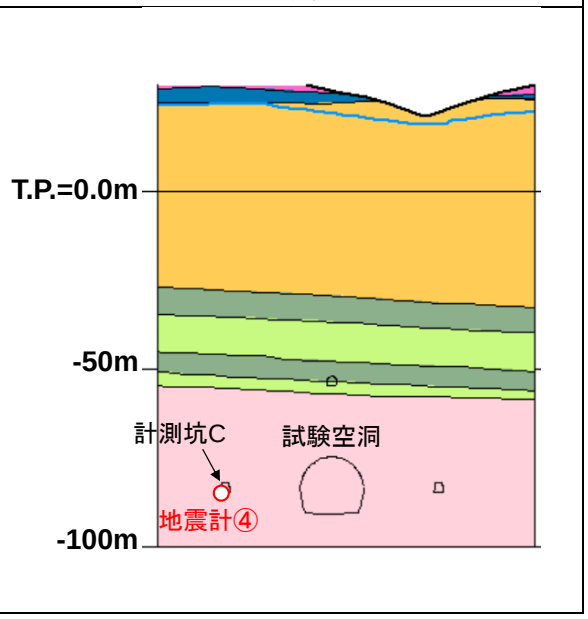


図 4.1-21　地震計⑤（地表）と地震計④（地下）の平面位置の関係

表 4.1-5　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

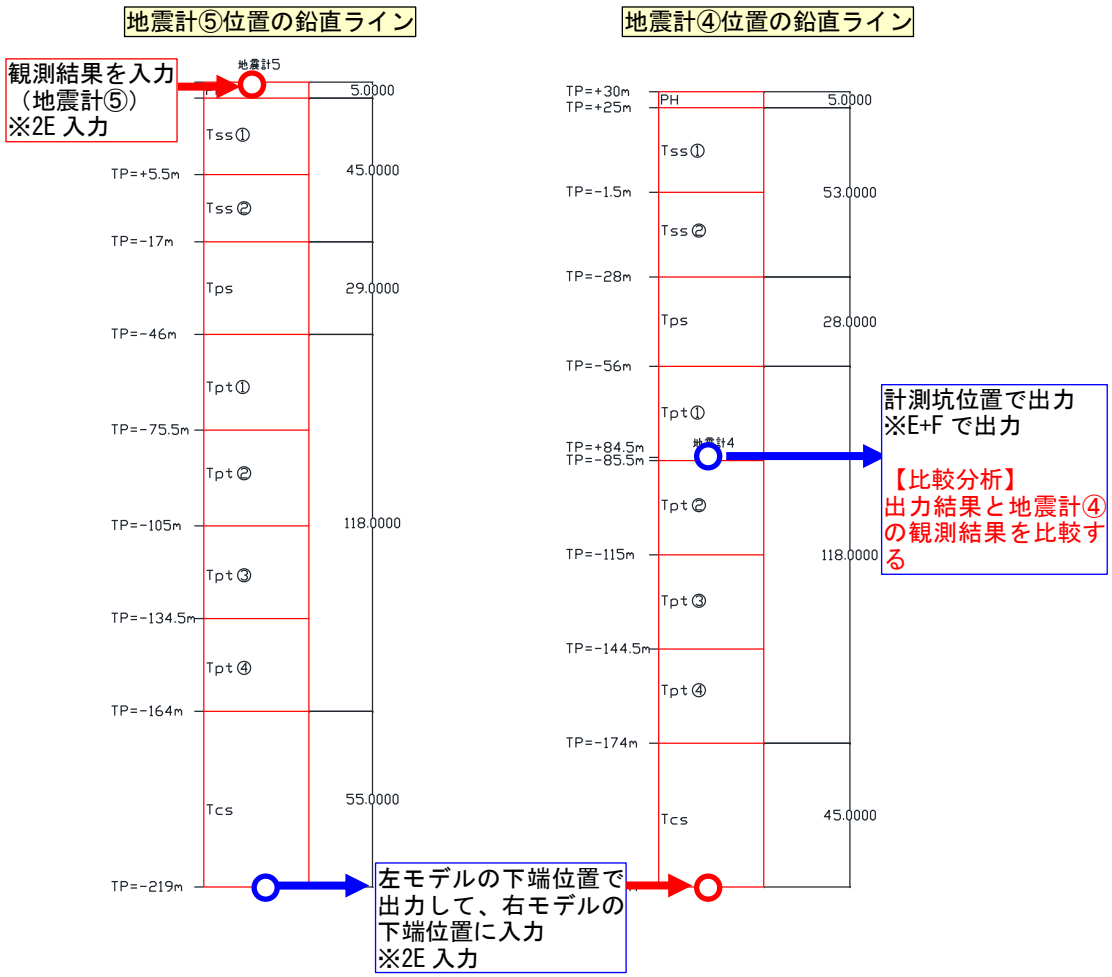


図 4.1-22　地震計⑤と地震計④の位置の 1 次元モデル

b. 解析モデルの合理化

前述の図 4.1-22 に示すように、

(1) 地表での観測地震動（地震計⑤）のデータを、地震計⑤位置の 1 次元モデルでモデル下端まで引戻す。
(2) 引戻した波形を地震計④位置の 1 次元モデルに入力して、地震計④の深度における解析結果と観測結果の整合性を確認する。

の手順で引戻し解析と引上げ解析で別々の 1 次元モデルを扱うことは可能であったものの、取得される地震動データ数及び解析手法の改良検討に伴うパラメータスタディ等によって検討ケースが膨大になった場合、2 つのモデルを常時に取り扱うことは解析時間も膨大になることが懸念された。そこで、解析結果と観測結果の整合性の見通しを得るためという目的に絞ることで、2 つのモデルの一本化について検討した。

具体的には図 4.1-23 に示すように、地震計④ラインにおける地震計④位置の応答が、地震計⑤ラインのどの標高で生じているかを確認する。その結果、両者の応答結果が整合する標高が確認できれば、地震計⑤ラインのモデルで一本化できると考えた。

4 回の地震動（2021/12/6、2022/3/16、3/18、4/28）を対象とした検討結果を表 4.1-6～表 4.1-9 に示す。表 4.1-6～表 4.1-9 の黒い太枠は地震計④位置の応答である。地震計⑤ラインのモデルの出力標高を EL=-81.5m～-94.3m で振った結果と、地震計④位置の結果を比較すると、青い太枠で囲った EL=-84.5m（地震計④の設置標高）で比較的整合する傾向がみられた。

以上より、地震計⑤ラインのモデルにおいて、EL=-84.5m の出力結果は、地震計④位置での応答と概ね整合すると評価し、地震計⑤ラインのモデルで一本化して検討することとした。

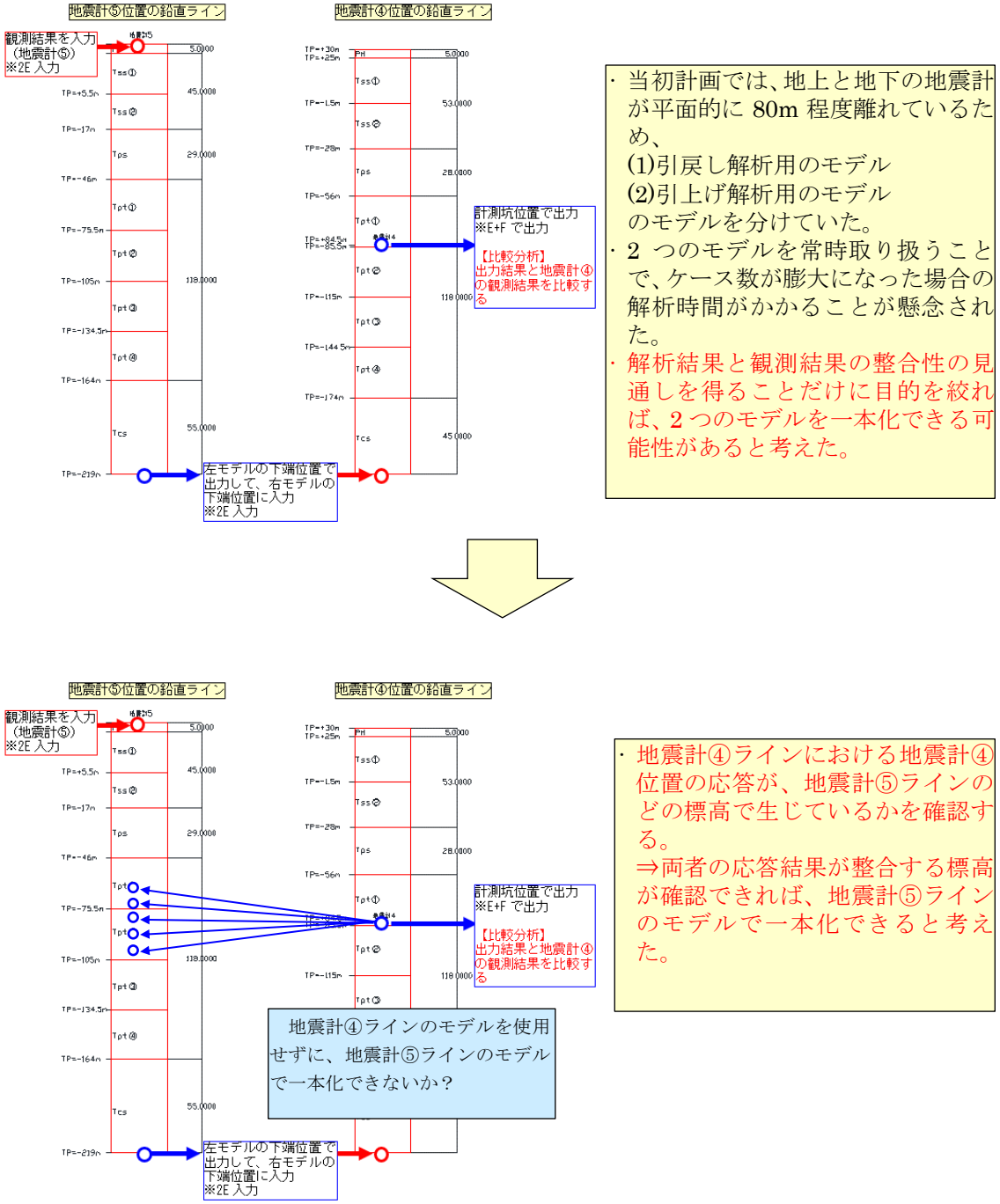


図 4.1-23　地震計⑤ラインのモデルによるモデルの一本化について

表 4.1-6　各標高における地震計④位置の結果との整合性確認（12/6）

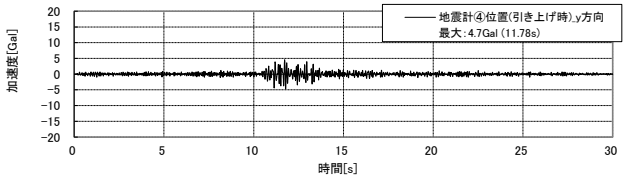
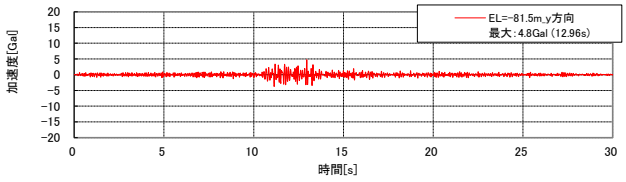
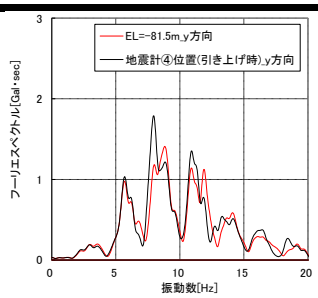
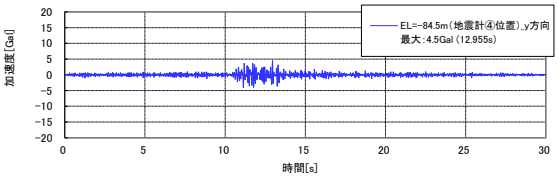
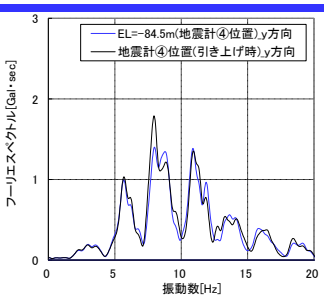
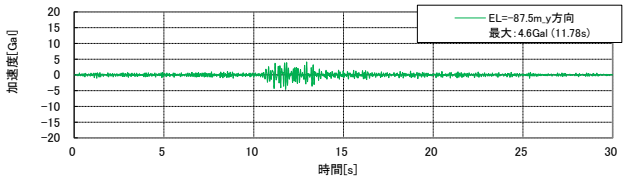
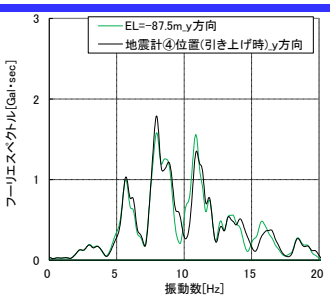
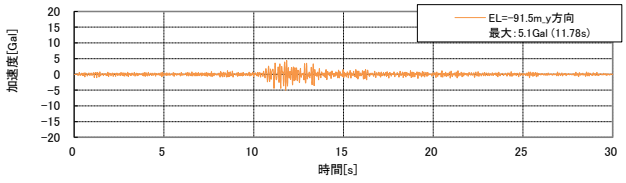
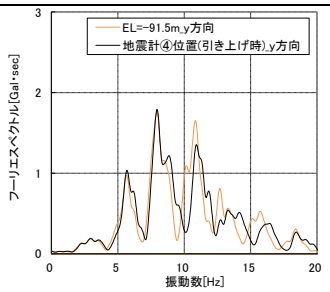
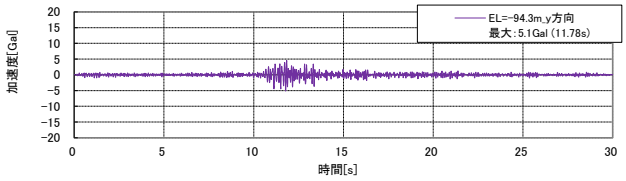
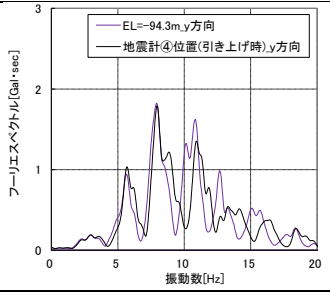
標高	応答加速度波形	フーリエスペクトル （地震計④位置と比較）
地震計④ 位置 （引き上 げ時）		※下のグラフで各標高の 結果と比較
EL= -81.5m		
EL= -84.5m （地震計 ④位置）		
EL= -87.5m		
EL= -91.5m		
EL= -94.3m		

表 4.1-7　各標高における地震計④位置の結果との整合性確認（3/16）

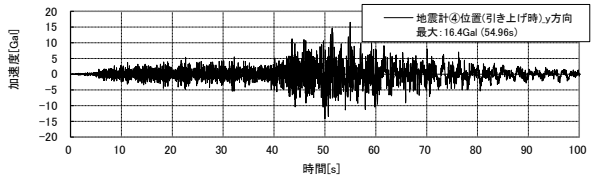
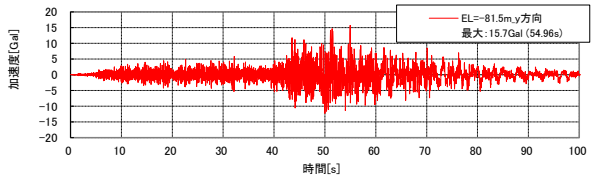
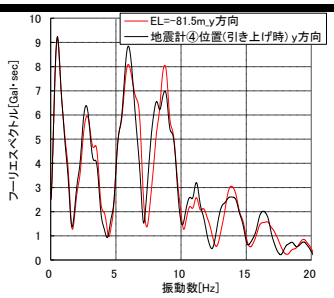
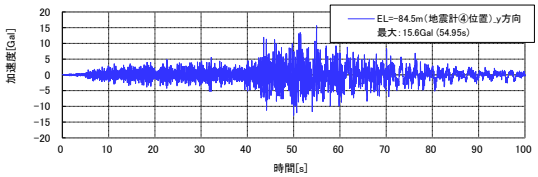
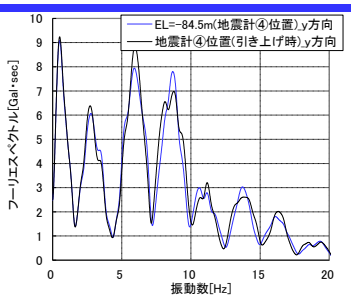
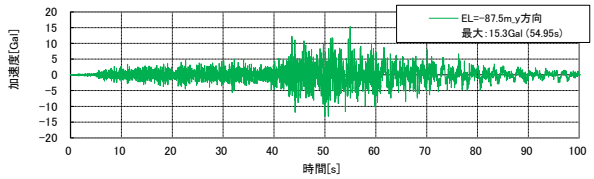
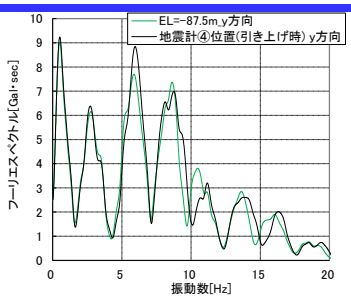
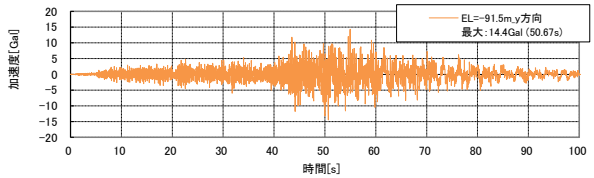
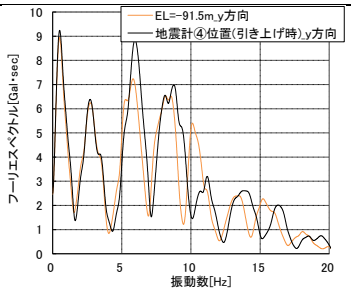
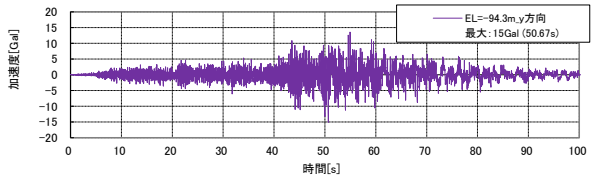
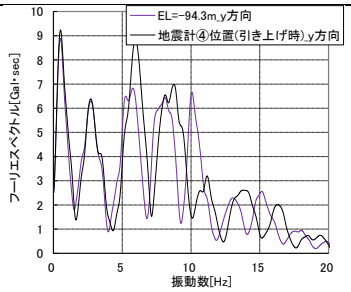
標高	応答加速度波形	フーリエスペクトル （地震計④位置と比較）
地震計④ 位置 （引き上 げ時）		※下のグラフで各標高の 結果と比較
EL= -81.5m		
EL= -84.5m （地震計 ④位置）		
EL= -87.5m		
EL= -91.5m		
EL= -94.3m		

表 4.1-8　各標高における地震計④位置の結果との整合性確認（3/18）

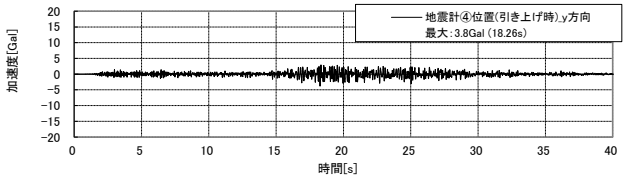
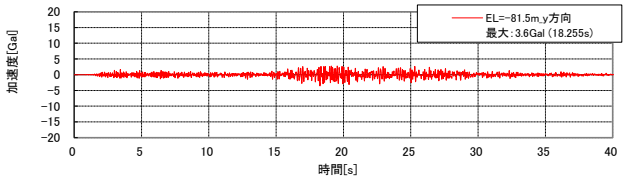
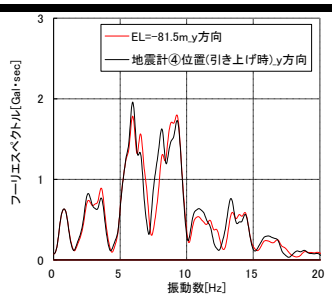
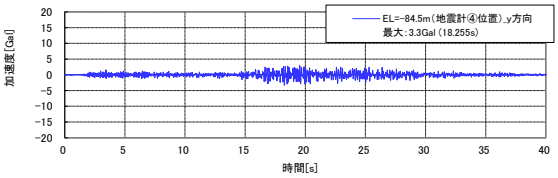
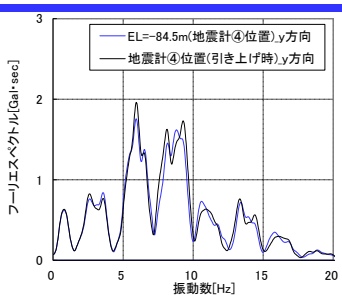
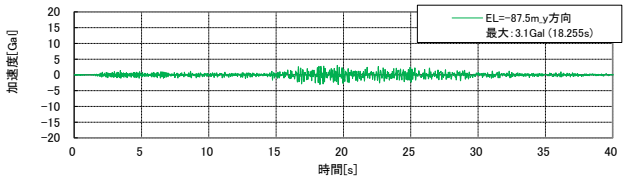
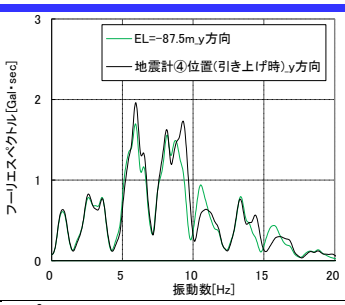
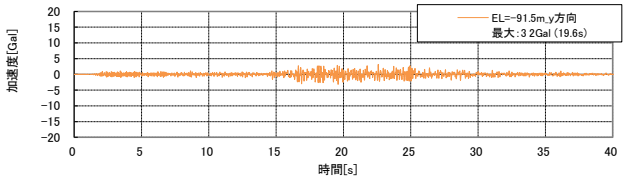
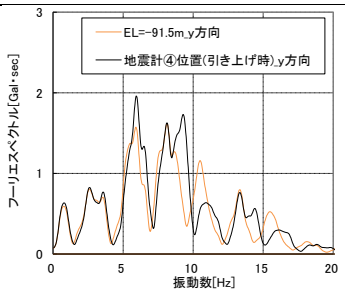
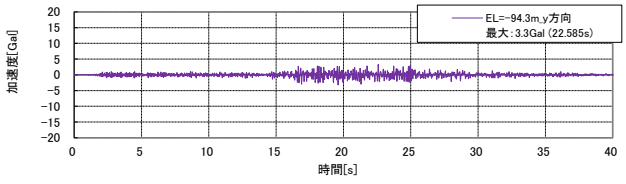
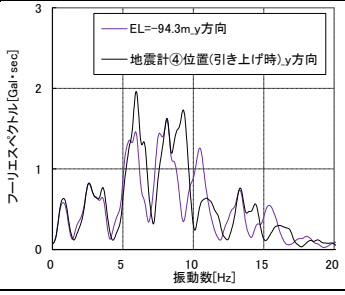
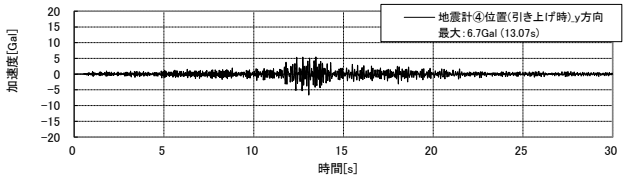
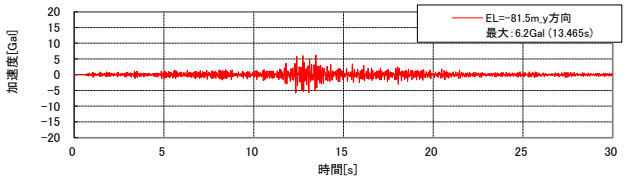
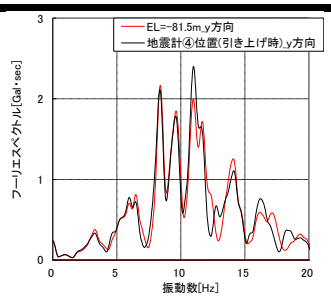
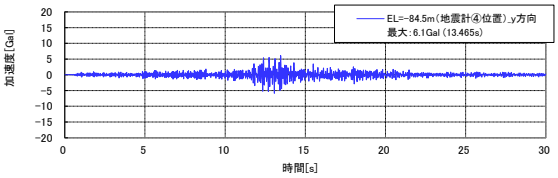
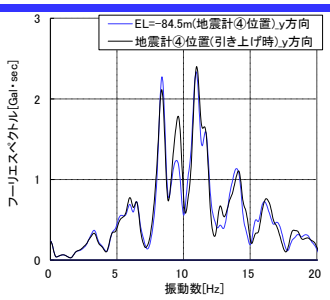
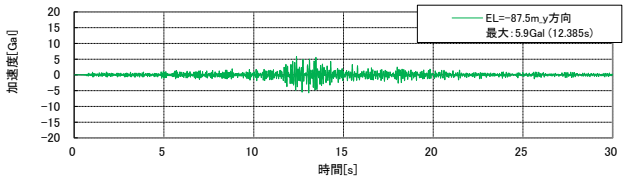
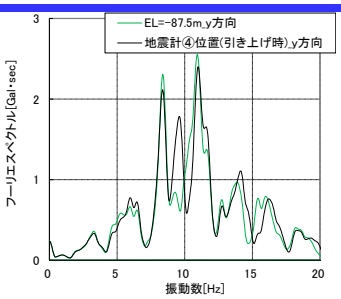
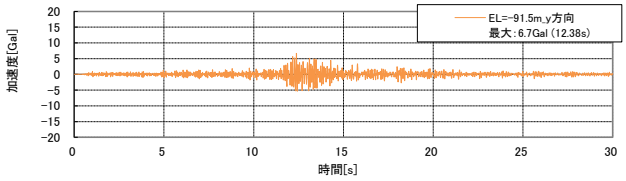
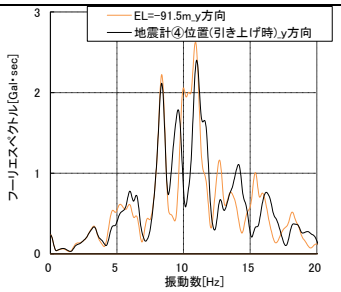
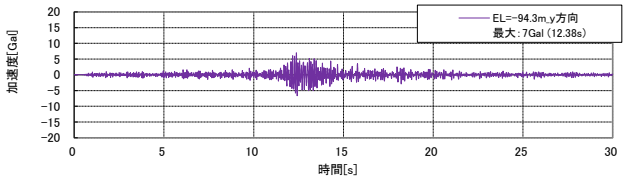
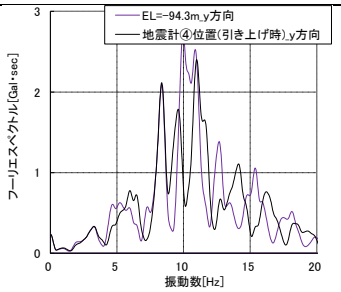
標高	応答加速度波形	フーリエスペクトル （地震計④位置と比較）
地震計④ 位置 （引き上 げ時）		※下のグラフで各標高の 結果と比較
EL= -81.5m		
EL= -84.5m （地震計 ④位置）		
EL= -87.5m		
EL= -91.5m		
EL= -94.3m		

表 4.1-9　各標高における地震計④位置の結果との整合性確認（4/28）

標高	応答加速度波形	フーリエスペクトル （地震計④位置と比較）
地震計④ 位置 （引き上 げ時）		※下のグラフで各標高の 結果と比較
EL= -81.5m		
EL= -84.5m （地震計 ④位置）		
EL= -87.5m		
EL= -91.5m		
EL= -94.3m		

5）初期せん断剛性をパラメータとした感度解析

逆解析による地盤物性の同定の見通しを得るために、地表付近の地層の初期せん断剛性をパラメータとして、地震計⑤の観測データを 1 次元モデルで地震計④の深度まで引き戻した際の応答値に与える感度を確認した。

a．パラメータ変化の対象とする地層の選定

初期せん断剛性を変化させることにより、どの地層が地震動の伝播に影響を与えやすいかを評価した。

図 4.1-24 に示すように、2022/3/16 の地震計⑤の観測結果をモデル上端から入力した場合の各地層境界におけるフーリエスペクトルを抽出し、さらに上下の地層境界間の比（伝達関数）を確認した。その結果、表層に近い PH、Tss①、Tss②、Tps の層の伝達関数が大きくなる傾向がみられた。すなわち、上記の 4 層では地震動が大きく増幅する振動数帯を有しており、初期せん断剛性を変化させた場合の応答値に与える感度も大きくなると推察された。

そこで、上記 4 層を対象として初期せん断剛性のパラメータスタディを実施し、解析結果と観測結果の整合の見込みを確認することとした。

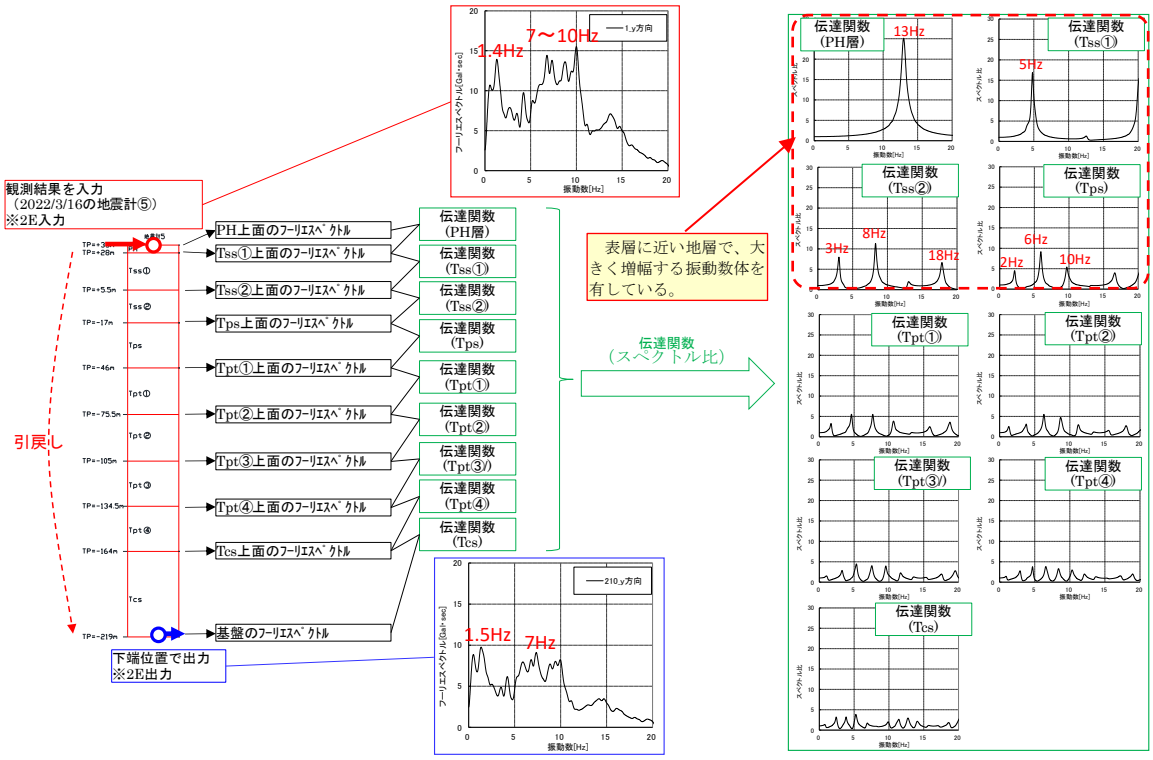


図 4.1-24　地層境界間の伝達関数

b. 検討条件

ここでは、図 4.1-25 に示すように地震計⑤の観測結果をモデル上端から入力し、表層の 4 層（PH、Tss①、Tss②、Tps）の初期せん断剛性を変化させた場合の地震計④位置における応答値を出力する。初期せん断剛性の変化量は、表 4.1-10 に示すように、現状設定している初期せん断剛性の値を 1.0 倍又は 0.5 倍した組合せを設定し、計 5 ケースを実施した。

地震計④の位置まで引戻した解析結果と地震計④の観測結果を比較することにより、逆解析による地盤物性の同定の見通しについて評価した。

なお、検討に用いた地震動は 2021/12/6 と 2022/3/16 の 2 波とした。

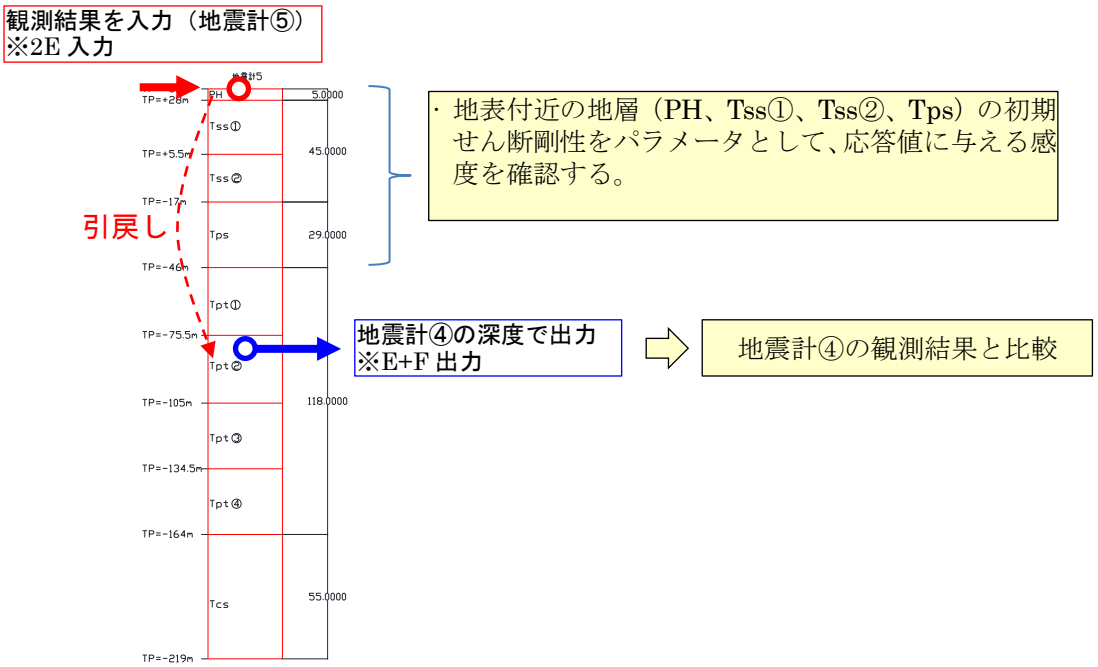


図 4.1-25　表層の初期せん断剛性をパラメータとした引戻し解析

表 4.1-10　各ケースの表層の初期せん断剛性の組合せ（各層の剛性の倍率）

地層	ケース 1（現状）	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5
PH	1.0 倍	0.5 倍	0.5 倍	0.5 倍	0.5 倍
Tss①	1.0 倍	1.0 倍	0.5 倍	0.5 倍	0.5 倍
Tss②	1.0 倍	1.0 倍	1.0 倍	0.5 倍	0.5 倍
Tps	1.0 倍	1.0 倍	1.0 倍	1.0 倍	0.5 倍

※表中の数値は、現状設定している初期せん断剛性に対する比率である。

c．検討結果

2021/12/6 の波形を用いた場合の結果を表 4.1-11、2022/3/16 の波形を用いた場合の結果を表 4.1-12 に示す。表 4.1-11～表 4.1-12 に示すように、表層の初期せん断剛性を変化させることにより、地震計④位置の応答値も変化することが確認できた。

しかしながら、解析結果と観測結果の最大加速度及びフーリエスペクトルは、表層の初期せん断剛性を変化させても、依然現状のケース 1 と同様の差異が生じたままであることがわかった。

表 4.1-11　地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（2021/12/6）

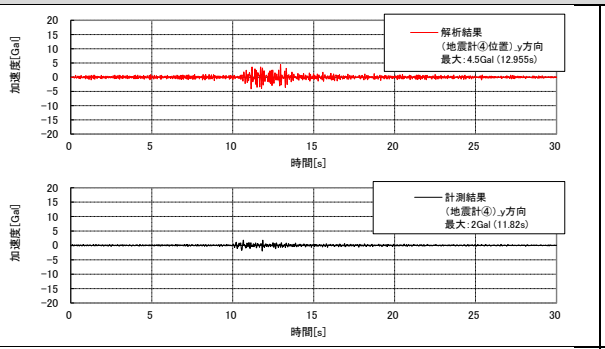
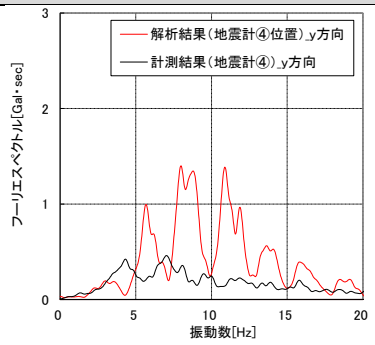
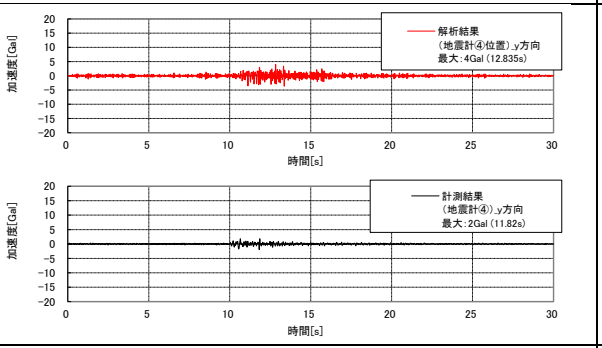
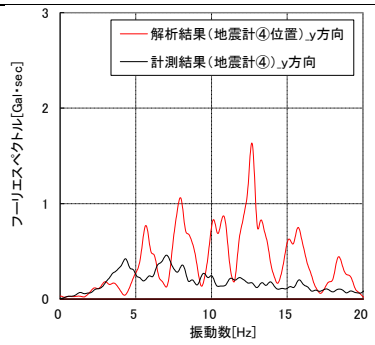
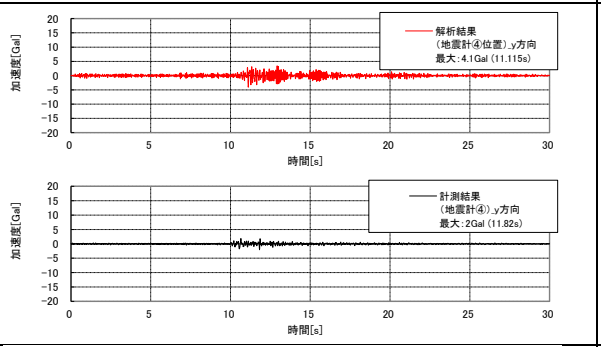
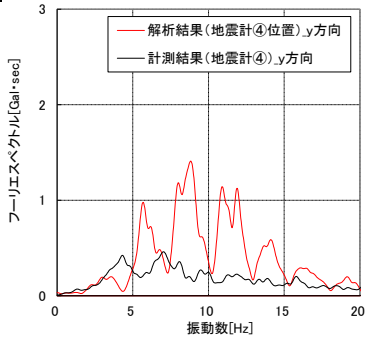
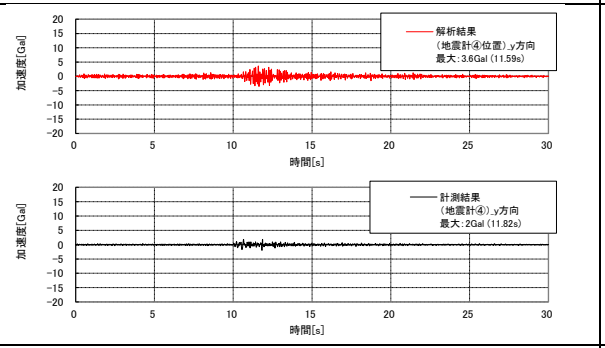
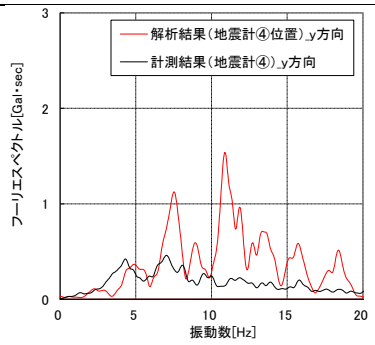
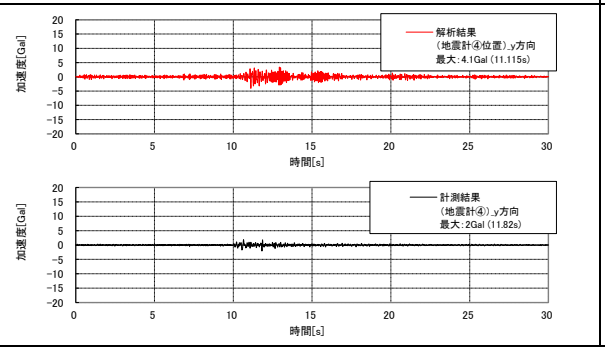
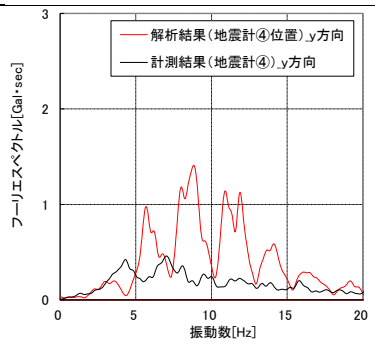
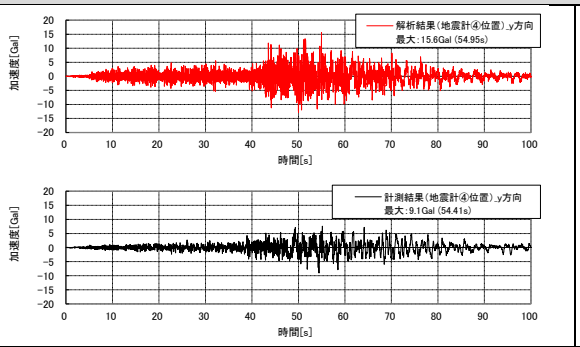
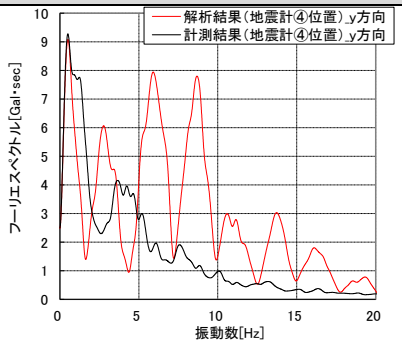
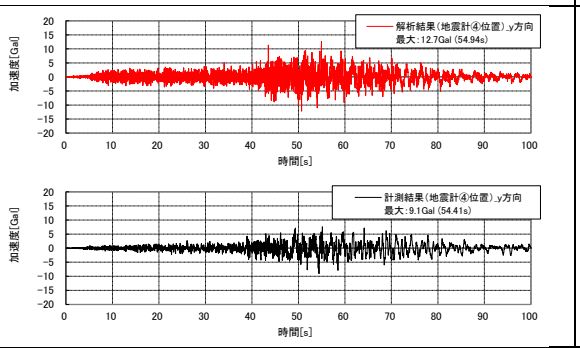
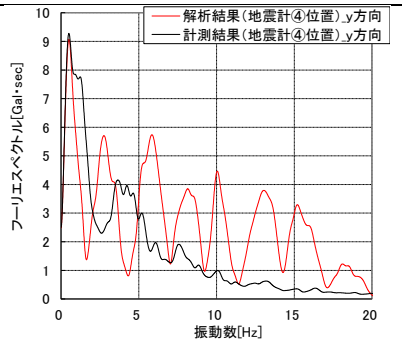
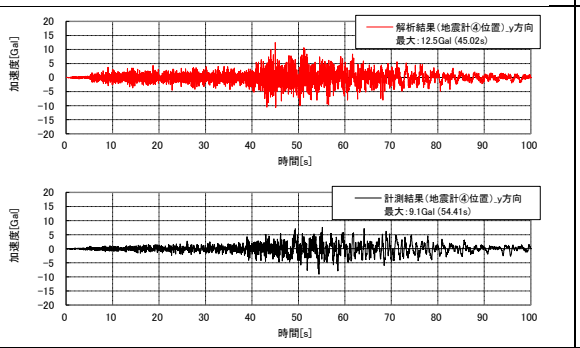
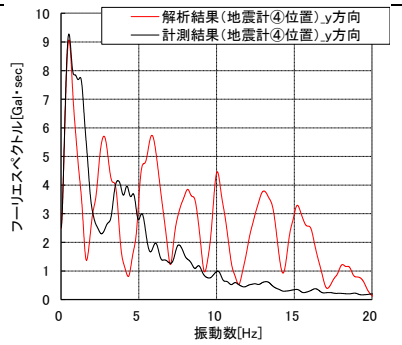
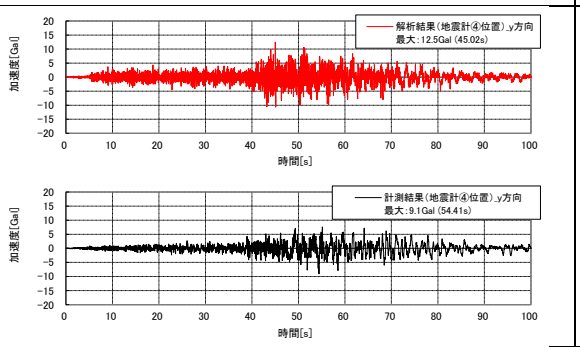
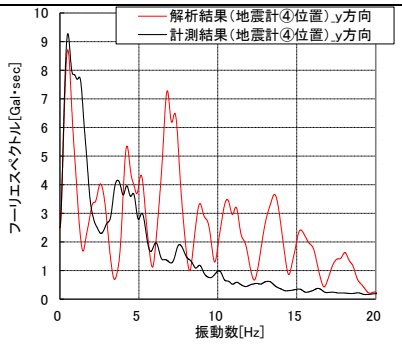
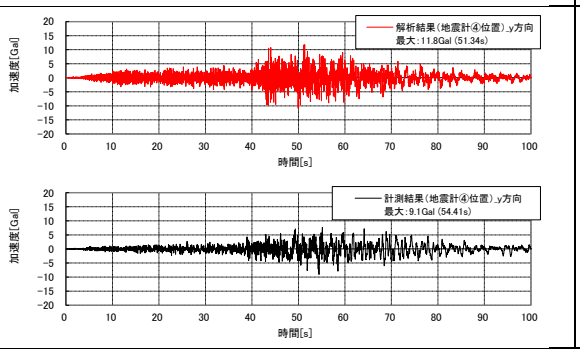
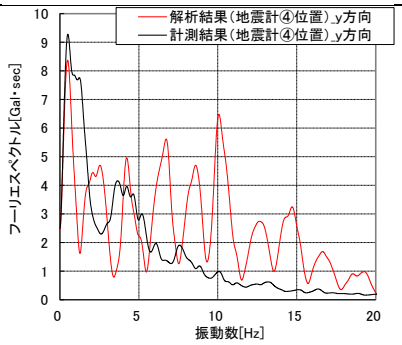
	応答加速度波形及びフーリエスペクトル	
ケース 1		
ケース 2		
ケース 3		
ケース 4		
ケース 5		

表 4.1-12　地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（2022/3/16）

	応答加速度波形及びフーリエスペクトル	
ケース 1		
ケース 2		
ケース 3		
ケース 4		
ケース 5		

6）評価

逆解析による地盤物性の同定として、地震動の伝播に与える影響が大きいと考えられる。

表層地盤の初期せん断剛性を変化させたパラメータスタディを実施したが、依然、解析結果と観測結果の差異が改善される傾向はみられなかった。

現状、当該サイトでは地震計設置箇所において PS 検層等の調査を実施していないため、詳細な地質構造の把握は困難である。また、観測地震動を用いて地質構造及び地盤物性値（G_0）を同定（逆解析）するにしても、観測地震動が 2 つの深度のみであり情報不足である。よって、現状の地表と地下の 2 つの深度における地震動計測のほかに、その間の深度を補間できる位置に地震計を追加設置することで物性値評価の精度が上げられると考えられるが、即座の対応は難しいと考えられる。

そこで、以降では、現地で得られる地表と地下の観測データより、当該サイトにおける地震動の増幅（伝達関数）を分析し、その結果を利用して、地表の観測データから地下の観測データを推定できる手法について試行することとした。

(4) 加速度振幅の補正による入力地震動設定方法の検討

1) 概要

前述の「(2) 減衰定数の周波数依存性の考慮」及び「(3) 逆解析による地盤物性の同定」において、解析用物性値の精査により引戻し解析の精度を改善することを試みたが、解析結果と観測結果の整合性への効果はみられなかった。現状は、地表と地下の 2 つの深度における地震動計測を実施しているが、物性値の更なる精査にあたっては、現状の設置深度のほかに、その間の深度を補間できる位置に地震計を追加設置することが望まれるが、即座の対応は難しいと考えられる

ここでは、現地で得られる地表と地下の観測データを用いて、当該サイトにおける地震動の増幅特性（伝達関数）を分析し、その結果を利用して、本検討の目的である「地表の観測データを利用した地下空洞及び地下施設の地震時応答の推定」に資する解析手法について検討した。

2) 伝達関数の分析

地下の地震計④から地表の地震計⑤の観測データを用いて、地下から地表に向かう増幅特性（伝達関数）について分析した。対象とした地震動は、両地震計で同時刻の地震動が記録できている 6 回の地震動（2022/2/17、3/16、3/18、4/28、5/23、6/10）の水平 2 方向（空洞縦断方向、空洞横断方向）とした。地震動の諸元を表 4.1-13 に示す。

地震計④に対する地震計⑤のフーリエスペクトルの比（伝達関数）を表 4.1-14 に示す。表 4.1-14 に示すように、岩盤内空洞や地下施設に影響を与えると考えられる振動数帯（1～20(Hz)程度）では、いずれ観測地震動においても同等の伝達関数となっていることがわかった。このことから、現状得られている最大加速度が数十 Gal 程度の地震動では、岩盤は弾性範囲の挙動となり、どの地震動でも同等の伝達関数になると推察される。なお、非線形性が出てくるような加速度レベルが大きな地震においては、表 4.1-14 の伝達関数とは異なる応答になると考えられ、その確認のために引き続き地震動観察の継続が望まれる。

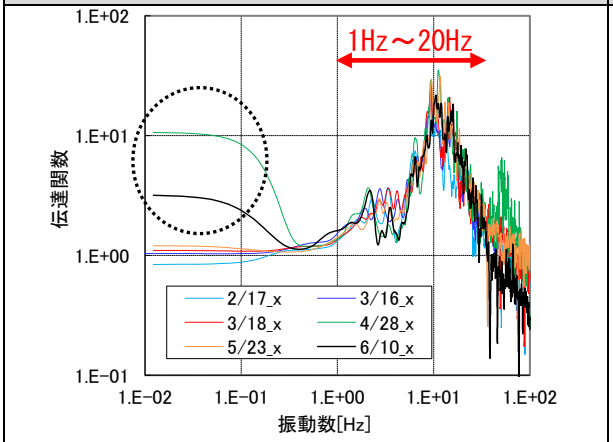
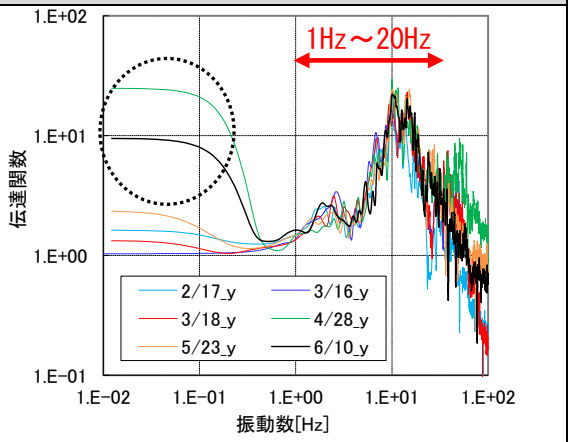
一方、0.2(Hz)以下の低振動数帯（周期は 5s 以上）においては、4 波（2022/2/17、3/16、3/18、5/23）は概ね伝達関数が 1 付近となっているが、2 波（2022/4/28、6/10）は伝達関数が 10 程度まで大きくなっていることがわかる。低振動数帯の応答については、今後追加される地震動データを含めて分析することが必要と考えられるが、地下施設の評価には影響を与えない振動数帯であるため、大きな問題にはならないと考えられる。

また、20(Hz)以上の高振動数帯（周期は 0.05s 以下）においても、各地震動で伝達関数が全ばらつく傾向がみられるものの、地下施設の評価には影響を与えない振動数と考えられること及び 20(Hz)以上は計測時のノイズ等の影響が含まれる可能性があることから、大きな問題にはならないと考えられる。

表 4.1-13　伝達関数に用いた地震動の諸元

地震の発生日	震央地名	M	最大震度	尾駮の震度	地震計⑤ Y方向
2022年 2月17日	浦河沖	5	震度3	震度2	7.0 gal
2022年 3月16日	福島県沖	7.4	震度6強	震度3	29.6 gal
2022年 3月18日	岩手県沖	5.6	震度5強	震度1	7.6 gal
2022年 4月28日	青森県 東方沖	4.7	震度2	震度1	24.6 gal
2022年 5月23日	青森県 東方沖	5.6	震度3	震度1	7.6 gal
2022年 6月10日	浦河沖	4.9	震度3	震度1	7.8 gal

表 4.1-14　伝達関数のまとめ（地震計⑤/地震計④）

水平 x 方向 （空洞縦断方向）	水平 y 方向 （空洞横断方向）
	

3）加速度振幅を補正した引戻し解析

前述の「2）伝達関数の分析」より、地表と地下の 2 点間の伝達関数が類似していることから、当該サイトでは、地形の効果や斜め入射等の影響を受けていない観測データを取得できていると評価され、1 次元の引き戻し解析により入力地震動を設定できると考えられる。また、上記の 2 点間に分布する詳細な地質構造及び地盤物性値(G_0)を把握する、あるいは同定することで観測地震動を 1 次元解析により再現できる可能性が見いだせたものと評価する。

ここでは、上記で述べたように、観測地震動そのものが地形効果及び斜め入射の影響を受けていないのであれば、微小ひずみレベル（弾性挙動レベル）の条件下では、図 4.1-26 に示すように、観測地震動の加速度の振幅補正を行うことで 1 次元解析により観測地震動を再現できると考え、これを確認するために、振幅補正値をパラメータにした 1 次元の試解析を実施した。

この方法は、地盤物性の誤差の問題は残したままではあるが、地盤物性の誤差の問題を加速度振幅に乗ずる補正値で調整することにより、本検討の目的である「地表の観測データを用いて地下施設の地震時挙動を予測する」という観点より提案した。

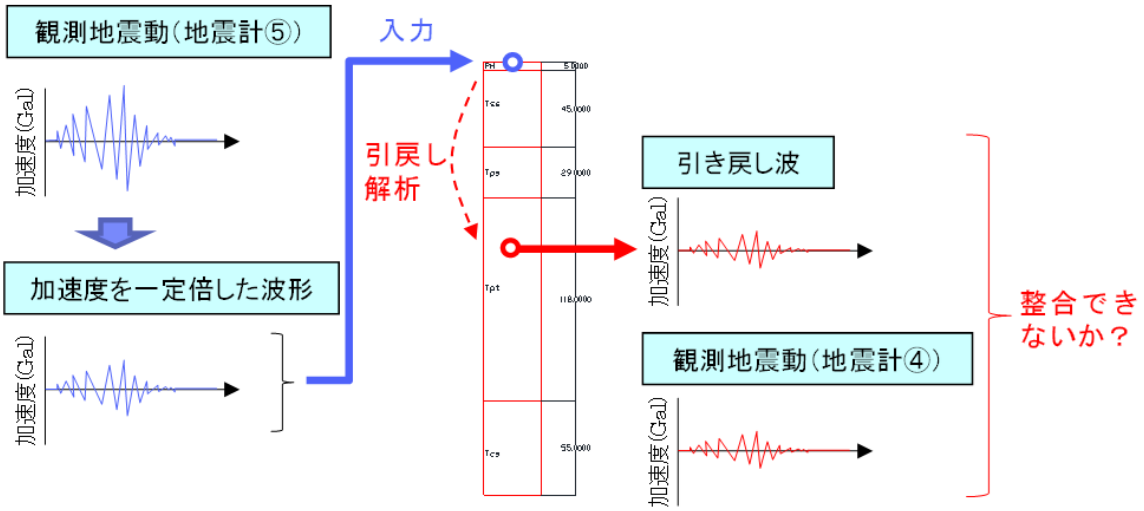


図 4.1-26　地震計⑤の加速度振幅を調整した引戻し解析の流れ

4）補正値の感度分析

地震計⑤と地震計④ともに同時刻の地震動が記録できている 6 回の地震動（2022/2/17、3/16、3/18、4/28、5/23、6/10）について補正値αのパラメータスタディを実施し、αが解析結果に与える感度を確認した。

a．2022/2/17 の観測データ

地震計⑤の空洞横断水平方向（y 方向）の地震動データに乗じる補正値αをα=1.0、0.8、0.7、0.5 にした場合を表 4.1-15 に示す。それぞれの波形を 1 次元モデルで引戻して地下の地震計④位置における解析結果（引戻し波）と観測結果（地震計④）を比較した。

各ケースの地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（加速度時刻歴、フーリエスペクトル）を図 4.1-27～図 4.1-30、各ケースの最大加速度の比較を表 4.1-16 に示す。

表 4.1-16 に示すように、地震計⑤における補正値をα=0.7 程度にすることによって、地下の地震計④位置における解析結果と観測結果の加速度レベルが比較的整合できることがわかった。

表 4.1-15　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/2/17）

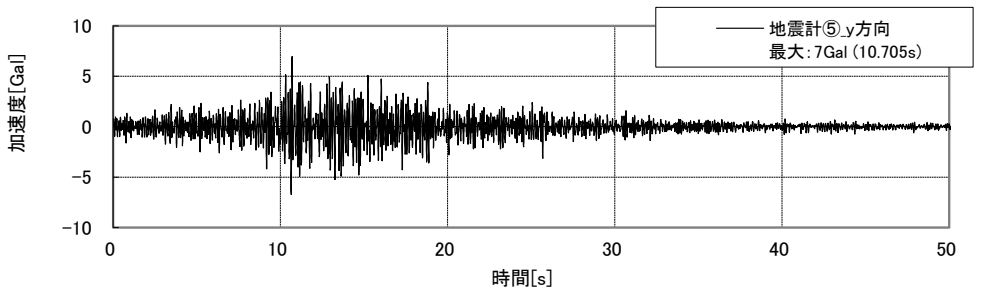
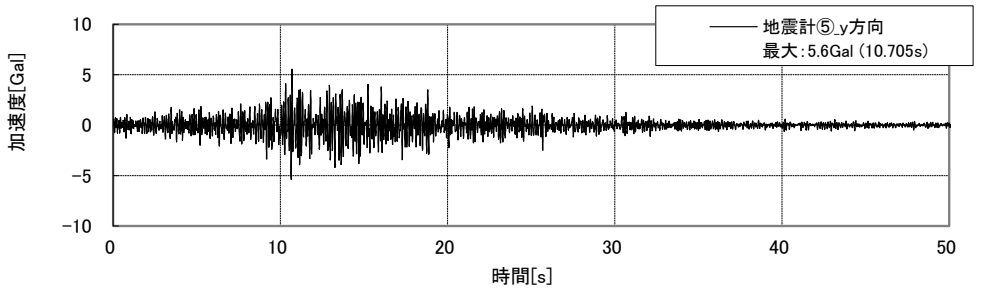
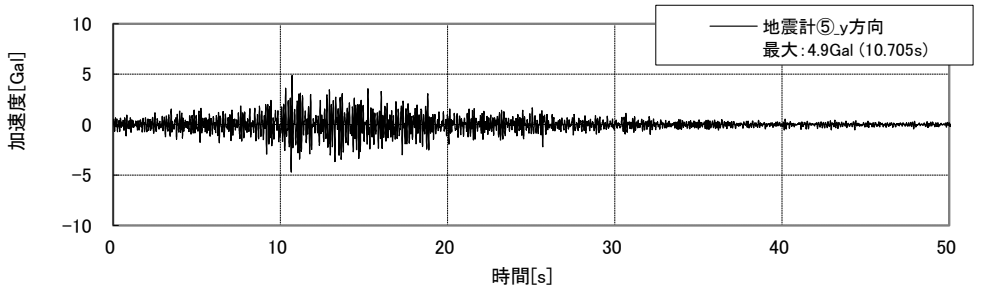
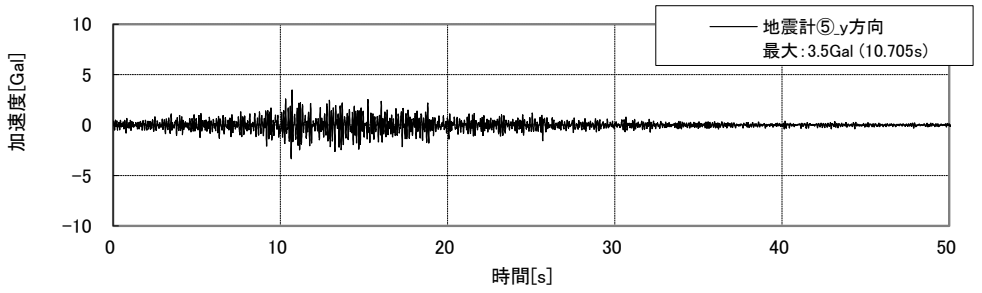
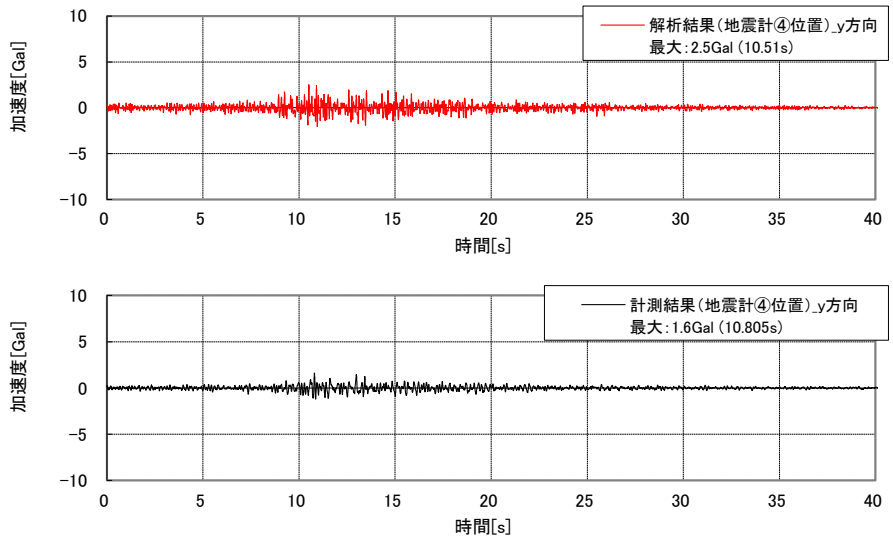
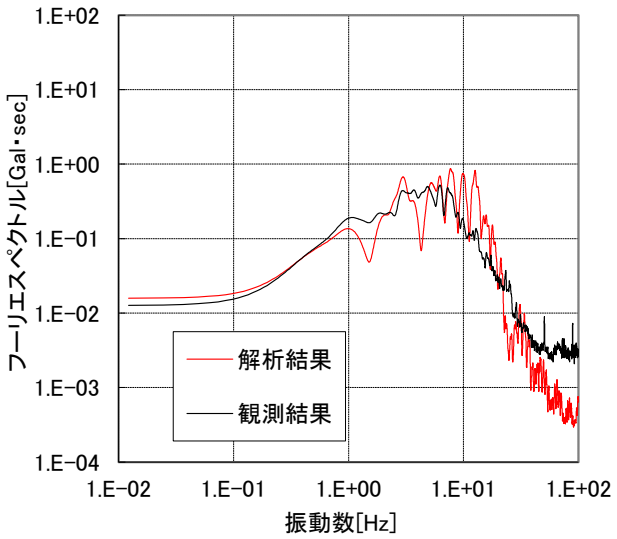
振幅補正値	加速度振幅補正後の地震計⑤の加速度時刻歴
α=1.0 （観測地震動と一致）	
α=0.8	
α=0.7	
α=0.5	

表 4.1-16　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/2/17）

	最大加速度(Gal)		比率
	解析結果	観測結果	（解析／観測）
α=1.0 （観測地震動と一致）	2.5	1.6	1.6
α=0.8	2	1.6	1.3
α=0.7	1.7	1.6	1.1
α=0.5	1.2	1.6	0.8

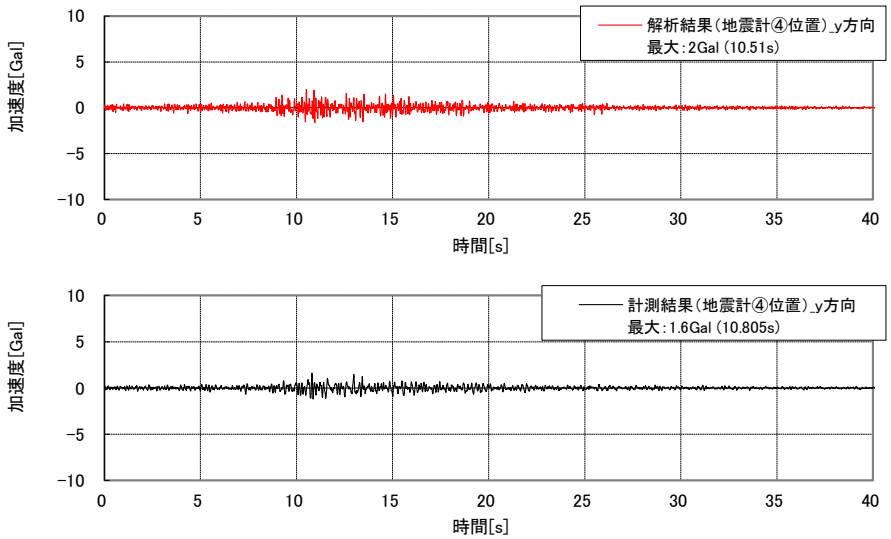


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

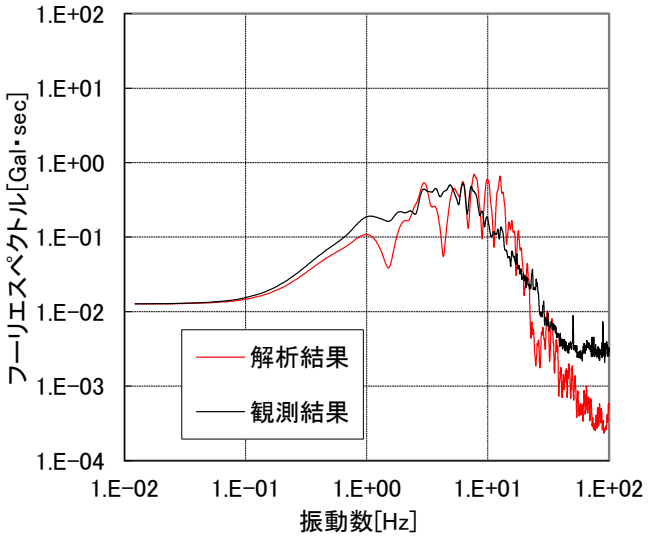


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-27　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/2/17）

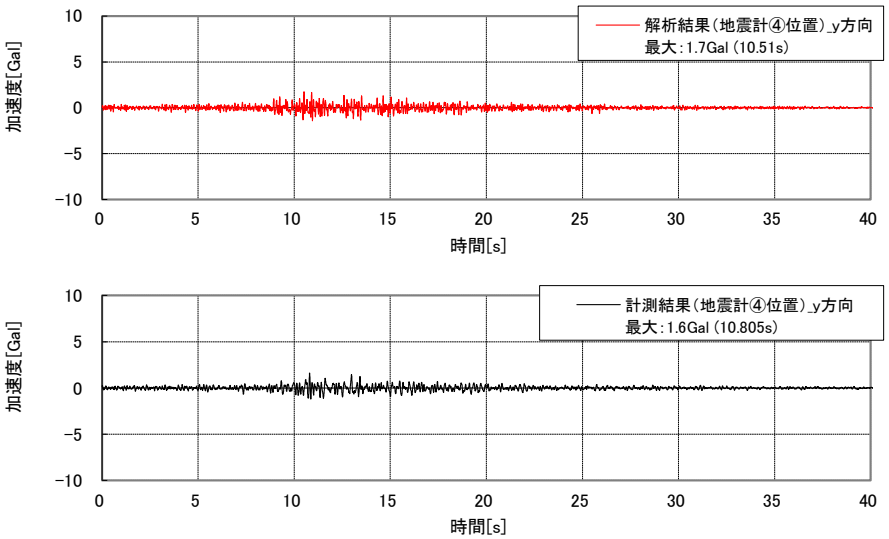


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

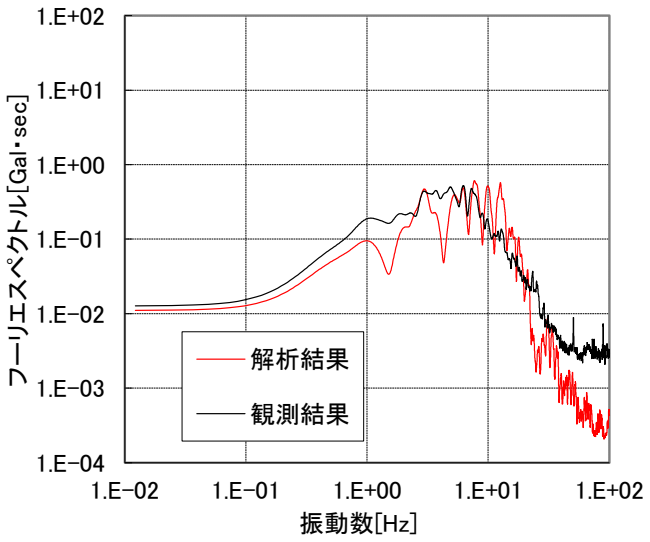


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-28　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/2/17）

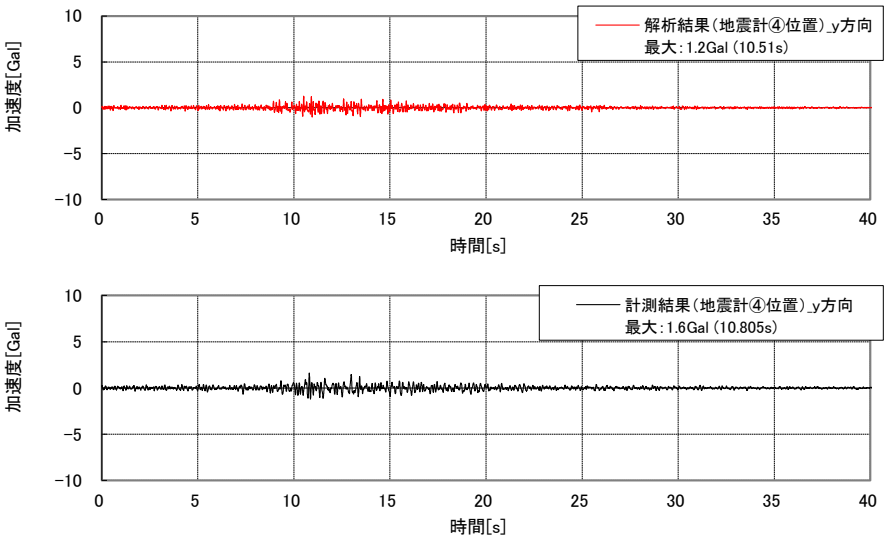


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

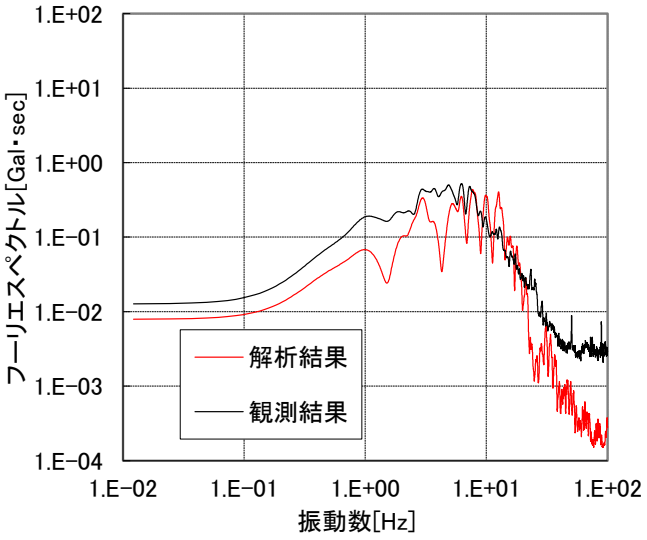


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-29　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/2/17）



(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）



(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-30　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/2/17）

b. 2022/3/16 の観測データ

地震計⑤の空洞横断水平方向（y 方向）の地震動データに乗じる補正値αをα=1.0、0.8、0.7、0.5 にした場合を表 4.1-17 に示す。それぞれの波形を 1 次元モデルで引戻して地下の地震計④位置における解析結果（引戻し波）と観測結果（地震計④）を比較した。

各ケースの地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（加速度時刻歴、フーリエスペクトル）を図 4.1-31～図 4.1-34、各ケースの最大加速度の比較を表 4.1-18 に示す。

表 4.1-18 に示すように、地震計⑤における補正値をα=0.7 程度にすることによって、地下の地震計④位置における解析結果と観測結果の加速度レベルが比較的整合できることがわかった。

表 4.1-17　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/3/16）

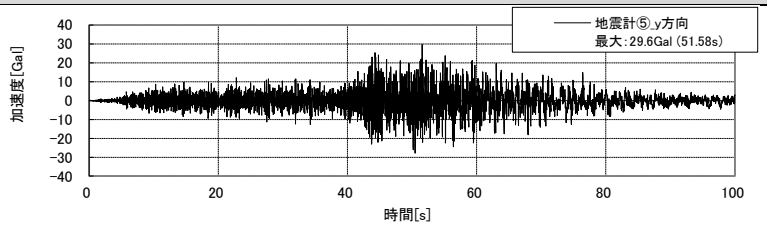
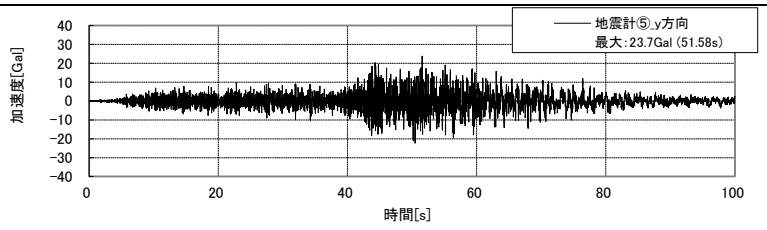
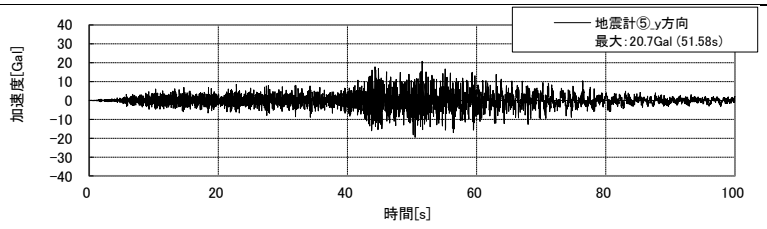
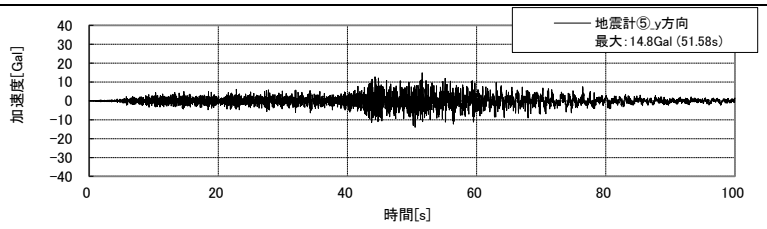
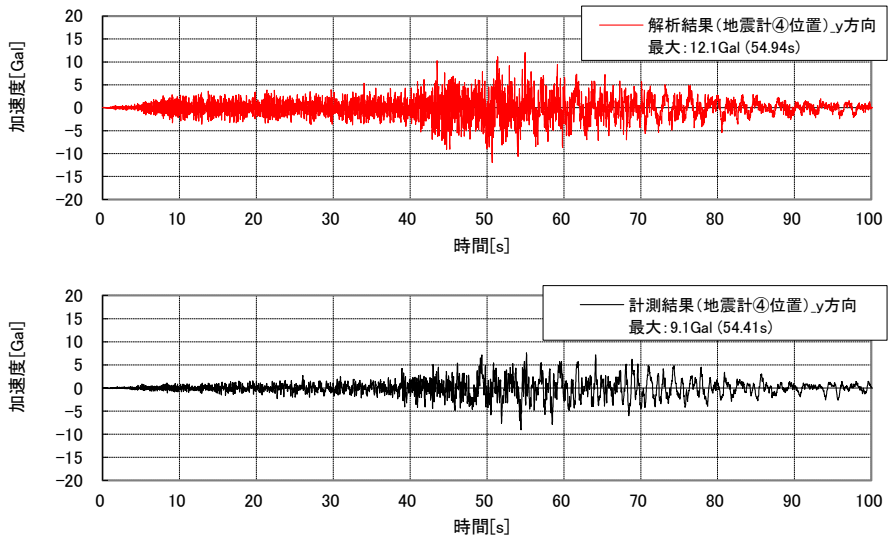
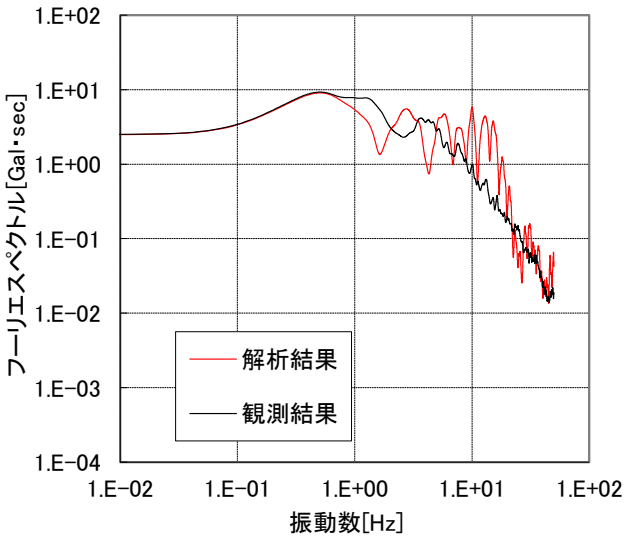
振幅補正値	加速度振幅補正後の地震計⑤の加速度時刻歴
α=1.0 （観測地震動と一致）	
α=0.8	
α=0.7	
α=0.5	

表 4.1-18　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/3/16）

	最大加速度(Gal)		比率
	解析結果	観測結果	（解析／観測）
α=1.0 （観測地震動と一致）	12.1	9.1	1.3
α=0.8	9.7	9.1	1.1
α=0.7	8.5	9.1	0.9
α=0.5	6.1	9.1	0.7

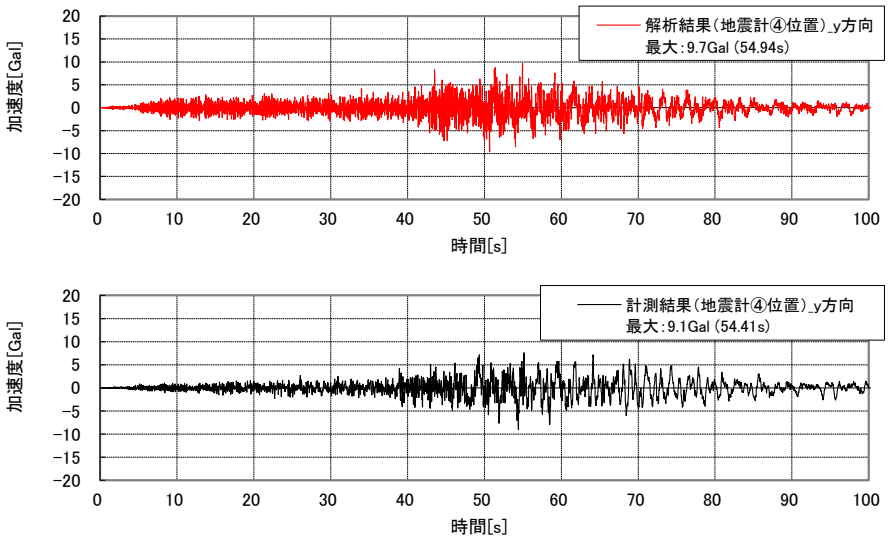


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

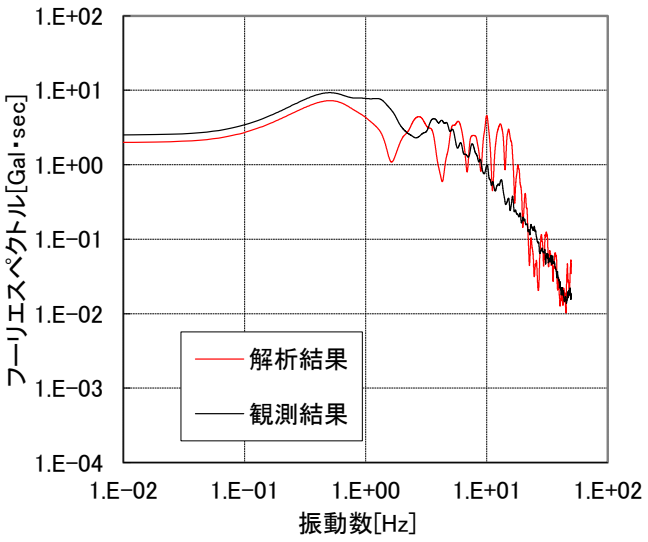


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-31　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/3/16）

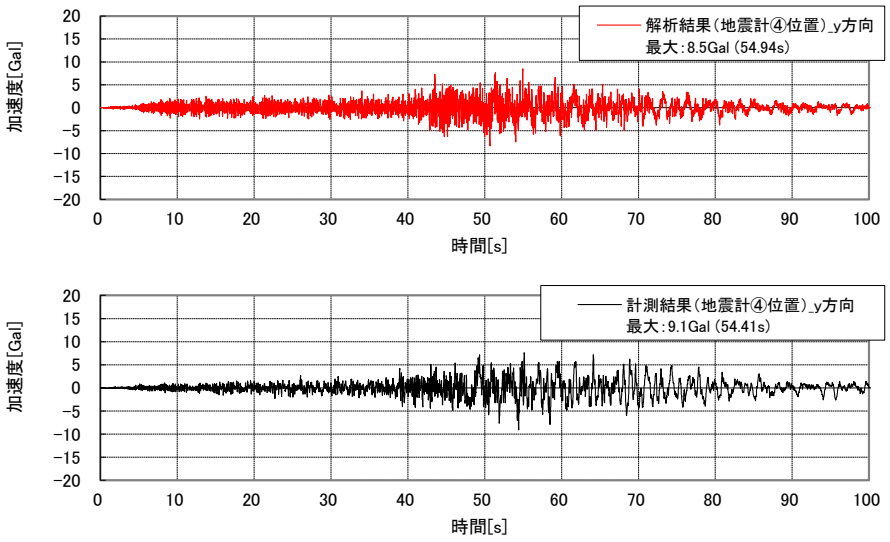


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

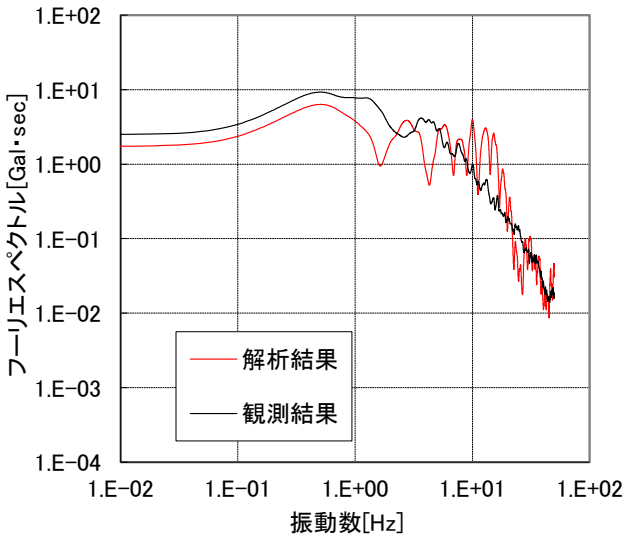


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-32　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/3/16）

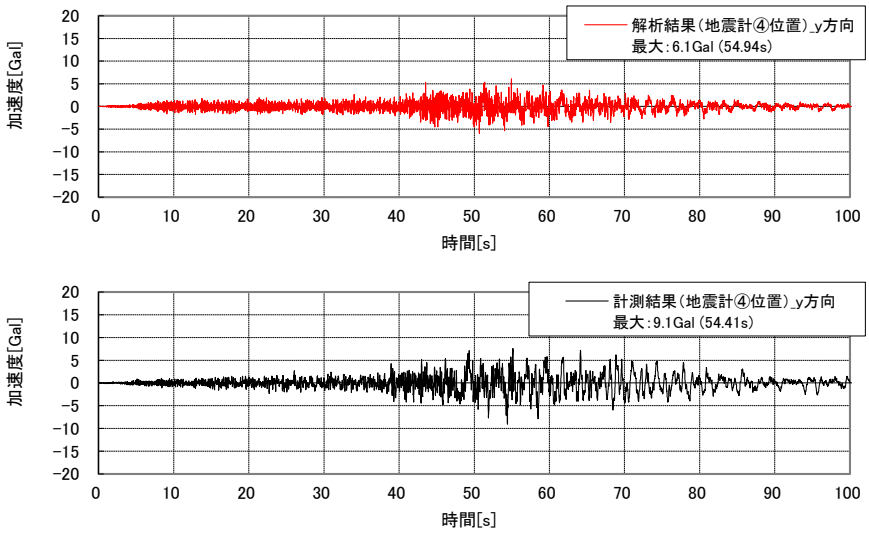


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

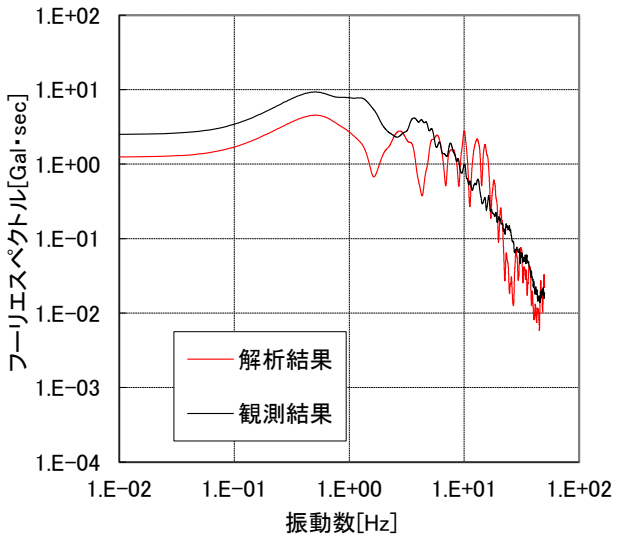


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-33　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/3/16）



(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）



(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-34　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/3/16）

c．2022/3/18 の観測データ

地震計⑤の空洞横断水平方向（y 方向）の地震動データに乗じる補正値αをα=1.0、0.8、0.7、0.5 にした場合を表 4.1-19 に示す。それぞれの波形を 1 次元モデルで引戻して地下の地震計④位置における解析結果（引戻し波）と観測結果（地震計④）を比較した。

各ケースの地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（加速度時刻歴、フーリエスペクトル）を図 4.1-35～図 4.1-38、各ケースの最大加速度の比較を表 4.1-20 に示す。

表 4.1-20 に示すように、地震計⑤における補正値をα=0.7 程度にすることによって、地下の地震計④位置における解析結果と観測結果の加速度レベルが比較的整合できることがわかった。

表 4.1-19　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/3/18）

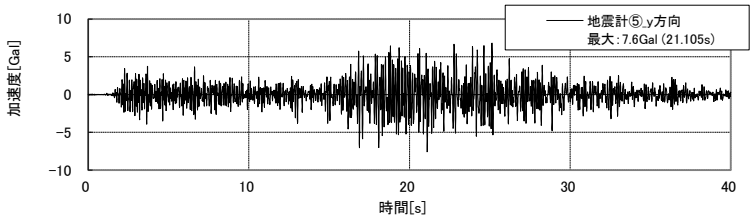
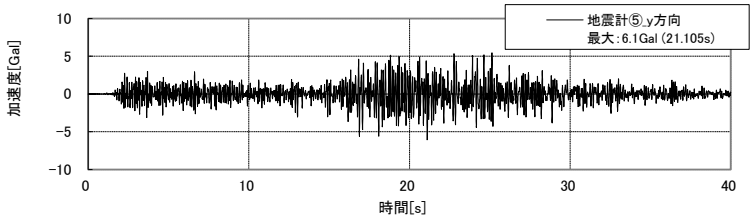
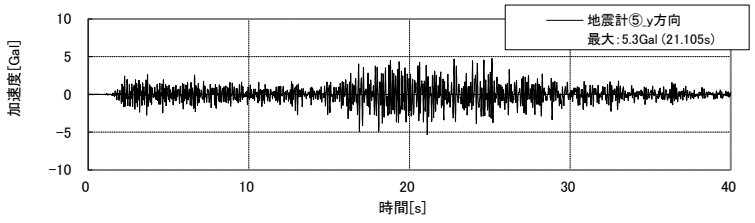
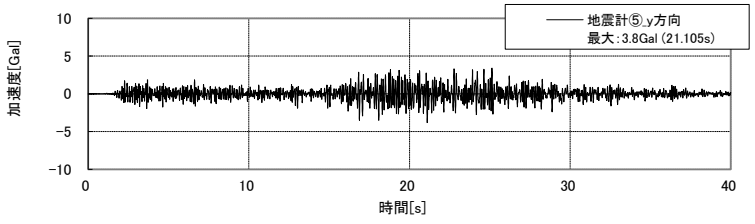
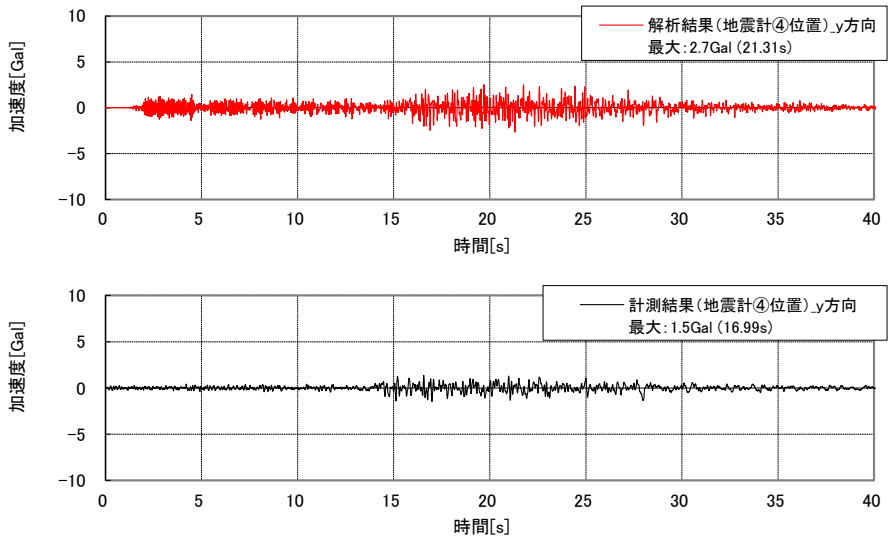
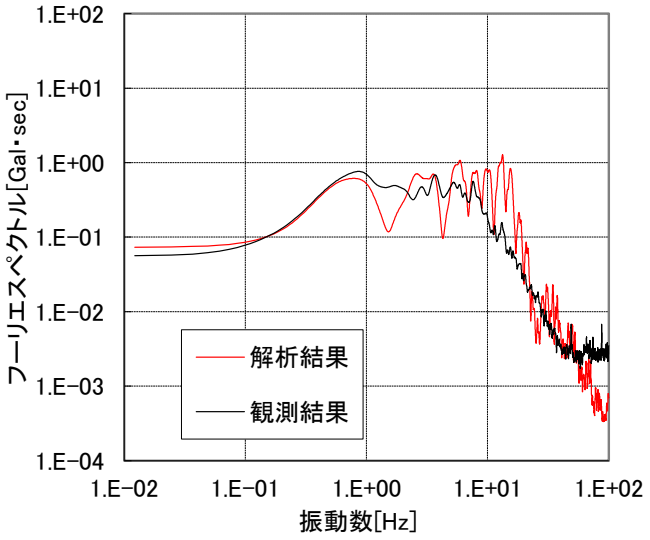
振幅補正値	加速度振幅補正後の地震計⑤の加速度時刻歴
α=1.0 （観測地震動と一致）	
α=0.8	
α=0.7	
α=0.5	

表 4.1-20　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/3/18）

	最大加速度(Gal)		比率
	解析結果	観測結果	（解析／観測）
α=1.0 （観測地震動と一致）	2.7	1.5	1.8
α=0.8	2.1	1.5	1.4
α=0.7	1.8	1.5	1.2
α=0.5	1.3	1.5	0.9

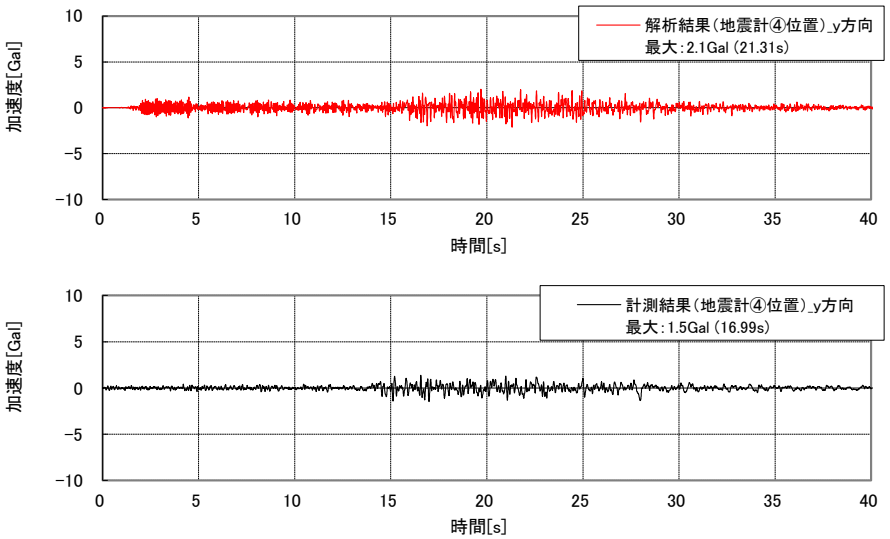


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

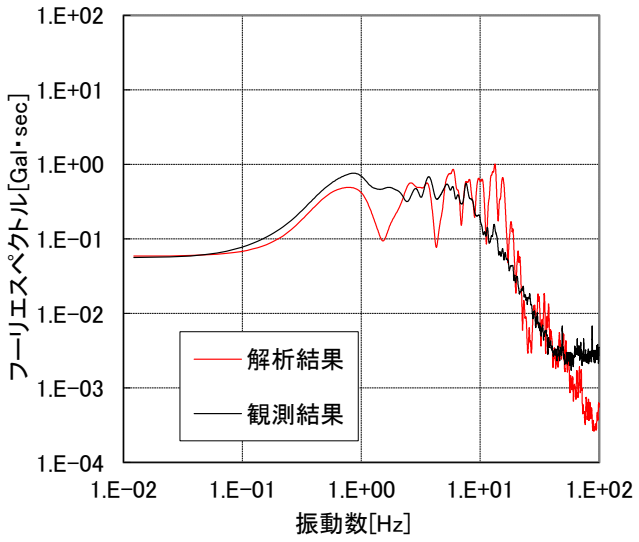


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-35　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/3/18）

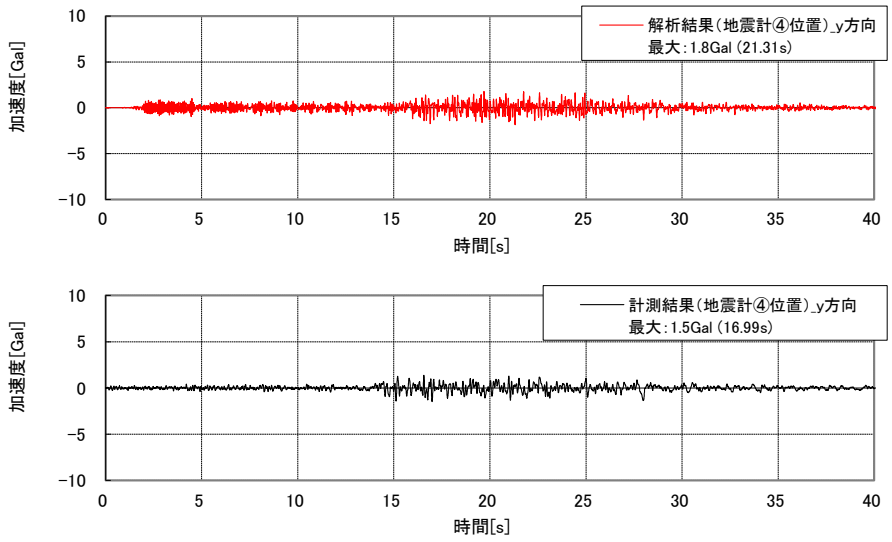


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

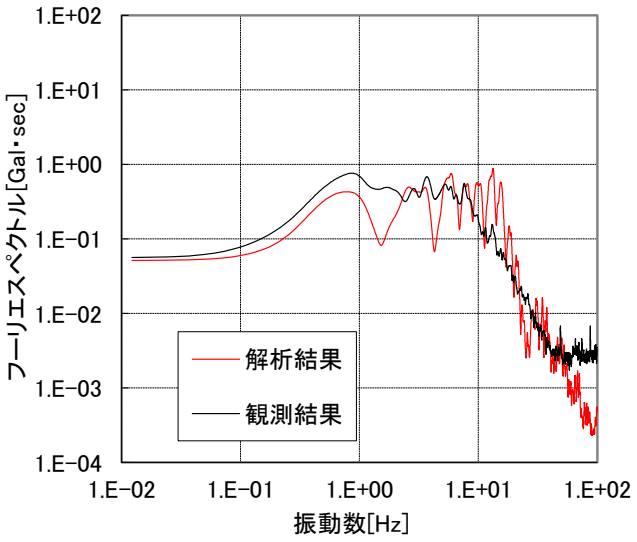


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-36　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/3/18）

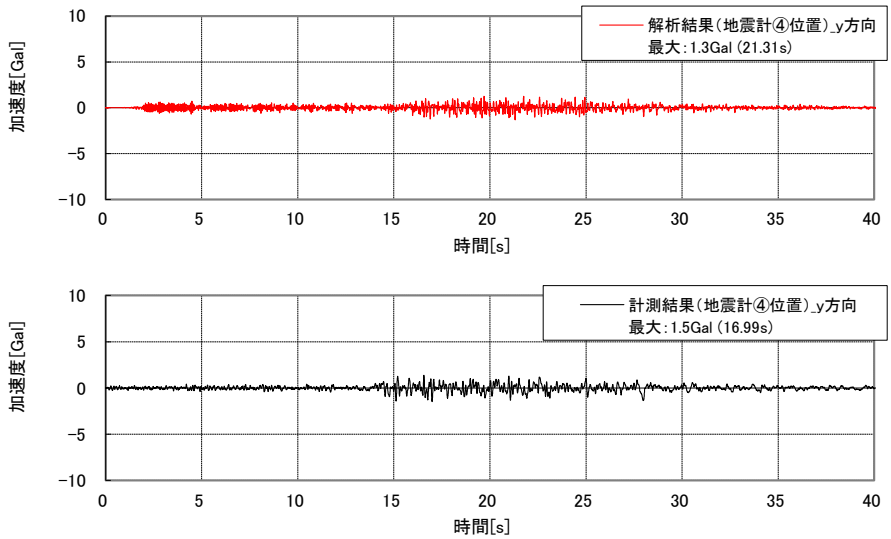


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

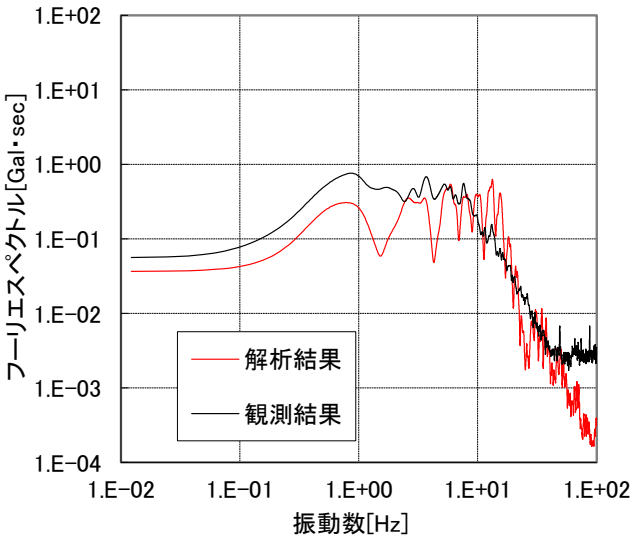


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-37　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/3/18）



(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）



(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-38　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/3/18）

d. 2022/4/28 の観測データ

地震計⑤の空洞横断水平方向（y 方向）の地震動データに乗じる補正値αをα=1.0、0.8、0.7、0.5 にした場合を表 4.1-21 に示す。それぞれの波形を 1 次元モデルで引戻して地下の地震計④位置における解析結果（引戻し波）と観測結果（地震計④）を比較した。

各ケースの地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（加速度時刻歴、フーリエスペクトル）を図 4.1-39～図 4.1-42、各ケースの最大加速度の比較を表 4.1-22 に示す。

表 4.1-22 に示すように、α=1.0～0.5 の範囲では、地下の地震計④位置における解析結果と観測結果の加速度レベルが整合しないことがわかった。

表 4.1-21　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/4/28）

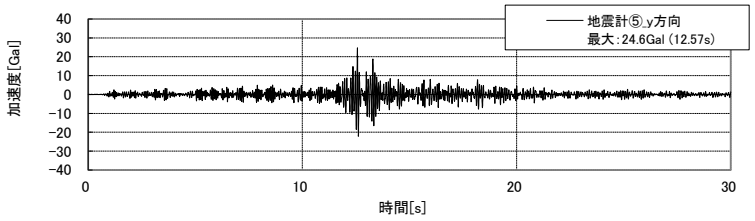
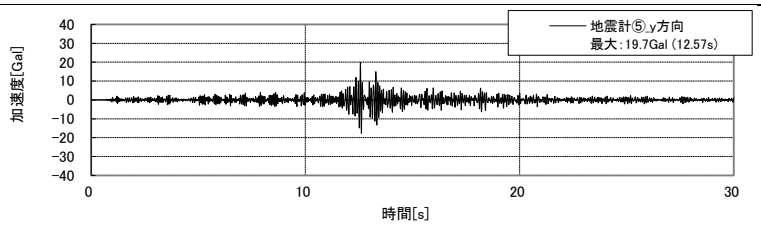
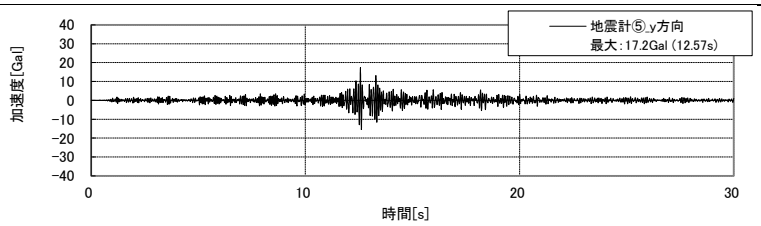
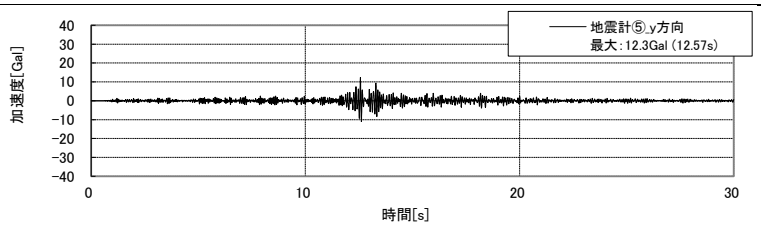
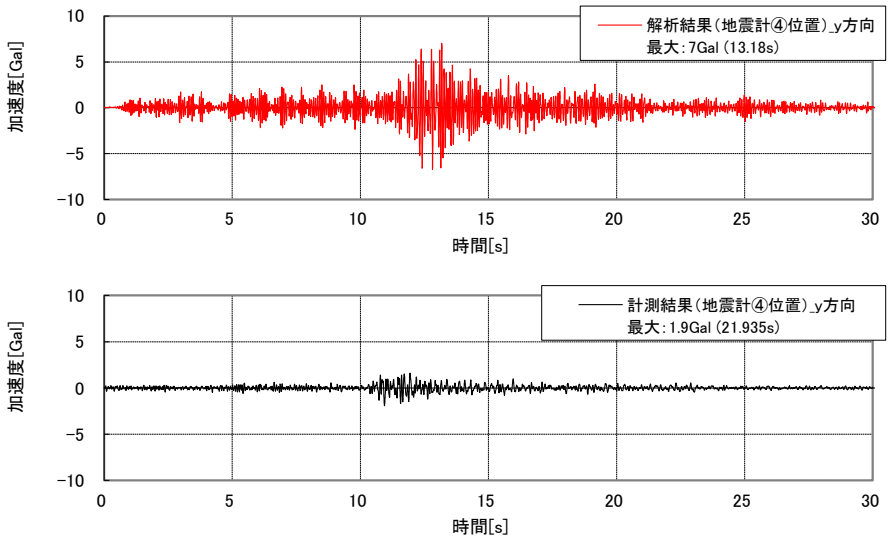
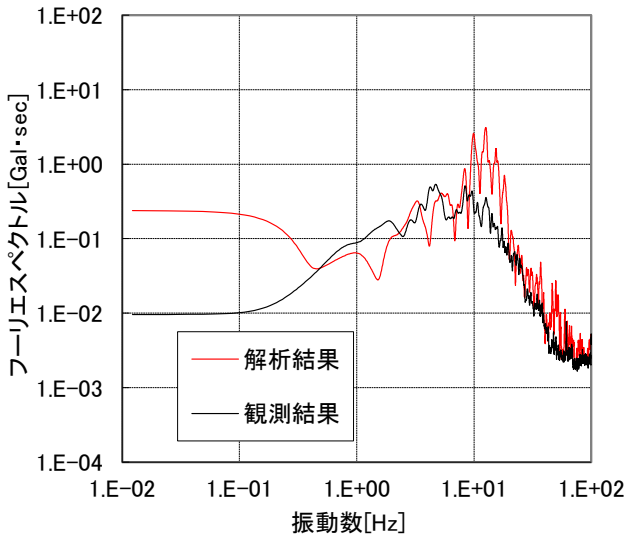
振幅補正値	加速度振幅補正後の地震計⑤の加速度時刻歴
α=1.0 （観測地震動と一致）	
α=0.8	
α=0.7	
α=0.5	

表 4.1-22　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/4/28）

	最大加速度(Gal)		比率
	解析結果	観測結果	（解析／観測）
α=1.0 （観測地震動と一致）	7	1.9	3.7
α=0.8	5.5	1.9	2.9
α=0.7	4.8	1.9	2.5
α=0.5	3.4	1.9	1.8

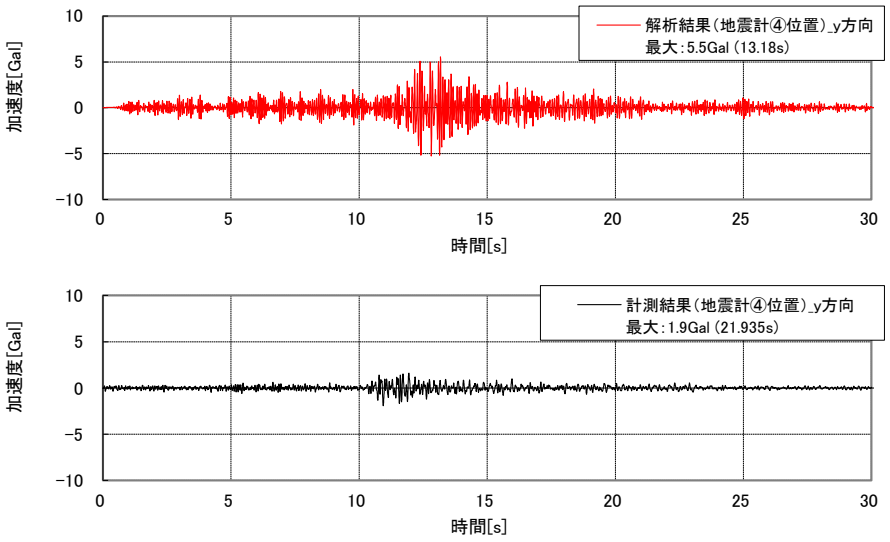


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

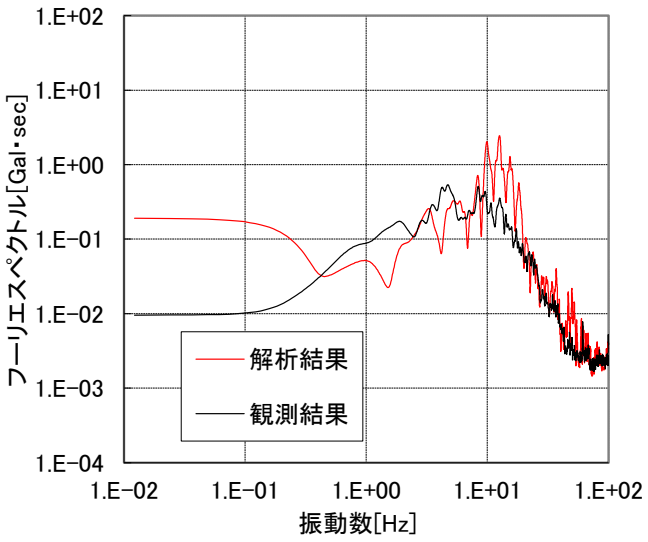


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-39　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/4/28）

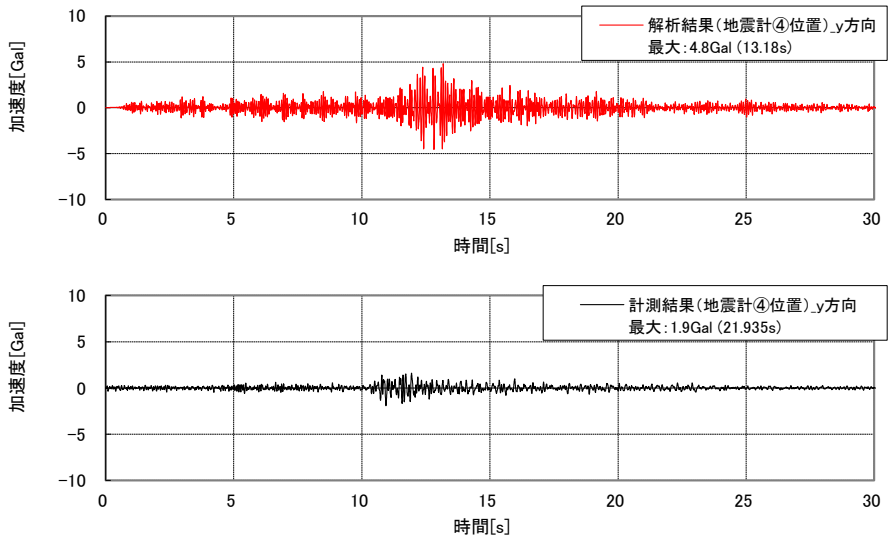


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

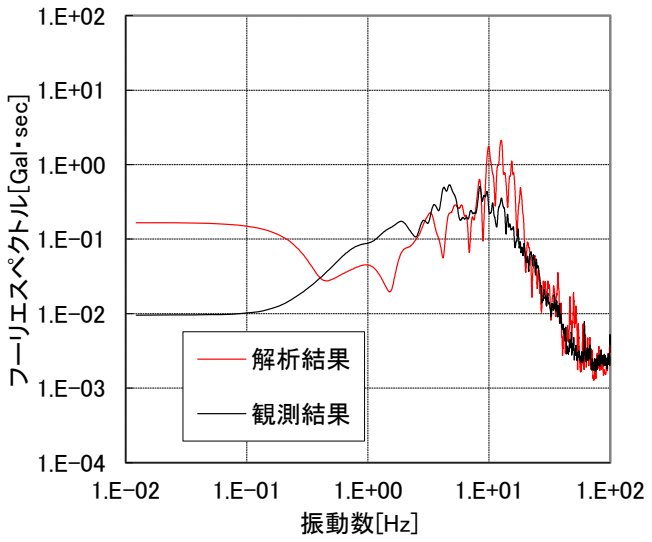


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-40　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/4/28）

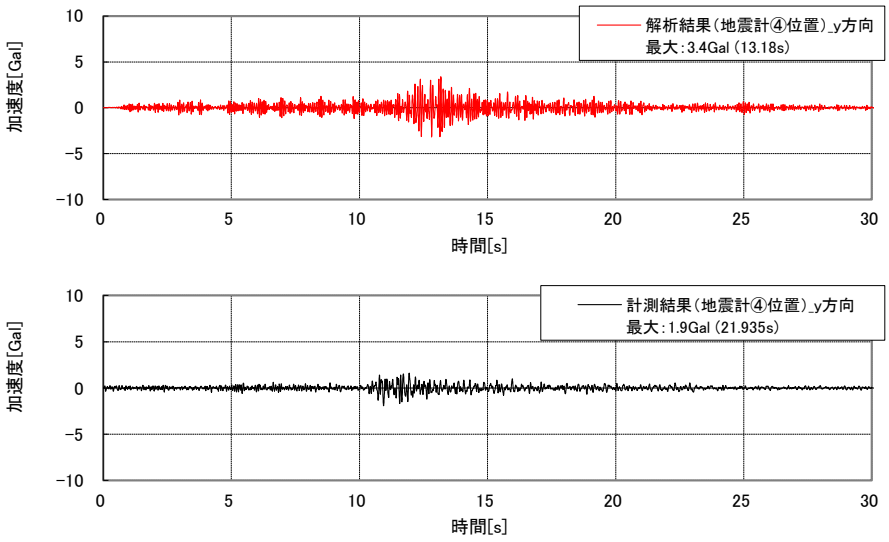


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

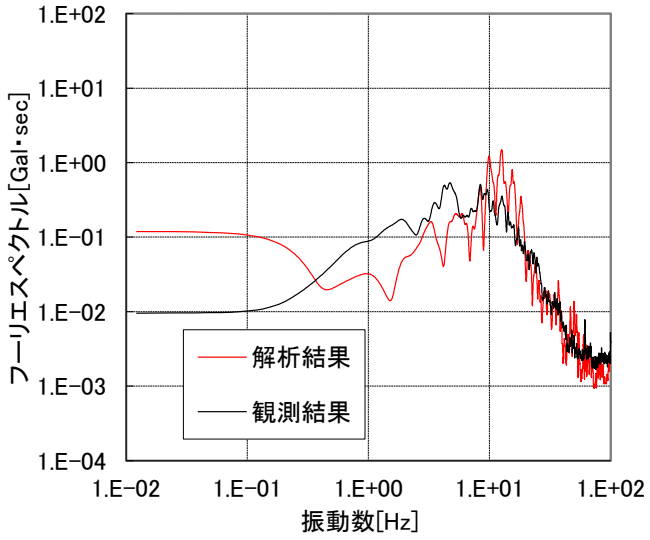


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-41　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/4/28）



(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）



(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-42　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/4/28）

e．2022/5/23 の観測データ

地震計⑤の空洞横断水平方向（y 方向）の地震動データに乗じる補正値αをα=1.0、0.8、0.7、0.5 にした場合を表 4.1-23 に示す。それぞれの波形を 1 次元モデルで引戻して地下の地震計④位置における解析結果（引戻し波）と観測結果（地震計④）を比較した。

各ケースの地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（加速度時刻歴、フーリエスペクトル）を図 4.1-43～図 4.1-46、各ケースの最大加速度の比較を表 4.1-24 に示す。

表 4.1-24 に示すように、地震計⑤における補正値をα=0.7 程度にすることによって、地下の地震計④位置における解析結果と観測結果の加速度レベルが比較的整合できることがわかった。

表 4.1-23　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/5/23）

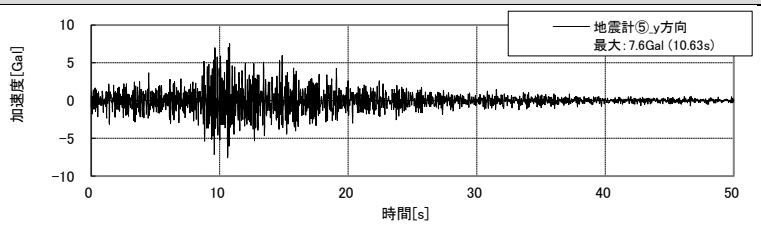
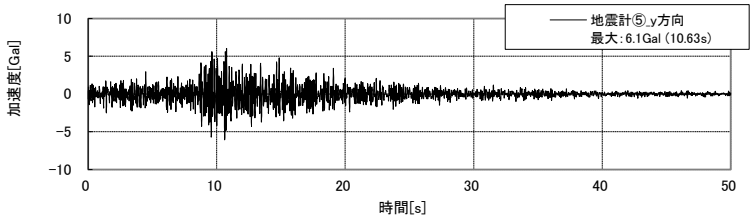
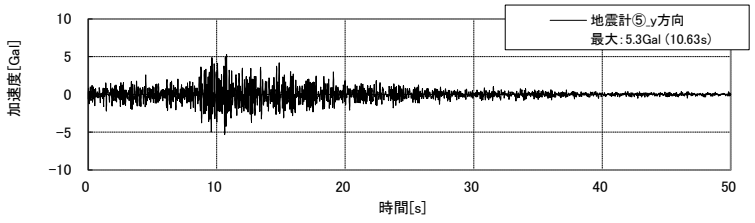
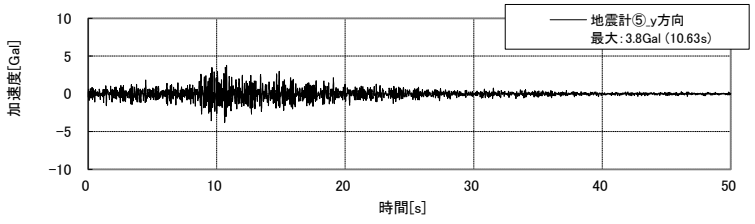
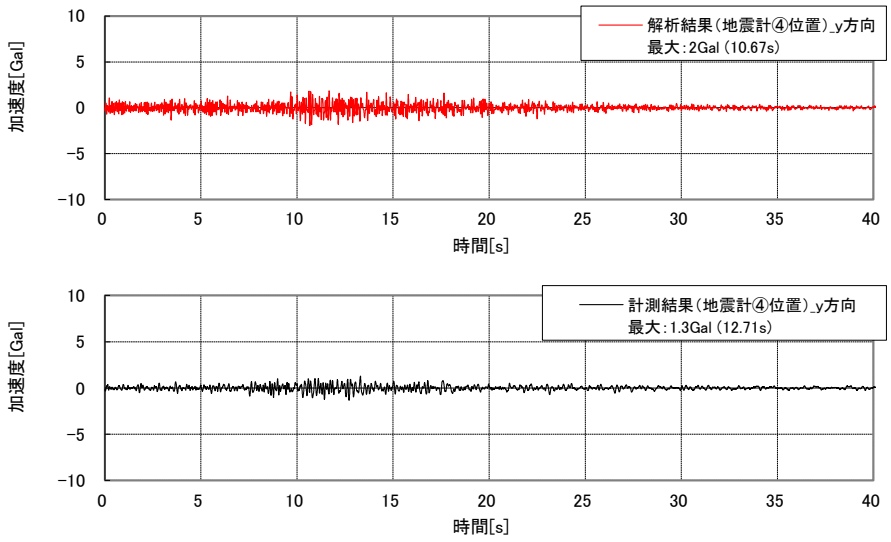
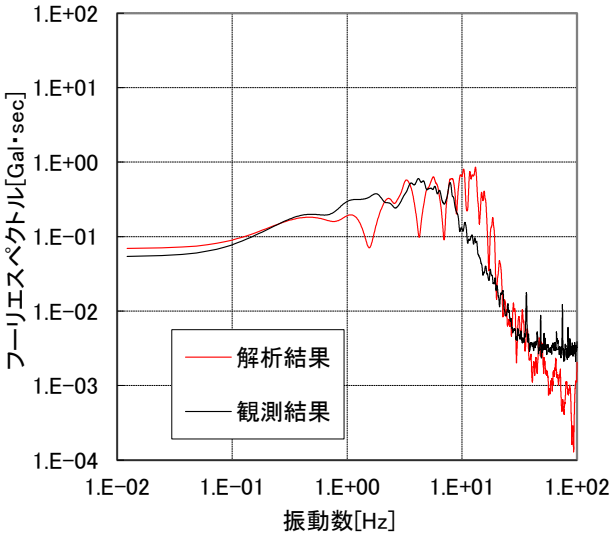
振幅補正値	加速度振幅補正後の地震計⑤の加速度時刻歴
α=1.0 （観測地震動と一致）	
α=0.8	
α=0.7	
α=0.5	

表 4.1-24　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/5/23）

	最大加速度(Gal)		比率
	解析結果	観測結果	（解析／観測）
α=1.0 （観測地震動と一致）	2	1.3	1.5
α=0.8	1.6	1.3	1.2
α=0.7	1.4	1.3	1.1
α=0.5	1	1.3	0.8

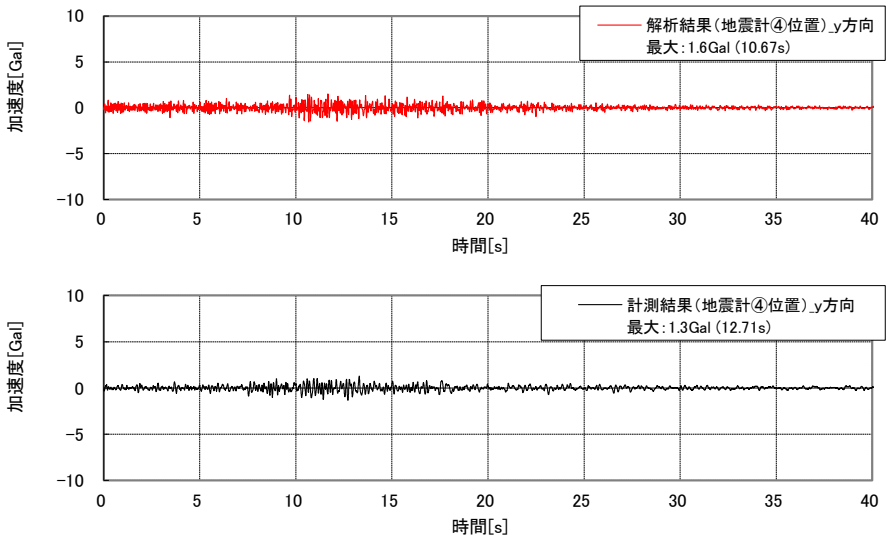


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

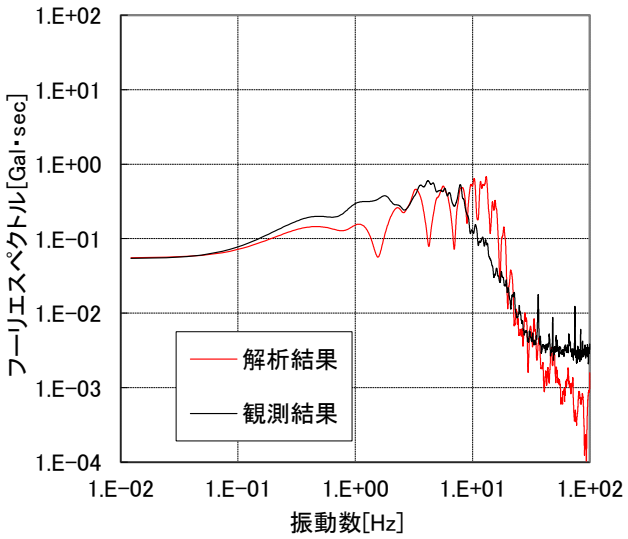


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-43　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/5/23）

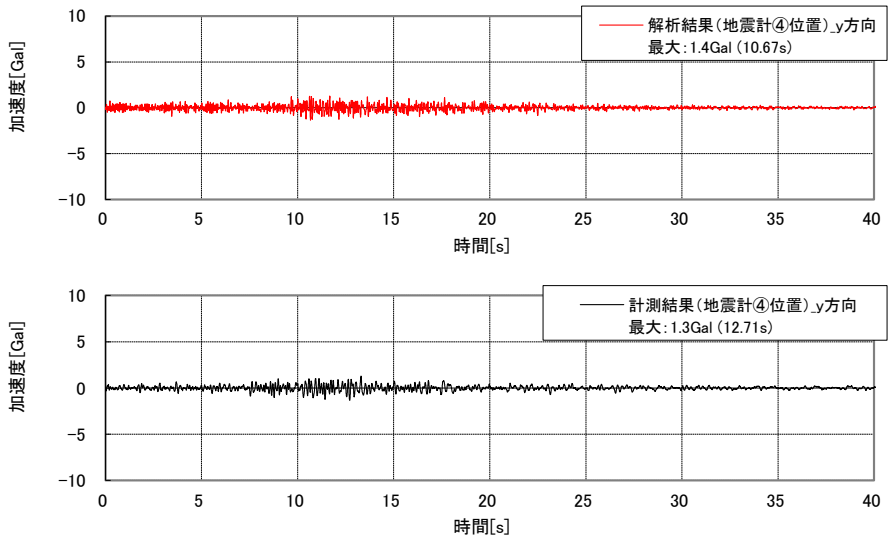


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

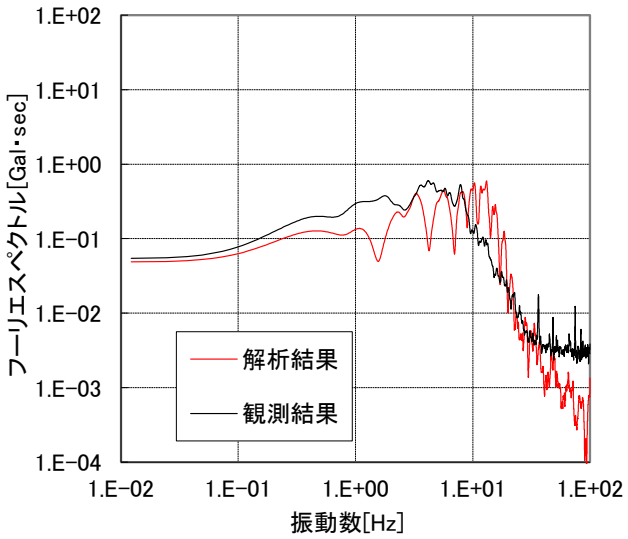


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-44　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/5/23）

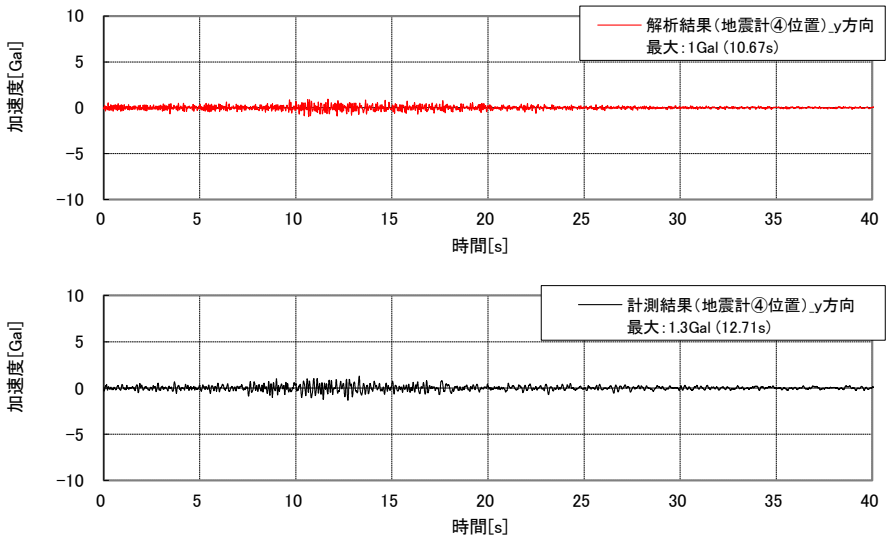


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

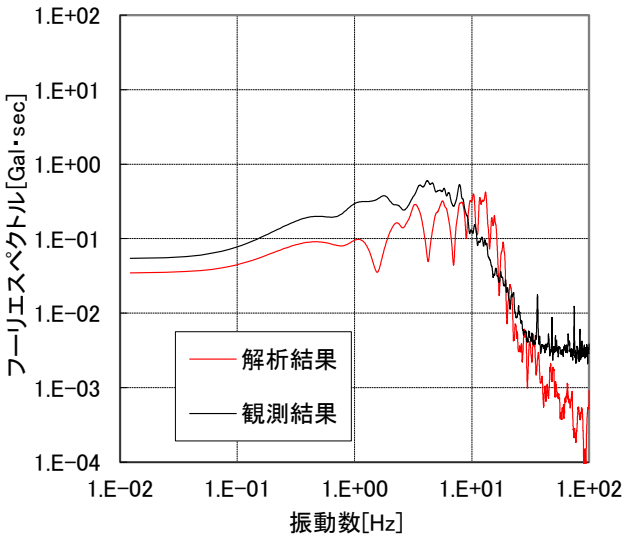


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-45　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/5/23）



(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）



(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-46　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/5/23）

f．2022/6/10 の観測データ

地震計⑤の空洞横断水平方向（y 方向）の地震動データに乗じる補正値αをα=1.0、0.8、0.7、0.5 にした場合を表 4.1-25 に示す。それぞれの波形を 1 次元モデルで引戻して地下の地震計④位置における解析結果（引戻し波）と観測結果（地震計④）を比較した。

各ケースの地震計④位置における解析結果と観測結果の比較（加速度時刻歴、フーリエスペクトル）を図 4.1-47～図 4.1-50、各ケースの最大加速度の比較を表 4.1-26 に示す。

表 4.1-26 に示すように、α=1.0～0.5 の範囲では、地下の地震計④位置における解析結果と観測結果の加速度レベルが整合しないことがわかった。

表 4.1-25　加速度振幅補正後の地震動データ（y 方向、2022/6/10）

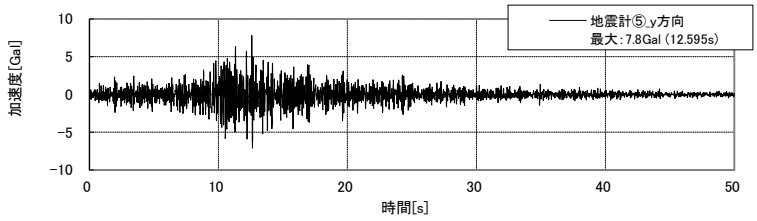
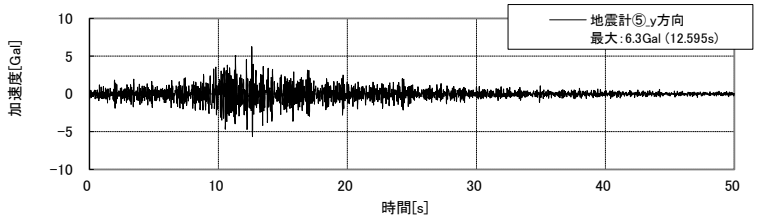
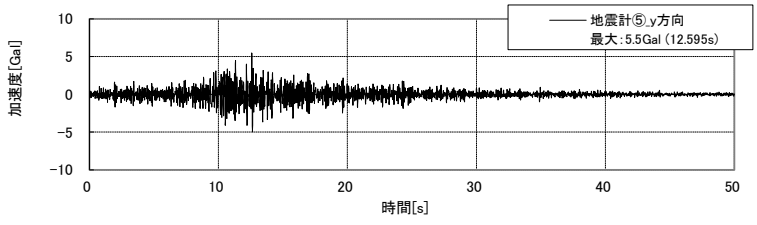
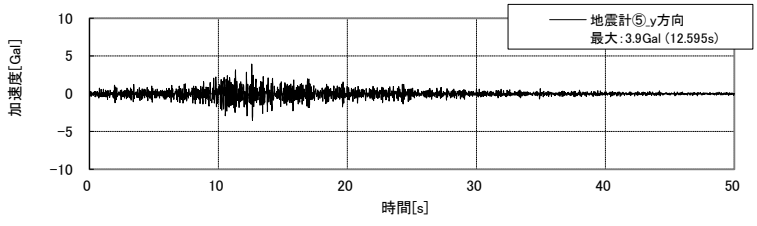
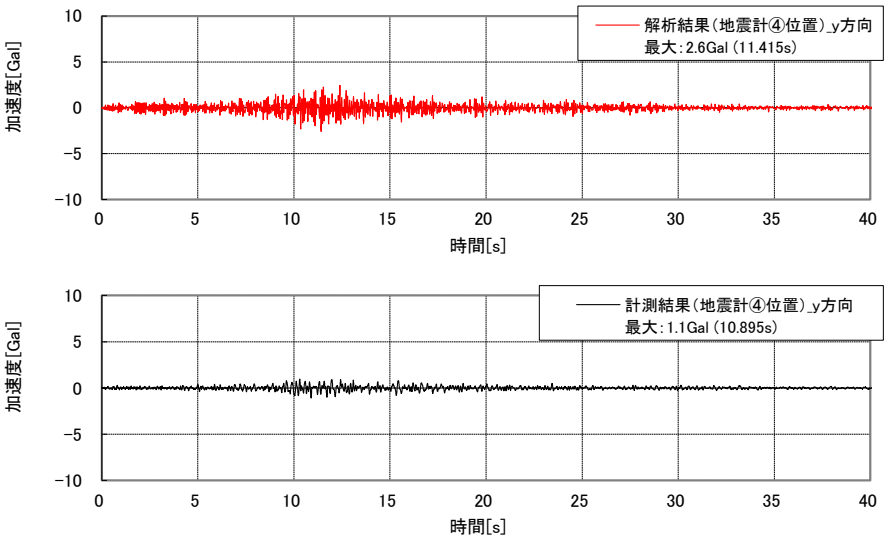
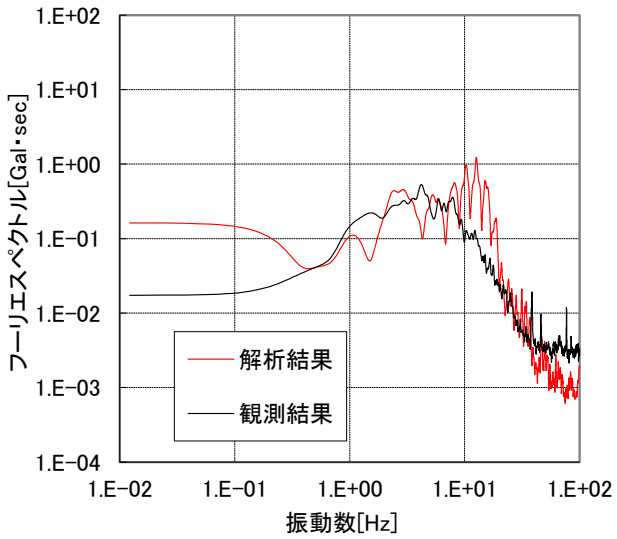
振幅補正値	加速度振幅補正後の地震計⑤の加速度時刻歴
α=1.0 （観測地震動と一致）	
α=0.8	
α=0.7	
α=0.5	

表 4.1-26　最大加速度の比較（地震計④位置、2022/6/10）

	最大加速度(Gal)		比率
	解析結果	観測結果	（解析／観測）
α=1.0 （観測地震動と一致）	2.6	1.1	2.4
α=0.8	2	1.1	1.8
α=0.7	1.8	1.1	1.6
α=0.5	1.3	1.1	1.2

