## 令和5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

地下空洞型処分調查技術高度化開発

# 報告書

### 令和6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6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5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 に作用す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4年目となる令和5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。

第1章 全	全体概要1	-1
1.1 本事	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)	地震時影響評価技術の検討及び地震動観測1	-4
1.2.2	中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化1	-4
(1)	既往検討成果の調査と技術オプションの検討1	-4
(2)	ベントナイト系材料の移行抑制性能メカニズムに関する研究1	-4
1.2.3	情報収集及び委員会の設置・運営1	-5
(1)	情報収集1	-5
(2)	委員会の設置・運営1	-5
1.3 令利	□5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)	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-	15
1.3.3	情報収集及び委員会の設置・運営1-	19
(1)	情報収集1-	19
(2)	委員会の設置・運営1-	19
第1章0	り参考文献1-2	20
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うち、初期地圧測定技術の高	度
化	開発2	-1
2.1 試懸	検装置の詳細設計と検証試験2	-1
2.1.1	実施概要	-1

	(1)	接着剤の追加調査	2-9
	(2)	岩石への接着試験	2-10
	(3)	接着剤供試体の物性試験	2-12
	(4)	ひずみの測定感度の比較試験	2-14
	(5)	接着剤の硬化特性の確認試験	2-17
	(6)	湧水の影響検討	2-21
	2.1.3	感度試験と応力解析の方法の検討	2-24
	(1)	感度試験の設置位置・載荷圧の検討	2-24
	(2)	応力解析方法の検討	2-26
	2.1.4	試験装置の設計・製作	2-29
	(1)	ひずみ測定器	2-29
	(2)	ひずみ計貼付装置	2-30
	(3)	現場用掘削ツールス	2-31
	2.1.5	室内検証試験	2-35
	(1)	岩石ブロック載荷試験	2-35
	(2)	アクリル容器を用いた可視環境での試験	2-48
	2.1.6	現場検証試験	2-57
	(1)	現場検証試験の概要	2-57
	(2)	現場検証試験の方法	2-63
	(3)	ボーリング掘削結果	2-77
	(4)	試験で生じた課題とその解決策	2-85
	(5)	応力測定結果	2-90
	2.1.7	今後の開発計画	2-106
	(1)	技術課題の整理	2-106
	(2)	試験装置の改良	2-106
	(3)	検証試験の計画	2-107
	2.1 節	jの参考文献	2-108
2.2	初期均	也圧測定の開発に付随した技術課題の検討	2-109
	2.2.1	検討概要	2-109
	(1)	全体計画	2-109
	(2)	本年度の検討内容	2-111
	2.2.2	原位置試験(水圧破砕法試験)のシミュレーション	2-112
	(1)	これまでの経緯(課題)と対応策	2-112
	(2)	三軸圧縮試験のシミュレーション	2-115
	(3)	水圧破砕法シミュレーション	2-118
	(4)	まとめ	2-121

2.2.3	現場検証試験(円錐孔壁ひずみ法)のシミュレーション	2-122
(1)	検討の目的	2-122
(2)	現場検証試験のシミュレーション	2-122
(3)	課題と対応策の検討	2-134
2.2 節	の参考文献	2-141
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うち、地震時影響	評価技術の検
討	及び地震動観測	3-1
3.1 地震	『時影響評価技術の検討	3-1
3.1.1	検討概要	3-1
(1)	検討目的	3-1
(2)	既往検討の成果	3-1
(3)	今年度の検討概要	3-4
(4)	検討フロー	3-4
(5)	検討工程	3-6
3.1.2	入力地震動設定の検討	3-7
(1)	概要	3-7
(2)	逆解析による地盤物性の設定	3-10
(3)	観測地震動の分析による3次元地形の影響確認	3-24
(4)	入力地震動の設定	3-28
3.1.3	地震応答解析による試験空洞及び試験施設の地震時挙動の再現性検討	3-31
(1)	概要	3-31
(2)	解析条件	3-31
(3)	解析結果及び分析	3-35
(4)	まとめ	3-41
3.1.4	遺伝的アルゴリズムを用いた地盤物性逆解析手法の妥当性確認	3-42
(1)	概要	3-42
(2)	検討方法	3-42
(3)	模擬観測波の作成	3-43
(4)	地盤物性値の逆解析	3-47
3.1.5	まとめ	3-50
3.1 節	の参考文献	3-51
3.2 地震	動観測	3-52
3.2.1	検討概要	3-52
3.2.2	地下の地震動計測システム	3-52
3.2.3	地表面の地震動計測システム	3-57

3.2.4	地震計メンテナンス・計測データ回収	3-60
(1)	メンテナンス方法	3-60
(2)	データ回収方法	3-62
(3)	データ整理方法	3 <b>-</b> 63
(4)	地震動データ取得一覧	3-64
(5)	地震動データ	3-66
(6)	計測坑 C の地震動データ	3-101
(7)	地表と地下の最大加速度の比較	3-108
(8)	周波数特性の分析	3-109

第4章 中深度処分相当の地下環境等を考慮した設計技術の高度化のうち、技術オプション	の
検討4	-1
4.1 緒言4	-1
4.1.1 検討の背景4	-1
4.1.2 検討の目的	-1
4.2 設計プロセスの検討4	-3
4.2.1 過年度検討の整理	-3
4.2.2 設計プロセスの整理4-	14
4.3 ALARA を考慮した評価手法の検討4-	17
4.3.1 考え方の整理4-	17
4.3.2 評価手法の整理	17
4.3.3 対象オプションの設定4-	19
4.3.4 解析モデルの設定	20
4.3.5 解析パラメータの設定4-2	28
4.3.6 核種移行解析結果の詳細4	43
4.3.7 DoLift による簡易解析4	56
4.3.8 不確実性に関する線量評価	59
4.3.9 頑健性に関する線量評価4-0	61
4.3.10 線量評価に基づいたオプションの比較評価のまとめ	63
4.4 結言	64
4.4.1 令和5年度のまとめ4-0	64
4.4.2 課題と今後の方針4-0	64
第4章の参考文献4-	65

5.1 研究の背景と目的	5-1
5.2 年度計画及び実施内容	5-5
5.2.1 令和5年度の実施計画と実施工程	5-5
5.2.2 令和 5 年度の実施内容	5-6
(1) ベントナイト系材料の透水特性データの取得	5-6
(2) 実体顕微鏡観察によるベントナイト混合土の間隙構造観察	5-12
(3) 加水~混合~締固め過程における遮水性発現メカニズムの検討	5-14
5.3 実験結果	5-16
5.3.1 ベントナイト系材料の透水特性データの取得	5-16
(1) 非塑性細粒分混合土の室内締固め~透水試験結果	5-16
(2) 非膨潤性細粒分混合土の室内締固め~透水試験結果	5-18
(3) ベントナイト(膨潤性細粒分)混合土の室内締固め~透水試験結果	5-21
(4) 締固め~透水試験結果の整理	5-23
(5) カオリン 30%混合土の λ/ε 実験結果	5-25
(6) ベントナイト混合土の被膜構造形成メカニズムに関する実験結果	5-34
(7) 加水~混合~締固め過程の室内再現実験結果	5-39
5.3.2 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	5-42
(1) 非塑性~非膨潤性~膨潤性細粒分混合土における透水特性メカニズム	の評価案5-42
(2) 透水係数評価式(重回帰分析)の追加検討と今後の見直し方針	5-53
(3) ベントナイト混合土の被膜構造形成メカニズムの検討計画(令和6年	度)5-56
(4) 加水~混合~締固め過程の DEM 再現解析	5-56
5.4 まとめ	5-61
第5章の参考文献	5-62
第6章 まとめ	6-1
6.1 本事業のまとめ	6-1
011 中巡座知八相火の地工理院大河江大大社学の古座ル	0.1

6.1.1	中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化	6-1
(1)	初期地圧測定技術の高度化開発	6-1
(2)	地震時影響評価技術の検討及び地震動観測	6-1
6.1.2	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	6-2
(1)	技術オプションの検討	6-2
(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	6-3

添付資料-1 室内検証試験と装置の設計検討に係る試験データ

- 添付資料-2 現場検証試験に係る試験データ
- 添付資料-3 現場検証試験に係るボーリング調査結果

1	¥	i I	H	1/1
	$\times$			1八

义	1.1-1	中深度処分の廃棄物埋設施設のイメージ	1-2
义	1.2 - 1	本事業の全体フロー	1-3
义	1.3-1	円錐孔壁ひずみ法の概要図	1-7
义	1.3-2	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	1-10
义	1.3-3	水圧破砕シミュレーション結果	1-10
义	1.3-4	解析結果(昨年度、今年度)と観測結果の比較(地震計③位置、水平方向).	1-12
义	1.3-5	提案した設計プロセスのフロー及び本検討の位置づけ	1-13
义	1.3-6	核種移行解析モデルの概念図	1 <b>-</b> 14
义	1.3-7	核種移行解析結果例	1 <b>-</b> 14
义	1.3-8	ベントナイト混合土の 1Ec 締固め-透水試験結果	1-17
义	1.3-9	非塑性~非膨潤性~膨潤性細粒分混合土における土粒子間隙構造の変化	1-18
义	2.1-1	円錐孔壁ひずみ法の概要図	2-2
义	2.1-2	実績工程	2-4
义	2.1-3	円錐孔壁ひずみ法の試験手順	2-8
义	2.1-4	岩石への接着試験の手順	2-11
义	2.1-5	各接着剤で接着した試料の断面と各接着剤の付着力	2-11
义	2.1-6	各接着剤で接着した試料の実体顕微鏡撮影結果(目盛は 0.5mm 間隔)	2-12
义	2.1-7	3種の接着剤供試体の様子	2-13
义	2.1-8	3種の接着剤供試体のヤング率・ポアソン比の経時変化	2-13
义	2.1-9	ひずみの測定感度の比較試験の各供試体の様子(試験前)	2-14
义	2.1 - 10	供試体へのひずみ計の貼付状況	2-15
义	2.1 - 11	ひずみの測定感度の比較試験の試験状況	2-15
义	2.1 - 12	各岩種でのひずみの測定感度試験の載荷パターン	2-16
义	2.1 - 13	各接着剤のひずみの測定感度の比較試験結果(4 供試体)	2-17
义	$2.1  ext{-} 14$	ストレインセルの図面とそのひずみゲージの説明	2-18
义	2.1 - 15	周載荷感度試験の試験状況(左)と概念図(右)	2-18
义	2.1 - 16	周載荷感度試験の載荷パターン	2-19
义	2.1 - 17	周方向の応力-ひずみ曲線(接着開始後 24h)	2-19
义	2.1 - 18	周載荷感度試験で求めた周方向ひずみ感度係数の経時変化	2-20
义	2.1 - 19	湧水の影響検討試験の概要図	2-21
义	2.1 - 20	湧水の影響確認試験の試験状況	2-22
义	2.1 - 21	送水圧 0.004MPa での接着剤表面の様子	2-23
义	2.1 - 22	送水圧 0.06MPa での接着剤表面の様子	2-23
义	2.1-23	試験状況(左)と装置内のメンブレン(右)	2-24

	2.1 - 24	フレスケールの色濃度と圧力の関係	2-25
义	2.1 - 25	各載荷圧でのプレスケールの結果(その1)	2-25
义	2.1 - 26	各載荷圧でのプレスケールの結果(その2)	2-26
义	2.1 - 27	数値解析に用いたシミュレーションモデル(二次元)	2-28
义	2.1 - 28	組立前のひずみ測定器の様子	2-29
义	2.1 - 29	組立後のひずみ測定器の様子	2-29
义	2.1 - 30	ひずみ計貼付装置の設計図(図の左側が鉛直に立てた際の上側)	2-30
义	2.1 - 31	圧着前後のひずみ計貼付装置の様子	2-30
义	2.1 - 32	ひずみ測定器の(a)挿入、(b)圧着、貼付装置の(c)分離、(d)回収状況	2-31
义	2.1 - 33	円錐リーマの改良図面	2-32
义	2.1 - 34	<b>φ56mm</b> 孔掘削用のノンコアビットの図面	2-32
义	2.1 - 35	φ116mm 孔用センタリングガイドケーシング下端の図面	2-33
义	2.1 - 36	φ116mm 孔用センタリングガイドケーシング中間部の図面	2-33
义	2.1 - 37	φ116mm 孔用センタリングガイドケーシングのレジューサーの図面	2-34
义	2.1 - 38	センタリングガイドケーシング(約 30m 分)	2-34
义	2.1 - 39	試験に用いた大谷石ブロック	2-35
义	2.1-40	三軸載荷試験結果(大谷石、コニシ e205 接着剤使用)	2-37
义	2.1-41	周載荷感度試験結果(大谷石、コニシ e205 接着剤使用)	2-38
义	2.1-42	三軸載荷時のひずみから求めた三次元主応力(大谷石、コニシ e205 接着剤使	用)
			2-39
义	2.1-43	掘進長と解放ひずみの関係(大谷石、コニシ e205 接着剤使用)	2-40
义	0144		
	<b>Z.1</b> -44	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41
义	2.1-44 2.1-45	解放ひずみから求めた三次元主応力 試験に用いた軽石凝灰岩ブロック	2-41 2-42
X X	2.1-44 2.1-45 2.1-46	解放ひずみから求めた三次元主応力 試験に用いた軽石凝灰岩ブロック 三軸載荷試験結果(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用)	2-41 2-42 2-43
図 図 図	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47	解放ひずみから求めた三次元主応力 試験に用いた軽石凝灰岩ブロック 三軸載荷試験結果(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用) 周載荷感度試験結果(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用)	2-41 2-42 2-43 2-44
8 8 8 8	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44  使用)
図 図 図	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44  使用) 2-45
図 図 図 図	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-47 2.1-48  2.1-49	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44 l使用) 2-45 2-46
	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48  2.1-49 2.1-50	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44 ]使用) 2-45 2-46 2-47
	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48  2.1-49 2.1-50 2.1-51	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44 l使用) 2-45 2-46 2-47 2-48
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48 2.1-48 2.1-49 2.1-50 2.1-51 2.1-52	解放ひずみから求めた三次元主応力 試験に用いた軽石凝灰岩ブロック 三軸載荷試験結果(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用) 周載荷感度試験結果(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用) 三軸載荷時のひずみから求めた三次元主応力(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤 加進長と解放ひずみの関係(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用) 解放ひずみから求めた三次元主応力(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用) アクリル容器の概要図 アクリル容器の設計図面	2-41 2-42 2-43 2-44  使用) 2-45 2-46 2-47 2-48 2-49
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48  2.1-49 2.1-50 2.1-51 2.1-52 2.1-53	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44 l使用) 2-45 2-46 2-47 2-48 2-48 2-49 2-51
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48  2.1-49 2.1-50 2.1-51 2.1-52 2.1-53 2.1-54	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44 (使用) 2-45 2-46 2-47 2-48 2-49 2-51 2-52
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48 2.1-49 2.1-50 2.1-51 2.1-52 2.1-53 2.1-54 2.1-55	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44 l使用) 2-45 2-46 2-47 2-48 2-49 2-51 2-52 2-53
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	2.1-44 2.1-45 2.1-46 2.1-47 2.1-48 2.1-49 2.1-50 2.1-51 2.1-52 2.1-53 2.1-54 2.1-55 2.1-56	解放ひずみから求めた三次元主応力	2-41 2-42 2-43 2-44 l使用) 2-45 2-46 2-47 2-48 2-49 2-51 2-52 2-53 美子

义	2.1-57	アクリル容器内で確認したひずみ測定器設置状況	2-55
义	2.1-58	ひずみ測定器の収録データ(ひずみ測定器の孔内挿入前から貼付装置回収後ま~	で)
	•••••		2-56
义	2.1-59	調査坑と試験孔掘削位置の概要	2-60
义	2.1-60	試験孔掘削位置図	2-61
义	2.1-61	第5 拡幅部における試験孔掘削位置図	2-62
义	2.1-62	資材荷降ろし概要	2-64
义	2.1-63	足場及びやぐらの仮設概要図(単管パイプ三脚やぐら)	2-65
义	2.1-64	ボーリング作業時の足場及び資材機材等の配置	2-65
义	2.1-65	現場試験の作業手順(1)	2-66
义	2.1-66	現場試験の作業手順(2)	2-67
义	2.1-67	試験孔掘削作業の流れ	2-68
义	2.1-68	削孔の概要	2-69
义	2.1-69	ハイドロリックフィード型ボーリングマシン	2-69
义	2.1-70	φ116mm 及び φ56mm 削孔器具(コアチューブ)の概要	2-70
义	2.1-71	試験孔掘削ツールス	2-70
义	2.1-72	ボーリングコア箱の整理方法の例	2-71
义	2.1-73	OBI2 ボアホールカメラ	2-72
义	2.1-74	本測定用に改造した孔内カメラの先端パーツ	2-72
义	2.1-75	現場での周載荷感度試験の概要図	2-74
义	2.1-76	間隙水圧測定の概要図と測定装置写真	2-75
义	2.1-77	試験孔掘削位置の概要	2-77
义	2.1-78	試験孔掘削位置(地質平面図)	2-78
义	2.1-79	試験孔掘削位置(地質断面図)	2-78
义	2.1-80	試験孔掘削位置及び地質断面図	2-81
义	2.1-81	TI1-850(2)孔 ボーリングコア写真(深度 0.00m~20.00m)	2-82
义	2.1-82	TI1-850(2)孔 ボーリングコア写真(深度 20.00m~35.15m)	2-83
义	2.1-83	TI1-850(2)孔の掘削に伴う孔内水位の変化状況	2-84
义	2.1-84	孔内カメラによる各試験深度の円錐孔壁画像	2-87
义	2.1-85	1 深度目のコア写真	2-88
义	2.1-86	2 深度目のコア写真	2-88
义	2.1-87	3深度目のひずみ測定器とセンタリングガイド(回収後)	2-88
义	2.1-88	4 深度目のひずみ測定器(挿入前)	2-89
义	2.1-89	4 深度目の孔内状況図及びコア写真	2-89
义	2.1-90	ひずみ測定器で収録したひずみの経時変化(4 深度目)	2-92
义	2.1-91	ひずみ測定器で収録した圧力と温度の経時変化(4 深度目)	2-93

义	$2.1 -\!92$	オーバーコアリング時の掘進長と解放ひずみの関係(4 深度目)	2-94
义	2.1-93	軸対称 FEM モデルによるオーバーコアリングに伴うゲージ位置でのひずみ?	变化
			2-95
义	2.1-94	周載荷感度試験時の応力-ひずみ関係(4 深度目)	2-96
义	2.1-95	ひずみ測定器設置時のひずみ変化	2-98
义	2.1-96	ひずみ計貼付装置・センタリングガイド回収時のひずみ変化	2-99
义	2.1-97	オーバーコアリング時の各ロゼットゲージのひずみ変化	2-100
义	2.1-98	オーバーコアリングしたコアを試験深度から地上に回収する際のひずみ変化	2-101
义	2.1-99	周載荷感度試験時の各ロゼットゲージのひずみ変化	2-102
义	2.1-100	) 4 深度目で得られた応力解析の暫定結果	2-105
义	2.1-10	l 令和2年度実施の水圧破砕試験結果に本深度を加筆	2-105
义	2.2 - 1	円錐孔壁ひずみ法	2-109
义	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	2-110
义	2.2-3	三軸圧縮試験シミュレーション応力 - ひずみ曲線(軟化過程改善前)	2-112
义	2.2-4	クランプの形状	2-112
义	2.2-5	三軸圧縮試験シミュレーション応力 - ひずみ曲線(軟化過程改善後)	2-113
义	2.2-6	水圧の経時変化(原位置試験結果と水圧破砕シミュレーション結果)	2-113
义	2.2-7	<b>DEM</b> の接触モデル(転がり摩擦)	2-114
义	2.2-8	DEM の接触モデル(引張抵抗バネ)	2-114
义	2.2-9	三軸圧縮試験の応力—ひずみ曲線(砂質軽石凝灰岩、深度 95.15m~96.15m)	2-115
义	2.2-10	三軸圧縮試験シミュレーションの解析モデル(3次元)	2-116
义	2.2-11	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	2-116
义	2.2-12	破壊形状の比較	2-117
义	2.2-13	水圧破砕法試験結果経時変化図(砂質軽石凝灰岩、深度 95.1m)	2-118
义	2.2-14	発生クラック	2-118
义	2.2 - 15	水圧破砕法試験シミュレーションのモデル概要	2-119
义	2.2-16	解析モデル(3 次元)	2-120
义	2.2 - 17	水圧破砕シミュレーション結果(破砕圧)	2-120
义	2.2-18	水圧破砕シミュレーション結果(クラック分布(cb=400N)	2-121
义	2.2-19	三軸圧縮試験の応力‐ひずみ曲線(軽石凝灰岩)	2-123
义	2.2-20	三軸圧縮試験シミュレーションの解析モデル(3次元)	2-123
义	2.2-21	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
义	2.2-22	円錐孔壁ひずみ法の形状・寸法	2-125
义	2.2-23	ストレインセル部の形状・寸法	2-125
义	2.2-24	解析モデル	2-126
义	2.2 - 25	ストレインセル部の形状・寸法(再掲)	2-127

义	2.2-26	オーバーコアリング時の解析モデルの変化	2-128
义	2.2-27	微視クラック分布	2-129
义	2.2-28	4深度目の孔内状況図及びコア写真	2-130
义	2.2-29	オーバーコアリング時のひずみ経時変化	2-131
义	2.2-30	微視クラック分布(引張限界力 1.5 倍のシミュレーション結果)	2-132
义	2.2-31	オーバーコアリング時のひずみ経時変化(引張限界力 1.5 倍)	2-133
义	2.2-32	3 次元 FEM 解析結果に基づくオーバーコアリング時のひずみ経時変化	2-135
义	2.2-33	既往事例における円錐孔底ひずみ法による解放ひずみ	2-136
义	2.2-34	応力解放法の軸対称 FEM 解析モデル	2-136
义	2.2-35	応力解放法の軸対称 FEM 解析結果	2-137
义	2.2-36	三軸圧縮試験シミュレーションの解析モデル(高さ 30cm 直径 15cm)と解	析結果
	•••••		2-138
义	2.2-37	オーバーコアリング時のひずみ経時変化	2-140
义	3.1-1	解析結果と観測結果の乖離に関する想定原因の抽出及び対応策の概要	3-2
义	3.1 - 2	5ヵ年実施計画のフローにおける令和5年度の検討内容の位置づけ	3-5
义	3.1-3	地震計の設置位置	3-7
义	3.1-4	地震応答解析の流れ	3-8
义	3.1 - 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	3-8
义	3.1-6	観測結果(地震計⑤、y方向、2022/3/16)	3-10
义	3.1-7	観測結果(地震計④、y方向、2022/3/16)	3-10
义	3.1-8	初期せん断剛性に乗じる倍率の組合せパターン	3-11
义	3.1-9	解析結果と観測結果のフーリエスペクトルの比較	3-12
义	3.1-10	解析結果(補正前・後)と観測結果の加速度波形の比較	3-13
义	3.1-11	解析結果(補正前・後)と観測結果のフーリエスペクトルの比較	3-14
义	3.1 - 12	解析結果(補正前・後)と観測結果の Vs 及びインピーダンス比の比較	3-14
义	3.1-13	追加検討の Vs の深度分布(緑線)	3-15
义	3.1-14	解析結果(補正前・後・追加ケース)と観測結果の加速度波形の比較	3-16
义	3.1-15	解析結果(補正前・後・追加ケース)と観測結果のフーリエスペクトルの比	上較3-17
义	3.1-16	減衰定数のパラメータ	3-18
义	3.1-17	解析結果と観測結果の加速度波形の比較	3-19
义	3.1-18	解析結果と観測結果のフーリエスペクトルの比較	3-20
义	3.1-19	地表の地震計設置位置の周辺状況	3-21
义	3.1-20	解析結果と観測結果の加速度波形の比較	3-22
义	3.1-21	解析結果と観測結果のフーリエスペクトルの比較	3-23
义	3.1 - 22	地震計⑤と地震計④位置の地質断面図	3-24
义	3.1-23	地震計⑤(地表)と地震計④(地下)の平面位置の関係	3-24

义	3.1 - 24	地表(地震計⑤)の長周期成分の波形抽出	3-25
义	3.1 - 25	地下(地震計④)の長周期成分の波形抽出	3-25
义	3.1-26	地表及び地下の加速度オービット	3-26
义	3.1 - 27	水平方向 2 成分の伝達関数(5 波)	3-27
义	3.1-28	水平方向2成分の伝達関数(5波の平均のみ表示)	3-27
义	3.1 - 29	入力地震動の設定	3-28
义	3.1-30	P波速度の設定値と原位置試験結果の比較	3-29
义	3.1-31	入力地震動(今年度実施、表層の剛性を見直し)	3-30
义	3.1 - 32	【参考】入力地震動(前年度実施)	3-30
义	3.1-33	解析モデル(Case2 の場合)	3-32
义	3.1 - 34	入力地震動(モデル下端深度)(図 3.1-31 を再掲)	3-35
义	3.1 - 35	検討内容のイメージ図	3-42
义	3.1-36	1次元地盤応答解析に用いた地盤構造モデル	3 <b>-</b> 44
义	3.1 - 37	地中観測記録(No.10)を用いた地震応答解析結果の加速度時刻歴	3 <b>-</b> 44
义	3.1 - 38	加速度フーリエスペクトル比(地表/地中)の重描き(1/2)	3-45
义	3.1 - 39	加速度フーリエスペクトル比(地表/地中)の重描き(2/2)	3-46
义	3.1-40	遺伝的アルゴリズムによる逆解析で得られた最適地盤モデル	3-47
义	3.1-41	最適地盤モデルの伝達関数と観測データの幾何平均フーリエスペクトル比との	の比較
	(1/2)		3-48
义	3.1-42	最適地盤モデルの伝達関数と観測データの幾何平均フーリエスペクトル比との	の比較
	(2/2)		3-49
义	3.2 - 1	地下の地震計の設置位置平面図(全体)と設置状況	3-53
义	3.2-2	地震計の設置位置(試験施設)	3-54
义	3.2-3	計測設備の配置	3-56
义	3.2-4	RWMC 現場計測室 機器設置のネットワーク図	3-56
义	3.2-5	地震計の設置位置平面図(地表面)と設置状況	3-57
义	3.2-6	ソーラーパネルの設置状況(地表面)	3-58
义	3.2-7	メンテナンス時の草刈りと除雪の範囲	3 <b>-</b> 61
义	3.2-8	KiK-net 六ヶ所のデータの方位補正	3 <b>-</b> 63
义	3.2-9	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-66
义	3.2 - 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	3-66
义	3.2 - 11	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-67
义	3.2 - 12	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-67
义	3.2 - 13	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-68
义	3.2-14	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-68

図 3.2-16	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-69
図 3.2-17	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-70
図 3.2-18	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ図	3-70
図 3.2-19	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-71
図 3.2-20	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-71
図 3.2-21	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-72
図 3.2-22	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-72
図 3.2-23	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-73
図 3.2-24	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-73
図 3.2-25	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-74
図 3.2-26	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-74
図 3.2-27	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-75
図 3.2-28	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-75
図 3.2-29	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-76
図 3.2-30	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-76
図 3.2-31	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-77
図 3.2-32	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-77
図 3.2-33	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-78
図 3.2-34	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-78
図 3.2-35	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-79
図 3.2-36	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-79
図 3.2-37	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-80
図 3.2-38	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-80
図 3.2-39	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-81
図 3.2-40	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-81
図 3.2-41	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-82
図 3.2-42	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-82
図 3.2-43	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-83
図 3.2-44	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-83
図 3.2-45	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-84
図 3.2-46	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-84
図 3.2-47	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-85
図 3.2-48	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-85
図 3.2-49	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-86
図 3.2-50	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-86
図 3.2-51	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-87

义	3.2 - 52	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-87
义	3.2-53	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-88
义	3.2 - 54	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-88
义	3.2 - 55	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-89
义	3.2 - 56	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-89
义	3.2 - 57	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-90
义	3.2-58	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-90
义	3.2-59	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-91
义	3.2-60	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-91
义	3.2-61	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-92
义	3.2-62	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-92
义	3.2-63	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-93
义	3.2-64	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-93
义	3.2-65	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-94
义	3.2-66	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-94
义	3.2-67	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-95
义	3.2-68	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-95
义	3.2-69	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-96
义	3.2-70	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-96
义	3.2-71	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	3-97
义	3.2-72	地震計①(試験空洞底盤上) 地震動取得データ	3-97
义	3.2-73	地震計②(底部コンクリートピット上) 地震動取得データ	3-98
义	3.2-74	地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ	3-98
义	3.2-75	地震計⑤(地表面) 地震動取得データ	3-99
义	3.2-76	KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ	3-99
义	3.2-77	KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ	.3-100
义	3.2-78	計測坑 C 地震動取得データ	.3-101
义	3.2-79	計測坑 C 地震動取得データ	.3-102
义	3.2-80	計測坑 C 地震動取得データ	.3-102
义	3.2-81	計測坑 C 地震動取得データ	.3-103
义	3.2-82	計測坑 C 地震動取得データ	.3-103
义	3.2-83	計測坑 C 地震動取得データ	.3-104
义	3.2-84	計測坑 C 地震動取得データ	.3-104
义	3.2-85	計測坑 C 地震動取得データ	.3-105
义	3.2-86	計測坑 C 地震動取得データ	.3-105
义	3.2-87	計測坑 C 地震動取得データ	.3-106

义	3.2-88	計測坑 C 地震動取得データ	3-106
义	3.2-89	計測坑 C 地震動取得データ	3-107
义	3.2-90	計測坑 C 地震動取得データ	3-107
汊	3.2-91	周波数特性の分析対象地震の震央位置	3-110
汊	3.2-92	各地震の周波数特性(1)	3-111
义	3.2-93	各地震の周波数特性(2)	3-112
义	3.2-94	No.9 の地震の震央の断面図	3-112
义	3.2-95	No.4 と No.12 の地震の震央の断面図	3-113
义	4.2-1	オプション絞り込みの全体フロー案(令和2年度)	4-3
义	4.2-2	バリア層と安全機能の関係(令和2年度)	4-4
义	4.2-3	オプション一覧(令和2年度)	4-6
义	4.2-4	想定される設計フロー(令和3年度)	4-7
义	4.2-5	本検討における絞り込みフロー(令和3年度)	4-7
义	4.2-6	ベースオプション(令和3年度)	4-8
図	4.2-7	母岩Aに対するオプションの費用対効果(令和3年度)	4-9
义	4.2-8	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	· (令和 4
	年度)		4-10
义	4.2-9	設計プロセス及び本検討の位置づけ	4-15
义	4.2-10	絞り込み過程のイメージ	4-15
义	4.3-1	中深度処分に対する廃止措置後の安全確保のための設計要求について原子力	規制員会
	の考え	え方(案)	4-18
义	4.3-2	検討手順	4-19
义	4.3-3	対象オプションのイメージ	4-19
义	4.3-4	核種移行モデルの概念図	4-21
义	4.3-5	坑道に平行な流向を考えた場合のプラグ間隔と通過流量の関係	4-24
义	4.3-6	流向に対応した浸透流量に対する解析モデルの概念	4-24
义	4.3-7	簡易的な施設浸透水量の解析解	4-25
义	4.3-8	低透水層の透水係数の変化と対応する施設浸透水量	4-27
义	4.3-9	ベースケースの結果の比較	4-45
义	4.3-10	ベースケースの結果に寄与する核種(参考上限シナリオ)	4-46
义	4.3-11	ベースケースの結果に寄与する核種(最尤シナリオ)	4-46
义	4.3-12	ベースケースの結果に寄与する核種(保守シナリオ)	4-47
図	4.3-13	ベースケースの結果に寄与する核種(機能喪失シナリオ・低拡散層なし).	4-47
図	4.3-14	ベースケースの結果に寄与する核種(機能喪失シナリオ・低透水層なし).	4-48
义	4.3-15	ベースケースの結果に寄与する核種(参考下限シナリオ)	4-48
义	4.3-16	多重円筒モデルと球モデルの結果の比較(最尤シナリオ)	4-50

义	4.3-17	多重円筒モデルと球モデルの結果の比較(機能喪失シナリオ・低透水層なし)	4-50
义	4.3-18	ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(最尤シナリオ)	4-52
义	4.3-19	ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(保守シナリオ)	4-52
义	4.3-20	ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(岩盤透水係数 6×10 <sup>-7</sup> m/s)	4-53
义	4.3-21	ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(岩盤透水係数 6×10 <sup>-8</sup> m/s)	4-54
义	4.3-22	ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(岩盤透水係数 2×10 <sup>-9</sup> m/s)	4-55
义	4.3-23	複数の領域を接続する概念	4-56
义	4.3-24	DoLift による解析結果(参考上限シナリオ)	4-58
义	4.3-25	不確実性に関する線量評価(通常の状態)	4-59
义	4.3-26	不確実性に関する線量評価(厳しい状態)	4-60
义	4.3-27	不確実性に関する線量評価(全状態)	4-60
义	4.3-28	頑健性に関する線量評価(最尤シナリオ)	4-61
义	4.3-29	頑健性に関する線量評価(保守シナリオ)	4-62
义	4.3-30	線量差例(基本オプション)	4-62
义	4.3-31	頑健性に関する線量評価(最尤シナリオと保守シナリオの線量差)	4-63
义	$5.1 \cdot 1$	本研究のターゲットと研究の方向性	5-4
义	5.2 - 1	ベントナイト系材料の透水特性データの取得(研究のフレームワーク)	5-9
义	5.2-2	当初実施予定の6材料の粒度特性	5-11
义	5.2 - 3	今年度追加した細粒分の粒度特性	5-11
义	5.2-4	追加実施した 30%混合土の粒度特性(既往データ併記)	5-11
义	5.2 - 5	細粒分単体及び 30%混合土の塑性指数	5-12
义	5.2-6	試料の混合・加水状況	5-13
义	5.2-7	各ベントナイト混合土の試料状態	5-13
义	5.2-8	カオリン混合土 10%の各含水比における試料状況	5-14
义	5.2-9	カオリン混合土 30%の各含水比における試料状況	5-14
义	5.2 - 10	モールド内の試料状況と締固め状況	5-15
义	5.2 - 11	締固め試験に用いたアクリル円筒とマイクロスコープ	5-15
义	$5.3 \cdot 1$	非塑性材料の粒度曲線	5-17
义	5.3-2	非塑性材料の 1Ec 締固め曲線	5-17
义	5.3 - 3	非塑性材料の 1Ec 締固め~透水試験結果	5-18
义	5.3-4	非膨潤性材料の粒度曲線	5-19
义	5.3 - 5	非膨潤性材料の 1Ec 締固め曲線	5-20
义	5.3-6	非膨潤性材料の 1Ec 締固め~透水試験結果	5-20
义	5.3-7	ベントナイト混合土の粒度曲線	5-21
义	5.3-8	ベントナイト混合土の 1Ec 締固め曲線	5-22
义	5.3 - 9	ベントナイト混合土の 1Ec 締固め~透水試験結果	5-22

义	$5.3 \cdot 10$	ベントナイト混合土の最小透水係数の整理イメージと圧密試験装置	5-24
义	5.3-11	非塑性材料~高塑性膨潤性材料に至る透水特性の整理イメージ	5-24
义	5.3-12	細粒分の塑性/膨潤性と混合率が透水特性に及ぼす影響の整理イメージ	5-25
义	5.3-13	λ/ε 実験の供試体条件(購入砂+カオリン10%、30%混合)	5-25
义	5.3-14	λ/ε 実験結果(購入砂+カオリン 10%)	5-26
义	$5.3 \cdot 15$	λ実験結果(購入砂+カオリン 30%)	5-27
义	$5.3 \cdot 16$	ε実験結果(購入砂+カオリン 30%)	5-27
义	5.3 - 17	λ/ε実験の供試体条件(粒度調整材単体、カオリン 30%混合)	5-28
义	5.3-18	$\lambda \epsilon$ 実験結果(粒度調整材単体 既報告)	5-28
义	5.3-19	$\lambda$ 実験結果(粒度調整材 $+30\%$ カオリン)	5-29
义	5.3-20	ε実験結果(粒度調整材+30%カオリン)	5-29
义	5.3 - 21	λ/ε 実験終了後供試体の観察結果(粒度調整材+30%カオリン)	5-29
义	5.3-22	既往研究事例(Mitchell&Soga、龍岡)との比較	5-30
义	5.3-23	$\lambda$ 実験結果の総括	5-32
义	5.3-24	ε 実験結果の総括	5-32
义	5.3 - 25	購入砂+5%クニゲルの λ/ε 実験結果(途中経過)	5-33
义	5.3-26	各ベントナイト混合土の締固め状況	5-34
义	5.3 - 27	実体顕微鏡(Nikon SMZ18)	5-35
义	5.3-28	実体顕微鏡により撮影したベントナイト混合土の供試体画像(不飽和)	5-35
义	5.3 - 29	ベントナイト混合土供試体の飽和状況	5-36
义	5.3 - 30	実体顕微鏡により撮影したベントナイト混合土の供試体画像(飽和)	5-36
义	5.3 - 31	カオリン混合土 10%の締固め供試体画像	5-37
义	5.3-32	カオリン混合土 30%の締固め供試体画像	5-38
义	5.3-33	実体顕微鏡により撮影した供試体画像(カオリン混合土 10%)	5-38
义	5.3-34	実体顕微鏡により撮影した供試体画像(カオリン混合土 30%)	5-38
义	5.3 - 35	突固め回数による乾燥密度及び締固め曲線の変化	5-39
义	5.3-36	アクリル容器側面から見た締固めによる供試体の変化	5-40
义	5.3 - 37	供試体高さと乾燥密度の関係	5-40
义	5.3-38	マイクロスコープによる供試体表面画像と輝度ヒストグラム	5-41
义	5.3 - 39	乾燥密度と標準偏差の関係	5-41
义	5.3-40	非塑性~非膨潤性~膨潤性細粒分混合土における土粒子間隙構造の変化	5-43
义	5.3-41	非塑性~非膨潤性~膨潤性細粒分混合土における透水特性メカニズムの変化(	案)
			5-44
义	5.3-42	ベントナイト含水比 WBT による実験結果の整理案	5-45
义	5.3 - 43	ベントナイト(細粒分)含水比 WBT 及び液性指数 IL による実験結果の整理案	5-46
义	5.3 - 44	カオリン含水比 WKA及び液性指数 ILによる実験結果の整理案	5-47

义	5.3 - 45	飽和度 Sr・有効モンモリロナイト湿潤密度 pmw・ベントナイト含水比 wbrの定義	5
			5-49
义	5.3-46	締固め時飽和度以外の指標による透水特性の整理(ベントナイト 10%混合土)	
		E	5-49
义	5.3 - 47	締固め時飽和度以外の指標による透水特性の整理(ベントナイト 30%混合土)	
			5-50
义	5.3 - 48	飽和度 Sr・有効モンモリロナイト湿潤密度 pmw・ベントナイト含水比 wBTの関係	
			5-50
义	5.3 - 49	膨潤性/非膨潤性混合土の透水特性メカニズムの比較	5-51
义	5.3 - 50	ベントナイト混合土の諸要因が品質(遮水性能)と施工性に及ぼす影響	5-51
义	5.3 - 51	ベントナイト混合土転圧時の施工性(走破性)に関する検討	5-52
义	5.3 - 52	重回帰分析における係数 λ(乾燥密度項)と材料特性の関係	5-53
义	5.3 - 53	重回帰分析における係数 ε(飽和度項)と材料特性の関係	5-54
义	5.3 - 54	重回帰分析における定数項γと材料特性の関係	5-54
义	5.3 - 55	レーザ回折式粒子径測定装置と用いた供試土	5-55
义	5.3 - 56	レーザ回折式粒子径測定結果と沈降分析結果の比較	5-55
义	5.3 - 57	顕微鏡画像における飽和・不飽和供試体の比較	5-56
义	5.3 - 58	DEM 解析に用いた各含水比における粒子塊	5-57
义	5.3 - 59	DEM 解析に用いたベントナイト混合土特性	5-57
义	5.3-60	<b>DEM</b> 解析による変形図	5-58
义	5.3-61	DEM 解析による締固め回数と乾燥密度・締固め曲線関係の結果	5-58
义	5.3-62	各解析における粒子塊ダメージ量分布	5-59
义	5.3 - 63	各解析における粒子塊の変形状況の一例	5-59
义	5.3-64	上端面から見た間隙比分布図	5-60
义	5.3 - 65	各解析ケースにおける間隙比のヒストグラムと平均値・標準偏差の関係	5-60

±.	Ħ	$\chi_{h}$
衣	Ħ	一八

表	1.3-1	令和5年度の実施工程表1-6
表	1.3-2	再選定試験に用いた接着剤一覧1-8
表	1.3-3	現場検証試験における現場調査数量1-9
表	1.3-4	室内締固め-透水試験の実施状況と今後の実施計画案(実験A、実験B)1-16
表	1.3-5	令和5年度検討委員会実施経緯1-19
表	2.1 - 1	再選定試験に用いた接着剤一覧
表	2.1-2	ひずみ測定器の主な仕様2-29
表	2.1 - 3	現場検証試験における現場調査数量2-57
表	2.1-4	現場工程表(予定と実績)
表	2.1-5	試験孔掘削の仕様
表	2.1-6	試験孔掘削用機械
表	2.1-7	試験孔掘削用の主な資機材
表	2.1-8	試験区間掘削用の主な資機材
表	2.1-9	試験孔掘削の概要
表	2.1 - 10	試験孔掘削地点周辺の地質層序2-79
表	2.1 - 11	ー軸繰返し試験及び三軸圧縮試験(CD・CUB)の結果一覧2-104
表	2.2 - 1	令和5年度の工程
表	2.2-2	三軸圧縮試験条件
表	2.2-3	パラメータ
表	2.2-4	水圧破砕法試験結果(水平面内主応力)2-119
表	2.2-5	実施項目、実施目的及び実施内容2-122
表	2.2-6	パラメータ
表	2.2-7	初期地圧2-126
表	2.2-8	パラメータ
表	3.1-1	令和5年度の工程
表	3.1 - 2	引戻し解析の精度向上の課題と対応策
表	3.1-3	初期せん断剛性に乗じる倍率の補正前後の結果
表	3.1-4	1次元引戻し解析の入力物性値(水平動検討用)
表	3.1 - 5	1次元引戻し解析の入力物性値(鉛直動検討用)
表	3.1-6	検討ケース
表	3.1-7	材料モデル
表	3.1-8	解析物性值一覧
表	3.1 - 9	解析結果と観測結果の比較(地震計①位置、y方向)
表	3.1-10	解析結果と観測結果の比較(地震計①位置、z方向)

表	3.1-11	解析結果と観測結果の比較(地震計③位置、y方向)3-39
表	$3.1 \cdot 12$	解析結果と観測結果の比較(地震計③位置、z方向)3-40
表	3.1-13	検討で使用した地震記録一覧3-43
表	3.2 - 1	地震観測のための計測システム(地下)
表	3.2-2	地震計の仕様(地下)
表	3.2 - 3	地震観測のための計測システム(地表面)3-55
表	3.2-4	地震計の仕様(地表面)
表	3.2-5	回収データの仕様
表	3.2-6	データ取得した地震の諸元
表	3.2-7	各地震計のデータ取得の有無
表	3.2-8	地表と地下の最大加速度の比較
表	3.2-9	周波数特性の分析対象地震の一覧
表	4.2-1	施工の実現性のあるオプション絞り込み(令和2年度)4-
表	4.2-2	工学的技術性における重要度の尺度の決定(令和2年度)4-
表	4.2-3	解析ケース(令和3年度)4-8
表	4.2-4	母岩Aに対して抽出したオプションの仕様(令和3年度)4-8
表	4.2-5	「主要な事項」が異なる例(令和4年度)4-10
表	4.2-6	安全機能と構成要素の関係(令和4年度)4-12
表	4.2-7	人工バリアの機能及び代表因子(令和4年度)4-12
表	4.2-8	人工バリアの代表因子に係るパラメータ設定に資する条件(令和4年度)4-1
表	4.2-9	天然バリアの機能及び代表因子(令和4年度)4-12
表	4.2-10	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(令和4年度)4-12
表	4.2-11	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)(令和4年度)
表	4.2 - 12	過年度検討のまとめ4-14
表	4.2 - 13	検討項目の具体化4-16
表	4.3-1	簡易的な状態設定4-18
表	4.3-2	対象オプションの仕様4-20
表	4.3-3	解析上のジオメトリーの設定4-26
表	4.3-4	インベントリの設定値(1)4-29
表	4.3-5	インベントリの設定値(2)4-30
表	4.3-6	インベントリの設定値(3)4-31
表	4.3-7	インベントリの設定値(4)4-32
表	4.3-8	インベントリの設定値(5)4-33
表	4.3-9	領域ごとの分配係数(1)4-38
表	4.3-10	領域ごとの分配係数(2)4-36

表	$4.3  ext{-}11$	河川水飲用に係るパラメータ	.4-37
表	4.3-12	経口摂取による線量換算係数(1)	.4-38
表	4.3-13	経口摂取による線量換算係数(2)	.4-39
表	4.3-14	経口摂取による線量換算係数(3)	.4-40
表	4.3-15	低透水層の透水係数の設定例	.4-41
表	4.3-16	低拡散層の拡散係数の設定例	.4-41
表	4.3-17	天然バリア(廃棄体埋設施設近傍)水理パラメータの設定例	.4-41
表	4.3-18	天然バリア(廃棄体埋設施設近傍以外)水理パラメータの設定例	.4-41
表	4.3-19	初期のパラメータ	.4-42
表	4.3-20	1万年後のパラメータ	.4-42
表	4.3-21	10 万年後のパラメータ	.4-42
表	4.3-22	天然バリア変動パラメータ	.4-43
表	4.3-23	解析ケースに適用したデータ(再整理結果)	.4-44
表	4.3-24	各ケースにおいて支配的となる核種	.4-45
表	4.3-25	DoLift で解析対象とした核種	.4-57
表	5.2 - 1	研究の全体 5 ヵ年計画(見直し・修正後)	5-5
表	5.2-2	2023 年度の実施計画と実施工程	5-6
表	5.2 - 3	室内締固め~透水試験の実験条件一覧と 2024 年度の実施計画案	.5-10

# 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 200 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、岩盤に作用する初期地圧の 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、前年度に実施した測定装置の詳細設計・製作、 並びに室内検証試験・現場検証試験の結果に基づき、設計の見直し、装置の製作、室内や現 場での更なる検証試験を実施し、令和6年度に実施を計画している本格的な現場検証試験の 準備を行う。また、室内・現場検証試験等のシミュレーションを別途実施し、解析手法の適 用性と初期地圧測定装置の仕様を検討する。

(2) 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た地震動デー 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

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。ここでは、日本原燃株式会社が公表している敷地内の天然バ リア環境のデータや、掘削可能な地下空洞の形状・寸法を参照し、人工バリア等の工学的な 構成要素について関連する安全機能を精査し、安全機能の更なる改善、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複数の技術オプションを整備する。また、処分システ ムをどのような過程で絞り込み選択するかの手法についても検討する。

それらを踏まえ、処分深度、地下水流動、空洞形状・寸法、人工バリア、埋戻し材、施工 性、操業性等を考慮した処分施設の設計オプションを選定し、性能評価結果に与える影響を 比較する。なお、開発にあたっては、これまで、大断面の地下空洞内に実規模試験施設を構 築し、より現実に即した条件下で実証した施設の施工技術、センサー等を用いた施工後のモ ニタリング技術等の成果も活用する。

令和5年度は、前年度までに実施した調査・検討の結果から抽出された技術課題の解決に 向け、技術オプション絞り込み手法の高度化、長期安全性評価の高度化に向けた検討を実施 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、締固め一透水試験、乾燥密度一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5年度の実施概要

令和5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、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5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5年度の成果の概要を示す。

	令和5年度											
実施項目等	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	初期均	也圧測定	産装置の	開発に「	向けた詞	《験装置	の詳細	設計、調	試験装置	の製作	、検証	試験
の高度化開発		ł	刃期地日	観定の	開発に	付随した	-技術課	見題の検	討			
2)地震時影響評価技			坩	也震時影	響評価	技術の材	食討					
術の検討及び地震動 観測	地震	貢動観測	ג× ע	レテナン	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)技術オプションの検 討	技術オ	プショ	ンの検討	寸(モテ	ル化、	感度解	<b>沂、</b> オン	プション	∕抽出、	比較検討	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	実験言	羊細計画	町 イ	- 各種実験	の実施	、デー	タの取得	导・整理	ē・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	員会の詞	委員会 ▼ 2置・運	営		UV.	委員会 ▼			委員会 ▼	

#### 表 1.3-1 令和5年度の実施工程表

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。

前年度までの検討結果を踏まえて、今年度は以下の内容を 実施した。

- ・本手法により適した接着剤を選定するための室内試験
- ・応力評価の方法を確立するための感度試験や応力解析の 方法の検討
- 前年度の試験結果をふまえた、ひずみ計貼付装置や掘削
   ツールス等の製作や改良
- ・改良した測定方法の検証のための室内及び現場での実証 試験



図 1.3-1 円錐孔壁ひずみ法の概要図

前年度の室内試験や現場試験でストレインセルの岩石や岩盤への接着が不十分であった ため、本応力測定法により適した接着剤の追加調査を行った。水中で接着でき、硬化後の接 着剤の剛性(ここではヤング率)が対象岩盤の剛性に近く、可使時間が 1~2 時間程度のエ ポキシ樹脂接着剤を調査したところ、前年度までに使用していた HIC 接着剤や三菱ケミカ ル社製のヤング率277MPa程度となる配合比のエポキシ樹脂接着剤に加えて、新たに2つの 接着剤としてコニシ社製のエポキシ樹脂 E205 とアルファ工業社製のアルファテック 380FX が見つかった。また、三菱ケミカル社製のエポキシ樹脂接着剤の配合を変えてヤング率が異 なるものを2種類用意した。各接着剤の特徴をまとめた一覧表を表 1.3-2 に示す。

これらの候補接着剤を対象に、岩石への接着試験、接着剤供試体の物性試験、ひずみの 測定感度の比較試験、接着剤の硬化特性の確認試験等の結果に基づき、⑤のコニシ製エポキ シ樹脂接着剤(E205)が本測定法の接着剤として最も適していると判断した。

No.	呼称	メーカー	接着剤名	粘性	可使時間	硬化時間	比重	ヤング率E	備考
				(mPa•s)	(min)	(h)		(MPa)	
1	HIC接着剤	Earth Sciences	HIC接着剤	-	20~30	16	1.6	4220	昨年度の室内試験で使用
2	ケミカルE277	三菱ケミカル	エポキシ樹脂 jER_ST	-	40~	24~	1.1	277	昨年度の室内・現場試験で 使用。ストレインセルのエポ キシ樹脂部分と同じ材料から 作製
3	ケミカルE548	同上	同上	-	-	-	1.1	548	接着剤②の混合液の配合比 を変えたもの
4	ケミカルE125	同上	同上	-	-	-	1.1	125	同上
5	コニシe205	コニシ	エポキシ樹脂 E205	130±20	45±10	24	1.1	1100	コンクリートひび割れ補修や 崩壊しやすい岩石試料の充 填整形に使用されているもの
6	アルファテック	アルファ工業	アルファテック 380FX	550	58	_	1.2	_	硬化物は柔軟性を有してお り、動きのあるコンクリートの ひび割れ補修に適したもの

表 1.3-2 再選定試験に用いた接着剤一覧

これと並行して、感度試験と応力解析の方法の検討、ひずみ計貼付装置や掘削ツールス 等の製作や改良を進めた上で、改良した測定方法の検証のための室内及び現場での実証試験 を実施した。

室内検証試験では、新たに選定したコニシ社製のエポキシ樹脂接着剤(呼称:コニシ e205)を用いて、大谷石と六ヶ所の軽石凝灰岩の2種類の岩石ブロックを使った室内試験を 行い、新たな接着剤の適用性や応力解析結果の妥当性を確認した。

現場検証試験は、青森県六ヶ所村の現場フィールドにて、前年度(試験孔掘削長 6m)よりも深い深度で、初期地圧測定に係る一連の作業性の確認と測定したひずみ・算出した応力の妥当性確認を目的に実施した。現場検証試験における現場調査数量を、表 1.3・3 に示す。

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 パイロット孔底に円錐孔壁掘削(孔径 56mm~36mm)
- ④ 孔内洗浄
- ⑤ 孔内カメラによる孔内観察
- ⑥ ひずみ測定器の円錐孔壁への接着
- ⑦ 孔径 116mm でオーバーコリング
- ⑧ 掘削したコアを観察し、コアの損傷程度を確認
- ⑨ 周載荷感度試験を実施
- ⑩ 深度を変えて、上記①~⑨を繰り返す

今年度の現場検証試験により、本手法の技術課題として以下の点が明らかになったため、 次年度に課題解決を図る。

- ・ 解放ひずみの評価方法及び応力解析方法に関する検討の継続
- ・ 試験深度での接着不良の原因と考えられる湧水影響や接着時の偏芯への対策

- ・ ひずみ測定器のデータロガー部分の性能向上(記憶容量、電池容量、収録内容など)
- ・ 円錐部から 36mm 孔の掘削コアの品質改善
- ・ センタリングガイドケーシング設置時の 116mm 孔の孔底でのケーシング内外間の水流 の抑制
- ・ 深部測定に対応するための孔内カメラの先端パーツの耐圧強化
- より深い深度での本応力測定法の適用性評価や標準法との応力測定結果の比較
- 周載荷感度試験方法の改良に関する検討の継続

	実施数量				
項 目	現場試験孔( $\phi$ 116mm)				
試験孔掘削	35.15m×1 孔				
コア観察、柱状図	35.15m×1 孔				
ボーリング孔閉塞	なし(裸孔残置、孔口湧水処理)				
本応力測定法の検証試験	4 箇所				
間隙水圧測定	2箇所				

表 1.3-3 現場検証試験における現場調査数量

初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討では、初期地圧測定時の岩盤の塑性化・ 破壊のメカニズムを解明するための解析手法(DEM 解析)を用いて、同手法の岩盤状態評 価手法としての適用性を確認するため、原位置試験(水圧破砕法試験)及び現場検証試験 (円錐孔壁ひずみ法)のシミュレーションを実施した。

はじめに、原位置試験(水圧破砕法試験)のシミュレーションでは、これまでの三軸圧 縮試験、室内検証試験のシミュレーションで適用性が確認されている解析手法を用いて、既 往の水圧破砕法試験の再現性向上を図った。まず、水圧破砕法試験と同じ岩種で実施した三 軸圧縮試験のシミュレーションを実施して、DEM 粒子パラメータを設定し、そのパラメー タを用いて、水圧破砕法試験のシミュレーションを実施した。

既往検討では、シミュレーションの破砕圧が試験値を超過するとともに、微視クラック が周辺に拡大し、現場検証試験の発生モードと異なる傾向が示された。この原因として、パ ラメータを設定する三軸圧縮試験(延性的)と水圧破砕法(脆性的)で、両者の破壊後挙動 が相違すること、粒子形状(クランプ)により延性的な破壊モードとなり、水圧破砕の脆性 破壊を再現できなかった可能性がある。対応策として、岩盤の破壊後挙動の再現性向上が期 待できる DEM の接触モデルを用いてシミュレーションを実施することとした。

三軸圧縮試験シミュレーションによる応力 - ひずみ曲線のフィッティング結果を図 1.3-2 に、水圧破砕法シミュレーション結果を図 1.3-3 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を用いた水圧破砕法シミュレーションの結果、微視クラックは、水圧が 5.1MPa 程度から発生し始めて、破砕圧 5.3MPa で最大主応力方向に卓越する結果を得た。

以上のように、粒子モデル等の見直しにより、水圧破砕法シミュレーションの再現性を 向上することができた。



図 1.3-2 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



図 1.3-3 水圧破砕シミュレーション結果

次に、現場検証試験(円錐孔壁ひずみ法)のシミュレーションでは、初期地圧測定装置 の開発に資するために実施した現場検証試験のシミュレーションを行い、現場検証試験の実 データとの比較を行った。

現場検証試験シミュレーションにおいても、現場検証試験箇所と同一岩種の三軸圧縮試 験結果のシミュレーションを実施して、DEM パラメータを設定し、現場検証試験のシミュ レーションを実施した。

三軸圧縮試験のシミュレーションは、初期弾性係数、ピーク強度は再現できたが、破壊 前の非線形性が整合しない結果となったため、今後、フィッティングの精度を向上させる必 要がある。次に、現場検証試験シミュレーションの結果、微視クラックは、特定の方向に連 続して発生する傾向が認められた。一方で、現場検証試験のコア観察でクラックは認められ ない。また、ひずみの発生傾向が実測挙動と整合しない部分が認められ、今後、実測値の評 価も含めて、上記課題を解決し、シミュレーションの再現性向上を計る必要がある。
(2) 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、現地で実施している地震計測システムで取得し た地震動データを活用して、入力地震動の設定及び地震応答解析による地震時挙動の再現性 に関する検討を実施した。

入力地震動設定では、逆解析による地盤物性値の検討を行った結果、現地の地表付近の 軟らかい地盤剛性を反映した物性値設定により、入力地震動の精度が向上することがわかっ た。

設定した入力地震動を用いた2次元地震応答解析を実施した結果、図1.3-4に示すように、 水平動の応答については、試験空洞及び試験施設の加速度レベルの再現性が向上した。しか し、鉛直動の応答については、解析結果と観測結果に差異が残ったままとなり、鉛直動の入 力地震動作成の課題が残った。

また、観測地震動データに適合した最適地盤モデルを合理的に取得することを目的とした「遺伝的アルゴリズムを用いた地盤物性逆解析手法」について、観測地震動データを基に 作成した模擬観測波を用いて検討し、本手法の妥当性を確認した。

今年度は、観測地震動 1 波を用いて 2 次元地震応答解析による試験空洞及び試験施設の 地震時挙動の再現性を確認したが、今後は異なる振動特性を含む観測地震動を用いた場合の 空洞及び施設応答の再現性の確認を実施予定である。

地震動観測については、現地の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 1.3-4 解析結果(昨年度、今年度)と観測結果の比較(地震計③位置、水平方向)

