

平成 25 年度
地層処分技術調査等事業
処分システム工学確証技術開発

報告書
(第 2 分冊)

—人工バリア品質／健全性評価手法の構築—
緩衝材

平成 26 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

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・資金管理センターが実施した、平成25年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発のうち、人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材－の開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成25年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発の報告書は、以下の分冊により構成されている。

当該報告書	分冊名	報告書の標題
	第1分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
◎	第2分冊	処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
	第3分冊	処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備
	第4分冊	自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発

目次

第1章 研究の目的及び概要.....	1-1
1.1 処分システム工学確証技術開発の背景、および目的.....	1-1
1.1.1 開発の背景.....	1-1
1.1.2 開発の目的.....	1-1
1.1.3 開発項目の相互関係.....	1-3
1.2 人工バリア品質評価技術の開発（緩衝材）に係わるこれまでの開発成果.....	1-5
1.2.1 遠隔操作技術高度化開発（搬送・定置技術）.....	1-5
1.2.2 人工バリア品質評価技術の開発（緩衝材）.....	1-8
第1章 参考文献.....	1-14
第2章 再冠水時に発生する現象の整理と検討計画.....	2-1
2.1 全体計画.....	2-1
2.1.1 基本方針.....	2-1
2.1.2 全体計画.....	2-2
2.1.3 5年間の全体研究計画.....	2-4
2.2 再冠水時に発生する現象の整理.....	2-6
2.2.1 再冠水時に発生する現象の整理方法.....	2-6
2.2.2 緩衝材の施工品質のうち再冠水挙動に影響を及ぼす項目.....	2-8
2.3 試験の共通条件.....	2-11
2.3.1 試験の実施環境.....	2-11
2.3.2 使用材料.....	2-12
第2章 参考文献.....	2-13
第3章 施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査.....	3-1
3.1 背景.....	3-1
3.2 既往の研究.....	3-1
3.3 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響試験の目的.....	3-4
3.3.1 試験ケース.....	3-4
3.3.2 供試体作成方法及び試験方法.....	3-6
3.3.3 試験結果[6].....	3-6
3.3.4 供試体解体後の物性試験.....	3-9
3.3.5 密度分布が膨潤圧に及ぼす影響の理論的考察.....	3-14
3.4 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響.....	3-15
3.4.1 試験ケース.....	3-15
3.4.2 試験結果（蒸留水ケース）.....	3-17
3.4.3 試験結果（NaCl水溶液ケース）.....	3-24
3.5 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響.....	3-27

3.5.1	試験ケース	3-27
3.5.2	試験結果（蒸留水のケース）	3-30
3.5.3	試験結果（NaCl 水溶液ケース）	3-35
3.6	力学に立脚した残留密度差の理論的解釈	3-38
3.6.1	概要	3-38
3.6.2	既往の成果による残留密度差の理論的解釈	3-38
3.6.3	残留密度差の理論的解釈に資するデータ取得	3-41
3.7	工学技術への反映	3-47
3.7.1	概要	3-47
3.7.2	試験結果に基づく密度差の工学技術への反映	3-48
3.8	解析技術への反映	3-50
3.8.1	解析技術への反映	3-50
第 3 章	参考文献	3-53
第 4 章	化学変質が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査	4-1
4.1	Ca 型化と飽和の可逆性検討	4-1
4.1.1	試験の目的及び概要	4-1
4.1.2	使用材料	4-2
4.1.3	試験ケース	4-3
4.1.4	供試体作成方法及び試験方法	4-3
4.1.5	試験結果	4-4
4.1.6	供試体解体後の物性試験	4-8
4.1.7	工学技術への反映	4-9
4.1.8	解析技術への反映	4-10
第 4 章	参考文献	4-11
第 5 章	緩衝材への地下水浸潤状況の評価	5-1
5.1	長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験	5-1
5.1.1	試験の目的及び概要	5-1
5.1.2	試験ケース	5-2
5.1.3	供試体作成方法及び試験方法	5-5
5.1.4	飽和度と比抵抗の関係取得	5-7
5.1.5	試験結果	5-10
5.1.6	工学技術への反映	5-16
5.1.7	解析技術への反映	5-16
第 5 章	参考文献	5-17
第 6 章	緩衝材表面近傍の止水性評価	6-1
6.1	小型セルによるパイピング・エロージョン・破過試験	6-1
6.1.1	試験の目的及び概要（既往試験のレビューも含む）	6-1

6.1.2	原位置施工を模擬した小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験	6-4
6.1.3	ブロック定置・ペレット充填方式を模擬した小型セルによるパイピング、エロージョン、破過試験	6-12
6.1.4	パイピング、エロージョン、破過現象の詳細検討	6-30
6.1.5	ブレイクスルー、パイピング、エロージョンに対する人工給水効果の評価	6-59
6.2	流路長がブレイクスルー、パイピング、エロージョンに及ぼす影響	6-64
6.2.1	試験概要	6-64
6.2.2	試験ケース	6-64
6.2.3	試験結果	6-66
6.3	緩衝材の限界流速の検討	6-82
6.3.1	試験概要	6-82
6.3.2	試験ケース	6-84
6.3.3	試験結果	6-85
6.4	工学規模パイピング・エロージョン試験	6-88
6.4.1	試験概要	6-88
6.4.2	試験ケース	6-90
6.4.3	試験結果	6-90
6.5	工学技術への反映	6-92
6.5.1	緩衝材や埋め戻し材等の材料特性としての許容流速の整理	6-92
6.5.2	試験結果に基づく対策フロー	6-95
6.5.3	湧水量制御技術に関する文献調査	6-98
6.6	緩衝材の流出に関する課題の抽出	6-100
6.6.1	処分概念に対する湧水環境のモデル化の実験的評価方法	6-100
6.6.2	影響低減対策の検討	6-106
6.6.3	解析技術への反映	6-107
6.6.4	まとめと今後の試験計画	6-107
6.7	排水の分析	6-109
6.7.1	試験の目的及び概要	6-109
6.7.2	これまでの排水分析結果	6-109
6.7.3	平成 23 年度以降の排水の分析結果	6-113
第 6 章	参考文献	6-117
第 7 章	土槽規模試験の実施	7-1
7.1	施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験（試験分類(c)一表 2.2.2-2）	7-1
7.1.1	概要	7-1
7.1.2	試験条件	7-1
7.1.3	試験結果(ペレット充填ケース)	7-3

7.1.4 試験結果(ブロック定置ケース).....	7-9
7.1.5 試験結果(ブロック定置とペレット充填併用ケース).....	7-28
第 8 章 浸潤による間隙空気の移行調査.....	8-1
8.1 検討の目的と手段	8-1
8.1.1 試験概要	8-1
8.2 緩衝材の製作方法	8-2
8.3 浸潤による間隙空気の移行調査手順.....	8-2
8.4 試験結果.....	8-4
8.4.1 流量制御過程	8-4
8.4.2 圧力制御過程	8-7
8.4.3 工学技術への反映	8-10
8.4.4 解析技術への反映	8-11
第 8 章 参考文献.....	8-12
第 9 章 緩衝材施工技術の高度化検討	9-1
9.1 背景.....	9-1
9.2 高度化する緩衝材の施工技術の選択.....	9-2
9.2.1 既往の緩衝材施工技術.....	9-2
9.2.2 海外の機関における知見	9-2
9.2.3 吹付け施工技術の概要.....	9-3
9.2.4 吹付け施工技術の適用性	9-12
9.3 湧水環境下における吹付け施工実験.....	9-23
9.3.1 試験概要及び長期計画.....	9-23
9.3.2 湧水影響評価	9-25
9.3.3 人工給水効果の検証	9-37
第 9 章 参考文献.....	9-53
第 10 章 今年度試験結果を受けた試験計画の見直し.....	10-1
10.1 緩衝材の品質評価に関する検討	10-1
10.1.1 試験計画の修正、および試験ケースの追加.....	10-1
第 10 章 参考文献.....	10-4
第 11 章 地下研究施設を活用した緩衝材の性能確認.....	11-1
11.1 地下研究施設を活用した試験.....	11-1
11.1.1 背景.....	11-1
11.1.2 試験概要	11-2
11.1.3 試験計画	11-3
11.1.4 試験孔の形状・仕様.....	11-4
11.1.5 試験孔の掘削工事	11-5

第 12 章 人工バリア全体としての設計・施工仕様の 策定に資する指標の整備.....	12-1
12.1 背景.....	12-1
12.1.1 人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に関する調査.....	12-1
12.1.2 埋め戻し材、プラグの要求品質に関する調査.....	12-3
12.1.3 人工注水・グラウトの要求品質に関する調査.....	12-8
第 12 章 参考文献.....	12-16
第 13 章 まとめ.....	13-1
13.1 実施内容.....	13-1
13.2 平成 25 年度までの成果.....	13-2
13.2.1 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験	13-2
13.2.2 Ca 型化と飽和の可逆性検討.....	13-5
13.2.3 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験.....	13-7
13.2.4 緩衝材表面近傍の止水性評価.....	13-8
13.2.5 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験	13-12
13.2.6 浸潤による間隙空気の移行調査手順.....	13-14
13.2.7 吹付け施工技術の適用性.....	13-15
13.3 研究計画の更新.....	13-15
13.3.1 5 年間の全体計画の更新.....	13-15
13.3.2 処分環境（湧水量や水質等）の影響検討.....	13-16
13.3.3 パイピング／エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討.....	13-17
13.3.4 人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資する指標の整備.....	13-17
第 13 章 参考文献.....	13-19

図目次

図 1.1.3-1	処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係	1-4
図 1.2.1-1	人工バリアの仕様例（HLW 第2次取りまとめ）	1-6
図 1.2.1-2	搬送・定置技術オプション	1-6
図 1.2.1-3	遠隔高度化開発－搬送・定置技術の成果[2]	1-7
図 1.2.2-1	検討内容の人工バリアの時系列における意味.....	1-9
図 1.2.2-2	再冠水時に緩衝材に生じる事象を踏まえた建設作業時の影響項目の評価と その反映先	1-9
図 1.2.2-3	本研究の位置づけ.....	1-10
図 1.2.2-4	人工バリア品質評価技術の開発－緩衝材の成果[2].....	1-12
図 1.2.2-5	緩衝材の設計・施工仕様設定のプロセス（案）	1-13
図 2.1.1-1	本研究の基本方針.....	2-1
図 2.1.2-1	全体試験計画.....	2-3
図 2.2.1-1	再冠水時に発生する現象の整理のイメージ（高レベル放射性廃棄物地層処分縦置 き、横置き） [1]	2-7
図 2.2.2-1	抽出した現象の相互関係.....	2-10
図 2.2.2-2	抽出した試験項目の位置付け.....	2-11
図 2.3.1-1	試験状況.....	2-11
図 3.2- 1	既往の均質化試験例[1].....	3-1
図 3.2- 2	既往の均質化試験例[2].....	3-2
図 3.2- 3	小峯らの試験装置概要[3]	3-2
図 3.2- 4	小峯らの試験結果[3]	3-3
図 3.2- 5	JAEA（旧 JNC）の試験結果[4]	3-3
図 3.2- 6	鈴木らの試験結果[5]	3-4
図 3.3.1-1	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験機	3-5
図 3.3.1-2	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験の供試体	3-5
図 3.3.2-1	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験の供試体作製手順	3-6
図 3.3.3-1	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験結果.....	3-7
図 3.3.3-2	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験の収束状況.....	3-7
図 3.3.3-3	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験の透水係数経時変 化	3-8
図 3.3.3-4	有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係.....	3-8
図 3.3.3-5	上下方向に密度分布を有する供試体の膨潤圧と既往の研究の比較.....	3-9
図 3.3.3-6	半径方向に密度分布を有する供試体の膨潤圧と既往の研究の比較.....	3-9
図 3.3.4-1	供試体の解体計画図	3-10
図 3.3.4-2	密度分布を有する供試体の試験前後の密度分布	3-11
図 3.3.4-3	密度分布を有する供試体の解体状況写真.....	3-12

図 3.3.4-4	膨潤圧試験の解釈.....	3-13
図 3.3.4-5	膨潤圧試験のイメージ	3-13
図 3.3.5-1	平衡膨潤圧のばらつきに関する考察.....	3-14
図 3.3.5-2	既往の研究による平衡膨潤圧と正規圧密曲線の関係.....	3-15
図 3.4.1-1	力学物性（膨潤量）による均質化の判断のイメージ.....	3-16
図 3.4.1-2	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験機	3-16
図 3.4.1-3	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験機.....	3-17
図 3.4.2-1	膨潤量の経時変化.....	3-19
図 3.4.2-2	フローポンプによる通水圧の経時変化	3-19
図 3.4.2-3	フローポンプによる制御流量の経時変化.....	3-20
図 3.4.2-4	膨潤に伴う乾燥密度の経時変化	3-20
図 3.4.2-5	供試体模式図.....	3-21
図 3.4.2-6	膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化.....	3-22
図 3.4.2-7	供試体の解体図	3-22
図 3.4.2-8	膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化(再掲).....	3-23
図 3.4.2-9	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	3-23
図 3.4.3-1	膨潤量の経時変化(NaCl 水溶液).....	3-24
図 3.4.3-2	膨潤に伴う乾燥密度の経時変化(NaCl 水溶液).....	3-25
図 3.4.3-3	直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化(NaCl 水溶液).....	3-25
図 3.4.3-4	直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化(NaCl 水溶液)	3-26
図 3.5.1-1	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の詳細図.....	3-28
図 3.5.1-2	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験機	3-29
図 3.5.1-3	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の供試体調整手順	3-29
図 3.5.1-4	密度分布、及び膨潤量試験のイメージ	3-29
図 3.5.2-1	膨潤量の経時変化.....	3-30
図 3.5.2-2	フローポンプによる通水圧、膨潤圧の経時変化	3-31
図 3.5.2-3	フローポンプによる制御流量の経時変化.....	3-31
図 3.5.2-4	膨潤に伴う乾燥密度の経時変化	3-32
図 3.5.2-5	応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価（膨潤圧の経時変化）	3-33
図 3.5.2-6	供試体の解体計画図	3-33
図 3.5.2-7	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	3-34
図 3.5.3-1	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	3-35
図 3.5.3-2	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	3-35
図 3.5.3-3	応力履歴の影響評価試験試験の乾燥密度分布.....	3-36
図 3.5.3-4	応力履歴の影響評価試験に用いた供試体の給水量.....	3-37
図 3.6.2-1	残留密度分布の力学的解釈(Case1).....	3-39
図 3.6.2-2	残留密度分布の力学的解釈(Case2).....	3-40
図 3.6.2-3	残留密度分布の力学的解釈(Case3).....	3-40
図 3.6.2-4	応力履歴による密度差の発生に関する力学的解釈（右図：拡大図）	3-41

図 3.6.3-1	緩衝材の $e\text{-log}p$ 関係	3-45
図 3.6.3-2	緩衝材の $\rho d\text{-log}p$ 関係	3-45
図 3.6.3-3	大型予圧密の圧密沈下曲線(Case3)	3-46
図 3.7.1-1	施工品質が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための 試験の工学技術への反映イメージ	3-47
図 3.7.2-1	JAEA DATABASESE に対する Kozeny-Carman 則のフィッティング結果	3-48
図 3.7.2-2	Kozeny-Carman 則を用いた残留密度差と透水係数の関係	3-49
図 3.8.1-1	膨潤圧試験のイメージ	3-50
図 3.8.1-2	膨潤圧試験開始直後のイメージ	3-51
図 3.8.1-3	高・低飽和度供試体の膨潤圧試験のイメージ	3-51
図 3.8.1-4	膨潤性鉱物の水分特性曲線のイメージ	3-52
図 4.1.1-1	田中らの試験結果[1]	4-1
図 4.1.2-1	Na 型化、Ca 型化ベントナイトの作製フロー	4-2
図 4.1.4-1	Ca 型化が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の詳細図	4-4
図 4.1.4-2	Ca 型化が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響のイメージ	4-4
図 4.1.5-1	Ca 型化が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験結果	4-6
図 4.1.5-2	Ca 型化の過程が圧縮ベントナイトの透水係数に及ぼす影響	4-6
図 4.1.5-3	局所の変質が膨潤圧と透水係数に及ぼす影響のイメージ	4-8
図 4.1.6-1	供試体の解体計画図	4-9
図 4.1.7-1	緩衝材表面近傍に発生する様々な事象のイメージ	4-10
図 5.1.1-1	鈴木らの試験結果[1]	5-2
図 5.1.1-2	鈴木らの試験結果による浸潤フロントの経時変化[1]	5-2
図 5.1.2-1	長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験	5-4
図 5.1.3-1	5mm 撒き出し分のベントナイトの計量	5-5
図 5.1.3-2	1000mm アクリルセル	5-5
図 5.1.3-3	比抵抗測定用電極	5-6
図 5.1.3-4	比抵抗測定用電極の設置	5-6
図 5.1.3-5	締め固め時のアクリルセル保護用ダンパー	5-6
図 5.1.3-6	締め固め時の高さ管理方法	5-6
図 5.1.3-7	ヒーター付きピストン	5-7
図 5.1.3-8	完成図	5-7
図 5.1.4-1	飽和度と比抵抗の関係取得試験装置	5-8
図 5.1.4-2	飽和度と比抵抗の関係取得試験装置	5-8
図 5.1.4-3	飽和度と比抵抗の関係(乾燥密度 1.6Mg/m^3)	5-9
図 5.1.4-4	飽和度と比抵抗の関係(乾燥密度 1.6Mg/m^3)	5-10
図 5.1.5-1	浸潤に伴う比抵抗の変化 (左: 蒸留水、右: NaCl 水溶液 (0.5M))	5-11
図 5.1.5-2	浸潤に伴う飽和度の変化 (左: 蒸留水、右: NaCl 水溶液 (0.5M))	5-11
図 5.1.5-3	浸潤フロントの進展状況 (比抵抗値 99%、95%以下で定義)	5-12
図 5.1.5-4	浸潤フロントと進展速度 (比抵抗値 99%、95%以下で定義)	5-13

図 5.1.5-5	浸潤フロントの進展状況（初期飽和度からの増分が1%で定義）	5-13
図 5.1.5-6	浸潤フロントの進展速度（初期飽和度からの増分が1%で定義）	5-13
図 5.1.5-7	液体の浸潤状況（左：蒸留水、右：NaCl水溶液（0.5M））	5-14
図 5.1.5-8	液体の浸潤状況	5-15
図 5.1.5-9	液体の浸潤状況（左：蒸留水、右：NaCl水溶液（0.5M））	5-15
図 5.1.5-10	圧力計と浸潤面の水位差	5-16
図 6.1.1-1	SKB社による水みちのパイピング試験（SKB社 Report R-06-80 [2]）	6-2
図 6.1.1-2	SKB社による隙間のパイピング試験（SKB社 Report R-06-80 [2]）	6-2
図 6.1.1-3	SKB社によるペレット充填部のパイピング試験（SKB社 Report R-06-72 [3]）	6-3
図 6.1.1-4	SKB社による B 30/S70 ベントナイトブロックのパイピング試験（SKB社 Report R-06-72 [3]）	6-3
図 6.1.2-1	破過圧計測試験のイメージ	6-4
図 6.1.2-2	破過圧測定試験装置概略図	6-5
図 6.1.2-3	破過圧測定試験装置	6-5
図 6.1.2-4	破過試験の試験ケース	6-5
図 6.1.2-5	破過圧計測試験の試験結果のイメージ	6-6
図 6.1.2-6	破過圧計測試験結果(流速 0.001cc/min)	6-7
図 6.1.2-7	破過圧計測試験結果（拡大図）	6-8
図 6.1.2-8	破過圧計測試験結果(流速 0.01cc/min)	6-9
図 6.1.2-9	破過圧計測試験結果	6-9
図 6.1.2-10	破過試験中の全応力の作用	6-10
図 6.1.2-11	ローダミン注入後のベントナイト/セメント供試体	6-11
図 6.1.2-12	ローダミン注入後のベントナイト/花崗岩供試体	6-12
図 6.1.3-1	ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験条件の検討（左：ブロック定置工法、右：ペレット充填工法）	6-13
図 6.1.3-2	HLW 縦置き概念イメージ図	6-14
図 6.1.3-3	ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験セルの概略図	6-15
図 6.1.3-4	2連シリンジポンプによる定流量制御装置	6-16
図 6.1.3-5	2連シリンジポンプによる定流量制御装置状況	6-16
図 6.1.3-6	注入口:底面/蒸留水/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-17
図 6.1.3-7	注入口:底面/NaCl水溶液/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-18
図 6.1.3-8	注入口:底面/蒸留水/大粒径 ^o レットケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-19
図 6.1.3-9	蒸留水/注入口底面/大小粒径 ^o レットケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-20
図 6.1.3-10	注入口:底面/蒸留水/大小粒径 ^o レットケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-20

.....	6-22
図 6.1.3-11 注入口:底面/蒸留水/大粒径 ^o レットケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-23
.....	6-24
図 6.1.3-12 注入口:上面/蒸留水/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-25
.....	6-26
図 6.1.3-13 注入口:上面/蒸留水/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-27
.....	6-28
図 6.1.3-14 蒸留水/注入口底面/大粒径 ^o レットケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-29
.....	6-30
図 6.1.3-15 注入口:上面/NaCl 水溶液/大粒径 ^o レットケースのパイピングとエロージョンの発生状況	6-31
.....	6-32
図 6.1.3-16 パイピングとエロージョン試験中の通水圧の発生状況	6-33
図 6.1.4-1 膨潤による間隙体積の減少	6-34
図 6.1.4-2 水みちの収斂のイメージ図	6-35
図 6.1.4-3 水みちの収斂現象の確認試験イメージ	6-36
図 6.1.4-4 水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージ	6-37
図 6.1.4-5 人為的な水みちを有する供試体作製状況	6-38
図 6.1.4-6 水みちの形成状況 (Case1)	6-39
図 6.1.4-7 解体状況 (Case1)	6-40
図 6.1.4-8 Case1 の通水圧と流量の関係	6-41
図 6.1.4-9 水みちの形成状況 (Case2)	6-42
図 6.1.4-10 解体状況 (Case2)	6-43
図 6.1.4-11 Case2 の通水圧と流量の関係	6-44
図 6.1.4-12 水みちの形成状況 (Case3)	6-45
図 6.1.4-13 Case3 の通水圧と流量の関係	6-46
図 6.1.4-14 総流量とエロージョン質量の関係	6-47
図 6.1.4-15 水みちの形成状況 (Case4)	6-48
図 6.1.4-16 解体状況 (Case4)	6-49
図 6.1.4-17 Case4 の通水圧と流量の関係	6-50
図 6.1.4-18 水みちの形成状況 (Case5)	6-51
図 6.1.4-19 解体状況 (Case5)	6-52
図 6.1.4-20 Case5 の通水圧と流量の関係	6-53
図 6.1.4-21 水みちの形成状況 (Case6)	6-54
図 6.1.4-22 解体状況 (Case6)	6-55
図 6.1.4-23 Case6 の通水圧と流量の関係	6-56
図 6.1.4-24 水みちの形成状況 (Case7)	6-57
図 6.1.4-25 解体状況 (Case7)	6-58
図 6.1.4-26 Case7 の通水圧と流量の関係	6-59
図 6.1.4-27 水みちの形成状況 (Case8)	6-60

図 6.1.4-28	解体状況 (Case8)	6-48
図 6.1.4-29	Case8 の通水圧と流量の関係.....	6-48
図 6.1.4-30	水みちの形成状況 (Case1)	6-49
図 6.1.4-31	解体状況 (Case1)	6-49
図 6.1.4-32	Case1 の通水圧と流量の関係.....	6-49
図 6.1.4-33	水みちの形成状況 (Case2)	6-50
図 6.1.4-34	解体状況 (Case2)	6-50
図 6.1.4-35	Case2 の通水圧と流量の関係.....	6-50
図 6.1.4-36	水みちの形成状況 (Case3)	6-51
図 6.1.4-37	Case3 の通水圧と流量の関係.....	6-52
図 6.1.4-38	総流量とエロージョン質量の関係.....	6-52
図 6.1.4-39	水みちの形成状況 (Case4)	6-53
図 6.1.4-40	解体状況 (Case4)	6-53
図 6.1.4-41	Case4 の通水圧と流量の関係.....	6-53
図 6.1.4-42	水みちの形成状況 (Case5)	6-54
図 6.1.4-43	解体状況 (Case5)	6-54
図 6.1.4-44	Case5 の通水圧と流量の関係.....	6-54
図 6.1.4-45	水みちの形成状況 (Case6)	6-55
図 6.1.4-46	解体状況 (Case6)	6-56
図 6.1.4-47	Case6 の通水圧と流量の関係.....	6-56
図 6.1.4-48	水みちの形成状況 (Case7)	6-57
図 6.1.4-49	解体状況 (Case7)	6-57
図 6.1.4-50	Case7 の通水圧と流量の関係.....	6-57
図 6.1.4-51	水みちの形成状況 (Case8)	6-58
図 6.1.4-52	解体状況 (Case8)	6-58
図 6.1.4-53	Case8 の通水圧と流量の関係.....	6-58
図 6.1.5-1	水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージ.....	6-59
図 6.1.5-2	通水圧と総流量の経時変化	6-61
図 6.1.5-3	湧水圧により発生する隙間が流出箇所と連通するような場合を模擬した実験例	6-63
図 6.2.2-1	パイピング生成試験機全景	6-65
図 6.2.2-2	パイピング生成試験セル.....	6-65
図 6.2.3-1	パイピング試験結果.....	6-67
図 6.2.3-2	パイピング試験中の状況.....	6-67
図 6.2.3-3	パイピング試験結果 (拡大図)	6-68
図 6.2.3-4	試験中の状況.....	6-68
図 6.2.3-5	パイピング試験中の軸応力の経時変化	6-69
図 6.2.3-6	1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況	6-70

図 6.2.3-7	1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況	6-70
図 6.2.3-8	ローダミンによる水みちの発生状況の確認	6-71
図 6.2.3-9	1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況	6-72
図 6.2.3-10	1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況	6-72
図 6.2.3-11	写真による水みちの発生状況の確認	6-73
図 6.2.3-12	水みちの形成状況 (H24)	6-74
図 6.2.3-13	水みちの形成状況 (拡大) (H24)	6-75
図 6.2.3-14	1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況 (H24)	6-75
図 6.2.3-15	1000mm セルによるパイピング試験の水みち観察(H24)	6-76
図 6.2.3-16	1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係	6-76
図 6.2.3-17	1000mm セルによるパイピング試験におけるケイ砂の堆積状況とエロージョン質量	6-77
図 6.2.3-18	吸光度とモンモリロナイト含有量の関係	6-79
図 6.2.3-19	水みち形成状況	6-79
図 6.2.3-20	1000mm セルによるパイピング試験中の膨潤圧と送水圧の経時変化	6-80
図 6.2.3-21	1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係	6-81
図 6.3.1-1	限界流速計測試験	6-82
図 6.3.1-2	限界流速計測試験結果のイメージ	6-83
図 6.3.1-3	限界流速のイメージ	6-83
図 6.3.3-1	膨潤量と流速の経時変化 (乾燥密度 1.6Mg/m ³ の場合)	6-85
図 6.3.3-2	流量毎の膨潤・エロージョン状況 (乾燥密度 1.6Mg/m ³ の場合)	6-85
図 6.3.3-3	膨潤量と流速の経時変化 (乾燥密度 1.8Mg/m ³ の場合)	6-86
図 6.3.3-4	流量毎の膨潤・エロージョン状況 (乾燥密度 1.8Mg/m ³ の場合)	6-86
図 6.3.3-5	膨潤量と流速の関係 (乾燥密度 1.6 Mg/m ³ と 1.8Mg/m ³ の場合)	6-87
図 6.3.3-6	限界流速と乾燥密度の関係	6-87
図 6.4.1-1	工学規模パイピング・エロージョン試験セルのイメージ	6-88
図 6.4.3-1	送水圧と送水量の経時変化	6-90
図 6.4.3-2	水みち形成観察結果のイメージ	6-92
図 6.5.1-1	流量とエロージョン量の関係における湧水対策の意味	6-93
図 6.5.1-2	削孔→1次覆工→ベントナイト吹付け→2次覆工	6-94
図 6.5.2-1	処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法の決定チャートにおける本検討結果反映先	6-96
図 6.6.1-1	試験ケース	6-100
図 6.6.1-2	試験ケース	6-100
図 6.6.1-3	ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験セルの概略図	6-101

図 6.6.1-4	パイピング生成試験セル（流路長を変化）	6-102
図 6.6.1-5	コンパートメントプラグの止水性効果の検討	6-102
図 6.6.1-6	人工給水効果の検討	6-103
図 6.6.1-7	水封効果の検討	6-103
図 6.6.1-8	水密構造評価試験セル	6-104
図 6.6.1-9	実験装置系統図	6-105
図 6.7.1-1	小規模試験の排水取得状況	6-109
図 6.7.2-1	クニゲル V1 の鉱物組成[9]	6-112
図 6.7.3-1	ナトリウムイオン濃度の経時変化	6-114
図 6.7.3-2	カルシウムイオン濃度の経時変化	6-114
図 6.7.3-3	カリウムイオン濃度の経時変化	6-114
図 6.7.3-4	マグネシウムイオン濃度の経時変化	6-115
図 6.7.3-5	硫酸イオン濃度の経時変化	6-115
図 6.7.3-6	塩化物イオン濃度の経時変化	6-115
図 6.7.3-7	ケイ酸イオン濃度の経時変化	6-116
図 7.1.2-1	土槽試験による施工に伴う密度分布を有する緩衝材の均一化試験イメージ図	7-2
図 7.1.2-2	土槽試験による工夫	7-3
図 7.1.3-1	ペレット充填ケースの土槽試験手順	7-4
図 7.1.3-2	再冠水状況／ペレット充填ケース／給水開始 20 分後	7-4
図 7.1.3-3	再冠水状況／ペレット充填ケース／給水開始後 12 時間	7-5
図 7.1.3-4	再冠水状況／ペレット充填ケース／給水開始後 3 日	7-6
図 7.1.3-5	再冠水状況／ペレット充填ケース／給水開始後 30 日	7-6
図 7.1.3-6	ペレット充填ケースの給水状況	7-7
図 7.1.3-7	ペレット充填ケースの膨潤圧の経時変化	7-7
図 7.1.3-8	ペレット充填ケースの比抵抗分布の変遷	7-8
図 7.1.3-9	解体時のペレット土槽の含水比と乾燥密度の分布	7-9
図 7.1.4-1	ブロック定置ケースの土槽試験手順	7-10
図 7.1.4-2	各ブロックの制作諸元（裏面 1 段目～2 段目）	7-11
図 7.1.4-3	各ブロックの制作諸元（裏面 3 段目～4 段目）	7-12
図 7.1.4-4	各ブロックの制作諸元（中面 1 段目～2 段目）	7-13
図 7.1.4-5	各ブロックの制作諸元（中面 3 段目～4 段目）	7-14
図 7.1.4-6	各ブロックの制作諸元（表面 1 段目～2 段目）	7-15
図 7.1.4-7	各ブロックの制作諸元（表面 3 段目～4 段目）	7-16
図 7.1.4-8	再冠水状況／ブロック定置ケース／給水開始 1 時間までの状況	7-17
図 7.1.4-9	再冠水状況／ブロック定置ケース／給水開始 17 時間後	7-18
図 7.1.4-10	再冠水状況／ブロック定置ケース／給水開始 4 日後	7-18
図 7.1.4-11	ブロック定置ケースの浸潤イメージ	7-19
図 7.1.4-12	ブロック定置ケースの給水状況	7-20
図 7.1.4-13	ブロック定置ケースの膨潤圧の経時変化	7-20

図 7.1.4-14	ブロック定置ケースの比抵抗分布の変遷	7-22
図 7.1.4-15	ブロック定置ケースの飽和度分布の変遷	7-25
図 7.1.4-16	ブロック定置ケースの含水比分布と乾燥密度分布	7-26
図 7.1.4-17	ブロック定置ケースの飽和度分布	7-27
図 7.1.5-1	ブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷	7-29
図 7.1.5-2	ブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷	7-30
図 7.1.5-3	ブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化	7-32
図 7.1.5-4	ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧の経時変化	7-32
図 7.1.5-5	ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧分布の変遷	7-33
図 8.1.1-1	浸潤による間隙空気の移行試験（イメージ図）	8-1
図 8.1.1-1	浸潤による間隙空気の移行試験手順	8-3
図 8.1.1-2	浸潤による間隙空気の移行試験セル	8-4
図 8.1.1-3	浸潤による間隙空気の移行試験用シリンジポンプユニット	8-4
図 8.4.1-1	浸潤による間隙空気の移行試験における給水量と給水圧の経時変化	8-5
図 8.4.1-2	供試体上部と下部での給水状況の差異	8-5
図 8.4.1-3	浸潤による間隙空気の移行試験における間隙空気圧と大気圧の経時変化	8-6
図 8.4.1-4	浸潤による間隙空気の移行試験における流量と膨潤圧の経時変化	8-6
図 8.4.1-5	浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布（流量制御過程）	8-7
図 8.4.2-1	浸潤による間隙空気の移行試験における給水圧と給水量の経時変化（圧力制御過程）	8-8
図 8.4.2-2	浸潤による間隙空気の移行試験における流量と膨潤圧の経時変化（圧力制御過程）	8-8
図 8.4.2-3	浸潤による間隙空気の移行試験における間隙空気圧と大気圧の経時変化（圧力制御過程）	8-8
図 8.4.2-4	浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布（圧力制御過程）	8-9
図 8.4.2-5	浸潤による間隙空気の移行試験における飽和度分布（圧力制御過程）	8-9
図 8.4.3-1	浸潤による間隙空気の移行のイメージ	8-10
図 8.4.3-2	浸潤による間隙空気の移行試験の工学技術への反映フロー	8-11
図 9.2.3-1	ドライコンプレッサー	9-4
図 9.2.3-2	ローター式吹付け機	9-4
図 9.2.3-3	材料供給機	9-4
図 9.2.3-4	吸引回収機	9-4
図 9.2.3-5	集塵機	9-4
図 9.2.3-6	吹付け工法の標準機器と配置	9-5
図 9.2.3-7	湿潤材料の定量供給機	9-6
図 9.2.3-8	湿潤材料供給機の供給量の定量性	9-6
図 9.2.3-9	超音速ノズルの概略図	9-7
図 9.2.3-10	転圧と吹付け工法による緩衝材の密度分布の比較	9-7
図 9.2.3-11	吸引方式によるリバウンド材の回収イメージ	9-8

図 9.2.3-12	吸引機のベルヌーイ効果.....	9-8
図 9.2.3-13	サイクロンによる気体と個体の分離技術.....	9-9
図 9.2.3-14	浮力法による嵩密度測定方法.....	9-10
図 9.2.3-15	不飽和土のメニスカス水の表面張力の概念図.....	9-10
図 9.2.3-16	極性有機分子-水、無極性有機分子-水の界面張力の相違.....	9-11
図 9.2.3-17	浸漬時間と乾燥密度関係（シリコンオイル染込みの影響あり）.....	9-12
図 9.2.3-18	浸漬時間と乾燥密度関係（シリコンオイル染込みの影響除去）.....	9-12
図 9.2.3-19	ノギス法とシリコンオイル法の比較.....	9-12
図 9.2.4-1	吹付け箱試験の概要.....	9-13
図 9.2.4-2	試験で使用した吹付け箱.....	9-13
図 9.2.4-3	突固め試験で得られた締固め曲線（締固めエネルギー5Ec）.....	9-15
図 9.2.4-4	吹付け箱試験で得られた締固め曲線.....	9-16
図 9.2.4-5	吹付け後の吹付け箱の写真（MX80 紛体）.....	9-17
図 9.2.4-6	吹付け後の吹付け箱の写真（MX80 5mm 以下）.....	9-17
図 9.2.4-7	吹付け後の吹付け箱の写真（Milos Ca-bentonite 紛体）.....	9-18
図 9.2.4-8	吹付け後の吹付け箱の写真（Milos Ca-bentonite 5mm 以下）.....	9-18
図 9.2.4-9	吹付け後の吹付け箱の写真（Friedland Clay 紛体）.....	9-19
図 9.2.4-10	吹付け後の吹付け箱の写真（Friedland Clay 5mm 以下）.....	9-19
図 9.2.4-11	締固め工法における間隙水の役割.....	9-20
図 9.2.4-12	透水係数の経時変化（Friedland Clay）.....	9-21
図 9.2.4-13	透水係数と乾燥密度の関係（Friedland Clay）.....	9-21
図 9.2.4-14	有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係（[7]に加筆）.....	9-22
図 9.3.1-1	施工方法の高度化試験イメージ.....	9-23
図 9.3.1-2	緩衝材施工試験工学規模リング型土槽.....	9-24
図 9.3.1-3	緩衝材の施工技術の高度化による影響度の低減試験工程.....	9-25
図 9.3.2-1	施工方法の実験イメージ.....	9-26
図 9.3.2-2	リング型モールドの諸元.....	9-26
図 9.3.2-3	リング型モールド.....	9-26
図 9.3.2-4	フローポンプ.....	9-27
図 9.3.2-5	ジャンクションパイプ.....	9-27
図 9.3.2-6	制御機器（シーケンサ、モータドライバ、PC）.....	9-27
図 9.3.2-7	実験装置系統図（Case1）.....	9-28
図 9.3.2-8	Case1 の吹付け方法（平面図）.....	9-29
図 9.3.2-9	Case2 の吹付け方法.....	9-29
図 9.3.2-10	ブロックサンプル箇所.....	9-30
図 9.3.2-11	吹付け前の様子（Case1）.....	9-30
図 9.3.2-12	吹付け後の施工部（Case1）.....	9-30
図 9.3.2-13	経過時間-送水圧-流量関係（Case1）.....	9-31
図 9.3.2-14	リング型モールドの湧水孔.....	9-31

図 9.3.2-15	側壁と底盤の間からの水漏れ.....	9-32
図 9.3.2-16	仕切り壁と側壁の間からの水漏れ.....	9-32
図 9.3.2-17	密度分布図 (Case1、平面図)	9-33
図 9.3.2-18	吹付け前の様子 (Case2)	9-34
図 9.3.2-19	吹付け後の施工部 (Case2)	9-34
図 9.3.2-20	経過時間-送水圧-流量関係 (Case2)	9-34
図 9.3.2-21	密度分布図 (Case2、側面図)	9-35
図 9.3.2-22	各段における施工部の側壁との界面部 (case2、モールド中心からの距離 1180mm)	9-35
図 9.3.2-23	吹付け前の様子 (Case3)	9-36
図 9.3.2-24	吹付け後の施工部 (Case3)	9-36
図 9.3.2-25	経過時間-送水圧-流量関係 (Case3)	9-36
図 9.3.2-26	密度分布図 (Case2、側面図)	9-37
図 9.3.2-27	各段における施工部の側壁との界面部 (Case3、モールド中心からの距離 1180mm)	9-37
図 9.3.3-1	検討のフロー.....	9-38
図 9.3.3-2	実規模 1/4 リングモールド外観.....	9-39
図 9.3.3-3	底板と側壁の剛結箇所	9-39
図 9.3.3-4	実規模 1/4 リングモールド組立順序	9-39
図 9.3.3-5	実規模 1/4 リングモールドの諸元 (側壁・底盤部)	9-40
図 9.3.3-6	実規模 1/4 リングモールドの諸元 (側壁・底盤部)	9-40
図 9.3.3-7	実規模 1/4 リングモールドの諸元 (アクリル蓋)	9-41
図 9.3.3-8	実規模 1/4 リングモールドの諸元 (鋼製蓋)	9-41
図 9.3.3-9	液状ガスケット	9-42
図 9.3.3-10	塗布の様子	9-42
図 9.3.3-11	フローポンプ	9-43
図 9.3.3-12	ジャンクションパイプ	9-43
図 9.3.3-13	制御機器 (シーケンサ、モータドライバ、PC)	9-43
図 9.3.3-14	実験装置系統図 (Case1 の場合)	9-43
図 9.3.3-15	吹付け方法 (平面図、図 9.3.2-8 を再掲)	9-44
図 9.3.3-16	経過時間-送水量-流量関係【Case1 堆積岩】	9-44
図 9.3.3-17	経過時間-送水量-流量関係【Case2 結晶質岩】	9-46
図 9.3.3-18	含水比と乾燥密度の関係.....	9-48
図 9.3.3-19	人工給水過程の給水圧の経時変化.....	9-49
図 9.3.3-20	経過時間-送水圧の関係【Case1 堆積岩】	9-51
図 9.3.3-21	経過時間-送水圧の関係【Case2 結晶質岩】	9-51
図 11.1.1-1	幌延地下研究施設試験位置	11-1
図 11.1.1-2	幌延地下研究施設試験位置	11-2
図 11.1.4-1	試験孔の形状.....	11-4

図 11.1.5-1	試験孔位置マーキング	11-5
図 11.1.5-2	作業前現場養生状況	11-5
図 11.1.5-3	既設コンクリート切断状況（コンクリートカッター使用）	11-6
図 11.1.5-4	既設コンクリートハツリ状況（ブレーカー、ピックハンマー使用）	11-6
図 11.1.5-5	人力による掘削ガラ・浮石の除去状況	11-7
図 11.1.5-6	掘削ガラ・浮石除去完了	11-7
図 11.1.5-7	型枠作成状況	11-8
図 11.1.5-8	型枠設置状況	11-8
図 11.1.5-9	型枠設置完了	11-9
図 11.1.5-10	コンクリート打設①（材料練混ぜ）	11-9
図 11.1.5-11	コンクリート打設②（材料練混ぜ）	11-10
図 11.1.5-12	コンクリート打設③（コンクリート型枠内投入）	11-10
図 11.1.5-13	コンクリート打設完了	11-11
図 11.1.5-14	型枠解体	11-11
図 11.1.5-15	孔壁保護コンクリート打設完了	11-12
図 11.1.5-16	無収縮モルタル打設状況	11-12
図 11.1.5-17	削孔状況（全景）	11-13
図 11.1.5-18	削孔状況（ピット内）	11-13
図 11.1.5-19	底盤スライム除去状況	11-14
図 11.1.5-20	試験孔削孔完了	11-14
図 11.1.5-21	孔壁保護用の塩ビ管の設置	11-15
図 11.1.5-22	試験孔 2（TG5-PE-1）孔壁展開写真	11-17
図 11.1.5-23	試験孔 3（TG5-PE-2）孔壁展開写真	11-18
図 11.1.5-24	壁面視察スケッチ（試験孔 2）	11-19
図 11.1.5-25	壁面視察スケッチ（試験孔 3）	11-20
図 12.1.2-1	坑道断面図（仮想）におけるブロック構成の例[1]	12-3
図 12.1.2-2	処分孔最上部の埋め戻し[1]	12-3
図 12.1.2-3	プラグの基本設計の断面図[2]	12-6
図 12.1.2-4	Posiva におけるプラグ試験（POPLU）[3]	12-7
図 12.1.2-5	SKB におけるプラグ試験（DOMPLU）[4]	12-7
図 12.1.3-1	人工注水用の給水管、エア抜き用の管の配置[6]	12-11
図 12.1.3-2	KBS-3V のプレグラウチング[6]	12-12
図 12.1.3-3	KBS-3H の掘削工法[6]	12-13
図 12.1.3-4	Mega Packer システム[6]	12-13
図 12.1.3-5	流入量に対応した KBS 3H の適用[6]	12-14
図 12.1.3-6	緩衝材ブロック設置時のゴムシート	12-14

表目次

表 1.1.3-1	処分システム工学確証技術開発の成果目標	1-4
表 2.1.3-1	5カ年間の全体研究計画.....	2-5
表 2.2.2-1	試験計画のための整理表[1]	2-9
表 2.2.2-2	抽出した試験項目とその試験分類.....	2-10
表 3.3.1-1	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験条件.....	3-5
表 3.3.4-1	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験供試体の物理試験 結果.....	3-10
表 3.4.1-1	密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験条件.....	3-17
表 3.4.2-1	直列膨潤量試験の解体結果	3-23
表 3.5.1-1	応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験条件.....	3-28
表 3.5.2-1	直列膨潤量試験の解体結果	3-34
表 3.6.3-1	圧密試験ケース	3-41
表 3.6.3-2	供試体諸元	3-43
表 3.7.2-1	直列膨潤圧試験結果に基づく残留密度分布と透水係数	3-48
表 4.1.3-1	可逆性確認試験ケース案.....	4-3
表 4.1.5-1	排水から算出した Ca 型化率	4-7
表 4.1.5-2	ベントナイト系人工バリア材料の陽イオン交換容量一覧.....	4-7
表 5.1.1-1	鈴木らの試験条件[1]	5-2
表 5.1.2-1	長尺ベントナイト供試体を用いた次元浸潤速度取得試験のケース	5-4
表 5.1.4-1	飽和度と比抵抗の関係取得試験ケース一覧	5-8
表 6.1.2-1	原位置施工の試験ケース	6-6
表 6.1.3-1	膨潤供試体のブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験ケース	6-14
表 6.1.3-2	エロージョン状況一覧	6-28
表 6.1.4-1	水みちの収斂現象の確認試験全ケースの試験条件.....	6-34
表 6.1.5-1	人工給水・エロージョン試験の検討ケース	6-60
表 6.1.5-2	人工給水・エロージョン試験の状況一覧.....	6-62
表 6.2.2-1	流路長がブレイクスルー、パイピング、エロージョンに及ぼす影響試験ケース	6-66
表 6.3.2-1	自己シール限界流速取得試験ケース	6-84
表 6.4.2-1	工学規模パイピング・エロージョン試験ケース	6-90
表 6.5.3-1	処分施設の湧水対策一覧.....	6-99
表 6.7.2-1	排水の状況	6-110
表 6.7.2-2	排水の ICP-AES 結果	6-112
表 7.1.2-1	土槽規模試験の試験ケース	7-2
表 7.1.3-1	ペレット充填による模擬緩衝材の初期状態	7-3
表 7.1.4-1	ブロック定置による模擬緩衝材の初期状態	7-9
表 7.1.5-1	ブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元	7-27

表 8.1.1-1	浸潤による間隙空気の移行試験のケース	8-2
表 9.2.3-1	本工法の標準機器仕様一覧	9-5
表 9.2.3-2	サイクロンによる気体と固体の分離技術の効果	9-9
表 9.2.4-1	各試料のモンモリロナイト含有率	9-14
表 9.2.4-2	各試料の土粒子密度	9-14
表 9.2.4-3	吹付け箱試験ケース一覧	9-15
表 9.2.4-4	各試験ケースの乾燥密度一覧	9-16
表 9.2.4-5	各試験ケースの付着量一覧	9-16
表 9.2.4-6	Friedland Clay の透水試験結果	9-21
表 9.3.1-1	緩衝材の施工方法の高度化試験ケース案	9-25
表 9.3.2-1	実験ケース	9-28
表 9.3.3-1	実験ケース	9-38
表 9.3.3-2	液状ガスケットの諸元	9-42
表 9.3.3-3	各イベントの状況【Case1 堆積岩】	9-45
表 9.3.3-4	各イベントの状況【Case2 結晶質岩】	9-47
表 9.3.3-5	シリコンオイル比重法による測定結果	9-48
表 11.1.2-1	緩衝材エロージョン試験仕様	11-3
表 11.1.2-2	緩衝材エロージョン試験 試験ケース一覧	11-3
表 11.1.3-1	緩衝材エロージョン試験全体工程表(5年間)	11-4
表 11.1.5-1	壁面観察結果のまとめ(試験孔2)	11-21
表 11.1.5-2	壁面観察結果のまとめ(試験孔3)	11-21
表 12.1.1-1	SKB-3 における緩衝材のバリア機能、設計留意事項とパラメータ	12-2
表 12.1.2-1	埋め戻し材の基本設計に対して計算された設置後の乾燥密度[2]	12-4
表 12.1.2-2	坑道埋め戻し材性能指標および達成基準の要約[2]	12-4
表 12.1.2-3	プラグに用いる低 pH コンクリートの配合[2]	12-6
表 12.1.3-1	SKB における 1 処分孔当たりエロージョン量 100kg の算定根拠(その 1)	12-9
表 12.1.3-2	SKB における 1 処分孔当たりエロージョン量 100kg の算定根拠(その 2)	12-10
表 12.1.3-3	KBS-3H と 3V との比較	12-15

第1章 研究の目的及び概要

1.1 処分システム工学確証技術開発の背景、および目的

1.1.1 開発の背景

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、その処理・処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）については、地層処分に向けた取組が行われており、処分技術の信頼性向上に関する基盤技術の開発が、最終処分のサイト選定プロセスを考慮して段階的に実施されている。

処分場の操業期間中におけるガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術及び人工バリアのモニタリング技術等の要素技術について、サイト選定の第3段階である精密調査の前半段階（地上からの調査段階）において必要となる基盤技術が整備されてきた。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のためには実際の深部地下環境での活用を通して、これらの工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、操業期間中における自然災害である巨大地震や巨大津波等の操業期間中の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

本事業では、上記状況を踏まえ、今後5年程度の期間について処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術及びモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設を活用して確証していくとともに、自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行う。

1.1.2 開発の目的

(1) 処分システム工学確証技術開発

人工バリアとして、オーバーパック及び緩衝材の製作・施工技術について、深地層の環境を考慮し、品質評価に必要な指標の提示や品質評価、健全性評価を行う。また、モニタリング技術の地下研究施設での適用性確認を行う。

1) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック

実際の地下深部を想定した複合系でのオーバーパック溶接部の耐食性評価試験を実施するとともに、オーバーパック材料の機械的性質が長期健全性におよぼす影響を品質評価に取り入れるための調査・検討を実施する。

上記実施内容で得られる知見より、オーバーパックの長期健全性をより確実なものとするため、構造評価と腐食評価を合わせた、人工バリア性能を満足するオーバーパック指標の具体化に資するものとする。

平成25年度は、オーバーパック溶接部健全性評価モデルの検討等を実施する。具体的には、オーバーパックの設計、製作、評価の各段階で必要となる判断指標を抽出し、3つの検討項目（腐食、材料劣化、欠陥）に大別する。そして、抽出した判断指標を提示するための

健全性評価モデル案を作成する。このモデル案を基に、5カ年の全体計画を立案する。腐食試験については、地上及び地下施設を活用した試験計画を立案し、検討に着手する。また、材料劣化事象の一つである中性子照射脆化を予測するための、オーバーパックの照射線量計算について検討を進める。さらに、非破壊検査による欠陥寸法測定の誤差について検討を実施する。

2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材

緩衝材の製作・施工技術について実規模試験などを通してその実現性が示された一方、緩衝材の初期の密度分布は膨潤しても均質化せず密度分布が残ることや、隙間を有する緩衝材施工において湧水量によってはパイピングが発生し、ベントナイトの成分が流出することが示されている。

本開発では、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した調査・検討を実施し、緩衝材施工法の選定方法に定量的な評価を加える。さらに、緩衝材の性能劣化事象として懸念されるパイピング／エロージョン現象に対しては、工学的対策の提示に向けた調査・検討を実施する。また、上記実施内容で得られる知見を取りまとめ、多様な技術により構築される人工バリアの品質／健全性評価に向け、人工バリア性能を満足する緩衝材指標の具体化に資するものとする。

平成25年度は、人工バリアの品質確認及び品質改善手法の検討等を実施する。具体的には、今後5カ年の研究計画を立案するとともに、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した調査により緩衝材施工法の選定方法を検討する。また、パイピング／エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討及び人工バリア全体としての設計・施工仕様に関する検討を実施する。さらに、地下施設を活用した試験計画を策定し、試験孔と設備の一部を施工する。平成25年度は、人工バリアの品質確認及び品質改善手法の検討等を実施する。

3) モニタリング関連技術の整備

地層処分のためのモニタリングの目的を検討し、特に重点的な検討が必要な性能確認モニタリングについて制約条件やパラメータの選定方法案を提示するとともに、地下研究施設における地中無線通信装置の性能確認試験の成果を反映した技術メニューの整備を実施した。さらに、併せて制度的管理としての記録保存について媒体の開発や国内外の調査を行い、基本的システム案を提示した。

本整備では、技術的選択肢検討の基盤となるモニタリングの枠組みや結果の反映方法等に関する検討を、国際研究等への参画とフィードバック等により実施する。また、モニタリングの技術的実現性の向上のため、バリア機能や処分場性能を保持したモニタリングシステムの確立に向けた地中無線モニタリング技術の検討を、地下研究施設への反映を考慮して実施する。

上記で得られる知見より、セーフティーケース信頼性強化に資するモニタリングの技術選択肢の整備を推し進め、モニタリングシステムの提示に資するものとする。

また、併せて制度的管理としての記録保存についても動向の調査を実施する。

平成25年度は、モニタリング技術に関する技術選択肢の整備等を実施する。具体的には、

国際共同研究 MoDeRn による検討成果の取りまとめにより検討課題を抽出し、5 年間の研究計画を立案する。また、モニタリング結果の性能確認への反映方法に関する検討を実施するとともに、研究開発成果や文献調査結果を反映した技術メニューの整備方針を検討する。さらに、モニタリングの技術的実現性の向上のため、地中無線モニタリング技術について地下研究所における中継試験等を実施する。これらに加え、記録保存に関し OECD/NEA 等における検討状況の調査を実施する。

(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発

本開発では、東北地方太平洋沖地震を受け、事業主体が実施する地層処分施設の設計に反映すべく、主に処分事業操業中の処分システムに対する地震・津波等の大規模な自然災害の影響を検討し、安全確保のための対策技術を開発、提示する。

平成 25 年度は、上記の目標を 5 年間で達成可能な調査及び試験に係る研究・試験計画を具体化する。さらに、具体化した研究・試験計画に基づき、技術課題に係る要素技術についての調査及び解析的検討等を実施することにより、要素技術の適用性を確認する。また、異常状態・事故発生時の人工バリアの限界性能等に係る調査・試験を実施する。具体的には、平成 24 年度に選定した「状況把握・監視技術」、「施設計画技術」及び「人工バリアの限界性能等の調査試験」の 3 つの技術開発課題について、今後 5 年間の研究・試験計画を具体化する。また、具体化した研究・試験計画に基づき、異常時の状況把握・監視手順の整理と状況把握・監視に係る現況技術の調査、及び処分パネルにおける火災事象等に対する安全確保のための施設計画に係る調査・検討を実施する。さらに、人工バリアの火災影響についての解析的検討と試験によるデータ取得及びキャニスタの腐食性の調査を実施する。

1.1.3 開発項目の相互関係

人工バリアの品質に係わる判断指標や健全性評価技術は、製作・搬送・定置技術により構築される人工バリアを対象として、オーバーパックと緩衝材の相互影響を考慮した検討を実施するものである。また、人工バリアの構築後の健全性は、性能確認に関するモニタリングの知見と技術に基づいて確認する必要がある。さらに、操業期間中の自然災害への対策に関しては、自然災害が人工バリアの健全性に与える影響や、状態把握のためのモニタリングを理解した検討が不可欠である。以上のように本事業にて実施される各開発は相互に関係を持つことから、統合的に開発を実施する必要がある。図 1.1.3-1 に処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係を示す。また、併せて成果目標を表 1.1.3-1 に示す。図 1.1.3-1 に於いて、「人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材」は、オーバーパックの品質／健全性に関する検討と相互に情報を与え、互いの影響を考慮するとともに、モニタリングに関する検討に対してモニタリング対象としての事象とパラメータをインプットとして与え、これらの事象のモニタリングの技術的可能性合うとプとして受け取る。また、自然災害の影響による人工バリアの限界性能に関する検討結果をアウトプットとして受け取る。このように、「人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材」は、処分システム工学確証技術開発の各開発項目と連携を持って進める必要があることが分かる。

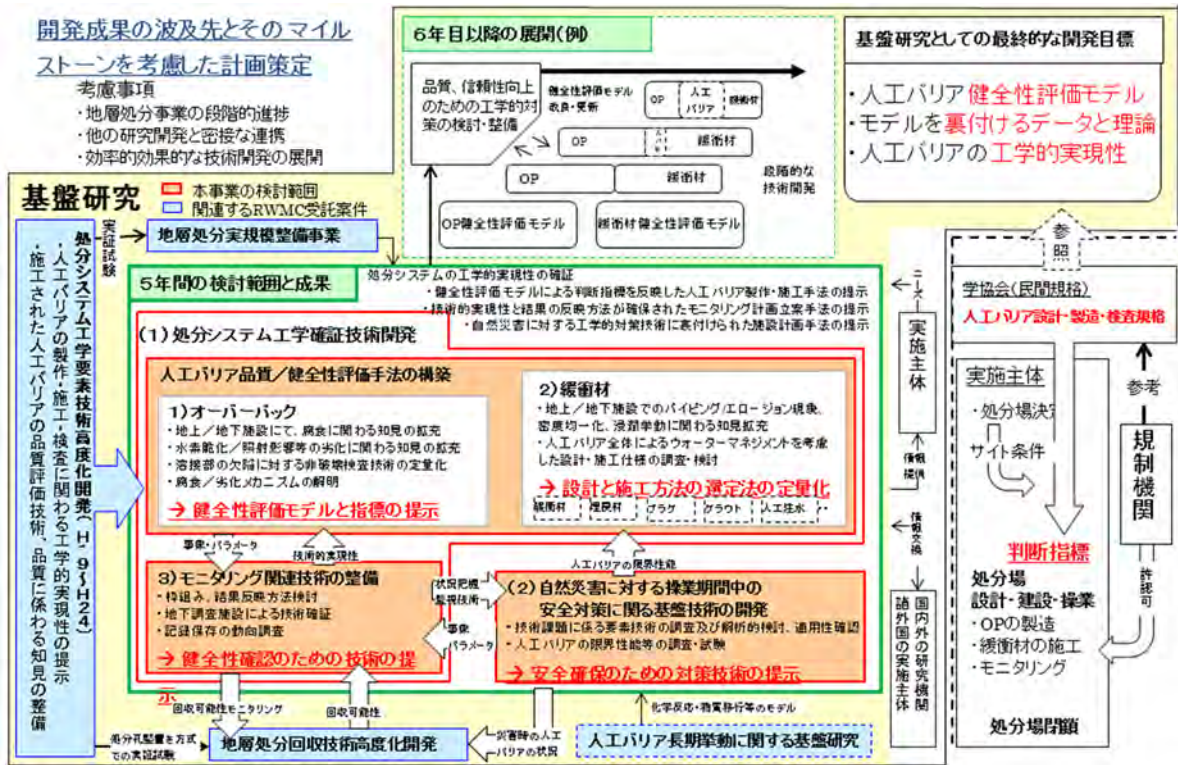


図 1.1.3-1 処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係

表 1.1.3-1 処分システム工学確証技術開発の成果目標

	H25	H26	H27	H28	H29
(1) 処分システム工学確証技術開発					
1) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—オーバーバック	・判断指標の抽出 ・健全性評価モデル案の作成 ・研究開発計画策定	・判断指標に影響する劣化事象の抽出	・破壊評価に基づく限界欠陥寸法の提示	・材料劣化を考慮した品質評価法の提案	・品質評価/健全性評価手法の提案
2) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象(流入量、液種)の定量化	・ウォーターマネジメント(人工注水、グラウト等)の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	・説明性のある長期健全性判断指標の提示
3) モニタリング関連技術の整備	・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・作業安全等に関するモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示
(2) 自然災害に対する作業期間中の安全対策に関する基礎技術の開発	・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・火災事象に対する人工バリアの健全性の把握	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案	・人工バリア限界性能等に関する知見の整備	・地下施設の作業安全確保のための制約事項等の提案

5年間の成果目標

処分システムの工学的実現性の確認

- ・健全性評価モデルによる判断指標を反映した人工バリア製作・施工手法の提示
- ・技術的实现性と結果の反映方法が確保されたモニタリング計画立案手法の提示
- ・自然災害に対する工学的対策技術に裏付けられた施設計画手法の提示

1.2 人工バリア品質評価技術の開発（緩衝材）に係わるこれまでの開発成果

1.2.1 遠隔操作技術高度化開発（搬送・定置技術）

(1) 開発の目的

地層処分に関わる遠隔操作技術については、核燃料サイクル開発機構の「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性・地層処分研究開発第2次取りまとめ（JNC TN1400 99-020～023）」（以下、「HLW 第2次取りまとめ」と称す）[1]に示された処分概念に対する技術の実現性を幅広く、定量的に示しておくことが技術基盤の整備と事業推進の支援として求められるところである。

「遠隔搬送・定置技術高度化開発」では、処分システムの構築を行う操業技術のうち、人工バリアを構築するため、主として技術開発課題の多い緩衝材について処分孔、処分坑道への搬送・定置技術を対象に、操業システムの成立性の提示に向けて、実規模試験等を通して各要素技術や要素技術の組合せによる技術的実現性を提示してきた。

(2) 開発の成果

代表的な廃棄体の定置方式として、処分孔縦置き定置方式と処分坑道横置き方式がある。処分孔縦置き定置方式では、廃棄体は処分坑道に一定間隔で縦向きに掘削された処分孔にそれぞれ定置される。一方、処分坑道横置き方式では、廃棄体は処分坑道に直接横向きに一定間隔で定置される。これらの定置方式は処分場の地質環境条件等に応じて、それぞれの方式の特徴を生かしながら、組合せも含めて設定されることとなる。「HLW 第2次取りまとめ」に示されている人工バリアの仕様例を図 1.2.1-1 に示す。

「遠隔搬送・定置技術高度化開発」では、処分孔縦置き方式、処分坑道横置き方式のそれぞれに対して定置方式の技術オプション（図 1.2.1-2）を提示するとともに、処分孔縦置き方式に対してはブロック定置方式、原位置締固め方式、吹付け方式の、処分坑道横置き方式に対してはペレット充てん方式、PEM方式の材料や要素技術の組合せによる実規模での緩衝材の製作・組立、搬送・定置の実現性を提示するとともに、人工バリアの構築によって生じる、品質に係わる種々の状態を提示した。具体的には、緩衝材を「HLW 第2次取りまとめ」に示された仕様例（ベントナイト 70wt%とケイ砂 30wt%混合、乾燥密度 1.6Mg/m³、厚さ 700mm）を満足するための様々な成型方法を各技術オプションの中で検討した結果、成形方法により「密度分布（乾燥密度）」の違いが生じることを示した。また、例えば緩衝材定置（施工）のためのブロック定置方式では緩衝材ブロックと処分孔の間に隙間が生ずることを示し、この隙間をベントナイト系材料（ペレット等）により充てんする技術と達成密度（乾燥密度）を提示した。これらに加え、操業環境に関する調査を実施することにより、緩衝材の品質を変化させる因子として「温度」「湿度」「湧水」を挙げ、対応する緩衝材の品質指標として「密度」「成分」「形状」を特定した。「遠隔搬送・定置技術高度化開発」の開発成果を図 1.2.1-3 に示す。

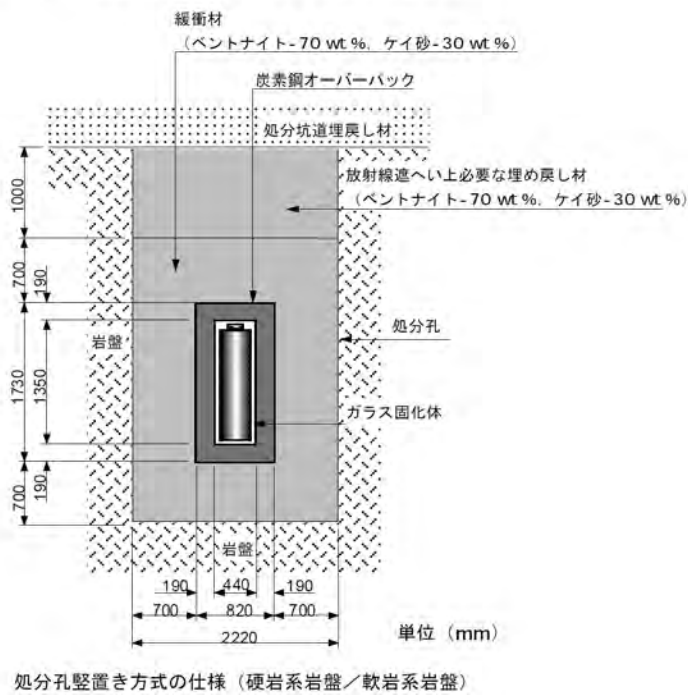
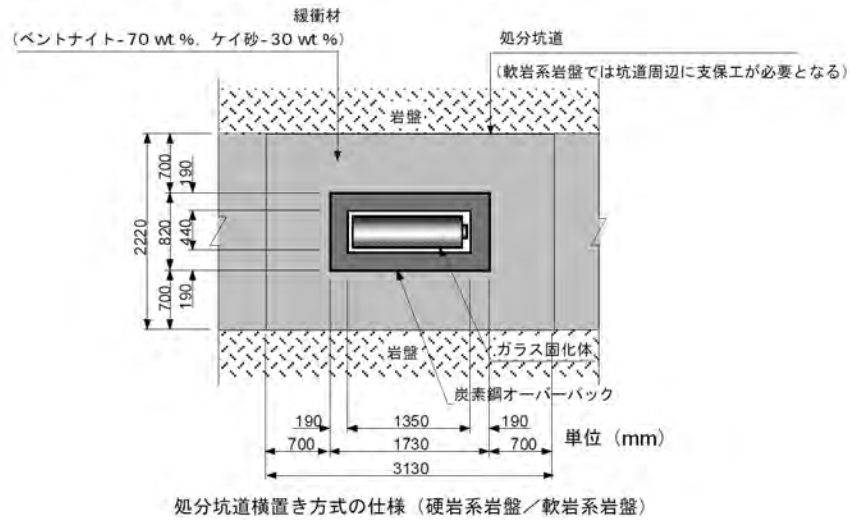


図 1.2.1-1 人工バリアの仕様例 (HLW 第2次取りまとめ)

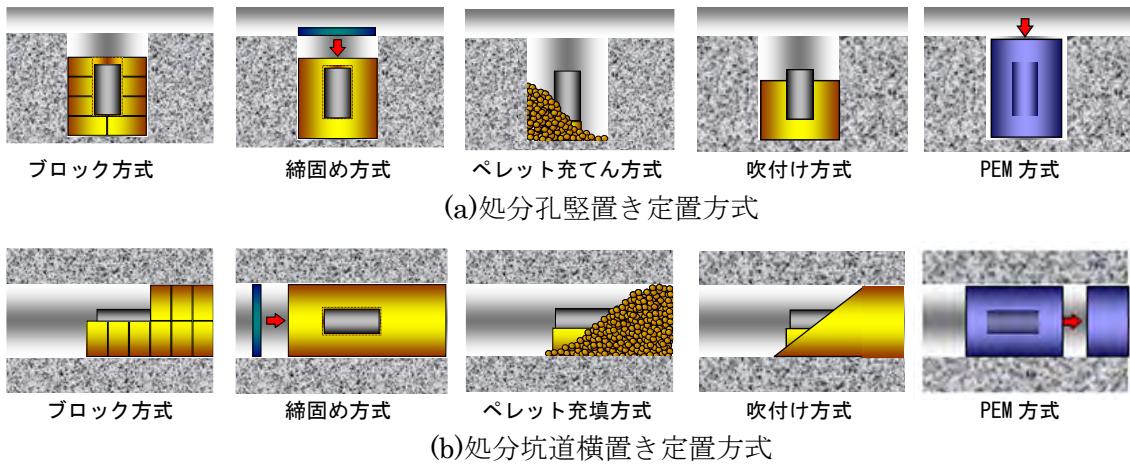


図 1.2.1-2 搬送・定置技術オプション

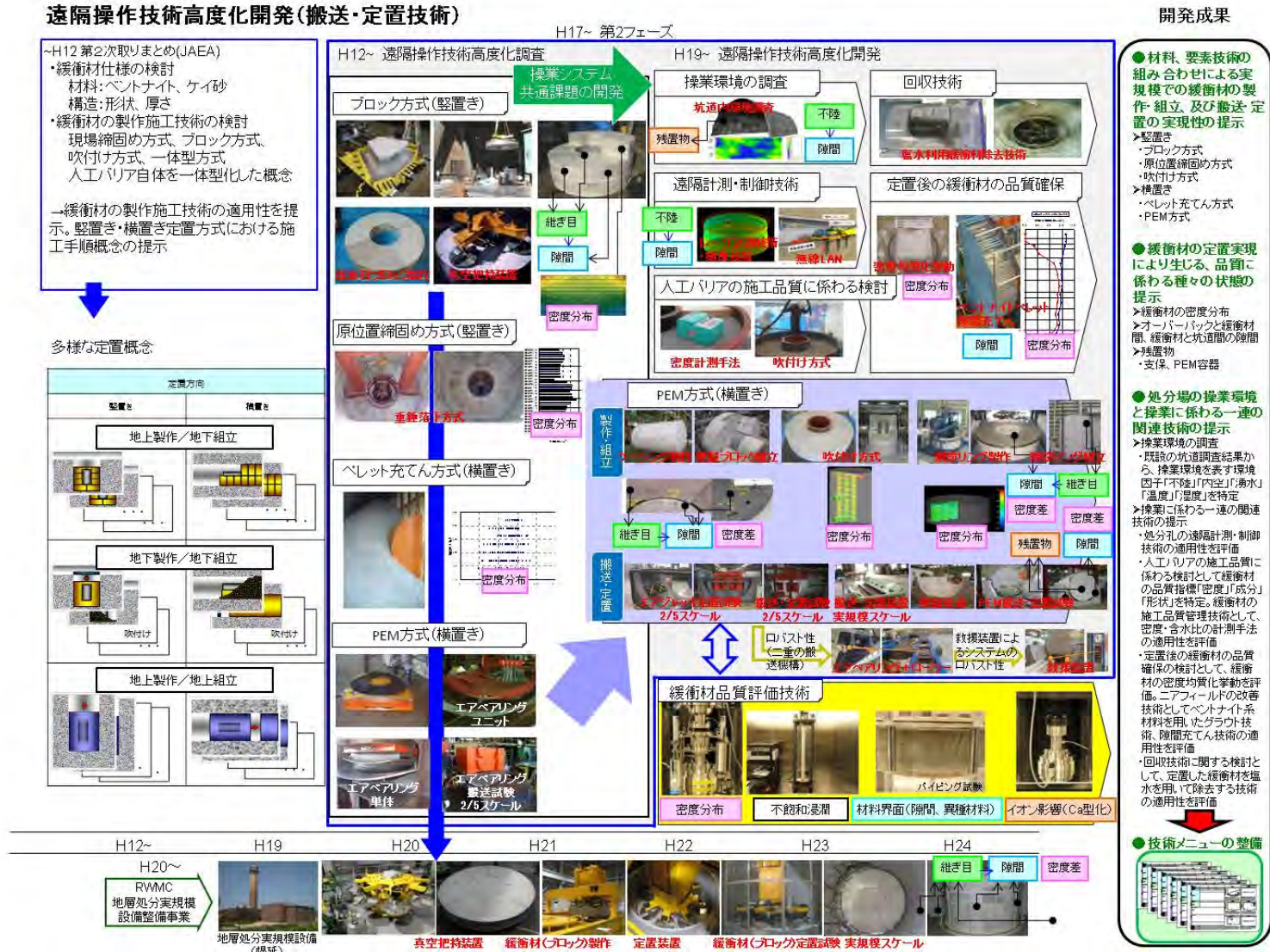


図 1.2.1-3 遠隔高度化開発—搬送・定置技術の成果[2]

1.2.2 人工バリア品質評価技術の開発（緩衝材）

(1) 本研究の背景

前述の「遠隔搬送・定置技術高度化開発」に於いて特定した緩衝材の品質指標である「密度」「成分」「形状」は、地層処分施設の建設・操業時の緩衝材の施工品質と、その後の再冠水に至る期間における環境の「温度」「湿度」「湧水」の影響を反映する。

地層処分施設の建設・操業時は、湧水や滴水に対する対策を講じて、ベントナイト系人工バリア材料に締固めという外力を作用させて緩衝材を構築する時期であり、緩衝材の化学変質に必要な間隙水がほとんど存在しない不飽和状態である。このため、建設・操業時の緩衝材は、力学的な挙動が支配的である。また、この時期の緩衝材は、不飽和状態であるため、施工に伴う外力が緩衝材に作用しても時間遅れを伴う圧密挙動のような非定常状態は長期間続かず、比較的短期間に釣合い（定常）状態に達する。一方、再冠水後においては、緩衝材に作用する外力は天然バリアのクリープ挙動程度であり、化学的な変質が支配的である。この化学的な変質は非常に緩慢であり、室内試験の時間スケールの中では定常状態と見なせる場合が多い。このような理由から、これまでの放射性廃棄物地層処分施設の緩衝材の室内試験による研究は、比較的短時間に定常状態と見なせる建設・操業時の検討や、定常状態と見なせる再冠水後の緩衝材の長期性能評価に関するものが大半である。

しかしながら、緩衝材の構築後から再冠水終了後までの期間（力学的挙動が支配的な状態から化学的な挙動が支配的な状態への過渡的段階）においては、地下水の浸潤によってベントナイトの膨潤が生じる一方で剛性や強度が低下するなど、力学的な釣合い場が崩れ、別の釣合い状態へ遷移する。さらにグラウトなどの影響による Ca イオンを含む地下水の浸潤によってベントナイト中のモンモリロナイトの Ca 型化などの化学的な変質が生じ始める。このように再冠水時は、水理、力学、化学的な挙動が全て別の安定な系へ変遷していく過程であり、室内試験規模で検証することが非常に難しく、現状では十分な検討がなされていない。このため、建設・操業時から長期性能までの緩衝材の性能を連続的に評価することが難しい状況であり、建設・操業時に要求性能を満足している緩衝材が、長期性能の観点から緩衝材に求められる性能を満足できない可能性も懸念される。

このため、建設・操業時の緩衝材の施工品質が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響を考慮して再冠水時の挙動を定量的に評価することによって、図 1.2.2-1 に示す建設・操業時から再冠水後（長期性能評価の初期状態）までの緩衝材の性能を連続的に評価する必要がある。

ここで、不飽和状態での緩衝材における水の移行と、飽和状態における水の移行は異なるものであることが指摘されている[3]。不飽和状態では周囲の岩盤からの水の吸収によって緩衝材のサクション（間隙水の負圧）や相対湿度の変化に伴って膨潤圧、乾燥密度が変化する。また、岩盤からの流入量によってはパイピング・エロージョンが発生し、移流が重要なプロセスとなり、長期の安全性能に影響を与える。一方、緩衝材の飽和状態では緩衝材の浸透性は非常に低いため、水、溶存種の重要なメカニズムは拡散となる。したがって緩衝材の膨潤挙動については不飽和状態と飽和状態を分けて取り扱うことが必要である。

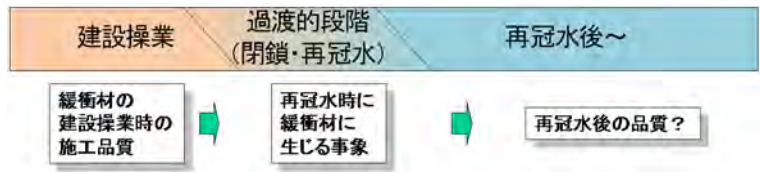


図 1.2.2-1 検討内容の人工バリアの時系列における意味

(2) 開発の目的

地層処分における緩衝材については、建設・操業時の緩衝材の施工品質が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響を考慮し、再冠水時の挙動を定量的に評価することによって、建設・操業時から再冠水後（長期性能評価の初期状態）までの緩衝材の性能を連続的に評価する必要がある。「人工バリア品質評価技術の開発」（以下「本研究」と称す。）では、緩衝材の再冠水挙動に影響を及ぼす因子として、

- ・ 隙間の有無、位置
- ・ 密度分布の程度、方向
- ・ 初期透水性（施工直後の間隙分布）

を取り上げ、これらが再冠水時に生じる以下の事象により、どのように変遷するかを把握するためのデータを取得してきた。

- ・ 膨潤挙動
- ・ 化学変質（イオン交換）
- ・ 力学性能変化
- ・ 地下水浸潤（流入量、液種）
- ・ ガス移行（間隙空気移行）
- ・ 熱影響

本研究はこのようなデータを踏まえ、①再冠水後の長期性能の観点から施工技術の評価項目に数値範囲を与えること、つまり、施工品質への仕様の提示（例えば、均質化すると見做せる密度差の範囲）を目的としている。これらの結果は、海外の実施機関（SKB等）との共同研究成果も踏まえ、施工方法の選定や施工管理項目の設定に反映される（図 1.2.2-2）。

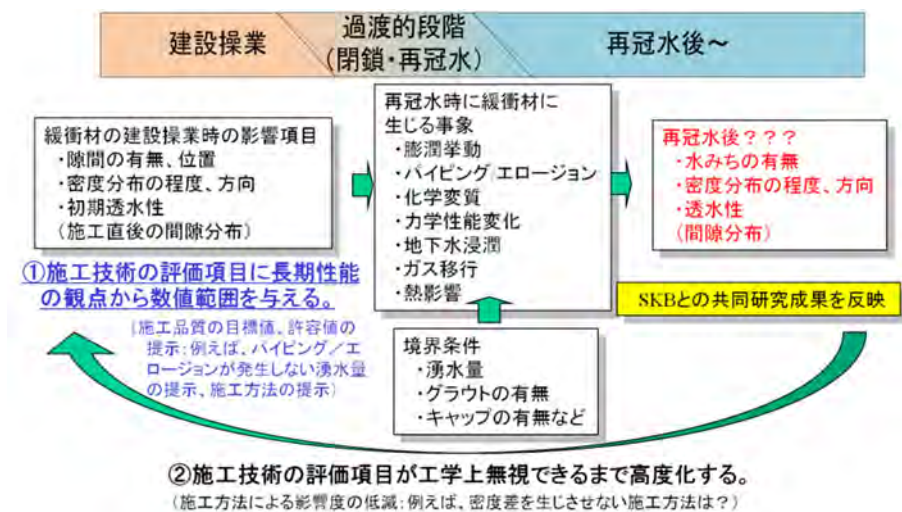


図 1.2.2-2 再冠水時に緩衝材に生じる事象を踏まえた建設操業時の影響項目の評価とその反映先

さらに、図上①で提示した数値範囲に抑えることができる技術選択肢を拡充するため、②施工技術の評価項目が工学上無視できるまで高度化すること、つまり、施工方法による影響度の低減（例えば、密度差を生じさせない施工方法の開発）も目的としている。緩衝材施工技術の高度化によって施工技術が緩衝材の長期性能に及ぼす影響を低減できれば、再冠水中に緩衝材に発生する事象が、緩衝材の定置から長期に亘る性能に及ぼす影響を小さくすることが出来るため、長期性能評価技術の精度が向上するものと考えられる。

本研究は、再冠水後の長期間に亘る“緩衝材の性能を適切に確保”するために図 1.2.2-3 に示すように長期性能の初期条件として“再冠水後の緩衝材の品質”に大きく影響する“建設作業時の施工品質”、“地下水の浸潤等再冠水時の影響”に関する指標を与えることを目的としている。再冠水後の緩衝材の品質を評価するためには、“建設作業時の施工品質”を評価した上で、“地下水の浸潤等再冠水時の影響”を適切に評価することが必要であり、“建設作業時の施工品質”は、設計仕様、施工材料、施工（建設作業）技術、施工精度及び原位置における施工条件（湧水圧・量等）によって制約を受けるためである。

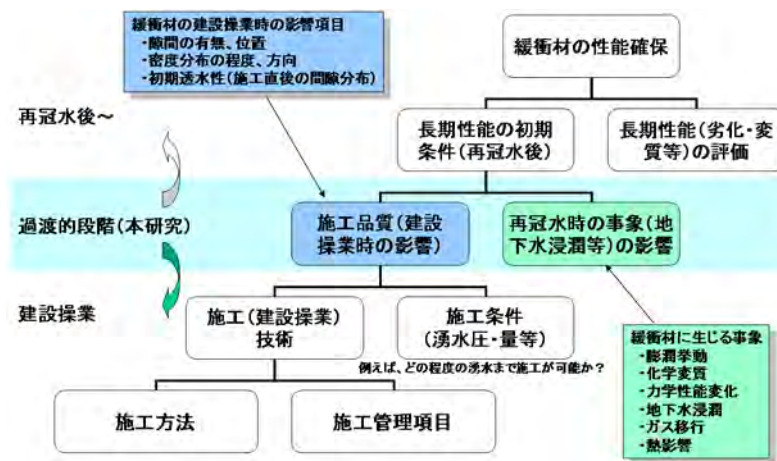


図 1.2.2-3 本研究の位置づけ

(3) 開発の成果

本研究では、製作・施工された緩衝材の過渡的段階（地下水の再冠水）における事象について、緩衝材の性能を定量的に評価できる知見を取得し、工学技術へ反映すること、すなわち緩衝材の設計・施工仕様設定に資する知見を取得することを目的に開発を進めてきた。開発成果を図 1.2.2-4 に示す。以下、本研究を通じて取得した知見をまとめる。

1) 施工方法に起因する密度分布の範囲（密度差）の設定について

これまでの緩衝材性能の考え方は、緩衝材全体としての平均乾燥密度で考えていたため、施工時、膨潤後の乾燥密度に区別がなかった。しかし密度分布を有する緩衝材は膨潤しても密度分布が残留する可能性があり、その場合、膨潤後の乾燥密度と施工時の乾燥密度は区別して取り扱わなければならない。本開発では、応力履歴が緩衝材の均質化に及ぼす影響について、力学的な解釈により定量的に評価できる見通しを得た。これにより、以下に示すようなプロセスを追って工学技術への反映が期待できる。

- ① ベントナイトの膨潤によって均質化が期待できる密度差が定量的に与えられる。
- ② 緩衝材の施工方法に起因するベントナイトの密度分布（密度差）を施工試験などによって取得する。
- ③ ①、②から施工方法毎に膨潤後の密度分布が推定できる。
- ④ この膨潤後の密度分布と要求される透水係数を比較することによって、施工方法の選択における指標を示すことが可能となる。

2) 緩衝材の設計・施工仕様設定のプロセス（案）について

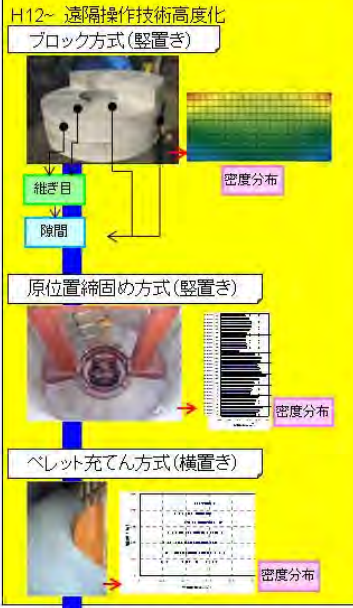
処分場の満足すべき性能は、放射性核種の移行を抑制することである。この性能を満足するため、人工バリア（ガラス個化体、オーバーパック、緩衝材による遮蔽）及び天然バリア（岩盤による遮蔽）からなる多重バリアシステムが構成される。

このうち、緩衝材が満足すべき性能は緩衝材の乾燥密度に対する依存（さらに、成分としてモンモリロナイト含有量、形状として緩衝材厚さも依存する）が大きい。すなわち、緩衝材に求められる低透水性などを満足するためには、乾燥密度の設定が必要となり、乾燥密度の設定にあたっての施工仕様設定のプロセスが必要となる。図 1.2.2-5 に示す、緩衝材の設計・施工仕様設定のプロセス（案）には、前述で示した「施工方法に起因する密度分布の範囲（密度差）の設定」に加え、緩衝材が飽和に至るまでの期間（流入量、地下水組成、浸潤速度などに依存）に発生する可能性がある、イオン交換（層間イオン）、パイピング・エロージョンなど、本研究を通じて明らかになってきた、「緩衝材が満足すべき性能」に対し影響を与え得る事象も記載した。パイピング・エロージョン事象は処分孔、処分坑道の湧水を規定する重要な事象と考えられる。以下に緩衝材の設計・施工仕様設定のプロセス（案）の内容を示す。

- ① 緩衝材の低透水性は透水係数の範囲で与えられる。この緩衝材透水係数と乾燥密度の関係は、既往の研究で多数取得されている。
- ② 緩衝材の低透水性が透水係数の範囲で与えられれば、緩衝材の乾燥密度の範囲に変換できる。ただし、ここで規定される緩衝材の乾燥密度の範囲は、膨潤後（飽和時）の乾燥密度で規定されていることに注意が必要である。
- ③ 膨潤後の緩衝材の乾燥密度が規定されると、施工時の許容される乾燥密度の範囲が規定できるが、施工時の乾燥密度に影響を与える要素には、湧水量、液種、成分（モンモリロナイト含有量など）、形状、含水比、隙間、応力履歴、浸潤速度がある。
- ④ さらに、この許容される施工時乾燥密度の範囲を実現できる施工方法、及び施工仕様が決まる。各施工方法は、コスト比較や湧水環境下での施工可能性、さらには安全衛生などの観点から最終的な決定がなされる。
- ⑤ この許容される施工時乾燥密度の範囲を満足できる施工方法、及び施工仕様は、別途施工試験においても決定されるべきであるが、本研究の成果は緩衝材性能と設計・施工仕様を結び付ける理論的解釈（考え方）や、数値範囲に資する知見として反映することとなる。

人工バリア品質評価技術の開発(緩衝材)

~H12 第2次取りまとめ(JAEA)
 ・緩衝材仕様検討
 材料:ベントナイト、ケイ砂
 構造:形状、厚さ
 ・緩衝材の製作施工技術の検討
 現場締固め方式、ブロック方式、吹付け方式、一体型方式、人工バリア自体を一体化した概念
 ~緩衝材の製作施工技術の適用性を提示。縦置き・横置き定置方式における施工手順概念の提示



H20~ 人工バリア品質評価技術(緩衝材)の開発

発生事象の整理

発生事象	発生状況	対策	効果
不均質	発生	均質化	達成
隙間	発生	充填	達成
水移動	発生	抑制	達成
イオン交換	発生	抑制	達成
間隙空気移行	発生	抑制	達成

研究の基本方針(試験のスケールアップ)

建設作業/過渡的段階/再冠水後~

単一事象

- 密度均質/不均質
- バイピンング/エロージョン
- 水移行
- イオン交換
- 間隙空気移行

複合事象(スケールアップ)

- 不均質な浸潤・膨潤挙動の把握
- 施工過程を考慮したバイピンング試験

吹付け方式

堆積岩における 湧水環境模擬試験

結晶岩における 湧水環境模擬試験



開発成果

●緩衝材の製作・組立及び搬送・定置実現により生じる、品質に係わる種々の状態(密度分布、隙間、残置物)が緩衝材の人工バリア性能(低透水性、自己シール性など)に及ぼす影響の理解

- 密度均質/不均質
 - 緩衝材の初期の密度分布は、膨潤でも均質化せず、密度分布が残ることが分かった。これは応力が均合い状態に至るまでの膨潤しないという力学的解釈で説明できる。
- バイピンング/エロージョン
 - 隙間を有するブロック供試体、隙間を有するペレット供試体でバイピンング試験を実施し、バイピンングの発生条件となる流量などを取得した。また、ブロック供試体でNaCl水溶液を通水したバイピンング試験では、ケイ砂とベントナイトの分離、ケイ砂の沈降堆積が起こり、緩衝材の自己シール性が障害されることが分かった。
- 水移行
 - 不飽和長尺ベントナイトに蒸留水とNaCl水溶液を通水し、一次元浸透試験を実施し、浸透フロントの移動速度を取得した。設定した水圧条件下では自己拡散で浸透フロントが推移することを確認した。
- イオン交換
 - 緩衝材を蒸留水で飽和させた後、CaCl₂水溶液でブレイドレーション効果を確認した。本試験条件では、一定の期間は透水係数の上昇は見られないものの、時間の経過とともに透水係数の上昇が見られ、実質と飽和の順番によらず、透水係数によって時点の浸潤状況によって決まる可能性が高いことが分かった。

●技術メニューの整備

図 1.2.2-4 人工バリア品質評価技術の開発—緩衝材の成果[2]

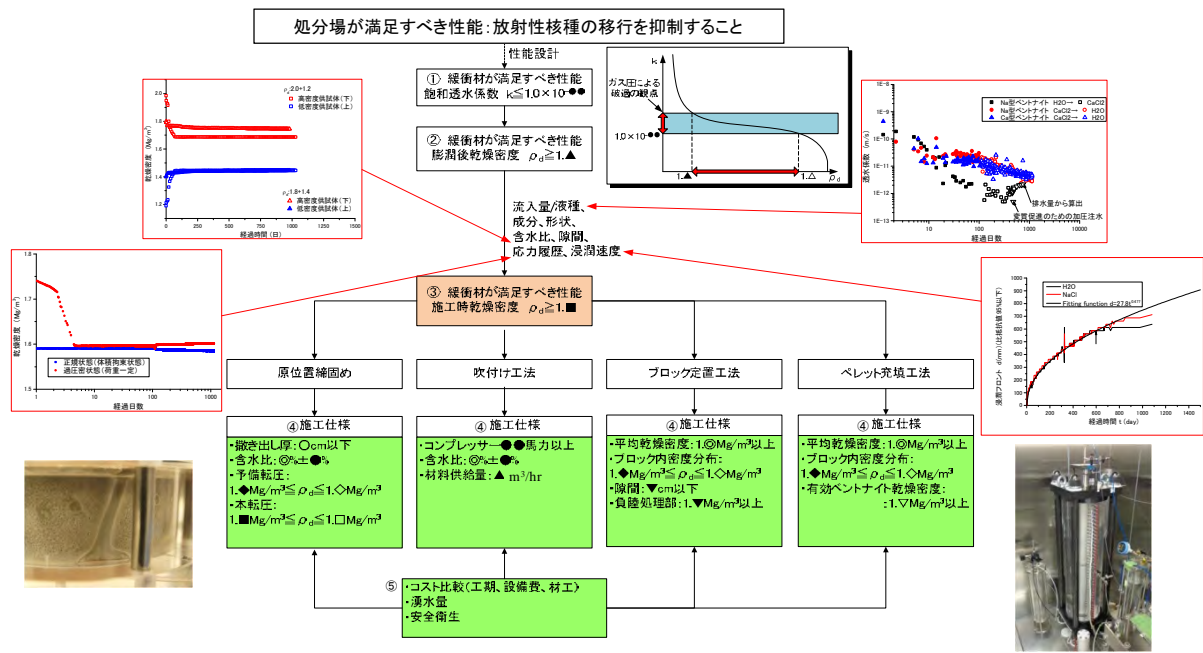


図 1.2.2-5 緩衝材の設計・施工仕様設定のプロセス (案)

第 1 章 参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－, JNC TN1400 99-020～023 (1999).
- [2] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2）(2009).
- [3] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－(2008).

第2章 再冠水時に発生する現象の整理と検討計画

2.1 全体計画

2.1.1 基本方針

本研究は、放射性廃棄物の地層処分における緩衝材の施工品質が再冠水時の発生現象に及ぼす影響の整理、発生現象の定量的評価、および施工技術へのフィードバックを調査、検討するものであり、平成 20 年度に試験計画を立案した。この試験計画に準じて平成 21 年度以降、理想的な系における小規模試験、単純な系における土槽試験、さらには複合的な系における工学規模土槽試験へと、長期性能評価上問題となる発生現象の影響を試験によって確認し、検討すべき現象を段階的に絞り込みながらスケールアップさせることを基本として試験を実施している(図 2.1.1-1 参照)。このため、本研究の実施においては長期間を要し、平成 21 年度から平成 34 年度まで合計 15 年間程度を一つの目処としている。今後の試験結果や、今後のわが国の地層処分事業の進捗状況によっては、工程に見直しが生じること(例えば、短縮など)も考えられる。

このような試験規模の段階的なスケールアップは、複雑な現象の個別検討を可能にするだけでなく、各段階で確実な成果をもたらすものと考えられる。こうして得られる検討成果は、再冠水から長期性能評価の観点からの緩衝材の設計や品質、及び搬送・定置技術への提言(施工方法の選択に資する情報などの工学技術)へ反映させる。ただし、検討段階で複合的な現象に対して詳細な検討が必要になった場合には、試験規模をスケールダウンして単一現象について詳細な検討を行う。

さらに、これらの成果は、その都度、不飽和浸透流解析へ反映させながら、最終的には複合的な系の工学規模土槽試験に適用し得る評価解析ツールへと高度化させることも可能である。不飽和浸透流解析成果は、実規模試験への適用、ひいては実現場の設計などに適用可能なものとなる。

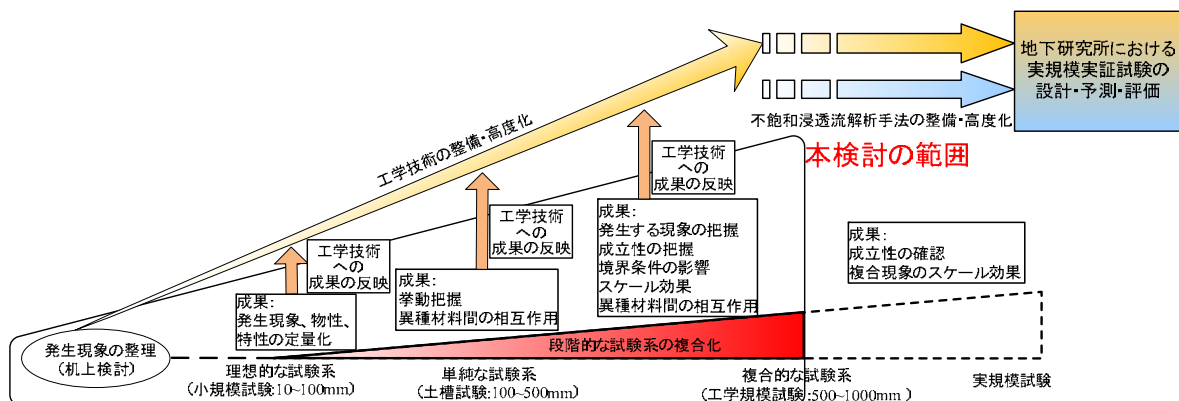


図 2.1.1-1 本研究の基本方針

2.1.2 全体計画

本研究では、2.1.1 の基本方針に示したように、建設・操業から再冠水後まで切れ間のない、緩衝材の性能の連続的な評価を実施することを最終目標として、平成 20 年度には、先ず、再冠水時に影響を及ぼす緩衝材の施工方法に関連する因子（影響因子）を抽出し、次に、この影響因子によって変動する再冠水時に緩衝材に発生する現象を整理した。そして、抽出した施工方法の影響因子が、再冠水時の緩衝材に発生する現象に及ぼす影響を実験的に定量評価することによって、緩衝材の長期性能の観点から施工方法の影響因子の許容範囲を示すことが可能となる試験計画を立案した。

さらに本研究を通じて、緩衝材の設計や品質、および搬送・定置技術への提言をより積極的に行うために、緩衝材の施工方法を高度化することによってより均質な緩衝材を構築できるようにする。このことにより、緩衝材の施工方法が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響を減少できる。このような緩衝材の施工方法を高度化した成果は、再冠水時の緩衝材に発生する現象の不確実性や建設・操業から長期性能評価までの緩衝材に関わる性能について、連続的な説明をすることにも役立つ。

これらの各検討項目とその実施内容を現状の想定に基づき年度展開したものを図 2.1.2-1 に示す。同図には、各試験の成果の流れも示しており、小規模試験から工学規模試験へと試験結果が反映される計画となっている。

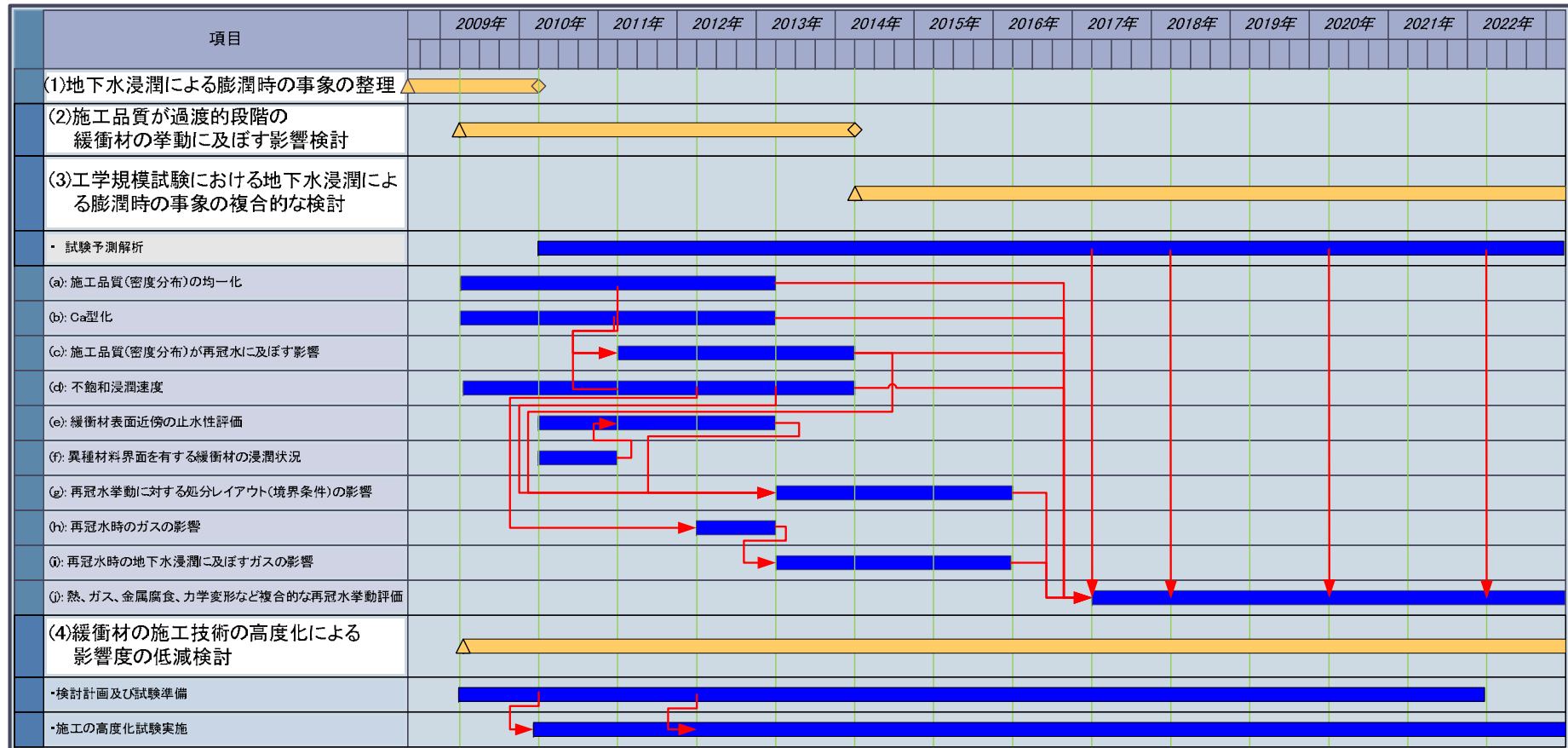


図 2.1.2-1 全体試験計画

2.1.3 5年間の全体研究計画

平成20年度から平成25年度には、緩衝材ブロックは、クニゲルV1 70wt%+ケイ砂 30wt%を対象として、緩衝材の再冠水挙動について実験を行い、緩衝材の初期の密度分布は膨潤しても均質化せず密度分布が残ることや、隙間を有する緩衝材施工において湧水量によってはパイピングが発生し、ベントナイトの成分が流出することを確認した。特に、0.5M NaClが0.1L/分の流速で下から上に流出する塩水環境においては、ケイ砂が分離し、自己修復しないことを確認した。これは、実際の海水起源の地下水環境では、クニゲルV1 70wt%+ケイ砂 30wt%は適切な材料ではない可能性があることを示している。SKBが提出した建築許可申請では、緩衝材として2タイプを挙げているが、これだけでは不十分であるという国際レビューの指摘からも、日本においてクニゲルV1 70wt%+ケイ砂 30wt%のみをレファレンス デザインとするのは、説明性が不足していると指摘される可能性が高い。

そのため、今後、5年間は一方では、クニゲルV1 70wt%+ケイ砂 30wt%の緩衝材が、地下環境において所定の健全性を保持できることを確証するために、より現実的な処分環境(工学規模、湧水量や水質等)を考慮した研究を行う必要がある。緩衝材の性能劣化事象として懸念されるパイピング/エロージョン現象に対しては、緩衝材の工学的対策として、平成25年度に検討した方法について有効性を評価するとともに、モンモリロナイトの含有率を上げてクニゲルV1 100wt%の材料も評価しなければならない。さらに、埋め戻し材や、プラグを含む人工バリアの性能について調査を行う。一方、海外と比較して日本では地下での湧水量が多いことが予想されており、湧水量を制御するためのグラウトや、人工注水等の地下水マネジメントについても調査を行い、人工バリア品質評価モデル、健全性評価モデルによる判断指標を反映した人工バリア設計・製作・施工手法の基礎を提示することを目標とする。実施にあたっては以下の4項目について検討を実施する。なお、本年度策定した計画は、随時見直しを行い、変更があるものとして進めていくものとする。表 2.1.3-1 5カ年間の全体研究計画を示す。

表 2.1.3-1 5カ年間の全体研究計画

	H25	H26	H27	H28	H29
①5年間の全体研究計画立案	計画立案		進捗確認 計画の更新		
②処分環境(湧水量や水質等)による影響の調査・検討					
i 施工品質(密度分布)の均質化 (0.5M NaCl、人工海水(0.5M NaCl+0.5/3M CaCl ₂))	0.5M NaCl溶液の場合:①密度均質化の検討、 ②応力履歴の検討		0.5M NaCl+0.5/3M CaCl ₂ 溶液場合:①密度均質化の検討、②応力履歴の検討		
ii 施工品質が再冠水に及ぼす影響試験 (土槽試験)	①緩衝材ブロックの乾燥密分布の取得 ②ブロック+ベレット浸潤状況、密度分布		③塩水環境下における土槽試験		
iii 緩衝材の品質確認及び品質改善手法の 検討	e-log F曲線の取得:①1.2Mg/m ³ ~2.0Mg/m ³ までの段階圧密試験、 ②液性限界程度での段階圧密試験、③塩水環境でのe-log F曲線取得		④塩水環境でのe-log F曲線取得、④緩衝材の膨潤挙動の力学的解釈		
	①Ca型化の発生時期が膨潤挙動に及ぼす影響の取得、②一次元浸潤速度試験の継続		③プレハイドレーション効果の確認		
	①間隙空気の移行に関する調査・検討		②熱影響を受けた間隙空気の移行に関する調査・検討		
③パイピング/エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討					
i 小規模パイピング試験(海水相当の液種)	①0.5M NaCl溶液の場合のエロージョン量の把握	②0.5M NaCl+0.5/3M CaCl ₂ の場合のエロージョン量の把握		③1処分孔当たりの許容エロージョン量の範囲設定	
ii 工学規模パイピング試験(給水位置、箇所、流速、処分孔の不陸)	①ブロック+大小ベレット(流入量、液種)	②ブロック+大小ベレット(流入量、液種)	③ブロック+大小ベレット(流入量、液種)	④ブロック+大小ベレット(流入量、液種)	
iii 地下施設を活用した緩衝材の性能確認	①実地下環境における試験準備	②流量制御でエロージョン量計測	③流量制御でエロージョン量計測	④流量制御でエロージョン量計測	試験結果の評価
iv 施工技術の高度化による影響度の低減検討(吹付、現場締固め試験)(体積拘束)	①湧水環境下における吹付け施工試験(体積拘束効果の確認)		②湧水環境下における現場締固め試験(体積拘束効果の確認)		③体積拘束効果の評価
④人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資する指標の整備					
i 人工バリア全体の設計・施工仕様の策定に関する調査	①前提条件に関する調査・検討	人工バリア全体の設計・施工仕様の調査・検討	②地下水環境の人工バリア設計・施工仕様に関する調査・検討	③わが国の人工バリア全体の設計・施工仕様の指標範囲の検討	
ii 埋め戻し材、プラグの要求品質に関する調査・検討	①要求品質に関する調査・検討	埋め戻し材、プラグの実規模性能の調査・検討	②地下水環境を考慮した埋め戻し材、プラグ設計・施工仕様に関する調査・検討	③わが国の埋め戻し材、プラグ設計・施工仕様の指標範囲の検討	
iii 人工注水、グラウトの要求品質に関する調査・検討	①要求品質に関する調査・検討	ウォーターマネジメント手法に関する調査・検討	②地下水環境を考慮した人工注水、グラウトの施工仕様に関する調査・検討	③わが国の人工注水、グラウトの施工仕様の指標範囲の検討	
各年度の成果目標	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象(流入量、液種)の定量化	・ウォーターマネジメント(人工注水、グラウト等)の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	・品質評価/健全性評価手法提案 ・説明性のある長期健全性判断指標の提示

2.2 再冠水時に発生する現象の整理

2.2.1 再冠水時に発生する現象の整理方法

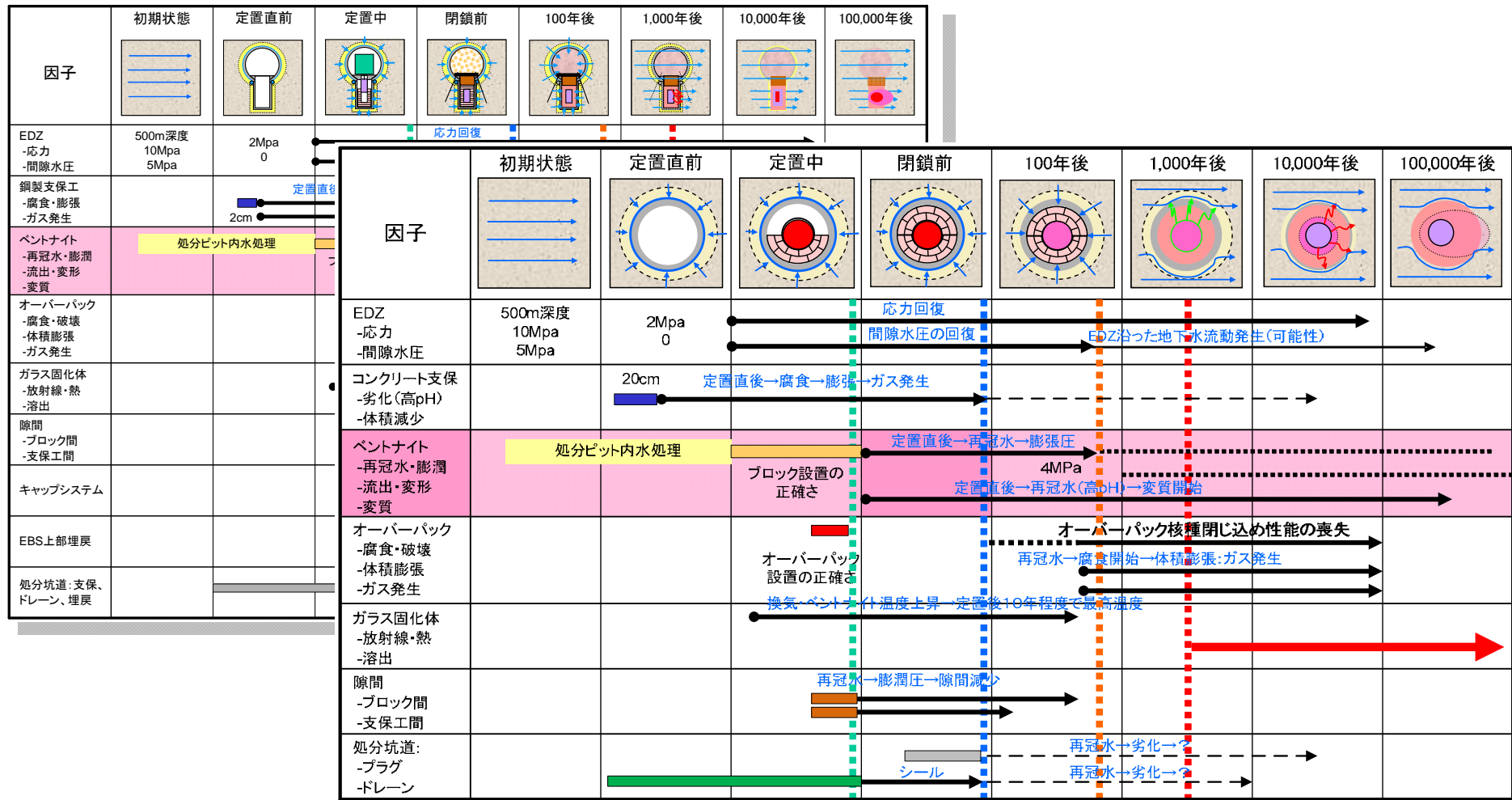
建設・操業から再冠水後の数万年間という長期間の中でも、施設の閉鎖から再冠水終了までの間は、人工バリアにとって、様々な現象が急速に変化する期間である。建設・操業時の人工バリアには、施工による様々な外的要因として力学的作用と、岩盤からの地下水流入による水理学的作用が主であるといえる。この再冠水時における発生現象の整理を行い、建設・操業時から再冠水後の状態への平衡場の変化の評価が実施できれば、建設・操業時から再冠水後まで、説明性の高い処分概念を構築することが可能となる。そのためには、緩衝材の施工時の品質によって影響を受ける再冠水時に発生する現象のうち、処分シナリオに及ぼす影響が大きいと考えられる現象を抽出する必要がある。

そこで本研究では、図 2.2.1-1 に示すように、既往の研究[1]などを参考に、緩衝材の施工品質が再冠水時の緩衝材に発生する現象を抽出した。

さらに、下記に示す既往の FEP（地層処分システムに影響を及ぼすと考えられるシステムの特徴（**Feature**）、そこで発生する事象（**Event**）や過程（**Process**））に関する調査を行い、FEP リストに基づき整理した再冠水時に緩衝材に発生する現象との対比によってその網羅性を確認した。

- ・ 地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおける FEP
- ・ 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめにおける FEP
- ・ スウェーデン、フィンランドの FEP
- ・ ベルギー、フランスの事象に関する知見

更に、放射性廃棄物地層処分関連機関で緩衝材の研究施設（ベントナイト研究所）を有し、世界的にも研究と地層処分の実施状況が先行している SKB 社（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）に対して調査を行い、抽出した現象の妥当性を確認した。



平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）—遠隔操作技術高度化開発—(2/2)より抜粋

図 2.2.1-1 再冠水時に発生する現象の整理のイメージ（高レベル放射性廃棄物地層処分縦置き、横置き）[1]

2.2.2 緩衝材の施工品質のうち再冠水挙動に影響を及ぼす項目

平成 20 年度は、文献調査などによって緩衝材の施工品質のうち再冠水挙動に影響を及ぼす項目（影響因子）、及び影響因子によって影響を受ける再冠水時の現象を抽出した。影響因子としては、

- ・ 隙間の有無、位置
- ・ 密度分布の程度、方向
- ・ 初期透水性（施工直後の間隙分布）

を考え、これらの影響因子によって影響を受ける再冠水時に緩衝材に発生する現象としては、

- ・ 膨潤
- ・ 化学変質
- ・ 力学性能変化
- ・ 地下水浸潤（流入量、液種）
- ・ ガス移行
- ・ 熱影響

を抽出した。これらの妥当性は、既往の研究「平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）—遠隔操作技術高度化開発—」[1]、下記の文献、及び先行機関（SKB 社）調査で確認した。

- ・ 地層処分研究開発第 2 次取りまとめにおける FEP
- ・ 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめにおける FEP
- ・ スウェーデンの FEP[4],[5]
- ・ フィンランドの FEP[6]
- ・ ベルギー、フランスの事象に関する知見

これらに加え、本研究では、スウェーデンの HLW 地層処分の実施主体である SKB 社からヒアリングを行い、緩衝材の初期に問題となるパイピングに関する事象について考慮することとした。

表 2.2.2-1 には整理した施工法の影響因子、再冠水時に緩衝材に発生する現象、及びその影響因子が再冠水時に緩衝材に発生する現象に及ぼす影響の評価項目を示している。これらの評価項目を実験によって調べるための試験計画を a~j まで立案した。平成 22 年度までの試験計画に加えて、再冠水時の緩衝材の密度分布や異種材料との界面、隙間などに発生することが考えられるパイピングの発生の有無を評価すべき事象として加えることとした。

これらの事象は表 2.2.2-2 に示すように、表 2.2.2-1 中に示した試験項目(a)~(k)までを示し、さらにどのような試験規模で定量的に評価するのかを分類している。前述のように、本研究では、試験規模をスケールアップさせることによって着実な成果を創造することを基本方針としており、現象毎に単独現象を室内小規模試験レベルで評価した後に、複合的な現象として工学規模試験を行う計画となっている（図 2.2.2-1 参照）。

これらの試験計画が着目している再冠水時の発生現象を図示すると図 2.2.2-2 のようになる。図からもわかるように、再冠水時には熱・水理・力学・化学（THMC）の影響割合が変化しながら定常状態へと至る。その過程において本研究で計画している試験によって着目している現

象は水理、力学が中心である。また時系列的には、再冠水初期には力学関係の現象、さらに再冠水が進むにつれて水理・化学関係の現象に着目していることが分かる[1]。

表 2.2.2-1 試験計画のための整理表[1]

緩衝材の建設・作業時の影響因子	再冠水時に緩衝材に発生する現象	評価項目	試験分類		
			小規模試験	土槽試験	工学規模試験
隙間の有無、位置	・膨潤挙動	隙間の自己シール、膨潤パターン	(a)	(c)	
	・化学変質	速い化学変質の発生パターン	(b)		
	・力学性能変化	浸潤による剛性低下、変形			(j)
	・地下水浸潤	浸潤経路・パイピング・浸潤パターン	(d),(e)	(f)	(g)
	・ガス移行	ガストラップ、破過	(h)		(i),(j)
	・熱影響	熱収縮、亀裂の発生			(j)
密度分布の程度、方向	・膨潤挙動	膨潤圧分布、残留密度分布	(a)	(c)	
	・化学変質	低密度領域の凝集など	(b)		
	・力学性能変化	浸潤による剛性低下、変形			(j)
	・地下水浸潤	浸潤経路・パイピング・透水係数分布	(d),(e)	(f)	(g)
	・ガス移行	ガストラップ、破過	(h)		(i),(j)
	・熱影響	熱収縮、亀裂の発生			(j)
初期透水性 (施工直後の間隙分布)	・膨潤挙動	膨潤パターン	(a)	(c)	
	・化学変質	速い化学変質の発生パターン	(b)		
	・力学性能変化	浸潤による剛性低下、変形			(j)
	・地下水浸潤	透水性の変化、パイピング	(d),(e)	(f)	(g)
	・ガス移行	ガストラップ、破過	(h)		(i),(j)
	・熱影響	熱収縮、亀裂の発生			(j)

表 2.2.2-2 抽出した試験項目とその試験分類

	小規模試験	土槽試験	工学規模	分類
(a)：施工品質（密度分布）の均質化	●	—	—	密度均質化
(b)：Ca型化	●	—	—	
(c)：施工品質（密度分布）が再冠水に及ぼす影響	—	●	—	
(d)：不飽和浸潤速度	●	—	—	浸潤状況把握
(e)：緩衝材表面近傍の止水性能評価	●	—	—	
(f)：異種材料界面を有する緩衝材の浸潤状況	—	●	—	
(g)：再冠水挙動に対する処分レイアウト（境界条件）の影響	—	—	●	複合問題
(h)：再冠水時のガスの影響	●	—	—	
(i)：再冠水時の地下水浸潤に及ぼすガスの影響	—	—	●	
(j)：熱、ガス、金属腐食、力学変形など複合的な再冠水挙動評価	—	—	●	
(k)：緩衝材の施工技術の高度化による影響度の低減検討	—	—	●	

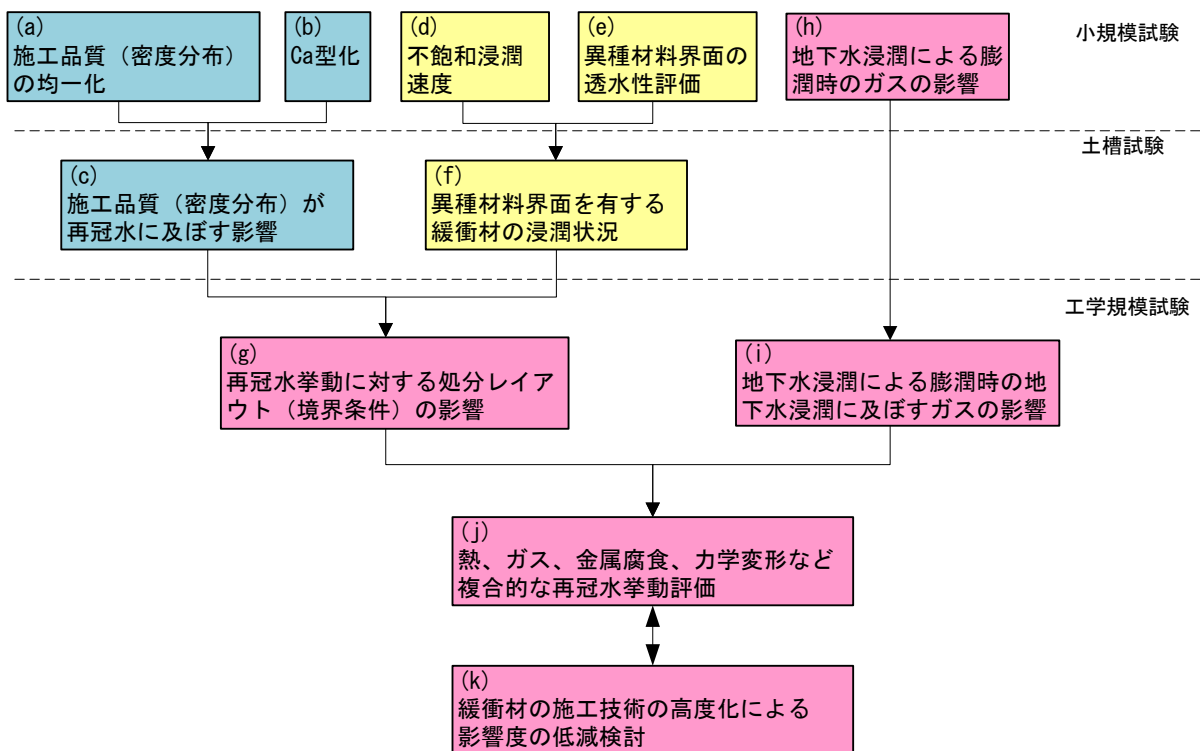


図 2.2.2-1 抽出した現象の相互関係

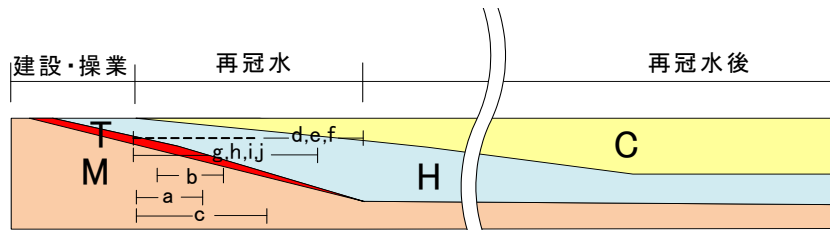


図 2.2.2-2 抽出した試験項目の位置付け

2.3 試験の共通条件

表 2.2.2-1 に示した(a)~(k)で実施している試験では、放射性廃棄物処分施設の再冠水時に、緩衝材に発生する事象を試験によって定量評価することが目的の一つとなっている。そのために、様々な試験を実施している。以下に、これらの試験に共通する試験条件、試験環境を示す。本検討では、特に断りがない限り、下記の条件に準拠して試験を実施している。

2.3.1 試験の実施環境

小規模試験は、緩衝材へ水を定量、若しくは定圧で給水するものである。緩衝材の液体の供給はシリンジポンプ（フローポンプ）で制御している。シリンジポンプによる制御のメリットは、定量、若しくは定圧での液体の供給が高精度、且つ自動で実施できる点である。ただし、シリンジポンプで供給される液体は、難透水性の緩衝材とシリンジポンプによってほぼ体積拘束された状態となるため、温度変化に対してその通水圧が敏感となる。そこで、試験は 20℃、相対湿度 65% の恒温恒湿チャンバー内で実施した。図 2.3.1-1 に試験状況を示す。

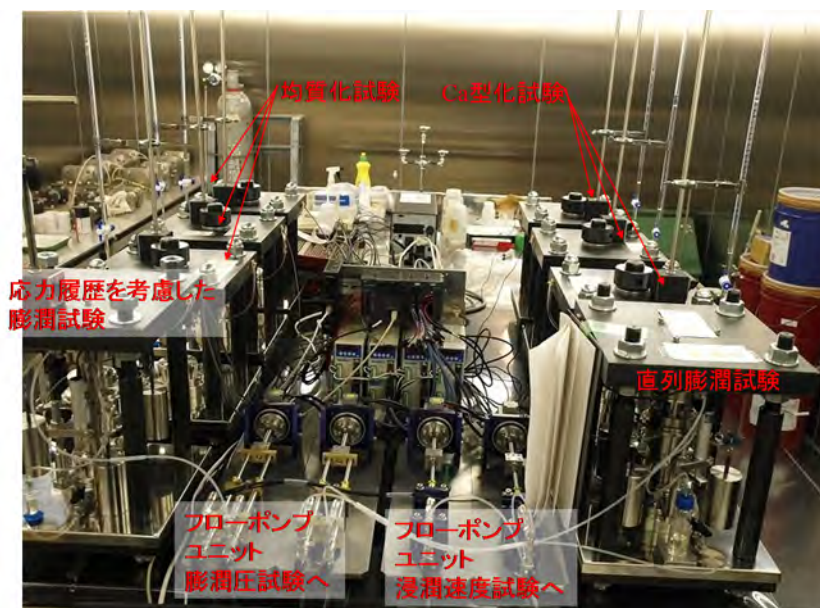


図 2.3.1-1 試験状況

2.3.2 使用材料

使用する材料は山形県産の Na 型ベントナイト（クニゲル V1）に対して愛知県産のケイ砂 3 号とオーストラリア産のケイ砂 5 号を 7:1.5:1.5 の割合で混合したケイ砂 30wt%混合ベントナイトである。ベントナイトの土粒子密度は 2.733Mg/m³ 程度であり、ケイ砂の土粒子密度は 2.65Mg/m³ 程度である。また、クニゲル V1 のモンモリロナイト含有率は 50~60%程度である。ただし、(e)-1 小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験で使用するペレットは Na 型ベントナイト単体である。

第2章 参考文献

- [1] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成19年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第1分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2008）.
- [2] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成20年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第1分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2/2）（2009）.
- [3] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成21年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学技術高度化開発報告書（第1分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2/2）（2010）.
- [4] SKB : Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB TR-06-18 (2006).
- [5] SKB : FEP report for the safety assessment SR-Can, SKB TR-06-20 (2006).
- [6] Bill Miller and Nuria Marcos : Process Report -FEPs and Scenarios for a Spent Fuel Repository and Olkiluoto, POSIVA 2007-12 (2007).

第3章 施工品質（密度差）が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査

3.1 背景

これまで、処分施設における緩衝材は、建設操業技術と長期性能検討は個別になされてきた。これは建設操業技術と長期性能検討を繋ぐ再冠水時の挙動を定量的に評価できる情報が少なかったことに併せて、どのような施工法で緩衝材を施工しても、全体の乾燥密度が仕様を満足すれば、緩衝材の持つ膨潤性能によって、再冠水中に施工による緩衝材内の密度分布はなくなる、という想定がなされていたことが考えられる。このため、長期性能評価では施工方法特有の密度分布は反映されずに、均一な乾燥密度を想定していた実施されていた。

3.2 既往の研究

ベントナイト系材料は、再冠水によって膨潤するため、緩衝材の施工時の密度分布や隙間などがあっても、飽和後には均質化すると考えられている。そのため、図 3.2- 1 に示したように、過去に密度分布を有する供試体が均質化する様子を取得する試験は数多くなされてきた。しかしながら、これらの試験で密度分布がなくなるまで均質に膨潤した例は無い。図 3.2- 1 に示した結果 [1] も、均質化する傾向が若干見られるものの、最終的には密度差を残したままで膨潤変形が収束していることが分かる。

さらに、図 3.2- 2 には、SKB 社（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社） [2] が実施した均質化試験の結果を示している。試験では、緩衝材とその隙間に充填されたペレットを実規模で模擬して、再冠水によって低密度のペレット充填領域が均質化するかを調べている。図から、均質化する傾向が若干見られるものの、やはり最終的には密度差を残したままで膨潤変形が収束していることが分かる。これに対して SKB 社は、残留密度の原因が、ベントナイトとその周辺の材料との摩擦によるものが主だという解釈をしている。

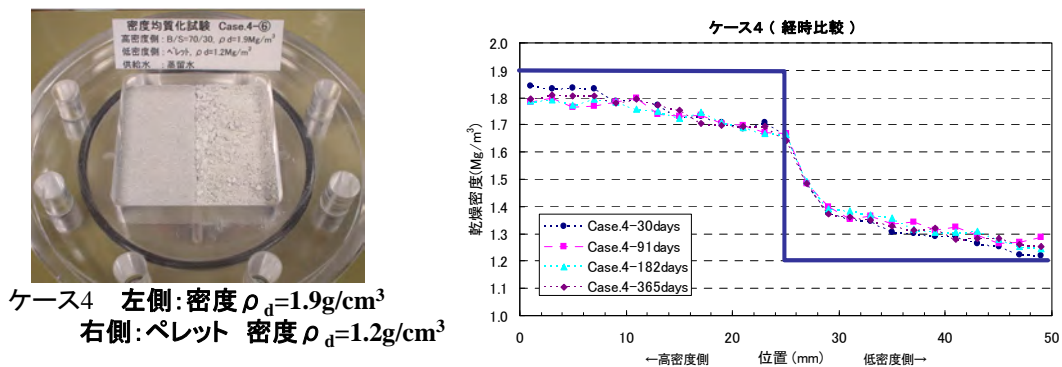


図 3.2- 1 既往の均質化試験例 [1]

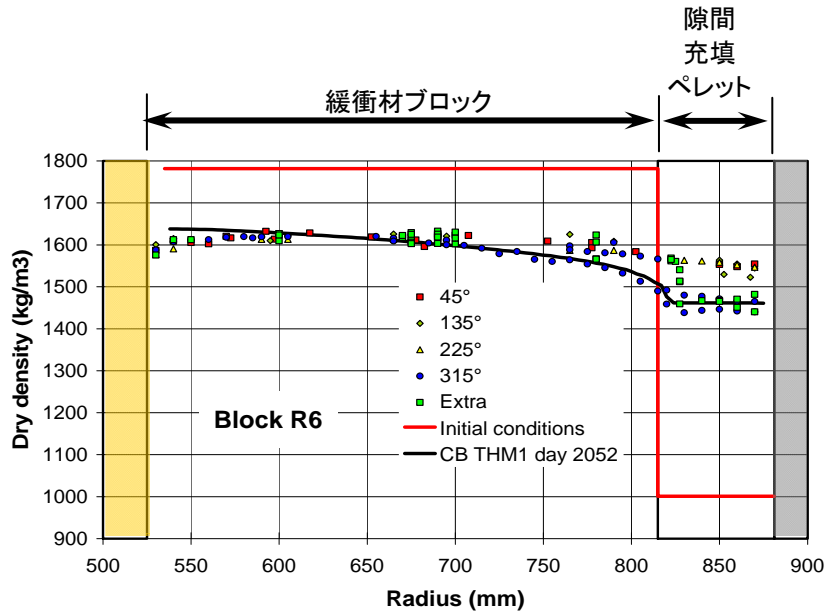


図 3.2-2 既往の均質化試験例[2]

一方、小峯ら[3]は、図 3.2-3 に示すような試験装置を用いて、さまざまな条件のベントナイト系材料の膨潤圧を計測している。その中で、図 3.2-3 に示すように、供試体上部に隙間を空けた状態で冠水させ、供試体が十分に膨潤し、隙間を埋めた際の膨潤圧を計測している。言い換えれば、初期密度を揃えた供試体（膨潤圧試験開始時の密度はそれぞれ異なる）に、膨潤という応力履歴を与えた場合と与えない場合（図中、白抜きプロット）で、傾向的に膨潤圧の発現が異なるかどうか実験していることになる。その結果、図 3.2-4 に示すように、傾向的な膨潤圧の差異は認められなかった。これは、供試体の密度が同じであれば、その供試体が膨潤圧の発生に至る途中の応力履歴は膨潤圧に無関係であるということを示唆していることに他ならない。後述するが、本研究では、供試体作製時の圧力や試験前の膨潤過程の有無で密度が同等でも応力履歴が異なる供試体を準備して、その膨潤挙動の違いを調べている。

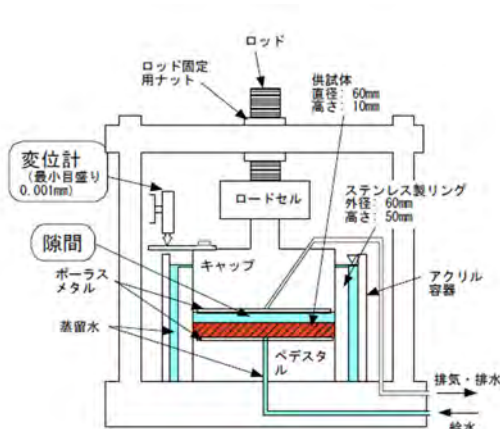


図 3.2-3 小峯らの試験装置概要[3]

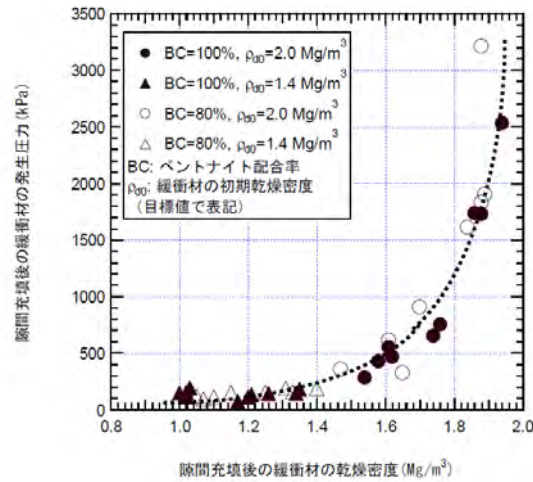


図 3.2-4 小峯らの試験結果[3]

さらには、JAEA (旧 JNC) [4]は、第2次取りまとめの中で、膨潤方向と注水位置、さらには膨潤履歴の有無による膨潤圧の違いについて調べている。図 3.2-5 に示すように、小峯ら[3]が示した結果と同様に、膨潤圧と膨潤履歴の有無や膨潤方向や注水位置などは有意に影響せず、ほぼ乾燥密度に一意の関係にあるとみなせる。

一方、鈴木ら[5]は、図 3.2-6 に示すように、供試体の成型圧と膨潤圧の関係を調べ、乾燥密度が同じであっても成型圧が高いほど膨潤圧が大きいという結果を示している。乾燥密度が同じで成型圧が高いということは、膨潤圧が成型圧に依存するのではなく、飽和度が低いほど成型圧が高くなるため、結果として、成型圧が高いほど膨潤圧が大きくなるものと考えられる。つまり、膨潤圧は飽和に伴い解放されるサクシオン圧の分だけ発生するとも考えられる。サクシオン圧は飽和度が小さいほど大きいため、飽和度が小さいほど膨潤圧が大きくなることと整合する。この結果は、先行圧密圧力とそれに伴うサクシオン圧の差異が膨潤圧に少なからず影響を及ぼしていることを示唆している結果であると考えられる。

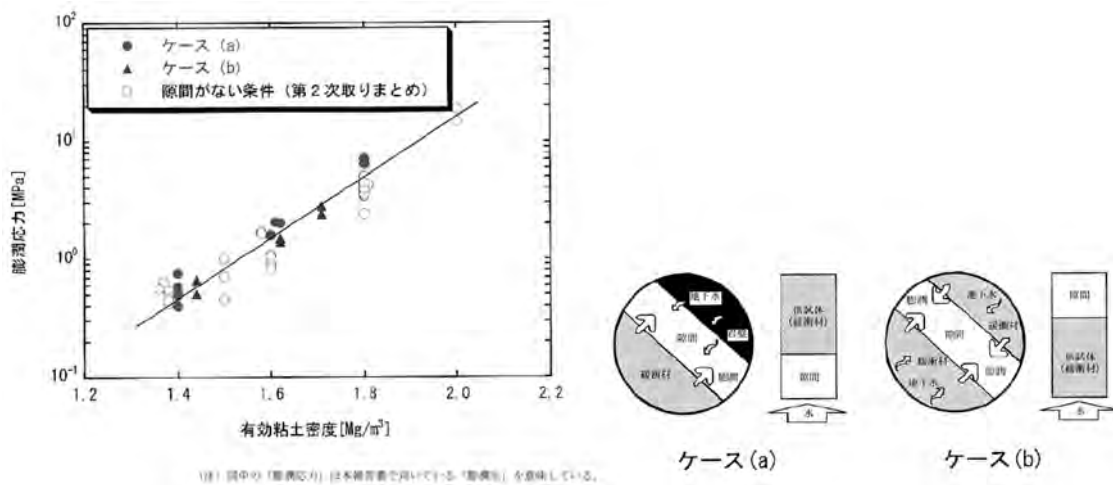


図 3.2-5 JAEA (旧 JNC) の試験結果[4]

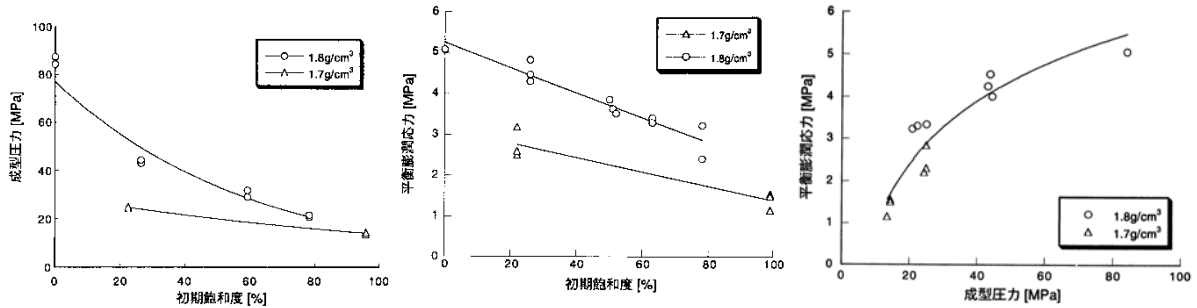


図 3.2-6 鈴木らの試験結果[5]

この鈴木ら[5]の結果は、小峯ら[3]の結果と異なり、密度が同じであっても成型圧が異なれば密度が同じでも膨潤圧が異なるということを示している。小峯らの試験は、膨潤後の密度が同じになるように、初期密度を設定しており、膨潤させた供試体の方が供試体作製時の乾燥密度が大きいため、成型圧力は大きいものと考えられる。このような観点から小峯らの結果を眺めると、成型圧という、いわば応力履歴の違いによって、膨潤させた供試体のほうが膨潤圧が大き目であるようにも見える。

この膨潤履歴や成型圧などの応力履歴の違いは、浸透膨潤圧そのものに比べれば小さな影響しか及ぼさないかもしれないが、膨潤圧試験のばらつきなどを説明するためには不可欠な要因である可能性がある。

3.3 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響試験の目的

本検討は、密度分布を有する緩衝材が再冠水によって膨潤し、密度が均一化するかどうか、均一化しなければどの程度の密度分布が残留するのか、さらに平衡膨潤圧と乾燥密度との関係を理論的に説明できるモデル化を行うことを目的としており、表 2.2.2-2 に示す(a)施工品質（密度分布）の均質化試験のうち、後述する互いに異なる密度を有する緩衝材の直列膨潤試験、互いに応力履歴の異なる緩衝材の直列膨潤試験の基礎検討となるものである。

3.3.1 試験ケース

図 3.2-4 に示した膨潤圧による均質化を評価試験のイメージ図を元に、図 3.3.1-1 に示すような密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験機を準備した。試験機を準備するに当たり、明確にした試験条件は以下のとおりである。

- ・ 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、下面から上向きに一方向、一次元に浸潤させる。
- ・ 供試体とセルとの間の摩擦が膨潤挙動に及ぼす影響を軽減するために、供試体の直径を 60mm、高さを 20mm としてアスペクト比を大きくした。
- ・ 注水は 1 m 程度の水位差で行った。注水側はビューレットによって注水量を計測し、排水側は集水瓶で重量によって計測した。
- ・ 図 3.3.1-2 に示すように、密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響を取得するた

めに、均質な供試体、半径方向に密度分布がある供試体、上下方向に密度分布がある供試体の3種類である。

- ・ モールドと供試体との摩擦低減に留意した。

以上をまとめると表 3.3.1-1 のようになる。表には、作製した高密度ブロックとの低乾燥密度ブロックの乾燥密度の実測値も示している。表に示すように、概ね、計画通りのブロックが作製できていることが分かる。

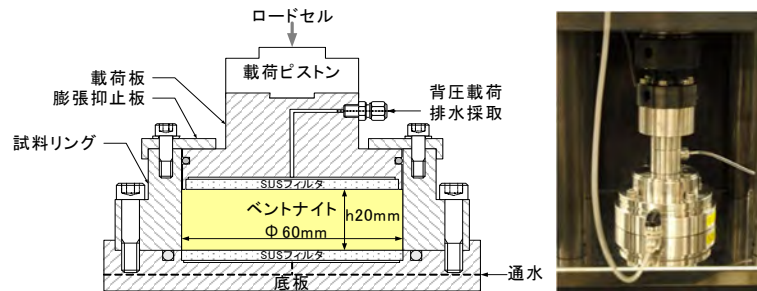


図 3.3.1-1 密度分布が圧縮ペントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験機

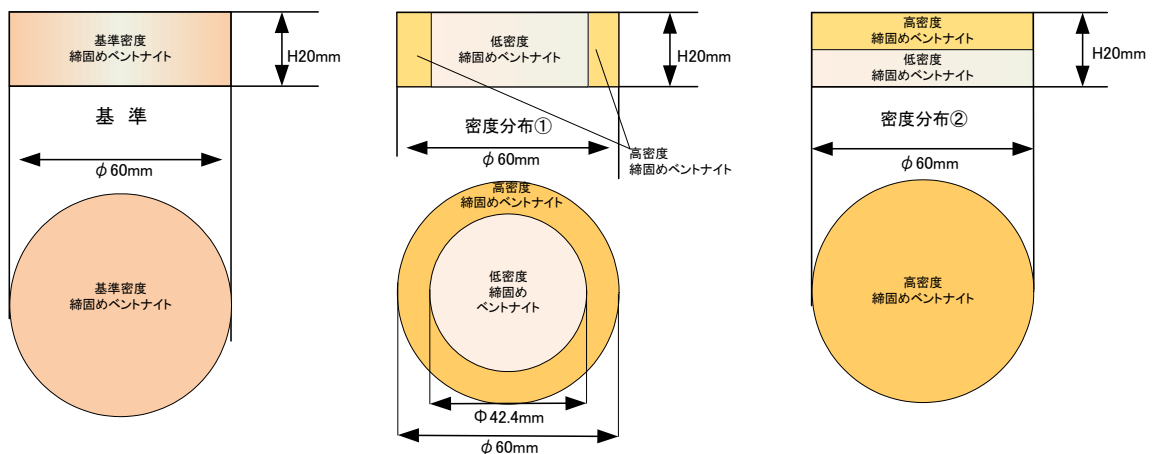


図 3.3.1-2 密度分布が圧縮ペントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験の供試体

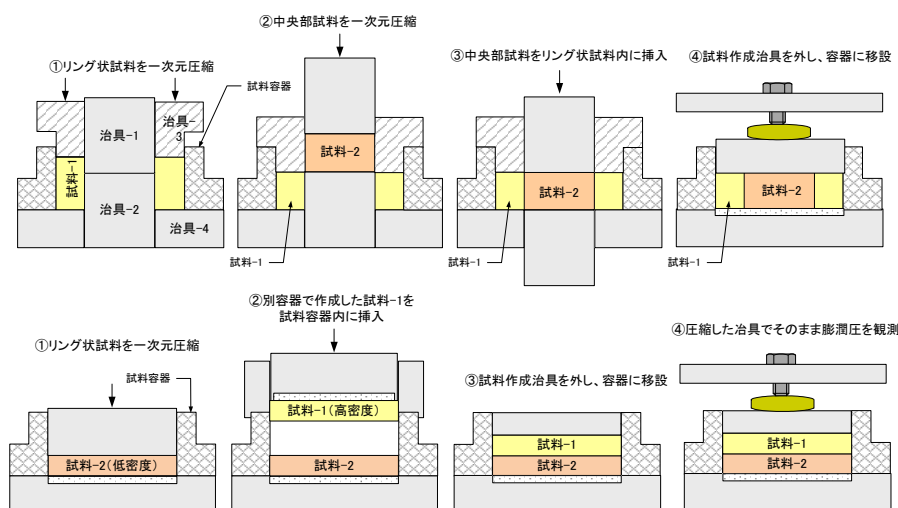
表 3.3.1-1 密度分布が圧縮ペントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験条件

試験 ケース *	高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	有効 ペントナイト 乾燥密度 (Mg/m ³)		初期含水比 (%)		膨潤 方向	平均乾燥 密度 (Mg/m ³)	液種	備考
			1.351	1.784	0.967	13.41				
1	1.584 (1.6)	1.584 (1.6)	1.351		25.91		等方	1.584(1.6)	蒸留水	実施済み
2	1.978 (2.0)	1.195 (1.2)	1.784	0.967	13.41	46.74	水平	1.587(1.6)		ケイ砂 30wt%混合 Na型ペントナイト 試験後、含水比、密 度計測を行なう
3	1.978 (2.0)	1.195 (1.2)	1.784	0.967	13.41	46.74	鉛直			

*試験結果に基づき調整
()は計画値

3.3.2 供試体作成方法及び試験方法

図 3.3.2-1 に示すように、密度分布は、乾燥密度 2.0Mg/m^3 の高密度ブロックと乾燥密度 1.2Mg/m^3 の低乾燥密度ブロックをあわせることで表現した。両ブロックの体積は同等であるため、両者を合わせた乾燥密度は、均質供試体と同様な乾燥密度 1.6Mg/m^3 となる。



低密度供試体(内側)

図 3.3.2-1 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験の供試体作製手順

3.3.3 試験結果[6]

試験結果を図 3.3.3-1 に示す。図には均質な供試体、半径方向に密度分布がある供試体、上下方向に密度分布がある供試体の膨潤圧の経時変化を併せて示している。また、再現性確認のために同条件で実施した結果も併せて示している。図から、密度分布がある供試体の平衡膨潤圧が 0.7MPa 程度であるのに対して、均質供試体の平衡膨潤圧が 0.5MPa 程度である。図 3.3.3-2 には、膨潤圧の経時変化を対数軸で示すことで平衡状態の判定を行っている。図から、全体的に若干の増加傾向であるものの、その差は縮まる傾向には無いことが分かる。また、半径方向に密度分布がある供試体、上下方向に密度分布がある供試体の膨潤圧の経時変化は、初期の立ち上がりが上下方向に密度分布がある供試体の方が急であるが、平衡状態では膨潤圧はほぼ同等である。

均質な供試体、半径方向に密度分布がある供試体、上下方向に密度分布がある供試体のマスの乾燥密度は全てほぼ 1.6Mg/m^3 である。通常の膨潤圧試験でこのような試験を実施した場合、乾

乾燥密度 1.6Mg/m^3 のケイ砂 30wt%混合ベントナイトの膨潤圧は $0.5\sim 0.7\text{MPa}$ となる。マスの乾燥密度で膨潤圧を整理すると、膨潤圧がばらつく原因となる。

従来、ベントナイトの膨潤圧試験は、その試験結果がばらつく事が指摘されてきたが[7]、その一因として供試体の密度分布の影響が示唆された。

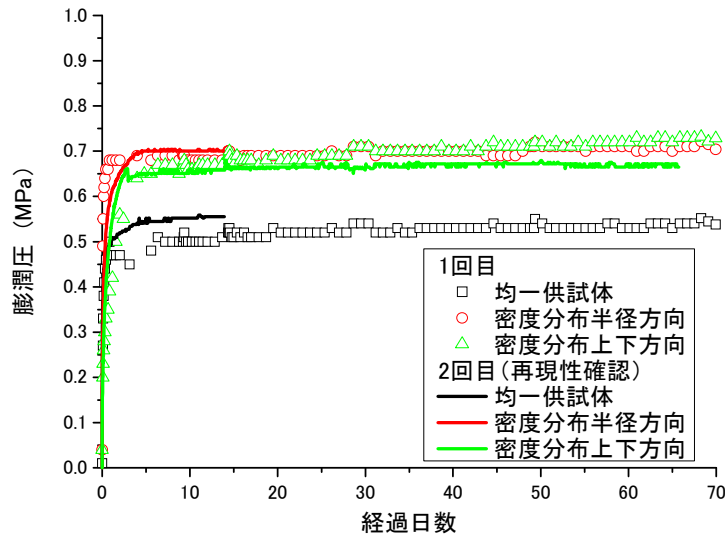


図 3.3.3-1 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験結果

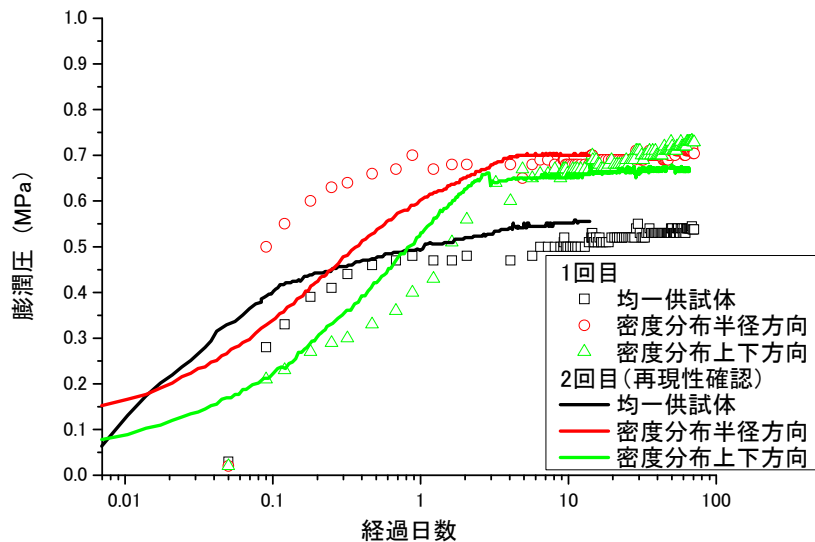


図 3.3.3-2 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験の収束状況

図 3.3.3-3 には、密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験時の透水係数の経時変化を示す。透水係数は給水量から算出している。図から、透水係数にばらつきがあるものの、概ね、どのケースも透水係数に傾向的な相違は見られない。すなわち、均質な供試体は膨潤

圧が小さく、かつ透水係数も小さいが、密度分布がある場合、均質な供試体と透水係数は変わらないが膨潤圧が大きめになる可能性がある。これは、本試験の密度差の範囲では、膨潤圧よりも透水係数の方が乾燥密度に対してより線形であると考えられる（図 3.3.3-4、図 3.3.3-5 参照）。

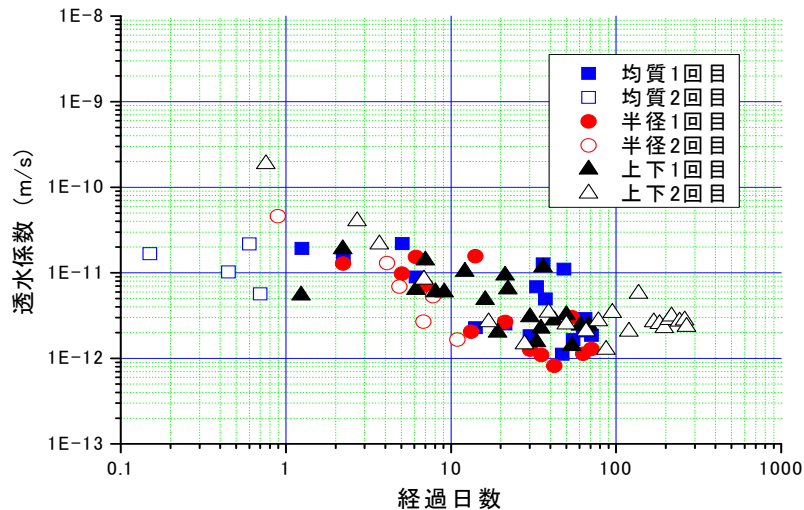


図 3.3.3-3 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験の透水係数経時変化

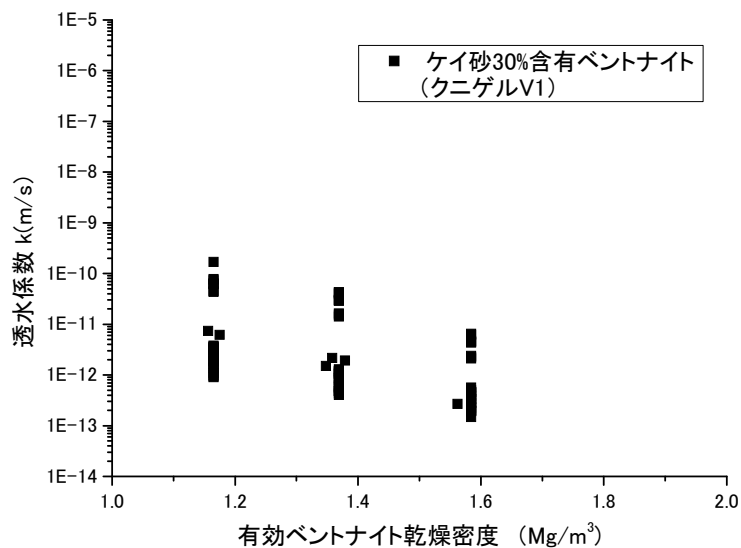


図 3.3.3-4 有効ベントナイト乾燥密度と透水係数の関係

図 3.3.3-5 と図 3.3.3-6 には、図 3.3.3-1 に示した試験結果の妥当性を調べるために、JAEA の緩衝材基本特性データベースから取得した有効ベントナイト乾燥密度と平衡膨潤圧の関係に均質な供試体、半径方向に密度分布がある供試体、上下方向に密度分布がある供試体のマスの有効ベントナイト乾燥密度に対する平衡膨潤圧をプロットしている。図から、均質な供試体、半径方向に密度分布がある供試体、上下方向に密度分布がある供試体の平衡膨潤圧は、マスの乾燥密度に対する値としては、ほぼ妥当であると言える。