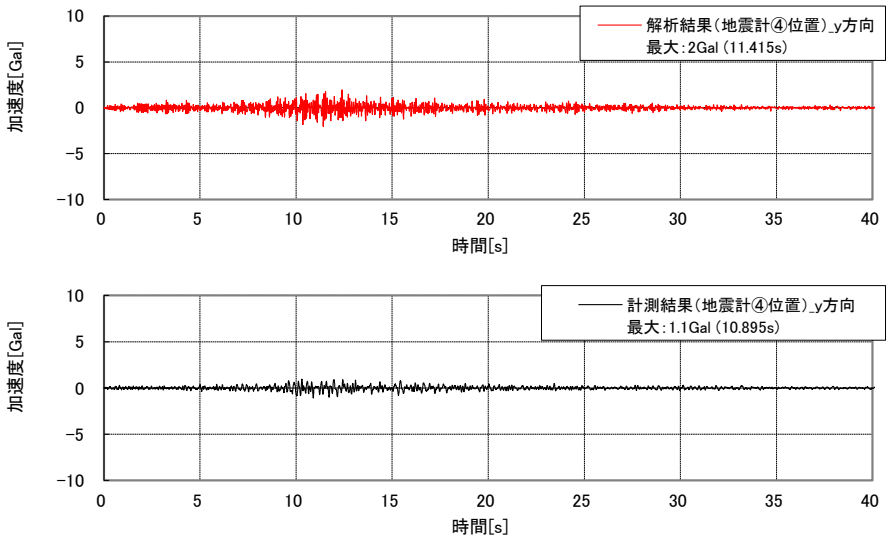


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

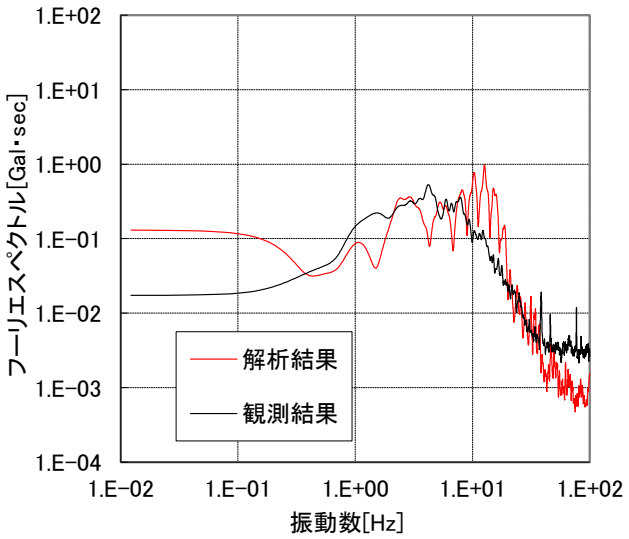


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-47　解析結果と観測結果の比較（α=1.0、地震計④、y 方向、2022/6/10）

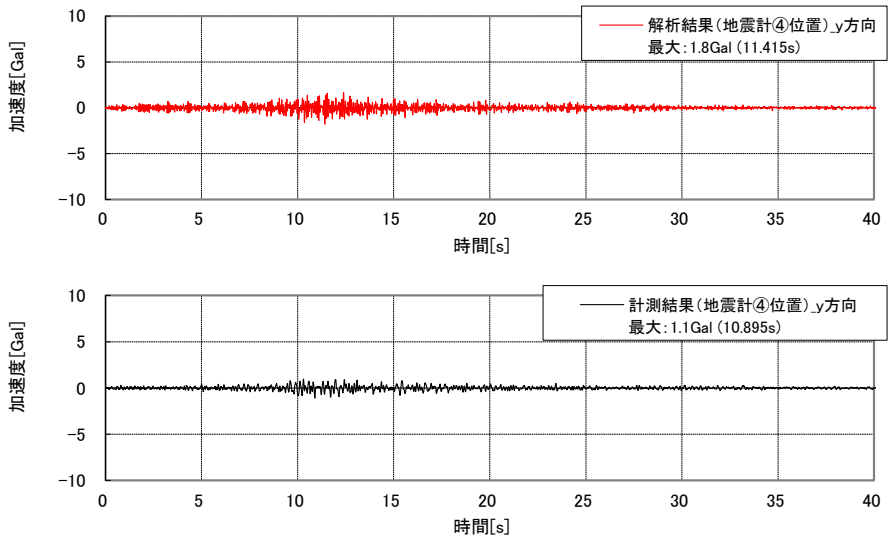


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

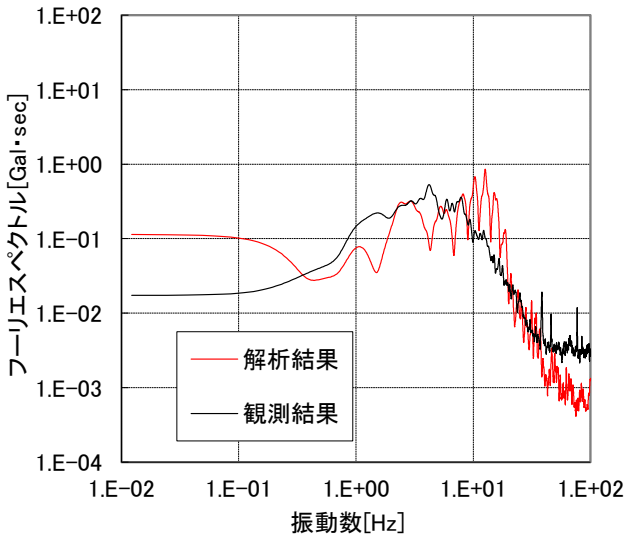


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-48　解析結果と観測結果の比較（α=0.8、地震計④、y 方向、2022/6/10）

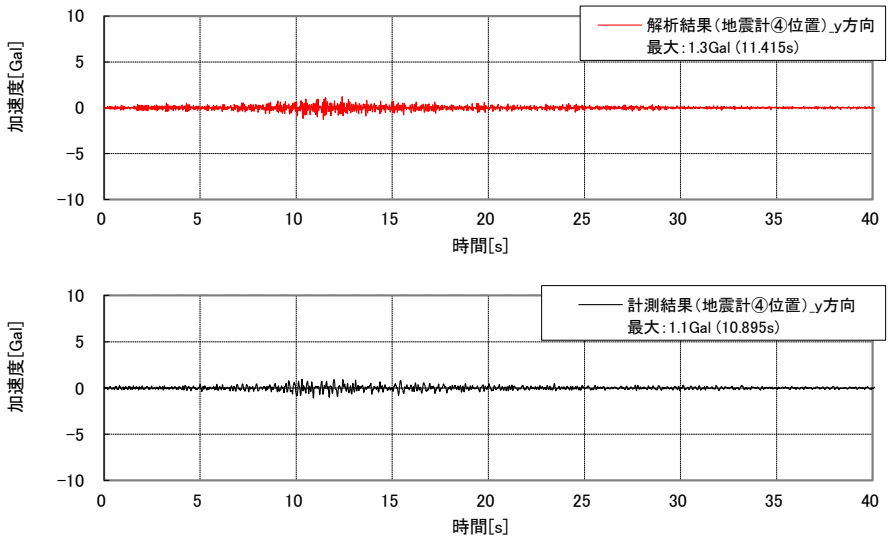


(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）

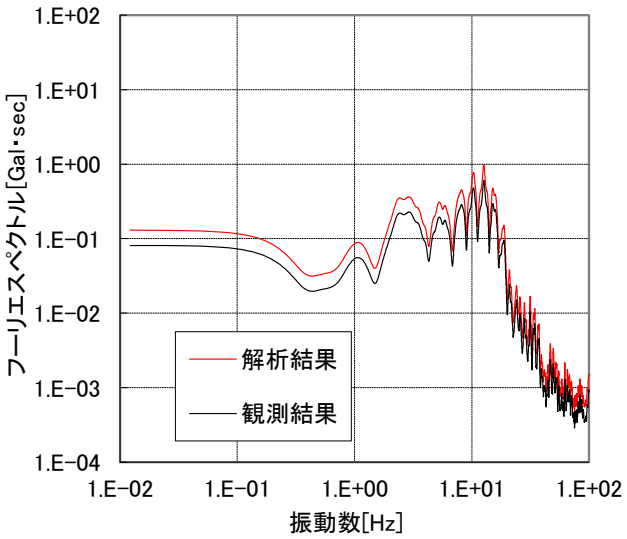


(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-49　解析結果と観測結果の比較（α=0.7、地震計④、y 方向、2022/6/10）



(1)加速度時刻歴（赤：解析結果、黒：観測結果）



(2)フーリエスペクトル（赤：解析結果、黒：観測結果）

図 4.1-50　解析結果と観測結果の比較（α=0.5、地震計④、y 方向、2022/6/10）

5）補正値の適用性の分析

前述の「4）補正値の感度分析」の結果を整理することにより、補正値αの適用性について分析する。

各地震動における、α=1.0～0.5 の場合の解析結果及び観測結果を図 4.1-51 に示す。また、観測結果に対する解析結果の最大加速度の比率を図 4.1-52、さらに最大加速度の比率と補正値αの関係を図 4.1-53 に示す。図 4.1-51～図 4.1-53 に示すように、α を 1.0 から 0.5 に小さくすることにより解析結果の最大加速度が線形的に小さくなることがわかる。また、図 4.1-53 に示すように、解析結果が観測結果に比較的近くなる補正値αは 0.7 程度であると推察される。

一方で、図 4.1-53 に示すように、4/28 と 6/10 の地震動においては、α=0.7 にしても他の地震動データと比較して解析結果と観測結果の最大加速度で差異が生じたままとなっている。この 2 回の地震動については、図 4.1-54 に示すように低周波数帯（0.5(Hz)程度以下）においても、地下から地表に向かって伝達関数が 10 倍程度増幅している地震であることが、上記の最大加速度の差異が生じた原因である可能性がある。よって、低周波数帯で増幅する地震動では、今回の方法は適用できない可能性がある。

以上より、限定的な地点（当該サイトのみ）かつ限定的な地震動（低周波数帯で増幅が小さい地震動）のみでの適用にはなるが、地表の観測地震動の加速度振幅を 0.7 倍程度にして引戻すことで、地下における加速度レベルを再現できる可能性があることがわかった。

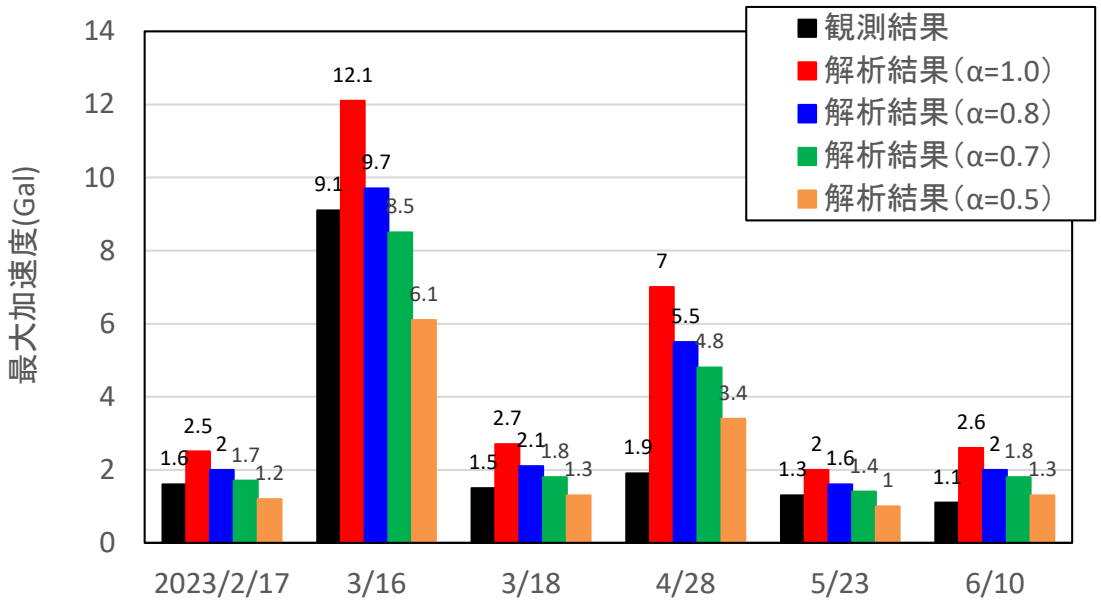


図 4.1-51　解析結果と観測結果（α=1.0～0.5）の最大加速度の比較

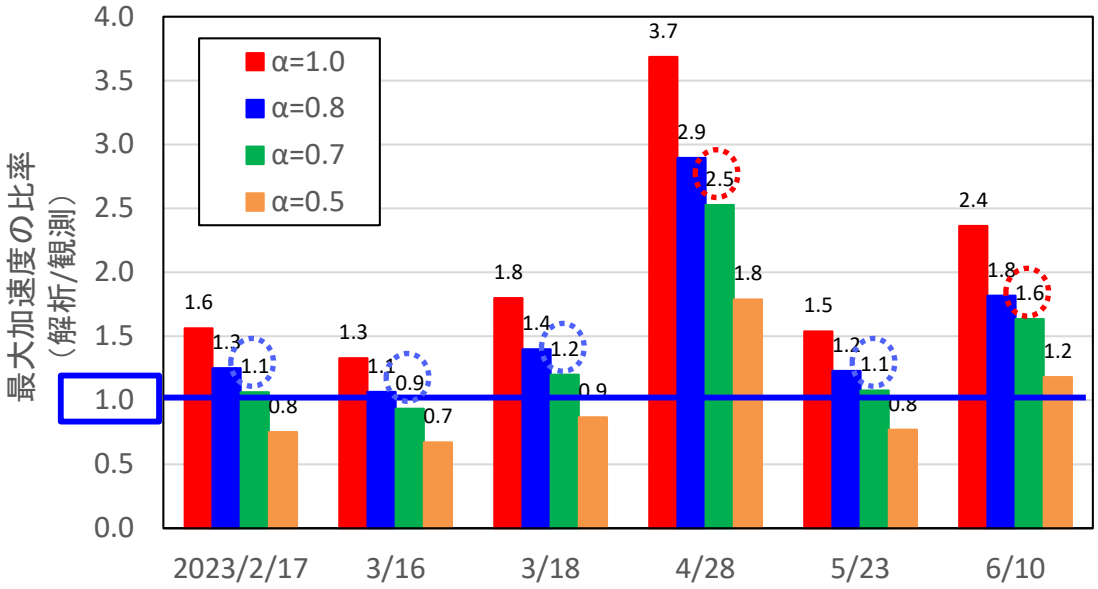


図 4.1-52　観測結果に対する解析結果の最大加速度の比率

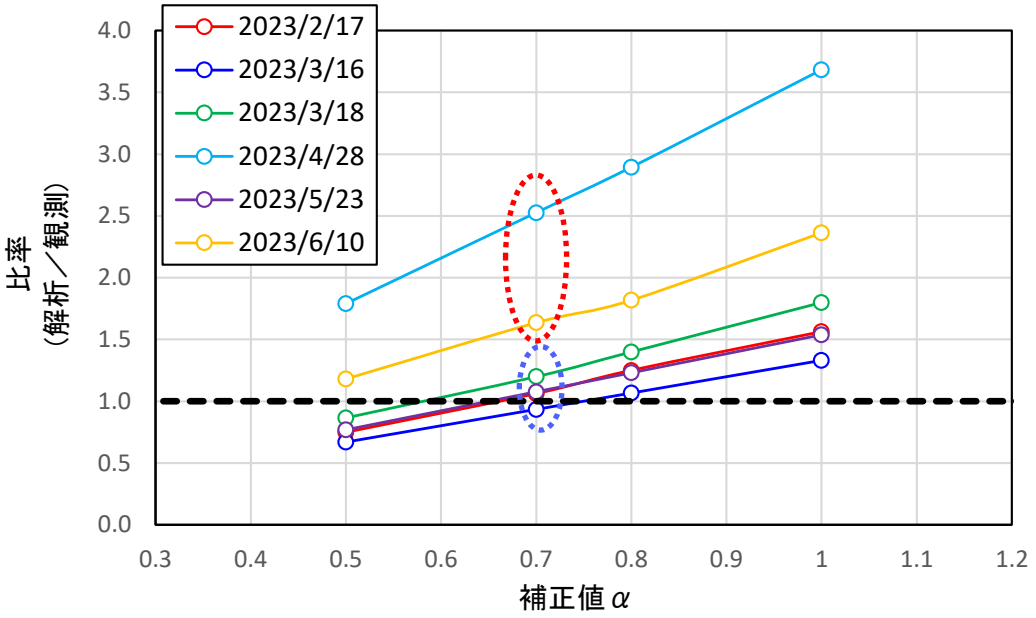


図 4.1-53　比率（解析結果／観測結果）と補正値 α の関係

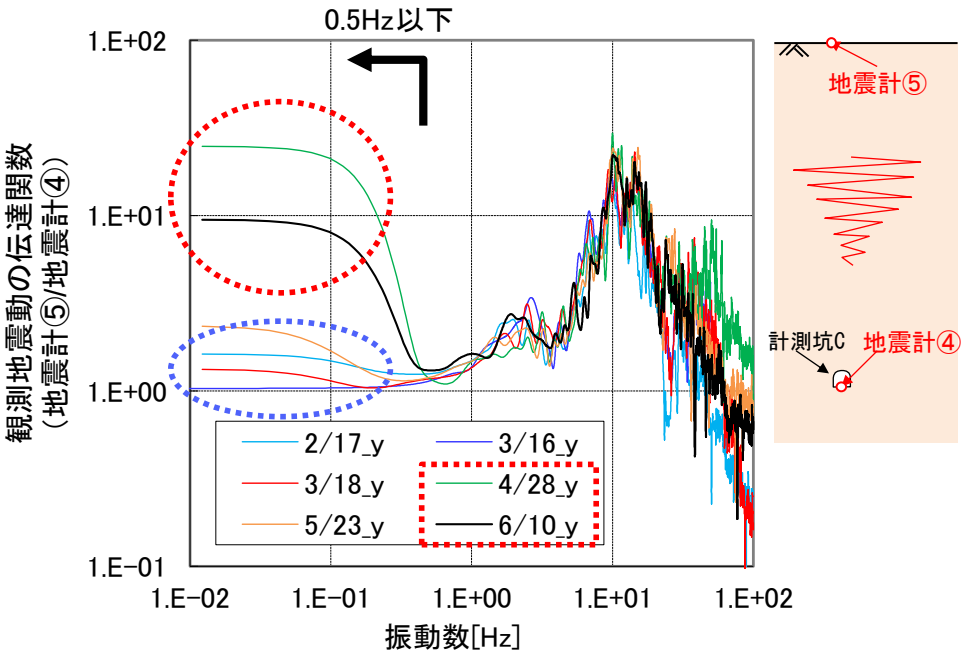


図 4.1-54　伝達関数（地震計⑤/地震計④、y 方向）

6）2 次元モデルによる再現性の確認（2022/3/16 の地震動で実施）

図 4.1-55 のステップ 1 において、補正値αを用いて地震計⑤の観測データを引戻し、ステップ 2 の 2 次元地震応答解析の入力地震動を作成し、試験空洞位置における応答値を確認した。ここでは、比較として補正値αは 1.0 と 0.7 の場合で実施した。なお、検討に用いた地震動は比較的加速度レベルが大きい 2022/3/16 の観測データとした。

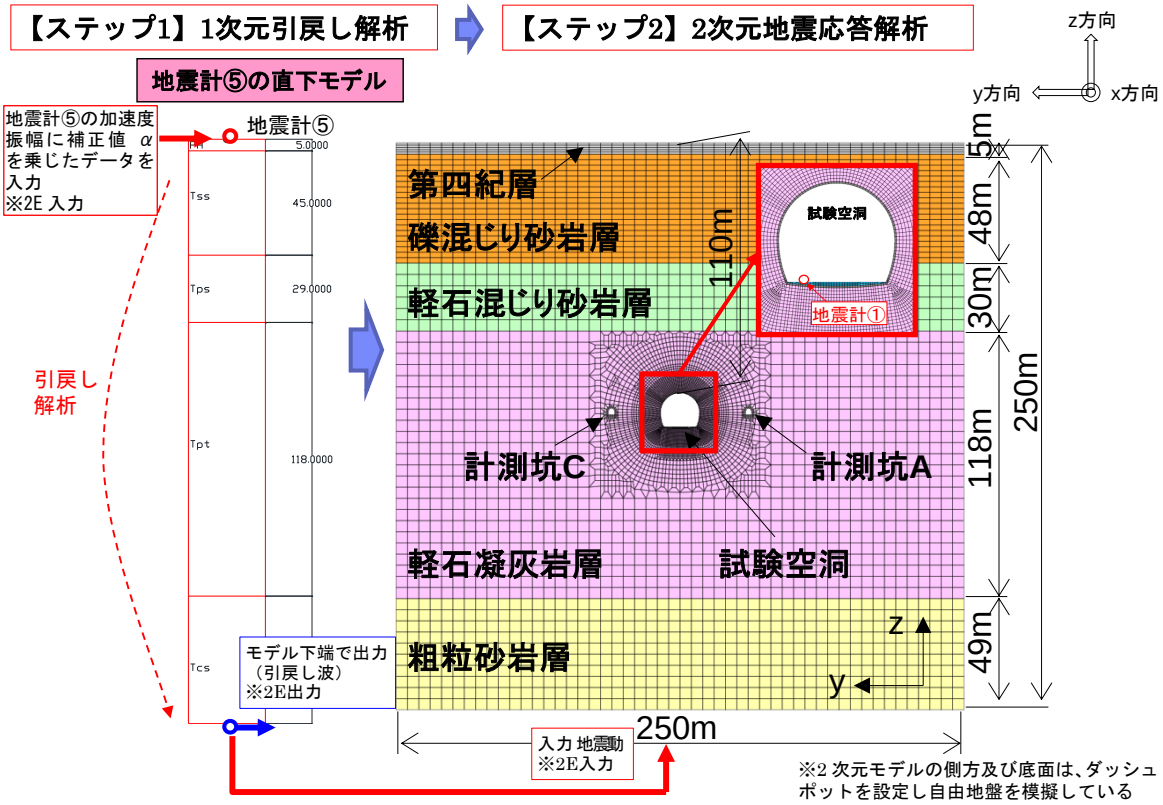


図 4.1-55　地震応答解析の流れ

a．解析条件

(a) 解析モデル

本検討では、図 4.1-55 に示すように試験空洞底盤に設置した地震計①の応答を確認するために、試験施設を含めない空洞のみのモデルとした。解析モデルは、平面ひずみ問題として周辺岩盤を含めて有限要素法を用いてモデル化（ソリッド要素）した。なお、解析モデルの側方及び底面は、ダッシュポットを設定し自由地盤を模擬した。

地震応答解析に用いた部材ごとの材料モデルを表 4.1-27 に示す。

解析には、2 次元・3 次元汎用有限要素解析プログラム（Soil Plus 2019）を用いた。

表 4.1-27　材料モデル

部材	材料モデル
岩盤	修正 R-0 モデル
支保工	弾性モデル
埋戻し材（セメント系）	
均しコンクリート	

(b) 物性値の設定

解析に用いた物性値一覧を表 4.1-28 に示す。

本解析に用いた構造物の物性値は、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。地盤物性値については、日本原燃再処理施設の物性値[3]を適用した。なお、PH 層の初期せん断剛性については、「4.1.2 (3) 2) 表層（PH 層）の物性値の精査」の結果を踏まえて見直した。

表 4.1-28　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	165	56	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	－	－	－	－

b. 解析結果

試験空洞底盤の地震計①の位置における解析結果と観測結果を図 4.1-56 に示す。地表の観測地震動の加速度振幅を 0.7 倍にして入力地震動を作成することで、2 次元解析においても解析結果と観測結果の最大加速度が同程度となることが確認できた。

よって、地表の観測地震動を用いて地下の応答を推測できる可能性があることがわかった。

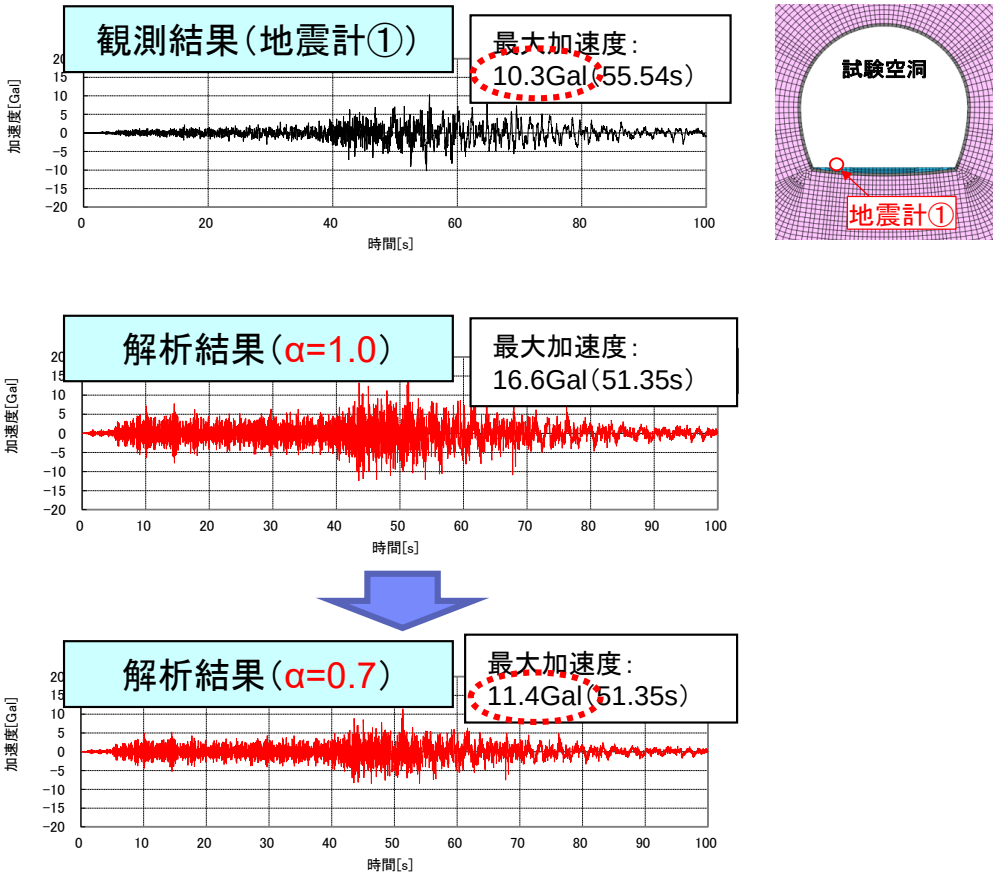


図 4.1-56 解析結果と観測結果の比較（地震計①位置、2022/3/16）

4.1.3 まとめ

令和 3 年度は、前年度構築した地震計測システムで取得した地震動データを活用して、引戻し解析手法の改良（入力地震動設定）に関する検討を実施した。

入力地震動設定の検討においては、解析用地盤物性値の減衰定数の周波数依存性の影響及び逆解析による物性値の同定について分析を行ったが、現状の問題となっている地表と地下における解析結果と観測結果の不整合の改善までには結びつかなかった。

そこで、現地に設置した地震計の地表と地下での伝達関数の特徴を分析し、引戻す前の観測地震動に対して、あらかじめ加速度振幅に補正値を乗じたデータを引戻し解析に入力する方法を提案した。この方法は、限定的な地点（当該サイトのみ）かつ限定的な地震動（低周波数帯で増幅が小さい地震動）のみでの適用にはなるが、地表の観測地震動の加速度振幅を 0.7 倍程度にして引戻すことで、地下における加速度レベルを再現できることがわかった。また、当該サイトの観測地震動データは、地形効果及び斜め入射の影響を殆ど受けておらず、地質構造及び地盤物性（G_0）の精度向上を図ることで、1 次元の引戻し解析により入力地震動を設定できる見通しが得られたものと考えられる。

今後は、引き続き地質構造及び地盤物性の精度向上を図り、また追加される地震動データを用いて上記手法の適用性の精査を行う。さらに、空洞内の試験施設に設置している地震計を利用して、地震時の施設挙動の再現性についても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] 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 4 年 3 月

[3] 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

[4] 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

[5] 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

[6] 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

[7] 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.

[8] 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

[9] 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

[10] 社団法人 土木学会：コンクリート標準示方書　構造性能照査編（2002 年制定）、平成 14 年 3 月

[11] 皆木孝英 他：ＰＳ検層法を用いた砕石路盤の剛性評価に関する研究、土木学会舗装工学論文集 第６巻、2001 年 12 月

4.2　地震動観測

4.2.1　検討概要

平成２７年～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）において、試験施設の地震時における施設挙動の分析評価に資することを目的として、試験施設及び空洞底盤に設置してある 3 台の地震計により地震動データが取得されてきた。しかしながら、地震動データが取得できるのは不定期であり、分析評価に用いられるデータ数も限られていることから、引き続き、分析評価に用いるためのデータの蓄積を行う意義は大きい。

また、それまでは地震計の設置場所が地中のほぼ同一深度の 3 台のみであり、鉛直方向の地震動特性の把握ができない状態であったことから、前年度までに、地表面に地震計を 1 台新設するとともに、空洞の影響が比較的小さいと考えられる計測坑 C にて別研究の既存計器で観測している地震動データが活用できる環境が整った。

本業務は、この地震動計測システムにより地震動データの取得を継続的に行うとともに、地震動計測システムの保守・点検を行うものである。

4.2.2　地下の地震計計測システム

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。

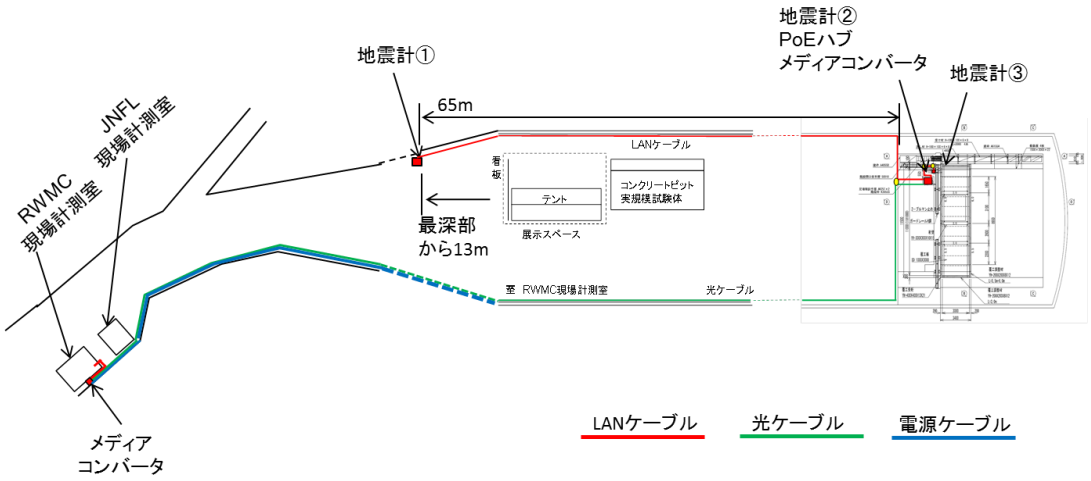
① 試験空洞斜路上（入力側）

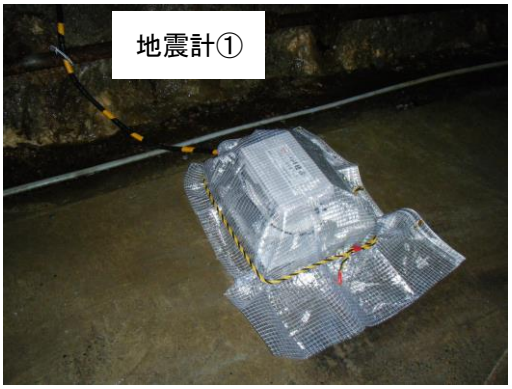
② 試験施設の底部コンクリートピット上（応答側）

③ 試験施設の手前部コンクリートピットの上部（応答側）

地下の地震観測のための計測システムを表 4.2-1、地震計の仕様を表 4.2-2 に示す。

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。





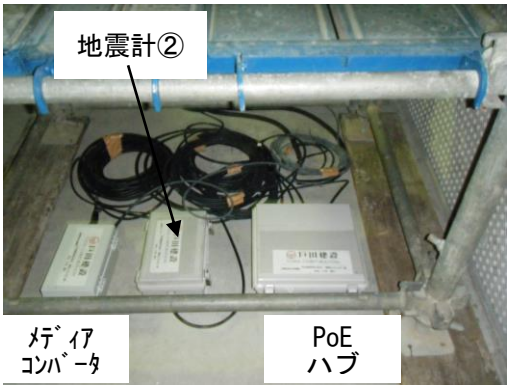


図 4.2-1　地下の地震計の設置位置平面図（全体）と設置状況

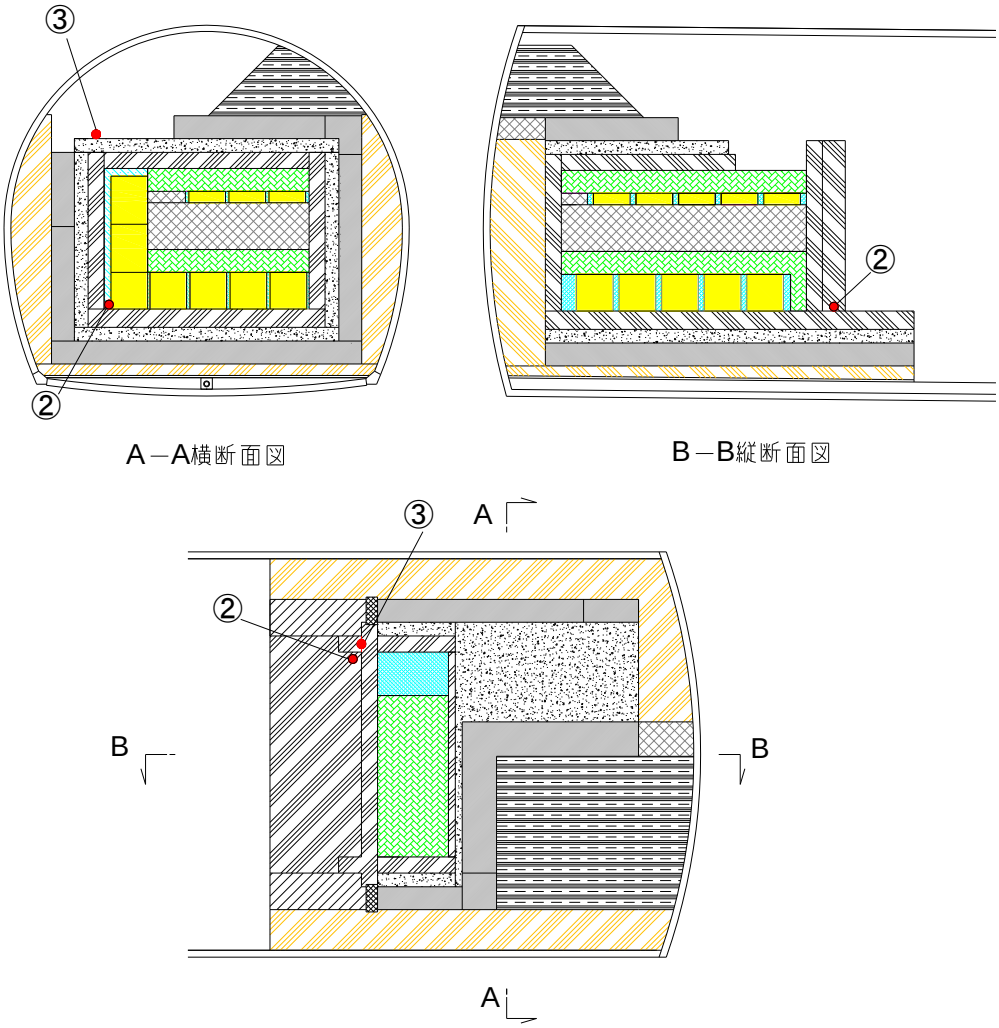


図 4.2-2　地震計の設置位置（試験施設）

表 4.2-1　地震観測のための計測システム（地下）

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　地震計の仕様（地下）

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）

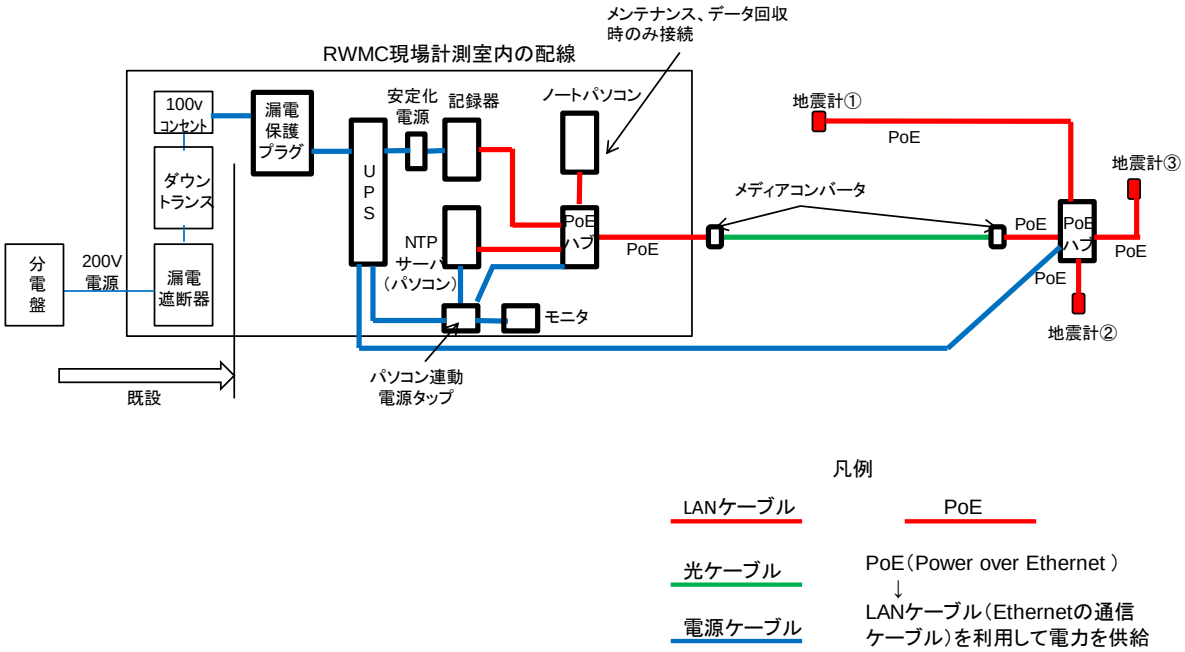


図 4.2-3　計測設備の配置

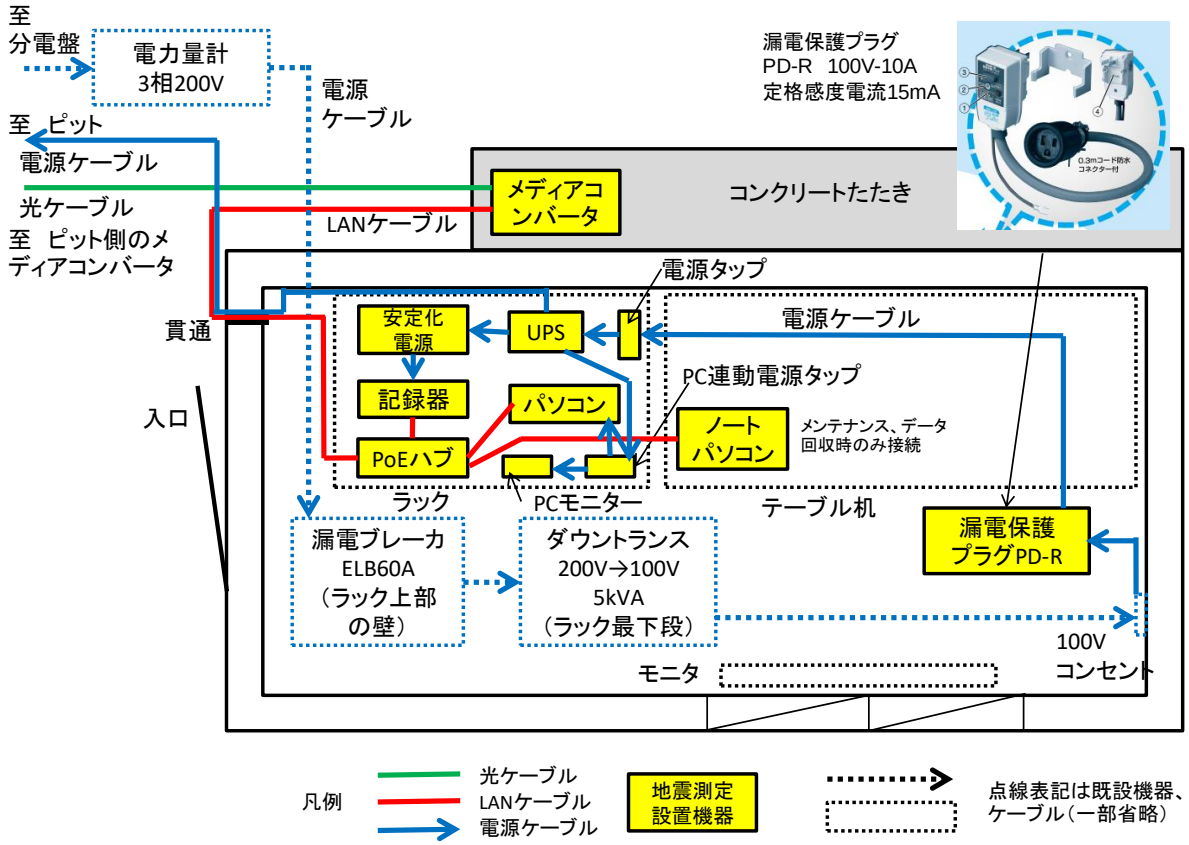


図 4.2-4　RWMC 現場計測室　機器設置のネットワーク図

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　地表面の地震計計測システム

地表面の地震計は、令和 3 年度に設置された新設の 1 箇所の地震計を継続使用する。地震計の設置位置と設置状況を図 4.2-5、ソーラーパネルの設置状況を図 4.2-6 に示す。また、地震観測のための計測システムを表 4.2-3、地震計の仕様を表 4.2-4 に示す。

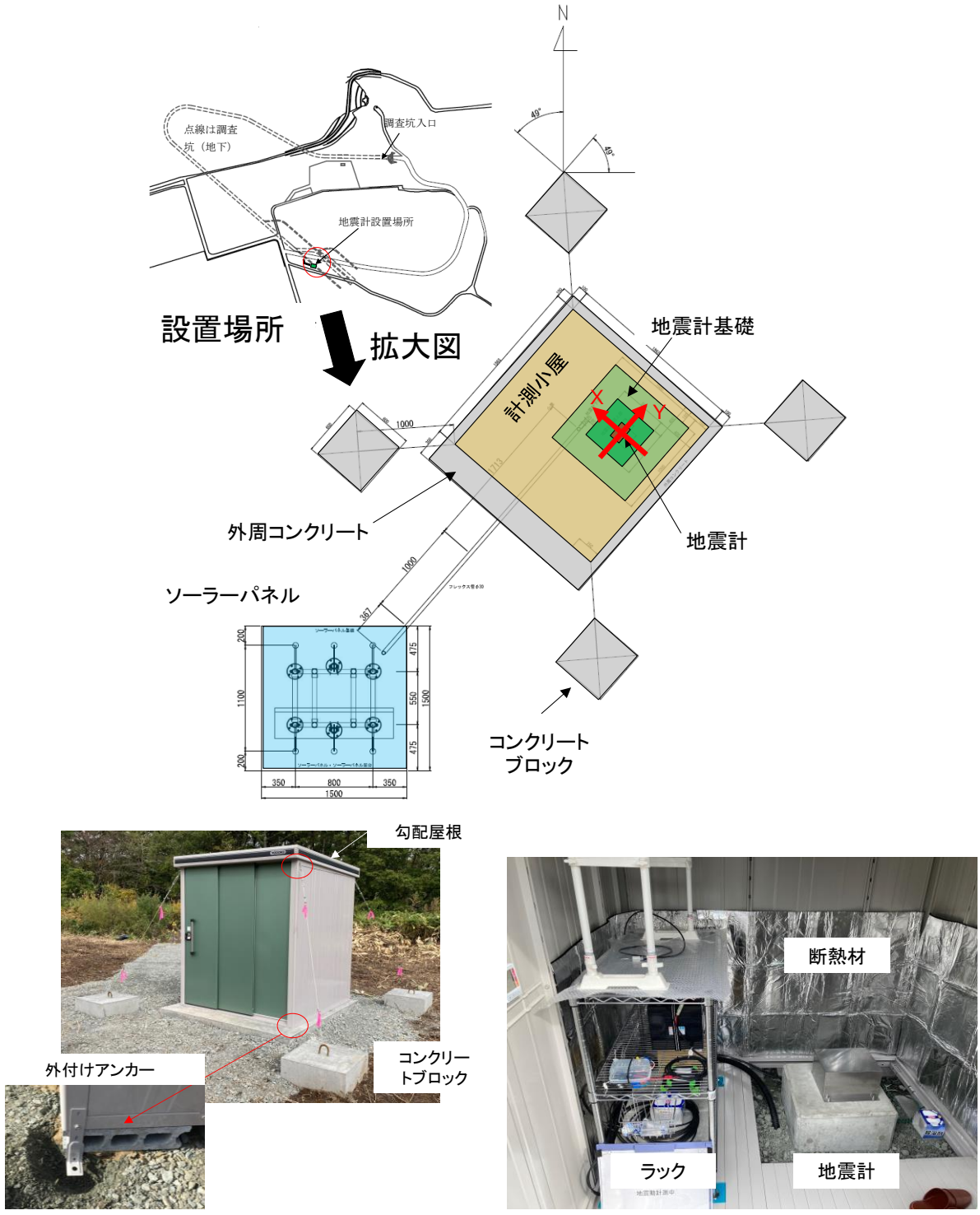


図 4.2-5　地震計の設置位置平面図（地表面）と設置状況

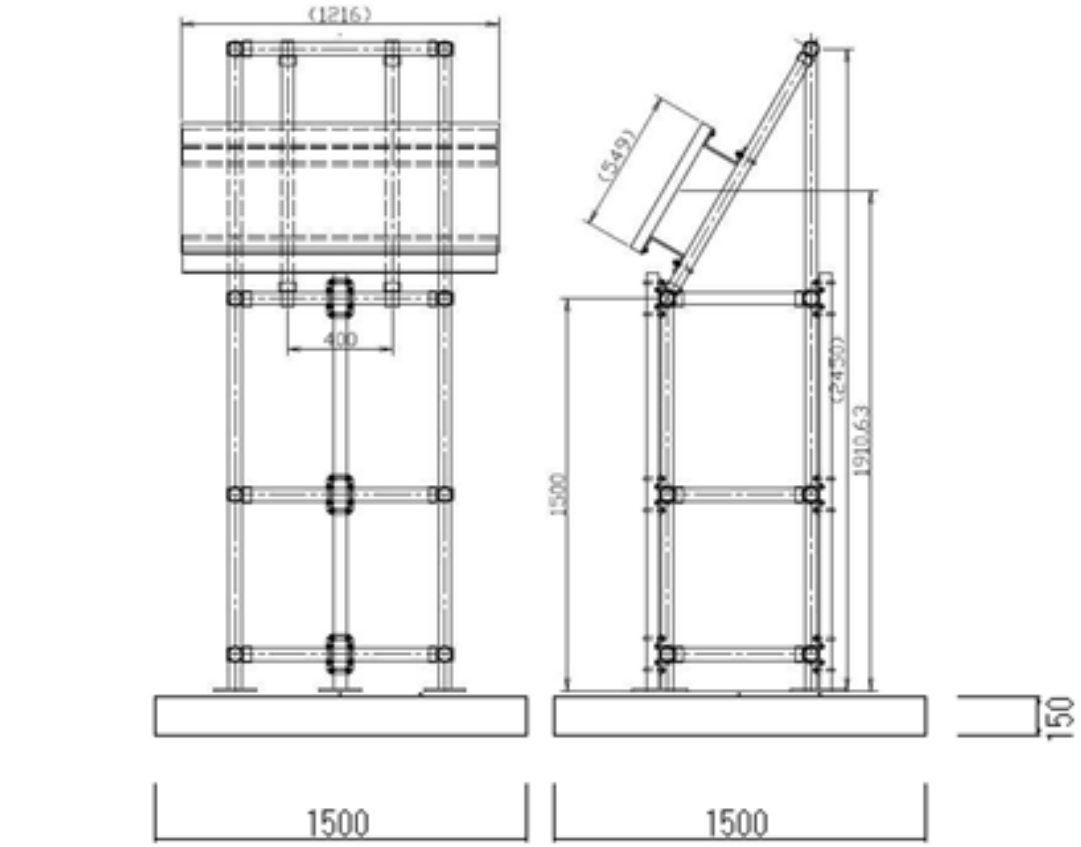


図 4.2-6　ソーラーパネルの設置状況（地表面）

表 4.2-3　地震観測のための計測システム(地表面)

項　目		単位	数量	摘　要
地震計（小型サーボ型加速度計）		台	1	ネットワークセンサ 3 成分計測±2000Gal コンパクトフラッシュカード：32GB 内蔵 保護カバー内に収納
GPS アンテナ		台	1	ソーラーパネルの架台に設置
GPS 避雷器		台	1	計測小屋に設置
データ回収用 PC		台	1	ノート型
ソーラーパネル		台	1	DBG100-12、屋外に設置
充放電コントローラ		台	1	SA-BAG10、計測小屋に設置
バッテリー（蓄電池）		台	3	JR55-12、計測小屋に設置
ケーブル類	同軸ケーブル	式	1	GPS アンテナ～GPS 避雷器間を接続
	通信線	式	1	GPS 避雷器～地震計間を接続
	LAN ケーブル	式	1	地震計～データ回収用パソコン間を接続
	電源ケーブル	式	1	ソーラーパネル、充放電コントローラ、バッテリー、地震計間を接続

表 4.2-4　地震計の仕様（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

4.2.4　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 3 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

現場計測室での作業（地下）

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。

地震計設置場所での作業（地下）

①地震計のメンテナンス（作業順序）

・車両をピット前の広場で駐車し、必要最小限の手荷物を持参して、地震計②（底部コンクリートピット上）→地震計③（ピット手前部側壁上）→地震計①（試験空洞斜路上）の順にメンテナンス作業を行う。

②ピット上での作業

・地震計②、地震計③のメンテナンス作業では安全帯を装備して昇降設備を上がり、所定の場所で作業を行う。

③斜路上での作業

・地震計①のメンテナンス作業は斜路上の所定の場所で、車両や作業員の通行に注意を払いながら行う。

④メンテナンス作業の内容

・各場所に設置している地震計、PoE ハブ、メディアコンバータ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。

・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。

地震計設置場所での手順（地表面）

①充放電コントローラの LED 表示を目視で確認し、ソーラーパネルからの充放電が正常に動作していることを確認する。

②データ回収用 PC を地震計と LAN ケーブルで接続し、通信ソフト（FFFTP）で地震計にアクセスできることで地震計が正常に動作していることを確認する。

③計測小屋内に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。

④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。

⑤ケーブル類の損傷、漏電などトラブルが発生した場合、状況の確認、原因の調査を行ったうえで、必要な資器材を準備し、対策、復旧作業を行う。

⑥雑草が茂っている時または冬期で積雪量が多い時で通行が困難な場合は、土のう階段から計測小屋までの通行路（図 4.2-7 参照）について事前に草刈りまたは除雪を行い、通行できる状態にしたあとで計測小屋内でメンテナンス作業を行う。

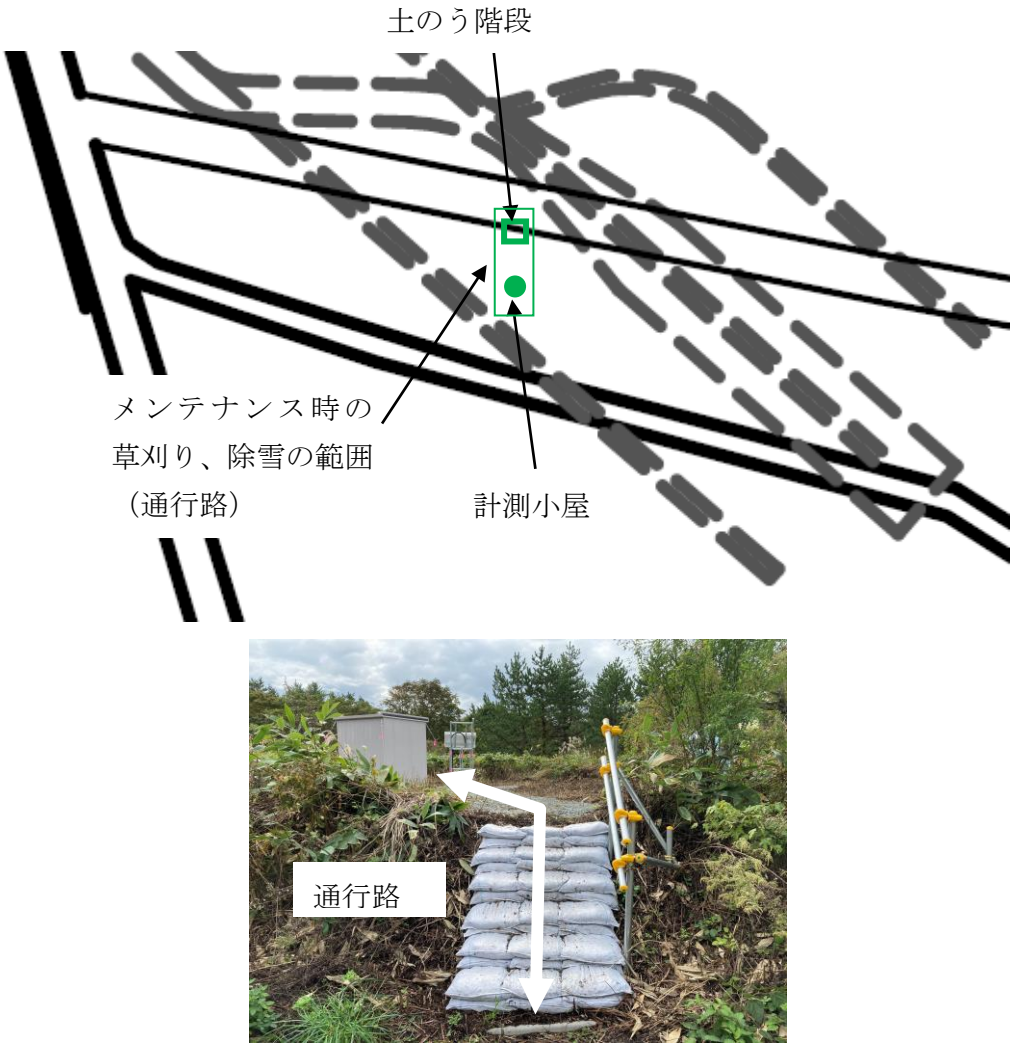


図 4.2-7　メンテナンス時の草刈りと除雪の範囲

(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 4.2-5 に示す。

表 4.2-5　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 1 Gal 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、当日の現場作業の影響など、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。

地表の地震計のデータは地下の地震計のデータと対比や引き戻し解析の検証を行うため、地下でデータが取れている地震のみ記録として残すものとする。また地下の富士電機製の地震計と地表の東京測振製の地震計はデータ形式が異なるため、地表の地震計のデータは 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。

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。

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。それぞれのデータは異なる局所座標系によるものであるため、KiK-net 六ヶ所のデータ（方位座標）を試験空洞の軸・軸直角方向に変換することで直接比較できるように、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。

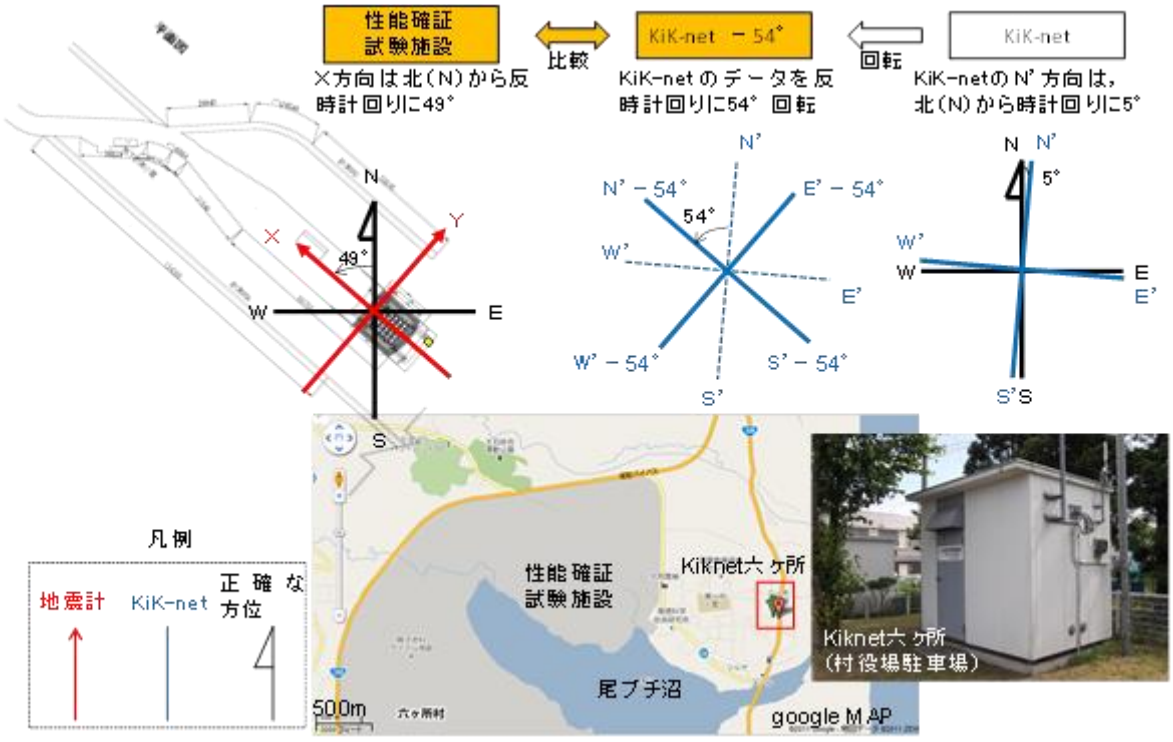


図 4.2-8 KiK-net 六ヶ所のデータの方位補正

(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）12 件の諸元を表 4.2-6 に示す。各データの取得日を下記に示す。

・No.1～6　2022 年 6 月 24 日にデータ取得
・No.7～11　2022 年 11 月 18 日にデータ取得
・No.12　2023 年 2 月 17 日にデータ取得

表 4.2-6　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	2022 年 2 月 17 日	18:17:45	浦河沖	42° 02.5′N	142° 32.2′E	57 km	5.0	震度 3	震度 2
2	2022 年 3 月 16 日	23:36:33	福島県沖	37° 41.8′N	141° 37.3′E	57 km	7.4	震度 6 強	震度 3
3	2022 年 3 月 18 日	23:25:16	岩手県沖	39° 59.4′N	142° 00.2′E	18 km	5.6	震度 5 強	震度 1
4	2022 年 4 月 28 日	19:03:21	青森県東方沖	41° 11.7′N	142° 19.8′E	53 km	4.7	震度 2	震度 1
5	2022 年 5 月 23 日	11:01:06	青森県東方沖	41° 13.4′N	143° 05.8′E	24 km	5.6	震度 3	震度 1
6	2022 年 6 月 10 日	11:14:05	浦河沖	41° 49.9′N	142° 12.1′E	67 km	4.9	震度 3	震度 1
7	2022 年 7 月 2 日	10:59:44	宗谷海峡	45° 49.1′N	142° 13.6′E	324 km	5.9	震度 3	震度 2
8	2022 年 7 月 6 日	13:02:11	青森県東方沖	41° 29.5′N	142° 00.9′E	58 km	4.6	震度 2	震度 1
9	2022 年 7 月 22 日	12:01:57	青森県三八上北地方	40° 33.0′N	141° 25.0′E	86 km	5.3	震度 4	震度 2
10	2022 年 9 月 13 日	9:51:59	青森県東方沖	41° 34.5′N	142° 06.2′E	54 km	5.1	震度 3	震度 2
11	2022 年 11 月 17 日	9:28:20	青森県東方沖	40° 43.8′N	142° 25.2′E	64 km	5.0	震度 3	震度 2
12	2023 年 1 月 16 日	1:25:26	青森県東方沖	41° 06.1′N	142° 26.1′E	46 km	4.5	震度 2	震度 1

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 4.2-7 に示す。

表 4.2-7　各地震計のデータ取得の有無

No.	地震の発生日	震央地名	尾駁の震度	国プロ　地震計				提供	KIK-net 六ヶ所
				①	②	③	⑤	④	
1	2022 年 2 月 17 日	浦河沖	震度 2	○	○	○	○	○	○
2	2022 年 3 月 16 日	福島県沖	震度 3	○	○	○	○	○	○
3	2022 年 3 月 18 日	岩手県沖	震度 1	○	○	○	○	○	○
4	2022 年 4 月 28 日	青森県東方沖	震度 1	○	○	○	○	○	○
5	2022 年 5 月 23 日	青森県東方沖	震度 1	○	○	○	○	○	○
6	2022 年 6 月 10 日	浦河沖	震度 1	○	○	○	○	○	○
7	2022 年 7 月 2 日	宗谷海峡	震度 2	○	○	○	○	○	○
8	2022 年 7 月 6 日	青森県東方沖	震度 1	○	○	○	○	○	○
9	2022 年 7 月 22 日	青森県三八上北地方	震度 2	○	○	○	○	○	○
10	2022 年 9 月 13 日	青森県東方沖	震度 2	○	○	○	○	○	○
11	2022 年 11 月 17 日	青森県東方沖	震度 2	○	○	○	○	○	○
12	2023 年 1 月 16 日	青森県東方沖	震度 1	○	○	○	○	○	×

