平成27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)

ー人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材

平成 28 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27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 27 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		
	笠1八皿	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		
	舟 1万冊	手法の構築-オーバーパック		
	笠の八皿	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		
0	<i>퐈厶</i> 万Ⅲ	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 人工バリアと周辺岩盤の長期		
		挙動評価手法の構築		
	第4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5公冊	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		
	おり刀間	開発		

第1章 はじめに	
1.1 処分システム工学確証技術開発	
1.1.1 背景および目的	1-1
1.1.2 研究開発項目の相互関係と年度目標	
1.1.3 平成 27 年度の実施内容	
1.2 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材に関する研究開発の背景、お	るよび目
的	1-6
1.2.1 研究開発の背景	1-6
1.2.2 研究開発の目的	1-7
1.3 試験計画	
1.4 報告書の構成及び概要	1-11
第1章 参考文献	1-12
第2章 再冠水時に発生する現象の整理	
2.1 全体計画	
2.1.1 基本方針	
2.1.2 研究計画	
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	
2.2.2 緩衝材性能に影響を与える主な再冠水時の挙動	
2.3 試験の共通条件	
2.3.1 試験の実施環境	
2.3.2 幌延地下水分析	
2.3.3 使用材料	
第2章 参考文献	2-10
第3章 緩衝材への地下水浸潤に関わる調査	
3.1 緩衝材への地下水浸潤状況の評価	
3.1.1 飽和度と比抵抗の関係取得	
3.1.2 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(密度一定条件)	3-7
3.1.3 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(膨潤変形条件)	3-21
3.2 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	3-28
3.2.1 背景と目的	3-28
3.2.2 密度分布が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響	3-28
3.2.3 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響	3-37
3.2.4 力学に立脚した残留密度差の理論的解釈	3-48

目 次

3.2.5 工学技術への反映	3-57
3.2.6 解析技術への反映	
3.3 施工品質による密度分布の均質化検討(2次元土槽試験)	3-63
3.3.1 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
	3-63
3.4 浸潤による間隙空気の移行調査	
3.4.1 検討の目的と手段	
3.4.2 試験結果	3-91
第3章 参考文献	
第4章 再冠水時の緩衝材の変質に関わる検討	4-1
4.1 化学変質が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査	
4.1.1 Ca 型化と飽和の可逆性検討	
4.1.2 供試体作成方法及び試験方法	
第4章 参考文献	4-8
第5章 緩衝材の流出に関する検討	5-1
5.1 緩衝材表面近傍の止水性に関する評価	5-1
5.1.1 小型セルによる緩衝材流出試験	5-1
5.1.2 給排水の位置関係が緩衝材の流出に及ぼす影響	5-48
5.1.3 ベントナイトの粘度による緩衝材の限界流速の検討	5-59
5.1.4 工学規模緩衝材流出試験	5-64
5.1.5 緩衝材施工技術の高度化	5-88
5.1.6 工学技術への反映	5-97
5.2 地下研究施設における緩衝材流出試験	5-104
5.2.1 はじめに	5-104
5.2.2 実施事項	5-104
5.2.3 緩衝材および定置治具の製作	5-107
5.2.4 試験環境の整備	5-115
5.2.5 予備試験の実施	5-124
5.2.6 試験設備の整備	5-128
5.2.7 短期加圧注水試験	5-133
5.2.8 長期加圧注水試験	5-164
5.2.9 まとめ	5-168
5.3 SKB 社による試験のレビューから得た知見	5-169
5.4 SKB 社報告書全文	5-172
5.4.1 Introduction	5-172
5.4.2 Scope of SKB's work for FY2015	5-172

5.4.3 Laboratory-scale experiments	5-174
5.4.4 Experimental plan	5-174
5.4.5 Convergence of water channel (Granitic test cell)	5-174
5.4.6 Breakthrough test – pre-hydration of bentonite	5-179
5.4.7 Artificial unevenness as counter measure	5-180
5.4.8 In-situ erosion experiments in Horonobe test site	5-184
5.4.9 Experiments performed in 2014	5-184
5.4.10 In-situ erosion test FY2015	5-187
5.4.11 Plan for "Long term test"	5-191
5.4.12 Development of design and installation methodology	5-192
5.4.13 Safety functions, requirements and criteria	5-194
5.4.14 Use of test data to establish design and installation criteria	5-195
5.4.15 SKB requirements on buffer related to long term safety	5-196
$5.4.16~{ m SKB's}$ test in Äspö ${ m HRL}$ on water handling during installation	of backfill and
buffer	5-200
第5章 参考文献	5-204
第6章 再冠水時の緩衝材のモデル化・解析に関わる検討	6-1
6.1 地下水流入低下工法に関する検討	6-1
6.1.1 研究目的	6-1
6.1.2 割れ目ネットワークによる水理モデル構築のための幌延の地質・水理ラ	データの整理6-2
6.1.3 幌延の実測データの整合する水理地質構造モデルの構築	6-22
6.1.4 幌延の水理地質構造モデルに基づく止水工法の感度解析の実施	6-48
6.1.5 幌延の水理地質構造モデルによる周辺坑道の影響評価解析の実施	6-128
6.2 まとめ	6-139
第6章 参考文献	6-142
第7章 まとめ	
7.1 はじめに	
7.2 平成 27 年度の成果	
7.2.1 緩衝材への地下水浸潤に関わる調査	
7.2.2 化学変質が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査	
7.2.3 緩衝材の流出に関わる検討	
7.2.4 再冠水時の緩衝材のモデル化・解析に関わる検討	

义	1.1-1 义	し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	1-3
义	1.2-1 ₮	手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		1-7
义	1.2-2 本	研究の位置づけ	1-8
义	2.1.1-1	本研究の基本方針	2-1
义	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]	2-4
义	2.3.1-1	試験状況	2-7
义	3.1.1-1	飽和度と比抵抗の関係取得試験装置の断面図	3-1
义	3.1.1-2	飽和度と比抵抗の関係取得試験装置	3-2
义	3.1.1-3	飽和度と比抵抗の関係(ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト)	3-5
义	3.1.1-4	飽和度と比抵抗の関係(ケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイト)	3-6
义	3.1.1-5	飽和度と比抵抗の関係(ケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイト)	3-6
义	3.1.2-1	鈴木らの試験結果[1]	3-7
义	3.1.2-2	鈴木らの試験結果による浸潤フロントの経時変化[1]	3-8
义	3.1.2-3	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	3-9
义	3.1.2-4	5mm 撒き出し分のベントナイトの計量	3-10
义	3.1.2-5	1000mm アクリルセル	3-10
义	3.1.2-6	比抵抗測定用電極	3-10
义	3.1.2-7	比抵抗測定用電極の設置	3-11
义	3.1.2-8	締め固め時のアクリルセル保護用ダンパー	3-11
义	3.1.2-9	締固め時の高さ管理方法	3-11
义	3.1.2-10) ヒーター付きピストン	3-11
义	3.1.2-11	完成図	3-12
义	3.1.2-12	2 浸潤に伴う比抵抗の変化(上:蒸留水、下:NaCl水溶液(0.5M))	3-14
义	3.1.2-13	3 浸潤に伴う飽和度の変化(上:蒸留水、下:NaCl水溶液(0.5M))	3-15
义	3.1.2-14	- 液体の浸潤状況(左:蒸留水、右:NaCl水溶液(0.5M)、2015/12 現在).	3-16
义	$3.1.2 \cdot 15$	う 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)	3-17
义	3.1.2-16	; 飽和フロントの進展状況(飽和度 95%以上で定義)	3-18
义	3.1.2-17	' 飽和度の遷移領域	3-18
义	3.1.2-18	3 液体の浸潤状況	3-19
义	3.1.2-19) 液体の浸潤状況(左:蒸留水、右:NaCl水溶液(0.5M))	3-19
义	3.1.2-20) 圧力計と浸潤面の水位差	3-20
义	3.1.2-21	軸応力の経時変化	3-20

図 目 次

义	3.1.3-1	一次元浸潤速度試験セル(膨潤変形条件)	3-22
义	3.1.3 - 2	マーカー選定試験	3-23
义	3.1.3 - 3	供試体作製方法	3-23
义	3.1.3 - 4	供試体密度分布	3-23
义	3.1.3 - 5	供試体完成時の状況	3-24
义	3.1.3 - 6	膨潤試験状況	3-24
义	3.1.3 - 7	供試体密度分布	3-25
义	3.1.3-8	供試体密度分布(拡大図)	3-25
义	3.1.3 - 9	比抵抗値から算出した飽和度分布	3-26
义	3.1.3-10	試験開始前後の供試体上面の状況	3-26
义	3.1.3 - 11	供試体密度分布	3-26
义	3.2.2-1	力学物性(膨潤量)による均質化の判断のイメージ	3-29
义	3.2.2-2	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	3-29
义	3.2.2-3	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	3-30
义	3.2.2-4	膨潤量の経時変化	3-31
义	3.2.2 - 5	フローポンプによる通水圧の経時変化	3-32
义	3.2.2-6	フローポンプによる制御流量の経時変化	3-32
义	3.2.2-7	膨潤に伴う乾燥密度の経時変化	3-33
义	3.2.2-8	膨潤量の経時変化(NaCl 水溶液)	3-34
义	3.2.2-9	膨潤に伴う乾燥密度の経時変化(NaCl水溶液)	3-34
义	3.2.2-10	直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化(NaCl 水溶液)	3-35
义	$3.2.2 \cdot 11$	直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化(NaCl水溶液)	3-36
义	3.2.3-1	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	3-39
义	3.2.3-2	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	3-39
义	3.2.3 - 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	頁
			3-40
义	3.2.3-4	密度分布、及び膨潤量試験のイメージ	3-40
义	3.2.3-5	膨潤量の経時変化	3-41
义	3.2.3-6	膨潤に伴う乾燥密度の経時変化	3-41
义	3.2.3-7	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)	3-42
义	3.2.3-8	Case2-2の給水量の経時変化	3-43
义	3.2.3-9	Case2-2の膨潤量の経時変化	3-43
义	3.2.3-10	Case2-2の直列膨潤量試験中の乾燥密度の経時変化	3-44
义	3.2.3-11	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	3-44
义	3.2.3-12	直列膨潤量試験の乾燥密度分布	3-45
义	3.2.3-13	直列膨潤量試験(再)の乾燥密度分布	3-45

义	3.2.3-14	1 応力履歴の影響評価試験の乾燥密度分布	3-46
义	3.2.3-15	5 応力履歴の影響評価試験に用いた供試体の給水量	3-47
义	3.2.4-1	残留密度分布の力学的解釈(Case1)	3-49
义	3.2.4-2	残留密度分布の力学的解釈(Case2)	3-50
义	3.2.4-3	残留密度分布の力学的解釈(Case3)	3-50
义	3.2.4-4	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)	3-51
义	3.2.4-5	緩衝材の e ⁻ logp 関係	3-55
义	3.2.4-6	緩衝材のpd ⁻ log <i>p</i> 関係	3-56
义	3.2.4-7	大型予圧密の圧密沈下曲線(Case3)	3-56
义	$3.2.5 \cdot 1$	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	3-57
义	3.2.5-2	JAEA DATABESE に対する Kozeny-Carman 則のフィッティング結界	₹.3-58
义	3.2.5 - 3	Kozeny-Carman 則を用いた残留密度差と透水係数の関係	3-59
义	3.2.6-1	膨潤圧試験のイメージ	3-60
义	3.2.6-2	膨潤圧試験開始直後のイメージ	3 - 61
义	3.2.6-3	高・低飽和度供試体の膨潤圧試験のイメージ	3 - 61
义	3.2.6-4	膨潤性鉱物の水分特性曲線のイメージ	3-62
义	3.3.1-1	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
			3-65
义	3.3.1-2	土槽試験による工夫	3-65
义	3.3.1-3	再冠水状況/ペレット充填ケース/給水開始20分後	3 - 66
义	3.3.1-4	再冠水状況/ペレット充填ケース/給水開始後3日	3-67
义	$3.3.1 \cdot 5$	ペレット充填ケースの給水状況	3-67
义	3.3.1-6	ペレット充填ケースの比抵抗分布の変遷	3-68
义	3.3.1-7	解体時のペレット土槽の含水比と乾燥密度の分布	3-68
义	3.3.1-8	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	3-69
义	3.3.1-9	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)	3-70
义	3.3.1-10) ブロック定置ケースの浸潤イメージ	3-70
义	3.3.1-11	ブロック定置ケースの比抵抗分布の変遷	3-72
义	3.3.1-12	2 ブロック定置ケースの飽和度分布	3-73
义	3.3.1-13	3 土槽規模試験による2次元浸潤試験(H2Oブロック・ペレット併用ケース).3-75
义	3.3.1-14	↓ ブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷(H2O)	3-76
义	3.3.1-15	5 ブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷(H2O)	3-77
义	3.3.1-16	うブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化	3-78
义	3.3.1-17	7 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧の経時変化	3-79
义	3.3.1-18	3 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧分布の変遷	3-79

义	3.3.1-19	解体時の状況	
义	3.3.1-20	含水比と飽和度	
义	3.3.1-21	土槽規模試験による2次元浸潤試験(0.5M-NaCl ブロック・ペレット併用ケース))
	••••••		
汊	3.3.1-22	ブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷(0.5M-NaCl)	
义	3.3.1-23	ブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷(0.5M-NaCl)	
义	3.3.1-24	ブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化3-86	
义	3.3.1 - 25	ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧の経時変化3-86	
义	3.3.1-26	ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧分布の変遷3-87	
义	3.4.1-1	浸潤による間隙空気の移行試験(イメージ図)	
义	3.4.1-2	浸潤による間隙空気の移行試験手順	
义	3.4.1-3	浸潤による間隙空気の移行試験セル	
义	3.4.1-4	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	
义	3.4.2-1	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3-92	
义	3.4.2-2	供試体上部と下部での給水状況の差異	
义	3.4.2-3	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	
	••••••		
义	3.4.2-4	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 3-93	
义	3.4.2-5	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)	
义	3.4.2-6	給水圧と給水量の経時変化(圧力制御過程)	
义	3.4.2-7	間隙空気圧と大気圧の経時変化(試験初期段階)	
义	3.4.2-8	間隙空気圧と大気圧の経時変化(背圧適用後、圧力制御過程) 3-96	
义	3.4.2-9	間隙空気圧と給水速度の経時変化(背圧適用後、圧力制御過程) 3-96	
义	3.4.2-10	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)	
义	3.4.2-11	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)	
义	3.4.2-12	浸潤による間隙空気の移行のイメージ	
义	3.4.2-13	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	
义	4.1.2-1	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4-3	
义	4.1.2-2	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4-3	
义	4.1.2-3	解体状況	
义	4.1.2-4	解体結果	
义	4.1.2-5	緩衝材表面近傍に発生する様々な事象のイメージ4-7	
义	5.1.1-1	HLW 縦置き概念イメージ図	

义	5.1.1-2	膨潤による間隙体積の減少	5-3
义	5.1.1 - 3	水みちの収斂のイメージ図	5- 3
义	5.1.1-4	水みちの収斂現象の確認試験イメージ	5-4
义	$5.1.1 \cdot 5$	水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージ	5-6
义	5.1.1-6	人為的な水みちを有する供試体作製状況	5-7
义	5.1.1-7	水みちの形成状況(Case1)	5-9
义	5.1.1-8	解体状況(Case1)	5-9
义	5.1.1-9	Case1 の通水圧と流量の関係	5-10
义	$5.1.1 \cdot 10$	総流量と流出量の関係	5-10
义	$5.1.1 \cdot 11$	総流量と流出質量の関係	5-11
义	$5.1.1 \cdot 12$	総流量と流出量の関係	5-12
义	$5.1.1 \cdot 13$	水みちの形成状況(Case1)	5-13
义	5.1.1-14	解体状況(Case1)	5-13
义	$5.1.1 \cdot 15$	Case1 の通水圧と流量の関係	5-13
义	$5.1.1 \cdot 16$	水みちの形成状況(Case2)	5-14
义	$5.1.1 \cdot 17$	解体状況(Case2)	5-14
义	$5.1.1 \cdot 18$	Case2 の通水圧と流量の関係	5-14
义	$5.1.1 \cdot 19$	水みちの形成状況(Case3)	5-15
义	5.1.1-20	解体状況(Case3)	5-15
义	$5.1.1 \cdot 21$	Case3 の通水圧と流量の関係	5-16
义	5.1.1-22	総流量と流出量の関係	5-16
义	5.1.1 - 23	水みちの形成状況(Case4)	5-17
义	5.1.1-24	解体状況(Case4)	5-17
义	5.1.1 - 25	Case4 の通水圧と流量の関係	5-17
义	5.1.1 - 26	水みちの形成状況(Case5)	5-18
义	5.1.1 - 27	解体状況(Case5)	5-18
义	5.1.1-28	Case5 の通水圧と流量の関係	5-18
义	5.1.1-29	水みちの形成状況(Case6)	5-19
义	5.1.1 - 30	解体状況(Case6)	5-19
义	$5.1.1 \cdot 31$	Case6 の通水圧と流量の関係	5-19
义	5.1.1 - 32	水みちの形成状況(Case7)	5-20
义	5.1.1-33	解体状況(Case7)	5-20
义	$5.1.1 \cdot 34$	Case7 の通水圧と流量の関係	5-20
义	5.1.1 - 35	水みちの形成状況(Case8)	5-21
义	5.1.1 - 36	解体状況(Case8)	5-21
义	5.1.1-37	Case8の通水圧と流量の関係	5-22

义	5.1.1 - 38	花崗岩セルの概略図	5-23
义	5.1.1-39	水みちの形成状況(Case1)	5-23
义	5.1.1-40	解体状況(Case1)	5-24
义	5.1.1-41	Case1 の通水圧と流量の関係	5-24
义	5.1.1-42	水みちの形成状況(Case2)	5-25
义	5.1.1-43	解体状況(Case2)	5-25
义	5.1.1-44	Case2 の通水圧と流量の関係	5-25
义	5.1.1-45	水みちの形成状況(Case3)	5-26
义	5.1.1-46	解体状況(Case3)	5-27
义	5.1.1-47	Case3 の通水圧と流量の関係	5-27
义	5.1.1-48	総流量と緩衝材流出質量の関係	5-27
义	5.1.1-49	水みちの形成状況(Case4)	5-28
义	5.1.1-50	解体状況(Case4)	5-28
义	$5.1.1 \cdot 51$	Case4 の通水圧と流量の関係	5-29
义	5.1.1-52	水みちの形成状況(Case5)	5-29
义	$5.1.1 \cdot 53$	解体状況(Case5)	5-30
义	$5.1.1 \cdot 54$	Case5 の通水圧と流量の関係	5-30
义	5.1.1 - 55	水みちの形成状況(Case6)	5- 31
义	5.1.1-56	解体状況(Case6)	5- 31
义	5.1.1-57	Case6 の通水圧と流量の関係	5- 31
义	5.1.1-58	水みちの形成状況(Case7)	5-32
义	5.1.1-59	解体状況(Case7)	5-32
义	5.1.1-60	Case7 の通水圧と流量の関係	5-33
义	5.1.1-61	水みちの形成状況(Case8)	5-33
义	5.1.1-62	解体状況(Case8)	5- 34
义	5.1.1-63	Case8 の通水圧と流量の関係	5- 34
义	5.1.1-64	水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージ	5-35
义	5.1.1-65	水位差による人工給水状況	5-35
义	5.1.1-66	通水圧と総流量の経時変化(Case1~8)	5-38
义	5.1.1-67	通水圧と総流量の経時変化(Case9~11)	5-39
义	5.1.1-68	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
			5-42
义	5.1.1-69	通水圧と総流量の経時変化(Case12~14)	5-43
义	5.1.1-70	水みちの形成状況(Case12~14)	5-44
义	5.1.1-71	模擬幌延地下水による人工給水状況	5-45
义	5.1.1-72	通水圧と総流量の経時変化(Case15~18)	5-46