また、密度分布を有する供試体に関しては、得られた平衡膨潤圧が、低密度ブロックのマスの有効ベントナイト乾燥密度に対しては大きく、高密度ブロックのマスの有効ベントナイト乾燥密

度に対しては小さいことから、内部では、高密度ブロックの膨潤圧が、低密度ブロックの圧縮変形で相殺されることによって密度分布の均質化が生じていることが推定される。図 3.3.3-6 には、低密度ブロックと高密度ブロックの有効ベントナイト乾燥密度から推定される平衡膨潤圧の平均値と本試験から得られた密度分布を有する供試体のマスの有効ベントナイト乾燥密度に相当する平衡膨潤圧の比較を示している。図から、平衡膨潤圧と有効粘土密度の関係が線形ではないため両ブロックの平衡膨潤圧の平均値で評価するとマスの膨潤圧を高めに見積もることになることが分かる。

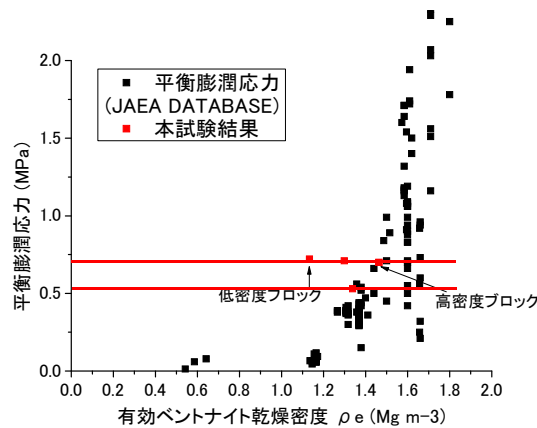


図 3.3.3-5 上下方向に密度分布を有する供試体の膨潤圧と既往の研究の比較

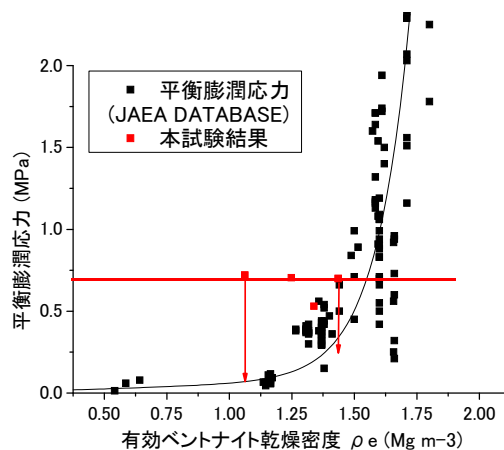


図 3.3.3-6 半径方向に密度分布を有する供試体の膨潤圧と既往の研究の比較

3.3.4 供試体解体後の物性試験

試験終了後の供試体の物理試験（密度計測、含水比計測）、および排水の化学分析（イオン分析）を実施した。図 3.3.4-1 に各供試体の解体計画図を示す。密度分布を設定した方向に可能限り分割して試験後の密度分布はパラフィン法などで、含水比分布は炉乾燥法で計測した。試験結果を表 3.3.4-1 に示す。また、図 3.3.4-2 には表 3.3.4-1 に示した試験後の密度分布を図示している。図中には試験前の高、低密度各領域の平均密度と供試体全体の平均密度も示している。

表、図から、膨潤圧は平衡に達しているのにも関わらず、供試体内部では密度分布が残っていることが分かる。また、初期の乾燥密度分布に比べ、均質化する方向に密度分布が変化している。このことから、密度分布や隙間を有する緩衝材は再冠水後に膨潤して均質化すると暗黙のうちに想定されているが、必ずしも均質化までは至らない可能性がある。さらに、膨潤圧が同じであっても密度分布が異なる場合があることも明らかとなった。このことから、密度と膨潤圧は必ずしも一意に対応しない可能性がある。図 3.3.4-3 には解体時の供試体の写真を示しているが、目視観察からも明らかに密度分布が残っていることが確認できる。

なお、幾つかのケースで飽和度が 100%を超えるものがあるが、脱型や解体中の間隙水の移動などによるものと考えられる。また、サンプルの平均値と試験前の供試体の乾燥密度が異なるが、これは解体に伴う除荷により供試体が力学膨潤したためと考えられる。

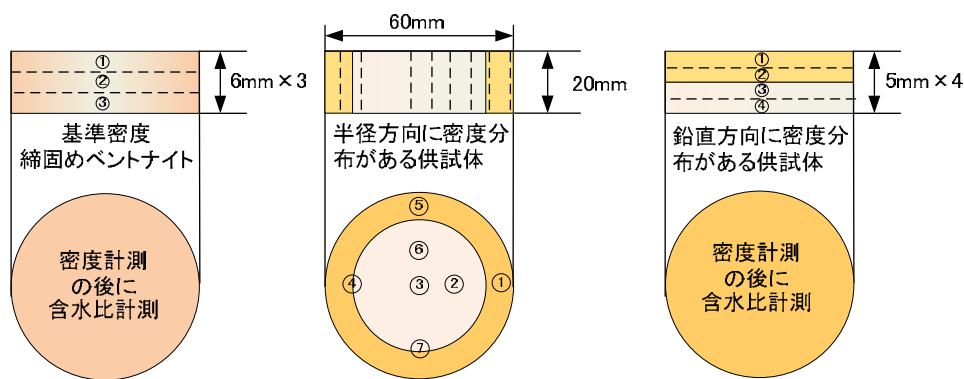


図 3.3.4-1 供試体の解体計画図

表 3.3.4-1 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験供試体の物理試験結果

試験ケース	試料位置	乾燥密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	備考
均質な供試体	1	1.550	30.25	平均乾燥密度 1.584 (Mg/m ³)
	2	1.583	25.35	
	3	1.578	27.59	
半径方向に密度分布がある供試体	1	1.680	20.17	平均乾燥密度 1.587 (Mg/m ³) 高乾燥密度領域 1.978(Mg/m ³)
	2	1.313	36.30	
	3	1.285	37.95	
	4	1.524	25.76	
	5	1.646	21.56	
	6	1.284	38.01	
	7	1.480	28.00	
上下方向に密度分布がある供試体	1	1.617	21.64	低乾燥密度領域 1.195 (Mg/m ³)
	2	1.761	20.39	
	3	1.387	31.51	
	4	1.348	36.26	

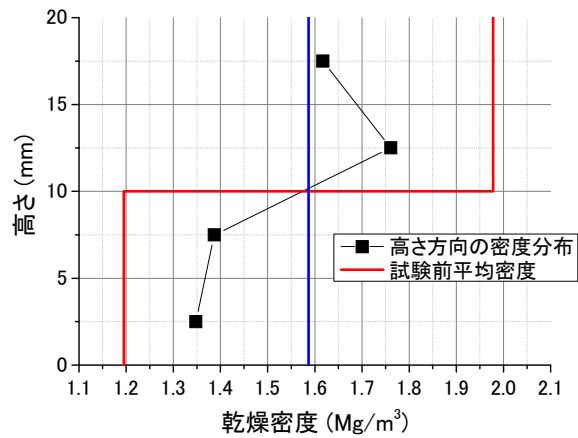
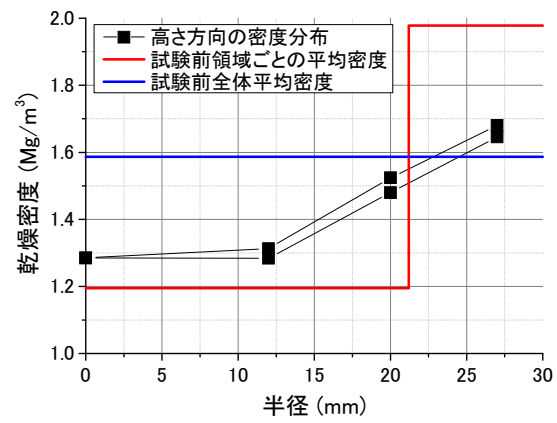
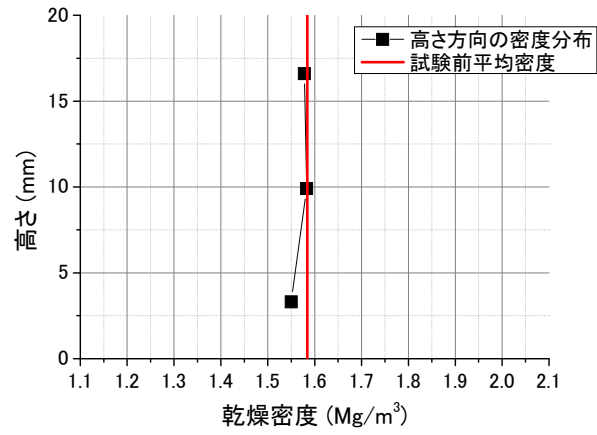


図 3.3.4-2 密度分布を有する供試体の試験前後の密度分布

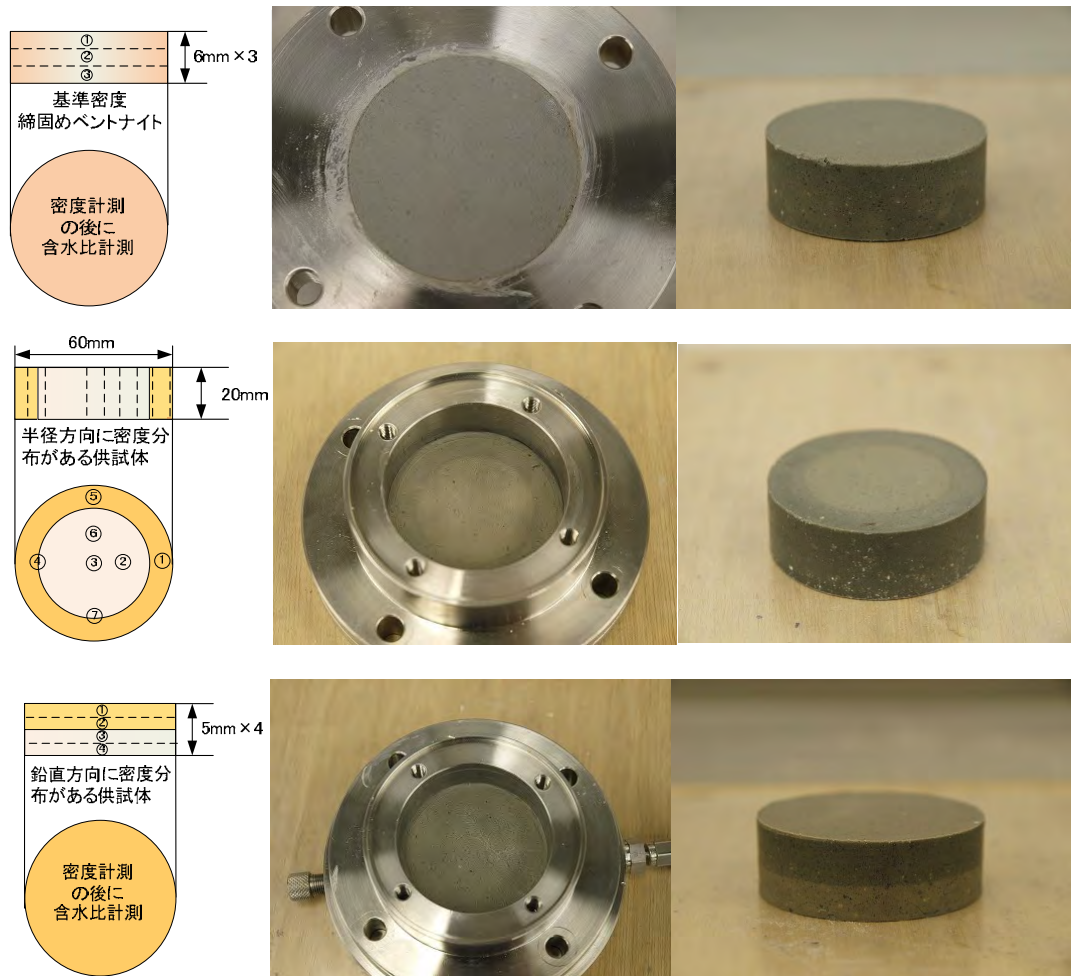


図 3.3.4-3 密度分布を有する供試体の解体状況写真

図 3.3.4-4 には、膨潤圧試験の解釈を示す。図中最上段には、密度が同じ高さが異なる飽和したベントナイトが体積拘束下で膨潤圧試験に供されている。この際に発揮される膨潤圧は両者とも同じである。なぜならば、両供試体の内部に発生する応力は互いに相殺し合うためである。

さらに図 3.3.4-4 中段には、同じ供試体の膨潤圧試験の試験開始直後と平衡状態の供試体の様子を示している。図から、仮に供試体に摩擦が作用せず、不飽和領域のベントナイトが膨潤圧によって塑性変形を生じないとすれば、試験開始直後であっても、ある程度飽和領域が形成されれば、平衡膨潤圧が発生する。なぜならば飽和領域内部の膨潤圧は相殺されるため、飽和領域が形成されるかどうかで平衡膨潤圧が発揮されるかどうかが決まるからである。

図 3.3.4-5 には膨潤圧試験のイメージを示す。上述の通り、膨潤圧が平衡状態であるということが、供試体内の飽和や均質化を意味しておらず、有意な飽和領域が形成されたことを意味しているに過ぎない。このことは、膨潤圧試験で膨潤圧の経時変化を取得すると、実験初期の供試体から排水がなされない段階から膨潤圧が平衡状態に達するという知見とも合致する。また、密度分布が膨潤によって均一化せず、また密度分布の有無によって平衡膨潤圧が異なることから、同じバルクの乾燥密度でも平衡膨潤圧が異なったり、逆に異なるバルクの乾燥密度でも平衡膨潤圧が同じになるということもあり得る。

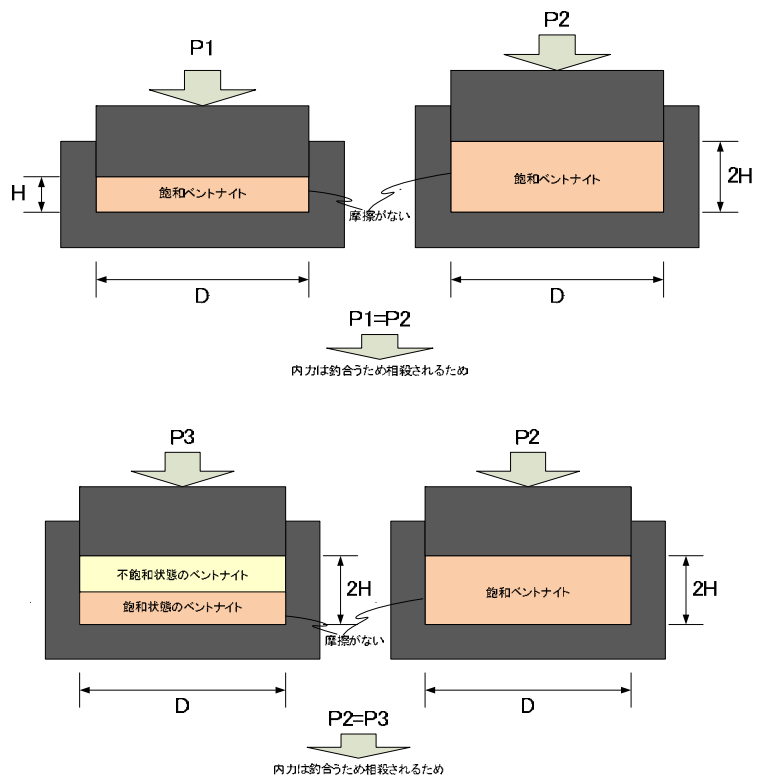


図 3.3.4-4 膨潤圧試験の解釈

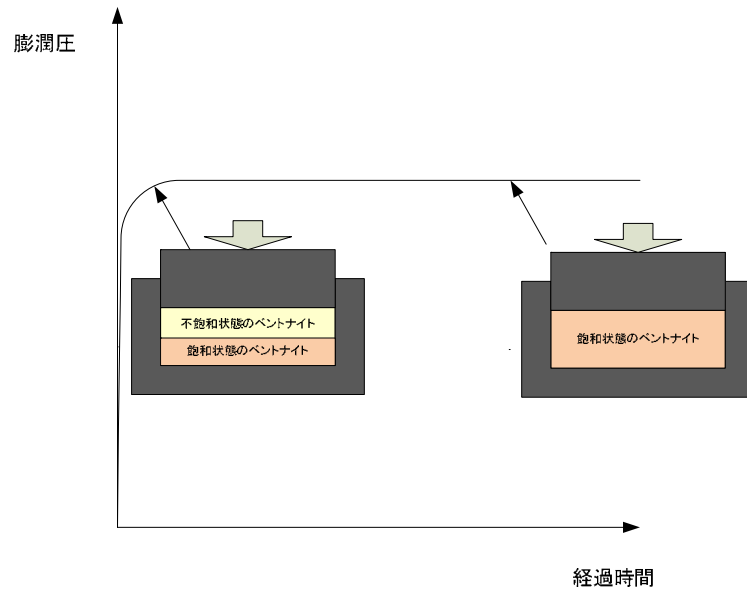


図 3.3.4-5 膨潤圧試験のイメージ

3.3.5 密度分布が膨潤圧に及ぼす影響の理論的考察

図 3.3.5-1 には平衡膨潤圧のばらつきに関する考察を示している。これまで、膨潤圧のばらつきについて、帰納的に調べられた事例はあるが、演繹的に検討された事例は少ない。そこでここでは、膨潤圧のばらつきに関して演繹的な考察を加える。

平成 22 年度実施した試験では、密度分布が膨潤圧のばらつきに影響を与える可能性を示すことが出来た。図 3.3.5-1 にはこのばらつきの理由を力学的に示している。先ず、図 3.3.5-1 の上図に示したように、平衡膨潤圧と乾燥密度の関係が線形関数として与えられるとすれば、供試体内に密度分布があっても、平均乾燥密度と計測される膨潤圧の平均値はその線形関数からずれない。しかしながら、図 3.3.3-5 と図 3.3.3-6 に示した平衡膨潤圧と乾燥密度の関係を眺めると、少なくとも平衡膨潤圧は乾燥密度に対して非線形であると言える。この場合、供試体の平均乾燥密度と計測される膨潤圧の平均値は非線形関数からずれることになる(図 3.3.5-1 下図)。膨潤圧試験において、多くの場合、平衡膨潤圧と乾燥密度の関係は下に凸の関数であるため、均質な場合の膨潤圧は密度分布がある供試体の平衡膨潤圧よりも低くなることも分かる。この傾向は、図 3.3.3-1 に示した試験結果とも整合する。尚、図 3.3.5-1 下図に示した平衡膨潤圧と乾燥密度の関係は、非線形であれば事足りるので便宜上簡単な関数を仮定しただけであることに注意が必要である。

図 3.3.5-2 には小林ら[8]による正規圧密曲線と平衡膨潤圧の関係を示している。図から、正規圧密曲線は平衡膨潤圧の上限値を示していることから、密度分布を有する供試体の膨潤圧は正規圧密曲線よりも下側に位置していることが分かる。正規圧密曲線の下側は、弾塑性力学上、弾性域であることから、この膨潤圧の差は応力履歴の影響である可能性がある。

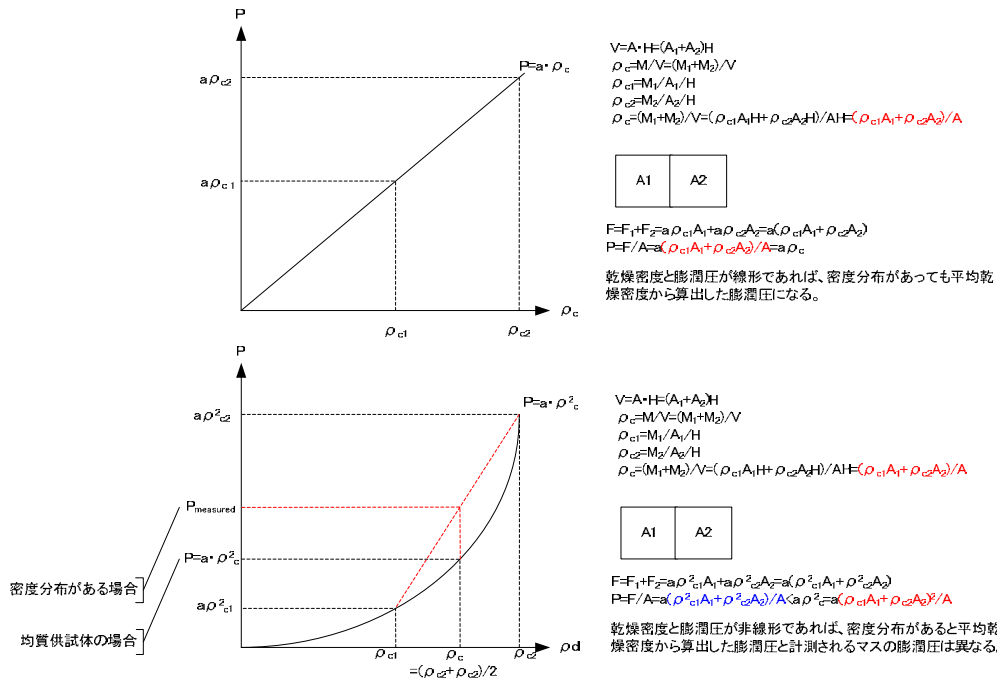


図 3.3.5-1 平衡膨潤圧のばらつきに関する考察

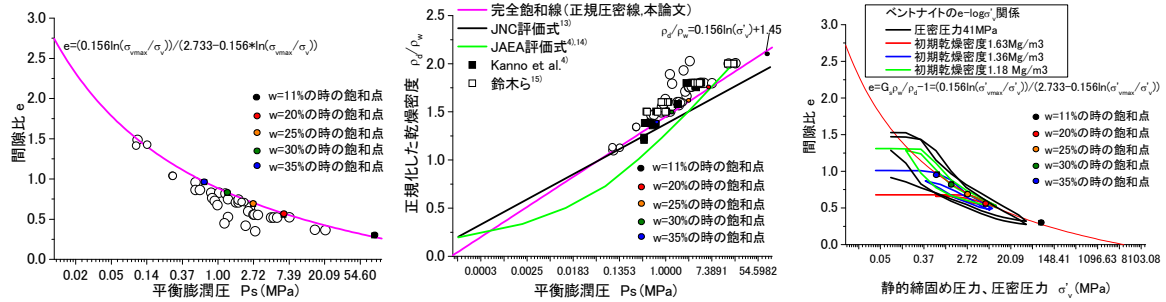


図 3.3.5-2 既往の研究による平衡膨潤圧と正規圧密曲線の関係

3.4 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

(試験分類(a)一表 2.2.2-2)

3.4.1 試験ケース

密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響を評価する試験については、図 3.4.1-1 に示すような密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響を取得するための試験機（以下、直列膨潤量試験機）を準備した。試験機を準備するに当たり、留意した試験条件は以下のとおりである。

- 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、一方向、一次元に浸潤させる。
- 注水はシリンジポンプ(フローポンプ)によって行い、排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- 1つの供試体内に密度の異なるブロックを混在させると、その界面の移動の観察が非常に困難となることから、図 3.4.1-1 に示すように密度の異なる均質供試体の膨潤量試験機のピストンを直列に繋ぎ、ピストンの動きを計測することによって界面の膨潤量を計測する。
- 直列した膨潤量試験機の下側に高密度供試体、上側に低密度供試体をセットする。この際、下側の供試体にはピストンの死荷重が作用するため、ピストンの荷重(3520g)を相殺するカウンタウェイトを配置する(図 3.4.1-2 参照)。

試験ケースをまとめると表 3.4.1-1 のようになる。表には、今年度から開始する試験水として、0.5M の NaCl 水溶液を使用したケース 1s~3s も記載している。また、作製した高密度ブロックとの低乾燥密度ブロックの乾燥密度の実測値も示している。表に示すように、概ね、計画通りのブロックが製作できていることが分かる。ケース 1~3 とケース 1s~3s は、試験水が異なるだけで、他の試験条件はほぼ同じとした。両者を比較することによって、膨潤挙動に対して、間隙水のイオン強度が及ぼす影響も定量評価できる。

この試験によって得られる膨潤量の経時変化は、図 3.4.1-3 に示すように、高密度供試体が膨潤することによって低密度供試体を圧縮し均質化の傾向を示す。力学に照らせば、この傾向は膨潤圧が釣合うまで生じるはずである。よって本試験では、この内部膨潤量の経時変化からベントナイトの密度が均質化するのに要する時間を取得するのではなく、膨潤圧が釣合うのに要する時間を取得することになる。尚、膨潤圧が釣合った時点の密度は、締固め時の応力履歴(最大圧縮

圧力) の違いによって一致しないと考えられる。このことが確認できれば、図 3.3.3-5 に示した不均質供試体の膨潤圧解釈に役立つ。

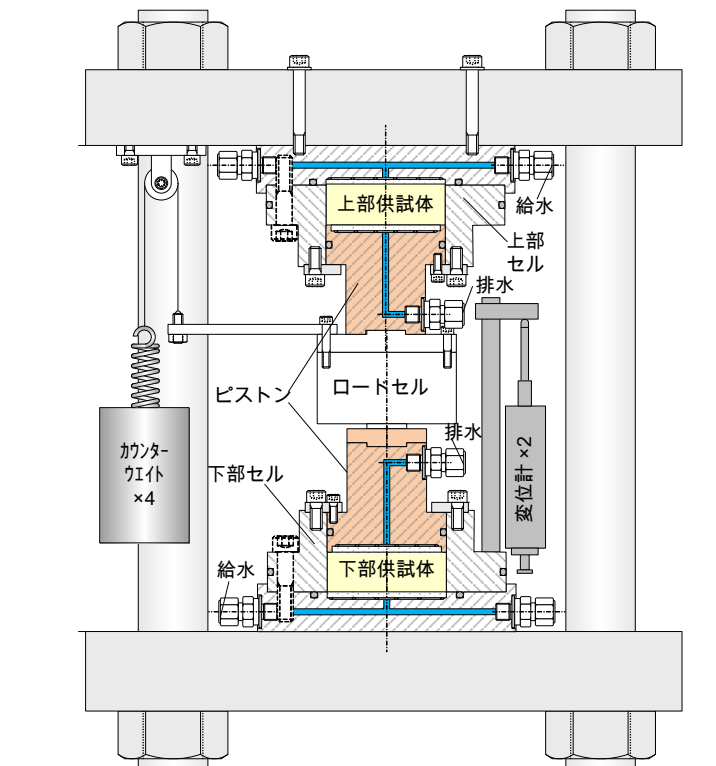


図 3.4.1-1 力学物性（膨潤量）による均質化の判断のイメージ

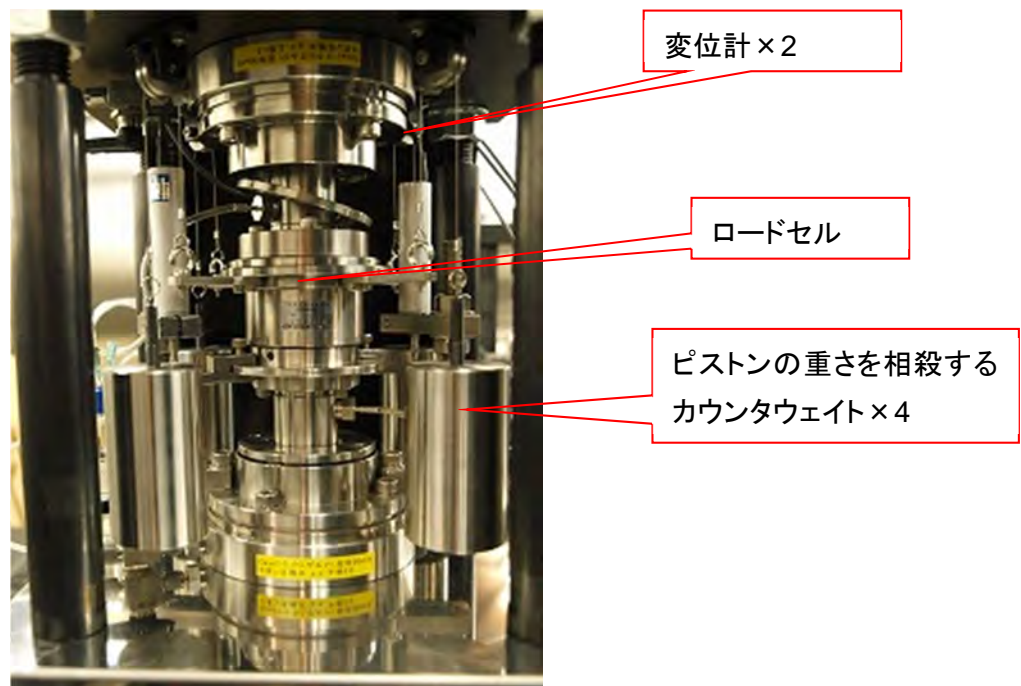


図 3.4.1-2 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験機

表 3.4.1-1 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験条件

試験 ケース*	高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	有効ベントナイト 乾燥密度(Mg/m ³)		初期含水比 (%)		膨潤 方向	平均乾燥密度 (Mg/m ³)	液種	備考
1	1.798(1.8)	1.399(1.4)	1.581	1.164	18.97	34.84	鉛直	1.6 (ケイ砂 30wt% 混合 Na 型ベン トナイト)	蒸留水	継続中
2	1.984 (2.0)	1.190 (1.2)	1.792	0.963	13.41	46.74				実施済み
3	1.698(1.7)	1.493(1.5)	1.473	1.258	19.81	27.35				継続中
1s	1.790(1.8)	1.426(1.4)	1.573	1.191	19.24	32.06	鉛直	1.6 (ケイ砂 30wt% 混合 Na 型ベン トナイト)	NaCl 水溶液 0.5M	新規
2s	1.991 (2.0)	1.187 (1.2)	1.801	0.960	13.54	47.96				新規
3s	1.747(1.7)	1.550(1.5)	1.526	1.317	18.57	25.55				新規

*試験結果に基づき調整 (全体計画にて調整)
()は計画値

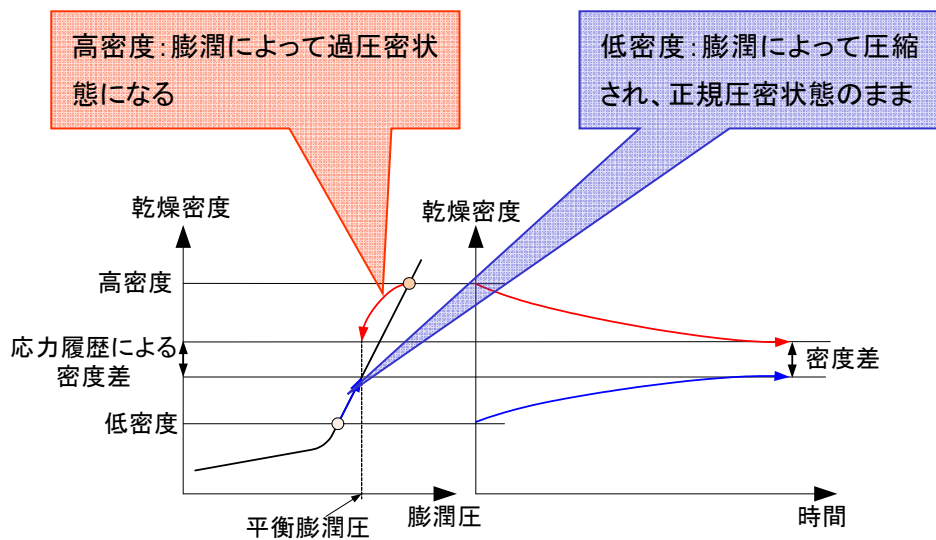


図 3.4.1-3 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響取得試験機

3.4.2 試験結果 (蒸留水ケース)

(1) 膨潤量

試験結果を図 3.4.2-1～図 3.4.2-4 に示す。試験結果は、比較のために既に終了している Case2 も示している。図 3.4.2-1 に膨潤量の経時変化を示す。図には Case1 (高密度供試体 (乾燥密度 1.8Mg/m³)、低密度供試体 (乾燥密度 1.4Mg/m³)) と Case2 (高密度供試体 (乾燥密度 2.0Mg/m³)、低密度供試体 (乾燥密度 1.2Mg/m³))、さらに Case3 (高密度供試体 (乾燥密度 1.7Mg/m³)、低密度供試体 (乾燥密度 1.5Mg/m³)) の乾燥密度の経時変化を併せて示している。

なお、ここで膨潤量は、下側の高密度供試体が上向に膨潤する場合を正として取りまとめている。

Case2 の膨潤変形は、当初フローポンプで流量制御で飽和させたため、試験開始から早い段階で定常状態に至っているのに対して、Case1 と Case3 では、フローポンプを使用せずに圧力制御で給水しているため、膨潤挙動が緩慢であり、Case1 では約 1000 日以上経過した現在でも、まだ定常に達しておらず、未だに少しずつ変形が継続している。Case3 も同様に緩慢ではあるが、変形が継続している。Case2 では、変形は 100 日程度でほぼ定常になりそれ以降一定であることから、後述するように解体を行った。

図 3.4.2-2 には、Case1 では加圧タンクによる圧力制御通水圧と膨潤圧の経時変化を、Case2 と Case3 にはフローポンプの通水圧と膨潤圧の経時変化をそれぞれ示している。図 3.4.2-2 に示すように、Case1 の場合、圧力制御で吸水させているため、膨潤圧の経時変化が滑らかであるのに対して、Case2 の場合は膨潤圧の経時変化がフローポンプにより通水圧の変化の影響を受けている。Case2 では、フローポンプの水圧計の計測範囲の上限値が 2MPa 程度であるため、通水圧が 2MPa を上回らないように試験を継続した。膨潤圧に関しては Case1 では 0.66MPa、Case2 では 0.45MPa であった。Case1 に関しては、未だ平衡状態ではないものと考えられる。Case3 では、フローポンプの通水圧を 0.01MPa 程度にして膨潤圧に有意な影響が及ばないように配慮した。なお、本試験における膨潤圧を計測するロードセルは両供試体の間に設置しており、計測される膨潤圧は釣り合うまでは常に低乾燥密度の膨潤圧を計測することになることに注意すべきである。このため、低乾燥密度供試体の中で最も密度が高い Case3 の膨潤圧が大きくなっている。

図 3.4.2-3 には、Case1 と Case3 のローポンプによる制御流量の経時変化を示している。Case1 では、001cc/min の流速で注水を行い、膨潤量がほぼ定常になった時点で流速を 0.0005cc/min に増加させた。この際に通水圧が水圧計の計測範囲の上限値である 2MPa に近づいたため、流速を 0.0002cc/min にして試験を継続している。なお、試験開始後 18 日目に通水が一時的に止まっているが、これは停電によるものである。停電復旧後速やかに試験を開始し、停電の前後で挙動に大きな差異が無いことを確認した上で試験を継続している。この点に関しては他の試験においても同様である。Case3 では、前述のように計測される膨潤圧に通水圧が有意な影響を及ぼさないようにするために、フローポンプの通水圧を 0.01MPa に制御したため、通水量が 0.00001cc/min 程度となっている。

図 3.4.2-4 には、Case1、Case2、Case3 の膨潤に伴う高密度供試体と低密度供試体の密度の経時変化を示している。図から、どちらのケースも下部にある高密度供試体の膨潤圧が上部にある低密度供試体の乾燥密度よりも膨潤圧が大きいため高密度供試体は膨潤しながら密度が下がり、低密度供試体は圧縮されながら密度が増加している。

Case1 に関しては、試験初期に排水が得られなかったことから、通水圧が相殺するように上下の両供試体にそれぞれ 0.2MPa の通水圧を作用させて飽和を促進させた。その結果、排水が確認された。高密度の供試体が $1.8 \rightarrow 1.75 \text{ Mg/m}^3$ へと減少し、その後定常化し、低密度の供試体は $1.4 \rightarrow 1.45 \text{ Mg/m}^3$ へと増加し、その後定常化した状況が継続している。今後、試験を継続することで、定常に至る過程でさらに密度差は低減するものと考えられる、均一化には至らないものと予想される。

Case2 に関しては、高密度の供試体が $2.0 \rightarrow 1.69 \text{ Mg/m}^3$ へ減少し、その後定常化し、低密度の供試体は $1.2 \rightarrow 1.45 \text{ Mg/m}^3$ へと増加し、その後、平成 23 年度ではほぼ定常になり、有意な密度差が残る結果となった。この密度差は、後述する土質力学（弾塑性力学）に立脚した理論的な説明も可能であることから、試験は平成 23 年度で終了し、平成 24 年度には後述する供試体内部の密度分布、含水比などの諸量を取得した。

Case3 に関しては、高密度の供試体が $1.7 \rightarrow 1.67 \text{ Mg/m}^3$ へ減少し、その後定常化し、低密度の供試体は $1.5 \rightarrow 1.53 \text{ Mg/m}^3$ へと増加し、その後、平成 23 年度ではほぼ定常になり、有意な密度差が残る結果となった。

膨潤圧とベントナイトの乾燥密度が一意に対応しているのであれば、この膨潤圧の経時変化は両供試体の乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 になった時点で平衡状態に達するはずである。しかしながら力学的には、物体の変形は釣合いが満足されるまで生じるはずであり、乾燥密度が同じかどうかではなく、膨潤圧が釣合った時点で変形が止まると考えることのほうが自然である。この力学的な解釈が正しければ、図 3.4.1-3 に示したように、高密度供試体と低密度供試体の密度変化は互いに近づくが、密度差はゼロにはならないと考えられる。

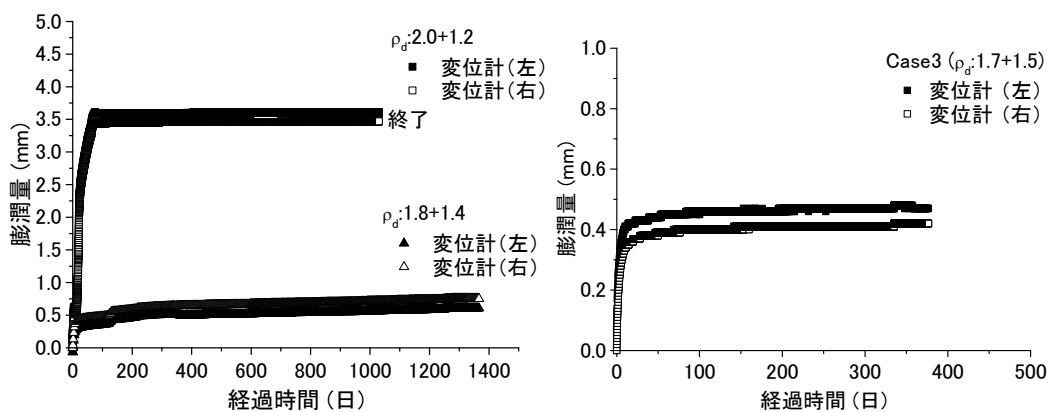


図 3.4.2-1 膨潤量の経時変化

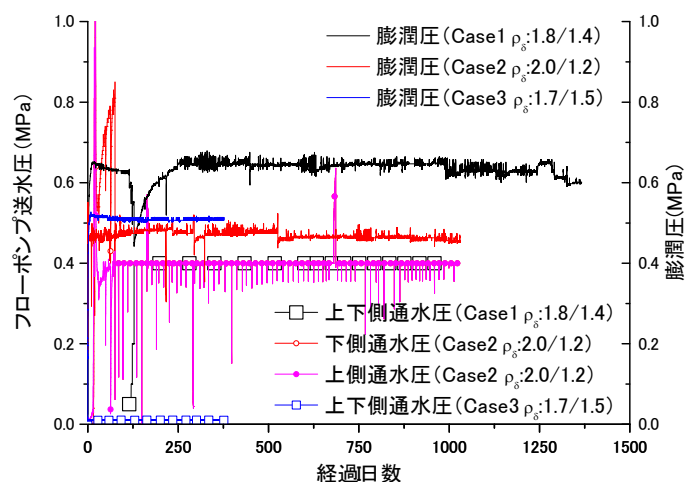


図 3.4.2-2 フローポンプによる通水圧の経時変化

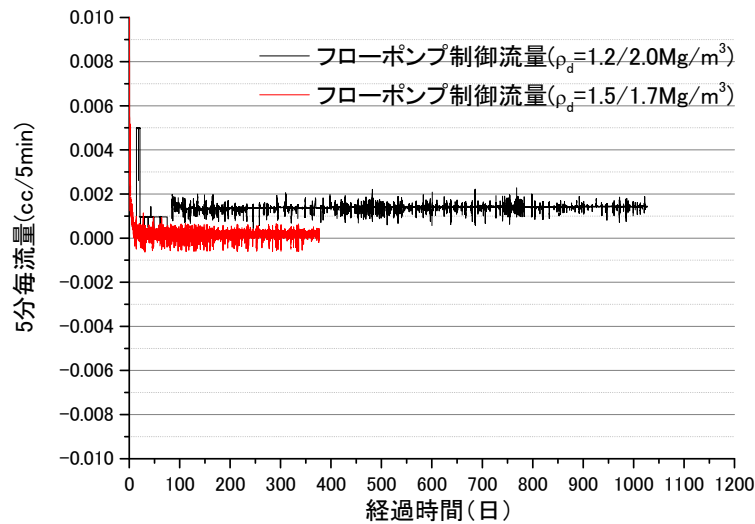


図 3.4.2-3 フローポンプによる制御流量の経時変化

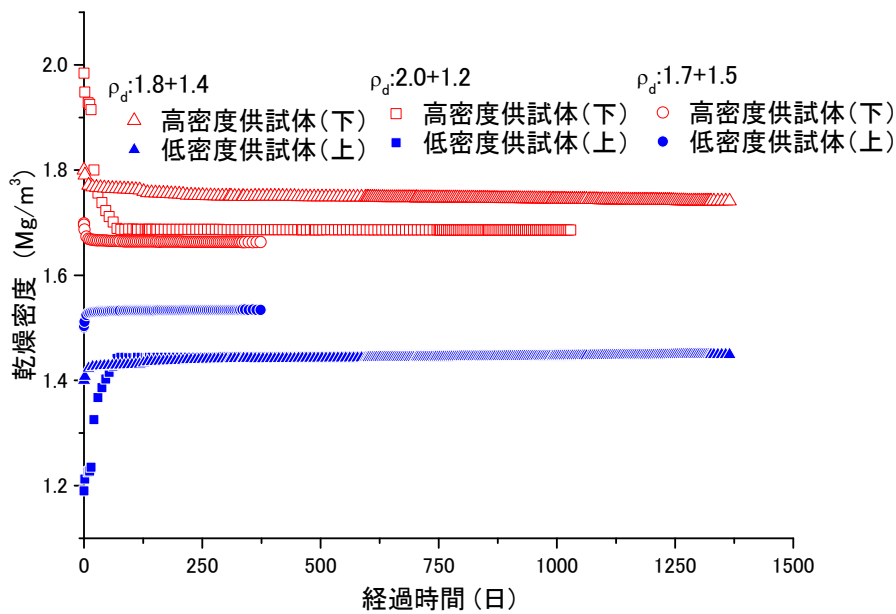


図 3.4.2-4 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化

(2) 供試体解体結果

本検討では、試験終了後の供試体の物理試験（密度計測、含水比計測）、および排水の化学分析（イオン分析）を実施する計画である。

図 3.4.2-5 に膨潤量供試体の模式図を示す。初期高さ H 、面積 A 、乾燥質量 W の供試体のかさ乾燥密度 ρ_d とすると、 $\rho_d = \frac{W}{AH}$ で表される。ここで、膨潤変形 d が発生したとすると、バル

クの乾燥密度 ρ_d は $\rho_d = \frac{W}{A(H+d)}$ となる。

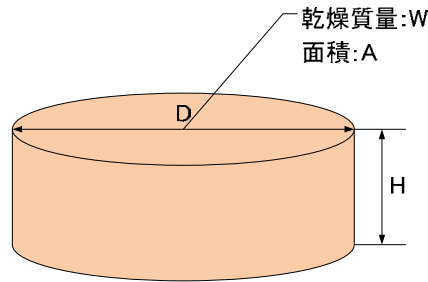


図 3.4.2-5 供試体模式図

ここで、直列膨潤量試験について考える。直列膨潤量試験では、乾燥密度 ρ_{dl} の低密度供試体と乾燥密度 ρ_{dh} の高密度供試体がピストンを介して繋がっているため、高密度供試体に膨潤変形 d が発生したとすると、乾燥密度は $\rho_{dh} = \frac{W_H}{A(H+d)}$ となる。この時の低密度供試体は、高密度

供試体に膨潤変形によって d だけ圧縮される為、その乾燥密度は $\rho_{dl} = \frac{W_L}{A(H-d)}$ となる。なお、

下添え字、 H は高密度供試体、 L は低密度供試体をそれぞれ表している。両供試体の初期形状は同じであり、直径 D 、高さ H 、面積 A である。ここで、両供試体の算術平均乾燥密度 $\bar{\rho}_d$ を、膨潤変形 d を用いて表すと、

$$\bar{\rho}_d = \frac{\rho_{dh} + \rho_{dl}}{2} = \frac{\frac{W_H}{A(H+d)} + \frac{W_L}{A(H-d)}}{2} = \frac{W_H(H-d) + W_L(H+d)}{2A(H-d)(H+d)}$$

で表される。一方、両供試体を一体として考えて、両供試体の総乾燥質量を両供試体の総体積で除して定義する平均密度 $\hat{\rho}_d$ は、

$$\hat{\rho}_d = \frac{W_H + W_L}{A(H-d) + A(H+d)} = \frac{W_H + W_L}{2AH}$$

となり、膨潤量に無関係になる。

ここで、本検討の試験条件である、乾燥密度 $\rho_{dl} = 1.2 \text{Mg/m}^3$ の低密度供試体と乾燥密度 $\rho_{dh} = 2.0 \text{Mg/m}^3$ で初期供試体高さ 20mm、直径 60mm の場合の膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化を図 3.4.2-6 のようになる。両供試体の乾燥密度は、それぞれ、正と負の反比例のグラフとなり、算術平均乾燥密度 $\bar{\rho}_d$ も下に凸の関数となっていることが分かる。両者が同じ乾燥密度になるのは乾燥密度が $\bar{\rho}_d = 1.6 \text{Mg/m}^3$ の場合であり、この時に限り $\bar{\rho}_d = \hat{\rho}_d$ となることが分かる。本試験の場合、解体時の膨潤変形量が 2.14mm であったため、高密度供試体の乾燥密度は 1.807Mg/m^3 (図中の赤丸) であり、低密度供試体の乾燥密度は 1.344Mg/m^3 (図中の青丸) である。図に示したように、低密度供試体と高密度供試体の初期乾燥密度の算術平均値が 1.6Mg/m^3 であっても、膨潤量が小さい場合では算術平均値は 1.6Mg/m^3 よりも小さくなることが分かる。

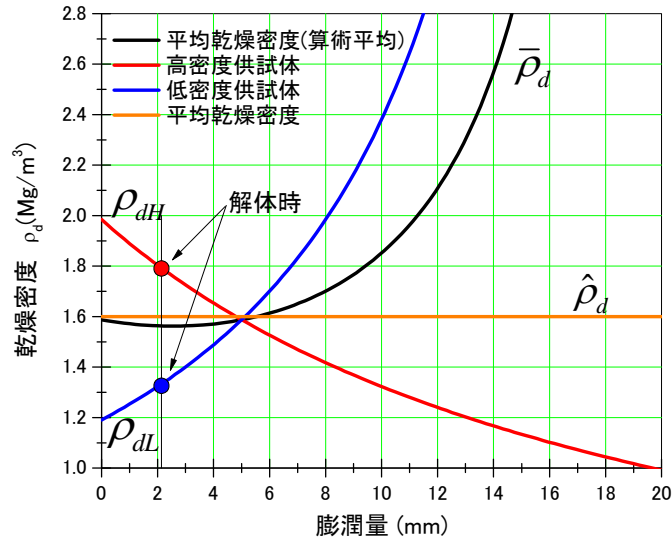


図 3.4.2-6 膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化

図 3.4.2-7 に今年度解体した直列膨潤量試験のうち高密度供試体(初期乾燥密度:2.0Mg/m³)と低密度供試体(初期乾燥密度 1.2Mg/m³)の解体計画図を示す。膨潤方向に可能限り分割して試験後の密度分布はノギス法で、含水比分布は炉乾燥法で計測した。

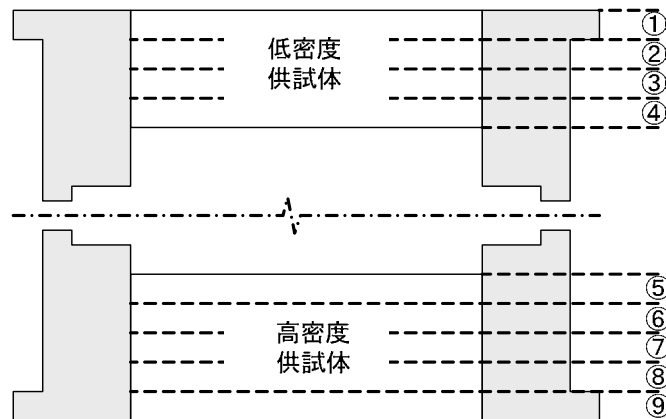


図 3.4.2-7 供試体の解体図

表 3.4.2-1 に直列膨潤量試験の解体結果を示す。表には、各供試体を分割して取得した密度分布を示している。計測された各分割供試体の乾燥密度は、図 3.4.2-6 に示した膨潤量と乾燥密度の関係から得られる乾燥密度とほぼ等しいことが分かる。図 3.4.2-8 に図 3.4.2-6 に示した膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化に表 3.4.2-1 に示した分割した供試体の各乾燥密度を併せて示している。図からも、計測値が膨潤量から算出される乾燥密度とほぼ等しいことが分かった。

図 3.4.2-9 には、分割した供試体の乾燥密度分布を示している。図から、両供試体共に、上面側の密度が小さいことが分かる。上側の供試体(低密度供試体)は上面が給水面であるが、下側の供試体(高密度供試体)は下面が給水面である。このことから、解体時に給水面から水を吸って局所的に膨潤したのではなく、供試体の上部にあった水が解体時に供試体に流下して

膨潤したものと考えられる。仮にこの解体時の膨潤がなければ、概ね均一な供試体分布となっており、両供試体とも給水側だけが膨潤しているという状況ではないことが分かる。

表 3.4.2-1 直列膨潤量試験の解体結果

供試体	供試体番号	分割高さ ΔH (mm)	含水比 W (%)	乾燥密度 ρ_d Mg/m ³	飽和度 Sr %
低密度供試体	①	0.483	45.79	1.224	102.3
	②	0.416	37.69	1.382	106.4
	③	0.294	36.25	1.434	110.6
	④	0.583	39.08	1.374	109.1
	平均値			39.70	1.354
高密度供試体	①	0.481	22.35	1.713	104.3
	②	0.455	18.14	1.832	102.8
	③	0.422	17.56	1.857	103.8
	④	0.415	16.53	1.899	105.2
	⑤	0.431	18.74	1.822	104.4
	平均値			18.66	1.824

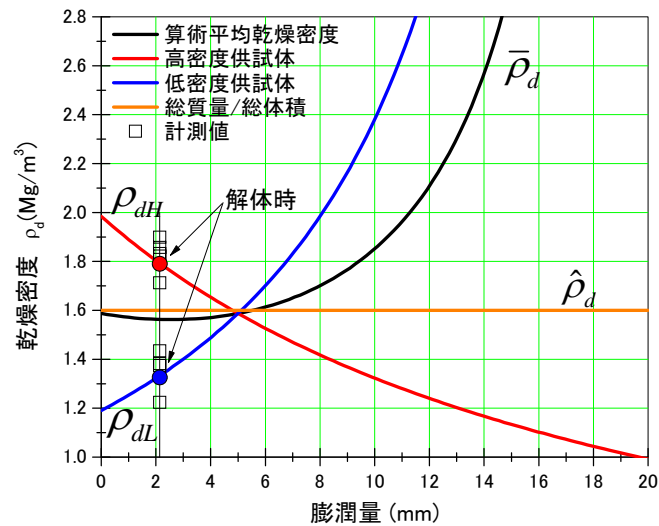


図 3.4.2-8 膨潤量に対する個々の供試体の乾燥密度と平均乾燥密度の変化(再掲)

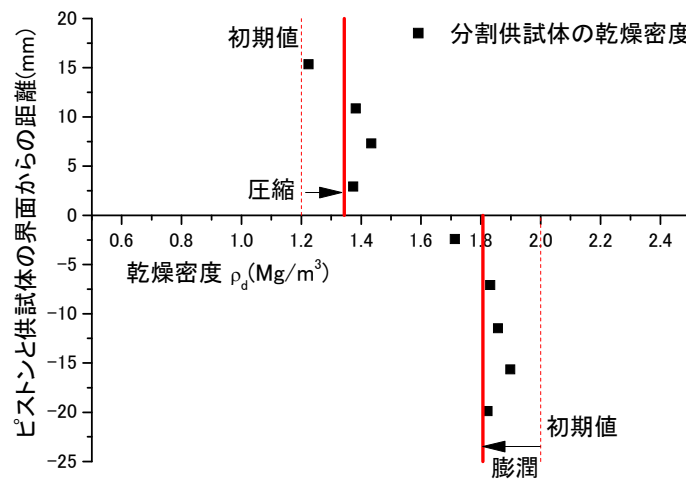


図 3.4.2-9 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

3.4.3 試験結果 (NaCl 水溶液ケース)

(1) 膨潤量

図 3.4.3-1 にイオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した直列膨潤量試験で取得した膨潤量の経時変化を示している。図には、前述の蒸留水のケースも比較のために併せて示している。図から、イオン強度の影響で、イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の方が、蒸留水のケースに比べ、膨潤量は小さいことが分かる。

本来、直列膨潤量試験では、2 つの供試体のうち、高乾燥密度供試体の乾燥密度の値が大きい程、膨潤量が大きくなると考えられる。イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の試験結果は、この考えに整合している。しかしながら、蒸留水のケースのうち、乾燥密度 1.5Mg/m^3 と 1.7Mg/m^3 の膨潤量よりも乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の方が小さくなっている。乾燥密度のばらつき以外の理由で、膨潤量が大きめに発生することは考えにくいので、乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 のケースの膨潤量が小さいと考えられる。

図 3.4.3-2 には、前述の膨潤量から算出した直列膨潤量試験中のイオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の乾燥密度の経時変化を示す。この図も、同様に、前述の蒸留水のケースも比較のために併せて示している。図から、蒸留水のケースに比べて NaCl 水溶液のケースの方が、残留密度差は大きいことが分かる。さらに、初期の密度差が大きいものほど、残留密度差が、大きくなることが分かる。

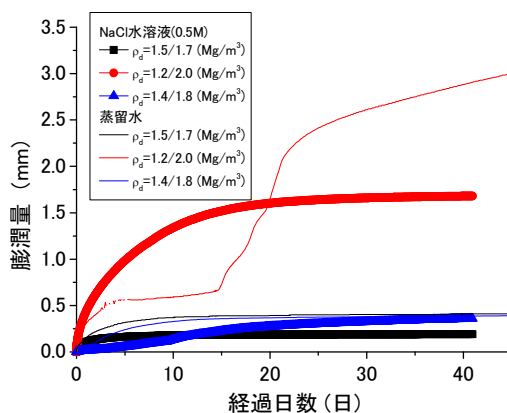


図 3.4.3-1 膨潤量の経時変化(NaCl 水溶液)

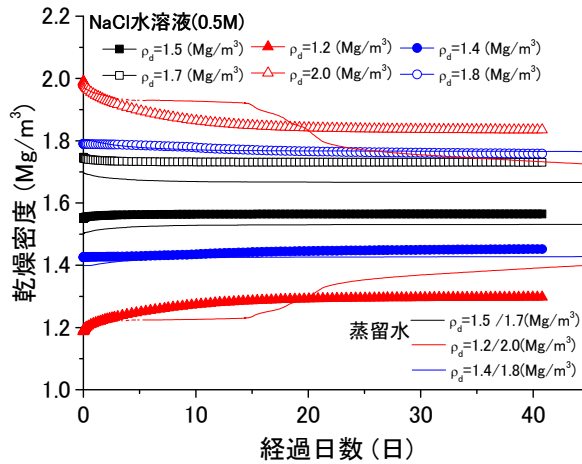


図 3.4.3-2 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化(NaCl 水溶液)

図 3.4.3-3 には、NaCl 水溶液の場合の直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化を示している。この図も、前述の蒸留水のケースを比較のために併せて示している。図から、イオン強度の影響により、蒸留水のケースに比べ、NaCl 水溶液ケースの方が膨潤圧は小さい傾向にある。

直列膨潤量試験の場合、膨潤圧は、2 つある供試体のうち、低乾燥密度供試体の乾燥密度が大きい程大きくなるものと考えられる。NaCl 水溶液ケースでは、この考え方に整合した結果が得られているのに対して、蒸留水では、乾燥密度 1.5Mg/m³ と 1.7Mg/m³ の膨潤圧よりも乾燥密度 1.4Mg/m³ と 1.8Mg/m³ の方が大きくなっている。前述の膨潤量試験の結果と併せて考えると、乾燥密度 1.4Mg/m³ と 1.8Mg/m³ の場合において、乾燥密度 1.4Mg/m³ セルにおいて、ピストンの傾き、ピストンとセルの摩擦などの影響で、乾燥密度 1.8Mg/m³ の供試体の膨潤量が乾燥密度 1.4Mg/m³ の供試体にきちんと伝播されておらず、その反力として、膨潤圧が大きくなったものと考えられる。また、同様の原因で、乾燥密度 1.4Mg/m³ と 1.8Mg/m³ の場合において膨潤量が小さめになっているものと考えられる。

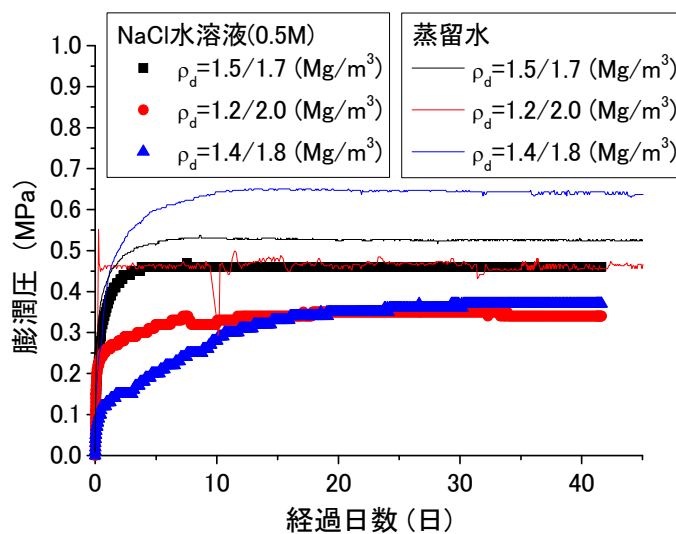


図 3.4.3-3 直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化(NaCl 水溶液)

図 3.4.3-4 には NaCl 水溶液のケースにおける直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化を示す。図から、直列膨潤量試験の 2 つの供試体のうち、乾燥密度が大きい供試体の方が、給水量が大きいことが分かる。これは、乾燥密度が大きい供試体は吸水膨潤するためである。一方、乾燥密度が小さい供試体は、直列膨潤量試験では、高乾燥密度供試体の膨潤に伴って圧縮されるが、供試体の空隙やセルの隙間などへの給水分が計測されているものと考えられる。また、乾燥密度が 1.2Mg/m^3 と 2.0Mg/m^3 のケースでは、乾燥密度 2.0Mg/m^3 の供試体の膨潤に伴って、乾燥密度 1.2Mg/m^3 の供試体から排水が計測されている。

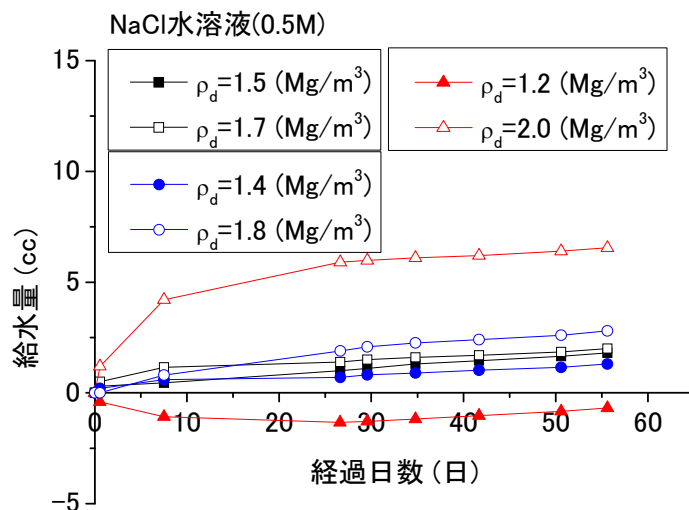


図 3.4.3-4 直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化(NaCl 水溶液)

3.5 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

(試験分類(a)―表 2.2.2-2)

3.5.1 試験ケース

これまでの試験から、密度と膨潤圧は必ずしも一意に対応しない可能性があることを示した。そこで、図 3.5.1-1 に示すように乾燥密度が同じであるが、膨潤による応力履歴が異なる供試体を直列に繋いだ膨潤量試験を実施した。この試験では、直列に繋いだ膨潤圧試験の供試体は密度差が無い場合、密度と膨潤圧が一意に対応するのであれば膨潤変形は生じないはずである。試験条件は以下のとおりである。

- ・ 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、一方向、一次元に浸潤させる。
- ・ 注水はシリンジポンプ(フローポンプ)によって行い、排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- ・ 図 3.4.1-1 と同様の試験機を用いて試験を実施する。まず、上部供試体(乾燥密度 1.6Mg/m^3) と下部供試体(乾燥密度 1.8Mg/m^3) を試験機にセットし飽和させる。この際、上部供試体は体積拘束条件で密度が 1.6Mg/m^3 のままとするようにして、下部供試体は乾燥密度が 1.8Mg/m^3 から 1.6Mg/m^3 となるまで膨潤させる。両供試体の飽和後の乾燥密度が同じになったところでピストンを繋いで、直列の膨潤量試験を開始する。
- ・ 下側の供試体にはピストンの死荷重が作用するため、ピストンの荷重(3520g)を相殺するカウンタウェイトを配置する(図 3.5.1-2)。

試験ケースを表 3.5.1-1 に示す。表には、表には、今年度から開始する試験水として、0.5M の NaCl 水溶液を使用したケース 1s~3s も記載している。また、製作した過圧密(高密度)ブロックとの正規圧密(低乾燥密度)ブロックの乾燥密度の実測値も示している。表に示すように、概ね、計画通りのブロックが作製できていることが分かる。

図 3.5.1-3 には応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の供試体の調整手順が示す。正規圧密供試体は、乾燥密度 1.6Mg/m^3 に静的に締固めた後に体積拘束条件で飽和したものであり、過圧密供試体は、乾燥密度 1.8Mg/m^3 に静的に締固めた後に乾燥密度 1.6Mg/m^3 まで膨潤させながら飽和したものである。このようにすることで、乾燥密度が同じであるが、膨潤による応力履歴が異なる供試体を直列に繋いだ膨潤量試験を実施可能になる。この試験によって膨潤量の経時変化が得られれば、図 3.5.1-4 に示すような力学的な解釈によるベントナイトの再冠水後の残留密度差を推定できる可能性がある。なお、ベントナイトの吸水膨潤が力学的な除荷と同等であるかどうかは議論の余地があるが、供試体の特徴を端的に示す名前としてこの名称を採用した。また、直列膨潤量試験は、過圧密供試体と正規圧密供試体の場合のみとして、正規圧密/正規圧密、過圧密/過圧密のケースはそれぞれ直列膨潤量試験にする必要がないとの判断から、1 供試体による通常の膨潤圧試験とした。

正規圧密の試験ケースでは、乾燥密度 1.6Mg/m^3 まで圧縮した供試体をそのまま膨潤圧試験に供したが、他のケースに比べて非常に早期に試験を終了したため、今年度 Case1-2 として再度試験を開始した。

過圧密の試験ケースに関しては、一旦、乾燥密度 1.8Mg/m^3 まで圧縮したものを 1.6Mg/m^3 まで膨潤させ、その後に膨潤圧を計測した。十分に飽和したことを確認した後に、体積拘束条件(乾

乾燥密度 1.6Mg/m³ 以下にならない様に拘束している) を解除して、膨潤圧の計測を行った。

表 3.5.1-1 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験条件

試験ケース*	高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	有効ベントナイト乾燥密度 (Mg/m ³)		初期含水比 (%)		応力履歴	平均乾燥密度 (Mg/m ³)	液種	備考
1	1.584(NC) (1.6)		1.351		25.91		正規	1.6 (ケイ砂 30wt% 混合 Na 型 ベントナイト)	蒸留水	終了
1-2	1.610(NC) (1.6)		1.379		22.33		正規			再現性確認中
2	1.794→1.596 (1.8→1.6)	1.589 (1.6)	1.576→ 1.368	1.357	25.91	18.97	正規+ 過圧密			解体実施
2-2	1.820→ (1.8→1.6)	1.600 (1.6)	1.606→	1.369	25.59	17.32	正規+ 過圧密			再現性確認中
3	1.798 →1.605 (OC) (1.8→1.6)		1.581 →1.368		18.97		過圧密			継続中
1s	1.612(NC) (1.6)		1.381		24.69		正規	NaCl 水溶液 0.5M	新規	
2s	1.813→ (1.8→1.6)	(1.6)	1.598→		17.75		正規+ 過圧密		新規	
3s	1.810→ (OC) (1.8→1.6)		1.595→		17.96		過圧密		新規	

*試験結果に基づき調整 (全体計画にて調整)
()は計画値

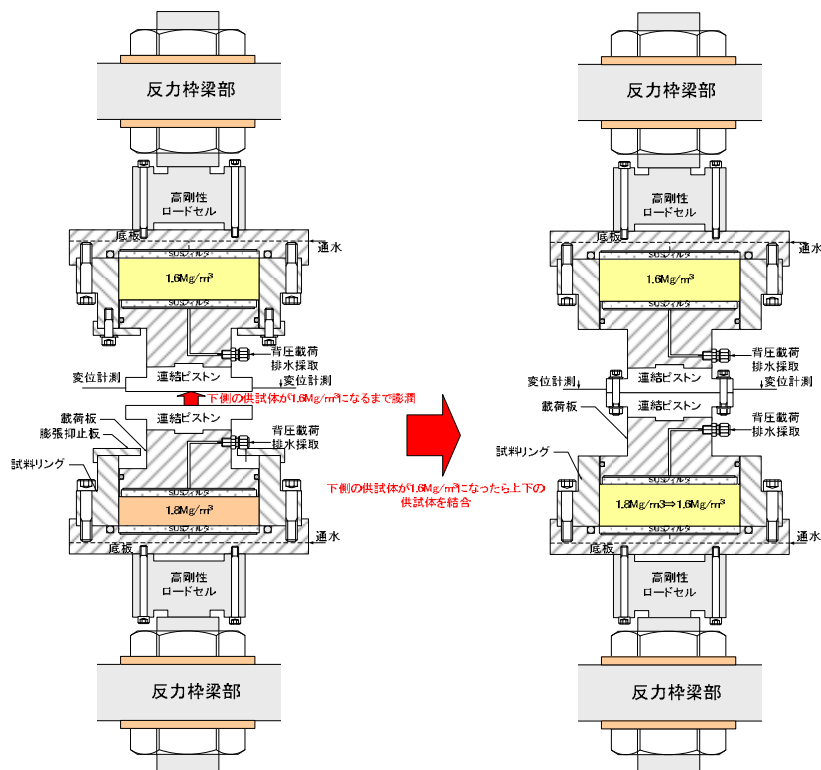


図 3.5.1-1 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の詳細図

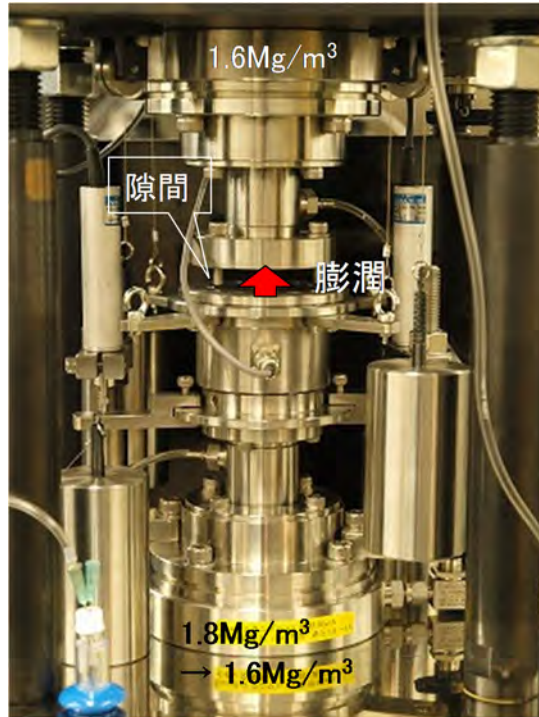


図 3.5.1-2 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験機

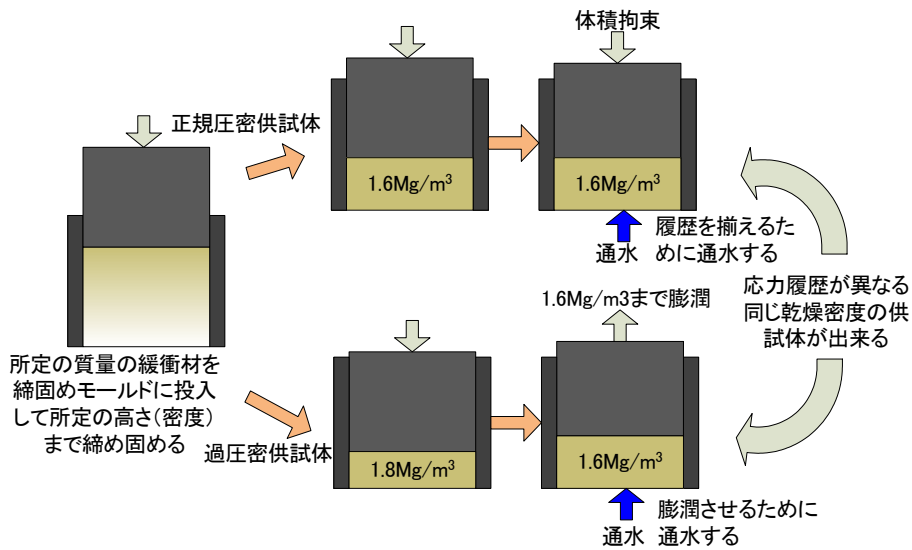


図 3.5.1-3 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の供試体調整手順

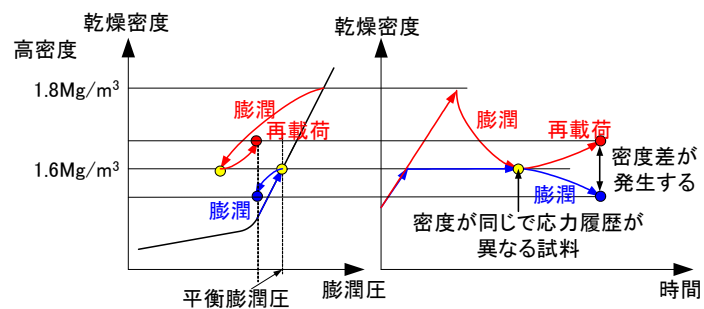


図 3.5.1-4 密度分布、及び膨潤量試験のイメージ

3.5.2 試験結果 (蒸留水のケース)

(1) 膨潤量

試験結果を図 3.5.2-1～図 3.5.2-4 に示す。図 3.5.2-1 には Case2(過圧密/正規圧密のケース)の膨潤量の経時変化を示している。ここで膨潤量は、下部の過圧密供試体が下向に膨潤する場合を正として取りまとめている。なお、試験初期には上部の正規圧密供試体は体積拘束条件で飽和するため膨潤量はゼロである。下部の過圧密供試体は、通水後 110 日目で乾燥密度がおおよそ 1.6Mg/m^3 に達したため、ピストンを介して上下の供試体を繋いで体積拘束条件を解除した。体積拘束条件を解除したところ、下部供試体は上部供試体に圧縮され、下方に変位していることが分かる。

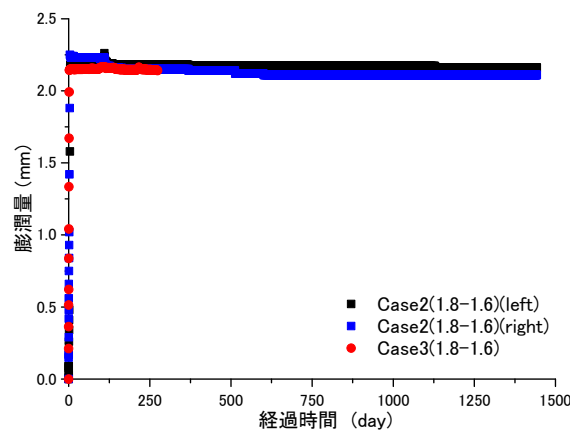


図 3.5.2-1 膨潤量の経時変化

Case2 の通水圧は図 3.5.2-2 に示すように、上部供試体に関してはフローポンプにより実施している。下部供試体は自由に膨潤できる境界条件でありフローポンプで通水させた場合に浮き上がるなどの不具合が出ないようにするために、ビューレットで 1m 程度の水位差で飽和させている。図 3.5.2-1 に示すように、乾燥密度 1.6Mg/m^3 に相当する膨潤量で一定値を示していることを確認してからフローポンプで排水を確認するまで通水を行い、その後ピストンを接続した。上下の供試体で異なる通水圧を作用させると通水圧の差で変形が発生することが考えられるため、通水から 75 日以降は、上下の通水圧が相殺するように上下にそれぞれ 0.4MPa の通水圧を作用させた。

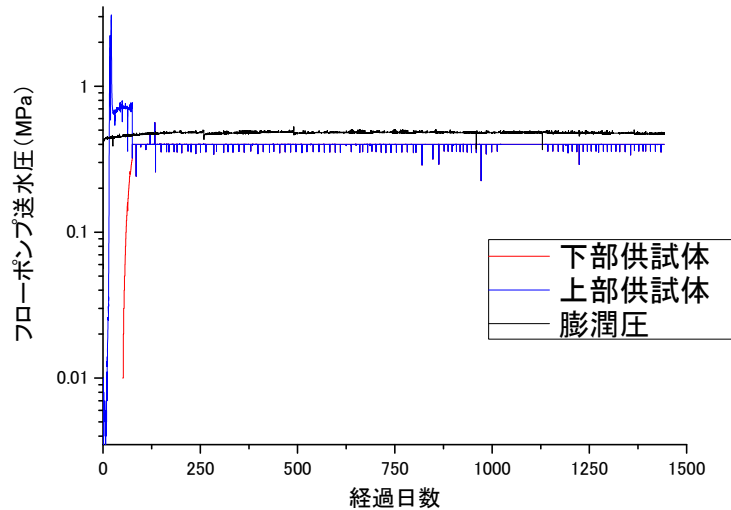


図 3.5.2-2 フローポンプによる通水圧、膨潤圧の経時変化

図 3.5.2-3 には、Case2 の上部供試体のフローポンプによる制御流量の経時変化を示している。試験当初は 0.0001cc/min の流速で注水を行い、膨潤圧がほぼ定常になった時点で流速を 0.005 cc/min に増加させた。この際に通水圧が水圧計の計測範囲の上限値である 2MPa に近づいたため、流速を 0.0002cc/min にして試験を継続した。その後、上下の供試体に同じ通水量を作用させた場合、通水圧に優位な差が表れたため、通水圧の差による変位が発生しない様に、通水開始から 75 日目で上下供試体に同じ通水圧を作用させる圧力制御に切り替えて試験を継続している。なお、75 日目以降の通水量は上下の供試体の通水量の総和であることに注意が必要である。

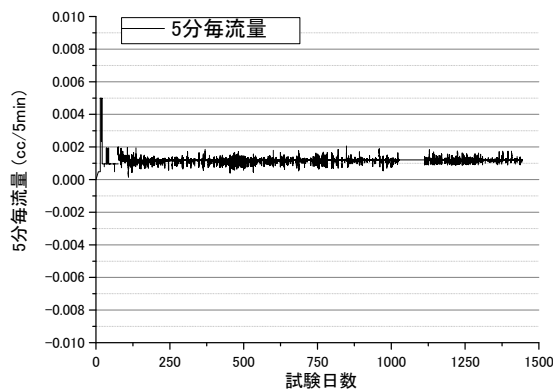


図 3.5.2-3 フローポンプによる制御流量の経時変化

図 3.5.2-4 には、Case2 の膨潤に伴う高密度供試体と低密度供試体の密度の経時変化を示している。図から、下部にある高密度供試体が膨潤して、ほぼ乾燥密度が上部にある低密度供試体の乾燥密度 (1.6Mg/m³) と同程度になっていることが分かる。さらに上下部の両供試体からの排水をもって十分に飽和したとみなして両供試体をピストンを介して接合した。

この試験では、膨潤量とベントナイトの乾燥密度が一意に対応しているのであれば、両供試

体を接合しても密度が同じであるためほとんど膨潤変形が生じないはずである。しかしながら、図に示すようにピストンを介して接合し、体積拘束条件を解除したところ膨潤変形が生じている。これは、膨潤量とベントナイトの乾燥密度が一意に対応しているのではないことを示唆している。

ベントナイトに限らず、物体の変形は釣合いが満足されるまで生じるはずであり、乾燥密度が同じかどうかではなく、膨潤圧が釣合った時点で変形が止まると考えることのほうが自然である。この力学的な解釈が正しければ、図 3.5.1-4 に示したように、膨潤という応力履歴の違いによって、密度差は解消されないと考えられるため、残留密度差の力学的解釈を後述する。

図 3.5.2-5 に正規圧密 ($1.6\text{Mg}/\text{m}^3$) 単体供試体、過圧密 ($1.6\text{Mg}/\text{m}^3$) と正規圧密 ($1.6\text{Mg}/\text{m}^3$) の直列供試体、および過圧密 ($1.6\text{Mg}/\text{m}^3$) 単体供試体の膨潤圧を示す。正規圧密は 80 日後で 0.55MPa であり、この時点で試験を終了した。直列供試体は上下の体積拘束を除荷した 110 日以降は 0.5MPa であり、体積拘束除荷後 690 日まで定常状態である。一方、過圧密供試体は、試験開始後 1 か月から 1000 日の期間に 0.4MPa から 0.6MPa に上昇した。

直列膨潤量試験では、ロードセルが上下の供試体の中間に設置されていることから、計測される膨潤圧は上下の供試体の内、小さい方の膨潤圧を計測することになる。その際、ロードセルは、大きな膨潤圧と小さな膨潤圧の差圧により、両者が釣り合うまで移動することになる。試験開始後 1 か月程度までの試験結果からは、直列膨潤量試験の結果は、過圧密供試体単体の膨潤圧とほぼ同等の値を示しているが、それ以降は過圧密供試体単体の膨潤圧が他のケースよりも大きくなっていることが分かる。直列膨潤量試験結果からは、正規圧密供試体の膨潤圧の方が、過圧密供試体の膨潤圧よりも大きくなっており、この結果が正しいとすれば、正規圧密供試体単体は過圧密供試体単体の膨潤圧よりもかなり大きくなっていなければならない。そこで、試験期間が他のケースよりも短かった正規圧密の供試体に関して、再現性確認の目的で再度膨潤圧試験実施した (Case1-2)。過圧密の供試体の膨潤圧が上昇した理由については、ベントナイト中のイオンが蒸留水の通水により放出された影響も関係している可能性もあるため、溶液の分析を実施して検討する計画である。

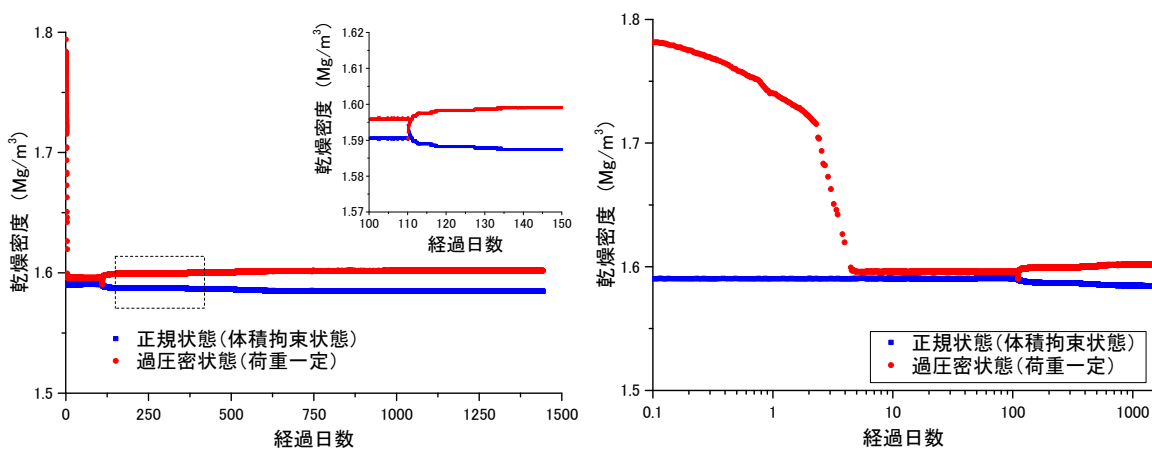


図 3.5.2-4 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化

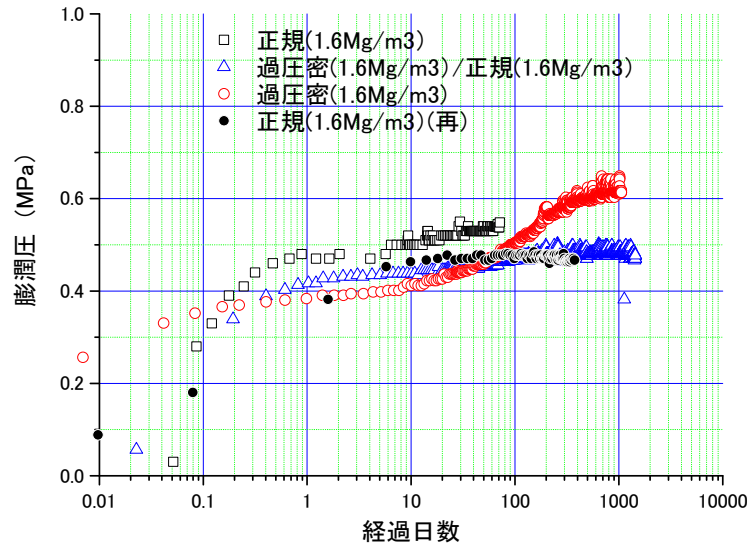


図 3.5.2-5 応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価（膨潤圧の経時変化）

(2) 供試体解体結果

試験終了後は供試体の物理試験（密度計測、含水比計測）を実施した。図 3.5.2-6 に正規圧密供試体、過圧密供試体の解体計画図を示す。解体は、セルから供試体を 5 mm 程度押し出した分だけスライスするやり方で行った。

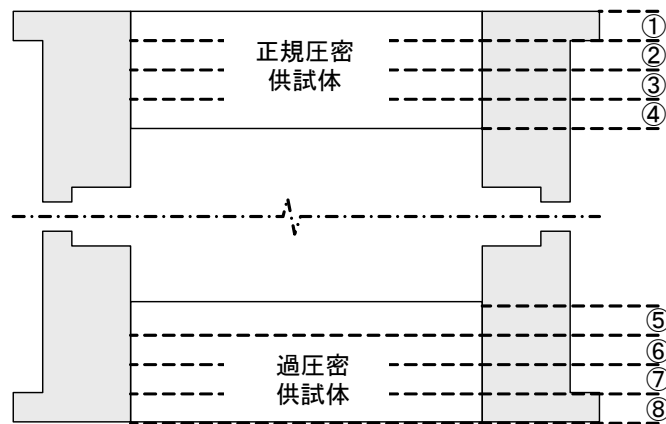


図 3.5.2-6 供試体の解体計画図

表 3.5.2-1 に直列膨潤量試験の解体結果を示す。表には、各供試体を分割して取得した密度分布を示している。図 3.5.2-7 には、分割した供試体の乾燥密度分布を示している。図から、試験前に比べ、全体的に乾燥密度が低下していることが分かった。これは、供試体作製時にセルに投入した試料の乾燥質量 90.84g が正規圧密供試体で 2.26g、過圧密供試体で 3.5g 減少しているためである。この質量の低下は、排水中に含まれる水溶性の塩類によるものと考えられる。さらに、解体時の除荷による体積膨張も乾燥密度の低下の一因であると考えられる。

密度分布に着目すると、過圧密供試体の上下端が膨潤して試験開始時に比べ乾燥密度が低下していることが分かる。このことから、過圧密供試体が正規圧密供試体に圧縮された原因に、応力履歴が膨潤圧に及ぼす影響以外にも、直列膨潤試験前の膨潤過程による密度分布の影響も

含まれる可能性がある。今後、再現性確認をする場合、過圧密供試体の膨潤過程には十分な時間をかける必要がある。

表 3.5.2-1 直列膨潤量試験の解体結果

供試体	供試体番号	分割高さ ΔH (mm)	含水比 W (%)	乾燥密度 ρ_d Mg/m ³	飽和度 Sr %
正規圧密 供試体	①	4.84	27.14	1.560	99.7
	②	4.85	26.33	1.580	99.7
	③	4.89	26.76	1.570	99.7
	④	6.48	28.03	1.539	99.7
	平均値			27.07	1.562
過圧密 供試体	⑤	5.54	28.55	1.527	99.7
	⑥	4.92	24.03	1.640	99.7
	⑦	4.97	26.25	1.583	99.7
	⑧	5.13	34.04	1.409	99.7
	平均値			28.22	1.540

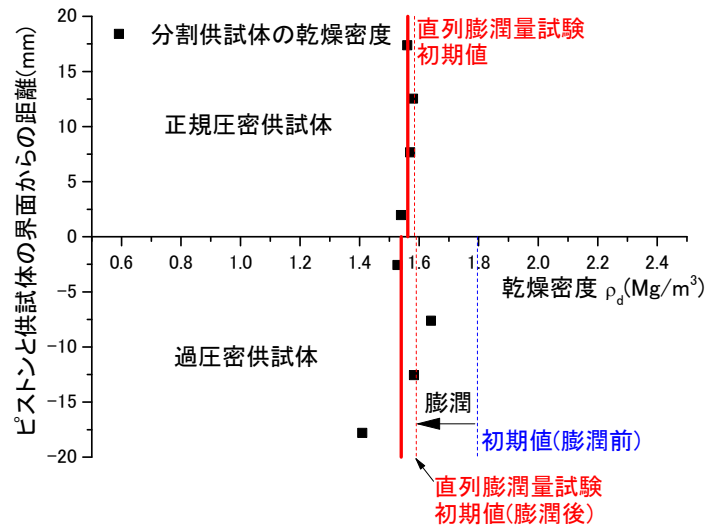


図 3.5.2-7 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

3.5.3 試験結果 (NaCl 水溶液ケース)

(1) 膨潤量

図 3.5.3-1 に、イオン強度 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した直列膨潤量試験のうち、過圧密供試体の膨潤量の経時変化を示す。図には、前述の蒸留水を用いて実施した直列膨潤量試験の過圧密供試体の膨潤量の経時変化も比較のために併せて示している。図から、蒸留水のケースは 1 週間程度、NaCl 水溶液のケースは 2 週間程度で膨潤量が平衡状態に達している。しかしながら、イオン強度の影響により、NaCl 水溶液のケースの平衡膨潤量は、蒸留水のケースよりも小さい。そのため、図 3.5.3-2 に示すように、NaCl 水溶液のケースにおける過圧密供試体の乾燥密度の平衡値は乾燥密度 1.6Mg/m^3 に達していない。イオン強度 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した直列膨潤量試験は、別途実施している過圧密供試体単体の膨潤量試験結果に基づいて試験計画を立案し、再試する必要がある。

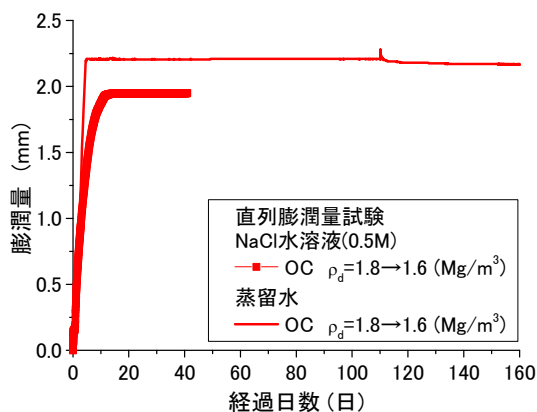


図 3.5.3-1 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

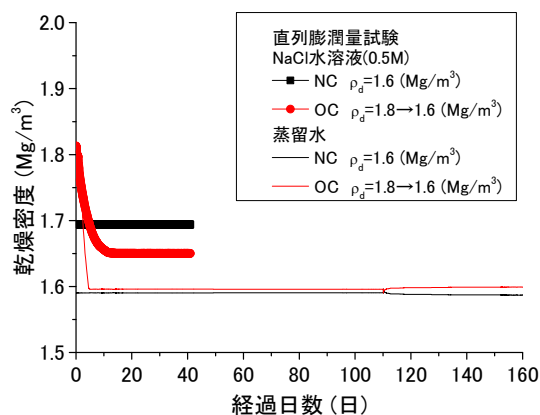


図 3.5.3-2 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

図 3.5.3-3 には、NaCl 水溶液を用いた場合の NC 供試体、OC 供試体単体の膨潤圧の経時変化、NC 供試体と OC 供試体の直列膨潤量試験から得られた膨潤圧の経時変化を示している。

また、図には、前述の蒸留水のケースの結果も併せて示している。図から、NaCl のケースの OC 単体の膨潤圧が他のケースに比べて非常に大きいことが分かる。これは、蒸留水のケースの OC 供試体の解体結果として密度分布が大きかったことから、NaCl 水溶液のケースでは、なるべく OC 供試体の密度分布を小さくするために、OC 供試体を乾燥密度 1.6Mg/m^3 まで膨潤させる前に十分に飽和させる過程を設けている。図中の膨潤圧は OC 供試体の膨潤前の飽和段階のものである。この際の乾燥密度は 1.8Mg/m^3 であるため、他のケースよりも膨潤圧が大きくなっている。また、NC 供試体と OC 供試体の直列膨潤量試験から得られた膨潤圧はゼロである。これも同様に、OC 供試体の飽和過程の膨潤圧であり、NC 供試体と OC 供試体は連結されていないため、ロードセルの値はゼロのままである。NC 供試体単体の膨潤圧は、蒸留水のケースと概ね同等であり、この乾燥密度 1.6Mg/m^3 程度の高密度では、イオン強度が膨潤圧に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

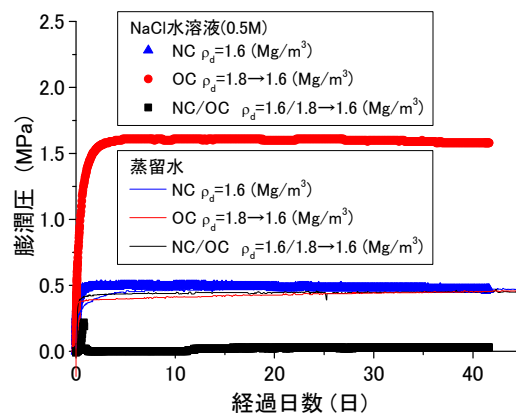


図 3.5.3-3 応力履歴の影響評価試験試験の乾燥密度分布

図 3.5.3-4 には、NaCl 水溶液を用いた場合の NC 供試体、OC 供試体単体の膨潤圧試験中の給水量、さらに NC 供試体と OC 供試体の直列膨潤量試験中の給水量を示している。図から、OC 供試体単体のケースと直列膨潤量試験の OC 供試体の給水量は同等で最も多く、次いで NC 供試体単体、直列膨潤試験の NC 供試体の順となっている。OC 供試体は前述のように、膨潤させる前の飽和段階であるため、乾燥密度 1.8Mg/m^3 の状態での給水量である。このため、OC 供試体の給水量が多いことと膨潤は関係ない。これらの給水量の違いは、供試体の初期飽和度やセル内の隙間、直列膨潤量試験の場合は供試体の上下関係によってもことなるため、試験初期段階では明確な傾向はないものと考えられる。

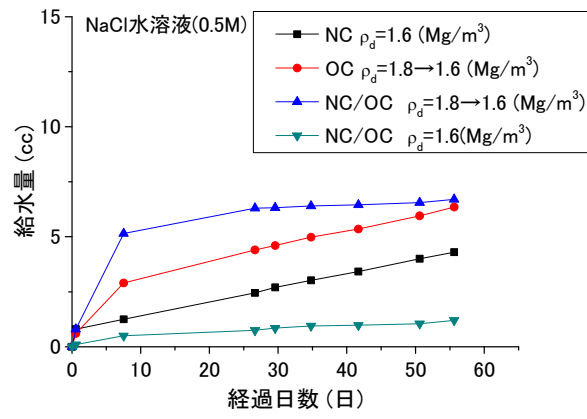


図 3.5.3-4 応力履歴の影響評価試験に用いた供試体の給水量

3.6 力学に立脚した残留密度差の理論的解釈

3.6.1 概要

ベントナイト系材料は、再冠水によって膨潤するため、緩衝材の施工時の密度分布や隙間などがあっても、飽和後には均質化すると考えられている。そのため、過去に密度分布を有する供試体が均質化する様子を取得する試験は数多くなされてきた。しかしながら、これらの試験で密度分布がなくなるまで均質に膨潤した例は無い。いずれの結果も、均質化する傾向が若干見られるものの、最終的には密度差を残したままで膨潤変形が収束している。

ベントナイト系材料が均質化するという点を積極的に説明できる理論はこれまでもなかった。熱力学や鉱物化学的なアプローチでは変形という概念を導入することは難しい。基底間隔を積み重ねた物が膨潤量であっても、境界条件を導入できないからである。このような状況で、暗黙のうちに乾燥密度と膨潤圧、膨潤量は一意の関係にあるという風に考えられてきたことは、力学的な検討が不十分であったためである。密度の異なるベントナイト系材料を接触させた膨潤による均質化試験を力学的に解釈すれば、先行圧密圧力（降伏点）と初期応力状態の異なる材料のサクシオンを開放させた場合の変形試験と考えられるであろう。当然、考慮すべき応力はこれだけではなく、浸透膨潤に伴う膨潤応力も考慮しなければならない。この浸透膨潤応力は、熱力学的には、単位体積当たりのモンモリロナイトと水のモル数によって決まるものである。力学的には、物体の変形は、必ず、浸透膨潤応力を含む力が釣り合う点で止まることも当然である。しかしながら、従来の解釈は、浸透膨潤応力のみを考えていたため、乾燥密度が同じ（単位体積当たりのモンモリロナイトと水のモル数が同じ）であれば同じ密度になるまで膨潤変形すると考えられてきたものと考えられる。このような力学的な観点から、従来行われてきたベントナイト系材料の均質化試験を解釈することによって残留密度差を解釈できることが明らかとなった。

3.6.2 既往の成果による残留密度差の理論的解釈

図 3.6.2-1 には、Sasakura ら[9]が取得したクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られる乾燥密度 $\cdot \log p$ 関係（応力ひずみ関係）に、前述の 3.4 で述べた乾燥密度 1.8Mg/m^3 と 1.4Mg/m^3 のケイ砂 30wt%混合ベントナイトの直列均質化試験（Case1）の膨潤圧を有効ベントナイト乾燥密度に対してプロットしている。この有効ベントナイト乾燥密度 ρ_{ben} は、ベントナイト部分の土

粒子体積 V_b と空隙 V_v （全体の体積からベントナイト以外の鉱物を引いたもの）に対するベント

ナイト部分の土粒子質量 W_b の割合で定義され $\rho_{ben} = \frac{W_b}{V_v + V_b}$ で示される。

このケースの場合、両者が釣り合うと考えられる密度と現在の密度に差があることが分かる。但し、上部供試体（低密度供試体）が下部供試体（高密度供試体）の膨潤に従って圧縮され、両者の密度差が縮まり、膨潤圧も増加傾向にあることから、両供試体の膨潤圧が釣り合うところで均一化の傾向は止まり、残留密度差が残るものと考えられる。

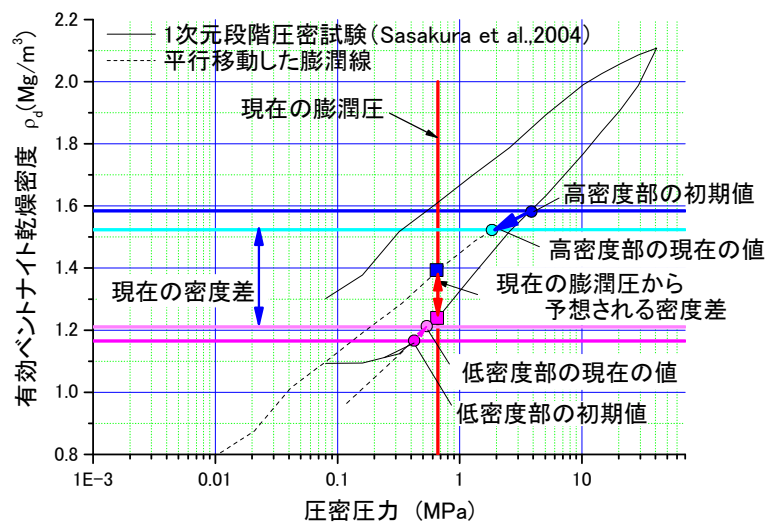


図 3.6.2-1 残留密度分布の力学的解釈(Case1)

図 3.6.2-2 には、Sasakura ら[9]が取得したクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られる乾燥密度 \cdot logp 関係(応力ひずみ関係)に、前述の 3.4 で述べた乾燥密度 2.0Mg/m^3 と 1.2Mg/m^3 のケイ砂 30wt%混合ベントナイトの直列均質化試験 (Case2) の膨潤圧を有効ベントナイト乾燥密度に対してプロットしている。

初期には高密度部と低密度部の応力状態は、両者とも正規圧密線上に存在している(図中●、●)。高密度部分は膨潤しながら乾燥密度が低下するので、膨潤線を辿って●まで至っている。一方、低密度部は高密度部の膨潤によって圧縮され、密度が増加する。そのため、●に至る。これに対して、両者の間に設置してあるピストンのロードセルから計測される膨潤圧は、図中の赤線で示してあるように、約 0.64MPa である。これらの関係をみると、●の応力値と●の応力値はほぼ釣り合い状態にあり、その値はおおよそ $0.6\sim 0.7\text{MPa}$ 程度である。その時に得られる密度差は約 0.22Mg/m^3 であり、実測が約 0.25Mg/m^3 である。若干のずれの原因は、膨潤圧試験における摩擦の影響や圧密試験の材料の相違などが考えられるが、これらを勘案しても、力学的な解釈で、おおよその残留密度差の説明ができることが分かった。

さらに図 3.5.1-3 には Case3 の膨潤圧を有効ベントナイト乾燥密度に対してプロットしている。Case1、2 の場合と同様に、初期には高密度部と低密度部の応力状態は、両者とも正規圧密線上に存在している(図中●、●)。高密度部分は膨潤しながら乾燥密度が低下するので、膨潤線を辿って●まで至っている。一方、低密度部は高密度部の膨潤によって圧縮され、密度が増加する。そのため、●に至る。これに対して、両者の間に設置してあるピストンのロードセルから計測される膨潤圧は、図中の赤線で示してあるように、約 0.53MPa である。試験開始直後であるため、試験を継続し、工学的に均一化すると見なせる初期乾燥密度を取得する計画である。

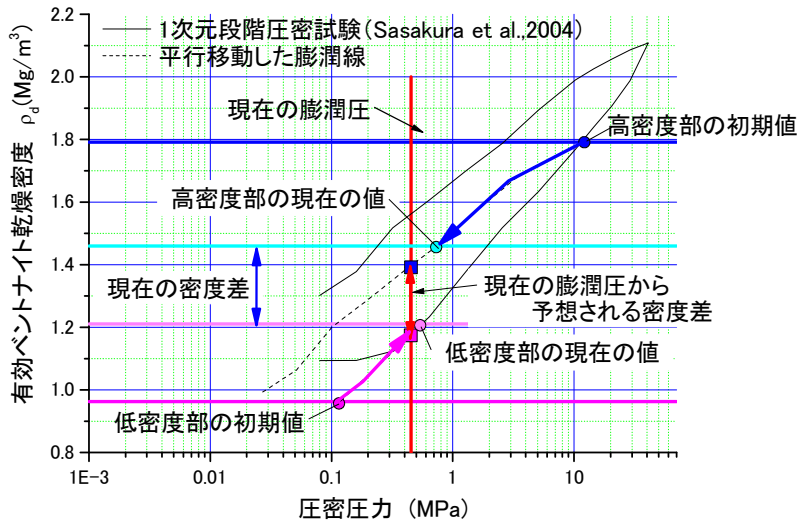


図 3.6.2-2 残留密度分布の力学的解釈(Case2)

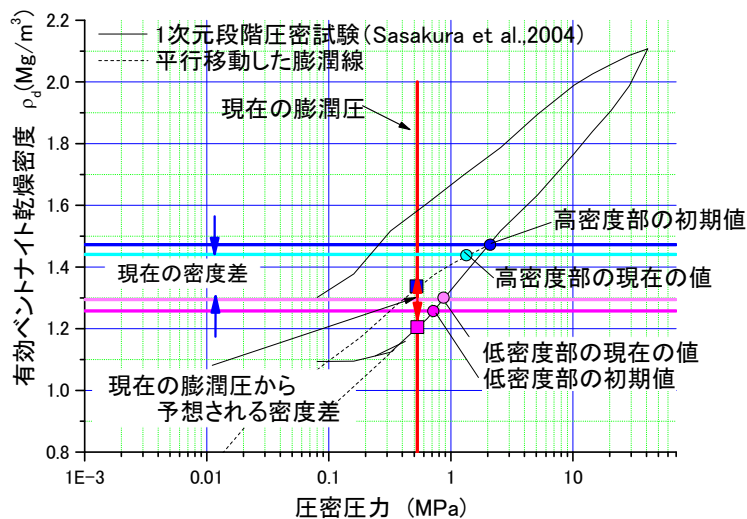


図 3.6.2-3 残留密度分布の力学的解釈(Case3)

図 3.6.2-4 には、Sasakura ら[9]が取得したクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られる乾燥密度- $\log p$ 関係（応力ひずみ関係）に、3.5 で述べた乾燥密度は上下共に 1.6Mg/m^3 のケイ砂 30wt%混合ベントナイトであるが応力履歴が異なる供試体の直列均質化試験の結果をプロットしている。なお、これも図 3.6.2-1 と同様に図中の縦軸は有効ベントナイト乾燥密度に換算してある。初期には上部の正規圧密供試体は応力状態が正規圧密線上に存在している（図中●）。一方、過圧密供試体は除荷線上で乾燥密度が 1.6Mg/m^3 に相当する有効ベントナイト乾燥密度の点（図中●）に応力状態が存在している。よって、密度は同じであるが、応力状態が異なることになる。ここで、直列膨潤量試験を行うと、正規圧密供試体の方が、応力状態が大きいいため、膨潤し（図中●）、過圧密供試体を圧縮する（図中●）。現時点では、まだ平衡状態に至っていないため定量的な議論は難しいが、応力点の移動はこの力学的な解釈と同じ傾向である。

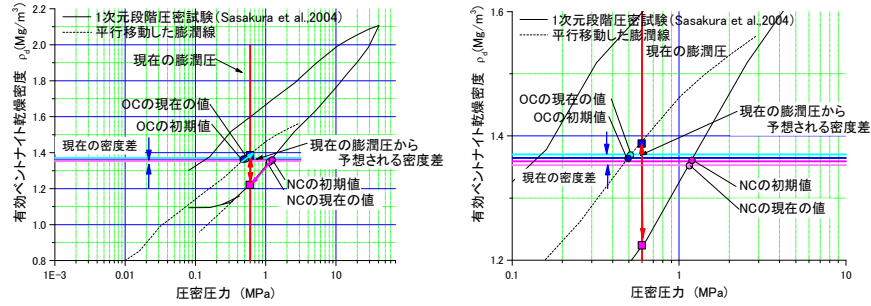


図 3.6.2-4 応力履歴による密度差の発生に関する力学的解釈 (右図：拡大図)

3.6.3 残留密度差の理論的解釈に資するデータ取得

(1) 試験ケース

前述のように、残留密度差を弾塑性力学に立脚して説明しようとする試みは、残留密度差の推定や緩衝材の許容される密度分布などの施工方法に対する仕様の決定につながる可能性があり、非常に重要である。しかしながら、本検討で実施している乾燥密度 1.2~2.0Mg/m³の緩衝材の膨潤挙動を説明できる非常に幅広い応力レベルで実施された圧密試験結果が存在しないため、現状では、比較的幅広い応力レベルで Sasakura ら[9]によって取得されたクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られる乾燥密度-logp 関係（応力ひずみ関係）を用いるより他はない。ただし、この結果は 2002 年のクニゲル V1 を用いた試験結果であり材料ロットが異なることや、乾燥密度 1.2Mg/m³ 付近の正規圧密曲線が不足していることなどから、本検討で実施した直列膨潤量試験から得られた残留密度差の結果を理論的に説明するためには、乾燥密度-logp 関係を新たに取得することが望ましい。そこで、表 3.6.3-1 に試験ケースを示す。Case 1 は、あらかじめ不飽和で静的に締固めた供試体を圧密セル内で飽和させた後に圧密するものであり、Case2 は圧密セル内に液性限界程度に調整したスラリー状のベントナイトを入れ、そのまま圧密に供するもの、最後に Case3 は、直径 500 mm×高さ 500 mm程度の予備圧密容器内に液性限界程度に調整したスラリー状のベントナイトをいれ、予備圧密した後に、サンプラーでコア抜きしたものを圧密試験に供するものである。Case3 で予備圧密した試料は、今後、圧密以外の力学試験にも供することが可能である。

表 3.6.3-1 圧密試験ケース

ケース	初期乾燥密度 Mg/m ³	含水比 %	高さ mm	直径 mm	試験手順	備考
1	1.0	10	20	60	乾燥密度 載荷: 1.2 Mg/m ³ ⇒2.0 Mg/m ³ 除荷: 2.0 Mg/m ³ ⇒1.6 Mg/m ³	新規 試験セルで飽和
2	スラリー	液性限界程度	20	60	段階載荷により圧密 Case2 の結果に基づいて Case3 の試験条件を協議の 下で決定する。	新規 試験セルでスラ リーから圧密
3	スラリー	液性限界程度	500	500		新規 圧密終了後コア 抜きして試験に 供する

写真 3.6.3-1 に Case1 の圧密試験装置を示す。本試験では一般土で用いられる圧密試験機を用いて試験を行う。排水条件は上下面の両面排水である。上面は大気に曝される機械構造となっているため、乾燥を防止するために濡れウエスなどによって対策を施している。下面からの排水量は、ビューレットで計測される。

写真 3.6.3-2 には Case2 のベントナイトスラリーの圧密試験装置を示す。ベントナイトスラリーは通常の圧密試験容器では試験することが難しいため、膨潤圧試験容器を用いて試験を実施する。本試験も排水条件は両面排水であり、上下面からの排水量を採水した。



写真 3.6.3-1 圧密試験装置 (Case1)

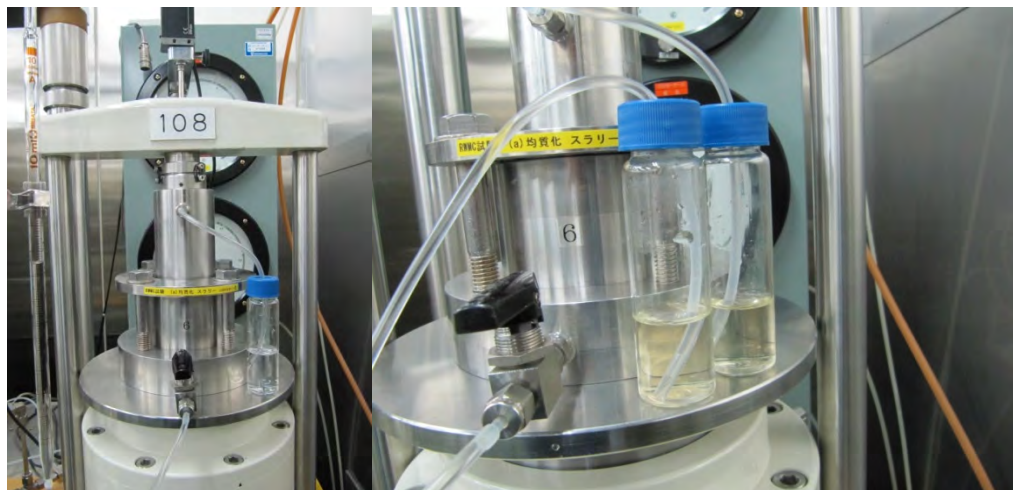


写真 3.6.3-2 スラリーの圧密試験装置 (Case2) と採水状況

写真 3.6.3-3 には Case3 のベントナイトスラリーの予備圧密試験装置を示す。本試験は、圧密容器として 500mm×600mm の半割れモールドを使用し、そのモールドの中でベントナイトスラリーを圧密した。所定の乾燥密度になった時点でコア抜きし、各種力学試験に供する予定である。



写真 3.6.3-3 スラリーの予備圧密試験装置 (Case3)

(2) 試験結果

表 3.6.3-2 に各ケースの供試体諸元を示す。Case1 では初期乾燥密度 $1.194\text{Mg}/\text{m}^3$ 、Case2 では $0.282\text{Mg}/\text{m}^3$ である。ベントナイトは液性限界が 307.11% と非常に高いため、Case2 の初期乾燥密度が非常に小さい。

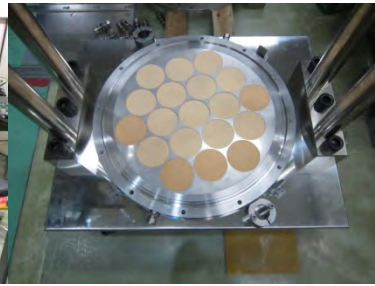
表 3.6.3-2 供試体諸元

Case		1	2	3
土粒子密度 ρ_s	Mg/m^3	2.707	2.707	2.707
初期含水比 w_0	%	40.76	307.11	332.29
供試体初期高さ	cm	1.970	3.760	52.7
供試体面積	cm^2	28.27	28.27	1962.5
供試体体積	cm^3	55.70	106.31	103476.2
初期湿潤質量	g	93.58	122.23	117691.33
初期乾燥質量	g	66.48	30.02	27225.09
初期湿潤密度	Mg/m^3	1.680	1.150	1.137
初期乾燥密度	Mg/m^3	1.194	0.282	0.263
実質供試体高さ	cm	0.869	0.392	49.0

Case3 に関しては、含水比 332% のベントナイトスラリーを 19 回に分けて、空気が入らないようにコテで均しながら所定の高さまで充填した。作製状況の写真を写真 3.6.3-4 に示す。



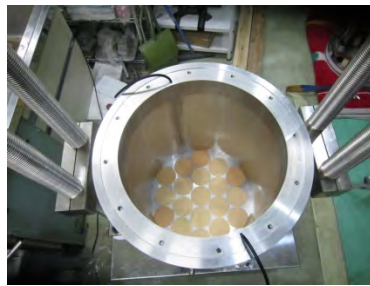
装置仮組状況



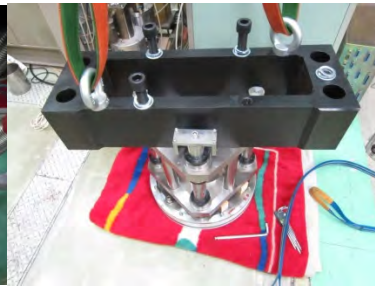
圧密容器底盤



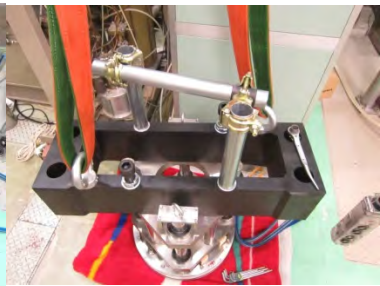
モールド設置状況 (1)



モールド設置状況 (2)



载荷ヘッド



载荷ピストン支保設置状況



調整試料状況



試料計量状況



試料投入状況



試料敷均し状況



1層充填



残尺測定状況



充填完了

写真 3.6.3-4 スラリーの予備圧密試験の供試体作製状況

図 3.6.3-1 には緩衝材の e - $\log p$ 関係、図 3.6.3-2 緩衝材の ρ_d - $\log p$ 関係を示す。両図には、小林ら[8]による完全飽和線も示してある。図から、Case1 の e - $\log p$ 関係、 ρ_d - $\log p$ 関係は完全飽和線と整合していることが分かる。一方、Case2 は、同じ応力レベルで比較すると、完全飽和線よりも高めの間隙比となっている。ただし、圧密が進行するにしたがって急激に完全飽和線に接近している。このことは、ある乾燥密度のブロック状態で飽和した供試体とスラリー状態からある乾燥密度まで圧密して作製した供試体で異なる応力履歴をたどることを意味しており、今後、更なる検討を進める必要がある。なお、Case1 で低応力レベルにおいて間隙比が一定なのは、Case1 の試験容器が膨潤しないような機構を有しているためである。

Case3 に関しては試験を開始した直後であり、载荷重はピストンの自重(6.5kPa)である。図 3.6.3-1、図 3.6.3-2 に示すように、Case2 の結果と整合する傾向を示している。図 3.6.3-3 には Case3 の圧密沈下曲線を示す。Case2 では、圧密が発生した応力レベルが 30kPa 程度であったため、Case3 においても同等の応力レベルまでは有意な圧密沈下は発生しないものと考えられる。

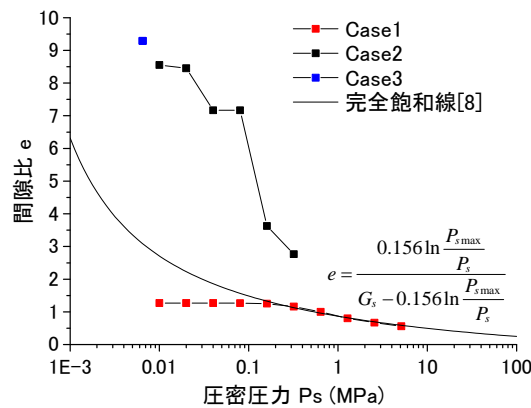


図 3.6.3-1 緩衝材の e - $\log p$ 関係

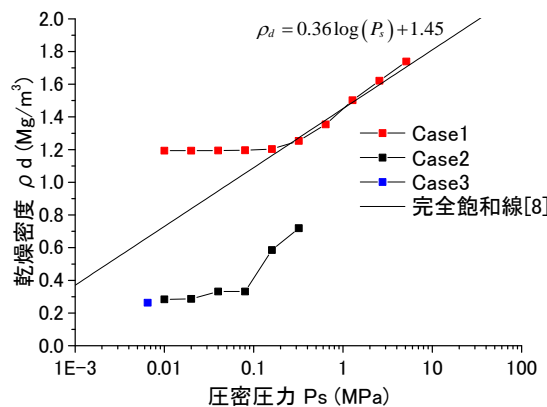


図 3.6.3-2 緩衝材の ρ_d - $\log p$ 関係

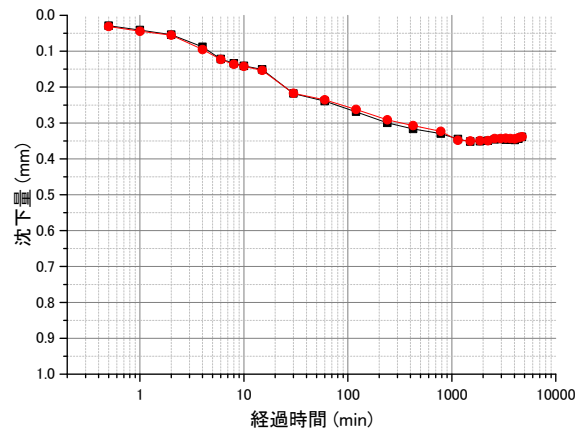


図 3.6.3-3 大型予圧密の圧密沈下曲線(Case3)

3.7 工学技術への反映

3.7.1 概要

本検討の試験の成果によって、応力履歴が緩衝材の均質化に及ぼす影響が定量的に評価されつつある。さらに、応力履歴の影響を推定できる力学的な解釈が可能となった。これにより、図 3.7.1-1 に示すような工学技術への反映が期待できる。すなわち、

- ① ベントナイトの膨潤によって均質化が期待できる密度差が定量的に与えられる。
- ② 別途、緩衝材の施工方法に起因するベントナイトの密度分布（密度差）が施工試験などによって定量評価できる。
- ③ ①、②から施工方法毎に膨潤後の密度分布が推定できる。
- ④ この膨潤後の密度分布と透水係数の要求性能を比較することによって、施工方法の選択における指標を示すことが可能となる。

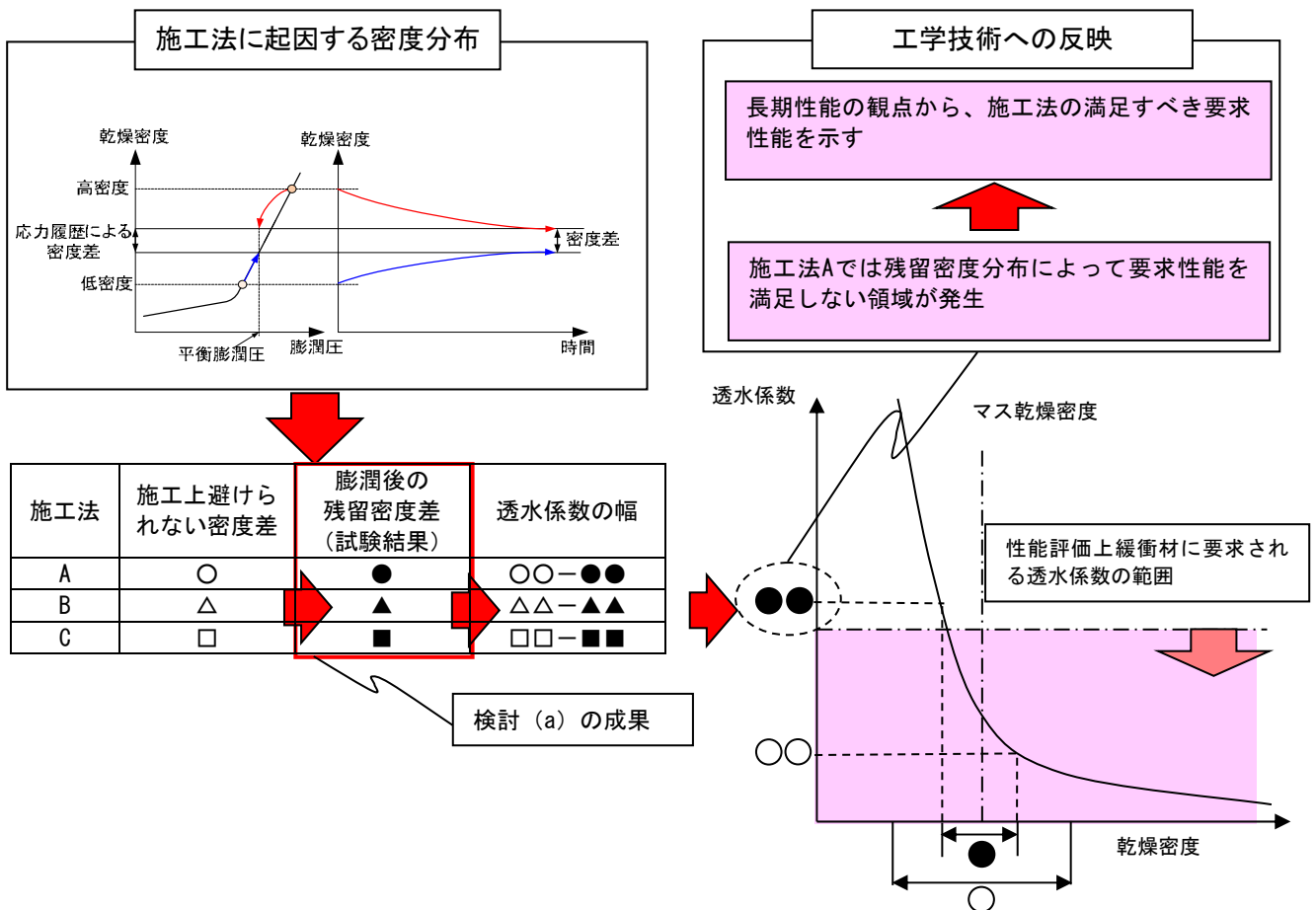


図 3.7.1-1 施工品質が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験の工学技術への反映イメージ

3.7.2 試験結果に基づく密度差の工学技術への反映

表 3.7.2-1 に、直列膨潤圧試験の結果として得られた残留密度分布に Kozeny-Carman 則を適用して得られる透水係数を示す。Kozeny-Carman 則は、乾燥密度 ρ_d (g/m³)を用いて下式で表される。

$$k = \frac{1}{5} \frac{\rho_g}{\mu} \frac{1}{Sv^2} \frac{e^3}{1+e} = \frac{1}{5} \frac{\rho_g}{\mu} \frac{1}{\left(\frac{36w^*}{\rho_d}\right)^2} \frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_d} - 1\right)^3}{\frac{\rho_s}{\rho_d}}$$

ただし、土粒子密度 $\rho_s = 2.733 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ 、二層膨潤含水比 w^* [10]を用いた。

二層膨潤含水比 w^* は、液種やベントナイト毎に含水比をパラメータにした XRD から取得するものであるが、本検討では、蒸留水と NaCl 水溶液のケースの乾燥密度と透水係数の関係は、図 3.7.2-1 に示すように、既往の研究 [11]から取得した乾燥密度と透水係数の関係に、二層膨潤含水比 w^* をパラメータとして Kozeny-Carman 則をフィッティングさせたものを使用した。

表 3.7.2-1 直列膨潤圧試験結果に基づく残留密度分布と透水係数

試験ケース*	液種	初期状態 (施工直後)				膨潤後 (再冠水後)			
		高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	高乾燥密度 透水係数 (m/s)	低乾燥密度 透水係数 (m/s)	高乾燥密度 (Mg/m ³)	低乾燥密度 (Mg/m ³)	高乾燥密度 透水係数 (m/s)	低乾燥密度 透水係数 (m/s)
1	蒸留水	1.798	1.399	9.54E-14	6.49E-13	1.741	1.449	1.23E-13	5.05E-13
2		1.984	1.190	4.56E-14	1.91E-12	1.686	1.445	1.59E-13	5.15E-13
3		1.698	1.493	1.50E-13	4.06E-13	1.665	1.533	1.76E-13	3.33E-13
1s	NaCl 水溶液 (0.5M)	1.790	1.426	2.28E-12	1.31E-11	1.758	1.452	2.63E-12	1.14E-11
2s		1.991	1.187	1.03E-12	4.46E-11	1.835	1.298	1.87E-12	2.50E-11
3s		1.747	1.550	2.76E-12	7.06E-12	1.731	1.565	2.97E-12	6.56E-12

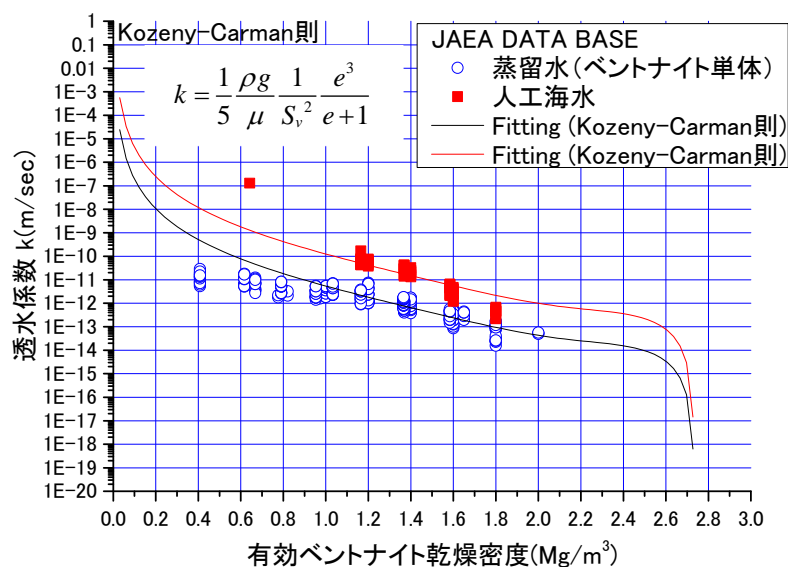


図 3.7.2-1 JAEA DATABASE に対する Kozeny-Carman 則のフィッティング結果

図 3.7.2-2 には、表 3.7.2-1 に示した直列膨潤圧試験の結果として得られた残留密度分布に Kozeny-Carman 則を適用した結果を示す。図から、試験前の乾燥密度分布が最大で 1.2Mg/m³ から 2.0Mg/m³ 程度であったが、試験後には、蒸留水のケースでは乾燥密度分布が 1.45Mg/m³ から 1.69Mg/m³ 程度まで解消されていることが分かる。一方、NaCl 水溶液のケースでは、乾燥密度分布が 1.30Mg/m³ から 1.84Mg/m³ 程度までしか解消されていない。この結果を Kozeny-Carman 則に適用すると、試験後の透水係数は、蒸留水のケースでは、10⁻¹³m/s オーダーであるが、NaCl 水溶液のケースでは、10⁻¹¹m/s から 10⁻¹²m/s 程度である。

ここで、試験前の密度分布を緩衝材施工直後の密度分布、試験後の密度分布を再冠水後の密度分布として考えると、仮に、処分サイトの地下水が 0.5M 程度の海水系地下水で緩衝材の要求性能が 5×10⁻¹²m/s 以下であるとすると、膨潤後の乾燥密度は 1.63Mg/m³ 以上でなければならない。この乾燥密度を満足するために許容される緩衝材の施工時の乾燥密度は試験結果から、1.55Mg/m³ から 1.75Mg/m³ 程度であることが分かる。

このように、本試験結果をまとめることで、緩衝材の施工方法の仕様を、再冠水後の緩衝材の性能を考慮して決定することが可能となる。

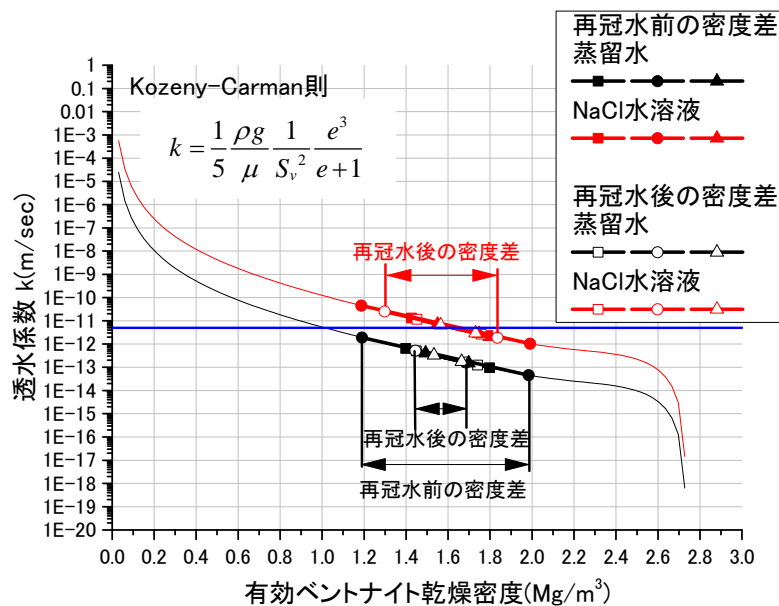


図 3.7.2-2 Kozeny-Carman 則を用いた残留密度差と透水係数の関係

3.8 解析技術への反映

3.8.1 解析技術への反映

本検討では、放射性廃棄物地層処分施設の建設作業時における緩衝材の構築後から再冠水終了後までの期間（力学的事象が支配的な状態から化学的事象が支配的な状態への過渡的段階）において緩衝材に発生する事象の定量評価を目的の一つに掲げている。このためには、ベントナイトの膨潤挙動を力学体系の中で説明できなければならない。従来のような現象論的な取り扱いを積み上げて予測能力や説明性を高めることは出来ない。

そこで本検討で実施した小規模試験を弾塑性力学に立脚した土水連成解析によって別途解析している。その解析では、緩衝材の膨潤挙動は、サクシオン圧の開放と比表面積の増加で表現した。このような土構造骨格の力学とその間隙を満たす水の水理を連成させた解析によって、ベントナイトの膨潤挙動に関して次のような知見が得られた。

膨潤圧試験のイメージ図を図 3.8.1-1 に示す。図に示すように、膨潤圧試験では、体積拘束したベントナイトを水で飽和させた際の膨潤圧を計測する。同じ密度で膨潤圧セルと供試体間に摩擦がない場合、供試体高さだけが異なる場合、取得される膨潤圧は同じである。なぜならば、内力が釣り合う（相殺される）ためである。これは図に示したバネに例えるとわかりやすい。同じバネ定数のバネをいくつ直列に繋いでも、同じひずみを与えた場合の反力は同じである。

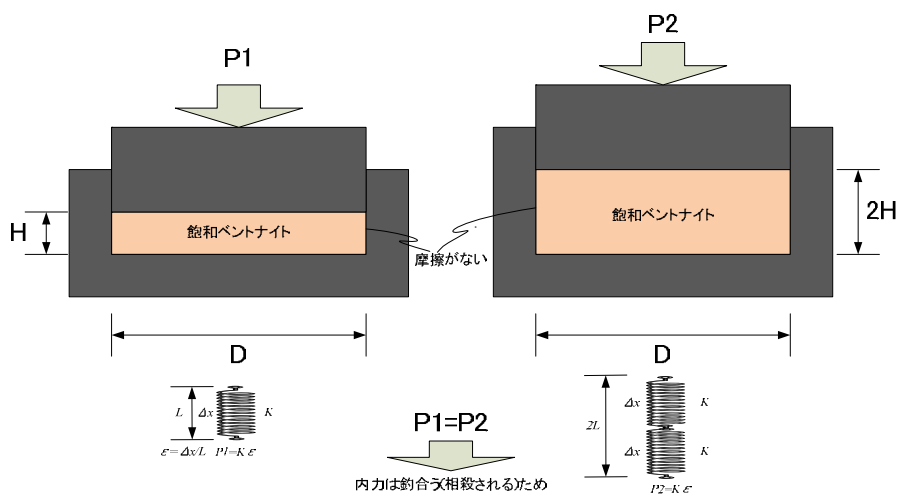


図 3.8.1-1 膨潤圧試験のイメージ

次に、図 3.8.1-2 のような状態を考える。左図は膨潤圧試験の開始直後のイメージである。左図に示すように、給水側である底面に飽和領域があり、その上部に不飽和領域がある状態を考える。この場合でもやはり、飽和領域は、右図に示す完全に飽和した状態とほぼ同じ膨潤圧を発揮する。これは、図 3.8.1-1 に示したバネの上に質量を無視できる程度に小さい剛体が乗っている状態と同じである。これが実際の膨潤圧試験において、試験開始直後に最大膨潤圧が発揮される理由である。

このように解釈すると、図 3.8.1-3 に示すように、高飽和度のベントナイトの膨潤圧試験と低

飽和度の膨潤圧試験で得られる膨潤圧の経時変化が異なることもサクシジョンの開放である程度説明が出来る。すなわち、試験開始直後に底面に飽和領域が形成されると、最大膨潤圧が発揮される。その一方で、後述する長尺ベントナイトの一次元浸潤速度取得試験の試験結果からも明らかのように、飽和領域ではサクシジョンがなくなるため吸水速度が低下する。初期飽和度が高い供試体の場合、不飽和領域のサクシジョンは大きくないため、低下した吸水速度よりも供試体内部での浸透速度が遅ければ膨潤圧は低下せず一定値を保つ（図 3.8.1-3 左）。一方、初期飽和度が低い供試体の場合、不飽和領域のサクシジョンが大きいため、低下した吸水速度よりも供試体内部での浸透速度が速ければ飽和領域が不飽和化するために膨潤圧が低下し、膨潤圧の経時変化においてピーク値を示す（図 3.8.1-3 右）。

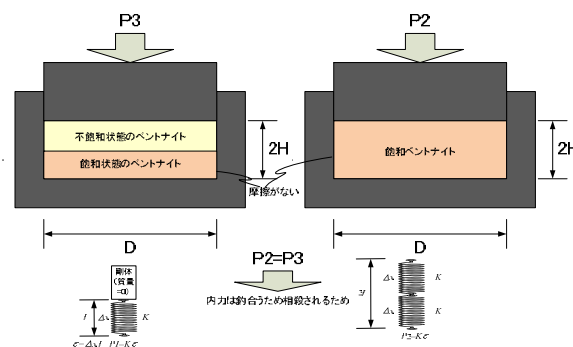


図 3.8.1-2 膨潤圧試験開始直後のイメージ

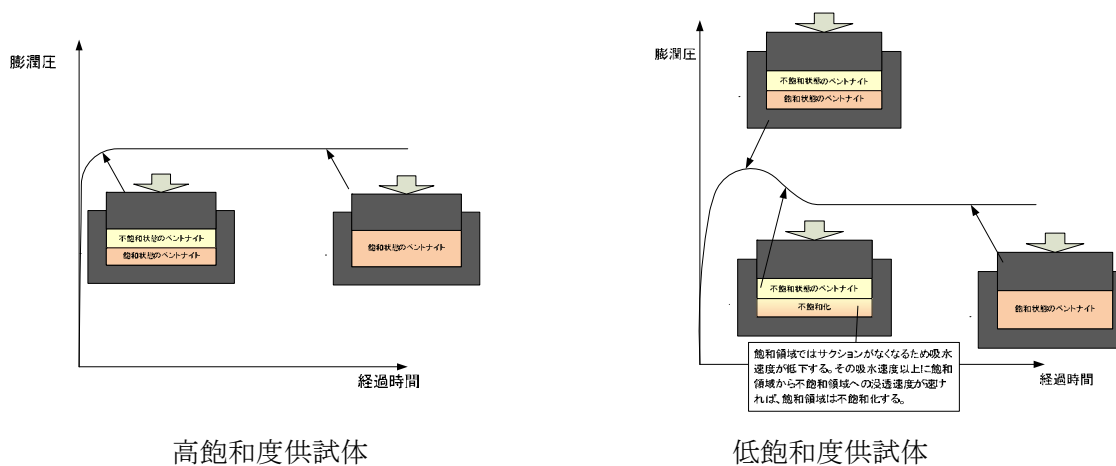


図 3.8.1-3 高・低飽和度供試体の膨潤圧試験のイメージ

本検討では、このバネの反力がサクシジョンの開放によって生じるというモデル化によってベントナイトの膨潤挙動がある程度表現できると考えている。また、このサクシジョンは水分特性曲線によって飽和度の関数として与えられており、言い換えれば、バネの反力は飽和度の関数となっている。本解析で用いた水分特性曲線では、サクシジョンは飽和度が 1(100%)になればゼロになるという、非膨潤性鉱物のモデルを用いているために、平衡膨潤圧がゼロとなり、ベントナイトの実験事実をきちんと表現できない。言い換えれば、ベントナイトのような膨潤性鉱物の水分特性曲線を取得できれば力学と水理解析でも膨潤圧を取得できるのである。

ベントナイトのような膨潤性鉱物の水分特性曲線を取得する方法は、幾つか考えられるが、最も簡単な方法は、膨潤圧試験において平衡蒸気圧を制御した膨潤圧試験を実施し、平衡蒸気圧と飽和度関係から、飽和度と膨潤圧の関係を取得する方法である。この際の膨潤圧が全てサクシヨンの開放によるものと見做せば、図 3.8.1-4 に示すような膨潤性鉱物の水分特性曲線が得られる。この膨潤性鉱物の水分特性曲線を、不飽和挙動を考慮した土水連成解析に導入すれば、ベントナイトの膨潤挙動を精度良く表現可能と思われる。さらに、このような現象論的なアプローチではなく、例えば Komine and Ogata [12]による微視的考察による熱力学的な観点から得られた浸透膨潤圧の推定式を用いて、力学膨潤と浸透膨潤の和として膨潤挙動を表すというより高度なアプローチも考えられる。

本検討によってベントナイト系材料であっても、一般の地盤材料と同様に、応力履歴の影響を受け、その影響で均質化しない可能性があることを指摘できた。このことは、試験実施前から予想していた通りであるとは言え、力学試験結果と膨潤による均質化試験から得られる残留密度差が整合しているという実験事実から推測したに過ぎない。この推論の確度を高めるためには、再現性の確認や様々な初期条件からの膨潤圧、膨潤量試験を行う必要がある。

実施する膨潤圧、膨潤量試験は力学的解釈が可能ないように、応力履歴を各実験段階で記録しておく必要がある。初期成型圧や初期含水比なども重要なパラメータとなる。また、応力ひずみ関係に相当する間隙比（乾燥密度）と圧密圧力の関係や水分特性曲線を取得することも不可欠である。これらを十分に取得できれば、ベントナイトの膨潤モデルの構築や解析コードの高度化などが実施可能となる。

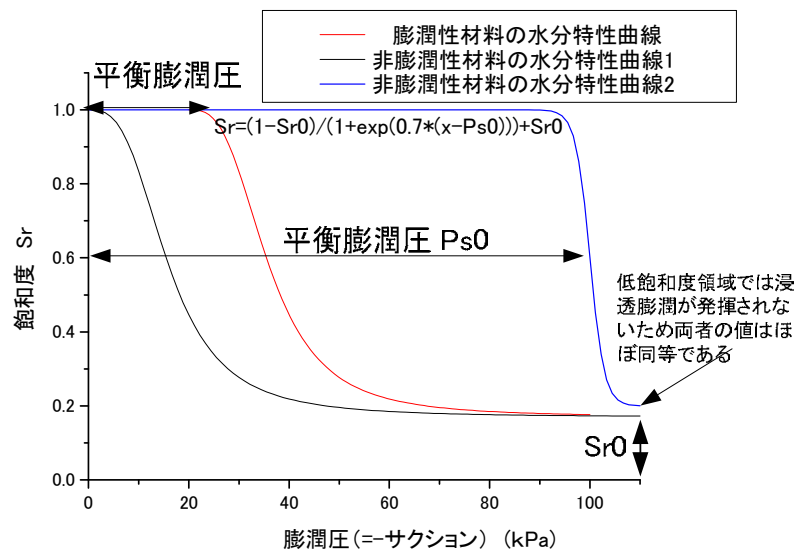


図 3.8.1-4 膨潤性鉱物の水分特性曲線のイメージ

第3章 参考文献

- [1] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－遠隔操作技術高度化開発－（2008）.
- [2] SKB 社：Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Can, TR-06-22 (2006).
- [3] 小峯秀雄, 緒方信英, 中島晃, 高尾肇, 植田浩義, 木元崇宏：一次元模型実験によるベントナイト系緩衝材の自己シール性評価, 土木学会論文集, No.757/III-66, pp.101-112 (2004).
- [4] 核燃料サイクル開発機構：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発－平成 13 年度報告－, JNC-TN1400-2002-003 (2002).
- [5] 鈴木英明, 藤田朝雄：緩衝材の膨潤特性, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TJ8400-99-038 (1999).
- [6] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発（第 2 分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2/2）（2010）.
- [7] 田中幸久, 中村邦彦：試験条件が膨潤圧試験結果に及ぼす影響の検討, 土木学会第 65 回年次講演会, CS7-020 (2010).
- [8] 小林一三, 戸井田克, 笹倉剛, 太田秀樹：等含水比線と等飽和度線を用いた締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈, 土木学会論文集 C, vol.63, No.4, pp.1065-1078 (2007).
- [9] Sasakura, T., Kobayashi, I., Sahara, F., Murakami, T., Ohi, T., Mihara, M. and Itoh, H.: Studies on mechanical behavior of bentonite for development of elasto-plastic constitutive model, International Conference on Radioactive Waste Disposal (DisTec 2004), pp.498-507 (2004).
- [10] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術人工バリア長期性能評価技術開発報告書（第 1 分冊）－人工バリアの長期挙動の評価－（2012）.
- [11] (独)日本原子力研究開発機構：JAEA 緩衝材基本特製データベース,
<http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>
- [12] Komine, H. and Ogata, N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 40, No. 2, pp. 460-475 (2003).