凡例　○:データ取得、×：データ未取得

（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　2022 年 2 月 17 日

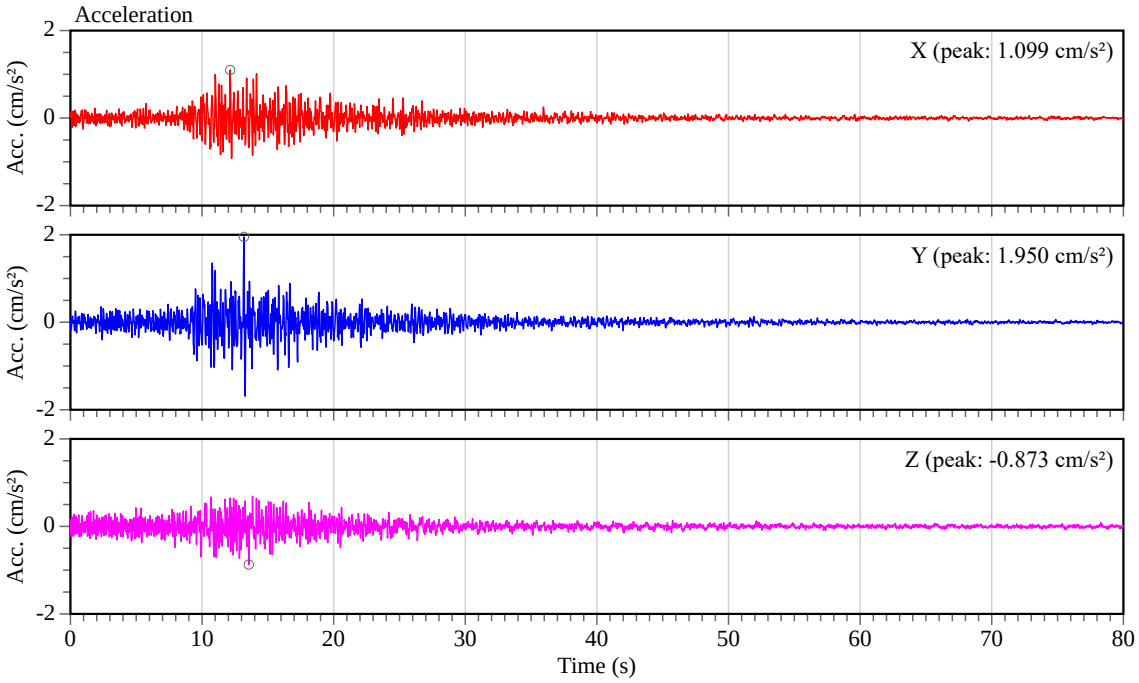


図 4.2-9　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

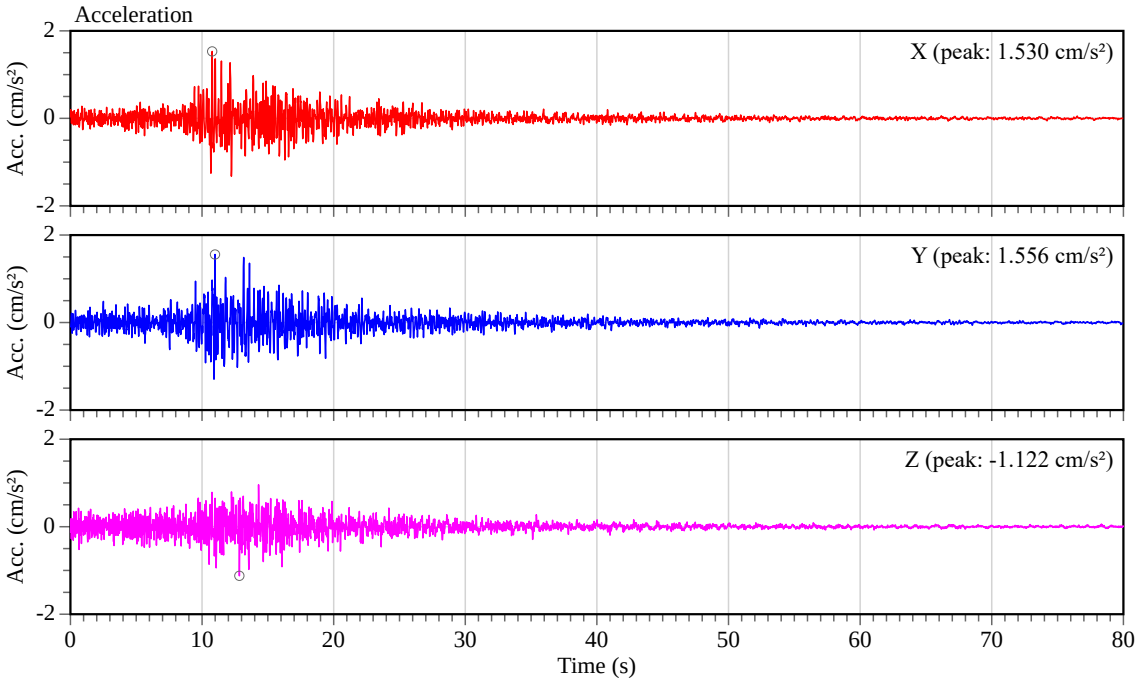


図 4.2-10　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

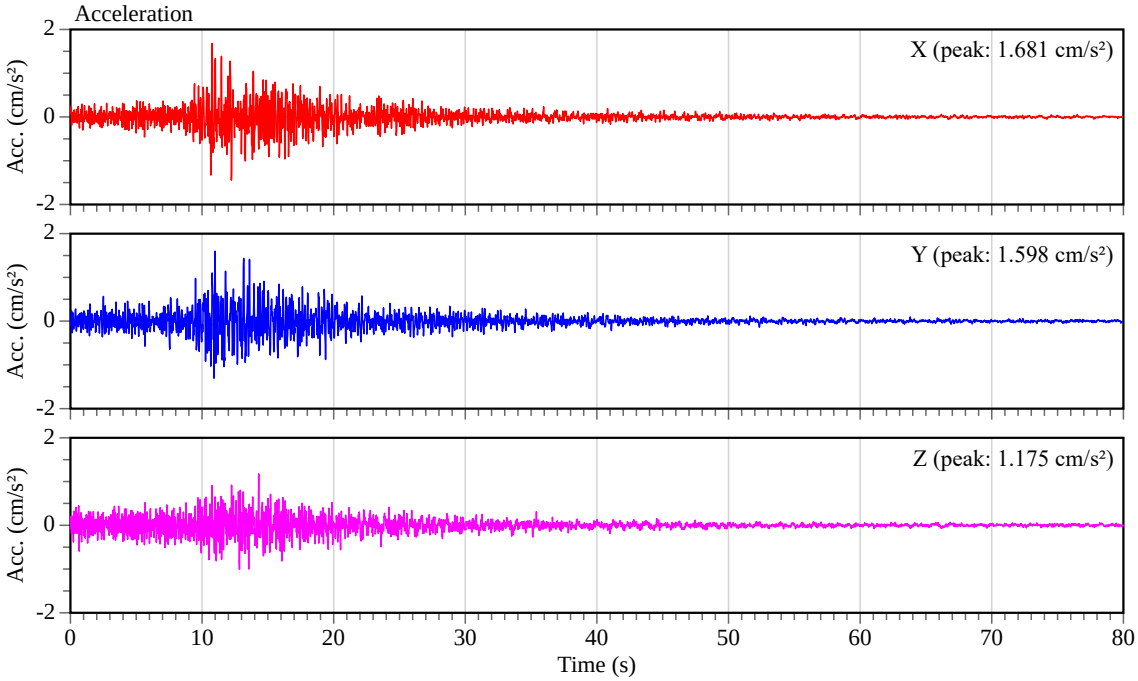


図 4.2-11　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

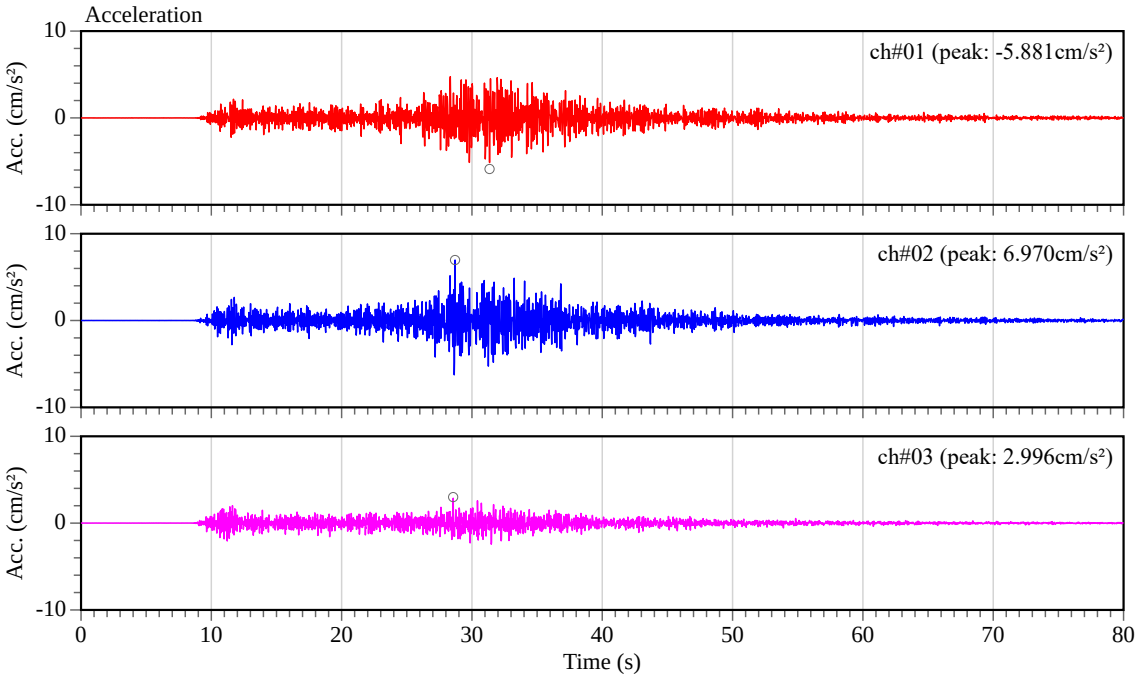


図 4.2-12　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

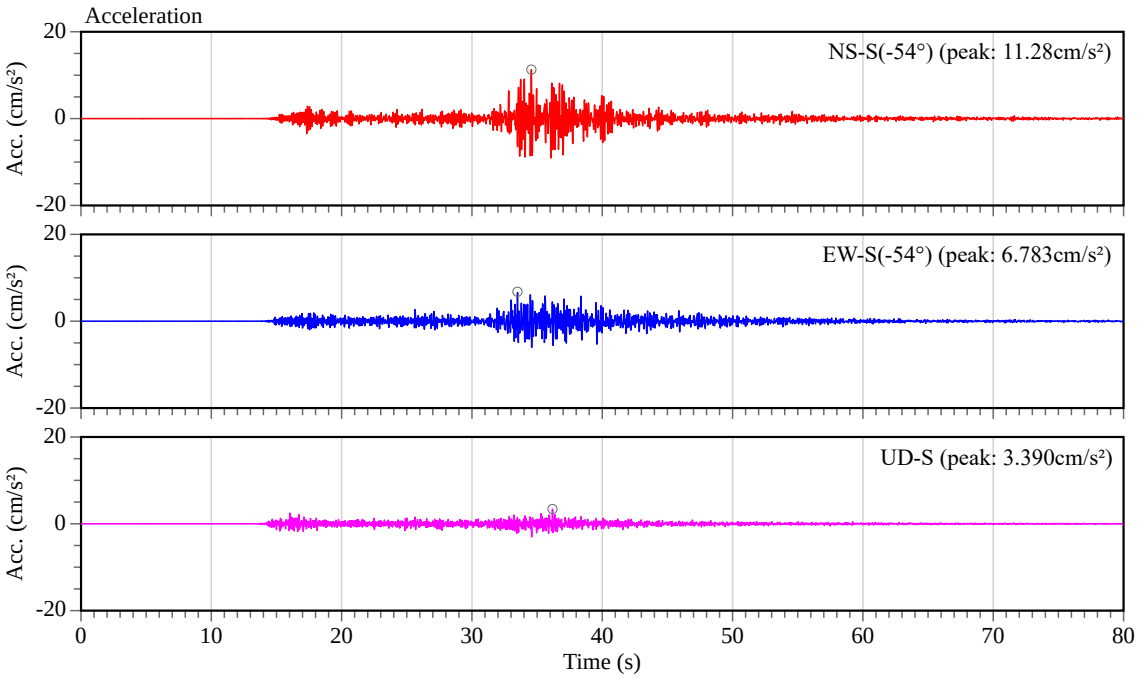


図 4.2-13　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

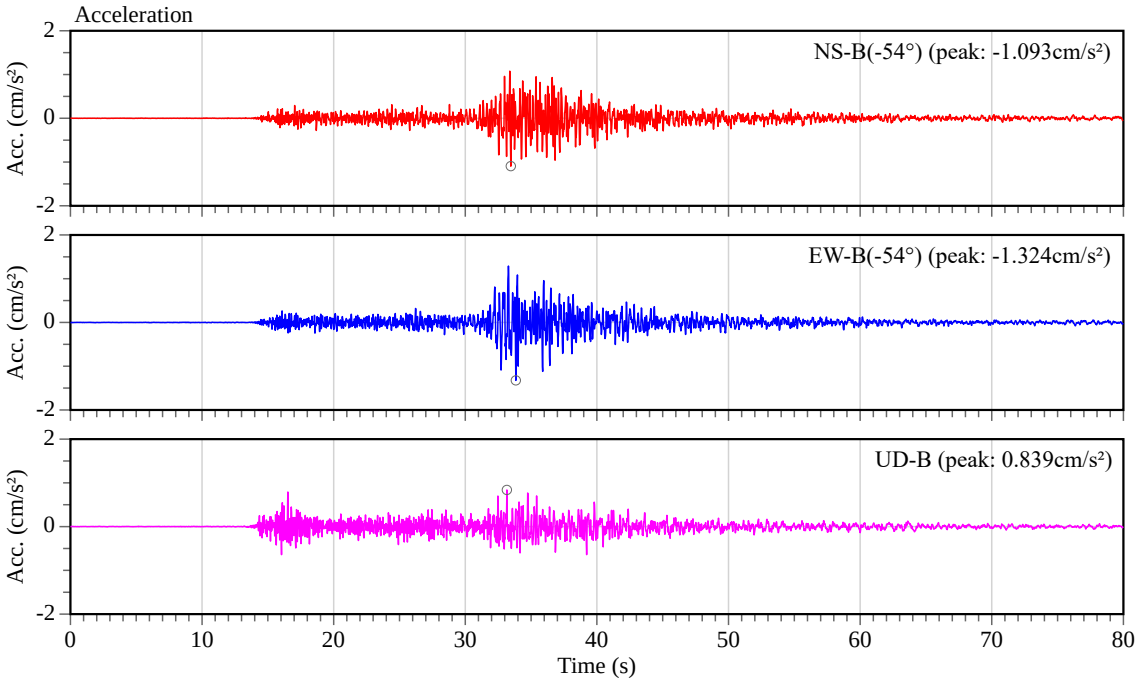


図 4.2-14　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.2　2022 年 3 月 16 日

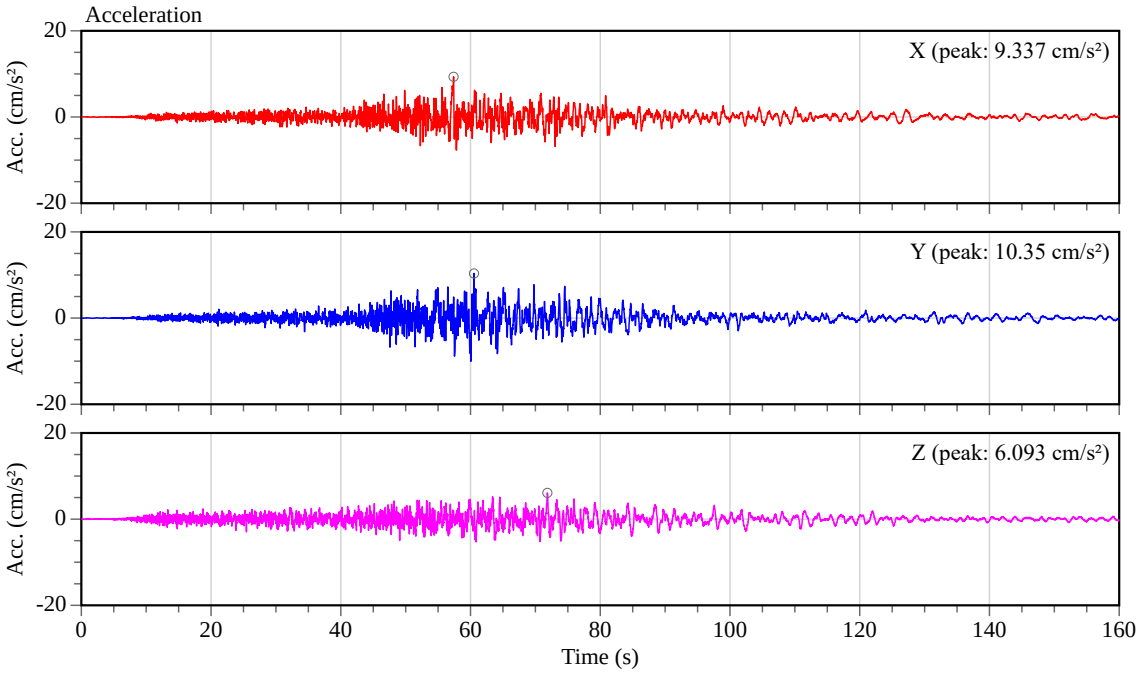


図 4.2-15　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

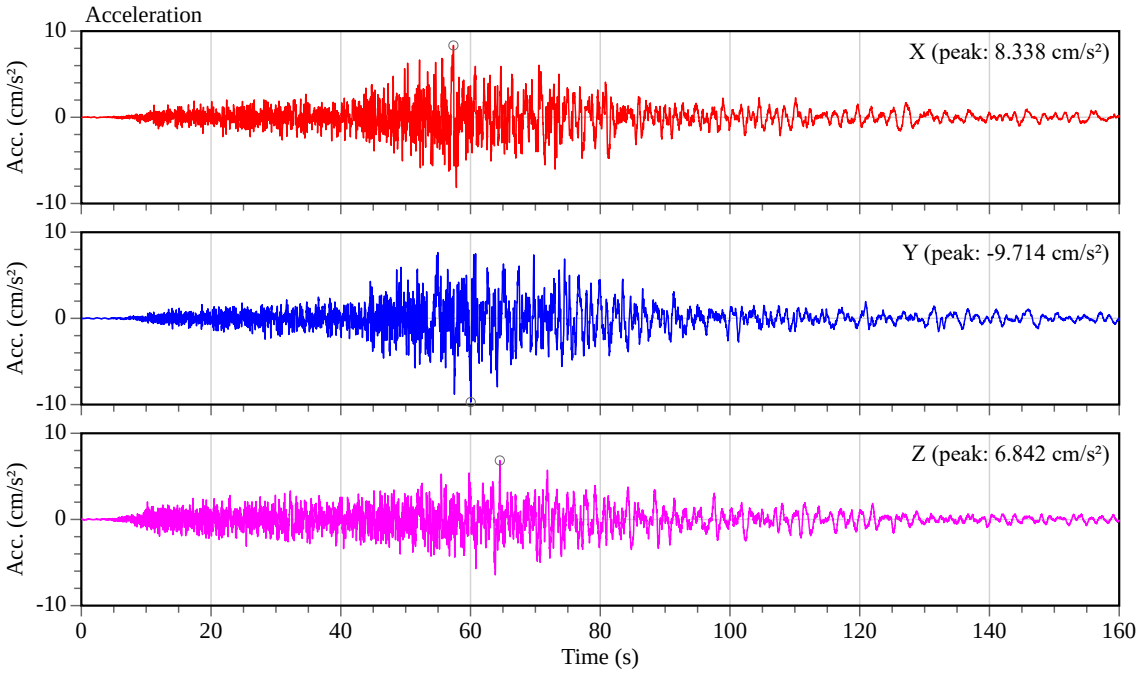


図 4.2-16　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

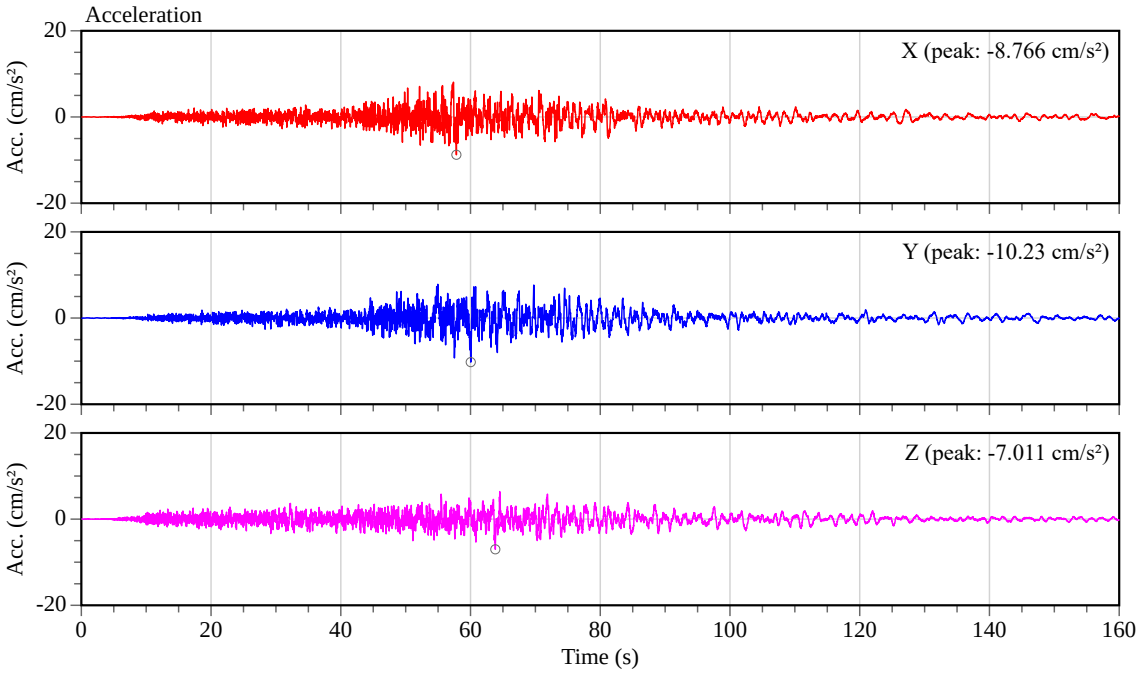


図 4.2-17　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

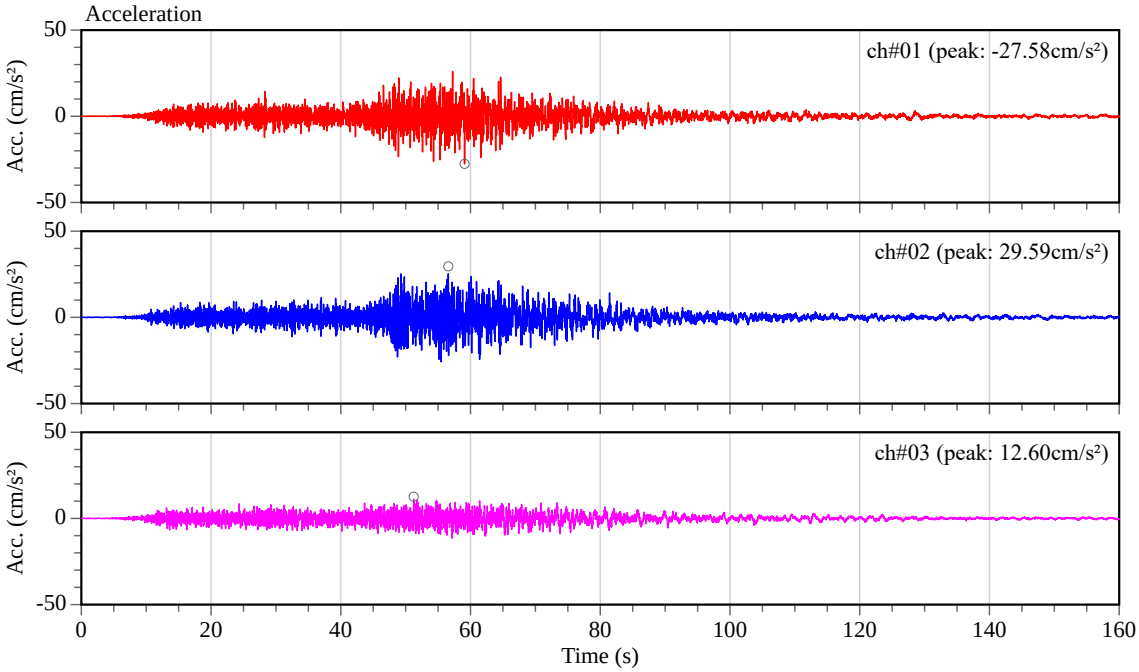


図 4.2-18　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

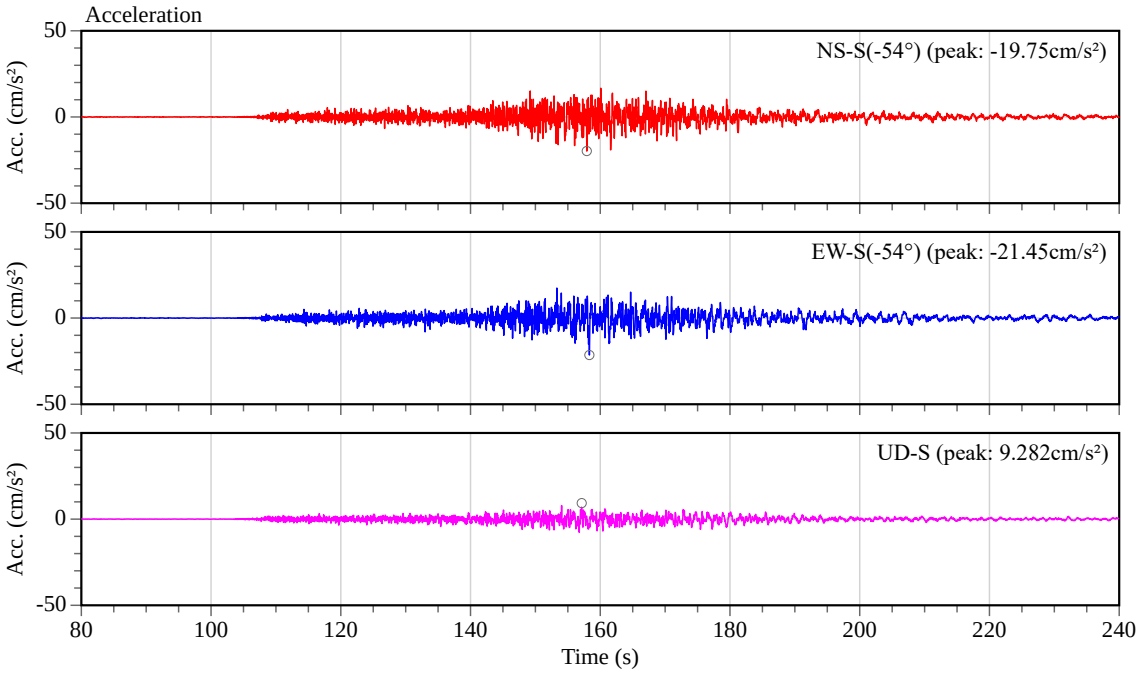


図 4.2-19　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

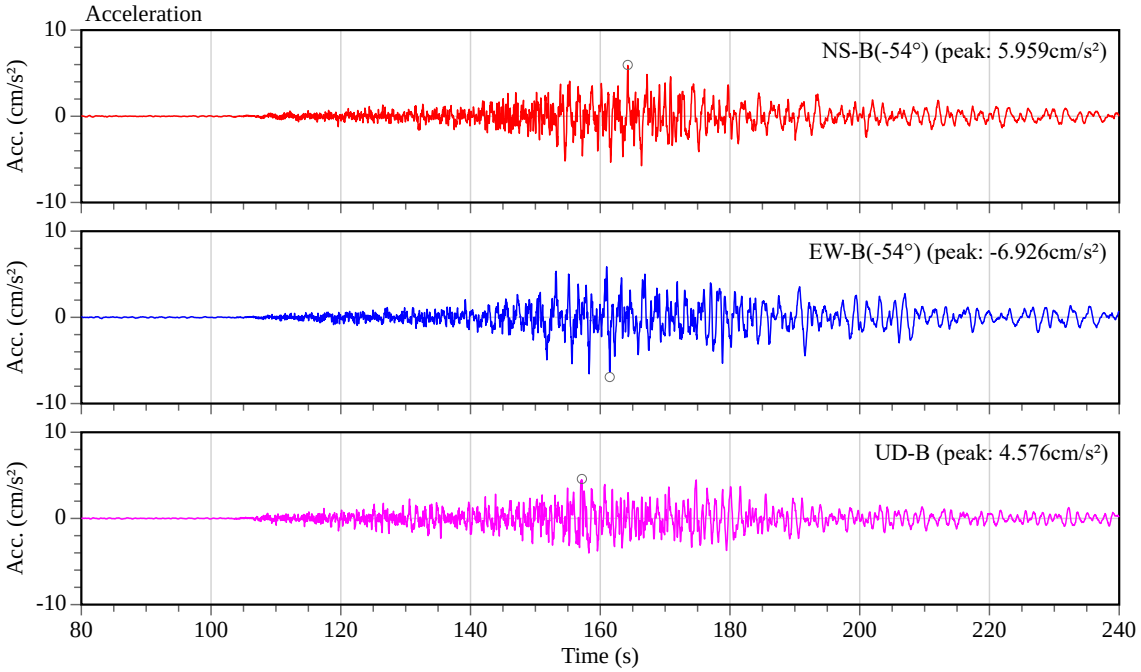


図 4.2-20　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.3　2022 年 3 月 18 日

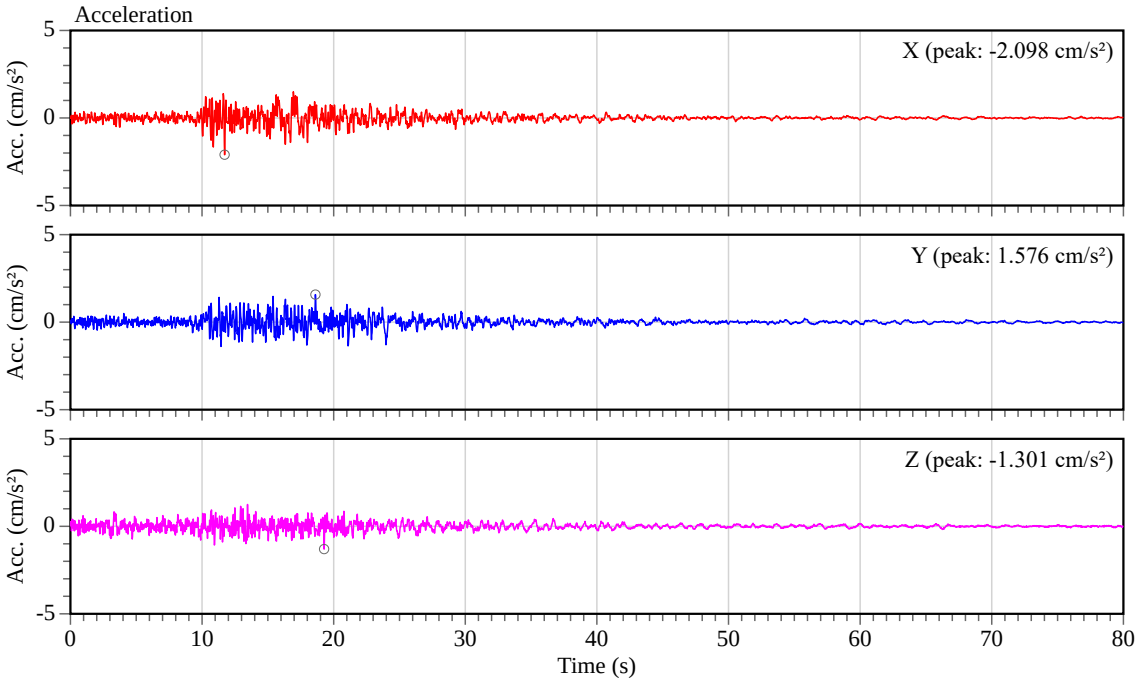


図 4.2-21　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

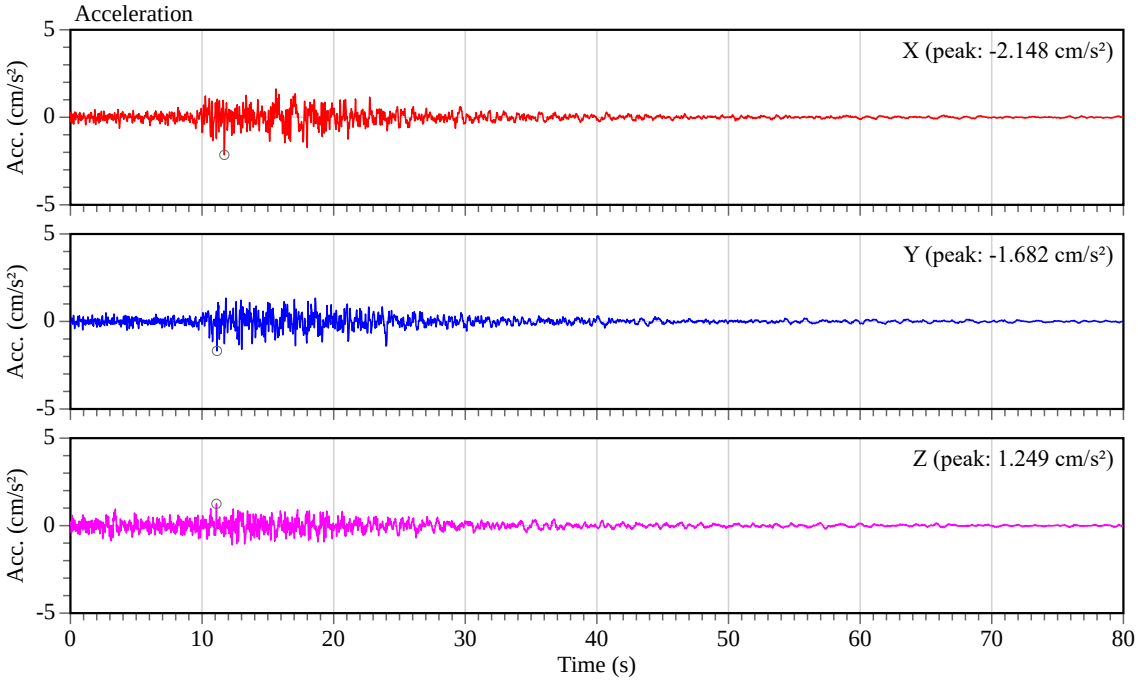


図 4.2-22　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

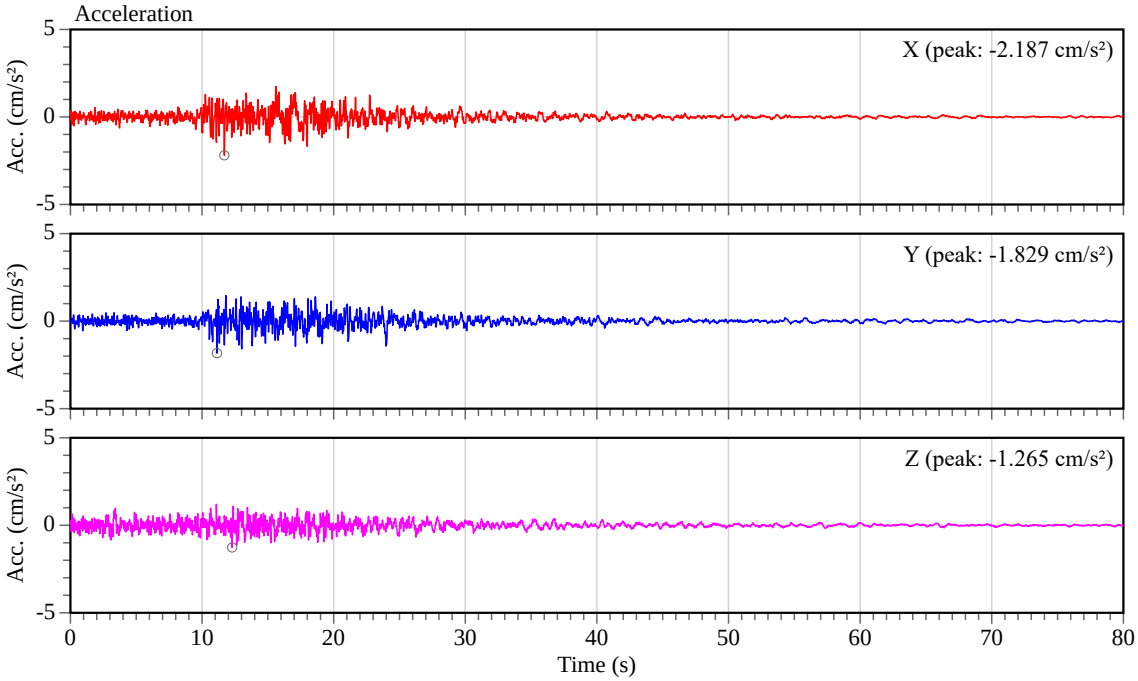


図 4.2-23　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

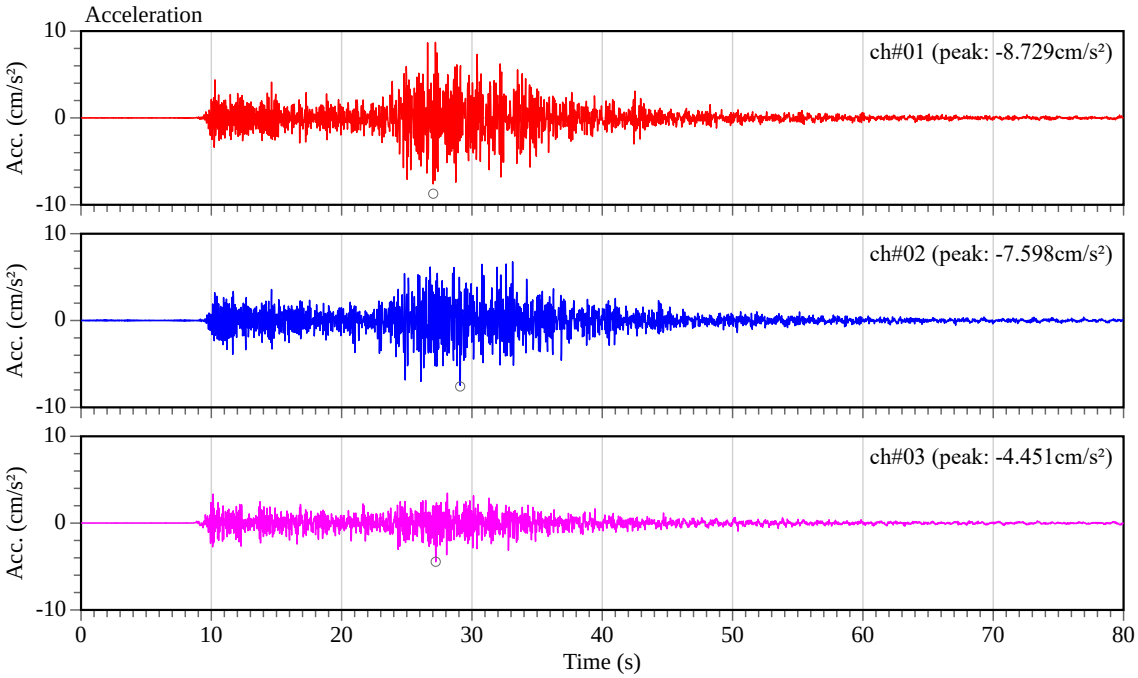


図 4.2-24　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

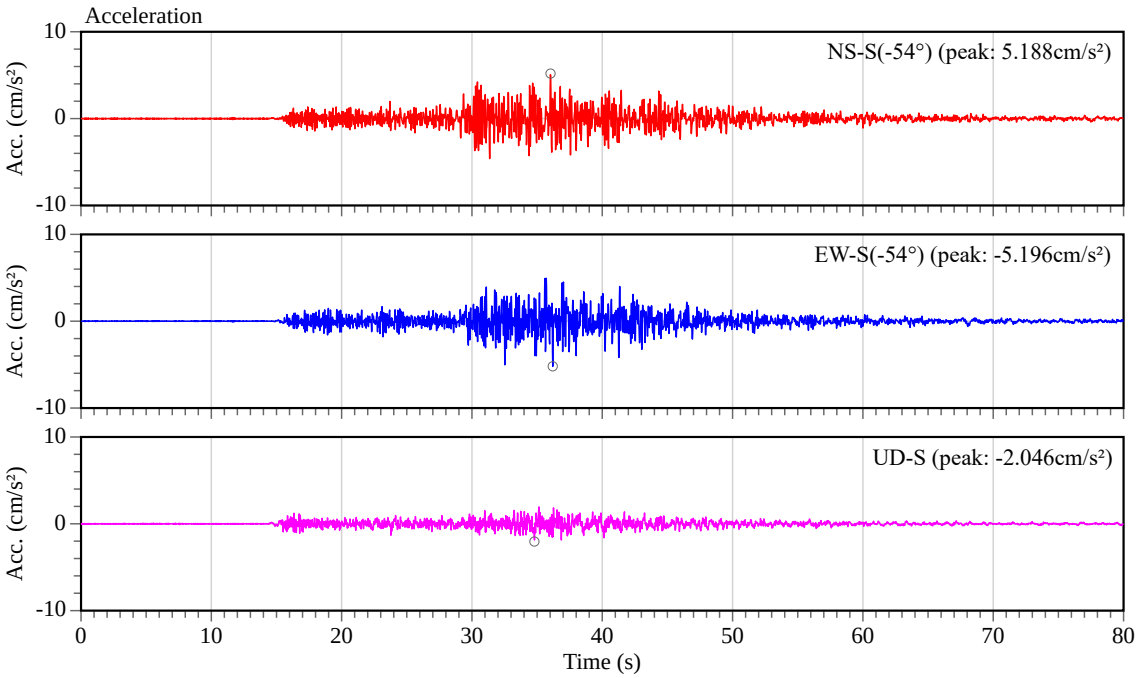


図 4.2-25　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

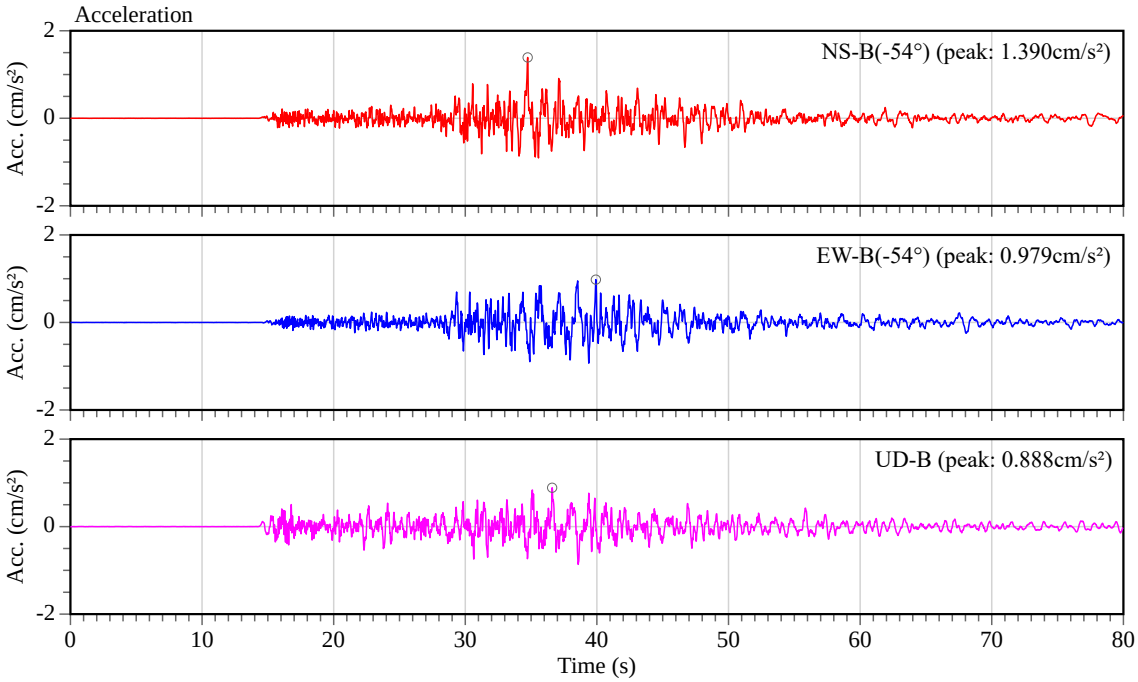


図 4.2-26　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.4　2022 年 4 月 28 日

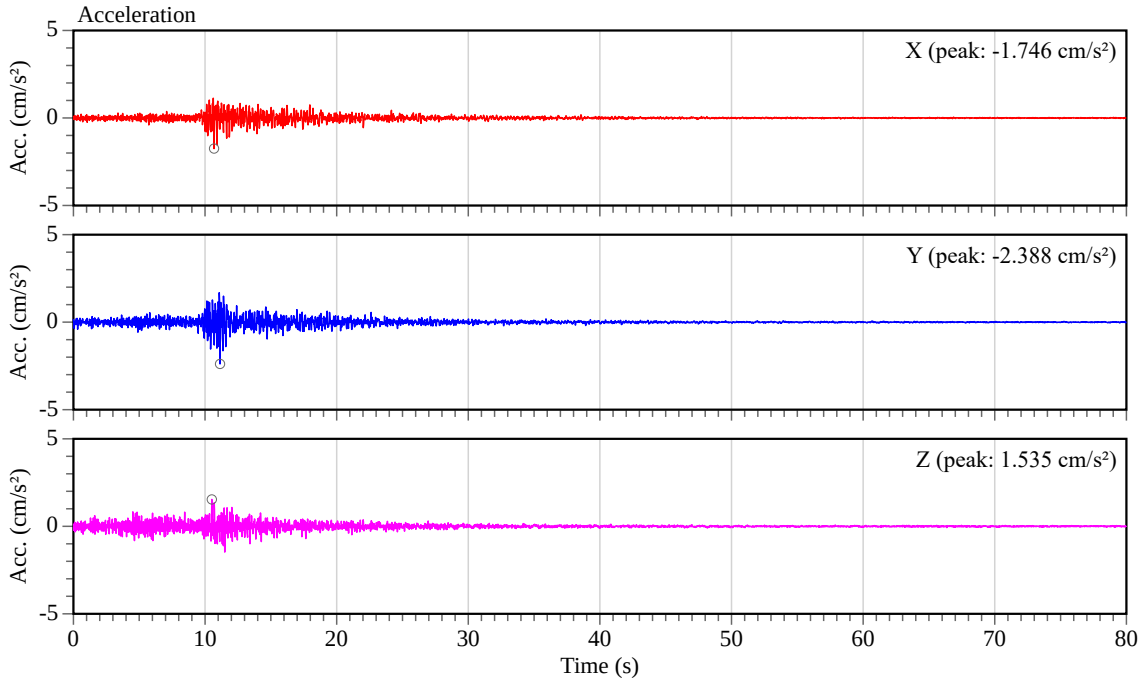


図 4.2-27　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

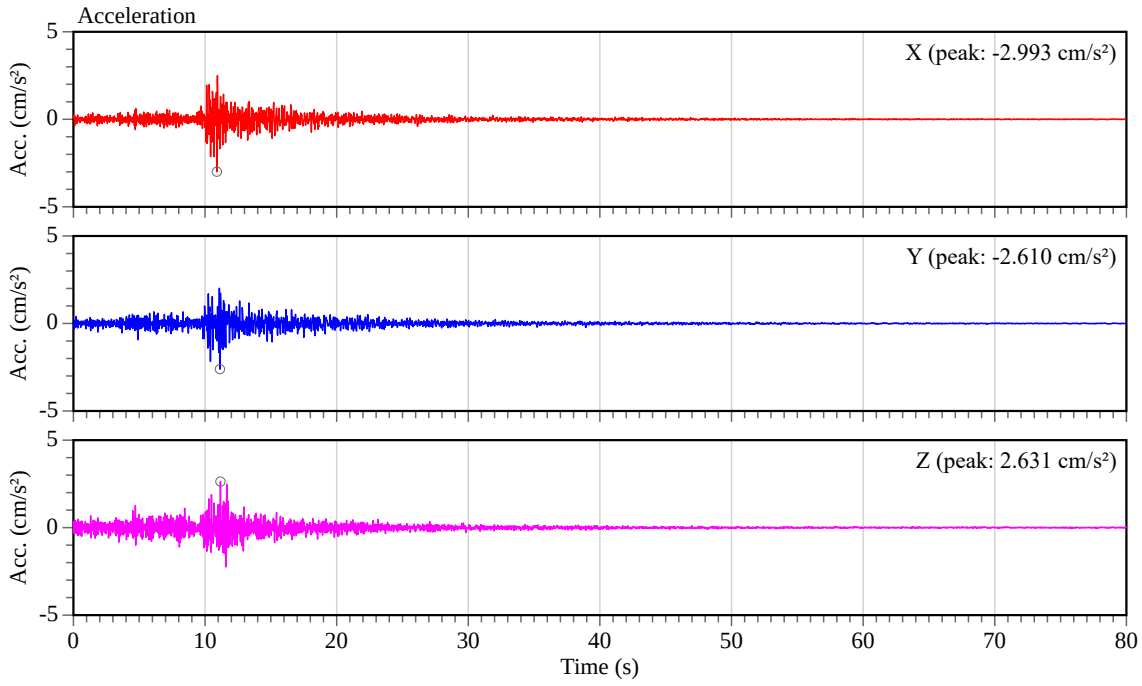


図 4.2-28　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

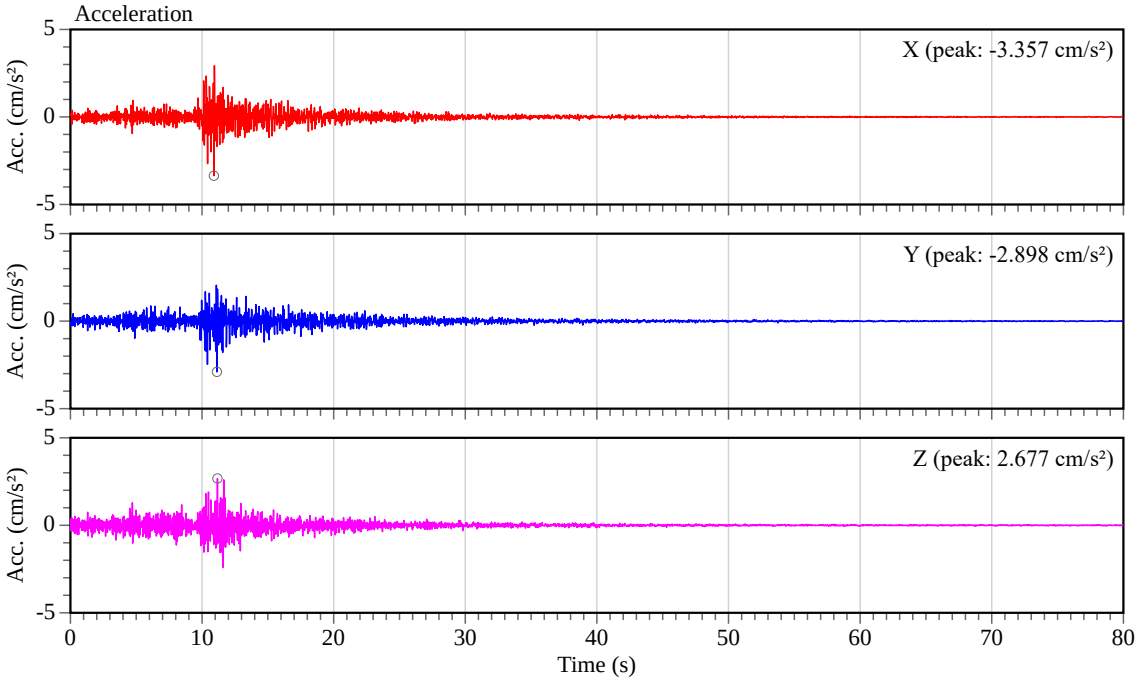


図 4.2-29　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

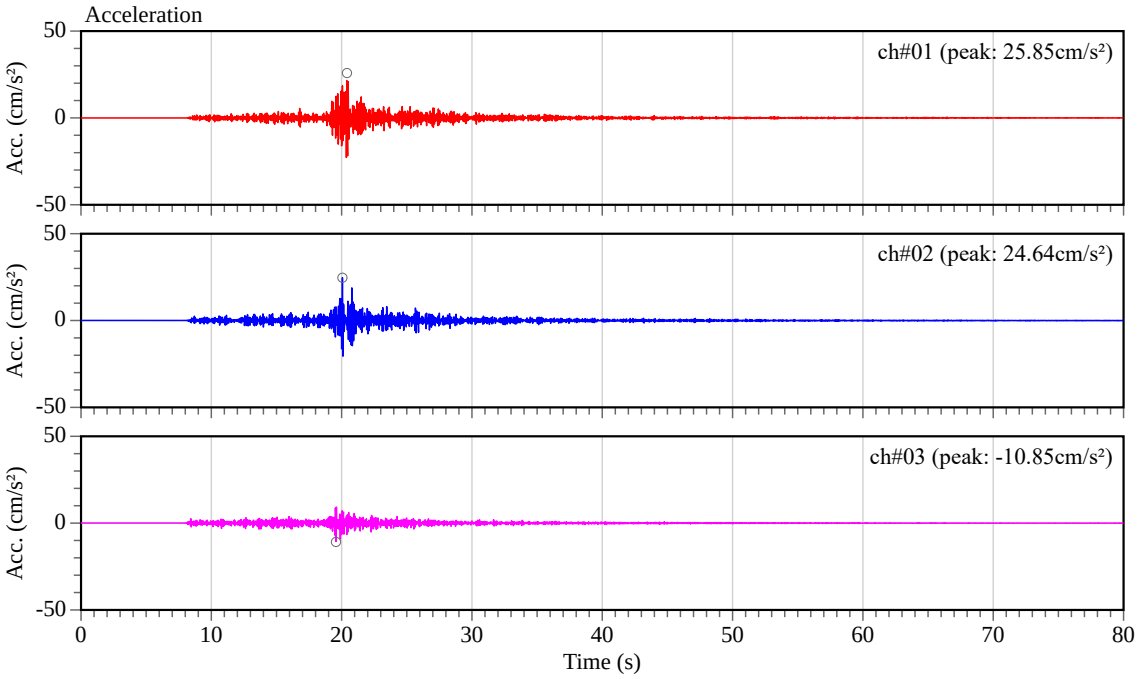


図 4.2-30　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

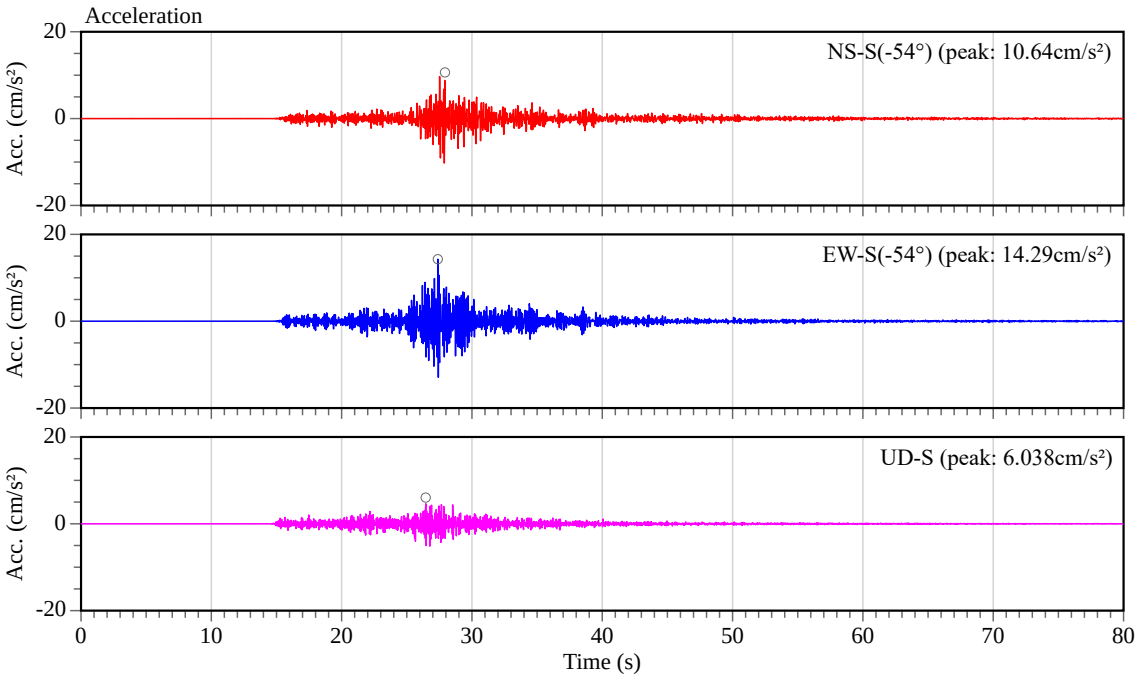


図 4.2-31　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

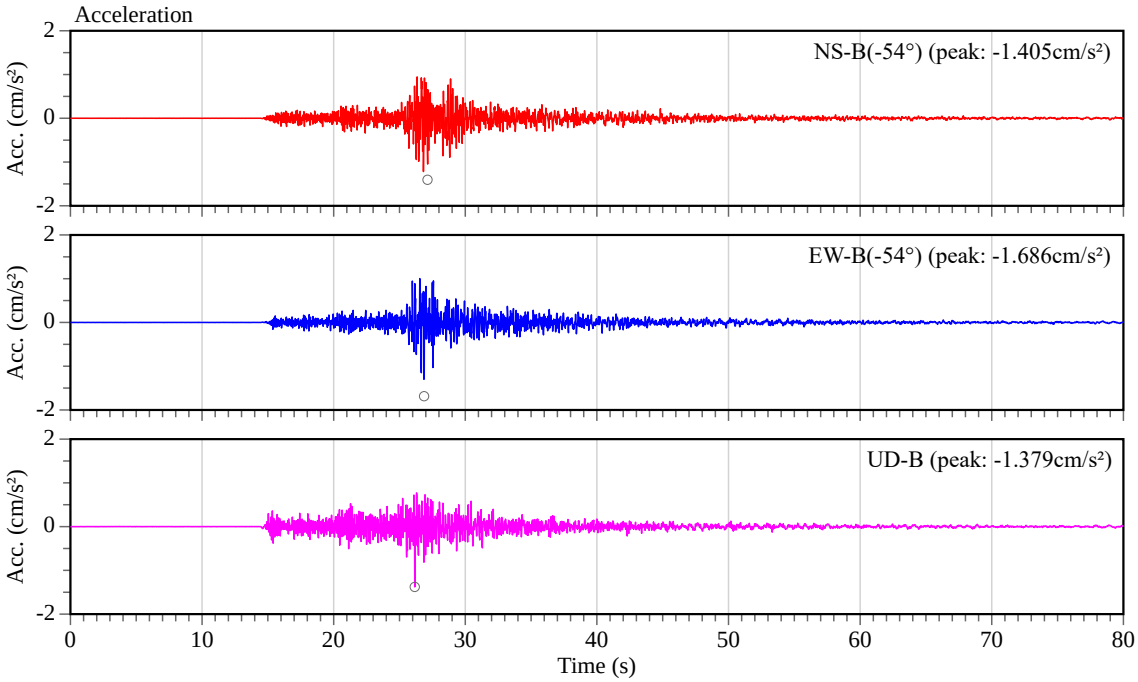


図 4.2-32　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.5　2022 年 5 月 23 日

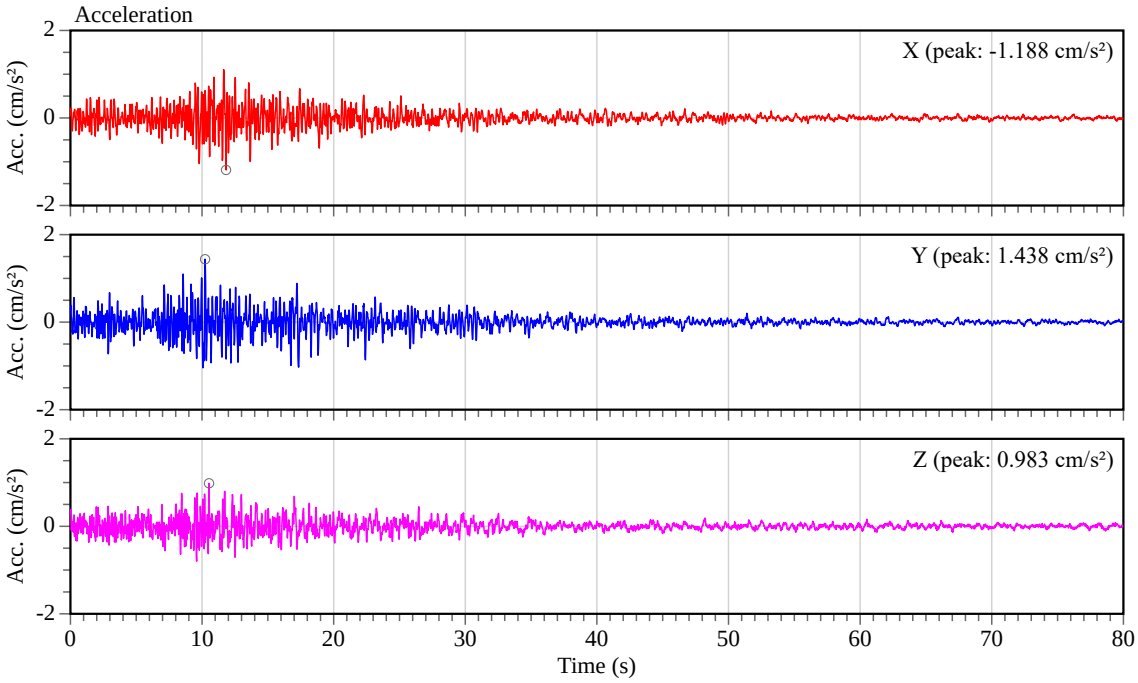


図 4.2-33　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

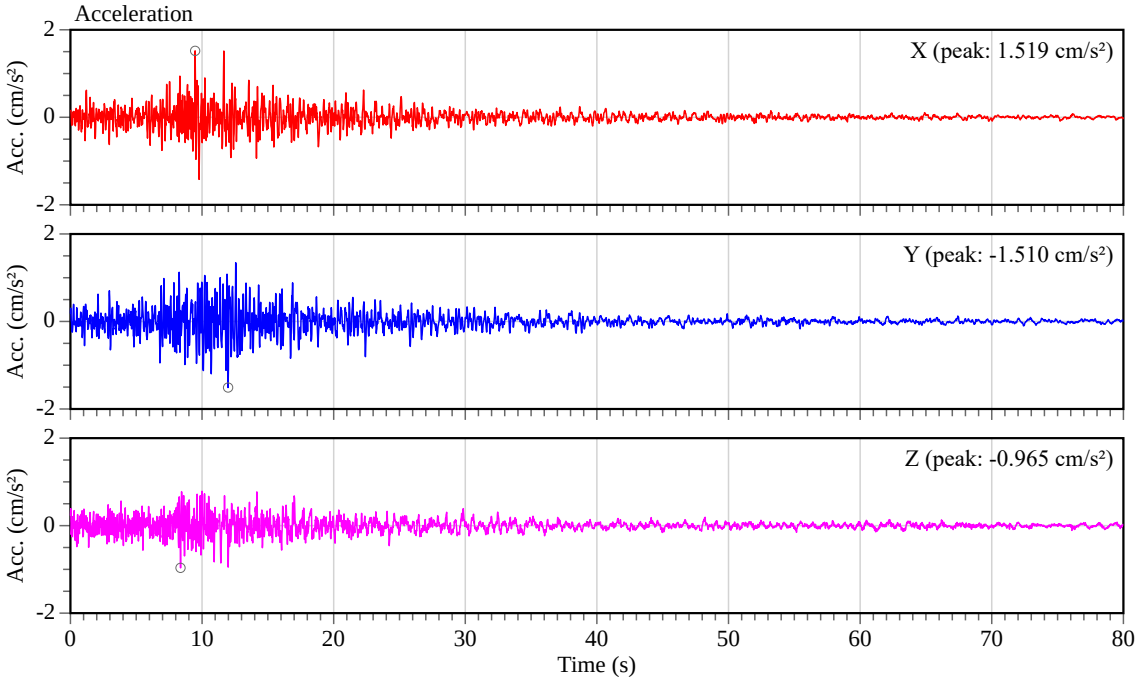


図 4.2-34　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

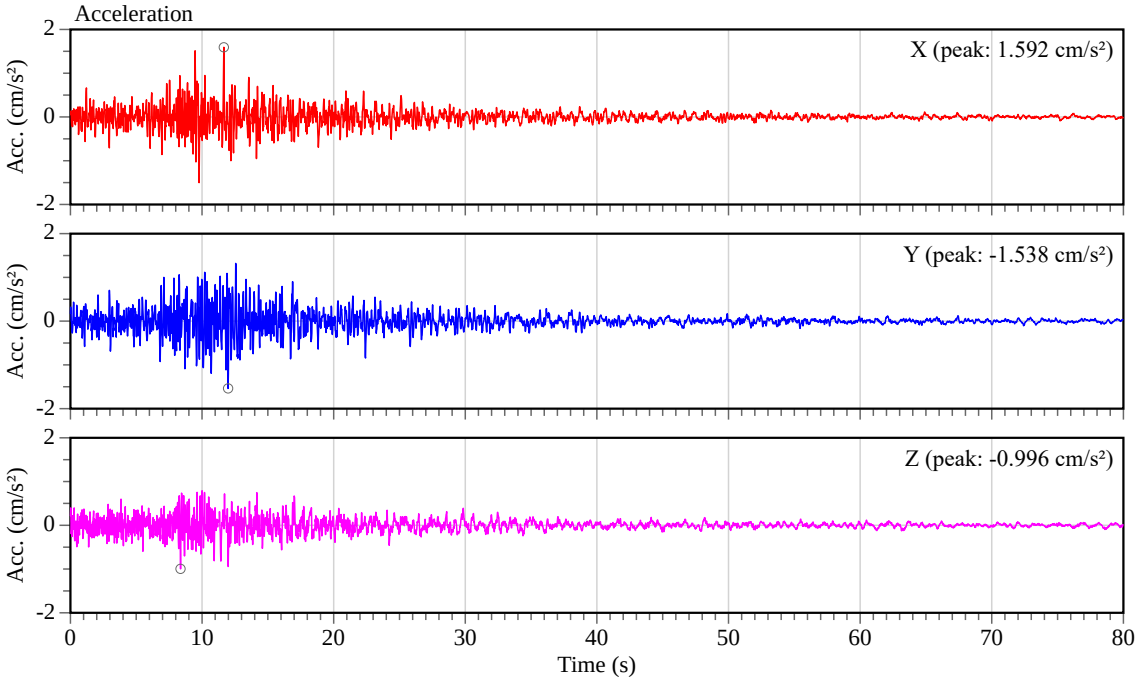


図 4.2-35　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

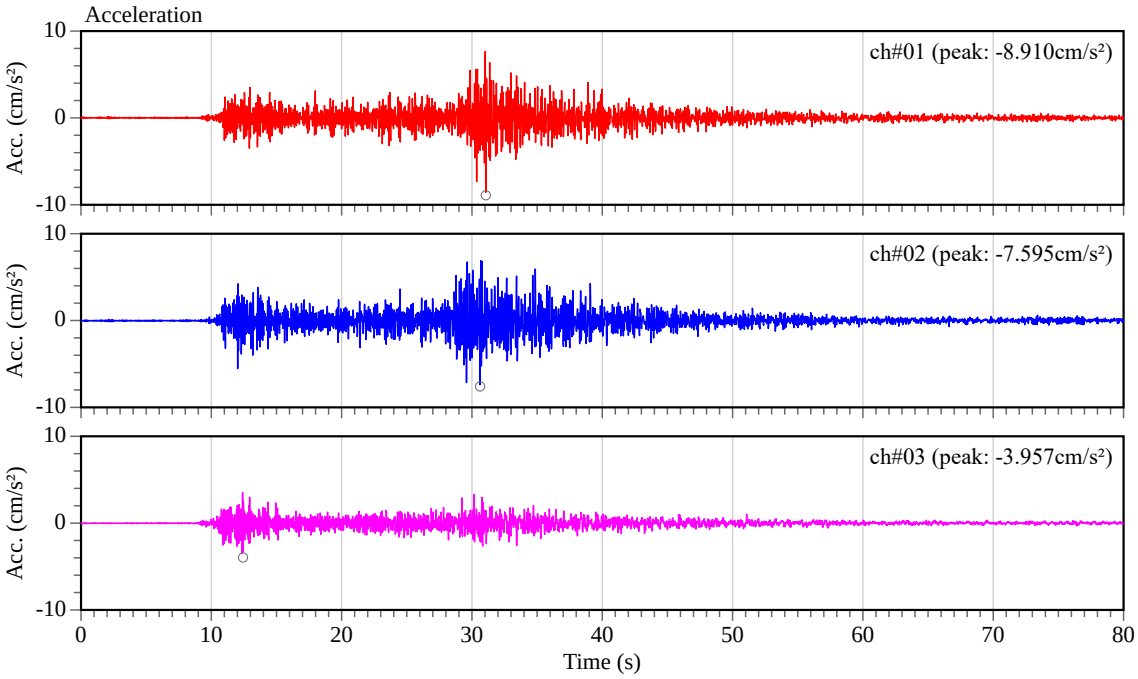


図 4.2-36　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

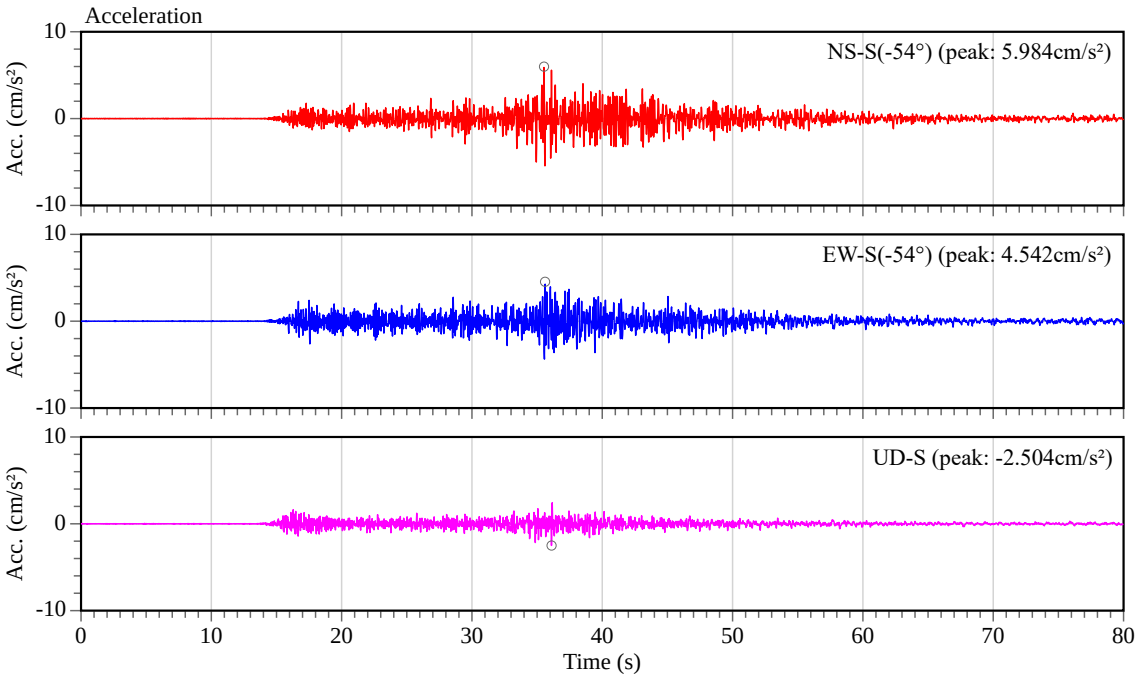


図 4.2-37　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

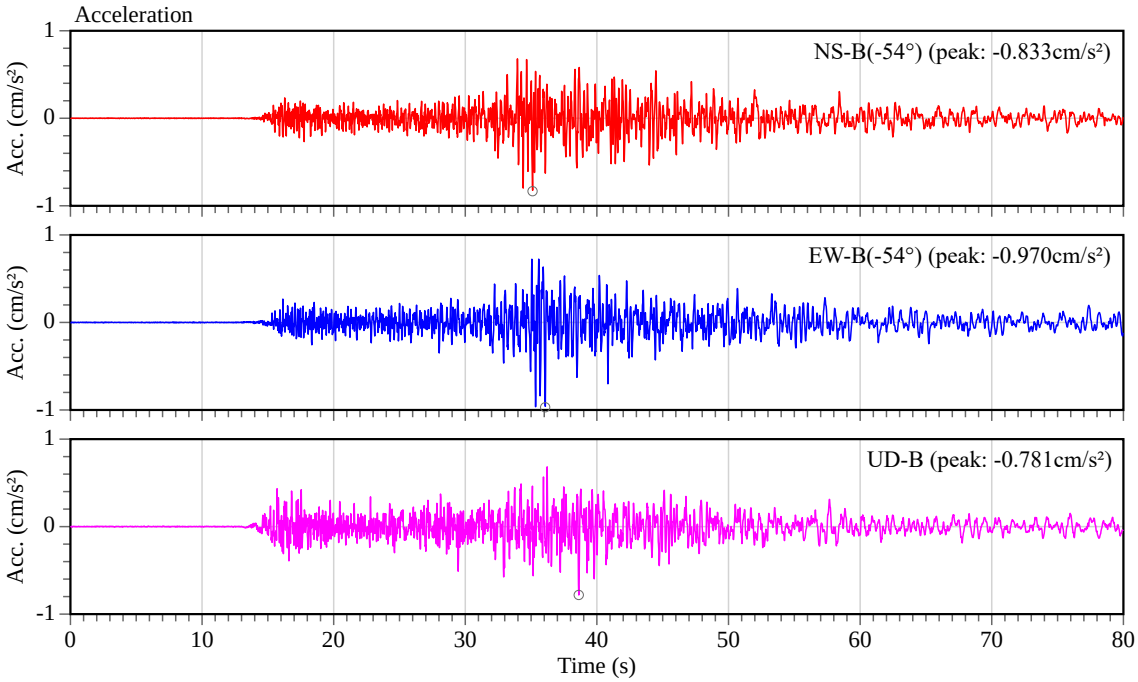


図 4.2-38　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.6　2022 年 6 月 10 日

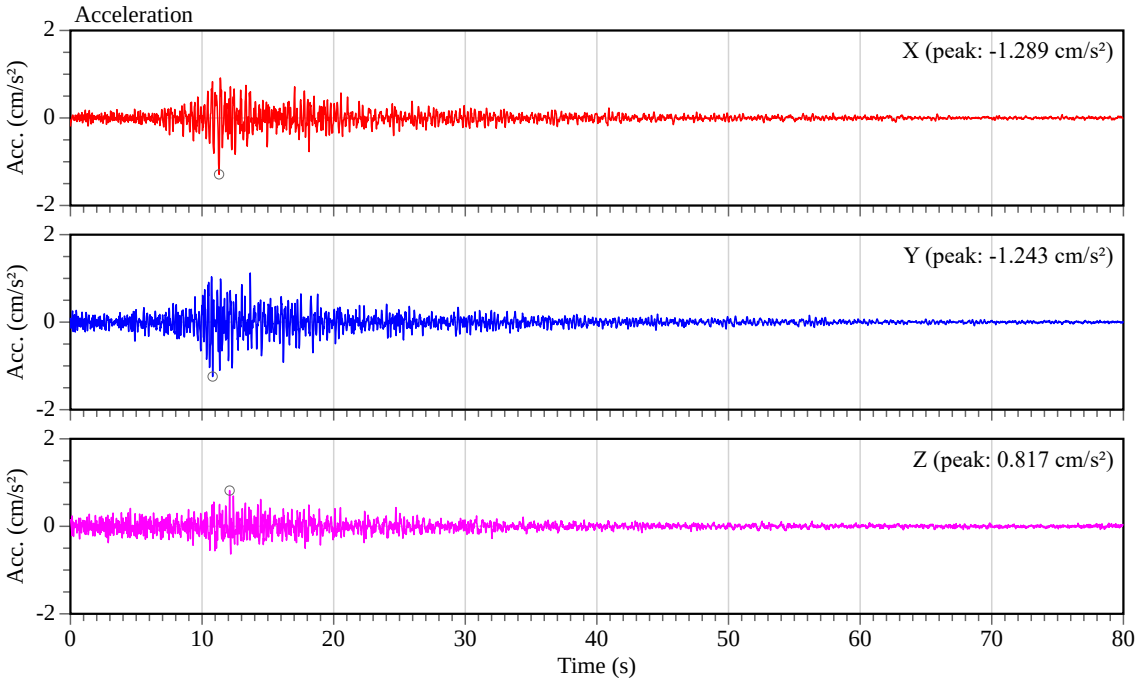


図 4.2-39　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

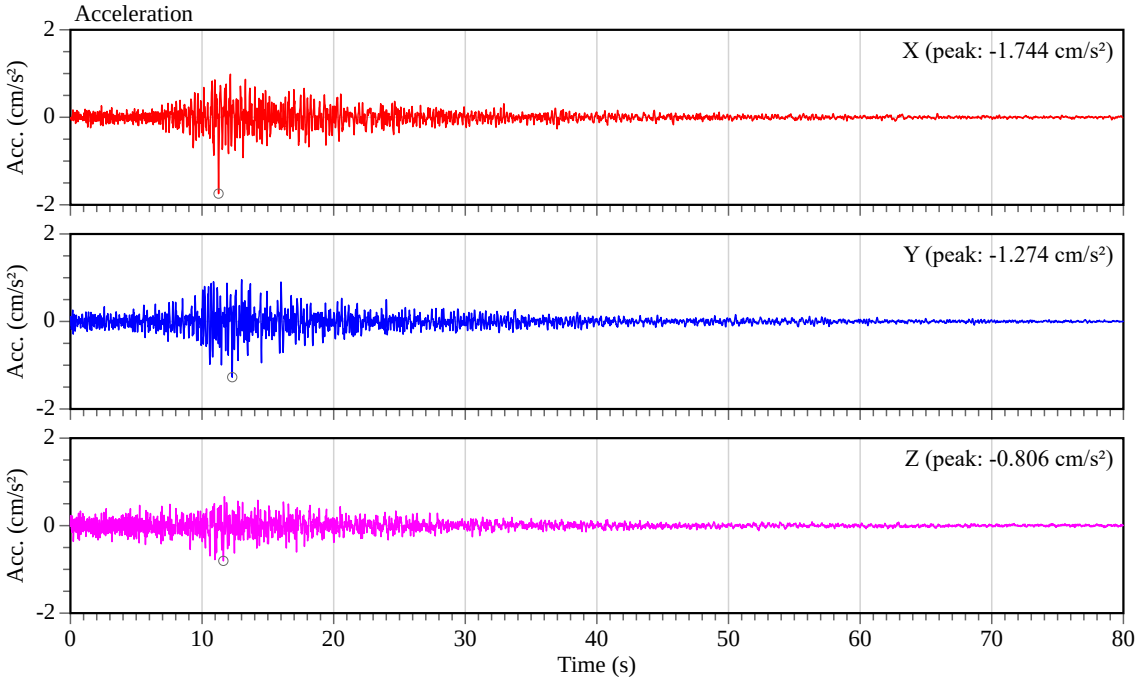


図 4.2-40　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

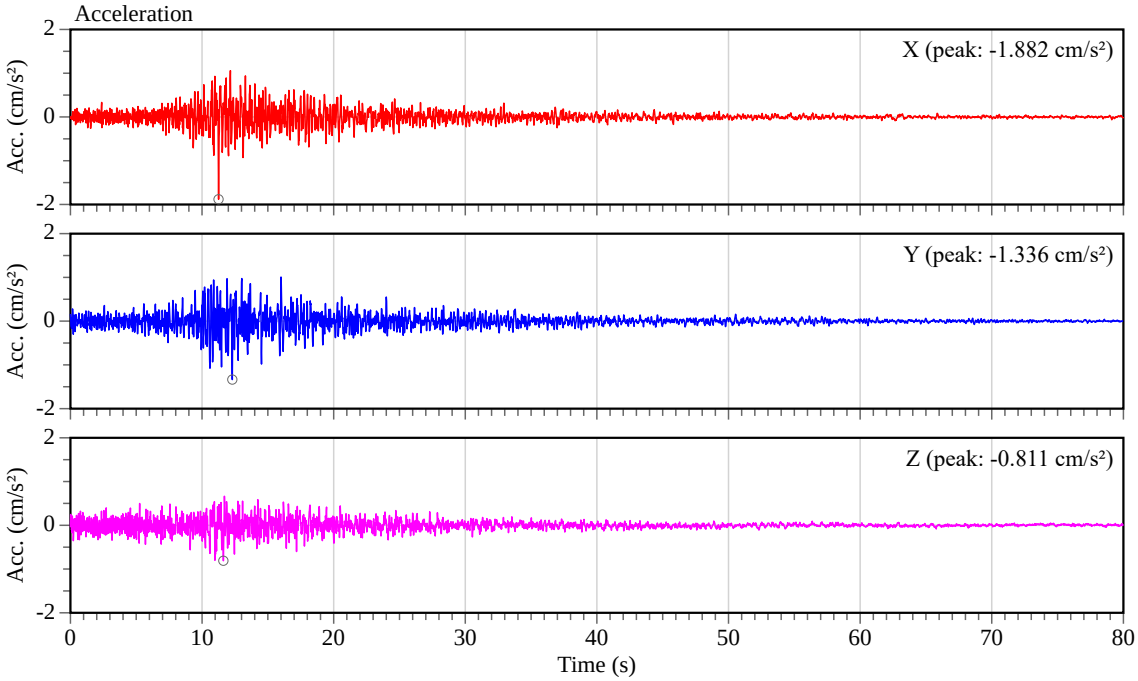


図 4.2-41　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

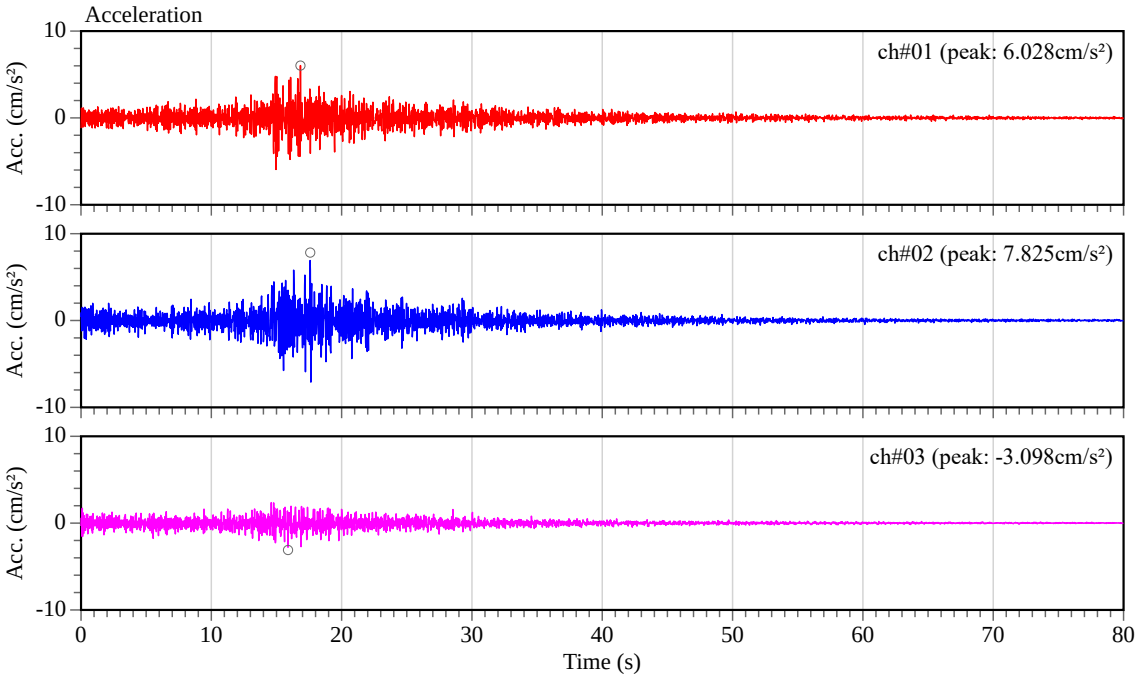


図 4.2-42　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

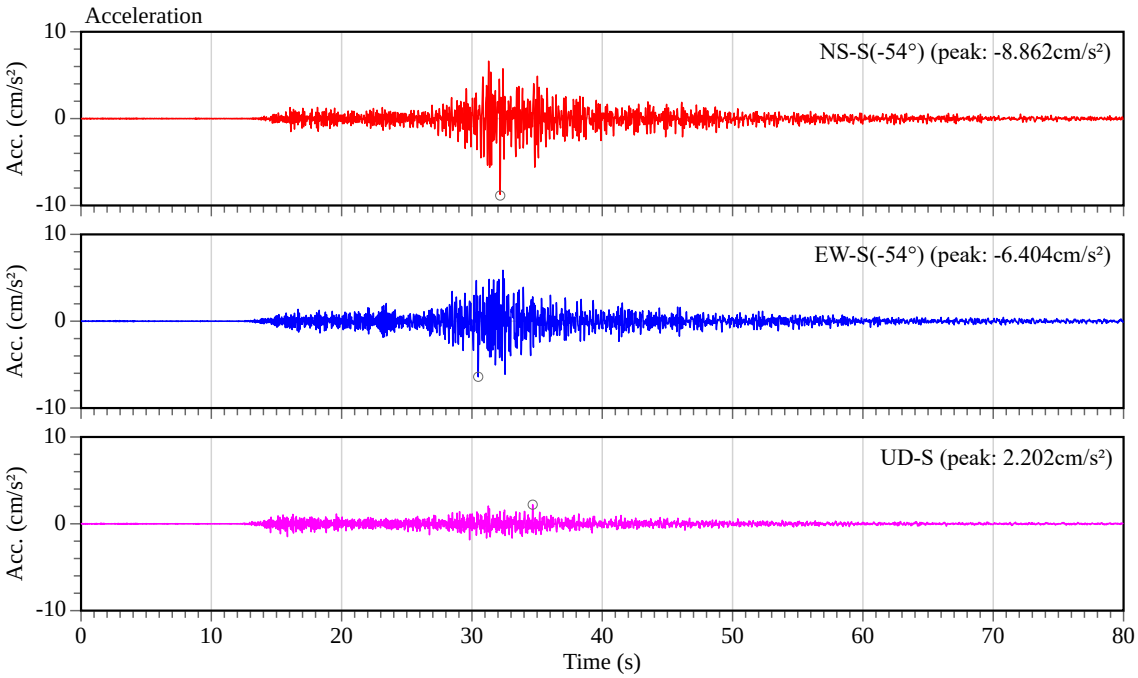


図 4.2-43　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

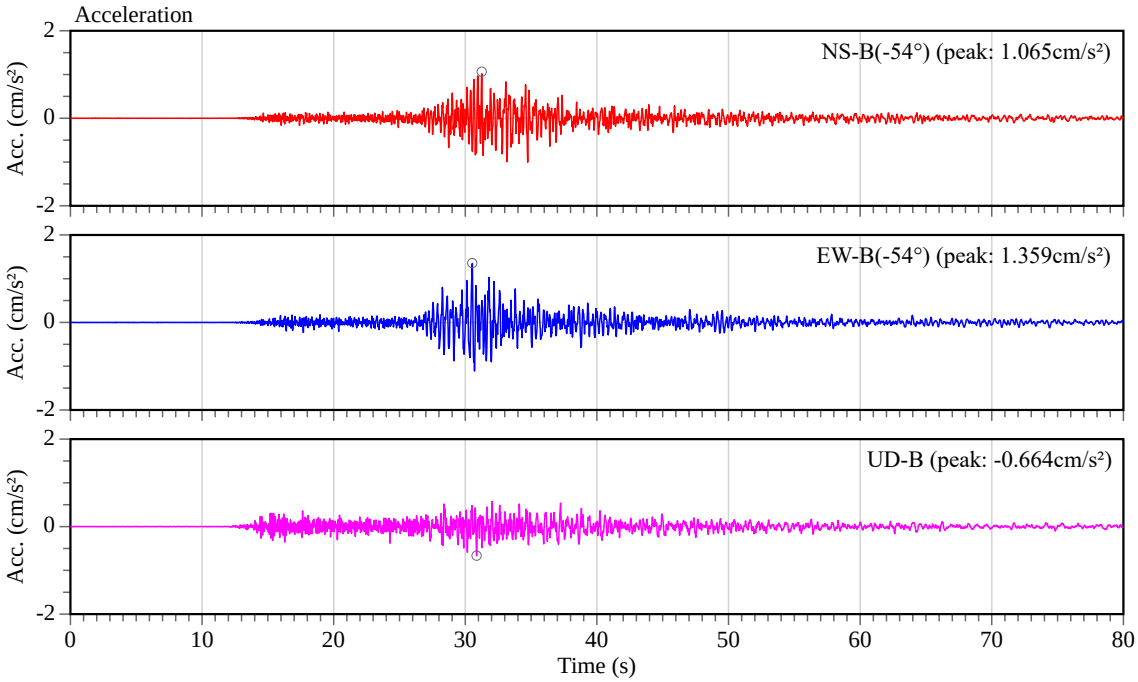


図 4.2-44　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.7　2022 年 7 月 2 日

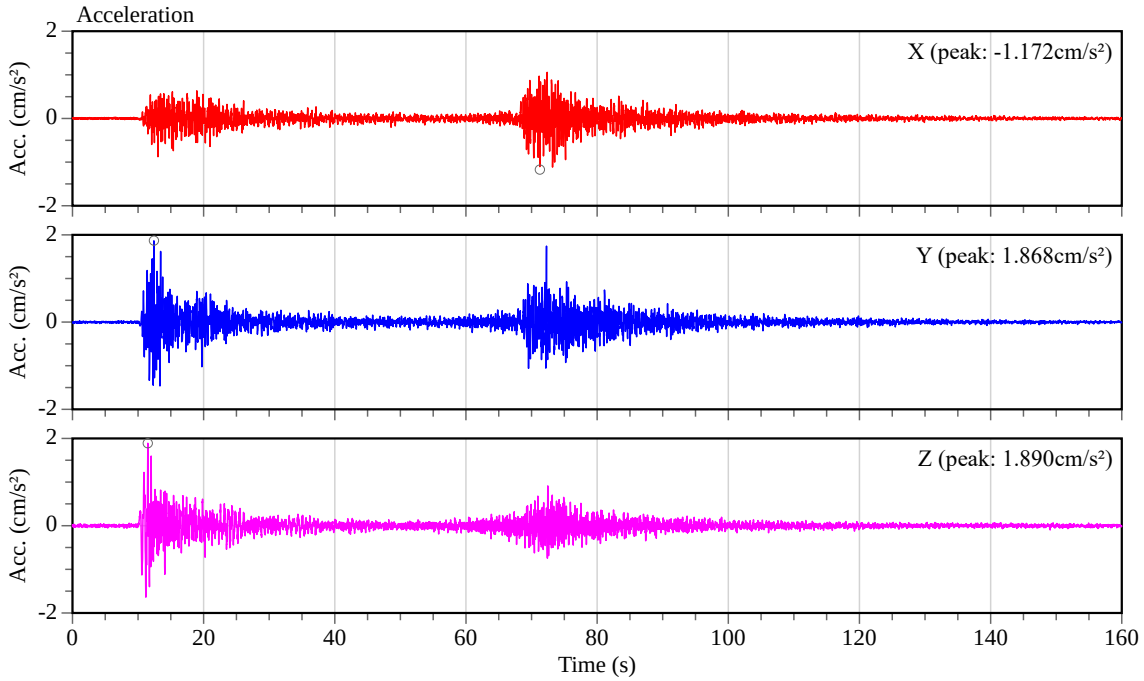


図 4.2-45　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

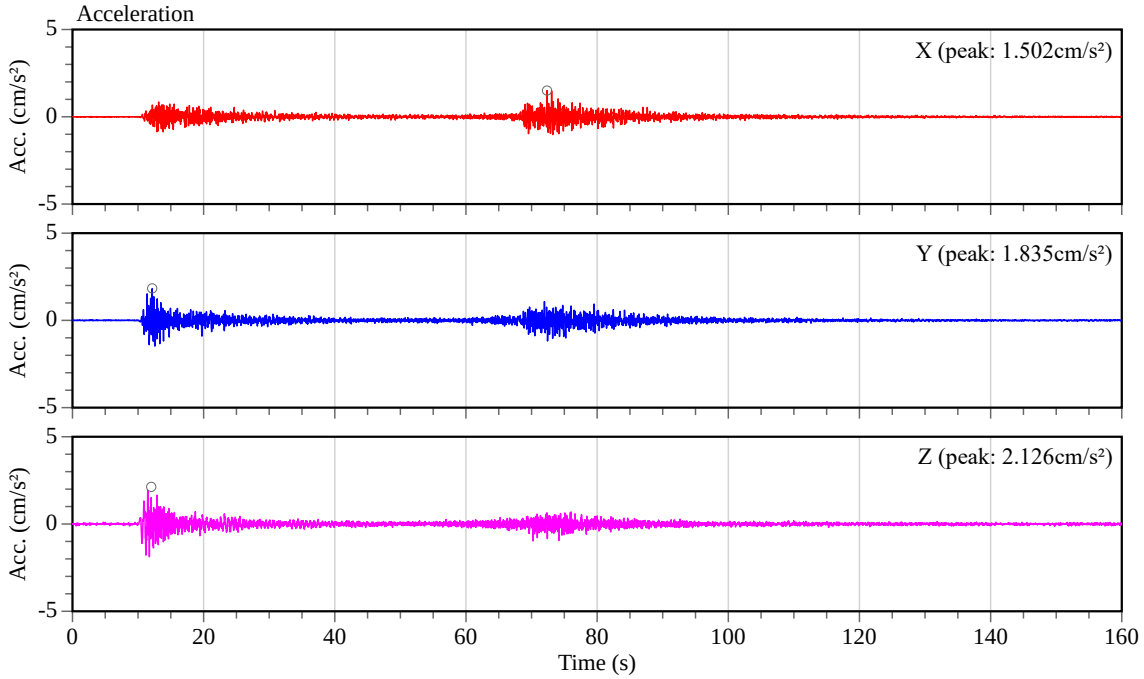


図 4.2-46　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

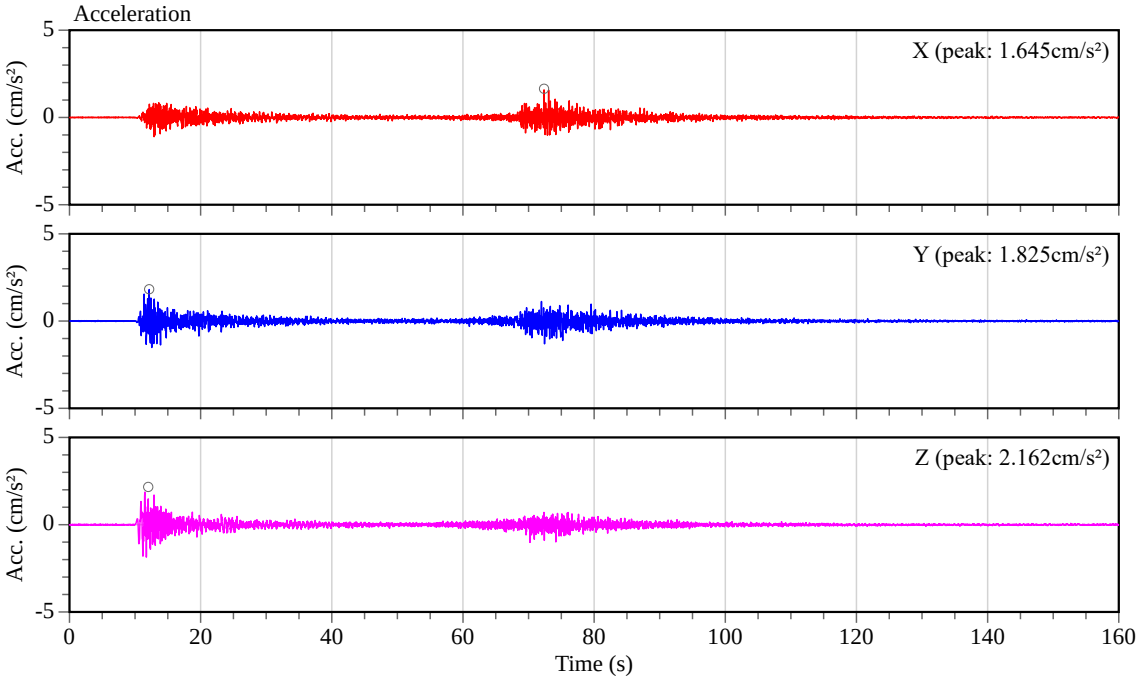


図 4.2-47　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

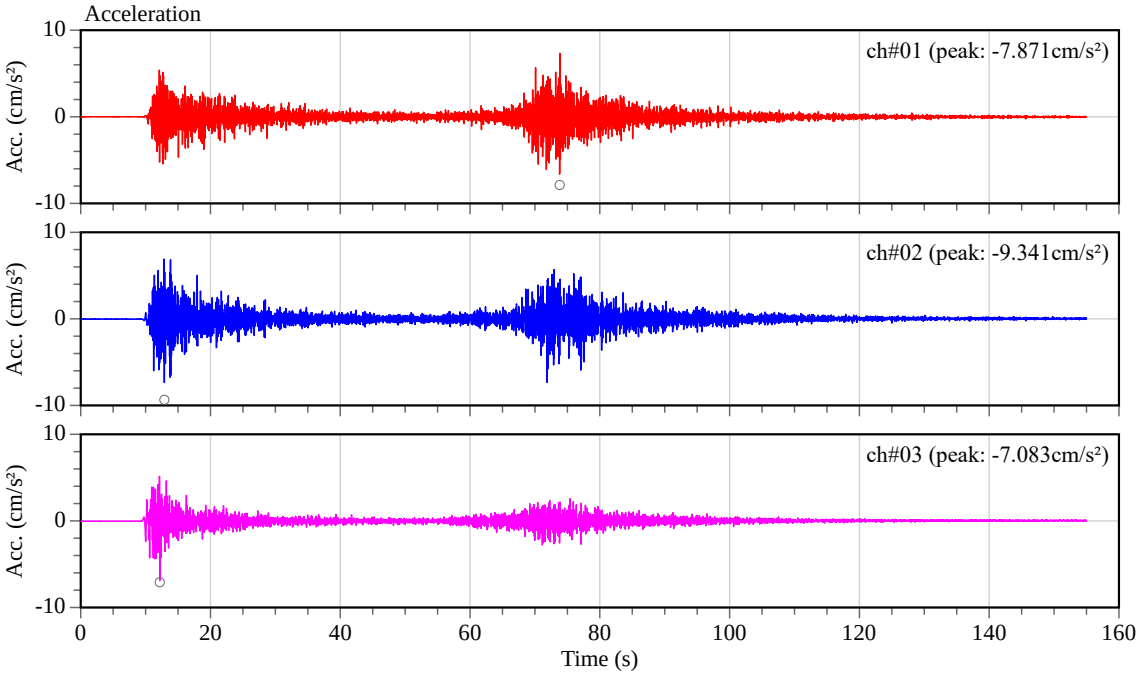


図 4.2-48　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

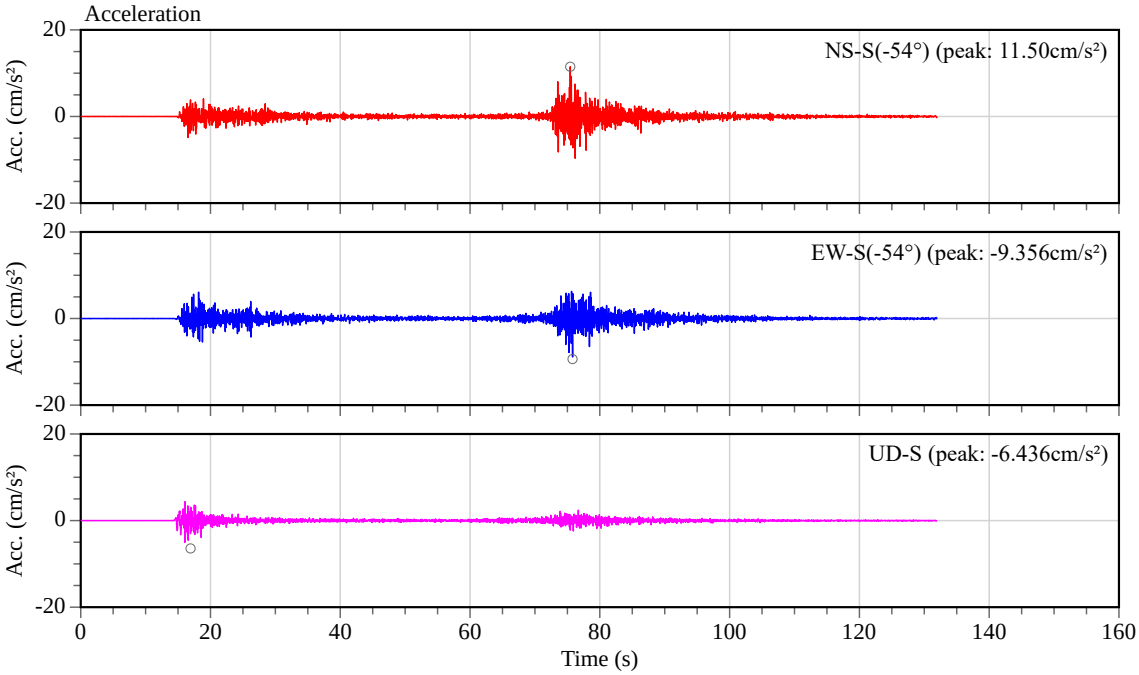


図 4.2-49　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

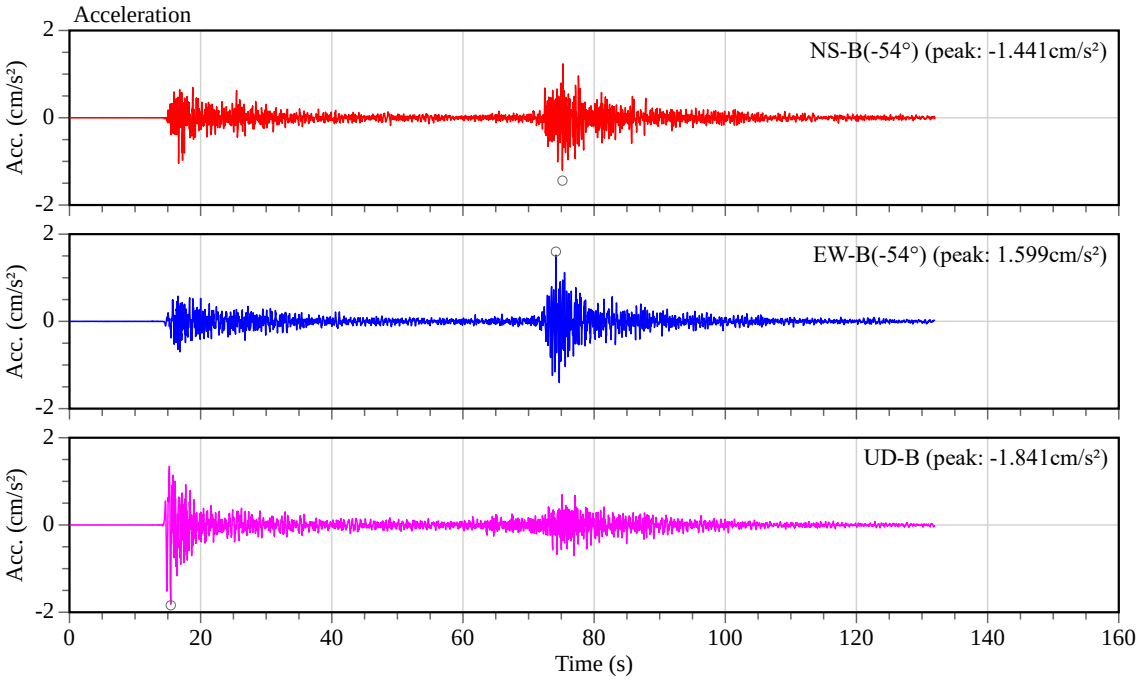


図 4.2-50　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.8　2022 年 7 月 6 日

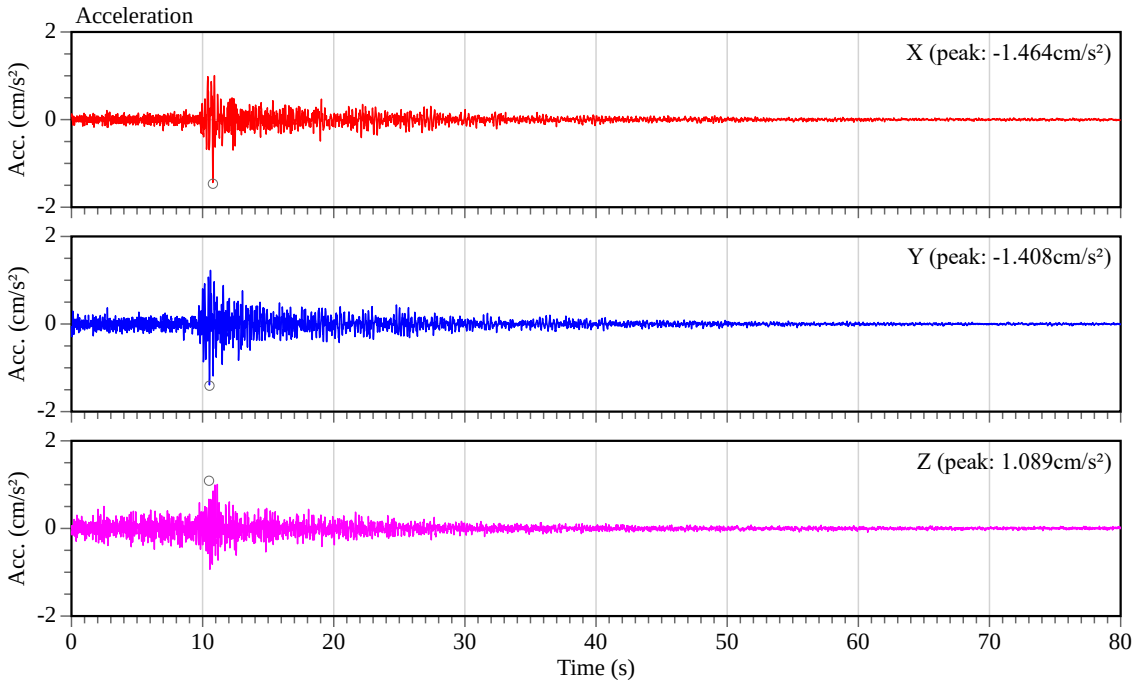


図 4.2-51　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

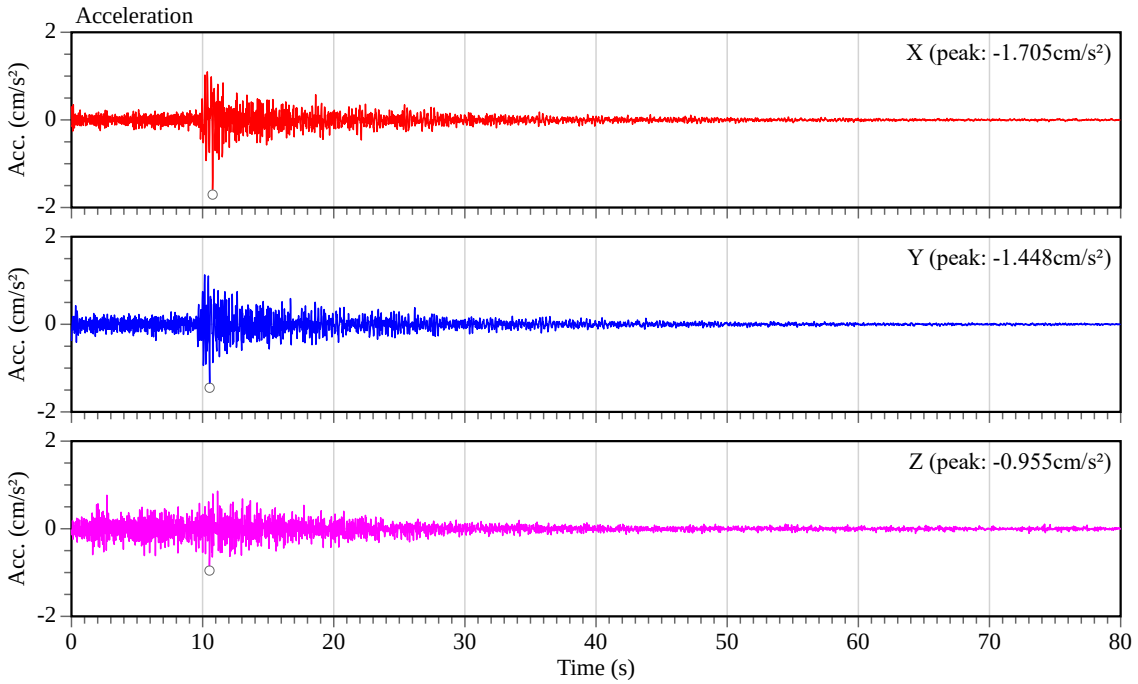


図 4.2-52　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

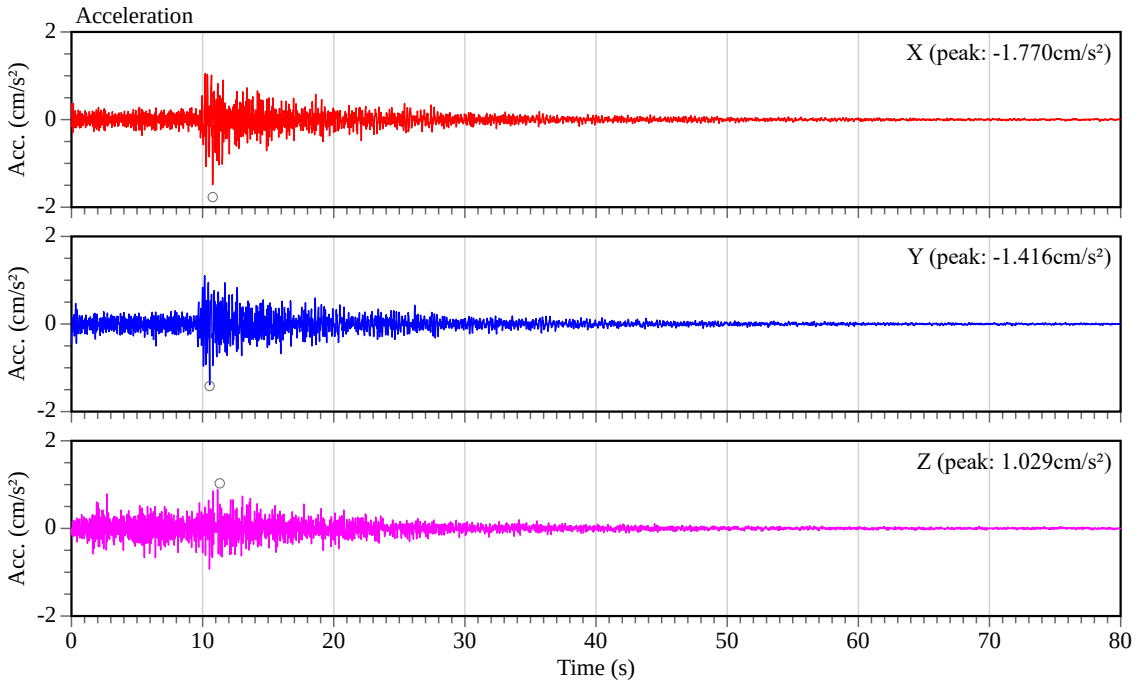


図 4.2-53　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

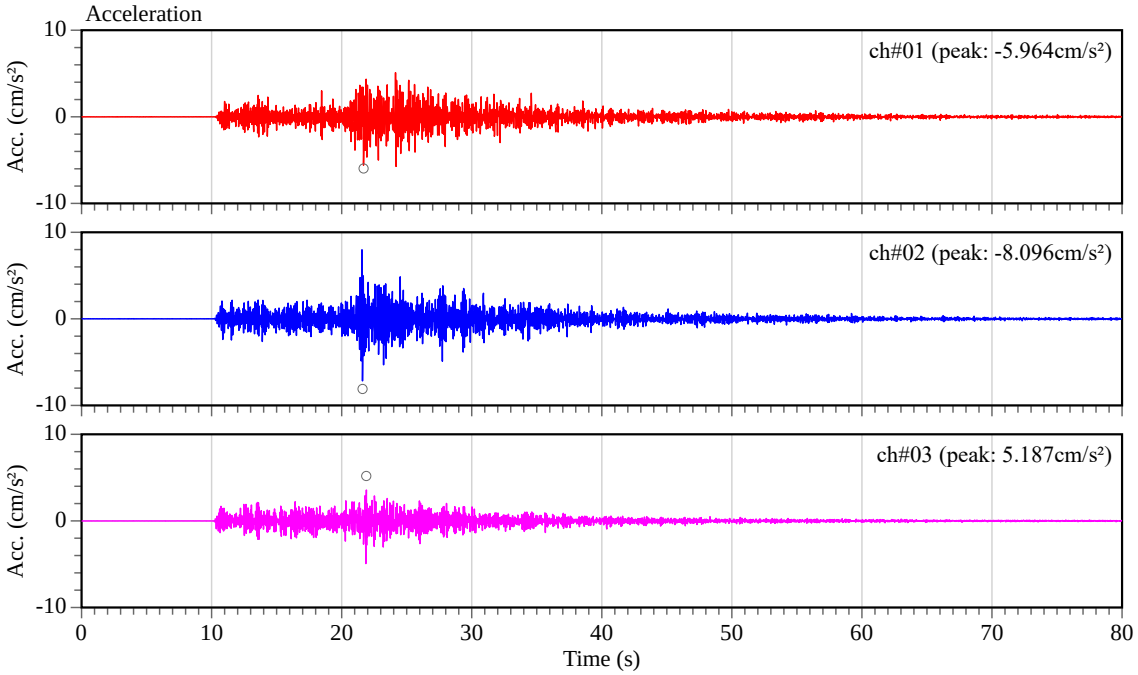


図 4.2-54　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

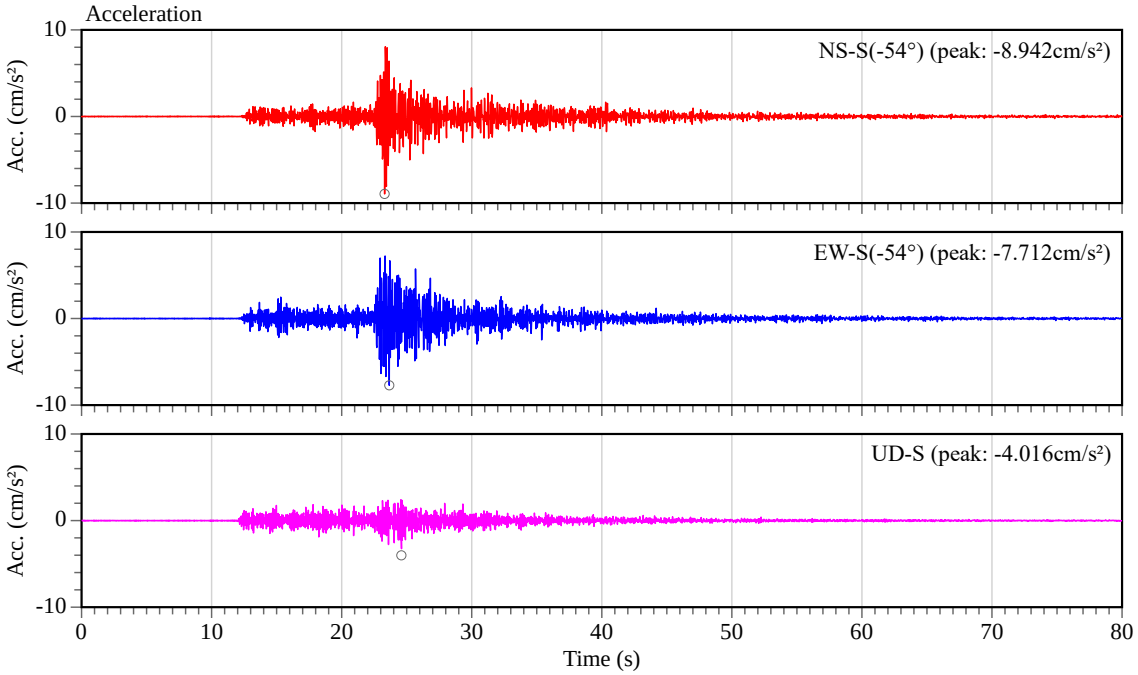


図 4.2-55　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

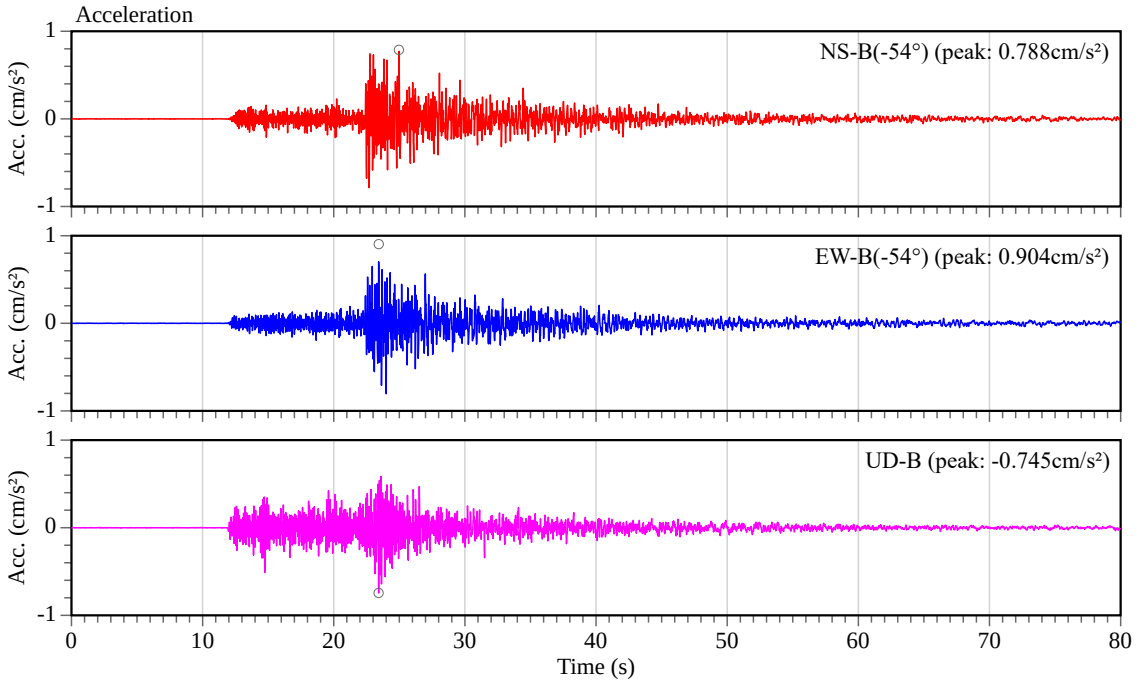


図 4.2-56　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.9　2022 年 7 月 22 日

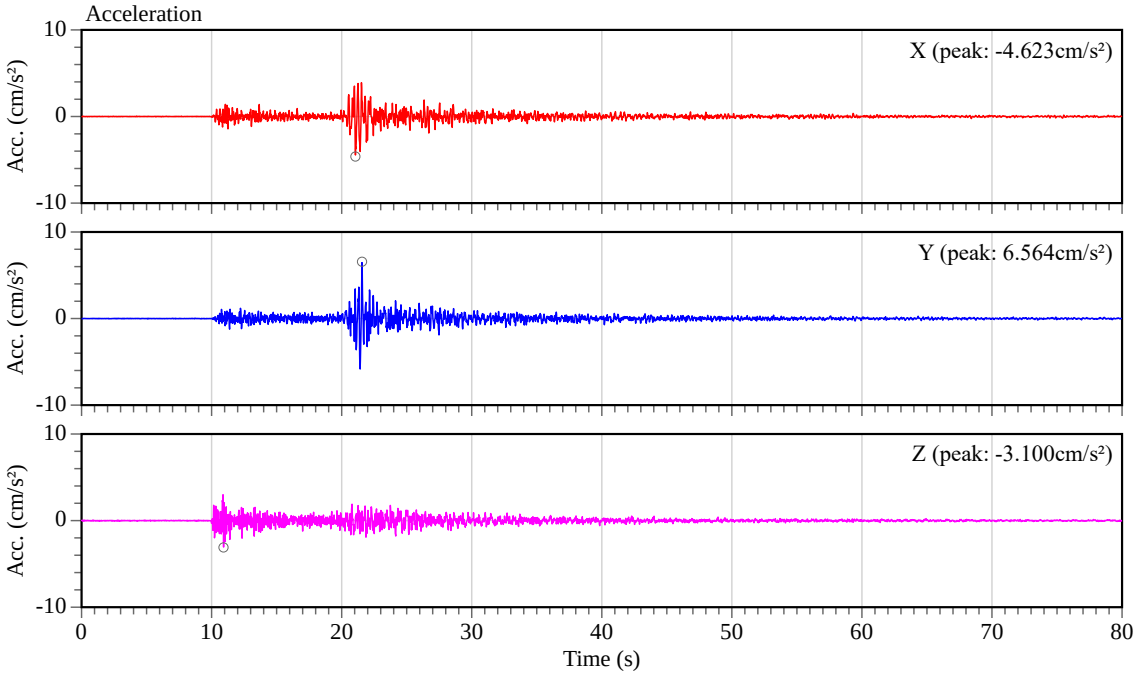


図 4.2-57　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

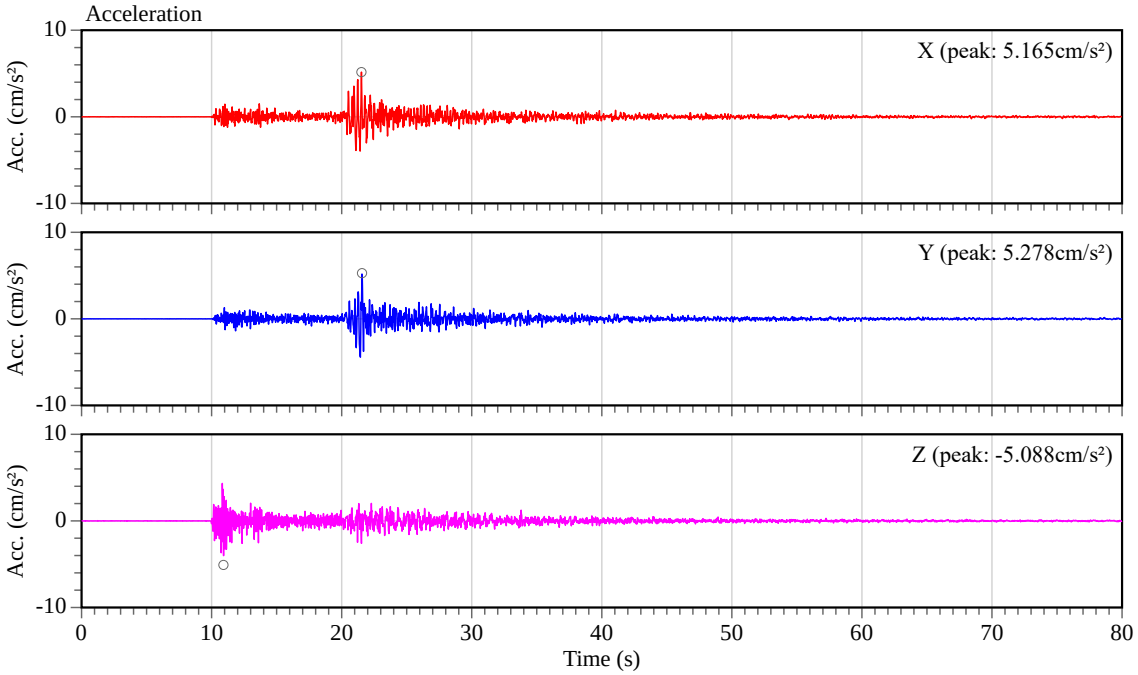


図 4.2-58　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

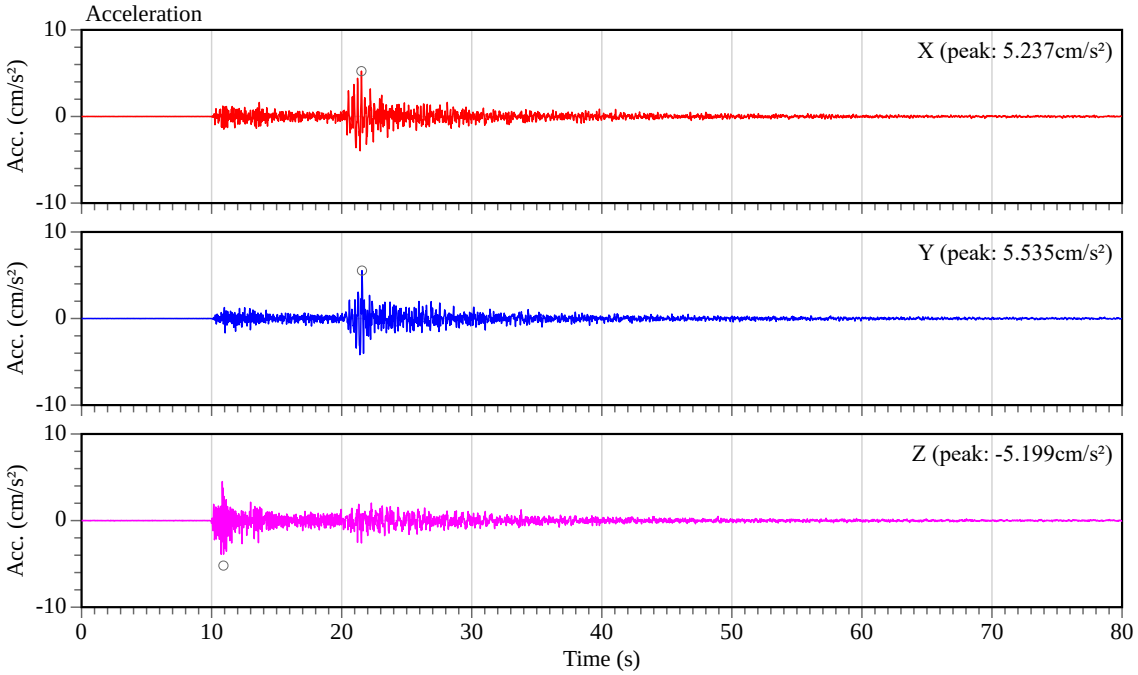


図 4.2-59　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

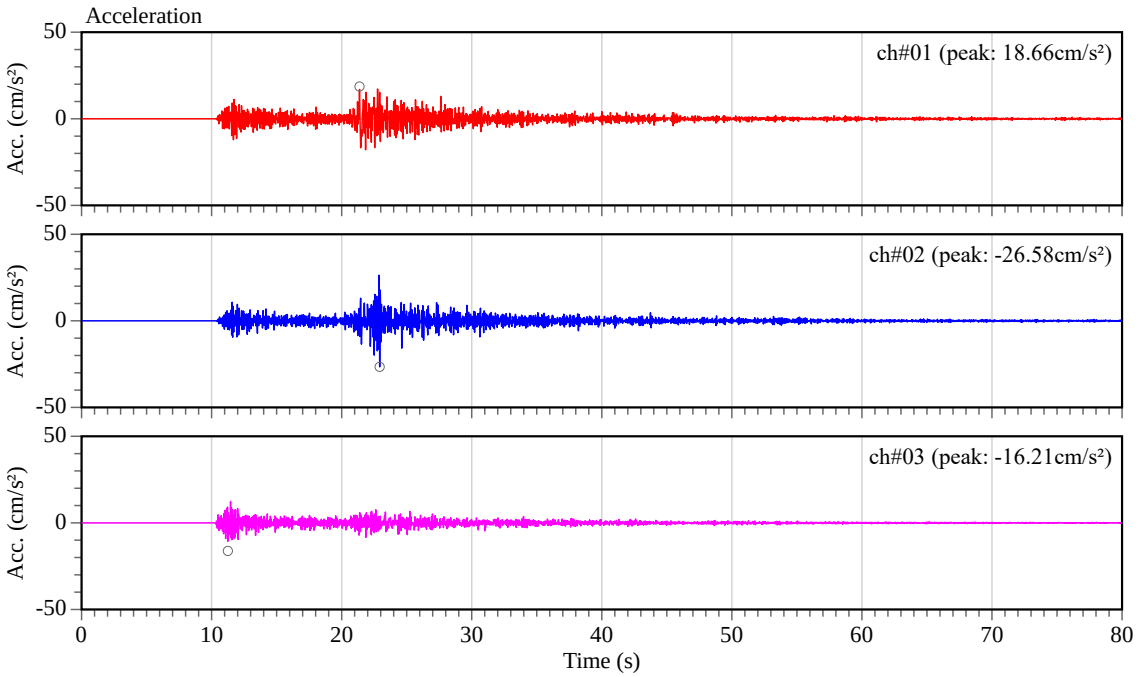


図 4.2-60　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

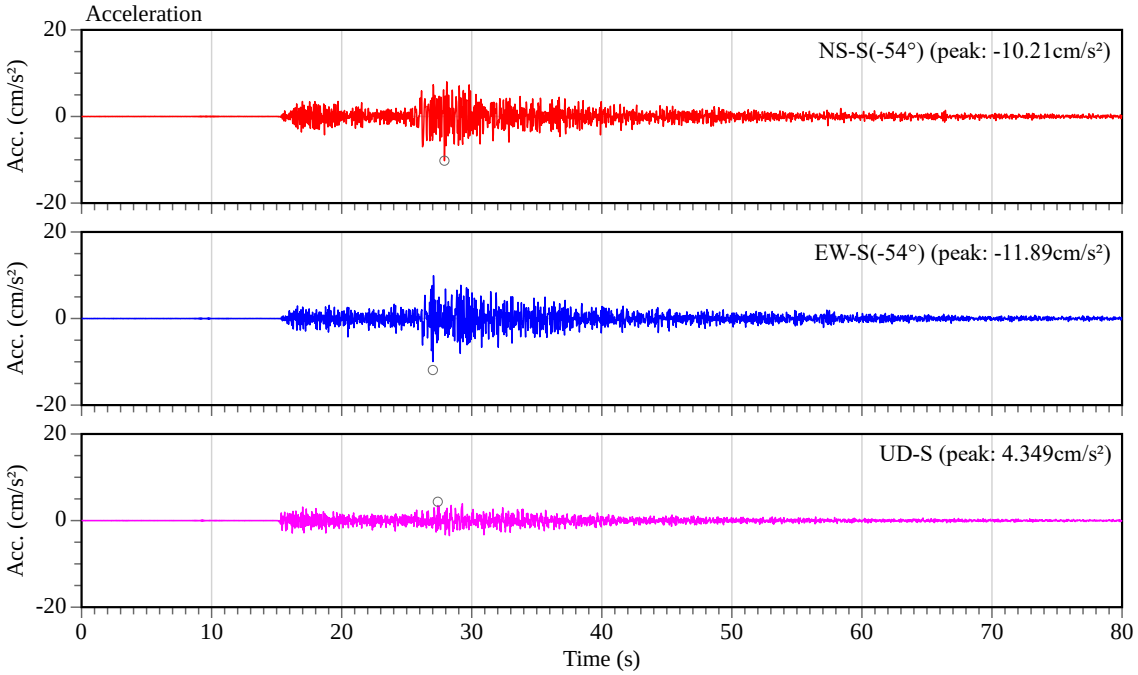


図 4.2-61　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

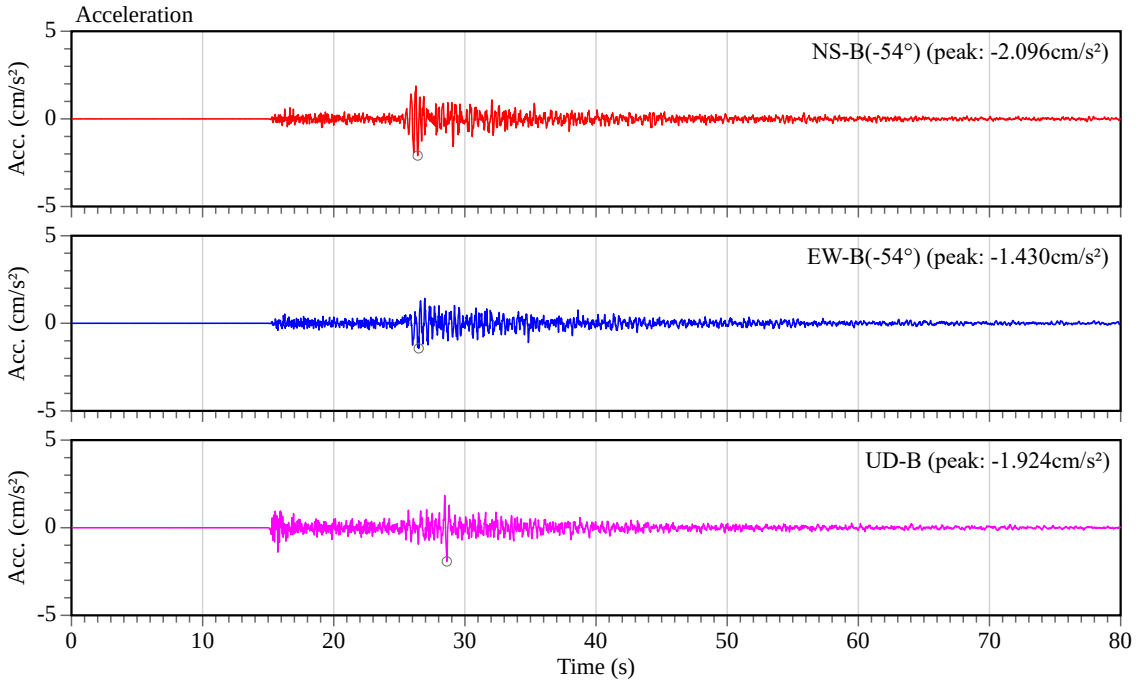


図 4.2-62　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.10　2022 年 9 月 13 日

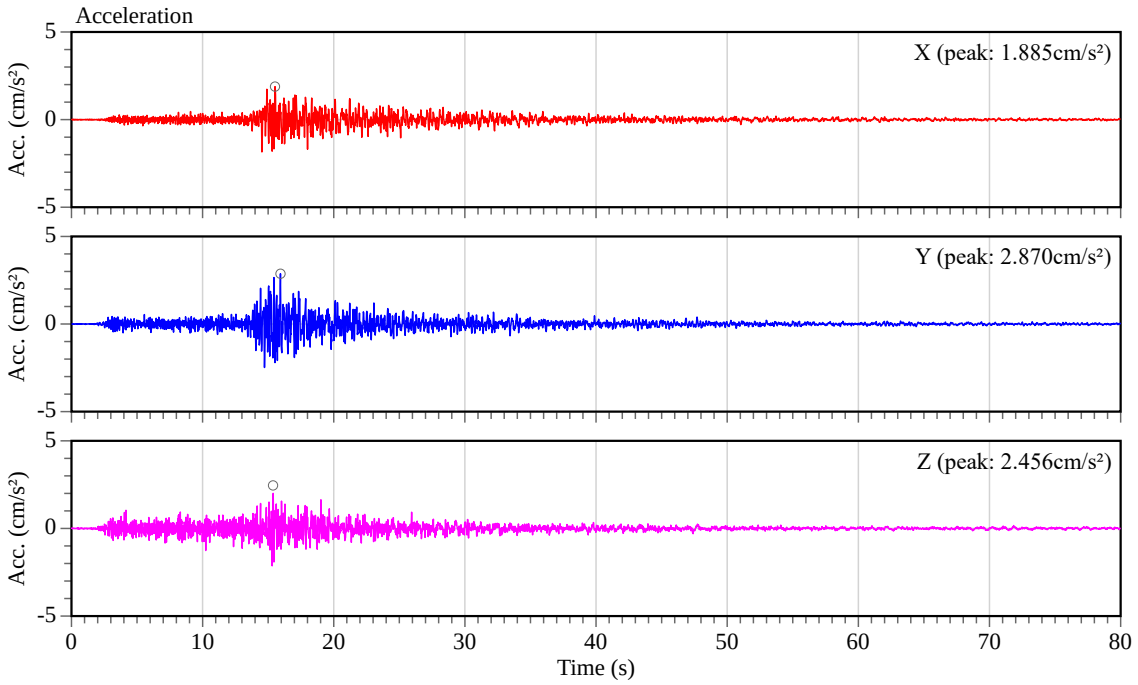


図 4.2-63　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

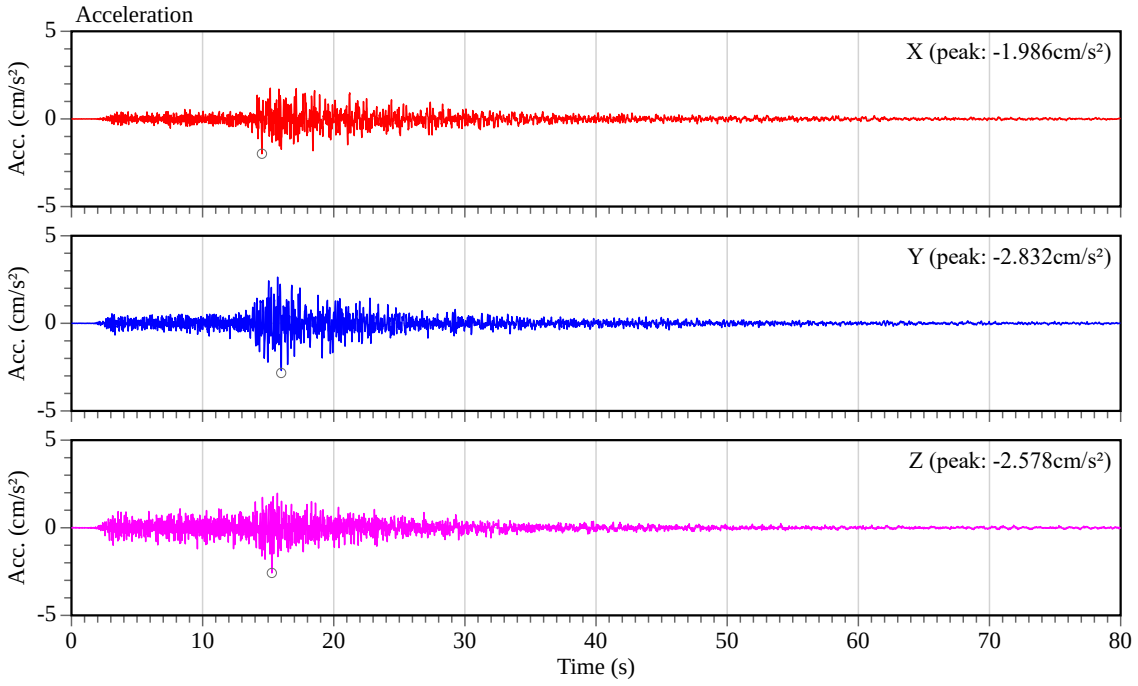


図 4.2-64　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

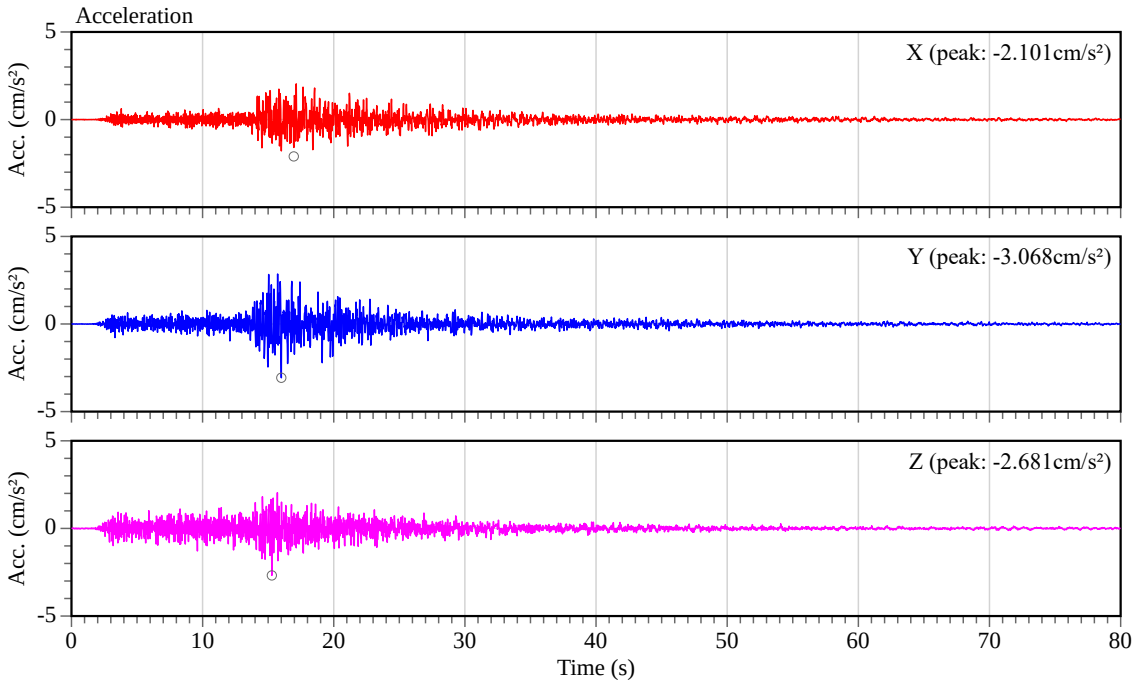


図 4.2-65　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

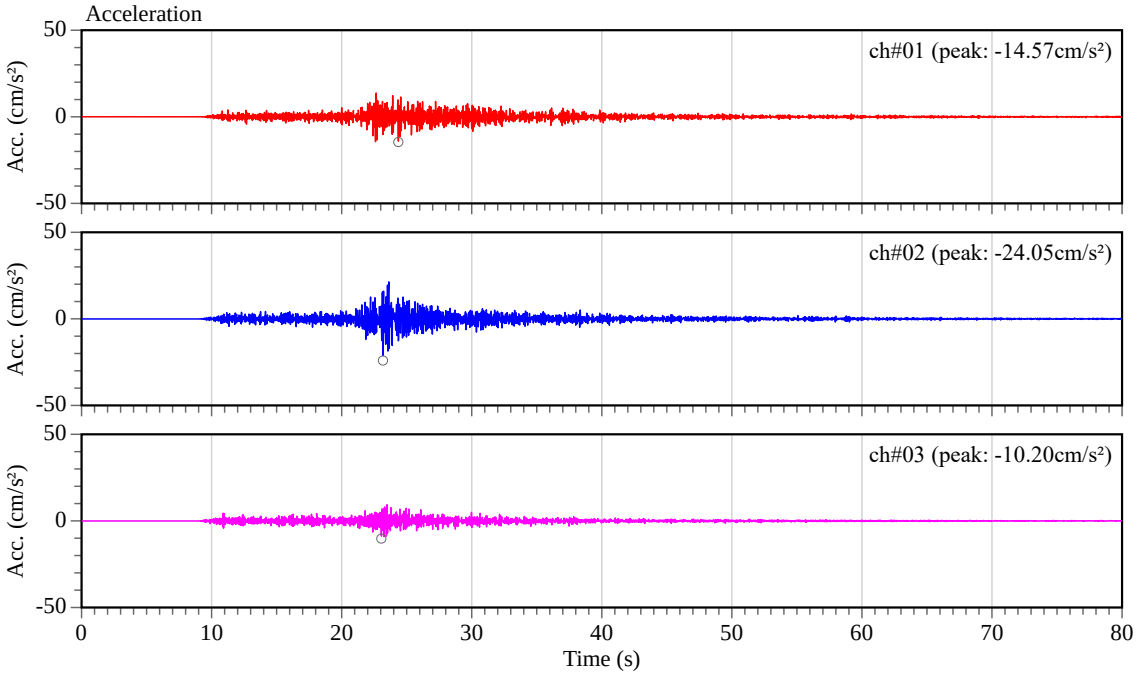


図 4.2-66　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

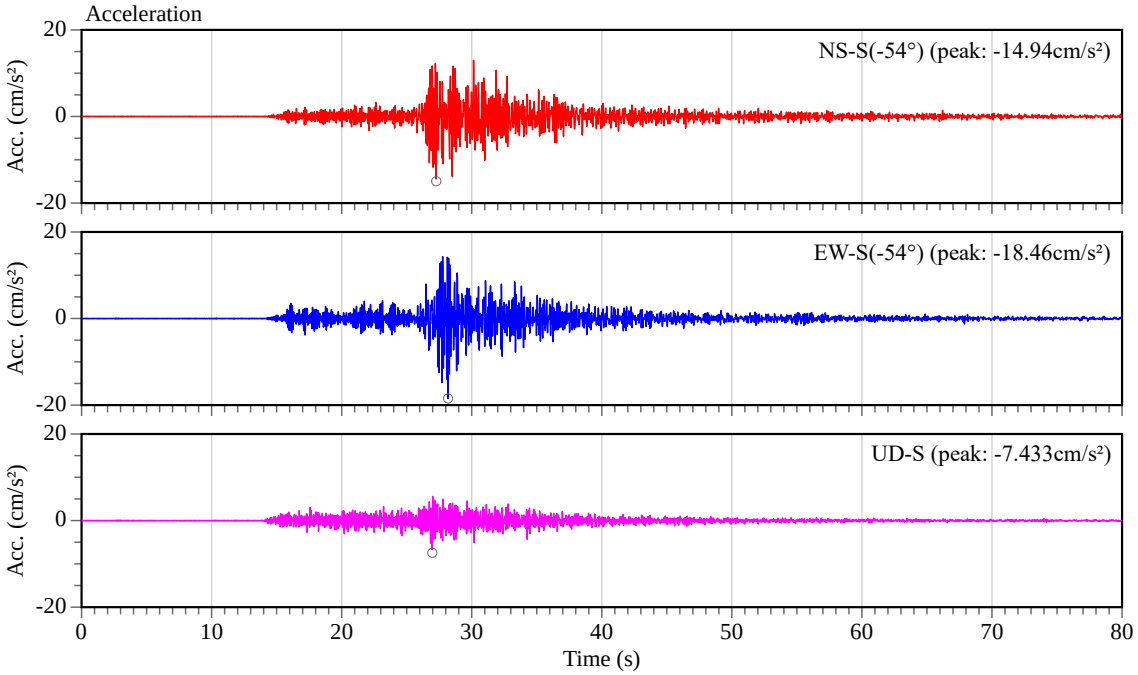


図 4.2-67　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

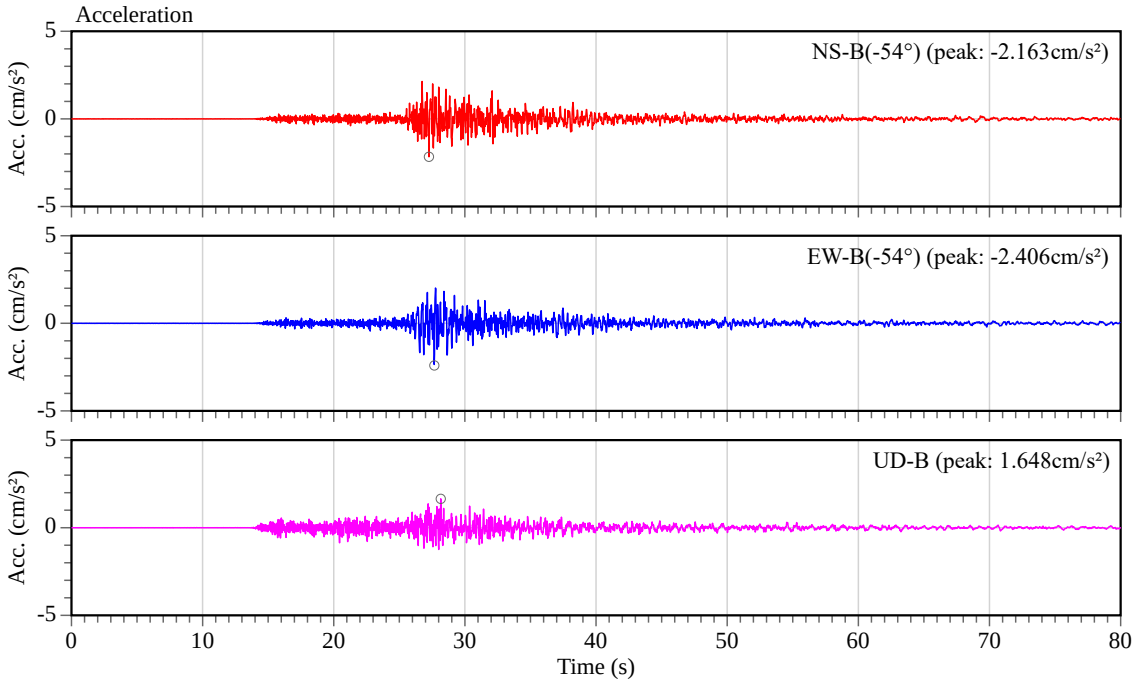


図 4.2-68　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.11　2022 年 11 月 17 日

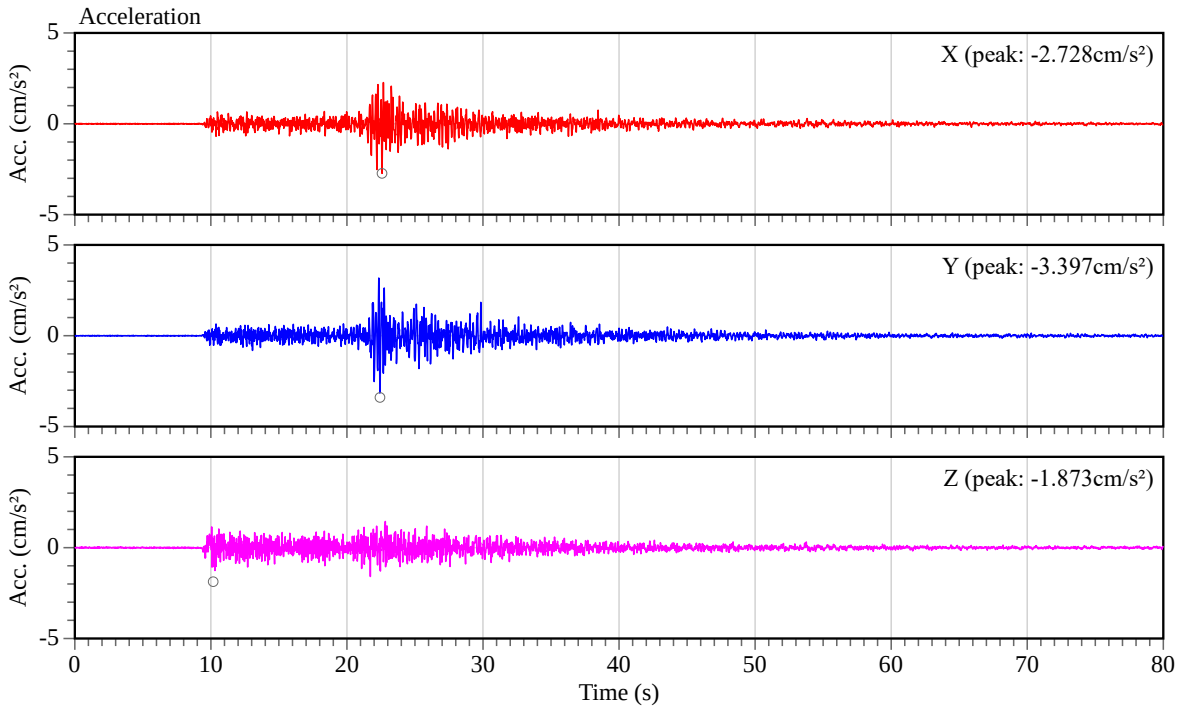


図 4.2-69　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

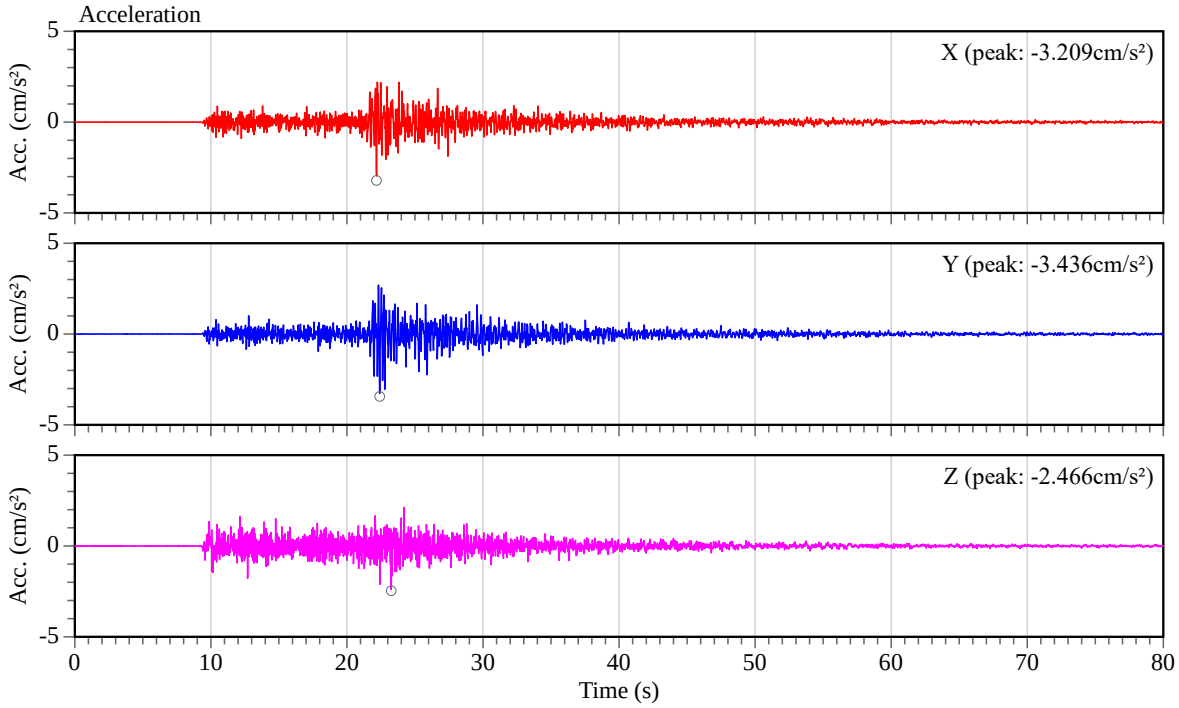


図 4.2-70　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

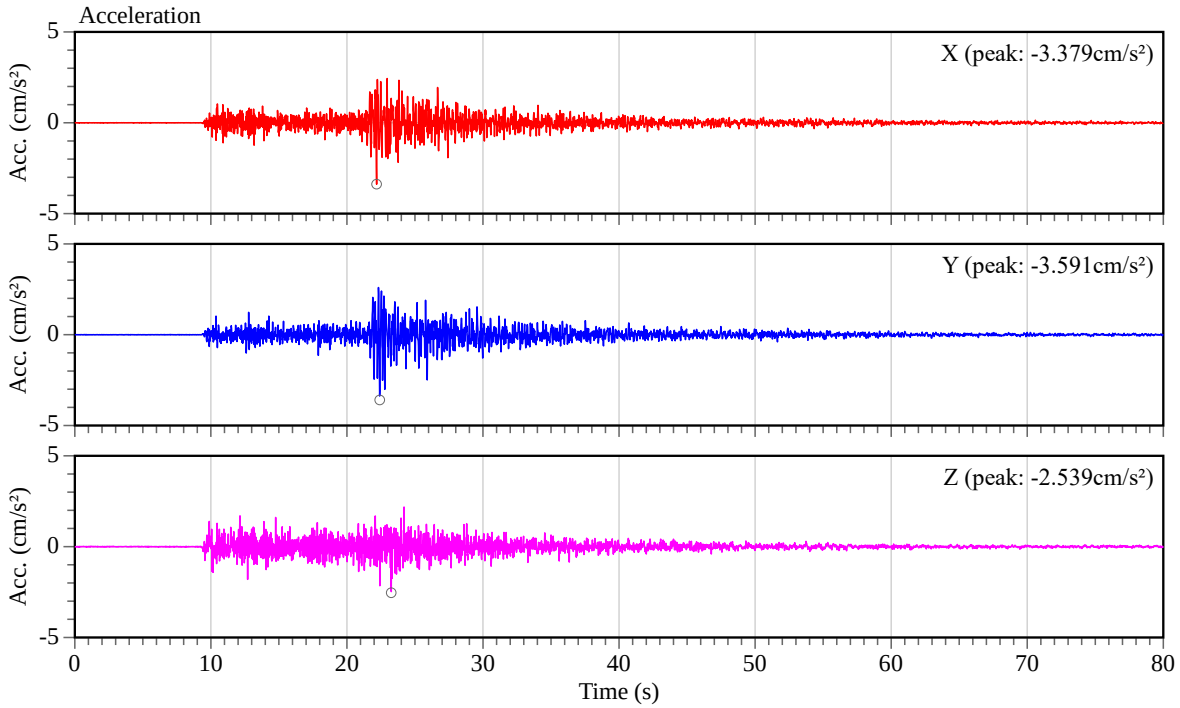


図 4.2-71　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

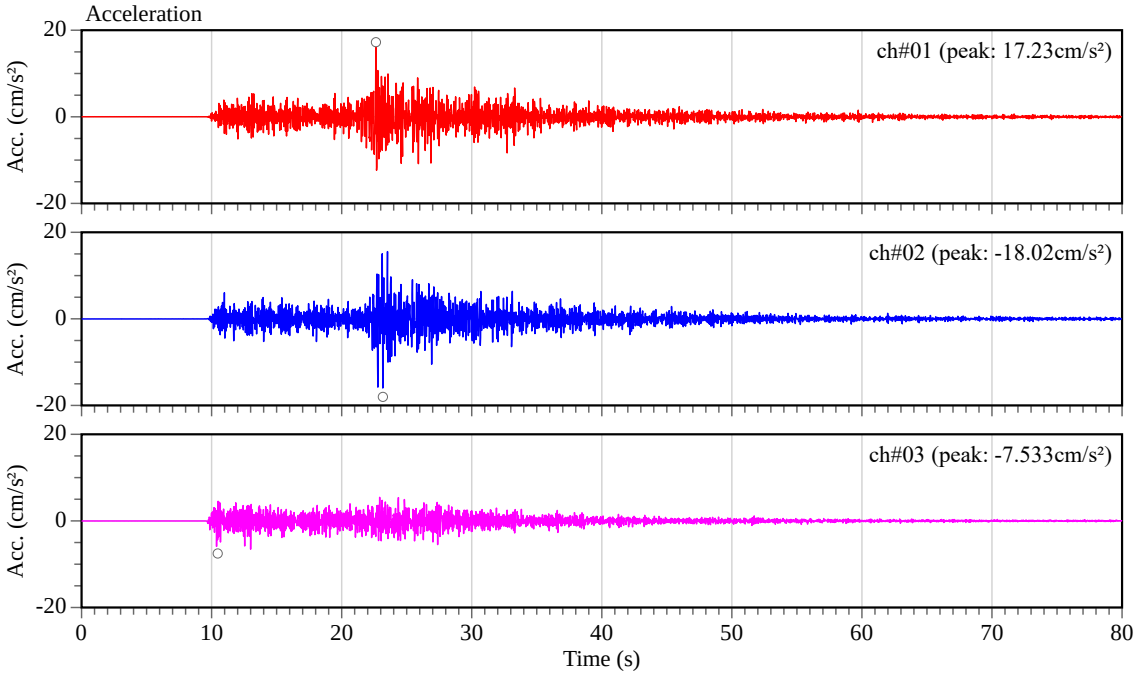


図 4.2-72　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

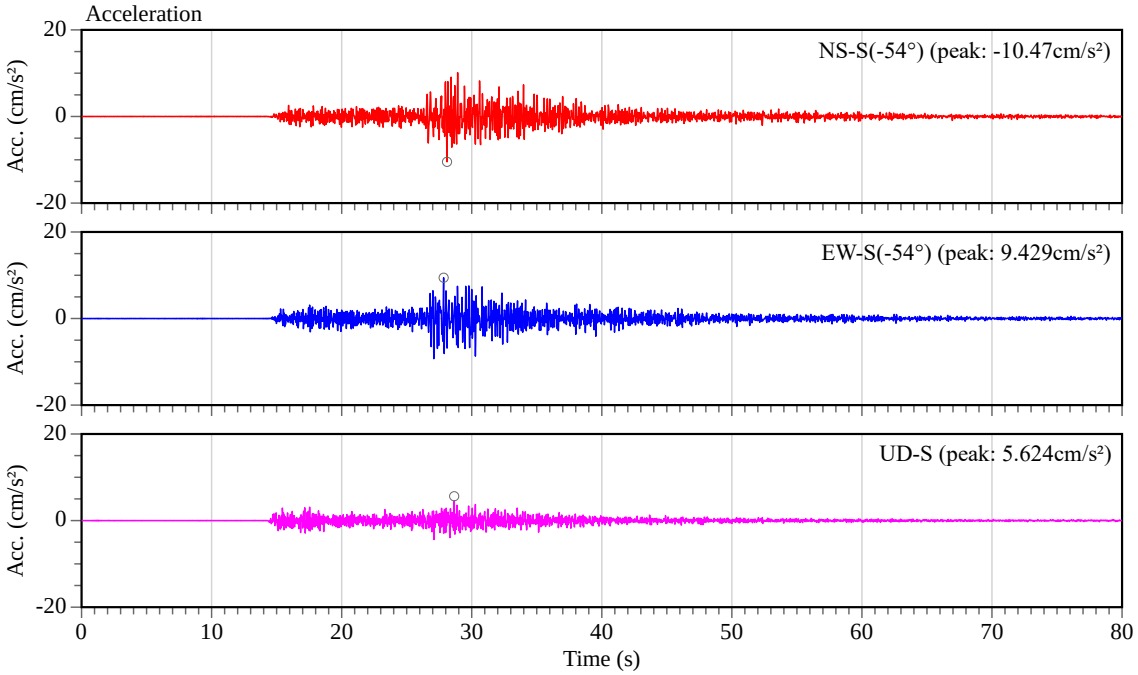


図 4.2-73　KiK-net 六ヶ所（地表、方位補正後）　地震動データ

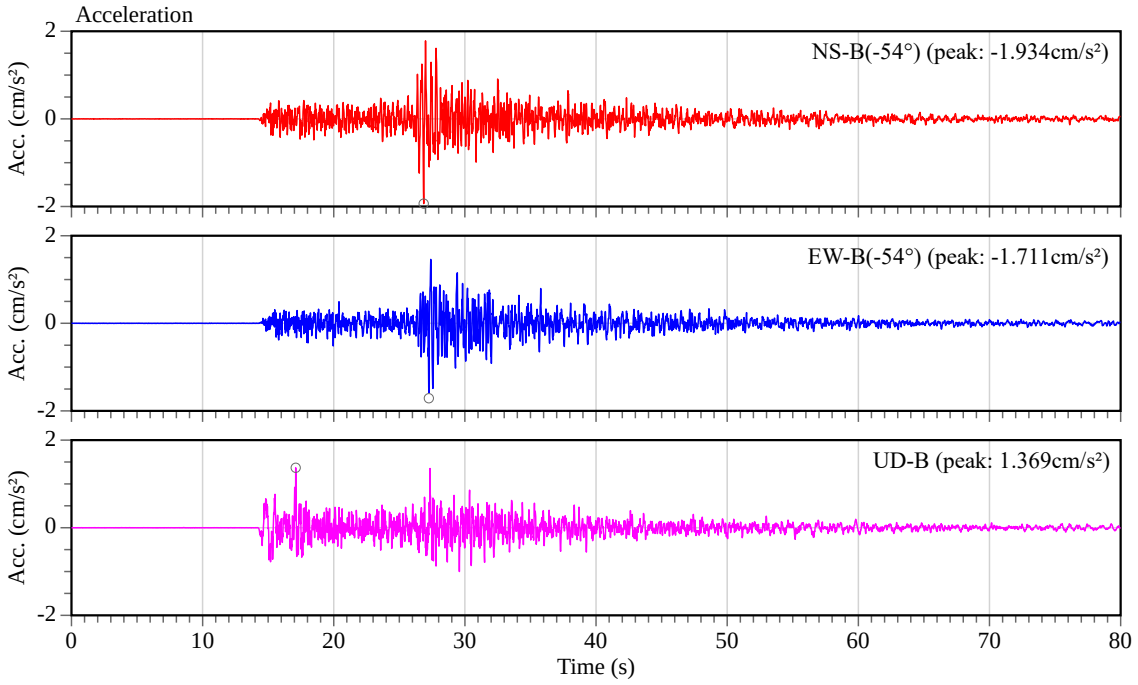


図 4.2-74　KiK-net 六ヶ所（地下 100m、方位補正後）　地震動データ

・No.12　2023 年 1 月 16 日

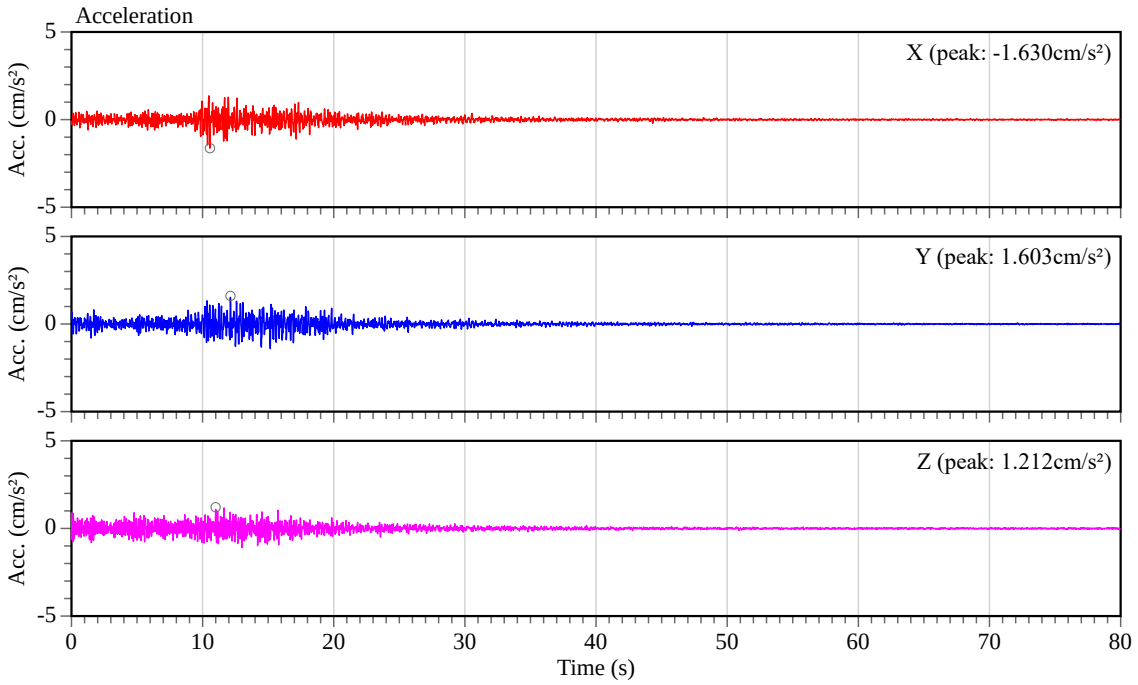


図 4.2-75　地震計①（試験空洞底盤上）　地震動取得データ

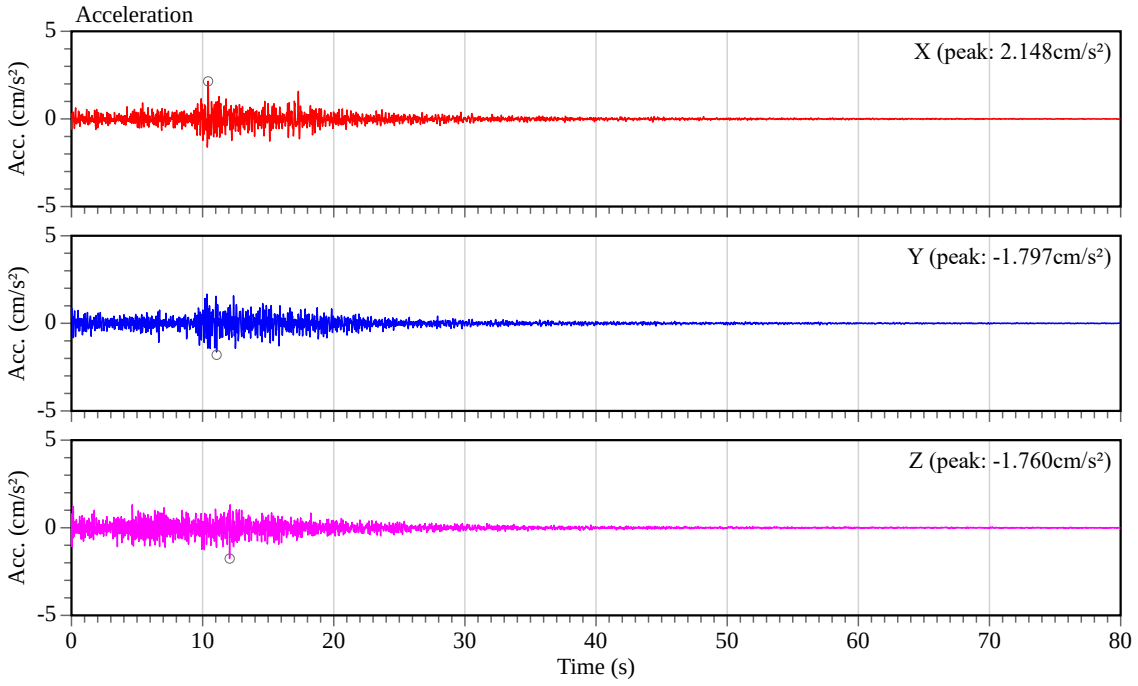


図 4.2-76　地震計②（底部コンクリートピット上）　地震動取得データ

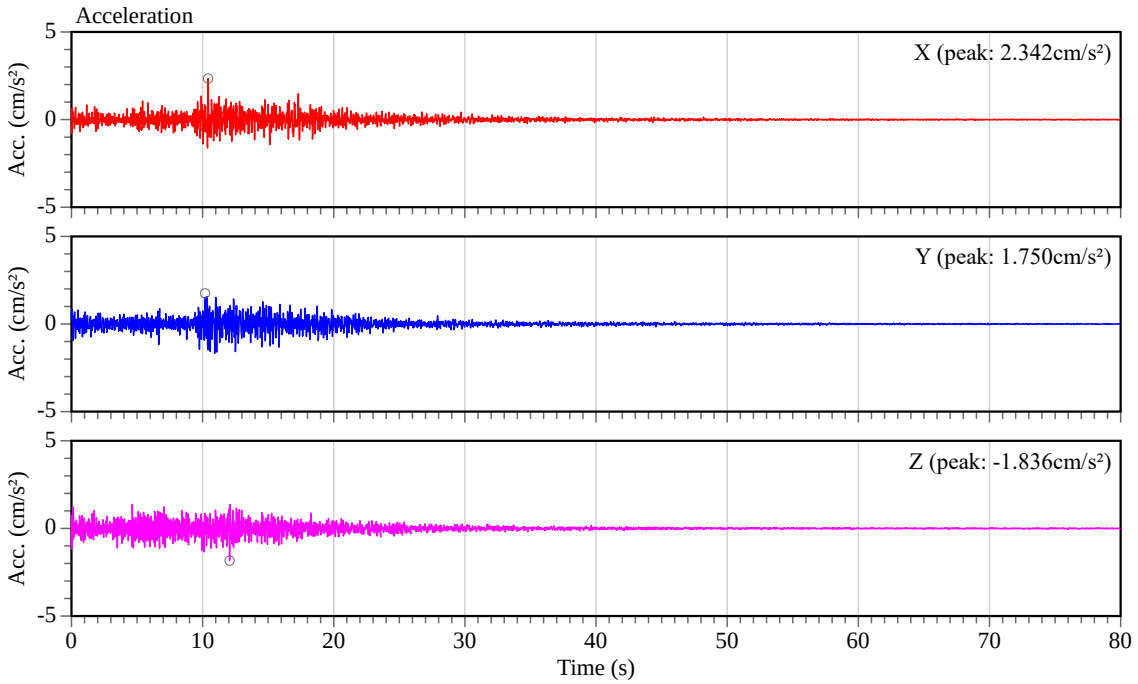


図 4.2-77　地震計③（手前部側壁の上部）　地震動取得データ

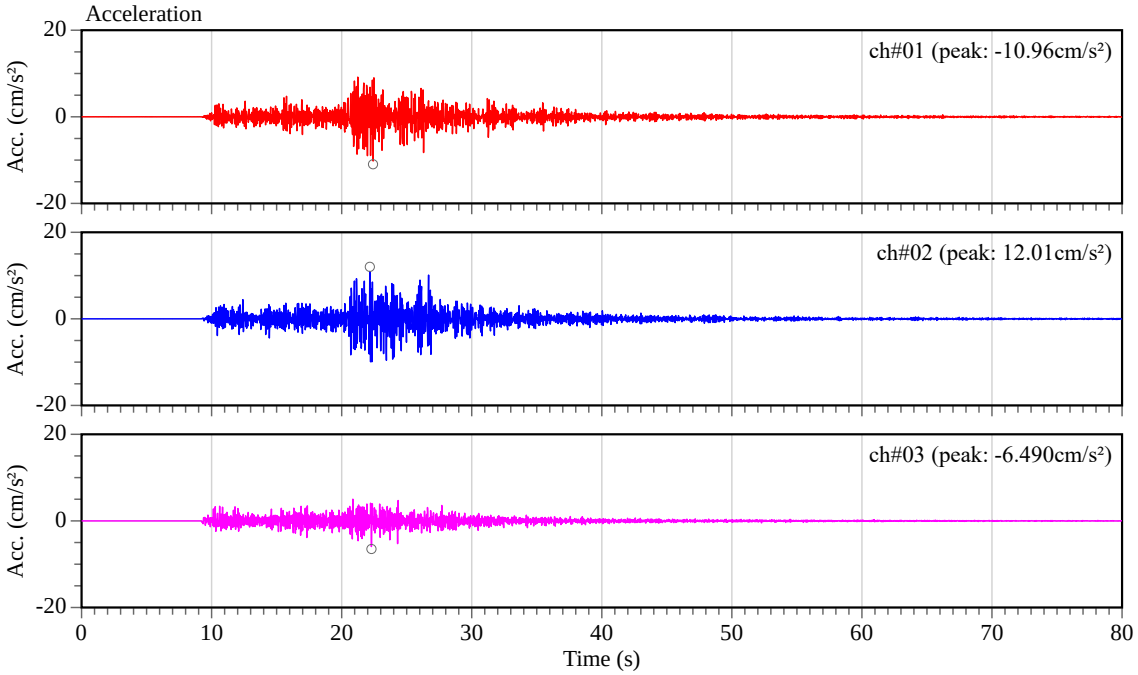


図 4.2-78　地震計⑤（地表面）　地震動取得データ

（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　2022 年 2 月 17 日

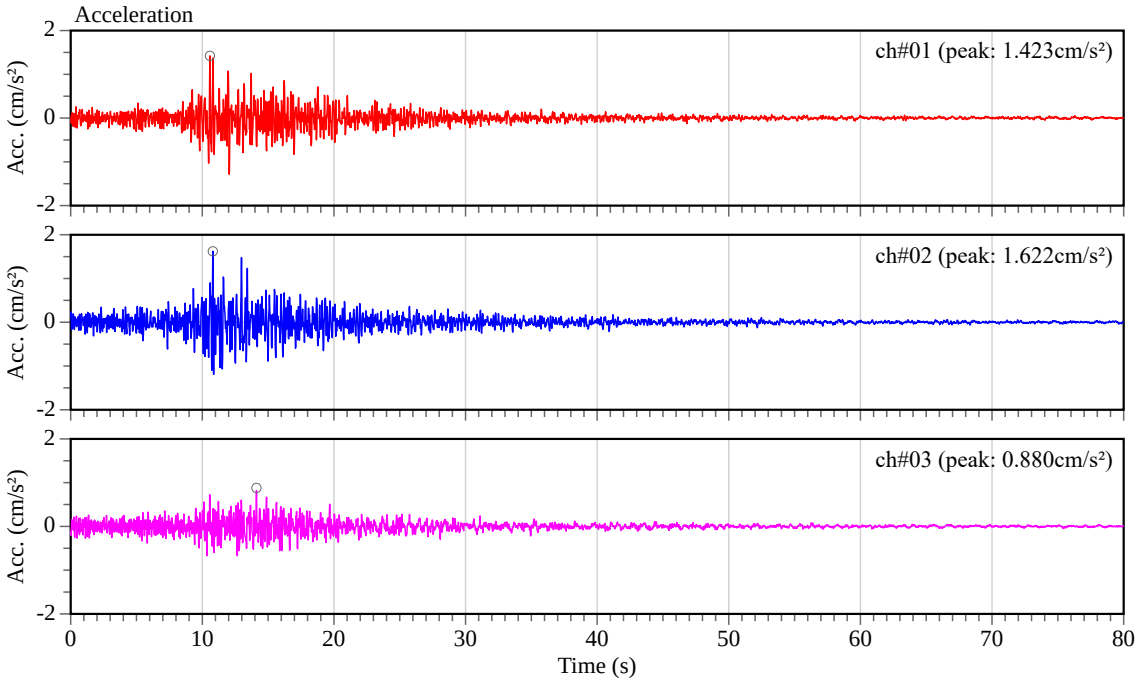


図 4.2-79　計測坑 C　地震動データ

・No.2　2022 年 3 月 16 日

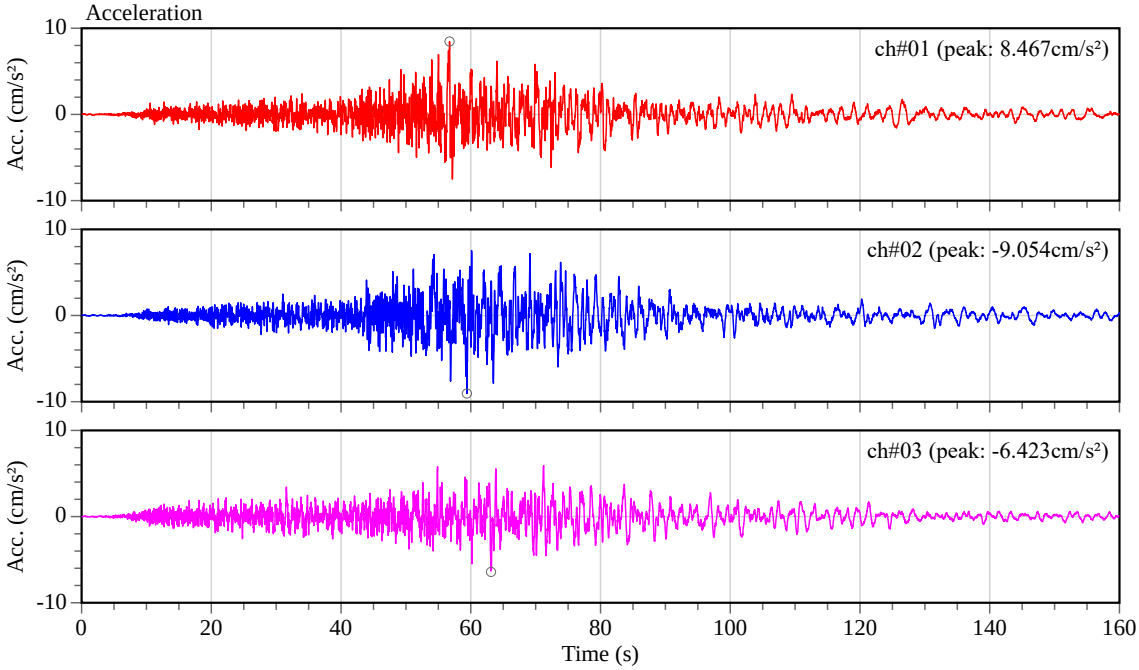


図 4.2-80　計測坑 C　地震動データ

・No.3　2022 年 3 月 18 日

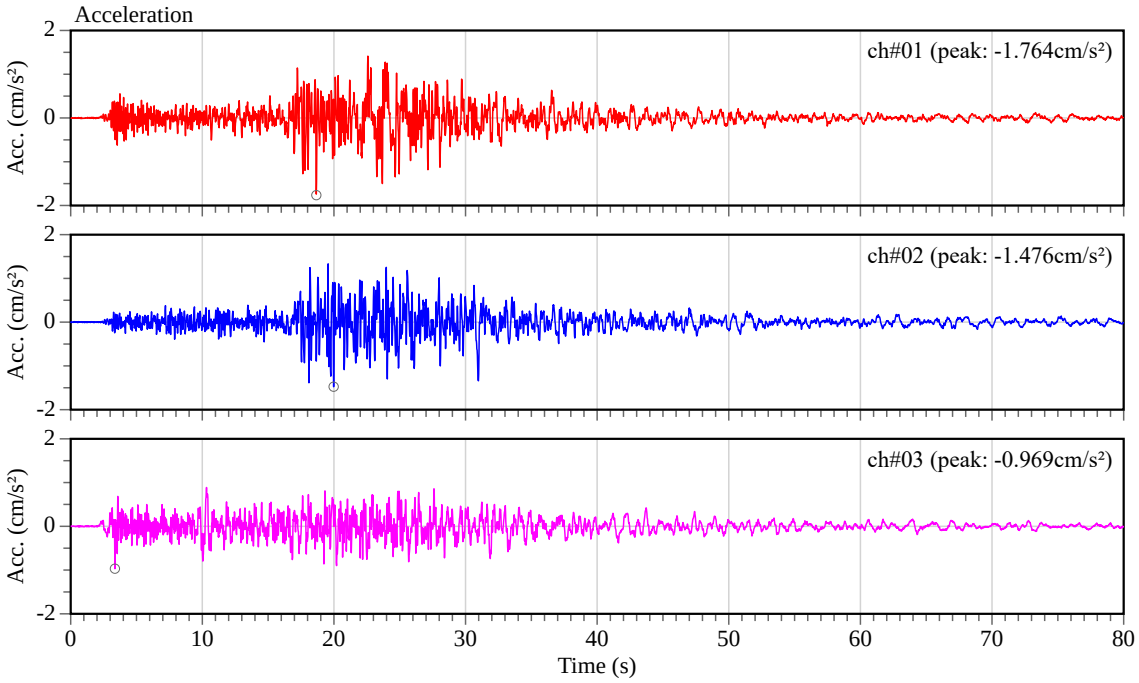


図 4.2-81　計測坑 C　地震動データ

・No.4　2022 年 4 月 28 日

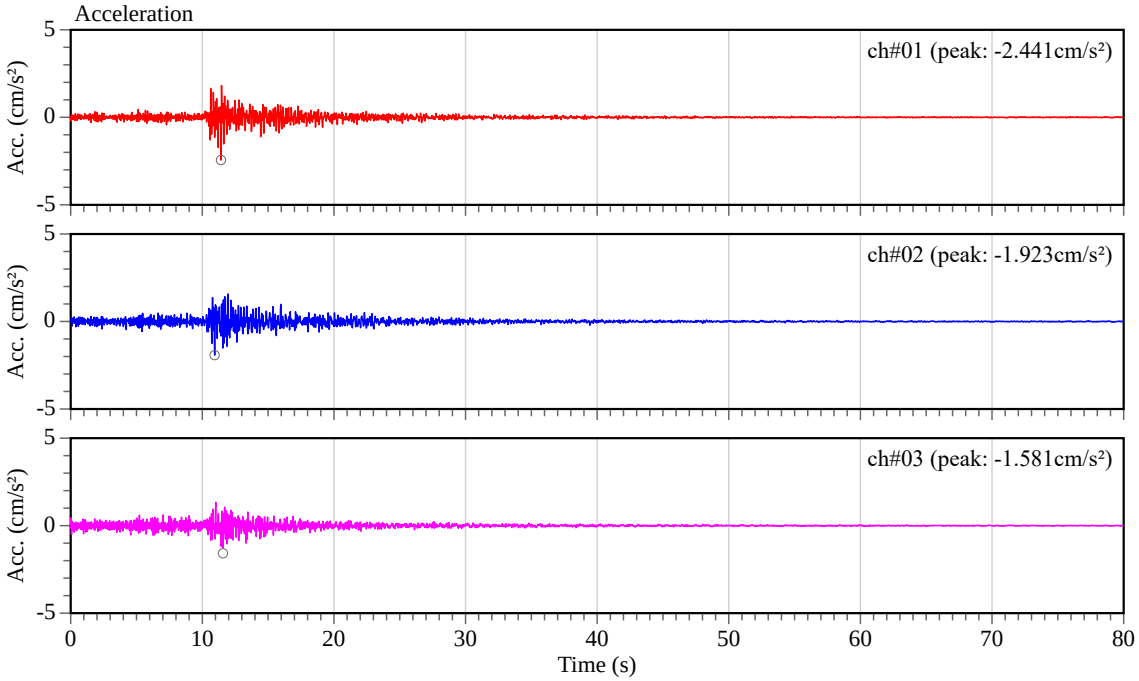


図 4.2-82　計測坑 C　地震動データ

・No.5　2022 年 5 月 23 日

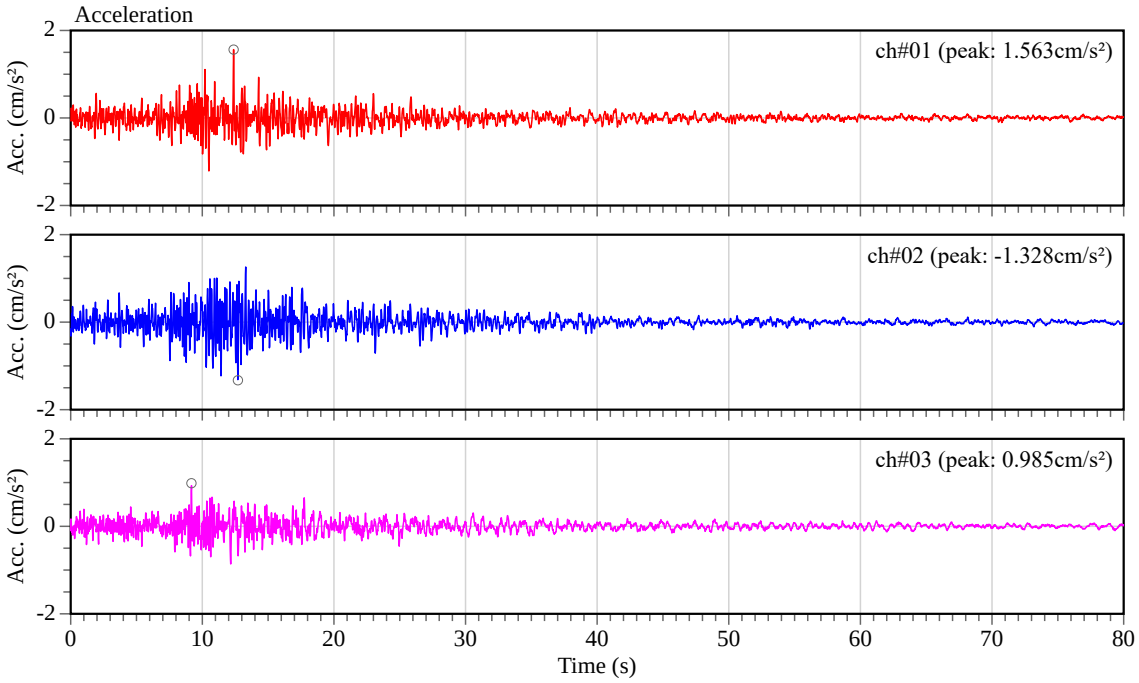


図 4.2-83　計測坑 C　地震動データ

・No.6　2022 年 6 月 10 日

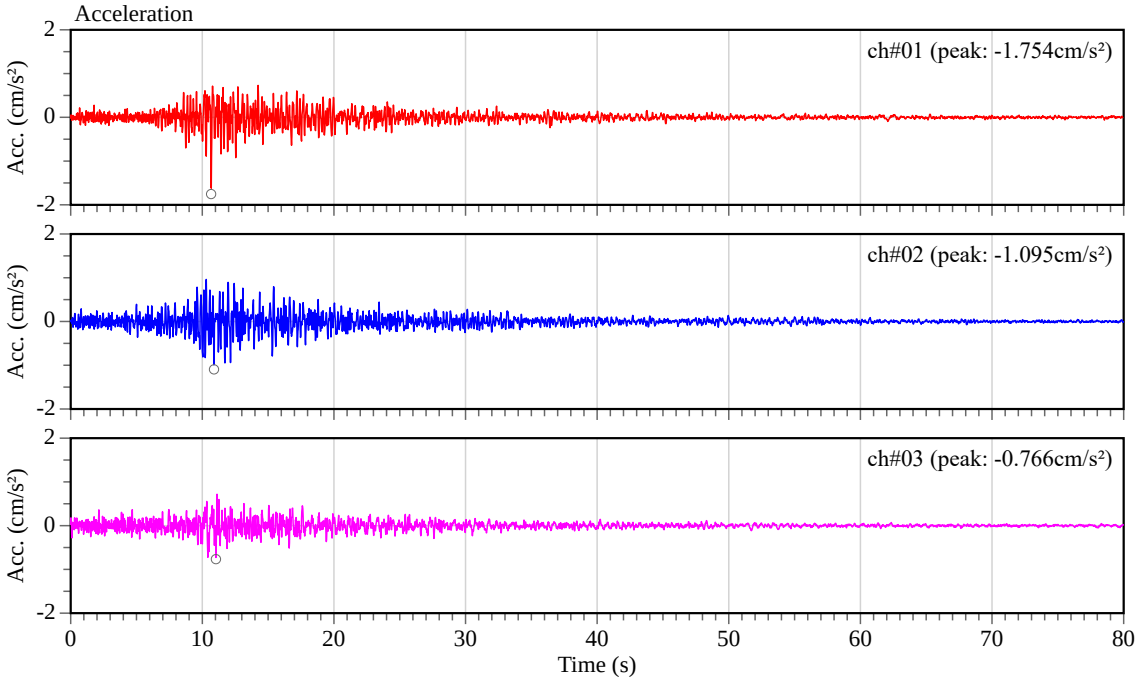


図 4.2-84　計測坑 C　地震動データ

・No.7　2022 年 7 月 2 日

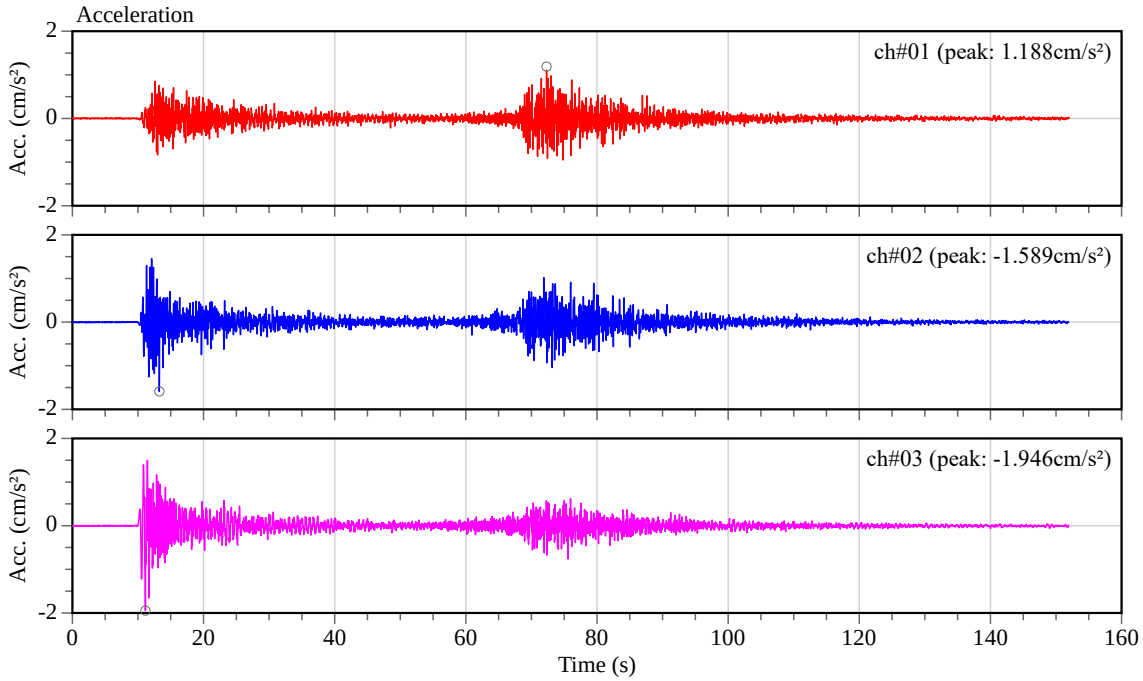


図 4.2-85　計測坑 C　地震動データ

・No.8　2022 年 7 月 6 日

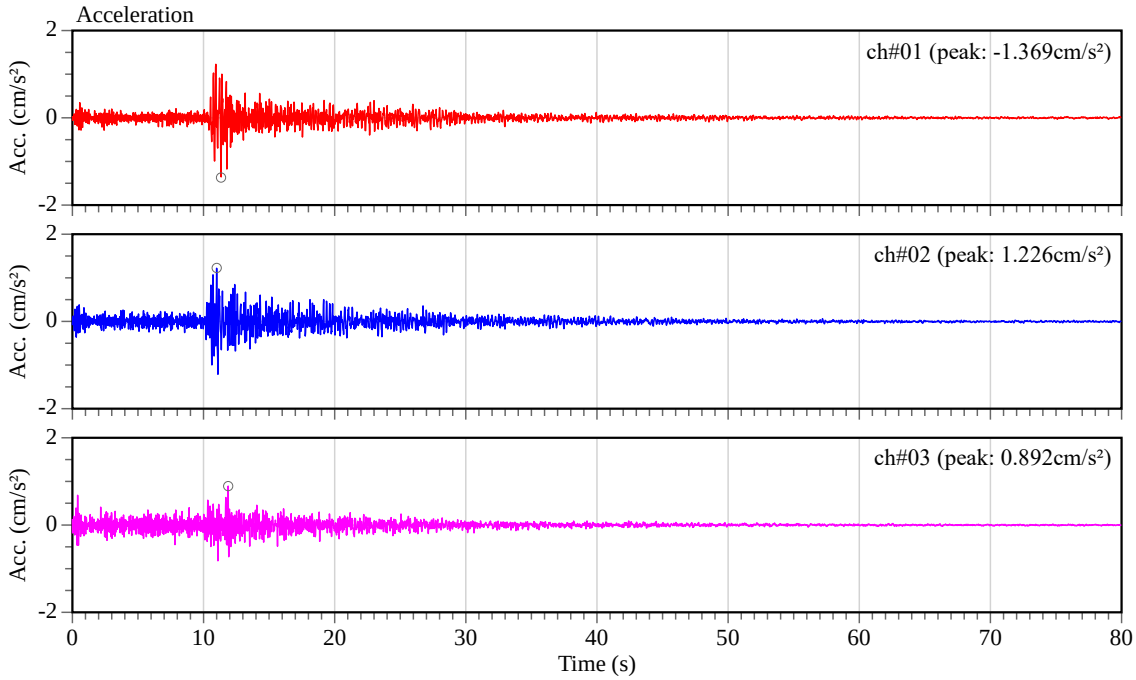


図 4.2-86　計測坑 C　地震動データ

・No.9　2022 年 7 月 22 日

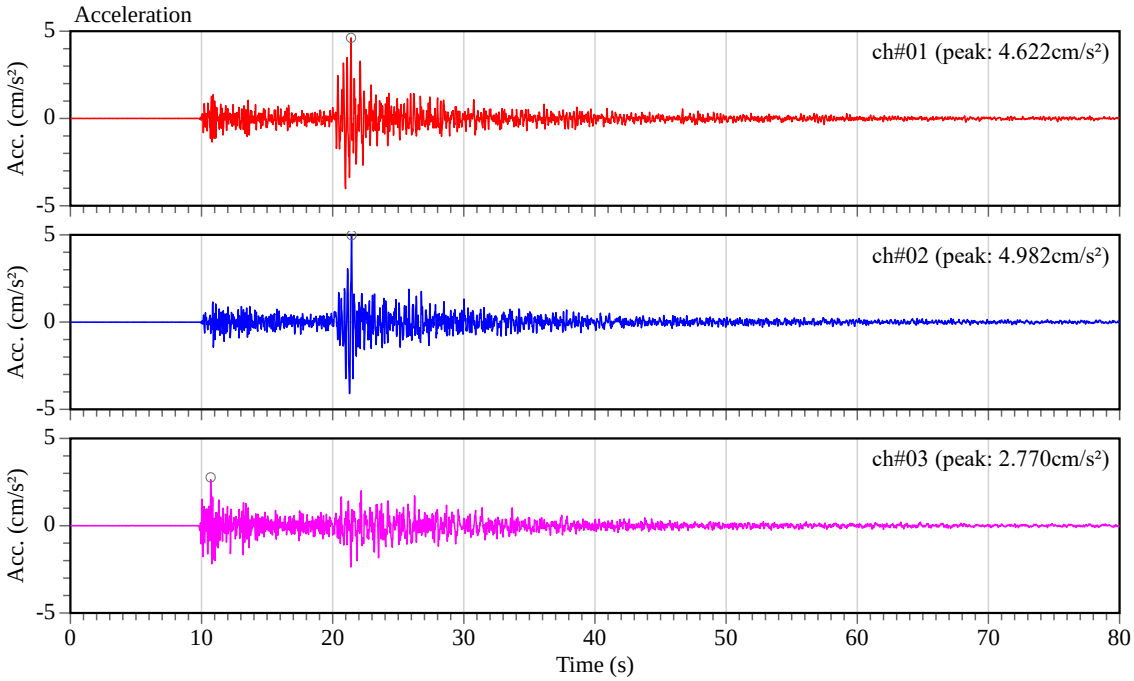


図 4.2-87　計測坑 C　地震動データ

・No.10　2022 年 9 月 13 日

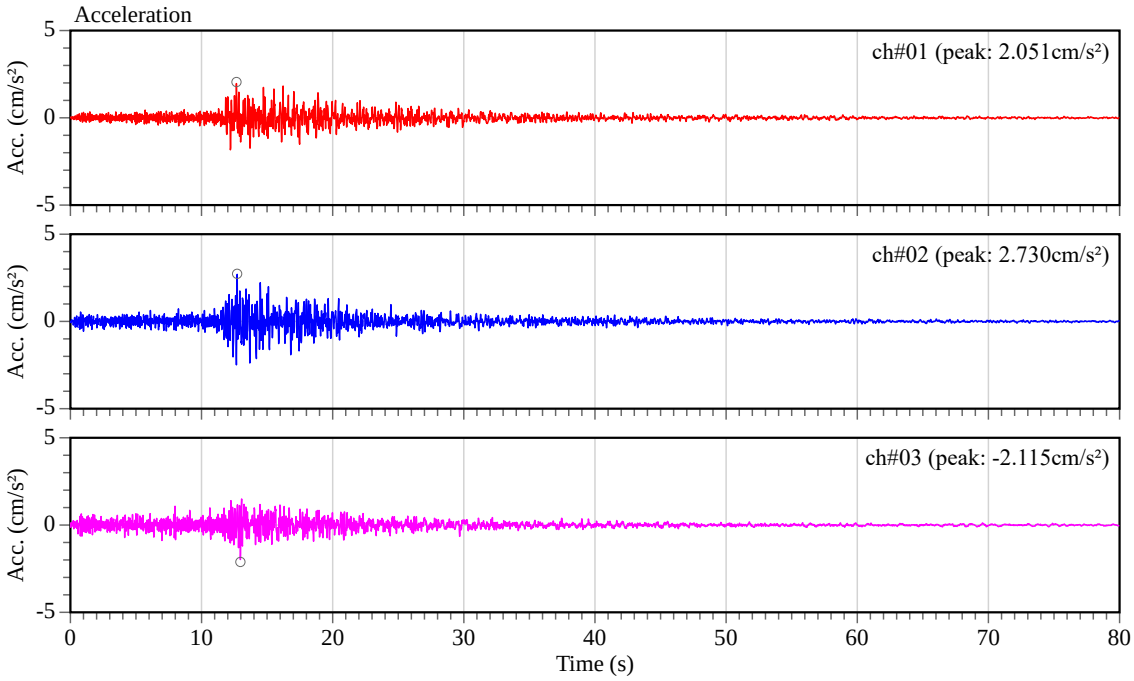


図 4.2-88　計測坑 C　地震動データ

・No.11　2022 年 11 月 17 日

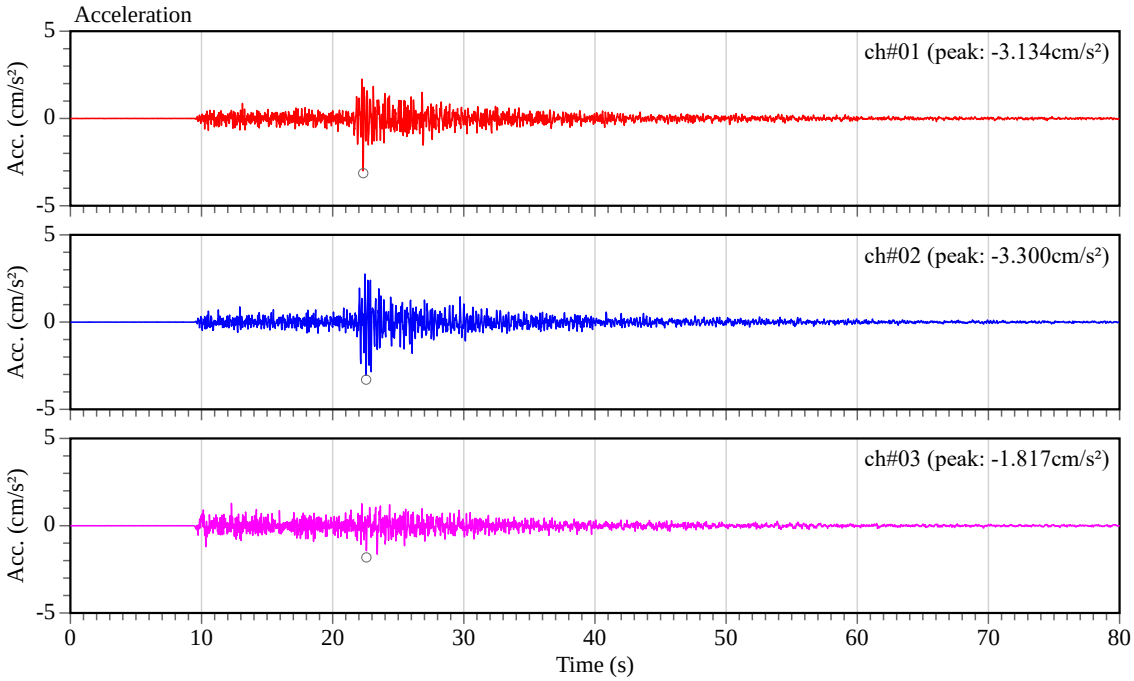


図 4.2-89　計測坑 C　地震動データ

・No.12　2023 年 1 月 16 日

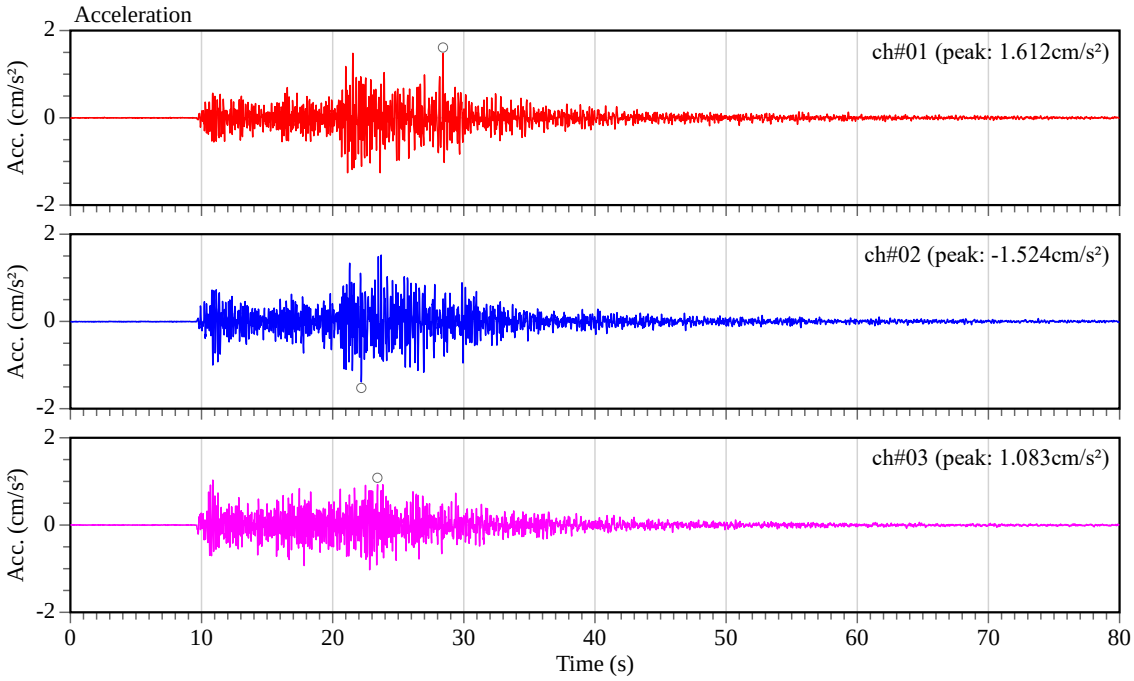


図 4.2-90　計測坑 C　地震動データ

(7) 地表と地下の最大加速度の比較

今年度の取得データについて、地表と地下の最大加速度の比較を行った。比較に使ったのは、地下は地震計④（計測坑 C)、地表は地震計⑤とした。

各地震での地表の地震計⑤の Y 方向の最大加速度と、地震計⑤（地表）／地震計④（地下）の最大加速度の比率を表 4.2-8 に示す。

表 4.2-8　地表と地下の最大加速度の比較

No.	地震の発生日	震央地名	尾駮の震度	地震計⑤最大加速度(Y 方向)	地震計⑤／地震計④の比率		
					X 方向	Y 方向	Z 方向
1	2022 年 2 月 17 日	浦河沖	震度 2	6.970 gal	4.13	4.30	3.40
2	2022 年 3 月 16 日	福島県沖	震度 3	29.59 gal	3.26	3.27	1.96
3	2022 年 3 月 18 日	岩手県沖	震度 1	7.598 gal	4.95	5.15	4.59
4	2022 年 4 月 28 日	青森県東方沖	震度 1	24.64 gal	10.59	12.81	6.86
5	2022 年 5 月 23 日	青森県東方沖	震度 1	7.595 gal	5.70	5.72	4.02
6	2022 年 6 月 10 日	浦河沖	震度 1	7.825 gal	3.44	7.15	4.04
7	2022 年 7 月 2 日	宗谷海峡	震度 2	9.341 gal	6.63	5.88	3.64
8	2022 年 7 月 6 日	青森県東方沖	震度 1	8.096 gal	4.36	6.60	5.82
9	2022 年 7 月 22 日	青森県三八上北地方	震度 2	26.58 gal	4.04	5.34	5.85
10	2022 年 9 月 13 日	青森県東方沖	震度 2	24.05 gal	7.10	8.81	4.82
11	2022 年 11 月 17 日	青森県東方沖	震度 2	18.02 gal	5.50	5.46	4.15
12	2023 年 1 月 16 日	青森県東方沖	震度 1	12.01 gal	6.80	7.88	5.99

最大加速度の比率の平均は X 方向で 5.5 倍、Y 方向で 6.5 倍、Z 方向で 4.6 倍であった。

また、最も比率の小さい地震は No.2 の福島県沖を震央とする地震、最も比率の大きい地震は No.4 の青森県東方沖を震央とする地震であった。この 2 件の地震の周波数特性は次節で分析対象とする。

(8) 周波数特性の分析

今年度の取得データのうち、六ヶ所村尾駮の震度 2 以上の地震 6 件について、周波数特性の分析を行った。分析に使ったのは、地下は地震計④（計測坑 C）、地表は地震計⑤で、調査坑のトンネル軸直角方向の Y 方向の地震動とした。

対象の地震の一覧を表 4.2-9、震央の位置図を図 4.2-91、各地震の周波数特性を図 4.2-92 に示す。

また地表と地下の最大加速度の比較で最も比率の大きい No.4 の青森県東方沖を震央とする地震（Y 方向で 12.81 倍）についても参考として周波数特性を図 4.2-93 に示す。

表 4.2-9 六ヶ所村尾駮の震度 2 以上の地震の一覧

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	2022 年 2 月 17 日	18:17:45	浦河沖	42° 02.5′N	142° 32.2′E	57 km	5.0	震度 3	震度 2
2	2022 年 3 月 16 日	23:36:33	福島県沖	37° 41.8′N	141° 37.3′E	57 km	7.4	震度 6 強	震度 3
7	2022 年 7 月 2 日	10:59:44	宗谷海峡	45° 49.1′N	142° 13.6′E	324 km	5.9	震度 3	震度 2
9	2022 年 7 月 22 日	12:01:57	青森県三八上北地方	40° 33.0′N	141° 25.0′E	86 km	5.3	震度 4	震度 2
10	2022 年 9 月 13 日	9:51:59	青森県東方沖	41° 34.5′N	142° 06.2′E	54 km	5.1	震度 3	震度 2
11	2022 年 11 月 17 日	9:28:20	青森県東方沖	40° 43.8′N	142° 25.2′E	64 km	5.0	震度 3	震度 2