义	5.1.2-1	緩衝材流出試験機全景5-4	19
义	5.1.2-2	緩衝材流出試験セル(横置き処分ケース)5-5	50
义	5.1.2-3	送水圧と送水量の経時変化(蒸留水ケース)	51
义	5.1.2-4	破過前後の水みちと堆砂状況の違い(上:破過前(4日目)、下:破過後(5日目]))
			53
义	5.1.2-5	送水圧と送水量の経時変化(NaCl水溶液ケース)5-5	54
义	5.1.2-6	送水圧と送水量の経時変化(CaCl2水溶液ケース)5-5	56
义	5.1.2-7	総流量と流出量の関係	58
义	5.1.2-8	総流量と流出量の関係の比較 5-5	59
义	$5.1.3 \cdot 1$	水みちにおける水と緩衝材の界面での緩衝材流出現象発生条件のイメージ[义
			59
义	5.1.3-2	膨潤した緩衝材の降伏値の取得イメージ5-6	30
义	5.1.3-3	限界流速のイメージ5-6	30
义	5.1.3-4	相対速度とせん断応力の関係(蒸留水)5-6	32
义	5.1.3-5	相対速度とせん断応力の関係(ベントナイトスラリー)5-6	32
义	5.1.3-6	乾燥密度と降伏値の関係5-6	33
义	5.1.4-1	工学規模緩衝材流出試験セルのイメージ5-6	34
义	5.1.4-2	工学規模緩衝材流出試験セル5-6	35
义	5.1.4-3	工学規模緩衝材流出試験供試体作成状況5-6	35
义	5.1.4-4	送水圧と送水量の経時変化5-6	37
义	5.1.4-5	工学規模緩衝材流出試験における水みち形成状況5-6	37
义	5.1.4-6	水みち形成観察結果のイメージ5-6	38
义	5.1.4-7	流出対策としての人工不陸の意味	39
义	5.1.4-8	給水量と給水圧の経時変化5-7	70
义	5.1.4-9	側面最下部に発生した水みちと人工不陸箇所の乾燥状況	71
义	5.1.4-10) 人工不陸箇所と人工不陸未設置箇所の状況(20日後)5-7	72
义	5.1.4-11	工学的対策の効果の評価5-7	72
义	5.1.4-12	2 工学規模緩衝材流出試験のサンプリング位置5-7	73
义	5.1.4-13	3 工学規模緩衝材流出試験の解体結果(乾燥密度分布)5-7	74
义	5.1.4-14	4 工学規模緩衝材流出試験の解体結果(飽和度分布) 5-7	74
义	5.1.4-15	5 工学規模緩衝材流出試験の試験イメージ	75
义	5.1.4-16	3 給水量と給水圧の経時変化5-7	76
义	5.1.4-17	7 工学規模緩衝材流出試験状況(上面)5-7	76
义	5.1.4-18	3 工学規模緩衝材流出試験状況(側面)5-7	77
义	5.1.4-19	9 工学規模緩衝材流出試験状況(側面:11 日後)5-7	77
义	5.1.4-20) 工学規模緩衝材流出試験状況(給水側)5-7	79

义	5.1.4-21	工学規模緩衝お材流出試験状況(排水側)	5-80
义	5.1.4-22	工学規模緩衝材流出試験のサンプリング位置	5-81
义	5.1.4-23	工学規模緩衝材流出試験の解体結果(乾燥密度分布)	5-82
义	5.1.4-24	工学規模緩衝材流出試験の解体結果(飽和度分布)	5 - 83
义	5.1.4-25	ペレット充填供試体の作製工程	5 - 84
义	5.1.4-26	総流量と給水圧の経時変化	5-85
义	5.1.4-27	工学規模緩衝材流出試験状況(上面)	5-85
义	5.1.4-28	工学規模緩衝材流出試験状況(側面)	5-86
义	5.1.4-29	流出量と給水量の関係	5-86
义	$5.1.5 \cdot 1$	本研究の位置付け	5-87
义	$5.1.5 \cdot 2$	実規模 1/4 リング緩衝材供試体の解体状況その 1	5-89
义	5.1.5 - 3	実規模 1/4 リング緩衝材供試体の解体状況その 2	5-90
义	5.1.5-4	サンプリング位置	5-91
义	$5.1.5 \cdot 5$	サンプリングコア(両コア共に左側が底部)	5-91
义	5.1.5-6	ブロックサンプリングによる変質部の採取(両ブロック共に左側が底	医部) 5-92
义	5.1.5-7	解体結果(堆積岩ケース)	5-93
义	5.1.5-8	解体結果(結晶質岩ケース)	5-94
义	5.1.5 - 9	今後の試験計画案	5-95
义	5.1.6-1	流量と流出量の関係における湧水対策の意味	5-97
义	5.1.6-2	削孔→1次覆工→ベントナイト吹付け→2次覆工	5-98
义	5.1.6-3	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	定チャートにおける本検討結果反映先	5-99
义	5.2.3-1	静的締固め試験結果	5-107
义	5.2.3-2	緩衝材定置治具 図面	5-109
义	$5.2.3 \cdot 3$	流出試験用定置治具	5-113
义	5.2.4-1	孔壁の充填に用いた材料(水中不分離無収縮モルタル)	5-115
义	5.2.4-2	モルタル打設完了時の状態(左:試験孔2、右:試験孔3)	5-115
义	5.2.4-3	削孔直前の状態(左:試験孔2、右:試験孔3)	5-115
义	5.2.4-4	試験孔3の湧水湧出箇所	5-116
义	5.2.4-5	削孔出来形の確認(左:試験孔2、右:試験孔3)	5-116
义	5.2.4-6	削孔直後の状態(左:試験孔2、右:試験孔3)	5-116
义	5.2.4-7	斜めボーリングの概念図	5-118
义	5.2.4-8	ボーリングマシンによる削孔状況	5-118
义	5.2.4-9	ボアホールテレビ実施状況	5-119
义	5.2.4-10	ボアホールテレビ実施結果	5-119
义	5.2.4-11	設置パッカーの確認	5-120

5.2.4-12	パッカー設置状況	5-120
5.2.4-13	抜け防止およびロ元配管実施結果	5-120
5.2.4-14	再止水前の試験孔3の状況(西側)	5-121
5.2.4-15	再止水に用いた止水材(左:エレホン、右:カスター)	5-121
5.2.4-16	止水作業状況	5-122
5.2.4-17	再止水後の試験孔3の状況(西側)	5-122
$5.2.5 \cdot 1$	水圧計(S&DL mini およびバロメータ)	5-123
5.2.5 - 2	試験孔 3 の水位の経時変化	5-125
5.2.5 - 3	試験孔3の湧水量と水位の相関(移動平均)	5-125
5.2.6-1	試験設備の概要(定圧注水時)	5-128
5.2.6-2	試験設備の概要(定流量注水時)	5-129
5.2.6-3	設置した試験設備	5-131
5.2.7-1	試験体設置状況	5-132
5.2.7-2	計測機器類	5-132
5.2.7-3	試験方法決定フロー	5-134
5.2.7-4	初期の水みち確認結果の概要	5-135
5.2.7-5	パッカー拡張前後の注水ボーリング孔からの CCD 画像	5-136
5.2.7-6	静置期間中の排水量データ	5-137
5.2.7-7	静置期間中の注水孔水位データ	5-137
5.2.7-8	静置期間中の土圧計データ	5-138
5.2.7-9	静置期間中のベントナイト濃度データ	5-138
$5.2.7 \cdot 10$	定流量注水フロー	5-140
5.2.7-11	短期注水試験1回目(第1段階)の概要と結果	5-141
$5.2.7 \cdot 12$	短期注水試験1回目(第2段階)の概要と結果	5-142
$5.2.7 \cdot 13$	短期注水試験1回目(第3段階)の概要と結果	5-143
$5.2.7 \cdot 14$	短期注水試験1回目(第1段階)の概要と結果	5-144
$5.2.7 \cdot 15$	短期注水試験後の水みち確認結果の概要図	5-145
$5.2.7 \cdot 16$	ベントナイト自己修復期間中の注水孔水位の経時変化	5-146
$5.2.7 \cdot 17$	短期注水試験2回目(第1段階)の概要と結果	5-147
5.2.7-18	短期注水試験2回目(第1段階および夜間)の概要と結果	5-147
5.2.7-19	短期注水試験2回目(第2段階)の概要と結果	5-148
5.2.7-20	短期注水試験2回目(第3段階)の概要と結果	5-149
5.2.7 - 21	短期注水試験(1回目)の結果	5-151
5.2.7- 22	短期注水試験(2回目)の結果	5-151
5.2.7- 23	引上げ用治具の取り付け状況	5-152
5.2.7 - 24	孔壁との縁切り用ジャッキ	5-153
	5.2.4-12 5.2.4-13 5.2.4-14 5.2.4-15 5.2.4-16 5.2.4-17 5.2.5-1 5.2.5-2 5.2.5-3 5.2.6-1 5.2.6-2 5.2.7-2 5.2.7-3 5.2.7-2 5.2.7-3 5.2.7-6 5.2.7-7 5.2.7-6 5.2.7-7 5.2.7-8 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-10 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20 5.2.7-20	 5.2.4-12 バッカー設置状況 5.2.4-13 抜け防止および口元配管実施結果 5.2.4-14 再止水前の試験孔 3 の状況(西側) 5.2.4-15 再止水に用いた止水材(左:エレホン、右:カスター) 5.2.4-16 止水作業状況 5.2.4-17 再止水後の試験孔 3 の状況(西側) 5.2.5-1 水圧計(S&DL mini およびパロメータ) 5.2.5-2 試験孔 3 の水位の経時変化 5.2.5-3 試験力 3 の水位の経時変化 5.2.6-1 試験設備の概要(定正注水時) 5.2.6-2 試験設備の概要(定正注水時) 5.2.6-3 設置した試験設備 5.2.7-1 試験体設置状況 5.2.7-2 計測機器類 5.2.7-3 試験方法決定フロー 5.2.7-3 試験方法決定フロー 5.2.7-4 初期の水みち確認結果の概要 5.2.7-6 静置期間中の注水礼水位データ 5.2.7-7 静置期間中の立止計データ 5.2.7-19 静置期間中のベントナイト濃度データ 5.2.7-10 定流量注水フロー 5.2.7-11 短期注水試験 1 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-12 短期注水試験 1 回目(第 2 段階)の概要と結果 5.2.7-13 短期注水試験 1 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-14 短期注水試験 1 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-15 短期注水試験 1 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-17 短期注水試験 2 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-18 短期注水試験 2 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-19 短期注水試験 2 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-19 短期注水試験 2 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-19 短期注水試験 2 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-21 短期注水試験 2 回目(第 1 段階)の概要と結果 5.2.7-22 短期注水試験 2 回目(第 3 段階)の概要と結果 5.2.7-22 短期注水試験 2 回目(第 3 段階)の概要と結果 5.2.7-22 短期注水試験 2 回目(第 3 段階)の概要と結果 5.2.7-23 引上げ用治具の取り付け状況 5.2.7-24 孔壁との緑切り円ジャッキ

义	5.2.7-25 チェーンブロックによる試験体引上げ状況(1) 5-153
义	5.2.7-26 チェーンブロックによる試験体引上げ状況(2) 5-153
义	5.2.7-27 引上げられた試験体に見られた水みちの痕跡 5-154
义	5.2.7-28 試験孔パノラマ写真に見られた水みちの痕跡
义	5.2.7-29 分光光度計 U-5100 および超音波分散機 UH-50(昨年度撮影) 5-156
义	5.2.7-30 昨年度得られた検量線5-157
义	5.2.7-31 短期試験の注水孔水位とベントナイト濃度の経時変化(1回目総括)
义	5.2.7-32 短期試験の注水孔水位とベントナイト濃度の経時変化(2回目総括)
义	5.2.8-1 長期注水試験の経過
义	5.2.8-2 ベントナイト濃度と注水孔水位の比較
义	5.2.8-3 土圧計と注水孔の水位の比較
义	5.2.9-1. 緩衝材流出現象の概念図
义	5.4.4-1 Experimental plan, including step-wise increase of scale
义	5.4.5-1 Test plan for investigation on convergence of water channels due to
	piping. There is a gap between the specimen and the equipment $5-174$
义	$5.4.5\mathchar`2$ Experiment set-up, the part of the test cell that surrounds the specimen
	are either made of acrylic resin or granite with a hydraulic conductivity of $5\cdot\!10^{-10}$
	¹² m/s
义	$5.4.5\mathchar`-3$ The granite in the interface test performed in 2010
义	5.4.5-4 Test results
义	5.4.6-1 Test cases with pre-saturated bentonite
义	5.4.6-2 Test results
义	5.4.7-1 Test cell
义	5.4.7-2. Test results
义	5.4.9-1 SKB's recommendation to install a lid and valves 5-185
义	
	5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P_{sw} exceeds P_w piping
	5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P _{sw} exceeds P _w piping may stop
図	 5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P_{sw} exceeds P_w piping may stop
X	5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P _{sw} exceeds P _w piping may stop
X X	5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P _{sw} exceeds P _w piping may stop
図 図 図	5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P _{sw} exceeds P _w piping may stop 5.4.16-1 Backfill in deposition tunnel – bentonite block stack, pellet filling in slots, and pellet bed. 5-200 6.1.2-1 6.1.2-2 西連絡坑道で観察された割れ目の方向分布
义 义 义 义 义	5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P _{sw} exceeds P _w piping may stop 5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P _{sw} exceeds P _w piping may stop 5.4.16-1 Backfill in deposition tunnel – bentonite block stack, pellet filling in slots, and pellet bed 6.1.2-1 350m 坑道の平面図 6-3 6.1.2-2 西連絡坑道で観察された割れ目の方向分布 6-4 6.1.2-3 東連絡坑道で観察された割れ目の方向分布
※※※※※※※※※※※%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%<	5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P _{sw} exceeds P _w piping may stop 5.4.10-1 Conceptual illustration of piping/erosion. When P _{sw} exceeds P _w piping may stop 5.4.16-1 Backfill in deposition tunnel – bentonite block stack, pellet filling in slots, and pellet bed 6.1.2-1 350m 坑道の平面図 6-3 6.1.2-2 西連絡坑道で観察された割れ目の方向分布 6-4 6.1.2-3 東連絡坑道で観察された割れ目の方向分布 6-4 6.1.2-4

义	6.1.2-6 割れ目卓越方向の区分(シュミットネット表示)	. 6-5
义	6.1.2-7 DFN モデルを用いて再現した仮想坑道の坑壁に現れる割れ目の方向分布	i 6-8
义	6.1.2-8 極座標系における走向角と傾斜角の定義	. 6-8
义	6.1.2-9 H4-2 孔の孔壁画像と透水試験結果	6-13
义	6.1.2-10 透水試験孔 H2-1 のレイアウト	6-14
义	6.1.2-11 H2-1 孔の透水試験結果(間隙水圧・透水係数)と孔壁画像	6-14
义	6.1.2-12 水平坑道からの総湧水量と1m あたりの湧水量の経時変化	6-15
义	6.1.2-13 試験坑道 2 および試験坑道 4 周辺における水圧・水質モニタリング実施	箇所
		6-17
义	6.1.2-14 C05 における水圧モニタリング結果	6-18
义	6.1.2-15 C06 における水圧モニタリング結果	6-18
义	6.1.2-16 間隙水圧と坑壁からの距離との関係	6-19
义	6.1.2-17 間隙水圧と坑壁からの距離との関係	6-20
义	6.1.3-1 割れ目発生プログラム処理フロー	6-23
义	6.1.3-2 チャンネルネットワークによるモデル化概念図	6-23
义	6.1.3-3 割れ目分布図 HR-FF100(1)	6-25
义	6.1.3-4 割れ目分布図 HR-FF100(2)	6-26
义	6.1.3-5 割れ目分布図 HR-FF100(3)	6-27
义	6.1.3-6 割れ目分布図 HR-FF100(4)	6-28
义	6.1.3-7 割れ目分布図 HR-FF100(5)	6-29
义	6.1.3-8 作成したモデルの割れ目枚数	6-30
义	6.1.3-9 作成したモデルの割れ目のシュミットネットプロット	6-31
义	6.1.3-10 セット毎の割れ目の半径分布	6-32
义	6.1.3-11 格子状パイプによる水理地質構造のモデル化	6-33
义	6.1.3-12 水理地質構造モデルの概念図	6-34
义	6.1.3-13 割れ目分布図 HR-FF022(1)	6-35
义	6.1.3-14 割れ目分布図 HR-FF022(2)	6-36
义	6.1.3-15 割れ目分布図 HR-FF022(3)	6-37
义	6.1.3-16 割れ目分布図 HR-FF022(4)	6-38
义	6.1.3-17 割れ目分布図 HR-FF022(5)	6-39
义	6.1.3-18 水理試験再現解析による割れ目量透水係数の算定フロー	6-40
义	6.1.3-19 水理試験再現解析による透水量係数分布	6-42
义	6.1.3-20 処分坑道及び掘削影響領域(EDZ)の設定	6-43
义	6.1.3-21 掘削影響領域(EDZ)のモデル化	6-44
义	6.1.3・22 チャンネルネットワーク内への掘削影響領域のモデル化	6-44
义	6.1.3-23 境界条件の設定	6-45

义	6.1.4-1	割れ目ネットワークモデル内の処分坑道及び処分孔イメージ	6-48
义	6.1.4-2	処分孔のモデル化	6-49
义	6.1.4-3	各リアライゼーションの坑道 100m 長における総湧水量	6-52
义	6.1.4-4	HR1_R01 処分坑道区間湧水量	6-53
义	6.1.4-5	HR1_R02 処分坑道区間湧水量	6-53
义	6.1.4-6	HR1_R03 処分坑道区間湧水量	6-5 4
义	6.1.4-7	HR1_R04 処分坑道区間湧水量	6-5 4
义	6.1.4-8	HR1_R05 処分坑道区間湧水量	6-55
义	6.1.4-9	HR1_R06 処分坑道区間湧水量	6-55
义	6.1.4-10) HR1_R07 処分坑道区間湧水量	6-56
义	6.1.4-11	HR1_R08 処分坑道区間湧水量	6-56
义	6.1.4-12	2 HR1_R09 処分坑道区間湧水量	6-57
义	6.1.4-13	3 HR1_R10 処分坑道区間湧水量	6-57
义	6.1.4-14	- 坑道壁面の湧水量分布(HR1_R01)	6-59
义	6.1.4-15	5 坑道壁面の湧水量分布(HR1_R02)	6-60
义	6.1.4-16	3 坑道壁面の湧水量分布(HR1_R03)	6-61
义	6.1.4-17	′坑道壁面の湧水量分布(HR1_R04)	6-62
义	6.1.4-18	3 坑道壁面の湧水量分布(HR1_R05)	6- 63
义	6.1.4-19)坑道壁面の湧水量分布(HR1_R06)	6-6 4
义	6.1.4-20)坑道壁面の湧水量分布(HR1_R07)	6-65
义	6.1.4-21	抗道壁面の湧水量分布(HR1_R08)	6-66
义	6.1.4-22	2 坑道壁面の湧水量分布(HR1_R09)	6-67
义	6.1.4-23	3 坑道壁面の湧水量分布(HR1_R10)	6-68
义	6.1.4-24	・ 処分孔毎の湧水量算定結果	6-70
义	6.1.4-25	5 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R01)	6-74
义	6.1.4-26	5 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R02)	6-74
义	6.1.4-27	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R03)	6-75
义	6.1.4-28	3 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R04)	6-75
义	6.1.4-29) 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R05)	6-76
义	6.1.4-30) 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R06)	6-76
义	6.1.4-31	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R07)	6-77
义	6.1.4-32	2 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R08)	6-77
図	6.1.4-33	3 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R09)	6-78
义	6.1.4 - 34	・ 処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R10)	6-78
义	6.1.4-35	5 HR1_R08 坑道湧水量と割れ目半径の関係	6-79
义	6.1.4-36	3 HR1_R08 処分孔湧水量と割れ目半径の関係	6-79

义	6.1.4-37	HR1_R08 で坑道及び処分孔湧水量が多い2つの割れ目の位置図	. 6-80
义	6.1.4-38	処分孔周辺へのグラウトのイメージ図	. 6-81
义	6.1.4-39	処分孔周辺へのグラウトの設定方法	. 6-82
义	6.1.4-40	各リアライゼーションの坑道 100m 長における総湧水量	. 6-86
义	6.1.4-41	HR1_R01 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-87
义	6.1.4-42	HR1_R02 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-87
义	6.1.4-43	HR1_R03 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-88
义	6.1.4-44	HR1_R04 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-88
义	6.1.4-45	HR1_R05 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-89
义	6.1.4-46	HR1_R06 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-89
义	6.1.4-47	HR1_R07 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-90
义	6.1.4-48	HR1_R08 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-90
义	6.1.4-49	HR1_R09 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6 - 91
义	6.1.4-50	HR1_R10 処分坑道区間湧水量(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-91
义	6.1.4-51	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R01)(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-93
义	6.1.4-52	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R02)(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6 - 94
义	6.1.4-53	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R03)(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-95
义	6.1.4-54	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R04)(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-96
义	6.1.4-55	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R05)(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-97
义	6.1.4-56	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R06)(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-98
义	6.1.4-57	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R07)(0.1L/min 以上の止水対策後)	. 6-99
义	6.1.4-58	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R08)(0.1L/min 以上の止水対策後)	6-100
义	6.1.4-59	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R09)(0.1L/min 以上の止水対策後)	6-101
义	6.1.4-60	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R10)(0.1L/min 以上の止水対策後)	6-102
义	6.1.4-61	HR1_R01 処分坑道区間湧水量(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-103
义	6.1.4-62	HR1_R05 処分坑道区間湧水量(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-103
义	6.1.4-63	HR1_R06 処分坑道区間湧水量(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-104
义	6.1.4-64	HR1_R07 処分坑道区間湧水量(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-104
义	6.1.4-65	HR1_R08 処分坑道区間湧水量(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-105
义	6.1.4-66	HR1_R10 処分坑道区間湧水量(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-105
义	6.1.4-67	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R01)(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-107
义	6.1.4-68	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R05)(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-108
义	6.1.4-69	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R06)(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-109
义	6.1.4-70	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R07)(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-110
义	6.1.4-71	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R08)(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-111
义	6.1.4-72	坑道壁面の湧水量分布(HR1_R10)(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-112

