

ニアフィールド水理場の長期的変遷 評価システム構築に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2005年2月

鹿島建設株式会社
株式会社クインテッサジャパン

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システム構築に関する研究 (核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

奥津 一夫^{*1} 森川 誠司^{*1} 広中 良和^{*1} 前田 宗宏^{*1} 新保 弘^{*1}
畔柳 幹雄^{*1} 田部井 和人^{*1} 佐原 史浩^{*1} 村上 武志^{*1} 青山 裕司^{*2}

要 旨

TRU 廃棄物処分場の安全裕度を正確に把握し、より信頼性の高い性能評価を行うためには、バリア材料の変遷挙動を考慮したニアフィールド水理場の長期的変遷評価を可能とする評価システムの構築が必要である。

本研究では、この長期的変遷評価システムの構成要素となる力学的変遷挙動解析システム (MACBECE) について、昨年度までに構築したシステムのさらなる高度化を検討、実施し、また別途開発中の化学・物質移動解析システムとの連成、及び水理解析へのデータの受渡に寄与する補間プログラムの一部を開発した。本年度の主な研究成果を以下に示す。

- 1) 昨年度までに構築した MACBECE に対し、ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの溶解、及び液相中の溶解イオンの影響による変形を概略評価できるように高度化した。また、大久保モデルによる岩盤クリープ解析を数ケース実施し、クリープ変形の程度を把握した上で、MACBECE による力学的変遷挙動解析に考慮すべき変形の代表ケースを選定した。同時に、その岩盤クリープの影響も評価できるように、昨年度の研究成果も踏まえて、MACBECE を高度化した。
- 2) 1)で高度化した MACBECE で必要となる、ベントナイト系材料、及びセメント系材料の力学、水理パラメータについて、既往のデータ、研究を化学的変遷指標との関係を念頭に整理し、物性値、物性評価式を検討、設定した。またセメント系材料については、海水環境下における変質やそれに伴う力学的な影響についても調査、整理した。
さらに長期的な化学的変遷を設定し、上記クリープ変形、物性の変遷を考慮した MACBECE による力学的変遷挙動解析を実施し、クリープ変形を考慮した方が緩衝材の止水性が担保されること、またクリープ変形を考慮しなくても拡散場が担保されると推察される結果が得られた。

- 3) 力学的変遷挙動解析システムと化学・物質移動解析システム統合するため、両解析から得られる異なるメッシュ上での鉱物濃度などの変数を相互に変換するツールを開発した。本ツールを媒介として、化学・物質移動の影響を考慮した力学的変遷挙動解析を実施し、また、力学的変遷挙動解析とクリーブ解析の結果より、水理解析のための透水係数場を作成した。

本報告書は、鹿島建設(株) , (株)クインテッサジャパンが核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分材料研究グループ

*1 鹿島建設(株)

*2 (株)クインテッサジャパン

Study on the System Development for Evaluating Long-term Alteration
of Hydraulic Field in Near Field
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Trust Contract)

Kazuo Okutu*, Seiji Morikawa*, Yoshikazu Hironaka*, Munehiro Maeda*
Hirosi Shimbo*, Mikio Kuroyanagi*, Kazuto Tabei*, Fumihiro Sahara*
Takeshi Murakami*, Yuji Aoyama**

Abstract

For the high performance evaluation of reliability of TRU waste repository, the system development for evaluating long-term alteration in consideration of the changes action of barrier materials of hydraulic field in Near Field is required.

In this research, the developed mechanical alteration action analysis system (MACBECE) was improved furthermore, that is one of the components of the system for evaluating long-term alteration in Near Field. The program was developed for interpolation from the result of the developed chemical alteration action analysis system, and into the condition of the hydraulic analysis. The research results of this year are shown below.

- 1) The developed MACBECE was improved to evaluate the mechanical behavior that originates the dissolution of montmorillonite and the dissolution ion. Moreover, the long-term rock creep analysis was calculated using the "Okubo model" , for evaluating the level of creep displacement and selecting the case of creep displacement to consider for the long-term mechanical alteration action analysis. Furthermore, the MACBECE was improved to evaluate the effects of rock creep displacement.
- 2) The mechanical and hydraulic parameters for the materials of bentonite and cement, that is necessary for the analysis of MACBECE, were arranged for the chemical parameters. And the values or the evaluative equations about them were examined and set. Moreover, the effects of seawater environment for cement materials is investigated and arranged.

In addition, the long-term chemical alteration action was set, and the analysis of MACBECE, considering the rock creep displacement and the mechanical alteration, was performed. The analysis results indicated that the case of analysis considering the rock creep could keep the lower permeability than the case of analysis disregarding the rock creep, but the diffusion field was also kept on the case disregarding it.

3) To integrate dynamic and hydraulic – chemical systems, a tool which converts the variables on different meshes was developed. Using the tool, dynamical analysis considering the effect of hydraulic – chemical analysis was performed. Furthermore, a transmissivity field for hydraulic analysis was generated using the result from dynamical analysis and creep analysis.

This work was performed by KAJIMA Corporation and Quintessa K.K. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Materials Research Group, Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* KAJIMA Corporation.

** Quintessa K.K.

目 次

はじめに	1
1. 力学的変遷評価システムの構築に関する検討	3
1.1 ベントナイト系材料の力学挙動評価モデルの高度化	4
1.1.1 膨潤挙動、透水性の評価モデル	4
1.1.2 モンモリロナイトの溶解に伴う変形挙動のモデル化	7
(1) モデル化の方針	7
(2) モデル化	9
(3) 化学的変遷指標	10
1.1.3 液相の陽電荷密度の変化に伴う変形挙動のモデル化	15
(1) モデル化の方針	15
(2) 化学的変遷指標	15
1.1.4 ベントナイト系材料の力学挙動評価モデルのまとめ	16
(1) 非線形膨潤挙動評価モデル	16
(2) 膨潤圧の変化に伴うベントナイトの力学挙動評価モデル	17
(3) 透水係数評価モデル	18
1.2 岩盤のクリープ変形による影響評価手法に関する検討	19
1.2.1 岩盤クリープ変形の定性的評価	19
(1) 大久保モデルの特徴と構成方程式	20
(2) 解析条件	21
(3) 解析モデル図	23
(4) 解析結果	25
(5) クリープ変形の評価	30
(6) 考慮すべきクリープ変形量の選定	31
1.2.2 岩盤クリープの影響評価手法	33
(1) MACBECE への導入方法	33
(2) MACBECE の改良点	33

1.3	力学的変遷挙動解析システムの構築	34
1.3.1	MACBECE の構築	34
1.3.2	システムの検証	36
(1)	ベントナイト系材料単体での検証解析	36
(2)	ベントナイト - セメント共存系での検証解析	40
(3)	評価モデルの不確実性に関する検討	45
2.	力学的変遷挙動評価に関する検討	49
2.1	ベントナイト系材料の力学パラメータの設定	49
2.1.1	対象となる処分坑道の部位とその仕様	49
2.1.2	化学的変遷指標	50
2.1.3	設定すべきパラメータ	51
2.1.4	圧縮指数 ()	52
(1)	ESP の影響	53
(2)	s_{me} の影響	55
(3)	c の影響	57
(4)	の設定	58
2.1.5	膨潤挙動評価パラメータ (α_0 、 β_0 、 OCR_b)	59
(1)	実験データ ($e-\ln(p)$ 膨潤曲線) における α_0 の定義の設定	61
(2)	化学的変遷指標と α_0 の関係の整理	62
(3)	α_0 の設定	66
(4)	膨潤曲線の一次フィッティング	67
(5)	s_{me} とケイ砂混合率の関係	73
(6)	の評価式の設定	77
(7)	OCR_b をパラメータとした実験データの再フィッティング	81
(8)	化学的変遷指標と $OCR_b(ESP, C_{sand}, c)$ の関係の整理と評価式の設定	83
(9)	膨潤挙動評価式のまとめ	89
(10)	実験結果との比較	90

2.1.6	限界状態パラメータ (M)	93
(1)	ESP の影響	93
(2)	e_{sme} の影響	94
(3)	c の影響	95
(4)	M の設定	96
2.1.7	初期間隙比 (e_0)	97
2.1.8	透水係数の評価に関わるパラメータ	98
(1)	透水係数評価式	98
(2)	変形を考慮した e'_{sme} の算定	99
(3)	透水係数の評価式のまとめ	101
2.1.9	発揮すべき膨潤圧 (P_{bal})	102
(1)	モデル化の方針	102
(2)	最小膨潤圧の評価式 $f(e_{sme})$	104
(3)	ESP の影響を評価する関係式 $g(ESP, e_{sme})$	106
(4)	陽電荷密度の影響 $h(c)$	108
(5)	変形を考慮した e'_{sme} の算定	109
(6)	膨潤圧評価式のまとめ	111
2.1.10	ベントナイト系材料のパラメータのまとめ	114
2.2	セメント系材料の力学パラメータの設定	117
2.2.1	セメント系材料の力学挙動評価モデル	117
(1)	背景	117
(2)	評価モデル・手法の概要	118
(3)	必要な力学パラメータ	120
2.2.2	各パラメータの設定	120
(1)	セメント系材料からなる部位の整理	121
(2)	各部位の仕様、配合の設定	122
(3)	各部位の初期物性の設定	123
(4)	化学的変遷指標の設定	130
(5)	弾性係数、強度の下限値の設定	133

(6) 化学的変遷に伴う各物性の変遷の設定	134
(7) 各物性の設定のまとめ	146
2.2.3 海水環境におけるセメント系材料の変質機構とその影響	149
(1) 対象とした文献	149
(2) 調査結果	152
(3) まとめ	165
2.3 ニアフィールドの力学挙動の長期的変遷評価	166
2.3.1 解析モデルと境界条件	167
2.3.2 解析ステップと解析ケース	167
2.3.3 岩盤掘削時に発生する支保応力の導入	171
2.3.4 解析用物性値	173
2.3.5 解析結果	175
2.3.6 結果のまとめと考察	184
3. 水理場変遷評価システムの構築に関する検討	187
3.1 力学的変遷挙動解析システムと化学・物質移動解析システムの統合	187
3.1.1 システムの統合	187
3.1.2 変数の変換方法	188
3.2 メッシュデータの変換	191
3.2.1 化学・物質移動解析結果の力学的変遷挙動解析システムメッシュへの変換	191
3.2.2 力学的変遷挙動解析システムから物質移動解析システムへの変換	197
3.3 水理解析	209
3.4 解析のフロー	217
おわりに	219
参考文献	220
付録-1	付-1(226)
付録-2	付-2(235)
付録-3	付-3(244)

目 次

図-1	ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システムの構築に必要な研究項目	1
図 1-1	検討対象断面	3
図 1.1-1	ベントナイトの膨潤特性	5
図 1.1-2	膨潤圧低下に伴う変形挙動のモデル化の概念	9
図 1.1-3	有効ベントナイト乾燥密度~膨潤圧関係(クニゲル V1) [前田ほか,1998]	11
図 1.1-4	有効ベントナイト乾燥密度~膨潤圧関係(Ca 型化クニゲル V1) [前田ほか,1998]	12
図 1.1-5	有効ベントナイト乾燥密度~膨潤圧関係 [鈴木ほか,1999]	12
図 1.1-6	スメクタイト部分乾燥密度・間隙比	13
図 1.1-7	膨潤圧の低下に伴う変形挙動の計算フロー	17
図 1.2-1	クリープ解析モデル(円形坑道)	23
図 1.2-2	クリープ解析モデル(幌形坑道)	24
図 1.2-3	クリープ変位量の経時変化(坑道天端中央部)	25
図 1.2-4(a)	コンプライアンス比分布(1/2)	26
図 1.2-4(b)	コンプライアンス比分布(2/2)	27
図 1.2-5(a)	体積ひずみ分布(1/2)	28
図 1.2-5(b)	体積ひずみ分布(2/2)	29
図 1.2-6	長期力学的変遷評価に用いる変形量(Case2 相当)	32
図 1.3-1	MACBECE の解析フロー図	35
図 1.3-2	簡易検証解析モデル図	36
図 1.3-3	化学的変遷指標の設定値	37
図 1.3-4	変形図(初期状態)	38
図 1.3-5	変形図(最終状態)	38
図 1.3-6	スメクタイト部分乾燥密度分布(最終状態)	39
図 1.3-7	水平方向応力分布(最終状態)	39
図 1.3-8	検証解析モデル	40
図 1.3-9	変形図	42

図 1.3-10	体積ひずみ分布図	43
図 1.3-11	平均応力分布図	43
図 1.3-12	緩衝材の平均応力の推移	44
図 1.3-13	e - $\ln p$ 関係上での膨潤圧と間隙比の変遷	46
図 1.3-14	ベントナイト系材料の応力の概念	47
図 1.3-15	ベントナイト系材料の変形、 s_{me} の推移の模式図 (例)	48
図 2.1-1	実験値の α の定義	52
図 2.1-2	ESP と圧縮指数 α の関係 (ベントナイト単体)	54
図 2.1-3	圧縮指数 α と塑性指数との関係 (飯塚、1988)	54
図 2.1-4	ESP と圧縮指数 α の関係 (ケイ砂 30wt%混合)	55
図 2.1-5	ケイ砂混合率と α の関係 (左: Na 型、右: Ca 型化)	56
図 2.1-6	陽電荷密度と α の関係 (ベントナイト単体)	57
図 2.1-7	陽電荷密度と α の関係 (Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)	57
図 2.1-8	膨潤挙動評価パラメータの関係式の設定フロー図	60
図 2.1-9	実験値の α_0 の定義	61
図 2.1-10	ESP と初期膨潤指数 α_0 の関係 (ベントナイト単体: 蒸留水)	63
図 2.1-11	非可逆比と塑性指数の関係 (飯塚、1988)	63
図 2.1-12	ESP と初期膨潤指数 α_0 の関係 (ケイ砂 30wt%混合: 蒸留水)	64
図 2.1-13	ケイ砂混合率と α_0 の関係 (蒸留水)	65
図 2.1-14	陽電荷密度と α_0 の関係 (ベントナイト単体)	66
図 2.1-15	陽電荷密度と α_0 の関係 (Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)	66
図 2.1-16	ESP と α_0 、 OCR_b の関係 (ベントナイト単体: 蒸留水)	69
図 2.1-17	ESP と α_0 、 OCR_b の関係 (ケイ砂 30wt%混合: 蒸留水)	69
図 2.1-18	ケイ砂混合率と α_0 、 OCR_b の関係 (Na 型相当)	70
図 2.1-19	ケイ砂混合率と α_0 、 OCR_b の関係 (Ca 型化相当)	70
図 2.1-20	陽電荷密度と α_0 、 OCR_b の関係 (Na 型相当、ベントナイト単体)	71
図 2.1-21	陽電荷密度と α_0 、 OCR_b の関係 (Ca 型化相当、ベントナイト単体)	72
図 2.1-22	陽電荷密度と α_0 、 OCR_b の関係 (Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)	72
図 2.1-23	スメクタイト部分乾燥密度の考え方	73

図 2.1-24	諸係数の関係	74
図 2.1-25	スメクタイトの溶解に伴う膨潤特性の変遷評価フロー	77
図 2.1-26	(ESP,0.0,0.0)、(ESP,0.3,0.0)の設定	78
図 2.1-27	の比較(ケイ砂の影響:蒸留水)	79
図 2.1-28	の比較(陽電荷密度の影響:ベントナイト単体)	79
図 2.1-29	の比較(陽電荷密度の影響:ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)	80
図 2.1-30	ESP と OCR_b の関係(蒸留水)	83
図 2.1-31	ESP と OCR_b の関係の評価式(蒸留水)	84
図 2.1-32	ケイ砂混合率と OCR_b の関係(蒸留水)	84
図 2.1-33	ケイ砂混合率と OCR_b の関係の評価式(蒸留水)	85
図 2.1-34	陽電荷密度と OCR_b の関係(ベントナイト単体)	86
図 2.1-35	陽電荷密度と OCR_b の関係(Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)	87
図 2.1-36	陽電荷密度と OCR_b の関係の評価式(ベントナイト単体)	88
図 2.1-37	陽電荷密度と OCR_b の関係(Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)	89
図 2.1-38	評価式と実験値の比較(Na 型相当、ベントナイト単体、蒸留水)	90
図 2.1-39	評価式と実験値の比較(Ca 型化 50%相当、ベントナイト単体、蒸留水)	90
図 2.1-40	評価式と実験値の比較(Ca 型化相当、ベントナイト単体、蒸留水)	91
図 2.1-41	評価式と実験値の比較(Na 型相当、ケイ砂混合ベントナイト、蒸留水)	91
図 2.1-42	評価式と実験値の比較(Ca 型化相当、ケイ砂混合ベントナイト、蒸留水)	91
図 2.1-43	評価式と実験値(戸井田ほか、2005)の比較 (ベントナイト単体、 $c = 3.0\text{eq/l}$)	92
図 2.1-44	評価式と実験値(高治ほか、2004)の比較 (Na 型相当、ケイ砂 30wt%混合ベントナイト、 $c > 0\text{eq/l}$)	92
図 2.1-45	ESP と M の関係(蒸留水)	94
図 2.1-46	ケイ砂混合率と M の関係(蒸留水)	95
図 2.1-47	試験溶液の陽電荷密度と M の関係(ベントナイト単体)	95
図 2.1-48	試験溶液の M への影響(高治ほか、2004)	96
図 2.1-49	緩衝材の構成	97
図 2.1-50	実験値と評価式の比較の例(1)(伊藤ほか、2005)	98

図 2.1-51	実験値と評価式の比較の例(2) (伊藤ほか,2005)	99
図 2.1-52	変形による s_{me} 、 e_{sme} の変化の概念図	99
図 2.1-53	透水係数評価フロー	101
図 2.1-54	膨潤曲線の概念	103
図 2.1-55	有効ベントナイト密度 ~ 膨潤応力	103
図 2.1-56	s_{me} と平衡膨潤圧 ($c > 0.5\text{eq/l}$) の関係	104
図 2.1-57	s_{me} と平衡膨潤圧 (ESP が 0.1 前後 : 蒸留水) の関係	105
図 2.1-58	図 2.1-56,57 の重合せ	105
図 2.1-59	s_{me} ~ 最小膨潤圧	105
図 2.1-60	Na 型ベントナイトの膨潤圧と $f(s_{me})$ の比較	106
図 2.1-61	Na 型膨潤圧と最小膨潤圧の比	107
図 2.1-62	L(ESP=0.457) の設定	108
図 2.1-63	ESP と L(ESP) の関係	108
図 2.1-64	c と $h(c)$ の関係	109
図 2.1-65	膨潤圧評価式と実験値の比較 (蒸留水)	111
図 2.1-66	膨潤圧評価式と実験値の比較 (Na 型相当 : 蒸留水)	112
図 2.1-67	膨潤圧評価式と実験値の比較 (Ca 型化 50%相当 : 蒸留水)	112
図 2.1-68	膨潤圧評価式と実験値の比較 (Ca 型化 : 蒸留水)	112
図 2.1-69	膨潤圧評価式と実験値の比較 ($c > 0.5\text{eq/l}$)	113
図 2.1-70	膨潤圧評価式と実験値の比較 (Na 型相当)	113
図 2.1-71	膨潤圧評価式と実験値の比較 (陽電荷密度の影響)	113
図 2.1-72	変形による変化を考慮した膨潤圧評価フロー	114
図 2.2-1	想定されるセメント系材料の変形挙動 (応力 - ひずみ関係)	118
図 2.2-2	強度低下と Mohr の応力円の関係	119
図 2.2-3	各パラメータの設定フロー	120
図 2.2-4	処分坑道概念図 (堆積岩系)	121
図 2.2-5	透水係数	126
図 2.2-6	セメント系材料における事象	130
図 2.2-7	Ca 残存率とビッカース硬度比の関係 (横関, 2003)	134

図 2.2-8	補正関数 s_c	136
図 2.2-9	コンクリートの圧縮強度の変遷の設定	137
図 2.2-10	コンクリートの弾性係数の変遷の設定	138
図 2.2-11	k_p の評価式の比較	140
図 2.2-12	c と p_c 及び $'_p$ の関係	140
図 2.2-13	補正関数 s_m	142
図 2.2-14	モルタルの圧縮強度の変遷の設定	143
図 2.2-15	モルタルの弾性係数の変遷の設定	144
図 2.2-16	m と p_m 及び $'_p$ の関係	145
図 2.2-17	圧縮強度の変遷	148
図 2.2-18	弾性係数の変遷	148
図 2.2-19	透水係数の変遷	148
図 2.2-20	変化の概念図	153
図 2.2-21	60 年間の S の浸透	154
図 2.2-22	炭酸カルシウムとフリーデル氏塩の生成量の関係	155
図 2.2-23	海洋環境下における長期強度の推移	159
図 2.2-24	海水浸漬中の残留強度	160
図 2.2-25	溶脱による空隙率の増加	161
図 2.2-26	空隙率の変化	161
図 2.2-27	コンクリート物性と鉱物組成の関係	162
図 2.3-1	解析モデル図	167
図 2.3-2(a)	化学的変遷指標分布 (セメント系材料)	169
図 2.3-2(b)	化学的変遷指標分布 (ベントナイト系材料)	170
図 2.3-3	岩盤掘削による支保の応力 (掘削径 13.2m、深度 500m、SR-C)	171
図 2.3-4	変形図	175
図 2.3-5	平均応力分布	176
図 2.3-6	軸差応力分布	177
図 2.3-7	最小主応力分布	178
図 2.3-8	最大せん断ひずみ分布	179

図 2.3-9	体積ひずみ分布	180
図 2.3-10	透水係数分布	181
図 2.3-11	最終ステップの緩衝材の透水係数分布	182
図 2.3-12	透水係数の変遷 (図 2.3-11 における白丸の要素)	182
図 2.3-13	最終ステップのセメント系材料の透水係数分布	183
図 2.3-14	透水係数の変遷 (図 2.3-13 における白丸の要素)	183
図 2.3-15	CaseA 変形図	186
図 2.3-16	CaseB 変形図	186
図 3.1-1	メッシュの例	187
図 3.1-2	力学メッシュと化学・物質移動解析メッシュの関係の拡大図	189
図 3.1-3	化学メッシュと力学メッシュ間の鉱物濃度の変換例	190
図 3.2-1	力学的変遷挙動解析システムのメッシュ	192
図 3.2-2	化学・物質移動解析のメッシュ	193
図 3.2-3	化学・物質移動解析メッシュの領域への分割	193
図 3.2-4	各領域の番号	194
図 3.2-5	時刻 1 における空隙率の分布	195
図 3.2-6	時刻 2 における空隙率の分布	195
図 3.2-7	時刻 3 における空隙率の分布	196
図 3.2-8	時刻 1 における岩盤の透水係数分布	198
図 3.2-9	時刻 2 における岩盤の透水係数分布	198
図 3.2-10	時刻 3 における岩盤の透水係数分布	199
図 3.2-11	時刻 1 における坑道内の透水係数分布 (クリープを考慮)	200
図 3.2-12	時刻 2 における坑道内の透水係数分布 (クリープを考慮)	200
図 3.2-13	時刻 3 における坑道内の透水係数分布 (クリープを考慮)	201
図 3.2-14	時刻 1 における坑道内の透水係数分布 (クリープなし)	202
図 3.2-15	時刻 2 における坑道内の透水係数分布 (クリープなし)	202
図 3.2-16	時刻 3 における坑道内の透水係数分布 (クリープなし)	203
図 3.2-17	水理解析メッシュ	204
図 3.2-18	水理解析メッシュ坑道周辺部拡大図	204

図 3.2-19	時刻 1 における水理解析のための透水係数場 (クリープを考慮)	205
図 3.2-20	時刻 2 における水理解析のための透水係数場 (クリープを考慮)	205
図 3.2-21	時刻 3 における水理解析のための透水係数場 (クリープを考慮)	206
図 3.2-22	時刻 1 における水理解析のための透水係数場 (クリープなし)	207
図 3.2-23	時刻 2 における水理解析のための透水係数場 (クリープなし)	207
図 3.2-24	時刻 3 における水理解析のための透水係数場 (クリープなし)	208
図 3.3-1	水理解析の概念図	209
図 3.3-2	時刻 1 の水頭分布 (クリープを考慮)	210
図 3.3-3	時刻 1 の流速分布 (クリープを考慮)	210
図 3.3-4	時刻 2 の水頭分布 (クリープを考慮)	211
図 3.3-5	時刻 2 の流速分布 (クリープを考慮)	211
図 3.3-6	時刻 3 の水頭分布 (クリープを考慮)	212
図 3.3-7	時刻 3 の流速分布 (クリープを考慮)	212
図 3.3-8	時刻 1 の水頭分布 (クリープなし)	213
図 3.3-9	時刻 1 の流速分布 (クリープなし)	213
図 3.3-10	時刻 2 の水頭分布 (クリープなし)	214
図 3.3-11	時刻 2 の流速分布 (クリープなし)	214
図 3.3-12	時刻 3 の水頭分布 (クリープなし)	215
図 3.3-13	時刻 3 の流速分布 (クリープなし)	215
図 3.4-1	解析のフロー	218
付図 1-1	一次フィッティング結果 (No1~3)	付-1(228)
付図 1-2	一次フィッティング結果 (No4~6)	付-1(228)
付図 1-3	一次フィッティング結果 (No7~9)	付-1(228)
付図 1-4	一次フィッティング結果 (No10~11)	付-1(229)
付図 1-5	一次フィッティング結果 (No12~13)	付-1(229)
付図 1-6	一次フィッティング結果 (No14~15)	付-1(229)
付図 1-7	一次フィッティング結果 (No16~17)	付-1(229)
付図 1-8	一次フィッティング結果 (No18~19)	付-1(230)
付図 1-9	一次フィッティング結果 (No20~21)	付-1(230)

付図 1-10	一次フィッティング結果 (No22~23)	付-1(230)
付図 1-11	一次フィッティング結果 (No24~25)	付-1(230)
付図 1-12	一次フィッティング結果 (No26~27)	付-1(231)
付図 1-13	一次フィッティング結果 (No28~29)	付-1(231)
付図 1-14	一次フィッティング結果 (No30~31)	付-1(231)
付図 1-15	一次フィッティング結果 (No32~33)	付-1(231)
付図 1-16	一次フィッティング結果 (No34~35)	付-1(232)
付図 1-17	一次フィッティング結果 (No36~37)	付-1(232)
付図 1-18	一次フィッティング結果 (No38~39)	付-1(232)
付図 1-19	一次フィッティング結果 (No40~42)	付-1(232)
付図 1-20	一次フィッティング結果 (No43~44)	付-1(233)
付図 1-21	一次フィッティング結果 (No45~46)	付-1(233)
付図 1-22	一次フィッティング結果 (No47~48)	付-1(233)
付図 1-23	一次フィッティング結果 (No49~50)	付-1(233)
付図 1-24	一次フィッティング結果 (No51~52)	付-1(234)
付図 1-25	一次フィッティング結果 (No53~55)	付-1(234)
付図 2-1	再フィッティング結果 (No1~3)	付-2(237)
付図 2-2	再フィッティング結果 (No4~6)	付-2(237)
付図 2-3	再フィッティング結果 (No7~9)	付-2(227)
付図 2-4	再フィッティング結果 (No10~11)	付-2(238)
付図 2-5	再フィッティング結果 (No12~13)	付-2(238)
付図 2-6	再フィッティング結果 (No14~15)	付-2(238)
付図 2-7	再フィッティング結果 (No16~17)	付-2(238)
付図 2-8	再フィッティング結果 (No18~19)	付-2(239)
付図 2-9	再フィッティング結果 (No20~21)	付-2(239)
付図 2-10	再フィッティング結果 (No22~23)	付-2(239)
付図 2-11	再フィッティング結果 (No24~25)	付-2(239)
付図 2-12	再フィッティング結果 (No26~27)	付-2(240)
付図 2-13	再フィッティング結果 (No28~29)	付-2(240)

付図 2-14	再フィッティング結果 (No30~31)	付-2(240)
付図 2-15	再フィッティング結果 (No32~33)	付-2(240)
付図 2-16	再フィッティング結果 (No34~35)	付-2(241)
付図 2-17	再フィッティング結果 (No36~37)	付-2(241)
付図 2-18	再フィッティング結果 (No38~39)	付-2(241)
付図 2-19	再フィッティング結果 (No40~42)	付-2(241)
付図 2-20	再フィッティング結果 (No43~44)	付-2(242)
付図 2-21	再フィッティング結果 (No45~46)	付-2(242)
付図 2-22	再フィッティング結果 (No47~48)	付-2(242)
付図 2-23	再フィッティング結果 (No49~50)	付-2(242)
付図 2-24	再フィッティング結果 (No51~52)	付-2(243)
付図 2-25	再フィッティング結果 (No53~55)	付-2(243)

表 目 次

表 1.2-1	岩盤物性値	21
表 1.2-2	解析ケース	22
表 1.2-3	Case4 内容物、各部位の劣化後物性	22
表 1.2-4	100 万年後のクリープ最大変位量（坑道天端中央部）	25
表 1.2-5	100 万年後のクリープ最大変位量の比	30
表 1.2-6	処分システム諸元	31
表 1.3-1	解析用物性値（ベントナイト系材料：弾塑性材料）	36
表 1.3-2	解析ステップ	37
表 1.3-3	化学的変遷指標の設定値（初期状態）	37
表 1.3-4	化学的変遷指標の設定値（最終状態）	37
表 1.3-5	解析用物性値（ベントナイト系材料[緩衝材]：弾塑性材料）	41
表 1.3-6	解析用物性値（セメント系材料[廃棄体・支保工]：弾性材料）	41
表 1.3-7	解析ステップ	41
表 1.3-8	化学的変遷指標の設定値（緩衝材）	42
表 2.1-1	緩衝材の仕様	49
表 2.1-2	ベントナイトとケイ砂の諸元	50
表 2.1-3	既往のデータにおける圧縮指数	53
表 2.1-4	既往のデータにおける初期膨潤指数 α_0	62
表 2.1-5	膨潤曲線の一次フィッティングによって得られた α_0 、 OCR_b	68
表 2.1-6	α_0 、 OCR_b の概略傾向	73
表 2.1-7	膨潤曲線の再フィッティングによって得られた OCR_b	82
表 2.1-8	限界状態パラメータ M	93
表 2.1-9	ベントナイト系材料のパラメータの設定(1)	115
表 2.1-10	ベントナイト系材料のパラメータの設定(2)	116
表 2.2-1	セメント系材料の物性の種類	122
表 2.2-2	コンクリートの配合	122
表 2.2-3	コンクリートの空隙率と密度	123