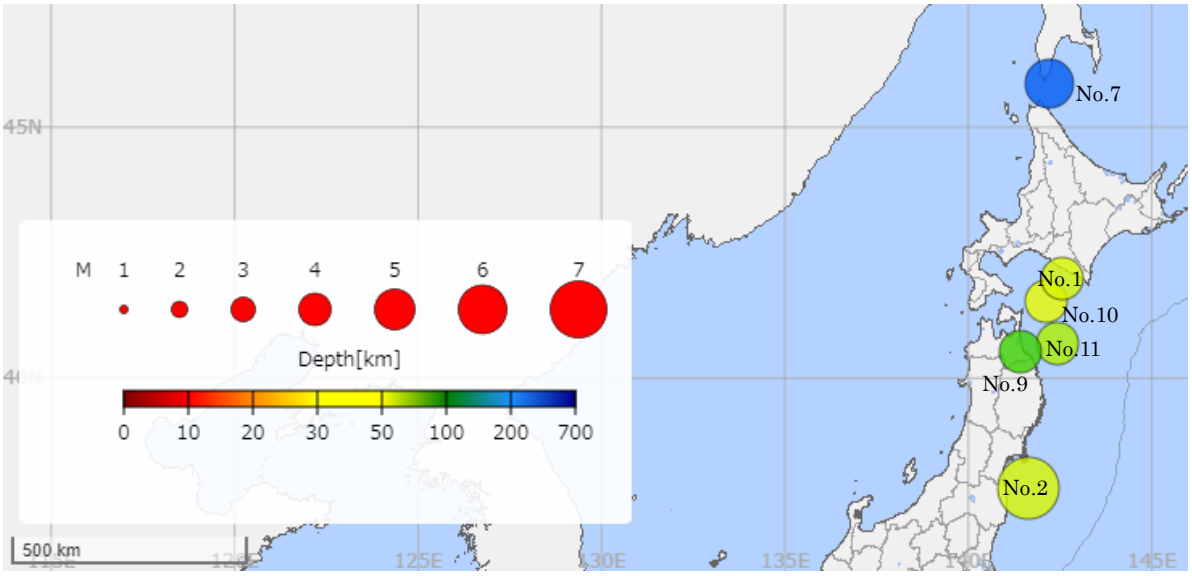


図 4.2-91 六ヶ所村尾駮の震度 2 以上の地震の震央位置

（気象庁震度データベース検索 https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/ に加筆）

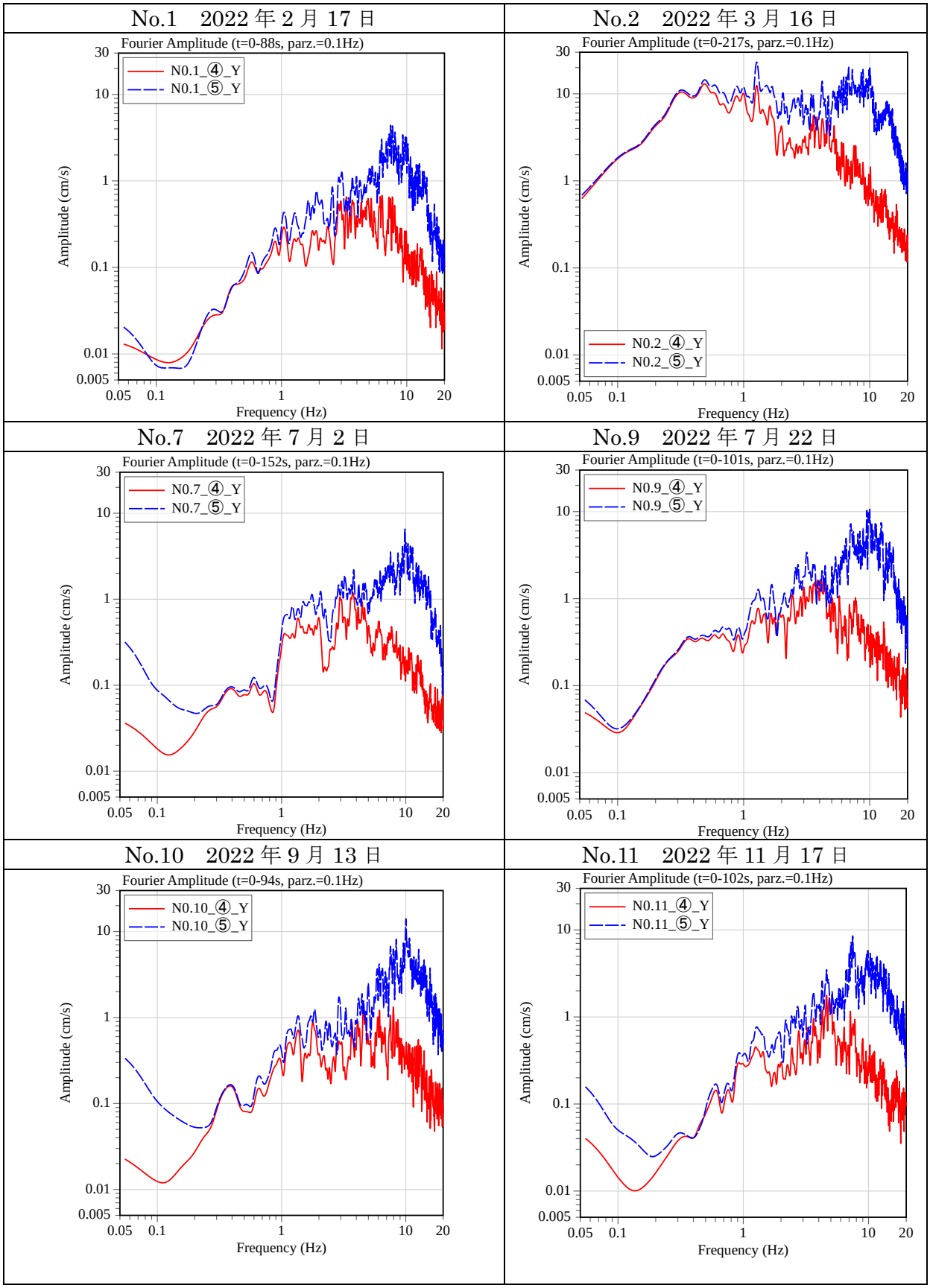


図 4.2-92　各地震の周波数特性

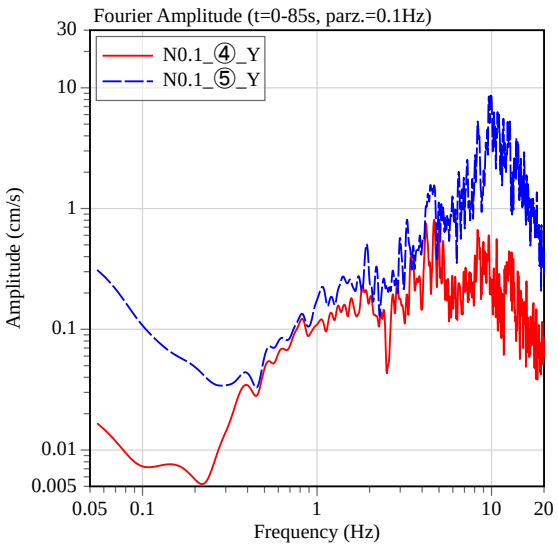


図 4.2-93　No.4 の地震の周波数特性

各地震の周波数特性を見ると、No.2 以外の 5 件及び No.4 は次のような類似の特徴がある。

・地震計④（地表）　8～10Hz に大きなピークがある三角形分布

・地震計⑤（地下）　1～10Hz の間に緩やかなピークがある台形分布

一方で No.2 の福島県沖を震央とする地震は、次のような特徴があり、明らかに他の地震との周波数特性の違いがみられた。この地震については、地表と地下の最大加速度の比較においても最も小さな比率であり、地震動に特性の違いがあると考えられる。

・地震計④（地表）　0.3～10Hz の間に緩やかなピークがある台形分布

・地震計⑤（地下）　0.3～0.5Hz にピークがある三角形分布

No.2 の宗谷海峡を震央とする地震については、観測場所（六ヶ所村）からの距離が最も遠く、震源深さも 324km（他の地震は 100km 以下）と深いが、1Hz 付近で落ち込みがあるほかは周波数特性に大きな違いは見られなかった。

No.9 の地震は震央が青森県三八上北地方と内陸部であるが、青森県東方沖などを震央とする地震と周波数特性が類似している。この No.9 と青森県東方沖を震央とする No.10 の震央の断面図（図 4.2-94）によると両者とも太平洋プレート内部で発生した地震であることが分かった。

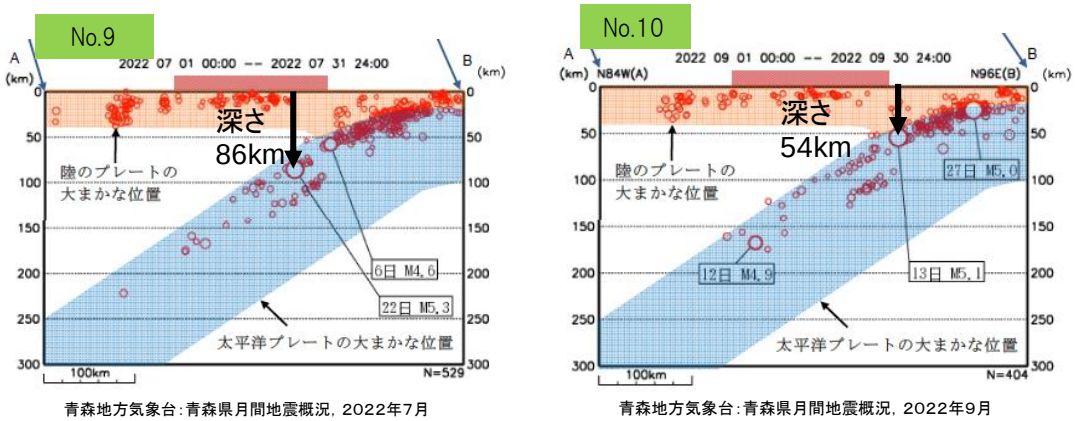


図 4.2-94　No.9 と No.10 の地震の震央の断面図

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

中深度処分施設は、それを構成する天然バリアと人工バリアが両立し、相互に補完的であるように設計する必要がある。そのためには、中深度処分施設の各構成要素について、関連する安全機能を精査し、複数の技術オプションの中から安全機能のさらなる改善、安全性を損なうことなく設計合理化が図れる可能性のある技術オプションの絞り込みを行う必要がある。

本検討では、中深度処分の設計最適化に向け、技術オプションの絞り込み等に関する調査を実施するとともに、技術オプション絞り込みのための評価方法について検討することを目的とする。

5.1　既往検討成果の調査

5.1.1　規制等の追加調査

2021 年 6 月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]。また、同年 7 月には、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た[2][3][4]。さらに、2022 年 8 月には、それらの規制基準のうち、中深度処分に係る規制基準等が定められた背景、経緯及び関連する情報を取りまとめた NRA 技術ノートが原子力規制庁長官官房技術基盤グループより公開された[5]。NRA 技術ノートでは、廃棄物埋設地や坑道（地上から廃棄物埋設地に至る廃棄体の搬入通路等）に関する対策や操業期間を大きく超える長期の安全確保に必要な対策など、中深度処分に特有の設計上及び管理上の対策を中心に記載している。同ノートは廃棄物埋設地の安全設計に対しての考え方について言及されたものであり、本検討を進める上で有益かつ重要な知見を含んでいると考えられることから、記載内容について調査・整理した。

NRA 技術ノートでは、中深度処分の廃棄物埋設施設のイメージとして、図 5.1-1 に示す電気事業連合会で検討された概念図が示されている[6]。廃棄物埋設施設とは、廃棄物埋設施設の構築物であり、廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏出の防止及び低減のための機能を有するものを人工バリアとされている。

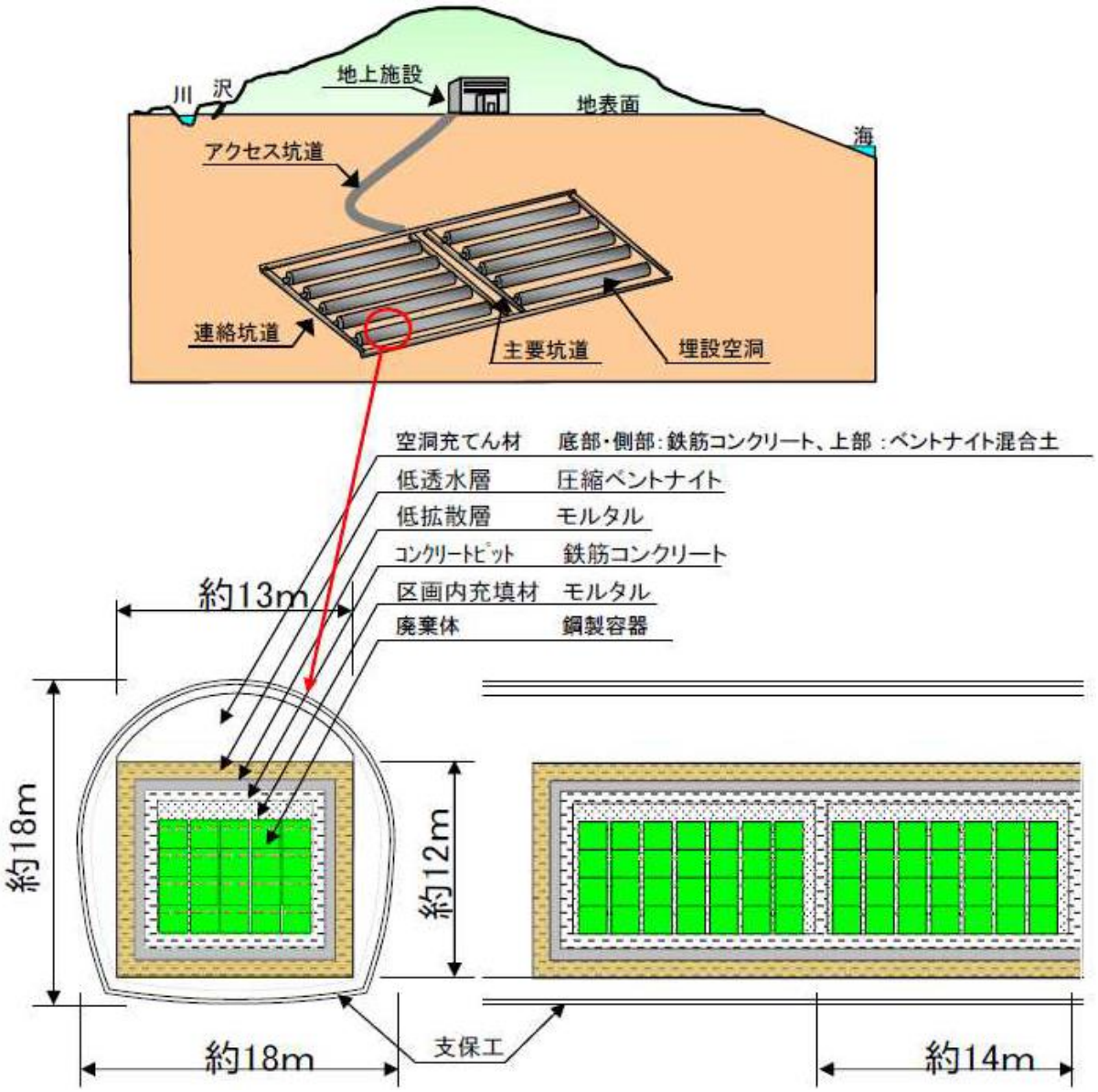


図 5.1-1　中深度処分の廃棄物埋設施設のイメージ[6]

規制基準より、人工バリアの機能は、自然事象や人為事象により物理的に損傷を受けた場合には、その性能が大きく低下又は機能喪失するおそれがあり、また、通常の状態においても、自然劣化により性能が低下していくことが想定されている。人工バリアが設置される地下環境下における人工バリアの腐食や変質による自然劣化による性能低下は、緩慢な変化であり徐々に進展すると考えられることから、性能が突然に大きく低下又はそれによって機能を喪失することは想定し難いが、人工バリアの機能が局所的に喪失することはあり得る。例えば、金属容器が地下水の浸入を遮断する機能は、仮に腐食により貫通部が形成された場合はその時点で低下又は喪失することが考えられる。一方で、天然バリアの放射性物質の移動を抑制する機能に係る性能は、自然劣化によって大きく低下することは通常想定されないため、自然事象や人為事象による物理的な損傷を受けなければ、数万年以上にわたり性能維持を期待することができると考えられている。大きな亀裂や透水性の高い場所がなければ、放射性物質の移動の原因となる地下水の流動が岩盤

等の微細な割れ目などに限定されることによって地下水の流速が抑えられ、また、岩盤等への放射性物質の収着によって放射性物質の移動が抑制されることも期待できる。

以上のような考えから、放射性物質移行の抑制は人工バリア並びに天然バリアで行うものであり、それぞれが段階ごとに適切な機能を有することが重要であるとわかる。中深度処分の事業については、以下のような段階に分離されるとしている。

- 立地段階（立地場所の調査～事業許可申請）
- 許可段階（事業許可申請～事業許可）
- 建設段階（事業許可～廃棄体の受入れ開始）
- 廃棄体の埋設段階（廃棄体の受入れ開始～廃棄物埋設地の埋設の終了）
- 坑道の閉鎖措置段階（坑道の閉鎖開始～坑道の閉鎖終了）
- 坑道の閉鎖終了から廃止措置の開始までの段階
- 廃止措置段階（廃止措置の開始～廃止措置の終了）
- 規制期間終了後

上記段階のうち、坑道の閉鎖段階終了から廃止措置の開始までの段階では、埋設の終了から廃止措置の開始までの期間は300～400年以内を目安とすることとしている。この期間に含まれる坑道の閉鎖措置段階の期間については、特に規則等に規定されていないが、同期間は坑道が埋め戻されていない期間となり、防護措置上の観点から、坑道の閉鎖措置段階の期間が300年よりもはるかに短い期間なった場合は、坑道の閉鎖終了から廃止措置の開始までの期間は、300～400年近くにわたる期間となる、としている。このような規制期間中については、公衆と生活環境に対するリスクを十分に低減するための設計に加え、事業者が適切な能動的管理を行うことが要求されている。また、規制期間終了後に発生が合理的に想定できる範囲内の事象への事前対策として、廃棄物埋設地を設置する位置等に関し、次の事項が必須のものとして要求されている。

- 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。
- 侵食により地表からの深さが70メートル未満に減少するおそれがないものであること。
- 有用な鉱物資源等が存在する場所を避けること。
- 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。
- 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、策定されたものであること。

上記、廃棄物埋設地の設置に関する事項のうち、「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を比較検討した上で策定されたものであること」

について、「主要な事項」の考え方が以下のように示されている。

・　「主要な事項」とは、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及び当該移動した放射性物質の生活環境への移動に大きく影響を及ぼすと考えられる事項であると考えられる。「主要な事項において異なる内容を含む複数の案」とは、全ての案において「主要な事項」が異なっている必要はなく、例えば表 5.1-1 のいずれかが異なる設計の案であれば「複数の案」と見なすことができると考えられる。

表 5.1-1　「主要な事項」が異なる例[5]

「主要な事項」の例	分類(注27)	「異なる」の例
(a)廃棄物埋設地を設置する岩盤等の水理地質構造	廃棄物埋設施設の位置 ・敷地内における主要な廃棄物埋設施設の位置	・廃棄物埋設地を設置する地層の種類 ・帯水層の位置(廃棄物埋設地の上部か下部など)
(b)区画別放射能量	区画別放射能量	・埋設坑道や区画ごとの放射性物質の種類、放射能量
(c)人工バリアの基本的な構造及び仕様	廃棄物埋設施設の一般構造 ・放射性物質の漏出の防止、低減及び移動の抑制に関する構造 ・その他の主要な構造	・廃棄物埋設地の形状、寸法 ・人工バリアの材質、組合せ、配置等

前述のとおり、本検討の目的は、技術オプションの絞り込み等に関する調査と技術オプション絞り込みのための評価方法の検討である。その観点から、表 5.1-1 に示される「主要な事項」は技術オプションを絞り込むための評価指標として有用であり、主要な事項の違いがそのまま設計案の違いになると考えられる。

5.2　設計プロセスにおける人工バリアの設計に係る選択肢に関する検討

5.2.1　検討の背景と目的

規制要求となる設計プロセスにおいては、最終的な設計の選定のためには、複数の人工バリア案と複数の配置案の組み合わせによる複数の処分システムを選定した上でそれらを比較検討することが求められている。中深度処分についてはサイトが未選定であることを考慮し、本検討では、人工バリアの設計に係る選択肢の部分に比重を置き、複数の人工バリア案をどのように設定するかについての考え方を検討する。

5.1.1 に前述したとおり、人工バリアの設計に係る選択肢として、「廃棄物埋設地の形状、寸法」や「人工バリアの材質、組合せ、配置等」が挙げられる。対象となる項目が多いこと、項目毎にもさまざまなレベルがあることから、人工バリアの設計に係る選択肢のバリエーションは非常に多岐にわたる。前年度の検討では、図 5.1-1 に示された中深度処分の廃棄物埋設施設のイメージ、すなわち、人工バリアとしては区画内充填材、コンクリートピット、低拡散層、低透水層及び空洞充てん材にて構成される処分概念を前提に、「廃棄物埋設地の形状、寸法」を主対象として、人工バリア厚さ等を決定する手法について検討した。

今年度は、前年度の検討の前提とした人工バリア構成自体が何故妥当なのか、その説明を求められた場合を想定して、設計プロセスにおける人工バリアの設計に係る選択肢に関して「人工バリアの組合せ」に着目した検討を実施する。前年度検討の前提とした人工バリア構成に係る検討となるという意味において、今年度の検討は前年度の上流部を対象としたものと位置づけられる。

5.2.2　検討フローの策定

5.1.1　において調査した NRA 技術ノートを踏まえると、複数の設計案を絞り込んでいく過程を検討することで技術オプションの絞り込みに繋がると考えられる。ここでは、複数の設計案の絞り込みに関する検討フローを策定するために、中深度処分の規制基準に関する既往の検討を参考にした。

中深度処分の処分システムを選定する考え方として、「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（2018）」[7]に、設計プロセスが示されている（図 5.2-1 参照）。

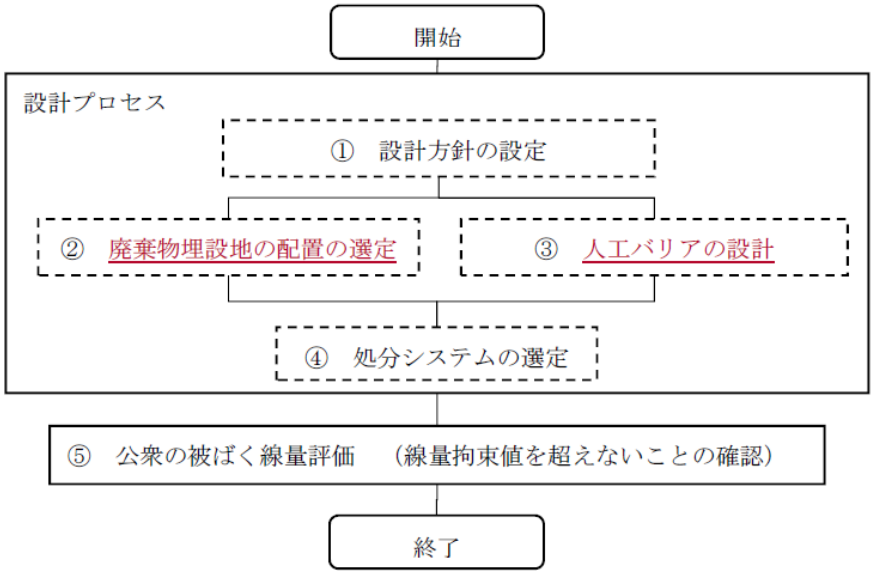


図 5.2-1 設計プロセス[7]

設計プロセスには、4 つの作業項目があり、ある設計方針に従って廃棄物埋設地の配置の選定と人工バリアの設計が行われる。さらに、それぞれの検討に基づき処分システムが選定される。処分システムの選定後に被ばく線量評価があることを踏まえると、処分システムの選定の段階で、複数の設計案が選ばれると考えられる。したがって、その前段階である廃棄物埋設地の配置の選定、並びに人工バリアの設計における設計方針が重要となる。同骨子案では、設計方針の設定について、以下のような項目に沿って作業を行うものとしている。

- 主要な放射性物質の選定
- 放射性物質の特性等を考慮した設計方針
  - ➢ 主要な放射性物質の分類

    主要な放射性物質が、放射能量、半減期、放射性廃棄物又は廃棄体内での存在状態、処分システム内における化学形態、人工バリア及び天然バリアへの収着性、人への被ばく経路等の特性に応じて分類されていることを確認する。

  - ➢ 人工バリア構成要素の機能と性能の提示

    主要な放射性物質の物理化学的な性質に応じて、これらの漏出及びや移行を抑制するための人工バリア構成要素ごとの機能及びその性能についての設計方針について、天然バリアの機能及びその性能との関係を含めて示されていることを確認する。

  - ➢ 人工バリア構成要素の機能及びその性能に関する目標の設定

    主要な放射性物質を人工バリア内にできる限りだけ閉じ込めるために、それらの放射性物質の物理化学的な性質に応じて人工バリア構成要素ごとに割り当てた機能及びその性能が整理され、それらの性能を特徴付ける主要な物理化学的特性と合わせて

示されていることを確認する。また、人工バリア構成要素ごとに割り当てた機能の性能について、定量的な目標が示されていることを確認する。

- 放射性物質の閉じ込め又は移行抑制に関連する機能が一つの機能に過度に依存しないこと

  設計方針において、一部の人工バリア構成要素の機能が劣化又は損傷した場合の人工バリアの性能を示し、人工バリアの性能が容易に低下しないこと、他の人工バリア構成要素による性能の低下を抑制するための代替の機能があること及びその機能が継続する期間について説明されていることを確認する。人工バリア構成要素のそれぞれが、廃棄物埋設地及びその周辺の状態の変化によって容易に劣化・損傷することのないよう抵抗性を持つことが示されていることを確認する。人工バリア構成要素のそれぞれが劣化・損傷を受けた場合においても、残存する性能が、初期の性能に対して著しく劣るものではないことが示されていることを確認する。一部の人工バリア構成要素の機能の性能が著しく低下した場合又は廃棄物埋設地の一部区画が劣化・損傷を受けた場合にあっても、他の人工バリア構成要素の機能によって人工バリアとしての性能が著しく低下しないこと及び影響を受ける廃棄物埋設地の空間的な範囲が限定されていることが示されていることを確認する。この際、ある人工バリア構成要素の機能の性能が著しく低下したことによる、その周囲の地下水流速、地球化学環境等の状態の変化が考慮されていることを確認する。

- 複数の設計方針の設定

  天然バリアの特性も考え合わせて、低拡散層の機能に重点を置いた設計方針、低透水層の機能に重点を置いた設計方針等、人工バリア構成要素へ割り当てる機能又はその性能の重み付けが異なる複数の設計方針を設定して検討してもよい。

上記を踏まえると、複数の設計案を絞り込むためには、複数の設計方針について検討することが肝要であると考えられる。また、複数の設計案は、対象核種や周辺環境等を考慮した複数の設計方針に基づきそれを具現化したものであると考えられ、設計方針は、処分概念を満足するための考え方を詳細化したものである。このような段階的な検討のイメージを例と共に図 5.2-2 に示す。

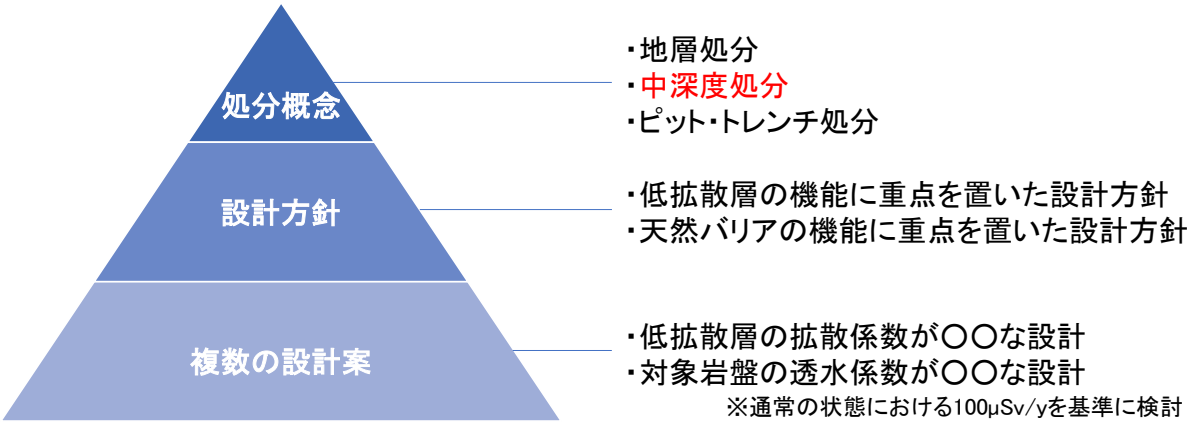


図 5.2-2　段階的な検討のイメージ

設計方針の検討にあたっては、人工バリアの構成要素とその機能を提示した上で、それらの機能が満足するか否かを検討する必要がある。人工バリアの構成要素と機能の設定に関する既往検討[8][9]では、主たる人工バリアを低透水層、低拡散層、コンクリートピット及び内部充てん材とし、それと必要とされる安全機能とを対応付けていることから、バリアコンセプトとでもいうべき人工バリア構成は図 5.1-1 に示す 1 種類のみとなる。本検討では、天然バリア性能など環境条件の違いにより、合理的な人工バリア構成自体が異なる可能性がありえることを念頭に置き、人工バリアの安全機能と構成要素の関係を再整理することとする。

要求機能については、閉鎖措置前と閉鎖措置後に大別する。更に、閉鎖措置前と閉鎖措置後という段階別に、日本原子力学会標準、土木学会、包括的技術報告書などの既往検討成果を参考に、要求される機能を細分化する。ここで、閉鎖措置後については、放射性物質の移行抑制や隔離という長期安全性に係るものが要求機能の主たるものとなるのに対して、閉鎖措置前については、放射性物質の漏洩や放出といった機能に加えて、建設・操業に係る安定性や安全性が重要となることに留意する。

長期安全性に着目した要求機能の再整理に当たっては、複数の感度解析を通じて成立条件を探りつつ進める。例えば、中深度処分施設の人工バリアに求められる性能としての透水係数が明らかとなった際に、それを複数の人工バリアに分離することは困難であることから、まず単一の人工バリアにて感度解析を実施し、単一の人工バリアでは要求性能（線量）を満たさない範囲に対して別の人工バリアを追加した多重の人工バリアを対象にする。また、材料の劣化等を念頭に置いた人工バリア性能の時間変化を考慮した感度解析も併せて実施する。

このようなバリア構成導出の考え方を、図 5.2-3 に示す。また、本節の設計プロセスにおける人工バリアの設計等に係る選択肢に関する検討フローを、図 5.2-4 に示す。

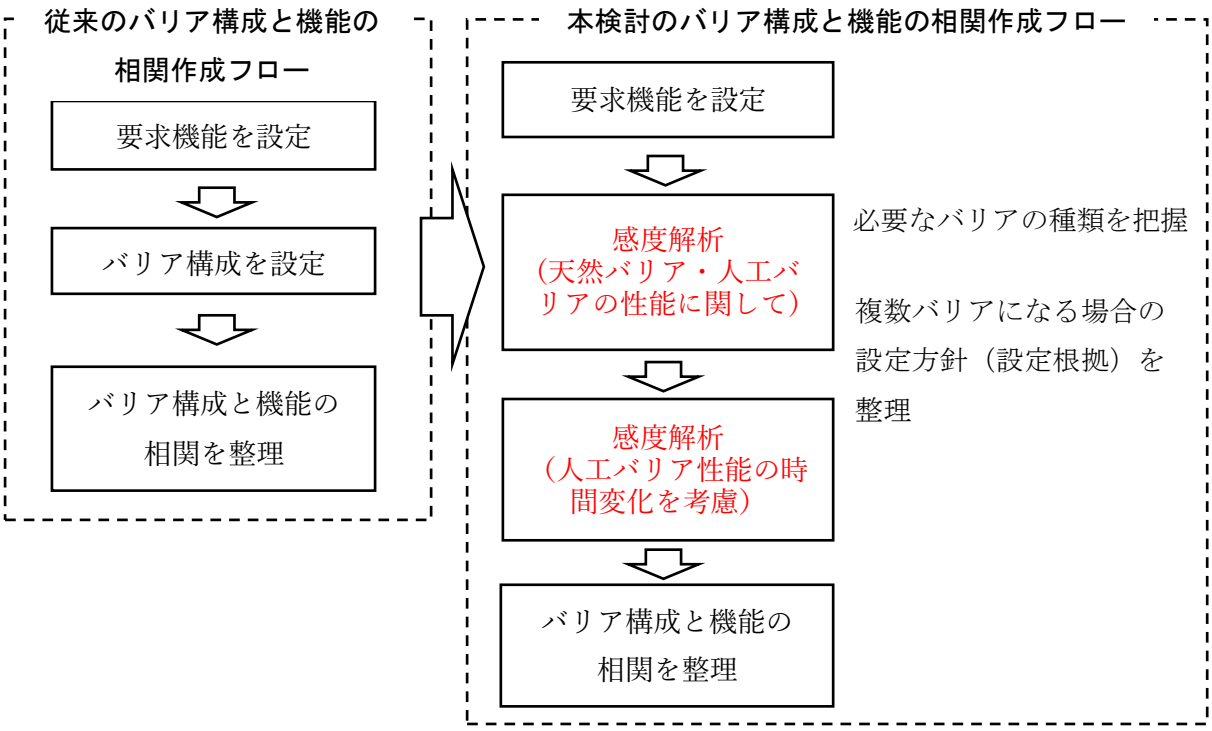


図 5.2-3　バリア構成導出の考え方

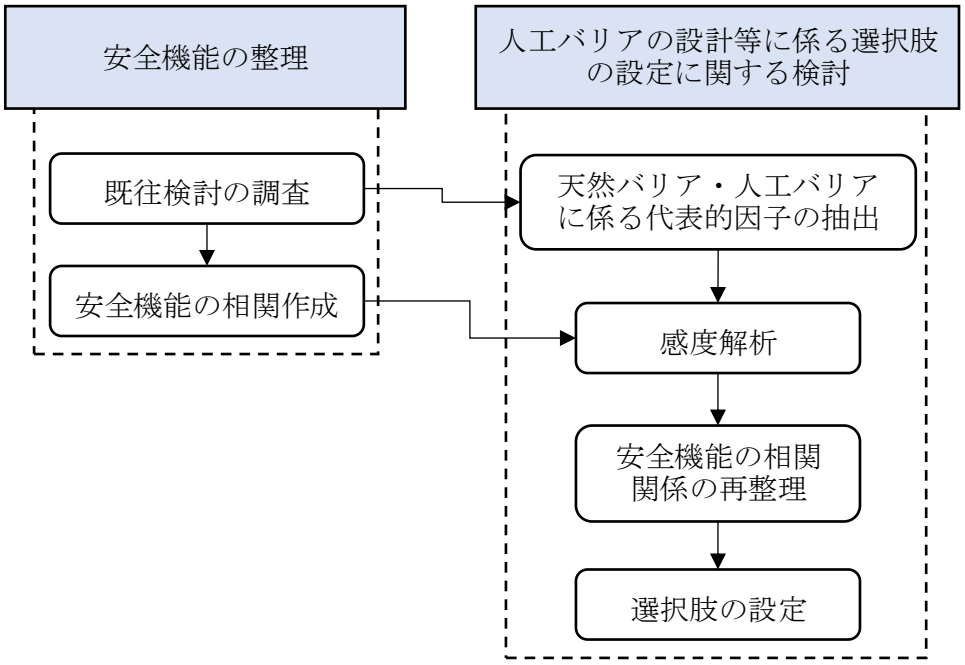


図 5.2-4　設計プロセスにおける人工バリアの設計等に係る選択肢に関する検討フロー

5.2.3 安全機能の整理

(1) 既往検討の調査

安全機能に関して、日本原子力学会標準[8]、土木学会[9]及び包括的技術報告書における定義とその内容等を再確認した。その際、事業段階に応じて安全機能がどのように整理されているのか、それぞれの安全機能がどの構成要素（天然バリア／人工バリア／廃棄体容器）と対応付けられているのかに着目した。

(2) 安全機能の相関作成

既往検討の調査を受けて、安全機能と構成要素の関係を整理した。安全機能は、閉鎖措置前と閉鎖措置後に大別した上で、機能の項目とその内容を整理した。更に、それぞれの機能とそれを担保する主たる構成要素を対応付けた。整理した結果を、表 5.2-1 に示す。

表 5.2-1 安全機能と構成要素の関係

段階	安全機能		構成要素
閉鎖措置前	閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏洩の防止	廃棄体容器 人工バリア
		施設外への放射性物質の放出の防止	その他施設
	遮蔽	放射線の遮蔽	廃棄体容器 人工バリア
	操業安全	空間・力学的安定性の確保	人工バリア
閉鎖措置後	移行抑制	放射性物質の収着（核種収着性）	人工バリア 天然バリア
		拡散による移行を抑制（低拡散性）	人工バリア 天然バリア
		処分施設を通過する地下水流量を抑制（低透水性）	人工バリア 天然バリア
		溶解抑制	天然バリア
		コロイド移行の抑制	人工バリア
		放射性物質の分散	天然バリア
		卓越した移行経路形成の防止	人工バリア
	溶出抑制	溶出の抑制	廃棄体容器
		廃棄体と地下水の接触の防止	廃棄体容器
	離隔	離隔距離の確保	天然バリア
		容易な人間侵入の抑制	天然バリア

5.2.4　人工バリアの設計等に係る選択肢の設定に関する検討

(1) 検討方法

閉鎖措置前の安全機能の中で特徴的なものとして、遮蔽と操業安全が挙げられる。中深度処分の対象となる廃棄体は、表面線量が高く、廃棄体の運搬・定置は遠隔操作が必要であると見込まれている。廃棄体定置後の人工バリアの施工においては遮蔽物の存在は非常に有効であること、また、廃棄体は定置後、内部充てん材が施工されるまである程度の期間を有するため、地震などへの備えとして廃棄体の転倒・落下対策が必要であることから、鉄筋コンクリート造のコンクリートピットを人工バリアの一つとして設けることが望ましいと考えられる。

閉鎖措置後については、要求されている安全機能のうち、特に移行抑制に着目し、長期安全性の観点から、自然事象を対象とした安全評価に係る感度解析結果を踏まえて、人工バリアの設計等に係る選択肢をどのように設定するかについて、手順を示すことで一つの考え方を提示することとする。

中深度処分の規制基準の中で、廃棄物埋設地の安全設計に関する要求にある設計プロセスでは、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が求められている。その際、設計の策定では、公衆の受ける線量を十分に低減できることとして、通常の状態で保守的にパラメータを設定した状態での自然事象シナリオによる公衆の受ける線量が、おおむねね 100 マイクロシーベルト／年を超えないこととされている（表 5.2-2 参照)。

表 5.2-2　中深度処分における安全確保に求められる性能（規制期間終了後）

	評価シナリオ	線量基準
自然事象	厳しい状態（通常の状態で保守的にパラメータを設定した状態に、バリアの一部機能喪失を重畳)	300μSv/年
	通常の状態で保守的にパラメータを設定した状態	100μSv/年
人為事象	ボーリングシナリオ	20mSv/年

人工バリアの設計が要件を満足するかどうか、このエントリー条件の確認に資するために、広範囲にパラメータを振った感度解析を行う。感度解析に先立ち、天然バリア及び人工バリアに係る代表的因子の抽出を行う。

感度解析結果を整理することにより、天然バリアに係る条件に応じて、エントリー条件を満たす人工バリアの条件が導出可能となることから、表 5.2-1 に示した構成要素を次の八つの領域に分離した形で安全機能と構成要素の関係を再整理する。

- 廃棄体容器
- 岩盤
- 区画内充填材
- コンクリートピット
- 低拡散層
- 低透水層
- 空洞

・　空洞内充填材

(2) 天然バリア、人工バリアに係る代表的因子の抽出

1) 人工バリアに係る代表的因子の抽出

表 5.2-1 より、人工バリアに要求される機能のうち長期安全性に関するものは以下のとおりとなる。

・　放射性物質の収着（核種収着性）
・　拡散による移行を抑制（低拡散性）
・　処分施設を通過する地下水流量を抑制（低透水性）
・　コロイド移行の抑制
・　卓越した移行経路形成の防止

これまでに検討されてきた長期安全性に対する機能を有する人工バリアの構成要素の候補としては、中深度処分相当では、低拡散層及び低透水層、地層処分相当では、緩衝材が挙げられる。このうち、低透水層及び緩衝材は、いずれもベントナイトを主材料としており、本検討においても、ベントナイト系材料を人工バリアの材料として想定した。また、低拡散層についてはセメント系材料を想定した。

土木学会[9]では、核種収着性は低拡散層が有するべき機能としており、表 5.2-3 のように整理されている。

表 5.2-3　核種収着性における重要度の高いパラメータ　[9]に追記

重要度の高いパラメータ	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項目
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
	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

重要度の高いパラメータとして、分配係数及び収着体積が示されている。分配係数は対象とする核種によって異なり、すべての核種を対象とすると他因子との組み合わせにより、パラメータが膨大になる。本検討の目的は、移行抑制の機能を十分に備えた設計の方向性を示すことであるため、フィージビリティ・スタディ的位置づけとして、代表的な核種を選定する。

次に、同じく土木学会[9]では、低拡散性についても低拡散層が有するべき機能としており、表 5.2-4 のように整理されている。重要度の高いパラメータとして、実行拡散係数、ひび割

れ幅の開口面積及び厚さが挙げられている。

表 5.2-4　低拡散性における重要度の高いパラメータ　[9]に追記

重要度の高いパラメータ	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項目
実効拡散係数	基質部（マトリックス）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
ひび割れの開口面積	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

低透水性について、土木学会[9]では、低透水性は低透水層及び空洞内充てん材が有するべき機能としており、表 5.2-5 のように整理されている。重要度の高いパラメータとして、透水係数、厚さが挙げられている。ひび割れの開口面積は、セメント系材料を想定した場合のパラメータとして設定されており、拡散による移行抑制機能は、セメント系材料の健全部の実行拡散係数とひび割れや打継目の劣化によるつながりを持った空隙部などの劣化部の割合を設定して評価されるとしている（庭瀬ほか、2006）。低透水性に関するパラメータは、ひび割れ開口面積を考慮した上で設定する。

表 5.2-5　低透水性における重要度の高いパラメータ　[9]に追記

重要度の高いパラメータ	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項目
透水係数	モンモリロナイト層間イオン種	・交換性陽イオンの変化	・鉱物組成（層間陽イオン組成） ・密度（かさ密度）
	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

コロイド移行の抑制について、包括的技術報告書では、緩衝材が有すべき機能として整理されている。コロイド移行の抑制については、表 5.2-6 に示すとおり、コロイドろ過能、自己シール性、自己修復性で構成されている。

表 5.2-6　低透水性における重要度の高いパラメータ

設計因子	要求事項	緩衝材の設計要件
閉鎖後長期の安全性（緩衝材）	放射性物質の移行抑制 ・放射性物質の移流による移行の抑制 ・コロイド移行の抑制	低透水性
		コロイドろ過能
		自己シール性
		自己修復性
閉鎖後長期の安全性（オーバーパック）	放射性物質の溶出の抑制 ・廃棄体と地下水の接触の防止	微生物影響の防止
		物理的緩衝性
工学的成立性	・実現可能な建設・操業・閉鎖の作業工程・方法 ・実証された技術の適用	製作施工性

コロイドろ過能は、淡水条件下において、ベントナイト及びケイ砂混合土の有効粘土密度が 0.8Mg/m^3 であれば、その機能を発揮することが透過試験により示されている。第一段階の感度解析では、人工バリアは単一層で構成されるものとし、使用材料を特定せず行うことから代表的因子としては設定しないが、材料の実現性の観点から、有効粘土密度が 0.8Mg/m^3 以上であることをパラメータ設定時の条件として整理する。

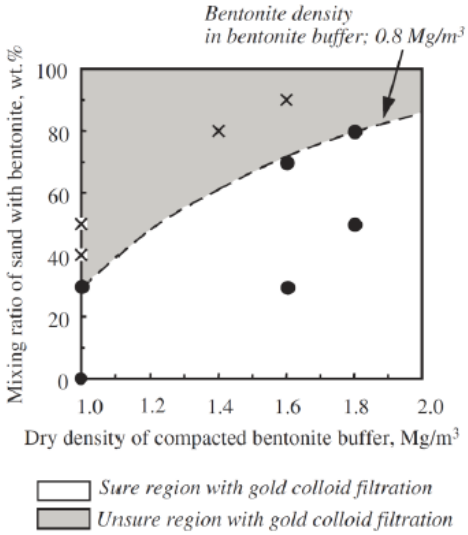


図 5.2-5　コロイドろ過能を発揮する緩衝材密度とケイ砂混合率の関係

自己シール性とは、緩衝材の施工時に緩衝材と孔壁及びオーバーパック間にできる隙間を、緩衝材の膨潤により閉塞する性能のことである。自己シール性とはすなわちベントナイトの膨潤特性を示し、これは初期有効粘土密度、地下水に含まれる塩分濃度、ベントナイト材料の Ca 型化や緩衝材厚さ等が重要な指標となる。包括的技術報告書には、自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度と緩衝材厚さの関係が示されている。淡水条件（グラフ中の青い曲線）に着目し、コロイドろ過能を発揮するための有効粘土密度 0.8Mg/m³ 以上を考慮すると、緩衝材厚さは 100mm 以上必要であることが分かる。したがって、ベントナイト系材料を使用した人工バリアを設定する際は、その部材厚を 100mm 以上とすることをパラメータの下限として整理する。

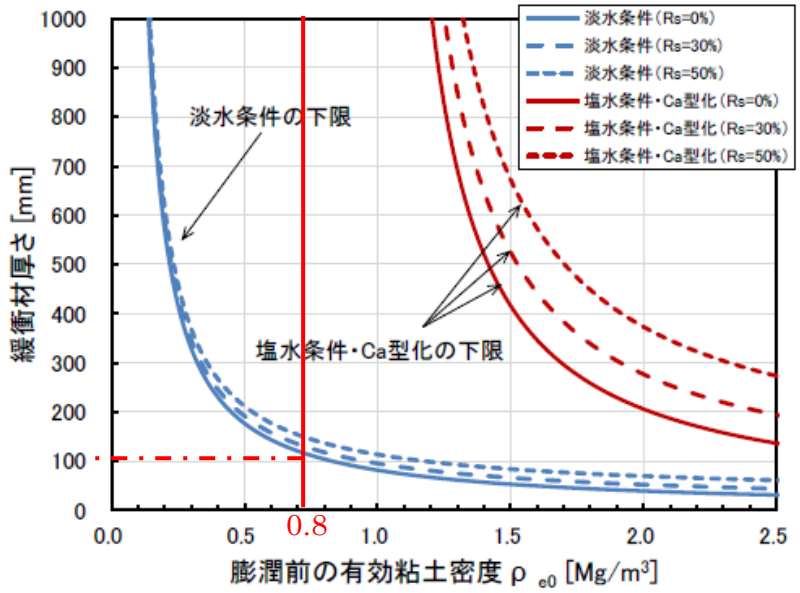


図 5.2-6　自己シール性を確保するために必要な有効粘土密度と緩衝材厚さの関係
（包括的技術報告書付属書 4-15 に追記）

包括的技術報告書では、オーバーパックの還元腐食によって発生するガスの蓄積で、緩衝材にガスの透気経路が形成された際の亀裂閉塞性能を自己修復性としている。NRA 技術ノートより、中深度処分で使用される廃棄体においても、放射線分解や金属の反応等によって水素ガスを発生する可能性のある廃棄物については、廃棄体容器内のガス圧力の上昇を防ぐため、密封構造は求めないものの、埋設の終了までの期間中において、発生するガスによって廃棄体の機能を損なうおそれがないよう措置される必要があるとしている。措置の方法として、廃棄体にフィルターを装着する、ガス発生を抑制する成分を添加するなどが考えられると述べられており、人工バリアの措置、あるいは人工バリアへのガスの影響については言及されていない。このように、ガス発生に伴う人工バリアへの対策は、廃棄体が担う考え方もあるが、廃棄体コロイドの移行を抑制するにあたっては、人工バリアが自己修復性を有することが望ましいと考えられる。包括的技術報告書では、ガス透過前後のベントナイト混合土透水性の変化について記載があり、有効粘土密度 0.64Mg/m³ を境に透水係数が増加することが確認されている。試験条件（例えば地下水塩分濃度、ベントナイトの種類）によっては、結果が異なると考えられるが、ここでは、パラメータ設定の条件として、有効粘土密度 0.64Mg/m³ を考慮することとする。

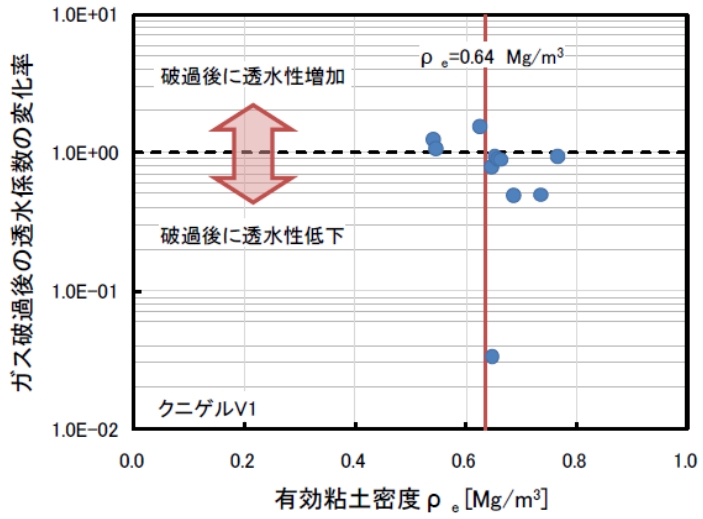


図 5.2-7　ガス透過後の透水係数の変化率と有効粘土密度の関係

人工バリアに要求される機能のうち、卓越した移行経路形成の防止について、土木学会では、埋め戻し材に要求される機能として整理されている。ここでの埋め戻し材とは、処分坑道より先の主要坑道等を埋め戻す部材を示している。主要坑道より先は、処分場のレイアウト検討で取り扱うこととして、今後の検討対象とする。

以上より、人工バリアの代表的因子及びパラメータ設定に資する条件を表 5.2-7 及び表 5.2-8 に整理する。

表 5.2-7　人工バリアの機能及び代表的因子

機能	代表的因子
核種収着性	分配係数
	体積（単位奥行き当たりとして厚さに換算）
低拡散性	実行拡散係数
	開口ひび割れ面積比
	厚さ
低透水性	透水係数
	厚さ

表 5.2-8　人工バリアの代表的因子に係るパラメータ設定に資する条件

機能	条件
コロイド移行抑制	
コロイドろ過能	有効粘土密度 0.8Mg/m^3 以上
自己シール性	部材厚 100mm 以上
自己修復性	有効粘土密度 0.64Mg/m^3 以上

2）天然バリアに係る代表的因子の抽出

表 5.2-1 より、天然バリアに要求される機能のうち長期安全性に関するものは以下のとおりである。

- 放射性物質の収着（核種収着性）
- 拡散による移行を抑制（低拡散性）
- 処分施設を通過する地下水流量を抑制（低透水性）
- 溶解抑制
- 放射性物質の分散
- 離隔距離の確保
- 容易な人間侵入の抑制

核種収着性、低拡散性及び低透水層は、人工バリアと同様の考え方とする。また、離隔距離の確保及び容易な人間侵入の抑制は、処分坑道のみならず主要坑道等を含めたレイアウト検討が必要になるため、ここでは割愛する。溶解抑制は、地下深部の地下水流れが極めて遅いこと、酸化還元電位が低いことから期待される性能である。酸化還元電位によっては、廃棄体容器を含む金属廃棄物等から放射性核種が溶出する可能性がある。想定される廃棄体の特性を考慮し、ここでは、溶出挙動を考慮しない。

天然バリアにおける放射性物質の分散について、包括的技術報告付属書 6-4 の NUMOFEP（FEP 番号：F4.3.2.2）によると、「水の速度および経路の変動により分散、すなわち、移流による輸送からの汚染の空間的な広がりが生じる。」と示されている。このうち、地下水の見かけの流速（ダルシー流速）は、透水係数と動水勾配で求めることができことから、地下水流速を代表的因子として整理する。

以上より、天然バリアの機能と代表的因子について表 5.2-9 にまとめる。

表 5.2-9　天然バリアの機能及び代表的因子

機能	代表的因子
核種収着性	分配係数
	体積（単位奥行き当たりとして厚さに換算）
低拡散性	実行拡散係数
	厚さ
低透水性	透水係数
	厚さ
放射性物質の分散	地下水流速

(3) 感度解析

1) 感度解析におけるパラメータ設定と解析ケース

上記(2) で設定した人工バリア及び天然バリアの代表的因子に基づき、感度解析に資するパラメータを設定する。パラメータ設定にあたっては、原子力学会標準に加え、前年度の検討成果を参考にする。

原子力学会標準[8]では、中深度処分相当の処分システムの状態変化を考慮した核種移行解析が行われている。線量評価の対象とする処分システムの状態変化について、「可能性の高い状態」並びに「可能性のある変動状態」に対するパラメータの設定と、経時的な変化を示している（表 5.2-10、表 5.2-11 参照）。可能性のある変動状態とは、可能性が低く不確実性を考慮した状態であり、保守的な値が設定されている。

表 5.2-10　可能性の高い状態における処分システムの設定パラメータ

経過時間 [a] / パラメータ	初期	1E+4	2.5E+4	4E+4	1E+5	2.5E+5	4E+5	1E+6
施設近傍以外の岩盤移行距離（m）	300	→	→	→	→	150	→ 30	30
施設近傍岩盤透水係数（m/s）	1E-08	→	→	→	→	→	1E-07	1E-07
地下水実流速（m/a）	0.1	→	→	→	→	→	1.0	1.0
ベントナイト系材料層透水係数（m/s）	3E-13	→ 1E-12	→	→	→ 3E-12	-	-	3E-12
施設浸入水量（m^3/a/100m）	0.018	→ 0.06	→	→	→ 0.18	-	-	0.18
低拡散層拡散係数（m^2/s）	1E-12	→ 3E-12	→	→	→ 2E-11	-	-	2E-11

表 5.2-11　可能性のある変動状態における処分システムの設定パラメータ

経過時間 [a] / パラメータ	初期	1E+4	2.5E+4	4E+4	1E+5	2.5E+5	4E+5	1E+6
施設近傍以外の岩盤移行距離（m）	300		150	30				30
施設近傍岩盤透水係数（m/s）	1E-08			1E-07				1E-07
地下水実流速（m/a）	0.1			1.0				1.0
ベントナイト系材料層透水係数（m/s）	3E-13	3E-11						3E-11
施設浸入水量（m^3/a/100m）	0.018	1.8						1.8
低拡散層拡散係数（m^2/s）	1E-12	2E-11						2E-11

以上を参考に、本感度解析では、原子力学会標準に基づく、最も可能性が高い状態を想定したケースを基本ケース①とし、この中でさまざまなパラメータに関する感度を評価する。

また、天然バリアの性能の高低という条件の違いによる影響を把握するために、基本ケースに比べて天然バリア性能が高い場合を想定してケース②を、天然バリア性能が低い場合を想定してケース③をそれぞれ設定する。このケース②及びケース③では、人工バリアの拡散性能が優れたケースと劣ったケースをサブケースとし、それぞれに対して人工バリアの透水係数による感度を確認する。ケース①～ケース③の感度解析では、人工バリアとしては単一バリアを想定したモデルにて行う。

更に、人工バリアの劣化等を念頭に置き、基本ケース①に対して低拡散バリアの時間変化を考慮したケースをケース④とする。この際、人工バリアのモデルは、低拡散層のみのケースと、セメント系材料とベントナイト系材料による多重バリアを想定した低拡散層＋低透水層のケースを考慮する。

感度解析ケース一覧を表 5.2-12 に示す。また、ケース①～ケース③の感度解析に用いるパラメータを表 5.2-13～表 5.2-15 に、ケース④における時間変化に係る設定を表 5.2-16 に示す。

表 5.2-12　感度解析ケース一覧

感度解析	内　容
ケース①	最も可能性が高い状態を想定したケース（基本ケース）
ケース②	ケース①に比べて天然バリア性能が高い場合を想定したケース
ケース③	ケース①に比べて天然バリア性能が低い場合を想定したケース
ケース④	ケース①に対して低拡散バリアの時間変化を考慮したケース

表 5.2-13　感度解析ケース①のパラメータ

	パラメータ											
	天然バリア								人工バリア			
機能	移行距離		核種収着性	低拡散性		低透水性		放射性物質の分散	部材厚（cm）	核種収着性	低拡散性	低透水性
代表的因子	領域①（m）	領域②（m）	分配係数（m^3/kg）	分散長（m）		透水係数（m/s）		地下水流速		分配係数（m^3/kg）	拡散係数（m^2/s）	透水係数（m/s）
			領域①②	領域①	領域②	領域①	領域②	領域①②				
ケース① 最も可能性が高い状態を想定したケース	100	300	対象核種ごと	10	移行距離1/10	1E-8	1E-05	透水係数に動水勾配（1/100）を乗じる	160	対象核種ごと	1.00E-12	3.00E-13
パラメータ	10 50 100	30～300	対象核種ごと	10	移行距離1/10	1E-6～1E-10	1E-05	透水係数に動水勾配（1/100）を乗じる	0～300	対象核種ごと	2E-9～1E-12	1E-5～3E-13
備考							固定		昨年度検討より、低透水層100cm、低拡散層 60cm を想定	拡散係数のパラスタ時はセメント材料、透水係数のパラスタ時はベントナイト材料、それ以外は保守的な値を使う		上限値は砂相当の値を設定

注記）解析は、一つのパラメータのみ変更してそれぞれ実施。例えば、天然バリア領域①の移行距離を変更する場合は、他パラメータはすべて基本ケースの値に固定。

表 5.2-14　感度解析ケース②のパラメータ

	パラメータ											
	天然バリア								人工バリア			
機能	移行距離		核種収着性	低拡散性		低透水性		放射性物質の分散	部材厚（cm）	核種収着性	低拡散性	低透水性
代表的因子	領域①（m）	領域②（m）	分配係数（m^3/kg）	実効拡散係数（m^2/s）		透水係数（m/s）		地下水流速		分配係数（m^3/kg）	拡散係数（m^2/s）	透水係数（m/s）
			領域①②	領域①	領域②	領域①	領域②	領域①②				
ケース②-1 天然バリアの性能が高く、人工バリアの拡散性能が優れたケース	100	300	対象核種ごと	10	移行距離1/10	1E-10	1E-09	透水係数に動水勾配（1/100）を乗じる	100	対象核種ごと	1.00E-12	1E-5～3E-13
ケース②-2 天然バリアの性能が高く、人工バリアの拡散性能が劣ったケース	100	300	対象核種ごと	10	移行距離1/10	1E-10	1E-09	透水係数に動水勾配（1/100）を乗じる	100	対象核種ごと	2.00E-09	1E-5～3E-13
備考	固定	固定				固定	領域①より一桁増		固定	拡散係数のパラスタ時はセメント材料、透水係数のパラスタ時はベントナイト材料、それ以外は保守的な値を使う	固定	上限値は砂相当の値を設定

注記）パラスタは、人工バリアの透水係数のみ。

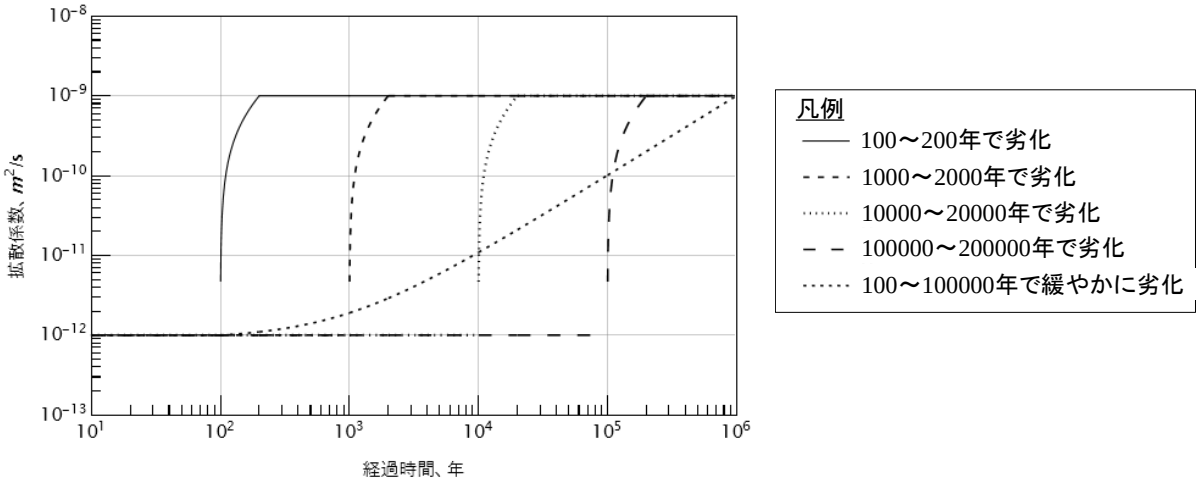
表 5.2-15　感度解析ケース③のパラメータ

	パラメータ											
	天然バリア								人工バリア			
機能	移行距離		核種収着性	低拡散性		低透水性		放射性物質の分散	部材厚（cm）	核種収着性	低拡散性	低透水性
代表的因子	領域①（m）	領域②（m）	分配係数（m^3/kg）	実効拡散係数（m^2/s）		透水係数（m/s）		地下水流速		分配係数（m^3/kg）	拡散係数（m^2/s）	透水係数（m/s）
			領域①②	領域①	領域②	領域①	領域②	領域①②				
ケース③-1 天然バリアの性能が低く、人工バリアの拡散性能が高いケース	100	300	対象核種ごと	10	移行距離1/10	1E-06	1E-05	透水係数に動水勾配（1/100）を乗じる	100	対象核種ごと	1.00E-12	1E-5～3E-13
ケース③-2 天然バリアの性能が低く、人工バリアの拡散性能が低いケース	100	300	対象核種ごと	10	移行距離1/10	1E-06	1E-05	透水係数に動水勾配（1/100）を乗じる	100	対象核種ごと	2.00E-09	1E-5～3E-13
備考	固定	固定				固定	領域①より一桁増		固定	拡散係数のパラスタ時はセメント材料、透水係数のパラスタ時はベントナイト材料、それ以外は保守的な値を使う	固定	上限値は砂相当の値を設定

注記）パラスタは、人工バリアの透水係数のみ。

表 5.2-16　感度解析ケース④のパラメータ

	領域①の透水係数（m/s）	低拡散層の拡散係数（m²/s）	低拡散層の透水係数（m/s）	低透水層の拡散係数（m²/s）	低透水層の透水係数（m/s）
低拡散層のみ	5 ケース 1E-6～1E-10	1E-12⇒1E-9 （リニアに変化） 下図参照	1E-6	—	—
低拡散層 ＋低透水層				1E-09	3E-13



核種の移行経路については、原子力学会標準を参考に図 5.2-8 に示すものを想定する。処分場を建設する母岩は、処分場の距離によって二つの領域に分けられる。領域①は処分場近傍岩盤であり、領域②は処分場から離れた不確実性が大きいと考えられる岩盤である。隆起・侵食により移行距離が変化するようなことを考慮する必要があるため、領域②におけるパラメータは保守的な値を設定する。

なお、その他の基本的な解析条件（解析モデル等）については、前年度の検討と同様とした。

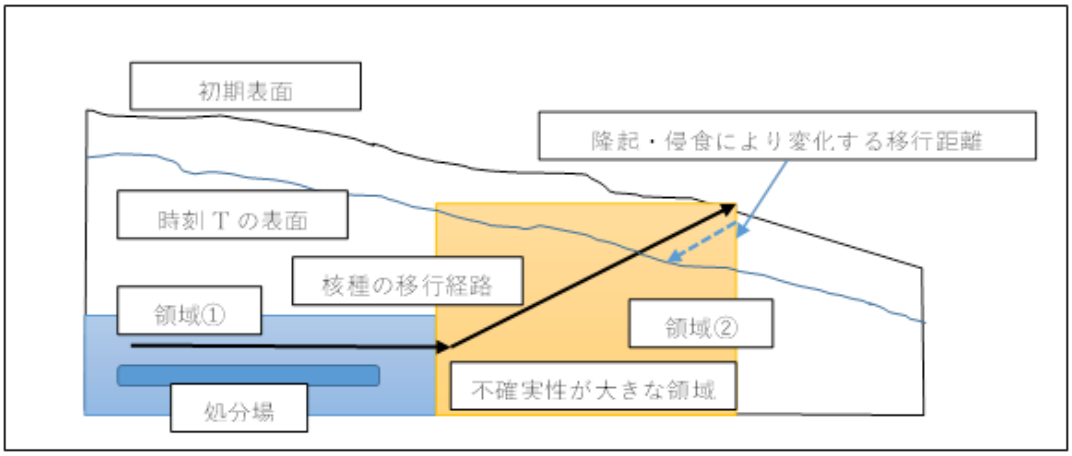


図 5.2-8　核種の移行経路の考え方

2）感度解析結果

ケース①に関する感度解析の中で特徴的な傾向が認められた結果を、図 5.2-9～図 5.2-13 に示す。総じて、被ばく線量に影響が大きい因子として、領域①の移行距離、領域①の透水係数が挙げられる。それに対して、領域②の移行距離が被ばく線量に及ぼす影響は小さかった。

図 5.2-10 から、天然バリアの透水係数が 1×10^{-7}m/s 以上の場合には目安となる線量値を超えてしまう。したがって、透水性の低い天然バリアの選択が必要であることがわかる。図 5.2-11 から、人工バリアの透水係数は線量に影響を及ぼすことがわかるが、ケース①で前提とした天然バリア性能の条件の下、今回設定した人工バリア性能に係るパラメータの範囲では、いずれも線量は 100μSv/y を下回っている。低拡散層か低透水層のいずれか一方を人工バリアとした場合には、前者の方が線量低減に効果的であるという傾向も認められた。図 5.2-13 から、人工バリアの厚さが線量に及ぼす影響を見ることができるが、ある厚さで線量の低減効果は頭打ちになっている。

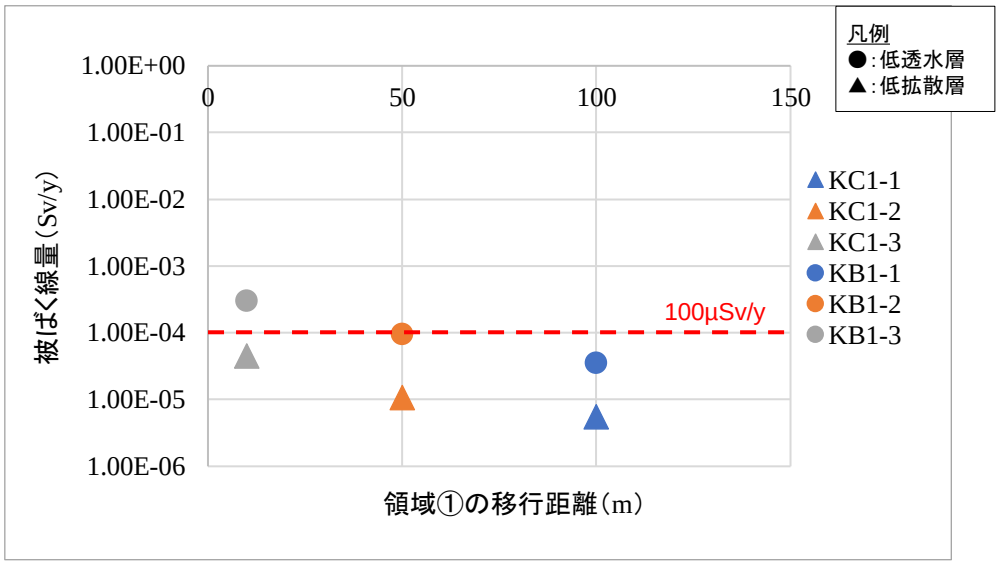


図 5.2-9　領域①の移行距離における感度解析結果（ケース①）

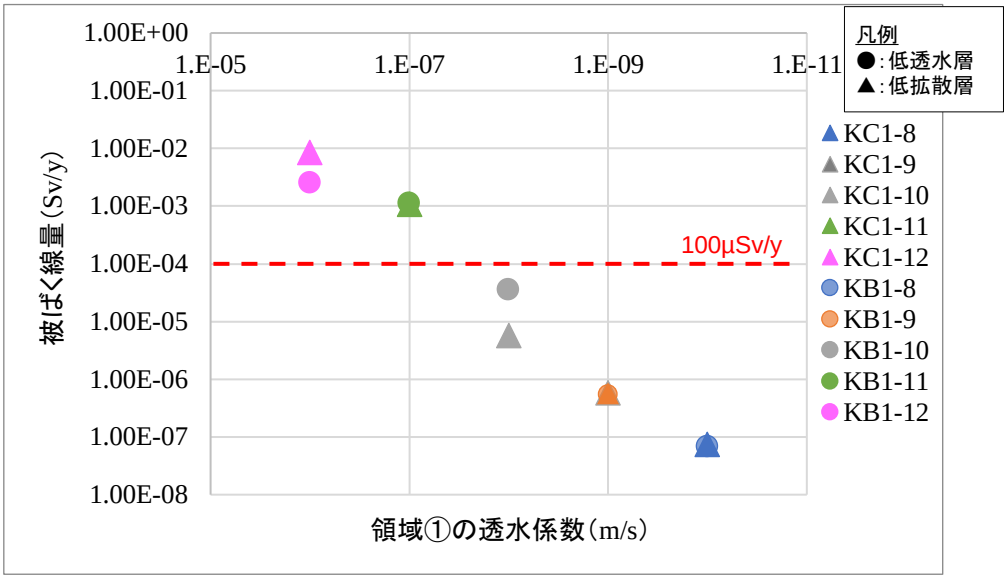


図 5.2-10　領域①の透水係数における感度解析結果（ケース①）

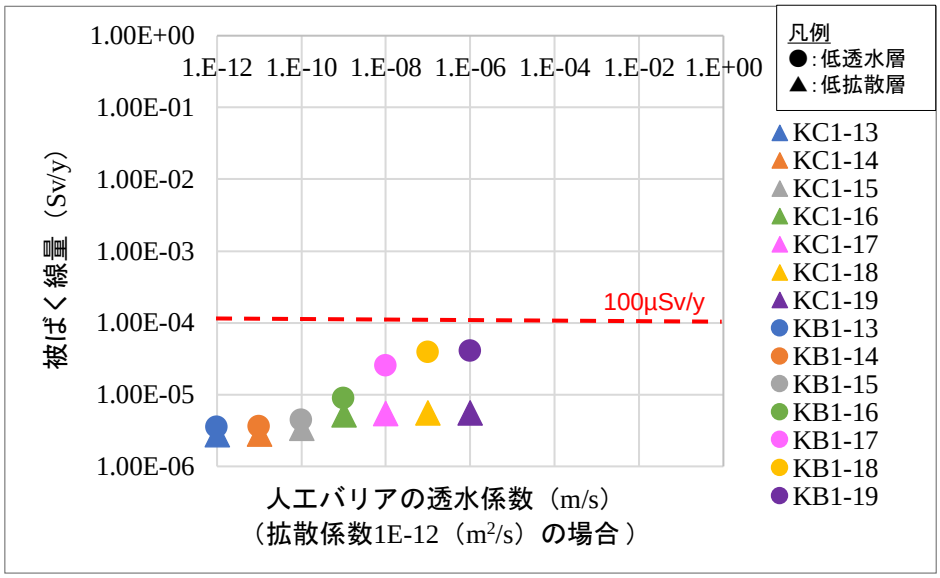


図 5.2-11　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-12（m^2/s））における感度解析結果（ケース①）

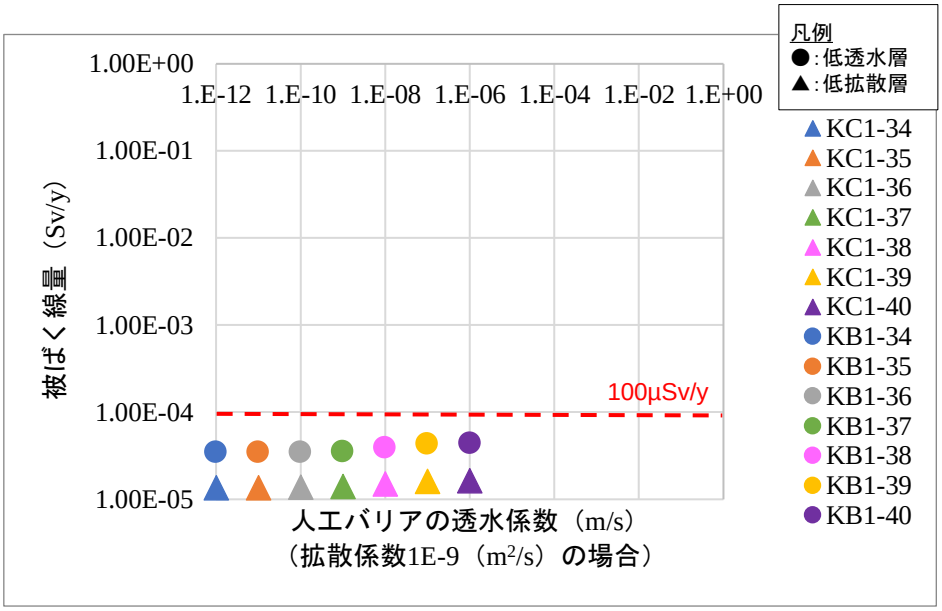


図 5.2-12　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-9（m^2/s））における感度解析結果（ケース①）

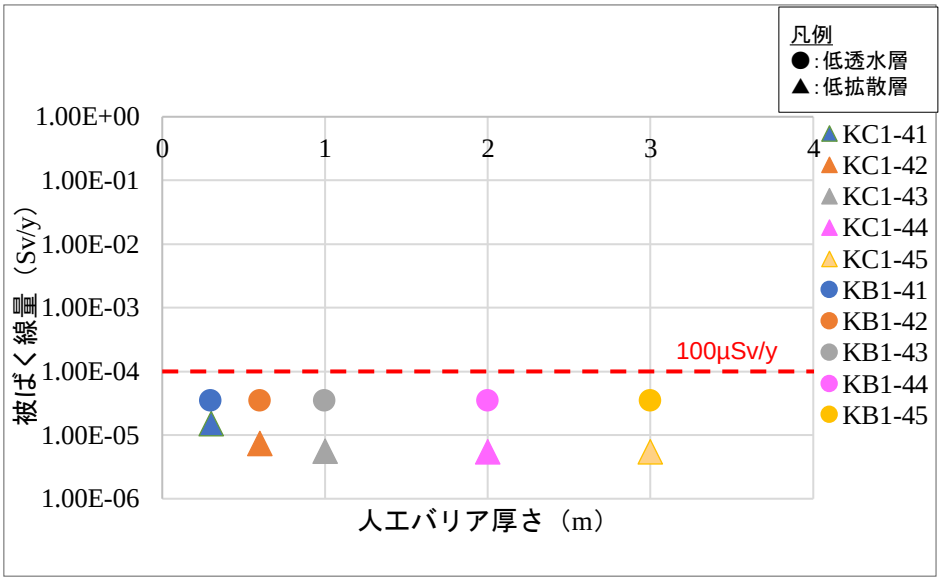


図 5.2-13　人工バリアの厚さにおける感度解析結果（ケース①）

ケース②に関する感度解析の中で特徴的な傾向が認められた結果を、図 5.2-14～図 5.2-18 に、ケース③に関する感度解析の中で特徴的な傾向が認められた結果を、図 5.2-19～図 5.2-23 にそれぞれ示す。

当然のことながら、ケース①に比べて天然バリア性能が高い場合を想定したケース②の線量は、ケース①に比べて天然バリア性能が低い場合を想定したケース③に比べて全体的に低いものとなっている。ケース②では、大半のケースが目安となる線量値を大きく下回っており、人工バリアにそれほど負荷をかけない設計が可能であるのに対して、ケース③では、目安となる線量値を満たさないケースも多く、それを回避するためには高い人工バリア性能を確保することが必要となる。その場合、図 5.2-21 から、目安となる線量値を下回るためには単一の人工バリアを想定するのであれば透水係数が 10^{-10}m/s オーダー以下（拡散係数が 1×10^{-12}m²/s の場合）の優れた人工バリアが必要なことがわかる。

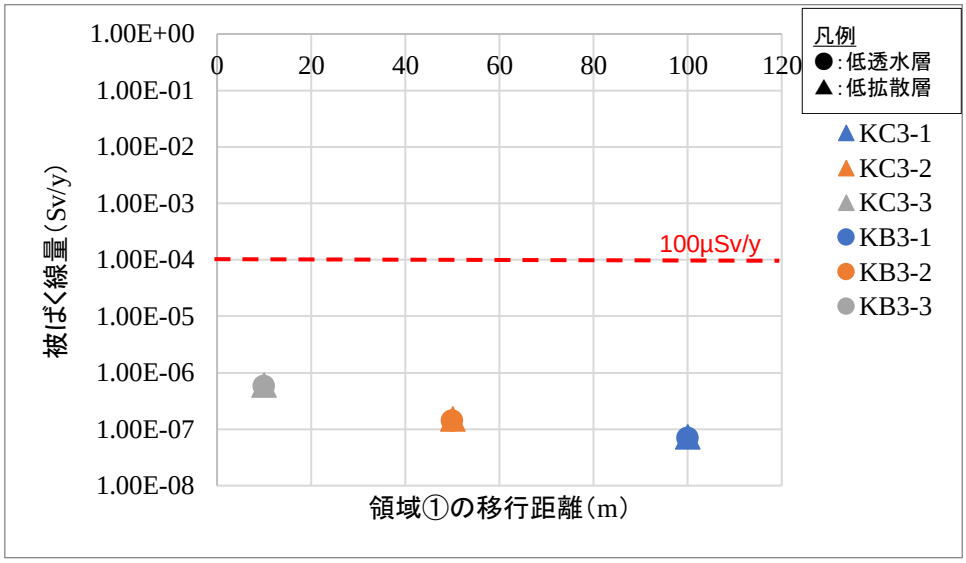


図 5.2-14　領域①の移行距離における感度解析結果（ケース②）

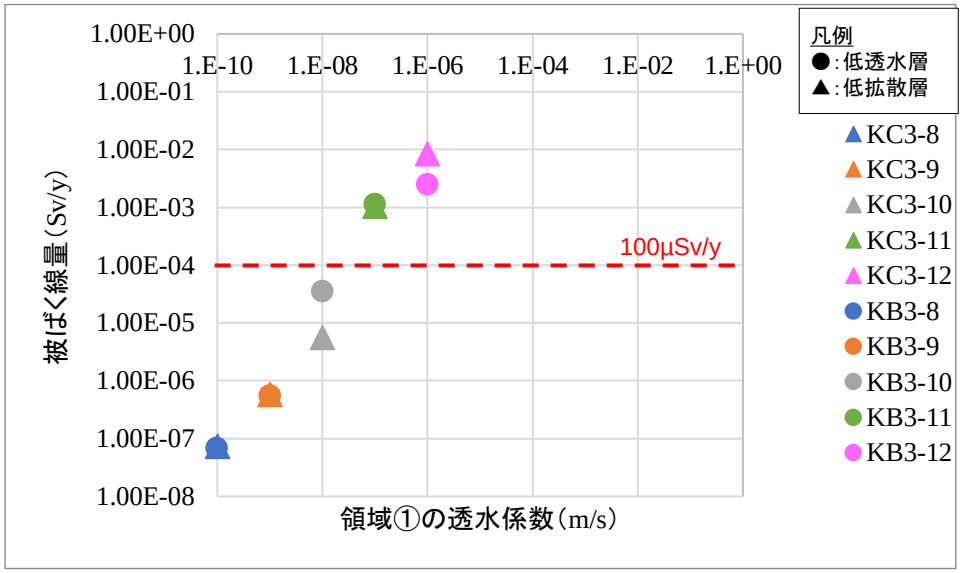


図 5.2-15　領域①の透水係数における感度解析結果（ケース②）

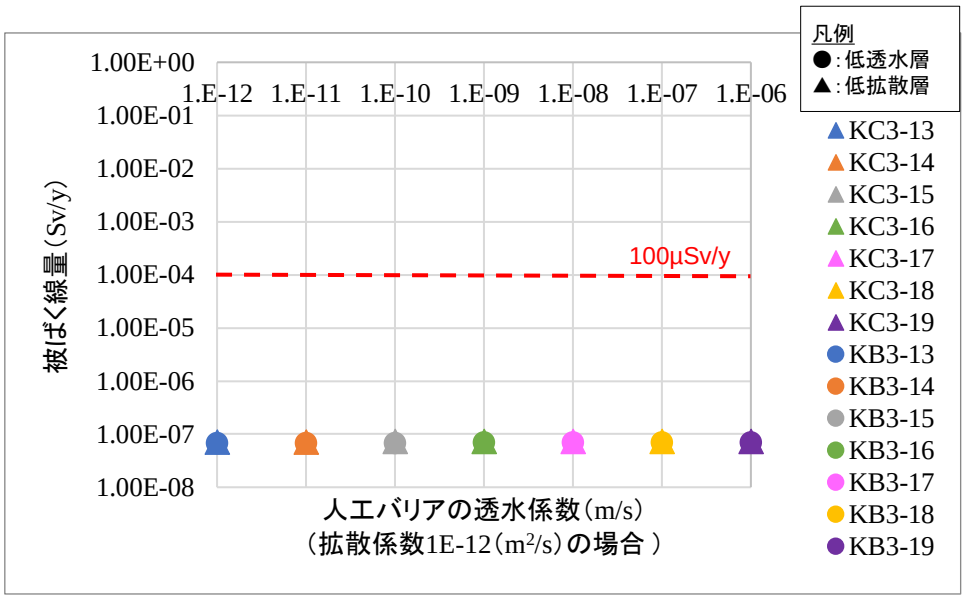


図 5.2-16　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-12（m^2/s））における感度解析結果（ケース②）

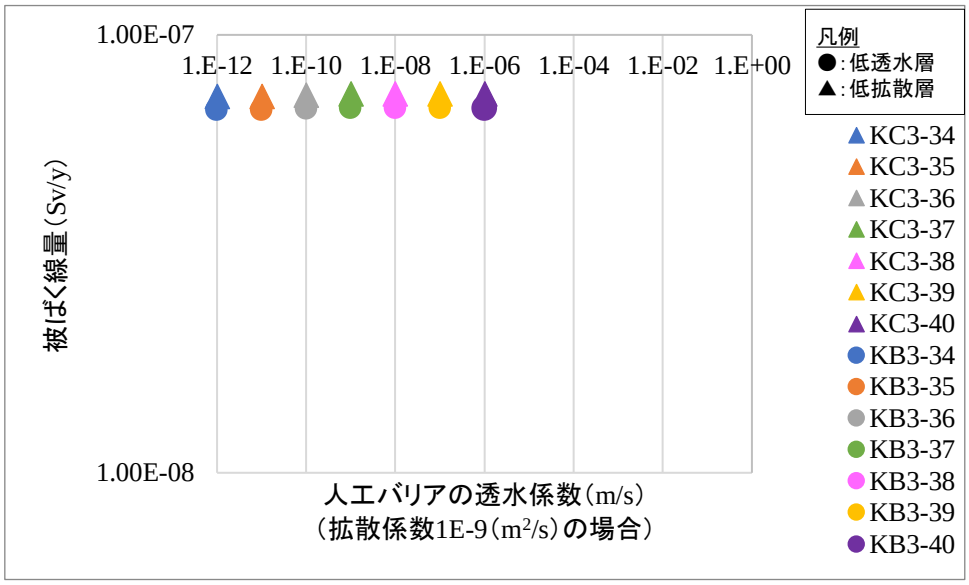


図 5.2-17　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-9（m^2/s））における感度解析結果（ケース②）

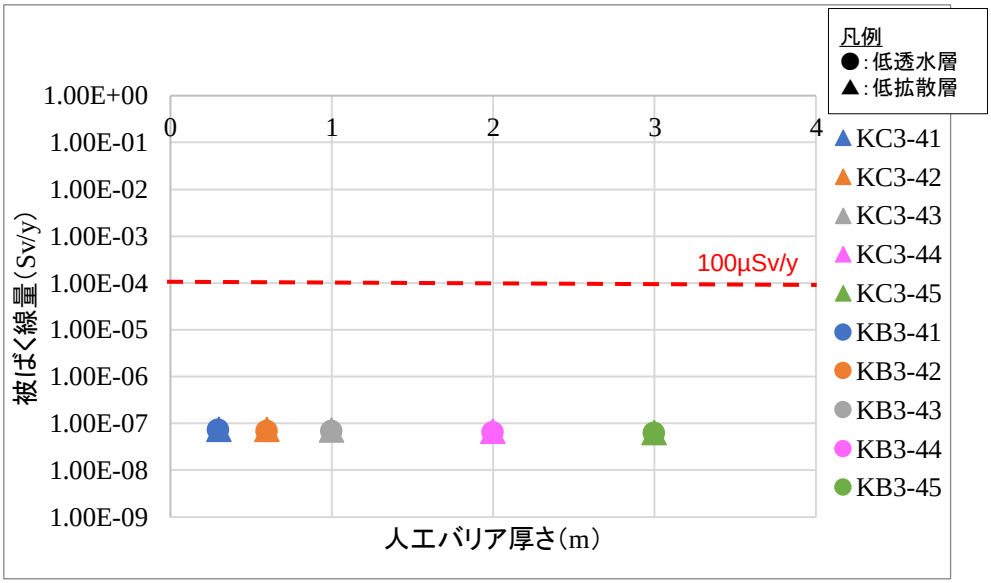


図 5.2-18　人工バリアの厚さにおける感度解析結果（ケース②）

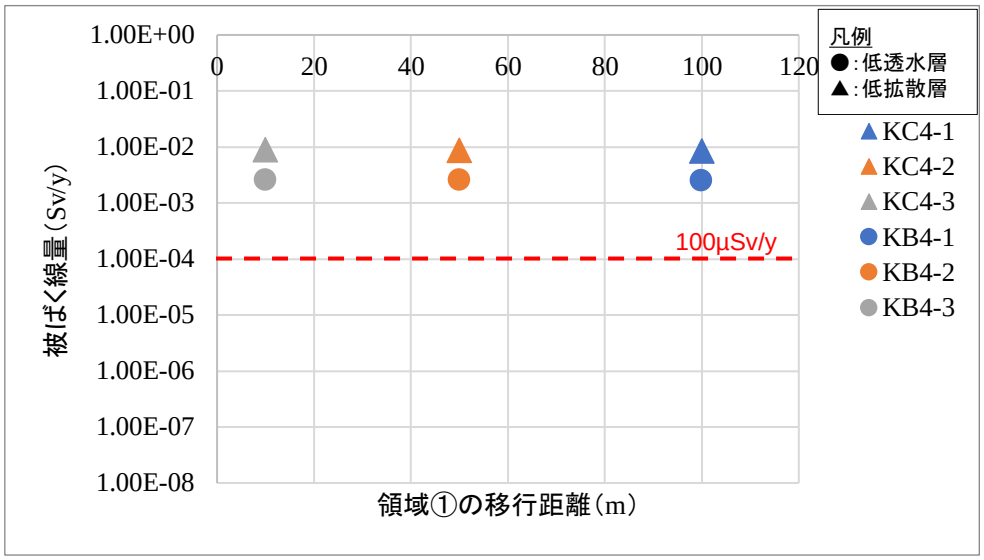


図 5.2-19　領域①の移行距離における感度解析結果（ケース③）

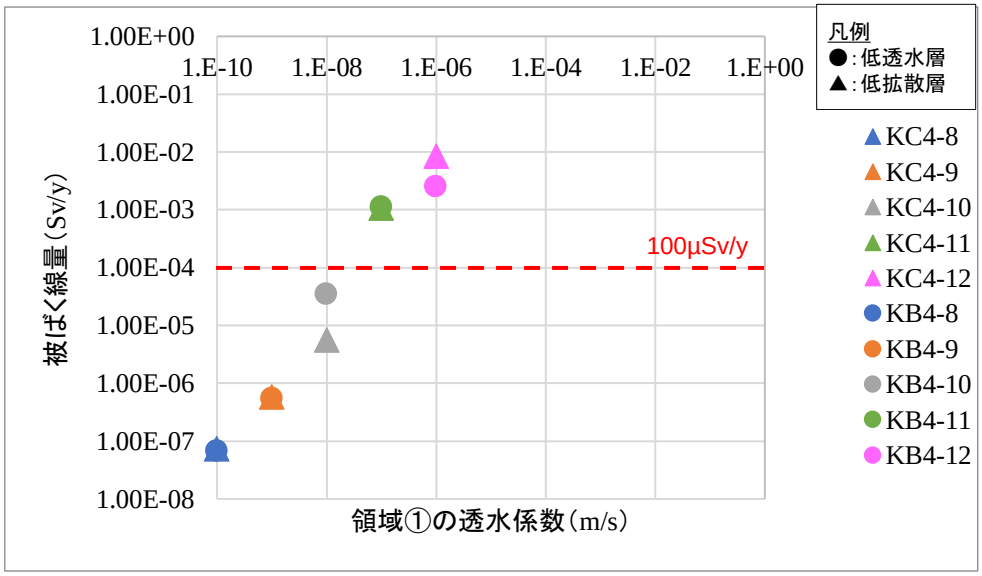


図 5.2-20　領域①の透水係数における感度解析結果（ケース③）

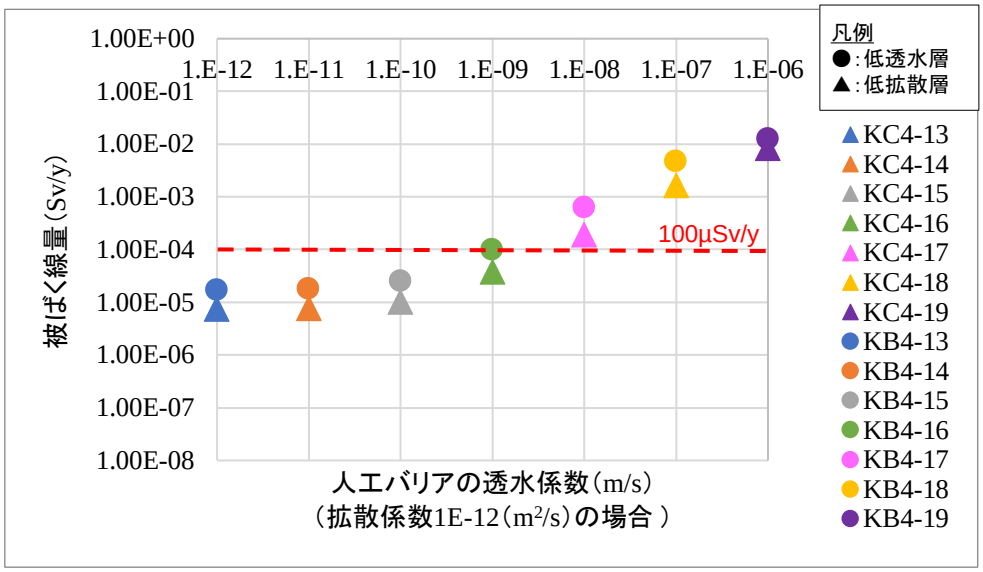


図 5.2-21　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-12（m^2/s））における感度解析結果（ケース③）

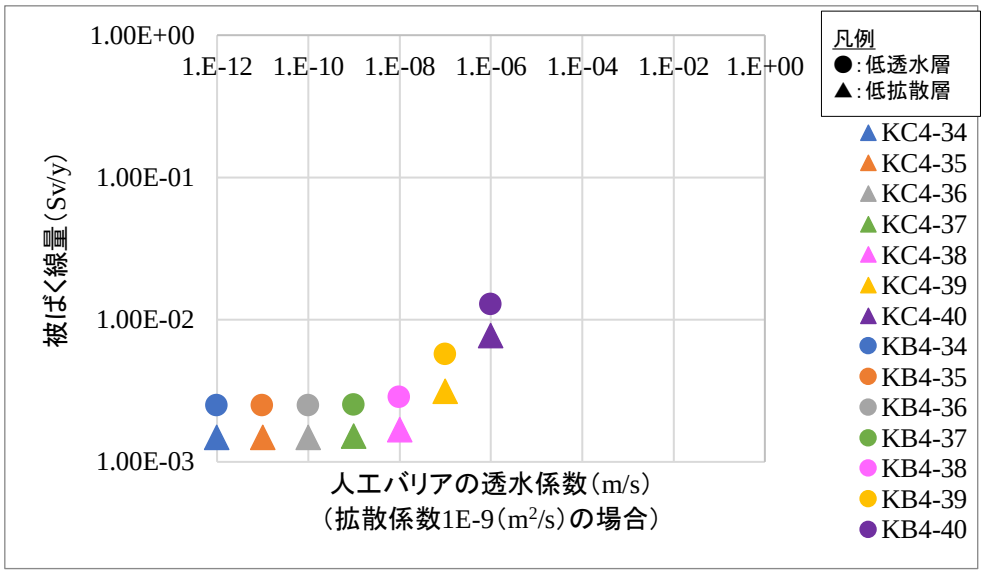


図 5.2-22　人工バリアの透水係数（拡散係数 1E-9（m^2/s））における感度解析結果（ケース③）

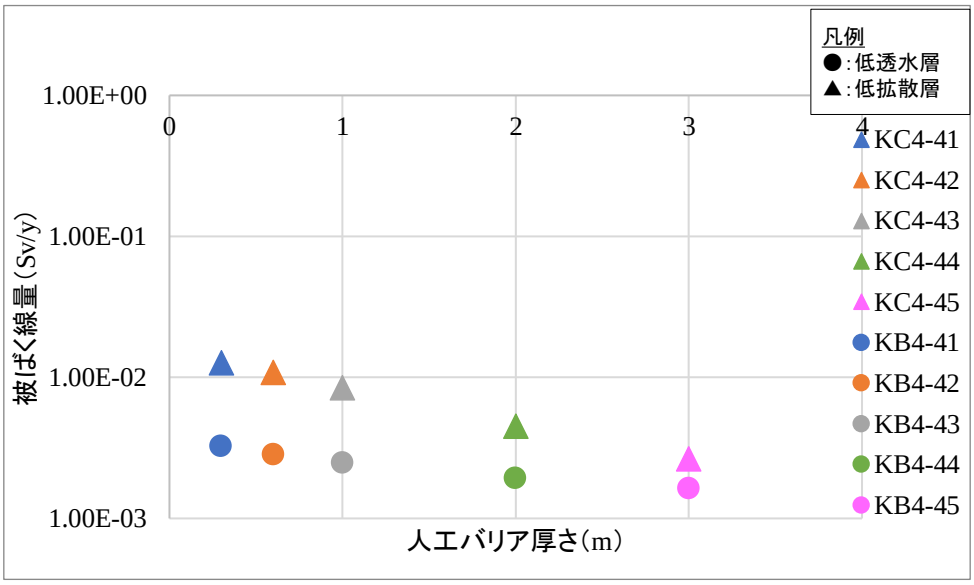


図 5.2-23　人工バリアの厚さにおける感度解析結果（ケース③）

ケース④に関する感度解析の中で特徴的な傾向が認められた結果を、図 5.2-24～図 5.2-28 に示す。

天然バリアの領域①の性能が高い場合（領域①の透水係数が 10^{-9}m/s 以下）、低拡散層性能の時間変化のパターンによる差異はほとんど認められず、いずれの場合も目安となる線量値を大きく下回っている。これに対して、領域①の透水係数が 10^{-8}m/s 以上の場合には、低拡散層性能の時間変化のパターンにより差が見られるようになる。特に、低拡散層性能の時間変化のパターンとして低拡散層の拡散係数が 100,000 年～200,000 年で劣化するとしたケースが、他のケースに比べて線量低減が良好な結果となっている。線量の絶対値を見た時、低拡散層性能の時間変化のパターン次第で、感度解析結果が目安となる線量値を上回ったり下回ったりしていることから、低拡散層性能の時間変化のパターン設定の信頼性をいかに確保するかは大きな課題といえる。

また、天然バリア性能がそれほど良好ではないケースでは、低拡散層のみでは目安となる線量値を上回るケースがいくつか認められ、その場合には、低拡散層と低透水層を合わせた多重の人工バリアが必要とされる。

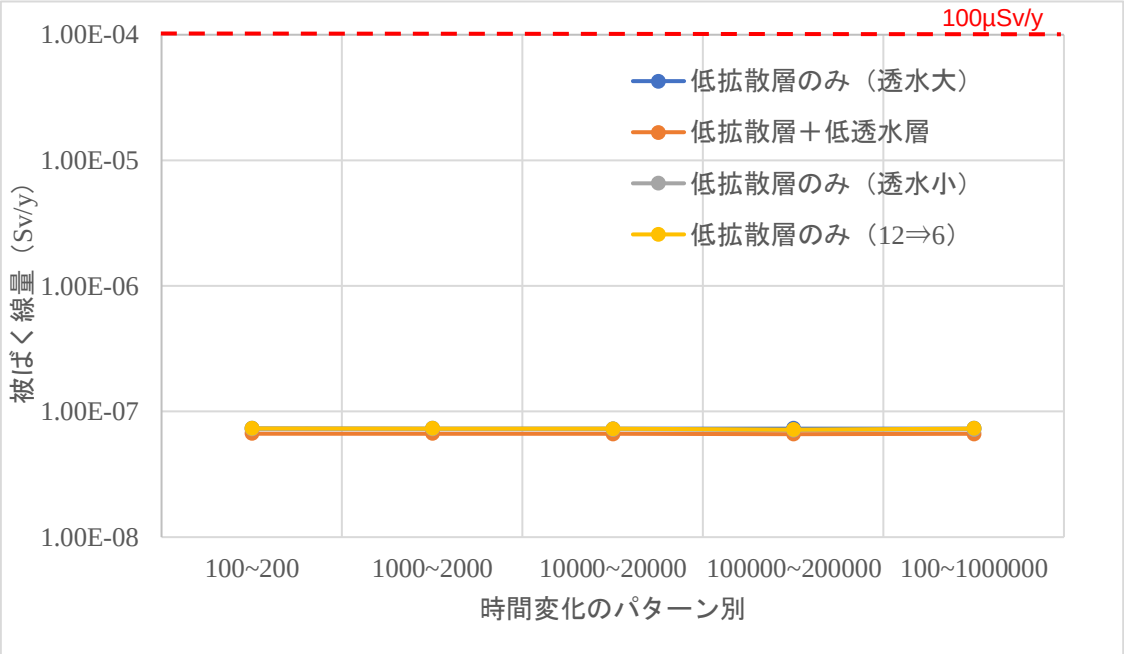


図 5.2-24　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-10m/s）（ケース④）

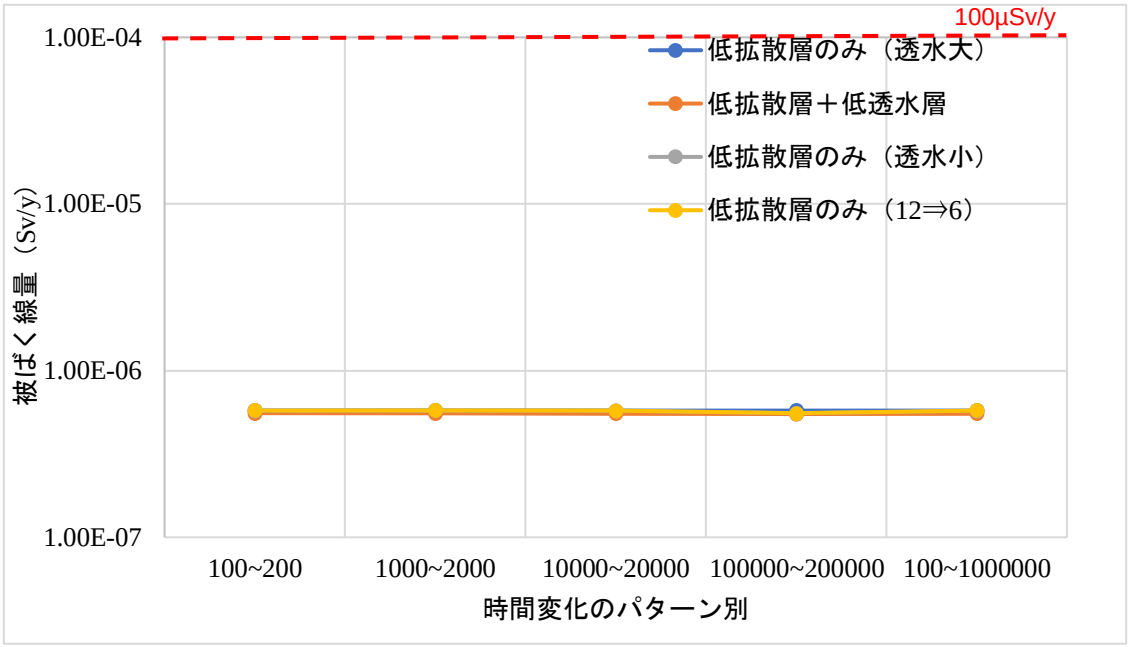


図 5.2-25　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-9m/s）（ケース④）

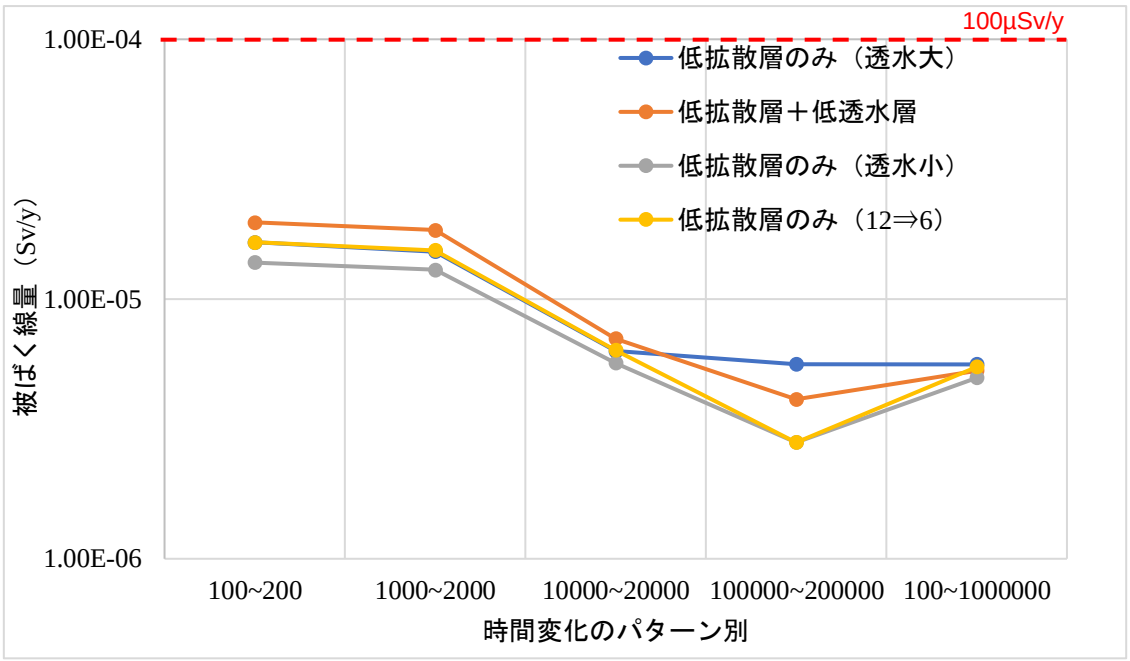


図 5.2-26　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-8m/s）（ケース④）

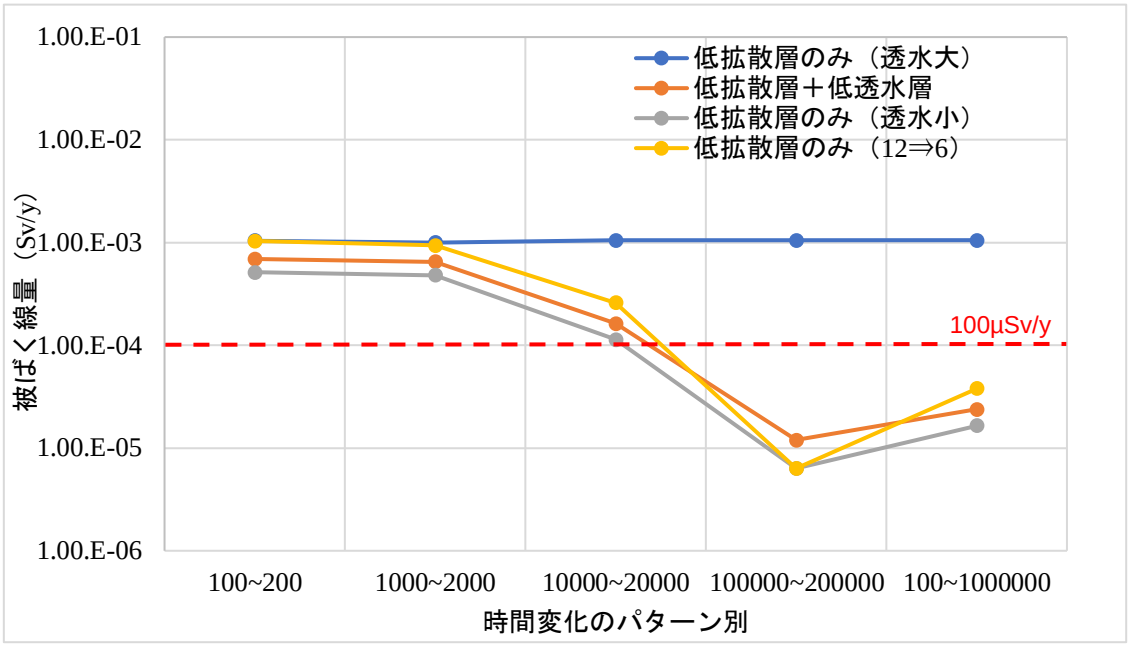


図 5.2-27　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-7m/s）（ケース④）

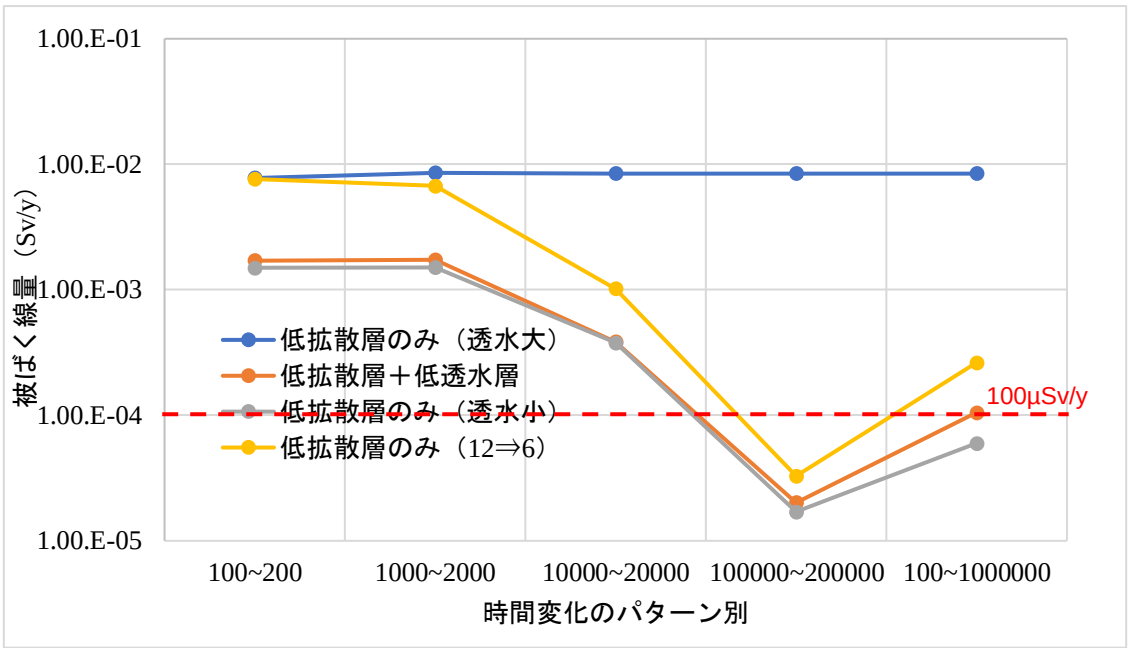


図 5.2-28　低拡散層の時間変化を考慮した感度解析結果（領域①の透水係数：1E-6m/s）（ケース④）

(4) 安全機能の相関関係の再整理

一連の感度解析結果を参照することにより、5.2.3　で整理した安全機能と構成要素の関係（表 5.2-17）を再整理する。その際、天然バリアの性能の高低（高透水性母岩（透水係数が 10^{-8}m/s 以上）／低透水性母岩（透水係数が 10^{-9}m/s 以下））に場合分けした表とする。また、表 5.2-17 の構成要素の欄は次の 8 つの領域に細分化した形で安全機能と構成要素の関係を再整理する。

・ 廃棄体容器
・ 岩盤
・ 区画内充填材
・ コンクリートピット
・ 低拡散層
・ 低透水層
・ 空洞
・ 空洞内充填材

表 5.2-17　安全機能と構成要素の関係（再掲）

段階	安全機能		構成要素
閉鎖措置前	閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏洩の防止	廃棄体容器 人工バリア
		施設外への放射性物質の放出の防止	その他施設
	遮蔽	放射線の遮蔽	廃棄体容器 人工バリア
	操業安全	空間・力学的安定性の確保	人工バリア
閉鎖措置後	移行抑制	放射性物質の収着（核種収着性）	人工バリア 天然バリア
		拡散による移行を抑制（低拡散性）	人工バリア 天然バリア
		処分施設を通過する地下水流量を抑制（低透水性）	人工バリア 天然バリア
		溶解抑制	天然バリア
		コロイド移行の抑制	人工バリア
		放射性物質の分散	天然バリア
		卓越した移行経路形成の防止	人工バリア
	溶出抑制	溶出の抑制	廃棄体容器
		廃棄体と地下水の接触の防止	廃棄体容器
	離隔	離隔距離の確保	天然バリア
		容易な人間侵入の抑制	天然バリア

再整理した結果を、表 5.2-18 及び表 5.2-19 に示す。〇印があるものは、成立要件とされる構成要素である。成立するためには必ずしも必須ではないもの、或いは、その評価が微妙なものには△印を付与した。また、段階を閉鎖措置前と閉鎖措置後に分け、更に、それぞれに対して複数の機能を設定しているが、それらのいずれかで一つでも〇印が付いていれば、廃棄物埋設施設の構成要素として必須となる。

表 5.2-18　感度解析結果を反映した安全機能と構成要素の関係（高透水性母岩）

段階	機能		構成要素							
			廃棄体容器	岩盤 透水係数： 1E-8m/s 以上	区画内充填材	コンクリート ピット	低拡散層	低透水層	空洞	空洞内充填材
閉鎖措置前	閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏洩の防止	○			○		○		
	遮蔽	放射線の遮蔽	○		○	○	○			
	操業安全	空間・力学的安定性の確保				○				
閉鎖措置後	移行抑制	放射性物質の収着（核種収着性）		○			○	○		
		拡散による移行を抑制（低拡散性）		△			○	※ 低透水層による拡散場維持		
		処分施設を通過する地下水流量を抑制（低透水性）		△				○		
		卓越した移行経路の防止								○
	溶出抑制	溶出の抑制	○							
		廃棄体と地下水の接触の防止	○							
	離隔	離隔距離の確保		○					○	
		容易な人間侵入の抑制		○						○
		自然現象からの著しい影響からの防護		○						

表 5.2-19　感度解析結果を反映した安全機能と構成要素の関係（低透水性母岩）

段階	機能		構成要素							
			廃棄体容器	岩盤 透水係数： 1E-9m/s 以下	区画内充填材	コンクリート ピット	低拡散層	低透水層	空洞	空洞内充填材
閉鎖措置前	閉じ込め	廃棄体からの放射性物質の漏洩の防止	○			○		○		
	遮蔽	放射線の遮蔽	○		○	○				
	操業安全	空間・力学的安定性の確保				○				
閉鎖措置後	移行抑制	放射性物質の収着（核種収着性）		○			△	△		
		拡散による移行を抑制（低拡散性）		○			△			
		処分施設を通過する地下水流量を抑制（低透水性）		○				△		
		卓越した移行経路の防止								○
	溶出抑制	溶出の抑制	○							
		廃棄体と地下水の接触の防止	○							
	離隔	離隔距離の確保		○					○	
		容易な人間侵入の抑制		○						○
		自然現象からの著しい影響からの防護		○						

(5) 人工バリアの設計等に係る選択肢の設定

このような手順で整理した表 5.2-18、表 5.2-19 に基づき、それを人工バリアのバリア構成として図化したものを、図 5.2-29、図 5.2-30 にそれぞれ示す。このようにすることで、天然バリア性能に対応した人工バリアの設計等に係る複数の選択肢が設定できると考えた。

天然バリア性能が比較的低いケースでは、人工バリアに多重性を持たせるなど人工バリアに高い性能を持たせるような設計が要求される。一方、天然バリア性能が比較的高いケースでは、必ずしも人工バリアとして低透水層と低拡散層の両方を持たせなくてもエントリー条件を満たす人工バリアの設計等に係る選択肢となり得る。

事業段階ではある程度サイト候補が絞られ、天然バリア性能を定義することができるため、そこで確認、設定された天然バリア性能に基づき、前述の手順と考え方を適用することが、規制基準で要求される設計プロセスを示す一助になると考えられる。

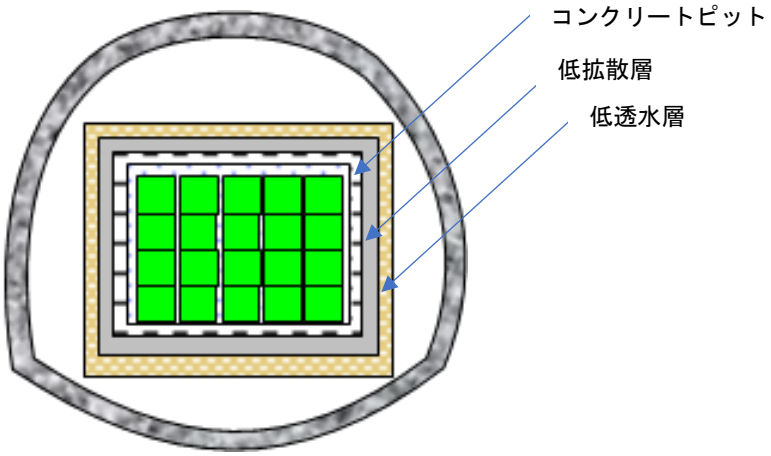


図 5.2-29　高透水性母岩で想定される人工バリア構成のイメージ

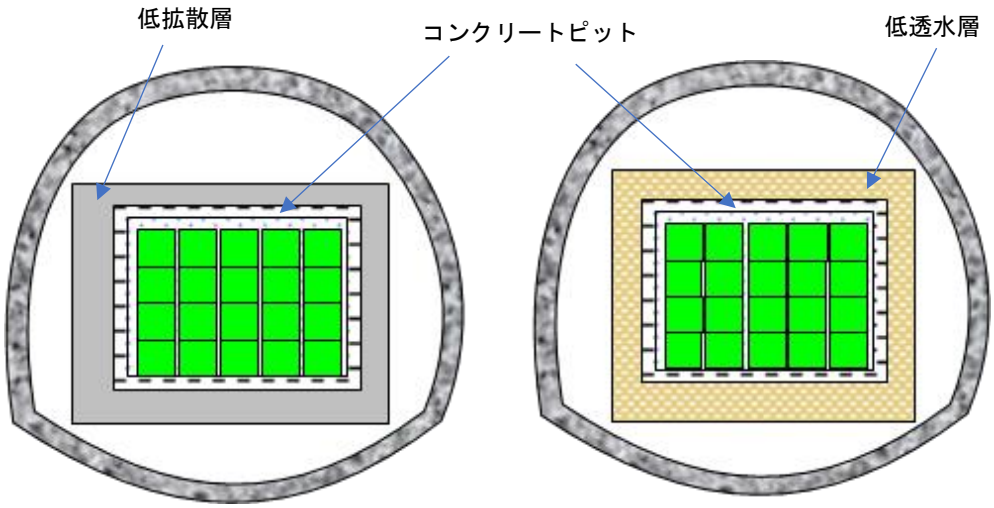


図 5.2-30　低透水性母岩で想定される人工バリア構成のイメージ

5.2.5 まとめ

規制要求で示される設計プロセスについて、考え方とその手順をできるだけ具体化して示すことを試みた。最終的な処分システムの選定では、精緻な安全評価が求められるが、それに先立つ人工バリアの設計に係る選択肢の抽出では、予備的線量評価として広範囲なパラメータを対象とした感度解析を行い、その結果に基づき成立要件の範囲を確認した上で、安全機能と構成要素の関係に落とし込む方法を提示した。この安全機能と構成要素の関係を図化することにより、天然バリアなど環境条件に応じた合理的な人工バリア概念の具現化が可能となる。

今年度は、前年度の検討の前提とした人工バリア構成（現状で広く認識されている中深度処分の人工バリア構成）自体が何故妥当なのか、それを説明する場合にはどのような考え方で論理展開するかという視点で、設計プロセスに関する検討を行った。設計プロセスにはさまざまなレベルが想定され、今年度の対象としたバリアコンセプトから更に踏み込み、人工バリアの材質や寸法（厚さ）を選択肢の中心とするようなレベルも対象になり得る。その場合には、前年度に提案した考え方と手順を適用することとなる。前年度と今年度の検討で提示した手順を組み合わせた手法は、概略的ではあるものの、上流から下流に至る一連の設計プロセスにおける人工バリアの設計に係る選択肢についての説明の一助になるものと考えられる。

なお、今年度の検討に関して、現時点で認識している留意事項と課題を以下に記す。

- 設計プロセスにおける人工バリアの設計に係る選択肢を抽出する際の考え方と手順を示すことを今年度の検討の第一の目的とした。
- ここに提案したものは、一つの考え方と手順に過ぎず、他にも有用な考え方と手順が考えられる。
- 感度解析とその結果を判断材料としてその手順を示しているが、感度解析に用いるパラメータは暫定的に設定したもので、今後、精査が必要である。そのため、感度解析結果としての線量値の絶対値の取り扱いには注意が必要である。
- 規制基準に示される設計プロセスについてはさまざまな解釈があると考えられる。そのため、これまでに本事業で検討した内容についてはできるだけ多くの分野の有識者のレビューを受けるなどの取り組みを通じて、今後、検討を深めていくことが求められる。

5.1 節、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] 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ：NRA 技術ノート　中深度処分の規制基準の背景及び根拠，NTEN-2022-0001，2022
[6] 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　廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム第 2 回会合，資料 2-1，2015
[7] 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，2018
[8] 日本原子力学会：日本原子力学会標準　余裕深度処分の安全評価手法：2008，AESJ-SC-F012，2009
[9] 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

5.3 長期安全性の観点からの技術オプションの整理と感度解析モデルの作成

5.3.1 長期安全性の観点からの技術オプション

(1) 処分場設計に係る手順

放射性廃棄物の処分では、建設・操業における安全性と同様に処分後長期の閉鎖後安全性が重視され、規制においても事業者が構築した処分場の長期安全性に関して規制が課される。

処分における基本的な安全性は IAEA-SSR5 [1]では、安全のための設計概念として以下の記述がなされている。

『処分施設は、放射性廃棄物に付随する放射性核種を閉じ込めるようにするとともに、それらを接近可能な生物圏から隔離するように設計される。処分施設は、地圏及び生物圏における放射性核種の分散を遅延させ、なおかつ施設の健全性を低下させる激しい現象からの廃棄物の隔離をもたらすように設計されなければならない。処分システムの様々な要素は、物理的な構成要素及び管理手順を含めて、異なる時間スケールにわたり、種々の仕方で安全機能を果たすことに寄与する。(3.32)』

わが国の安全規制においてもこれらの基本概念は踏襲されており、「放射性核種の閉じ込め」と「隔離」に対する処分場の性能が満足することが求められている[2]。言い換えれば、長期安全性を有する処分場は、「放射性核種の閉じ込め」と「隔離」に対して十分な性能を有する設計であることを証明することが事業者に求められる。

「隔離」は主に処分深度や鉱物資源、隆起・侵食による物理的な厚さの現象などの人為的行為に対するバリア機能である。これに対して、「放射性核種の閉じ込め」は天然バリアの性能と人工バリアの放射性核種の収着や移行遅延、移行率の低減の性能を具体化した設計が求められる。放射性核種の収着や移行遅延、移行率の低減の性能は安全機能として一般化され、これを用いて核種の生活圏への移行率を定量化することによって処分場の設計や人工バリアの構成が具体化される。この安全機能を具体的なバリア材料を適用しパラメータ化して「感度解析」を実施することは、処分場の概念設計の段階においては重要な作業と考えられる。

図 5.3-1 に処分場の設計案の選択に関する作業フロー案を示す。図の前半部分が基本的な処分概念を決定するための感度解析に基づくフローであり、後半部分が安全審査等に提示するための評価のフローとなる。

前半部分で、感度解析が 2 回実施されるフローとなっている。最初の感度解析は安全機能を具体化するための部材や材料に目途をつけるためであり、安全性にあまり影響を与えないと予想される構造を特定する。これによって、バリア機能を有する構造に具体的な性能を与えることを考え、それ以外の部分は、保守的な上限や様式化されたパラメータ値を適用することが可能となる。後半の安全評価ではバリアの性能の有無に拠らずに精緻な状態設定を想定している。

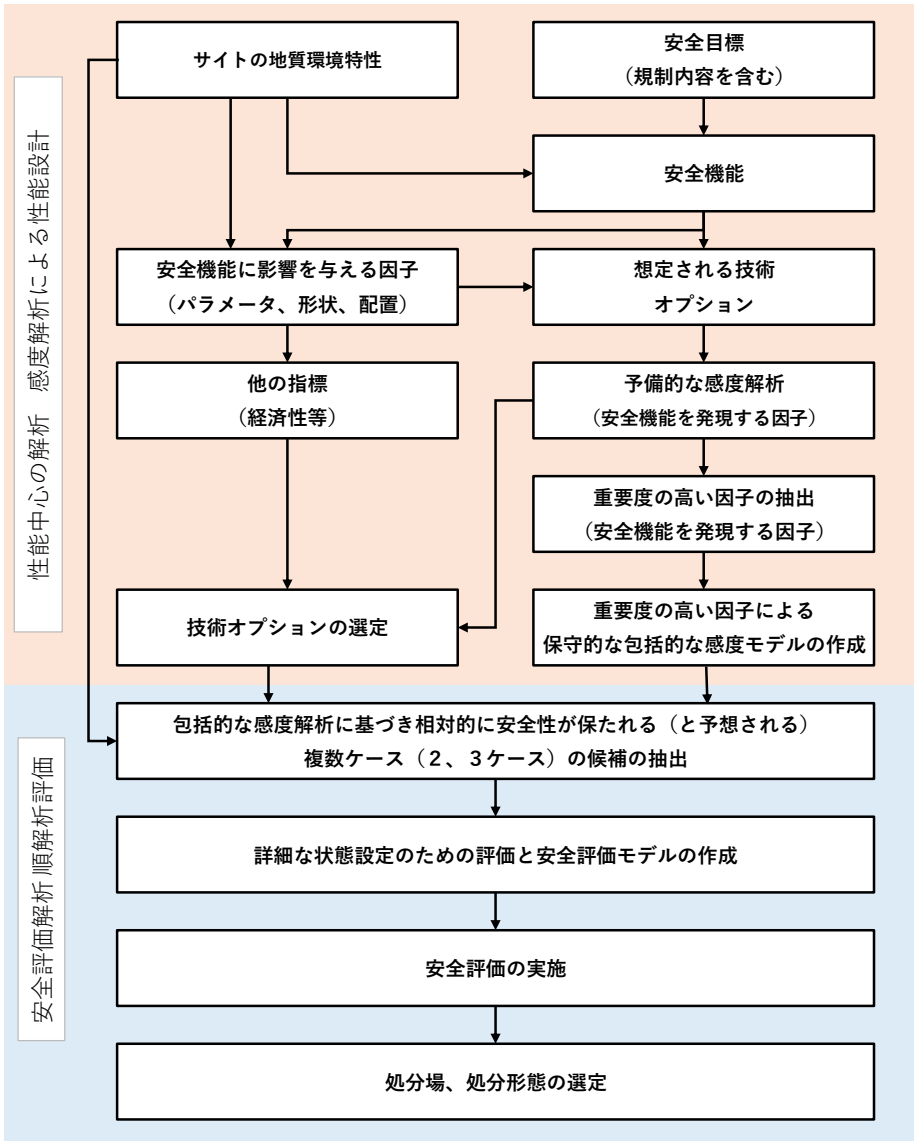


図 5.3-1 処分場の設計に係る作業フロー案

(2) 安全評価の観点からの技術オプションの定義案

長期安全確保の観点から処分場の建設は表 5.3-1 に示すような「閉じ込め」と「隔離」の安全機能を満足する必要がある。建設に対応する設計の方針としては、広義には「与えられた地質環境」に対応し、生活圏での被ばくをより小さくすることが求められる[2]。

表 5.3-1 長期安全性における安全機能[2]

安全確保の基本概念	安全機能	説明
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	自然現象の著しい影響により廃棄物が地表に接近あるいは露出しないように防護すること
	人の接近の抑制	人が特殊な技術を用いることなしに，廃棄物への偶発的な接近を困難にすること
閉じ込め	放射性物質の溶出抑制	廃棄体からの放射性物質の溶出を抑制することで，地下水への放出率を低下させること
	放射性物質の移行抑制	溶出した放射性物質の移行を抑制することにより，放射性物質の移行率を低下させること

一方で、設計・建設においては、既存の技術が適用可能であるとともに、その技術レベルが高く、処分場の長期性能を阻害する材料を避けることや、処分場の建設費用が妥当であることが求められる（BAT（Best Available Technique））。

包括的技術報告書の定義では設計オプション（技術オプションと読み替える）は、処分場概念のレベルから、構造、材料、操業方法等のレベルの様々な選択肢を包含するものであり、以下のようなオプションが例示されている。

- 廃棄体の配置方式オプションとしての分散配置と集積配置
- 地下施設における処分区画形状オプションとしてのパネル型とデッドエンド型
- 高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）の定置形態オプションとしての竪置きと横置き
- 緩衝材の製作・定置方法オプションとしてのブロック方式と原位置締固め方式
- TRU 等廃棄物の廃棄体の定置方法オプションとしてのクレーン方式とフォークリフト方式
- オーバーパックの材料オプションとしての炭素鋼製とチタン製

NUMO では、可能性のありそうなオプションをガラス固化体仕様から地上施設までの幅広い範囲でカタログ化して提示されている[3]。これらは、概要調査の段階において長期安全性だけではなく多様な側面から比較検討され、図 5.3-2 に示すように精密調査段階において絞られた設計条件を比較して選択される。

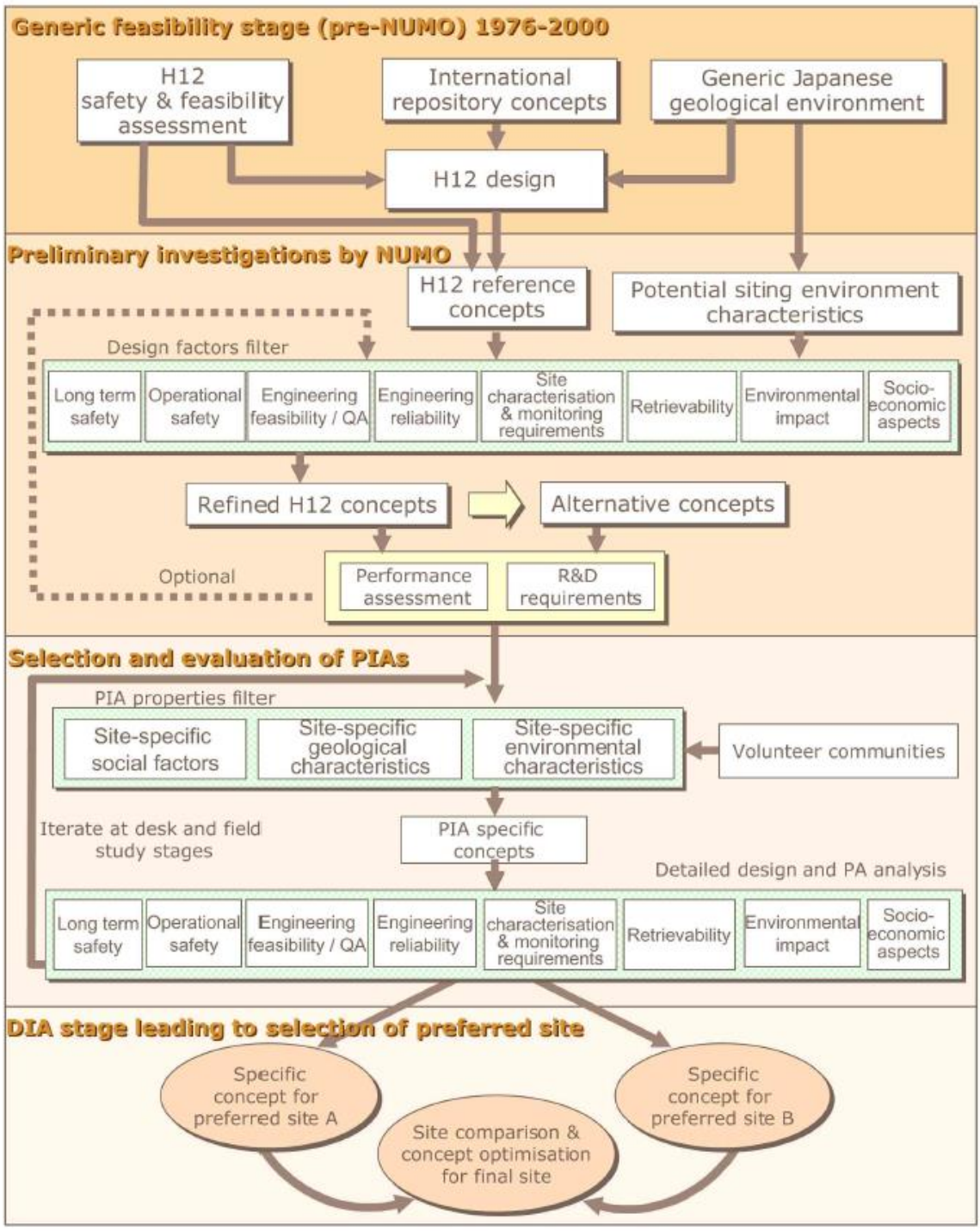


Figure 1-6: **Repository concept development during the staged site characterisation process.**

図 5.3-2 処分場開発のプロセス[3]

令和 2 年度の検討[4]では諸外国の検討結果を含め、図 5.3-3 に示すように技術オプションとなるカタログを提示した。この検討では、人工バリアの断面を中心として技術オプションの評価を実施し、坑道断面が絞り込まれた段階において、バリア厚さ等を決定する手法について検討した。

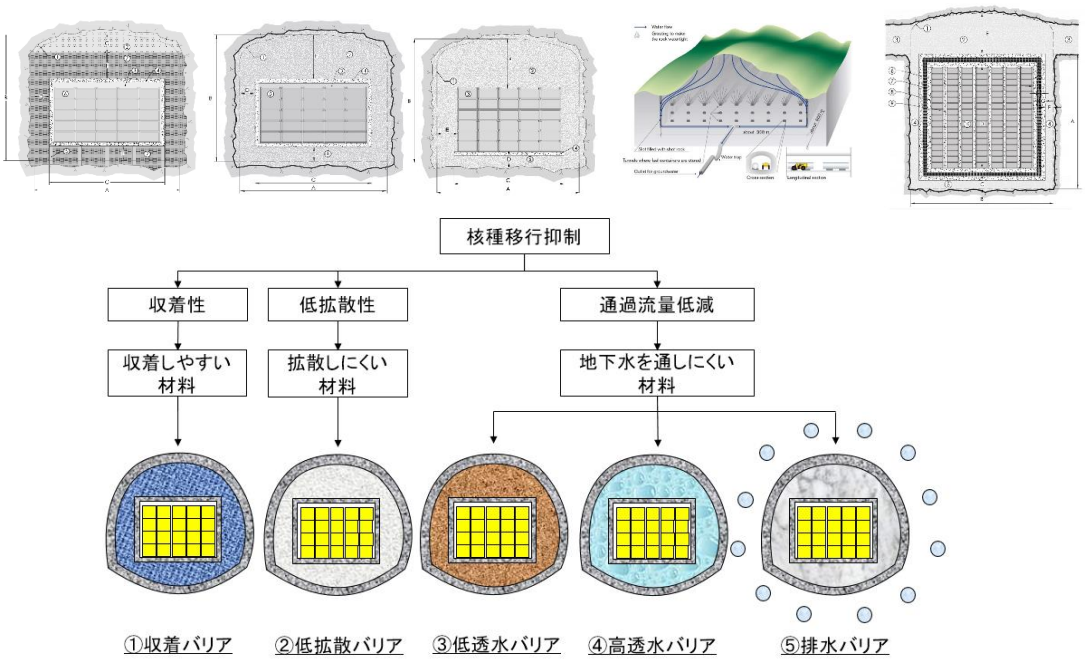


図 5.3-3　令和 2 年度の検討例[4]

現状、技術（設計）オプションの定義は明確ではなく、広義の考え方では NUMO が示したような幅広い検討内容が含まれる。そのため、本業務における技術オプションを幅広く定義し、これまでの検討内容に加えることによりオプション選択の手順等を検討することとする。

(3) 安全規制の方針から予想される技術オプション

原子力規制庁は中深度の規制を目的として、中深度処分の規制基準の背景及び根拠[5]を令和 4 年に公表し、安全審査において何を規制対象とするかの方針を示した。方針は許可基準規則毎に記載されている。記載内容は以下のとおりであり、表 5.3-2～表 5.3-15 に、中深度処分の規制基準の背景及び根拠[5]に示された内容を添付する。

・断層等（許可基準規則第 12 条）
・火山（許可基準規則第 12 条）
・侵食を考慮した深度の確保（許可基準規則第 12 条）
・鉱物資源等（許可基準規則第 12 条）
・耐震（許可基準規則第 4 条）
・安全機能を有する施設の維持（許可基準規則第 9 条）
・放射性廃棄物の回収（許可基準規則第 10 条）
・人工バリア（許可基準規則第 12 条）
・監視測定設備（許可基準規則第 15 条）
・排水設備（許可基準規則第 16 条）
・長半減期核種の濃度制限に関する要求(1)（許可基準規則第 12 条）
・自然事象シナリオ（許可基準規則第 12 条）
・ボーリングシナリオ（許可基準規則第 12 条）
・設計プロセス（許可基準規則第 12 条）

これらの規制の規則は、放射性廃棄物処分の基本的な概念を取りまとめた IAEA の SSR-5[1]や ICRP の方針[6]に準拠するものであり、それらの方針と異なるものではない。SSR-5[1]においては、「3.放射性廃棄物の処分の計画立案のための安全要件」のなかで事業者（操業者）の責任として「放射性廃棄物の処分施設の操業者は、その安全に責任を負わなければならない。操業者は、安全評価を行い、セーフティケースを開発し、維持しなければならず、サイト選定・評価、施設設計、建設・操業・閉鎖、必要に応じ閉鎖後サーベイランスに必要なすべての活動を、国の戦略や規制上の要件に従い、法令上及び規制上の基盤の範囲内で、実施しなければならない。」とあり、コンプライアンスの遵守が明記されている。そのため、安全規制を参照し安全性に寄与する処分場開発であることが求められる。

表 5.3-2　規制における方針；断層等[5]

【許可基準規則第 12 条】

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。

【解釈】

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】

（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 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。

（2）「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。

（3）「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。

（4）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」（解釈第 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。

表 5.3-3　規制における方針；火山[5]

【許可基準規則第 12 条】 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。
【解釈】 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】 （1）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 13061910 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定））の 3.2(1)及び(2)の規定を準用する。 （2）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。

表 5.3-4　規制における方針；侵食を考慮した深度の確保[5]

【許可基準規則第 12 条】 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。
【解釈】 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】 （１）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、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。 （２）廃棄物埋設地の頂部から地表面までの距離の測定方法 ・ 「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」（解釈第 12 条 2）について、廃棄物埋設地が複数の埋設坑道から構成されている場合は、個々の埋設坑道について、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当該埋設坑道の頂部までの距離が７０メートル以上であることが確認されていることを確認する。

表 5.3-5　規制における方針；鉱物資源［5］

【許可基準規則第 12 条】

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。

【解釈】

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】

（１）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。

（２）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。

✧ 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。

表 5.3-6　規制における方針；地震［5］

【許可基準規則第 4 条】

3 中深度処分に係る廃棄物埋設地及び坑道（以下この項において「廃棄物埋設地等」という。）は、埋設する放射性廃棄物の受入れの開始から閉鎖措置の終了までの間に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に十分耐えることができるものでなければならない。

【解釈】

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―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。

表 5.3-7　規制における方針；　安全機能を有する施設の維持[5]

【許可基準規則第 9 条】 1　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。

表 5.3-8　規制における方針；放射性廃棄物の回収[5]

【許可基準規則第 10 条】 1　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】 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。

表 5.3-9　規制における方針；人工バリア[5]

【許可基準規則第 12 条】 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。
【解釈】 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、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。

表 5.3-10　規制における方針；監視測定設備[5]

【許可基準規則第 15 条】

1 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、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

【解釈】

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・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 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、事業規則第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。

表 5.3-11　規制における方針；排水設備[5]

【許可基準規則第 16 条】 1　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するための施設を設けなければならない。
【解釈】 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。