义	6.1.4-73	処分孔毎の湧水量算定結果(0.1L/min 以上の止水対策後)	6-114
义	6.1.4-74	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R01)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-117
义	6.1.4-75	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R02)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-117
义	6.1.4-76	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R03)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-118
义	6.1.4-77	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R04)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-118
义	6.1.4-78	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R05)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-119
义	6.1.4-79	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R06)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-119
义	6.1.4-80	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R07)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-120
义	6.1.4-81	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R08)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-120
义	6.1.4-82	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R09)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-121
义	6.1.4-83	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R10)(0.1L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-121
义	6.1.4-84	処分孔毎の湧水量算定結果(0.5L/min 以上の止水対策後)	6-123
义	6.1.4-85	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R01)(0.5L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-125
义	6.1.4-86	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R05)(0.5L/min	以上の
	止水対象	策後)	6-125
义	6.1.4-87	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R06)(0.5L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-126
义	6.1.4-88	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R07)(0.5L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-126
义	6.1.4-89	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R08)(0.5L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-127
义	6.1.4-90	処分孔交差割れ目分布と処分孔湧水量分布(HR1_R10)(0.5L/min	以上の
	止水対策	策後)	6-127
义	6.1.5-1	感度解析の実施フロー図	6-128
义	6.1.5 - 2	2次元理論解析モデルと3次元モデルの圧力境界設定位置	6-129

义	6.1.5-3	CASE1 の 2 次元理論解析評価横断図	3-130
义	6.1.5-4	CASE2の2次元理論解析評価横断図	3-130
义	$6.1.5 \cdot 5$	水抜孔が配置されたトンネル周辺の流れの計算方法	3-131
义	6.1.5-6	2 次元理論解析結果(CASE1)	3-132
义	6.1.5-7	2 次元理論解析結果(CASE3)	3-133
义	6.1.5-8	2次元理論解析結果の3次元割れ目モデルへの適用イメージ	3-134
义	6.1.5 - 9	各ケースでの総湧水量の比較	3-137
义	6.1.5-10) 各ケースでの処分孔湧水量平均、 $0.1L/min$ 以下の処分孔数の比較 ϵ	3-137
义	6.1.5-11	L処分孔毎の初期とCASE1の湧水量の比較	3-138

表	1.1-1 -	平成 25 年度に策定した処分システム工学確証技術開発の成果目標	1-3
表	2.2.2-1	調査項目と試験規模の関係	2-6
表	2.3.2-1	幌延地下水分析結果	2-8
表	2.3.3-1	模擬幌延地下水組成	2-9
表	3.1.1-1	飽和度と比抵抗の関係取得試験ケース	3-2
表	3.1.1-2	飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースと試験結果一覧(Na 型ベントナイト、蒸	褶
	水)		3-3
表	3.1.1-3	飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースと試験結果一覧(Na 型ベントナイト、Na	aCl
	水溶液	i)	3-3
表	3.1.1-4	飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースと試験結果一覧(Ca型ベントナイト、蒸	留
	水)		3-4
表	3.1.2-1	鈴木らの試験条件[1]	3-8
表	3.1.2-2	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	3-9
表	3.1.3-1	長尺ベントナイトの不飽和浸潤速度取得試験ケース一覧3	$\cdot 21$
表	3.1.3-2	供試体諸元	$\cdot 24$
表	3.2.2-1	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	·30
表	3.2.3-1	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	38
表	3.2.4-1	圧密試験ケース	$\cdot 51$
表	3.2.4-2	供試体諸元	·53
表	$3.2.5 \cdot 1$	直列膨潤圧試験結果に基づく残留密度分布と透水係数	$\cdot 58$
表	3.3.1-1	土槽規模試験の試験ケース	·64
表	3.3.1-2	ペレット充填による模擬緩衝材の初期状態	·66
表	3.3.1-3	ブロック定置による模擬緩衝材の初期状態	·69
表	3.3.1-4	ブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元	·73
表	$3.3.1 \cdot 5$	ブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元	·82
表	3.4.1-1	浸潤による間隙空気の移行試験のケース3·	·89
表	4.1.1-1	Ca型化可逆性確認試験ケース案	4-2
表	4.1.2-1	Ca型化可逆性確認試験解体結果	4-5
表	5.1.1-1	水みちの収斂現象の確認試験全ケースの試験条件	5-7
表	5.1.1-2	水みちの収斂現象の確認試験供試体の乾燥密度	5-8
表	$5.1.1 \cdot 3$	人工給水・流出試験の検討ケース5·	·36
表	5.1.1-4	人工給水・流出試験の状況一覧 (Case1~8)	·40
表	5.1.1-5	人工給水・流出試験の状況一覧(Case9~11)	$\cdot 41$
表	5.1.1-6	人工給水・緩衝材流出試験の状況一覧(Case12~14)	$\cdot 44$
表	5.1.1-7	人工給水・流出試験の状況一覧(Case15~18)5	$\cdot 47$

表 目 次

表	$5.1.2 \cdot 1$	横置き 1000mm セルによる緩衝材流出試験ケース	5-49
表	5.1.3-1	粘性による流速取得試験ケース	5-61
表	5.1.4-1	工学規模緩衝材流出試験ケース	5-66
表	$5.2.3 \cdot 1$	混合材料の使用材料と配合5	-106
表	5.2.3-2	試験ケースごとの緩衝材ブロックの仕様5	-107
表	5.2.3-3	緩衝材ブロック製作時の品質・出来形確認項目・管理基準値5	-108
表	5.2.3-4	外圧強度計算結果5	-110
表	5.2.3-5	作用荷重内訳5	-110
表	5.2.3-6	底板強度計算結果5	-111
表	5.2.3-7	溶接部強度計算結果5	-111
表	5.2.3-8	ネジ部リングの強度計算結果 5	-112
表	5.2.3-9	スペーサー管断面の強度計算結果5	-112
表	5.2.3-10	スペーサー吊上げ部の強度計算結果5	-113
表	$5.2.5 \cdot 1$	湧水量測定ケース設定5	-123
表	5.2.5-2	ケースごとの平均湧水量5	-126
表	5.2.6-1	本業務に用いた設備の一覧5	-130
表	5.2.7-1	短期注水試験ケース5	-139
表	5.2.7-2	分光光度計仕様5	-155
表	5.2.7-3	超音波分散器仕様	-156
表	5.2.7-4	採取したコアの土質試験結果5	-162
表	5.4.10-1	. Presentation of cases in "Short term test"	-188
表	5.4.15-1	. Preliminary safety functions and performance targets for the buffe	er in
	a KBS	-3 repository (vertical deposition of the canisters)5	-197
表	5.4.15-2	2 Preliminary technical design requirements and related characteris	stics
	for the	Buffer in a KBS-3 repository (vertical deposition of the canisters). 5	-198
表	5.4.16-1	Preliminary plan on when different counter measures are needed.	
	•••••		-201
表	6.1.2-1	割れ目卓越方向の区分(表形式)	. 6-5
表	6.1.2-2	設定した割れ目の幾何学的パラメータセット	. 6-7
表	6.1.2-3	湧水の分類基準	. 6-9
表	6.1.2-4	割れ目の分類基準	. 6-9
表	6.1.2-5	坑壁において湧水等が認められた割れ目の割合	6-10
表	6.1.2-6	坑壁において湧水等が認められた割れ目と成因に基づく分類との関係	6-10
表	6.1.2-7	せん断性割れ目の割合	6-11
表	6.1.2-8	PB-V01 孔における水理試験結果の一覧表	6-12
表	6.1.2-9	井戸理論に基づいて推定した坑道湧水量と透水係数の関係	6-16

表	6.1.2-10	坑壁から測定区間までの距離と水圧の関係
表	6.1.2-11	割れ目の幾何学的パラメータセット6-21
表	6.1.2-12	水理モデル作成のためのパラメータセット6-21
表	6.1.3-1	作成したモデルの割れ目数
表	6.1.3-2	作成したモデルの三次元割れ目密度6-30
表	$6.1.3 \cdot 3$	作成したモデルの卓越方向及びフィッシャ定数
表	6.1.3-4	作成したモデルの割れ目半径に対する超過割れ目枚数
表	6.1.3-5	作成したモデルの透水割れ目数6-34
表	6.1.3-6	水理試験再現解析結果(今年度モデル(HR1))6-42
表	6.1.3-7	本モデルにおける透水係数の設定値6-44
表	6.1.3-8	坑道湧水量解析結果6-46
表	6.1.3-9	坑道湧水量解析結果(掘削影響領域 k=1.3×10 ⁻⁷ /sec)
表	6.1.4-1	処分坑道及び処分孔湧水量の算定結果
表	6.1.4-2	坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果(処分孔掘削時)
表	6.1.4-3	処分孔湧水に占める EDZ からの湧水量の割合6-71
表	6.1.4-4	処分孔に交差する主要割れ目の流量算定結果(処分孔掘削時)(1)6-72
表	6.1.4-5	処分孔に交差する主要割れ目の流量算定結果(処分孔掘削時)(2)6-73
表	6.1.4-6	止水対策後の坑道湧水及び処分孔湧水量の算定結果(0.1L/min 以上)6-83
表	6.1.4-7	止水対策後の坑道湧水及び処分孔湧水量の算定結果(0.5L/min 以上)6-85
表	6.1.4-8	坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果(0.1L/min 以上の止水対策後)92
表	6.1.4-9	坑道に交差する主要割れ目の流量算定結果(0.5L/min 以上の止水対策後) 6-
	106	
表	6.1.4-10	処分孔毎の湧水量変化率(0.5L/min 以上の止水対策後)6-113
表	6.1.4-11	処分孔に交差する主要割れ目の流量算定結果(0.1L/min 以上の止水対策後)
	(1)	
表	6.1.4-12	処分孔に交差する主要割れ目の流量算定結果(0.1L/min 以上の止水対策後)
	(2)	
表	6.1.4-13	処分孔毎の湧水量変化率(0.5L/min 以上の止水対策後)6-122
表	6.1.4-14	処分孔に交差する主要割れ目の流量算定結果(0.5L/min 以上の止水対策後)
表	6.1.5-1	CASE1の浸透流解析結果6-135
表	6.1.5 - 2	CASE2 の浸透流解析結果 6-136
表	7.2.1-1	試験分類7-1

第1章 はじめに

1.1 処分システム工学確証技術開発

1.1.1 背景および目的

本研究の背景

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、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る基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

(2) 本研究の目的

本研究では、上記状況を踏まえ、平成25年度から5年程度の期間で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 うことを目的とする。

(3) 本研究の構成

本研究は以下の5つの研究開発項目で構成されている。

- 1) 処分システム工学確証技術開発
 - a) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-オーバーパック
 - b) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材
 - c) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
 - d) モニタリング関連技術の整備
- 2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関る基盤技術の開発

1.1.2 研究開発項目の相互関係と年度目標

図 1.1-1 に処分システム工学確証技術開発の全体概要と検討課題の関連を示す。人工バリアを構成 する要素には、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材がある。人工バリアに要求される機能は、ガラ ス固化体、オーバーパックまたは緩衝材のそれぞれが単独で達成できるものではない。各要素が相互 に影響をおよぼし合い、人工バリアシステムとしての要求機能が達成される。仮に一つの人工バリア が機能を満たさなくなれば、人工バリアシステム全体としての機能が損なわれる可能性がある。

一般的な構造物とは異なり、地層処分の人工バリアは供用後(埋設後)の検査や必要に応じた補修を 行うことが想定されていない。供用後の検査や補修を必要とせずに人工バリアの健全性を確保するた めには、想定される劣化や破損事象を考慮した設計を行い、製作・施工の個々のプロセスで品質管理を 実施する必要がある。そして、各プロセスで品質が保証されていることを判断するための指標は、人工 バリア構成要素の相互の影響や不確実性を考慮できる健全性評価により設定される必要がある。一方 で、人工バリアの健全性評価のためには、モニタリング技術を用いて処分場の環境条件を把握する必 要がある。また、処分場操業時のモニタリングにより、人工バリアの健全性に対する信頼性を向上させ ることができると考えらえる。さらに、処分場閉鎖の判断要因の一つとして、処分場の環境条件が想定 した範囲内にあることをモニタリングで確認することも必要になると考えられる。そのためは、人工 バリアおよびモニタリングに関する個別および境界の課題を抽出し、相互に共有され検討を進める必 要がある。さらに、処分場操業期間中に自然災害が発生すれば、その影響により人工バリア機能が低下 することも考えられる。処分場の安全確保のためには、必要に応じて災害への対策技術を開発し、人工 バリアの限界性能について把握しておくことが重要となる。ただし、この安全対策により人工バリア システムの機能が低下するようなことがあってはならない。人工バリアの限界性能を把握するために は、個々の人工バリアの特性だけでなく、システム全体としての機能について総合的に検討する必要 がある。また、その機能低下を推定するためには、測定すべきパラメータについての検討や、人工バリ アシステムの健全性に影響をおよぼさないモニタリング方法の開発が必要となる。したがって、長期 間の健全性を有する人工バリアシステムの工学的実現性を示すためには、オーバーパック、緩衝材、モ ニタリング、自然災害に対する安全対策の4つの検討項目について、それぞれの境界にある課題や個々 の成果などを共有しつつ研究開発を進める必要がある。

1-2



図 1.1-1 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

(2) 年度毎の成果目標

本研究のための年度毎の成果目標を表 1.1-1 に示す(追而 年度毎の成果目標は、今年度の研 究開発に関する中間評価結果を反映し、必要に応じて更新する予定である)。

		H25	H26	H27	H28	H29
(1) 発	処分システム工学確正技術開					
	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IC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	・緩衝材の品質評価 項目の抽出	・エロージョンによ、 る性能劣化事象 /	人工注水、グラウト などの 工学的対策の	・緩衝材の設計・ 施工仕様策定に	 説明性のある 長期健全性判断
	全性評価手法の 構築− 緩衝材	・研究開発計画策定	(流入量、液種) の定量化	実施・課題の検討	資する指標範囲 の提示	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	・操業安全等に 関るモニタリン 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 人エバリア等の モニタリング計 画の例示
(2) 間回 技術)自然災害に対する操業期 中の安全対策に関る基盤 杯の開発	・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 る人エバリアの 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	・人エバリア限界 性能等に関する 知見の整備	 ・地下施設の操業 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	<u> 処分システム</u> の工学的実現性の確証 ・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 ・技術的実現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					

表 1.1-1 平成 25 年度に策定した処分システム工学確証技術開発の成果目標

1.1.3 平成 27 年度の実施内容

平成 25 年度に立案した 5 か年計画の 3 年目として、以下の研究開発を実施する。オーバーパ ック及び緩衝材の製作・施工技術に対して深部地下環境を考慮した長期健全性の観点から工学的 信頼性の向上を図るため、種々の判断指標の提示に向けた品質に係わる知見の拡充、および健全 性評価技術の構築に係わる検討を行う。また、モニタリング技術の整備の一環として地下研究施 設での適用性確認等を行う。

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

平成 26 年度は、地上及び地下研究施設でのオーバーパック溶接部耐食性評価試験を開始する とともに、耐食性におよぼす溶接組織の影響を評価するための知見を電気化学試験により取得し た。また、計算コードを用いてオーバーパックへのガラス固化体からの照射線量を取得するとと もに、オーバーパックの脆化が、長期健全性に影響するか否かを判断するための方法について検 討した。さらに、材料の欠陥については、非破壊検査による欠陥寸法測定精度向上に関する検討 を実施した。

平成 27 年度は、地下研究施設を活用したオーバーパック溶接部耐食性試験を継続実施すると ともに、機械的強度に対する材料劣化や溶接欠陥を考慮した健全性評価手法について検討を実施 する。また、緩衝材との境界条件を考慮したオーバーパックの健全性評価に関する検討を実施す る。さらに、腐食評価と構造評価を合わせて、オーバーパックの健全性確保のための判断指標の 具体化を進める。

2) 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材

平成26年度は、地下研究施設および地上での緩衝材流出現象に関する試験を行い、塩水環境下 における緩衝材の密度分布の残留現象、緩衝材流出現象を定量的に評価するとともに、平成25年 度に検討した緩衝材流出現象に対する工学的対策の有効性を検討した。その結果に基づき、人工 バリア全体としての設計・施工仕様の策定に資するデータを整備した。

平成27年度は、再冠水時の処分環境を考慮した緩衝材の挙動評価のために、これまでに実施 されている地上での試験結果などと比較しつつ、地下研究施設を活用した試験データに基づく緩 衝材の流出等の挙動及び工学的対策の効果について検討を行う。また、緩衝材の設計・施工仕様 の策定に資する判断指標の具体化に向けて検討を進める。

1-4

3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築

人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築のため、人工バリアの定置後に曝される多様 な環境条件を考慮した遠心力模型実験と数値解析を通じ、数値解析手法・実験結果の妥当性や実 験データの取得方法を検討する。

平成 27 年度は長期挙動データ(数百年相当)を取得するための研究開発計画を策定する。数値 解析については長期挙動を評価するための熱-力学-水理連成解析コードを用いて、次年度以降 実施する長期挙動を考慮した数値解析に先立ち、パラメータの感度解析と要素試験を通じ必要な 解析パラメータの取得を行う。遠心力模型試験については、策定した試験計画に基づいて試験を 実施する。

4) モニタリング関連技術の整備

平成 27 年度は、 人工バリア性能の確認に対するモニタリング結果の反映方法について検討 を実施するとともに、操業期間中の安全性および廃棄体の回収可能性に関連するモニタリングに ついて検討を実施した。また、研究開発成果や文献調査結果を反映する技術メニューについて、 見直しを含む整備を実施した。さらに、地中無線モニタリング技術については、地下研究施設に おける適用試験等を実施し、技術的成立性を実証した。記録保存に関しては、引続き OECD/NEA における検討状況の調査を継続実施した。

平成 27 年度は、人工バリアの健全性に関わる状態の把握・確認について、確認対象となる項目 と結果の反映方法を検討する。なお、検討においては海外の研究事例についても調査する。また、 人工バリアの健全性に対する信頼性を向上させるため、適用技術に関する整理を行うとともに、 地中無線モニタリング技術について地下研究施設における適用性試験等を継続して実施し、埋設 後の状態把握の実現に向けた検討を実施する。さらに、記録保存に関して引き続き OECD/NEA における検討状況の調査を実施する。

(4) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関る基盤技術の開発

平成 26 年度は、処分パネルの解析モデルによる気流解析及び避難シミュレーション解析を実施し、火災事象等に対する安全確保対策の検討にあたっての解析的手法の適用性等を検討し、火災事象等に対する安全確保対策の検討課題を整理した。また、火災等により高温履歴を受けた人工バリア材料の力学的な物性値実験により取得し、また津波被害を想定したキャニスタの腐食評価のための温度条件を解析により取得した。

平 27 年度は、平成 26 年度までに行った解析及び検討の結果に基づき、操業安全に関わる施設 計画技術については、抽出された課題に対する具体的な対応策の検討と取りまとめを行う。また、 自然災害等による人工バリアへの影響については、想定した災害事象に対する評価手法について の適用性の検討と整理を行う。 1.2 人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材に関する研究開発の背景、および目的

1.2.1 研究開発の背景

人工バリアの一部である緩衝材には、放射性物質の移行抑制などの機能や、制作・施工性を考 慮した技術要件が設定されている[1]。そういった機能や技術要件に関連する緩衝材の品質指標 である「乾燥密度」「化学組成」「形状」は、定置直後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」の影響を受ける。

地層処分施設の定置時は、湧水や滴水に対する対策を講じるため、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にある。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。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 プ変形程度であり、化学的な変質が緩衝材の変質について支配的である。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定置直後の検討や、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が Ca 型化するなどの化学的変質が生じ始める。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、定置直後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、定置直後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、定置直後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、定置直後から再冠水後(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。

また、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。不飽和状態では周囲の岩盤からの水の吸収による緩衝材のサクショ 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 地下水の流入量によっては緩衝材の流出が発生し、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。 1.2.2 研究開発の目的

本調査の目的は、緩衝材施工品質や再冠水時の現象を考慮した緩衝材設計の考え方や、その根拠となる実験及び解析結果を本研究の成果として提示することを計画している。

地層処分における緩衝材については、定置直後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、定置直後から再冠水 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/健全性評価手法の構築 - 緩衝材」(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)

を取り上げた。これらの施工時の緩衝材密度の品質が再冠水時に、どのように変遷するかを把握 するために以下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、緩衝材の「バリア性能」及び「その他の人工バリアの長 期健全性の維持性能」に対し、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)の先行研究成果も踏まえ、施工 方法の選定や施工管理項目の設定に反映される(図1.2-1)。



(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は?)