第4章 化学変質が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査

4.1 Ca 型化と飽和の可逆性検討

(試験分類(b)―表 2.2.2-2)

4.1.1 試験の目的及び概要

放射性廃棄物処分施設の緩衝材は、再冠水の過程で、セメント系材料からの浸出液に含まれる Ca イオンによって Ca 型化することが想定される。この Ca 型化は陽イオン交換反応と呼ばれる反応で、鉱物の溶解などに比べ、比較的速い化学変質と考えられている。その一方で、湧水が多い地盤の場合、セメント系材料から Ca イオンが溶出するよりも速く緩衝材が湧水によって飽和し、その後、拡散によって Ca 型化することも考えられる。

本試験は、このような、Na 型ベントナイトが飽和してから Ca 型化する場合と Ca 型化と飽和が同時に生じる場合、Ca 型化してから飽和する場合など、化学変質と飽和の事象の順番によって緩衝材の性能に違いが生じるかどうかを調べることを目的としている。

田中ら[1]は、ベントナイト系人工バリア材料の Ca 型化が膨潤性能に及ぼす影響について調べている。田中らは、膨潤量試験において、Na 型ベントナイトに水酸化カルシウム水溶液を通水した場合と、あらかじめ Ca 型化させたベントナイトに水酸化カルシウム水溶液を通水した場合を比較し、その結果として、Na 型ベントナイトに水酸化カルシウム水溶液を通水した場合の方が、膨潤量が大きいことを示している。さらに、Na 型ベントナイトに水酸化カルシウム水溶液を通水した場合の膨潤量は、Na 型ベントナイトに蒸留水を通水した場合の膨潤量よりも小さいことから、ベントナイトの Ca 型化は膨潤が同時に生じる場合、膨潤速度と比較して Ca 型化速度を瞬時と仮定できるほどは速くないことが分かる。また、微視的には Ca イオンは陽イオン交換反応によって消費され、交換された Na イオンが間隙に放出されるため、通水方向の深部では、Ca イオンよりも Na イオンの方が多く見られる場合も予想されるため、Ca 型化に時間がかかる可能性がある。

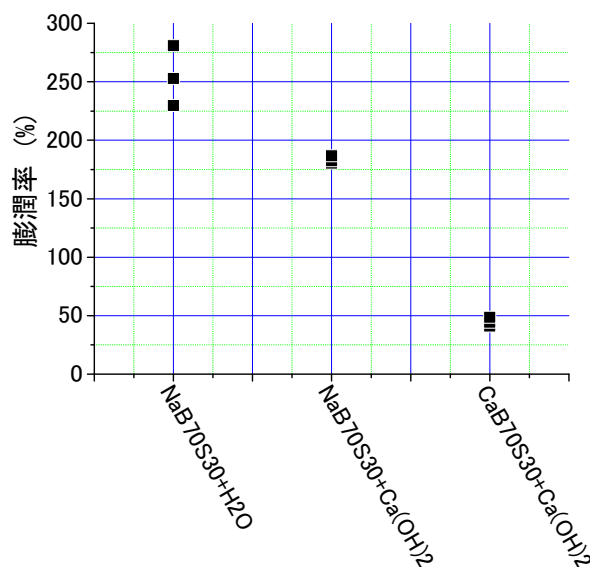


図 4.1.1-1 田中らの試験結果[1]

4.1.2 使用材料

本検討で使用する材料は山形県産の Na 型ベントナイト（クニゲル V1）に対して愛知県産のケイ砂 3 号とオーストラリア産のケイ砂 5 号を 7:1.5:1.5 の割合で混合したケイ砂 30wt%混合ベントナイトである。

ベントナイトの土粒子密度は 2.733Mg/m^3 程度であり、ケイ砂の土粒子密度は 2.65Mg/m^3 程度である。また、クニゲル V1 のモンモリロナイト含有率は 50~60%程度である。

また、Ca 型化ベントナイトは上記クニゲル V1 を CaCl_2 水溶液で人為的に Ca 型化させたものを用いた。作成方法は下図の通りである。

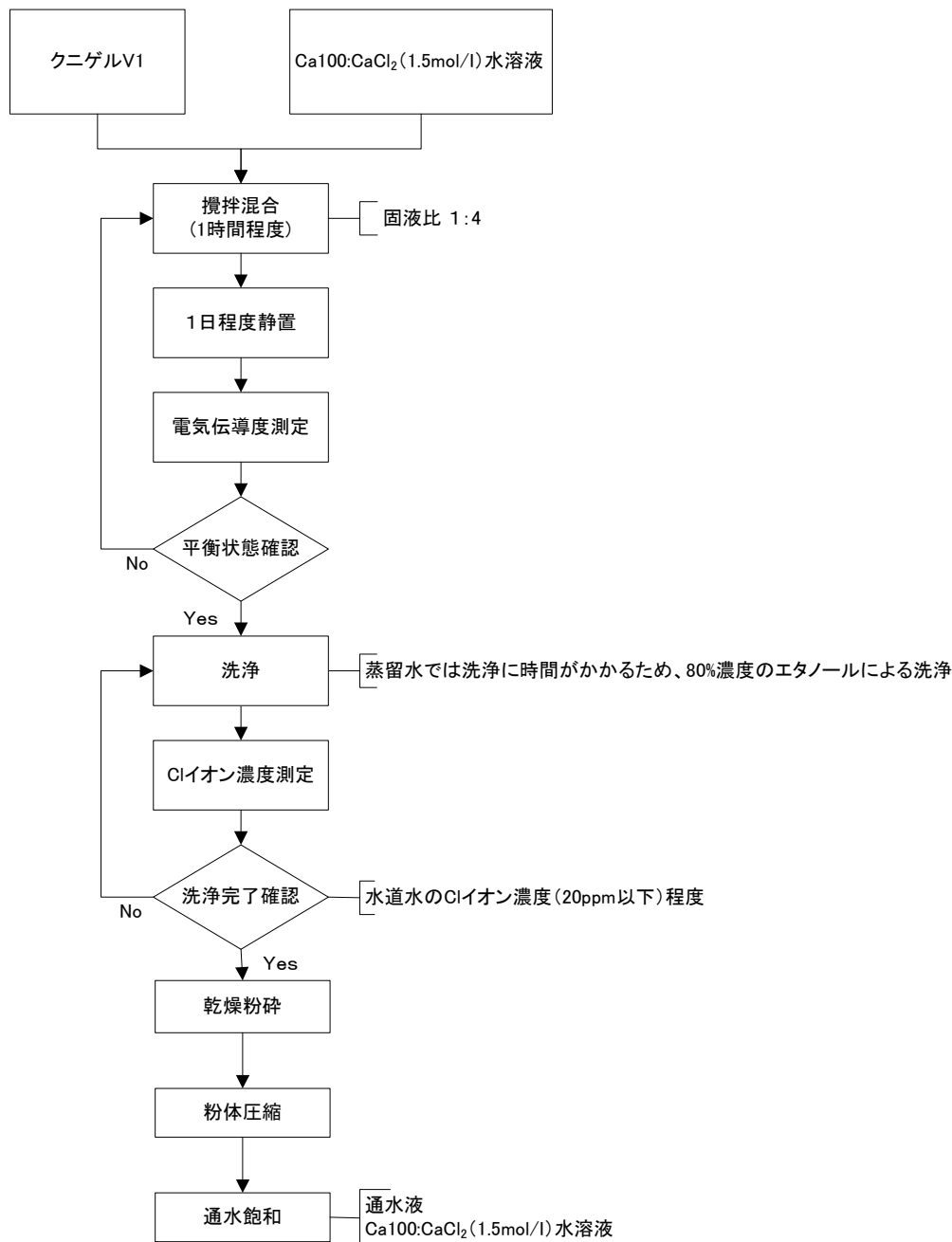


図 4.1.2-1 Na 型化、Ca 型化ベントナイトの作製フロー

4.1.3 試験ケース

試験ケースを表 4.1.3-1 に示す。表には、作製した供試体の乾燥密度、有効ベントナイト乾燥密度の実測値も示している。表に示すように、概ね、計画通りの供試体が作製できていることが分かる。

表 4.1.3-1 可逆性確認試験ケース案

試験ケース	ベントナイト	乾燥密度 Mg/m ³	有効ベントナイト 乾燥密度 Mg/m ³	CaCl ₂ 水溶液濃度 mol/l	試験手順 (今後の予定も含む)	備考
1	Na 型 (ケイ砂 30wt%)	1.593	1.361	1	① 蒸留水で飽和後に、CaCl ₂ 水溶液を通水する。 ② 透水係数も取得する。 ③ 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。	継続中
2		1.595	1.363		① 初期の不飽和状態で CaCl ₂ 水溶液を通水する。 ② 平衡膨潤圧に達したら通水液を蒸留水に交換する。 ③ CaCl₂水溶液を再度、通水する。 ④ 透水係数も取得する。 ⑤ 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。	継続中
3		Ca 型化 (ケイ砂 30wt%)	1.595		1.363	① 初期の不飽和状態で CaCl ₂ 水溶液を通水する。 ② 平衡膨潤圧に達したら通水液を蒸留水に交換する。 ③ CaCl₂水溶液を再度、通水する。 ④ 透水係数も取得する。 ⑤ 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。

【土壤環境分析法第 V.7】に則り溶出陽イオン (Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺) 分析を実施、陽イオン交換容量 (CEC) も計測

4.1.4 供試体作成方法及び試験方法

平成 22 年度に示した Ca 型化が圧縮ベントナイトの膨潤挙動に及ぼす影響を評価する試験のイメージ図を元に、図 4.1.4-1 に示すような試験機を準備した。試験機を準備するに当たり、設定にした試験条件は以下のとおりである。

- 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、一方向、一次元に浸潤させる。
- 注水はビューレットによる 1m 程度の水位差で行い、排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- 供試体は、乾燥密度 1.6Mg/m³のケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイトとケイ砂 30wt%混合 Ca 型化ベントナイトであり、注水する液体は、1 mol/l の CaCl₂水溶液と蒸留水である。
- ケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイトに CaCl₂水溶液を適用すると、膨潤しながら Ca 型化が生じるが、ケイ砂 30wt%混合 Ca 型化ベントナイトに CaCl₂水溶液を通水しても何も変質は生じない。そのため、最終的には、両ケースともケイ砂 30wt%混合 Ca 型化ベントナイトに CaCl₂水溶液を通水している状態になる。この最終状態に至る膨潤圧の推移を取得する (図 4.1.4-2 参照)。
- 全てのケースで平衡状態になった時点で、通水液を蒸留水のケースは CaCl₂水溶液に、CaCl₂水溶液のケースは蒸留水に交換する。
- ケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイトを蒸留水で飽和させた後に CaCl₂水溶液に切り替えるケースも実施する。このようにする事により、膨潤履歴の有無と Ca 型化の影響の関係を取得できる (プレハイドレーション効果、図 4.1.4-2 参照)。

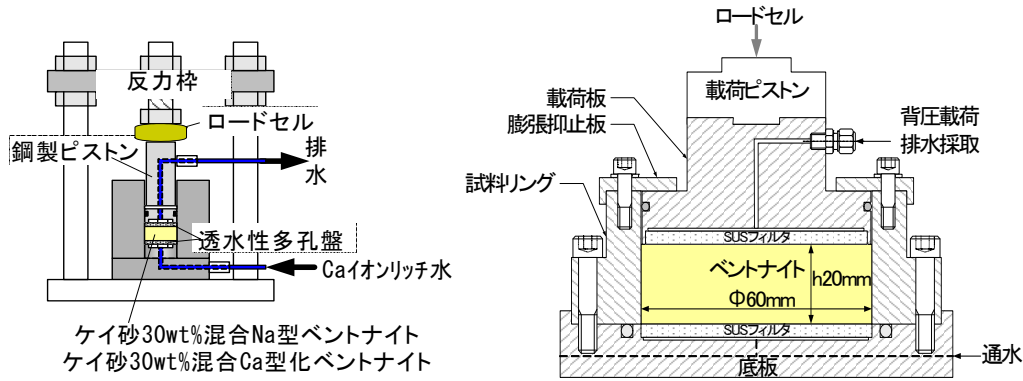


図 4.1.4-1 Ca 型化が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験の詳細図

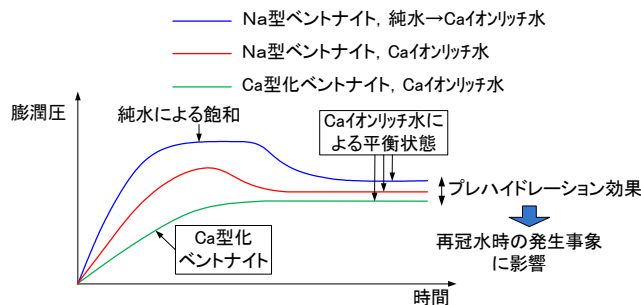


図 4.1.4-2 Ca 型化が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響のイメージ

4.1.5 試験結果

(1) 実験初期

試験結果を図 4.1.5-1 に示す。図 4.1.5-1 右図には定常状態かどうかの判断のための時間を対数軸にしたものも併記している。Na 型ベントナイトに蒸留水を通水したケース(Case1)に着目すると、膨潤圧は 0.52MPa であるが、若干、増加傾向にある。Ca 型化ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水した場合とほぼ同等の値を示した。Ca 型化ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水した場合(Case3)の膨潤圧は既に平衡状態であり、その値も最も大きく平衡膨潤圧は 0.56MPa であった。一方、Na 型ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水した場合(Case2)の膨潤圧は最も小さく、 0.31MPa であった。Na 型ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水したケースは既に平衡状態にあるが、平衡膨潤圧が異なる結果となった。全てのケースで膨潤圧がほぼ平衡状態に至ったと見做された通水開始から 110 日後に、それぞれ通水液の種類を切り替えた。

(2) 初期～第 1 回液種交換後

Na 型ベントナイトを蒸留水で飽和させた後に CaCl_2 水溶液を通水したケース (Case1) では、膨潤圧が漸減傾向を示した。これはイオン強度が増加したことが理由として考えられる。さらに、後述する Ca 型化率の計算結果から、本ケースで液種を交換した後 300 日の時点の Ca 型化率は 2.7%程度であったため、 CaCl_2 水溶液に 0.2MPa を作用させて、Ca 型化を促進させた。

その結果、図に示すように、0.2MPa の通水圧を作用させた場合、膨潤圧を計測値から通水圧を差し引いて有効応力として整理すると、膨潤圧はほとんどゼロとなった。ここで注意が必要なのは、通水圧は必ずしも間隙水圧と同等ではないため、実際の膨潤圧は算出値よりも大きいものと予想される。

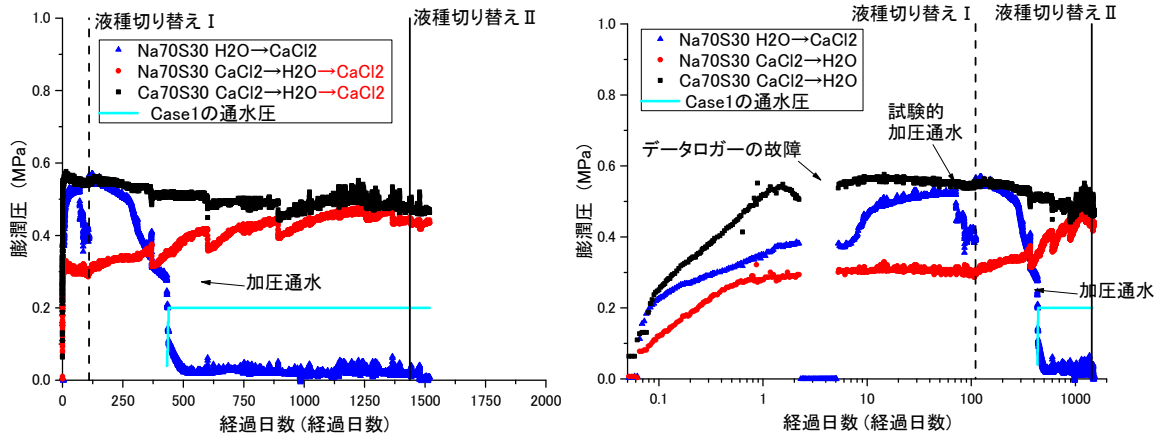
Na 型ベントナイトに直接 CaCl₂ 水溶液を通水したケース(Case2)は、蒸留水に切り替えたところ膨潤圧が漸増傾向を示した。これはイオン強度が低下したことなどの理由が考えられる。膨潤圧は 0.5MPa 弱であり、Ca 型化ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水したケースに漸近している。

後述する Ca 型化率の計算結果から、本ケースで液種を交換した時点の Ca 型化率は 46.1%程度であった。Ca 型化ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水した場合は、蒸留水に切り替えても殆ど平衡状態は変化しなかった。

さらに、これらの通水過程で給水量から算出される透水係数の経時変化を図 4.1.5-2 に示す。図中の塗りつぶしのプロットは液種変更前、白抜きのプロットが液種交換後の結果である。図から、どのケースも通水液の変更前後で透水係数がドラステックに変化していないことが分かる。

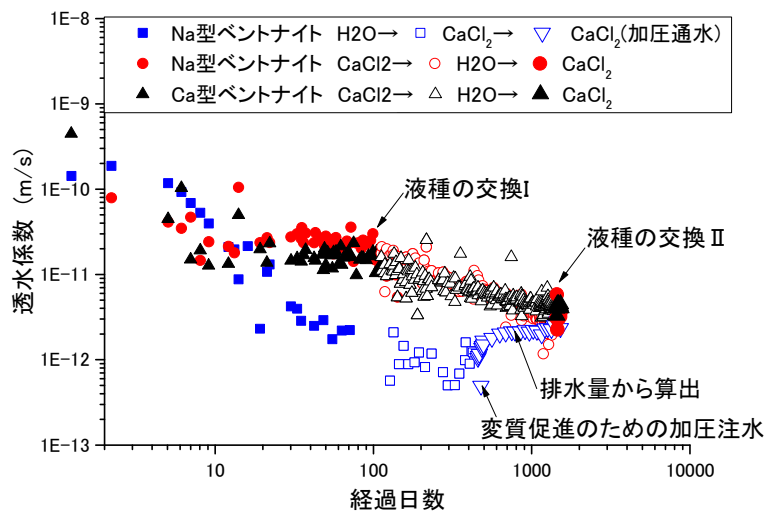
Case1 と Case2 では、平衡膨潤圧はほとんど変化しなかったが、Case1 の方が透水係数は小さかった。しかしながら Ca 型化の進行が非常に遅かったために、0.2MPa の通水圧作用させた後は、有効応力として整理した膨潤圧がほぼゼロとなり、さらに Ca 型化の進行に伴って透水係数は徐々に大きくなった。最終的には Case2, Case3 の透水係数とほぼ一致する見込みである。なお、Case1 において過圧給水中は給水量が計測できないため、排水量で透水係数を算出している(図中▽)。

これらの結果から、緩衝材の止水性は、蒸留水による飽和と Ca 型化の順序に依らず、最終的な透水係数は可逆的であると言える。また、膨潤圧に関しては、膨潤圧の有効応力としての整理方法に議論の余地があるが、蒸留水による飽和と Ca 型化の順序に依存する結果となった。前述の止水性能よりも膨潤性能の方が密度分布に対して非線形性が強いという結果に鑑みて、供試体内に Ca 型化率の分布が発生しているとすると、その影響は止水性能よりも膨潤性能に強く表れるものと考えられる。今後、試験を継続し、十分に Ca 型化させた上で議論をする必要がある。



※Ca70S30はCaCl₂によってCa型化させたクニゲルV1とケイ砂30wt%の混合土

図 4.1.5-1 Ca型化が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響試験結果



※Ca型化ベントナイトはCaCl₂によってCa型化させたクニゲルV1とケイ砂30wt%の混合土

図 4.1.5-2 Ca型化の過程が圧縮ベントナイトの透水係数に及ぼす影響

(3) 第2回液種交換までの変質状況評価

本試験の各ケースの供給液から変質の度合いを調べた。結果を表 4.1.5-1 に示す。これらの算出には、表 4.1.5-2 に示すベントナイト系人工バリア材料の陽イオン交換容量一覧を用いた。Ca型化率の算出方法は、表 4.1.5-2 に示したベントナイト 100g 当たりの陽イオン交換容量から供試体 1 つ当たりの陽イオン交換容量を算出し、Ca イオンが全て陽イオン交換で消費されるとして算出した。なお、実際の Ca 型化率は、後述するように、試験終了後に供試体の層間用イオンを直接計測する予定である。

表 4.1.5-1 から、Na 型ベントナイトに蒸留水を通水した後に CaCl₂ 水溶液を通水したケースは、現状では、CaCl₂ 水溶液を通水 300 日後でも Ca 型化が 2.7% しか進んでいない。これは排水が集水瓶に集まったものだけで算出しており、多孔質板やシンプレックスチューブ中の排水は考慮していないため、実際には Ca 型化を過小評価している可能性があるものの、膨潤圧が軸方向に一次的に変質した場合、僅かな領域でも Ca 型化すれば膨潤圧が大きく変化するこ

とを示している。そこで、前述のように Ca 型化を促進させる目的で CaCl₂ 水溶液に 0.2MPa の通水圧を作用させたところ、計算上、127.7%の Ca 型化率となった。これは、供試体が持つ陽イオン交換容量の 1.27 倍の Ca イオンを供給したことを意味する。

一方、不飽和状態の Na 型ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水した後に蒸留水を通水したケースでは、Ca 型化率が 46.1%であった。すなわち CaCl₂ 水溶液を通水開始 110 日で Ca 型化が 46.1%進んでいるのに対して、Na 型ベントナイトを一旦蒸留水で膨潤させたの後に CaCl₂ 水溶液を通水させたケースは 300 日の通水期間で 2.7%の Ca 型化率という結果であった。このことから、事前に蒸留水で飽和させると Ca 型化などの変質を抑制する効果が期待できる。これは、飽和したベントナイトでは Ca イオンなどの陽イオン交換反応を生じさせるイオンが拡散現象で供給されるのに対して、不飽和状態では毛細管現象や陽イオン交換反応を生じさせるイオンを含む水溶液の自己拡散現象などで供給されることに起因するものと考えられる。

以上から、膨潤圧は十分に飽和した供試体の軸方向に一次的に Ca 型化が生じる場合、変質領域と未変質領域のうち小さい方の膨潤圧によって変質方向の全体の膨潤圧が決まる。一方、透水係数の場合、変質領域と未変質領域のうち小さい方の透水係数によって変質方向の全体の透水係数が決まる。このため、Ca 型化が再冠水中に緩衝材の止水性能に及ぼす影響は小さいものと考えられる（図 4.1.5-3 参照）。

表 4.1.5-1 排水から算出した Ca 型化率

試験ケース	ケイ砂 30wt% 混合 ベントナイト	乾燥密度 Mg/m ³	有効ベントナイト 乾燥密度 Mg/m ³	CaCl ₂ 水溶液 モル濃度 (mmol/mL)	交換性 Na イオン量 (meq/100g)	CEC※ (meq/供試体)	CaCl ₂ 給水量 (mL)	CaCl ₂ の当量 (meq)	Ca 型化率 (%)
1	Na 型	1.593	1.361	0.333	64.2	40.66	1.65	1.10	2.7 ⇒127.7
2		1.595	1.363		64.2	40.66	28.15	18.75	46.1
3	Ca 型化	1.595	1.363		5.47	3.46	21.7	14.45	100

※ 交換性 Na イオンのみが Ca イオンと陽イオン交換反応するとして算出した 1 供試体当たりの CEC

表 4.1.5-2 ベントナイト系人工バリア材料の陽イオン交換容量一覧

試料名	計測項目	CEC	交換性 Na	交換性 Ca	交換性 Mg	交換性 K
		meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g	meq/100g
クニピア F	-	111	101	21.5	2.87	2.15
Ca 型化クニピア F	-	107.71	2.98	98.46	3.08	0.80
クニゲル V1	-	79.1	64.2	50.1	3.05	2.37
Ca 型化クニゲル V1	-	72.64	5.47	114.86	3.86	1.74

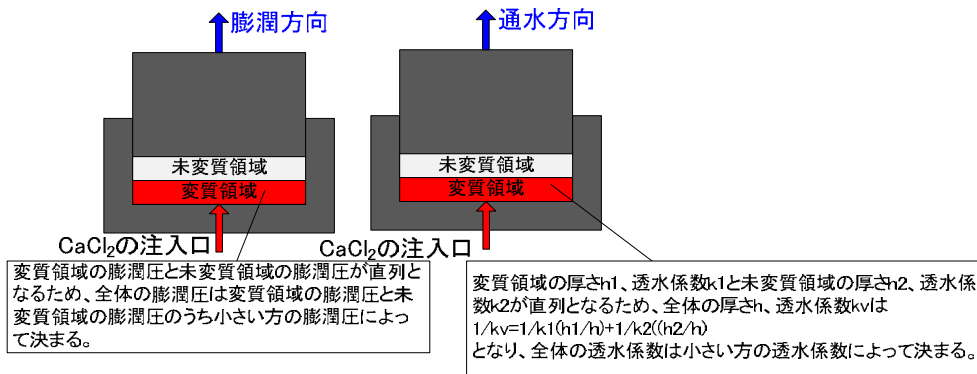


図 4.1.5-3 局所の変質が膨潤圧と透水係数に及ぼす影響のイメージ

(4) 第1回液種交換後～第2回液種交換後

第1回液種交換後の変質状況評価によって、不飽和状態のNa型ベントナイトに直接CaCl₂水溶液を通水した後に通水液を蒸留水に切り替えたケース(Case2)は十分にCa型化されていない可能性が高いことが分かった。また、Ca型化ベントナイトにCaCl₂水溶液を通水したケース(Case3)も蒸留水を通水しており、十分にCa型化されていると考えられるCase1とCase2、Case3の全てのケースでベントナイトと通水液の組み合わせが整合していない状態であることが分かった。そこで、Case2も十分にCa型化させ、全てのケースでCa型化ベントナイトにCaCl₂水溶液を通水する試験条件にすべく、再度、全てのケースでCaCl₂水溶液を通水した。

図4.1.5-1には、Case2とCase3でCaCl₂水溶液に切り替えた後の膨潤圧の経時変化も併せて示している。Case2とCase3でCaCl₂水溶液に再度切り替えたのは、試験開始から1437日目であり、第一回目の通水液の切り替えからは1327日目である。

現状では、膨潤圧への影響を避けるために通水圧を作用させていないため、CaCl₂水溶液は拡散で供試体内に移動している。拡散で変質させるのには時間がかかるため、ある程度の時間、通水液の切り替えによる膨潤圧の変動を観察した後にCase1と同様に、0.2MPa程度の通水圧を作用させる計画である。

さらに、前述の図4.1.5-2には、第2回目の通水液切り替え後の透水係数の経時変化を併せて示している。図中の塗りつぶしのプロットは液種変更前、白抜きプロットが第1回液種交換後、さらに白抜き後の塗りつぶしのプロットは第2回液種交換後の結果である。図から、第2回液種交換後に透水係数が増加する傾向を示している。ただし、透水係数の経時変化は変動が大きいため、今後の推移を静観した上で判断する必要がある。

4.1.6 供試体解体後の物性試験

試験終了後の供試体の物理試験(密度計測、含水比計測)、および排水の化学分析(イオン分析)を実施する計画である。図4.1.6-1に供試体の解体計画図を示す。密度分布を設定した方向に可能な限り分割して密度分布はパラフィン法などで、含水比分布は炉乾燥法で計測する計画である。

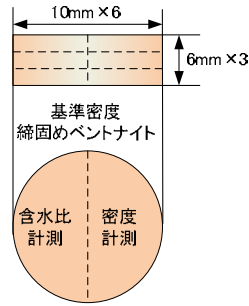


図 4.1.6-1 供試体の解体計画図

4.1.7 工学技術への反映

今後、液種を変化させた試験の結果が得られ成果がまとめれば、Ca 型化と膨潤挙動の発生時期やその可逆性を定量的に評価できる。この成果の反映先としては、パイピング・エロージョン現象への対策工が挙げられる（図 4.1.7-1 参照）。

後述の緩衝材表面近傍の止水性能評価では、パイピング・エロージョン現象が緩衝材の表面に発生することが示されている。この緩衝材は、処分概念によっては、セメント系材料と接触するため、膨潤と同時に Ca 型化するのであれば、パイピング・エロージョン現象への対策を検討する際に考慮しなければならない。

例えば、パイピング・エロージョン現象に対する対策として、人工給水を行った場合を考えれば、人工給水によって緩衝材が十分に膨潤して拡散場が形成されたとしても、セメント系人工バリアとの接触面において処分坑道の閉鎖前に Ca 型化が発生し、緩衝材表面だけが十分な止水性を発揮できない状態になるのであれば、人工給水はパイピング・エロージョン現象への十分な対策とはならない可能性がある。

その一方で、清水で膨潤させた後に Ca 型化させることで、処分坑道の閉鎖まで Ca 型化を抑制できるのであれば、清水で人工給水させることは、膨潤による拡散場の構築だけでなく、Ca 型化の影響を閉鎖までの間抑制させる対策として有効であるという結果になる可能性もある。

このように本試験結果は、Ca 型化がパイピング・エロージョン現象に及ぼす影響を定量的に評価するために膨潤圧の観点から有用な情報を与えるものである。

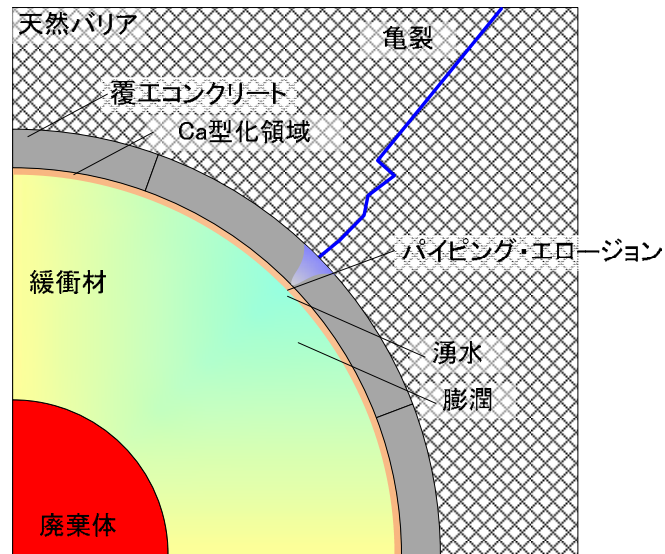


図 4.1.7-1 緩衝材表面近傍に発生する様々な事象のイメージ

4.1.8 解析技術への反映

本検討では、Ca 化と膨潤挙動のどちらが再冠水初期に緩衝材の挙動に対して支配的か、さらに Ca 化と膨潤挙動の発生順序の可逆性を定量的に評価している。これらの成果は、化学変質解析だけでなく、力学や間隙水の移流や拡散などのモデル化、ベンチマーク試験として役立つものである。

特に、後述する排水の分析では、蒸留水で飽和させた緩衝材(Case1)と不飽和状態の緩衝材(Case2)にそれぞれ CaCl_2 水溶液を流した場合、Case1 よりも Case2 の方が、その排水に含まれる陽イオン濃度が高いという結果が得られている。通常、化学解析における不飽和状態は、水と鉱物の接触面積の低下など、化学反応を低減させる要因として取り扱われる。しかしながら、本試験結果は、不飽和状態であっても十分に陽イオン交換反応が発生するため、Ca イオンリッチ水の不飽和浸潤挙動の把握が重要であることを示している。このような、不飽和状態の化学変質に関しては、今後、検討や考察を深め、化学解析を不飽和状態から実施できるモデル化へ反映させる予定である。

第4章 参考文献

- [1] 田中益弘, 山本博之, 藤澤理, 奥津一夫, 三浦一彦, 高村尚: TRU 廃棄物の処分概念の検討 (5)－人工バリア材料の力学特性に関する研究－ (研究委託内容報告書), JNC TJ8400 2000-036 (2000).

第5章 緩衝材への地下水浸潤状況の評価

(試験分類(d) ー表 2.2.2-2)

5.1 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験

5.1.1 試験の目的及び概要

ベントナイト系人工バリア材料は不飽和締固め膨潤性粘性土である。このような材料に水が浸潤する場合の不飽和領域と飽和領域の境界線である浸潤フロントの移動速度を推定することは、非常に難しい。これは、ベントナイトは浸潤に伴う飽和度の変化で土骨格構造が変化するためである。一方で、この浸潤フロントの移動速度を取得することは、再冠水中の緩衝材内で化学変化が開始される時期を推定する上で非常に重要である。そこで本検討では、一次元が成り立つと考えられる簡単な境界条件における水と海水相当のイオン強度の NaCl 水溶液(0.5M)が緩衝材に浸潤する際の浸潤フロントの移動速度を取得することを目的としている。

同様の研究は、これまでも幾つかなされていた。鈴木ら[1]は、ベントナイト系人工バリア材料で作製した乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ の供試体 ($\phi 20\text{mm} \times h20\text{mm}$) を絶乾状態にした後に、純水に浸漬させ、供試体内の飽和度分布の経時変化を取得している。この不飽和浸潤試験では、浸漬した供試体を一定時間後に解体し、浸潤方向に 2mm 厚に輪切りにし含水比を計測するというやり方で不飽和浸潤挙動を取得している。その他の試験条件は、表 5.1.1-1 に示すように、材料がベントナイト単体 (乾燥密度 $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$)、ケイ砂 30wt%混合ベントナイト (乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$) であり、試験温度もパラメータとしている。鈴木らの試験結果から、本試験と同様にケイ砂 30wt%混合ベントナイトで乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ の場合を例に取れば、供試体が飽和する体積含水率 (水の体積/全体積) が $0.403\text{cm}^3/\text{cm}^3$ であるため、供試体の下面付近と中央付近の飽和度が $0.403\text{cm}^3/\text{cm}^3$ に近づく様子を求めると図 5.1.1-2 のようになる。なお、供試体体積が 6.283cm^3 であるため、供試体が飽和するのに必要な水分量は 2.532cm^3 である。図 5.1.1-2 に示した浸潤フロントの経時変化から飽和に要する時間を算出すると、底面から 3mm の地点で 88.9hr、9mm の地点で 236.5hr となる。浸透速度は、図に示すように、時間に反比例しており、浸潤が進むほど浸潤速度は遅くなる傾向になる。

この方法では、数多くの供試体を準備する必要があるため、供試体サイズを大きくできないという欠点がある。また、供試体を解体する際の乱れなども考慮する必要があると考えられる。

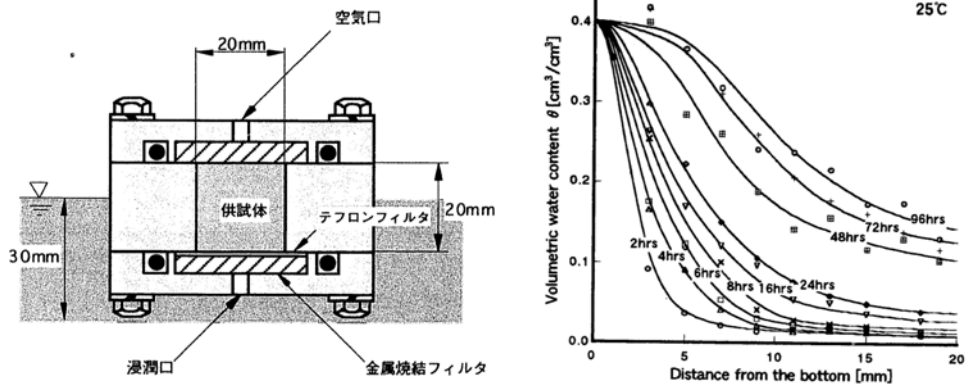


図 5.1.1-1 鈴木らの試験結果[1]

表 5.1.1-1 鈴木らの試験条件[1]

	ベントナイト単体	ケイ砂 30wt%混合体
乾燥密度(Mg/m ³)	1.8	1.6
初期体積含水率 (-)	0	
供試体寸法(mm)	φ 20mm×H20mm	
試験温度(°C)	25,40,80	
浸潤液	純水	
繰り返し回数 (回)	3	

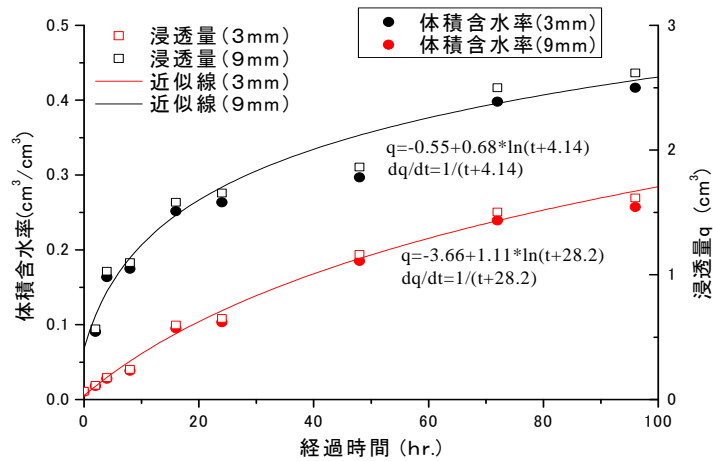


図 5.1.1-2 鈴木らの試験結果による浸潤フロントの経時変化[1]

5.1.2 試験ケース

平成 22 年度示した一次元浸潤速度取得試験のイメージ図を元に、図 5.1.2-1 に示すような試験機を準備した。試験機を準備するに当たり、設定した試験条件は以下のとおりである。

- 供試体内に間隙の空気がトラップされないように、一方向、一次元に浸潤させる。

- 注水はフローポンプで行い、排水は集水瓶で集めイオン分析する。
- フローポンプによる注水は圧力一定となるように流量を制御する。
- 注入する液体は、イオン交換水とイオン強度 0.5mol/l の NaCl 水溶液である。
- 浸潤フロントの計測は、比抵抗の変化によって計測する。
- 供試体上端にはヒーターを配置し、必要に応じて熱勾配を与えることができる。
- 必要に応じて排水側もフローポンプによる圧力、流量制御が可能である。

以上をまとめると表 5.1.2-1 のようになる。

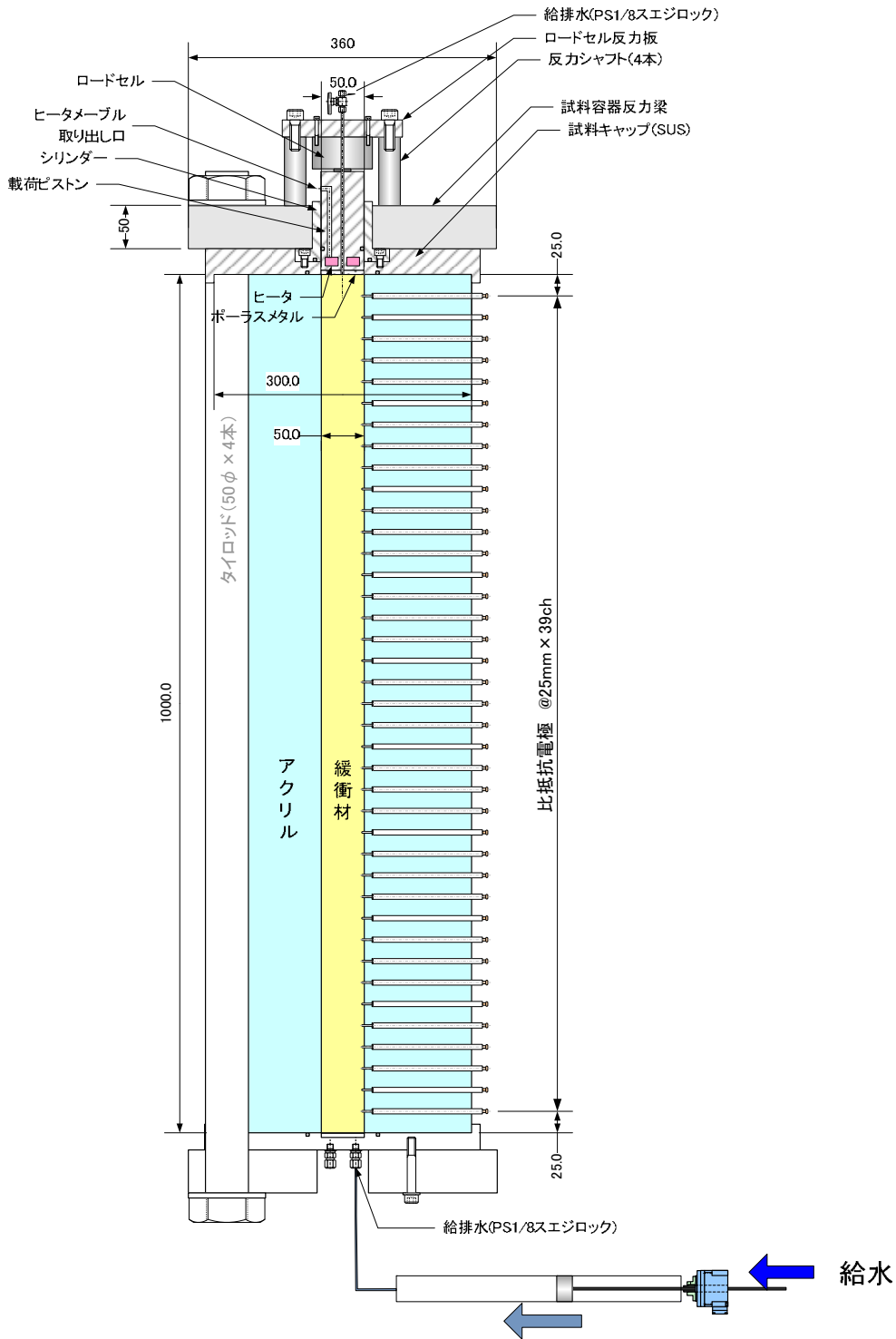


図 5.1.2-1 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験

表 5.1.2-1 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験のケース

試験ケース*	ベントナイト乾燥密度	初期含水比 (%)	液種	計測項目	備考
1	1.6Mg/m ³ (Na型ケイ砂 30wt%混合)	10	蒸留水	注水量・注水圧 比抵抗 (浸潤速度) 試験後：含水比、密度計測	継続中
2			塩水		継続中

5.1.3 供試体作成方法及び試験方法

供試体は仕上がり層厚 5mm となるように撒き出し (図 5.1.3-1) と静的締固めを 200 回繰り返して作製した。この供試体作製の際には、図 5.1.3-2 に示したアクリル製セルに図 5.1.3-3 に示した比抵抗計測用の電極を設置した状態で (図 5.1.3-4) 直接、静的締固めを実施した。このようにすることによって、アクリルセルと供試体の界面が水みちになること、供試体と電極の接触不良となることを防いだ。締固めによってアクリルセルが破損することを防ぐためにダンパーを配置した圧縮機で図 5.1.3-5、図 5.1.3-6 に示すように高さ 5mm となるように締固めを行った。締固め終わった供試体に図 5.1.3-7 に示すように頂部にヒーター付きピストンを設置し、膨潤圧を測定できる試験機とした (図 5.1.3-8)。

また、注水方法はフローポンプによって圧力一定となるように流量を制御することを基本とするが、試験初期に通水圧によってアクリルセルが変形し、供試体との界面が水みちになることを防ぐために、試験当初は流量制御である程度供試体を膨潤させておいて、その後、圧力制御に切り替えることとした。



図 5.1.3-1 5mm 撒き出し分のベントナイトの計量

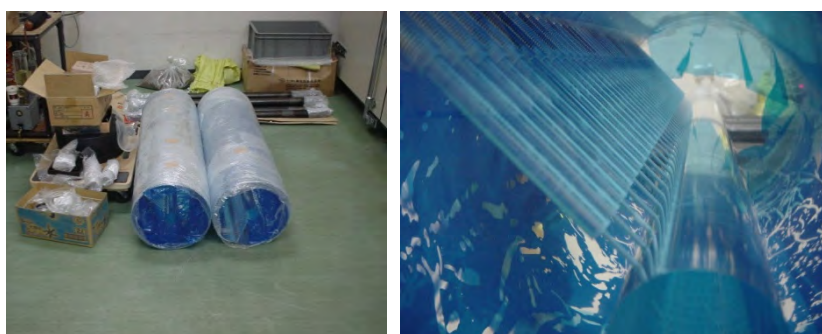


図 5.1.3-2 1000mm アクリルセル

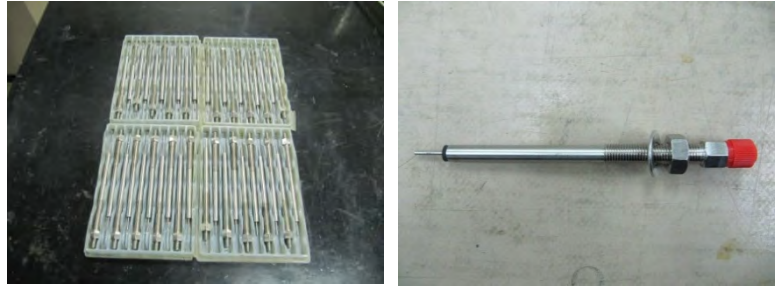


図 5.1.3-3 比抵抗測定用電極



図 5.1.3-4 比抵抗測定用電極の設置

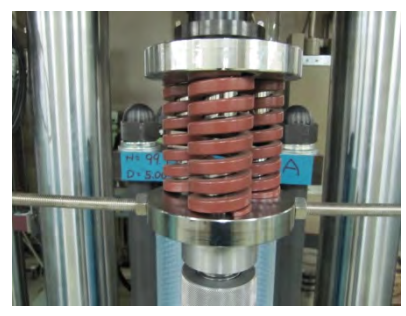


図 5.1.3-5 締め固め時のアクリルセル保護用ダンパー

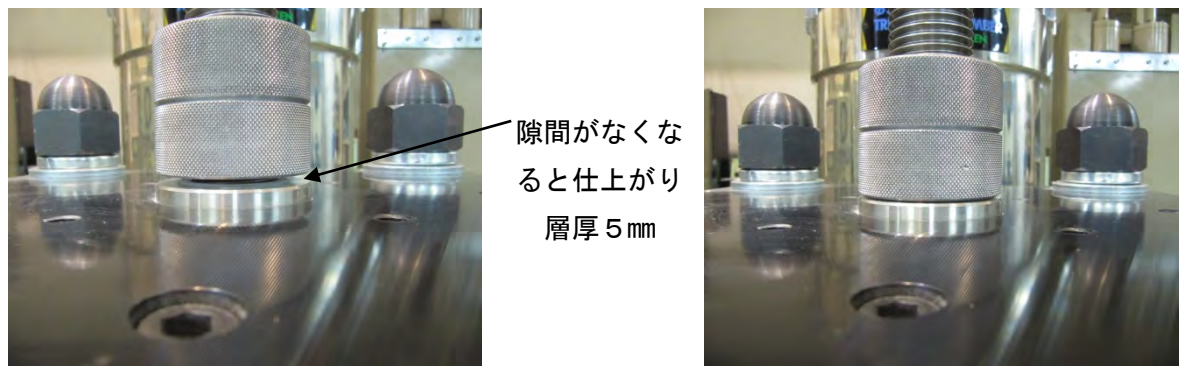


図 5.1.3-6 締め固め時の高さ管理方法



図 5.1.3-7 ヒーター付きピストン



図 5.1.3-8 完成図

5.1.4 飽和度と比抵抗の関係取得

放射性廃棄物処分施設の再冠水期間中にその緩衝材に発生する事象について検討する場合、緩衝材中の浸潤面の移動や飽和度変化などが重要なパラメータとなる。この緩衝材中の浸潤面の移動や飽和度変化を、供試体を乱すことなく計測する方法として比抵抗計測がある。この比抵抗計測は、緩衝材に接触している電極間に電流を流し、その電極間の抵抗値を計測するものである。この抵抗は、電極間の緩衝材の飽和度が大きい程小さくなるため、事前に飽和度と比抵抗の関係を取得していれば、比抵抗計測から飽和度変化を同定できることになる。この比抵抗による浸潤状況の観察は、本試験並びに、後述する土槽規模試験、さらに浸潤による間隙空気移行調査においても実施しており、比抵抗値から飽和度を換算することは有用である。

そこで、本検討では、図 5.1.4-1 に示すような試験装置を用いて、飽和度と比抵抗の関係を取得した。図 5.1.4-2 には、飽和度と比抵抗の関係取得試験装置を示している。締め固めは高さ 100mm の供試体を 20 回に分けて締め固めて作製した。ここで、飽和度と比抵抗の関係は一意ではなく、その乾燥密度によって変化するものと考えられる。そこで試験では、乾燥密度 1.2、1.6、1.8、2.0Mg/m³ の場合について飽和度をパラメータとして取得した。表 5.1.4-1 に飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースの一覧を示す。

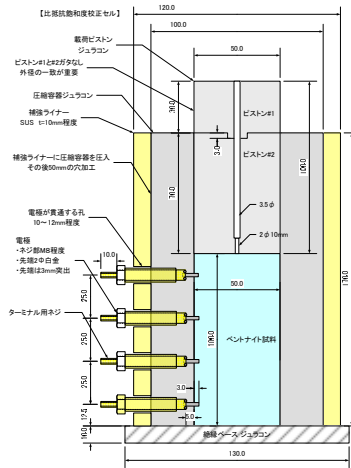


図 5.1.4-1 飽和度と比抵抗の関係取得試験装置



図 5.1.4-2 飽和度と比抵抗の関係取得試験装置

表 5.1.4-1 飽和度と比抵抗の関係取得試験ケース一覧

バルクの土粒子密度 $\rho_s=2.707 \text{ (Mg/m}^3\text{)}$											
設計値					実測値						
乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	体積含水率 θ (%)	乾燥密度 ρ_d (Mg/m^3)	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	体積含水率 θ (%)	比抵抗 R (Ωm)	
1.200	13.92	1.256	30.0	16.70	1.199	13.56	1.258	29.17	16.25	28.23	
	20.87	1.256	45.0	25.04	1.205	19.97	1.246	43.37	24.07	9.88	
	27.83	1.256	60.0	33.40	1.209	26.66	1.240	58.21	32.22	5.67	
	34.79	1.256	75.0	41.75	1.201	33.74	1.253	72.88	40.54	4.12	
	41.75	1.256	90.0	50.10	1.208	40.56	1.242	88.43	48.98	3.13	
1.600	7.67	0.692	30.0	12.27	1.602	7.52	0.690	29.5	12.05	37.51	
	11.50	0.692	45.0	18.40	1.600	11.30	0.692	44.2	18.09	16.98	
	15.33	0.692	60.0	24.53	1.603	14.95	0.688	58.8	23.97	6.41	
	19.17	0.692	75.0	30.67	1.584	19.96	0.709	76.3	31.63	4.53	
	23.00	0.692	90.0	36.80	1.588	23.68	0.705	91.0	37.61	3.35	
1.800	5.58	0.504	30.0	10.04	1.797	5.51	0.506	29.48	9.91	53.62	
	8.37	0.504	45.0	15.07	1.802	7.92	0.502	42.72	14.28	21.38	
	11.17	0.504	60.0	20.11	1.803	10.71	0.502	57.82	19.31	9.67	
	13.96	0.504	75.0	25.13	1.806	13.61	0.499	73.82	24.58	4.56	
	16.75	0.504	90.0	30.15	1.804	16.35	0.501	88.38	29.49	4.02	
2.000	3.92	0.354	30.0	7.84	1.992	3.73	0.359	28.12	7.43	76.89	
	9.79	0.354	75.0	19.58	2.020	9.40	0.340	74.76	18.98	8.87	

ここで比抵抗値と地盤の関係式として Archie 式[2]がある。この式は、検層解析において油層の物理パラメータから水飽和率を求める基本となる関係式である。頁岩の含まれていない岩石のコアサンプル(その比抵抗値 R_t 、地層水により 100%飽和している場合の比抵抗値 R_0)を使用し、地層比抵抗係数 F 、地層水の比抵抗値 R_w 、水飽和率 S_w 、孔隙率 ϕ の間に以下の経験式を導き出した。

$$F = \frac{R_0}{R_w}$$

$$F = \frac{1}{\phi^m}$$

$$S_w^n = \frac{FR_w}{R_t} = \frac{1}{\phi^m} \frac{R_w}{R_t}$$

ここで、 m は膠結係数(通常は2に近い値)、 n は飽和率指数(通常は2あるいは2に近い値)[3]である。

図 5.1.4-3 に飽和度と比抵抗の計測結果を示す。図には乾燥密度 1.2、1.6、1.8、2.0Mg/m³ の場合の結果を示している。この計測結果に対して、Archie 式を参考に近似式を以下のように定めた。

$$R = \left\{ (\rho_d / \rho_w) / e^{0.01} \right\} \times (R_w / s_r^{2.3}) \quad (\text{式 4.1.4-1})$$

ただし、 s_r ($\times 100\%$)は飽和度であり、 R_w は飽和時の比抵抗値であるが、 $R_w \equiv (\rho_d / \rho_w)$ であるとした。図から、上式を用いれば、どの乾燥密度であっても飽和度と比抵抗値の関係を取得することが出来る。この式を用いて前述の比抵抗値の分布を飽和度に換算すれば、飽和度分布となる。

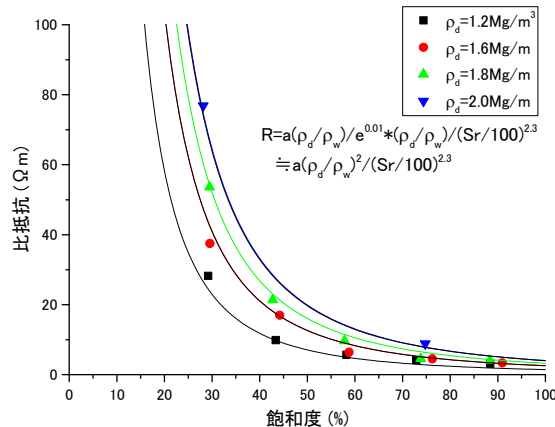


図 5.1.4-3 飽和度と比抵抗の関係(乾燥密度 1.6Mg/m³)

ここで、Archie 式を変形すると、

$$R_t = \frac{1}{\phi^m} \frac{R_w}{S_w^n} = \frac{1}{\left(\frac{e}{1+e}\right)^m} \frac{R_w}{S_w^n} = \frac{1}{\frac{e}{1+e} \left(\frac{e}{1+e}\right)^{m-1}} \frac{R_w}{S_w^n} = \frac{\rho_d}{1+e} \frac{R_w}{\left(\frac{e}{1+e}\right)^m S_w^n} = \frac{\rho_d / \rho_w}{1+e} \frac{R_w}{\left(\frac{e}{1+e}\right)^m S_w^n}$$

となるので、各係数を比較して、 $\frac{G_s}{1+e} \left(\frac{e}{1+e} \right) \rightarrow e$ 、 $m=0.01$ 、 $n=2.3$ となる。

さらに、 $F(e) = \frac{G_s}{1+e} \left(\frac{e}{1+e} \right)^m$ と $F(e) = e^m$ を比較すると、図 5.1.4-4 のようになる。図から、

ベントナイトに適用する際に用いた $F(e) = e^m$ は現実的な間隙比の範囲では、Archie 式が対象としている油層と本試験との違いに鑑みても大きな違いはないと考えられる。

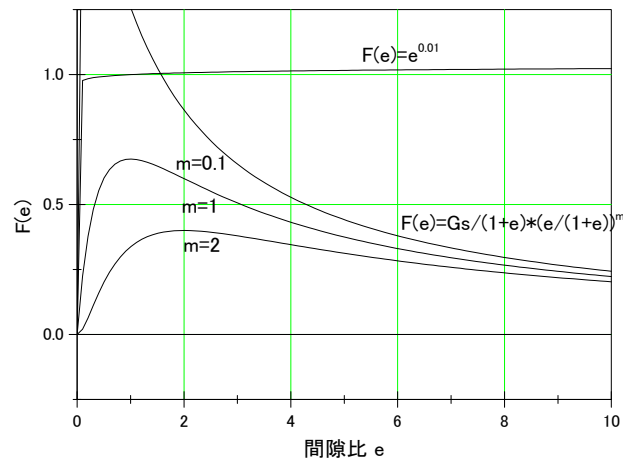


図 5.1.4-4 飽和度と比抵抗の関係(乾燥密度 1.6Mg/m³)

5.1.5 試験結果

試験結果を図 5.1.5-1 に示す。図には初期の比抵抗からの変化量を初期の比抵抗で無次元化したものを示している。図から、浸潤に伴って比抵抗が注水側から徐々に低下していることが分かる。また、蒸留水に比べ NaCl 水溶液の方が、浸透距離が大きく、更に比抵抗の低下割合が大きいことが分かる。どちらのケースも比抵抗が変化しているフロントは、900mm 程度に読み取れる。ただし、蒸留水のケースと塩水のケースで通水圧が異なることに注意が必要である。

図 5.1.5-2 には、前述の Archie 式を援用して求めたベントナイトの飽和度と比抵抗の関係（式 4.1.4-1）を用いて、図 5.1.5-1 の比抵抗値を飽和度に換算したものを示す。ただし、式 4.1.4-1 は蒸留水を使用した場合の関係式であり、本来、NaCl 水溶液には使用できないが、NaCl 水溶液のケースにも援用していることに注意が必要である。

図から、比抵抗値の分布と飽和度の分布は概ね同様であるが、飽和度分布の方が蒸留水と NaCl 水溶液の違いが顕著である。これは、ベントナイトの飽和度と比抵抗の関係（式 4.1.4-1）の非線形性が強く、低飽和度領域では比抵抗値の変化に飽和度の変化が緩慢で、高飽和度領域では比抵抗値の変化に対して飽和度の変化が急であるためである。

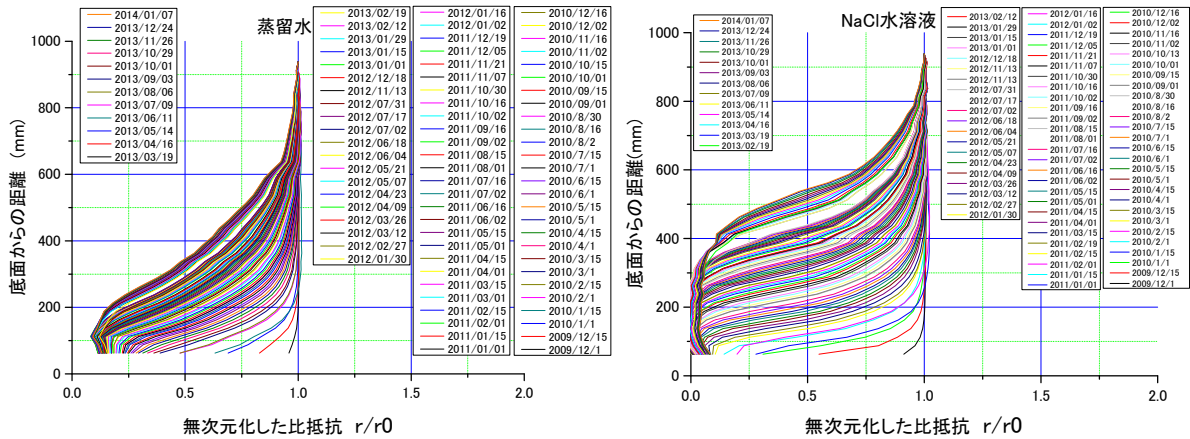


図 5.1.5-1 浸潤に伴う比抵抗の変化 (左：蒸留水、右：NaCl 水溶液 (0.5M))

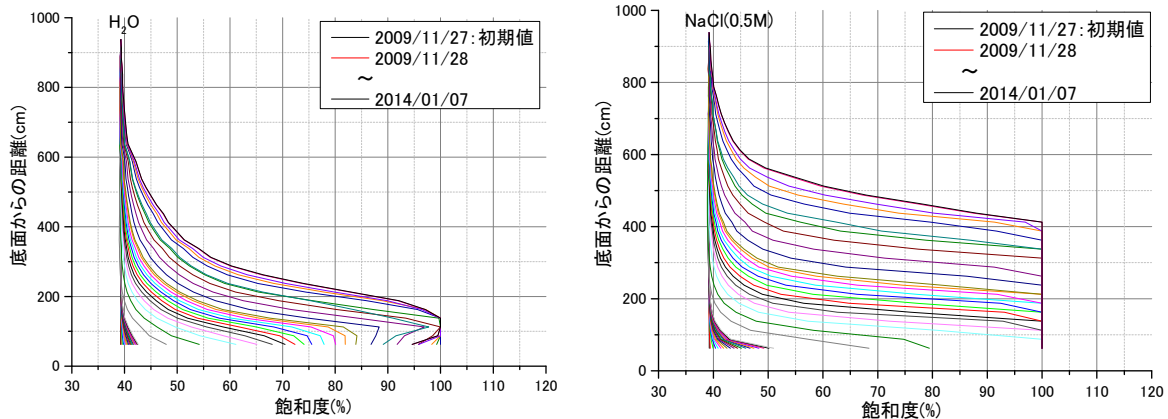


図 5.1.5-2 浸潤に伴う飽和度の変化 (左：蒸留水、右：NaCl 水溶液 (0.5M))

図 5.1.5-3 には、図 5.1.5-1 に示した比抵抗値が、その初期値から 5%低下した時点で浸潤フロントが到達したと見做した場合の浸潤フロントの進展状況を示している。この浸潤フロントの算出には、通水開始から 389 日間までのデータを用いた。

この結果から、平成 22 年度では、浸潤フロントの底面からの位置を $d(\text{mm})$ 、経過時間を $t(\text{day})$ とすると、近似関数が $d = 27.8t^{0.477}$ で表わされることを示した。さらに、1000mm の供試体の上端面まで浸潤フロントが進展するのに要する時間を算出すると、 $t=1828$ 日となり、約 5 年に相当することを示した。平成 23 年度取得した 389 日以降のデータと近似関数の相関を調べると、850 日程度までは相関性が高いことが分かった。ただし、今年度の結果に対しては徐々に近似式から取得結果が浸潤フロント位置の進展が遅くなる方向にずれている。ことから、平成 23 年度では 5 年間で 1000mm まで浸潤フロントが進展するという予測を立てていたが、実際にはこの期間よりも時間がかかるものと考えられる。

そこで、比抵抗値が初期値から 1%低下した時点で浸潤フロントが到達したと見做した場合の浸潤フロントの進展状況も図 5.1.5-3 に示す。図には、浸潤フロントの底面からの位置を $d(\text{mm})$ 、経過時間を $t(\text{day})$ の計測結果を機械的に近似した関数 $d = 60t^{0.385}$ と、浸潤フロント位置 $d(\text{mm})$ が経過時間 $t(\text{day})$ の平方根に比例するという毛管現象による水の拡散速度式(Washburn 式)を踏ま

えて $d = 27.8t^{0.5}$ とした場合の両者を併せて示している。これらの関数であれば、実験結果と概ね整合する結果となった。さらに、1000mm の供試体の上端面まで浸潤フロントが進展するのに要する時間を算出すると、 $d = 60t^{0.385}$ の場合 $t=1492$ 日となり、約 4.1 年に相当し、 $d = 27.8t^{0.5}$ の場合 $t=1294$ 日となり、約 3.5 年に相当することが明らかとなった。

さらに、この浸潤フロントの近似関数を微分すると、進展速度が図 5.1.5-4 のようになる。進展速度は浸潤直後に急激に小さくなるなり、1 年目以降は漸減しているのが分かる。

図 5.1.5-5 に、図 5.1.5-2 に示した Archie 式を採用して求めたベントナイトの飽和度と比抵抗の関係（式 4.1.4-1）から取得した飽和度分布の推移から、初期飽和度から 1% 飽和度が増加した時点で浸潤フロントが到達したとみなした場合の浸潤フロントの進展状況を示す。図から、比抵抗値から定義した浸潤フロントに比べ、両者の差異が小さいことが分かる。また、浸潤フロントの進展速度は、 $d = 60t^{0.35}$ となり、浸潤フロント位置 $d(\text{mm})$ が経過時間 $t(\text{day})$ の平方根に比例するという毛管現象による水の拡散速度式(Washburn 式)よりも緩慢な結果となった。この差異は、初期飽和度から 1% 飽和度が増加した時点浸潤フロントと定義したこと、比抵抗値の計測位置が 50 mm 間隔であることなどが原因と考えられる。

図 5.1.5-6 には、図 5.1.5-5 に示した浸潤フロントの近似関数を微分して取得した、進展速度の経時変化を示している。進展速度は浸潤直後に急激に小さくなるなり、1 年目以降は漸減しているのが分かる。

図 5.1.5-7 には液体の浸潤状況写真を示している。通水開始直後は、蒸留水の場合は、飽和領域と不飽和領域のコントラストが明確であり、NaCl 水溶液の場合は明快な飽和領域が小さく、飽和領域から不飽和領域に至る遷移領域が長いように見えていたが、現在では、浸潤フロントの位置などの識別は、両者とも目視では難しい状況である。

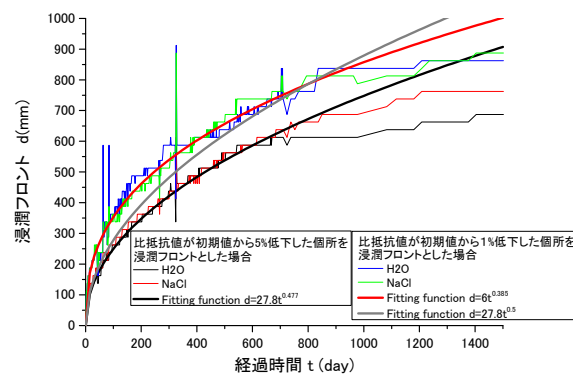


図 5.1.5-3 浸潤フロントの進展状況（比抵抗値 99%、95%以下で定義）

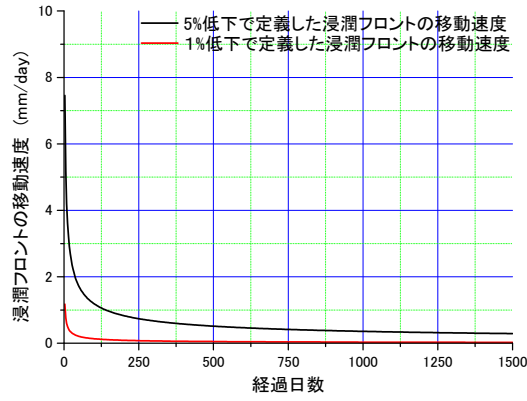


図 5.1.5-4 浸潤フロントと進展速度（比抵抗値 99%、95%以下で定義）

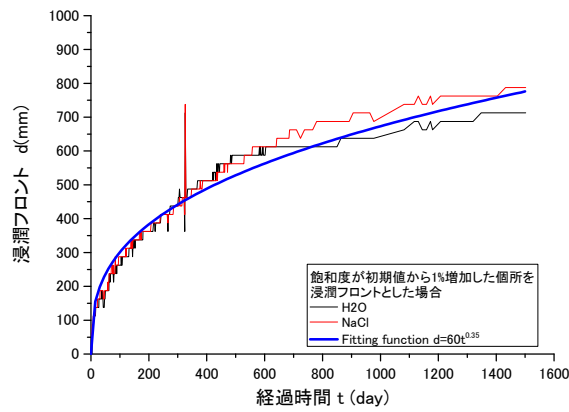


図 5.1.5-5 浸潤フロントの進展状況（初期飽和度からの増分が 1%で定義）

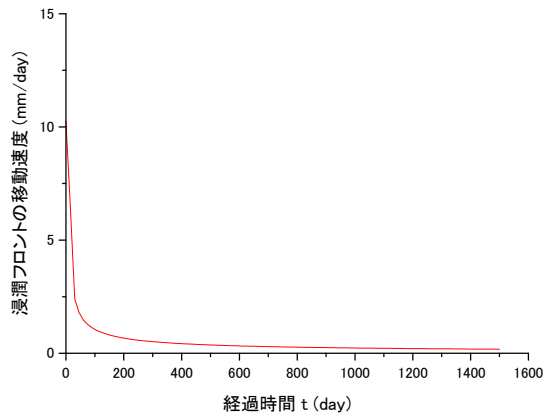


図 5.1.5-6 浸潤フロントの進展速度（初期飽和度からの増分が 1%で定義）

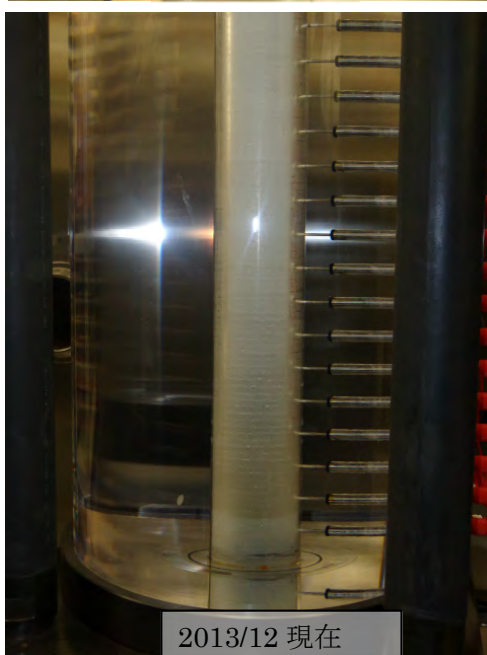
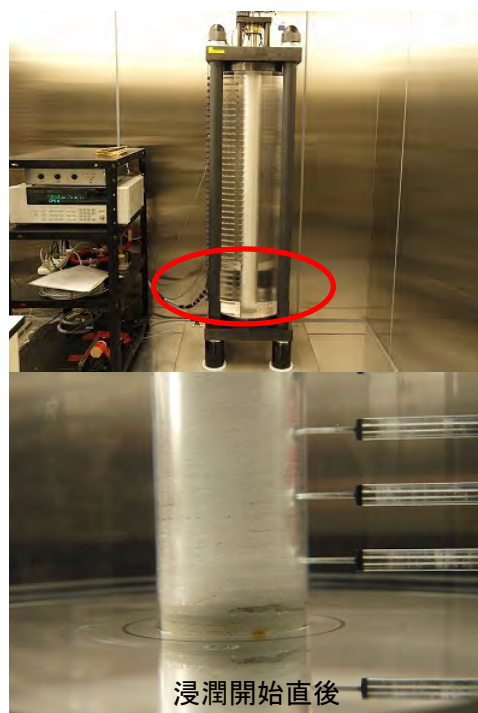


図 5.1.5-7 液体の浸潤状況（左：蒸留水、右：NaCl 水溶液（0.5M））

図 5.1.5-8 には、給水量を間隙面積で除して算出した注水距離を示している。フローポンプによって流量制御で給水していた試験当初は、ほぼ一定速度で浸潤している。圧力制御に変更した後は、図 5.1.5-4 と同様に徐々に浸透し難くなっていることが分かる。図 5.1.5-8 と図 5.1.5-4 は浸潤フロントの距離が異なるが、これは図 5.1.5-4 が飽和度の遷移領域を含んだ浸潤のフロントであるのに対して、図 5.1.5-8 は供試体下面から遷移領域を考慮しない浸潤フロントであるためである。なお、実際の飽和領域は図 5.1.5-8 のフロントの距離よりは小さいため、実際の飽和度の遷移領域は図 5.1.5-8 と図 5.1.5-4 のフロントの差以上であると考えられる。

図 5.1.5-9 には、流量制御で注水している最中の通水圧変化を示している。蒸留水の場合（図

5.1.5-9 左)、通水初期は通水圧が負値であるが、通水量が増加するに従って徐々に通水圧が増加した。この通水初期の通水圧の負値は、図 5.1.5-10 に示すように、圧力計と浸潤面の位置の差(水頭差)が 76cm あり、水圧は 7kPa 程度の負値になる。浸潤面が進行すると飽和領域のベントナイトが膨潤して、吸水し難くなることから、徐々に通水圧が上がったものと考えられる。

一方、NaCl 水溶液の場合、通水初期からずっと通水圧が負値のままであることが分かる。通水圧は-17kPa 程度である。これは、圧力計と浸潤面の位置の差以上の水頭差に相当する。このことから、NaCl 水溶液の場合、制御流量よりも供試体の吸水速度の方が大きく、1.7m 程度の水位差に相当する負圧が計測されているものと考えられる。また、NaCl 水溶液の場合、浸潤した領域のベントナイトの膨潤が抑制される為、浸潤領域の止水性向上の様子は見られない。

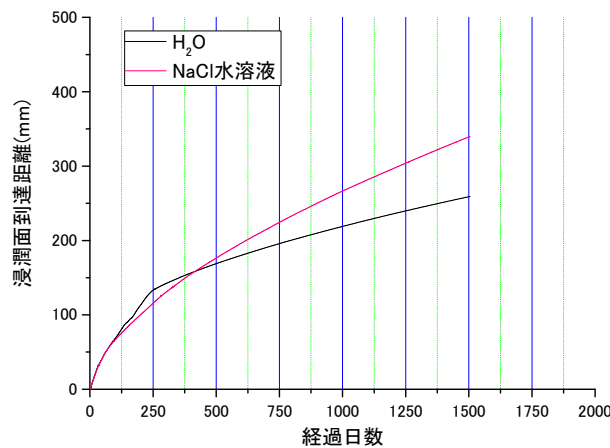


図 5.1.5-8 液体の浸潤状況

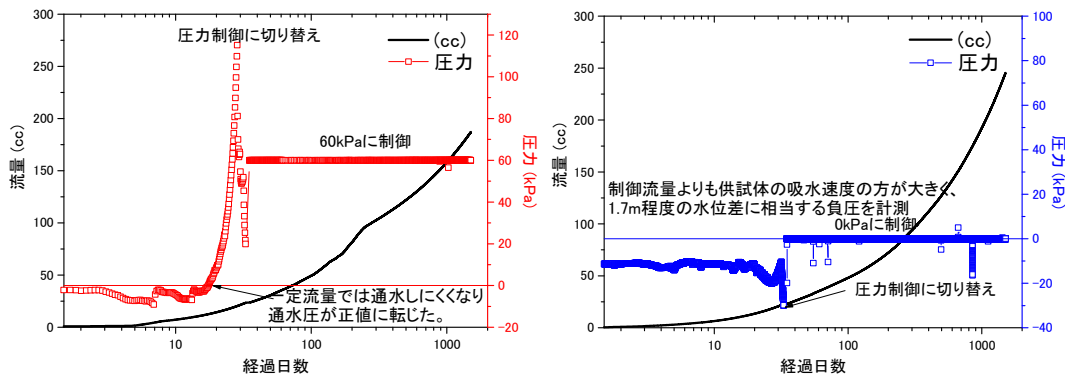


図 5.1.5-9 液体の浸潤状況 (左：蒸留水、右：NaCl 水溶液 (0.5M))

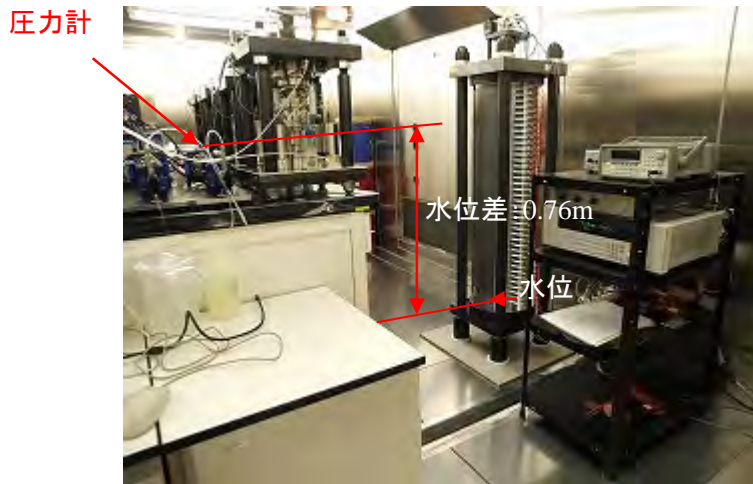


図 5.1.5-10 圧力計と浸潤面の水位差

5.1.6 工学技術への反映

本試験の結果によって、ベントナイト系人工バリアへの浸潤速度が取得できる。この浸潤速度が把握できれば、様々な境界条件を考慮できる解析技術に本試験結果を反映させることによって化学的な変質挙動が施設閉鎖後の何時から始まるのかを推定できる。また、今後の浸潤状況を把握することによって浸潤が一次元的に推移するのか、それとも界面を卓越的に浸潤していくのかが分かる。

現在の緩衝材の施工方法は、緩衝材と天然バリアの間は隙間、若しくはペレットを充填する方法か、原位置締固めや吹付けのように界面に隙間なく施工出来る方法とが想定されており、施工方法の選択において界面の水理場は施工方法を特徴付けるポイントでもある。

本試験では、供試体をアクリルセル内で締固めて作製したため、緩衝材は界面には隙間がない施工方法で構築したものに相当する。言い換えれば最も浸潤し難い施工方法における浸潤速度を取得していることになる。よって、今後実施予定である土槽試験の試験ケースの実験条件の設定や試験期間の推定などにも本試験結果が反映できる。

5.1.7 解析技術への反映

本試験結果では、一次元で不飽和状態の緩衝材に蒸留水や NaCl 水溶液を浸潤させた場合、浸潤フロントの進展速度を実験的に取得した。これは、拡散方程式の解が時間の平方根に比例することに概ね整合する結果であり、この試験結果は、従来の不飽和状態の緩衝材の水の浸潤に対して、水分濃度の異なる場の水自身の拡散運動として捉えるやり方の妥当性の裏付けになるものである。この不飽和状態の水の移動は、不飽和状態の化学変質や膨潤挙動評価にも重要な事象であるため、緩衝材の化学、水理、力学挙動を精緻にモデル化するためにも不可欠なものである。

さらに本試験結果は、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析のベンチマーク試験という活用も可能であり、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析が可能な CODE-BRIGHT [4]や DACSAR-UA [5]などの高度化に資する情報となる。

第 5 章 参考文献

- [1] 鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の不飽和水理特性、核燃料サイクル開発機構業務報告書、JNC-TN8430-99-010 (1999).
- [2] Archie, G.E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", Petroleum Transactions of AIME 146, pp.54–62. (1942).
- [3] JOGMEC: 石油・天然ガス用語辞典, <http://oilgas-info.jogmec.go.jp/dicsearch.pl>
- [4] Olivella S, Gens A, Carrera J and Alonso EE.: Numerical formulation for a simulator (CODE BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. Eng Computations 13(7): 87–112 (1996).
- [5] A.Iizuka, H.Ohta: A Determination Procedure of Input Parameters in Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis, Soils & Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87 (1987).

第6章 緩衝材表面近傍の止水性評価

6.1 小型セルによるパイピング・エロージョン・破過試験

6.1.1 試験の目的及び概要（既往試験のレビューも含む）

廃棄物地層処分施設は多重バリア構造を基本としており、ベントナイト系人工バリア、オーバークラックやセメント系人工バリア、天然バリアなどで囲まれた構造になっている。この異種材料界面は地層処分においては地下水の水みちとなることが懸念されているが、評価が難しいため、現状であっても性能評価上は他の部位と同等に扱われており、界面の影響は考慮されていない。界面近傍から選択的に地下水が浸潤した場合と、地下水流入位置から緩衝材深部に地下水が浸潤する場合とは、その後に緩衝材に発生する事象や事象の順番などが異なってくるため、様々な影響が考えられる。例えば、SKB社では、ベントナイトブロックと天然バリアの間を充填するペレットのバルク密度をパラメータとした浸潤解析を実施して、界面付近のモデル化を行っている[1]。SKB社の処分概念では、緩衝材と天然バリアの間はペレットで充填されるため、ペレットの物性をパラメータとした界面のモデル化と浸潤位置などが重要となるため、界面自体の水理モデルに関してはあまり検討がなされておらず、ある厚さを持った界面近傍のペレットのモデル化や浸潤位置をパラメータとした浸潤解析がなされている。さらに、ベントナイトブロック間の界面の物性に関しては、力学的な特性のみを摩擦性材料として解析に考慮している。また、緩衝材と天然バリアの間にはSURFACE ELEMENTと呼ばれる解析モデルを導入した検討も実施しているが、力学的な特性の表現はしているが、水理的な観点でのモデル化はなされていない。

さらに、SKB社はこの界面の透水性評価に関して、緩衝材と天然バリアの隙間に充填するペレットにおけるパイピング現象を検討している。このパイピング現象はペレットのような低密度緩衝材がエロージョンによって自己シール出来ない状態で水みちとして残るものであり、一旦、パイピング現象が生じると、緩衝材がその性能を損ねる程の量が流出することも懸念されている。

SKB社では、SKB社 Report R-06-80 [2]やSKB社 Report R-06-72 [3]において、パイピングに関して実験的な検討を行っている。まず、SKB社 Report R-06-80 [2]では、事前に直径2～4mmの水みち、供試体とセルの隙間に強制通水を行っている（図 6.1.1-1、図 6.1.1-2 参照）。この際のパラメータは、水みちの直径（2, 4mm）、塩分濃度（0, 1%）、供試体長、流量、通水圧である。密度は2Mg/m³以下、含水率は17%以下である。この試験では、あらかじめ供試体にパイピングが形成される水みちを設けて、不飽和状態で通水している。

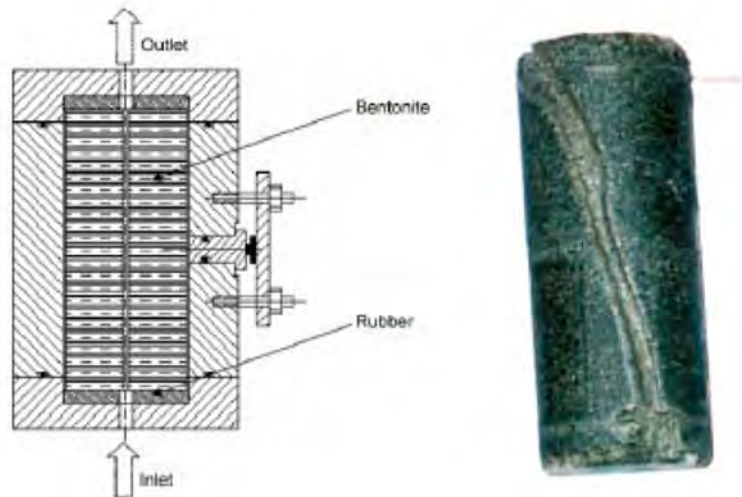


図 6.1.1-1 SKB 社による水みちのパイピング試験 (SKB 社 Report R-06-80 [2])

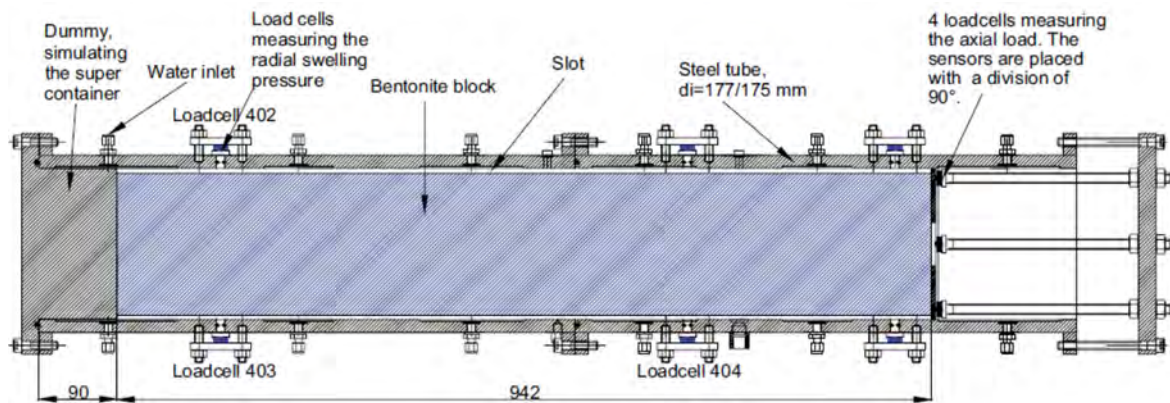


図 6.1.1-2 SKB 社による隙間のパイピング試験 (SKB 社 Report R-06-80 [2])

SKB 社の Report R-06-72 [3]では、アクリルパイプ内にペレットを充填させ、パイピングの形成条件を調べている。パラメータは流量 0.001~1L/min、塩分濃度が水道水、1%、3.5%、供試体長が 0.2、1、3m である(図 6.1.1-3 参照)。この試験も、ペレット充填部の大間隙が連なってあらかじめ水みちが形成される場所が用意された供試体に不飽和状態で流量を与える試験である。

一方、図 6.1.1-4 には、SKB 社 Report R-06-72 [3]で実施したベントナイトブロックに対するパイピング試験の様子を示している。このブロックはベントナイト含有率が 30%である。この試験では、事前にパイピングが形成される場所を設けていないため、明確なパイピングが目視観察されていない。また、注水部分が浸透圧密され、隙間ができていたなどの現象が報告されている。

以上の既往の検討を踏まえ、本検討では、放射性廃棄物地層処分施設が再冠水する際に、地下水が緩衝材に浸潤して行く過程で発生する事象、表 2.2.2-2 の(a)~(j)のうち、(e): 緩衝材表面近傍の止水性能評価に着目する。HLW 処分施設や TRU 廃棄物地層処分施設は多重バリアになっており、ベントナイト系人工バリア、オーバパックやセメント系人工バリア、天然バリアなどで囲まれた構造になっている。さらに処分施設は、建設作業時の力学的安全性の確保の観点から、天然バリアの地質によってはグラウト、ロックボルト、鋼製支保工などが施されることが予想さ

れる。このような緩衝材表面近傍は、再冠水時の水みちとなる可能性が指摘されている。

一方、ベントナイト系人工バリアの施工に着目すると、ベントナイト系人工バリアと異種材料の界面近傍の止水性能は、その施工方法によって大きく異なる。例えば、原位置施工では界面は異種材料と密着しているが、ブロック定置では隙間が存在する。その隙間にペレット充填をしても大隙間が存在するため、再冠水の初期段階では高い止水性は期待できない。

そこで本検討では、この緩衝材の施工方法を考慮して、緩衝材表面近傍の止水性に関して小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験による検討を行った。

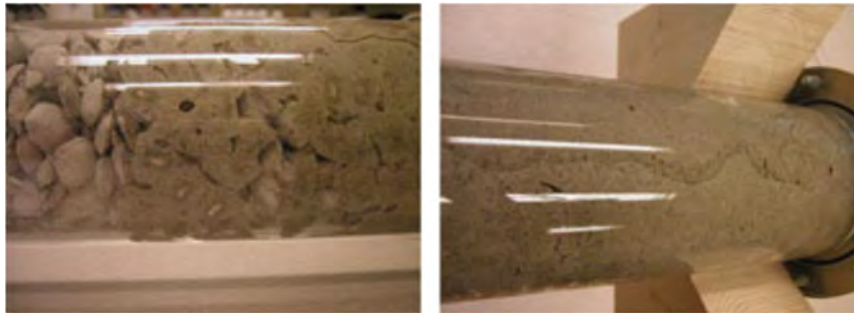


図 6.1.1-3 SKB 社によるペレット充填部のパイピング試験 (SKB 社 Report R-06-72 [3])

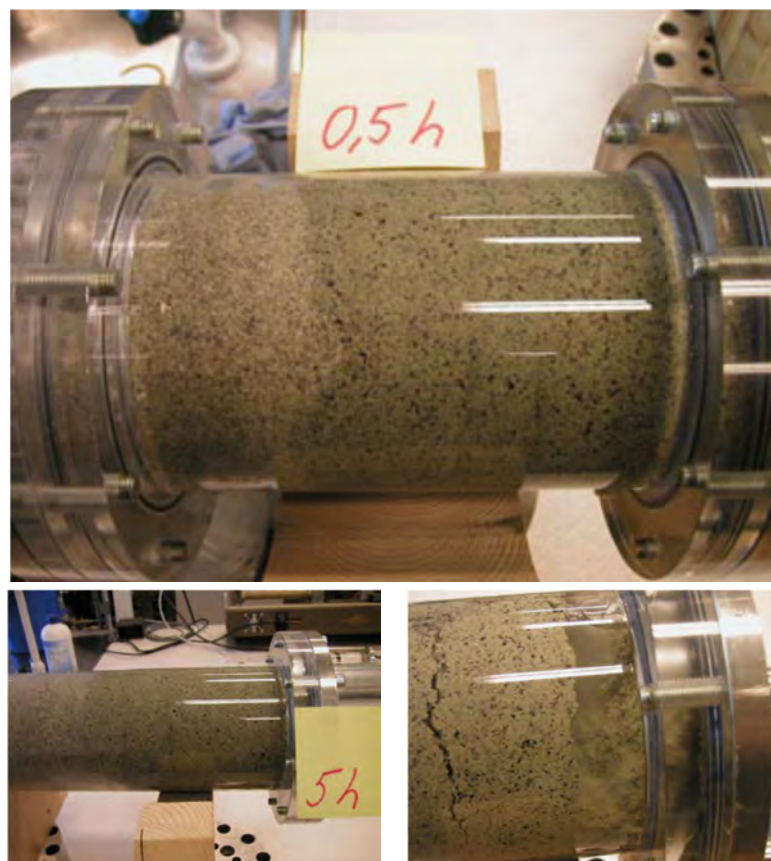


図 6.1.1-4 SKB 社による B 30/S70 ベントナイトブロックのパイピング試験 (SKB 社 Report R-06-72 [3])

6.1.2 原位置施工を模擬した小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験

(1) 試験概要

緩衝材の施工方法を考慮した小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験として、先ず原位置締固め工法を模擬して、緩衝材と異種材料が密着し、界面に隙間や大間隙がない試験条件での通水を行った。

(2) 試験条件

図 6.1.2-1 には試験セルのイメージ図を示している。図に示すようにセルは高さが異なる 3 種類を準備した。これは破過後に供試体長が短すぎて水みちの観察が困難な場合には、供試体長の大きな供試体で試験を行うために作製したものである。なお、これらの供試体の寸法は高さ 2cm のものから実施することとした。仮に水みちの確認が困難な場合には、高さ 6cm、12cm のセルを使用することとする。また、供試体とセルの界面に水みちが生じることの無いよう、上下のポーラスメタルの直径は供試体より小さくし、ベントナイトがセルと接しないケースの場合には、セルと供試体の接触部分には樹脂を塗布する。本試験で使用する試験装置の概略図は図 6.1.2-2 に、試験状況写真は図 6.1.2-3 に示している。通水は下面から行い、上面から排水する機構となっている。排水はシリンジポンプに接合することも可能であるが、今回は採水瓶で排水を採水することとした。流量は別途実施している不飽和ベントナイトの浸潤速度試験条件 (0.0001cc/min) を参考にして、その十倍の 0.001cc/min、0.01cc/min の 2 通りとした。

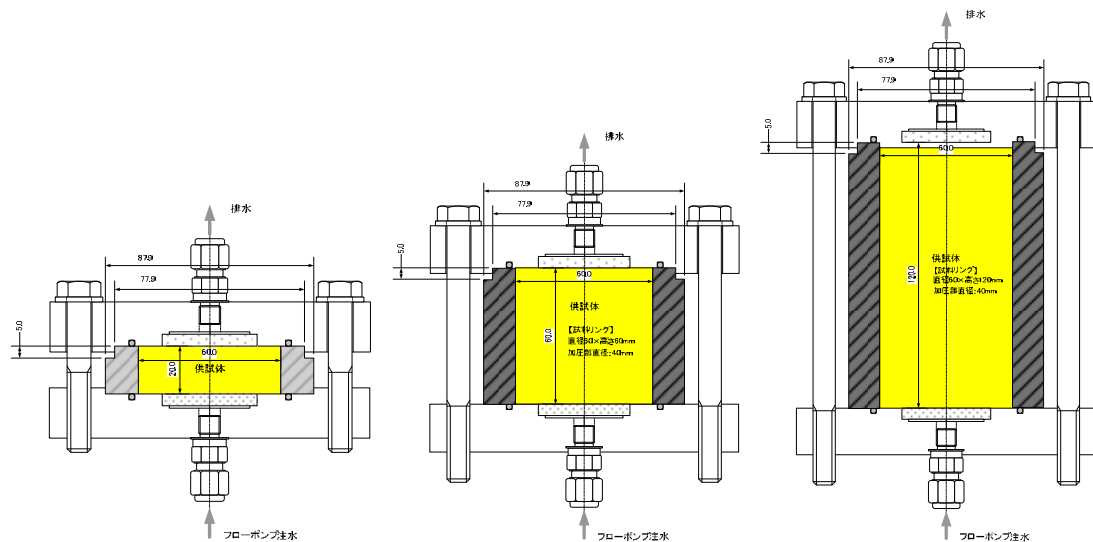


図 6.1.2-1 破過圧計測試験のイメージ

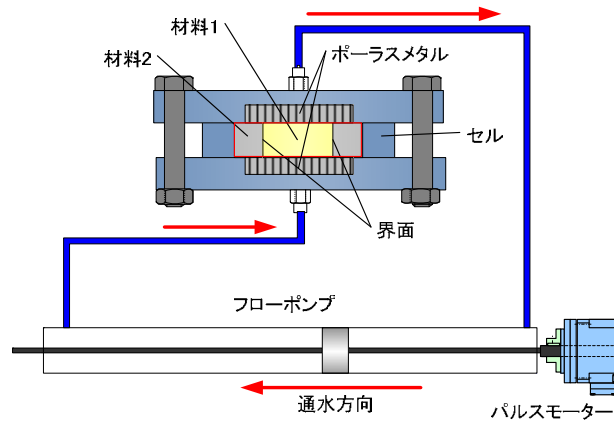


図 6.1.2-2 破過圧測定試験装置概略図

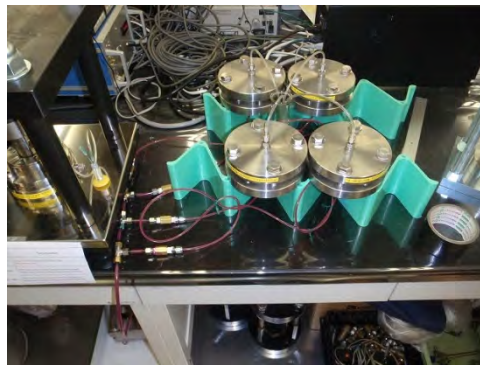


図 6.1.2-3 破過圧測定試験装置

緩衝材表面近傍の止水性能評価として、異種材料との界面の止水性について図 6.1.2-4 に示すような材料の組み合わせで検討を行った。パラメータは、供試体の界面の有無、材料の組み合わせである。ベントナイト同士の界面はブロック施工時のブロック間の隙間の模擬、セメントとベントナイトの界面は覆工とベントナイト系人工バリアの界面の模擬、花崗岩とベントナイトの界面は天然バリアとベントナイト系人工バリアの界面の模擬に相当する。

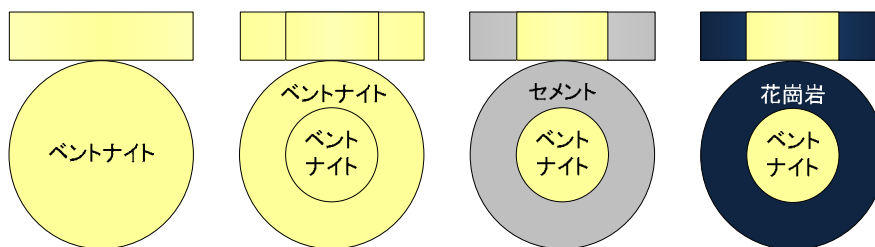


図 6.1.2-4 破過試験の試験ケース

以上をまとめて、試験ケースを表 6.1.2-1 に示す。なお、本試験では、供試体の界面の有無と材料の組み合わせに加え、溶液の種類やベントナイトの初期飽和度もパラメータとなるが、本年度は溶液を蒸留水、初期飽和度を 100%として試験を実施した。

表 6.1.2-1 原位置施工の試験ケース

ケース	材料 1	材料 2	ベントナイトの乾燥密度 Mg/m ³	溶液	ベントナイトの初期含水比(%)(飽和度%)	流速(cc/min)	備考
1	ベントナイト系人工バリア	—	1.6 (砂 30 wt% 混合 Na ベントナイト)	蒸留水	10 (27.4)	0.001 と 0.01	実施済み 界面なし
2	ベントナイト系人工バリア	ベントナイト系人工バリア					実施済み 界面あり (ブロック施工を模擬)
3	ベントナイト系人工バリア	セメント系人工バリア					実施済み 界面あり (覆工との界面を模擬)
4	ベントナイト系人工バリア	花崗岩					実施済み 界面あり (天然バリアとの界面を模擬)

図 6.1.2-5 に試験結果のイメージを示す。パイピングが生じると通水圧が急激に減少することから、通水圧が急激に減少するまで通水を行うことで破過圧を求めることが可能となる。試験の結果、界面を有する供試体の破過圧が界面を有しない供試体の破過圧より小さければ、継ぎ目や密度分布の生じない緩衝材の施工方法の適用、地下水浸潤の制御などが必要となる可能性がある。また、平成 22 年度の試験では供試体の乾燥密度を全て同じ値にしているため、膨潤圧も全て同じ値になることから、破過圧と膨潤圧の関係も取得可能である。

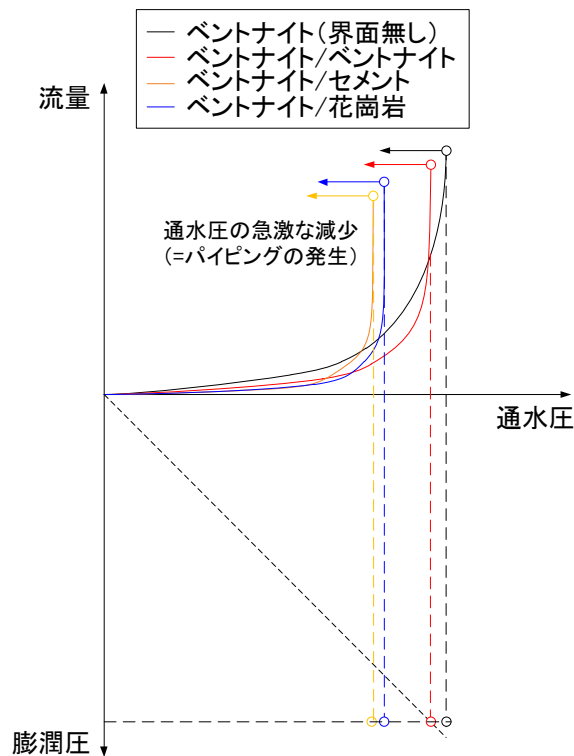


図 6.1.2-5 破過圧計測試験の試験結果のイメージ

(3) 試験結果

通水圧と流量の関係を図 6.1.2-6 に、図 6.1.2-6 の低通水圧領域の拡大図を図 6.1.2-7 に示す。まず、ベントナイト同士の界面を有する供試体に着目すると、通水圧の急激な低下は生じておらず、その通水圧は界面を有しない供試体と比較して大きい。このことから、本試験の通水条件ではベントナイト同士の界面に破過は生じないと判断できる。さらに、ベントナイト同士の界面が、供試体の深部まで全体的に飽和することを促進する役割を果たしているため、不飽和供試体の吸水が早い段階で鈍る事に起因すると考えられる。

次に、セメントとの界面を有する供試体に着目すると、破過が生じて通水圧が減少していることが分かる。ただし、流速が遅いため、すぐにシールされ、通水圧は再上昇している。

一方、花崗岩との界面を有する供試体に関しても、セメントとの界面を有する供試体と同様に、破過が生じて通水圧が減少しているが、直後に通水圧は再上昇している。

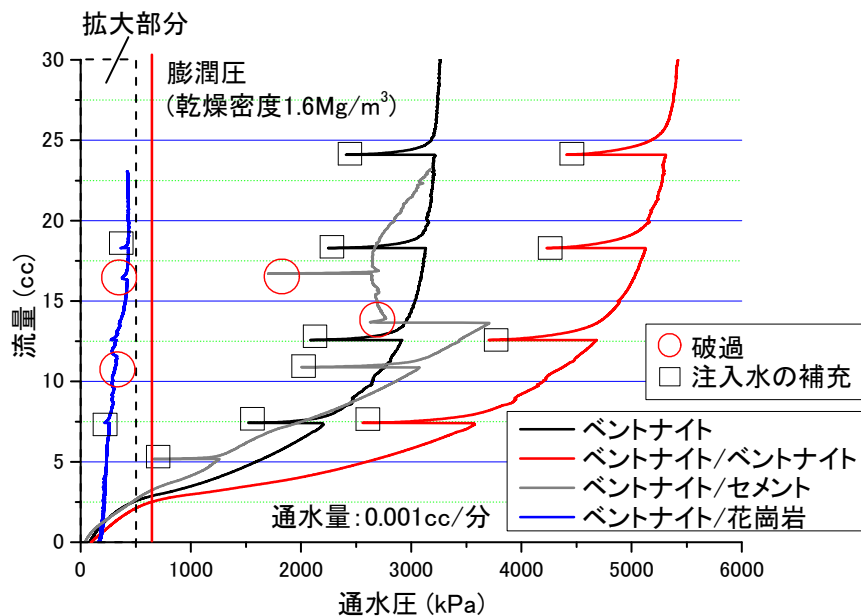


図 6.1.2-6 破過圧計測試験結果(流速 0.001cc/min)

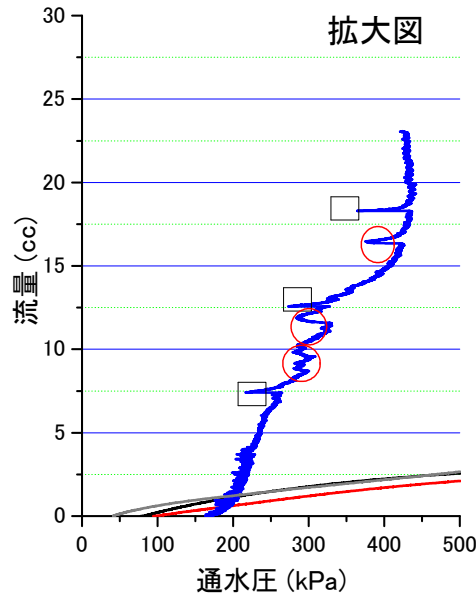


図 6.1.2-7 破過圧計測試験結果（拡大図）

次に、図 6.1.2-8 には流速 0.01cc/min に増加した場合の破過圧計測試験結果を示す。図に示すように、ベントナイト単体、ベントナイト同士の界面を有する場合、どちらも本試験機の水圧計の上限値である 10MPa 付近まで破過現象は見られなかったため通水を中止した。また、この場合も、ベントナイト同士の界面が供試体の深部まで全体的に飽和することを促進する役割を果たしているためベントナイト単体よりはベントナイト同士の界面を有する場合の方が通水圧が大きい。

さらに、ベントナイトとセメントのケースでは、通水速度を 0.01cc/min に上昇させているのにも関わらず、破過現象は見られなかった。同様に、ベントナイトと花崗岩のケースでも破過現象は見られなかった。そこでこの両ケースについては、図 6.1.2-9 に示すように通水速度を 0.1cc/min まで増加させて試験を継続した。しかしながら、両者とも破過現象には至らなかった。

これは、ベントナイトの難透水性によって、通水圧自体が全応力としてベントナイトに作用する。そのため通水圧がベントナイトを異種材料の界面に密着させるように作用し、この影響で界面の密着度が高まるためであると考えられる。流速を増加させるほど通水圧が増加し、ベントナイトを圧縮させるため、界面での通水が生じにくくなると考えられる（図 6.1.2-10 参照）。

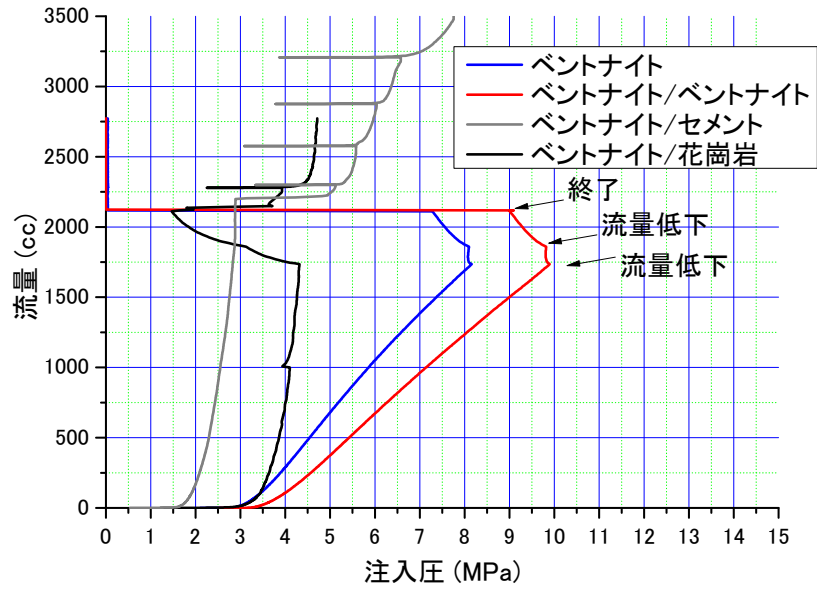


図 6.1.2-8 破過圧計測試験結果(流速 0.01cc/min)

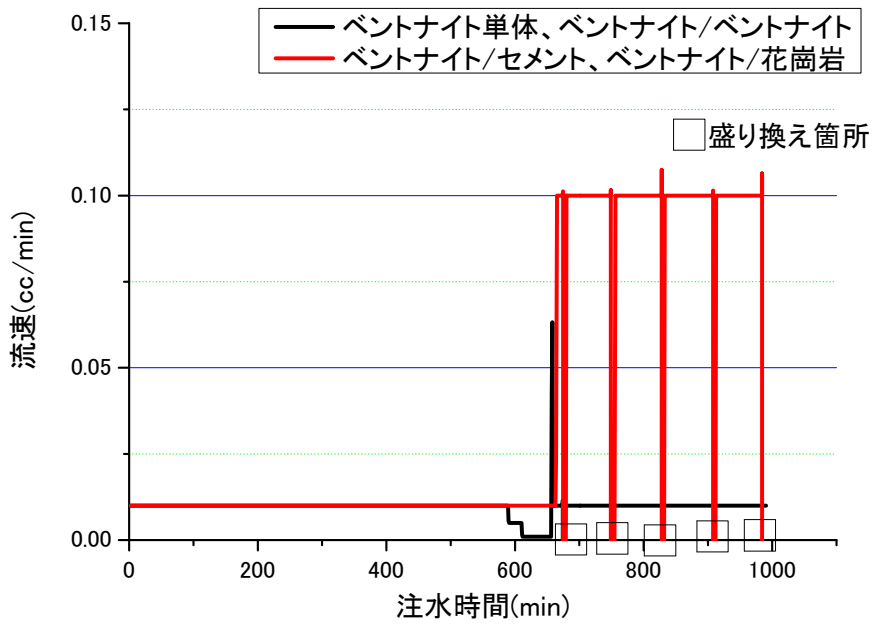


図 6.1.2-9 破過圧計測試験結果

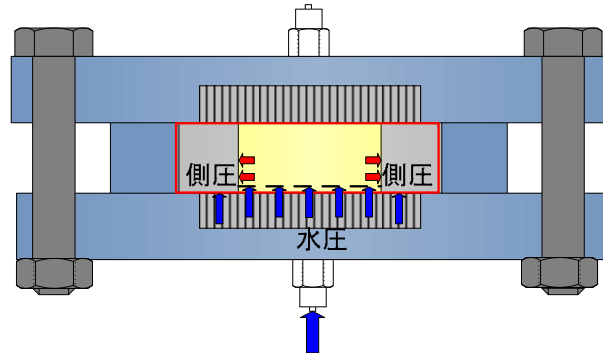


図 6.1.2-10 破過試験中の全応力の作用

以上の結果から、この原位置締固めを模擬した試験条件では破過現象は生じ難いことが分かった。実際の処分場に置き換えて考えれば、HLW 地層処分施設は深度 300m 以深に建設されるため、地下水場は、本試験条件と同様に高水圧、低流量であると考えられる。このような条件で破過現象が生じても、低流量であるため破過後の水圧を維持するほどの地下水が供給されないため、水圧は瞬時に低下し、緩衝材の膨潤挙動によって修復されると考えられる。

(4) 水みち観察

1) セメント/ベントナイトの界面

図 6.1.2-8 に示した結果のうち、破過現象が発生したと考えられるセメント/ベントナイトのケースに対して水みちの形成を確認するために、染料であるローダミンを通水した。ローダミン注入後の供試体の写真を図 6.1.2-11 に示す。

セメント内部、ベントナイト内部には全くローダミンは流れておらず、着色されていないのに対して、セメントとベントナイトの界面だけがローダミンによって着色されていることが分かる。このことから、セメントとベントナイトとの界面を選択的にローダミンが流れたことが分かる。このセメントとベントナイトの界面が水みちとなった理由として、界面における Ca 型化などの化学変質による膨潤性能、止水性能の低下の影響が考えられる。



図 6.1.2-11 ローダミン注入後のベントナイト/セメント供試体

2) 花崗岩/ベントナイトの界面

図 6.1.2-8 に示した結果のうち、他のケースと挙動が異なった花崗岩のケースに対して水みちの形成を確認するために、染料であるローダミンを通水した。ローダミン注入後の供試体の写真を図 6.1.2-12 に示す。

花崗岩部分は強く着色されているのに対し、ベントナイト部分はほとんど着色されておらず、水のほとんどがベントナイト部分ではなく透水係数の高い花崗岩部分を通過していると判断できる。このことが、花崗岩との界面を有する供試体の通水圧が小さい原因と考えられる。

花崗岩は取りたてて透水性の高い岩ではなく、実際の処分場の母岩となる可能性は十分にありえる材料である。ベントナイトよりも止水性が高い岩盤をサイトに選ぶことは難しく、この花崗岩のケースのような現象は実際の処分場であっても生じる可能性があると考えられる。

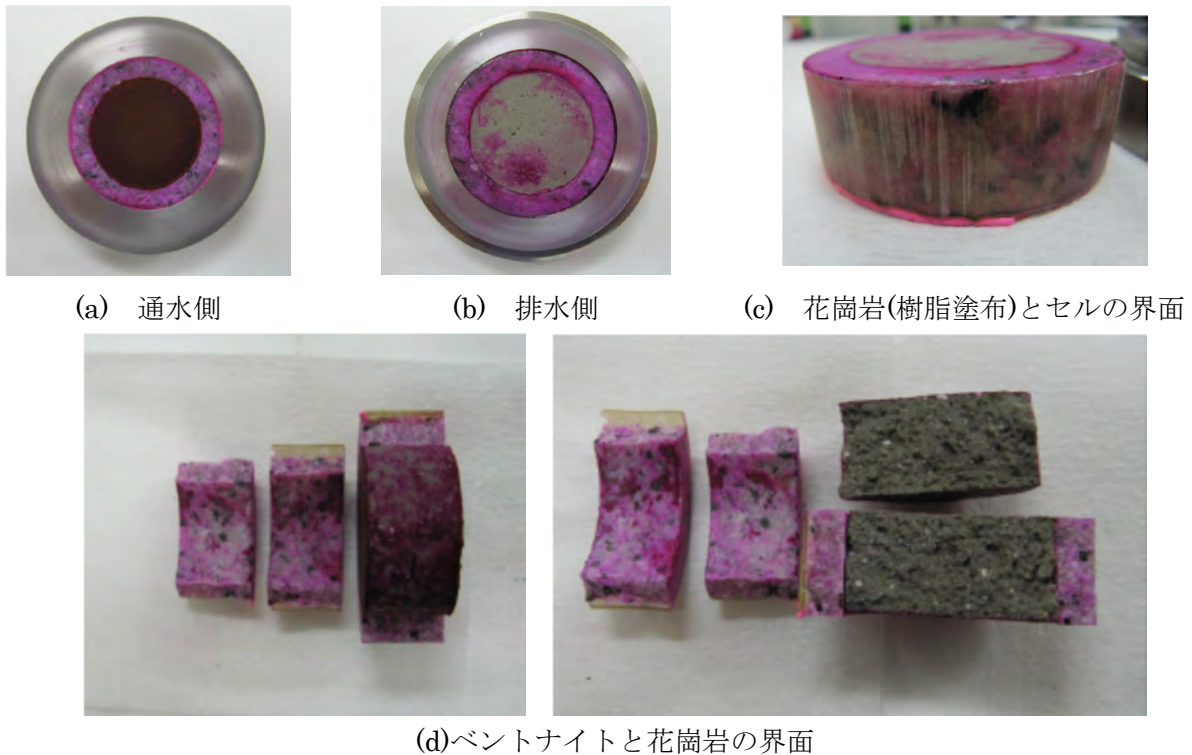


図 6.1.2-12 ローダミン注入後のベントナイト/花崗岩供試体

6.1.3 ブロック定置・ペレット充填方式を模擬した小型セルによるパイピング、エロージョン、破過試験

(1) 概要

ベントナイト系人工バリアがベントナイト系人工バリアや異種材料と界面を有する場合であっても、ベントナイト系人工バリアが界面と十分に密着するように設置された場合、通水圧がベントナイトを圧縮変形させて界面を密着させるように作用するため、破過現象が生じないという場合があるという結果となった。しかしながら、通常、ベントナイト系人工バリアの表面近傍は難施工箇所であり、施工方法によっては隙間が生じ易いと考えられる。そこで、異種材料との界面に隙間の存在が想定されるブロック定置・ペレット充填方式を模擬した試験系でベントナイト系人工バリア表面近傍のパイピング、エロージョン、破過の各現象の発生の有無を検討する。

(2) 試験ケース、および試験装置

図 6.1.3-1 に試験イメージを示す。ベントナイト系人工バリアの施工方法として図に示すように、ブロック定置工法とペレット充填工法に関して検討した。ブロック定置工法では緩衝材

と天然バリアの間には隙間が存在することが想定される為、試験セルと供試体間には隙間を設けた。ペレット充填工法では、初期に大きな隙間が存在するため、試験でもセル内にペレットを充填した。

試験ケースを表 6.1.3-1 に示す。ケース名の最初のアルファベット Bot、Top は注水箇所を示し、続くアルファベットは通水液の種類を表す (H:H₂O、N:NaCl 水溶液)。さらに、ハイフンの後のアルファベットはブロック定置の場合 B、ペレット充填の場合には P としている。“●●-B” のケースブロック定置工を模擬して初期状態でセルと供試体間に隙間があるケース、“●●-P” はペレット充填工法を模擬して初期状態で大きな隙間があるケースである (例、H-B: 蒸留水をブロックに通水したケース)。表中の見かけの乾燥密度は、供試体の乾燥重量をセルの容積で除したものであり、膨潤後の乾燥密度である。

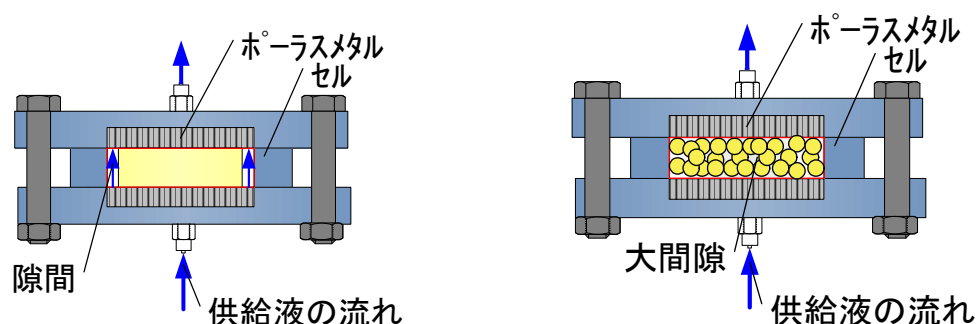


図 6.1.3-1 ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験条件の検討
(左：ブロック定置工法、右：ペレット充填工法)

さらに、表 6.1.3-1 には上面から給水する上蓋と供試体の間に隙間があるブロック定置工法のケース(Top●-B)、同様に上面から給水するペレット充填工法のケース(Top●-P)も示している。両ケースとも、供給口の位置以外はそれぞれ同じ条件である。この” Top●-B”と” Top●-P”は、膨潤を妨げる方向に通水圧が作用するように設定したケースである。これは、図 6.1.3-2 に示すように、実際の HLW 縦置き概念において、緩衝材と天然バリアの隙間、若しくはペレット充填部に水平に湧水があった場合に相当する。

さらに、各ケースで蒸留水とイオン強度 0.5M の NaCl 水溶液の 2 ケースを実施した。ペレット充填工法のケースで使用したペレットは、既往の研究で検討されたペレット[4]であり、粒径 10~20mm 程度のものを使用した。ただし、BotH-2-P に関しては、蒸留水のケースで、ペレットの見かけの乾燥密度を変化させるために大きなペレット(粒径 10~20mm)だけでなく、小さなペレット(粒径 1~3mm 程度)を組み合わせたケースも実施した。

近年の研究[5]で、ペレット自体の乾燥密度を高めてペレット充填工法で乾燥密度 1.6Mg/m³ を達成する検討も為されており、ペレット充填工法で様々な乾燥密度で試験を実施できるように、この大小の高密度ペレットについても検討を行った(BotH-3-P)。

全てのケースで、初期の流量は 0.1L/min.として、一部の試験で適宜流量を低下させた。この流量は SKB 社や POSIVA 社などの処分坑の要求性能として設定されている湧水量の上限値を参考にした[6]。

表 6.1.3-1 膨潤供試体のブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験ケース

ケース	初期状態	見かけの隙間/空隙割合	見かけの乾燥密度 (Mg/m ³)	液種 (イ ⁺ 強度)	最大通水圧 (MPa)	流量	給水口	備考
BotH-B	隙間あり	10%	1.6 (*1.936) (ケイ砂 30%混合 クニゲル V1)	蒸留水/	3	0.1L/min	底面	実施済み
BotN-B				NaCl 水溶液 0.5M		0.1L/min		実施済み
BotH-1-P	大間隙	10~40%	約 1.1 (クニゲル V1)	蒸留水		0.1L/min		実施済み
BotH-2-P						約 1.5 (クニゲル V1)		0.1L/min
BotH-3-P				約 1.6 (クニゲル V1)	0.1→0.01→0.001 L/min	実施済み		
BotN-P				約 1.1 (クニゲル V1)	NaCl 水溶液 0.5M	0.1L/min	実施済み	
TopH-B	隙間あり	10%	1.6 (*1.778) (ケイ砂 30%混合 クニゲル V1)	蒸留水/	3	0.1L/min	上面	実施済み
TopN-B				NaCl 水溶液 0.5M		0.1L/min		実施済み
TopH-P	大間隙	10~40%	約 1.1 (クニゲル V1)	蒸留水/		0.1L/min		実施済み
TopN-P				NaCl 水溶液 0.5M		0.1L/min		実施済み

*(膨潤前乾燥密度)

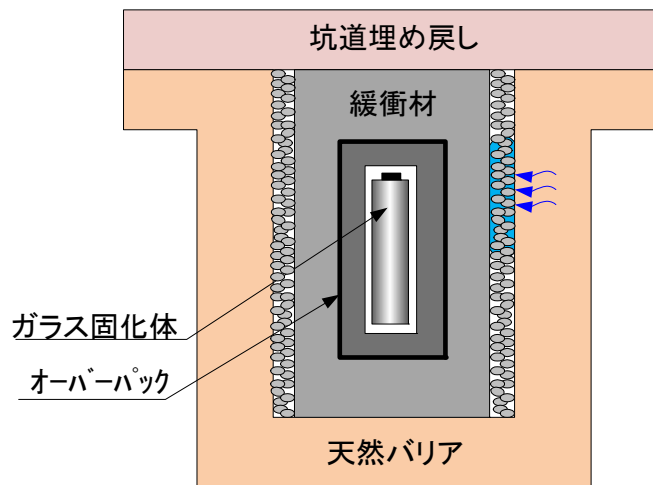


図 6.1.3-2 HLW 縦置き概念イメージ図

図 6.1.3-3 に試験セルの概略図を示す。試験セルの容積はφ110mm×h50mmである。供給口は上面と下面の二箇所あり、どちらか一方、若しくは両方から通水可能である。さらに、排水は、セルの上蓋と側部リングの間に設けた幅 5mm のスリットから上蓋の上に設けられたエ

ローションで排出されたベントナイトを貯留するセルを介して排水される。

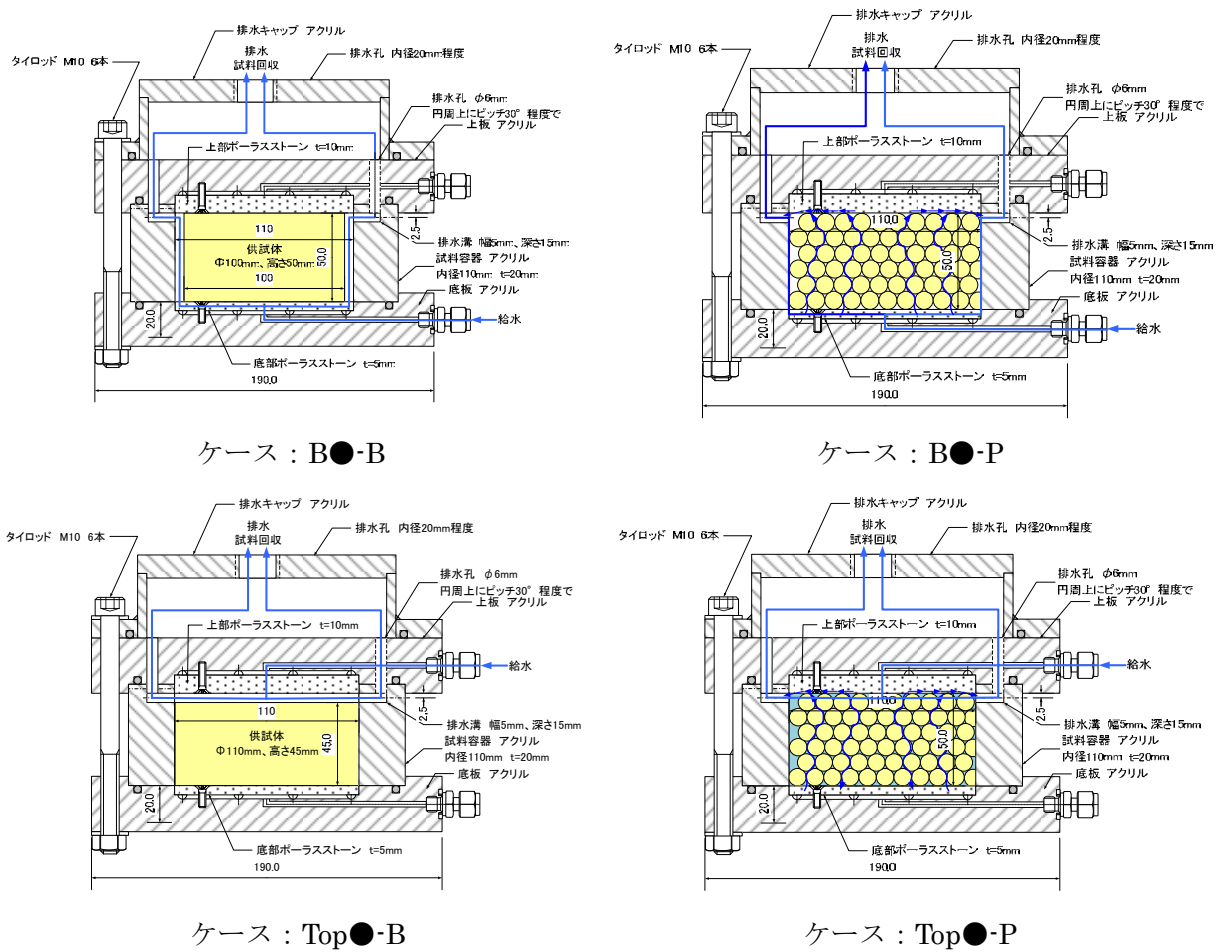


図 6.1.3-3 ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験セルの概略図

図 6.1.3-4 には、長時間一定流量を制御できる 2 連シリンジポンプによる定流量制御装置を示している。この定流量制御装置は、一方のシリンジポンプが供試体へ通水液を注入中に、他方のシリンジポンプに通水液を充填するという自動の盛換えを繰り返すものである。図 6.1.3-5 に実際の 2 連シリンジポンプによる定流量制御装置による自動盛り換え状況を示す。シリンジポンプ 1 とシリンジポンプ 2 の勾配が異なるのは、両シリンジポンプの断面積が異なるためである。図から、供試体への注入とシリンジポンプへの充填が交互に切れ間なく行われていることが分かる。



図 6.1.3-4 2連シリンジポンプによる定流量制御装置

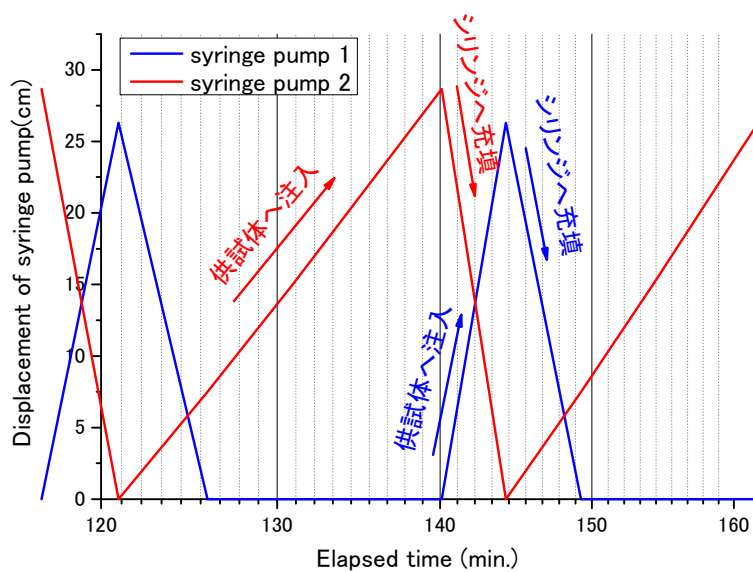


図 6.1.3-5 2連シリンジポンプによる定流量制御装置状況

(3) 試験結果

1) BotH-B (注入口:底面/蒸留水/ブロックのパイピングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-6 に蒸留水を底面から通水量 0.1L/min で注入した場合のブロック定置工法（側部に隙間）のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。ここでパイピングとは、不飽和状態の緩衝材に地下水が流入した場合、膨潤圧に対して流水圧が大きくなるため水みちが形成され、緩衝材微粒子が排出されることをエロージョンという。通水開始後 3 時間で水みちが形成されていることが分かる。さらに、膨潤前の乾燥密度は 1.963Mg/m³ と高密度であるのにも拘らず、6 時間後には水みちが形成されエロージョンが卓越している。試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度（単位時間当たりのエロージョン率）は 0.66%/hr であった。



図 6.1.3-6 注入口:底面/蒸留水/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況

2) BotN-B (注入口:底面/NaCl 水溶液/ブロックのパイピングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-7 に NaCl 水溶液を底面から通水量 0.1 L /min で注入した場合のブロック定置工法（側部に隙間）のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。図から、沈殿物が非常に多く、2 時間後に沈殿物内に水みちが形成されていることが分かる。6 時間後には沈殿物は膨潤した供試体と一体化し区別がつかなくなるが、9 時間後には沈殿物内に形成された水みちは、沈殿物と供試体が一体化した後でも存在している。特筆すべきは、水みちに緩衝材のケイ砂が堆積している点である。12 時間後ではこの砂が水みちのシールを阻害してい

るように観察された。この水みちに堆積した砂の影響もあって、膨潤前の乾燥密度は 1.963Mg/m^3 と高密度であるのにも拘らず、水みちはシールされずにエロージョンが卓越している。試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は $0.39\%/hr$ であった。

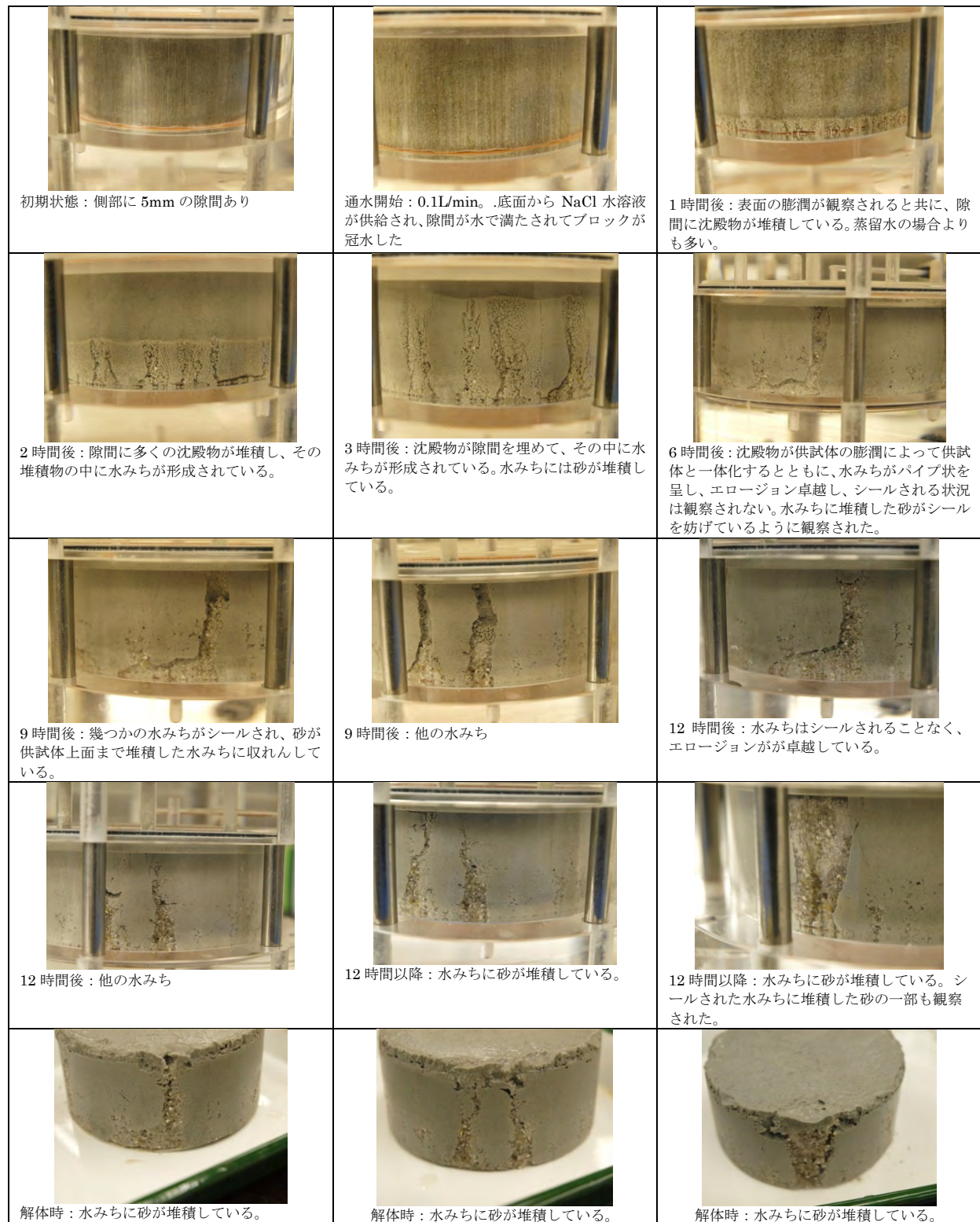


図 6.1.3-7 注入口:底面/NaCl 水溶液/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況

3) BotH-1-P (注入口:底面/蒸留水/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-8 に蒸留水を底面から通水量 0.1 L/min で注入した場合の大粒径ペレット充填工法 (大間隙) のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットのみを使用している。見かけの乾燥密度は 1.1Mg/m³ 程度である。

図から、給水直後に供試体の大間隙を水が満たしていることが分かる。なお、14) 通水圧の発生状況で詳述するが、この間に通水圧の上昇は生じていない。試験開始から 1 時間後にはペレット表面が膨潤し、間隙が網目状の水みちを形成していく過程が得られた。この水みちには、6 時間後には沈殿物が堆積し、沈殿した堆積物が水の流れを阻害するような場合には、その水みちは膨潤によってシールされる。さらに、蛇行している水みちは絶えず形状を変化させ、河川と同様に、なるべく真っすぐな水みちに変化しているように観察された。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.38%/hr であった。

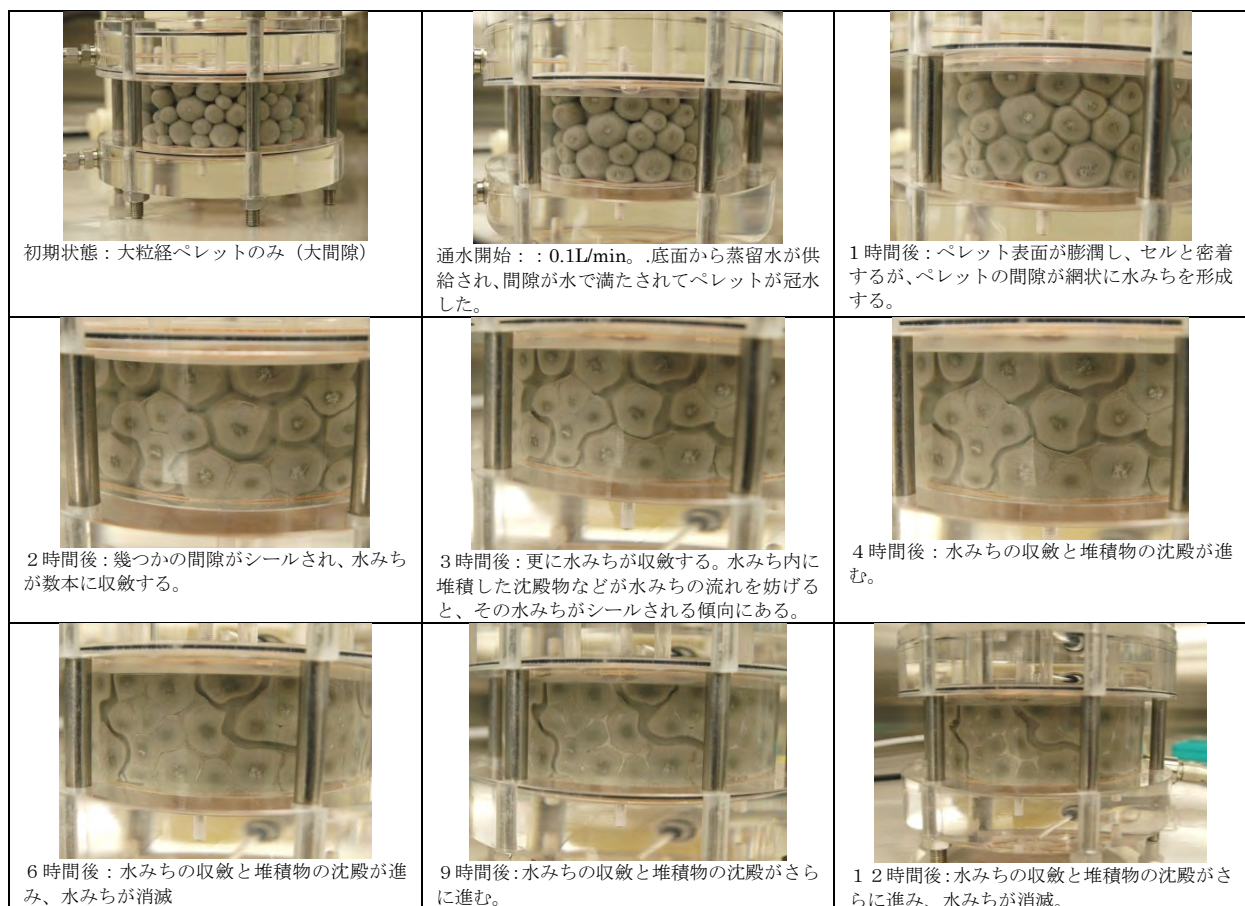


図 6.1.3-8 注入口:底面/蒸留水/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

4) BotH-2-P (注入口:底面/蒸留水/大小粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-9 に蒸留水を通水量 0.1L/min で底面から注入した場合の大小粒径ペレット充填工法 (大間隙) のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットの大間隙を 1~3mm 程度の小粒径ペレットで充填している。見かけの乾燥密度は 1.5Mg/m³ 程度である。

図から、給水直後に供試体の間隙を水が満たしていることが分かる。なお、この間に通水圧の上昇は生じておらず、この傾向は前述の大粒径のみのケースと大差はない。また、試験開始 15 分後に小粒径部分に多数の小さな水みちが形成された。この多数の水みちは、通水を継続する過程で収斂し、3 時間後には大きな 1 つの水みちを形成した。6 時間後に 1 つに収斂した水みち周辺はエロージョンによって流出し、水みちの太さは増加傾向であった。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.42%/hr であった。

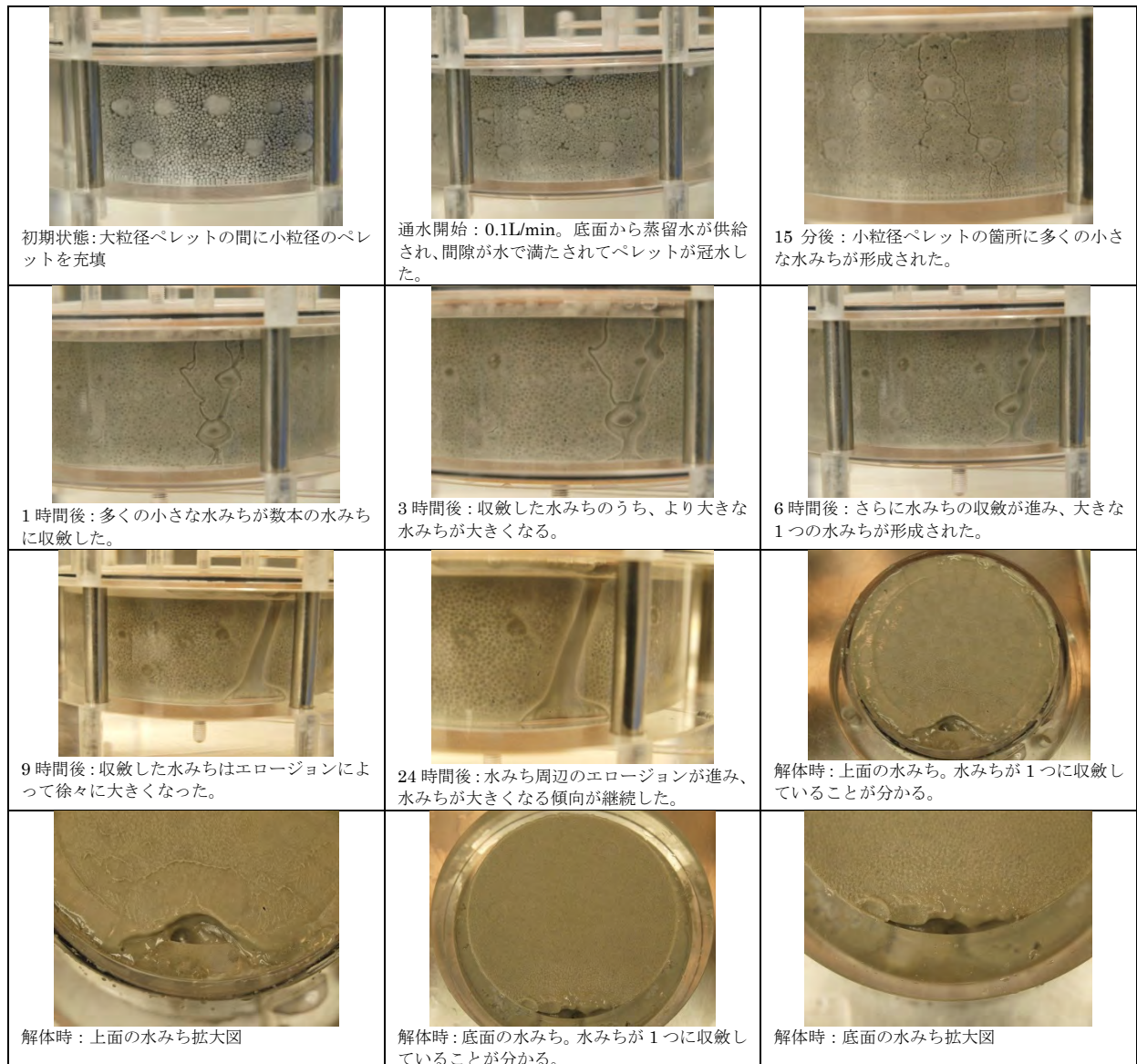


図 6.1.3-9 蒸留水/注入口底面/大小粒径[®]ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

5) BotH-3-P (注入口:底面/蒸留水/高密度大小粒径ペレットケースのパッキングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-10 に蒸留水を底面から 0.1→0.01→0.001L/min で注入した場合の高密度大小粒径ペレット(PP ペレット)充填工法(大間隙)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットの大間隙を 1~3mm 程度の小粒径ペレットで充填している。見かけの乾燥密度は 1.6Mg/m³ 程度である。

図から、0.1L/min で給水した直後に供試体の間隙を水が満たしていることが分かる。なお、この間に通水圧の上昇は生じておらず、この傾向は前述の大粒径のみのケースと大差ない。また、試験開始後 15 分で小粒径部分に多数の小さな水みちが形成された。この多数の水みちは、通水を継続する過程で収斂し、3 時間後には大きな 1 つの水みちを形成した。9 時間後には 1 つに収斂した水みち周辺はエロージョンによって流出し、水みちの太さは増加傾向であった。この傾向は、前述の大小粒径ペレット充填工法と同様であった。

ある程度水みち形成が落ち着いてから、12 時間後に流速を 1/10 倍に低下させた(0.01L/min)。およそ、3 時間程度で水みちの太さが膨潤によって細くなった。さらに 18 時間後に流速を 1/10 倍に低下させた(0.001L/min)場合、水みちはさらに細くなった。これは、水みちの大きさが、膨潤とエロージョンの定常状態(膨潤とエロージョンの闘い)で決まるためであると考えられる。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.3%/hr であった。



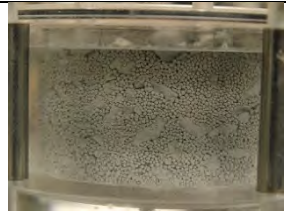
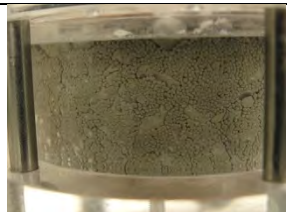
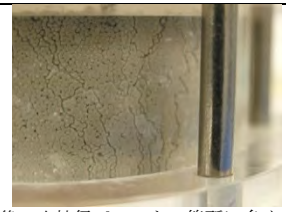


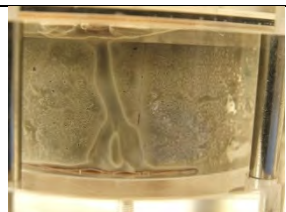
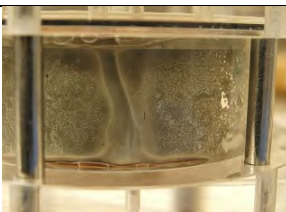
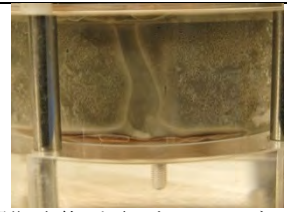
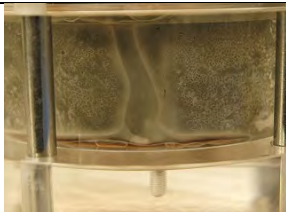

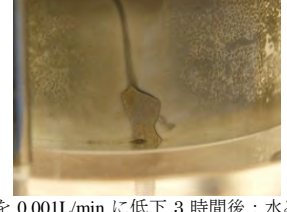
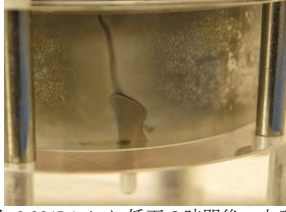

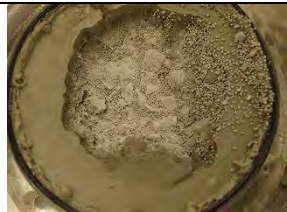


 <p>高密度大粒径ペレット</p>	 <p>小粒径ペレット</p>	 <p>初期状態: 大粒径ペレットの間に小粒径のペレットを充填</p>
 <p>通水開始: 0.1L/min。底面から蒸留水が供給され、間隙が水で満たされてペレットが冠水した。通水開始直後から潜在的な水みちが観察できる。</p>	 <p>15分後: 小粒径ペレットの箇所に多くの小さな水みちが形成された。</p>	 <p>30分後: 多くの小さな水みちが数本の水みちに収斂した。</p>
 <p>1時間後: 収斂した水みちのうち、より大きな水みちが大きくなる。</p>	 <p>3時間後: さらに水みちの収斂が進み、大きな1つの水みちが形成された。</p>	 <p>6時間後: 収斂した水みちはエロージョンによって徐々に大きくなった。</p>
 <p>9時間後: 収斂した水みちはエロージョンによって徐々に大きくなった。</p>	 <p>12時間後: 水みち周囲のエロージョンが進み、水みちが大きくなる傾向が継続。</p>	 <p>流量を0.01L/minに低下3時間後: 水みちが膨潤によって細くなった。</p>
 <p>流量を0.001L/minに低下3時間後: 水みちが膨潤によってさらに細くなり、底部に堆積していた沈殿物が押し上げられ、水みちを閉塞しているように見える(実際は水みちは閉塞していない)。</p>	 <p>流量を0.001L/minに低下6時間後: 水みちが膨潤によってさらに細くなった。水みちを閉塞するように堆積している沈殿物を避けるように新たな水みちが形成された。</p>	 <p>流量を0.001L/minに低下9時間後: 水みちが膨潤によってさらに細くなった。水みちを閉塞するように堆積している沈殿物を避けるように新たな水みちが形成された。</p>
 <p>解体時: 供試体内部は乾燥しており、周辺部のみが冠水したことが分かる。</p>	 <p>解体時: 上面の水みち</p>	 <p>解体時: 底面の水みち</p>

図 6.1.3-10 注入口:底面/蒸留水/大小粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

6) BotN-P (注入口:底面/NaCl 水溶液/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョン
の発生状況)

図 6.1.3-11 に NaCl 水溶液を底面から 0.1L/min で注入した場合の大粒径ペレット充填工法 (大間隙) のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットのみを使用している。見かけの乾燥密度は 1.1Mg/m³ 程度である。

図から、0.1L/min で給水した直後に供試体の大間隙を NaCl 水溶液が満たしていることが分かる。なお、この間に通水圧の上昇は生じていない。試験開始直後からペレット表面が逆立ち、沈殿が始まった。1 時間後には堆積した沈殿物に水みちが形成された。この水みちには、3 時間後には沈殿物が堆積し、沈殿した堆積物が水の流れを阻害するような場合には、その水みちは膨潤によってシールされる。12 時間後には多数の小さな水みちは徐々に大きな数本の水みちに収斂し、最終的には 1 本の水みちとなった。この水みちの収斂には、上述の沈殿した堆積物による水みちの閉塞が寄与している。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.21%/hr であった。



図 6.1.3-11 注入口:底面/蒸留水/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

7) TopH-B (注入口:上面/蒸留水/ロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-12 に蒸留水を上面から通水量 0.1L/min で注入した場合のブロック定置工法（側部に隙間）のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。セルの上蓋と供試体上面の間に 5mm の隙間を設けている。

図から、供試体側面からは浸潤面に進展は観察されるが、大きな変化は見られなかった。但し、解体時の上面はエロージョンによってベントナイトが流出し、砂っぽい状態になっていた。また、上面には浅い水みちが観察された。

膨潤前の乾燥密度は 1.778Mg/m³ と高密度であるのにも拘らず、隙間はシールされずにエロージョンが卓越している。ただし、セルと供試体側面の界面の浸潤は大きく進展しておらず、底面も乾燥したままであった。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.15%/hr であった。

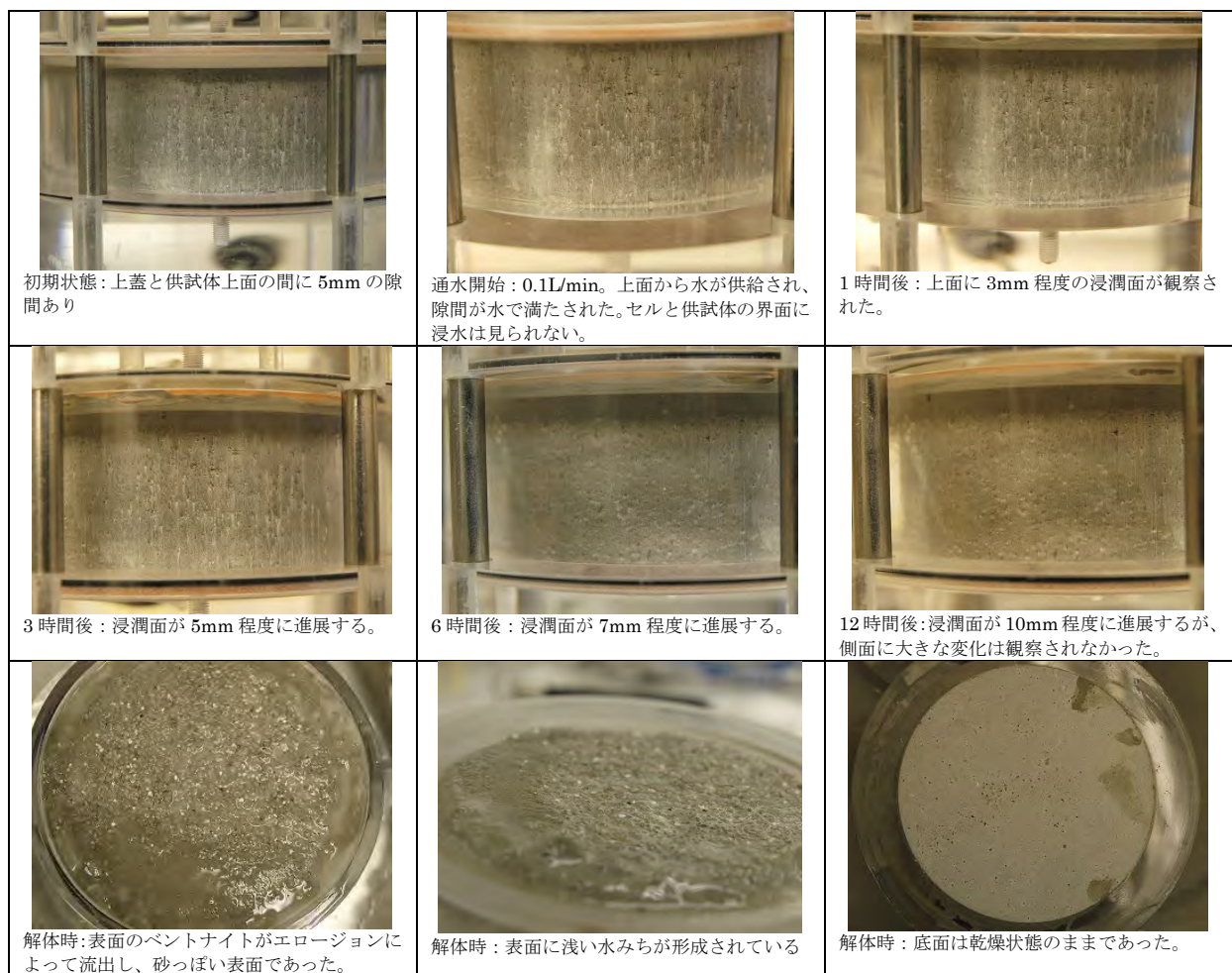


図 6.1.3-12 注入口:上面/蒸留水/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況

8) TopN-B (注入口:上面/NaCl 水溶液/ロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-13 に NaCl 水溶液を上面から通水量 0.1L/min で注入した場合のブロック定置工法 (側部に隙間) のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。セルの上蓋と供試体上面の間に 5mm の隙間を設けている。

図から、供試体側面からは浸潤面に進展は観察されるが、大きな変化は見られなかった。浸潤速度は蒸留水のケース(UpH-B)に比べ速いことが分かる。但し、解体時の上面は、特に上面の淵のエロージョンが激しかった。

膨潤前の乾燥密度は 1.778Mg/m³ と高密度であるのにも拘らず、隙間はシールされずにエロージョンが卓越している。ただし、セルと供試体側面の界面の浸潤は大きく進展しておらず、底面も乾燥したままであった。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.04%/hr であった。

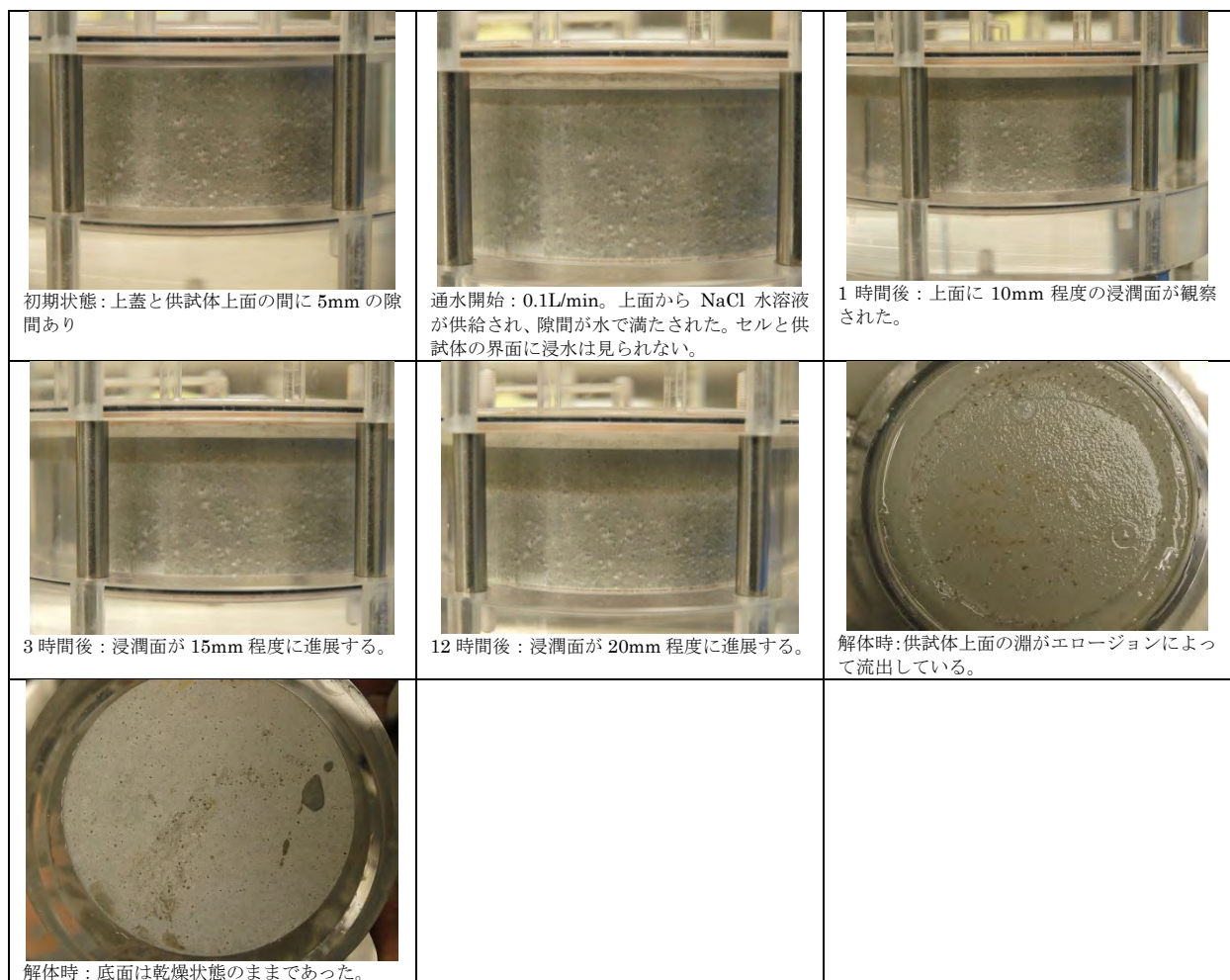


図 6.1.3-13 注入口:上面/蒸留水ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況

9) TopH-P (注入口:上面/蒸留水/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-14 に蒸留水を上面から通水量 0.1L/min で注入した場合の大粒径ペレット充填工法 (大間隙) のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットのみを使用している。見かけの乾燥密度は 1.1Mg/m³ 程度である。

図から、給水直後に供試体の大間隙を水が満たしていることが分かる。なお、この間に通水圧の上昇は生じていない。試験開始から 1 時間後にはペレット表面が膨潤し、間隙が網目状の水みちを形成していく過程が得られた。この水みちには、給水を底部から行った場合と比較して小さい。これは、上部から給水された水は、膨潤後、供試体上面を流れ、供試体内、下部では拡散場となるため、膨潤が卓越するためだと考えられる。そのため、試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.03%/hr と他のケースに比べて小さかった。