表 5.3-12　規制における方針；長半減期核種の濃度制限に関する要求(1/2)　[5]

【許可基準規則第 12 条】

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】

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であること」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。

【審査ガイド(注 23)】

解釈第 12 条 8 一に規定する評価について、次に掲げるシナリオ（以下「廃棄物埋設地と公衆の接近を仮定したシナリオ」という。）を踏まえて廃棄物埋設地を構成する坑道（以下「埋設坑道」という。図 2.1-1 参照）ごとに行われていることを確認する。

（１）評価対象の放射性物質について

・ 評価対象の放射性物質について、10 万年後の廃棄物埋設地に存在する主なものとして、10 万年後の時点で十分減衰しているものを除いたものが埋設坑道ごとに選定されていることを確認する。

（２）「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」の設定の方法について

・ 「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」（以下「混合土壌」という。）について、廃棄物埋設地の構造及び設備を適切に考慮し、次のように設定されていること。

－混合土壌の設定は、埋設坑道ごとに行う。

－混合土壌の範囲は、混合土壌中の放射性物質の放射能濃度が著しく過小評価されないよう、廃棄物埋設地（即ち放射性廃棄物を埋設する、掘削された区域）に埋設され、又は設置された物のみを考慮。

－混合土壌の重量は、廃棄物埋設地の構成物である、埋設される廃棄体、人工バリア、埋戻し材及び埋設坑道の外縁を構成する支保工等の構造物の重量の総和を設定。

－混合土壌中において放射性物質は均一に分布し、保守的に 10 万年間は埋設坑道の外への漏出はないものと仮定。

表 5.3-13　規制における方針；長半減期核種の濃度制限に関する要求(2/2) [5]

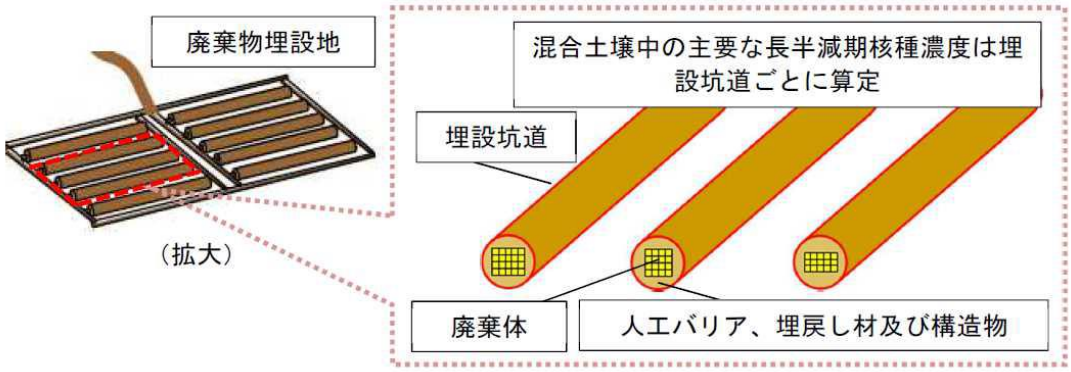


図 2.1-1 複数の埋設坑道から廃棄物埋設地が構成される場合のイメージ

（3）公衆の被ばくに係る評価方法について

・公衆の被ばくに係る評価方法について、以下の点を踏まえて設定されていること。

－評価の対象とする公衆は、混合土壌上の家屋等に居住し、その居住者が屋外にいる間に客土を用いない混合土壌に含まれる放射性物質から受ける外部被ばくに加え、その居住者が混合土壌上での農耕作業における粉じん吸入及び農作物の摂取による内部被ばくを仮定（図 2.1-2 参照）。

－廃棄物埋設地の設計に依存しない線量換算係数等のパラメータについては、自然事象シナリオ（解釈第 12 条 8 二イ）の評価において使用するパラメータを準用し設定。

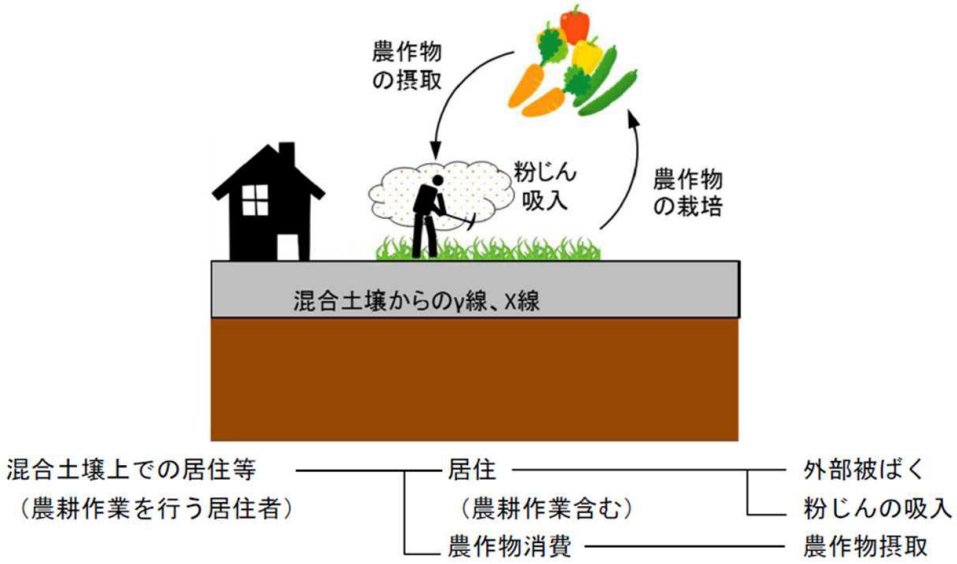


図 2.1-2 混合土壌上での居住等による被ばく状況

表 5.3-14　規制における方針；ボーリングシナリオ(1/2) [5]

【許可基準規則第 12 条】

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】

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。

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。

【審査ガイド(注 25)】

ボーリングシナリオ（解釈第 12 条 8 二ロ）について、以下の点を踏まえて設定されていることを確認する。

（１）評価対象の放射性物質について

・評価対象の放射性物質について、廃止措置の終了直後において廃棄物埋設地に存在する主なものとして、自然事象シナリオ（解釈第 12 条 8 二イ）における「主要な放射性物質」が選定されていること。

（２）「区画別放射能量が最も多くなる区画」の設定の方法について

・「区画別放射能量が最も多くなる区画」について、以下の点を踏まえて設定されていること。

－地表から鉛直方向に１本のボーリング孔が打たれることを仮定し、ボーリング孔が貫通した区画（以下「損傷区画」という。鉛直方向に複数の埋設坑道が存在する場合で１ 本のボーリング孔がこれら複数の埋設坑道を貫通する場合は損傷区画の数は複数となることから、これらに含まれる放射能量を足し合わせる必要がある。）に含まれる放射性物質の放射能量が最も多くなる場合の当該損傷区画を選定（図 2.2-1 参照）。

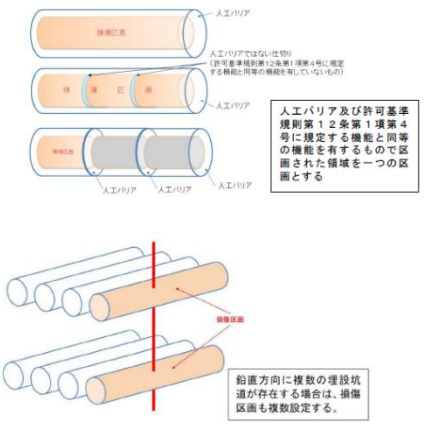


図 2.2-1　ボーリング孔の貫通による影響が及ぶ損傷区画のイメージ

表 5.3-15　規制における方針；ボーリングシナリオ(2/2) [5]

（３）被ばく経路及び評価パラメータの設定について

１）廃棄物埋設地の近傍に採水可能な帯水層が存在する場合

・被ばく経路について、以下の点を踏まえて設定されていること（注１）。

－ボーリング孔が廃棄物埋設地を貫通することにより、地下水流動経路が形成されることを仮定。

－地下水流動経路を介して損傷区画から放射性物質が移動した帯水層への井戸掘削が行われることを仮定し、井戸水利用により公衆が被ばくすることを仮定（図 2.2-2 参照）。

－ボーリング孔の孔径は、設計時点において一般的なボーリング又は事業許可に係る地質調査等で用いたボーリングの形状から設定。

・損傷区画から帯水層への放射性物質の移動が、次のように設定されていること、又は保守的かつ簡便な設定として、ボーリング孔が貫通した時点で損傷区画に含まれる放射性物質が全て帯水層に移動すると仮定して設定されていることを確認する。

－損傷区画内において損傷を受けた廃棄体による放射性物質の漏出防止機能は失われ、損傷区画内は帯水層から流入した地下水で冠水していると仮定。

－ボーリング掘削時点における損傷区画内の環境条件を考慮して、損傷区画内の地下水中に溶存する放射性物質の放射能量を評価。その際、以下の点を考慮すること。

損傷区画内の地下水の化学的環境に応じた放射性物質の固液分配比及び溶解度等金属廃棄物からの放射化生成物の溶出率（注２）

・井戸水利用について、以下の点を踏まえて設定されていることを確認する。

－帯水層中の放射性物質の放射能濃度は、帯水層の化学的環境に応じた放射性物質の固液分配比及び溶解度等を考慮して設定。

－井戸の取水量及びその利用方法は、廃棄物埋設施設の敷地周辺の地域に存在する井戸の取水量及びその利用方法を参考に設定。

(4) 線量を低減させる設計条件

(3) で示した規制において対応する規制条件は、「廃棄体の仕様」、「地質環境の選定」、「処分場の基本設計」で大枠を分類することが可能である。これらについては、規制で対象とするシナリオでの線量を低下させ、核種放出率を低下させる条件を設計に反映するための設計方針が必要となる。

しかしながら、廃棄体の仕様において放射能量は与条件であり、施設設計において低減することはできない。一方で、放射能濃度は、表 5.3-12　規制における方針；長半減期核種の濃度制限に関する要求(1/2)表 5.3-12 に記載されるように混合土壌の上部での生活に対しての線量であり、混合土壌の定義として「混合土壌の重量は、廃棄物埋設地の構成物である、埋設される廃棄体、人工バリア、埋戻し材及び埋設坑道の外縁を構成する支保工等の構造物の重量の総和を設定」とある。したがって、廃棄体以外の埋戻し材及び埋設坑道の外縁の体積を増やすことによって、濃度の低下を見込むことができる。規則に対応する条件を表 5.3-16 にまとめる。

表 5.3-16　規制に対応可能と予想される設計の条件（長期安全性）

	前提となる条件	対応する規制	対応する設計条件
廃棄体仕様	処分容器の寸法･材質･遮蔽厚さ	第12条第1項-1.6、1.7	廃棄体製作
	放射能濃度	第12条第1項-1.8.二-イ、ロ	空洞体積、空洞断面積、区画大きさ
	放射能量	第12条第1項-1.8.二-イ	空洞体積、処分密度
	廃棄体の物理特性･化学特性･熱特性	第12条第1項-1.6、1.7	廃棄体性状
	全体物量	第12条第1項-1.8.二-イ、ロ	空洞の総体積、空洞形状、空洞配置
地質環境	地質･地質構造	第12条第1項-1.2	処分深度
	岩盤の力学特性	第12条第1項-1.4	処分深度、空洞形状
	岩盤の熱特性	第12条第1項-1.8.二-イ	処分深度、空洞配置
	地温勾配	第12条第1項-1.8.二-イ	処分深度、空洞配置
	地下水流動特性 （生活圏までの距離）	第12条第1項-1.8.二-イ	地下施設配置位置、配置方向
	地化学環境 （収着性、移行形態）	第12条第1項-1.8.二-イ	処分深度、人工バリア構造
	物質移行特性（収着性、移行挙動）	第12条第1項-1.8.二-イ	処分深度、人工バリア構造
	地理・地形	第12条第1項-1.2	地下施設の配置位置・処分深度
	地震･断層活動	第12条第1項-1.1.一、二	地上地下施設の配置位置と構造
	火山･火成活動	第12条第1項-1.1.三、四	地下施設の配置位置
	隆起･浸食	第12条第1項-1.2、1-8.一	地下施設の配置位置・処分深度
	天然資源	第12条第1項-1.3	地下施設の配置位置・処分深度
	気候・海水準変動	第12条第1項-1.2	地下施設の配置位置・処分深度
	洪水･津波	第6条第1項	地上施設の配置位置と構造
人工バリア仕様	基本設計	第12条第1項-1.8.二-イ	空洞の形状
	基本設計	第12条第1項-1.8.二-イ	バリア材料の選定
	基本設計	第12条第1項-1.8.二-イ	バリア機能の配置、組み合わせ
	基本設計	第12条第1項-1.8.二-イ	バリア材料の構造
	基本設計	第12条第1項-1.8.二-イ	地質環境（流動特性）との関係

長期安全性に対する規制条件としては原子力規制委員会規則で定める基準（許可基準規則）の中の第 12 条が適用される。処分概念を変える可能性のある要件としては第 10 条の「回収可能性」（表 5.3-8 参照）が考えられるが、これに関しては、現状において、概ね方針が固められている廃棄体のパッケージ等の見直しも必要であり、処分場の設計条件（ここでは、技術オプションの選択）だけではなく、廃棄体製造を含む処分全体の計画やバリアの概念そのものを見直す必要があるものと予想される。また、「回収の容易性」を考える概念は現状の課題でもある。ここでは、（楽観的ではあるが）「人為的に処分されたものの回収は可能であろう」との前提に、「閉鎖後の閉じ込め」「隔離」に注目した概念、すなわち「廃棄物中の放射性核種が移行し難い」環境が有利となるようなバリア条件を考え、処分場がより安全性を増す方向の概念の構築に資するような設計条件を考えることとした。設計での対応を表 5.3-17 にまとめる。

表 5.3-17　線量低減のための設計での対応案

	前提となる条件	対応する設計条件	設計条件の線量解析への反映
廃棄体仕様	処分容器の寸法･材質･遮蔽厚さ	廃棄体製作	容器の気密性維持期間の想定
	放射能濃度	空洞体積、空洞断面積、区画大きさ	廃棄体と他の領域の比率、廃棄体の濃度分布の想
	放射能量	空洞体積、処分密度	（与条件）
	廃棄体の物理特性･化学特性･熱特性	廃棄体性状	廃棄体の種類と浸出率の想定
	全体物量	空洞の総体積、空洞形状、空洞配置	（与条件）
地質環境	地質･地質構造	処分深度	地点、地質条件の選択
	岩盤の力学特性	処分深度、空洞形状	地点、地質条件の選択
	岩盤の熱特性	処分深度、空洞配置	地点、地質条件の選択
	地温勾配	処分深度、空洞配置	地点、地質条件の選択
	地下水流動特性 （生活圏までの距離）	地下施設配置位置、配置方向	地点、地質条件の選択、坑道の配置方向
	地化学環境 （収着性、移行形態）	処分深度、人工バリア構造	地点、地質条件の選択
	物質移行特性（収着性、移行挙動）	処分深度、人工バリア構造	地点、地質条件の選択
	地理・地形	地下施設の配置位置・処分深度	地点、地質条件の選択
	地震･断層活動	地上地下施設の配置位置と構造	地点、地質条件の選択
	火山･火成活動	地下施設の配置位置	地点、地質条件の選択
	隆起･浸食	地下施設の配置位置・処分深度	地点、地質条件の選択
	天然資源	地下施設の配置位置・処分深度	地点、地質条件の選択
	気候・海水準変動	地下施設の配置位置・処分深度	地点、地質条件の選択
	洪水･津波	地上施設の配置位置と構造	地上施設の位置
人工バリア仕様	人工バリア設計の概念	空洞の形状	空洞形状、放射能濃度
	人工バリア設計の概念	バリア材料の選定	収着性、拡散性、施設浸透水量
	人工バリア設計の概念	バリア機能の配置、組み合わせ	廃棄体部での収着体積、施設浸透水量
	人工バリア設計の概念	バリア材料の構造	バリア厚さ、体積、施設浸透水量
	人工バリア設計の概念	地質環境（流動特性）との関係	施設浸透水量

(5) 地質環境への対応

設計に係る多くの方針は選択する地質環境に依存する。SSR-5[1]の要件 16 においては以下の様に記述されている。

「SSR-5 要件 16：処分施設の設計

処分施設とその人工バリアは､危険性を伴う廃棄物を閉じ込め､母岩となる地層(host geological formation) および/または地表環境と物理的、化学的に適合し、立地環境によりもたらされるそれらの特質を補完する閉鎖後の安全特質をもたらすように設計されなければならない。施設とその人工バリアは、操業期間中の安全をもたらすように設計されなければならない。

4.30. 放射性廃棄物の処分施設の設計は、処分される廃棄物の種類ならびに、母岩となる地層（host geological formation）および／または地表環境によって、大きく異なるかもしれない。一般に、立地環境によりもたらされる安全特質を最適に活用しなければならない。これは、許容できない長期的なサイトの擾乱を引き起こすことなく、それ自体はサイトによって防護され、天然バリアを補完する安全機能を果たす処分施設を設計することにより、なされなければならない。

4.31. レイアウトは、廃棄物が最も適した位置に定置されるように設計されなければならない。廃棄物中に核分裂性物質が存在する場合、未臨界配置を維持することが、設計上の考慮の一部でなければならない。地層処分施設の立坑や密閉などの主要な特質が適切に配置されなければならない。施設内で利用される材料は、施設内の支配的条件下（例えば、化学と温度の条件）で劣化に耐えるものでなければならず、また、処分システムのいかなる要素の安全機能に対する好ましくない影響を制限するために選択されなければならない。」

この様に、地質環境の特性に沿った処分施設の設計が求められるが、地質環境を特定していない条件での本研究においては、地質環境へ対応する設計条件については詳細な検討がし難いと予想される。可能な範囲としては、令和 4 年度までの本研究で採用した「岩盤の透水性」で区分する程度の可能性がある。ただし、透水性に関して平均的な透水性を想定するか、断層や透水性の不均質性を想定するかによって人工バリア周りの評価方法が異なることになる。これに関しては、課題として残すが、次年度の感度解析の方針として不均質性の条件についても検討する。

5.3.2　感度解析モデルの開発

(1) モデル構築の目的

感度解析の目的は性能（ここでは閉鎖後長期性能）を前提として、どの様な人工バリアが適切であるかの検討を多様な設計条件を踏まえて評価することにある。

5.3.1　において規制側の要求をどのような設計の条件に適用できるかの検討を行った。条件の中には地質環境の選択等の受動的な条件が多い。坑道や人工バリアの配置・構造のように積極的に設計によって安全性を向上させる可能性が高いものとしては、坑道の構造や人工バリアの材質等であり、以下の条件をパラメータとして感度解析に取り込めるような解析モデルを構築する。

- 複数のバリアの構成と順序、形状の考慮
- 人工バリア材質の多様性を考慮（分配係数等の多様性や不確実性に考慮）
- バリア材料の時間的変遷を考慮
- 坑道の設計条件に応じた施設浸透水量の適用

また、放射性核種が含まれる廃棄体の特性を線量解析の結果に反映させることを目的として、中レベル処分の対象廃棄体の電気事業連合会の取りまとめ結果[7]を用いるものとする。

- 廃棄体性能の考慮（インベントリーの見直し、廃棄体からの核種の浸出速度、吸着層と廃棄物量の比率）

感度解析をより簡便に実施する目的として、4 因子公式[8]の採用を考える。なお、規制委員会の示すシナリオの中で、濃度制限に関するシナリオ（表 5.3-12 参照）に関しては、予備的な評価手法として検討を行うものとする。

- 自然事象シナリオ以外の考慮→ 4 因子公式等の適用

バリア材料の時間的な変遷のモデルへの組み込みは容易であるが、劣化挙動の同定が現状においても大きな課題となっている。ただし、感度解析の目的が、「どの程度の期間、バリアとしての性能が必要か？」といった、いわゆる「逆解析」の観点からパラメータの変動について以下の機能を組み込むものとする。

- バリアの劣化開始時期
- バリアの劣化終了時期
- 劣化前のパラメータ値
- 劣化後のパラメータ値
- 劣化挙動に関する関数

(2) 核種インベントリーと評価対象核種

インベントリーは、閉鎖前、閉鎖後の安全性の評価において前提条件としての基本的な量である。実廃棄体が存在しない現在、インベントリーは、原子炉の運転記録や燃料サイクルの稼働の想定での値である。令和 2,令和 3 年度の本検討の感度解析において用いた学会標準[9]では、原子炉廃棄物については「原子力安全委員会」が濃度上限値として提示している「軽水炉・ガス炉、重水炉・高速炉」の値を、サイクル廃棄物に関しては「日本原燃」、「JAEA」で提示された値を用いている。濃度上限値を参照していることから、設定値は保守性を重視しているものと予想される。

他方、電気事業連合は平成 26 年 12 月 25 日に、運転中の軽水炉発電所（48 プラント（BWR:24 プラント、PWR:24 プラント））、廃止措置中の軽水炉発電所（8 プラント）及び日本原子力発電（株）東海発電所、建設中の軽水炉発電所（2 プラント）並びに日本原燃（株）再処理工場・MOX 工場から発生する運転廃棄物及び解体廃棄物（東京電力（株）福島第一原子力発電所 1～3 号機の解体廃棄物は除く）のうち、余裕深度処分対象となる廃棄物について、その種類、物量、放射能量等の基本データを示すと共に、その評価方法について示している。

放射能の発生量は、炉のタイプ、炉内の位置毎の燃焼条件、中性子束分布、燃料条件に基づき、放射化計算（ORIGEN-2、ORIGEN-S 利用）し算出している（BWR 例　図 5.3-4 参照）。これは、PWR、GCR、再処理工場 MOX 工場毎に算出され以下の量がまとめられている。

① 廃棄物物量
② 廃棄物放射能濃度
③ 廃棄体仕様
④ 廃棄体放射能濃度（内容物のみ、容器込み、容器除く）
⑤ 廃棄体個数
⑥ 総放射能量

総放射能量の比較結果を図 5.3-5~図 5.3-7 に示す。2 桁以上の相違がみられることから、インベントリーの不確実性をふまえた感度解析が必要となる。しかしながら、インベントリーは与条件として考慮するべきであり、線量解析結果に対しては、ほぼ線形に作用することから固定した解析（電気事業連合会算出値）で評価を行い、結果に対する考察のみでも可能となるものと考えられる。今後の感度解析の中で決定する。

線量を支配する核種は一部であるものの、図 5.3-5~図 5.3-7 に示された核種を評価対象とする。

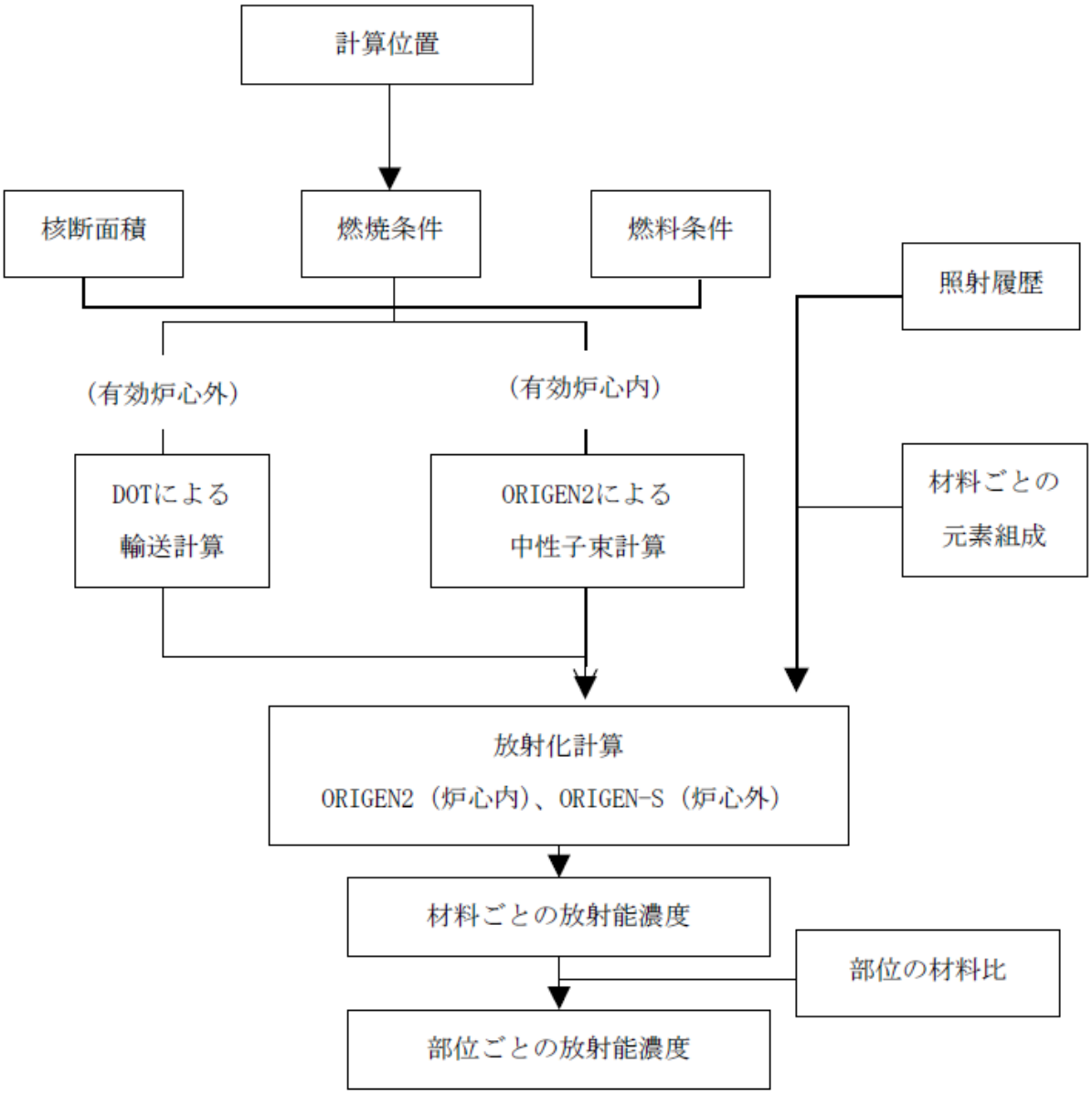


図 5.3-4　BWR 運転廃棄物（放射化金属）及び解体廃棄物の放射化計算フロー[7]

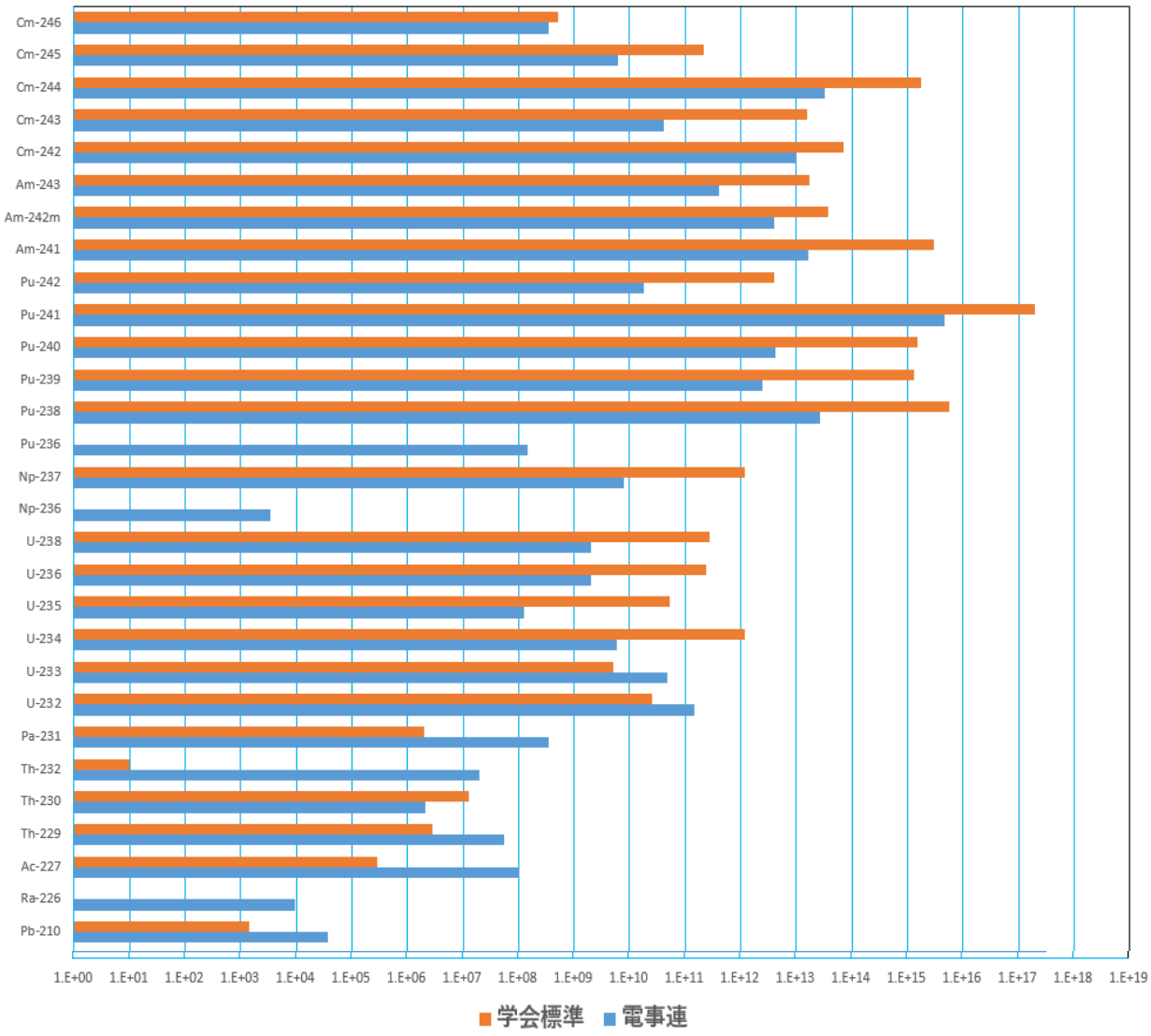


図 5.3-5　総インベントリーの比較（1）

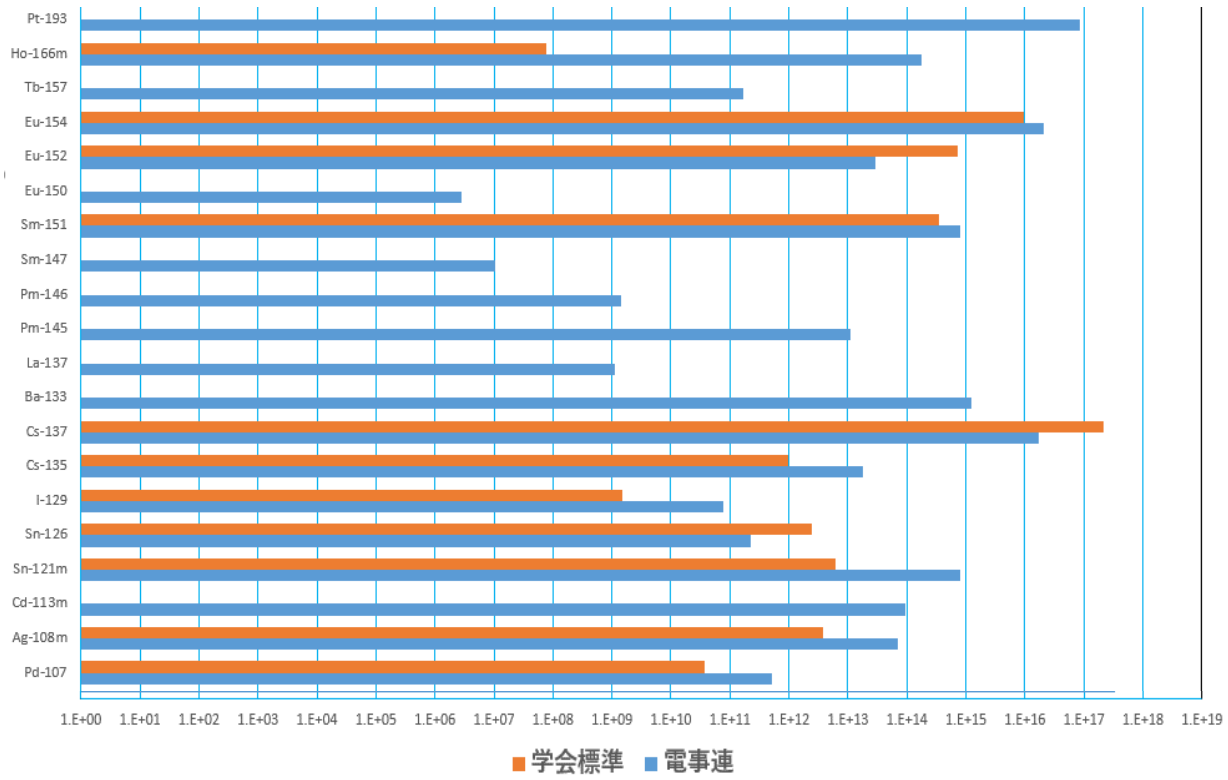


図 5.3-6　総インベントリーの比較（2）

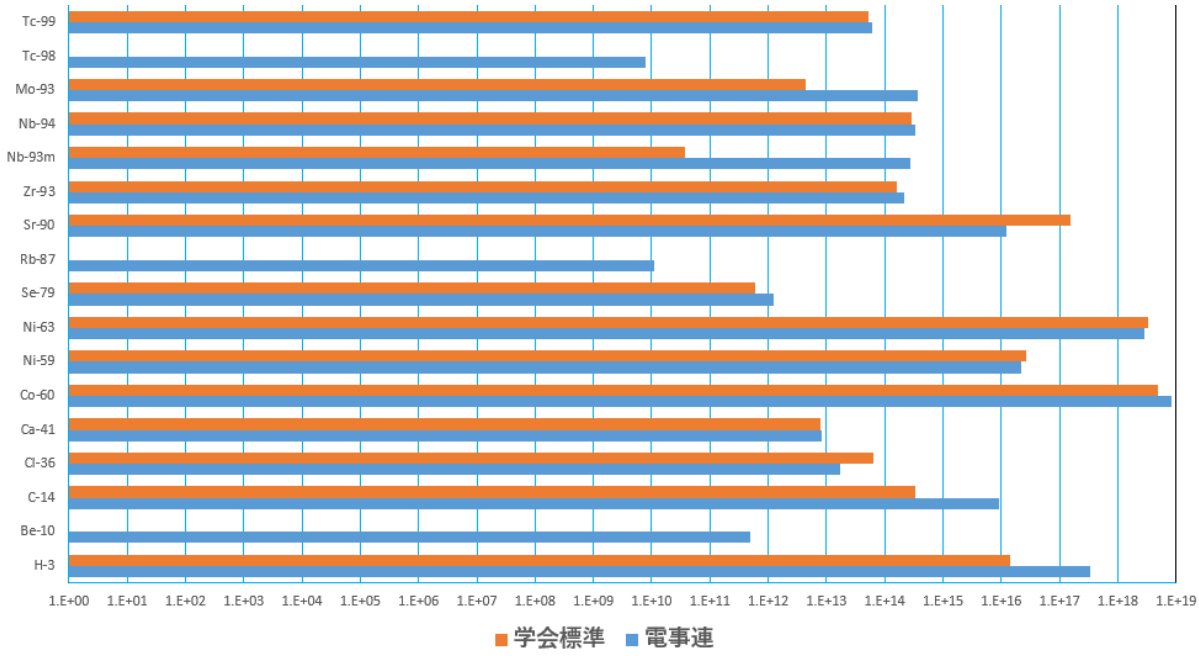


図 5.3-7　総インベントリーの比較（3）

(3) 施設浸透水量の具体化

1) 坑道直交方向の流向における施設浸透水量

坑道内部及び廃棄体領域を流れる地下水流量は、人工バリアの核種の閉じ込め性に影響を与えることから、規制においても「地下水の浸入（施設浸透水量）の抑制」に関しては、表 5.3-9 においてもバリアの機能としてカウントしている。

令和 4 年度までの本研究では、多重円筒モデルを用いて、坑道長手方向に対して直交する条件を仮定して、解析解を用いた人工バリア内の流量を算出し、図 5.3-8 に示すように核種移行モデルに組み込んだ。

ここで用いられた解析解は、様々な評価において利用されている。次年度の感度解析モデルは、本モデルを拡張し「処分区画」に適用するための検討を行うことから、本解析解と数値解（PFLOTRAN 利用[10]）を相互に比較し、3 次元への拡張を行うこととした。なお、PFLOTRAN は、放射性核種の移行と水理解析結果のリンクも組み込まれていることから、今後の検討に資することを目的として、移流分散解析との比較も実施した。

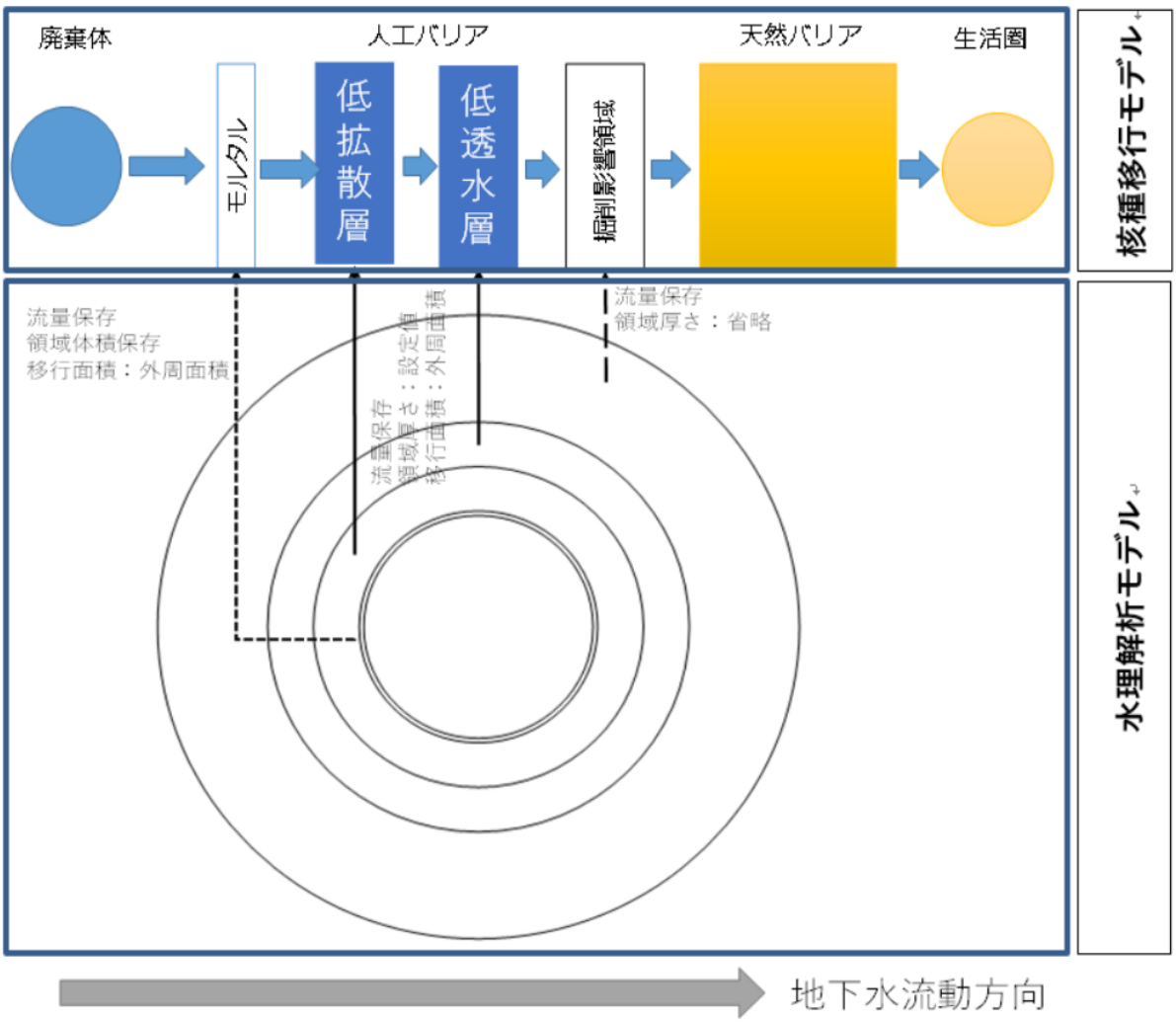


図 5.3-8　水理モデルと核種移行モデルのリンク

a. PFLOTRAN の検証（水理解析２次元）

(a) 使用する数値解モデル

PFLOTRAN での Solver 等の選択は、以下のとおりである。

- プロセスモデル　：SUBSURFACE_FLOW
- 支配方程式：　RICHARDS の方程式
- 数値解析方法：　DIRECT ソルバー（1CPU）
- 解析次元：２次元
- メッシュ構成：構造格子、226×1×226 の不等間隔メッシュ

(b) 流動解析形状

比較解析は、同心円形状の領域を仮定し各領域に表記の透水係数を仮定し、広域における動水勾配を 0.01 として実施した。解析解においては∞距離、数値解は 100mの正方形の形状において境界条件を与える。解析形状及び設定パラメータを図 5.3-9、表 5.3-18 にまとめる。

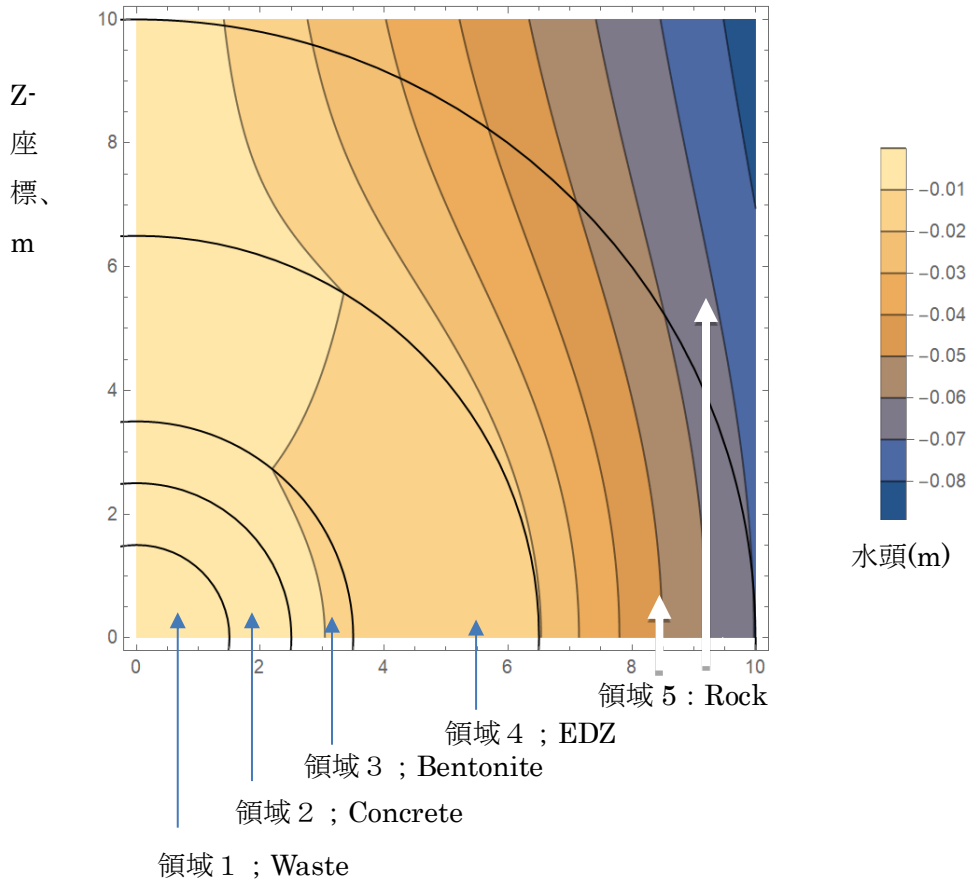


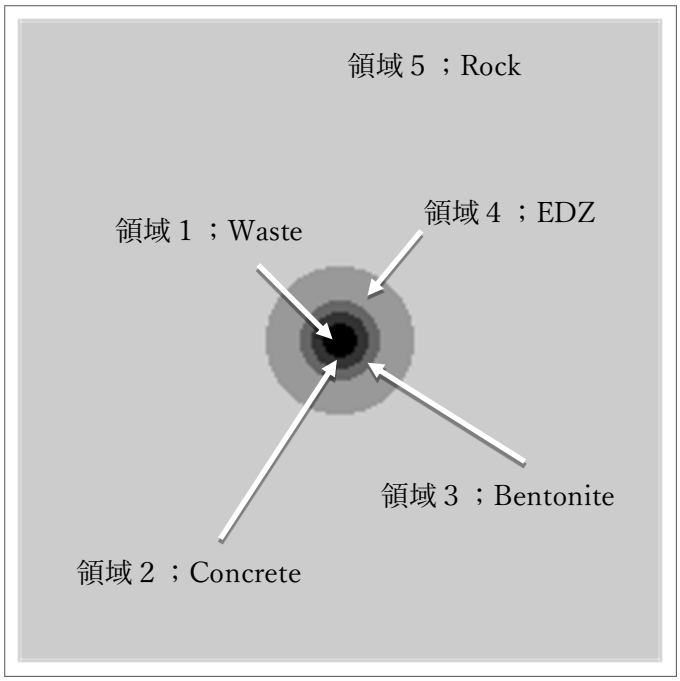
図 5.3-9 解析形状（人工バリア部分、1/4 の形状で表示）

表 5.3-18　比較計算における透水係数の設定

領域	透水係数(m/s)	間隙率(-)
1	1×10^{-6}	0.2
2	1×10^{-8}	0.2
3	1×10^{-9}	0.4
4	1×10^{-7}	0.3
5	1×10^{-8}	0.25

(c) PFLOTRAN による水理解析結果の比較

PFLOTRAN では、解析解を導出するための形状に基づき、構造格子（GRID）で離散化を行った。領域サイズは、領域１～４を含む領域を 0.25m とし外部の領域を 0.5、全体のサイズを 100×100m として解析を実施した。



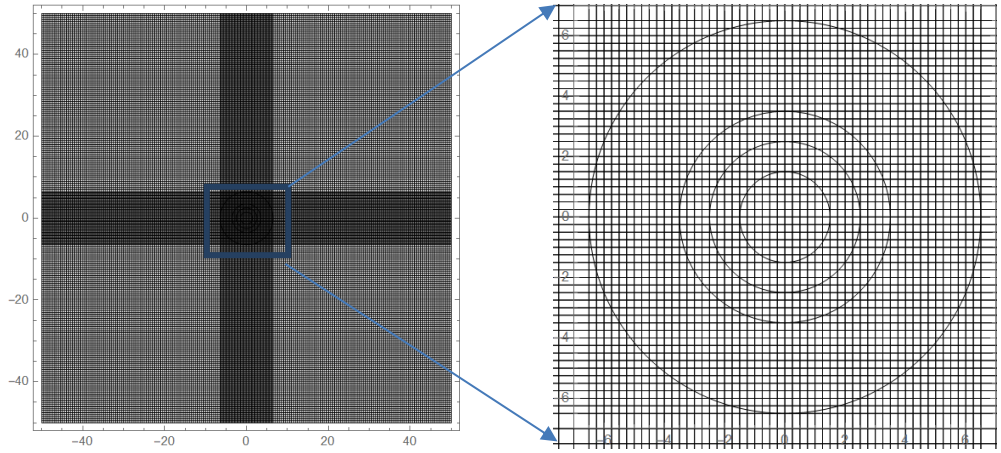
材料配置（構造格子上）

図 5.3-10　PLOTRAN における形状モデル

なお、本解析では Z 方向を重力方向として標準的な水の物性値及び重力加速度を設定している。解析メッシュ（構造格子グリッド）を図 5.3-11 に示し、設定した物性値を表 5.3-19 に示す。

表 5.3-19　基本物性の設定値（数値解で利用）

重力加速度	9.80665 m/s^2
水密度	997.16 kg/m^3
水粘性係数	8.904156 $\times10^{-4}$ Pa・s

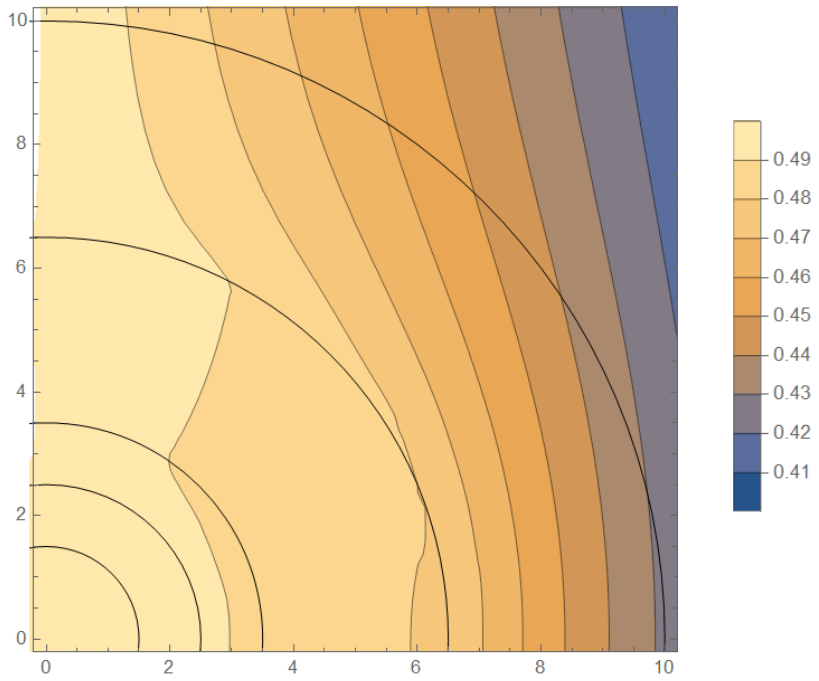


構造格子グリッド

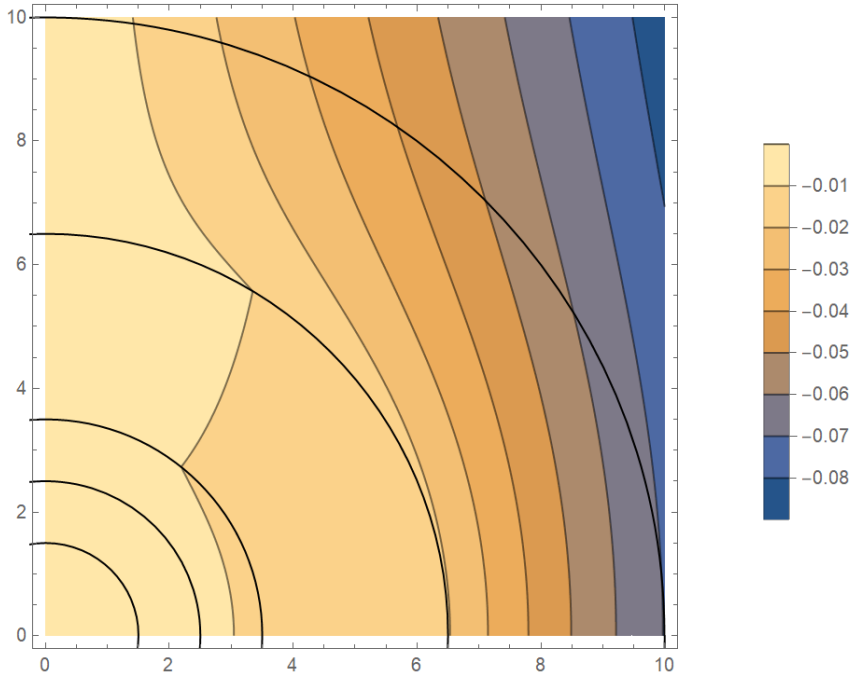
メッシュサイズ：粗い部分：0.5m

詳細部：0.25m

図 5.3-11　数値解析における構造格子グリッド



PFLOTRAN の解（水頭）



解析解（水頭）

注：凡例は、水頭分布（絶対値ではなく、差を比較すること）

図 5.3-12 水頭分布の解析結果の比較

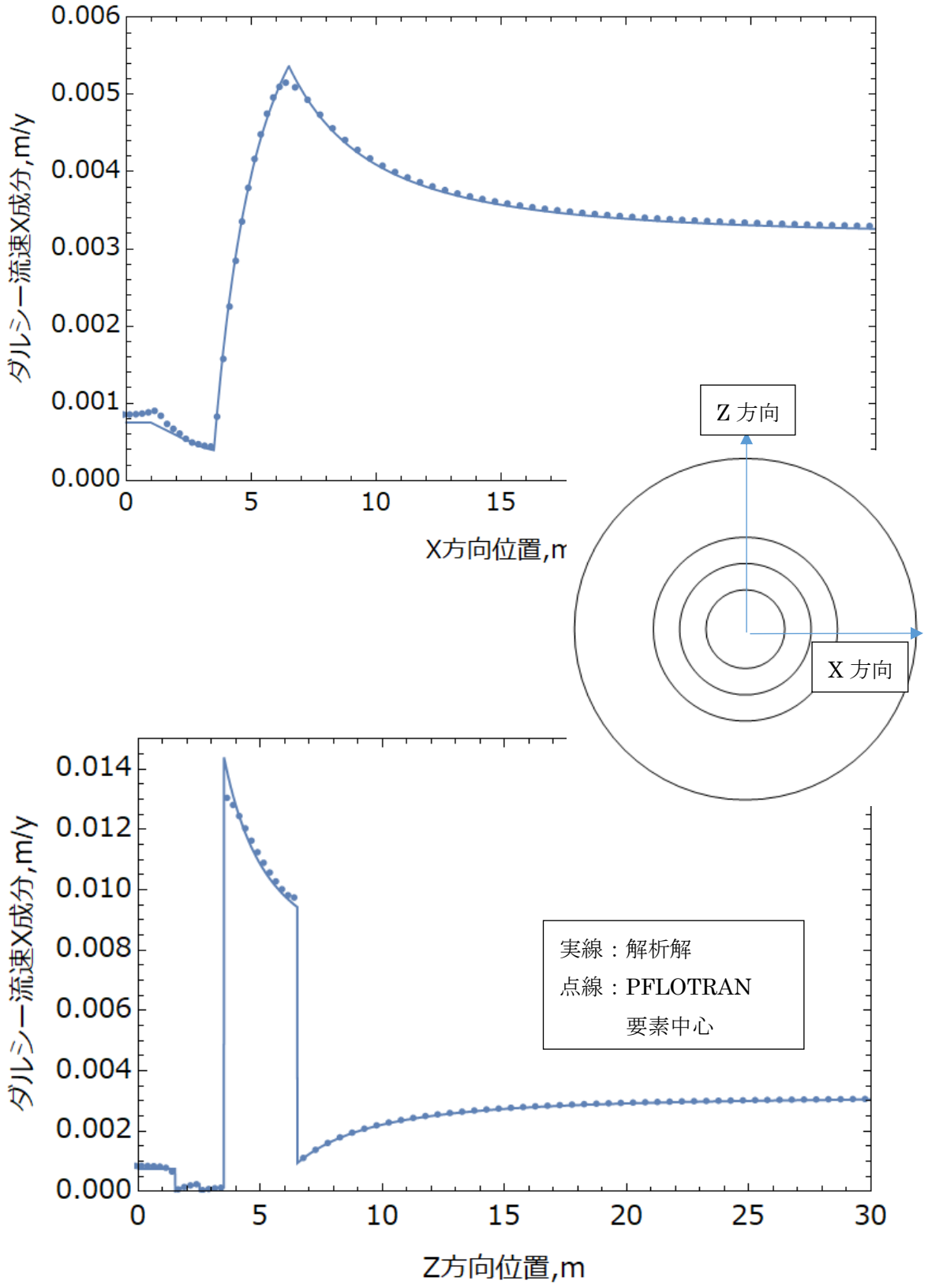


図 5.3-13 流速（X 成分）の比較

図 5.3-12 に水頭分布を示す。数値解と解析解の相違は以下の点にある。

- 解析領域の大きさ：解析解／無限領域　数値解／100m×100m
- 境界条件:解析解／無限遠において0.01の水頭分布　数値解:左右端で水頭差1m、上下不透水境界
- 重力方向の考慮：解析解／なし　数値解／あり

これらが異なるものの、全水頭の分布は比較的よく一致している。透水係数のコントラストは、緩衝材とゆるみ域で2桁あり、そのため、境界部の水頭分布は透水性の差が大きな掘削影響領域と緩衝材の部分で収束性が良くない結果となっている。完全に一致させるためには、解析領域を大きくし、解析メッシュを細かくする必要があるものと予想される。

図 5.3-13に、ダルシー流速（X成分）の比較結果を示す。材質が切り替わる部分で差異がみられるものの、精度よく一致していると考えてよい。

解析解と数値解は相互に一致すると考えてよく、核種移行モデルに組み込んだ解析解の妥当性を確認することができた。

b．PFLOTRANの検証（1次元物質移行解析）

(a) 使用するモデル

数値解を用いた多次元の核種移行解析を本業務において利用することは、現時点で考えていない。PFLOTRAN は水理解析とリンクした物質移行モデルの取り扱いが可能であり、業務の方向性によっては利用する可能性もある。そのため1次元ではあるが、簡単な解析解との比較検証を実施した。

PFLOTRAN：利用モデル

- プロセスモデル　：SUBSURFACE_TRANSPORT
- 支配方程式：　移流分散方程式、UFD（Decay Process Model）
- 数値解析方法：　GIRT ソルバー（マルチ CPU 利用可）
- 解析次元：1次元
- メッシュ構成：構造格子、200×1×1、100×1×1、400×1×1 の3パターンの等間隔メッシュ
- 境界条件（濃度境界）　左端：1.0　右端：0　（規格化濃度とした）
- 解析領域　0～100mの領域

解析解モデル（関数）[11]

- 境界条件（濃度境界）　左端：1.0　無限遠：0.0、解析解モデルは無限遠での濃度を0としていることから、数値解とは右端で相違が想定される。

$c\ [t_, x_, Dx_, vx_]:=$(引数：時間: t、評価位置: x、拡散分散係数: Dx、実流速: vx)＝

$$\frac{1}{2}\mathrm{Exp}[\frac{\mathrm{vx}\,x}{2\mathrm{Dx}}](\mathrm{Exp}[-\frac{\mathrm{vx}\,x}{2\mathrm{Dx}}]\mathrm{Erfc}[\frac{x}{\sqrt{\mathrm{Dx}}}/(2\sqrt{t})-\frac{\mathrm{vx}}{2\sqrt{\mathrm{Dx}}}\sqrt{t}]$$
$$+\mathrm{Exp}[\frac{\mathrm{vx}\,x}{2\mathrm{Dx}}]\mathrm{Erfc}[\frac{x}{\sqrt{\mathrm{Dx}}}/(2\sqrt{t})+\frac{\mathrm{vx}}{2\sqrt{\mathrm{Dx}}}\sqrt{t}])$$

・ 分配係数を用いる場合は、実流速: vx と拡散分散係数: Dx を遅延係数で割ったものを利用

表 5.3-20 物質移行モデルでのパラメータ設定

分散長	0、1、10	m
分配係数	0、0.01、1	m^3/kg
母岩真密度	2650	kg/m^3
遅延係数	（分配係数から算出）	-
拡散係数	0.0315576＋分散係数	m^2/y
分散係数	分散長×流速	m^2/y
母岩空隙率	0.25	-
ダルシー流速	0.01	m/y
実流速	0.04	m/y
母岩移行距離	100	m
評価時間	300、1000、3000	y
解析メッシュ数	100、200、400 （1m,0.5m,0.25m/Mesh）	m

(b) 比較結果

a）解析メッシュ数に関する感度

図 5.3-14 に解析メッシュ数を変化させた比較結果を示す。メッシュの大きさを変化させた場合のペクレ数（グリッド Pe 数）は、表 5.3-21 に示すとおりである。

表 5.3-21 メッシュ数とペクレ数の関係

メッシュ数	分散長 m	グリッド Pe 数 （流速×グリット長さ）／（分散係数＋拡散係数）
100	0	1.27
200	0	0.63
400	0	0.32

境界条件の相違による予想の様に右端での相違は大きい。しかしながら、内部での比較結果は良好で、メッシュ数が大きくなるに従い、数値解は解析解に漸近する。特に、グリッド Pe 数が 0.4 以下では、解析解と数値解はほぼ一致する。数値解の利用においては、Pe を小さくすることが求められる。

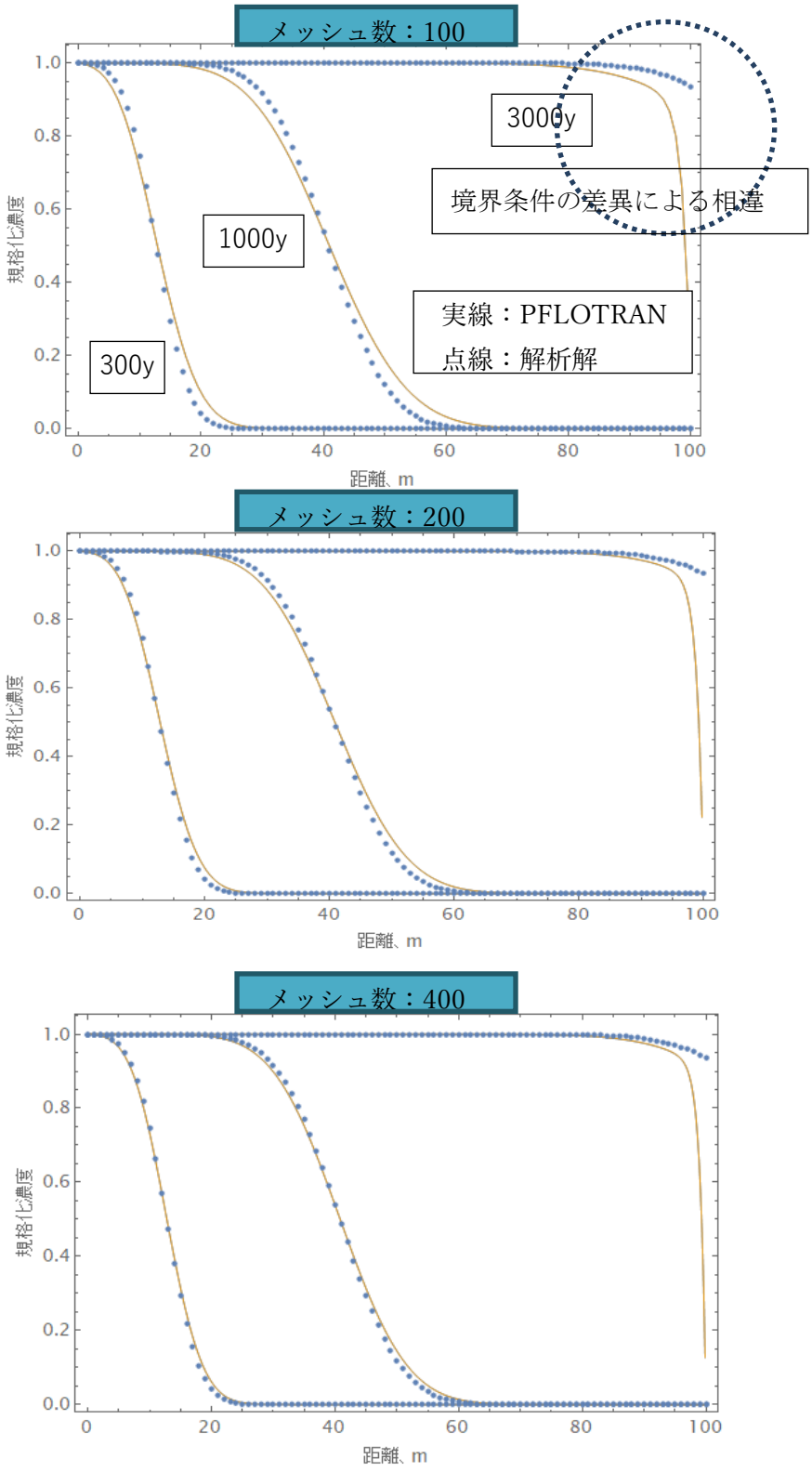


図 5.3-14　物質移行モデル、解析メッシュ数の相違による比較

b）分散長に関する感度

分散長は、移流・分散（拡散）方程式では方程式の性質上、拡散係数として組み込む場合が多い。分散効果をより精度よく表す方法として、非整数型の微分方程式等、検討はされているものの一般的ではない。PFLOTRAN においても、2 次の偏微分方程式の適用が組み込まれている。

そのため、分散長の増加は拡散係数の増加と同義であり、結果としてはペクレ数を低下させる効果があり、数値解としては安定する方向に向かう。図 5.3-15 に分散長を変化させた数値解と解析解の比較を示す。条件設定は、表 5.3-20 と同じであり、分配係数は 0m^3/kg としている。表 5.3-22 に、メッシュ数との検討と同様にペクレ数を示す。

表 5.3-22 分散長とペクレ数の関係

メッシュ数	分散長	グリッド Pe 数（流速×グリット長さ）／（分散＋拡散係数）
200	0	0.63
200	1	0.28
200	10	0.05

メッシュ数の検討と同様にペクレ数の小さなケースでは解析解と数値解は良好に一致する。

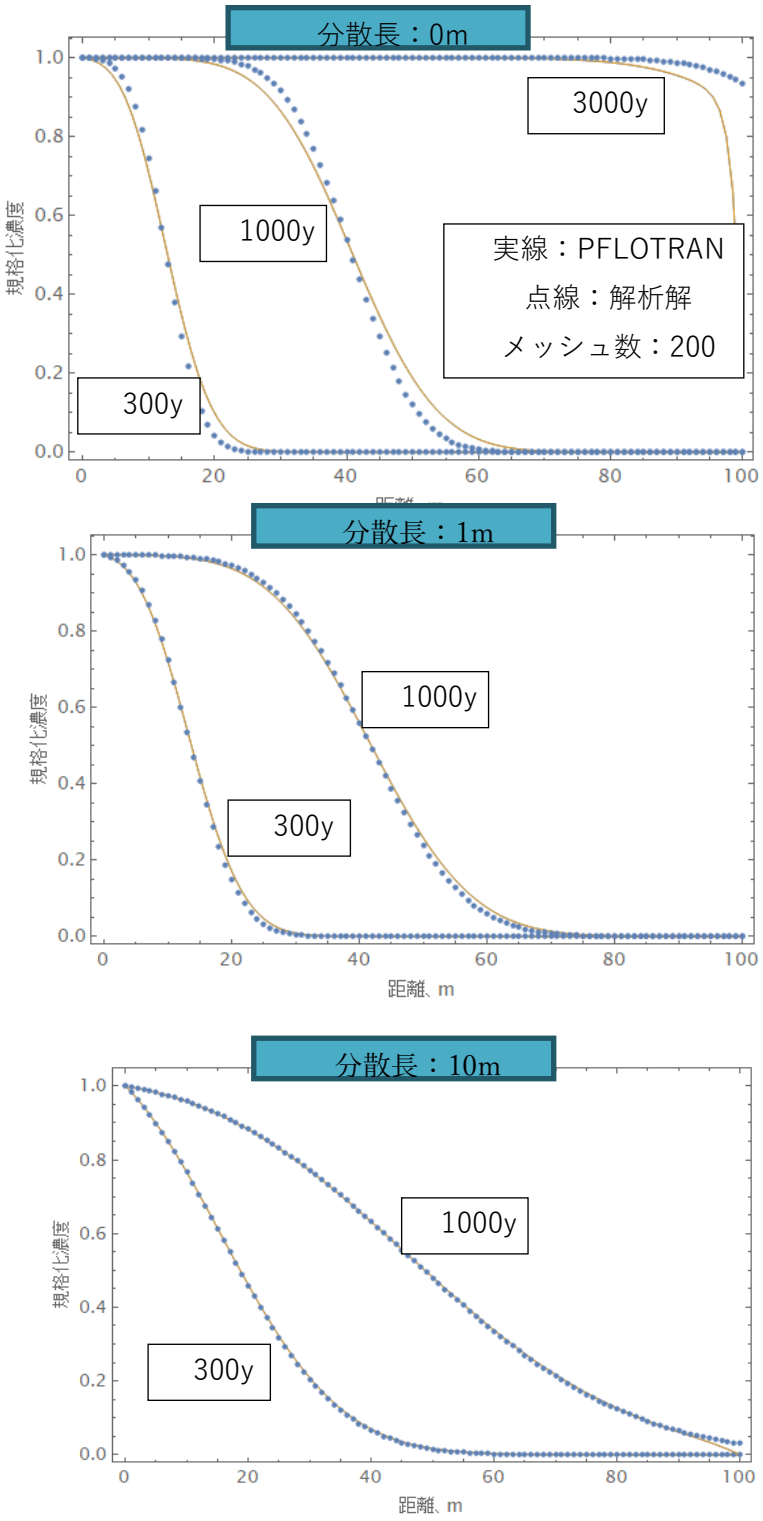


図 5.3-15 分散長の変化による数値解と解析解の比較

c）分配係数に関する感度

核種移行解析の実施においては、岩盤に対する元素毎の吸着挙動を組み込む必要がある。これまでの多くの性能評価の研究においては簡易な線形吸着モデルの仮定が多い。PFLOTRAN においては、線形・非線形吸着の何れも選択可能であるが、一般的な線形吸着モデル（Kd モデル）に関して、解析解と数値解との比較を行った。

図 5.3-16、図 5.3-17 に比較結果を示す。図 5.3-16 は分散長 0m、メッシュ数 200 とする場合の結果であり、時間の経過に従い誤差が大きくなる。分配係数が大きなケース（図下側）では、解析が必要な期間が延びることから誤差は増加しているものと予想される。ペクレ数は 0.6 程度であり、解析時間が増加することにより誤差範囲も増加している。

図 5.3-17 は、分散長を仮定した場合の結果でありペクレ数は 0.05 程度まで低下する。分配係数が 0.01m³/kg のケースにおいては、解析解と数値解は一致するが分配係数が 1m³/kg のケースにおいては、分散長を仮定しないケースよりも一致の程度は良好であるが、解析解と数値解は誤差が生じている。検証解析数を増やす必要が認められるものの、移行距離が短い範囲（バリアからの移行率が増加し始める初期）においては、数値解の場合では数値分散等の誤差が大きい可能性がある。

d）PFLOTRAN の適用性

今後、人工バリアからの移行率等の解析モデル構築や天然バリア出口での移行率のモデルを高度化するためには、設計条件を反映した 2 次元又は 3 次元の核種移行モデルの利用が考えられることから、PFLOTRAN の物質移行に関して簡易な体系で解析解との比較を行った。結論としては、ペクレ数を適切に設定することにより、多次元の核種移行解析に適用可能であると予想される。核種の出始め等に誤差が生じる可能性があることを認識する必要が有るが、ツールとしての適用可能であると予想される。

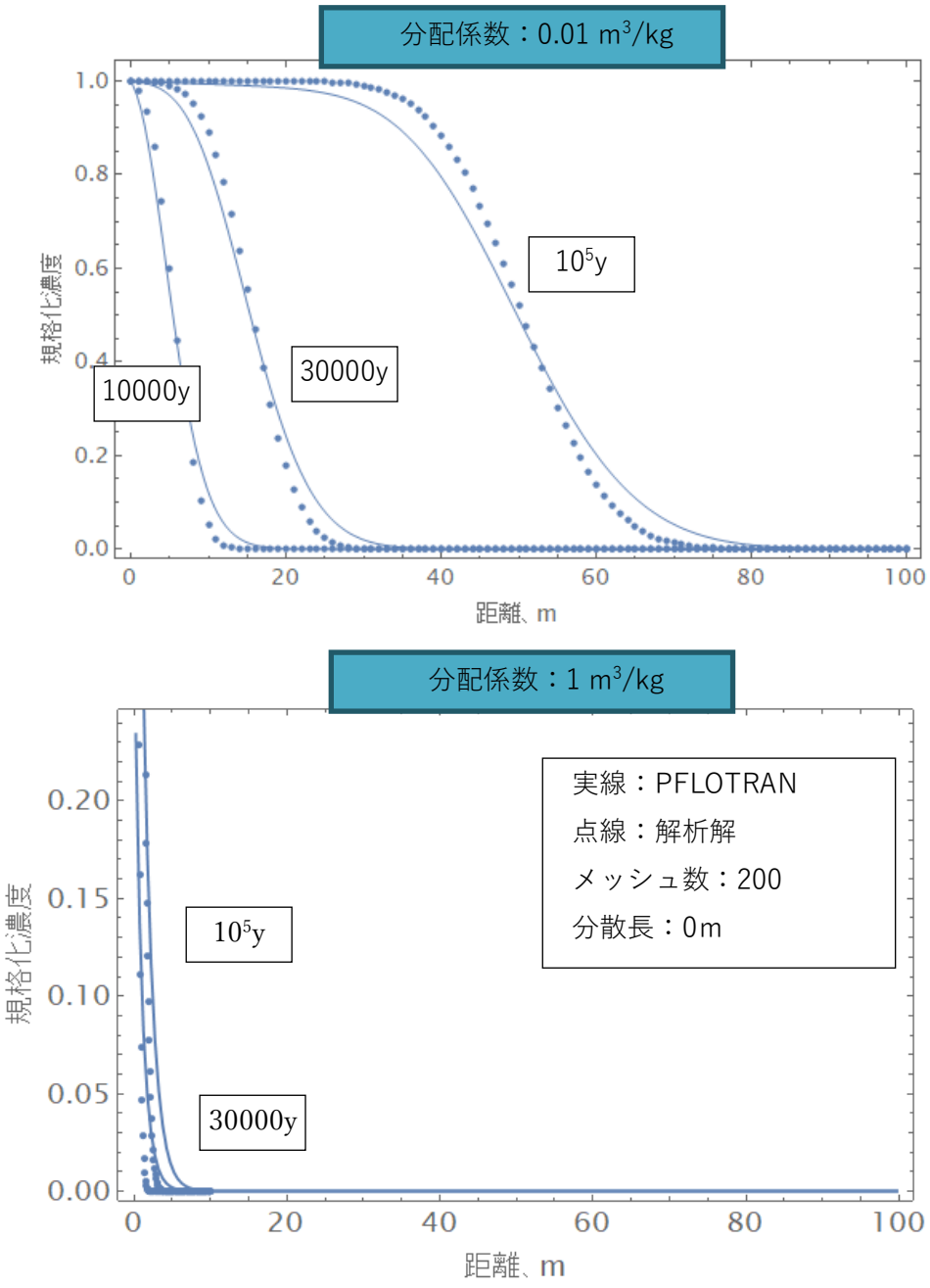


図 5.3-16　物質移行モデル、分配係数の相違による比較

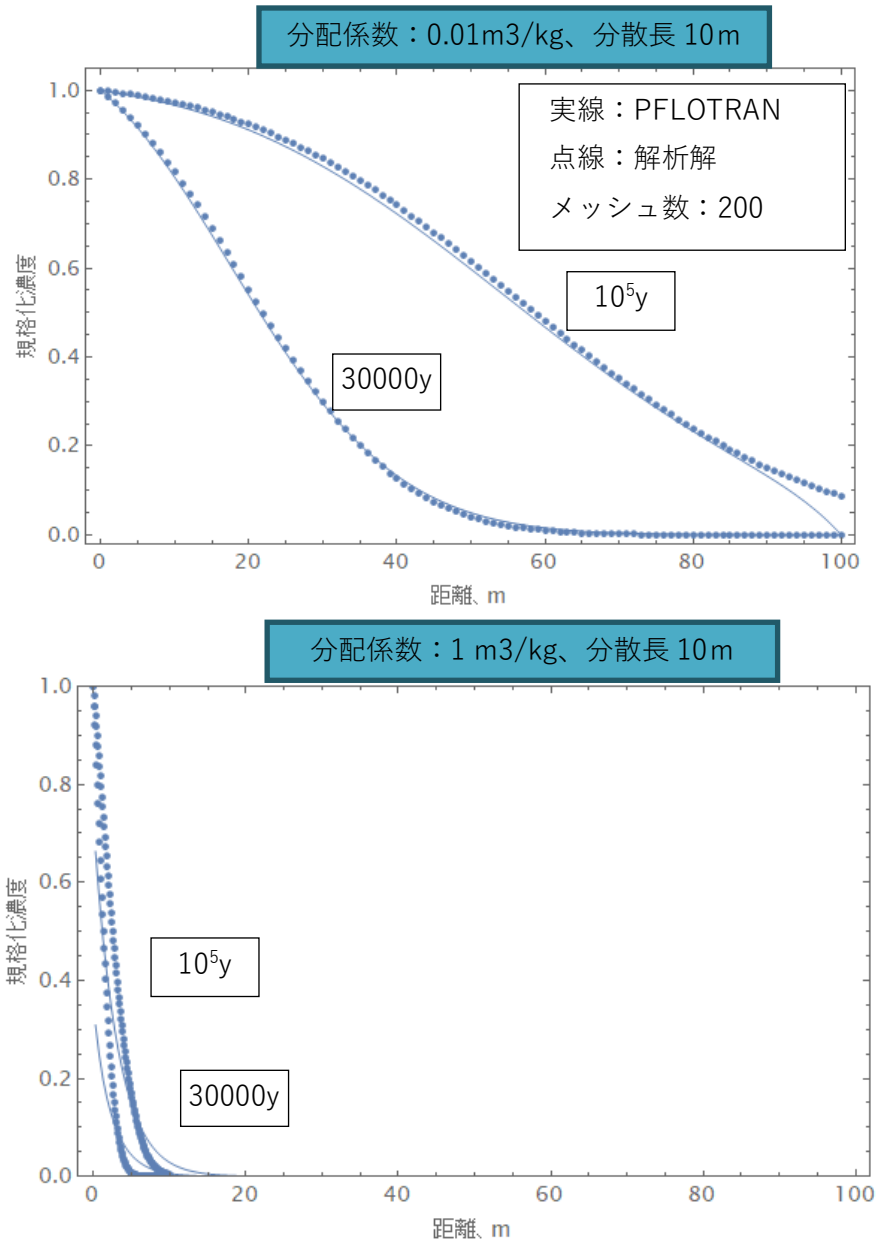


図 5.3-17　物質移行モデル、分散長を考慮した場合の分配係数の相違による比較

2) 球モデルによる浸透水量の近似

a. 目的

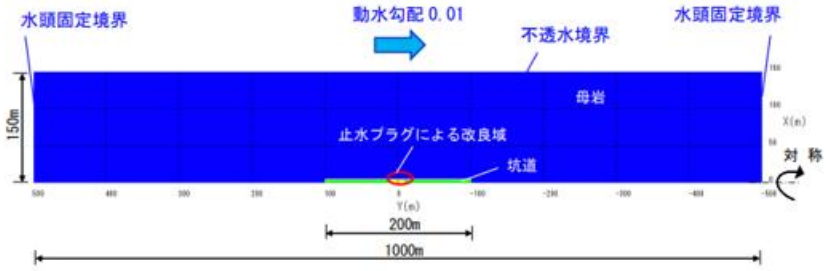
施設に流入する地下水流量は坑道の配置や廃棄体の定置領域の区切り方で異なる。設計の条件を踏まえた核種移行の感度解析の実施には、坑道の形状や坑道の配置方法、処分区画に関する設計方針を反映することが望ましい。

しかしながら、核種移行解析の感度解析において、解析の都度、多次元モデルで坑道等の内部の流量を多次元モデルで評価することは合理的ではないと考えられる。そこで、GoldSim[12]の利用を前提として、これに組み込むための簡易モデルの開発を行った。

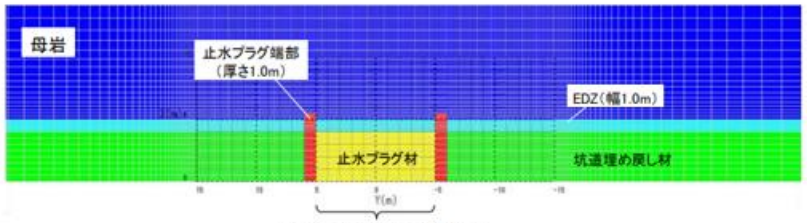
これまで、多重円筒モデルの利用により施設浸透水量を簡易に算出し（図 5.3-8 参照）これを用いた核種移行解析を実施してきたが、「坑道に直交する流れ」の仮定そのものが非保守側であると予想され、流向に強く依存しないモデルが必要となる。

NUMO 包括的技術報告書[2]では、止水プラグの効果の確認を目的として、図 5.3-18 に示すような解析を実施している。すなわち、坑道内部又は横置き処分の場合の廃棄体領域への地下水の流入量を低減するための設計に資する解析である。

図 5.3-18 に示される止水プラグと止水プラグの間を、設計上の区画と仮定し、この区間内の流量を適切に算出することを目的としたモデルの開発を行った。止水プラグ間の領域を 1 つの区画と仮定し、この領域を１つの球としてモデル化することによって、多重円筒モデルと同様に多重球モデルを用いた解析解を用いた流量を算出する。多重球によるモデル化の概念を図 5.3-19 に示す。このような区画に分割するモデル化は坑道型の処分場以外のサイロ型の処分場概念にも適用できることから、汎用性は高く、簡易な解析で流量が算出可能となれば有用であると予想される。



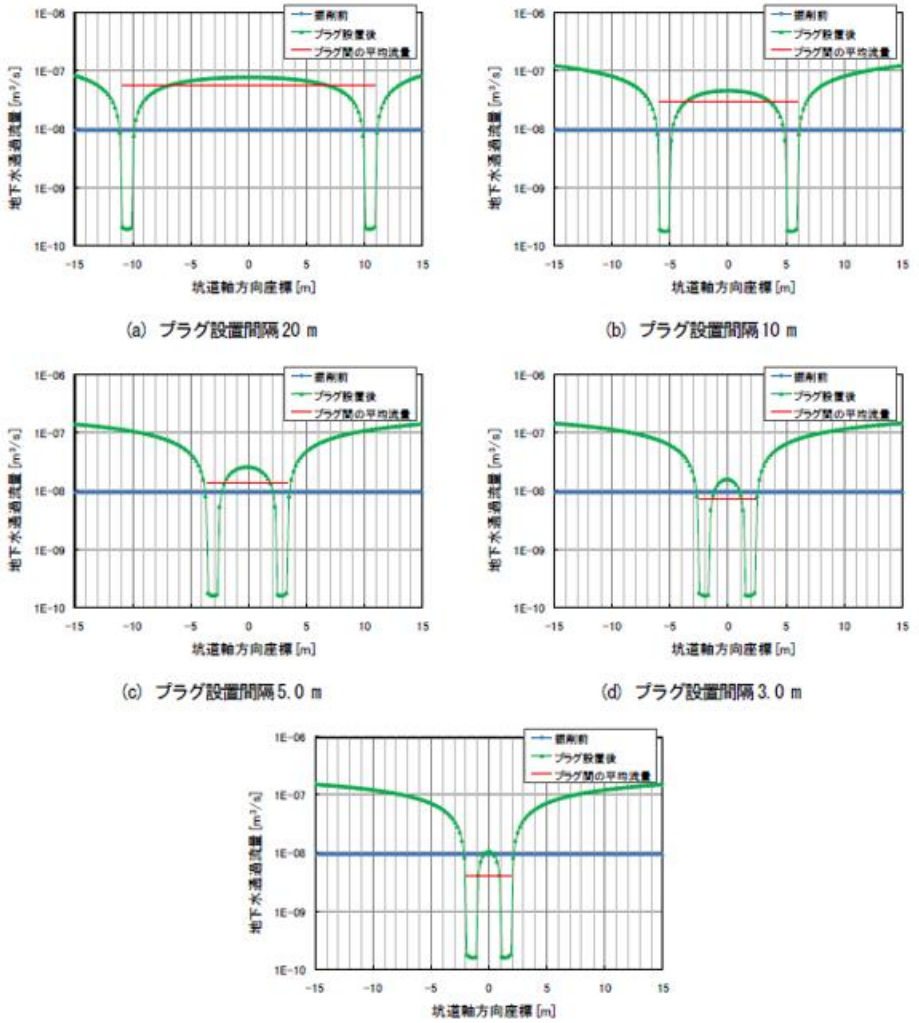
付図 B-1　解析モデル



止水プラグ端部の設置間隔

付表 B-1　解析ケース

	透水係数 [m/s]			止水プラグ設置間隔 [m]
	母岩	EDZ	埋戻し材	
Case-C1-1	1×10^{-8}	1×10^{-6}	1×10^{-7}	20
Case-C1-2				10
Case-C1-3				5
Case-C1-4				3
Case-C1-5				2



(a) プラグ設置間隔 20 m　(b) プラグ設置間隔 10 m

(c) プラグ設置間隔 5.0 m　(d) プラグ設置間隔 3.0 m

(e) プラグ設置間隔 2.0 m

図 5.3-18　止水プラグの効果確認のための解析例[2]

仮定：坑道を処分区画により複数の区画に分離する。
　　分離は、透水性の小さな材質により構成される。

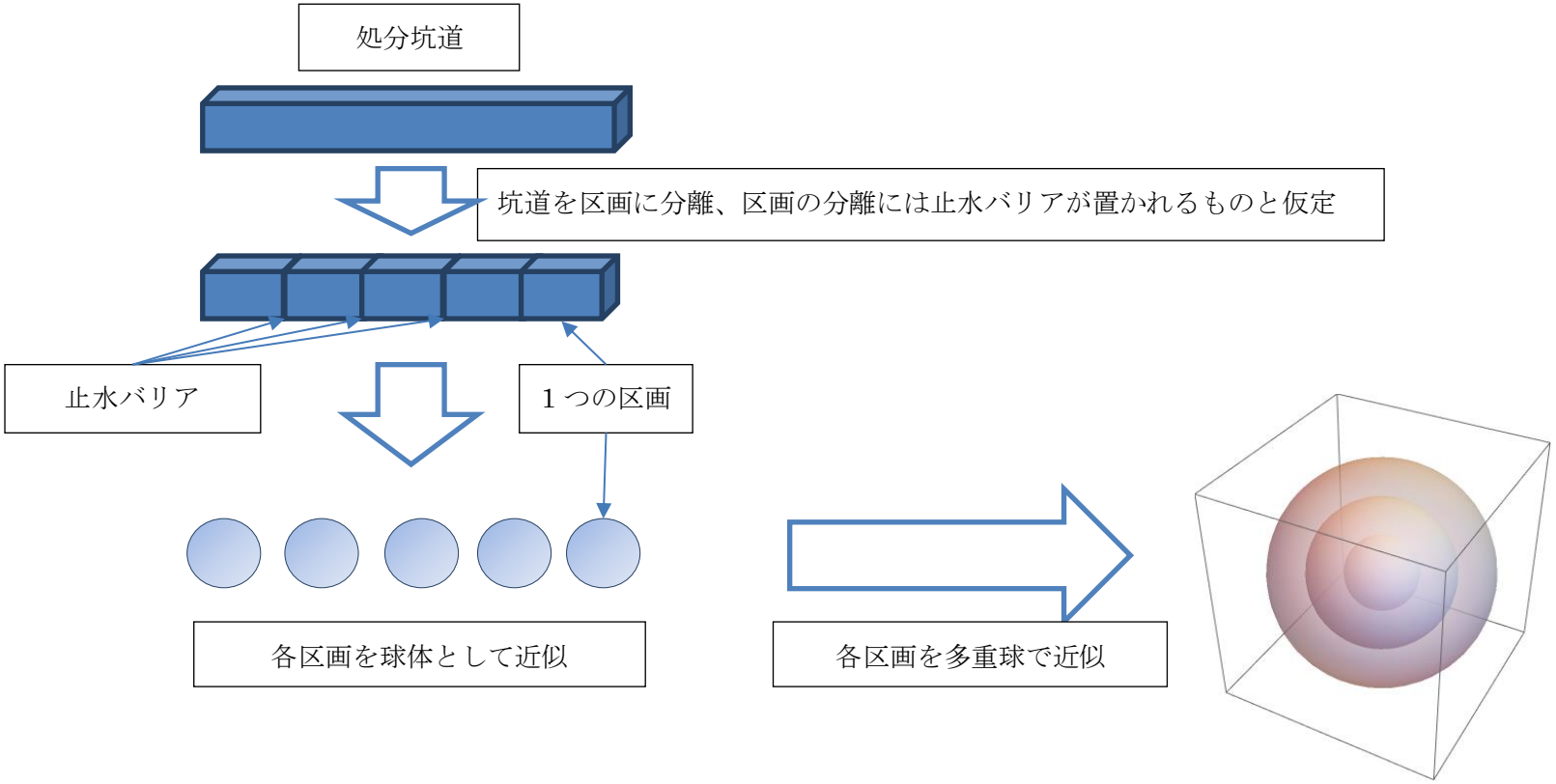
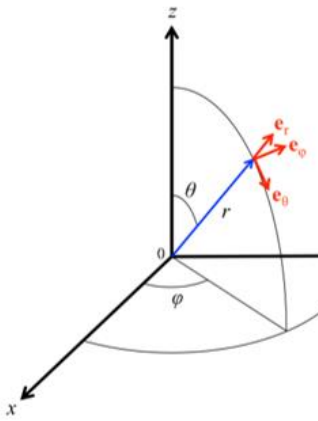


図 5.3-19　坑道の区画分離とモデル化の概念

b. 多重球における近似

坑道を複数の区画で分離する場合、1 つの区画は縦横比が小さい場合には、同体積、又は同表面積の球として表現することが可能と考えられる。原点を同じくする複数の球体においては、水頭分布（$\Phi(r,\theta)$）はラプラスの方程式を解く[13]ことにより多重円筒モデルと同様に解を求めることができる。解析解及び試解析結果を図 5.3-20 に示す。多重球の解析は、図 5.3-20 の例では、3 層のモデルを利用しているが、多重円筒モデルと同様に任意の層の仮定が可能である。



極座標系[r, θ,φ] のラプラス方程式の一般解

（z *軸φ方向に*対して対象とする，LegendreP:ルジャンドル陪関数）

$$\Phi(r,\theta) = \sum_{l=0}^{\infty}\left(a_l r^l + \frac{b_l}{r^{l+1}}\right)\mathrm{LegendreP}[l,m,\mathrm{Cos}[\theta]]$$

Z 方向（図の下から上）圧力勾配が発生しているとして

Z=0 の平面において、　　水頭:$h=O$

Z⇒∞の平面において、水頭:$h=-r\ Cos[\theta]$ であることから、

l=1, m=0

水頭：$\Phi(r,\theta) = (A\,r + B\,r^{-2})\ Cos[\theta]$

A,B 未定定数、A,B を境界条件から
領域ごとに決定する

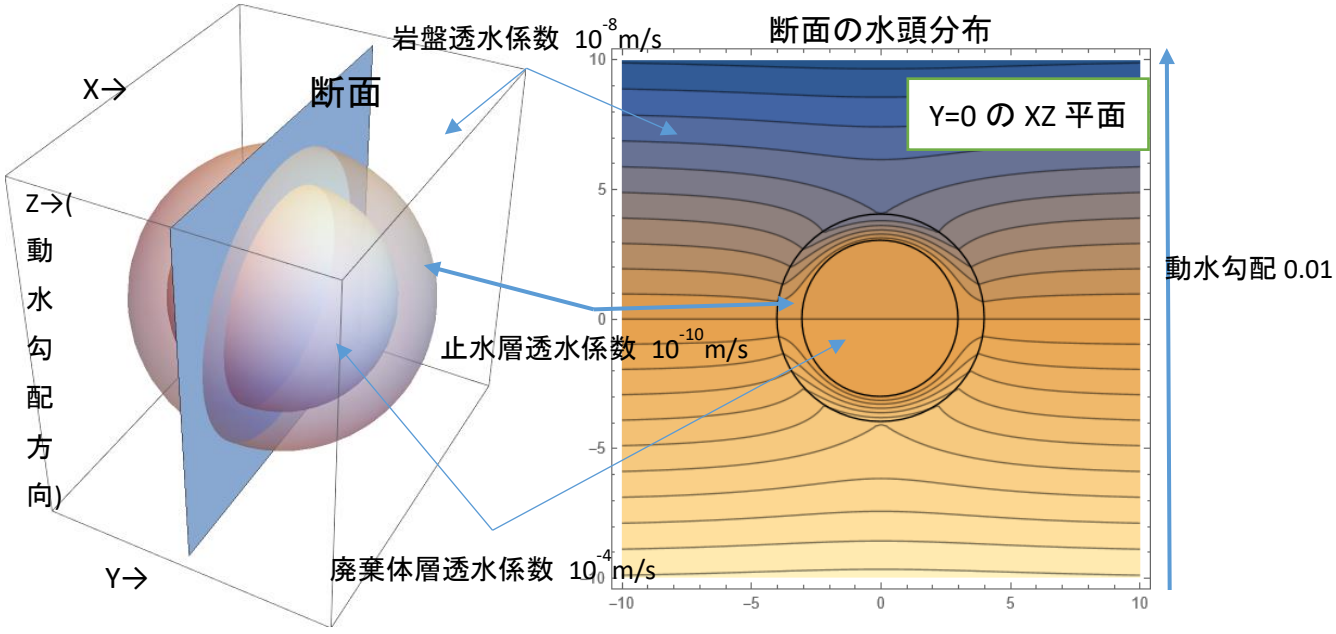


図 5.3-20　多重球モデルの解析解と水頭解析結果例

c．数値解モデルとの比較による近似方法

PFLOTRAN（Ver.4）を用い図 5.3-18 と同じように、中央部分を２つの止水バリアで区切り区切られた内部の流速及び流量を求め、多重球モデル内部の流量との比較を行う。図 5.3-21 に数値解の解析モデルを例示する。坑道は正方形断面と簡素化したモデルである。

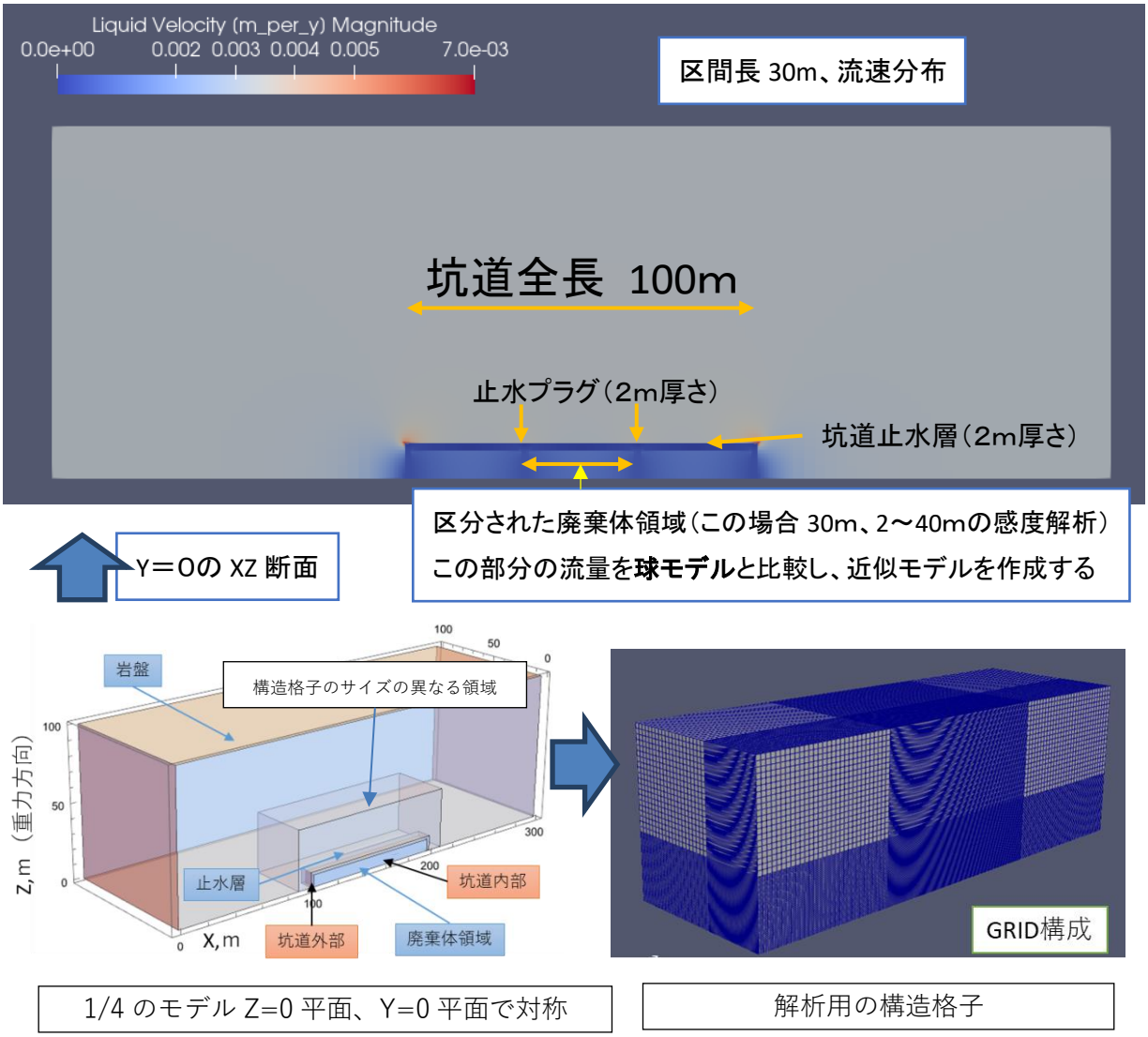


図 5.3-21　止水プラグを想定した解析モデル

上述のモデルを用い感度解析を実施し、この結果を多重球モデルの結果を比較することによって、多重球モデルの適用性を検討する。なお、水理的ゆるみ域を含む４層構造による比較も可能であるが、坑道内部の流量が大きく算出されるように水理的ゆるみ域を含めない解析とした。

止水層の外部に透水性の高い層を設置し、止水層内部の流量を低下させる概念も考えられ

ているが、外部の流量が大きくなると「拡散勾配」が大きくなり「拡散による浸出」が卓越する、外部の流量が小さくなると「移流による浸出」が卓越する。このバランスは母岩の流速に依存することから、どちらの保守性が高いかは、場合により異なる。そのため、ここでは内部流量が大きくなるように水理的ゆるみ域は排した。流量算定に用いたパラメータを表 5.3-23 にまとめる。

表 5.3-23　坑道内流量の感度解析パラメータ

坑道全長:100m	廃棄体層間隙率：0.25
止水層厚さ（坑道周辺、プラグ）:2 m	止水層間隙率：0.4
広域の動水勾配:0.01	岩盤間隙率：0.25
	（間隙率は、ダルシー流速の算出に寄与しない）

	廃棄体領域の高さ	プラグ間距離	廃棄体層透水係数	止水層透水係数
Case1	16m	4,8,12,20,30,40m	10^{-4}m/s	10^{-10}m/s
Case2	8m	4,8,12,20,30,40m	10^{-4}m/s	10^{-10}m/s
Case3	30m	4,8,12,20,30,40m	10^{-4}m/s	10^{-10}m/s
Case4	16m	4,8,12,20,30,40m	10^{-4}m/s	10^{-12}m/s
Case5	16m	4,8,12,20,30,40m	10^{-4}m/s	10^{-9}m/s
Case6	16m	4,8,12,20,30,40m	10^{-5}m/s	10^{-10}m/s

d. 数値解による解析結果

図 5.3-22 に水理解析結果の例を示す（Case1、止水プラグなし）。図上部の水頭コンター図によれば、中央（150m 位置）の上流側では坑道に地下水が流入し、下流側では地下水が流出している。上流側、下流側共に 50m 近い水頭勾配がそのまま厚さ 2m の坑道の止水層に作用している。そのため、坑道の高さが低いほどダルシー流速が上昇する結果（図 5.3-22 下図）となっている。ダルシー流速は、坑道の高さが低いほど（坑道の断面が小さいほど）大きくなっている。これは、断面の大きさよりも、側面積（地下水の流入面積）と止水層の透水係数に依存していることが予想される。そのため、止水層の透水係数が周辺の岩盤より数桁小さい場合には、単純に

側面積×止水層透水係数×給水区間透水差（Z=100m 位置の坑道長での透水差）

とすることも、正確性には欠けるが可能であり、簡便な手法となるものと予想される。

図 5.3-23、図 5.3-24 に Case1 の水頭コンター図を示す。傾向は、中央部（150m 位置）を挟んで、上流側が給水領域で下流側が排水領域であることに変化はない。内部の流速、流量は区間長が短くなるほど小さくなる。

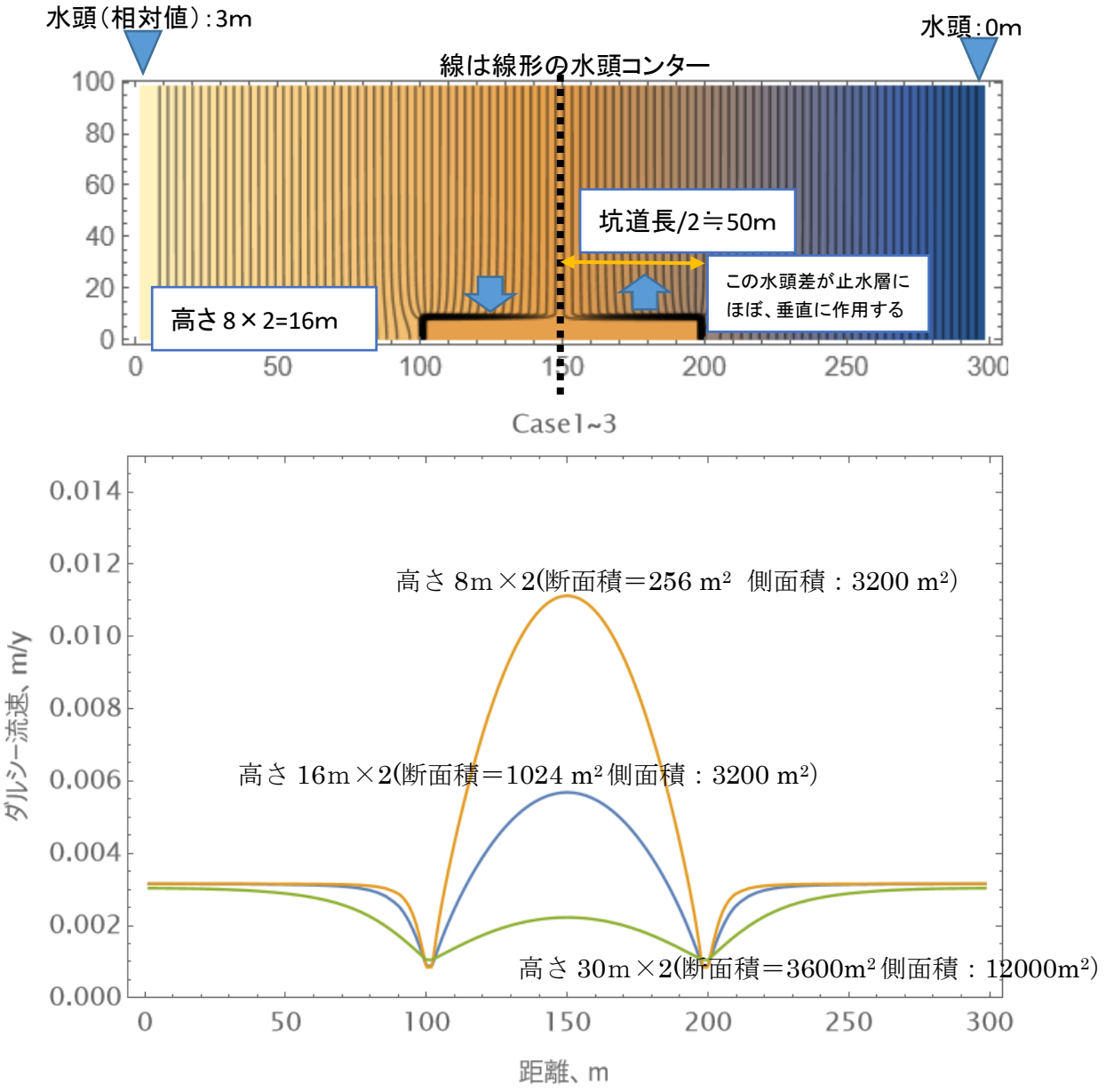


図 5.3-22 数値解による水理解析結果例

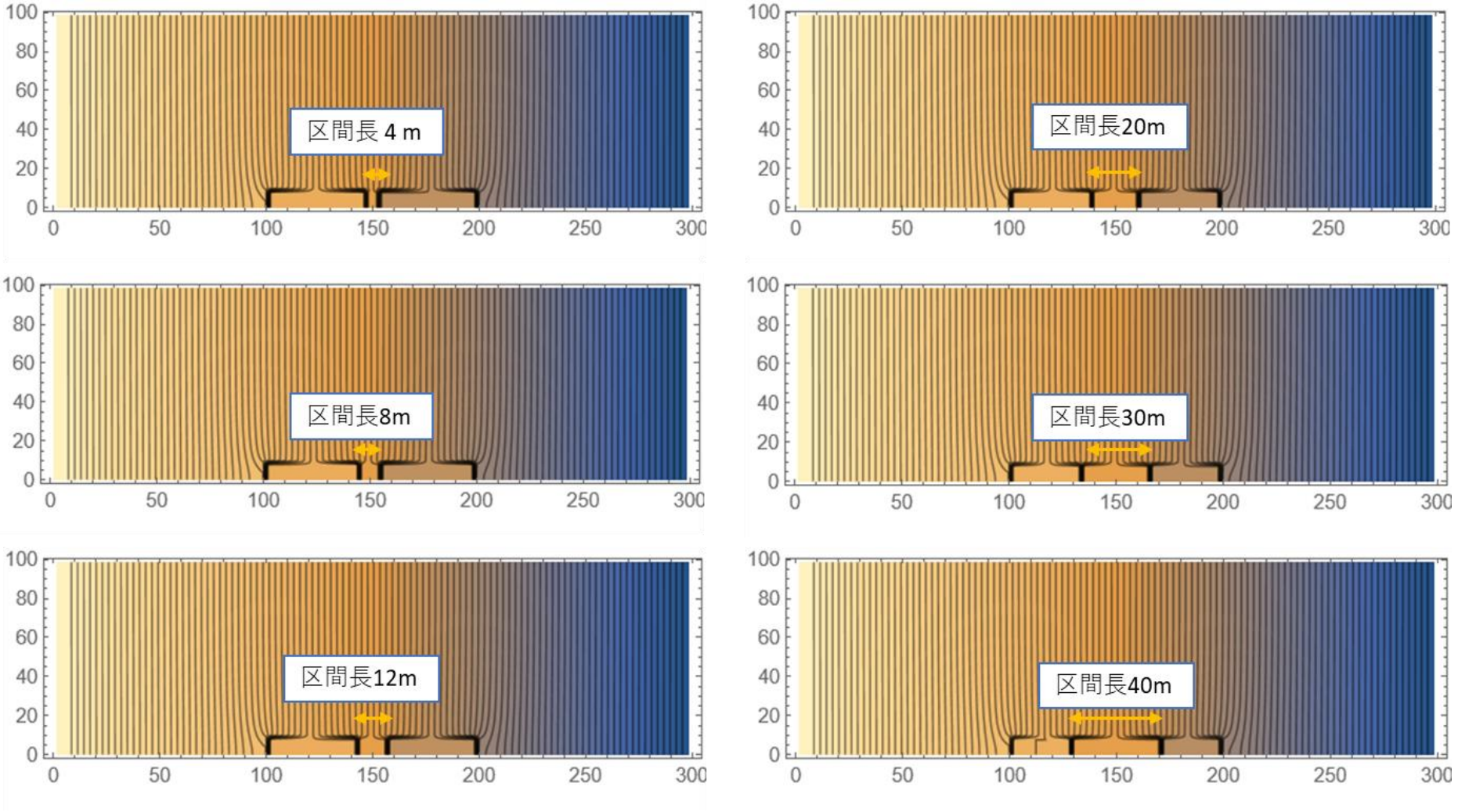


図 5.3-23　区間を区切った場合の水頭分布（Case1,坑道高さ 16m）

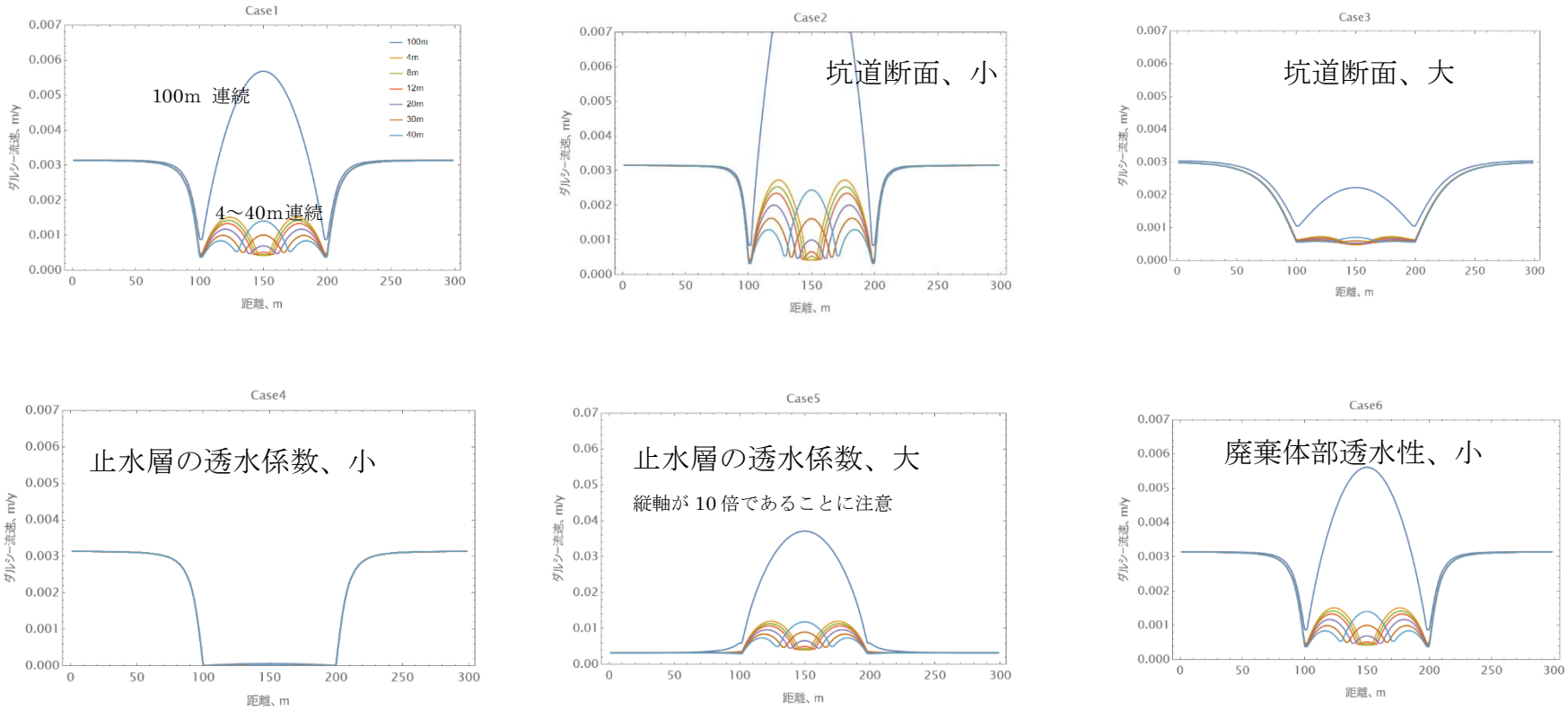


図 5.3-24　坑道内部のダルシー流速（坑道中央部、全ケース）

e．解析解との比較

数値解と解析解の比較では、解析解の設定において

- 体積保存；区画内の体積を保存して球の半径を算出
- 表面積保存；区画側面の表面積を保存して球の半径を算出
- 簡易式：側面積×止水層透水係数×給水区間透水差（Z=100m 位置の透水差）

を矩形坑道を止水プラグ（２m）で区切った Case1~6 の全ケースの結果との比較を行った。

解析結果を図 5.3-25 にまとめる。

なお、球モデルの解析の算出においては、坑道の連続する長さ(L)＞球の直径(2R)の場合は L/2R で補正（L<2R の場合は補正なし）を実施した。これは、寄与する水頭差の差が大きくなるための形状補正である。

結果では、表面積を保存するケースが数値解との一致が優れていることが解った。X 方向の水頭が止水バリア（Y 方向、及び Z 方向）に作用することから、流入する地下水は、表面積に依存するためである。

数値解モデルが矩形で、区画前後の坑道による擾乱を受けていることもあり、精度よく再現できるものではないが、感度解析のように多様なケースを想定する場合においては、解析解を用いることにより簡易に水量を設定できるものと考えられる。

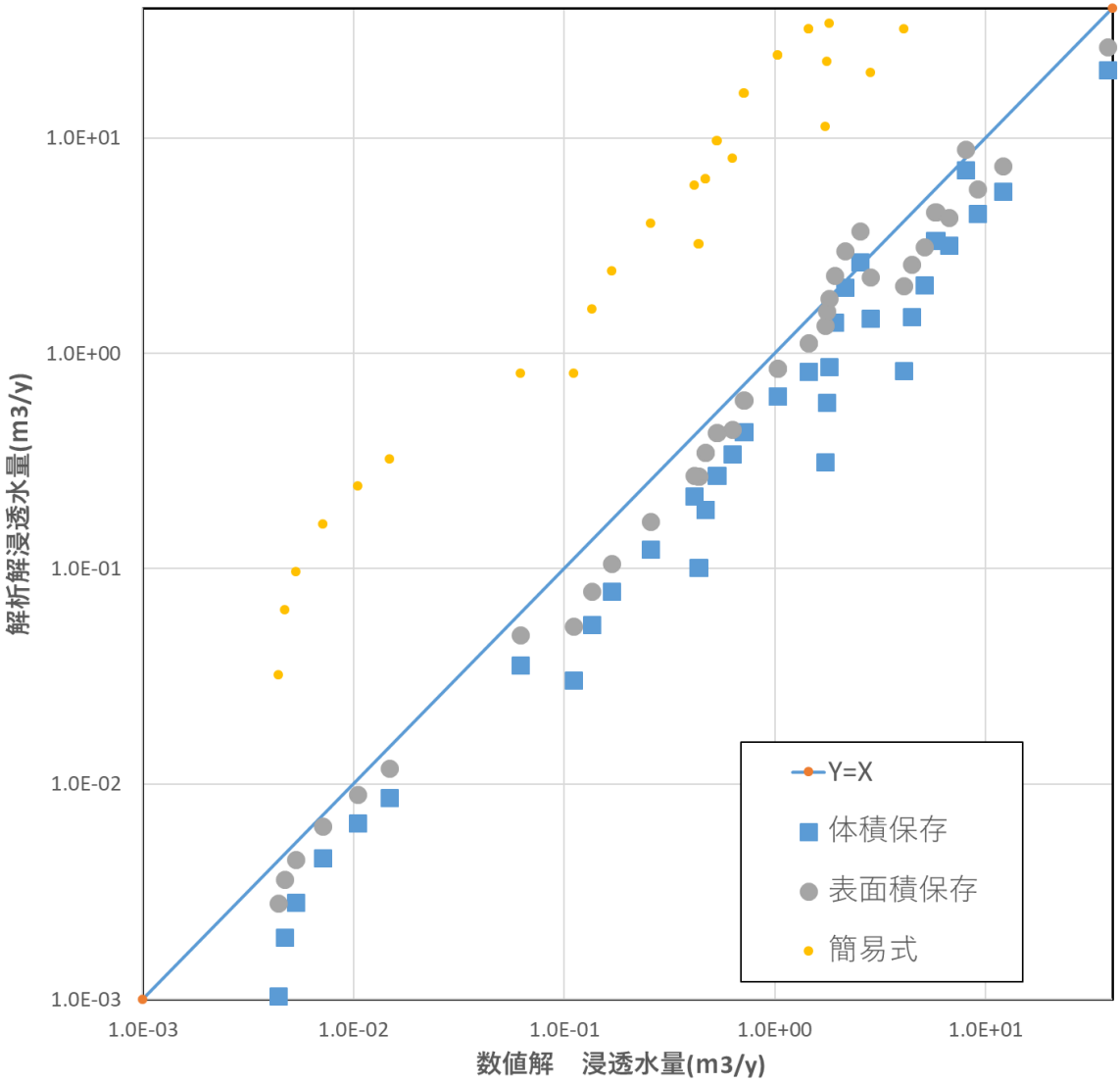


図 5.3-25　数値解と解析解による施設浸透水量の比較

3) 濃度制限に係るシナリオ等の評価

自然事象以外の規制側の要求においては、隆起や侵食に係るシナリオ（表 5.3-12 参照）やボーリングに係るシナリオ（表 5.3-14）への配慮が必須となる。この 2 つのシナリオは、施設内での放射能量や 1 区画に含まれる放射能量に依存する。言い換えれば、「設計」により対処可能なものと考えることができる。

ここで必要な量は、以下のものとなる。

- 区画内の放射能量
- トンネル等の施設を含む区画の体積

これらは、廃棄体が存在しない現在においてインベントリーに不確実性は内包するものの、人工バリア内の核種移行パラメータや天然バリアでの核種移行パラメータを必要としないことから、自然事象等の他のシナリオよりも評価がしやすいものであり、設計とのリンクが取りやすいシナリオである。

4 因子公式で[14]は、被ばく線量を簡易に比較する方法として以下の定量化方法が検討された。

被ばく線量[Sv/y]　$D_{w,i}^{\mathrm{MB}} = Q_{w,i}^{\mathrm{MB}} \times E_{w,i}^{\mathrm{MB}} \times G_{w,i}^{\mathrm{MB}} \times B_{w,i}^{\mathrm{MB}}$

$Q_{w,i}^{\mathrm{MB}}$	総放射能量[Bq]
$E_{w,i}^{\mathrm{MB}}$	人工バリアの防護機能に係る指標[1/y]
$G_{w,i}^{\mathrm{MB}}$	天然バリアの防護機能に係る指標[-]
$B_{w,i}^{\mathrm{MB}}$	生活圏における線量換算係数[Sv/Bq]
i	核種
w	地下水移行シナリオ
MB	「多重バリア機能に期待する期間」

この中で、地下水移行シナリオへの適用を考えているが、上述のシナリオの評価では、$Q_{w,i}^{\mathrm{MB}}$ と $B_{w,i}^{\mathrm{MB}}$が基本的な評価対象となり、$E_{w,i}^{\mathrm{MB}}$には坑道の設計上の体積や区画サイズを入れることにより、濃度制限シナリオの評価が可能となる。

5.3.3 まとめ

規制条件との対応を想定し、処分場の設計において対処可能と想定される条件を取りまとめた。長期安全性の観点から、処分場の基本的な概念や人工バリアの概念の構築を目標とする感度解析の位置づけを行った。

感度解析モデルに必要となる条件、特に、施設浸透水量を感度解析モデルに組み込むための方法を提案した。

5.3 節の参考文献

[1] IAEA ：Disposal of Radioactive Waste, SSR-5. , 2011.
[2] 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, NUMO-TR-20-03，2021.
[3] 原子力発電環境整備機構： Development of Repository Concepts for Volunteer Siting Environments August 2004, NUMO, 2004.
[4] 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] 原子力規制庁：中深度処分の規制基準の背景及び根拠 NTEM-2022-0001, 2022.
[6] ICRP.: Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. ICRP Publication 81. Ann. ICRP 28(4). 1998.
[7] 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.
[8] 独立行政法人原子力安全基盤機構：放射性廃棄物処分施設の安全特性把握のための 4 因子公式、JNES-RE-2012-0018. , 2012.
[9] 日本原子力学会標準：余裕深度処分の安全評価手法 2008 , 2008.
[10] PFLOTRAN ホームページ：https://www.pflotran.org/
[11] 斎藤大作、星 清：移流拡散方程式の解析解(1).　開発土木研究所　月報　No.533 1997.10, 1997.
[12] Technology GoldSim：User's Guide GoldSim :Version 12.1 (June 2018). 2018.
[13] JAEGER.J.C and Carslaw.H.S. ：CONDUCTION of HEAT IN SOLIDS., 1959.
[14] 独立行政法人原子力安全基盤機構：放射性廃棄物処分施設の安全特性把握のための 4 因子公式、JNES-RE-2012-0018,2012.