図 1.2-1 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、図中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)についても検討している。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 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"施工時の品質"、 "地下水の浸潤等再冠水時の影響"に関して検討を行う。再冠水後の緩衝材の品質を評価するた めには、"定置直後の施工品質"を勘案した上で、"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、"定置直後の施工品質"は、設計仕様、施工材料、施工(建設操業)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 本研究の位置づけ

1.3 試験計画

平成 25 年度に策定した 5 年間の調査研究計画を基に、これまでの試験で得ることができた新たな知見等を考慮し一部更新を行った計画を表 1.3-1 に示す。

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、理想的な系から現実で予想される複雑な処分環境(工学規模、湧水量や 水質等)を考慮した研究を行っている。緩衝材の性能劣化事象として懸念される緩衝材流出現象 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、例えば、モンモリロナイトの含有率を上げてクニゲル V1 100wt%の材料を評価するな どの検討も実施しなければならない。

さらに、埋め戻し材やプラグを含む緩衝材近傍の部材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、 人工注水等の工学的対策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 を反映した人工バリア設計・製作・施工手法の考え方についても提示する。 実施にあたっては以下の4項目について、すなわち、①緩衝材の建設操業時の影響の項目の調 査・検討、②過渡的段階に緩衝材に生じる現象の評価、③施工技術の高度化による影響低減検討、 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について検討を実施する。

	表	1.3 - 1	平成25年度から平成29年度の調査研究計画
--	---	---------	-----------------------

		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						
Ø	②再冠水挙動の調査・検討									
i	施工品質(密度分布)の均質化試験 (0.5 NaCl、人工海水(0.5M NaC+0.5/3M CaCl?))	0.5M NaCl溶液の場合:①密度 討	均質化の検討、②応力履歴の検	蒸留水、0.5/3M CaCl₂溶液の場合継続:①密度均質化の検討、②応力履歴の検討						
i	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 ②ブロック+ペレット浸潤状況、	6の取得 密度分布	③塩水環境下における土槽試 0.5 M NaCl	氲水環境下における土槽試験(ブロック+ ベレット) M NaCl					
		 e-log P曲線の取得:①12Mg/m³~2.0Mg/m³までの段階圧密試 ②液性限界程度での段階圧密試験 		 ③塩水環境下でのe-log P曲線の取得、④緩衝材膨潤挙動の 力学的解釈 						
ü	緩衝材の品質確認及び品質改善手法 の検討	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		③Ca型化の発生時期が膨潤挙動に及ぼす影響の取得(再現性) ④一次元浸潤速度試験(継続)						
		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	の移行に関する調査・検討					
3	③緩衝材流出に対する工学的対策に関する調査・検討									
i	小規模/工学規模バイビング試験(海 水相当の液種)、限界流速確認試験	①0.5M NaCI溶液の場合のエ ロージョン量の把握 ②ブロック(流入量、液種)	③05MNaCH+05/3MCaCl₂の 場合のエロージョン量の把握 ④ブロック(流入量、液種) ⑤1.8Mg/1.6Mgの限界流速	 ⑥地下水の場合のエロージョン量の把握 ⑦工学的対策確認試験ブロック+人工不陸 ⑧1.4Mg/1.2Mgの限界流速 	③工学的対策確認試験 ⑩0.8Mg/0.6Mgの限界流速	1処分孔当たりのエロージョン 量の範囲設定				
ii	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現況で流入量計測/エロー ジョン試験の実施	③地下坑道の自然環境におけ る緩衝材流出条件の検討	④地下坑道の自然環境におけ る緩衝材流出条件の検討/工 学的対策の効果確認	⑤試験結果の評価				
iii	地下水流動解析		①地下水位低下工法の効果検 討/地下水流動解析	②幌延地下環境のモデル化+ 工学的対策の効果検討	③処分バネルを想定した止水 対策工の効果確認検討	④緩衝材設置後のモデル化に よる流出挙動を含めた湧水影 響の解析				
4	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 調査・検討(許容エロージョン量の算定 方法)	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 討	設計・施工仕様の指標範囲の検	人工バリア全体の設計・施工 仕様の策定に関する調査	④緩衝材施工/初期性能の提 示				
ii	施工技術の高度化による影響度の低 減	①湧水環境における吹き付け 認	施工試験 + 仮設プラグの効果確	②湧水環境における吹き付け 施工試験解体+エロージョン 試験	③緩衝材膨潤時の挙動のモデ ル化と浸潤挙動の解析	×1,				
1.4 報告書の構成及び概要

本報告書は、第1章から第8章までの構成となっている。

第1章では本研究の背景や目的、概要を示す。

第2章では再冠水時に発生する現象を整理し、検討計画を示す。

第3章では再冠水時の緩衝材への地下水浸潤挙動を把握する試験結果を示す。

ここでは、地下水浸潤の挙動及び地下水浸潤により影響を受ける緩衝材中の空気の挙動を観 察するために実施した試験は以下のとおりである。

・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

・長尺ベントナイト供試体を用いた間隙空気の移行試験

・施工品質(密度差)が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響を把握するための密度差試験

・密度差試験をスケールアップした土槽規模試験

第4章では再冠水時の緩衝材における、緩衝材の変質を把握するための試験を示す。本年度 は化学変質が緩衝材及び地下水の浸潤に与える影響を観察するため、ベントナイトの Ca 型化に よる影響に関する試験を実施した。

第5章では再冠水時の緩衝材における、緩衝材の流出について把握するために実施した試験に ついて示す。本年度は、塩水環境下における室内規模の緩衝材流出試験及び幌延深地層研究セン ターにおいて実施した緩衝材流出試験を実施した。5章の内容についてスウェーデンの実施主体 であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社(以下、SKB社)からレビューを受けた。その内容 は第5章の末尾に掲載する。

第6章では、地下水の浸潤に対する工学的対策の効果について解析的に検討した。本年度は、 幌延深地層研究センターのデータを使用して水理地質構造モデルを作成し、処分孔への地下水流 入量を解析によって算出した。また処分孔にグラウト充填などの工学的対策を施した場合を想定 した解析を実施し、効果を検証した。

第7章では、本年度の成果の取りまとめた。

第1章参考文献

- [1] 地層処分事業の安全確保(2010年度版) 確かな技術による安全な地層処分の実現のため に-NUMO2010年レポート 第6章 処分場の設計,建設・操業・閉鎖技術
- [2] (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

2.1 全体計画

2.1.1 基本方針

本研究は、緩衝材の施工品質が再冠水時の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、ひいては処分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

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、緩衝材の施工方法及び緩衝材の性能変化に対する工学的対策に関して検討を行う。

このような緩衝材の施工方法及び工学的対策を考慮に入れた検討成果は、解析による検討を経 て、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ものと考えられる。

2.1.2 研究計画

緩衝材の設計仕様から導かれる性能は、建設操業後の再冠水中に緩衝材の性能が変動しても長期性能を満足するものでなければならない。これらの再冠水中に緩衝材の乾燥密度や厚さが想定 以上に変動しなければ長期性能を満足すると考えられる。

平成 20 年度から平成 24 年度では、緩衝材ブロックとしてクニゲル V1 70wt%+ケイ砂 30wt% を用いて、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では湧水量によっては水みちが発生し、 ベントナイトの成分が流出することを確認した。さらに、0.5MNaCl 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、水みちが緩衝材の膨潤によって閉塞しないこ とを確認した。このことは、施工時に設計仕様を満足する緩衝材を施工しても再冠水中に流出(透 水係数の増加)する可能性があり、塩水環境下では水みちが残る(透水係数の増加)可能性があ ることを示している。

平成 25 年度からは、緩衝材が、地下環境において受ける影響を検討するために、より現実的な 処分環境(工学規模、湧水量や水質等)を考慮した室内試験を行うとともに、幌延地下研究セン ターを活用した原位置試験を行う。これにより室内試験結果の地下環境への反映と、原位置試験 からこれまで考慮していなかった試験条件等を抽出し、今後の試験計画へ反映する計画である。 また、緩衝材の性能劣化事象として懸念される変質現象及び流出現象の影響に対する緩衝材設計 と工学的対策についても検討を行う。緩衝材設計は、再冠水時の影響を考慮した、設計値の決定 が挙げられる。一方、工学的対策には流出現象の原因となる過度な動水勾配を速やかに解消する 方法(早期埋戻し)や流出する緩衝材の許容値の増強(緩衝材の高密度化)などが挙げられる。

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、緩衝材にとって、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は力学的作用と、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 い処分概念を説明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 受ける再冠水時で発生する現象のうち、緩衝材の性能に特に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、平成 20 年に、図 2.2.1-1 に示すように、既往の研究[1]な どを参考に、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質(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。

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[2],[3]
- ・フィンランドの FEP[4]
- ・ベルギー、フランスにおける知見
- ・ スウェーデンの HLW 地層処分の実施主体である SKB からのヒアリング



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]

2-4

2.2.2 緩衝材性能に影響を与える主な再冠水時の挙動

緩衝材の設計値は再冠水時に緩衝材に生じる現象を網羅的に説明できることが望ましい。緩衝 材の設計値として考えられる要素として、初期乾燥密度、厚さ及び材料の選択(ケイ砂との混合 率等)等が挙げられる。本研究では、施工時における緩衝材の乾燥密度を検討する設計値とした。 緩衝材の乾燥密度は、再冠水時に生じる地下水の浸潤の速度や緩衝材の膨潤性能に影響を与える 一方、地下水の流量によっては、緩衝材が処分孔外に流出するため低下するというように、再冠 水時に緩衝材の性能に関しての重要な指標となりうるためである。

平成 20 年度は、文献調査などによって緩衝材の施工により緩衝材の乾燥密度に影響を及ぼす 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)

を考えた。

これらの影響因子から、再冠水時に緩衝材の乾燥密度に影響を与える現象として、

- ・ 地下水浸潤挙動(熱影響、ガスによる影響を含む)
- · 化学変質
- 緩衝材流出

を抽出し、研究を実施した。これらの妥当性は、2.1.1 で示した FEP により確認されている。

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、乾燥密度に影響する現象は水理、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する[1]。

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得ることを基本方針 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である。

表 2.2.2-1 に本年度実施した試験項目と試験規模の関係を示す。

再冠水時に考慮すべ き緩衝材の挙動	小規模試験	土槽試験	工学規模試験 (複合問題)
地下水浸潤	(a): 不飽和浸潤速度	_	_
	(b): 施工品質 (密度分布)	(c):施工品質(密度分布)	-
	の均質化	が再冠水に及ぼす影響	
		(d): 異種材料界面を有す	
		る緩衝材の浸潤状況	
	(e): 再冠水時のガスの影響		
緩衝材の化学変質	(f): 緩衝材の Ca 型化	_	_
緩衝材の流出	(g): 緩衝材表面近傍の止水	-	(h):幌延地下施設にお
	性能評価		ける緩衝材流出試験

表 2.2.2-1 調査項目と試験規模の関係

上記の検討に加え、本研究では、緩衝材の性能変化に対する工学的対策の考え方の提示を行う。 ここでいう工学的対策は、処分孔周辺の性質(湧水量、地下水のイオン濃度等)に対して、緩衝 材近傍の部材(グラウト等)により、緩衝材の性能劣化現象を抑制する対策を指す。例えば、湧 水による緩衝材への影響に着目し、処分孔周辺の地下水流量を解析的に求めている。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るためである。今後、本解析は湧水量を制御 するためのグラウトによる対策等の有効性を確認するために用いる予定である。

2.3 試験の共通条件

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、もしくは定圧で給水するものである。緩衝材への溶液の供給は主としてシリンジポンプ(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、もしくは定圧での溶液の供給が高精度、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溶液は、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 幌延地下水分析

平成 27 年度から、試験で使用する液種として、より現実的な処分環境における地下水を模擬し た模擬地下水を選択肢の一つとして加えた。ただし、わが国では地層処分サイトはまだ決まって いないため、国内の地下水の一例として JAEA の幌延地下研究施設で採取された地下水組成を模 擬した模擬幌延地下水を作製することとした。

模擬幌延地下水の作製に先立って、JAEA の幌延地下研究施設で採取した地下水組成を分析した。分析結果を表 2.3.2-1 に示す。平成 26 年度に採取されたものを地下水を No.1、平成 27 年度に採取された地下水を No.2 として、試験を 2 回実施した。表 2.3.2-1 には実施した分析方法のJIS 番号も記載している。測定に当たっては、全項目の測定結果が出そろった後に、再度、pH と EC の測定と酸消費量の分析を行った。

pH と EC の測定は、No.1 と No.2 で搬入直後と全ての分析終了後の 2 回行ったが、両者の差 はほとんど認められなかった。また、No.2 では pH に影響を与える炭酸物質の溶存状態の把握の ため、酸消費量の測定も搬入直後と全ての分析終了後の 2 回行ったが、その差はほとんど認めら れなかった。この点については、pH の変化と整合している。一方、No.1 と No.2 でイオンクロマ トグラフを実施したところ、No.1 では亜硝酸イオンのピークが確認されたが、No.2 では亜硝酸 イオンのピークが確認されず、代わりに硝酸イオンの顕著なピークが確認された。

		測定	結果	定量	
測定の対象	単 位	幌延地	也下水	下限值	測定の方法
		No. 1	No. 2	TRALE	
pH(搬入直後)	—	7.4	8.2	—	JIS K 0102-2013 12.1
電気伝導率(搬入直後)	mS/m	1220	1290	—	JIS K 0102-2013 13.
p H (分析終了時)	—	8.5	8.4	—	JIS K 0102-2013 12.1
電気伝導率(分析終了時)	mS/m	1200	1320	—	JIS K 0102-2013 13.
ナトリウムイオン	mg/L	3120	3270	0.1	JIS K 0102-2013 48.2
カリウムイオン	mg/L	87.1	94.5	0.1	JIS K 0102-2013 49.2
カルシウムイオン	mg/L	56.4	32.5	0.1	JIS K 0102-2013 50.2
マグネシウムイオン	mg/L	49.8	53.2	0.1	JIS K 0102-2013 51.2
炭酸水素イオン(搬入直後)	mg/L	1210	1770	0.5	JIS K 0101-1998 13.1 及び 13.2
炭酸イオン(搬入直後)	mg/L	386	299	0.5	JIS K 0101-1998 13.1 及び 13.3
炭酸水素イオン(分析終了時)	mg/L	—	1660	0.5	JIS K 0101-1998 13.1 及び 13.2
炭酸イオン(分析終了時)	mg/L	386	302	0.5	JIS K 0101-1998 13.1 及び 13.3
塩化物イオン	mg/L	4050	4000	0.1	JIS K 0102-2013 35.3
硫酸イオン	mg/L	36.3	19.7	0.1	JIS K 0102-2013 41.3
ケイ素	mg/L	19.7	20.2	0.1	ICP 発光分光分析法
全鉄	mg/L	0.07	0.05	0.03	JIS K 0102-2013 58.4
アンモニウムイオン	mg/L	88.2	81.4	0.1	JIS K 0102-2013 42.2
(亜硝酸イオン)	mg/L	132.0	_	0.1	JIS K 0102-2013 43.2.5
(硝酸イオン)	mg/L	_	120	0.1	JIS K 0102-2013 43.2.5

表 2.3.2-1 幌延地下水分析結果

2.3.3 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、小型セルによる緩衝材流出試験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。

さらに、試験に使用する液種は、蒸留水、水道水、イオン強度が 0.5 の NaCl 水溶液や CaCl² 水溶液である。さらに、後述する一部の試験では、より現実的な地下水での緩衝材の再冠水時 の挙動を評価するために、JAEA の幌延地下研究センターで採取された地下水組成を模擬した 模擬幌延地下水を表 2.3.3-1 に示すような配合で作製して試験に供した。

試薬	ppm	Mol/L
NaCl	5200	8.9E-02
NaHCO ₃	3000	3.6E-02
CaCl_2	180	1.6E-03
KCl	230	3.1E-03
${ m MgCl}_2$	190	2.0E-03
H ₃ BO ₃	410	6.6E-03

表 2.3.3-1 模擬幌延地下水組成

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] SKB : Buffer and backfill process report for the safety assessment SR-Can, SKB TR-06-18 (2006).
- [3] SKB : FEP report for the safety assessment SR-Can, SKB TR-06-20 (2006).
- [4] Bill Miller and Nuria Marcos : Process Report -FEPs and Scenarios for a Spent Fuel Repository and Olkiluoto, POSIVA 2007-12 (2007).

第3章 緩衝材への地下水浸潤に関わる調査

3.1 緩衝材への地下水浸潤状況の評価

3.1.1 飽和度と比抵抗の関係取得

(1) 試験の目的及び概要

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 3.1.1-1 に示すような試験装置を用いて、様々なベントナイトの飽和 度と比抵抗の関係を取得した。図 3.1.1-2 には、飽和度と比抵抗の関係取得試験装置を示してい る。締固めは高さ 100mm の供試体を仕上がり層厚 5mm×20 層で締固めて作製した。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。試験ケースを表 3.1.1-1 に示す。



図 3.1.1-1 飽和度と比抵抗の関係取得試験装置の断面図



外部セル

内部セル 図 3.1.1-2 飽和度と比抵抗の関係取得試験装置

これまでに、Na型ベントナイトについて蒸留水を用いた場合とイオン強度 0.5 の NaCl 水溶液 を用いた場合の乾燥密度ごとに飽和度と比抵抗の関係を取得した。本年度は Ca 型化ベントナイ トに蒸留水を用いた場合の乾燥密度ごとに飽和度と比抵抗の関係を取得した。

今後、Ca型化ベントナイトにイオン強度 0.5 の CaCl2 水溶液を用いた場合や Na 型化ベントナ イトにイオン強度 0.5 の CaCl2 水溶液を用いた場合の結果が揃うと、比抵抗計測で緩衝材の Ca 型化の状況が判断可能となる可能性がある。

				• • •		
ベントナイト	間隙液種	イオン	ケイ砂	乾燥密度	飽和度※	状況
		強度	含有率	Mg/m ³	%	
			wt%			
Na	蒸留水	—		1.0	30.0	済
Na	NaCl 水溶液	0.5		1.2	45.0^{*}	済
Ca	蒸留水	—	30	1.6	60.0^{*}	今年度実施
Ca	CaCl2水溶液	0.5		1.0	75.0	先行実施ケースの結果に
Na	CaCl2水溶液	0.5		2.0	90.0^{*}	応じて実施予定

表 3.1.1-1 飽和度と比抵抗の関係取得試験ケース

*乾燥密度 2.0 Mg/m³の時には実施しない

(2) 試験結果

表 3.1.1-2 と表 3.1.1-3 にケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水として蒸留水と NaCl 水溶液を用いた場合の飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースとその結果の一覧を示す。さら に、表 3.1.1-4 には、ケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイトで間隙水として蒸留水を用いた場 合の飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースとその結果の一覧を示す。

	バルクの土粒子密度 <u>æ</u> =2.707 (Mg/m ³)									
						51	実測値			
乾燥密度	含水比	間隙比	飽和度	体積含水率	乾燥密度	含水比	間隙比	飽和度	体積含水率	比抵抗
æ	w		Sr	θ	æ	W		Sr	θ	R
(Mg/m ³)	(%)	e	(%)	(%)	(Mg∕m³)	(%)	е	(%)	(%)	(Ωm)
	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
1.200	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
	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
1.600	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
	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
1.800	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
2.000	9.79	0.354	75.0	19.58	2.020	9.40	0.340	74.76	18.98	8.87

表 3.1.1-2 飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースと試験結果一覧(Na型ベントナイト、蒸留水)