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) 技術オプションの検討

技術オプションの検討では、これまで、令和2年度の検討では、ALARA(As Low As Reasonably Achievable)を考慮した技術オプション絞り込みのための評価手法について、施設設計の観点から考え方を整理した上で、評価の試行を実施し、評価を進める際の課題を抽出した。また、令和3年度の検討では、人工バリアの部材厚さに着目し、線量と費用を評価項目としたオプションの絞り込みを実施した。さらに、令和4年度は、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。今年度は、中深度処分に求められる設計プロセス及び設計オプションを明確にするために、これまでの検討成果を整理したうえで、合理的な設計オプションの抽出方法や絞り込み手法について検討することとした。

過年度検討の調査結果より、規制要求では複数の設計オプションを比較し、検討結果 を過程(設計プロセス)とともに示すことが要求されており、その際選定される設計オ プションは合理的な範囲で最も優れている必要がある。しかしながら、この要求を満た すためには複数のオプションに対して線量評価などの人工バリア・天然バリアの長期性 能に係る解析を実施する必要があり、検討数が膨大となるため検討対象とする全てのオ プションに対して詳細かつ精緻な解析・検討・評価を行うことは非現実的である。その ため、本検討では段階的な検討を組み込み、複数の設計オプションから絞り込んだうえ で最終的な比較を実施する考え方を示した。過年度検討、国内外の事例に基づき作成し た本検討における設計プロセスのフローを図 1.3-5 に示す。設計プロセスを前半と後半 に分割し、概念検討において感度解析や線量評価により 2、3 のオプションを選定し、 選定されたオプションに対して詳細検討を実施する構造とした。また、概念検討におい て最新技術の調査結果に応じて都度見直しを図る、前半・後半の線量評価において明ら かな差異がある場合は見直すなど、場合によっては前段階へ戻る方針とし、条件変更に も柔軟に対応できるフローとした。本検討では、サイトや廃棄体条件は既知という前提 のもと、前半フローに当たる概念検討を実施した。



図 1.3-5 提案した設計プロセスのフロー及び本検討の位置づけ

規制基準で示されている設計プロセスは、ALARA が強く意識されている。過年度の 検討では、ALARA の R (Reasonably)を考慮する際に経済性を指標として事例検討を 行ったが、今年度は、設計オプションが有する不確実性や頑健性を評価する方法を試み た。

線量評価における解析モデルの概念図を図 1.3・6 に示す。解析モデルは GoldSim に よって作成した。なお、施設浸透水量の設定は、多重円筒モデル及び多重球モデルで近 似した。透水係数や拡散係数は、評価対象としたシナリオに基づき、時間変化を想定し た。核種移行率の線量への変換は、河川水の飲用のみと単純化した。



核種移行解析結果の一例を、図 1.3-7 に示す。ケースは人工バリアからの核種移行率 を線量に変換(図中では Index と表示)したものである。対象としたシナリオは、最尤 としたデータセットを用いた。



設計プロセスを前半・後半に分割し、本年度では前半にあたる概念検討を対象として、人 エバリアの長期安全性に着目した比較評価を新たに実施した。比較評価では ALARA を考慮 して、性能面における合理的なオプションについて検討した。簡易的ながらも原子力規制委 員会の考え方及び原子力学会標準を参考に複数の状態を設定し、オプションが取り得る被ば く線量値の幅及び状態ごとの線量の分布を求めることで、オプションの有する不確実性や頑 健性を評価する際の考え方、具体的な方法、事例検討での評価結果を提示した。評価するポ イントにより選定されるオプションが異なるため、オプション選定時は複数の視点から評価 し、総合的な観点から良好なオプションを判断することの重要性が浮き彫りとなった。

(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

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、初年度に策定し過年度に一部見直した5ヵ年計画に 従い、実験A~実験E(このうち、実験Dは前年度までに完了)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 ための室内締固め一透水試験である。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は実 体顕微鏡による締固め土の構造観察、実験Eは締固め過程の間隙構造形成プロセスの観察と なる。

実験 A から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、それぞれ実験データとして取得 された。実験 C から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。更に、実験 E からは締固め時の初期含水比の違いに起因する土 粒子骨格構造の違いが観察された。

表 1.3・4 に室内締固め – 透水試験の実施状況と今後の実施計画案を示す。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、ベントナイト混合土の 1Ec 締固め試料を対象とした締固め曲線と透水試 験結果を図 1.3・8 に示す。クニゲル V1 混合土の場合、混合率が 5%、10%、30%と増加 するにつれ、透水係数が一桁ずつ低下、遮水性が混合率に直結していることを示す。ま た、5%の貧配合混合土も含め、1Ec 締固めの条件下では締固め含水比に対する透水係 数の変化は非常に小さく、いわば、施工含水比のばらつきに対して安定的な遮水性の発 現を確認できる。一方膨潤性の低い Ca 型ベントナイト混合土は、最小透水係数だけで 比較すると、同じ混合率のクニゲル V1 混合土に対して1オーダー程度大きな透水係数 値を示しているものの、締固め含水比の変動に対する変化が非常に大きく、乾燥側締固 めでは湿潤側に対して数百倍の透水係数値を示している点が特徴的と言える。

	母材	添加する細粒分	混合率	1Ec締固め~透水 (6本)	λ / ε 実験 (12本)	令和6年度		
<b>^</b>	購入砂	無し	0		0			
	粒在調敷材	無し	0	0	0			
	11/2 前 王 们	珪砂紛(0)	30	R5年度実施済	-			
	微粒砂(珪砂粉単体)	無し	0	R5年度実施済	-	済		
		珪砂紛(0)	10	0	0			
	_	-1.0 101 (0)	30	R5年度実施済	-			
Ť		藤森粘土(18)	10	R5年度実施済	-			
青:非塑性材料	<b>勝入 が</b>		30	R5年度実施済	12	12本実施		
	7 <b>H</b> 7 <b>(</b> 19	大筋壯十(17)	10	0	0			
黄:非膨潤性材料		不即相工(47)	30	R5年度実施済	-			
灰:膨潤性材料			10	0	0			
		微粉カオリン	30	R5年度実施済	R5年度実施済	済		
単体の塑性指数	粒度調整材	(01)	30	R5年度実施済	R5年度実施済			
•		Ca型BT (110)	5	R5年度実施済	-			
	購入砂		10	R5年度実施済	12	12本実施       6本実施		
			20	R6年度実施予定	-			
			30	R5年度実施済	12	12本実施		
	粒度調整材	]	20	R6年度実施予定	-	6本実施		
	微粒砂(珪砂粉単体)		30	R6年度実施予定	—	6本実施		
			5	R5年度実施済	R5年度1/2実 施済(6本)	残り6本実施		
	購入砂	クニゲルV1(363)	10	0	0	*		
		: JGS0312	30	0	0	洱		
○ <b>:既実施</b>			20	R6年度後半(6本)	-			
赤:R5年度実施済	<b>0# 3</b> 74	カオリン	20	1EC締固め~コーン	-	6本実施		
緑:R6年度実施予定	購入앧	Ca型BT (110)	20	試験(6本)	-			

表 1.3-4 室内締固め-透水試験の実施状況と今後の実施計画案(実験 A、実験 B)



図 1.3-9 は、非塑性非膨潤性材料(珪砂粉)~低塑性非膨潤性材料(藤森)~高塑性 非膨潤性材料(カオリン)~高塑性低膨潤性材料(Ca型ベントナイト)~超高塑性高 膨潤性材料(クニゲル V1)の順に特性が変化する細粒分を同一母材(購入砂)に混合 した際の透水係数の変化を示したものである。添加する細粒分の混合率を横軸に、1Ec

締固め供試体の最小透水係数を縦軸に取り、添加する細粒分の塑性や膨潤性の有無毎に 混合率と最小透水係数の関係を整理した。図中には、非塑性材料の遮水性能の下限ライ ン(10<sup>-7</sup>m/s)及び実験 B において透水係数の急減(ジャンプ)が生じた遷移領域の概 ねの下限値(10<sup>-9</sup>m/s)を併記した。図中には、これら3領域において混合土の土粒子間 隙構造にどのような変化が生じているかの想定を併記している。非塑性材料では土粒子 同士が骨格構造を形成し、非塑性の細粒分が母材間隙を充填する構造を取る。透水試験 時の水はその残存間隙を浸透し、残存間隙は材料の粒度や締固め密度(間隙比)により 決まる。透水係数の遷移領域の上半分(10<sup>-9</sup>m/s 以上)の領域では、細粒分ケーキやベ ントナイトゲルが均一な被膜構造を形成するに至らず、土粒子骨格の残存間隙と被膜が 混合した構造を有しており、湿潤側の加水~混合~締固めにより均一な細粒分被膜が面 的に形成された瞬間に、一気に透水係数のジャンプが発生するものと想定される。被膜 形成は、被膜の原材料(吸水した細粒分ケーキやベントナイトゲル)の総量と締固め時 の圧延性により決定され、細粒分の塑性や膨潤性と混合量がこれを左右するのではない かと考えられた。次年度は、この仮説を検証するために、図の3領域に相当する代表的 な細粒土材料と混合率の組合せのもと締固め供試体を作製し、今年度試行した顕微鏡観 察(表面の湿潤化含む)と画像解析手法により、その妥当性を確認することを通じて、 土質系材料の透水メカニズムについて理解を深める予定である。



<sup>※1</sup>Ec締固めにおける最小透水係数(湿潤側供試体)でプロット

図 1.3-9 非塑性~非膨潤性~膨潤性細粒分混合土における土粒子間隙構造の変化

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5年度の検討の経緯を表 1.3-5 に示す。

開催日	場 所	審議内容
第1回 令和5年7月18日	(web 会議)	<ul> <li>令和5年度実施計画のレビュー</li> <li>初期地圧測定技術の高度化開発</li> <li>地震時影響評価技術の検討及び地震動観測</li> <li>技術オプションの検討</li> <li>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</li> </ul>
第2回 令和5年11月14日	(web 会議)	<ul> <li>令和5年度中間成果のレビュー</li> <li>初期地圧測定技術の高度化開発</li> <li>地震時影響評価技術の検討及び地震動観測</li> <li>技術オプションの検討</li> <li>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</li> </ul>
第3回 令和6年2月15日	(web 会議)	<ul> <li>令和5年度最終成果のレビュー</li> <li>初期地圧測定技術の高度化開発</li> <li>地震時影響評価技術の検討及び地震動観測</li> <li>技術オプションの検討</li> <li>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</li> </ul>

表 1.3-5 令和 5 年度検討委員会実施経緯

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:第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈の制定について、原規規発第2109292号、令和3年9月29日
- [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.

## 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

# うち、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う

## ち、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と検証試験

#### 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。

前年度は、円錐孔壁ひずみ法で用いる試験装置の基本・詳細設計、製作、室内検証試験、 浅深度現場検証試験を行った。

それらを受けて、今年度は以下の内容を実施した。

- ・本手法により適した接着剤を選定するための室内試験
- ・応力評価の方法を確立するための感度試験や応力解析の方法の検討
- ・前年度の試験結果をふまえた、ひずみ計貼付装置や掘削ツールス等の製作や改良
- ・改良した測定方法の検証のための室内及び現場での実証試験



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。

		令和5年							令和6年				
区分	項目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
既往検討成果の調査													
接着剤の選定	接着剤の追加調査・候補洗出し												
	岩石の物性試験												
	セル片の六ヶ所岩石への接着試験												
	接着剤の硬化特性(硬化時間やヤング率の経時変化)の把握												
	六ヶ所円柱岩石試料の掘削・感度試験												
	湧水の影響確認試験												
	ブロック載荷試験(接着剤1~2種、大谷石や六ヶ所岩石)					_							
感度試験+解析方	感度試験装置へのコア設置位置や設置方法の検討												
法の確立	載荷速度・載荷圧の検討												
ひずみ測定器の製	ソケット部の検討・改良												
作	収録パターンやプログラムの改良												
ひずみ計貼付装置	装置の詳細設計・協議												
の設計・製作	装置の製作			-									
アクリル容器を用	実験条件・手順の検討				_								
いた可視環境での	アクリル容器の設計・製作												
試験	可視環境での実験												
現場検証試験	試験場所の選定												
	試験条件の検討												
	事前協議												
	掘削ツールスの改良												
	現場試験(深度30~35m、軽石凝灰岩層対象、試験4回)												
結果の検証	取得データの整理・分析												
	測定法の見直し・改善点整理												
委員会報告					*				*			*	
外部発表					★地盤工学	学研究発表会							
													予定

図 2.1-2 実績工程

実績

(3) 本応力測定の手順と課題

本応力測定手法の手順を図 2.1-3 に示す。図中の①~⑩の各ステップの方法とその留意点、 及び前年度の業務実施により明らかとなった【前年度の課題】を以下に記載する。

手順① 測定深度までの掘削

図 2.1-3 の手順①にあたる測定深度までの掘削では、手順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。このため、コアチューブの上部にリーミングシェルやセンタライザー を接続し、剛性の高いボーリンロッドを用いて孔曲がりや芯ぶれの少ない掘削を行う。

ボーリング孔内で湧水があれば、ストレインセルの確実な接着や応力解析に影響が生じる。 このため、ボーリング掘進時には孔内水位や湧水圧の変化に留意し、掘進終了後には孔底付 近の間隙水圧を測定する。

孔底の残コアを除去し小口径ボーリングのパイロット孔掘削のため、先端が凸型のフラッ トビットを用いる。また、孔底にできるだけスライムを残さないためにセジメントチューブ を利用する。

2) 手順②~⑤ φ56mm 孔掘削及びパイロットボーリング

図 2.1-3 の手順②に示すように、 φ 116mm 孔の孔底からストレインセル設置のための φ 56mm 孔を掘削する。 φ 56mm 孔はオーバーコアリング時の確実なコア回収と応力解析の精度を保つため、正確なセンタリングが必要となる。このため、φ 116mm 孔の孔底にセンタリングガイドケーシングを設置して φ 56mm 孔を掘削する。 φ 56mm 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 以上とする。

その後、図 2.1-3 の手順③に示すように、パイロットボーリングとして円錐孔壁とその下 部の φ 36mm 孔を掘削する。 φ 36mm 孔はスライム溜まりとして機能する。円錐孔壁と φ 36mm 孔の掘進は、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コア から確認する。この際も、孔曲がりや芯ぶれを防止するため、センタリングガイドケーシン グの内径に合わせたセントライザーを使用する。

パイロットボーリング終了後は、図 2.1-3 の手順④に示すように、コアチューブの先端を 孔底から数 cm 上げた状態で清水を送り、排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円錐孔壁面を孔内カメラで観察する(図 2.1-3 の手順⑤参照)。 この孔壁にスライムが付着している場合は再度洗浄する。孔壁に割れ目や極端に不均質な岩 盤状況が存在し測定箇所には不適と判断された時には、再度、手順①~手順⑤の手順を実施 する。

【前年度の課題】手順③のパイロットボーリングにシングルコアチューブを使用し、回収 されたコアに機械割れが多く含まれていた。測定箇所の岩盤状況をより正確に確認するため には、掘進方法の見直しや工夫が必要である。

3) 手順⑥~⑧ ストレインセルの接着

ストレインセル接着のため、図 2.1-3 の手順⑥に示すように、接着剤注入装置をパイロット孔に挿入する。接着剤注入装置を円錐孔壁の先端まで下ろしたとき、その先端に装着された栓がφ36mm 孔に挿入される。その状態から接着剤装入装置を引き上げると先端の栓が切り離され接着剤が自然流下する。このとき手順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。

次に、図 2.1-3 の手順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、地下水に満 たされた堆積軟岩の円錐孔壁面に確実にストレインセルを接着することができる。また、ス トレインセルの表面だけでなくその上部も接着剤で固めることでひずみ測定器が固定される ことにより、オーバーコアリングによるコアの損傷を防ぐことができる。接着開始後は、こ の状態で約 20 時間養生する。

【前年度の課題】このため、再度最適な接着剤の選定と接着剤の物性試験が求められた。 前年度の室内試験や現場試験でストレインセルの岩石や岩盤への接着が不十分であったため、 接着性のより良い接着剤を再選定する必要がある。また、ひずみ測定器を完成させる。さら に、ひずみ計貼付装置は、深い深度でもより確実な切り離しを実施できるよう改良する。

#### 4) 手順⑨ オーバーコアリング及びコア回収

接着剤硬化後、ひずみ計貼付装置を地上に引き上げ、センタリングガイドケーシングも引 き上げて回収する。その後、図 2.1-3 の手順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、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、ひずみが安定した状態でのデータを収録するため、水の循環を一時停止する。なお、コ ア回収時には、測定深度から孔口までの水圧変化や温度変化の影響下でのひずみ変化のデー タも収録されている。

#### 5) 手順⑩ 周載荷感度試験

回収したコアの内部には、ひずみ測定器が接着固定されているため、その取り扱いは慎重 に行う。特に、岩石の強度が小さいため回収コアをコアチューブから取り出した後は、でき るだけ鉛直に立てた状態を維持して感度試験装置内に速やかに設置する。 回収したコアを用いて個々のひずみゲージの感度を求めるため、周載荷感度試験を行う。 この試験は、図 2.1-3 の手順⑩に模式的に示したようにコアに周圧を与えたときのひずみ変 化を求めるものである。なお、この試験を実施する前には、回収コアの岩相やその不均質性、 損傷や割れ目の有無などを観察する。また、試験後は周圧載荷による損傷なども確認する。

【前年度の課題】前年度の室内試験では周載荷感度試験によってコア軸に直交する引張破 壊が生じた。今後は、載荷圧に対するコアの加圧状況を把握し、より良い設置位置や載荷方 法などを検討する必要がある。また、前年度の室内試験においてストレインセルで測定した ひずみ変化から応力状態を評価したが、実測値と解析値の整合性が十分でなかった。そのた め、より整合性の良い解析方法をさらに検討していく必要がある。



図 2.1-3 円錐孔壁ひずみ法の試験手順

#### 2.1.2 接着剤の再選定

(1) 接着剤の追加調査

前年度の室内試験や現場試験でストレインセルの岩石や岩盤への接着が不十分であったため、本応力測定法により適した接着剤の追加調査を行った。

水中で接着でき、硬化後の接着剤の剛性(ここではヤング率)が対象岩盤の剛性に近く、 可使時間が 1~2 時間程度のエポキシ樹脂接着剤を調査したところ、前年度までに使用して いた HIC 接着剤や三菱ケミカル社製のヤング率 277MPa 程度となる配合比のエポキシ樹脂 接着剤に加えて、新たに 2 つの接着剤としてコニシ社製のエポキシ樹脂 E205 とアルファエ 業社製のアルファテック 380FX が見つかった。また、三菱ケミカル社製のエポキシ樹脂接着 剤の配合を変えてヤング率が異なるものを 2 種類用意した。各接着剤の特徴をまとめた一覧 表を表 2.1-1 に示す。

接着剤①の HIC 接着剤は、前年度の室内実験でも使用しており、十分な接着力を有するものの、ヤング率が 4220MPa と本プロジェクトで対象とする岩石のヤング率(1000MPa 程度)より大きいため、岩石の変形に追従しづらいという問題があった。なお、本接着剤はCSIRO HI セルによるオーバーコアリング法 (応力解放法の一つ)[2]でも使用されている。

接着剤②~④の三菱ケミカル製のエポキシ樹脂 jER\_ST は、主剤である可撓性付与剤 (jER871) と希釈剤 (jER811) を混ぜ、さらに硬化剤 (ダイトクラール ST12) を混ぜ合わ せる3液混合タイプである。接着剤②は前年度の室内実験や現場試験でも使用したが、粘性 が低く取り扱いやすいものの、対象岩石との接着性が十分でなかった。

また、エポキシ樹脂 jER\_ST は質量配合比を変えることで接着剤の剛性を調整できる。可 撓性付与剤の割合を増やすことでヤング率が小さくなる傾向が見られた。接着剤②~④の質 量配合比 (jER871 : jER811 : ST12) は、②が 14.6 : 21.4 : 13、③が 6 : 30 : 13、剤④が 18 : 18 : 13 である。なお、本手法で使用しているストレインセル(ヤング率 25MPa)の同配合 比は 24.1 : 11.9 : 13 である。

接着剤⑤のコニシ製エポキシ樹脂 E205 は超低粘度の接着剤であり、コンクリートのひび 割れ補修や岩石試料の充填整形などに使われている製品である。泥岩や粘土など湿潤状態の 試料にも使用実績があるため、水中環境でも十分な付着力を有することを期待して候補の一 つとした。

接着剤⑥のアルファテック 380FX はコニシと同じくコンクリート補修で使用されている 低粘度の接着剤であり、濡れたコンクリートにも高い接着性能を持つ。また動きのあるひび 割れに適しており、変形追従性が高いという特性がある。

2-9

No.	呼称	メーカー	接着剤名	粘性	可使時間	硬化時間	比重	ヤング率 <i>E</i>	備考
				(mPa•s)	(min)	(h)		(MPa)	
1	HIC接着剤	Earth Sciences	HIC接着剤	-	20~30	16	1.6	4220	昨年度の室内試験で使用
2	ケミカルE277	三菱ケミカル	エポキシ樹脂 jER_ST	-	40~	24~	1.1	277	昨年度の室内・現場試験で 使用。ストレインセルのエポ キシ樹脂部分と同じ材料から 作製
3	ケミカルE548	同上	同上	-	-	-	1.1	548	接着剤②の混合液の配合比 を変えたもの
4	ケミカルE125	同上	同上	-	-	-	1.1	125	同上
5	コニシe205	コニシ	エポキシ樹脂 E205	130±20	45±10	24	1.1	1100	コンクリートひび割れ補修や 崩壊しやすい岩石試料の充 填整形に使用されているもの
6	アルファテック	アルファエ業	アルファテック 380FX	550	58	_	1.2	-	硬化物は柔軟性を有してお り、動きのあるコンクリートの ひび割れ補修に適したもの

表 2.1-1 再選定試験に用いた接着剤一覧

- (2) 岩石への接着試験
  - 1) 試験目的

各接着剤の接着程度(付着力、接着層の厚みや均質性など)を確認し、本応力測定に適し た接着剤を選定することを目的として、岩石への接着試験を行った。

2) 試験方法

試験手順を以下に示す。

- ・ 図 2.1-4 に示すように、六ヶ所の軽石凝灰岩の岩石試料(直径 60mm、高さ 30mm)を 容器内で浸水させて、候補の接着剤を注ぎ、ストレインセルのエポキシ樹脂部分と同じ材 質のセル片(直径 50mm、高さ 50mm)を岩石上に置いて、約 2kgのウエイトを載せて 接着させた。試験環境は、温度 22~25℃、湿度 55~63%であった。
- ・ 接着後に、ばねばかりに試料を吊るして、岩石を手で引き下げて、剥がれる荷重を測定し て付着力を確認した。
- ・ 同様の方法で接着させた後、試料を半割にして接着層の様子を目視及び実体顕微鏡で観察した。なお、本観察に用いたセル片の大きさは直径 50mm、高さ 30mm とした。

3) 試験結果

a. 接着後の付着力

図 2.1-5 に示すように、①HIC 接着剤と⑤コニシ e205 の接着剤が 70kPa 以上と最も 大きく、前年度現場などで用いた②ケミカル E277 の接着剤はそれらよりも低かった。 b. 可使時間

①の接着剤のみ1時間以内で、②~⑥は2時間以内であった。

c. 実体顕微鏡での観察結果

図 2.1-6 に示すように、各接着層の厚みに違いが見られ、⑤の接着剤が 0.1mm 以下と最 も薄い層であった。①は0.5mm、②は0.2mm であった。

以上、a、b、cの結果から、⑤のコニシ製エポキシ樹脂接着剤(E205)が本測定法の接 着剤として最も適していると判断した。



真空脱気して飽和させた岩石を浸水

岩石上面に接着剤注入

セル片を接着



岩石とセル片の付着力試験



図 2.1-4 岩石への接着試験の手順



④ケミカルE125:付着力10kPa



⑤コニシe205:付着力70kPa以上



⑥アルファテック:付着力32kPa

図 2.1-5 各接着剤で接着した試料の断面と各接着剤の付着力



①HIC接着剤
 (接着層の厚さ0.5mm程度)



②ケミカルE277(接着層の厚さ0.2mm程度)



⑤コニシe205(接着層の厚さ0.1mm以下)



⑥AT380FX (接着層の厚さ0.1mm程度)

図 2.1-6 各接着剤で接着した試料の実体顕微鏡撮影結果(目盛は 0.5mm 間隔)

- (3) 接着剤供試体の物性試験
  - 1) 試験目的

接着剤自体の物性は、接着剤を選定する上でも応力解析方法を検討する上でも重要なため、 接着剤のヤング率やポアソン比を把握するために物性試験を行った。

- 2) 試験方法
  - モールドに接着剤を流し入れ、24時間養生した。なお、前述の②、5、6の3種の接着剤を対象に供試体(図 2.1-7参照)を作製した。
  - 作製した供試体に直交二軸のひずみゲージを貼付して、供試体の上面に約2kgのウエ イトを1つずつ載せた際のひずみ変化をロガーで収録した。また、1つずつウエイト を外した際のひずみ変化も同様に収録した。載荷圧とひずみの関係からヤング率やポ アソン比を1日おきに測定した。
- 3) 試験結果 (図 2.1-8 参照)
  - ・ ヤング率は、⑤のコニシ e205 の接着剤が最も大きく、ヤング率は 1GPa 程度と対象 岩盤のヤング率と同程度であった。なお、同接着剤は養生から 72 時間程度でヤング 率が 0.97GPa に収束した。
  - ポアソン比に関しては大きいほうから②、⑤、⑥であり、0.35~0.5の範囲で時間とと もに増加する傾向が見られた。いずれの接着剤も養生から 72 時間程度で収束した。
     本試験の結果からも、⑤のコニシ製エポキシ樹脂接着剤(E205)は本測定法の接着剤として適していると判断した。







⑥アルファテック

②ケミカルE277

⑤コニシe205 (2供試体、ひずみゲージ貼付後) 図 2.1-7 3種の接着剤供試体の様子

1.6 ■ ケミカルE277 -**→**⊐≍シ≥e205 1.4 アルファテック 1.2 0.4 0.2 0.0 0 24 48 96 72 経過時間 (hour) 0.60 0.50 0.40 ポアンン比 0.30 0.20 -**→**-⊐=ジe205 ■−ケミカルE277 0.10 アルファテック 0.00 0 96 24 48 72 経過時間 (hour)

図 2.1-8 3種の接着剤供試体のヤング率・ポアソン比の経時変化

(4) ひずみの測定感度の比較試験

1) 試験目的

⑤コニシ e205 と②ケミカル E277 の各接着剤のひずみの測定感度を比較し、より感度の良い接着剤を選定することを目的として岩石供試体を用いた試験を行った。

- 2) 試験方法
  - ・ 供試体(図 2.1-9 参照): 六ヶ所の現場から採取した軽石凝灰岩と砂質軽石凝灰岩の 2供試体ずつ(直径 50mm、高さ 100mm)
  - 接着方法(図 2.1-10参照):直交二軸のひずみゲージを②ケミカル E277 と⑤コニシ e205の各接着剤で2枚ずつ貼付、LDTを2組設置(LDTでは接着剤の影響を受けず 岩石のひずみを測定できるため、これと比較する。ただし、軽石も含まれるため、測 定位置によりひずみは異なる。)
  - 試験状況を図 2.1-11、載荷パターンを図 2.1-12 にそれぞれ示す。
- 3) 試験結果(図 2.1-13 参照)
  - ・ コニシ e205 のほうがケミカル E277 よりも LDT と近いヤング率を示した。
  - ・ コニシ e205 のほうがケミカル E277 よりもひずみの測定感度が高い。

本試験の結果からも、⑤のコニシ製エポキシ樹脂接着剤(E205)は本測定法の接着剤として適していると判断した。



図 2.1-9 ひずみの測定感度の比較試験の各供試体の様子(試験前)



図 2.1-10 供試体へのひずみ計の貼付状況



図 2.1-11 ひずみの測定感度の比較試験の試験状況



図 2.1-12 各岩種でのひずみの測定感度試験の載荷パターン



図 2.1-13 各接着剤のひずみの測定感度の比較試験結果(4供試体)

- (5) 接着剤の硬化特性の確認試験
- 1) 試験目的

試験孔にストレインセルをコニシ e205 の接着剤で接着し、ひずみ感度が安定する接着時間 を把握する。

- 2) 試験方法
  - ・ 六ヶ所の軽石凝灰岩ブロックに円錐孔を掘削し、コア径 92mm でオーバーコアリング を行った。
  - ストレインセル(図 2.1-14 参照)をおもり 20kg で円錐孔壁に圧着した状態で接着した。
  - 接着開始から18h、21h、24h後と24h、40h後に各1試料ずつ0.2~0.4MPaの範囲で 周載荷感度試験を行った(図2.1-15、図2.1-16参照)。
  - · 試験環境:温度24~25℃、湿度74~83%
- 3) 試験結果:
  - ・ 周方向では載荷・除荷に伴うヒステリシスが見られるが、弾性的な挙動を示している(図 2.1-17 参照)。
  - 周方向ひずみ感度係数は、周方向のひずみゲージにおける除荷時の応力-ひずみ関係から求めた。接着開始後21時間以降では周方向のひずみ感度係数が安定している(図2.1-18参照)。

本試験の結果から、⑤のコニシ製エポキシ樹脂接着剤(E205)は本測定法の接着剤として 使用する場合、接着開始後21時間以降であれば適用可能と判断した。



図 2.1-14 ストレインセルの図面とそのひずみゲージの説明



図 2.1-15 周載荷感度試験の試験状況(左)と概念図(右)



図 2.1-16 周載荷感度試験の載荷パターン



図 2.1-17 周方向の応力・ひずみ曲線(接着開始後 24h) (メンブレンの反発力に相当する 0.1MPa までは非表示)







図 2.1-18 周載荷感度試験で求めた周方向ひずみ感度係数の経時変化 (上下図で別試料)

- (6) 湧水の影響検討
- 1) 試験目的

湧水条件下で、栓の止水性や接着剤への影響を確認することを目的として、孔内を模擬した 検証試験を実施した。

2) 試験方法

- 以下の手順で試験を実施した。
- ・ 図 2.1-19 に示すように、現場と同じ形状の試験孔を有する岩石を装置に固定した。
- ・ 円錐部下側の φ 36mm 孔に接着剤注入装置の栓を設置し、栓より上側を透明な水で満た した。
- ・ 目視で確認しやすいように赤色に着色した接着剤を 160g、試験孔に上から注入し栓より 上に溜めた。
- ・ 栓の下部には青色に着色した水を満たし水圧をかけ、上側から漏水の有無を観察した。試 験状況を、図 2.1-20 に示す。
- 3) 試験結果
  - ・送水圧 0.004MPa で接着層の上面中央部に向けて下側から水みちが生じた(図 2.1-21 参 照)。同図の赤色の接着層の中央部に、青い着色水が漏出した状況が視認できる。
  - ・ 送水圧 0.06MPa で栓が外れた。なお、図 2.1-22 は、栓が外れる直前の状況である。この後、栓と接着剤が一体となって浮き上がった。
  - 原位置とは圧力の作用の仕方が異なるが、上下の水圧差に対する栓の抵抗力や止水性の 目安を確認できた。また、栓の下または岩盤表面から湧水が生じた場合の接着剤の挙動を 知ることができた。



図 2.1-19 湧水の影響検討試験の概要図



図 2.1-20 湧水の影響確認試験の試験状況



図 2.1-21 送水圧 0.004MPa での接着剤表面の様子



図 2.1-22 送水圧 0.06MPa での接着剤表面の様子

- 2.1.3 感度試験と応力解析の方法の検討
- (1) 感度試験の設置位置・載荷圧の検討
  - 1) 目的

プレスケールを用いて、載荷に伴う試料とメンブレンの接触範囲・圧力分布を把握し、周 載荷感度試験に適した試料の設置位置・載荷圧を検討した。

- 2) 方法 (図 2.1-23 参照)
  - ・ 六ヶ所の軽石凝灰岩と同程度のヤング率を有するウレタン製の円柱試料(直径 90.5mm)
     に普通紙を1周分巻き、その外側にプレスケール1枚(測定可能範囲 0.5~2.5MPa)を
     巻き、周載荷装置内にセットした。
  - ・ プレスケールの加圧条件に従い、測定圧到達時間 2 分、測定圧保持時間 2 分で試験を行った。測定圧は 0.6~1.5MPa の範囲とした。
  - · 試験環境:室温 31℃、湿度 72%
- 3) 結果 (図 2.1-24、図 2.1-25、図 2.1-26 参照)
  - ・ メンブレンは端部を含めて軸方向に 206mm の長さがある。
  - ・ 載荷圧 0.6MPa では、軸方向の載荷幅は中央の 197mm で試料への接触具合は概ね同等 であった。中央部の濃い赤色の線状の模様は載荷に伴う紙のよれである。
  - ・ 載荷圧 0.8MPa~1.5MPa では、軸方向の載荷幅で中央の 184mm 程度は試料への接触具 合がそれぞれ概ね同程度であった。一方、両端の各 10mm 幅程度は中央部よりも圧力が 高い傾向がみられた。
  - プレスケールの色濃度に対応する圧力は、載荷圧からよりもやや低い傾向が見られた。この主な原因はメンブレンの反発力(0.1MPa程度)による影響と載荷圧が小さいことが考えられる。
  - ・以上より、周載荷装置の中央部にストレインセルがくるようにセットして試験を行えば、
     均等に載荷できるといえる。低圧でも所定の圧力を載荷できるよう、感度試験装置の改良
     も引き続き検討する。



図 2.1-23 試験状況(左)と装置内のメンブレン(右)


図 2.1-24 プレスケールの色濃度と圧力の関係



図 2.1-25 各載荷圧でのプレスケールの結果 (その1)

## 載荷圧1.1MPa

<u>載荷圧1.5MPa</u>



図 2.1-26 各載荷圧でのプレスケールの結果(その2)

(2) 応力解析方法の検討

今回対象としている岩石が堆積軟岩であり、どの接着剤を用いてもひずみの測定感度が低下 する傾向がみられた。また、不均質性もあるため、測定点ごとに物性が異なることも想定され た。

精度を向上させるためには、周載荷感度試験を利用して、各測定点の位置や方向ごとの岩石 の物性や状態、接着剤の影響を考慮した応力解析が必要である。

岩石の不均質性や異方性などの影響から測定点ごとにヤング率 Eが異なる可能性があり、この差が大きければ大きいほど測定精度に影響を及ぼすと考えられたため測定点の位置と方向ごとに Eを校正していく方法を新たに考えた。

・初期応力の観測方程式:

 $\{\varepsilon\} = \frac{1}{F} [A] \{\sigma\}$ 

- *{*ε*}*: 測定された解放ひずみ
- **{σ}**: 初期応力
- [A]:係数マトリクス

・周載荷感度試験の載荷条件で得られる弾性定数:

- {Emam}: 周載荷感度試験から得られる各方向の見掛け弾性定数(24個)
  - →回収したコアに対して周圧載荷を行うことで、それぞれのひずみゲージにおける各 方向の応力--ひずみ線図の傾きから求める。
- {E<sub>ca,m</sub>}:境界条件を補正するための各方向の見掛け単位弾性定数(3 個)(シミュレーション)
  →周載荷感度試験を行った時の周圧と測定点におけるひずみの関係は形状など特殊な 境界条件なため、この境界条件を考慮できるような補正係数を求める必要がある。

・ヤング率補正係数(24個):

$$\left\{\boldsymbol{C}_{\boldsymbol{E},\boldsymbol{m}}\right\} = \frac{\left\{\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{m}\boldsymbol{a},\boldsymbol{m}}\right\}}{\left\{\boldsymbol{E}_{\boldsymbol{c}\boldsymbol{a},\boldsymbol{m}}\right\}} \qquad (\boldsymbol{m}=\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{\theta},\boldsymbol{\varphi})$$

- →一軸圧縮試験で得られるヤング率 *E*をゲージ毎(24個)の感度を用いて補正するための係数 (ポアソン比の関数)
- ・個々のゲージにおける弾性定数を校正した観測方程式:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}_m\} = \left[\frac{1}{E_0}\right] \left\{\frac{1}{C_{E,m}}\right\} [A] \{\boldsymbol{\sigma}\}$$

境界条件を考慮した軸対称問題として数値解析し、測定点の各方向のひずみ{*ɛɛa,m*}を求めて 次式で評価する。ポアソン比ごとに計算する。

・境界条件を補正するための各方向の見掛け単位弾性定数(3個):

$$\{E_{ca,m}\} = \frac{\sigma_p}{\{\varepsilon_{ca,m}\}} \qquad (m = \rho, \theta, \varphi)$$
$$\varepsilon_{ca,\rho} = \varepsilon_r \sin^2 \omega + \varepsilon_z \cos^2 \omega + 2\gamma_{rz} \sin \omega \cos \omega$$
$$\varepsilon_{ca,\theta} = \varepsilon_{\theta}$$
$$\varepsilon_{ca,\varphi} = (\varepsilon_{cp,\rho} + \varepsilon_{cp,\theta})/2$$

上記のとおり 24 成分の観測方程式を導き、最小二乗法により初期応力(6 成分)を算出する。



図 2.1-27 数値解析に用いたシミュレーションモデル (二次元)

## 2.1.4 試験装置の設計・製作

(1) ひずみ測定器

ストレインセルとデータロガーから成るひずみ測定器を設計・製作した。ひずみ測定器の仕様を表 2.1-2 に示す。また組立前後のひずみ測定器を図 2.1-28 と図 2.1-29 に示す。

寸法・重さ	直径50mm、長さ873mm、重さ3.9kg
耐圧	10MPa <sup>*</sup>
ひずみゲージ	抵抗値:120 $\Omega$ 、測定範囲: $\varepsilon_{max}$ =±20,000 $\mu$ 、精度:±1 $\mu$
温度ゲージ	抵抗值: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(4,000×10 <sup>-6</sup> 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・収録能力	最小測定間隔:2秒、収録可能時間は電池容量や状態による
	収録可能回数:最大65,408回
電源	7.4V、5600mAh リチウムイオン電池(充電式)

表 2.1-2 ひずみ測定器の主な仕様

※圧力変換器や外管の耐圧



図 2.1-28 組立前のひずみ測定器の様子



図 2.1-29 組立後のひずみ測定器の様子

(2) ひずみ計貼付装置

前年度の浅深度現場検証試験で使用した貼付装置は、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。そこで、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で、ひずみ測定器(ロガー+ストレインセル)と分離可能 なひずみ計貼付装置を製作した。

ひずみ計貼付装置の設計図面を図 2.1-30 に示す。ひずみ計貼付装置は図 2.1-31 の圧着前の 状態で、同図右側にアーマードケーブルを接続して孔口に吊り下げ、ひずみ測定器を同図左側 に接続して孔内に挿入する(図 2.1-32 の(a)の状態)。円錐部分にひずみ測定器のストレインセ ルが到達すると、図 2.1-31 の圧着後の状態までひずみ計貼付装置が短くなって、ひずみ測定器 に約 20kg の重さのひずみ計貼付装置が載った状態となって、ひずみ測定器のストレインセル が円錐孔壁に圧着される状態(図 2.1-32 の(b)の状態)になる。その状態で 24 時間程度圧着し、 ひずみ測定器を円錐孔壁に接着させた後、ひずみ計貼付装置を地上に回収する。

現場前に円錐孔を模擬したアクリル容器を作製して可視環境での動作確認を行った結果、図 2.1-32 に示すようにスムーズに貼付・切り離しができることを確認した。



図 2.1-30 ひずみ計貼付装置の設計図(図の左側が鉛直に立てた際の上側)



図 2.1-31 圧着前後のひずみ計貼付装置の様子



図 2.1-32 ひずみ測定器の(a)挿入、(b)圧着、貼付装置の(c)分離、(d)回収状況 (アクリル容器を用いた可視環境での試験)

- (3) 現場用掘削ツールス
- 1) 円錐リーマ

図 2.1-33に示すように、円錐リーマの56mm 孔掘削部分にキッカーダイヤをつけることで、 円錐孔壁への掘削ずりの残留を抑制できるよう改良した。

2) *φ*36mm 孔の掘削ツールス

円錐部から φ 36mm 孔の掘削コアの割れ目を抑えるために、φ 36mm 掘削用のダブルコアチ ューブを新たに製作した。なお、ダブルコアチューブを用いる際は、事前に φ 56mm 孔掘削後 に φ 36mm の凸部のついたノンコアビット(図 2.1-34 参照)で、孔底を整形して芯出しを行 い、ダブルコアチューブで φ 36mm 孔を掘削し、円錐部を円錐リーマで拡孔するという手順で 実施する。

3) センタリングガイドケーシング

前年度製作したセンタリングガイドケーシングの下端(図 2.1-35 参照)の 1m は変えずに、 それより上部のケーシングの内径を大きくすることでケーシング内でのツールスの引っ掛かり を抑えた。内径のより大きいケーシングを図 2.1-36 に示す。これはリングがついている 1m 長 のものだが、同様の外径・内径を有してリングのない 3m 長のケーシングも組み合わせるよう にした。なお、ケーシングの下端とそれより上のケーシングを接続するために図 2.1-37 に示す レジューサーを製作した。約 30m 分のセンタリングガイドを左側を下端として接続順に並べた 様子を図 2.1-38 に示す。



図 2.1-33 円錐リーマの改良図面

((株)クリステンセン・マイカイ 56 拡径 インプリ リーマ ジオ)



図 2.1-34 φ56mm 孔掘削用のノンコアビットの図面
 ((株)クリステンセン・マイカイ 56 ノンコア インプリ)



 図 2.1-35 φ116mm 孔用センタリングガイドケーシング下端の図面 (共栄試錐工業(株) センタリングガイド(先端))





 図 2.1-36 φ116mm 孔用センタリングガイドケーシング中間部の図面 (共栄試錐工業(株)センタリングガイド(中間))



 図 2.1-37 φ116mm 孔用センタリングガイドケーシングのレジューサーの図面 (共栄試錐工業(株)レジューサー)



図 2.1-38 センタリングガイドケーシング(約 30m 分)

#### 2.1.5 室内検証試験

(1) 岩石ブロック載荷試験

新たに選定したコニシ社製のエポキシ樹脂接着剤(呼称:コニシe205)を用いて、大谷石と 六ヶ所の軽石凝灰岩の2種類の岩石ブロックを使った室内試験を行い、新たな接着剤の適用性 や応力解析結果の妥当性を確認した。

- 1) 大谷石
  - a. 試験方法

コニシの接着剤でブロック中の円錐孔にストレインセル(ヤング率 0.025GPa)を接着し、三 軸載荷・オーバーコアリング・周載荷感度試験を順に行った。試験に使用した大谷石の岩石ブ ロック(載荷試験前日から浸水させた湿潤状態の試料、ヤング率 2.7GPa)を図 2.1-39 に示す。 ストレインセル接着環境は、室温 23~27℃、水温 24~26℃、三軸載荷試験環境は室温 31℃、 水温 23℃であった。

三軸載荷試験は、接着開始 24h 後に載荷試験を行った。載荷圧は X 方向 3.0MPa、Y 方向 2.0MPa、Z 方向(鉛直方向) 1.5MPa とした。

オーバーコアリングは、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。

周載荷感度試験は、載荷圧 0.3MPa から載荷・除荷を繰り返し、 0.6、0.9、1.2、1.4MPa まで段階的に載荷圧を上げた。



図 2.1-39 試験に用いた大谷石ブロック

b. 三軸載荷試験及び周載荷感度試験の結果

三軸載荷試験での載荷圧に対するひずみの変化を図 2.1-40 に示す。載荷圧に対する各ひず みは想定される挙動を示した。また、8-ρゲージのひずみ値が他に比べて大きい傾向が見られ た。

オーバーコアリングで採取したコア試料に対して、周載荷感度試験を実施した。載荷パター ンと各方向の載荷圧とひずみの関係を図 2.1-41 に示す。同図よりいずれのゲージでも弾性的 な挙動を示しており、ヒステリシスも小さい。

三軸載荷時のひずみ値と周載荷感度試験で求めた各ゲージでの見掛け弾性定数 {*E*<sub>ma,m</sub>}、

{*C*<sub>E,m</sub>}、一軸繰返し試験で求めたポアソン比 0.2 を用いて応力解析を行った。なお、一軸繰返し試験の結果については、添付資料-1 に記載した。

応力値の整合性(解析値/設定値)は0.78~0.95倍と、HIC 接着剤やケミカル E277で接着 した場合の試験結果(前年度実施分)[3]よりも改善した。応力方向はいずれもよく整合して いた(図 2.1-42参照)。

c. オーバーコアリングの結果

オーバーコアリング時のひずみの変化を図 2.1-43 に示す。オーバーコアリング時の各ゲージのひずみ変化は、応力解放の大きさに対応した挙動を示している。

オーバーコアリングに伴う解放ひずみの値と周載荷感度試験で求めた各ゲージでの見掛け弾性定数 {*E*<sub>ma,m</sub>}、{*C*<sub>E,m</sub>}、一軸繰返し試験で求めたポアソン比 0.2 を用いて応力解析を行った。

応力値の整合性(解析値/設定値)は0.94~1.13倍と、HICや三菱ケミカルで接着した場合の試験結果(前年度実施分)[3]よりも改善した。応力方向に関しても、X・Y・Zのいずれの方向もよく整合していた(図 2.1-44参照)。



図 2.1-40 三軸載荷試験結果(大谷石、コニシe205 接着剤使用)



図 2.1-41 周載荷感度試験結果(大谷石、コニシ e205 接着剤使用)



図 2.1-42 三軸載荷時のひずみから求めた三次元主応力(大谷石、コニシ e205 接着剤使用)



図 2.1-43 掘進長と解放ひずみの関係(大谷石、コニシ e205 接着剤使用)



図 2.1-44 解放ひずみから求めた三次元主応力

2) 軽石凝灰岩

a. 試験方法

コニシ e205 の接着剤で、六ヶ所の軽石凝灰岩の岩石ブロック(載荷試験前日から浸水させた 湿潤状態の試料、図 2.1-45 参照)の中央に掘削した円錐孔にストレインセルを接着し、三軸載 荷・オーバーコアリング・周載荷感度試験を順に行った。

ストレインセルの接着環境は、室温 21~23℃であり、三軸載荷試験・オーバーコアリング・ 周載荷感度試験の試験環境は室温 17~20℃、水温 18~20℃であった。

三軸載荷試験は、接着開始 26h 後に載荷試験を行った。載荷圧は X 方向 1.5MPa、Y 方向 1.0MPa、Z 方向 1.1MPa とした。

オーバーコアリングは、X方向 0.3MPa、Y方向 0.2MPa の二軸載荷状態で実施した。

周載荷感度試験は、載荷圧 0.1MPa から載荷・除荷を繰り返し、 0.2、0.3、0.4MPa まで段 階的に載荷圧を上げた。

b. 三軸載荷試験及び周載荷感度試験の結果

三軸載荷試験での載荷圧及びひずみ値の経時変化を図 2.1-46 に示す。同図より各ゲージの ひずみ変化は応力状態の変化に対応している。

周載荷感度試験では図 2.1-47 に示すように、約 0.1MPa より大きい載荷圧において、弾性的 な挙動を示しているがヒステリシスが見られる。 三軸載荷時のひずみ値と周載荷感度試験で求めた各ゲージでの見掛け弾性定数 { Ema,m }、

{*C*<sub>E,m</sub>}、一軸繰返し試験で求めたポアソン比 0.3 を用いて応力解析を行った。なお、三軸載荷 試験の載荷範囲は 1.0~1.5MPa と周載荷感度試験の載荷圧に比べて大きいため、{*E*<sub>ma,m</sub>} は周 載荷感度試験の 0.4MPa~0.3MPa の範囲に限定して除荷時の応力-ひずみ線図の傾きから算 出した。また、一軸繰返し試験の結果については、添付資料-1 に記載した。

応力値の整合性(解析値/設定値)は0.68~1.04倍と、HICやケミカル E277で接着した場合の試験結果(前年度実施分)[3]より大きく改善した。応力方向もよく整合していた(図 2.1-48参照)。

c. オーバーコアリングの結果

オーバーコアリングに伴う解放ひずみを図 2.1-49 に示す。オーバーコアリング時の各ゲージのひずみ変化は、応力解放の大きさに対応した挙動を示している。

オーバーコアリングに伴う解放ひずみの値と周載荷感度試験で求めた各ゲージでの見掛け弾 性定数 {*E*<sub>ma,m</sub>} (0.4MPa~0.1MPa の除荷範囲が対象)、{*C*<sub>E,m</sub>}、一軸繰返し試験で求めたポア ソン比 0.3 を用いて応力解析を行った。

応力値の整合性(解析値/設定値)は0.70~1.10倍と、HICや三菱ケミカルで接着した場合の試験結果(前年度実施分)[3]よりも大きく改善した。応力方向に関しても、いずれの方向もよく整合していた(図 2.1-50参照)。



図 2.1-45 試験に用いた軽石凝灰岩ブロック





- 応力解析対象

軽石凝灰岩 三軸載荷(x=1.5MPa、y=1.0MPa、z=1.1MPa)(稜線方向ρ) 【ひずみ】 1000 正:引張 1-ρ 負:圧縮 500 2- p 3- p 0 **ሆታ ች** ው. (μ) 4- p -500 5- p 6-p -1000 7-ρ -1500 8-ρ

-2000 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9





図 2.1-46 三軸載荷試験結果(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用)



図 2.1-47 周載荷感度試験結果(軽石凝灰岩、コニシ e205 接着剤使用)



У

図 2.1-48 三軸載荷時のひずみから求めた三次元主応力(軽石凝灰岩、コニシe205 接着剤使

用)





軽石凝灰岩オーバーコアリング(x=0.3MPa、y=0.2MPa)(稜線方向ρ) 【ひずみ】 800 正:引張 -1-ρ 負:圧縮 600 2-p 400 3-ρ 200 **ሆታች** ን (µ) 4-D 0 5-ρ -200 6-p -400 '7-ρ -600 8-ρ -800 - 応力解析対象 -1000 0 50 100 150 200 250 300 350 掘進長(mm)









図 2.1-50 解放ひずみから求めた三次元主応力(軽石凝灰岩、コニシe205 接着剤使用)

- (2) アクリル容器を用いた可視環境での試験
- 1) 試験目的

アクリル容器を用いた可視環境で、孔内洗浄や接着剤注入装置での接着剤注入からひずみ測 定器の設置までの一連の手順を実施し、接着剤の挙動や孔内状況を目視で確認する。また、ひ ずみ測定器でひずみを測定し、動作に対応した値が得られていることを確かめる。

2) 試験方法

図 2.1-51 に示す概要図及び図 2.1-52 に示す設計図のもと、アクリル容器を製作して、以下の試験を実施した。なお、試験環境は室温 30~34℃、水温 20℃であった。

a. 円錐孔壁掘削ツールスを用いた孔内洗浄状況の観察

以下の手順で実施した。

- 高さの低い水槽の中に水中ポンプを設置し、水中ポンプより高さのある台を置き、その 台の上にアクリル容器を固定した。
- ・ 軽石凝灰岩を掘削して生じたスライム(掘削ずり)と水を混合した泥水を、アクリル容器の孔内に注入した。



図 2.1-51 アクリル容器の概要図



図 2.1-52 アクリル容器の設計図面

(原工業株式会社 アクリル容器、図面左が試験時の上側、単位は mm)

- スライムが孔底に沈んだ後、図 2.1-53 に示すように、円錐孔壁掘削ツールスにφ40.5 ロ ッド 0.5m をつなぎ、その上にホイスチングウォータースイベル、シャックルを取り付 け、天井クレーンで吊り上げ、孔内に挿入した。
- スイベルにつないだホースから注水して孔内洗浄を行い、その様子を観察した。10L/min、
  20L/min と順に流量を増やし、流量と洗浄具合の関係を確認した。
- b. 接着剤注入からひずみ測定器設置の孔内状況観察

上記 a の試験後に、孔内のスライムをすべて取り除いてアクリル容器を水槽内に再設置し、 孔内を水で充填した。その後、以下の手順で孔内状況の観察を行った。

- ・ 接着剤の状況を確認しやすいように、接着剤をインクジェットプリンターの赤色インク で着色した。
- ・ 着色した接着剤の入った接着剤注入装置に重錘、アーマードケーブルを順に接続し、装置を吊り下げて、アクリル容器の孔内に挿入した。装置の栓を36mm孔に設置して、接着剤を試験深度に注入した。
- ・ ひずみ測定器にひずみ計貼付装置、ワイヤーを順に接続し、ひずみ測定器を孔内に挿入した。そして、ストレインセルを円錐孔壁部に圧着し、ワイヤーを引き上げてひずみ計貼付装置をひずみ測定器と分離して回収した。その後、ひずみ測定器も孔内から回収した。本試験時は、ひずみ測定器での収録を行い、各動作に伴うひずみや温度を測定した。

3) 試験結果

- アクリル容器を用いた可視環境での試験結果は、以下のとおりである。
- a. 円錐孔壁掘削ツールスを用いた孔内洗浄状況の観察

ツールスを孔外に回収しても円錐孔壁部は澄んだままだった。

- 20L/min で送水した場合(図 2.1-55 参照): 10L/min のケースよりも孔内のスライム 量を多い状態にして、スライム層の上端から掘削ツールスを 50mm 上げた状態で送水し たところ、送水前に濁っていた円錐部は送水から 42 秒には澄んだ状態になった。また、 送水開始から 1 分 50 秒でスライム層の上端深度は 30mm 程度低くなった。また、 10L/min での洗浄に比べて円錐孔壁部での乱流の程度が大きかった。
- b. 接着剤注入からひずみ測定器設置の孔内状況観察

接着剤注入時の孔内への流下状況やストレインセル圧着時の接着剤の挙動、貼付装置の動き に問題がないことを確認した。詳細は以下のとおりである。

- 接着剤注入装置の孔内挿入から接着剤注入の様子を図 2.1-56 に示す。接着剤注入装置 の栓は所定の深度に留まって、注入装置を上げると接着剤がスムーズに流れ出て試験深 度に溜まることを確認した。また、注入装置内の接着剤は 2 分程度ですべて流れ出た。
- ・ ひずみ測定器の孔内設置状況を図 2.1-57 に示す。ストレインセルの設置に伴って、接着 剤が上方向に広がる様子を確認した。
- ・ ひずみ計貼付装置のオーバーショット機構の挙動確認結果については、2.1.4 の(2)で前述したとおりである(図 2.1-31 参照)。

また、試験時のひずみ測定器で測定したデータを示した図 2.1-58 を見ると、ひずみ測定器の 孔内(水中)挿入、孔壁への圧着、貼付装置回収、ひずみ測定器回収までの各動作に対応した 正常なひずみ変化を測定できることを確認できた。なお、各破線での動作は、実際は時間幅を 持っているため、その前後のひずみや温度の変化は各動作によるものと考えられる。



図 2.1-53 円錐孔壁掘削ツールスを用いた孔内洗浄状況の観察の様子



2-52

(a)孔内洗浄前

(b) 孔内洗浄開始から3秒経過

(c) 孔内洗浄開始から10秒経過

(d) 孔内洗浄開始から3分経過

図 2.1-54 アクリル容器内で確認した孔内洗浄時の孔内状況(10L/min での送水時)



(a) 孔内洗浄前

(b) 孔内洗浄開始から12秒経過

(c) 孔内洗浄開始から42秒経過

(d) 孔内洗浄開始から1分50秒経過

図 2.1-55 アクリル容器内で確認した孔内洗浄時の孔内状況(20L/min での送水時)



図 2.1-56 アクリル容器内で確認した接着剤注入装置の孔内挿入から接着剤注入までの様子



図 2.1-57 アクリル容器内で確認したひずみ測定器設置状況

(a:ひずみ測定器設置後にひずみ計貼付装置を吊り上げて回収する様子、b:ひずみ計測定装置の設置状況(全景)、c:ひずみ計測定装置の設置状況(試験深度付近))



図 2.1-58 ひずみ測定器の収録データ(ひずみ測定器の孔内挿入前から貼付装置回収後まで)

### 2.1.6 現場検証試験

- (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 2.1-3 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。

- ▶ 試験孔掘削(ボーリング掘削)
  - ・掘削及びコア採取
  - ・コア観察、柱状図作成
  - ·孔口湧水処理
- ▶ 本応力測定法の検証試験(現場試験)

	実施数量
項 目	現場試験孔( $\phi$ 116mm)
試験孔掘削	35.15m×1 孔
コア観察、柱状図	35.15m×1 孔
ボーリング孔閉塞	なし(裸孔残置、孔口湧水処理)
本応力測定法の検証試験	4 箇所
間隙水圧測定	2 箇所

表 2.1-3 現場検証試験における現場調査数量

2) 現場工程

現場工程表(予定と実績)を表 2.1-4 に示す。深度 30m 以深で現場試験を 4 回実施した。1 回目は 11/7~14 のうち実働 5 日間、2 回目は 11/16~20 の 5 日間、3 回目は 11/20~22 の 2 日 間、4 回目は 11/22~24 の 3 日間で実施した(間隙水圧測定を除く)。また、間隙水圧測定を 2 回目の直前、4 回目の直後に各 1 日間で実施した。

# 表 2.1-4 現場工程表(予定と実績)

		10月23日	10月24日	10月25日	10月26	日 10月2	27日 1	10月28日		10月29日		10月30日		10月31日		11月1日		11月2日		3日	11月4日		11月5日		11月6日		11月7日		11月8日		11月9日		11月10日	
	実施項目	月	月火水		木	木金		±		日		月		火		水		木		金			日		月		火		水		木		金	
		am pm	am pm	am pm	am pr	m am	pm a	m pn	n am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am p	om a	am p	pm a	am	pm a	ım	pm	am	pm	am	pm	am	pm
坑内作業	仮設・撤去																																	
(予定)	試験孔掘削	乗道	込・仮設												_												-				100	試験		
	現場試験					おけ	山位	一面	1- H	- Z	. /+	-  _	-															F						
坑内作業	仮設・撤去					シレド	יבין נ	Ē		- 6			-																					
(実績)	試験孔掘削	乗道	込・仮設																					-				1[	回目記	式験				
	現場試験																									-	-							

		11月	11	11)	月12日	11,	]13E	11月	14日	11月	15日	11月1	16日	11月	1月17日 1		11月18日		11月19日		11月20日		11月21日		11月22日		23日	11月24日		11月25日		11月26日		11月27日		3 11月28日	
	実施項目		±		日		月	1	火	,	水	木	<		ЫY		£	-	日	ļ		ッ	K	가	<	*	~	4N	Ν×	-	£	1	日	J	ŧ	1	火
		am	pn	n am	n pm	am	pn	n am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm	am	pm
坑内作業	仮設・撤去																																				
(予定)	試験孔掘削								Γ	2	目試	験									ſ	3		、験		f	解体・	・撤去									
	現場試験																									I											
坑内作業	仮設・撤去																													_	-					-	
(実績)	試験孔掘削						106	試験	1 -			20	]目試	験								3回	目試験	<b></b> 食	-		4回目	試験				角	解体・	撤去			
	現場試験																													-							