表 2.2-4	モルタルの配合	123
表 2.2-5	モルタルの空隙率と密度	123
表 2.2-6	各物性のまとめ	147
表 2.2-7(a)	調査対象とした文献一覧	150
表 2.2-7(b)	調査対象とした文献一覧	151
表 2.2-8	海水およびコンクリート中の液相組成	152
表 2.2-9	フリーデル氏塩の物性	156
表 2.2-10	エトリンガイトの物性	157
表 2.2-11	ブルーサイトの物性	158
表 2.2-12	アラゴナイトの物性	158
表 2.2-13	文献調査結果	165
表 2.3-1	処分システム諸元	166
表 2.3-2	解析ステップ	168
表 2.3-3(a)	化学的変遷指標 (セメント系材料)	168
表 2.3-3(b)	化学的変遷指標 (ベントナイト系材料)	168
表 2.3-4	解析ケース	168
表 2.3-5	ベントナイト系材料の想定仕様	173
表 2.3-6	セメント系材料の想定仕様	173
表 2.3-7	解析用物性値 [初期地圧・初期膨潤圧計算 (1STEP・2STEP)]	173
表 2.3-8(a)	解析用物性値 (緩衝材) [長期力学挙動解析]	174
表 2.3-8(b)	解析用物性値 (セメント系材料) [長期力学挙動解析]	174
表 3.2-1	物性値の設定	194
表 3.3-1	部材境界を通過する地下水流量	216
付表 1-1	膨潤曲線の一次フィッティングによって得られた α 、 OCR_b	付-1(227)
付表 2-1	膨潤曲線の再フィッティングによって得られた OCR_b	付-2(236)
付表 3-1	既往の膨潤圧試験結果(1)	付-3(246)
付表 3-2	既往の膨潤圧試験結果(2)	付-3(247)
付表 3-3	既往の膨潤圧試験結果(3)	付-3(248)
付表 3-4	既往の膨潤圧試験結果(4)	付-3(249)

付表 3-1 既往の膨潤圧試験結果(1) 付-3(246)

はじめに

TRU廃棄物の処分に関しては、平成12年春に公開されたTRU廃棄物処分概念検討書においてその見通しが示された。その中で、長期的な被ばく線量を支配するのは、非吸着性核種の I-129、C-14等であることが明らかとなった。また、TRU廃棄物の処分概念（地層処分並びに余裕深度処分を対象）の安全裕度評価に重要な評価パラメータの抽出等に関する検討の結果、バリア材料の変質による透水係数の変化の重要性が示された。

本研究は、セメント系材料からの浸出液や硝酸塩起源物質による各バリア材料の変質、透水係数の変化並びにバリアシステム全体の力学挙動の変遷の結果として生じる可能性のあるニアフィールド（処分場およびその近傍）の水理場の長期変遷を精度よく予測評価するためのシステム構築を目的とし、平成13年度より4ヵ年計画で開始した。本件はその最終年度の研究である。

この評価システムの構築に必要と考えられる研究項目を図-1に示す。

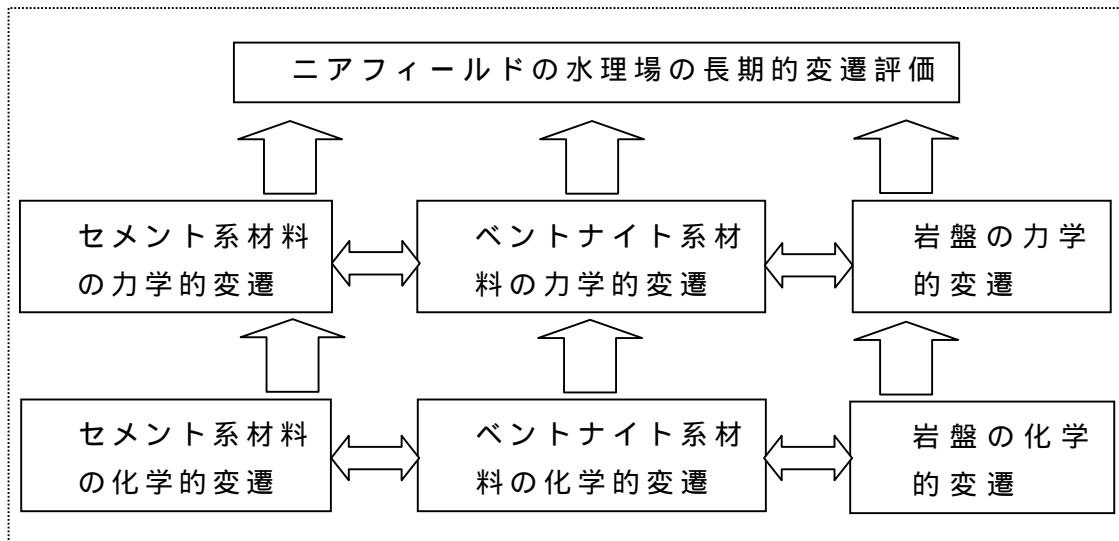


図-1 ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システムの構築に必要な研究項目

4ヵ年計画の初年度である平成13年度の研究（ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システム構築に関する研究）においては、このニアフィールド水理場の長期的変遷評価システムの構築に向けた検討として、このシステムの構成要素となる化学的・力学的変遷挙動解析システムの基本仕様、並びにそれらからなる全体システムの基本仕様、構成等の検討を行っ

た。

次年度の平成14年度の研究（ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システム構築に関する研究）においては、平成13年度に検討、提示したシステムの基本仕様、基本構成に基づき、必要な現象評価モデルの構築やシステムのプロトタイプ構築、および化学的・力学的変遷評価システムの連成方法等の検討を実施するとともに、今後その精度、妥当性の向上するために必要となる各々の開発要素について整理した。

続く平成15年度の研究（ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システム構築に関する研究）においては、まず処分場の長期安定性が保たれる条件が成立するための論理構造の作成と評価を実施した。さらに、平成15年度に構築したプロトタイプのシステムの検証、高度化等の検討を実施し、それらを連成させた長期的変遷評価システムを用いて、前述の論理構造の評価に基づいた解析、評価を実施した。

今年度の研究では過去3年間の成果を踏まえ、システムの高度化・実用化及びシステムを用いた評価を行う。さらに、今年度末までに取りまとめる予定のTRU廃棄物処分に関する次期技術レポートの記述に反映させることを目的とする。

本件では、力学挙動評価システムの構築、水理場評価システムの構築に関する研究を実施する。

力学挙動の変遷評価については、まず、ベントナイト系材料の構成方程式及びセメント系材料の挙動評価モデルの適用性を各種試験結果との照合により確認し、また、周辺岩盤の力学挙動の影響評価手法を検討し、ニアフィールドの力学挙動を評価可能な解析システムを構築する。次に、処分場で想定される主要な化学的変質に応じて、代表的な化学変遷評価指標と力学特性の関係を設定する。これらの解析システムと特性関係式を用いて、ある任意の環境条件での長期力学挙動を評価し、解析システムの動作性、適用性を確認する。

水理場の変遷評価については、上述の力学解析システムと別途開発中の化学・物質移動解析システムとの連成方法を検討し、化学/力学の影響を考慮したニアフィールドの水理場を評価可能な解析システムを構築する。

1. 力学的変遷評価システムの構築に関する検討

核燃料サイクル開発機構殿委託研究「ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システム構築に関する研究 ～ 」(以下「システム構築 ～ 」と称す)において、TRU 廃棄物処分システムにおけるベントナイト系材料、及びセメント系材料の化学的変質に伴う物理的特性の変化を考慮した力学的変遷挙動評価システム(MACBECE)を試作した。本研究においては、さらにモンモリロナイトの溶解、間隙水の陽電荷密度、岩盤クリープの影響等を評価できるように、力学的変遷評価システムを高度化する。

なお、本研究において基本的に対象とする処分坑道断面は、

- ・ 岩種：堆積岩(SR-C)
- ・ 深度：500m
- ・ 断面形状：円形
- ・ 対象廃棄体：廃棄体 Gr 1 (廃銀吸着材のセメント固化体)

とする。(図 1-1)

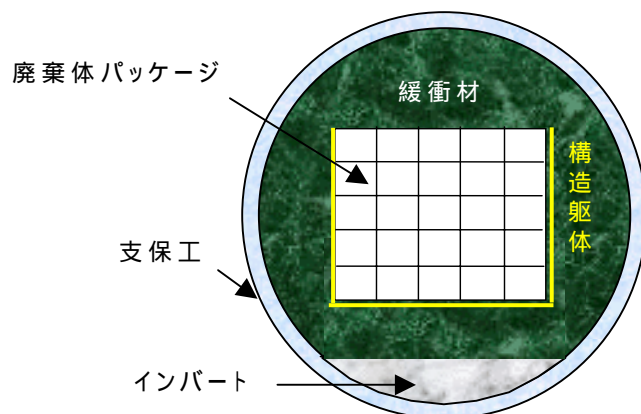


図 1-1 検討対象断面

1.1 ベントナイト系材料の力学挙動評価モデルの高度化

ベントナイト系材料については、システム構築 まではカルシウム型化による特性変化（膨潤性変化）に着目した変形挙動のモデル化を実施してきた。ここでは、実際の処分場環境で生じうると考えられる、ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの溶解、及び間隙水のイオン強度（或いは陽イオン濃度）による力学特性の変化に伴う変形も評価できるように、モデルの改良、高度化を行う。

1.1.1 膨潤挙動、透水性の評価モデル

ベントナイト系材料の非線形膨潤挙動に関するモデル化は、システム構築 において改良した弾塑性構成方程式を用いることとし、以下にそのモデル概要を示す。

ベントナイト系材料の弾塑性構成方程式は、自然堆積粘土の構成方程式としてコード化され実績がある関口・太田の提案による弾(粘)塑性構成式（以下、関口・太田モデル）(Sekiguchi and Ohta,1977; Iizuka and Ohta,1987)を援用した。ベントナイトはその低透水性と膨潤性において自然堆積粘土と大きく異なるが、Biot の多次元圧密理論(Biot,1941)に基づき土骨格と間隙水の連成挙動として表現すれば構成式と透水性は関係しないことから、膨潤性に着目して拡張した。また、膨潤挙動は弾性域での挙動であることから、関口・太田モデルの体積弾性係数 K を、過圧密比 OCR で場合分けをした下式(1.1.1)、(1.1.2)に示す K_s に置換することによって拡張した。

$$1 \leq OCR \leq OCR_b : \tilde{K}_s = \frac{\kappa}{\xi(OCR)\exp\{\xi(OCR-1)\} + \kappa} \tilde{K} \quad (1.1.1)$$

$$OCR_b \leq OCR : \tilde{K}_s = \frac{\kappa \log_e(10)}{A + \kappa \log_e(10)} \tilde{K} \quad (1.1.2)$$

ここで、 OCR は過圧密比 ($OCR = \frac{P'_0}{P'}$)、 ξ 、 OCR_b は材料定数（以下、浸透膨潤パラメータ）、 A は初期膨潤指数であり、 \tilde{K} 、 \tilde{K}_s は、図 1.1-1 に示す膨潤特性から求められる。

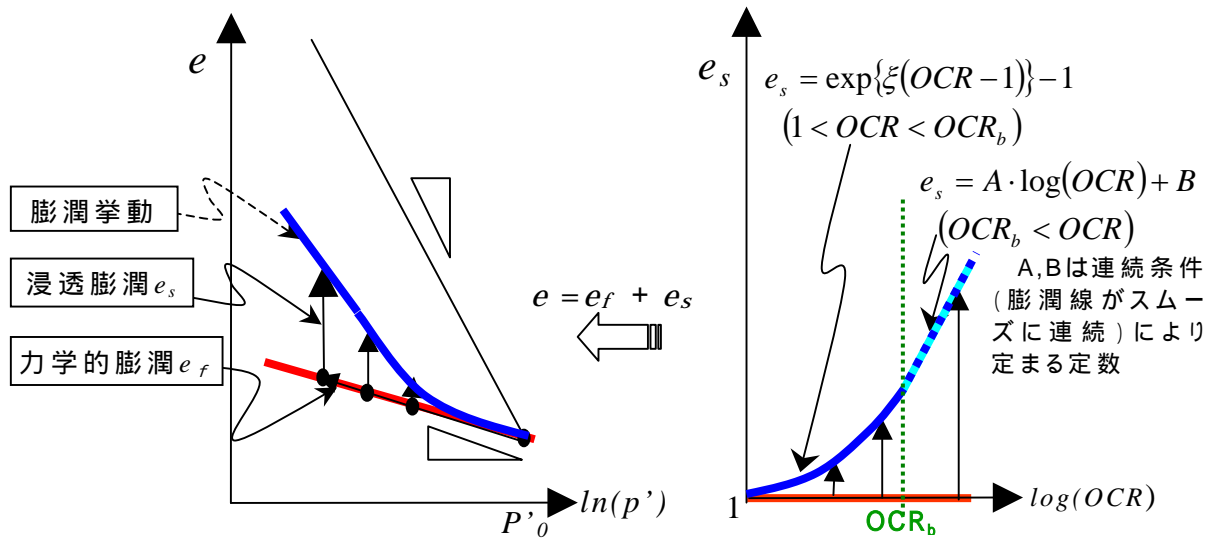


図 1.1-1 ベントナイトの膨潤特性

また透水性に関する評価モデルについても、システム構築と同様の間隙比に基づく式(1.1.3)を基本とした。

$$k = \alpha \cdot e \quad (e: \text{間隙比}) \quad (1.1.3)$$

なお、これらのモデルに必要なパラメータについては、以下のとおりである。

- 圧縮指数 (λ)
- 膨潤指数 (ξ)
- ・非可逆比 ($\alpha = 1 - \lambda / \lambda_0$)
- 浸透膨潤パラメータ (ξ, OCR_b)
- 限界状態パラメータ (M)
- ・ダイランシー係数 ($D = \lambda_0 / (1 + e_0) / M$)
- 初期間隙比 (e_0)
- ・弾性領域のせん断弾性係数 ($G = (1 + e_0) / \lambda_0 \cdot p' \times 3/2(1 - 2\nu') / (1 + \nu')$)
- ・有効ポアソン比 ($\nu' = K_0 / (1 + K_0)$)
- 先行土被り圧 (σ'_{v0})
- 正規圧密状態における静止土圧係数 (K_0)
- 有効上載圧 (σ'_{vi})
- 現在の静止土圧係数 (K_i)
- ・透水係数 ($k = \alpha \cdot e$)
- 透水係数に関わるパラメータ (λ_0, M)

注) " " : 設定が必要なパラメータ

"・" : 他のパラメータより算出されるパラメータ

" " : その他のパラメータ

(1) 先行土被り圧 (σ'_{v0}) については、本研究では膨潤圧が発揮された状態が正規圧密状態と仮定することとし、

$$\sigma'_{v0} = \text{「有効上載圧 (} \sigma'_{vi} \text{)」}$$

と設定

(2)(1)の仮定より、

「正規圧密状態における静止土圧係数 (K_0)」

$$= \text{「現在の静止土圧係数 (} K_i \text{)」}$$

と設定

(3) 有効上載圧 (σ'_{vi})、及び現在の静止土圧係数 (K_i) については、自重、及び膨潤圧計算によって算出された各要素ごとの有効上載圧、静止土圧 (鉛直応力と水平応力の比) として設定することとした。

以上の設定が必要なパラメータ ("○") の具体的な設定値、あるいは評価関係式については、2.1 において検討、設定することとする。なお、本検討においてはオリジナル関口・太田モデルには考慮されている粘性項は以下の理由により考慮していない。今後、必要に応じて導入する予定である。

- ・ 基本的にはセメント系材料の長期的な剛性・強度低下によるベントナイト系材料の膨潤挙動 (除荷) を想定しているため、ベントナイト系材料は弾性域に収まり、粘性項は力学挙動に影響しない。
- ・ 仮にベントナイト系材料が局部的に弾塑性域になっても、概念検討書 (核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会、2000) における圧密沈下解析結果から、二次圧密の影響は小さいと考えられる。
- ・ 化学・水理場変遷挙動評価システムにおける経時的な変遷との連成を考慮すると、力学的変遷挙動評価システムから時間の概念を含む粘性項を除き、時間軸を統一して扱うことが合理的である。

1.1.2 モンモリロナイトの溶解に伴う変形挙動のモデル化

(1)モデル化の方針

ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトは、セメント系材料からの高 pH の浸出液によって溶解し、二次鉱物に変質する可能性がある。この生成二次鉱物の同定には未だ不確実性が残るため、ベントナイト系材料がどのような物性に变化し、それに伴ってどのような挙動をするかは正確に把握することはできない。

本検討においては、以下のような極端な2ケースを考えることによって、評価すべき事象を絞りこみ、その事象を概略評価しうるモデル化を試みた。

二次鉱物はない(モンモリロナイトが溶けるのみ)
生成された二次鉱物の剛性が高く、ケイ砂相当と見なす

を想定した場合、厳密にはベントナイト中のモンモリロナイトとその他の鉱物の比が変わるため物性は変化しうるが、それを無視すれば、間隙比が大きくなるだけであるため、膨潤圧や透水係数以外の圧縮・膨潤指数や限界状態パラメータ等については、大きくは変化しないと考えることが出来る。これらのパラメータは間隙比に依存しないパラメータであるからである。

一方 を想定した場合は、同密度のベントナイト単体とケイ砂混合ベントナイトの特性を比較することで定性的な傾向を捉えることができる。既往のデータ(例えば、笹倉ほか、2002,2003; 戸井田ほか、2005)より、ベントナイト単体に比べケイ砂混合ベントナイトは、

- ・膨潤圧・膨潤量が低い(膨潤性能が低い)
- ・限界状態パラメータ M は同程度、またはやや大きい
- ・圧縮指数は同程度、またはやや大きい
- ・透水係数が大きい

という傾向がある。

ここで、限界状態パラメータ M については、M が増加することは強度が増加することを意味するため、保守性の点から考えても、本研究においてはモンモリロナイトの溶解、及び二次鉱物の生成があっても M は不変(一定)と取り扱うことがよりよいと考えられる。

また圧縮指数 についても、ベントナイト系材料の長期的な卓越挙動が「膨潤挙動」であり、 の長期挙動への影響が小さいと考えられることから、本検討においてはモンモリロナイトの溶解、及び二次鉱物の生成があ

っても は不変（一定）と取り扱うことがよりよいと考えられる。

以上より、 α 、 β の2つの考えた方の双方について共通していえることとして、モンモリロナイトの溶解、及び二次鉱物の生成に伴って生じうる事象は、本検討においては以下の二つに絞りこむこととした。

- A)膨潤性能が低下する
- B)透水係数が増加する

このうち B)については、ベントナイト系材料の力学挙動とは直接関係しないため、単に物性変更（前述の α 、 β 等）を加味するだけで対応が可能であり、具体的にどのような物性変更（モンモリロナイトの溶解に対する透水係数の評価式）を設定するかは2.1にて取り扱うこととする。

一方 A)については、上記同様にベントナイトの膨潤性能を司るパラメータ（ α 、 OCR_b ）を物性変更することに加え（詳細は2.1）、「膨潤圧が低下することによる変形」を評価しうるモデル化が必要となる。これは、モンモリロナイトが溶解することによって、溶解した部分の応力状態が変わり、それに伴い変形が生じると考えられるが、本力学的変遷挙動評価システムが増分形式の解析システムであるため、単に物性を変更するだけではこの変形が表現できないためである。

このモンモリロナイトの溶解に伴うベントナイト系材料に膨潤圧の低下による変形挙動については、以下のような考え方でモデル化を実施することとした。

- モンモリロナイトの溶解に伴い低下した膨潤圧と、低下する前の膨潤圧の差分を要素内側に作用させることによって概略評価する（これまで未考慮だったCa型化による膨潤圧の低下も併せて行う）

(2)モデル化

(1)に示した方針にしたがって、ベントナイト系材料の Ca 型化、及びモンモリロナイトの溶解による膨潤圧の低下に起因する変形挙動を概略評価するためのモデル化を行う。

具体的な計算手順を以下に示す (図 1.1-2 参照)。

1)ある状態において発揮すべき膨潤圧 P_{bal} を、Ca 型化率の程度を表す化学的変遷指標と、モンモリロナイトの溶解の程度を表す化学的変遷指標の関数として定義する。

2)前の解析ステップにおける膨潤圧 $P_{bal(i)}$ と低下後の膨潤圧 $P_{bal(i+1)}$ を 1) で定義した関数から計算し、 $P_{bal(i)}$ と $P_{bal(i+1)}$ の差分の応力 P_{bal} を要素毎に計算する。

$$P_{bal} = P_{bal(i)} - P_{bal(i+1)} \quad (1.1.4)$$

3)当該要素の応力からあらかじめ P_{bal} を等方的に差し引いておく

4)その要素の内側方向に次式によって算出された外力を作用させる

$$\{F\} = \int_V [B]^T \{\Delta P_{bal}\} dV \quad (1.1.5)$$

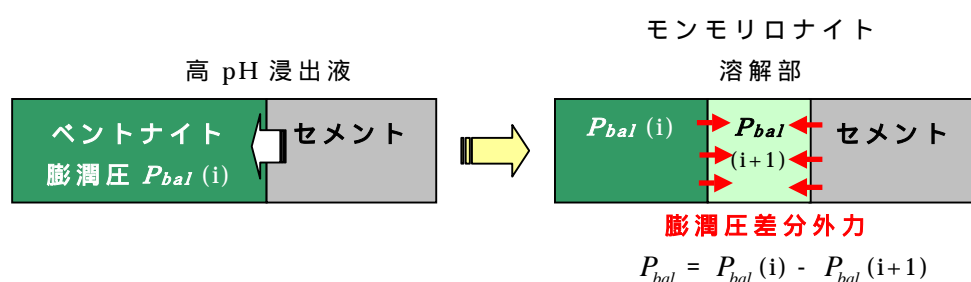


図 1.1-2 膨潤圧低下に伴う変形挙動のモデル化の概念

ここで、1)の

- ・ Ca 型化率の程度を表す化学的変遷指標
- ・ モンモリロナイトの溶解の程度を表す化学的変遷指標

については、次項の「(3)化学的変遷指標」で記載することとし、これらの指標による膨潤圧評価式の構築については、2.1 で取り扱うこととする。

(3) 化学的変遷指標

1) Ca 型化率の程度を表す化学的変遷指標

システム構築 においては、ベントナイトの交換性陽イオンの Ca 型化の程度を示す指標として、下式で示される「Ca イオン含有率」を採用していた。

$$\text{Ca}^{2+}\text{イオン含有率}(\%) : \alpha = \frac{\text{Ca}^{2+}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+} \times 100 \quad (1.1.6)$$

Ca^{2+} : クニゲル V1 に含まれる交換性 Ca^{2+} イオン総量 (meq/100g)

Na^+ : クニゲル V1 に含まれる交換性 Na^+ イオン総量 (meq/100g)

土壌の交換性陽イオン組成を測定する方法として、現在わが国では酢酸アンモニウムを用いて浸出させる方法が標準法となっている。クニゲル V1 の場合、この方法による測定値は、交換性陽イオンと Ca と Mg を主な金属元素とする可溶性塩の溶解によって生じた陽イオンを含んだ値となる (小田ほか, 1999)。

ベントナイトの Ca 型化は主に交換性 Na、交換性 Ca イオン量の変化である。そこで本研究においては、Ca 型化の程度をしめす化学的変遷指標には、交換性陽イオン組成の定量方法による影響が大きい交換性 Ca イオン量を含まず、また土壌学の分野でソーダ質化の指標としても広く用いられている交換性ナトリウム率 (ESP) (足立・岩田編, 2003) を採用した。

$$ESP = \frac{Na}{CEC} \quad (0 \leq ESP \leq 1) \quad (1.1.7)$$

Na : 交換性ナトリウムイオンの当量濃度 (meq/100g)

CEC : 交換性陽イオン容量 (meq/100g)

2)モンモリロナイトの溶解の程度を表す化学的変遷指標

ベントナイト中のモンモリロナイトを高アルカリ溶液によって溶解した試料を用いた膨潤圧試験はあまり実施されていないのに加え、試料中のモンモリロナイトの溶解量を正確に計測することも困難であるのが現状である。

ここで、モンモリロナイトの溶解を有効ベントナイト乾燥密度の低下と読み替えて膨潤圧を評価する、すなわち化学的変遷指標を「有効ベントナイト乾燥密度」としてモンモリロナイトの溶解後の膨潤圧を評価することを考える。ベントナイトの膨潤圧と有効ベントナイト乾燥密度の関係は、評価式がいくつか提案されている。

[Na 型クニゲル V1 / 蒸留水]

$$P = 10^{2.130\gamma_{be} - 3.275} \quad (\text{前田ほか, 1998}) \quad (1.1.8)$$

[Ca 型化クニゲル V1 / 蒸留水]

$$P = 10^{2.451\gamma_{be} - 3.867} \quad (\text{前田ほか, 1998}) \quad (1.1.9)$$

[Na 型クニゲル V1 / 蒸留水]

$$P = \exp(3.8497\gamma_{be}^2 - 7.3332\gamma_{be} + 2.0856) \quad (\text{鈴木ほか, 1999}) \quad (1.1.11)$$

[Na 型クニゲル V1 / 人工海水]

$$P = 3.7952 \times 10^{-5} \exp(6.4482\gamma_{be}) \quad (\text{鈴木ほか, 1999}) \quad (1.1.12)$$

P : 平衡膨潤圧 [MPa]

γ_{be} : 有効ベントナイト乾燥密度 [Mg/m³]

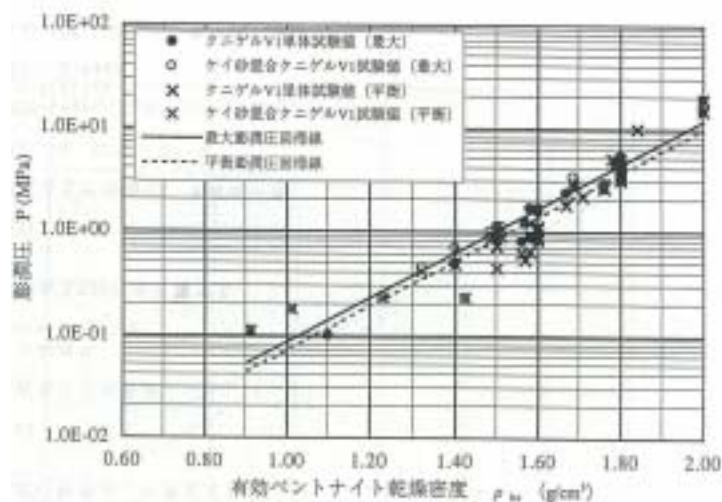


図 1.1-3 有効ベントナイト乾燥密度~膨潤圧関係 (クニゲル V1) [前田ほか, 1998]

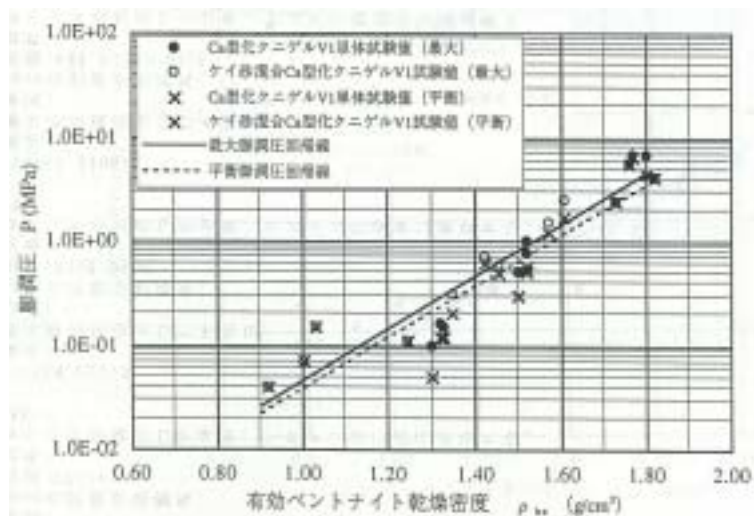


図 1.1-4 有効ベントナイト乾燥密度~膨潤圧関係
(Ca型化クニゲルV1) [前田ほか,1998]

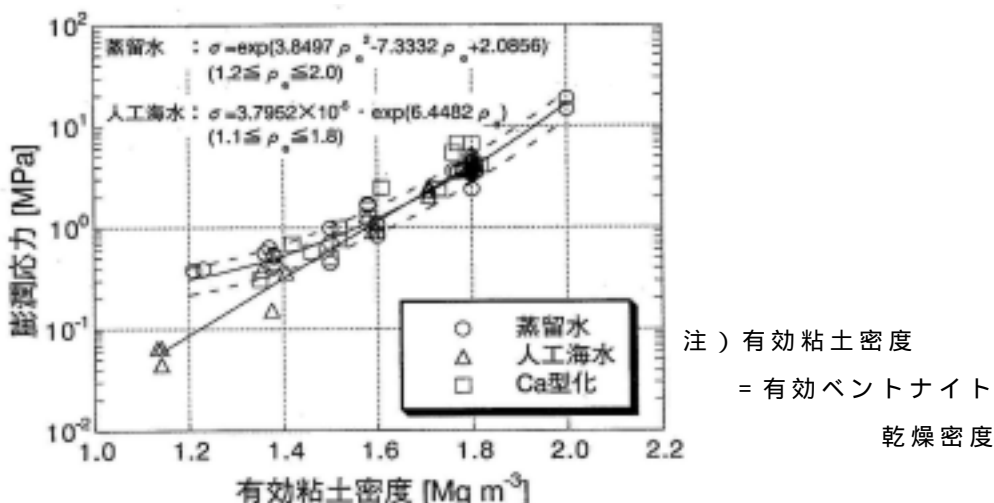


図 1.1-5 有効ベントナイト乾燥密度~膨潤圧関係
[鈴木ほか,1999]