表 3.1.1-3 飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースと試験結果一覧(Na型ベントナイト、NaCl水溶液)

				バルクの土粒	[子密度 <i>_0</i> \$=2	2.707 (Mg/n	n³)			
		設計値						実測値		
乾燥密度	含水比	間隙比	飽和度	体積含水率	乾燥密度	含水比	間隙比	飽和度	体積含水率	比抵抗
æ	w		Sr	θ	æ	W		Sr	θ	R
(Mg∕m³)	(%)	e	(%)	(%)	(Mg/m ³)	(%)	e	(%)	(%)	(Ωm)
	13. 92	1. 256	30	16. 70	1.200	14.31	1.255	30. 9	17. 17	11.45
	20.87	1.256	45	25.05	1.200	21.28	1.256	45.9	25.54	4.13
1.200	27.83	1.256	60	33. 40	1.200	28.03	1.256	60.4	33.64	2. 52
	34. 79	1.256	75	41.75	1.200	35.00	1.255	75.5	42.00	1.43
	41.75	1.256	90	50. 10	1.200	42.64	1.255	91.9	51.17	0.88
	7.67	0. 692	30	12. 27	1.603	7.64	0.690	30.0	12. 24	24.35
	11.5	0. 692	45	18.4	1.606	11.32	0.692	44. 7	18. 18	8.68
1.600	15.33	0. 692	60	24. 53	1.607	15.11	0.688	59.8	24. 28	4.19
	19.17	0. 692	75	30. 67	1.605	19.17	0.709	75.6	30.76	2.50
	23	0. 692	90	36.8	1.606	22.96	0.705	90.7	36.88	1.72
	5.59	0.504	30	10.06	1.800	5.53	0.504	29.72	9.95	33.99
	8.38	0.504	45	15.08	1.800	8.39	0.504	45.08	15. 10	12.08
1.800	11.17	0.504	60	20.11	1.800	11.00	0.504	59.11	19.80	6.03
	13.97	0.504	75	25.14	1.800	13.82	0.504	74.26	24.88	12.08
	16.76	0.504	90	30. 17	1.800	16.83	0.504	90.44	30. 2939	2.64
	3. 92	0.353	30	7.83	2.000	4. 36	0.353	33.40	8. 72	34.44
2.000	5.87	0.353	45	11.75	2.000	5.77	0.353	44.20	11.54	17.64
2.000	9.79	0.353	75	19.58	2.000	9.45	0.353	72.39	18.90	5.49

	バルクの土粒	子密度 <u>/</u> &=2	.708 (Mg/m	1 ³)						
		設計値						実測値		
乾燥密度	含水比	間隙比	飽和度	体積含水率	乾燥密度	含水比	間隙比	飽和度	体積含水率	比抵抗
æ	w		Sr	θ	æ	W	2	Sr	θ	R
(Mg∕m³)	(%)	e	(%)	(%)	(Mg/m ³)	(%)	e	(%)	(%)	(Ωm)
	13.92	1.257	30	16.71	1.200	14.55	1.257	31.3	23.3	38.54
	20.88	1.257	45	25.06	1.200	22.50	1.257	48.3	36.0	13.82
1.200	27.84	1.257	60	33.41	1.200	28.27	1.257	60.7	45.2	8.80
	34.80	1.257	75	41.77	1.200	36.48	1.257	78.4	58.4	5.98
	41.77	1.257	90	50.12	1.200	42.20	1.257	90.7	67.5	4.74
	7.67	0.693	30	12.28	1.600	8.61	0.693	33.6	13.8	65.75
	11.51	0.693	45	18.41	1.600	13.40	0.693	52.2	21.4	20.08
1.600	15.34	0.693	60	24.55	1.600	15.18	0.693	59.2	24.3	11.50
	19.18	0.693	75	30.69	1.600	20.81	0.693	81.1	33.3	5.53
	23.02	0.693	90	36.82	1.600	23.22	0.693	90.5	37.2	5.19
	5.59	0.504	30	10.06	1.800	6.66	0.504	35.6	10.7	219.89
	8.38	0.504	45	15.09	1.800	9.70	0.504	51.9	15.5	25.90
1.800	11.18	0.504	60	20.12	1.800	11.20	0.504	59.9	17.9	12.86
	13.97	0.504	75	25.15	1.800	15.38	0.504	82.3	24.6	6.20
	16.77	0.504	90	30.18	1.800	16.87	0.504	90.3	27.0	5.53
2,000	3.92	0.354	30	7.84	2.000	4.720	0.354	36.0	7.6	331.87
2.000	9.80	0.354	75	19.61	2.000	10.37	0.354	79.1	16.6	6.579

表 3.1.1-4 飽和度と比抵抗の関係取得試験ケースと試験結果一覧(Ca型ベントナイト、蒸留水)

既往の比抵抗値と飽和度の関係式としては、岩石に対して Archie 式[2]、粘土分を含む岩石に 対して Patnode and Wyllie (1950)による並列回路モデル[2]などがある。これらの式は、岩石のコア サンプルを使用した実験により、経験的に取得されたものである。例えば、Archie 式によると、 比抵抗値 R は、地層水により 100%飽和している場合の比抵抗値 R_0 、地層水の比抵抗値 R_m 、飽和 度 s, 孔隙率(空隙率) ϕ として、

$$R = \frac{R_0}{R_w} \frac{R_w}{S_r^{\,n}} = \frac{1}{\phi^m} \frac{R_w}{S_r^{\,n}} \quad (\text{$\%$z$. 3.1.1-1)}$$

で表される。ここに、 mは膠結係数、 n は飽和率指数[2]である。さらに並列回路モデルにおいて 比抵抗値 R は、粘土分による過剰導電分の比抵抗値 R として、

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_c} = \left(\frac{\phi^m}{R_w} + \frac{1}{R_c}\right) S_r^n \quad (\text{数式 3.1.1-2})$$

で表される。両者の違いは、岩石では間隙水のみが電気伝導に寄与しているのに対して、粘土分 を含む岩石の場合、電気伝導に対して間隙水と鉱物表面近傍の間隙水を分けて考える必要がある という点である。これは、粘土鉱物の表面が電気的に中性ではなく、その近傍に有意なイオン強 度を持つ電気二重層が形成されるためである。

ベントナイト系人工バリアの場合、その母材が粘土鉱物であるが、その間隙は非常に小さく、 その間隙水の伝導性を鉱物表面近傍とその他で区別する必要性がないと考えられる。このため、 本検討では、比抵抗値と飽和度の関係の近似式として、並列回路モデルではなく、Archie 式の関 数形を踏まえて、試験結果のフィッティング関数を以下のように決定した。

$$R = a \left(\frac{\rho_d / \rho_w}{S_r}\right)^{2.2} = a \left(\frac{G_s}{S_r (1+e)}\right)^{2.2} \quad (\text{xz 3.1.1-3})$$

ただし、ρ_aは乾燥密度、ρ_aは間隙液の単位体積質量、s,(×100%)は飽和度、eは間隙比、G,は 土粒子比重である。さらに、a(Ωm)は液種の違いによる補正係数であり、試験結果に対するフィッ ティングからケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイトで間隙水が蒸留水の場合は 1.0、0.5M の NaCl 水溶液の場合 0.6 となった。図 3.1.1・3 に表 3.1.1・2 と表 3.1.1・3 に示したケイ砂 30wt%含 有の Na 型ベントナイトで間隙水として蒸留水と NaCl 水溶液を用いた場合の飽和度と比抵抗の 関係取得試験結果にを用いてフィッティングした結果を示す。図から、この近似式が全ての試験 結果と非常に良く整合していることが分かる。この式を用いれば、ベントナイト系人工バリア材 料であれば、幅広い乾燥密度で適用可能であると考えられる。



図 3.1.1-3 飽和度と比抵抗の関係(ケイ砂 30wt%含有の Na 型ベントナイト)

一方、図 3.1.1・4 には、表 3.1.1・4 に示したケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイトで間隙水 として蒸留水を用いた場合の飽和度と比抵抗の関係取得試験結果に(数式 3.1.1・3)を用いてフィ ッティングした結果を示す。ケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイトで間隙水が蒸留水の場合の 補正係数 2.0 となった。ただし、図からも明らかなように、乾燥密度 1.8Mg/m³ と 2.0 Mg/m³の ケースの低飽和度領域で(数式 3.1.1・3)との乖離が大きいことが分かる。これは、Ca 型ベント ナイトでは吸着水が多いため、低飽和度領域では自由水が少なくなり、比抵抗が急激に大きくな るためだと考えられる。

そこで、(数式 3.1.1-3) を(数式 3.1.1-4) のようにして Ca 型ベントナイトの補正係数 a を 0.06 として、飽和度の低下時の比抵抗値の急激な増加を表現すべく、指数 b を 5.0 とした。図 3.1.1-5 にフィッティングした結果を示す。概ね良好な一致が見られることが分かる。

比抵抗で飽和度を推定する場合、層間陽イオンの違いによる吸着水と自由水の差の影響を受け る可能性があることが分かった。乾燥密度が既知の緩衝材の飽和度を、比抵抗を計測と(数式 3.1.1-4)によって推定する場合、未知数は a、b の 2 個となり、このままでは飽和度を推定でき ない。層間陽イオンの Ca 型化率や地下水イオン強度、陽イオン濃度などの補足的な情報と未知 数 a、b の関係を取得し、推定できるように高度化する必要がある。さらに、乾燥密度や飽和度が 推定可能な場合、比抵抗値から Ca 型化率を推定することも可能となる。





図 3.1.1-4 飽和度と比抵抗の関係(ケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイト)



図 3.1.1-5 飽和度と比抵抗の関係 (ケイ砂 30wt%含有の Ca 型ベントナイト)

3.1.2 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(密度一定条件)

(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、浸潤に伴う飽和度の変化でベントナイトの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、これまでに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 1.6Mg/m³の供試体(φ20mm×h20mm)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 3.1.2-1 に示すように、材料がベントナイト単体(乾燥密度 1.8Mg/m³)、ケイ砂 30wt%混合ベントナイト(乾燥密度 1.6Mg/m³)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 1.6Mg/m³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 0.403cm³/cm³ であるため、供試体の下面付近と中央付近の飽和度が 0.403cm³/cm³に近づく様子を求めると図 3.1.2-2 のようになる。なお、供試体体積が 6.283 cm³であるため、供試体が飽和するのに必要な水分量は 2.532cm³である。図 3.1.2-2 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 3.1.2-1 鈴木らの試験結果[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 $ imes$ H20mm					
試験温度(℃)	25,40,80					
浸潤液	純水					
繰り返し回数(回)	3					

表 3.1.2-1 鈴木らの試験条件[1]



図 3.1.2-2 鈴木らの試験結果による浸潤フロントの経時変化[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 3.1.2-3 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 3.1.2-2のようになる。



図 3.1.2-3 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

表 3.1.2-2 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	$1.6 \mathrm{Mg/m^3}$	10	蒸留水	注水量・注水圧	継続中
2	(Na 型ケイ砂 30wt%混合)	10	塩水	試験後:含水比、密度計測	継続中

(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 3.1.2・4)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 3.1.2・5 に示したアクリル製セルに図 3.1.2・6 に示 した比抵抗計測用の電極を設置した状態で(図 3.1.2・7)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 3.1.2・8、図 3.1.2・9 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 3.1.2・10 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 3.1.2・11)。

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 3.1.2-4 5mm 撒き出し分のベントナイトの計量



図 3.1.2-5 1000mm アクリルセル



図 3.1.2-6 比抵抗測定用電極



図 3.1.2-7 比抵抗測定用電極の設置



図 3.1.2-8 締め固め時のアクリルセル保護用ダンパー



隙間がなくな ると仕上がり 層厚 5 mm



図 3.1.2-9 締固め時の高さ管理方法



図 3.1.2-10 ヒーター付きピストン



図 3.1.2-11 完成図

(4) 試験結果

写真 3.1.2-1 に、浸潤状況の写真を示す。写真から分かるように、浸潤フロントの位置を目視 で推定するのは困難である。



写真 3.1.2-1 液体の浸潤状況(左:蒸留水、右: NaCl 水溶液(0.5M))

約6年間に亘る比抵抗値による浸潤状況の計測結果を図 3.1.2-12 に示す。図の横軸は、比抵抗 値を初期比抵抗値で無次元化して、比抵抗値の浸潤に伴う低下割合を示している。なお、1 カ所 の比抵抗計測で4つの電極を使用するため、供試体の上下端75mm 分は計測ができない。

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、給水圧が小さいにも拘らず浸透距離が大きく、更に比抵抗の低下割合 が大きいことが分かる。しかしながら、どちらのケースも比抵抗が変化しているフロントは、給 水時間 2200 日に対して 925mm(供試体の計測限界)程度である。925mmでの比抵抗が低下し始 めたのは給水開始から約 1600 日程度であった。このため、1600 日程度で浸潤フロントが最上部 にまで達したものと判断した。ただし、蒸留水のケースと NaCl 水溶液のケースで給水圧が異な ることに注意が必要である。

ここで、図 3.1.2-12 に示した比抵抗値の経時変化のうち幾つかについて、(数式 3.1.1-3)のベ ントナイトの飽和度と比抵抗の関係式を用いて比抵抗値を飽和度に換算したものを図 3.1.2-13 に示す。図から、比抵抗値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、図 3.1.1-3 に示したように、ベントナイトの飽和度と比抵 抗関係の非線形性が強く、低飽和度領域では比飽和度の変化に対して比抵抗の変化が敏感で、逆 に、高飽和度領域では飽和度の変化に対して比抵抗の変化が鈍感であるためである。また、飽和 度分布から、蒸留水の場合、浸潤した水の多くが毛細管現象により供試体上部に拡散し飽和度の 遷移領域を形成しているが、NaCl 水溶液の場合、遷移領域があまり形成されていないことが分か る。これは、NaCl 水溶液の場合、モンモリロナイトの膨潤度合が蒸留水の場合に比べて小さく、 外間隙が十分に小さくなれず、毛管力が相対的に小さいためであると考えられる。なお、NaCl 水溶液のケースで初期飽和度が 39%ではなく、31%となっているのは、供試体作製時の含水比調 整を蒸留水で行っているが、(数式 3.1.1-3)の補正係数は 0.6 と固定しているためである。実際 には、供試体作製時の間隙水と供給された 0.5M の NaCl 水溶液が混合しながら浸潤するため、(数 式 3.1.1-3)の補正係数が経時変化するものと考えられる。



図 3.1.2-12 浸潤に伴う比抵抗の変化 (上:蒸留水、下: NaCl 水溶液(0.5M))

さらに、図 3.1.2-13の NaCl 水溶液の場合では、供試体底面から 400mm 付近で飽和度の逆転 現象が発生している。図 3.1.2-14 に示すように、目視観察では、供試体の当該箇所付近が他の部 分に比べて異なるなどの状況は確認できなかった。ただし、電極の腐食状況が、他の箇所よりも 進行している可能性があるため、今後、試験を解体する際に、実際の飽和度分布と計測値の整合 性を確認する予定である。



図 3.1.2-13 浸潤に伴う飽和度の変化 (上:蒸留水、下:NaCl水溶液(0.5M))

図 3.1.2-14 には、供試体底部付近の浸潤状況の目視観察写真を示す。図から、試験開始直後と 現在とで、目視観察では大きな変化をとらえることが難しいことが分かる。



図 3.1.2-14 液体の浸潤状況(左:蒸留水、右: NaCl 水溶液(0.5M)、2015/12 現在)

図 3.1.2-15 には、図 3.1.2-13 に示した飽和度分布において、飽和度が初期値から 1%増加した 時点で浸潤フロントが到達したと見なした場合の浸潤フロントの進展状況を示す。比抵抗計測の ための電極が 50mm 間隔で設置されているため、浸潤フロントの進展状況も階段状になっている ことに注意が必要である。

蒸留水のケースの場合、浸潤フロントの位置 d(mm)は、給水時間 t(day)の指数関数として d = 60t⁰³ で近似できる。この関係式に基づいて浸潤フロントが供試体上部(浸潤距離 1000mm)まで到達する時間を算出すると、約 8.5 年となる。この結果は、浸潤フロント位置 d(mm)が給水時間 t(day)

の平方根に比例するという毛細管現象による水の拡散速度の理論式である Washburn 式(図 3.1.2-15の破線)、

$$d = c \times t^{0.5}$$
 (数式 3.1.2-1)

よりも緩慢である。ここに、 *c* は濡れ角などの関数で表される材料と液種によって決まる係数である。

理論式と実測値を比較すると、浸潤フロントが 650mm 以下では実測値と理論式は良く整合す るが、650mm 以上では、理論式に比べ実測位置が徐々に遅くなる傾向を示している。これは、 浸潤に伴うモンモリロナイトの基底間隔の変化によって、間隙構造が徐々に変化したためではな いかと考えられる。さらに、初期飽和度から飽和度が 1%増加した時点を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も原因として挙げられる。一方、NaCl 水溶液の場合、浸潤フロントの位置 d(mm)と給水時間 t(day)の関係はd=14t⁰⁵と近似でき、給水時間 t(day)の平方根に比例するという Washburn 式と整合する結果であるが、浸潤フロントの進展状況 は蒸留水の場合よりも遅い。



図 3.1.2-15 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)

次に、飽和度が 95%以上となる場所を飽和フロントと定義して、その進展状況をまとめると図 3.1.2-16 のようになる。図から、飽和フロントの進展状況は、蒸留水の場合に比べ NaCl 水溶液 の場合の方が速いことが分かる。このことから、蒸留水の場合、ベントナイトに供給された水は、 比較的速やかに供試体上部に拡散するため浸潤フロントは移動するが、NaCl 水溶液の場合では供 給された NaCl 水溶液はあまり供試体内部に拡散されずに給水側に留まっているものと考えられ る。これは、NaCl 水溶液の場合、そのイオン強度の影響でモンモリロナイトが凝集し、毛細管現 象に寄与する微小な空隙が形成され難いためと考えられる。

なお、飽和フロントが供試体上部(浸潤距離 1000mm)まで到達する時間を近似式から計算する と、蒸留水の場合で約 34 年、NaCl 水溶液の場合で約 25 年となった。



図 3.1.2-16 飽和フロントの進展状況(飽和度 95%以上で定義)

図 3.1.2-17 には、図 3.1.2-15 と図 3.1.2-16 に示した浸潤フロントの結果から、飽和度が初期 値から 1%増加した地点から飽和度が 95%を超える地点を飽和度の遷移領域として示している。 図に示すように、飽和度の遷移領域は NaCl の方が短く、蒸留水の方が長いことが分かる。この ため、給水した際に、NaCl の方が高飽和度領域が供試体下部にある厚さで存在することになる。 蒸留水を給水した場合には、供給水が供試体上部に吸い上げられるために遷移領域が長くなり、 高飽和度領域の厚さは小さくなる。



図 3.1.2-17 飽和度の遷移領域

図 3.1.2-18 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 3.1.2-17 と同様に徐々に浸透し難くなっていることが分かる。なお、図 3.1.2-18 と図 3.1.2-17 では浸潤フロントの距離が異なるが、これは図 3.1.2-17 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 3.1.2-18 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。実際の飽和領域は図 3.1.2-18 のフロントの位置よりも飽和度の遷移領域に 消費される(毛細管現象で吸い上げられた)水分の分だけ小さいと考えられる。



図 3.1.2-18 液体の浸潤状況

図 3.1.2-19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 3.1.2-19 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 3.1.2-20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 水溶液が浸潤した領域のベント ナイトは、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。そのため、蒸留水 の場合に比べて小さな給水圧であるが、供試体に供給された流量はNaCl 水溶液の方がい大きい。



図 3.1.2-19 液体の浸潤状況(左:蒸留水、右: NaCl 水溶液(0.5M))



図 3.1.2-20 圧力計と浸潤面の水位差

図 3.1.2-21 には、試験中に計測された軸応力の経時変化を示している。供試体作製時にアクリ ルセル内で1層当たりの仕上がり層厚 5mmで 200 層締固めて 1000mm の供試体を作製し、軸方 向に体積拘束したため、供試体の弾性除荷に伴って、蒸留水で 1.71MPa、NaCl 水溶液で 1.38MPa の軸応力が発生している。その後、給水に伴って軸応力が減少しているが、これは給水によるコ ラプス沈下やセルと供試体間の摩擦の減少などの複合的な作用によるものと考えられる。その後、 膨潤圧により軸応力が増加に転じている。蒸留水の軸応力はいまだに増加傾向であるが、NaCl 水溶液の軸応力は定常状態となっている。



図 3.1.2-21 軸応力の経時変化

3.1.3 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(膨潤変形条件)