3) 実施手順

現場検証試験は、図 2.1-59 に示す第 5 拡幅部の拡幅側で、ボーリングマシンによる鉛直 ボーリングを行った。試験は表 2.1-5 に示す 30m~35m 間の 4 深度で、試験ツールスや作業 手順及び掘削コアの損傷程度の確認と実際のストレインセルの接着とオーバーコアリング作 業を行った。

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 パイロット孔底に円錐孔壁掘削(孔径 56mm~36mm)
- ④ 孔内洗浄
- ⑤ 孔内カメラによる孔内観察
- ⑥ ひずみ測定器の円錐孔壁への接着
- ⑦ 孔径 116mm でオーバーコリング
- ⑧ 掘削したコアを観察し、コアの損傷程度を確認
- ⑨ 周載荷感度試験を実施
- ⑩ 深度を変えて、上記①~⑨を繰り返す

項目	内容											
掘削灯 径	116mm、											
が出日リオレイ主	試験区間は 56mm~36mm で掘削											
掘削角度	鉛直下向き											
試料の有無	オールコア											
掘削長	35.15m											
対象地層	鷹架層中部層軽石凝灰岩層(T2pt)											
試験深度(円錐部上端深度)	31.28m、32.71m、33.92m、34.88m											

表 2.1-5 試験孔掘削の仕様

4) 試験孔掘削位置

本年度は、令和4年度の掘削深度10mより深い深度30m~40mに分布する軽石凝灰岩 (Tpt2)を対象として現場検証試験を計画した。既往調査結果(日本原燃殿の本格調査、令和2 年度の本開発業務での掘削結果)から調査坑第5拡幅部付近において、深度30m以深に軽石 凝灰岩層(T2pt)が分布することが判明していたことから、現場検証試験は第5拡幅部におい て実施することとした。

調査坑と試験孔掘削位置の概要を図 2.1-59 に示し、調査坑における掘削位置を図 2.1-60 に示す。

調査坑第5拡幅部での試験孔掘削地点は、調査坑の安全に支障が生じない地点を選定した。 第5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2.1-61に 示す。






図 2.1-60 試験孔掘削位置図



a)平面図



b) 断面図 図 2.1-61 第5 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5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。

掘削に用いた機械を表 2.1-6 に示し、主要な使用資機材を表 2.1-7 及び表 2.1-8 に示す。

使用するボーリング機材の重量は表 2.1-6 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。ボーリング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の使用する機器は、十分目的を達成できる 能力を有するものを使用した。

品名	規格	数量	単位	重量(kg)	摘要
ボーリング	東邦 D-1	1	台	550	掘進能力 150m
マシン等	エンジン				
	ヤンマーNFD11 型				
	試錐ポンプ	1	台	100	最大吐出量
	東邦製 BG-3 型				30 L/min

表 2.1-6 試験孔掘削用機械

表 2.1-7 試験孔掘削用の主な資機材

品名	規格	数量	単位	重量(kg)	摘要
コアチューブ	トリプルφ116mm	1	本	30	
ロッド	$\phi$ 40. 5mm, L=3. 0m	15	本	10/本	総長 45m
ケーシング	$\phi$ 140mm, L=1. Om	4	本	21/本	
セジメントチューブ	L=1.0m	1	本	12	
11	L=0.5m	1	本	6	
三又やぐら	L=5.0m	1	式	45	
単管パイプ	φ4.86cm	約 30	本	2.8/m	L=1.0m~4.0m
足場板	幅 0.25m,長 3.0m, 厚 0.05m	約 10	枚	10/枚	

品名	規格	数量	単位	重量(kg)	摘要
センタリングガイド	φ114mm,L=1.0m リング1個付	10	本	8/本	
11	φ114mm, L=1. 0m リング2個付	1	本	10/本	
11	φ114mm, L=3. 0m リングなし	11	本	18/本	
コアチューブ	φ56mm、L=1.5m	1	本	10	
11	φ36mm、L=1.5m	1	本	7	
円錐孔壁掘削リーマ	φ 36~56mm, L=0.16m	1	本	3	
セジメントチューブ	φ56mm、L=0.5m	1	本	3.5	
11	φ116mm、L=0.5m	1	本	6	
孔底フラットビット	φ 56mm, L=10cm	1	個	5	
]]	φ 116mm, L=10cm	1	個	8	

表 2.1-8 試験区間掘削用の主な資機材

第5 拡幅部での荷降ろし作業時の状況を図 2.1-62 に示す。送風管や坑壁、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 2.1-62 資材荷降ろし概要

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、一時的に通行止めを 行った。

ボーリングのやぐらは、削孔深度に応じて図 2.1-63 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、調査坑内の水路から水中ポンプで汲み上げてボーリング 掘削地点まで給水した。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。これらの利用にあたっては、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った。

ボーリング作業時の足場及び資材機材等の配置を図 2.1-64 に示す。



図 2.1-63 足場及びやぐらの仮設概要図(単管パイプ三脚やぐら)



図 2.1-64 ボーリング作業時の足場及び資材機材等の配置

3) 現場試験

現場試験では、主に測定深度までの掘削、パイロット孔(試験孔)掘削、孔内洗浄、孔壁 観察、接着剤注入、ひずみ測定器設置、オーバーコアリング(ひずみ測定器回収)、周載荷 感度試験を行った。現場試験の作業手順を図 2.1-65 及び図 2.1-66 に示す。

本試験は、作業は図 2.1-65 及び図 2.1-66 の①~ ⑩の作業を繰り返して深度 31.28m 付近、 深度 32.71m 付近、深度 33.92m 付近及び深度 34.88m 付近の 4 箇所で実施した。地質状況 を確認して割れ目の無い区間で実施した。

具体的な手順を次々ページ以降に記載する。



図 2.1-65 現場試験の作業手順(1)



## 図 2.1-66 現場試験の作業手順(2)

a. 試験孔掘削(パイロットボーリング)

試験孔掘削作業の流れを図 2.1-67 に示す。

削孔は鉛直下方向とし、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 2.1-68 及び図 2.1-69 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 2.1-70 に示す孔径 116mm 用の削孔器具(ダブルコアチューブ)を装着した。

孔径 116mm 孔を掘削後、セジメントチューブを接続したフラットビットで孔底を平滑に し、同ビットを孔底から 5cm 程度上げて送水することで孔内洗浄を行った。そして、外径 114mm のリングのついた 1m 長のセンタリングガイドケーシングとリングのない外径 70mm の 0.5~3m 長のケーシングをつなぎ合わせて、孔底まで挿入した。

その後、ビット外径 56mm のダブルコアチューブで孔径 56mm 孔を 300mm 以上掘削し、 同コアチューブで孔内洗浄を行った。そして、図 2.1-71 に示すコアバレル (コアチューブ) を装着して、円錐孔から孔径 36mm 孔の掘削を実施した。



図 2.1-67 試験孔掘削作業の流れ



図 2.1-68 削孔の概要



図 2.1-69 ハイドロリックフィード型ボーリングマシン





図 2.1-71 試験孔掘削ツールス

(上段からセジメントチューブ 1m 長、 φ 56mm 孔掘削用ダブルコアチューブ、 φ 36mm~ 円錐孔掘削用コアチューブにセジメントチューブ 0.5m 長を接続)

各ステップで採取したコアは、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 2.1-72 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。

また、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。





図 2.1-72 ボーリングコア箱の整理方法の例

b. 孔内洗浄及び孔内観察

掘削した試験箇所に汚れが残らないよう、また試験箇所以深にスライム(掘削ずり)が多 く残らないよう、各ステップで掘削したコアチューブを孔底から 5cm 程度上げて送水により 孔内洗浄を実施した。なお、コアチューブにはスライム回収用のセジメントチューブを接続 し、過度な洗浄により試験箇所が痛まないよう注意した。

孔内洗浄後、適宜孔内観察を行った。孔内観察は、掘削・洗浄した試験箇所(特にひずみ 計接着箇所)の地質状況(風化状況・岩相)、断層及び割れ目等の不連続面や弱部の確認、孔 壁の汚れの有無を確認するために孔内カメラにより実施した。

孔内カメラには、OBI2 ボアホールカメラ(応用計測サービス株式会社製、図 2.1-73 参照) を用いた。ただし、カメラの先端パーツは本測定用に改造したもの(図 2.1-74 参照)を用い た。その特徴や仕様は以下のとおりである。

・平面レンズを使用したカメラのため、真下方向(孔奥方向)を歪みなく撮影可能。

・装置外径 46mm、測定最大深度 450m (先端パーツを除く)。

・120万画素で鮮明な撮影が可能。撮影映像をモニタリング可能。

・4 芯アーマードケーブル使用、電源は DC12V。



図 2.1-73 OBI2 ボアホールカメラ



図 2.1-74 本測定用に改造した孔内カメラの先端パーツ

c. ひずみ測定器の設置

図 2.1-66 の手順⑥~⑦に示すように、ウインチを使用して接着剤注入装置を試験深度ま で挿入して、栓を残して接着剤注入装置を試験深度から 15cm 程度上げて試験箇所に接着剤 を注入し、試験箇所を接着剤で満たした後、注入装置を地上に回収した。回収後、接着剤注 入装置を速やかに水で洗浄した。

その洗浄と並行して、ウインチを使用して、貼付装置及びひずみ測定器(上からデータロ ガーとストレインセルが接続されたもの)を孔内に挿入して、図 2.1-66の手順⑧のように円 錐孔壁部にストレインセルを接着した。

ストレインセルが円錐孔壁部に接着し、状態が安定するのに 24 時間程度かかるため、スト レインセルを円錐孔壁に圧着させた状態(図 2.1-66 の手順⑧の状態)で 24 時間程度保持し た。

d. ひずみ測定器及びコアの回収

ひずみ測定器と貼付装置はオーバーショット機構で接続しているため、ウインチを回収す ると貼付装置がひずみ測定器と切り離される仕組みとなっている。そのため、ウインチを使 用して貼付装置を地上に回収した。

その後、センタリングガイドケーシングの地上部の上端にコネクターを接続し、ボーリン グマシンのホイスチングスイベルにつないで吊り上げ、地上のケーシングバンド等で落下し ないように固定し、ケーシングを外す。これを繰り返して、センタリングガイドケーシング をすべて回収した。

コアを含有した状態のコアチューブから地上でコアを取り出す際は、ひずみ計を貼り付け た周辺のコアが傷まないようにコアチューブを鉛直に立てた状態で取り出した。取り出した コアは足元に注意して、周載荷感度試験を行う場所に運んだ。そして、ひずみ測定器が接着 された状態のコアの状況(岩相、割れ目等)を観察した。

e. 周載荷感度試験

ひずみ測定器が接着された状態のコアを感度試験装置内に挿入する際は、人の手でコアを 持ち上げて挿入するか、それが難しい場合は三又やぐらと吊具を使用して挿入した。

そして、油圧ポンプを用いてコアの側面に対して周圧載荷を行い、載荷・除荷した周圧に 対するひずみ変化を計測した。感度試験の概要図を図 2.1-75 に示す。

試験後に、コアを感度試験装置から取り出して、コア観察を行った。



図 2.1-75 現場での周載荷感度試験の概要図

f. 間隙水圧測定

試験深度付近での間隙水圧及び湧水量を把握するために、試験孔掘削前またはオーバーコ アリングや周載荷感度試験を終えた後に間隙水圧測定を実施した。

間隙水圧測定の概要図を図 2.1-76 に示す。プローブ(パッカー: φ72mm、L1000mm) をロッド(φ40.5mm)に接続して孔底付近までプローブを挿入し、パッカーを膨張させて孔 底からパッカーの下端までの範囲を閉鎖し、閉鎖した区間の間隙水圧が安定するまで数時間 以上計測し、間隙水圧を測定後に同区間の湧水量を測定した。

プローブにはパッカーを膨張させるための送水ラインと間隙水圧及び湧水量を測定するための測定ラインの2本のライン(外径6mm、内径4mm)を設置し、地上まで敷設した。

送水ラインはプローブのヘッド部に取り付け、地上の送水用ポンプに接続した。パッカー を膨張させ φ 116mm 孔の孔壁に密着させるためには大量の水を送る必要があるため、電動 ポンプで送水しある程度パッカーが膨張したら、パッカーの破裂による孔内抑留事故を防ぐ ため手動ポンプに切り替え慎重に送水し孔壁に圧着した(パッカー圧:1.2MPa)。

測定ラインは地上で圧力計とバルブに接続し、バルブ解放時には湧水量を測定し、閉塞時

にはデータロガーを用いて間隙水圧の計測を行った。





図 2.1-76 間隙水圧測定の概要図と測定装置写真

4) 検尺

本試験孔におけるすべての現場試験が終了したことを監理員に確認し、検尺を行った。

5) 試験終了後の処置

削孔した試験孔は、次年度も同孔を使用する予定であることから、日本原燃殿との協議の 上、表層部(深度.0.1m~1.2m)にケーシングを設置し、深度 35.15m まで裸孔の状態で残置 した。孔口には鋼板蓋を設置し、調査坑の路面に湧水が流れ広がらないように、孔口から調 査坑の側溝へ湧水を排水した。

6) 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

本年度の試験孔は、令和2年度に実施したボーリング孔(TI1-850孔)から試験空洞側(調 査坑奥側) へ1.3m 離れた位置で実施した。

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 2.1-9 に示す。 また、試験孔掘削位置の概要を図 2.1-77 に示し、試験孔掘削位置を図 2.1-78、図 2.1-79 に 示す。

孔名	TI1-850(2)		
掘削位置	調査坑の坑口から約 850m 地点 (第 5 拡幅部) (X,Y=107385.5029, 43696.6595)		
孔口標高	EL74.724m		
掘削深度	35.15m〔EL109.874m〕 (第 5 拡幅部の路面を基準)		
掘削方向	鉛直下向き		
掘削地点の 地表面標高	EL.+39m 程度		

表 2.1-9 試験孔掘削の概要





図 2.1-78 試験孔掘削位置(地質平面図)

(日本原燃〔株〕(2006)[4]の標高-80mの地質水平断面図を編集・加筆)



図 2.1-79 試験孔掘削位置(地質断面図) (日本原燃〔株〕(2006)[4]の地質鉛直断面図[A2]を編集・加筆)

2) TI1-850(2) 孔の地質状況

T1-850(2) 孔で確認した地質状況は以下のとおりであり、前掲図 2.1-79 に示す既往の地質 分布及び令和 2 年度に実施した TI1-850 孔とほぼ同様の地質を確認した。

なお、試験孔掘削地点のボーリング柱状図及びコア写真(拡大版)は添付資料-3に整理した。

①深度 0.00m~0.27m: コンクリート

②深度 0.27m~0.51m: 砕石

③深度 0.51m~20.89m: 軽石混り砂岩層(T2ps)

- ・軽石混り砂岩(Tps32)
- ・砂質軽石凝灰岩(Tspt31)
- ・軽石混り砂岩(Tps31)

④深度 20.89m~35.15m: 軽石凝灰岩層(T2pt)

・軽石凝灰岩(Tpt2)

試験孔掘削地点周辺の地質層序を表 2.1-10 に示す。

		<u>凡 例</u>		_
地層名		凡例		
盛土		fl		
第四紀層		q	確認した地質	
新		礫混り砂岩層	T2ss	・ <mark>軽石混り砂岩(Tps32)</mark> ・砂質軽石凝灰岩(Tspt31)
第	第中 部尾	軽石混り砂岩層	T2ps	· 軽石混り砂岩 (Tps31)
紀		軽石凝灰岩層	T2pt	· 軽石凝灰岩(Tpt2) 山、飯飯菜工幣広告(Topt2)
僧		粗粒砂岩層	T2cs	· 輕石質砂岩(Tpps2)
鳫架 層)	下部層	泥岩層	T1ms	

表 2.1-10 試験孔掘削地点周辺の地質層序

各地層について特徴を以下に示す。ボーリング結果及び地質断面図を図 2.1-80 に示し、ボ ーリングコア写真を図 2.1-81 及び図 2.1-82 に示す。

コンクリート:深度 0.00m~0.27m

調査坑の第5拡幅部の路面表層コンクリートである。硬質、棒状で骨材として安山岩の砕 石を含む。

② 砕石:深度 0.27m~0.51m

調査坑第5拡幅部の路盤材である。径10~30mmの安山岩角礫を主体とする。礫は硬質である。

③ 軽石混り砂岩層(T2ps): 深度 0.51m~20.89m

本層は、岩相により以下のとおり区分できる。

●深度 0.51m~9.01m: 軽石混り砂岩(Tps32)

深度 0.51m~8.82m までは、径 2~15mm の軽石を多く含み、暗灰~灰~赤褐色の径 10mm 以下の安山岩角礫を含む。基質は安山岩や石英の粒子を主体とする粗粒砂である。 深度 0.51m~1.10m までは割れ目沿いに幅 0.5~2cm 程度褐色を帯びているが、深度 1.10m 以深においては褐色部が認められない。

深度 8.82m~9.01m は、基質は暗灰色の粗粒砂岩となり、∠30°~∠45°の葉理が発達 し、径 30mm 程度の白~灰白色の軽石を混じえる。

下位層との境界は漸移的である。

●深度 9.01m~13.58m: 砂質軽石凝灰岩(Tspt31)

径 2~30mm、最大径 90mm の灰~灰白色の軽石を多く含む。基質は安山岩や石英の粒 子を主体とする粗粒砂である。径 10mm 以下の暗灰~灰~赤褐色の安山岩角礫を含む。 コアは新鮮、ハンマーの打撃で軽い金属音を発する程度の硬さである。下位ほど軽石の含 有量が少なくなる。

下位層との境界は漸移的である。

●深度 13.58m~20.89m: 軽石混り砂岩(Tps31)

径 10mm 以下の白色軽石及び径 20mm 以下の黒~灰~赤褐色の安山岩角礫を含む。基 質は安山岩、石英、軽石の粒子を主体とする粗粒~極粗粒砂である。コアは新鮮、ハンマ ーの打撃で軽い金属音を発する程度の硬さである。深度 17.00m~18.23m は、径 10mm 以 下の軽石や安山岩礫を含む粗粒砂岩である。深度 18.23m 以深は、∠15°以下の葉理が著 しく発達し、特に 19.15m 以深は径 10~30mm の礫や軽石を含む砂岩となる。

下位層との境界は∠10°程度で明瞭である。

④ 軽石凝灰岩層(T2pt): 20.85m~35.15m

本試験孔では、軽石凝灰岩層(T2pt)のうち軽石凝灰岩(Tpt2)のみを確認した。 ●深度 20.75m~35.15m:軽石凝灰岩(Tpt2)

灰色~暗灰色を呈する砂質軽石凝灰岩で、軽石の少ない区間と軽石の多い区間があるが、 基質は灰色、緻密な細粒凝灰岩が主体である。軽石の少ない区間は、径数 mm の白色軽石 を僅かに含む。軽石の多い区間は、径 2~20mm の灰白色軽石を多く含む。コアは新鮮で 硬質、ハンマーの打撃で軽い金属音を発する程度の硬さである。深度 20.89m~22.50m は 白色の軽石となっている(軽石の濃集部の可能性もある)。

また、本層には面なし(断層面が癒着・固結した)断層がしばしば認められる。



図 2.1-80 試験孔掘削位置及び地質断面図

## 【TI1-850(2)孔】



図 2.1-81 TI1-850(2)孔 ボーリングコア写真(深度 0.00m~20.00m)



図 2.1-82 TI1-850(2)孔 ボーリングコア写真(深度 20.00m~35.15m)

3) 試験孔掘削時の孔内水位状況

TI1-850(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 2.1-83 に示す。

調査坑第 5 拡幅部の路面から深度 10m 程度までは、試験孔の口元からの湧水はほとんど 認められなかった。深度 10m 以深を掘削した時点から徐々に調査坑路面より高い位置に孔内 水位(湧水位)が確認された。深度 20m を掘削した段階で Gl+0.7~0.9m 程度、現場検証試 験の対象となる深度 30m 以深を掘削した段階では GL+1.3m~1.9m 程度の孔内水位(湧水位) が確認された。

参考ではあるが、掘削中において口元に設置した 55cm の立上げパイプ (ケーシングパイプ) からの湧水は、11 月 13 日の 14L/min が最大となった。



孔内洗浄後に孔内水位が高く、湧水量が多くなる傾向が見られた。

(4) 試験で生じた課題とその解決策

現場試験を4深度で実施したところ、以下のような課題が生じ、その都度下記に示す対策を 立てて以降の改善を図った。なお、試験環境としては、温度 13~16℃、湿度 78~94%、 水温 17~20℃であった。

また、孔内カメラで撮影した円錐孔壁画像を図 2.1-84 に示す。各深度の円錐孔壁部に割れ 目や不均質性がないことを確認し、ストレインセルの設置を行った。

1) 1 深度目

1 深度目で採取したコアの写真を図 2.1-85 に示す。本深度では、36mm 孔が掘削や孔内洗浄 によって想定より大きく拡がったために、接着剤注入装置の栓が所定の深度よりも深く落下し、 接着剤が孔底付近に流下し、ストレインセルを円錐孔壁部に接着できなかった。

対策:

- ・ 暫定的な対策として栓にスポンジを巻いて、外径を 37mm から 40mm まで太くした。
- スライム残存量が少ないことが確認できたため、36mm 孔の長さを 690mm から 90mm まで短くし、栓が落下した場合でも接着可能となるようにした。
- 孔径があまり拡大しないように、同深度での掘削を繰り返さないようにし、孔内洗浄も最小限にした。

2) 2 深度目

試験区間の 56mm 孔を掘る前に 116mm 孔の孔底から 1m の範囲で間隙水圧測定を実施した ところ、間隙水圧は 0.50MPa、湧水量は 42mL/min であった。

2 深度目で採取したコアの写真を図 2.1-86 に示す。コア自体は良い状態であったものの、オ ーバーコアリングによるコア回収後に、途中でひずみ測定器の電池が切れて収録開始から 63 時 間(2 日と 15 時間)で収録が止まってしまっていたことがわかった。

設定した収録パターンは、2s 間隔で5時間(9,000回測定)、3600s 間隔で2日と14時間 (62回測定)、2s 間隔で10時間(18,000回測定)とした。なお、設計上は、収録可能回数は 65,408回(2秒間隔だと約36時間、10秒間隔だと約181時間測定できる計算)、収録可能時 間は電池容量や状態により変化するとのことであった。

収録可能回数より少ない収録数に設定したにもかかわらず、途中で電池切れとなった。 対策:

- ・ 現場環境によって収録可能時間は変動するので、安全側に見て以降の試験工程を定めた。
- ・ 今後は、ひずみ測定器のバッテリー容量や記憶容量を増やす改良を検討する。
- 3) 3 深度目

3 深度目では、図 2.1-87 に示すように、湧水の影響も受けセンタリングガイド内まで接着剤 が上昇し、ひずみ測定器とセンタリングガイドが一緒に接着され、オーバーコアリングを実施 できなかった。接着層は多孔質な状態で、想定より体積が大きくなった。

対策:

- ・ ひずみ測定器を試験深度に設置後に、センタリングガイドを 0.3m 程度孔底から上げる ことにした。
- ・ 図 2.1-88 に示すようにひずみ測定器の中央部にクッション材を巻くことで、接着剤の 上昇を抑えた。
- 4) 4 深度目

以上の対策を施すことで、ひずみ測定器を試験深度に接着・設置し、オーバーコアリングに よる解放ひずみの測定を行うことができた(図 2.1-88、図 2.1-89 参照)。

また、オーバーコアリング後に深度 34.40m~孔底(深度 35.15m)の区間で間隙水圧測定を 実施したところ、間隙水圧は 0.54MPa、湧水量は 76mL/min であった。



図 2.1-84 孔内カメラによる各試験深度の円錐孔壁画像 (各図中の赤矢印先が磁北方向)



図 2.1-85 1 深度目のコア写真 (上段:116mm 孔の OC コア、下段:56~36mm 孔のコア)



図 2.1-86 2 深度目のコア写真 (上段:116mm 孔の OC コア、下段:56~36mm 孔のコア)



図 2.1-87 3 深度目のひずみ測定器とセンタリングガイド(回収後)



図 2.1-88 4 深度目のひずみ測定器(挿入前)



図 2.1-89 4 深度目の孔内状況図及びコア写真

(5) 応力測定結果

4深度目で得られたひずみの測定データをもとに、測定結果の分析と応力解析を行った。

1) ひずみ測定器で収録したデータの経時変化

ひずみ測定器で収録した際の主なタイムラインは、以下のとおりである。

- 11/23 12:00 ひずみ測定器でのデータ収録開始
  - 13:38 接着剤混合開始
    - 15:00 ひずみ測定器を所定深度に圧着開始
  - 15:01 センタリングガイドケーシングを 116mm 孔の孔底から 33cm 上げて固定
- 11/24 8:30 孔内水位 GL+1.77m(センタリングガイドケーシング内)を確認
  - 8:35 ひずみ計貼付装置を回収開始
  - 9:30 センタリングガイドケーシングを回収開始
  - 14:28 オーバーコアリング開始(接着剤混合から約25時間後)
  - 14:38 オーバーコアリング終了
  - 15:10 周載荷感度試験開始
  - 15:40 周載荷感度試験終了

ひずみ測定器で収録したひずみの経時変化を図 2.1-90 に示す。同図より、各動作に応じて ひずみが変化していることがわかる。ひずみ変化の詳細については 2)と 3)で後述する。

圧力や温度の経時変化(図 2.1-91 参照)に関して、ひずみ測定器の試験深度への圧着開始からオーバーコアリング開始前までの孔内の水圧や水温は概ね安定しており、孔内の試験深度の水圧は 0.35~0.36MPa、孔内の水温は 17.9~18.5℃であった。なお、ひずみ測定器の孔内挿入前に温度変化が大きい理由は、ひずみ測定器の組み立て及び収録開始の作業を今回は坑外の作業場(室温 30℃程度)で実施し、その後坑内(気温 16℃程度)に持ち込んだためである。

2) オーバーコアリングと周載荷感度試験の結果

オーバーコアリングに伴う掘進長と解放ひずみの関係を図 2.1-92 に示す。同図の内、"周方 向 θ"のひずみ変化をみると、全体的に応力解放に伴うひずみ変化は掘進長 330mm 付近から 現れているようにみえる。これは、応力解放に伴うひずみ変化がゲージ貼付位置の 70mm 程度 手前から始まっており、ボーリングロ径 116mm よりやや短い。この応力解放に伴う周方向の ひずみ変化は、図 2.1-93 で示される軸対称 FEM モデルによるオーバーコアリングに伴う孔 径方向のひずみ変化の解析結果に類似している。この解析結果では、ひずみの変化はゲージの 口径分の手前の位置から始まっていることが分かる。

また、ρゲージで測定したひずみが掘進長 50mm 以降で引張方向に生じているが、室内試験 (図 2.1-49 参照)でのρゲージのひずみは掘進長 40~120mm の範囲でわずかに圧縮方向に 生じていた。この違いについて、現場では鉛直方向に土被り圧相当の応力が作用しているのに 対して、室内試験では鉛直方向の応力が作用していないため、オーバーコアリングに伴うρ方 向の解放ひずみの傾向が現場と室内で異なったと考えられる。

図 2.1-94 の周載荷感度試験時の応力--ひずみ関係は、ρ方向やθ方向の多くのゲージにお いて弾性的な挙動を示しており、ρ方向やφ方向の複数のゲージでヒステリシスが見られる。 全体的にばらつきが大きいものの、正常な挙動を示しているデータもあり、個々のひずみ変化 を吟味する必要がある。

ρゲージ 3000 周載荷感度試験 2500 1-ρ センタリング ガイドを回収 2000 2-ρ 1500 ひずみ,μ 3-ρ ひずみ測定器を 孔内に挿入開始 1000 4-ρ 500 5-ρ 0 6-ρ ーバーコア オ -500 7-ρ ひずみ測定器を 試験深度に圧着開始 リング開始 ひずみ計貼付 -1000 装置を回収 8-ρ -1500 11/23 12:00 11/23 18:00 11/24 00:00 11/24 06:00 11/24 12:00 11/24 18:00 測定日時, hh:mm

*θ*ゲージ







図 2.1-90 ひずみ測定器で収録したひずみの経時変化(4深度目)









図 2.1-91 ひずみ測定器で収録した圧力と温度の経時変化(4 深度目)

















図 2.1-93 軸対称 FEM モデルによるオーバーコアリングに伴うゲージ位置でのひずみ変化





図 2.1-94 周載荷感度試験時の応力-ひずみ関係(4深度目)
3) 測定したひずみの詳細分析

まず、オーバーコアリング前の各ステップでのひずみの挙動を確認し、各ゲージでの測定値 に異常がないことを確認した。具体的には以下のとおりである。

ひずみ測定器を試験深度に設置した際のひずみ変化を図 2.1-95 に示す。設置に伴い、ひず み計貼付装置の重さ約 20kg が作用するため、 $\rho$ 方向(稜線方向)の各ゲージでは圧縮ひずみが 生じている。一方、 $\theta$ 方向(周方向)は円周方向のポアソン比分の変形により引張ひずみが生 じている。 $\phi$ 方向(斜め方向)は $\rho$ 方向と $\theta$ 方向の中間の挙動を示している。その後、すべて の方向で接着剤の硬化に伴う膨張により緩やかに伸張ひずみが生じている。以上のように、い ずれも正常な挙動と考えられる。

ひずみ計貼付装置・センタリングガイドケーシングの試験深度から回収した際のひずみ変化 を図 2.1-96 に示す。ひずみ計貼付装置の回収は 2 段階(図 2.1-96 の経過時間 0 分からと 25 分からの 2 回)で実施したため、 $\rho$ ゲージのひずみが 2 段階で引張方向に解放されている。一 方、 $\theta$ ゲージのひずみの変化は小さい。センタリングガイドケーシングの回収(経過時間 62 分 から)は数 m ずつワイヤーで回収したため、回収に伴う水圧変化により一時的に $\rho \cdot \phi$ ゲージ でひずみを観測している。本ステップでも異常な挙動は見られない。

次に、オーバーコアリング時の各ひずみ変化を、ストレインセルの中心軸対称位置の一組の ロゼットゲージごとに横に並べて (1 と 5、2 と 6、3 と 7、4 と 8)比較した (図 2.1-97 参照)。 通常、均質な岩盤であれば、対称のゲージで同様の傾向が $\rho \cdot \theta \cdot \phi$ の全方向で見られるのだ が、掘進長 250mm 以前では、3 番と 7 番のゲージを除き、対称のゲージごとに同様の傾向が 見られるため、試験深度の岩盤はコアの岩相同様に概ね均質な岩盤と言える。しかし、掘進長 250mm 以降はいずれのロゼットゲージも対称のゲージごとに同様の傾向が見られない。

そこで、オーバーコアリングに伴うひずみ変化として確からしい挙動を示すゲージを選定した。掘進長 400mm がロゼットゲージの設置深度であり、通常はビットがそのゲージ設置深度 近傍を通過し、コアが解放されることに伴いθ方向のひずみが引張方向に増加し、その後解放 ひずみを維持する。そのような挙動を示す1番、2番、8番のゲージは確からしいといえる。また、3番と7番のゲージについて、掘進長 250mm 以前で比較すると3番のρゲージの引張方 向のひずみが大きい。これは3番ゲージ近傍で引張き裂が発生し、その影響をとらえた可能性 がある。そのため、3番ゲージは棄却し、7番ゲージはθゲージにおいても掘進長 400mm 以降 の解放ひずみのあまり大きな低下が見られないため確からしい挙動を示すゲージとして選定した。

さらに、オーバーコアリングしたコアを試験深度から地上に回収する際のひずみ変化(図 2.1-98 参照)をみると、ρゲージとθゲージで最大 100 μ 程度のひずみ変化が見られた。

最後に、周載荷感度試験時の各ロゼットゲージのひずみ変化(図 2.1-99 参照)を分析する。 周載荷感度試験における載荷・除荷に伴うひずみ変化も、通常は対称のロゼットゲージごとに 同様の傾向を示すが、いずれのゲージも同様の傾向が見られない。1番、2番のロゼットゲージ では載荷・除荷に対するひずみ変化が比較的大きい。オーバーコアリングのひずみ変化から選 定した7番、8番のロゼットゲージについても、ひずみの大きさは比較的小さいものの弾性的 な挙動を示している。そのため、選定した1、2、7、8番の全ゲージの応力ひずみの傾きから



軽石凝灰岩 ひずみ測定器設置時(稜線方向ρ)

図 2.1-95 ひずみ測定器設置時のひずみ変化









図 2.1-96 ひずみ計貼付装置・センタリングガイド回収時のひずみ変化



図 2.1-97 オーバーコアリング時の各ロゼットゲージのひずみ変化



図 2.1-98 オーバーコアリングしたコアを試験深度から地上に回収する際のひずみ変化



図 2.1-99 周載荷感度試験時の各ロゼットゲージのひずみ変化

4) 応力解析に用いるポアソン比の検討

応力解析に用いるポアソン比を求めるため、オーバーコアリングを実施した深度付近のコア 試料を用いて、室内で一軸繰返し試験、三軸圧縮試験(圧密排水条件、CD)、三軸圧縮試験(圧 密非排水条件で間隙水圧測定あり、CUB)を実施し、どの試験方法が適しているかを検討した。 試験条件は、以下のとおりである。

【共通する試験条件】

- ・ 地盤工学会基準に準拠して、試験を実施した。
- 各供試体は、直径 50mm、高さ 100mm に整形した。なお、コア試料の直径は 92mm の ため、現場での掘削軸方向に直径 65mm 程度になるようにコアリングしたのち、包丁で 直径 50mm に整形した。
- 各供試体は試験前に水中で真空引きして湿潤状態にした。
- 各供試体の側面に、クロスゲージを軸対称で2枚貼付した。また、同ゲージの測定値からポアソン比を求めた。

【各手法の試験条件】

- 一軸繰返し試験:載荷・除荷を繰り返し、ピーク圧を 0.24、0.48、0.72、0.96、1.20MPa
   の5段階で上げた。その載荷速度は 0.12MPa/min(0.002MPa/sec)とした。
- 三軸圧縮試験:背圧 0.5MPa(現地の間隙水圧相当)、圧密応力 2.0MPa(現地の有効土 被り圧相当)とし、圧密後の軸ひずみ速度は CUB が 0.1%/min、CD が 0.01%/min とした。また、CUB・CD ともに軸ひずみが 5%生じるまで実施して終了とした。

試験結果の一覧を、表 2.1-11 に示す。同表より、一軸繰返し試験と三軸圧縮試験(CD)で 求めたポアソン比は 0.2 前後で近いが、三軸圧縮試験(CUB)で求めたポアソン比は平均 0.34 と比較的大きい。なお、各試験結果の詳細は添付資料-2 に記載した。

オーバーコアリングでは、三軸で応力がかかった状態から排水条件で一気に応力が解放され るひずみを測定している。そのため、載荷速度が比較的速く、排水条件でもある点で、一軸繰 返し試験がオーバーコアリング時の条件に最も近いと考えられる。ただし、三軸圧縮試験のほ うが現場の応力状態に近い。

また、周載荷感度試験は側面載荷・排水条件のもと平均 0.12MPa/min の除荷速度で生じた ひずみ変化から {*E*<sub>ma,m</sub>} を算出するため、一軸繰返し試験が最も周載荷感度試験の試験条件に 近いといえる。

以上より、一軸繰返し試験で求めたポアソン比の平均値 0.20 を応力解析に用いる。

試験方法	供試体名	採取深度 (GL- m)		供試体高さ (mm)	供試体直径 (mm)	質量 (g)	湿潤密度 ρ(Mg/m³)	ヤング率 E (MPa)	変形係数 E₀ (MPa)	ポアソン比 <i>ν</i>
一軸繰返し試験	TI(2)-3-3	30.03 ~	30.16	95.05	49.31	301.18	1.659	979	-	0.19
	TI(2)-4-2	34.15 ~	34.28	100.05	49.19	318.57	1.676	985	-	0.21
三軸圧縮試験	TI(2)-1-1	29.00 ~	29.13	99.26	49.03	315.80	1.685	-	938	0.20
(CD)	TI(2)-2-2	29.63 ~	29.76	100.40	49.16	318.89	1.673	-	913	0.21
三軸圧縮試験	TI(2)-2-1	29.49 ~	29.63	99.95	49.12	318.78	1.683	-	1,210	0.36
(CUB)	TI(2)-4-1	34.37 ~	34.50	100.29	49.21	323.86	1.698	-	1,410	0.32

表 2.1-11 一軸繰返し試験及び三軸圧縮試験 (CD・CUB) の結果一覧

5) 応力解析

以上より、オーバーコアリングでのひずみ変化が確からしいと判断できる1、2、7、8番の4 つのロゼットゲージのひずみ値と同ゲージの周載荷感度試験から求めた {*E*<sub>ma,m</sub>}、数値解析で 算出した {*C*<sub>E,m</sub>}、一軸繰返し試験で得られたポアソン比0.20を用いて応力解析を行った。

応力解析の暫定結果を図 2.1-100 に示す。同図より、応力解析で求めた主応力値は全般的に 小さく、最大主応力 1.46MPa も対象深度の土被り圧 2.8MPa の 1/2 程度と小さい。また、解析 で求めた水平面内での最大主応力方向は N101°E (N-79°E)であり、図 2.1-101 に示す令 和 2 年度の水圧破砕試験 [6] の方向よりも東向きである。

今回の試験深度では、8つのロゼットゲージのうち、4つのロゼットゲージの解放ひずみを用いて解析を行ったが、全ゲージの値を用いることができなかった原因として、湧水の影響や接着時の偏芯により一部のゲージで接着不良となった可能性が考えられる。

今後は、プロセスシミュレーションなどにより解放ひずみの妥当性を検討し、応力解析内容 について引き続き検討する。



図 2.1-101 令和2年度実施の水圧破砕試験結果 [6] に本深度を加筆

80

90

100

- 2.1.7 今後の開発計画
  - (1) 技術課題の整理

今年度の現場検証試験によって明らかになった本手法の技術課題は、以下の点である。

- ・ 解放ひずみの評価方法及び応力解析方法に関する検討の継続
- ・ 試験深度での接着不良の原因と考えられる湧水影響や接着時の偏芯への対策
- ひずみ測定器のデータロガー部分の性能向上(記憶容量、電池容量、収録内容など)
- ・ 円錐部から 36mm 孔の掘削コアの品質改善
- ・ センタリングガイドケーシング設置時の 116mm 孔の孔底でのケーシング内外間の水流 の抑制
- ・ 深部測定に対応するための孔内カメラの先端パーツの耐圧強化
- ・ より深い深度での本応力測定法の適用性評価や標準法との応力測定結果の比較
- ・ 周載荷感度試験方法の改良に関する検討の継続

(2) 試験装置の改良

上記の技術課題に対して、試験装置の改良案を以下に示す。

- <u>孔内水圧調整用のケーシングヘッドの製作</u>:試験深度の湧水圧に対抗する水圧でケーシングヘッドから孔内に送水することにより、試験区間の水流を抑制する。このケーシングヘッドは、ひずみ測定器を試験深度に圧着し始めた直後にセンタリングガイドケーシングに接続して使用することを想定している。
- ・ <u>接着剤注入装置・ひずみ計貼付装置の側面溝切り</u>:現状の左記装置は、56mm 孔と装置のクリアランスが狭い部分があるため、装置を上下すると試験深度で水流が発生したり、
   湧水の流速が速まったりして試験深度の接着層が乱されやすい状態であった。そこで、
   装置側面に溝切りをすることでそのような水の流れを抑制する。
- ひずみ計貼付装置の改造:現有の装置はひずみ測定器の直上にφ55.9mm・長さ160mmの箇所が1つあり、この部分のみで芯出しをしているため、ひずみ測定器の接着時に1~2°の偏芯が生じた。そのため、孔径56mmに近く太い箇所を2つ以上設けるように改良する。また、ひずみ計貼付装置は圧着前の長さが約2.5mと長く、現場で取り扱いにくかったため、短くできないか検討する。
- ・ <u>ひずみ測定器のデータロガー部分の改良</u>:記憶容量や電池容量を増大し、収録内容の改 良を行う。また、不測の事態に備えて、スペアの製作を検討する。
- ・ 掘削ツールスの改良:コア回収を改善し、複数の掘進長に対応するために、ビット先端 部分を改良し、複数の長さの 36mm 孔掘削ビットを製作する。また、センタリングガイ ドケーシング設置時の 116mm 孔の孔底でのケーシング内外の水流を抑制し、また試験 孔の偏芯を抑制するために、116mm 孔のノンコアビットを改良する。
- ・ <u>孔内カメラの先端パーツの耐圧強化</u>:より深い深度での測定にも対応できるように、耐 圧が低い先端パーツも孔内カメラの他の部分の耐圧 4.5MPa と同等となるように製作す る。
- ・ 周載荷感度試験方法の改良: 土被り圧相当の圧力を載荷・除荷した際のひずみ変化を測

定できるように、引張破壊が生じやすいコア側面のみへの周載荷ではなく、コア全体に 等圧で載荷可能な装置の製作を検討する。

- ・ <u>接着剤注入装置の栓の改良</u>:孔径が大きくなっても所定の深度で設置できるよう、栓の 改良を検討する。
- (3) 検証試験の計画
- 1) 概要

来年度は、今年度実施したボーリング孔をさらに延伸掘削し、今年度よりも深い、深度 100m 程度(土被り約 224m 相当)までの区間で、円錐孔壁ひずみ法の現場検証試験を行うことを計 画している。

- 2) 目的
  - 今年度の現場試験で判明した課題について改良を行い、改良した手法の検証を行う。
  - ・ 今年度よりさらに深い水深位置での適用性検証を行う。
  - ・ これまで実施した軽石凝灰岩 Tpt2 だけでなく砂質軽石凝灰岩 Tspt2 を対象とした検 証試験を行う。
  - ・ 令和2年度に実施した水圧破砕試験での応力測定結果と比較検討するため、水圧破砕 法を実施した深度付近での測定を行う。
- 3) 方法

今回の現場試験で実施した試験孔を掘り増して、深度 100m 程度までの複数深度で円錐孔壁 ひずみ法による応力測定を行う。試験は、令和2年度の水圧破砕試験の実施深度付近を中心に 実施する。 **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] ベルナール・アマディ、オーヴ・ステファンソン、石田毅(監修): 岩盤応力とその測定、京都大学学術出版会, 272-325, 2012
- [3] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター、東電設計株式会社:令和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,2023
- [4] 日本原燃株式会社: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1日),2006
- [5] 金川忠、日比野敏、石田毅:オーバーコアリング法による3次元地圧計測法-埋設型8成分 ゲージの開発-,電力中央研究所報告(研究報告:385033),1986
- [6] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター、東電設計株式会社:令和2年度 低 レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分調査技術高度化開発 報 告書,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

初期地圧測定時の岩盤の塑性化・破壊のメカニズムを解明するための解析手法(DEM 解 析)を用いて、現場検証試験等のシミュレーションを実施し、同手法の岩盤状態評価手法と しての適用性を確認する。

実施項目は、下記のとおりである。

- I. 原位置試験(水圧破砕法試験)のシミュレーション
  - これまでの三軸圧縮試験、室内検証試験のシミュレーションで適用性が確認されている解析手法を用いて、既往の水圧破砕法試験の再現性向上を図る。
- II. 現場検証試験(円錐孔壁ひずみ法)のシミュレーション
  - 初期地圧測定装置の開発に資するために実施する現場検証試験のシミュレーション を行い、解析手法の適用性と初期地圧測定装置の仕様を検討する。

本年度の工程を表 2.2-1 に示す。

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(水 圧破砕法試験) のシミュレーション		E	デル・パラメ	一タ検討	水圧破砕	法試験シミ	ュレーション	, ,				
(2)現場検証試験 (円錐孔壁ひずみ 法)シミュレーション					≢デル・パラ 	メータ検討		円錐孔壁	♪ずみ法シ	ミュレーショ	v	
報告書作成								(				
委員会等			第1回委員	<u></u> 숫		Ĵ	2回委員会			第3回委員会 ──		

表 2.2-1 令和5年度の工程

2.2.2 原位置試験(水圧破砕法試験)のシミュレーション

(1)これまでの経緯(課題)と対応策

1) シミュレーションの流れ

水圧破砕法試験と同じ岩種で実施した三軸圧縮試験のシミュレーションを実施して、DEM 粒子パラメータを設定する。その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。

2) 既往検討のシミュレーション結果

当初、三軸圧縮試験シミュレーションでは、図 2.2-3 に示すようにピーク強度並びに破壊 後の軟化過程を再現できないことが課題としてあった。この原因は、解析モデルに採用した 粒子形状が円形で、転がり摩擦のような回転抵抗を発揮せず、破壊後の延性的な挙動を再現 できないためと考えられた。この課題を解決するため、凹凸の引っ掛かりによって回転抵抗 が働き、破壊後の挙動を延性的にすることが期待できる粒子形状であるクランプの適用を図 った(図 2.2-4 参照)



図 2.2-3 三軸圧縮試験シミュレーション応力 - ひずみ曲線(軟化過程改善前)



図 2.2-4 クランプの形状

クランプを用いたシミュレーションを実施することで、図 2.2-5 に示すように、三軸圧縮 試験の非線形挙動や、ピーク強度、破壊後の挙動を再現できた。



図 2.2-5 三軸圧縮試験シミュレーション応力 - ひずみ曲線(軟化過程改善後)

三軸圧縮試験シミュレーションで求めたパラメータを用いて、水圧破砕法試験シミュレーションを実施した結果は以下のとおりである。

- 図 2.2-6 のように破砕圧が試験値(7.65MPa)を超過
- 解析結果の微視クラックは、周辺に拡大し、原位置試験と発生モードが異なる



図 2.2-6 水圧の経時変化(原位置試験結果と水圧破砕シミュレーション結果)

これらの原因として、三軸圧縮試験(延性的)と水圧破砕法(脆性的)で、両者の破壊後 挙動が相違すること、粒子形状(クランプ)で、延性的な破壊モードとなり、水圧破砕の脆 性破壊を再現できなかった可能性がある。

3) 対応策

前述した水圧破砕法試験のシミュレーションにおける課題を解決する対応策として、岩盤の破壊後挙動の再現性向上が可能な DEM の接触モデルを用いてシミュレーションを実施することとした。

球を連結したクランプ要素は、球では再現できない非線形挙動、具体的には見かけの粘着 カやピーク後のひずみ軟化挙動を、粒子間の接触モデルではなく物理形状を非球にすること によりインターロッキングを生じさせ再現しようとする自然な発想に基づく方法である。一 方、クランプ要素は複数の球を組み合わせるので、要素一個の寸法が大きくなってしまう点 が不利である。図 2.2・7 右に示す転がり摩擦 (Sakaguchi,1993[1])は、球同士の接触があた かも面で接触するかのように解析的に扱う工夫であり球粒子単独でインターロッキングを表 現することができる。このことにより、モデル数に対して粒子寸法を小さくすることができ、 現実の微視挙動により近づけることができる。さらに、粒状体で岩のような固体を表現する ためには、図 2.2・8 に示すような接触点で引張に抵抗するモデルを考慮する必要がある。こ れらのモデルはいずれも、そのパラメータの値を大きくすると、せん断強度を大きくする性 質がある。



【CUNDALL の接触モデル】

【転がり摩擦】





図 2.2-8 DEM の接触モデル(引張抵抗バネ)

(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 2.2-9 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 2.2-9 三軸圧縮試験の応力一ひずみ曲線(砂質軽石凝灰岩、深度 95.15m~96.15m)

内:	容	単位	值		
供封休十述	高さ	mm	100		
供訊件竹伝	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		

表 2.2-2 三軸圧縮試験条件

b. 解析手法

HiDEM-2012(海洋開発研究機構の個別要素法解析ソフトウェア)を使用した。

HiDEM-2012 は海洋開発研究機構(転がり摩擦を考案した阪ロ氏)によって開発された個 別要素法の高速解析プログラムであり、予め接触判定する粒子の候補を設定し、粒子の移動 量によりその候補を更新することにより高速化を図っている。また、転がり摩擦の機能が具 備されている。

## 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、粒子形状は球を採用した。解析モデルを図 2.2-10 に示す。



図 2.2-10 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(引張限界力)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 2.2-11 に示 す。図には、供試体での微視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 2.2-11 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

バネ係数	フィッティング→ <b>3.0×10<sup>8</sup>(N/m)</b>				
粘性減衰係数	8.75×10 <sup>2</sup> (N•s/m)				
粒子密度	2438(kg/m <sup>3</sup> )				
摩擦角	30°				
バネ引張限界力	フィッティング → 17500N				
転がり摩擦係数	フィッティング → 0.02				

表 2.2-3 パラメータ

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微視クラック発生図の比較を図 2.2-12 に示す。微視クラックの発生傾向からせん断帯の形成が認められ、供試体のせん断破 壊と同様の傾向が示されている。



図 2.2-12 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 2.2-13 に、発生クラックを図 2.2-14 に、水平面内の主 応力を表 2.2-4 に示す。



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



図 2.2-14 発生クラック

衣 <b>2.2</b> 1		
最大主応力 S <sub>H</sub> (MPa)	最小主応力 S <sub>h</sub> (MPa)	最大主応力方位 (°)
5.79	3.89	N40E

## 表 2.2-4 水圧破砕法試験結果(水平面内主応力)

b. 解析手法

HiDEM-2012(海洋開発研究機構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 2.2-15 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 2.2-16 に示す。解析モデルの奥行き方向の厚さは、3D モデルにした効果 を得られるであろう十分な粒子数を確保して粒子数個分の厚みを持たせるため 0.12m とし た。

孔壁への荷重載荷方法は、孔壁の内側粒子に円孔の半径方向の外向きの水平集中荷重を 徐々に増加させる設定とした。



図 2.2-15 水圧破砕法試験シミュレーションのモデル概要



図 2.2-16 解析モデル (3 次元)

2) 解析結果

水圧及び境界でモニターしている地圧の経時変化を図 2.2 17 に示す。初期地圧を 1 秒後 に実現する設定とした。三軸圧縮試験で設定したパラメータで、破砕圧(5.3MPa)で、試験 値(7.6MPa)を超過することのない結果が得られた。

微視クラック分布図を図 2.2-18 に示す。

水圧が 5.1MPa 程度から微視クラックが発生し始めて、破砕圧 5.3MPa で最大主応力方向 に微視クラックの発生が卓越する結果を得た。

以上より、粒子モデル等の見直しにより、水圧破砕法シミュレーションの再現性を向上す ることができた。



Width:壁(最小主応力方向)の反力





図 2.2-18 水圧破砕シミュレーション結果 (クラック分布 (cb=400N)

(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。

- 水圧破砕法による破壊後挙動の再現性向上のため、CUNDALLの接触モデルを採用し、 さらに粒子の接触点で引張に抵抗するモデルを適用した。
- 三軸圧縮試験で設定したパラメータを用いて水圧破砕法試験シミュレーションを実施 した結果、破砕圧(5.3MPa)で試験値(7.6MPa)を超過することのない結果が得ら れた。
- 水圧が 5.1MPa 程度から微視クラックが発生し始めて、破砕圧 5.3MPa で最大主応力 方向に微視クラックの発生が卓越する結果を得た。
- 以上より、粒子モデル等の見直しにより、水圧破砕法シミュレーションの再現性を向 上することができた。

2.2.3 現場検証試験(円錐孔壁ひずみ法)のシミュレーション

(1) 検討の目的

初期地圧測定装置の開発に資するために実施する現場検証試験のシミュレーションを行い、 解析手法の適用性と初期地圧測定装置の仕様を検討する。実施項目、実施目的及び実施内容 を表 2.2-5 に示す。

表 2.2-5 実施項目、実施目的及び実施内容

実施項目	実施目的	実が	<b>拖</b> 内容
原位置試験のシミ	解析手法の適用性検	✓	三軸圧縮試験のシミュレーションを実
ュレーション	討・仕様検討		施し、パラメータを設定
		$\checkmark$	現場検証試験条件に基づいて解析モデ
			ルを作成し、シミュレーションを実施
		$\checkmark$	現場検証試験結果と比較

(2) 現場検証試験のシミュレーション

1) 三軸圧縮試験シミュレーション

a. 対象とする三軸圧縮試験結果

現場検証試験のシミュレーションに供する DEM パラメータを設定するため、三軸圧縮試験のシミュレーションを実施し、試験結果の応力 - ひずみ曲線と比較する。

シミュレーションに用いる三軸圧縮試験結果は、軽石凝灰岩の試験結果である。

三軸圧縮試験結果の応力 - ひずみ曲線を図 2.2-19 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。原位置試験は、調査坑第 5 拡幅部で実施された。原 位置試験実施箇所は、2.1 節で示した図 2.1-78、図 2.1-79 のとおりである。第 5 拡幅部での ボーリング孔口の土被りは、113.68m である。原位置試験(ひずみゲージ設置位置)は、ボ ーリング深度 34.9m で実施されているため、試験箇所の土被りは、148.58m となる。そこ で、三軸圧縮試験の拘束圧のうち有効土被り圧に近い値となる 1.1MPa を採用した。



図 2.2-19 三軸圧縮試験の応力 - ひずみ曲線(軽石凝灰岩)

b. 解析手法

HiDEM-2012(海洋開発研究機構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、粒子形状は球を採用した。解析モデルを図 2.2-20 に示す。



図 2.2-20 三軸圧縮試験シミュレーションの解析モデル (3 次元)

d. 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 2.2-21 に示 す。図には、供試体での微視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 2.2-6 に示す。

試験結果とシミュレーション結果を比較すると、初期剛性、ピーク強度は概ね一致するが、 破壊前の非線形性が整合しない結果となった。今後、パラメータを見直して精度を向上させ る必要がある。

なお、現場検証試験の実測ひずみレベルは 0.2~0.3%であり、この範囲においてはシミュ レーション結果と試験結果は整合しているので、本結果を用いて現場検証試験シミュレーシ ョンを実施した。



図 2.2-21 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

三軸圧縮試験のシミュレーションで用いた粒子サイズとして、計算時間の節約のため現場 検証試験のコア周辺のモデルに用いる大きい粒子のサイズ(粒子半径 0.01m)を用いた。しか し、コアのモデルに用いる粒子のサイズは 1/4(粒子半径 0.0025m)なので、粒子サイズの比に 応じて応力とひずみが不変となるよう等価なパラメータを設定した。具体的には、バネ係数 を 1/4、バネ引張限界力を 1/16 とした。設定されたパラメータを表 2.2-6 に示す。

バネ係数	フィッティング→3.125×10 <sup>6</sup> (N/m)				
粘性減衰係数	3.78×10 <sup>1</sup> (N∙s/m)				
粒子密度	2561(kg/m <sup>3</sup> )				
摩擦角	30°				
バネ引張限界力	フィッティング → 68.75N				
転がり摩擦係数	フィッティング → 0.02				

表 2.2-6 パラメータ

2) 現場検証試験のシミュレーション

a. 解析条件

(a) 装置形状・寸法

現場検証試験に適用した円錐孔壁ひずみ法の形状・寸法を図 2.2-22 に、ストレインセル部の形状・寸法を図 2.2-23 に示す。





(b) 初期地圧

初期地圧は、R2年度水圧破砕法試験結果を参照して設定した。現場検証試験を実施した深度の試験結果が無いため、軽石凝灰岩(深度 67.1m)の試験結果を土被り比例で算出した地 圧を採用した。初期地圧を表 2.2-7 に示す。



表 2.2-7 初期地圧

b. 解析手法

HiDEM-2012(海洋開発研究機構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

先に示した装置形状・寸法に基づいて、オーバーコアリングの解析モデルを3次元で構築 した。解析モデルを図 2.2-24 に示す。



図 2.2-24 解析モデル

岩盤薄肉部内側の測定装置のうち、ストレインセル(樹脂部)をモデル化した。ストレインセ ル樹脂部の上部に、浮力を考慮の上、データロガー+ストレインセルの重量を作用させた。

ここで、データロガーとストレインセルの合計の質量、体積及び重量は以下のとおりである。

```
質量:3.1 kg
体積:1,694 cm <sup>3</sup>=0.0017m<sup>3</sup>
重量:3.1 kg×9.8m/s<sup>2</sup>=30.38N
```

さらに、浮力は以下のようになる。

0.0017m<sup>3</sup>×1000kg/m<sup>3</sup>×9.8m/s<sup>2</sup>=16.66N 従って、 装置重量-浮力=30.38-16.66=13.72N

 $\phi = 46$  mm 断面積 S=0.00166m<sup>2</sup>

以上から上載荷重(応力)は以下のようになる(図 2.2-25 参照)。 応力 σ = 8.25kN/m<sup>2</sup>



図 2.2-25 ストレインセル部の形状・寸法 (再掲)

オーバーコアリング時のモデルの推移を図 2.2-26 に示す。



図 2.2-26 オーバーコアリング時の解析モデルの変化

d. 解析結果

現場検証試験のシミュレーション結果を以下に記す。

(a) 微視クラック分布

微視クラック分布を図 2.2-27 に示す。上段がオーバーコアリング開始前、下段がオーバー コアリング時の増分で、●が微視クラックである。ここでは、粒子間バネが切断した状態を 微視クラック発生と定義した。



図 2.2-27 微視クラック分布

オーバーコアリング開始前で壁面近傍に微視クラックが発生し、その後オーバーコアリン グ実施に伴い、微視クラックは増加する。微視クラックは、特定の方向に連続して発生する 傾向が認められる。

現場検証試験でのオーバーコアリング終了時のコア写真を図 2.2-28 に示す。目視による コア確認で、表面にクラックは確認されていない。





図 2.2-28 4 深度目の孔内状況図及びコア写真

(b) ひずみ経時変化

シミュレーションと現場検証試験のオーバーコアリング時ひずみ経時変化の比較を図 2.2-29 に示す。上段がシミュレーション結果、下段が現場検証試験結果である。ここでは、 θ 方向と Z 方向(現場検証試験は ρ 方向)について比較した。