これらを参考に、モンモリロナイトの溶解後の膨潤圧を評価することが可能と考えられる。

しかしながら、システム構築 においても指摘したように、ベントナイトを構成する鉱物のうちモンモリロナイトは 50%程度であり、その他も 50%程度含まれるため、モンモリロナイトがすべて溶解したとしても有効ベントナイト乾燥密度はゼロにはならず、膨潤性能を司るモンモリロナイトがなくても膨潤圧を有する結果となってしまう。

そこで、本検討においては、有効ベントナイト乾燥密度の考え方を参考に、さらに図 1.1-6(c)に示す「スメクタイト部分乾燥密度」という指

標を定義することで、モンモリロナイトの溶解に伴う膨潤圧の評価を行うこととした。ここでスメクタイトとは、モンモリロナイト、バイデライト、ノントロナイト等の粘土鉱物群を総称した名称であるが、クニゲル V1 に含まれるスメクタイトはモンモリロナイトであるため、本検討においては、スメクタイトはモンモリロナイトと同義なものとして取り扱うこととした。

このスメクタイト部分乾燥密度、及び間隙比について、通常の乾燥密度・間隙比と有効ベントナイト乾燥密度・間隙比との関係とともに図 1.1-6 に整理する。

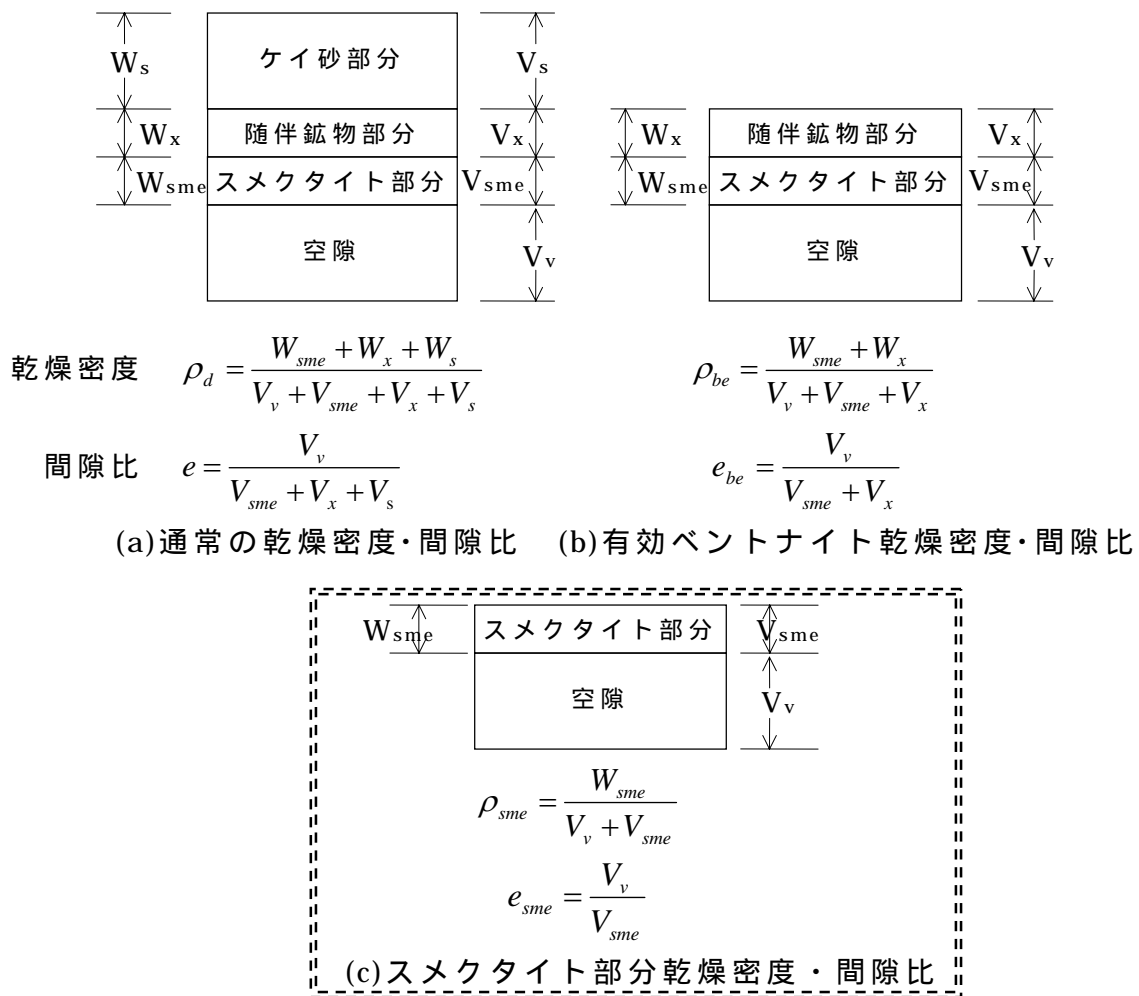


図 1.1-6 スメクタイト部分乾燥密度・間隙比

図 1.1-6 を見て分かるとおり、定義した「スメクタイト部分乾燥密度」とは、ケイ砂やスメクタイト以外の鉱物を除外した、スメクタイトと空隙の体積の和に対するスメクタイトの平均的な乾燥重量であり、スメクタイトが全て溶解すればゼロになる指標である。したがって、前述の有効ベントナイト乾燥密度での評価における問題点は回避でき、かつスメクタイトの量を膨潤圧と直接関連付けられるより有効な指標である。また、「スメクタイト部分空隙比」とはスメクタイトの体積に対する空隙の体積の比である。

以上より、本検討においては、膨潤圧評価式に対するモンモリロナイトの溶解の程度を表す化学的変遷指標として、以下の式で表される「スメクタイト部分乾燥密度」を採用することとした。

$$\text{スメクタイト部分乾燥密度} : \rho_{sme} = \frac{W_{sme}}{V_v + V_{sme}} \quad [\text{Mg/m}^3] \quad (1.1.13)$$

W_{sme} : スメクタイト重量 [Mg]

V_v : 空隙の体積 [m³]

V_{sme} : スメクタイトの体積 [m³]

1.1.3 液相の陽電荷密度の変化に伴う変形挙動のモデル化

(1)モデル化の方針

海水系地下水の浸入や、セメント系材料の溶解等により、ベントナイト中の液相中のイオン濃度、イオン強度、電荷密度等が長期的に変化することが想定される。既往のデータ（例えば、戸井田ほか、2005）や、システム構築において影響を整理した結果によると、イオン強度や陽電荷密度が増加することによって、以下の定性的な傾向がある。

- ・ 膨潤圧・膨潤量が低下する（Na イオン含有率が高いほど影響大）
- ・ 限界状態パラメータ M がやや増加する
- ・ 透水係数が増加する

イオン強度の変化による挙動評価事象についても、1.1.2 と同様の理由により、本検討においては以下の二つに絞りこむこととした。

- A)膨潤性能が低下する
- B)透水係数が増加する

このうち B)については、ベントナイト系材料の力学挙動とは直接関係しないため、単に物性変更（前述の、等）を加味するだけで対応が可能であり、具体的にどのような物性変更（液相の特性に対する透水係数の評価式）を設定するかは 2.1 にて取り扱うこととする。液相の特性変化に伴う膨潤圧の変化による挙動評価については、1.1.2 と同様に取り扱うこととした。

(2)化学的変遷指標

既往の研究においては、ベントナイトの膨潤性能や透水性能に影響を及ぼす液相の特性を表す指標としては、濃度（溶液濃度や模擬海水濃度等）やイオン強度がよく使われている。

一方、2.1 で設定するベントナイトの透水係数の評価式においては、電気拡散二重層理論との兼ね合いに着目し、液相の陽電荷密度を指標として採用している。陽電荷密度は濃度やイオン強度とも相関のある指標である。

以上より本検討においては、膨潤圧の評価においても下式で表される「液相の陽電荷密度」を化学的変遷指標として採用することとした。

$$\text{陽電荷密度} : \rho_c = \sum C_i Z_i \quad [\text{eq/lit}] \quad (1.1.14)$$

C_i : 溶液中の陽イオン i のモル濃度 [mol/lit]

Z_i : 溶液中の陽イオン i の価数

1.1.4 ベントナイト系材料の力学挙動評価モデルのまとめ

ここでは、1.1.1～1.1.3 で述べたベントナイト系材料の力学挙動評価モデルについて、まとめる。

(1)非線形膨潤挙動評価モデル

関口・太田モデルの体積弾性係数 K を、過圧密比 OCR で場合分けをした下式(1.1.1)、(1.1.2)に示す K_s に置換することによって拡張したモデルを適用する。

$$1 \leq OCR \leq OCR_b : \tilde{K}_s = \frac{\kappa}{\xi(OCR)\exp\{\xi(OCR-1)\} + \kappa} \tilde{K} \quad (1.1.1)$$

$$OCR_b \leq OCR : \tilde{K}_s = \frac{\kappa \log_e(10)}{A + \kappa \log_e(10)} \tilde{K} \quad (1.1.2)$$

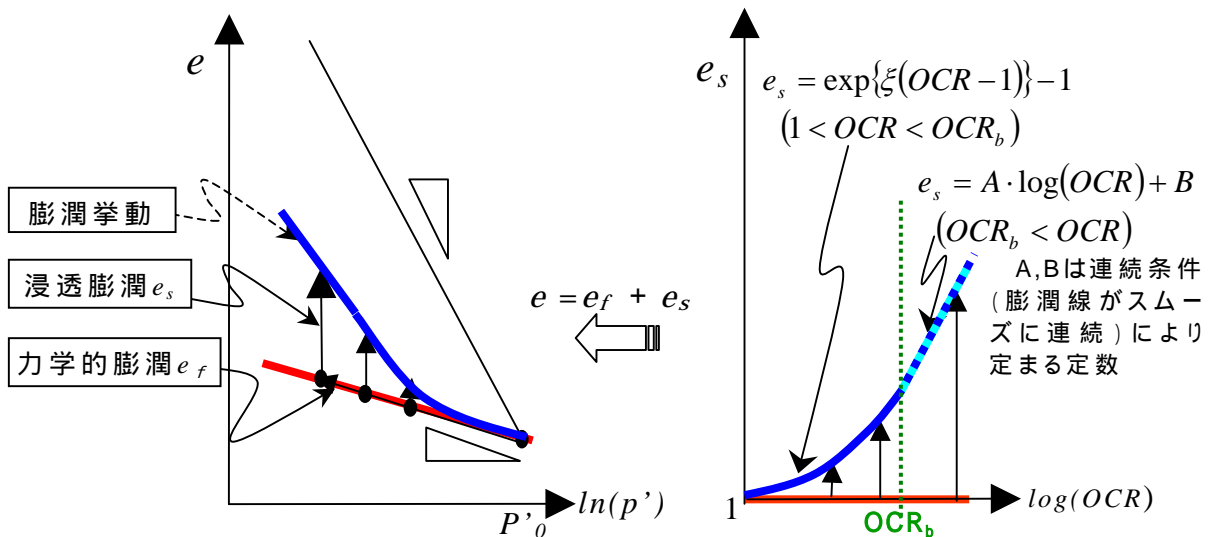


図 1.1-1 ベントナイトの膨潤特性(再掲)

なお、 ξ 、 OCR_b 等のパラメータの化学的変遷指標(前述のESP, $s_{me,c}$)との関連、及びその具体的な設定値、或いは設定評価式については、2.1にて後述する。

(2)膨潤圧の変化に伴うベントナイトの力学挙動評価モデル

陽イオン交換、モンモリロナイトの溶解、及び液相環境の変化に伴い低下した膨潤圧と、低下する前の膨潤圧の差分を要素内側に作用させる。具体的な計算手順とその概念図を図 1.1-7、図 1.1-2 (再掲) に示す。

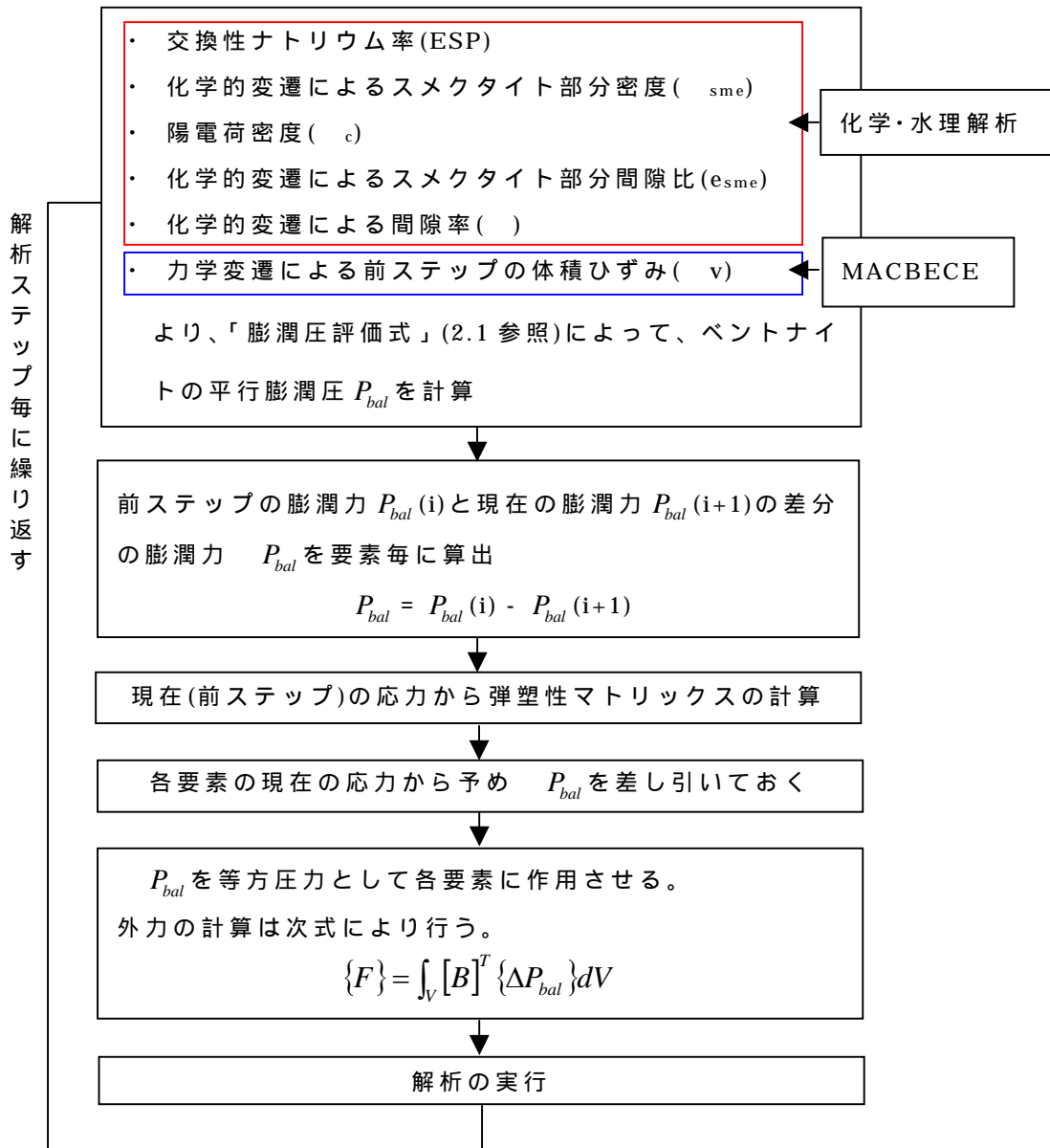


図 1.1-7 膨潤圧の低下に伴う変形挙動の計算フロー

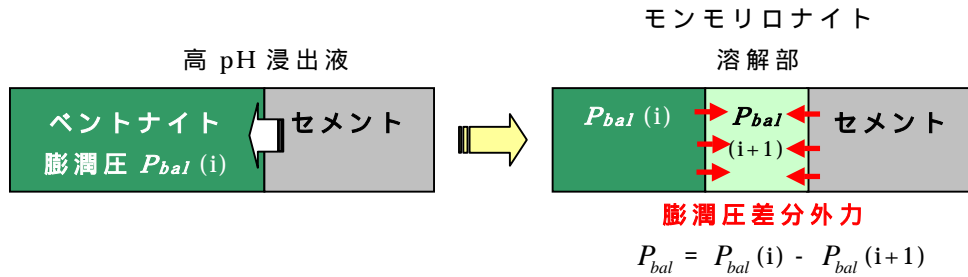


図 1.1-2 膨潤圧低下に伴う変形挙動のモデル化の概念(再掲)

なお、図 1.1-7 における「膨潤圧評価式」については、2.1 において詳細を検討、提示することとする。また、膨潤圧の計算において必要となるパラメータとして、前述の

- ・ ESP：交換性ナトリウム率[-]
- ・ s_{me} ：スメクタイト部分乾燥密度 [Mg/m³]
- ・ c ：液相の陽電荷密度 [eq/lit]

以外に、

- ・ e_{sme} ：スメクタイト部分間隙比
- ・ e ：間隙率

を記載しているが、これらのパラメータは、MACBECE による変形解析によって得られた各要素の体積ひずみ (ϵ_v) から、変形による変化を考慮したスメクタイト部分乾燥密度 (s'_{sme}) を算出するために必要なもので、詳細は 2.1 において記述することとする。

(3) 透水係数評価モデル

システム構築と同様の間隙比に基づく式(1.1.3)を基本とする。

$$k = \alpha \cdot e \quad (e: \text{間隙比}) \quad (1.1.3)$$

ただし、モンモリロナイトの溶解等を考慮する場合、残存するスメクタイト量がより直接的に関与する「スメクタイト部分間隙比」で整理する方が望ましいと考えられるため、本検討においては式(1.1.3)を改良した式(1.1.14)で透水係数を評価することとした。

$$k = \alpha \cdot e_{sme} \quad (e_{sme}: \text{スメクタイト部分間隙比}) \quad (1.1.14)$$

この時、式(1.1.14)の α は、化学的変遷指標 (ESP, s_{me} , c) の関数となるが、具体的な設定値、透水係数評価式については、2.1 において取り扱うこととする。

1.2 岩盤のクリープ変形による影響評価手法に関する検討

ここでは、まず現在想定されている TRU 廃棄物の処分坑道形状、岩盤物性に対して、岩盤クリープ変形量を予備的に解析評価する。この評価結果を受けて、ニアフィールドの長期的な力学挙動評価として考慮すべきクリープ変形量を選定するとともに、有意なクリープ変形が想定される地質環境においても評価可能な解析システムを構築する。

1.2.1 岩盤クリープ変形の定性的評価

岩盤のクリープ変形を表現する構成方程式として、TRU 概念検討書（核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会、2000）や地層処分研究開発第 2 次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）等で採用されている「大久保モデル」を適用し、二次元有限要素法（平面ひずみ）により解析を実施し、クリープ変形量の程度を評価し、またニアフィールドの長期的な力学挙動評価として考慮すべきクリープ変形量を選定する。

(1)大久保モデルの特徴と構成方程式

大久保モデルは以下に示す特徴を有し、現状で最適と考えられる。

- ・ 3次クリープまで表現できる。
- ・ 短期から超長期まで解析が可能である。
- ・ 6つのパラメータを用いるが、いずれも一般的な岩盤試験によって取得できる。
- ・ m_0 、 n_0 の2つのパラメータの設定により脆性から延性までの、硬岩から軟岩までの広範囲に適用できる。

大久保モデルの構成式（大久保ほか、1987）を以下に示す。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\Delta\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m \quad \dots \text{コンプライアンス可変型構成方程式} \quad (1.2.1)$$

$$a = \frac{1}{t_0} \left(\frac{m}{n_0 + 1} \right)^{m/(n_0 - m + 1)} \quad (1.2.2)$$

$$\Delta\varepsilon^* = \lambda^* \cdot \Delta\sigma^* \\ \Delta\sigma^* = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\Delta\sigma_0} \quad \dots \text{破壊限接近度} \quad (1.2.3)$$

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_c \left(1 + \frac{\sigma_3}{\sigma_t} \right)^{0.5} - \sigma_3 \quad \dots \text{Janachの破壊条件式} \quad (1.2.4)$$

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad (1.2.5)$$

・ ・ ・ コンプライアンスの増大に伴うポアソン比の増大

$$n = \left(\frac{\Delta\sigma_0}{\sigma_c} \right) \cdot n_0 \quad \dots \text{周圧による強度増加の効果} \quad (1.2.6)$$

ここで、

- λ^{*} : コンプライアンス(弾性係数の逆数)
- t₀ : 定歪速度試験で歪が ε₀ になるまでの時間
- σ_c : 一軸圧縮強度
- σ_t : 一軸引張強度
- m : 延性の程度を決めるパラメータ
- n : 時間依存性の程度を決めるパラメータ
- n₀ : n の一軸応力下での値

(2)解析条件

1)側圧係数

側圧係数は、地層処分研究開発第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）と同様に次式に従うものとする。

$$K = 163/h + 0.74 \quad (1.2.7)$$

ここに、 K ：側圧係数 h ：処分深度(m)

2)岩盤物性値

表 1.2-1 に解析に適用する岩盤物性値を整理する。大久保モデルのパラメータを除く岩盤物性値は、結晶質岩系岩盤については、地層処分研究開発第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）におけるHR ケース、堆積岩系岩盤についてはSR-B、SR-C、SR-D ケースに対応する。

大久保モデルのパラメータ m 及び n_0 は、以下に記す岩盤の一般的な性質と大久保らによる研究成果（大久保ほか、1997）を総合的に判断して設定した。

表 1.2-1 岩盤物性値

	堆積岩系岩盤			結晶質岩系岩盤
	SR-B	SR-C	SR-D	HR
密度 (Mg/m ³)	2.35	2.20	1.95	2.67
弾性係数 E(MPa)	4000	3500	2500	37000
ポアソン比	0.30	0.30	0.30	0.25
一軸圧縮強度 q_u (MPa)	20	15	10	115
引張強度 t (MPa)	2.8	2.1	1.4	8
大久保モデルパラメータ	n_0	20	20	30
	m	5	5	20

3)解析ケースと内容物（人工バリア）の物性値
各解析ケースと適用する内容物の物性値を示す。

表 1.2-2 解析ケース

Case	掘削径 (m)	岩盤特性	深度 (m)	空洞形状	ポアソン比	内容物剛性 (MPa)	検討項目
1	13.2	SR-C	500	円形	-	0.0(均一)	内容物剛性
2	13.2	SR-C	500	円形	0.4	3.0(均一)	
3	13.2	SR-C	500	円形	0.4	100.0(均一)	
4	13.2	SR-C	500	円形	(表 1.2-3)	劣化後物性 (表 1.2-3)	
5	13.2	SR-B	500	円形	0.4	3.0(均一)	岩種（深度）
6	13.2	SR-D	500	円形	0.4	3.0(均一)	
7	13.2	HR	1000	円形	0.4	3.0(均一)	
8	12.5	SR-C	500	円形	-	0.0(均一)	掘削径 (空洞形状)
9	12.5	SR-C	500	円形	0.4	3.0(均一)	
10	12.5	SR-C	500	円形	0.4	100.0(均一)	
11	12.0	SR-C	500	円形	0.4	3.0(均一)	
12	W12× H18	HR	1000	幌型	0.4	3.0(均一)	

剛性 3MPa、ポアソン比 0.4 は、ケイ砂混合(30wt%混合)ベントナイト（クニゲル V1）の飽和時の値相当 [TRU 概念検討書より]

表 1.2-3 Case4 内容物、各部位の劣化後物性

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
支保工	3000	0.2
インパート コンクリート	3000	0.2
廃棄体定置部	1000	0.2
緩衝材	3.0	0.4