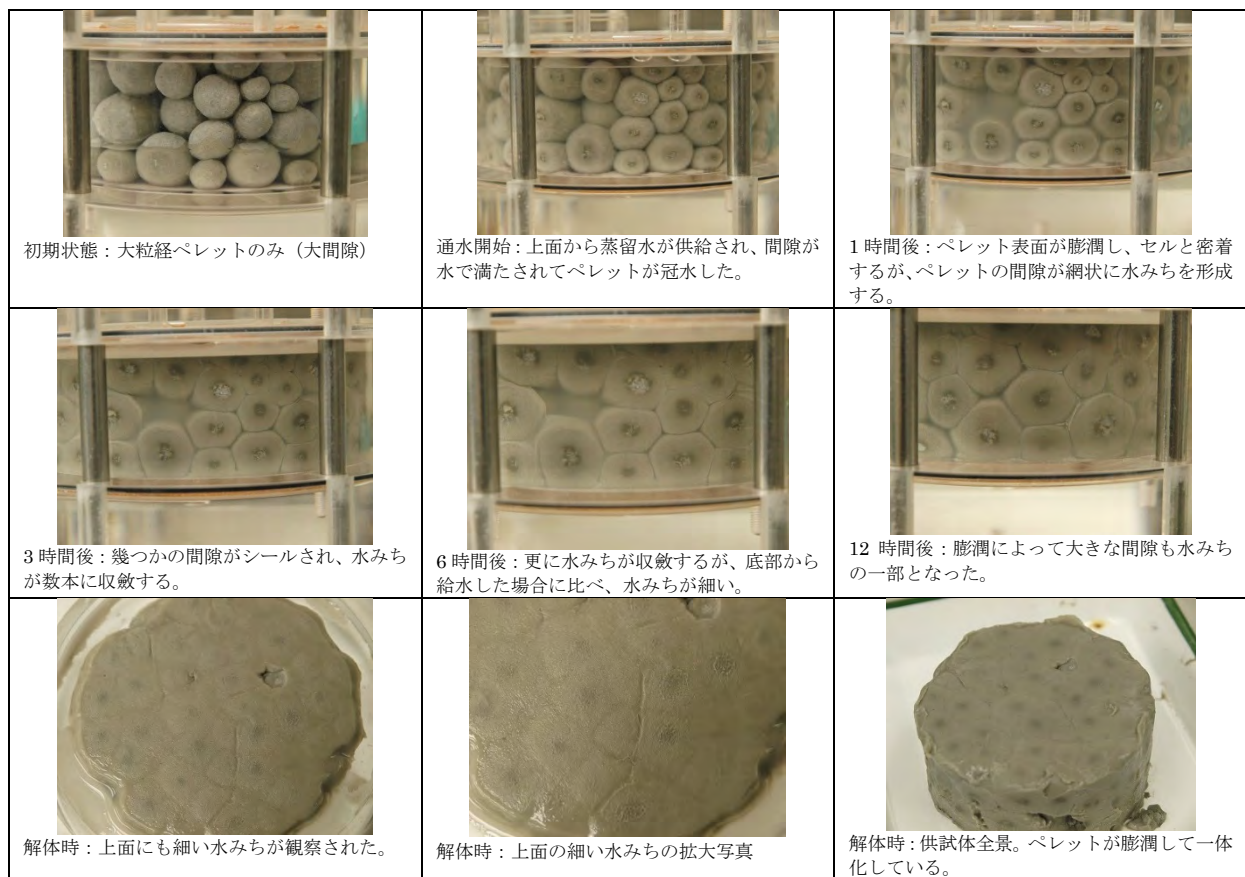


図 6.1.3-14 蒸留水/注入口底面/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

10) TopN-P (注入口:上面/NaCl 水溶液/大粒径ペレットケースのパイピングと

エロージョンの発生状況)

図 6.1.3-15 に NaCl 水溶液を底面から通水量 0.1L/min で注入した場合の大粒径ペレット充填工法 (大間隙) のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットのみを使用している。見かけの乾燥密度は 1.1Mg/m³ 程度である。

図から、給水直後に供試体の大間隙を水が満たしていることが分かる。なお、この間に通水圧の上昇は生じていない。試験開始から 1 時間後にはペレット表面から沈殿物が底部、間隙に堆積し、3 時間後にはそれらとペレットの膨潤が一体化し水みちを塞いだ。この水みちには、沈殿物が堆積し、沈殿した堆積物が水の流れを阻害するような場合には、その水みちは膨潤によってシールされる。さらに、6 時間には沈殿と膨潤が進み明確な水みちは観察されなくなった。これは、上部から給水された水は、膨潤後、供試体上面を流れ、供試体内、下部では拡散場となるため、膨潤が卓越するためだと考えられる。そのため、試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.03%/hr と他のケースに比べて小さかった。

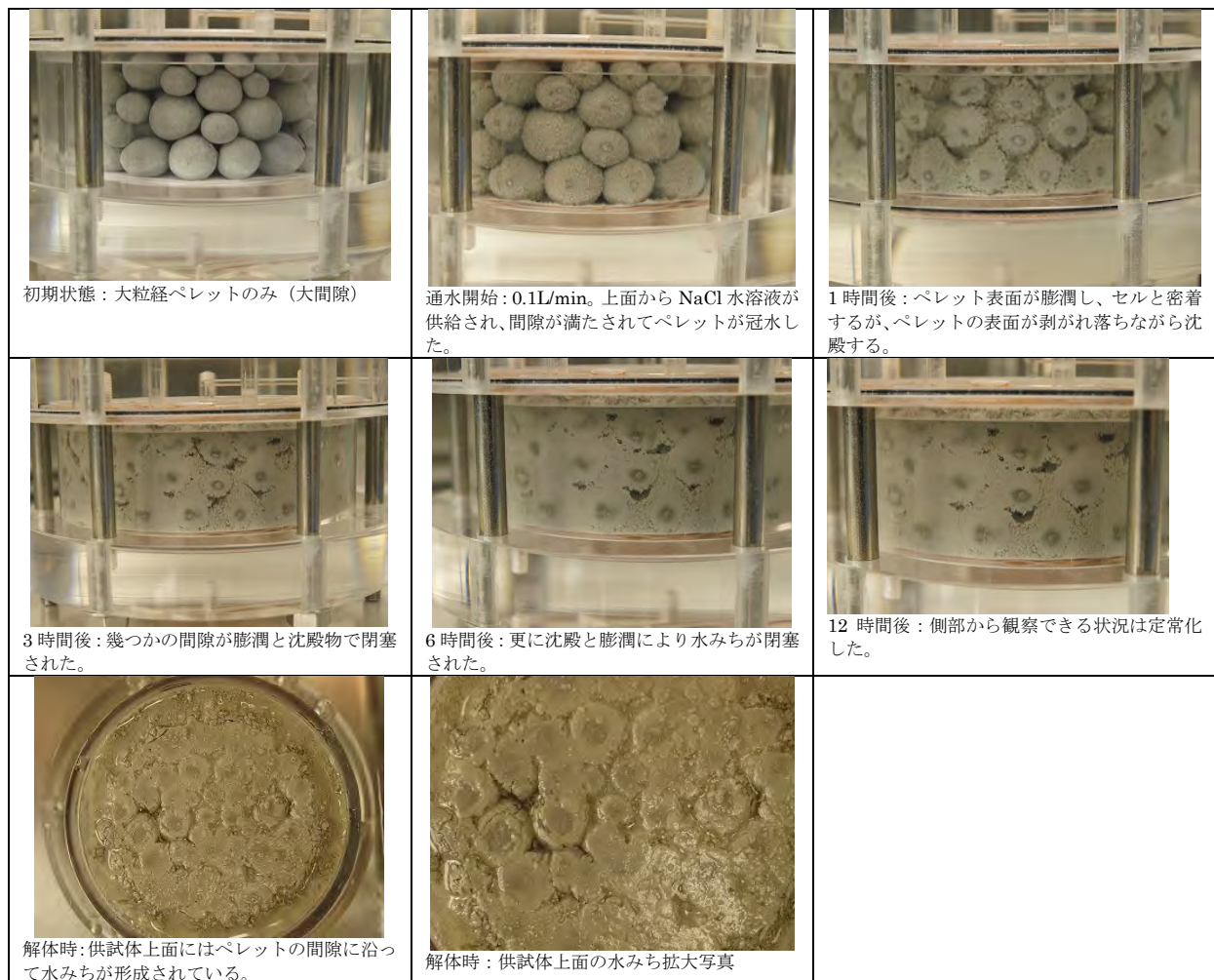


図 6.1.3-15 注入口:上面/NaCl 水溶液/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

11) 各ケースのエロージョン状況

各試験のエロージョン状況を表 6.1.3-2 に示す。各試験のエロージョンによって流出した物質はエロージョン物質の貯留セルに溜め置かれるが、水に分散している細粒分については貯留セルに溜まらずに排水されてしまう。そこで、排水をポリバケツに溜めて濾過を試みたが、排水量が 100L 程度と多く、濾過に膨大な時間を要するため、試験後の供試体乾燥質量を計測することによってエロージョン質量を算出した。さらにエロージョン質量を試験前供試体乾燥質量で除してエロージョン率、さらにエロージョン率を試験時間で除してエロージョン速度を算出した。

表から、ペレットよりもブロックの方がエロージョン質量、エロージョン率が大きいことから、エロージョンし易い傾向にある。これは、ペレットでの見かけの初期乾燥密度は 1.1Mg/m^3 であり、ブロックの見かけの乾燥密度は 1.6Mg/m^3 であるため、ブロックの方が間隙の体積は小さい。そのため、給水速度が 0.1L/min. で同じ条件であっても間隙を流れる水の速さはブロックの方が速いためであると考えられる。また、ペレットの方が、流れが複雑となるためにエロージョンを抑制する作用があるものと考えられる。さらに、ペレットの見かけの乾燥密度を高くしても間隙の体積が小さくなるため、間隙における流速が速くなりエロージョンを防ぐことは出来なかった。

同じ条件で、給水液が蒸留水の場合と NaCl 水溶液の場合を比較すると、NaCl 水溶液の方がエロージョンし難いという結果となった。これは、NaCl 水溶液の場合、沈殿の方がエロージョンよりも卓越しているためであると考えられる。

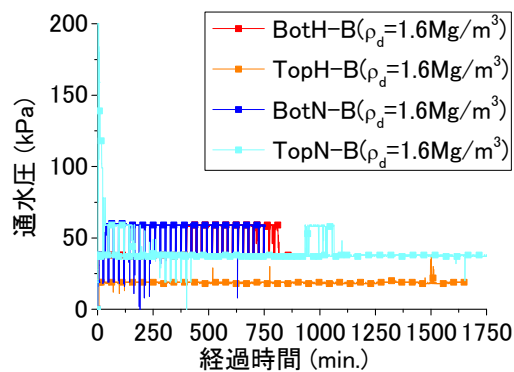
表 6.1.3-2 エロージョン状況一覧

ケース	試験前 乾燥質量(g)	試験後 乾燥質量(g)	試験前 乾燥密度(Mg/m^3)	エロージョン 質量(g)	エロージョン率 (%)	エロージョン速度 (%/hr)
BotH-B	756.8	684.4	1.593	72.310	9.555	0.66
BotN-B	758.1	721.2	1.595	36.940	4.873	0.39
BotH-1-P	524.9	496.8	1.105	28.050	5.344	0.38
BotH-2-P	712.7	644.3	1.500	68.449	9.603	0.42
BotH-3-P	746.0	703.1	1.570	42.910	5.752	0.30
BotN-P	525.6	521.5	1.106	4.060	0.773	0.21
TopH-B	759.2	727.9	1.598	31.360	4.131	0.15
TopN-B	759.1	740.6	1.598	18.480	2.435	0.04
TopH-P	525.3	518.2	1.106	7.120	1.355	0.03
TopN-P	526.2	524.8	1.107	1.440	0.274	0.03

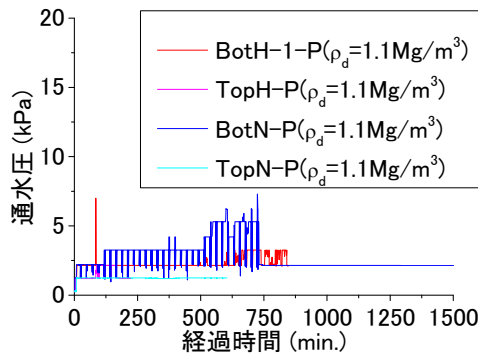
12) パイピングとエロージョン試験中の通水圧の発生状況

図 6.1.3-16 にパイピングとエロージョン試験中の通水圧の発生状況を示す。図から、通水速度が 0.1L/min.一定であるため、ブロック、ペレットに関わらず、初期の見かけの乾燥密度が大きいもの程（間隙体積が小さいもの程）通水圧が大きいことが分かる。

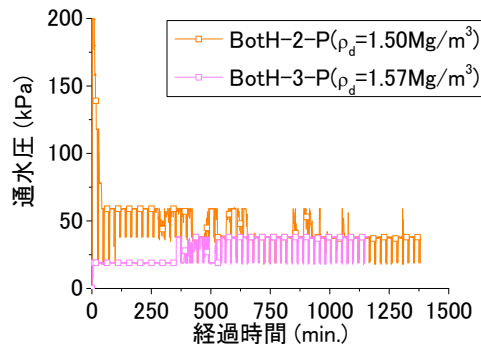
また、どのケースも通水開始から通水圧が大きく変化していないため、一貫して水みちがシールされていないことが分かる。BotH-3-P のケースにおいて、流速を 0.001L/min.まで低下させたが、通水圧が低下しておらず、ほぼ一定であった。これは、流速を低下させた分だけエロージョンよりも膨潤が卓越し、水みちが細くなったため、通水圧が低下せず、一定となったものと考えられる。



(a) ブロックケース



(b) 大粒径ペレットケース



(c) 大粒径・小粒径混合ペレットケース

図 6.1.3-16 パイピングとエロージョン試験中の通水圧の発生状況

6.1.4 パイピング、エロージョン、破過現象の詳細検討

(1) 概要

緩衝材表面近傍の止水性能評価のために、ブロック定置工法とペレット充填工法を取り挙げてブレイクスルー、パイピング、エロージョンなどの現象について実験により検討した。その結果、全てのケースでパイピングとエロージョン現象を観察できた。この試験では、原則として流速を 0.1L/min.一定条件で行ったため、図 6.1.4-1 に示すように膨潤が生じて間隙体積が小さくなると、間隙における流速は速くなる。間隙における流速が速くなると、ブロックやペレットの表面の膨潤したベントナイトは流出（エロージョン）する。エロージョンが発生すると間隙は拡大するため流速が遅くなり、ベントナイトのエロージョンが収まる。このことから、パイピングが発生するかどうかは、パイピング内の水圧と緩衝材の膨潤圧との大ききさで決定されるものと考えられる。

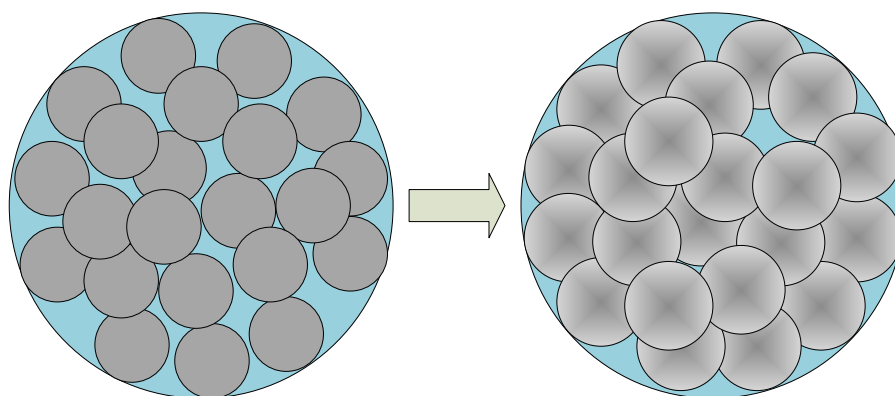


図 6.1.4-1 膨潤による間隙体積の減少

さらに、パイピング現象によって生じた水みちは、発生当初は多数存在しても、時間が経過すると共に数本に収斂し、最終的には 1 つの大きな水みちになる傾向が観察された。これは、ランダムに存在する初期間隙やベントナイトの不均一な膨潤により、水みちごとに流れ易さが異なるものと考えられる。通水液は流れ易い方に多く流れるため、流れ易い水みちはエロージョンが卓越し、ますます流れ易くなり、流れ難い水みちは流量が低下するため膨潤が卓越し、ますます流れ難くなる。このようなメカニズムにより水みちが数本に収斂していくものと考えられる。

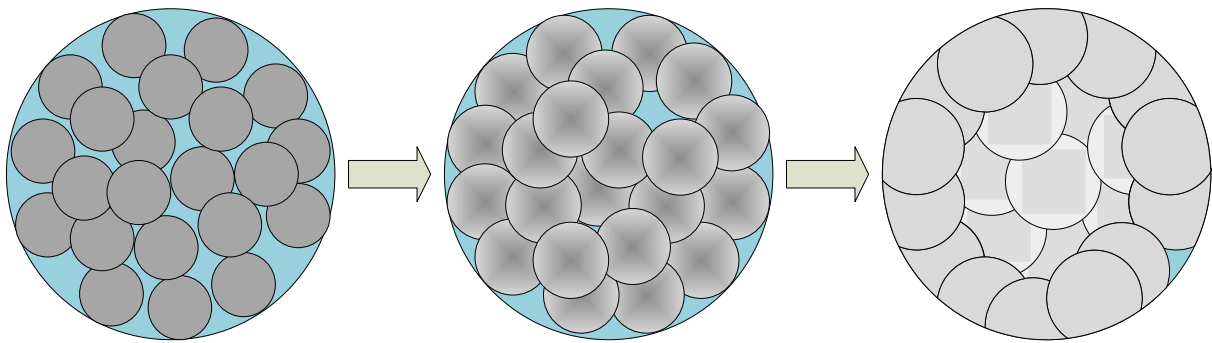


図 6.1.4-2 水みちの収斂のイメージ図

仮に、この水みちの収斂現象が実際の処分孔でも生じるとすると、SKB 社や POSIVA 社で設定している処分孔の仕様である処分孔当たりの湧水が 0.1L/min.以下という規定は、最終的には 1 つの水みちの流速となる。すなわち、緩衝材に 0.1L/min.の流速の水みちが生じてもシール出来なければならなくなる。

この水みちが数本に収斂する現象は、緩衝材の仕様に大きく影響するため、確認する必要がある。その試験方法として、図 6.1.4-3 に示すように、ブロック状の緩衝材に人為的に水みちを作り、水みちが最終的に 1 つに収斂するかどうかを確認するという方法が考えられる。

また、本試験では、原則として流速を 0.1L/min.一定条件で行ったが、BH-3-P で流速を 0.001L/min.まで低下させると水みちが非常に小さくなった。ただし、通水圧が大きくなっていないことから、シールされていないことが確認できた。ただし、試験初期から 0.001L/min.の流速で試験を行った場合にも同様に水みちが生成されるのかどうかは不明である。そこで、試験初期から 0.001L/min.など、流速をパラメータとした試験を行い、エロージョンよりも膨潤が卓越する流速を取得することも重要である。

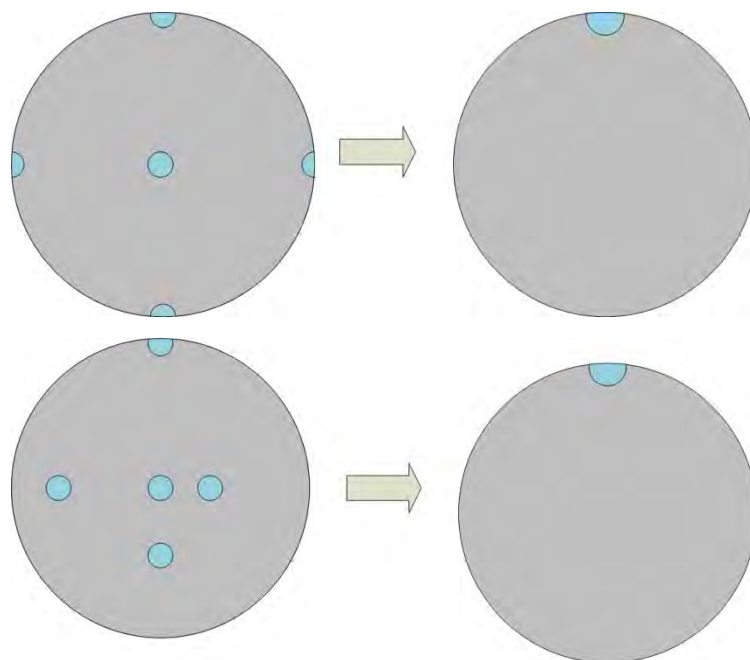


図 6.1.4-3 水みちの収斂現象の確認試験イメージ

(2) 試験ケースと供試体作成方法

図 6.1.4-4 に水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージを示す。また、表 6.1.4-1 には各試験の試験条件をまとめて示している。

まず、Case1、Case2 では、事前に人為的に供試体に作製した水みちが通水過程で 1 本に収斂していく状況を調べるものである。Case1 と Case2 では人為的な水みちの配置が異なり、水みちが収斂する場所が人為的な水みちの配置に関係なく、膨潤性材料と非膨潤性材料（本試験の場合はアクリルセル）の界面に収斂することを確認することが目的である。

Case3～Case6 では、大小のペレットを充填したケースで流速一定で通水試験を行った場合にどの流速で水みちがシールされるかを調べるものである。最大で昨年度の試験と同様に 0.1L/min であり、最小で 0.001L/min である。なお、平成 23 年度の試験では初期流速は全て 0.1L/min であり、水みち形成を確認してから流速を低下させたことに注意が必要である。さらに、試験計画段階では 0.1cc/min でも通水試験を実施する計画であったが、流速が 0.001L/min の場合に水みちのシールが確認されたため、5cc/min に変更した。

Case7、Case8 はブロックとペレット充填部の界面が水みちとならず、膨潤性材料と非膨潤性材料（本試験の場合はアクリルセル）の界面に水みちが収斂することを確認する目的で実施した。

使用する液種は、蒸留水と NaCl 水溶液の 2 種類である。NaCl 水溶液のモル濃度は 0.5M であり、水みちの形成にイオン強度が及ぼす影響を検討できる。

全てのケースで吸水方法は平成 23 年度と同様にフローポンプをリレーさせて常に一定流量が供試体底面から上面に向かって流れるようにした。また、試験時間は 1 日とした。ただし、Case3 では 0.1L/min でエロージョン質量と時間の関係を取得するため、長時間通水を行った。

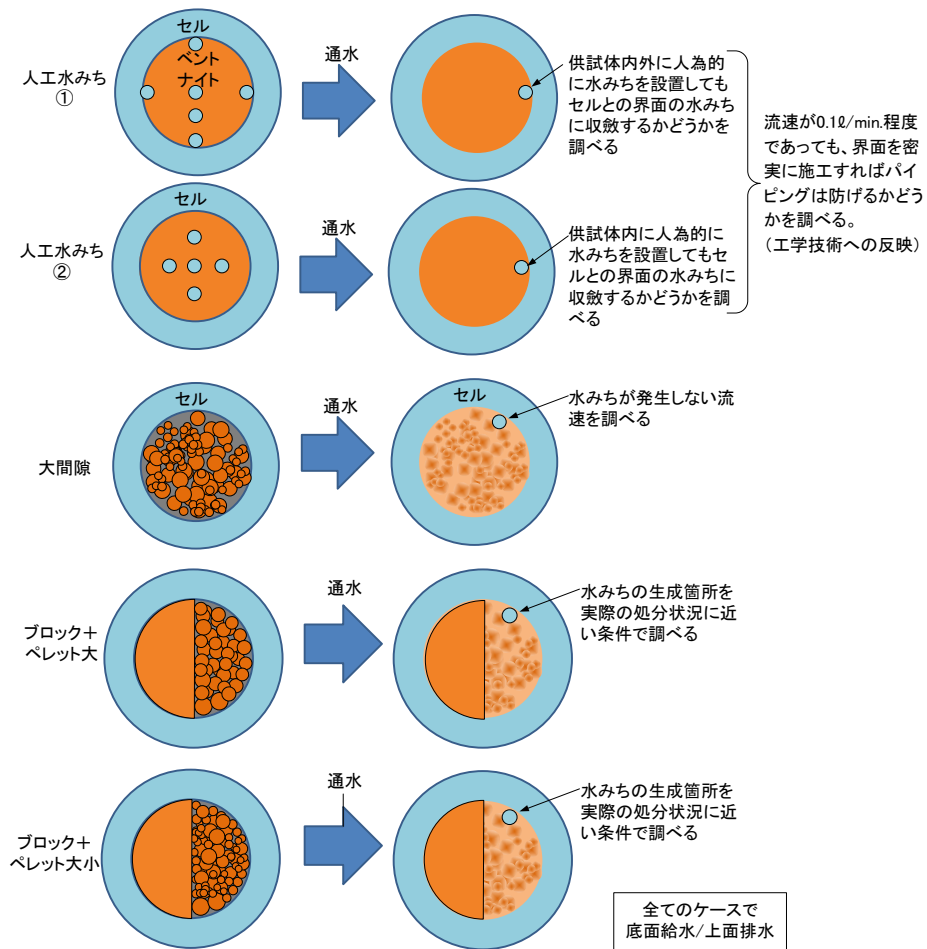


図 6.1.4-4 水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージ

表 6.1.4-1 水みちの収斂現象の確認試験全ケースの試験条件

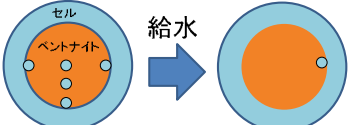
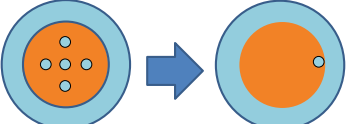
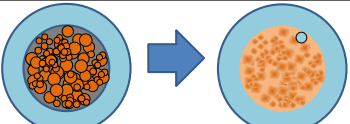
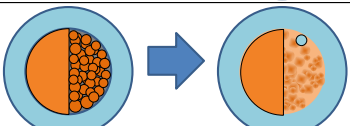
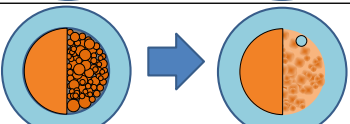
Case	試験イメージ	流速 (cc/min.)	液種	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	最大通水圧 (MPa)
1		100	H2O NaCl水溶液 (0.5M)	1.594	3
2				1.595	
3~6		Case3: 100 Case4: 10 Case5: 1 Case6: 0.1⇒5 (1ccで閉塞したため)		1.5程度(計画値) 1.471 1.490 1.465	
7		100		ペレット部:1.074 ブロック部:1.601 平均:1.348	
8				ペレット部:1.531 ブロック部:1.595 平均:1.563	

図 6.1.4-5 に人為的な水みちを有する供試体作製状況を示す。写真に示すように予め水みちを配置する場所にピンを配置して圧縮成型すれば水みちが出来るように圧縮供試体を作製した。



図 6.1.4-5 人為的な水みちを有する供試体作製状況

(3) 試験結果 (蒸留水のケース)

1) Case1

図 6.1.4-6 に水みちの形成状況を示す。内部を含めて複数があった人工的な水みちは通水初期段階でセルとの界面に設置した 1 本の水みちが大きくなり、最終的に 1 本に収斂した。

図 6.1.4-7 には供試体の解体状況を示している。写真から、大きな水みちが側面に大きく形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。また、大きな水みちにはケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが膨潤してもシールを妨げる可能性がある。

図 6.1.4-8 に Case1 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。

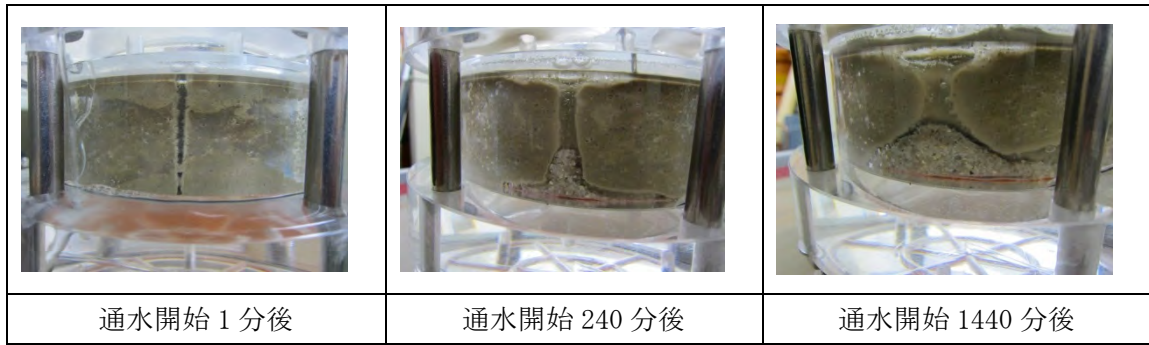


図 6.1.4-6 水みちの形成状況 (Case1)

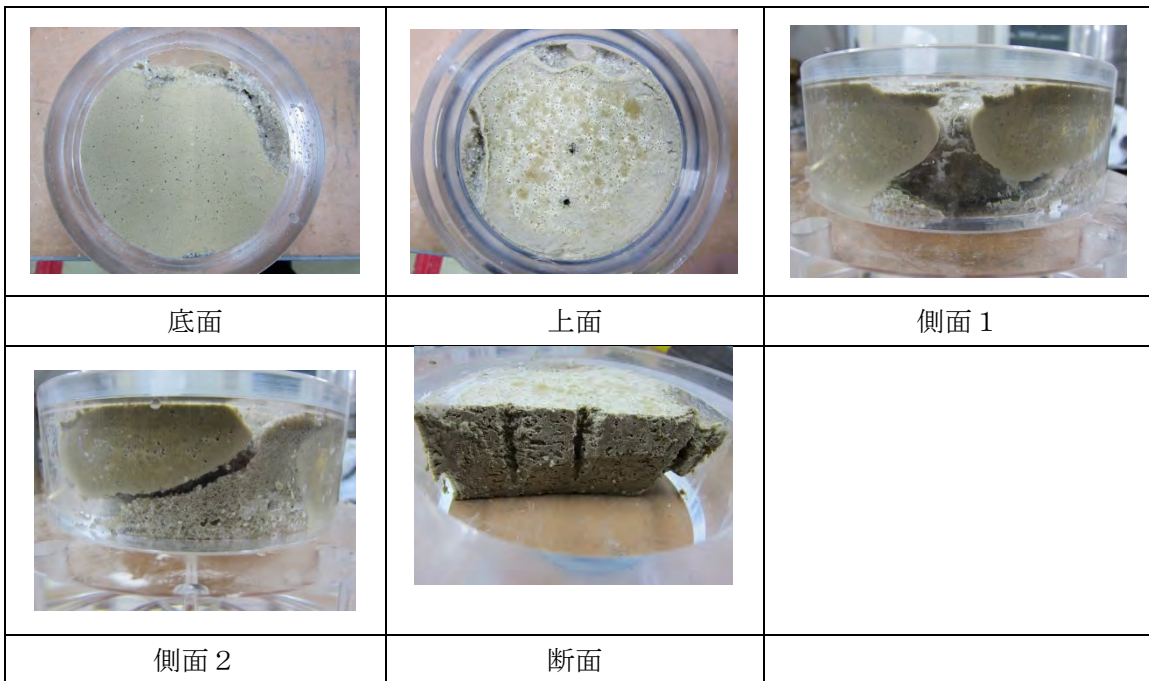


図 6.1.4-7 解体状況 (Case1)

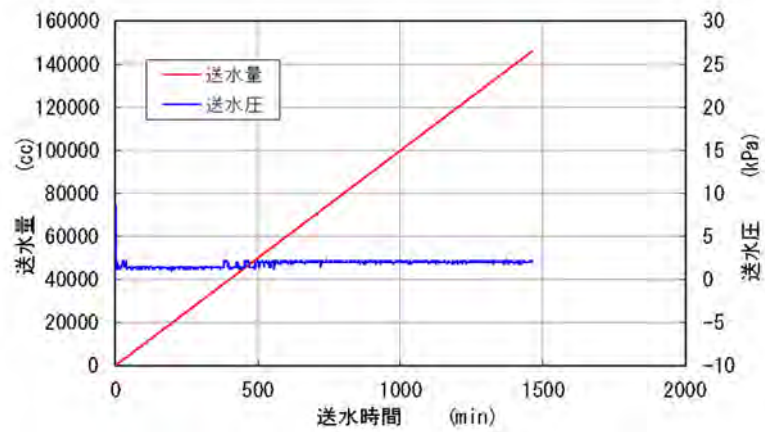


図 6.1.4-8 Case1 の通水圧と流量の関係

2) Case2

Case2 の供試体の作製方法も Case1 と同様である。すなわち、ピンの配置を Case1 から変えて、全ての人為的な水みちが供試体内部にあるように配置して圧縮成型することによって圧縮供試体を作製した。

図 6.1.4-9 に水みちの形成状況を示す。供試体内部にしか人工的な水みちを配置しなかったが通水初期段階でセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-10 には供試体の解体状況を示している。写真から、大きな水みちが側面に大きく形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。また、大きな水みちにはケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが膨潤してもシールを妨げる可能性がある。Case1 と Case2 からパイピングは緩衝材内部には形成されずに、緩衝材と非膨潤性材料の界面に形成されることが分かった。

図 6.1.4-11 に Case2 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。

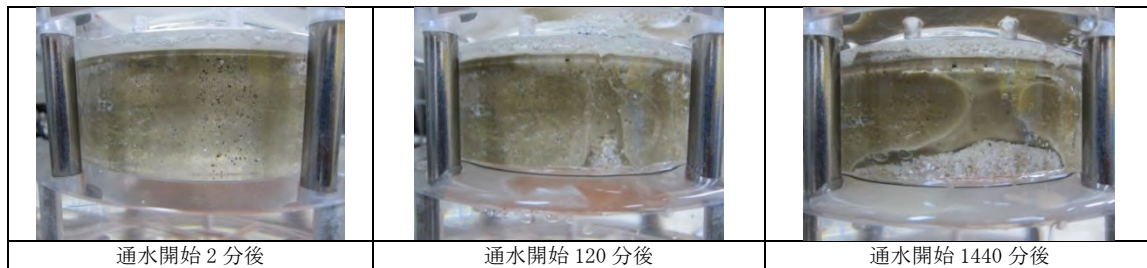


図 6.1.4-9 水みちの形成状況 (Case2)

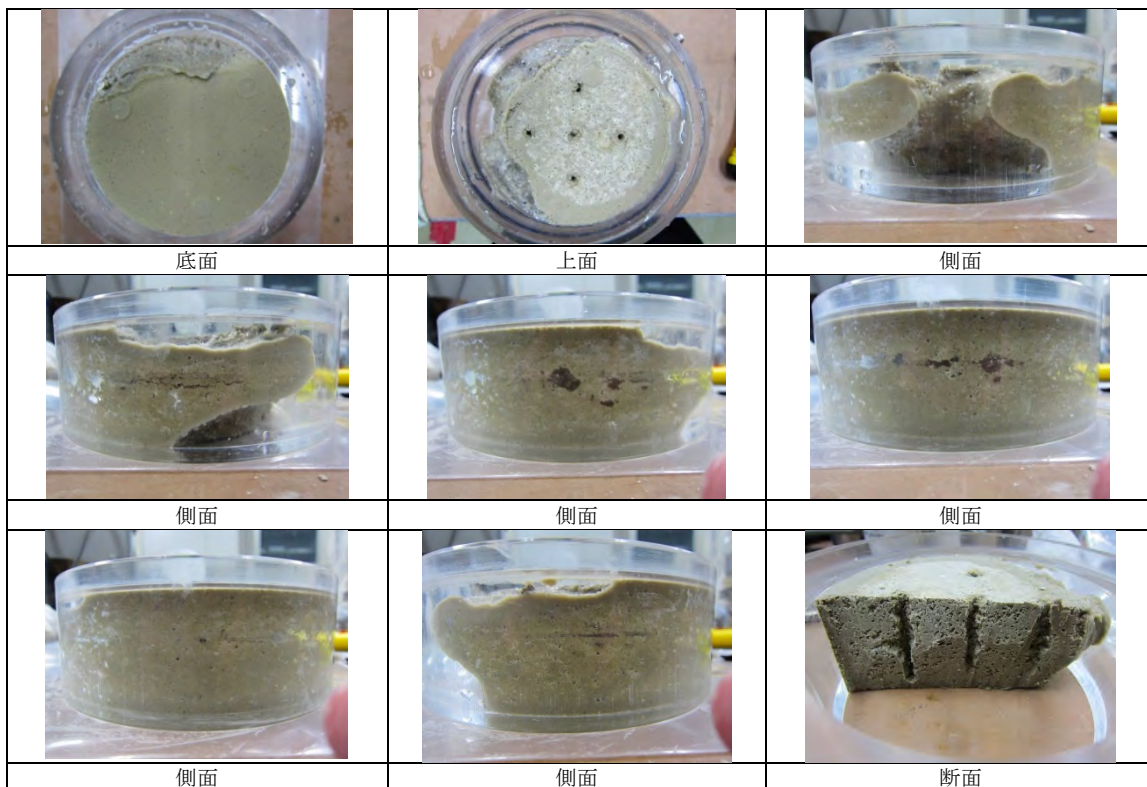


図 6.1.4-10 解体状況 (Case2)

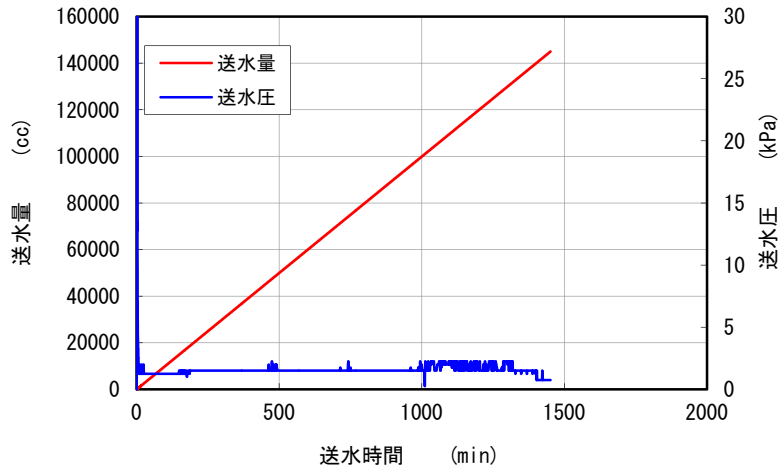


図 6.1.4-11 Case2 の通水圧と流量の関係

3) Case3

Case3 の供試体の作製方法は昨年度の大小ペレット充填ケースと同様であるが、通水速度は一定であり、全ての材料が流出するまで試験を実施した。

図 6.1.4-9 に水みちの形成状況を示す。通水初期段階で供試体の大間隙を連ねた水みちが、供試体とセルとの界面に複数形成され、そのうちの 1 本の水みち形成に収斂し、次第に成長した。写真から、大きな水みちが周囲のベントナイトを削りながら、その流路を変化させている状況が分かる。これまでの観察から、供試体表面に水みちが形成されていても内部は乾燥状態のままであるため、水みちが形成された後に、水が供試体内部に浸潤していく過程で生じる膨潤によって、水みちの形状が変化するものと推察された。定点観察から、本試験条件の場合、全てのベントナイトが流出するのには 27 日程度を要することが分かった。

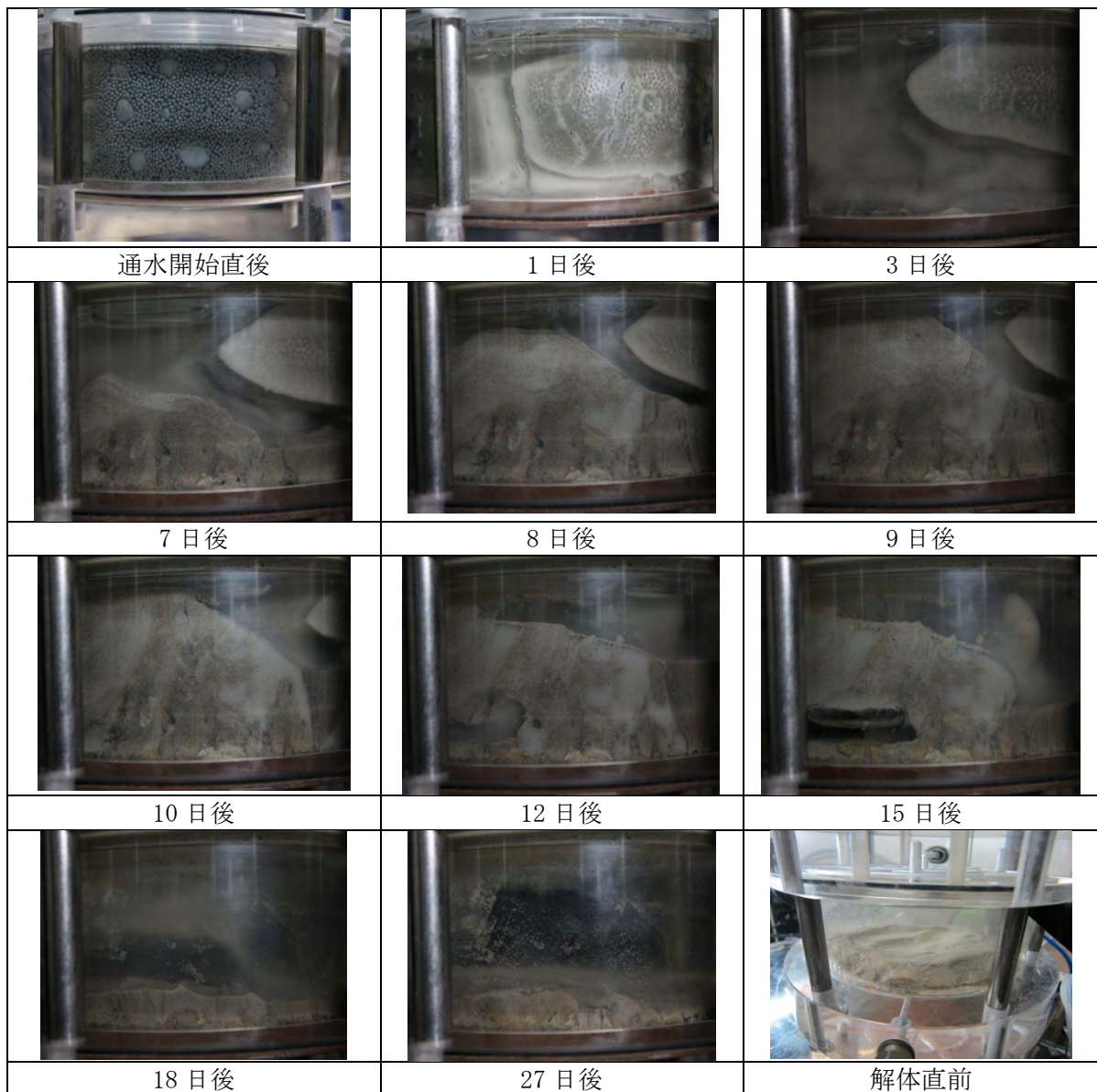


図 6.1.4-12 水みちの形成状況 (Case3)

図 6.1.4-13 には、通水圧と流量の関係を示す。図から、100cc/min の一定流量で給水されても通水圧が増加することなく、最大でも 6kPa 程度であることが分かる。

図 6.1.4-14 には、総流量とエロージョン質量の関係を示している。図には、SKB 社が MX80 のペレットを筒状のセルに充填して取得した、総流量とエロージョン質量の関係も併せて示している。図から、MX80 とクニゲル V1 の総流量とエロージョン質量の関係は、どちらもほぼ同じ勾配であるが、クニゲル V1 に比べ、MX80 の方がエロージョンし易い材料であることが分かる。これはクニゲル V1 に比べ MX80 の方がモンモリロナイト含有率が多いためであると考えられる。

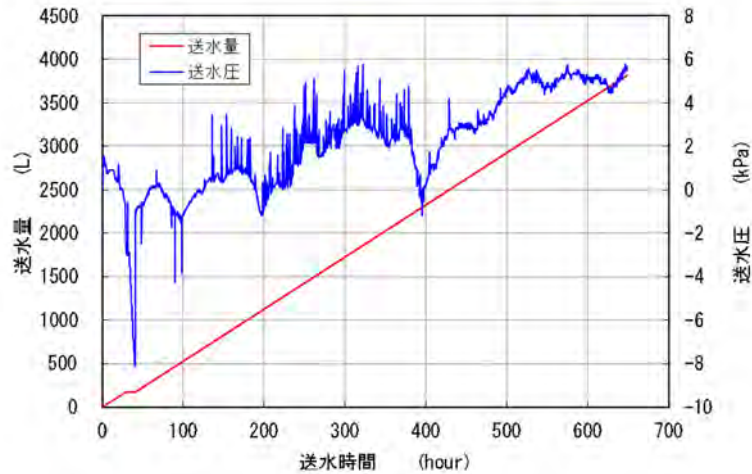


図 6.1.4-13 Case3 の通水圧と流量の関係

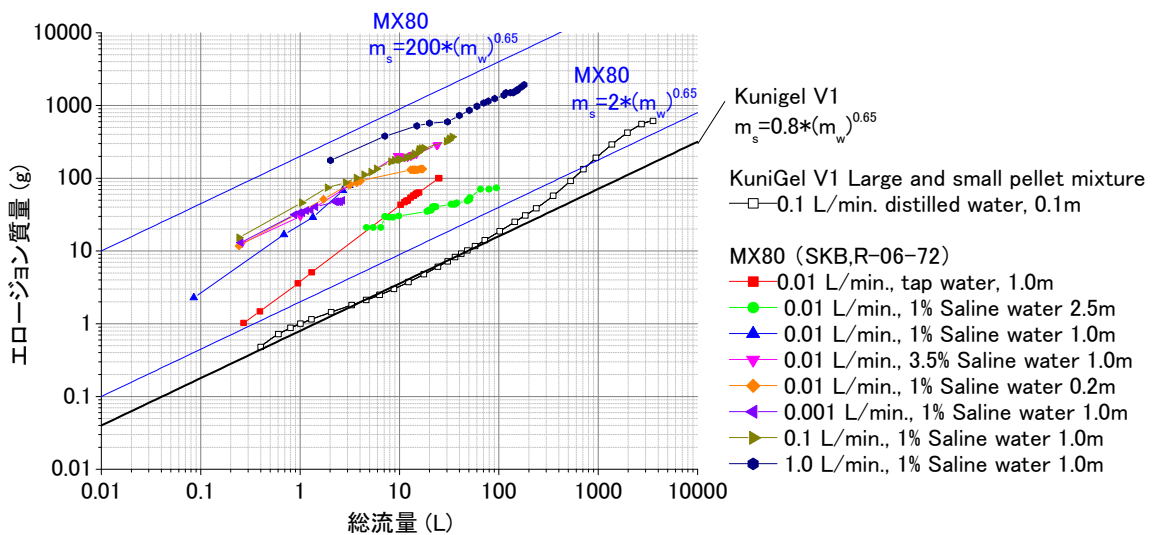


図 6.1.4-14 総流量とエロージョン質量の関係

4) Case4

Case4 の供試体の作製方法は昨年度の大小ペレット充填ケースと同様である。流速は 0.01L/min で一定である。

図 6.1.4-15 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.01L/min 一定で通水を行ったが、通水初期段階でセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-16 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水みちが形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。そのため、側部には水みちが形成されているが、供試体内部には乾燥領域が存在している。

図 6.1.4-17 に Case4 の通水圧と流量の関係を示す。側面に水みちが形成されたため、0.01L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。

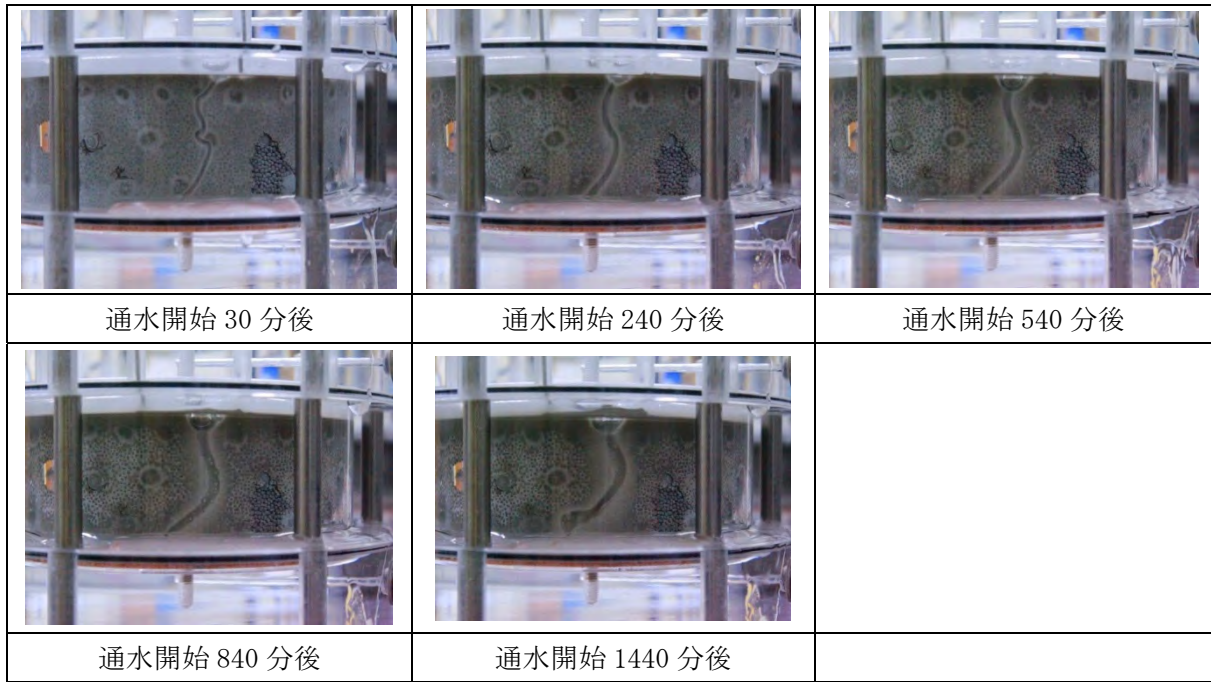


図 6.1.4-15 水みちの形成状況 (Case4)

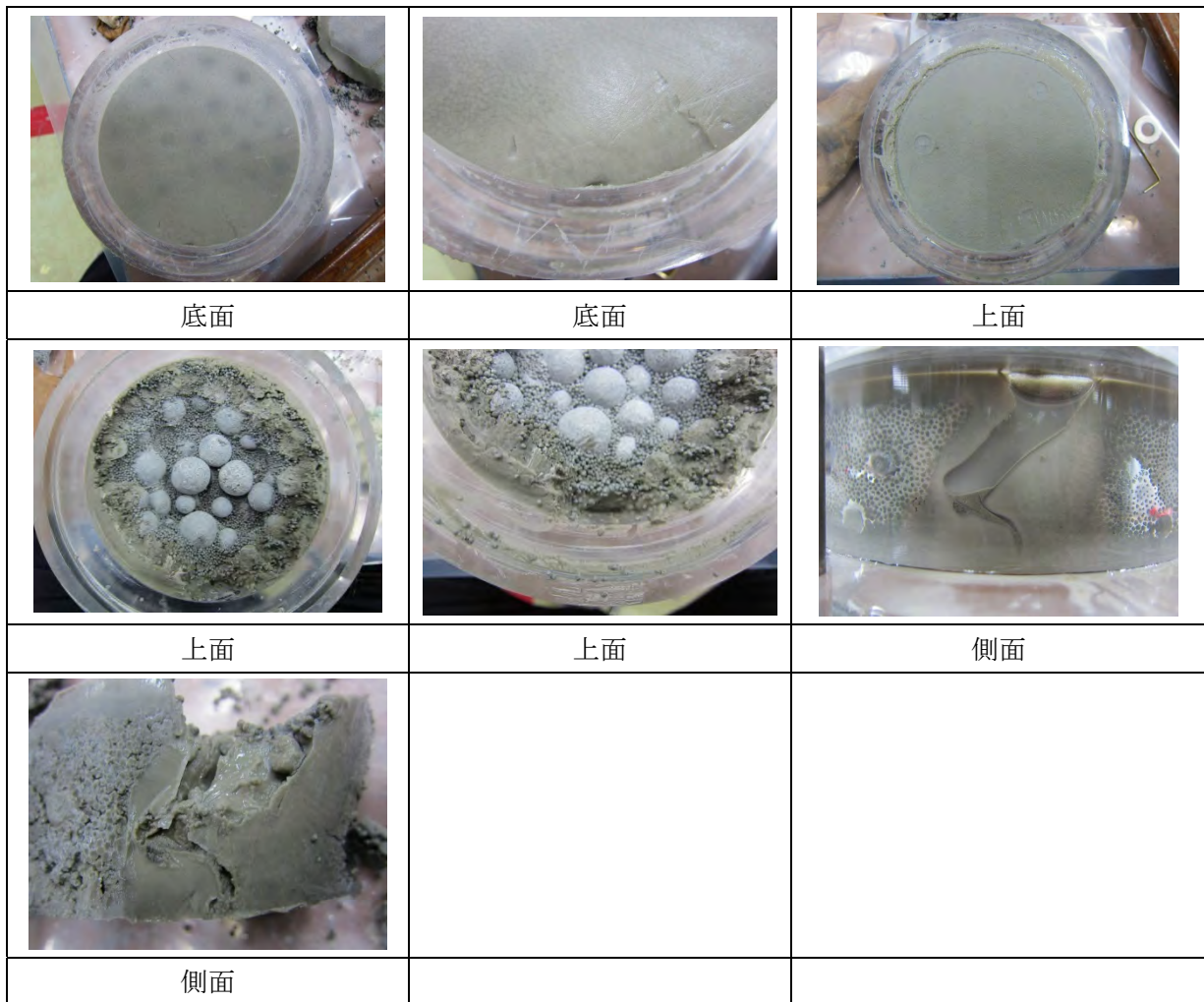


図 6.1.4-16 解体状況 (Case4)

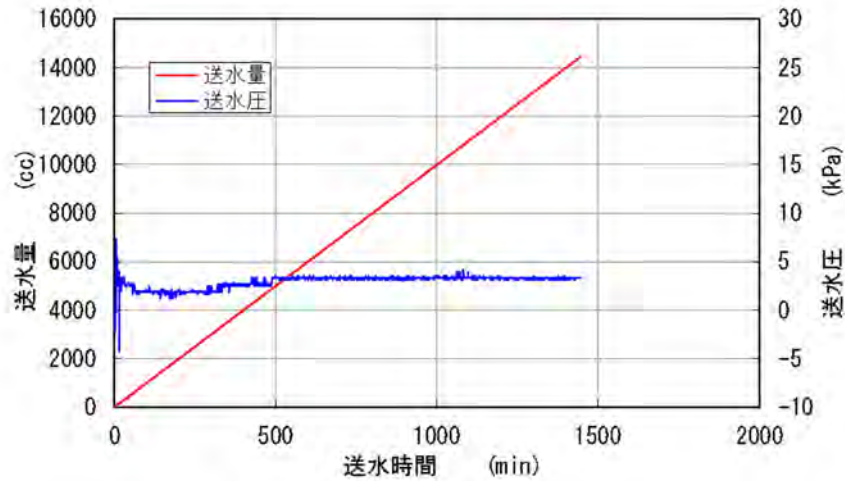


図 6.1.4-17 Case4 の通水圧と流量の関係

5) Case5

Case5 の供試体の作製方法は昨年度の大小ペレット充填ケースと同様である。流速は 0.001L/min で一定である。

図 6.1.4-18 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.001L/min 一定で通水を行った結果、セルとの界面に水みち形成は観察されず、次第に給水側で均一に膨潤が生じ、最終的に止水された。図 6.1.4-19 には供試体の解体状況を示している。写真から、供試体内部にはまだ乾燥領域があるものの、給水側である底部領域はしっかりと膨潤して、ペレットの大間隙をシールしていることが分かる。

図 6.1.4-20 に Case5 の通水圧と流量の関係を示す。水みちが形成されなかったため、0.001L/min で給水した場合の通水圧は最大で 3MPa 弱まで上昇した。

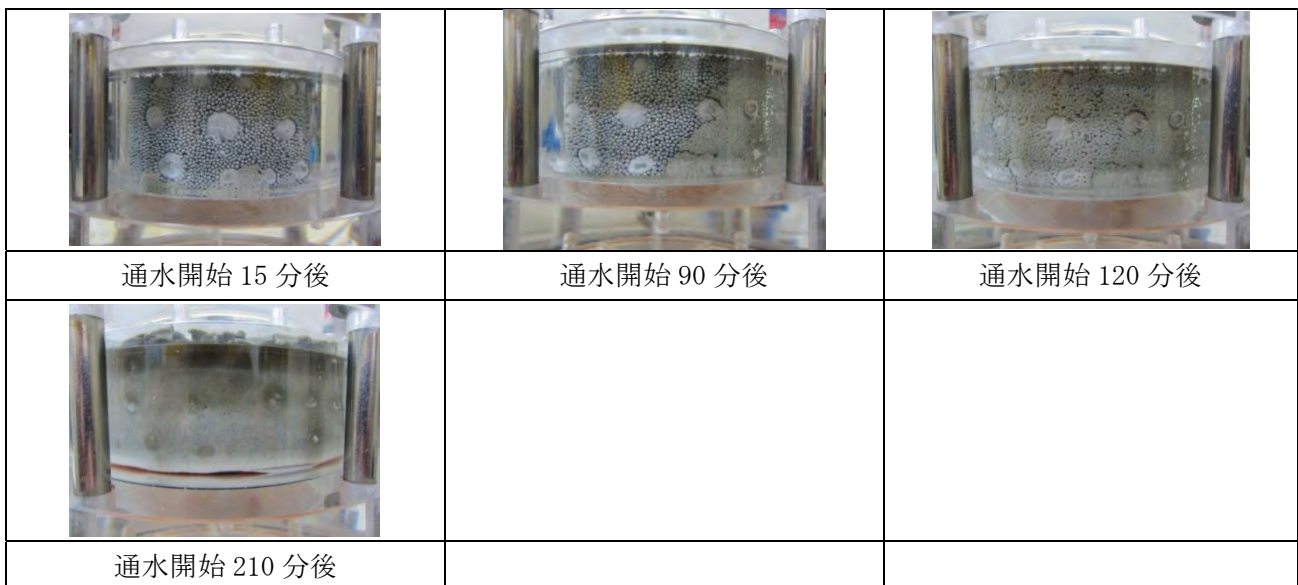


図 6.1.4-18 水みちの形成状況 (Case5)

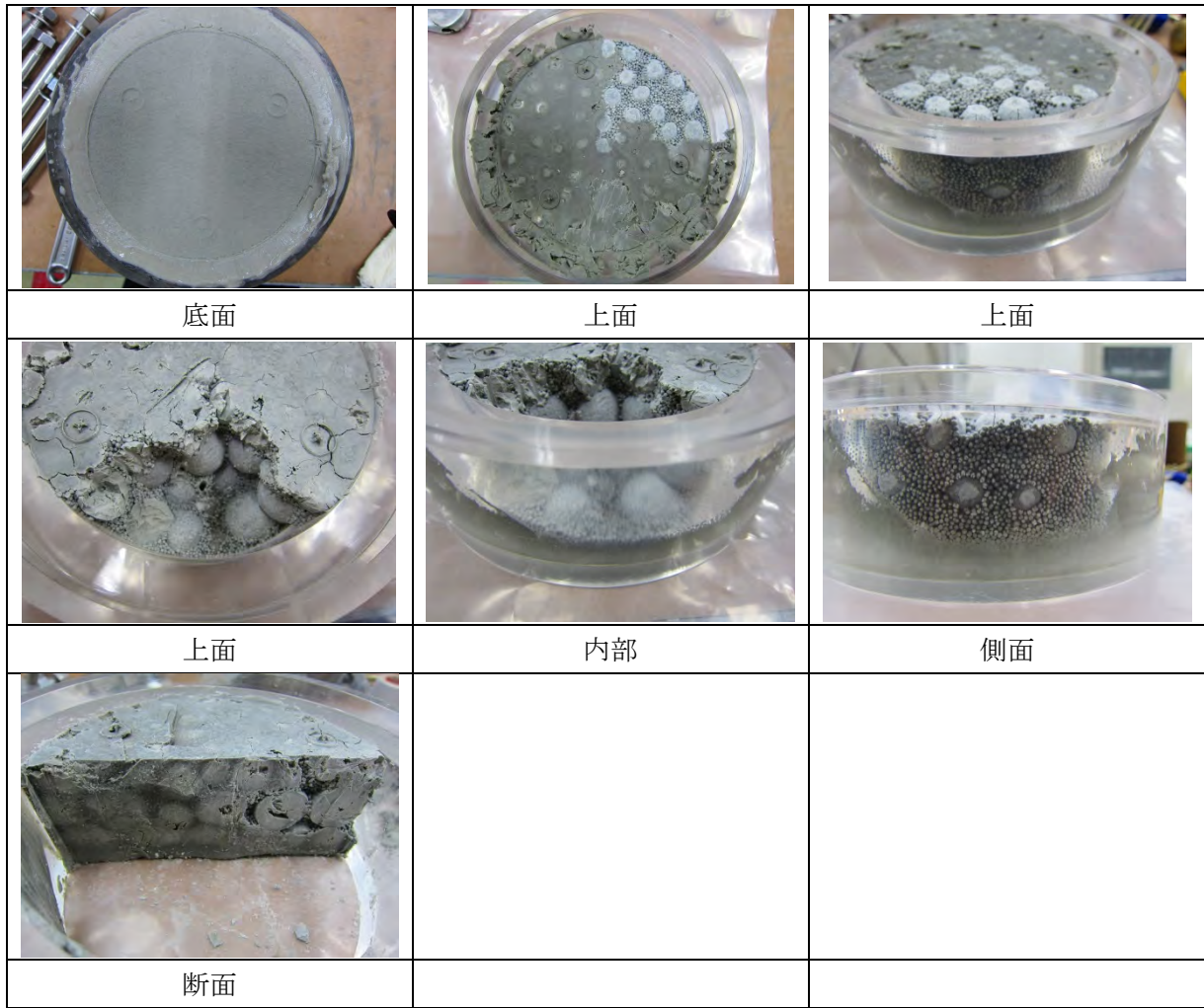


図 6.1.4-19 解体状況 (Case5)

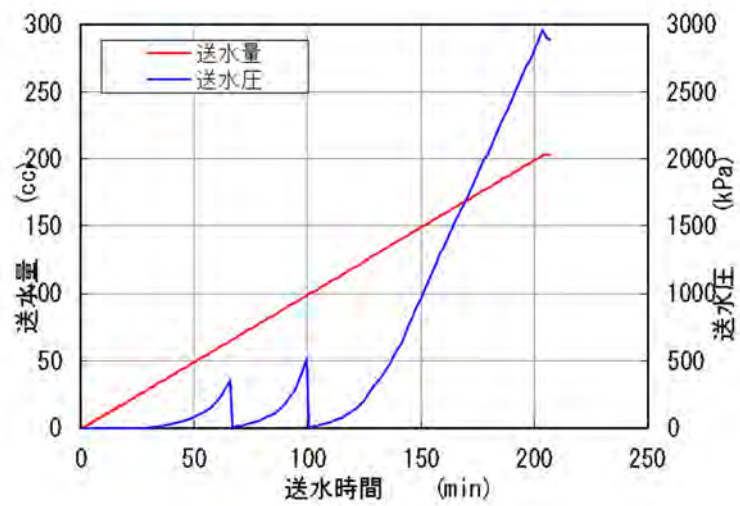


図 6.1.4-20 Case5 の通水圧と流量の関係

6) Case6

Case6 の供試体の作製方法は昨年度の大小ペレット充填ケースと同様である。流速は 5cc/min で一定である。当初計画では 0.1cc/min で試験を実施する予定であったが、1cc/min で水みちが形成されなかったことから、計画を変更して 5cc/min の流速で試験を実施することとした。

図 6.1.4-21 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 5cc/min 一定で通水を行ったが、通水初期段階でセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-22 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水みちが形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。そのため、側部には水みちが形成されているが、供試体内部には乾燥領域が存在している。

図 6.1.4-23 に Case6 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、5cc/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。

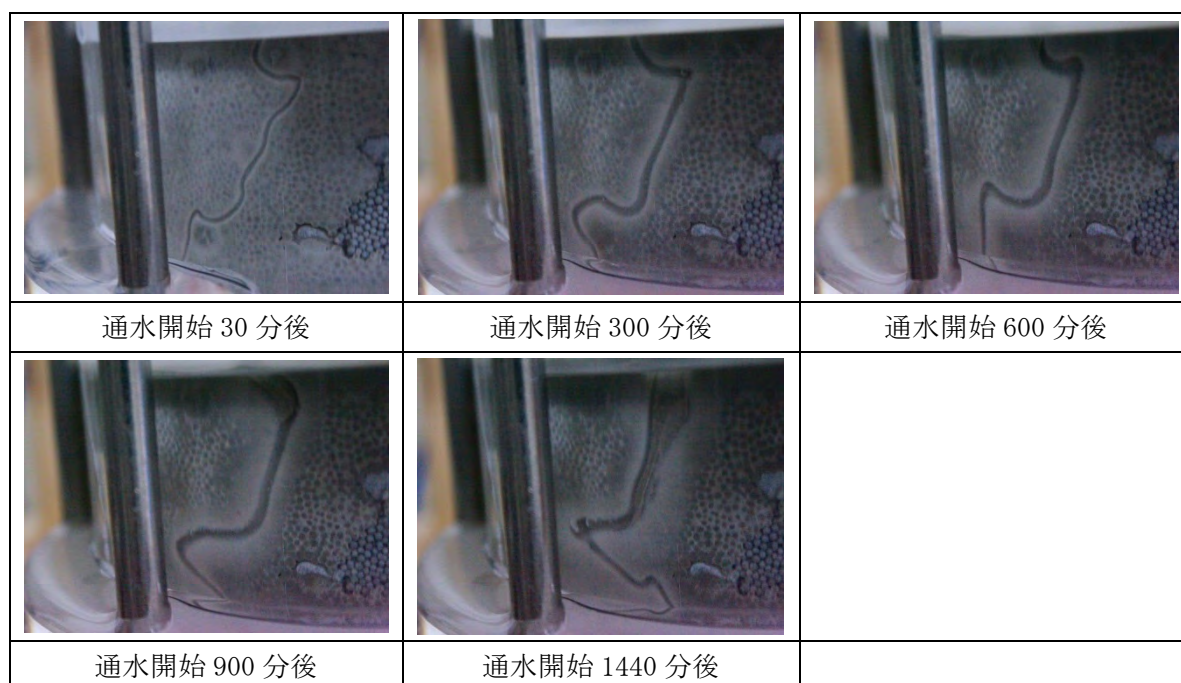


図 6.1.4-21 水みちの形成状況 (Case6)

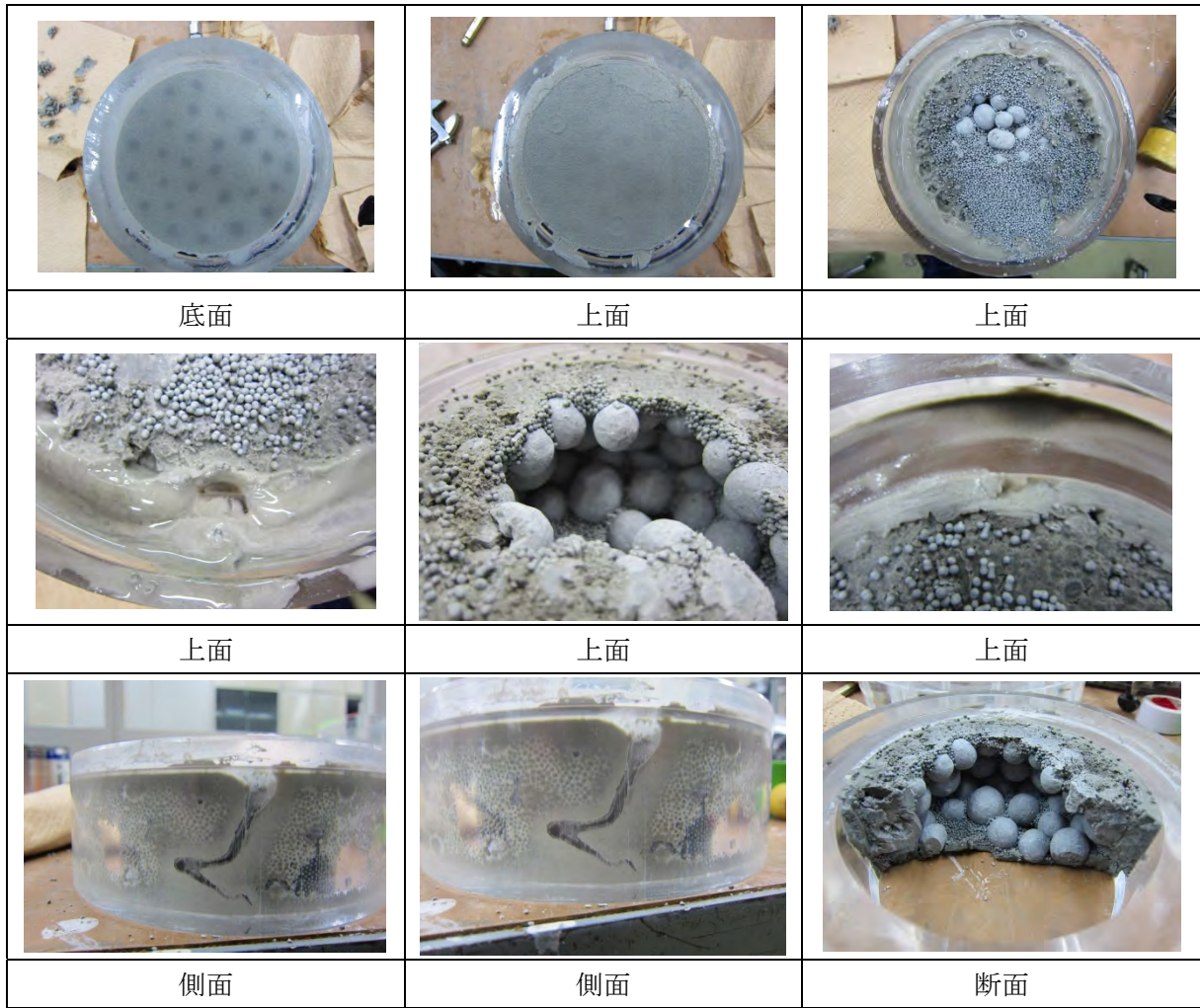


図 6.1.4-22 解体状況 (Case6)

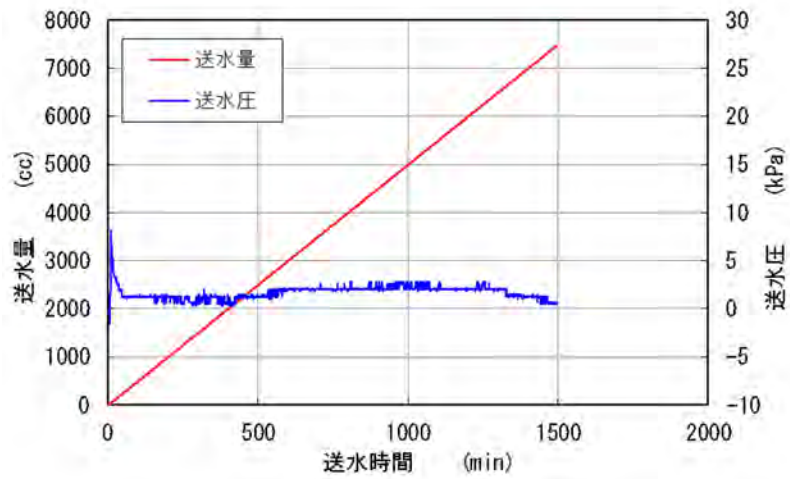


図 6.1.4-23 Case6 の通水圧と流量の関係

7) Case7

Case7 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、残りの部分を大粒径ペレットで充填して作製した。流速は 0.1L/min で一定である。

図 6.1.4-24 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.1L/min 一定で通水を行ったが、通水初期段階でペレット側のセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-25 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水みちが形成され、ブロックとペレットの界面には水みちが形成されていないことが分かる。

図 6.1.4-26 に Case7 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。

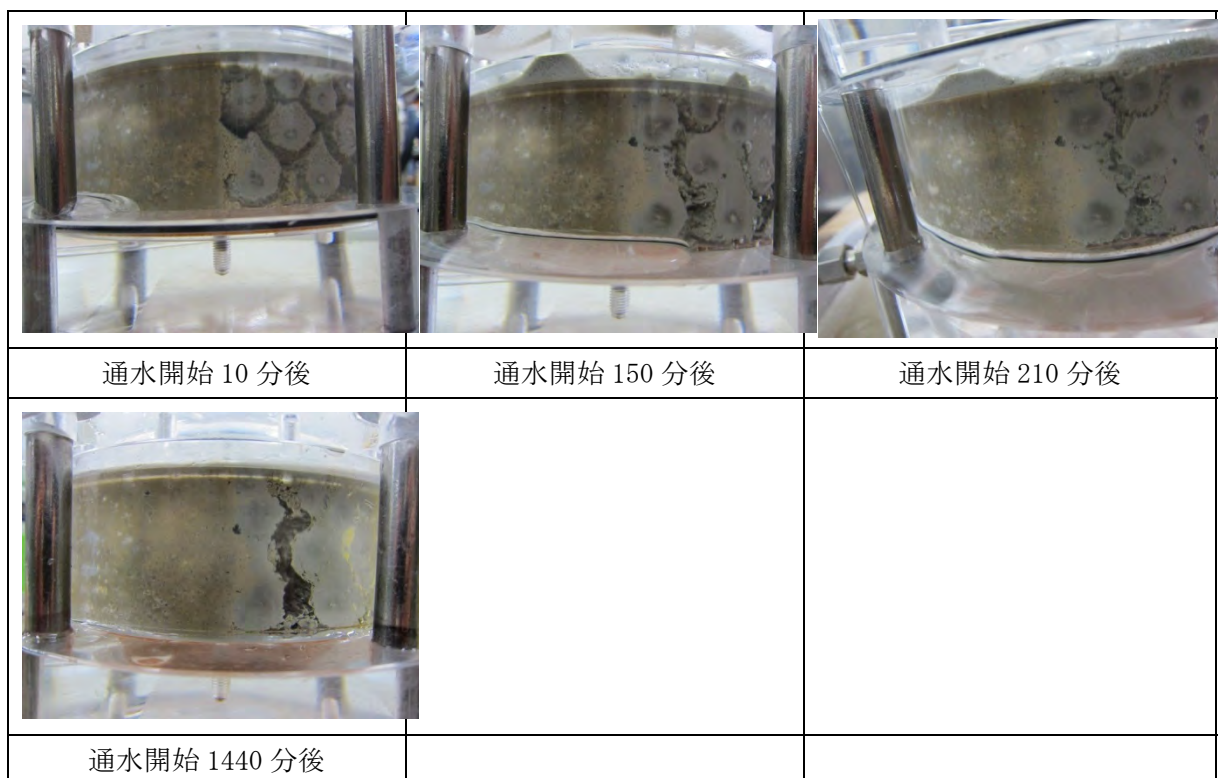


図 6.1.4-24 水みちの形成状況 (Case7)

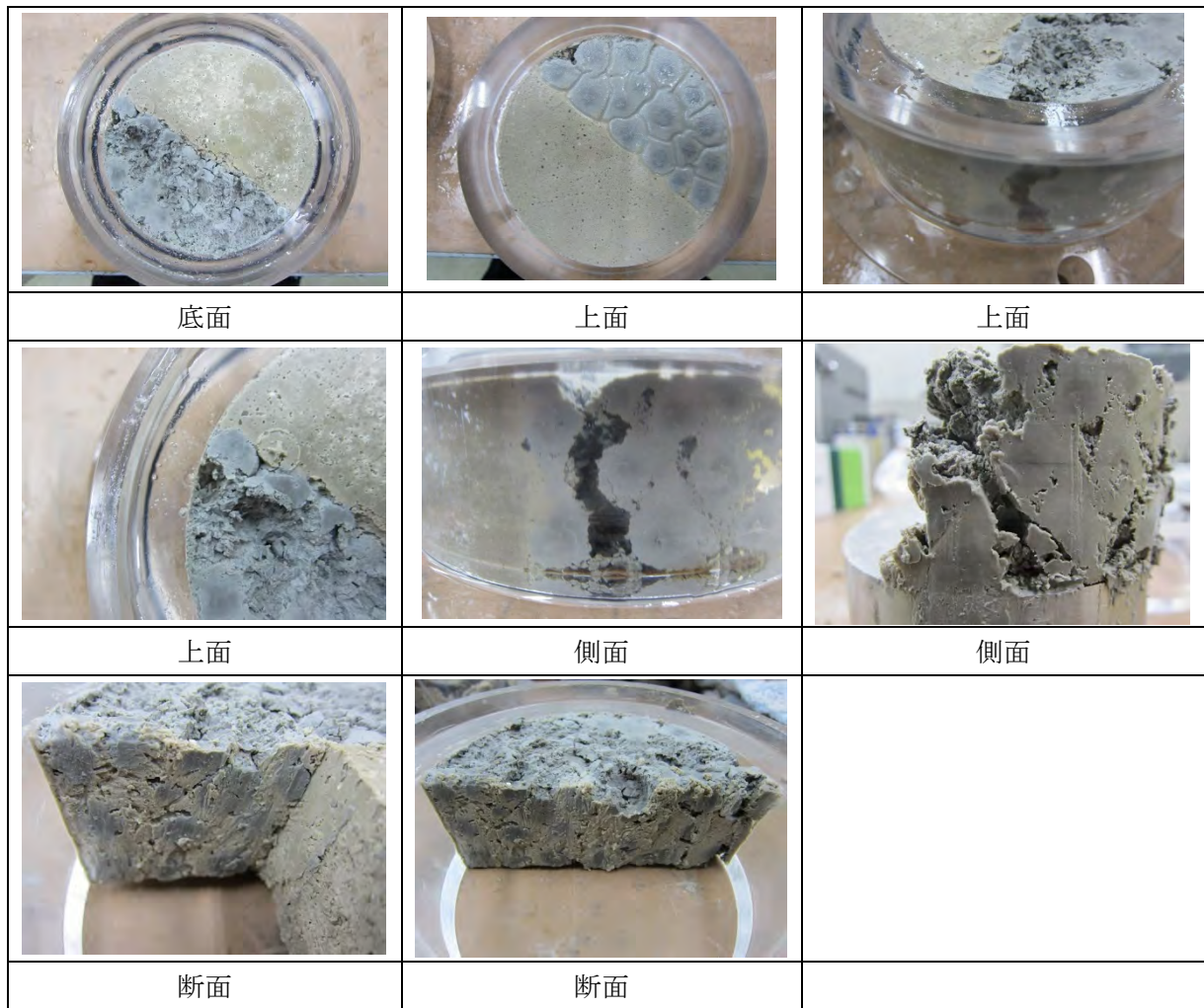


図 6.1.4-25 解体状況 (Case7)

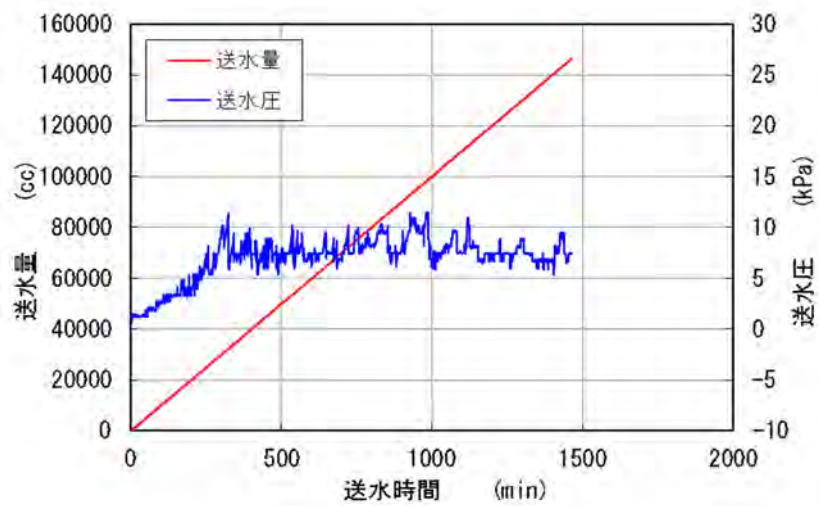


図 6.1.4-26 Case7 の通水圧と流量の関係

8) Case8

Case8 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、残りの部分を大小粒径ペレットで充填して作製した。流速は 0.1L/min で一定である。

図 6.1.4-27 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.1L/min 一定で通水を行ったが、通水初期段階でペレット側のセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-28 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水みちが形成され、ブロックとペレットの界面には水みちが形成されていないことが分かる。

図 6.1.4-26 に Case8 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。

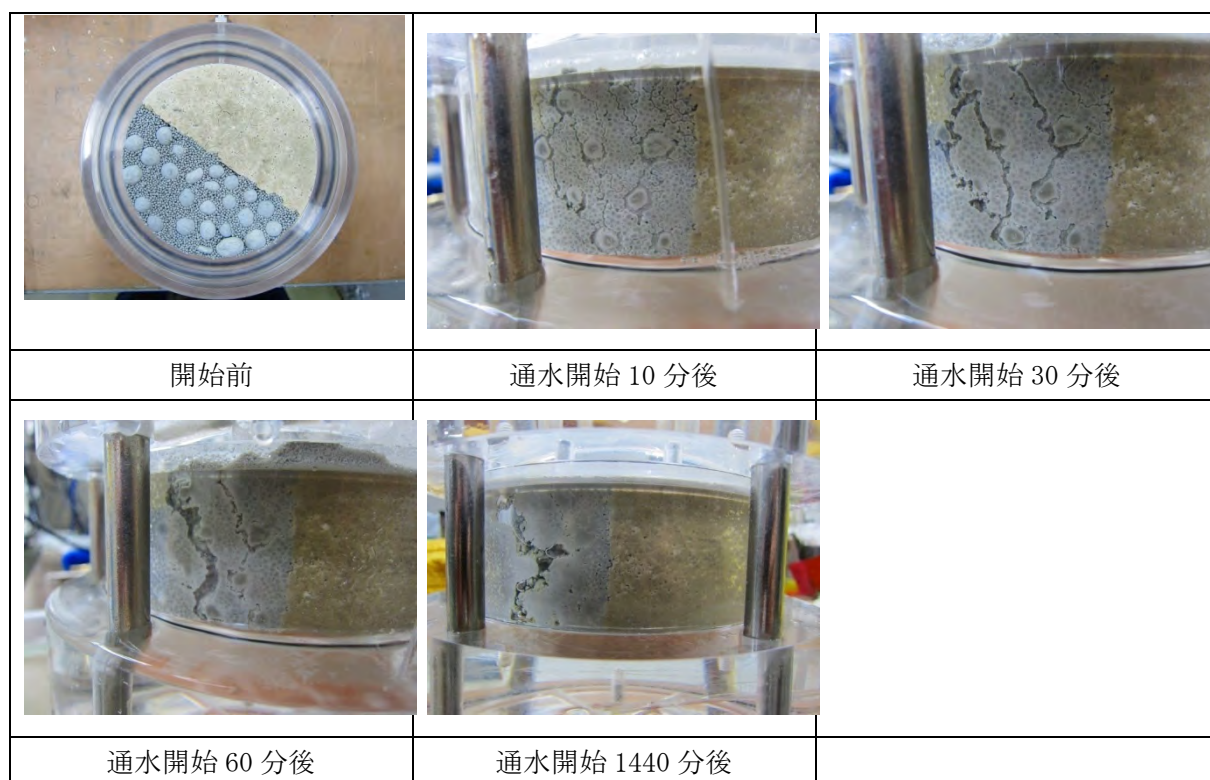


図 6.1.4-27 水みちの形成状況 (Case8)

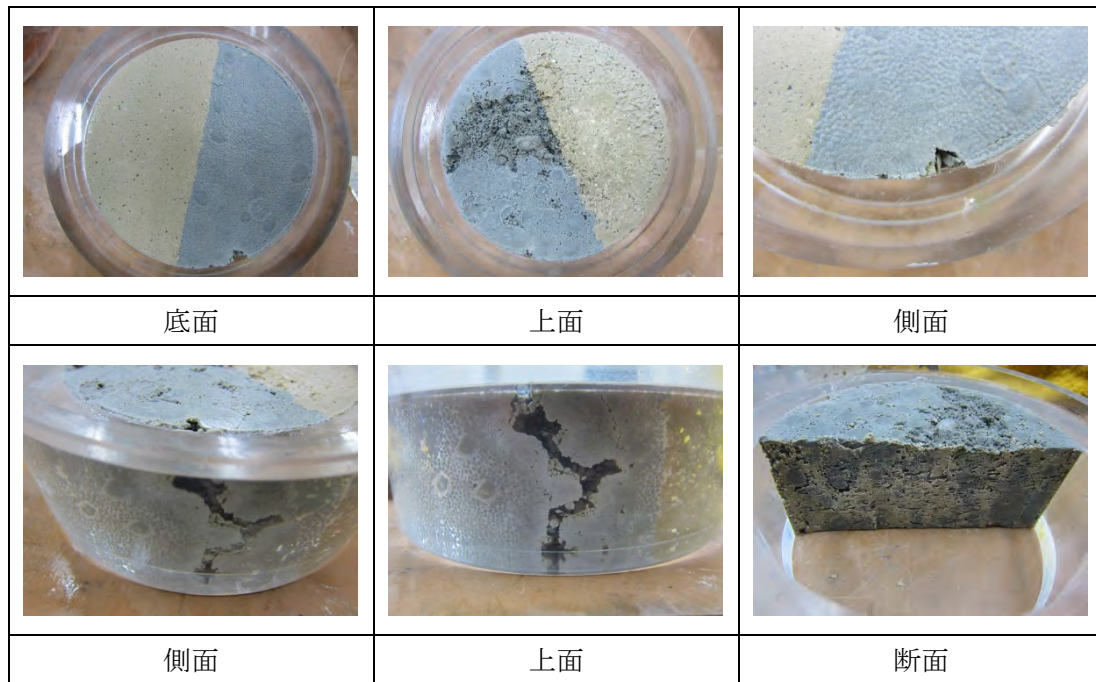


図 6.1.4-28 解体状況 (Case8)

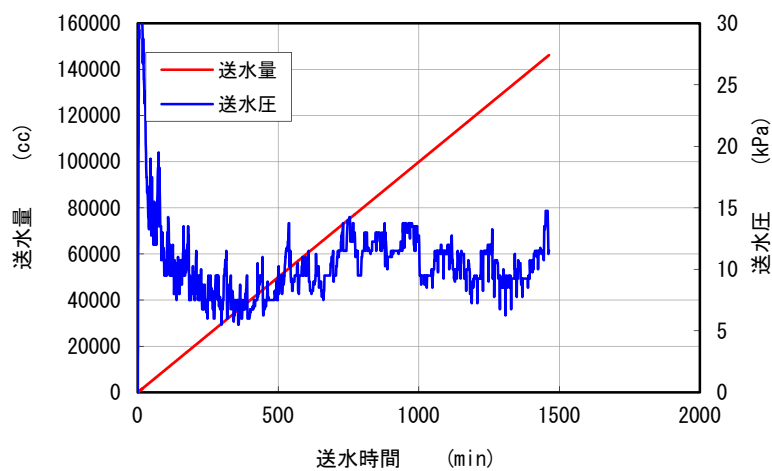


図 6.1.4-29 Case8 の通水圧と流量の関係

(4) 試験結果 (NaCl 水溶液 0.5M のケース)

1) Case1

図 6.1.4-30 に水みちの形成状況を示す。内部を含めて複数があった人工的な水みちは通水初期段階でセルとの界面に設置した 1 本の水みちが大きくなり、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-31 には供試体の解体状況を示している。写真から、比較的大きな水みちが側面に大きく形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。また、大きな水みちにはケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが膨潤してもシールを妨げる可能性がある。図 6.1.4-32 に Case1 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、0.1L/min で給水しても通水圧は 10kPa 程度しかない。これらの傾向は、前述の蒸留水の場合

合と同等であった。

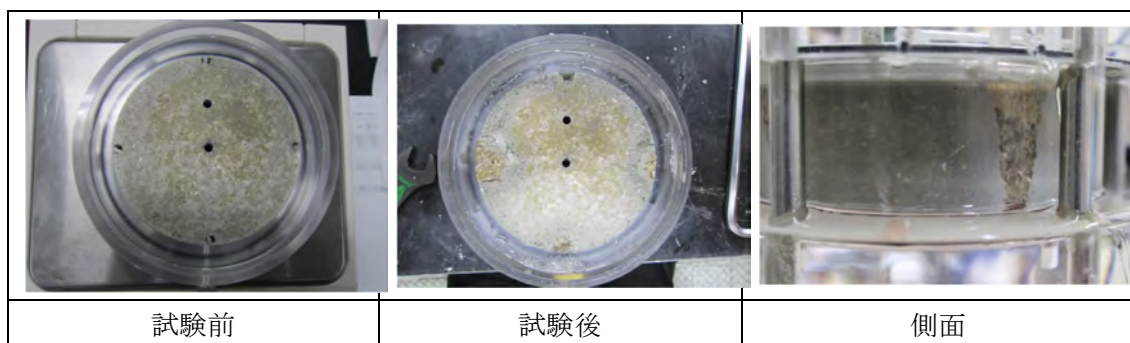


図 6.1.4-30 水みちの形成状況 (Case1)



図 6.1.4-31 解体状況 (Case1)

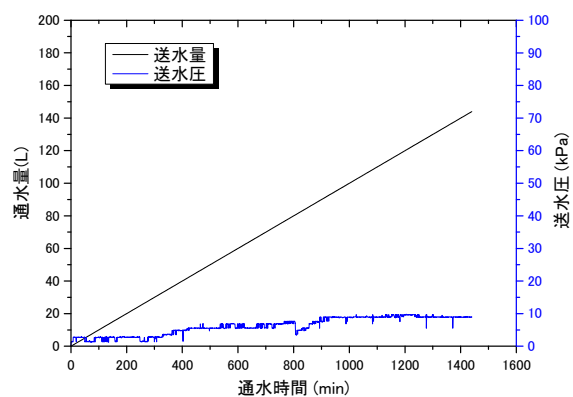


図 6.1.4-32 Case1 の通水圧と流量の関係

2) Case2

Case2 の供試体の作製方法も Case1 と同様である。すなわち、ピンの配置を Case1 から変えて、全ての人為的な水みちが供試体内部にあるように配置して圧縮成型することによって圧縮供試体を作製した。

図 6.1.4-33 に水みちの形成状況を示す。供試体内部にしか人工的な水みちを配置しなかったが通水初期段階でセルとの界面近傍に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-34 には供試体の解体状況を示している。写真から、セルとの界面近

傍に比較的大きな水みちが側面に大きく形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。また、大きな水みちにはケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが膨潤してもシールを妨げる可能性がある。Case1 と Case2 からパイピングは緩衝材内部には形成されずに、緩衝材と非膨潤性材料の界面に形成されることが分かった。図 6.1.4-35 に Case2 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、0.1L/min で給水しても通水圧は 60kPa 程度しかない。これらの傾向は、前述の蒸留水の場合と同等であった。

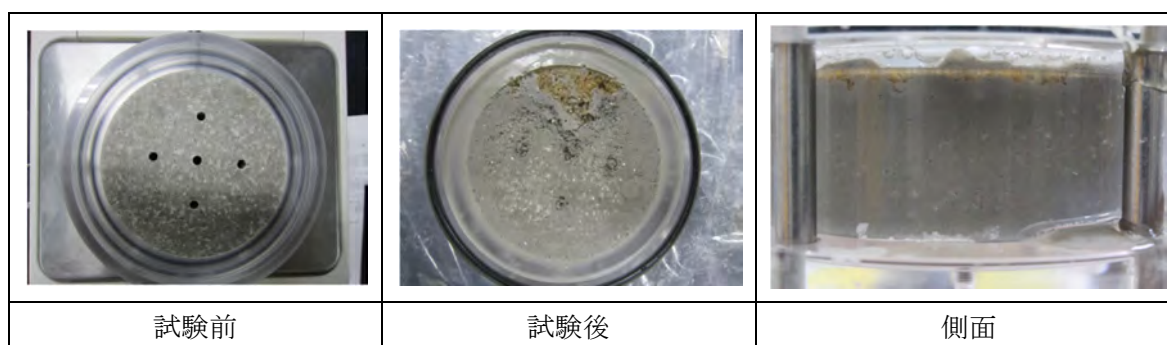


図 6.1.4-33 水みちの形成状況 (Case2)



図 6.1.4-34 解体状況 (Case2)

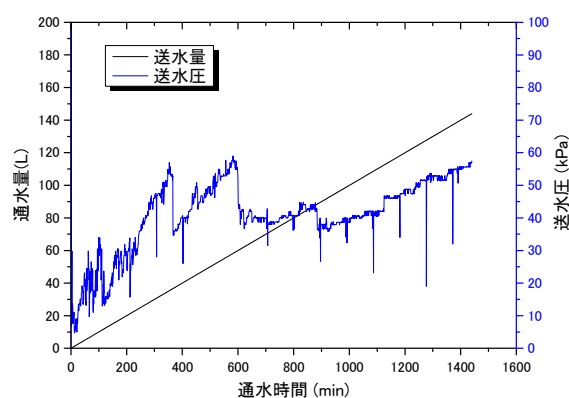


図 6.1.4-35 Case2 の通水圧と流量の関係

3) Case3

Case3 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様であるが、通水速度は

一定であり、全ての材料が流出するまで試験を実施した。

図 6.1.4-36 に水みちの形成状況を示す。通水初期段階で供試体の大間隙を連ねた水みちが、供試体とセルとの界面に複数形成され、そのうちの 1 本の水みち形成に収斂し、次第に成長した。写真から、通水開始から 2 時間で大きな水みちが形成され、そのままの形で 16 日目まで至っている。最終的に残った水みち以外は次第に閉塞されているのが分かる。NaCl 水溶液の場合、蒸留水の場合と比較して、排水が透明であり、水みちの形状もあまり変化しないことが分かる。これは、イオン強度の影響でベントナイトが膨潤しないためであると考えられる。蒸留水の場合、全てのベントナイトが流出するのには 27 日程度を要したが、NaCl 水溶液の場合、27 日を超えても、ベントナイトはほとんど変化していない。

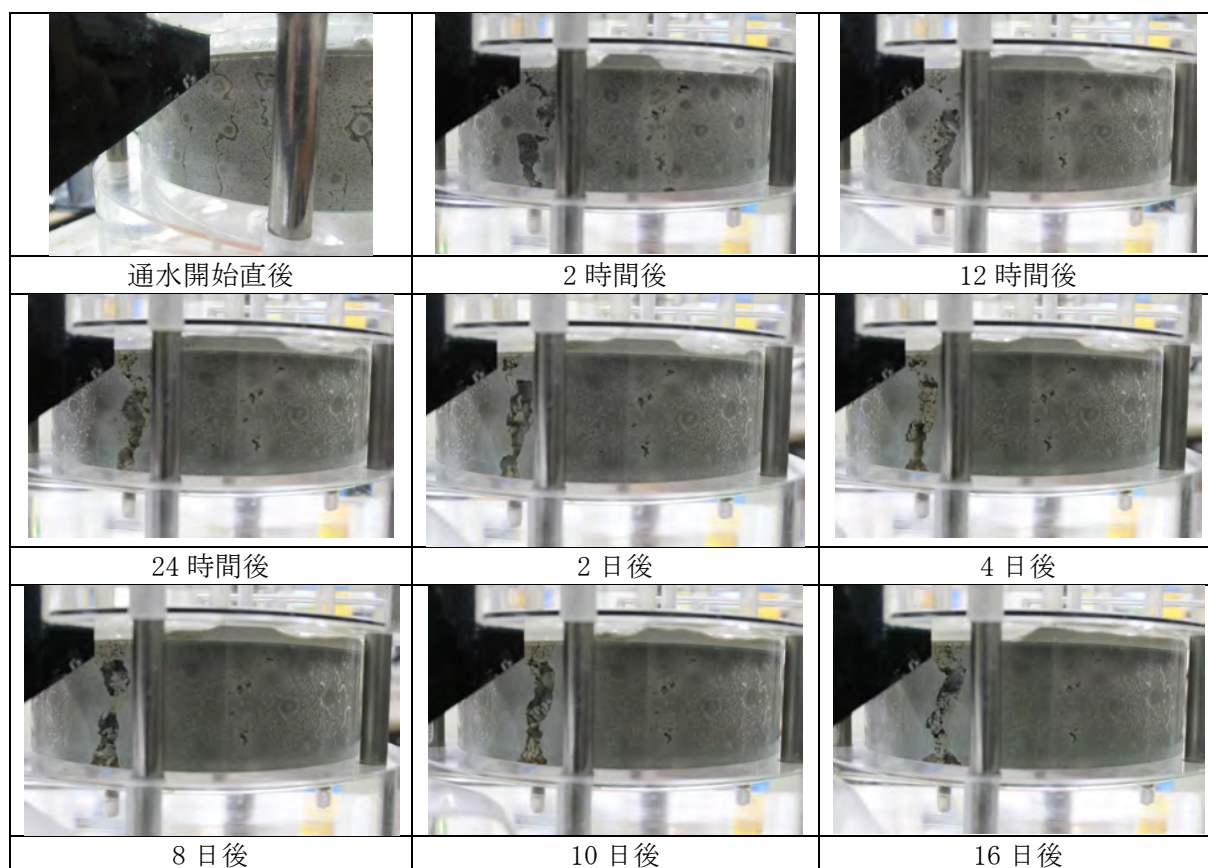


図 6.1.4-36 水みちの形成状況 (Case3)

図 6.1.4-37 には、通水圧と流量の関係を示す。図から、0.1L/min の一定流量で給水されても通水圧が増加することなく、最大でも 30kPa 程度であることが分かる。

図 6.1.4-38 には、総流量とエロージョン質量の関係を示している。図には、蒸留水のケースと SKB 社が MX80 のペレットを筒状のセルに充填して取得した、総流量とエロージョン質量の関係も併せて示している。図から、MX80 とクニゲル V1 の総流量とエロージョン質量の関係は、どちらもほぼ同じ勾配であるが、クニゲル V1 に比べ、MX80 の方がエロージョンし易い材料であることが分かる。これはクニゲル V1 に比べ MX80 の方がモンモリロナイト含有率が多いためであると考えられる。さらに、クニゲル V1 の蒸留水のケースに比べ、NaCl 水溶液のケースの方がエロージョン量が少ない。これは、NaCl 水溶液のイオン強度の

影響でモンモリロナイトの膨潤が抑制されるため、水みち内の流水に分散せず、沈殿するためであると考えられる。また、水みちが収斂した後では、エロージョン材料は沈殿し、セル外に流出されないため、総流量とエロージョン質量の関係の勾配は水平である。これらの傾向は、底面から上面に向かって通水させているためであり、通水方向と排水箇所の位置関係に依存するものと考えられる。

MX80 の場合、塩水の方が、水道水よりもエロージョンし易いという結果になっているが、境界条件に依存するため、更なるデータの蓄積を行い、同じ条件同士で比較する必要である。

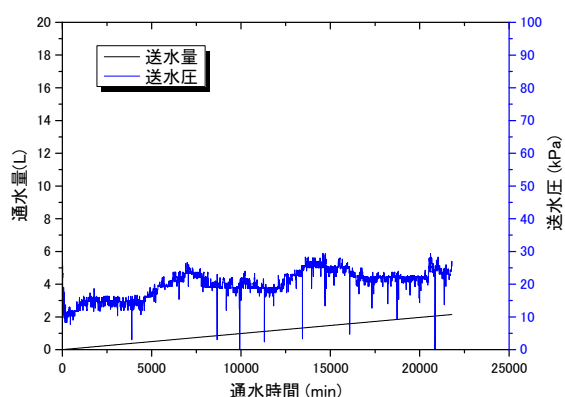


図 6.1.4-37 Case3 の通水圧と流量の関係

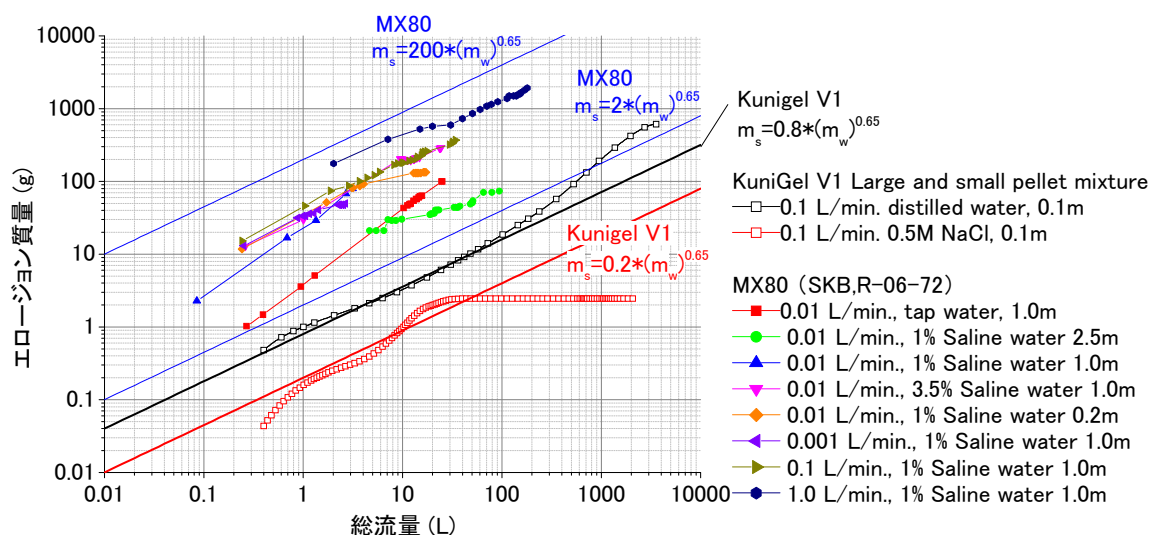


図 6.1.4-38 総流量とエロージョン質量の関係

4) Case4

Case4 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流速は 0.01L/min で一定である。図 6.1.4-39 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.01L/min 一定で通水を行ったが、通水初期段階でセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-40 には供試体の解体状況を示している。写真から、

側面に水みちが形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。そのため、側部には水みちが形成されているが、供試体内部には乾燥領域が存在している。

図 6.1.4-41 に Case4 の通水圧と流量の関係を示す。側面に水みちが形成されたため、0.01L/min で給水しても通水圧は 25kPa 程度しかない。これらの傾向は、蒸留水のケースと同等である。

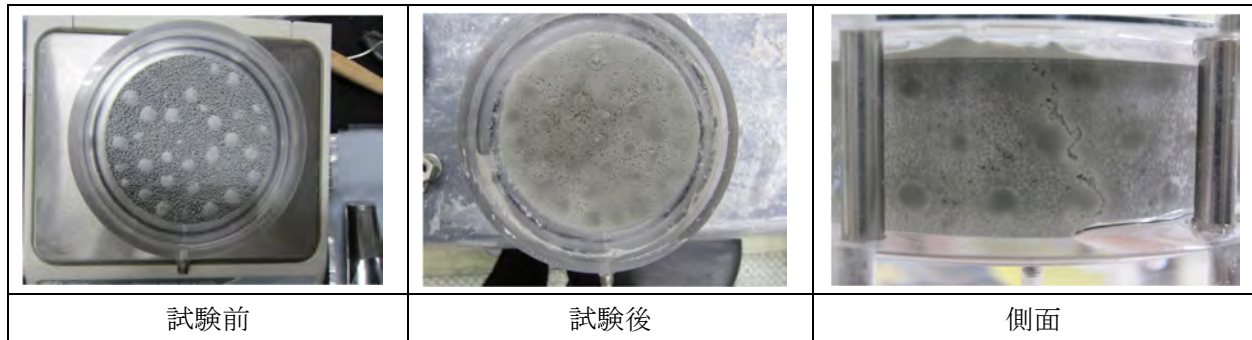


図 6.1.4-39 水みちの形成状況 (Case4)



図 6.1.4-40 解体状況 (Case4)

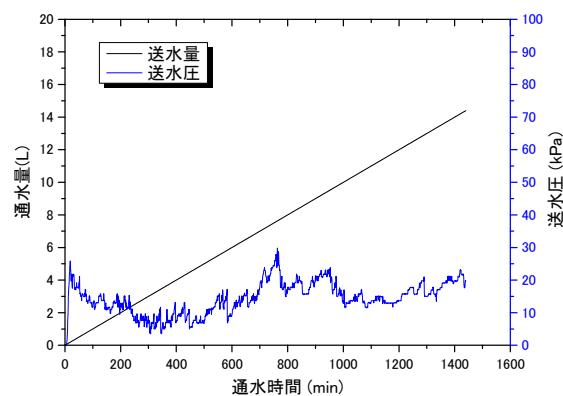


図 6.1.4-41 Case4 の通水圧と流量の関係

5) Case5

Case5 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流速は 0.001L/min で一定である。

図 6.1.4-42 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.001L/min 一定で通水を行った結果、セルとの界面に水みちが形成されたものの、破過とシールを繰り返した。図 6.1.4-43 には供試体の解体状況を示している。写真から、供試体内部にはまだ乾燥領域があるものの、給水側である底部領域はしっかりと膨潤して、ペレットの大間隙をシールしていることが分かる。

図 6.1.4-44 に Case5 の通水圧と流量の関係を示す。水みちの形成と破過を繰り返しているため、通水圧は増減を繰り返している。0.001L/min で給水した場合の通水圧は、最大で 0.8MPa 程度であった。

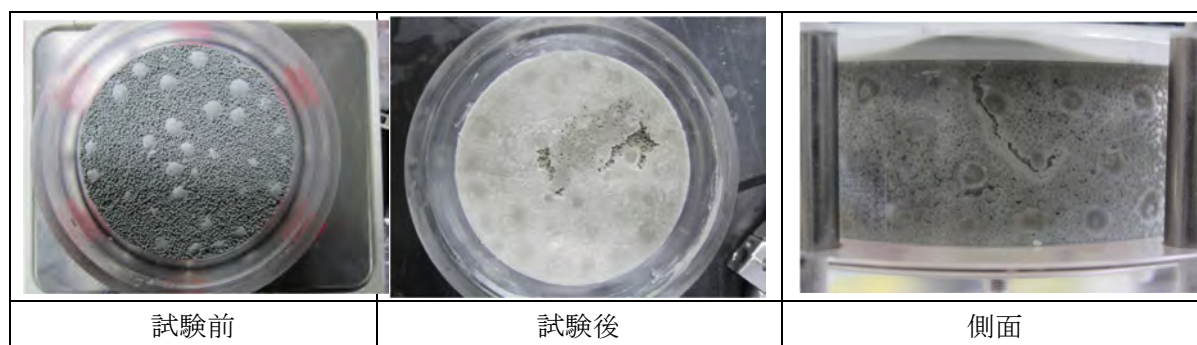


図 6.1.4-42 水みちの形成状況 (Case5)



図 6.1.4-43 解体状況 (Case5)

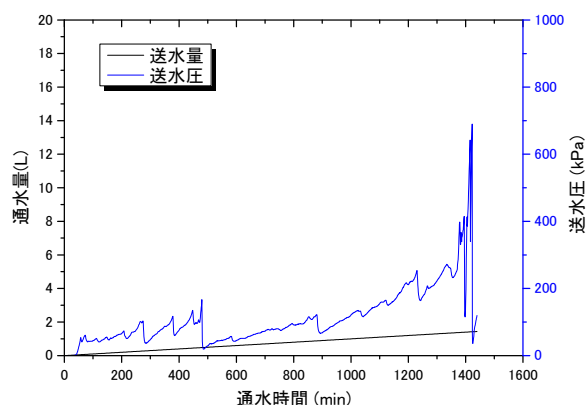


図 6.1.4-44 Case5 の通水圧と流量の関係

6) Case6

Case6の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流速は5cc/minで一定である。これは蒸留水のケースで、当初計画では0.1cc/minで試験を実施する予定であったが、1cc/minで水みちが形成されなかったために、計画変更して実施された流速5cc/minのケースの比較のために実施したものである。ただし、NaCl水溶液のケースの場合、1cc/minでもシールと破過を繰り返していることから、追加で0.1cc/minのケースも実施した。

図 6.1.4-45 に水みちの形成状況を示す。試験開始から5cc/min一定で通水を行ったが、通水初期段階でセルとの界面に1本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に1本に収斂した。図 6.1.4-46 には供試体の解体状況を示している。写真から、5cc/minの場合では、側面に水みちが形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。そのため、側部には水みちが形成されているが、供試体内部には乾燥領域が存在している。一方、0.1cc/minの場合、水みちが形成されるものの、部分的に閉塞していることが分かる。通水圧に達すると、この部分的な閉塞箇所が破過するものと考えられる。試験後の供試体内部の状況は、5cc/minのケースに比べ、内部までしっかりと膨潤していることが分かる。全体を通じて、流速が速い場合、内部が乾燥状態のまま表面に水みちが形成され、流速が遅い場合内部まで浸潤し、しっかりと膨潤している。水みちの生成に、供試体内部への浸潤速度と流速の大きさのバランスが重要であることが示唆された。

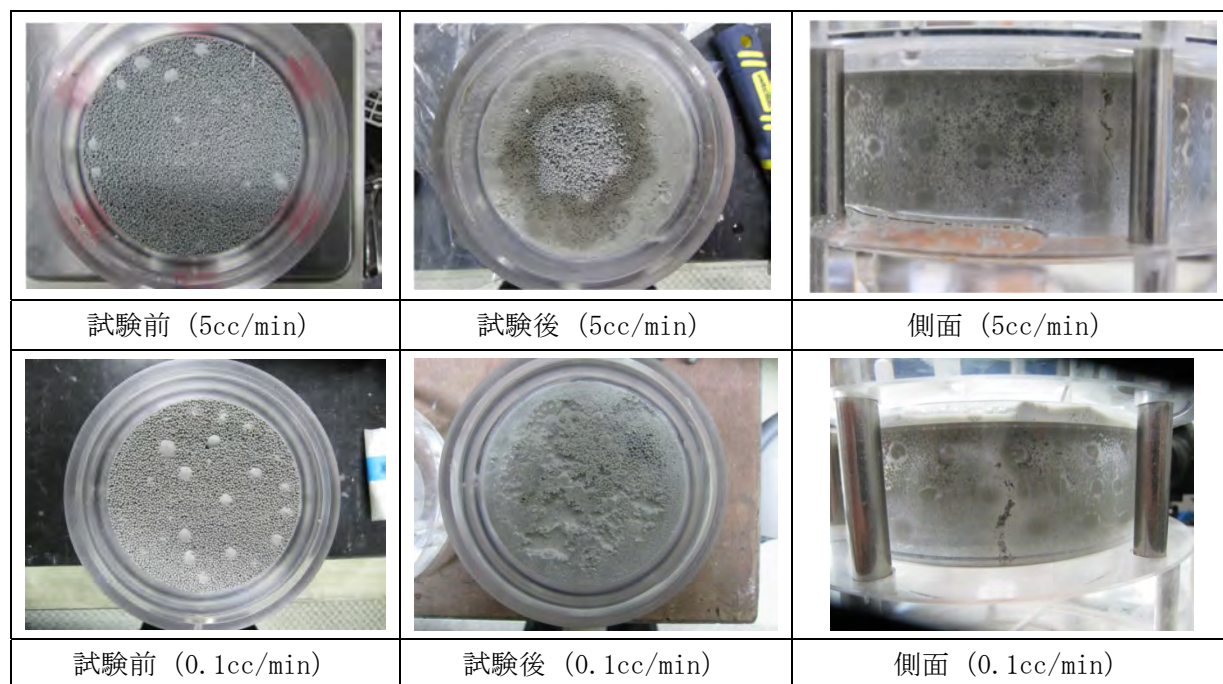


図 6.1.4-45 水みちの形成状況 (Case6)

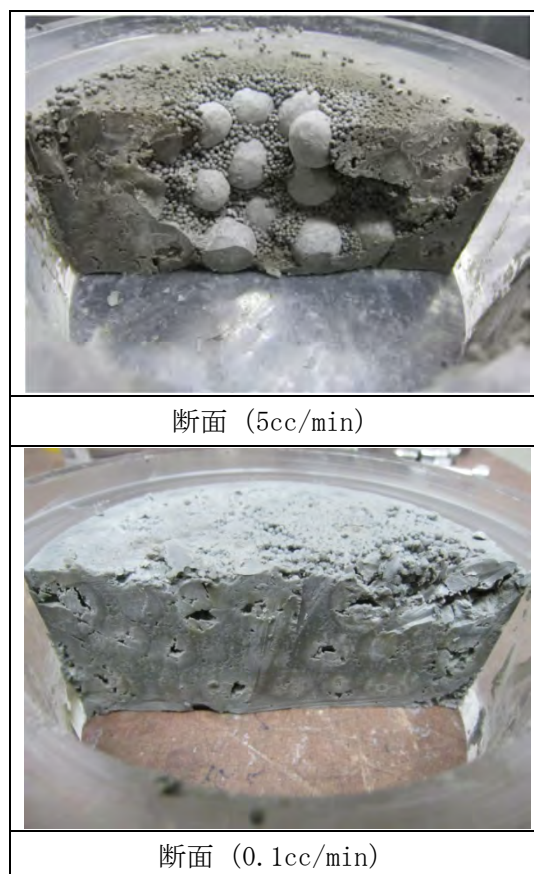


図 6.1.4-46 解体状況 (Case6)

図 6.1.4-47 に Case6 の通水圧と流量の関係を示す。水みちが形成されたため、5cc/min で給水しても通水圧は 100kPa 弱しかない。一方、0.1cc/min の場合、通水圧が増減を繰り返しているため、破過とシールを繰り返していることが分かる。0.1cc/min の場合の最大通水圧が 0.9MPa 程度であった。

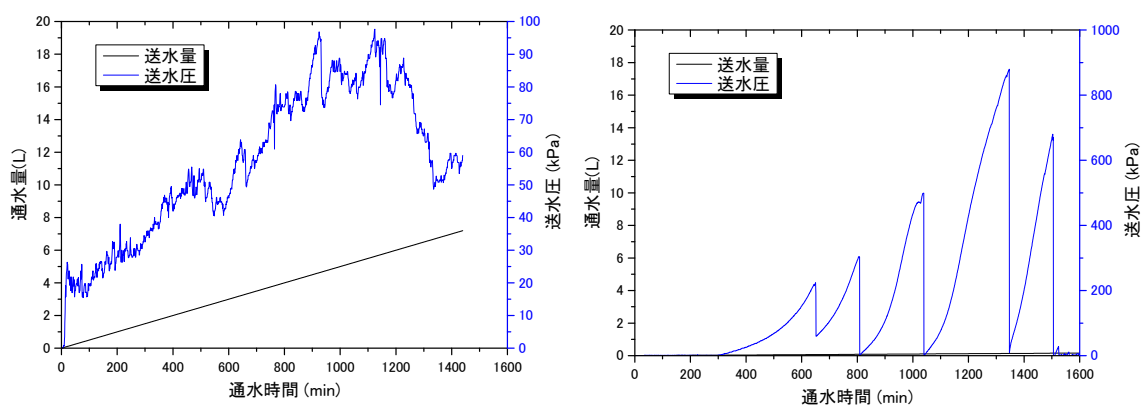


図 6.1.4-47 Case6 の通水圧と流量の関係

7) Case7

Case7 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、残りの部分を大粒径ペレットで充填して作製した。流速は $0.1\text{L}/\text{min}$ で一定である。

図 6.1.4-48 に水みちの形成状況を示す。試験開始から $0.1\text{L}/\text{min}$ 一定で通水を行ったが、通水初期段階でペレット側のセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-49 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水みちが形成され、ブロックとペレットの界面には水みちが形成されていないことが分かる。

図 6.1.4-50 に Case7 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、 $0.1\text{L}/\text{min}$ で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。これらの傾向は、蒸留水のケースと同等であった。



図 6.1.4-48 水みちの形成状況 (Case7)



図 6.1.4-49 解体状況 (Case7)

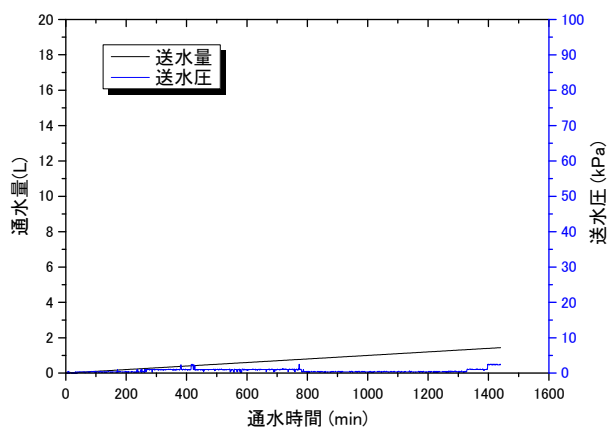


図 6.1.4-50 Case7 の通水圧と流量の関係

8) Case8

Case8 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、残りの部分を大小粒径ペレットで充填して作製した。流速は $0.1\text{L}/\text{min}$ で一定である。

図 6.1.4-51 に水みちの形成状況を示す。試験開始から $0.1\text{L}/\text{min}$ 一定で通水を行ったが、通水初期段階でペレット側のセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-52 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水みちが形成され、ブロックとペレットの界面には水みちが形成されていないことが分かる。

図 6.1.4-53 に Case8 の通水圧と流量の関係を示す。通水開始直後、通水圧が一時的に 600kPa 弱まで増加したが、破過が発生した後は、大きな水みちが形成されたため、 $0.1\text{L}/\text{min}$ で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。

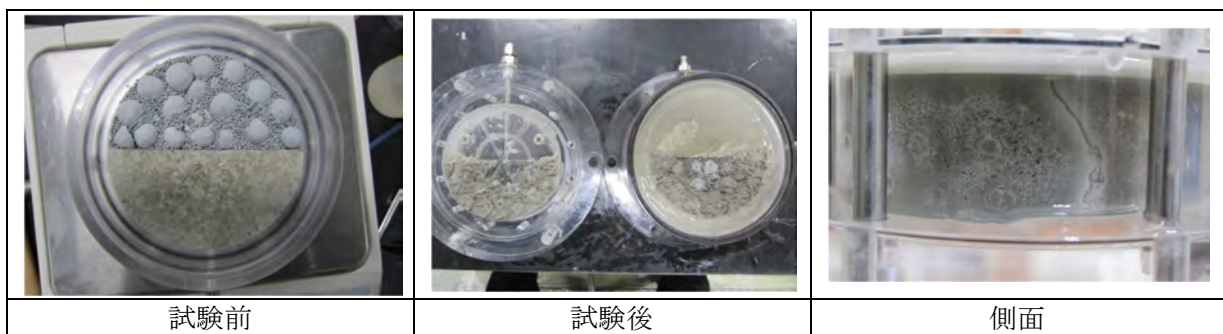


図 6.1.4-51 水みちの形成状況 (Case8)

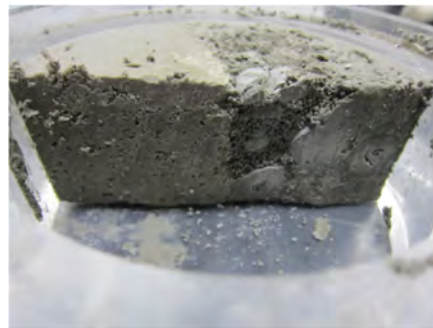


図 6.1.4-52 解体状況 (Case8)

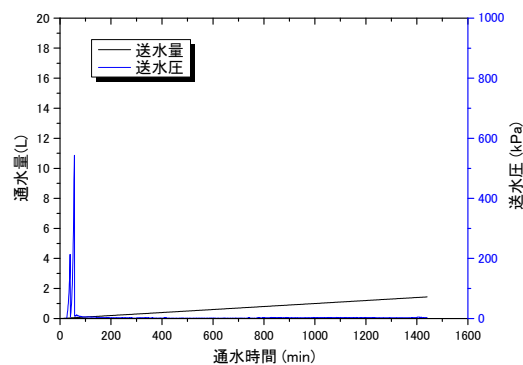


図 6.1.4-53 Case8 の通水圧と流量の関係

6.1.5 ブレイクスルー、パイピング、エロージョンに対する人工給水効果の評価

(1) 試験概要

前述の小規模試験でのブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象の検討において、パイピングによって生成された水みちにおいて、膨潤による流速の増加に伴うエロージョンの発生とエロージョンによる水みち断面の増加に伴う流速の低下という相反する2つの現象が発生しており、再冠水の初期状態で、一旦、水みちが形成されると、緩衝材の膨潤によってその水みちをシールすることは難しいことが明らかとなった。

このような現象に対して、例えばSKB社では、横置き処分概念であるKBS-3Hにおいて、人工給水によって水みちが形成されないように緩衝材を膨潤させる方法を検討している。緩衝材に水みちが形成されないように制御しながら給水して、緩衝材が十分に膨潤すれば、界面には隙間や大間隙がなくなり、その後に地下水が浸潤しようとしても緩衝材内には拡散でしか浸潤できず、水みちが形成され難いものと考えられる。

そこで本検討では、図6.1.5-1に示すように、ブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象に関する小規模試験で検討したケースの内、ブロックと大小ペレットを併用したケースに対して、人工給水の効果について検討を行った。

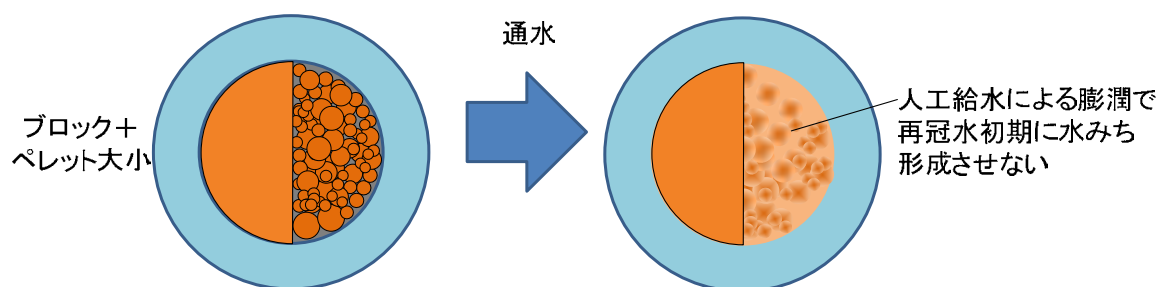


図 6.1.5-1 水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージ

(2) 試験ケース

試験は、図 6.1.5-1 に示したブロックと大小ペレットを併用した供試体に対して、液種と流速をパラメータとして実施した。すべてのケースで、まず給水して十分に膨潤させ、その後に設定した流速でブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験に移行した。給水膨潤中はセルの排水孔にピンを差し込んで人為的に閉鎖した。これによりセル内は拡散場となるため、水みちを形成することなく膨潤させることが可能となる。また、ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験に移行する場合は、排水孔に差し込んだピンを抜いて、前述のブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験と同じ条件となるようにした。

表 6.1.5-1 人工給水・エロージョン試験の検討ケース

ケース	液種	通水方向	供試体	流速 (L/min)	備考
1	蒸留水	底面から 上面	ブロック +大小ペレット	0.5	ブロック部乾燥密度： 1.6Mg/m ³ 程度 ペレット部乾燥密度： 1.5Mg/m ³ 程度
2				0.1	
3				0.01	
4				0.001	
5	NaCl 水溶液 イオン強度 0.5			0.5	
6				0.1	
7				0.01	
8				0.001	

(3) 試験結果

図 6.1.5-2 に通水圧と総流量の経時変化を示す。試験は流量制御で実施したため、総流量が所定の流速に合わせて一定勾配で増加している。また、全てのケースで通水圧がアクリルセルの上限圧である 3MPa に達していることから、人工給水による膨潤によって、パイピングやエロージョンが抑制できることが分かった。NaCl 水溶液の場合、0.5L/min や 0.1L/min のケースで、一時的に送水圧が低下しているため、破過現象が発生したことが分かる。しかしながら、その後、再び送水圧が増加に転じており、パイピングやエロージョンの発生には至っていない。

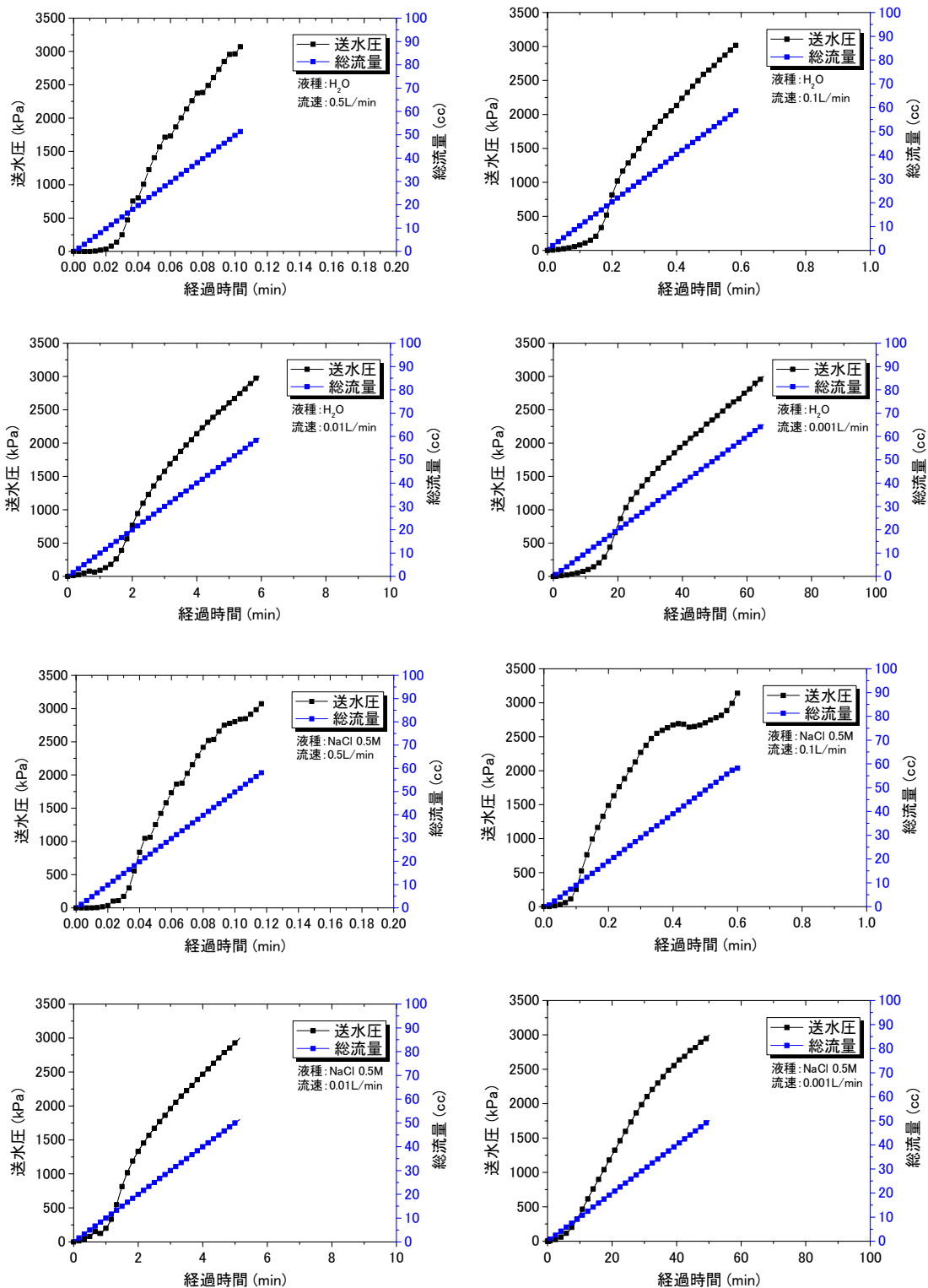


図 6.1.5-2 通水圧と総流量の経時変化

表 6.1.5-2 には、各ケースの試験前、給水中、試験後の供試体上面の様子と給水中の側面の様子を示している。全てのケースで排水側用の溝にペントナイトが膨潤して止水し、水みちが形成されていないことが分かる。ただし、試験中の側面図の観察から、ペレット側の底面では、通水圧が全応力として作用し、供試体を押し上げて圧縮し、隙間が発生していることが変わる。

同様の結果は図 6.1.1-4 に示したように SKB 社の検討 (SKB 社 Report R-06-72 [3]) でもみられており、人工給水を行っても、湧水の圧力によって発生する隙間が流出箇所と連通するような場合には破過現象が断続的に生じるものと考えられる。

表 6.1.5-2 人工給水・エロージョン試験の状況一覧




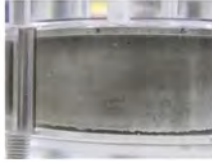



















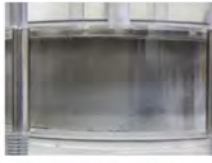


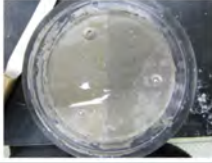

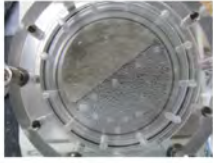



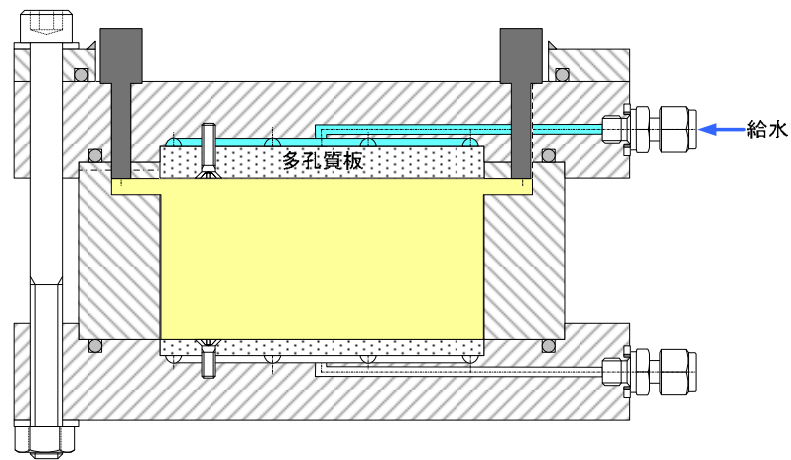
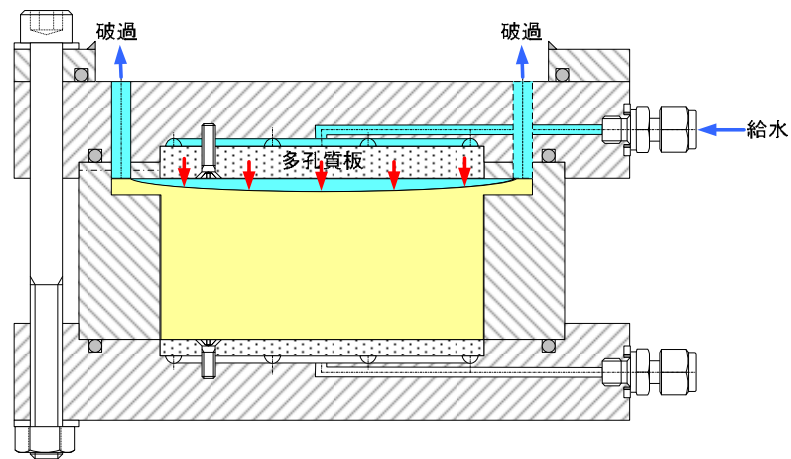
Case	試験前	給水後	試験後	試験中側面
1 H ₂ O 0.5L/min				
2 H ₂ O 0.1L/min				
3 H ₂ O 0.01L/min				
4 H ₂ O 0.001L/min				
5 NaCl 0.5M 0.5L/min				
6 NaCl 0.5M 0.1L/min				
7 NaCl 0.5M 0.01L/min				
8 NaCl 0.5M 0.001L/min				

図 6.1.5-3 には、湧水の圧力によって発生する隙間が流出箇所と連通するような場合を模擬した実験例を示す。このような場合には、人工給水を行っても、湧水圧によって発生した隙間が亀裂などの流出孔と連通したら瞬時に水が流れるのと同時に水圧が下がり、隙間が塞がると

いう現象（破過）が繰り返されるものと考えられる。緩衝材の流出対策には、特効薬のような対策は存在せず、境界条件を考慮して、複合的な対策を取る必要があると考えられる。



人工給水過程（膨潤）



通水・破過

図 6.1.5-3 湧水圧により発生する隙間が流出箇所と連通するような場合を模擬した実験例

6.2 流路長がブレイクスルー、パイピング、エロージョンに及ぼす影響

6.2.1 試験概要

SKB 社の放射性廃棄物横置き処分概念である KBS-3H では、緩衝材だけでなく、Distance ブロックや Filling ブロック、さらにはコンパートメントプラグなどにより、エロージョンに対する性能の担保を目指している。

Distance ブロックは、湧水や滴水による緩衝材のエロージョンの防止、破砕帯からスーパーキャニスタを隔離する、処分孔の密閉、定置作業の一時的な中断、スーパーコンテナの水理学的観点と廃棄体熱的な観点から必要な間隔の確保、処分に不適切な区間を密閉、密度の低下に対する膨潤材料の補充、スーパーコンテナの固定、閉鎖された区間からの流出防止、などを目的としたベントナイトブロックである。その使用は、処分孔との隙間によるが、乾燥密度で 1.6Mg/m^3 程度とされている。Filling ブロックは、処分孔の上限湧水量である 0.1L/min よりも大きく、コンパートメントプラグの設置基準の下限である 1.0L/min よりも小さい箇所に設置されるもので、2つの重要な仕様がある。一つは緩衝材に接し続けることで、もう一つは緩衝材の流失や再配置を防ぐことである。

すなわち、この Distance ブロックや Filling ブロックはベントナイト系材料が想定されており、ベントナイト系材料の流路距離を長くして耐エロージョン性を高めるものと考えられる。前述の小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験では、一次的に注水可能なセルに直径 100mm 、高さ 50mm の長尺ベントナイト (1.6Mg/m^3 、Na 型ケイ砂 30wt%混合) を設置し、パイピングの形成状況及び膨潤に伴うパイピングの収束状況を観察した。既に実施したブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験ではパイピング現象やエロージョン現象が得られた。また水みちの収斂という現象の発生も推測された。これらの現象に対して、流路距離が及ぼす影響に関して調べるために、 1000mm の高さ (通水距離) のセルを用いてブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験を実施する。

6.2.2 試験ケース

ブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象に対して、流路距離が及ぼす影響に関して調べるために、高さ 1000mm 、直径 50mm (膨潤後の直径) の供試体を作製した。供試体の作製に当たっては、初期乾燥密度分布、間隙径、隙間の有無などによって施工法を模擬した。さらに、試験のパラメータは液種、乾燥密度、水圧、流速などが考えられるが、前述の一次元浸潤速度取得試験と条件を参考にして試験条件を決定した。原位置締固め工法、ブロック定置工法のケースでは、供試体はケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイトであり、ペレット充填工法のケースでは供試体は Na 型ベントナイト単体である。

図 6.2.2-1 にパイピング試験機の全景、図 6.2.2-2 に試験のイメージ図を示す。試験ケースは前述の一次元浸潤速度取得試験機とほぼ同等であるが、破過現象などの際に高通水圧が作用することも考慮して、電極の設置のための孔などは設けていない。また、給水口は底面であり、排水は上面とした。試験ケースを表 6.2.2-1 に示す。



図 6.2.2-1 パイピング生成試験機全景

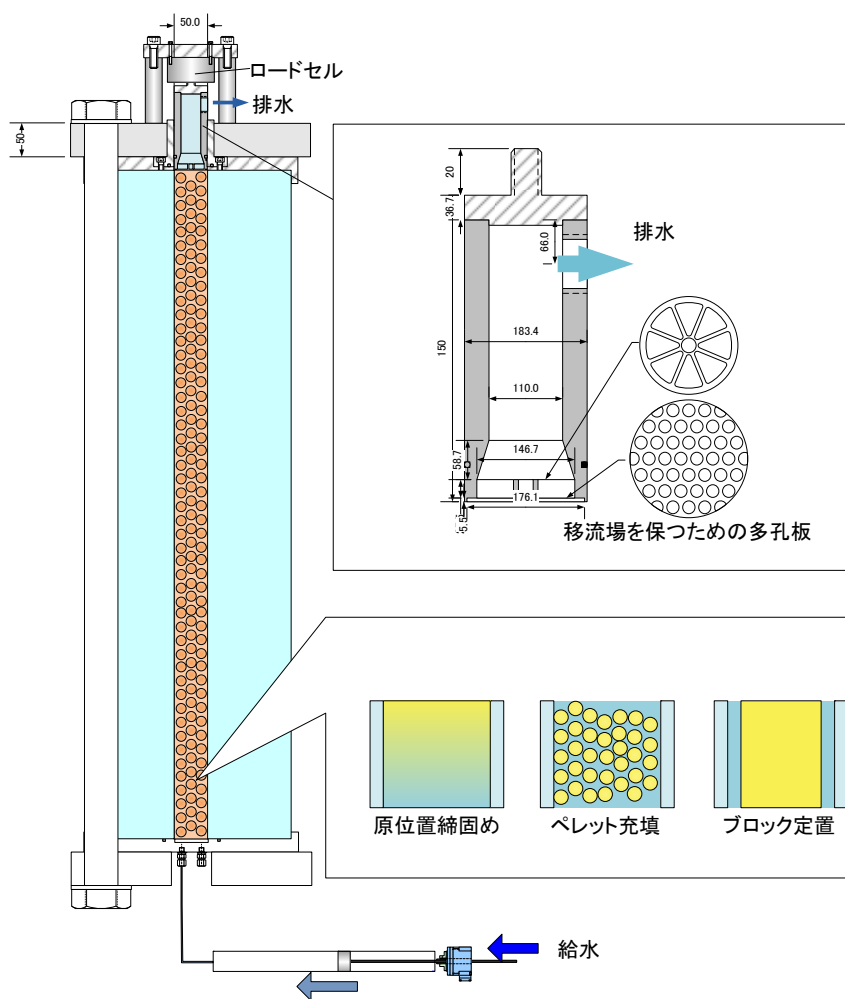


図 6.2.2-2 パイピング生成試験セル

表 6.2.2-1 流路長がブレイクスルー、パイピング、エロージョンに及ぼす影響試験ケース

ケース	施工法	乾燥密度 Mg/m ³	溶液	試験条件
1	原位置締固め	1.6 (ケイ砂 30 wt% 混合 Na 型ベントナイト)	蒸留水	水圧制御 0.2→0.5→1.0→2.0→2.5→3.0MPa
2	ブロック定置	1.6 (*1.936) (ケイ砂 30 wt% 混合 Na 型ベントナイト)		流量制御 100~0.1cc/min
3	ペレット充填	1.1~1.2 Na 型ベントナイト		
4	ブロック定置	1.6 (*1.936) (ケイ砂 30 wt% 混合 Na 型ベントナイト)	NaCl (0.5M)	流量制御 100cc/min
5	ブロック定置	1.6 (*1.936) (Na 型ベントナイト)	蒸留水	

※膨潤前乾燥密度

6.2.3 試験結果

(1) 原位置締固め・蒸留水ケース (Case1)

本ケースでは、供試体はアクリルセル内で仕上がり高さ 5mm を 200 層締固めて作成したものであり、セルと供試体間には隙間は存在しない。すなわち、前述の小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験における施工方法では、原位置締固め工法や吹付け工法に相当する。本試験では、流量制御では通水圧が直ぐに上限値に達してしまうため、水圧を制御して徐々に水圧を増加させ、破過状況を観察した。一旦破過したら注水を止め、自己シールさせた後に再度水圧を上昇させて破過状況を観察した。

図 6.2.3-1 に試験結果を示す。図に示すように、試験では実際の処分場の深度である地下 300m 以深に相当する圧力として 3.0MPa を与えた。注水圧制御で 0.2、0.5、1.0、2.0、2.5、3.0MPa に段階的に水圧を作用させた。その間、破過現象と思われる微細な水圧の現象は見られるものの、大局的には安定して水圧が保持されている。また、図 6.2.3-2 には、試験中の供試体注水側の状況を示している。図から、別途実施中である一次元浸潤速度試験の供試体の注水側と比較しても、本試験の供試体の注水側は、注水によって水が浸潤している箇所と浸潤していない箇所のコントラストが非常に明確に観察できることが分かる。

浸潤速度は時間の対数に対してほぼ線形に増加しており、

$$q(cc) = t^{0.35548} (\text{min.})$$

で表わされる。この場合の流速は、

$$\frac{dq}{dt} = 0.33548t^{-0.66452}$$

となり、初期に非常に早く、時間が経つに従って遅くなる傾向にある。よって、試験開始直後は、注水速度が緩衝材内部の間隙水の拡散速度よりも圧倒的に早く、供試体近傍のみに浸潤し、注水側の過剰間隙水圧が上昇している状況であると考えられる。

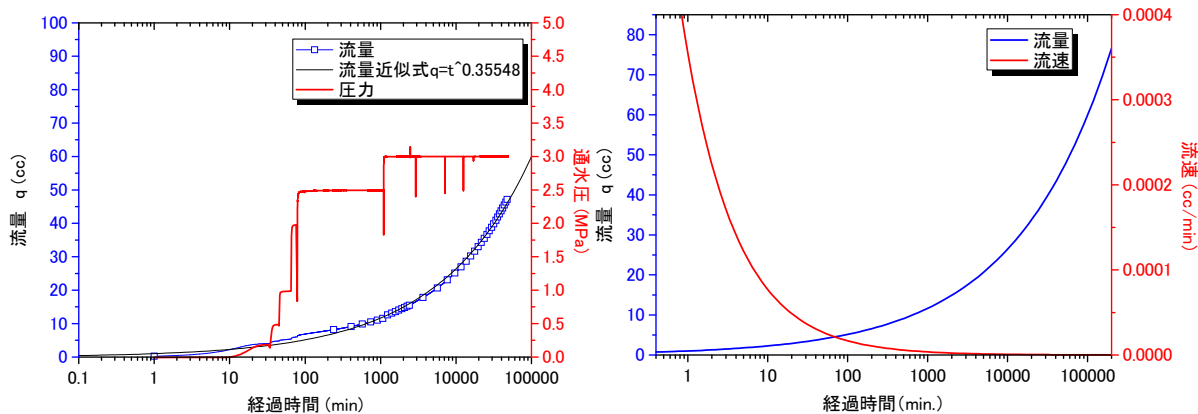
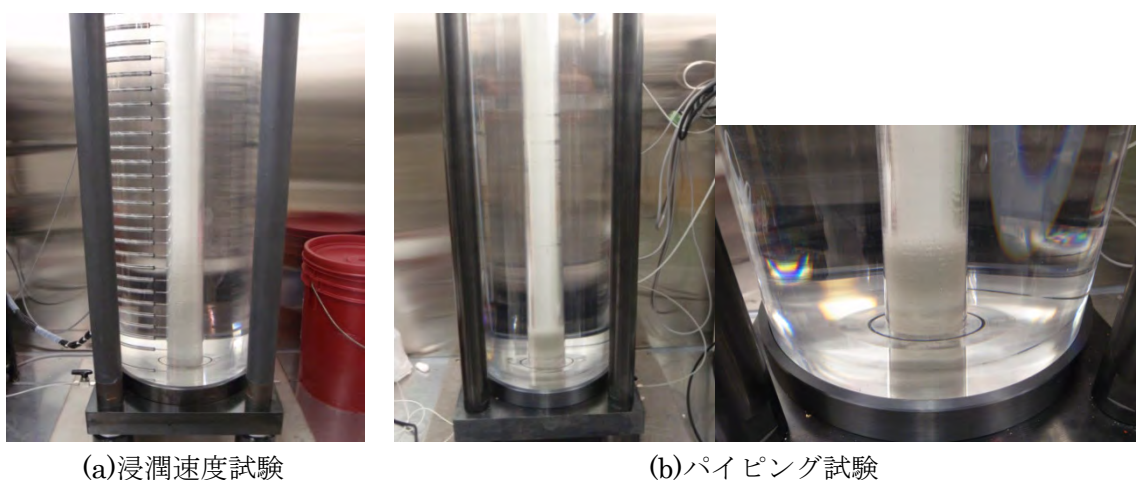


図 6.2.3-1 パイピング試験結果



(a)浸潤速度試験

(b)パイピング試験

図 6.2.3-2 パイピング試験中の状況

図 6.2.3-3 には、図 6.2.3-1 の拡大図を示している。図に示すように、僅かながら注水圧は増減を繰り返しながら増加している。シリンジポンプ内の水を入れ替える際の減圧（盛り換え箇所）以外にも、数十～100 k Pa 程度の突発的な減圧が観測されていることが分かる。注水圧はシリンジポンプを一定速度で押し込むことで作用させており、基本的に、盛り換え以外に計測される注水圧の増減は供試体の応答であると考えられる。

この注水中の供試体の浸潤フロント近傍の目視観察を行ったが、注水圧の増減によって浸潤フロントに差は見られず、減圧現象が破過によるものであるかどうかは目視観察からは不明であった（図 6.2.3-4 参照）。

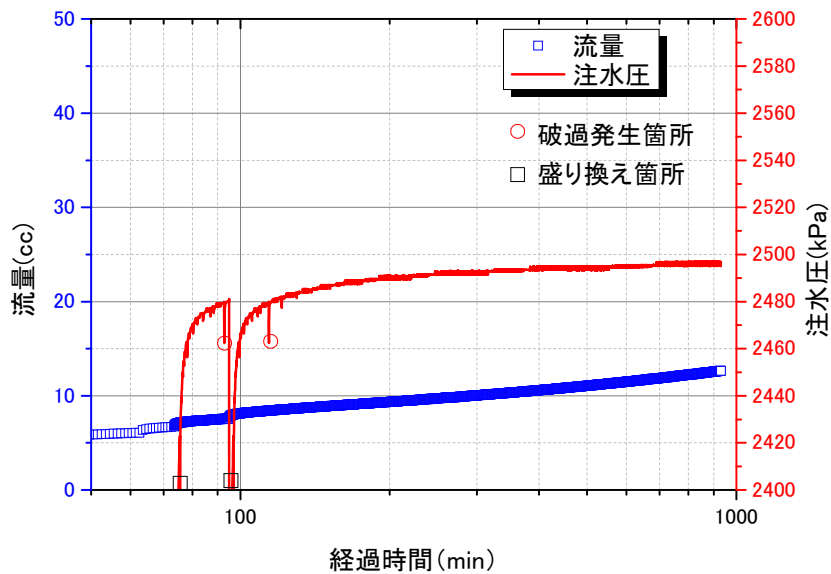


図 6.2.3-3 パイピング試験結果 (拡大図)

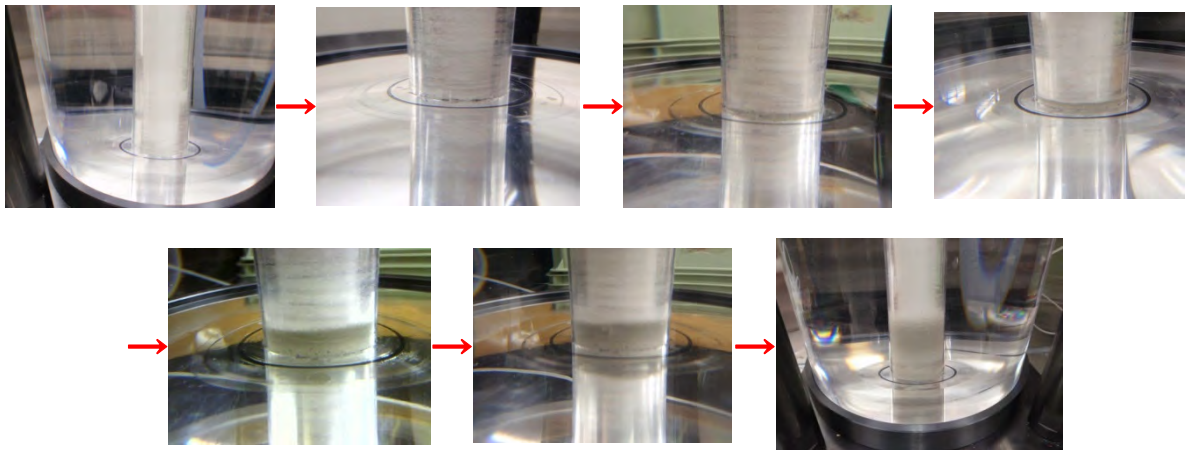


図 6.2.3-4 試験中の状況

図 6.2.3-5 には、パイピング試験中の軸応力の経時変化を示している。経過時間がゼロ日の点が通水開始であり、それ以前は圧縮成型後の内部応力を示している。供試体作成時の静的締固め圧力として約 3.0MPa が作用している状態で通水を開始した。本来ならばこの軸応力には、通水圧、および浸潤に伴う膨潤圧などが加算されるはずであるが、軸応力はむしろ、時間が経過するに従って僅かではあるが減少傾向にあることが分かる。これは、通水圧の増加分 3.0MPa や膨潤圧はアクリルセルと供試体との摩擦により相殺され、クリープ変形による内部応力の減少分、サクシオン開放によるコラプスに伴う内部応力の減少分のみが計測されているものと考えられる。特に、注水開始で軸応力の減少傾向に変化がないことから、破過に伴う内部応力変化分も極僅かであるか、摩擦により相殺されロードセルに作用していない可能性がある。よって、軸応力の変化からも急激に圧力が減少したなどの現象は見られず、供試体とアクリル製セルの界面の縁が切れるようなパイピング現象が発生したかどうかは不明であった。

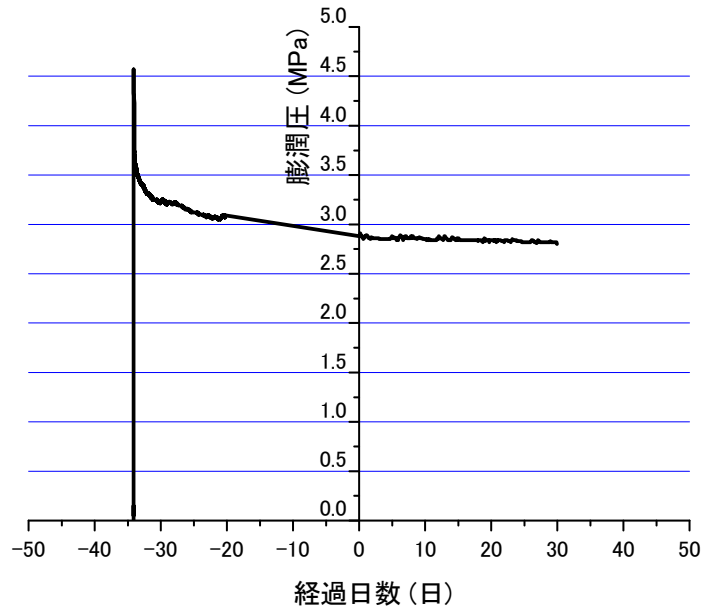


図 6.2.3-5 パイピング試験中の軸応力の経時変化

(2) ブロック定置・蒸留水ケース (Case2)