ひずみの出現は、概ね同様な傾向を示すが、主応力方向でのひずみが出現するトレンドが 整合しない。Z 方向のひずみがマイナス(圧縮側)となるが、現場検証試験結果では全て正 (引張側)となっている。



[シミュレーション] [現場検証試験] 図 2.2-29 オーバーコアリング時のひずみ経時変化

х

z

e. 考察

上記のように、オーバーコアリング時の微視クラックが過大評価されている可能性がある と推察された。この原因として、引張限界力を大きく見積もったことが考えられる。そこで、 引張限界力を 1.5 倍とした解析を実施し、微視クラック発生傾向を確認した。微視クラック 分布を図 2.2-30 に示す。

引張限界力を大きくしたことで、微視クラックの発生数は減少する傾向が認められた。



図 2.2-30 微視クラック分布(引張限界力 1.5 倍のシミュレーション結果)

オーバーコアリングに伴うひずみの経時変化を図 2.2-31 に示す。図の点線が引張限界力 を大きくした場合のひずみである。Z方向ひずみをみると、オーバーコアリング後にマイナ ス(圧縮)側に推移していたひずみが、0付近で止まっている結果となった。

以上より、基本ケースにおける引張限界力は大きく見積った可能性がある。






3) まとめ

- 三軸圧縮試験のシミュレーションは、初期弾性係数、ピーク強度は再現できたが、破壊前の非線形性が整合しない結果となった。今後、フィッティングの精度を向上させる必要がある。
- 現場検証試験シミュレーションの結果、微視クラックは、特定の方向に連続して発生する傾向が認められた。一方で、現位置試験のコア観察でクラックは認められない。
- 鉛直方向ひずみがマイナス(圧縮側)となるが、強度(引張限界力)を増加するとプラス(引張側)に転移した。主応力方向のトレンドが実測挙動と整合しない。
- 今後、実測値の評価も含めて、上記課題を解決し、シミュレーションの再現性向上を
  図る。また、適用限界の検討は、再現性の結果を踏まえて再度実施する。

(3) 課題と対応策の検討

1) 課題

前項までで述べたように、本検討で実施した現場検証試験のシミュレーション結果での課 題は以下のとおりである。

<フィッティング結果>

- 三軸圧縮試験のシミュレーションは、初期弾性係数、ピーク強度は再現できた。しかし、破壊前の非線形性は、試験結果より小さい傾向を示した。また、軸ひずみ1.2%程度とかなり早い段階でピークを示し、その後室内試験では見られないひずみ軟化現象が発現する結果となった。
- 現場検証試験シミュレーションの結果、微視クラックは、特定の方向に連続して発生し、薄肉部を通過するような発現を示す傾向が認められた。一方で、現場検証試験のコア観察でクラックは認められていない。

<オーバーコアリング時のひずみ挙動>

- 図 2.2-29 に示したオーバーコアリング時のひずみのうち Z 方向のひずみにおいて、 解析結果では、ひずみゲージ位置の約 140 mm手前からひずみが発生する。一方、現場 検証試験による実データも、オーバーコアリング開始時から徐々にひずみが生じるが、 ひずみゲージ位置の 140 mm程度手前からひずみの出現傾向が変わることが認められる。 この 140 mmは、1D(D:オーバーコアリング径)に相当する。1D手前付近からの挙 動がどのような事象なのか、確認しておくことが必要である。
- 現場検証試験のρ方向ひずみは、オーバーコアリング開始後、比較的早い段階から(引張)ひずみが増加し始めている。初期からρ方向でひずみが増加する挙動は、初期地 圧測定の応力評価でどこからを解放ひずみと見なすかに関わることであるため、現場 検証試験の実データの分析と解析での再現性の確認が望ましい。

2) 対応策

上述の課題に対する対応策を以下に述べる。

<フィッティング結果>

- 三軸圧縮試験シミュレーションでは初期剛性とせん断強度は再現できたものの、破壊前の非線形性が少なく、破壊後は、室内試験では見られないひずみ軟化現象が発現する結果となった。この原因は、解析モデルの供試体寸法に対する粒子数が少ないためと考えられる。粒子数が多いほど、局所的な破壊の数が多くなり、非線形性を表現しやすくなる可能性があるため、解析パラメータを調整する方法の他、供試体寸法に対する粒子数を多くすることも改善策と考えられる。
- 現場検証試験で微視クラックが薄肉部を通過するまでに拡大した理由として、モデルに用いた粒子径が大きく、薄肉部の上端部ではその幅に対して10粒程度の粒子し

か存在しない状態であった点が考えられる。つまり、端部で発生した微視クラック が反対側まで通過しやすい脆弱な構造であったと言える。現状でもかなり小さい粒 子を用いているが、粒径をさらに小さくして薄肉部の粒子数を限界まで増加させる ことにより、薄肉部の塑性による微視クラックの伝播を抑制できれば、靭性が確保 されて実現象に近づけると考えられる。

<オーバーコアリング時のひずみ挙動に関わる既往検討事例>

上述したオーバーコアリング時のひずみ挙動に関わり、既往検討での事例を以下に記す。

「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 2.3 初期地圧測定の開発に付随した技術課題の検討[2]」で実施した3次元 FEM 解析結果によるオーバーコアリング時のひずみ経時変化を図 2.2-32 に示す。

ρ 方向におけるゲージ位置(掘進深度 230mm)通過前のひずみは引張側に発生する。ひず みの変化量は、θ 方向の圧縮ひずみの方が大きい傾向がある。



**(θ方向ひずみ)** 

図 2.2-32 3 次元 FEM 解析結果に基づくオーバーコアリング時のひずみ経時変化

軽石質の凝灰岩が分布する地点で、円錐孔底ひずみ法を実施したときの解法ひずみの測定 結果[3]を図 2.2·33 に示す。正確な数字は不明だが、ゲージ設置位置約 450mm に対して、 ρ方向ひずみは、掘進深度 200mm、すなわちゲージ設置位置の 250mm 手前から引張側に ひずみが進展するが、円錐孔壁ひずみ法による現場検証試験と比べるとひずみは遅い時期に 出現している。また、ρ方向よりθ方向ひずみの変化が大きい。なお、この既往事例[3]は、 測定手法が異なり、水平ボーリングによる測定である点が今回の現場検証試験と異なる条件 である。



図 2.2-33 既往事例における円錐孔底ひずみ法による解放ひずみ[3]

ここで、主応力比の違いの解放ひずみへの影響に関する既往検討事例[4]を示す。図 2.2-34 に示す軸対称モデルを用いた FEM 解析を行っている。孔径方向応力 $\sigma_r$ と孔軸方向応力 $\sigma_z$  との比 $\sigma_r / \sigma_z$ をパラメータとして、掘進深度と解析ひずみとの関係を求めている。解析結果を図 2.2-35 に示す。



図 2.2-34 応力解放法の軸対称 FEM 解析モデル[4]



図 2.2-35 応力解放法の軸対称 FEM 解析結果[4]

図 2.2-35 の(b) 孔軸方向に着目すると、 $\sigma_r / \sigma_z$ の値によって、ゲージ位置通過前のひずみの大きさが異なる傾向が認められる。 $\sigma_r / \sigma_z$ の値が小さいほど、ゲージ位置通過前のひずみは引張側に大きくなる傾向がある。この結果は、孔軸方向の応力が孔径方向に比べて大きい場合、引張ひずみが大きくなることを示唆する結果である。

上述の既往検討事例に基づくオーバーコアリング時のひずみ挙動の知見・考察を以下にまとめる。

- 初期応力が異方性を有する場における初期地圧測定では、応力の卓越方向のひずみが 大きく出現する可能性がある。
- 引張、圧縮の違いはあるが、ρ方向、θ方向ともひずみゲージ通過前にひずみが出現 する。
- 令和2年度の水圧破砕法試験結果は、側圧係数が1以上で、鉛直方向より水平方向の 応力が卓越する。既往検討事例の知見に基づくと、現場検証試験のひずみ挙動と異な る挙動を示唆する。
- 現場検証試験結果は、θ方向よりρ方向のひずみ変化が大きく、既往検討事例と傾向 が異なる。

以上を鑑みると、実挙動の分析を引き続き行い、ひずみ挙動の妥当性を確認するため詳細 な検討を行う必要がある。 3) 対応策(フィッティング結果の課題)に関する見通しの検討

- a. 基本ケースの再解析
  - 1) 三軸試験のシミュレーション

現場検証試験シミュレーションにおいては、粒径が相対的に大きい粒子を用いた三軸圧縮 試験結果を基に、応力とひずみを不変として、現場検証試験シミュレーションのコア部分に 用いる小粒子のパラメータを設定した。三軸圧縮試験と現場検証試験シミュレーションのコ ア部分の粒子径を一致させることも再現性向上となる可能性があるため、三軸圧縮試験シミ ュレーションモデルの粒径を小粒子としてシミュレーションを実施した。

三軸圧縮試験シミュレーションの試験体寸法に対する粒子数は 1.7 倍の 53,738 個とした。 図 2.2-36 に解析モデルと解析結果を示す。

シミュレーションの結果、破壊後のひずみ軟化が認められなくなる点は改善されたが、破 壊前の非線形性が試験結果と整合しない結果である。

表 2.2-8 にフィッティング結果で設定した解析パラメータを示す。引張限界力は、表 2.2-6 で設定した値より大きくなった。



図 2.2-36 三軸圧縮試験シミュレーションの解析モデル(高さ 30cm 直径 15cm)と解析結果

表	2.2-8	パラメータ
~	0	

バネ係数	フィッティング→1.0×10⁰(N/m)
粘性減衰係数	2.14×10 <sup>1</sup> (N⋅s/m)
粒子密度	2561(kg/m <sup>3</sup> )
摩擦角	30°
バネ引張限界力	フィッティング → 93.75N
転がり摩擦係数	フィッティング → 0.02

図 2.2-36 をみると、軸ひずみが1%に達するまでの微視クラック発生が少ないことが認め られる。これより、非線形性が小さい原因は、微視クラックの発生が少ないことが原因と考 えられる。さらに、微視クラックの発生が抑制されたのは、引張限界力が小さいことによる と推定できる。したがって、破壊前の非線形性を室内試験結果と整合させるためには、引張 限界力を小さくする必要がある。

2) 現場検証試験のシミュレーション

三軸圧縮試験のシミュレーションで決定した表 2.2-8 のパラメータを用いて現場検証試験 のシミュレーションを行った。その結果、オーバーコアリング時に微視クラックが全く発生 しない結果となった。

(a) ひずみ経時変化

シミュレーションと現場検証試験のオーバーコアリング時ひずみ経時変化の比較を図 2.2-37 に示す。上段がシミュレーション結果、下段が現場検証試験結果である。ここでは、 θ 方向と Z 方向(現場検証試験は ρ 方向)について比較した。

シミュレーションと現場検証試験のひずみのトレンドは、 $\theta$ 方向、Z 方向ともに整合する 結果となった。一方で、ひずみの絶対値は、シミュレーション結果が現場検証試験結果より 小さい(例えば、 $\theta$ 方向かつ最小主応力方向のひずみは、シミュレーション 400 $\mu$ 、現場検 証試験 2,000 $\mu$ で 1/4)。ひずみの絶対値が異なる原因は、パラメータ設定において岩盤の剛 性を過大に評価した可能性がある。



b. 今後の方針

今回の検討で明らかとなった課題は以下のとおりである。

- 三軸圧縮試験の破壊前の非線形性が試験結果に比べて少ないため、微視クラックの発生を促進させる必要がある。
- 基本ケースでは、現場検証試験での微視クラックの発生が多い傾向があり、抑制する 必要がある。一方で、ひずみの絶対値は、現場検証試験と比べて小さいため、整合す るようにパラメータの見直しが必要である。

三軸圧縮試験における破壊前の非線形性は、微視クラックの発生が影響する。微視クラッ クの発生を促進するためには引張限界力を低減させることが対応策と考えられる。また、ひ ずみの絶対値を現場検証試験結果のオーダーと整合するためには、岩盤の剛性を小さくする ことが改善策と考えられる。これも三軸圧縮試験の初期段階の微視クラック発生を促進する ことで改善が期待される。一方で、現場検証試験での微視クラックの過度な発生要因は、粒 子径が大きいことにより局所的な破壊がモデル全体に伝搬したためと考えられる。そこで、 粒子径を小さく、すなわち、モデルにおける粒子数を増加することを試行する。なお、粒子 径を変えることで、微視クラック発生やひずみ挙動に対する引張限界力の効果も変わるため、 粒子径(モデル設定)と引張限界力等のパラメータ設定を関連付けて検討する必要がある。 2.2 節の参考文献

[1] Sakaguchi, H., Ozaki, E. & Igarashi, T. : Plugging of the Flow of Granular Materials during the Discharge from a Silo, Int. J. Mod. Phys. B, 7, pp.1949-1963 (1993).

[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:令和3年 度低レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分調査技術高度化開発 報告書(2022)

[3] 冨田敦紀:堆積軟岩空洞の掘削損傷領域評価に関する研究、京都大学博士論文(2008) [4] 横山幸也ほか:埋設法による初期地圧測定の信頼性向上のための検討、応用地質年報、 No.13(1991)

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

うち、地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

## 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う

# ち、地震時影響評価技術の検討及び地震動観測

- 3.1 地震時影響評価技術の検討
- 3.1.1 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
  - 1) 令和2年度

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。
- 周辺地盤では、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 3.1-1 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 3.1-1 解析結果と観測結果の乖離に関する想定原因の抽出及び対応策の概要

3-2

2) 令和3年度

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、地下施設や周辺地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) 令和4年度

令和4年度の検討[3]では、前年度に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を 実施し、成果及び今後の課題を得た。

【減衰定数の周波数依存性の考慮】

解析用地盤物性値のうち、減衰定数の周波数依存性への影響及び逆解析による剛性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。

【加速度振幅の補正による入力地震動設定方法の検討】

- 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。
- ・ 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。

(3) 今年度の検討概要

令和5年度は、前年度に引き続き、現状の課題を踏まえた引戻し解析手法の高度化につい て検討するとともに、設定した入力地震動を用いて、2次元モデル(試験空洞・試験施設を含 む)における地震応答解析を実施し、地震時挙動の再現性について検討した。さらに、観測 データに適合した最適地盤モデルを合理的に取得することを目的として提案した「遺伝的ア ルゴリズムを用いた地盤物性逆解析手法」について、本手法の妥当性について確認した。 実施項目を以下に示す。

- ・ 入力地震動設定の検討
- ・ 地震応答解析による試験空洞及び試験施設の地震時挙動の再現性検討
- ・ 遺伝的アルゴリズムを用いた地盤物性逆解析手法の妥当性確認
- (4) 検討フロー

令和2年度に立案した5ヵ年実施計画のフローにおける令和5年度の検討内容の位置づけ を図 3.1-2に示す。



図 3.1-2 5ヵ年実施計画のフローにおける令和5年度の検討内容の位置づけ

### (5) 検討工程

令和5年度の工程を表 3.1-1に示す。

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)地震動データの 取得・整理		$\bigtriangledown$	地震計	メンテナ	ンス、デ-	ータ回収(	年3回程 ▽	度)		$\bigtriangledown$		データ取得は次
			デ <del>ー</del> タの 支映					データの <b>反</b> 映		デ 反	ータの 映(次年	年度以降も継続
(2) 解析用入力地 震動設定の検討		<b>•</b>					; *			 ■ ■	実施)	
(3)試験空洞・試験 施設を対象とした 地震応答解析手 法の検討							1					
報告書作成												
委員会等			第1回委	員会			第2回委員:	AK		第3回委員	会	

表 3.1-1 令和5年度の工程

3.1.2 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 3.1-3 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 3.1-4 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 3.1-5 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。

この不整合の要因の1つとして考えられることとして、本検討で用いている地盤物性値が 隣接地域の地盤物性値[4]を代用していることが挙げられるが、その他に考えられる要因を含 めて、入力地震動作成における引戻し解析の精度向上の課題と対応策を表 3.1-2 に整理する。 表 3.1-2 の整理結果を踏まえて、本項では以下の項目について述べる。

・逆解析による地盤物性の設定

・観測地震動の分析による3次元地形の影響確認



図 3.1-3 地震計の設置位置



図 3.1-4 地震応答解析の流れ



図 3.1-5 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

課題	調照の中容	対応策				
(不確実性)	林思の内谷	本研究	残された課題			
①地震計設置箇所の地層 構成	地表地震計の直下のボー リング調査なし。 現地の地質状況より水平 成層を仮定。	逆解析(パラメータスタ ディ)により、以下項目の同 定。 ・地層構成 ・地盤物性(G <sub>0</sub> (Vs))	当該地点の地層構成及び 地盤物性を取得する。 ・ボーリング調査 ・PS検層			
②地盤物性及び動的物性 (2) 地盤物性及び動的物性	当該地点から離れた同一 岩種の物性(初期せん断剛 性G <sub>0</sub> 、動的変形特性(G/G <sub>0</sub> 、 h~γ)を流用。	•地盤物性(h)	⇒ 逆解析で予測した物性と の比較分析。			
③3次元の地形、地層	地形、地層の3次元の影 響については不明。	観測地震動の分析(オー ビット特性、伝達関数)によ る3次元の影響を確認。	2次元モデル、3次元モデ ルによる引き戻し解析、3次 元地震アレー観測。			
④その他	減衰の周波数依存性が不 明。	加速度レベルが小さい場 合の減衰の周波数依存性 の影響が小さいことを確認 (令和4年度実施)。	大規模地震の観測データ を用いた減衰の周波数依 存性の影響分析。			

### 表 3.1-2 引戻し解析の精度向上の課題と対応策

(2) 逆解析による地盤物性の設定

ここでは、地盤物性のうち初期せん断剛性及び減衰定数をパラメータとした逆解析により、 観測地震動結果と整合する地盤物性の設定を実施した。

なお、逆解析に用いた地震動は、前年度の検討に引き続き、図 3.1-6 及び図 3.1-7 に示す ように、2022/3/16 に発生した地震動の地震計⑤及び地震計④の観測データ(水平方向(空洞 横断方向)、y 方向)を用いた。







図 3.1-7 観測結果(地震計④、y方向、2022/3/16)

- 1) モデル全体の剛性に着目したパラメータスタディ
  - a. 検討条件

図 3.1-8 に示すように、モデル全体(地表~地下)の地層を対象として、観測結果と整合する地盤物性の組み合わせを確認するために、現状用いている初期せん断剛性に対して 0.1 倍~10 倍に振ったケースを設定して引戻し解析を実施した。

なお、初期せん断剛性の組み合わせの最適化の判定には、図 3.1-9 に示すように、引戻 し後の解析結果と観測結果のフーリエスペクトルに対して、最小二乗法(残差平方和が最 小)を用いた。



図 3.1-8 初期せん断剛性に乗じる倍率の組合せパターン



図 3.1-9 解析結果と観測結果のフーリエスペクトルの比較

b. 検討結果

パラメータスタディによって得られた、最も観測結果に近づく剛性の組合せを表 3.1-3 に示す。また、解析結果(補正前・後)と観測結果の加速度波形の比較を図 3.1-10、フー リエスペクトルの比較を図 3.1-11 に示す。さらに、補正前・後のせん断波速度 Vs 及び インピーダンス比の深度分布を図 3.1-12 に示す。

図 3.1-10 及び図 3.1-11 に示すように、最大加速度の加速度レベル及びフーリエスペクトルの分布は、剛性の補正により観測結果に近づく傾向がみられた。

しかし、図 3.1-12 に示すように、標高-50m 以深に着目すると、補正後の Vs の深度分 布は参考として併記した原位置 PS 検層結果による Vs の深度分布よりも 3 倍程度大きい 結果となり、非現実な値となっている。なお、補正前の Vs の分布は、原位置 PS 検層結 果の Vs の分布と概ね整合している。

一方、標高-50m 以浅に着目すると、Vs の変化が顕著である(インピーダンス比が大きい)ことがわかる。すなわち、標高-50m 以浅の表層付近では、インピーダンス比を大きくすることで最適化地盤に近づく可能性があることが示唆された。

そこで、追加検討として、標高-50m以深は原位置 PS 検層結果と整合している現状の 補正前の Vs、標高-50m以浅は上記のインピーダンスになるように Vs を調整したケース による解析を実施した。

地層	補正前 (現状のパターン)	補正後			
PH	1.0 倍	1.78 倍			
Tss①	1.0 倍	1.02 倍			
Tss2	1.0 倍	0.83 倍			
Tps	1.0 倍	0.39 倍			
Tpt(1)					
Tpt <sup>2</sup>	10/5	10 倍			
Tpt3	1.0 倍				
Tpt4					
Tcs	1.0 倍	10 倍			

表 3.1-3 初期せん断剛性に乗じる倍率の補正前後の結果



図 3.1-10 解析結果(補正前・後)と観測結果の加速度波形の比較



図 3.1-11 解析結果(補正前・後)と観測結果のフーリエスペクトルの比較



図 3.1-12 解析結果(補正前・後)と観測結果のVs及びインピーダンス比の比較

#### c. 追加検討

前項で述べたように、追加検討として、標高-50m以深は原位置 PS 検層結果と整合している現状の補正前の Vs、標高-50m以浅は前項のインピーダンス結果を用いて Vs を調整したケースによる解析を実施した。

追加検討に用いた Vs の深度分布を図 3.1-13 の緑線で示す。



図 3.1-13 追加検討の Vs の深度分布(緑線)

解析結果(補正前・後・追加ケース)と観測結果の加速度波形の比較を図 3.1-14、フー リエスペクトルの比較を図 3.1-15 に示す。

図 3.1-14~図 3.1-15 に示すように、追加ケースでは、補正前ケースよりも最大加速度 は観測結果に近づく傾向はみられたものの、顕著な改善は確認できなかった。



図 3.1-14 解析結果(補正前・後・追加ケース)と観測結果の加速度波形の比較



図 3.1-15 解析結果(補正前・後・追加ケース)と観測結果のフーリエスペクトルの比較

- 2) モデル全体の減衰に着目したパラメータスタディ
- a. 検討条件

入力パラメータのうち、減衰定数が解析結果に与える感度を確認するために、全層の減 衰定数を一律で変化させた条件を設定した。

減衰定数のパラメータは、現状ケースの1%に対して、減衰を考慮しないケースの0%、 減衰を過度に大きくしたケースの10%を設定した。



図 3.1-16 減衰定数のパラメータ

b. 検討結果

解析結果と観測結果の加速度波形の比較を図 3.1-17、フーリエスペクトルの比較を図 3.1-18 に示す。

図 3.1-17 及び図 3.1-18 に示すように、減衰定数を現状の 1%から 0%にしても、加速 度波形及びフーリエスペクトルの結果に与える感度は小さいことがわかった。また、減衰 定数を一律 10%にすると、引戻し後の加速度レベルが極端に大きくなり、観測結果から 離れる結果となった。

以上より、減衰定数のパラメータ調整による改善は確認できなかった。



図 3.1-17 解析結果と観測結果の加速度波形の比較



図 3.1-18 解析結果と観測結果のフーリエスペクトルの比較

- 3) 地表付近の剛性に着目したパラメータスタディ
  - a. 検討条件

前項で述べたように、モデル全体を対象とした地層単位による初期せん断剛性及び減 衰定数のパラメータスタディによる逆解析では、観測結果と整合する地盤物性値は得ら れなかった。

地表の PH 層 (層厚 5m) においても、図 3.1-19 に示すように、これまでは層厚 5m 分 を均一物性としてモデル化していた。一方、地震計設置時の現地の状況をみると、地表の 1~2m 付近は軟らかい粘性土が堆積し、剛性が小さくなっていることが確認されている。 この地表付近の小さい剛性の影響が、地表での観測データに含まれていると考えられる ため、ここでは、PH 層の表層 1m を対象に、剛性の感度解析を実施した。

剛性のパラメータスタディのケースは、以下の4ケースで実施した。

- 現状の剛性: 55600kN/m<sup>2</sup>
- ② ①の約 1/5 倍: 10000kN/m<sup>2</sup>
- ③ ①の約 1/10 倍: 6000kN/m<sup>2</sup>
- ④ ①の約 1/50 倍: 1000kN/m<sup>2</sup>



図 3.1-19 地表の地震計設置位置の周辺状況

b. 検討結果

解析結果と観測結果の加速度波形の比較を図 3.1-20、フーリエスペクトルの比較を図 3.1-21 に示す。

図 3.1-20 及び図 3.1-21 に示すように、解析結果に与える表層の剛性の感度は大きい ことがわかる。また、図 3.1-21 に示すように、これまでの地層単位でのパラメータスタ ディでは調整することが難しかった 10~20Hz 帯においても解析結果が観測結果に近づ く傾向も確認できた。

本検討結果より、加速度レベル及びフーリエスペクトルの分布結果より、「表層の剛性 を約 1/10 (G=6000kN/m<sup>2</sup>)」にしたケースが観測結果に近づく地盤モデルになると判断 した。







図 3.1-21 解析結果と観測結果のフーリエスペクトルの比較

(3) 観測地震動の分析による3次元地形の影響確認

現地で得られた地震動の観測データには、3次元地形の影響(地層の傾斜等)が含まれる と考えられる。一方、本検討では、図 3.1-22及び図 3.1-23に示す地質断面図の地層構成や 地層の傾斜等を参照して、現地の地層が概ね水平であるとみなして、解析は簡易的に水平成 層としてモデル化している。

ここでは、現地で得られた地表〜地下の観測データのうち、水平方向2成分のデータに着 目した分析を実施することにより、観測データに含まれる3次元地形の影響について検討す る。



※地質断面図は日本原燃(株)提供に加筆

図 3.1-22 地震計⑤と地震計④位置の地質断面図



図 3.1-23 地震計⑤(地表)と地震計④(地下)の平面位置の関係
1) 加速度オービットによる地震動の計測方向の確認

はじめに、地表と地下で観測された加速度データを用いて、地震動の計測方向にズレがな いことを確認する。

確認方法は、まず図 3.1-24 及び図 3.1-25 に示すように地表と地下で観測された水平方向 2 成分(x 方向、y 方向)の加速度データのうち 0.5Hz 以下の長周期成分のみの加速度時刻歴 を抽出する。次に、抽出した水平方向 2 成分の加速度時刻歴データを用いて、図 3.1-26 に示 す加速度オービットを作成する。

図 3.1-26 に示すように、水平方向 2 成分の加速度オービットの形状は、地表と地下で類 似していることより、両者は同一方向に挙動していることがわかる。以上より、地震計の計 測方向には問題は無いことを確認した。



図 3.1-24 地表(地震計⑤)の長周期成分の波形抽出



図 3.1-25 地下(地震計④)の長周期成分の波形抽出



図 3.1-26 地表及び地下の加速度オービット

2) 伝達関数による分析

今年度取得された 5 波の観測データを用いて作成した水平方向 2 成分(x 方向、y 方向)の伝達関数を図 3.1-27 に示す。また、x 方向、y 方向それぞれの 5 波の平均値のみを重ね合わせた伝達関数を図 3.1-28 に示す。

図 3.1-28 に示すように、地表〜地下の観測データの伝達関数を整理すると、x 方向とy 方向で伝達関数の分布は類似していることが確認できる。すなわち、水平方向2成分の地震動の増幅傾向が同等であることから、現地の3次元地形(地層の傾斜等)の影響は小さいと考えられる。よって、本検討における解析モデルにおいても、水平成層としてモデル化してもよいと判断した。



図 3.1-27 水平方向2成分の伝達関数(5波)



図 3.1-28 水平方向2成分の伝達関数(5波の平均のみ表示)

(4) 入力地震動の設定

図 3.1-29 に示すように、2022/3/16 に発生した地震動の地震計⑤の観測データを1次元引 戻し解析によりモデル下端深度まで引戻して、2次元地震応答解析の入力地震動を設定する。 前項で設定した地表付近の剛性を反映した引戻し解析の入力物性値のうち、水平動検討用 を表 3.1-4、鉛直動検討用を表 3.1-5 に示す。

鉛直動検討用に適用する剛性は、表 3.1-5 の備考に示すように、水平動検討時の初期せん 断剛性 G<sub>0</sub> とポアソン比 v より換算して設定した。その剛性の妥当性については、図 3.1-30 に示すように、解析で設定した P 波速度と、一部深度で実施した原位置 PS 検層結果の P 波 速度が概ね同等の深度分布を示すことより確認した。

引戻し解析により設定した入力地震動を図 3.1-31 に示す。参考として、前年度実施した地 表付近の剛性を反映しない場合の入力地震動を図 3.1-32 に示す。図 3.1-31 及び図 3.1-32 の前年度と今年度の最大加速度を比較すると、水平方向は 16.7Gal から 13.2Gal に 3.5Gal 減少(21%減少)、鉛直方向は 12.4Gal から 11.7Gal に 0.7Gal 減少(6%減少)となった。



種類	区分	単位体積重量	初期せん断 剛性	ポアソン比	減衰定数	S波速度	備考
		$\gamma [kN/m^3]$	G <sub>0</sub> [MPa]	ν[-]	h[-]	Vs[m/s]	
	PH(表層~深度1m)	19.0	6	0.47	0.01	56	
	PH(深度1m~5m)	19.0	56	0.47	0.01	172	
	Tss①	17.8	552	0.45	0.01	557	・過年度の検討より、発生
	Tss2	18.0	737	0.43	0.01	640	ひずみレベルは弾性範囲
地	Tps	16.8	1,022	0.41	0.01	780	とみなし、せん断剛性及
盤	Tpt(1)	15.2	1,005	0.40	0.01	813	び減衰定数のひずみ依存
	Tpt(2)	15.2	1,080	0.39	0.01	843	特性は考慮せず一定値と
	Tpt3	15.2	1,156	0.38	0.01	872	した。
	Tpt④	15.2	1,231	0.38	0.01	900	
	Tcs	19.9	2.030	0.37	0.01	1.010	

表 3.1-4 1次元引戻し解析の入力物性値(水平動検討用)

表 3.1-5 1次元引戻し解析の入力物性値(鉛直動検討用)

種類	区分	単位体積重量	剛性 (鉛直方向 検討用)	ポアソン比	減衰定数	P波速度	備考
		γ[kN/m³]	G'₀[MPa]	ν[-]	h[-]	Vp[m/s]	
	PH(表層~深度1m)	19.0	106	0.47	0.01	236	
	PH(深度1m~5m)	19.0	989	0.47	0.01	722	・水平方向と同様、剛性 取び減春空数は一空値と
	Tss①	17.8	6,072	0.45	0.01	1,847	した。
地盤	Tss2	18.0	6,001	0.43	0.01	1,826	<ul> <li>・鉛直方向検討時の剛性</li> <li>G'。は、水平方向検討時の</li> <li>せん断剛性G。とポアソン</li> <li>比 ν より、以下の式で算定した。</li> <li>G'、=(2×(1-ν)×G。)</li> </ul>
	Tps	16.8	6,700	0.41	0.01	1,997	
	Tpt①	15.2	6,030	0.40	0.01	1,992	
	Tpt(2)	15.2	5,989	0.39	0.01	1,985	
	Tpt③	15.2	5,973	0.38	0.01	1,982	
	Tpt④	15.2	6,360	0.38	0.01	2,046	$/(1-2 \times \nu)$
	Tcs	19.9	9,838	0.37	0.01	2,223	



図 3.1-30 P 波速度の設定値と原位置試験結果の比較



(2)鉛直方向(z方向)図 3.1-31 入力地震動(今年度実施、表層の剛性を見直し)



3.1.3 地震応答解析による試験空洞及び試験施設の地震時挙動の再現性検討

(1) 概要

前項で作成した入力地震動を用いて、表 3.1-6 に示すように、試験空洞及び試験施設をモ デル化した 2 次元地震応答解析を実施する。解析結果と試験空洞及び試験施設に設置してい る地震計との比較分析により、解析における地震時挙動の再現性について検討した。

なお、表 3.1-6 に示す第四紀層 (PH) の層厚 5m のうち表層 1m は、前項で設定したよう に剛性を小さくした物性値を適用した。詳細は後述する。



表 3.1-6 検討ケース

- (2) 解析条件
  - 1) 解析モデル

本検討では、表 3.1-6 の Case1 (空洞モデル)で試験空洞底盤に設置した地震計①との地 震時応答を比較分析し、Case2 (施設モデル)で試験施設上部に設置した地震計③との地震時 応答を比較分析する。

解析モデルは、図 3.1-33 に示すように平面ひずみ問題として周辺地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、解析モデルの底面は粘性境界とし、側方 には自由地盤を設けて粘性境界とした。

地震応答解析に用いた部材ごとの材料モデルを表 3.1-7 に示す。



(1)全体モデル



図 3.1-33 解析モデル (Case2 の場合)

女17 + +	材料モデル		
百万人	地震応答解析		
地盤	修正 R-0 モデル		
支保工	部件エデル		
埋戻し材(セメント系)	弾性モデル		
埋戻し材(土質系)	修正 R-0 モデル		
低透水層			
低拡散層			
コンクリートピット			
廃棄体間充填材	弾性モデル		
上部充填材			
均しコンクリート			

表 3.1-7 材料モデル

2)物性値の設定

解析に用いた物性値一覧を表 3.1-8 に示す。本解析に用いた構造物の物性値は、過年度の 報告書[5]より設定した。地盤の物性値については、日本原燃再処理施設の物性値[4]を適用し た。

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	レーリー減衰パラメータ		修正R-Oパラメータ	
		$\gamma [kN/m^3]$	E[MPa]	G <sub>0</sub> [MPa]	ν[-]	α	β	α	β
	PH(表層~深度1m)	19.0	18	6	0.47			1 204	1 9 5 1
	PH(深度1m~5m)	19.0	165	56	0.47			1.004	1.001
	Tss①	17.8	1601	552	0.45			2 1 0 1	2 1 2 1
	Tss2	18.0	2108	737	0.43			2.131	2.131
地	Tps	16.8	2882	1,022	0.41	0 2172	0.0001251	2.451	2.293
盤	Tpt(1)	15.2	2814	1,005	0.40	0.2175	0.0001231		
	Tpt(2)	15.2	3002	1,080	0.39			2 4 5 1	2 203
	Tpt3	15.2	3191	1,156	0.38			2.401	2.230
	Tpt④	15.2	3398	1,231	0.38				
	Tcs	19.9	5562	2,030	0.37			1.727	1.788
	支保工	24.5	27,900	_	0.2			-	_
	均しコンクリート	23.0	22,000	_	0.2	0 5424	0.0002120	-	-
	コンクリートピット	24.5	37,900	_	0.2	0.5454	0.0003128	-	-
	低拡散層	23.0	29,300	_	0.2			-	_
構	低透水層	19.0	-	300	0.41	0.2173	0.0001251	3.346	2.293
造	充填材	23.0	33,100	-	0.2			—	Ι
物	上部充填材	24.5	39,100	_	0.2		0.0002120	-	-
	支保工	24.5	27,900	_	0.2	0 5424		-	-
	埋戻し材(セメント系)	24.5	38,900	_	0.2	0.0404	0.0003120	_	_
	埋戻し材(土質系)	19.1	_	92.3	0.43			2.046	1.916
	均しコンクリート	23.0	22,000	_	0.2			_	_

表 3.1-8 解析物性值一覧

#### 3) 入力地震動

入力地震動は、図 3.1-34 に再掲するように、前項で設定した波形を用いた。



- (3) 解析結果及び分析
  - 1) Case1 (空洞モデル)

試験空洞底盤の地震計①の位置における、水平方向(y方向)と鉛直方向(z方向)の解析 結果と観測結果の比較を表 3.1-9及び表 3.1-10に示す。なお、表 3.1-9及び表 3.1-10には、 前年度実施した、PH 層の表層の物性値を変化しないで実施(入力地震動設定及び地震応答 解析)した結果を併記した。

y方向は、表 3.1-9 に示すように、今年度物性値を見直すことにより最大加速度は 16.6Gal から 10.5Gal に 6.1Gal 減少(37%減少)し、観測結果の 10.3Gal に近づく結果となった。また、フーリエスペクトルにおいても、試験施設の固有振動数帯(10~15Hz 程度)の範囲で解析結果と観測結果が近づく傾向が確認できた。

一方、z方向は、表 3.1-10 に示すように、今年度物性値を見直しても最大加速度及びフー リエスペクトルの前年度からの変化はあまり見られず、観測結果とは依然として離れた結果 となった。

# 表 3.1-9 解析結果と観測結果の比較(地震計①位置、y方向)



# 表 3.1-10 解析結果と観測結果の比較(地震計①位置、z方向)



2) Case2(施設モデル)

試験施設上部(コンクリートピット上面)に設置している地震計③の位置における、水平 方向(y方向)と鉛直方向(z方向)の解析結果と観測結果の比較を表 3.1-11 及び表 3.1-12 に示す。なお、表 3.1-11 及び表 3.1-12 には、前年度実施した、PH 層の表層の物性値を変 化しないで実施(入力地震動設定及び地震応答解析)した結果を併記した。

y方向は、表 3.1-11 に示すように、今年度物性値を見直すことにより最大加速度は14.4Gal から 9.3Gal に 5.1Gal 減少(35%減少)し、観測結果の10.1Gal に近づく結果となった。また、フーリエスペクトルにおいても、試験施設の固有振動数帯(10~15Hz 程度)の範囲で解析結果と観測結果が近づく傾向が確認できた。

一方、z方向は、表 3.1-12 に示すように、今年度物性値を見直しても最大加速度及びフー リエスペクトルの前年度からの変化はあまり見られず、観測結果とは依然として離れた結果 となった。

y方向及びz方向ともに、Case1と同様の分析結果となった。

# 表 3.1-11 解析結果と観測結果の比較(地震計③位置、y方向)



# 表 3.1-12 解析結果と観測結果の比較(地震計③位置、z方向)



(4) まとめ

今年度見直した入力地震動を用いて、試験空洞及び試験施設をモデル化した2次元地震応 答解析を実施した。解析結果と試験空洞及び試験施設に設置している地震計との比較分析に より、以下のことがわかった。

- 水平方向(y方向)の地震時応答は、Case1(空洞モデル)、Case2(施設モデル)ともに、
   今年度見直した入力地震動により加速度レベル及びフーリエスペクトルの分布結果が、
   過年度実施の結果よりも観測結果に近づく傾向が確認できた。
- ・ 鉛直方向(z方向)の地震時応答は、Case1(空洞モデル)、Case2(施設モデル)ともに、
   今年度見直した入力地震動の効果があまりみられなかった。この原因としては、鉛直方向の入力地震動の精度がよくないことが挙げられる。鉛直動の入力地震動作成のための引戻し解析では、前述したように水平動検討用の初期せん断剛性とポアソン比を用いて鉛直動検討用の剛性を設定しているが、ポアソン比の感度影響や鉛直動個別の逆解析による物性値の最適化検討が必要である可能性が考えられる。

- 3.1.4 遺伝的アルゴリズムを用いた地盤物性逆解析手法の妥当性確認
- (1) 概要

鉛直アレー観測システムで観測された地中及び地表観測記録を用いて表層地盤の増幅特性 をよく表現する地盤モデルが得られることを確認するために、数値実験による検討を行う。 ここで、鉛直アレー観測システムとは、地中及び地表に鉛直方向に設置した複数の地震計間 の時刻同期が図られた同時計測システムを表している。

現状の地震動観測システムでは、地中及び地表の地震計の時刻同期は図られていないため、 観測データを用いた検討は実施できない。そこで、本検討では地中の観測記録を、1次元波 動伝播理論を用いて地表波(模擬波)を作成することにより時刻同期がとれた2点間の波形 を設定した。

(2) 検討方法

数値実験による検討内容のイメージ図を図 3.1-35 に示す。サイトで得られている地中観 測記録及び PS 検層結果を用いて、1 次元波動伝播理論を用いて地表波を算定する。ここで、 入力波は E+F 条件で鉛直入射し、弾性解析とする。サイトで得られる実際の観測記録は不確 定性を有しており、観測波は地震ごとにばらついている。そこで、その不確定性を表すため に、模擬観測波にホワイトノイズを混入させる。

模擬観測波の地中波に対する地表波のフーリエスペクトル比を算定し、その幾何平均値を ターゲットとして、最適な地盤物性値を遺伝的アルゴリズム[6]による逆解析で求める。得ら れた最適地盤モデルの Vs と地盤応答解析で使用した Vs の真値とを比較する。また、模擬観 測波の平均フーリエスペクトル比と最適地盤モデルの理論伝達関数とを比較する、両者の対 応性から、本手法の妥当性を確認する。



図 3.1-35 検討内容のイメージ図

(3) 模擬観測波の作成

サイトの計測坑 C に設置された地震計④で得られている地中地震計の記録の中から表 3.1-13 に示す 10 地震の観測記録を選定して検討に用いた。本検討では、3 成分のうち X 成 分(空洞軸方向)の記録を用いた。また、本検討で設定している当該地点の Vs 構造に基づく 地盤構造モデルを図 3.1-36 に示す。先述の地中観測記録 10 波を用いて、1 次元波動伝播理 論により地表波を 10 波算定した。ここで、地中入力波は E+F 条件で鉛直入射し、弾性解析 を行った。一例として、地中観測記録 No.10 を用いた地震応答解析結果の加速度時刻歴を図 3.1-37 に示す。

サイトで得られる実際の観測記録は不確定性を有しており、観測波は地震ごとにばらつい ている。そこで、その不確定性を表すために、模擬観測波にホワイトノイズを混入させた。 具体的には、地中波及び地表波の時刻歴データにホワイトノイズの時刻歴データを加えた。 ノイズの大きさについては、地表波の最大加速度の5%~20%に変化させた。また、ノイズを 混入させない地震波(ノイズ:0%)も比較用に用意した。地中波に対する地表波の加速度フ ーリエスペクトル比の10波の重描きを図 3.1-38~図 3.1-39に示す。ここで、観測データを 黒線、図 3.1-36に示した地盤構造モデルで算定した理論伝達関数を赤線で表している。この ノイズを混入した観測データを、鉛直アレー観測システムで得られた模擬観測波として以降 の検討で用いる。

No.	発震時刻	震央地名	Mj	地震計④ X成分最大加速度 (Gal)
01	2022/03/16 23:36	福島県東方沖	7.4	8.5
02	2022/07/22 12:01	青森県三八上北地方	5.3	4.6
03	2022/09/13 09:51	青森県東方沖	5.1	2.1
04	2022/11/17 09:28	青森県東方沖	5.0	3.1
05	2023/03/28 18:18	青森県東方沖	6.2	5.5
06	2023/05/06 02:47	青森県東方沖	5.7	4.3
07	2023/06/11 18:54	苫小牧沖	6.2	3.7
08	2023/08/11 09:14	青森県東方沖	6.2	3.5
09	2023/10/14 11:29	青森県東方沖	4.7	2.5
10	2023/11/20 06:01	青森県東方沖	5.9	12.4

表 3.1-13 検討で使用した地震記録一覧







(2) 地中波(観測記録)





図 3.1-38 加速度フーリエスペクトル比(地表/地中)の重描き(1/2)



図 3.1-39 加速度フーリエスペクトル比(地表/地中)の重描き(2/2)

(4) 地盤物性値の逆解析

先に作成した模擬観測波の地中波に対する地表波の幾何平均フーリエスペクトル比をター ゲットとして、最適な地盤物性値(Vs構造及び減衰構造)を遺伝的アルゴリズム[6]による逆 解析で求めた。遺伝的アルゴリズムによる逆解析で得られた最適地盤モデルを図 3.1-40 に 示す。図 3.1-40 より、ノイズの大きさに拘らず Vs は真値に近い値が得られていることがわ かる。また、減衰定数はノイズの影響で、真値と比較して過大評価になっている。これはホ ワイトノイズの混入により、観測データのフーリエスペクトル比の高周波成分が減少してい ることに起因している。ある程度以上の振幅のノイズを混入されると、地震波に含まれる高 周波成分の信号がノイズに埋もれてしまうことによって生じている。しかしながら、実際の 地表~地中間の精度のよい地震動を観測することにより、真値に近い減衰定数が得られると 考えられる。

最適地盤モデルの伝達関数と観測データの幾何平均フーリエスペクトル比との比較を図 3.1-41~図 3.1-42 に示す。両者はよく対応していることがわかる。

以上より、遺伝的アルゴリズムを用いた地盤物性逆解析手法により、観測データに適合し た表層地盤増幅特性(最適地盤モデル)が得られることが確認され、本手法の妥当性が示さ れた。



(1) Vs 構造(2) 減衰構造図 3.1-40 遺伝的アルゴリズムによる逆解析で得られた最適地盤モデル



図 3.1-41 最適地盤モデルの伝達関数と観測データの幾何平均フーリエスペクトル比との比較 (1/2)



図 3.1-42 最適地盤モデルの伝達関数と観測データの幾何平均フーリエスペクトル比との比較 (2/2)

3.1.5 まとめ

今年度の成果を以下に示す。

- ・ 地表の観測データの引戻し解析では、現地の地表付近の軟らかい地盤剛性を反映した設 定により解析結果が観測結果に近づくことがわかった。
- 上記の引戻し解析による入力地震動を用いた2次元地震応答解析を実施した結果、水平 動の応答については、試験空洞及び試験施設の加速度レベル及びスペクトル分布の再現 性が向上したことを確認した。しかし、鉛直動の応答については、解析結果と観測結果に 差異が残ったままとなり、鉛直動の入力地震動作成の課題が残った。
- ・ 遺伝的アルゴリズムを用いた地盤物性逆解析手法により、観測データに適合した最適地 盤モデルが得られることを確認した。

今後の課題としては、上述の鉛直動の入力地震動作成の他に、今回は観測地震動1波を用いて 2次元地震応答解析による試験空洞及び試験施設の地震時挙動の再現性を確認したが、異なる振 動特性を含む観測地震動における空洞及び施設応答の再現性の確認が挙げられる。

- また、残された課題として、以下が挙げられる。
  - ・ 当該地点の地層構成及び地盤物性の取得(ボーリング調査、PS 検層等)
  - ・ 地表~解析モデル下端深度における地震計の設置(アレー観測)

3.1 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: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 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:令和3年度 低 レベル放射性廃棄物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分調査技術高度化開発 報 告書、令和4年3月
- [3] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター 東電設計株式会社:令和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
- [4] 日本原燃株式会社:「再処理施設及び特定廃棄物管理施設「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の改訂に係る耐震安全性評価報告 コメント回答(基礎地盤の安定性)」、平成 22年6月
- [5] 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 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 報告書、令和2年3月
- [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

3.2 地震動観測

#### 3.2.1 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、令和3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を活用できる環境を整えた。

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。

3.2.2 地下の地震動計測システム

3台の地震計の設置位置(当初計画)と設置状況を、図 3.2-1 ~ 図 3.2-2 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 3.2-1、地震計の仕様を表 3.2-2 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 3.2-3 に、RWMC 現場計 測室内のネットワーク図を図 3.2-4 に示す。









図 3.2-1 地下の地震計の設置位置平面図(全体)と設置状況





図 3.2-2 地震計の設置位置(試験施設)

	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	石	1	コンパクトフラッシュカード:32GB	
NTP 4	ナーバ (PC)	台	1	ディスクトップ型、液晶モニター	
データ	回収用 PC	石	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)		石	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	
	光ケーブル	式	1	配線長:約 120m(余裕長を含め 150m)	
ケー ブル 類	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		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 3.2-1 地震観測のための計測システム(地下)

表 3.2-2 地震計の仕様(地下)

名称	仕様	機 種
	計 測 範 囲:±1.5G	富士電機(株)製
	周 波 数 応 答:0.1~50Hz	<b>MEMS</b> 応用感振センサ
	分 解 能:X、Y軸:0.02gal	CPUKSNSP-00(防水・防塵形)
地震計 (加速	Z 軸:0.07gal	
地長司(加速	サンプリング周波数:100Hz、200Hz(設定値)	
度センリ	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	





図 3.2-3 計測設備の配置



図 3.2-4 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 3.2-3 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。

#### 3.2.3 地表面の地震動計測システム

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 3.2-5、ソーラーパネルの設置状況を図 3.2-6に示す。また、地震観測のための計測システムを表 3.2-3、地震計の仕様を表 3.2-4に示す。





図 3.2-5 地震計の設置位置平面図(地表面)と設置状況



底部プレート アンカーで固定

ケーブルで固定

ソーラーパネル設置状況

ソーラーパネル機器(計測小屋内)

図 3.2-6 ソーラーパネルの設置状況(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 アンラ	テナ	石	1	ソーラーパネルの架台に設置	
GPS 避雷器		石	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		石	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	
	同軸ケーブル	式	1	GPS アンテナ~GPS 避雷器間を接続	
ケーブル 類	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 3.2-3 地震観測のための計測システム(地表面)

表 3.2-4 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)	<ul> <li>計 測範 囲:±2.0G</li> <li>周 波 数応答: DC~100Hz</li> <li>分解 能:10mgalp<sup>-</sup>p以下(サンプリング周波数100Hz、2000gal フルスケール時)</li> <li>サンプリング 周波数:100Hz、200Hz(設定値)</li> <li>送信周波数:0.5sec(200Hz)</li> <li>1.0sec(100Hz)</li> <li>使用条件:使用温度範囲:0℃~50℃</li> <li>保護等級 :IP65</li> </ul>	東京測振製 ネットワークセンサ CV-374A

#### 3.2.4 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 3.2-7参照)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 3.2-7 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 3.2-5 に示す。

項目	仕様
トリガ冬州	マスタとする地震計(地震計①試験空洞底盤上(入力側))で、
トリル未住	XYZ のいずれかが 1gal 以上(マスタ・スレーブ方式)と設定
	地震検知時間幅 10秒
トリガ引き伸ばし時間	(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)
	トリガ検知前の収集時間 10 秒
プレトリガ時間	(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)
	地震収束判断時間 60 秒
ポストトリガ時間	(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)
サンプリング国連粉,時間	周波数 200Hz(1 秒間に 200 データを取得)
リンノリンク向仮数・时间	時間 最小で3分間(180秒、36,000データ)
山中形式	データ変換後、CSV ファイル形式
山刀形式	1 列目に取得時刻、2~4 列目に XYZ の加速度データ (gal)

表 3.2-5 回収データの仕様

(3) データ整理方法

トリガ値の1galを超えている回収データのうち、連続的にデータを取得している場合、 地震以外のデータである可能性が高いので、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 3.2-8 KiK-net 六ヶ所のデータの方位補正

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)13件 の諸元を表 3.2-6に示す。各データの取得日を下記に示す。

- ・No.1~7 2023 年 6 月 27 日にデータ取得
- ・No.8~12 2023 年 11 月 21 日にデータ取得
- ・No.13 2024年2月19日(地震計④)、2024年2月20日(地震計①~③、⑤) にデータ取得

No	地震の 発生日	地震の 発生時刻	震央地 名	緯度	経度	深さ	М	最大 震度	尾 較 の 震度	震央 距離 (尾駮)
1	2023 年 2 月 25 日	22:27:44	釧路沖	42°45. 3'N	145°04 .5′E	63 km	6	震度 5 弱	震度 2	366km
2	2023 年 3 月 28 日	18:18:29	青森県 東方沖	41°09. 5'N	142°50 .9′E	28 km	6.2	震度 4	震度 3	126km
3	2023 年 5 月 6 日	2:47:16	青森県 東方沖	41°28. 4'N	142°05 .1′E	56 km	5.7	震度 4	震度 2	82km
4	2023 年 5 月 11 日	18:52:45	日高地 方東部	42°22. 4'N	143°00 .4′E	55 km	5.5	震度 4	震度 1	207km
5	2023 年 6 月 11 日	18:54:45	苫小牧 沖	42°33. 5′N	141°54 .9′E	136 km	6.2	震度 5 弱	震度 3	182km
6	2023 年 6 月 17 日	9:26:16	青森県 東方沖	41°08. 0'N	142°50 .6′E	30 km	5.7	震度 3	震度 2	120km
7	2023 年 6月 22 日	16:39:47	青森県 東方沖	41°35. 0'N	142°05 .4′E	55 km	4.1	震度 3	震度 1	91km
8	2023年 8月11日	9:14:34	青森県 東方沖	41°07. 5'N	142°54 .7′E	28 km	6.2	震度 4	震度 2	131km
9	2023 年 8月 23 日	0:03:47	岩手県 沖	40°11. 5'N	141°55 .1′E	15 km	4.7	震度 3	震度 1	98km
10	2023 年 9 月 8 日	18:28:49	宮城県 沖	38°54. 0'N	142°06 .0′E	46 km	5.4	震度 4	震度 1	238km
11	2023 年 10 月 14 日	11:29:25	青森県 東方沖	41°30. 7'N	142°05 .0′E	54 km	4.7	震度 3	震度 2	85km
12	2023 年 11 月 20 日	6:01:31	青森県 東方沖	41°10. 0'N	142°17 .5′E	52 km	5.9	震度 4	震度 3	80km
13	2023 年 12 月 28 日	22:16:54	青森県 東方沖	41°34. 8'N	142°29 .4′E	43 km	4.5	震度 2	震度 1	104km

表 3.2-6 データ取得した地震の諸元

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 3.2-7 に示す。

	此屋の	雷山山	尾駮		国プロ	地震計		提供	KiK-
No.	地震の 発生日	晨 <del>天</del> 地 名	の 震度	1	2	3	(5)	4	net 六ヶ所
1	2023 年 2月 25 日	釧路沖	震度 2	0	0	0	0	0	0
2	2023 年 3月 28 日	青森県 東方沖	震度 3	0	0	0	0	0	0
3	2023年 5月6日	青森県 東方沖	震度 2	0	0	0	0	0	0
4	2023 年 5月11日	日高地 方東部	震度 1	0	0	0	0	0	0
5	2023年 6月11日	苫小牧 沖	震度 3	$\times^{*1}$	$\times^{*1}$	$\times^{*1}$	0	0	0
6	2023年 6月17日	青森県 東方沖	震度 2	$\times^{*1}$	$\times^{*1}$	$\times^{*1}$	0	0	0
7	2023 年 6月 22 日	青森県 東方沖	震度 1	$\times^{*1}$	$\times^{*1}$	$\times^{*1}$	0	0	0
8	2023年 8月11日	青森県 東方沖	震度 2	0	0	0	0	0	0
9	2023 年 8月 23 日	岩手県 沖	震度 1	0	0	0	0	0	0
10	2023年 9月8日	宮城県 沖	震度 1	0	0	0	0	0	0
11	2023 年 10 月 14 日	青森県 東方沖	震度 2	0	0	0	0	0	0
12	2023 年   11 月 20 日	青森県 東方沖	震度 3	0	0	0	0	0	0
13	2023 年 12 月 28 日	青森県 東方沖	震度 1	0	0	0	0	0	0

表 3.2-7 各地震計のデータ取得の有無

凡例 ○:データ取得、×:データ未取得

データ未取得の状況

\*1 No.5~7、地震計①~③ 2023 年 6 月 10 日の停電が原因、2023 年 6 月 27 日に 復旧 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 2023年2月25日















図 3.2-17 地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ













図 3.2-23 地震計③(手前部側壁の上部) 地震動取得データ































・No.6 2023年6月17日











図 3.2-41 KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ



・No.8 2023年8月11日











・No.9 2023 年 8 月 23 日











•No.10 2023年9月8日











・No.11 2023 年 10 月 14 日







図 3.2-64 KiK-net 六ヶ所(地表、方位補正後) 地震動取得データ





・No.12 2023 年 11 月 20 日








図 3.2-71 KiK-net 六ヶ所(地下 100m、方位補正後) 地震動取得データ



•No.13 2023年12月28日











(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 2023年2月25日

図 3.2-78 計測坑 C 地震動取得データ





図 3.2-79 計測坑 C 地震動取得データ



•No.3 2023年5月6日







•No.6 2023年6月17日



図 3.2-83 計測坑 C 地震動取得データ



•No.7 2023年6月22日







図 3.2-85 計測坑 C 地震動取得データ



•No.9 2023年8月23日





•No.11 2023年10月14日



図 3.2-87 計測坑 C 地震動取得データ









図 3.2-89 計測坑 C 地震動取得データ



・No.13 2023 年 12 月 28 日



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 3.2-8 に示す。

No	地震の	雪山地夕	尾駮の	地震計⑤ 鼻七加速度	地震計億	)/地震計④の比率		
NU.	発生日		震度	取八加速度 (Y 方向)	X 方向	Y 方向	Z 方向	
1	2023 年 2月 25 日	釧路沖	震度 2	12.84 gal	5.31	5.54	2.94	
2	2023 年 3 月 28 日	青森県 東方沖	震度 3	30.41 gal	5.78	4.42	3.69	
3	2023年 5月6日	青森県 東方沖	震度 2	35.60 gal	5.79	7.93	5.24	
4	2023年 5月11日	日高地 方東部	震度 1	7.94 gal	5.49	4.26	4.33	
5	2023年 6月11日	苫小牧 沖	震度 3	28.93 gal	7.70	5.07	4.67	
6	2023年 6月17日	青森県 東方沖	震度 2	17.00 gal	6.70	7.10	4.66	
7	2023年 6月22日	青森県 東方沖	震度 1	11.27 gal	7.16	9.04	7.20	
8	2023年 8月11日	青森県 東方沖	震度 2	18.27 gal	4.68	4.44	3.46	
9	2023年 8月23日	岩手県 沖	震度 1	8.35 gal	6.50	5.18	3.69	
10	2023年 9月8日	宮城県 沖	震度 1	3.15 gal	3.40	4.21	2.43	
11	2023年 10月14日	青森県 東方沖	震度 2	38.07 gal	7.80	13.19	6.16	
12	2023年 11月20日	青森県 東方沖	震度 3	67.77 gal	4.55	5.21	4.98	
13	2023年 12月28日	青森県 東方沖	震度 1	5.32 gal	7.35	6.70	3.22	

表 3.2-8 地表と地下の最大加速度の比較

最大加速度の比率の平均は X 方向で 6.0 倍、Y 方向で 6.3 倍、Z 方向で 4.4 倍であった。 また、最も比率の小さい地震は No.10 の宮城県沖を震央とする地震、最も比率の大きい地 震は No.11 の青森県東方沖を震央とする地震であった。No.11 の地震では、図 3.2-63 で 示すように地震計⑤(地表)の最大加速度が突出(38.07gal)していたため、比率が大きく なった。この 2 件の地震の周波数特性は次節で分析対象とする。 今年度の取得データのうち、震央地名が青森県東方沖以外の地震、尾駮で震度3以上の 地震、地表と地下の最大加速度の比率が10以上の地震について、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 3.2-9、震央の位置図を図 3.2-91、各地震の周波数特性を図 3.2-92 に示す。