セメント系材料の弾性係数は 2.2 で検討・設定した弾性係数の最小値を丸めた数値とした。

(3)解析モデル図

解析モデルを図 1.2-1、2 に示す。解析領域は、TRU 廃棄物処分概念検討書（共同作業チーム、2000）を参考に決定した。

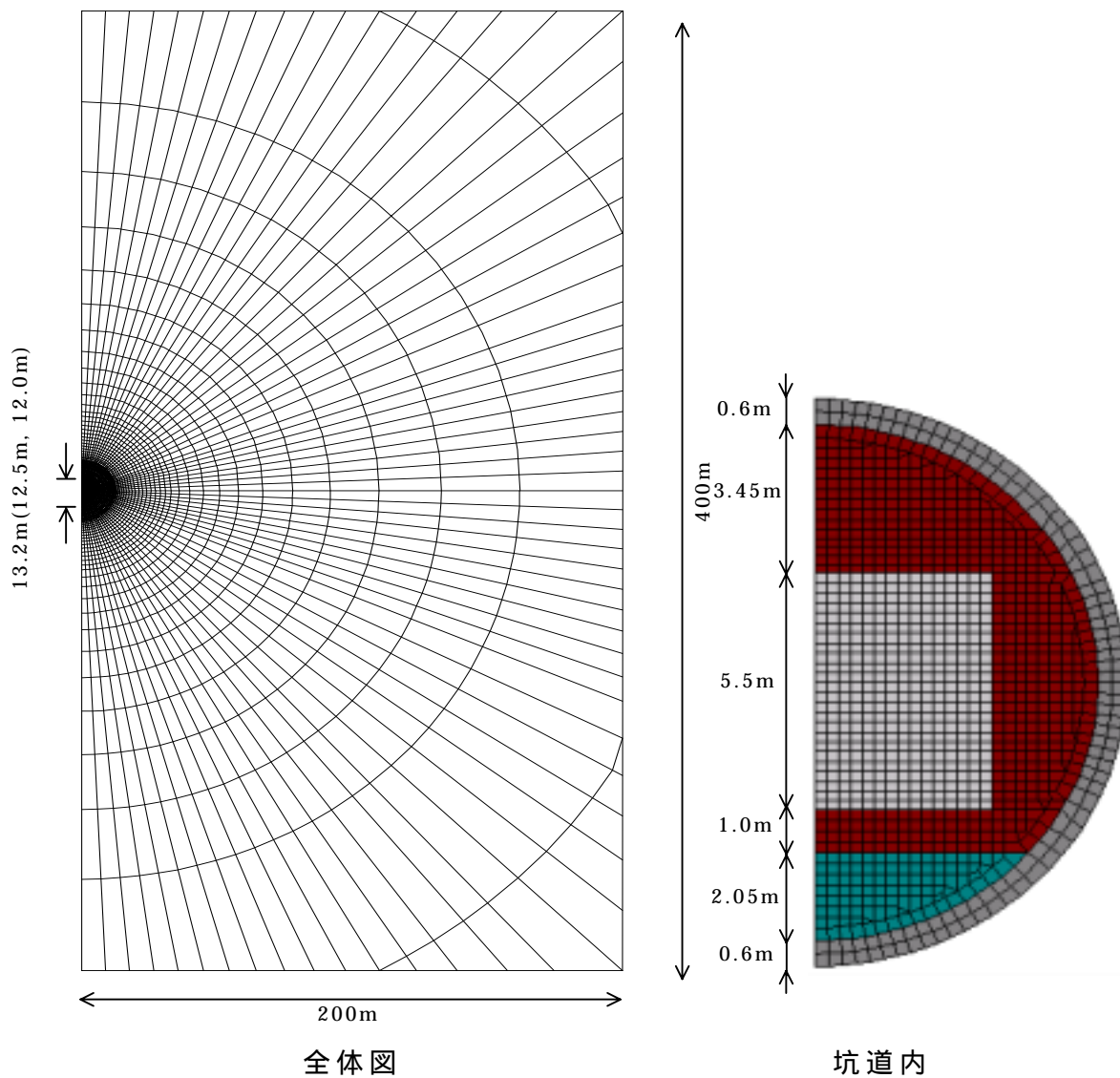


図 1.2-1 クリープ解析モデル（円形坑道）

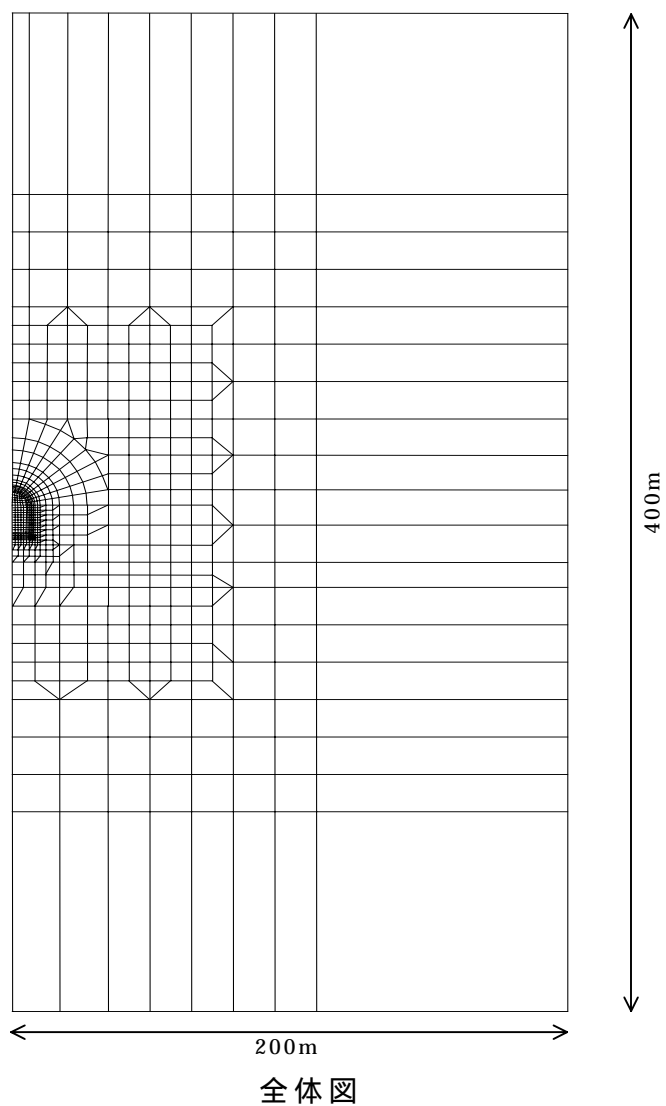


図 1.2-2 クリープ解析モデル（幌形坑道）

(4) 解析結果

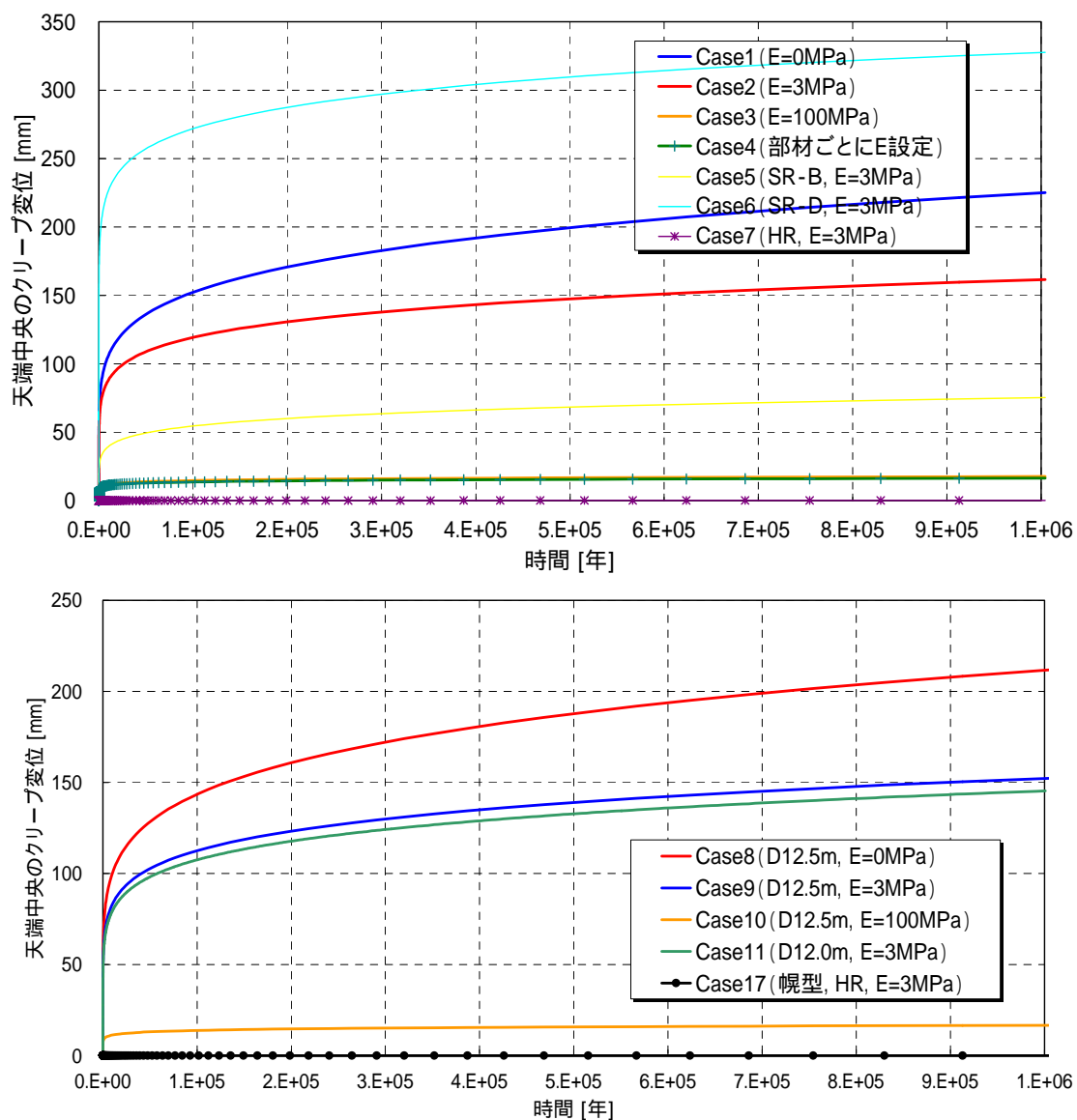


図 1.2-3 クリープ変位量の経時変化（坑道天端中央部）

表 1.2-4 100 万年後のクリープ最大変位量（坑道天端中央部）

Case	最大変位量 (mm)
1	225
2	162
3	18
4	16
5	75
6	328

Case	最大変位量 (mm)
7	0
8	212
9	152
10	17
11	145
12	0

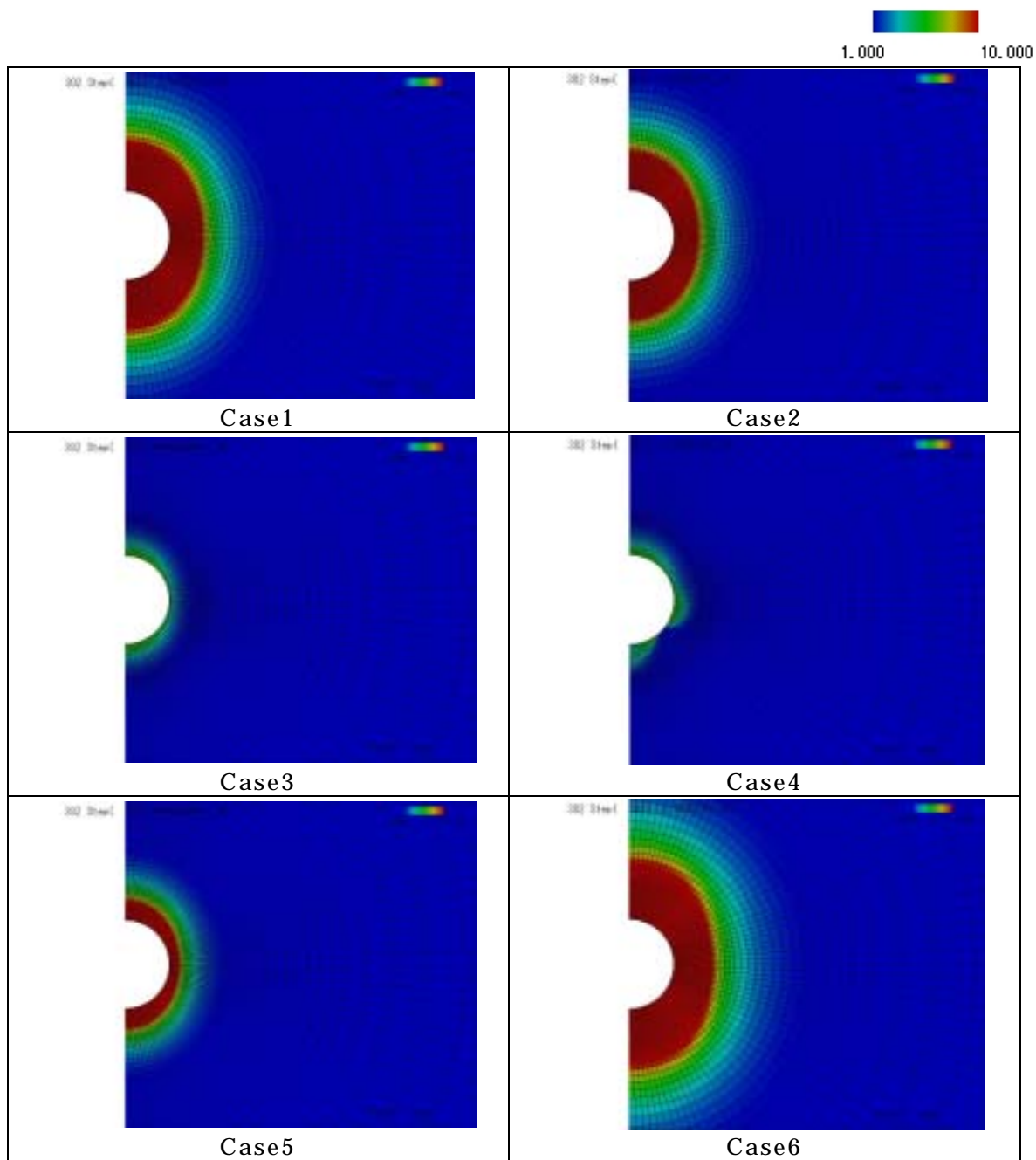


図 1.2-4(a) コンプライアンス比分布 (1/2)

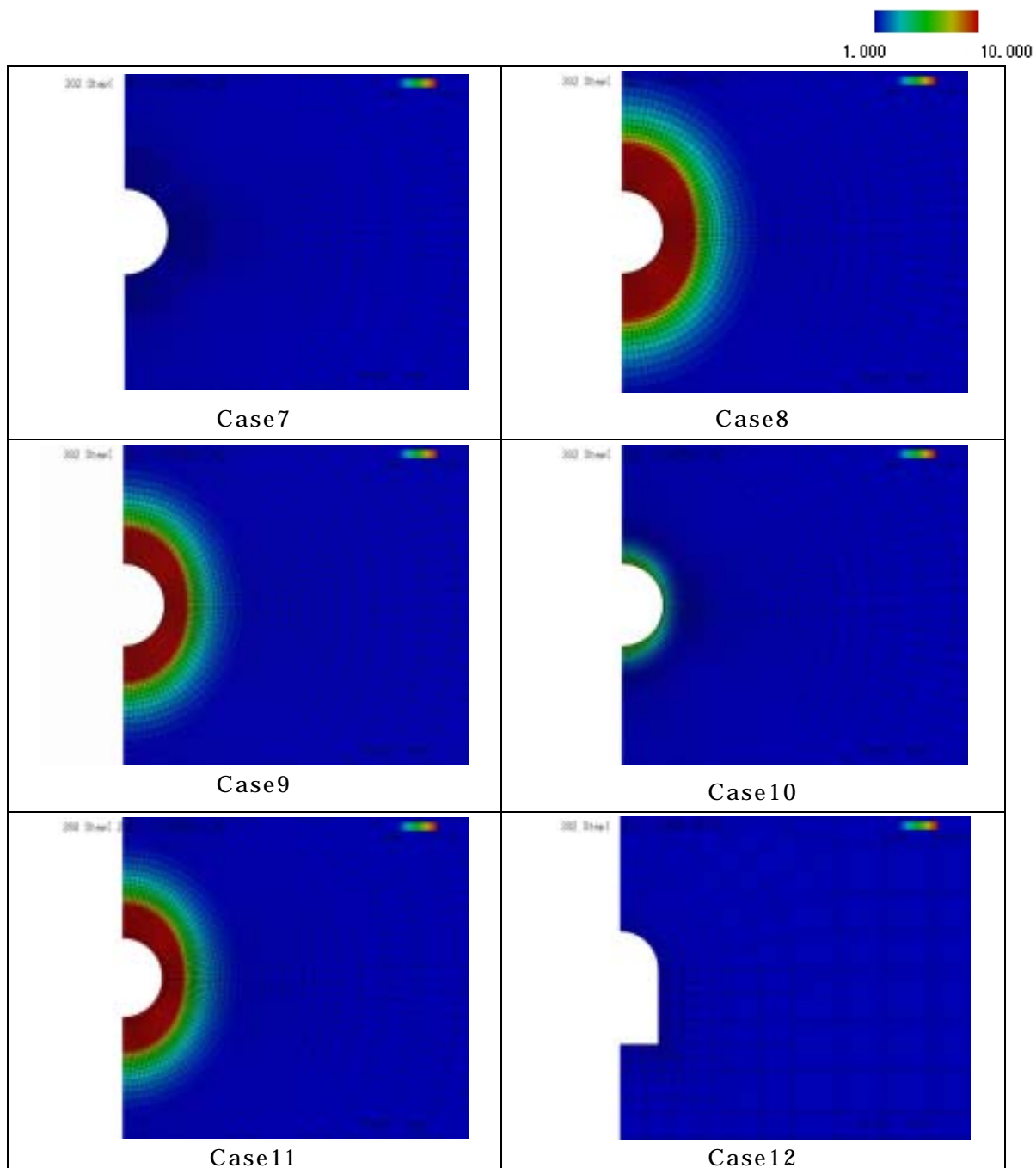


図 1.2-4(b) コンプライアンス比分布 (2/2)

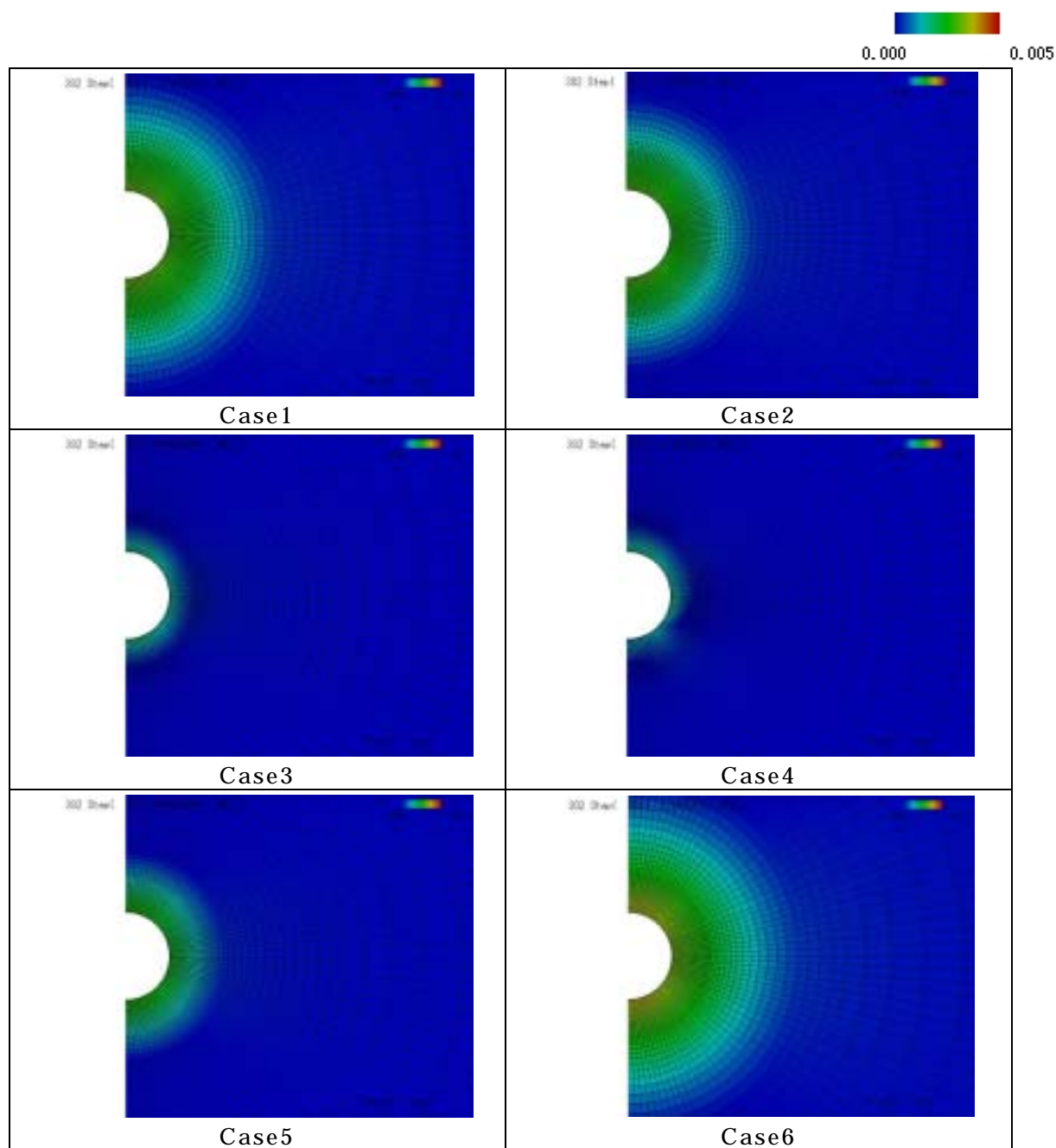


図 1.2-5(a) 体積ひずみ分布 (1/2)

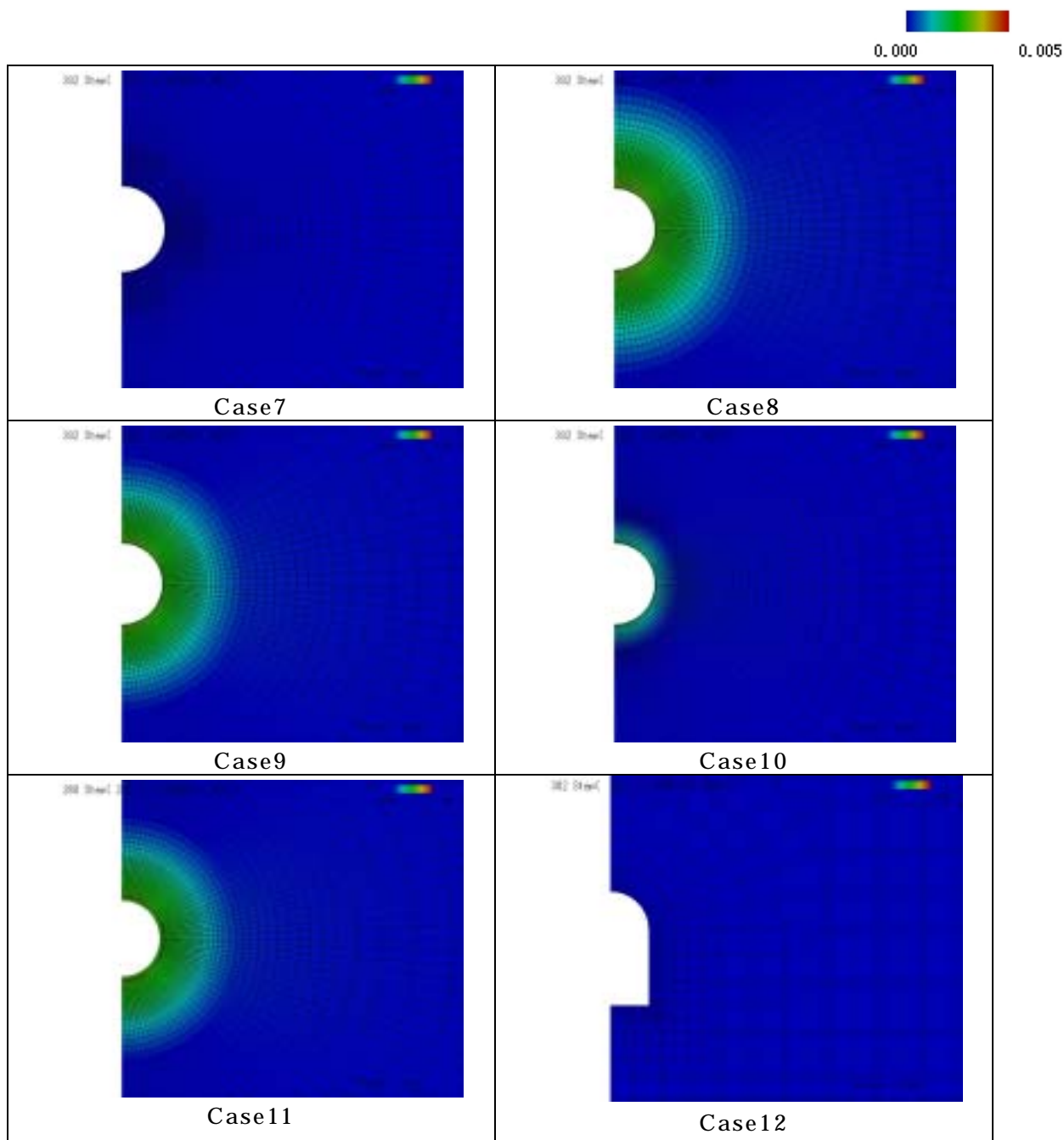


図 1.2-5(b) 体積ひずみ分布 (2/2)

(5) クリープ変形の評価

Case1～Case12の坑道天端中央クリープ変位量の経時変化を図1.2-3に、100万年経過時のクリープ変位量の最大値(坑道天端中央)を表1.2-4に示す。ここで、クリープ変位量とは、トータルの変位量から瞬時(t=0)に掘削した弾性掘削変位を差し引いた値である。

内容物の剛性による比較(Case1～Case4)では、内容物の剛性を3.0MPaとしたケース(Case2)で正規化すると、内容物の剛性を0としたケース(Case1)は約1.39倍、内容物の剛性を100MPaとしたケース(Case3)及び内容物の剛性を劣化後剛性としたケース(Case4)は1/10程度であり、クリープ変位量に大きな差がある。一方、掘削径による比較(Case2、Case9、Case11)では、掘削径13.2m(Case2)と比較して掘削径12.0m(Case11)は0.9倍程度であり、その差は小さい。岩種による比較(Case2、Case5、Case6)では、SR-D(Case6)はSR-C(Case2)と比較して約2倍のクリープ変位であり、検討ケースの中で最も大きな値となった。HRでは円形(Case7)、幌型(Case12)ともにクリープ変位が発生しない結果となった。

100万年経過時のコンプライアンス比分布、体積ひずみ分布をそれぞれ図1.2-4、5に示す。Case2のコンプライアンス比分布を見ると、コンプライアンス比が10以上である範囲は空洞壁面からおよそ掘削半径程度以内となっている。クリープ変位が最も大きいCase6が最もコンプライアンス比の低下領域が大きくなっている。内容物の剛性が劣化後剛性であるCase4と岩種がHRであるCase7、Case12では、コンプライアンス比はほぼ1であり、岩盤の剛性低下はみられない。

体積ひずみ分布は、コンプライアンス比分布に対応した分布域となっており、Case6の最大値で約0.4となっている。

表 1.2-5 100 万年後のクリープ最大変位量の比

Case	最大変位量の比	Case	最大変位量の比
1	1.39	7	0.00
2	1.00	8	1.31
3	0.11	9	0.94
4	0.10	10	0.10
5	0.46	11	0.90
6	2.02	12	0.00

(6)考慮すべきクリープ変形量の選定

本年度の力学的変遷挙動評価において想定している処分システムの諸元を表 1.2-6 に示す。

表 1.2-6 処分システム諸元

対象岩盤	坑道形状	処分深度	掘削径
SR-C	円形	500m	13.2m

この諸元に対応する解析ケースは Case1 ~ Case4 である。内容物の剛性に関しては、本来経時的、空間的に変化・分布するものであるが、そのような設定、解析は現状困難であるため、Case1 ~ Case4 のクリープ変形量から、2.3 における長期力学的変遷挙動解析の評価に用いるクリープ変形量を選定することとした。

この場合の留意点は以下のとおりである。

Case1 では超長期間にわたって坑道内部になにも存在しない結果に該当するため過剰に保守的であり、支保等に劣化後の剛性を用いた Case4 の変形がもっとも現実的であると言える。

Case1 ~ 4 の変形量は、前述のとおり空洞掘削（除荷）直後からの変形量であり、実際は坑道内部を埋め戻すまでに十年以上の期間を有し、また少なくとも支保のコンクリートを打設し、所定の強度を発揮するまでにある程度の変形が進行すると考えられるため、ある時間までの変形量は差し引いた変形を、長期的な変形として考えるのがより妥当である。

堆積岩系岩盤 SR-C の物性値そのものに不確実性が含まれることに加えて、長期的には高アルカリ浸出液等の影響によって岩盤が変質し、より脆弱な物質に変化する可能性もある。

より Case4 がより現実的であり、かつ を考えれば保守的な値であるともいえる。しかしながら を想定した場合、必ずしも保守的とは言い切れない。また、Case1 では のとおり過剰に保守的であると考えられる。（ここで「保守的」とは単にクリープ変形量が大きいことを意味し、長期力学的変遷挙動解析において保守的に結果が得られる、という訳ではない。）

以上のことを鑑み、2.3での解析評価においては、均一な剛性 3MPa(ケイ砂 30wt%混合ベントナイト飽和時相当)を用いた Case2 でのクリープ変形量を用いることとした。MACBECE に入力するクリープ変位の変形図を図 1.2-6 に示す。

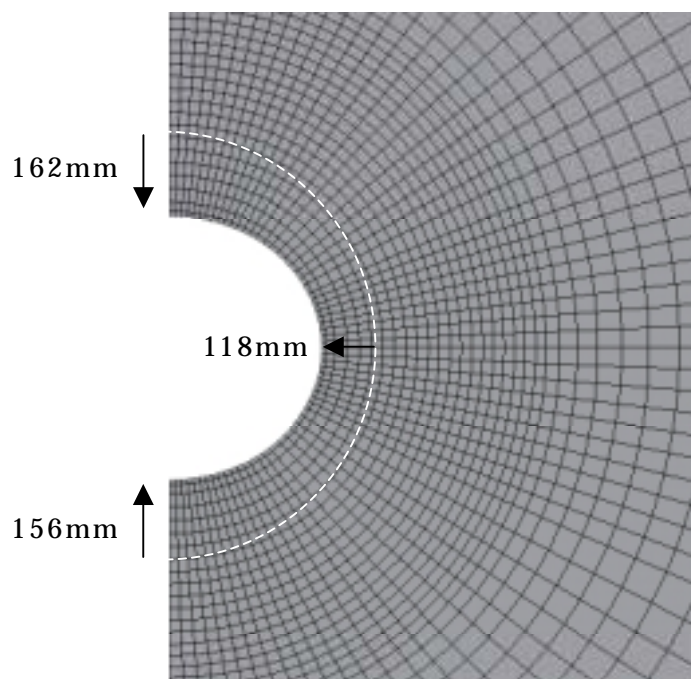


図 1.2-6 長期力学的変遷評価に用いる変形量 (Case2 相当)

1.2.2 岩盤クリープの影響評価手法

(1)MACBECE への導入方法

これまで本研究の対象としていた結晶質系岩盤では、既往の研究から岩盤のクリープ変位はほとんど発生しないとの事から、力学解析システム「MACBECE」では岩盤クリープによる検討は行っていなかった。しかし、対象とする岩盤が比較的脆弱な堆積岩系岩盤では岩盤クリープ量は無視できない。

岩盤クリープを考慮するための基本仕様については、システム構築、において、

- ・ 応力状態や時間スケールなどにとらわれず適用範囲が広いこと
- ・ 試験によりパラメータの同定が簡単であること
- ・ 超長期の解析が容易に行えること

などの理由から大久保モデルについて検討を行っている。また、大久保モデルのシステムへの導入に関する検討では、

- ・ 大久保モデル等を用いた岩盤クリープ解析を別途実施し、本力学的変遷挙動解析システムにその岩盤変位量を強制変位として入力し、ニアフィールド水理場への影響を評価する
- ・ 増分形の大久保モデルを本システムに導入し、連成解析を実施して影響を評価する

の2通りの方法が提案されている。いずれの方法でもシステムへの導入は可能であるが、これまでの研究実績の豊富さから、前者の方法を採用することとした。

(2)MACBECE の改良点

システム構築までに構築された MACBECE には、化学・水理解析との連成解析中に強制変位を入れる機能がなかった。そこで、別途解析した岩盤クリープ解析による変位量をファイルから読み込み、連成解析中にも強制変位を入力できるようにプログラム改良を実施した。

1.3 力学的変遷挙動解析システムの構築

ここでは、1.1、1.2 での検討内容を統合し、TRU 廃棄物処分坑道のニアフィールドの力学的変遷挙動を解析するためのシステム（MACBECE）を構築する。また、試解析を実施しシステムの動作確認（コーディングの確認）を行うとともに、システム中の評価モデル、評価手法に関わる不確実性について検討を加える。

1.3.1 MACBECE の構築

昨年度までに構築した MACBECE について、1.1、1.2 で示した検討内容を評価できるように改良、高度化を行った。高度化した MACBECE の解析フロー図を、図 1.3-1 に示す。大きく改良している点は以下のとおりであり、図 1.3-1 において網掛けしている部分に該当する。

[MACBECE の主な改良点]

- (1) ベントナイトの Ca 型化、モンモリロナイトの溶解、液相の状態変化に伴う膨潤圧の変化に起因する変形を評価できるようにした。
- (2) 岩盤のクリープを強制変位として加えられるように改良し、有意なクリープ変形が生じうる地質環境においても、長期的な力学的変遷挙動を評価できるようにした。
- (3) MACBECE の評価モデルに必要なパラメータに対し、最新のデータ、知見を踏まえて更新したパラメータ値、或いはパラメータ評価式を必要に応じて MACBECE の解析コード内に導入、更新した。