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、更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（転圧重機、撒き出し厚、転圧回数などの転圧仕様の管理)、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透水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諸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する。

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う。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揮メカニズムにメスを入れることができればと考える。

初年度の令和２年度では、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一透水特性の確認、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、従来のマクロな締固め—透水試験に加えて実体顕微鏡（光学顕微鏡）による土粒子間隙構造の可視化と画像解析による定量化、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、後者については実験手法の最適化（実験治具や供試土の条件設定と選定）に着手した。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、遮水性発現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始める）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。

引き続き令和 3 年度は、前年度に策定した全 5 ヵ年計画に従いベントナイト系材料（及び通常の土質材料）の透水特性に関する実験データの取得、及び透水メカニズムの評価に着手した。得られた実験データから、ベントナイト混合土を含む締固め土の遮水性に関して、近年、締固め土の品質管理に適用されつつある飽和度管理の考え方（飽和透水係数を締固め時の乾燥密度 ρ_d と飽和度 Sr の 2 指標の一次線形和として表現）が概ね成立することを確認し、上記、最適含水比のやや湿潤側で透水係数が最小となる現象についても定量的に再現することができた。また、締固め時の乾燥密度 ρ_d を一定にし、締固め時の含水比（飽和度 Sr）を変えた一連の供試体（JGS0312 長期透水試験完了後供試体）の顕微鏡観察の結果から、締固め時飽和度 Sr の違いが吸水ベントナイトと母材の付着形態の違いをもたらし、よって、飽和度管理の関数形に即した遮水性の変化が生じていることを明らかにした。同時並行で進めた中性子イメージング実験では実験手法の最適化を進め、実験目的に即した供試体や試験箱の寸法を確定すると共に、不飽和締固め時（粒子間サクションや吸水ベントナイトの付着状況）→軽水飽和時（土粒子配列状況）→重水浸透時（飽和透水試験実施状況の定性的な再現）といった複数の目的に本実験結果を有効利用可能なことを確認した。令和 2 年度に策定した 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見直しと修正を行っていくべきものと考えており、以上の令和 3 年度までの成果を総括したうえで、令和 3 年度末に令和 4 年度実施計画に対する最初の研究計画の見直しと修正を行い、報告書に取りまとめた。

令和 4 年度は、5 ヵ年計画の 3 年目に相当する。令和 3 年度のフィードバック結果を受けて引き続き透水特性データの取得を実施、遮水性発現メカニズムの解明を進めた。当初予定どおり、土質材料（段階的解明実験）及びベントナイト混合土（実務ターゲット実験）の両供試土を用いた締固め-透水試験（λ_k/ε_k 実験）を実施した。また、今年度得られた実験結果を基に、次年度以降の供試土の条件についても吟味を加えた。実体顕微鏡による土粒子間隙構造の観察に関しては、遮水性発現メカニズムの説明のために λ_k/ε_k 実験終了後の供試体（JGS0312 及び JISA1218）をそのまま残置し顕微鏡撮影に供することで、透水係数と土粒子間隙構造の関連性を考察した。更に今年度は、画像解析による土粒子間隙構造の定量化を試み、透水係数との関係を把握した。中性子イメージング実験に関しては、主にベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに力点を置き、ベントナイトの混合量や締固め密度、締固め時含水比の違い、添加するベントナイトの膨潤性の違い（非膨潤性のカオリンも比較実施）などが締固め時の土粒度間隙構造及び後続の重水浸透現象の違いをもたらす様子を観察し、顕微鏡写真と同様の画像解析による定量化を行った結果を報告する。更に、令和 3 年度実施の顕微鏡撮影や中性子イメージング実験では、不飽和締固め過程における「母材と細粒材(含むベントナイト)間のメニスカス形成や吸水ベントナイトの付着状況」を観察可能であることが明らかになった。そこで、遮水性発現の根源的なメカニズムを考察する目的で、母材・細粒土（含むベントナイト）・水の 3 材料加水・混合⇒締固め過程中の土粒子間隙構造の変化を、顕微鏡撮影と中性子イメージング実験の両者で連続追跡している。

これらの成果を総合し、現時点においては、遮水性発現メカニズムに関して以下の仮説

【締固め土（ベントナイト混合土を含む）の遮水性】

⇒ 締固め時の乾燥密度 ρ_d（間隙比 e）と飽和度 Sr の 2 要因をパラメータとして発現

⇒ 2 要因の発現原因は土粒子間隙構造（あるいは吸水ベントナイトの付着状態）の違いにより説明可能

⇒ その土粒子間隙構造の違いは材料加水・混合と締固めの過程で既に発生し、飽和後の透水試験開始から終了後までそのまま残存して影響を及ぼす

を想定可能と考えている。前述の「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」という実験事実もまた、根源的には材料混合時の含水比状態の違いが加水・混合時（ベントナイトの吸水による団粒化など）⇒締固め中⇒締固め後に至る土粒子間隙構造の形成過程に違いをもたらした結果として説明される。

なお、もう一段、より根源的な（深い）考察を試みようとするならば、締固め時含水比の違いによるベントナイト混合土の力学特性（一般に、ベントナイト混合土は遮水性が注目され、強度や剛性といった力学特性に視点がおかれることは稀である）や、粘土粒子の電荷状態や保水性の違いといった化学的性質に言及することが必要となる。更に、締固め時の飽和度 Sr の違い（＝土粒子間隙構造の違い）による強度・剛性等の諸力学特性の違いが明らかになれば、「締固め時の土粒子間隙構造の違い」が遮水性だけでなく、締固め土の工学的性質全般に影響を及ぼすことを明らかにすることができ、不飽和土質力学に対する多大な貢献をもたらす可能性がある。今年度はそのための基礎的データの収集も並行して開始している。更に、締固め中の母材と吸水ベントナイトの土粒子間隙構造形成の過程を可視化することを目的とした個別要素法（DEM）による締固めシミュレーションも試行を始めており、来年度以降に本格実施していきたい。

6.2 年度計画及び実施内容

6.2.1 令和 4 年度の実施計画と実施工程

本研究の 5 ヵ年全体計画を表 6.2-1 に、令和 4 年度の実施内容を表 6.2-2 に示す。5 ヵ年計画については、令和 4 年度の成果を踏まえ、今回、全体計画自体にも見直しと修正を加えた。全体計画の見直しと修正の主な内容は以下のとおりである。

① 実験 A～C：当初予定どおり実施していく。ベントナイト混合土については混合率 10%と 30%のケースを今年度までに終了した。一方、その結果を分析すると、研究の端緒である「最小透水係数 $k_{min.}$の湿潤側含水比での発現」については、定性的にはその傾向を確認できるものの、この混合率では $k_{min.}$の値は乾燥（ドライ）側の高々数倍に過ぎず、その傾向は 30%混合土でより顕著となっている。この原因の一つとしては、母材が単粒の購入砂であることも考えられるが、小峯[1]が指摘するように、膨潤性ベントナイトの混合率が増えると透水係数と乾燥密度、あるいは締固め時飽和度（含水比）の影響が鈍感になるものと考えられる（後述する実験 B の重回帰分析結果はそれを物語

っている)。従って、ベントナイト混合土に関しては締固め含水比の影響がより鮮明となる混合率 5%のケースを実施したいと考える。これは、ベントナイト混合土の透水係数評価式を作成する上で、混合率を 3 水準準備するという実務的な意味もある。本実験は低透水材料の長期透水試験法（JGS0312）を用いるため、最終年度となる令和 6 年度前半までのデータ取得となる。

② 実験 D：中性子イメージング実験については、本年度でデータ取得を終了とする。本実験については、最適化実験の過程で以下に示すような幾つかの難しさや実験装置、実験方法、供試土の限界が確認された（詳細は 6.3.1(3)で述べる)。

・中性子イメージング実験装置の分解能の限界
・クリアな画像を取得するための供試土の粒径の限界
・厚み 6 ㎜のアルミ箱（実験治具としてはどうしても強度が不足）中に土を密に締固め供試体を作製すること自体の困難さ
・供試体隅角部からの水の浸透による「透水試験としての重水浸透」の困難さ
・ベントナイトの高い遮水性による撮像の難しさ
・不飽和締固め時⇒飽和通水時⇒重水浸透時の可視化のトレードオフ（天秤問題）

一方、令和 4 年度までの実験により、ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムや影響要因を説明するためのデータや、加水・混合⇒締固め過程での含水比分布（≒吸水ベントナイトの配置状況に対応すると考えられる）の変化といったデータの取得に成功し、メカニズムの解釈に関してはデータが出揃ったものと判断した。

③ 実験 E:追加力学試験・化学実験を今年度より開始した。遮水性発現メカニズムの解明（解釈）を補佐する意図で来年度まで実施する予定である。個別要素法（DEM)による締固めシミュレーションも、これに付随するものとして試行していくが、本解析試行は締固め過程で母材と吸水ベントナイトが含水比（飽和度）依存の土粒子間隙構造を徐々に形成していくプロセス（＝吸水ベントナイトと母材間の粒子構造が具体的にどう形成されていくのか）を粒子同士の移動配置を示しながら定性的に再現、可視化しようとするものである。あくまで補助的な試みであり、実現象を精緻に再現する意図はない（こちらも令和 5 年度で終了とする)。令和 4 年度は、この全体計画に従い以下 3 点を実施した（令和 3 年度と同様)。

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 6.2-2 中には実施概要を示し、詳細な内容は「6.2.2 令和 4 年度の実施内容」に記載する。ベントナイト混合土を用いた透水試験は低透水性材料の長期透水試験法（JGS0312)を用いるため、昨年度同様、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。なお、研究の実施内容や実験条件の詳細については定期的に有識者の意見を求め、それを反映させる形で適宜修正を施した。

表 6.2-1　研究の全体 5 ヵ年計画（見直しと修正後）

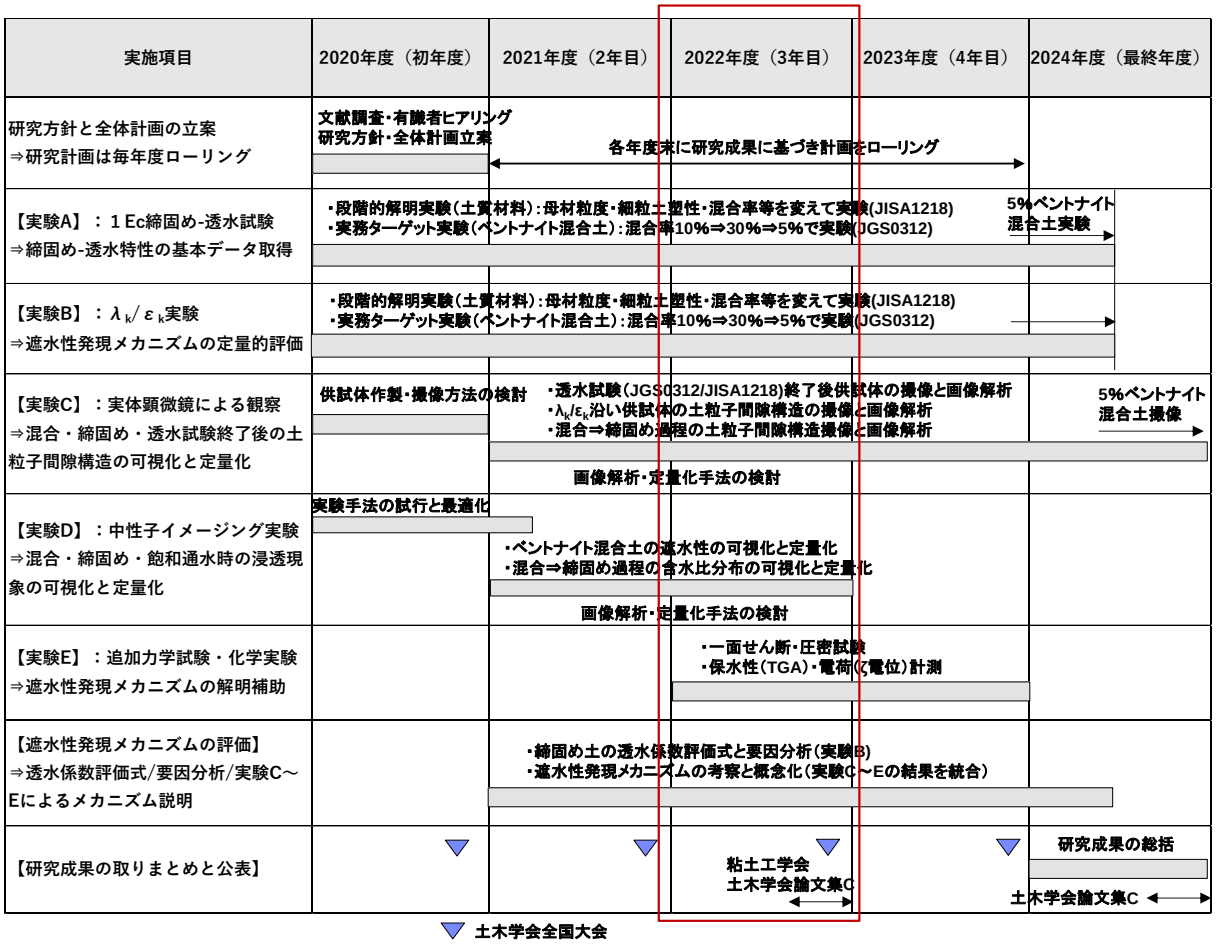
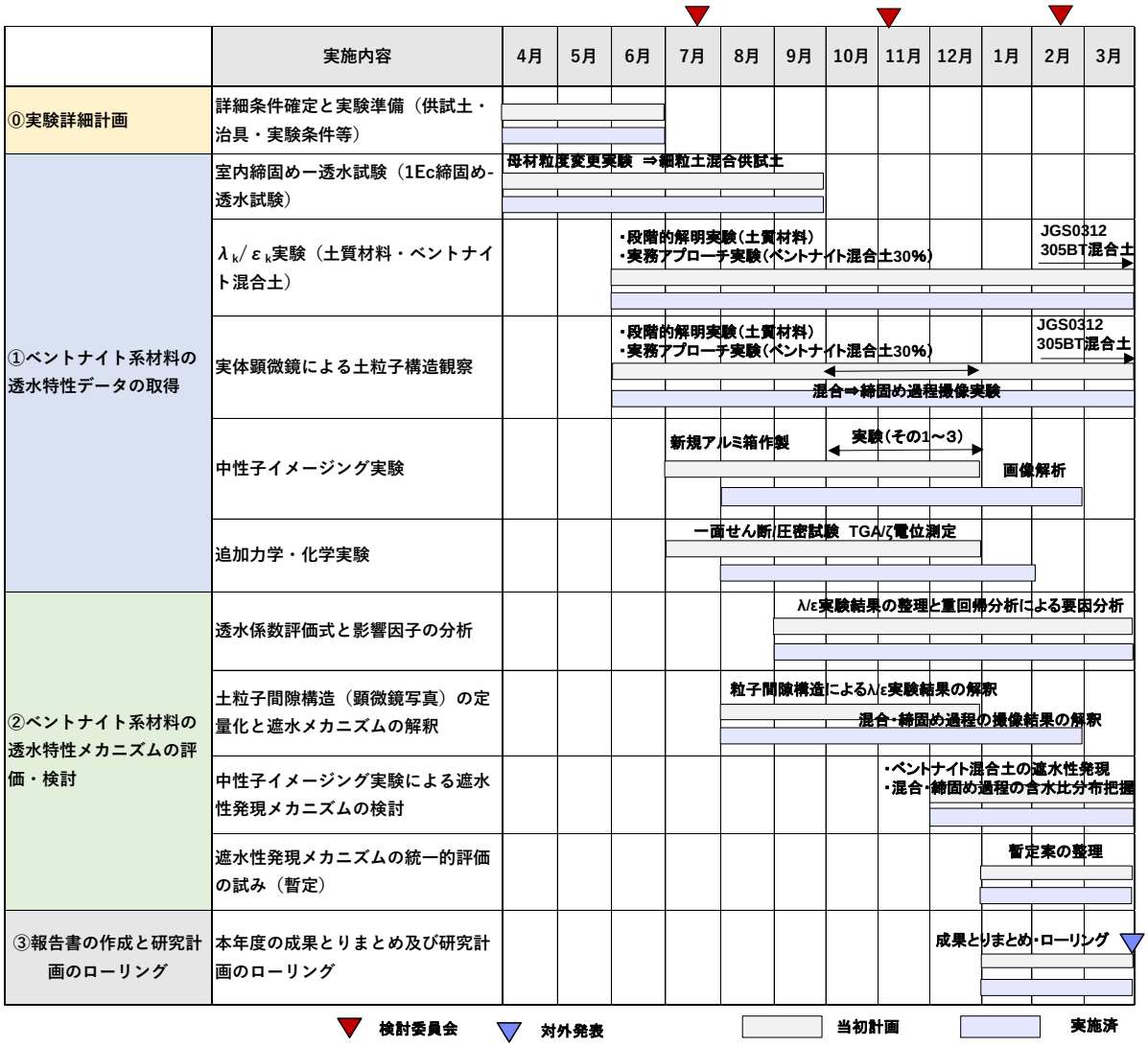


表 6.2-2　令和 4 年度の実施計画と実施工程



6.2.2　令和 4 年度の実施内容

(1) ベントナイト系材料の透水特性データの取得

令和 3 年度の成果を受け、引き続き以下に示す締固め-透水特性データの取得を進めた。なお、用いた材料は土質材料（段階的解明実験）及びベントナイト混合土（実務ターゲット実験）である（供試土の詳細や実験条件は後述）。透水試験は土質材料に対しては JISA1218 法、ベントナイト混合土に対しては低透水性材料の長期透水試験方法（JGS0312 法）を用いた。

① 室内 1Ec 締固め-透水実験（実験 A）

・1Ec 締固め-透水試験（0.1/0.2Ec 及び 4.5Ec は実験 B の供試体条件を決めるため、締固めのみ実施）。なお、ゆる詰め状態の締固めに関しては、モールド径と突き固め回数の関係から土質材料は 0.2Ec、ベントナイト混合土は 0.1Ec で実施した。

② λ_k/ε_k 実験（実験 B）

・締固め時飽和度 Sr 一定/乾燥密度 ρ_d 変更供試体の透水試験（λ_k 実験）

・締固め時乾燥密度 ρ_d 一定/飽和度 Sr 変更供試体の透水試験（ε_k 実験）

③　実体顕微鏡撮影による締固め土の微視的（粒子間隙）構造観察（実験 C）

・ベントナイト混合土 JGS0312 終了後供試土（30%混合土）の顕微鏡観察

・締固めたベントナイト混合土（30%混合）の顕微鏡観察

⇒加水混合時観察・締固め前・締固め後の各過程で撮像

・締固めた土質材料（カオリン 10%混合土）の顕微鏡観察

⇒加水混合時観察・締固め前・締固め後の各過程で撮像

④　中性子イメージング実験(実験 D)

・ベントナイト混合土の遮水性能に関する一連の実験

⇒混合率・締固め時乾燥密度 ρd・締固め時飽和度 Sr を変更した実験

添加細粒土の膨潤性を変更した実験（Na 型・Ca 型・非膨潤カオリン）

・材料混合（含水比変更）⇒締固め過程における供試体含水比分布の追跡実験

⑤　遮水性発現メカニズム解明のための力学試験及び化学実験（実験 E）

・締固めたベントナイト混合土の一面せん断試験（混合率と締固め時飽和度を変更）

・Na 型・Ca 型・非膨潤カオリンの TGA/DTA 試験（保水性の定性的な比較）

・Na 型・Ca 型・非膨潤カオリンの ζ 電位測定

（電荷状態≒飽和透水時の電気二重層の強弱に関する定性的な比較）

以下に各々の詳細を示す。

(2) 室内締固め-透水実験（実験 A 及び実験 B）

図 6.2-1 及び図 6.2-2 に、令和 3 年度に着手した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・実務アプローチ実験の基本的な考え方を示す。龍岡[2]によ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 ρ_d と飽和度 Sr の関数（一次線形和）として表現しうるものと仮定し、図 6.2-1 中に示す以下 3 つのシリーズの実験を実施した。以降、透水係数とは飽和通水後の飽和透水係数を指す。

①1Ec 締固め-透水試験：基本的な締固め-透水特性を把握するために 1Ec 締固め供試体に対する透水試験を実施した。また、②、③の供試体締固め条件（乾燥密度と含水比（飽和度）の組合せ）を決める目的で、緩詰め（0.1Ec/0.2Ec）と密詰め（4.5Ec）状態の締固め曲線を 2 本求めた（②、③用供試体の締固め乾燥密度や飽和度の上下限を求めるため）。本結果は、後述する締固め土の透水係数評価式を用いて、締固めエネルギーが変化した場合の透水係数予測を試みる際にも用いている。

②λ_k 実験：締固め時の飽和度 Sr 一定で乾燥密度 ρ_d を数種類変更した供試体の透水係数を計測。透水係数に及ぼす乾燥密度（間隙比 e）の影響を抽出。

③ε_k 実験：締固め時の乾燥密度 ρ_d 一定で飽和度（含水比）Sr を数種類変更した供試体の透水係数を計測。透水係数に及ぼす締固め時飽和度 Sr の影響を抽出。

注）乾燥密度 ρ_d、飽和度 Sr 共に、「締固め時の値」である。透水試験は締固め後飽和させてから実施するため、試験時の飽和度は全て 100%となる。

図 6.2-2 には、段階的実験と実務アプローチ実験のフロー及び供試土と実験手法の組合せを示す。令和 3 年度には、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（購入砂：単粒な母材）：段階的実験

B：砂＋非塑性細粒土（非塑性の珪砂粉を 10%混合）：段階的実験

C：ベントナイト混合土（購入砂＋クニゲル 10%混合）：実務ターゲット実験

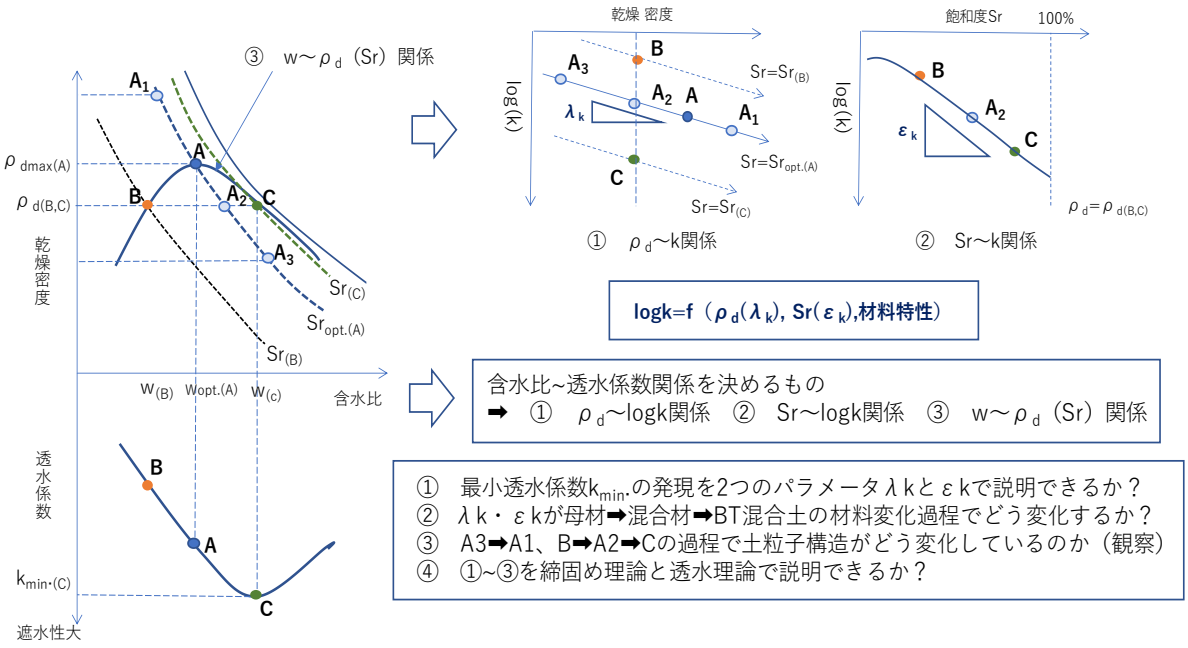


図 6.2-1　1Ec 締固め-透水及び λ_k/ε_k 実験の供試体条件とデータ整理方法

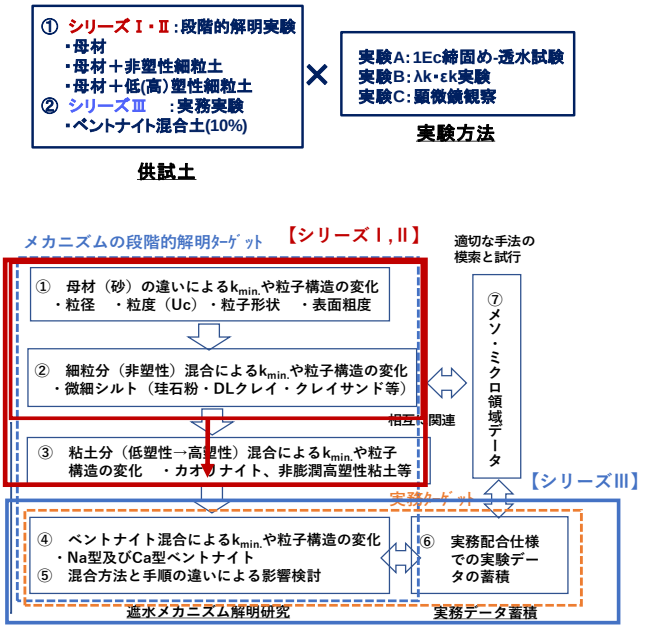


図 6.2-2　段階的・実務ターゲット実験手法と令和 4 年度の着手範囲（シリーズ A～C）

これに引き続き、令和 4 年度は下記に示す一連の締固め-透水試験を実施した。

1）段階的解明実験

D　：購入砂＋低塑性粘土（木節粘土を 10%混合）

E　：購入砂＋高塑性粘土（微粒カオリンを 10%混合）

F　：粒度調整母材(単体)

シリーズ D,E は、令和 3 年度に実施した材料 A（細粒分無し）,材料 B（非塑性細粒分）に対して細粒分の塑性を 2 段階に変化させた実験である。また、材料 F は令和 3 年度の実験結果の総括から、母材が単粒である A の購入砂では締固め時乾燥密度や含水比（飽和度）の変化に対する透水係数の変化が鈍感であったとの実験事実から、締固め土の既往実験結果を参照し、粒度良好な調整材（実ロックフィルダム遮水材の粒度を再現）の実験に着手したものである（次年度は、これを母材として細粒分を混合していく予定）。

実験ケース及び数量は後出の表 6.2-3 に示すとおりであり、D,E,F の 3 材料に対して以下を実施した。

①　0.2Ec、1Ec、4.5Ec 締固め試験：3 エネルギー×6 点含水比/1 供試土

②　λ_k/ε_k 実験（乾燥密度/飽和度一定の締固め-透水試験）:JISA1218

：16 点/1 供試土（1Ec 締固め 6 供試体の透水試験を含む）

2）実務ターゲット実験

令和 3 年度実施のベントナイト 10%混合土に引き続き、混合率を 30%に変更した実験を実施した。

G：ベントナイト 30%混合土(購入砂＋30%クニゲル V1)

実験数量は、以下のとおりである。

① 0.1Ec、4.5Ec 締固め試験：2 エネルギー×6 点含水比/1 供試土

② λ_k/ε_k 実験（乾燥密度/飽和度一定の締固め-透水試験）：JGS0312

：12 点/1 供試土

なお、30%ベントナイト混合土については令和 2 年度に 1Ec 締固め一透水 (JGS0312)6 点を実施済であり、結果の整理（透水係数評価式や重回帰分析）に際してはこれらのデータも利用した。

実務ターゲット実験については、令和 5 年度以降に混合率 5%の貧配合ベントナイト混合土供試体での実験を実施したいと考えている。これら段階的＋実務ターゲット実験を積み重ねることで、母材の粒度特性（均等係数 Uc・平均粒径 D_{50}・細粒分の塑性指数 Ip（NP・低塑性・高塑性・膨潤性の 4 水準））や細粒分の混合率等をパラメータとした透水係数評価式や、各係数（λ/ε/定数項 γ）への材料特性の影響を統一的に評価することを検討していく予定である。

表 6.2-3 には、令和 3 年度までの実施結果を参照して定めた実験条件の見直しと修正結果を整理して示した。青が実施済、緑が令和 4 年度実施、黄色が令和 5 年度以降に実施予定の実験条件である。図中に細粒分の塑性指数 Ip を併記した。当初、カオリンが低塑性、木節粘土が高塑性の代表として選定していたが、カオリンが微粒タイプの高塑性土であったため、順番を逆にして示している。今年度の結果を鑑み、木節粘土よりも塑性の低い細粒分、あるいは微粒カオリンとベントナイトの中間的な塑性指数を有する細粒分を用いたケースについても、今後検討を加えていきたいと考える。

表 6.2-3 段階的解明実験及び実務ターゲット実験の計画の見直しと修正状況

母材	添加する細粒分	混合率		
購入砂（均等粒径：Uc小）	なし	0%		
	非塑性（珪砂粉）	10%	30%	ー
	高塑性（木節粘土）	10%	30%	ー
	高塑性（カオリン）	10%	30%	ー
	膨潤性（クニゲル）	5%	10%	30%
粒度調整材_1（Uc大）	非・低・高塑性土	0%	10%	30%
粒度調整材_2（より細粒側）		未定（今年度の実験結果を参照して決定）		

	実施済
	R4実施
	R5/6実施

	塑性指数Ip
珪砂粉	0
木節粘土	46.6
微粒カオリン	61.5
ベントナイト	363.4

(3) 実体顕微鏡撮影による締固め土の微視的（粒子間隙）構造観察（実験 C）

実体（光学）顕微鏡による微視的（粒子間隙）構造観察に関しては、令和 3 年度はベントナイト混合土（10%・30%混合）の JGS0312 終了後飽和供試体(主に ε_k 沿い：締固め時の乾燥密度一定で飽和度を変更した供試体)に対する観察を中心に実施し、一部段階的実験（通常の土質材料）供試体の構造観察も試行した。令和 4 年度は、引き続き以下に示す構造観察とその画像解析を実施した。

1) 段階的実験（土質材料）

① 購入砂＋カオリン 10%

2) 実務ターゲット実験（ベントナイト混合土）

① 10%混合土の JGS0312 試験終了後供試体（令和 3 年度 λ_k 実験供試土）の撮影と解析

② 30%混合土の JGS0312 試験終了後供試体（令和 4 年度 λ_k・ε_k 実験）の撮影と解析

3) 材料調整・加水混合・締固め過程におけるベントナイト付着状況の観察

ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムを解明するためには、締固め前の材料準備段階で母材、ベントナイト、水の 3 者がどのように相互挙動しているのかを確認する必要がある。そこで、材料の各準備過程における吸水ベントナイトと母材の存在形態を顕微鏡写真で連続的に追跡し、そのメカニズムを考察した。図 6.2-3 に示すように、

① 締固め含水比、ベントナイト混合量、混合手順をパラメータとして混合土の状態(団粒化の程度など)を観察・撮影

② ①をモールドに詰め、締固め前（緩詰め状態）と締固め後の両方に対して顕微鏡による構造観察と画像解析を実施（JGS0312 終了後、すなわち、この締固め土を飽和通水させて透水試験を実施した後の写真は既に上記 2）にて取得済）。本結果と JGS0312 終了後供試土の写真を比較検討した。

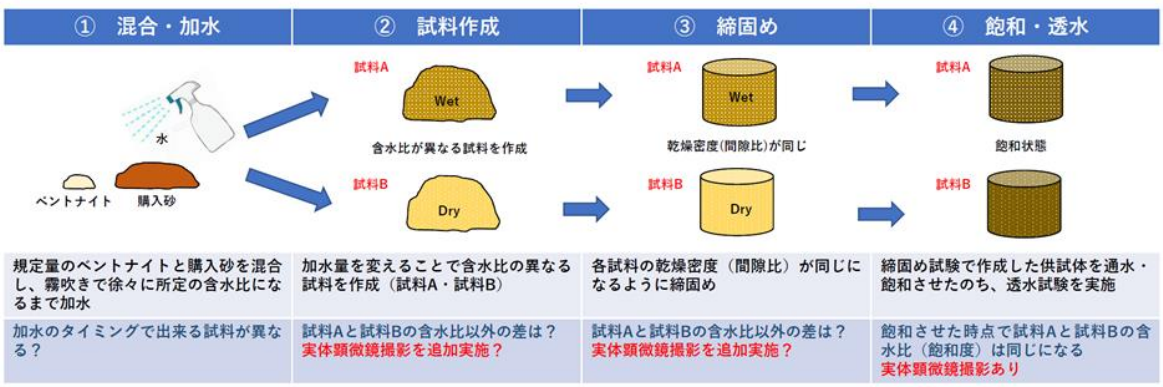


図 6.2-3 材料準備・混合・締固め過程における母材とベントナイトの存在形態の追跡

(4) 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に関しては、令和 3 年度に実験条件の最適化と不飽和締固め→軽水飽和→重水浸透過程の連続撮影を実施し、一部の土質材料では締固め含水比の違いによる粒子配列や重水浸透状況の違いを定性的に確認した。一方、ベントナイト混合土に関しては、実母材（細粒購入砂）と実ベントナイト混合率の組み合わせでの混合土では中性子イメージング実験装置の分解能上、粒子構造や重水浸透挙動の把握が不可能であること、逆に可視化のために最適化された粗砂（珪砂）ではアルミ箱境界部を流れる水を阻止できず、締固め含水比の違いによる重水浸透時挙動の変化を把握できないことが課題として残された（トレードオフ問題)。一方、不飽和締固め時の母材とベントナイトの配置状態については、ベントナイトを貧配合にした供試体とすることで不飽和時の撮影が有効であること、この場合、画像解析の助けを借りれば、重水浸透時挙動の可視化も可能であることが分かっている。

令和 4 年度はこれらの反省を踏まえ、ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムや実験 B で得られた λ_k/ε_k 沿いの透水係数の変化を定性的に説明するためのデータ取得に注力した。また、実験 C で実施した材料加水混合⇒締固め過程の土粒子間隙構造の変化に関しても、中性子イメージング実験によって「不飽和状態での含水比分布の変化」を追跡することで間接的に吸水ベントナイトの母材への付着状況を可視化し、メカニズム解釈の一助となるデータを取得した。

表 6.2-4 に今年度実施した中性子イメージング実験の実験条件を実験目的別に整理して示す。実験は以下 A～C の 3 つの実験目的のもと実施した。

表 6.2-4　中性子イメージング実験の目的と実験条件

	実験目的	母材	細粒分	条件（混合率・含水比等）：第2回	条件（混合率・含水比等）：第3回
A	遮水性発現メカニズムの検証用データの取得（λ_k/ε_k沿い供試土の重水浸透時挙動の可視化）	珪砂2号	クニゲルV1	・珪砂2号にBTを0/0.1/0.2/0.3/0.5/1.0混合（含水比はw=10%に固定） ・適切なベントナイト混合率を模索 ⇒混合率0.2～0.3が可視化可能と判断	・ベントナイト混合率を2水準（0.2と0.3）に固定 ⇒ ε_k沿い挙動やk_{min}発現を重水浸透時挙動を確認 ・λ_k沿い（ρ_d一定）供試体で重水浸透時挙動を確認
B	添加ベントナイトの材料特性の違いの影響検討	珪砂2号	クニゲルV1 クニボンド カオリン	・珪砂2号＋BT1.0（w10%） ・珪砂2号+カオリン1.0（w10%)の比較	・膨潤性の異なるベントナイト2種(Na型、Ca型）と非膨潤性カオリンを同一混合・締固め条件で添加 ・添加細粒分の特性が重水浸透時挙動に及ぼす影響を可視化 ・実務ターゲット実験の購入砂＋ベントナイトは取得済（重水浸透は全くなし）
C	混合・締固め過程でのベントナイト付着状況変化の追跡（間隙構造形成メカニズムを含水比分布により可視化）	購入砂 珪砂2号	クニゲルV1	・購入砂＋BT0.5/1.0混合 （乾燥密度1.0⇒1.4⇒1.7） ・珪砂2号＋BT1.0混合 （乾燥密度0.8⇒1.0⇒1.2）	・購入砂＋BT1.0,3.0混合で締固め含水比を変えて締固め過程での含水比分布（≒吸水ベントナイトの付着状況）を可視化 ・珪砂2号（母材へのベントナイト付着状況がより鮮明）でも同様の追跡を実施

＊第1回目は母材を購入砂、珪砂粉・カオリン・クニゲルを混合し締固め含水比が浸透速度や重水浸透に及ぼす影響を調べたが、結果の評価は困難であった

A. ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの検証

実験 B で得られた λ_k/ε_k 沿いの透水係数の変化を裏付けるデータを取得。重水浸透の可視化を優先し、粒径の大きな珪砂 2 号にクニゲルを貧配合で混合、可視化可能な混合率を摸索した（ベントナイト混合率の増加と共に遮水性が高まる様子も可視化できた)。次にその混合率で締固め時の乾燥密度や飽和度を変えた供試土を作成し、λ_k/ε_k 沿いの透水係数の変化（実験 B）に対応する重水浸透の違いを可視化した。またこれらの供試土では不飽和締固め時の撮像も行い、重水浸透の違い（≒透水係数の違い）が、締固め時の吸水ベントナイトの空間的な付着状態（中性子イメージング実験では、含水比分布として把握可能）の違いによりもたらされることを確認した。

B. ベントナイトの膨潤性の違いの影響に関する検討

膨潤性の高い Na 型ベントナイト、相対的に低い Ca 型ベントナイト、非膨潤性のカオリンの 3 種類の添加材を同一条件で混合し、重水浸透時挙動へ及ぼす影響を調べた。3 種類の添加剤の化学的特性の違いについても別途計測を行った。

C. 加水混合・締固め過程におけるベントナイト付着状況の変化の追跡

実験 C で述べた材料加水混合・締固め過程での吸水ベントナイトの付着状況の変化（実体顕微鏡を用いる実験 B では土粒子間隙構造の画像として認識）を、中性子イメージング実験では含水比分布の変化として把握可能である。母材を購入砂と珪砂 2 号の 2 種類とし、アルミ箱に緩く詰めた状態から、逐次締固めを行って乾燥密度を変化させながら撮像を実施し、含水比分布の変化を追跡した。

【取得画像に対する画像解析の試み】

実験 C,D で取得した実体顕微鏡写真及び中性子イメージング映像に対し、昨年度より画像解析による定量的評価の検討に着手しており、粒子配列や吸水ベントナイトの付着状況の定量化を試みてきた。検討の結果、取得画像を色度・明度・彩度に分解し、締固め含水比によるそれらの値や分布状態(ヒストグラム)の変化を定量化することとしたまた、粒径の大きな材料については土粒子輪郭のエッジ処理等による土粒子配置の可視化を施している。実験 B の λ_k/ε_k ライン沿い各供試土の撮影画像を画像解析することでこれらの傾きが発生する根本理由を明らかにすると共に、透水係数との対応を定量的に示すことができる。また中性子イメージング実験についても、不飽和時の画像解析により吸水ベントナイトの付着状況≒含水比分布をより明瞭に可視化、定量化することができる更に、軽水飽和時と重水飽和時の明度の差分量を取ることで、重水浸透の多少や浸透領域を可視化・定量化した。

図 6.2-4 には、その一例として、令和 3 年度実施のガラス玉の中性子イメージング画像に対する画像解析例を示す。一般的な二値化処理ではなく、取得画像に対してフィルタリングや明度反転等の前処理を施し粒子形状を明瞭化する。その後、軽水飽和画像と不飽和画像の差分から不飽和締固め時の水分・吸水ベントナイトの配置状況を、重水浸透画像と軽水飽和画像の差分から重水浸透状況を可視化している。今年度取得画像に対する画像解析手法の詳細については後述する。

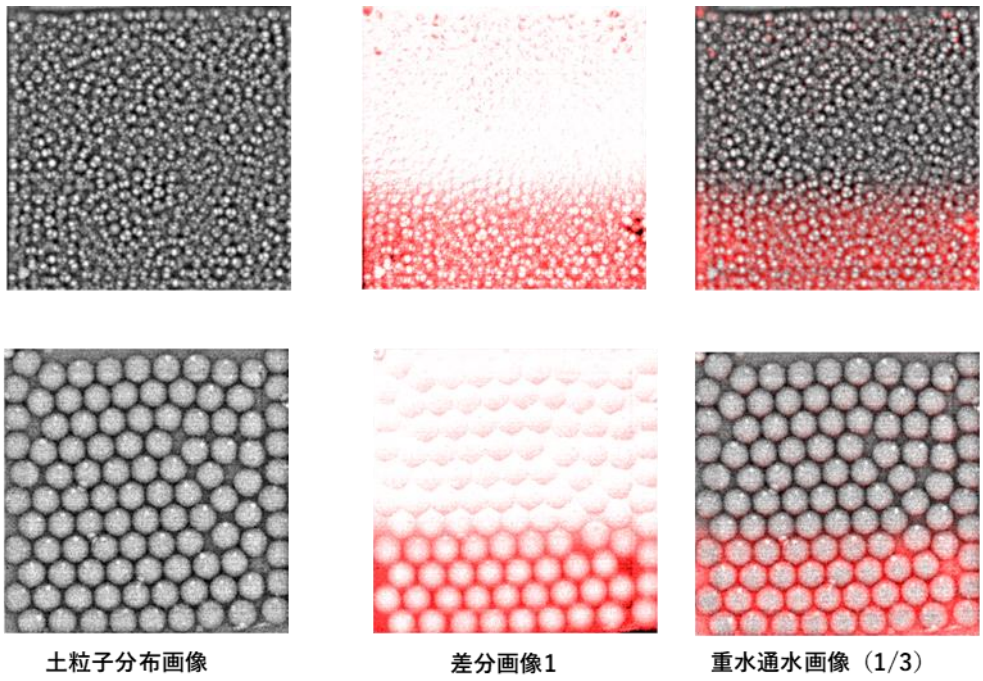


図 6.2-4　令和 3 年度実施の中性子イメージング実験結果（ガラス玉）の画像解析例

(5) 遮水性発現メカニズム解明のための力学試験及び化学実験（実験 E）

以上の実験 B,C,D で得られた実験結果の評価（遮水性発現メカニズムのより本質的な説明や補助的説明）に資することを目的として、前田建設 ICI 総合センターの土質試験装置及び化学実験装置を用いて以下 3 種類の室内試験を実施した。実験手法や実験装置、実験条件等の詳細は 6.3 で詳述する。

① ベントナイト混合土の一面せん断試験

ベントナイト混合土の力学特性が（遮水性だけではなく）、締固め時飽和度 Sr の違いによりどう変化するかを検証する目的で実施した。令和 3 年度の顕微鏡観察で見られた吸水ベントナイトの付着状況の違いを、一面せん断特性の違いにより再検証することを目的とした。乾燥・最適・湿潤側の各含水比で乾燥密度を揃えて作製したベントナイト混合土供試体（実験 B の条件に整合させた。混合率は 10%と 30%の 2 水準）を用い、低上載荷重下で定圧一面せん断試験を実施してせん断応力～水平変位関係への影響（せん断強度や水平変位依存性＝材料延性の違い）を確認した。一面せん断終了後の供試体に対しても顕微鏡撮影を実施し、微視的構造と力学特性の関係を明らかにした。図 6.2-5 に一面せん断試験装置及び実験結果の概念図を示す。

② TG-DTA（熱分析）

ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの説明補佐を目的として、Na 型ベントナイト単体材料（比較のため Ca 型ベントナイト、非膨潤性もカオリンに対しても実施）を対象として 2 種類の化学実験を実施した。最初の実験は TG-DTA（熱分析）であり、単体ベントナイトを乾燥側から湿潤側まで複数の含水比状態で準備し、層間水や層間距離（＝吸水性）

に及ぼす影響を調べた。本結果は、上記一面せん断試験の結果（材料延性やせん断強度など）を説明する目的で用いた。また不飽和状態での熱分析に加え、これらを飽和させた状態での計測を実施した。本結果は、飽和状態で実施される透水試験の結果が締固め時の含水比により変化するという実験事実に対して、その原因が化学的特性の違いにあるか否かを説明するために実施した（飽和後の吸水ベントナイトの化学的特性に違いがなければ、飽和透水係数の違いはベントナイトの付着状態の違いという物理的理由に帰着される）。

③　ζ電位測定

ベントナイトの電荷状態を調べる実験である。飽和状態にある粘土は一般にマイナス電荷を有し、粘土土の表面には陽イオンが付着して中和した状態にある。その陽イオンの存在により、粘土の間隙を通る水自体も、粘土表面からある距離までは電荷した状態にあり、いわゆる電気二重層を形成する[3]。この電気二重層の存在が、飽和時に土粒子間隙を流れる自由水に対する通水抵抗となることが知られている。すなわち、ベントナイト混合土の遮水性は、前述の物理的要因＝ベントナイトの付着状態とこの化学的要因の足し合わせとして生じている可能性がある。本年度はまず、ζ電位を計測することで、その可能性の有無を検討した。絶対値の評価ではなく、非膨潤性カオリン⇒Ca 型（低膨潤性）ベントナイト⇒Na 型（高膨潤性）ベントナイトの順番にζ電位がどの程度変化するかについての基礎的データの取得を行い、②の TDA 実験との関係性を吟味した。

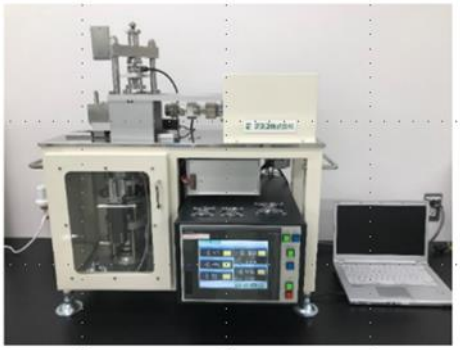
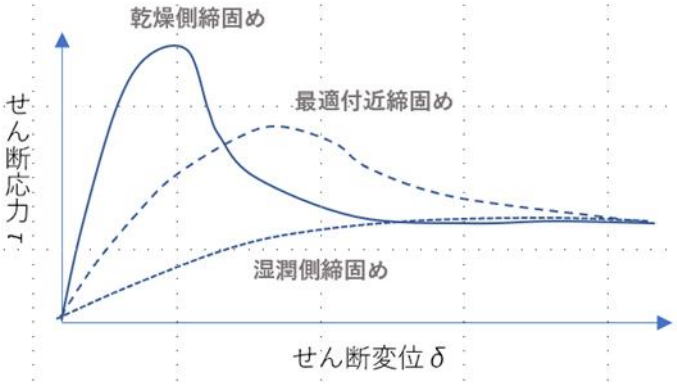


写真-1 スマート一面せん断試験装置



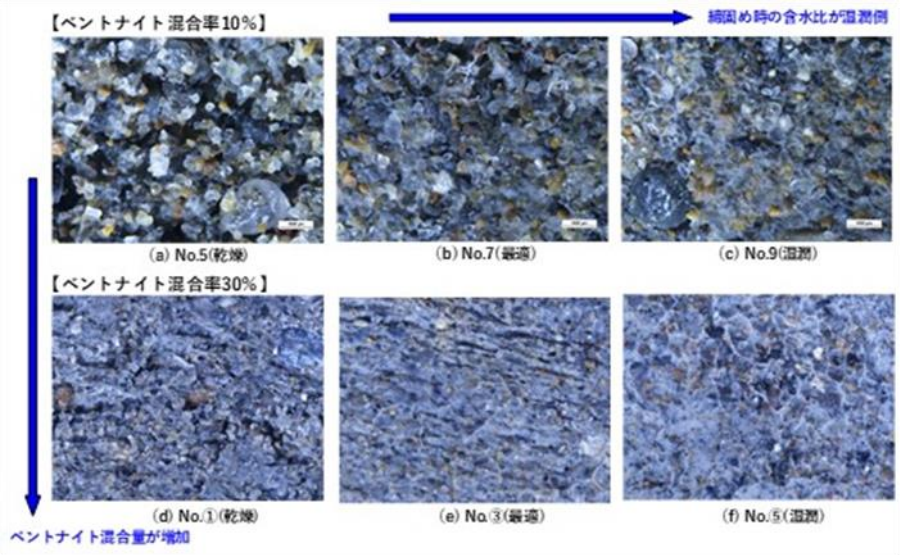


図 6.2-5　締固め含水比を変えたベントナイト混合土の一面せん断試験（模式図）

以上の(1)(2)(4)の実験ケースと実験条件、数量一覧を表 6.2-5 に示す（既実施も併記）。

表 6.2-5　令和 4 年度までに実施した室内試験一覧（中性子イメージング実験を除く）

実験種別	供試土	実験条件	数量	摘要
段階的解明実験（実施済）	A.購入砂（単粒母材）	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
	B.購入砂＋10%珪砂粉	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
段階的解明実験（今年度実施）	D.購入砂＋10%カオリン	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
	E.購入砂＋10%木節粘土	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
	F.粒度調整母材	0.2Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	16	1Ec締固め6点含む
実務ターゲット実験（実施済）	C.購入砂＋10%ベントナイト	0.1Ec,1Ec,4.5Ec締固め試験	18	
		λk・εk実験	12	評価には1Ec締固め6点含む
実務ターゲット実験（今年度実施）	G.購入砂＋30%ベントナイト	0.1Ec,4.5Ec締固め試験	12	1Ec6点は既実施
		λk・εk実験	12	評価には既実施の1Ec締固め6点含む
力学試験	D.購入砂＋10%カオリン	一次元圧縮（圧密）試験	6	含水比3水準×2（不飽和・飽和）
	F.粒度調整材(ダムコア＜2㎜)		6	
	C.購入砂＋10%ベントナイト	定圧一面せん断試験	6	含水比3水準×混合率2水準
化学試験	ベントナイト（Na型・Ca型）・カオリン	TG-DTA(熱分析）計測	3	3供試体×含水比変化
		ζ電位計測	3	
顕微鏡観察（長期透水試験後）	C.購入砂＋10%ベントナイト	JGS0312 λ_k実験終了供試体	6	昨年度実施済供試体
	G.購入砂＋30%ベントナイト	JGS0312 λ_k・ε_k実験終了供試体	12	今年度終了次第実施
顕微鏡観察（材料混合・締固め過程）	C.購入砂＋10%ベントナイト	混合・加水・練混ぜ・静的締固めの各過程で顕微鏡観察	適宜	・含水比を乾燥⇒最適⇒湿潤で変化 ・混合（団粒化）の観察と撮影 ・締固め前⇒締固め後の撮影 ・混合順序の違いの影響も検討
	G.購入砂＋30%ベントナイト			
	D.購入砂＋10%カオリン			

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

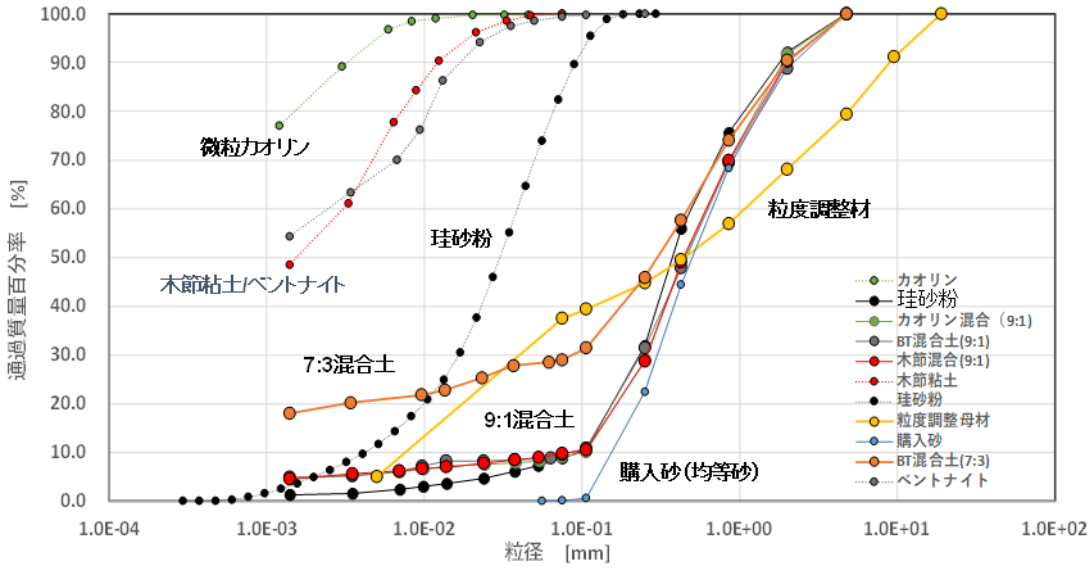
（1）室内締固め～透水試験（実験 A,B）

図 6.3-1 に、実験 A、B に用いた供試土の粒度特性と細粒分の塑性指数を示す（実験条件一覧と塑性指数を再掲）。前年度実施した購入砂単体、購入砂＋珪砂粉 10%、＋ベントナイト 10%の粒度も併記した。今年度準備した微粉カオリンと木節粘土の単体粒度を図中に併記しているが、木節粘土とベントナイト（クニゲル V1）は粒度が良く似ており、両者の比較に

より同一粒度での塑性や膨潤性の影響を検討できる。一方、微粉カオリンは木節粘土よりも細粒側にあり塑性指数も大きいものの、粒度の違いの影響を検討できる。9:1 混合土の粒度は母材粒度の影響が卓越するため全て近い範囲(細粒分含有率 Fc≒10%)に収まるが、7:3 ベントナイト混合土は細粒分含有率が 30%近い。母材粒度の影響を調べるために今年度より実験を開始した粒度調整材は砂と礫を適度に混合した材料であり、単粒の購入材との比較により母材粒度の影響を抽出できる。粒度調整材は敢えて細粒分を加えないギャップ粒度としており、次年度はこれに細粒分を添加し、母材粒度＋細粒分の影響を調べる予定である。

図 6.3-2 に実験 A（1Ec 締固め-透水試験）の結果を示す。上半分の締固め試験結果を見ると、母材に細粒土（珪砂粉、木節粘土、カオリン、ベントナイト）を混合した場合は締固め密度がいずれも増加しているが、非膨潤性の材料を添加した場合に比べ、膨潤性のベントナイトを混合した場合、乾燥密度の増加量が少なく、ベントナイト混合率が大きいとその傾向がより顕著になる。本結果は、吸水ベントナイトの反発力（層間水を取り込み膨張＝反発力を有する）が締固め効果を低減させた結果と考えられる。令和 2 年度に実施した不均一供試体（ベントナイトダマを予め形成し、これを混合して締固め）の締固め-透水試験結果では、より顕著に締固め効果の阻害が生じていた事実とも符合する。粒度調整材は、いわゆる間詰効果により最も高い乾燥密度を発揮している。

図 6.3-2 の下半分には透水試験結果を示している。母材⇒非塑性細粒土混合⇒高塑性細粒土混合⇒膨潤性細粒土混合⇒その混合率の増加、の順に、透水係数がそのオーダーを変えながら変化している様子を確認できる。また、同じ母材であっても粒度調整材は乾燥密度に対応した高い遮水性を発揮していることも見て取れる。全ての材料で、透水係数は乾燥側よりも湿潤側のほうが小さくなっており、本研究の端緒である「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」傾向も、さほど顕著ではないものの概ね確認できる。木節粘土やカオリンを混合した材料では、他に比べて乾燥側と湿潤側の透水係数の差がより大きくなっており、その傾向は膨潤性ベントナイトを混合すると再び顕著でなくなることなども図より判別できる。



	塑性指数Ip
珪砂粉	0
木節粘土	46.6
微粒カオリン	61.5
ベントナイト	363.4

	実施済
	R4実施
	R5/6実施

母材	添加する細粒分	混合率		
購入砂（均等粒径：Uc小）	なし	0%		
	非塑性（珪砂粉）	10%	30%	ー
	低塑性（カオリン）	10%	30%	ー
	高塑性（木節粘土）	10%	30%	ー
	膨潤性（クニゲル）	5%	10%	30%
粒度調整材_1（Uc大）	非・低・高塑性土	0%	10%	30%
粒度調整材_2（より細粒側）		未定（今年度の実験結果を参照して決定）		

図 6.3-1　実験 A・実験 B に用いた供試土の粒度特性と細粒分の塑性指数

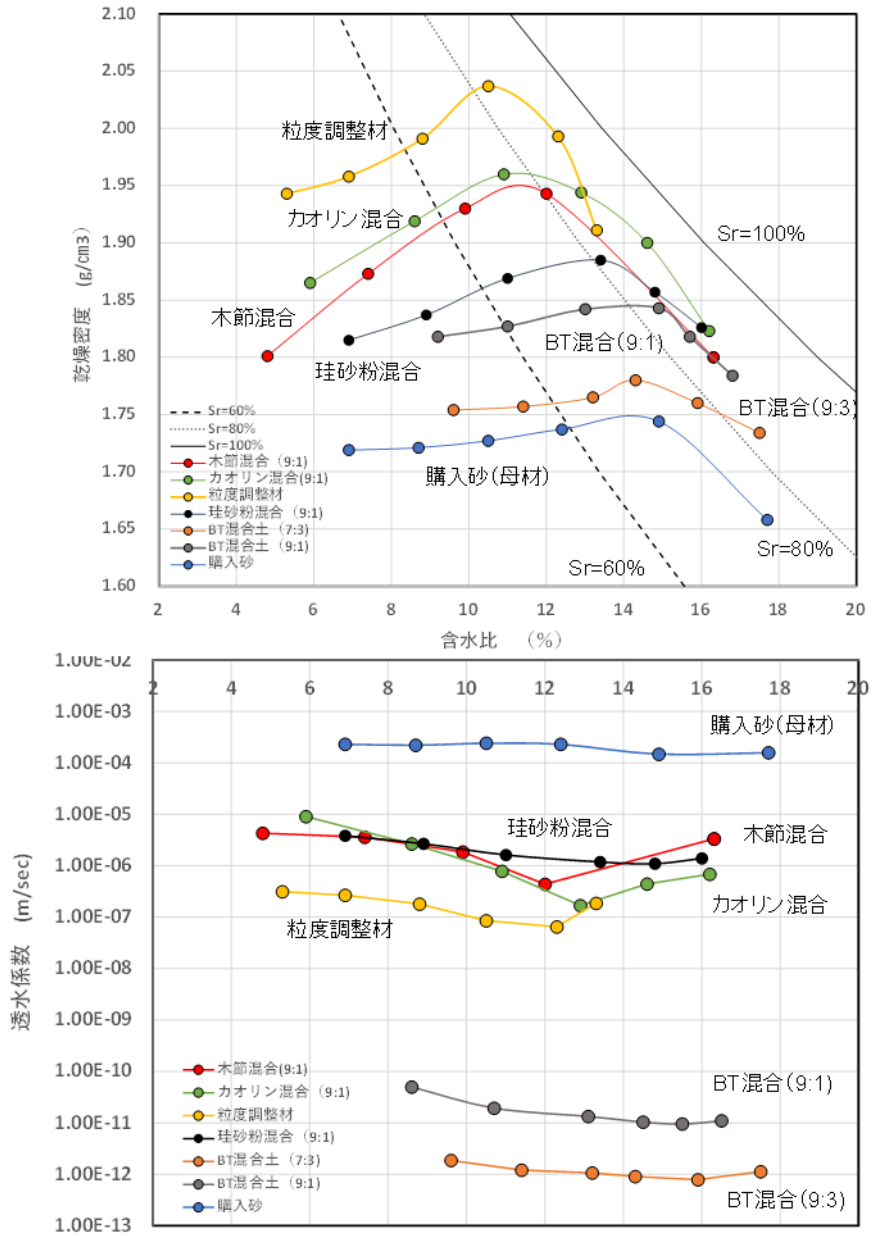


図 6.3-2　実験 A（1Ec 締固め-透水試験）の結果

次に、実験 B（λ_k/ε_k 実験）の結果を、昨年度実施した内容を再掲しながら示していく。図 6.3-3～図 6.3-6 には、各材料の供試体の締固め条件（乾燥密度 ρ_d と飽和度 Sr の組み合わせ）を示す。λ_k/ε_k ラインの整理には実験 A のデータも用いており、その供試体番号は丸数字で示されている図 6.3-7～図 6.3-13 には、各材料毎に、供試体の締固め条件(再掲)と共に、得られた λ_k ライン、 ε_k ラインを示す。各々の図中には図 6.3-3～図 6.3-6 に示した供試体番号を対応付けて記載した（丸数字は 1Ec 締固め供試体）。

なお、木節粘土とカオリン添加及び粒度調整材の実験では、高飽和度側での 1Ec 締固め供試体の一部（特に低乾燥密度条件）で細粒分の分離が発生し、透水試験用供試体としての品質（均一性）を確保できなかった。それらの供試体は評価外とすると共に、カオリン 10%実験では試みに供試体 13,14 を追加実施した。単粒母材に 10%程度の非膨潤性細粒土を混合す

る場合、乾燥側や最適状態では供試体作製に問題は生じないが、湿潤側（特に飽和度 90%付近）の供試体では 1Ec による締固めはランマ落下の早期に乾燥密度が収れんし、以降は表面に水が浮いた状態でランマを規定どおり落下し続けることになる。この場合、ランマ落下箇所が陥没、その周辺に細粒分が噴出（噴泥）し、供試体としての均一性が確保できなかった。そこで追加供試体 13,14 では、ランマ落下を規定せず、できるだけ静的に供試体を締固め、所定密度に達したらそこで締固めを停止した。その結果は図 6.3-10 中に示すように、乾燥側や最適側供試体と整合的な結果を与えた。この影響は単粒母材×非膨潤性細粒土×10%混合率の組み合わせや粒度調整材の一部（やはり高飽和度×低乾燥密度の条件）で生じているものであり、例えばベントナイト混合土 10%では膨潤性のベントナイトが母材粒子同士をその粘着性によって結合するため、問題は生じていない。次年度以降、母材粒度が良好となることから、今後は生じにくいものと思われるが、今後もこの点には留意しながら供試体条件の設定や結果評価を行っていきたい。

以下、① 購入砂単体　② 購入砂＋珪砂粉 10%　③ 購入砂＋木節 10%　④ 購入砂＋カオリン 10%　⑤ 粒度調整材　⑥ 購入砂＋ベントナイト（クニゲル V1）10%　⑦ 購入砂＋ベントナイト（クニゲル V1）30%　の順に実験結果を示す。これら一連の実験結果より、以下の傾向を指摘することができる。

① 材料特性の違いに関わらず、λ_k と ε_k のラインは透水係数 k の片対数 logk に対して概ね線形的な傾向を示す（完全な直線とは言い難い:特に＋珪砂粉 10%）
② 締固め時飽和度一定の λ_k ラインは、締固め密度 ρ_d の増加に伴い右下がりに低下する傾向を示し、各々のラインは締固め時飽和度が高いほど下方に（平行）移動する
③ 締固め時乾燥密度一定の ε_k ラインは、締固め時飽和度 Sr の増加に伴い右下がりに低下する傾向を示し、各々のラインは締固め時乾燥密度が大きいほど下方に（平行）移動する。龍岡が指摘する「飽和度 50%までは一定値で以降右下がり」の傾向は一部見られるものの、現時点では判然としない。
④ ②、③の結果は、材料特性に関わらず、締固め土の飽和透水係数が乾燥密度と飽和度の組み合わせにより決まることを示している。

一方、特に珪砂粉 10%混合土で見られた λ_k の「下に凸の形状」については、乾燥密度を指標としていることがその理由の一つと考えられる。例えば飽和粘性土の圧密解析では透水係数の間隙比 e に対する依存性（透水係数の非線形性）を λ_k と称する。圧密曲線 e-logp が正規圧密領域において 1 本の直線となることに拠っており、締固め土の場合も乾燥密度ではなく間隙比 e による整理を試みてみた。図 6.3-14 には珪砂粉の他、カオリン、クニゲル混合時の λ_k ラインを間隙比 e で整理した結果を示すが、確かにこのような整理を行えば、右上がりの直線に近い関係と見なすこともできそうである。

各材料の λ_k、ε_k ラインを全て併記した結果を図 6.3-15 及び図 6.3-16 に示す。これより、以下の傾向を指摘することができる。

① λ_k ラインは非塑性細粒土の混合に伴い締固め密度が右側に増加し、ある一定の勾配で logk が減少（遮水性が高まる）する。一方、高塑性のカオリンや木節粘土を混合した場合、その傾きは購入砂に対して高密度領域で明らかに増加する傾向を示す。更に、細粒

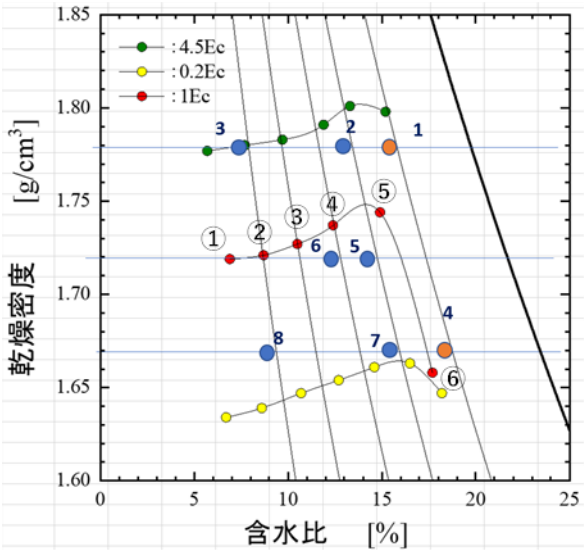
分を含まない粒度調整材では再び勾配が低下し、単粒の購入材に近い挙動を示す（細粒分の混合がλ_kに影響を及ぼすことを示唆）。

② 一方、膨潤性のベントナイトを混合した場合、λ_kの傾きは再び減少し、ベントナイトの混合率が増加すると、更にその傾きは低下する（透水係数に対する締固め時乾燥密度の依存性が低下していく）傾向を示す。

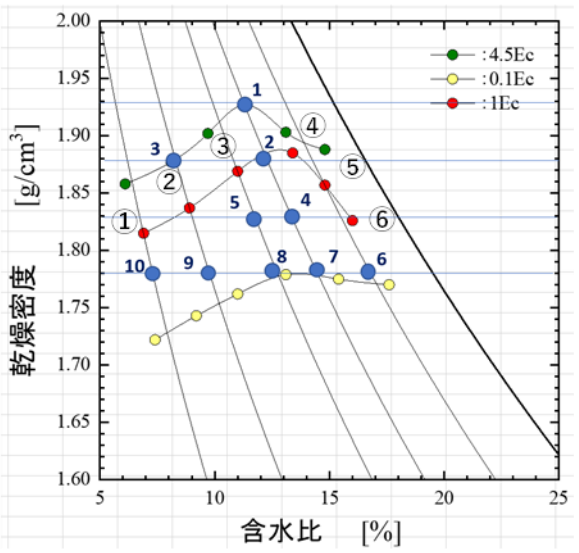
③ ε_kラインにも同様の傾向が現れており、非塑性細粒土混合土ではその傾き（飽和度依存性）が小さいが、高塑性のカオリンや木節粘土を混合した場合、傾きが明らかに増加し、締固め飽和度 Sr の依存性が増加する。細粒分を含まない粒度調整材では再びεの勾配が低下し、単粒の購入材に近い挙動を示すことも同様である（細粒分の混合はλ_kのみならずε_kにも影響を及ぼすことを示唆）。

④ ③膨潤性のベントナイトを混合した場合の変化もλ_kラインによく似ており、その傾きは再び低下し、ベントナイトの混合率が増加すると、その傾向はより顕著となる。

これら材料特性の変化の影響については、引き続き 6.4 の重回帰分析の結果の中で定量的な評価を進めていくが、現時点では膨潤性のベントナイトを高い重量比で混合した場合、締固め時の乾燥密度や飽和度の影響が明らかに小さくなることが見て取れる。これは、膨潤性のベントナイト量が多い場合、締固め密度（間隙量）や飽和度（間隙分布）の影響が、透水試験前の飽和通水時の再膨潤により一律低下すること（小峯[1]はベントナイト混合率が 20%を超えると透水係数が収れんする（一定レベルとなる）ことを述べており、本結果や、後述する透水試験後の顕微鏡写真の結果（30%混合では締固め含水比の違いによる土粒子構造の違いが 10%ほど顕著でない）と整合するものと言える。

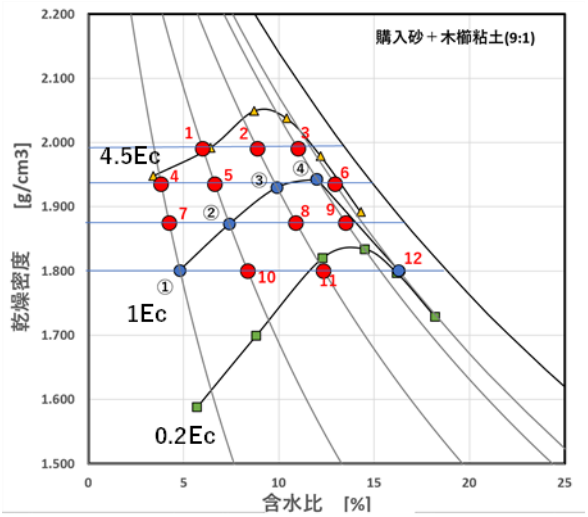


① 購入砂（単体）

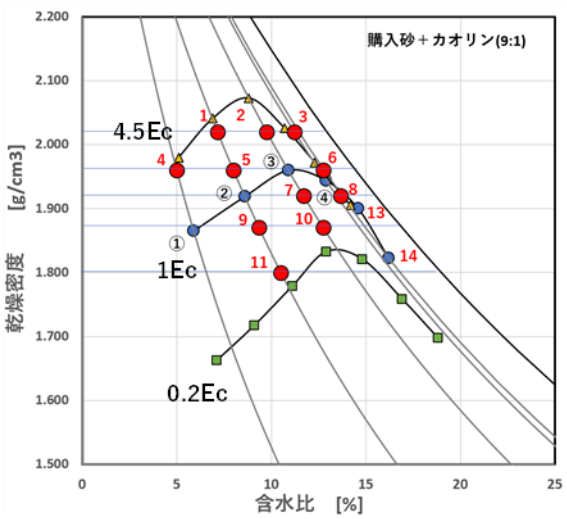


② 購入砂＋10%珪砂粉

図 6.3-3 実験 B（λk/εk実験）の供試体条件（①、②）

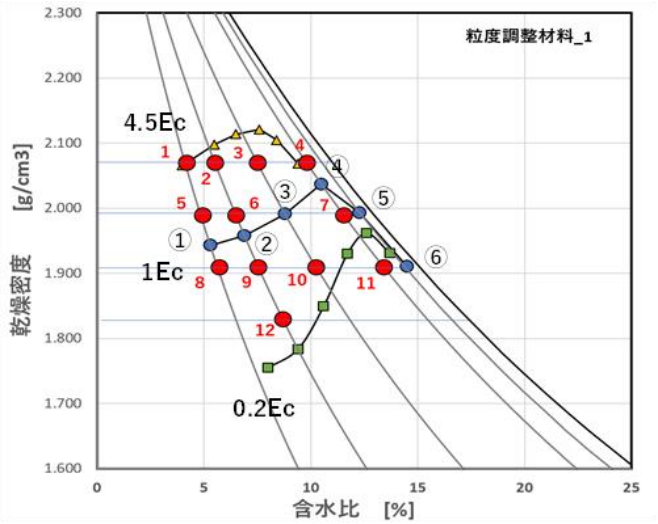


③ 購入砂＋10%木節粘土



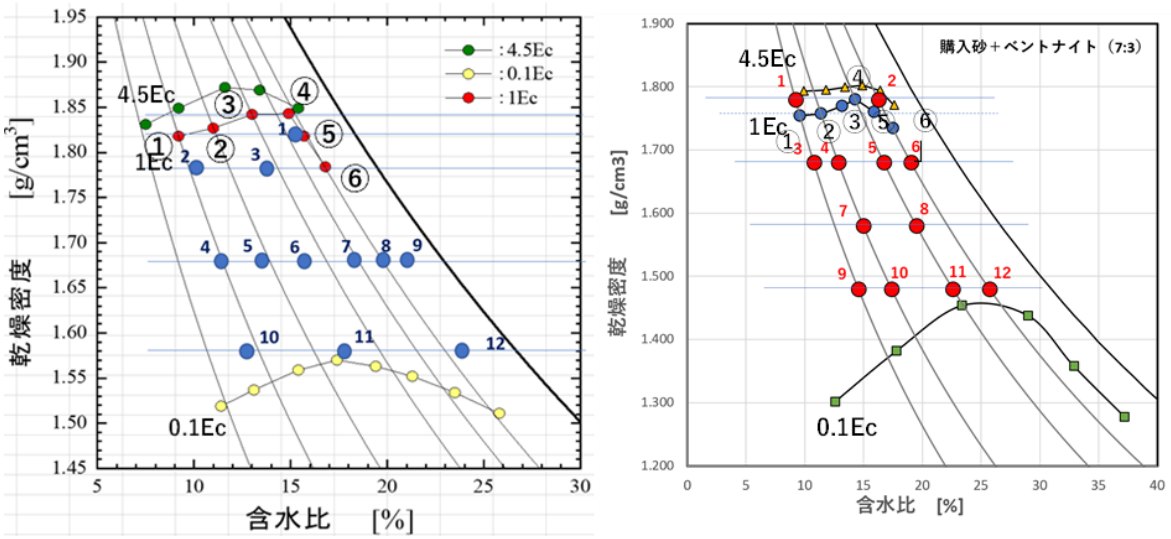
④ 購入砂＋10%微粉カオリン

図 6.3-4 実験 B（λk/εk実験）の供試体条件（③、④）



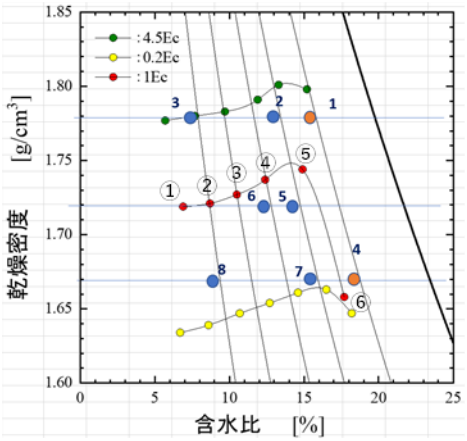
⑤ 粒度調整材単体（細粒分なし）

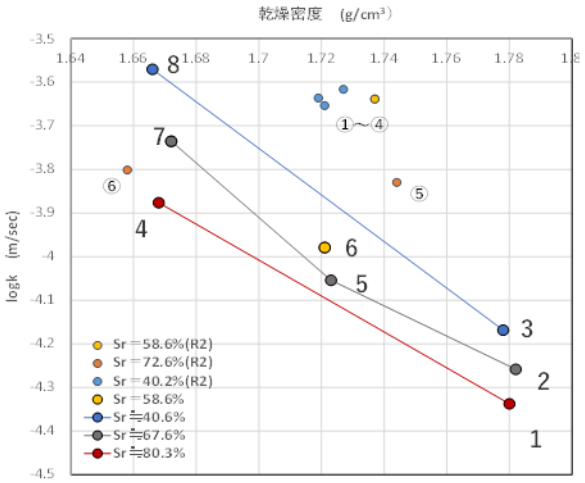
図 6.3-5　実験 B（λ_k/ε_k 実験）の供試体条件：粒度調整材（⑤）



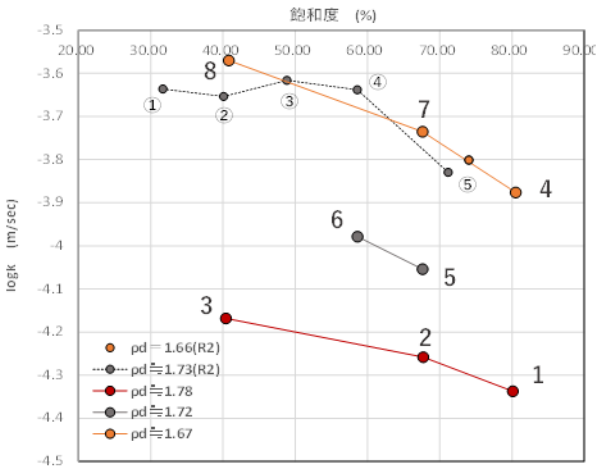
⑥ 購入砂＋クニゲル 10%　　⑦ 購入砂＋クニゲル 30%

図 6.3-6　実験 B（λ_k/ε_k 実験）の供試体条件（⑥、⑦）



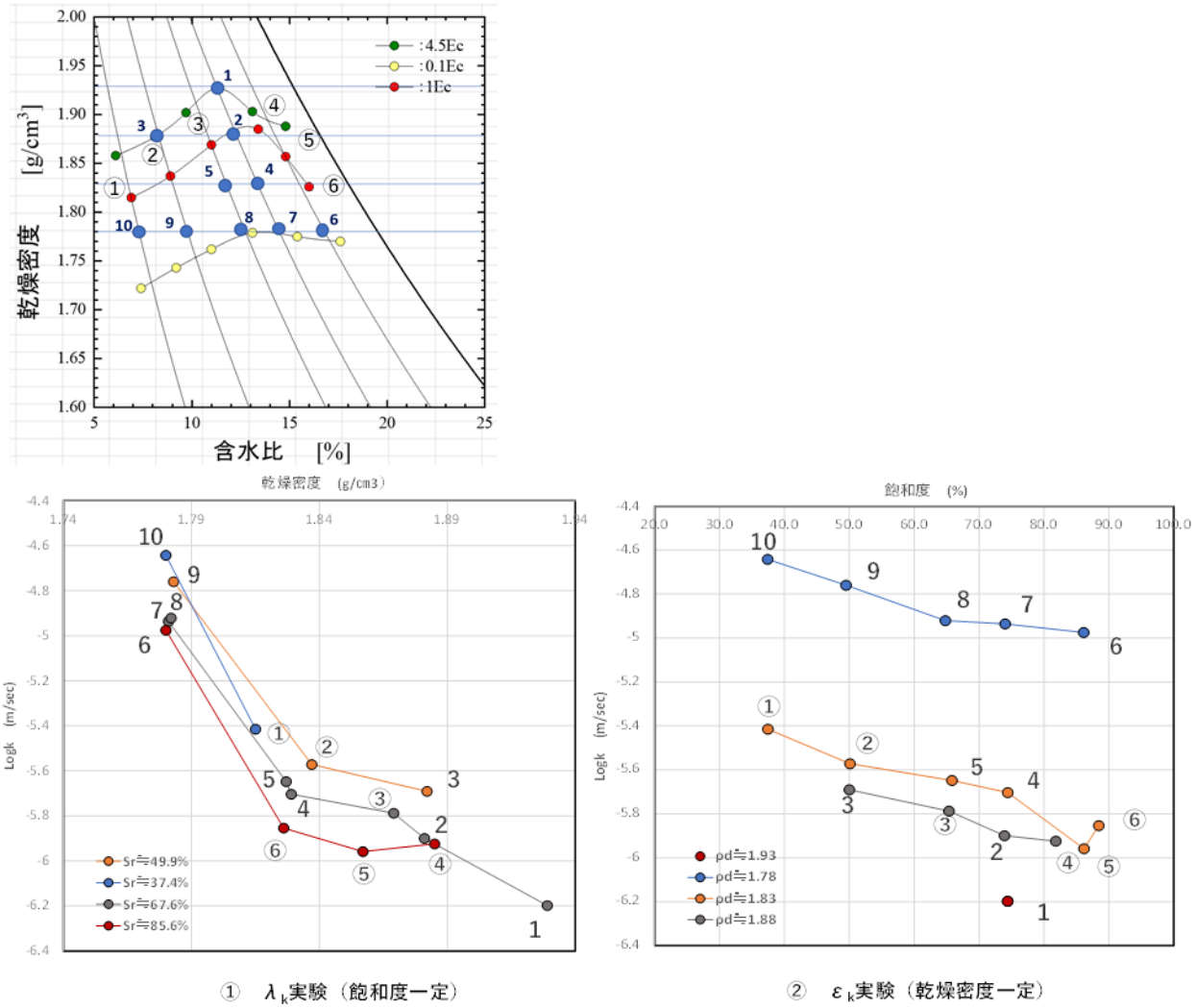


① λ_k実験（飽和度一定）



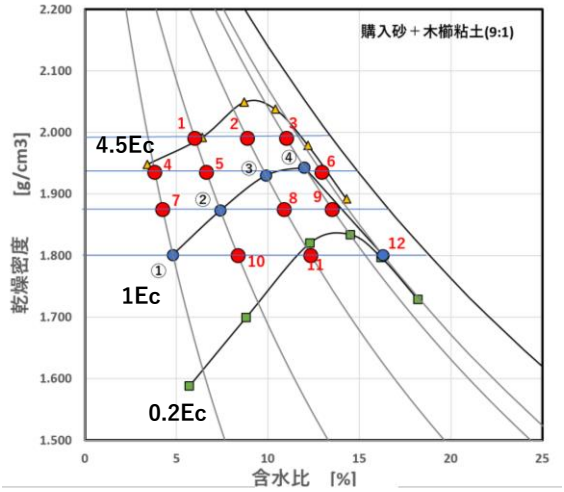
② ε_k実験（乾燥密度一定）

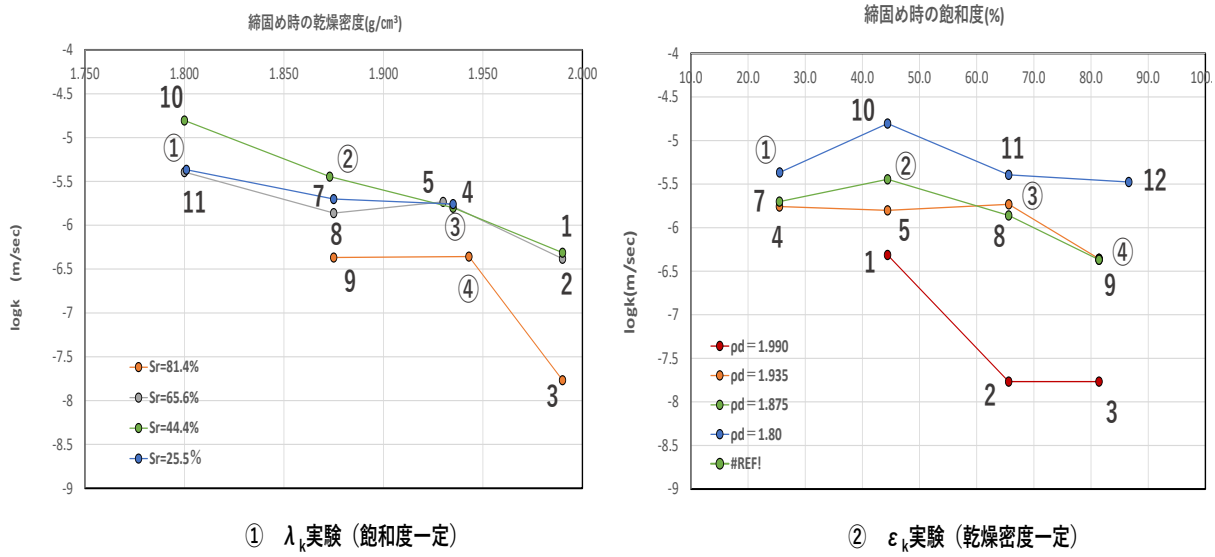
図 6.3-7　実験 B（λ_k/ ε_k実験）結果：購入砂（単体）



① λ_k実験（飽和度一定）　② ε_k実験（乾燥密度一定）

図 6.3-8　実験 B（λ_k/ ε_k実験）結果：購入砂＋珪砂粉 10%





① λ_k実験（飽和度一定）　② ε_k実験（乾燥密度一定）

図 6.3-9　実験 B（λ_k/ ε_k 実験）結果：購入砂＋10%木節粘土

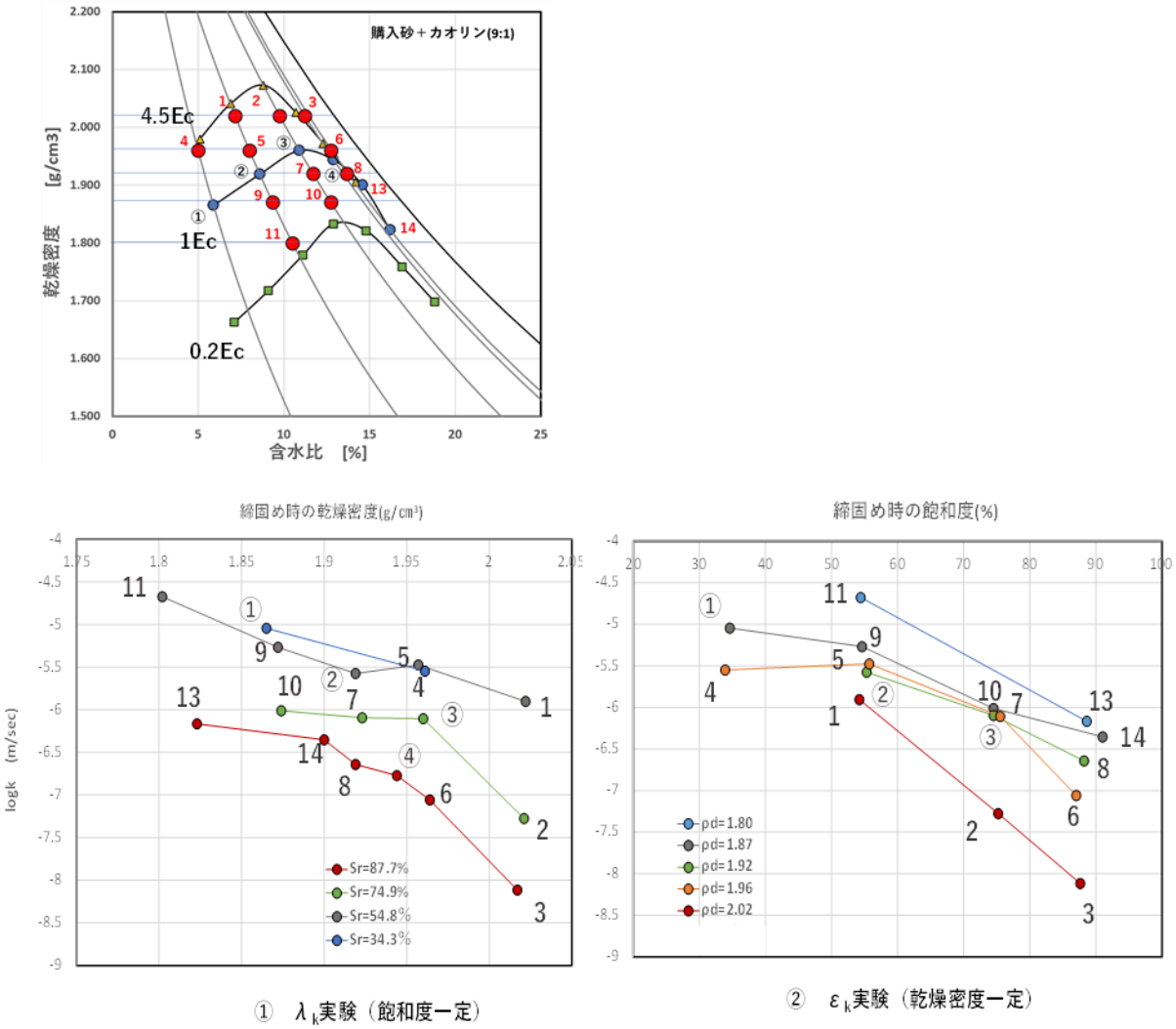
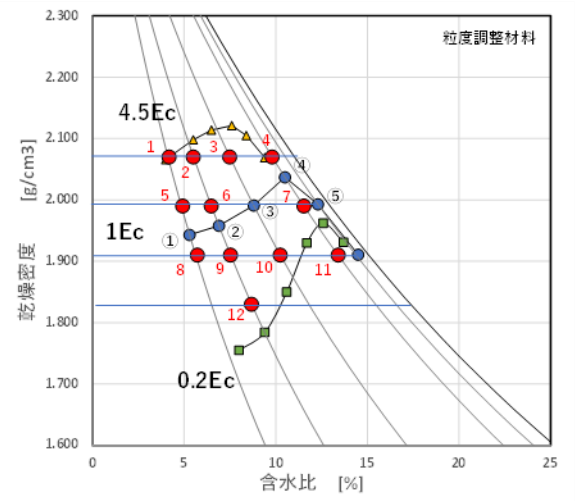


図 6.3-10　実験 B（λk/εk実験）結果：購入砂＋10%微粉カオリン



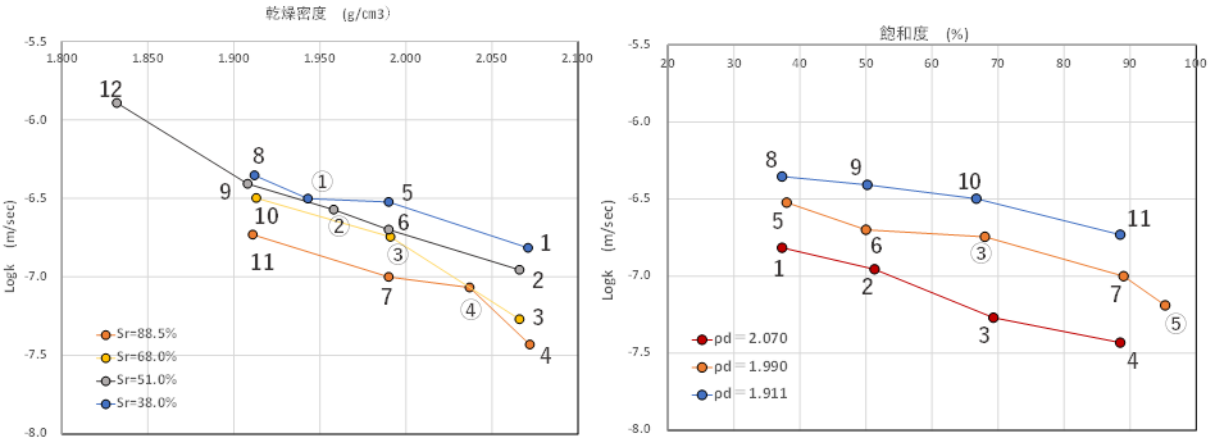


図 6.3-11　実験 B（λ_k/ε_k 実験）結果：粒度調整材

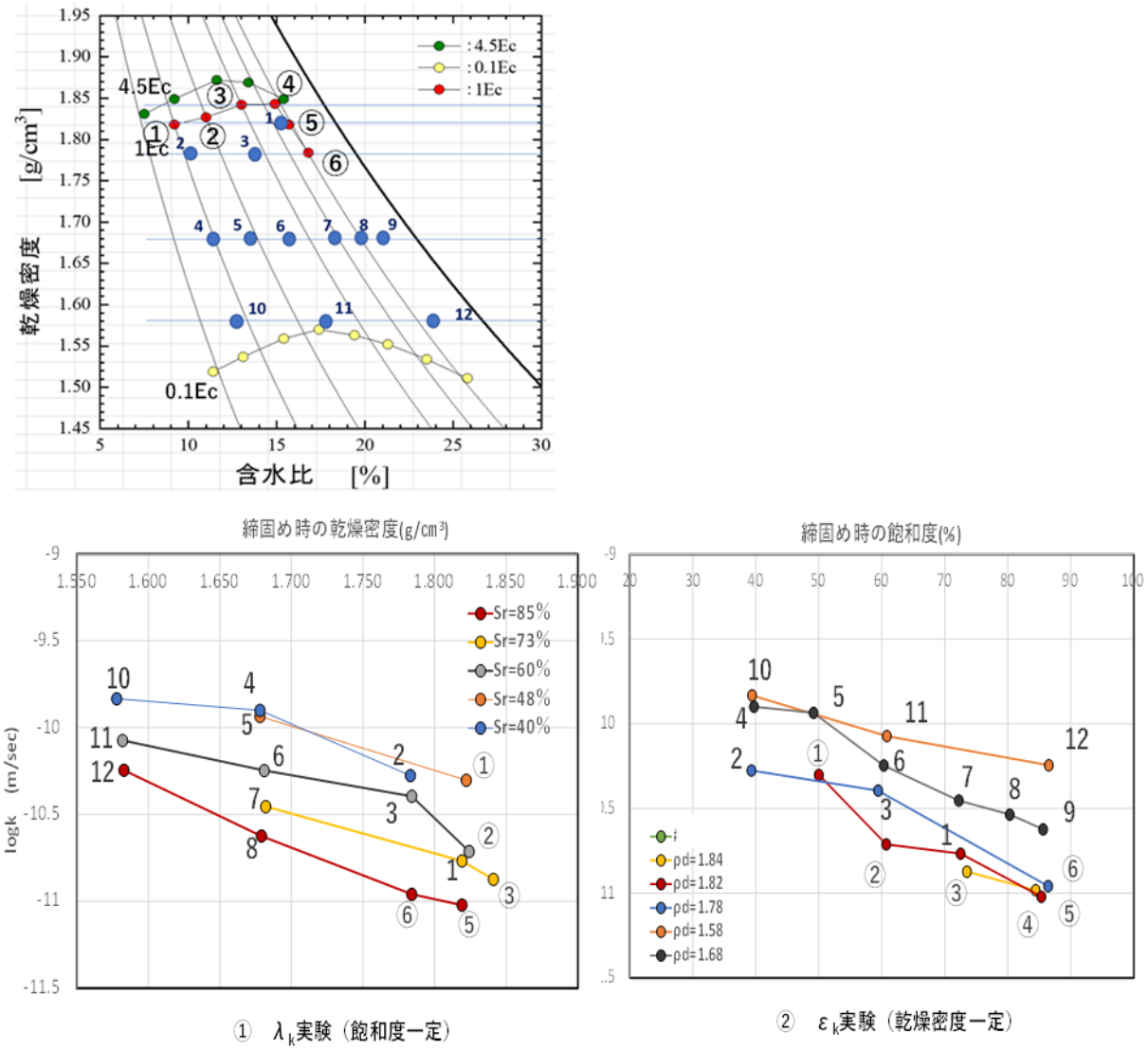
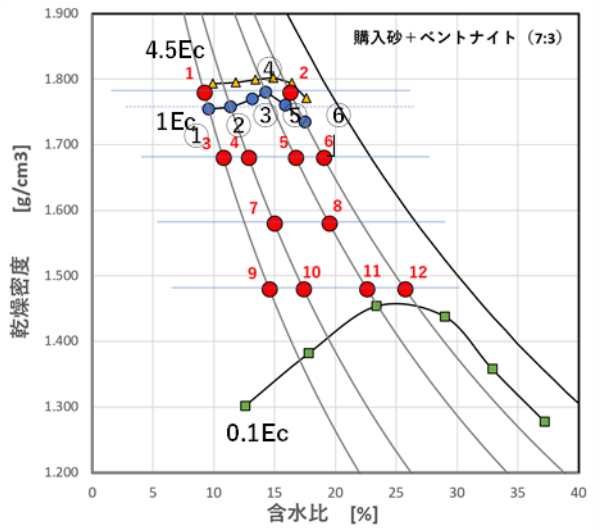


図 6.3-12　実験 B（λ k/ ε k 実験）結果：購入砂＋クニゲル 10%



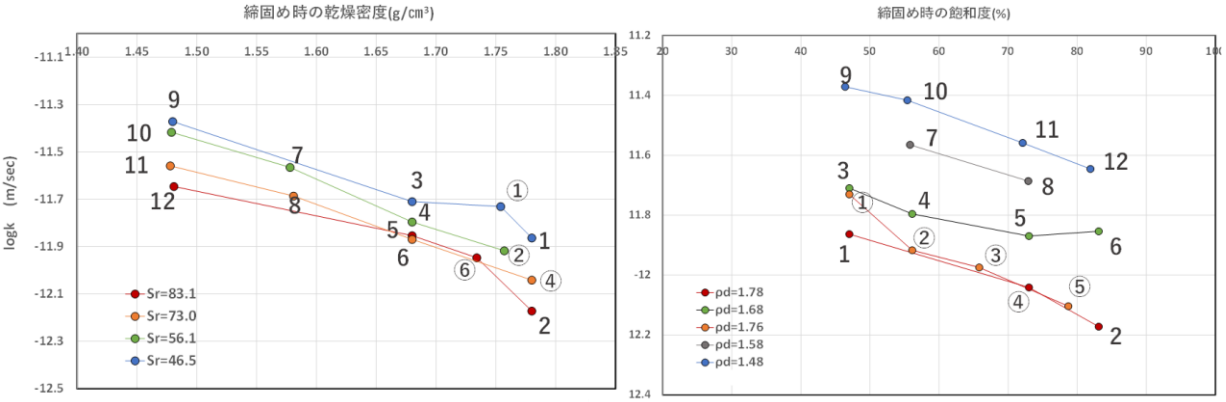


図 6.3-13　実験 B（λ_k/ ε_k 実験）結果：購入砂＋クニゲル 30%

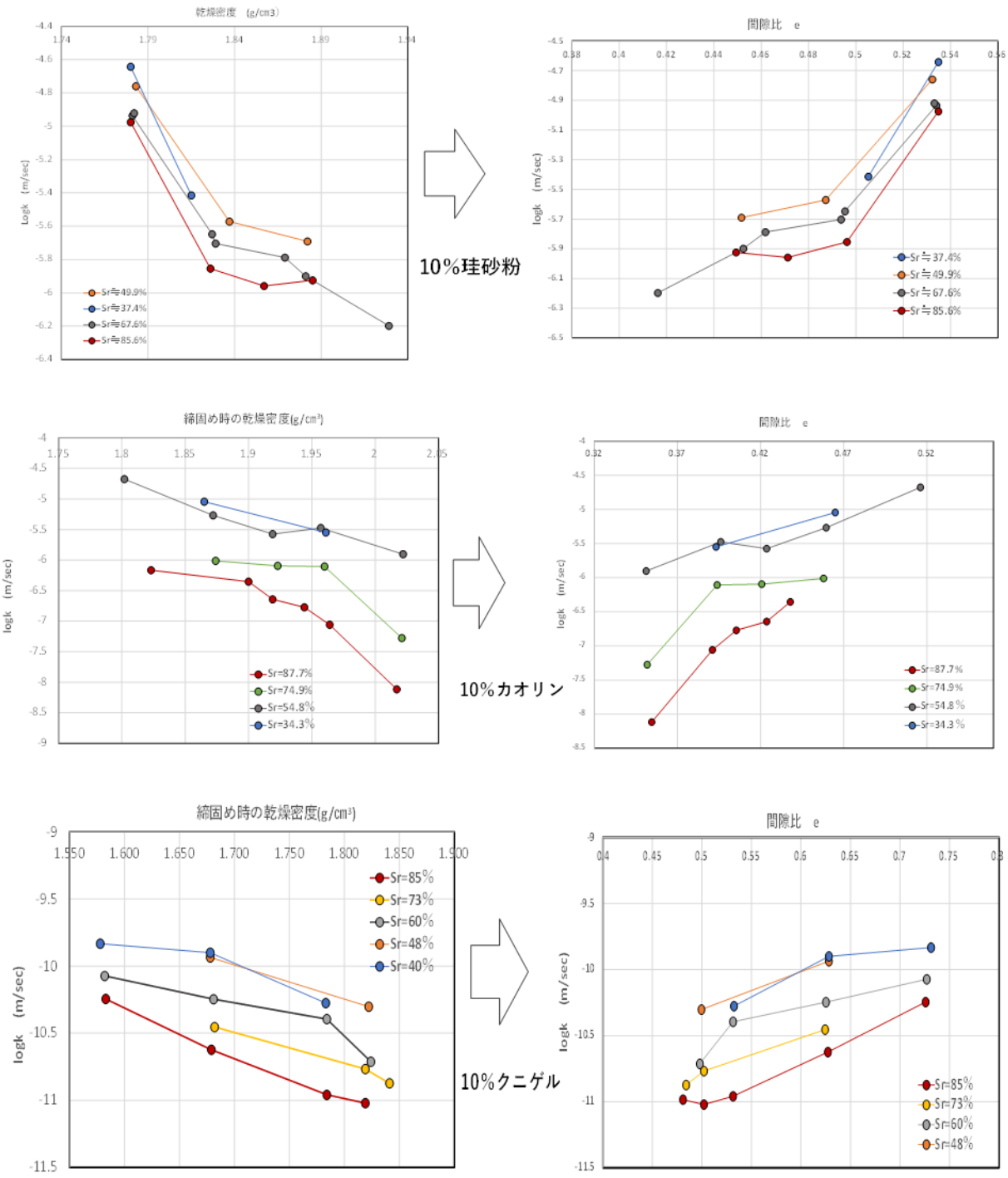


図 6.3-14　実験 B（λ_k 実験）の間隙比整理結果

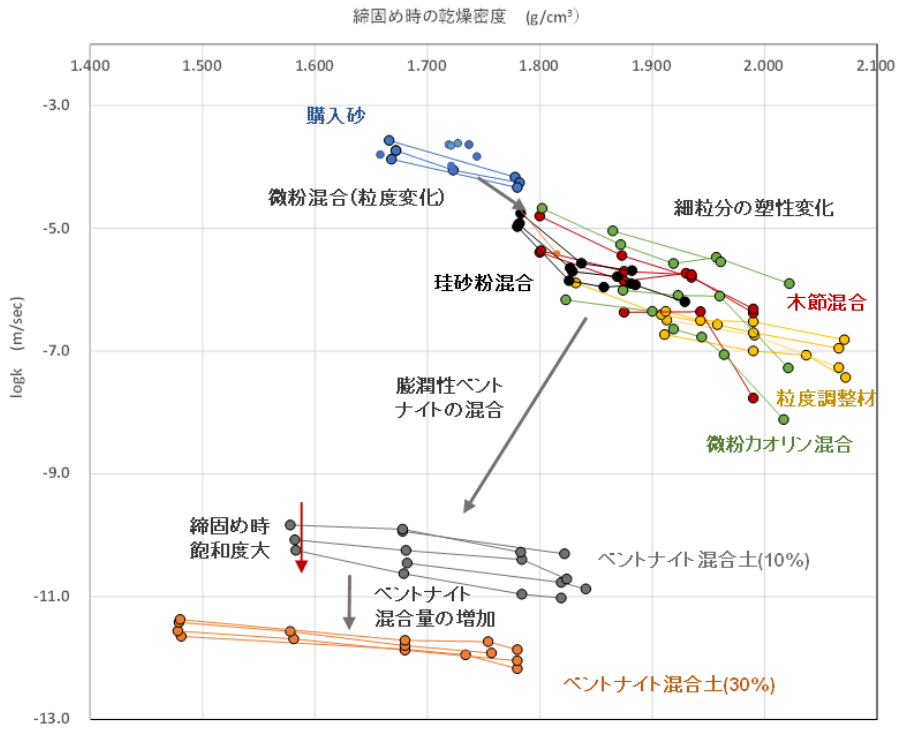


図 6.3-15　実験 B（λ_k 実験）の総括：全データ併記

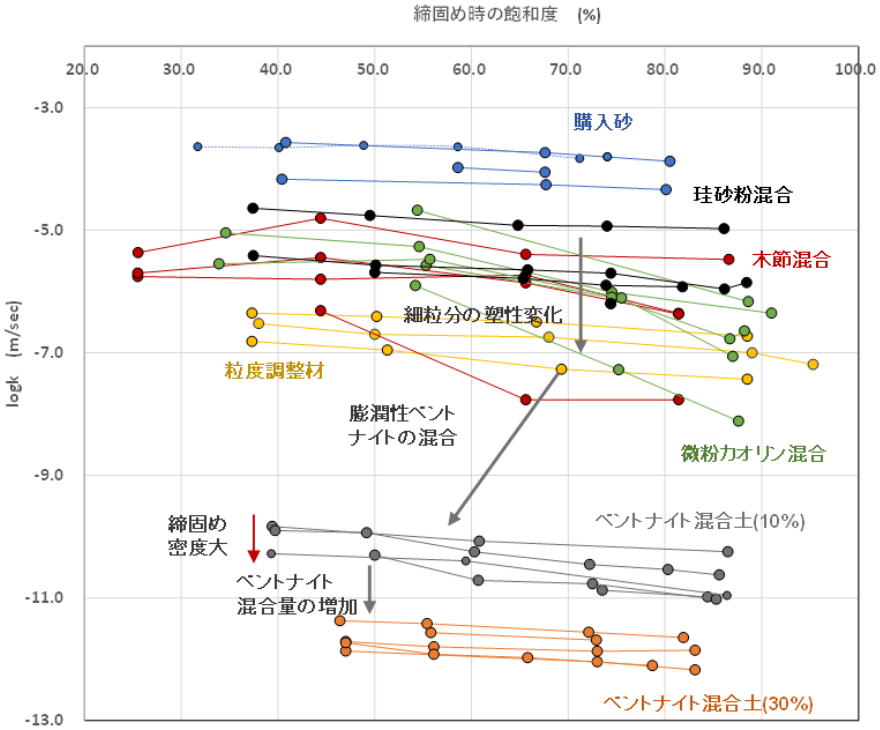


図 6.3-16　実験 B（ε_k 実験）の総括：全データ併記

(2) 実体顕微鏡による土粒子間隙構造観察（実験 C）

締固め～透水試験を実施した供試体に対して、実体顕微鏡による観察及び画像撮影を実施した。今回対象としたのは、母材である購入砂とベントナイト（クニゲル V1）を 9：1 で混合した試料（ベントナイト混合土 10%）と、購入砂とベントナイトを 7：3 で混合した試料（ベントナイト混合土 30%）の 2 種である。図 6.3-17 は、これら混合土の締固め試験結果と締固め～透水試験（JGS0312）を実施した位置（図中の No1～No12 の赤プロット）を示している。これらの供試体に対して、透水試験終了後に上端表面を図 6.3-18 に示した実体顕微鏡にて観察・撮影を行った。

図 6.3-19 及び図 6.3-20 は、実体顕微鏡により撮影した各供試体画像の一例である。図 6.3-19 に示したベントナイト混合土 10%について、同じ乾燥密度 1.680g/cm³ である No4～No9 の供試体画像を比較すると、飽和度の低い No4 や No5 では比較的大きな空隙が見られるのに対して、飽和度の高い No8 や No9 では半透明ゲル状のベントナイトが間隙を埋めており大きな間隙も見られない。これは、図 6.3-20 に示したベントナイト混合土 30%のについて同じ乾燥密度 1.480g/cm³ である No9～No12 の供試体画像を比較しても、同様の傾向を見ることができるが、ベントナイト混合土 10%ほど顕著な差ではない。このように、乾燥密度（間隙比）が同じであるにもかかわらず間隙構造には違いがあることが観測され、この影響で透水係数にも違いが生じているのではないかと考えられる。

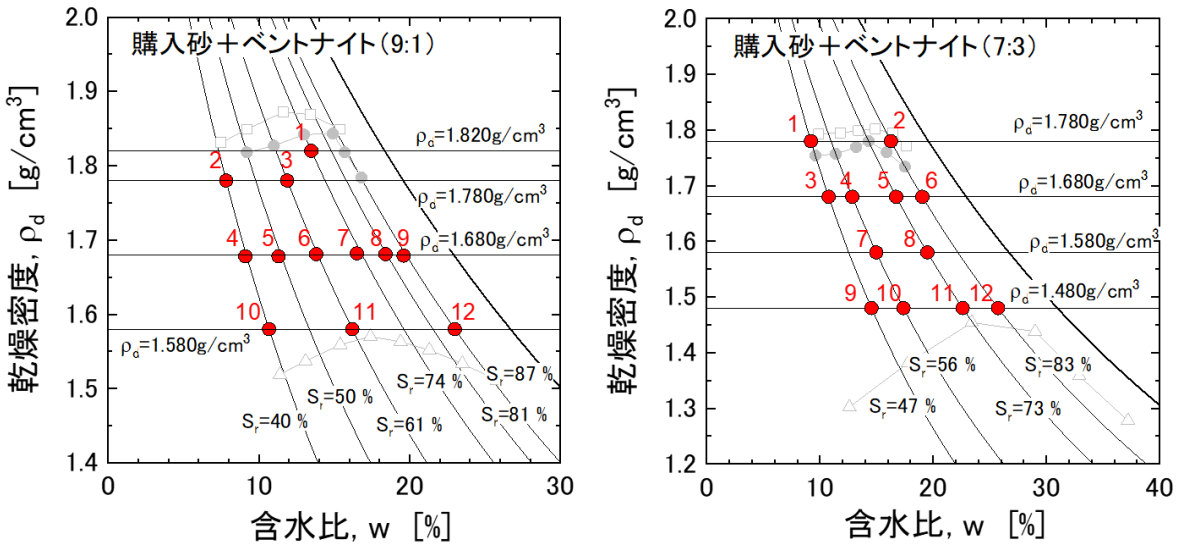


図 6.3-17　締固め～透水試験実施位置

図 6.3-18　実体顕微鏡（Nikon SMZ18）

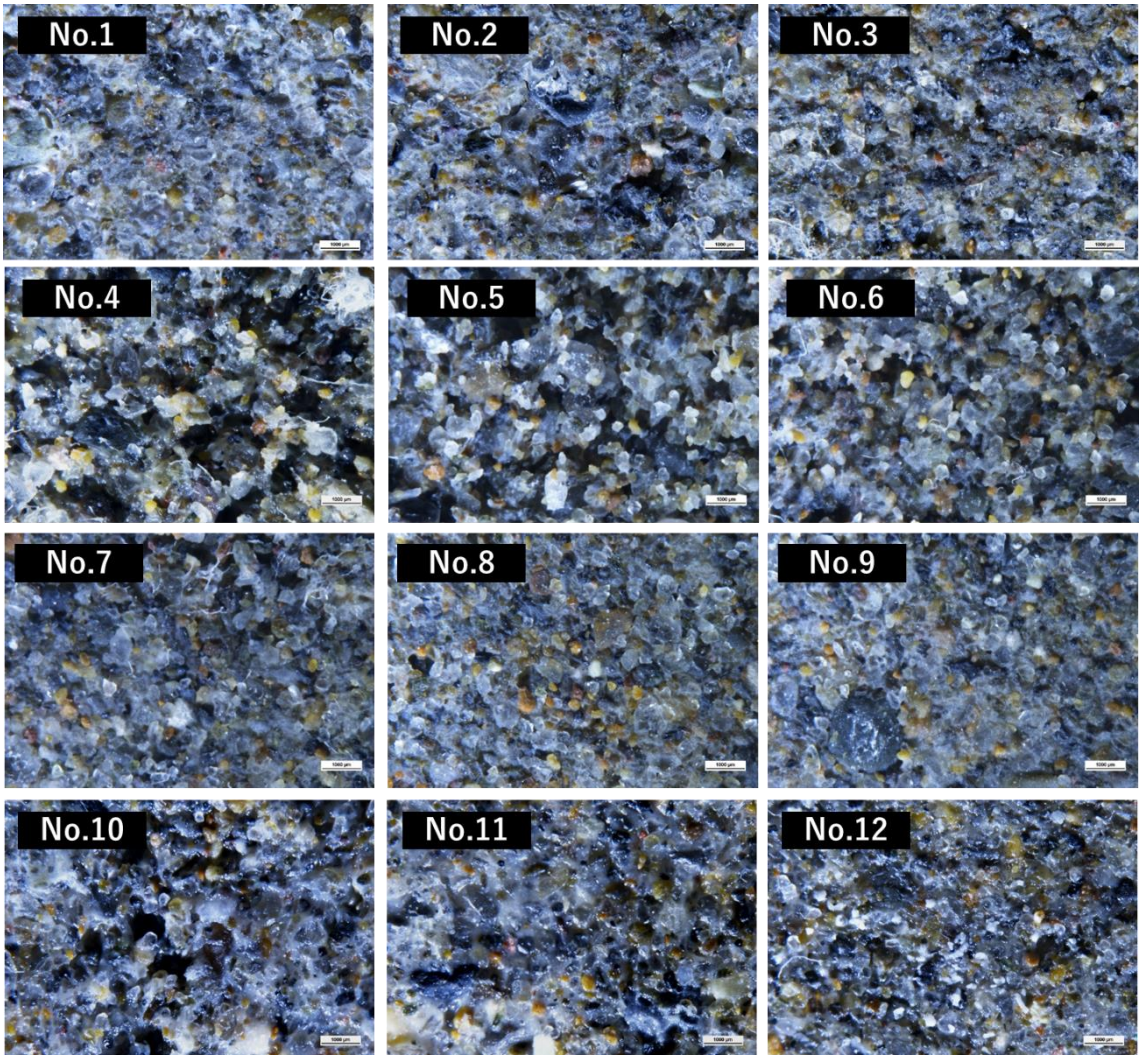


図 6.3-19　実体顕微鏡により撮影した供試体の一例（購入砂＋ベントナイト 9：1）

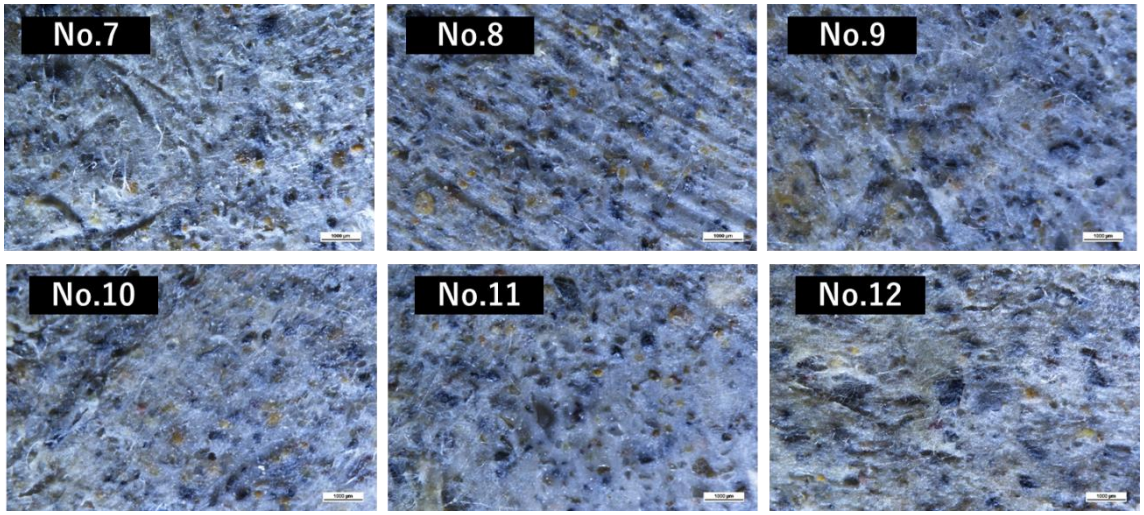
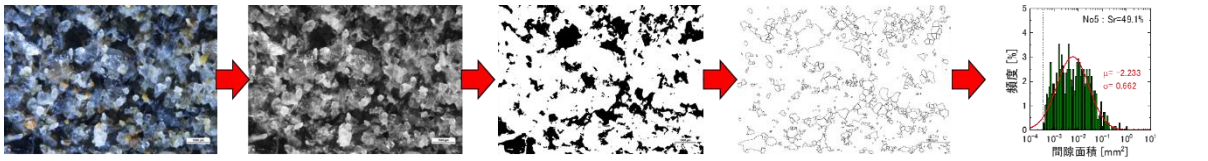


図 6.3-20　実体顕微鏡により撮影した供試体の一例（購入砂＋ベントナイト 7：3）

顕微鏡画像で観察された間隙構造の違いは、間隙の大きさや形状、数やばらつきとして現れると考えられる。そこで、顕微鏡画像に対して画像解析を実施し、間隙の大きさをヒストグラムで表すことで間隙構造の違いの定量的な評価を試みた。画像解析では元画像をグレースケールに変換し、閾値 70 にて二値化処理を実施、黒い部分を間隙相当であると設定し面積分布のヒストグラムを作成した。図 6.3-21 に画像解析の手順を示す。なお、実体顕微鏡による画像スケールは 0.00587mm/pixel であり、この画像の解像度ではベントネイト粒子で構成される間隙は画像では捉えられないため、購入砂で構成される大きな間隙部分のみでの評価となる。図 6.3-22 及び図 6.3-23 に、実体顕微鏡画像に対する画像処理結果（グレースケール画像、二値化画像、ヒストグラム）を示す。なお、これら画像解析結果についての詳細な考察については、他の試験結果とともに後述する。



① 元画像　② グレースケール画像　③ 二値化処理画像　④ 間隙面積分析　⑤ 間隙面積ヒストグラム

図 6.3-21　画像解析の手順

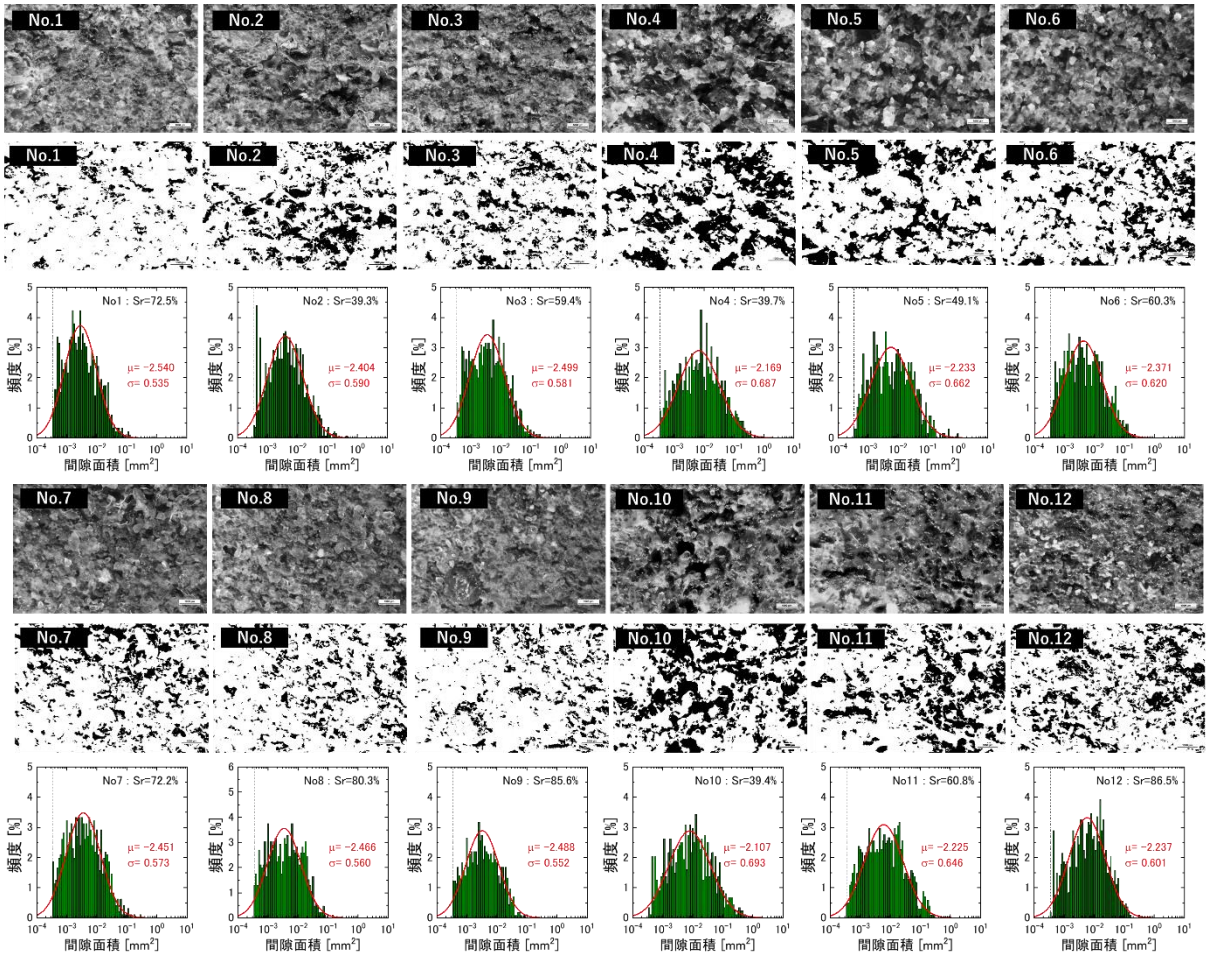


図 6.3-22　実体顕微鏡画像の処理結果（購入砂＋ベントナイト 9：1）

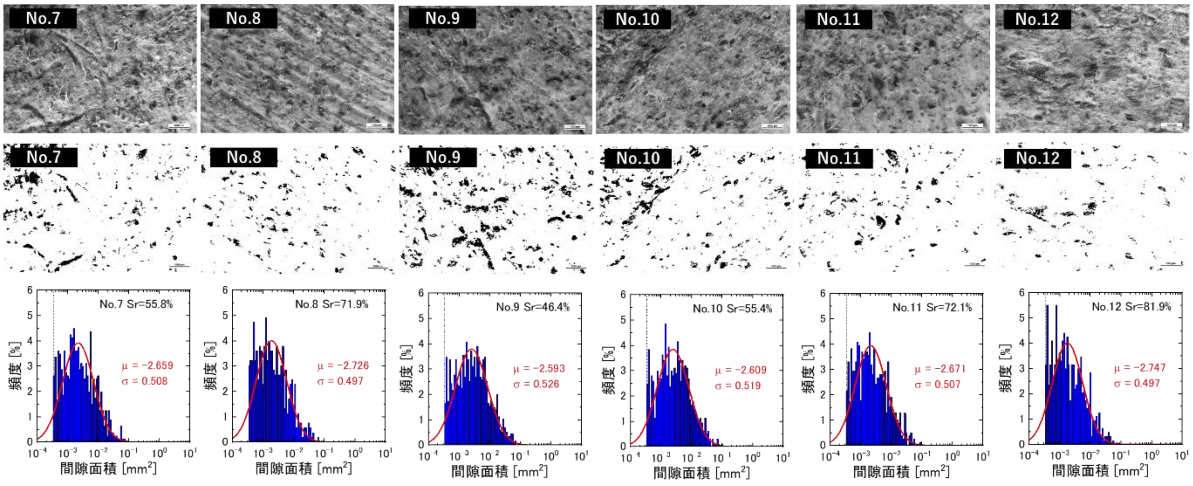


図 6.3-23　実体顕微鏡画像の処理結果（購入砂＋ベントナイト 7：3）

(3) 中性子イメージング実験（実験 D）

昨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。実験は、これまでと同様に図 6.3-24 に示す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。

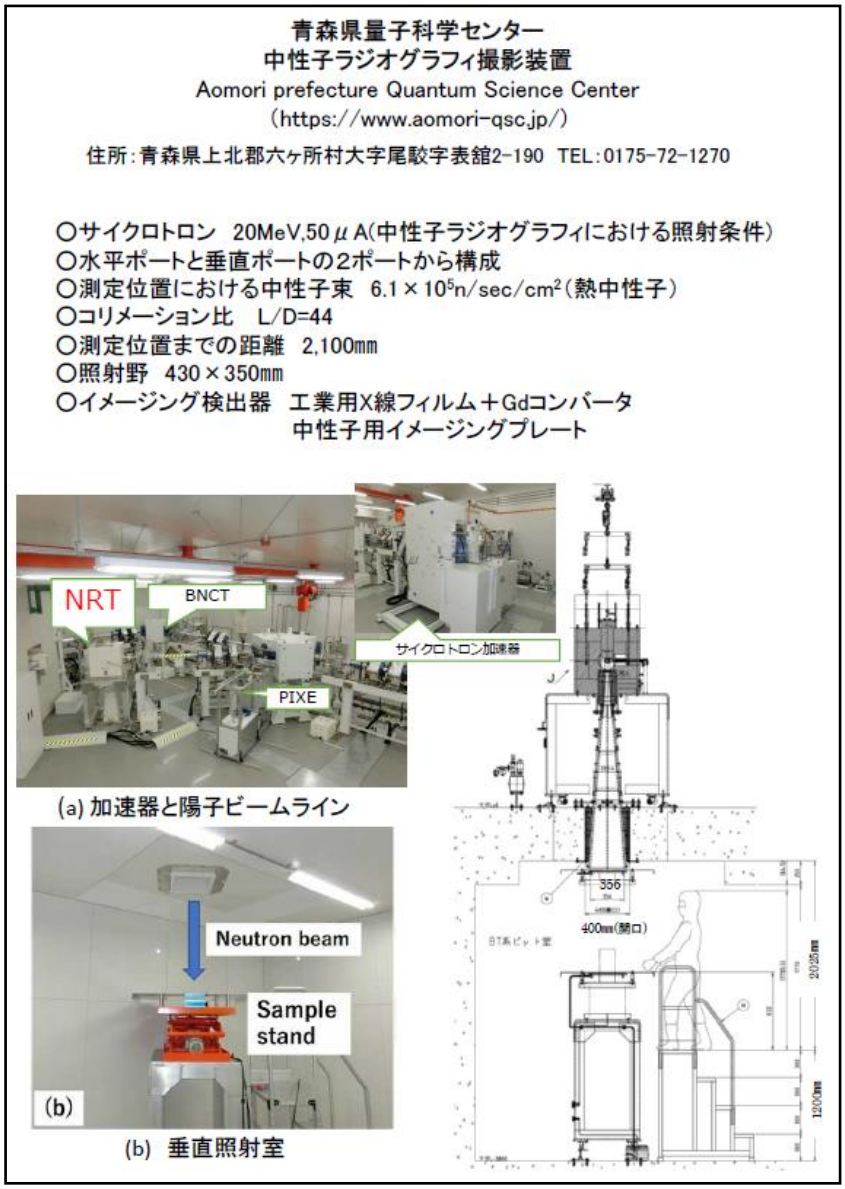


図 6.3-24 NRT 装置（青森県量子科学センター）の概要

表 6.3-1 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。先に述べたように、以下の A～C を目的として合計 3 回の実験を行っている。

A：ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの検証

B：ベントナイトの膨潤性の違いの影響に関する検討

C：加水混合・締固め過程におけるベントナイト付着状況の変化の追跡

図 6.3-25～図 6.3-27 に中性子イメージング試験結果を示す。

表 6.3-1　中性子イメージング試験の実施ケース一覧

	供試体 No.	試料名	初期状態		目的
			乾燥密度	含水比	
第1回	1	購入砂＋ベントナイト（5%混合）	1.730	9.0	A：ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの検証
	2	購入砂＋ベントナイト（5%混合）	1.730	12.0	
	3	購入砂＋ベントナイト（5%混合）	1.730	15.0	
	4	購入砂＋ベントナイト（5%混合）	1.730	18.0	
	5	購入砂＋カオリン（10%混合）	1.730	7.0	
	6	購入砂＋カオリン（10%混合）	1.730	10.0	
	7	購入砂＋カオリン（10%混合）	1.730	13.0	
	8	購入砂＋カオリン（10%混合）	1.730	16.0	
	9	購入砂＋珪砂粉末（10%混合）	1.730	7.0	
	10	購入砂＋珪砂粉末（10%混合）	1.730	10.0	
	11	購入砂＋珪砂粉末（10%混合）	1.730	13.0	
	12	購入砂＋珪砂粉末（10%混合）	1.730	16.0	
第2回	1	珪砂2号	1.250	10.0	A：ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの検証
	2	珪砂2号＋ベントナイト（1%混合）	1.250	10.0	
	3	珪砂2号＋ベントナイト（2%混合）	1.250	10.0	
	4	珪砂2号＋ベントナイト（3%混合）	1.250	10.0	
	5	珪砂2号＋ベントナイト（5%混合）	1.250	10.0	
	6	珪砂2号＋ベントナイト（10%混合）	1.250	10.0	
	7	珪砂2号＋カオリン（10%混合）	1.250	10.0	
	8	購入砂＋ベントナイト（5%混合）	1.000	13.5	C：加水混合・締固め過程におけるベントナイト付着状況の変化の追跡
	9	購入砂＋ベントナイト（10%混合）	1.000	13.5	
	10	珪砂2号＋ベントナイト（10%混合）	0.800	10.0	
第3回	1	珪砂2号＋ベントナイト（2%混合）	1.250	4.0	B：ベントナイトの膨潤性の違いの影響に関する検討
	2	珪砂2号＋ベントナイト（2%混合）	1.250	7.0	
	3	珪砂2号＋ベントナイト（2%混合）	1.250	13.0	
	4	珪砂2号＋ベントナイト（2%混合）	1.250	16.0	
	5	珪砂2号＋ベントナイト（3%混合）	1.250	4.0	
	6	珪砂2号＋ベントナイト（3%混合）	1.250	7.0	
	7	珪砂2号＋ベントナイト（3%混合）	1.250	13.0	
	8	珪砂2号＋ベントナイト（3%混合）	1.250	16.0	
	9	珪砂2号＋ベントナイト（2%混合）	1.150	11.6	
	10	珪砂2号＋ベントナイト（2%混合）	1.350	8.6	
	11	珪砂2号＋クニボンド（10%混合）	1.250	10.0	
	12	購入砂＋ベントナイト（10%混合）	1.000	9.0	C：加水混合・締固め過程におけるベントナイト付着状況の変化の追跡
	13	購入砂＋ベントナイト（10%混合）	1.000	15.0	
	14	購入砂＋ベントナイト（10%混合）	1.000	21.0	
	15	購入砂＋ベントナイト（30%混合）	1.000	13.5	

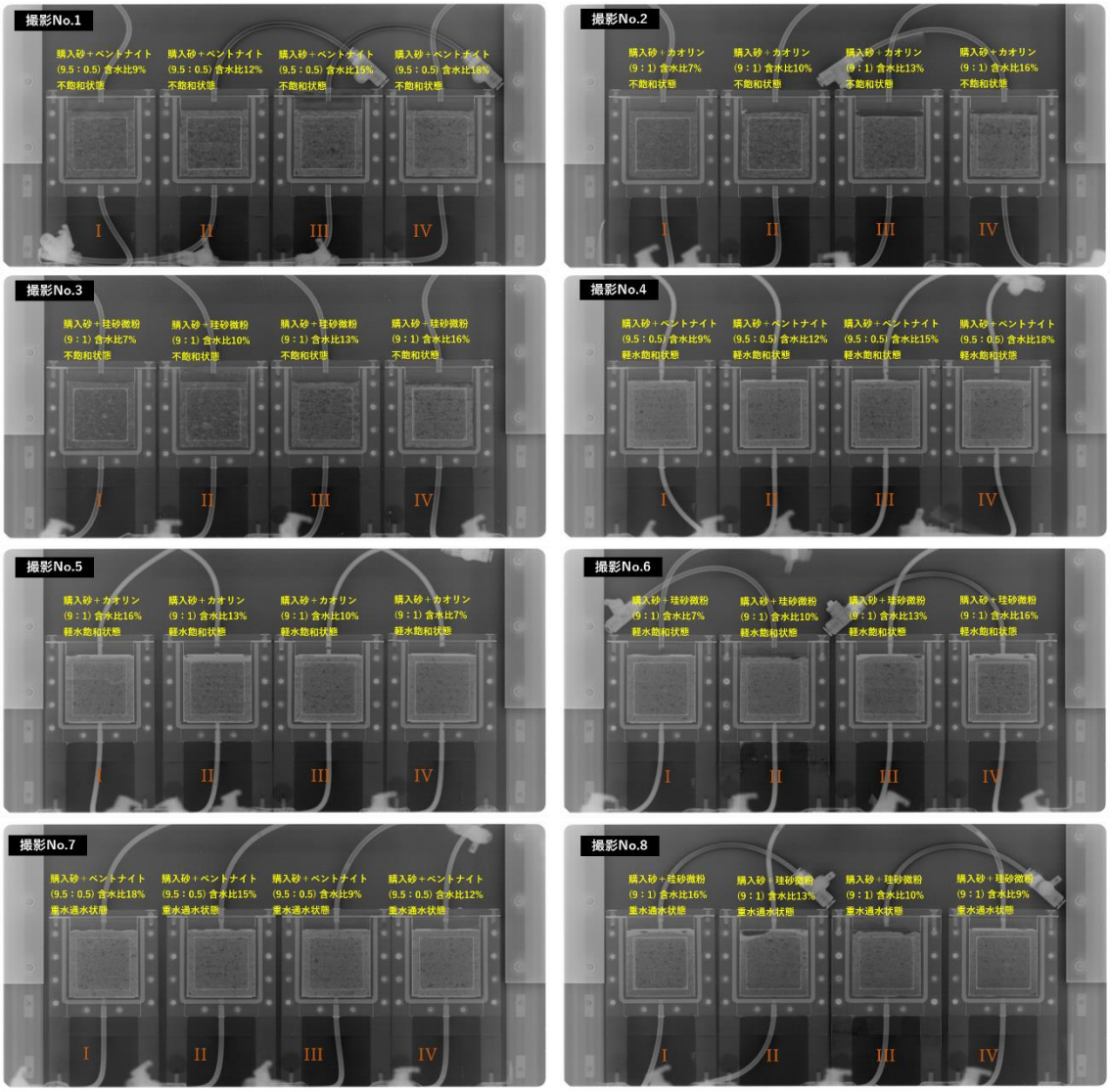


図 6.3-25　中性子イメージング結果（第 1 回）

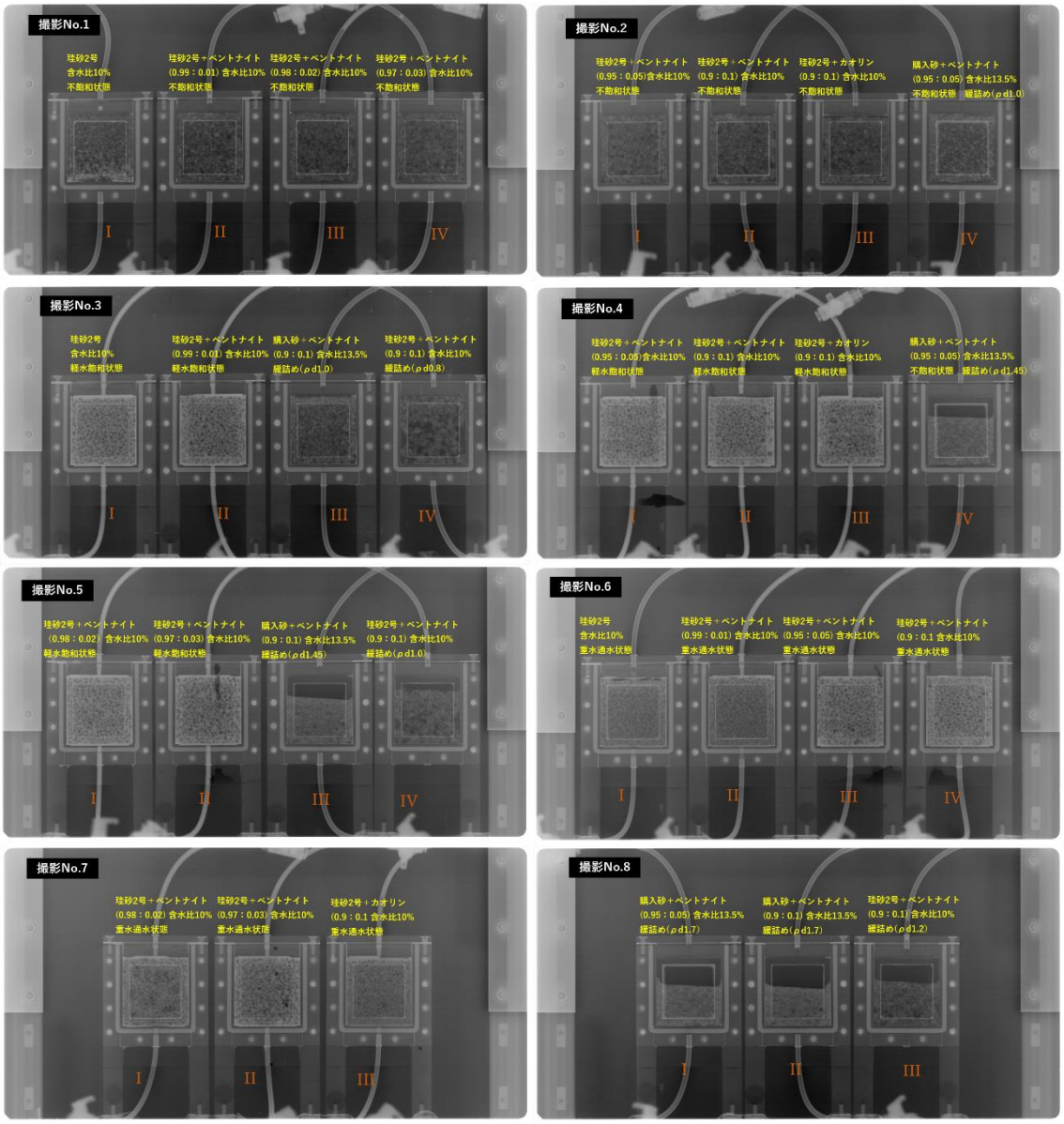


図 6.3-26　中性子イメージング結果（第 2 回）

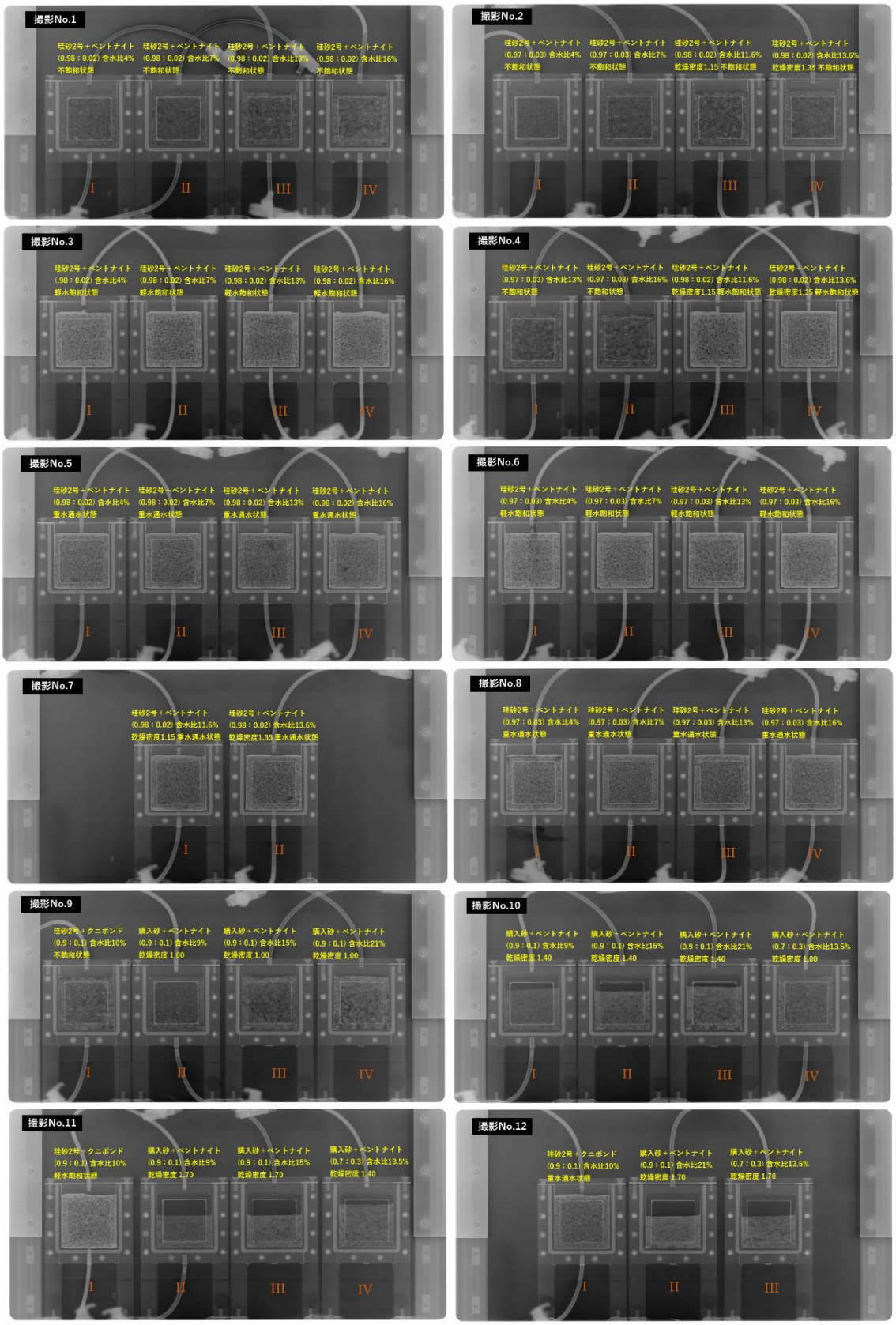


図 6.3-27　中性子イメージング結果（第 3 回）

実験では中性子の照射条件を同じにして撮影しているが、実験毎の中性子照射量には若干のムラが生じてしまうため得られる画像のコントラスト（輝度）は一定ではない。また、中心部から同心円状に中性子の照射量は減少すると考えられる。このため、中性子イメージングによって取得した画像を比較・考察するためには、これらの画像の輝度補正が必要となる。そこで、条件が変わらないと考えられる供試体箱のフレーム部分の輝度から補正値を算出することとした。画像中心から同心円状に輝度が高くなるため、図 6.3-28 に示すように左右のフレームの輝度平均値を補正値とした。また、補正値を得るフレームの位置は、図 6.3-29 に示すように得られた画像の高さ中心位置に近い箇所としている。図 6.3-30～図 6.3-32 に各画像から得られたフレーム輝度の分布を示す。これらのグラフが示すように、撮影毎に中性子の照射量が若干異なるため、画像毎の輝度が異なることがわかる。また中性子が放射状に分散するため、中心から離れた位置では輝度が大きくなっていることもわかる。これらの輝度差を考慮して各画像の補正を行った。補正した各画像の比較や考察については、他の試験結果の考察とともに後述する。

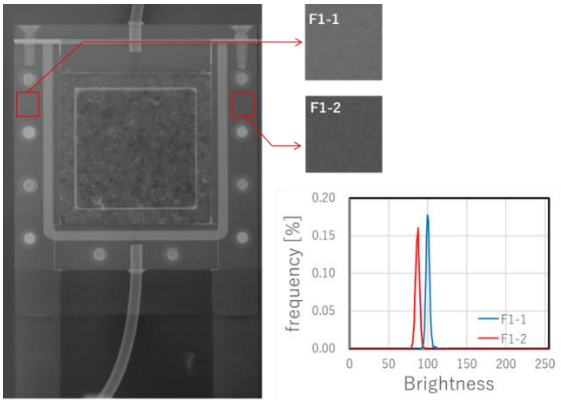


図 6.3-28　中性子イメージング画像の輝度補正

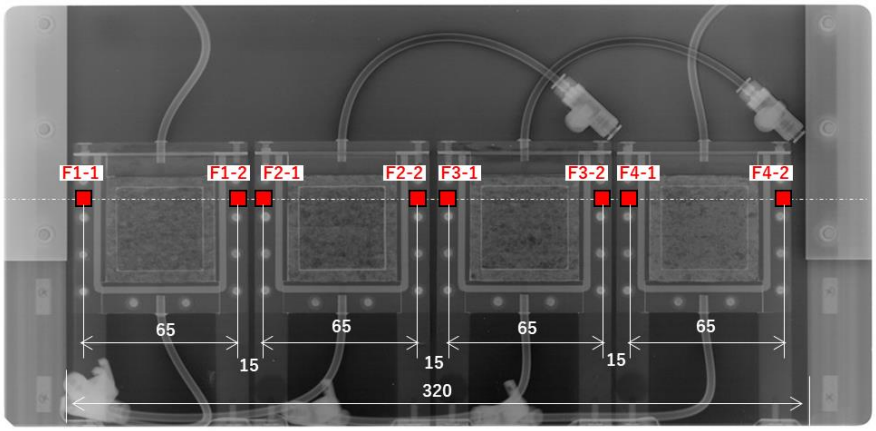


図 6.3-29　供試体箱フレームの輝度取得位置

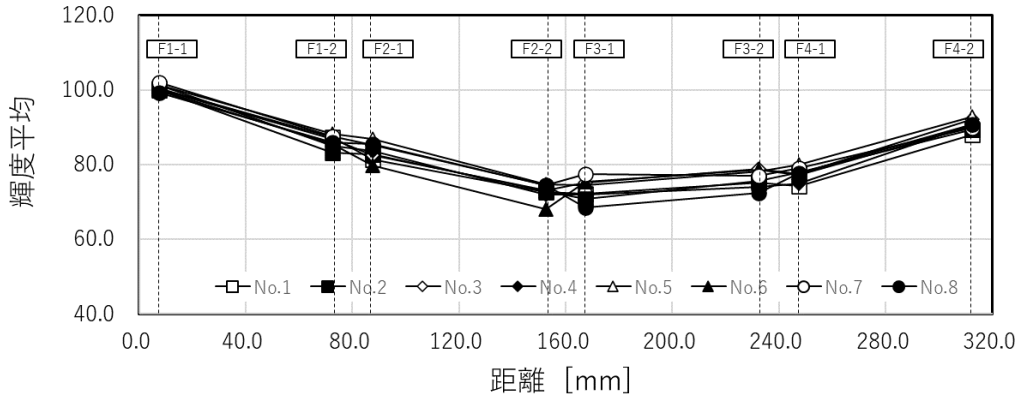


図 6.3-30　供試体箱フレームの輝度分布（第 1 回試験）

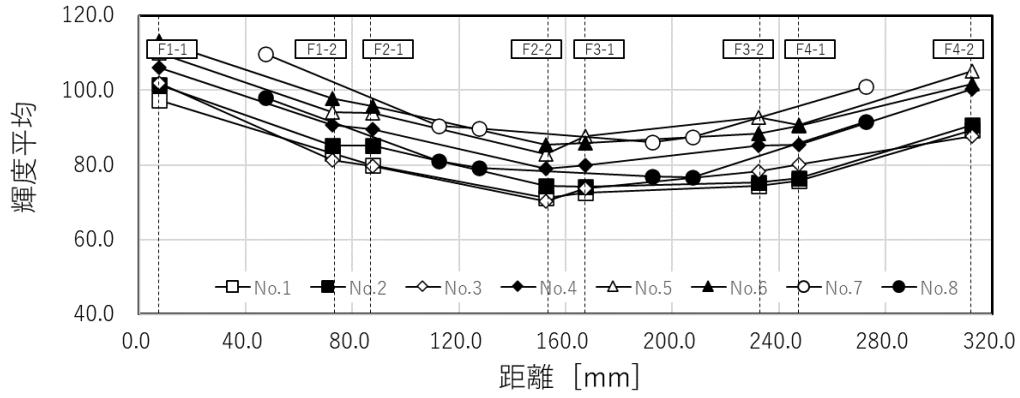


図 6.3-31　供試体箱フレームの輝度分布（第 2 回試験）

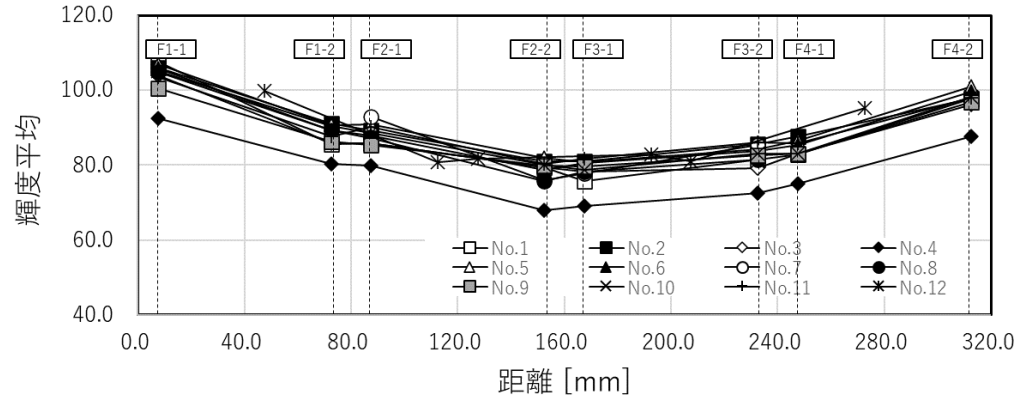


図 6.3-32　供試体箱フレームの輝度分布（第 3 回試験）

（4）遮水性発現メカニズム解明のための力学・化学実験（実験 E）

1）ベントナイト混合土の一面せん断試験

実験 B,C の結果より、ベントナイト混合土の透水係数が締固め時の飽和度 Sr（含水比）により変化すること、そのメカニズムが母材に対する吸水ベントナイトの付着形態の違いにあることが明らかとなった。このような土粒子間隙構造の違いは、遮水性以外の力学特性、例えば強度特性に対しても等しく影響を及ぼすのではないかと考えた。そこで、実験 B,C と同一条件で供試体を作製し、ベントナイト混合率や締固め含水比を変えた供試体に対して一面せん断試験装置により強度特性を実測し、遮水性と同様に土粒子構造の違いの影響が発現するか否かを確認した。

a．実験装置及び実験条件

実験は図 6.2-5 に示した前田建設工業 ICI 総合センターのスマート一面せん断試験装置を用いて行った。図 6.3-33 にはベントナイト混合土 10%及び 30%混合供試体の作製条件を示す。λ_k/ε_k 実験及び実体顕微鏡撮影と同一乾燥密度で締固めた供試体を一面せん断試験装置にセットし、上載圧 40kN/m²（締固め時の特性を調べる目的であるため、できるだけ上載荷重の影響の少ない、小さな圧縮荷重を採用）で圧縮した後、せん断速度 1 ㎜/分で定圧せん断した。締固め含水比は、図中に示したように乾燥側（9%）から湿潤側（20%）まで条件を変えた。

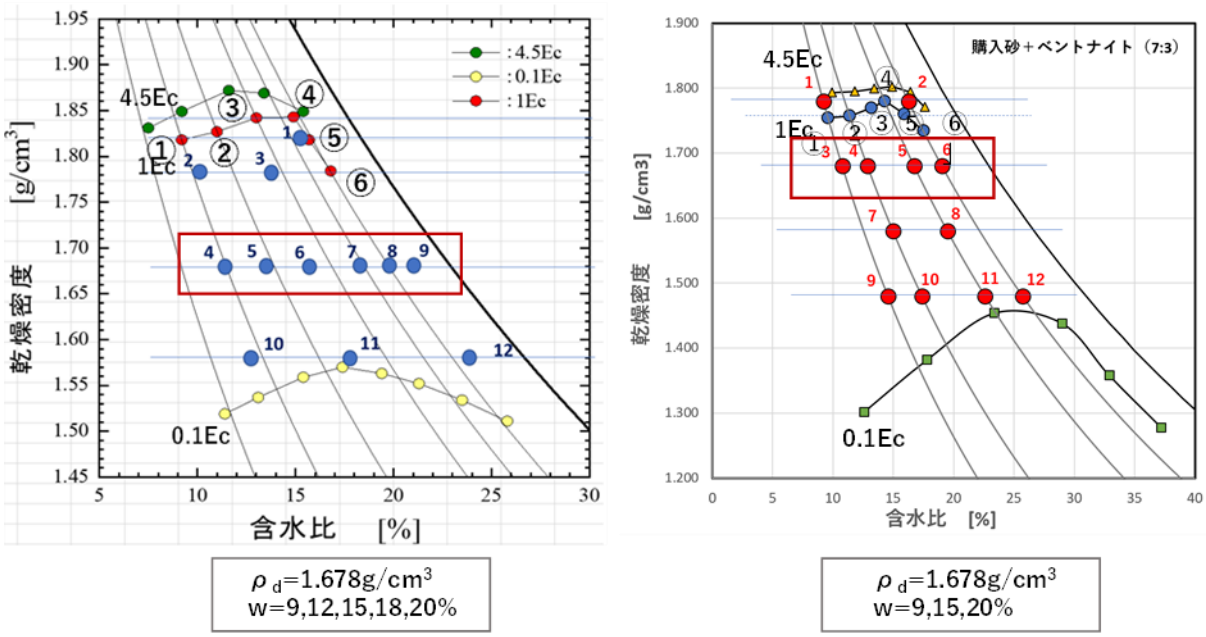


図 6.3-33　一面せん断試験の供試体条件（10%及び 30%ベントナイト混合土）

b．実験結果

図 6.3-34 及び図 6.3-35 に、各々10%混合、30%混合の場合の一面せん断試験結果を示す。これらの結果より、以下の知見を得ることができる。

① 混合率の違いに関わらず、ベントナイト混合土の強度は母材強度よりも大となっており、吸水ベントナイトの持つ粘着力が加算された結果を呈している。せん断強度は 10%混合よりも 30%混合土のほうが大きく、吸水ベントナイトが母材粒子同士を強固に結合していることが示唆される。

② 10%混合、30%混合のいずれにおいても、締固め時の乾燥密度は同一でありながら、締固め時の含水比（飽和度）の違いによって一面せん断特性には明らかな違いが生じている。遮水性と同様、締固め時飽和度の違いが力学特性にも影響を及ぼしていることが確認される。せん断強度は乾燥側締固め土ではピーク⇒残留の過圧密に類似した挙動を取り、ピーク強度は乾燥側ほど大きい。一方、最適側や湿潤側ではピーク特性が消失し最適含水比での最大≒残留せん断強度は乾燥側供試体よりも大となる。

③ これは図中に併記した顕微鏡写真と整合的であり、乾燥側供試体では締固め後に固結度の高い（固練り・団粒状態）の吸水ベントナイトが母材に対して離散的に付着しているため、せん断時には高いピーク強度を有するが、せん断変位が大になるにつれ付着が切れ、母材強度に近い残留強度に落ち着くものと想定される。一方、最適や湿潤側では吸水ベントナイトはより延性的（膜状）な性状となって母材を面的に被膜する形態に移行する。従ってピーク⇒残留的な挙動とはならず、せん断変位が大きくなっても膜状となった吸水ベントナイトの高い変形追随性により残留状態まで強度を維持するものと考えられる。