27	地震の	震央地	尾駮         震央           距離         距離		地震計5	地震計5	④の比率	
No.	発生日	名	の震度	(尾 駮)	最大加速度 (Y 方向)	X 方向	Y 方向	Z 方向
1	2023 年 2月 25 日	釧路沖	震度 2	366km	12.84 gal	5.31	5.54	2.94
2	2023 年	青森県	震度	196km	30.41	5 78	1 12	3 69
	3月28日	東方沖	3	120KIII	gal	0.10	4.42	5.09
4	2023 年	日高地	震度	2071m	7.941	5 40	1.96	1 2 2
4	5月11日	方東部	1	207KIII	gal	0.49	4.20	4.00
5	2023 年	苫小牧	震度	189km	28.93	7 70	5.07	4.67
0	6月11日	沖	3	102KIII	gal	1.10		4.07
0	2023 年	岩手県	震度	0.81m	8.352	6 50	5 19	2 60
9	8月23日	沪	1	JOKIII	gal	0.00	5.16	5.69
10	2023 年	宮城県	震度	2281rm	3.153	2 40	4.91	0.40
10	9月8日	沖	1	230KIII	gal	5.40	4.21	2.45
11	2023 年	青森県	震度	951.m	38.07	7.90	19.10	0.10
	10月14日	東方沖	2	OJKIII	gal	1.80	13.19	6.16
10	2023 年	青森県	震度	801rm	67.77	1 55	<b>F</b> 01	4.00
12	11月20日	東方沖	3	OUKIII	gal	4.00	0.21	4.98

表 3.2-9 周波数特性の分析対象地震の一覧

■青森県東方沖以外 ■尾駮で震度3以上 ■地表と地下の最大加速度の比率が10以上



図 3.2-91 周波数特性の分析対象地震の震央位置 (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、 ここで、No. を記載している円が対象地震の震央)





図 3.2-93 各地震の周波数特性(2)

各地震の周波数特性を見ると、全体として次のような特徴がある。

・地震計④(地下)のピークの周波数より地震計⑤(地表)のピークの周波数が大きい ・サイト増幅特性により、10Hz付近の短周期で地下から地表への振幅の増幅がみられる (図 3.2-92 矢印)

また、No.9と No.10 以外の 6 件は次のような類似の特徴がある。

・地震計④(地下) 1~10Hzの間に緩やかなピークがある台形分布

・地震計⑤(地表) 10Hz付近に大きなピークがある三角形分布

一方 No.9 の岩手県沖を震央とする地震は、地震計⑤(地表)の周波数特性は他と同様三 角形分布だが、地震計④(地下)も三角形分布となる。

・地震計④(地下) 3Hz付近に大きなピークがある三角形分布

・地震計⑤(地表) 10Hz付近に大きなピークがある三角形分布

No.9 の震央の断面図(図 3.2-94)によると、8月23日に発生したこの地震の震央は海域だが、陸のプレートの地殻内で発生した地震であることが分かった。



図 3.2-94 No.9 の地震の震央の断面図

また、No.10 の宮城県沖を震央とする地震は、次のような特徴があり、長周期側の振幅 が大きいことが判明した。この地震は、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(地下) 1~3Hzの間に緩やかなピークがある台形分布
- ・地震計⑤(地表) 3~10Hz に緩やかなピークがある台形分布

No.4 の地震は震央が日高地方東部と内陸部であるが、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.4 と青森県東方沖を震央とする No.12 の震央の 断面図(図 3.2-95)によると両者ともプレート境界で発生した地震であることが分かった。



図 3.2-95 No.4 と No.12 の地震の震央の断面図

# 第4章 中深度処分相当の地下環境等を考慮した設計技術の 高度化のうち、技術オプションの検討

# 第4章 中深度処分相当の地下環境等を考慮した設計技術の高度化

# のうち、技術オプションの検討

#### 4.1 緒言

#### 4.1.1 検討の背景

中深度処分に対する規制基準は、規制当局により整備が進められており、令和3年6月30日 に原子力規制庁開催の第17回原子力規制委員会にて、議題の一部に「第二種廃棄物埋設及びク リアランスに係る規則等の改正案」について説明があり、その中で、中深度処分に係る規則等の 案が了承された[1]。また、同年7月1日から30日間行政手続法に基づく意見募集及び任意の意 見募集が実施されており、同年9月29日にこれらの意見募集に対する回答を取りまとめるとと もに、規則等の改正及び審査ガイドの策定に関する情報が規制委員会より示されている[2][3][4]。 さらに、令和4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 な対策や設計へのALARAの適用など、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 載されている。

本年度は、令和4年度までに実施した上記の調査結果を踏まえて、設計プロセスの考え方、 ALARAを考慮した評価手法について検討する。

#### 4.1.2 検討の目的

令和2年度の検討では、ALARA を考慮した技術オプション絞り込みのための評価手法につい て、施設設計の観点から考え方を整理した上で、評価の試行を実施し、評価を進める際の課題を 抽出した。また、令和3年度の検討では、人工バリアの部材厚さに着目し、線量と費用を評価項 目としたオプションの絞り込みを実施した。さらに、令和4年度は、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。今年度は、中深度処分に 求められる設計プロセス及び設計オプションを明確にするために、これまでの検討成果を整理し たうえで、合理的な設計オプションの抽出方法や絞り込み手法について検討する。以上を踏まえ、 本検討の検討項目を以下に示す。

- ・ 設計プロセスの検討(4.2)
- ALARA を考慮した評価手法の検討(4.3)

なお、検討にあたっては、必要に応じて、安全性の観点からの技術オプションの検討を相互参 照することで、検討結果の説明性向上を図る。

#### 4.2 設計プロセスの検討

#### 4.2.1 過年度検討の整理

令和 2~4 年度に実施してきた検討内容を以下に整理する。

#### (1) 令和2年度

令和2年度は既往検討成果の調査を実施し、その結果を参考にALARAを考慮した設計オ プションの絞り込みフローを設定、試行するとともに課題を抽出した。

○ 既往検討成果の調査

既往検討成果の調査では、放射性廃棄物処分施設の設計に係る国際的な考え方、諸外国にお ける規制と事業者の取り組み、中深度処分(余裕深度処分を含む)に関する規制要求、既往検 討成果について調査・整理した。

#### ○ 技術オプションの検討

ALARA を考慮した設計オプションの絞り込みを実施するため、既往検討成果の調査結果を 参考に、米国方式をベースにスウェーデン方式を組み合わせた絞り込みの全体フローを整備し、 オプションの整備、絶対評価による絞り込み、相対評価による絞り込み、詳細検討の4段階か らなる段階的な絞り込みフローを作成した。令和2年度では、廃棄物埋設地、廃棄体の条件を 仮に設定し、人工バリア構成についてオプションの整備、絶対評価による絞り込み、相対評価 による絞り込み、詳細検討に資する予備的検討を実施した。



図 4.2-1 オプション絞り込みの全体フロー案(令和2年度)

○ オプションの整備

低中レベル放射性廃棄物に係る国内外の検討事例を参考に、網羅的に人工バリアのオプションを抽出した。最も検討例の多いトンネル型処分場を検討対象とし、要求される基本安全機能のうち核種移行抑制機能に着目した5つのバリア層(収着バリア、低拡散バリア、低透水バリア、高透水バリア、排水バリア)を1以上組み合わせ、31種類の基本オプションを選定した。



○絶対評価による絞り込み

すべての基本安全機能(低拡散性、通過流量低減、収着性)を満たすか、材料の実現性、施 工の実現性を評価指標として、31種類の基本オプションに対して〇×で評価した。その結果、 ④低拡散層+低透水層、⑧低拡散層+高透水層、©低拡散層+低透水層+高透水層の3つの基 本オプションに絞り込まれた。

	1層	1	2	3	<b>(4</b> )	(5)					
収	着性	0	0	×	×	×					
低打	広散性	×	0	×	×	×					
205 205 205	低透水性	×	×	0	×	×					
通過加	高透水性	×	×	×	0	×					
里也成	排水性	×	×	×	×	0					
							_				
	2層	12	13	14		23	24	25	34	35	45
収	着性	0	0	0		0	0	0	×	×	×
低打	広散性	0	×	×		0	0	0	×	×	×
涌過流	低透水性	×	0	×		0	×	×	0	0	×
量低減	高透水性	×	×	0		×	0	×	0	×	
重电版	排水性	×	×	×		×	×	0	×	0	0
								_			
	3層	123	124	125				234	235	245	345
収	着性	0	0	0				0	0	0	×
低打	広散性	0	0	0				0	0	0	×
通過流	低透水性	0	×	×				0	0	×	0
量通流	高透水性	×	0	×				0	×	0	0
THE 162 186	排水性	×	×	0	×	0	0	×	0	0	0
					-						
	4層	1234	1235	1245	0345	2345					
収	着性	0	0	0		0					
低打	広散性	0	0	0	×	0	1				
诵過流	低透水性	0	0	×	0	0					
<u>温</u> 迥加 景低满	高透水性	0	×	0	0	0					
.mai. 165 3/96	排水性	×	0	0	0	0	1				
			-								
	5層	12345									

表 4.2-1 施工の実現性のあるオプション絞り込み(令和2年度)

	12345	
収	0	
低打	広散性	0
运运运	低透水性	
<sup>通過流</sup> 量低減	高透水性	
	排水性	0

○ 相対評価による絞り込み

階層分析法である AHP 法を用いて「合理性」を主題に置き、「工学的技術性」、「安全性」、「事業性」の3つの評価指標を階層構造化した。それぞれの評価指標に重点を置いて基本オプション間のペア比較を実施し、重み付けによる重要度を算出した。その結果、工学的技術性、事業性では④、安全性では©の合理性が最も高いと判断された。

	左の項目が極めて重要	中間	左の項目が非常に重要	中間	左の項目がかなり重要	中間	左の項目がやや重要	中間	左右同じくらい重要	中間	右の項目がやや重要	中間	右の項目がかなり重要	中間	右の項目が非常に重要	中間	右の項目が極めて重要	
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	
Α							0											В
Α					0													С
В							0											С

表 4.2・2 工学的技術性における重要度の尺度の決定(令和2年度)

## ○詳細検討に資する予備的検討

詳細検討では、寸法や使用材料、施工法を選定するが、現段階では具体的な数値を伴う評価 基準が無く、合理性を考慮することは困難である。そこで、詳細検討の前に複数のオプション を相対評価する予備的検討を実施した。基本オプション④をリファレンスケースとし、部材厚、 断面当たりの廃棄体定置数、低拡散層と低透水層の配置を変更した 8 オプションについて AHP 法を用いて相対評価した。「閉鎖前の安全性」、「閉鎖後の安全性」、「環境影響性」、「経済 性」を評価指標とし、代替パラメータを設定して数値化した。ペア比較と重み計算を実施した ところ、合理性の観点から最も好ましいオプション A-7 (バリア層の厚さは変更せず廃棄体数 を増やす)が選定された。



図 4.2-3 オプション一覧(令和2年度)

○ 令和2年度のまとめ

絞り込みフローを試行した結果、合理性の観点から好ましいオプションを絞り込む一例を示 すことができた。しかし、相対評価で用いた AHP 法は評価指標の重み付けに大きく依存する ため、様々なステークホルダーからの意見集約が必要である。また、より網羅的なオプション の展開方法について検討する必要がある。

(2) 令和 3 年度

令和3年度は、既往検討成果の調査を実施し、規制要求に鑑みた中深度処分施設の設計最 適化に向け、設計オプションを選定する考え方を整理し、選定手法の検討・試行を実施した。

○ 既往検討成果の調査

原子力規制庁によって改正された中深度処分の規則等を調査・整理した。技術オプションを 検討する上で考慮すべき記載は下記のとおりである。

- ・オプションを絞り込む段階で人工バリアの施工実現性について検討が必要である。
- ・複数のバリア機能を有し、放射性物質の漏出を防止する機能は一つに過度に依存しない。
- ・廃止措置後の線量評価の不確実性が大きいため、複数の設計案を抽出できる構造とする。
- ・自然事象シナリオにおいて公衆の受ける線量を十分に低減できる目安は 100 µSv/y である。

○ 技術オプションの検討

中深度処分施設を設計する際に想定される設計フローのうち、令和 2 年度に実施した検討 は「処分方式の検討」及び「処分概念の検討」に相当し、令和 3 年度では次段階の「処分場の 概略検討」を実施した。



図 4.2-4 想定される設計フロー(令和3年度)

○ 絞り込みフローの策定

ALARA に則り最適化した人工バリアの仕様(寸法)を選定するための絞り込みフローを策 定した。絞り込みフローは、処分場の長期安全性に対する人工バリア仕様の感度を把握した上 で、複数の設計オプションを抽出し、それらを比較検討することにより、最適化された設計案 を絞り込むことができるものとした。検討に当たっては、地質環境を仮定し、電事連で検討さ れている処分概念、人工バリア構成及び廃棄体を踏襲した。



図 4.2-5 本検討における絞り込みフロー(令和3年度)

#### ○ 長期安全性に係る感度解析

核種移行抑制への影響が大きいとされる3要素(低透水層の部材厚、低拡散層の部材厚、断 面当たりの廃棄体数)と岩盤の透水係数を組み合わせ、被ばく線量をそれぞれ算出した。岩盤 の透水係数に関しては、天然バリアの特性に応じた人工バリアオプションを抽出することを目 的とした。各要素を変動パラメータとして感度解析し、長期安全性に与える影響の程度を確認 した。感度解析の結果、岩盤の透水係数は被ばく線量への影響が大きいことが確認されたため、 設計オプション抽出とその絞り込み手法の検討においては、透水係数の異なる 2 種類の岩盤 ( ④透水係数:  $1 \times 10^{-6}$  m/s、 ⑧透水係数:  $1 \times 10^{-8}$  m/s)を設定することとした。

	岩盤の透水係数	廃棄体定置数	低透水層部材厚	低拡散層部材厚
	m/s	体/断面	m	m
番号	基本ケース	20 (5列×4段)	1	0.6
1-1		20 (5列×4段)	1	0~3
1-2	1E-06	20 (5列×4段)	0~3	0.6
1-3		6 (3列×2段) ~42 (7列×6段)	1	0.6
2-1		20(5列×4段)	1	0~3
2-2	1E-07	20(5列×4段)	0~3	0.6
2-3		6 (3列×2段) ~42 (7列×6段)	1	0.6
3-1		20(5列×4段)	1	0~3
3-2	1E-08	20(5列×4段)	0~3	0.6
3-3		6 (3列×2段) ~42 (7列×6段)	1	0.6
4-1		20(5列×4段)	1	0~3
4-2	1E-09	20(5列×4段)	0~3	0.6
4-3		6 (3列×2段) ~42 (7列×6段)	1	0.6
5-1		20 (5列×4段)	1	0~3
5-2	1E-10	20 (5列×4段)	0~3	0.6
5-3		6 (3列×2段) ~42 (7列×6段)	1	0.6

表 4.2-3 解析ケース (令和3年度)

○ 設計オプションの抽出

2 種類の岩盤を対象に、低拡散層の部材厚、低透水層の部材厚、断面当たりの廃棄体数を基本オプションから増減して設計オプションを抽出した。人工バリア部材の部材厚を低減する場合には、長期安全性を確保する観点に加え、人工バリアの施工実現性も考慮した。確証試験を参考に部材ごとに必要部材厚を検討し、オプション抽出に適用した。



図 4.2-6 ベースオプション (令和3年度)

表 4.2·4 母岩Aに対して抽出したオプションの仕様(令和3年度)

		母岩 A (1×10 <sup>-6</sup> m/s)						
オプシ	オプション		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
低沃土屋	上部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
155小唐	側部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	700
(mm)	底部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
	上部	600	900	1400	600	600	900	900
低孤散層 (mm)	側部	600	900	1400	600	600	900	900
	底部	600	900	1400	600	600	900	900
廃棄体数		5×4	4×3	4×3	4×3	$4 \times 3$	4×3	$5 \times 4$

#### ○ 設計オプションの絞り込み

国内外の事例を参考に、処分場の長期安全性(被ばく線量)と経済性(建設費)を評価項目 として設定し、設計オプションの絞り込みを実施した。各オプションにおいて、被ばく線量比 率/建設費比率として費用対効果を算出したところ、低透水層の部材厚を施工可能な厚さまで 低減し、その分低拡散層の部材厚を増大したオプションの費用対効果が最も高くなった。また、 検討結果から、低拡散層の部材厚を増大することが設計の最適化に寄与することを確認し、相 対効果による評価は、設計オプションの最適化に向けた有効な手段の一つであるという知見を 得た。



図 4.2-7 母岩Aに対するオプションの費用対効果(令和3年度)

○ まとめ

処分場の概略検討として、人工バリア寸法に着目して費用対効果を用いて設計オプションの 絞り込みを実施した。処分場の長期安全性を確保する上で重要度が高いと考えた人工バリア部 材(低透水層、低拡散層)の部材厚を主な検討対象としたが、処分場に要求される安全機能を 設定し、安全機能を担保するための人工バリア構成を検討することが重要である。また、これ までは、廃棄体の発熱に伴う人工バリアへの影響評価を考慮しておらず、どの段階で廃棄体発 熱影響を評価すべきかの検討が必要である。

(3) 令和 4 年度

令和4年度は、規制要求で示される人工バリアの設計プロセスの考え方や手順を具体化し、 前年度検討の人工バリア構成の妥当性を確認した。

○ 既往検討成果の調査

原子力規制庁によって改正された中深度処分の規則等を調査・整理した。また、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 NRA 技術ノートが公開されたため、記載 内容について調査・整理した。技術オプションを検討する上で考慮すべき記載は下記のとおり である。

- ・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。
- ・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

「主要な事項」の例	分類(性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	<ul> <li>・廃棄物埋設地を設置 する地層の種類</li> <li>・帯水層の位置(廃棄物 埋設地の上部か下部 など)</li> </ul>
(b)区画別放射能量	区画別放射能量	<ul> <li>・埋設坑道や区画ごとの放射性物質の種類、放射能量</li> </ul>
(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	<ul> <li>・廃棄物埋設地の形状、 寸法</li> <li>・人工バリアの材質、組 合せ、配置等</li> </ul>

表 4.2-5 「主要な事項」が異なる例(令和4年度)

○ 技術オプションの検討

前年度検討の人工バリア構成の妥当性を確認するため、「人工バリアの組合せ」に着目して 検討を実施した。長期安全性に着目した人工バリア構成の要求機能を再整理し、中深度処分の 規制基準に関する既往検討を参考に絞り込みフローを策定、試行した。



図 4.2-8 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(令和4 年度)

### ○ 安全機能の整理

事業段階(閉鎖措置前後)に応じた安全機能とそれに対応する構成要素(天然バリア/人工 バリア/廃棄体容器)を整理した。

	安全機能			
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		
	放射性物質の収着(核種収着性)	人工バリア 天然バリア		
移行抑制	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           修行抑制           (低透水性)           溶解抑制           コロイド移行の抑制			
	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		
波山市地	溶出の抑制	廃棄体容器		
俗田夘몌	廃棄体と地下水の接触の防止	廃棄体容器		
南份以合	離隔距離の確保	天然バリア		
阿住印約	離隔 容易な人間侵入の抑制			
	<ul> <li>閉じ込め</li> <li>遮蔽</li> <li>操業安全</li> <li>移行抑制</li> <li>溶出抑制</li> <li>離隔</li> </ul>	安全機能           廃棄体からの放射性物質の漏洩の防止           施設外への放射性物質の加速の防止           遮蔽         放射線の遮蔽           操業安全         空間・力学的安定性の確保           換素安全         空間・力学的安定性の確保           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)         処分施設を通過する地下水流量を抑制           移行抑制         ごロイド移行の抑制           室解抑制         コロイド移行の抑制           室出の抑制         廃棄体と地下水の接触の防止           離隔         確隔距離の確保           離隔         容易な人間侵入の抑制		

表 4.2-6 安全機能と構成要素の関係(令和4年度)

○ 人工バリアに係る代表的因子の抽出

既往検討成果の調査結果から、人工バリアの代表的因子とパラメータ設定に資する条件を整 理した。

表 4.2-7 人	エバリアの機能及び代表因子	(令和4年度)
-----------	---------------	---------

機能	代表的因子
核種収差批	分配係数
核裡収有性	体積(単位奥行き当たりとして厚さに換算)
	実行拡散係数
低拡散性	開口ひび割れ面積比
	厚さ
任法业性	透水係数
14.757小生	厚さ

表 4.2-8 人工バリアの代表因子に係るパラメータ設定に資する条件(令和4年度)

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 0.8 Mg/m <sup>3</sup> 以上
自己シール性	部材厚 100 mm 以上
自己修復性	有効粘土密度 0.64 Mg/m <sup>3</sup> 以上

○ 天然バリアに係る代表的因子の抽出

既往検討成果の調査結果から、天然バリアの機能と代表的因子を整理した。

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
任运业性	透水係数
14.7万/小注	厚さ
放射性物質の分散	地下水流速

表 4.2-9 天然バリアの機能及び代表因子(令和4年度)

○ 感度解析

長期安全性の観点から、閉鎖措置前は「遮蔽」「操業安全」、閉鎖措置後は「移行抑制」に着 目して自然事象を対象とした安全評価に係る感度解析を実施した。人工バリア及び天然バリア の代表的因子に基づいてパラメータを設定した。パラメータの設定に当たっては、線量評価の 対象とする処分システムの状態変化を考慮した。検討の結果、天然バリアの性能によって必要 な人工バリア構成が異なることがわかった。

表 4.2-10 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(令和4年度)

経過時間 [a]	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
ペ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 <sup>3</sup> /a/100m)	0.018-	▶ 0.06 –			▶ 0.18 -			- 0.18
低拡散層 拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)	1E-12-	►3E-12-			▶2E-11-			2E-11

#### ○ 安全機能の相関関係の再整理

感度解析結果より、天然バリアの性能の高低(高透水性母岩(透水係数が10<sup>-8</sup> m/s 以上)、 低透水性母岩(透水係数が10<sup>-9</sup> m/s 以下))に場合分けして安全機能と構成要素の関係を再整 備し、廃棄物埋設施設の構成要素として必須の項目を抽出した。この整理結果に基づいて人工 バリア構成を設定すれば、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られる。

## 表 4.2-11 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)(令和4年

度)

		構成要素								
段階		機能	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	0			0		0		
	遮蔽	放射線の遮蔽	0		0	0	0			
	操業安全	空間・力学的安定性の確保				0				
閉鎖措置後	移行抑制	放射性物質の収着(核種収着性)		0			0	0		
		拡散による移行を抑制(低拡散 性)		Δ			0	※ 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)						0		
		卓越した移行経路の防止								0
	溶出抑制	溶出の抑制	0							
		廃棄体と地下水の接触の防止	0							
	商推評語	離隔距離の確保		0					0	
		容易な人間侵入の抑制		0						0
		自然現象からの著しい影響からの 防護		0						

○ まとめ

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 な人工バリア概念を具現化できた。天然バリアの性能により人工バリア構成が変化することが 想定されたが、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できるため、 本検討における手順と考え方を適用できると考えられる。また、他にも有用な考え方と手順が 考えられるため、今後、検討を深めていくことが求められる。 (4) 過年度検討のまとめ

過年度の検討内容と課題を表 4.2-12 に示す。

年度	検討内容	課題
令和 2年度	様々な処分概念を対象: ・諸外国の検討事例を整理 ・AHP による絞り込みの試行	・地質環境に応じた人工バリア設計 ・オプション抽出のプロセスが不十分
令和 3年度	電事連モデルを対象: ・部材厚等のパラスタ ・線量とコストによる費用対効果	<ul> <li>・電事連モデルの説明性が不十分</li> <li>・バリア構成と機能の関係が不明瞭</li> <li>・線量評価はバリア劣化を考慮すべき</li> </ul>
令和 4 年度	坑道型処分を対象: ・機能とバリア構成の再整理 ・バリア性能のパラスタ ・バリアの経時変化を考慮 ・岩盤透水係数を考慮	<ul> <li>・設計オプションの対象が不明瞭</li> <li>・長期安全以外の機能の整理が不十分 (例えば、再取出し性を考慮した場合、地層処分 でのPEM 方式のようなものが抽出されないか)</li> <li>・パラメータの精査・追加が必要</li> <li>・設計プロセスの明確化</li> </ul>

表 4.2-12 過年度検討のまとめ

4.2.2 設計プロセスの整理

過年度検討の調査結果より、規制要求では複数の設計オプションを比較し、検討結果を過程(設計プロセス)とともに示すことが要求されており、その際選定される設計オプションは合理的な範囲で最も優れている必要がある。しかしながら、この要求を満たすためには複数のオプション に対して線量評価などの人工バリア・天然バリアの長期性能に係る解析を実施する必要があり、 検討数が膨大となるため非現実的である。そのため、本検討では段階的な検討を組み込み、複数 の設計オプションから絞り込んだうえで最終的な比較を実施する考え方を示した。

過年度検討、国内外の事例に基づき作成した本検討における設計プロセスを図 4.2-9 に示す。 設計プロセスを前半と後半に分割し、概念検討において感度解析や線量評価により 2、3のオプ ションを選定し、選定されたオプションに対して詳細検討を実施する構造とした。また、概念検 討において最新技術の調査結果に応じて都度見直しを図る、前半・後半の線量評価において明ら かな差異がある場合は見直すなど、場合によっては前段階へ戻るルートも組み込み、条件変更に も柔軟に対応できるフローを設定した。本検討では、サイトや廃棄体条件は既知という前提のも と、前半フローに相当する概念検討として比較評価を試行した。



図 4.2-9 設計プロセス及び本検討の位置づけ

概念検討は処分概念、処分場の機能とバリア構成、設計、比較評価の要素に段階的に分割され、 過年度検討ではこれらの要素検討を部分的に実施してきた。概念検討の絞り込みのイメージを過 年度検討の試行例を参考に図 4.2-10 に整理した。過年度検討の検討内容については 4.2.1 を参 照されたい。



図 4.2-10 絞り込み過程のイメージ

また、過年度検討を参考に、各検討段階で絞り込みのターゲットとした項目や、試行例につい て表 4.2-13 に整理した。本年度では令和3年度で設定したオプションを用いて新たに比較評価 を試行した。

検討項目	オプション例	選定方法	考慮すべき項目	本検討の試行例
諸条件	地質,深度,インベントリ	総合的な評価	火山,隆起等	仮定
処分概念	サイロ, トンネル	国内外の事例調査	法令への適用性 知見の充実性	トンネル型
処分場の機能	低拡散性, 低透水性 (高透水性, 低拡散性)	国内外の事例調査	知見の充実性	移行抑制,低拡散性等
バリア構成	低拡散層, 低透水層 (高透水層, 高収着層)	性能の感度解析	知見の充実性 天然バリアの性状 材料の実現性 長期安全性	低拡散層及び低透水層 による構成
設計	部材厚, 廃棄体定置数	設計の感度解析	施工の実現性 長期安全性	部材厚〇〇cm
比較評価	部材厚, 廃棄体定置数, バリア構成 の異なる設計	簡易的な 状態設定+線量評価	材料性能の変化幅 天然バリア性状の変化幅 頑健性・不確実性を考慮 した長期安全性	参考上限シナリオ 最尤シナリオ 保守シナリオ

表 4.2-13 検討項目の具体化
## 4.3 ALARA を考慮した評価手法の検討

## 4.3.1 考え方の整理

NRA 技術ノートでは、「中深度処分では、数万年を超える長期間にわたって放射性廃棄物を起 因とする放射線による影響から公衆と生活環境を防護する必要がある。このため、設計段階で行 う公衆の線量評価も長期に及ぶことから、そこで用いられる長期のシナリオ及びそれに関連する 現象、パラメータ、将来の公衆の生活様式等には大きな不確実性があり、これらの設定の如何に よって線量評価結果も大きな不確実性を伴う。(中略)したがって、埋設した放射性廃棄物に起 因する将来の周辺の公衆全体の被ばくの可能性及び線量を合理的な範囲でできる限り低減する ための対策として、規制期間終了後における生活環境への放射性物質の移動を抑制する性能が一 定の水準に達している設計の選択肢の中から、最も優れたものを選定することが考えられる」と している。このうち、公衆全体の被ばくの可能性及び線量を合理的な範囲でできる限り低減する という考え方は、ALARA に基づくものであり、この考え方を反映した上で設計の選択肢の中か ら、最も優れたものを選定する必要がある。ALARAのRはReasonablyで、合理的に、適度に、 ほどほどにといった意味を持つため、令和4年度までの検討では、最も優れた設計を選定する評 価指標として経済性を主体にオプションの比較を実施した。この評価によって経済性の面から合 理的なオプションを絞り込む場合の考え方について一定の整理ができたため、令和5年度の検討 では、それとは別に、不確実性、頑健性という性能面から合理的な設計を絞り込む方法について 検討することとした。

# 4.3.2 評価手法の整理

性能面から合理的なオプションを考える際に、原子力規制委員会の考え方[6]及び原子力学会 標準[7]に着目した。原子力規制員会では、二つの設計を比較する際の考え方の例として、通常の 状態と厳しい状態という二つの状態を考慮し、前者においては状態の確率に応じた線量を評価し、 より良い設計を選ぶことを求めている(図 4.3-1 参照)。



図 4.3-1 中深度処分に対する廃止措置後の安全確保のための設計要求について原子力規制員会の考え方(案)

このような選択の方法は、不確実性のあるなかで長期的な安全性を保障する観点から優れてい ると考えられる。しかし、多数の選択肢を比較し絞り込む必要がある概念検討の段階で、その数 多くの選択肢に対して精緻に状態設定を行い、線量評価の確率分布を算出することは現実的では ない。そこで本検討では、簡易的な状態を複数設定し、オプションが取り得る被ばく線量値の幅 及び状態ごとの線量の分布を求めることで、オプションの有する不確実性や頑健性を評価するこ ととした。簡易的な状態設定は、原子力規制委員会の考え方及び原子力学会標準を参考に、表 4.3-1のように設定した。

状態	概要	経時変化	備考
参考上限 シナリオ	初期に設定した設計値が 10 万年後 まで続く状態	無	設定値は安全評価 2023(※)参 考
最尤 シナリオ	通常の状態で科学的に最も可能性 が高い状態	有	設定値は安全評価 2023 参考
保守 シナリオ	通常の状態で保守的にパラメータ を設定した状態	有	設定値は安全評価 2023 参考
機能喪失 シナリオ	通常の状態で保守的にパラメータ を設定した状態、かつ、1バリアの 機能喪失を重畳(厳しい状態)	有	相互作用がなくなることによる 優位性は、非保守的な評価とな る可能性があるため考慮しない
下限参考 シナリオ	厳しい状態における 10 万年後の値 が初期から続く状態	無	設定値は安全評価 2023 参考

表 4.3-1 簡易的な状態設定

この状態設定に基づき、各オプションの不確実性について評価するが、先にも述べたとおり、 本検討で提案する設計プロセスでは、天然バリアに関する条件は与条件とした。したがって、こ こでは、人工バリアの長期安全性に着目した検討を実施することとする。検討手順を図 4.3-2 に 示す。



4.3.3 対象オプションの設定

本検討では、令和3年度に抽出したオプションを対象に比較評価を試行する。対象とするオプ ションのイメージを図 4.3-3 に、オプションの仕様を表 4.3-2 に示す。



オプション		ベース	А	В	С	D	Е	F
低透水層	上部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
の部材厚	側部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	700
(mm)	底部	1000	1000	1000	1500	1800	1500	300
低拡散層	上部	600	900	1400	600	600	900	900
の部材厚	側部	600	900	1400	600	600	900	900
(mm)	底部	600	900	1400	600	600	900	900
処分空洞の横断面当		E×4	429	422	422	422	422	E×4
たりの廃棄	体定置数	3×4	4×3	4×3	4×3	4×3	4×3	<b>ə</b> ×4

表 4.3-2 対象オプションの仕様

これらのオプションは、岩盤の透水係数が比較的大きい場合を想定しており、施工の実現性や 目安線量に対する安全性を考慮した上で抽出されたものである。オプションの詳細は、令和3年 度の検討[8]を参照されたい。

## 4.3.4 解析モデルの設定

4.3.2 で示した解析対象とする 5 つのシナリオ及び、最尤シナリオと保守シナリオにおける 核種移行解析を実施するために、GoldSim[9][10]によりモデル化を行った。これらシナリオ及び 入力条件に適用するためのモデルの特徴としては、以下のものが挙げられる。なお、対象は地下 水移行シナリオに限定する。

- バリア材の劣化を踏まえた時間変化の取り扱いは、下記パラメータについて時間変化を取り扱うものとする。
  - 低透水層、低拡散層、岩盤の透水係数(岩盤の変化は、今回は未使用)
  - 低透水層、低拡散層の拡散係数
- ・ 将来的な拡張性を念頭に置き、多様なシナリオに対応可能な核種組成として 134 種類の核 種を対象としてモデルを構築する。(4.3.5 参照)
- 多様な人工バリアオプションに対する施設浸透水量の推定を見据え、多重円筒モデル及び 多重球モデルでの近似を行った。なお、多重円筒モデル、多重球モデルのいずれも選択で きるようにモデル化する。一次元の核種移行モデルへの近似は別途記述するが、移流成分 が小さい拡散支配の状態において、多重円筒モデルと多重球モデルによる核種移行率が同 じとなるように移行面積を調整する。
- 溶出形態の異なる廃棄体からの放出挙動を再現可能とするために、複数のソースタームを 想定し、移行時間とソースタームの追加が容易にできるようにモデル化する。なお、今年 度の評価では1年間で全量が充填材に移行するように設定した。

- ・ 複数の天然バリアを配置可能とする。
- ・ 分配係数値に対して係数を乗じることによりシナリオに対応可能となるようにモデル化す る。

地下水移行シナリオにおいて核種移行解析を実施するための、概念モデルを図 4.3・4 に示す。





#### (1) ソースターム

廃棄体部から充填材+ピットへの核種の移行率は、廃棄体中のセメントへの吸着を想定す る場合には、セメント中の間隙(水で飽和しているものと仮定)と元素の分配平衡で決定さ れる濃度の地下水が移流、又は拡散によって次のバリアに移行するモデルが適用される。し かしながら、廃棄体部分の形状はパッケージ内のセメントとパッケージ外部のセメントが混 在していることから、単純に分配平衡モデルとするよりも、外部の充填セメントとピットの セメントを合わせ、パッケージ内部のセメントと分けるものとした。

なお、パッケージ内での分配平衡は廃棄体の内容によっても異なり不確実性が大きいこと からここでの吸着は考慮しないこととした。なお、金属廃棄物に含まれる核種は金属腐食に 伴う溶出期間が想定されるが、ここでは、放出期間を1年間とし、瞬時溶出に近い設定とし た。

 $F_{\text{source}}^{i}(t) = \frac{M_{i}(t)}{t_{\text{time}}} unitstep(t_{\text{time}} - t)$ 

$F_{\rm source}^i(t)$	:時刻tでの核種i の充填材+ピットへの移行率[g/yr]
$M_i(t)$	: 時刻tでの核種iのインベントリ[g]、崩壊を含む
$t_{ m time}$	: 充填材+ピットへの放出期間[yr]
unitstep(x)	: x>0 なら1、x<=0 なら0の関数

### (2) 人工バリア内での核種の移動

人工バリア内部は、充填材+ピット、低拡散層、低透水層、掘削影響領域の4層の多孔質 媒体で一次元化した。なお、充填材+ピット部分は領域が分散していることもあり、1メッ シュで構成し、低拡散層及び低透水層は各10メッシュ、EDZは核種の移動に影響を与えな いように小さな体積として設定した。

$$V_m \epsilon_m R f_i^m \frac{\partial}{\partial t} c_i^m(t, x) = S_m V_m \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_m D_i^m \frac{\partial}{\partial x} c_i^m(t, x) - v^m c_i^m(t, x) \right) \\ -V_m \lambda_i \epsilon_m R f_i^m c_i^m(t, x) + V_m \lambda_{i-1} \epsilon_m R f_{i-1}^m c_{i-1}^m(t, x)$$

$\epsilon_m$	:領域 <b>m</b> の間隙率
$Rf_i^m$	: 領域 m 核種 iの遅延係数
$c_i^m(t,x)$	:領域m 核種 iの核種の液相中の濃度
$\epsilon_m D_i^m$	: 領域m 核種 iの実効拡散係数
$v^m$	:領域m での地下水の実流速
$\lambda_i$	: 核種 <i>i</i> の崩壊定数
$V_m$	:領域 <i>m</i> の体積
$S_m$	:領域mの移行面積

領域が充填材+ピットにはソースタームが加わる。

モデル上、EDZから天然バリアへの移行は天然バリアへの移行率に影響を受けないような 小さな EDZ 体積を仮定し、EDZ で想定される流量で持ち去られる核種を移行率として与え る。したがって、EDZ 流量が大きな場合には、0 濃度境界に漸近する。 (3) 天然バリアでの移行

天然バリアは2つの多孔質媒体の移行経路を直列に接続したものをモデル化した。移行に ついて、人工バリア内での移行の方程式と同様である。上流側の境界条件は、接続される媒 体からの移行率とした。下流側境界条件は0濃度境界が適用され、移行率が次に接続される 媒体に渡される。

(4) 施設内浸透水量に適用する簡易モデル

処分坑道に対して動水勾配がどの様な方向から作用するかは、施設浸透水量に強く影響を 与える。しかしながら、岩盤中の地下水流量が小さい場合や、人工バリアに低透水層が配置 される場合においては、人工バリア内部の核種の移動の駆動力は拡散が支配的となることか ら、核種移行量に大きな影響を与えることはなく、条件の整った地質環境においては、精緻 な検討の必要性は大きくはない。しかしながら、将来的な地質環境の変動等を含むシナリオ の多様性に対応するためには、施設内の浸透水量を評価することが求められると考えられる。

学会標準[7]においては、施設浸透水量をセメント部にひび割れモデルを適用し、差分法を 用いた数値解を適用している。安全審査等の評価には数値解の適用が適切と予想されるが、 処分オプションを検討するための感度解析においては簡易な施設浸透流モデルの適用が望ま れる。

NUMOの包括的技術報告書[11]では、処分坑道の止水プラグの間隔を検討するために、流向を坑道方向として止水プラグの間隔に対する感度解析を実施している(図 4.3-5)。その結果からは、施設内の地下水の通過流量はプラグ間隔に強く依存する結果であった。

過年度の検討[8]においては、多重円筒モデルの解析解を用いて解析を実施した。しかしな がら、多重円筒モデルは坑道に動水勾配が直交する方向のみの解であり、坑道と平行な地下 水の流れに対しては適用できないことと、直交する方向のみの解が非保守側であることから、 図 4.3-6 に示すような多重球モデルの適用[8]を試みた。球モデルであれば、区画体積等の分 割による効果も評価できるものと考えられる。図 4.3-7 に示す解析解は、円筒モデルは円筒 座標系、球モデルは極座標系で解かれた結果に基づくものである[12]。

円筒モデル及び球モデルのいずれを用いても坑道内部の位置による流量変化の再現はできない。図 4.3-5 に示すように、止水バリアの上流側から流量は増加し、中央部で最大となり、 止水バリアの下流部まで流量は低下する。中央から上流側が給水領域(外部から施設に水が 入ってくる)であり、下流側が排水領域(施設から外部へ水が出ていく)であることがわか る。





図 4.3-6 流向に対応した浸透流量に対する解析モデルの概念



図 4.3-7 簡易的な施設浸透水量の解析解

(5) 核種移行面積及び体積の設定

簡易的な地下水流動解析結果及び坑道の形状から一次元核種移行モデルを構築する。二次 元及び三次元モデルで移行モデルの構築が望ましいが、解析の簡便性の必要性から一次元の GoldSim モデルの構築を行った。一次元モデルでの核種移行モデルの構築においては、各バ リアでの移流や拡散の状態を簡略化する必要がある。

・各バリア内の流速

二次元及び三次元の地下水流動解析の実施結果は各バリア内部での流速は、バリア内の位置によって異なる。(4) で述べたように、均質多孔質で流動解析を実施するとバリア中央部の 上流側は地下水がバリア内に流入し、下流側は流出する。

一次元モデルにおいては、バリアの体積や表面積に基づき均質な流速を与える。すなわち、 施設浸透水量を移行表面積で除したものを地下水流速として与える。

・各バリア内の移流・拡散面積

バリアの流動条件と同じように、地下水がバリア内に流入する場所では拡散による溶質の 移動は制限(水の流れ方向と逆側に拡散する)されるが、地下水の流出が生じる場所におい ては、移流と拡散による溶質移動が生じる。均質な多孔質を対象とする水理解析では給水部 と排水部の面積は等しいが、実際には岩盤の不均質性に基づく不確実性があることから、給 水部と排水部の面積比率も不確実なものとなる。そのため、廃棄体に接する全面積が拡散に 寄与するものと保守性の観点から仮定する。この仮定は、人工バリア内部が拡散支配となる ケースが多いものとの予想に基づく。

4-25

・バリアの解析上のジオメトリー

水理解析モデルである円筒モデル及び球モデルでは、廃棄体体積及び設計断面から求める ことができる体積を基準として「半径」を算出することによりモデルを構築する。その際、 廃棄体体積及び充填材体積は体積を保存する半径を算出するが、低拡散層及び低透水層は設 計上の厚さを保存するように半径を調整した。一方で核種移行モデルは一次元で近似するこ とから、円筒及び球の表面積とは異なるが核種移行面積は設計上の外周長さに奥行を乗じて 算出した。これは、人工バリア内部が拡散支配場となった場合、2 つのモデルで核種移行率 に相違が発生しないようにするためである。表 4.3-3 に水理解析及び核種移行解析における ジオメトリー設定を示す。

一次元の核種移行モデルへの簡略化においては、現状、モデル構築における方法論は確立 されたものではなく、三次元解析における核種移行結果と合わせ方法論を検討することが望 ましい。

	円筒モデルで浸透水	球モデルで浸透水	核種移行
	量を仮定する場合	量を仮定する場合	モデル
廃棄体の奥行	1m(単位長さ)	14m(区画長さ)	_
廃棄体の体積	廃棄体数×睹	所面積×奥行	—
廃棄体の半径	廃棄体体積から	算出(円、球)	—
充填材体積	低透水層内側体	—	
充填材半径	低透水層内側体積か	_	
充填材厚さ	-	充填材体積/低拡散層	
			外部面積
低拡散層半径・厚さ	充填材半径+低拡散	層厚さ ; 厚さを保持	厚さを保存
低透水層半径・厚さ	低拡散層半径+低層1	k層厚さ;厚さを保持	厚さを保存
EDZ 半径	低透水層半径+E	EDZ 厚さ(3m)	—
低拡散層外部面積			低拡散層外周×奥行
低透水外部層面積	—	—	低透水層外周×奥行
母岩移行面積	低透水外部層面積×奥行		低透水外部層面積×奥行

表 4.3-3 解析上のジオメトリーの設定

(6) パラメータの時間変化

時間変化の様式として線形でのパラメータの増加減をモデル化した。時間変化するパラメ ータに関しては、GoldSim モデル内部で処理する。

図 4.3-8 に低透水層の透水係数を 0~1 万年、1 万年~10 万年で変化するケースでモデル 化された結果を示す。それに対応する施設浸透水量の結果からは、球モデルでトンネル区画 (14m)をモデル化した結果が、円筒モデルの結果に比較して1オーダー以上大きなことが わかる。ただし、坑道の単位長さあたりにすると、円筒モデルも球モデルもほぼ同じ浸透水 量となった。



図 4.3-8 低透水層の透水係数の変化と対応する施設浸透水量

(7) 生活圏モデル

核種の移行率から被ばく線量への換算は、被ばく経路と生活圏での状態設定が必要となる。 被ばく評価においては、河川水量等の地表環境のモデルとデータと生活圏での水の利用形態 や土地利用や食物の摂取量等のモデルとデータが必要となる。これらは、処分場の決定後に おける調査結果に基づくものとなる。

本検討の対象では、処分場が未定の状態を想定していることから、これらの不確実性や様 式化の範囲は幅広く、核種の移行率から導かれる「線量」は幅広い範囲となる。そのため、 ここでは、「線量」と同じ単位[Sv/y]ではあるが、予想される被ばく線量ではなく「Index」又 は「ポテンシャル」として取り扱うことが必要と考える。そのため、複雑な被ばく経路を想 定し解析を実施するものとした。

被ばく経路としては以下の簡単なプロセスを仮定した。

- ・バリアから放出される核種が一般的な河川に流入する。
- ・河川水を年間一定量摂取する。
- ・ICRP 等の経口摂取換算係数で「Index」又は「ポテンシャル」に変換する。

なお、この仮定においても、シナリオを河川水から井戸水に変更すると、「Index」又は「ポ テンシャル」は、2~3オーダー程度上昇する。

- 4.3.5 解析パラメータの設定
- (1) インベントリ

インベントリは、放射化生成物を含む 134 核種を対象とした。評価対象とした 134 核種に 設定したインベントリを表 4.3・4~表 4.3・8 に示す。電気事業連合のデータ[13]は、炉形や部 材により詳細に示されているが、ここでは、総インベントリを用い評価を行った。なお、日 本原子力学会標準[7]において、付属書に示されている核種移行の基本データとなる元素ごと の分配係数に記載されていない核種及び本検討で設定した評価対象核種が表に存在しないも のを区別するために、「Kd の有無」、「インベントリの有無」として表示した。

ICRP Pub.107[14]で示される核種のうち半減期が 1.5 年以上あるものを合わせ、以下で利用される核種の和集合をとり決定した。

- ・地層処分第2次とりまとめ
- ・TRU 廃棄物処分概念検討書
- ・低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値評価対象核種
- ・旧原安委第二種埋設指針(地下水、隆起シナリオ対象核種)
- ·東京電力福島第一原子力発電所構内土壤測定対象核種
- ・廃棄物の貯蔵・処分時の外部被ばくの主要核種

核種組成を幅広く設定したことから、評価に必要な核種のデータが欠如(又は不要と考え られるもの)する核種のインベントリは0として評価を行った。

No	核種	半減期	総インベントリ	Kd データ データ有無	インベントリ データ有無
		年	Bq	1/あり、0/なし	1/あり、0/なし
1	H-3	1.23E+01	2.90E+17	1	1
2	Be-7	1.43E-01	0.00E+00	1	0
3	Be-10	1.51E+06	3.30E+11	1	1
4	C-14	5.73E+03	6.70E+15	1	1
5	Na-22	2.60E+00	0.00E+00	0	1
6	Si-32	1.32E+02	0.00E+00	0	1
7	Cl-36	3.01E+05	1.00E+13	1	1
8	K-40	1.25E+09	0.00E+00	0	1
9	Ca-41	1.02E+05	7.40E+12	1	1
10	Mn-54	8.55E-01	2.00E+16	1	1
11	Fe-55	2.74E+00	3.40E+18	1	1
12	Fe-59	1.22E-01	7.80E+03	1	1
13	Co-58	1.94E-01	6.40E+08	1	1
14	Co-60	5.27E+00	7.40E+18	1	1
15	Ni-59	1.01E+05	1.40E+16	1	1
16	Ni-63	1.00E+02	1.90E+18	1	1
17	Se-79	2.95E+05	1.40E+12	1	1
18	Rb-87	4.92E+10	0.00E+00	0	1
19	Sr-89	1.38E-01	7.20E+01	1	1
20	Sr-90	2.88E+01	1.20E+16	1	1
21	Zr-93	1.53E+06	1.90E+14	1	1
22	Nb-91	6.80E+02	9.80E+13	1	1
23	Nb-92	3.47E+07	1.30E+09	1	1
24	Nb-93m	1.61E+01	1.60E+14	1	1
25	Nb-94	2.03E+04	2.50E+14	1	1
26	Nb-95	9.59E-02	3.70E+10	1	1
27	Mo-93	4.00E+03	2.20E+14	1	1
28	Mo-99	7.53E-03	0.00E+00	1	0

表 4.3-4 インベントリの設定値(1)

No	核種	半減期	総インベントリ	Kd データ データ有無	インベントリ データ有無
		年	Bq	1/あり、0/なし	1/あり、0/なし
29	Tc-97	2.60E+06	3.90E+11	1	1
30	Tc-98	4.20E+06	3.10E+09	1	1
31	Tc-99	2.11E+05	3.30E+13	1	1
32	Tc-99m	6.87E-04	0.00E+00	1	0
33	Ru-103	1.08E-01	4.00E+00	1	1
34	Ru-106	1.02E+00	1.90E+14	1	1
35	Rh-101	3.30E+00	0.00E+00	0	0
36	Rh-102	5.67E-01	0.00E+00	0	1
37	Rh-102m	3.74E+00	0.00E+00	0	0
38	Pd-107	6.50E+06	3.90E+11	1	1
39	Ag-108m	4.18E+02	3.60E+15	1	1
40	Ag-110m	6.84E-01	2.00E+14	1	1
41	Cd-113	7.70E+15	0.00E+00	0	1
42	Cd-113m	1.41E+01	0.00E+00	0	1
43	In-115	4.41E+14	0.00E+00	0	1
44	Sn-121m	4.39E+01	7.30E+14	1	1
45	Sn-126	2.30E+05	2.30E+11	1	1
46	Sb-125	2.76E+00	1.30E+17	1	1
47	Te-123	6.00E+14	2.40E+05	1	1
48	Te-125m	1.57 E-01	3.20E+16	1	1
49	Te-129m	9.21E-02	5.80 E-05	1	1
50	Te-132	8.78E-03	0.00E+00	1	0
51	I-129	1.57E+07	6.10E+10	1	1
52	I-131	2.20E-02	0.00E+00	1	0
53	Cs-134	2.06E+00	1.20E+18	1	1
54	Cs-135	2.30E+06	1.50E+13	1	1
55	Cs-136	3.61E-02	0.00E+00	1	0
56	Cs-137	3.02E+01	1.70E+16	1	1

表 4.3-5 インベントリの設定値(2)

No	核種	半減期	総インベントリ	Kd データ データ有無	インベントリ データ有無
		年	Bq	1/あり、0/なし	1/あり、0/なし
57	Ba-133	1.05E+01	0.00E+00	0	1
58	Ba-140	3.49E-02	0.00E+00	0	0
59	La-137	6.00E+04	0.00E+00	0	1
60	La-138	1.02E+11	0.00E+00	0	1
61	La-140	4.60E-03	0.00E+00	0	0
62	Ce-139	3.77E-01	6.90E+05	1	1
63	Ce-141	8.91E-02	1.40E-05	1	1
64	Ce-144	7.81E-01	6.30E+14	1	1
65	Nd-144	2.29E+15	0.00E+00	0	1
66	Pm-145	1.77E+01	0.00E+00	0	1
67	Pm-146	5.53E+00	0.00E+00	0	1
68	Pm-147	2.62E+00	0.00E+00	0	1
69	Sm-146	1.03E+08	1.20E+06	1	1
70	Sm-147	1.06E+11	7.60E+06	1	1
71	Sm-148	7.00E+15	1.40E+02	1	1
72	Sm-151	9.00E+01	6.40E+14	1	1
73	Eu-150	3.69E+01	1.40E+06	1	1
74	Eu-152	1.35E+01	2.00E+14	1	1
75	Eu-154	8.59E+00	1.90E+16	1	1
76	Eu-155	4.76E+00	6.40E+15	1	1
77	Gd-152	1.08E+14	0.00E+00	0	1
78	Tb-157	7.10E+01	0.00E+00	0	1
79	Ho-163	4.57E+03	8.40E+11	1	1
80	Ho-166m	1.20E+03	9.40E+13	1	1
81	Tm-171	1.92E+00	0.00E+00	0	1
82	Lu-176	3.85E+10	0.00E+00	0	1
83	Hf-182	9.00E+06	0.00E+00	0	1
84	Ta-180m	1.20E+15	0.00E+00	0	1

表 4.3-6 インベントリの設定値(3)

No	核種	半減期	総インベントリ	Kd データ データ有無	インベントリ データ有無
		年	Bq	1/あり、0/なし	1/あり、0/なし
85	Re-187	4.12E+10	0.00E+00	0	1
86	Os-194	6.00E+00	0.00E+00	0	1
87	Ir-192m	2.41E+02	0.00E+00	0	1
88	Pt-190	6.50E+11	0.00E+00	0	1
89	Pt-193	5.00E+01	0.00E+00	0	1
90	Tl-204	3.78E+00	0.00E+00	0	1
91	Pb-205	1.53E+07	0.00E+00	0	1
92	Pb-210	2.22E+01	3.90E+04	1	1
93	Bi-208	3.68E+05	0.00E+00	0	1
94	Bi-210m	3.04E+06	0.00E+00	0	1
95	Po-210	3.79E-01	8.30E+09	1	1
96	Ra-226	1.60E+03	1.10E+04	1	1
97	Ra-228	5.75E+00	1.60E+07	1	1
98	Ac-227	2.18E+01	1.20E+08	1	1
99	Th-228	1.91E+00	1.50E+11	1	1
100	Th-229	7.34E+03	6.20E+07	1	1
101	Th-230	7.54E+04	2.20E+06	1	1
102	Th-232	1.41E+11	2.00E+07	1	1
103	Pa-231	3.28E+04	3.70E+08	1	1
104	Pa-233	7.39E-02	0.00E+00	1	0
105	U-232	6.89E+01	1.50E+11	1	1
106	U-233	1.59E+05	4.90E+10	1	1
107	U-234	2.46E+05	6.10E+09	1	1
108	U-235	7.04E+08	1.30E+08	1	1
109	U-236	2.34E+07	2.10E+09	1	1
110	U-238	4.47E+09	2.00E+09	1	1
111	Np-236	1.54E+05	3.30E+03	1	1
112	Np-237	2.14E+06	8.00E+09	1	1

表 4.3-7 インベントリの設定値(4)

No	核種	半減期	総インベントリ	Kd データ データ有無	インベントリ データ有無
		年	Bq	1/あり、0/なし	1/あり、0/なし
113	Pu-236	2.86E+00	1.60E+08	1	1
114	Pu-238	8.77E+01	2.70E+13	1	1
115	Pu-239	2.41E+04	2.50E+12	1	1
116	Pu-240	6.56E+03	4.20E+12	1	1
117	Pu-241	1.44E+01	4.50E+15	1	1
118	Pu-242	3.75E+05	1.80E+10	1	1
119	Pu-244	8.00E+07	1.20E+03	1	1
120	Am-241	4.32E+02	1.60E+13	1	1
121	Am-242m	1.41E+02	4.00E+12	1	1
122	Am-243	7.37E+03	4.10E+11	1	1
123	Cm-242	4.46E-01	7.80E+12	1	1
124	Cm-243	2.91E+01	3.60E+10	1	1
125	Cm-244	1.81E+01	3.20E+13	1	1
126	Cm-245	8.50E+03	6.00E+09	1	1
127	Cm-246	4.76E+03	2.90E+08	1	1
128	Cm-247	1.56E+07	1.70E+03	1	1
129	Cm-248	3.48E+05	2.40E+04	1	1
130	Cm-250	8.30E+03	1.70E-02	1	1
131	Cf-249	3.51E+02	0.00E+00	0	1
132	Cf-250	1.31E+01	0.00E+00	0	1
133	Cf-251	9.00E+02	0.00E+00	0	1
134	Cf-252	2.65E+00	0.00E+00	0	1

表 4.3-8 インベントリの設定値(5)

# (2) 分配係数

学会標準[7]の付属書において、廃棄物層、セメント、ベントナイト、岩盤及び土壌の元素 ごとの分配係数が示されている。例示された値がすべての評価に適用されるのもではなく、 材料の変更や地質環境の選択等、設計のステップの進展に応じて変化していくことが前提と なる。設定値を表 4.3-9~表 4.3-10 にまとめる。

NT	分配係数[m <sup>3</sup> /kg]					
No	元素	廃棄物層	セメント	ベントナイト	岩盤	土壤
1	Ac	0.25	0.25	0.45	0.45	0.45
2	Ag	0.01	0.01	0.045	0.045	0.045
3	Am	10	10	10	2	2
4	Ba	0	0	0	0	0
5	Be	0.05	0.05	0.24	0.24	0.24
6	Bi	0	0	0	0	0
7	С	0.05	0.05	0.001	0.002	0.002
8	Ca	0.01	0.01	0.004	0.004	0.004
9	Cd	0	0	0	0	0
10	Ce	2.5	2.5	0.49	0.49	0.49
11	$\mathbf{C}\mathbf{f}$	0	0	0	0	0
12	Cl	0.001	0.001	0	0	0
13	Cm	0.25	0.25	1	5	5
14	Co	0.1	0.1	0.05	0.6	0.6
15	$\mathbf{Cs}$	0.03	0.03	0.1	1	1
16	Eu	2.5	2.5	0.65	0.65	0.65
17	Fe	0.04	0.04	0.025	0.025	0.025
18	Gd	0	0	0	0	0
19	Н	0	0	0	0	0
20	$\mathbf{H}\mathbf{f}$	0	0	0	0	0
21	Ho	2.5	2.5	0.24	0.24	0.24
22	Ι	0	0	0	0.0001	0.0001
23	In	0	0	0	0	0
24	Ir	0	0	0	0	0
25	K	0	0	0	0	0
26	La	0	0	0	0	0
27	Lu	0	0	0	0	0
28	Mn	0.04	0.04	0.049	0.049	0.049
29	Mo	0.0025	0.0025	0	0	0
30	Na	0	0	0	0	0
31	Nb	0.08	0.08	0.05	0.4	0.4

表 4.3-9 領域ごとの分配係数(1)

ハッチング部は、[7]の記載に無いもの

	分配係数[m <sup>3</sup> /kg]							
No	元素	廃棄物層	セメント	ベントナイト	岩盤	土壤		
32	Nd	0	0	0	0	0		
33	Ni	0.08	0.08	0.05	0.5	0.5		
34	Np	0.25	0.25	0.0041	0.0041	0.0041		
35	Os	0	0	0	0	0		
36	Pa	0.25	0.25	0.54	0.54	0.54		
37	Pb	0.0125	0.0125	0.05	0.05	0.05		
38	Pd	0.0125	0.0125	0.055	0.055	0.055		
39	Pm	0	0	0	0	0		
40	Ро	0	0	0.15	0.15	0.15		
41	Pt	0	0	0	0	0		
42	Pu	10	10	1	2	2		
43	Ra	0.00125	0.00125	0.45	0.45	0.45		
44	Rb	0	0	0	0	0		
45	Re	0	0	0	0	0		
46	Rh	0	0	0	0	0		
47	Ru	0.04	0.04	0.055	0.055	0.055		
48	Sb	5	5	0.045	0.045	0.045		
49	Se	0.0025	0.0025	0	0	0		
50	Si	0	0	0	0	0		
51	Sm	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24		
52	Sn	2.5	2.5	0.13	0.13	0.13		
53	$\mathbf{Sr}$	0.01	0.01	0.2	0.2	0.2		
54	Ta	0	0	0	0	0		
55	Tb	0	0	0	0	0		
56	Te	0.0003	0.0003	0	0.0005	0.0005		
57	Te	0.0025	0.0025	0.3	0.3	0.3		
58	Th	0.25	0.25	3	3	3		
59	Tl	0	0	0	0	0		
60	Tm	0	0	0	0	0		
61	U	0.25	0.25	0.033	0.033	0.033		
62	Zr	2.5	2.5	0.6	0.6	0.6		