なお、(3)の具体的な内容については 2.2、2.3 において記載することとする。

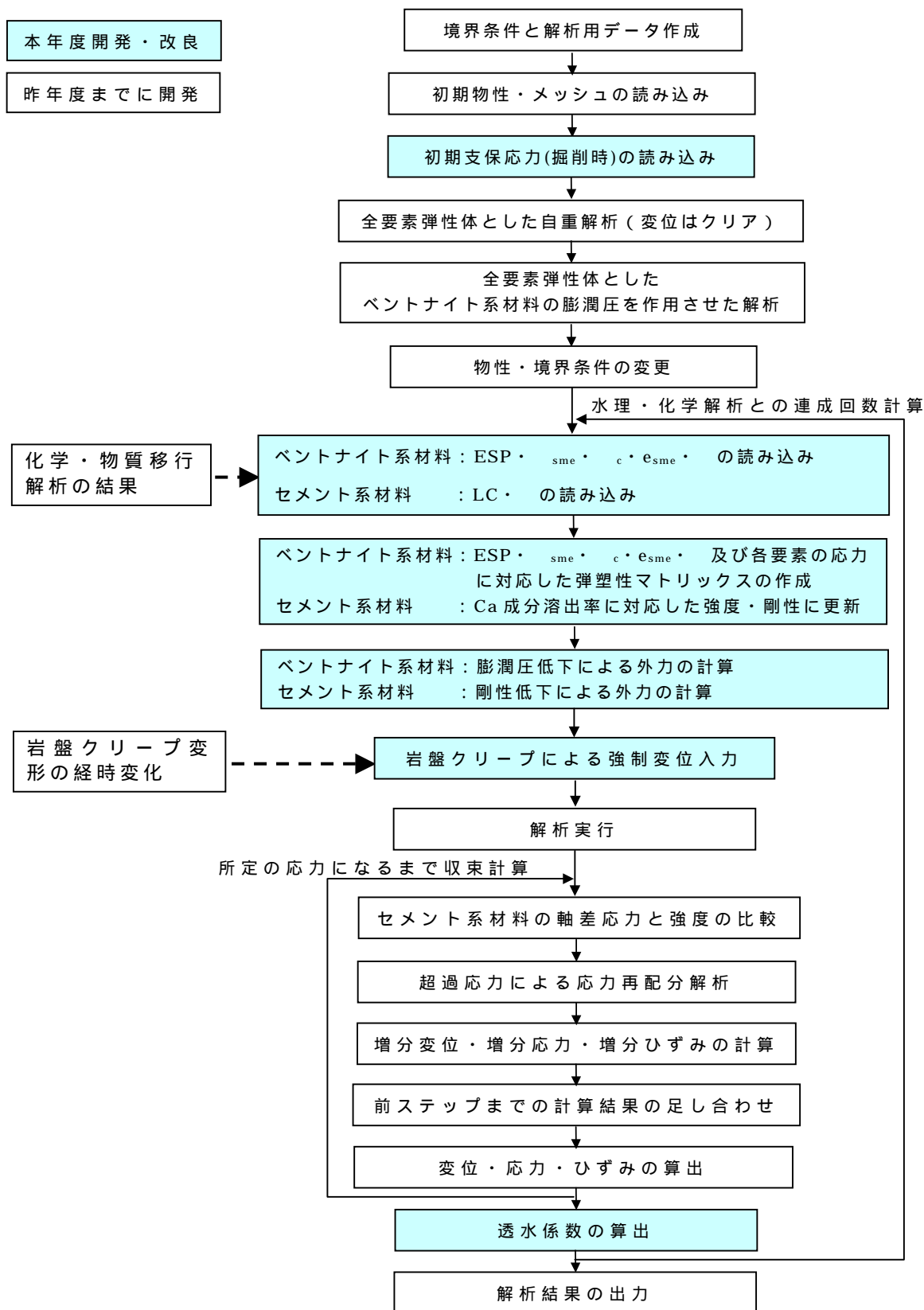


図 1.3-1 MACBECE の解析フロー図

1.3.2 システムの検証

1.3.1で構築したMACBECEを用いて簡易モデルによる検証解析を実施し、システムの動作確認（コーディングの確認）を行うとともに、システム中の評価モデル、評価手法に関わる不確実性について検討した。

(1)ベントナイト系材料単体での検証解析

ベントナイト系材料のみの簡易モデルを用いて、モンモリロナイトの溶解、すなわちスメクタイト部分乾燥密度の低下に伴う変形挙動、応力状態の推移を検証した。

1)解析モデル

図 1.3-2 に示すような簡易的なモデルを用いて計算する。

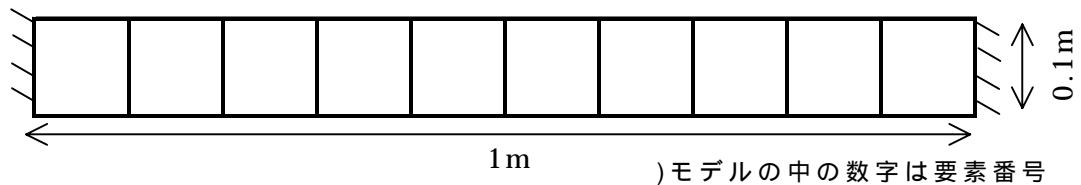


図 1.3-2 簡易検証解析モデル図

2)解析用物性値

緩衝材（30wt%ケイ砂混合ベントナイト，乾燥密度 1.6Mg/m³）に相当する物性とする。表 1.3-1 に解析用物性値を示す。なお、各物性値の設定根拠、評価上の意味合い等については、2.1 を参照するものとする。

表 1.3-1 解析用物性値（ベントナイト系材料：弾塑性材料）

ダイルトン係数 D	非可逆比	初期膨潤指数 o	限界応力比 M	ポアソン比	初期間隙比 e
0.10	0.898	0.0086	0.45	0.42	0.688

3)解析ステップ

表 1.3-2 に解析ステップを示す。なお、解析ステップ 1 において設定している初期応力は緩衝材の膨潤圧に相当するものであり、2.1 において設定している膨潤圧評価式によって算出される膨潤圧である（2.3 参照）。

表 1.3-2 解析ステップ

ステップ	内容
1	初期応力 (0.49Mpa) の入力
2 ~ 101	緩衝材 (ベントナイト系材料) の化学的変遷に伴う変形・応力場の計算

) 2.1 で設定した膨潤圧評価式によって算出した膨潤圧

3) 化学的変遷指標

化学的変遷指標は、表 1.3-3,4、図 1.3-3 に示す初期状態、最終状態を解析上インプットとして設定し、これを 100 分割して逐次解析を行った (解析ステップ 2 ~ 101)。

表 1.3-3 化学的変遷指標の設定値 (初期状態)

	要素番号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
空隙率	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
スメクタイト部分密度 sme(Mg/m3)	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
スメクタイト部分間隙比 esme	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94	1.94
交換性ナトリウム率 ESP	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
陽電荷密度 c(eq/lit)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 1.3-4 化学的変遷指標の設定値 (最終状態)

	要素番号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
空隙率	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
スメクタイト部分密度 sme(Mg/m3)	0.92	0.88	0.84	0.80	0.76	0.71	0.67	0.63	0.59	0.55
スメクタイト部分間隙比 esme	1.94	2.16	2.37	2.59	2.81	3.02	3.24	3.46	3.67	3.89
交換性ナトリウム率 ESP	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
陽電荷密度 c(eq/lit)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

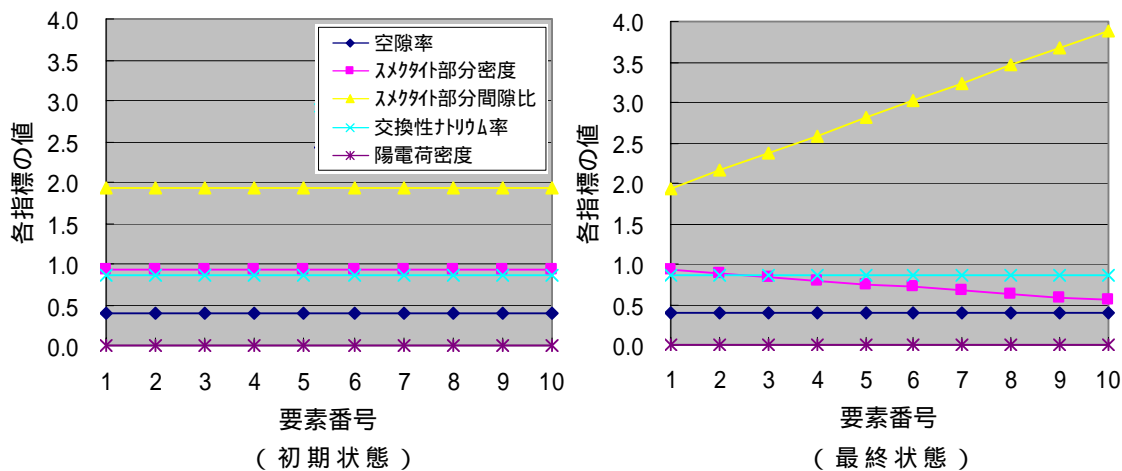


図 1.3-3 化学的変遷指標の設定値

ここでは、

- ・スメクタイト部分乾燥密度
- ・スメクタイト部分間隙比

のみを変化させており、ベントナイトの陽イオン交換や液相の陽電荷密度の変化等に起因する変形は考慮せず、モンモリロナイトの溶解のみによる変形を評価していることになる。解析モデルの左端(要素)はモンモリロナイトは溶解せず、右端(要素)はスメクタイト部分乾燥密度で 0.92 から 0.55 まで溶解するものとし、要素 ~ については要素 と を線形補間することで設定した。

またここでは、空隙率は終始一定、という設定にしており、これはモンモリロナイトが溶けることによって、溶けたモンモリロナイトと同体積の二次鉱物が生成されることを意味するものである。

4)検証解析結果

初期状態、最終状態の変形図を図 1.3-4、5 に、最終状態におけるスメクタイト部分乾燥密度の入力値と解析結果(入力値に変形分の変化量が考慮された値)の分布図を図 1.3-6 に示す。また初期状態と最終状態における各要素の水平方向の応力分布図を図 1.3-7 に示す。



図 1.3-4 変形図(初期状態)

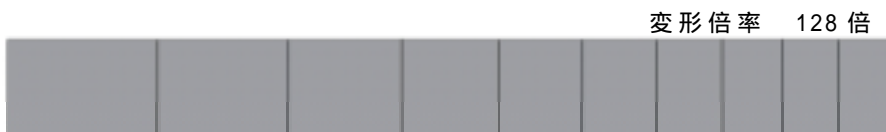


図 1.3-5 変形図(最終状態)

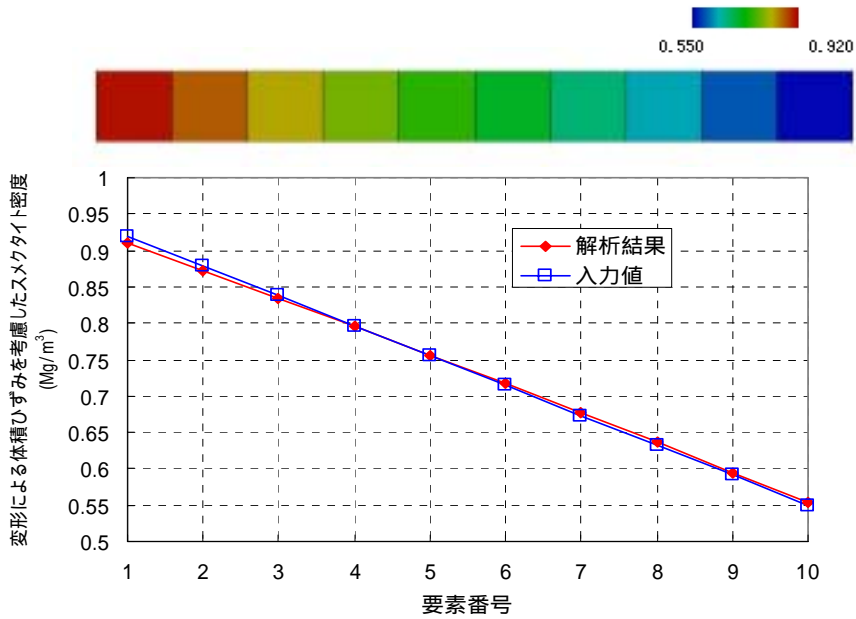


図 1.3-6 スメクタイト部分乾燥密度分布（最終状態）

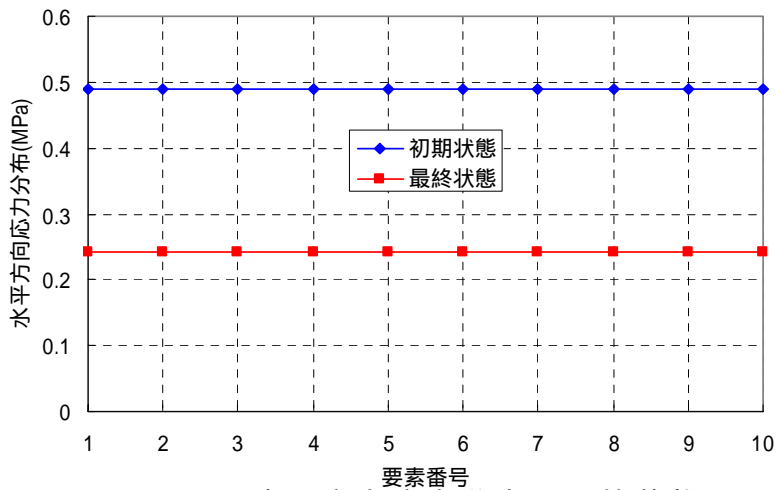


図 1.3-7 水平方向応力分布（最終状態）

5) 考察

図 1.3-4、5 をみると、スメクタイト部分乾燥密度が低下する、すなわちモンモリロナイトが溶解する解析モデル右側の要素方向に変位しており、モンモリロナイトがより多く溶けた要素が圧縮され、あまり溶けない部分が膨潤していることがわかる。この変形モードはモデル化の方針と整合する結果であり、モデル化の方針にそったコーディングになっていると考えられる。

変形量としては、この変形図の変形倍率は 128 倍であり、非常に小さい。図 1.3-6 をみても分かるとおり、入力値として設定したスメクタイト部分

乾燥密度分布と変形による体積ひずみ分を考慮したスメクタイト部分乾燥密度分布ではあまり差がない結果となっている。一方、図 1.3-7 から、水平方向応力は初期応力状態から約 0.25MPa 低下しており、また全ての要素で一様となっている。このことから、スメクタイトが溶解することによって膨潤圧が低下した後も力の釣り合いはとれていることが分かる。

なお変形量が非常に小さいことの妥当性は、MACBECE におけるベントナイト系材料の構成式の不確実性に関わることと考えられることから、「(3)評価モデルの不確実性に関する検討」において詳述することとする。

(2)ベントナイト - セメント共存系での検証解析

ここでは、実際の処分坑道断面により近い断面形状で、化学的変遷指標 (ESP、 s_{me} 、 c) の変遷によるベントナイトの膨潤圧変化、及びそれに伴う変形挙動を解析し、MACBECE のコーディングを確認する。

1)解析モデル

図 1.3-8 に示すような簡易的なモデルを用いて計算する。ここではセメント系材料は弾性材料として取り扱うこととした。

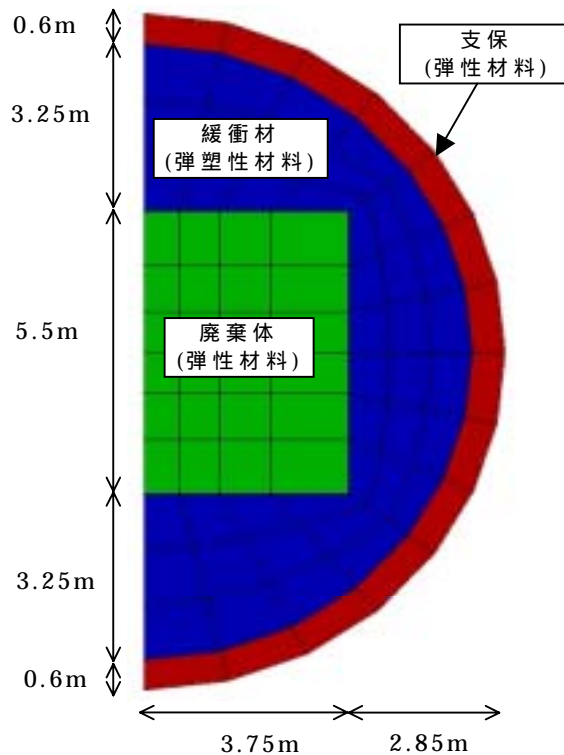


図 1.3-8 検証解析モデル

2)解析用物性値

緩衝材（30wt%ケイ砂混合ベントナイト、乾燥密度 1.6Mg/m³）、廃棄体（モルタル）、支保工（コンクリート）の解析用物性値を表 1.3-5,6 示す。なお、各物性値の設定根拠、評価上の意味合い等については、2.1 を参照するものとする。

表 1.3-5 解析用物性値（ベントナイト系材料[緩衝材]：弾塑性材料）

ダイルトン係数 D	非可逆比	初期膨潤指数 o	限界応力比 M	ポアソン比	初期間隙比 e
0.10	0.898	0.0086	0.45	0.42	0.688

表 1.3-6 解析用物性値

（セメント系材料[廃棄体・支保工]：弾性材料）

	弾性係数 E(MPa)	ポアソン比
廃棄体	1.75 × 10 ⁴	0.20
支保工	3.04 × 10 ⁴	0.20

3)解析ステップ

解析ステップは表 1.3-7 のとおりである。なお、解析ステップ 1 において設定している初期応力は緩衝材の膨潤圧に相当するものであり、2.1 において設定している膨潤圧評価式によって算出される膨潤圧である（2.3 参照）。

表 1.3-7 解析ステップ

ステップ	内容
1	初期応力（0.49MPa）の入力
2～4	ベントナイトの化学的変遷（膨潤力低下）計算

）2.1 で設定した膨潤圧評価式によって算出した膨潤圧

4)化学的変遷指標

検証解析に用いた化学的変遷指標を表 1.3-8 に示す。ここで設定した化学的変遷指標の推移は、(1)の検証解析における設定値と同等のものである。また前述のとおり、ここではセメント系材料を弾性材料として取り扱っており、セメント系材料の化学的変遷については考慮していない。

表 1.3-8 化学的変遷指標の設定値（緩衝材）

STEP	交換性ナトリウム率 ESP [-]	スワイト部分密度 ρ_{sme} [Mg/m ³]	陽電荷密度 c [eq/l]	スワイト部分間隙比 e_{sme} [-]	空隙率 [-]
1	0.85	0.92	0.0	1.94	0.40
2	0.85	0.80	0.0	2.59	0.40
3	0.85	0.67	0.0	3.24	0.40
4	0.85	0.55	0.0	3.89	0.40

5) 検証解析結果

変形図、体積ひずみ分布図、平均応力分布図をそれぞれ図 1.3-9～11 に示す。また緩衝材のある要素について、2.1 で詳述する膨潤圧評価式によって算定される膨潤圧と解析結果による応力の関係を解析ステップごとに比較した図を図 1.3-12 に示す。

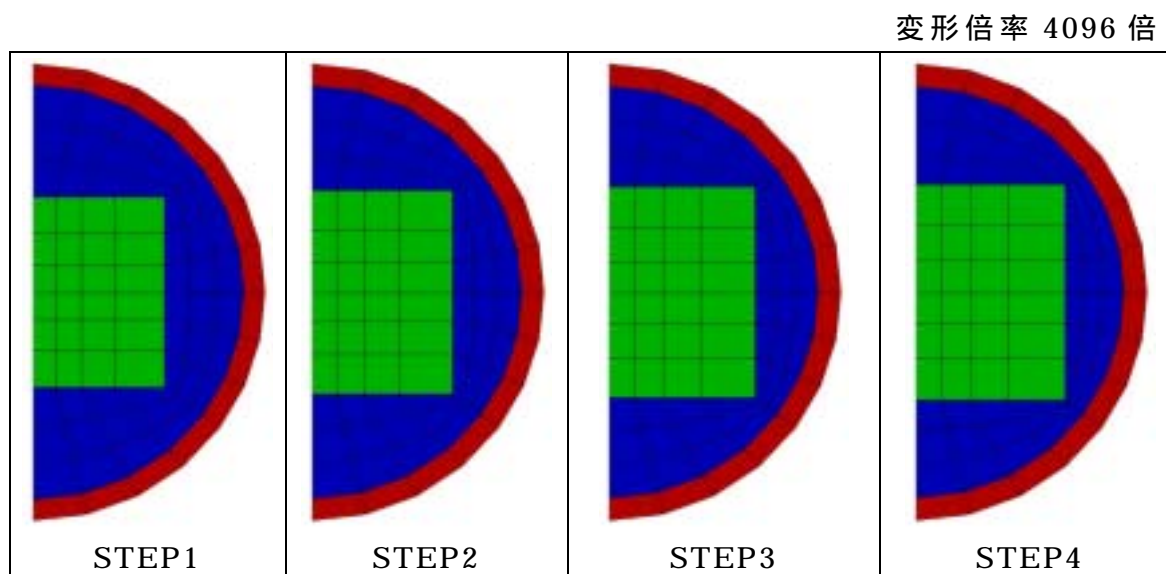


図 1.3-9 変形図

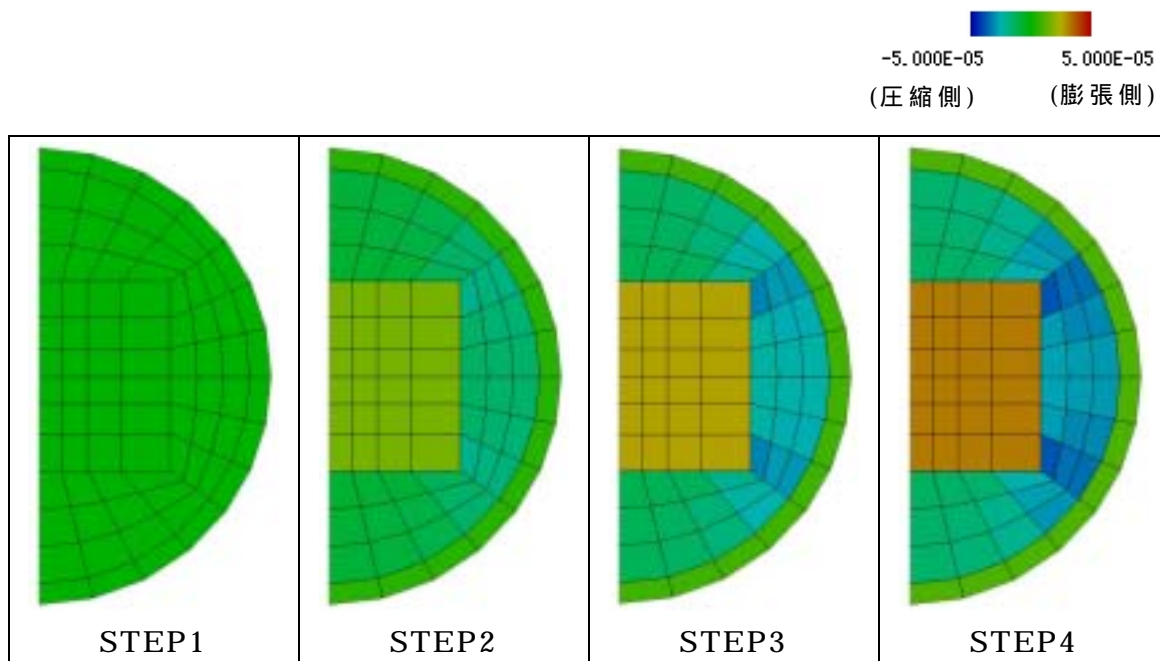


図 1.3-10 体積ひずみ分布図

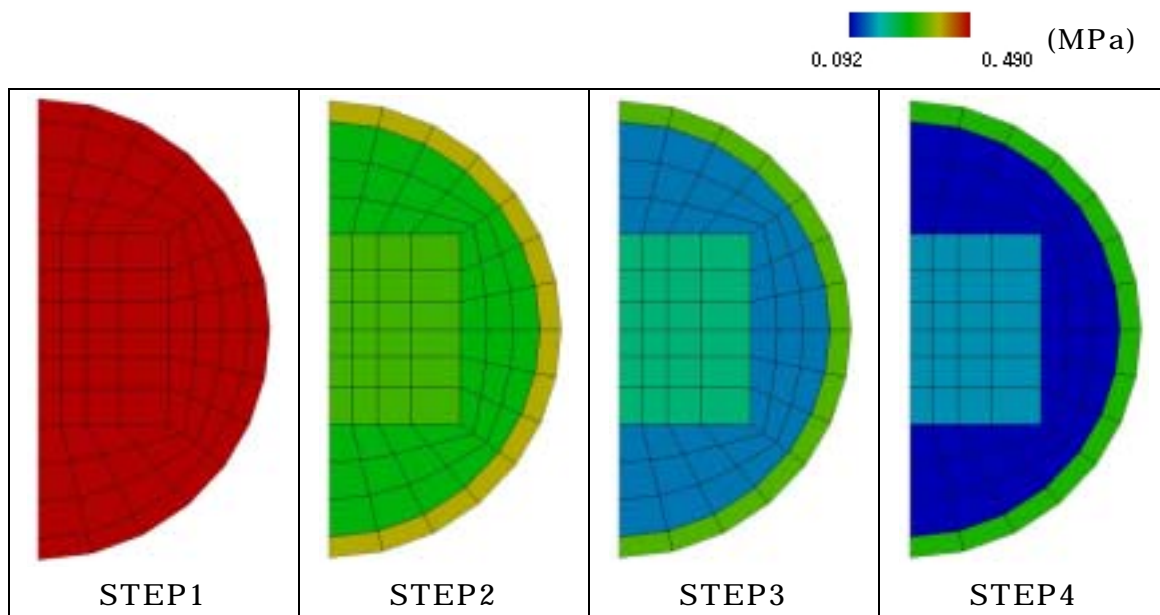


図 1.3-11 平均応力分布図

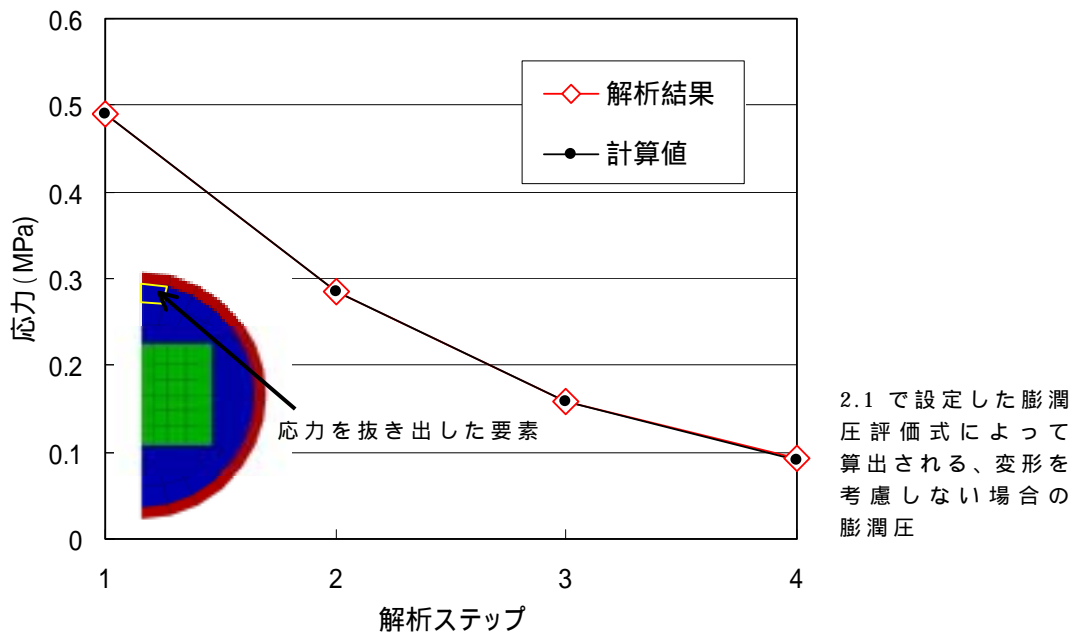


図 1.3-12 緩衝材の平均応力の推移

6) 考察

図 1.3-9、10 を見ると、変形量は微小ではあるが、解析ステップが進むにつれて緩衝材が収縮している様子が分かる。これより、スメクタイト部分乾燥密度の低下によって、発揮しうる緩衝材の膨潤圧が減少し、相対的に収縮しようとする荷重が解析において正常に作用していると言える。これによって、変形挙動に関しては実際の処分坑道断面に近い形状でもモデル化の方針と整合していることが分かる。なお、ここでは緩衝材の膨潤圧を初期応力として与えており、自己膨潤による膨張は考慮していない。

図 1.3-11 では、ステップが進むにつれて、ベントナイト系材料の平均応力が減少する様子がわかる。

また図 1.3-12 に、坑道中央上部の緩衝材要素における平均応力の変遷を示しているが、2.1 で設定した膨潤圧評価式によって化学的変遷指標から算出される、変形を考慮しない場合の膨潤圧とほぼ等しくなっている。要素ごとの応力は周辺要素の拘束効果等によっても変化するが、本解析では変形量が小さいため、変形を考慮しない膨潤圧と緩衝材要素の平均応力がほぼ一致する結果となっている。逆に言えば、このことから 2.1 で詳述する膨潤圧評価式が MACBECE に正常に導入されていることが確認できる。

(3)評価モデルの不確実性に関する検討

ここまで検証してきたように、導入したベントナイト系材料の膨潤圧の変化に対して、変形の方法や膨潤応力に関してはモデル化の方針と整合した結果を得ている。ただし変形量については非常に小さく算定されており、化学的变化による密度変化が変形挙動によって均一化するという事象が実際に起こるとすると、本研究で導入したモデルでは表現することはできないことを意味するものである。

変形によって密度が均一かすることが仮に正しいとすると、これは、モンモリロナイトが溶解することによって「スメクタイト部分乾燥密度」、「空隙率」が変化した場合の物性（剛性）の変化が開発した構成方程式に正確な意味では導入されていないことが理由の一つとして考えられる。

実際にモンモリロナイトを溶解させたような試料を用いた圧密除荷試験結果があれば、その結果に基づいたモデル化を実施すればより現実に近い物性の評価ができると考えられる。しかしながら現状ではそのようなデータはなく、また取得も困難な状況であるため、MACBECEにおいては、2.1で詳述するように、モンモリロナイトの溶解をモンモリロナイトとそれ以外の非膨潤性鉱物（ケイ砂も含む）の比の低下と捉え、その比に対応するケイ砂混合率の膨潤曲線に準じた剛性、すなわち膨潤指数を用いて変形量を計算している。