(1) 試験の目的及び概要

実際の処分場環境での緩衝材への地下水浸潤は、緩衝材の膨潤変形も伴っているものと考えら れる。この膨潤変形に伴って緩衝材の浸潤領域の乾燥密度は低下するため、前述のような乾燥密 度一定条件下での浸潤状況とは異なることが予想される。特に、後述するような緩衝材の流出現 象が懸念されるような条件では緩衝材の周辺には隙間が存在し、その隙間を緩衝材がシール(膨 潤)する過程で流出現象が発生する。この流出現象は、湧水量に比べて湧水が緩衝材に浸潤する 速度が小さい場合に発生するものと考えられるため、このような膨潤変形条件下での浸潤速度取 得も重要であると考えられる。

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いて、緩衝材の膨潤変 形を許容した系での蒸留水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。さらに本試験では、浸潤に伴う緩衝材の膨潤フロントの計測、さらに膨潤に伴う 乾燥密度の分布の変遷なども取得する。

(2) 試験ケース

表 3.1.3-1 に試験ケースを示す。試験では、図 3.1.3-1 に示した装置を用いて浸潤速度、膨潤 速度、乾燥密度分布などを計測する。乾燥密度分布の計測は、定点撮影による変形量や比抵抗値 の変化などから評価する。また、変形量の測定が難しい膨潤領域の乾燥密度については飽和度を 仮定して比抵抗値から密度分布を計測する。

- X J.I.J I 以八 ~ / / / / / / / / / / / / / / / / / /	ナイトの不飽和浸潤速度取得試験ケース一覧	-イ	長尺ベント	3.1.3-1	表
------------------------------------------------------	----------------------	----	-------	---------	---

条件	状態	液種	供試体	給水量	試験数	計測項目
膨潤変形条件	新規	H ₂ O	ケイ砂 30wt%混合 Na 型ベントナイト 初期高さ:300 mm 初期乾燥密度:1.6Mg/m ³ 程度	水位一定	1	比抵抗計測 定点撮影



図 3.1.3-1 一次元浸潤速度試験セル(膨潤変形条件)

(3) 供試体作成方法及び試験方法

供試体は、図 5.3.31に示すように、先ず、仮締固めモールドで層厚 5.5mm 程度に締固め、出 来上がったブロックの辺を油性マジックで縁取り、試験用のアクリルセルに挿入して本締固めを 行った。本締固め、密度一定条件での浸潤速度試験と同様に、仕上がり層厚 5mm となるように 行い、60 回繰り返して高さ 30mm の供試体を作製した。その後、比抵抗計測用の電極を設置し て供試体上部に給水して試験を開始した。水位はマリオット管で一定となるようにした。 また、注水方法は供試体上部の 700mm 分を蒸留水で満たし、自由吸水できる条件とした。試験 中の膨潤量は、比抵抗値の変化と油性マジックの縁取り箇所の目視で計測することとした。マー カーは、写真 5.3.31に示すように、実際と同じ状況で試験を実施して、視認性の高さや滲み、 膨潤性への影響などを考慮して選定を行った。その他の試験条件は、密度一定条件での浸潤速度 試験と概ね同様である。



図 3.1.3-2 マーカー選定試験

図 5.3.3 2 には作製した供試体の各層の密度分布を示す。概ね、乾燥密度 1.6Mg/m3 の均一な 供試体が作製できていることが分かる。表 5.3.3 1 には供試体の諸元を示す。供試体は平均で乾 燥密度 1.6Mg/m3、含水比 10%程度、飽和度 40%程度であった。写真 5.3.3 2 に供試体完成時の 状況を示す。



材料		ケイ砂 30wt%混合クニゲル V1
土粒子密度	(Mg/m ³)	2.707
直径	(cm)	5.000
高さ	(cm)	30.000
含水比	(%)	10.58
乾燥密度	(Mg/m ³)	1.600
間隙比	(-)	0.692
飽和度	(%)	41.411

表 3.1.3-2 供試体諸元



図 3.1.3-5 供試体完成時の状況

(4) 試験結果

図 3.1.3-6 に膨潤試験状況を示す。図に示すように、水と接している最上部の層のみが著しく 膨潤しているのが分かる。図 3.1.3-7 には目視観察から得られた密度分布を示す。さらに、図 3.1.3-8 には、図 3.1.3-7 の上部のみの拡大図を示す。図から、表層が膨潤しながら乾燥密度を低 下させている状況が分かる。



図 3.1.3-6 膨潤試験状況


図 3.1.3-8 供試体密度分布(拡大図)

図 3.1.2-18 に示した、密度一定条件の飽和フロント: d=9√t や浸潤フロント d=60√(0.35&t) を援用してそれぞれを算出すると飽和フロントが約 8mm、浸潤フロントが約 55 mm となった。 しかしながら、目視観察では大きな変化は見られないことから、膨潤によって間隙が大きくなり、 毛細管現象が鈍り、浸潤速度が密度一定条件に比べ小さくなったことが考えられる。

図 3.1.3-9 には、比抵抗値から算出した飽和度分布を示す。図 3.1.3-6 に示したように、上部の 比抵抗電極は供試体に触れておらず、水と接触している状態である。また、比抵抗計測は 4 極法 で行っているため、4 つの電極が全て供試体と接触している状態でなければならない。そのため、 4 つの電極がすべて接している状態での計測点である底面から 26.25mm までの計測値のみを示 している。図から、初期状態から底面から 26.25mm の飽和度が他の箇所に比べ小さいことが分 かる。これは、底面から 26.25mm の地点を計測する場合、4 極の内の最上部が供試体表面に位置 しており、初期状態では電極がしっかりと供試体に接触していないために比抵抗値が大きく、試 験開始直後には膨潤して電極と供試体はしっかりと接触するが乾燥密度が低下している状態(図 5.3.4 5 参照) であるのにも拘わらず、飽和度の評価は密度一定の場合の比抵抗と飽和度の関係式 $sr=(\rho_d/\rho_w)^2.2/R$ を使用しているために飽和度を小さく見積もっていると考えられる。

図 3.1.3-11 には、底面から 26.25mm の地点の飽和度の経時変化を示している。試験開始直後は 飽和度が低下し、その後、増加に転じている。このことから、供試体表面の膨潤領域では、開始 直後は浸潤による比抵抗の低下よりも乾燥密度の低下の影響が大きく、その後に比抵抗の低下が 顕著になったものと考えられる。

本試験では、比抵抗値と飽和度と乾燥密度が全て変化するため、今後、飽和度が 100%と見なせる膨潤領域の比抵抗値から密度を推定する予定である。



図 3.1.3-9 比抵抗値から算出した飽和度分布



図 3.1.3-10 試験開始前後の供試体上面の状況



図 3.1.3-11 供試体密度分布

(5) 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。

(6) 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。 3.2 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

3.2.1 背景と目的

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。

3.2.2 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 3.2.2-1 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)を作成した。試験機を作成するに当たり、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 3.2.2-1 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、ビ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 3.2.2・2 参照)。

試験ケースをまとめると表 3.2.2-1 のようになる。表には、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。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 3.2.2-3 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。力学理論に照らせば、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。これにより、不均質供試体の膨潤圧解釈に 役立つと考えられる。



図 3.2.2-1 力学物性(膨潤量)による均質化の判断のイメージ



図 3.2.2-2 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

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							継続中
2	1.984 (2.0)	1.190 (1.2)	1.792	0.963	13.41	46.74	鉛直	1.6 (ケイ砂 30wt% 混合 Na型ベン トナイト)	蒸留水	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			継続中			
2s	1.991 (2.0)	1.187 (1.2)	1.801	0.960	13.54	47.96 鉛直		鉛直	1.6 (ケイ砂 30wt% 混合 Na型ベン トナイト)	NaCl 水溶液 0.5M	継続中		
3s	1.747(1.7)	1.550(1.5)	1.526	1.317	18.57	25.55				継続中			
()は計													

表 3.2.2-1 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



図 3.2.2-3 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

(2) 試験結果 (蒸留水ケース)

試験結果を図 3.2.2-4~図 3.2.2-7 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 3.2.2-4 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

3-30

で給水しているため、膨潤挙動が緩慢であり、Case1 では約 2000 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ものの、概ね定常に達したと見做しても良い程度の変形である。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、解体した。



図 3.2.2-4 膨潤量の経時変化

図 3.2.2・5 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 3.2.2・5 に 示すように、Case1 の場合、圧力制御で給水しているため、給水圧の経時変化が滑らかである のに対して、Case2 の場合は、試験当初、破過による過流量を防ぐためにフローポンプによる 流量制御で給水を行ったため、上下の供試体の通水圧に相違が発生した。このため、一旦給水 を止めて上下に同じ給水圧となるようにフローポンプによる圧力制御で給水を行った。このような段取り替えのため、試験初期段階で大きな給水圧の増減があるが、その後の試験状況に影響は及んでいないものと考えられる。なお、給水圧の小刻みな振幅は、フローポンプの盛替え によるものである。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。膨潤圧に関しては Case1 では 0.66MPa、Case2 では 0.45MPa であった。

膨潤量の観点から平衡状態を判断すると、Case1 と Case3 に関しては、未だ平衡状態ではな いものと考えられる。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 圧が増加傾向であり、Case1 の膨潤圧が低下傾向である。現段階では、Case1 よりも Case3 の 膨潤圧の方が大きいため、Case1 から Case3 の膨潤圧の大きさは、低乾燥密度供試体の密度 の順番と整合している。この実験事実は、緩衝材のバルクの膨潤圧は低乾燥密度領域によって 決定し、低乾燥密度領域が膨潤によって解消されるに従って増加することを示唆している。こ のことは、緩衝材の膨出対策で見込むべき膨潤圧などの推定にも役立つものと考えられる。



図 3.2.2-5 フローポンプによる通水圧の経時変化

図 3.2.2-6 には、Case1 と Case3 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。 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 に低下させた。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 3.2.2-6 フローポンプによる制御流量の経時変化

図 3.2.2-7 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に、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、試験開始からしばらくの間、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。高密度供試体は 1.8→1.74Mg/m³ へと減少し、その後定常化し た。低密度供試体は 1.4→1.45 Mg/m³ 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が、 均一化には至らないものと予想される。

Case3 に関しては、高密度の供試体が 1.7→1.66Mg/m³ へ減少し、その後定常化し、低密度の供試体は 1.5→1.53 Mg/m³ へと増加し、その後、平成 23 年度でほぼ定常になり、有意な密度 差が残っている。

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/m³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 3.2.2-3 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 3.2.2-7 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化

(3) 試験結果(NaCl水溶液ケース)

図 3.2.2-8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。 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が、本試験においても蒸留水のケースとイオン強度が 0.5 の NaCl水溶液を用いて実施した場合の試験結果は、どちらもこの考えに整合している。また、イオ ン強度の影響により、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、膨潤量が小さくなっている。ただし、乾燥密度 1.4Mg/m³と 1.8Mg/m³の場合の蒸 留水のケースが他のケースに比べて膨潤挙動が非常に緩慢であるため、蒸留水のケースとイオン 強度が 0.5 の NaCl 水溶液のケースの膨潤量が逆転している。逆に言えば、他のケースの膨潤量 の差異から、乾燥密度 1.4Mg/m³と 1.8Mg/m³の場合の蒸留水のケースの膨潤量は現状よりも大き くなることが予想される。そのため、定常になるにはさらに試験を継続する必要がある。



図 3.2.2-8 膨潤量の経時変化(NaCl水溶液)

図 3.2.2-9 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 3.2.2-9 膨潤に伴う乾燥密度の経時変化(NaCl 水溶液)

図 3.2.2-10 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の膨潤圧は、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。蒸留水と NaCl 水溶液ケースでは、ともに、一時的に 逆転現象が発生しているものの、大局的には、この考え方に整合した結果が得られている。

前述の乾燥密度 1.4Mg/m³と 1.8Mg/m³の場合の蒸留水のケースにおいて、膨潤圧が大きめで、 膨潤変形が緩慢であることを膨潤量試験の結果と併せて考えると、乾燥密度 1.4Mg/m³ セルに おいて、ピストンンの傾ぎ、ピストンとセルの摩擦などの影響で、乾燥密度 1.8Mg/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 3.2.2-10 直列膨潤量試験中の膨潤圧の経時変化(NaCl水溶液)

図 3.2.2-11 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(給水した分だけ膨潤する) 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/m³ と 2.0Mg/m³のケースでは、乾燥密度 2.0Mg/m³の供試体の 膨潤に伴って、乾燥密度 1.2Mg/m³ の供試体から排水が計測されている。これは、高密度領域の 膨潤による低密度領域の圧密といえる。



図 3.2.2-11 直列膨潤量試験中の給排水量の経時変化(NaCl水溶液)

3.2.3 応力履歴が圧縮ベントナイトの膨潤量に及ぼす影響

(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 3.2.3-1 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 差が無いため、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 3.2.2-1 と同様の試験機を用いて試験を実施する。先ず、上部供試体(乾燥密度 1.6Mg/m³) と下部供試体(乾燥密度 1.8Mg/m³)を試験機にセットし飽和させる(NaCl 水溶液の場合は、 上部供試体の乾燥密度: 1.7Mg/m³) と下部供試体の乾燥密度: 1.8Mg/m³)。この際、上部供 試体は体積拘束条件で密度が一定のままとなるようにして、下部供試体は乾燥密度が 1.8Mg/m³から 1.6Mg/m³(NaCl 水溶液の場合は 1.7Mg/m³)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。ただし、NaCl 水溶液を用いた過圧密供試体と蒸留水を用いた再試験の過圧密供試体 (Case2-2、Case2s、Case3s)に関しては、膨潤時の密度分布の発生を避けるために、十分に 飽和させてから膨潤過程に移行することとする。
- 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 3.2.3-2)。

これまでに実施している試験ケースを表 3.2.3-1 に示す。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。図 3.2.3-3 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/m³ 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/m³に静的に締固めた後に乾燥密度 1.6Mg/m³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 3.2.3-4 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ため、1 供試体による通常の膨潤圧 試験とした。蒸留水を用いた正規圧密供試体と過圧密供試体の直列膨潤量試験は、長期間に亘っ て定常状態となったため、平成〇〇年に解体を行った。また、再現性を確認する目的で、再度、 同条件の試験を実施した(Case2-2)。ただし、解体の結果、過圧密供試体に給水面側に大きな密度 低下(非均一な膨潤)が観察されたため、Case2-2 の過圧密供試体の膨潤は、十分に飽和させて から行うこととした。この工程の変更は、NaCl水溶液を用いた Case2s や Case3s の場合も同様

3-37

である。

蒸留水を用いた正規圧密の試験ケースでは、乾燥密度 1.6Mg/m³まで圧縮した供試体をそのま ま膨潤圧試験に供した試験は、再現性確認のために Case1-2 として再度試験を実施した。

過圧密の試験ケースに関しては、前述のように、一旦、乾燥密度 1.8Mg/m³ まで圧縮したもの を 1.6Mg/m³ まで膨潤させ、その後に膨潤圧を計測した。その後、十分に飽和したことを確認し た後に、体積拘束条件(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 潤圧の計測を行っていた。しかしながら、給水と膨潤変形を同時に実施させると密度分布が発生 する可能性があることから、後続開始の試験は、体積拘束下で給水飽和させた後に膨潤させるこ ととした。よって、飽和中の膨潤圧は、乾燥密度 1.8Mg/m³ での値となることに注意が必要であ る。

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			終了
1-2	1.610(NC) (1.6)		1.379		22.33		正規			再現性確認中
2	$1.794 {\rightarrow} 1.596 \\ (1.8 {\rightarrow} 1.6)$	$1.589 \\ (1.6)$	1.576→ 1.368	1.357	25.91 18.97		正規+ 過圧密		蒸留水	終了
2-2	$1.803 \rightarrow \%$ (1.8 \rightarrow 1.6)	$1.582 \\ (1.6)$	1.587→ ※	1.350	25.59	17.32	正規+ 過圧密	1.6 (ケイ砂		再現性確認中
3	$\begin{array}{c} 1.798 \rightarrow 1.605 \text{ (OC)} \\ (1.8 \rightarrow 1.6) \end{array}$		$1.581 \rightarrow 1.368$		18.97		過圧密	30wt% 混合 Na 型 ベントナイト)		継続中
1s	1.612(NC) (1.6)		1.381		24.69		正規			継続中
2s	$1.800 \rightarrow \%$ (1.8 \rightarrow 1.7)	$1.700 \\ (1.7)$	1.584→ ※	1.475	18.40	3.40 21.60 正規+ 過圧密			NaCl 水溶液 0.5M	継続中
3s	$ \begin{array}{c} 1.810 \rightarrow \mbox{$\stackrel{\circ}{\times}$} (OC) \\ (1.8 \rightarrow 1.7) \end{array} $		1.595	l →※	17.96		過圧密			継続中

表 3.2.3-1 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

*飽和終了後に膨潤過程に移行

()は計画値



図 3.2.3-1 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 3.2.3-2 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 3.2.3-3 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 3.2.3-4 密度分布、及び膨潤量試験のイメージ

- (2) 試験結果 (蒸留水のケース)
 - 1) 膨潤量

試験結果を図 3.2.3-5~図 3.2.3-6 に示す。図 3.2.3-5 には Case2(過圧密/正規圧密のケース) と Case3(過圧密のケース)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/m³ 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 3.2.3-5 膨潤量の経時変化

図 3.2.3-6 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 3.2.3-4 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。





図 3.2.3-7 に正規圧密(1.6Mg/m³)単体供試体、過圧密(1.6Mg/m³)と正規圧密(1.6Mg/m³)の直列供試体、および過圧密(1.6Mg/m³)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、再試験も含めて検討する必要が ある。



図 3.2.3-7 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) 再現性確認試験状況

前述のように解体した正規圧密供試体と過圧密供試体の直列膨潤量試験の再現性を確認する目 的で、同様の試験条件で試験を実施した(試験ケース Case2-2)。ただし、Case2 の解体の結果、 過圧密供試体の給水側に密度低下が見られたことから、給水と膨潤を同時に実施せずに、十分に 飽和させた後に膨潤過程に移行する手順とした。

図 3.2.3-8 に Case2-2 の給水量の経時変化を示す。ビューレットによる水位差のみでは飽和に 時間がかかることから、両供試体に二重管ビューレットで背圧を 0.2MPa 作用させて飽和を促進 させた。これにより排水が確認され、過圧密供試体は通水開始から 600 日後に膨潤過程に移行し た。この際に、背圧を大気圧に戻し、ビューレットの水位差(30 cm程度)のみで給水を継続した。



図 3.2.3-8 Case2-2 の給水量の経時変化

図 3.2.3-9 には、過圧密供試体の膨潤過程における膨潤量の経時変化を示す。図から、概ね目 標としている乾燥密度 1.6Mg/m³ に到達していることが分かった。このため、直列膨潤量試験に 移行した。図に示すように、直列膨潤量試験に移行したところ、過圧密供試体は正規圧密供試体 に押し戻されていることが分かる。



図 3.2.3-9 Case2-2の膨潤量の経時変化

図 3.2.3-10 には、過圧密供試体の膨潤過程における乾燥密度の経時変化を示す。図から、概ね 目標としている乾燥密度 1.6Mg/m³に到達していることが分かったため、直列膨潤量試験に移行 した。図から、直列膨潤量試験に移行すると同じ密度であるのにも拘らず、応力履歴の違いによ って密度差が発生することの再現性が確認できた。このことから、膨潤圧は乾燥密度によって一 意に決まるものではないことが確認できた。



図 3.2.3-10 Case2-2 の直列膨潤量試験中の乾燥密度の経時変化

- (3) 試験結果(NaCl 水溶液ケース)
 - 1) 膨潤量の経時変化

図 3.2.3・11 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 3.2.3・12 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/m³に達していない。この結果から、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、正規圧密供試体の乾燥密度は 1.7Mg/m³、過圧密供試体の乾燥密 度は 1.8Mg./m³を飽和後に 1.7Mg/m³に膨潤させた後に直列に繋ぐこととした。



図 3.2.3-11 直列膨潤量試験の乾燥密度分布



図 3.2.3-12 直列膨潤量試験の乾燥密度分布

図 3.2.3-13に、イオン強度 0.5の NaCl 水溶液を用いて、正規圧密供試体の乾燥密度は 1.7 Mg/m³、 過圧密供試体の乾燥密度は 1.8 Mg./m³を飽和後に 1.7 Mg/m³に膨潤させた後に直列膨潤量試験を 実施した際の乾燥密度の経時変化を示す。図から、過圧密供試体が乾燥密度 1.7 Mg/m³に膨潤し、 定常状態に至っていることが分かる。