表 4.3-10 領域ごとの分配係数(2)

ハッチング部は、[7]の記載に無いもの

(3) 線量換算係数

表 4.3-11 及び表 4.3-12~表 4.3-14 に「Index」又は「ポテンシャル」(一部、被ばく線量として取り扱う)に換算するためのデータを示す。

河川水の飲用モデルの希釈水量は 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/年と大きく、井戸利用等で用いられる希釈水量と比較して 1~2 オーダー大きい。そのため、線量は生活圏のモデルにより大きく異なる。したがって、ここでの結果は Sv/年の単位となるが、安全性を示す線量ではなく Index として取り扱うものとする。

パラメータ	設定値	
河川による希釈水量	10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> /年	学会標準[7]から引用
年間の水摂取量、	0.6 m³/年	学会標準[7]から引用

表 4.3-11 河川水飲用に係るパラメータ

	線量換算	係数[Sv/Bq]		線量換算	係数[Sv/Bq]
	核種	経口摂取		核種	経口摂取
1	H-3	4.20E-11	29	Tc-97	6.80E-11
2	Be-7	2.80E-11	30	Tc-98	2.00E-09
3	Be-10	1.10E-09	31	Tc-99	6.40E-10
4	C-14	5.80E-10	32	Tc-99m	2.20E-11
5	Na-22	3.20E-09	33	Ru-103	7.30E-10
6	Si-32	3.00E-09	34	Ru-106	7.00E-09
7	Cl-36	9.30E-10	35	Rh-101	5.50E-10
8	K-40	6.20E-09	36	Rh-102	2.60E-09
9	Ca-41	1.90E-10	37	Rh-102m	1.20E-09
10	Mn-54	7.10E-10	38	Pd-107	3.70E-11
11	Fe-55	3.30E-10	39	Ag-108m	2.30E-09
12	Fe-59	1.80E-09	40	Ag-110m	2.80E-09
13	Co-58	7.40E-10	41	Cd-113	2.50E-08
14	Co-60	3.40E-09	42	Cd-113m	2.30E-08
15	Ni-59	6.30E-11	43	In-115	3.20E-08
16	Ni-63	1.50E-10	44	Sn-121m	5.60E-10
17	Se-79	2.90E-09	45	Sn-126	5.10E-09
18	Rb-87	1.50E-09	46	Sb-125	1.30E-09
19	Sr-89	2.60E-09	47	Te-123	4.40E-09
20	Sr-90	3.10E-08	48	Te-125m	8.70E-10
21	Zr-93	1.20E-09	49	Te-129m	3.00E-09
22	Nb-91	4.60E-11	50	Te-132	3.70E-09
23	Nb-92	1.00E-09	51	I-129	1.10E-07
24	Nb-93m	1.20E-10	52	I-131	2.20E-08
25	Nb-94	1.70E-09	53	Cs-134	1.90E-08
26	Nb-95	5.80E-10	54	Cs-135	2.00E-09
27	Mo-93	3.20E-09	55	Cs-136	3.00E-09
28	Mo-99	1.20E-09	56	Cs-137	1.30E-08

表 4.3-12 経口摂取による線量換算係数(1)

	線量換算	係数[Sv/Bq]		線量換算	係数[Sv/Bq]
	核種	経口摂取		核種	経口摂取
57	Ba-133	1.50E-09	85	Re-187	5.10E-12
58	Ba-140	2.50E-09	86	Os-194	3.70E-09
59	La-137	8.10E-11	87	Ir-192m	1.70E-09
60	La-138	1.10E-09	88	Pt-190	6.80E-09
61	La-140	2.00E-09	89	Pt-193	3.10E-11
62	Ce-139	2.60E-10	90	Tl-204	1.20E-09
63	Ce-141	7.10E-10	91	Pb-205	2.80E-10
64	Ce-144	5.20E-09	92	Pb-210	6.90E-07
65	Nd-144	4.10E-08	93	Bi-208	1.20E-09
66	Pm-145	1.10E-10	94	Bi-210m	1.50E-08
67	Pm-146	9.00E-10	95	Po-210	1.20E-06
68	Pm-147	2.60E-10	96	Ra-226	2.80E-07
69	Sm-146	5.40E-08	97	Ra-228	6.90E-07
70	Sm-147	4.90E-08	98	Ac-227	1.20E-06
71	Sm-148	4.30E-08	99	Th-228	1.40E-07
72	Sm-151	9.80E-11	100	Th-229	6.10E-07
73	Eu-150	1.30E-09	101	Th-230	2.10E-07
74	Eu-152	1.40E-09	102	Th-232	2.30E-07
75	Eu-154	2.00E-09	103	Pa-231	7.10E-07
76	Eu-155	3.20E-10	104	Pa-233	8.70E-10
77	Gd-152	4.10E-08	105	U-232	3.30E-07
78	Tb-157	3.40E-11	106	U-233	5.10E-08
79	Ho-163	6.80E-12	107	U-234	4.90E-08
80	Ho-166m	2.00E-09	108	U-235	4.70E-08
81	Tm-171	1.10E-10	109	U-236	4.70E-08
82	Lu-176	1.80E-09	110	U-238	4.80E-08
83	Hf-182	4.50E-09	111	Np-236	1.70E-08
84	Ta-180m	8.40E-10	112	Np-237	1.10E-07

表 4.3-13 経口摂取による線量換算係数(2)

	線量換算	係数[Sv/Bq]		線量換算	係数[Sv/Bq]
	核種	経口摂取		核種	経口摂取
113	Pu-236	8.70E-08	124	Cm-243	1.50 E- 07
114	Pu-238	2.30E-07	125	Cm-244	1.20E-07
115	Pu-239	$2.50  ext{E-07}$	126	Cm-245	2.10E-07
116	Pu-240	$2.50  ext{E-07}$	127	Cm-246	2.10E-07
117	Pu-241	4.80E-09	128	Cm-247	1.90E-07
118	Pu-242	2.40E-07	129	Cm-248	7.70E-07
119	Pu-244	2.40E-07	130	Cm-250	4.40E-06
120	Am-241	2.00E-07	131	Cf-249	$3.50  ext{E-07}$
121	Am-242m	2.00E-07	132	Cf-250	1.60E-07
122	Am-243	2.00E-07	133	Cf-251	3.60E-07
123	Cm-242	1.20E-08	134	Cf-252	9.00E-08

表 4.3-14 経口摂取による線量換算係数(3)

(4) 分析に用いたパラメータに関するデータ

状態設定に基づき、解析パラメータを設定する。状態設定より、参考上限シナリオ及び参 考下限シナリオは経時変化が無く、最尤シナリオ、保守シナリオ及び機能喪失シナリオは初 期から 10 万年にかけて経時的な劣化を考慮する。パラメータ値の設定にあたっては、原子力 学会標準での設定値(表 4.3·15~表 4.3·18)を参考とした。初期、1 万年後及び 10 万年後 の各パラメータを表 4.3·19、表 4.3·20 及び表 4.3·21 に示す。なお、初期~1 万年後、1 万 年後~10 万年後の期間の経時変化は、実数線形補完とした。

	科学的に最も可能性が高い状態				保守的なパラメータを設定した 状態				厳しい状態			
	初期	1万年 後	10 万年 後	100 万 年後	初期	1 万年 後	10 万年 後	100 万 年後	初期	1 万年 後	10 万年 後	100 万 年後
増加率	1	3.33	10	100	1	16.7	50	500	10	167	500	5 000
透水係数 (m/s)	3.0E-13	1.0E-12	3.0E-12	3.0E-11	3.0E-13	5.0E-12	1.5E-11	1.5E-10	3.0E-12	5.0E-11	1.5E-10	1.5E-09
施設浸入水量 (m <sup>3</sup> /a)	0.018	0.12	0.9	90	0.09	6	45	4 500	0.9	60	450	45 000

表 4.3-15 低透水層の透水係数の設定例

表 4.3-16 低拡散層の拡散係数の設定例

	科学的	に最も可	能性が高	い状態	保守的なパラメータを設定した 状態				厳しい状態			
	初期	1万年 後	10 万年 後	100 万 年後	初期	1万年 後	10 万年 後	100 万 年後	初期	1 万年 後	10 万年 後	100 万 年後
貫通ひび割れ 割合(-)	0	0.001	0.01	0.01	0	0.005	0.05	0.05	0	0.005	0.05	0.05
拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)	1E-12	3E-12	2E-11	2E-11	1E-12	1E-11	1E-10	1E-10	4E-10	4.1E-10	4.8E-10	4.8E-10

表 4.3-17 天然バリア (廃棄体埋設施設近傍) 水理パラメータの設定例

廃棄物埋設地	科学的は	こ最も可	能性が高	い状態	保守的7	なパラメ 状	ータを設 態	定した	厳しい状態			
近傍	初期	1万年 後	10 万年 後	100 万 年後	初期	1万年 後	10 万年 後	100 万 年後	初期	1万年 後	10 万年 後	100 万 年後
透水係数 (m/s)	2E-08	2E-08	2E-08	2E-07	1E-07	1E-07	1E-07	1E-06	1E-07	1E-07	1E-07	1E-06
動水勾配算定の ための距離 (m)	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
水頭差 (m)	30	60	150	150	30	120	300	300	30	120	300	300
動水勾配 (-)	0.06	0.12	0.3	0.3	0.06	0.24	0.6	0.6	0.06	0.24	0.6	0.6
間隙率 (-)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
地下水実流速 (m/a)	0.1	0.2	0.5	5	0.5	2	5	50	0.5	2	5	50
移動距離 (m)	200	200	200	200	200	200	200	200	100	100	100	100

表 4.3-18 天然バリア (廃棄体埋設施設近傍以外)水理パラメータの設定例

廃棄物埋設地	科学的に最も可能性が高い状態				保守的	保守的なパラメータを設定した 状態				厳しい状態			
近傍以外	初期	1万年 後	10 万年 後	100 万 年後	初期	1 万年 後	10 万年 後	100 万 年後	初期	1万年 後	10 万年 後	100 万 年後	
透水係数 (m/s)	2E-07	2E-07	2E-07	2E-06	1E-06	1E-06	1E-06	1E-05	1E-06	1E-06	1E-06	1E-05	
動水勾配 (-)	0.06	0.12	0.3	0.3	0.06	0.24	0.6	0.6	0.06	0.24	0.6	0.6	
有効間隙率 (-)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
地下水実流速 (m/a)	1	2	5	50	5	20	50	500	5	20	50	500	
移動距離 (m)	300	290	200	200	300	280	100	100	150	140	50	50	

	1	2	3	4	5	6
初期	参考上限	最尤	保守	機能喪失 低拡散層無	機能喪失 低透水層無	参考上限
人工バリア						
低透水層の 透水係数 (m/s)	3.0E-13	3.0E-13	3.0E-13	3.0E-13	_	1.5E-10
低拡散層の 拡散係数(m²/s)	1.0E-12	1.0E-12	1.0E-12		1.0E-12	4.8E-10
天然バリア						
透水係数 (m/s)	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
移動距離(m)	1	1	1	1	1	1

表 4.3-19 初期のパラメータ

表 4.3-20 1万年後のパラメータ

	1	2	3	4	5	6
1 万年後	参考上限	最尤	保守	機能喪失 低拡散層無	機能喪失 低透水層無	参考上限
人工バリア						
低透水層の 透水係数 (m/s)	3.0E-13	1.0E-12	5.0E-12	5.0E-12	_	1.5E-10
低拡散層の 拡散係数 (m²/s)	1.0E-12	3.0E-12	1.0E-11	_	1.0E-11	4.8E-10
天然バリア						
透水係数(m/s)	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
移動距離(m)	1	1	1	1	1	1

表 4.3-21 10万年後のパラメータ

	1	2	3	4	5	6
10 万年後	参考上限	最尤	保守	機能喪失 低拡散層無	機能喪失 低透水層無	参考上限
人工バリア						
低透水層の 透水係数 (m/s)	3.0E-13	3.0E-12	1.5E-11	1.5E-11	-	1.5E-10
低拡散層の 拡散係数 (m²/s)	1.0E-12	2.0E-11	1.0E-10	-	1.0E-10	4.8E-10
天然バリア						
透水係数(m/s)	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
移動距離(m)	1	1	1	1	1	1

また、天然バリアの性状が変動しても被ばく線量の増減が小さな人工バリアを有するオプ ションは頑健性が高い、という考えの下、天然バリアのパラメータを変動させた線量評価を 実施する。本検討では、天然バリアの代表的なパラメータとして、透水係数に着目する。ま た、人工バリアの頑健性を評価することを目的としていることから、天然バリアパラメータ の経時変化は考慮せず、最尤シナリオ及び保守シナリオについて検討する。天然バリアのパ ラメータについては、与えられるサイト条件に応じてパラメータの種類や範囲について検討 する必要があることに留意する。表 4.3-22 に天然バリアが変動する際のパラメータを示す。

	初	期	1万	年後	10 万	「年後
	2	3	2	3	2	3
	最尤	保守	最尤	保守	最尤	保守
人工バリア						
低透水層の透水係数 (m/s)	3.0E-13	3.0E-13	1.0E-12	5.0E-12	3.0E-12	1.5E-11
低拡散層の拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)	1.0E-12	1.0E-12	3.0E-12	1.0E-11	2.0E-11	1.0E-10
天然バリア (埋設地近傍)						
	2.0E-07	2.0E-07	2.0E-07	2.0E-07	2.0E-07	2.0E-07
透水係数(m/s)	2.0E-08	2.0E-08	2.0E-08	2.0E-08	2.0E-08	2.0E-08
	2.0E-09	2.0E-09	2.0E-09	2.0E-09	2.0E-09	2.0E-09
移動距離(m)	200	200	200	200	200	200
天然バリア (埋設地近傍以外)						
透水係数(m/s)	2.0E-06	2.0E-06	2.0E-06	2.0E-06	2.0E-06	2.0E-06
移動距離(m)	300	300	300	300	300	300

表 4.3-22 天然バリア変動パラメータ

## 4.3.6 核種移行解析結果の詳細

(1) シナリオ毎の比較

人工バリア核種移行率に着目した解析ケースのうち、ベースケースに対する設定条件ごと の入力データを表 4.3-23 にまとめる。このケースは不確実性に関する線量評価の一部であ り、処分オプションのベースケースを用いて、人工バリアからの放射性核種の放出率を比較 した結果である。結果は 1m 程度の天然バリアを通過した後の浸出率であり、ほぼ人工バリ ア出口の結果と考えてよい。

		Base					
		1	2	3	4	5	6
	時刻	参考上限	最尤	保守	低拡散層なし	低透水層なし	参考下限
低透水層透水係数	0	3.0E-13	3.0E-13	3.0E-13	3.0E-13	1.0E-05	1.5E-10
m/s	10000	3.0E-13	1.0E-12	5.0E-12	5.0E-12	1.0E-05	1.5E-10
	100000	3.0E-13	3.0E-12	1.5E-11	1.5E-11	1.0E-05	1.5E-10
低拡散層透水係数	0	1.5E-10	1.5E-10	1.5E-10	1.0E-05	1.5E-10	1.5E-10
m/s	10000	1.5E-10	1.5E-10	1.5E-10	1.0E-05	1.5E-10	1.5E-10
	100000	1.5E-10	1.5E-10	1.5E-10	1.0E-05	1.5E-10	1.5E-10
岩盤透水係数	0	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
m/s	10000	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
	100000	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05	1.0E-05
低透水層拡散係数	0	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10
m2/s	10000	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10
	100000	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10	4.8E-10
低拡散層拡散係数	0	1.0E-12	1.0E-12	1.0E-12	1.0E-09	1.0E-12	4.8E-10
m2/s	10000	1.0E-12	3.0E-12	1.0E-11	1.0E-09	1.0E-11	4.8E-10
	100000	1.0E-12	2.0E-11	1.0E-10	1.0E-09	1.0E-10	4.8E-10
動水勾配	0	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02
m2/s	10000	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02
	100000	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02	1.0E-02
Kd比率_廃棄体層		0	0	0	0	0	0
Kd比率_構造躯体 + 充填材		1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
Kd比率_低拡散層		1	1	0.5	0	0.5	0
Kd比率_低透水層		1	1	0.5	0.5	0	0.5
Kd比率_母岩(EDZ)		0	0	0	0	0	0
Kd比率_母岩		1	1	0.5	0.5	0.5	0.1

表 4.3-23 解析ケースに適用したデータ(再整理結果)

移行面積については、円筒座標系での施設浸透流量を用いた

図 4.3・9 にベースケースの結果の比較を示す。核種移行率を Index (単位は、Sv/y) に変換し、核種毎の結果を足し合わせたものである。結果は、不確実性に対応したシナリオによって3オーダー程度の差異が生じた。最も厳しいシナリオは、機能喪失シナリオの低拡散層がないケースであった。更に、機能喪失シナリオのうち低拡散層がないケースの結果は、参考下限シナリオの結果を上回っている。

予想では、参考下限が最も厳しいシナリオであると予想したが、低拡散層の有無がこのシ ステムにおいては重要であることが示された。



図 4.3-9 ベースケースの結果の比較

図 4.3-10~図 4.3-15 に Index (線量) に寄与する核種を上位から 5 核種選択し図示する。 また、表 4.3-24 に各シナリオにおいて支配的となる核種をまとめる。

シナリオ毎の各領域で仮定する分配係数が異なることから、単純に比較することは難しい が、低拡散層の有無による差異は、このシステムが「拡散」の駆動力に依存していることを 表すものと考えられる。また、核種組成の観点からは、低拡散層のみにおいて収着性の大き な核種である Mo-99、C-14、Tc-99 がシステムの構成に強い影響を受けている。また、半減 期の短い H-3 も同様である。

核種の移動駆動力が拡散であるのか移流であるのかは、原理的には Pe 数の比較によって 判断されるが、本システムでは、(後述の Drift の結果を参照) Pe 数は 0.001 以下であり、移 行において移流成分がほとんど無いことが特徴である。

参考上限	最尤	保守	機能喪失 低拡散層なし	機能喪失 低透水層なし	参考下限
I-129	Tc-99	Tc-99	Mo-99	Pb-210	Mo-93
Tc-99	I-129	I-129	H-3	Tc-99	C-14
Cl-36	Cl-36	Ni-59	C-14	I-129	Tc-99
Se-79	Se-79	Cl-36	Tc-99	Ni-59	I-129
Tc-97	Cs-135	Mo93	I-129	Mo-93	Ni-59

表 4.3-24 各ケースにおいて支配的となる核種







図 4.3-11 ベースケースの結果に寄与する核種(最尤シナリオ)







図 4.3-13 ベースケースの結果に寄与する核種(機能喪失シナリオ・低拡散層なし)



図 4.3-14 ベースケースの結果に寄与する核種(機能喪失シナリオ・低透水層なし)



図 4.3-15 ベースケースの結果に寄与する核種(参考下限シナリオ)

(2) 浸透流モデルの相違

本検討のモデルは、坑道と流向の関係を勘案して、浸透水量を多重円筒モデルと多重球モ デルで近似する構成とした。モデルの構成については、坑道の移流・拡散面積が両モデルに おいて一致するようにした。

解析結果のうち最尤シナリオを図 4.3·16 に、機能喪失シナリオ・低透水層なしを図 4.3·17 に示す。モデルの相違はほとんど見られず、このシステムが拡散支配であることがわかる。 拡散支配となる原因は、施設浸透水量が小さいことによるが、一次元モデルの構成において、 坑道の全側面積を拡散面積としていることによる可能性も加味する必要がある。均質な多孔 質を仮定し、廃棄体層等の内部の透水性が大きな場合、人工バリアに浸透する流量は、人工 バリアの上流側が給水であり下流側で排水となる。給水域で流動方向と逆向きに拡散するこ とは考えにくい。また、モデルでは内部流量を側面積で割った値を流速(ダルシー流速)と しているが、物質移行の観点から、排水部の位置による流速の相違は考慮することが望まし い。

3 次元モデルによる核種移行率の比較と一次元モデルの修正については、今後の課題とする。



図 4.3-16 多重円筒モデルと球モデルの結果の比較(最尤シナリオ)



図 4.3-17 多重円筒モデルと球モデルの結果の比較(機能喪失シナリオ・低透水層なし)

(3) 頑健性の線量評価に対応する解析結果

頑健性に関する線量評価では、最尤シナリオの状態設定及び保守シナリオの状態設定の 2 つの状態設定に対して、7 つのオプションを用いて解析を行った。その中で、ベースケース の結果について以下に考察する。

図 4.3-18、図 4.3-19 に、最尤シナリオ及び保守シナリオにおける解析結果を示す。浸出率は、岩盤を通過した後の結果である(岩盤1出口、岩盤1と2では差異はほとんどない)。 岩盤の透水性が小さくなるほど Index (線量) は低下するが、線形で低下するものではなく、 2×10<sup>8</sup> m/s より小さくなると、その効果が大きいことがわかる。また、最尤シナリオと保守 シナリオの差異は1オーダーに満たない。

図 4.3・20~図 4.3・22 に、最尤シナリオにおいて透水係数を変化させた場合の Index (線量)に支配的となる核種を示す。天然バリアを通過することによって、6×10<sup>-7</sup> m/s のケース 及び、6×10<sup>-8</sup> m/s のケースでは、核種の放出される時刻は遅くはなるが、最大線量は低透水 層出口での線量との相違は小さい。これに対して 2×10<sup>-9</sup> m/s のケースでは、天然バリアで の放出時間が 1 オーダー程度遅延することから、分散効果の影響により Index (線量) が 1 オーダー程度低下する。線量を支配する核種は、いずれの場合も長半減期で分配係数の小さ な核種である。I-129、Tc-99、Cl-36 はこれらの代表であり、放出に関する時間遅延による分 散効果が期待できる地質環境の選択が必要となる。



図 4.3-18 ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(最尤シナリオ)



図 4.3-19 ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(保守シナリオ)


図 4.3-20 ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(岩盤透水係数 6×10-7 m/s)











図 4.3-21 ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(岩盤透水係数 6×10-8 m/s)









(b) 岩盤出口

図 4.3-22 ベースケースに対する評価シナリオの解析結果(岩盤透水係数 2×10<sup>-9</sup> m/s)

# 4.3.7 DoLift による簡易解析

大江ら[15]は、設計プロセスに核種移行解析の結果をフィードバックしやすくすることを目的 に、多層構造の人工バリアが持つ核種移行遅延機能を簡易に評価するために、各層からの定常放 出フラックスを導出する手順を整備した。

解析における詳細は、大江らの文献を参照いただきたい。解析手法を簡略に示すと、移流分散 方程式における解析解はよく知られている(例えば、[12])。この解析解を、図 4.3-23 に示すよ うな複数の領域に適用し、領域間の接続条件として移行率(図中では、F で示される)を境界条 件及び初期条件とすることによって、連立代数方程式を構成し、これを解くことによって、領域 ごとに内部の移行率の変化を解析している。



図 4.3-23 複数の領域を接続する概念

系に入力する移行率(F<sub>00</sub>)の関数形によって、方程式そのものが変化する。また、外側境界条件(F<sub>33</sub>)を多様化することにより、0濃度境界、ミキシングセル境界、自然移行境界とすることにより、解析の保守性等の勘案が可能となっている。

現在、F<sub>00</sub>が定常入力のケースにおいて DoLiFT (Domain Linkage steady Flux calculation Toolkit)としてコード化 (Excel マクロ関数で作成) されており、入力が時間変化のある任意の関数の場合等について拡張が検討されている。

系内部の地下水流動(浸透水量)については、多重円筒による解析解を適用することにより、 煩雑な流動解析を簡略化していことも特徴の一つであり、矩形の坑道を円筒に近似するためのモ ジュールについても準備されている。

解析は、簡易に実施することが可能であることから、人工バリアオプションとしての部材厚さ 等の検討には適切なツールとなっている。

本業務では DoLiFT を用いて、これまでの解析結果との比較だけではなく、部材厚さの変更に 「当たりをつける」人工バリアオプションの選択のための適用を目途に検討を行った。 DoLiFT の解析は、核種ごとに対して実施される。本検討ではこれまでの解析で総 Index (線量)に支配的となる核種及び人工バリア内に閉じ込めたい半減期の小さな核種として、表 4.3-25 に示した核種を選択し、解析を実施した。

解析結果を図 4.3-24 に示す。なお、比較のために GoldSim による解析結果を併せて示す。充 填材に流入される移行率を1として規格化された結果である。現状の DoLiFT の解析では、定常 解析が実施されていることから、原理的には長半減期核種の移行率は1になるはずである。実際 に、I-129、Tc-99、Cs-135 は、バリアによる減衰効果が見られない。短半減期核種である Cs-137、 Sr-90 は、最初の充填材+PIT 部分でも大きく低下するが、低拡散層及び低透水層において大き く減衰していることがわかる。

図 4.3-24 の下図は、今年度作成した GoldSim モデルにおける結果であるが、短半減期核種 が、低透水層で低下していることがわかる。DoLiFT と GoldSim モデルの相違は、前者が定常 解析に基づく結果であり、後者が非定常解析であることにある。特に GoldSim モデルでは、充 填材+PIT への移行率は、デルタ関数に近く、そのために、長半減期核種においても減衰してい るように見える。これは、時間的な分散効果によるものと推察される。

DoLiFT においては、多重円筒モデルを用いた水理解析結果を用いて、Pe 数が算出される。この結果からは、低透水層、低拡散層ともに 5×10<sup>-3</sup>よりも小さく、この系が完全に拡散支配であることが示されている。

モデルの相違から、完全な一致とはならないが、移行率の低下を期待する核種が短半減期であ る場合、バリアの厚さや分配係数に関してその「あたり」をつけることが可能となる。バリア設 計時においては、有益なツールとなるものと期待される。

入力される移行率の導入や、天然バリアを含む移行率の低減部分の完成を目指し、次年度での 解析で用いることを予定する。

	半減期	収着分配係数 [m <sup>3</sup> /kg]					
核種名	[yr]	充填材 + PIT	セメント	ベントナイト	岩盤		
			低拡散層	低透水層			
C-14	5.7E+03	0.05	0.05	0.001	0		
CI-36	3.0E+05	0.001	0.001	0	0		
Ni-59	1.0E+05	0.08	0.08	0.05	0		
Se-79	3.0E+05	0.0025	0.0025	0	0		
Sr-90	2.9E+01	0.01	0.01	0.2	0.2		
Mo-93	4.0E+03	0.0025	0.0025	0	0		
Tc-99	2.1E+05	0.0003	0.0003	0	0		
I-129	1.6E+07	0	0	0	0		
Cs-137	3.0E+01	0.03	0.03	0.1	0		
Cs-135	2.3E+06	0.03	0.03	0.1	0		

表 4.3-25 DoLift で解析対象とした核種



## 4.3.8 不確実性に関する線量評価

オプションの取り得る線量値の最大最小幅と分布を評価するため参考上限シナリオを特性値 として他ケースへの透水係数の変化比率を確認した。本検討においては円筒断面と球団面の検討 結果にほとんど変化がなかったため、ここでは円筒断面の結果について評価する。

各オプションにおける通常状態の線量評価結果を図 4.3-25 に、厳しい状態の線量評価結果を 図 4.3-26 に、通常状態と厳しい状態の全ての状態の線量評価結果を図 4.3-27 に示す。

通常の状態においては、検討結果から変化比率が概ね同値である3パターンに大別され、変化 比率の高い順に オプション B > オプション A、E、F > オプション BASE、C、D となる。 各オプションの仕様を比較すると、低拡散層の部材厚で分類されており、低拡散層が厚いオプシ ョンほど線量の変化比率(材料特性の不確実性が線量に与える影響)が高い傾向を示すことがわ かる。

- ・ 低拡散層が厚いオプションほど、変化比率が大きい。
- 低透水層の部材厚の違いによる線量評価結果の差異は大きくない(低透水層の部材厚は線 量評価結果にさほど影響が無い)。



図 4.3-25 不確実性に関する線量評価(通常の状態)

一方、厳しい状態においては、低拡拡散層の機能喪失シナリオと参考下限シナリオの変化比率 が特性値より3オーダー程度大きくなっており、低拡拡散層の機能喪失シナリオではオプション F(低透水層厚が最も薄いオプション)の安全性が、参考下限シナリオではオプションB(低拡 散層厚が最も厚いオプション)の安全性が最も低くなることが確認された。また、機能喪失シナ リオのうち低拡散層が無いケースの変化比率は、低透水層が無いケースの変化比率よりも3オー ダー程度大きく、参考下限シナリオと同等以上の変化比率となっている。



図 4.3-26 不確実性に関する線量評価 (厳しい状態)

通常の状態及び厳しい状態を比較した際、前述のとおり厳しい状態での変化比率は通常状態よ り3オーダー程度大きくなることがわかる。一方で、厳しい状態のうち低透水層が無いケース (=低拡散層の条件は通常状態の保守シナリオと同様)の変化比率は、通常状態の保守シナリオ とほぼ同等となっていることから、本検討で対象とした廃棄体及び人工バリア構成においては、 低拡散層のバリア機能が線量評価結果に与える影響が大きいと推察され、低拡散層の部材厚が大 きいほどシナリオによるバリア機能の劣化の影響(変化比率)が大きくなることから、不確実性 が高いオプションと評価される。



図 4.3-27 不確実性に関する線量評価(全状態)

## 4.3.9 頑健性に関する線量評価

通常状態の最尤シナリオと保守シナリオについて、天然バリア性能(母岩の透水係数)を変動 させた場合の線量評価を実施した。本検討においても、円筒断面と球団面の検討結果にほとんど 変化がなかったため、円筒断面の結果を示す。

最尤シナリオの線量評価結果を図 4.3-28、保守シナリオの線量評価結果を図 4.3-29 に示す。

最尤シナリオにおいては不確実性の評価と同様に、線量の変化が概ね同値である3パターンに 大別され、線量の低い順にオプション B < オプション A、E、F < オプション BASE、C、D となる。各オプションの仕様を比較すると、低拡散層の部材厚に依存し、厚いほど低い線量を示 すことが確認された。

- ・ 低拡散層が厚いオプションほど、線量が低い。
- 低透水層の部材厚の違いによる線量評価結果の差異は大きくない(低透水層の部材厚は線 量評価結果にさほど影響が無い)。



図 4.3-28 頑健性に関する線量評価(最尤シナリオ)

保守シナリオにおいては、最尤シナリオと同様の傾向を示すが、線量は最尤シナリオの3倍 程度増加しており、オプション状態の変化による影響が確認された。



図 4.3-29 頑健性に関する線量評価(保守シナリオ)

オプションごとに最尤シナリオと保守シナリオの線量差(図 4.3-30 参照)を算出し、図 4.3-31 に比較結果を示す。最尤シナリオ、保守シナリオの線量評価結果と同様に、線量差が低い順にオ プション B < オプション A、E、F < オプション BASE、C、D であるため、低拡散層の部材 厚が厚いほど線量が低く、オプション状態の変化による影響も少ないことがわかる。線量差が小 さいほど、天然バリア性能への依存度が低く人工バリアの頑健性が高いと考えられるため、最も 被ばく線量が低く最尤シナリオと保守シナリオの線量差も小さいオプション B (低拡散層が最も 厚いオプション) が本検討において最も人工バリアの頑健性が高いと評価される。



図 4.3-30 線量差例(基本オプション)



図 4.3-31 頑健性に関する線量評価(最尤シナリオと保守シナリオの線量差)

4.3.10 線量評価に基づいたオプションの比較評価のまとめ

不確実性と頑健性に着目して線量評価を実施した結果、低拡散層の部材厚が線量評価結果に与 える影響が大きいことが確認された。不確実性の観点では、低拡散層の部材厚が厚いほどオプシ ョン状態を変化した際の変化比率が大きくなるため、不確実性が高くなる。一方で、頑健性の観 点では、低拡散層の部材厚が厚いほど線量が低く線量差も小さいため、頑健性が高くなる。した がって、評価する観点によって好ましいオプションが異なるため、オプション選定には不確実性 や頑健性など複数の視点から評価し、有識者の意見等も鑑みて総合的に良好なオプションを判断 する必要がある。 4.4 結言

# 4.4.1 令和5年度のまとめ

過年度検討、国内外の事例に基づき設計プロセスを整理し、技術オプション選定のための検討 フローを作成した。また、過年度検討は設計プロセスの各要素を部分的に実施したものであり、 どの段階に対応した検討であるか整理した。設計プロセスを前半・後半に分割し、本年度では前 半にあたる概念検討を対象として、人工バリアの長期安全性に着目した比較評価を新たに実施し た。

比較評価では ALARA を考慮して、性能面における合理的なオプションについて検討した。原 子力規制委員会の考え方及び原子力学会標準を参考に複数の簡易的な状態を設定し、オプション が取り得る被ばく線量値の幅及び状態ごとの線量の分布を求めることで、オプションの有する不 確実性や頑健性を評価した。検討の結果、評価する観点により選定されるオプションが異なるた め、オプション選定時は複数の視点から評価し、総合的に良好なオプションを判断する必要があ る。

## 4.4.2 課題と今後の方針

今年度の検討を通じて抽出された課題と今後の対応方針を以下に記す。

- 本検討では、順解析的な検討の中に段階的な検討を組み込み、「複数の設計案」にあたり をつけたうえで最終的な比較を行う一連の考え方を示したが、段階的な検討の過程で残す べき設計オプションが排除されないか、より良い設計がないか十分に検討すべきである。
- ・ 設計プロセスは様々な変更に対応できるように設定したが、段階ごとに有識者のレビュー を受けるなどして、確実に絞り込みを実施していく必要がある。
- ・ 比較検討において、評価する観点により選定されるオプションが異なるため、オプション
   選定時は複数の視点から評価する必要がある。
- 今年度の検討にて、過年度検討と合わせて概念検討における絞り込みフローの各要素をひ ととおり試行できたが、あくまで部分的な要素検討であるため、フローどおりに一気通貫 で試行することが求められる。

第4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則等の改正案 (2021a)
- [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 (2021b)
- [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 (2021c)
- [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 (2021d)
- [5] 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(2022)
- [6] 原子力規制庁: 中深度処分等に係る規制基準等の策定について-ALARAに適用における線量 評価の位置付け-(2018)
- [7] 日本原子力学会:日本原子力学会標準低レベル放射性廃棄物処分施設の安全評価の実施方法 -中深度処分編:2023 (2023)
- [8] 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3 年度低レベル放射性廃棄 物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分調査技術高度化開発報告書(2022)
- [9] GoldSim User's Guide Version 14.0: GoldSim Technology Group LLC,2021
- [10] GoldSim User's Guide Version 14.0, Contaminant Transport Module: GoldSim Technology Group LLC,2021
- [11] 原子力発電環境整備機構:包括的技術報告書、わが国における安全な地層処分の実現-適切 なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築-本編および付属書、2021
- [12] Carslaw and Jaeger: Condition of Heat in Solids Second edition, 1959
- [13] 電気事業連合: 余裕深度処分対象廃棄物に関する基本データ(一部改訂)、平成28年8月23
   日、2016
- [14] ICRP Publication 107 Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations (線量計算のための 核壊変データ)、2007
- [15] 大江 俊昭,稲井 隆将, 矢込 吉則, 若杉 圭一郎:多層構造の人工バリア概念設計のための 核種移行遅延機能の簡易評価 - 各層からの定常放出フラックスの一括導出 - , 原子力バックエ ンド研究、2023

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 化のうち、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 化のうち、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

5.1 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)、乾燥密度(有効モン モリロナイト湿潤密度)、含水比等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。これ らの代替指標は、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ベントナイト混合土の遮水性はどの 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)よりも高い含水比(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を解釈することができればと考える。

初年度の2020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把握、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一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及び選定) 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(母材や混合する細粒分の 土質特性、混合率など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 2021 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 常の非塑性あるいは非膨潤性土質材料)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、締固め土の現場品質管理への適用事例が増え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 pa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 pd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ゲル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ゲルの付着状況)→ 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。2020年度に策定した5か年計画は固 定的なものではなく、実験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 2021 年度までの成果を総括したうえで、2021 年末に 2022 年度実施計画に対する最初の 研究計画見直し・修正を行い、報告書に取りまとめた。

5ヵ年計画の3年目に相当する2022年度は、2021年度の研究成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。当初予定通り、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

(Ak/εk 実験)を実施した。得られた実験結果を基に、次年度以降の供試土の条件(母材や細粒分) 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 Ak/εk 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、画像解析(二 値化や輪郭処理など)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。更 に、2021 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ゲルの付着状況」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(何故・何時遮水 性が発現するのか)を考察する目的で、母材・細粒土(含むベントナイト)・水の3材料の加水・ 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 連続的に追跡した。中性子イメージング実験については、以上の成果を鑑み、2022年度で完了と した。これらの実験成果を総合し、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 pd(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(吸水したベントナイトゲルの母材への付着状態) 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・混合及び締固めの過程で主に発生し、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

を想定可能と考えた。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も のと考えた。更に、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考えた。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ものと考えた。 2022 年度は、そのための基礎的データ(力学・化学的特性)の収集も並行実施した。

5ヵ年計画4年目の2023年度も、引き続き透水特性データの取得を進めた。2023年度は特に、 ベントナイト混合土独特の高い遮水性発現とそのメカニズムを説明するために、混合する細粒分 の特性(塑性の違いや膨潤性の有無)とその混合率を種々に変え、その過程で混合土の遮水性が どのように段階的に変化していくのかを追跡した。本結果を用いて上記2022年度のメカニズム 仮説のさらなる補強を目指した。Mを実験についても、非塑性材料と膨潤性材料を跨ぐ材料(高塑 性×高混合率の条件)での実験結果を取得し、非塑性から高塑性、膨潤性細粒土混合土までを包含 した統一的な遮水性発現メカニズムの解釈を試みている。実体顕微鏡観察については、ベントナ イト混合土の遮水性発現要因と考えられるベントナイトゲル被膜の形成過程やその条件を検討す るために、締固め含水比とベントナイト混合量の組合せを種々変えた供試体の顕微鏡観察を実施 し、更に、透水試験時と同様、観察面を飽和膨潤させた状態での顕微鏡観察を行うための供試体 作製方法の検討を行った。加水〜混合〜締固め過程の追跡に関しては、ランマー落下による室内 締固め試験中のダマ(母材/ベントナイト/水混合の団粒塊)の扁平化や相互連結、これに伴う母材 残存間隙の閉塞状況の観察を実施した。加えて、そのプロセスの可視化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を実施し、今年度でこれらの検討を終了した。

本研究のターゲットと研究の方向性を図 5.1-1 に総括して示す。



図 5.1-1 本研究のターゲットと研究の方向性

# 5.2 年度計画及び実施内容

#### 5.2.1 令和5年度の実施計画と実施工程

本研究の5ヵ年全体計画(見直し・修正後)を表 5.2-1に、令和5年度(2023年度)の実施工 程を表 5.2-2に示す。5ヵ年計画については、基本的には2021年度末の見直し・修正結果に従っ たが、2022年度から2023年度前半に取得した締固め~透水特性データを整理・分析した結果、 後半より実験に用いる供試土(添加する細粒分)を追加することとした。

2023年度は、本全体計画に従い以下3点を実施した(2022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(実験 A~F:実験 D は前年度で終了)
- 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 研究成果の取りまとめ

表 5.2-2 中には実施概要を示し、詳細な内容は「5.2.2 2023 年度の実施内容」に記載する。研 究の実施内容や実験条件の詳細等については、定期的に有識者の意見を求め、それを反映させる 形で適宜見直しと修正を施した。

							1
実施項目	2020年度(初年度)	2021年度(2年目)	2022年度(3年目		2023年度(4年目)	202	24年度(最終年度)
研究方針と全体計画の立案 ⇒研究計画は毎年度見直し・修正	文献調査・有識者ヒアリン 研究方針・全体計画立案	グ 各年度末0 ◀	)研究成果に基づき計	画を	見直し・修正 混合する細粒土の見直		→ 終了
【実験A】:1Ec締固め-透水試験 ⇒締固め-透水特性の基本データ取得	<ul> <li>・段階的解明実験(土質相・実務ターゲット実験(ベン)</li> </ul>	材料):母材粒度・細粒土塑 ットナイト混合土):混合率1	性・混合率等を変えて 0%⇒30%⇒5%⇒20	実験 9%1	(JISA1218) で実験(JGS0312) 直した供試士の実験様		20%BT混合土 ◀━━►
【実験B】:λ <sub>k</sub> /ε <sub>k</sub> 実験	<ul> <li>・段階的解明実験(土質4</li> <li>・実務ターゲット実験(ペン)</li> </ul>	材料):母材粒度・細粒土塑 ットナイト混合土):混合率1	性・混合率等を変えて 0%⇒30%⇒5%で実	実験 (、	(JISA1218) 59 IGS0312) —	вт	混合土 →
→遮水性発現メカニズムの定量的評価	供試体作製・撮像方法の	検討 ・透水試験(JGS0	312/JISA1218) <b>終了</b> 者	」 t供	見直した供試土の実験構 気体の撮像と画像解析	59	あ、20%ペントナ
【実験C】【実験E】実体顕微鏡観察 ⇒混合・締固め・透水試験終了後の土 粒子間隙構造の可視化と定量化		<ul> <li>・入<sub>k</sub>/ε<sub>k</sub>沿い供試体</li> <li>・混合⇒締固め過</li> <li>・</li> <li< td=""><td>の土粒子間隙構造の 程の土粒子間隙構造</td><td><b>最像</b></td><td>と画像解析 と画像解析 BT被膜構造の形成観明</td><td>  1  </td><td></td></li<></ul>	の土粒子間隙構造の 程の土粒子間隙構造	<b>最像</b>	と画像解析 と画像解析 BT被膜構造の形成観明	1 	
【実験D】:中性子イメージング実験 ⇒混合・締固め・飽和通水時の浸透現 象の可視化と定量化	実験手法の試行と最適化	##01-2010年2000 ・ペントナイト混合土の遮 ・混合→締固め過程の含	水性の可視化と定量化 水比分布の可視化とフ		化終了		
【実験F】:追加力学試験・化学実験・ DEM締固め解析(参考) ⇒遮水性発現メカニズムの解明補助	(B) (97)	解析・定重化于法の模訂	・一面せん断試験/圧 ・保水性(TGA)/電荷	<b>密制</b> (ス間 室	<b>(験・近赤外線(層間水) (位)計測</b> 内締固めの再現実験/解	析	<u>終了</u>
【遮水性発現メカニズムの評価】 ⇒透水係数評価式/要因分析/実験C~F によるメカニズム説明		・締固め土の透水 ・遠水性発現メカ	、係数評価式と要因分 ニズムの考察と概念化	折() ;(実	実験B) 験C〜Eの結果を統合) 「塑性〜高塑性影満性」	の	
【研究成果の取りまとめと公表】		14	2編 5書		たの準備 粘土工学会2編 ア地盤工学ジャーナル <sup>▼</sup>		研究成果の総括
<u> </u>	1	1				土木	学会全国大会投稿

表 5.2-1 研究の全体 5ヵ年計画(見直し・修正後)



#### 表 5.2-2 2023 年度の実施計画と実施工程

# 5.2.2 令和5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

図 5.2-1 に、ベントナイト系材料の透水特性データ取得の全体像(研究のフレームワーク)を 示す。実験は下記に示す A~E に分類され、実験 D(中性子イメージング実験)は前年度で終了 している。実験 A、B は締固めた供試体の透水試験、実験 C、E は実体顕微鏡観察、実験 F とし ては、今年度は室内締固めの再現実験と DEM(個別要素法)による数値実験を実施した。

実験に用いた材料(供試土)の詳細については後述するが、ベントナイト系材料(ベントナイ ト混合土)に加え、ベントナイト系材料の透水特性メカニズムを評価するための比較対象として 非塑性細粒土や非膨潤性細粒土を混合した一般的な混合土も併せ用いた。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~透水試験(実験 A)

基本的な締固め~透水特性データを得るために、1Ec 締固め供試体の透水試験を実施した。締 固め試験については、別途締固めエネルギーを変えて 0.1/0.2Ec (緩詰め)及び 4.5Ec (密詰め) でも実施している。本結果は、次の実験 B(λ/ε 実験)の供試体条件(締固め時の乾燥密度と飽和 度の組合せ)の決定に用いられた。なお、ゆる詰めの締固めに関しては、モールド径と突固め回 数の関係から非膨潤性の土質材料は 0.2Ec、ベントナイト混合土は 0.1Ec で実施した。

② λ/ε 実験(実験 B)

締固め条件(締固め時の乾燥密度と飽和度の組合せ)の違いが透水係数に及ぼす影響を系統的 に調べ、透水特性メカニズムを検討する目的で、締固め時飽和度 Sr 一定/乾燥密度 ρd 変更供試体 の透水試験(λ実験)及び締固め時乾燥密度 ρd 一定/飽和度 Sr 変更供試体の透水試験(ε実験)を 実施した。前年度に引き続き、貧配合(5%)ベントナイト混合土の実験、及び高塑性カオリン 30% (富配合)混合土の実験を実施した。

③ 長期透水試験終了後供試体の顕微鏡観察(実験 C)

前年度に引き続き、JGS0312(長期透水試験)終了後供試体の顕微鏡観察を実施した。今年度 は5%ベントナイト混合土の長期透水試験を実施し、試験終了次第、順次顕微鏡観察に供した。 ④ ベントナイト混合量と締固め時飽和度を変えた供試体の顕微鏡観察(実験 E)

ベントナイト混合土の遮水性発現に関与すると考えられるベントナイトゲル被膜の形成状況や その影響要因を確認する目的で、ベントナイト混合量と締固め時飽和度(含水比)の組合せを変 えた供試体を作製し、顕微鏡観察を実施した。貧配合×低含水比(被膜形成が少ない)から富配合 ×高含水比(安定的な被膜形成)に至る種々の供試体を作製し、被膜状態が順次変化して行く様子 を観察した。また、透水試験が不飽和締固め供試体を飽和させた状態(ベントナイトの再膨潤が 生ずる可能性がある)で実施されることから、これら供試体表面を湿潤させ、その変化を追跡す ることも併せ試みた。作製した供試体については、次年度に顕微鏡観察と分析を進める予定であ る。

⑤ 加水~混合~締固め過程の再現実験と間隙構造観察(実験 F)

前年度に引き続き、加水~混合~締固め過程におけるベントナイト混合土の団粒化や締固めに よる扁平化・相互連結といった土粒子間隙構造の変化を追跡した。今年度は、①の1Ec 締固めを 再現した室内締固め実験を実施し、この際の間隙構造変化を透明モールドの側面及び上面から観 察することで、1Ec 締固め過程におけるベントナイト混合土の間隙構造の変化を追跡した。

実験 A、B(締固め~透水試験)の実験条件一覧を表 5.2-3 に示す。実験 C、E、F については 別途後述する。表 5.2-3 中には研究初年度以降の実施ケース(既実施〇)と最終年度(2024 年度) の実施予定ケース(緑)を併記し、母材・混合する細粒分・混合率毎にグルーピングして整理し た。前年度まで試行錯誤的なデータ取得を進めてきたが、本表にてこれらを以下の 3 つのグルー プに分類・実験結果を整理し、次年度の残ケースを吟味した。

 非塑性材料:購入砂及び粒度調整材(非塑性)に珪砂粉(非塑性)を混合した、粘土分を 含まない砂質系材料。今年度30%珪砂粉混合土及び珪砂粉単体(微細砂の母材として扱う) の実験を追加実施し、今年度にて終了した。

- 2) 非膨潤性材料:塑性を有する細粒分(ただし膨潤性なし)を混合した材料。前年度までは微粉 カオリンと木節粘土を用いていたが、これらの塑性指数が比較的近く、かつ締固め~透水特性 も類似の傾向を示したことから、今年度添加細粒分の追加を検討し、低塑性の藤森粘土と高塑 性の Ca 型ベントナイト(グループとしては、次の膨潤性材料に含めた)を追加した。
- 3) 膨潤性材料: Na型の高膨潤性ベントナイトであるクニゲル V1 に加え、2)で述べた低膨潤性の Ca型ベントナイトを今年度追加した。

図 5.2・2 に、今年度当初に実施を予定していた 6 材料(購入砂+5%クニゲル混合土、購入砂+ 30%カオリン・木節粘土混合土、粒度調整材+30%珪砂粉・カオリン混合土、微細砂単体)の粒 度曲線を示す。実験結果については後述するが、珪砂粉混合や微細砂単体の実験結果より、非塑 性材料の遮水性の限界を見極めることができたものと考えられたため、非塑性材料については今 年度にて実験を終了することとした。非膨潤性材料については、カオリンと木節粘土の塑性指数 が Ip=61、47 と比較的近く、締固め~透水試験結果も類似の傾向を得たことから、より低塑性あ るいは高塑性の細粒分を混合した供試体を用いた実験が必要なものと判断した。

図 5.2-3 に、追加導入した細粒分の粒度曲線を既往細粒分材料と比較して示す。複数の候補材料に対して試行錯誤的に塑性指数を確認した結果、低塑性細粒土として藤森粘土(Ip=18:通称青粘土)を、高塑性細粒土として Ca 型ベントナイト(Ip=110)を採用することとした。低塑性粘土については石粉、高塑性粘土については関東ロームなども検討したが、塑性指数の値や材料採取・均一性確保の観点からこれらを選定した。図に示すように、低塑性の藤森粘土は粘土分が少なく珪砂粉のやや左側に位置し、Ca 型ベントナイトはクニゲル V1 と大差ない粒度となっている。

図 5.2-4 に、新たに追加した細粒分を含む 30%混合土の粒度曲線を示す(追加細粒分については、今年度、遮水性が大きく改善されるであろう 30%混合土より先行着手した)。粘土分含有量の違いに対応し、30%混合土の粒度は非塑性(珪砂粉)と低塑性(藤森粘土)、及びそれ以外の2 つのグループに区分される。

図 5.2・5 は、細粒分単体及び 30%混合土の塑性指数を材料別に示した結果である。非塑性の珪 砂粉から高塑性・高膨潤性のクニゲル V1 まで、広範囲な塑性指数を有する細粒土及び混合土を 準備し、細粒分の塑性や膨潤性の違いが透水特性に及ぼす影響を吟味することとした。なお、混 合土の塑性指数は JIS 規格に則り、<0.425 mm試料での値を取得している。木節粘土は微粉カオリ ンと塑性指数が近いことから、今後は微粉カオリンで代表させ、Ca 型ベントナイトは低膨潤性で はあるものの、同じベントナイトであるクニゲル V1 と同じ範疇に入れ、低膨潤性ベントナイト として整理して行くこととした。Ca 型ベントナイトは塑性指数>100 を狙った材料ではあったが、 結果的に Na/Ca 型というベントナイト特性の違いや膨潤性の違いがベントナイト混合土の透水 特性に及ぼす影響を検討可能であるものと考えた。



図 5.2-1 ベントナイト系材料の透水特性データの取得(研究のフレームワーク)

	母材	添加する細粒分	混合率	1Ec締固め~透水 (6本)	λ / ε 実験 (12本)	令和6年度	
		無し	0		0		
		無し	0	0	0	-	
	<b>社</b> 度 調	珪砂紛(0)	30	R5年度実施済	-		
	微粒砂(珪砂粉単体)	無し	0	R5年度実施済	-	済	
	購入砂	珪砂紛( <b>0</b> )	10	0	0		
			30	R5年度実施済	-		
<b>≜</b>		藤森粘土(18)	10	R5年度実施済	—		
<b>青:非塑性材料</b>			30	R5年度実施済	12	12本実施	
		土 笠*F土 (17)	10	0	0	· · · ·	
黄:非膨潤性材料		不即怕工(47)	30	R5年度実施済	-		
灰:膨潤性材料		微粉カオリン (61)	10	0	0		
			30	R5年度実施済	R5年度実施済		
単体の塑性指数	粒度調整材		30	R5年度実施済	R5年度実施済		
1	購入砂	Ca型BT (110)	5	R5年度実施済	-		
			10	R5年度実施済	12	12本実施	
			20	R6年度実施予定	-	6本実施	
			30	R5年度実施済	12	12本実施	
	粒度調整材		30	R6年度実施予定	-	6本実施	
	微粒砂(珪砂粉単体)			R6年度実施予定	-	6本実施	
		クニゲルV1(363) :JGS0312	5	R5年度実施済	R5年度1/2実 施済(6本)	残り6本実施	
	購入砂		10	0	0	*	
	将ハッ		30	0	0	л	
○ <b>:既実施</b>			20	R6年度後半(6本)	-		
赤:R5年度実施済	ᄩᆂᆪᅎᄿ	カオリン	20	1EC締固め〜コーン	-	6本実施	
緑:R6年度実施予定	► 明八17	Ca型BT (110)	20	試験(6本)	-		

表 5.2-3 室内締固め~透水試験の実験条件一覧と 2024 年度の実施計画案



図 5.2-2 当初実施予定の6材料の粒度特性







図 5.2-4 追加実施した 30%混合土の粒度特性(既往データ併記)



図 5.2-5 細粒分単体及び 30%混合土の塑性指数

(2) 実体顕微鏡観察によるベントナイト混合土の間隙構造観察

締固め~透水試験(実験A、B)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 像撮影を実施する(実験C)。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9.5:0.5で混合した試料(ベントナイト混合±5%)である。なお、長期透水試 験(JGS0312)を順次実施しているため、供試体撮影は一部しか行えていない。これらの結 果については、来年度実施する残りの供試体の結果と共に報告する予定である。

また、ベントナイト混合土に対して含水比(飽和度)を変えた締固め供試体を作成し、その供試体表面の顕微鏡観察を実施した(実験 E)。なお、前年度はベントナイト混合土10%及び30%の試料に対して、含水比(飽和度)を変化させて実験を行っているが、今年度はベントナイトの配合量を5%、10%、15%、20%、30%、40%の6種類とし、含水比を9.8%、12.9%、16.1%、18.2%の4ケース、計16ケースに対して実施した。これら試料の混合方法については、図 5.2-6 に示すように購入砂と乾燥状態のベントナイトを十分に攪拌した後、霧吹きを用いて加水しながらスプーンで攪拌している。この際、できるだけダマが生じないように少量ずつ加水しており、生じたダマはできるだけ潰しながら全体が均等になるよう十分な時間攪拌した。各ベントナイト混合土試料の混合状況写真を図 5.2-7 に示す。この写真のように、ベントナイト混合量が多いほど全体的に白っぽい色になっており、ベントナイトの色相の影響を受けていることがわかる。また、含水比が高くなると、大きなダマが発生していることもわかる。実験では、この試料を直径 60mm の剛な容器内で乾燥密度が 1.730g/cm<sup>3</sup>になるように締め固め、その表面を顕微鏡にて観察及び画像撮影を実施した。なお、ベントナイトとの比較のため、カオリン混合土 10%と 30%に対しても試料を作成し顕微鏡観察を実施し

た。図 5.2-8 及び図 5.2-9 に、カオリン混合土の各含水比における試料の状況写真を示す。ベントナイト混合土と同様に、含水比が高いほど大きなダマが発生しいることがわかる。



図 5.2-6 試料の混合・加水状況



図 5.2-7 各ベントナイト混合土の試料状態



図 5.2-8 カオリン混合土 10%の各含水比における試料状況



図 5.2-9 カオリン混合土 30%の各含水比における試料状況

(3) 加水~混合~締固め過程における遮水性発現メカニズムの検討

これまで実施してきた実験 C の実体顕微鏡による土粒子間隙構造の観察結果や、実験 D の中性 子イメージングによる供試体内部の通水状況等の観察結果から、ベントナイト混合土の飽和透水 係数に影響を及ぼす一要因として、締固め時の初期含水比の違いに起因する土粒子間隙構造の違 いが考えられる。そこで、締固め時に間隙構造がどのように形成されるのか、というプロセスを 検討するため、ベントナイト混合土の締固め試験における締固め過程の観察を実施した。

ここでは、A-c 法(ランマー質量 2.5kg、モールド内径 100mm、突固め回数 25 回)に準拠した 締固め試験を実施し、各締固め回数における乾燥密度を逐次計測することで、締固め回数に対す る乾燥密度の変化を求めた。用いた試料は購入砂とベントナイトを重量比 9:1 で混合したベント ナイト混合土で、その含水比は事前に実施している 1Ec の締固め試験結果を参考に、最適含水比 13.5%と乾燥側 6.0%、湿潤側 21.0%の 3 種類とした。なお、通常の A-c 法では 3 層に分けて締固 めを実施するが、ここでは 1 層のみを対象とした。また、乾燥密度を計測する都合から、試料上 面に板を載せ、この上にランマーを落下させることで均一に締固めた。また、モールドに試料を 詰める際には、各供試体の初期乾燥密度が 0.90g/cm<sup>3</sup>になるように調整している。図 5.2-10 にモ ールド内の試料状況とランマーによる突固め状況を示す。

締固め過程における供試体の土粒子間隙構造の変化を観察するため、高さ 80mm、内径 50mm のアクリル円筒を用いた締固め試験を並行実施した。先ほどの締固め試験と同様に、含水比 6.0%、 13.5%、21.0%に調整した 3 種類のベントナイト混合土試料(ベントナイト混合量 10%)を使用 した。この試験では、アクリル円筒内に自由落下で試料を詰め、上面から静的に圧縮している。 供試体状況の撮影は圧縮量 5mm 毎に実施しており、アクリル円筒側面からのカメラ撮影と、供 試体上端面からマイクロスコープによる撮影を行っている。図 5.2-11 に、締固めに用いたアクリ ル円筒とマイクロスコープを示す。