この膨潤指数は次式によって定義している（2.1参照）。

$$\kappa = \kappa_0 + \xi(OCR) \exp\{\xi(OCR-1)\} \quad [1 < OCR < OCR_b] \quad (1.3.1)$$

$$\kappa = \kappa_0 + \xi(OCR_b) \exp\{\xi(OCR_b-1)\} \quad [OCR > OCR_b] \quad (1.3.2)$$

$$= - (0.0297 \times C_{sand} + 0.0039) \times c - 0.0272 \times C_{sand} + 0.0198 \quad (1.3.3)$$

$$C_{sand} = 1 - 1 / \{C_{sme} \cdot (1 + C_{sx})\} \quad (1.3.4)$$

$$C_{sx} = \frac{G_{sme} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_s} - \frac{G_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}} \right) + \rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_{sme} \cdot \frac{\rho_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}}} \quad (1.3.5)$$

$$OCR_b = \{ - 2.7644 \times ESP + 0.7379 \} \times c + \{ - 15.3017 \times ESP + 5.1977 \} \times C_{sand} + 8.1629 \times ESP + 1.5050 \quad (1.3.6)$$

ここで κ_0 、 C_{sme} 、 C_{sand0} 、 G_{sme} 、 G_s 、 ρ_{d0} は材料定数であり、 ξ は c_{sme} 、 c 及び C_{sand} によって、 OCR_b は ESP 、 c_{sme} 、 c 及び C_{sand} によって変化するパ

ラメータである。

ここでは分かりやすくするため、モンモリロナイトが溶解し、同量の二次鉱物が生成される場合、すなわち ESP、 c_c 及び α は一定で s_{me} のみが低下する場合を想定し、現状における計算過程を模式的に図 1.3-13 に示す。

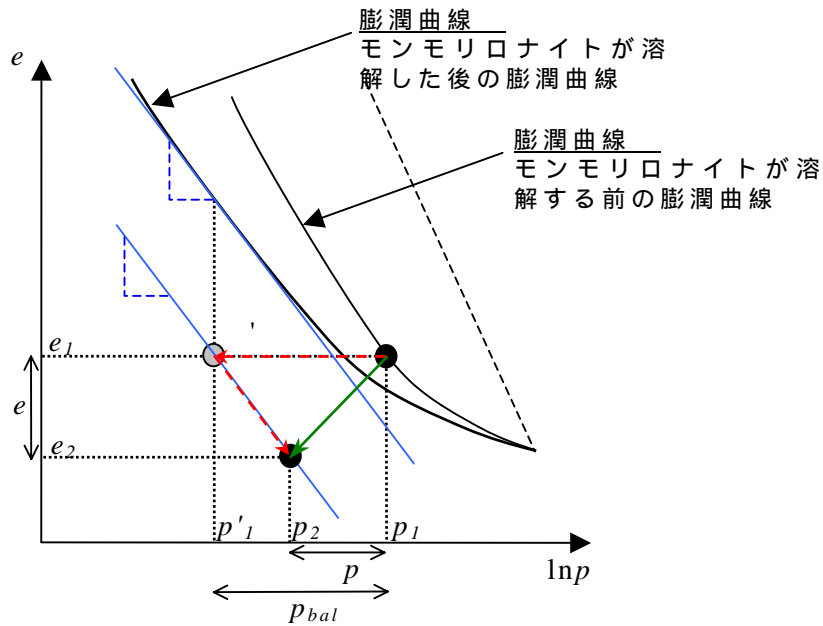


図 1.3-13 e - $\ln p$ 関係上での膨潤圧と間隙比の変遷

モンモリロナイトの溶解によって膨潤圧が低下した場合、図 1.3-13 では (p_1, e_1) から (p_2, e_2) に移動する。すなわち、膨潤圧が低下することによってそれまでバランスしていた外力によって圧縮され、間隙比は e_1 から e_2 に低下し、また応力は溶解前の p_1 から低下し p_2 になる。

これを現状の MACBECE では、便宜的に (p_1, e_1) の順に計算を実行している。 (p_1, e_1) はモンモリロナイトが溶解する前の状態、 (p_2, e_2) は溶解によって (p_1, e_1) の状態から応力（膨潤圧）のみが低下した状態、 (p_1', e_2) は (p_1, e_1) においてバランスしていた外力によって変形（圧縮）した後の状態である。

ここで、 (p_1, e_1) から (p_1', e_2) に移行する際に用いている膨潤指数（ある応力状態に応じたベントナイト系材料の剛性に相当）は、モンモリロナイトが溶解した後の膨潤曲線（膨潤曲線 (p_1', e_2) ）における、溶解によって低下した応力 p_1' における勾配（図 1.3-13 における青線の傾きに相当）を用いている。

前述のとおり、まず膨潤曲線 (p_1, e_1) 自体が便宜上設定したものであり、不確実性を多分に含んでいることに加え、 p_1' の算定についても、2.1 で設定した膨潤圧評価式によって推定した膨潤圧変化量 (p_{bal}) に基づいており、

不確実性を多分に有している。このように、'から'に移行する際に用いている膨潤指数には二重の不確実性が含まれており、この膨潤指数をより正確に評価することで、現状評価できていない密度の均一化挙動が評価できるようになる可能性はある。

一方、化学的变化による密度変化は、変形によって均一化する方向へすすみはするものの、完全には均一化しない、という考察も成り立つ。

例えば、モンモリロナイトの溶解によってベントナイト系材料の膨潤圧が低下した場合、それまでバランスしていた外力によって圧縮され、応力が回復するが(図 1.3-13 ')、図 1.3-14 に示すように応力の回復によって増加するものは膨潤圧のみではなく、土粒子がかみ合う力(以後、力学的応力と称する)も増加する。

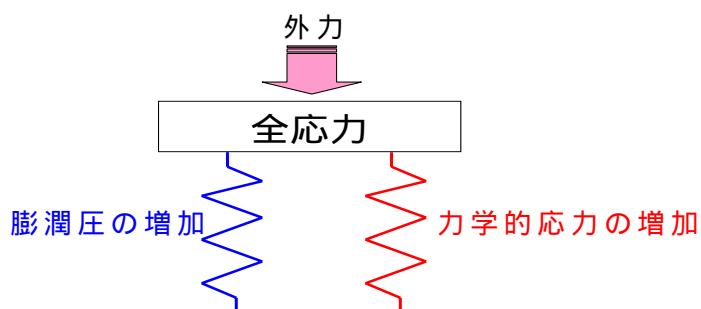


図 1.3-14 ベントナイト系材料の応力の概念図

すなわち、ベントナイト系材料の応力は、膨潤圧と力学的応力の和であり、モンモリロナイトの溶解等によって変形し、最終的に応力はバランスするものの、応力の一部を構成する膨潤圧については均一化し一定になる訳ではない、という考え方が成立しうる。これは、膨潤圧を評価する指標として考えているスメクタイト部分乾燥密度が、変形によって均一化するわけではない、ということの意味するものである。

この概念を分かりやすくするために、図 1.3-15 にベントナイト系材料の要素の一部が、完全にモンモリロナイトを失った場合の変形、スメクタイト部分乾燥密度 s_{me} の推移の模式図を示す。

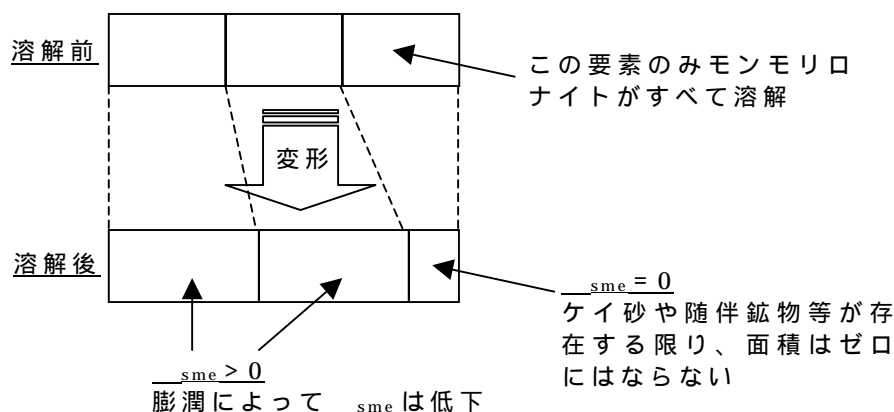


図 1.3-15 ベントナイト系材料の変形、 s_{me} の推移の模式図 (例)

図 1.3-15 における一番右の要素のモンモリロナイトがすべて溶解した場合、溶解していない左方の要素の膨潤圧によって圧縮される。溶解した要素にはモンモリロナイトは存在しないため s_{me} はゼロになるが、ケイ砂や随伴鉱物は残存するため面積がゼロになるようなことはなく、応力がバランスしたところで変形はとまる。この状態は、溶解後応力はバランスしているが膨潤圧は釣り合っておらず、 s_{me} は均一にはなっていない状態である。

このように、化学的变化による密度変化は、変形によって均一化する方向へ向かうものの、完全には均一化しない、ということは十分に考えられる。しかしながら、モンモリロナイトの溶解、変形に伴って、図 1.3-14 における一番右の要素に左方の要素に存在するモンモリロナイトが入り混んでいき、結果的に s_{me} が均一になるといった事象が生じた場合は、この概念は成立しない。

以上のように、化学的变化による密度変化が変形挙動によって均一化するといった事象が今後実験的に確認された場合には、上述した課題を検討する必要がある。

2. 力学的変遷挙動の評価に関する検討

2.1 ベントナイト系材料の力学パラメータの設定

ここでは、1章において高度化、構築された MACBECE に導入されているベントナイト系材料の力学挙動評価モデルに必要な各パラメータについて、既往の研究、及びサイクル機構で実施中の研究成果に基づき、化学的変遷指標との関係を整理し、2.3における解析等で用いる物性値、或いは物性評価式を設定する。

2.1.1 対象となる処分坑道の部位とその仕様

本検討で対象とする処分坑道断面形状は、1章で示した図 1-1(再掲)のとおりである。

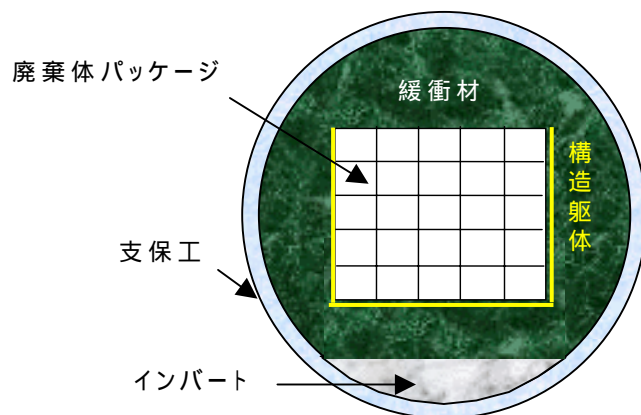


図 1-1 検討対象断面（再掲）

この場合、ベントナイト系材料は緩衝材のみであり、現在想定されている緩衝材の仕様を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 緩衝材の仕様

ベントナイト混合率	ケイ砂混合率	乾燥密度
C_b [wt%]	C_{sand0} [wt%]	ρ_{d0} [Mg/m ³]
70	30	1.6

また、緩衝材の構成材料であるベントナイト、及びケイ砂の諸元については、地層処分研究開発第2次とりまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999）等の既往の文献を参考に、表 2.1-2 のように設定した。

表 2.1-2 ベントナイトとケイ砂の諸元

ベントナイト(クニゲル V1 相当)						ケイ砂
平均的な 比重[-]	スメクタイト 比重[-]	他の鉱物の 平均比重[-]	スメクタイト 含有率[-]	陽イオン交換 容量[eq/l]	交換性 Na ⁺ 総量[eq/l]	平均的な 比重[-]
G _{be}	G _{sme}	G _x	C _{sme}	CEC	Na ⁺	G _s
2.7	2.7	2.7	0.5	60.1	51.4	2.7

※C_{sme}、Na⁺は、初期状態の値

本検討においては、この表 2.1-1 に示した仕様、及び表 2.1-2 で設定したベントナイト（クニゲル V1）、及びケイ砂の諸元に則した物性、及び物性評価式を設定することとする。

2.1.2 化学的変遷指標

1章において記述したように、ベントナイト系材料の化学的変遷指標としては基本的には以下の3つを取り扱うこととし、これらの指標と 2.1.3 に示すパラメータとの関係を整理する。また後述するように、パラメータの設定においては補足指標として「空隙率」も必要となる。

$$\cdot \text{交換性ナトリウム率} : ESP = \frac{Na}{CEC} \quad (0 \leq ESP \leq 1) \quad (1.1.7)$$

Na : 交換性ナトリウムイオンの当量濃度 (meq/100g)

CEC : 交換性陽イオン容量 (meq/100g)

$$\cdot \text{スメクタイト部分乾燥密度} : \rho_{sme} = \frac{W_{sme}}{V_v + V_{sme}} \quad [\text{Mg/m}^3] \quad (1.1.13)$$

$$\text{またはスメクタイト部分間隙比} : e_{sme} = \frac{V_v}{V_{sme}} \quad [-] \quad (2.1.1)$$

W_{sme} : スメクタイト重量[Mg]

V_v : 空隙の体積[m³]

V_{sme} : スメクタイトの体積[m³]

$$\cdot \text{陽電荷密度} : \rho_c = \sum C_i Z_i \quad [\text{eq/lit}] \quad (1.1.14)$$

C_i : 溶液中の陽イオン i のモル濃度 [mol/lit]

Z_i : 溶液中の陽イオン i の価数 [-]

$$\cdot \text{空隙率} : \theta \quad [-]$$

2.1.3 設定すべきパラメータ

1.1 において整理したように、まずベントナイト系材料の膨潤挙動、透水性の評価モデルに必要なパラメータは、以下のとおりである。

- 1) 圧縮指数 [λ]
- 2) 初期膨潤指数 [κ_0]
- 3) 浸透膨潤パラメータ [ξ 、 OCR_b]
- 4) 限界状態パラメータ（限界応力比）[M]
- 5) 初期間隙比 [e_0]
- 6) 透水係数の評価に関わるパラメータ

これに加え、膨潤圧の変化による変形挙動の評価モデルに必要なパラメータ（評価式）として、

- 7) 発揮すべき膨潤圧 [P_{bal}]

がある。

以上の 7 種のパラメータについて、2.1.4 以降、データ整理、検討、及び評価上の設定を行う。

2.1.4 圧縮指数 ()

圧縮指数 λ は圧密試験から得られる e - $\ln P$ 曲線の正規圧密曲線の傾きに対応するパラメータである。

既往のベントナイト系材料の圧密試験（笹倉ほか、2002,2003、並河ほか、1997等）によって得られた正規圧密曲線は、非線形な形状となっているものもある。図2.1.1に示すように、ここでは除荷過程に入る直前の傾きを λ として取り扱うこととした。

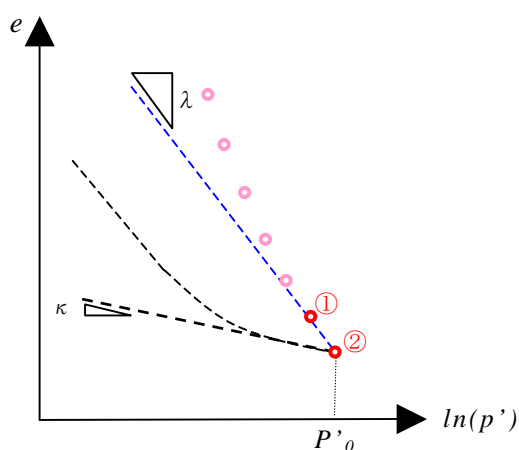


図 2.1-1 実験値の の定義

既往のベントナイト系材料の圧密試験（笹倉ほか、2002,2003等）で取得されたデータから、上記で定義した λ を算出し、整理した結果を表2.1-3に示す。なおここでは、圧密前の初期間隙比の異なる試験結果を同一に取り扱っており、CEC（陽イオン交換容量）や Na^+ （交換性ナトリウムイオンの当量濃度）を測定していない試料については、他のデータを参考に設定した。

表 2.1-3 既往のデータにおける圧縮指数

引用先	ESP [-]	ゲイ砂混合率 [-]	c [eq/l]	P0 [MPa]	Cc [-]	[-]
核燃料サイクル開発機構 (1999) [HLW2次レポート]	0.822	0.0	0.0	19.6	0.2480	0.1076
	0.822	0.0	0.0	19.6	0.2324	0.1008
	0.822	0.0	0.0	19.6	0.0400	0.0174
	0.822	0.0	0.0	19.6	0.1956	0.0849
	0.822	0.0	0.0	19.6	0.1921	0.0834
	0.822	0.0	0.0	19.6	0.2034	0.0883
	0.822	0.3	0.0	19.6	0.1806	0.0784
	0.822	0.3	0.0	19.6	0.1991	0.0864
笹倉ほか (2002)	0.822	0.0	0.0	10.24	0.2922	0.1268
	0.822	0.0	0.0	10.24	0.3055	0.1326
	0.822	0.0	0.0	10.24	0.3289	0.1427
	0.822	0.0	0.0	10.02	0.3739	0.1623
	0.822	0.0	0.0	10.24	0.3554	0.1543
	0.822	0.0	0.0	10.24	0.3488	0.1514
	0.822	0.0	0.0	10.04	0.4309	0.1870
	0.822	0.0	0.0	10.04	0.4468	0.1939
	0.122	0.0	0.0	10.24	0.1528	0.0663
	0.122	0.0	0.0	10.04	0.1993	0.0865
	0.122	0.0	0.0	10.24	0.2890	0.1254
	0.122	0.0	0.0	10.04	0.2624	0.1139
	0.122	0.0	0.0	10.24	0.2957	0.1283
	0.122	0.0	0.0	10.04	0.3123	0.1355
	0.122	0.0	0.0	10.04	0.4458	0.1935
0.122	0.0	0.0	10.04	0.3942	0.1711	
笹倉ほか (2003)	0.457	0.0	0.0	10.24	0.3454	0.1499
	0.457	0.0	0.0	10.24	0.3387	0.1470
	0.457	0.0	0.0	10.24	0.1926	0.0836
	0.457	0.0	0.0	10.24	0.3454	0.1499
	0.457	0.0	0.0	10.24	0.3919	0.1701
	0.457	0.0	0.0	10.24	0.3852	0.1672
	0.457	0.0	0.0	10.24	0.4450	0.1931
	0.457	0.0	0.0	10.24	0.4118	0.1787
	0.822	0.0	0.0	40.96	0.5646	0.2450
	0.822	0.0	0.0	40.96	0.4782	0.2075
	0.457	0.0	0.0	40.96	0.4052	0.1758
	0.457	0.0	0.0	40.96	0.3985	0.1730
	0.122	0.0	0.0	40.96	0.5446	0.2364
	0.122	0.0	0.0	40.96	0.4782	0.2075
	戸井田ほか (2005)	0.822	0.5	0.0	10.24	0.2125
0.822		0.5	0.0	10.24	0.1129	0.0490
0.822		0.5	0.0	10.24	0.2125	0.0922
0.822		0.5	0.0	10.24	0.1063	0.0461
0.122		0.3	0.0	10.24	0.2325	0.1009
0.122		0.3	0.0	10.24	0.1461	0.0634
0.122		0.3	0.0	10.24	0.2524	0.1095
0.122		0.3	0.0	10.24	0.1395	0.0605
0.912		0.0	3.0	10.24	0.2457	0.1067
0.912		0.0	3.0	10.24	0.2790	0.1211
0.912		0.0	3.0	10.24	0.2524	0.1095
0.912		0.0	3.0	10.24	0.2856	0.1239
0.145		0.0	3.0	10.24	0.2192	0.0951
0.145		0.0	3.0	10.24	0.2457	0.1067
高治ほか (2004)		0.822	0.3	0.8	19.60	0.1548
	0.822	0.3	0.2	19.60	0.3594	0.1560
	0.822	0.3	0.212	19.60	0.1770	0.0768

※ $\lambda = 0.434 \cdot Cc$

(1)ESP の影響

システム構築Ⅲと同様に、まずデータが多数あるベントナイト単体試料、蒸留水を用いた圧密試験から得られた圧縮指数 λ とESPの関係を整理する。表2.1-3で対象となるデータについて、横軸にESP、縦軸に λ をプロットした図を図2.1-2に示す。

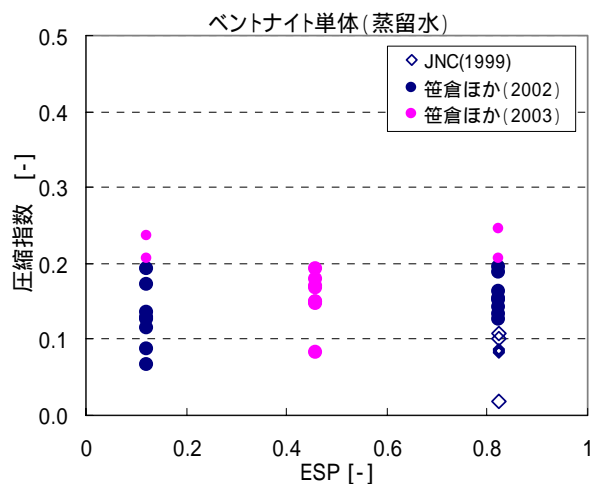


図 2.1-2 ESP と圧縮指数 の関係 (ベントナイト単体)

これを見る限り、ESP の変化に伴う λ の増減の傾向はあまり見受けられない。

ここで λ のバラツキについて検討を加える。図 2.1-3 に、既往の研究(飯塚、1988)において整理された、様々な粘性土の圧縮指数 λ と塑性指数の関係を示す。

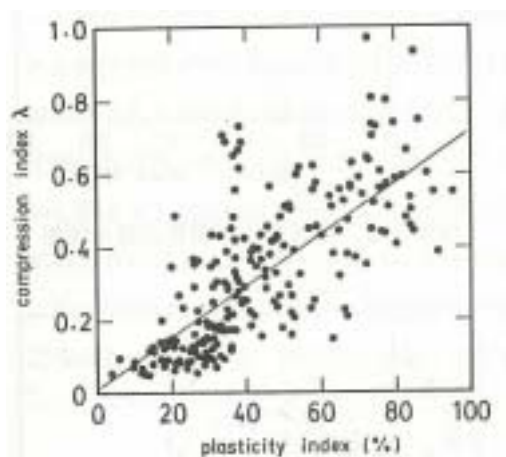


図 2.1-3 圧縮指数 と塑性指数の関係 (飯塚、1988)

これを見ると、同じ塑性指数の粘性土においても λ は 0.5 程度の幅でバラツキがある。図 2.1-2 に示した λ の分布は、同じ ESP で見た場合、基本的には同じ材料でのバラツキを見ていることになるので、図 2.1-3 とは本質的には比較できるものではないが、 λ は 0.5 程度の幅でバラツキが生じる可能性がある値であることが推察される。

これに加え、正規圧密曲線が非線形な場合については、前述の λ の定義

の考え方では、データの取得間隔によっても λ の値が変わることになる。

以上のことを鑑みると、データのバラツキを考慮すれば、圧縮指数 λ はESPによらずほぼ一定と考えることができる。

次にケイ砂が混入した場合について、ケイ砂 30wt%混合ベントナイト試料、蒸留水を用いた既往の圧密試験から得られた圧縮指数 λ とESPの関係を整理する。表 2.1-3 で対象となるデータについて、横軸にESP、縦軸に λ をプロットした図を図 2.1-4 に示す。

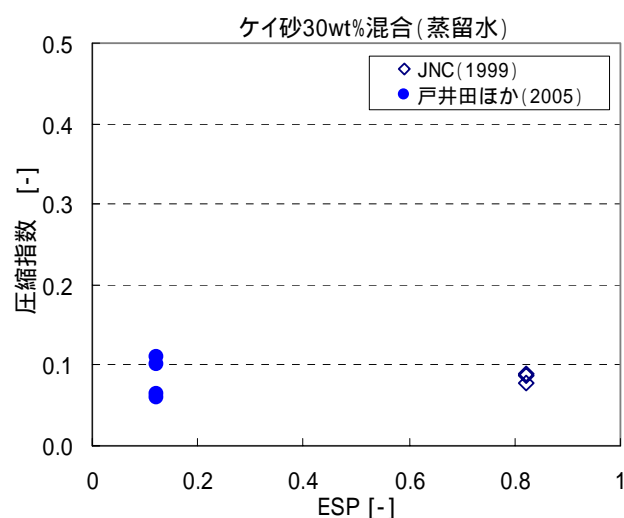


図 2.1-4 ESP と圧縮指数 の関係 (ケイ砂 30wt%混合)

これを見る限り、ケイ砂混合ベントナイトについてもデータのバラツキを考慮すれば、 λ はESPによらずほぼ一定と考えることができる。

以上より、圧縮指数 λ はESPによらず一定値をとると考えることができる。

(2) ρ_{sme} の影響

ρ_{sme} は 1 章で述べたとおり、モンモリロナイトの溶解という現象に対する力学パラメータの変遷を評価するための化学的変遷指標であり、本来であれば実際にモンモリロナイトが溶解した試料での実験から、その影響評価をすべきである。しかしながらそのようなデータは未だなく、また実施できる見通しもないため、ケイ砂の混合率によって相対的に ρ_{sme} が異なる試料の λ を比較することによって検討を加える。

表 2.1-3 のデータのうち、Na 型相当、及び Ca 型化相当のベントナイトに対して、蒸留水を用いて取得された λ を、ケイ砂混合率を横軸に整理した図を図 2.1-5 に示す。

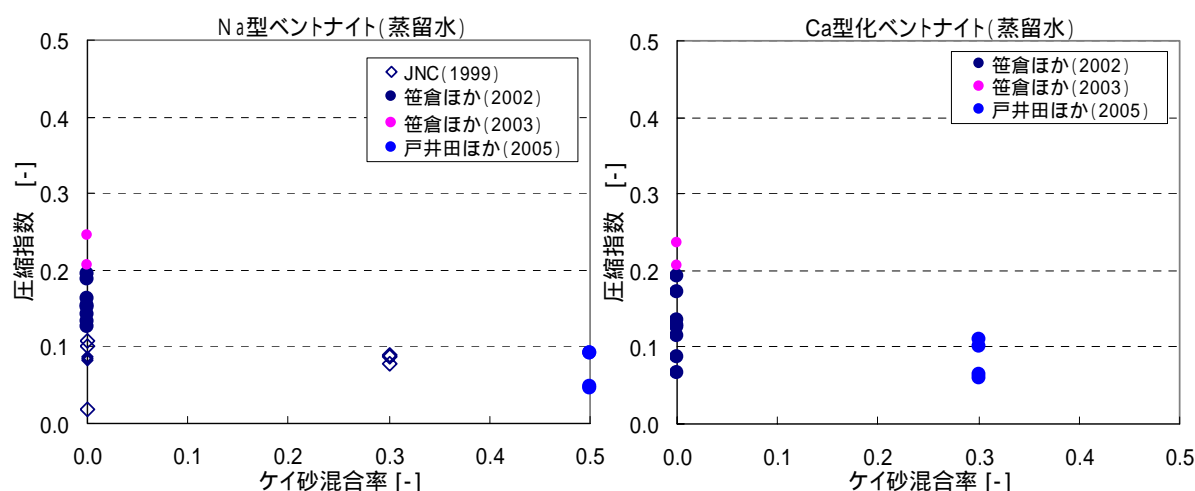


図 2.1-5 ケイ砂混合率と の関係（左：Na 型、右：Ca 型化）

図 2.1-5 を見ると、ベントナイトの ESP によらず、ケイ砂の混合率が增加するにつれて、 λ が減少する傾向があることがわかる。

λ が減少するという事は、応力の変化に対する間隙比 e の変化割合が小さくなる、すなわち正規圧密状態におけるベントナイトの剛性が増加することを意味する。粘土系の材料に、より剛性の高いケイ砂が混入されることを考えれば、十分予想可能な傾向である。

しかしながら、実際にモンモリロナイトの溶解に伴い生成される二次鉱物の性質は現状の知見では不確実性が大きい。それが剛性の高い物質であれば全体の剛性が上がることも考えられるし、二次鉱物ができないと考える場合も、もともと緩衝材にケイ砂が混入されていることを考えれば、モンモリロナイトが溶解することによってベントナイトの量が減少し、相対的にはケイ砂の混合率も増加することになるため全体の剛性も増加すると考えることもできる。しかし逆に、生成される二次鉱物の性質がベントナイト中のモンモリロナイト以外の鉱物相当である場合、 ρ_{sme} は減少するが見かけ上のベントナイトの量は変わらないことになり、ケイ砂の混合率も変わらないことになる。

以上を鑑みると、モンモリロナイトの溶解することによる λ の変化を定量的に評価するには知見が不十分であり「保守性」を考えて設定すべきであると思われるが、 λ の増加を想定した場合、減少を想定した場合のどちらが保守的であるかは解析条件によっても異なると考えられる。したがってここでは、モンモリロナイトの溶解に伴う λ の変化は考えないこととする。解析の結果、 λ の設定による影響が大きいと判断される場合は再度検討する必要がある。

(3) ρ_c の影響

戸井田ほか(2005)は、ベントナイト単体試料に対し、Na型ベントナイトには $\text{NaCl}3\text{mol/l}$ ($\rho_c = 3.0\text{eq/l}$) 溶液を、Ca型化ベントナイトには $\text{CaCl}_21.5\text{mol/l}$ ($\rho_c = 3.0\text{eq/l}$) 溶液を用いた圧密試験を実施し、表 2.1-3 に示す λ を取得している。この λ と、表 2.1-3 に示した蒸留水を用いた場合の λ を比較した図を図 2.1-6 に示す。