④ 最適と湿潤側締固め供試体を比べると、最適含水比の供試体のせん断強度が残留状態まで含めて一番大きい、湿潤側では最適含水比に比べて吸水ベントナイトの粘着力が相対的に低下し、変形追随性は高いものの、せん断強度としては最適含水比付近の供試体が最大値を示すものと考えられる。

図 6.3-36 は、締固め含水比 9%（乾燥側），15%（最適付近），20%（湿潤側）の各々で、母材、10%混合土、30%混合土のせん断応力～水平変位特性を調べた結果を示す。前述のように、

① いずれの含水比においてもベントナイト混合土のせん断強度は母材のそれを上回り、10%混合土よりも 30%混合土のほうが高いせん断強度を示すこと

② 乾燥側ではピーク⇒残留挙動を示すが、混合率が大きいほどその影響が顕著であること

③ 最適含水比においてせん断強度は最大となり、湿潤側では混合率の違いの影響も小さくなること

などを指摘できる。これらは締固めたベントナイト混合土の遮水性に関する実験 B,C で得られた知見と整合的である。

なお、本年度は不飽和状態のベントナイト混合土に対して一面せん断特性を調べた。一方、透水試験は通水飽和した後に実施しているため、不飽和締固め時のベントナイトが再膨潤した後に透水係数が計測されている。一面せん断試験供試体についても、次年度は飽和供試体に対する強度特性の確認を継続実施していきたい。

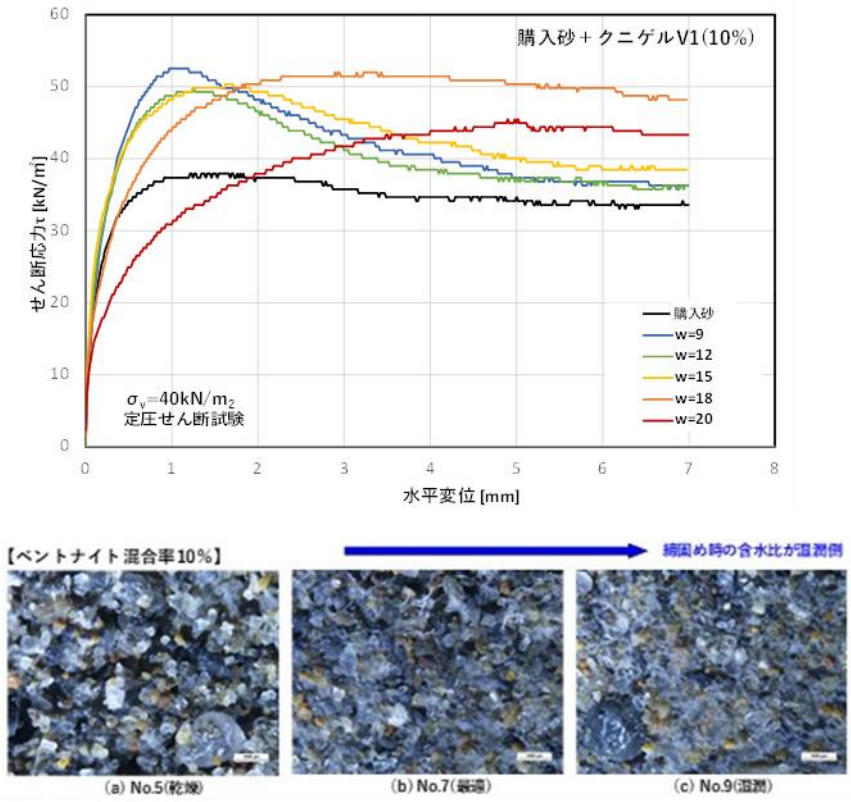


図 6.3-34　ベントナイト混合土（10%）の一面せん断特性と顕微鏡写真

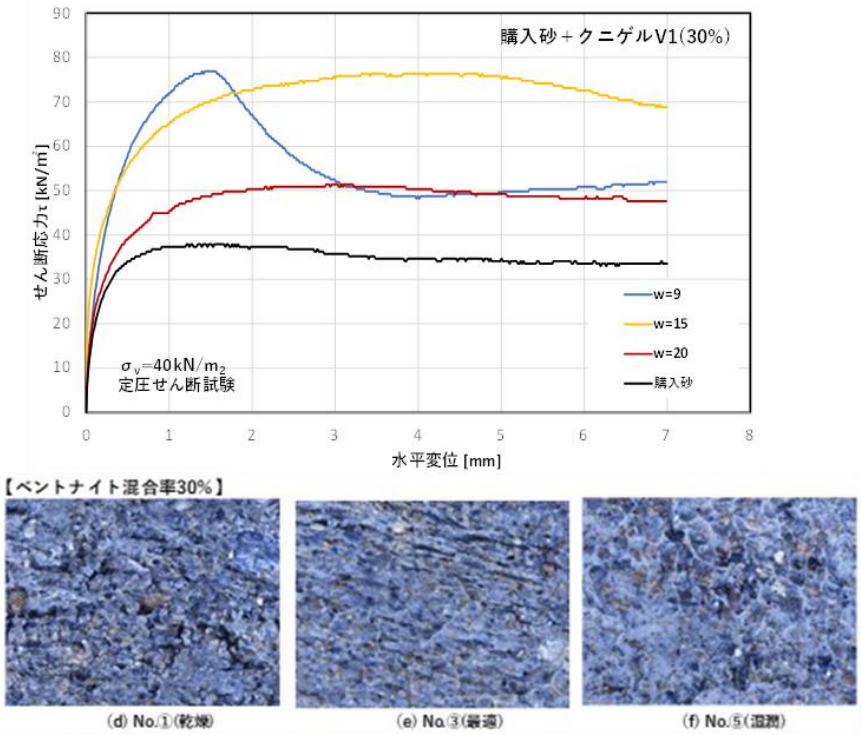


図 6.3-35　ベントナイト混合土（30%）の一面せん断特性と顕微鏡写真

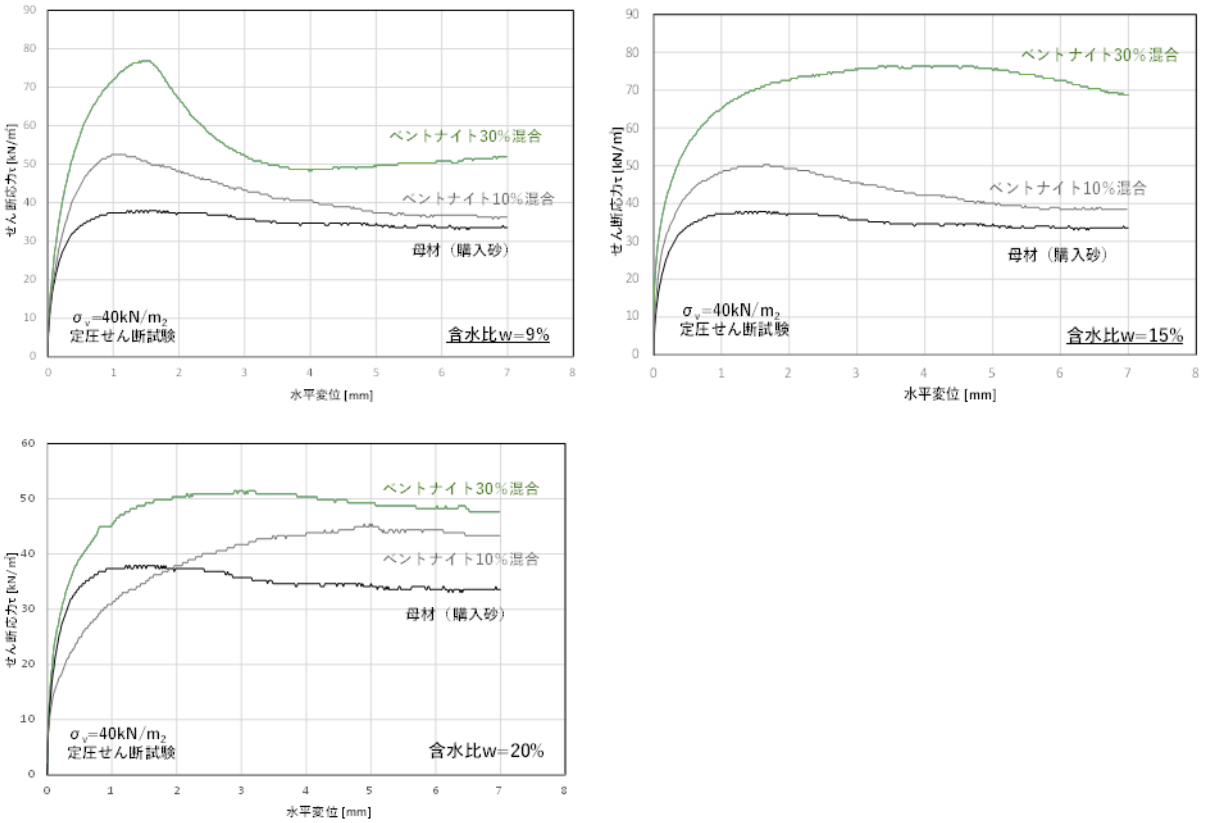


図 6.3-36　ベントナイト混合土の一面せん断特性に及ぼす混合率の影響

c．吸水ベントナイトのミニコーン貫入試験結果

一面せん断試験では、締固め含水比の違いによりせん断強度が異なり、最適含水比で最大、湿潤側で低下する傾向が確認された。これは吸水したベントナイトの強度（粘着力）が含水比に応じて変化したものと考えられる。そこで、次にベントナイト単体を供試土とし、締固め含水比を変えた供試体を作製し、ミニコーンの貫入抵抗の計測を試みた。図 6.3-37 に、供試体作製条件、各含水比毎の供試体状況、ミニコーン貫入状況を示す。ベントナイトは締固め中の挙動であることを勘案し、乾燥密度 0.8g/cm³ のゆる詰め条件で、ベントナイト単体に対する最適含水比 25.4%に対して乾燥側から湿潤側に変化させた。特に最適付近より湿潤側では吸水ベントナイトがダマとなるため均一な供試体を作製することは中々難しく、貫入抵抗値もあるバラツキを有している。そのためあくまで参考値と考える。

実験結果を図 6.3-38 に示す。バラツキはあるものの、吸水ベントナイトの貫入抵抗は最適含水比をピークに湿潤側ほど低下しており、前述の一面せん断試験結果（最適含水比のせん断強度が最大）と整合的である。

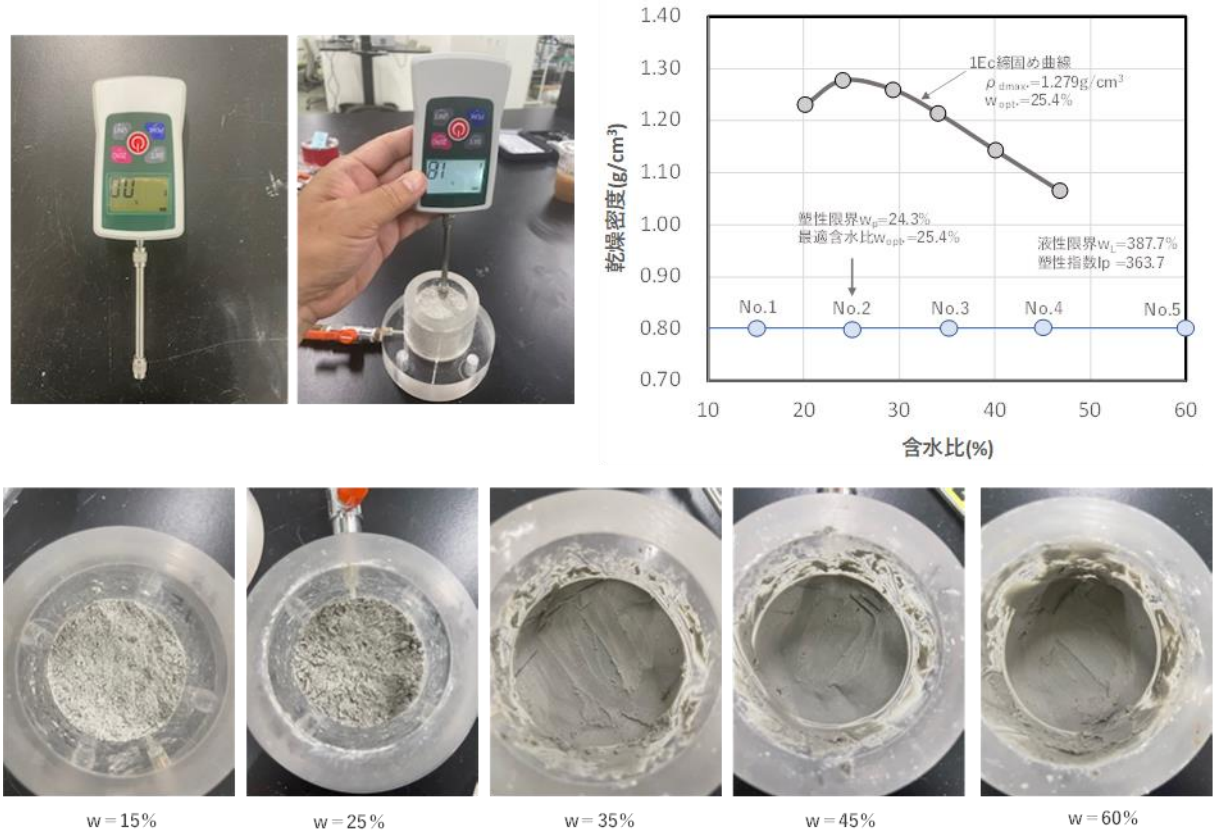


図 6.3-37　単体ベントナイトのミニコーン貫入試験の実施状況と供試体条件

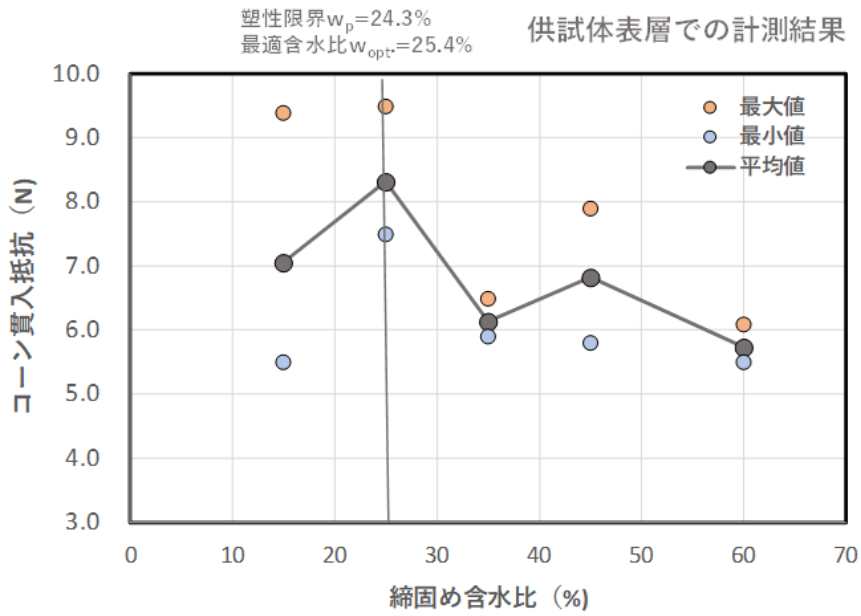


図 6.3-38　ミニコーン貫入試験結果

2）DTA（熱分析）試験結果

材料単体での保水特性を明らかにすることを目的として、示差熱（DTA）分析を行った。

a．分析装置及び分析条件

分析は図 6.3-39 に示した島津製作所製の示差熱・重量分析計（DTG-60AH）を用い実施した。測定範囲は、常温から粘土鉱物中の結晶構造中の水、及び水酸基が放出される約700℃程度までとした。

クニゲルの含水比を 15～60%に調整したもの（不飽和）、及び含水比 15～60%の不飽和状態のクニゲルを飽和させたもの（飽和）を分析試料とした。

また、クニボンド、カオリンについても含水比調整したものを分析試料とし、各材料における差異を確認した。

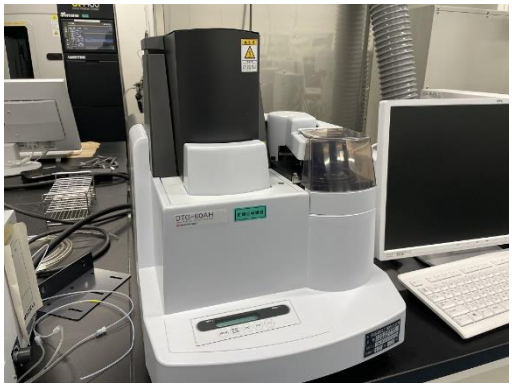


図 6.3-39　示差熱・重量分析計

b．分析結果

クニゲル V1 の不飽和試料、飽和試料の分析結果を図 6.3-40、図 6.3-41 にそれぞれ示す。なお、100℃付近に見られる吸熱ピークは、自由水及び層間水に該当するする吸熱エネルギーであり、500℃以降の吸熱ピークは、粘土鉱物の結晶構造中の水及び水酸基に該当する吸熱エネルギーである。図 6.3-41 より、飽和前の含水状態の違いによらず、飽和後は同様の波形を示す結果となった。

次に、不飽和状態のクニゲルとクニボンド、カオリンにおける DTA 分析の結果を図 6.3-42～図 6.3-43 に示す。カオリン、クニゲルとクニボンドでも、大きな吸熱ピークが１本となる結果となっており、材料中に存在する水の形態（自由水、層間水）の有無による差異は、本方法では認められなかった。

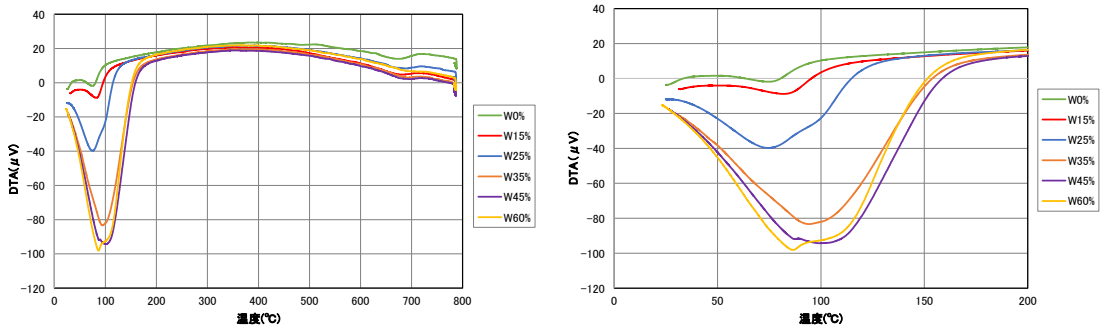


図 6.3-40　クニゲル不飽和試料 DTA

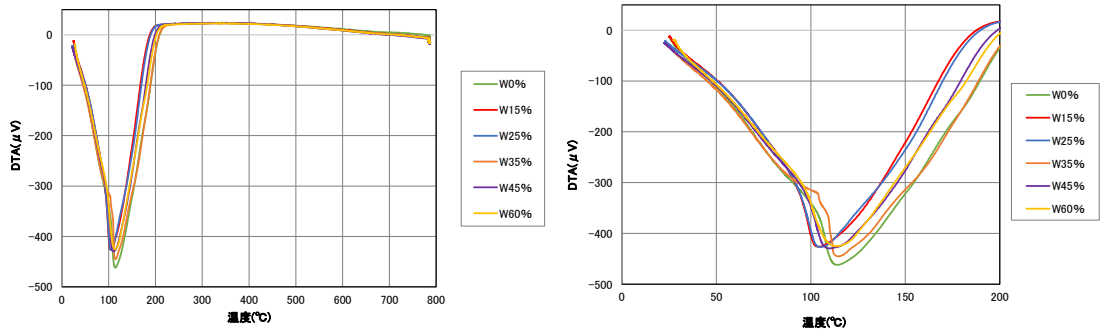


図 6.3-41　クニゲル飽和試料 DTA

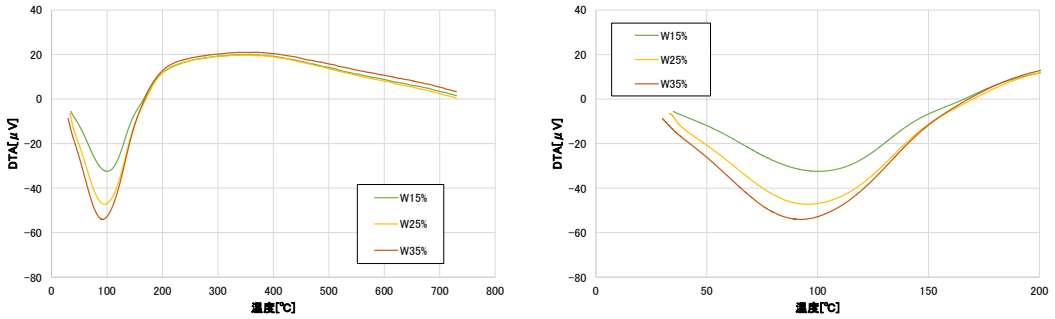


図 6.3-42　クニボンド飽和試料 DTA

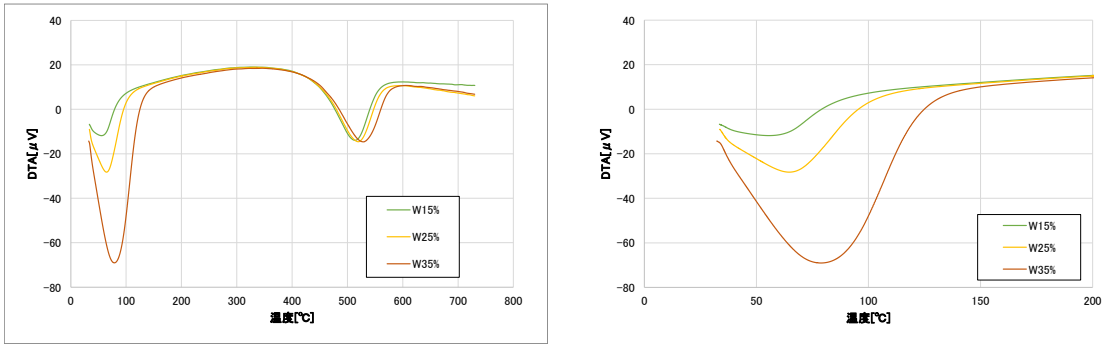


図 6.3-43　カオリン飽和試料 DTA

3）ζ電位計測結果

ベントナイト（スメクタイト）は、カオリンなどの粘土鉱物よりも、表面電位が大きいことが知られている。ここでは、本試験に供したベントナイトの表面電位を確認するために、ζ電位測定を行った。

a. 測定装置及び測定方法

測定は図 6.3-44 に示した Malvern Panalytical 社製のゼータ電位計（ゼータサイザー Ultra）を用いて実施した。

分析試料は、クニゲル、クニボンド、カオリンの３種類とし、飽和後の風乾試料を用いて測定を行った。

図 6.3-44　ゼータ電位計

b. 測定結果

ζ電位の測定結果を図 6.3-45 に示す。

クニゲル V1 において、試料間のばらつきはあるものの、他の試料に比べ大きな負の値を示し、9 検体の平均値が-31mV となった。また、カオリンにおいては、19 検体の平均値が-0.42mV と小さい値を示した。

一方、クニボンドについては、スメクタイト由来である粘土材料であるが、正の値を示すなど、従来の知見と異なる結果が出ており、その原因は現時点では不明である。次年度、継続的に検討する。

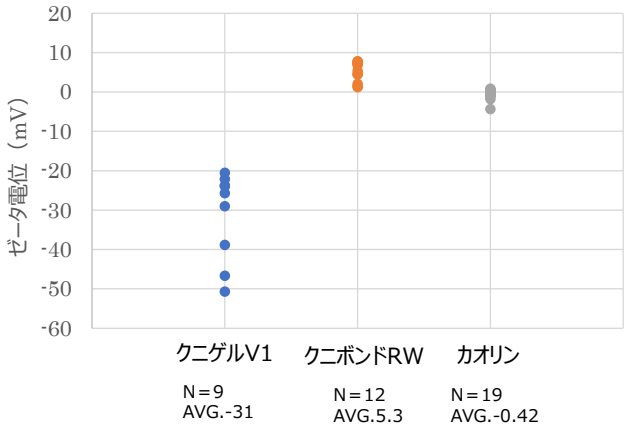


図 6.3-45　ゼータ電位測定結果

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

実験 A～E で取得した透水特性データ他を用いて、以下に示す評価・検討を実施した。今回実施した評価・検討内容の概要を先に示し、以降に個別に詳細を述べていく。図 6.3-46 及び図 6.3-47 に評価・検討の枠組みと検討フローを示す（具体的に、研究の端緒である最小透水係数 $k_{min.}$発現メカニズムの説明を題材にしたフローとした）。6.3.1 で示した実験 A～実験 E の結果を下記の順に積み重ねていくことで、遮水性発現メカニズムの解明にアプローチする。現時点での仮説を最後の(5)に示す。

(1)　締固め土の透水係数評価式の構築と影響因子の分析（実験 A,B）
(2)　顕微鏡観察結果に対する画像解析及び透水特性との関係性検討(実験 C)
(3)　中性子イメージング実験結果によるメカニズムの解釈（実験 D）
(4)　他の力学・化学実験によるメカニズムの確認（実験 E）
(5)　ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する現時点での仮説

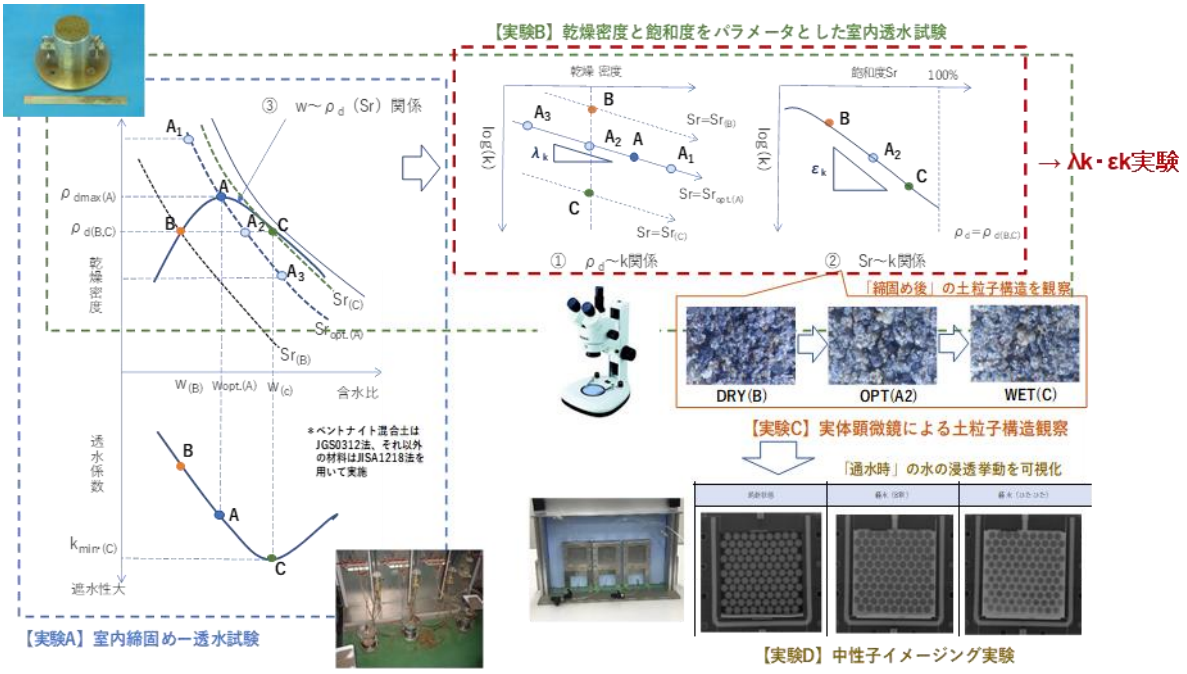


図 6.3-46　遮水性発現メカニズム説明のための各種実験とその組み合わせ

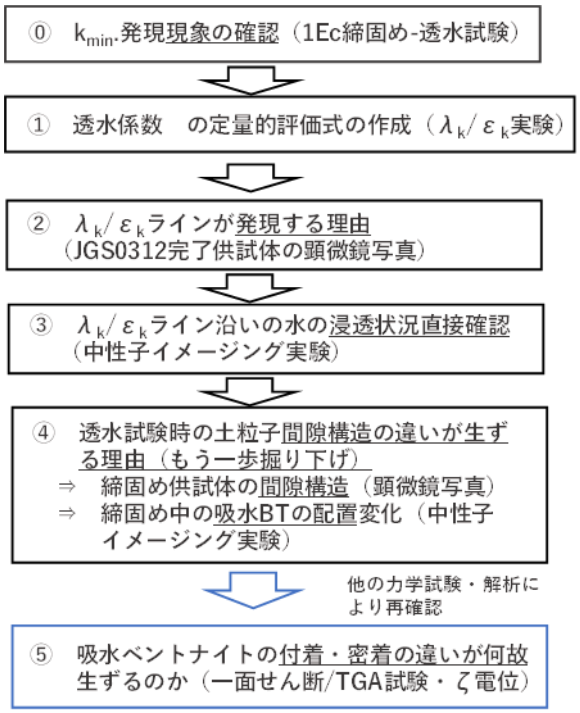


図 6.3-47　締固めたベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの検討フロー

以下、各検討の狙いと手法、及び得られた成果を取りまとめる（評価検討のために取得した元データは 6.3.1 にて示した）。これらを用いて想定されるベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する現時点での仮説について、最後の(5)で総括する

(1) 締固め土の透水係数評価式の構築と影響因子の分析（実験 A,B）

実験 A,B で得られた一連の締固め-透水試験結果を用いて、透水係数（片対数）と締固め時乾燥密度 ρ_d の関係（傾き λ_k）、及び透水係数（片対数）と締固め時飽和度 Sr の関係（傾き ε_k）の関係を整理し、その直線性（一次線形性）を確認した（傾き λ_k については、圧密解析と同様、間隙比 e に対する e-logk の直線性についても若干吟味を加えた）。次に、透水係数（片対数）を目的変数、乾燥密度と飽和度を説明変数とする重回帰分析を実施し、透水係数評価式を作成（昨年度に追加）した。なお、一次線形和を取っていることから、以降、重回帰式の係数は k のサフィックスのない λ、ε と記述して区別する。重回帰分析で得られた λ は締固め後の間隙比 e（土粒子間隙の総量）、ε は締固め時飽和度に対応する土粒子間隙構造（有効間隙径の分布）、定数項 γ は母材・細粒分の添加量・細粒分の塑性（含む膨潤性）等の組合せにより決まる材料特性を表すものと考えた。令和 3 年度既実施結果と今年度取得データを総合し、これら各係数と材料特性（母材粒度・細粒分の塑性・混合率等）の関係を調べた。本結果は、締固め土の透水係数に対する統一的評価（令和 6 年度）の足掛かりになるものと考えている。

令和 3 年度実施の購入砂、＋10%珪砂粉、＋10%ベントナイト及び令和 4 年度実施の＋10%木節粘土、＋10%カオリン、＋30%ベントナイト、粒度調整材の λ_k、ε_k 実験結果を用いて、透水係数の方対数 logk を目的変数、締固め時の乾燥密度 ρ_d と飽和度 Sr を説明変数と

して実施した重回帰分析結果を表 6.3-2 に示す。ほとんどの材料では重相関 R は 0.9 以上となっており、締固め時の乾燥密度 ρ_d と飽和度 Sr の一次線形和による評価精度はかなり高い（木節粘土添加のみ R=0.85 とやや低い。これは 6.3.1 で示したように、単粒かつ非膨潤性粘土を 10%程度しか添加していないため、高飽和度領域での供試体作製が難しく、この領域のデータを排除したためである。カオリン添加については、前述したように供試体作製方法を静的なものに修正して追加実験を行った結果、再び高い相関性を得た)。重回帰分析で得られた係数 λ 、 ε 、定数項 γ の値を図中に併記した。λ と ε の係数は全てマイナス値となっており、締固め密度が高いほど、締固め時の飽和度が高いほど、飽和透水係数の値は小さく（遮水性は高く）なることを示している。一方、定数項 γ については材料による違いが大きく、購入砂＋珪砂粉の＋11 から 30%ベントナイト混合土の-9 まで、大きくばらついている。図 6.3-48 には logk の回帰式による評価値と実測値の比較結果を示すが、透水係数 10^{-4}m/sec～10^{-13}m/sec の広範囲な透水係数レンジにおいて、両者の整合性はかなり高い。

図 6.3-49 は、係数 λ 、 ε 、定数項 γ を、各材料毎に比較した結果であるが、図より以下を指摘できる。

① 締固め時乾燥密度 ρ_d の影響を表す係数 λ は、細粒分を含まない購入砂と粒度調整材の値は、珪砂粉 10%混合、木節 10%混合、カオリン 10%混合に比べて小さい値を撮り、細粒分の有無が λ に影響を及ぼしていることを示唆する。圧密解析では透水係数の非線形性 λ_k は（圧密係数 Cv が同じであれば）土の圧縮指数 λ に等しくなる。一般に土の圧縮指数 λ は細粒分を含むほど大となる（母材粒子同士の潤滑性が増し、間隙が減少しやすくなる）と言われており、本結果はこれに整合する。一方、λ については細粒分の塑性が増大しても大きな変化は見られない。これら細粒分混合土では λ は比較的大きなマイナス値を取り、締固め密度が透水係数に及ぼす影響が大であることを示している。一方、ベントナイト混合土ではその値が低下し、混合率 30%ではより顕著となる（前述の統合図の傾向を裏付ける)。

② 締固め時飽和度 Sr の影響を表す係数 ε は、逆に購入砂、珪砂粉 10%混合土では小さな値を示し、砂単体や非塑性添加材では締固め飽和度の影響が小さい。これは細粒分を含まない粒度調整材も同様である。一方、高塑性カオリン 10%混合土では最も大きな値（マイナス値）を示し、細粒分の塑性が高いほど、締固め時の飽和度が透水係数に及ぼす影響が大となる（後述する顕微鏡写真の知見を勘案すると、粘性土の母材への付着の影響が高飽和度領域ほど顕著に表れるものと想定される)。一方、ベントナイト混合土では λ と同様その値が再び低下し、混合率 30%ではより顕著（非常に小さな値）をなっている。これも前述の統合図の傾向を裏付ける。

③ 定数項 γ は、図 6.3 (c)に示したように材料特性との関係性が明瞭である。細粒分を含まない購入砂と粒度調整材は λ 、 ε 共に小さく締固め乾燥密度や締固め時飽和度の影響が少ない、このため、γ 項が大きく影響し、単粒の購入砂に対して粒度良好な粒度調整材のほうが γ は小さく＝遮水性が高くなる。これは粒度が良好であることにより締固め時の間隙比が単粒材よりも小さくなり、これが γ 項の違い、ひいては透水係数の違いをもたらすものと理解される。単粒の砂や細粒分を含まない礫質土（粒度調整材）では、締固め密度や含水比の影響が小さく、材料特性（平均粒径など）のみで

透水特性がほぼ決まるものと考えられる（つまり、締固めという行為が透水特性に及ぼす影響が非常に小さく、これは透水性の良い砂や礫の傾向を素直に表している。

④ 非塑性の珪砂粉混合⇒高塑性の微粉カオリン混合⇒膨潤性のベントナイト（クニゲル）混合⇒クニゲル混合率の増加の順番に、γの値はマイナス側に変化し、「締固めに左右されない、材料（配合）自体の遮水性の高さ」を表しているように思われる。係数λ、ε、定数項γについては、次年度以降も異なる材料や配合での実験結果を逐次追加しながら、総合的な評価を試みていく予定である。

表 6.3-2　実験 B の重回帰分析結果

材料	凡例	係数λ	係数ε	切片	重相関R
購入砂		-4.729	-0.550	4.499	0.989
粒度調整材(細粒分無)		-4.101	-0.884	1.903	0.972
購入砂＋珪砂粉10%		-8.838	-0.701	11.180	0.930
購入砂＋木節10%		-6.827	-1.223	7.722	0.849
購入砂＋カオリン10%		-7.297	-3.142	10.097	0.926
ベントナイト混合土(10%)		-2.569	-1.460	-5.051	0.974
ベントナイト混合土(30%)		-1.625	-0.692	-8.638	0.979

$\log k = \lambda \times \rho_d + \varepsilon \times Sr + \gamma$（材料特性）

k：透水係数　ρ_d：締固め時の乾燥密度（間隙比）　Sr：締固め時の飽和度

γ：材料特性項（母材粒度・粒径・礫率・細粒分含有率・Ip・膨潤性の有無等）

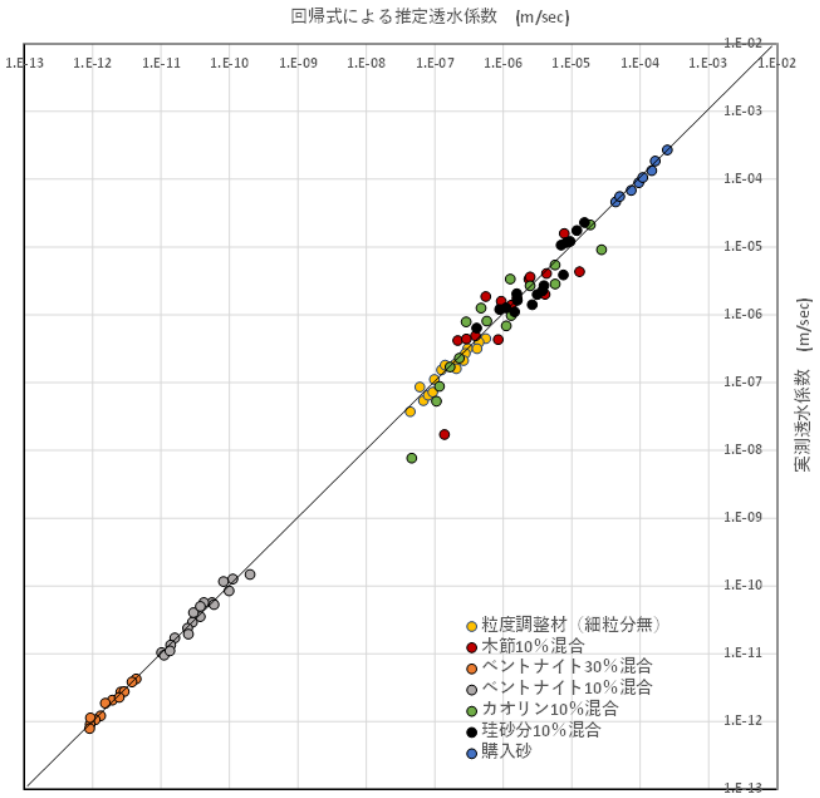
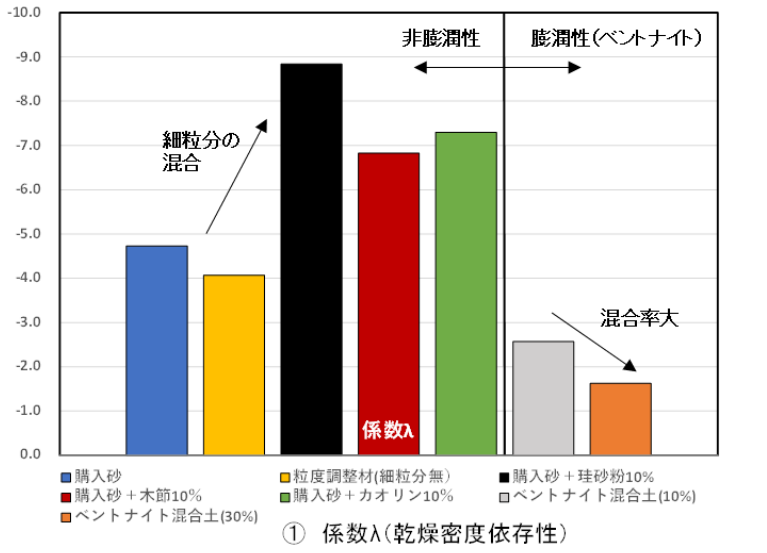
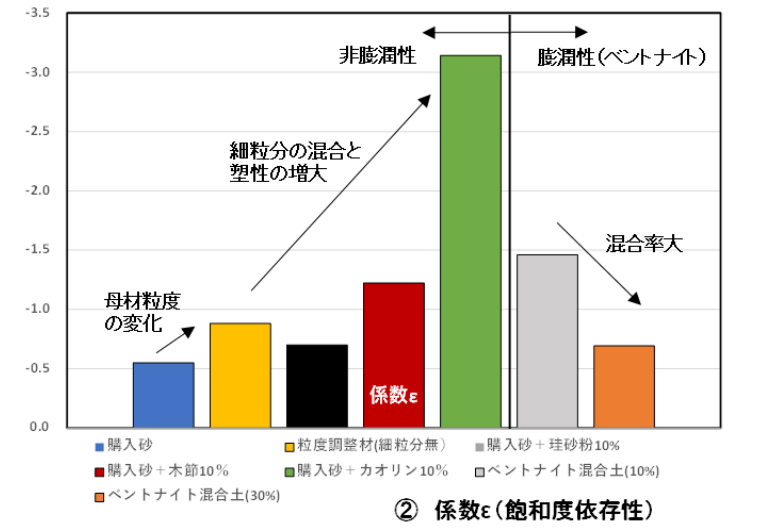


図 6.3-48　重回帰分析による評価精度





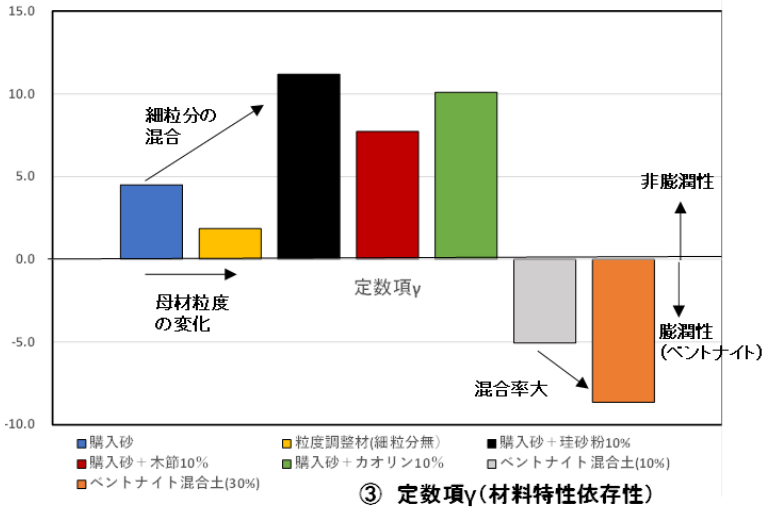


図 6.3-49　重回帰分析の係数λ、εと定数項γ

図 6.3-50 は、各材料の 1Ec 締固め-透水試験結果に対する回帰式による予測結果と実測値との比較結果を示している。室内締固め試験で得られた締固め密度とその時の飽和度を回帰式に入力し、得られた透水係数と実測透水係数を比較している。図より、様々な材料と配合に対して回帰式による透水係数は実測傾向を良好に再現している（購入砂については初年度の 1Ec 締固めと次年度の λ / ε 実験結果に若干の乖離があるため整合していないように見える。本結果は追試を行っても同様であり、透水係数 1×10^{-4}m/sec の高透水係数レンジの中での 2～3 倍の違いの比較を行うこと自体が余り意味はないものと考える）。透水係数が最適含水比のやや湿潤側で最小となる傾向も図より見て取れる。

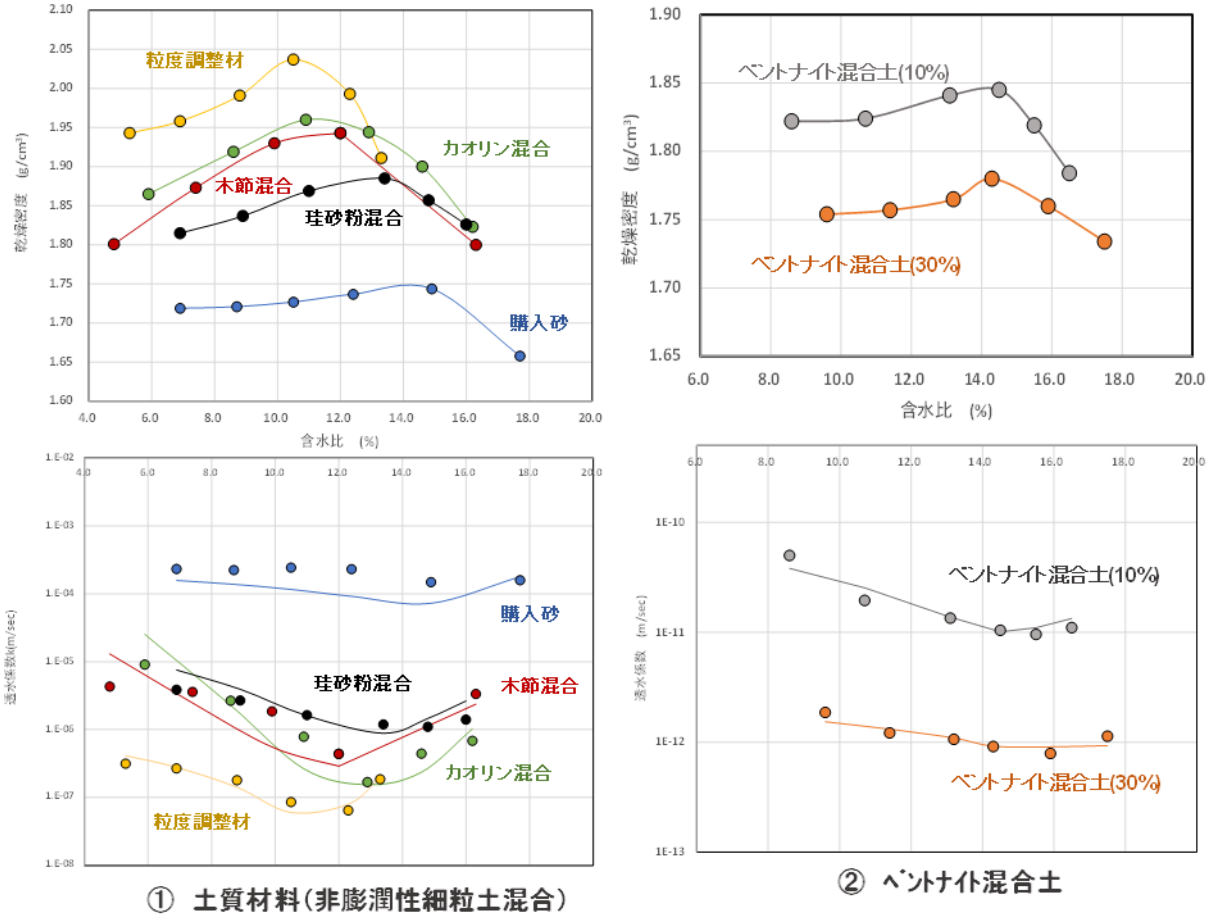


図 6.3-50　透水係数の実測値と回帰式による予測値の比較

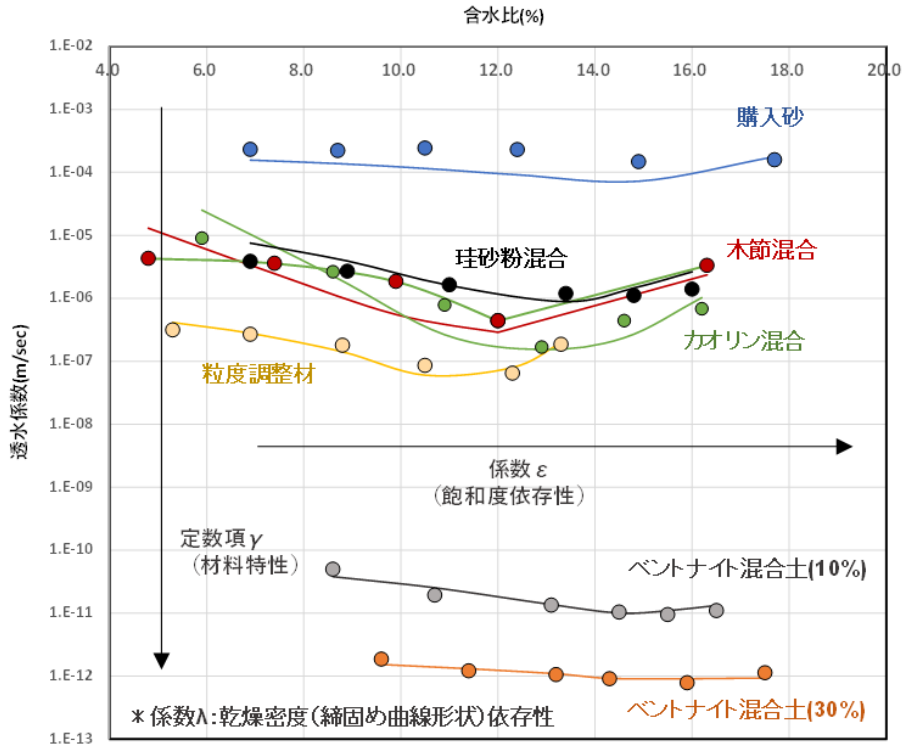
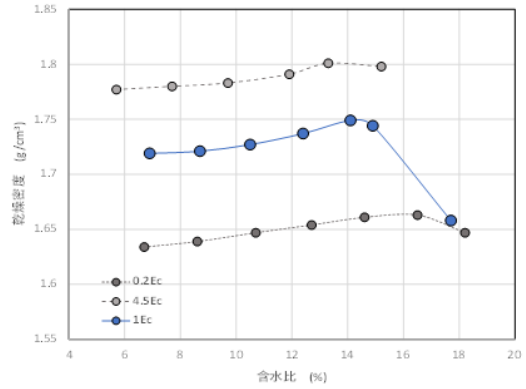
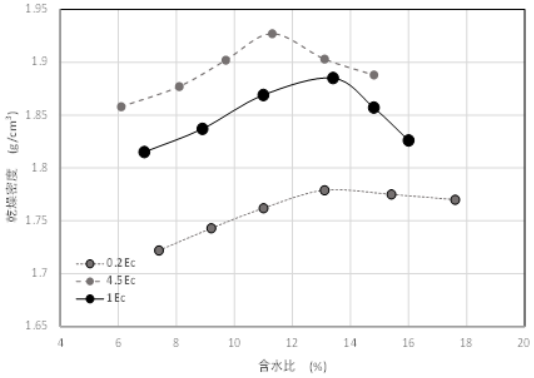


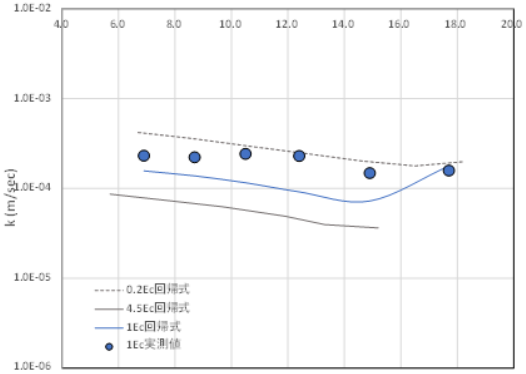
図 6.3-51　広範囲な度実材料と透水係数レンジにおける実測値と回帰式の比較結果

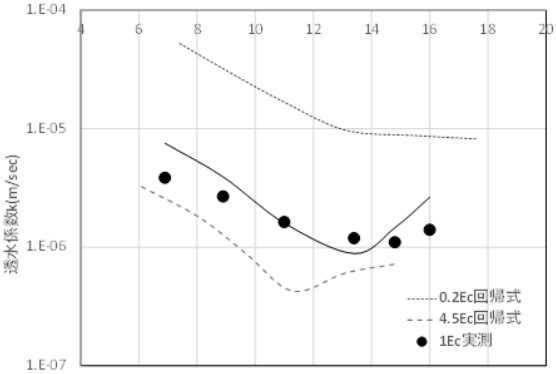
図 6.3-51 には、広範囲な土質材料と透水係数レンジにおける実測値と回帰式の比較結果を示す。このようなレンジ内で比較すると各回帰結果は実測値とほぼ一致しているように見えるが、ここで指摘したいのは、定数項γの値、すなわち母材、添加する細粒分、その塑性と混合率といった総合的な材料特性の違いが、まずは透水係数のレンジを決めており、これに締固め時の乾燥密度と飽和度といった締固め要因が加わることで遮水性が決まってくるものと思われる（図を見る限り、広範囲な透水係数レンジの中では、まず材料特性が遮水性を決める第一要因となる）。本検討についても、次年度以降、材料特性を変えた場合の実測値との比較を継続的に進めていきたい。

最後に図 6.3-52 及び図 6.3-53 には、締固めエネルギー（締固め曲線）の違いが透水係数に及ぼす影響を吟味した結果を示す。λ / ε 実験の供試体条件（締固めの上下限範囲）を求めるために、締固めのみ 0.1Ec あるいは 0.2Ec（低密度領域）及び 4.5Ec（高密度領域）を実施している（これらの供試体では透水試験は実施していない）。この締固め曲線上の乾燥密度と飽和度を回帰式に入力すれば、それら低エネルギー（現場撒き出し状態相当）や高エネルギー（薄撒き×大型重機状態相当）での透水係数を推定可能となる。これらを概観すると、最小透水係数 k_{min}の発現はこれら締固めエネルギー（締固め曲線の位置と形状）の違いによっても異なること（例えば高締固めエネルギーでは湿潤側締固めほど遮水性が一方向に高まる可能性がある）が伺われ、最小透水係数の発現現象が締固め含水比のみに依存するものではなく、材料と締固め特性など全ての影響を受けることを示唆している。



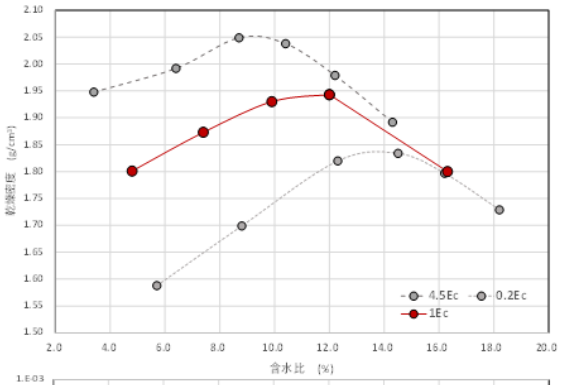


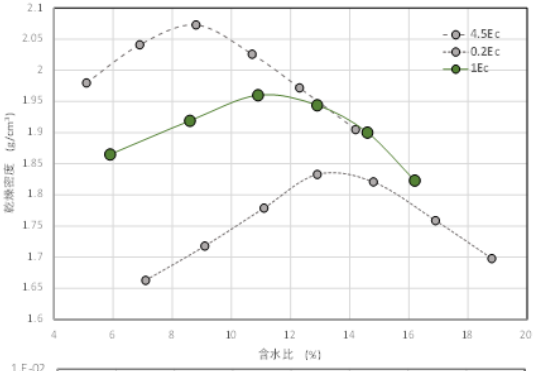


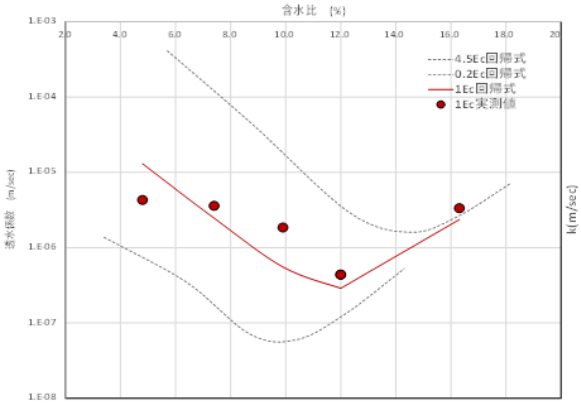


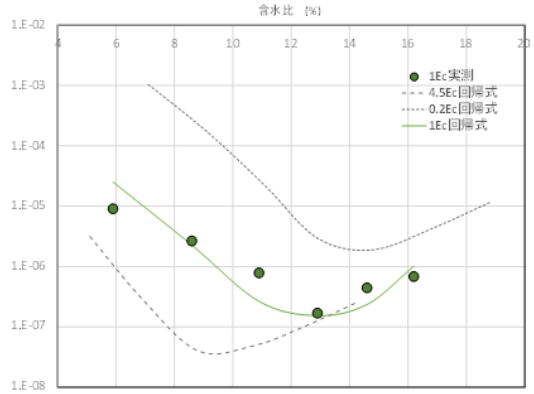
① 購入砂

② 購入砂＋10%珪砂粉





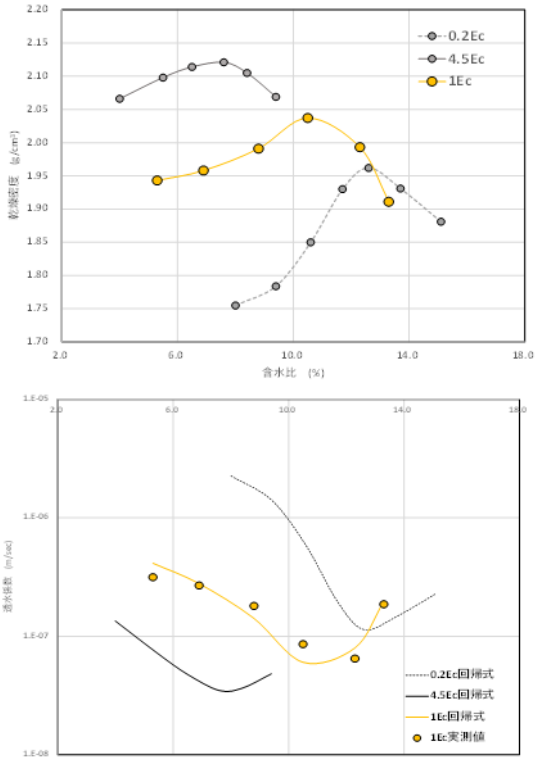




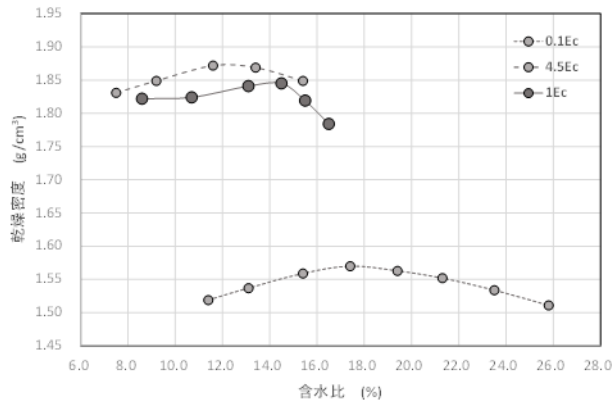
③ 購入砂＋10%木節

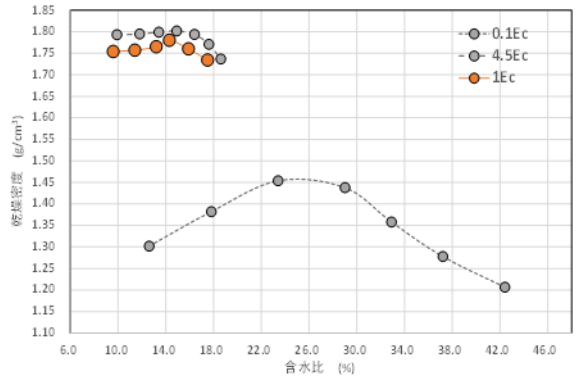
④ 購入砂＋10%カオリン

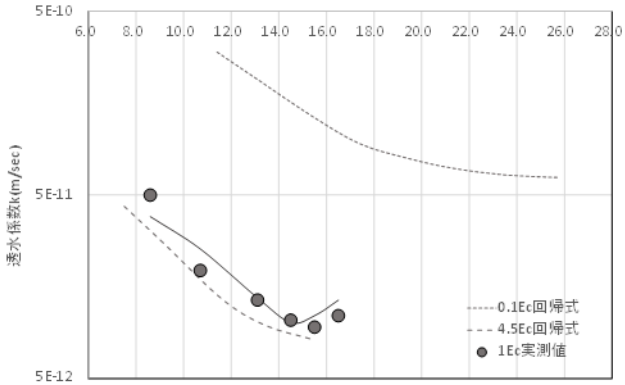
図 6.3-52 締固め曲線の違いが透水係数に及ぼす影響（全材料）

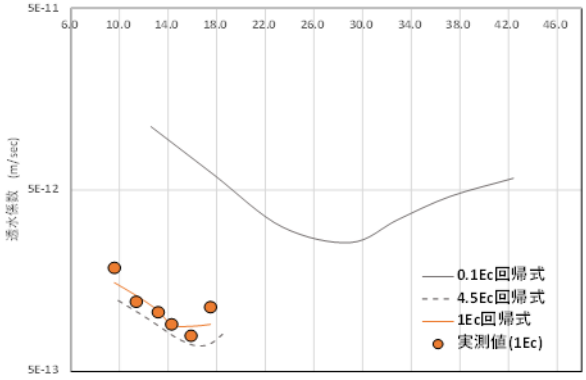


⑤　粒度調整材（細粒分無し）









⑥　購入砂＋10%クニゲル　　⑦　購入砂＋30%クニゲル

図 6.3-53　締固め曲線の違いが透水係数に及ぼす影響（全材料）

(2) 実体顕微鏡観察結果に対する画像解析及び透水特性との関係性検討(実験 C)

λ_k や ε_k の勾配に従って締固め土の透水係数が変化する時、締固め土の何が変化しているのかを顕微鏡写真とその画像分析により検討した。着目点は 2 つあり、間隙の合計（間隙比）とその分布（間隙径分布）である。これにより、例えば間隙比 e が一定でありながら締固め時飽和度 Sr の違いによって何故透水係数に顕著な違いが生ずるのか（ε_k が生ずるのか）を検討した。具体的には、令和 3 年度及び今年度実施したベントナイト混合土の JGS0312 試験終了供試体（飽和状態）の顕微鏡写真に対する画像解析結果を定量化し、実験 B で得られた透水係数値との関係性を整理した。また、今年度実施した材料混合・締固め過程における土粒子間隙構造の追跡結果（この最終過程＝JGS0312 の飽和前の状態）も併せ吟味することで、透水係数を決める土粒子間隙構造がどの時点で、いかなるメカニズムで形成されているのかを検討した(図 6.3-54 参照)。具体的な供試体準備、撮像方法、撮像結果については 6.3(2)にて詳述した。以下では画像解析による土粒子間隙構造の定量化結果を再掲しながら、締固め土の遮水性発現メカニズムとの関連性を議論する。

図 6.3-56～図 6.3-57 には、ベントナイト混合土(10%、30%)の長期透水試験(JGS0312)終了後供試体の顕微鏡写真を示している。図 6.3-55 に示した乾燥密度一定、締固め時飽和度を変えた供試体の写真（ε_k 沿い）である。図中には元写真と画像解析結果、下に間隙径面積のヒストグラムを示す。

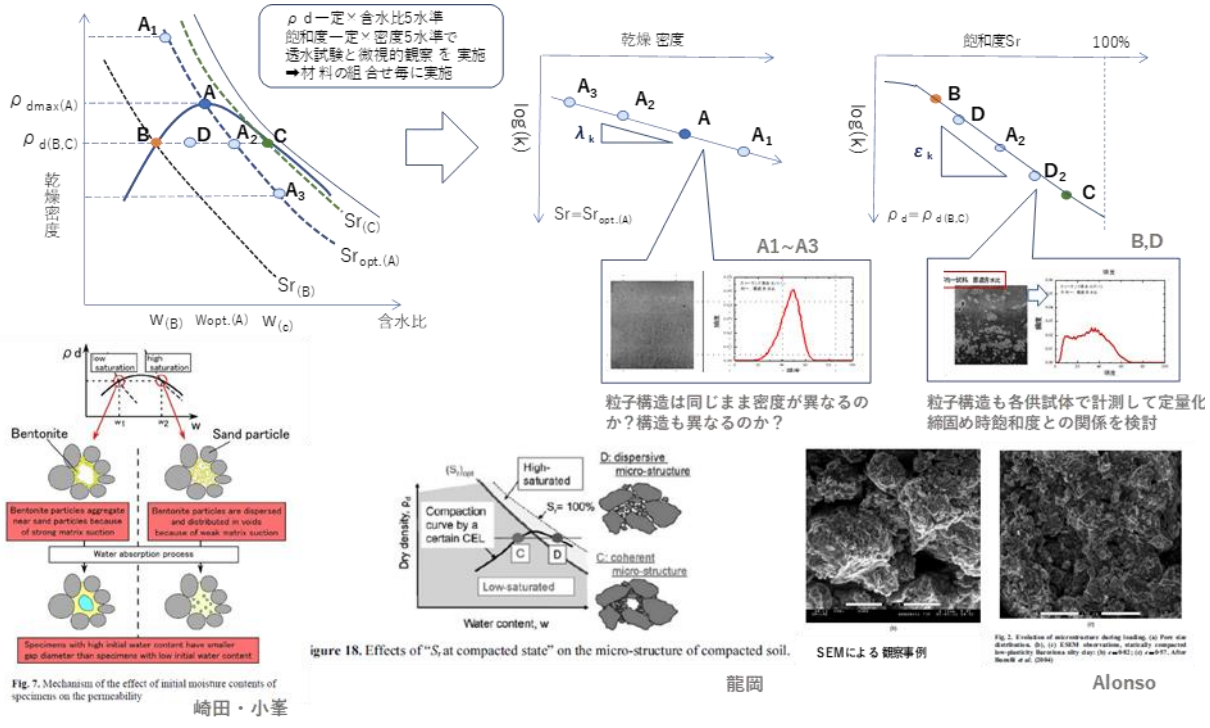


図 6.3-54　λ_k と ε_k ライン上での供試体の土粒子間隙構造の観察

図 6.3-56～図 6.3-57 より、締固め時飽和度（含水比）が高い程、間隙面積ヒストグラムの平均値 μ が減少（細孔側に変化）し、標準偏差 σ も減少（間隙面積が均一化）していることが分かる。これを透水係数との関係で整理したものが図 6.3-58 である。ベントナイト混合土の透水係数は締固め時飽和度の増加と共に減少するが、飽和度と間隙面積率の関係もまた、これと同じ傾向を示す。ベントナイト混合量が 10%から 30%に増加すると両者の傾きが低下する結果もまた、前述した λ/ε 実験の重回帰分析結果（係数 ε が低下）に対応するものと言える。図には間隙面積平均 μ、標準偏差 σ と透水係数の関係を示しているが、両者は高い相関性を有しており、ε_k ライン沿いの透水係数の変化は、これら間隙径分布特性の違いによって説明される。

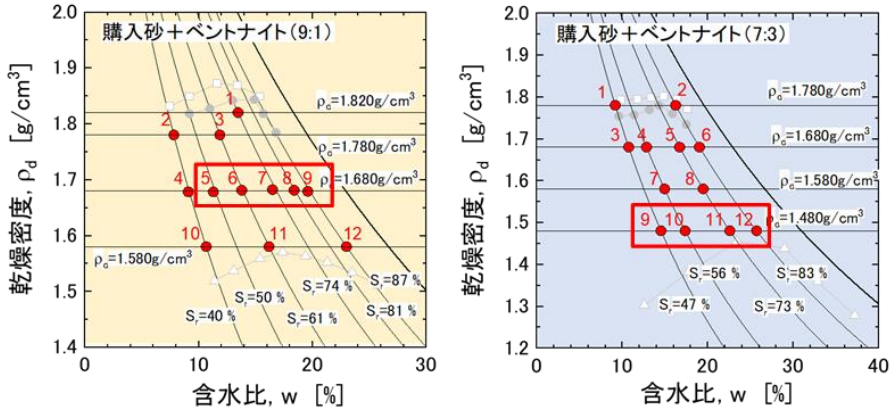


図 6.3-55　実体顕微鏡撮影の供試体条件（10%,30%ベントナイト混合土）

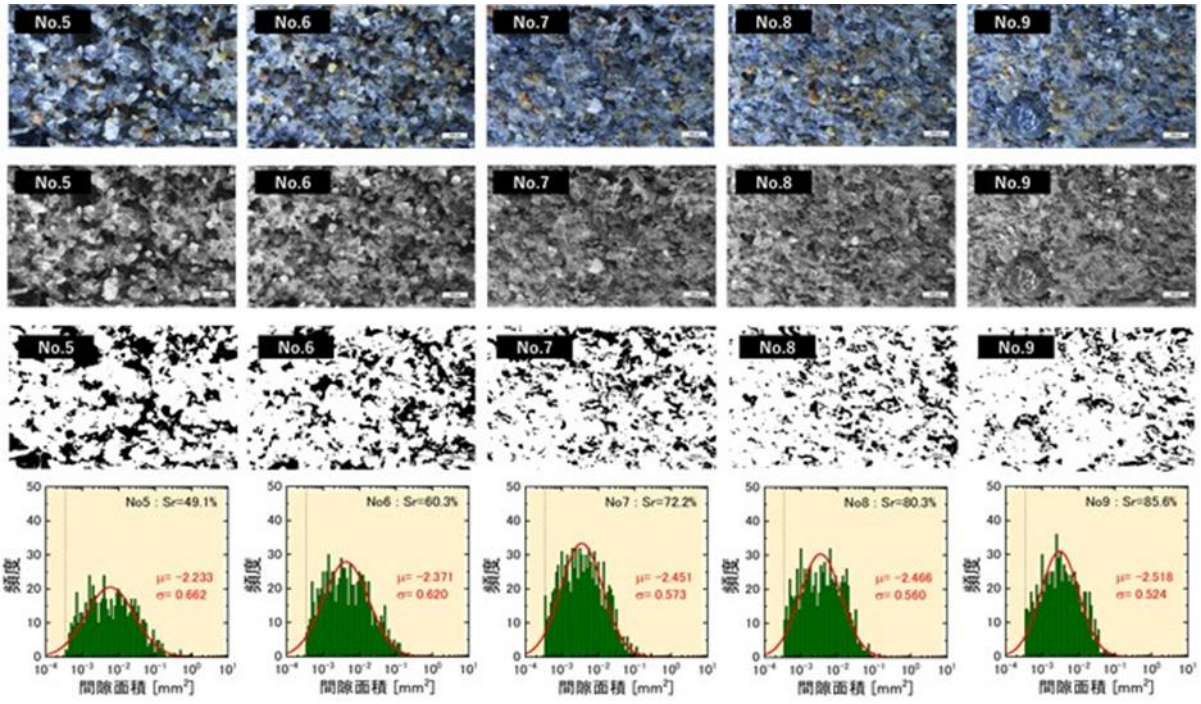


図 6.3-56　顕微鏡写真の画像解析結果と間隙面積のヒストグラム（10%ベントナイト混合土）

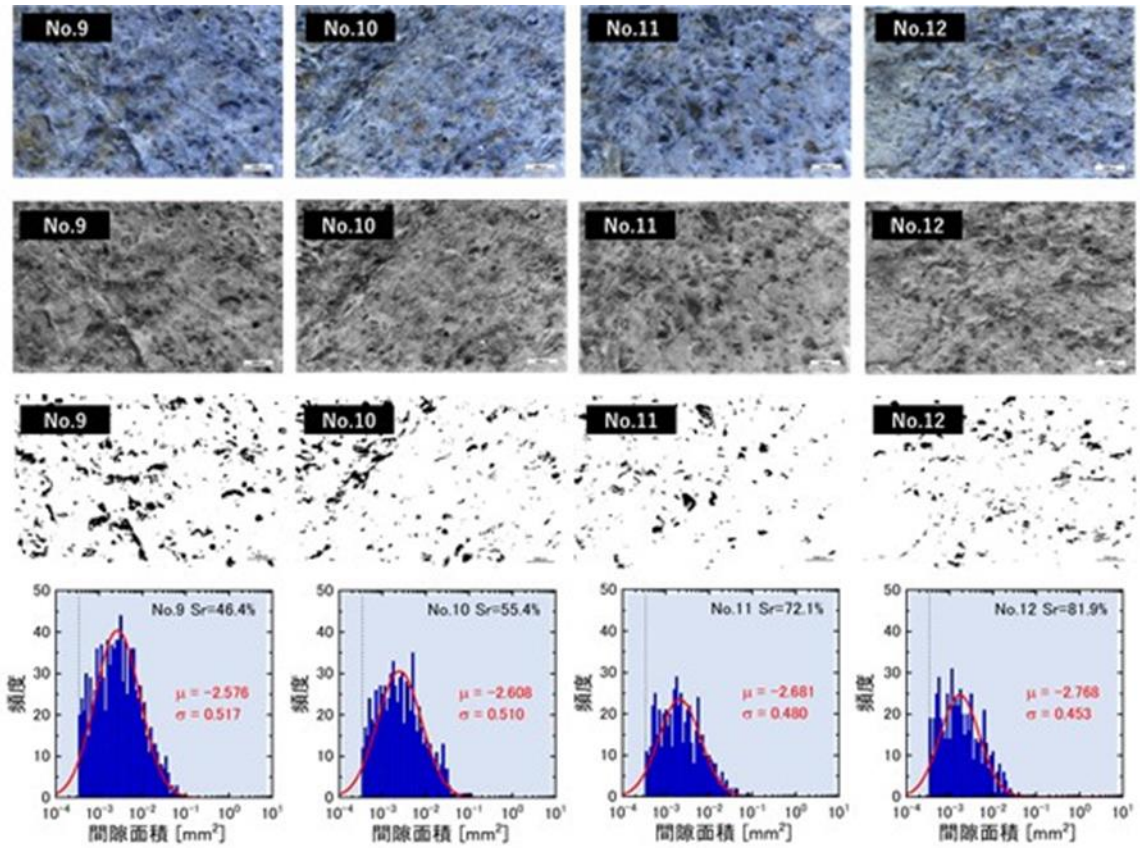


図 6.3-57　顕微鏡写真の画像解析結果と間隙面積のヒストグラム（30%ベントナイト混合土）

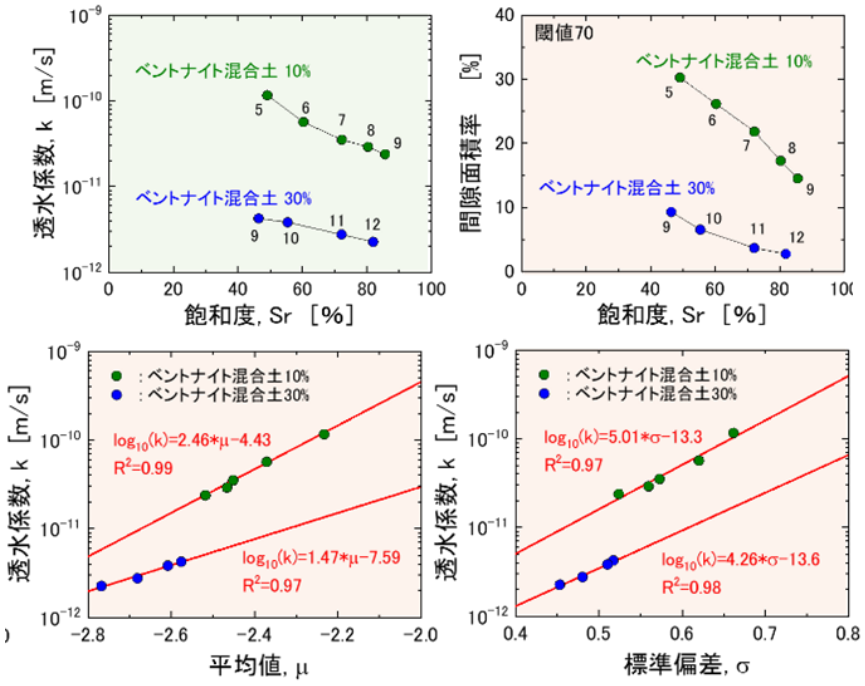


図 6.3-58　実体顕微鏡写真の画像解析結果と透水係数との関係

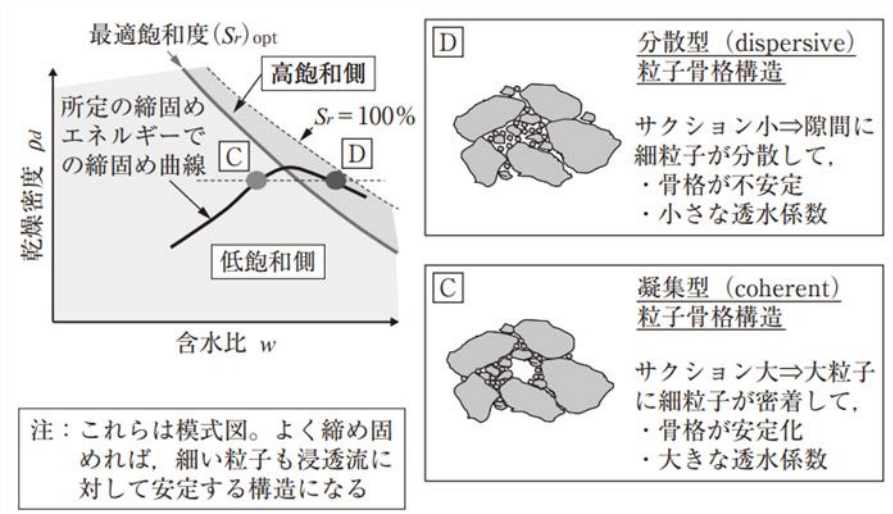


図 6.3-59　締固め土の土粒子間隙構造（龍岡[4]）

図 6.3-59 は、龍岡による乾燥側締固めと湿潤側締固め供試体の土粒子間隙構造の違い（模式図）を示している。乾燥側では凝集型、湿潤側では分散型構造がもたらされ、これにより同じ乾燥密度でありながら透水係数に違いが生ずることが述べられている。今回の結果は、この模式図をヒストグラムの変化の形で定量化し、更に透水係数との直接的な関係性を明らかにした初めての事例といえる。

一方 λ_k ライン沿い供試体については、乾燥密度すなわち間隙比 e が変化するため、透水係数がこれに対応して変化することは自明である。今回の顕微鏡撮影でも λ_k ライン沿い供試体の間隙径分布の変化を追跡しており、その結果を図 6.3-60 に示す。

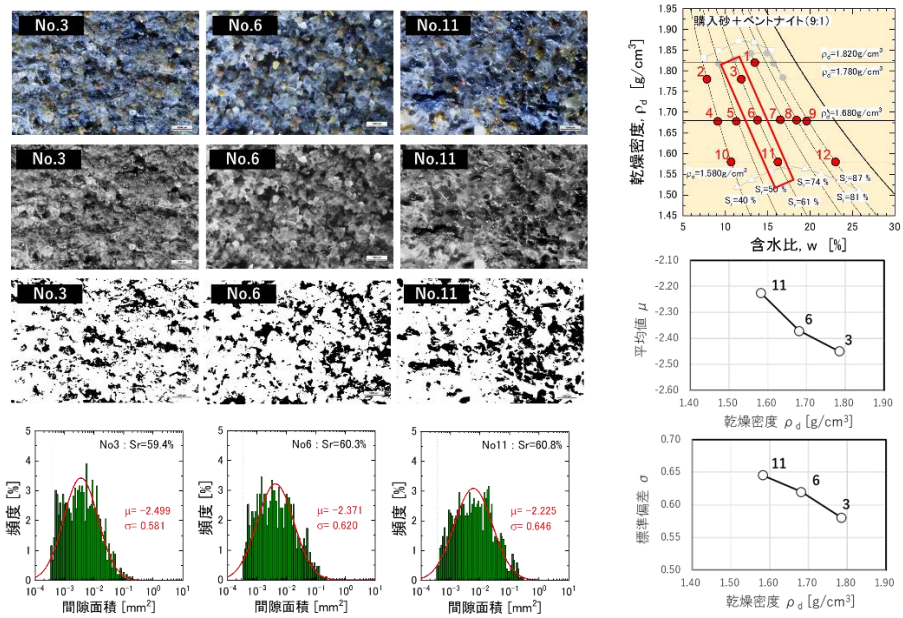


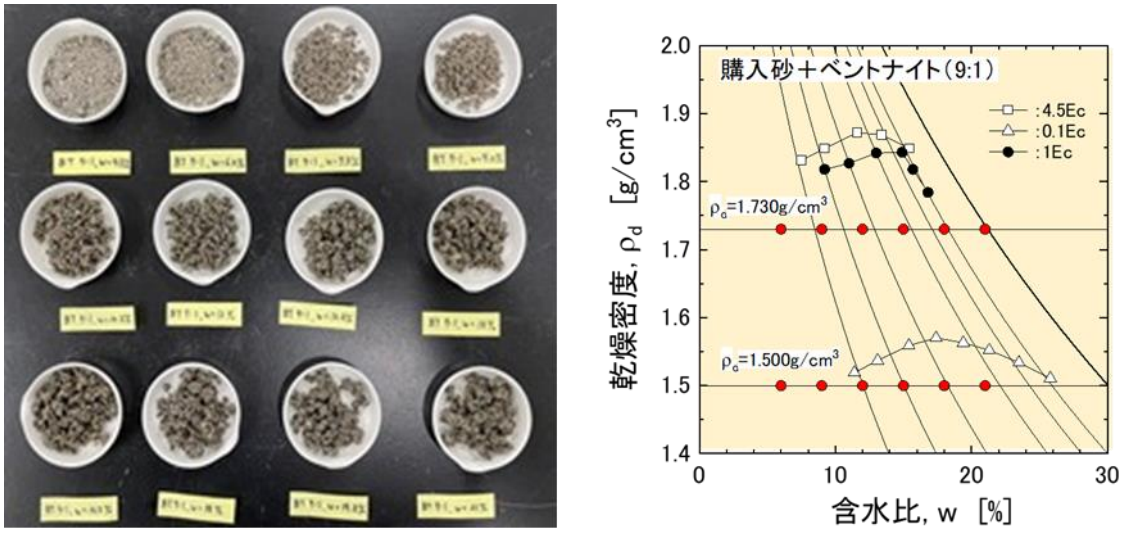
図 6.3-60　λ_k ライン沿い供試体の顕微鏡写真と画像解析結果

では、長期透水試験終了後供試体に見られた土粒子間隙構造の違いは、「いつ、どの段階で、どのように」生じるのか。更に一歩踏み込んだメカニズムの説明を行うために、これら供試

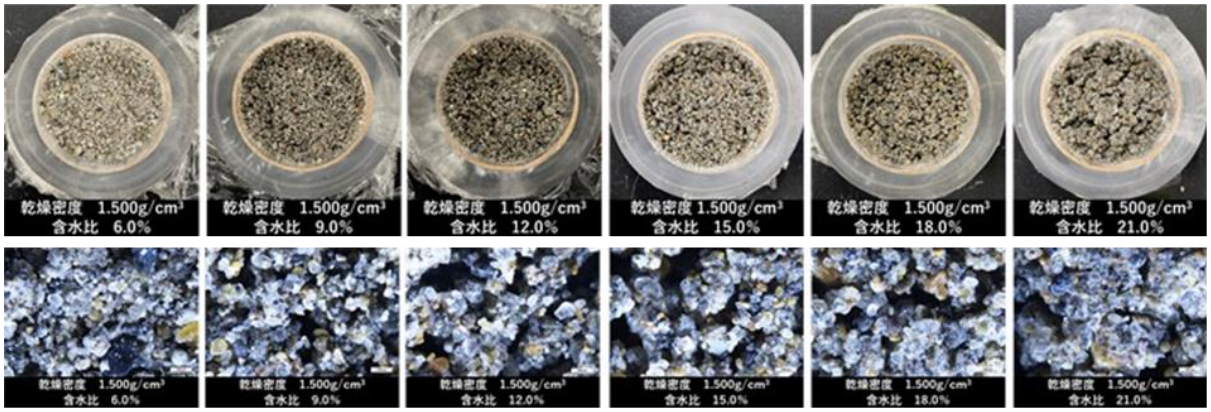
体の作製過程（加水混合⇒ゆる詰め⇒締固め）での顕微鏡写真撮影を実施した。図 6.3-61 にその一例を示す（詳細は 6.3 (2) 参照）。(a)は含水比 4.5%から 21%まで 1.5%ピッチで含水比を変えながら加水混合した際の供試体の状況を示している。乾燥側では母材とベントナイトは均一に混合されているが、最適含水比の 15%付近よりベントナイトの吸水膨潤に伴う団粒化（いわゆるダマ）の発生が不可避となる。以降、含水比を増やすとダマの径は更に大きくなり、強度的には固練りからペースト状に変化していく（ダマの剛性自体は湿潤側ほど低下する。前述のベントナイト 100%供試体のミニコーン実験結果もこれを裏付ける）。(b)は、これを乾燥密度 1.5g/cm^3 のゆる詰め状態にして撮像した結果である。乾燥側では詳細に見ると粉体上のベントナイトが散在し、母材周辺に付着している。最適⇒湿潤側含水比では、団粒化した混合土をそのまま緩く詰めるため、ダマ同士の間には大きな間隙が残存する。また、湿潤側に移行するほどベントナイトがジェル状に変化し、半透明な色調へと変化していることが目視でも確認できる。(c)は、これを乾燥密度 1.73g/cm^3 まで密に締固めた後の写真であるが、特に湿潤側では団粒化した材料が締固め荷重によって変形、いわば圧延される形で土粒子間隙を埋め、膜状ジェルとなって被覆している様子が見て取れる。乾燥側では、吸水ベントナイトがいわゆる「固練り」状態となっているため圧延効果はさほどではなく、密に締固めてもなお、大きな土粒子間隙が幾つか残存する。このようにして得られた締固め後の画像は、前出の JGS0312 完了後の画像に酷似しており、締固め後に通水飽和⇒長期透水（通水）した後も、締固め直後の間隙構造（吸水ベントナイトの被覆状態）がそのまま残存しているものと考えられる。

このように、締固めたベントナイト混合土の透水係数は乾燥密度のみならず、締固め時の含水比や飽和度によって変化し、その直接原因は透水試験時の土粒子間隙構造の違いにある。更にこの間隙構造（吸水ベントナイトの存在形態）は、母材・ベントナイト・水の加水混合時にその素因（団粒化）が生じ、これが締固めという行為により更に顕著になる（誘因）ものとして説明することができる。

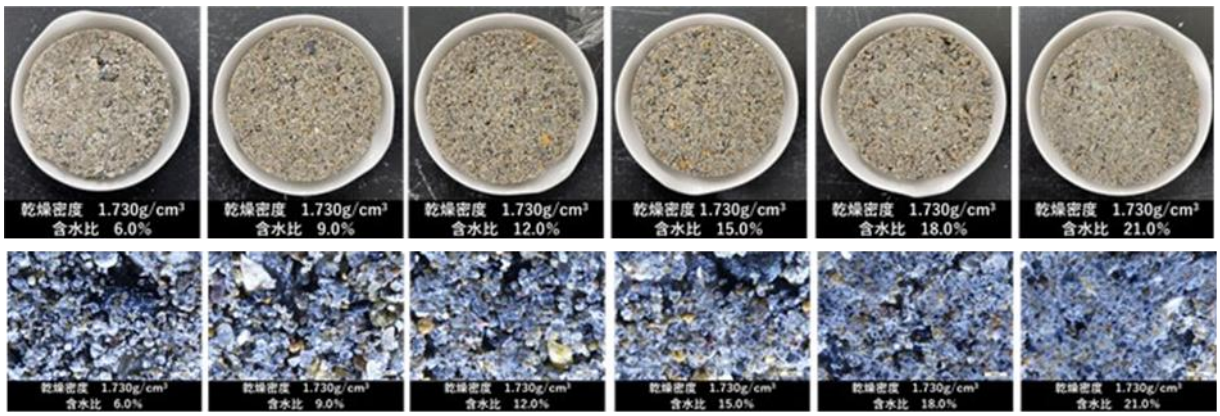
材料混合加水⇒締固め時のこのような挙動のさらなる本質を説明するためには、吸水ベントナイトの粘着力や圧延性（変形追随性）といった力学特性に、そしてその力学特性のさらなる本質は、締固め含水比の違いによるベントナイトの層間水の取り込みや電荷状態といった化学的性質の違いにまで遡る必要がある。これについては、後ろの実験 E の箇所で再考する。



(a) 加水混合直後の材料の状態と締固め条件



(b)　ゆる詰め状態の供試体の顕微鏡写真



(c)　密詰め状態の供試体の顕微鏡写真

図 6.3-61　材料混合加水⇒ゆる詰め⇒締固め過程における土粒子間隙構造の変化

(3) 中性子イメージング実験結果によるメカニズムの解釈(実験 D)

(2)に引き続き、中性子イメージング実験結果を用いてλ_kやε_k沿い供試土の遮水性の変化を重水浸透時挙動の違いにより吟味した。前述したように、中性子イメージング実験には分解能や実験装置上の限界があるため、実験 B,C と同一の供試土ではなく、可視化可能な粒径

の大きな母材に貧配合のベントナイトを混合した供試土を用いて、遮水性発現の状況や影響因子、λ_kやε_k沿いの変化などを定性的に確認した。中性子イメージング実験では、顕微鏡観察（色調や明度）と異なり吸水ベントナイトの付着状況に対応すると考えられる「含水比分布」が締固め後の不飽和状態から得られているため、締固め時のベントナイト分布と軽水飽和後の重水浸透領域（＝飽和透水特性）の関係性を議論できること、顕微鏡写真とは異なり、重水浸透という透水試験とアナロジックな試験で議論できることなどに大きな利点がある。

以下では、ベントナイト混合率、締固め密度、締固め含水比、ベントナイトの膨潤性（非膨潤のカオリンを含む）といった各種要因がベントナイト混合土の重水浸透時挙動に及ぼす影響を整理し、(1)の透水係数評価式及び(2)の顕微鏡観結果との関連性を議論する。実験手法や実験条件、実験結果の詳細は既に 6.3.1(3)で報告した。以下では画像解析結果による主な定量化の結果を用いて遮水性発現メカニズムとの関連性を再整理する。

中性子イメージング実験は、前述したように以下 A～C の 3 つの目的で実施した。

A. ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの検証
   実験 B で得られたλ_k/ε_k沿いの透水係数の変化を裏付けるデータを取得すること
B. ベントナイトの膨潤性の違いの影響に関する検討
   膨潤性の高い Na 型ベントナイト、相対的に低い Ca 型ベントナイト、非膨潤性のカオリンの 3 種類の添加材を同一条件で混合し、重水浸透時挙動へ及ぼす影響を検討
C. 加水混合・締固め過程におけるベントナイト付着状況の変化の追跡
   顕微鏡写真で撮像した結果を、吸水ベントナイトの分布（≒含水比分布）で確認する

以下、各々の主な結果を説明する。

1）ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの検証

図 6.3-62 に、珪砂 2 号＋ベントナイト 2%,3%供試体に対する結果を示す。左側は締固め時飽和度を 26%の一定とし乾燥密度を変えた結果（λ_kライン沿い）を、右側には乾燥密度を 1.25g/cm^{3}で一定とし、締固め含水比を乾燥側から湿潤側に徐々に変化させた場合の結果を併記した。本検討では、不飽和締固め時⇒軽水飽和時⇒重水浸透後の画像を連続計測し、軽水飽和時の重水浸透時の輝度の差分をとって、そのヒストグラムを示した。軽水と重水では輝度が異なるため、輝度の差分平均値が小さいほど重水への置き換わりが少なく、重水が浸透していない＝透水係数が小さいことを表している。目視では難しい評価ではあるが、輝度平均値のヒストグラムを取ると、乾燥密度や締固め含水比の変化に応じて、ヒストグラムの平均値やその形が変化していることを確認できる。

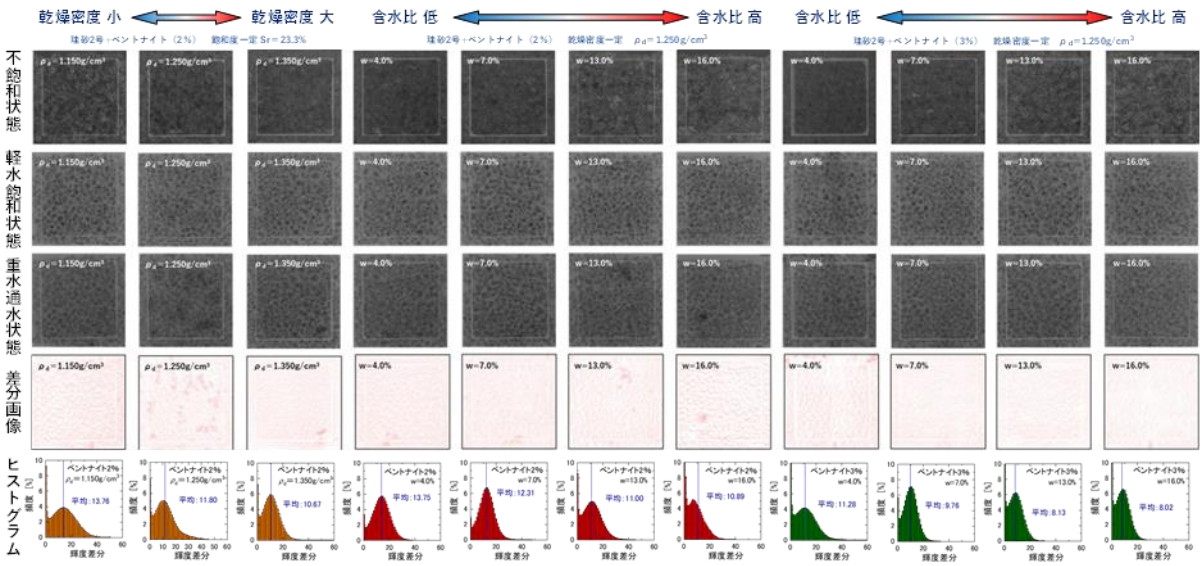


図 6.3-62　飽和度一定・乾燥密度一定供試体の重水浸透状況の変化と輝度差分のヒストグラム

図 6.3-63 は、左側に乾燥密度と輝度差分平均値の関係を、右側に締固め時含水比と差分平均値の関係を整理した結果を示す。図より、乾燥密度が大となる程輝度差分の平均値が減少し、重水が浸透しづらくなっていること、つまり遮水性が高いことが確認できる。右側の締固め含水比（飽和度）も同様に、湿潤側締固めほど輝度差分平均が減少し、重水浸透量が低下していることを示している。また、不飽和締固め時の画像を見ると、締固め含水比が高いほど白い色の吸水ベントナイトが団塊状⇒圧延状態に存在しており、前述の材料混合加水⇒締固め過程の顕微鏡写真と同様の傾向にあることが伺える。これより、JGS0312 の透水試験⇔同一供試体での顕微鏡観察⇔同一条件での模擬供試体での中性子イメージング試験結果（不飽和締固め状態及び重水浸透時）の 3 種類の実験結果が横ぐしを指す形で連動・符号していることを確認できた。

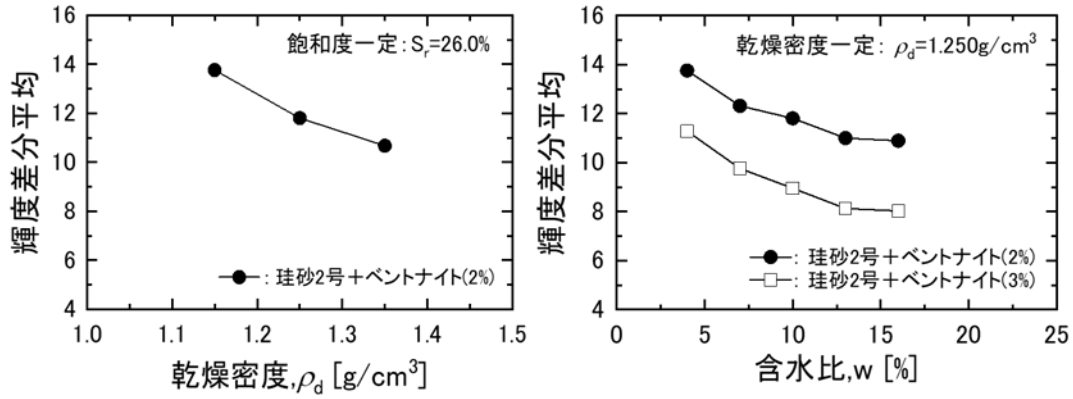


図 6.3-63　λ_k/ ε_k ライン沿いを模擬した供試体の重水浸透時挙動の違い

2）ベントナイト混合量や膨潤性の違いの影響に関する検討

ベントナイト混合土の遮水性が混合量や膨潤性によりどう変化するかを確認するために、一連の中性子イメージング実験を実施した。図 6.3-64 にその結果を示す（図の整理と表示は 1)と同じ)。左側は珪砂 2 号を母材とし、乾燥密度と含水比を一定にしてベントナイト混合率を 0%～10%まで変化させた場合の結果を示している。ベントナイト混合量が増加する程重水の浸透量が減少し、輝度差分平均が小さくなると共に、輝度差分のヒストグラムは 0 付近が卓越する形状に変化している（既述のように、この形状の変化は軽水飽和時と重水浸透時の共に正規分布的形状の差分を取った結果、0 付近が卓越する結果となったものである)。更に、その右側には、クニゲルに比べて膨潤性の低いクニボンド、及び非膨潤性かつ高塑性の微粉カオリンを同一条件で混合した場合の結果を併記した。同じ混合率 10%であっても細粒分の膨潤性が低い（若しくは無し）の場合、重水浸透量が大きく異なることが差分画像からも確認できる。

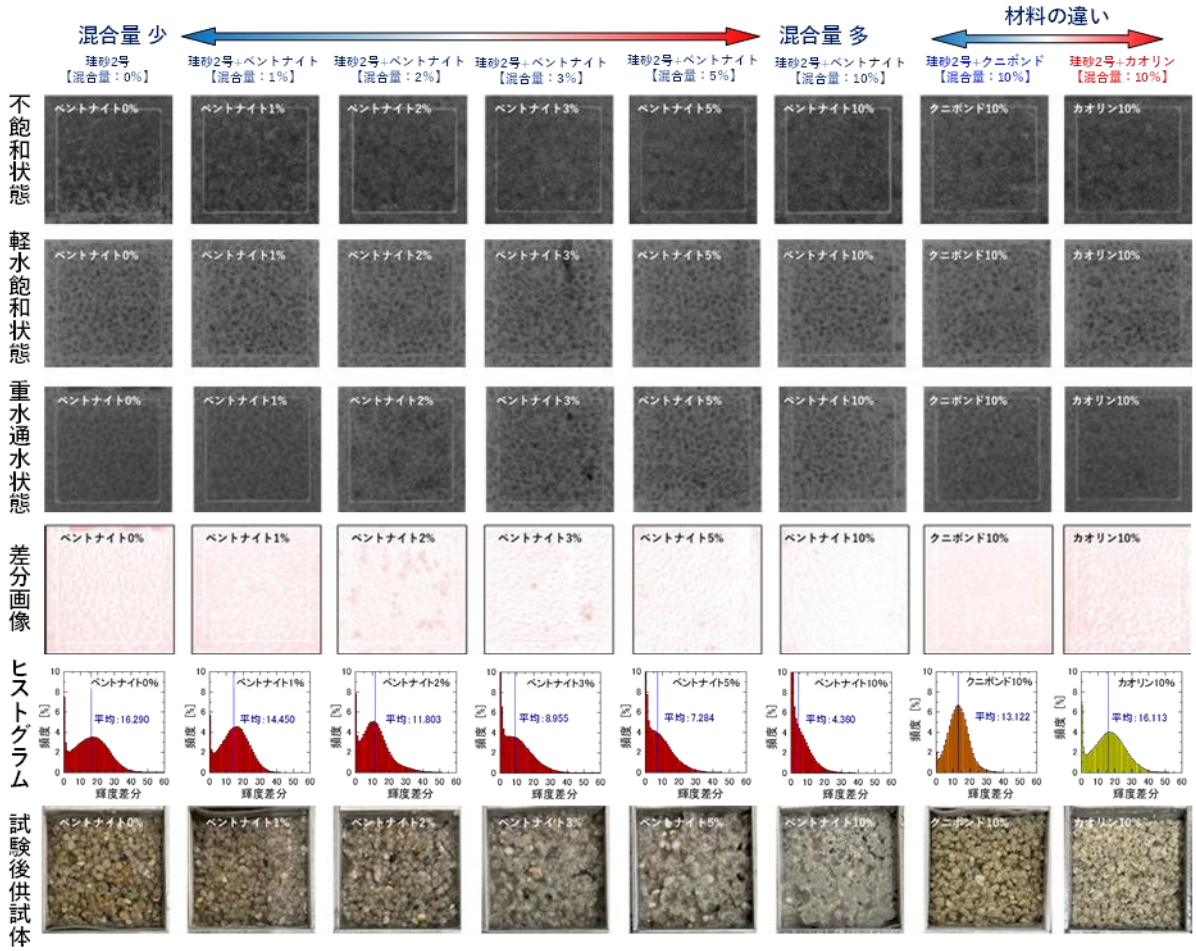


図 6.3-64　ベントナイト混合量とベントナイト特性の違いの影響

図 6.3-65 は混合率と輝度差分平均値の関係を整理した結果を示す。ベントナイト混合量が多いほど輝度差分平均は小となり、重水浸透量が低下すること、すなわち遮水性が高まることを図は示している。膨潤性の低いクニボンド10%はクニゲル2%混合と同程度の、また非膨潤性のカオリンを添加した場合はクニゲル 1%以下と同程度の輝度差分となっており、ベントナイトの添加量もさることながら、その膨潤性が遮水性に大きな影響を及ぼすことが確認できる。なおa)と同様、ベントナイト混合量が増加すると吸水ベントナイトの付着領域が増加し、これが重水浸透量の低下に対応していることも伺われる。

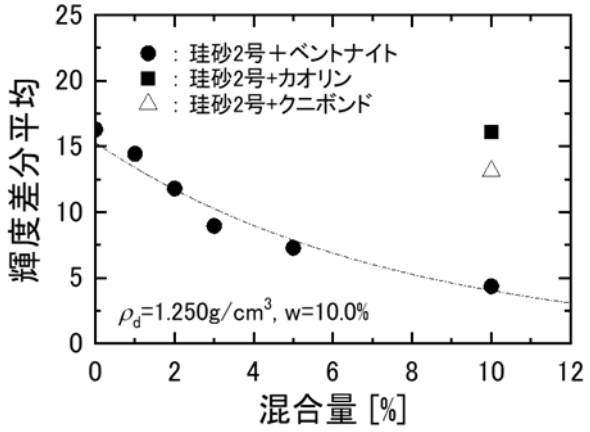


図 6.3-65　ベントナイト混合量と輝度差分平均の関係

3）加水混合・締固め過程におけるベントナイト付着状況の変化の追跡

前述の実体顕微鏡観察においては材料混合加水⇒ゆる詰め⇒締固め過程における土粒子間隙構造の追跡を実施した。中性子イメージング実験では同じ画像データではありながら、含水比の分布≒吸水ベントナイトの付着状況や付着面積比の変化で同じ追跡が可能となる。以下では購入砂を母材としてこれにベントナイトを混合し、締固め過程における中性子イメージング撮像を行った結果を示す。母材を購入砂にした理由は、珪砂 2 号ではアルミ箱の中で十分な締固めを行うことができないためであり、また本実験では軽水飽和や重水浸透は実施していない（締固めにより供試体厚が変化するため、浸透実験には向かない）。

図 6.3-66 に撮像結果及び画像解析の結果を示す。左側は含水比一定でベントナイト混合量を変化させながら、締固め密度の変化（緩詰め⇒中詰め⇒密詰め）に伴う撮像を行った結果、右側は混合量を一定にして締固め含水比を変えた供試体で締固め密度の変化に伴う撮像を行った結果である。本ケースでは軽水飽和や重水浸透は行なっておらず、含水比分布そのものを求めることが目的であるため、輝度差分ではなく、輝度そのもののヒストグラム及び輝度平均値μと標準偏差σの変化を追跡している。また締固めに伴い供試体高さが変化するため、図中に四角で囲ったエリアに対する輝度の面積%分布として整理している。

図より、締固めが進展するにつれ、輝度のヒストグラムが右に移動し、その平均値μが増大していることを確認できる。同時に、ヒストグラムの幅は狭くなり、標準偏差σが低下すること、すなわち吸水ベントナイトの占める面積が増え、かつベントナイトの面的な分布が

より均一化していることを示している。左側のベントナイト混合量変化のケースでは、混合量が少ない場合ほどその変化が大きい。30%混合のケースでは、締固めの当初から吸水ベントナイトの占める面積が大のため、締固めによるその後の変化は相対的に小さくなっている（重回帰分析において 30%混合の λ が 10%混合のそれよりも小である事実に符合する）。図 6.3-67 には、輝度平均値 μ ・標準偏差 σ と乾燥密度の関係を示すが、密度増加＝締固めに伴い μ （含水比・飽和度・吸水ベントナイト比率に対応）が増加し、 σ が減少して均一化する様子を直接確認できる。λ_k ライン上では、このような現象が供試体内で進展することで、遮水性の向上がもたらされているものと理解される。

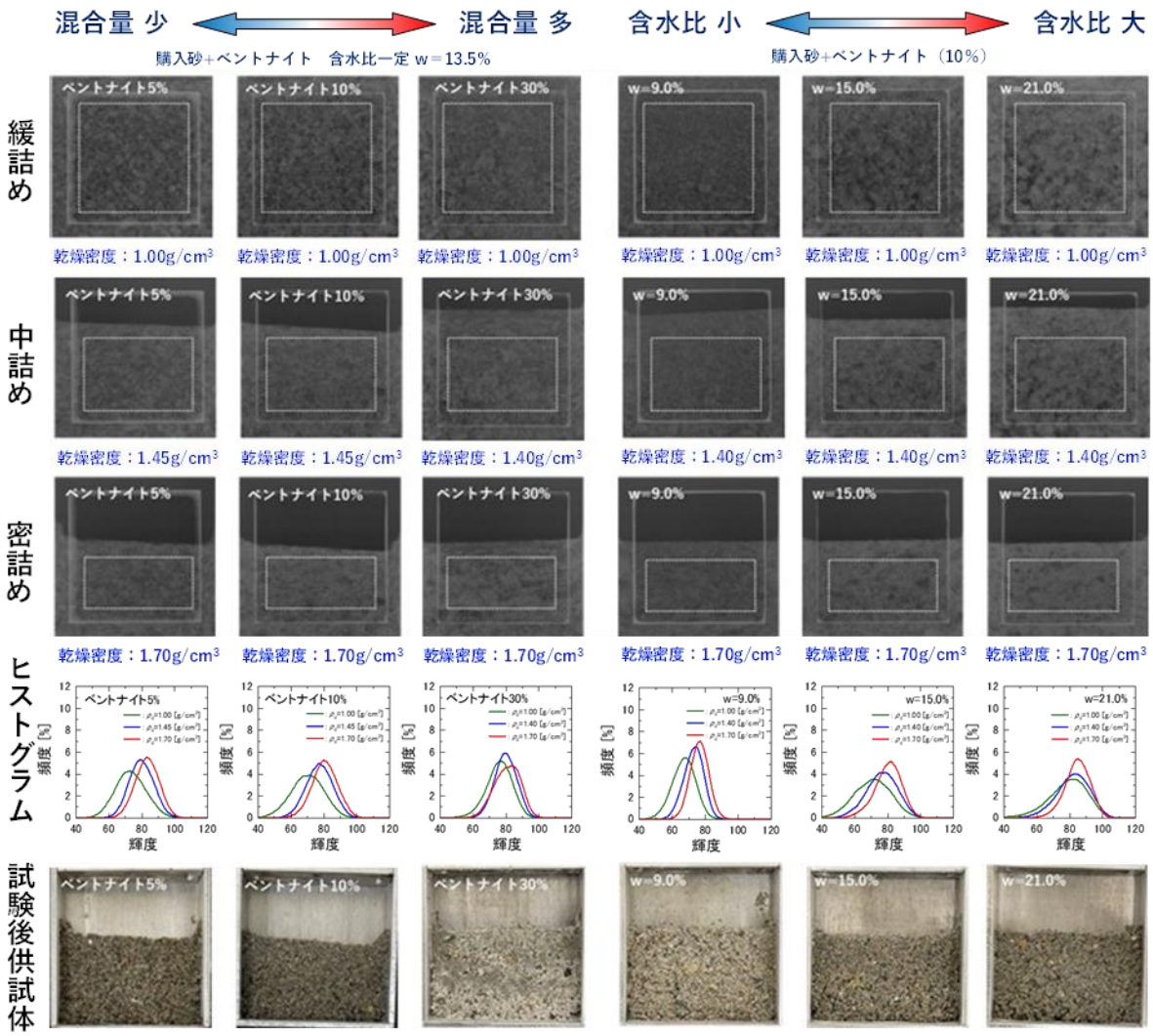


図 6.3-66　締固め過程における含水比分布の変化の追跡結果

一方、図の右側は ε_k、すなわち締固め含水比を変えた場合の結果である（10%混合土）。この場合も締固めと共に μ が増加し σ が減少する傾向は同じであるが、同じ乾燥密度で見ると締固め含水比が大きいほど輝度平均値は大となり、飽和度・遮水性共に大となることが判る。混合率が大きいとヒストグラム変動が少なかったのと同様、締固め含水比が大きいと、締固め当初より輝度平均値（≒吸水ベントナイトの付着比率）が大きく、締固め効果と相まってより高い μ の値≒高い遮水性を発揮していることが分かる。

以上の結果は、λ_k/ε_k ライン上での遮水性の変化が、材料混合・加水の初期状態⇒締固め過程において、初期条件（混合率や締固め含水比）に応じて逐次生じている状況を可視化しているものといえる。

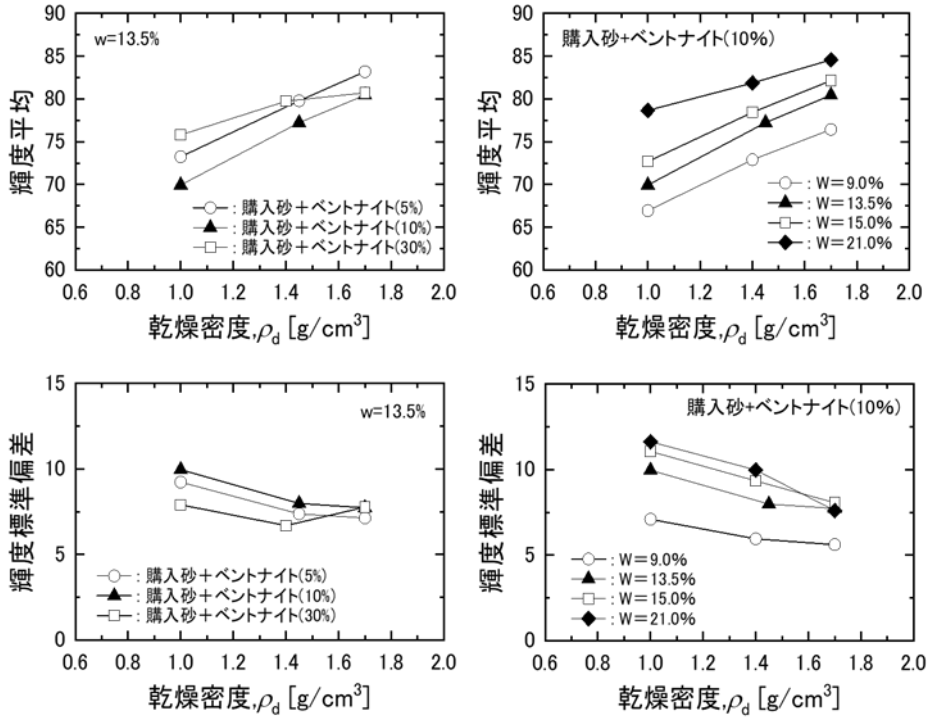


図 6.3-67　締固め過程における含水比分布の画像解析結果

(4) 他の力学・化学実験によるメカニズムの確認(実験 E)

(2)(3)で議論した締固め土の土粒子間隙構造（吸水ベントナイトの付着形態）の違いが生ずるメカニズムを補足的に検証する目的で、締固めた不飽和ベントナイト混合土の一面せん断試験とベントナイト単体の化学的特性の計測を今年度より試みている。実験手法や条件の詳細は 6.3.1(4)にて述べた。

図 6.3-68 に、10%ベントナイト混合土の一面せん断試験結果を示す。ここまで述べてきた顕微鏡写真や中性子イメージング実験の不飽和撮像結果は、乾燥側締固めでは吸水ベントナイトが離散的に母材間に配置され、最適⇒湿潤側ほどジェル状かつ被覆状に配置されることを確認している。このような吸水ベントナイトの配置状況の違いは、図の一面せん断試験結果にも表れており、乾燥側締固めではピーク⇒残留強度特性を示し、残留状態は母材に近い値となる。この過圧密的挙動は、固練り状態かつ離散配置状態の吸水ベントナイトがせん断力を受け、微小変位までは固練り状態の高い粘着力（せん断抵抗）を発揮するものの、せん断変位追随性を失って強度ドロップが生じ、母材強度＋α に至るプロセスを表しているように思われる。一方、最適含水比付近では吸水ベントナイトのジェル化が始まり、被覆面積が増えるためせん断抵抗が増加し、また変形追随性も発揮されるためピーク⇒残留挙動が見られなくなる。湿潤側ではより被覆的配置になるが、前述のミニコーン試験で示したように粘着力は最適含水比よりもやや低下するため、せん断強度は最適含水比よりも小さくなる。ただし変形追随性はより顕著となるため、せん断応力～水平変位関係はひずみ硬化型に変化している。

このように、ベントナイト混合土の締固め時の飽和度 Sr が一面せん断強度や水平変位依存性（材料靭性：粘り強さ）を変化させており、これが顕微鏡写真のベントナイト付着状況と定性的に整合していることが確認された。

今年度のターゲットは、締固めた状態（不飽和状態）のベントナイト付着形態の違いを不飽和一面せん断試験で再検証することにあったが、次年度はこれを飽和させた供試体を作製し、飽和後にも残存するベントナイト付着形態の違いの影響を調べたい。こちらは飽和透水係数に及ぼす締固め時飽和度の影響が、飽和供試体の一面せん断特性にも等しく表れるかどうかの確認となる。

更に、吸水したベントナイト単体の化学的特性についての実験（ζ 電位計測と DTA 計測）結果を図 6.3-69 及び図 6.3-70 に示す。膨潤性の高い Na 型ベントナイトが高い保水性能（≒材料靭性）を持つこと、プラス側への電荷が（膨潤性の低い Ca 型や非膨潤性のカオリンなどに比べて）相対的高いこと＝飽和時の電気二重層の影響が大きく、高い透水抵抗の原因となりうることなどを実験結果により示そうとするものである。実験手法や実験条件、実験結果の詳細は既に 6.3.1(4)で報告した。ζ 電位については、膨潤力の高いクニゲル V1 がマイナス側に出ていることは確認できたが、クニボンドがプラス側に出ているなど、今後の検討が必要である。DTA についてはクニゲルの結果を示すが、不飽和ベントナイトの TDA は締固め含水比に応じて変化し、湿潤側ほど TDA が大となること、すなわち湿潤側ほど保水強度が高いことを示している。このことは、上記一面せん断試験で湿潤側ほど変形追随性が高まったことに対応する。一方、不飽和状態のクニゲルを飽和させた後の実験結果は、締固め含水比に関わらず 1 本のラインに収束する。つまり不飽和締固め時には吸水ベントナイトの保

水特性（層間水の取り込み）が含水比により異なるものの、いったん飽和（再膨潤）してしまえば、同等の保水特性に収れんすることを示している。このことは、飽和通水後に実施する透水試験においては吸水ベントナイトの化学的特性は同等のものとなっていること、言い換えれば、その状態での透水係数の違いはベントナイトの化学的特性によるものではなく、ベントナイトの母材への配置構造という物理的要因に支配されていることを示唆するものと考えられる。

これら化学的特性に関する検討は、次年度に継続的に実施していきたい。

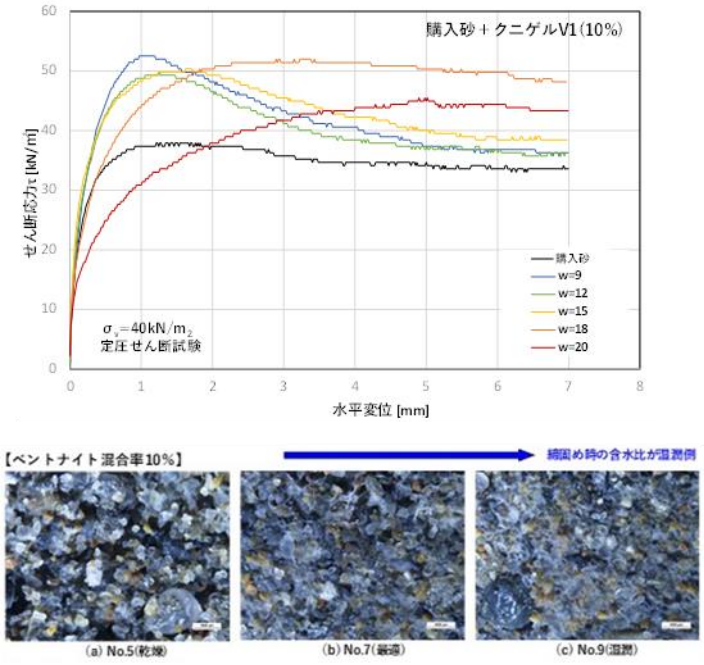


図 6.3-68　締固めたベントナイト混合土の一面せん断試験結果（10%混合土）

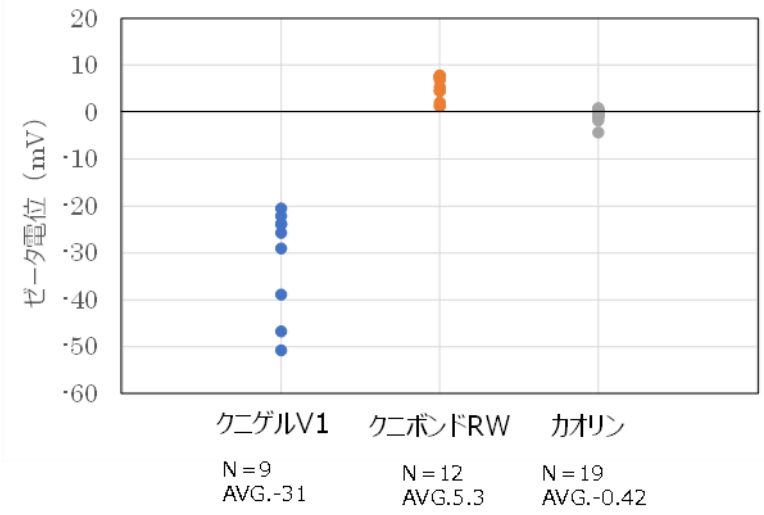
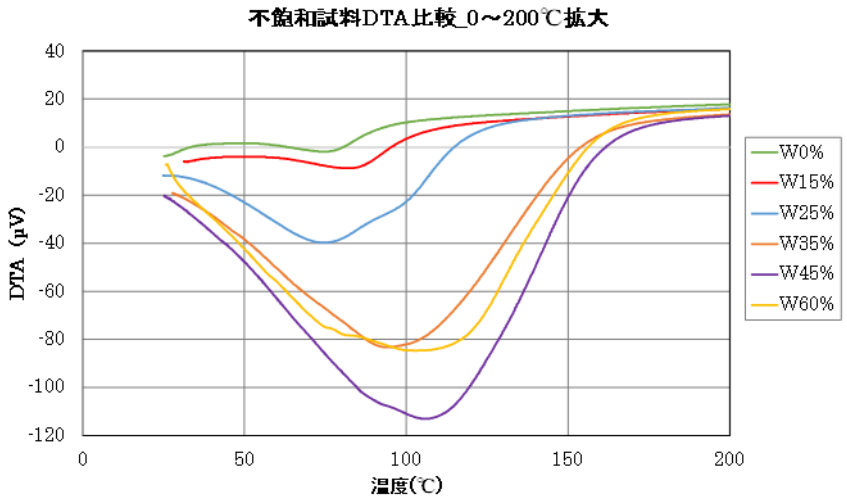
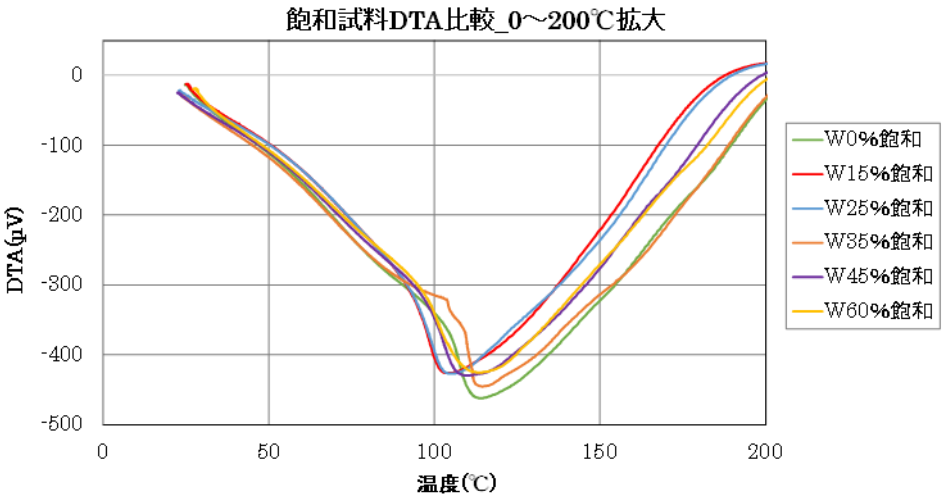


図 6.3-69　3 試料のζ電位比較



① 不飽和供試体（クニゲル V1）



② 飽和供試体（クニゲル V1）

図 6.3-70 不飽和・飽和クニゲルの DTA 試験結果

(5) ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する現時点での仮説

以上(1)～(4)の整理結果を基に、ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する現時点での仮説を図 6.3-71 にとりまとめた。以下にその仮説（説明手順）と知見を整理する。

① 最小透水係数 $k_{min.}$の発現

実験 A により確認。ただし単粒の購入砂を母材としているため乾燥側と湿潤側の透水係数の比率はさほど大きくはなく、現時点で数倍～100 倍程度である。ベントナイト混合土ではその比率が低下する傾向があるが、最小透水係数は少なくとも最適含水比付近か、その湿潤側にて発現することは確かである。

② 透水係数の定量的評価式による最小透水係数 $k_{min.}$発現の説明

λ_k/ε_k実験の結果から広範囲な土に対して飽和透水係数 k の log 値は締固め時の乾燥密度と飽和度の一次線形和となることを確認。飽和度依存性を表す係数 ε の影響が乾燥密度依存性を表す係数 λ のそれを上回ると、最小透水係数 $k_{min.}$は最適含水比の湿潤側で発現することになる。実際、重回帰式による推定結果はその実験事実を裏付ける。係数 λ 、 ε 、定数項 γ は材料特性により変化し、現在そのデータを継続取得中である。

③ λ_k/ε_kラインが生ずる理由

λ_k/ε_k ライン上にある供試体で何故透水係数が変化するのかを説明する必要がある。λ_kラインでは乾燥密度が増加するため、透水係数の低下は自明であるが、締固め時の飽和度が変化した際の/ε_kライン上の変化の理由は説明が必要。これらライン上供試体（透水試験終了後）を用いて実体顕微鏡写真を撮影し、画像解析を実施。結果、乾燥側では吸水ベントナイトが離散的に母材に付着し、大きな粒子間隙が残存。湿潤側ではジェル状の吸水ベントナイトが膜状に配置され土粒子間隙を埋めていることを確認。更に、λ_k/ε_k ライン上にある供試体と同一条件で材料混合加水⇒締固め工程の顕微鏡撮像を実施した結果、このような間隙構造の違いが、材料混合加水時の団粒化に素因を、締固め過程における圧延による密実化に誘因を持つことが判明。締固め供試体と長期透水試験終了後供試体の顕微鏡写真は酷似している。

④ λ_k/ε_kライン上供試体での土粒子間隙構造と水の浸透状況の関係把握

③の顕微鏡写真は飽和透水係数を求める透水試験の実施状況を反映していない。そこでライン上供試土を模擬した材料により中性子イメージング実験を実施。含水比分布（≒吸水ベントナイト分布）や軽水⇒重水置換時差分画像を用いて浸透状況の変化を可視化。結果、③の顕微鏡写真と同様の吸水ベントナイトの配置状況を確認し、その供試体で連続的に実施した重水浸透時の可視化から、遮水性の違いが、その配置状況の違いによりもたらされていることを確認。中性子イメージング実験ではベントナイト添加量やベントナイトの膨潤性の違いの影響に関するデータも取得し、②、③で得られている実験的な知見との関連性を再確認した。これにより上記①～④の実験結果を連動・系統的に繋げてのメカニズム説明が可能となった。

⑤ 他の力学・化学実験による再検証

③、④の吸水ベントナイト配置状況の違いの影響が、不飽和一面せん断試験結果においても同様に発現していることから、配置状況の違いを定量的に検証。またζ電位や TDA 計測により遮水性発現と細粒土の膨潤性の関係を明らかにすると共に、飽和時の吸

水ベントナイトの化学的特性が締固め含水比の影響を受けないこと、すなわち飽和透水係数の違いが吸水ベントナイトの化学的特性ではなく、母材への配置状況という物理的要因に支配されていることを確認（化学的要因と物理的要因の分離）。

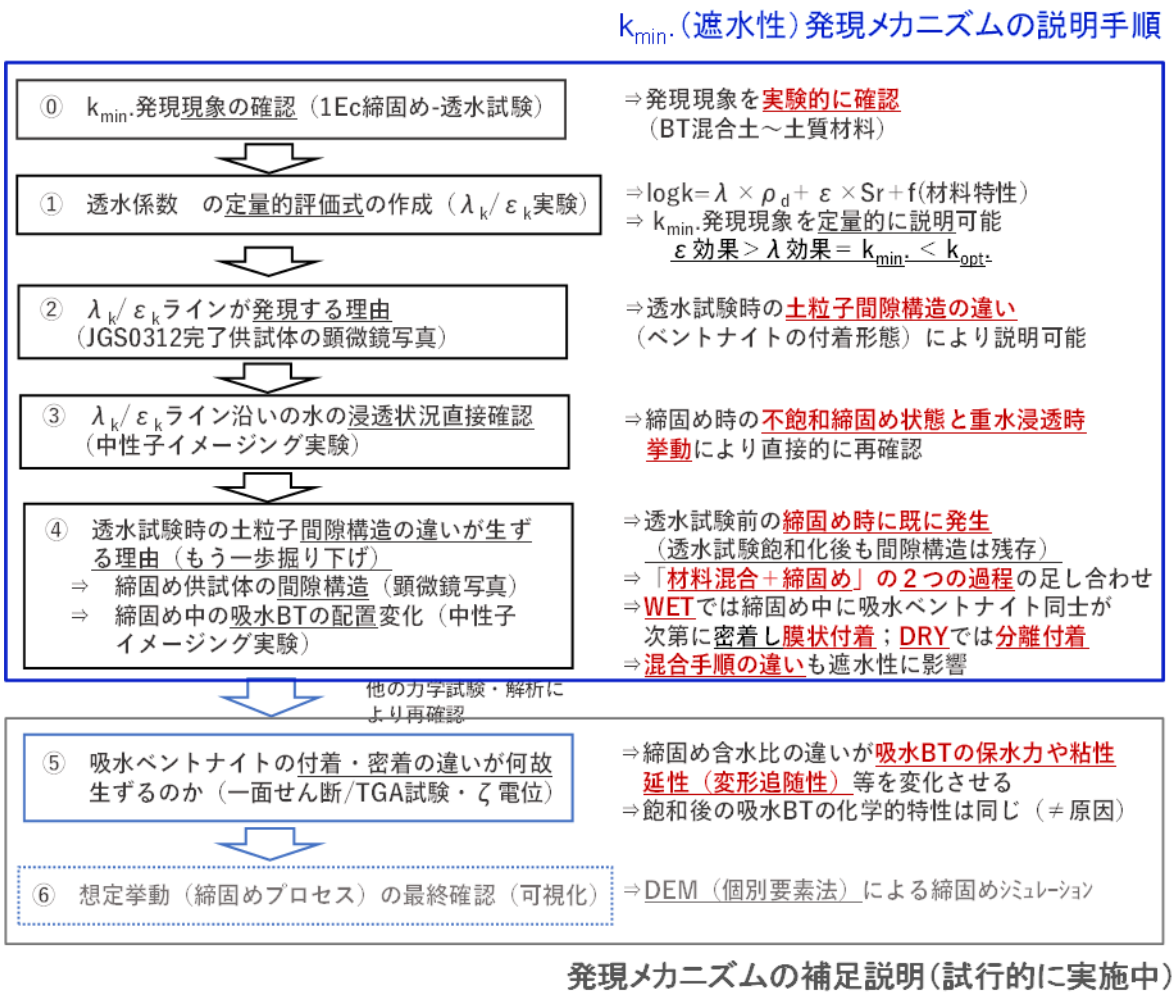


図 6.3-71　ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムに関する現時点での仮説

6.4 現時点での技術的課題と今後の方策（研究計画の見直しと修正）

6.4.1 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、＋高塑性粘土（木節・カオリン）、ベントナイト 10%混合土、ベントナイト 30%混合土、粒度調整材（細粒分添加なし）の 7 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 4 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く。

【実験 A】：1Ec 締固め～透水試験

① 7 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」を実験的に確認した。

② 前年度の結果では、最適含水比における透水係数 $k_{opt.}$と $k_{min.}$の差異がかなり小さく（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問題が残された。一方、本年度実施のカオリン添加や木節粘土添加、あるいは粒度調整材ではその差がより大となる傾向が見られており、差異の理由として母材（購入砂）が均一粒度（単粒）であること、及び逆にベントナイト混合土では細粒分の膨潤性により締固め時飽和度の影響が消失する方向に向かうことが示唆された。

③ 従って、今後、粒度調整材に高塑性の細粒土を混合するなどすれば、透水係数 $k_{opt.}$と $k_{min.}$の差異の問題は次第に解消されていく可能性があり、次年度以降の実験条件に工夫を加える必要がある。

【実験 B】：λ_k、ε_k 実験

① 7 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した。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した（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）。

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、従来の地盤工学の知見（飽和度管理の考え方）と整合することを確認した。

③ 一般土で言われている既往の知見、すなわち、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、これと整合する結果が多いものの、異なる挙動が幾つか散見されている。一方、締固め時乾燥密度に対する傾き λ については、より本質的な指標である間隙比 e による整理のほうが線形性を示しやすく、そのような整理方法も今後視野に置く。

④ 締固め土の透水係数が材料特性（母材の粒度＝単粒性や平均粒径、細粒分混合による粒度変化、及び細粒分や膨潤性のベントナイト添加による変化等）の影響を強く受けていることが示唆された。

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いが、双方ともベントナイトの混合により一般土よりもラインの傾きが低下し、混合率の増加と共にその傾向がより顕著となる結果が得られている。

⑥ 後述する重回帰分析の結果を用い、種々材料に対して実験 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。 $k_{opt.}$ と $k_{min.}$ の実測の差異が比較的小さく、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精緻な評価は難しいが、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等を示唆した（ただし、最適含水比やそ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。10%混合土については、λ_k ライン沿いの供試体についても観察を実施し、透水係数の違いに応じた間隙構造の変化を確認できた。

② 10%混合土に続き、30%混合土についても同様の観察を実施した。実験 B の λ 、ε の傾きの変化に対応する形で、取得された映像も混合率が増えると締固め時飽和度の影響が 10%ほど顕著には見られなかった。

③ 以上、①の締固め時乾燥密度や飽和度の違いと共に,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。またカオリン混合土についても同様の観察を行い、締固め時飽和度の違いによる細粒分の配置状況の変化（ベントナイト混合土と定性的には類似傾向にあること）を確認することができた。

④ 今年度は、取得した顕微鏡画像に対する画像解析を本格的に実施した。λ / ε ライン取得画像に対してグレースケール化⇒二値化（閾値は前年度実施の λ_k 沿い供試体の実測データより設定）を行い、間隙面積率及び間隙面積分布（平均値と標準偏差）のヒストグラムを求めた。結果、湿潤側締固めでは間隙面積率が低下し、同時に間隙面積の平均値 σ と標準偏差 μ が減少（間隙径が細かくかつ均一化）する傾向が得られ、飽和透水係数との良好な整合性を確認できた。

⑤ これにより、ベントナイト混合土に対するλ/εライン沿いの飽和透水係数の変化の原因を、土粒子間隙構造の変化により定量的に説明可能であることが分かった。今後、本結果を一般土に対しても拡大していきたい。

⑥ 長期透水試験（JGS0312）完了後の供試体で観察された土粒子間隙構造がどの時点で形成されているのかを確認する目的で、これと同一材料、同一手法で作製した締固め供試体の顕微鏡撮影を試みた。結果、JGS0312 供試体で観察された構造が締固め時に既に形成されていること、その素因が砂-ベントナイト-水混合時の含水量と団粒化の程度にあることが示唆された。また、本結果はカオリン混合土においても同様であった。粒子間隙構造の形成は、締固めによる密実化において、更に助長されていることも確認できた。

⑦ 以上の結果より、締固めたベントナイト混合土の飽和透水係数の大小が、締固め前の材料混合・加水調整時にその素因を持ち、締固め（誘因）により更に形成されていくプロセスを実験 B により確認することができた。今後、次年度実施の 5%混合土や一般の土質材料に対しても同様のアプローチを試み、締固め土の遮水性発現の統一的なメカニズム解釈や膨潤性ベントナイトの特異性（非膨潤性材料との違い）等についてデータの集積を進めていきたい。

【実験 D】：中性子イメージング実験

① 昨年度より実験手法の最適化検討を進めると共に、アルミ箱を用いて作製した供試体が、透水性を把握する試験体としては不適格である（通常の円筒モールドでなくアルミ製低強度の直方体の箱の中で締固めを十分に行えないため、隅角部からの逸水が不可避となる）ことを結論付けた。このため、今年度は不飽和締固め時のベントナイトの付着状況観察⇒軽水飽和後の重水の供試体内浸透状況の可視化に注力して実験を実施した。

② 実験を、A：ベントナイト混合土のλ/εライン沿い供試体（定性的に再現）での飽和透水係数の違いに対応した重水浸透状況の違いの確認＝実験 B の裏付けデータ取得、B：ベントナイト混合土の高い遮水性の裏付けデータ取得、C：締固め過程における土粒子間隙構造の変化（上記実験 C の⑥に対応）に関するデータ取得の３つに絞った。

③ 目的 A については、まず重水浸透の可視化が可能な母材＋ベントナイト混合率の組み合わせを摸索し、珪砂 2 号＋クニゲルを 9.8：0.2～9.7：0.3 の貧配合に設定した。本供試体において締固め密度と締固め時飽和度を変えた供試体を作製し、不飽和締固め時と重水浸透の可視化を行った。この粗粒母材＋貧配合においてすらベントナイト混合土の遮水性能はかなり高く、可視化には画像解析（軽水飽和時からの差分取得）の助けが必要であった。一方、画像解析の助けを借りることで、λ/εライン沿いの重水浸透状況の変化（実験 B の飽和透水係数の変化に対応）を可視化することができた。

④ 目的 B については、③で述べたベントナイト混合量の設定実験により、ベントナイト混合量の増加に伴い遮水性が次第に発揮されていく様子を可視化した。また、膨潤力の高い Na 型クニゲル混合土と同一条件で膨潤力の低い Ca 型クニボンド、非膨潤性のカオリンを混合した供試体を作製し、重水浸透時挙動の違いを確認することができた。

⑤ 目的 C については、購入砂＋ベントナイト混合土を対象として、実験 C の混合・加水⇒締固め中の土粒子間隙構造の変化を中性子イメージング実験により可視化し、実態顕微鏡とは異なる「含水比分布（＝ベントナイト付着状況）の混合・加水⇒締固めによる変化」を追跡した。結果、実験 C と整合する粒子間隙構造の（締固め密度の増加に対応した）変化を可視化、確認することができた。

【実験 E】: 力学試験（一面せん断試験）及び化学実験

① 不飽和状態のベントナイト混合土を対象とした定圧一面せん断試験に着手した。混合率 10%と 30%で締固め時飽和度を乾燥側から湿潤側まで変えた供試体の強度特性を調べた結果、強度値及びせん断応力～水平変位関係が締固め時飽和度により変化すること、特に湿潤側締固めではせん断強度と共に材料靭性も増大し、吸水ベントナイトの保水性が引張強度や材料延性をもたらしていることが確認された。ベントナイト混合量を増やすとせん断強度も増加し、最適含水比付近において最大値を示すことが明らかとなった。これらの結果は実験 C の実体顕微鏡写真と整合的である。今年度は不飽和締固め供試体を用いたが、次年度以降、飽和供試体についても継続実施していく。

② ①の結果から、締固め時飽和度の違いにより、飽和透水係数以外の力学特性もその影響を受けて変化すること、すなわち土粒子間隙構造の違いが他の力学特性にも同じく影響を及ぼすことを確認した。本結果をサポートする目的で、膨潤性の高いクニゲル V1、低いクニボンド、非膨潤性のカオリンの 3 種類の供試土の TGA/DTA 試験とζ電位測定を実施し、膨潤性の高いクニゲル V1 ほど吸水性能や電荷が著しいこと、これらが飽和透水係数や上記力学試験にも影響を及ぼしていることを確認した。

6.4.2 研究の現状と今後の方向性について

6.4.1 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。更に、実験 B の結果を用いた重回帰分析による回帰式が、実験 A で得られた実測透水係数を精度良く再現できていることを確認し始めている。

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)した。更に、実験 B の結果を用いた重回帰分析を順次実施しており、母材粒度や添加する塑性、膨潤性、細粒分の混合率等によって回帰式の係数や定数項が変化することを確認し始めている。

③ 実験 C：ベントナイト混合土の長期透水試験(JGS0312)実施後の供試体で λ_k 及び 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。更に、取得画像に対する画像解析を行って土粒子間隙構造の定量化を行い、飽和透水係数との関係性を定量的に確認し始めている。砂系供試土では、カオリン粘土添加材料に対する観察を実施し、ベントナイト混合土と類似した傾向を確認した。更に、JGS0312 供試体の前段階である材料混合・加水⇒締固め過程における土粒子間隙構造の変化を追跡し、飽和透水係数を決める土粒子間隙構造がこれら材料準備と締固め中に形成されていることを明らかにしつつある。

④ 実験 D：透水試験装置としてのアルミ箱と簡易通水装置の限界を確認し、不飽和締固め状態と軽水飽和後の「供試体内部（境界部ではない）」の重水浸透状況の確認に注力。λ / ε ライン沿いの供試体での重水浸透状況の違い、ベントナイト独特の遮水性、③と同じ締固め過程における土粒子間隙構造の変化を、中性子イメージング実験により取得した。実験装置や供試土の制約条件の多い実験装置であり、所定の目的に達したと判断し今年度にて実験を終了とする。

⑤ 実験 E：飽和透水係数以外の力学特性に締固め時飽和度の影響が見られることを確認し、土粒子間隙構造の違いが遮水性発現メカニズムの大きな要因となっていることの傍証を得た。同時に膨潤性ベントナイト独特の遮水性を TGA 試験及び ζ 電位計測により裏付けた。

【今後の方向性】

① 実験 A：予定どおり継続する（令和 4 年度に 5 年計画自体を見直しと修正したため、これに従う）
ベントナイト混合土は 5%の貧配合供試体のデータ取得に進む。土質材料は予定どおり、母材・添加する細粒材・混合率をパラメータとして広範囲な条件でデータを取得する。

② 実験 B：予定どおり継続する。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、実験結果の重回帰分析により飽和透水係数に影響を及ぼす因子とその影響度合いが何によって決まるのかを継続的に検討していく。

③ 実験 C: 予定どおり継続するする。実験 A,B の長期透水試験後供試体や、締固め過程における土粒子間隙構造画像の取得を続けていく。画像解析による定量化結果についても、②の重回帰分析結果との定量的な比較を試みていく。

④ 実験 D：令和 4 年度にて完了とする。

⑤ 実験 E：継続して実施する。引き続きベントナイト混合土の飽和供試体での一面せん断試験を実施していく。次年度は圧密特性への影響についても検討を試みる。化学実験については、今年度実施の TGA と ζ 電位計測で終了とするが、有識者の意見を伺い、必要な追加化学実験があれば適宜実施していく。

【令和 5 年度の実施予定内容（研究計画の見直しと修正)】

① 実験 A

・土質系材料：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 1Ec 締固め-透水試験

・ベントナイト混合土：混合率 5%の 1Ec 締固め-透水試験

② 実験 B

・土質系材料：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 5%材料の λ_k、ε_k 実験（JGS0312）

③ 実験 C

・実験 A,B の透水試験終了供試体に対する顕微鏡写真の取得と画像解析の実施

・材料混合⇒締固め過程における土粒子間隙構造の追跡（5%ベントナイト混合土及び代表的な土質材料）

④ 実験 E

・実験 B の λ_k、ε_k 沿い供試体の一面せん断試験（飽和状態)。5%ベントナイト混合土及び代表的な土質材料で実施

・圧密試験及び化学実験については令和 4 年度成果を勘案し、有識者の意見も取り入れて適宜追加実施

⑤ 締固め土の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（継続)。

・ベントナイト混合土に関するメカニズム解釈の現状案を本年度成果として示した。次年以降は、5%ベントナイト混合土のデータによる追加検証に加え、実験 C,E の成果を用いてその多面的な説明を試みる。

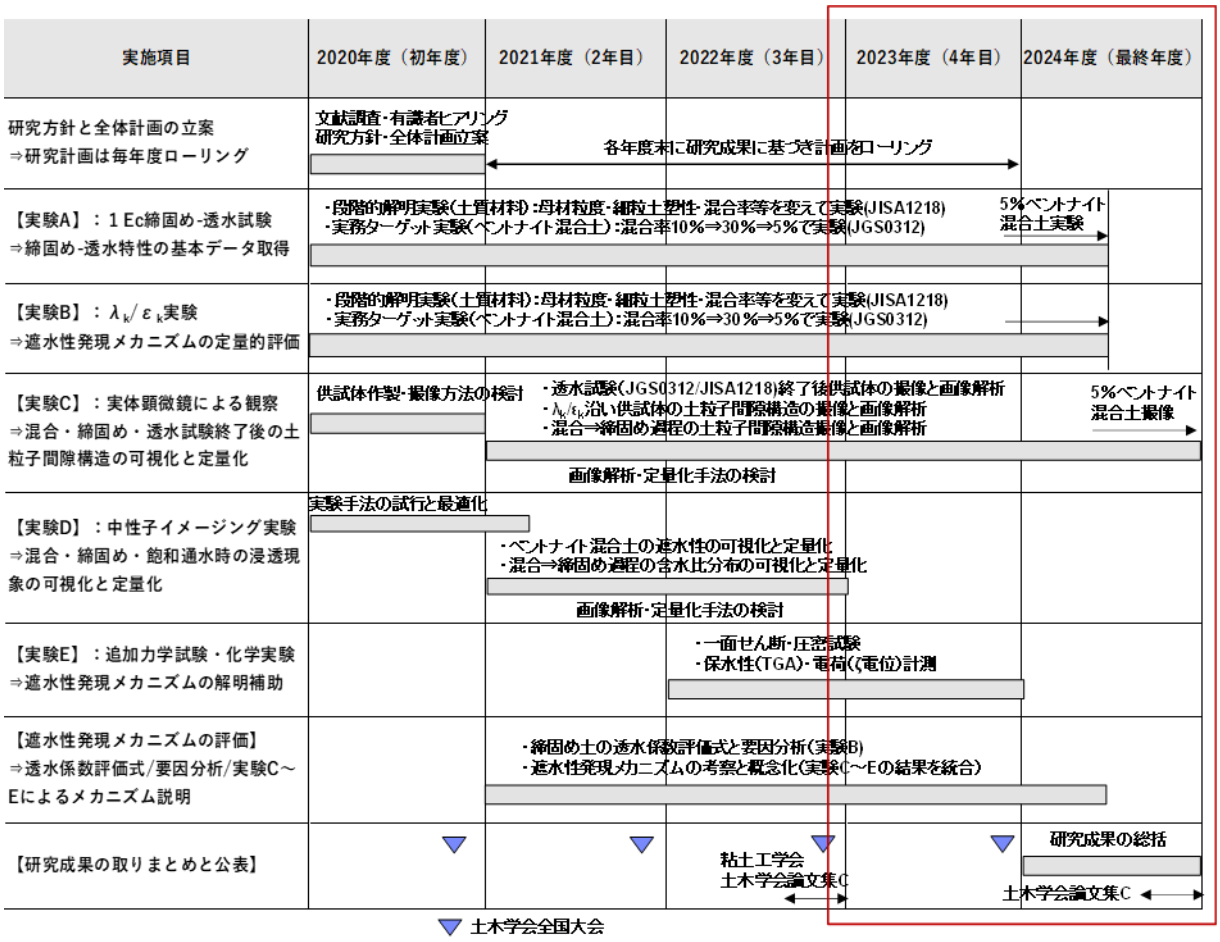
・土質系材料についても、引き続き実施する実験 A～C の結果を踏まえ、ベントナイト混合土と一般土に共通した「汎用的な遮水性発現メカニズム」と、膨潤性ベントナイト独特の「膨潤性細粒土の混合が遮水性発現に及ぼす影響」の２つを区分して説明することに力点を移す。

以上の整理結果を表 6.4-1 に、令和 5 年度と令和 6 年度のロードマップを表 6.4-2 に示す。

表 6.4-1　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5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6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。最適含水比と湿潤側での透水係数の違いは単粒母材を用いている現状ではさほど顕著ではないが、今年度実施の粒度調整材や高塑性細粒分混合土ではその影響が次第に顕著となってきている。ベントナイト混合土では土質材料と異なり、その影響は相対的に小さい（実験Bの結果から説明可能）	今年度の実験結果から「粒度調整材＋高塑性細粒分」の組み合わせでは最小透水係数発現傾向（締固め飽和度依存性）がより顕著になるものと想定されるため、当初計画に従い、引き続き材料特性を変えた実験を実施する。ベントナイト混合土については、混合率5%の貧配合材料のデータ取得を進める	① 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 ② ベントナイト混合土：クニゲル5%混合土の1Ec締固め-長期透水試験(JGS0312)
【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6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（λ/εの線形性など異なる点も散見されるが、原因として単粒母材を用いている事を想定） ③実験結果を基に締固め土の透水係数を乾燥密度と飽和度の一次線形和で定式化し、遮水性発現メカニズムの説明や影響因子の検討を試行 ④重回帰分析によるλ、ε、定数項γと材料特性の関連性を検討中。母材粒度・添加する細粒分の塑性・細粒分の膨潤性の有無・混合率（細粒分含有率）といった諸要因が透水係数に影響を及ぼしている事が明らかになるつつある	①当初計画に従い追加供試土で λ_k ε_k説を継続的に確認 ②母材粒度（平均粒径・均等係数）や添加する細粒土の性状、添加率等の影響を体系的に検討（段階的解明実験） ③ベントナイト混合土については最後のケースとして貧配合5%混合土の長期透水試験を継続実施（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5%のλ_k, ε_k実験（JGS0312）
【実験C】 ：土粒子構造観察（光学顕微鏡）	①ベントナイト混合土の長期透水試験後供試体でλ_k/ε_kライン沿いの土粒子構造観察を実施。透水係数との関係性（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画像解析により土粒子間隙構造の違いを定量化しλ/ε沿いの透水係数の変化との関係性を確認（遮水性発現メカニズムを確認） ③材料混合⇒加水⇒締固め過程における顕微鏡撮影を実施し、②の構造の生成原因とそのプロセスを確認 ④カオリン混合土においても同様の検討を実施し、定性的には同様の土粒子間隙構造の違いが生じている事を確認	今年度の結果に基づき、以下の検討を引き続き実施 ①実験Bのλ/εライン沿い供試体に対する継続的な顕微鏡観察（土質材料およびベントナイト混合土） ②画像解析結果と透水係数の関係性検討（継続） ③膨潤性ベントナイト混合土独自のメカニズムの検討 ④材料混合加水⇒締固め過程の追跡（継続）	①実験Bの供試体に対する顕微鏡観察と画像解析 ②土質系材料に対する土粒子間隙構造観察の更なる試行 ③材料混合加水⇒締固め過程の間隙構造変化に対する検討（本質的メカニズムの追及）
【実験D】 ：中性子イメージング実験	①実験手法の最適化（供試体粒径・アルミ箱・ベントナイト混合率等）を完了 ②ベントナイト混合土の遮水性発現メカニズム（膨潤性細粒土の混合効果）に関するデータ取得（画像解析による定量化） ③λ_k/ε_k沿い供試体（模擬土）での土粒子間隙構造と重水浸透時挙動の関係性確認（画像解析による定量化） ④締固め過程における土粒子間隙構造変化の確認（画像解析による定量化）	当初目的としていたベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの解明、実験B,Cとの関連性把握に関するデータの取得を完了した。青森県六ケ所村での実験は今期で完了し、引き続き取得画像の画像解析と外部発表（粘土学会に投稿予定）を進める	①令和4年度取得画像の画像解析 ②対外発表（査読付き論文）
【実験E】 ：力学・化学追加実験	①ベントナイト混合土（不飽和締固め）の一面せん断試験を実施し、締固め時含水比とベントナイト混合率がせん断特性に及ぼす影響を確認⇒遮水性以外の力学指標にも土粒子間隙構造の違いが影響を及ぼす事を確認 ②カオリン混合土の不飽和締固め⇒飽和⇒圧密試験に着手（土粒子間隙構造の違いが圧密特性に及ぼす影響） ③TGA/DTA実験⇒吸水ベントナイト単体の保水力の違いについて締固め含水比の影響を調べると共に、クニゲル・クニボンド・カオリンの比較（膨潤性や膨潤力の違い）を実施 ④ζ電位計測：③の3供試土について電荷状態の違いを確認（遮水性の違いを説明するためのバックデータの蓄積）	実験B,C結果の分析に足並みを合わせ、遮水性発現メカニズムの説明に必要な力学・化学実験を適宜実施して行く。岩手大学の実験装置の利用も視野に置く	①ベントナイト混合土の一面せん断試験（飽和供試体） ②圧密試験の本格的な実施（土質材料：材料特性を変化） ③化学実験：岩手大学とも協議しながら進める
【透水メカニズムの評価】	①実験A：基本的な締固め-透水特性把握　②実験B：λ_k/ε_k実験による透水係数の定式化及び材料特性が各係数に及ぼす影響検討　③実験C：JGS0312完了後供試体および同一条件での締固め供試体の間隙構造観察とその画像解析　④実験C：材料混合加水⇒締固め工程における土粒子間隙構造の変化の観察とその画像解析　⑤中性子イメージング実験による遮水性発現メカニズム・実験B,Cとの関連性把握、締固め過程での間隙構造変化の観察とその画像解析　⑥追加力学・化学実験による遮水性発現メカニズムの裏付け 等、今期得られた成果により、遮水性発現メカニズムの本質的・統一的評価の目途が立った	引き続き、材料特性を変えた場合の実験A,B,Cの結果を追加し、想定メカニズムの確認や微修正を進めて行く。化学実験については岩手大学実験装置の使用も視野に置く	①実験B：λ/ε実験結果および重回帰分析の継続 ②実験C：実験B完了後供試体および同一条件の締固め供試体での顕微鏡写真取得及び画像解析 ③メカニズム評価：実験Eも織り交ぜながら、想定メカニズムの検証と修正を進める（今期は膨潤性/非膨潤性でのメカニズムの違いにも注力）

表 6.4-2　令和 5 年度と令和 6 年度のロードマップ



6.5 まとめ

本年度得られた知見と成果を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）を実験的に確認した。各供試土に対し、重回帰分析による定量的評価を行い、回帰式による実験結果(飽和透水係数)の再現を確認した。

② 追加される供試土（ベントナイト混合率や土質材料の特性を変更）に対して次年度以降も継続的に確認を進めていく。

(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 7 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した。本結果を用いた重回帰分析により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実施した。

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)。材料特性と回帰式の各係数との関係性を議論することで、締固め土の飽和透水係数に対する統一的な評価式の提案を狙う。

④ ベントナイト混合土についても、最後の 5%混合土に対する 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)、重回帰分析による定量化を試みる。

(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 λ_k/ε_k ライン沿いの構造観察を継続実施し、飽和透水係数と土粒子間隙構造の関係を確認した。

② 土質系供試土でも代表的な材料に対して λ_k/ε_k 沿いに構造の違いを観察し、乾燥⇒最適⇒湿潤による構造の違いを確認した。

③ 取得画像に対する画像解析を実施し、土粒子間隙構造を定量化した上で、透水特性との関連性を議論した。

④ 引き続き、実験 A,B の透水試験終了後、及び同一条件での締固め供試体に対して顕微鏡観察を実施し、画像解析による定量化及び透水特性との関連性の吟味を進めていく。

(4) 【実験 D】

① λ_k/ε_k 沿いの供試体条件を模した供試土を用いて、締固め時の乾燥密度と飽和度の違いが、飽和透水試験時に対応する軽水飽和⇒重水浸透時の挙動にも同様の影響を及ぼしていることを確認した。

② ①の違いが、締固め時の吸水ベントナイトの付着状態の違いによりもたらされていることを、前段階である不飽和中性子イメージング画像により確認した。

③ ベントナイト混合土独特の遮水性の発現状況を可視化するために、ベントナイト混合率、締固め時飽和度、添加する材料の膨潤性（Na 型、Ca 型、非膨潤）を変えた実験を実施し、これら諸要因の影響を確認した。

④ 締固め過程における土粒子間隙構造の変化を「含水比分布≒吸水ベントナイトの付着状態」により可視化する目的で、締固め時飽和度を変えたベントナイト混合土の締固め中の中性子イメージング画像の取得を実施した。その画像解析結果から、締固め中の土粒子間隙構造の形成過程を定量的に示した。

⑤ 以上の成果により、今年度で実験 D のデータ取得を完了した。

(5) 【遮水性発現メカニズムの評価】

① 上記実験 A～D の結果を用いて、ベントナイト混合土の遮水性発揮メカニズムについての最初の仮説を提示した。また新たに実験 E（他の力学特性及び化学実験）を実施することで、想定メカニズムの裏付けデータの取得に着手した。

② ①の枠組みを次年度以降、5%ベントナイト混合土で検証する。また、これを援用して土質系材料に評価を拡張すると共に、共通（汎用）メカニズムと材料依存（膨潤性の影響を分離）メカニズムの両面での評価を試みていきたい。

第 6 章の参考文献

[1] 小峯秀雄・緒方信英 : 高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の透水特性, 電力中央研究所報告 U00041　平成 13 年 3 月
[2] 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.
[3] 小峯秀雄 : 化学・物理　7.土の化学・物理と高レベル放射性廃棄物処分、地盤工学会誌 59-3　講座 2011
[4] 龍岡文夫ら : 第 9 回盛土の締固め⑨、基礎工 2014.3、連載 : 地盤工学・技術ノート,pp88-92.