図 5.2-10 モールド内の試料状況と締固め状況



図 5.2-11 締固め試験に用いたアクリル円筒とマイクロスコープ

# 5.3 実験結果

# 5.3.1 ベントナイト系材料の透水特性データの取得

以下、実験A、B(締固め~透水試験)により得られた透水特性データを説明する。表 5.2-3の 分類に従い、非塑性材料、非膨潤性材料、ベントナイト混合土(膨潤性材料)の順に1Ec 締固め ~透水試験結果を示した後、現時点での総括や評価方法案を示す。引き続き、今年度実施した λ/ε 実験(30%カオリン混合土)の実験結果を報告し、既往実験結果との比較、総括を行うと共に、 次年度(最終年度)の実施ケースについて言及する。

## (1) 非塑性細粒分混合土の室内締固め~透水試験結果

図 5.3-1 に非塑性細粒分混合土の粒度曲線、図 5.3-2 に 1Ec 締固め曲線、図 5.3-3 に 1Ec 締固 め~透水試験結果を示す。既往実験結果も併せ記載した。非塑性材料では均等な細砂(購入砂) と粒度調整材(粘土・シルト分含まず)、及び均等な微細砂(珪砂粉単体)の3材料を母材とし、 これに非塑性の珪砂粉を重量比で 10%、30%混合した材料を使用した。 購入砂に 30%の珪砂粉を 混合した材料、粒径の小さな微細砂、粒度良好な調整材に珪砂粉を30%混合した材料などは、非 塑性材料の中でも最も高めの遮水性を発揮する(相対的に透水係数が小さくなる)ことを想定し た供試土である。図 5.3-1の粒度曲線を見ると、これら6材料は平均粒径や均等係数が各々異な り、その影響を吟味することができる。図 5.3-2 に示す 1Ec 締固め曲線ではまず、微細砂→購入 砂→粒度調整材の順に平均粒径と均等係数が増加すると共に締固め曲線が左上に移動し、締固め 密度が増加することを確認できる。購入砂に珪砂粉を混合すると粒度改善や間詰め効果により締 固め密度が増加するが、元々粒度が良好な粒度調整材では、30%の<u></u>建砂粉を混合すると逆に締固 め密度が低下し、締固め効果が阻害される様子が伺われる(供試体の剛性が高まり、締固め外力 への抵抗性が増すものと想定)。図 5.3-3 に示す 1Ec 締固め供試体の透水係数は、これら粒度特 性と締固め密度の変化に対応した変化を示しており、平均粒径が小さい(微細砂)ほど、均等係 数が大きい(粒度良好)ほど、締固め密度が高いほど透水係数が低下し、遮水性が向上して行く 様子を見て取れる。

砂の透水係数は、従来より粒径(平均粒径や15%粒径など)と間隙比 e(乾燥密度)の関数と して表現されてきたが、今回の結果はこれと調和的である。一方、非塑性材料では、粒度や粒径、 締固め密度の組合せにより透水係数が次第に変化していくものの、遮水性の下限値は概ね 10<sup>-7</sup>m/s 近傍にあり、これ以上の遮水性の向上(透水係数をこれ以下にする)のためには、塑性を有する 細粒分(粘土・シルト分)の混合が必要であることが伺える。本研究はベントナイト混合土の透 水特性メカニズムの解明を目的とするため、非塑性材料の実験は、今回その下限値を見極められ たものとして終了し、次に述べる非膨潤性材料、膨潤性材料の透水特性の変化を考える上での比 較データとして用いることとする。なお、本研究の中で重回帰分析を用いた透水係数評価を別途 試みているが、非塑性材料では乾燥密度項の係数  $\lambda$  も飽和度項の係数  $\epsilon$  も小さ目の値を取り、定 数項  $\gamma$  が支配的となっている。このため、この定数項  $\gamma$  を粒径 D や均等係数、間隙比 e などの関 数として表現することを今後試行していきたいと考える。



図 5.3-1 非塑性材料の粒度曲線



図 5.3-2 非塑性材料の 1Ec 締固め曲線



図 5.3-3 非塑性材料の 1Ec 締固め~透水試験結果

(2) 非膨潤性細粒分混合土の室内締固め~透水試験結果

図 5.3・4 に非膨潤性細粒分混合土の粒度曲線、図 5.3・5 に 1Ec 締固め曲線、図 5.3・6 に 1Ec 締 固め~透水試験結果を示す。今年度追加した細粒分混合土については遮水性が大きく向上する 30%混合土(母材は購入砂に統一)より着手し、比較のため前述の非塑性材料やベントナイト混 合土(30%混合)の結果を併せて記載した。図 5.3・4 は 図 5.2・4 の再掲であり、同じ 30%混合 土であっても細粒分の中の粘土分比率が低い藤森粘土やこれを含まない珪砂粉混合土は、他の混 合材料に比べて粘土・シルト分(0.075 mm未満)の通過重量百分率が小さめの値を取っている。細 粒分の塑性指数は、図 5.2・5 に示したように、非塑性(珪砂粉:Ip=0)→低塑性(藤森粘土:Ip=18) →中塑性(木節粘土:Ip=47)→高塑性(微粉カオリン:Ip=61)→高塑性低膨潤(Ca 型ベントナイ ト:Ip=110)→超高塑性高膨潤(クニゲル V1: Ip=363)の順に塑性や膨潤性が順次変化する。

図 5.3-5 の 1Ec 締固め曲線では、混合する細粒分が非膨潤性かつ塑性が低いほど、締固め密度 は大となる傾向を示す。珪砂粉→藤森粘土混合で曲線が左上に移動、締固め密度が最大値を示し た後、中・高塑性のカオリン・木節粘土混合では締固め曲線が右下に移動し、締固め効果が低下 する。膨潤性の高いクニゲル V1 では更に、母材付近まで締固め曲線が移動しており、吸水膨潤し たベントナイトが、その反発力により締固め外力に抵抗していることが伺える(研究初年度にベ ントナイトダマを作為的に事前作製、混合した供試土の締固めを行ってみたが、締固め用のラン マーが反発力を受け密度が全く増えない現象を確認済である)。 一方、今回新たに実施した Ca 型ベントナイト混合土の締固め曲線は、クニゲル V1 よりも低塑 性かつ低膨潤性であるにも関わらず締固め曲線が購入砂の右下に位置する結果となった。その原 因は現時点では不明であるが、今後の Ca 型ベントナイト 5%及び 10%混合材料の締固め試験結 果を待って判断したい。

図 5.3-6 の 1Ec 締固め~透水試験結果は、透水係数が細粒分の塑性と膨潤性の大小の組合せに 対応して次第に変化する傾向を示しており、細粒分の塑性が高い程、膨潤性が高いほど透水係数 の最小値が低下していく現象が捉えられている。なお、この図のように 10<sup>4</sup>m/s~10<sup>-13</sup>m/s に至る 広範囲な透水係数レンジの中での変化を概観すると、一番上の非塑性材料と一番下の高膨潤性ベ ントナイト混合土では、いずれも締固め含水比に対する透水係数の変化が鈍感であり、その間の 透水係数の遷移領域において締固め含水比の影響が非常に大きくなることを指摘できる。ただし、 非塑性材料とクニゲル混合土で、透水係数が含水比に対して鈍感になるメカニズムは異なるもの と考えられる。例えば、今回新たに実施した Ca 型ベントナイト混合土では、実験を行った含水比 範囲内での透水係数の最大値/最小値の比は 487 と、透水係数に数百倍の違いが生じている。本研 究の端緒となった「最小透水係数が最適含水比の湿潤側で発生する現象」は、この図からはさほ ど顕著ではない(最適含水比付近かやや湿潤側で最小透水係数が発現)が、透水係数の含水比依 存性が、混合する細粒分の塑性と膨潤性の組合わせにより大きく変化することは興味深い。本結 果は、実施工での現場品質のバラツキへの影響など、実務への示唆を含んでいるものと考えられ る。



図 5.3-4 非膨潤性材料の粒度曲線





図 5.3-6 非膨潤性材料の 1Ec 締固め~透水試験結果
(3) ベントナイト(膨潤性細粒分)混合土の室内締固め~透水試験結果

図 5.3-7 にベントナイト混合土の粒度曲線、図 5.3-8 に 1Ec 締固め曲線、図 5.3-9 に 1Ec 締固 め~透水試験結果を示す。今回追加実施した低膨潤性の Ca 型ベントナイト 30%混合土の実験結 果を、高膨潤性のクニゲル 5%、10%、30%混合土の結果に併記した。図 5.3-7 に示す通り、クニ ゲル V1 混合土では混合率に対応した粒度変化が生じ、ベントナイト混合率と透水係数の関係を 直接確認することができる。クニゲル V1 と Ca 型ベントナイト単体の粒度はほぼ同じであるた め、30%混合土の粒度もほぼ同じとなり、ここでは添加するベントナイトの塑性と膨潤性の違い の影響を直接確認できる。

図 5.3-8 の 1Ec 締固め曲線では、クニゲルの混合率が 5%→10%と増加するにつれ締固め曲線 が上方に移動し、締固め密度が大となる。ただし最適含水比には顕著な変化はなく、(2)の非膨 潤性細粒土混合の場合とはやや異なる傾向を示す。混合率が 30%に増加すると、締固め曲線は下 方に移動し、母材である購入砂に近づく。Ca型ベントナイト混合土の締固め曲線は、前述したよ うに購入砂のそれよりも右下に位置しており、継続検討としたい。

図 5.3・9 の 1Ec 締固め~透水試験結果は、クニゲル V1 混合土の場合、混合率が 5%、10%、 30%と増加するにつれ、透水係数が一桁ずつ低下、遮水性が混合率に直結していることを示す。 また、5%の貧配合混合土も含め、1Ec 締固めの(比較的密詰めの)条件下では締固め含水比に対 する透水係数の変化は非常に小さく、いわば、施工含水比のばらつきに対して安定的な遮水性の 発現を確認できる。一方、膨潤性の低い Ca 型ベントナイト混合土は、最小透水係数だけで比較す ると、同じ混合率のクニゲル V1 混合土に対して1オーダー程度大きな透水係数値を示している ものの、締固め含水比の変動に対する変化が非常に大きく、乾燥側締固めでは湿潤側に対して数 百倍の透水係数値を示している点が特徴的と言える。



図 5.3-7 ベントナイト混合土の粒度曲線







図 5.3-9 ベントナイト混合土の 1Ec 締固め~透水試験結果

## (4) 締固め~透水試験結果の整理

(1)~(3)で報告した締固め~透水試験結果の整理・分析のイメージを図 5.3-10~図 5.3-12 に 示す。図 5.3-10 は、ベントナイト混合土の透水特性の整理イメージである。図は小峯[1]による既 往実験結果(クニゲル 5%混合から 100%クニゲル供試土までの広範囲な高圧圧密試験結果)の 上に、本研究の実験結果(1Ec 締固め供試体の最小透水係数)を併記した結果である。高圧圧密 と JGS0312 透水試験結果は、試験法の違いの影響もあり完全に一致するものではないが、混合率 5%~30%の本研究の結果は、小峯による実験データの下限値に近く、混合率の増加に対する透水 係数の低減傾向はこれと調和的である。小峯は、混合率 50%~100%の供試体に対しても透水係 数の計測を行っており、論文から読み取ったプロットを青字で併記した。これらの連続性を考え ると、ベントナイトの混合率が増加し、透水係数がある一定値に収れんしていく(小峯は混合率 が20%を越える領域で透水係数の低下傾向が小さくなることを指摘)先には、母材の土粒子間隙 を全てベントナイトゲルが充填した状態、すなわち、100%クニゲル供試土の透水係数に近い値が 相当するのではないかと考えられる。図中には、今回追加実施した Ca 型ベントナイト混合土の データをプロットした。Na 型と Ca 型ではベントナイトに含まれるモンモリロナイト量が異なる ため、同じ混合率では1桁透水係数が異なる結果となっている。この図の中に混合率を5%、10% に変えた実験結果を今後追記することで、Na 型と Ca 型ベントナイト毎に混合率と透水係数の関 係を整理していく(混合率に対する透水係数の変化傾向の違いも確認できる)。なお、図の右側に は圧密試験装置の外観を示した。透水係数の小さな Na 型では、通常の圧密試験では長期計測を 要するため、小峯の既往実験結果を参照することとするが、Ca 型ベントナイト(や非膨潤性細粒 土) 100%供試土に対し、次年度より圧密試験を実施し、100%混合率のプロットを求め、図を完 成させていきたいと考えている。図 5.3-11 には非塑性材料から非膨潤性材料、膨潤性材料に至る 広範囲な混合土に対する実験結果の整理(現時点)結果を示す。細粒分の混合率と1Ec 締固め供 試体の最小透水係数の関係を各細粒分毎に整理した。横軸 100%のプロットは 100%細粒土の透 水係数(圧密試験結果)に相当し、現時点では非塑性材料(珪砂粉単体)とクニゲル V1(小峯論 文より読み取り)の2点が得られている。この点は、混合率~透水係数関係の収れん傾向と調和 的であり、今後、図 5.3·10 の圧密試験装置を用いて藤森粘土、微粉カオリン、Ca 型ベントナイ トの値を取得、追記して行く予定である。図 5.3-12 は、細粒土の塑性指数 Ip と 1Ec 締固め供試 体の最小透水係数の関係を整理したものである。Ip=0~363 までの広範囲なレンジの中での透水 係数の変化を混合率毎に整理している。ベントナイト混合土については、今後、5%混合土と20% 混合土のデータを取得し、追記する予定である。図中には同一混合率での Ca 型、Na 型ベントナ イト混合土のデータ範囲を示した。モンモリロナイトをより豊富に含む Na 型では混合率の違い による透水係数の変動幅が Ca 型よりも小さく、前述の締固め含水比のばらつきに加え、混合時 のベントナイト粉体のばらつきに対しても、いわば安定した遮水性能を発揮していることが伺わ れる。このような整理を行うことで、ベントナイト混合土の設計・施工・施工管理実務への提言 も次年度に試みていければと考えている。







図 5.3-11 非塑性材料~高塑性膨潤性材料に至る透水特性の整理イメージ



図 5.3-12 細粒分の塑性/膨潤性と混合率が透水特性に及ぼす影響の整理イメージ

(5) カオリン 30%混合土の λ/ε 実験結果

 $\lambda$ / $\epsilon$  実験については、今年度、購入砂及び粒度調整材にカオリンを 30%混合した材料に対して データを取得した。図 5.3-13 はまず、購入砂+カオリン 30%混合土の供試体条件を示す。比較 のために既実施の購入砂+10%カオリンの同図を再掲した。図中の丸数字は 1Ec 締固め供試体で あり、残りの数字は 0.2Ec (緩詰め) と 4.5Ec (密詰め)の締固め曲線の間で、締固め時の乾燥密 度と飽和度の組合せを種々変化させた供試体条件を表している。図中  $\lambda$  実験は締固め時飽和度を 一定にして締固め乾燥密度を変化させる実験であり、例えば左図の 1→5→②→9→11 のように等 飽和度ライン上で乾燥密度を高密度から低密度まで複数変化させた。 $\epsilon$  実験は例えば 4→5→③→6 のように乾燥密度一定で、締固め時の飽和度 (含水比)を乾燥側から湿潤側まで変化させている。



図 5.3-13 Mre 実験の供試体条件(購入砂+カオリン 10%、30%混合)

図 5.3・14 は、購入砂+10%カオリン混合土の λ/ε 実験結果(既報告)を示す。図の左が λ 実験 結果で、横軸に締固め時の乾燥密度を、縦軸に透水係数 k の log 値を取り、これを締固め時の飽 和度毎にプロットしている。右は ε 実験結果であり、横軸を締固め時飽和度にとり、logk を締固 め時乾燥密度毎にプロットしている。図より、λ 実験結果は右下がり(締固め時の乾燥密度が大き いほど透水係数が小さくなる)の直線群となり、締固め時飽和度が高い(湿潤側)ほど下方に移 動する。同様に、ε 実験結果も右下がり(締固め時の飽和度が大きいほど透水係数が小さくなる) の直線群となり、締固め時乾燥密度が大きい(高密度側)ほど下方に移動する。これらは、今年 度までの母材及び 10%混合土の λ/ε 実験で共通して見られた挙動である。

一方、図 5.3-15 は、今回得られた購入砂+30%カオリン混合土の $\lambda$ 実験結果である。締固め飽 和度が相対的に低い供試体では同じく右下がりの直線となっている(ただし直線群の間は狭く、 締固め時飽和度の影響は小さい)が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$  (一) ( $\oplus) = 0$  ( $\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$  ( $\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) ( $\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) ( $\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$ ) が、図中に赤枠で囲った  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) \rightarrow (\oplus) = 0$  が ( $\oplus) = 0$ ) がの目 ( $\oplus) = 0$ ) が ( $\oplus) = 0$ ) がの目 ( $\oplus) = 0$ ) かった  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) = 0$  がのま  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) = 0$  が ( $\oplus) = 0$ ) かった  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) = 0$  がのま  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) = 0$  がのま  $2\rightarrow 5\rightarrow (\oplus) = 0$  かった  $2\rightarrow (\oplus) = 0$  かっhetee (\oplus) = 0 かった  $2\rightarrow (\oplus) = 0$  かっhetee (\oplus) = 0 かっhetee (\oplus



図 5.3-14  $\lambda/\epsilon$  実験結果 (購入砂+カオリン 10%)



図 5.3-16 ε実験結果 (購入砂+カオリン 30%)

図 5.3-17~図 5.3-20には、粒度調整材+30%カオリン混合土のλ/ε実験について、購入砂+30% 混合土と同様の整理を行った結果を示す。粒度調整材ではカオリン 10%混合土の実験は実施して いないため、粒度調整材単体の実験と比較して示した。得られた実験結果は購入砂+30%カオリ ン混合土のそれに酷似しており、粒度調整材単体では λ/ε 実験結果共に直線群となる結果であっ たものが、30%のカオリンを混合した場合、最適飽和度の湿潤側飽和度ライン沿いで透水係数が 急減し、一定値に収れんしていることをここでも確認できる。ε実験結果で logk が急減する飽和 度 (75%付近) もほぼ同じであり、この独特な現象は母材に関係なく、高塑性細粒分を富配合で 混合した土に特有のものと考えられる。図 5.3-21 は、この高飽和度ライン沿い供試体の実験終了 後の写真を撮影した結果を示している(④、⑤、⑥)。これらの写真からは、高含水比状態のカオ リンがケーキ状(ベントナイトの場合のゲルとは性状が異なるため、このように仮称)となって 供試体全面を被覆している状況を確認できる。供試体⑥では、内部構造を確認するために試掘を 行った結果を併記しているが、このカオリンケーキの被覆状態は供試体内部でも同様に連続して 見られ、高い遮水性を発揮していることを裏付けている。このように最適飽和度の湿潤側では、 締固め密度に関係なく富配合の細粒分がケーキ状となって母材間隙を埋める充填構造を取った結果、透水係数の急減と収れんが生じたものと考えられる。10%混合土では細粒分の量、すなわち母材間隙を充填するための細粒分ケーキの総量が少ないために、充填構造を取り得なかった(結果、透水係数の急減や収れんが生じなかった)ものと推察される。

図 5.3-22 には、Mitchell&Soga[2]及び龍岡[3]による既往研究事例を示す。本研究で採用した 粒度調整材は、龍岡の論文に示された御母衣ダムコア材の粒度を参考にした(ただし細粒分を除 去)が、今回の 30%カオリン混合土は、これに細粒分を加え、このコア材に近い粒度、細粒分特 性となっている。図の右側には龍岡によるこの材料の整理結果を示すが、飽和度~logk ラインの 折れ曲がり飽和度の位置を含め、今回の 2 つの実験結果に酷似している。左の Mitchell&Soga の データは、ε実験と同じく締固め時の乾燥密度を一定にして締固め時含水比の違いの影響を見て いるが、やはり最適飽和度の一つ隣(湿潤側)の供試体で透水係数の急減と収れんが見られてお り、透水係数が数百分の1にまで低減していることが見て取れる。



図 5.3-17 Mr 実験の供試体条件(粒度調整材単体、カオリン 30%混合)



図 5.3-18 Mr 実験結果(粒度調整材単体 既報告)





図 5.3-19 λ実験結果(粒度調整材+30%カオリン)

図 5.3-20 ε実験結果(粒度調整材+30%カオリン)



図 5.3-21 Mr 実験終了後供試体の観察結果(粒度調整材+30%カオリン)



図 5.3-22 既往研究事例(Mitchell&Soga、龍岡)との比較

以上の結果を、A、E実験毎に総括した結果が図 5.3-23 と図 5.3-24 である。ここまで実施して きた非塑性材料、非膨潤性材料、ベントナイト混合土の実験結果の中に、今回の2データを併記 した。図の煩雑さを避けるために、既往データは直線群の上下限のみ示し、また次の図 5.3-25 で 述べる 5%ベントナイト混合土の実験も今年度 12 本実施時点での途中経過値を赤プロットで併 記した。図より、以下の傾向を見いだすことができる。

- ① λ 実験結果
- ・高透水性領域の非塑性材料と極低透水性領域のベントナイト混合土では直線の傾き、すなわち 締固め時乾燥密度の依存性が小さい。非塑性材料では粒径や粒度などの粒度特性が支配的とな ること、逆に膨潤性のベントナイト混合土ではベントナイトゲルが被膜構造を取ることがその 理由と考えられ、そのメカニズムは両者で異なる。
- ・添加する細粒分の量が少ない10%混合土では、既報告の通り直線の傾きが大となり、細粒分の 塑性が大きいほど傾きが増加する傾向を示す。透水係数は締固め時飽和度が高いほど小さな値

となる(直線群となる)。

・今回の30%カオリン混合土は、その中間的な透水係数領域において特異な挙動を取り、締固め時飽和度が低い(乾燥側)で10%混合土と調和的(連続的)な挙動を取った後(いったんんの傾きが増加)、前述した透水係数の急減(ジャンプと仮称)が生じて、以降は傾きが小さくなる。 図より、ジャンプが生じた後の傾きは貧配合5%ベントナイト混合土のそれに近く、ある意味、細粒分の塑性や混合量に関わらず透水係数に対して連続的な挙動と見なすこともできる。

図中には、前述の非塑性材料の遮水性限界(10<sup>-7</sup>m/sec 付近)に加え、透水係数のジャンプが生じるラインとして、暫定的に 10<sup>-9</sup>m/sec ラインを併記した。これら 2 ラインの妥当性は次年度実施の追加 λ/ε 実験で検証したいと考えているが、非塑性材料から膨潤性のベントナイト混合土までの広範囲な混合土の透水特性を連続的に評価することを、次年度も引き続き試みていく。

- 2 ε 実験結果
- ・ λ 実験結果と同様、高透水性領域の非塑性材料と極低透水性領域のベントナイト混合土では直線の傾き、すなわち締固め時飽和度の依存性が小さい。λ 実験と同様、そのメカニズムは異なるものと考えられる。
- ・添加する細粒分の量が少ない10%混合土では、既報告(重回帰分析)の通り直線の傾きがやや 増加し、細粒分の塑性が大きいほど傾きが増加する傾向を示すが、λ実験ほど顕著ではない。透 水係数は締固め時乾燥密度が大きいほど小さな値となる(直線群となる)。
- ・今回の30%カオリン混合土は、その中間的な透水性領域において特異な挙動を取り、締固め時 飽和度が低い(乾燥側)では10%混合土と調和的な挙動を取った後、締固め時飽和度75%付近 で透水係数の急減(ジャンプ)が生じて、高飽和度領域(85%付近)で透水係数が一定値に収 斂する。ジャンプ以降は直線の傾きは小さくなり、ベントナイト混合土のそれに近くなる。

ε実験結果においても、λ実験結果と同様、細粒分の塑性や混合量に関わらず透水係数のレンジ で見ると連続的な挙動と見なすこともできる。来期の Mε実験では、この中間的な遷移領域を狙 った実験を計画している。ベントナイト 5%混合土(残ケース)に加え、低塑性藤森粘土 30%混 合(おそらく遷移領域より上の透水係数レンジ)、Ca型ベントナイト 10%、30%混合(遷移領域 を跨ぐ可能性大)を実施し、今回のカオリン 30%混合土実験結果の再現性を確認する予定である。







締固め時の飽和度 (%)

図 5.3-24 c 実験結果の総括

最後に、図 5.3-25 でクニゲル 5%混合土の  $M\epsilon$  実験実施状況をもう少し詳細に吟味する。 今年度、1Ec 締固め供試体 6本(丸数字)及び図中に青で囲った 6本の計 12 本を実施済である。 これらを整理した結果を右に示しているが、 $\lambda$  実験の結果については、右下がりの直線群となる ものの、締固め時飽和度の依存性は低め(変化幅が小さい)となっており、30%カオリン混合土 で見られた遷移領域での挙動(締固め時飽和度の影響が低下)に近い。 $\epsilon$  実験では最適含水比より も高飽和度領域(1→⑤→⑥など)で透水係数のジャンプが発生し赤丸で囲んだ領域に収れん、logk がこれ以下となる領域(①→②→③→⑤)では直線の傾きが激減している。カオリン 30%混合土 とよく似た挙動を示しており、5%ベントナイト混合土は、膨潤性材料でありながら、貧配合であ るがゆえに遷移領域を跨ぐ挙動を示している可能性がある。そのためには、より低密度領域のデ ータを取得する必要があることから、図の左下の緑のプロットで示すように、次年度の残り 6 点 は 10→11→12 沿いの低密度領域のデータを緻密に取得すべく、実験計画(供試体条件)を微修正 する予定である。



図 5.3-25 購入砂+5%クニゲルの \/ ε 実験結果(途中経過)

(6) ベントナイト混合土の被膜構造形成メカニズムに関する実験結果

図 5.3・26 は、図 5.2・7 に示した各ベントナイト混合土を乾燥密度 1.730g/cm<sup>3</sup>で締め固めた供 試体の写真である。供試体の含水比が 9.8%、12.9%、16.1%、18.2%の 4 ケースであることから、 乾燥密度 1.730g/cm<sup>3</sup>で締め固めた際の供試体の飽和度は、それぞれ 46%、61%、76%、86%とな る。この写真のように、ベントナイト混合量が多いほど全体的に白っぽい色になっており、表面 も密に詰まっているように見える。図 5.3・28 は、この供試体の表面を図 5.3・27 に示した実体顕 微鏡 (Nikon SMZ18) で撮影した画像である。この画像を見ると、ベントナイト混合量が多いほ ど、初期含水比 (飽和度) が高いほど土粒子間隙が少なくなっているように見える。また、ベン トナイト混合量が少ない供試体と混合量が多い供試体では、ベントナイト自体の状態も異なるよ うに見える。混合量 5%の供試体では、母材である購入砂の間に透明なジェル状のベントナイトが 付着しているのに対して、混合量 15%程度になるとこのベントナイトが白っぽい色となり、混合 量が 30%や 40%になると青っぽいボソボソのベントナイトが母材を覆っている状態となってい る。膨潤性材料であるベントナイトが、混合土に含まれる間隙水を吸水していると考えると、ベ ントナイトの混合量が多いほど、初期含水比が低いほどベントナイトの給水量は少なくなる。こ のようなベントナイトの状態が、締固め時の間隙構造形成に影響を与る要因の 1 つになっている と考えられる。



図 5.3-26 各ベントナイト混合土の締固め状況



図 5.3-27 実体顕微鏡 (Nikon SMZ18)



図 5.3-28 実体顕微鏡により撮影したベントナイト混合土の供試体画像(不飽和)

本研究で議論しているベントナイト混合土の透水係数は、飽和状態の供試体を用いて計測され る(試験前に通水飽和してから実施)。特にベントナイトは膨潤性材料であるため、試験前の飽和 過程で再膨潤が発生し、不飽和状態と飽和状態では土粒子間隙構造が異なることが予想される。 そこで、図 5.3-29 に示したように、締め固めた供試体の表面にろ紙を置き、霧吹きで湿らせるこ とで供試体表面を飽和させて顕微鏡観察を実施した。供試体の吸水が止まり、ろ紙の乾燥がこれ 以上進まない状態になるまで、継続的に霧吹きの加水を行った(供試体条件によりその期間は異 なる)。図 5.3-30 は、表面飽和状態で撮影したベントナイト混合土表面の顕微鏡画像である。図 5.3-28 に示した不飽和状態の画像と比べると、ベントナイトが吸水し画像が変化していることが わかる。また、これまで実施してきた締固め~透水試験実施後の供試体の顕微鏡画像(実験 C) とも非常によく似た画像となっている。長期透水試験には多大な労力と時間を要するため、実験 後の供試体の顕微鏡写真を取得することは大変である。その代わりに、このような手法により様々 な供試体(非膨潤性土含め)の飽和表面写真を取得することができれば、非常に有用と考えられ る。なお、ベントナイト混合量の少ない5%や10%の供試体では、吸水したベントナイトの中に 母材である砂粒子が透けて見えているが、混合量の多い30%や40%の供試体では、ベントナイト が母材を厚く覆っているため、母材である砂粒子はほとんど見ることができない。つまり、ベン トナイト混合土の透水性は、混合量が少ないと母材である砂粒子の骨格構造の影響が大きく、混 合量が多いと母材の影響が少なくなり、混合量依存、ベントナイトゲル自体の遮水性に依存する 形になるものと考えられる。



図 5.3-29 ベントナイト混合土供試体の飽和状況



図 5.3-30 実体顕微鏡により撮影したベントナイト混合土の供試体画像(飽和)

図 5.3-31 は購入砂にカオリンを 10%混合した供試体画像、図 5.3-32 はカオリンを 30%混合 した供試体画像である。それぞれ、上段画像が緩詰め(乾燥密度 1.50g/cm<sup>3</sup>)、下段が密詰め(10% 混合は乾燥密度 1.83g/cm<sup>3</sup>、30%混合は乾燥密度 1.73g/cm<sup>3</sup>)となっている。初期含水比が低い DRY 側 (4.0%や 7.0%)の画像を見ると、供試体表面にカオリンが浮き出て白っぽい表面をして おり、大きな間隙は見られない。一方、含水比が高い WET 側(16.0%や 19.0%)の供試体画像 を見ると、緩詰め状態では加水混合時にできたダマが残っており、大きな間隙が見られる。密詰 めになると、このダマが潰れて大きな間隙を埋めていることがわかるが、供試体表面にはこの間 隙の跡が若干残っている。図 5.3-33 及び図 5.3-34 は、これらの供試体の顕微鏡画像である。こ の顕微鏡画像を見ても初期含水比の低い供試体の方が大きな間隙が少なく、密に詰まっているよ うに見える。一方、カオリン混合土の締固め~透水試験結果は、初期含水比(飽和度)が低い供 試体の方が透水性が高い結果を示している。今回の顕微鏡画像は不飽和状態であるため、飽和時 の間隙構造の差が透水性に影響を及ぼすことを考えると、カオリン混合土に対しても先ほどのベ ントナイト混合土と同様に、不飽和状態ではなく表面を飽和させた状態での顕微鏡画像の比較が 必要だと考えられ、次年度に検討を行いたい。



図 5.3-31 カオリン混合土 10%の締固め供試体画像



図 5.3-32 カオリン混合土 30%の締固め供試体画像



図 5.3-33 実体顕微鏡により撮影した供試体画像(カオリン混合土 10%)



図 5.3-34 実体顕微鏡により撮影した供試体画像(カオリン混合土 30%)

(7) 加水~混合~締固め過程の室内再現実験結果

図 5.3-35は、JISA1210(土の締固め試験)のA-c法(ランマー質量2.5kg、モールド内径100mm、 突固め回数 25回)に準拠して実施した締固め試験の結果であり、締固め回数の増加に伴う乾燥密 度と締固め曲線の変化を表したグラフである。締固め回数と乾燥密度の関係を見ると、乾燥側 6.0%と最適含水比13.5%では締固めにより乾燥密度が常に増加する傾向にあるが、湿潤側21%で は突固め7回程度で乾燥密度がほぼ横ばいとなっている。締固め回数と締固め曲線のグラフをみ ると、突固め回数が少ない段階では含水比が高いほど密度が上昇しやすく右上がりの締固め曲線 となるが、突固め7回程度で湿潤側21.0%の供試体が飽和度90%に達し乾燥密度がこれ以上大き くならないため、突固めの増加に伴い乾燥側6.0%と最適含水比13.5%の供試体の乾燥密度が湿潤 側21.0%の乾燥密度を上回り、最終的に見慣れた山なり形状の締固め曲線になる。



図 5.3-35 突固め回数による乾燥密度及び締固め曲線の変化

図 5.3-36 は、締固め過程における供試体の状況を観察するため、高さ 80mm、内径 50mm の アクリル円筒を用いて別途実施した締固め試験結果であり、供試体をアクリル側面から撮影した 画像である。供試体初期では、加水・混合して作成した試料を自然落下でアクリル円筒内に詰め ており、混合した際のダマ形状がそのまま積み重なっている様子がわかる。ダマ形状は含水比が 高いほど大きいため、初期状態では WET 側の含水比 21.0%の供試体で大きな間隙が見受けられ る。締固めが進行すると、この WET 側の含水比 21.0%の供試体ではダマが押し潰されながら間 隙を埋めていき、密な状態へと移行していく。一方、DRY 側 6.0%では混合時の試料はほぼサラ サラ状態で、締固めも全体的に圧縮されていく様子が伺え、DRY 側と WET 側で明確に締固め過 程における変形の様子が異なることが観察できている。

図 5.3-37 は、供試体高さと乾燥密度の関係を示したグラフである。このグラフ中の乾燥密度が 近い〇印で囲った供試体について、上端面をハンディタイプのマイクロスコープで撮影した画像 と、これらの画像の輝度ヒストグラムを図 5.3-38 に示す。これらマイクロスコープ画像の黒色部 分は粒子間の影、いわゆる間隙であると考えられる。締固めによって間隙比が減少すると、黒色 部分が減少し大きさも小さくなっていることが確認できる。この様子は輝度ヒストグラムにも表 れており、供試体の乾燥密度が低い状態(図中青線)ではヒストグラムが広範囲に緩やかに分布 しているのに対し、締固めが進行して乾燥密度の高い密な状態(図中赤線)では、ヒストグラム の分布は範囲が狭く均等な形状へと変化している。図 5.3-39 は、このヒストグラムの標準偏差を 比較したグラフである。DRY 側 6.0%では、乾燥密度が高い密な状態でも最適含水比や WET 側 より標準偏差が大きいため、同じ乾燥密度でも間隙径のばらつきが大きく、大きな間隙を有して いると推測される。



図 5.3-36 アクリル容器側面から見た締固めによる供試体の変化



図 5.3-37 供試体高さと乾燥密度の関係



図 5.3-38 マイクロスコープによる供試体表面画像と輝度ヒストグラム



図 5.3-39 乾燥密度と標準偏差の関係

## 5.3.2 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

## (1) 非塑性~非膨潤性~膨潤性細粒分混合土における透水特性メカニズムの評価案

図 5.3-40 は、非塑性非膨潤性材料(珪砂粉)~低塑性非膨潤性材料(藤森)~高塑性非膨潤性 材料(カオリン)~高塑性低膨潤性材料(Ca型ベントナイト)~超高塑性高膨潤性材料(クニゲ ルV1)の順に特性が変化する細粒分を同一母材(購入砂)に混合した際の透水係数の変化を示す。 添加する細粒分の混合率を横軸に、1Ec 締固め供試体の最小透水係数を縦軸に取り、添加する細 粒分の塑性や膨潤性の有無毎に混合率と最小透水係数の関係を整理した。図中には、非塑性材料 の遮水性能の下限ライン(10<sup>-7</sup>m/s)、及び λ/ε 実験において透水係数の急減(ジャンプ)が生じ た遷移領域の概ねの下限値(10.9m/s)を併記した。図中には、これら3領域において混合土の土 粒子間隙構造にどのような変化が生じているかの想定を併記した。非塑性材料では土粒子同士が 骨格構造を形成し、非塑性の細粒分が母材間隙を充填する構造を取る。透水試験時の水はその残 存間隙を浸透し、残存間隙は材料の粒度や締固め密度(間隙比)により決まる。一方、今回、高塑 性カオリン 30%の富配合条件で透水係数の急減(ジャンプ)が発生し、ジャンプ後の供試体では カオリンケーキが母材間隙を充填した均一被膜構造を取っていることを写真撮影と試掘により確 認した。 透水係数が<10<sup>.9</sup>m/s となる高遮水性能の領域ではカオリンケーキやベントナイトゲルが 均一な被膜構造を形成すること、ベントナイト混合量が多いほど、安定したゲル被膜が形成され、 透水係数が1桁ずつ低下して行くことを確認済である。このことから、透水係数の遷移領域の上 半分では、細粒分ケーキやベントナイトゲルが均一な被膜構造を形成するに至らず、土粒子骨格 の残存間隙と被膜が混合した構造を有しており、湿潤側の加水〜混合〜締固めにより均一な細粒 分被膜が面的に形成された瞬間に、一気に透水係数のジャンプが発生するものと想定される。被 膜形成は、被膜の原材料(吸水した細粒分ケーキやベントナイトゲル)の総量と締固め時の圧延 性により決定され、細粒分の塑性や膨潤性と混合量がこれを左右するのではないかと考えられる。



<sup>※1</sup>Ec締固めにおける最小透水係数(湿潤側供試体)でプロット

この仮説を検証するため、次年度はこの図の3領域に相当する代表的な細粒土材料と混合率の 組合せのもと締固め供試体を作製し、今年度試行した顕微鏡観察(表面の湿潤化含む)と画像解 析手法により、その妥当性を検証していきたいと考えている。なお、ベントナイト混合土を含む 細粒分混り土の遮水性能に影響を及ぼす各種要因と遮水性能への影響度合いを図 5.3-41 中に表 示した。この表の中で、〇の組合せが多い要因ほど遮水性発現への影響が大きいことになる。母 材粒度や締固め密度(間隙比)は遮水性を決める一要因とはなるものの、均一被膜構造が高い遮 水性をもたらすことを考えるならば、ベントナイト混合土を含む細粒分混り土の透水係数の高遮 水性を支配するのは、主に細粒分の混合量、細粒分の塑性と膨潤性、そして締固め時の含水比の 3要因ではないかと考えられる。

図 5.3-40 非塑性~非膨潤性~膨潤性細粒分混合土における土粒子間隙構造の変化

粗砂(0) 非塑性材料	_	
<u>非塑性材料(非塑性砂質土)</u> ・粒度/粒径/間隙比が透水係数 を支配 ・λ/ε(締固め条件)の影響小 ・10 <sup>-7</sup> m/sオーダーが限界 ・土粒子間隙構造が支配的	藤森粘土(18) 非膨潤性細粒土混合材	<ul> <li>被膜 (ゲル/非ゲル)</li> <li>浸透流量</li> <li>=f(残存間隙分布(被膜分布) ,被膜部透水係数)</li> <li><u>被膜分布 (面積)</u></li> <li>=g(被膜原料供給量,被膜</li> </ul>
粒度良好材 /微粒砂(0) ・紙 ・約 ・ が ・ 約 ・ う ・ 、 ・ 約 ・ 約 ・ 約 ・ 、 約 ・ 約 ・ 、 約 ・ 、 約 ・ 、 約 ・ 、 ・ 、	<u>潤性細粒土混合材(粘性土混り)</u> 粒分の塑性と混合量が透水係数を支配 / <i>ɛ</i> (締固め条件)の影響大 固め含水比の影響大(<10 <sup>-9</sup> m/sの低透 性は高飽和度域で選択的に発現) 0 <sup>-7</sup> ~10 <sup>-9</sup> m/sの遷移領域を介在して透水 特性が変化(細粒分の塑性と混合量による) 粒分ケーキの被覆構造が支配的	原料の力学特性(被膜形 成のし易さ) Ca型BT(110) 膨潤性細粒土混合
	微粉カオリン(61) ・ へ 係 ・ λ ・ ネ ・ 新 能	2週性細粒土混合材(ベントナイト混合土) ベントナイト混合量と膨潤性(塑性)が透水 数を支配 ./ε(締固め条件)や母材の影響小 ベントナイトゲルの被覆構造が支配的 超固め含水比と混合量がゲル被膜構造(遮水性 3の安定性)を決める Na型BT(363)

	品質(初期および長期遮水性能)				
影響因子	母材(骨 格)間隙量	被膜原材料 の総量	原材料の物 性(延性)	被膜部(100%粘 土)の透水性	
① 母材粒度	0	_	_	_	
<ol> <li>締固め密度(間隙比)</li> </ol>	0	Ι	_	_	
③ 細粒分の混合量	0	0	_	_	
④ 細粒分の塑性/膨潤性	0	0	0	0	
<ol> <li>(5) 締固め含水比(細粒 土部の含水比)</li> </ol>	0	0	0	△(飽和後は同)	
摘要	締固め特性 両者で被膜構造や残存母 への影響 材間隙量が決まる			通水量=残存間隙 部(大)+被膜部 (小)。膜状被膜 ではこのkが支配的	

図 5.3・41 非塑性~非膨潤性~膨潤性細粒分混合土における透水特性メカニズムの変化(案)

一方、細粒分の物性や混合量が、被膜原材料の総量、締固め時の圧延性等の被膜材料の物性、 被膜物質(100%細粒土ケーキやゲル)の透水係数に影響をもたらす結果、混合土としての高い遮 水性がもたらさせると考えるならば、これまで採用してきた混合土の含水比ではなく、ベントナ イトなど細粒部分の含水比へと指標を変えていくことが必要ではないかと考える。被膜材料の圧 延性等の物性の変化は、前年度まで実施してきたベントナイト混合土の一面せん断試験結果から も推察されている。膨潤性ベントナイトのみならず、混合土に添加した水は、その大半が細粒分 に吸収され、細粒分ケーキやベントナイトゲルに形を変えるものと考えられる(母材の中に取り 込まれる水の量は無視できるほど小さい)。また、膨潤性ベントナイトでは添加した水の量によ りベントナイトゲルの体積膨張量(率)が異なるため、被膜原材料の総量に対してもベントナイ ト含水比が大きく影響するものと考えられる。ベントナイトゲルの延性については、吸水ベント ナイトの塑性(ベントナイト含水比が液性限界と塑性限界のどこに位置するのか)に伴い変化す るものと考えられ、この意味からも混合土含水比からベントナイト含水比への発想の転換が必要 と思われる。図 5.3-42 に、その考え方を示した。図 5.3-43 は、この考え方に従ってこれまでの ベントナイト混合土の含水比 w を横軸に、加えた水をベントナイトが全て吸水したと想定した場 合のベントナイト含水比 wbr を縦軸に取り、その関係を示したものである。両者は直線的な比例 関係にあり、ベントナイト混合量が少ないほど、直線が上方に移動する。図中には、今回用いた クニゲル V1 の液性限界と塑性限界を併記した。今回実験で用いたベントナイト混合土の含水比 範囲内では、ベントナイト含水比はすべて液性限界以下にあり、不飽和締固め時には適度な塑性 や圧延性を有していることが想定される。図の左下には、これを液性指数 L(塑性限界を 0、液 性限界を1とし、塑性がどの位置にあるかを相対値として示したもの)で整理した結果を併記し た。今回の供試体の LL値は多くは 0.5 以下にあり、混合率 5%の貧配合条件のみが 0.5~1 近い値 を取っていることが分かる。図の横には大河原ら[4]が、吸水したベントナイト単体土の層間距離 と配向性が含水比によりどう変化するかを調べた結果を参考に併記した。ベントナイト含水比が 塑性限界から液性限界へ変化するにつれ、層間距離が増大(膨潤)し、配向性(延性などの変形 性に影響)が配向構造⇒ランダム構造へと変化して行く様子が伺われる。このようなベントナイ ト含水比(ベントナイト混合土含水比)の変化に伴う膨潤性(ゲル総量に関与)や配向性(延性 に関与)の変化が、図 5.3-40 に表示したような遮水性発現に影響を及ぼしているのではないかと 考えている。



図 5.3-42 ベントナイト含水比 WBTによる実験結果の整理案



図 5.3-43 ベントナイト(細粒分)含水比 WBT 及び液性指数 IL による実験結果の整理案

図 5.3・44 は、図 5.3・43 と同じ整理をカオリン混合土に対して行った結果である。ベントナイ ト混合土と比較すると、カオリン含水比は(混合土の含水比として)湿潤側では液性限界を大き く越えた液体状となり、液性指数 L が 1 を超え、同じ混合土含水比であっても、ベントナイトと カオリン混合では細粒分含水比の状態量が全く異なることが分かる。クニゲル V1 と異なりカオ リンの塑性限界と液性限界の幅はかなり狭く、カオリン混合土の含水比が湿潤側に変化すると、 カオリンケーキは塑性状ではなく、図中に併記した顕微鏡写真の如く、液体状(乳液のように) となって母材間隙に分布する様子が確認できる。ベントナイト混土とカオリン混合土では、締固 め含水比の変化の伴う透水係数の変化傾向が全く異なり、前者は含水比変化に鈍感、後者は敏感 であったが、その原因は、ここに示される塑性指数と液性指数の範囲(つまり塑性指数 IP)の違い と、これに伴う細粒分塑性の変化傾向の違いに関係しているように思われ、次年度にその解釈を 試みたい。また、カオリン混合土においても締固め含水比の違いがカオリンケーキ(や乳液)の 被覆状態を変化させており、乾燥側では母材間隙の残存(混合構造)、湿潤側では均一被膜構造の 形成、の違いが生じていることを確認できる。このことは、塑性の違いや膨潤性と非膨潤性の違 いに関係なく、細粒分混合土の透水特性を統一的に解釈できることを示唆する。



図 5.3-44 カオリン含水比 WKA 及び液性指数 IL による実験結果の整理案

以上の考察に基づき、εライン(飽和度~透水係数関係)の横軸を、より透水特性メカニズムに 即した指標に変更して行くことを考えていきたい。図 5.3-45 は、ベントナイト混合土の透水性評 価に用いられることの多い有効モンモリロナイト湿潤密度の定義を示している(文献[5]より引 用・加筆)。ここでは、ベントナイト混合土をベントナイト(モンモリロナイトと他の随伴鉱物)、 骨材(母材)、水分、空隙の統合体と考える。有効モンモリロナイト湿潤密度は図中の算式に示す 通り、母材間隙(空隙+水分)とモンモリロナイト体積の足し合わせを分母とし、分子にモンモ リロナイトと水分重量の足し合わせを取る。水分を含むモンモリロナイトが、非透水部(随伴鉱 物+骨材)以外の部分(水を通し得る体積)の中でどの程度密に詰まっており、かつ、どの程度 湿潤側にあるかを表す指標となっている。一方、現在 ε ラインの横軸に用いている飽和度や前述 のベントナイト含水比(水分を全てベントナイトが吸収したと想定)は、図中の算式で表される。 有効モンモリロナイト湿潤密度、飽和度、ベントナイト含水比は、Vp、mm、mwなど共通した値 を用いて計算される値となっており、全く同じ指標ではないが、これらは相互に関連する(独立 に変化しえない) 指標となっていることが分かる。そこで、今年度までのλ ライン、ε ラインを再 考し、ε ラインの横軸を有効モンモリロナイト湿潤密度やベントナイト含水比に取り直すとどう なるかを検討した。図 5.3-46、図 5.3-47は、各々10%、30%ベントナイト混合土の結果を示す。 両ラインは既報告の通り、締固め時の飽和度や乾燥密度が高いほど下方に位置する一連の直線群 となっているが、図中に併記した③有効モンモリロナイト湿潤密度~logk 関係、④ベントナイト 含水比~logk 関係が、②の飽和度~logk 関係と全く同型の形を取っていることを確認できる。図 5.3-48 は、飽和度 Sr と有効モンモリロナイト湿潤密度 Omw、ベントナイト含水比 WBT の関係を 直接求めた結果であるが、3者は相互に関連性を有し、上記同型となることを裏付ける。

本結果は、これまでの $\lambda$ 、 $\epsilon$  ラインの評価を少し変えていく必要があることを示唆する。すなわ ち、 $\lambda$  ラインは締固めに伴う透水係数の変化を直接的に表すものであり、右下がりの直線群は締 固め時のベントナイト含水比 wbr や有効モンモリロナイト湿潤密度 pmwの影響を受けて変化する との現象論的な解釈が可能である。一方、 $\epsilon$  ラインは、横軸をベントナイト含水比 wbr や有効モ ンモリロナイト湿潤密度 pmw により整理するならば、「何故右下がりとなるのか」を説明するメカ ニズム論的な解釈を与える図になるものと理解される。

一方、図 5.3・49 はベントナイト混合土の含水比や混合量の概念を包含するが、ベントナイト (モンモリロナイト)の不飽和締固め時の体積膨潤は考慮されていない。透水試験前の通水飽和 過程で再膨潤し、結局は同じ膨潤後体積に至る、と考えることもできるが、例えば貧配合条件に おいて土粒子間隙の骨格+ゲル被膜混合構造が形成される場合には、不飽和締固め時の被膜状態 や残存母材間隙分布が締固め時含水比により異なるため、この締固め時の膨潤度合いの違いを考 慮に入れることが必要となるのではないかと考える。次年度は、これらベントナイトの塑性、膨 潤性、混合率を加味した新しい指標を検討し、ε ラインに対してより本質的なメカニズム論的解釈 を試みていきたい。図 5.3-50 には、以上の考察を踏まえた膨潤性/非膨潤性混合土の透水特性メ カニズムの相違案を取りまとめた。図中に赤字で記載したものが膨潤性ベントナイト特有の特性 であり、この有無が、非膨潤性土混合の場合との透水特性の違いをもたらしているものと考えている。

本研究ではベントナイト混合土の透水特性メカニズムに対する研究的・学術的アプローチを進 めているが、その結果がベントナイト混合土を用いた遮水層構築の実務設計や現場施工に貢献で きればと考えている。図 5.3-51 は、既出図 5.3-41 の右側に施工性の欄を追加したものである。 図 5.3-51 に示すように、例えば透水係数のジャンプが生じるような湿潤側カオリン混合土はカオ リンケーキが母材間隙を充填した構造となる。この構造では遮水性は高いものの、図中に示した ように施工時の施工機械の走破性(トラフィカビリティ)を喪失してしまう可能性[6]をはらんで いる。ベントナイトの高い塑性(粘性)と膨潤性(締固め挙動に見られた反発性)が、走破性に対 してどう働くのか。図中には購入砂+20%クニゲル 1Ec 締固め供試体のコーン指数の計測結果を 示している。コーン指数が膨潤性の低い Ca 型ベントナイトや非膨潤性のカオリン混合の場合、 どう変化するのか。これら施工性への影響についても次年度にデータの蓄積を行う予定である。 また、品質(初期及び長期遮水性能)の欄に記載した通り、本研究でベントナイト混合土の長期 安定性への影響要因を抽出することができたならば、最終的にはその結果を示すことで、ベント ナイト混合土を用いた遮水層築造上の実務的な留意点を幾つか指摘することができるのではない かと考えている。

5-48



<u>飽和度Sr=V<sub>w</sub>/V<sub>p</sub></u>=m<sub>w</sub>/Vp <u>ベントナイト含水比w<sub>BT</sub>=m<sub>w</sub>/m<sub>BT</sub></u>

図 5.3-45 飽和度 Sr・有効モンモリロナイト湿潤密度 pmw・ベントナイト含水比 wbr の定義



図 5.3-46 締固め時飽和度以外の指標による透水特性の整理(ベントナイト 10%混合土)



図 5.3-47 締固め時飽和度以外の指標による透水特性の整理(ベントナイト 30%混合土)



図 5.3-48 飽和度 Sr・有効モンモリロナイト湿潤密度 pmw・ベントナイト含水比 wBTの関係



	※赤字は膨潤性細粒土	(ペントナ	イト)	特有の現象
--	------------	-------	-----	-------

工程	影響要因	膨潤性細粒土を混合	非膨潤性細粒土を混合	検討課題	
A.母材・細粒土混合時	母材と細粒土(粉体)の 混合状態	大きな差異な			
	水の供給量と散布状態	混合方法が同じな	散布後の団粒化より差異が発生		
B.加水及び材料混合時	団粒化の程度と団粒径	<mark>団粒化顕著×団粒径大</mark> (膨潤性/ 加水量に依存して変化)	団粒化少(細粒土の塑性/加水量 に依存して変化)	細粒土の塑性/膨潤性/加水量と団粒 化(径)の関係	
	体積膨張とゲル化	<mark>膨潤</mark> 有り(層間水の取り込み)	無し(非ゲル状)	DTA値の比較	
	被膜原料の供給量	<mark>多い</mark> (膨潤性/加水量依存)	少ない(塑性/加水量依存)	加水量/膨潤性と膨潤量の関係	
	被膜原料の力学的性質	延性・相互連結性大(ゲル:膨潤 性/加水量依存)	延性・相互連結性小(非ゲル:塑 性/加水量依存)	被膜原料の力学特性と塑性/膨張性/ 加水量の関係	
C.締固め時(圧縮と繰 返しせん断)	被膜状態の出来易さ	<mark>被膜形成が容易</mark> (延性ゲルが相互 連結:膨潤性/加水量依存)	被膜形成少(非ゲル状で延性/連 結性小)	締固め中の被膜形成状況の違い	
D.飽和通水時	膜構造の成長と母材残存 間隙のさらなる減少	有り( <mark>再膨潤</mark> :膨潤性/締固め時 被膜状態に依存)	無し	飽和前後の残存間隙構造比較	
	被膜部自体の遮水性	極低透水性(ゲル状)	膨潤性土よりも遮水性低い(非ゲ ル)	飽和100%細粒土の透水特性比較	
E.透水試験時	母材残存間隙分布	微細均一(膨潤性/加水量依存)	凝集不均一(塑性/加水量依存)		
	残存間隙部の通水抵抗	<mark>影響大</mark> (電気化学的抵抗あり)	影響小(電気化学的抵抗無し)	ゼータ電位の比較	

\*同一混合比(母材:細粒土の乾燥重量比),同一乾燥密度(混合土),同一加水量(混合土含水比)で比較

図 5.3-49 膨潤性/非膨潤性混合土の透水特性メカニズムの比較

	品質(初期および長期遮水性能)				施工性	
影響因子	・響因子         母材(骨 格)間隙量         被膜原材料 の総量         原材料の物         被膜部(100%)           ・		被膜部(100%粘 土)の透水性	材料混合性	走破性(強 度)	
<ol> <li>母材粒度</li> </ol>	0	I	I	I	0	0
<ol> <li>締固め密度(間隙比)</li> </ol>	0	1	Ι	-	-	0
③ 細粒分の混合量	0	0	Ι	-	0	0
<ol> <li>4 細粒分の塑性/膨潤性</li> </ol>	0	0	0	0	0	0
<ol> <li>5 締固め含水比(細粒 土部の含水比)</li> </ol>	0	0	0	△(飽和後は同)	0	0
摘要	締固め特性 への影響	両者で被膜構造や残存母 材間隙量が決まる		通水量=残存間隙 部(大)+被膜部 (小)。膜状被膜 ではこのkが支配的	団粒塊の発 生/混合時の 不均一性	混合土の強 度(コーン 指数)

図 5.3-50 ベントナイト混合土の諸要因が品質(遮水性能)と施工性に及ぼす影響



図 5.3-51 ベントナイト混合土転圧時の施工性(走破性)に関する検討

(2) 透水係数評価式(重回帰分析)の追加検討と今後の見直し方針

締固め時乾燥密度と飽和度の関数として透水係数を定式化することを目的として、乾燥密度と 飽和度の一次線形和を想定した重回帰分析を実施してきた。一方、今回追加されたカオリン 30% 混合土の $\lambda$ 、 $\epsilon$ 実験では、高飽和度の湿潤領域において透水係数のジャンプが発生し、一次線形和 の前提が成立しないことが確認された。一方、本研究のターゲットであるベントナイト混合土で あれば(貧配合 5%のケースは現在データ取得中であるが)、この前提が成立することが分かって いる。そこで、以下、上記の一次線形和の不成立を念頭に置いた上で、カオリン 30%混合の追加 ケース及び 5%ベントナイト混合土の 12 点データを用いて重回帰分析を実施した結果を報告す る。

図 5.3-52~図 5.3-54 は、透水係数ジャンプが生じた購入砂+30%カオリン、粒度調整材+30% カオリンの λ、ε 実験データ、及び 5%ベントナイト混合土の現状データ(18 本のうち 12 本)を 用いて一次線形和で重回帰分析を実施し、係数λ、ε及び定数項γと材料特性の関係を示したもの である。重回帰係数 R は、これまでの材料では R=0.93~0.99 の範囲にあったが、今回のカオリ ン 30% 混合土では 0.81(粒調材+30%)、0.88(購入材+30%)と、やはり回帰精度が低下する 結果となった。また、粒調材+カオリン 30%のケースの定数項γは、本研究では初めて非有意の 判定となった。一方、5%ベントナイト混合土では透水係数ジャンプの傾向がやや見られるものの、 重回帰係数は 0.946 かつ有意判定の結果を得た。5%供試体については令和 6 年度実施の低乾燥 密度領域データの追加を待つ必要がある(特に係数 ε への影響)ものの、ベントナイト混合量の 増加に伴う係数 λ の増加、定数項 γ のプラス側への符合反転などは想定通りとなっており、ベン トナイト混合土かつ透水係数ジャンプが生じない遮水領域に限定し、実務設計式として提案して 行く方向が考えられる。 なお、 先の図 5.3-46、 図 5.3-47 では有効モンモリロナイト湿潤密度 ρ<sub>mw</sub> と透水係数の関係を示したが、両者の関係はユニークではなく、ベントナイト混合土全体の乾燥 密度(すなわち締固め効果による母材間隙の変化)をパラメータとした直線群となっている。文 献[5]でも、「有効モンモリロナイト湿潤密度 ρmw による整理を行った結果にはなお透水係数の幅 があるが」とのコメントが見られるが、既往データでは、いずれも 4.5Ec の高締固めエネルギー のデータを前提としているため、一見本指標で整理するとばらつきの幅が小さいように見える。 しかし、実務の場では大型転圧機械が入れない狭隘部の施工なども想定され、締固めエネルギー や締固め密度の影響を加味してくことが必要と考えられる。今後、実務設計式を、締固め乾燥密 度と有効モンモリロナイト湿潤密度 ρmwの関数などとして再提案できるならば、より精度の高い 透水係数推定式を得ることが可能となるのではないかと思われる。