過圧密供試体の膨潤挙動が定常になっていることが確認できた段階でストッパーを解除して直 列膨潤量試験に移行した。図 3.2.3-13 には、直列膨潤量試験に移行後の乾燥密度変化も併せて示 している。図より、両者の乾燥密度が同等であるのにも拘らず、応力履歴の違いによって密度分 布が発生していることが分かる。このことは、前述の蒸留水のケースと同様である(図 3.2.3-10)。



図 3.2.3-13 直列膨潤量試験(再)の乾燥密度分布

2) 膨潤圧の経時変化

図 3.2.3-14 には、NaCl 水溶液を用いた場合の正規圧密供試体、過圧密供試体単体の膨潤圧の 経時変化を示している。正規圧密供試体と過圧密供試体の直列膨潤量試験はピストンを連結する まで膨潤圧を計測できないため膨潤圧はほぼゼロである。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のケースの過圧密供試体単体の膨潤圧が他のケースに比べて非常に大きいが、これは過圧密供試体の膨潤前の飽和段階のものである。この飽和段階は、蒸留水のケースの過圧密 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、なるべく過 圧密供試体の密度分布を小さくするために、過圧密供試体を乾燥密度 1.7Mg/m³まで膨潤させる 前に十分に飽和させるために設けた過程である。飽和段階の乾燥密度は1.8Mg/m³で一定のため、 他のケースよりも膨潤圧が大きくなっている。膨潤圧が吸水に伴って急激に低下しているが、こ れは供試体作製時の締固め圧力が、給水に伴って解放されたためであると考えられる。

正規圧密供試体単体の膨潤圧は、給水開始から単調減少傾向を示し蒸留水のケースより小さくなっている。これは、間隙水のイオン強度が膨潤圧に及ぼす影響によるものと考えられる。



図 3.2.3-14 応力履歴の影響評価試験の乾燥密度分布

3) 給水状況

図 3.2.3-15 には、NaCl 水溶液を用いた場合の正規圧密供試体、過圧密供試体単体の膨潤圧 試験中の給水量、さらに正規圧密供試体と過圧密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、過圧密供試体単体のケースと正規圧密供試体単体のケースの給水量はほぼ同等 であり、直列膨潤量試験の正規圧密供試体と過圧密供試体の給水量が同等である。正規圧密供 試体(乾燥密度 1.6Mg/m³)の間隙体積が 19cm³程度、過圧密供試体(乾燥密度 1.8Mg/m³)の 間隙体積が 23cm³程度であることから、既に十分な量の NaCl 水溶液を供給している。蒸発散 や排水経路の間隙体積分により、未だに排水は確認されていない。過圧密供試体は、排水経路 内の排水の有無などを確認して飽和と見なせるようであれば膨潤過程に移行する。

さらに、直列膨潤量試験の正規圧密供試体と過圧密供試体には、二重管ビューレットで 0.2MPaの通水圧を作用させて飽和過程の促進を開始した。その結果、300日程度で十分な排 水が確認されたため、通水圧を解除して、過圧密供試体は膨潤過程に移行した。



図 3.2.3-15 応力履歴の影響評価試験に用いた供試体の給水量

(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こと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 ショ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。

(2) 既往の成果による残留密度差の理論的解釈

図 3.2.4-1 には、Sasakura ら[14]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-logp 関係(応力ひずみ関係)に、前述の 3.2.2 で述べた乾燥密度 1.8Mg/m³と 1.4 Mg/m³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 pben は、ベントナイト部

分の土粒子体積V,と空隙Vv(全体の体積からベントナイト以外の鉱物を引いたもの)に対するべ

ントナイト部分の土粒子質量 W_b の割合で定義され $\rho_{ben} = \frac{W_b}{Vv + V_b}$ 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 3.2.4-1 残留密度分布の力学的解釈(Case1)

図 3.2.4-2 には、Sasakura ら[14]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-logp 関係(応力ひずみ関係)に、前述の 3.2.2 で述べた乾燥密度 2.0Mg/m³と 1.2 Mg/m³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0.6~0.7MPa程度である。その時に得られる密度差は 約0.22Mg/m³であり、実測が約0.25Mg/m³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 3.2.3・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 3.2.4-2 残留密度分布の力学的解釈(Case2)



図 3.2.4-3 残留密度分布の力学的解釈(Case3)

図 3.2.4-4 には、Sasakura ら[14]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-logp 関係(応力ひずみ関係)に、3.2.3 で述べた乾燥密度は上下共に 1.6Mg/m³ 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 3.2.4-1 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/m³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 3.2.4-4 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) 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、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 3.2.4-1 に示す試験ケースを実施している。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 に供するものである。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。

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	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	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 圧密終了後コア 抜きして試験に 供する

表 3.2.4-1 圧密試験ケース

写真 3.2.4-1 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 3.2.4-2 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 3.2.4-1 圧密試験装置 (Case1)



写真 3.2.4-2 スラリーの圧密試験装置(Case2)と採水状況

写真 3.2.4-3 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 3.2.4-3 スラリーの予備圧密試験装置 (Case3)

2) 試験結果

表 3.2.4-2 に各ケースの供試体諸元を示す。Case1 では初期乾燥密度 1.194Mg/m³、Case2 で は 0.282Mg/m³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。 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 3.2.4-4 に示す。

Case		1	2	3			
土粒子密度 /s	Mg/m^3	2.707	2.707	2.707			
初期含水比 wo	%	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	cm²	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	bg	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			
初期飽和度	%	87.1	96.7	96.7			
実質供試体高さ	cm	0.869	0.392	49.0			

表 3.2.4-2 供試体諸元



モールド設置状況(1)







調整試料状況



in i





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 3.2.4-4 スラリーの予備圧密試験の供試体作製状況

図 3.2.4-5 には緩衝材の $e \log p$ 関係、図 3.2.4-6 緩衝材の $\rho_d \log p$ 関係を示す。両図には、小林ら[13]よる完全飽和線も示してある。図から、Case1 の $e \log p$ 関係、 $\rho_d \log p$ 関係は完全飽和線と整合していることが分かる。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。

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 が、圧密圧力を増加するに従って急激に完全飽和線に接近する傾向を示していた。しかしながら、 圧密圧力が 0.12~0.64MPa までの間では、荷重増加に対して沈下量(間隙比や乾燥密度の変化割 合)がほとんど発生しないという結果となった。スラリー圧密の場合、供試体の剛性が極端に小 さい割に沈下量が多いために載荷板の移動量が大きく、載荷板が偏芯して圧密セルに引っ掛かっ た可能性が高いと判断した。そのため、一旦 0.01MPa まで除荷を行い、再度 0.32MPa まで載荷 を行った。この結果、引っ掛かりは解消され、その後の *e*log*p* 関係は Case1 と同様に完全飽和線 と非常に良く整合していることが分かる。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(Case1)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(Case2)、さらには 粉体状態から飽和するまで排気圧縮された供試体(完全飽和線)まで、異なる応力履歴を経て作成さ れた供試体でも、正規状態になれば同じ正規圧密曲線を辿ることを意味している。

Case3 に関しては試験の第1段階の圧密圧力は、ピストンの自重(6.5kPa)である。第1段階の 圧密終了後、第2段階としてピストン+ピストンの固定治具の自重19.6kPa を作用させ、さらに 圧密終了後に第3段階として 46.3kPa の圧密圧力を作用させた。図 3.2.4-5、図 3.2.4-6 に示す ように、Case2 の結果と整合する傾向を示している。図 3.2.4-7 には Case3 の圧密沈下曲線を示 す。第3段階の圧密沈下曲線は、第1段階や第2段階の物に比べ直線的に圧密が進んでいるが、 まだ圧密が終了する傾向は見られない。供試体作成方法の特殊性から、第1段階や2段階目の圧 密沈下曲線には、供試体上面の不陸の解消などによる変形分も含まれるため非常に早期に圧密が 終了しているように見える。第3段階の圧密終了時間が判明すれば、今後の試験に要する時間も 推察できるものと考えられる。



図 3.2.4-5 緩衝材の e-logp 関係







図 3.2.4-7 大型予圧密の圧密沈下曲線(Case3)

3.2.5 工学技術への反映

(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 3.2.5-1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 3.2.5-1 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

(2) 試験結果に基づく密度差の工学技術への反映

表 3.2.5-1 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p_d(g/m³)を用いて下式で表される。

$$k = \frac{1}{5} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S v^2} \frac{e^3}{1+e} = \frac{1}{5} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{\left(\frac{36w^*}{\rho_d}\right)^2} \frac{\left(\frac{\rho_S}{\rho_d} - 1\right)^3}{\frac{\rho_S}{\rho_d}} \quad (\text{xz 3.2.5-1})$$

ただし、土粒子密度 $\rho_s = 2.733 \times 10^6 g/m^3$ 、二層膨潤含水比 w^* [15]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 3.2.5-2 に示すように、既往の研究 [16]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。

	液種		初期状態(カ	施工直後)	膨潤後(再冠水後)				
試験 ケース*		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		1.798	1.399	9.54E-14	6.49E-13	1.741	1.449	1.23E-13	5.05E-13
2	2 蒸留水	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	NECL	1.790	1.426	2.28E-12	1.31E-11	1.758	1.452	2.63E-12	1.14E-11
2s	NaCl 水溶液 (0.5M)	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

表 3.2.5-1 直列膨潤圧試験結果に基づく残留密度分布と透水係数



図 3.2.5-2 JAEA DATABESE に対する Kozeny-Carman 則のフィッティング結果

図 3.2.5-3 には、表 3.2.5-1 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 3.2.5-3 Kozeny-Carman 則を用いた残留密度差と透水係数の関係

3.2.6 解析技術への反映

(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操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な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 積み上げても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、サクショ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 3.2.6-1 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 3.2.6-1 膨潤圧試験のイメージ

次に、図 3.2.6-2 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 3.2.6-1 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 3.2.6-3 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 なように、飽和度領域ではサクシ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 3.2.6-3 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 3.2.6-3 右)。



図 3.2.6-2 膨潤圧試験開始直後のイメージ



図 3.2.6-3 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ョ ンの開放によるものと見做せば、図 3.2.6-4 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 [17]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 3.2.6-4 膨潤性鉱物の水分特性曲線のイメージ

3.3 施工品質による密度分布の均質化検討(2次元土槽試験)

3.3.1 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) 概要

これまでの検討では、小規模試験と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。

(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、間隙の大きさなどで代表させ、様々な地下水組成の条件で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 3.3.1-1 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。地下水組成と しては H27 年度まではが蒸留水を用いたケースであり、H27 年度に蒸留水を用いたブロック定置 とペレット充填の併用ケースを解体してから、再度、イオン強度 0.5 の NaCl 水溶液でブロック 定置とペレット充填の併用ケースを実施した。

給水は土槽の底面から一次元的に行うこととした。一次元的に給水を行う場合、表 3.3.1-1 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 3.3.1-1 に示すように、前述の試験 (a)と試験条件がほぼ同等となため、原位置締固め、吹付けのケースは土槽試験では実施せずに、 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 3.3.1-2 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3.3.1-2(a)に示すように、穴が開けてあり、そこか ら図3.3.1-2(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3.3.1-2(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3.3.1-2(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3.3.1-2(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。

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	原位置締固め	高密度/低密度の互層	ケイ砂 30wt%含有		実施済み	
2	吹付け	均一な密度分布	クニゲル V1:		要素試験から推定	
3	ブロック定置	界面や隙間を有する	1.6 Mg/m^3		実施済み	
4	ペレット充填	大間隙を有する	ベントナイト単体: 1.1Mg/m ³ 程度		実施済み	
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	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	蒸留水	解体 【試験中計測項目】 比抵抗分布 膨潤圧分布 給水量 目視観察 【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	
6	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	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	イオン強度 0.5 NaCl 水溶液	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 【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	

表 3.3.1-1 土槽規模試験の試験ケース



図 3.3.1-1 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 3.3.1-2 土槽試験による工夫

(3) これまでの試験結果

1) 蒸留水、ペレット充填ケース

表 3.3.1-2 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/m³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 10054cm³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。

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

表 3.3.1-2 ペレット充填による模擬緩衝材の初期状態

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、水が一次元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 3.3.1-3 に示す。ペレットは下から序々に浸潤していく様子が観察された。さらに、ペレット充填ケースの給水開始 3 日後の状況を図 3.3.1-4 に示す。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た。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た。



図 3.3.1-3 再冠水状況/ペレット充填ケース/給水開始 20 分後



図 3.3.1-4 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状況を図 3.3.1-5 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 3.3.1-5 ペレット充填ケースの給水状況

図 3.3.1-6 にペレット充填ケースの比抵抗分布の変遷を示す。図 3.3.1-7 には解体時のペレット 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。

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 3.3.1-6 ペレット充填ケースの比抵抗分布の変遷



図 3.3.1-7 解体時のペレット土槽の含水比と乾燥密度の分布

2) 蒸留水、ブロック定置ケース

表 3.3.1-3 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/m³ である。また、模擬緩衝材の空隙体積は 5714.05cm³ 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。

	作成ブロック	寸法調整	充填	平均	概算試料	上墙休拜	如期於協密由	初期
土槽面	合計質量	切削質量	試料質量	含水比	乾燥質量	上間伴傾	初期乾燥省度	空隙体積
	(g)	(g)	(g)	(%)	(g)	(cm ³)	(Mg/m ³)	(cm ³)
裏面	12537.80	537.50	12000.30	9.85	10924.25			
中面	12319.46	251.43	12068.03	9.55	11015.83	21000	1.556	5714.05
表面	12319.77	538.86	11780.91	9.83	10726.71			

表 3.3.1-3 ブロック定置による模擬緩衝材の初期状態

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 3.3.1-8 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 3.3.1-8 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

図 3.3.1-7 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速度よりも、 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 3.3.1-10 参照)。



図 3.3.1-9 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 3.3.1-10 ブロック定置ケースの浸潤イメージ

図 3.3.1-11 にブロック定置ケースの比抵抗分布の変遷を示す。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 3.3.1-11 ブロック定置ケースの比抵抗分布の変遷

図 3.3.1-12 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かった。



図 3.3.1-12 ブロック定置ケースの飽和度分布

(4) 試験結果(蒸留水、ブロック定置とペレット充填併用ケース)

平成 25 年度にブロック定置とペレット充填併用のケースの試験をスタートした[〇]。浸潤のために供給したのは蒸留水である。本年度は飽和まで継続し、解体することとした。

表 3.3.1-4 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。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 6907.57cm³ である。よって、給水量 が 6907.57cm³ となればマクロ的には供試体は飽和したことになる。

高さ	(cm)		20. 0		20. 0		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)	供試	27126. 27	供試	6012.64	<u>лн</u>	33138.91
湿潤密度	(g/cm^3)	体 ブ	1. 722	体ペ	1. 145	供試	1. 578
含水比	(%)	ロッ	9.94	レッ	8.57	¹⁴ 全体	7.86
乾燥密度	(g/cm^3)	ク 部	1.567	ト 部	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

表 3.3.1-4 ブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元

図 3.3.1-13 土槽規模試験による2次元浸潤試験(H2Oブロック・ペレット併用ケース)に浸 潤状況写真を示す。図は、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 面から一次元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た。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 生していた。

ペレットとブロックの間の隙間やペレットの空隙、さらにはブロック間の隙間は、給水時間が 経過するに従って次第にシールされ、給水開始から 259 日で底面から 10 cm程度の位置まで、空 隙はほとんどなくなっていた。

図 3.3.1-14 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 3.3.1-15 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 3.3.1-14、図 3.3.1-15 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、図 3.3.1-13 土槽 規模試験による2次元浸潤試験(H2Oブロック・ペレット併用ケース)に示した浸潤状況と整合 している。しかしながら、比抵抗から推定した飽和度はほとんど 100%に近いのに対して、浸潤 状況の目視観察からは土槽に向かって右上付近に乾燥している領域が存在している。比抵抗計測 から得られる値は、背面側の供試体表面の値であるため、前面と背面が必ずしも一致していると は限らない。今後、解体時の飽和度分布と比較して計測結果の妥当性を検討する必要がある。



図 3.3.1-13 土槽規模試験による2次元浸潤試験(H₂Oブロック・ペレット併用ケース)



図 3.3.1-14 ブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷(H2O)



図 3.3.1-15 ブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷(H2O)

図 3.3.1-16 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。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。これは、一旦、ペレット部分の大間隙を満たした水がベントナイトの 膨潤に消費され、土槽低部のペレットとブロックが隙間をシールしたため、給水量が低下したも のと考えられ、目視観察結果と一致している。

さらに時間が経過すると、給水量が漸増している。飽和度分布の変遷に照らして考えると、上 部のブロックの方に水が浸潤して飽和度が増加しており、この給水量の増加は、上部ブロックへ の浸透によるものだと考えられる。給水時間 500 日程度で給水量は供試体の間隙体積を超えてお り、計算上、飽和に至っているものと考えられる。この状況は、比抵抗分布から推定される飽和 度と比較して遅い傾向であるが、概ね、整合しているものと考えられる。なお、給水量が供試体 の間隙体積を超えているのは、マリオット管や土槽からの蒸発散によるものと考えられる。



図 3.3.1-16 ブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化

図 3.3.1-17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。さらに給水が進むと、ブロック側の膨潤圧が低下し、逆にペレット側の 膨潤圧が増加している。これは、ブロックが相対的に密度の低いペレット側に膨潤し、ペレット 部を圧縮したためだと考えられる。



図 3.3.1-17 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧の経時変化

図 3.3.1-18 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。この傾向は給水が進んでも未だに解消されていないが、最も膨潤圧の高い箇所(土 槽左端から 375mm、575mm 付近)の圧力が低下傾向を維持した。さらに、給水を続ければ、ブ ロック定置ケースのように、均等な膨潤圧分布に移行したものと予想される。



図 3.3.1-18 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧分布の変遷

図 3.3.1-19 に土槽解体時の状況を示す。写真から、供試体上面にはペレットの隙間やブロック の隙間の位置が目視で判断できる。これは、マリオット管の水位管理を供試体の初期高さに合せ てあった為、十分に給水されなかったためであると考えられる。しかしながら、供試体内部で密 実に膨潤しており、解体時にペレットやブロックの隙間で剥離することはなかった。

解体時の状況から、供試体が、十分に飽和していないと判断された。これは、給水停止から解体までに1週間程度の時間が経過したことによる乾燥や、比抵抗電極を配置している供試体の背面と土槽の界面に選択的に水が吸水されたことも原因として考えられた。ただし、図 3.3.1-19 解体時の状況に示すような解体方法では、局所的な含水比分布を計測できないため、今後の課題となった。





図 3.3.1-20 含水比と飽和度

(5) 試験結果(0.5M-NaCl水溶液、ブロック定置とペレット充填併用ケース)

表 3.3.1-5 に 0.5 M の NaCl 水溶液を用いた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 6348.3cm³である。よって、給水量が 6348.3cm³となればマクロ的には供試体は飽和したことになる。

高さ	(cm)		20. 0		20. 0		20. 0
幅	(cm)		53.0		17.0		70.0
奥行	(cm)		15.0		15.0		15.0
体積	(cm ³)		15900. 0		5100.0		21000.0
湿潤質量	(g)	供試	27983. 2	供 試	6123.8	щ	34107.0
湿潤密度	(g/cm^3)	_体 ブ	1.8	体ペ	1.2	は、	1.6
含水比	(%)	ロッ	11.0	レッ	8.6	14 全 体	10. 5
乾燥密度	(g/cm^3)	ク 部	1.6	ト 部	1.1	144	1.5
乾燥質量	(g)		25218. 8		5640. 4		30859.1
土粒子密度	(g/cm^3)		2. 700		2. 733		2. 706
間隙水体積	(cm ³)	2764.4			483.4		3247.8
空隙体積	(cm ³)		3795.3		2552.8		6348.3

表 3.3.1-5 ブロック定置とペレット充填併用ケースの供試体諸元

図 3.3.1-21 図 3.3.1-21 土槽規模試験による 2次元浸潤試験(0.5M-NaCl ブロック・ペレッ ト併用ケース)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、底面から一次元的に給水したところ、ペレット側に選択的に NaCl 水溶液が 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。蒸留水の場合と異なるの は、NaCl 水溶液で間隙が満たされたペレットは、その場で膨潤するのではなく、崩れながら、一 旦、土槽下部に沈殿しその後に膨潤している点である。さらに、蒸留水の場合と異なり、膨潤後 のペレット部には空隙が再度発生するという現象が起きていない。このことは、一見、ペレット が NaCl 水溶液を給水して膨潤し、空隙をシールしているように見えるが、蒸留水の場合とは異 なり、十分に膨潤しておらず、透水係数が大きいために給水が継続しているためであると考えら れる。また、ペレット部の間隙は膨潤により 6 時間程度で満たされていることが分かる。また、 ペレット部に供給されている NaCl 水溶液が、ブロックに対して側方からの NaCl 水溶液の供給 源となっている状況も観察された。