本試験ケースでは、供試体は高さ 100mm×直径 45mm の円筒形ブロックを 10 段重ねること
 とで作製した。よって、試験初期には、供試体とセルの間には 2.5mm の隙間が存在している。

図 6.2.3-6 にブロック定置工法を模擬した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パイ
 ピング、エロージョンの発生状況を示す。図には、注入圧と流量の経時変化を示している。
 図から、試験開始当初、流速が 0.1L/min.～0.001L/min.までは、注入圧は小さい状態であった。
 前述の小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験においても流速が
 0.001L/min.では注入圧が大きく変動することはなかった。しかしながら、流速を 0.0001L/min.
 まで低下させると注入圧が大きく変動した。注入圧が大きくなると直後に、注入圧が非常
 に小さくなるなどランダムに振動している様子が分かる。これば、一時的に水みちがシールさ
 れた後に注入圧によってシールが破過した (ブレイクスルー) したものと考えられる。

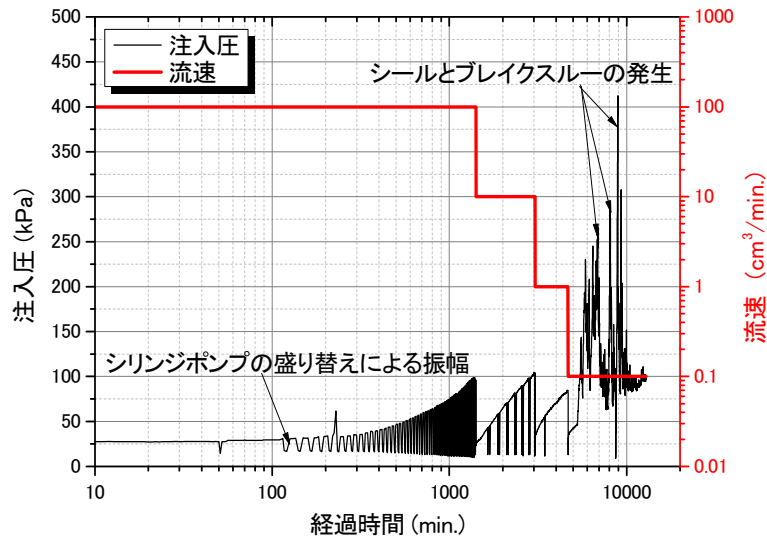


図 6.2.3-6 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況

図 6.2.3-7 にはロードセルで計測した試験中の荷重値と注入圧に断面積を掛けた値の経時変化を示している。図から、流速を 0.0001L/min.まで低下させると注入圧が大きく変動するため、注入圧に断面積を掛けた値も大きく変動している。さらに、両者は最終的にほぼ同じ値を示していることが分かる。ロードセルで計測されている荷重値と注入圧に断面積を掛けた値が同じであるということは、ロードセルで計測されている荷重値が全て注入圧によるものであることを意味しており、このことから、0.0001L/min.まで低下させると水みちはシールされて、注入圧によって供試体が全体的に上方に押し上げられているものと考えられる。

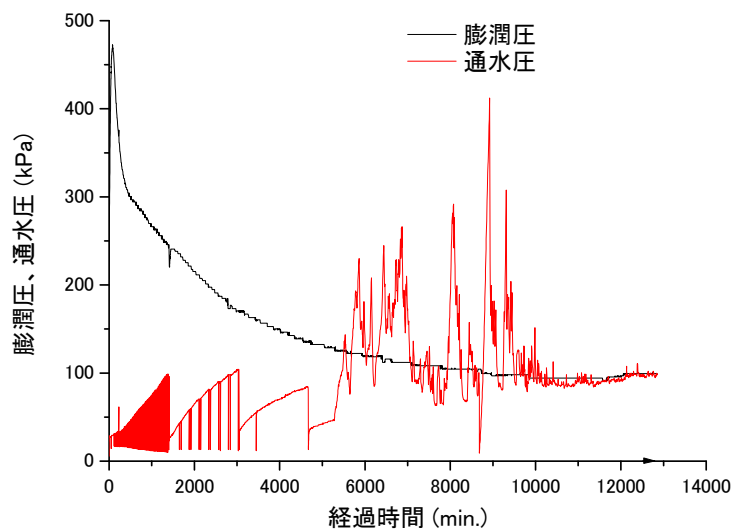


図 6.2.3-7 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況

図 6.2.3-8 には、ローダミンによる試験終了時の水みちを示す。図から、水みちが 1 つに収斂していることが分かる。さらに、0.0001L/min.まで流速を低下させたために、水みちが目視では所々でシールされているように見えた。

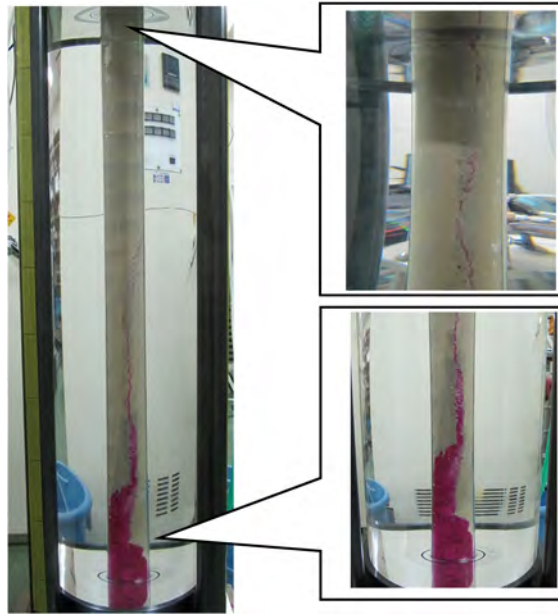


図 6.2.3-8 ローダミンによる水みちの発生状況の確認

(3) ペレット充填・蒸留水ケース (Case3)

本試験ケースでは、供試体は大粒径のペレットを充填することで作製した。このため、初期状態では、大きな間隙が存在する。また、乾燥密度も $1.1\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度であった。

図 6.2.3-9 にペレットを充填した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョンの発生状況を示す。図には、注入圧と流速の経時変化を示している。図から、試験開始当初、流速が $0.1\text{L}/\text{min.}$ ~ $0.001\text{L}/\text{min.}$ までは、注入圧は小さい状態であった。前述の小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験においても流速が $0.001\text{L}/\text{min.}$ では注入圧が大きく変動することはなかった。しかしながら、流速を $0.0001\text{L}/\text{min.}$ まで低下させると注入圧が大きく変動した。注入圧が大きな値を示した直後に、注入圧が非常に小さくなるなどランダムに振動している様子が分かる。これば、一時的に水みちがシールされた後に注入圧によってシールが破過（ブレイクスルー）したものと考えられる。

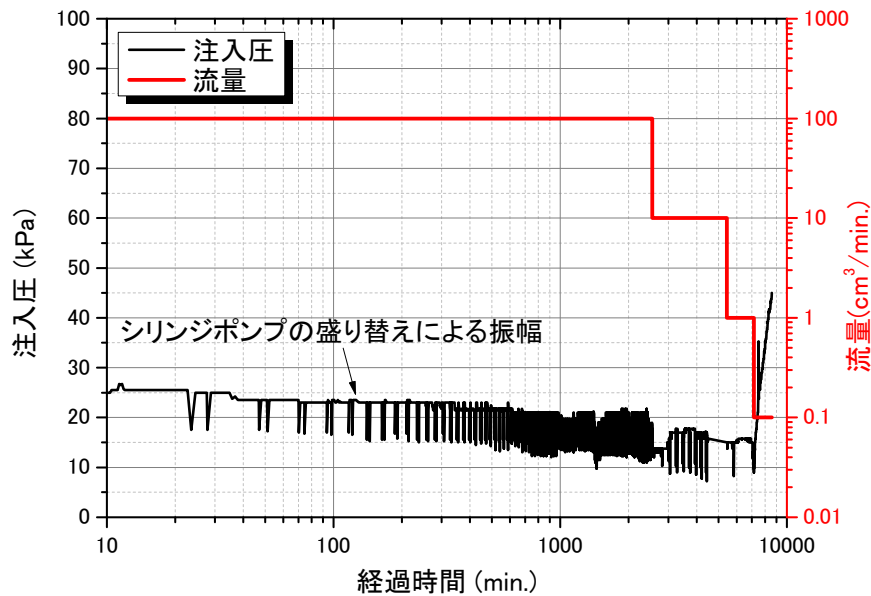


図 6.2.3-9 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況

図 6.2.3-10 にはロードセルで計測した試験中の荷重値と注入圧に断面積を掛けた値の経時変化を示している。図から、ロードセルで計測した試験中の荷重値は、一旦ゼロになった後に、流速を 0.01L/min. に低下させた頃から増加に転じた。さらに、流速を 0.0001L/min. まで低下させると注入圧が大きく変動するため、注入圧に断面積も大きく変動している。さらに、両者はほぼ同じ値を示した後に、最終的には、注入圧の方が大きな値を示している。同時期にブレイクスルーと見られる注入圧の上下変動がみられることから、シールされていない水みちが存在し、注入圧が全て荷重として計測されていないためであると考えられる。

図 6.2.3-11 には、写真のパッチワークによる試験終了時の水みちを示す。図から、水みちが 1 つに収斂していることが分かる。さらに、0.0001L/min. まで流速を低下させたが、水みちが目視で観察できた。

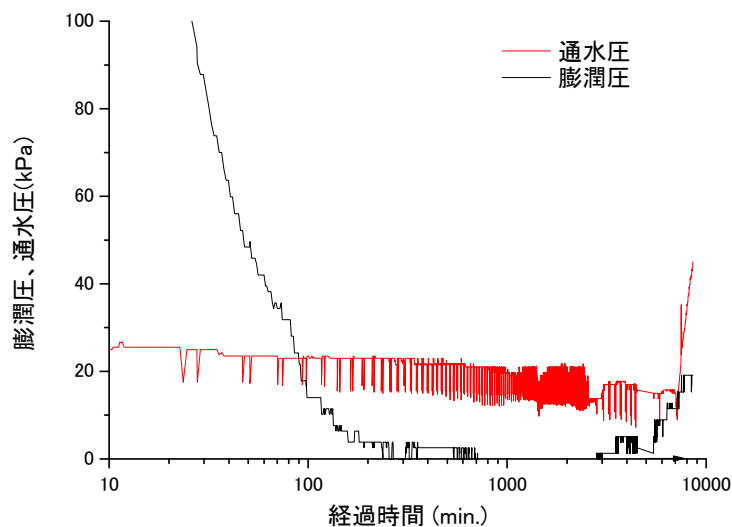


図 6.2.3-10 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況

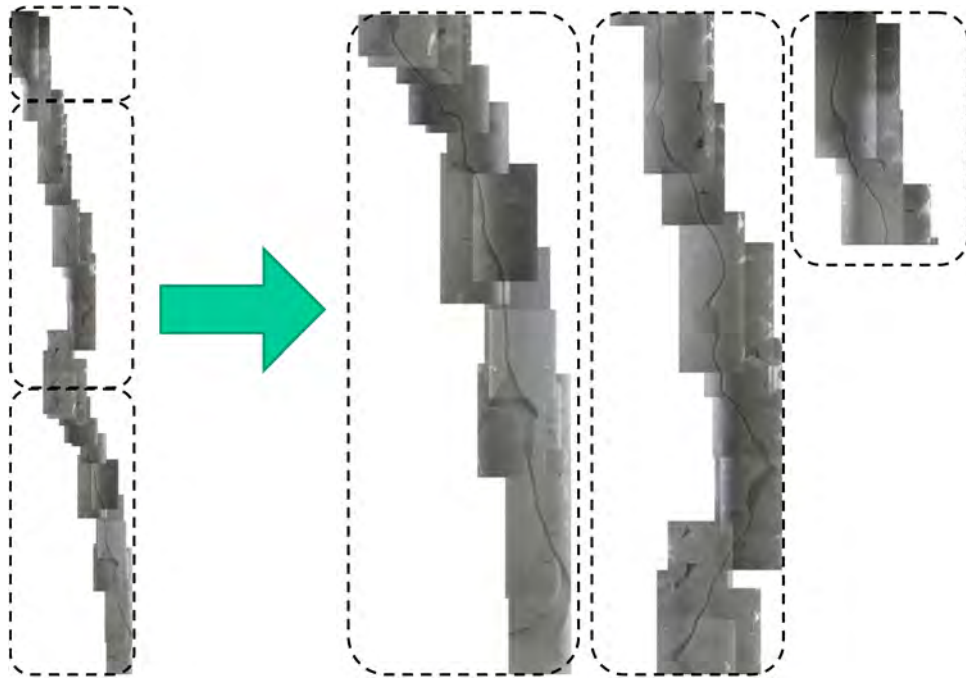


図 6.2.3-11 写真による水みちの発生状況の確認

(4) ブロック定置・NaCl 水溶液ケース (Case4)

本試験ケースでは、前述の Case2 とほぼ同じ条件で試験を行ったが、使用する液種が蒸留水ではなく、0.5M の NaCl 水溶液である。これにより、レイクスルー、パイピング、エロージョンの発生にイオン強度が及ぼす影響を取得できる。

図 6.2.3-12 にブロック定置工法を模擬した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョンの発生状況を示す。写真から、平成 23 年度のブロック定置工法のケースと同様に大きな水みちがセルとの界面に発生し、水みちには緩衝材から分離して沈殿したケイ砂が沈殿している。図 6.2.3-13 にはブロック定置工法を模擬した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョンの発生状況の拡大写真を示す。写真から、NaCl 水溶液であっても、蒸留水の場合と同様に、大きな水みちの底部には 3 号ケイ砂、中部には 5 号ケイ砂、上部には舞いあがったベントナイトが堆積している。舞いあがったベントナイトは徐々にエロージョンによってセル外に流出するものと考えられる。

図 6.2.3-14 には、1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況をグラフで示している。まず、給水量と排水量の経時変化では、給水量よりも排水量の方が小さいため、まだ供試体は飽和しておらず、パイピング・エロージョンしながら少しずつ供試体内部に水が浸潤していることが分かった。給水圧力の経時変化からは、水みちが形成されているため、大きな給水圧は発生していないことが分かる。膨潤圧の経時変化から、本試験に供した乾燥密度 1.6Mg/m³ のケイ砂 30wt% 混じりのクニゲル V1 の膨潤圧に比べ、非常に小さい値となっていることが分かる。さらに、膨潤圧は減少傾向を示している。このことから、エロージョン中には供試体内部への水の浸潤よりも表面が膨潤して、同時に洗堀されていくという状況で、十分な膨潤圧が発生させられない可能性があることが分かった。図 6.2.3-15 には試験後に供試体に染料であるローダミン B を流して水みちを観察した時の写真を示している。写真から水みちが 1 本に収斂していることが分かる。

図 6.2.3-16 には、総流量とエロージョン質量の関係を示している。図には SKB 社が MX80 のペレットを円筒形のセルに充填して取得した総流量とエロージョン質量の関係を示している。諸条件が異なるため、一概に比較できないが、他のケースに比べ明らかに総流量とエロージョン質量の関係の勾配が急であることが分かる。但し、通水量が 20L を過ぎた辺りから、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっている。これは、ブロックとセルの界面に形成された水みちに堆積したケイ砂がエロージョンを抑制しているためだと考えられる。図 6.2.3-17 には、1000mm セルによるパイピング試験におけるケイ砂の堆積状況と総流量とエロージョン質量の関係を併せて示す。図から、水みちに堆積したケイ砂が 40cm 程度の高さになった頃から、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっていることが分かった。



図 6.2.3-12 水みちの形成状況 (H24)




		<p>上部 白濁部の上部ではモンモリロナイト成分が凝結し、塊の状態で攪拌されている状況</p>
		<p>中部 ケイ砂が分離堆積した位置から通水液が噴出し、白濁部が攪拌されている状況</p>
		<p>下部 複数の水みちが1本に収斂</p>

図 6.2.3-13 水みちの形成状況 (拡大) (H24)

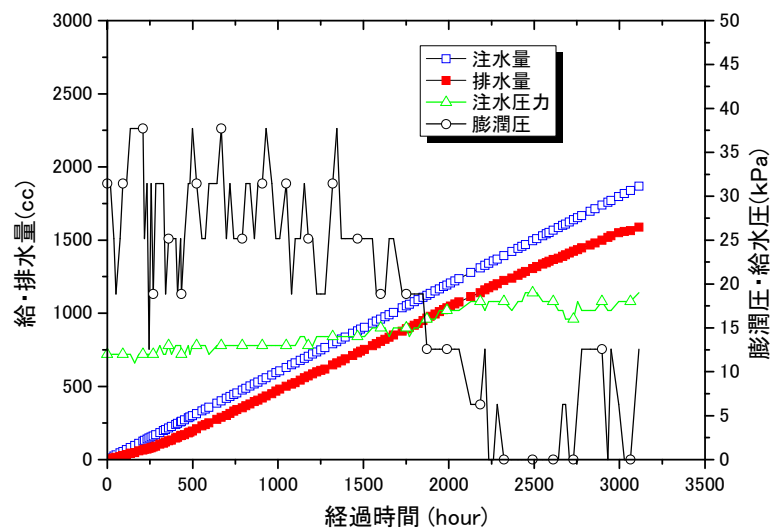


図 6.2.3-14 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況(H24)



図 6.2.3-15 1000mm セルによるパイピング試験の水みち観察(H24)

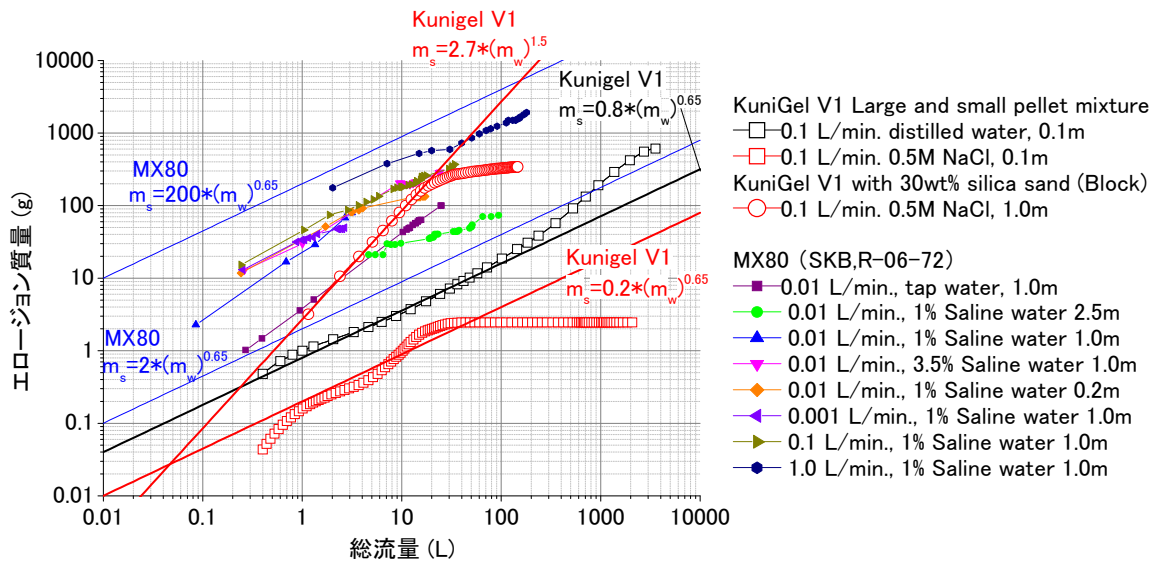


図 6.2.3-16 1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係

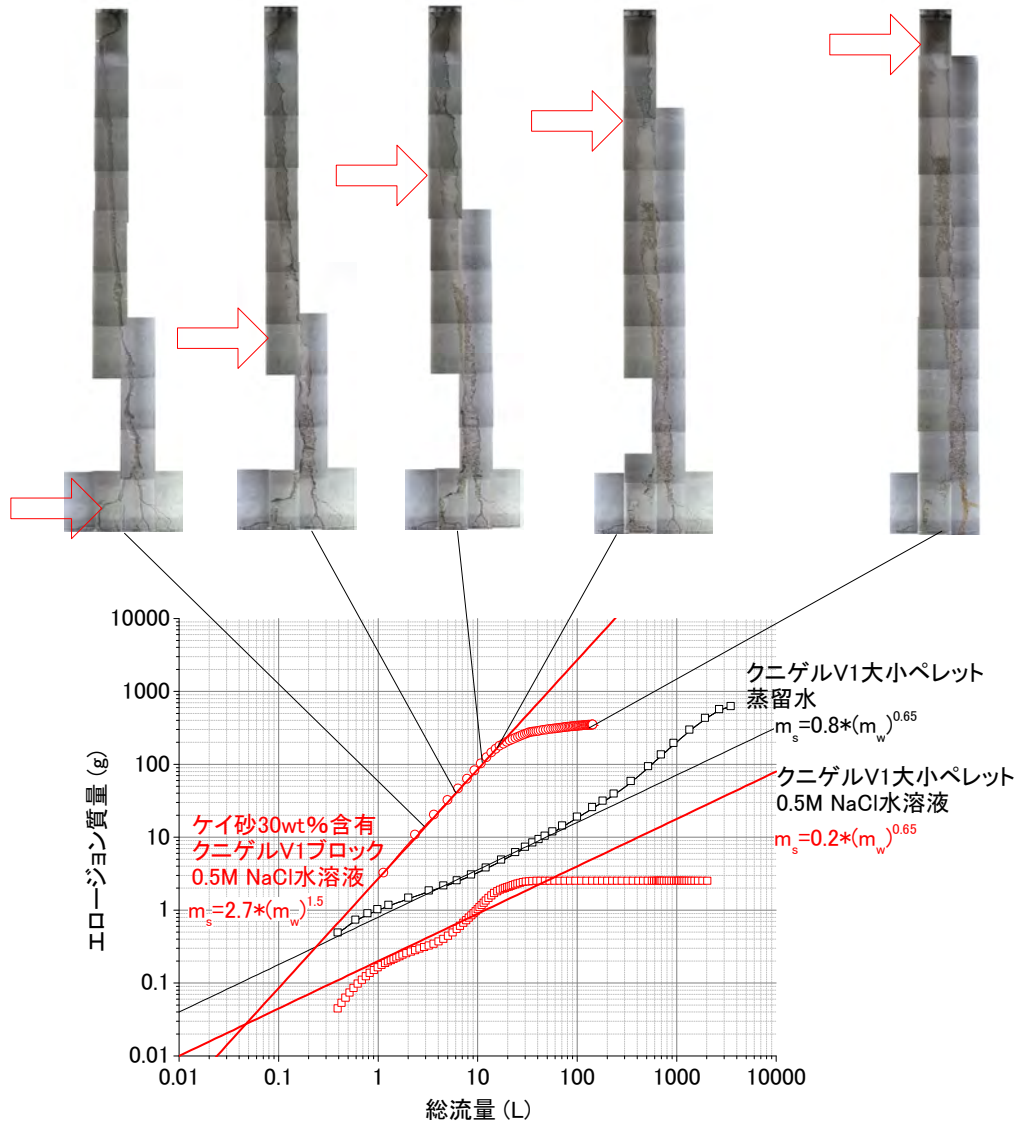


図 6.2.3-17 1000mm セルによるパイピング試験におけるケイ砂の堆積状況とロージョン質量

(5) モンモリロナイトブロック定置・蒸留水ケース (Case5)

本ケースでは、モンモリロナイト含有率がパイピング・エロージョン現象に及ぼす影響を調べるために、山形県産の Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 のモンモリロナイトを水簸してモンモリロナイト含有率が 99%以上になるまで精製したクニピア F で作製した供試体長 1000mm のブロック供試体を用いて試験を実施した。モンモリロナイト含有率が高くなると圧縮性が悪くなることや除荷時のリバウンドが大きいことなどから、 $\phi 45\text{mm} \times 50\text{mm}$ のブロックを 20 段積み上げて供試体を作製した (写真 6.2.3-1 参照)。試験で使用する液体は蒸留水であり、試験中は供試体をカメラで定点観測し、パイピングによる水みちの形成状況、膨潤による自己シール状況などを観察した (写真 6.2.3-2)。その他、写真 6.2.3-2 に示すように、試験中の通水圧や膨潤圧、さらには排水に含まれるエロージョン物質を採水して吸光度 (濁度) を計測した。計測した吸光度は、図 6.2.3-18 に示すように、事前にモンモリロナイト含有量をパラメータとして吸光度を計測して得られたキャリブレーションラインによって、排水中に含まれるモンモリロナイト量に換算できる。



写真 6.2.3-1 モンモリロナイトブロック (左) を積み上げた 1000mm ブロック供試体(右)

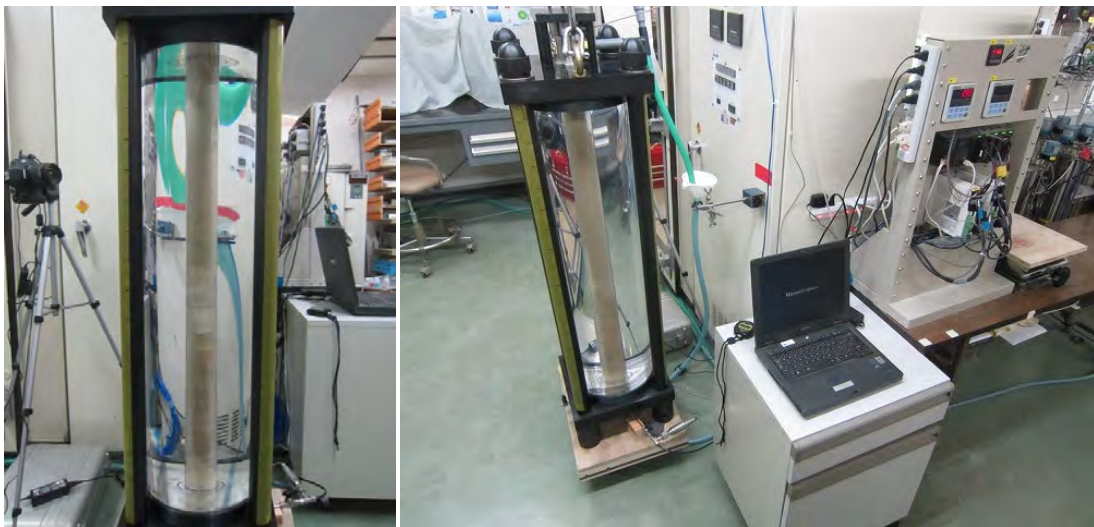


写真 6.2.3-2 定点観測状況 (左) と計測機器 (右)

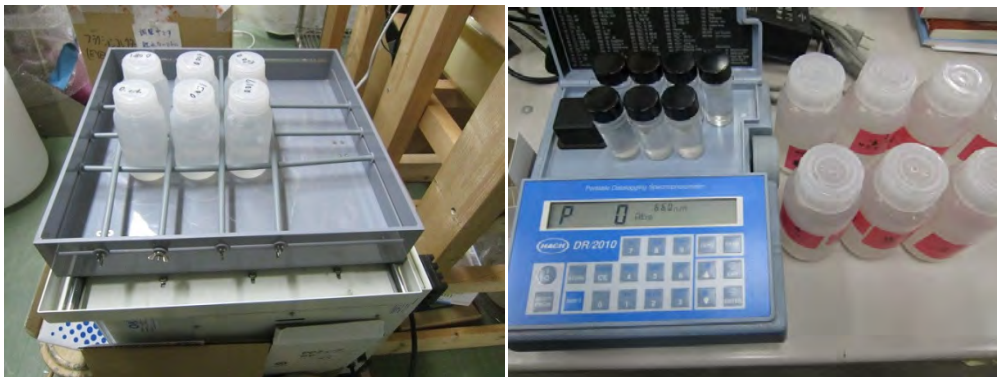


写真 6.2.3-3 濁度 (吸光度) 計測用の分散状況 (左) と濁度 (吸光度) 計測状況(右)

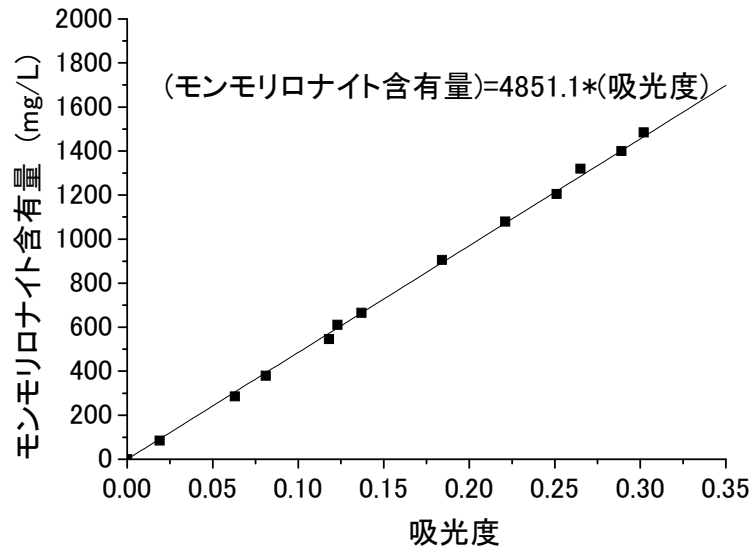


図 6.2.3-18 吸光度とモンモロロナイト含有量の関係

図 6.2.3-19 には、試験中の水みちの形成状況を示している。図から、試験開始直後には複数あった水みちが 1 本の水みちに収斂しているのが分かる。また、試験開始 22 日目までは水みちの大きさが徐々に大きくなっているが、その 23 日目以降、急激に小さくなった。

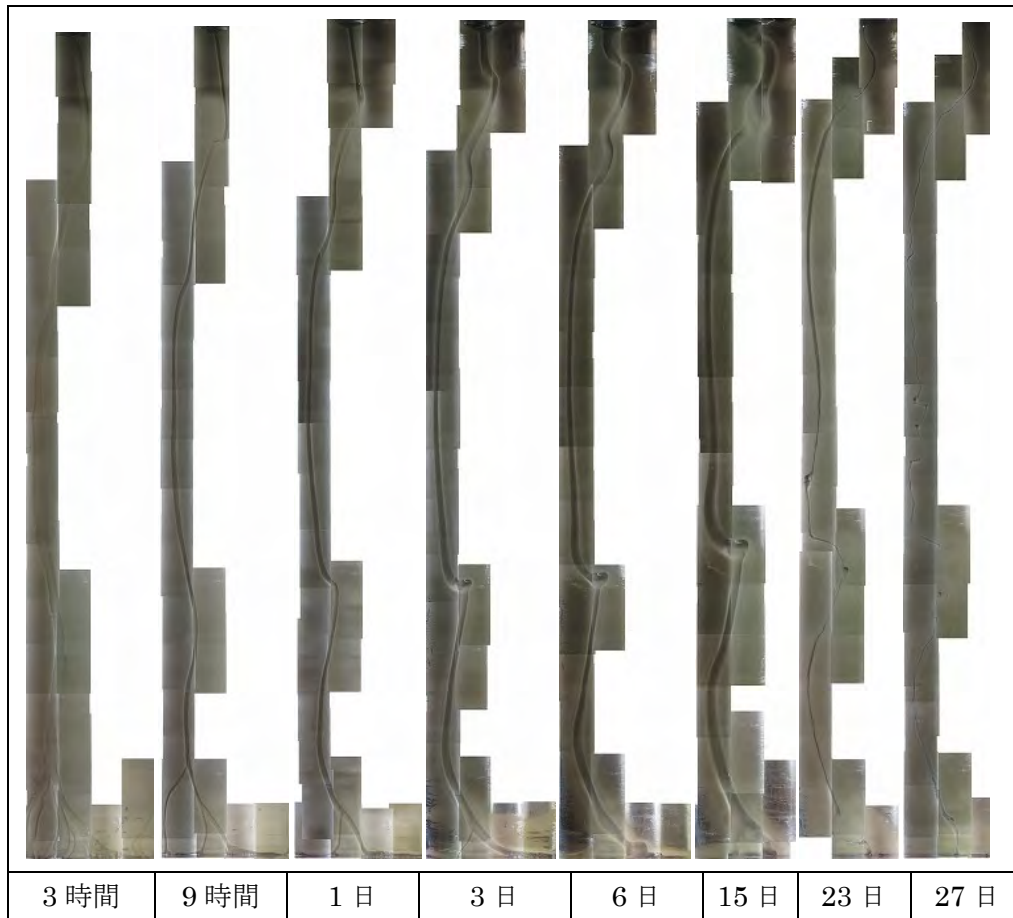


図 6.2.3-19 水みち形成状況

図 6.2.3-20 には膨潤圧と通水圧の経時変化を示す。図から、通水開始直後には 1MPa 程度あった膨潤圧が、試験開始から 22 日程度で 0.05MPa 程度まで減少している。水みちが拡大傾向であった 22 日目までは通水圧も減少傾向であり、通水圧と膨潤圧の経時変化は連動しているように見える。さらに、23 日目以降、水みちが小さくなるに従って、通水圧は激しく振動しながら増加傾向に転じている。この通水圧の経時変化は、水みちの観察結果は整合していると言える。一方、膨潤圧は、23 日目以降も減少傾向状態のままである。水みちを膨潤によってシールするためには、反力をとる必要があると考えられるため、現状の観察結果からは、半径方向に供試体が膨潤することによって発生するセルと供試体の摩擦を反力にしながらかみちをシールしているなどの可能性が考えられる。今後、さらなる計測と観察を行う必要がある。

図 6.2.3-21 には、総流量とエロージョン質量の関係を示す。図には、前述の大小ペレットを高さ 100mm になるように充填した供試体に蒸留水と 0.5M の NaCl 水溶液を通水して得られた総流量とエロージョン質量の関係、さらにケイ砂 30wt% 含有クニゲル V1 で作製したの 1000mm ブロック供試体に 0.5M の NaCl 水溶液を通水して得られた総流量とエロージョン質量の関係も併せて示している。

図から、NaCl 水溶液を用いた場合には、エロージョン物質が沈殿するために試験の途中からエロージョン量が鈍化している。これは供試体底面から上面に向けて通水しているためであり、横向きにした供試体の場合には異なる結果が得られる可能性がある。

大小ペレットを高さ 100mm になるように充填した供試体に蒸留水を通水して得られた結果と本試験結果を比較すると、モンモリロナイト含有率を高めてもエロージョンを抑制する効果は期待できないという結果となった。エロージョン量は排水中に含まれる混合物の濃度から換算しているが、モンモリロナイトが選択的に流出して、随伴鉱物は沈殿して排出されないとすると、モンモリロナイト含有率が高いベントナイトの方がエロージョンし易いという結果となる。

今後、ベントナイトに対して実施したエロージョン試験から得られたエロージョン材料や試験後の供試体のモンモリロナイト含有率を計測する必要がある。

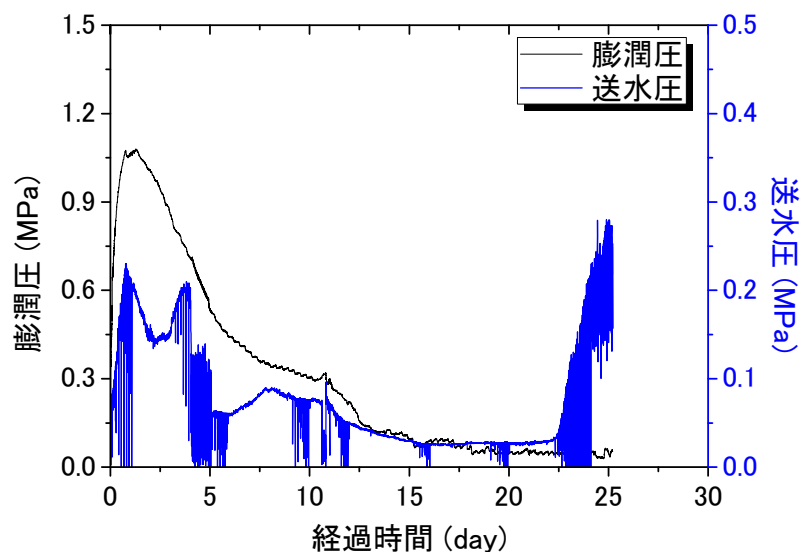


図 6.2.3-20 1000mm セルによるパイピング試験中の膨潤圧と送水圧の経時変化

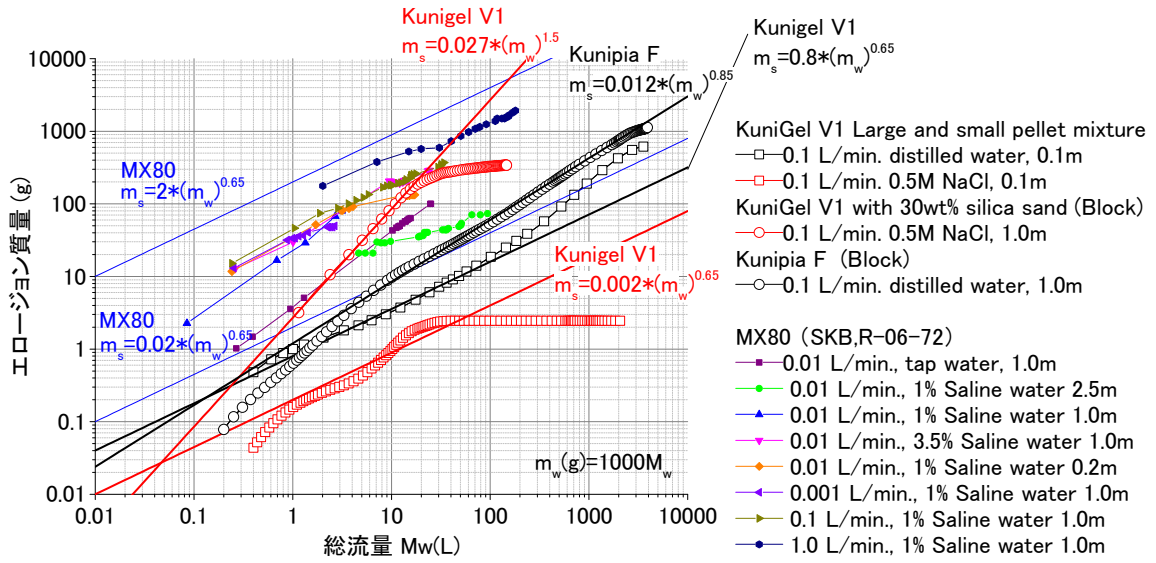


図 6.2.3-21 1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係

6.3 緩衝材の限界流速の検討

6.3.1 試験概要

SKB 社では、実験から取得した流量とエロージョン量の関係をモデルとして処分場におけるエロージョンの評価に用いている。しかしながら、流量とエロージョン量の関係をモデルとして汎用的に用いることの妥当性を検証するためには、この関係が、系の大きさに依存しないのか、通水方向や膨潤方向に依存しないのか、材料に対して一意に決まるものなのかなど、確かめなければならないことが多い。

仮に、この流量とエロージョン量の関係が材料特性だとすると、材料特性としての限界流速 q_l が存在することになる。この限界流速 q_l の取得を目的として、図 6.3.1-1 に示すような限界流速計測試験装置を用いた試験を実施した。なお、写真 6.3.1-1 に示すように、限界流速計測試験装置内の流れが層流であることを、事前に染料を流して確認した。

試験手順は次のとおりである。

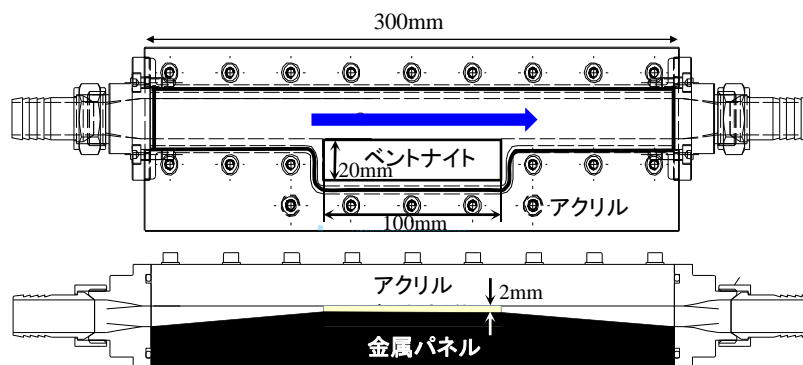


図 6.3.1-1 限界流速計測試験

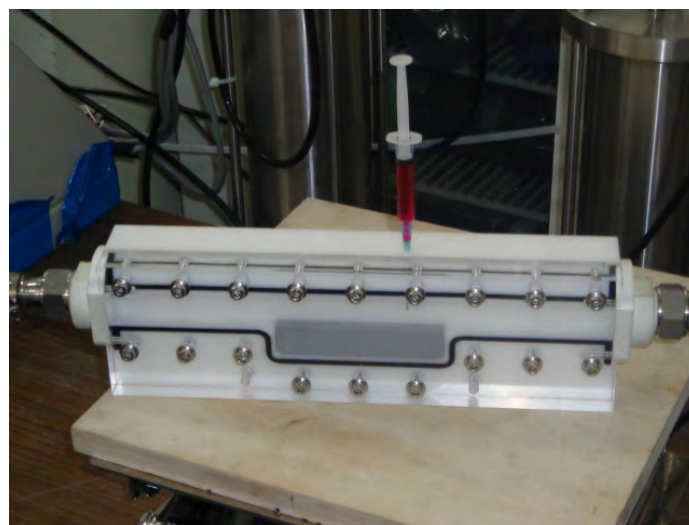


写真 6.3.1-1 限界流速計測試験の層流確認状況

- ① ある乾燥密度 ρ_d に締め付けた緩衝材を人工的に作った流路の河床部に設置し、様々な流速 q で通水する。流速が小さい場合、緩衝材が膨潤し、流路を狭くするため流速が増加し、エロージョンと膨潤が平衡するところまで膨潤する。逆に、流速が大きいと、緩衝材の表面が膨潤と同時に洗掘され、緩衝材の表面位置が一定値を示す。
- ② 通水中の緩衝材の膨潤挙動を計測し、膨潤量と流速 q の関係を取得する (図 6.3.1-2 参照)。
- ③ 膨潤量と流速 q の関係において、膨潤量がゼロとなる流速を、ある乾燥密度 ρ_d の限界流速 q_l とする。
- ④ ①～③を様々な乾燥密度について取得し、まとめると乾燥密度 ρ_d と限界流速 q_l の関係が図 6.3.1-3 のように得られる。

乾燥密度 ρ_d と限界流速 q_l の関係が図 6.3.1-3 上図のようになれば、限界流速は乾燥密度に依らず一定であり、材料物性として取り扱うことが可能であると思われる。一方、乾燥密度 ρ_d と限界流速 q_l の関係が図 6.3.1-3 下図のようになれば、限界流速 q_l が乾燥密度 ρ_d の関数となるため、エロージョンの評価に対して、施工に起因する乾燥密度分布や境界条件などを考慮しなければならない。さらに、設計においてはこの乾燥密度 ρ_d と限界流速 q_l の関係の非線形性を考慮してエロージョン量の評価をしなければならない。

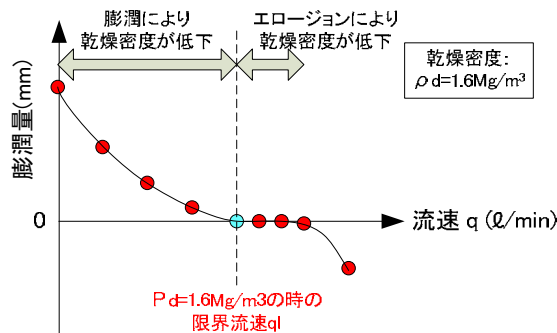


図 6.3.1-2 限界流速計測試験結果のイメージ

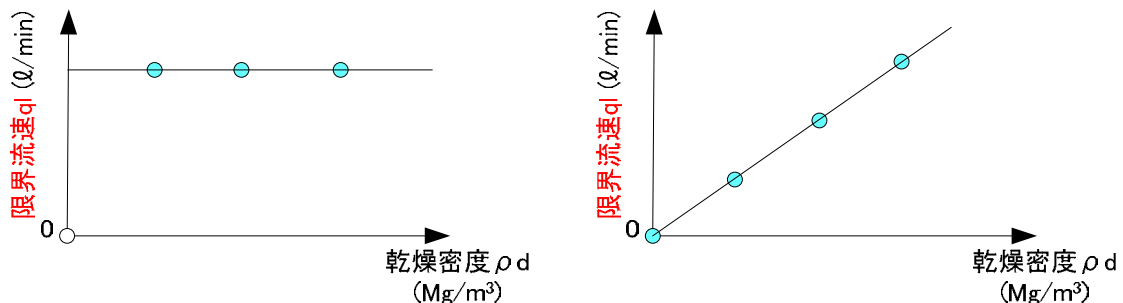


図 6.3.1-3 限界流速のイメージ

6.3.2 試験ケース

本検討では、図 6.3.1-1 に示すような、パイピングによって発生した水みちの内部の地下水流れを模擬したセルを作製し、流速をパラメータにして通水試験を実施する。試験では、水みちの一部が緩衝材となっており、緩衝材が膨潤するかエロージョンするかを流速ごとに観察し、エロージョンと膨潤が発生する流速の閾値を取得する。表 6.3.2-1 に試験ケースをまとめる。

この試験結果をまとめることによって物性値としての限界流速の存在について調べる。設定した流速は、これまでの検討の結果から 1.0~0.005L/min とした。

表 6.3.2-1 自己シール限界流速取得試験ケース

目的	状態	液種	通水方向	供試体	試験条件 流速(L/min)	試験数	備考
界面の透水性評価 自己シール限界流速	継続	蒸留水	一次元 膨潤方向に 対して垂直 方向	乾燥密度: 1.6Mg/m ³	1.0	各 1	新規
					0.50		新規
					0.25		新規
					0.10		新規
					0.0005		新規
	継続	蒸留水	一次元 膨潤方向に 対して垂直 方向	乾燥密度: 1.8Mg/m ³	1.0	各 1	新規
					0.50		新規
					0.25		新規
					0.10		新規
					0.0005		新規

6.3.3 試験結果

(1) 乾燥密度 1.6Mg/m^3 の場合

図 6.3.3-1 には各流量における供試体の上流、中央部、下流部の膨潤量と供試体中央部の流速を示す。膨潤量は、定点撮影した写真から読み取ったものである。膨潤量は、流速が遅いほど膨潤量が大きく、膨潤量の経時変化も滑らかである。逆に、流速が速いと膨潤量の経時変化の変動が激しい。これは、図 6.3.3-2 に示すように、流速が速い場合、緩衝材が土塊状に削られているためである。

なお、図 6.3.3-1 に示すように、本試験では、全てのケースで膨潤が発生しており、膨潤せず初期からエロージョンによって削られるというケースは見られなかった。

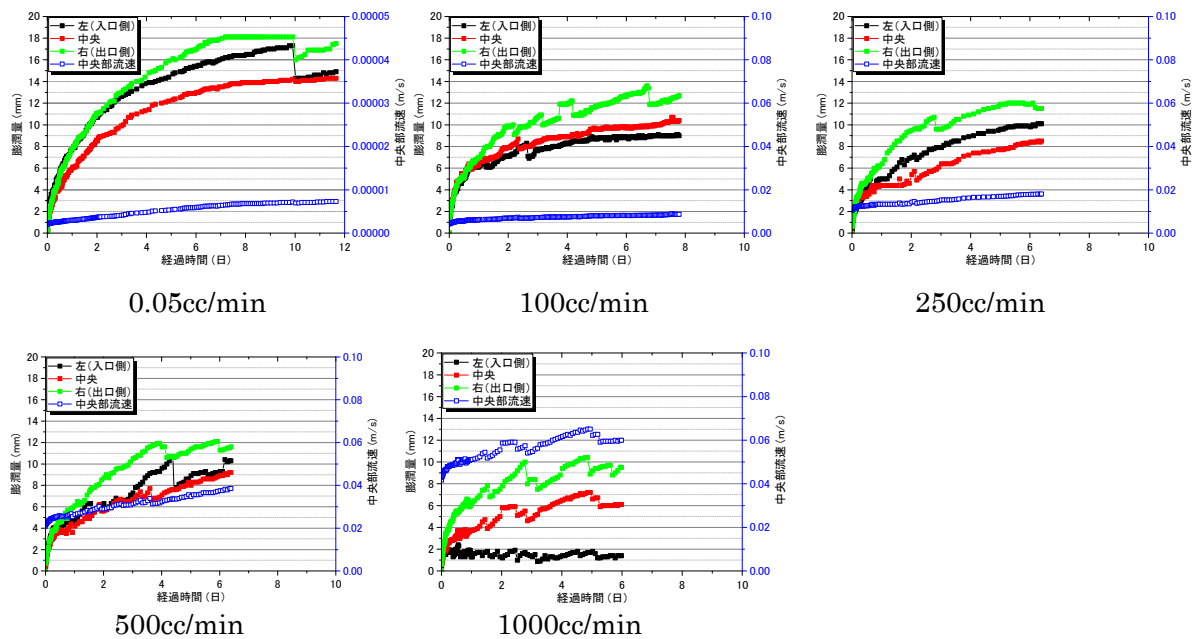


図 6.3.3-1 膨潤量と流速の経時変化（乾燥密度 1.6Mg/m^3 の場合）

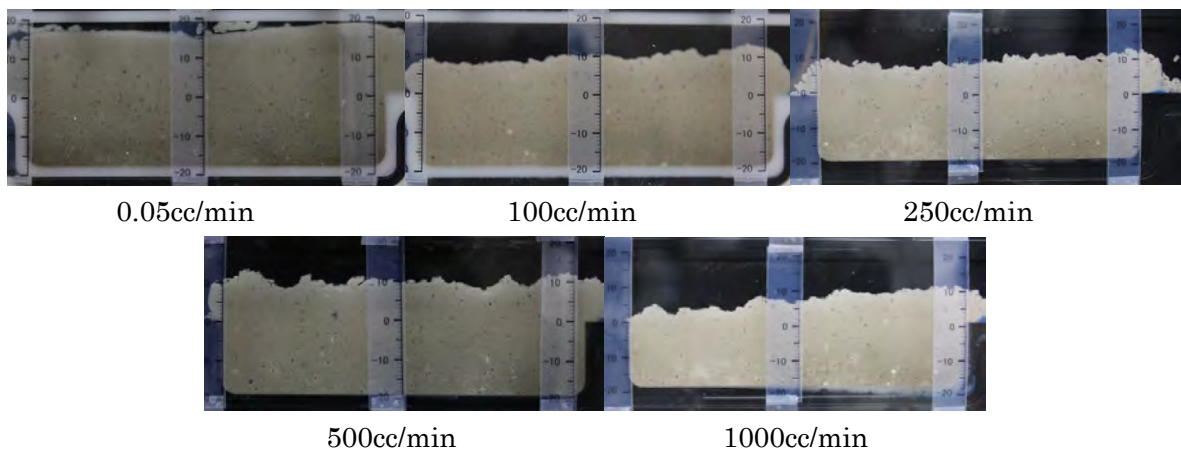


図 6.3.3-2 流量毎の膨潤・エロージョン状況（乾燥密度 1.6Mg/m^3 の場合）

(2) 乾燥密度 1.8Mg/m^3 の場合

図 6.3.3-1 には各流量における供試体の上流、中央部、下流部の膨潤量と供試体中央部の流速を示す。膨潤量は、定点撮影した写真から読み取ったものである。膨潤量は、流速が遅いほど膨潤量が大きく、膨潤量の経時変化も滑らかである。逆に、流速が速いと膨潤量の経時変化の変動が激しい。これは、図 6.3.3-2 に示すように、流速が速い場合、緩衝材が土塊状に削られているためである。

なお、図 6.3.3-1 に示すように、本試験では、全てのケースで膨潤が発生しており、膨潤せずに初期からエロージョンによって削られるというケースは見られなかった。

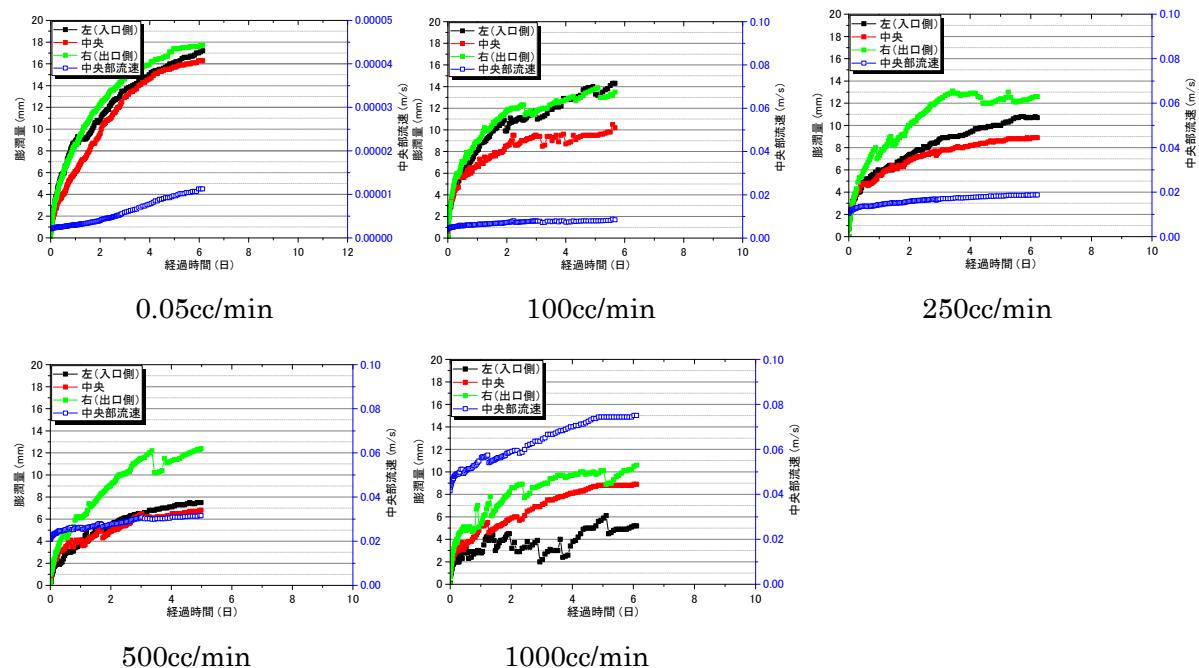


図 6.3.3-3 膨潤量と流速の経時変化（乾燥密度 1.8Mg/m^3 の場合）

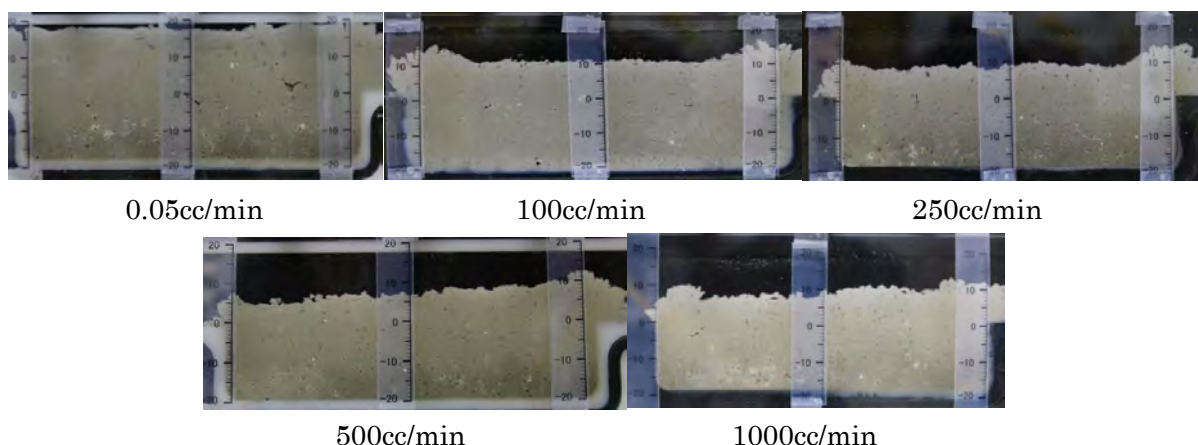


図 6.3.3-4 流量毎の膨潤・エロージョン状況（乾燥密度 1.8Mg/m^3 の場合）

(3) 流速と膨潤量の関係

図 6.3.3-5 には初期乾燥密度 1.6 Mg/m^3 と 1.8 Mg/m^3 の場合の平衡状態の膨潤量と流速の関係を併せて示す。ただし、緩衝材の膨潤が平衡状態であることを確認するための十分な時間を確保することが困難であったため、6 日程度の通水時間における膨潤量を平衡状態と見なして結果を取りまとめている。

平衡状態の膨潤量と流速の関係は、概ね 1 本の関数で近似できるように見える。しかしながら、流速が速くなるほど平衡状態の膨潤量が小さくなる傾向を示していることから、流速に対して平衡膨潤量に相当する乾燥密度が存在するものと考えたほうが妥当と考えられる。このため、初期乾燥密度 1.6 Mg/m^3 と 1.8 Mg/m^3 のケース毎に近似関数を取得した。全体的な傾向として、流速が遅いほど、両ケースの膨潤量の差が小さい。これは、流速が遅いほど、十分に膨潤した状態でエロージョンが発生するため、初期乾燥密度が膨潤量に及ぼす影響が小さくなるためである。

この近似関数で外挿すれば、初期乾燥密度 1.6 Mg/m^3 の限界流速が 0.22 m/s 、 1.8 Mg/m^3 の場合が 0.40 m/s であった。この結果をまとめると図 6.3.3-6 のようになる。今年度の試験からは 2 点しか限界流速が得られないが、今後、様々な乾燥密度に対する限界流速を取得することによって、パイピング・エロージョンに対する対策に資する情報として取りまとめたい。緩衝材の膨潤が平衡状態であることを機械的に決定できる方法に関しても、今後、検討が必要である。これらに関しては、今後の課題としたい。

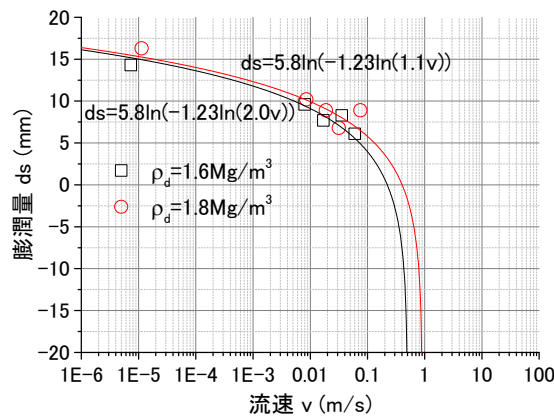


図 6.3.3-5 膨潤量と流速の関係 (乾燥密度 1.6 Mg/m^3 と 1.8 Mg/m^3 の場合)

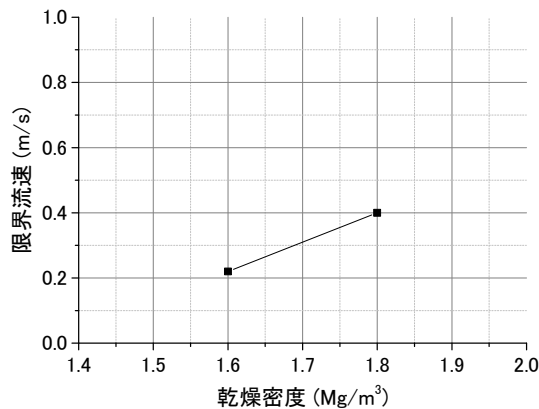


図 6.3.3-6 限界流速と乾燥密度の関係

6.4 工学規模パイピング・エロージョン試験

6.4.1 試験概要

高レベル放射性廃棄物地層処分施設において、緩衝材の定置後再冠水期間に、処分孔への地下水の浸入による水みち形成(パイピング)、浸食(エロージョン)が発生し、ベントナイトの自己修復作用を妨げる場合には、長期性能に影響を与える可能性がある。そこで、本研究では、前述のように小規模試験でパイピングやエロージョン現象について検討を行った。

小規模試験で明らかになった現象は、主に緩衝材と異種材料の界面に発生した水みち内で発生しており、小規模試験と言えども供試体寸法は水みちよりも十分に大きいため、これらの現象が試験規模に及ぼす影響は小さいものと考えられるが、確認が必要である。さらに、前述の小規模試験では、複雑な境界条件を考慮することが困難であったため、給水位置と数(鉛直方向と水平方向)、処分孔の不陸、ペレットの粒径、エロージョン対策の効果などの検討には適さないと考えられる。

そこで、本年度は、小規模試験よりスケールアップした工学規模試験において、試験規模の影響評価、実際の処分孔を模擬した境界条件下でのパイピング・エロージョン現象の発生状況観察や発生条件の検討、さらにエロージョンのモデル化を行う。図 6.4.1-1 に工学規模パイピング・エロージョン試験セルのイメージを、写真 6.4.1-1 には工学規模パイピング・エロージョン試験セルの写真を示す。写真 6.4.1-2 には供試体作成状況を示す。供試体の作製では、SUS製の半割れモールド内で、仕上がり層厚1cmとなるように静的締固めを60層実施した。完成後は、供試体の高さ調整の後に半割れモールドから脱型して、写真 6.4.1-1 に示したアクリルセル、及び上蓋などを被せて供試体を完成させた。なお、底盤は供試体の静的締固め時から後述するパイピング・エロージョン試験まで、同じ底盤を使用することで、不要な供試体の移動を排除した。

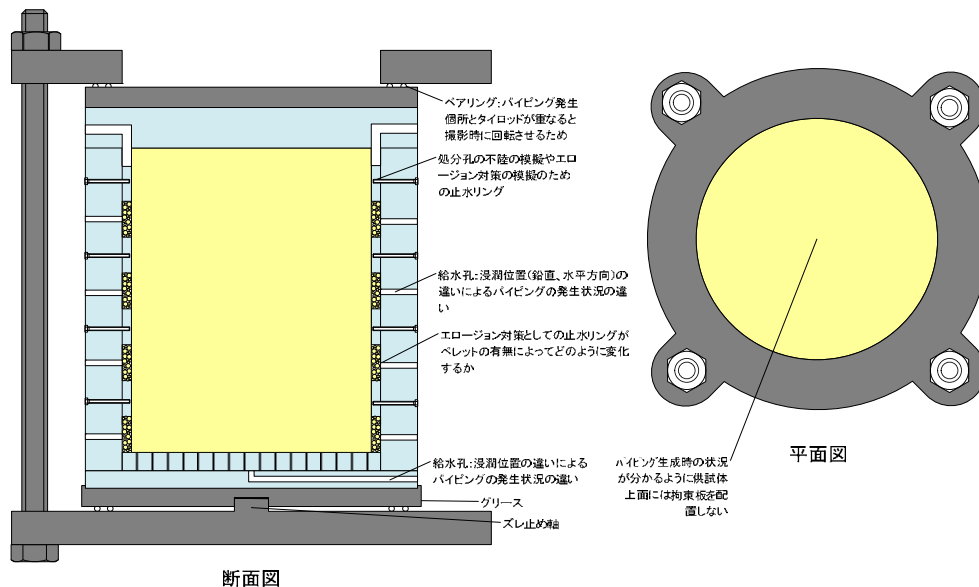


図 6.4.1-1 工学規模パイピング・エロージョン試験セルのイメージ



写真 6.4.1-1 工学規模パイピング・エロージョン試験セル



SUS 製半割れモールド



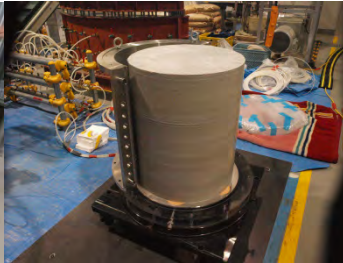
撒き出し状況



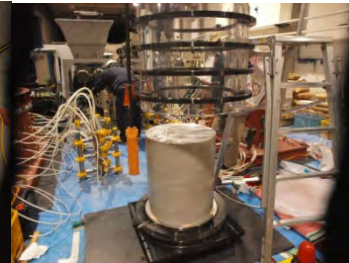
静的圧縮



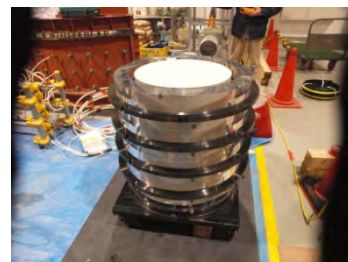
供試体完成



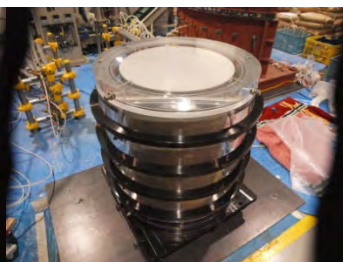
脱型



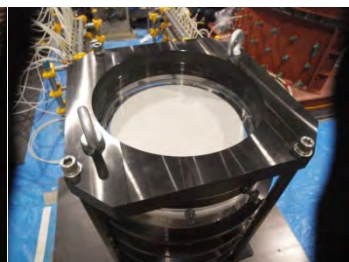
アクリルセル設置状況



アクリルセル設置



アクリル製上蓋設置



反力盤設置 (完成)

写真 6.4.1-2 工学規模パイピング・エロージョン試験供試体作成状況

6.4.2 試験ケース

表 6.4.2-1 に今年度実施する試験ケースを示す。今年度は、前述の小規模試験との比較のために、セルとの間に隙間がある条件で蒸留水を下面から上面に向かって一次元的に通水させた。供試体とセルの間の隙間は 30mm のリング状であり、水はこの隙間を下面から上面の排水孔に向かって流れる。この際の流速は、シリンジポンプで 0.1L/min となるように制御した。

排水孔は 5 mm のパイプ状であり、90° 毎に 1 カ所、合計 4 カ所設けた。

表 6.4.2-1 工学規模パイピング・エロージョン試験ケース

目的	液種	通水方向	供試体	流速 (L/min)	試験数	試験項目	備考
境界条件を考慮した工学規模パイピング試験	蒸留水	底面から上面	膨潤後の平均乾燥密度 1.6Mg/m ³ 程度のブロック 寸法： φ 500 mm × h600 mm	0.1	1	通水圧 エロージョン量 (濁度) パイピング・エロージョン 挙動の観察	新規 セル内径： 560 mm 高さ： 600 mm

6.4.3 試験結果

図 6.4.3-1 に送水圧と送水量の経時変化を示す。図から、送水量は 0.1L/min で一定であり、通水圧は増減を繰り返しながら、大局的には漸増傾向を示している。

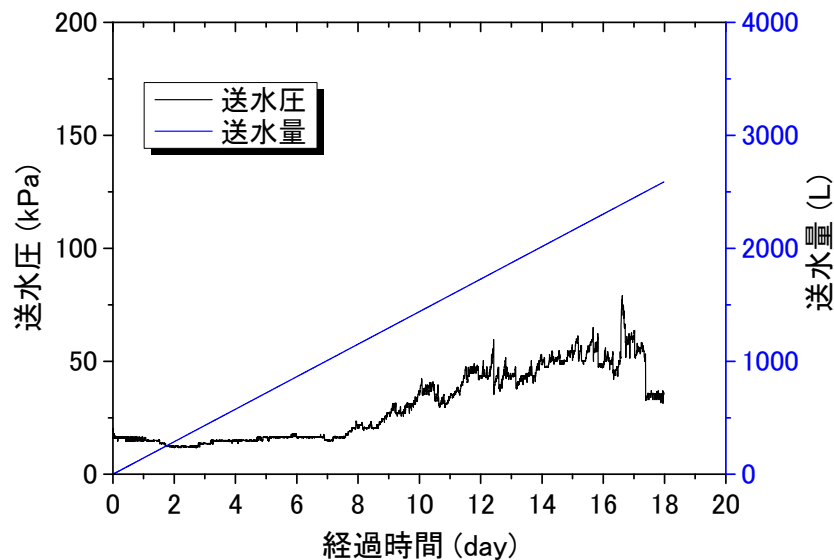


図 6.4.3-1 送水圧と送水量の経時変化

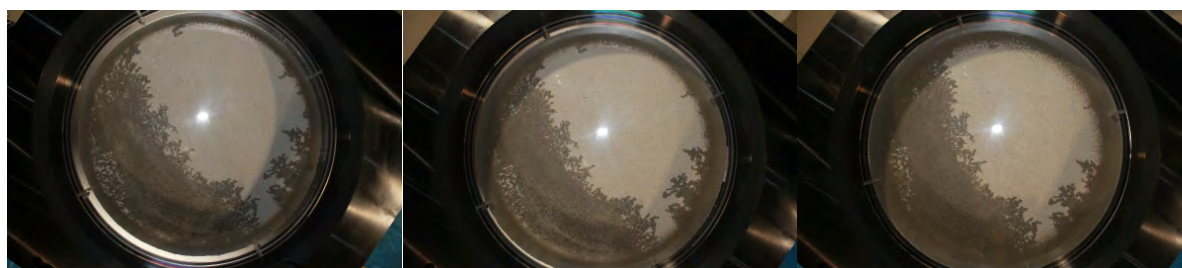
写真 6.4.3-1 には、供試体上面の定点撮影による浸潤状況を示している。写真から、通水開始直後にアクリル製の上蓋と供試体との隙間に水が浸潤しているが、それ以降、湿潤領域の形はほとんど変化していない。これは、供試体の上面の縁が膨潤することにより、隙間がなくなったため、水の供給が途絶えたためであると思われる。また、供試体の周囲は時間経過に伴って膨潤し、17 日目にはほとんどの隙間がシールされた。



開始直後

1日目

2日目



4日目

10日目

17日目

写真 6.4.3-1 工学規模パイピング・エロージョン試験上面の浸潤状況

写真 6.4.3-2 には、水みちの形成状況を示す。試験直後、供試体下段に発生した水みちが徐々に上段に向かって進展し、最終的には排水孔とつながった。このため、図 6.4.3-1 に示した通水圧の経時変化も低い値のままである。中段の水みちは、一見、シールされたように見えるが、緩いベントナイトがセルの表面に付着しているだけで、シールされてはいない。

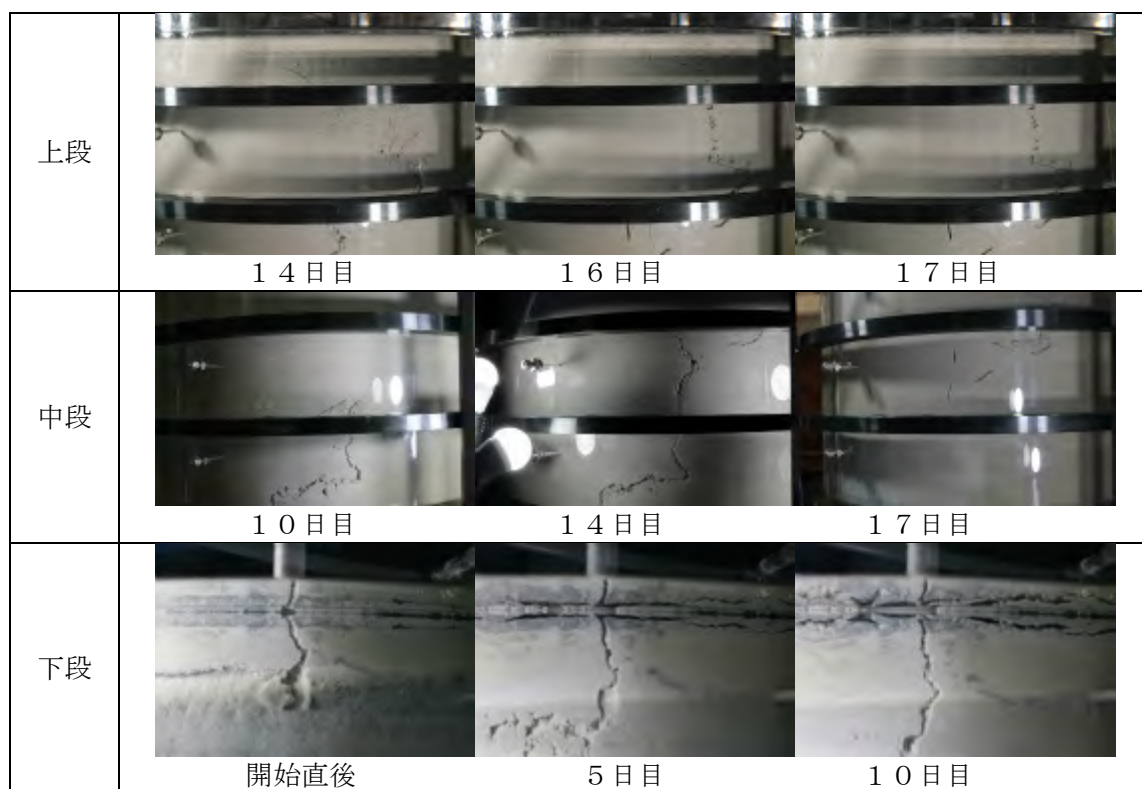


写真 6.4.3-2 工学規模パイピング・エロージョン試験における水みち形成状況

図 6.4.3-2 には、水みち形成観察結果のイメージを示す。試験を観察すると、細心の注意を払って篩を使用しながら材料を撒き出して仕上がり層厚 1 cm 作製した供試体であっても、その膨潤は決して一様ではなく、上下方向、円周方向に、膨潤が早期に発生する場所と遅れて膨潤する場所が存在する。早期に膨潤する場所と遅れて膨潤する場所が上下に発生すると、遅れて膨潤する場所が横向きの水みちとして残り、早期に膨潤する場所と遅れて膨潤する場所が円周方向に存在すると、遅れて膨潤する場所が縦方向の水みちとして残る。このような水みちの形成メカニズムから、写真 6.4.3-2 にしめすように、水みちは階段状をとっている。

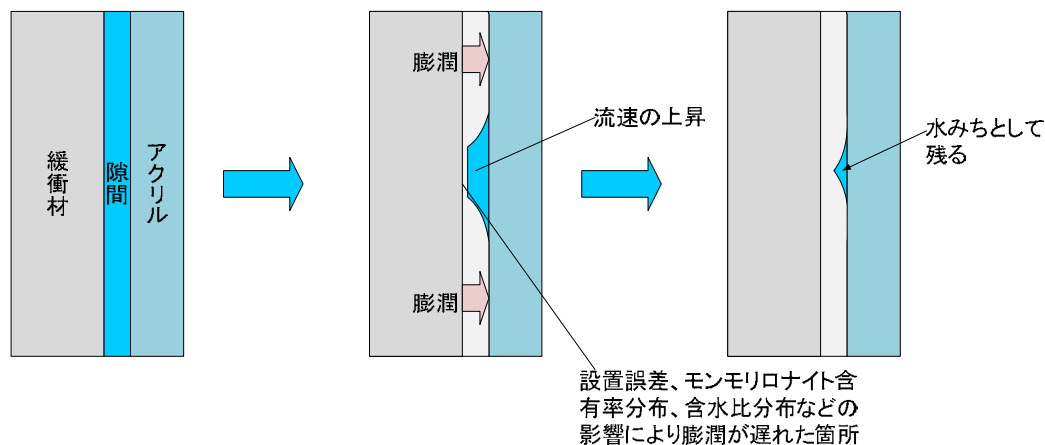


図 6.4.3-2 水みち形成観察結果のイメージ

6.5 工学技術への反映

6.5.1 緩衝材や埋め戻し材等の材料特性としての許容流速の整理

SKB 社では、実験から取得した流量とエロージョン量の関係を用いて処分孔の許容される流量とエロージョン量に対して基準を設けるべく検討を行っている[7]。その検討手順は、以下のようなやり方である。まず、①流量とエロージョン量の関係の取得しておく。次に、②処分場の地下水流動解析から、各処分孔からの湧水量を算出する。③①の流量とエロージョン量の関係の関係を地下水流動解析結果に適用し、湧水量と同時にエロージョン量を算出する。④許容される流速とエロージョン量の基準に照らして処分孔としての適性を評価する。また、検討では、エロージョンを防ぐために、なるべく早く処分孔を閉鎖する必要性を示しており、処分孔を閉鎖する順番による地下水挙動の変化なども考慮して処分孔を閉鎖する順番などについても検討している。

この方法にならって、処分孔として許容される流量を決定するフローを考える。処分孔における緩衝材の性能は、力学・水理・化学・熱的な緩衝性である。この性能を満足しているかどうかを評価するための代替パラメータとして乾燥密度 ρ_d に基準値 $\bar{\rho}_d$ が与えられている。

いま、施工した処分孔の緩衝材の体積 V 、乾燥質量 M とすると、施工した緩衝材は、

$$\bar{\rho}_d < \frac{M}{V}$$

を満足しなければならない。また、基準乾燥密度 $\bar{\rho}_d$ とする緩衝材の体積と乾燥質量が V 、 \bar{M} で与えられるとすると、

$$\bar{\rho}_d = \frac{\bar{M}}{V}$$

で表される。この時、処分孔当たりの許容されるエロージョン量（乾燥質量） E は、

$$E = M - \bar{M}$$

で与えられる。ここで、エロージョン量（乾燥質量） E となる総湧水量 Q は、前述の室内試験から、

$$E = \beta Q^\alpha$$

で与えられるため、許容される総湧水量 Q が、

$$Q = \sqrt[\alpha]{\frac{E}{\beta}}$$

で与えられる。いま、ある処分孔において、緩衝材を施工してから（仮）閉鎖するまでの時間を T とすれば、許容される流速 q が、

$$q = \frac{Q}{T} = \frac{1}{T} \sqrt[\alpha]{\frac{E}{\beta}} = \frac{1}{T} \sqrt[\alpha]{\frac{M - M'}{\beta}}$$

で与えられる。ここで、許容される流速 q をなるべく大きくして処分可能な孔を多く確保するためには、止水工法や地下水低下工法などで流速 q を小さくさせる以外には、閉鎖するまでの時間 T を短くするか、施工する緩衝材の密度を高める（処分孔当たりの緩衝材の乾燥質量 M を大きくする）以外に工学技術としての対策はない。また、許容される流速 q と緩衝材が施工可能な流速の大小関係についても検討が必要である（図 6.5.1-1 参照）。

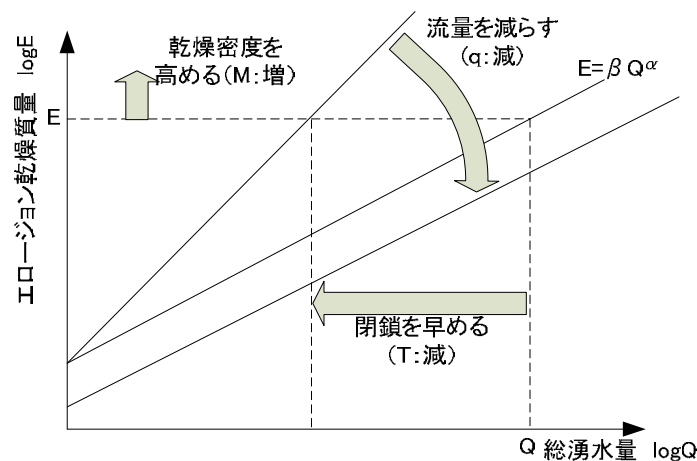


図 6.5.1-1 流量とエロージョン量の関係における湧水対策の意味

(1) 閉鎖を早める対策

前述のように、緩衝材の流出現象の対策の一つとして、閉鎖時期を早めるというものが考えられる。その一方で、近年の地層処分事業に対しては、社会的な要請から廃棄体の再取り出し可能性に関する検討が開始されている。なお、本検討では、再取り出し可能な状態とは、連絡坑道の埋戻しがなされない状態とする。

処分孔の掘削後から閉鎖までの想定される工程は、①緩衝材の施工、廃棄体定置、②処分孔

の端部プラグ設置、③閉鎖（連絡坑道埋戻し）、である。処分施設を閉鎖する前の段階では、連絡坑道は水位が下がっており、地下水は処分坑道から連絡坑道に向かって流れるものと考えられる。このような状態で、再取出し可能性を維持するためには、ある程度の緩衝材の流出を許容する必要があり、再取出し可能性とエロージョン現象はトレードオフの関係にある。

よって、エロージョン抑制の観点からは、再取り出し可能な期間を全く設けずに、閉鎖した処分坑道は、随時、埋め戻し、水位を回復させるという対策が考えられる。縦置き処分方式の場合は、処分孔毎に端部プラグと埋め戻し材を施工し、人工給水させ、膨潤圧の反力は埋め戻し材から取るという方法が考えられる。横置き処分方式の場合は、廃棄体定置後、その都度、コンパートメントプラグを施工して人工給水し、所定量の廃棄体を定置した後に処分坑道の端部プラグを施工する。処分済みの処分坑道までの連絡坑道を埋め戻し、地下水を回復させることが最も合理的であると考えられる。閉鎖時期を早める対策の場合、連絡坑道の埋め戻しだけでなく、地下水位を回復させる必要があるため、水位回復用のプラグを段階的に設置する必要がある。

(2) 流量を減らす対策

廃棄体の再取り出し可能な期間を長期間維持したい場合、埋め戻したり、水位を回復させたりすることは難しいため、処分孔の湧水量を極力小さくする必要がある。そのためには、揚水による地下水位の低下や裏面排水シートや一次・二次覆工などの水密構造を採用するなどの対策が考えられる。しかしながら、この再取出し可能性を維持しなければならない間、揚水し続けることや、有機物の防水シートで水密構造を維持し続けることは実績がなく、無機の防水シートも存在しないことから実現性が不確実である。そこで、一次覆工と二次覆工の間にベントナイト遮水層を介在させる水密構造が考えられる。このベントナイト遮水層の構築は、吹付け工法か二次覆工の背面にプレキャストでベントナイトブロック設置する施工も可能であると考えられる。この水密構造の処分孔を構築するためには、土圧と水圧に耐える力学構造にする必要があり、施工費が大幅に増加するが、その一方で、湧水による緩衝材の流出に対する対策を施工時から維持管理時まで実施する必要がなくなること、処分孔からの排水処理をする必要がなくなるなどのコスト低減効果も見込める。

揚水による対策も実現性は高いが、排水に環境基準を上回る溶解物が存在する場合、再取り出し可能な期間、ずっと排水処理費用が掛かるリスクを孕んでいる。

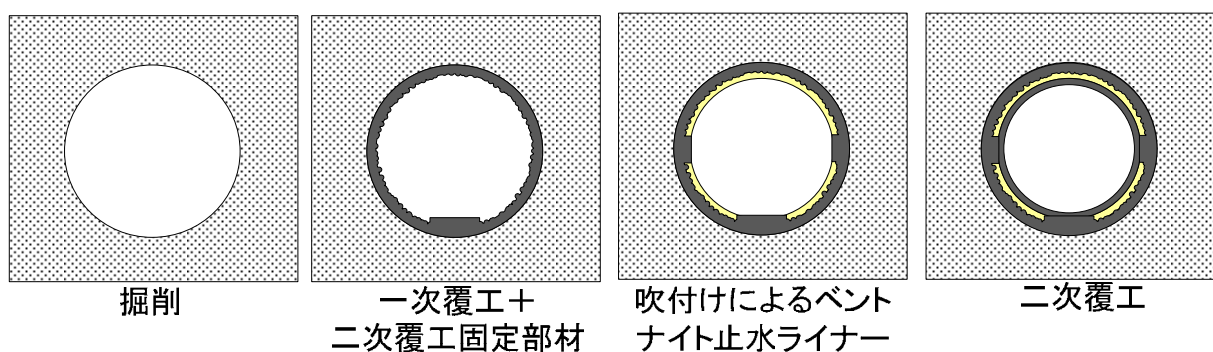


図 6.5.1-2 削孔→1次覆工→ベントナイト吹付け→2次覆工

(3) 緩衝材の乾燥密度（乾燥質量）を高める対策

前述のような、許容されるエロージョン量が、総流量とエロージョン量の関係から規定される場合、乾燥密度が一定であれば、緩衝材の体積が大きい方が、許容されるエロージョン量が大きくなり、再取り出し期間を長く設定できる。逆に、処分坑道の体積が一定であれば、乾燥密度を高くすれば、再取り出し期間を長く設定できる。

乾燥密度の値は、施工方法によって達成可能な値が異なるため、このような対策は施工方法選択条件となり得る可能性がある。一方、処分坑道の体積を大きくすることは、処分施設の施工コストの増大を招くが、幅広く施工方法を選択できるという長所がある。緩衝材の乾燥密度は、施工性やエロージョンの観点からだけでは決定できないため、処分施設の施工コストの増大を齎すが、処分坑道の体積を大きくする対策の方が現実的であると考えられる。

6.5.2 試験結果に基づく対策フロー

本検討では、処分孔の緩衝材表面近傍で発生する、ブレイクスルー、パイピング、エロージョンの各現象の発生状況を小規模試験によって観察した。その中で、湧水量が 0.1L/min の場合、通水初期には多くの水みちが発生しているが、最終的には1つの大きな水みちに収斂する可能性があることを示した。このことは、蒸留水でも海水相当の NaCl 水溶液でも同様であった。収斂した1本の水みちの大きさに対して試験系は十分に大きいため、実際の処分孔や処分坑道の孔壁と緩衝材の間に多数の水みちが発生しても、最終的には1つの大きな水みちに収斂する可能性を示唆している。このことは、仮に処分孔としての使用可否を処分孔当たりの湧水量によって決定しても、処分孔当たりの湧水量が最終的には収斂した水みちを流れる湧水の流量となることを意味している。このため、収斂した水みちの流量とエロージョンが発生する流量の関係も考慮したうえで処分孔としての使用可否を決定する必要がある。

さらに、実際の処分孔であっても最終的に1つの大きな水みちに収斂するのであれば、小規模試験であっても、実際の処分孔で生じていることと同じ現象を観察できていることになる。よって本検討をパラメトリックスタディーとして実施して、地下水イオン強度ごとのエロージョンが発生する流量を取得し、別途、施工可能な湧水量を施工試験によって取得できれば、本検討結果によって処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法などを決定する基準値を与えることができる。

図 6.5.2-1 に、処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法などを決定するチャートにおける本検討結果反映先を示す。なお、図 6.5.2-1 に示すフローは、ある一定期間、廃棄体を再取り出し可能な状態にするという前提の下で記述されており、再取り出し期間を変化させるという対策は対象外としていることに注意が必要である。よって、下記のフローにおいて記述される限界流速は、実際には閉鎖を早めることで、変化させることが出来る。

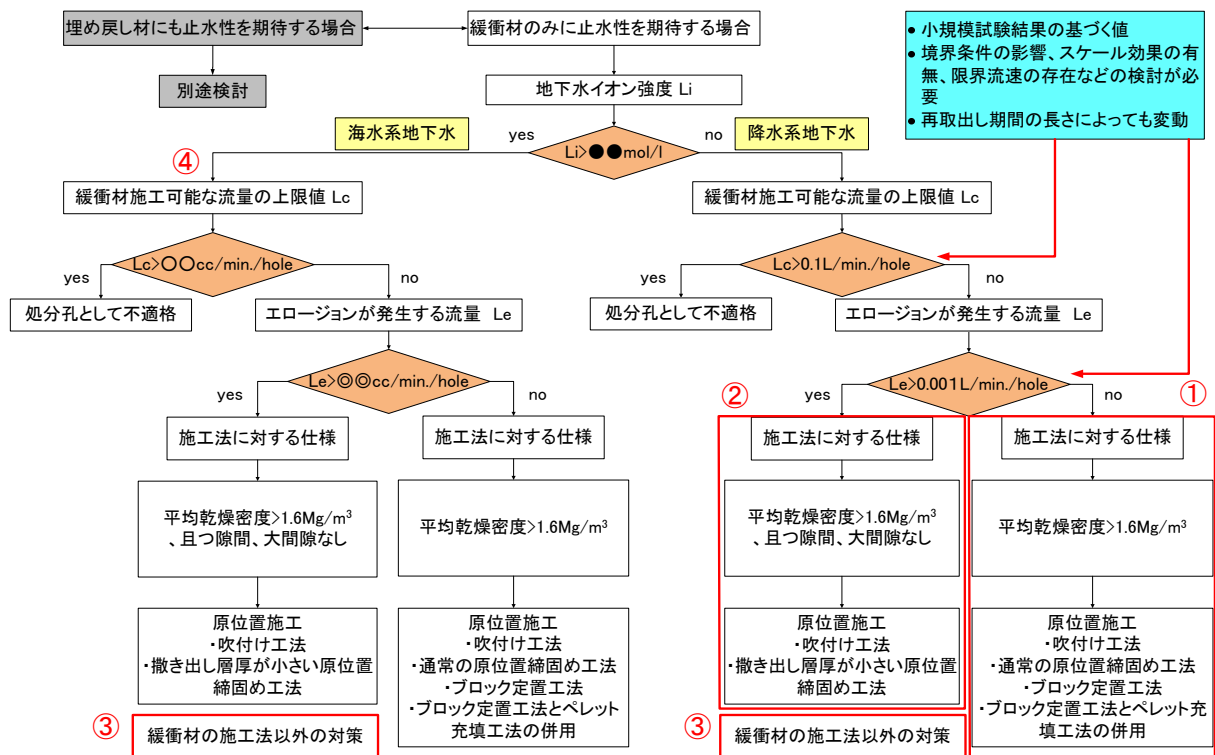


図 6.5.2-1 処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法の決定チャートにおける本検討結果反映先

平成 24 年度のパイピング・エロージョン試験の Case9 の結果から、液種が蒸留水であり、

①湧水量 Le が $0.001\text{L}/\text{min}$ 以下の場合

処分孔においてパイピング・エロージョンは発生しないという結果になった(図 6.5.2-1①)。

つまり湧水量が $0.001\text{L}/\text{min}$ 以下であれば、緩衝材の施工法として原位置施工のうち吹付け工法、原位置閉め固め工法、ブロック定着工法、ブロック定着工法+ペレット充填工法の併用のすべてが採用可能である。

② 湧水量 $Le > 0.001\text{L}/\text{min}$ の場合 (再取り出し可能期間は一定)

【対策 1】: 緩衝材ブロックのパイピング・エロージョンを防ぐために、ペレットを岩盤と緩衝材ブロックの間に充填する対策が考えられる。これは、前述の緩衝材の乾燥質量を増加させる対策に類する。さらに、水みちが収斂する時間を遅らせて、水みちの流速が急激に増加することを抑制する効果も期待できる。さらに、供試体内への地下水浸潤量を増やし、界面の水流れを減少させる効果や膨潤により岩盤から処分孔内への湧水量を減らすという効果も期待できる。これらは、前述の流量を減らす対策に類するものと考えられる。

【不確実性】: 現段階では、許容される上限の湧水量が明確になっていないが、本検討結果に基づいて決定すれば、 $0.001\text{L}/\text{min}$ ではエロージョンは発生せず、 $0.005\text{L}/\text{min}$ ではエロージョンが発生したことから、 $Le = 0.005\text{L}/\text{min}$ と考えることができる。ただし、これは、緩衝材のみに止水効果を期待する場合の値であり、処分孔や処分坑道の仮端部プラグの設置などの対策があればその値を更に大きくできる。また、再取出し可能な期間によってもその値が変わることを付記する。

【対策2】：吹付け工法、現場締め固め工法によって、緩衝材の隙間をなくし均質な乾燥密度を施工する対策が考えられる。これは、前述の緩衝材の乾燥質量を増加させる対策に類する。さらに、供試体内への地下水浸潤量を増やし、界面の水の流れを減少させる効果や膨潤により岩盤から処分孔内への湧水量を減らすという効果も期待できる。これらは、前述の流量を減らす対策に類するものと考えられる。

【不確実性】：吹付け工法の場合、平成24年度の施工技術高度化試験において、総湧水量は0.1 L/minの条件で施工を行った。この場合の1つの孔当たり0.0037L/min(Case1)の場合と0.03L/min(Case2)および0.003L/min(Case3)である。施工は順次、湧水箇所を模擬したノズルを吹付けで閉塞させながら施工するものであり、最終的に残ったノズルからの湧水は0.1 L/min程度と考えられる。それでも、施工自体は問題なく実施できたため、この本検討結果に基づいて施工可能な湧水量を決定すれば、0.1L/minとなる。他の施工法に関しては、同様の検討が未実施であるため、取得する必要がある。

さらに、湧水環境下でも施工することは可能であったが、止水することはできなかったため、施工中の湧水処理や施工後の仮止水による膨潤期間の設定など、施工以外の対策を検討する必要がある。膨潤期間の設定に関しては、後述する。

③ 湧水量 $Le > 0.001L/min$ の場合（再取り出し可能期間は一定）

【緩衝材の施工法以外の対策1】：室内試験の結果から、水みちは緩衝材と非膨潤性材料の界面に収斂するということが明らかとなった。実際の処分施設では、処分孔や処分坑道の孔壁と緩衝材の界面に水みちが形成されるものと考えられる。このため、孔壁に人工的な不陸を設置するという対策が考えられる。これにより、膨潤後の緩衝材の表面に凹凸が形成されるため、緩衝材と地下水の接触面積が増加して緩衝材内部に浸潤する湧水量が増加する効果が期待できる。さらに、地下水圧が作用しても緩衝材の連続的な水みちが形成され難くなり、緩衝材近傍に拡散場を作り易くなるなどの効果も期待できる。

【不確実性】：人工的な不陸の効果に関しては、前述の工学規模パイピング・エロージョン試験において検証する必要がある。また、不陸の形状や施工手順などに関しても今後、検討する必要がある。

【緩衝材の施工法以外の対策2】：室内試験結果から、人工給水によって緩衝材を事前に膨潤させる対策が考えられる。給水量を制御した状態で膨潤（プレハイドレーション）させ、湧水箇所や流出箇所をシールできれば、処分孔や処分坑道を拡散場とすることができる。この場合、人工給水に伴う膨潤変形を拘束するためのコンパートメントプラグや端部プラグなどの緩衝材以外の対策も不可欠となる。

【不確実性】：緩衝材をプレハイドレーションさせると、地下水圧がほぼ全応力として緩衝材に作用し、その圧力によって発生する隙間によって破過現象が発生する可能性がある。さらに、その隙間が流出箇所と連通するような場合、湧水圧によって発生した隙間が亀裂などの流出孔と連通したら瞬時に水が流れるのと同時に水圧が下がり、隙間が塞がるという現象が繰り返されるものと考えられる。このため、前述の人工的な不陸の設置を併用するなど、複合的な対策を取る必要があると考えられる。

④ 塩水環境における仕様検討

【対策】：海水相当の NaCl 水溶液での室内試験の結果から、緩衝材の流出現象は、蒸留水の場合と概ね同様であったが、0.0001L/min(0.1cc/min)でも破過現象とシールが繰り返されており、塩水環境における許容される湧水量は不明である。ただし、0.0001L/min(0.1cc/min)以下の流速を許容される湧水量とすることは現実的には厳しすぎるものと考えられるため、緩衝材だけで止水させるのではなく、閉鎖時期や許容流出量の考えなどから妥当な限界流速を決定する必要がある。

また、エロージョンによるケイ砂とベントナイトの分離傾向が著しく、水みちにケイ砂が沈殿する傾向がみられるため、緩衝材と孔壁の界面近傍はベントナイト単体とするなどの対策が考えられる。

【不確実性】：塩水環境下では、エロージョン材料が沈殿し易いため、流量の方向と流出位置の関係が重要となってくる。縦置き処分方式で、底面から方面に向かって湧水が流れるような場合には、エロージョン材料は沈殿して、処分孔から流出しない可能性が実験から示唆された。一方、横置き処分方式では、エロージョン材料が沈殿しても、流出位置によってはそのまま排出される可能性もある。今後、塩水環境下においては、流量の方向と流出位置に関して考慮しながら検討を進める必要がある。さらに、地下水組成として、Na/Ca イオン比もパラメータとすべきである。

6.5.3 湧水量制御技術に関する文献調査

前述のように、緩衝材だけで止水性を担保する場合、許容される湧水量が非常に厳しくなり、処分サイトの選択肢を著しく制限することになる。そこで、許容されるエロージョン量を総流量とエロージョン量の関係から規定すると、その対策は、閉鎖までの時間の削減、流量の低減、緩衝材の乾燥質量の増加、に大別される。これらの対策の実施可能な時期は、施工段階ごとに異なり、その施工段階は掘削前、掘削中～緩衝材施工中、さらに緩衝材施工後に大別できる。掘削前の湧水対策に関しては、湧水量の少ないサイトの選定やグラウトや揚水による止水対策などが考えられる。

掘削中～緩衝材施工中における具体的な湧水対策は処分概念毎に異なるが、基本的には、湧水量を減らす対策と湧水によるパイピング・エロージョン現象による緩衝材の流出を防ぐ対策、さらに許容される流出量を増やす対策に分けられる。

施工後の湧水対策に関しては、パイピング・エロージョン現象による緩衝材の流出を防ぐための対策として、処分孔の中を早期に拡散場にする対策が考えられる。

以上をまとめると表 6.5.3-1 のようになる。表 6.5.3-1 に挙げた各対策に関しては SKB 社による先駆的な検討がなされている [8]。

表 6.5.3-1 処分施設の湧水対策一覧

施工法		掘削前	掘削中～緩衝材施工中 その対策	緩衝材施工後 その対策
M の増加 密度分布の低下		—	Q、q の低減	q、T の低減
縦置き	原位置 施工方式	サイト選定 グラウト	防水シート 凍結 ポストグラウト 隙間充填 ウォータータイト 揚水	早期埋戻し 処分孔の水封 処分孔仮プラグ 処分孔への人工給水
	吹付け/ ペレット 充填方式		プレグラウト ポストグラウト 区間閉鎖 ウォータータイト 拌み勾配	早期埋戻し 処分孔の水封 処分孔仮プラグ 処分孔への人工給水
横置き	P E M方式		覆工 区間閉鎖 ペレット充填 ウォータータイト 拌み勾配	早期埋戻し 処分孔の水封 処分孔仮プラグ 処分孔への人工給水

6.6 緩衝材の流出に関する課題の抽出

6.6.1 処分概念に対する湧水環境のモデル化の実験的評価方法

(1) 処分孔周りの地下水流動による吸出しによるエロージョン検討

実際の処分場では、緩衝材よりも周辺の岩盤の方が透水係数は大きく、さらに処分孔の削孔時に EDZ が形成されれば、処分孔内よりも天然バリア内を地下水が流れる可能性が高い。この場合、緩衝材と天然バリアの界面では吸出し現象が発生し、緩衝材が天然バリア内に吸い出され、結果として水みちが緩衝材内にも形成される可能性もある。そこで、花崗岩などの多孔質体と界面を有する緩衝材に長期間通水を行い、多孔質エロージョンに対する評価を行う必要がある。試験系としては、前述の花崗岩との界面を有する緩衝材の通水試験や緩衝材と接する多孔質内に一定の流速で水を流した場合の緩衝材の挙動観察などが考えられる。

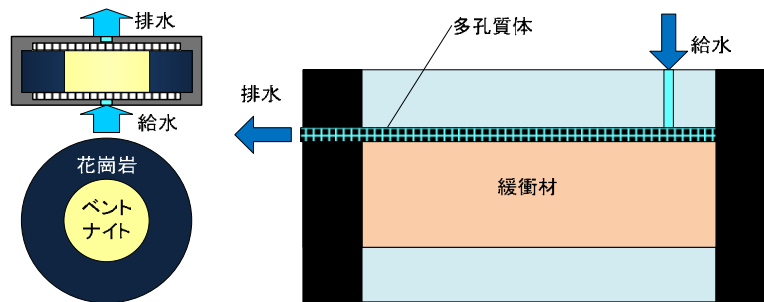


図 6.6.1-1 試験ケース

(2) Ca 型化がエロージョンに及ぼす影響検討

セメント系人工バリアと界面を有する緩衝材に通水した場合、水はその界面を選択的に流れていることが明らかとなった。長期的に通水を行った場合、セメント系人工バリアから Ca イオンが溶出し、界面近傍の緩衝材が Ca 型化する可能性がある。Ca 型化が発生すると、セメント系人工バリアは緻密さが失われ、緩衝材は止水性が低下し界面周辺に水みちを形成する可能性がある。そのため、Ca 型化がエロージョンに及ぼす影響を評価する必要がある。

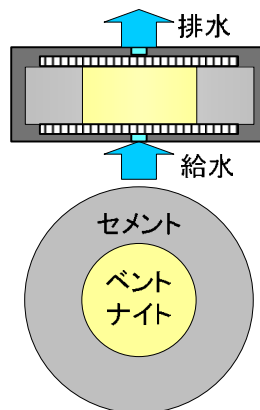


図 6.6.1-2 試験ケース

(3) 緩衝材の施工方法が総湧水量とエロージョン量の関係に及ぼす影響評価

横置き処分方式でのエロージョン試験を実施し、湧水量とエロージョン量と関係を取得する。特に、縦置き処分方式を模擬した場合、塩水ではエロージョン材料が沈殿して、エロージョンが抑制されるという結果となったが、横置き処分方式を模擬した場合でも同様の傾向が得られるかどうかを検証する。

また、原位置施工方式を模擬した界面に隙間がない供試体に対して通水した場合に、エロージョン材料が目詰まりしない状況でもエロージョン現象が抑制されるかどうかを確認する。初期飽和度をパラメータとして試験を実施し、自己シールされる流速に対する初期飽和度の影響に関する知見を取得する。

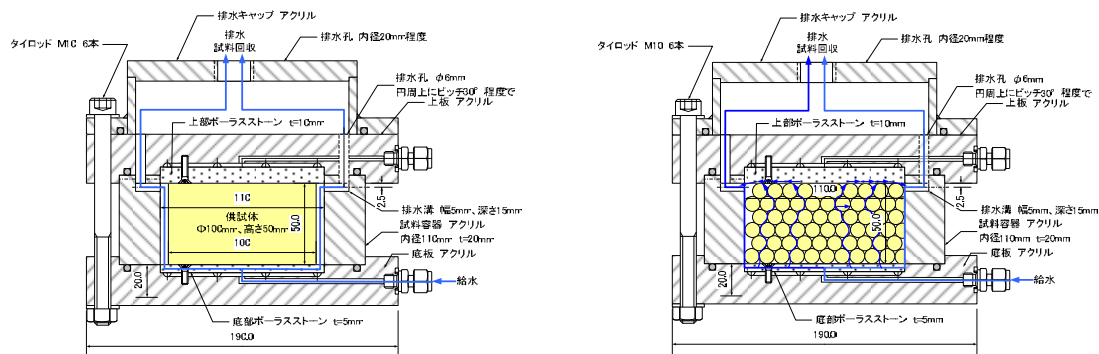


図 6.6.1-3 ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験セルの概略図

(4) 流路長の影響調査 (Distance ブロック、Filling ブロックの効果)

SKB 社の横置き処分孔では、緩衝材だけでなく、Distance ブロックや Filling ブロック、さらにはコンパートメントプラグなどにより、エロージョンに対する性能の担保を目指している。この Distance ブロックや Filling ブロックはベントナイト系材料が想定されており、流路長を大きくして耐エロージョン性を高めるものである。

そこで、横置き処分方式でのエロージョン試験を実施し、流路長がエロージョンに及ぼす影響を評価する。

初期飽和度をパラメータとして試験を実施し、自己シールされる流速に対する初期飽和度の影響に関する知見を取得する。

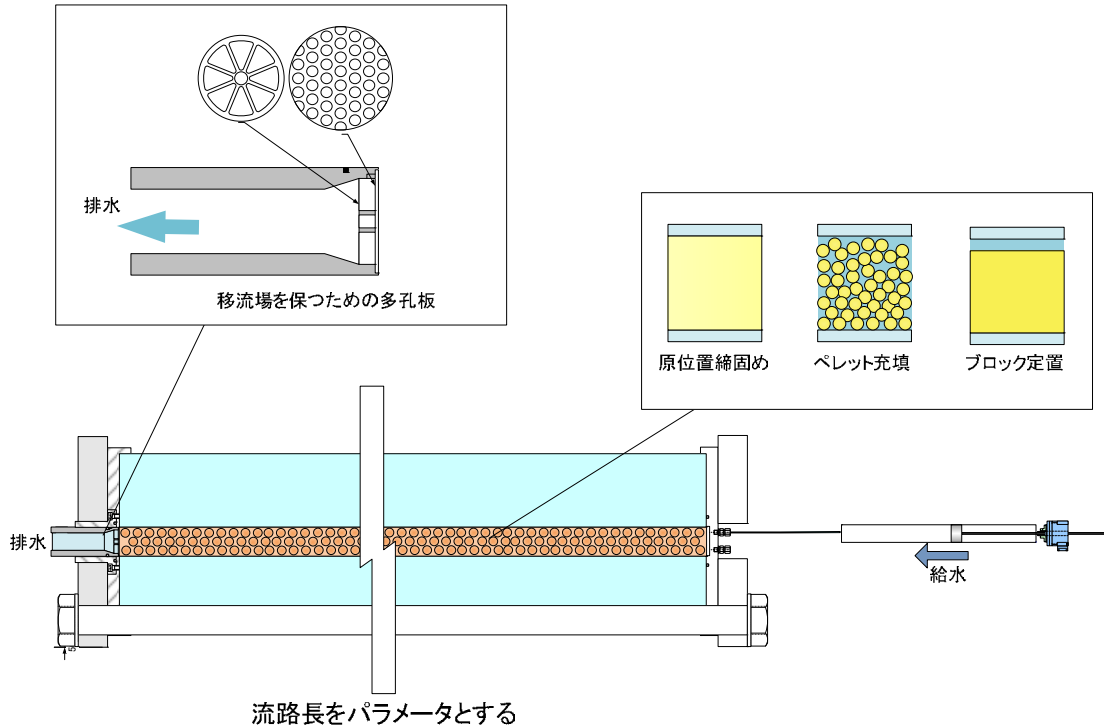


図 6.6.1-4 パイピング生成試験セル（流路長を変化）

(5) 人工給水とコンパートメントプラグの有効性の実証

SKB 社の横置き処分孔では、緩衝材だけでなく、Distance ブロックや Filling ブロック、さらにはコンパートメントプラグなどにより、エロージョンに対する性能の担保を目指している。コンパートメントプラグは鋼製であり、ベントナイト系材料を併用することでコンパートメントプラグで区切られた空間を拡散場にすることを実現するものである。SKB-3H では、人工注水するために用いられるが、処分孔を部分的に拡散場にできれば、エロージョンを抑制することにも効果が期待される。

このコンパートメントプラグのプラグ形式による止水性効果、及び人工給水の評価を行う。

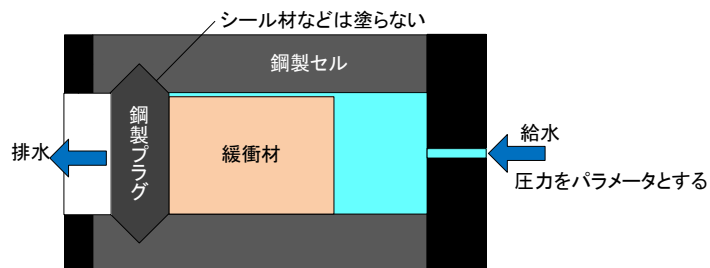


図 6.6.1-5 コンパートメントプラグの止水性効果の検討

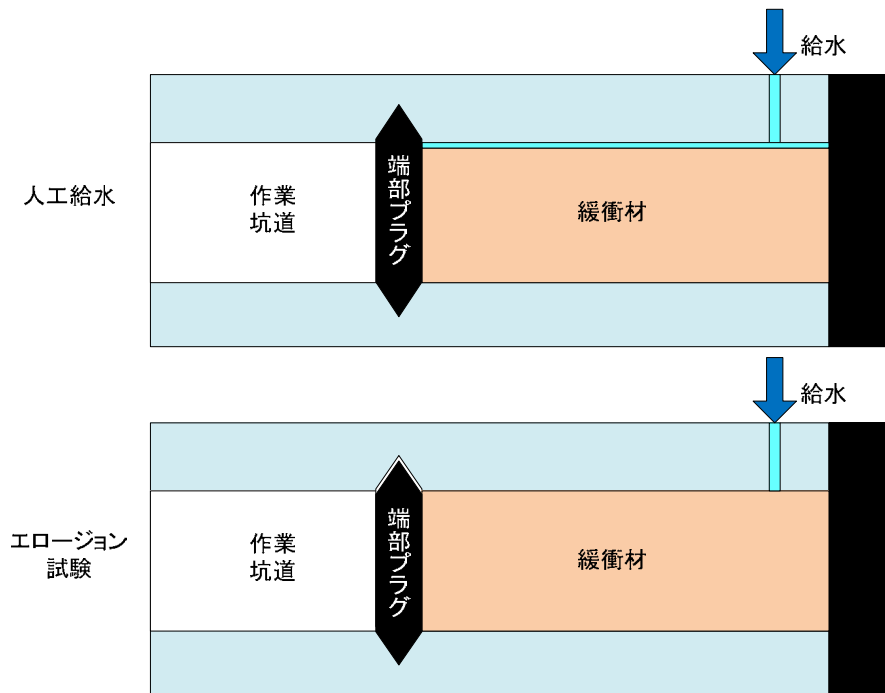


図 6.6.1-6 人工給水効果の検討

(6) 水封の効果の検証

実際の処分場では、緩衝材よりも周辺の岩盤の方が透水係数は大きく、さらに処分孔の削孔時に EDZ が形成されれば、処分孔内よりも天然バリア内を地下水が流れる可能性が高い。再取出し可能性の観点から、作業トンネルが埋め戻されない場合、地下水は天然バリアからこの作業トンネルに向かって流れることが予想されるが、この際に処分孔の端部プラグ付近の緩衝材を流出させることが懸念される。この対策として作業坑道を早期に埋め戻すことが挙げられるが、再取出し可能性とのトレードオフの関係となる。

そこで、作業トンネルを水没させ、周囲の地下水圧と同等の圧力を付与する水封化が折衷案として挙げられる。この水封化については検討されたことがなく、その効果を検証する必要がある。

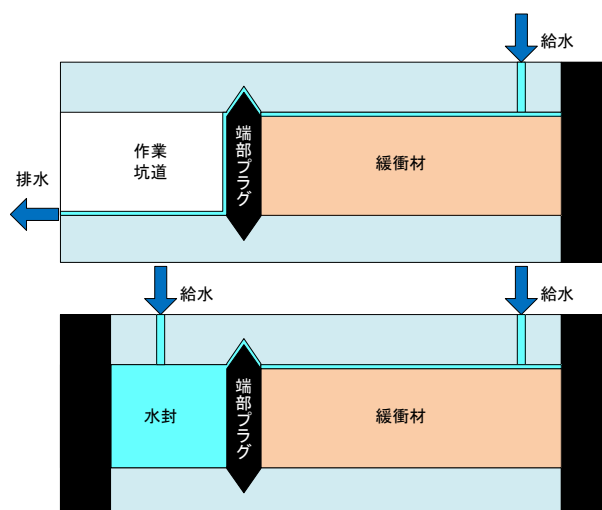


図 6.6.1-7 水封効果の検討

(7) 水密構造の検証

再取出し可能性を担保するためには、長期に亘り、作業坑道を埋め戻せない可能性がある。この場合、再取出し可能期間中、ずっと、処分施設を水没させることなく、地下水を処理しなければならないため非常に維持管理にコストがかかる可能性がある。

そこで、高度な水密構造を検討し、揚水しなくても坑道内に地下水を流入させない水密構造について検討することは、再取出し可能性、緩衝材の品質確保、コスト低減の観点からも有効である。そこで、一次・二次覆工とベントナイトを併用した水密構造の効果を評価する。

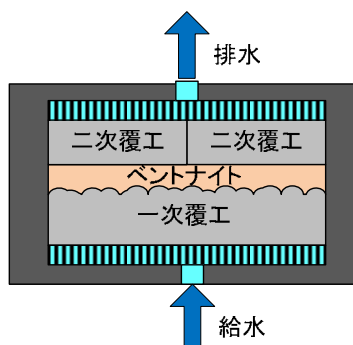


図 6.6.1-8 水密構造評価試験セル

(8) 実規模

1) 湧水環境下における様々な施工オプションでの施工確認試験の実施

これまで、縦置き処分方式の緩衝材について、湧水環境下での吹付け工法による緩衝材の施工可能性、および止水性について検討してきた。横置き処分・吹付け方式が湧水環境下で実施可能かどうかについても検討する必要がある。さらに、他の施工方式でも同様の試験を実施する必要がある。

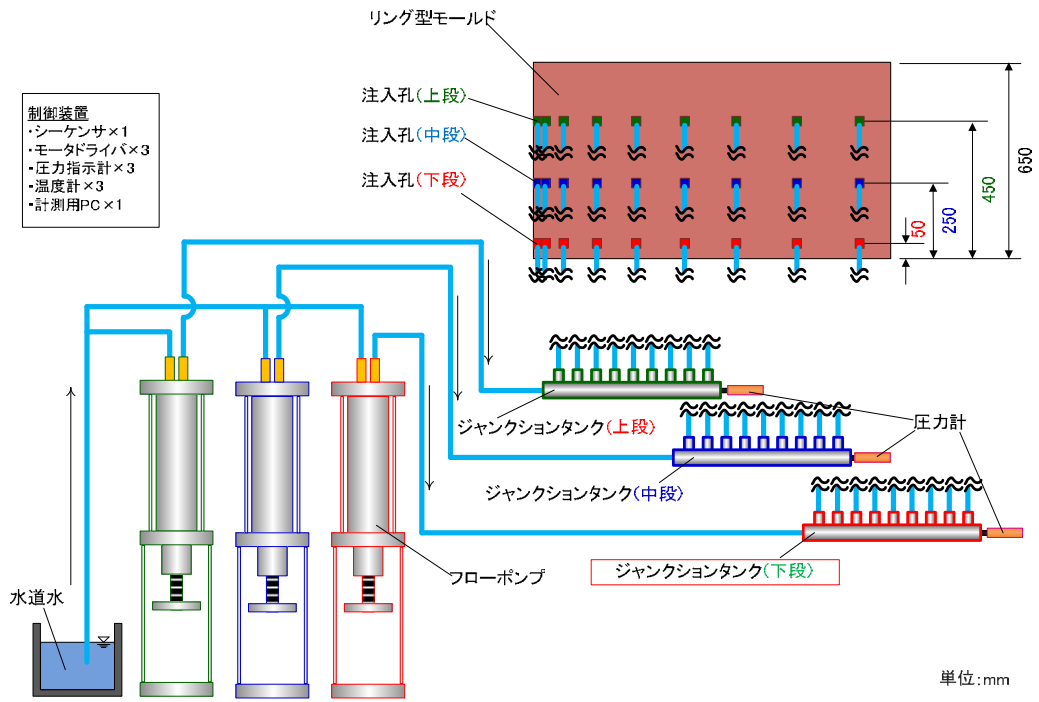


図 6.6.1-9 実験装置系統図

6.6.2 影響低減対策の検討

<<現時点で考えられる影響低減対策の検討>>

時期	縦置き・ブロック方式	横置き・原位置施工方式	横置き・PEM方式
掘削前	プレグラウト		
掘削中	揚水	斜坑	
掘削後	ポストグラウト		
緩衝材施工中	遮水シート	裏面排水	－（地上施工）
廃棄体定置		段階的閉鎖 （ディスタンスブロック・フィリングブロック・コンパートメントプラグ）	裏面排水 段階的閉鎖 （ディスタンスブロック・フィリングブロック・コンパートメントプラグ）
処分孔閉鎖	仮処分坑端部プラグ 早期埋戻し/連絡坑の水没 処分坑への人工給水		
管理期間中 （再取り出し）	力学止水プラグ		

6.6.3 解析技術への反映

本検討結果から、再冠水中に発生するブレイクスルー、パイピング、エロージョンの各現象の発生によって、再冠水後（長期性能評価の初期状態）では、必ずしも緩衝材は膨潤して均質な状態ではない可能性が示唆できた。特にパイピングの発生やエロージョンのような現象は、緩衝材自体の機能を損なう可能性があり、流速が速いと内部に地下水が浸潤する前にエロージョンによって表面の膨潤した緩衝材が洗い流されていく状況も観察できた。

このブレイクスルー、パイピング、エロージョンの各現象を連続体力学の枠組みの中で取り扱うには、非常に高度な解析技術が要求される。例えば、ブレイクスルー現象は、水みちを膨潤によって塞いだ緩衝材が水圧によって押し抜きせん断される現象であり、緩衝材の膨潤に伴う強度や剛性の低下とせん断による破壊現象を取り扱えなければならない。パイピング現象では、複数の水みちが1つの大きな水みちに収斂しながら、水密の流速が増していくという現象を表現できなければならない。この水みちの収斂には、緩衝材の膨潤や沈殿物の堆積による不整によって生じる分岐現象が表現できる解析手法が必要となる。さらに、エロージョン現象では、連続体として場に存在していた固体が解析領域から流出するという現象を表現できる必要がある。

このような現象が緩衝材の性能を損ねる可能性があるとするれば、例え高度な解析技術が必要であってもこれらの事象を考慮して解析的に長期性能への影響を調べる必要がある。すなわち本検討結果は、再冠水から長期性能までを統一的に表現できる解析技術に必要なスペックを与えているとも言える。

6.6.4 まとめと今後の試験計画

本検討では、供試体高さが100mmのセルと供試体高さが1000mmあるセルを用いてブレイクスルー、パイピング、エロージョンの各現象の発生状況について、流量制御で調べた。その結果、供試体高さに拠らず、概ね同様の挙動を取得することができた。すなわち、

- ▶ 0.1L/min.の流速で通水した場合、ブロック定置工法とペレット充填工法ではパイピング現象が発生する可能性がある。
- ▶ パイピング現象は、当初は複数の水みちを形成するが、次第に少数に収斂し、ついには1つの大きな水みちになる。
- ▶ 一旦、パイピング現象が発生し、大きな水みちに収斂すると、流速を下げない限り、その水みちはエロージョンし続ける。
- ▶ 蒸留水を通水した場合は、ペレットやブロックが膨潤して、ペレットの間隙やブロックとセルの隙間が水みちとして形成されていたが、NaCl水溶液の場合、ペレットやブロックが崩れながら沈殿し、堆積した沈殿物の中に水みちが形成されていた。さらにこの沈殿物の堆積が水みちの収斂の契機となっている。
- ▶ 大粒径ペレットと小粒径ペレットを混合したケースでは、小粒径ペレット内に小さな水みちが多数発生し、収斂して、結局大きな1つの水みちとなった。

さらに、本検討では、流量を0.1L/min.から0.0001L/min.まで低下させると、通水圧は上昇し

たが、それよりも大きな値の場合、通水圧は低いままであった。ただし、試験開始時から流量を0.0001L/min.にした場合と結果が同じであるかどうかは、調べる必要がある。また、水みちの収斂現象についても、人為的な水みちを配置した供試体で検証を行う必要がある。これは、水みちが必ず収斂するのであれば、処分孔あたりに定められた処分坑の採用基準としての湧水量は、収斂後の水みちの流量となるためである。

6.7 排水の分析

6.7.1 試験の目的及び概要

本検討で実施している小規模試験は全て、排水を採取し化学的な観点からの考察も行う計画である。図 6.7.1-1 に示すように、平成 23 年度までで 180 本程度の排水が採取されている。

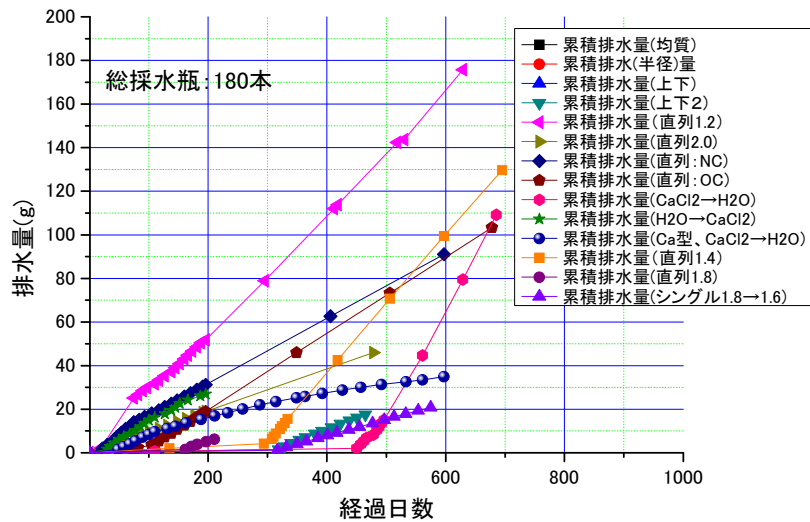


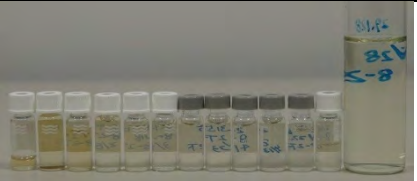

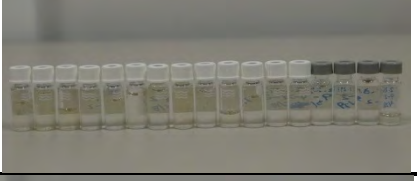
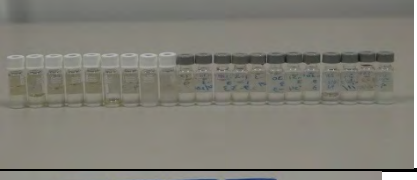

図 6.7.1-1 小規模試験の排水取得状況

6.7.2 これまでの排水分析結果

通常、排水中に含まれるイオンを分析する場合、イオンを特定して検査しなければならない。ただし、本検討で得られた排水にはどのようなイオンが含まれているかが不明である。そこで、試験方法として、分解能は 1mg/L 程度であるが数多くのイオンを調べることが出来る ICP-AES (Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometry) を使用することとした。表 6.7.2-1 に排水の状況を示す。表から、蒸留水を通水したケースでは、色の濃淡はあるものの、総じて黄色を呈している。またこの色は試験を継続するにしたがって徐々に薄くなっていることが分かる。一方、通水液に CaCl₂ 水溶液を用いた場合、排水は無色であった。

表 6.7.2-1 排水の状況

試験情報	ベントナイトの種類	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	注入水	排水の色 (左から右に時間経過)
均質供試体の膨潤圧試験	Na	1.6	蒸留水	
半径方向に密度分布を有する供試体の膨潤圧試験	Na	2.0/1.2 (平均 1.6)	蒸留水	
上下方向に密度分布を有する供試体の膨潤圧試験	Na	2.0/1.2 (平均 1.6) ※1回目	蒸留水	
	Na	2.0/1.2 (平均 1.6) ※2回目	蒸留水	
高密度供試体の直列膨潤試験 (1.8/1.4、平均 1.6)	Na	1.8 ※上部供試体	蒸留水	
	Na	1.4 ※下部供試体	蒸留水	
高密度供試体の直列膨潤試験 (2.0/1.2、平均 1.6)	Na	2.0 ※上部供試体	蒸留水	
	Na	1.2 ※下部供試体	蒸留水	
過圧密供試体の直列膨潤試験 (1.6(OC)/1.6(NC))	Na	1.8→1.6(OC) ※上部供試体	蒸留水	

	Na	1.6(NC) ※下部供試体	蒸留水	
Na 型を飽和させた後に CaCl ₂ 水溶液を通水したケース (後述)	Na	1.6	蒸留水 → CaCl ₂ 1M	
Na 型に CaCl ₂ 水溶液を通水したケース (後述)	Na	1.6	CaCl ₂ 1M → 蒸留水	
Ca 型に CaCl ₂ 水溶液を通水したケース (後述)	Ca	1.6	CaCl ₂ 1M → 蒸留水	
界面の影響を考慮した破過圧測定試験 (後述)	Na (界面無し) Na/Na Na/セメント Na/花崗岩 ※全 4 ケース	1.6	蒸留水	 ※1

※1 左から Na (界面無し)、Na/Na、Na/セメント、Na/花崗岩の順

平成 22 年度の試験対象は、排水が比較的多量 (23cc) に得られている密度差を有する供試体の直列膨潤量試験 (Case2) の、低密度部からの排水を分析することとした。分析結果を表 6.7.2-2 示す。表から、Na イオンと S イオンが多量に検出されていることが分かる。既往の研究[9]によれば、図 6.7.2-1 に示すようにベントナイト中にある S イオンの供給源としてはパイライト (FeS₂) が挙げられる。仮に S イオンがパイライト由来だとすると、陽イオンである Fe イオンも間隙水中に存在することになる。ただし、ベントナイト中のパイライト FeS₂ の内、Fe イオンはベントナイト中を通過する過程で Na イオンと陽イオン交換反応すると考えられるため、交換された Na イオンが Fe イオンの代わりに間隙水に放出され、S イオンはそのまま間隙水に存在するため、Na イオンと S イオンが排水に多量に存在するものと考えられる。

また、別の研究に拠れば[10]、非結晶のギプシウム(Gypsum、CaSO₄)の影響や、有識者によりミラビライト (Na₂SO₄) の影響も指摘されているが推定的な議論を脱し得ない状況であるため、排水の分析を進めて原因を究明する計画である。

表 6.7.2-2 排水の ICP-AES 結果

(単位:mg/L)

定性元素	分析・試験結果		検出下限値	分析・試験方法
	Blank イオン交換水	12/28 7-2 上 mc 29.13		
銅	<1	<1	1	ICP 発光分光分析法
鉄	<1	<1		
マンガン	<1	<1		
鉛	<1	<1		
亜鉛	<1	<1		
カドミウム	<1	<1		
クロム	<1	<1		
ニッケル	<1	<1		
アルミニウム	<1	<1		
ほう素	<1	1~10 (1)		
バリウム	<1	<1		
カルシウム	<1	1~10 (2)		
コバルト	<1	<1		
カリウム	<1	1~10 (3)		
リチウム	<1	<1		
マグネシウム	<1	<1		
モリブデン	<1	1~10 (1)		
ナトリウム	<1	100~1000 (580)		
リン	<1	<1		
アンチモン	<1	<1		
ケイ素	<1	1~10 (5)		
チタン	<1	<1		
バナジウム	<1	<1		
硫黄	<1	100~1000 (400)		

備考：カッコ内の数値は参考値とする。

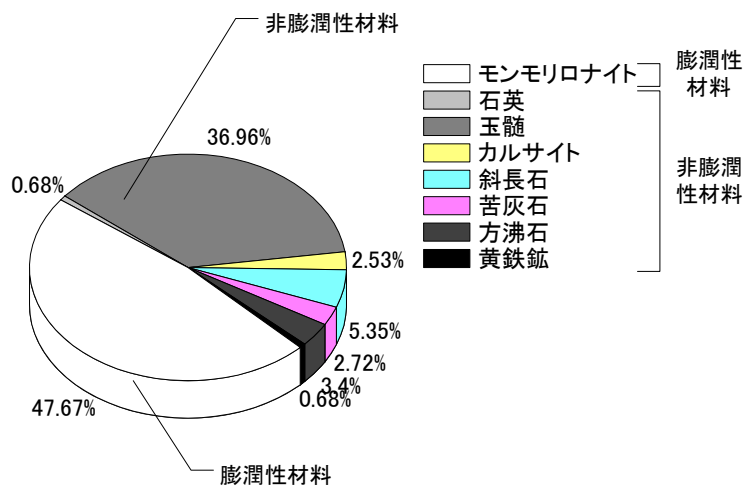


図 6.7.2-1 クニゲル V1 の鉱物組成[9]

6.7.3 平成 23 年度以降の排水の分析結果

平成 22 年度の排水の化学分析結果から、平成 23 年度の化学分析は陽イオンとして、Na、Ca、Mg、K、Si イオン、陰イオンとして、Cl、SO₄ イオンをイオンクロマトグラフィーで調べることにした。分析対象は、直列膨潤量試験の Case2(初期乾燥密度 2.0Mg/m³ と 1.2Mg/m³) の両供試体からの排水と、Ca 型化が膨潤に及ぼす影響を調べている試験 Case1~3 の各試験である。Case1 は、Na 型ベントナイトに蒸留水を通水した後に CaCl₂ 水溶液を通水したケースである。Case2 は、Na 型ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水した後に蒸留水を通水したケースである。Case3 は、Ca 型化ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水した後に蒸留水を通水したケースである。さらに、今年度は、平成 23 年度の試験結果の継続結果と、排水がある程度採取できた応力履歴が緩衝材の膨潤に及ぼす影響試験の Case3 の排水も化学分析に供した。これは、一旦、乾燥密度 1.8Mg/m³ まで圧縮したのちに乾燥密度 1.6Mg/m³ まで膨潤させてから通常の膨潤圧試験を実施したケースである。

陽イオンとして、図 6.7.3-1 にナトリウムイオン、図 6.7.3-2 にカルシウムイオン、図 6.7.3-3 にカリウムイオン、図 6.7.3-4 にマグネシウムイオンの mol 濃度の経時変化を示す。さらに、陰イオンとしては図 6.7.3-5 に硫酸イオン、図 6.7.3-6 に塩化物イオン、図 6.7.3-7 にケイ酸イオンの mol 濃度の経時変化を示す。

図から、蒸留水を用いたケースである直列膨潤量試験の上下供試体と応力履歴が緩衝材の膨潤に及ぼす影響試験の Case3 では、ナトリウムイオンと硫酸イオンが多いことが分かる。これは、平成 22 年度の IPC-AES の結果と整合している。

また、Ca 型化が膨潤に及ぼす影響を調べている試験 Case1 と Case2 を比較すると、不飽和状態から CaCl₂ 水溶液を通水した方(Case2)が、一旦蒸留水で飽和させてから CaCl₂ 水溶液を通水したケース (Case1) に比べ、排水に含まれるナトリウムイオン量が多い。このことから、事前に蒸留水で飽和させることは、陽イオン交換反応を遅延させる働きがあると言える。

陰イオンで硫酸イオンが多いのは、クニゲル V1 中に含まれるパイライトや非結晶のジプサム、ミラビライトなどに起因するものと考えられる。また、塩化物イオンが多いのは、CaCl₂ 水溶液に起因するものと、事前に人工的に Ca 型化させた際の CaCl₂ 水溶液が残留していたものと考えられる。また、有意な量のケイ酸イオンが計測されていることも特徴的である。特に、応力履歴が緩衝材の膨潤に及ぼす影響試験の Case3 はケイ酸イオンが多く排水中に含まれている。この理由としては、このケースは、一旦、乾燥密度 1.8Mg/m³ まで圧縮したのちに乾燥密度 1.6Mg/m³ まで膨潤させており、高密度に締め固めたことによる影響が考えられる。図 3.5.2-5 に示した各種の応力履歴の異なる緩衝材の膨潤圧の経時変化においては、応力履歴によって間隙水に電離している各種イオンの濃度が異なる可能性があり、単純に力学的な応力履歴の影響だけでなく、間隙水の組成に対する影響も今後は調べる必要がある。

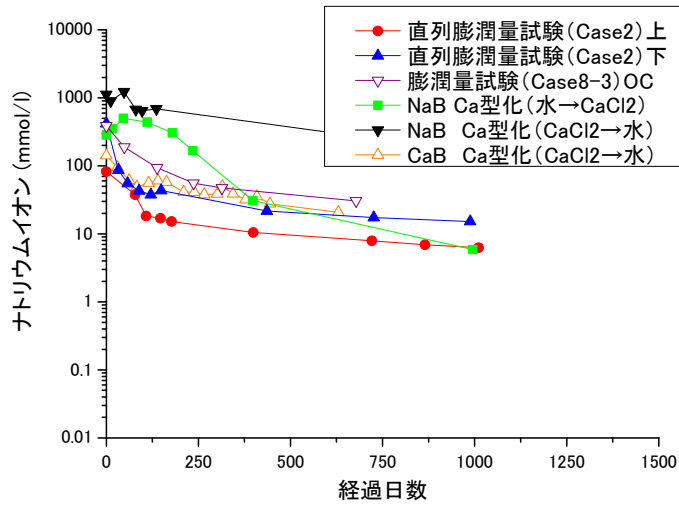


図 6.7.3-1 ナトリウムイオン濃度の経時変化

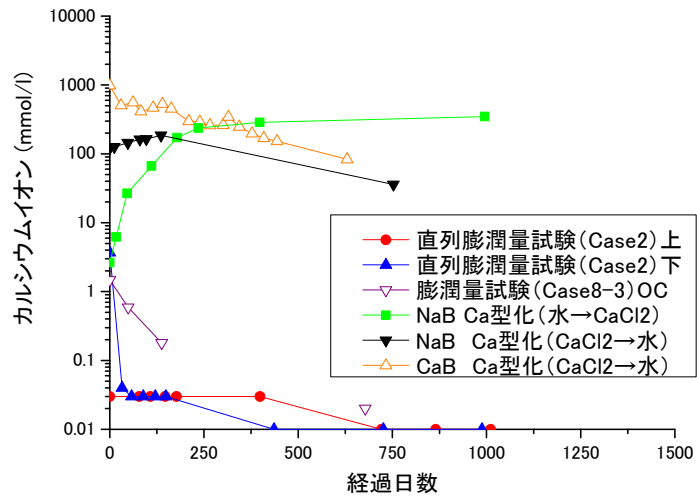


図 6.7.3-2 カルシウムイオン濃度の経時変化

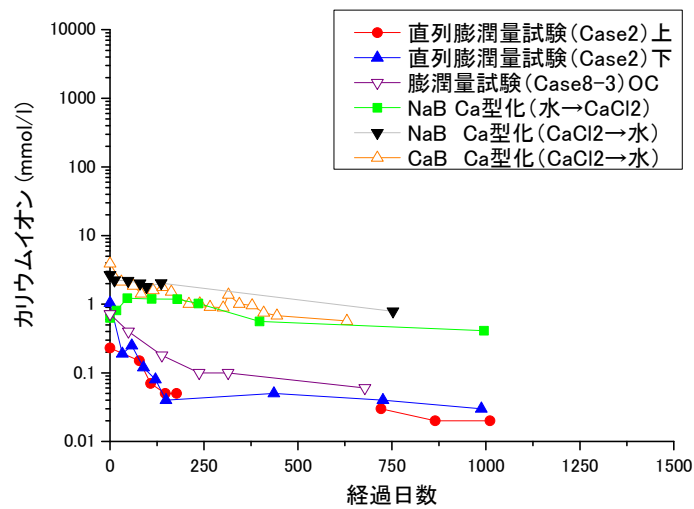


図 6.7.3-3 カリウムイオン濃度の経時変化

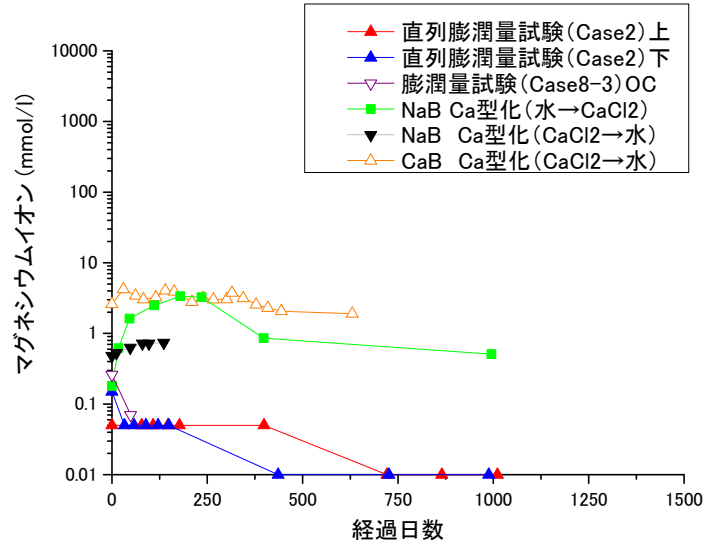


図 6.7.3-4 マグネシウムイオン濃度の経時変化

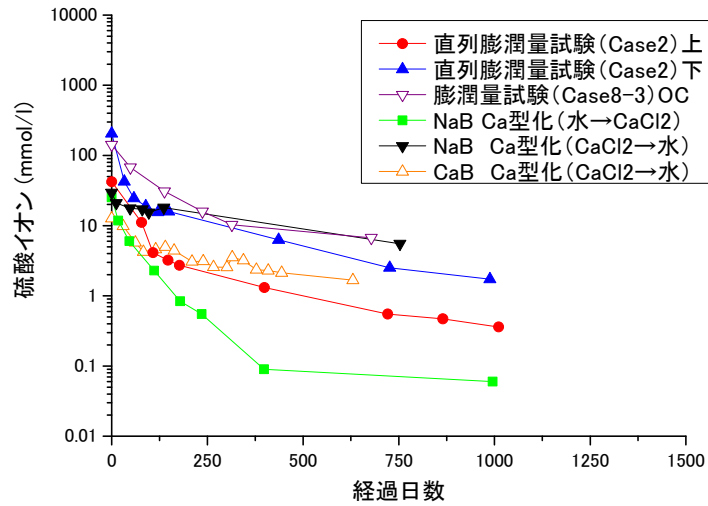


図 6.7.3-5 硫酸イオン濃度の経時変化

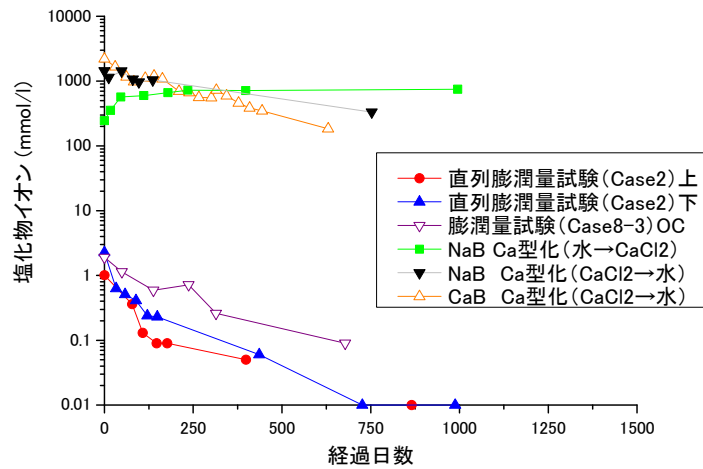


図 6.7.3-6 塩化物イオン濃度の経時変化

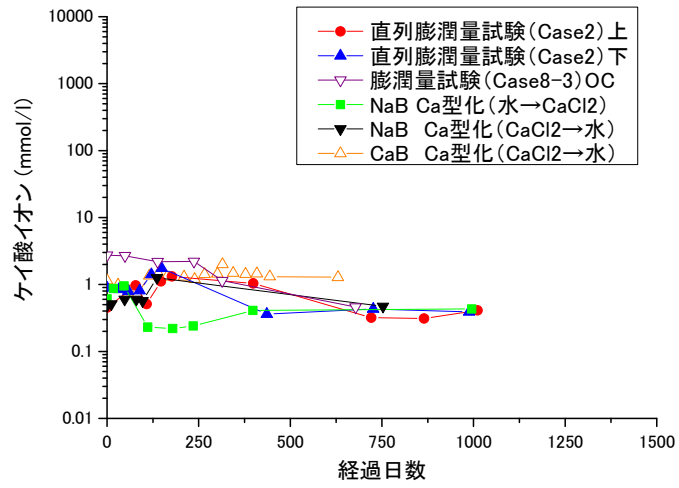


図 6.7.3-7 ケイ酸イオン濃度の経時変化

第6章 参考文献

- [1] Mattias Åkesson, Ola Kristensson, Lennart Börgesson, Ann Dueck: THM modelling of buffer, backfill and other system components, Critical processes and scenarios, SKB Technical Report TR-10-11 (2010).
- [2] Lennart Börgesson, Torbjörn Sandén : Piping and erosion in buffer and backfill materials Current knowledge, SKB Report R-06-80 (2006).
- [3] Torbjörn Sandén, Lennart Börgesson: Deep repository-engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill Laboratory tests to understand processes during early water uptake, SKB Report R-06-72 (2008).
- [4] (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度地層処分調査技術委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書，第一分冊，「遠隔操作技術高度化開発」(2/2) (2008).
- [5] 山本卓也，矢田勤，藤原斉郁，西村務，竹内靖典：粒状ベントナイト充填による狭隘部人工バリア施工の検討その3－施工・品質管理方法の検討－，土木学会年次学術講演会（平成 21 年 9 月）CS5-036 (2009).
- [6] Åberg A., Effects of water inflow on the buffer – an experimental study, SKB Report R-09-29 (2009)
- [7] RWMC と SKB 社の Sorkshop (2013).
- [8] SKB 社：KBS-3H Complementary studies 2008–2010, Technical Report TR-12-01 (2012).
- [9] 伊藤雅和，岡本真由美，鈴木啓三，他：ベントナイトの鉱物組成分析，原子力誌，36[11]，1055 (1994).
- [10] 藤田朝雄，油井三和，鈴木英明，藤崎淳，九石正美：塩濃縮シミュレーションに関する研究，JAEA-Research 2007-017 (2007)

第7章 土槽規模試験の実施

7.1 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験 （試験分類(c)－表 2.2.2-2）

7.1.1 概要

これまでの検討では、小規模試験と称して理想的な系と考えられる条件下で実験を行ってきた。これは、試験条件を極力簡単にして、再冠水中に緩衝材に発生する事象の理解を容易にするためである。表 1.3.2-2 に示す小規模試験項目として、(a)膨潤による密度の均一化、(c)Ca 型化が均一化に及ぼす影響、(d)浸潤速度、(e)緩衝材表面近傍の止水性、などを評価してきた。一部の試験を除いて、継続中であるが、傾向は概ね把握できてきた。

そこで本検討では、試験計画の基本概念である“スケールアップ”の方針に従って土槽規模試験を行う。すなわち、本検討で実施する土槽規模試験は、表 1.3.2-2 に示す小規模試験項目のうち、(a)膨潤による密度の均一化をスケールアップした試験という位置付けである。よって、土槽内に施工に伴う密度分布を考慮して緩衝材を設置し、膨潤による密度の均一化状況を調べる。この際、(d)浸潤速度や(e)緩衝材表面近傍の止水性などの事象も複合的に発生することが予想されるため、土槽試験結果の解釈には、(a)膨潤による密度の均一化の試験結果だけでなく、(d)浸潤速度や(e)緩衝材表面近傍の止水性の試験結果の反映も不可欠となる。

土槽規模試験では、実現象に近い複雑な境界条件もある程度考慮できる試験規模において、再冠水時に緩衝材に発生する事象を評価できる。しかしながら、その一方で、土槽試験から得られる事象は、様々な事象が複合的に発生するものと考えられ、その理解は小規模試験に比べ難しくなることが予想される。そのため、これまでに実施した小規模の試験結果を踏まえて実験結果を解釈することが重要となる。

7.1.2 試験条件

本試験では、試験(a)をスケールアップしたものであり、緩衝材の施工法を緩衝材の密度分布、隙間の有無、隙間の大きさなどで代表させ、緩衝材の施工方法に起因する密度分布などが再冠水時の膨潤挙動、膨潤による均質化挙動に及ぼす影響を土槽試験によって調べた。

試験ケースを表 7.1.2-1 に示す。本検討で考慮する施工方法としては、原位置締固め、吹付け、ブロック定置、ペレット充填、さらにブロック定置とペレット充填の併用である。給水は土槽の底面から一次的に行うこととした。このため、表 7.1.2-1 に示す施工方法のうち、原位置締固め、吹付けに関しては、図 7.1.2-1 に示すように、前述の試験(a)と試験条件がほぼ同等となる。そこで試験は、ペレット充填工法とブロック定置工法、さらにブロック定置とペレット充填の併用を対象として再冠水時の挙動を比抵抗計測、膨潤圧分布の計測などで調査した。

図 7.1.2-2 に、使用する土槽に施した測定装置を示す。今回使用する土槽は、幅 700mm、奥行き 150mm、高さ 200mm の緩衝材を設置できる大きさである。また、緩衝材の膨潤圧でも歪むこ

とのない十分な剛性を有している。上蓋は図 7.1.2-2(a)に示すように、穴が開けてあり、そこから図 7.1.2-2(b)に示した上蓋と一体化したロードセルの配線をしている。また、図 7.1.2-2(b)に示した上蓋と一体化したロードセルは、緩衝材に直接接することがないように、非常に剛性の高いジュラコン樹脂で覆っている。これは、緩衝材が金属に接するとその接触面が腐食する可能性があり、腐食が計測に及ぼす影響を排除するための工夫である。さらに、図 7.1.2-2(c)に示すように、土槽の背面には 147 個の電極が設置してあり、電極も緩衝材との接触点以外、樹脂で絶縁してある。この電極は、第 5 章 緩衝材への地下水浸潤状況の評価で使用しているものと同様のものである。緩衝材の飽和度が進むにつれて電気抵抗が小さくなることから、その電気抵抗を測定することによって、飽和度を測定できる。また電極の配置は、ブロックを設置した際にブロックの中心や界面に電極が位置するように配慮した。給水は図 7.1.2-2(d)に示すようにマリオット管で行い、供試体の水位が供試体上面に至るまで給水した。

表 7.1.2-1 土槽規模試験の試験ケース

ケース	施工方法	密度/間隙/隙間の分布	乾燥密度	注入液	備考
1	原位置締め	高密度/低密度の互層	ケイ砂 30wt%含有 クニゲル V1： 1.6 Mg/m ³	蒸留水	実施済み 要素試験から推定
2	吹付け	均一な密度分布			解体 【計測項目】 密度分布 飽和度（含水比）分布 ブロック間の界面状況観察 ブロックと土槽の界面状況観察
3	ブロック定置	界面や隙間を有する	ベントナイト単体： 1.1Mg/m ³ 程度		実施済み
4	ペレット充填	大間隙を有する	ケイ砂 30wt%含有 クニゲル V1： 1.6 Mg/m ³ ベントナイト単体： 1.1Mg/m ³ 程度		新規 【試験中計測項目】 比抵抗分布 膨潤圧分布 給水量 目視観察
5	ブロック定置・ ペレット充填 併用	ブロック部： 界面や隙間を有する ペレット部： 大間隙を有する			【試験後計測項目】 密度分布 飽和度（含水比）分布 ブロック間の界面状況観察

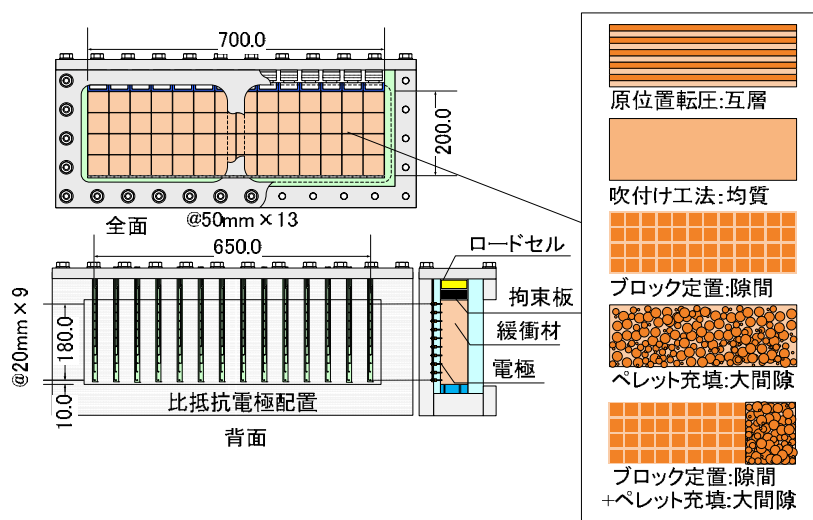


図 7.1.2-1 土槽試験による施工に伴う密度分布を有する緩衝材の均一化試験イメージ図

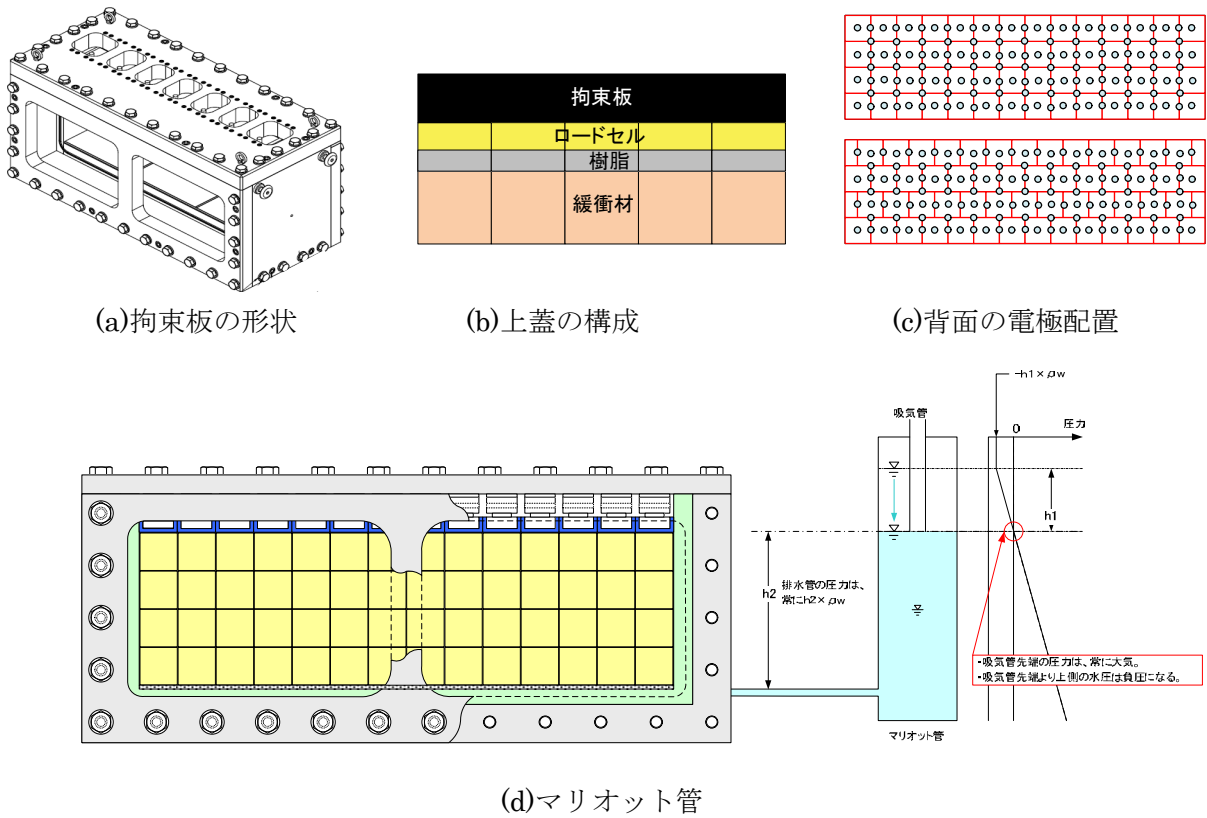


図 7.1.2-2 土槽試験による工夫

7.1.3 試験結果(ペレット充填ケース)