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

堆積軟岩を対象とし鉛直孔（深度－200m 程度まで）で 3 次元初期地圧が測定可能な手法として、応力解放法の一種である孔壁ひずみ法と円錐孔底ひずみ法を応用した「円錐孔壁ひずみ法」に関する試験装置の詳細設計と製作を行った。円錐孔壁ひずみ法を実用化するにあたり最も重要な項目の一つとなるストレインセルの接着に関しては、ストレインセルの接着性能や接着方法について室内検証試験により検討を進め、接着剤注入装置を設計、試作した上で、接着剤注入装置による円錐孔壁への接着剤の注入手順をトレースし、動作性に問題が無いことを確認した。併せて、接着剤候補として 2 種類（HIC 接着剤、エポキシ樹脂接着剤）を選定し、経時的な物性変化等を室内試験により検討した。両者ともそれぞれ優れた特徴を有していることから、次年度の追加検討により最終選定を行うこととした。更に、青森県六ヶ所村の現場フィールドにて、初期地圧測定に係る一連の作業性の確認を主目的とした浅深度現場検証試験を実施し、設計・製作を進めている測定装置とその測定方法・手順に大きな問題は認められず、開発の方向性が妥当であることを確認するとともに、改良点を明らかにした。

初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討では、原位置試験と室内検証試験のシミュレーションを実施した。原位置試験のシミュレーションとして、令和 3 年度に実施した水圧破砕法試験シミュレーションの再検討を実施した。三軸圧縮試験の応力 - ひずみ曲線は精度良く再現できたが、水圧破砕法試験による破砕圧や微視クラックの発生傾向は、原位置試験と異なる結果となった。一方、室内検証試験のシミュレーションでは、令和 3 年度の要素試験シミュレーションに引き続き、室内検証試験を模擬したシミュレーションを実施し、岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明する解析手法（DEM 解析）の適用性を検討した。今年度は、DEM 解析結果から応力・ひずみを直接評価する検討を実施した。岩盤ブロックを用いた室内オーバーコアリング試験のシミュレーションを実施し、薄肉部岩盤のひずみを抽出して分析した結果、オーバーコアリングの掘進に伴うひずみ挙動が、ブロック試験結果と傾向が類似することがわかった。応力についても別途抽出することができ、応力・ひずみを直接評価する方法の妥当性を確認した。今後、計画されている原位置オーバーコアリング試験のシミュレーションを実施して、DEM 解析手法の適用性検討を行う予定である。また、原位置試験の再現が課題として残った水圧破砕法試験と合わせて、オーバーコアリングのシミュレーションに対して、破壊規準も含めたパラメータ設定、解析モデルの検討を行う予定である。

(2) 地下水流動評価技術の調査

前年度までに実施した調査検討結果を踏まえ、低レベル放射性廃棄物の中深度処分に関わる規制基準が近年改訂整備されたことを受けて、それらに対応するために必要な技術のうち、特に地下水流動評価技術（計測/測定及び解析技術）について、地下水流動評価に係る要求事項の再整理とそれらへの対応に必要な重要技術項目の抽出、現状での技術開発状況の調査・整理並びに今後の技術的課題の検討・整理を行った。

また、それらの調査結果をもとに、中深度処分の新規制基準における地下水流動評価に関連する要求事項への対応を処分事業の段階的展開も考慮して実施するために求められる地下水流動・流況の調査・解析・評価や、地下水環境の監視・測定モニタリングに必要な調査・測定・試験・解析及び評価技術を体系的に整理するとともに、それらを“技術マップ”として概略的な取りまとめ作成を行った。この技術マップでは、地下水流動の調査・解析・評価と地下水等の監視測定モニタリングという技術分類毎に、大項目、目的、抽出した技術項目、対象場所、適用時期、関連規制基準、現状技術の具体例・技術情報、出典、今後の技術課題の項目にて表形式にとりまとめた。

(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については、前年度構築した地震計測システムで取得した地震動データを活用して、引戻し解析手法の改良（入力地震動設定）に関する検討を実施した。

入力地震動設定の検討においては、解析用地盤物性値の減衰定数の周波数依存性の影響及び逆解析による物性値の同定について分析を行ったが、現状の問題となっている地表と地下における解析結果と観測結果の不整合の改善までには結びつかなかった。そこで、現地に設置した地震計の地表と地下での伝達関数の特徴を分析し、引戻す前の観測地震動に対して、あらかじめ加速度振幅に補正値 α を乗じたデータを 1 次元の引戻し解析に入力する方法を提案した。この方法は、限定的な地点（当該サイトのみ）かつ限定的な地震動（低周波数帯で増幅が小さい地震動）のみでの適用にはなるが、地表の観測地震動の加速度振幅を 0.7 倍程度にして引戻すことで、地下における加速度レベルを再現できることがわかった。また、当該サイトの観測地震動データは、地形効果及び斜め入射の影響を殆ど受けておらず、地質構造及び地盤物性の精度向上を図ることで、1 次元の引戻し解析により入力地震動を設定できる見通しが得られた。

今後は、引き続き地質構造及び地盤物性の精度向上を図り、また追加される地震動データを用いて上記手法の適用性の精査を行う。更に、空洞内の試験施設に設置している地震計を利用して、地震時の施設挙動の再現性についても検討を進める予定である。

地震動観測については、前年度構築した地震計測システムにより記録された地震動データの回収及びシステムのメンテナンスを実施し、現在 5 台全ての地震計が稼働している。次年度も継続して地震計測システムを運用する予定である。

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

規制基準における設計プロセスに係る要求を念頭に置き、その中で特に人工バリアの設計について検討し、それをできるだけ具体化した形で示すことにより、人工バリアの設計等に係る選択肢をどのように設定するかについての一つの考え方を提案した。検討ではまず、安全機能の整理として中深度処分事業における段階を閉鎖措置前と閉鎖措置後に大別した上で要求される機能を整理し、細分化した機能とそれを担保する構成要素（廃棄体容器／人工バリア／天然バリア）を対応付けた。並行して、天然バリアと人工バリアの代表的因子を明らかにし、長期の安全確保（被ばく線量）の観点からその成立条件を評価するために、感度解析を実施した。感度解析結果等に基づき、要求される機能と構成要素を再整理することにより、天然バリア性能に応じた人工バリアの設計等に係る選択肢の設定についての考え方を例示した。

また、規制条件との対応を想定し、処分場の設計において対処可能と想定される条件を取りまとめるとともに、長期安全性の観点から、処分場の基本的な概念や人工バリアの概念の構築を目標とする感度解析の位置づけを検討した。更に、感度解析モデルに必要となる条件、特に、施設浸透水量を感度解析モデルに組み込むための方法を提案した。

(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 4 年度は、初年度に策定した 5 ヵ年計画に従い、実験 A～実験 D を通じて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。実験 A は、最も基本的な情報を得るための室内締固め－透水試験である。実験 B 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の実験である。実験 C は電子顕微鏡による締固め土の構造観察、実験 D は中性子イメージング実験となる。

実験 A からは母材に混合した細粒土（珪砂粉、木節粘土、カオリン、ベントナイト）の種類や混合率の違い等が締固め特性と透水特性に及ぼす影響が、実験 B からは締固め時の乾燥密度と飽和度の違いが透水特性に及ぼす影響が、実験データとして取得された。また、実験 C と実験 D からは透水特性を規定する主要な因子の一つと考えられている空隙構造に係る画像データを得た。これらに基づき、実験 A～D の結果を用いてのベントナイト混合土の遮水性発現メカニズムの説明手順について検討し、最初の仮説を提示した。

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。

5ヵ年にわたる本事業の3年目となる令和4年度は、初年度に策定した事業の全体計画に基づき、前年度までの検討結果を踏まえて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

室内検証試験と装置の設計検討

（第２章 2.1.2 参照）に係る試験データ

軽石凝灰岩の一軸繰り返し試験結果（HIC 接着剤でゲージ貼付）

軽石凝灰岩ブロック RO-6 から三軸載荷試験後に掘削して採取した円柱供試体を対象に、HIC 接着剤によりひずみゲージを貼り付けて、一軸繰り返し試験を実施した。なお、接着が難しく、縦方向（鉛直方向）は 2 枚、横方向（周方向）は 1 枚でのひずみ評価とした。

ヤング率やポアソン比は、地盤工学会基準 JGS3751-2012 円錐孔底ひずみ法の 5.4 節の c）に従って算出した。

表 1　一軸繰り返し試験結果一覧

供試体番号		供試体高さ (mm)	供試体直径 (mm)	質量 (g)	湿潤密度 ρ (Mg/m^3)	ヤング率 E (MN/m^2)	ポアソン比 ν
1	RO-6-U3	109.18	49.43	309.42	1.477	996	0.39

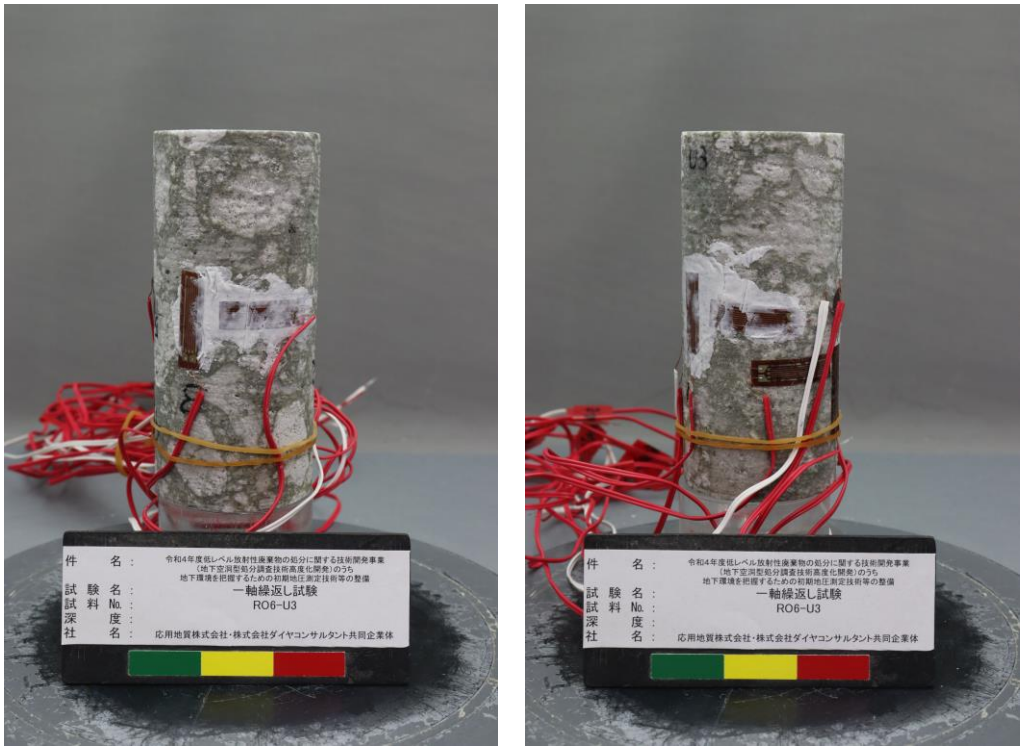


図 1　試験前の供試体（2 方向から撮影）

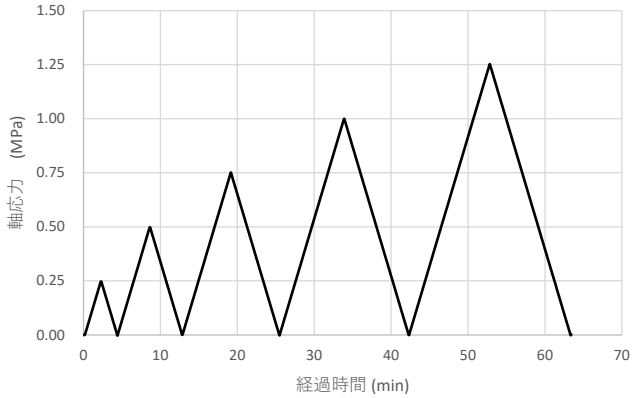


図２　載荷パターン

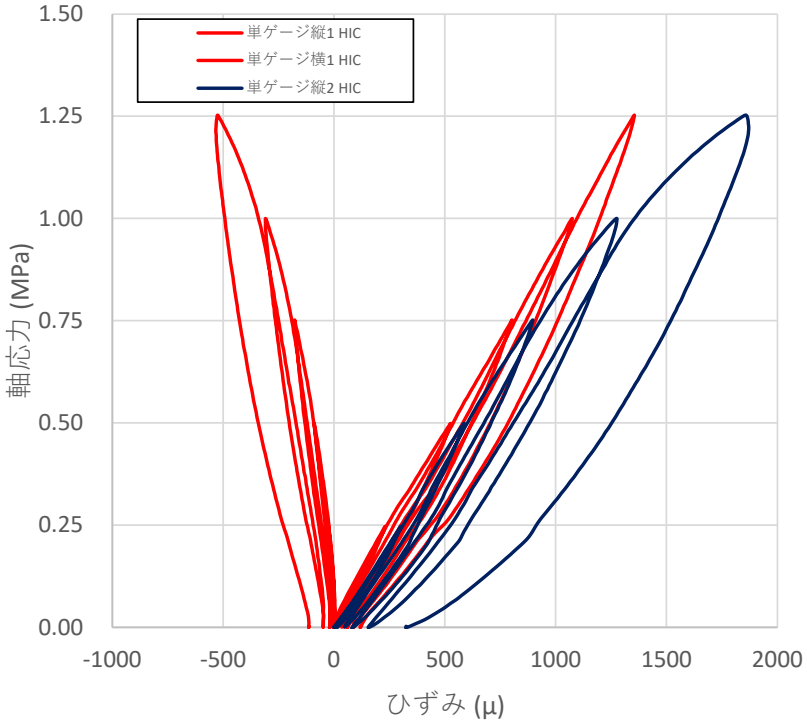


図３　一軸繰り返し試験の応力-ひずみ曲線

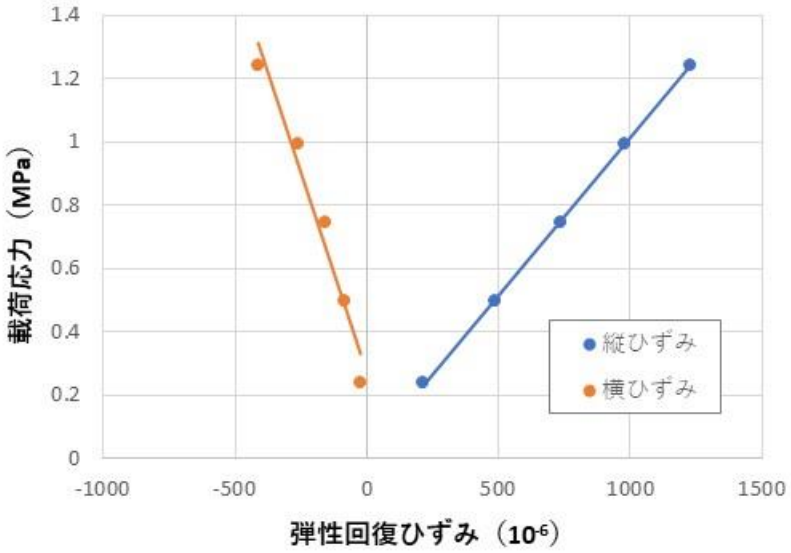


図４　載荷応力と弾性回復ひずみの関係

大谷石供試体の一軸圧縮試験結果

表 1 一軸圧縮試験結果一覧

供試体番号		供試体高さ (mm)	供試体直径 (mm)	質量 (g)	湿潤密度 ρ (Mg/m^3)	一軸圧縮強さ q_u (MN/m^2)	ヤング率 E_{50} (MN/m^2)	ポアソン比 ν
1	OY-A	103.82	49.64	-	-	8.470	3,759	0.28
2	OY-B	108.77	49.56	366.02	1.745	8.780	3,408	0.20
	平均値					8.625	3,584	0.24

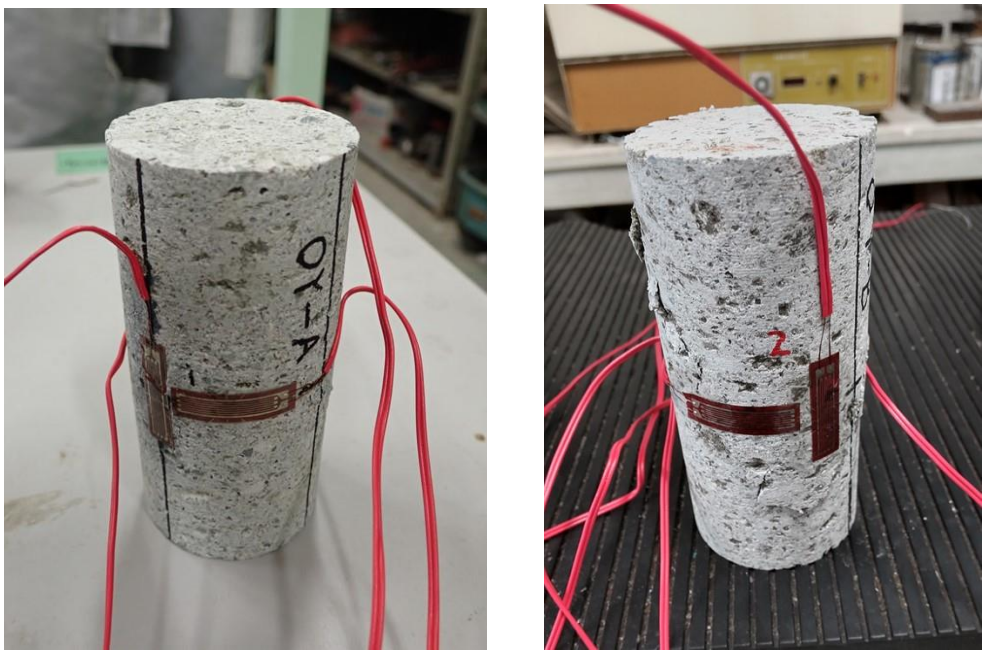


図 1　一軸圧縮試験後の供試体（左：OY-A、右：OY-B）

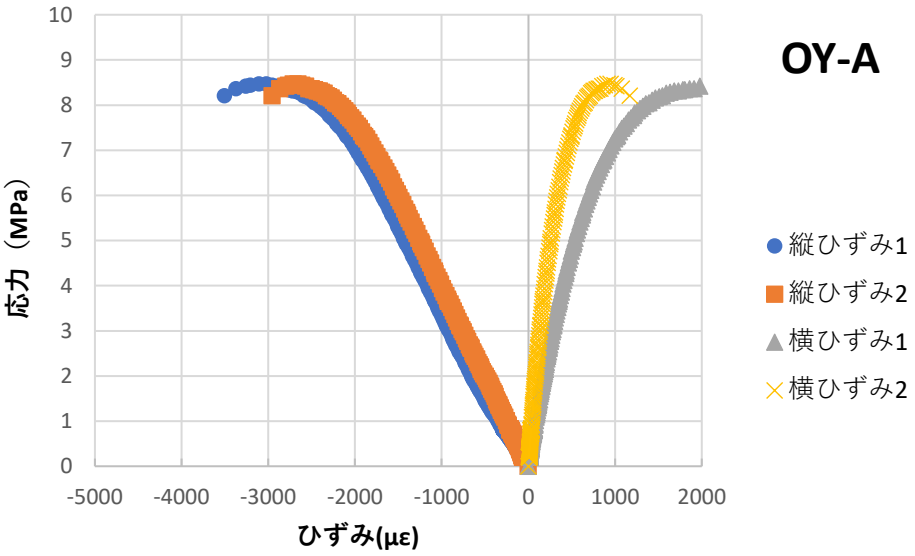


図 2　応力-ひずみ曲線（大谷石 OY-A）

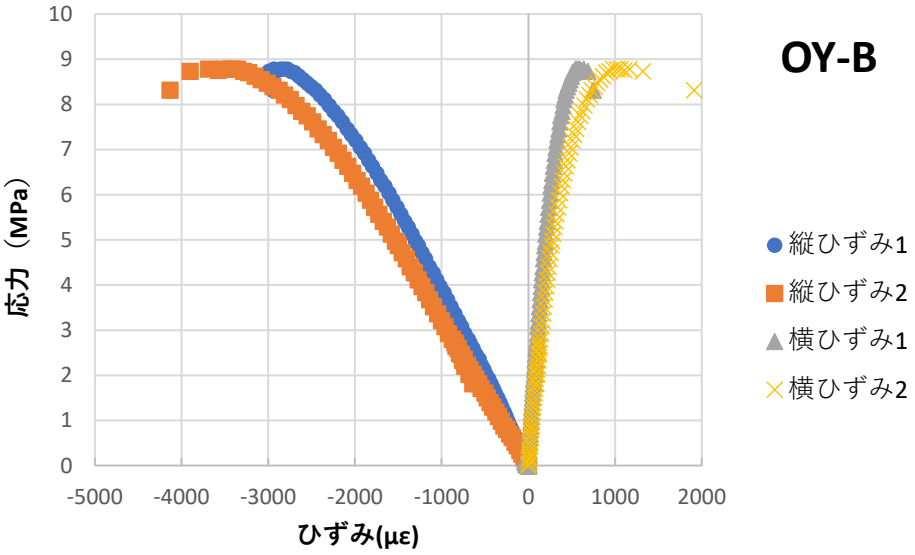


図 3　応力-ひずみ曲線（大谷石 OY-B）

~~JGS 0520~~	軟岩の三軸試験の供試体作製・設置	

調査件名　令和4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）のうち 地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備　　試験年月日　2023年2月23日

試料番号（深さ）　RO6-T　　試験者

供試体を用いる試験の基準番号と名称	JGS 2533-2020 軟岩の圧密非排水（$\overline{CU}$）三軸圧縮試験方法

試料の状態[1]		ボーリングコア		土粒子の密度 ρ_s[3] Mg/m³		
供試体の作製[2]		端面カット		液性限界 w_L[4] %		
岩石名		軽石凝灰岩		塑性限界 w_P[4] %		
供試体 No.		1	2	3	4	
初期状態	直径 mm	49.34	49.51	49.33	49.43	
		49.48	49.46	49.39	49.38	
		49.54	49.57	49.36	49.29	
	平均直径 D_i mm	49.45	49.51	49.36	49.37	
	高さ mm	99.28	100.39	99.87	100.25	
		98.77	100.46	99.98	100.28	
		98.66	100.27	100.14	100.12	
	平均高さ H_i mm	98.90	100.37	100.00	100.22	
	体積 V_i mm³	1.899E+05	1.932E+05	1.914E+05	1.919E+05	
	含水比 w_i %	70.0	78.2	77.7	74.8	
	質量 m_i g	282.38	280.31	282.96	277.41	
	湿潤密度 ρ_{ti}[3] Mg/m³	1.487	1.451	1.479	1.446	
	乾燥密度 ρ_{di}[3] Mg/m³	0.875	0.814	0.832	0.827	
	間隙比 e_i[3]					
	飽和度 S_{ri}[3] %					
	相対密度 D_{ri}[3] %					
設置・飽和過程	軸変位量の測定方法	外部変位計によって測定				
	設置時の軸変位量 mm					
	飽和過程の軸変位量 mm					
	軸変位量 ΔH_i[5] mm					
	体積変化量の測定方法	軸変位量~~及び直径~~の変位量から計算				
	設置時の体積変化量 mm³					
	飽和過程の体積変化量 mm³					
	体積変化量 ΔV_i[5] mm³					
圧密前（試験前）	高さ H_o mm	98.900	100.370	100.000	100.220	
	直径 D_o mm	49.450	49.510	49.361	49.370	
	体積 V_o mm³	1.899E+05	1.932E+05	1.914E+05	1.919E+05	
	乾燥密度 ρ_{do}[3] Mg/m³	0.875	0.814	0.832	0.827	
	間隙比 e_o[3]					
	相対密度 D_{ro}[3] %					
炉乾燥後	容器 No.					
	(炉乾燥供試体+容器)質量 g					
	容器質量 g					
	炉乾燥質量 m_s g					
試料名		RO6-T1	RO6-T2	RO6-T3	RO6-T4	
採取深度						

特記事項

1）試料の採取方法、試料の状態（塊状、凍結、ときほぐされた）等を記載する。
2）トリミング法、負圧法の種別、凍結試料の場合は解凍方法等を記載する。
3）必要に応じて記載する。
4）必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度、最大乾燥密度等を記載する。
5）設置時の変化と飽和過程および*B*値測定過程での変化を合わせる。

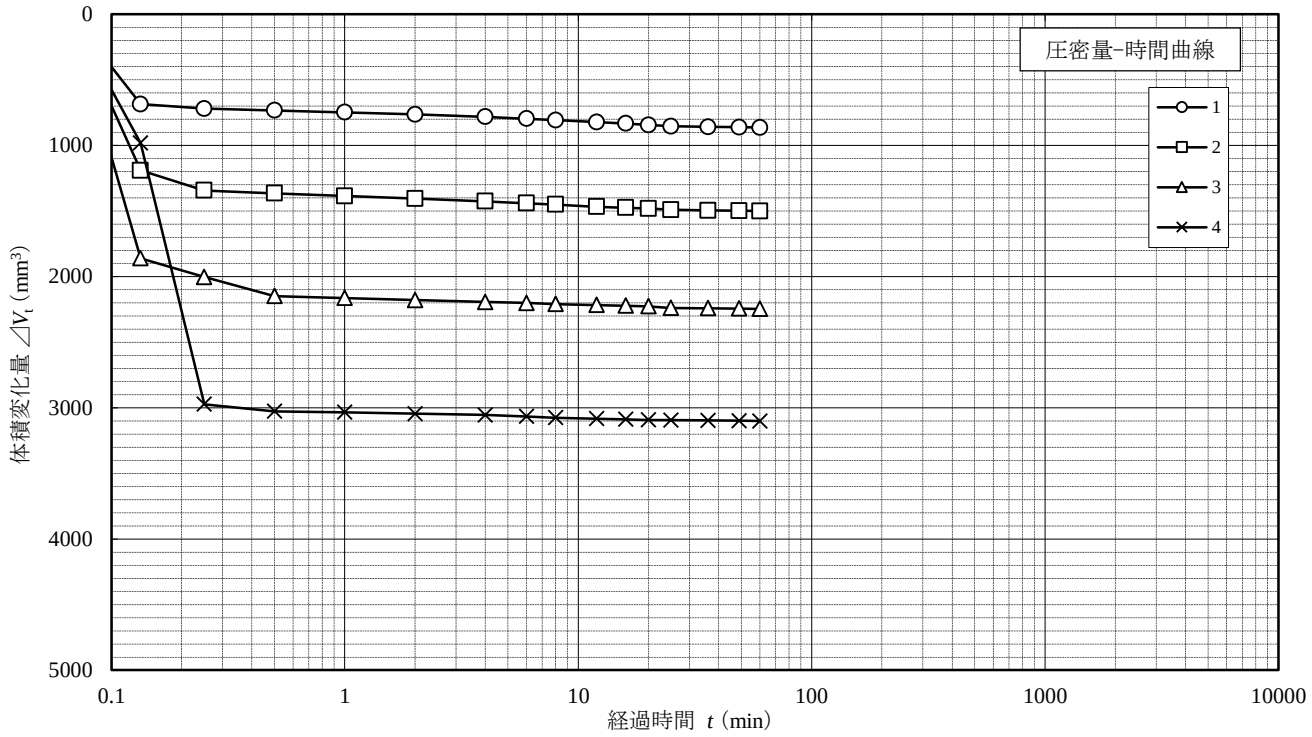
［1kN/m²≒0.0102kgf/cm²］

JGS 2533	軟岩の三軸圧縮試験［$\overline{CU}$］	〔 圧密前、圧密後 圧密量－時間曲線 〕	

調査件名　令和4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）のうち 地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備　　試験年月日　2023年2月23日

試料番号（深さ）　RO6-T　　試験者

試料の状態 1)		ボーリングコア	液性限界 w_L 4) %			
供試体の作製 2)		端面カット	塑性限界 w_P 4) %			
岩石名		軽石凝灰岩	圧密中の排水方法		側方・両端面ペーパードレーン	
土粒子の密度 ρ_s 3)	Mg/m³					
供試体 No.		1	2	3	4	
試験条件	セル圧 σ_c MN/m²	0.400	0.900	1.400	1.900	
	背圧 u_b MN/m²	0.300	0.300	0.300	0.300	
	圧密応力 σ'_c MN/m²	0.100	0.600	1.100	1.600	
圧密前	高さ H_o mm	98.90	100.37	100.00	100.22	
	直径 D_o mm	49.45	49.51	49.36	49.37	
	間隙比 e_o 3)					
圧密後	圧密時間 t_c min	60	60	60	60	
	体積変化量 ΔV_c mm³	863	1500	2245	3101	
	軸変位量 ΔH_c mm	0.104	0.212	0.316	0.439	
	体積 V_c mm³	1.891E+05	1.917E+05	1.891E+05	1.887E+05	
	高さ H_c mm	98.80	100.16	99.68	99.78	
	炉乾燥質量 m_s g	166.11	157.30	159.23	158.70	
	乾燥密度 ρ_{dc} Mg/m³	0.879	0.820	0.842	0.841	
	間隙比 e_c 3)					
間隙圧係数 B	等方応力増加量 $\Delta\sigma$ MN/m²	50.0	50.0	50.0	50.0	
	間隙水圧増加量 Δu MN/m²	49.5	48.0	47.5	48.0	
	測定に要した時間 min	1	1	1	1	
	B 値	0.99	0.96	0.95	0.96	



特記事項

1) 試料の採取方法、試料の状態（塊状、凍結、ときほぐされた）等を記載する。
2) トリミング法、負圧法の種別、凍結試料の場合は解凍方法等を記載する。
3) 必要に応じて記載する。
4) 必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度 最大乾燥密度等 を記載する。

［1kN/m²≒0.0102kgf/cm²］

JGS 2533	軟岩の三軸圧縮試験[$\overline{CU}$](応力-ひずみ曲線)	

調査件名　令和4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）のうち 地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備　　試験年月日　2023年2月23日

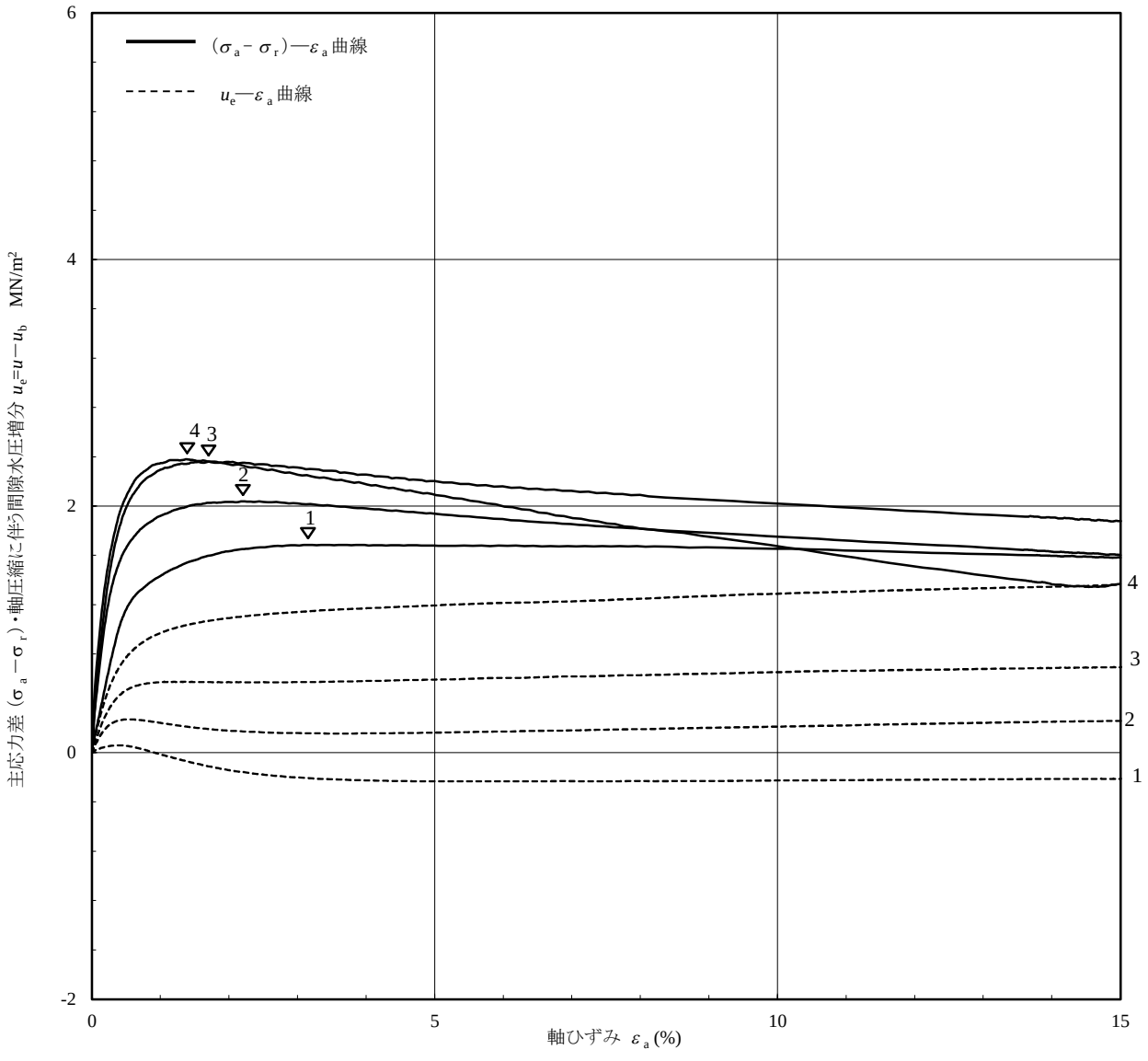
試料番号（深さ）　RO6-T　　試験者

岩石名	軽石凝灰岩
液性限界 w_L[1] %	
塑性限界 w_P[1] %	
ひずみ速度 %/min	0.01

特記事項

軸変位測定は外部変位計による1)必要に応じて粘性土の場合は液性限界、塑性限界、砂質土の場合は最小乾燥密度、最大乾燥密度を記載する。

供試体 No.			1	2	3	4	5
圧密応力		MN/m^2	0.100	0.600	1.100	1.600	
背圧 u_b		MN/m^2	0.300	0.300	0.300	0.300	
主応力差最大時	圧縮強さ $(\sigma_a-\sigma_r)_{max}$	MN/m^2	1.69	2.04	2.36	2.38	
	軸ひずみ ε_{af}	%	3.2	2.2	1.7	1.4	
	$\overline{CU}$ 間隙水圧 u_f	MN/m^2	0.094	0.473	0.873	1.34	
	$\overline{CU}$ 有効軸方向応力 σ'_{af}	MN/m^2	2.00	2.47	2.89	2.94	
	$\overline{CU}$ 有効側方向応力 σ'_{rf}	MN/m^2	0.306	0.427	0.527	0.560	
変形係数 E_0		MN/m^2	310	823	882	1220	
変形係数 E_{50}		MN/m^2	263	554	643	772	
残留強さ $(\sigma_a-\sigma_r)_r$		MN/m^2	1.58	1.60	1.88	1.34	
ポアソン比 ν			0.49	0.47	0.45	0.47	
供試体の破壊状況							



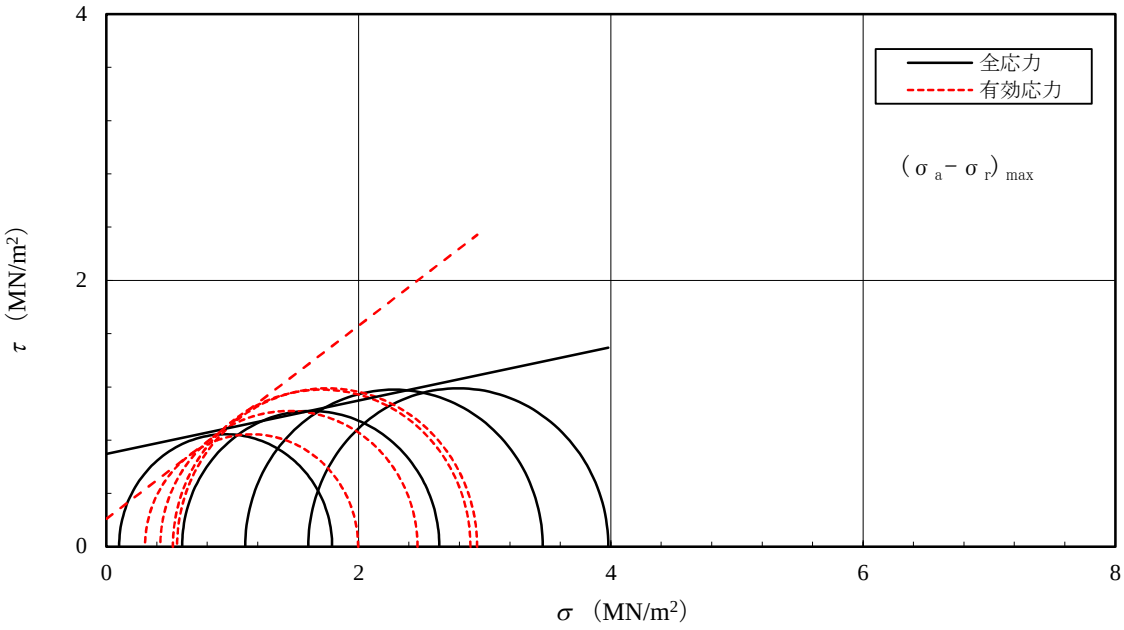
[1kN/m^2≒0.0102kgf/cm^2]

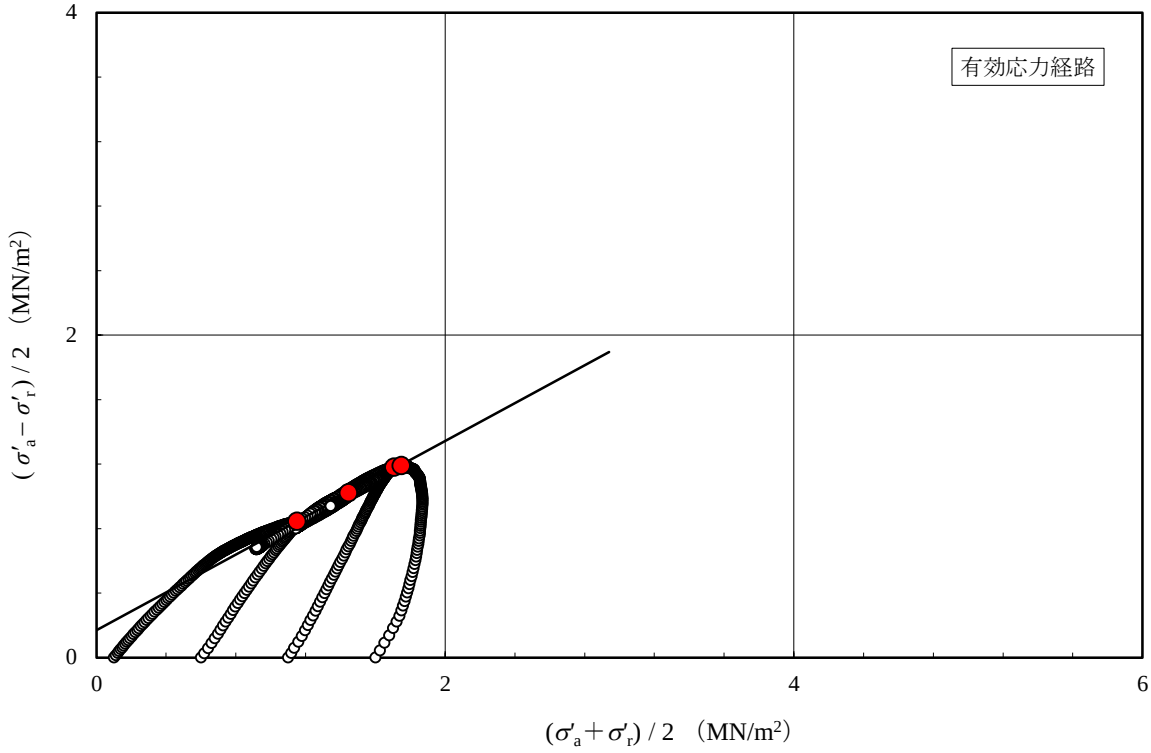
JGS 2533	軟岩の強度特性　軟岩の三軸圧縮試験［$\overline{\mathrm{CU}}$］	

調査件名　令和4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）のうち 地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備　　試験年月日　2023年2月23日

試料番号（深さ）　RO6-T　　試験者

強度定数 ＼ 応力範囲	全応力 c_{cu} MN/m^2	全応力 ϕ_{cu} °	全応力 $\tan\phi_{cu}$	有効応力 c' MN/m^2	有効応力 ϕ' °
主応力差最大時	0.70	11.3	0.200	0.21	36.0





特記事項

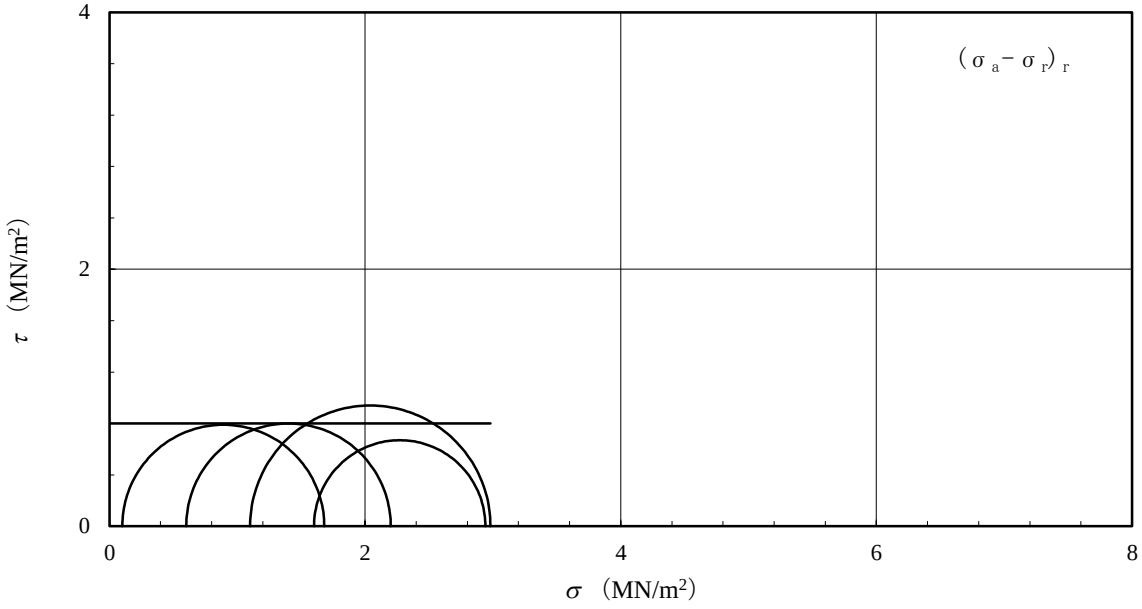
［1kN/m^2≒0.0102kgf/cm^2］

JGS 2533	軟岩の強度特性 軟岩の三軸圧縮試験 [$\overline{CU}$]	

調査件名　令和4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）のうち 地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備　　試験年月日　2023年2月23日

試料番号（深さ）　RO6-T　（0.00m ～ 0.00m）　試験者　0

強度定数 ＼ 応力範囲	全応力			有効応力	
	c_{cur} MN/m^2	ϕ_{cur} °	$\tan\phi_{cur}$	c' MN/m^2	ϕ' °
残留時	0.80	0.0	0.000		



特記事項

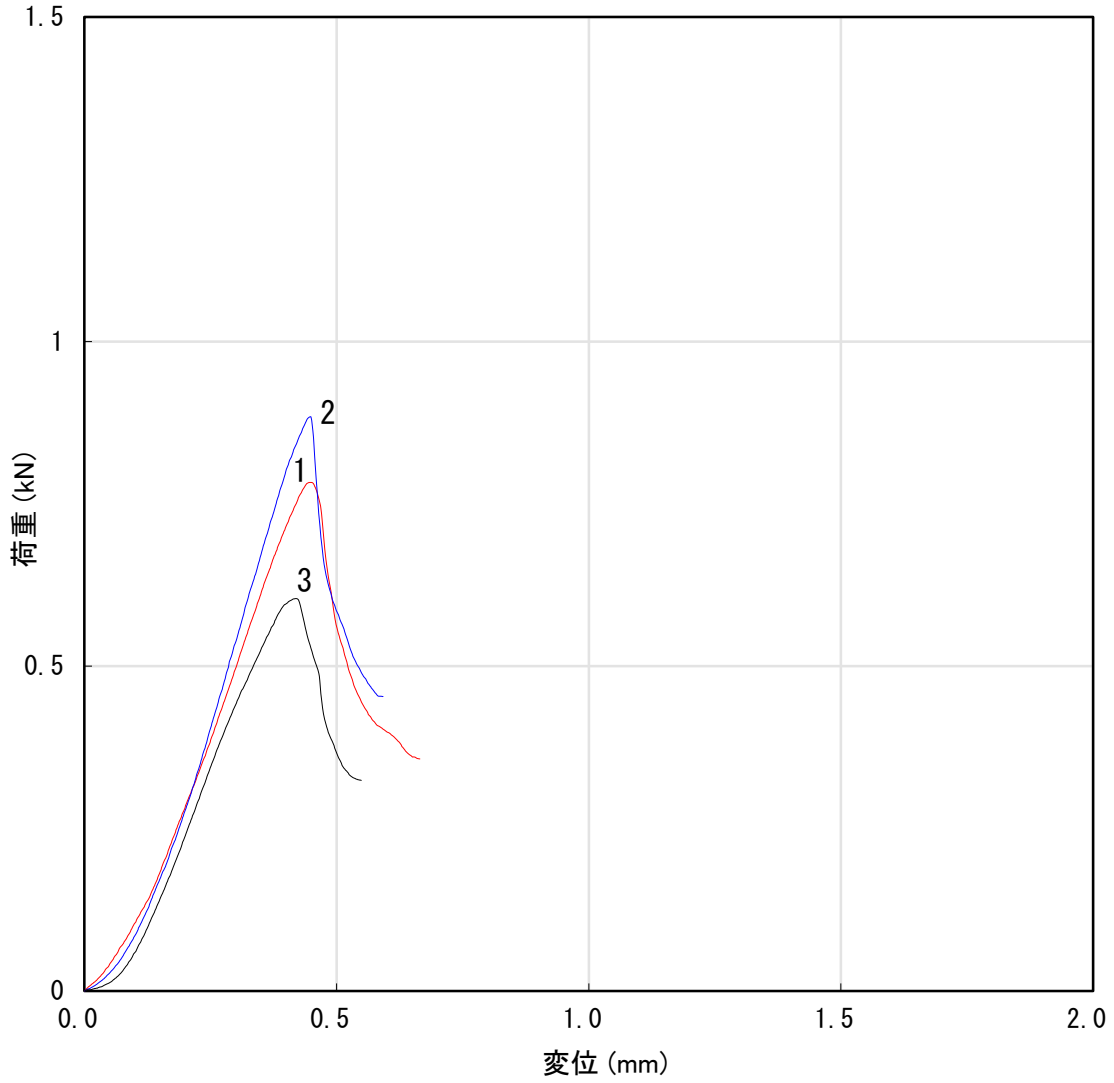
[1kN/m^2≒0.0102kgf/cm^2]

圧裂引張り試験結果一覧表

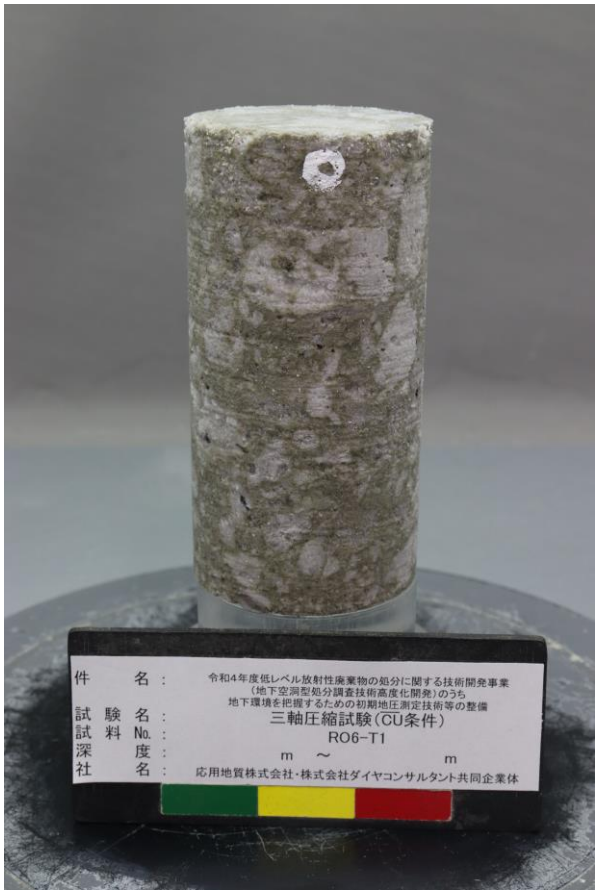
件　名：　令和４年度低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業
（地下空洞型処分調査技術高度化開発）のうち
地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備

試験日　2023年2月16日
試験者

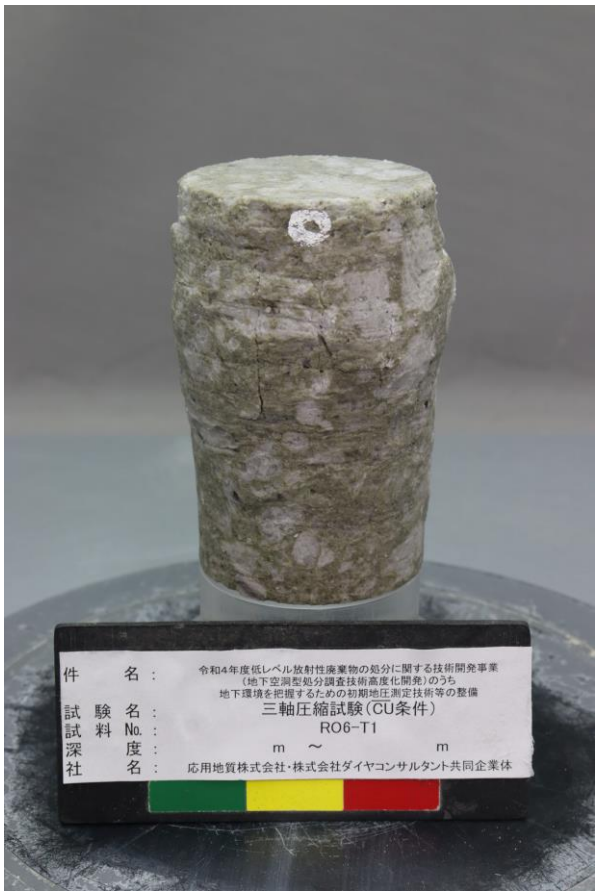
	試料番号	採取深度 [m]	試料長 L [mm]	試料径 D [mm]	湿潤密度 ρ_t [Mg/m^3]	含水比 w [%]	破壊荷重 P [kN]	引張り強さ σ_t [MN/m^2]
1	RO6-S1		45.52	49.45	1.461	75.6	0.783	0.221
2	RO6-S2		44.91	49.39	1.450	81.5	0.884	0.254
3	RO6-S3		47.22	49.47	1.467	64.3	0.604	0.165

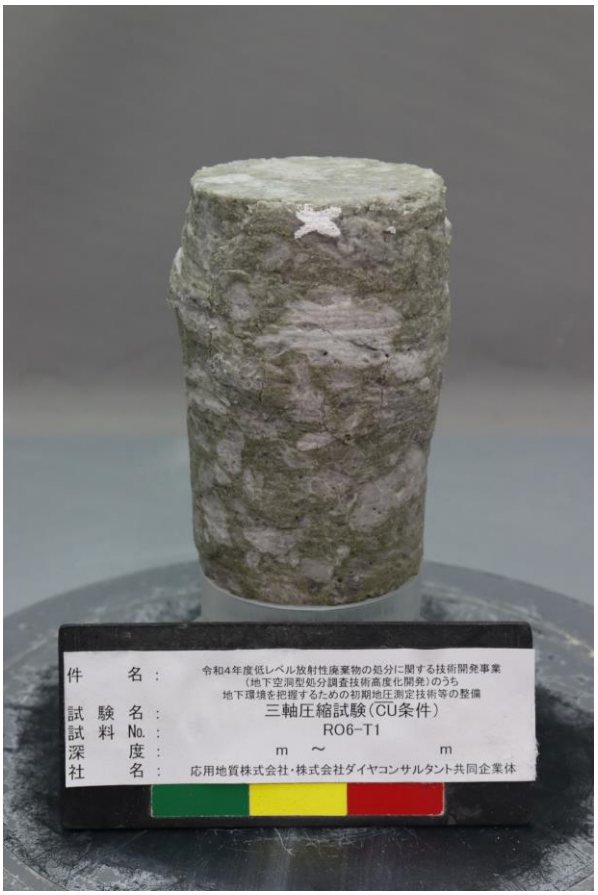


三軸圧縮試験　供試体写真



試験前



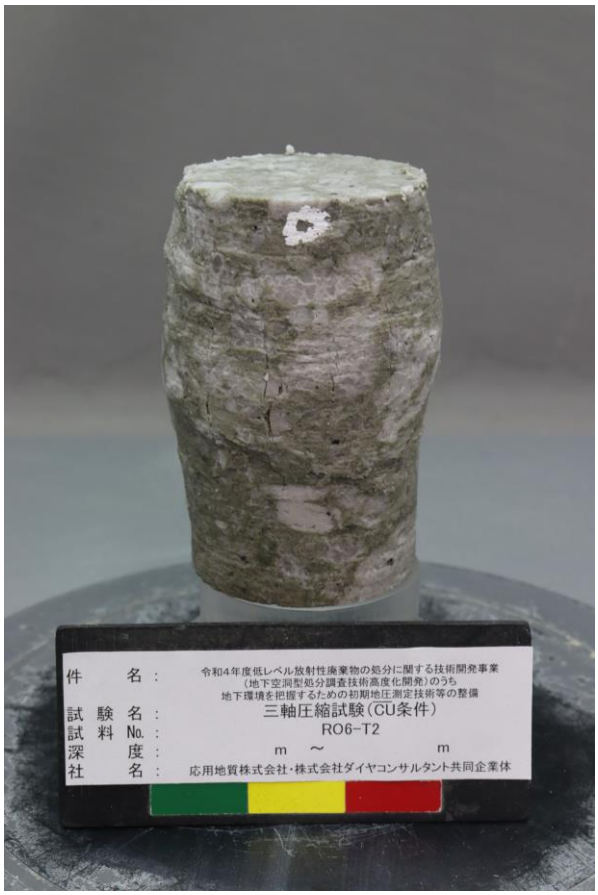


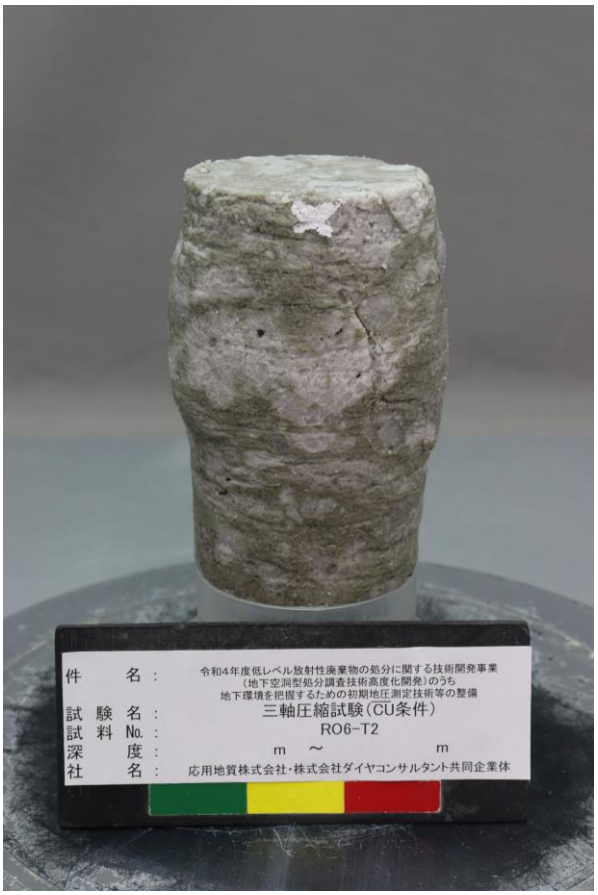
試験後

RO6-T1　圧密応力 0.10MPa

三軸圧縮試験　供試体写真

試験前

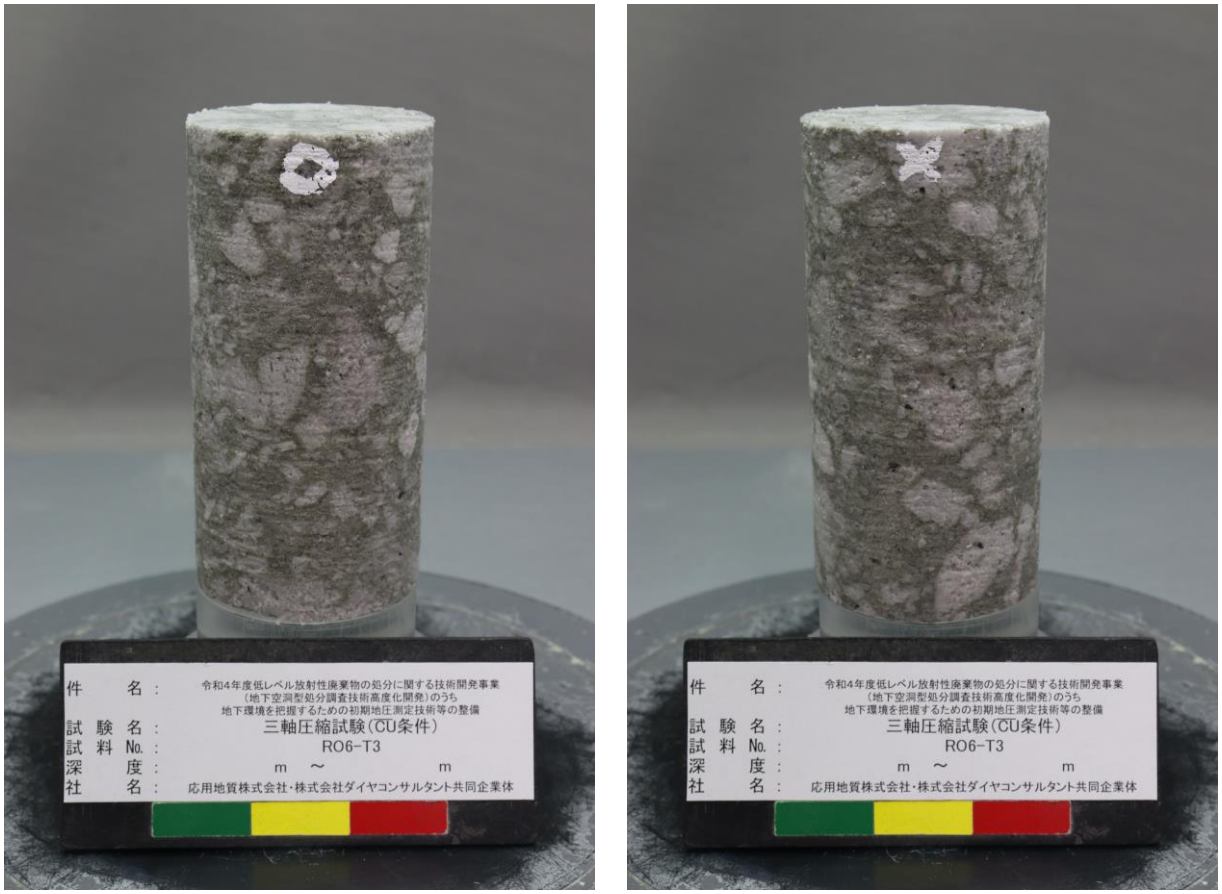




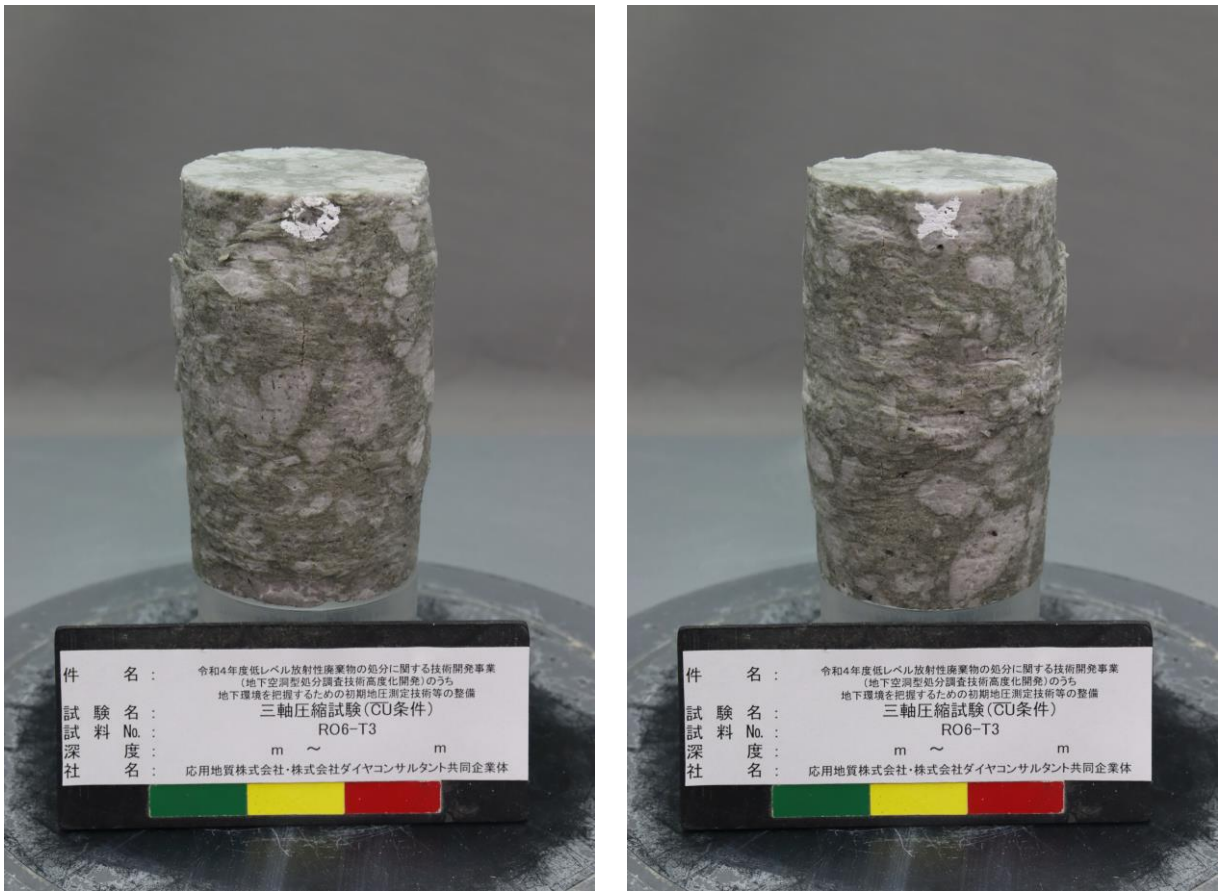
試験後

RO6-T2　圧密応力 0.60MPa

三軸圧縮試験　供試体写真



試験前



試験後

RO6-T3　圧密応力 1.10MPa

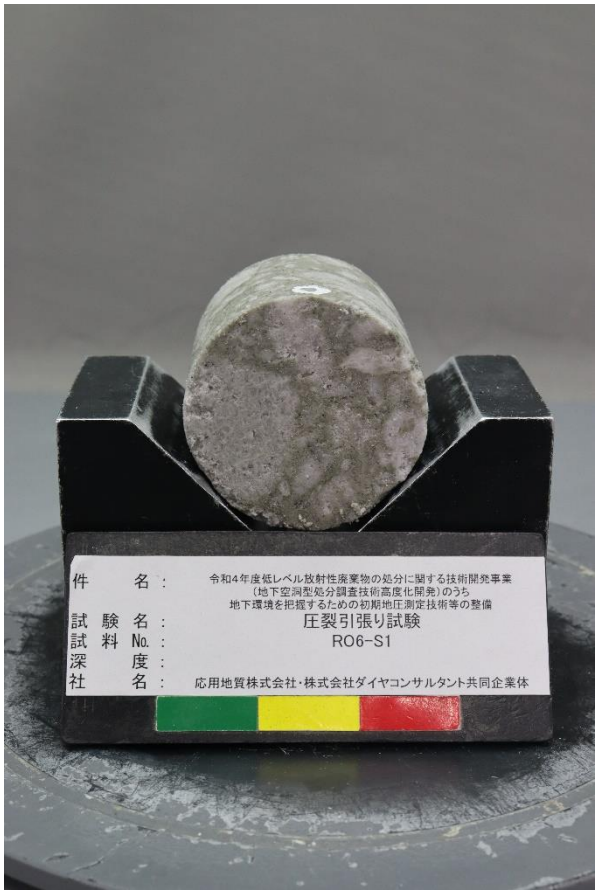
三軸圧縮試験　供試体写真

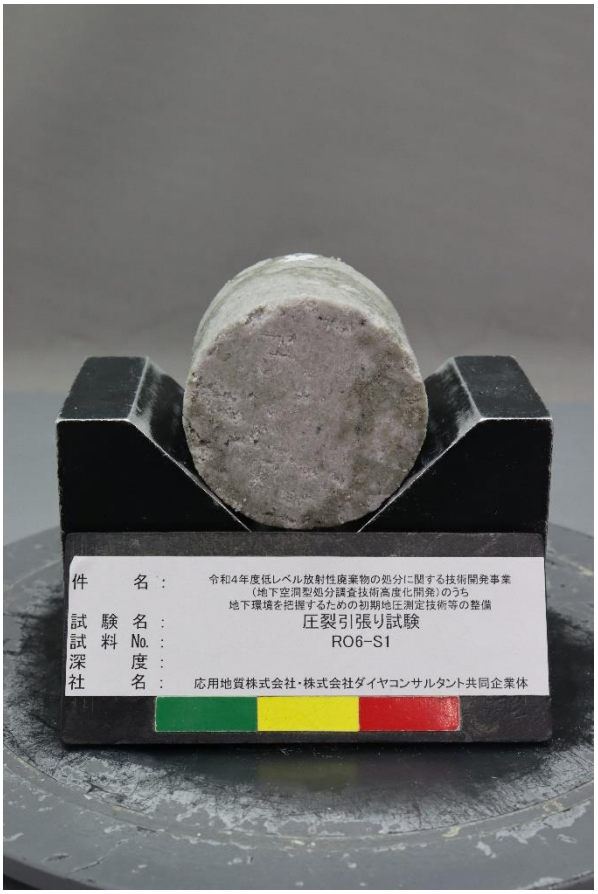
試験前

試験後

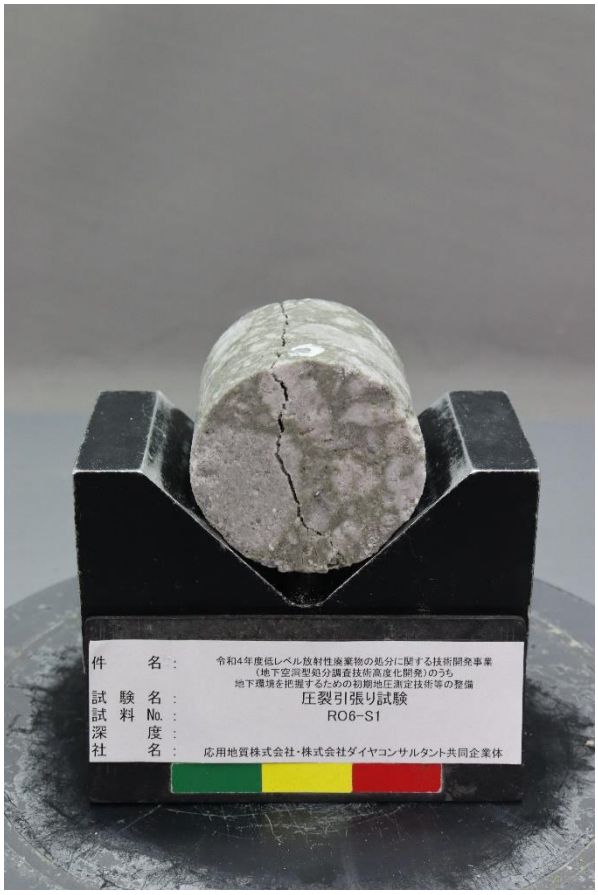
RO6-T4　圧密応力 1.60MPa

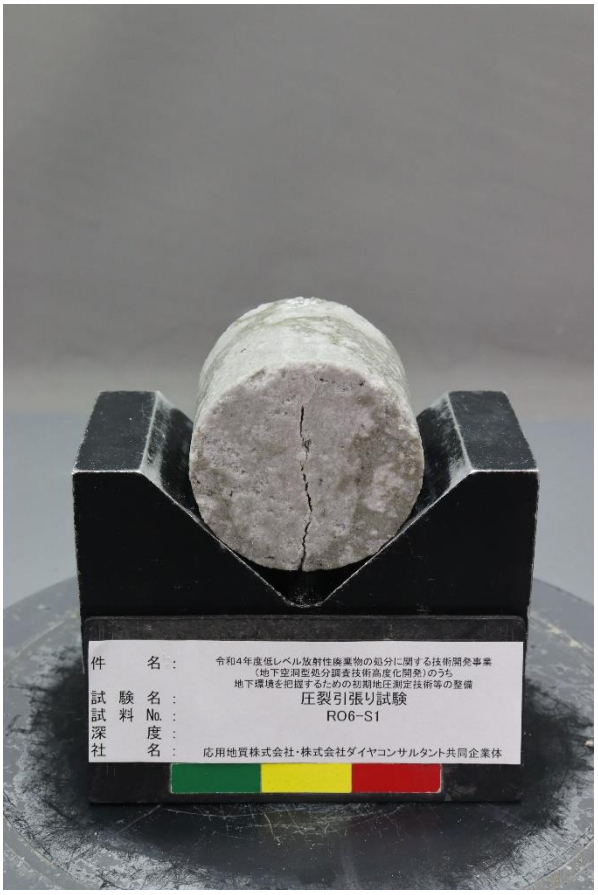
圧裂試験　供試体写真





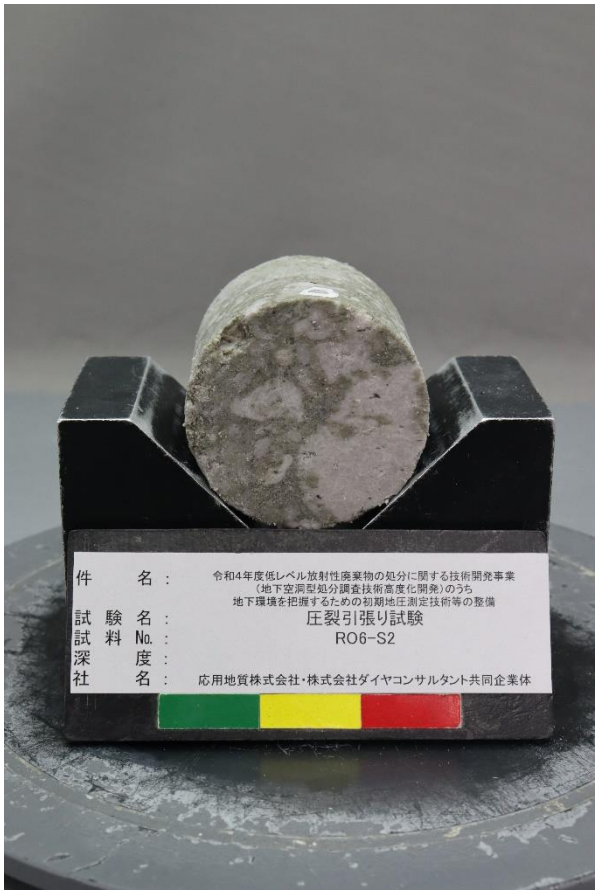
試験前

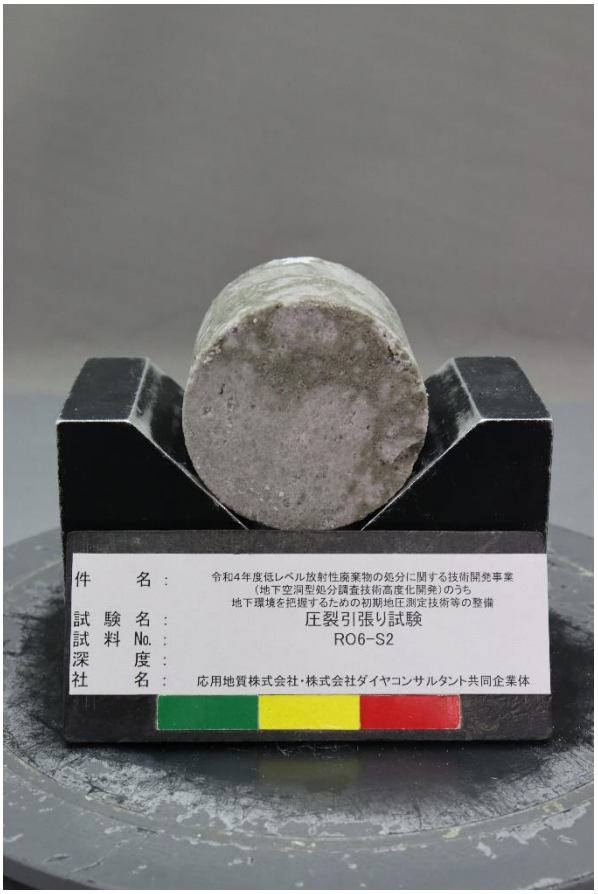




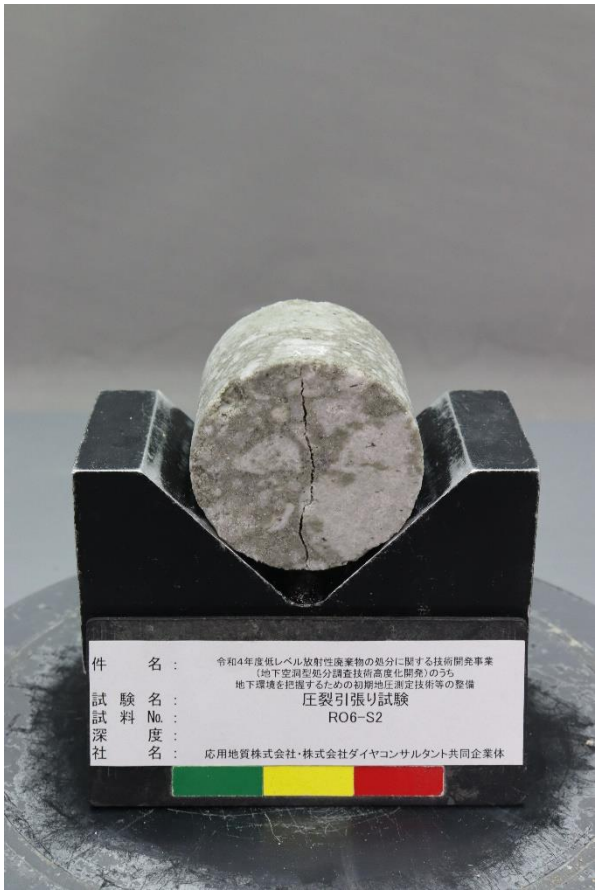
試験後

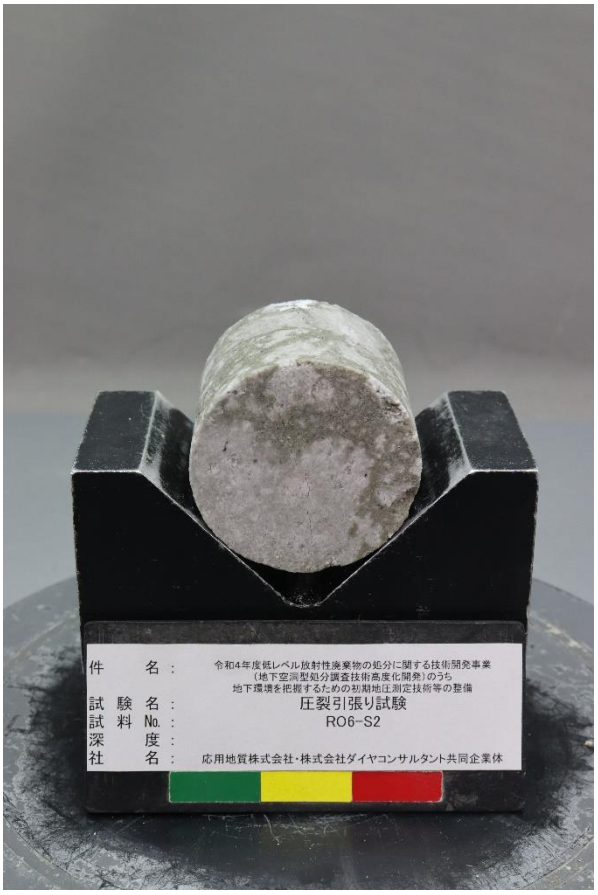
圧裂試験　供試体写真





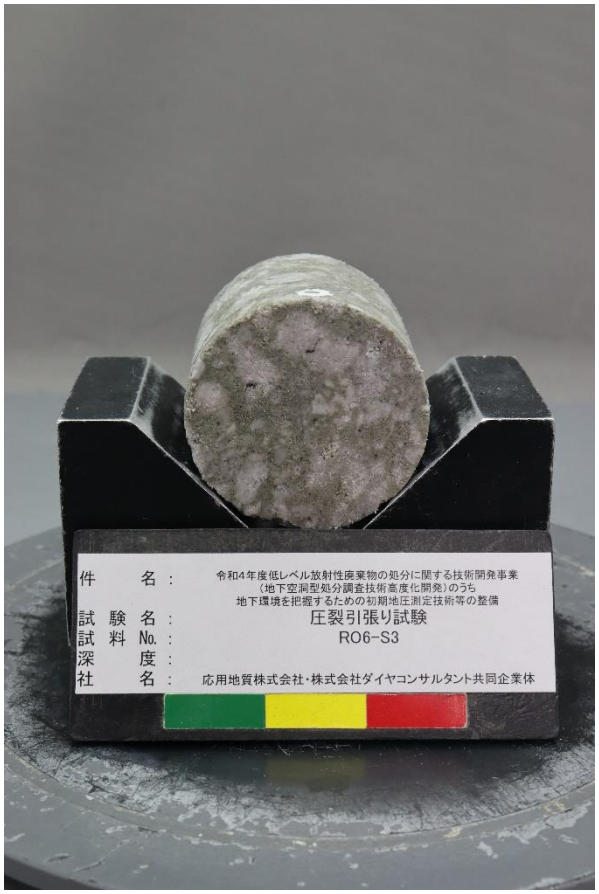
試験前

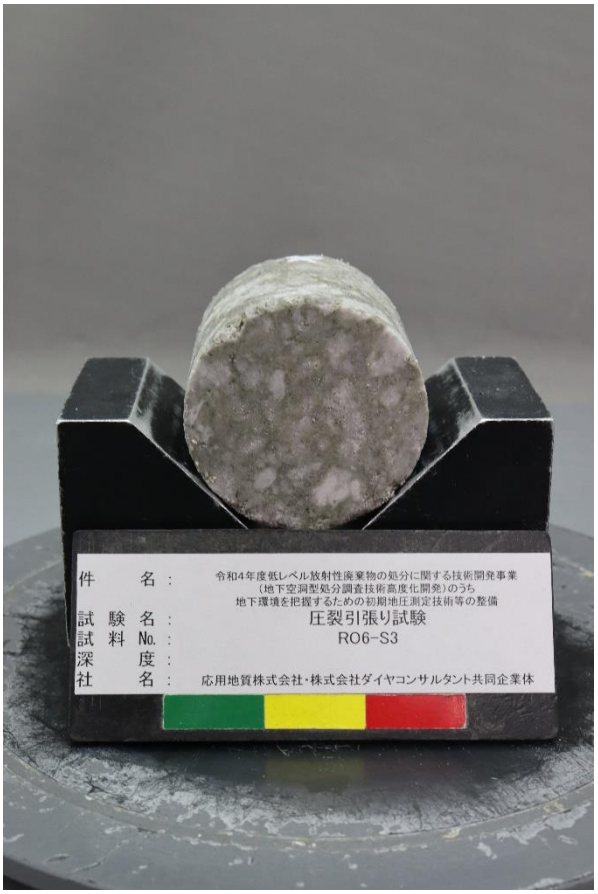




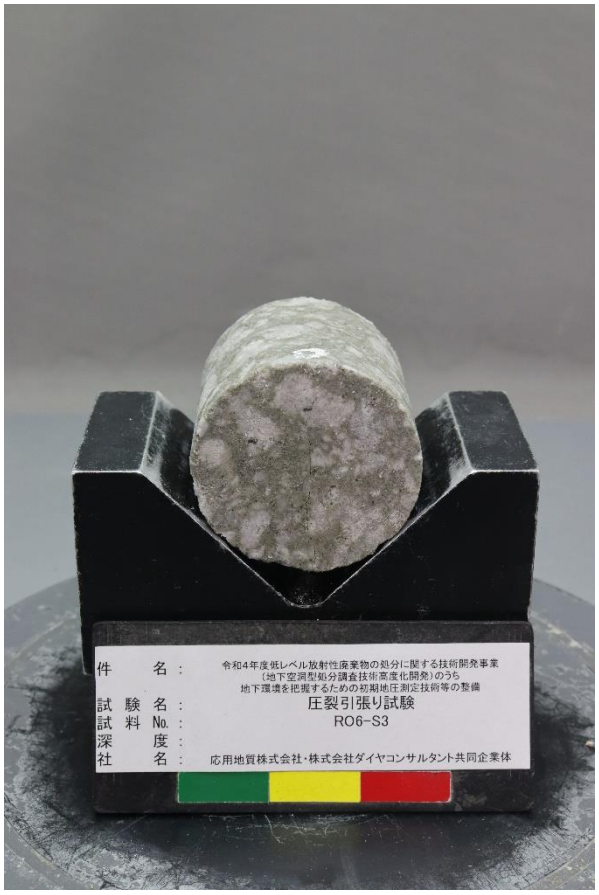
試験後

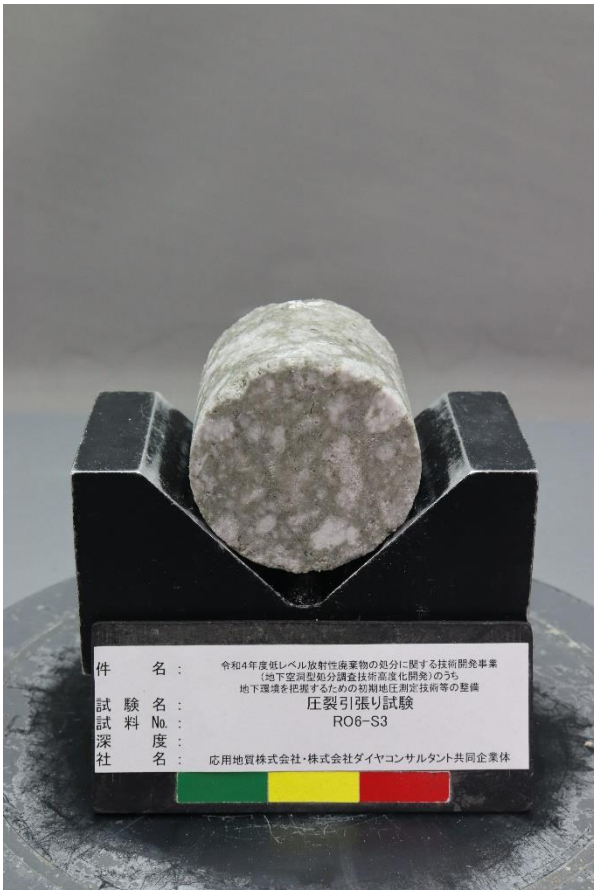
圧裂試験　供試体写真



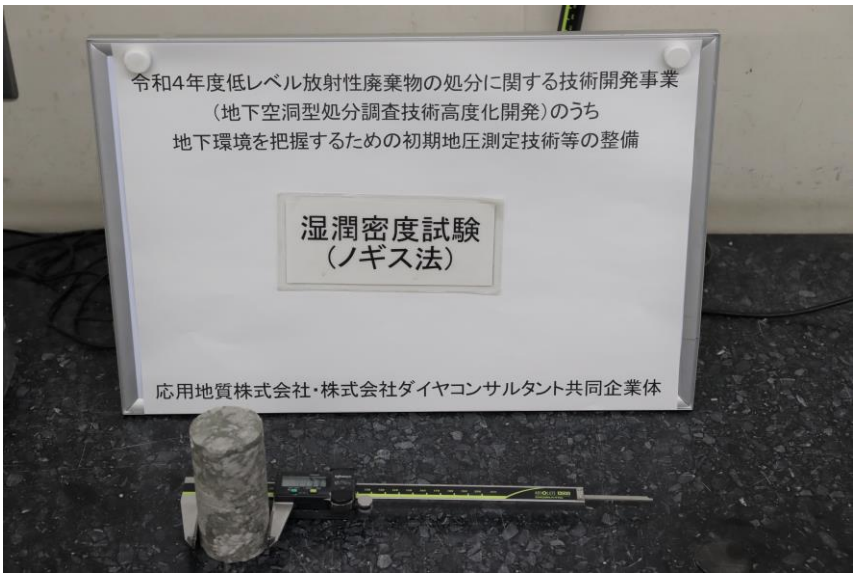


試験前





試験後



湿潤密度試験状況
（ノギス法）

一軸繰返し試験
状況

三軸圧縮試験状況

令和4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）のうち
地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備
圧裂引張り強度試験
応用地質株式会社・株式会社ダイヤコンサルタント共同企業体

圧裂引張り試験
状況

添付資料-2

浅深度現場検証試験と装置の設計検討

（第２章 2.1.3 参照）に係るボーリング調査結果

1. ボーリング柱状図

TI1-500 (1) 孔　ボーリング柱状図

作図範囲　0.00～ 6.00 m

件名	令和4年度地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備		
調査地	青森県上北郡六ヶ所村大石平	孔口標高 E.L. -42.84 m	方向：角度 0 ： -90
調査期間	2022 年 12 月 5 日 ～ 2022 年 12 月 22 日	最終孔内水位 G.L. -0.32 m	主任技術者
使用試錐機	東邦製D-1	掘削深度 G.L. -6.00 m	コア観察者

標尺 (m)	標高 (m)	深度 (m)	層厚 (m)	地質柱状図	地質 地層名	地質 層相	色調	硬軟区分	風化状況	観察記事
	43.08	0.24	0.24		コンクリート	コンクリート	灰	-	-	●0.00m～0.24m 路面ｺﾝｸﾘｰﾄ。硬質で柱状である。径10～20mmの角礫骨材(安山岩主体)含む。
	-43.34	0.50	0.26		砕石	砕石	暗灰			●0.24m～0.50m 路盤砕石。径10～30mmの安山岩角礫主体で細礫も含む。
1					鷹架層中部層軽石凝灰層	砂質軽石凝灰岩	灰～暗灰	硬	新鮮	●0.50m～6.00m 砂質軽石凝灰岩(Tspt2) 径5～20mmの白色軽石片を多く含む。最大径30mm程度。基質は灰色の中粒～粗粒の凝灰岩。塊状無層理で所々に径10mm程度の暗褐色の泥岩片を含む。 割れ目は無く棒状コア。全体にハンマー打撃で鈍い金属音を発し、ハンマー軽打で砕ける。 ・2.60m～5.07m 軽石片の含有は少なく、径3～5mmの軽石片を主体とする。最大径10mm。 ・5.07m～6.00m 軽石片の含有はやや多く、径5～10mmの軽石片を主体とする。 ・下記の深度で感度試験用のダミーセルと岩石試料を採取。 1.50m～2.14m 4.80m～5.32m
2										
3										
4										
5	-48.84	6.00	5.50							

岩級区分	コア採取率 (%)・最大コア長 cm・RQD [%]	割れ目分布図	BTV観察割れ目 BTV実施区間 (m)	BTV観察割れ目 開口幅 (mm)	透水試験結果 試験区間 (m)	透水係数 ORDER (m/s)	区間水位 (E.L. m)	試料採取	検層	採水
	[50]							1.50 感度試験 2.14		
	[100]									
	[100]									
	[100]							4.80 感度試験 5.32		
	[100]									

割れ目分布図：△せん断 ○引張 ▽葉理 □不明 ×機械 ◇新規／新鮮色／橙～黄褐色部分的／コアと同程度／緑色化

区間水位：間隙水圧計／試験時閉鎖系／試験時開放系

TI1-500(2)孔　ボーリング柱状図

作図範囲　0.00～10.00 m

件名	令和4年度地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備		
調査地	青森県上北郡六ヶ所村大石平	孔口標高 E.L. -42.80 m	方向：角度 0 ： -90
調査期間	2022年12月5日 ～ 2022年12月22日	最終孔内水位 G.L. -0.19 m	主任技術者
使用試錐機	東邦製D-1	掘削深度 G.L. -10.00 m	コア観察者

標尺 (m)	標高 (m)	深度 (m)	層厚 (m)	地質柱状図	地質 地層名	地質 相	色調	硬軟区分	風化状況	観察記事	岩級区分
1	-43.06	0.26	0.26		コンクリート	コンクリート	灰	-	-	●0.00m～0.26m 路面ｺﾝｸﾘｰﾄ。硬質で柱状である。径10～20mmの角礫骨材(安山岩主体)含む。	
	-43.31	0.51	0.25		砕石	砕石	暗灰			●0.26m～0.51m 路盤砕石。径10～30mmの安山岩角礫主体で細礫も含む。	
2					鷹架層中部層軽石凝灰層	砂質軽石凝灰岩	灰～暗灰	硬	新鮮	●0.51m～5.95m 砂質軽石凝灰岩(Tspt2) 径5～20mmの白色軽石片を多く含む。最大径30mm程度。基質は灰色の中粒～粗粒の凝灰岩。塊状無層理で所々に径10mm程度の暗褐色の泥岩片を含む。 割れ目は無く棒状コア。全体にハンマー打撃で鈍い金属音を発し、ハンマー軽打で割れる。 ・1.29m～1.33m 暗褐色の泥岩片。 ・2.37m～3.20m 軽石片の含有は少なく、径3～5mmの軽石片を主体とする。最大径10mm程度。 ・3.20m～3.55m 軽石片の含有は多い。 ・3.55m～4.80m 軽石片の含有は少なく、径3～5mmの軽石片を主体とする。最大径10mm程度。 ・4.80m～5.95m 軽石片の含有はやや多い、径10～20mmの軽石片を主体とする。	
3											
4											
5	-48.75	5.95	5.44								
6					鷹架層中部層軽石凝灰層	軽石質砂岩	暗灰			●5.95m～10.00m 軽石質砂岩(Tpps2) 径1～3mmの白色軽石片を所々に含み、長さ1～5mmの白色貝化石片(最大10mm)を含む。基質は暗灰色の中粒～粗粒の凝灰質砂岩。塊状でほぼ無層理。 割れ目は1条/1～2m程度あり、柱状～柱状コア。全体にハンマー打撃で鈍い金属音を発し、ハンマー軽打で砕ける。 ・6.40m付近 不明瞭ま葉理が認められる。 ・7.06m 割れ目　∠55° 割れ目面は分離。 ・8.59m 割れ目　∠30° 割れ目面は分離。 ・9.13m 面なし断層　∠40° 断層面はゆ着。 ・9.25m 割れ目　∠30° 割れ目面は分離。	
7											
8											
9	-52.80	10.00	4.05								

コア採取率 (%)　最大コア長 cm　RQD [%]

割れ目分布図：△せん断　○引張　▽葉理　□不明　×機械　◇新規　□新鮮色　■褐～黄褐色部分的　■コアと同程度　■緑色化

BTV観察割れ目：BTV実施区間 (m)　開口幅 (mm)

透水試験結果：試験区間 (m)　透水係数 ORDER (m/s)　区間水位 (E.L. m)　間隙水圧計　試験時閉鎖系　試験時開放系

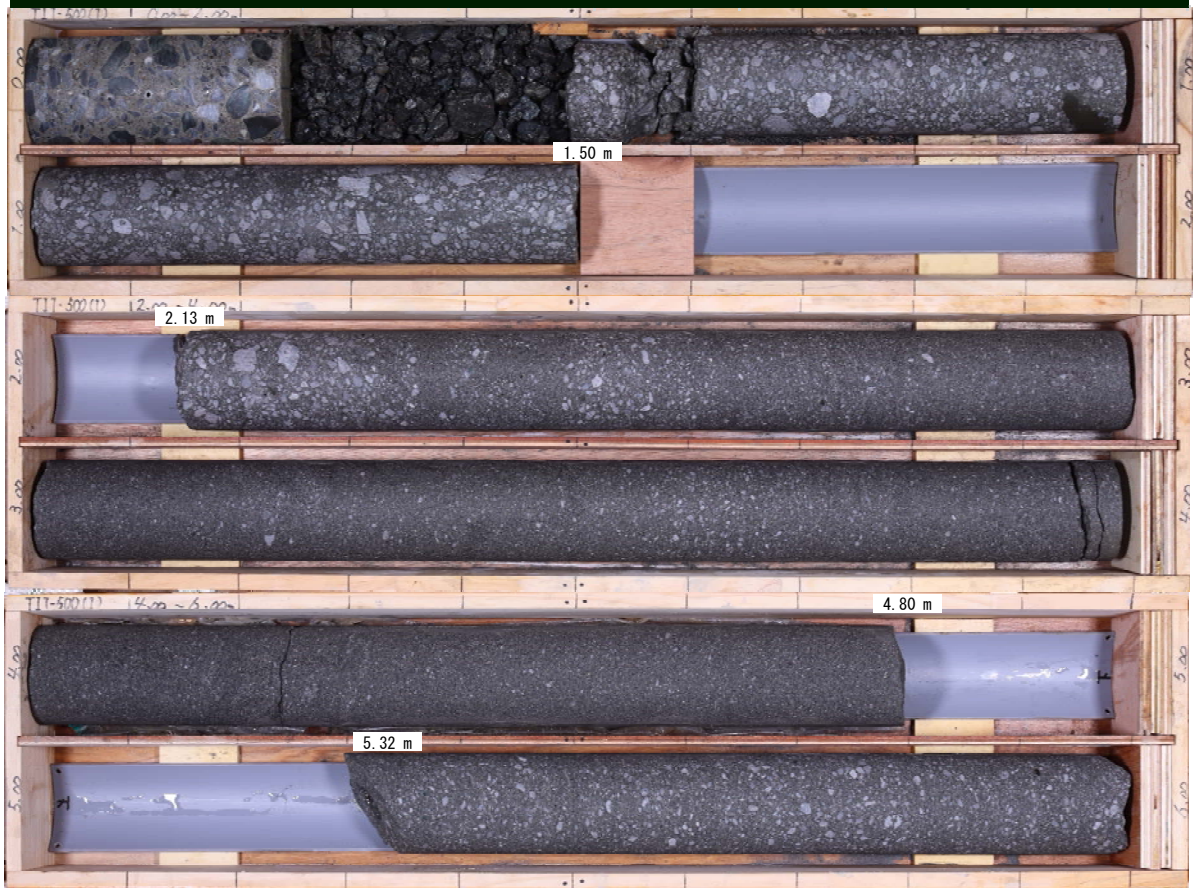
試料採取　検層　採水

2. ボーリングコア写真

件名：令和4年度地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備

孔名：TI1-500(1)

深度：　0.00　～　6.00　m



＊掘削孔径φ116mm

件名：令和4年度地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備

孔名：TI1-500(1)

深度：　　1.53～2.63m　及び　4.80～5.94m

1.53
2.53
4.80
5.80

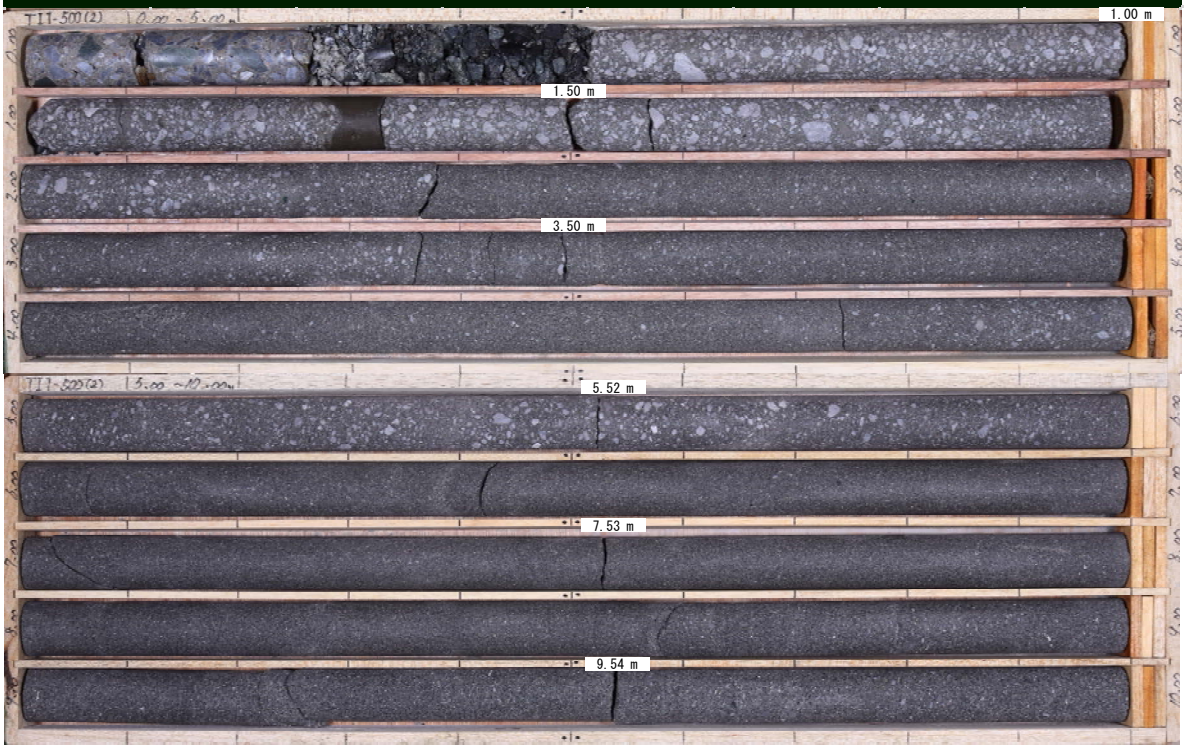
2.53
3.53
5.80
6.80

＊掘削孔径φ56mm及びφ36mm

件名：令和4年度地下環境を把握するための初期地圧測定技術等の整備

孔名：TI1-500(2)

深度：　0.00　～　10.00　m



0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

＊掘削孔径φ66mm

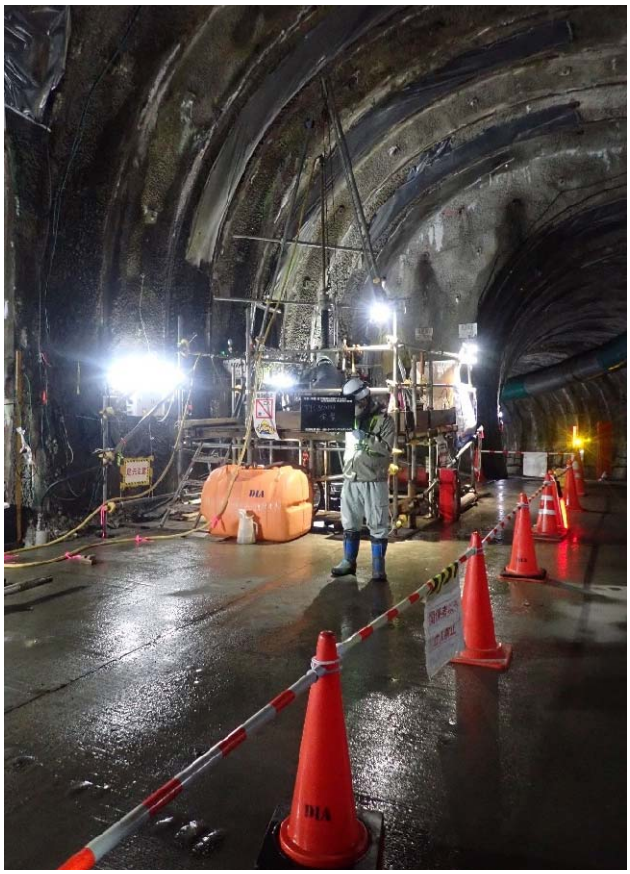
添付資料-3

浅深度現場検証試験と装置の設計検討

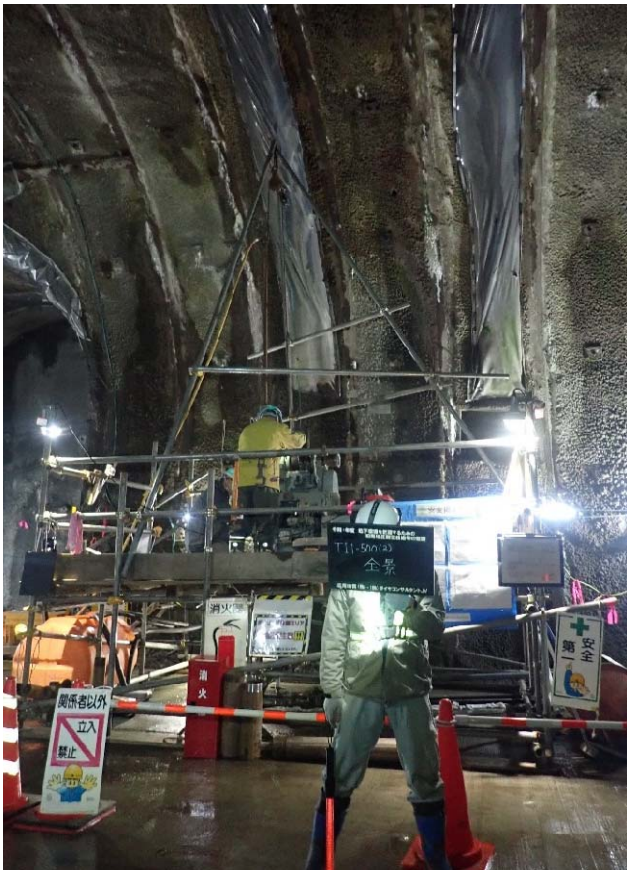
（第２章 2.1.3 参照）に係る現場記録写真

資機材搬入前（施工前）

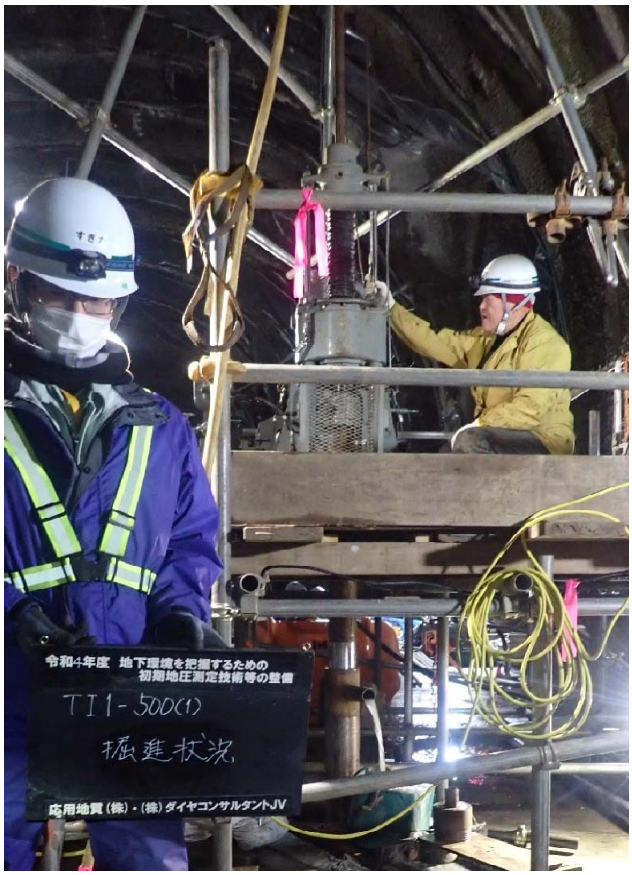
ボーリング仮設作業



ボーリング全景

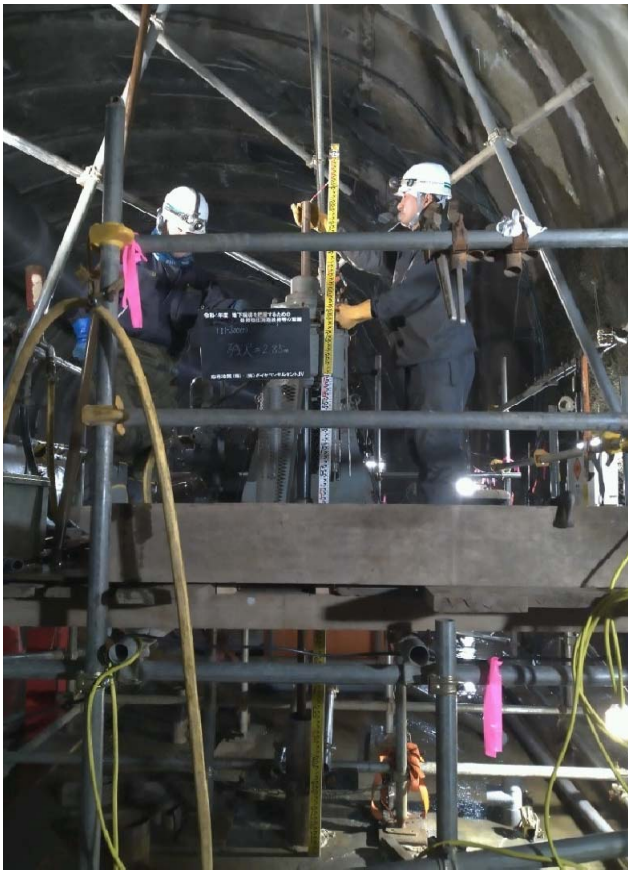


ボーリング全景（拡大）



TI1-500(1)孔 掘削状況

TI1-500(1)孔 166㎜コアチューブ



TI1-500(1)孔 残尺

TI1-500(1)孔 残尺拡大

TI1-500(1)孔 検尺

TI1-500(1)孔 検尺拡大

TI1-500(1)孔 孔内観察(カメラ挿入)

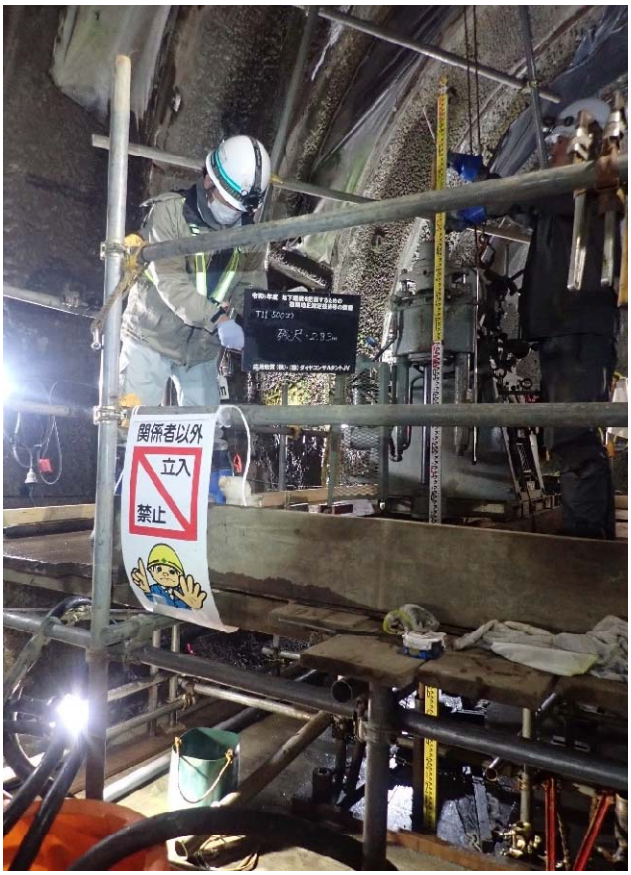
TI1-500(1)孔 孔内観察 (映像収録)

TI1-500(1)孔 孔内洗浄状況

TI1-500(1)孔 孔内水位の状況

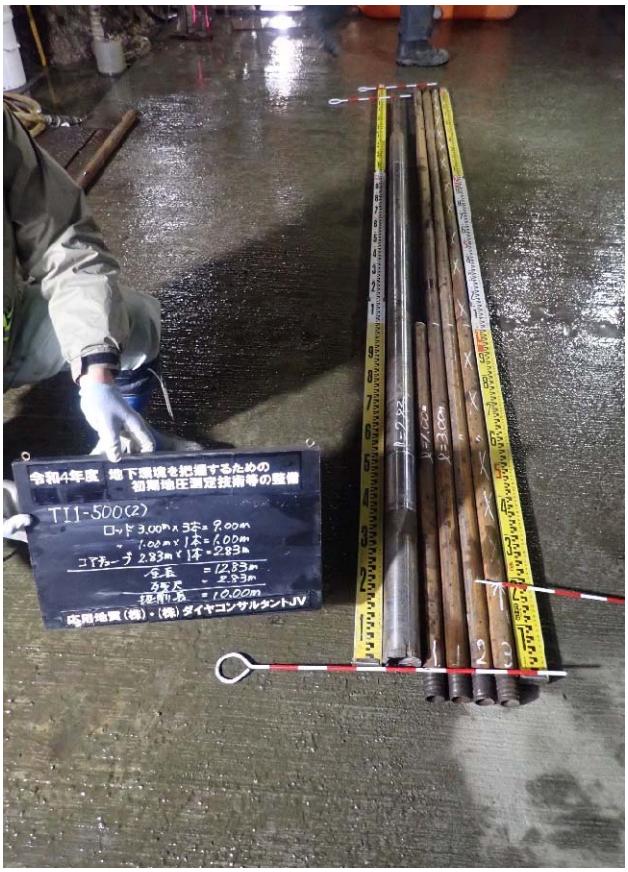
TI1-500(2)孔 掘進状況

TI1-500(2)孔 孔内水位（湧水圧）確認

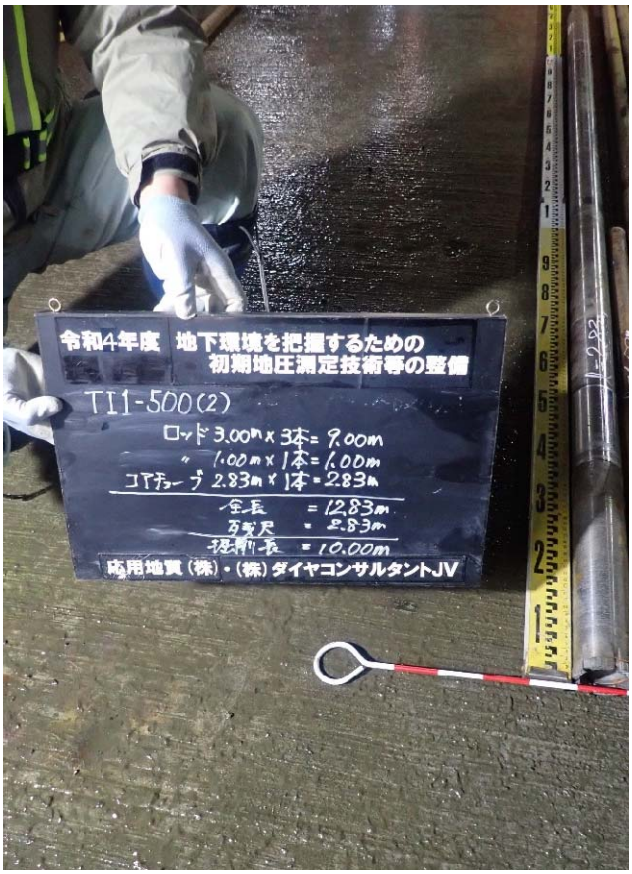


TI1-500(2)孔 残尺

TI1-500(2)孔 残尺拡大



TI1-500(2)孔 検尺



TI1-500(2) 孔検尺拡大

通行規制状況（坑口側）

通行規制状況（試験空洞側）

資機材搬出後（施工後）

ベントナイト投入状況

GL-5.00mまでベントナイト投入

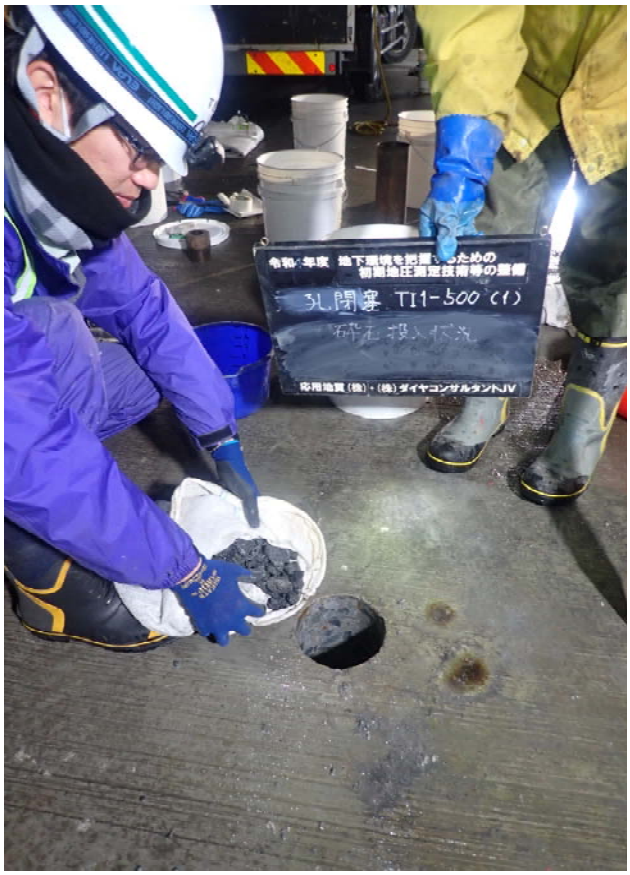
砂礫投入状況

GL-4.00mまで砂礫投入

GL-2.90mまでベントナイト投入

GL-2.00mまで砂礫投入

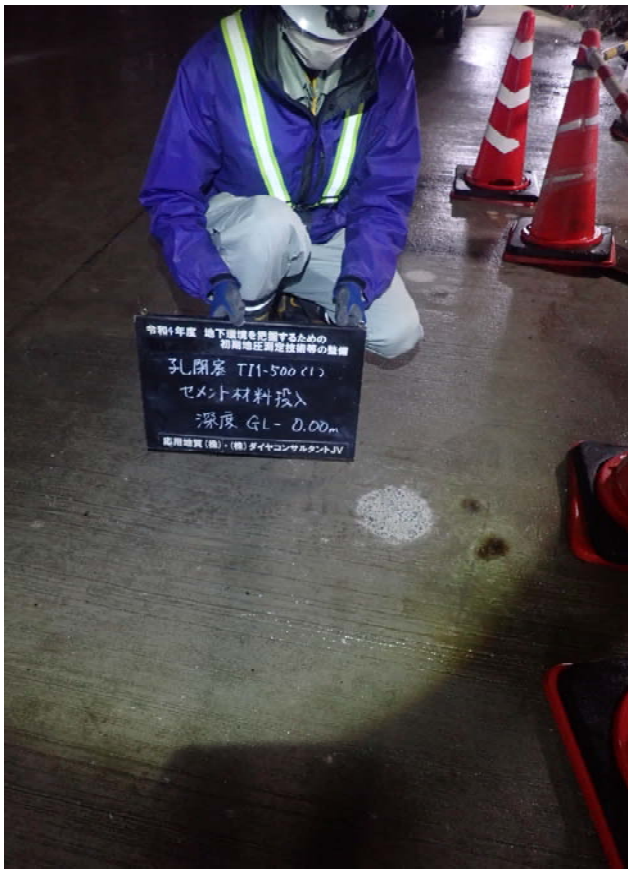
GL-0.60mまでベントナイト投入



砕石投入状況

GL-0.30mまで砕石投入

セメント材料投入状況



GL-0.00mまでセメント材料投入

ベントナイト投入状況

GL-9.00mまでベントナイト投入

砂礫投入状況

GL-6.99mまで砂礫投入

GL-4.75mまでベントナイト投入

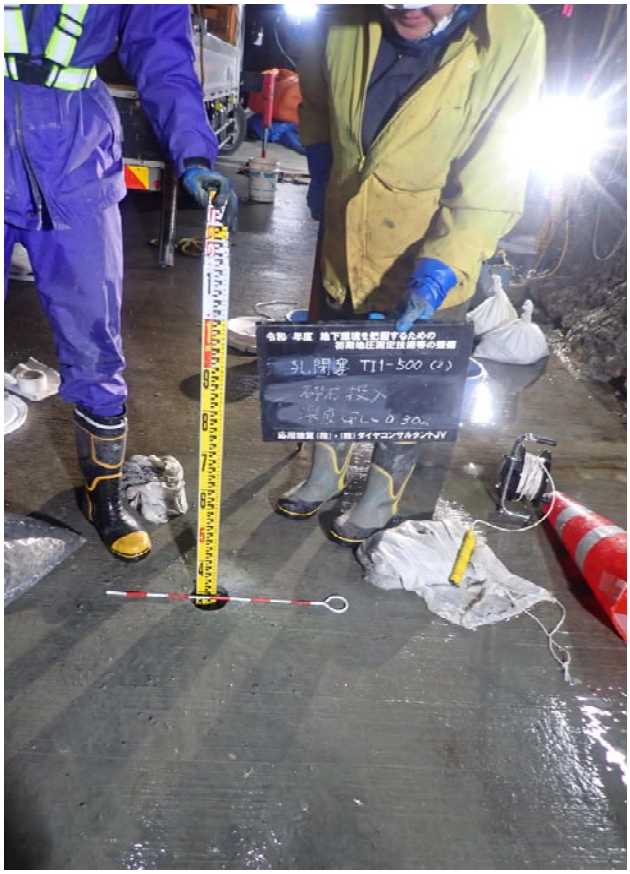
GL-3.92mまで砂礫投入

GL-2.90mまでベントナイト投入

GL-2.00mまで砂礫[redacted]

GL-0.60mまでベントナイト投入

砕石投入状況



GL-0.30mまで砕石投入

セメント材料投入状況

GL-0.00mまでセメント材料投入