図 5.3-52 重回帰分析における係数 λ(乾燥密度項)と材料特性の関係



図 5.3-53 重回帰分析における係数 ε(飽和度項)と材料特性の関係



図 5.3-54 重回帰分析における定数項γと材料特性の関係

【追記:細粒分の粒度曲線に及ぼす粒度測定法の違いの影響】

従来の沈降分析による粒度計測が、微細な粘土やベントナイトのような膨潤性細粒土にどの程 度の妥当性を有するのか。この点を検討する目的で、JIS/JGSの沈降分析とレーザー回折法によ る粒度分布測定結果の比較を試みた。図 5.3-55に用いた実験装置と供試土を、図 5.3-56に沈降 分析との比較結果を示す。実験は島津製のShimadzu SALD-2300を、供試土として、本研究で 用いた珪砂粉、藤森粘土、木節粘土、カオリン、Ca型ベントナイト、クニゲルV1の7種類を用 いた。レーザー回折式により計測された粒度は、沈降分析(JGS)に比べて相対的には粗粒側の評 価となっており、微粒側、粘土側ほどその差異が大きい。一方、非塑性粘土やシルト側では両者 の差異は小さくなる結果となった。



図 5.3-55 レーザ回折式粒子径測定装置と用いた供試土



図 5.3-56 レーザ回折式粒子径測定結果と沈降分析結果の比較

(3) ベントナイト混合土の被膜構造形成メカニズムの検討計画(令和6年度)

今年度実施しているベントナイト 5%混合土の締固め~長期透水試験がまだ終了していないこ とから、これら締固め~透水試験後の供試体観察については今年度はまだ実施しておらず、来年 度の試験結果も併せて実施する計画である。

含水比(飽和度)を変えた締固め供試体表面の顕微鏡観察を実施する実験 E については、今回 実施した結果から、図 5.3-57 に示すように飽和状態と不飽和状態では顕微鏡画像の見え方が異な ることが分かった。締固め~透水試験後の供試体に対する顕微鏡観察(実験 C)では、透水試験 前に供試体を飽和させていることからも、実験 E でも供試体観察面は不飽和状態ではなく飽和さ せる必要があると言える。飽和させて撮影した顕微鏡画像は、ベントナイト混合土特有の間隙構 造が観察できており、実験 C の画像とも一致している。来年度は、実験 E についても飽和させた 供試体での顕微鏡撮影を実施するとともに、この画像を用いた画像解析を行うことで、間隙構造 の違いの定量的な評価を試みる予定である(同様の試みは、カオリン混合土など非膨潤性土混合 供試体に対しても行っていく)。



図 5.3-57 顕微鏡画像における飽和・不飽和供試体の比較

## (4) 加水~混合~締固め過程の DEM 再現解析

今年度実施した実験 F の締固め再現実験において、初期含水比の違いによって土粒子間隙 構造形成のプロセスに差があることを確認している。そこで、この土粒子間隙構造形成プロ セスを可視化、定量化するために、ベントナイト混合土の突固め試験を DEM 解析によるシ ミュレーションで再現することを試みた。なお、実際の締固め試験を DEM 解析で忠実に再 現することはかなり困難であるため、ここではベントナイト混合土の材料特性や不飽和特性
を考慮することで、締固め試験を定性的に再現・評価することとした。

実施した DEM 解析では、ベントナイト粒子と間隙水はモデル化せず、母材土粒子のみを 直径 10mm の球でモデル化した。使用したプログラムは「LS-DYNA」[7]である.ベントナ イト混合土の初期含水比は、13.0%、18.0%、23.0%、28.0%の4ケースとし、この初期含水 比の違いによる土粒子塊(ダマ)の大きさの差は図 5.3-58に示すような粒子塊を設定するこ とで表現した。なお、各含水比の粒子数(ダマの径)は前年度実施した中性子イメージング 結果を参照して設定している。また、微細で膨潤性の高いベントナイト粒子は間隙水をすべ て吸水して母材をコーティングしていると仮定し、図 5.3-59 (a)の様に計算されるベントナイ ト厚をダマ粒子間のDEM 要素の破断距離として考慮した。不飽和土の強度増加については、 図 5.3-59 (b)に示す不飽和土の構成モデルである「Se-Hardening モデル」[8]の強度増加関数 ξ を適用し、各飽和度に対して全体の剛性がこの関数 ξ の比率に従うようダマ粒子間のばね 定数を設定した。不飽和特性であるサクションについては、図 5.3-59 (c)に示す水分特性曲線 と飽和度からサクション応力を計算し、全応力 180kPa からサクション応力を差し引いた有 効応力を上端面に静的載荷することで考慮した。



図 5.3-58 DEM 解析に用いた各含水比における粒子塊



解析では、図 5.3-58 に示した粒子塊を内径 100mm モールド内に自由落下させ、その後 乾燥密度 1.20gf/cm<sup>3</sup>になるように予備圧縮し、これを初期状態とした。締固め時は供試体高 さから飽和度を算出し、粒子間ばね定数とサクション応力をこの飽和度に対応する値に逐次 入れ替え上端面を静的に載荷、これを載荷毎に繰り返すことで試験を再現している。

図 5.3-60 は DEM によるシミュレーション結果であり、初期状態と締固め後の変形図であ る。なお、図中の粒子色は粒子塊を表している。また、今回実施した解析における締固め回 数は計 13 回であり、締固め後の変形図を見ると含水比 23%の高さが最も低く密に締め固ま っていることがわかる。図 5.3-61 は、締固め回数による乾燥密度及び締固め曲線の変化を示 したグラフである。乾燥密度及び締固め曲線の変化は、図 5.3-35 に示した実際の締固め再現 試験結果とも同じ傾向を示していることがわかる。



図 5.3-61 DEM 解析による締固め回数と乾燥密度・締固め曲線関係の結果

図 5.3-62 は締固め後の変形状態と粒子のダメージ量(粒子塊の結合が受けた破断量)を示 した図である。含水比が高いほどダメージ量が大きいため、粒子結合が破断してダマ形状が 崩れていることになる。図 5.3-63 は、供試体内部の代表的な粒子塊の変形を抜粋した図であ るが、含水比が高いほど締固めによりダマ形状がつぶれていることがわかり、実際の締固め 試験結果とも傾向が酷似している。図 5.3-64 は供試体上端面から見た間隙率のコンター図、 図 5.3-65 はその間隙比のヒストグラムである。ヒストグラムを見ると、締固めに伴い間隙比 は小さくなるとともに、ばらつきも減少し間隙が均一化していることがわかる。また、この ヒストグラムから求めた平均値及び標準偏差の関係をみると、間隙比の平均値は初期含水比 による影響は見られないが、標準偏差は初期含水比よって異なっており、含水比が高いほど 間隙比のばらつきは少なく、実際の締固め試験結果とも傾向が一致している。

以上の様に、DEM 解析によりベントナイト混合土の締固め過程の傾向を定性的に表現す ることができた。このことから、ベントナイトの材料特性や不飽和特性は、間隙構造の形成 過程に影響を及ぼす要因の1つであると考えられる。



【粒子投入時(自由落下)】







5.0

図 5.3-65 各解析ケースにおける間隙比のヒストグラムと平均値・標準偏差の関係

5.4 まとめ

令和5年度の研究成果と令和6年度の実施予定内容を以下にとりまとめる。

- (1) 令和5年度に得られた研究成果
- ベントナイト混合土独特の高い遮水性能の発現メカニズムを検証するために、非塑性材料、 非膨潤性材料、低膨潤性材料など広範囲な細粒土を混合した土の透水特性の把握を進めた。 このため今年度、低塑性粘土/低膨潤性 Ca 型ベントナイトを混合した供試土の実験を追加し、 添加する細粒分特性の影響を吟味した。
- ② 混合土の透水特性が添加混合する細粒分の塑性や膨潤性、混合率の影響を受けて変化する様 を実験的に確認した。更に、細粒分特性(塑性/膨潤性)と混合量を評価指標として透水特性 の整理を行う方針を検討したうえで、令和6年度の残ケースを定めた。
- ③ λ/ε 実験では高塑性&富配合土(カオリン 30%混合土)での高飽和度領域における透水係数ジャンプ(透水係数が急減する遷移領域)の現象を確認した。これを基に、λ/ε 実験でも令和
   6 年度の追加実験ケース及び新たな評価方法(細粒土含水比や有効モンモリロナイト湿潤密度などによる整理)を検討した。
- ④ ①~③の研究結果に基づき、令和6年度実施の実験ケース及び透水特性の評価方法(統一的 評価)を検討した。ベントナイト混合土の実務への提言に関しても検討に着手した。
- ⑤ ベントナイト混合土が安定した長期的遮水性能を発揮するためのゲル膜形成条件の検討に着 手し、実体顕微鏡を用いた実験手法を摸索、実施した(来年度にその評価を行う)。
- ⑥ ベントナイト混合土の加水混合~締固め過程でのダマ扁平化/相互連結現象を実験(室内締固 め試験時の混合土の間隙構造変化観察)及び数値実験(DEM 解析)により確認した。
- (2) 令和6年度(最終年度)の実施予定
- 実験A、Bについては、令和5年度に追加した細粒分混合土に対する締固め~透水試験の残 ケース(1Ec 締固め~透水試験及び \/ ε 実験)を実施する。
- ② 令和5年度に提案した土粒子骨格構造(非塑性材料)~混合構造(非膨潤性/低混合率)~ 均一膜構造(高塑性/高混合率/膨潤性)に至る混合土の土粒子間隙構造変化を直接確認する ために、種々の混合材料/混合条件/遮水性領域(透水係数レンジ)に対応する締固め供試体 の顕微鏡観察(湿潤面)を実施し、土粒子間隙構造の変化を追跡する。
- ③ ①、②により非塑性土~低・中・高塑性土~膨潤性土混合土の統一的透水特性メカニズムの 説明を試みる(細粒分混合量の影響も加味)。
- ④ ③の提案メカニズムに基づき、ベントナイト混合土の設計~施工~長期安定性確保に向けての実務提言(実務的な透水係数評価式の提案、材料混合均一性の重要性指摘、現場転圧時の施工性や施工管理上の留意点に関する提言など)を試みる。
- 5年間の研究成果の総括
   ④を含む形で過去5年間の研究成果を総括する。

第5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] Mitchell J. K. and Soga K. Fundamentals of Soil Behaviour, Third Edition, CHAPTER9, Conduction Phenomena, John Wiley & Sons, Inc., pp.251-262, 2005.
- [3] 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.
- [4] 齊藤康明、 大河原正文:X線回折法および近赤外分光法による単一イオン型モンモリロナイトの層間水の分析、 粘土化学、 第58号、 第2巻、 pp.43-59.2019.
- [5] 工藤淳、 庭瀬一仁、 千々松正和、 木村誠、 矢込吉則:低レベル放射性廃棄物処理施設における難透水性覆土の透水性評価の一考察、 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集、 Ⅲ-152、 pp.303-304、 2014.
- [6] 石黒健、中島秀樹、武田智治、川村亘輝、和田豊、貫井明、龍岡文夫:鵜川ダムコア 材の飽和度管理を重視した現場品質管理基準の策定と効率的現場管理の試み、土の締固め合 理化シンポジウム、地盤工学会関東支部、1-2、2021.
- [7] Karajan N. et. al : Interaction Possibilities of Bonded and Loose Particles in LS-DYNA, 2013.
- [8] 金澤伸一、豊嶋拓馬、河合克之、橘伸也、飯塚敦: 土/水/空気連成有限要素法を用いた締め固めた土の力学挙動の解析、土木学会論文集 A2(応用力学)、Vol.68、No.2(応用力学論文集 Vol.15)、I\_291-I\_298、2012.

# 第6章 まとめ

### 第6章 まとめ

#### 6.1 本事業のまとめ

6.1.1 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」の開発を行っている。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、改善を目指して接着剤の追加調査・試験を行い、 本測定法の接着剤としてコニシ製エポキシ樹脂接着剤を選定した。これと並行して、感度試 験と応力解析の方法の検討、ひずみ計貼付装置や掘削ツールス等の製作や改良を進めた上で、 改良した測定方法の検証のための室内及び現場での実証試験を実施した。

室内検証試験では、2 種類の岩石ブロックを用いて、新たな接着剤の適用性や応力解析結 果の妥当性を確認した。現場検証試験は、青森県六ヶ所村の現場フィールドにて前年度より も深い深度で実施し、初期地圧測定に係る一連の作業性を確認するとともに、測定したひず みと算出した応力がほぼ妥当であることが確認できた。また、この測定技術の信頼性を向上 させるための技術課題も明らかにした。

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(水圧破砕法試験)及び 現場検証試験(円錐孔壁ひずみ法)のシミュレーションを実施した。

原位置試験(水圧破砕法試験)のシミュレーションでは、岩盤の破壊後挙動の再現性向上 が期待できる DEM の接触モデルを用いてシミュレーションを実施し、三軸圧縮試験結果の 応力 - ひずみ関係とフィッティングさせたパラメータを用いて水圧破砕法試験シミュレーシ ョンを行い、試験値を超過しない破砕圧で、微視クラックが最大主応力方向に卓越する結果 を得た。以上より、粒子モデル等の見直しにより、水圧破砕法シミュレーションの再現性を 向上することができ、同手法の岩盤状態評価手法としての適用性を確認できた。

現場検証試験(円錐孔壁ひずみ法)のシミュレーションでは、三軸圧縮試験シミュレーシ ョンで破壊前の非線形性の再現が十分と言えず、現場検証試験シミュレーションで微視クラ ックの発生傾向やひずみ挙動が実データと整合しない部分が認められたため、今後、実測値 の評価も含めて、上記課題を解決し、シミュレーションの再現性向上を計る必要がある。

(2) 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、現地で実施している地震計測システムで取得した 地震動データを活用して、入力地震動の設定及び地震応答解析による地震時挙動の再現性に 関する検討を実施した。

入力地震動設定では、逆解析による地盤物性値の検討を行った結果、現地の地表付近の軟

らかい地盤剛性を反映した物性値設定により、入力地震動の精度が向上することがわかった。

設定した入力地震動を用いた2次元地震応答解析を実施した結果、水平動の応答について は、試験空洞及び試験施設の加速度レベルの再現性が向上した。しかし、鉛直動の応答につ いては、解析結果と観測結果に差異が残ったままとなり、鉛直動の入力地震動作成の課題が 残った。

また、観測地震動データに適合した最適地盤モデルを合理的に取得することを目的とした 「遺伝的アルゴリズムを用いた地盤物性逆解析手法」について、観測地震動データを基に作 成した模擬観測波を用いて検討し、本手法の妥当性を確認した。

今年度は、観測地震動1波を用いて2次元地震応答解析による試験空洞及び試験施設の地 震時挙動の再現性を確認したが、今後は異なる振動特性を含む観測地震動を用いた場合の空 洞及び施設応答の再現性の確認を実施予定である。

地震動観測については、現地の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。

6.1.2 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) 技術オプションの検討

過年度検討、国内外の事例に基づき規制基準で示される設計プロセスの考え方を再整理し、 本検討における設計プロセスの検討フローを作成した。そこでは、設計プロセスを前半と後 半に分割し、概念検討において感度解析や線量評価により2、3のオプションを選定し、選定 されたオプションに対して詳細検討を実施する構造とした。また、概念検討において最新技 術の調査結果に応じて都度見直しを図る、前半・後半の線量評価において明らかな差異があ る場合は見直すなど、場合によっては前段階へ戻る方針とし、条件変更にも柔軟に対応でき るフローとしている。その上で、前半にあたる概念検討を対象として、人工バリアの長期安 全性に着目した比較評価を実施した。

比較評価では ALARA を考慮して、性能面における合理的なオプションについて検討した。 比較評価では ALARA を考慮して、性能面における合理的なオプションについて検討した。 簡易的ながらも原子力規制委員会の考え方及び原子力学会標準を参考に複数の状態を設定し、 オプションが取り得る被ばく線量値の幅及び状態ごとの線量の分布を求めることで、オプシ ョンの有する不確実性や頑健性を評価する際の考え方、具体的な方法、事例検討での評価結 果を提示した。評価するポイントにより選定されるオプションが異なるため、オプション選 定時は複数の視点から評価し、総合的な観点から良好なオプションを判断することが重要で あることを示した。

技術オプションの構成及び評価対象としたシナリオに対応する核種移行モデルの作成を行った。また、簡易な核種移行率の低減についてもモデル化を実施し、試解析を行い有用性が 示唆された。解析モデルについては、核種の移行面積と人工バリア内での流速分布に基づく モデルの精緻化が課題として挙げられた。また、簡易モデルの拡張も課題となる。 (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

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、今年度は、初年 度に策定し過年度に一部見直した5ヵ年計画に従い、実験A~実験E(このうち、実験Dは 前年度までに完了)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一透水試験である。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は実体顕微鏡による締固め土の構造観察、実験E は締固め過程の間隙構造形成プロセスの観察となる。

実験 A から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、それぞれ実験データとして取得された。実験 C から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。更に、実験 E からは締固め時の初期含水比の違いに起因する土粒子骨格構造の違いが観 察された。

これらの実験結果に基づき、ベントナイト混合土を含めて土質系材料の遮水性発現メカニ ズムの説明手順について検討した。非塑性材料では土粒子同士が骨格構造を形成し、非塑性 の細粒分が母材間隙を充填する構造を取る。透水試験時の水はその残存間隙を浸透し、残存 間隙は材料の粒度や締固め密度(間隙比)により決まる。透水係数が 10<sup>9</sup>m/s 以上の領域で は、細粒分ケーキやベントナイトゲルが均一な被膜構造を形成するに至らず、土粒子骨格の 残存間隙と被膜が混合した構造を有しており、湿潤側の加水~混合~締固めにより均一な細 粒分被膜が面的に形成された瞬間に、一気に透水係数のジャンプが発生するものと想定され た。被膜形成は、被膜の原材料の総量と締固め時の圧延性により決定され、細粒分の塑性や 膨潤性と混合量がこれを左右するのではないかと考えられた。このように、土質系材料を砂 質土をベースとし、これに混合混合される細粒分の塑性や膨潤性の程度に応じて、土粒子骨 格構造~骨格/被膜混合構造~均一被膜構造に遷移すること、それが透水メカニズムを規定す ることを示した。

#### 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4年目となる令和5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2.1参照)に係る試験データ

- 岩石力学試験
- ・CT 撮影
- ・測定装置の改良・製作

#### 一軸繰返し試験結果

各供試体にクロスゲージを軸対象に2枚貼付し、一軸方向に載荷・除荷を繰返した。そして、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の 5.4 節 c)に従ってヤング率やポアソン比を算出した。

(1) 大谷石

報告書の 2.1.5 項の(1)の 1)の大谷石のブロック載荷試験を実施した後に、同ブロックから採取した供試体を用いて、以下の試験を実施した。

		1.1					
供試体番号		供試体高さ	供試体直径	重量	湿潤密度	ヤング率	ポアソン比
		(mm)	(mm)	(g)	ho (Mg/m <sup>3</sup> )	E(MN/m <sup>2</sup> )	ν
1	OY4-U3	99.57	49.48	360.09	1.881	2,700	0.21

表1 一軸繰返し試験結果一覧(大谷石)



図1 載荷パターン (大谷石)



図2 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(大谷石供試体 OY4-U3)

(2) 軽石凝灰岩

報告書の 2.1.5 項の(1)の 2)の軽石凝灰岩のブロック載荷試験を実施した後に、同ブロック (RO-5) から採取した供試体を用いて、以下の試験を実施した。

供試体番号		供試体高さ (mm)	供試体直径 (mm)	重量 (g)	湿潤密度 ρ(Mg/m³)	ヤング率 E(MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 <i>ν</i>
1	R05-U1	99.97	49.45	314.12	1.636	627	0.25
2	R05-U2	100.51	49.42	312.20	1.619	680	0.33
3	R05-U3	101.69	49.44	315.94	1.618	578	0.28

表2 一軸繰返し試験結果一覧(岩石ブロック RO-5 から採取した軽石凝灰岩)



図3 載荷パターン(岩石ブロック RO-5 から採取した軽石凝灰岩)



図4 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(軽石凝灰岩供試体 RO5-U1)



図5 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(軽石凝灰岩供試体 RO5-U2)



図6 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(軽石凝灰岩供試体 RO5-U3)

円錐孔壁ひずみ法の今後の検討のために、昨年度の本業務の報告書の2.1.3 項(浅深度現 場検証試験)に記載の試験孔 TI1-500(2)孔から昨年度採取したコア試料の一部を用いて供 試体を作製し、以下の試験を実施した。

供試体番号		採取深度(m)		供試体高さ (mm)	供試体直径 (mm)	重量 (g)	湿潤密度 ρ(Mg/m <sup>3</sup> )	ヤング率 E(MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 <i>ν</i>
1	T11(2)–U1	5.00 ~	5.12	100.72	49.63	361.65	1.856	4,900	0.16
2	T11(2)–U2	5.12 ~	5.24	100.70	49.62	359.81	1.848	5,300	0.14
3	T11(2)–U3	5.25 ~	5.37	99.92	49.62	355.03	1.837	4,500	0.12

表3 一軸繰返し試験結果一覧(TI1-500(2)孔から採取した軽石凝灰岩)



図7 載荷パターン (TI1-500(2) 孔から採取した軽石凝灰岩)



図8 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(軽石凝灰岩供試体 T11(2)-U1)



図9 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(軽石凝灰岩供試体 T11(2)-U2)



図 10 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(軽石凝灰岩供試 T11(2)-U3)

(3) 小松石

本手法の今後の検討のために、昨年度の本業務の報告書の 2.1.2 項の(2)の 5)の c に記載した本小松のブロック載荷試験を実施した後に、同ブロックから採取した供試体を用いて、以下の試験を実施した。

供試体番号		供試体高さ (mm)	供試体直径 (mm)	重量 (g)	湿潤密度 ρ(Mg/m³)	ヤング率 E(MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 <i>ν</i>
1	HKA-01	101.04	49.71	512.89	2.615	22,700	0.14
2	HKA-02	101.18	49.71	513.45	2.615	22,500	0.14
3	HKA-P1	101.09	49.68	514.14	2.624	30,200	0.16

表4 一軸繰返し試験結果一覧(本小松)

※末尾が O1 と O2 の 2 供試体は岩石ブロックの流理構造と直交する方向に掘削して端面整 形したものであり、P1 の供試体は流理構造と平行する方向に掘削・整形したものである。



図 11 載荷パターン (本小松)



図 12 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(本小松供試体 HKA-O1)



図 13 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(本小松供試体 HKA-O2)



図 14 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(本小松供試体 HKA-P1)

## 圧裂引張り試験結果一覧表

令和5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
 試験者

=+*业 ヱ ロ	採取深度	試料長	試料径	湿潤密度	含水比	破壊荷重	引張り強さ	
<b></b>	[m]	<i>L</i> [mm]	[mm]	$\rho_{\rm t}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	W [%]	[kN]	$[MN/m^2]$	
1 OY4-C1		48.92	49.51	1.892		5.45	1.43	
2 OY4-C2		49.18	49.49	1.881		3.82	0.999	
<sup>3</sup> OY4-C3		48.87	49.48	1.872		2.74	0.721	



備考:大谷石の岩石ブロックより採取したコア試料を用いた

## 圧裂引張り試験結果一覧表

令和5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11月1日

	採取深度	試料長	試料径	湿潤密度	含水比	破壊荷重	引張り強さ	
試料畨号		L	D	$ ho_{ m t}$	w	P	$\sigma_{\rm t}$	
	[m]	[mm]	[mm]	$[Mg/m^3]$	[%]	[kN]	$[MN/m^2]$	
1 RO5-C1		48.61	49.42	1.612		0.684	0.181	
2 RO5-C2		47.72	49.46	1.631		0.699	0.189	
3 RO5-C3		48.73	49.41	1.609		0.619	0.164	



備考:軽石凝灰岩の岩石ブロック(RO-5)より採取したコア試料を用いた

## 圧裂引張り試験結果一覧表

令和5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
 試験者

		2012690610		N179120/121817C1	又们守。空间			
= 5.4		採取深度	試料長	試料径	湿潤密度	含水比	破壊荷重	引張り強さ
試料	科番号		L	D	$ ho_{t}$	w	P	$\sigma_{\rm t}$
		[m]	[mm]	[mm]	$[Mg/m^3]$	[%]	[kN]	$[MN/m^2]$
1 RC	01-C1		47.38	49.41	1.488		0.831	0.226
2 RC	D1-C2		49.10	49.41	1.463		1.04	0.273
<sup>3</sup> RC	D1-C3		49.19	49.30	1.460		0.716	0.188



備考:軽石凝灰岩の岩石ブロック(RO-1)より採取したコア試料を用いた



試験前



試験後

図1 一軸繰返し試験 供試体 0Y4-U3



試験前



試験後

図2 一軸繰返し試験 供試体 R05-U1



試験前



試験後

図3 一軸繰返し試験 供試体 R05-U2

添付資料1-20


試験前



試験後

図4 一軸繰返し試験 供試体 R05-U3



図5 一軸繰返し試験 供試体 TI1(2)-U1 (試験前)



図6 一軸繰返し試験 供試体 TI1(2)-U2 (試験前)



図7 一軸繰返し試験 供試体 TI1(2)-U3 (試験前)



図8 一軸繰返し試験 供試体 HKA-01 (試験前)



図9 一軸繰返し試験 供試体 HKA-02 (試験前)



図10 一軸繰返し試験 供試体 HKA-03 (試験前)



試験前



試験後

図 11 圧裂引張り試験 供試体 0Y4-C1



試験前



試験後

図 12 圧裂引張り試験 供試体 0Y4-C2



試験前



試験後

図13 圧裂引張り試験 OY4-C3



試験前



試験後

図 14 圧裂引張り試験 供試体 R05-C1



試験前



試験後

図 15 圧裂引張り試験 供試体 R05-C2



試験前



試験後

図 16 圧裂引張り試験 供試体 R05-C3



試験前



試験後

図 17 圧裂引張り試験 供試体 R01-C1



試験前



試験後

図 18 圧裂引張り試験 供試体 R01-C2



試験前



試験後

図 19 圧裂引張り試験 供試体 R01-C3



湿潤密度試験状況 (ノギス法)



一軸繰返し試験 状況



圧裂引張り試験 状況

図 20 試験状況

### CT 撮影結果

対象試料:

報告書の 2.1.2 項の(5)接着剤の硬化特性の確認試験で用いた B 試料を試験後に半割した 試料(図1参照)。すなわち、軽石凝灰岩の岩石ブロックに円錐孔壁を掘削し、その周りを コア径 92mm でオーバーコアリングした後、その試験孔に接着剤コニシ e205 を注入し、ス トレインセルを円錐孔壁に接着し、接着開始から 24 時間後と 40 時間後に最大載荷圧 0.4MPa で周載荷感度試験を実施した後、半割にし、高さ方向も 100mm となるように切り 出した試料である。

・試験方法

図 1 の右側の試料に対して、CT 撮影装置により掘削軸に平行な面と垂直な面を撮影した。



#### 図1 CT 撮影を実施した半割の岩石試料



- ・円錐孔壁部の上端
   付近の孔壁にクラ
   ックが見られる。
   このクラックは半
   割した際に生じた
   と思われる。
- ・接着層に、所々わず かにエア(黒色の 密度が低い部分) が見られる。

図2 掘削軸に平行な面で撮影した CT 画像(半割面近く)



- ・半割面から少し離れると孔壁付近に クラックが見られない。
- ・接着層下部に大き なエアが1つ見ら れる。

図3 掘削軸に平行な面で撮影した CT 画像(半割面から少し離れた面)



・ 孔壁の上端付近に
 クラックが見られ
 るが、このクラッ
 クも上面の切断時
 に生じたと思われ
 る。

図4 掘削軸に平行な面で撮影した CT 画像(半割面から離れた面)



・軽石凝灰岩に、比較 的密度の大きい (比較的白い部 分)粒子や軽石(比 較的黒い部分)が 含有していること が確認できる。

図5 掘削軸に平行な面で撮影した CT 画像(岩石部分のみの面)



- ・岩石への接着剤の
   浸透は見られない。
- ・岩石とストレイン セルは良く密着し ている。
- ・ストレインセルの ひずみゲージやリ ード線の金属部で は、ハレーション が生じている。

図6 掘削軸に垂直な3断面(コア写真の①~③の面)で撮影した CT 画像



図7図6の①より上部の断面で撮影した CT 画像

・ 孔壁に存在する特
 に密度の低い軽石
 部分には、接着剤
 がわずかに浸透し
 ている可能性があ
 る(図中矢印の箇
 所)。



・ストレインセルの
 下端と接着層の境
 界に、エアが最も
 多く見られた。

図8 ストレインセルの下端と接着層の境界で撮影した CT 画像

#### ひずみ測定器の今年度実施した改良内容

1. 軽量化

データロガーのヘッドとストレインセルのソケットの材質をステンレスからアルミ合金 に変更して軽量化を図った(図1参照)。その結果、ひずみ測定器(データロガー及びスト レインセル)の質量が 4.2kg から 3.1kg に軽量化した。

しかし、現場検証試験を通して、ステンレス製のほうがアルミ合金製よりも耐久性に優れ ているため、繰り返し使用するヘッド部にはステンレス製のほうが適していることが判明 したため、ヘッド部はステンレス製に戻した。



図1 ひずみ測定器の改良内容

2. 最大測定時間の変更

最大測定時間は24時間で測定がストップするシステムになっていたため、これを変更し、 24時間以上連続で測定できるようにした。

3. ストレインセルの事前確認用ケーブルの作製

ストレインセルの現場試験前の機能確認方法として、円錐孔底ひずみ法ではストレイン セルの先端の各ひずみゲージ付近を手で押して、それによって生じるひずみの値をモニタ リングすることでストレインセルに異常がないことを確認している。

しかし、そのようなモニタリングができない状態であったため、ひずみ測定器のストレイ ンセルと地上測定型のデータロガー(例:株式会社東京測器研究所社製の TDS-540)の間 に接続するケーブルを製作し、図 2 の並びで接続することで、上記の確認方法によりモニ タリングできるようにした。



図2 ストレインセルの事前確認用ケーブルの接続概要図

添付資料-2

現場検証試験(第2章2.1参照)に係る試験データ

・採取試料を用いた室内岩石力学試験

## 一軸繰返し試験結果

各供試体にクロスゲージを軸対称に2枚貼付し、一軸方向に載荷・除荷を繰返した。そして、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の 5.4 節 c)に従ってヤング率やポアソン比を算出した。

供試体番号		採取深度(	m)	供試体高さ (mm)	供試体直径 (mm)	重量 (g)	湿潤密度 ρ(Mg/m³)	ヤング率 E(MN/m <sup>2</sup> )	ポアソン比 <i>ν</i>
1	TI(2)-3-3	30.03 ~	30.16	95.05	49.31	301.18	1.659	979	0.19
2	TI(2)-4-2	34.15 ~	34.28	100.05	49.19	318.57	1.676	985	0.21

表1 一軸繰返し試験結果一覧



40 経過時間(min)

60

図1 各供試体の載荷パターン

20

0



図2 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(供試体 TI(2)-3-3)



図3 応力-ひずみ曲線及び応力-弾性回復ひずみ関係(供試体 TI(2)-4-2)

		岩石の三軸試験の供試体作製・設置								
調査件名	令和5年度低レ (地下空洞型ダ 地下環境を把払	ベル放射性廃棄物の処 し分調査技術高度化開墾 とするための初期地圧測	:分に関する技術開発 発)のうち 則定技術等の整備	事業	試験年月日	2024年1月18日				
試料番号 (深さ)	)	TI(2)	(29.00m	$\sim 29.76$ m)	試験者					
供試体を用い	る試験の基準者	号と名称	JGS 2534-2020 岩	石の圧密排水(CD)∃	三軸圧縮試験方法	£				
試料の	状態1)	ボーリ	シグコア	土粒子の密度	$E \rho_s^{(3)} Mg/m^3$					
供試体の	)作製 <sup>2)</sup>	ኑሀミ	ング法	液性限界	$w_{\rm L}^{(4)}$ %					
岩 石	名	軽石	凝灰岩	塑性限界	w P <sup>4)</sup> %					
供 試	体 No.	1	2							
		48.74	48.84							
直径	m	n 49.07	49.20							
		49.29	49.46							
半均直径	$D_i$ m	n 49.03	49.16							
初京本		99.19	100.26							
同く	m	n 99.29	100.46							
期正均真さ	H m	99.29 m 00.26	100.48							
中 均 同 C	V m	$m^3 = 1.874E \pm 0.5$	1 006E+05							
米 全 水 比	w. C	an 1.874±+05	1.900L+03							
百 小 凡 香 - 量	m.	5 - 57.2	318.80							
能湿潤密度	$m_1$	$m^3$ 1.685	1 673							
他 伯 伍 反	$\rho_{\rm ti}$ Mg	$m^3 1.085$	1.073							
昭 席 山 及 間 階 바	$p_{di}$ wrg	1.226	1.205							
的东比	$\mathbf{c}^{(3)}$									
相対密度	$D_{i}^{3}$									
	- D <sub>n</sub> ベ 量の測定方法	外部変位計に	「よって測定							
設置時の軸	wind m	m								
設置的和過程の	) 軸変位量 n	m								
· 軸 変 位 量	$\Delta H_{\rm s}^{5}$ m	m								
飽 和 体積変化	量の測定方法									
過設置時の休	積変化量 m	m <sup>3</sup>		1						
程的和過程の	体積変化量 m	n <sup>3</sup>								
体積変化量	$\Delta V_{:}^{(5)}$ m	$n^3$								
正高 さ	$H_0$ m	m 99.26	100.40							
密直径	$D_0$ m	m 49.03	49.16							
前体積	V <sub>o</sub> m	$n^3$ 1.874E+05	1.906E+05							
試 乾燥密度	$\rho_{do}^{3)}$ Mg/	n <sup>3</sup> 1.228	1.203							
験 間 隙 比	$e_{0}^{3)}$									
→ 相対密度	$D_{\rm ro}^{3)}$									
~ 容器	No.	304	141							
が (炉乾燥供試	体+容器)質量	g 251.86	250.22							
燥容器質量	L	g 21.69	20.97							
废 炉乾燥質量	$m_s$	g 230.17	229.25							
試料	\$ 名	TI(2)-1-1	TI(2)-2-2							
ter ret	꺧귵	29.00m	29.63m							
1木収	休戊	$\sim$ 29.13m	$\sim$ 29.76m							

特記事項

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。
 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。

2) ドラペン・スレム、食圧ない食用が、保留な料やの湯白は麻体がなみそと記載する。
 3) 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。

j	IGS 2534	岩石(	の三軸圧縮試	.験 [CD]	( 圧密前、圧容 ( 圧密量−時)	5後 間曲線 ]	
調査	件名	令和5年度低レー (地下空洞型処 地下環境を把握	ベル放射性廃棄物の処 2分調査技術高度化開発 するための初期地圧測	分に関する技術開発事 ě)のうち 則定技術等の整備	「業	試験年月日	2024年1月18日
試料	番号 (深 さ)		TI(2)	(29.00m	$\sim$ 29.76m)	試験者	
試	料の状態	1)	ボーリングコア	液性限界	$w_{\rm L}^{(4)}$ %		
供	試体の作業	製 <sup>2)</sup>	トリミング法	塑性限界	$w_{\rm P}^{\ \ 4)}$ %		
岩 土料	石 名 Z子の密度 ρ <sub>s</sub>	<sup>3)</sup> Mg/m <sup>3</sup>	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
	供試体	No.	1	2			
試	セル圧	$s_{\rm c}$ MN/m <sup>2</sup>	2.500	2.500			
颖 条	背 圧	$u_{\rm b}$ MN/m <sup>2</sup>	0.500	0.500			
件	圧密応力	$\sigma'_{\rm c}$ MN/m <sup>2</sup>	2.000	2.000			
圧	高さ	H <sub>o</sub> mm	99.26	100.40			
密	直 径	D <sub>o</sub> mm	49.03	49.16			
胢	間 隙 比	$e_{0}^{(3)}$					
	<b>圧密時間</b>	t <sub>c</sub> min	60	60			
圧	体積変化量	$\Delta V_{\rm c}$ mm <sup>3</sup>	3999	3611			
	軸変位量	$\Delta H_{\rm c}$ mm	1.995	0.452			
宓	体 積	$V_{\rm c}$ mm <sup>3</sup>	1.834E+05	1.870E+05			
峾	高さ	H <sub>c</sub> mm	97.26	99.95			
141	炉乾燥質量	m <sub>s</sub> g	230.17	229.25			
伖	乾燥密度	$ ho_{ m dc}$ Mg/m <sup>3</sup>	1.255	1.226			
	間 隙 比	e c <sup>3)</sup>					
間	等方応力増加量	$\Delta \sigma \text{ kN/m}^2$					
原 圧	間隙水圧増加量	$\Delta u \text{ kN/m}^2$					
係数	測定に要した時	間 min					
B	B 值						
	5000	×	<b>99</b> 99	0-	99	↓ 正密量−#	→ 寺間曲線 → → → → → → → → → → → → →



## 添付資料2-5



## 添付資料2-6

		軟岩の三軸試験の供試体作製・設置								
調査	件名	令和5年月 (地下空) 地下環境	度低レベル 同型処分詞 を把握す	>放射性廃棄物の処分 間査技術高度化開発)。 るための初期地圧測定	に関する技術開発事員 のうち :技術等の整備	Ŕ	試験年月日	2024年1月10日		
試料都	番号 (深さ)		Т	T(2)	(29.49m	$\sim$ 34.50m)	試験者			
供調	試体を用いる	る試験の	基準番号	と名称	JGS 2533-2020 軟:	岩の圧密非排水(CU	)三軸圧縮試験方法	2		
試	料の:	状 態 ]	1)	ボーリン	ボーリングコア 土粒子の密度 ρ <sub>s</sub> <sup>3)</sup> Mg/m <sup>3</sup>					
供	試体の	作製	2)	トリミン	グ法 液性限界		w L <sup>4)</sup> %			
岩	石	名		輕石。	疑灰岩	塑性限界	$w_{ m P}^{4)}$ %			
(	共 試	体	No.	1	2					
	<b>*</b> \alpha			48.86	48.94					
	但		mm	49.09	49.15					
	亚齿直汉	ת	mm	49.40	49.54					
_	十均直住	Di	111111	49.12	49.21					
初	高 さ		mm	100.04	100.19					
			11111	99.88	100.20					
期	平均高さ	$H_{i}$	mm	99.95	100.12					
1	体積	V <sub>i</sub>	mm <sup>3</sup>	1.894E+05	1.908E+05					
状	含水比	w <sub>i</sub>	%	38.4	41.1					
)	質 量	m <sub>i</sub>	g	318.78	323.86					
態	湿潤密度	$ ho_{ m ti}{}^{3)}$	Mg/m <sup>3</sup>	1.683	1.698					
j	乾燥密度	$ ho_{ m di}{}^{3)}$	Mg/m <sup>3</sup>	1.216	1.203					
I	間 隙 比	<i>e</i> i <sup>3)</sup>								
1	飽和度	$S_{ri}^{3)}$	%							
7	相対密度	$D_{\rm ri}^{3)}$	%							
	軸変位量	の測定フ	方法	外部変位計に	よって測定	,				
設	設置時の軸	変位量	mm							
置 1	胞和過程の	軸炎位量	t mm							
飽	軸 炎 位 重	∆H <sub>i</sub>	i <sup>or</sup> mm	차萊산립사건	I Anter					
和	14 積変化1	重の測正	.万法 1. 3	=====================================	†异	,				
□ 程	設直時の体	値変化重 仕 建 本 山	Imm Zelova							
	配相迥性の	144頁後11 A V	」里 mm <sup>-</sup>							
Fi	体損変に重 高 さ	$\frac{\Delta v_i}{H_i}$	mm	99 950	100 290					
密	直径	$D_{\circ}$	mm	49.119	49.211					
前	体積	V <sub>o</sub>	mm <sup>3</sup>	1.894E+05	1.908E+05					
試	乾燥密度	$\rho_{do}{}^{3)}$	Mg/m <sup>2</sup>							
験 ┉	間 隙 比	e o <sup>3)</sup>	Ŭ							
<u> </u>	相対密度	$D_{\rm ro}^{3)}$	%							
炬	容器	lo.								
乾(	(炉乾燥供試体	本+容器)質	〔量 g							
燥 後	容器質量		g							
	炉乾燥質量	m <sub>s</sub>	g							
	試 彩	∤ 名		TI(2)-2-1	TI(2)-4-1					
	採取	深度		29.49m	34.37m					
				$\sim$ 29.63m	$\sim$ 34.50m					

特記事項

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。
 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。
 必要に応じて記載する。
 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、 長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。

	GS 2533     軟岩の三軸圧縮試験 [CU]     [ 圧密前、圧密後 圧密量-時間曲線 ]									
調査	件名	令和5年度低レイ (地下空洞型処) 地下環境を把握	≤ル放射性廃棄物の処分 分調査技術高度化開発 するための初期地圧測	分に関する技術開発事業 )のうち 定技術等の整備	Ę	試験年月日	2024年1月10日			
試料	番号 (深さ)		TI(2)	( 29.49m	$\sim$ 34.50m)	試 験 者				
試	料の状態	1)	ボーリングコア	液性限界	$w_{\rm L}^{(4)}$ %					
供	試体の作	製 <sup>2)</sup>	トリミング法	塑性限界	w P <sup>4)</sup> %					
岩	石 名		軽石凝灰岩	圧密中の	排水古法	侧方, 雨端雨心	ーパードレーン			
土粒	立子の密度 $\rho$	$_{s}^{3)}$ Mg/m <sup>3</sup>		(1.1.1)						
	供試体	K No.	1	2						
試驗	セル圧	$\sigma_{\rm c}$ MN/m <sup>2</sup>	2.500	2.500						
条	背 圧	$u_{\rm b}$ MN/m <sup>2</sup>	0.500	0.500						
件	圧密応力	$\sigma'_{\rm c}$ MN/m <sup>2</sup>	2.000	2.000						
圧	局 さ	$H_{\rm o}$ mm	99.95	100.29						
密前	直     住       間     隙     比	$\frac{D_{\rm o}}{e_{\rm o}^{3)}}$ mm	49.12	49.21						
	圧 密 時 間	$t_{\rm c}$ min	60	60						
厈	体積変化量	$\Delta V_{\rm c}$ mm <sup>3</sup>	4120	4233						
	軸変位量	$\Delta H_{\rm c}$ mm	0.330	0.371						
宓	体積	$V_{\rm c}$ mm <sup>3</sup>	1.853E+05	1.865E+05						
щ	高さ	$H_{\rm c}$ mm	99.62	99.92						
後	炉乾燥質量	m <sub>s</sub> g								
~	乾燥密度	$\rho_{\rm dc}$ Mg/m <sup>3</sup>								
	間隙比	<i>e</i> <sub>c</sub> <sup>3</sup>					ļ			
間隙	等方応力増加量	等方応力増加量 $\Delta \sigma MN/m^2$		0.050						
圧係	間隙水圧増加量 $\Delta u \text{ MN/m}^2$		0.049	0.049						
数	測定に要した時間 min		1	1						
В	B 值		0.98	0.97						
							寺間曲線			
	$\mathbb{Q}$									
m <sup>3</sup> )										
ť (m					]					
$\sqrt{1}$										
后量										
藚変										
体积										
1000										
1000	0.1	1		10 経過時間 + (m	100	1000	10000			
±+ ⇒	1 # 15			MILLUN PUT IL L	/					
特訂	C争惧				<ol> <li>1) 試料の採取方法、試料</li> <li>2) トリミング法、負圧法の種</li> </ol>	の状態(塊状、凍結、ときほぐされ 重別、凍結試料の場合は解凍方	ぃた)等を記載する。 法等を記載する。			
					<ol> <li>3) 必要に応じて記載する。</li> <li>4) 必要に応じて粘性+の</li> </ol>	場合は液性限界、塑性限界 砂	質土の場合は最小乾燥密度			
		[1kN/m <sup>2</sup> =0.0102kof/cm <sup>2</sup> ] 最大乾燥密度等を記載する。								

## 添付資料**2-8**

JGS	2533	軟岩の三軸圧縮試	験[CU]	(応力-ひす	み曲線)		
周查件名	令和5年度低レ- (地下空洞型処 地下環境を把握	ベル放射性廃棄物の処分に関する技術  分調査技術高度化開発)のうち  するための初期地圧測定技術等の整備	開発事業		試験年月日	2024年1月10日	E
式料番号(深	そさ)	TI(2)	( 29.49m	$\sim$ 34.50m)	試験者		
岩石名	軽石凝灰岩	供 試 体 No.	1	2			
友性限界w1 <sup>1)</sup> %		E 密 応 力 MN/m <sup>2</sup>	2.00	2.00			
也性限界w <sub>P</sub> <sup>1)</sup> %	ó	背 圧 u <sub>b</sub> MN/m <sup>2</sup>	0.500	0.500			
ひずみ速度 %/min	0.10	主 圧縮強さ ( $\sigma_a$ - $\sigma_r$ ) max MN/m <sup>2</sup>	7.21	7.12			
寺記事項		<sup>応</sup> 力 軸ひずみ <i>ε</i> af %	4.96	5.03			
		差 間隙水 圧 u <sub>f</sub> MN/m <sup>2</sup>	0.703	1.31			
曲変位測定は外 )必要に応じて#	·部変位計による 站性十の場合は	$大$ CU 有効軸方向応力 $\sigma'_{af}$ MN/m <sup>2</sup>	9.01	8.31			
友性限界、塑性[	限界、砂質土の	時 有効側方向応力 $\sigma'_{rf}$ MN/m <sup>2</sup>	1.80	1.19			
易合は最小乾燥 §度を記載する。	密度、最大乾燥	发形係数 $E_0$ MN/m <sup>2</sup>	1210	1410	+		
	5	変形係数 $E_{50}$ MN/m <sup>2</sup>	769	695			
		残留独さ $(\sigma_a - \sigma_r)_r$ MN/m	/.21	/.12			
ペアソン比は、ひ	ずみゲージに		0.30	0.32		······	
って測定し、(o .8MPaの範囲で	σ <sub>a</sub> -σ <sub>r</sub> )が0.1~ での平均値とした。	供試体の破壊状況					
1:	5						
	-	$(\sigma_{a} - \sigma_{r}) - \varepsilon_{a} \pm i k$					
		u <sub>e</sub> —ε <sub>a</sub> 曲線					
	-						
ε <u></u> 10	0						
NM	_						
$n^{\rm p}$							
n=	-						
Э и <sub>е</sub>							
増久							
水							
影響							
"	° 🗌 🖊						
い。	<i>  </i>						
μ							
単							
「呻	†/						
- σ <sub>r</sub> ) • 軸/							
σ <sub>a</sub> -σ <sub>r</sub> )・軸D							
差(σ <sub>a</sub> ーσ <sub>r</sub> )・軸/		2					
5.力差(σ <sub>a</sub> – σ <sub>r</sub> ) ・軸	0	2					
主応力差(σ <sub>a</sub> ーσ <sub>r</sub> )・軸/	0	2					
主応力差(o <sub>a</sub> -o <sub>r</sub> )・軸/	0	2 1					
主応力差(σ <sub>a</sub> – σ <sub>r</sub> ),軸	0	2					
主応力差 (σ a - σ r) •軸/	0	2					
主応力差(σ <sub>r</sub> )・軸/	0	2					
主応力差 (σ <sub>a</sub> ーσ <sub>r</sub> )・軸	0	2					
主応力差(σ <sub>α</sub> – σ <sub>r</sub> )・軸/	0	2					
主応力差(σ ª -σ r ) ·軸/		2					

# 圧裂引張り試験結果一覧表

令和5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<br/>(地下空洞型処分調査技術高度化開発)のうち<br/>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2024年1月10日試験者

	採取深度	試料長	試料径	湿潤密度	含水比	破壊荷重	引張り強さ
試料名		L	D	$ ho_{ m t}$	w	Р	$\sigma_{\rm t}$
	[m]	[mm]	[mm]	$[Mg/m^3]$	[%]	[kN]	$[MN/m^2]$
1	30.33						
TI(2)-3-1	$\sim$	44.97	48.97	1.696	41.4	0.372	0.108
	30.40						
2	30.40						
TI(2)-3-2	$\sim$	47.43	48.96	1.694	42.2	0.933	0.256
	30.47						





試験前



試験後

図1 一軸繰返し試験 供試体 TI(2)-3-3

添付資料2-11



試験前



試験後

図2 一軸繰返し試験 供試体 TI(2)-4-2

添付資料2-12


試験前



試験後

図 3 三軸圧縮試験(CD条件) 供試体 TI(2)-1-1



試験前





試験後

図 4 三軸圧縮試験(CD条件) 供試体 TI(2)-2-2



試験前



試験後

図 5 三軸圧縮試験(CUB条件) 供試体 7

供試体 TI(2)-2-1



試験前



試験後

図 6 三軸圧縮試験(CUB 条件) 供試体 TI (2)-4-1



試験前



試験後

図7 圧裂引張り試験 供試体 TI(2)-3-1



試験前



試験後

図8 圧裂引張り試験 供試体 TI(2)-3-2



湿潤密度試験状況 (ノギス法)



含水比試験 状況



ー軸繰返し試験 状況

図9 試験状況(その1)



三軸圧縮試験 (CD条件)状況



三軸圧縮試験 (CUB条件)状況

圧裂引張り試験 状況



図10 試験状況(その2)

添付資料-3

現場検証試験(第2章2.1参照)に係るボーリング調査結果

・T1-850(2)孔の柱状図

・T1-850(2)孔のコア写真

## TI1-850(2) 孔 ボーリング柱状図

<u>作図範囲 0.00~35.15 m</u>

## 名 令和5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 件

調查地	青森県上北郡六ヶ所村大石平	孔口標高	E. L.	–74. 72 m	方向:角度	0 : -90
調査期間	2023年10月23日 ~ 2023年11月28日	最終孔内水位	G. L.	+1. 77 m	主任技術者	
使用試錐機	東邦製D-1	掘削深度	G. L.	-35. 15 m	コア観察者	

標	標	深	層	地	地	質	色	硬	風					岩	-	コア採取率	害	れ目分布図	] в	⊤∨観察割∤	旧		透	水言	式験結	₹	試	検層	採
				質	地	層		<b>*</b> /2	114					¢Π.		─── (%) 是ナコア트	0	△ せん断 ○ 引 張 ▽ 葉 理	В	開口幅	5	試	透	水係	数	区間水位	skel		
				柱				<del>1</del> 1	16	観	察	記	事	舣	-	取入コノ長 ─◆── CM	!	□ 不 明 × 機 械				験				➡ 間隙水圧計 ➡ 試驗時閉鎖系	<del>ለ</del> ት		
尺	高	度	厚	۰ <u>–</u>	層			区	状			-	•	区	1	RQD		✓ 利 <u>戌</u> 新鮮色 褐~葉褐色	— <sup>施</sup> 区 間			区間		ORD	)ER (m/s)	── 試験時開放系	採		
				1											-	<b>-</b> [%]		■ <sup>部分的</sup> ■ コアと同程月 ■ <del>録</del> 色ル	ŧ,		ímm)	[目]				(E.L. m)	_		
(m)	(m)	(m)	(m)	X	名	相   <sub>コンク</sub>	調	分	況	00.00	0.07		-> 511 1	分	0	20 40 60 80 100	0	30 60	90 <sup>(m)</sup>	0246	8 P	(m)	-11 -10 -9 10 10 10	10 1	-/ -6 -5 0 10 10	10 20 30 40	取		水
	-75.23	0.51	0.27		<u>リニト</u> 砕石	<u>リート</u> 砕石	暗灰	-		00.00m 、硬質、	~0.2/m 棒状です	路面表層	1201-1	-		[46]													
-	-75.82	1.10		00					33)91.10	00.2/m ∼30mm0	~0.51m D安山岩角	路盤砕石。 角礫主体と	。Φ10 :する。			[00]										-			
-				ο ο ο ο						00.51m ps32)	∼9.01m	軽石混り	砂岩(T			[82]	×									_			
				00						0.51m 灰白色0	~8.82m D軽石を爹	φ2~15mr 多く含み、	nの灰~ <i>ϕ</i> 10m			[100]	×												
-				00						m以下の 岩角礫を	暗灰~灰 と含む。ま	~赤褐色( 基質は安山	の安山 」岩、石													-			
-				00		軽				英粒子主 0.51m	E体とする ~1.10m(;	る粗粒砂で t、 ∠0°	™ある。 ~20℃				Ô									-			
				00		石 混	暗   灰			程度の 日面及	D低角の書 るび割れF	割れ目あり 目沿いに幅	)。割れ 記.5~			[91]	9												
— 5				$\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$		り   砂	~   灰			2cm(=	酸化褐色	が認めら;	れる。				×									-			-
-				00		岩				マ	及休の13 発打で軽し	い金属音を	発する			[96]	0									_			
				00						。 8.82m	~9.01m	基質は暗	灰色の			[100]	× *												
-				00						租祉砂石	Ξ。∠30 δ。Φ30m Ξ≠3ΞιΣ	~45 0. m程度の灰	又是理小 又一灰白													-			
_				00						巴の戦化	コを准しフ	てる。				[100]	Ĭ									_			
				00	隆					▪下位層	層との境界	早は漸移的	٥.			[100]													
-	-83.73	9.01	8.50		架層					O9.01m (Tspt31	~13.58m	砂質軽石	凝灰岩				Ĭ									-			
— 10					中朝					<ul> <li></li></ul>	/ 30mm、最 ※石た名/	大々90mm。 く今ま、 道	の灰~			[100]	*									_			_
					層	砂質				山岩、石		それで、金子を主体と	する粗			[100]													
-					石	¥	灰			一 灰~赤衫	のる。ΨΤ 島色安山角	る職を含む 1	いたであった				×									-			
-					り	I凝					→ 新鮮、/	、ンマー子 る。 	撃で蛭			[100]										_			
					一台	岩				10.25 3~5mm反	m Z60% 灰白色。	C面なし断	T.唐、唱			[100]	×												
-										<ul> <li>●下位[3</li> <li>一 少、下位</li> </ul>	まど軽石の な層との均	り量及び料 竟界は漸移	立径が減 多的。				$\left[ \right]$									-			
_	-88.30	13.58	4.57	0 0 0 0						O13.58   岩(Tps3	m∼20.89 1)	m 軽石混	じり砂			[100]	$\left  \right $									_			
				00						<ul> <li>コアに</li> <li>い金属音</li> </ul>	は新鮮、ノ 旨を発する	ヽンマー打 る。	「撃で軽			[100]	$_{\star}^{\times}$												
- 15				00						•17.00 軽石、st	m~18.23 5山岩角砲	m φ10mm」 樂を多く含	以下の む。基				×									-			-
-				$\phi \phi$						質は極料 15.92	且粒砂とな m ∠10-	いる。 25°面な	し断層			[100]	Å												
				$\phi \phi$		軽	ज्य			3条 16.84	m ∠30°	面なし断	層			[93]													
-				0 0 0 0		1混	<u>八</u>   ~			<ul> <li>18.23</li> <li>色軽石を</li> </ul>	m~18.93 を多く <i>含み</i>	m φ5mm比 4、 /0~	に しての 10°の				8									-			
_				00		り砂	喧灰	硬	新	世祖 葉理が到 18 94	上)、ロ・ 発達する。 m~19_15	灬 _ ° ៣ 灰色細	約凝应			[100]	8												
				$\overline{0}$		石			鮮	lo.04 岩、ゆ1	0~30mm m~20_89	目度の礫も 加 其質(土)	含む。	A		[94]	▼ ¥												
-				00							間を20105 色安山岩、	石英及び					8									-			
20				$\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \end{array}$						30mm、É	の る 祖 和 1 1 色 軽 石 た	ッとのる。 が∠0~15°	°、幅			[100]	⊽ X_												_
20				00						2~30mm 互層状を	の未理と となす。	はり、10%	和中で			[100]	×												
-	-95.61	20.89	7.31							• ト位層   明瞭。	ョとの項タ	ティス∠10°	程度で				Ô									-			
										pt2)	m∼30.15	m 輇石凝)	火石(			[100]	X												
										・ 同岩に 石の多し	t、軽石の い区間がま	D少ない区 あるが、基	は間と軽 し質は灰			[100]	\$ 												
-										色、緻密  る。コフ	密な細粒渉 Pは新鮮、	縫灰岩を主 ハンマー	E体とす -打撃で				Ř									-			
_										軽い金属   20.89	<b>禹音を発す</b> m~22.50	する。 ⋒ 白色軽	<b>隆石(岩</b>			[100]	*												
										塊状、⊄   の可能性	Þ10~30m 生もあり)	mの軽石の 、Φ5~1(	)濃集部 Ommの黒			[100]													
- 25										色岩片含	きむ。 /			1			$^{* }$			11									.

- 25 - - - - - - - - - - - - - - - -	-109. 87 35. 15	01       14.26	軽石凝灰岩	明灰~灰		<ul> <li>色岩片含む。</li> <li>23.20m~23.45m φ2~10mmの白</li> <li>色軽石を多く含む。</li> <li>23.24m ∠50°、面なし断層。</li> <li>23.80m~23.94m ∠15~70°、</li> <li>面なし断層3条。</li> <li>24.13m ∠30°、24.18m ∠2</li> <li>5° 面なし断層。</li> <li>25.37m ∠40° 面なし断層。</li> <li>26.30m~28.00m φ2~10mmの白</li> <li>色軽石の密集部あるいはφ5cm~</li> <li>50cmの軽石凝灰岩の偽礫を含む。</li> <li>26.25m~26.30m ∠50°、面なし断層。</li> <li>26.25m~26.30m ∠50°、 で10°</li> <li>面なし断層6条。</li> <li>29.27m ∠50° 面なし断層。</li> <li>29.27m ∠60° 面なし断層。</li> <li>30.50m以深</li> <li>周載荷感度試験のためオーバーコ</li> <li>アリングを実施。</li> <li>基本的には割れ目の少ない区間であるが、コアの引上げによる⇒</li> <li>が認められる。</li> </ul>			<ul> <li>第二1.28</li> <li>第二1.34</li> <li>第二2.77</li> <li>第二2.77</li> <li>第二3.92</li> <li>第二3.92</li> <li>第二4.88</li> <li>第二4.94</li> </ul>	
					1				<i>/</i> <sup>m</sup>	

添付資料3-1



*ϕ*116mm孔、コア径92mm



*ϕ*116mm孔、コア径92mm



*ϕ*116mm孔、コア径92mm







 $\phi$ 116mm孔、コア径92mm



arphi56mm孔、コア径40mm 円錐〜arphi36mm孔、コア径24mm

添付資料3-5