表 7.1.3-1 にペレット充填による模擬緩衝材の初期状態を示す。ペレットの乾燥質量を土槽の容積で除して取得した初期乾燥密度は 1.156Mg/m^3 である。また、ペレット充填による模擬緩衝材の空隙体積は 10054cm^3 であった。なお、空隙体積はペレット内の空隙も含んでいる。

ペレット充填ケースの土槽試験手順を図 7.1.3-1 に示す。

表 7.1.3-1 ペレット充填による模擬緩衝材の初期状態

湿潤質量	乾燥質量	嵩体積	湿潤密度	乾燥密度	間隙比	空隙体積	含水比
(g)	(g)	(cm^3)	(Mg/m^3)	(Mg/m^3)		(cm^3)	(%)
26339	24276	21000	1.254	1.156	1.364	10054	8.5



図 7.1.3-1 ペレット充填ケースの土槽試験手順

ペレットは初期高さ 205mm まで充填し、ロードセル一体型の上蓋をボルト締めすることで 200mm の高さまで圧縮した。この間に発生した圧縮力を初期値として、通水中の圧力変化を観察した。

給水は水位差だけで行い、水が一次的にペレットの間隙を満たしていく状況を観察した。ペレット充填ケースの給水開始 20 時間後の状況を図 7.1.3-2 に示す。図から、ペレットは下から徐々に浸潤していく様子が観察された。



図 7.1.3-2 再冠水状況/ペレット充填ケース/給水開始 20 分後

ペレット充填ケースの給水開始 12 時間後の状況を図 7.1.3-3 に示す。図から、給水箇所付近の底部においてはペレットが膨潤しその境が曖昧となり、一体化しているように見える。水位は供試体上面から 1cm 程度を下がった位置であり、それよりも上側は乾燥していた。給水箇所付近の底部におけるペレットの膨潤により、給水量も徐々に低下した。

一部の空隙は、一旦、供給水に満たされたものの、その後の供給量が低下したため、周囲のペレットの膨潤に消費され、再び空隙になっている。さらに、各ペレットには、中心部に芯があり、その芯は乾燥していることが分かる。

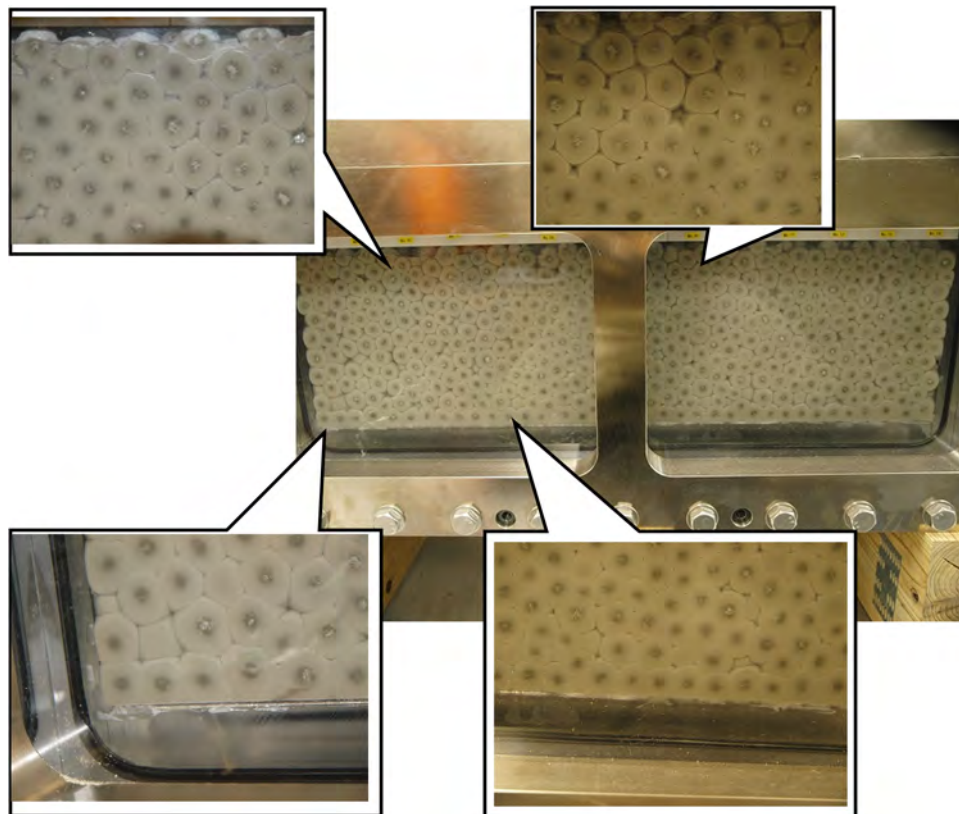


図 7.1.3-3 再冠水状況／ペレット充填ケース／給水開始後 12 時間

ペレット充填ケースの給水開始 3 日後の状況を図 7.1.3-4 に示す。図から、給水箇所付近から 5cm 程度まではペレットが膨潤して、その境が曖昧となり一体化しているように見える。間隙水は観察されず、全てペレットの膨潤に消費されたものと考えられる。これに伴い、空隙が供試体上面から供試体底部に向かって進展し、5cm 程度の深さとなっていた。

これは、一旦、供給水に満たされたものの、その後の供給量が低下したため、供給よりもペレットの膨潤に消費される水の量が多くなり、再び空隙になったものと考えられる。さらに、各ペレットには依然中心部に芯があるが、その芯は大きくなり、乾燥している状況は観察されなかった。

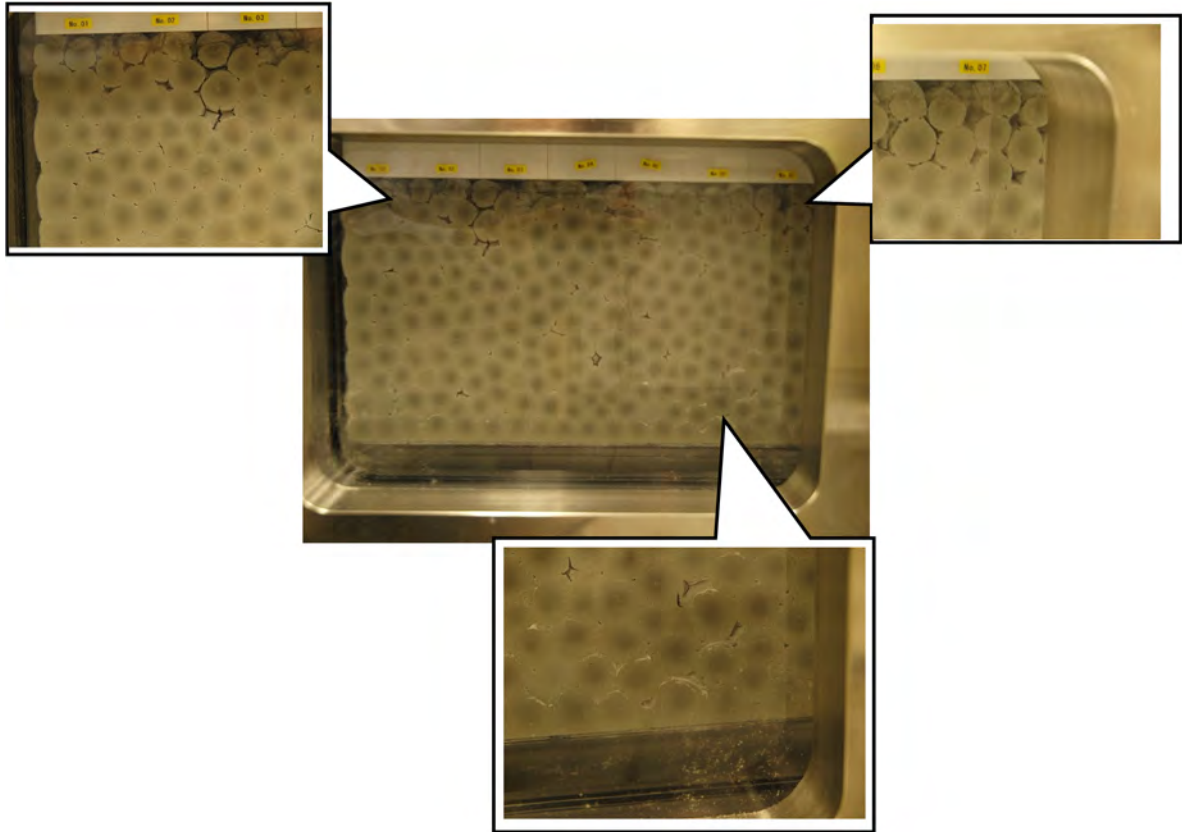


図 7.1.3-4 再冠水状況／ペレット充填ケース／給水開始後 3 日

ペレット充填ケースの給水開始 30 日後の状況を図 7.1.3-5 に示す。図から、ペレットが膨潤しその境が曖昧となっている領域は、給水箇所付近から 5cm 程度のままである。間隙水は観察されず、全てペレットの膨潤に消費されたものと考えられる。これに伴い、空隙が供試体上面から供試体底部に向かって進展し、10cm 程度の深さとなっていた。さらに、多くの箇所空隙が発生している。

これは、一旦、供給水に満たされたものの、その後の供給量が低下したため、周囲のペレットの膨潤に消費され、再び空隙になっているためである。さらに、各ペレットには、依然中心部に芯があるが、その芯はさらに大きくなり、乾燥している状況は観察されなかった。

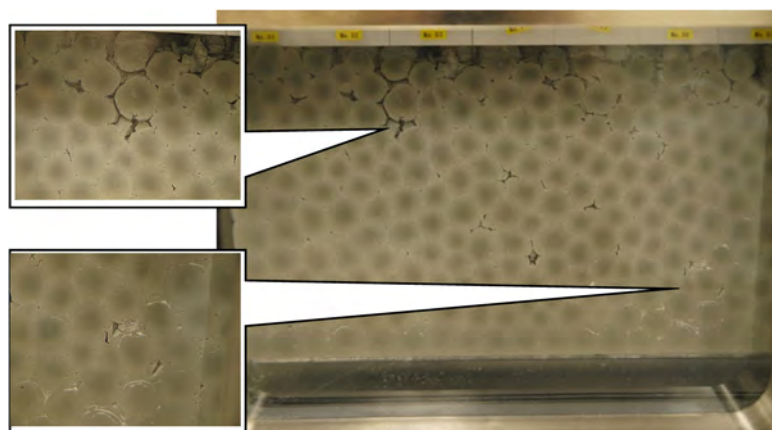


図 7.1.3-5 再冠水状況／ペレット充填ケース／給水開始後 30 日

ペレット充填ケースの給水状況を図 7.1.3-6 に示す。土槽底部のペレットが膨潤し、一体化するため、供給量が徐々に低下していることが分かる。本試験ではマリオット管による水位差で給水しているため、十分に飽和させるためには、加圧する必要があると考えられる。

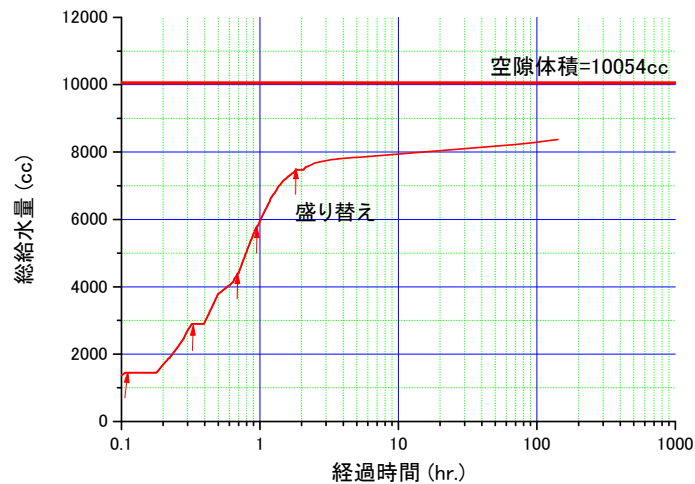


図 7.1.3-6 ペレット充填ケースの給水状況

図 7.1.3-7 にペレット充填ケースの膨潤圧の経時変化を示す。図から、供試体作製時に 205mm の高さまでペレットを充填し、200mm の高さまで上蓋で圧縮させたため、上蓋に付いているロードセルの初期値は 150~300kPa 程度の値を示している。また、この初期応力の分布は中心部が高い。給水を開始すると、この応力は急激に減少し、一旦、50kPa 程度まで低下した。これ以降の応力分布は、均一化する傾向を示したことから、給水によってペレット間の接触力などが弱まり、さらにペレットが膨潤して均一化しているものと思われる。

また、一旦、50kPa 程度まで低下した膨潤圧は、右側のみ 75kPa まで再度増加する傾向を示した。

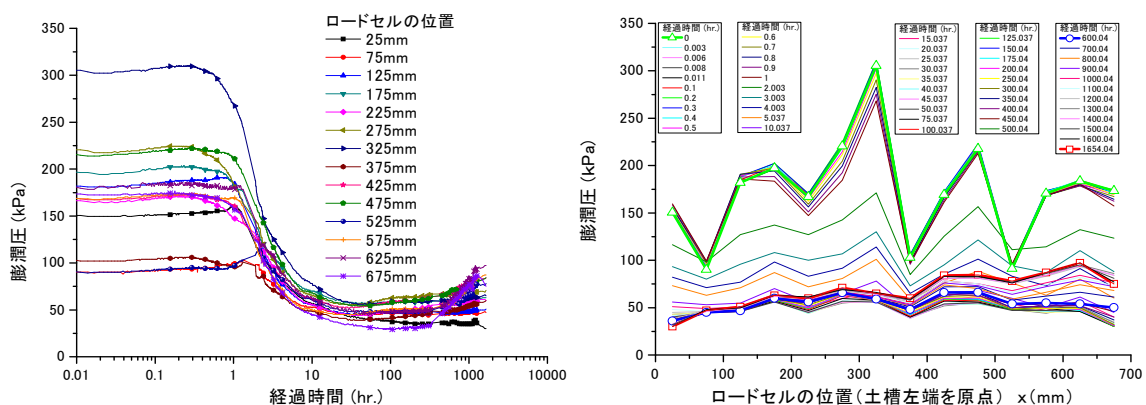


図 7.1.3-7 ペレット充填ケースの膨潤圧の経時変化

図 7.1.3-8 にペレット充填ケースの比抵抗分布の変遷を示す。図から、給水開始から 1 カ月程度までは底部の方が比抵抗は小さく、含水比が高い傾向を示していることが分かる。ただし、前述のように、底部のペレットが膨潤し、一体化してからは、間隙水を消費して膨潤する傾向を示

したため、比抵抗分布の傾向は変化して、所々に比抵抗が非常に大きなエリアがランダムに発生している。これは、ペレットと電極が点接触しているため、間隙の水分がペレットの膨潤に消費されて空隙になった箇所に電極が位置したものと考えられる。

さらに、1271 時間（53 日）以降は、全体的に比抵抗分布が小さくなっている。この原因として、供試体と土槽背面に隙間が生じて、局部的に浸潤が生じたなどが想像されるが、解体時の観察などでは、供試体と土槽背面の界面でも高含水比領域は観察されなかった。

図 7.1.3-9 に解体時のペレット土槽の含水比と乾燥密度の分布を示す。図から、底部の方が含水比は高く、乾燥密度は低い傾向にあることが分かる。また逆に、上部ほど含水比は低く、乾燥密度は高い傾向にある。さらに、奥行き方向には含水比と乾燥密度に分布は無いことが分かった。このことから、ペレット地盤では、給水側が膨潤して高含水比低密度になり、他の領域を押し上げているものと考えられる。

さらに、全体的に土槽右側の方が、含水比は高く、乾燥密度は低い傾向を示していることから、特に右側のペレットの方が、膨潤挙動が激しかったものと考えられる。この傾向は、前述の土槽上蓋のロードセルによる膨潤圧分布とも合致している。

以上から、ペレット充填工法では、施工時に均等にペレットを充填し浸潤初期に大間隙を介して均等に水が全体に供給されたとしても、その後は湧水近傍のみが膨潤し、他の領域が圧縮されるため、浸潤後に密度分布が発生する可能性があることが分かった。

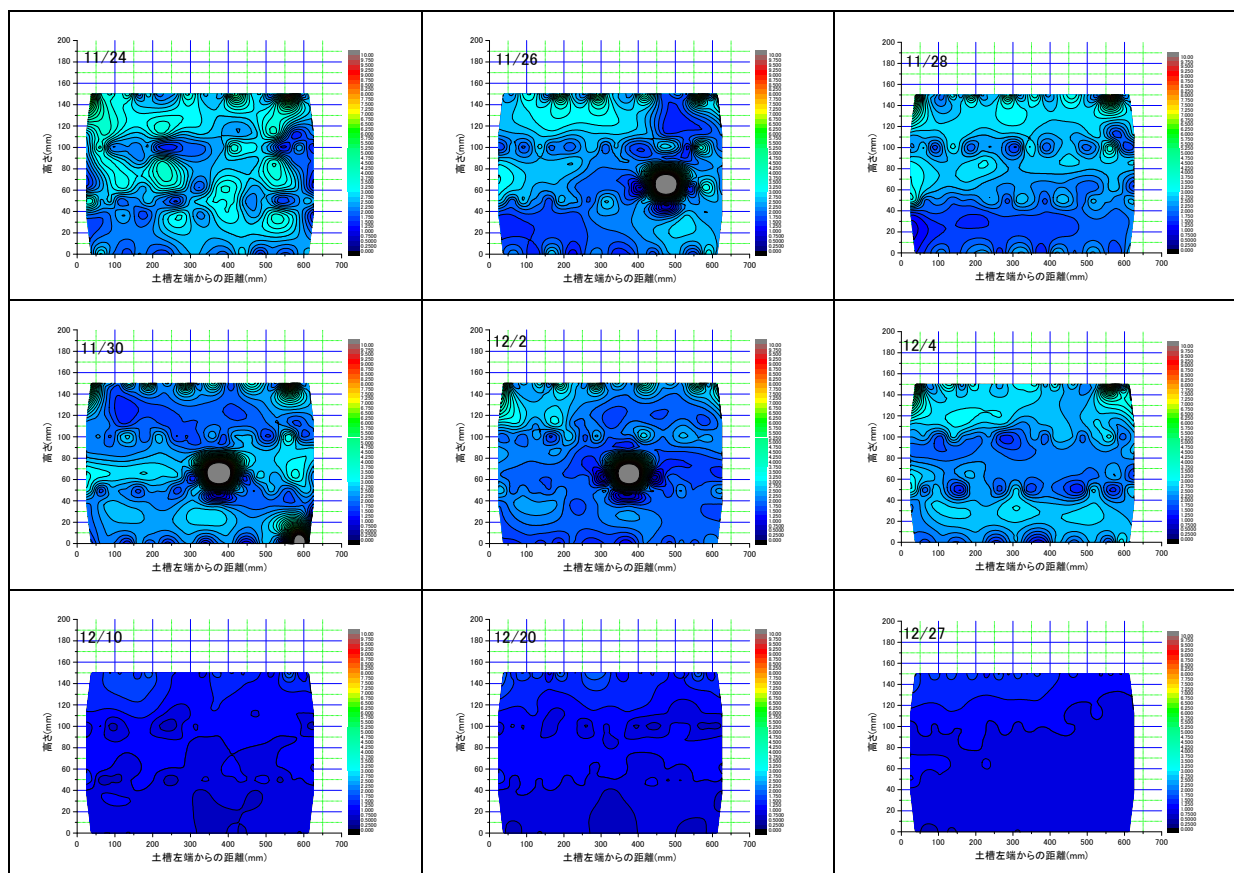


図 7.1.3-8 ペレット充填ケースの比抵抗分布の変遷

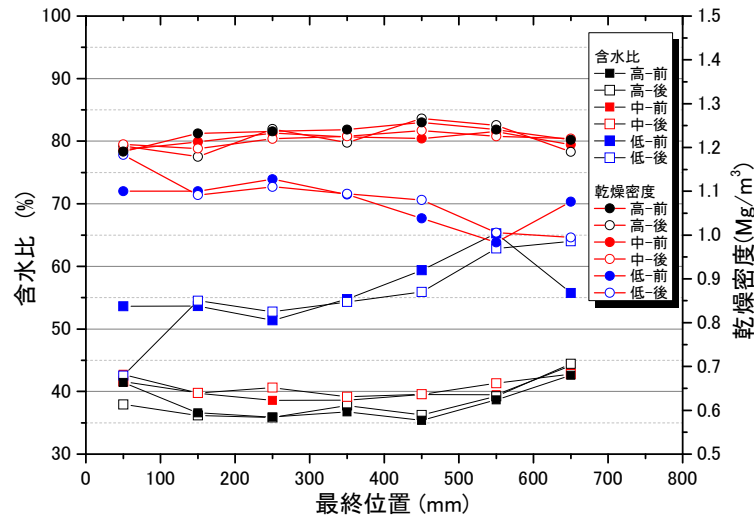


図 7.1.3-9 解体時のペレット土槽の含水比と乾燥密度の分布

7.1.4 試験結果(ブロック定置ケース)

表 7.1.4-1 にブロック定置を模擬した緩衝材の初期状態を示す。ブロックの総乾燥質量を土槽の容積で除して取得した初期乾燥密度は 1.556Mg/m^3 である。また、模擬緩衝材の空隙体積は 5714.05cm^3 であった。なお、空隙体積はブロック内の空隙も含んでいる。

ブロック定置ケースの土槽試験手順を図 7.1.3-1 に示す。ブロックは合計で 168 個 (= W14 個 × H4 個 × D3 個) であり、各ブロックの諸元を図 7.1.4-2～図 7.1.4-7 に示す。

表 7.1.4-1 ブロック定置による模擬緩衝材の初期状態

土槽面	作成ブロック 合計質量 (g)	寸法調整 切削質量 (g)	充填 試料質量 (g)	平均 含水比 (%)	概算試料 乾燥質量 (g)	土槽体積 (cm^3)	初期乾燥密度 (Mg/m^3)	初期 空隙体積 (cm^3)
裏面	12537.80	537.50	12000.30	9.85	10924.25	21000	1.556	5714.05
中面	12319.46	251.43	12068.03	9.55	11015.83			
表面	12319.77	538.86	11780.91	9.83	10726.71			

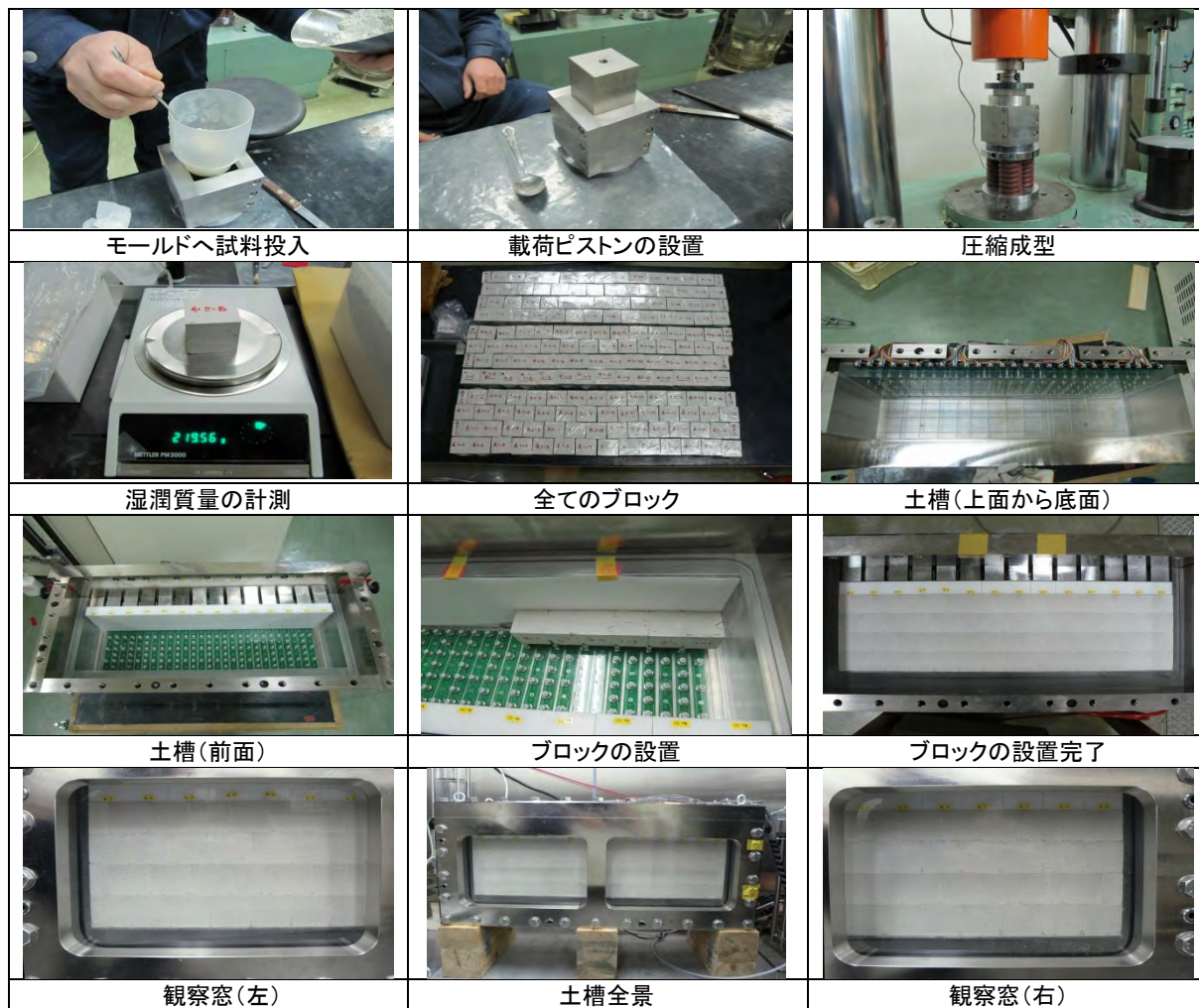
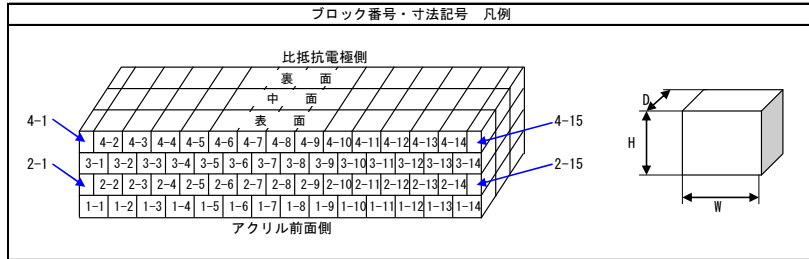


図 7.1.4-1 ブロック定置ケースの土槽試験手順

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

裏面 1 段目

ブロック作成年月日	2012/2/8		
調整後試料含水比	作成後残試料含水比		
容器番号	21	容器番号	40
ma (g)	130.57	ma (g)	145.98
mb (g)	128.44	mb (g)	142.97
mc (g)	108.24	mc (g)	109.90
w (%)	10.54	w (%)	9.10
平均含水比 (%)	9.82		



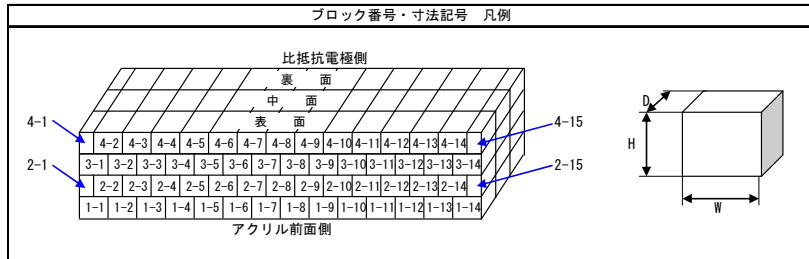
ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
裏面 1 - 1	219.85	5.163	5.166	5.179	5.066	5.060	5.068	5.067	5.060	5.169	5.065	5.065	132.607	1.658	9.82	1.510	
裏面 1 - 2	219.74	5.159	5.140	5.142	5.051	5.064	5.075	5.057	5.073	5.069	5.147	5.063	5.066	132.034	1.664	9.82	1.515
裏面 1 - 3	219.88	5.151	5.126	5.123	5.042	5.052	5.052	5.041	5.056	5.057	5.133	5.049	5.051	130.913	1.680	9.82	1.529
裏面 1 - 4	219.96	5.116	5.120	5.117	5.038	5.032	5.032	5.036	5.033	5.035	5.118	5.034	5.035	129.705	1.696	9.82	1.544
裏面 1 - 5	219.92	5.097	5.098	5.101	5.037	5.035	5.032	5.038	5.039	5.035	5.099	5.035	5.037	129.309	1.701	9.82	1.549
裏面 1 - 6	219.98	5.040	5.042	5.039	5.036	5.035	5.030	5.040	5.043	5.048	5.040	5.034	5.044	127.965	1.719	9.82	1.565
裏面 1 - 7	219.97	5.100	5.100	5.099	5.031	5.034	5.033	5.030	5.035	5.032	5.100	5.033	5.032	129.154	1.703	9.82	1.551
裏面 1 - 8	219.90	5.113	5.111	5.113	5.032	5.035	5.034	5.046	5.047	5.041	5.112	5.034	5.045	129.818	1.694	9.82	1.542
裏面 1 - 9	219.93	5.101	5.100	5.101	5.029	5.036	5.038	5.029	5.037	5.038	5.101	5.034	5.035	129.282	1.701	9.82	1.549
裏面 1 - 10	219.92	5.101	5.098	5.101	5.032	5.032	5.033	5.030	5.032	5.033	5.100	5.032	5.032	129.137	1.703	9.82	1.551
裏面 1 - 11	220.03	5.094	5.097	5.098	5.034	5.031	5.033	5.037	5.036	5.037	5.096	5.033	5.037	129.181	1.703	9.82	1.551
裏面 1 - 12	220.02	5.091	5.095	5.099	5.033	5.032	5.036	5.027	5.030	5.034	5.095	5.034	5.030	129.011	1.705	9.82	1.553
裏面 1 - 13	219.98	5.095	5.095	5.095	5.031	5.030	5.031	5.030	5.031	5.033	5.095	5.031	5.031	128.959	1.706	9.82	1.553
裏面 1 - 14	220.03	5.095	5.097	5.100	5.032	5.034	5.033	5.027	5.034	5.037	5.097	5.033	5.033	129.112	1.704	9.82	1.552
														129.728	1.696	9.82	1.544

ブロック作成総重量 (g)	湿潤	3079.11
	乾燥	2803.70

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

裏面 2 段目

ブロック作成年月日	2012/2/9		
調整後試料含水比	作成後残試料含水比		
容器番号	22	容器番号	23
ma (g)	155.08	ma (g)	147.31
mb (g)	150.94	mb (g)	143.88
mc (g)	110.11	mc (g)	109.38
w (%)	10.14	w (%)	9.94
平均含水比 (%)	10.04		



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
裏面 2 - 1	110.02	5.028	5.030	5.030	2.560	2.559	2.559	5.031	5.031	5.030	5.029	2.559	5.031	64.7534	1.699	10.04	1.544
裏面 2 - 2	219.66	4.987	4.989	4.989	5.027	5.034	5.037	5.034	5.043	5.045	4.988	5.033	5.041	126.544	1.736	10.04	1.577
裏面 2 - 3	220.02	4.991	4.995	4.992	5.038	5.035	5.033	4.998	4.997	5.000	4.993	5.035	4.998	125.657	1.751	10.04	1.591
裏面 2 - 4	219.86	4.987	4.992	4.993	5.027	5.030	5.031	5.001	4.998	4.985	4.991	5.029	4.995	125.365	1.754	10.04	1.594
裏面 2 - 5	219.92	4.988	4.995	4.998	5.027	5.036	5.034	5.026	5.030	5.031	4.997	5.032	5.029	126.462	1.739	10.04	1.580
裏面 2 - 6	219.96	4.995	4.987	4.989	5.026	5.029	5.027	5.032	5.029	5.031	4.990	5.027	5.031	126.21	1.743	10.04	1.584
裏面 2 - 7	219.95	4.997	4.996	4.995	5.029	5.032	5.031	5.029	5.028	5.027	4.996	5.031	5.028	126.37	1.741	10.04	1.582
裏面 2 - 8	219.97	4.996	4.993	4.993	5.028	5.032	5.029	5.032	5.031	5.030	4.994	5.030	5.031	126.369	1.741	10.04	1.582
裏面 2 - 9	219.99	4.993	4.988	4.984	5.024	5.031	5.029	5.032	5.031	5.032	4.988	5.028	5.032	126.201	1.743	10.04	1.584
裏面 2 - 10	219.99	4.998	4.991	4.990	5.027	5.031	5.032	5.031	5.031	5.030	4.993	5.030	5.031	126.344	1.741	10.04	1.582
裏面 2 - 11	219.99	4.990	4.992	4.993	5.028	5.033	5.038	5.035	5.034	5.032	4.992	5.033	5.034	126.461	1.740	10.04	1.581
裏面 2 - 12	220.03	4.987	4.991	4.987	5.032	5.036	5.032	5.034	5.030	5.030	4.988	5.033	5.031	126.326	1.742	10.04	1.583
裏面 2 - 13	220.00	4.995	4.993	4.989	5.027	5.030	5.032	5.034	5.035	5.033	4.992	5.030	5.034	126.403	1.740	10.04	1.582
裏面 2 - 14	220.00	4.983	4.995	4.996	5.030	5.031	5.030	5.040	5.034	5.031	4.991	5.030	5.035	126.419	1.740	10.04	1.581
裏面 2 - 15	110.00	5.027	5.028	5.027	2.566	2.564	2.562	5.038	5.032	5.030	5.027	2.564	5.033	64.8801	1.695	10.04	1.541

2-1, 2-15を除きH寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

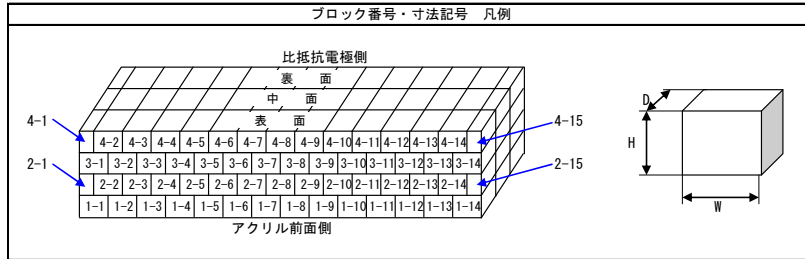
ブロック作成総重量 (g)	湿潤	2969.36
	乾燥	2698.42

図 7.1.4-2 各ブロックの制作諸元（裏面 1 段目～2 段目）

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

裏面 3 段目

ブロック作成年月日	2012/2/9	
調整後試料含水比	作成後残試料含水比	
容器番号	25	容器番号 27
ma (g)	139.87	ma (g) 148.21
mb (g)	137.30	mb (g) 144.92
mc (g)	108.65	mc (g) 108.27
w (%)	8.97	w (%) 8.98
平均含水比 (%)	8.97	



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
裏面 3 - 1	220.00	4.996	4.997	4.995	5.033	5.036	5.032	5.039	5.034	5.038	4.996	5.034	5.037	126.671	1.737	8.97	1.594
裏面 3 - 2	219.92	4.987	4.995	4.996	5.026	5.035	5.030	5.032	5.035	5.037	4.993	5.030	5.035	126.445	1.739	8.97	1.596
裏面 3 - 3	219.94	4.986	4.985	4.985	5.030	5.032	5.035	5.039	5.032	5.032	4.985	5.032	5.034	126.301	1.741	8.97	1.598
裏面 3 - 4	219.98	4.989	4.991	4.991	5.034	5.031	5.030	5.031	5.031	5.032	4.990	5.032	5.031	126.335	1.741	8.97	1.598
裏面 3 - 5	220.00	5.006	4.998	4.999	5.024	5.030	5.033	5.025	5.026	5.028	5.001	5.029	5.026	126.412	1.740	8.97	1.597
裏面 3 - 6	219.93	4.993	4.993	4.989	5.029	5.030	5.031	5.033	5.032	5.031	4.992	5.030	5.032	126.344	1.741	8.97	1.597
裏面 3 - 7	219.94	4.980	4.981	4.985	5.025	5.031	5.029	5.032	5.034	5.032	4.982	5.028	5.033	126.074	1.745	8.97	1.601
裏面 3 - 8	220.00	4.989	4.987	4.989	5.030	5.036	5.036	5.032	5.035	5.032	4.988	5.034	5.033	126.385	1.741	8.97	1.597
裏面 3 - 9	220.00	4.992	4.995	4.997	5.026	5.033	5.034	5.034	5.034	5.033	4.995	5.031	5.034	126.487	1.739	8.97	1.596
裏面 3 - 10	220.00	5.019	5.020	5.021	5.027	5.029	5.034	5.032	5.031	5.030	5.020	5.030	5.031	127.036	1.732	8.97	1.589
裏面 3 - 11	220.01	5.001	5.000	5.005	5.028	5.031	5.033	5.031	5.034	5.037	5.002	5.031	5.034	126.673	1.737	8.97	1.594
裏面 3 - 12	220.00	4.994	4.995	4.998	5.025	5.028	5.030	5.035	5.031	5.035	4.996	5.028	5.034	126.428	1.740	8.97	1.597
裏面 3 - 13	220.01	5.010	5.010	5.011	5.035	5.037	5.038	5.035	5.035	5.040	5.010	5.037	5.037	127.102	1.731	8.97	1.588
裏面 3 - 14	220.01	5.026	5.029	5.027	5.035	5.035	5.037	5.034	5.039	5.037	5.027	5.036	5.037	127.508	1.725	8.97	1.583

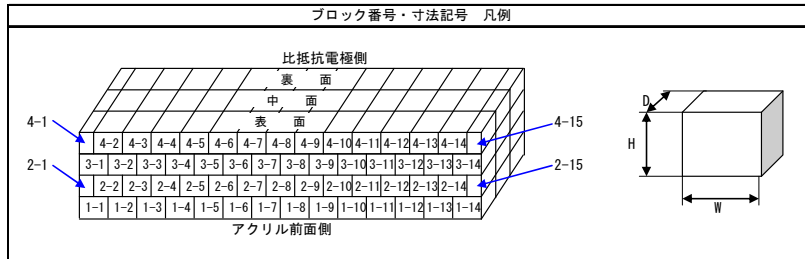
H寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

ブロック作成総重量 (g)	湿潤	3079.74
	乾燥	2826.13

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

裏面 4 段目

ブロック作成年月日	2012/2/10	
調整後試料含水比	作成後残試料含水比	
容器番号	28	容器番号 29
ma (g)	132.80	ma (g) 141.76
mb (g)	130.47	mb (g) 138.79
mc (g)	109.36	mc (g) 109.35
w (%)	11.04	w (%) 10.09
平均含水比 (%)	10.56	



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
裏面 4 - 1	110.00	5.032	5.027	5.030	2.565	2.562	2.562	5.031	5.030	5.034	5.030	2.563	5.032	64.8634	1.696	10.56	1.534
裏面 4 - 2	220.00	4.976	4.981	4.983	5.024	5.027	5.026	5.032	5.029	5.033	4.980	5.026	5.031	125.923	1.747	10.56	1.580
裏面 4 - 3	219.93	4.987	4.983	4.979	5.024	5.029	5.027	5.029	5.034	5.034	4.983	5.027	5.032	126.049	1.745	10.56	1.578
裏面 4 - 4	220.00	4.987	4.989	4.987	5.032	5.038	5.037	5.033	5.035	5.037	4.988	5.036	5.035	126.46	1.740	10.56	1.573
裏面 4 - 5	219.95	4.988	4.982	4.988	5.026	5.030	5.030	5.029	5.032	5.030	4.986	5.029	5.030	126.125	1.744	10.56	1.577
裏面 4 - 6	219.85	4.982	4.982	4.982	5.029	5.030	5.029	5.028	5.028	5.030	4.982	5.029	5.029	125.999	1.745	10.56	1.578
裏面 4 - 7	219.95	4.998	4.999	4.998	5.035	5.032	5.028	5.035	5.038	5.038	4.998	5.032	5.037	126.68	1.736	10.56	1.570
裏面 4 - 8	219.98	4.988	4.988	4.989	5.027	5.032	5.032	5.030	5.032	5.036	4.988	5.030	5.033	126.285	1.742	10.56	1.576
裏面 4 - 9	219.98	4.985	4.986	4.986	5.033	5.035	5.036	5.030	5.031	5.026	4.986	5.035	5.029	126.234	1.743	10.56	1.576
裏面 4 - 10	219.95	4.992	4.991	4.990	5.029	5.032	5.032	5.030	5.031	5.032	4.991	5.031	5.031	126.327	1.741	10.56	1.575
裏面 4 - 11	219.98	4.989	4.990	4.991	5.024	5.027	5.025	5.028	5.029	5.028	4.990	5.025	5.028	126.093	1.745	10.56	1.578
裏面 4 - 12	219.96	4.986	4.992	4.985	5.029	5.032	5.029	5.037	5.035	5.036	4.988	5.030	5.036	126.343	1.741	10.56	1.575
裏面 4 - 13	220.01	4.996	4.994	4.991	5.028	5.030	5.030	5.028	5.030	5.029	4.994	5.029	5.029	126.302	1.742	10.56	1.576
裏面 4 - 14	220.02	4.995	4.995	4.995	5.023	5.026	5.024	5.034	5.033	5.024	4.995	5.024	5.030	126.244	1.743	10.56	1.576
裏面 4 - 15	110.03	5.035	5.034	5.033	2.559	2.560	2.561	5.032	5.031	5.030	5.034	2.560	5.031	64.8347	1.697	10.56	1.535

4-1, 4-15を除きH寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

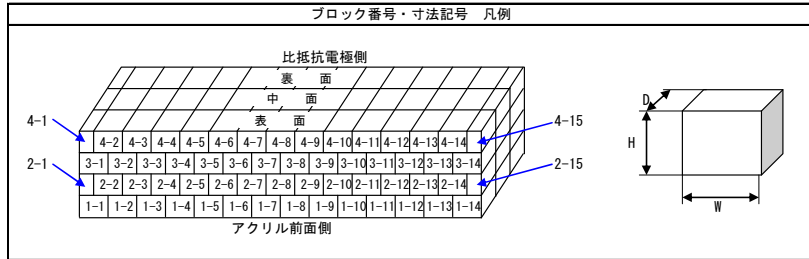
ブロック作成総重量 (g)	湿潤	2969.56
	乾燥	2685.86

図 7.1.4-3 各ブロックの制作諸元（裏面3段目～4段目）

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

中面 1 段目

ブロック作成年月日	2012/2/10		
調整後試料含水比	作成後残試料含水比		
容器番号	30	容器番号	1
ma (g)	135.43	ma (g)	144.96
mb (g)	133.20	mb (g)	141.15
mc (g)	109.89	mc (g)	101.99
w (%)	9.57	w (%)	9.73
平均含水比 (%)	9.65		



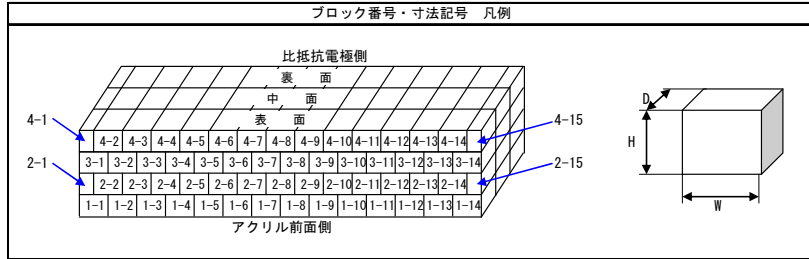
ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
中面 1 - 1	220.03	5.100	5.100	5.098	5.027	5.033	5.031	5.036	5.037	5.035	5.099	5.030	5.036	129.18	1.703	9.65	1.553
中面 1 - 2	220.00	5.095	5.098	5.099	5.028	5.033	5.033	5.033	5.036	5.035	5.097	5.031	5.035	129.121	1.704	9.65	1.554
中面 1 - 3	219.98	5.096	5.102	5.102	5.035	5.032	5.032	5.035	5.034	5.039	5.100	5.033	5.036	129.266	1.702	9.65	1.552
中面 1 - 4	219.98	5.099	5.096	5.099	5.031	5.033	5.031	5.058	5.034	5.033	5.098	5.032	5.042	129.326	1.701	9.65	1.551
中面 1 - 5	219.90	5.093	5.094	5.100	5.029	5.030	5.029	5.031	5.032	5.033	5.096	5.029	5.032	128.959	1.705	9.65	1.555
中面 1 - 6	219.93	5.099	5.096	5.094	5.026	5.032	5.033	5.028	5.033	5.034	5.096	5.030	5.032	128.993	1.705	9.65	1.555
中面 1 - 7	219.96	5.099	5.096	5.094	5.031	5.032	5.033	5.032	5.034	5.031	5.096	5.032	5.032	129.053	1.704	9.65	1.554
中面 1 - 8	219.93	5.095	5.093	5.098	5.030	5.032	5.026	5.028	5.031	5.027	5.095	5.029	5.029	128.865	1.707	9.65	1.556
中面 1 - 9	219.87	5.098	5.096	5.086	5.027	5.033	5.028	5.032	5.031	5.032	5.093	5.029	5.032	128.892	1.706	9.65	1.556
中面 1 - 10	219.94	5.100	5.098	5.100	5.029	5.030	5.030	5.025	5.029	5.032	5.099	5.030	5.029	128.975	1.705	9.65	1.555
中面 1 - 11	219.96	5.094	5.094	5.087	5.030	5.033	5.033	5.027	5.037	5.039	5.092	5.032	5.034	128.986	1.705	9.65	1.555
中面 1 - 12	219.98	5.093	5.095	5.092	5.030	5.031	5.033	5.032	5.034	5.029	5.093	5.031	5.032	128.943	1.706	9.65	1.556
中面 1 - 13	219.89	5.092	5.099	5.092	5.032	5.033	5.033	5.032	5.032	5.029	5.094	5.033	5.031	128.985	1.705	9.65	1.555
中面 1 - 14	220.00	5.093	5.096	5.094	5.033	5.032	5.031	5.032	5.035	5.035	5.094	5.032	5.034	129.045	1.705	9.65	1.555
														129.042	1.705	9.65	1.555

ブロック作成総重量 (g)	湿潤	3079.35
	乾燥	2808.40

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

中面 2 段目

ブロック作成年月日	2012/2/13		
調整後試料含水比	作成後残試料含水比		
容器番号	2	容器番号	3
ma (g)	133.63	ma (g)	132.76
mb (g)	130.99	mb (g)	130.11
mc (g)	103.36	mc (g)	102.45
w (%)	9.55	w (%)	9.58
平均含水比 (%)	9.57		



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
中面 2 - 1	109.98	5.033	5.031	5.033	2.568	2.567	2.562	5.042	5.044	5.048	5.032	2.566	5.045	65.1332	1.689	9.57	1.541
中面 2 - 2	219.98	4.985	4.985	4.985	5.028	5.031	5.029	5.029	5.033	5.033	4.985	5.029	5.032	126.15	1.744	9.57	1.592
中面 2 - 3	219.97	4.984	4.983	4.983	5.025	5.029	5.029	5.033	5.037	5.035	4.983	5.028	5.035	126.15	1.744	9.57	1.591
中面 2 - 4	220.01	4.989	4.988	4.985	5.035	5.038	5.025	5.028	5.032	5.032	4.987	5.033	5.031	126.268	1.742	9.57	1.590
中面 2 - 5	219.98	4.997	4.997	4.992	5.030	5.033	5.029	5.027	5.037	5.031	4.995	5.031	5.032	126.445	1.740	9.57	1.588
中面 2 - 6	219.97	4.996	4.995	4.995	5.029	5.031	5.027	5.033	5.031	5.029	4.995	5.029	5.031	126.386	1.740	9.57	1.588
中面 2 - 7	220.02	5.019	5.014	5.012	5.032	5.031	5.026	5.035	5.035	5.042	5.015	5.030	5.037	127.061	1.732	9.57	1.580
中面 2 - 8	219.55	4.997	4.982	4.981	5.029	5.030	5.030	5.030	5.037	5.033	4.987	5.030	5.033	126.242	1.739	9.57	1.587
中面 2 - 9	219.97	4.990	4.990	4.990	5.029	5.030	5.027	5.036	5.038	5.033	4.990	5.029	5.036	126.36	1.741	9.57	1.589
中面 2 - 10	220.03	4.990	4.991	4.991	5.028	5.029	5.026	5.028	5.032	5.031	4.991	5.028	5.030	126.218	1.743	9.57	1.591
中面 2 - 11	219.95	4.996	4.993	4.987	5.029	5.030	5.031	5.033	5.034	5.031	4.992	5.030	5.033	126.369	1.741	9.57	1.589
中面 2 - 12	219.99	4.991	4.996	4.993	5.028	5.033	5.032	5.028	5.032	5.032	4.993	5.031	5.031	126.378	1.741	9.57	1.589
中面 2 - 13	220.05	4.997	4.994	4.992	5.029	5.031	5.030	5.029	5.034	5.031	4.994	5.030	5.031	126.395	1.741	9.57	1.589
中面 2 - 14	220.03	4.983	4.986	4.986	5.030	5.029	5.026	5.028	5.031	5.033	4.985	5.028	5.031	126.1	1.745	9.57	1.593
中面 2 - 15	110.06	5.027	5.023	5.024	2.553	2.551	2.551	5.025	5.027	5.024	5.025	2.552	5.025	64.4312	1.708	9.57	1.559

2-1, 2-15を除きH寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

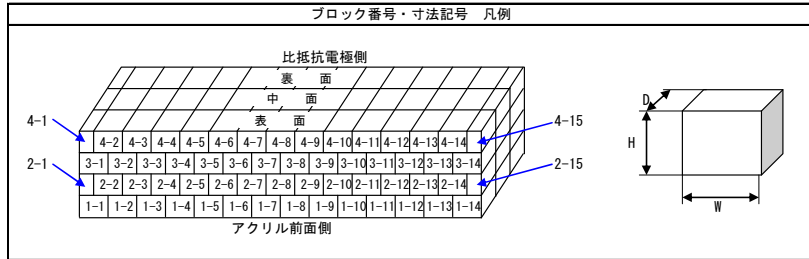
ブロック作成総重量 (g)	湿潤	2969.48
	乾燥	2710.18

図 7.1.4-4 各ブロックの制作諸元（中面 1 段目～2 段目）

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

中面 3 段目

ブロック作成年月日	2012/2/13	
調整後試料含水比	作成後残試料含水比	
容器番号	4	7
ma (g)	139.04	ma (g) 141.18
mb (g)	136.18	mb (g) 138.19
mc (g)	105.57	mc (g) 106.28
w (%)	9.34	w (%) 9.37
平均含水比 (%)	9.36	



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
中面 3 - 1	220.09	5.000	4.999	5.000	5.031	5.031	5.027	5.033	5.034	5.033	5.000	5.030	5.033	126.572	1.739	9.36	1.590
中面 3 - 2	220.05	4.994	4.994	4.993	5.029	5.029	5.027	5.027	5.031	5.032	4.994	5.028	5.030	126.302	1.742	9.36	1.593
中面 3 - 3	219.98	4.990	4.993	4.991	5.028	5.029	5.025	5.030	5.029	5.030	4.991	5.027	5.030	126.21	1.743	9.36	1.594
中面 3 - 4	219.98	4.993	4.994	4.996	5.026	5.031	5.033	5.031	5.035	5.033	4.994	5.030	5.033	126.436	1.740	9.36	1.591
中面 3 - 5	220.03	4.998	4.995	4.994	5.029	5.030	5.026	5.030	5.033	5.033	4.996	5.028	5.032	126.403	1.741	9.36	1.592
中面 3 - 6	220.00	5.011	5.001	5.015	5.029	5.032	5.027	5.029	5.032	5.032	5.009	5.029	5.031	126.741	1.736	9.36	1.587
中面 3 - 7	220.04	5.007	5.005	5.006	5.028	5.032	5.026	5.029	5.036	5.035	5.006	5.029	5.033	126.707	1.737	9.36	1.588
中面 3 - 8	220.00	4.984	4.984	4.979	5.029	5.030	5.025	5.028	5.030	5.035	4.982	5.028	5.031	126.032	1.746	9.36	1.596
中面 3 - 9	220.01	4.989	4.989	4.982	5.028	5.028	5.033	5.055	5.030	5.030	4.987	5.030	5.038	126.368	1.741	9.36	1.592
中面 3 - 10	219.95	5.015	4.986	4.984	5.029	5.032	5.026	5.027	5.032	5.030	4.995	5.029	5.030	126.344	1.741	9.36	1.592
中面 3 - 11	220.00	4.995	4.992	4.986	5.028	5.029	5.025	5.026	5.032	5.032	4.991	5.027	5.030	126.21	1.743	9.36	1.594
中面 3 - 12	220.06	4.988	4.987	4.988	5.031	5.031	5.027	5.028	5.032	5.030	4.988	5.030	5.030	126.184	1.744	9.36	1.595
中面 3 - 13	220.00	4.989	4.987	4.982	5.029	5.031	5.026	5.031	5.033	5.034	4.986	5.029	5.033	126.184	1.743	9.36	1.594
中面 3 - 14	220.03	4.993	4.997	4.995	5.032	5.036	5.029	5.034	5.034	5.033	4.995	5.032	5.034	126.529	1.739	9.36	1.590

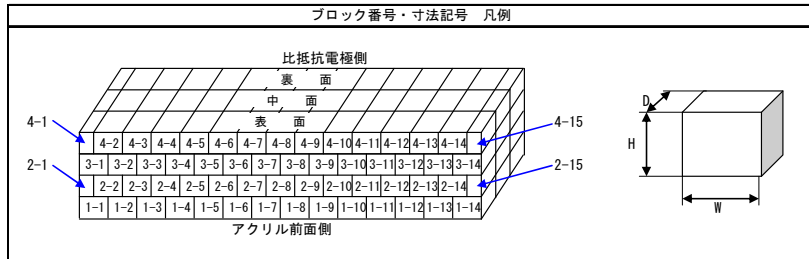
H寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

ブロック作成総重量 (g)	湿潤	3080.22
	乾燥	2816.67

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

中面 4 段目

ブロック作成年月日	2012/2/13	
調整後試料含水比	作成後残試料含水比	
容器番号	5	6
ma (g)	134.62	ma (g) 146.13
mb (g)	132.15	mb (g) 142.30
mc (g)	104.53	mc (g) 105.21
w (%)	8.94	w (%) 10.33
平均含水比 (%)	9.63	



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
中面 4 - 1	109.96	5.032	5.031	5.032	2.559	2.557	2.557	5.032	5.031	5.032	5.032	2.558	5.032	64.7542	1.698	9.63	1.549
中面 4 - 2	219.95	4.989	4.986	4.989	5.030	5.032	5.024	5.034	5.033	5.030	4.988	5.029	5.032	126.226	1.743	9.63	1.589
中面 4 - 3	220.05	4.989	4.991	4.991	5.028	5.026	5.024	5.030	5.028	5.030	4.990	5.026	5.029	126.143	1.744	9.63	1.591
中面 4 - 4	220.06	4.997	4.993	5.000	5.036	5.031	5.026	5.029	5.034	5.039	4.997	5.031	5.034	126.546	1.739	9.63	1.586
中面 4 - 5	220.04	4.998	4.998	4.998	5.031	5.032	5.031	5.033	5.031	5.029	4.998	5.031	5.031	126.513	1.739	9.63	1.586
中面 4 - 6	220.02	5.009	5.013	5.015	5.033	5.035	5.031	5.031	5.035	5.032	5.012	5.033	5.033	126.959	1.733	9.63	1.581
中面 4 - 7	220.01	4.991	4.991	4.991	5.033	5.033	5.032	5.033	5.034	5.028	4.991	5.033	5.032	126.386	1.741	9.63	1.588
中面 4 - 8	220.03	4.988	4.983	4.984	5.038	5.037	5.032	4.985	4.986	4.987	4.985	5.036	4.986	125.163	1.758	9.63	1.603
中面 4 - 9	220.03	4.984	4.985	4.984	5.034	5.030	5.035	5.035	5.032	5.034	4.984	5.033	5.034	126.275	1.742	9.63	1.589
中面 4 - 10	220.02	4.989	4.988	4.989	5.037	5.040	5.037	4.988	4.991	4.992	4.989	5.038	4.990	125.422	1.754	9.63	1.600
中面 4 - 11	220.04	4.991	4.991	4.992	5.026	5.037	5.032	4.990	4.991	4.990	4.991	5.032	4.990	125.331	1.756	9.63	1.601
中面 4 - 12	220.04	4.987	4.986	4.984	5.032	5.030	5.033	5.030	5.032	5.031	4.986	5.032	5.031	126.209	1.743	9.63	1.590
中面 4 - 13	220.04	4.992	4.993	4.990	5.032	5.033	5.030	5.026	5.032	5.033	4.992	5.032	5.030	126.344	1.742	9.63	1.589
中面 4 - 14	220.06	4.993	4.993	4.990	5.034	5.033	5.034	5.034	5.035	5.031	4.992	5.034	5.033	126.478	1.740	9.63	1.587
中面 4 - 15	110.00	5.029	5.027	5.030	2.558	2.560	2.561	5.035	5.032	5.032	5.029	2.560	5.033	64.7833	1.698	9.63	1.549

4-1, 4-15を除きH寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

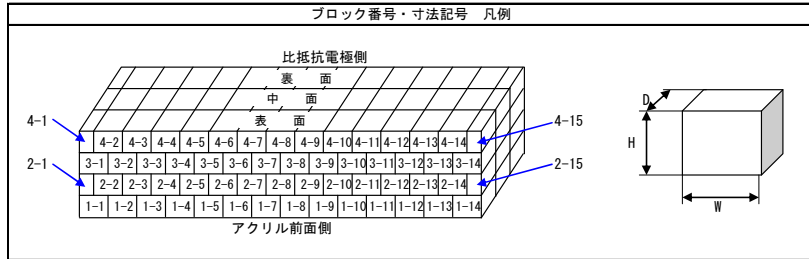
ブロック作成総重量 (g)	湿潤	2970.35
	乾燥	2709.32

図 7.1.4-5 各ブロックの制作諸元（中面 3 段目～4 段目）

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

表面 1 段目

ブロック作成年月日	2012/2/14		
調整後試料含水比	作成後残試料含水比		
容器番号	9	容器番号	8
ma (g)	147.56	ma (g)	149.21
mb (g)	143.74	mb (g)	145.28
mc (g)	105.61	mc (g)	106.01
w (%)	10.02	w (%)	10.01
平均含水比 (%)	10.01		



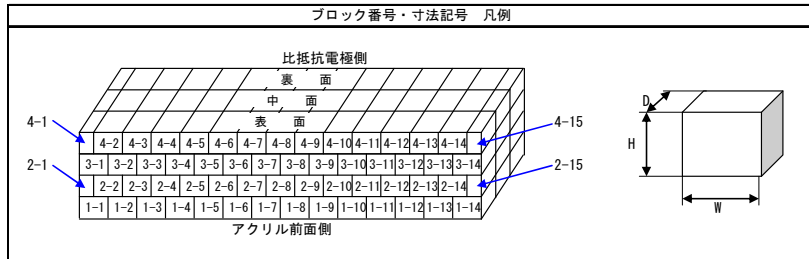
ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
表面 1 - 1	219.87	5.080	5.032	5.083	5.025	5.031	5.033	5.027	5.027	5.027	5.065	5.030	5.027	128.064	1.717	10.01	1.561
表面 1 - 2	220.00	5.080	5.080	5.080	5.024	5.027	5.025	5.024	5.028	5.028	5.080	5.025	5.027	128.324	1.714	10.01	1.558
表面 1 - 3	219.98	5.092	5.092	5.096	5.029	5.029	5.024	5.027	5.027	5.037	5.093	5.027	5.030	128.806	1.708	10.01	1.552
表面 1 - 4	220.01	5.089	5.086	5.085	5.028	5.027	5.024	5.031	5.032	5.032	5.087	5.026	5.030	128.846	1.710	10.01	1.555
表面 1 - 5	219.92	5.090	5.093	5.090	5.029	5.032	5.025	5.030	5.032	5.034	5.091	5.029	5.032	128.824	1.707	10.01	1.552
表面 1 - 6	219.95	5.080	5.093	5.079	5.025	5.027	5.024	5.026	5.029	5.026	5.084	5.025	5.027	128.434	1.713	10.01	1.557
表面 1 - 7	220.04	5.099	5.086	5.091	5.028	5.031	5.025	5.026	5.031	5.029	5.092	5.028	5.029	128.747	1.709	10.01	1.554
表面 1 - 8	220.03	5.090	5.091	5.090	5.030	5.030	5.026	5.026	5.030	5.030	5.090	5.029	5.029	128.722	1.709	10.01	1.554
表面 1 - 9	220.00	5.096	5.095	5.088	5.032	5.033	5.027	5.028	5.029	5.027	5.093	5.031	5.028	128.823	1.708	10.01	1.552
表面 1 - 10	219.97	5.099	5.090	5.096	5.034	5.033	5.026	5.030	5.031	5.031	5.095	5.031	5.031	128.951	1.706	10.01	1.551
表面 1 - 11	220.01	5.092	5.094	5.092	5.032	5.032	5.026	5.028	5.032	5.027	5.093	5.030	5.029	128.823	1.708	10.01	1.552
表面 1 - 12	220.04	5.080	5.081	5.075	5.027	5.027	5.021	5.023	5.026	5.028	5.079	5.025	5.026	128.257	1.716	10.01	1.559
表面 1 - 13	220.04	5.098	5.097	5.099	5.031	5.025	5.029	5.028	5.032	5.036	5.098	5.032	5.032	129.078	1.705	10.01	1.550
表面 1 - 14	220.05	5.102	5.110	5.115	5.036	5.036	5.033	5.029	5.033	5.031	5.109	5.035	5.031	129.417	1.700	10.01	1.546
														128.708	1.709	10.01	1.554

ブロック作成総重量 (g)	湿潤	3079.91
	乾燥	2799.59

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

表面 2 段目

ブロック作成年月日	2012/2/14		
調整後試料含水比	作成後残試料含水比		
容器番号	10	容器番号	11
ma (g)	148.25	ma (g)	145.43
mb (g)	144.38	mb (g)	141.70
mc (g)	105.90	mc (g)	105.32
w (%)	10.06	w (%)	10.25
平均含水比 (%)	10.16		



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
表面 2 - 1	110.02	5.041	5.033	5.030	2.561	2.565	2.556	5.032	5.033	5.029	5.035	2.561	5.031	64.8645	1.696	10.16	1.540
表面 2 - 2	220.03	4.992	4.994	4.996	5.032	5.031	5.030	5.032	5.029	5.032	4.994	5.031	5.031	126.403	1.741	10.16	1.580
表面 2 - 3	220.07	4.987	4.990	4.993	5.033	5.037	5.027	5.030	5.031	5.029	4.990	5.032	5.030	126.311	1.742	10.16	1.582
表面 2 - 4	220.06	4.989	4.988	4.989	5.034	5.034	5.026	5.029	5.030	5.032	4.989	5.031	5.030	126.26	1.743	10.16	1.582
表面 2 - 5	220.05	4.997	4.997	4.994	5.031	5.035	5.027	5.034	5.034	5.032	4.996	5.031	5.033	126.512	1.739	10.16	1.579
表面 2 - 6	219.99	4.988	4.988	4.990	5.032	5.035	5.031	5.026	5.031	5.032	4.989	5.033	5.030	126.276	1.742	10.16	1.582
表面 2 - 7	220.01	4.986	4.987	4.982	5.031	5.033	5.027	5.029	5.031	5.039	4.985	5.030	5.033	126.209	1.743	10.16	1.583
表面 2 - 8	220.03	4.987	4.989	4.987	5.033	5.034	5.026	5.030	5.030	5.031	4.988	5.031	5.030	126.226	1.743	10.16	1.582
表面 2 - 9	220.00	4.991	4.991	4.989	5.031	5.033	5.029	5.029	5.030	5.029	4.990	5.031	5.029	126.268	1.742	10.16	1.582
表面 2 - 10	219.97	4.985	4.989	4.982	5.030	5.033	5.026	5.032	5.032	5.032	4.985	5.030	5.032	126.175	1.743	10.16	1.583
表面 2 - 11	219.96	4.992	4.987	4.987	5.032	5.032	5.030	5.026	5.032	5.030	4.989	5.031	5.029	126.234	1.742	10.16	1.582
表面 2 - 12	219.97	4.993	4.997	4.997	5.033	5.033	5.028	5.037	5.037	5.038	4.996	5.031	5.037	126.613	1.737	10.16	1.577
表面 2 - 13	219.92	4.990	4.990	4.989	5.032	5.035	5.027	5.029	5.031	5.033	4.990	5.031	5.031	126.302	1.741	10.16	1.581
表面 2 - 14	220.02	4.993	4.994	4.986	5.033	5.033	5.028	5.029	5.032	5.033	4.991	5.031	5.031	126.344	1.741	10.16	1.581
表面 2 - 15	110.05	5.030	5.030	5.029	2.557	2.558	2.558	5.027	5.034	5.033	5.030	2.558	5.031	64.7241	1.700	10.16	1.544

2-1, 2-15を除きH寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

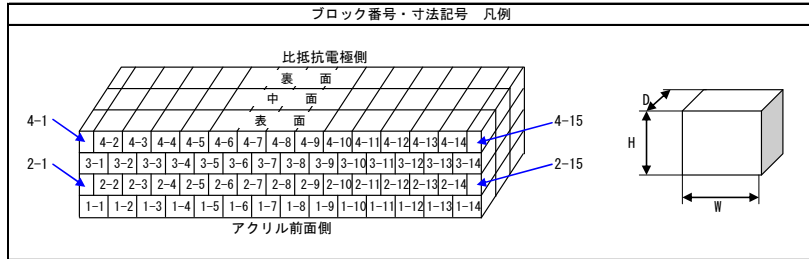
ブロック作成総重量 (g)	湿潤	2970.10
	乾燥	2696.29

図 7.1.4-6 各ブロックの制作諸元（表面1段目～2段目）

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

表面 3 段目

ブロック作成年月日	2012/2/14		
調整後試料含水比	作成後残試料含水比		
容器番号	12	容器番号	13
ma (g)	148.52	ma (g)	143.99
mb (g)	144.86	mb (g)	140.64
mc (g)	106.06	mc (g)	105.59
w (%)	9.43	w (%)	9.56
平均含水比 (%)	9.50		



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
表面 3 - 1	219.99	4.996	4.991	4.993	5.032	5.035	5.027	5.031	5.035	5.028	4.993	5.031	5.031	126.403	1.740	9.50	1.589
表面 3 - 2	219.99	4.990	4.998	4.991	5.033	5.034	5.026	5.028	5.030	5.033	4.993	5.031	5.030	126.361	1.741	9.50	1.590
表面 3 - 3	220.02	4.991	4.991	4.979	5.031	5.031	5.027	5.026	5.032	5.031	4.987	5.030	5.030	126.159	1.744	9.50	1.593
表面 3 - 4	219.94	4.996	5.000	4.995	5.032	5.035	5.028	5.029	5.034	5.031	4.997	5.032	5.031	126.504	1.739	9.50	1.588
表面 3 - 5	219.94	4.995	4.995	4.987	5.034	5.034	5.026	5.036	5.034	5.029	4.992	5.031	5.033	126.419	1.740	9.50	1.589
表面 3 - 6	219.96	4.999	5.000	4.987	5.032	5.031	5.027	5.028	5.031	5.030	4.995	5.030	5.030	126.378	1.740	9.50	1.590
表面 3 - 7	219.96	4.992	4.994	4.994	5.035	5.037	5.028	5.028	5.032	5.031	4.993	5.033	5.030	126.428	1.740	9.50	1.589
表面 3 - 8	219.97	5.000	5.006	4.996	5.035	5.034	5.031	5.031	5.033	5.040	5.001	5.033	5.035	126.723	1.736	9.50	1.585
表面 3 - 9	219.99	5.004	5.005	5.004	5.035	5.037	5.028	5.029	5.033	5.031	5.004	5.033	5.031	126.723	1.736	9.50	1.585
表面 3 - 10	219.95	4.993	4.994	4.993	5.031	5.031	5.027	5.027	5.033	5.035	4.993	5.030	5.032	126.369	1.741	9.50	1.590
表面 3 - 11	219.95	4.993	4.993	4.984	5.031	5.031	5.025	5.025	5.030	5.027	4.990	5.029	5.027	126.159	1.743	9.50	1.592
表面 3 - 12	219.92	5.004	5.005	5.002	5.035	5.034	5.027	5.026	5.031	5.029	5.004	5.032	5.029	126.614	1.737	9.50	1.586
表面 3 - 13	219.97	4.997	4.996	4.997	5.034	5.034	5.027	5.032	5.033	5.034	4.997	5.032	5.033	126.537	1.738	9.50	1.588
表面 3 - 14	220.01	4.987	4.993	4.993	5.033	5.033	5.028	5.027	5.034	5.030	4.991	5.031	5.030	126.319	1.742	9.50	1.591

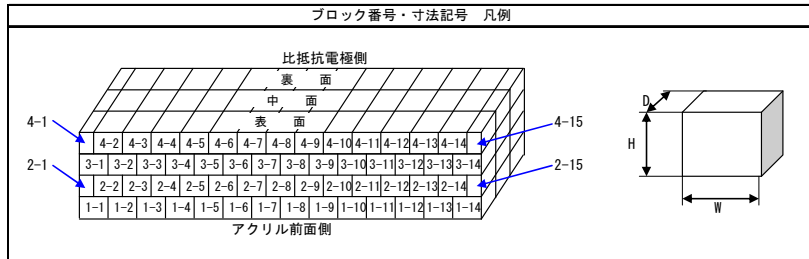
H寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

ブロック作成総重量 (g)	湿潤	3079.56
	乾燥	2812.50

均一化土槽（ブロック）供試体作成記録

表面 4 段目

ブロック作成年月日	2012/2/15		
調整後試料含水比	作成後残試料含水比		
容器番号	14	容器番号	15
ma (g)	136.73	ma (g)	134.97
mb (g)	134.05	mb (g)	132.29
mc (g)	105.38	mc (g)	105.35
w (%)	9.35	w (%)	9.95
平均含水比 (%)	9.65		



ブロック番号	湿潤重量 (g)	H (cm)			W (cm)			D (cm)			平均寸法 (cm)			体積 (cm³)	湿潤密度 (g/cm³)	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm³)
		左	中	右	上	中	下	前	中	奥	H	W	D				
表面 4 - 1	110.01	5.031	5.028	5.037	2.557	2.555	2.557	5.046	5.037		5.032	2.556	5.042	64.8512	1.696	9.65	1.547
表面 4 - 2	220.02	5.003	5.000	4.998	5.029	5.031	5.033	5.035	5.034		5.000	5.031	5.035	126.651	1.737	9.65	1.584
表面 4 - 3	220.06	5.015	5.014	5.011	5.035	5.033	5.026	5.030	5.035		5.013	5.031	5.033	126.939	1.734	9.65	1.581
表面 4 - 4	220.02	4.985	4.990	4.986	5.028	5.032	5.027	5.033	5.034		4.987	5.029	5.034	126.238	1.743	9.65	1.590
表面 4 - 5	220.00	4.985	4.990	4.985	5.031	5.037	5.036	5.028	5.031		4.987	5.035	5.030	126.272	1.742	9.65	1.589
表面 4 - 6	219.98	4.985	4.994	4.989	5.031	5.031	5.025	5.034	5.033		4.989	5.029	5.034	126.297	1.742	9.65	1.589
表面 4 - 7	219.99	4.988	4.988	4.986	5.028	5.030	5.028	5.027	5.031		4.987	5.029	5.029	126.125	1.744	9.65	1.591
表面 4 - 8	220.01	4.985	4.989	4.990	5.035	5.032	5.026	5.028	5.035		4.988	5.031	5.032	126.264	1.742	9.65	1.589
表面 4 - 9	219.99	4.989	4.982	4.983	5.029	5.030	5.025	5.028	5.032		4.985	5.028	5.030	126.066	1.745	9.65	1.591
表面 4 - 10	220.00	4.993	4.993	4.985	5.030	5.032	5.027	5.028	5.033		4.990	5.030	5.031	126.264	1.742	9.65	1.589
表面 4 - 11	220.05	4.987	4.989	4.983	5.036	5.035	5.024	5.030	5.035		4.986	5.032	5.033	126.263	1.743	9.65	1.589
表面 4 - 12	219.96	4.977	4.973	4.968	5.024	5.031	5.023	5.025	5.029		4.973	5.026	5.027	125.638	1.751	9.65	1.597
表面 4 - 13	220.02	4.993	4.994	4.983	5.031	5.027	5.025	5.026	5.029		4.990	5.028	5.028	126.13	1.744	9.65	1.591
表面 4 - 14	220.00	4.987	4.984	4.980	5.029	5.032	5.023	5.035	5.037		4.984	5.028	5.036	126.191	1.743	9.65	1.590
表面 4 - 15	110.04	5.030	5.028	5.031	2.559	2.561	2.559	5.036	5.031		5.030	2.560	5.034	64.8026	1.698	9.65	1.549

4-1, 4-15を除きH寸法調整板（厚さ1mm）を使用。

ブロック作成総重量 (g)	湿潤	2970.11
	乾燥	2708.77

図 7.1.4-7 各ブロックの制作諸元（表面3段目～4段目）

ブロックは初期高さ 201mm 程度であり、ロードセル一体型の上蓋をボルト締めすることで 200mm の高さまで圧縮した。この間に発生した圧縮力を初期値として、通水中の圧力変化を観察した。

ブロック定置ケースの給水開始から 1 時間後までの状況を図 7.1.4-8 に示す。図から、供給された水がブロックと土槽の界面、ブロックとブロックの間に選択的に浸潤していることが分かる。なお、給水はペレットのケースと同様にマリオット管による水位差のみで行い、水面高さはブロック上面と同じ高さである。

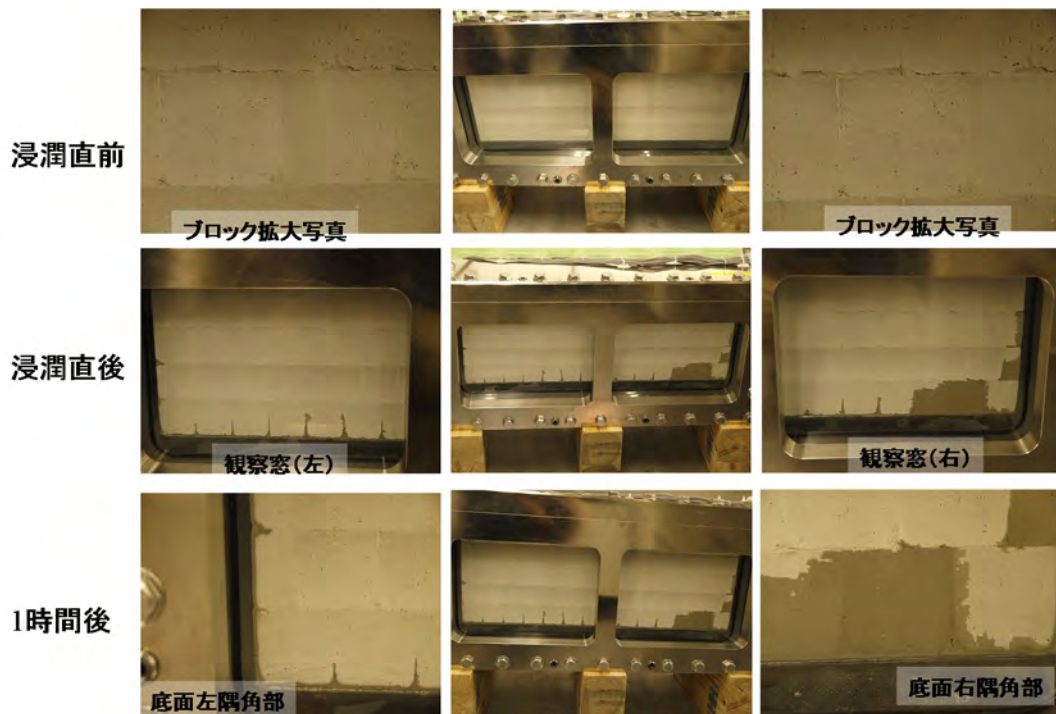


図 7.1.4-8 再冠水状況／ブロック定置ケース／給水開始 1 時間までの状況

ブロック定置ケースの給水開始 17 時間後の状況を図 7.1.4-9 に示す。図から、ブロックとブロックの間への浸潤は進展していないが、ブロックと土槽の界面では、ブロックの上面（ブロックとロードセルの界面）にまで達している。

さらにブロック定置ケースの給水開始 4 日後の状況を図 7.1.4-10 に示す。図から、ブロックとブロックの間やブロックと土槽の界面への浸潤はあまり進展していないが、ブロック内部への浸潤が僅かではあるが進行している。

写真 7.1.4-1 には給水開始から 300 日目の状況を示している。底部と両端のブロック間の隙間は目視ではほとんど判別できないほど一体化していることが分かる。このことから、水がブロックと土槽の界面を選択的に浸潤していることが推察できる。また、写真からは判別しにくいですが、底部から側部の界面を浸潤した水は上部のロードセルとの界面まで達しており、上面のブロック間の隙間も判別し難くなっている。このことから、非膨潤性材料に囲まれた緩衝材では、地下水が先行して非膨潤性材料との界面に浸潤するため、緩衝材内部に間隙空気がトラップされる可能性が高い。実際に本試験でもブロックの中央付近は依然としてブロックの色目が明るく、隙間が明確であることから、浸潤が進行していないものと考えられる。

写真 7.1.4-2 には、給水開始から 587 日目（解体直前）の状況を示している。底部と両端のブロックの一体化が進み、底部から 1 段目と 2 段目のブロックの界面まで一体化が進んでいることが分かる。その他にも、各段のブロックの上側の隙間も一体化している。このことから、底部から供給された水は、底部からブロック間の隙間だけでなく、土槽との界面に沿って土槽上部まで浸潤するが、土槽上部まで浸潤した水の一部は、ブロックの各段の間の界面に横から浸潤しブロックの上部を膨潤させるものと考えられる。底部からブロック間の隙間を浸潤する水の数よりも、土槽との界面に沿って土槽上部まで浸潤する水が、ブロックの各段の間の界面に横から浸潤する速度の方が速いため、各段のブロックの上側が一体化し、ブロックの下側には隙間が残るものと考えられる(図 7.1.4-11 参照)。

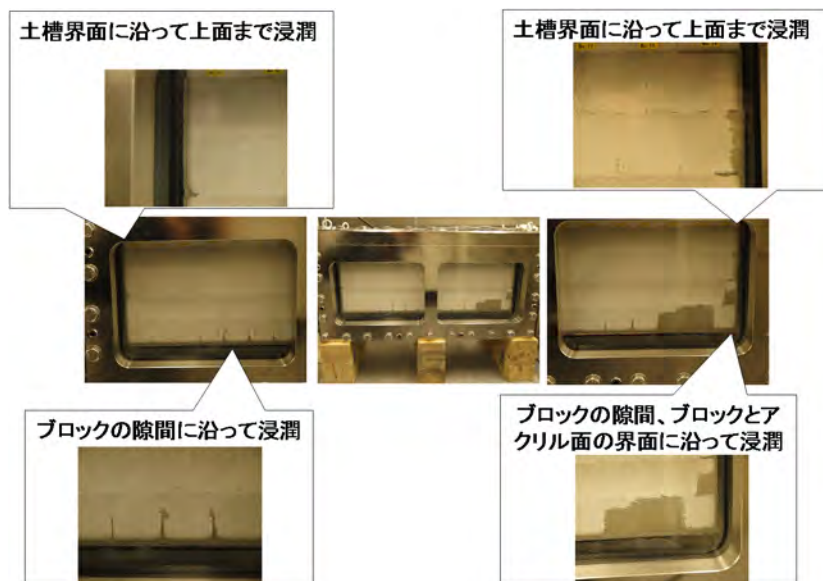


図 7.1.4-9 再冠水状況／ブロック定置ケース／給水開始 17 時間後



図 7.1.4-10 再冠水状況／ブロック定置ケース／給水開始 4 日後

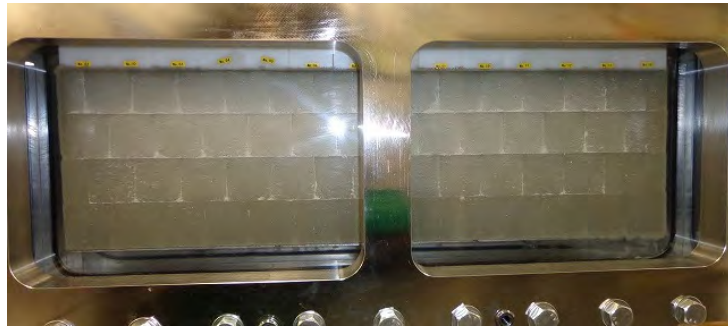


写真 7.1.4-1 再冠水状況／ブロック定置ケース／給水開始 300 日後

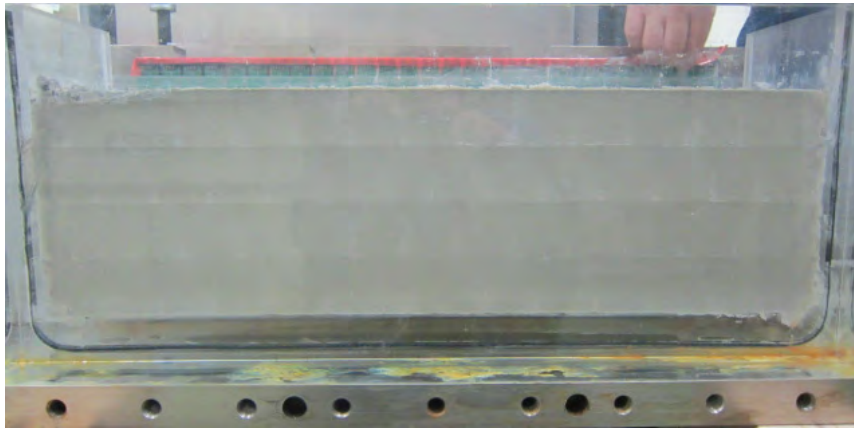


写真 7.1.4-2 再冠水状況／ブロック定置ケース／給水開始 587 日後（解体直前）

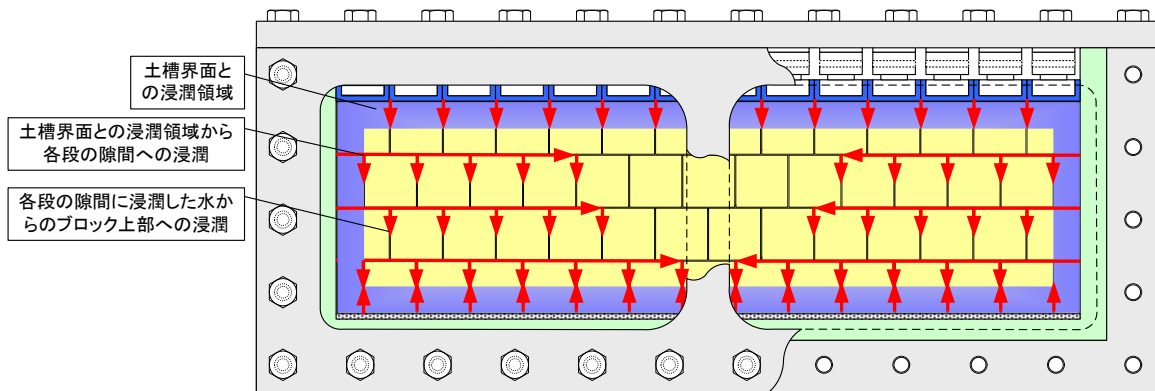


図 7.1.4-11 ブロック定置ケースの浸潤イメージ

ブロック定置ケースの給水状況を図 7.1.4-12 に示す。図には時間軸を対数軸と線形軸の両方で示している。図から、土槽底部のブロックが膨潤し、一体化するため、供給速度が徐々に低下している。しかしながら、マリオット管による水位差で給水したのにも関わらず、順調に給水され、試験開始から 8000 時間(333 日)程度で飽和注水量に達している。

飽和注水量に到達した後も給水量が増加し続けている理由としては、土槽の上蓋がロードセルの配線を引き出すために密閉構造となっておらず、隙間から間隙水が蒸発散しているためだと考えられる。

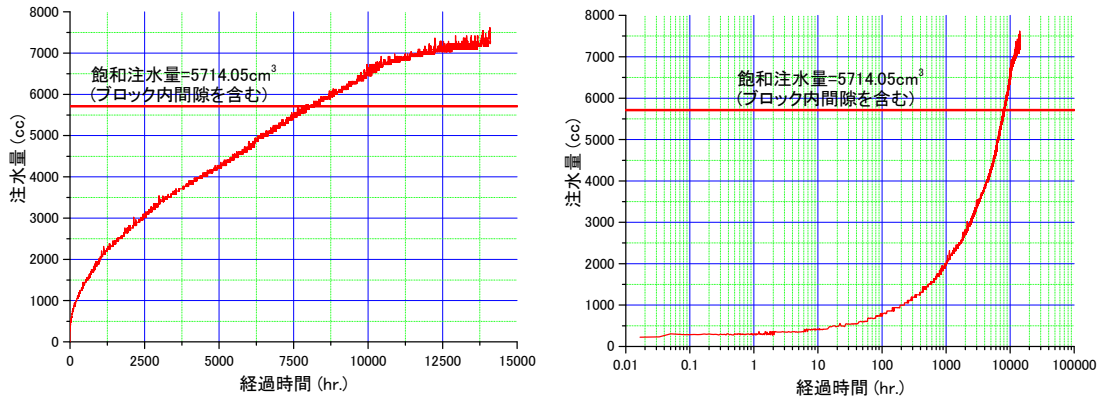


図 7.1.4-12 ブロック定置ケースの給水状況

図 7.1.4-13 にブロック定置ケースの膨潤圧の経時変化を示す。図から、供試体作製時に 201mm の高さまでペレットを充填し、200mm の高さまで上蓋で圧縮させたため、上蓋に付いているロードセルの初期値は 100~200kPa 程度の値を示している。また、この初期応力の分布は中心部と両端が比較的高い値を示している。給水を開始すると、この応力は徐々に増加した。増加傾向は給水開始から 3000 時間(約 125 日)まで続いて、その後ゆっくりと減少傾向を示している。

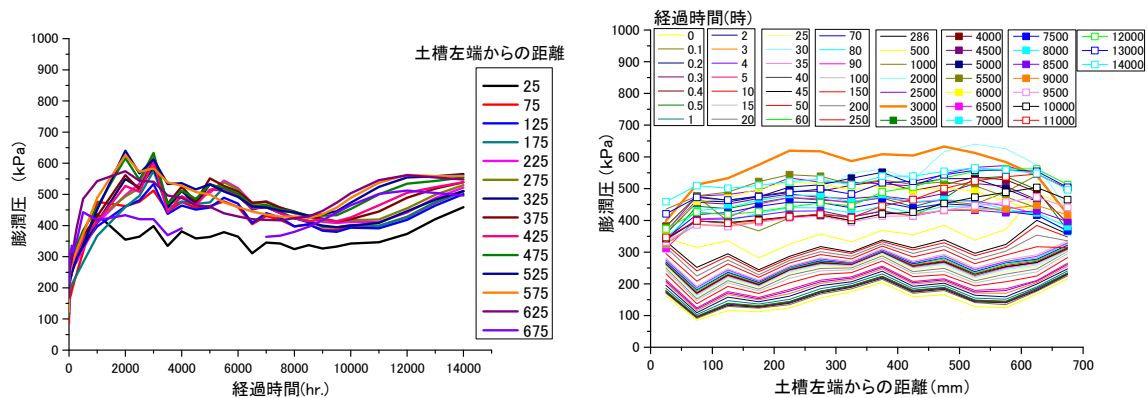
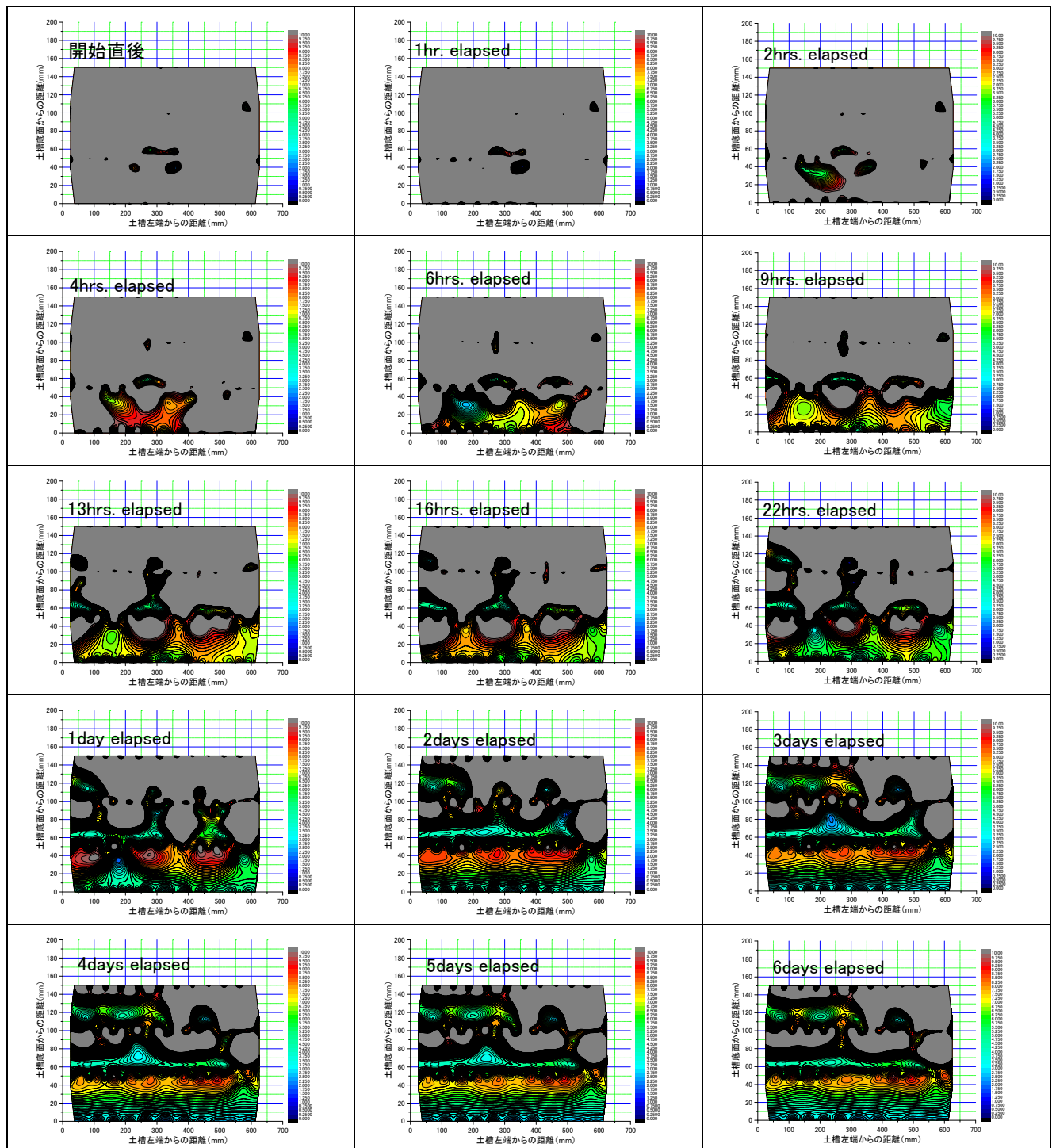


図 7.1.4-13 ブロック定置ケースの膨潤圧の経時変化

図 7.1.4-14 にブロック定置ケースの比抵抗分布の変遷を示す。なお、図中のグレーの部分はまだ水が浸潤していない領域を示しており、色は赤から青に近い程、比抵抗値が低いことを意味している。よって青に近い程、飽和度が高いことを意味している。

図から、水の浸潤がブロックとブロックの間から選択的に生じている状況を比抵抗値の変化として概ね計測できていることが分かる。給水開始日の 2/16 直後に、局所的ではあるが、土槽の上部にまで水が浸潤している。浸潤領域が飛び石のように発生しているのは、比抵抗を背面だけで計測しているためであると考えられる。また、給水開始日から約半日で、底部から 1 段分のブロックに水が浸潤している。その浸潤領域は、ブロックとブロックの間を底面から上面に向かって水が浸潤して、その後、そのブロックの周辺の隙間に浸潤し、最後にブロック全面が浸潤するという順番で広がっている。同様に、土層側面とブロックの界面に浸潤した水が各段の隙間に浸潤している状況も分かる。この状況は、前面の目視観察による考察と整合している。

給水量が土槽の飽和注水量に達する約 8000 時間（333 日）以降では、浸潤状況は、ほぼ定常状態になり、比抵抗値の分布も概ね解消され、ほぼ均一な状態になっている。このことから、給水中の土槽上面からの蒸発散の影響は小さく、比抵抗値による浸潤状況の計測結果と吸水量の関係も整合することが分かった。



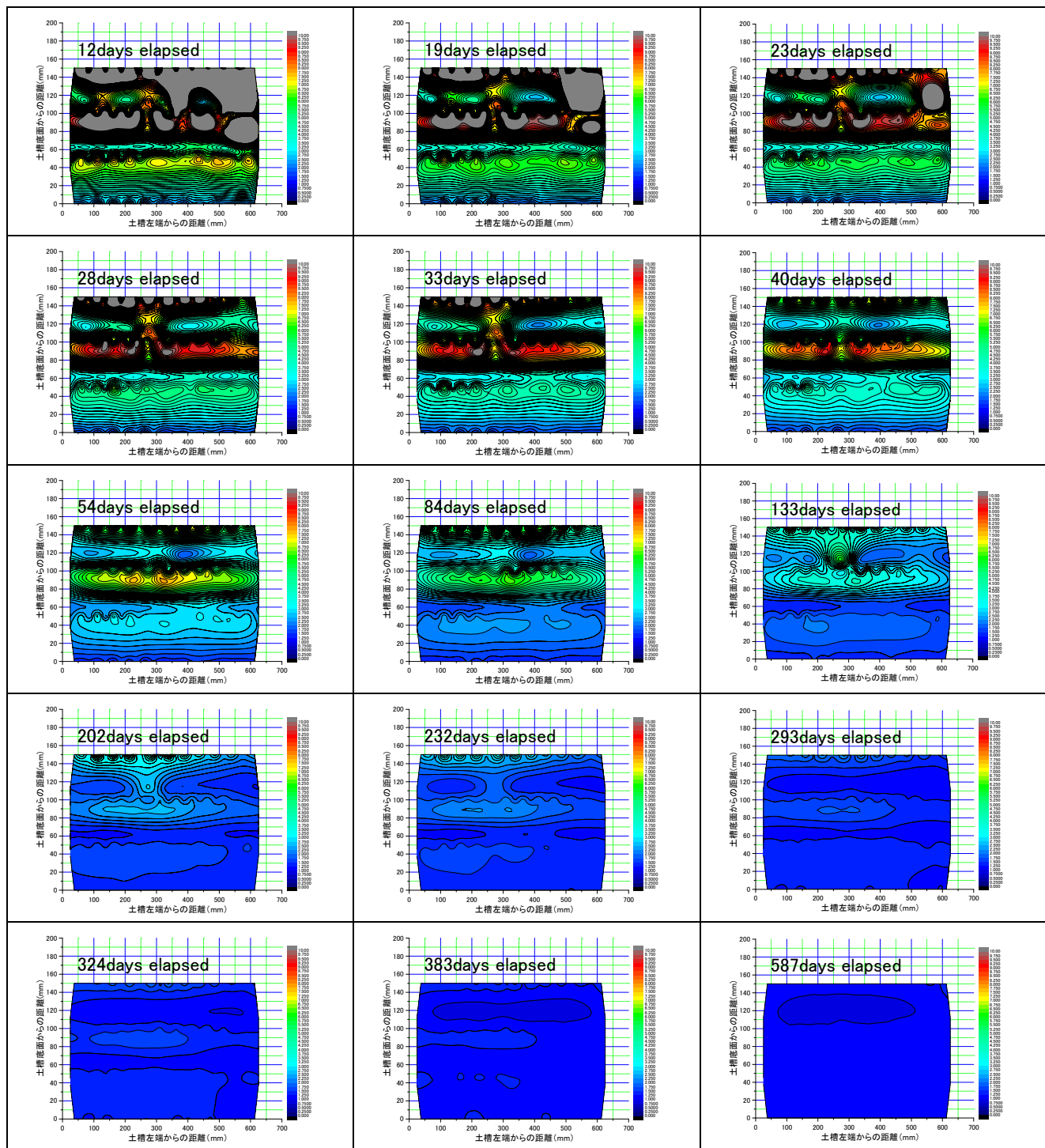
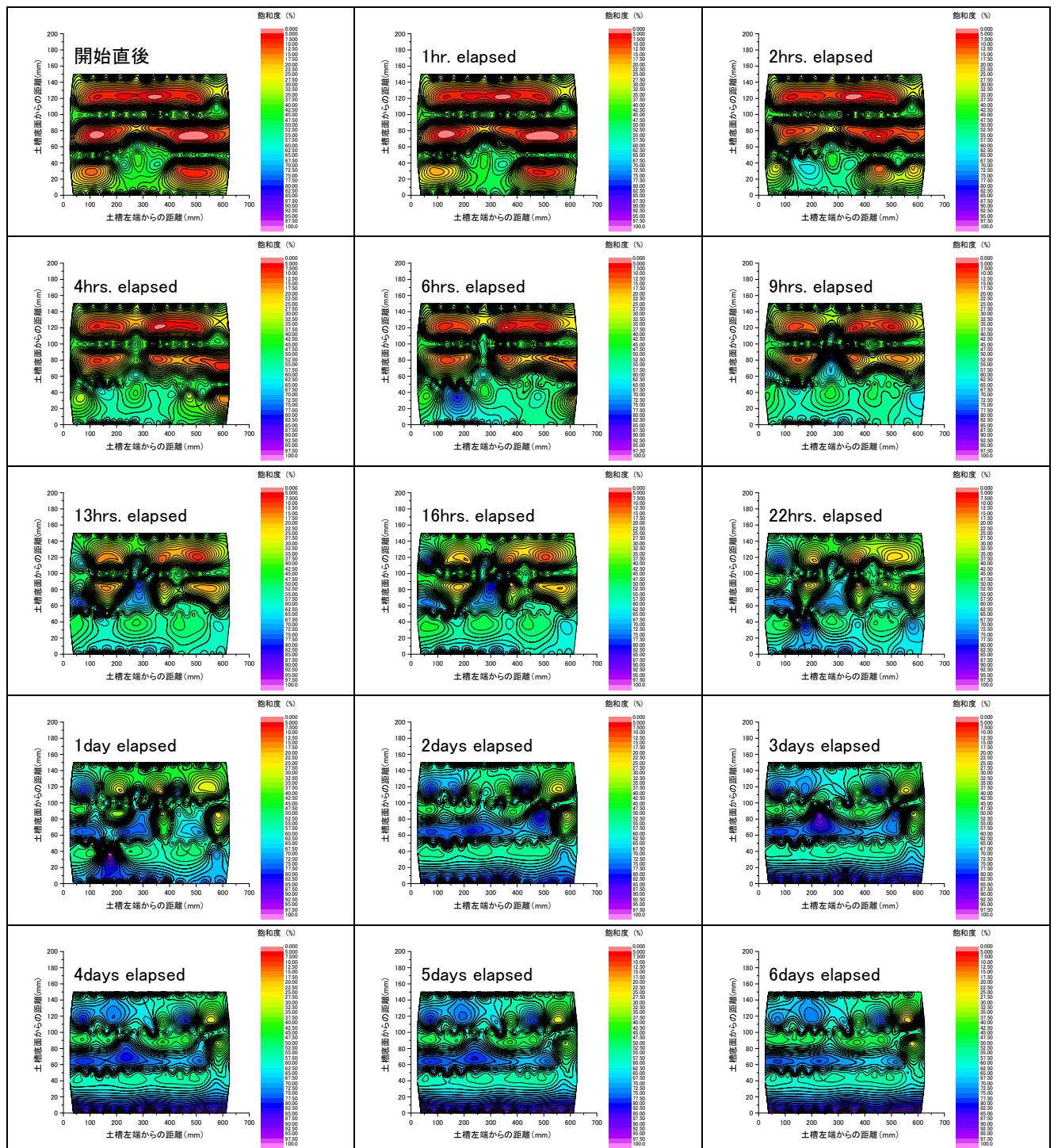


図 7.1.4-14 ブロック定置ケースの比抵抗分布の変遷

図 7.1.4-15 にブロック定置ケースの飽和度分布の変遷を示す。赤から紫向かって、飽和度が高いことを意味している。飽和度の分布図と比抵抗値の分布図が完全に一致しないのは、5.1.4 に示した比抵抗値と飽和度の関係が線形ではないためである。低飽和度領域では飽和度の変化に対して比抵抗値の変化が大きく、高飽和度領域では飽和度の変化に対して比抵抗値の変化が小さいため、ブロックの飽和度が低い試験初期には、比抵抗値の変化が大きく、飽和度が高い試験終盤

では比抵抗値の変化が小さくなる。また、比抵抗値を飽和度に換算するためにはその電極のある地点の乾燥密度が必要であるが、後述する供試体解体時の上段、中段、下段の乾燥密度（1.518、1.512、1.465Mg/m³）の平均値で代用した。

図から、5.1.4 に示した比抵抗値と飽和度の関係を用いることで、比抵抗値の計測により緩衝材ブロックへの不飽和浸潤過程が飽和度変化として取得できた。給水量が土槽の飽和注水量に達する約 8000 時間（333 日）以降では、飽和度は、ほぼ 100%で均一になっており、給水量の計測内容と整合する結果となった。



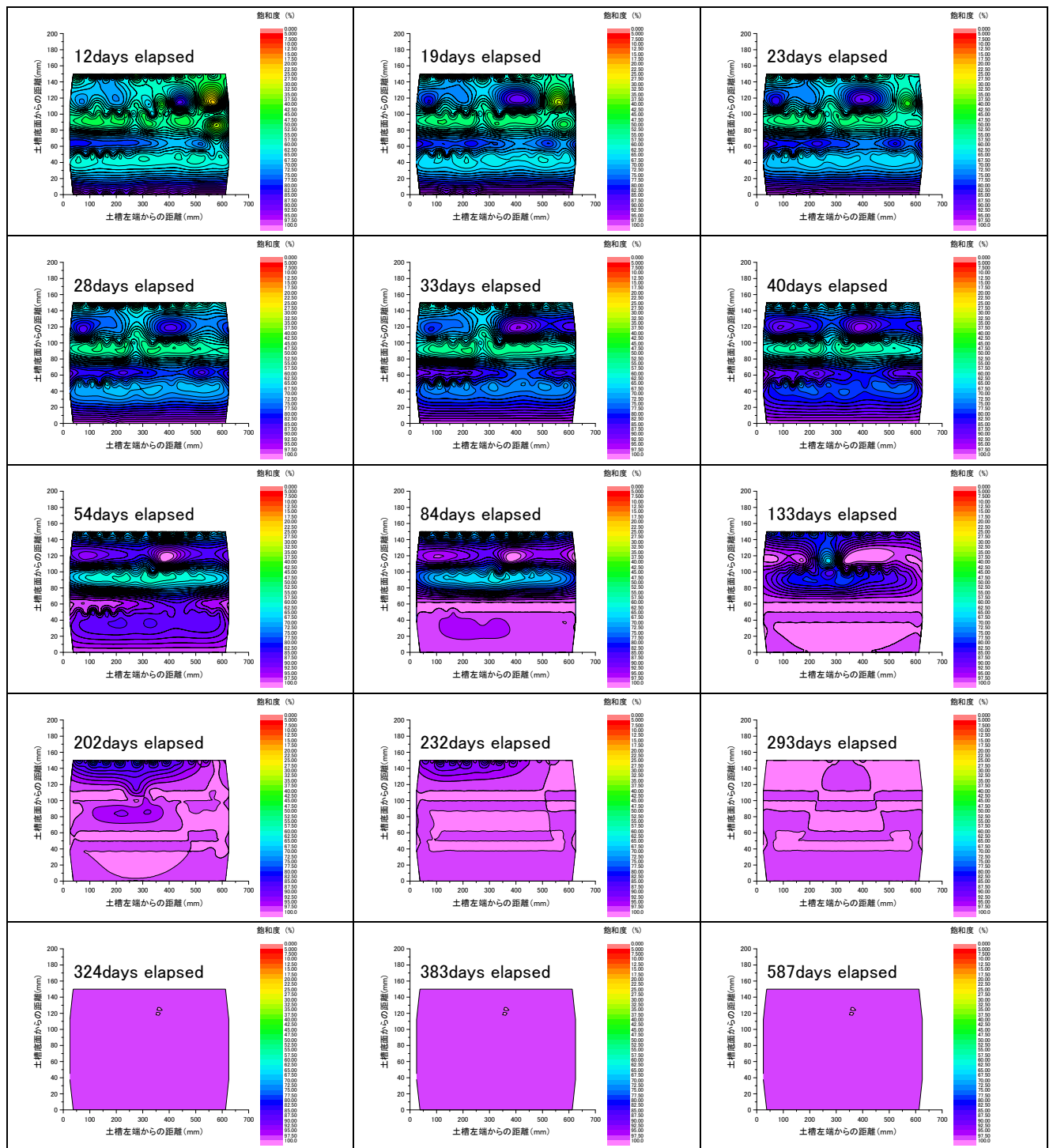


図 7.1.4-15 ブロック定置ケースの飽和度分布の変遷

写真 7.1.4-3 には解体時の状況写真を示す。供試体上面は一体化しており、目視では界面の位置は判断できなかった。そこで、供試体作製時のブロックの寸法を基に界面位置に線を引き、界面を横断するようにコアを抜いて、コアの含水比と乾燥密度を調べるとともに、界面の一体化の状況を観察した。

写真 7.1.4-4 には界面を含むコアの写真を示す。写真に示すように、界面は目視では判別できず、一体化して引き剥がすことも困難な状況であった。

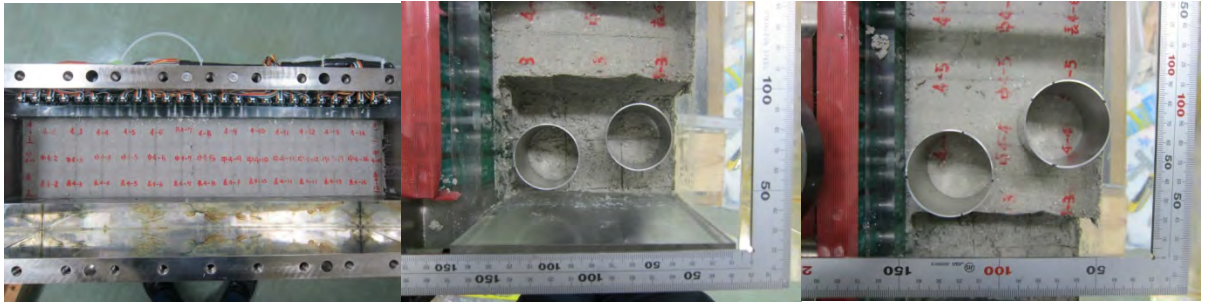


写真 7.1.4-3 解体時の状況写真 (ブロック定置ケース)

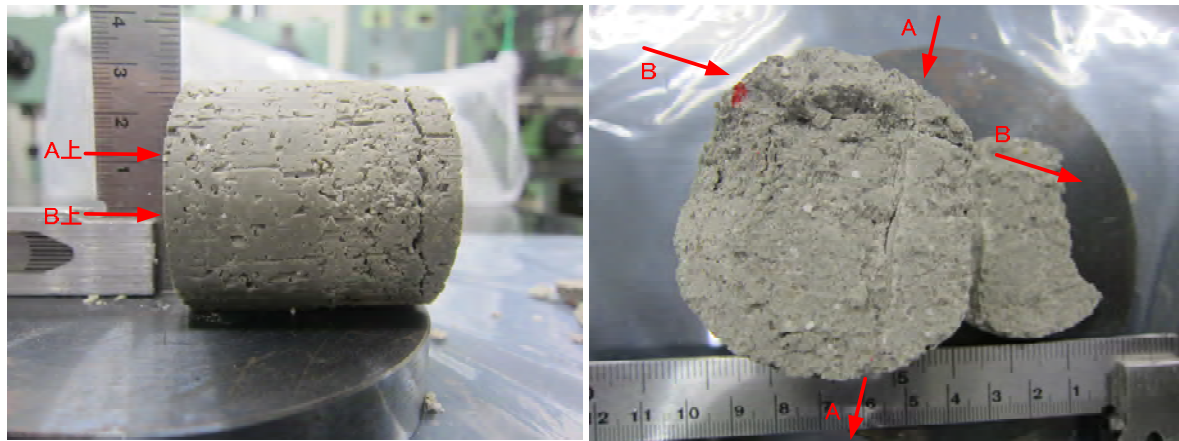


写真 7.1.4-4 解体時のブロック界面の状況

図 7.1.4-16 には、供試体作製時(図 7.1.4-16a)と解体時(図 7.1.4-16b)のブロック定置ケースの含水比分布と乾燥密度分布を示す。供試体作製時は各ブロックの値を示しており、解体時はブロックが一体化して引き剥がすことが困難だったため、コアサンプルの値を示す。図から、解体時の含水比は底部程高く、中段と上段は概ね同等の値であった。これは、給水が底面からなされていたことに加え、供試体作製時から1段目の乾燥密度が低かったためであると考えられる。また、解体時の密度分布は、底部の密度は低い、中段と上段の密度は概ね同等である。これも、供試体作製時の密度分布がそのまま反映されている。また、乾燥密度は全体的に0.1程度低下している。これは、ブロックの隙間の分だけ膨潤したことにより、一体化が進むとともに乾燥密度が低下したものと考えられる。

さらに、図 7.1.4-17 には、飽和度分布を示す。図から、飽和度は85%~95%程度であり、高密度の領域は飽和度が低く、低密度の領域の飽和度が高くなっていることが分かった。これらの結果は、比抵抗値から計測した飽和度分布の傾向とも整合している。ただし、全体的に解体時に計測した結果は、比抵抗値から換算した飽和度に比べて小さい。これは、解体時やコアリングの際の除荷や乱れ、さらに乾燥によるものと考えられる。

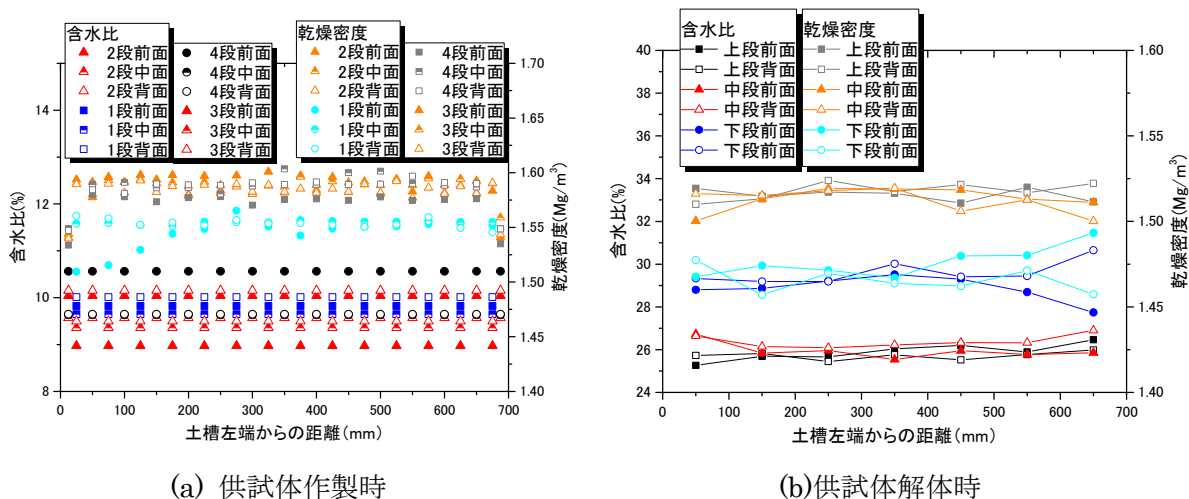


図 7.1.4-16 ブロック定置ケースの含水比分布と乾燥密度分布

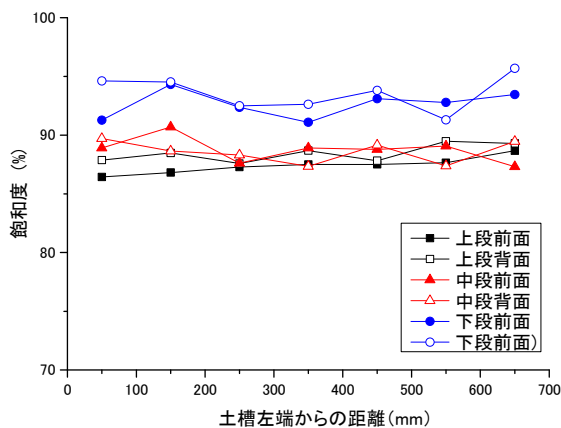


図 7.1.4-17 ブロック定置ケースの飽和度分布

7.1.5 試験結果(ブロック定置とペレット充填併用ケース)

表 7.1.5-1 にブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元を示す。表より、概ね計画通りの供試体が作製できていることが分かる。この供試体の間隙体積は、ブロックやペレットの間隙部部分の体積も含めて 6907.57cm^3 である。よって、給水量が 6907.57cm^3 となればマクロ的には供試体は飽和したことになる。

表 7.1.5-1 ブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元

高さ (cm)	供試体 ブロック部	20.0	供試体 ペレット部	20.0	供試体 全体	20.0
幅 (cm)		52.5		17.5		70.0
奥行 (cm)		15.0		15.0		15.0
体積 (cm ³)		15750.0		5250.0		21000.0
湿潤質量 (g)		27126.27		6012.64		33138.91
湿潤密度 (g/cm ³)		1.722		1.145		1.578
含水比 (%)		9.94		8.57		7.86
乾燥密度 (g/cm ³)		1.567		1.055		1.463
乾燥質量 (g)		24672.93		5538.02		30210.95
土粒子密度 (g/cm ³)		2.700		2.733		
間隙水体積 (cm ³)		2453.34		474.62		2927.96
空隙体積 (cm ³)		4158.54		2749.03		6907.57

写真 7.1.5-1 に浸潤状況写真を示す。写真は、土槽のペレット側半分の観察窓の経時変化を示している。図から、底面から一次的に給水したところ、ペレット側に選択的に水が浸潤している状況が分かる。土槽上部までは 30 分程度で到達している。また、ペレットは間隙にある水を吸水して比較的速く膨潤し、一日程度でその間隙をシールしていることが分かる。また、ペレットの大間隙を満たした水が、ブロックに対して側方からの水の供給源となっている状況も観察された。

しかしながら、1 日目以降では、底部のペレットが一体化し、底面からの水の供給量が低下するため、膨潤してシールされた緩い密度の領域が再び空隙に戻っている。これは、ペレットの中心部分には、まだ乾燥領域が残されており、給水が滞ったために含水比が高い緩い密度の領域からペレットの中心部に間隙水が移動したためだと考えられる。

同様の現象はブロックとペレットの間でも発生しており、一旦、ペレットが膨潤してブロックとペレットの界面はほぼ一体化したが、1 日目以降には、底面からの給水が滞ったために、再び界面に隙間が発生している。また、それに伴って、界面近傍のブロックが膨潤してひび割れが発生している。

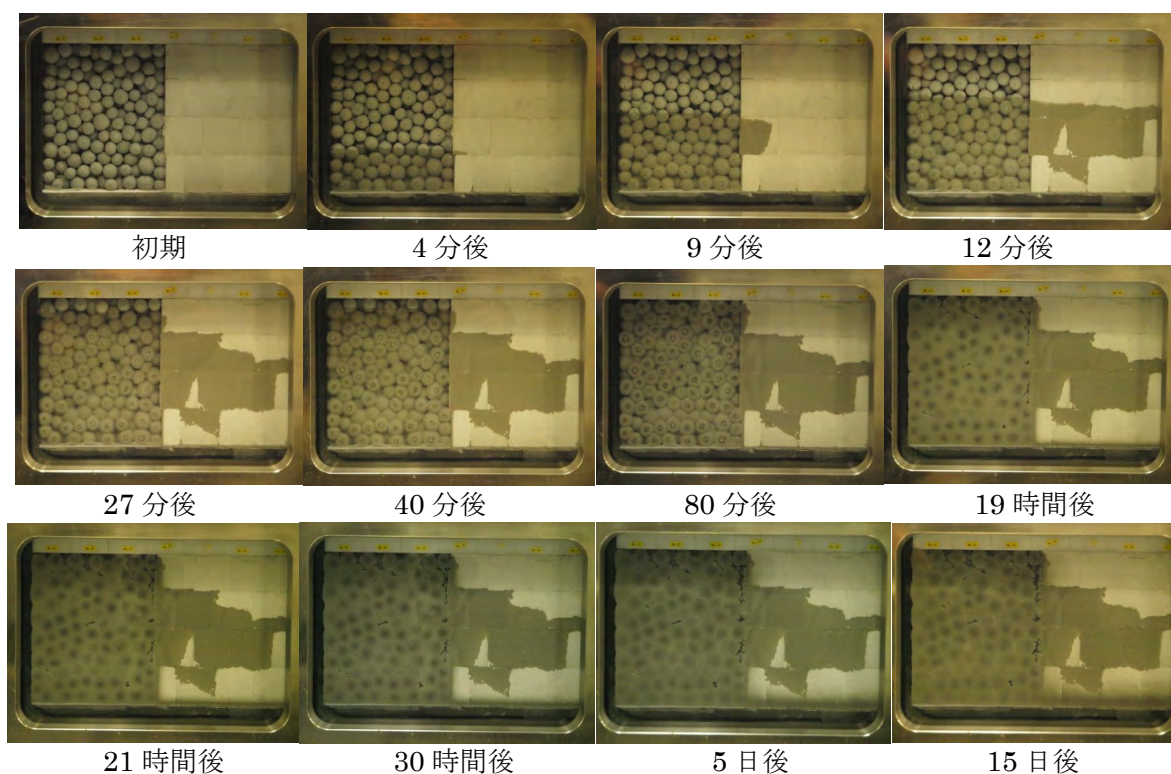


写真 7.1.5-1 土槽規模試験による2次元浸潤試験（ブロック・ペレット併用ケース）

図 7.1.5-1 にはブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷を、さらに図 7.1.5-2 にはブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷を示す。なお、図 7.1.5-1、図 7.1.5-2 では、土槽背面に設置されている電極の範囲（土槽左端から 25mm～625 mm）が示されている。

図から、試験開始直後にペレットが冠水し、給水面である底盤とペレット側からブロックに向かって水が浸潤している様子が分かる。ブロックでは、底盤とペレットから水が浸潤するため、飽和度は右上が最も小さく、左下が最も大きい傾向にある。これらの傾向は、写真 7.1.5-1 に示した浸潤状況と整合している。

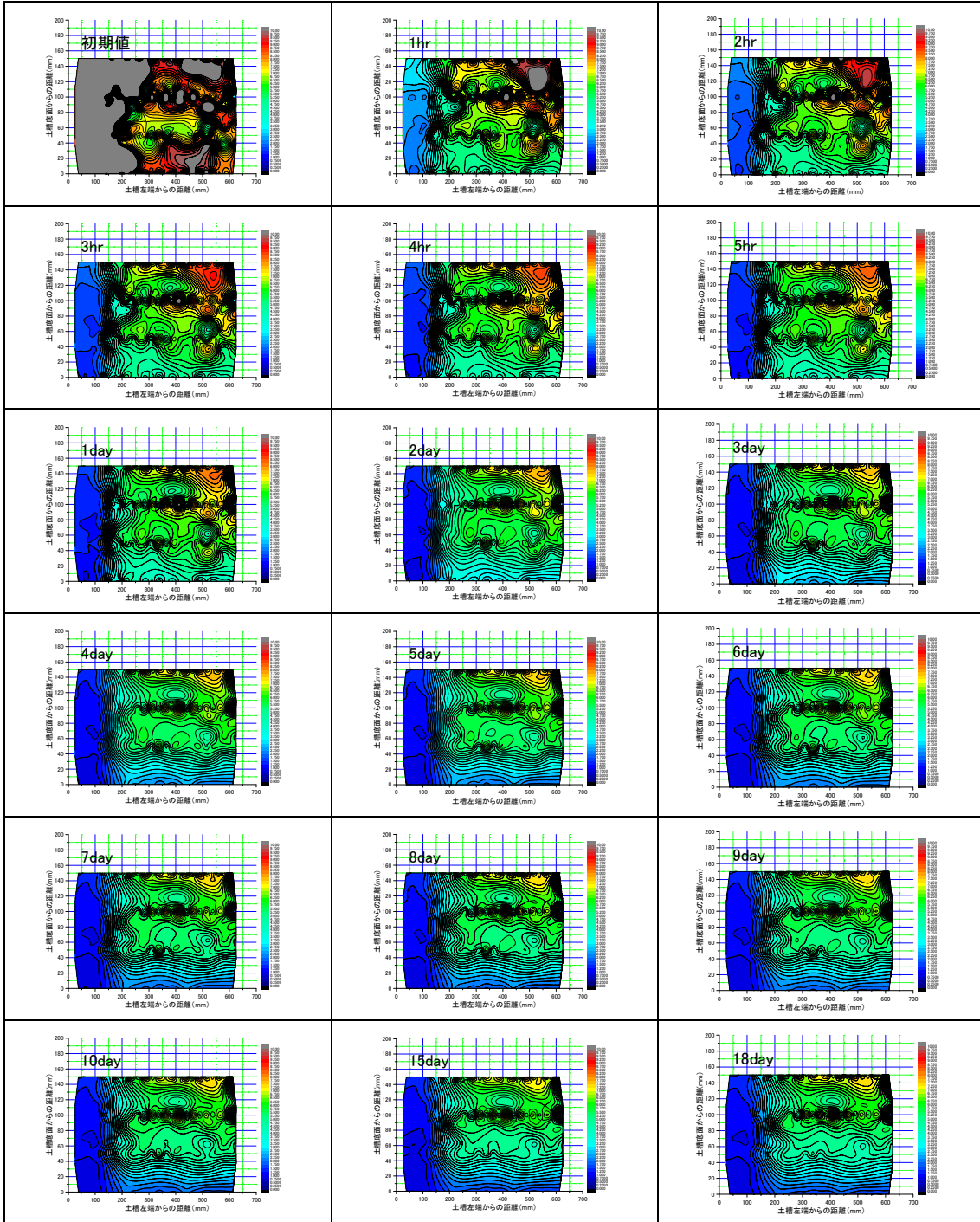


図 7.1.5-1 ブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷

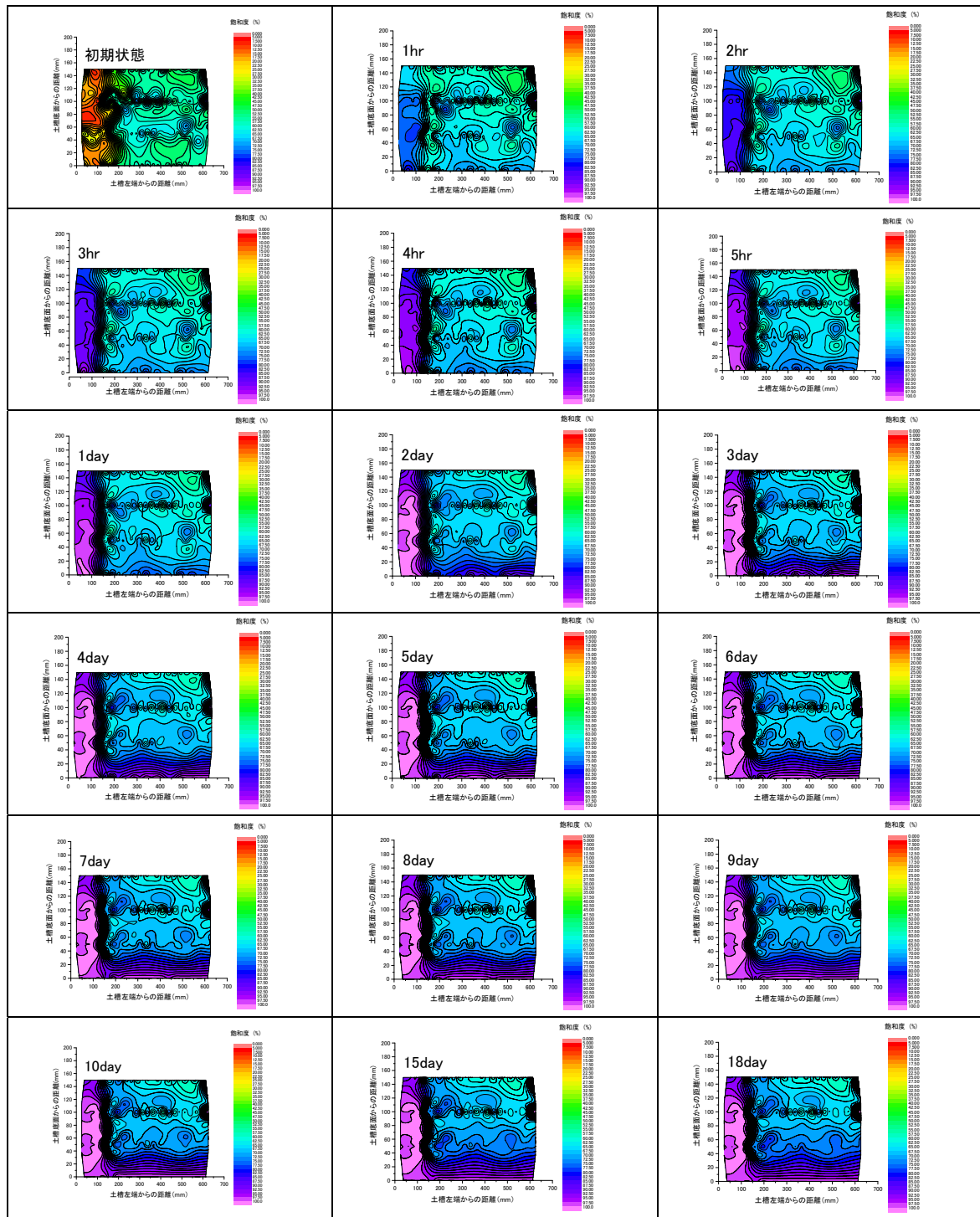


図 7.1.5-2 ブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷

図 7.1.5-3 には、ブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化を示す。給水初期の状況を分かりやすくするために時間の対数軸に対して給水量の経時変化を示している。図から、給水開始から 0.8 時間は給水量が急激に増加するが、0.8 時間以降は、流量は急激に小さくなり、給水量は微増傾向となっている。これも、目視観察結果と一致している。

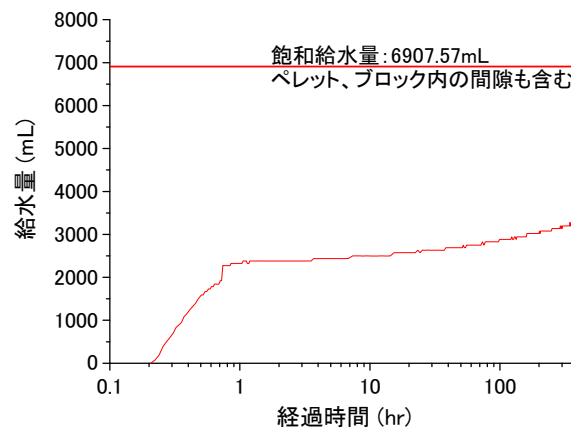


図 7.1.5-3 ブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化

図 7.1.5-4 には、土槽上面に配置した 14 個のロードセルで計測した膨潤圧の経時変化を示す。ロードセルの初期値は、ロードセルを反力盤の役割も兼ねている土槽の上蓋と供試体との間に挟み込んだ際の設置圧である。

図から、ペレットが充填されている範囲が土槽左端から 175mm であるため、それよりも左側のロードセルに関しては給水後、ロードセルの値が急激に低下している。これは給水に伴うコラプスが発生したためだと考えられる。一方、ブロック側のロードセルは、給水に伴って膨潤圧が増加傾向を示している。

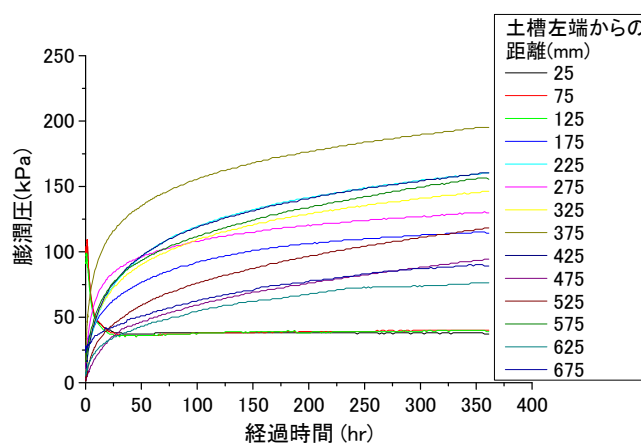


図 7.1.5-4 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧の経時変化

図 7.1.5-5 には、ロードセルで計測した膨潤圧分布の変遷を示す。図から、ペレット領域の膨潤圧は給水開始から 1.5 時間を最大として、それ以降は低下傾向を示している。またその分布はほぼ一定値である。一方、ブロック側の膨潤圧分布は、初期設置圧の影響により、凹凸が激しい

ことが分かる。

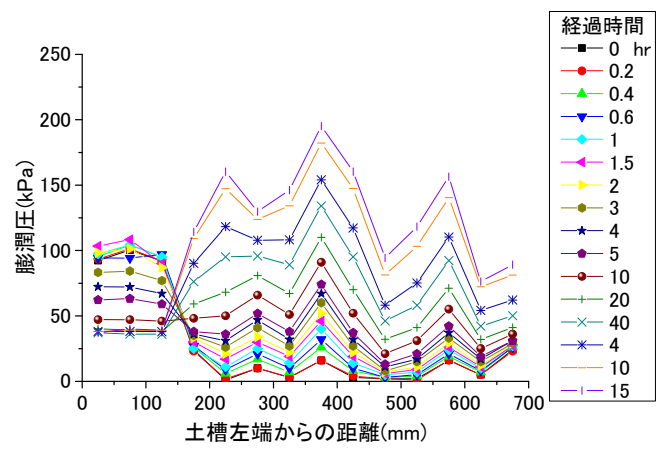


図 7.1.5-5 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧分布の変遷

第8章 浸潤による間隙空気の移行調査

8.1 検討の目的と手段

8.1.1 試験概要

前述の土槽試験によるブロック定置工法を模擬した緩衝材の浸潤試験において、地下水は緩衝材と非膨潤性材料の界面を選択的に浸潤して、その後に緩衝材の深部へ浸潤するという傾向が分かった。この際、ブロックの内部には飽和した緩衝材に囲まれて行き場がなくなった間隙空気が存在し、浸潤した地下水に溶存するか、水圧の大きさによっては浮力によって上方向に移動し、その際に破過する可能性も否定できない。

そこで本試験では、図 8.1.1-1 に示す緩衝材の一次元浸潤速度試験において、地下水が緩衝材に下から上に向かって一次的に浸潤する現象を精度良く評価することができた試験装置を用いて、トラップされた空気が地下水の浸潤挙動に及ぼす影響を調べる。前述の一次元浸潤速度試験では、地下水浸潤に伴う間隙空気圧の増加が地下水浸潤速度に影響を及ぼさないように供試体上端を大気圧解放条件としていた。しかしながら、実際の処分場における地下水の浸潤状況を想定すると、浸潤に伴って間隙空気が緩衝材内部にトラップされ、緩衝材の均一な飽和を阻害する可能性が考えられる。そこでここでは、間隙空気が緩衝材内部にトラップされた場合を想定し、上下から給水して地下水浸潤を模擬し、セル中央で間隙空気圧変動を制御・計測する。さらに地下水浸潤挙動は一次元浸潤速度試験と同様に比抵抗変化で計測する。これにより、緩衝材の浸潤挙動へ与える影響を室内試験によって定量的に評価する。

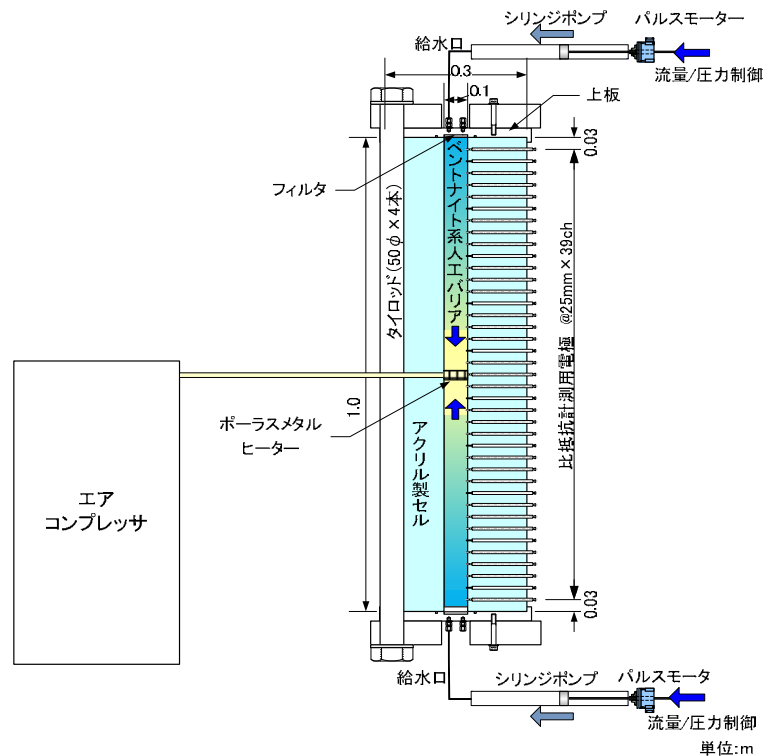


図 8.1.1-1 浸潤による間隙空気の移行試験 (イメージ図)

8.2 緩衝材の製作方法

試験に用いる緩衝材の製作には、緩衝材の含水比のばらつきによる不均一な密度分布が試験に影響しないように、平成 21 年から継続して実施している凍結混合法を採用し、表 8.1.1-1 に示す材料仕様を満足するように供試体を作成する。

供試体の作製においては、仕上がり層圧が 5mm となるように撒き出して、200 回程度静的に締固める。乾燥密度が均質になるように実施する。但し、供試体中央付近には間隙空気計測・制御用のポーラスメタルを配置するため、その分だけ緩衝材部分の高さは短くなる。

8.3 浸潤による間隙空気の移行調査手順

試験方法は、緩衝材の一次元浸潤状況を精度よく評価できた実績がある既往の研究[1]と同様に、浸潤状況を比抵抗値の変化として計測する。間隙空気が試験器内部にトラップされたり、供試体内を移行したりする現象も飽和度の変化を伴うため、比抵抗値の変化として計測される。

さらに、一定時間毎に、給水量、比抵抗分布、空気圧を測定する。表 8.1.1-1 に浸潤による間隙空気の移行試験のケースを示す。

表 8.1.1-1 浸潤による間隙空気の移行試験のケース

ベントナイト乾燥密度	初期含水比	液種	計測項目	備考
1.6Mg/m ³ (Na 型ケイ砂 30wt%混合)	10%	蒸留水	間隙空気圧 比抵抗値 流量 給水圧 空気圧	継続中

図 8.1.1-1 に浸潤による間隙空気の移行試験手順を示す。試験は、①まず、初期状態の比抵抗分布を計測する。次に、上下から蒸留水を 0.0001cc/min の流量一定で給水する。この間、適宜、比抵抗分布、間隙空気圧を計測する。ある程度の期間、給水圧の上昇や比抵抗分布から湿潤領域の形成がみられない場合には、流速を 5 倍にして再度試験を継続する。

②次に、給水圧が 100kPa 程度になった、若しくは比抵抗分布から膨潤領域が確認された時点で圧力制御に切り替えて浸潤速度を計測する。初期の通水圧は、流量制御時の通水圧の半分以下を基本とする。この際に、間隙空気に対して大気圧変動幅が有意にならないように 50kPa の背圧を付与した後にコックを閉じて封圧して間隙空気圧の変化を計測する。

③最後に、ある程度の浸潤領域が得られた時点で、間隙空気を高めて浸潤領域の変化を取得する。なお、この①～③の手順は、必ずしも単年度で全て実施するのではなく、各試験段階で計測結果を受けて次の試験段階へ移行する。図 8.1.1-2、図 8.1.1-3 には、浸潤による間隙空気の移行試験セルと浸潤による間隙空気の移行試験用シリンジポンプユニットを示す。

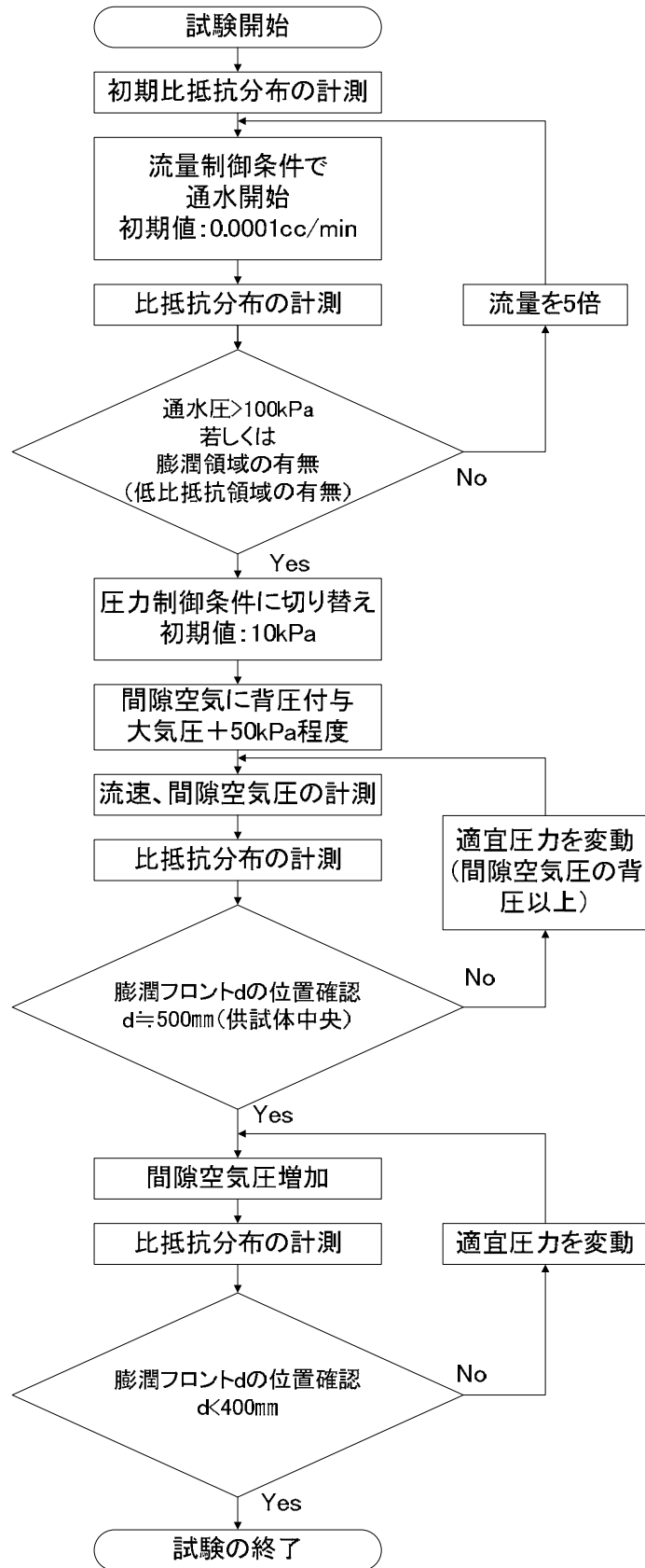


図 8.1.1-1 浸潤による間隙空気の移行試験手順

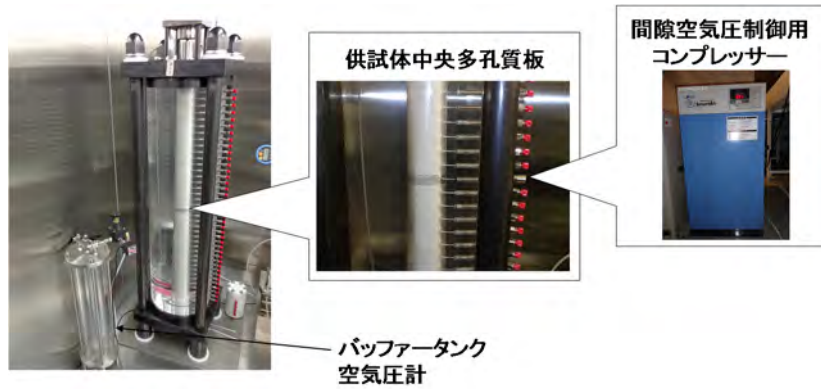


図 8.1.1-2 浸潤による間隙空気の移行試験セル

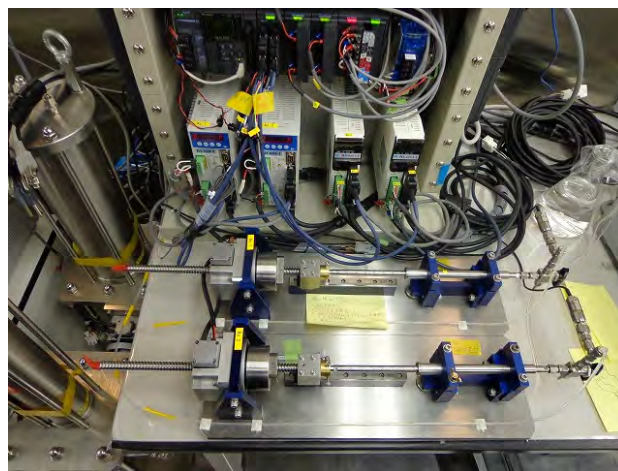


図 8.1.1-3 浸潤による間隙空気の移行試験用シリンジポンプユニット

8.4 試験結果

8.4.1 流量制御過程

図 8.4.1-1 に給水圧の経時変化を示す。初期の給水速度 $0.0001\text{cc}/\text{min}$ に比べ自己拡散による吸水速度の方が速かったため、初期段階では給水圧がゼロ～負圧となっている。このため、給水速度を $0.0005\text{cc}/\text{min}$ として流量制御で給水を継続した。この結果、供試体下部への給水圧は漸増傾向を示した。一方、供試体上部は、依然として給水圧が負圧であった。これは、図 8.4.1-2 に示すように、供試体上部と下部での浸潤状況の差異があるためと考えられる。すなわち、供試体の下部では、供給水の水面が上昇して、その水面が供試体と接して初めての給水が開始される。一旦、給水が始まると、常に面的に給水がなされる。一方、供試体の上部では、給水速度が非常に小さいために滴水として供試体に給水がなされる。供試体に到達した水は三次元的に供試体の深部に拡散するために供試体端面で常に不飽和状態となっていると考えられる。

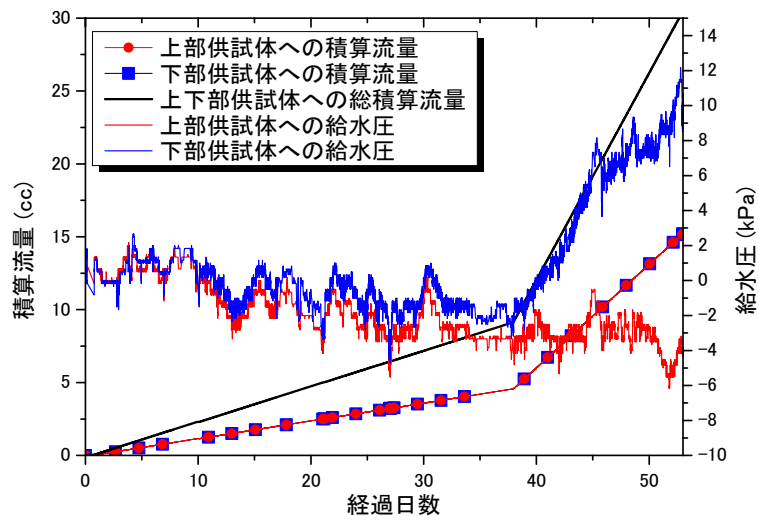


図 8.4.1-1 浸潤による間隙空気の移行試験における給水量と給水圧の経時変化

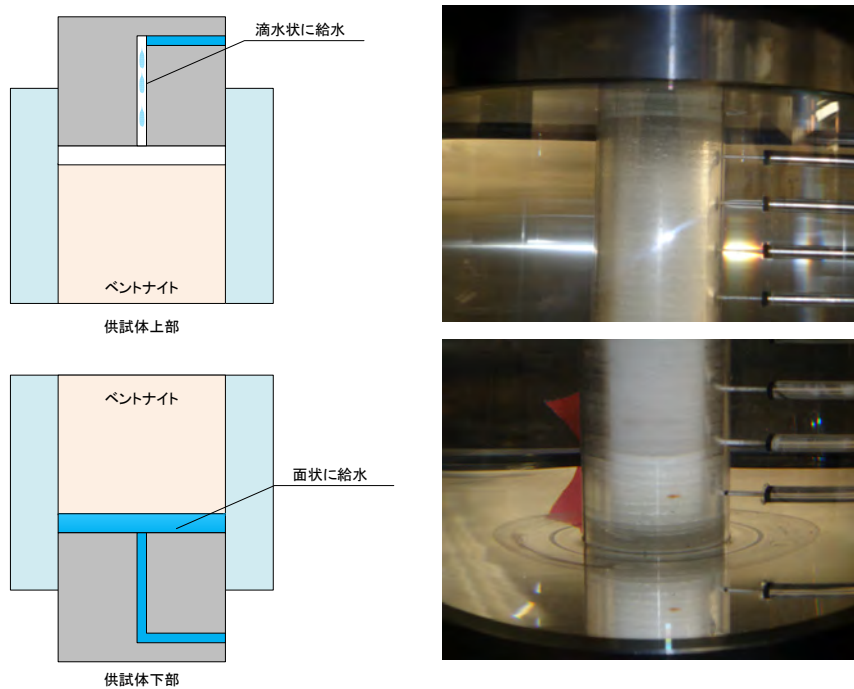


図 8.4.1-2 供試体上部と下部での給水状況の差異

図 8.4.1-3 には給水に伴う間隙空気圧の変化を示している。図には、大気圧変動も併せて示している。図から、間隙空気圧の変動と大気圧の変動が同期しており、変動要因が大気圧変動であることが分かる。よって、試験の初期段階では、給水による空隙体積の減少に伴う間隙空気圧の増加、間隙水への間隙空気の溶解による間隙空気圧の減少などの現象はほとんど発生していないものと考えられる。

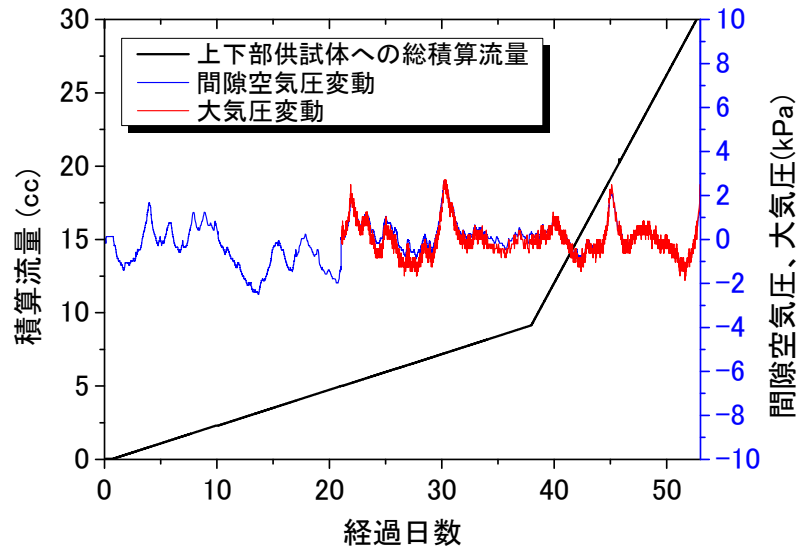


図 8.4.1-3 浸潤による間隙空気の移行試験における間隙空気圧と大気圧の経時変化

図 8.4.1-4 には給水に伴う膨潤圧の変化を示している。図から、膨潤圧は、0.6MPa 程度の値で収束傾向にあることが分かる。この値は、既往の研究[1]における同じベントナイト系人工バリア材料の同密度での膨潤圧試験結果の平衡膨潤圧と同等である。

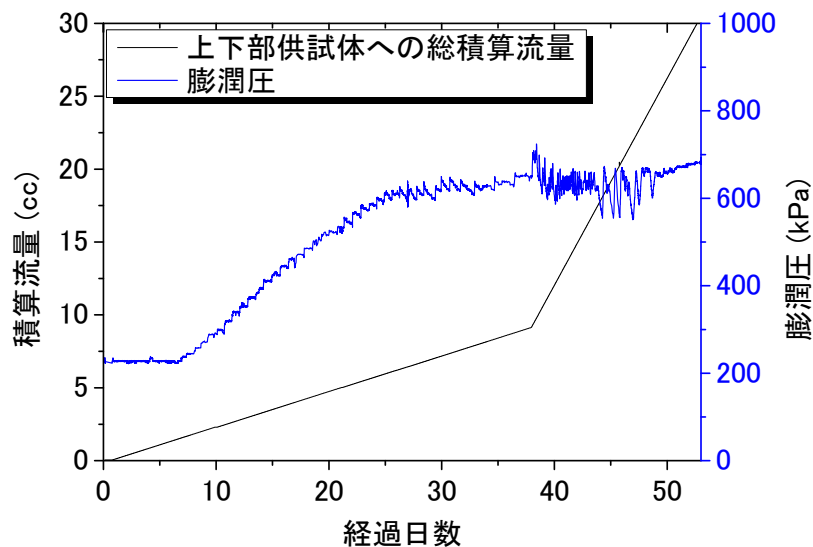


図 8.4.1-4 浸潤による間隙空気の移行試験における流量と膨潤圧の経時変化

図 8.4.1-5 には、給水に伴う比抵抗変化を示している。給水開始から 1 か月程度経過した時点で供試体上部において比抵抗値の低下が発生し、50 日後には、比抵抗値の低下領域が供試体上端から 250mm 程度まで進展しているのに対して、供試体下部では、比抵抗値の低下が給水開始から 50 日程度まで発生しておらず、53 日経過後にようやく比抵抗値の低下が確認できた。これらの違いも、前述の給水状況の差異によるものと考えられる。すなわち、供試体上部では滴水状に給水されるため、浸潤領域が半径方向に狭く、深度方向に深くなる傾向が予想されるのに対して、供試体下部では、半径方向に広く深度方向に浅くなる傾向が予想される。

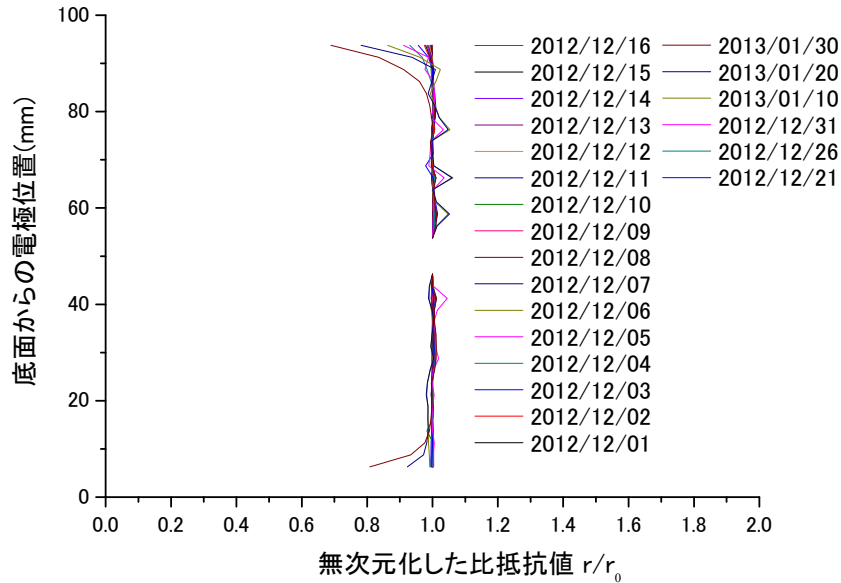


図 8.4.1-5 浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布（流量制御過程）

8.4.2 圧力制御過程

前述のように、下部供試体に関しては給水に伴って給水圧が増加傾向を示しており、圧力制御への切り替えることが可能な段階と判断された。一方、上部供試体に関しては、下部供試体と同じ流量を供給したのにも拘らず、一向に給水圧が増加する傾向がみられなかった。これは前述のように、供試体上部と下部での浸潤状況が異なることに起因すると考えられる。よって、供試体上下部で同じ供給量で制御しても、両方でそれぞれ適切な通水圧が発生する流量を決定することは難しいものと考えられる。一方、比抵抗分布に着目すると、50日目を以降では供試体の上下端に比抵抗の低下領域が形成されており、供給水の浸潤に伴う膨潤領域の存在が予想された。そこで、通水開始から53日目に圧力制御試験に切り替えた。上部供試体の給水圧が十分に増加していなかったことから、初期の給水圧を10kPaとした。図8.4.2-1に圧力制御に変更した後の浸潤による間隙空気の移行試験における給水圧と給水量の経時変化を示している。図から、流量制御から圧力制御に変更しても給水速度は大きく変化していないことが分かる。ただし、供試体下部への給水量は流量制御時の給水速度0.005cc/minよりも増加している。

図8.4.2-2には、圧力制御に変更した後の浸潤による間隙空気の移行試験における流量と膨潤圧の経時変化を示している。流量制御過程でほぼ一定状態に収束傾向であったが、圧力制御に返納したのちには再び増加傾向に変化した。なお、膨潤圧に比べ給水圧が非常に小さいことから、膨潤圧に対する給水圧自体の影響は小さいものと考えられる。膨潤圧が増加傾向に転じた原因としては浸潤領域の進展に伴うセルと供試体の摩擦の変化、後述する間隙空気圧の背圧などの影響が考えられる。

図8.4.2-3には、圧力制御に変更した後の浸潤による間隙空気の移行試験における間隙空気圧と大気圧の経時変化を示している。圧力制御に変更する際に、大気圧変化の影響が試験結果に有意にならないようにするために、50kPaを付与した。この結果、大気圧変化による間隙空気圧の変化の感度は低下していることが分かる。また、50kPaの間隙空気圧を作用させても10kPaで給

水できていることから、内部の間隙構造が連通していないことが分かる。

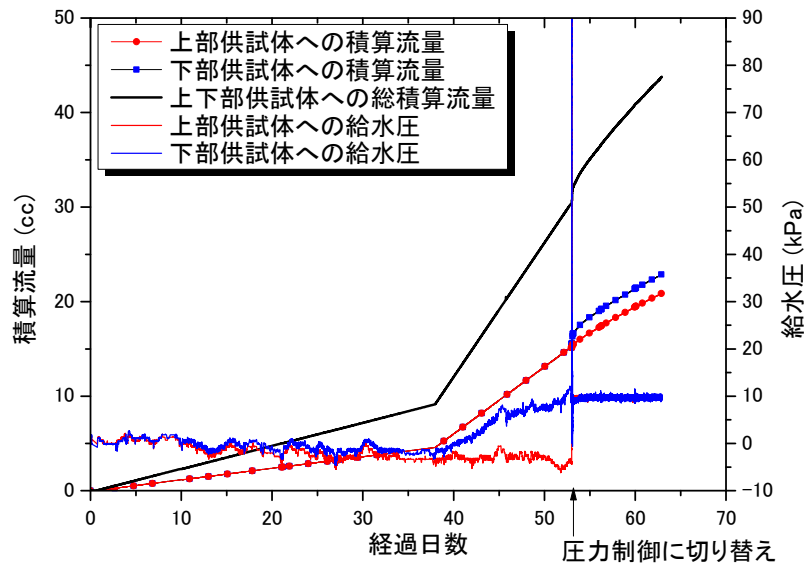


図 8.4.2-1 浸潤による間隙空気の移行試験における給水圧と給水量の経時変化 (圧力制御過程)

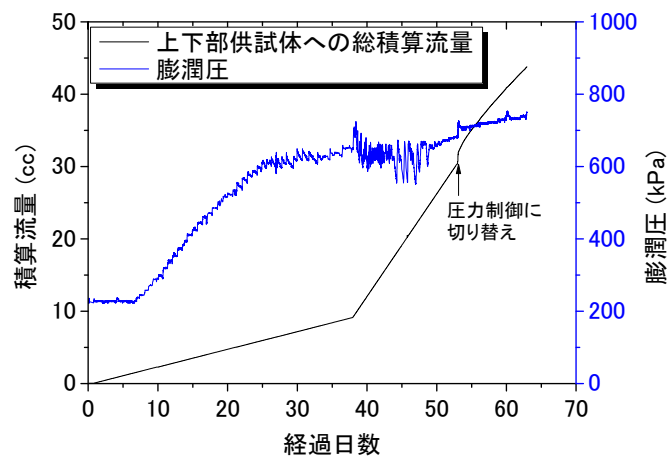


図 8.4.2-2 浸潤による間隙空気の移行試験における流量と膨潤圧の経時変化 (圧力制御過程)

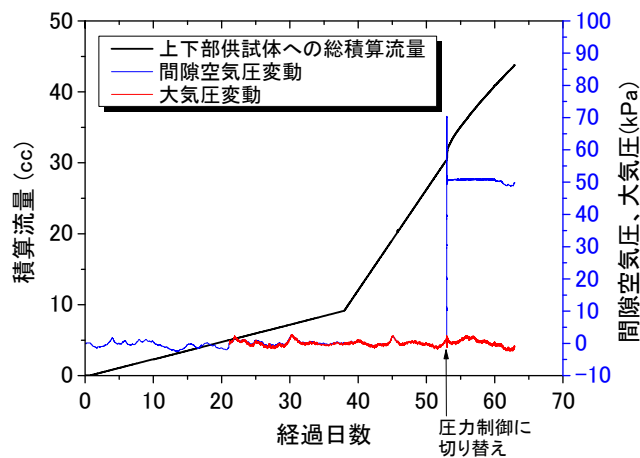


図 8.4.2-3 浸潤による間隙空気の移行試験における間隙空気圧と大気圧の経時変化 (圧力制御過程)

図 8.4.2-4 には、圧力制御に変更したのちの浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布を示している。10 日程度で比抵抗の低下領域が深部まで進行している傾向がみられるが、給水量の急激な増加などがみられないことから、破過現象などによるものではなく、浸潤フロントの進展によるものと考えられる。図 8.4.2-5 には、比抵抗値から換算した飽和度分布を示す。図から、上部と下部はどちらも供試体の中心に向かってなだらかに飽和度が低下しており、最上下部の電極付近でも飽和度が 90%程度である。仮に飽和領域が供試体内にしないとなると、給水を続けても間隙空気が供試体内から廃棄されてしまうため、通水圧を増加して明確な飽和領域を形成する必要がある。

この結果から、今後、給水圧を 50kPa 以上（最大 1MPa 程度）に段階的に増加させ、供給水の浸潤に伴って間隙空気圧が増減する状況を観察する計画である。

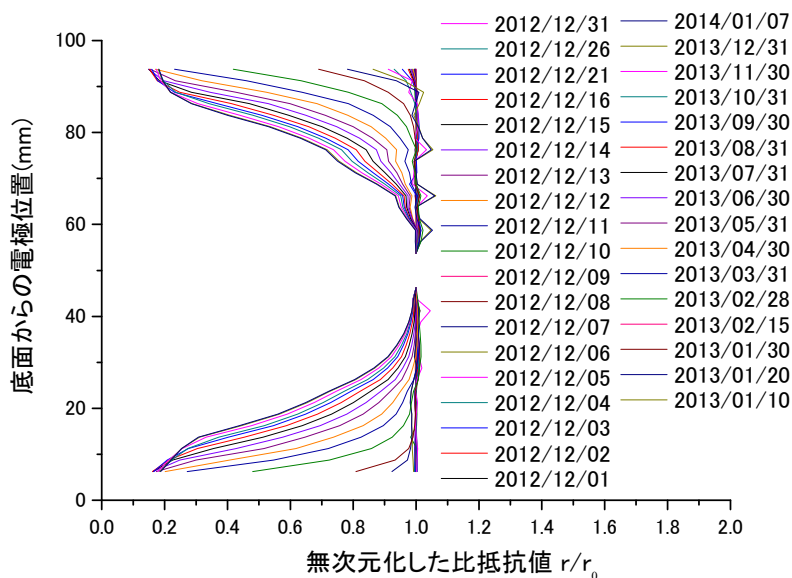


図 8.4.2-4 浸潤による間隙空気の移行試験における比抵抗分布（圧力制御過程）

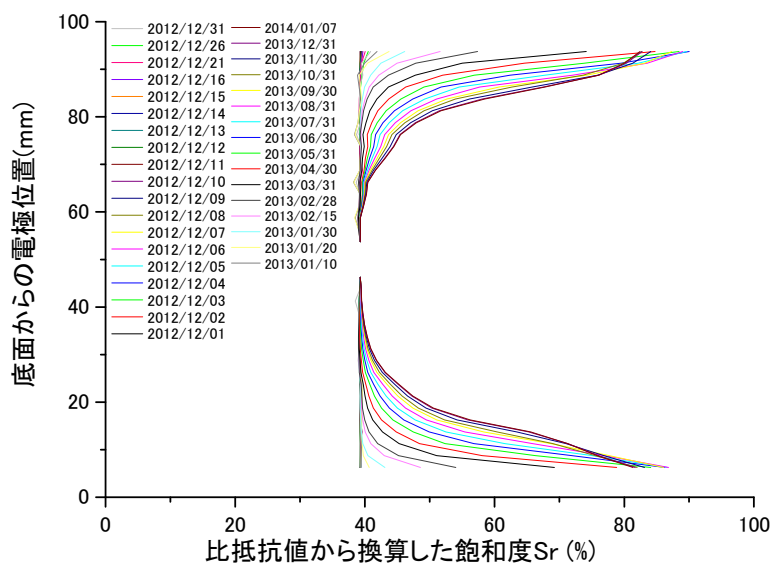


図 8.4.2-5 浸潤による間隙空気の移行試験における飽和度分布（圧力制御過程）

8.4.3 工学技術への反映

本検討では、緩衝材への地下水浸潤の過程で緩衝材内部にトラップされた間隙空気が、その後の地下水浸潤及ぼす影響を実験によって定量的に評価し、その成果を工学技術に反映することを目的としている。図 8.4.3-1 には浸潤による間隙空気の移行試験と同じ状態の豎置き処分施設のイメージを示す。既往の研究[2]における土槽内に設置したブロック緩衝材の 2 次元浸潤挙動評価試験では、供給水は土槽と緩衝材の界面を選択的に浸潤し、浸潤領域が緩衝材を取り囲み、その後ブロック間の隙間に浸潤していくという結果となった。この試験ではブロック施工を模擬しているが、実際のブロック施工では天然バリアとの界面には大きな隙間、若しくはペレットが充填されている可能性が高く、選択的に地下水が浸潤するとは考え難い。本試験条件は、むしろ原位置締固め工法に近いものと考えられる。また、豎置き処分概念では、緩衝材の膨出やパイピングを防ぐ目的で処分孔の上部に蓋を設置する方法が提案されている。このような場合も、蓋と緩衝材の界面には選択的に地下水が浸潤するものと思われる。

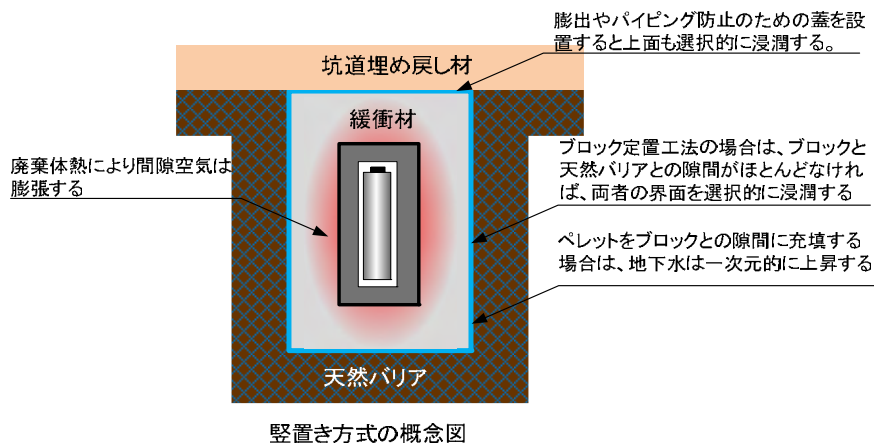


図 8.4.3-1 浸潤による間隙空気の移行のイメージ

本試験の結果、トラップされた空気が地下水に溶け込む速度が浸潤速度よりも遅く、地下水の緩衝材深部への浸潤が妨げられるという結果になれば、地下水浸潤と廃棄体熱で膨張によって加圧された間隙空気が破過する場合は懸念される。さらにトラップされた空気によって浸潤状況が変化するなどの影響があれば、浸潤のさせ方について検討する必要がある。すなわち、底部から一次元的に間隙空気が排気されやすいように浸潤させるなどの検討が必要となってくる。

一方、トラップされた空気が地下水に溶け込む速度が浸潤速度よりも速ければ、地下水が緩衝材深部へ浸潤するのと並行して間隙空気が溶解するため、間隙空気圧の上昇が抑制され、上記のような懸念は比較的小さいと考えられる。ただし、水への気体の溶解度は温度が高くなるにつれて小さくなるため、廃棄体熱で浸潤した地下水の温度が上昇すれば再度、間隙空気として析出する可能性があることに注意が必要である。以上をまとめると図 8.4.3-2 のようになる。

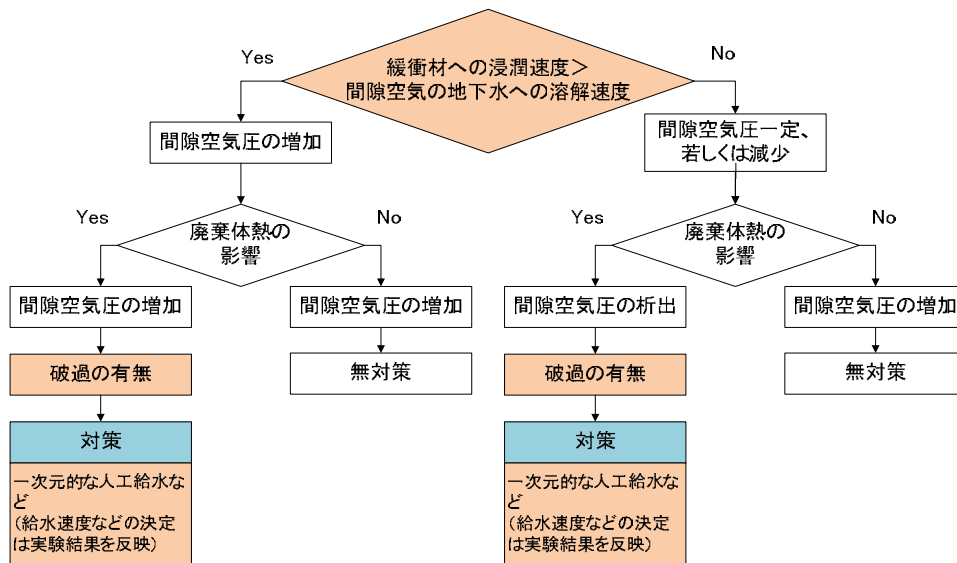


図 8.4.3-2 浸潤による間隙空気の移行試験の工学技術への反映フロー

8.4.4 解析技術への反映

前述のように、緩衝材に地下水が浸潤する場合の間隙空気圧の増加の有無は緩衝材への浸潤速度と間隙空気の地下水への溶解速度の大小関係と廃棄体熱の大きさに依存する。これらの現象は、長期性能評価のためにも重要であり、THMC 解析によって評価されるべき現象である。

緩衝材への浸潤速度や間隙空気の地下水への溶解速度、さらに、これらに対する廃棄体熱の影響を解析するための方法は既に存在しており、本試験結果はこれらのベンチマークとなる試験である。さらに、解析上必要な諸物性を与えるのにも有効である。

第8章 参考文献

- [1] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成23年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第2分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2／2）(2011).
- [2] (公財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成24年度地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第2分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2／2）、pp.4-10-4-20 (2012).