ブロック部に対しては、下面のみならずペレット側からの NaCl 水溶液の供給により、浸潤面 (浸潤に伴って色調が暗くなっている領域)がL字型に進展している。土槽側面や上面からの浸 潤状況もゆっくりではあるが進展しているため、NaCl 水溶液の給水が途絶えておらず、依然、供 試体上面に水位が存在しているものと考えられる。



初期

4 分後



11 分後

30 分後



1時間後

3時間後



6時間後

1日後



5日後

15日後

図 3.3.1-21 土槽規模試験による 2 次元浸潤試験(0.5M-NaCl ブロック・ペレット併用ケース)

図 3.3.1-22 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 3.3.1-23 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 3.3.1-22、図 3.3.1-23 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。ま た、給水開始前に比抵抗計測を行い、比抵抗値が恒温恒湿チャンバー内(室温 20℃、Rh63%)で 定常になるまで給水を待ったため、吸水開始時間よりも比抵抗の計測開始時間が1時間早い。 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、図 3.3.1-21 土槽 規模試験による2次元浸潤試験(0.5M-NaClブロック・ペレット併用ケース)に示した浸潤状況 と整合している。



図 3.3.1-22 ブロックとペレット併用ケースの比抵抗分布の変遷 (0.5M-NaCl)



図 3.3.1-23 ブロックとペレット併用ケースの飽和度分布の変遷 (0.5M-NaCl)

図 3.3.1-24 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1時間は給水量が急激に増加するが、1時間以降は、流量は小さくなり、給水量は漸増 している。これは、一旦、ペレット部分の大間隙を満たした NaCl 水溶液がベントナイトに吸水 されるまでは給水量が増加するが、それ以降はペレットやブロックの界面付近の飽和度が増加す るため、給水量が低下したものと考えられる。これらの傾向は、目視観察結果と一致している。



図 3.3.1-24 ブロックとペレット併用ケースの給水量の経時変化

図 3.3.1-25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。土槽の右端に行くほど設置圧が高い傾向を示している。

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、設置圧の大きなブロッ クは給水に伴うコラプスで応力が低下しているが、設置圧が比較的小さなブロックは給水に伴っ て膨潤圧が増加傾向を示している。この傾向が進めば、膨潤圧分布は均一化の方向に向かうもの と考えられる。



図 3.3.1-25 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧の経時変化

図 3.3.1-26 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 0.2 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、土槽の右端に 向かって大きくなる傾向を示していることが分かる。この傾向は給水が進んでも未だに解消され ていないが、最も膨潤圧の高い箇所の圧力が低下傾向を維持しており、給水を続ければ、ブロッ



図 3.3.1-26 ブロックとペレット併用ケースの膨潤圧分布の変遷

3.4 浸潤による間隙空気の移行調査

3.4.1 検討の目的と手段

(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、水圧の分布によっては浮力によって上方向に移動し、そ の際に緩衝材を破過する可能性も否定できない。

そこで本試験では、図 3.4.1-1 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元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、本試験では、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。



[1] 図 3.4.1-1 浸潤による間隙空気の移行試験(イメージ図)

(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 3.4.1-1 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。

(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[18]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 3.4.1-1 に浸潤による間 隙空気の移行試験のケースを示す。

ベントナイト乾燥密度	初期含水比	液種	計測項目	備考	
			間隙空気圧		
1 CM / ?	10%	蒸留水	比抵抗值		
			流量	継続中	
(INA 型クイ 砂 30Wt% 底合)			給水圧		
			空気圧		

[2] 表 3.4.1-1 浸潤による間隙空気の移行試験のケース

図 3.4.1-2 に浸潤による間隙空気の移行試験手順を示す。試験は、①先ず、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 3.4.1-3、図 3.4.1-4 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 3.4.1-3 浸潤による間隙空気の移行試験セル



図 3.4.1-4 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

3.4.2 試験結果

(1) 流量制御過程

図 3.4.2-1 に給水圧の経時変化を示す。初期の給水速度 0.0001cc/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 0.0005cc/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、給水速度を 0.0005cc/min に増加させても、依然として給水圧 が負圧であった。これは、図 3.4.2-2 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、常に一次元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 3.4.2-1 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 3.4.2-2 供試体上部と下部での給水状況の差異

図 3.4.2-3 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。

また、本試験結果より、浸潤による間隙空気圧の変化量に対して大気圧変動の大きさが有意で

あると試験結果の傾向を判断する際に差し障る可能性があることが分かった。このため、後述す る圧力制御過程では、大気圧変動に影響されない圧力計として絶対圧計を採用した。



図 3.4.2-3 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

図 3.4.2-4 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[18]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 3.4.2-4 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 3.4.2-5 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 3.4.2-5 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)

(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として段階的に給水圧を増加させ、550日目に 876kPa ま で増加させた。この圧力制御過程では、前述のように圧力計として絶対圧計を採用している。こ の絶対圧計は、真空状態をゼロとした圧力計である、一般的な大気圧をゼロとしたゲージ圧計よ りも1気圧(約101.3kPa)分だけ低く表示される。876kPaはゲージ圧計では約1MPaに相当す る。

図 3.4.2-6 に圧力制御に変更した後の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。このことから、 破過などの現象が発生しておらず、供試体の上下面には飽和領域が形成されていることが予想さ れる。また、図には膨潤圧を全応力表示と有効応力表示の両方で示している。図から、全応力の 膨潤圧は、給水圧の増加に伴って、増加する傾向を示している。全応力の膨潤圧から、給水圧を 減じた有効応力表示の膨潤圧に着目すると、給水圧を増加させると有効応力表示の膨潤圧は減少 傾向を示している。これは、給水圧の増加分の全てが全応力の増加に寄与しているのではなく、 そのうちの幾らかは供試体内部への浸潤や摩擦などによって消費されているものと考えられる。

図 3.4.2-7 には、試験初期段階における大気圧と間隙空気圧の経時変化を示している。間隙空 気圧が大気圧変動と同期しており、その変動幅が非常に大きいため浸潤に伴う間隙空気の変動傾 向を読み取ることができない。そこで、圧力制御に移行時に、間隙空気圧に 50kPa の背圧を空気 圧として与え、さらに圧力計を絶対圧計に変更した。これにより、大気圧変動による間隙空気圧 の変動を抑制できていることが分かる。



図 3.4.2-6 給水圧と給水量の経時変化(圧力制御過程)



図 3.4.2-7 間隙空気圧と大気圧の経時変化(試験初期段階)

図 3.4.2-8 には、背圧適用後の間隙空気圧と大気圧の経時変化を示している。図から、給水圧 が低い段階では、背圧を維持することができずに、背圧が減少傾向を示している。これは、間隙 水の毛細管現象による拡散の速度の方が給水速度よりも速く、間隙空気を閉じ込めるある程度の 厚さのある飽和領域を形成できなかったためだと考えられる。しかしながら、給水圧を 876kPa まで増加させると、減少傾向であった間隙空気圧が増加に転じていることが分かる。この傾向は、 今後も継続するものと考えられる。



図 3.4.2-8 間隙空気圧と大気圧の経時変化(背圧適用後、圧力制御過程)

図 3.4.2-9 には、間隙空気圧と給水速度の経時変化を示している。図に示すように、給水圧を 876kPa まで増加させた直後から給水速度は漸減しているが、間隙空気圧が漸減している期間に 比べて、その値は安定している。このことから、供試体への物質移動の収支が、給水と間隙水へ の間隙空気の溶存のみで決まり、不規則な間隙空気の移動などが生じていないものと考えられる。



図 3.4.2-9 間隙空気圧と給水速度の経時変化(背圧適用後、圧力制御過程)

図 3.4.2-10 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。さらに、図 3.4.2-11 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%程度まで増加した。



図 3.4.2-10 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)

しかしながら、2014年以降は、上下面の比抵抗値が低下する傾向を示している。比抵抗値の低下は、乾燥密度が一定の場合、飽和度の低下を意味している。そのため、図 3.4.2-11 に示すよう に飽和度が低下する傾向として算出されている。しかしながら、仮に浸潤の進行に伴う供試体中 央部の膨潤により、供試体の上下端面が圧縮され、乾燥密度が増加したという可能性も否定でき ない。この場合、飽和度が 100%で一定であったとすると、乾燥密度は比抵抗値と乾燥密度の関 係から、1.76~1.79Mg/m³まで増加したことになる。乾燥密度 1.8Mg/m³のクニゲル V1 単体の膨 潤圧が、小林ら(2007)[19]に示された完全飽和線から 1.42MPa 程度であり、上下端面に作用して いる圧力が全応力の膨潤圧として 1.6MPa 程度であることから、圧密による乾燥密度増加が発生 する可能性がある。

その一方で、供試体中央部に配置しているポーラスメタルにまで間隙水が浸潤し、電極の役割 を果たしたため供試体全体で比抵抗値が変化した可能性も否めない。この場合、比抵抗計測用の 電流が予期しない箇所を流れている可能性もあり、今後の計測にも影響をきたすことになる。

今後、供試体の解体時に飽和度や乾燥密度分布を計測することによって、現象の解明を行う必 要がある。



図 3.4.2-11 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)

(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 3.4.2-12 には浸潤による間隙空気の移行試験と同じ状態の竪置き処分施設の イメージを示す。既往の研究[19]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、竪置き処分概念では、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 3.4.2-12 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が懸念される。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生じる。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 3.4.2-13 のようになる。



図 3.4.2-13 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

(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。

- [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).
- [6] (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).
- [7] SKB社: Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Can, TR-06-22 (2006).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] (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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] (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).

- [16] (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/
- [17] 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).
- [18] (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).
- [19] 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).
- [20] (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4章 再冠水時の緩衝材の変質に関わる検討

4.1 化学変質が緩衝材の膨潤挙動に及ぼす影響の調査

4.1.1 Ca型化と飽和の可逆性検討

(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。

(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/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。

また、Ca型化ベントナイトは平成 21 年に CaCl₂水溶液で人為的に Ca型化させたものを用いた。

(3) 試験ケース

試験ケースを表 4.1.1-1 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。平成 26 年度まで実施していたケースを解体し、再現性確認のために 同じ試験ケースを平成 27 年度から開始した。ただし、平成 26 年度まで実施していたケースでは、 通水液を 2 回変更しているが、平成 27 年度から開始したケースでは 1 回だけ変更する計画であ る。そのため、定常に至るまでの膨潤圧の推移は同等にはならないことが予想される。

試験 5-7	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)		
1	No #J	1.593	1.361		 蒸留水で飽和後に、CaCl₂水溶液を通水する。 透水係数も取得する。 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。 	解体	
2	Na 生 (ケイ砂 30wt%)	1.595	1.363	1	 初期の不飽和状態で CaCl₂水溶液を通水する。 平衡膨潤圧に達したら通水液を蒸留水に交換する。 CaCl₂水溶液を再度、通水する。 透水係数も取得する。 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。 	解体	
3	Ca 型化 (ケイ砂 30wt%)	1.595	1.363		 初期の不飽和状態で CaCl₂水溶液を通水する。 平衡膨潤圧に達したら通水液を蒸留水に交換する。 CaCl₂水溶液を再度、通水する。 透水係数も取得する。 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。 	解体	
1R	Na 型	1.600	1.368		 ④ 蒸留水で飽和後に、CaCl2水溶液を通水する。 ⑤ 透水係数も取得する。 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。 	再現性	
2R	(ケイ砂 30wt%)	1.600	1.368	1	 ⑥ 蒸留水で飽和後に、CaCl₂水溶液を通水する。 ⑦ 透水係数も取得する。 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。 	再現性	
3R	Ca 型化 (ケイ砂 30wt%)	1.600	1.368		 ⑧ 蒸留水で飽和後に、CaCl₂水溶液を通水する。 ⑨ 透水係数も取得する。 試験後に含水比、密度計測、化学分析*を実施。 	再現性	

表 4.1.1-1 Ca 型化可逆性確認試験ケース案

【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

4.1.2 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 4.1.2-1 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 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 4.1.2・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 4.1.2・2 参照)。



図 4.1.2-1 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 4.1.2-2 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

(1) 平成26年までの成果

これまでの本調査では、表 4.1.1-1 に示した試験ケース1、2、3を実施した。 試験結果から、以下の成果が得られた。

緩衝材の透水係数

・蒸留水による飽和と Ca 型化の順序の違いは透水係数の値に影響しない。

・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。

②膨潤圧

・蒸留水による飽和と Ca 型化の順序に依存する。

・十分に飽和した供試体の軸方向に一次元的に 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。 (2) 本年度の試験結果

本年度は、ケース1から3の試験終了後の供試体を解体し、物理試験(密度計測、含水比計測) を実施した。排水の化学分析(イオン分析)については今後実施する予定である。解体は、既往 の研究[1][2]にならい、超音波カッターを用いた方法で実施した。解体手順は以下の通りである。

◇準備

①ゴム手袋を着用(汗のNaやKなどが分析の妨げになる)

◇排水の回収

②排水の採水瓶を取り外す

③給・排水経路にある液体を、細管を用いて注射器で吸引回収する

④バットの中でセルを解体し、バット内に漏れた液体も回収する

◇セルの解体

⑤解体したセルのポーラスメタル、メンブレンフィルタをセットで、給水側と排水側で分 けてシャーレに入れてパラフィンシートで密封。

◇供試体のスライス

⑥セルをスライサーにセットし、押し出した量、押し出された量を計測。

⑦超音波カッターで下記の厚さでスライスする。

供試体高さ 20mm の供試体は 0.5mm×12 枚、1mm×12 枚にスライスし、残試料の厚さ (2mm 程度)を計測し、遠沈管に全て分けて入れる。

⑧スライスした試料は風袋引きした遠沈管に入れて湿潤質量を計測する。

③スライス時にカッターの刃にこびり付いた試料は回収し質量を測るが、本体試料と混合せずに保管。

試験の状況写真を図 4.1.2-3 に示す。



セルの解体 (留め具に錆)



供試体給水面



スライス状況



スライス後供試体端面状況 図 4.1.2-3 解体状況

	押出し量	給水面からの距離	湿潤密度	含水比	乾燥密度	Ca 型化率	備考
Casel	mm	mm	Mg/m^3	%	Mg/m^3	%	1
1 層目	0.536	0.268	2.632	25.44	2.098	101.0	蒸留水で飽和後に、CaC12 水溶液を通
2 層目	1.036	0.786	2.386	25.39	1.903		水する。
3 層目	1.536	1.286	1.638	27.96	1.280	-	4
4 増日	2.036	1.786	2.228	27.02	1.754		-
5 層日	2.030	2.280	1.707	25.81	1.579		4
7 層目	3, 536	3, 286	1.997	26.03	1.584	101.0	4
8 層目	4.036	3.786	1.670	26.94	1.316		
9 層目	4.537	4.2865	2.402	25.54	1.913]
10 層目	5.039	4.788	1.701	25.73	1.353		
11 層目	5. 539	5.289	1.949	27.55	1.528		4
12 層日	6.039	5.789	2.157	27.04	1.698	101.1	4
13 層日	8.038	7 5385	1.939	24.61	1.536	101.1	4
15 層目	9.037	8. 5375	1.851	27.51	1.540		4
16 層目	10.037	9.537	2.076	26.26	1.645		1
17 層目	11.037	10.537	1.835	25.31	1.464		1
18 層目	12.037	11.537	2.230	25.60	1.775		
19 層目	13.037	12.537	1.890	25.15	1.510	101.0	
20 層目	14.037	13. 537	1.951	62.24	1.203	-	4
21 層日	15.037	14. 537	2.025	25.55	1.613		-
22 層日	17 037	16 537	1.941	23.99 24.78	1.570		-
24 層目	18.037	17.537	1.936	25.24	1.546	101.0	1
25 層目	19.902	18.9695	1.657	24.46	1.563	100.9	1
Caco?	押出し量	給水面からの距離	湿潤密度	含水比	乾燥密度	Ca 型化率	備考
Casez	mm	mm	Mg/m3	%	Mg/m3	%	
1 層目	0.500	0.25	1.868	14.33	1.634	89.0	初期の不飽和状態で CaCl2 水溶液を
2 層目	1.000	0.75	1.955	17.12	1.669		・ 連水する。 東海膨調圧に送したに通水液を惹印
3 唐日	1.500	1.25	1.896	15.52	1.641		一中国版 個 二 に 建 し に ら 通 小 板 を ※ 留 水 に 交換する。
5 層目	2.000	2 2505	1.840	16.00	1.592		CaC12 水溶液を再度、通水する。
6 層目	3.001	2.751	1.870	16.48	1.606		
7 層目	3.506	3.2535	1.918	18.53	1.618	89.6	1
8 層目	4.006	3.756	1.877	18.97	1.577]
9 層目	4.506	4.256	1.876	20.00	1.563		
10 層目	5.006	4.756	1.799	21.10	1.485		4
11 層日	5.506	5.256	1.860	21.71	1.528		4
12 暦日	6.006 7.006	5.756 6.506	1.884	21.60	1.549	90 F	4
13 宿日	8.006	7 506	1.037	24.08	1.514	69.0	4
15 層目	9.007	8.5065	1.927	25.11	1.540		1
16 層目	10.007	9.507	1.913	25.52	1.524		1
17 層目	11.006	10.5065	1.935	25.08	1.547		
18 層目	12.007	11.5065	1.966	24.22	1.583		4
19 層目	13.007	12.507	1.941	23.30	1.574	88.9	4
20 層日	14.007	13.507	1.885	19.75	1.574		4
22 層目	16.007	15 507	1.800	20.88	1.540		4
23 層目	17.006	16.5065	1.766	21.04	1.459		1
24 層目	20.336	18.671	1.892	24.84	1.516	89.5	1
Case3	押出し量	給水面からの距離	湿潤密度	含水比	乾燥密度	Ca 型化率	備考
cusco	mm	mm	Mg/m3	%	Mg/m3	%	
1 層目	0.500	0.25	2.261	18.37	1.910	100.6	初期のへ飽和状態で CaCl2 水溶液を 通水する
2 暦日 3 届日	1.000	0.75	1.976	18.85	1.662		平衡膨潤圧に達したら通水液を基礎
4 層目	2.000	1.20	1.119	20.51	1.471		水に交換する。
5 層目	2.500	2.25	1.885	21.69	1.549	1	CaC12 水溶液を再度、通水する。
6 層目	3.000	2.75	1.966	22.42	1.606		1
7 層目	3.562	3.281	1.914	23.16	1.554	100.1]
8 層目	4.062	3.812	1.884	22.76	1.535		4
9 層目	4.562	4.312	1.950	24.19	1.570		4
10 眉日	5.063	4.8125	1.955	23.07	1.588		4
11 / 信日	6.064	0.0100 5.814	1.910	22.50 22.57	1.553		1
13 層目	7.064	6.564	1.921	23.74	1.553	100.2	1
14 層目	8.064	7.564	1.955	23.97	1.577		1
15 層目	9.064	8.564	1.946	23.39	1.577]
16 層目	10.064	9.564	1.966	24.36	1.581		4
17 層目	11.064	10.564	1.982	24.79	1.588		4
18 層目	12.064	11.564	1.953	23.01	1.588	00.0	4
19 眉日	13.064	12.564	1.926	21.86	1.581	99.9	4
21 層目	15.064	14.564	1.942	20.22	1.595		1
22 層目	16.064	15.564	1.931	18.44	1.630	1	1
23 層目	17.065	16.5645	1.869	17.27	1.593]
24 層目	18.065	17.565	1.911	16.95	1.634	99.9	1
25 層目	20.085	19.075	1.914	25.36	1.527	99.8	1

表 4.1.2-1 Ca型化可逆性確認試験解体結果



図 4.1.2-4 解体結果

(3) 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まれば、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。また、Ca型化は緩衝材の設計仕様である部材厚がそのまま であっても透水係数や膨潤性能が劣化するため、再冠水中の緩衝材に発生する様々な事象に影響 を与えるものと考えられる。例えば、その代表的なものとして、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 4.1.2-5 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、ほとんど陽イオンを含まない水で膨潤させることにより、処分坑道の閉鎖まで Ca 型化を抑制できるのであれば、人工給水することは、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す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 4.1.2-5 緩衝材表面近傍に発生する様々な事象のイメージ

(4) 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 CaCl2 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。

4-7

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).
- [2] 公財 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 第4分冊-人工バリア材料長期挙動評価・人工バリア評価の初期条件の設定-(2015)