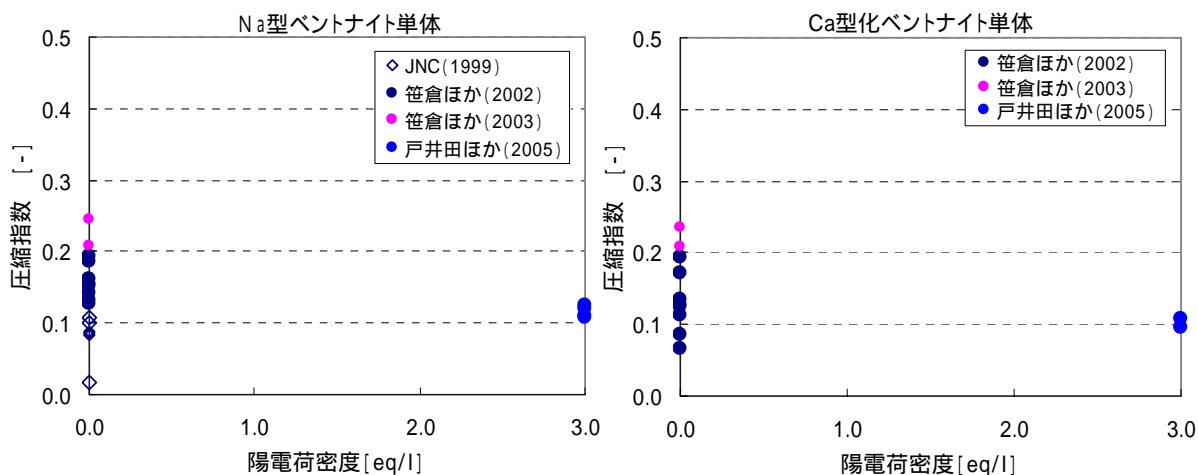


図 2.1-6 陽電荷密度と λ の関係 (ベントナイト単体)

図 2.1-6 をみると、データのバラツキを考慮すれば、 λ への ρ_c の影響はあまりなく、 ρ_c によらず λ は定義できると考えることができる。

また高治ほか(2004)は、Na型ケイ砂 30wt%混合ベントナイトに対し、 NaCl 溶液 0.2、0.8mol/l、及び幌延地下水 ($\rho_c = 0.212$ [eq/l]) を試験溶液として用いた圧密試験を実施している。この試験に対応する λ 、及び Na型ケイ砂 30wt%混合ベントナイトで蒸留水を用いた場合の λ に対応する表 2.1-2 の各値について、陽電荷密度を横軸にプロットした図を図 2.1-7 に示す。

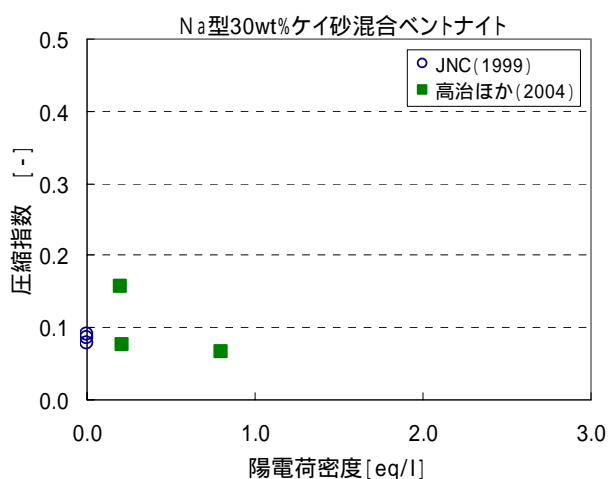


図 2.1-7 陽電荷密度と の関係 (Na 型ケイ砂 30wt%ベントナイト)

図 2.1-7 をみても、 ρ_c の変化に対する λ の増減の明確な傾向は見受けられない。

以上より、圧縮指数 λ は陽電荷密度 ρ_c によっては変化しないものと考えることとする。

(4) の設定

(1)～(3)の検討結果より、本検討においては圧縮指数 λ は ESP、 ρ_{sme} 、及び ρ_c によって変化しない、一定値として取り扱うこととする。

本検討において対象とするベントナイト系材料は、表 2.1-1、2 に示した仕様の緩衝材であり、ケイ砂が 30wt%混合されたベントナイトであるため、表 2.1-3 に示した λ のうち、ケイ砂 30%混合ベントナイトで蒸留水を使用している試験の λ の平均値として、

$$\lambda = 0.0842$$

と設定する。

2.1.5 膨潤挙動評価パラメータ (κ_0 , ξ , OCR_b)

1.1 において述べた、本研究における「ベントナイト系材料の膨潤挙動評価モデル」では、以下の3つのパラメータによって膨潤挙動が評価される。

① 初期膨潤指数 (κ_0)

$e-\ln(p)$ 上の膨潤曲線の初期勾配。

(「力学的膨潤」に該当する膨潤線の傾き)

② 浸透膨潤パラメータ (ξ)

上記 κ_0 によって定義される「力学的膨潤」から、さらなる非線形膨潤(浸透膨潤)の非線形の度合いをあらわすパラメータ。

③ 浸透膨潤パラメータ (OCR_b)

ξ によって定義される浸透膨潤量は、ある OCR (過圧密比) からは直線的になる実験結果が得られている。この浸透膨潤の曲線から直線にかわる OCR の境界値。

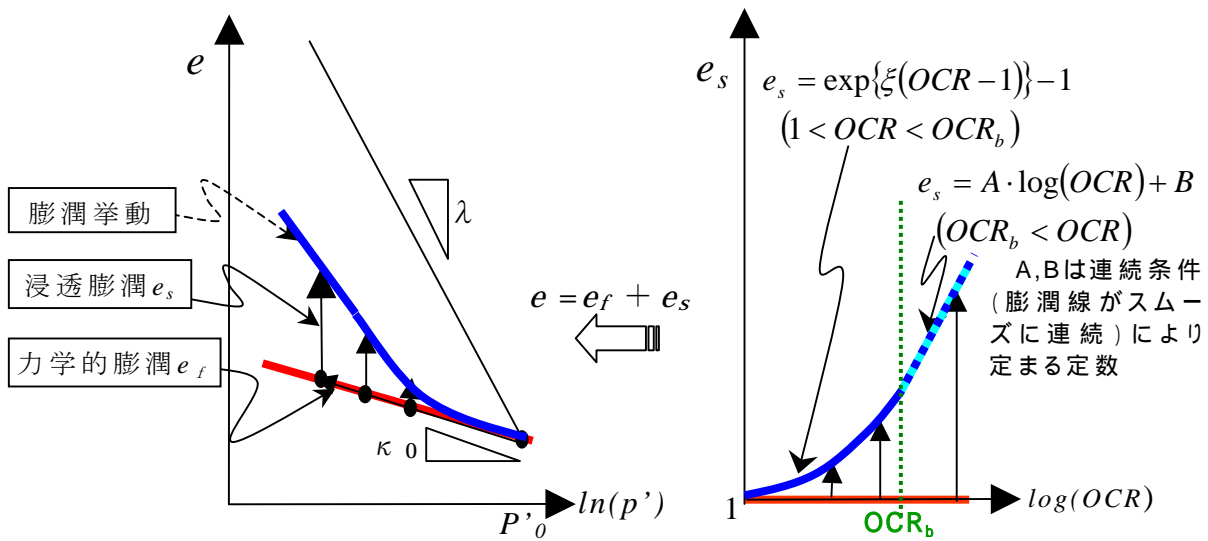
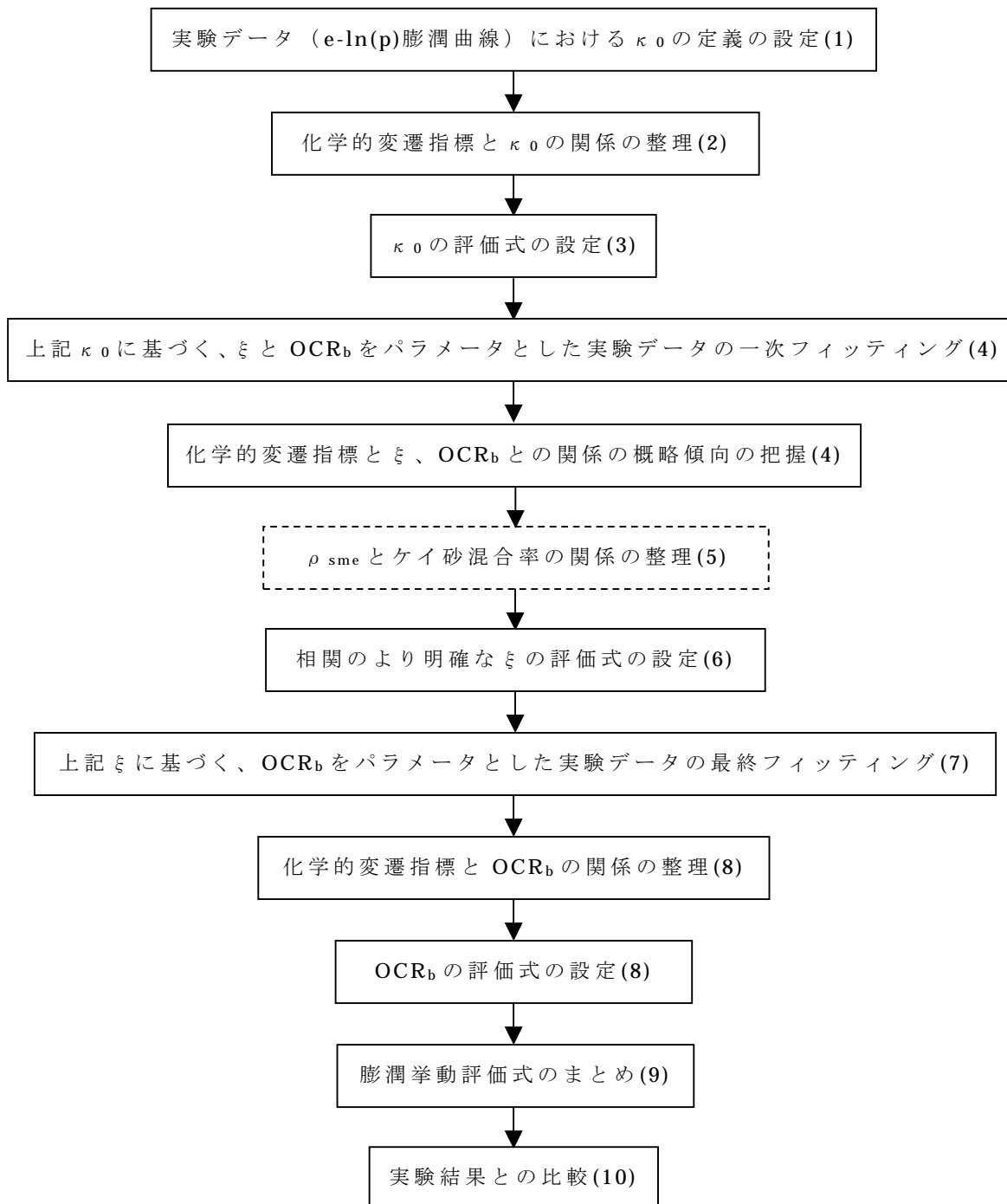


図 1.1-1 ベントナイト系材料の膨潤挙動評価モデル (再掲)

すなわち、1本の膨潤曲線を3つのパラメータで表現し、かつ前述の3つの化学的変遷指標の影響をそれぞれのパラメータに関係付ける必要がある。

しかしながら、圧密試験のデータは限られており、かつデータのバラツキも大きいことから、ここでは、ある程度の傾向把握に基づく仮定をもって、図 2.1-8 のフロー図の手順で膨潤挙動評価パラメータ (κ_0 , ξ , OCR_b)

と化学的変遷指標（ESP, ρ_{sme} , ρ_c ）の関係式を構築することとする。



※括弧内の数字は、以後検討項目番号に対応する

図 2.1-8 膨潤挙動評価パラメータの関係式の設定フロー図

(1)実験データ (e-ln(p)膨潤曲線)における κ_0 の定義の設定

基本的な κ_0 の定義は、前述のとおり、
 ベントナイトの e-ln(p)膨潤曲線の除荷初期の勾配
 である。すなわち、本来は
 膨潤曲線の OCR=1 における接線勾配
 である。

しかしながら、圧密（除荷）試験におけるデータ取得間隔（除荷間隔）は有意に大きく、また各実験においても必ずしも一定ではない。この意味では、 Δe -ln(p)関係を先に関数化し、その OCR=1 における微分値として κ_0 を定義することもできるが、本来の「通常の土質材料の力学的膨潤からの膨潤量増分（浸透膨潤）を ξ 、OCR_b でモデル化する」という考え方に反する。

したがって、ここでの κ_0 の取り扱いは、
 除荷前の実験値 (図 2.1-9 の①のプロット) と除荷直後の実験値 (図 2.1-9 の②のプロット) の 2 点の傾き
 として定義することとした。

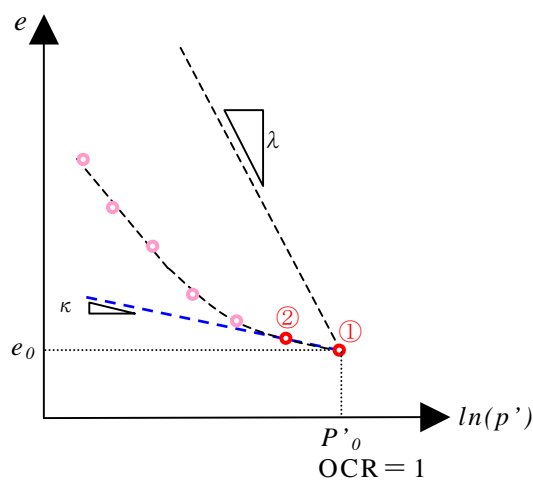


図 2.1-9 実験値の κ_0 の定義

(2)化学的変遷指標と e_0 の関係の整理

既往の研究（笹倉ほか、2002,2003、並河ほか、1997等）で取得された圧密除荷試験結果について、(1)で定義した κ_0 を算出し、整理した結果を表 2.1-4 に示す。なおここでは、圧密前の初期間隙比の異なる試験結果を同一に取り扱っており、CEC（陽イオン交換容量）や Na^+ （交換性ナトリウムイオンの当量濃度）を測定していない試料については、他のデータを参考に設定した。

表 2.1-4 既往のデータにおける初期膨潤指数 e_0

引用先	ESP [-]	ゲイ砂混合率 [-]	e_0 [-]	c [eq/l]	Cs_0 [-]	κ_0 [-]
核燃料サイクル開発機構 (1999) [HLW2次レポート]	0.822	0.0	0.385	0.0	0.0473	0.0205
	0.822	0.0	0.399	0.0	0.0463	0.0201
	0.822	0.0	0.385	0.0	0.0400	0.0174
	0.822	0.0	0.388	0.0	0.0337	0.0146
	0.822	0.0	0.388	0.0	0.0321	0.0139
	0.822	0.0	0.394	0.0	0.0400	0.0174
	0.822	0.3	0.284	0.0	0.0309	0.0134
	0.822	0.3	0.289	0.0	0.0360	0.0156
笹倉ほか (2002)	0.822	0.0	0.537	0.0	0.0332	0.0144
	0.822	0.0	0.529	0.0	0.0199	0.0086
	0.822	0.0	0.527	0.0	0.0830	0.0360
	0.822	0.0	0.403	0.0	0.0401	0.0174
	0.822	0.0	0.524	0.0	0.0631	0.0274
	0.822	0.0	0.538	0.0	0.0731	0.0317
	0.822	0.0	0.444	0.0	0.1247	0.0541
	0.822	0.0	0.428	0.0	0.1604	0.0696
	0.122	0.0	0.583	0.0	0.0399	0.0173
	0.122	0.0	0.562	0.0	0.0332	0.0144
	0.122	0.0	0.552	0.0	0.0664	0.0288
	0.122	0.0	0.559	0.0	0.0764	0.0332
	0.122	0.0	0.570	0.0	0.0664	0.0288
	0.122	0.0	0.558	0.0	0.0864	0.0375
	0.122	0.0	0.459	0.0	0.1337	0.0580
	0.122	0.0	0.522	0.0	0.1278	0.0555
笹倉ほか (2003)	0.457	0.0	0.585	0.0	0.0797	0.0346
	0.457	0.0	0.577	0.0	0.0664	0.0288
	0.457	0.0	0.561	0.0	0.0531	0.0231
	0.457	0.0	0.509	0.0	0.0863	0.0375
	0.457	0.0	0.526	0.0	0.0996	0.0432
	0.457	0.0	0.485	0.0	0.0930	0.0404
	0.457	0.0	0.373	0.0	0.1196	0.0519
	0.457	0.0	0.467	0.0	0.1395	0.0605
	0.822	0.0	0.319	0.0	0.0863	0.0375
	0.822	0.0	0.274	0.0	0.0930	0.0404
	0.457	0.0	0.293	0.0	0.0731	0.0317
	0.457	0.0	0.323	0.0	0.0863	0.0375
	0.122	0.0	0.236	0.0	0.0797	0.0346
	0.122	0.0	0.301	0.0	0.0731	0.0317
戸井田ほか (2005)	0.822	0.5	0.317	0.0	0.0465	0.0202
	0.822	0.5	0.289	0.0	0.0199	0.0086
	0.822	0.5	0.273	0.0	0.0399	0.0173
	0.822	0.5	0.362	0.0	0.0199	0.0086
	0.122	0.3	0.356	0.0	0.0465	0.0202
	0.122	0.3	0.363	0.0	0.0598	0.0259
	0.122	0.3	0.352	0.0	0.0664	0.0288
	0.122	0.3	0.381	0.0	0.0531	0.0231
	0.912	0.0	0.491	3.0	0.0399	0.0173
	0.912	0.0	0.492	3.0	0.0399	0.0173
	0.912	0.0	0.515	3.0	0.0465	0.0202
	0.912	0.0	0.518	3.0	0.0465	0.0202
	0.145	0.0	0.449	3.0	0.0332	0.0144
	0.145	0.0	0.443	3.0	0.0332	0.0144
高治ほか (2004)	0.822	0.3	0.309	0.8	0.0293	0.0127
	0.822	0.3	0.240	0.2	0.0283	0.0123
	0.822	0.3	0.288	0.212	0.0318	0.0138

()ESP の影響

まずデータが比較的多数あるベントナイト単体試料、蒸留水を用いた既往の圧密試験から得られた初期膨潤指数 κ_0 と ESP の関係を整理する。表 2.1-4 に整理した ESP と κ_0 の値のうち、該当するデータを横軸に ESP、縦軸に κ_0 をとってプロットした図を図 2.1-10 に示す。

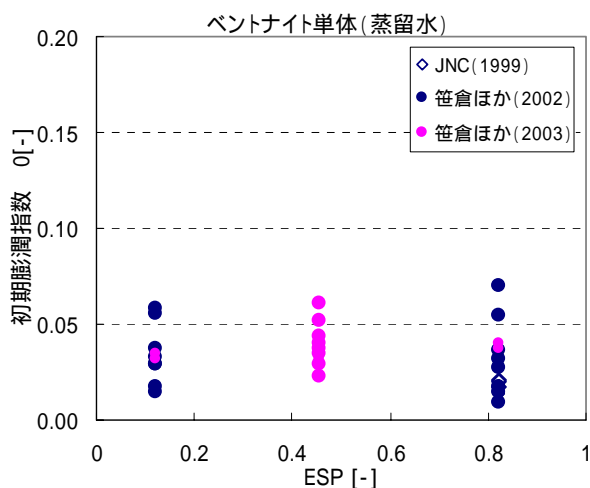


図 2.1-10 ESP と初期膨潤指数 κ_0 の関係 (ベントナイト単体：蒸留水)

図 2.1-10 を見る限り、ESP の変化に伴う κ_0 の増減の傾向はあまり見受けられない。

ここで κ_0 のバラツキの程度について、以下検討を加える。図 2.1-11 に、既往の研究 (飯塚、1988) において整理された、様々な粘性土の非可逆比と塑性指数の関係を示す。

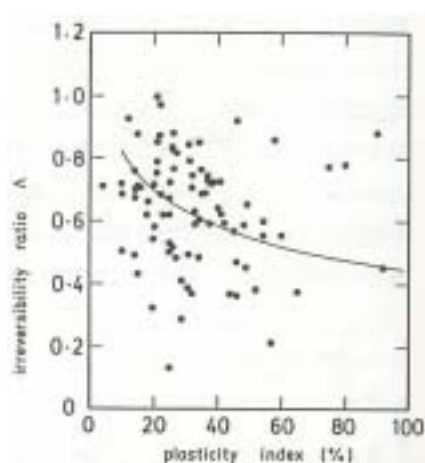


図 2.1-11 非可逆比と塑性指数の関係 (飯塚、1988)

これを見ると、圧縮指数と膨潤指数から算出される非可逆比 Λ は、塑性

指数に対し大きくばらついている。前述のとおり、圧縮指数も有意にバラツキがあるため断言することはできないが、膨潤指数についても通常ある程度のバラツキが含まれるものと推察される。なおここで言う膨潤指数は通常の粘性土の膨潤曲線（線形）の傾きであり、本研究で取り扱っている初期膨潤指数 κ_0 に対応するものである。

これに加え、前述の κ_0 の定義の考え方ではデータの取得間隔によっても κ_0 の値が変わることになり、設定上のバラツキも含まれることになる。

以上のことを鑑みると、データのバラツキを考慮すれば、 κ_0 は ESP によらずほぼ一定と考えることができる。

次にケイ砂が混入した場合について、ケイ砂 30wt%混合ベントナイト試料、蒸留水を用いた既往の圧密試験から得られた初期膨潤指数 κ_0 と ESP の関係について整理する。表 2.1-4 に整理した ESP と κ_0 の値のうち、該当するデータを横軸に ESP、縦軸に κ_0 をとってプロットした図を図 2.1-12 に示す。

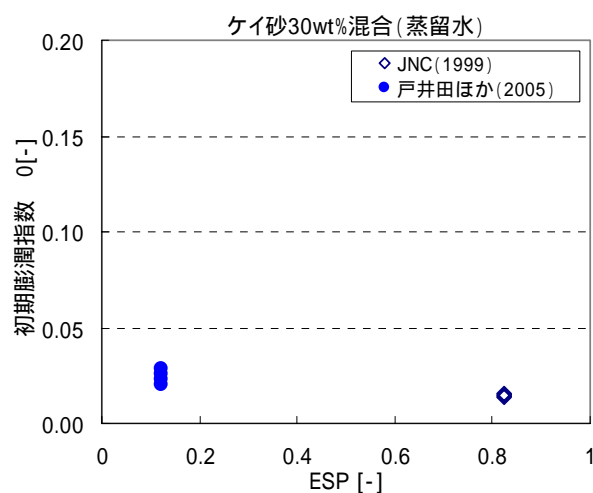


図 2.1-12 ESP と初期膨潤指数 κ_0 の関係（ケイ砂 30wt%混合：蒸留水）

図 2.1-12 を見る限り、ESP の増加に伴う若干の κ_0 の減少傾向があるものの、ケイ砂混合ベントナイトについてもデータのバラツキを考慮すれば、 κ_0 は ESP によらずほぼ一定と考えることができる。

以上より、初期膨潤指数 κ_0 は ESP によらず一定値をとると考えることができる。

(ii) ρ_{sme} の影響

ケイ砂の混合率によって相対的に ρ_{sme} が異なる試料の κ_0 を比較するこ

とによって検討を加える。

Na 型相当、及び Ca 型化相当のベントナイトに対して、蒸留水を用いて取得された κ_0 を整理する。表 2.1-4 に整理した κ_0 の値のうち、蒸留水を用いて取得した、Na 型相当、Ca 型化相当のベントナイトの κ_0 を、ケイ砂混合率を横軸に整理した図を図 2.1-13 に示す。

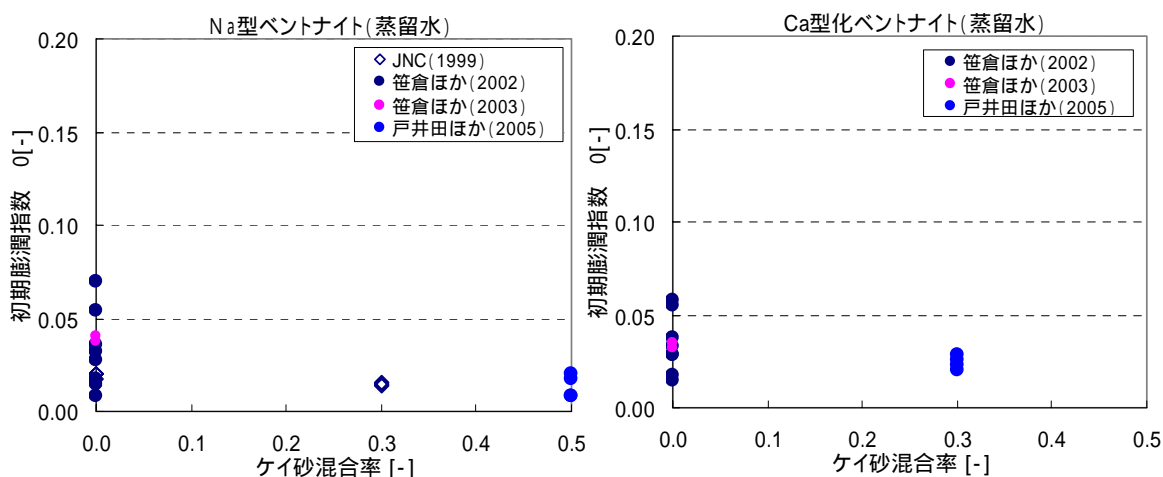


図 2.1-13 ケイ砂混合率と κ_0 の関係 (蒸留水)

図 2.1-13 を見ると、ベントナイトの ESP によらず、ケイ砂の混合率の増加に対して κ_0 が大きな影響を受けないことが分かる。

以上より、本検討においては、モンモリロナイトの溶解に伴う κ_0 の変化はないものとして設定することとする。

() ρ_c の影響

Na 型、Ca 型化ベントナイト単体試料、及び Na 型ケイ砂 30wt% 混合ベントナイトに対して取得された表 2.1-4 に示す κ_0 を、陽電荷密度 ρ_c を横軸にプロットした図を図 2.1-14、15 に示す。

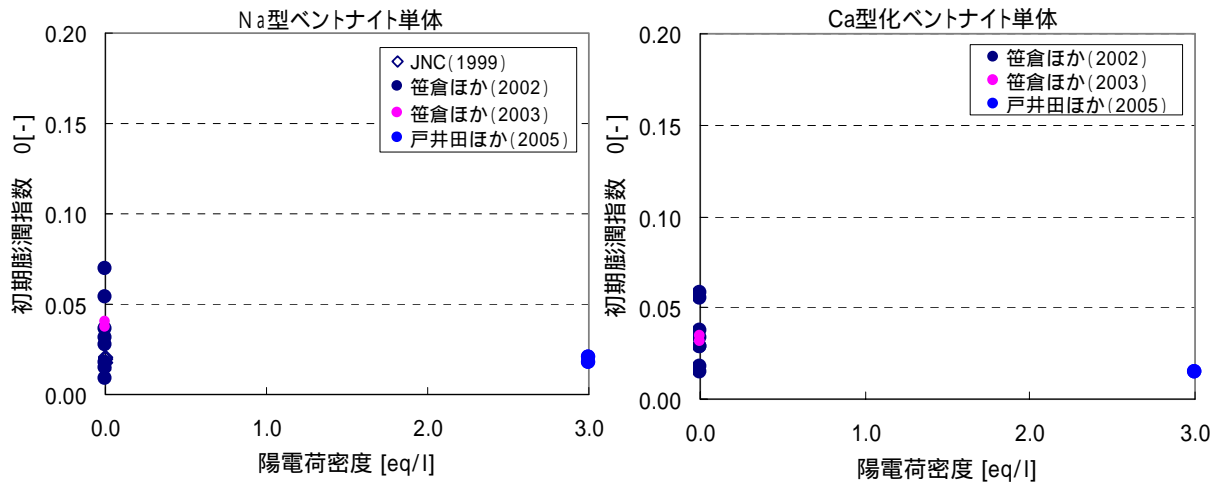


図 2.1-14 陽電荷密度と κ_0 の関係 (ベントナイト単体)

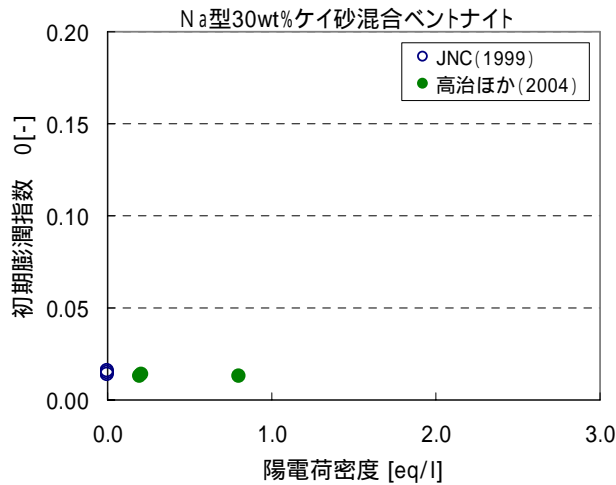


図 2.1-15 陽電荷密度と κ_0 の関係
(Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)

図 2.1-14、15 をみると、 ρ_c が κ_0 に及ぼす影響は小さく、 ρ_c によらず κ_0 は定義できると考えることができる。

以上より、初期膨潤指数 κ_0 は陽電荷密度 ρ_c によっては変化しないものと考えることとする。

(3) κ_0 の設定

(i)～(iii)の検討結果より、本検討においては初期膨潤指数 κ_0 は ESP、 ρ_{sme} 、及び ρ_c によって変化しない、一定値として取り扱うこととする。

先に述べたとおり、本検討においてはベントナイト系材料の膨潤挙動 (膨潤曲線) を、力学的膨潤 (間隙比増分 e_f) と浸透膨潤 (間隙比増分

e_s) の和で表現する。 κ_0 は力学的膨潤の量を規定するパラメータであり、仮に κ_0 に大きい値を採用すると、実際の除荷データをフィッティングするためには、浸透膨潤量を負にしなければならなくなる。浸透膨潤量が負になることを説明することは困難であり、また現行の浸透膨潤量評価モデルでは、負になるような e_s は表現できない。

$$e_s = \exp\{\xi (\text{OCR}-1)\} - 1 \quad (1 < \text{OCR} < \text{OCR}_b) \quad (2.1.2)$$

$$e_s = A \cdot \log(\text{OCR}) + B \quad (\text{OCR}_b < \text{OCR}) \quad (2.1.3)$$