第9章 緩衝材施工技術の高度化検討

9.1 背景

本研究は、廃棄物地層処分施設の閉鎖後の緩衝材に地下水が浸潤する再冠水過程において、緩衝材に発生する事象について試験によって定量評価することを目的としている。この目的のために、前述のように、試験規模を小規模～工学規模までスケールアップするという方策をとった。本検討では、再冠水中の緩衝材に実際に発生する様々な事象として、膨潤挙動、化学変質、力学性能変化、地下水浸潤、ガス移行、熱影響などを取り上げ、これらの事象に、影響因子として取り上げた隙間の有無、位置、密度分布の程度、方向、初期透水性（施工直後の間隙分布）が及ぼす影響を定量評価している。試験規模をスケールアップするという方針は、再冠水中に緩衝材では、これらの様々な事象が複雑に絡み合いながら発生するものと考えられるため、まずは境界条件などを制御できる小規模試験の系で、着目した単一事象を定量評価するためである。

一方、ここで上述の再冠水中の発生事象に影響を及ぼす個々の因子に着目すると、緩衝材の隙間は緩衝材の施工方法によってなくすことは可能である。密度分布の程度、方向も施工方法によって変化する。初期透水係数はこれらの隙間の有無や密度分布によって従属的に決まるものである。このように考えれば、影響因子は施工方法に起因するものであり、施工品質という言葉で置き換えられると考えられる。すなわち、本検討の目的である緩衝材に発生する事象を定量評価するために、再冠水中の緩衝材に発生する様々な事象の不確実性の原因となる施工品質を向上させて、緩衝材における発生事象の定量評価を容易にするという方策も考えられる。

そこで本章では、緩衝材の施工方法を向上させて、再冠水時に緩衝材に発生する事象に施工品質が及ぼす影響を低減させる検討を行った。すなわち、緩衝材の施工方法を高度化させ、隙間がなく均質な緩衝材を施工できれば、施工品質が再冠水時の緩衝材に発生する現象に及ぼす影響や、再冠水時の緩衝材に発生する現象が長期性能に及ぼす影響を、それぞれ低減させることができる。極端な例を挙げれば、仮に緩衝材を隙間や密度分布のない均質な状態で施工できれば、緩衝材は再冠水前の建設作業時から均質になっていることになるため、緩衝材が再冠水し、膨潤しても、すでに均質化しているため膨潤圧が釣り合って膨潤変形は生じない。よって前述の膨潤変形に応力履歴が及ぼす影響、密度分布による膨潤圧の違いなどの不確実性は排除することができる。さらに、建設・作業時に均質に施工できれば、再冠水後の状態（長期性能評価の初期状態）の予測が容易となるため、建設・作業から長期性能までの連続的な評価を可能にすることができる。また、単に施工方法としての開発ではなく、最終的には再冠水時の挙動や長期性能など、緩衝材施工を高度化することによる効果が再冠水～長期性能に至るまでに及ぼす影響を定量的に示し、処分事業の遂行に緩衝材施工技術の高度化が重要であることを示す必要がある。

9.2 高度化する緩衝材の施工技術の選択

本検討では、緩衝材の施工方法を高度化させるにあたって、現在検討されている緩衝材の施工方法について調査した。緩衝材の施工方法は、H21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発－遠隔操作技術高度化－を参考にした。

9.2.1 既往の緩衝材施工技術

緩衝材の施工方法を高度化させるにあたって、現在検討されている緩衝材の施工方法について調べた。緩衝材の施工方法は、H21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発－遠隔操作技術高度化－のうち、品質管理技術の高度化研究で緩衝材の施工方法として取り上げられている、ブロック定置方式、原位置締固め方式、ペレット充填方式、吹付け方式から選択した。

ペレット充填方式は、単体では緩衝材の乾燥密度の仕様を満足できないため、ブロック定置方式のブロックと天然バリアの隙間を充填するという補助的な仕様が想定されている。ブロック定置方式の場合、ブロック内部の密度分布を小さくするためには、ブロック制作時の材料の含水比を高く設定する必要があるが、その一方で含水比を高くして内部密度分布を小さくしたブロックは強度が弱く把持した際に自重に耐えられないという問題がある。また、ブロック間の隙間の影響を小さくするためには、なるべく大きな一体型のブロックの製造が望ましいが、現状では大きな一体型ブロックを製作する能力を有する圧縮機械は存在するものの、ベントナイトブロック制作に供することができないために現実的ではない。原位置締固めはブロック施工と異なり、隙間がない施工法であるが、密度分布を小さくするためには撒き出し層厚を小さくする必要があり、施工手間の観点から現実的には難しいと考えられる。吹付け方式は、施工原理が原位置締固め方式と同様であり、撒き出しと締固めを同時に行う施工法という解釈ができる。また、撒き出し層厚は土粒子 1 個分であるため、緩衝材を隙間や密度分布のない均質な状態で施工できる可能性を有している。この吹付け方式は、わが国が世界に先立って開発したものであり、既に実規模施工試験規模での高密度緩衝材の構築実績があり[1]、有望な緩衝材施工技術として挙げられる。

9.2.2 海外の機関における知見

海外機関における緩衝材の施工方法としては SKB 社はブロック定置方式のブロックと天然バリアの隙間を充填するというハイブリッドな施工方法を考えている。SKB 社の施工法の場合、ブロックに対して隙間を充填したペレット部の密度が低く、この密度差が最後まで残留すると結論付けている。そのため、この影響に関しては安全裕度を付与することにより対応することを考えている。

Posiva 社では緩衝材に関し、MANU-プロジェクト（BENTO-PROGRAM MANUFACTURING OF BUFFER）を進めている。緩衝材の成形技術については、Isostatic Pressing による一体成形技術の開発を進めている。成形技術はドイツの会社のもを活用し、小規模、中規模、実規模の 3 段階で開発を進めている。現状、100%MX-80 で中規模(直径 1.25m、高さ 1.33m、密度 2.131、重

量 3,334kg) の柱状のものまで成形している。引き続き、中空のカップ型の成形試験を始める計画である。ブロックの堅置き多段積みは時間がかかることから、湧水影響を考慮して、短時間での緩衝材定置の視点から一体型緩衝材の製作(成形)技術を推進中である。定置に関しては湧水対策として防水シートを設置し、定置後に防水シートを撤去するという方法を検討している。

緩衝材定置については、現在、工場建屋を利用して、堅置き方式について模擬処分孔を用いた、実規模スケールでの緩衝材ブロックの定置試験を実施中である。これは真空把持装置を用いてリング上に組んだ緩衝材ブロックを積み上げる試験である。ブロック 16 個で 1 リングであり、リングの外径は 1.7m、ブロック厚さは 20、50、100cm の 3 種類。円盤形緩衝材への真空把持装置は吸着パッド部分を特別に設計している。また、緩衝材の施工に関しては実証試験 (Three DEMO phases) を計画しており、2010 年にフェーズ 1 (緩衝材 1/3 スケール、実規模の実証試験のための演習)、2012 年にフェーズ 2 (緩衝材原位置実証試験)、2014-2016 年にフェーズ 3 (緩衝材・坑道埋め戻し原位置実証試験) を計画している。これらの試験でパイピングに関する知見も取得する計画である。フェーズ 2 とフェーズ 3 に関しては ONKALO の最深部・水平坑道部分 (深度 437m レベル) での実施が計画されている。現在、埋め戻し材と坑道との隙間を充填する方法として“ベントナイト吹き付け技術”を採用しており [2]、隙間や密度分布が少ない緩衝材の施工方法として、吹き付け方式は海外機関も認めるように有望な施工技術である。

9.2.3 吹き付け施工技術の概要

(1) 吹き付け施工技術の概要 [2]

一般的に、吹き付け工法は、事前に水分量を調整した材料を吹付ける「湿式吹き付け技術」とノズル付近で乾燥材料と水を混合させて吹付ける「乾式吹き付け技術」に二分化されるが、本吹き付け工法は前者の「湿式吹き付け技術」を応用した高密度ベントナイト構築技術である。本工法では、原則的にノズルワークが可能な施工空間が存在すれば施工可能なため、転圧工法やブロック定置工法と比較して、狭隘箇所での施工性に優れている。また、特筆すべき点は、後述する吹き付けノズルや施工条件などの様々な技術開発によって、これまで吹き付け工法では不可能とされてきた緩衝材の施工品質管理基準である乾燥密度 1.6Mg/m^3 を達成している点である。

本工法で使用する施工機器は、一般のコンクリート吹き付け工で使用する市販機器と同等のドライコンプレッサー (図 9.2.3-1) とローター式吹き付け機 (図 9.2.3-2) である。また、これらに加えて、湿潤ベントナイトの定量供給機 (図 9.2.3-3) とリバウンド材料の吸引式回収装置 (図 9.2.3-4、図 9.2.3-5) 等も使用している。各標準機器の仕様一覧を表 9.2.3-1 に示す。また、図 9.2.3-6 には、本工法の標準機器と機械配置を示す。



図 9.2.3-1 ドライコンプレッサー



図 9.2.3-2 ローター式吹付け機



図 9.2.3-3 材料供給機



図 9.2.3-4 吸引回収機



図 9.2.3-5 集塵機

表 9.2.3-1 本工法の標準機器仕様一覧

材料ホース内径(mm)		50.8
ドライ コンプレッサー	吐出圧力(MPa)	0.69
	吐出空気量 m ³ /分	19.4
	出力(PS)	190
ローター式 吹付け機	材料吐出量(m ³ /hr.)	20
	所要空気圧力(MPa)	0.74
	ローター回転数 (rpm)	30
	材料送り最大距離 (m)	水平 200 垂直 100
湿潤材料 供給機	材料吐出量(m ³ /hr.)	4
	回転数 (rpm)	10
	ホッパー容積(m ³)	1.4

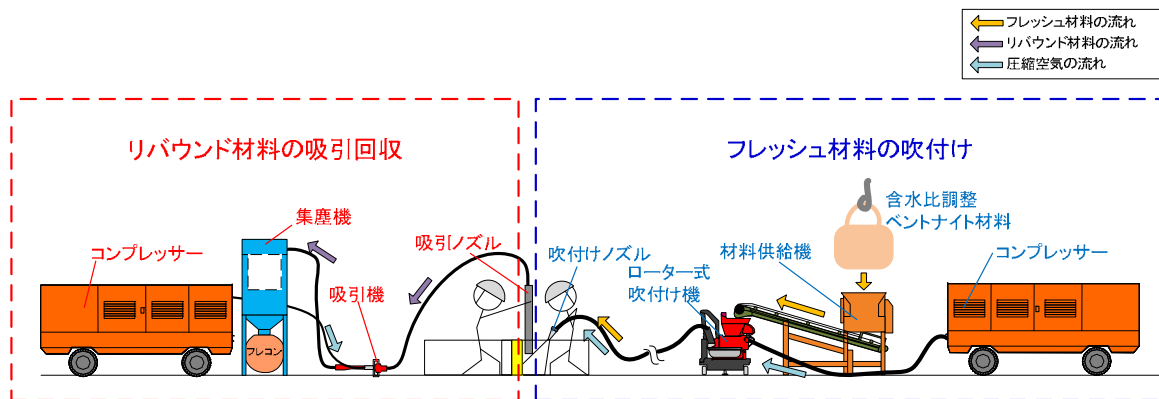


図 9.2.3-6 吹付け工法の標準機器と配置

本工法のような湿式吹付け工法では、均一な施工品質を確保するために湿潤材料を定量に供給することが重要となる。本工法で用いている湿潤材料の供給機は、図 9.2.3-7 に示すような解砕型の造粒機構を備えている。

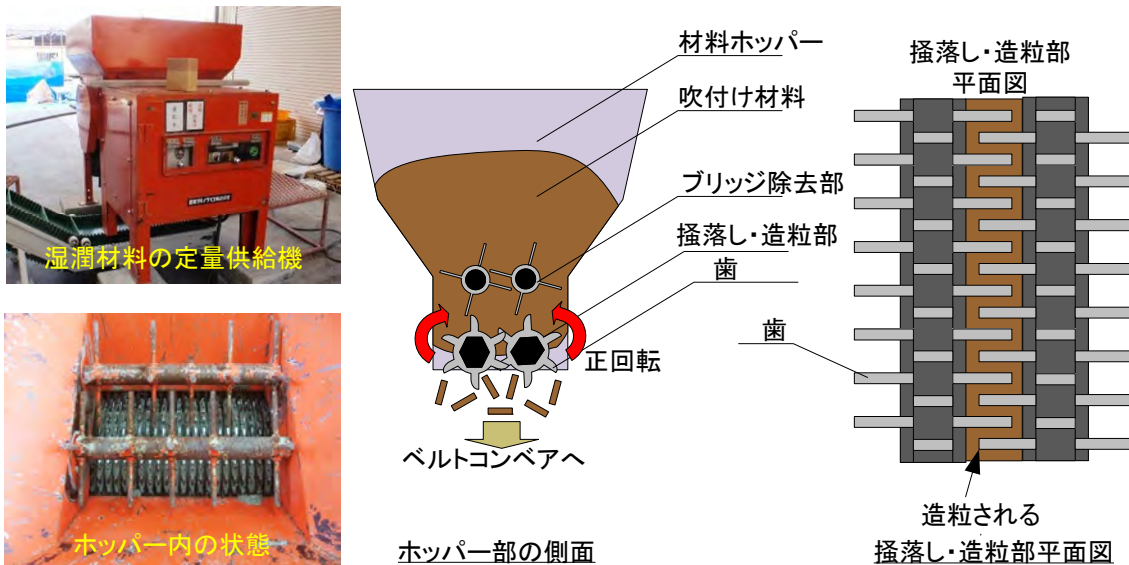


図 9.2.3-7 湿潤材料の定量供給機

一般的に湿潤状態の粉体材料は、ホッパー内でアーチ効果によるブリッジを形成し、材料の定量供給を困難にする。このため、本工法で使用する湿潤材料供給機には、ホッパー内にブリッジ除去用の回転シャフトを設置している。さらに、ホッパーの排出部付近に落とされた材料を一定速度で強制的に搔落し・造粒部でベルトコンベアに排出することによって一定供給性を実現している。この機械を通過した材料は、ゆるい団粒物となるが、圧縮空気で吹付け機から吹付けノズルに至るまでのホース内を搬送される間に再び解砕される程度の硬さになるように、搔落し・造粒部の歯の間隔を調整している。図 9.2.3-8 は、湿潤材料供給機の供給量の定量性を示している。湿潤材料供給機は、搔落し・造粒部の回転数によってその供給量を制御している。このため、回転数が大きい程、供給量が増えることになる。図から、吹付け材料の含水比にはよるものの、搔落し・造粒部の回転数と材料供給量の関係はほぼ線形であることが分かる。

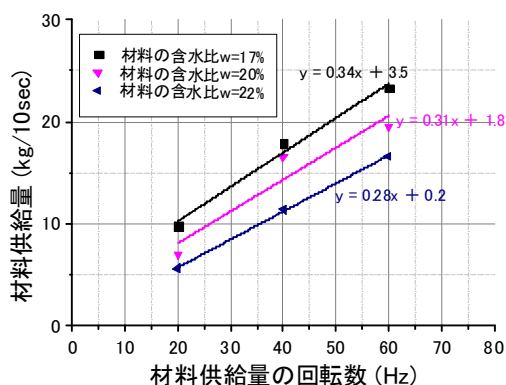


図 9.2.3-8 湿潤材料供給機の供給量の定量性

また、本工法では、吹付けノズルとして超音速ノズル（別名：ラバールノズル、スーパーソニックノズル）を採用している。この超音速ノズルは、ロケットエンジンの噴射口やアブレイシブエアジェットによる切削、ジェットバーナー、ジェットミルなど圧縮性流体を超音速にまで加速できるノズルとして、広く使用されているものである。図 9.2.3-9 に超音速ノズルの概

略図を示す。超音速ノズルとは、図に示すような圧縮部とその後に続く拡張部があるノズルの総称であり、空気などの圧縮性流体が亜音速まで加速されれば、管内を流れてきた圧縮性流体は、圧縮部で圧縮され、且つ速度を速めながらチョーク部に至り、チョーク部で亜音速に達すると、拡張部で密度を下げながら超音速にまで加速できるものである。

本検討で用いた超音速ノズルの形状は、乾燥密度 1.6Mg/m^3 のベントナイト系人工バリアを構築可能となるように、図 9.2.3-9 に示した拡張角度 θ_e 、拡張部の長さ L_e などをパラメータとした室内試験[6]によって決定している。

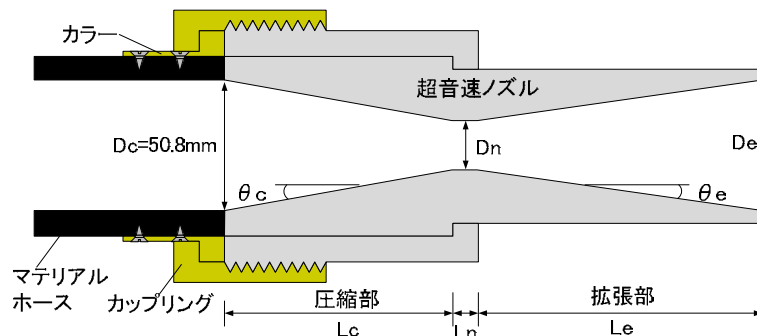


図 9.2.3-9 超音速ノズルの概略図

図 9.2.3-10 には振動転圧工法と吹付け工法による緩衝材の密度分布の比較を示している。どちらも低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分施設における側部緩衝材を模擬した施工エリアで緩衝材を施工した場合のサンプリングコアの密度分布を示している。図 9.2.3-10 から、転圧工法によって得られた緩衝材は仕上がり層上部、中央部、層下部ごとに密度が分かれ、上部から下部に向かって密度が低下しており、その差は 0.3Mg/m^3 程度である。また、目標の緩衝材全体の乾燥密度が 1.6Mg/m^3 であるのにも関わらず、最大乾燥密度が 1.75Mg/m^3 程度と大きい。一方、吹付け工法で施工した緩衝材の密度分布は、 0.1Mg/m^3 の幅に収まり、最大乾燥密度も 1.68Mg/m^3 程度であることがわかる。

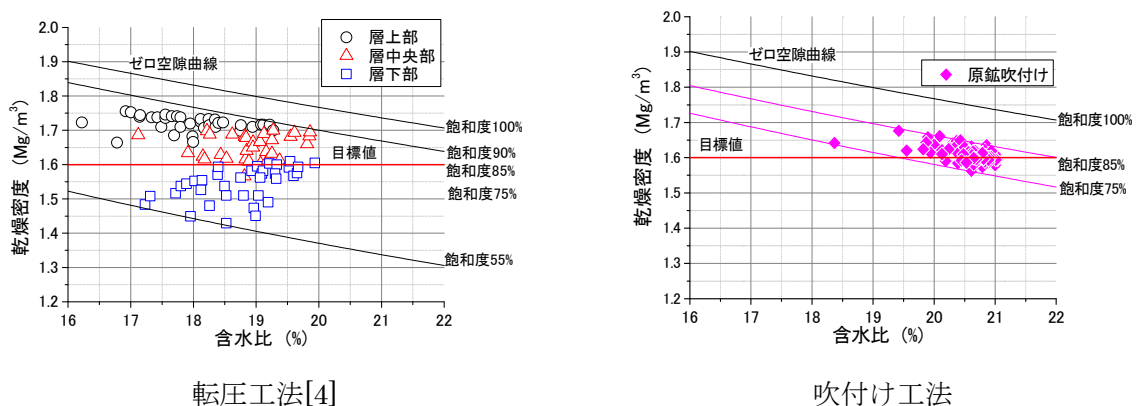


図 9.2.3-10 転圧と吹付け工法による緩衝材の密度分布の比較

吹付け工法では、吹付けた材料のうち、質量割合で3割程度が付着せずにリバウンド材料として滞留する。この滞留したリバウンド材を巻込んで吹付けを行った場合、緩衝材の密度が低下し、品質不良を発生させる恐れがあるため、施工時においては、リバウンド材の回収が肝要となる。そこで、図 9.2.3-11 に示すような、リバウンド材の吸引回収方法を適用する。この吸引回収方法は、吸引機と吸引ノズル、集塵機で構成されており、狭隘箇所における使用にも適した方法である。また、吹付け材料は前述のように含水比調整した粗粒ベントナイトであり、コンクリート吹付けと異なりリバウンド材料は水和反応して固化することはないことから、回収したリバウンド材料は何度でも再利用して吹付けることが可能である。

吸引機は、図 9.2.3-12 に示すような圧縮空気のベルヌーイ効果を利用した構造である。

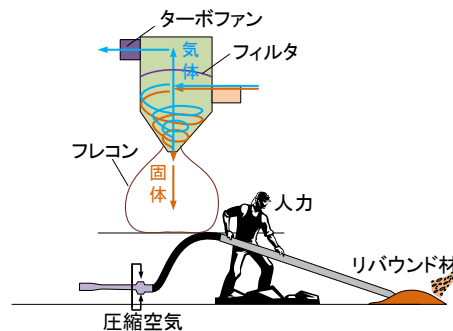


図 9.2.3-11 吸引方式によるリバウンド材の回収イメージ

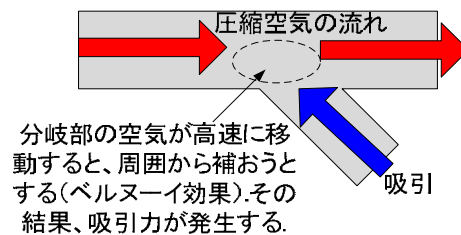


図 9.2.3-12 吸引機のベルヌーイ効果

リバウンド材料を再利用する際の留意事項として、吸引回収される際に圧縮空気に洗われることによって、リバウンド材料の含水比が低下することが挙げられる。含水比の低下は、吹付けた緩衝材の乾燥密度を増加する方向に変化させるため、止水性などの緩衝材の品質上問題はないと考えられるが、過度に乾燥した材料を吹付けることはリバウンド率の増加と過度な密度分布を発生させるため好ましくない。そこで、リバウンド材の回収時に、吸引されたリバウンド材が吸引時の圧縮空気内で対流するのを短時間に制限するために、図 9.2.3-13 に示すようなサイクロン効果を利用した気体と固体の分離機を採用している。これにより、表 9.2.3-2 に示すように吸引することによる含水比の低下割合を0.3%にすることができる。

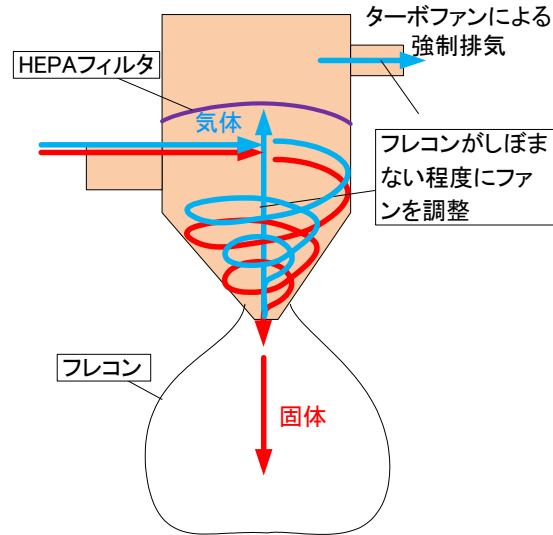


図 9.2.3-13 サイクロンによる気体と個体の分離技術

表 9.2.3-2 サイクロンによる気体と固体の分離技術の効果

吸引時間 (sec)	吸引量 (kg)	吸引速度 (kg/sec)	含水比 低下率 (%)
528	390	0.74	0.3

(2) 吹付けベントナイトの密度管理方法[5]

吹付けたベントナイトの乾燥密度は、図 9.2.3-14 に示すようなシリコンオイルを浸漬液とした浮力法（アルキメデス法）で取得した嵩密度から算出している。

一般に締固めたベントナイトは不飽和であり、土粒子の接点にあるメニスカス水の表面張力によって崩れることなく粉体材料の集合体としていられる（図 9.2.3-15）。仮にベントナイトを水やエタノールなどの極性を持つ液体に漬ければ、空隙が極性を有する液体で満たされるためにメニスカス水に溶解し、表面張力（界面自体）がなくなり、土粒子をつなぎとめている力は分子間力のみとなる（図 9.2.3-16）。さらに極性を有する液体が周囲を取り囲んでいる供試体表面では、極性を持つ液体がベントナイトのもつ吸着水や層間水を奪うために集合体の状態でいられなくなり、土粒子の凝集・沈殿・分散によって浸漬前に比べて大きく変形してしまう。

一方、シリコンオイル、ケロシン等の非極性有機分子からなる浸漬液にベントナイトを漬けても、メニスカス水と非極性有機分子の間には界面張力が作用し、さらに、メニスカス水と土粒子間の水素結合のほうが、非極性有機分子と土粒子間の分子間力よりも強いため、メニスカス水を剥ぎ取ることができない（図 9.2.3-16）。また、非極性有機分子ではベントナイトは膨潤できないことから、結果として締固めたベントナイトはシリコンオイルに半年以上浸漬しても膨潤や崩壊することはない。

従来から行われていたケロシンを用いた浮力法では、ケロシンが不飽和地盤材料の空隙に染込み易いことから、飽和土のみを対象としていた。しかしながら、シリコンオイルはケロシンなどに比べて、ある程度自由に粘性を選べることから、ベントナイト粒子間の空隙に入り込み

難い粘性を選択できるため、不飽和土への適用も可能である。また、揮発しにくい、製品の品質が安定しており比重が常に一定である、表面張力が小さいためにメニスカス水との界面張力を低下させにくいなどの特徴がある。これにより、吹付けベントナイトのような焼結していない多孔質体の嵩体積を浮力法によって計測することができる。

試験手順は、まず吹付けたベントナイトから任意の形状に供試体を切り出す。浮力法の長所は、ノギス法のように寸法どおりに切り出す必要がなく計測手間が少ないために、簡便でかつ人為的誤差が少ないことが挙げられる。次に、この切り出した供試体の気中重量 W_a を計測した後に供試体をシリコンオイルにつけて液中重量 W_b を計測する。この気中重量 W_a と液中重量 W_b の差が吹付けベントナイトに作用する浮力 $W_c = W_a - W_b$ となる。この浮力 W_c をシリコンオイルの比重 ρ_c で除すれば、吹付けベントナイトの嵩密度 $V_c (= W_c / \rho_c)$ が求められる。これにより、吹付けベントナイトの嵩密度 $\rho_t (= W_a / V_c)$ が求められ、さらに吹付けベントナイトの含水比 w より、吹付けベントナイトの乾燥密度 $\rho_d (= \rho_t / (1 + w/100))$ が求められる。

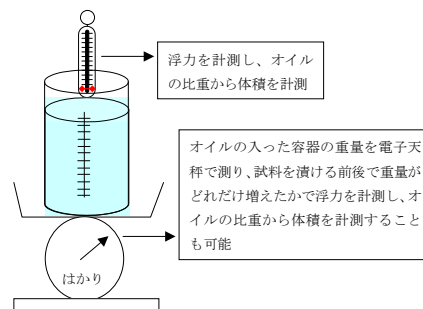


図 9.2.3-14 浮力法による嵩密度測定方法

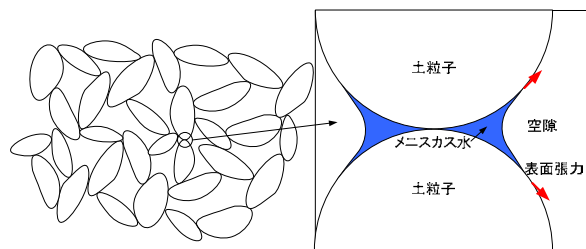


図 9.2.3-15 不飽和土のメニスカス水の表面張力の概念図

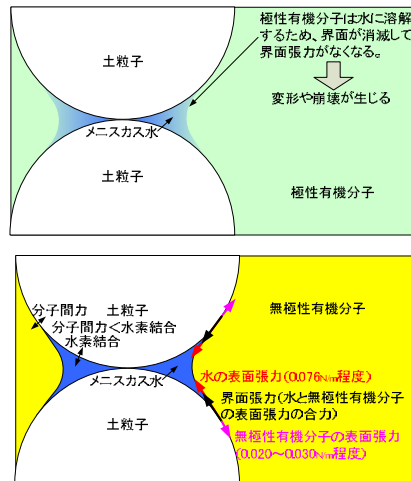


図 9.2.3-16 極性有機分子-水、無極性有機分子-水の界面張力の相違

図 9.2.3-17 に吹付けベントナイトの浸漬時間とシリコンオイルを用いた浮力法から求めた乾燥密度の関係を示す。図からも明らかなように、乾燥密度が 1.6Mg/m^3 付近では、シリコンオイルが染込むのに時間がかかるため。浸漬後 1 分程度で浮力を計測すれば、シリコンオイルがベントナイトに染込む影響はほとんど無いといえる。ただし、乾燥密度が 1.6Mg/m^3 以下の場合は、比較的早い浸漬時間でシリコンオイルがベントナイトに染込む影響で嵩密度が大きめに算出され、精度を高めるためには極力迅速に浮力を計測する必要がある。

そこで、シリコンオイルが染込む影響を次のような手順で補正する。まず、十分にシリコンオイルがベントナイトに染込んだ状態での液中重量 W_b^* を求める。このベントナイトを取り出して表面のシリコンオイルのみを拭き取り気中重量 W_a^* を計測する。このとき、ベントナイトに染込んだシリコンオイルの体積は、 $\Delta V = ((W_a^* - W_a) / \rho_c)$ となる。これにより、シリコンが染込む前の体積は、 $V_c = ((W_a - W_b^*) / \rho_c + \Delta V)$ で与えられる。よってベントナイトの嵩密度は $\rho_t = (W_a / V_c)$ として求められる。この方法では、シリコンオイルが染込む影響を除去でき、浮力が落ち着くまでゆっくりと計測できる。図 9.2.3-18 にこのシリコンオイルが染込む影響を除去した嵩密度を示す。図 9.2.3-17 と比較して、計測される嵩密度が浸漬時間に依らず一定値を示していることがわかる。図 9.2.3-19 には、ノギス法とシリコンオイル法の比較を示す。図に示すように、概ね良好な相関関係を示している。高密度になるほど、ノギス法に比べシリコンオイル法の方が密度が高めに見積もられているが、これは、密度が高くなるほど供試体の整形が難しくなるため、ノギス法の精度が悪化するためであると考えられる。

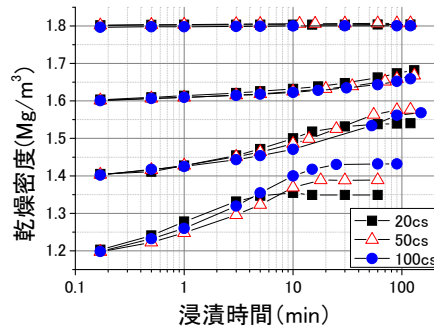


図 9.2.3-17 浸漬時間と乾燥密度関係 (シリコンオイル染込みの影響あり)

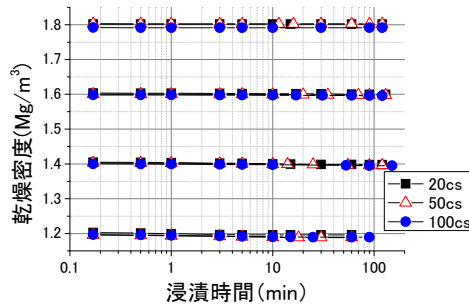


図 9.2.3-18 浸漬時間と乾燥密度関係 (シリコンオイル染込みの影響除去)

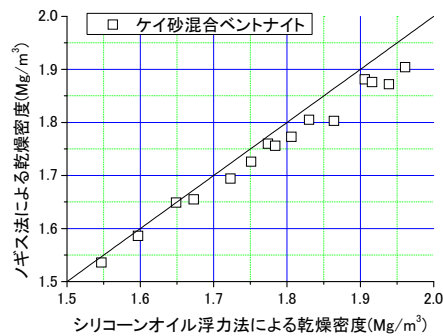


図 9.2.3-19 ノギス法とシリコンオイル法の比較

9.2.4 吹付け施工技術の適用性

吹付け方式による緩衝材施工では、事前に吹付け材料の含水比調整を行っている。この際の設定含水比は、通常、使用するベントナイトのモンモリロナイト含有率に依存しており、通常は、含水比をパラメータにした吹付け箱試験を行い、含水比と乾燥密度の関係（締固め曲線）を材料ごとに取り得し、材料の配合設計に資するデータとする。そこで、緩衝材の施工技術の高度化のための施工試験では、様々なベントナイト系材料の含水比と乾燥密度の関係（締固め曲線）取得のための吹付け箱試験を行った。これらの結果は、それ以降に実施する吹付け方式による緩衝材施工実験に資するデータとした。

使用したベントナイト系材料は、アメリカ産の MX80、ギリシャ産の Milos Ca ベントナイト、ドイツ産の Freadland Clay の 3 種類である。これらのベントナイト系材料はフィンランドの

HLW 地層処分の実施主体である POSIVA 社が緩衝材や埋め戻し材として仕様を検討しているものである。これらの材料はそれぞれモンモリロナイト含有率が異なるため、モンモリロナイト含有率と吹付け方式による緩衝材施工の関係に資するデータとなる。

(1) 試験ケース

平成 21 年度までは吹付け工法による緩衝材の施工は山形県産のクニゲル V1 のみで行ってきた。これに対して HLW 放射性廃棄物地層処分の最終処分地が決定しているフィンランド、スウェーデンなどでは、緩衝材は MX80、Milos Ca-bentonite、埋め戻し材は Friedland Clay などのように用途に応じて使い分けている。

ここでは吹き付け工法に適する材料を検討することを目的として、緩衝材として MX80、Milos Ca-bentonite、埋め戻し材として Friedland Clay を採用し、先ず吹付け工法によって吹付け箱試験を行う。吹付け箱試験の概要を図 9.2.4-1 に、試験で使用する吹付け箱を図 9.2.4-2 に示す。吹付け箱試験では、壁に立てかけた吹付け箱を吹付けによって充填し、吹付けベントナイトの密度を取得した。

次に、吹付け箱試験結果から得られた締固め曲線を用いて吹付け材料の配合を決定し、決定した配合の各種ベントナイト系人工バリア材料を用いて吹付け施工を行った。この際、所定の湧水量に対して施工可能性を検討した。POSIVA 社によれば、毎分 0.1 リットル/処分孔が仕様限界であるため、本検討でもこの値を参考に試験条件を決定した。

平成 21 年度は前述の試験手順のうち吹付け箱試験までを実施した。得られた結果を以下に述べる。

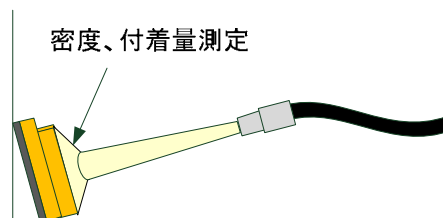


図 9.2.4-1 吹付け箱試験の概要

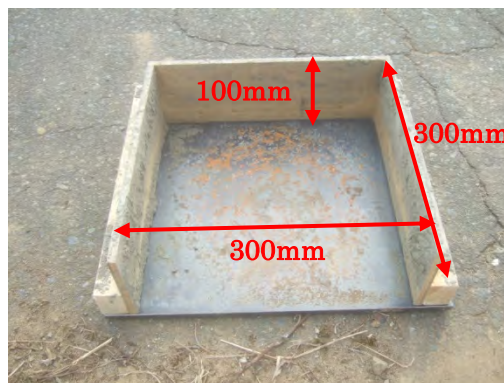


図 9.2.4-2 試験で使用した吹付け箱

(2) 試験方法

吹付け箱試験に使用した吹付けシステムは、前述の吹き付け施工技術の概要に示す通りである。本システムでは、締固めエネルギー5Ecの突固め試験と同等の乾燥密度で、吹付けベントナイトを構築することが可能である。

測定したデータは、施工品質に関連する乾燥密度と、施工性に関連する付着量である。乾燥密度はシリコンオイル法[1]で計測した湿潤密度と電子レンジ法で計測した含水比を用いて算出し、付着量は吹付け後の吹付け箱の重量から吹付け前の吹付け箱の重量を差し引いて算出した。

(3) 各試料の基礎物性

先ず、メチレンブルー吸着量試験で調べたMX80、Milos Ca-bentonite、Friedland Clayのモンモリロナイト含有率を表9.2.4-1に示す。なお、比較のためクニゲルV1の試験結果も表中に示す。表より、MX80、Milos Ca-bentoniteはクニゲルV1よりモンモリロナイト含有率が高い材料であり、逆にFriedland ClayはクニゲルV1よりモンモリロナイト含有率が低い材料であると判断できる。なお、本試験のメチレンブルー吸着量試験はクニミネ工業株式会社に依頼し、【日本ベントナイト工業会標準試験法：ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法、JBAS-107-91, 1991】[6]に則り実施した。各試料の土粒子密度を表9.2.4-2に示す。Friedland Clayの土粒子密度が非常に大きいことが分かる。これは、随伴鉱物に金属塩鉱物が含まれるためであると考えられる。

次に、突固め試験で得られた各試料の締固め曲線(締固めエネルギー5Ec)を図9.2.4-3に示す。図より、モンモリロナイト含有率が高くなると締固め曲線は右下方にシフトし、最適含水比は高く、最大乾燥密度は小さくなることがわかる。

表 9.2.4-1 各試料のモンモリロナイト含有率

材料	モンモリロナイト含有率(%)			
	1回目	2回目	3回目	平均
MX80	71.4	71.4	71.4	71.4
Milos Ca-bentonite	67.1	67.1	67.1	67.1
Friedland Clay	27.1	27.1	27.1	27.1
クニゲル V1	61.4	61.4	62.9	61.9

表 9.2.4-2 各試料の土粒子密度

材料	土粒子密度(Mg/m ³)
MX80	2.80
Milos Ca-bentonite	2.78
Friedland Clay	2.91

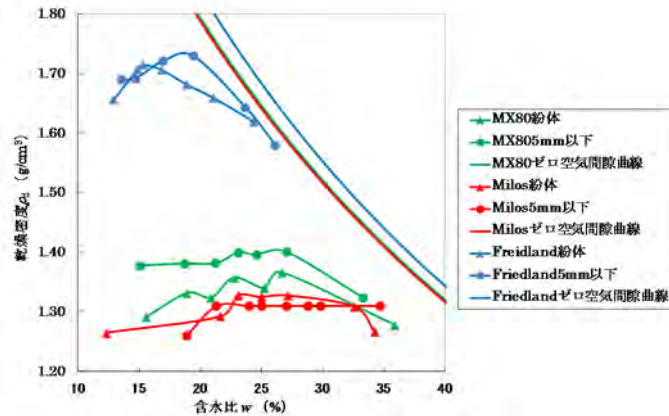


図 9.2.4-3 突固め試験で得られた締固め曲線 (締固めエネルギー5Ec)

(4) 吹付け箱試験の試験条件

吹付け箱試験の試験ケース一覧を表 9.2.4-3 に示す。前述の締固め試験の結果を踏まえ、MX80、Milos Ca-bentonite、Friedland Clay の3種類の試料それぞれに対し、最適含水比を中心に含水比を変化させた5ケースの試験を行うこととし、さらに全ての試料で粉体と5mm以下の2種類の最大粒径の試料を用意して、計30ケースの試験を実施した。

表 9.2.4-3 吹付け箱試験ケース一覧

材料	粒径	含水比(%)					備考
		計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	
MX80	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0	
	粉体	20.0	22.6	24.4	26.8	29.8	実施済み
	5mm以下	19.6	22.7	24.9	26.2	28.8	実施済み
Milos Ca-bentonite	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0	
	粉体	20.0	22.5	24.7	26.6	29.1	実施済み
	5mm以下	20.0	23.1	25.3	26.6	31.0	実施済み
Friedland Clay	計画含水比(%)	16.0	18.0	20.0	23.0	25.0	
	粉体	16.5	18.4	19.8	23.9	24.9	実施済み
	5mm以下	16.4	18.5	21.2	23.5	31.3	実施済み

(5) 吹付け箱試験結果

まず、吹付け箱試験で得られた乾燥密度を表 9.2.4-4 に、締固め曲線を図 9.2.4-4 に示す。モンモリロナイト含有率の高いMX80やMilos Ca-bentoniteのデータにはばらつきがみられるものの、モンモリロナイト含有率が高い試料ほど乾燥密度が小さくなっていることから、吹付け箱試験で得られた締固め曲線は突固め試験で得られた締固め曲線と同様の傾向を示すと判断できる。次に、吹付け箱への付着量を表 9.2.4-5 に、各試験ケースの吹付け後の吹付け箱の写真を図 9.2.4-5～図 9.2.4-10 に示す。全ての試料で含水比が高いケースほど付着量が多いことから、含水比の増加に従ってベントナイト試料の付着力は増加し、施工性は向上すると判断できる。

表 9.2.4-4 各試験ケースの乾燥密度一覧

材料	粒径	乾燥密度(Mg/m ³)				
		計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0
MX80	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	1.36	1.20	1.27	1.22	1.23
	5mm 以下	※1	※1	1.17	1.20	1.30
Milos Ca-bentonite	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	※1	1.27	1.32	1.15	1.15
	5mm 以下	※1	※1	※1	1.28	1.34
Friedland Clay	計画含水比(%)	16.0	18.0	20.0	23.0	25.0
	粉体	1.77	1.73	1.66	1.54	1.39
	5mm 以下	1.72	1.71	1.60	1.59	1.44

※1：付着が不十分のため計測不可

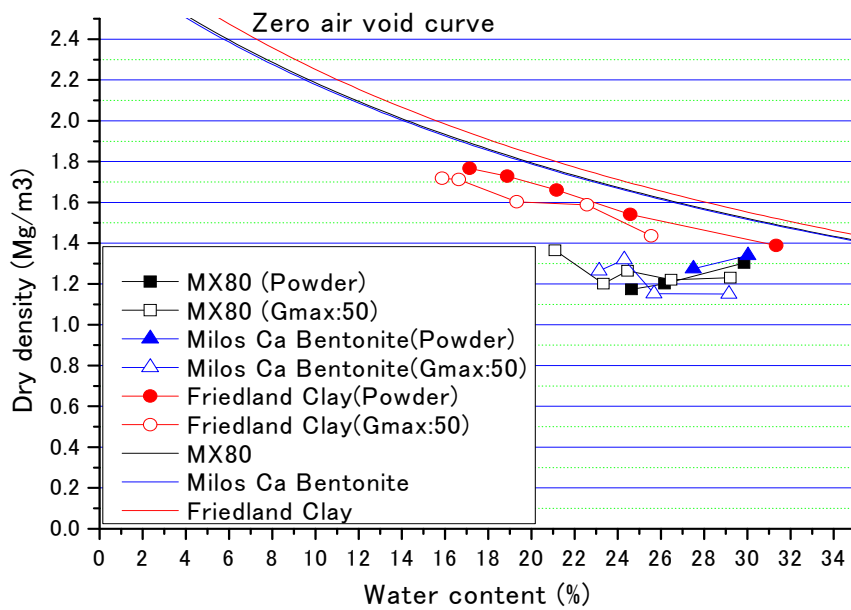


図 9.2.4-4 吹付け箱試験で得られた締固め曲線

表 9.2.4-5 各試験ケースの付着量一覧

材料	粒径	付着量(kg)				
		計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0
MX80	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	2.30	3.38	4.46	8.72	20.96
	5mm 以下	0.68	3.66	5.98	8.40	3.74
Milos Ca-bentonite	計画含水比(%)	20.0	23.0	25.0	27.0	30.0
	粉体	※1	1.44	3.54	2.90	9.50
	5mm 以下	※1	※1	※1	0.52	0.60
Friedland Clay	計画含水比(%)	16.0	18.0	20.0	23.0	25.0
	粉体	7.96	9.16	13.64	17.78	20.76
	5mm 以下	5.04	13.76	14.70	17.80	30*2

※1：付着せず

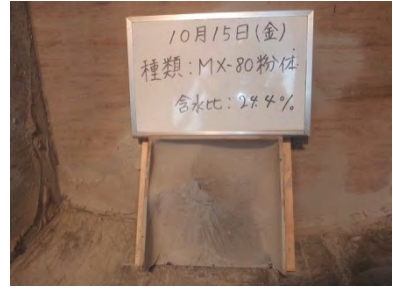
※2：電子秤の上限値



(a)計画含水比 20%



(b)計画含水比 23%



(c)計画含水比 25%

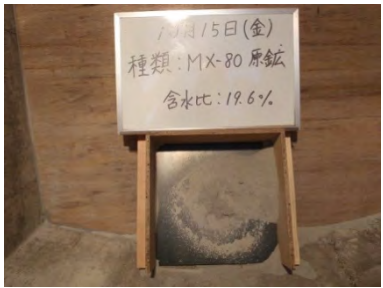


(d)計画含水比 27%



(e)計画含水比 30%

図 9.2.4-5 吹付け後の吹付け箱の写真 (MX80 粉体)



(a)計画含水比 20%



(b)計画含水比 23%



(c)計画含水比 25%



(d)計画含水比 27%



(e)計画含水比 30%

図 9.2.4-6 吹付け後の吹付け箱の写真 (MX80 5mm 以下)



(a)計画含水比 20%



(b)計画含水比 23%



(c)計画含水比 25%



(d)計画含水比 27%



(e)計画含水比 30%

図 9.2.4-7 吹付け後の吹付け箱の写真 (Milos Ca-bentonite 紛体)



(a)計画含水比 20%



(b)計画含水比 23%



(c)計画含水比 25%



(d)計画含水比 27%



(e)計画含水比 30%

図 9.2.4-8 吹付け後の吹付け箱の写真 (Milos Ca-bentonite 5mm 以下)



(a)計画含水比 16%



(b)計画含水比 18%



(c)計画含水比 18%



(d)計画含水比 23%



(e)計画含水比 25%

図 9.2.4-9 吹付け後の吹付け箱の写真 (Friedland Clay 粉体)



(a)計画含水比 16%



(b)計画含水比 18%



(c)計画含水比 18%



(d)計画含水比 23%



(e)計画含水比 25%

図 9.2.4-10 吹付け後の吹付け箱の写真 (Friedland Clay 5mm 以下)

一方、モンモリロナイト含有率の高いMX80及びMilos Ca-bentoniteに着目すると、モンモリロナイト含有率の低いFriedland Clayと比較して明らかに付着量が少なく、低含水比側では試料が全く付着しないケースもみられた。このような傾向が生じるのは、モンモリロナイト含有率が高いと試料内の水分が吸着水として土粒子に吸着されて自由水が減少し、付着力が低下するためと考えられる。この鉱物表面の吸着水は、鉱物と水素結合をしている水分子であり、いわゆる液体として振舞うのではなく鉱物の一部として固体として振舞うものである。実際に、例えば含水比25%のMX80、Milos-Ca Bentoniteを触れた感覚は、25%のFriedland Clayの

場合に比べ、明らかにパサパサした感じである。土粒子密度が 2.7Mg/m^3 程度の材料を乾燥密度 1.6Mg/m^3 に締固めた場合の飽和含水比は 26%程度であることを考えると、MX80 や Milos-Ca Bentonite を単体で乾燥密度 1.6Mg/m^3 に占め固める場合には、ほとんど自由水がない状態であると考えられる。

よって、モンモリロナイト含有率の高いベントナイト試料を吹付け工法で施工する場合、施工性を考えれば、試料の含水比を高く設定して付着力を増加させることが必要と判断できる(図 9.2.4-11 参照)。しかし、品質面を考慮すると、高含水比試料は低密度で飽和してしまうため施工後の乾燥密度が低くなり、要求品質を満足しなくなる可能性が高いと予想される。

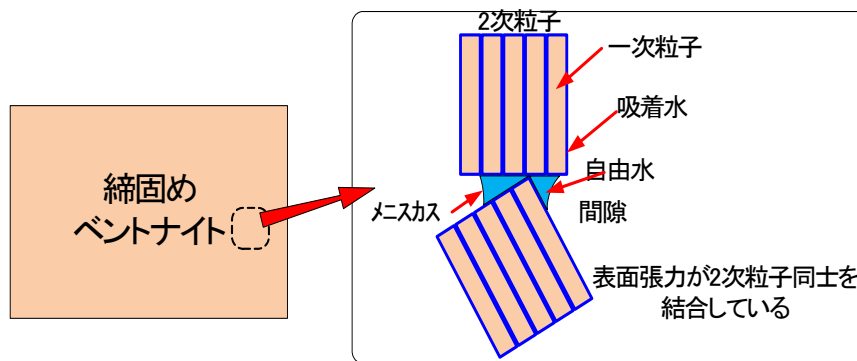


図 9.2.4-11 締固め工法における間隙水の役割

以上の検討結果から、MX80 や Milos Ca-bentonite などのモンモリロナイト含有率が高いベントナイト試料をそのまま吹付け工法で施工することは困難であり、何らかの対策を講じることが必要と判断できる。そこで、モンモリロナイト含有率が高いベントナイト試料を吹付け工法で施工する方法として、以下の 2 つの対策が考えられる。

① 試料の膨潤を抑える（吸着水を減らして自由水を増やす）

試料の膨潤を抑える（試料中の吸着水を減らして自由水を増加させる）ことで付着力が増加し、吹付け工法での施工が可能になると考えられる。具体的には、 NaHCO_3 （重曹）や Na_2CO_3 の混合が有効と予想される。

② モンモリロナイト含有率を下げる

ケイ砂を混合してモンモリロナイト含有率を下げることで、付着力が増加し吹付け工法での施工が可能になると考えられる。ただし、モンモリロナイト含有率を変化させると透水係数は変化し、両者の関係は非線形となることから、要求される遮水性を確保するためには、最適なモンモリロナイト含有率（ケイ砂含有率）を実験的に取得する必要がある。加えて、付着量が多く全ての試験ケースで供試体の作製が可能であった Friedland Clay の紛体試料を使用し、透水試験を実施した。試験結果の一覧を表 9.2.4-6 に、透水係数の経時変化を図 9.2.4-12、乾燥密度と透水係数の関係を図 9.2.4-13 に示す。

表 9.2.4-6 Friedland Clay の透水試験結果

吹付け時含水比 $w(\%)$	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg}/\text{m}^3)$	有効モンモリロナイト密度 $\rho_{em}(\text{Mg}/\text{m}^3)$	透水係数 $k(\text{m}/\text{sec})$
16.5	1.78	0.87	1.38×10^{-12}
18.4	1.71	0.81	1.41×10^{-12}
19.8	1.65	0.76	2.11×10^{-12}
23.9	1.58	0.71	3.19×10^{-12}
24.9	1.39	0.58	8.60×10^{-12}

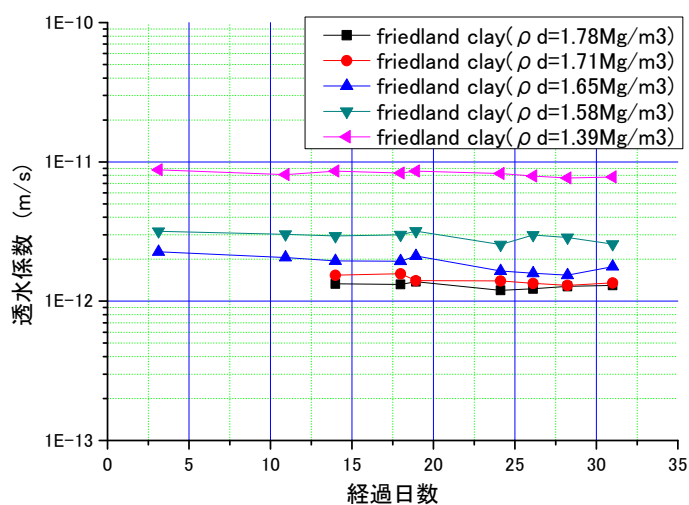


図 9.2.4-12 透水係数の経時変化 (Friedland Clay)

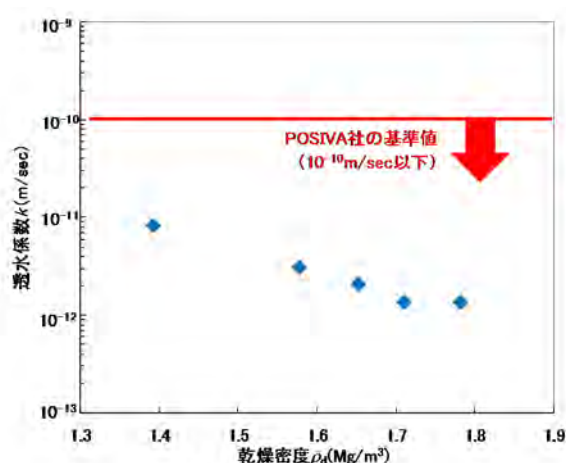


図 9.2.4-13 透水係数と乾燥密度の関係 (Friedland Clay)

図より、乾燥密度が大きくなるに従い、透水係数は小さくなることがわかる。また、透水係数の値に関しても、フィンランド POSIVA 社が設定した埋戻し部(Friedland Clay を使用予定)の透水係数の基準である $10^{-10}\text{m}/\text{sec}$ 以下を満たしている。よって、Friedland Clay は吹付け施

工で透水係数の要求性能を満足させることが可能と考えられる。

また、既往の研究[7]において、モンモリロナイト含有率の異なるベントナイトであっても、有効モンモリロナイト密度（単位体積あたりに含まれるモンモリロナイトの乾燥重量をモンモリロナイト以外の土粒子の体積を除いた体積で除すことで得られる密度）を用いて透水係数を整理すると、通水溶液が蒸留水であれば交換性陽イオンの種類ごとに両者の関係は一義的に決定すると報告されていることから、Friedland Clay の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係についても同様の傾向がみられるか確認することとした。有効モンモリロナイト密度の算出式は以下に示す（ベントナイト 100%の場合）。なお、今回の試験では、ベントナイト中のモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度が得られていないため、モンモリロナイトの土粒子密度とベントナイト中のそれ以外の鉱物の土粒子密度を一定と仮定し、表 9.2.4-2 に示すベントナイト全体の土粒子密度を代用した。

$$\rho_{em} = \frac{\rho_d C_m}{100 - \frac{\rho_d (100 - C_m)}{\rho_{nm}}}$$

ここで、 C_m ：モンモリロナイト含有率(%)

ρ_d ：乾燥密度(Mg/m³)

ρ_{em} ：有効モンモリロナイト密度(Mg/m³)

ρ_{nm} ：ベントナイト中のモンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)

Friedland Clay の有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係を図 9.2.4-14 に示す。なお、Friedland Clay は Na 型ベントナイトであることから、既往の研究[7]で得られている他の Na 型ベントナイトの有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係及び近似式も、比較のため図中に示している。

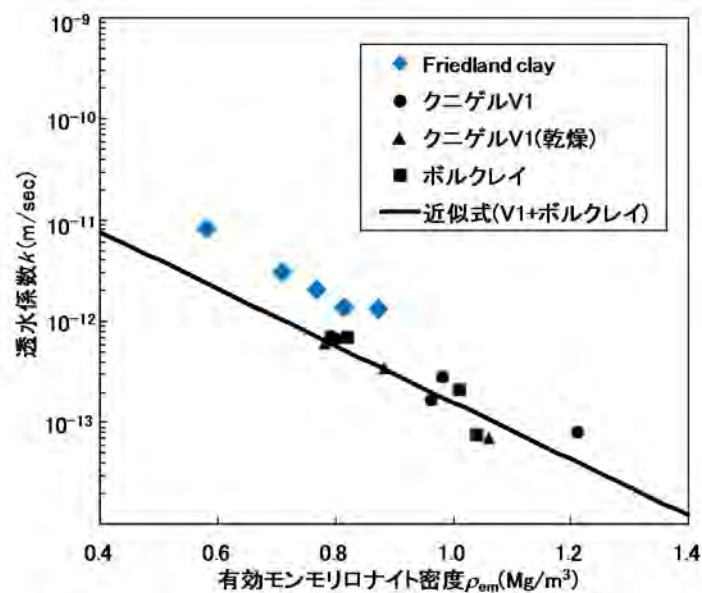


図 9.2.4-14 有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係 ([7]に加筆)

図より、Na型ベントナイトである Friedland Clay と他の Na型ベントナイトを比較すると、Friedland Clay の方が多少高い透水係数を示すものの、有効モンモリロナイト密度と透水係数の関係はおおむね一致することがわかる。この結果から、モンモリロナイトの含有率と交換性陽イオンの種類を把握することで、ベントナイトの産地や種類によらず透水係数を推定することが可能と考えられる。

9.3 湧水環境下における吹付け施工実験

9.3.1 試験概要及び長期計画

本検討では、緩衝材の設計や品質管理、搬送・定置技術、長期性能予測等への反映を行うためには、緩衝材の施工方法により品質自体を向上させて、再冠水時に発生する現象（膨潤挙動、化学変質など）に及ぼす影響を低減させることも必要となる。そこで、本研究では、品質向上（均質で隙間を生じさせない施工）の可能性を有するベントナイト吹付け施工技術に着目し、実際の施工環境を想定した施工能力に関する知見の取得を行う。

既に、既往の研究において吹付け工法で施工した緩衝材の均質性が確認されていることから、本研究では、実際の処分施設で緩衝材を施工する場合を想定して、湧水がある処分孔を模擬した実規模のモールドで吹付け実験を行い、湧水環境下における施工性、および施工品質の確認を行う。なお、本研究では吹付け工法だけでなく、他の緩衝材施工方法についても同様に検討する計画であるが、今年度は吹付け工法に着目して検討を行う。

試験では、先ず、図 9.3.1-1 に示すように、HLW 地層処分の縦置きレイアウトの青線で囲まれた箇所を模擬した実規模大のモールド（図 9.3.1-2 参照）を作製し、それに対して各施工方法を実施する。その際に、モールドの周囲に配置した孔から湧水を模擬した水を流出させる。その際、廃棄体を模擬したヒーターによる熱影響も考慮できるようにする。

緩衝材の施工方法は、これまでの検討を踏まえて吹付け工法として、施工可能な湧水量について検討を行う。

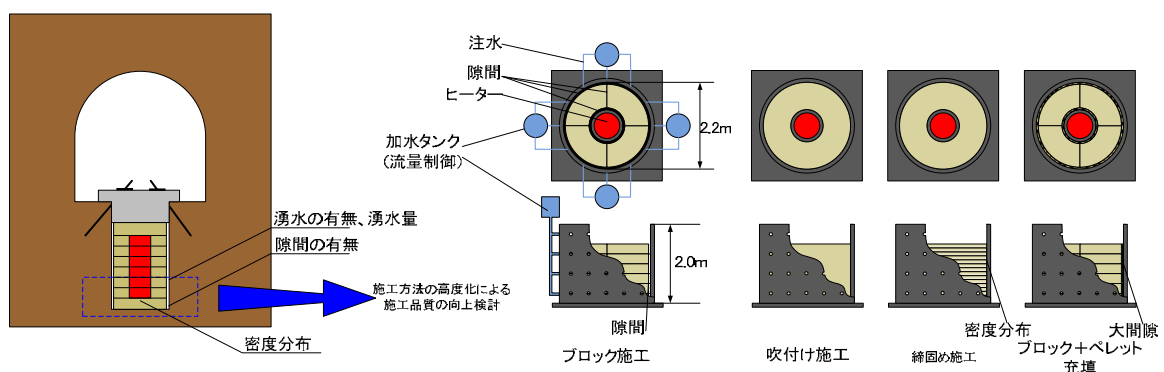


図 9.3.1-1 施工方法の高度化試験イメージ

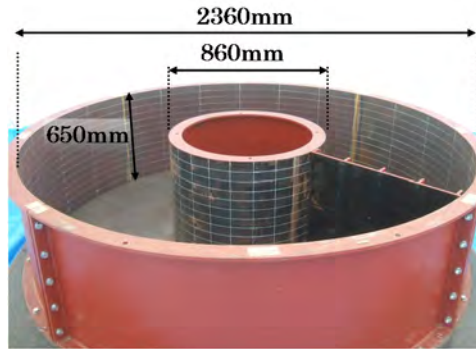


図 9.3.1-2 緩衝材施工試験工学規模リング型土槽

様々な施工方法によって、周囲から湧水が生じている状況で施工確認を行い、施工に対する湧水の影響を取得する。これは、本検討で実施した室内試験のすべての試験ケースにおいて、圧縮成型した緩衝材の供試体を試験機にセットした後に浸潤させる、という手順で湿潤状況の影響を検討してきた。このことは施工が終了し処分施設を閉鎖させるまでは、地下水を低下させ緩衝材が湿潤しないように対策することに相当している。しかしながら、実際の状況を踏まえると、湧水を止めるためにはポンプで地下水を汲み上げて地下水位を低下させる必要があるが、建設作業期間中ずっと排水ポンプを稼働し続けることは現実的ではない。さらに、仮に湧水があった場合にも施工品質上問題がないことを示すデータがないことや、実際にどのくらいの湧水量まで緩衝材の施工が可能なのかは緩衝材の施工方法によって異なることが予想されることなどから、湧水量と施工方法をパラメータにした検討が必要である。さらに、湧水に関しては、その量のみならず組成もパラメータとなり得る。降水系地下水に比べ、海水系地下水では、イオン強度の影響で緩衝材は膨潤しにくくなるため、同じ湧水量でも水みち形成しやすくなる可能性がある。

処分坑道や処分孔の施工手順によっては、廃棄体定置後に緩衝材を施工する可能性もあるため、熱影響もパラメータとなり得る。以上をまとめて、表 9.3.1-1 に試験ケース案を示す。表 9.3.1-1 は、施工時に緩衝材に影響を及ぼすと考えられる要因を幅広く示しているが全てを同時に検討するのではなく、前述の要素規模試験から工学規模試験までの結果を踏まえて、特に重要と考えられる要因について個別にその影響を調べる計画である。

図 9.3.1-3 に試験工程を示す。試験は実規模を計画しており、全体工程の初期に試験準備を行い、引き続き個別の要因を考慮した実規模での検討を実施する計画である。

表 9.3.1-1 緩衝材の施工方法の高度化試験ケース案

ケース	分類	施工方法	ベントナイト 乾燥密度	液種	熱影響	湧水量
工学規模 リング型 土槽		原位置締固め施工 ブロック施工 ブロック+ペレット 施工 吹付け施工	1.6Mg/m ³ (Na型ケイ砂 30wt%混合)	蒸留水 海水系 地下水 など		湧水量としては、 POSIVAの基準値（処分 分孔当たり 0.1 リットル/ min 以下）を参考に する。
HLW 地層 処分	縦置き	原位置締固め施工 ブロック施工 ブロック+ペレット 施工 吹付け施工	1.6Mg/m ³ (Na型ケイ砂 30wt%混合)	蒸留水 海水系 地下水 など	地熱と廃棄体 熱 (30℃~90℃ 程度)	吹付け工法に関しては、 上記の湧水量を最大値 として、湧水量をパラメ トリックに変化させ施工 可能な湧水量の範囲 を決定する。
	横置き					
TRU 廃棄物 地層処 分	堆積岩 系	原位置締固め施工 ブロック施工 ブロック+ペレット 施工 吹付け施工	1.6Mg/m ³ (Na型ケイ砂 30wt%混合)	蒸留水 海水系 地下水 など	地熱と廃棄体 熱 (30℃~90℃ 程度)	堆積岩系と結晶質岩系 で湧水の状態を変化させ る（堆積岩系：面状に 滲出、結晶質岩系：亀裂 から集中的に噴き出す など）
	結晶質 岩系					

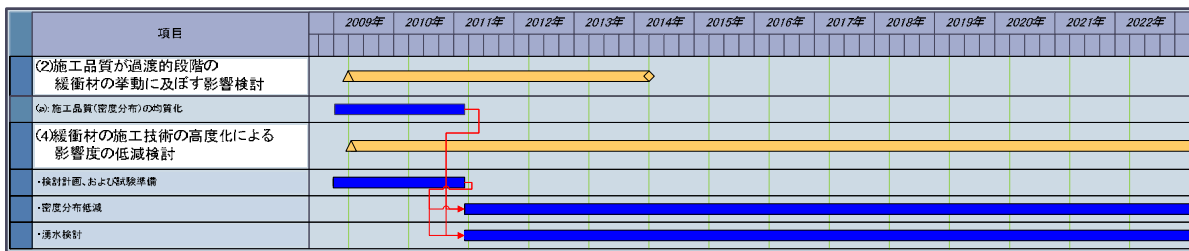


図 9.3.1-3 緩衝材の施工技術の高度化による影響度の低減試験工程

9.3.2 湧水影響評価

(1) 概要

本実験では、先ず、堆積岩と結晶質岩の場合の湧水が緩衝材施工に及ぼす影響について検討を行った。検討は、図 9.3.2-1 に示すように、HLW 地層処分の縦置きレイアウトの青線で囲まれた箇所を模擬した実規模のモールド（外径 2360mm、内径 860mm、高さ 500mm）を 4 分割した領域に対して吹付け施工で緩衝材を施工した。モールドの側面には底面から 50、250、450mm の高さ（上段、中段、下段と称す）に 9 個の孔が周方向に均等に配置（図 9.3.2-2、図 9.3.2-3 参照）されている。また、モールドの底板と側面の間には、約 5mm のクリアランスが設けられている。これは、吹付け中に漏水が発生した場合、ただちに視認できること、また、モールド底面に溜まった湧水をモールド外部に排水することを目的としている。

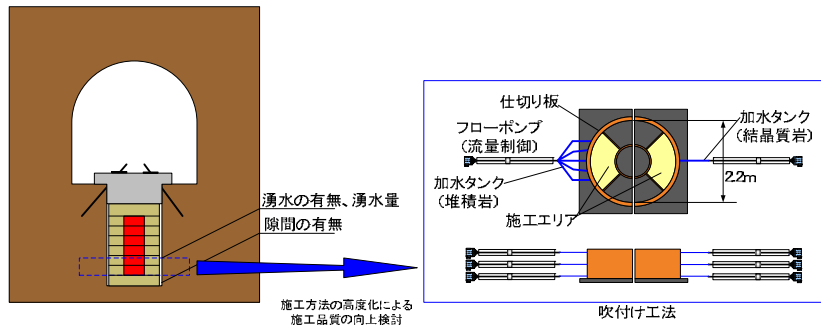


図 9.3.2-1 施工方法の実験イメージ

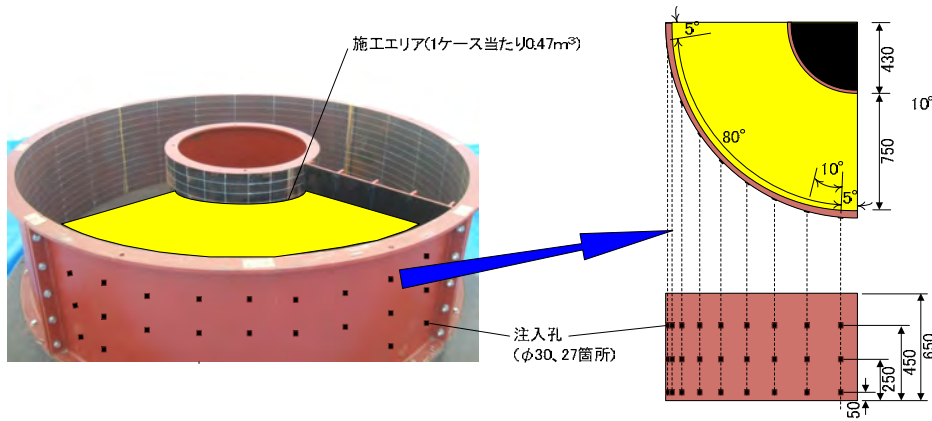
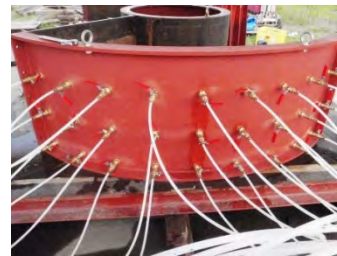


図 9.3.2-2 リング型モールドの諸元



全景



外壁側



内壁側



排水溝

図 9.3.2-3 リング型モールド

湧水環境を模擬するための装置として、フローポンプを図 9.3.2-4 に、ジャンクションタンクを図 9.3.2-5 に、シーケンサとモータドライバ、PC コンピュータで構成された制御機器を図

9.3.2-6 にそれぞれ示す。また、装置の系統図を図 9.3.2-7 に示す。本実験では、水道水をモールド内へ圧送するために 3 台のフローポンプを使用した。各フローポンプは、モールドの 3 高さ方向（上、中、下段）にそれぞれ対応しており、ポンプから圧送した水は、ジャンクションタンクを介して 9 方向に分岐され、モールドに設置された各孔から排水される。この際、流量の制御はシーケンサとモータドライバ×3、計測用 PC を用いて行った。また、各フローポンプの送水圧を計測するために、対応するジャンクションタンクに圧力計を設置した。



図 9.3.2-4 フローポンプ



図 9.3.2-5 ジャンクションパイプ



図 9.3.2-6 制御機器（シーケンサ、モータドライバ、PC）

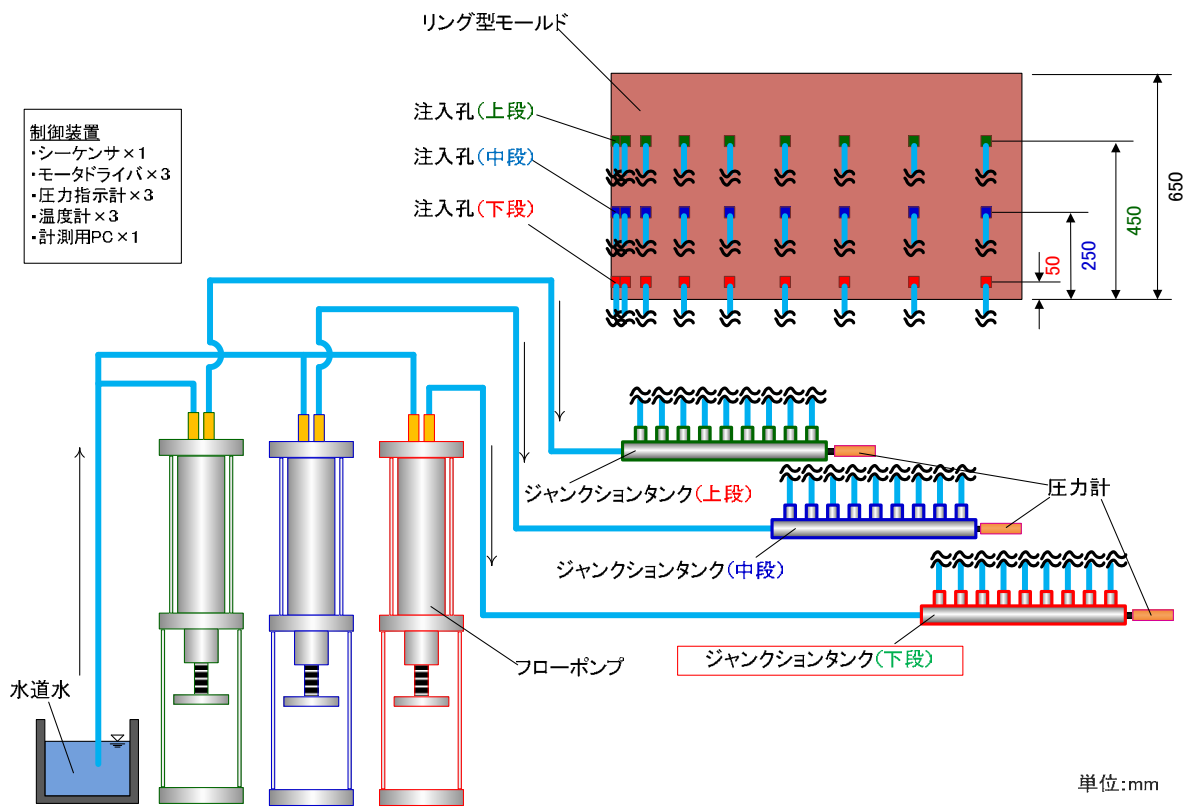


図 9.3.2-7 実験装置系統図 (Case1)

実験ケースを表 9.3.2-1 に示す。実験は、堆積岩を模擬した面状の湧水を想定し、全 27 箇所
の孔から 0.1L/min の湧水を生じさせる Case1 と、結晶質岩を模擬した噴水状の湧水を想定し、3
箇所の孔から 0.1L/min の湧水を生じさせる Case2、Case2 の湧水量を 0.01L/min に変更した
Case3 の全 3 ケースを行った。0.1L/min の湧水量は、POSIVA が 1 本の処分孔当たりの湧水量の
上限値として設定しているものである。

表 9.3.2-1 実験ケース

実験 ケース	岩種	湧水 条件	湧水 箇所	湧水量	備考
Case 1	堆積岩	面状湧水	27 箇所	0.1 L/min (注入孔 1 箇所当たり 0.1/27 L/min) 面状湧水	実施済み
Case 2	結晶質岩	噴水状湧 水	3 箇所	0.1 L/min (注入孔 1 箇所当たり 0.1 /3 L/min) 噴水状湧水	実施済み
Case 3	結晶質岩	噴水状湧 水	3 箇所	0.01 L/min (注入孔 1 箇所当たり 0.1 /3 L/min) 噴水状湧水	実施済み

(2) 吹付け方法

湧水環境下における吹付けでは、構築した施工部に湧水が接触することによる施工部の品質
低下が問題となる。そのため、構築した施工部に湧水が極力接触しないような吹付け方法（主

にノズルワーク)を行う必要がある。本実験で採用した吹付け方法について、Case1 の場合を図 9.3.2-8 に、Case2、3 の場合を図 9.3.2-9 にそれぞれ示す。Case1 における吹付け(図 9.3.2-8 参照)けでは、仕切り壁側から鉛直向きに施工部を構築し、半径方向の孔を閉塞させながら吹付けを行う。これにより、構築した施工部と他の孔から発生する湧水の接触を抑制できる。次に、Case2 では、モールドの底盤から鉛直上方向に吹付けを行う。この際、吹付け圧を利用して、未閉塞孔からの湧水を吹き飛ばし、構築した施工部への接触を避ける。

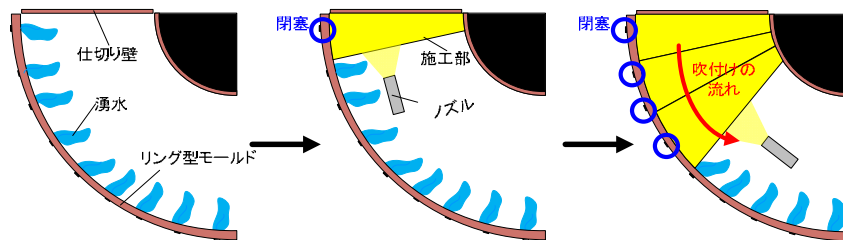


図 9.3.2-8 Case1 の吹付け方法 (平面図)

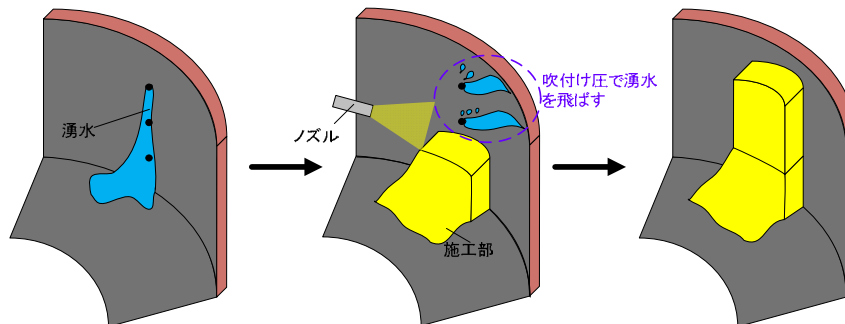


図 9.3.2-9 Case2 の吹付け方法

(3) 検討項目

本実験では、湧水環境下における吹付け施工の施工性、および施工品質の確認を目的としている。具体的な確認事項として、施工性に関しては下記を検討した。

- ・ 湧水環境下における吹付け施工の適用性の可否
- ・ 吹付け施工中における湧水圧力(送水圧)の変化

また、施工品質の確認では、吹付け終了後に施工部のブロックサンプルを行い、乾燥密度の深度分布および径方向分布を調べた。なお、乾燥密度は、アルキメデスの原理を利用したシリコンオイル比重法で計測した。図 9.3.2-10 にサンプリングの位置を示す。Case1 では、径方向に 7 箇所 (A~D)、各箇所の深度方向 3 点 (1~3) の全 21 箇所、Case2、3 においては径方向に 1 箇所 (H または I)、深度方向 3 点 (1~3) の各 3 箇所サンプリングおよび密度計測を行った。

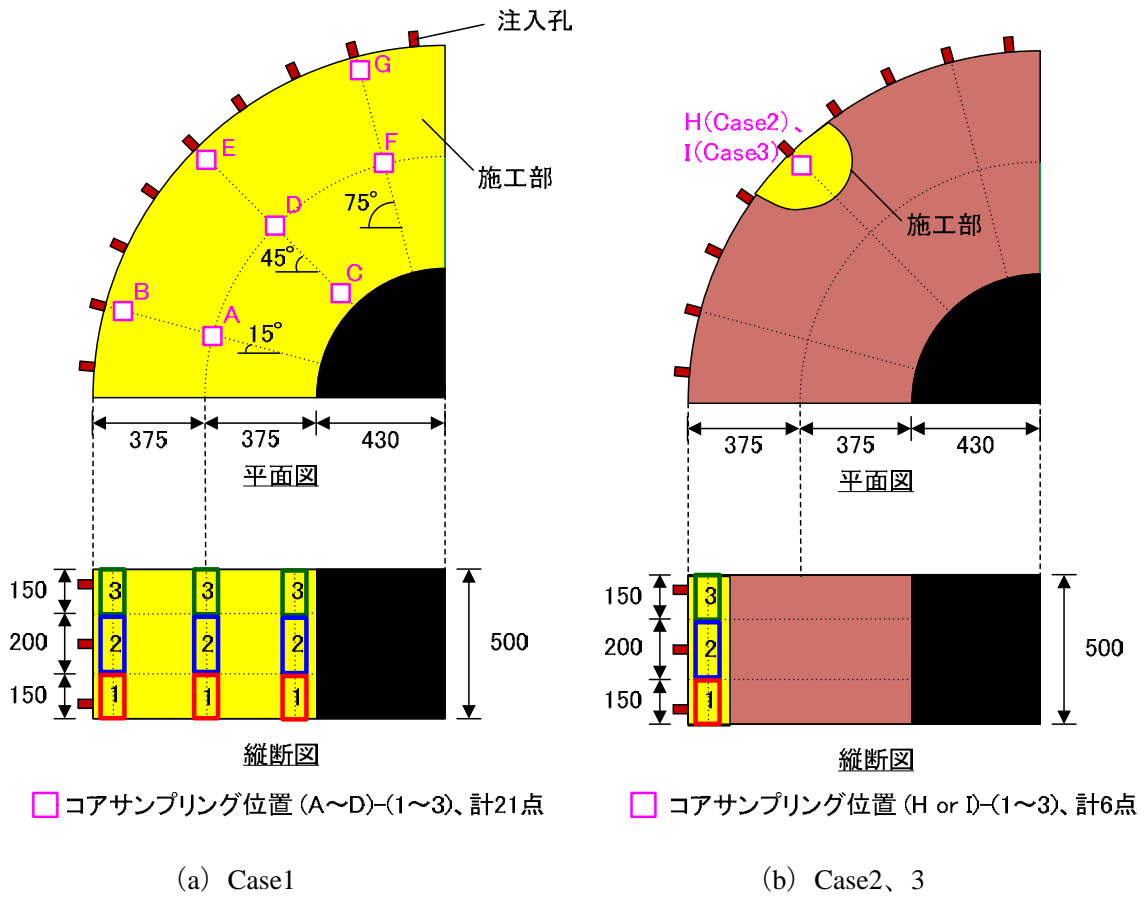


図 9.3.2-10 ブロックサンプル箇所

(4) 実験結果

1) Case1

Case1における吹付けでは、堆積岩を模擬した面状の湧水環境を想定し、全 27 箇所 の孔から 0.1L/min の湧水を生じさせた。吹付け前の様子と吹付け後の施工部を図 9.3.2-11、図 9.3.2-12 に示す。図 9.3.2-12 から、堆積岩を模擬した面状の湧水環境においても、吹付け施工によって、ベントナイト系人工バリアが構築可能であることが確認できた。



図 9.3.2-11 吹付け前の様子 (Case1)



図 9.3.2-12 吹付け後の施工部 (Case1)

図 9.3.2-13 に吹付け開始からの経過時間－送水圧－湧水流量の関係を示す。図中の送水圧は、合計湧水量が 0.1L/min.を満足した時点として 0kPa としている。また、赤、青、黄色で示した数値は、リング型モールドの湧水孔の箇所（図 9.3.2-14 参照）であり、吹付け施工中に各孔が閉塞したタイミングを矢印で示している。図 9.3.2-13 から、各段のフローポンプの送水圧は、吹付け最中にピーク値を示すものの、吹付け終了後には 0kPa 程度に低下している。このため、全ての湧水孔を完全に閉塞できていないことが考えられる。そこで、吹付け終了後にリング型モールドの周囲を確認したところ、図 9.3.2-15 や図 9.3.2-16 に示すようなリング型モールドの側壁と底盤および仕切り壁のクリアランスからの漏水を確認した。これらのクリアランスは、モールドの組立てに起因するものや、湧水の排水機能を目的として生じた本実験特有の境界条件であるため、今回の結果をそのまま実施工に反映することは適切ではなく、実施工の境界条件をより忠実に再現した条件下での吹付け施工を行う必要がある。

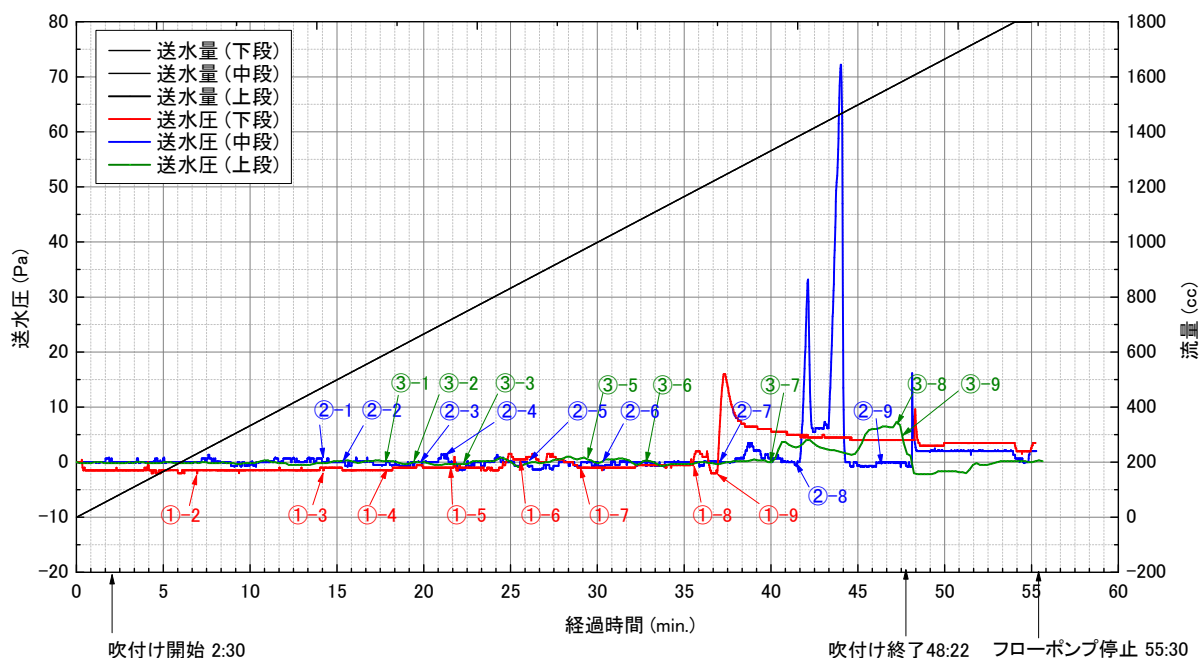


図 9.3.2-13 経過時間－送水圧－流量関係 (Case1)

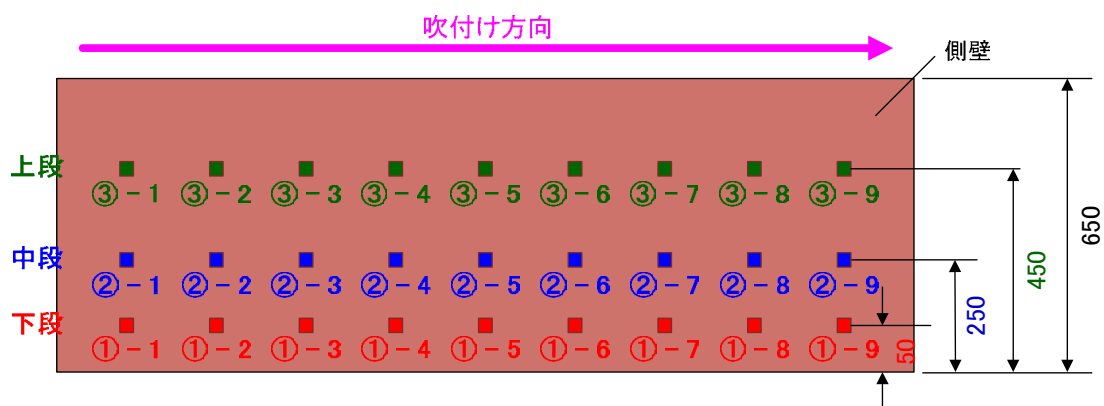


図 9.3.2-14 リング型モールドの湧水孔

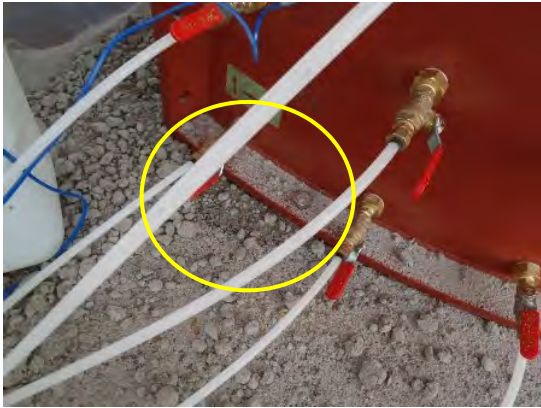


図 9.3.2-15 側壁と底盤の間からの水漏れ

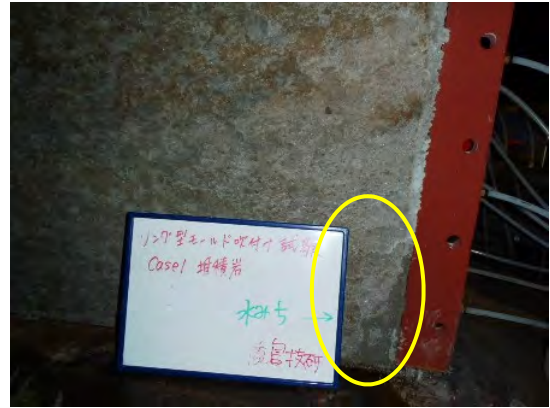


図 9.3.2-16 仕切り壁と側壁の間からの水漏れ

図 9.3.2-17 に施工部の密度分布を示す。図は、各湧水孔高さ ($h=50、250、450\text{mm}$) における施工部の密度分布を平面図で示している。各段の結果から、モールド中心から半径方向へ向かって密度が小さくなることがわかる。特に、下段における密度の変化は大きく、モールド中心付近の密度は 1.7Mg/m^3 程度であるのに対して、側壁付近では 1.6Mg/m^3 弱の箇所が存在している。このことは、吹付け中に湧水が完全に止水されず、施工部を侵食し続けた結果と考える。

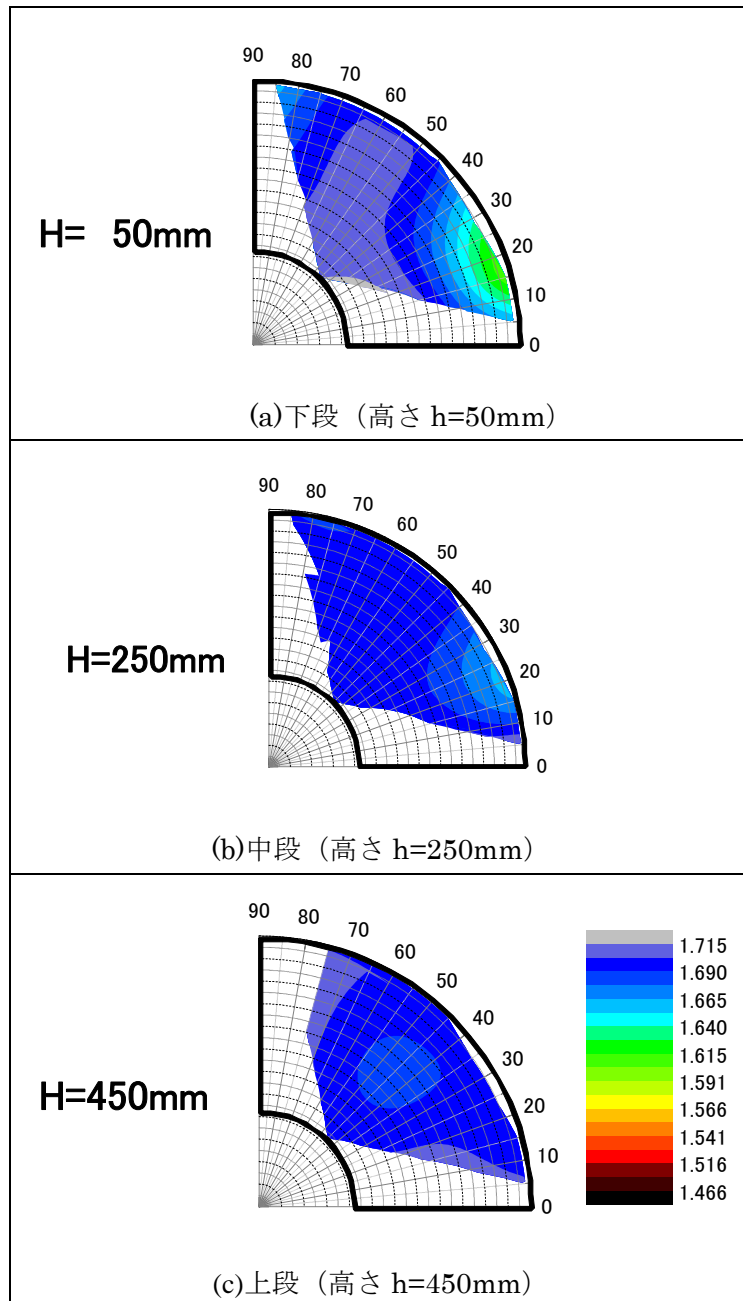


図 9.3.2-17 密度分布図 (Case1、平面図)

2) Case2

Case2 では、結晶質岩を模擬した噴水状の湧水環境を想定し、全 3 箇所 の孔から 0.1L/min の湧水を生じさせた。吹付け前の様子と吹付け後の施工部を図 9.3.2-18、図 9.3.2-19 に示す。図 9.3.2-19 から、結晶質を模擬した噴水状の湧水環境においても、Case1 の堆積岩の場合と同様、吹付け施工によって、ベントナイト系人工バリアが構築可能であることが確認できた。



図 9.3.2-18 吹付け前の様子 (Case2)



図 9.3.2-19 吹付け後の施工部 (Case2)

図 9.3.2-20 に吹付け開始からの経過時間—送水圧—湧水流量の関係を示す。図から、中段と下段のフローポンプの送水圧は、2.7分経過時にピーク値を示すものの、吹付け終了後には0kPa程度に低下していることから、Case1と同様、湧水孔を完全に閉塞できていないことが考えられる。

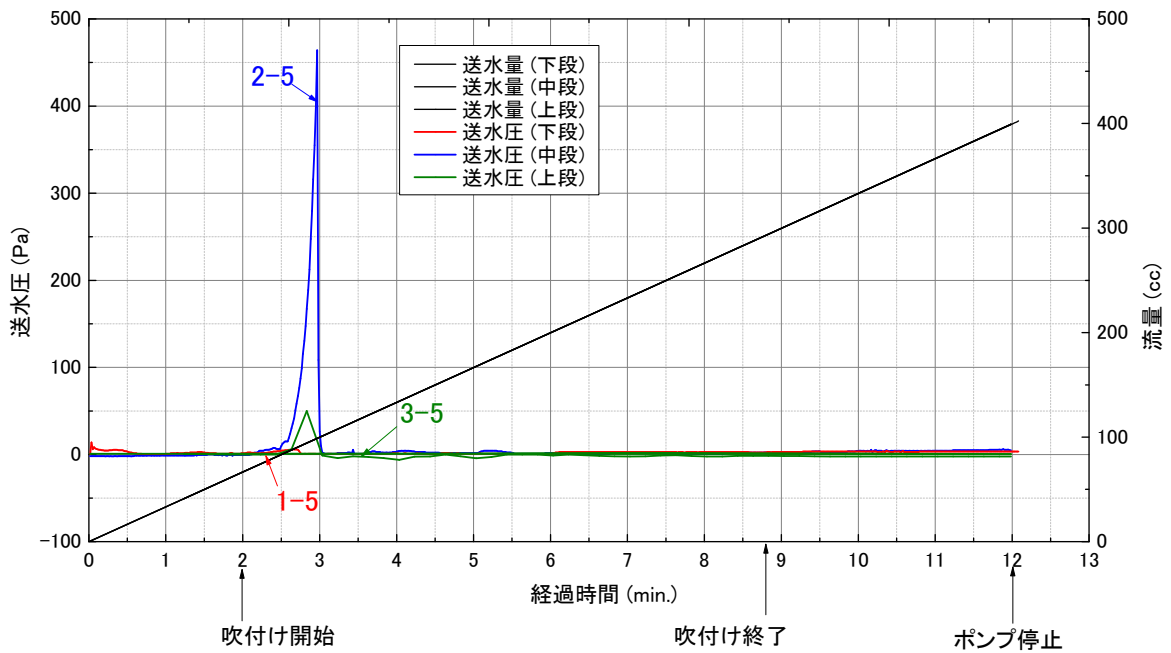


図 9.3.2-20 経過時間—送水圧—流量関係 (Case2)

図 9.3.2-21 に施工部の密度分布を示す。図は、施工部の高さ $h=50\sim 450\text{mm}$ までの密度分布を側面図で示している。図から、施工部の密度は $1.670\sim 1.680\text{ Mg/m}^3$ 程度でほぼ均一に分布していることがわかる。次に、密度サンプル時における各ブロックの界面付近 (図 9.3.2-22 参照) を観察すると、中段の孔からの湧水が止水されておらず、施工部上に湧水の流れた経路が確認できる。

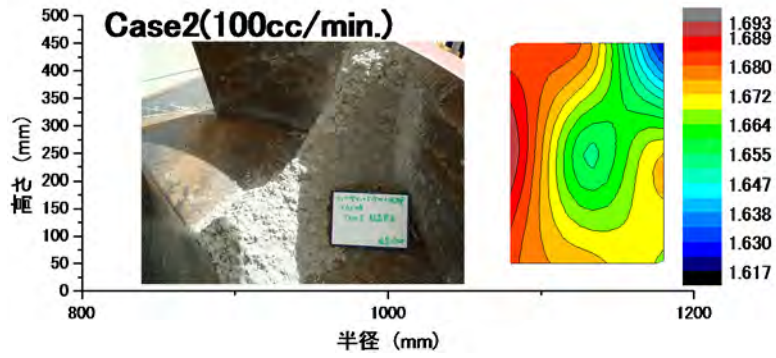


図 9.3.2-21 密度分布図 (Case2、側面図)

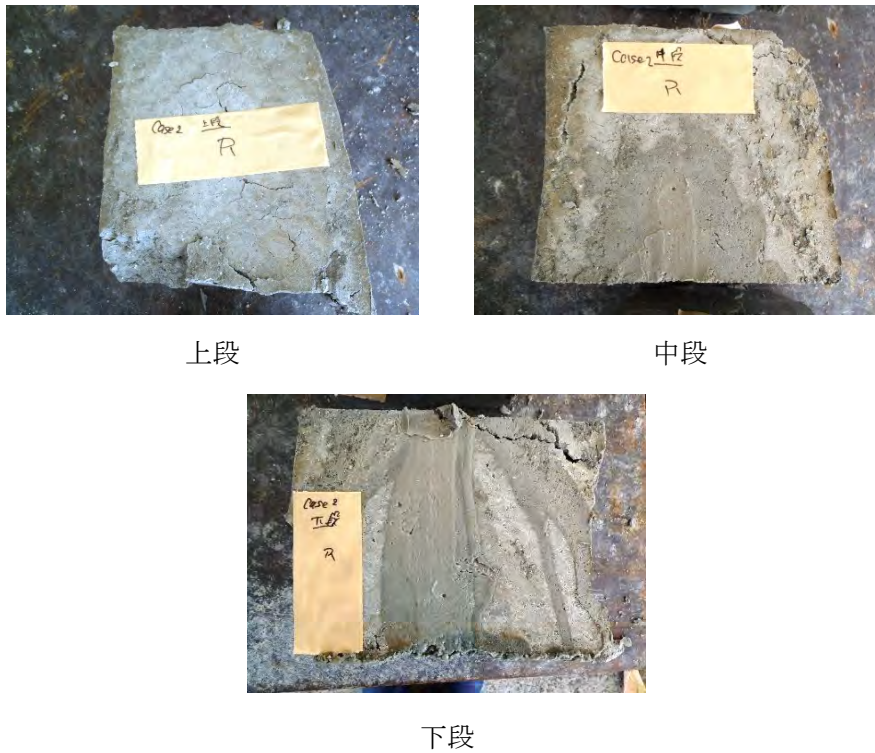


図 9.3.2-22 各段における施工部の側壁との界面部 (case2、モールド中心からの距離 1180mm)

3) Case3

Case2 において、湧水の止水が確認できなかったことから、Case3 では、湧水量を Case2 の 0.1 L/min から 0.01L/min に変更して吹付けを行った。吹付け前の様子と吹付け後の施工部を図 9.3.2-23、図 9.3.2-24 に示す。



図 9.3.2-23 吹付け前の様子 (Case3)



図 9.3.2-24 吹付け後の施工部 (Case3)

図 9.3.2-25 に吹付け開始からの経過時間—送水圧—湧水流量の関係を示す。図から、Case1、2 と同様、Case3 においても、吹付け終了後には送水圧が 0kPa 程度に低下していることから、湧水孔を完全に閉塞できていないことが考えられる。

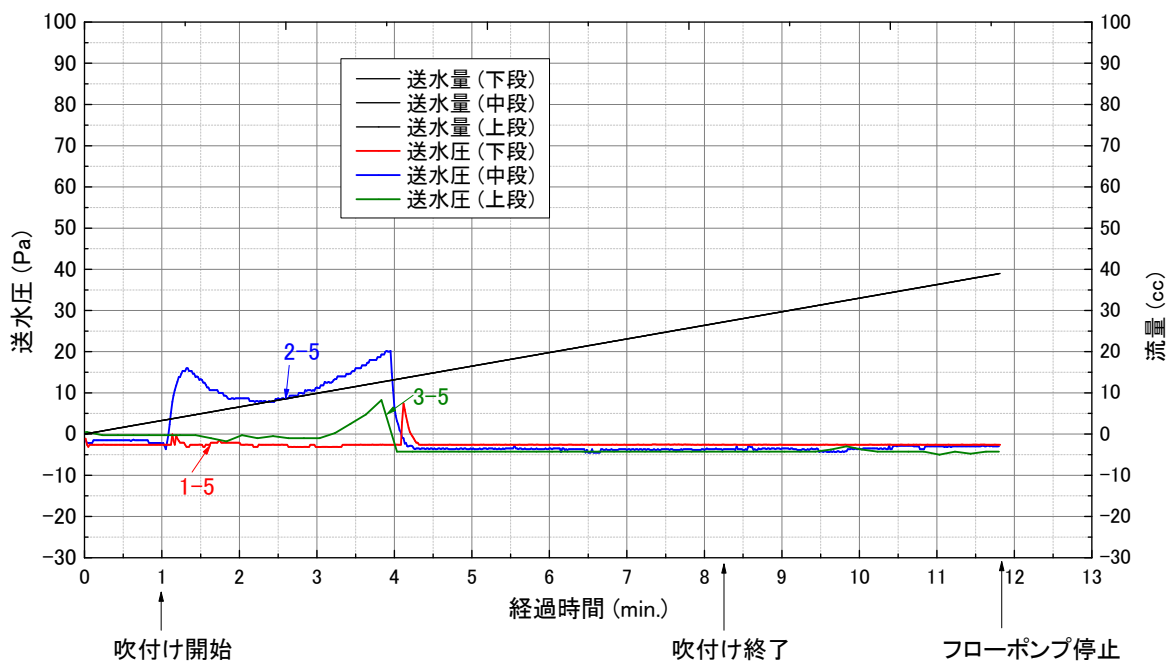


図 9.3.2-25 経過時間—送水圧—流量関係 (Case3)

図 9.3.2-26 に施工部の密度分布を示す。図は、施工部の高さ $h=50\sim 450\text{mm}$ までの密度分布を側面図で示している。図から、Case2 と同様、Case3 における施工部の密度は $1.660\sim 1.680\text{Mg/m}^3$ であり、ほぼ均一に分布していることがわかる。密度サンプル時における各ブロックの界面 (図 9.3.2-27 参照) を観察すると、下段の湧水孔からの湧水の流れが確認されたが、その量は Case2 より少ないことがわかる。

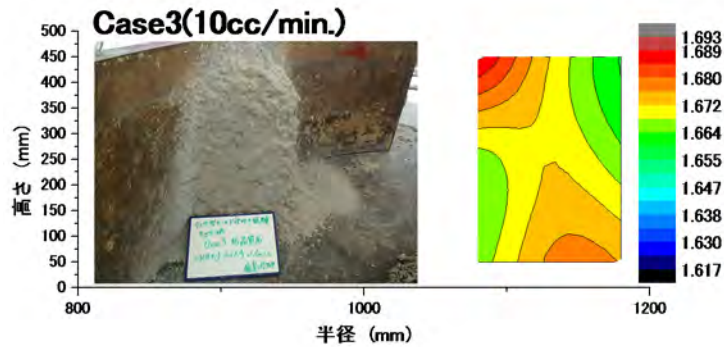


図 9.3.2-26 密度分布図 (Case2、側面図)

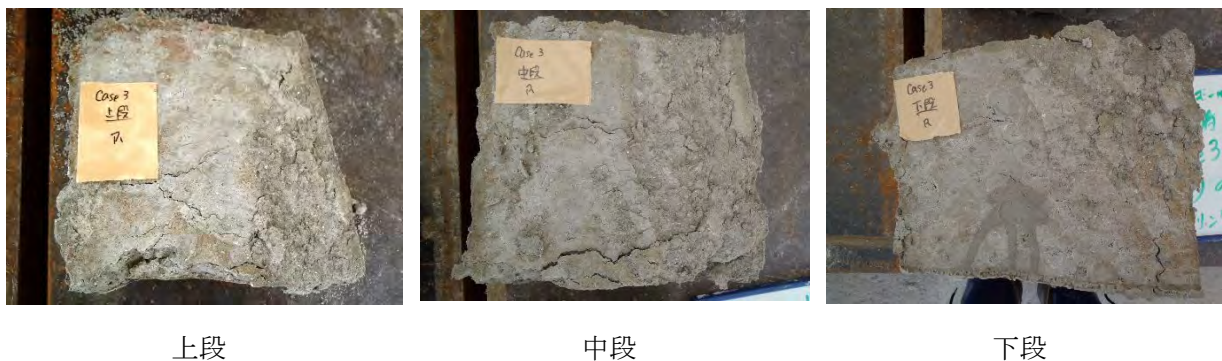


図 9.3.2-27 各段における施工部の側壁との界面部 (Case3、モールド中心からの距離 1180mm)

9.3.3 人工給水効果の検証

(1) 概要

要素規模試験において述べたように、緩衝材のパイピング・エロージョン現象は長期的には処分場の性能を劣化させる可能性があり、その対策の検討は重要である。前述の湧水影響評価試験では、0.1L/min 程度の湧水がある環境では、緩衝材の吹付け施工は可能であるものの、吹付け施工によって止水することは難しいという結果となった。このことは、施工時から緩衝材に水みちが形成され、施工後から閉鎖までの更なる湧水によって緩衝材が膨潤してもパイピング・エロージョン現象が解消されない可能性が高いことを意味する。

一方、SKB 社では、その横置き処分概念である KBS-3H において、湧水がある処分坑道においては、湧水箇所にはベントナイト系材料である Filling ブロックを設置して、その両側を Distance ブロックなどで閉鎖させることで処分坑道内の緩衝材の流出を防ぐ検討を実施している。さらに、緩衝材をコンパートメントプラグで仕切り、その区間に給水して人為的に膨潤させて拡散場を作り、閉鎖後の緩衝材の流出を防ぐという対策（人工給水）も検討されている。

そこで本試験では、0.1L/min 程度の湧水がある環境で緩衝材の吹付け施工を行った後に、一旦、体積拘束した状態で給水し緩衝材を十分に膨潤させ、再度、体積拘束を解除した状態で湧水を発生させることによって、緩衝材の膨潤がパイピング・エロージョン現象の抑制効果について調べた。

(2) 検討フロー

本試験の検討フローを図 9.3.3-1 に示す。まず、前述の湧水影響評価試験と同様な実規模緩衝材の 1/4 分割したリングモールドに人工的に湧水を発生させ、湧水がある状態で緩衝材を施工した (STEP1)。次に、モールドの上蓋を設置して緩衝材を体積拘束条件下にした状態で給水し、十分に膨潤させる (STEP2)。この際、浸潤・膨潤状況は、アクリル製の上蓋越しに目視観察できる。最後に、再度、上蓋を外し、給水圧を増加させ、破過圧を計測する (STEP3)。破過が確認されたら、その時点の供試体の状況に応じて、エロージョン試験や浸潤状況の確認のための解体を行う。

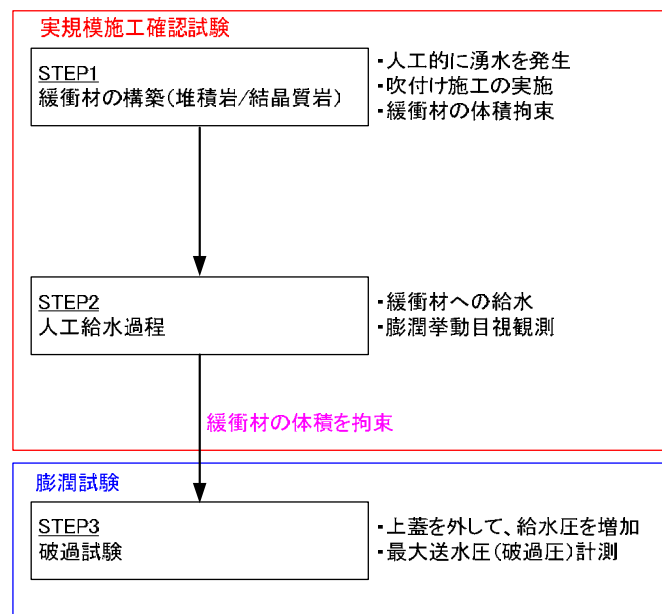


図 9.3.3-1 検討のフロー

(3) 実験条件

実験ケースを表 9.3.3-1 に示す。実験は、平成 24 年度の研究に倣い、堆積岩を模擬した面状の湧水を想定し、全 27 箇所から 0.1ℓ/min の湧水を生じさせる Case1 と、結晶室岩を模擬した噴水状の湧水を想定し、3 箇所から 0.1ℓ/min の湧水を生じさせる Case2 の計 2 ケースを行った。

表 9.3.3-1 実験ケース

試験ケース	使用材料	目標乾燥密度	岩種	湧水量	確認項目	備考
Case1	ケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイト	1.6Mg/m ³ 程度	堆積岩	流量一定条件 処分孔(27 箇所)当たり 0.1ℓ/min 面状湧水	施工性 施工品質 止水性	新規
Case2			結晶質岩	流量一定条件 処分孔(3 箇所)当たり 0.1ℓ/min 面状湧水		新規

吹付けに使用する材料は、Na 型ベントナイト (クミニネ工業産クニゲル V1) に珪砂 (三河珪砂 V3 号とアルバニー珪砂 5 号を質量割合 1:1 で混合) を質量割合 7:3 で混合した珪砂混じり

ベントナイトである。この吹付け材料は、アイリッヒミキサー（アイリッヒ社製 DEV22、容量 2250ℓ）を用いた水添加混合方式によって、仕上がり含水比が $w=20\pm 2\%$ の範囲に収まるように作製した。このアイリッヒミキサーは、回転する容器（パン）に対して、逆方向に回転するアジテータと上下方向の混合に特化した機能を持つ鋤型の回転ブレード（スター）によって、材料への高い剪断力と複雑な流れおよび速度差を発生させ、緻密かつ均一な混合を可能とする造粒機である。

本実験では、図 9.3.3-2 に示す HLW 地層処分の縦置きレイアウトを模擬した実規模のモールド（外径 2360mm、内径 860mm、高さ 500mm）を 4 分割した領域に対して、吹付け施工で緩衝材を施工した。このモールドの側面には、平成 24 年度と同様、底板から 50、250、450mm の高さ（上段、中段、下段と称す）に 9 個の孔が周方向に均等に配置されている。モールドの底板と側面は剛結されており（図 9.3.3-3 参照）、吹付けの進捗に伴って、仕切り板を設置した（図 9.3.3-4 参照）。また、吹付け終了後には、モールドの上面に緩衝材を目視で確認するための透明アクリル製の蓋と緩衝材の膨潤圧に十分耐える強度を持った鋼製蓋を取り付けて緩衝材の体積を拘束した。

実規模モールドの諸元を図 9.3.3-5、図 9.3.3-6、図 9.3.3-7、図 9.3.3-8 にそれぞれ示す。



図 9.3.3-2 実規模 1/4 リングモールド外観



図 9.3.3-3 底板と側壁の剛結箇所

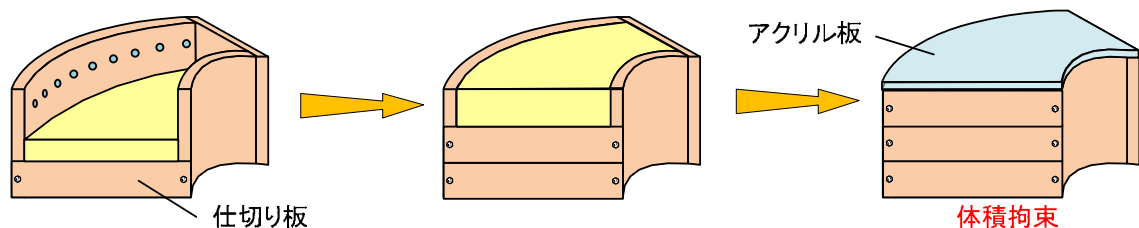


図 9.3.3-4 実規模 1/4 リングモールド組立順序

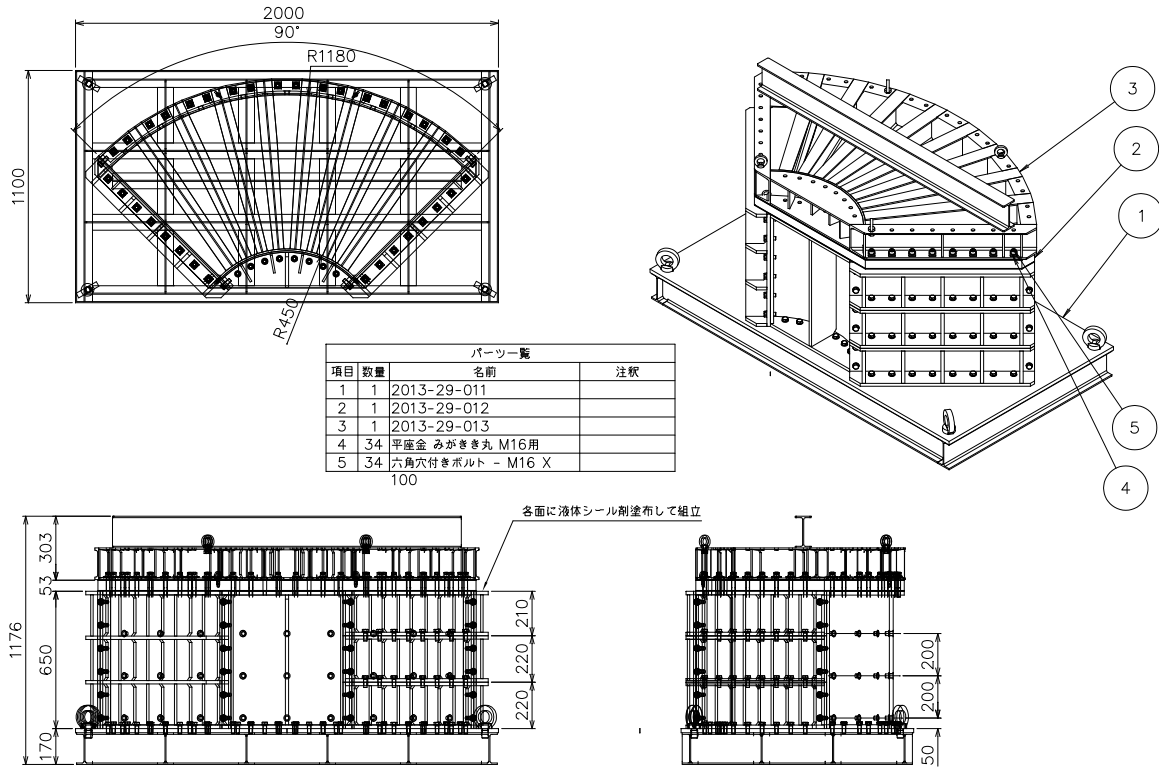


図 9.3.3-5 実規模 1/4 リングモールドの諸元 (側壁・底盤部)

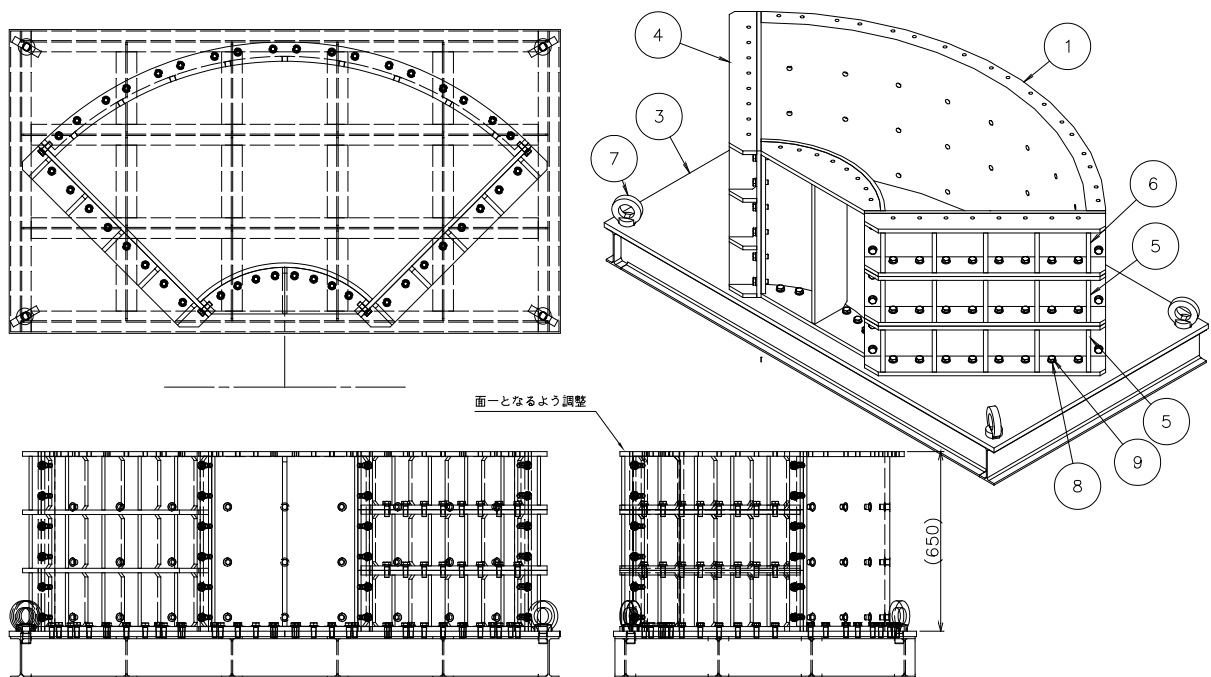


図 9.3.3-6 実規模 1/4 リングモールドの諸元 (側壁・底盤部)

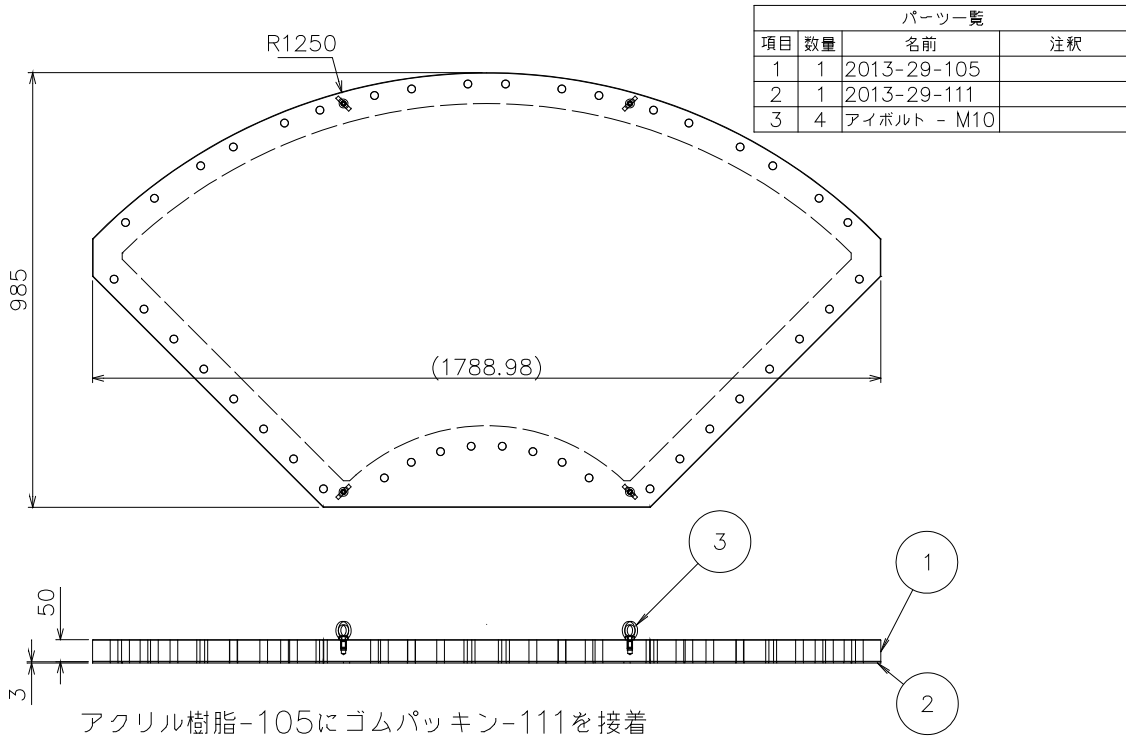


図 9.3.3-7 実規模 1/4 リングモールドの諸元 (アクリル蓋)

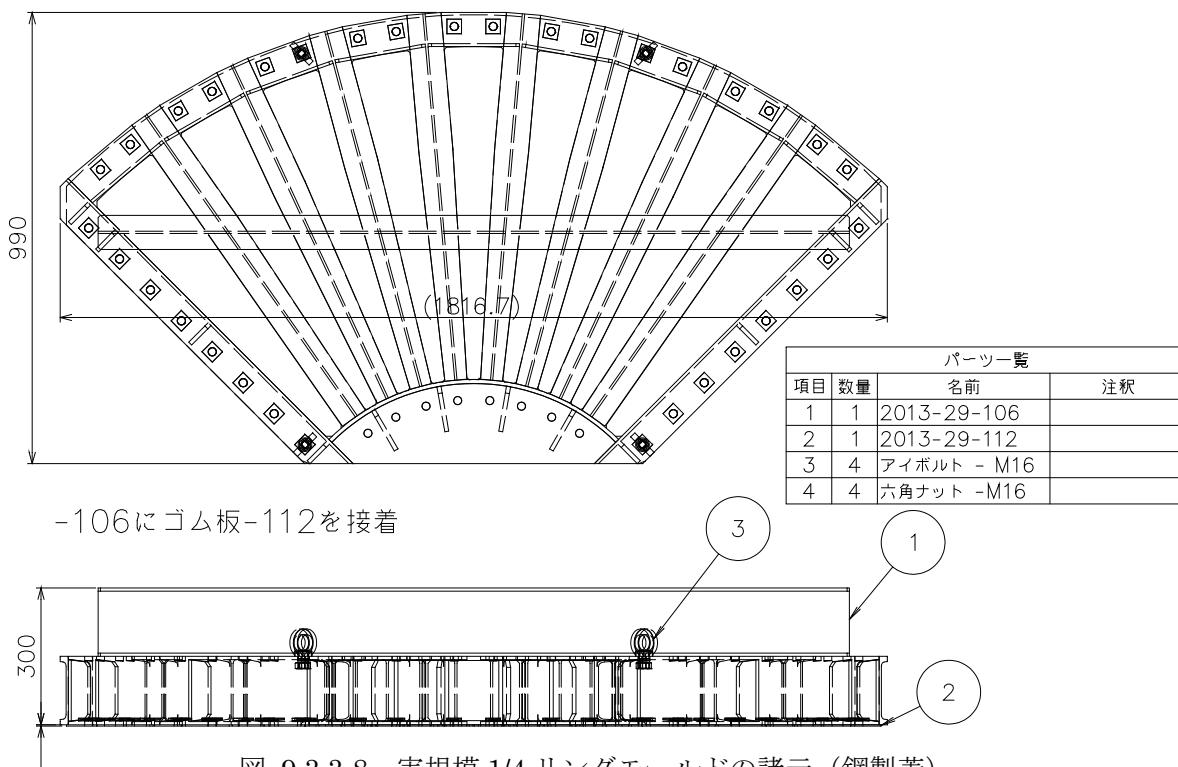


図 9.3.3-8 実規模 1/4 リングモールドの諸元 (鋼製蓋)

実規模 1/4 リングモールドは、金属面と金属面のシールおよび金属面とゴム板やアクリル蓋のシールによって止水する構造になっているが、これらの接触面は直交する箇所が多く、Oリング等によるシールが期待できない恐れがあることに加え、緩衝材の吹付け施工後から上蓋を

設置して体積拘束条件を整える間、湧水を一時的に止めているため、なるべく早期にシーリング材を性能を発揮させる必要があったため、図 9.3.3-9、図 9.3.3-10 に示す液状ガスケット (ThreeBond 1121) をシーリング材として使用した。表 9.3.3-2 に液状ガスケットの諸元を示す。この液状ガスケットは、シリコンコーキング等の一般止水材よりも耐圧性が高く、非硬化性で変形に対する追従性に優れており、温度変化に対してシーリング性が低下し難いことが特徴である。



図 9.3.3-9 液状ガスケット



図 9.3.3-10 塗布の様子

表 9.3.3-2 液状ガスケットの諸元

主成分	変性エステル系樹脂	
外観	ペースト状	目視
色相	灰色	目視
粘度	300000 mPa・s	25℃・BH 粘度計
比重	1.45	25℃・比重カップ
引火点	203℃	
腐食性	なし	
溶剤	無溶剤	
耐圧性	90kgf/cm ²	室温
	70kgf/cm ²	80℃

湧水環境を模擬するための装置は平成 24 年度と同様、フローポンプ (図 9.3.3-11 参照) とジャンクションパイプ (図 9.3.3-12 参照)、制御機器 (シーケンサとモータドライバ、PC コンピュータで構成。図 9.3.3-13 参照) を用いた。装置の系統図 (Case1 の場合) を図 9.3.3-14 に示す。平成 25 年度の実験では、平成 24 年度の仕様 (図 9.3.2-7 参照) とは異なり、3 本のジャンクションパイプを連結した。これによって、フローポンプとモールド側壁の上・中・下段に設置された各湧水孔との水頭差に変化が生じ、各段における湧水孔からの流量が必ずしも同一にならない (全体流量は一定) 恐れがあるが、この流量の違いは無視してよい程小さい

め、本実験ではこの影響に関する検討は省略した。

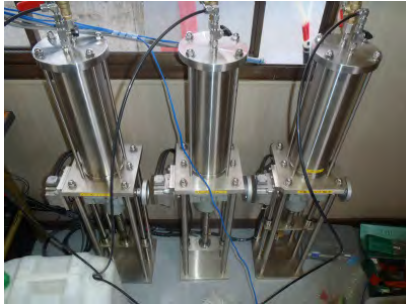


図 9.3.3-11 フローポンプ



図 9.3.3-12 ジャンクションパイプ



図 9.3.3-13 制御機器（シーケンサ、モータドライバ、PC）

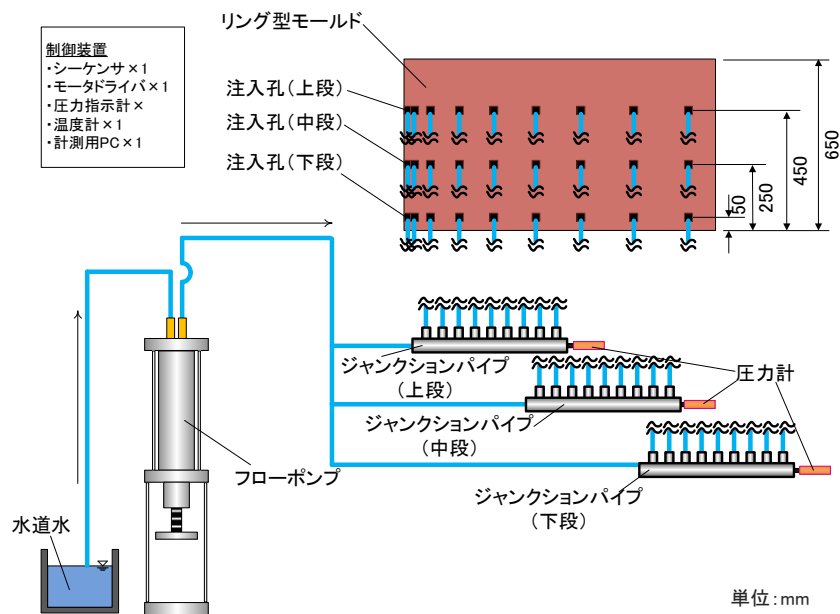


図 9.3.3-14 実験装置系統図（Case1 の場合）

(4) 吹付け方法

湧水環境下における吹付け方法に関しては、前述の湧水影響評価試験と同じ方法(図 9.3.3-15)を採用した。この吹付け方法は、仕切り壁側から鉛直縦向きに施工部を構築し、半径方向の孔を閉塞させながら吹付けを行うものである。これにより、構築した施工部と他の孔から発生す

る湧水の接触を極力減らすことが可能であり、緩衝材の品質低下を抑制できる。

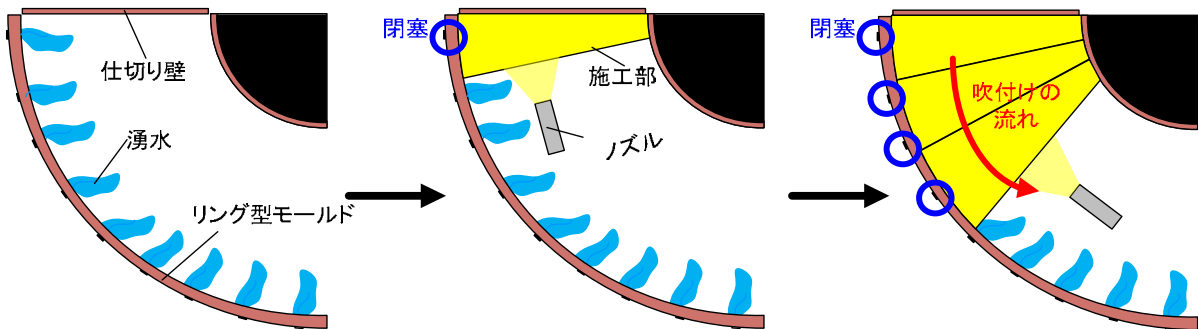


図 9.3.3-15 吹付け方法（平面図、図 9.3.2-8 を再掲）

(5) 実験結果【STEP1】

岩種を堆積岩とした Case1 における経過時間—送水量—流量の関係と各イベントの状況を図 9.3.3-16 と表 9.3.3-3 に示す。

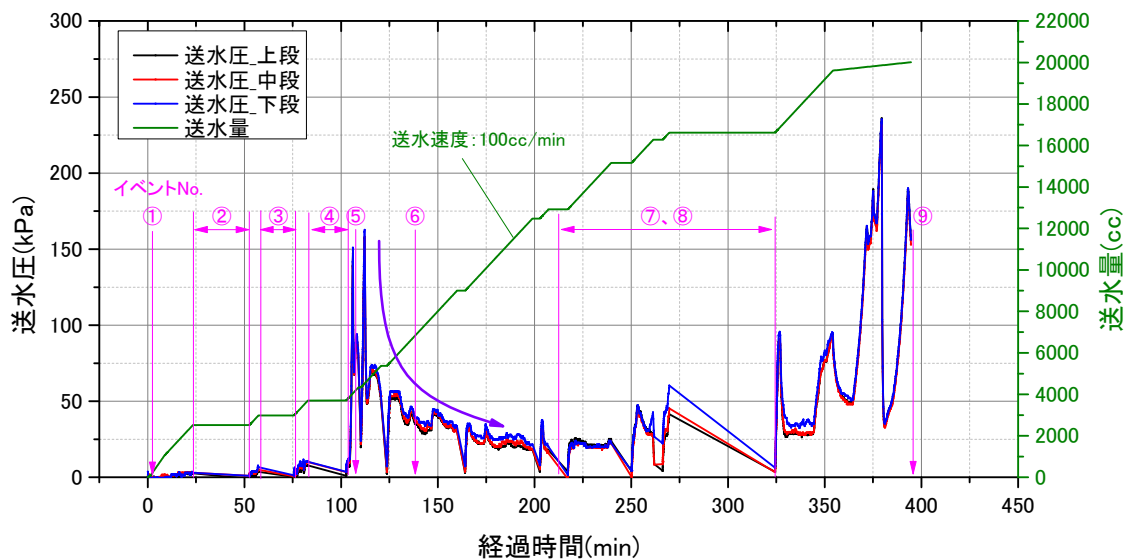


図 9.3.3-16 経過時間—送水量—流量関係【Case1 堆積岩】

図 9.3.3-16 から、吹付け開始から約 100 分経過後（吹付け終了時。表 9.3.3-3 の⑤参照）において、送水圧が 150kPa 程度まで急激に上昇し、その後、25kPa 程度まで緩やかに低下した（図 9.3.3-16 紫矢印参照）。この時の緩衝材の状態を観察すると、モールド側壁付近の緩衝材天端部からの漏水が確認された（表 9.3.3-3 の⑥参照）。この漏水箇所は、緩衝材の最終吹付け部であった。本試験では、湧水を模擬したノズルは全て連結されており、試験初期には 1 つのノズルから 0.1/27 l/min しか湧水は発生しないが、最後の 1 つのノズルが吹付けによって閉塞する際には、そのノズルからは 0.1 l/min の湧水が発生しているものと考えられる。そのため、最終吹付け部の緩衝材は他の部位に比べ含水比が高く、密度が低くなっていることが予想される。これにより、最終吹付け部において水みちが発生したものと考えられる。

これらの結果から、本試験においても湧水影響評価試験と同様に、吹付け施工は可能である

が、施工中の止水は困難であった。

吹付け終了後には、緩衝材の上端面を整形し、亚克力蓋と鋼製蓋を設置することによって緩衝材の体積を拘束した。その後、送水圧が 200kPa 程度まで上昇したことを確認し、Case1 の実規模吹付け試験を終了した。

表 9.3.3-3 各イベントの状況【Case1 堆積岩】

① 吹付け開始	② 側壁1段目設置(吹付け、送水停止)	③ 側壁2段目設置(吹付け、送水停止)
		
④ 側壁3段目設置(吹付け、送水停止)	⑤ 吹付け完了	⑥ 水みちの確認
		
⑦ 上端面の整形	⑧ 上蓋の設置	⑨ 送水開始、送水圧上昇の確認
		

岩種を結晶質岩とした Case2 の場合を図 9.3.3-17 と表 9.3.3-4 にそれぞれ示す。図 9.3.3-17 から、吹付け開始から約 55 分経過後（2 段目の側壁設置時。表 9.3.3-4 の③参照）において、送水圧が 275kPa 程度を示した後、25kPa 程度まで低下した（図 9.3.3-17 紫矢印参照）。この時の緩衝材の状態を観察すると、3 本の送水ノズル直上付近の緩衝材天端部から漏水が確認された（表 9.3.3-4 の⑥参照）。このことから、湧水影響評価試験と同様、湧水環境下において吹付け施工は可能であるが、施工中の止水は困難であることを再確認した。

吹付け施工終了後には、緩衝材の上端面を整形し、モールドの上蓋を設置することによって緩衝材の体積を拘束した。その後、送水圧が 200kPa 程度まで上昇したことを確認し、Case2 の実規模吹付け試験を終了した。

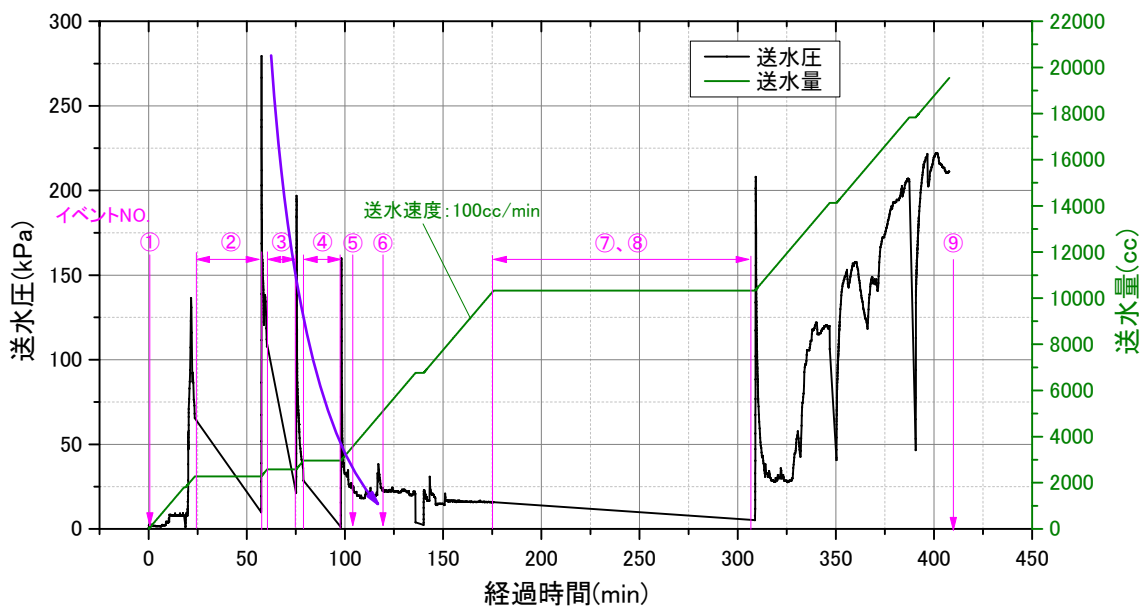


図 9.3.3-17 経過時間—送水量—流量関係【Case2 結晶質岩】

表 9.3.3-4 各イベントの状況【Case2 結晶質岩】










① 吹付け開始	② 側壁 1 段目設置 (吹付け、送水停止)	③ 側壁 2 段目設置 (吹付け、送水停止)
		
④ 側壁 3 段目設置 (吹付け、送水停止)	⑤ 吹付け完了	⑥ 水みちの確認
		
⑦ 上端面の整形	⑧ 上蓋の設置	⑨ 送水開始、送水圧上昇の確認
		 緩衝材の天端と上蓋間 における湧水の移動状況

表 9.3.3-5 と図 9.3.3-18 に、緩衝材の密度試験結果を示す。乾燥密度の測定は、シリコンオイル比重法を用いて、吹付け施工前と各 Case 施工時の計 3 回実施した。図 9.3.3-18 から、乾燥密度は 1.620~1.670Mg/m³ の範囲に収まっていることがわかる。湧水影響評価試験において吹付け施工によって構築した緩衝材の密度がほとんど均一であったことに鑑みると、本試験においても、緩衝材は目標乾燥密度 1.600Mg/m³ 程度で均質に施工できていると考えられる。

表 9.3.3-5 シリコンオイル比重法による測定結果

測定場所	供試体の質量 g	供試体の質量 (浸油後) g	供試体の体積			含水比				湿潤密度 [g/cm ³]	乾燥密度 [g/cm ³]			
			シリコンオイルにおける供試体の見掛けの質量 g	温度Tにおけるシリコンオイルの密度 (20CS) g/cm ³	体積 cm ³	w			ma g		mb g	mc g	g/cm ³	g/cm ³
						%	ma	mb						
—	g	g	g	g/cm ³	cm ³	%	g	g	g	g/cm ³	g/cm ³	g/cm ³		
試験吹き	115.636	116.086	60.490	0.9645	57.6	20.2	20.6	192.2	184.2	144.3	2.006	1.669	1.644	
Case1	129.467	129.885	67.357	0.9587	65.2	20.9		191.1	183.0	144.4	1.985	1.642		
Case2	114.319	115.20	59.100	0.9587	58.5	20.6		196.7	187.8	144.4	1.954	1.620		

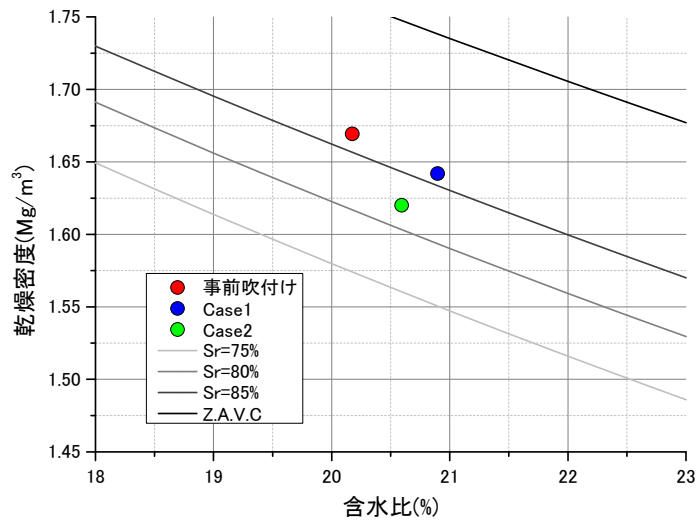


図 9.3.3-18 含水比と乾燥密度の関係

(6) 実験結果イメージ (STEP2)

STEP2 では、写真 9.3.3-1 に示すように、体積拘束下の緩衝材に給水を行い、緩衝材の膨潤を促した。給水圧は、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じない程度で、極力大きい方が好ましい。さらに、給水圧を、緩衝材への水の浸潤速度よりも速く作用させると、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じる可能性が懸念されることから、給水圧と給水圧の増加速度は試行錯誤しながら決定した。給水圧は、吹付け施工中に確認された最大給水圧 (Case1 堆積岩: 150kPa 程度。Case2 結晶質岩: 250kPa 程度) を参考として、200kPa 以上を目標とした。図 9.3.3-19 に人工給水過程の給水圧の経時変化を示す。

Case1 では、まず、10kPa で 2 日間給水した後に給水圧を一気に 200kPa まで増加させた。この際、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が観察されたことから、給水圧を 10kPa に低下させた。次に、50kPa で約 10 日間給水した後に 100kPa まで給水圧を増加させて 1 日間静置した。ここで、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じていないことを確認して、さらに 200kPa まで給水圧を増加した。200kPa まで増加させた段階で、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が観察されたことから、給水圧を再度 10kPa に低下させて約 10 日間静置した。約 10 日間の静置後、給水圧を 50kPa まで増加させ、さらに 100kPa まで増加させて 13 日間静置し、緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じていないことを確認して、20kPa/日の速度で給水圧を 200kPa まで増加させた。このような段階的な給水圧の増加では、200kPa の給水圧であっても界面の隙間は観察されなかった。このため、給水圧 200kPa のままで約 5 日間、静置した。

Case2 では、まず、200kPa まで一気に給水圧を増加させたが緩衝材とリング型モールドの界面に隙間が生じなかったため、さらに 300kPa まで給水圧を増加させた。この際、界面に隙間が観察されたことから給水圧を再び 200kPa まで低下させて、約 50 日間静置した。



写真 9.3.3-1 緩衝材への給水状況

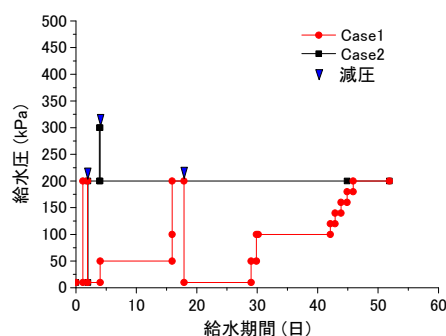


図 9.3.3-19 人工給水過程の給水圧の経時変化

写真 9.3.3-2、写真 9.3.3-3 には、Case1 と Case2 の給水開始から 2 か月経過後の緩衝材上端面の様子と緩衝材とモールド界面の様子を示している。写真から、Case1,Case2 ともに、界面に隙間がなく、ある程度、膨潤していることが確認できた。

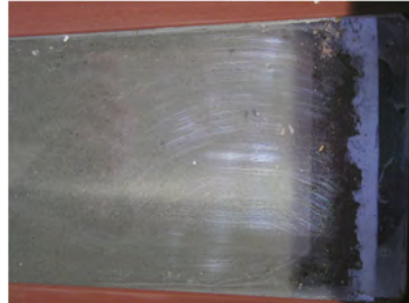


写真 9.3.3-2 Case1 緩衝材の上端面（給水期間：約 2 ヶ月）



写真 9.3.3-3 Case2 緩衝材の上端面（給水期間：約 2 ヶ月）

(7) 実験結果【STEP3】

STEP3 では、1/4 リング型モールドの上蓋の拘束を外して緩衝材の体積拘束を解除した後、吹付け試験時と同様、100cc/min で送水した。

Case1 と Case2 の送水開始からの経過時間と送水圧の関係を図 9.3.3-20、図 9.3.3-21 にそれぞれ示す。なお、図 9.3.3-20、図 9.3.3-21 には、参考値として、Case1 の吹付け施工中における最大送水（破過）圧を赤線で示している。

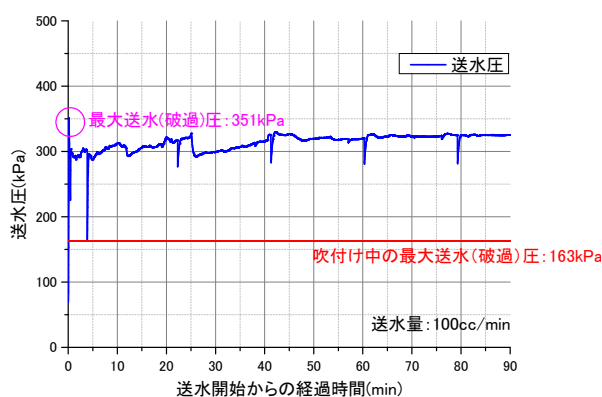


図 9.3.3-20 経過時間－送水圧の関係【Case1 堆積岩】

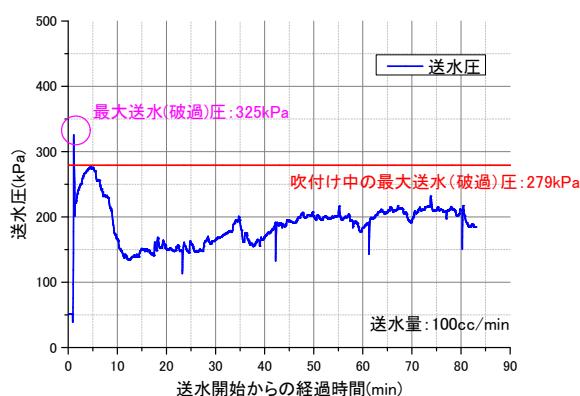


図 9.3.3-21 経過時間－送水圧の関係【Case2 結晶質岩】

図 9.3.3-20、図 9.3.3-21 から、Case1、Case2 ともに最大送水(破過)圧(図 9.3.3-20、図 9.3.3-21 の○参照)は、吹付け施工中の値と比較して高く、その増加量は、Case1 で 150kPa 程度、Case2 では 50kPa 程度であった。また、送水圧の経時変化に着目すると、Case2 では、最大送水(破過)圧を示した後に 150kPa 程度まで低下しているが、Case1 の場合では、ほぼ最大送水(破過)圧のまま推移している。これは、Case1 が 27 か所から給水したのに対して、Case2 の給水箇所が 3 か所しかなく、その膨潤領域が Case1 に比べ局所的であるため、一旦破過すると人工給水による膨潤の効果がなくなるためであると考えられる。このことから、人工給水を緩衝材のパイピング・エロージョン対策として実施する場合、給水箇所はなるべく分散させて膨潤領域が広範囲に亘るようにした方が、効果が高いことが分かった。また、結晶質岩の処分坑道で湧水がある場合、湧水による膨潤領域が小さく、一旦破過するとパイピング・エロージョン現象が生じやすいため、仮端部プラグなどの設置により処分坑道内を拡散場とするとともに、十分な膨潤時間を取る必要がある。

以上の結果から、体積拘束した緩衝材が膨潤することによって、吹付け施工時に発生したパイピング・エロージョン現象を抑制できる可能性が示された。また、この抑制効果を向上させるためには、緩衝材全体を効率良く膨潤させることが効果的と考えられる。

(8) まとめ

H25年度の湧水環境下における吹付け施工実験の結果を下記にまとめる。

- ▶ 吹付け工法は、湧水環境下においても均質かつ高密度な緩衝材を構築可能であるが、施工中における湧水の完全な止水は困難である。
- ▶ 吹付け施工中～緩衝材の体積拘束作業間において、緩衝材に水みちが発生した。この水みちは、送水ノズルから緩衝材天端部にかけて発生している。緩衝材の天端部は、拘束圧がほぼゼロであるため、水みちが発生し易いと考えられる。
- ▶ 体積拘束した緩衝材が膨潤することによって、吹付け施工時に発生したパイピング・エロージョン現象を抑制できる可能性が示された。また、この抑制効果を向上させるためには、緩衝材全体を効率良く膨潤させることが効果的と考えられる。

第9章 参考文献

- [1] I.Kobayashi, et al.,: Development of construction methods of the bentonite engineered barrier by the high-density shotclay system, Workshop on long-term performance of smectitic clays embedding canisters with highly radioactive waste, in Lund, Sweden, Nov. (2007).
- [2] Posiva: Flow-Through and Wetting Tests of Pre-Compacted Backfill Blocks in a Quarter-Scale Test Tunnel,WR 2008-89 (2009).
- [3] 小林一三, 中寫誠門, 戸井田克, 田中俊行: ベントナイト吹付け技術の開発(その1) - 高密度吹付け工法の室内試験と混合方法の検討 -, 鹿島技術研究所年報, Vol.54 (2006).
- [4] 吉越一郎, 千々松正和, 中越章雄, 三反畑勇: ベントナイト層の施工方法の開発, ハザマ研究年報, Vol.39 (2007).
- [5] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 18 年度地層処分技術調査等 遠隔操作技術高度化調査報告書 (2/2) (2007).
- [6] 日本ベントナイト工業会標準試験法: ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法, JBAS-107-91 (1991).
- [7] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 1 分冊) - 人工バリア品質評価技術の開発 -(2/2) (2009).

第10章 今年度試験結果を受けた試験計画の見直し

10.1 緩衝材の品質評価に関する検討

10.1.1 試験計画の修正、および試験ケースの追加

第1章、および第5章に示したように、緩衝材の施工品質に起因する項目が、再冠水時に緩衝材に発生する現象に対して及ぼす影響を実験によって定量的に調べることを目的として、試験計画を立案した[1]。さらに、試験計画立案では、緩衝材の施工品質に起因する項目が、再冠水時に緩衝材に発生する現象に対して及ぼす影響を整理し、その整理結果を踏まえて、(a)~(k)の11の試験項目を抽出し、各試験項目の試験計画を本項にて立案した。

(1) 直列膨潤量試験の新たなケースに関する試験計画

本検討の結果、施工に起因する密度分布は再冠水時に膨潤して最終的には均質になるものと考えられていたが、実際には応力履歴などの影響で密度分布が残る可能性を示した。この結果を処分概念の構築に反映させるには、建設作業時にどの程度の密度の範囲に収めれば、再冠水後にほぼ均一になるとみなせるか、という密度範囲を規定する必要がある。本検討の試験計画では、試験数が少なく、範囲を示すまでには至らないと考えられることから、再現性の確認に加え、様々な密度差の供試体の膨潤による均質化試験を実施する必要があると考えられる。さらに、乾燥密度 2.0Mg/m^3 と 1.2Mg/m^3 のケースを解体して供試体の密度分布を計測すると上下の供試体のどちらも、上面と下面の密度が低下していた。この密度分布が膨潤によるものか、供試体作成時に発生したものかを調べる必要がある。

(2) Ca型化が緩衝材の膨潤に及ぼす影響

本検討では、Na型ベントナイトに蒸留水を通水した後に CaCl_2 水溶液を通水した場合 (Case1)、Na型ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水した後に蒸留水を通水した場合 (Case2) の液種の交換時期を膨潤圧で判断した。この結果として、十分なCa型化を生じさせることができなかった可能性が高い。そこで、供試体の陽イオン交換容量に対して十分なCaイオンを供給してCa型化を完全に生じさせることによって、より明確に変質と飽和の発生順序、変質の可逆性などを議論することが可能となった。

本試験には、層間陽イオンの交換反応に加え、膨潤圧に対するイオン強度の影響やNa/Caイオン比をパラメータにした変質試験なども実施することによって、幅広い変質シナリオに対して緩衝材の膨潤性能を評価できるデータを取得できると考えられる。

(3) 一次元浸潤速度取得試験

本検討では、圧力一定となるようにフローポンプで流量を制御して浸潤速度を計測した。ただし、アクリルセルと供試体の界面が水道となることを避けるために、試験初期だけは流量制御で試験を行った。これらの試験の結果、通水圧に依らず、塩水と蒸留水はほぼ同じ浸潤速度

で緩衝材に浸潤していることが明らかとなった。これは、通水圧よりも緩衝材の毛細管現象などによる浸潤の影響の方が通水圧よりも大きいためだと考えられる。通常、この緩衝材の毛細管現象などによる浸潤は水の自己拡散係数などとして整理される場合が多い。

そこで、正確に通水圧がゼロとなる条件を制御して浸潤試験を実施すると、通水液の自己拡散速度を取得することができる。自己個拡散速度と等価な不飽和浸潤速度が得られるため、非常に有用なデータとなり得る。

さらに、水の自己拡散現象に対して緩衝材の間隙空気圧が及ぼす影響についても検討すれば、地下水の緩衝材への浸潤挙動の理解を深めることが可能となる。このためには、間隙空気圧を制御できるセルの中に緩衝材を設置して浸潤試験を行う必要がある。

排水が確認できた段階で、ヒーターにより熱勾配を加えて、熱勾配による水分量の変化なども取得する必要がある。

(4) 緩衝材表面近傍の止水性評価

パイピング試験に関しては、平成 22 年度から検討を開始し、当初の試験条件ではパイピングの発生が難しいことから、試験計画を変更して平成 23 年度、パイピングの発生状況の観察やエロージョン、ブレイクスルーなどの各現象を取得できた。これらの結果から、水みちは緩衝材と非膨潤性材料の界面に発生し、事前に水みちになるような隙間や大間隙を緩衝材施工時に残さない原位置締固め工法、吹付け工法などであれば水みちが発生し難いということ、逆にブロック定置やペレット充填では、流速、通水圧などにも依るがブレイクスルー、パイピング、エロージョンの各現象が発生する可能性があることが分かった。さらに、このブレイクスルー、パイピング、エロージョンの各現象が発生する過程の中で、水みちの収斂現象が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

今後、処分孔の使用可否の基準を構築する上でも重要な知見となるため、緩衝材を十分に膨潤させた後に水みちが発生するかどうか、セルの表面形状が水みちの形成に及ぼす影響などを実験的に検討する必要がある。また、本研究の対象である緩衝材だけで止水性を担保する処分概念だけでなく、端部プラグや埋戻し材なども含めた総合的な性能評価に向けて、データ取得を計画する必要がある。そのためには、工学規模のパイピング・エロージョン試験を実施して、パイピング・エロージョン試験結果に対するスケール効果の影響を評価する必要がある。さらに、パイピング・エロージョン現象の対策なども考慮した、より実際の処分孔に近い境界条件で試験を行う必要がある。

(5) 浸潤による間隙空気の移行調査

本試験では、流量制御試験による膨潤領域の形成を確認後、圧力制御による浸潤試験を実施し、この間隙空気圧を計測したが、浸潤に伴う圧力変動は観測されていない。今後、給水圧を増加させ、浸潤に伴う間隙空気圧の増減現象を観測する予定である。また、ある程度の期間、間隙空気圧の経時変化が取得できたら、廃棄体熱の影響を模擬して間隙空気圧を増減させ、浸潤領域の変化などを計測する計画である。

(6) 土槽試験による再冠水時の事象の評価

平成 23 年度から開始した土槽試験は、ペレット充填ケースとブロック定置ケースについて試験を実施した。本試験のように 20 cm 程度の水位差で給水した場合にはペレットの大間隙やブロックの隙間が選択的に水みちにはならないということが確認できた。水分の浸潤過程を把握するために実施した比抵抗計測結果からはブロックの界面を水が浸潤し、その後ブロックの深部に水が浸潤する過程を把握できた。また、試験後のブロック緩衝材を解体し、比抵抗値から換算した飽和度と解体後の実測の飽和度の傾向がおおむね一致していることを確認できた。

土槽試験においてはある程度複雑な境界条件を考慮できるため、実際の処分施設における緩衝材の境界条件を模擬した試験ケースを実施することが望ましい。

(7) 緩衝材施工技術の高度化

緩衝材施工技術の高度化においては、実規模緩衝材の 1/4 リングの湧水環境下での施工可能性が確認できたものの、湧水環境下での施工では、湧水を止水することは不可能であることが分かった。そこで施工した緩衝材を体積拘束条件下で膨潤させた後に破過圧計測を行った。膨潤に時間を掛ければ、徐々に破過圧は増加することが分かった。この膨潤・破過試験が終了した後には、実規模の緩衝材を用いたパイピング・エロージョン試験や人工給水のために解体して浸潤状況確認などを実施することが望ましい。

第 10 章 参考文献

- [1] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 1 分冊）－人工バリア品質評価技術の開発－（2/2）（2009）.

第11章 地下研究施設を活用した緩衝材の性能確認

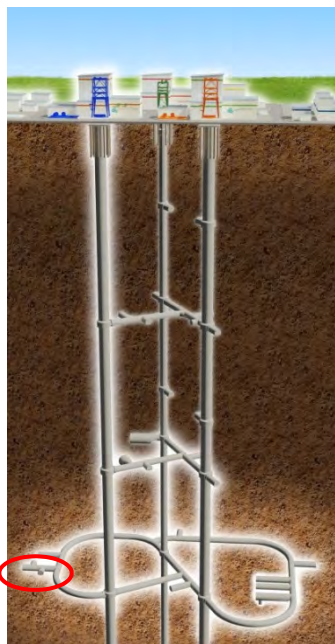
11.1 地下研究施設を活用した試験

(②パイピング・エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討 iii 地下施設を活用した緩衝材の性能確認 表 2.1.3-15 ャ年の全体研究計画)

11.1.1 背景

これまで処分施設における緩衝材の実験は、実験室または地上で実験が行われてきた。これは日本において、地下施設で試験ができる環境が整っていなかったことが大きな理由である。平成25年度に(独立行政法人)日本原子力開発機構(JAEA)の幌延深地層研究センターにおいて350m坑道が整備され、地下施設を活用した実験が可能になったことから、原環センターとJAEAは共同研究を締結して、図11.1.1-1に示すように350m坑道の一部において、資源エネルギー庁が発注する「処分システム工学確証技術開発」に関連したオーバーパック・緩衝材、地中無線技術に関する試験を実施することになった。特に、オーバーパックと緩衝材は、同じ坑道で実験を行い、地中無線技術は、別の坑道における実規模緩衝材性能確認試験に適用されることから、次の2つに分類した。

- ・地下施設を利用したオーバーパック・緩衝材の施工品質の確証に関する研究
- ・人工バリア等における無線計測技術の適用性に関する研究



幌延地下研究施設俯瞰図



350m坑道平面図

図 11.1.1-1 幌延地下研究施設試験位置

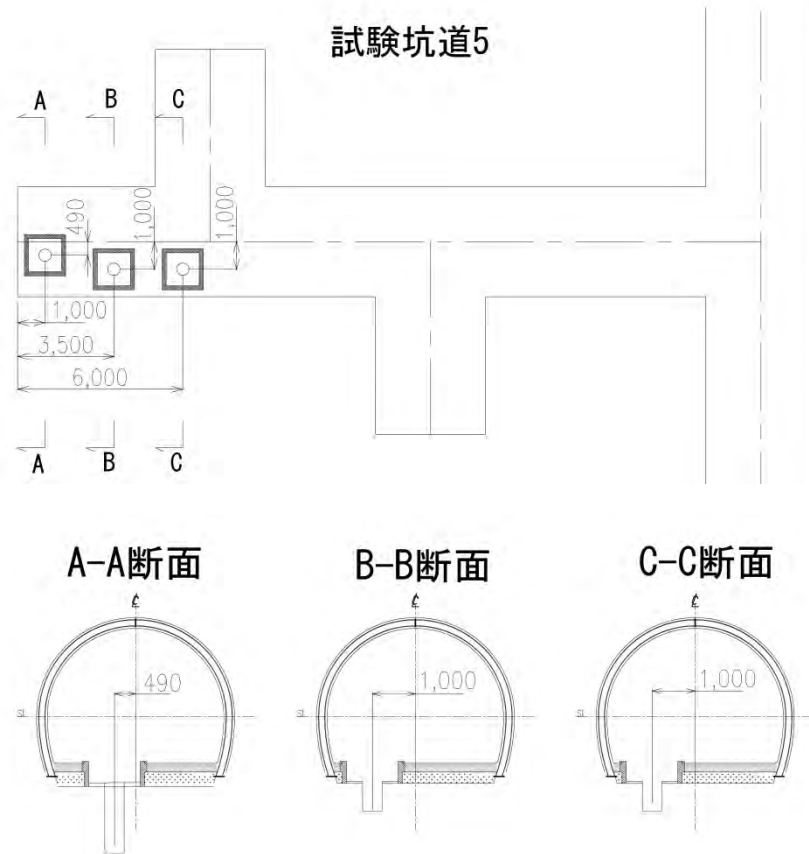


図 11.1.1-2 幌延地下研究施設試験位置

オーバーパック・緩衝材の試験は図 11.1.1-2 に示す坑道 5 で実施する。また、坑道 5 におけるオーバーパックの試験孔は、図 11.1.1-2 に示す A-A 断面であり、孔径 550mm、孔の深さは 1500mm である。緩衝材は B-B 断面、C-C 断面であり、孔径 550mm、孔の深さは 600mm である。

11.1.2 試験概要

高レベル放射性廃棄物地層処分施設において、緩衝材の定置後再冠水期間に、処分孔への地下水の浸入による水みち形成(パイピング)、浸食(エロージョン)が発生し、ベントナイトの自己修復作用を妨げる場合には、長期性能に影響を与える可能性がある。そこで、本年度は、小規模試験でパイピングやエロージョン現象について、実際の地下環境において、小規模試験の再現性、岩盤の不陸の影響、エロージョン量の取得、湧水環境への工学的対策の効果の確認を目的として工学規模試験を行うことを検討した。取得したデータは、原環センターが地上施設にて別途実施する試験の結果と比較し、地下環境の影響を評価する。

模擬処分孔として 2 孔を用いて再冠水試験を行うが、平成 26 年度に孔 2 つの蓋を設置し、2 孔で試験を開始する。液種は原則として地下施設内から採取した地下水を使用するものとする。流量は 0.1ℓ/min、0.01ℓ/min、0.001ℓ/min、0.0001ℓ/min の 4 ケースとする。上載荷重は特に設け

ない。緩衝材は、ブロック+大小粒径混合ペレット、ブロック+大粒径ペレット、ブロックのみ(隙間埋めペレットなし)の3ケースとする。

なお、液種、流量、緩衝材のケースについては、現地の状況に応じて、別途変更することもあるものとする。

測定項目は、給水量、給水圧、排水量、エロージョン量とする。また、試験開始時に試験に用いる地下水の温度、pH、電気伝導度を測定する。pH、電気伝導度が初期値と大きく異なる場合には、別途水質測定の実施を検討する。試験完了後解体時には緩衝材ブロック内の流路、膨潤によるひび割れの有無を確認する。表 11.1.2-1 に緩衝材エロージョンの試験仕様を、表 11.1.2-2 に緩衝材エロージョン試験の試験ケースを示す。

表 11.1.2-1 緩衝材エロージョン試験仕様

項目	仕様	備考
液種	地下施設内地下水	
流量	0.1、0.01、0.001、0.0001ℓ/min (4 ケース)	
上載荷重	なし	
緩衝材	<ul style="list-style-type: none"> ・ブロック+大小粒径混合ペレット ・ブロック+大粒径ペレット ・ブロックのみ(隙間埋めペレットなし) 	流量と併せて計 12 ケース
測定項目	<ul style="list-style-type: none"> ・給水量、給水圧 ・排水量 ・エロージョン量 ・地下水の温度、pH、電気伝導度 ・(パイピングの)流路 ・ひび割れの有無 	水質の確認 解体時(染料使用) 解体時

表 11.1.2-2 緩衝材エロージョン試験 試験ケース一覧

緩衝材 流量	ブロック+ 大小粒径混合ペレット	ブロック+ 大粒径ペレット	ブロックのみ (ペレットなし)
0.1ℓ/min	case 1A	case 1B	case 1C
0.01ℓ/min	case 2A	case 2B	case 2C
0.001ℓ/min	case 3A	case 3B	case 3C
0.0001ℓ/min	case 4A	case 4B	case 4C

※ケース名は流量を 1~4、緩衝材を A~C とし、それぞれ組み合わせた。

11.1.3 試験計画

緩衝材エロージョン試験の全体工程表を表 11.1.3-1 に示す。平成 26 年に 2 孔で試験を開始し、1 孔につき半年で 1 ケースのペースを基本とする。従って、平成 29 年度には、12 ケースの試験を終了する予定である。

表 11.1.3-1 緩衝材エロージョン試験全体工程表(5年間)

	H25年度	H26年度	H27年度	H28年度	H29年度	備考
計画、見直し	作成・				報告書	
	見直し					
模擬処分孔掘削	■					
資機材製作設置等		■	■			
模擬処分孔 a	観測		3C	3B	3A	
	孔 1		1C	1B	1A	
模擬処分孔 b	観測		4C	4B	4A	
	孔 2		2C	2B	2A	

11.1.4 試験孔の形状・仕様

試験孔の形状・仕様は、幌延 URL で実施する試験の前提条件、および試験坑道 5 の掘削工事の際に判明した岩盤の性状等を参考に図 11.1.4-1 に試験孔の形状を示す。試験孔の仕様は以下のように設定した。試験孔の直径は 550mm(仕上り)の裸孔とする。用の試験孔の掘削深さは、路盤コンクリート下の掘削ズリのガラを人力撤去・清掃した地盤高から 600mm とし、孔数は 2 孔とする。なお、試験孔掘削前の準備として、試験坑道 5 の路盤コンクリートの一部を撤去し、図 11.1.4-1 に示した孔壁保護用のコンクリートを打設する。また、試験孔掘削後に、路盤コンクリート上の水の孔内への流入、掘削ガラの孔内への落下を防ぐ構造とし、孔壁の崩落による試験孔埋没防止のため、保護管等により孔壁保護されているものとする。

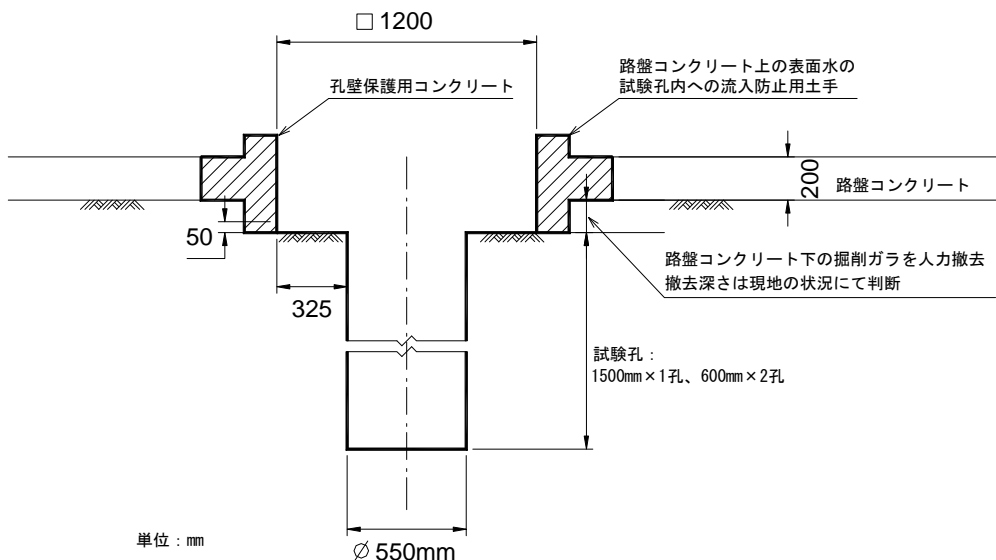


図 11.1.4-1 試験孔の形状

11.1.5 試験孔の掘削工事

(1) 準備工

試験孔の位置を測量し、施工位置のマーキングを実施した。その他、作業環境を整えるため、上部からの滴水の養生を実施した。



図 11.1.5-1 試験孔位置マーキング



図 11.1.5-2 作業前現場養生状況

(2) 既設コンクリート撤去

コンクリートカッターで既設路盤コンクリート切断し縁切りをした後にブレイカーで研り、コンクリートの撤去を行った。



図 11.1.5-3 既設コンクリート切断状況（コンクリートカッター使用）



図 11.1.5-4 既設コンクリートハツリ状況（ブレイカー、ピックハンマー使用）

(3) 掘削ガラ・浮石撤去

人力で取れる掘削ガラ・浮石のみを除去を行った。大きなものを取り終えた後は、圧縮空気・水による洗浄を行った。



図 11.1.5-5 人力による掘削ガラ・浮石の除去状況



図 11.1.5-6 掘削ガラ・浮石除去完了

(4) 孔壁保護用コンクリート

掘削ガラ・浮石を除去した岩盤の上に型枠を組立て、コンクリート打設を行った。なお、コンクリートはスーパージェットコンクリート（巻末資料参照）を使用した。コンクリートは現地でモルタルミキサーを用いて練り混ぜ、型枠内に投入した。養生期間をとった後に型枠を解体して、孔壁保護用コンクリートの施工を完了した。



図 11.1.5-7 型枠作成状況



図 11.1.5-8 型枠設置状況



図 11.1.5-9 型枠設置完了



図 11.1.5-10 コンクリート打設① (材料練混ぜ)



図 11.1.5-11 コンクリート打設② (材料練混ぜ)



図 11.1.5-12 コンクリート打設③ (コンクリート型枠内投入)



図 11.1.5-13 コンクリート打設完了



図 11.1.5-14 型枠解体



図 11.1.5-15 孔壁保護コンクリート打設完了

(5) 試験孔掘削前底盤清掃

無収縮モルタル打設前に底盤に新たな浮石等がないか確認し、除去を行った。

(6) 無収縮モルタル打設

無収縮モルタル打設前に試験孔掘削位置に発泡スチロールを配置し、箱抜きを行った。無収縮モルタルはモルタルミキサーで練り混ぜ、底盤に流し込む方法で施工した。



図 11.1.5-16 無収縮モルタル打設状況

(7) 試験孔掘削

ボーリングマシンを各試験孔の所定の位置にセットし、トリコンビットにて掘削を行った。掘削時に出たスライムは水中ポンプにて水槽にあげ、沈殿したものを大型土のうにいれて処理を行った。また底部に溜まるものについては柄杓等で随時除去しながら、掘削を行った。



図 11.1.5-17 削孔状況（全景）



図 11.1.5-18 削孔状況（ピット内）



図 11.1.5-19 底盤スライム除去状況



図 11.1.5-20 試験孔削孔完了

(8) 保護管の設置

掘削・完了後、孔壁を保護する目的として（VU500：外径 520mm）の塩ビ管を設置した。塩ビ管はチェンブロックを使用して、掘削した試験孔内に設置した。岩盤は乾燥により風化する傾向が認められるため、試験装置の設置まで地下水で満たした状態で養生した。



図 11.1.5-21 孔壁保護用の塩ビ管の設置

詳細壁面写真は、深度 0.05m～0.35m、0.25m～0.55m、0.50m～0.8m において、それぞれ北を基準とし時計回りに 5 枚ずつ計 15 枚を撮影した。図 11.1.5-22、図 11.1.5-23 にデジタルカメラで撮影した写真に基づく壁面観察図を示す。

図 11.1.5-24、図 11.1.5-25 に孔壁観察結果から作成した壁面観察スケッチを示す。試験孔 2 では、割れ目密集部が全域に発達しており、湧水量は 5.5L/分である。試験孔 3 深度 0.5m までは割れ目密集部が発達し、0.5m 以深では塊状地山部が多く分布しており、湧水量は 8L/分である。

試験孔の性状調査の結果のまとめを表 11.1.5-1 と表 11.1.5-2 に示す。湧水量については、隣接する緩衝材パイピング・エロージョン試験用の試験孔が路盤天場まで地下水で満たされた状態では表中の値となるが、排水状態ではこの値よりも低くなる傾向が見られた。これは、岩盤のき裂、若しくは路盤コンクリート下のすき間に水みちが存在し、隣接する試験孔から地下水が流入する可能性を示唆している。

幌延 URL に掘削した試験孔での試験では、以上のような性状であることを試験の前提条件とし、この環境で取得出来る試験項目の設定、試験装置の設置、および試験の維持管理計画を検討することが肝要である。

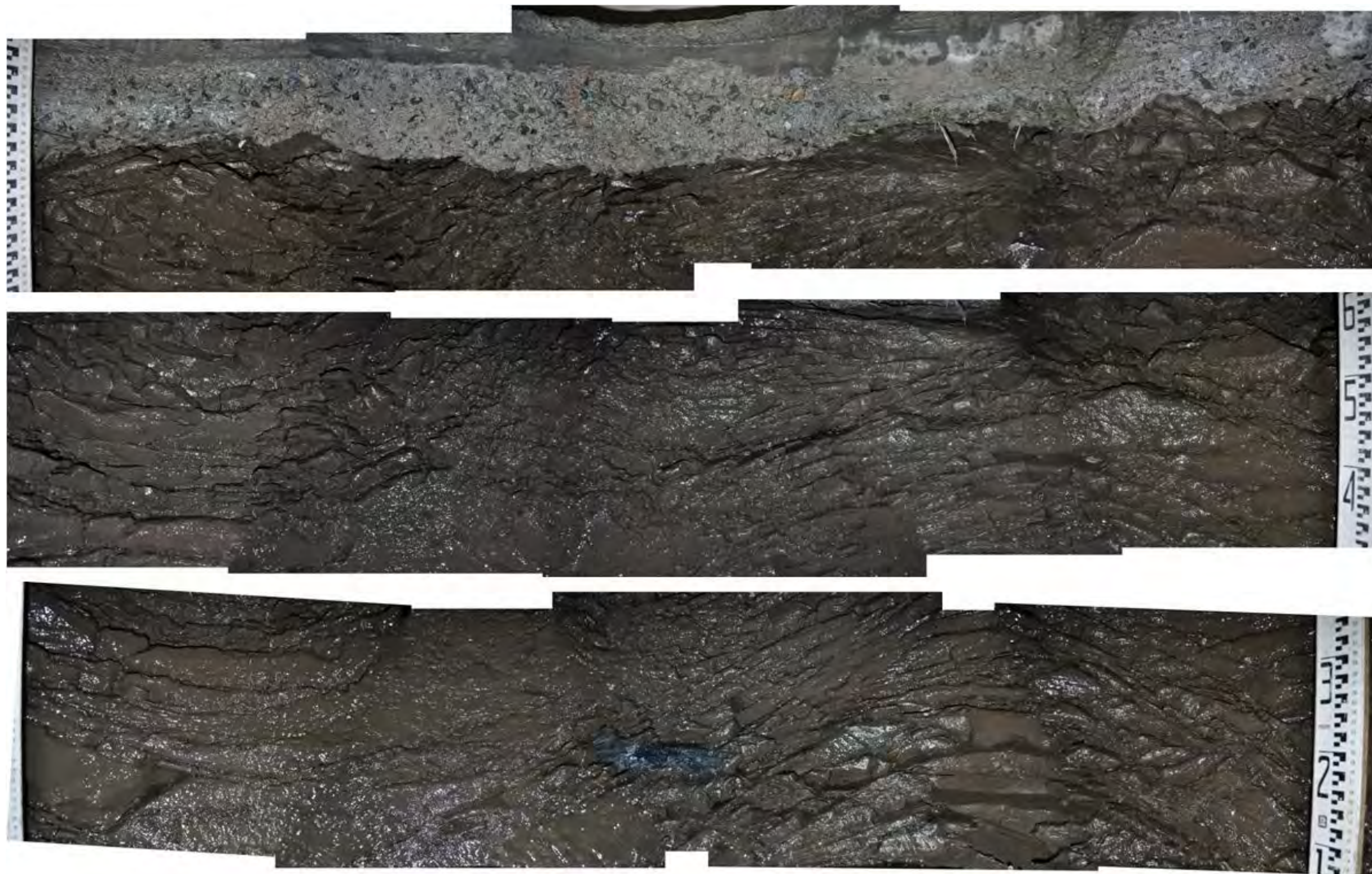


図 11.1.5-22 試験孔 2 (TG5-PE-1) 孔壁展開写真

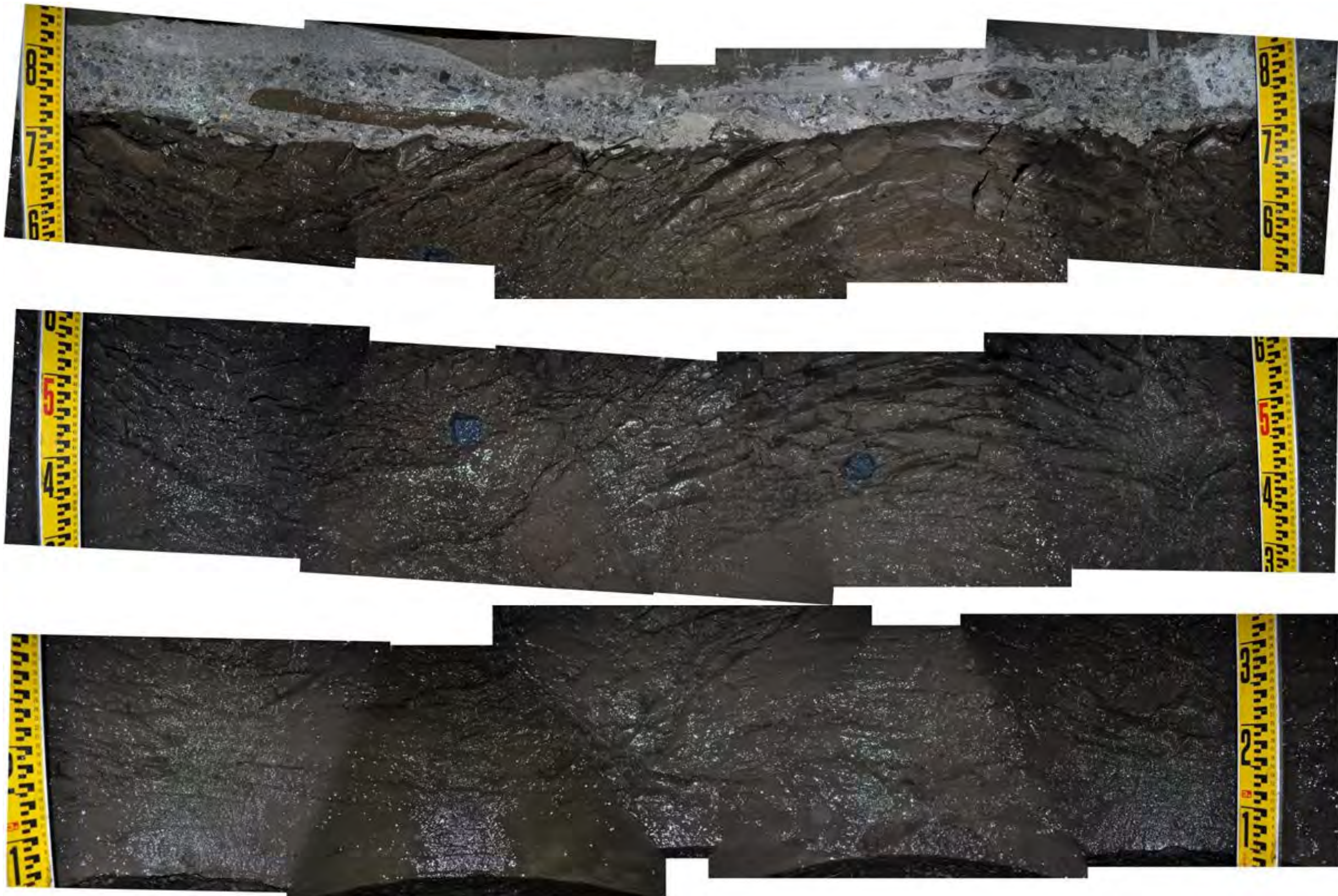


図 11.1.5-23 試験孔 3 (TG5-PE-2) 孔壁展開写真

パイピングエロージョン試験孔
TG5-PE-1

掘削深度 : 0.80m
* 0.00m = 箱枠底盤

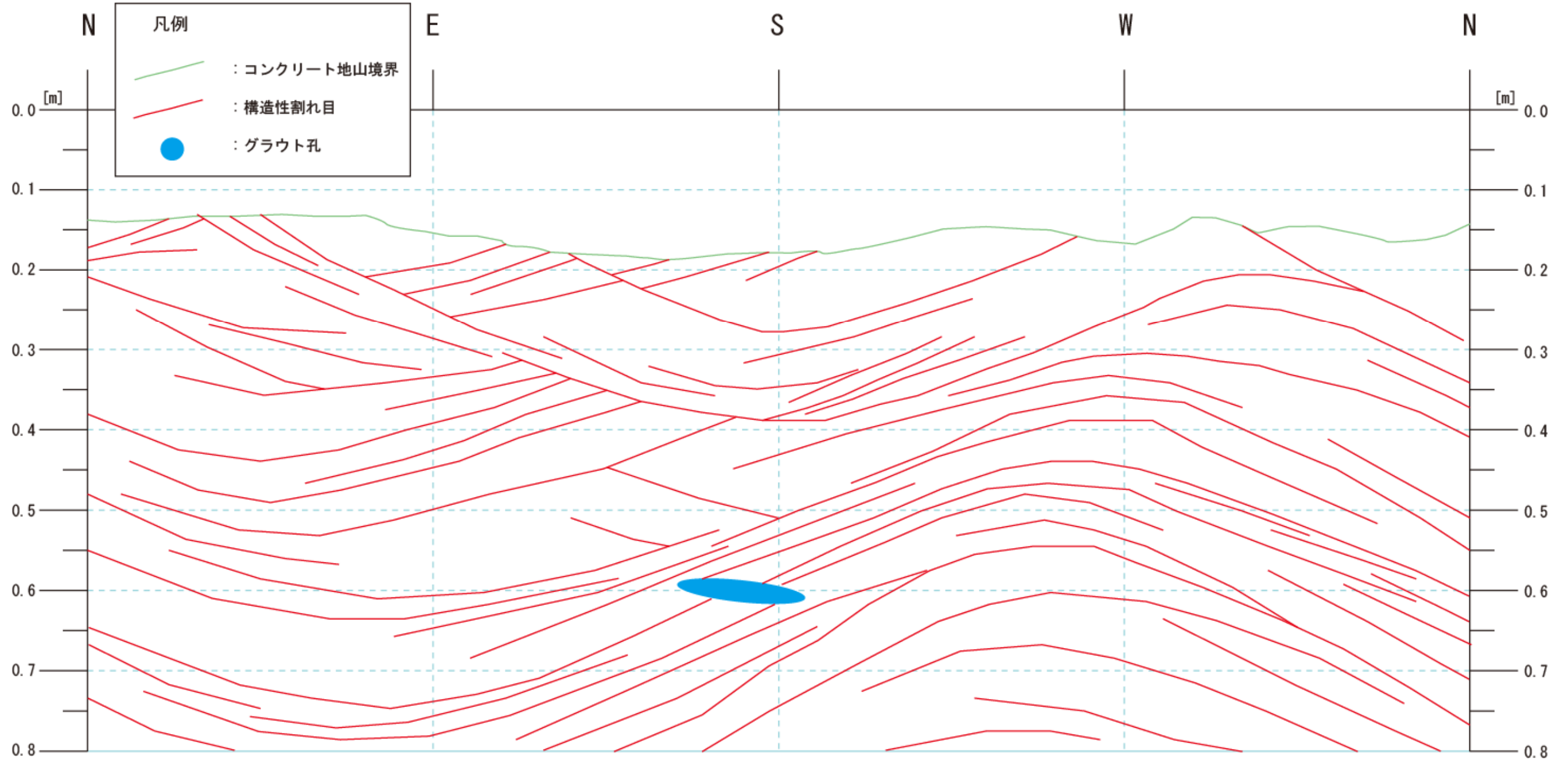


図 11.1.5-24 壁面視察スケッチ (試験孔 2)

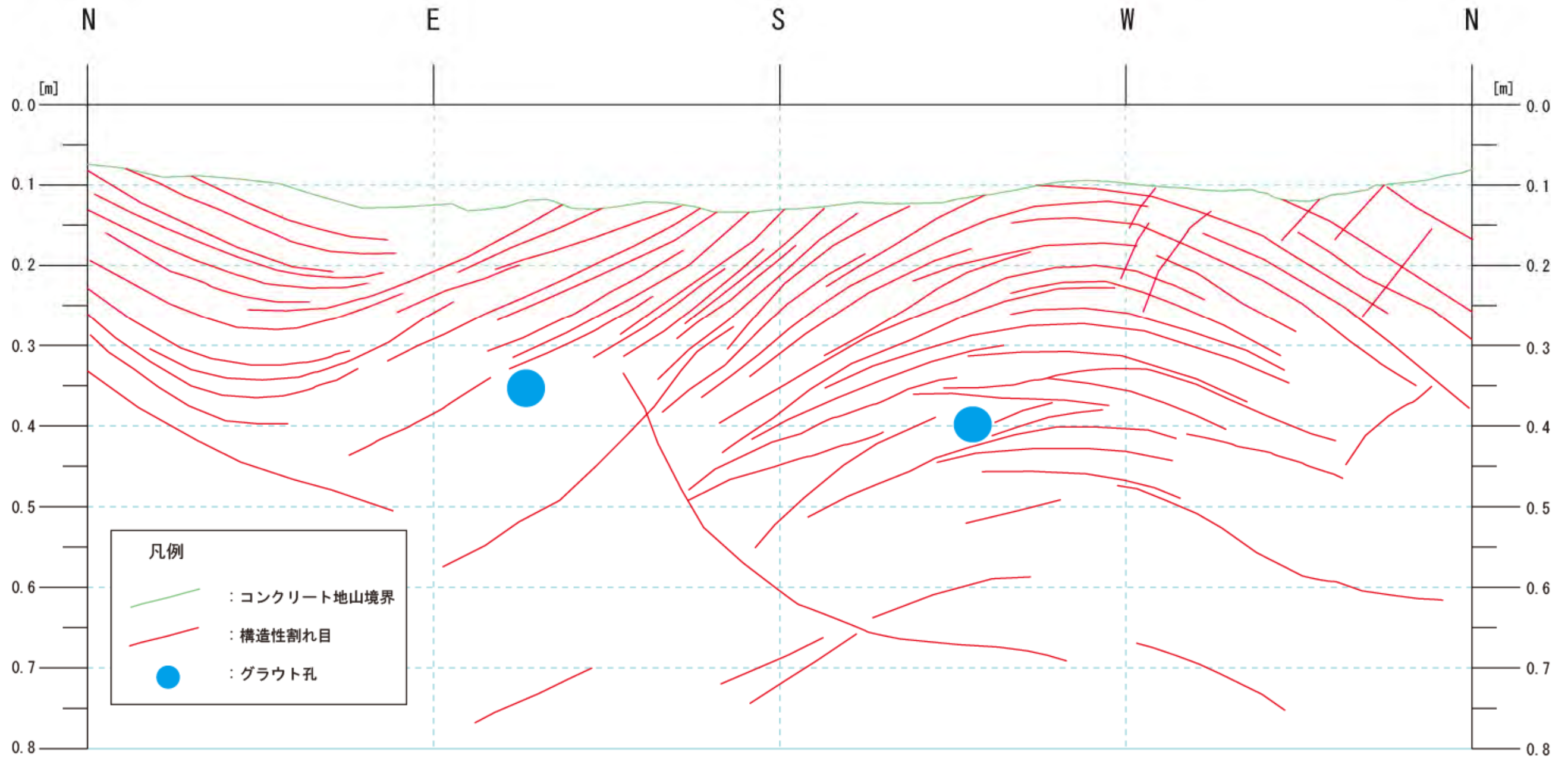


図 11.1.5-25 壁面視察スケッチ (試験孔 3)

表 11.1.5-1 壁面観察結果のまとめ（試験孔 2）

項目	内容	備考
岩種	稚内層	試験坑道 5 周辺の岩と同一。
岩級	CM-M	割れ目密集部が全域に発達（30%以上）。
亀裂の分布・性状	断層は認められない。 構造性と推察される割れ目が分布。	全体的に構造性割れ目が密に発達。
湧水箇所	孔内全域より流入水あり。	孔内水位上昇速度 2cm/分より換算して、約 5.5L/分の湧水量である。 (他 2 孔は口元まで満水状態)
その他	グラウト孔が孔口から深度 0.60m に出現。	

表 11.1.5-2 壁面観察結果のまとめ（試験孔 3）

項目	内容	備考
岩種	稚内層	試験坑道 5 周辺の岩と同一。
岩級	CM-M	割れ目密集部が深度 0.50m まで発達（30%以上）。
亀裂の分布・性状	断層は認められない。 構造性と推察される割れ目が分布。	深度 0.00～0.50m 区間は構造性割れ目が密に発達する。 深度 0.50m 以深では塊状地山部が多く分布。
湧水箇所	孔内全域より流入水あり。	孔内水位上昇速度 3cm/分より換算して、約 8L/分の湧水量である。 (他 2 孔は口元まで満水状態)
その他	グラウト孔が孔口から深度 0.35m～0.40m の深度で出現。	

第12章 人工バリア全体としての設計・施工仕様の

策定に資する指標の整備

(④人工バリア全体として設計・施工仕様の策定に資する指標の整備 表 2.1.3-1 5 ヶ年の全体研究計画)

12.1 背景

これまで緩衝材の不飽和から飽和に至る現象、及び挙動を把握してきたが、これは処分孔に使われる緩衝材を対象としてきたからである。一方、人工バリアを構成する緩衝材は、坑道の埋め戻し材、プラグ前面の止水性能を期待する緩衝材等もあり、それぞれに異なった材料仕様で使われる可能性が高いことから、人工バリア全体としての設計・施工仕様を策定するためには、それらの性能についても検討していく必要がある。現在、スウェーデンのSKBや、フィンランドのPosivaは結晶質岩における処分場の建設許可申請をしていることから、両国の検討例が参考となるものと考えられるが、日本は海外と比較して、地下での湧水量が多いことが予想されており、こうした特異な地下環境を考慮した上で、人工バリア全体としての設計・施工仕様について、その策定に資する検討を実施していく必要がある。現在、以下の4つの検討事項を上げ、それについて海外の事例を中心として調査していくものとする。

- ・人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に関する調査
- ・埋め戻し材、プラグの要求品質に関する調査
- ・人工注水・グラウトの要求品質に関する調査

12.1.1 人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に関する調査

平成25年度は、前提条件に関する調査・検討を行う。特に、今年度は湧水環境において緩衝材の性能劣化事象として懸念されるパイピング・エロージョンに着目した。すなわち、SKBやPosivaにおいては、1処分孔当たり0.1L/分の流量で地下水が流入した場合は、その処分孔は使用しないことが決められている。また、1処分孔当たりのエロージョン量は100kgと規定されている。SKB、では使用する緩衝材はNa型ベントナイトとしてMX80、Ca型ベントナイトとして、Deponite CA-N相当が定められている。これらは性能規定であるため、緩衝材材料として、この2つを使えばよいということではなく、あくまでこの材料相当ということに注意をする必要がある。すなわち、仕様規定ではないということである。

緩衝材のバリア機能、設計留意事項とパラメータを表12.1.1-1に示す。特に重要な点は、処分孔内での移流を防ぐこと、キャニスターを中心に保持する強度があること、コロイドの放出を防ぐこと、他のバリアの機能を損なわないことが挙げられている。そのためには、膨潤圧 $>2\text{MPa}$ 、透水係数 $<10\text{-}12\text{m/s}$ 、微生物の影響を小さくし、キャニスターのせん断変形による損傷を防ぐた

めに飽和状態での密度 > 1,650kg/m³ を目標としている [1]。

表 12.1.1-1 SKB-3 における緩衝材のバリア機能、設計留意事項とパラメータ

Item	Figure	Range	Reference
項目	数値	範囲	参考文献
緩衝材のバリア機能			
緩衝材の機能 1	・処分孔内での移流を防ぐこと。		TR-10-15 Design, production and initial state of the buffer, p18
緩衝材の機能 2	・キャニスターを出来る限り長期に亘って中央に保持すること。		
緩衝材の機能 3	・微生物の活動を制限する機能を持つこと。		
緩衝材の機能 4	・コロイドが緩衝材の中を運ばれていくことを防ぐこと。		
緩衝材の機能 5	・他のバリアの防護機能を著しく損なうことがないこと。		
緩衝材の機能 6	・最終処分場に期待される環境でバリア機能と長期耐久性を維持できること。		
緩衝材の機能 7	・キャニスターや緩衝材のバリア機能を著しく損なうことがないように、キャニスターの設置を可能とすること。		
緩衝材の設計留意事項			
設計留意事項 1	・緩衝材とその製造、設置、試験、検査方法は、よく訓練した、または十分試験された技術に基づいて行うこと。		TR-10-15 Design, production and initial state of the buffer, p19
設計留意事項 2	・緩衝材の特殊な仕様は、高度の信頼性を持って、製造可能であり、設置できなければならない。		
設計留意事項 3	・緩衝材の特性は、規定された許容基準に対して検査ができること。		
設計留意事項 4	・緩衝材とその製造、設置、試験、検査方法は、経済的でなければならない。		
設計留意事項 5	・緩衝材は、所定の頻度で製造、検査、設置されなければならない。		
設計の前提事項			
緩衝材の機能		特性値と設計パラメータ	
処分孔において緩衝材は移流を防ぐ(拡散状態とする)	膨潤圧と透水性に影響を与える特性。モンモリロナイトの含有量。定置時の乾燥密度。かさ密度。含水比。緩衝材の形状寸法。	微生物の影響を小さくし、キャニスターのせん断変形による損傷を防ぐものとして、透水係数 < 10 ⁻¹² m/s、膨潤圧 > 1MPa	
緩衝材は微生物の活動を制限する	膨潤圧と透水性に影響を与える特性。モンモリロナイトの含有量。定置時の乾燥密度。かさ密度。含水比。緩衝材の形状寸法。	定置時の乾燥密度 > 1,950kg/m ³ 、材料損失を考慮して膨潤圧 > 2MPa、モンモリロナイトの含有量は乾燥した緩衝材で重量比 75-90%。微生物の活動を制限するために膨潤圧 > 2MPa。	
緩衝材はコロイドの放出を防ぐ	間隙の大きさ、ねじれに影響を与える特性。定置時の乾燥密度。かさ密度。含水比。緩衝材の形状寸法。	微生物の影響を小さくし、キャニスターのせん断変形による損傷を防ぐものとして、飽和状態での密度が 1,650kg/m ³ であればコロイドの放出は防げる。	
緩衝材はキャニスターを中央の位置に要求される限り長く保持する。	膨潤圧に影響を与える特性。定置時の乾燥密度。かさ密度。含水比。緩衝材の形状寸法。	微生物の影響を小さくし、キャニスターのせん断変形による損傷を防ぐものとして、膨潤圧 > 0.2MPa	
緩衝材は他のバリアの機能を損なわないものである	膨潤圧、密度分布、剛性、せん断強度に影響を与える特性。モンモリロナイトの含有量。定置時の乾燥密度。かさ密度。含水比。緩衝材の形状寸法。定置時の形状寸法: 緩衝材ブロックの大きさ、位置、ベレットの充填される隙間の大きさ	定置時の密度は、飽和した緩衝材の密度に対応し、せん断変形を防ぐために < 2.05kg/m ³ 、モンモリロナイトの含有量は乾燥した緩衝材で重量比 75-90%。	
	キャニスター周りの化学的環境に影響を与える特性	オーガニック炭素の含有量を 1wt%、硫化物は全体質量の 0.5wt% を越えない。これは鉱物の 1% に相当する。	
緩衝材はバリア機能を保持する。処分場に要求される環境の中で長期の耐久性がある。	緩衝材を維持することに影響を与える特性。最小膨潤圧、最大透水係数、許容できる剛性、せん断強度、ねじれ、隙間の大きさ、化学的組成	緩衝材の形状寸法、およびその他の初期値は、SR-CAN で指定したものをを用いる。	
バリア機能	緩衝材を維持することに影響を与える特性。最小膨潤圧、最大透水係数、許容できる剛性、せん断強度、ねじれ、隙間の大きさ、化学的組成。モンモリロナイトの含有量。定置時の乾燥密度。かさ密度。含水比。緩衝材の形状寸法。定置時の形状寸法: 緩衝材ブロックの大きさ、位置、ベレットの充填される隙間の大きさ	膨潤後の緩衝材は最低 2MPa 以上を発揮する。透水係数は < 10 ⁻¹² m/s。Naイオン、Caイオンは 1M 以下とする。膨潤後の緩衝材のせん断強度は、キャニスターのせん断荷重に抵抗するせん断耐力を上回ってはならない。	
	熱伝導に影響を与える特性。モンモリロナイトの含有量。定置時の乾燥密度。かさ密度。含水比。緩衝材の形状寸法。定置時の形状寸法: 緩衝材ブロックの大きさ、位置、ベレットの充填される隙間の大きさ	緩衝材の温度が 100°C 以下になるように、緩衝材の形状、隙間、含水比、処分孔間距離を決定する。	

12.1.2 埋め戻し材、プラグの要求品質に関する調査

(1) 埋め戻し材に関する調査

処分坑道の孔にキャニスターと緩衝材を入れた後、坑道は埋め戻し材で満たされる。埋め戻し前に坑道内の設備（坑道の床のコンクリートなど）はすべて取り除かれるが、SR-Siteでは、処分坑道と搬送坑道およびランプとシャフトの下部は埋め戻し材が満たされているものと想定され、「埋め戻し」とみなされる。

SR-Siteにおける材料の例として、天然の膨潤粘土でプレコンパクトブロック「IBECO-RWC-BF」または「Milos-B」ベントナイトが使用される。坑道全体はプレコンパクトブロックを配置し、岩とブロックの隙間には同じ材料のペレットを詰める。ブロック充填材の例を図 12.1.2-1 に示す。処分孔最上部の埋め戻しを図 12.1.2-2 に示す。推計された体積と提案されている密度は表 12.1.1-1 に示す。

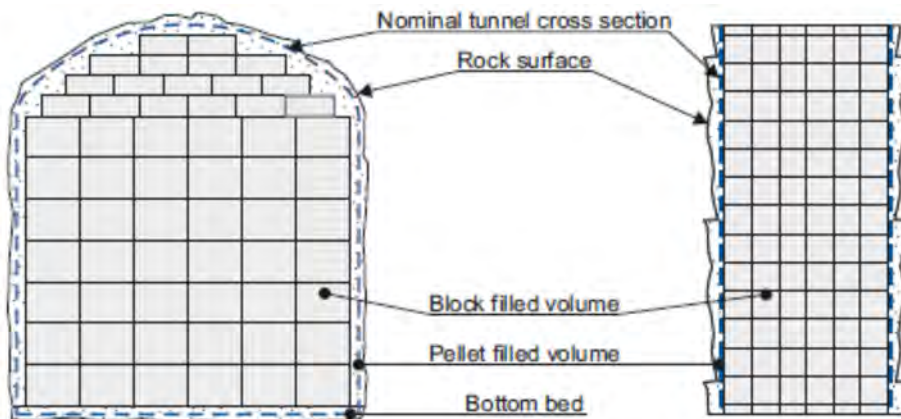


図 12.1.2-1 坑道断面図（仮想）におけるブロック構成の例[1]

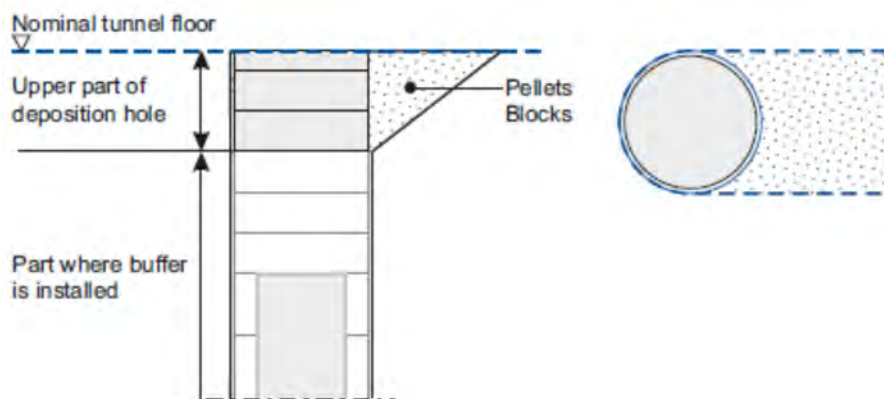


図 12.1.2-2 処分孔最上部の埋め戻し[1]

表 12.1.2-1 埋め戻し材の基本設計に対して計算された設置後の乾燥密度[2]

パラメータ	坑道断面	処分孔の上部
ブロックの乾燥密度 (p_{db})	1,700 kg/m ³	1,710 kg/m ³
ペレットの乾燥密度 (p_{dp}) ¹	1,000 kg/m ³	1,200 kg/m ³
ブロック間の隙間の体積分率 (dV_s)	2%	0
ペレット充填材および底置層の体積	合計体積からブロックと空の部分を差し引く 公称：25-16,8* (1+0.02) m ³ /m 容認：25-0.60*25 (1+0.02) m ³ /m	2.56 m ³
合計体積	坑道爆破体積の最大許容値 25 m ³ /m	5.17 m ³
計算された設置後の乾燥密度 (断面図の公称ブロック部分および坑道体積の最大許容値)	1,458 kg/m ³	1,457 kg/m ³
計算された設置後の乾燥密度 (断面図の許容可能なブロック部分および坑道体積の最大許容値)	1,408 kg/m ³	-

坑道埋め戻し材の性能を評価するため、性能指標が、時間の経過に伴い満たすべき基準とともに示されている。これらの基準については表 12.1.2-2 に要約する。重要な点は、坑道の移流を制限するために、バルク透水係数 $<10^{-10}$ m/s とし、埋め戻し材の均質性を確保し、コロイド放出を防ぐために膨潤圧 >0.1 Mpa、凍結を防ぐために温度 $T > -2^{\circ}\text{C}$ である。

表 12.1.2-2 坑道埋め戻し材性能指標および達成基準の要約[2]

性能指標	基準	根拠
バルク透水係数	$k_{埋め戻し材} < 10^{-10}$ m/s	移流を制限する
膨潤圧力	$P_{埋め戻し材膨潤} > 0.1$ Mpa	均質性を確保し、選択的経路を回避
最低温度	$T_{埋め戻し材} > -2^{\circ}\text{C}$	凍結を防ぐ

(2) プラグの要求品質に関する調査

プラグはそれ自体バリアではないが、処分坑道の埋め戻し材はバリアの性能を維持する上で欠かせない要素である。プラグの主要要素を以下に示す。

- ・プラグは処分坑道を密封し、処分坑道および搬送坑道が埋め戻されて水で飽和され、静水圧を取り戻すまで、運転フェーズ中に埋め戻し材を所定の位置に維持する[2]。
- ・プラグは処分場レベルでの静水圧と、埋め戻し材およびベントナイト・シールからの膨潤圧

力に耐える。

- ・プラグは、処分坑道からの有害な埋め戻し材のエロージョンが発生しないよう、プラグを超えた処分坑道からの水の流れを制限する。
- ・プラグは他のバリアの性能を有意に悪化させない。
- ・圧力によるプラグの動作は、プラグ周辺の埋め戻し材の密度が低下しないよう十分小規模なものとする。

坑道プラグを構成する 5 つの異なる要素を図 12.1.2-3 に示す。これらの要素は坑道の内側から外側に向かって以下のとおりである。

- ・コンクリート製プラグが硬化するまで低い水圧を維持するために使用される排水材料（砕石フィルター）
- ・ベントナイト・ブロックで作られたベントナイト・シール
- ・ベントナイト・シールを支え、排出材料とコンクリート製プラグからこれを分離するためにコンクリート製ビームで構成された 2 つの壁
- ・グラウト用パイプのあるコンクリート製プラグ
- ・排水材料で圧力を制御するための排水機構

このため、プラグ全体は以下に示す 5 つの異なる性能を持つ材料の複合物である。

- 1) 排水材は、硬化するまでコンクリート製プラグからの圧力を維持すること。その後は性能を失う。
- 2) ベントナイト・シールは、排水システムの閉鎖後、両側で完全な水圧に達するまでプラグからの漏れを防ぐこと。
- 3) 壁は、建設中に材料を分離するためにのみ必要である。
- 4) コンクリート製プラグは、両側で完全な水圧に達するまで、力学的にプラグ内の水圧と膨潤圧力に耐えられること。
- 5) 排水システムは排水材の水圧を低いレベルに維持すること。

表 12.1.2-3 にプラグの低 pH コンクリートの配合を示す。プラグは現在、EU7 の DOPAS プロジェクトの一環として SKB と Posiva で実規模性能確認試験が準備されている。SKB は DOMPLU プロジェクトと称して、プラグ内部の圧力をコンクリート製のプラグが直接岩盤に伝える構造となっており、Posiva は POPULU プロジェクトと称して、プラグ内部の圧力をコンクリート製のプラグのせん断抵抗で持たせるというコンセプトである。特に、止水性能について検討されており、次年度にそのデータが上がってくる。当センターとしてもその結果をフォローして、プラグの試験において所定の機能が満足されるかどうか調査していきたい。

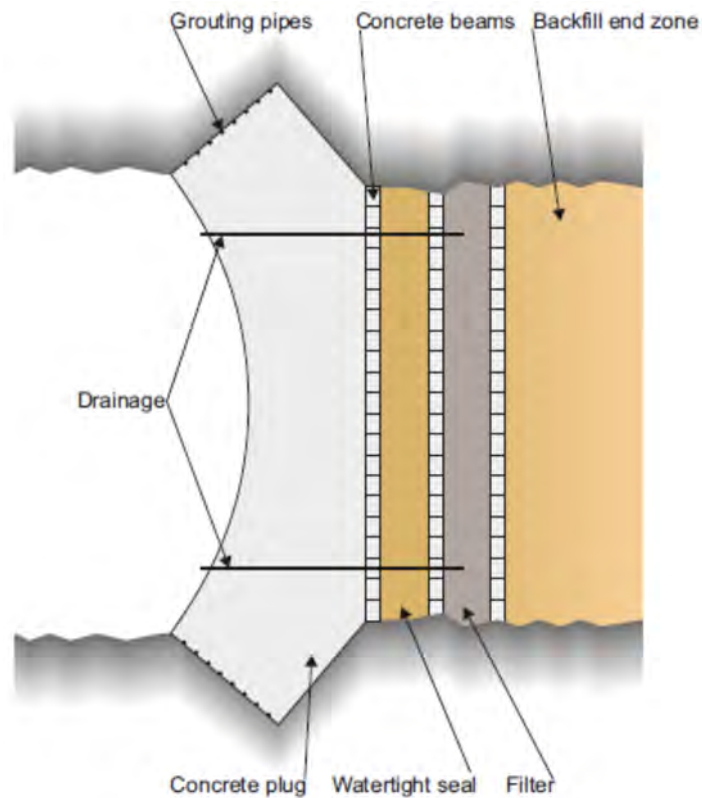


図 12.1.2-3 プラグの基本設計の断面図[2]

表 12.1.2-3 プラグに用いる低 pH コンクリートの配合[2]

設計パラメータ	公称設計 (指定されていない場合は kg/m ³)
結合剤	
セメント CEM I 42.5 MH/LA/SR	120
シリカフューム (硬化済み)	80
その他の成分	
水	165
石灰岩充填材 L25	369
砂 0~8 mm	1,037
砂利 8~16 mm	558
グレニウム 51	6,38
水/セメント	1,375 kg/kg
水/結合剤	0,825 kg/kg
水/粉末	0.29 kg/kg

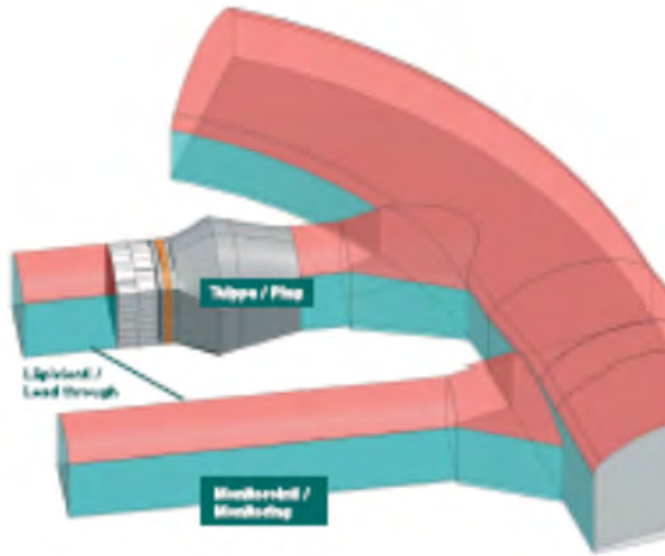


図 12.1.2-4 Posiva におけるプラグ試験 (POPLU) [3]

Valvplugg - Dome plug (DOMPLU)

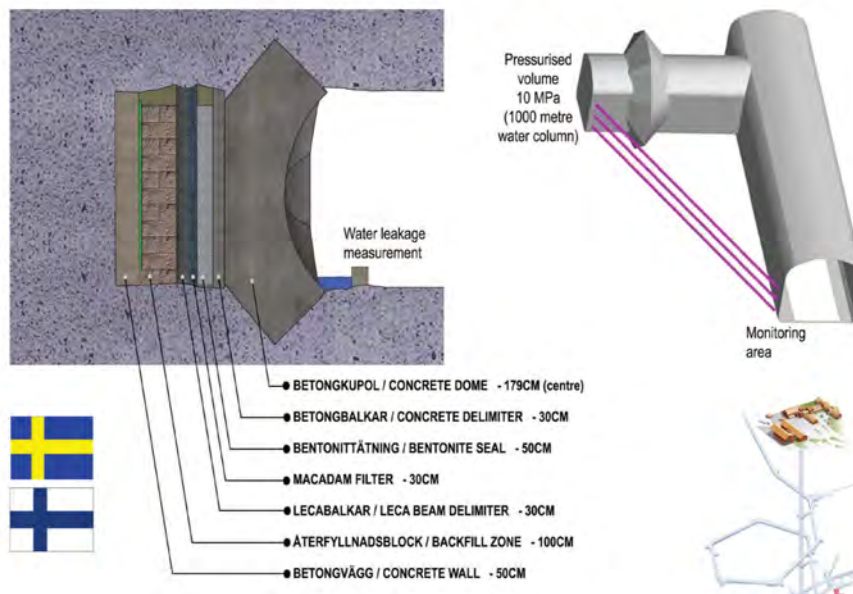


図 12.1.2-5 SKB におけるプラグ試験 (DOMPLU) [4]

12.1.3 人工注水・グラウトの要求品質に関する調査

緩衝材は、不飽和の状態で処分孔に地下水が流入すると、ある流量を超えるとパイピング・エロージョンが発生する。これを防ぐために、SKB や Posiva は 1 処分孔当たりの地下水の流入量を 0.1L/分と制限し、これを上回る処分孔は排除することを原則としている。そこでこの調査では、先ず、1 処分孔当たりのエロージョン量が 100kg と決められた算定根拠を明らかにした。

(1) エロージョン量算定の背景

処分坑道はプラグで囲まれた 300m を想定し、処分孔の数は 50 本としている[5]。緩衝材ブロックの外径 1.65m で岩盤とブロックとの隙間は 5cm である。表 12.1.3-1、表 12.1.3-2 に算定根拠となった特性値を示す。基本的な考え方は、500m の坑道内、処分孔内にある空隙が完全に水で満たされるためには必要な流入量（体積）を計算し（1250m³）、これをベースにエロージョン量 m_s を $m_s = \beta X (mw)^{0.65}$ に代入して求める。ここで 0.65 は、MA80 を使ってエロージョン量を縦軸に、累計通水量（L）を横軸にとった場合のグラフの傾きである。ここで β は、エロージョンに関する係数で横方向のエロージョンについては $\beta = 0.02 \sim 2.0$ 、鉛直方向の流れの場合は、 $\beta = 0.02 \sim 0.2$ として表現される。従って β の範囲に対応するエロージョン量を計算すると横方向のながれの場合、縦方向の流れの場合で以下ようになる。

$$\begin{aligned} \text{横方向の流れの場合のエロージョン量} \quad m_s &= 0.02X (1.25X10^3)^{0.65} \sim m_s = 2.0X (1.25X10^3)^{0.65} \\ &= 16.4\text{kg} \sim 1640\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{縦方向の流れの場合のエロージョン量} \quad m_s &= 0.02X (1.25X10^3)^{0.65} \sim m_s = 0.2X (1.25X10^3)^{0.65} \\ &= 16.4\text{kg} \sim 164\text{kg} \end{aligned}$$

従って、1 処分孔当たり 100kg は、縦方向の流れの場合のエロージョンで、エロージョン量は 16.4kg から 164kg までの範囲の中にあるが、それを 100kg としたというのがこの計算根拠である。

表 12.1.3-1 SKBにおける1処分孔当たりエロージョン量 100kg の算定根拠(その1)

Item	Figure	Range	Reference
項目	数値	範囲	参考文献
処分孔の流入量	0.1L/min	エスポの平均値の上限、Forsmarkの高値	TR-06-09 Long-term safety for KBS-3 at Forsmark and Laxner - a first evolution Main Report of the Scan project
処分孔の許容エロージョン量	100kg	$\beta = 0.01-0.2$ に対応するエロージョン量は、 $m_s = \beta \cdot (1.25 \cdot 109)0.65 \text{ g} = 16.4-164 \text{ kg}$ であるので、100kgのベントナイトとする。	TR-10-11:THM modelling of buffer,backfill and other system components Part2/ 11.3 layout and initial conditions p246
1処分孔当たりの可能な流入量(体積)		1.250m ³	
仮定			
坑道長さ	300m	プラグで囲まれた区間	TR-10-11:THM modelling of buffer,backfill and other system components Part2/ 11.3 layout and initial conditions p243
処分孔数	50個		TR-10-11:Part2/ 11.3 layout and initial conditions p243
緩衝材ブロック外径	1.65m		TR-10-15 : Design, production and initial state of buffer/ Installed buffer p29
ペレット充填の隙間	5cm		
平均坑道面積A	22.7m ²		
ペレット/乾燥密度pd	1.000kg/m ³		
ペレット/間隙比 e	1.78		
ペレット/空隙率 n	0.64%		
ペレット充填中の空間比率	0.54%	$n \times (1-0.15) = 0.54$ 緩衝材の15%は水で充填されている	
初期含水比: W 坑道	0.17		
初期含水比: W 処分孔	0.1		
処分孔のペレット体積: V p d	1.55m ³	$9.0\text{m} \times 0.06 \times 1.69 \pi = 2.87\text{m}^3, 2.87\text{m}^3 \times 0.54 = 1.55\text{m}^3$	
坑道のペレット体積: Vpt	850m ³	$A \times (1-0.74) = 22.7 \times 0.26 = 5.96\text{m}^2, 5.96\text{m}^2 \times 300 = 850\text{m}^3$	
Total empty volume	928m ³	$V_{pt} + 50 \times V_{pd} = 928\text{m}^3$	
坑道ブロック間の隙間体積: Vsp	101m ³	ブロック全体積の2%: $0.002 \times 0.74 \times 22.7 \times 300 = 101\text{m}^3$	
プラグからの地下水の流出量		全体積の20%:	
人工バリアへの流入総量: Vt	1250m ³	$V_t = 1.2 \times (V_{pt} + 50V_{pd} + V_{sp}) = 1250\text{m}^3$	TR-10-11:THM modelling of buffer,backfill and other system components Part2/ 11.3 layout and initial conditions p243
レファレンスレイアウト	<p>Figure 11-1. Reference layout of the repository and illustration of the progressed backfilling just after pellets filling of the next deposition hole.</p>		
Item	Figure	Range	Reference
項目	数値	範囲	参考文献
エロージョン量算定式 (横方向の流れ)	$m_s = \beta \times (m_w)^\alpha$	m_s : ベントナイトの総エロージョン量 (g) m_w : 総ベントナイト水 (g) β : 0.02-2.0 或る流入量の場合のエロージョンレベルのパラメーター α : 0.65 = 直線の傾きで定義されるパラメーター	R-08-135: Deep repository- Engineered barrier system: Erosion and sealing process in tunnel backfill materials investigated laboratory. P46
エロージョン量(横方向の流れ)		$M_s: 16.4\text{kg}-1640\text{kg}$	

表 12.1.3-2 SKBにおける1処分孔当たりエロージョン量100kgの算定根拠(その2)

Item	Figure	Range	Reference
項目	数値	範囲	参考文献
エロージョン量算定式 (横方向の流れ)	$M_s = \beta \times (M_w)^\alpha$	M_s : ベントナイトの総エロージョン量 (g) M_w : 総ベエロージョン水 (g) β : 0.02-2.0 或る流入量の場合のエロージョンレベルのパラメーター α : 0.65=直線の傾きで定義されるパラメータ	R-08-135: Deep repository- Engineered barrier system: Erosion and sealing process in tunnel backfill materials investigated laboratory. P46
エロージョン量(横方向の流れ)		M_s : 16.4kg-1640kg	
大きな隙間を有する場合のエロージョン量(横方向の流れ)	<p>黒: チューブテスト 赤: 大きな隙間 青: 緩衝材ブロック</p> <p>Figure 11-2. Example of erosion results plotted in one diagram. The lower boundary line corresponds to $\beta = 0.02$ and the upper $\beta = 2.0$. The inclination corresponding to $\alpha = 0.65$ is maintained in the figure. $\alpha = 1.0$ (corresponding to constant erosion rate) is also illustrated.</p>	R-08-135: Deep repository- Engineered barrier system: Erosion and sealing process in tunnel backfill materials investigated laboratory. P48	
エロージョン量算定式 (鉛直方向の流れ)	$M_s = \beta \times (M_w)^\alpha$	M_s : ベントナイトの総エロージョン量 (g) M_w : 総ベエロージョン水 (g) β : 0.02-0.2 或る流入量の場合のエロージョンレベルのパラメーター α : 0.65 = 直線の傾きで定義されるパラメータ	R-10-70 Early effects of waqter inflow into a deposition hole: labarptry tests results. P44
エロージョン量(鉛直方向の流れ)		M_s : 16.4kg-164kg	ベントナイトの許容エロージョン量は、左の値のうち100kgとする。
$M_s=100kg$ に相当する β の値		$\beta = 100 \times 10^3 / (1.25 \times 10^9)^{0.65} = 1.2219$	
100kgのエロージョンが発生するに必要な流入量(m_w)	$584m^3$ $1250m^3$ に対して47% に相当	$M_w = (M_s / \beta)^{1/\alpha}$ $\beta = 0.2$ $M_s = 100 \times 10^3 g$ $\alpha : 0.65$	TR-10-11: THM modelling of buffer, backfill and other system components Part2/ 11.4.2 p246
ペレット充填の場合の鉛直方向流れを有する場合のエロージョン量	<p>Figure 11-3. New tests made with vertical flow in pellets filling and suggested revision of the model.</p>		R-10-70 Early effects of waqter inflow into a deposition hole: labarptry tests results. P44

(2) 人工注水

キャニスターを水平に設置する KBS-3H 概念では、地下水によって緩衝材にパイピング・エロージョンが発生しないように人工注水を実施することがレファレンスデザインとなっている。人工注水は、プラグを通して実施されるが、長さ 5.56m のスーパーコンテナ 15 本と岩盤との間の隙間は、42.5mm であり、この隙間に注水用の $\phi 17.2\text{mm}$ のパイプを両側に 1 本とエア抜き用の $\phi 10\text{mm}$ のパイプ 1 本が配置される。給水管 1 本当たりの流量は 45L/分であり、1 スーパーコンテナ当たり 3L/分の流量が供給されることとなる。また、ノズルは 12 本/スーパーコンテナであるから 1 ノズルから供給される流量は 0.13L/分となる。この流入量の場合、15 本のスーパーコンテナは 14 時間で冠水する。また、使われた給水管と空気抜き用の管は、緩衝材が膨潤するまでの間に引き抜くことが計画されている。

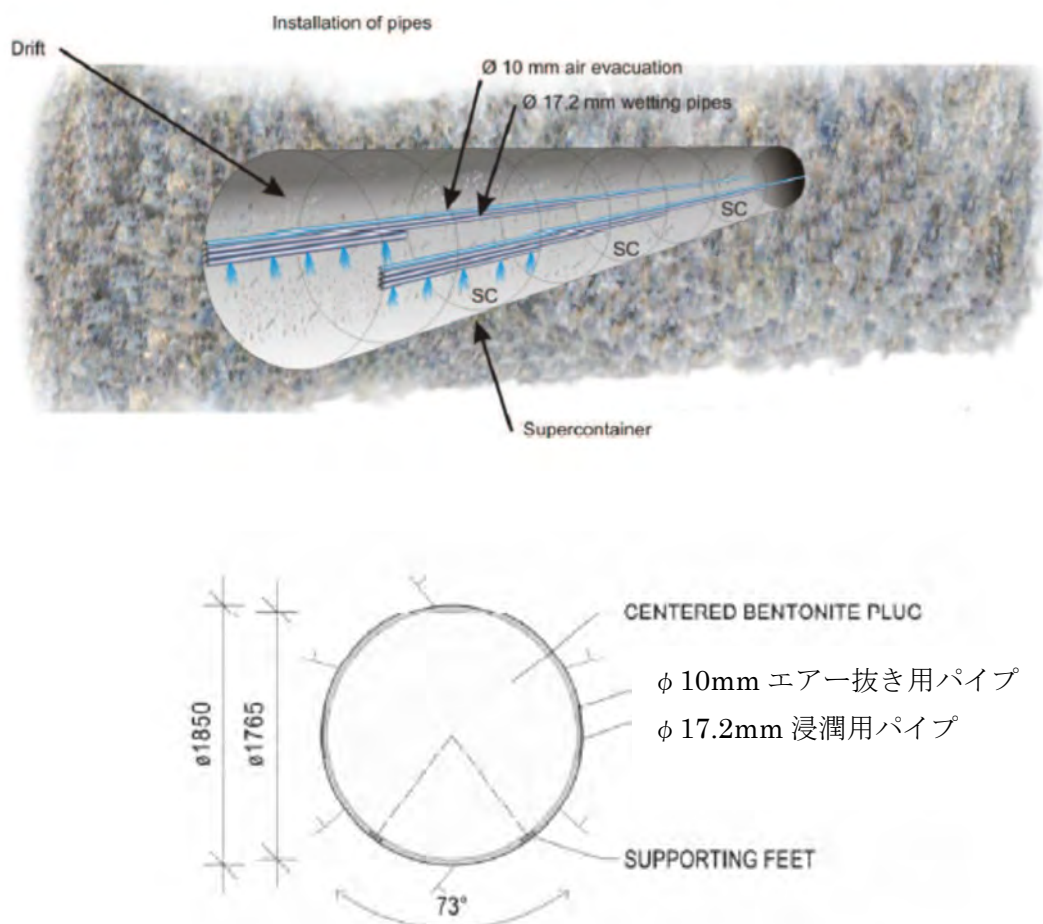


図 12.1.3-1 人工注水用の給水管、エア抜き用の管の配置[6]

(3) グラウト

SKB の Forsmark のサイト 6916 処分孔の計算例として、エロージョン量で 1 処分孔当たりの最大エロージョン量は 160kg で、100kg を超えると予想されるのは 5 箇所のみであり、0.01kg 以下が 5890 箇所と非常に少ない。エロージョンに対する対策として以下の 3 つを考えている。

- 1) 処分孔への流入量として 0.1L/分を守る
－流入量が多いケースを除く
- 2) プラグを設置する前に処分孔に流入しないように坑道の埋め戻しプロセスに関する規定を設ける
- 3) プラグの止水性能について規定を設ける

これらは集中的なエロージョンの場合には役立たないが、エロージョンは長期間では起こらないことから、問題とはならないという見解である。むしろ、ハイリスクな点は、一つの処分孔への流入水が非常に少なく、緩衝材のひび割れ等を発生させることであるとしている。

地下水量を低減させる方法として、グラウト工法がり、プレグラウチングとポストグラウチングが行われる。

(4) プレグラウチング

プレグラウチングは、1995 年から技術開発が実施され、岩盤特性の把握、岩盤内へのグラウト材の侵入と拡散について調査が行われた。グラウトの種類として以下の 4 つがある。

- ・セメントをベースとした材料 (High and low pH)
- ・シリカサンドをベースとした材料
- ・有機材料を使ったもの
- ・シリカゾル

KBS-3V においては、プレボーリングは、坑道トンネルを使って、前方斜め方向にファン状に広げてボーリングが可能である。

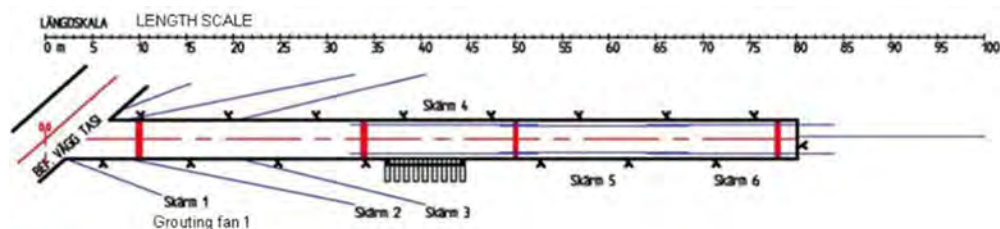


図 12.1.3-2 KBS-3V のプレグラウチング[6]

KBS-3H の施工は、下図に示すように坑道から直角方向に、ボーリングマシーンを設置するための作業用坑道 15～25m を掘削する。次に水平処分孔道 $\phi 1.85\text{m}$ の孔はカッターヘッドを装

着したボーリングマシンで掘削する。破砕帯が想定される場合、先端から 20m の長さの部分は 4 本の細いボーリングを行い、ここからグラウトを実施する。

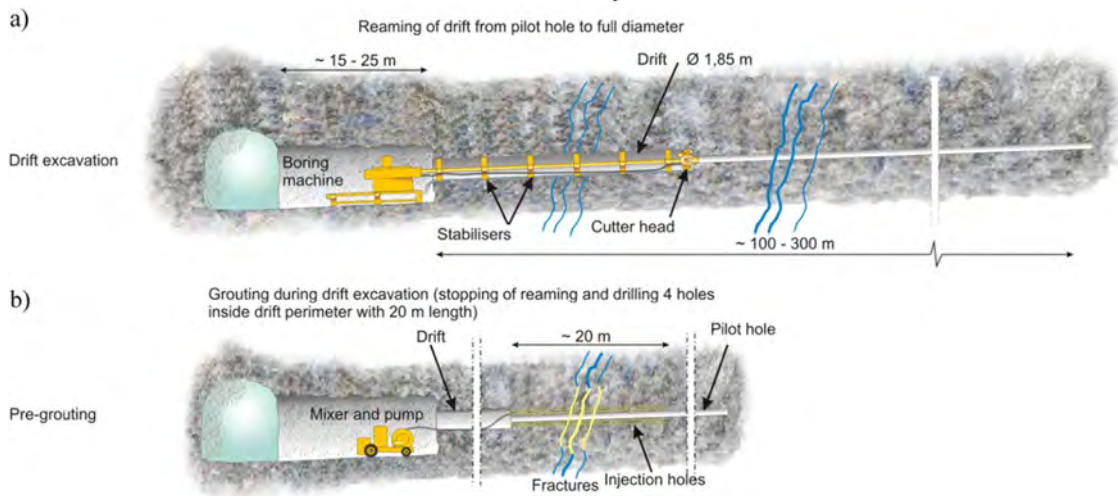


図 12.1.3-3 KBS-3H の掘削工法[6]

(5) ポストグラウチング

KBS-3H においてはプラグウトを Mega-Packer というマシンでグラウトする。下図に示す鋼製の筒を横坑の中に配置、岩盤と鋼製の筒の間を Silica Sol を充填し、ひび割れからの漏水を止める方法である。KBS-3H では、湧水量に応じて、グラウトの設計を考案している。最大では 35 L/分の流入があっても対応可能であるという報告があった。



図 12.1.3-4 Mega Packer システム[6]

KBS-3H – applied design dependent on water inflow

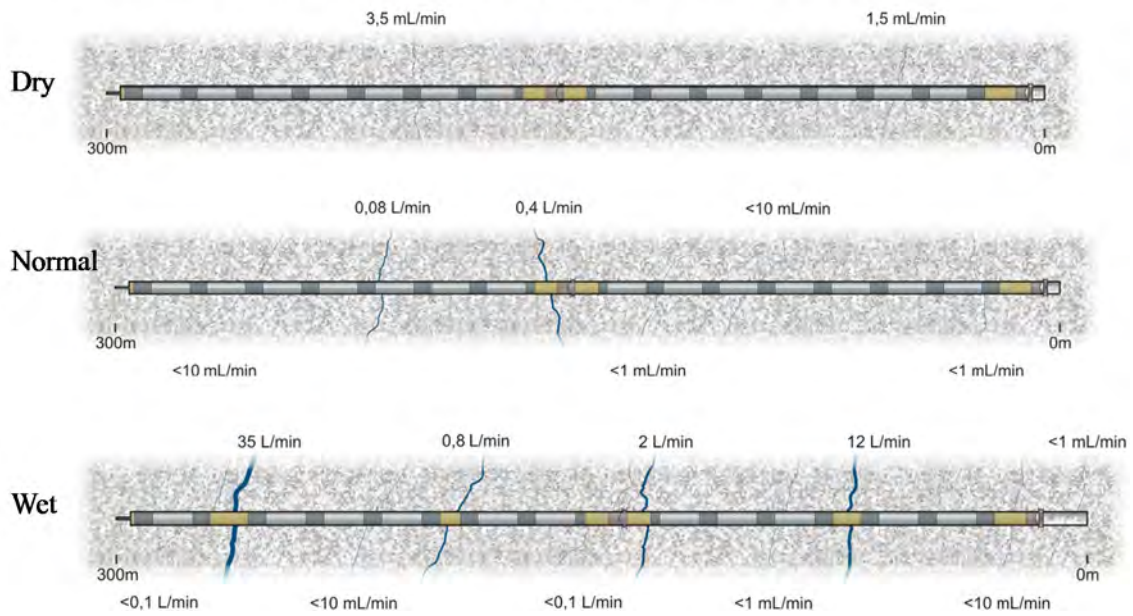


図 12.1.3-5 流入量に対応した KBS 3H の適用[6]

(6) 緩衝材設置時における緩衝材の浸潤防止方法

緩衝材を処分孔に設置する時に地下水や、湿度によって緩衝材が膨潤をすることを防ぐことを目的としてゴムシートを処分孔の周りに設置する。これは、ペレットを岩盤と緩衝材ウロックとの間に施工する時に撤去する。



図 12.1.3-6 緩衝材ブロック設置時のゴムシート

(7) KBS-3Hに関する最近の知見について

KBS-3Hに関する最近の知見をKBS-3Vと比較して表12.1.3-3に示す。

表 12.1.3-3 KBS-3H と 3V との比較

項目	KBS-3V	KBS-3H
坑道 (Deposition tunnel) 有 無	有	無
埋め戻し材の有無	有	無
岩盤掘削体積	100%	60%
品質管理 (建設・操業中)	—	より工業化されたプロセス
岩盤の擾乱	大：発破を使用するた め	小：機械掘削のため
建設中の環境への影響	—	小：充填材の体積が小さい
建設コスト	—	経済的 (埋戻しが無い)
重量：キャニスター/ スーパーコンテナ+緩衝材	25tf	46tf
坑道長	100m-300m	100m-300m
人工注水	無	有
人工注水/換気用パイプ長	—	150m
プラグの種類	ドリフトプラグ	コンパートメントプラグ+ドリフト プラグ

KBS-3H は、人工注水を前提とした DAWE(Drainage, Artificial Watering and air Evacuation) がレファレンスデザインとなっている。蒸留水を短いパイプで人工注水すれば、エロージョンはクリティカルではないという研究結果が報告されている。地下水の流入に関するデータが更新され、2008年の研究成果よりも流入量が少なく、発生箇所が分散しているという結果であった。ポストグラウチングの一手法であるメガパッカーシステム (Mega-Packer system) は、シリカゾルを使い、効率的であること報告されているが、試験を実施した深さは地下220mであり、500mの地中での水圧に耐えられるかは、今後の課題であると考えられる。地下水流入量が坑道10m当たり1.0L/分を超える場合には、その間に2つのコンパートメントプラグを設置し、その間には浸透性のある材料 (現在はまだ設計されていない) を充填することが考えられている。

第 12 章 参考文献

- [1] SKB: Design, production and initial state of the buffer, SKB Technical Report, TR-10-15,2015
- [2] SKB: Buffer, backfill and closure proreort for the safety assessment SR-Site, SKB Technical Report,, TR-10-47. 2010
- [3] DOPAS POPULU Poster ONKALO D7 8 :
http://www.posiva.fi/dopas/wp_3/experiment_4_poplu
- [4] DOPAS DOMPLU Poster at Äspo HRL D7 7 :
http://www.posiva.fi/dopas/wp_3/experiment_3_domplu
- [5] Mattias Åkesson, Ola Kristensson,Lennart Börgesson, Ann Dueck: THM modelling of buffer, backfill and other system components Critical processes and scenarios ,Part 2, p246,SKB Technical Report, TR-10-11 2010
- [6] Pekka Ant t i la, Jorma Aut io, Jarno Berghäl l, Lennar t Börges son, et.al, KBS-3H Design Description 2007, Posiva 2008-01

第13章 まとめ

13.1 実施内容

本検討では、平成 20 年度に整理した「緩衝材の施工品質が再冠水時に緩衝材に発生する事象に及ぼす影響の定量的評価のための室内試験計画」に基づき以下の事項について、試験を実施した。

- (a): 施工品質（密度分布）の均質化
- (b): Ca 型化
- (c): 施工品質（密度分布）が再冠水に及ぼす影響
- (d): 不飽和浸潤速度
- (e): 緩衝材表面近傍の止水性能評価
- (f): 異種材料界面を有する緩衝材の浸潤状況
- (h): 再冠水時のガスの影響
- (k): 緩衝材の施工技術の高度化による影響度の低減検討

これらの試験結果は、再冠水時に緩衝材に発生する事象に対する影響項目が、緩衝材の品質評価に及ぼす影響の定量評価のための試験という位置付けだけでなく、後続する大きな規模の土槽試験条件を確定させる情報も与えることができ、さらに大きな規模の工学規模試験結果の解釈などに役立つため、他に先んじて実施する必要がある。また、小規模試験は境界条件が比較的明確であることから、解析技術の向上にも資する情報を与えることも考えられる。そのため、この小規模試験結果を解析し、解析ツールを高度化する検討も併せて実施している。これにより、土槽試験や工学規模試験などの試験条件を確定させるための予測解析などに役立てることができる。

平成 23 年度からは、本検討の試験計画の基本概念である、この段階的に試験規模を大きくしていく“スケールアップを実践し、試験(a)をスケールアップした土槽規模試験として、

- (c) 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験

を新規に開始した。

さらに本検討では、緩衝材の施工方法の品質自体を向上させて、再冠水時に緩衝材に発生する事象に及ぼす影響を低減させる観点から、緩衝材の施工検討も実施している。これにより緩衝材の施工方法を高度化させ、均質な緩衝材を施工できれば、施工品質が再冠水中の緩衝材に発生する事象に及ぼす影響や、再冠水中に緩衝材に発生する事象が長期性能に及ぼす影響を、それぞれ低減させることができる。そのため、工学技術の高度化によって施工品質から長期性能までの連続的な評価を可能にすることができる。

平成 20 年度には検討計画を立案し、平成 21 年度には吹付け施工に適用可能な材料を調べるために、各国のベントナイト系材料を用いて吹付け箱試験を実施した。平成 22 年度では、平成 21 年度に実施した(e) 緩衝材表面近傍の止水性能評価の検討結果を受けて、吹付け工法による緩衝材

表面近傍の止水性能向上を意図した施工試験計画を検討した。平成 24 年度では高レベル放射性廃棄物地層処分施設堅置き処分孔と同規模のリング型モールドに対して、湧水を模擬してモールド壁面から水を供給した状態で緩衝材の吹付け施工を行った。

13.2 平成 25 年度までの成果

平成 24 年度までの検討結果を取りまとめると、以下のようになる。

13.2.1 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験

(1) 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

1) 試験結果（蒸留水のケース）

- 密度分布が均質な供試体と不均質な（密度分布を有する）供試体とでは、全体の密度が同じであっても平衡膨潤圧が異なる結果を示した。このことから、膨潤圧試験のばらつきの要因の一つとして密度分布が考えられる。また、平衡膨潤圧に達した後に解体した供試体には、目視でも判断できる明確な密度分布が残っており、膨潤圧が平衡状態にあることと密度分布が均質化することが同時に成り立つという考え方には一致しない結果となった。これに対して、同供試体の透水係数は大差がないという結果となった。このことから、乾燥密度と膨潤圧の関係は、乾燥密度と透水係数の関係よりも非線形性が強いと考えられる。
- 乾燥密度 1.8Mg/m^3 と乾燥密度 1.4Mg/m^3 の場合(Case1)、供試体は同じ密度にならず密度分布を残した状態で 600 日間程度、非常にゆっくりであるが均一化傾向を継続している。
- 密度の異なる供試体同士を、ピストンを介して直列に繋いだ膨潤量試験(直列膨潤量試験)では、乾燥密度 2.0Mg/m^3 と乾燥密度 1.2Mg/m^3 の場合(Case2)、供試体は同じ密度にならず密度分布を残した状態で 900 日間以上、平衡状態に至っている。このため、試験を終了し解体した結果、上下の供試体内部に密度分布が確認された。この密度分布が膨潤によるものか、供試体作成時に発生したものかを明らかにするために、本試験と同じ手順で再度供試体を作成し、試験前の密度分布を取得する必要がある。
- 膨潤によって密度分布が均一化する範囲を明確にするために、乾燥密度 1.7Mg/m^3 と乾燥密度 1.5Mg/m^3 のケース(Case3)を開始した。試験開始 3 か月弱で既に均一化傾向が鈍化している。
- 今年度解体した直列膨潤量試験のうち高密度供試体（初期乾燥密度： 2.0Mg/m^3 ）と低密度供試体（初期乾燥密度 1.2Mg/m^3 ）の解体を行い、密度分布を計測した。両供試体共に、上面側の密度が小さいことが分かる。上側の供試体（低密度供試体）は上面が給水面であるが、下側の供試体（高密度供試体）は下面が給水面である。このことから、解体時に給水面から水を吸って局所的に膨潤したのではなく、供試体の上部にあった水が解体

時に供試体に流下して膨潤したものと考えられる。仮にこの解体時の膨潤がなければ、概ね均一な供試体分布となっており、両供試体とも給水側だけが膨潤しているという状況ではないことが分かった。

2) 試験結果 (NaCl 水溶液ケース)

- 今年度から試験水として 0.5M の NaCl 水溶液を使用した密度差のある供試体の直列膨潤量試験を開始した。密度差は蒸留水と同等である。すべてのケースで密度差が残った状態で定常状態に達した。膨潤圧とベントナイトの乾燥密度が一意に対応しているのであれば、この膨潤圧の経時変化は両供試体の乾燥密度が 1.6Mg/m^3 になった時点で平衡状態に達するはずである。しかしながら力学的には、物体の変形は釣合いが満足されるまで生じるはずであり、乾燥密度が同じかどうかではなく、膨潤圧が釣合った時点で変形が止まると考えることのほうが自然である。この力学的な解釈が正しければ、高密度供試体と低密度供試体の密度変化は互いに近づくが、密度差はゼロにはならないと考えられる。
- イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の直列膨潤量試験の膨潤量は、蒸留水のケースに比べ、イオン強度の影響で小さい。このことから、イオン強度が高いほど残留密度差が大きくなると言える。また、初期の密度差が大きいものほど、残留密度差が、大きくなる。さらに、イオン強度の影響により、蒸留水のケースに比べ、NaCl 水溶液ケースの方が膨潤圧は小さい傾向にある。
- 直列膨潤量試験では、2 つの供試体のうち、高乾燥密度供試体の乾燥密度の値が大きい程、膨潤量が大きくなる。イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液を用いて実施した場合の試験結果は、この考えに整合している。しかしながら、蒸留水のケースのうち、乾燥密度 1.5Mg/m^3 と 1.7Mg/m^3 の膨潤量よりも乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の方が小さくなっている。乾燥密度のばらつき以外の理由で、膨潤量が大きめに発生することは考えにくいいため、乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 のケースの膨潤量が小さいと考えられる。一方、直列膨潤量試験の場合、膨潤圧は、2 つある供試体のうち、低乾燥密度供試体の乾燥密度が大きい程大きくなる。NaCl 水溶液ケースでは、この考え方に整合した結果が得られているのに対して、蒸留水では、乾燥密度 1.5Mg/m^3 と 1.7Mg/m^3 の膨潤圧よりも乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の方が大きくなっている。前述の膨潤量試験の結果と併せて考えると、乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の場合において、乾燥密度 1.4Mg/m^3 セルにおいて、ピストンの傾ぎ、ピストンとセルの摩擦などの影響で、乾燥密度 1.8Mg/m^3 の供試体の膨潤量が乾燥密度 1.4Mg/m^3 の供試体にきちんと伝播されておらず、その反力として、膨潤圧が大きくなったものと考えられる。また、同様の原因で、乾燥密度 1.4Mg/m^3 と 1.8Mg/m^3 の場合において膨潤量が小さめになっているものと考えられる。
- NaCl 水溶液のケースにおける直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化から、直列膨潤量

試験の2つの供試体のうち、乾燥密度が大きい供試体の方が、給水量が大きいことが分かった。これは、乾燥密度が大きい供試体は吸水膨潤するためである。乾燥密度が 1.2Mg/m^3 と 2.0Mg/m^3 のケースでは、乾燥密度 2.0Mg/m^3 の供試体の膨潤に伴って、乾燥密度 1.2Mg/m^3 の供試体から排水が計測された。

- 直列膨潤圧試験の結果として得られた残留密度分布に Kozeny-Carman 則を適用し、残量密度差に起因する透水係数分布を取得した。この結果、試験後の透水係数は、蒸留水のケースでは、 10^{-13}m/s オーダーであるが、NaCl 水溶液のケースでは、 10^{-11}m/s から 10^{-12}m/s 程度である。

(2) 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

- 力学的な解釈の妥当性を検証するために実施した密度が同じであっても応力履歴が異なる供試体同士を、ピストンを解して直列に繋いだ膨潤圧試験では、両供試体が同じ密度であるのにも関わらず、応力状態が釣合っていないため変形(密度分布)が生じ始めている。このことから、ベントナイトは均質化するまで膨潤するのではなく、力が釣合い状態に至るまで膨潤するという解釈の妥当性が分かった。
- 密度差の有無がベントナイトの膨潤圧に及ぼす影響を力学的に評価した。乾燥密度と膨潤圧の関係が非線形関数であると仮定すると、全体の乾燥密度が同じであっても密度分布の有無によって、計測される膨潤圧が異なる可能性があることを示した。
- 応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価において、蒸留水を用いた直列膨潤量試験のケース (Case2) の解体を行った。供試体作製時にセルに投入した試料の乾燥質量 90.84g が正規圧密供試体で 2.26g 、過圧密供試体で 3.5g 減少していた。この質量の低下は、排水中に含まれる水溶性の塩類によるものと考えられる。さらに、解体時の除荷による体積膨張も乾燥密度の低下の一因であると考えられる。密度分布に着目すると、過圧密供試体の上下端が膨潤して試験開始時に比べ乾燥密度が低下していることが分かる。このことから、過圧密供試体が正規圧密供試体に圧縮された原因に、応力履歴が膨潤圧に及ぼす影響以外にも、直列膨潤試験前の膨潤過程による密度分布の影響も含まれる可能性がある。今後、再現性確認をする場合、過圧密供試体の膨潤過程には十分な時間をかける必要がある。
- イオン強度0.5のNaCl水溶液を用いて応力履歴が膨潤挙動に及ぼす影響評価を実施した。蒸留水を用いた直列膨潤量試験のケース (Case2) の解体の結果、密度分布が生じていることが明らかとなったため、NaCl 水溶液で OC 供試体の作製は、先に飽和させてから膨潤させることとした。

(3) 力学に立脚した残留密度差の理論的解釈

- この事象を弾塑性力学的に解釈すると、高密度領域の応力状態は膨潤線を辿り、低密度領域の応力状態は圧縮線を辿るため、両者は乾燥密度と応力の平面で交わることなく(膨潤

圧が平衡状態にあることと密度分布が均質化することが同時に成り立つことがなく)、応力の釣合う点で密度の平均化は止まる（密度分布が残る）ということを示すことができた。

- 既往の研究で取得した $\epsilon \log P$ 関係で各ケースを調べると、Case1 では現状ではまだ応力状態が釣り合っておらず、Case2 では応力状態がほぼ釣り合っているという結果が得られ、この弾塑性力学に立脚した解釈の妥当性が確認できた。
- 残留密度差を弾塑性力学に立脚して説明しようとする試みは、残留密度差の推定や緩衝材の許容される密度分布などの施工方法に対する仕様の決定につながる可能性があり、非常に重要である。しかしながら、本検討で実施している乾燥密度 $1.2 \sim 2.0 \text{Mg/m}^3$ の緩衝材の膨潤挙動を説明できる非常に幅広い応力レベルで実施された圧密試験結果が存在しないため、現状では、比較的幅広い応力レベルで Sasakura ら[1]によって取得されたクニゲル V1 の一次元段階載荷圧密試験から得られる乾燥密度- $\log p$ 関係（応力ひずみ関係）を用いるより他はない。ただし、この結果は 2002 年のクニゲル V1 を用いた試験結果であり材料ロットが異なることや、乾燥密度 1.2Mg/m^3 付近の正規圧密曲線が不足していることなどから、本検討で実施した直列膨潤量試験から得られた残留密度差の結果を理論的に説明するためには、乾燥密度- $\log p$ 関係を新たに取得すべく圧密試験を開始した。

13.2.2 Ca 型化と飽和の可逆性検討

(1) 初期～第 1 回液種交換後

- Na 型ベントナイトを蒸留水で飽和した後に CaCl_2 水溶液を通水したケース(Case1)、Na 型ベントナイトに直接 CaCl_2 水溶液を通水したケース(Case2)、Ca 型ベントナイトに CaCl_2 水溶液を通水したケース(Case3)では、それぞれ平衡膨潤圧が異なる傾向を示した。このため、Case2 と Case3 では通水液を蒸留水に切り替えた。
- Case2 と Case1 とでは平衡膨潤圧が異なる結果となっていたが、Case1 の膨潤圧が急激に低下し、両者はほぼ同じ値となった。さらに Ca 型化の促進のために Case1 に 0.2MPa の通水圧を与えたところ、膨潤圧が有効応力として整理した場合にほぼゼロとなった。膨潤圧の解釈を有効応力として取り扱うことは妥当であると考えられるが、通水圧自体が間隙水圧と等価ではないため、正確な膨潤圧を取得するためには間隙水圧の評価が課題となった。
- Case1、Case2 では、注入した CaCl_2 水溶液に含まれる Ca イオンが全て Ca 型化に消費されると仮定して、Na 型ベントナイトの陽イオン交換容量から Ca 型化率を算出した。Case2、Case3 の液種交換時点で Case1 の Ca 型化率は 2.7%であったのに対して、Case2 では 46.1%であった。このことから、事前に蒸留水で緩衝材を飽和させることは Ca 型化させる Ca イオンの供給を遅らせる効果(Pre-Hydration 効果)がある可能性がある。

(2) 第2回液種交換までの変質状況評価

- Case1 の通水圧増加前の Ca 型率が通水期間 300 日で 2.7%であったのに対して、Case2 では 110 日間で 46.1%であった。さらに Case1 で通水圧を増加させた後の Ca 型化率は 127.7%であり、供試体 1 個を十分に Ca 型化させる量の Ca イオンが供給できた。通水圧増加前の Case1 の飽和した緩衝材では Ca イオンが拡散現象で供給されるのに対して、通水圧増加後の Case1 や Case2 では Ca イオンが毛細管現象、もしくは移流によって供給されている。このことから、Pre-Hydration 効果は、緩衝材を拡散場にして変質される陽イオンを移流させない効果であると考えられる。
- Case2 では、通水液を蒸留水に変化させてから、膨潤圧が漸増を続けている。これは間隙水のイオン強度が低下したからであると考えられる。また、Case3 では、Ca 型ベントナイトは液種の違いに拠らず、膨潤圧がほぼ一定値を示している。このことから、Ca 型ベントナイトの膨潤圧は液種の影響を受け難いと考えられる。
- ベントナイトの膨潤圧はドラスティックに変化しているが、その一方で透水係数は Na 型ベントナイトを蒸留水で飽和させた後に CaCl₂ 水溶液を通水した場合の透水係数が一貫して他のケースよりも低い。原因としてはプレハイドレーション効果と呼ばれる現象が挙げられる。これは、一旦、蒸留水による膨潤で土骨格構造が形成されると、その後に CaCl₂ 水溶液を通水しても土骨格構造が完全に崩れないため、Ca 型化の影響が低減されるというものである。このプレハイドレーション効果に関しては実験により定量評価する必要がある。

(3) 第1回液種交換後～第2回液種交換後

- 変質状況評価によって、不飽和状態の Na 型ベントナイトに直接 CaCl₂ 水溶液を通水した後に通水液を蒸留水に切り替えたケース (Case2) は十分に Ca 型化されていない可能性が高いことが分かった。また、Ca 型化ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水したケース (Case3)も蒸留水を通水しており、十分に Ca 型化されていると考えられる Case1 と Case2、Case3 の全てのケースでベントナイトと通水液の組み合わせが整合していない状態であることが分かった。そこで、Case2 も十分に Ca 型化させ、全てのケースで Ca 型化ベントナイトに CaCl₂ 水溶液を通水する試験条件にすべく、再度、全てのケースで CaCl₂ 水溶液を通水した。Case2 と Case3 で CaCl₂ 水溶液に再度切り替えたのは、試験開始から 1437 日目であり、第一回目の通水液の切り替えからは 1327 日目である。第2回液種交換後に透水係数が増加する傾向を示している。ただし、透水係数の経時変化は変動が大きいため、今後の推移を静観した上で判断する必要がある。
- 現状では、膨潤圧への影響を避けるために通水圧を作用させていないため、CaCl₂ 水溶液は拡散で供試体内に移動している。拡散で変質させるのには時間がかかるため、ある程度の時間、通水液の切り替えによる膨潤圧の変動を観察した後に Case1 と同様に、0.2MPa 程度の通水圧を作用させる計画である。

13.2.3 長尺ベントナイト供試体を用いた一次元浸潤速度取得試験

- 乾燥密度 1.6Mg/m^3 、初期含水比 10%のケイ砂 30wt%含有ベントナイトの供試体($\phi 50\text{mm} \times 1,000\text{mm}$)に対して、蒸留水と NaCl 水溶液による一次元浸潤試験を実施した。その結果、蒸留水の場合の通水圧 60kPa (水位差 $+7.5\text{kPa}$)に対して NaCl 水溶液の方が低い圧力 0kPa (水位差 $+7.5\text{kPa}$)でも同等に浸潤が進むことがわかった。比抵抗値の変化点を浸潤フロントとすると両ケースとも 1500 日程度で 900mm 程度であった。
- このことから、液種の違いによるベントナイトの膨潤の程度の違いがベントナイトの不飽和浸潤挙動に対して大きな影響を与えることが分かった。本試験は今後継続実施し、緩衝材の飽和に掛かる時間評価などに資する情報を与える。
- 平成 22 年度、比抵抗値が初期値から 5%低下した時点で浸潤フロントが到達したと見做した場合の浸潤フロントの進展状況から、浸潤フロントの底面からの位置を $d(\text{mm})$ 、経過時間を $t(\text{day})$ とすると、近似関数が $d = 27.8t^{0.477}$ で表わされることを示した。この近似関数を用いて、 1000mm の供試体の上端面まで浸潤フロントが進展するのに要する時間を算出すると、 $t=1828$ 日となり、約 5 年に相当することが分かった。平成 23 年度、後続する試験結果もこの近似曲線と非常に良い相関を示していることから、この近似曲線の予測精度の高さが確認できた。
- 上記の近似曲線を時間微分することによってフロント位置の移動速度の経時変化を算出した。
- 本試験の結果、化学的な変質挙動が施設閉鎖後の何時から始まるのかを推定できる。また、今後の浸潤状況を把握することによって浸潤が一次的に推移するのか、それとも界面を卓越的に浸潤していくのかが分かる。現在の緩衝材の施工方法は、緩衝材と天然バリアの間は隙間、若しくはペレットを充填する方法か、原位置締固めや吹付けのように界面に隙間なく施工出来る方法とが想定されており、施工方法の選択において界面の水理場は施工方法を特徴付けるポイントでもある。
- 本試験結果は、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析のベンチマーク試験という活用の仕方も可能であり、膨潤性鉱物の不飽和一次元浸潤解析が可能な CODE-BRIGHT[2]や DACSAR-UA[3]などの高度化に資する情報となる。
- Archie 式を援用して求めたベントナイトの飽和度と比抵抗の関係(式 4.1.4-1)を用いて、比抵抗値の推移から飽和度の推移を換算した。比抵抗値の分布と飽和度の分布は概ね同様であるが、飽和度分布の方が蒸留水と NaCl 水溶液の違いが顕著である。これは、ベントナイトの飽和度と比抵抗の関係(式 4.1.4-1)の非線形性が強く、低飽和度領域では比抵抗値の変化に飽和度の変化が緩慢で、高飽和度領域では比抵抗値の変化に対して飽和度の

変化が急であるためである。Archie 式を援用して求めたベントナイトの飽和度と比抵抗の関係（式 4.1.4-1）から取得した飽和度分布の推移から、初期飽和度から 1%飽和度が増加した時点で浸潤フロントが到達したとみなした場合の浸潤フロントの進展状況を取得した。

13.2.4 緩衝材表面近傍の止水性評価

(1) 小型セルによるパイピング・エロージョン・破過試験

1) 原位置施工を模擬した小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験

- ▶ 平成 22 年度では、鋼製の通水セルを用いて破過圧計測試験を行った。試験はベントナイト単体（界面なし）、ベントナイトとベントナイトの界面有り、セメントとベントナイトの界面有り、花崗岩とベントナイトの界面有りの 4 ケースで実施した。また、通水速度も 0.001cc/min パラメータとした。試験後は染料であるローダミンを供試体に通して、水みちの観察を行った。しかしながら、有意なブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象は計測されなかった。

2) ブロック定置・ペレット充填方式を模擬した小型セルによるパイピング、エロージョン、破過試験

- ▶ 平成 23 年度は、アクリルセルを用いてセルと供試体の間に隙間を設けた場合とペレットを充填した場合でブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象を計測した。これは、ブロック定置工法とペレット充填工法に相当する。このように解釈すれば、平成 22 年度のケースは原位置締固め工法に相当すると考えられる。
- ▶ 通水速度は、POSIVA や SKB 社の処分坑の仕様である 0.1L/min.を参考にして、最大流速を 0.1L/min.とした流量制御試験とした。また注入口の位置を下面と上面にした。上面から注水する場合、隙間を有するケースは供試体上面とセルの上蓋の間にあり、通水圧はベントナイトの膨潤を抑制する方向に作用することになる。
- ▶ ペレット充填ケースでは、大粒径ペレットと大粒径と小粒径の混合のケースで実施した。大きなペレットのみケースでは乾燥密度 1.1Mg/m³、大粒径と小粒径の混合のケースでは 1.5、1.57Mg/m³ であった。いずれのケースにおいても通水初期に小さな水みちが形成され、時間経過に伴って、大きな 1 つの水みちとなることが分かった。
- ▶ ペレット充填ケースにおいて、水みちが形成された後に流量を 0.1cc/min まで低下させた。この結果、水みちの断面積は流速の低減に応じて小さくなる傾向を示した。また、流量 0.1cc/min では、通水圧が増加し始めた。
- ▶ ブロックのケースでは、膨潤後の乾燥密度が 1.6Mg/m³ となるように作製した。この場合、通水初期に帯状の水みちが複数形成され、時間経過に伴って、数本の大きな帯状の

水みちとなることが分かった。

3) パイピング、エロージョン、破過現象の詳細検討

- 人為的に複数の水みちを供試体に設置したブロック供試体によるパイピング・エロージョン試験を実施した。その結果、水みちは、1本に収斂すること、その水みちの発生箇所は緩衝材と非膨潤性材料の界面であることが明らかとなった。この傾向は、0.5MのNaCl水溶液の場合も同様であった。
- 蒸留水の場合、初期から最後まで流速を一定にしてエロージョンが発生しない流速を計測した結果、本試験条件では、1cc/minであった。0.5MのNaCl水溶液の場合、0.1cc/minであっても破過とシールが繰り返され、完全にシールされることはなかった。
- Case3では、エロージョンで全てのベントナイトが流出するのに要する時間を調べる目的で、 $\phi 100\text{ mm} \times H50\text{ mm}$ の供試体の周りに5mmの隙間を有するセルに($\phi 110\text{ mm} \times H50\text{ mm}$ に膨潤後の乾燥密度は 1.6 Mg/m^3)流速が0.1L/minで通水を行った。蒸留水の場合では、エロージョンで全てのベントナイトが流出するには27日程度を要する。0.5MのNaCl水溶液で通水を行った結果、通水開始から2時間で大きな水みちが形成され、そのままの形で16日目まで至っている。最終的に残った水みち以外は次第に閉塞されているのが分かる。NaCl水溶液の場合、蒸留水の場合と比較して、排水が透明であり、水みちの形状もあまり変化しないことが分かる。これは、イオン強度の影響でベントナイトが膨潤しないためであると考えられる。蒸留水の場合、全てのベントナイトが流出するには27日程度を要したが、NaCl水溶液の場合、27日を超えても、ベントナイトはほとんど変化していない。
- クニゲルV1の蒸留水のケースに比べ、NaCl水溶液のケースの方が、エロージョン量が少ない。これは、NaCl水溶液のイオン強度の影響でモンモリロナイトの膨潤が抑制されるため、水みち内の流水に分散せず、沈殿するためであると考えられる。また、水みちが収斂した後では、エロージョン材料は沈殿し、セル外に流出されないため、総流量とエロージョン質量の関係の勾配は水平である。これらの傾向は、底面から上面に向かって通水させているためであり、通水方向と排水箇所的位置関係に依存するものと考えられる。既往の研究から、MX80の場合、塩水の方が、水道水よりもエロージョンし易いという結果になっているが、境界条件に依存するため、更なるデータの蓄積を行い、同じ条件同士で比較する必要である。
- 流速が速い場合、内部が乾燥状態のまま表面に水みちが形成され、流速が遅い場合内部まで浸潤し、しっかりと膨潤している。水みちの生成に、供試体内部への浸潤速度と流速の大きさのバランスが重要であることが示唆された。
- 0.5MのNaCl水溶液を0.001L/minで通水した場合、水みちの形成と破過を繰り返して

いるため、通水圧は増減を繰り返した。0.001L/min で給水した場合の通水圧は、最大で 0.8MPa 程度であった。0.1cc/min の場合、通水圧が増減を繰り返しているため、破過とシールを繰り返した。この場合の最大通水圧がは 0.9MPa 程度であった。

4) ブレイクスルー、パイピング、エロージョンに対する人工給水効果の評価

- 事前に給水膨潤させた供試体に流量制御で通水した結果、全てのケースで通水圧がアクリルセルの上限圧である 3MPa に達していることから、人工給水による膨潤によって、パイピングやエロージョンが抑制できることが分かった。NaCl 水溶液の場合、0.5L/min や 0.1L/min のケースで、一時的に送水圧が低下しているため、破過現象が発生したことが分かる。しかしながら、その後、再び送水圧が増加に転じており、パイピングやエロージョンの発生には至っていない。
- 全てのケースで排水側用の溝にベントナイトが膨潤して止水し、水みちが形成されていないことが分かる。ただし、試験中の側面図の観察から、ペレット側の底面では、通水圧が全応力として作用し、供試体を押し上げて圧縮し、隙間が発生していることが変わる。同様の結果は SKB 社の検討 (SKB 社 Report R-06-72[4]) でもみられており、人工給水を行っても、湧水の圧力によって発生する隙間が流出箇所と連通するような場合には破過現象が断続的に生じるものと考えられる。

(2) 流路長がブレイクスルー、パイピング、エロージョンに及ぼす影響

1) 原位置締固め・蒸留水ケース (Case1)

- 供試体はアクリルセル内で仕上がり高さ 5mm を 200 層締め固めて作成したものであり、セルと供試体間には隙間は存在しない。すなわち、前述の小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験における施工方法では、原位置締固め工法や吹付け工法に相当する。試験では実際の処分場の深度である地下 300m 以深に相当する通水圧力として 3.0MPa を与えた。注水圧制御で 0.2、0.5、1.0、2.0、2.5、3.0MPa に段階的に水圧を作用させた。その間、破過現象と思われる微細な水圧の現象は見られるものの、大局的には安定して水圧が保持された。

2) ブロック定置・蒸留水ケース (Case2)

- 供試体は高さ 100mm×直径 45mm の円筒形ブロックを 10 段重ねることで作製した。試験初期には、供試体とセルの間には 2.5mm の隙間が存在している。流速は 0.1L/min. から 0.0001L/min. まで段階的に低下させた。流速が 0.1L/min. から 0.001L/min. までは、水みちが形成されており注入圧は小さい状態であった。しかしながら、流速を 0.0001L/min. まで低下させると注入圧が大きく変動した。注入圧が大きな値を示した直後に、注入圧が非常に小さくなるなど振動した。これば、一時的に水みちがシールされた後に注入圧によってシールが破過した (ブレイクスルー) したものと考えられる。

3) ペレット充填・蒸留水ケース (Case3)

- ▶ 供試体は大粒径のペレットを充填することで作製した。このため、初期状態では、大きな間隙が存在する。また、乾燥密度も 1.1Mg/m^3 程度であった。流速は 0.1L/min. から 0.0001L/min. まで段階的に低下させた。流速が 0.1L/min. から 0.001L/min. までは、水みちが形成されており注入圧は小さい状態であった。しかしながら、流速を 0.0001L/min. まで低下させると注入圧が大きく変動した。注入圧が大きな値を示した直後に、注入圧が非常に小さくなるなど振動した。これば、一時的に水みちがシールされた後に注入圧によってシールが破過した（ブレイクスルー）したものと考えられる。

4) ブロック定置・NaCl 水溶液ケース (Case4)

- ▶ Case2 とほぼ同じ条件で試験を行ったが、使用する液種が蒸留水ではなく、 0.5M の NaCl 水溶液である。蒸留水のブロック定置工法のケースと同様に大きな水みちがセルとの界面に発生し、水みちには緩衝材から分離して沈殿したケイ砂が沈殿している。NaCl 水溶液であっても、蒸留水の場合と同様に、大きな水みちの底部には 3 号ケイ砂、中部には 5 号ケイ砂、上部には舞いあがったベントナイトが堆積している。舞いあがったベントナイトは徐々にエロージョンによってセル外に流出するものと考えられる。
- ▶ 給水量よりも排水量の方が小さいため、まだ供試体は飽和しておらず、パイピングしながら少しずつ供試体内部に水が浸潤していることが分かった。給水圧力の経時変化から、水みちが形成されているため、大きな給水圧は発生していない。試験後に供試体に染料であるローダミン B を流して水みちを観察した結果、水みちが 1 本に収斂していることが分かった。
- ▶ 総流量とエロージョン質量の関係を取得した。他のケースに比べ明らかに総流量とエロージョン質量の関係の勾配が急であることが分かった。但し、通水量が 20L を過ぎた辺りから、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっている。これは、ブロックとセルの界面に形成された水みちに堆積したケイ砂がエロージョンを抑制しているためだと考えられる。水みちに堆積したケイ砂が 40cm 程度の高さになった頃から、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっていることが分かった。

5) モンモリロナイトブロック定置・蒸留水ケース (Case5)

- ▶ 供試体は高さ 100mm × 直径 45mm のモンモリロナイト 100% の円筒形ブロックを 10 段重ねることで作製した。試験初期には、供試体とセルの間には 2.5mm の隙間が存在している。流速は 0.1L/min. である。試験初期から、複数の水みちが大きな水みち 1 本に収斂し、シールされることなくエロージョンが継続した。総流量とエロージョン質量の関係は、クニゲル V1 と同じ勾配であったことから、クニゲル V1 においても、エロージョン材料の大半はモンモリロナイトであることが示唆された。

(3) 緩衝材の限界流速の検討

- 材料特性としての限界流速の存在を確かめるために限界流速計測試験を実施した。ある乾燥密度に締固めた緩衝材を人工的に作った流路の河床部に設置し、様々な流速で通水した。

(4) 工学規模パイピング・エロージョン試験

- 小規模試験よりスケールアップした工学規模試験において、試験規模の影響評価、実際の処分孔を模擬した境界条件下でのパイピング・エロージョン現象の発生状況観察や発生条件の検討、さらにエロージョンのモデル化を行った。セルとの間に隙間がある条件で蒸留水を下面から上面に向かって一次的に通水させた。この際の流速は、シリンジポンプで 0.1L/min となるように制御した。セルの寸法は $\phi 560 \text{ mm} \times \text{h}600 \text{ mm}$ であり、供試体は $\phi 500 \text{ mm} \times \text{h}600 \text{ mm}$ で膨潤後の乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 である。

(5) 緩衝材や埋め戻し材等の材料特性としての許容流速の整理

- 総流量とエロージョン質量の関係に基づいて、許容流速と許容エロージョン量の設計概念を示した。この概念に基づいて、許容される流速をなるべく大きくして処分可能な孔を多く確保するためには、止水工法や地下水低下工法などで流速を小さくさせる以外には、閉鎖するまでの時間を短くするか、施工する緩衝材の密度を高める（処分孔当たりの緩衝材の乾燥質量を大きくする）以外に工学技術としての対策はない。また、許容される流速と緩衝材が施工可能な流速の大小関係に関しても検討が必要である。

13.2.5 施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験

(1) ペレット充填ケース

- 試験(a)の要素試験による施工品質（密度差）が再冠水時に発生する現象に及ぼす影響の調査のための試験をスケールアップして、供試体寸法が $\text{W}700 \text{ mm} \times \text{H}200 \text{ mm} \times \text{D}150 \text{ mm}$ となる土槽を用いた試験を実施した。試験(a)と同様に、施工法は供試体に人為的に与えた密度分布、隙間、初期間隙径などによって代表させた。注水位置は底面に配置された3枚のポーラスメタルから為され、背面には浸潤状況を取得するための比抵抗計測用の電極、上盤には膨潤圧分布を計測するためのロードセルを配置した。注水はマリOTT管を用いて行い、水位が供試体上面になるように水頭差を制御して行った。
- 平成23年度は、ペレット充填工法とブロック定置工法を取り上げて土槽試験を行った。ペレット充填方法では、初期間隙が非常に大きいため、注水開始直後に供試体上面まで水位が達した。その後にペレットに間隙水が吸われるとともに膨潤圧が発生した。ペレットには乾燥した芯が見られるが、徐々に膨潤によって間隙がシールされた。シールされた後もペレット間の界面は識別可能であった。
- 試験開始1日で、吸水面（底面）近傍のペレットは一体化され、止水層を形成した。これ

に伴い、水の供給が断たれたため、試験開始直後に供給された間隙水を消費して膨潤が進んだ。膨潤に伴って、吸水によって間隙の水が奪われ、一旦、ペレット表面の膨潤によってシールされた間隙であっても再度、空隙になるという現象がみられた。このような空隙は、時間経過に伴って上面から深部に進展した。

- ▶ 浸潤状況は、ある程度比抵抗計測によって把握できるが、ペレットと電極が点接触している可能性があり、その変動が激しい。ブロック定置のケースでその適用性について確認したい。
- ▶ 膨潤圧分布は、上蓋設置時にペレットを圧縮させた際に発生した圧力を初期値として、給水によって圧力は急激に低下した。その分布は、給水前に不均一であったが、給水によって均一化する傾向を示した。また、給水開始 2 カ月後には膨潤圧は増加に転じた。

(2) ブロック定置ケース

- ▶ ブロック定置ケースの給水開始 17 時間後の段階で、ブロックとブロックの間への浸潤は進展していないが、ブロックと土槽の界面では、ブロックの上面（ブロックとロードセルの界面）にまで達することが目視観察の結果から分かった。さらに、給水開始から 300 日目には、底部と両端のブロック間の隙間は目視ではほとんど判別できないほど一体化した。このことから、水がブロックと土槽の界面を選択的に浸潤していることが推察できた。底部から側部の界面を浸潤した水は上部のロードセルとの界面まで達しており、上面のブロック間の隙間も判別し難くなっている。このことから、非膨潤性材料に囲まれた緩衝材では、地下水が先行して非膨潤性材料との界面に浸潤するため、緩衝材内部に空隙空気がトラップされる可能性が高い。
- ▶ 給水開始から 587 日目（解体直前）では、底部と両端のブロックの一体化が進み、底部から 1 段目と 2 段目のブロックの界面まで一体化が進んだ。その他にも、各段のブロックの上側の隙間も一体化している。このことから、底部から供給された水は、底部からブロック間の隙間だけでなく、土槽との界面に沿って土槽上部まで浸潤するが、土槽上部まで浸潤した水の一部は、ブロックの各段の間の界面に横から浸潤しブロックの上部を膨潤させるものと考えられる。底部からブロック間の隙間を浸潤する水の数よりも、土槽との界面に沿って土槽上部まで浸潤する水が、ブロックの各段の間の界面に横から浸潤する速度の方が速いため、各段のブロックの上側が一体化し、ブロックの下側には隙間が残るものと考えられる。
- ▶ 試験開始から 8000 時間(333 日)程度で飽和注水量に達している。飽和注水量に到達した後も給水量が増加し続けている理由としては、土槽の上蓋がロードセルの配線を引き出すために密閉構造となっておらず、隙間から間隙水が蒸発しているためだと考えられる。

- ブロック定置ケースの膨潤圧の経時変化は、初期に設置圧 100～200kPa 程度の値を示しているが、給水を開始後は、この応力は徐々に増加した。増加傾向は給水開始から 3000 時間(約 125 日)まで続いて、その後ゆっくりと減少傾向を示した。
- 比抵抗による浸潤状況の把握を行った。その結果、水量が土槽の飽和注水量に達する約 8000 時間 (333 日) 以降では、浸潤状況は、ほぼ定常状態になり、比抵抗値の分布も概ね解消され、ほぼ均一な状態になっているなど、比抵抗値による浸潤状況の計測結果と吸水量の関係も整合することが分かった。このことから、比抵抗値による浸潤状況の計測は有効であると言える。
- 比抵抗値と飽和度の関係から飽和度分布を取得した。この結果は、解体による乱れなどの影響があるものの、土槽の解体結果とおおむね一致しており、さらに、給水量が土槽の飽和注水量に達する約 8000 時間 (333 日) 以降では、飽和度は、ほぼ 100%で均一になるなど、給水量の計測内容と整合する結果となった。

13.2.6 浸潤による間隙空気の移行調査手順

(1) 浸潤による間隙空気の移行調査

- 1000 mmの長尺アクリルセルの中央にポーラスメタルを配置して、その上下を乾燥密度 1.6Mg/m³ のベントナイトで挟み込むようにセットした供試体を用いて、浸潤に伴う間隙空気の移行調査を開始した。
- 供試体の上下端から流量制御である程度給水したのちに圧力制御することで、破過現象などを発生させることなく試験を遂行できた。
- 供試体中央の間隙空気を計測している空気圧計は大気圧変動の影響を常に受けることが明らかとなった。大気圧の変動を小さくする方策として、間隙空気圧に 50kPa の背圧を作用させることが有効であった。これにより大気圧変動に対して鈍感になった。
- 背圧として作用させた 50kPa の間隙空気圧に対して、10kPa でも給水が可能であったことから、間隙構造が連通していないものと考えられる。今後、給水圧を段階的に増加させる必要がある。
- 浸潤状況を比抵抗変化で取得できた。

13.2.7 吹付け施工技術の適用性

(1) 高度化する緩衝材の施工技術の選択

- 緩衝材の施工方法を高度化することによって密度分布や隙間がない緩衝材を構築できれば、再冠水に伴う様々な発生事象の影響を低減できる可能性がある。そのため、密度分布が小さく、隙間が出来ない施工法である吹付け工法による緩衝材の施工試験の前段階としてMX80、Milos Ca bentonite、Friedland Clayの3種類のベントナイトの吹付け箱試験を行った。その結果、モンモリロナイトは吹付けに適さないことが分かった。重曹水などを添加して膨潤を抑制するか、ケイ砂などを混合させてモンモリロナイト含有率を下げることによって、自由水を増やすことができれば、吹付けに適する材料と出来る可能性がある。Friedland Clayは吹付けに適した材料であり、Friedland Clayを用いた埋戻しを吹付け工法で行うことは理にかなっている。

(2) 湧水環境下における吹付け施工実験

1) 湧水影響評価

- 結晶質岩(0.1L/min/27孔)・堆積岩(0.1L/min/3孔、0.01L/min/3孔)での湧水を模擬した環境下で実規模の1/4の大きさの緩衝材を吹付け施工し、緩衝材施工の可能性、施工による止水の可能性について検討した。その結果、湧水環境下において吹付け施工は可能であるが、施工中の止水は困難であることが分かった。
- 湧水環境下で吹付けによって施工した緩衝材の密度分布を計測した結果、均質であることが分かった。

2) 人工給水効果の検証

- 結晶質岩(0.1L/min/27孔)・堆積岩(0.1L/min/3孔)での湧水を模擬した環境下で実規模の1/4の大きさの緩衝材を吹付け施工し、緩衝材施工の可能性、施工による止水の可能性について検討した。その結果、湧水環境下において吹付け施工は可能であるが、施工中の止水は困難であることが分かった。
- 吹付け施工終了後には、緩衝材の上端面を整形し、モールドの上蓋を設置することによって緩衝材の体積を拘束した。その後、送水圧が200kPa程度まで通水圧を増加させ、飽和させた。

13.3 研究計画の更新

13.3.1 5年間の全体計画の更新

平成25年度に全体5ヵ年計画を立案し、各年毎の成果目標に対する進捗状況を確認するとともに、平成27年度には、研究項目に関する進捗管理と項目に関する見直しを行う。

13.3.2 処分環境（湧水量や水質等）の影響検討

(1) 液種の影響

0.5M NaCl 溶液、人工海水(0.5M NaCl+0.5M/3 CaCl₂)での緩衝材の乾燥密度均質化性能をそれぞれ平成 25、26 年度と平成 27、28 年度の 2 年間に亘って確認する。

(2) 施工品質が再冠水に及ぼす影響試験

緩衝材ブロックとペレットが混在したケースで、蒸留水を使った場合の浸潤挙動を土槽試験で確認する。平成 25、26 年度は蒸留水を給水して比抵抗分布から飽和度分布を取得し、乾燥密度、膨潤圧を提示する。平成 27、28 年度には塩水 (0.5M NaCl 溶液、人工海水(0.5M NaCl+0.5M/3 CaCl₂))について、緩衝材ブロック、ペレット、緩衝材ブロック+ペレットのデータを取得する。

(3) 緩衝材の品質確認及び品質改善手法の検討

本検討では以下の 5 項目について、調査・検討を行う。

1) e-log P 曲線の取得

本研究における乾燥密度の範囲を対象として、平成 25、26 年度は蒸留水を給水した場合の (1.2Mg/m³~2.0Mg/m³)、e-log P 曲線を取得する。また、液性限界程度での段階圧密試験を行う。続いて、平成 27、28 年度には液種が塩水の場合の 2 タイプについて、蒸留水の場合と同様に e-log P 曲線と液性限界程度での段階圧密試験を行う。

緩衝材の密度差に関する力学的解釈を提示し、プレハイドレーション効果を確認する。

2) Na 型緩衝材の Ca 型化へと変化する時期が、緩衝材の膨潤時期に及ぼす影響

Ca 型化よりも膨潤挙動の発生が早ければ、Ca 型化は常にある程度均質な状態で発生する。

この場合、Ca 型化の影響を施工法の選択要件からはずすことができる。また、Ca イオンを含まない水で緩衝材を人為的に膨潤させる対策（人工注水）を行えば、Ca 型化の影響を施工法の要件からはずすことができる。

3) 1 次元浸潤試験速度試験の継続

比抵抗試験結果を使って、初期飽和度から 1 %飽和度が増加した時点を浸潤フロントと定義して、遷移速度を取得する。

4) プレハイドレーション効果の確認

大小粒径ペレットに蒸留水、塩水 (0.5M NaCl) で浸潤させ、膨潤させた後に、流速を 0.5m/分、0.1, 0.01, 0.001 と変化させて、通水をした場合の効果を調査する。

平成 25 年度に大小粒径ペレットで実験し、平成 26 年度は人工海水(0.5M NaCl+0.5M/3 CaCl₂)で浸潤させる。

5) 間隙空気の移行試験

長さ 1 m、半径 5 cm の開口を有するアクリルに緩衝材 (1.6Mg/m³) を充填し、初期含水比 10% として上部と下部から蒸留水を浸潤させた場合、トラップされた空気の挙動を観察する。初期は流量一定 0.0001cc/分で給水し、給水圧が 100kPa になった時点で圧力制御に切り替える。試験の結果、間隙空気圧の増加が認められ、破過の有無が確認された場合には、間隙空気が排気されるような方法や、給水速度の調整等の対策を検討する必要がでてくる。平成 25、26 年度に継続して実験を行う。

13.3.3 パイピング/エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討

(1) 小規模パイピング試験

海水相当の液種により、小規模試験において、パイピング/エロージョン挙動を定量的に確認し、1 処分孔当たりの許容エロージョン量に数値範囲を与える。平成 25 年度は 0.5M NaCl 溶液で浸潤し、平成 26 年度は人工海水(0.5M NaCl+0.5M/3 CaCl₂)で浸潤させる。

(2) 工学規模試験パイピング試験

小規模試験において確認された事象が、工学規模試験において再現性があるか否かを確認し、パイピング/エロージョン挙動を定量的に確認する。具体的には、パイピングエロージョン量は吸光度計を使って測定する。平成 25 年度から平成 29 年度まで、流入量を変化させて実験を継続する。

(3) 地下施設を活用した緩衝材の性能確認

実際の地下施設を活用し、工学規模試験でパイピング/エロージョン挙動を定量的に確認する。幌延地下深層研究所の構内に直径 550mmX 深さ 600mm の孔を削孔し、現地の地下水を使ってエロージョン試験を実施する。ケースは実験室における工学規模試験と同様とし、比較評価する。

(4) 施工技術の高度化による影響度の低減検討

湧水環境下での吹付け施工試験におけるパイピング/エロージョン挙動の確認、および工学的対策を検討する。平成 25 年、26 年度は、堆積岩、結晶岩を想定し 0.1L/分の湧水環境下で、吹付けを行い、その後、頂部に仮プラグとして上蓋を設置して、緩衝材を膨潤させた後に再度、水圧を作用させて破過しないかどうかを確認する。平成 27 年、28 年度は現場締め固め工法に関するパイピング/エロージョン挙動について試験を行う。

13.3.4 人工バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資する指標の整備

結晶岩内に処分場を建設する予定のスウェーデン、フィンランドを対象として、以下の 3 項目について調査を行う。

(1) 人工バリア全体の設計・施工仕様の策定に関する調査・検討

平成 26 年度は、スウェーデン、フィンランドを対象として基本設計から詳細設計への流れを把握することを目的として、前提条件を整理する。平成 27 年には、特定のサイトを対象とした D2 レポートを分析し、サイト選定後の詳細設計条件を整理する。

(2) 埋め戻し材、プラグの要求品質に関する調査・検討

平成 26 年度は、スウェーデン、フィンランドを対象として埋め戻し材、プラグの要求品質に関して把握することを目的として、前提条件を整理する。平成 27 年度から実規模プラグ試験 (DOPAS) の測定結果に関する情報を収集し、止水性がどの程度確保されているのか、確認する。

(3) 海外機関との情報の交換と更新

平成 26 年度は、スウェーデン、フィンランドを対象として処分場の概念である KBS-3V と 3H について最新の情報を取得するとともに、人工注水、グラウトの要求品質に関する調査・検討を行う。

(4) ウォーターマネージメントのための解析的な検討

平成 27 年度から、パネル内の 1 つの坑道から湧水が発生している状況を想定し、解析に必要なパラメータ、解析手法に関する調査を行う。平成 28 年度から解析コードを使ったシミュレーションを実施し、その性能について評価する。

第 13 章 参考文献

- [1] Sasakura, T., Kobayashi, I., Sahara, F., Murakami, T., Ohi, T., Mihara, M. and Itoh, H.: Studies on mechanical behavior of bentonite for development of elasto-plastic constitutive model, International Conference on Radioactive Waste Disposal (DisTec 2004), pp.498-507 (2004).
- [2] Olivella S, Gens A, Carrera J and Alonso EE.: Numerical formulation for a simulator (CODE BRIGHT) for the coupled analysis of saline media. Eng Computations 13(7): 87–112 (1996).
- [3] A.Iizuka, H.Ohta: A Determination Procedure of Input Parameters in Elasto-Viscoplastic Finite Element Analysis, Soils & Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87 (1987).
- [4] Torbjorn Sanden, Lennart Borgesson: Deep repository-engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill Laboratory tests to understand processes during early water uptake, SKB Report R-06-72 (2008).