逆に、 κ_0 に小さい値を採用すると、力学的膨潤による間隙比増分 e_f は小さくなるが、その分 e_s が大きくなるような ξ 、 OCR_b を設定することによって、全体膨潤量 e を精度よく評価することが可能である。

また、(1) で示したように、実験結果から算出した κ_0 はデータの取得間隔に依存するものであり、データ間隔をより細かくすれば、表 2.1-4 に整理した κ_0 の値より小さい値が得られるものと推察される。

以上のことを鑑み、本検討においては表 2.1-4 に整理した値のうち、最小の値を初期膨潤指数 κ_0 として設定することとした。

$$\kappa_0 = 0.0086$$

(4) 膨潤曲線の一次フィッティング

ここでは既往の実験データ ($e-\ln(p)$ 膨潤曲線) に対し、(3) で設定した κ_0 を前提に、 ξ 、及び OCR_b をパラメータとして膨潤曲線をフィッティングし、 ξ 、 OCR_b を求めた。得られたそれぞれのパラメータの値を表 2.1-5 に整理する。なお、実験の除荷レベルが小さく OCR_b を十分に規定してなかったものについては、 OCR_b の値を括弧書きで示している。また表 2.1-5 の ξ 、 OCR_b で表現される OCR と間隙比増分の関係と実験結果との対応は付録-1 に示す。

表 2.1-5 膨潤曲線の 1 次フィッティングによって得られた、OCR_b

0 = 0.0086 として膨潤曲線をフィッティングした、OCR_bの値

引用先	ESP [-]	ケイ砂混合率 [-]	c [eq/l]	[-]	OCR _b [-]
核燃料サイクル開発機構 (1999) [HLW2次レポート]	0.822	0.0	0.0	0.0115	(9.0)
	0.822	0.0	0.0	0.011	(10.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0100	(10.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0120	(10.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0115	(10.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0115	(10.0)
	0.822	0.3	0.0	0.0065	(19.0)
	0.822	0.3	0.0	0.0065	(21.0)
笹倉ほか (2002)	0.822	0.3	0.0	0.0065	(18.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0145	(10.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0145	(10.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0185	(8.5)
	0.822	0.0	0.0	0.0205	(9.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0155	17.0
	0.822	0.0	0.0	0.0145	16.5
	0.822	0.0	0.0	0.0235	22.0
	0.822	0.0	0.0	0.0265	19.5
	0.122	0.0	0.0	0.0055	(3.0)
	0.122	0.0	0.0	0.0160	(2.5)
	0.122	0.0	0.0	0.0140	4.0
	0.122	0.0	0.0	0.0160	3.5
	0.122	0.0	0.0	0.0145	4.0
	0.122	0.0	0.0	0.0175	4.0
笹倉ほか (2003)	0.122	0.0	0.0	0.0300	2.5
	0.122	0.0	0.0	0.0300	2.5
	0.457	0.0	0.0	0.0255	(7.0)
	0.457	0.0	0.0	0.0260	(7.0)
	0.457	0.0	0.0	0.0155	2.5
	0.457	0.0	0.0	0.0300	2.5
	0.457	0.0	0.0	0.0320	2.5
	0.457	0.0	0.0	0.0300	3.0
	0.457	0.0	0.0	0.0320	2.5
	0.457	0.0	0.0	0.0390	2.0
	0.822	0.0	0.0	0.0210	4.5
	0.822	0.0	0.0	0.0210	5.0
	0.457	0.0	0.0	0.0215	4.0
0.457	0.0	0.0	0.0220	4.0	
戸井田ほか (2005)	0.122	0.0	0.0	0.0190	4.0
	0.122	0.0	0.0	0.0175	3.5
	0.822	0.5	0.0	0.0045	9.5
	0.822	0.5	0.0	0.0045	10.5
	0.822	0.5	0.0	0.0045	10.5
	0.122	0.3	0.0	0.0125	3.0
	0.122	0.3	0.0	0.0165	2.5
	0.122	0.3	0.0	0.0165	1.9
	0.122	0.3	0.0	0.0165	2.4
	0.912	0.0	3.0	0.0090	3.1
	0.912	0.0	3.0	0.0080	3.8
	0.912	0.0	3.0	0.0085	3.4
	0.912	0.0	3.0	0.0090	3.3
0.145	0.0	3.0	0.0067	5.0	
0.145	0.0	3.0	0.0069	4.5	
高治ほか (2004)	0.822	0.3	0.8	0.0025	9.5
	0.822	0.3	0.2	0.0065	7.8
	0.822	0.3	0.212	0.007	6.5

()ESP の影響

まずデータが比較的多数あるベントナイト単体試料、蒸留水を用いた既往の圧密試験から得られた ξ 、 OCR_b と ESP の関係を整理する。表 2.1-5 に整理した ESP と ξ 、 OCR_b の値のうち、該当するデータを横軸に ESP、縦軸に ξ 、 OCR_b をとってプロットした図を図 2.1-16 に示す。

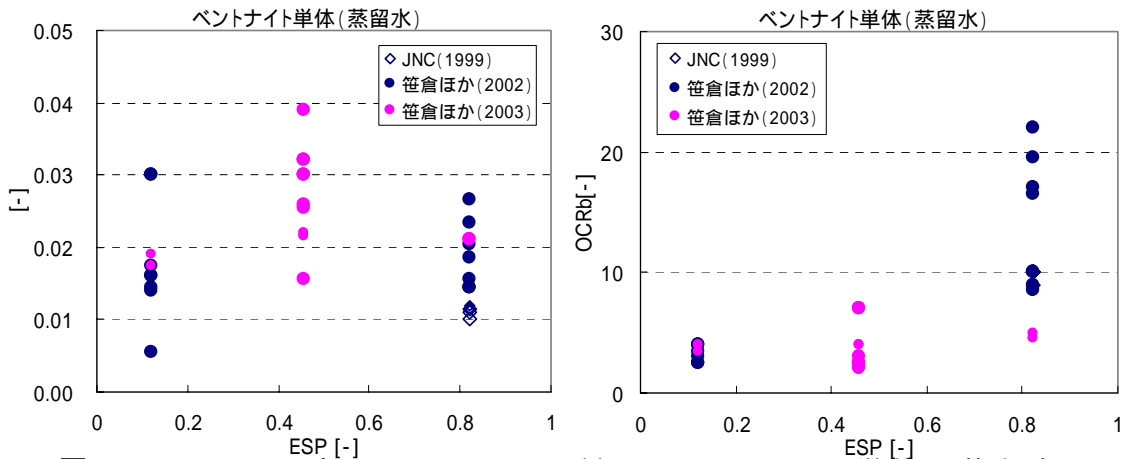


図 2.1-16 ESP と ξ 、 OCR_b の関係 (ベントナイト単体：蒸留水)

図 2.1-16 を見る限り、データのバラツキを考慮すれば、 ξ は ESP によらずほぼ一定、また OCR_b は ESP の増加に伴い増加する、と考えることができる。これは、膨潤初期の膨潤挙動は ESP に依存せず、その後の挙動は ESP が大きいほど、すなわち交換性 Na イオンの量が多いほどより非線形膨潤が進む、と言換えることができる。

次にケイ砂が混入した場合について、ケイ砂 30wt%混合ベントナイト試料、蒸留水を用いた圧密試験から得られた ξ 、 OCR_b と ESP の関係を図を図 2.1-17 に示す。

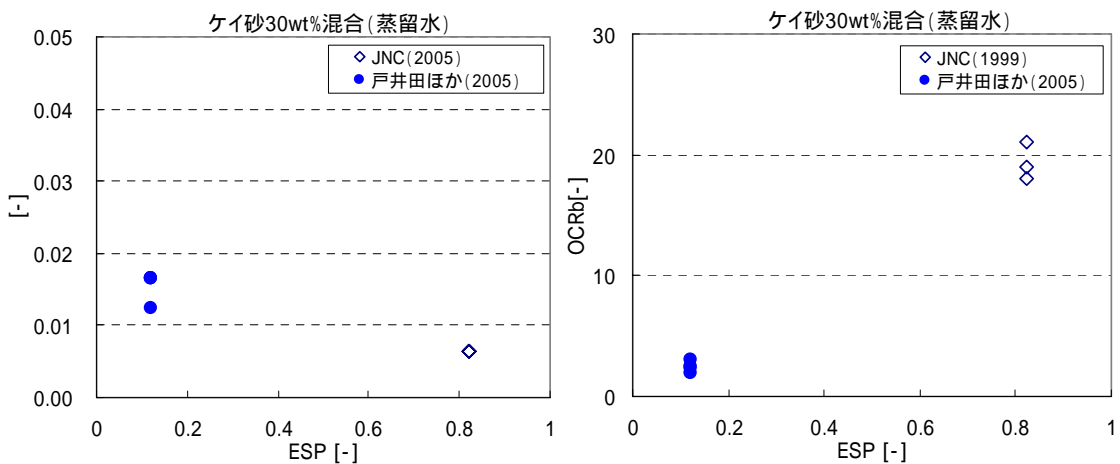


図 2.1-17 ESP と ξ 、 OCR_b の関係 (ケイ砂 30wt%混合：蒸留水)

図 2.1-17 を見ても、データ数が少ないため若干減少するような傾向も見受けられるものの ξ は ESP によらずほぼ一定、また OCR_b は ESP の増加に伴い増加する、と考えることができる。

以上より、ケイ砂の有無に係らず、膨潤初期の膨潤挙動は ESP に依存せず、その後の挙動は ESP が大きいほど、すなわち交換性 Na イオンの量が多いほどより非線形膨潤が進む、と考えられる。

(ii) ρ_{sme} の影響

前述のとおり、ケイ砂の混合率によって相対的に ρ_{sme} が異なる試料の ξ 、 OCR_b をを比較することによって検討を加える。

表 2.1-5 に整理した ξ 、 OCR_b の値のうち、蒸留水を用いて取得した、Na 型相当、Ca 型化相当のベントナイトの ξ 、 OCR_b を、ケイ砂混合率を横軸に整理した図を図 2.1-18、19 に示す。

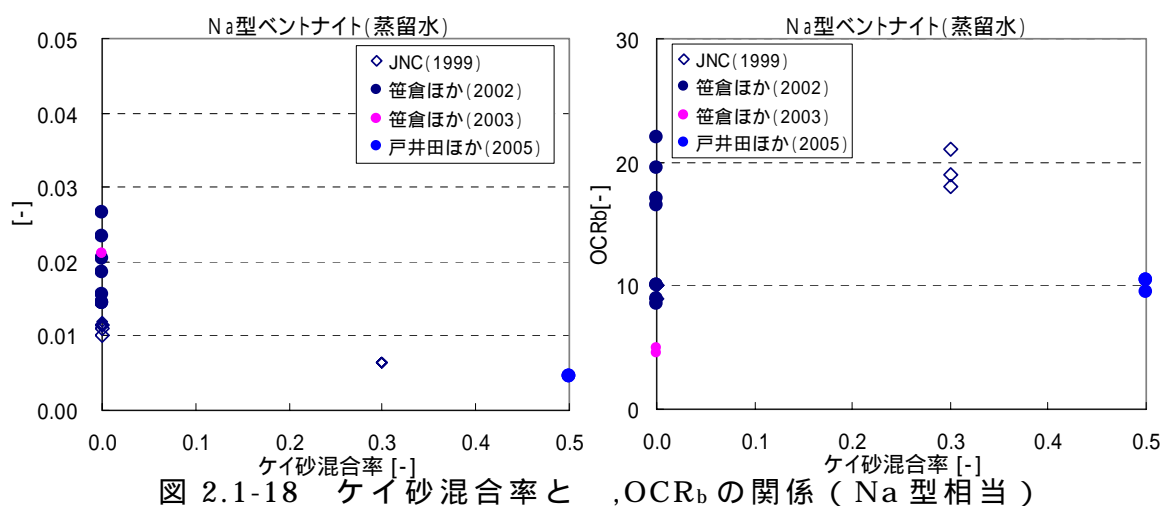


図 2.1-18 ケイ砂混合率と ξ, OCR_b の関係 (Na 型相当)

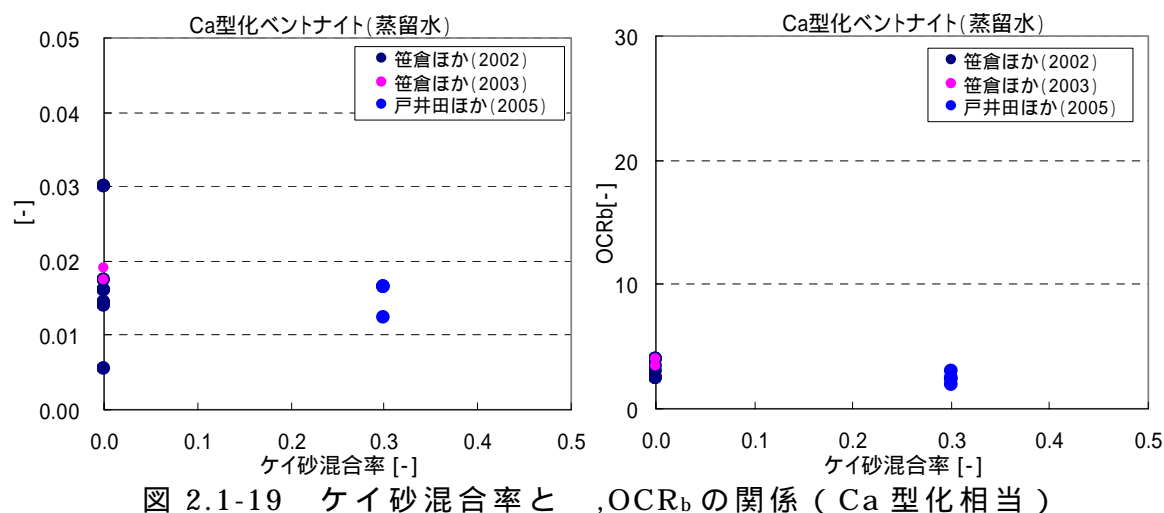


図 2.1-19 ケイ砂混合率と ξ, OCR_b の関係 (Ca 型化相当)

図 2.1-18、19 を見ると、まず ξ については、Na 型ベントナイトではケイ砂混合率の増加に伴い ξ の低下傾向が見受けられる。一方 Ca 型化ベントナイトでは、データ数が少ないことやデータのバラツキもあり、明確な ξ の低下傾向は見受けられない。しかしながら、例えばケイ砂混合率が 100wt% の場合は、ベントナイトが含まれないため、浸透膨潤は無くなることを考えると、基本的にはケイ砂混合率の増加に伴い ξ は低下するものと推察される。

また OCR_b については、Ca 型化ベントナイトではケイ砂混合率の影響は小さく見受けられるが、Na ベントナイトではデータがバラツキもあり傾向は不明確である。

() ρ_c の影響

表 2.1-5 に示す ξ 、 OCR_b のうち、Na 型相当、Ca 型相当のベントナイト単体、及び Na 型ケイ砂 30wt% 混合ベントナイトに対する値を、陽電荷密度 ρ_c を横軸にプロットした図を図 2.1-20～22 に示す。

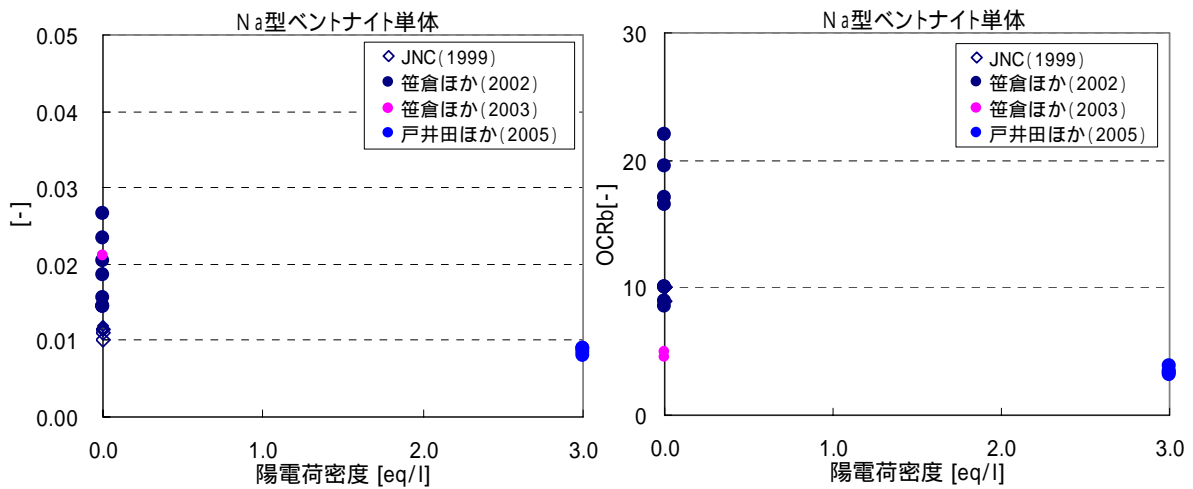


図 2.1-20 陽電荷密度と ξ 、 OCR_b の関係

(Na 型相当、ベントナイト単体)

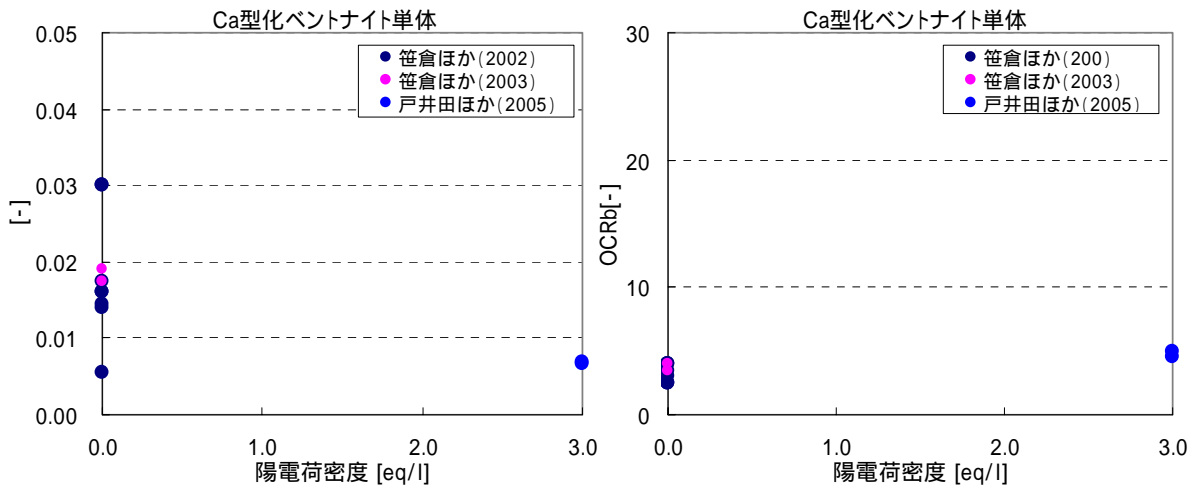


図 2.1-21 陽電荷密度と ξ 、 OCR_b の関係
(Ca 型化相当、ベントナイト単体)

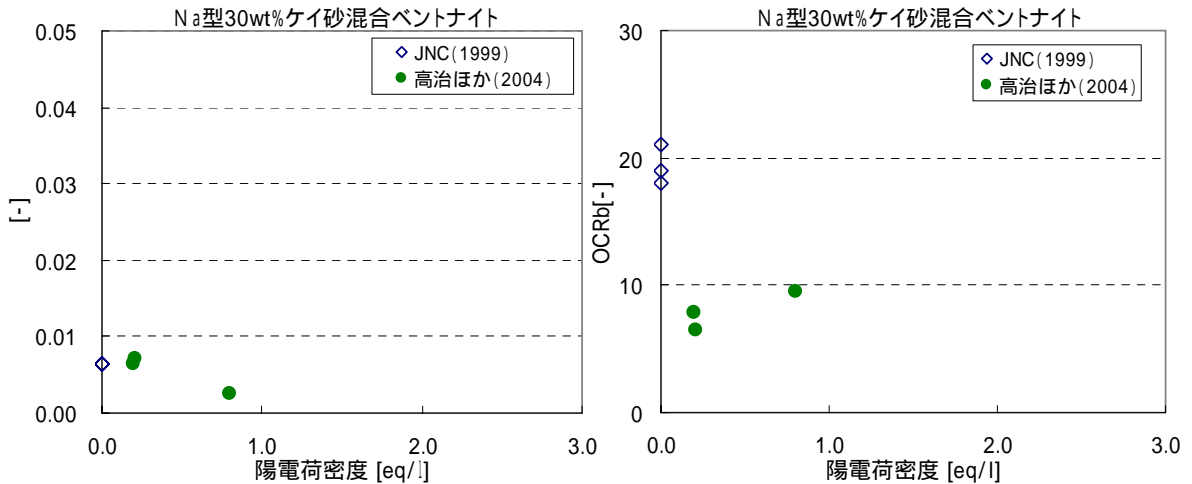


図 2.1-22 陽電荷密度と ξ 、 OCR_b の関係
(Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)

図 2.1-20~22 より、 ξ については、陽電荷密度の増加に伴い減少する傾向が見受けられる。 OCR_b については、Na 型ベントナイトでは陽電荷密度の増加に伴い減少する傾向が見られ、Ca 型化ベントナイトでは陽電荷密度による影響は小さい傾向が見られるが、Na 型 30wt%ケイ砂混合ベントナイトでは影響の傾向を判断することが難しく、総じて傾向は不明瞭である。

()、 OCR_b の概略傾向のまとめ

(i)~(iii)の検討による ξ 、 OCR_b の概略傾向を表 2.1-6 にまとめる。

表 2.1-6 、OCR_b の概略傾向

化学的変遷指標の変化	ξ	OCR _b
ESP の増加	影響小	増加
ケイ混合率の増加	減少	(不明確)
ρ _c の増加	減少	(不明確)

(5) ρ_{sme} とケイ砂混合率の関係の整理

ξ、OCR_b の評価式の設定に先立ち、今まで ρ_{sme} の代替指標として整理してきたケイ砂混合率と ρ_{sme} の関係について整理する。ρ_{sme} はそもそもスメクタイトが溶解することによる物性変化、及びそれに伴う変形を概略評価するために設定した化学的変遷指標である。一方で ρ_{sme} の定義は式(1.1.13) (再掲) のとおりであり、ベントナイトの鉱物組成、及びケイ砂混合率が同じであっても、乾燥密度が異なれば ρ_{sme} も異なる。

$$\rho_{sme} = \frac{W_{sme}}{V_v + V_{sme}} \tag{1.1.13}$$

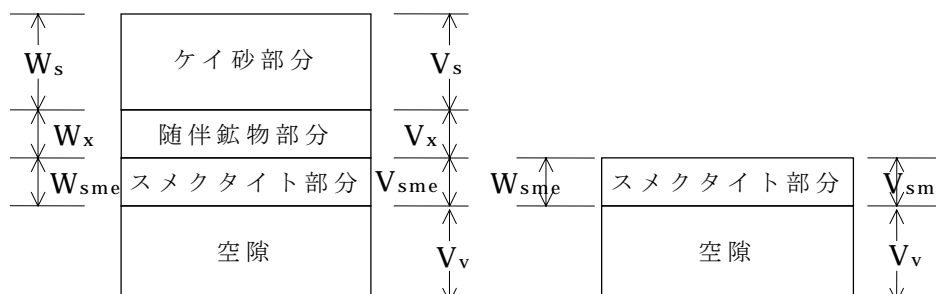


図 2.1-23 スメクタイト部分乾燥密度の考え方

しかしながら、本検討における膨潤挙動評価モデルは、乾燥密度によって膨潤曲線の形状が変わるものではないため、ρ_{sme} と膨潤曲線の形状を規定する ξ や OCR_b といったパラメータとを直接結びつけることは不適當である。本質的には、ベントナイト系材料の膨潤性鉱物と非膨潤性鉱物の比の変化によって膨潤曲線の形状が変わると考えられるため、既往の実験でパラメータとしているケイ砂混合率と膨潤性鉱物と非膨潤性鉱物の比、さらに ρ_{sme} との関係性を以下に整理する。

まず、ケイ砂混合率と非膨潤性－膨潤性鉱物の比の関係は以下のとおりである。

$$\begin{aligned}
 C_{sand} &= 1 - \{ [1 + 1 \times (1 - C_{sme}) / C_{sme}] / (1 + C_{sx}) \} \\
 &= 1 - \{ [C_{sme} + 1 - C_{sme}] / C_{sme} / (1 + C_{sx}) \} \\
 &= 1 - 1 / \{ C_{sme} \cdot (1 + C_{sx}) \}
 \end{aligned}
 \tag{2.1.4}$$

ここで、

C_{sand} : 実験データに対応するケイ砂混合率 [-]
 (= $W_s / (W_s + W_x + W_{sme})$)

C_{sx} : 非膨潤性鉱物と膨潤性鉱物 (スメクタイト) の比 [-]
 (= $(W_x + W_s) / W_{sme}$)

C_{sme} : 実験データに対応するベントナイトのスメクタイト含有率
 [-] (= $W_{sme} / (W_{sme} + W_x)$)

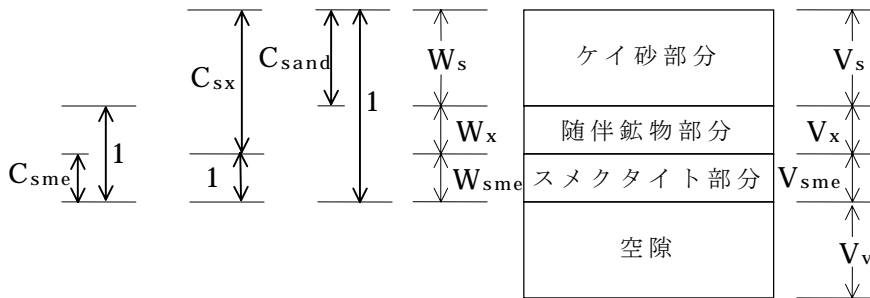


図 2.1-24 諸係数の関係

式(2.1.4)を C_{sx} について表すと以下のようになる。

$$\begin{aligned}
 C_{sand}(1 + C_{sx}) &= (1 + C_{sx}) - 1 / C_{sme} \\
 (1 - C_{sand})(1 + C_{sx}) &= 1 / C_{sme} \\
 C_{sx} &= 1 / \{ (1 - C_{sand}) C_{sme} \}
 \end{aligned}
 \tag{2.1.5}$$

実験データから算出した ξ 、 OCR_b をこの C_{sx} について整理し、それらの関係式を構築することも可能である。この場合、化学的変遷指標の ρ_{sme} 等から C_{sx} を算定し、構築した関係式から ξ 、 OCR_b を算出し、膨潤挙動を評価するといったフローになる。

またこれとは別に、実験データから算出した ξ 、 OCR_b を C_{sand} について整理し、またその関係式を構築することで、化学的変遷指標の ρ_{sme} 等から算定した C_{sx} を用いて実験値に対応する C_{sand} を算出し、その C_{sand} から ξ 、 OCR_b を算出することも可能である。

両者は本質的には同等であり、どちらでも評価上問題ないため、本検討では後者を採用することとした。なお実験に用いた個々のベントナイトの

スメクタイト含有比 C_{sme} は計測されていないため、HLW2 次取りまとめ等を参考にクニゲル V1 の一般的な値として $C_{sme}=0.5$ として取り扱うこととした。

以下、化学的変遷指標の ρ_{sme} 等と C_{sx} の関係について整理する。

ベントナイト中のスメクタイト及びスメクタイト以外の随伴鉱物の比重は、計測している実績が限られているため、双方が同等であり、 $G_{sme}=2.7$ として取り扱うこととした。この時、以下の式が成り立つ。

$$C_{sx} = \frac{W_x + W_s}{W_{sme}} = \frac{G_{sme} \cdot V_x + G_s \cdot V_s}{G_{sme} \cdot V_{sme}} \quad (2.1.6)$$

$$\rho_{sme} = \frac{W_{sme}}{V_v + V_{sme}} = \frac{G_{sme} \cdot V_{sme}}{V_v + V_{sme}} \quad (2.1.7)$$

また、

$$\theta = \frac{V_v}{V_s + V_x + V_{sme} + V_v} \quad (2.1.8)$$

ここで、スメクタイトが溶解することによって変化する値は V_{sme} と V_v である。また、スメクタイトの溶解と同時に何らかの二次鉱物が生成される場合は、その二次鉱物がベントナイトの随伴鉱物と同等であると仮定すると、 V_x も変化することになる。

実際は生成させる二次鉱物の比重がスメクタイトの比重より小さい場合、溶解したスメクタイトの体積 ΔV_{sme} より生成された二次鉱物の体積が大きく、もとの全体体積 ($=V_s + V_x + V_{sme} + V_v$) よりも体積が増加することも考えられる。しかしながら、生成される二次鉱物の同定には不確実性があること、及び現状の MACBECE においては、ベントナイト系材料の化学的変遷のみによる体積変化は想定していないこと等から、ここでは溶解したスメクタイトの量は空隙量、及び二次鉱物（もともとあるベントナイト中のスメクタイト以外の随伴鉱物と同等のものとして取り扱う）の変化量の総和と等しい、と仮定することとした。

$$\Delta V_x + \Delta V_{sme} + \Delta V_v = 0 \quad (2.1.9)$$

すなわち、

$$V_x + V_x + V_{sme} + V_v = V \quad (\text{一定}) \quad (2.1.10)$$

このとき、

$$\theta = \frac{V_v}{V} \quad V_v = \theta \cdot V \quad (2.1.11)$$

$$\begin{aligned} \rho_{sme} &= \frac{G_{sme} \cdot V_{sme}}{V_v + V_{sme}} = \frac{G_{sme} \cdot V_{sme}}{\theta \cdot V + V_{sme}} \\ (G_{sme} - \rho_{sme}) \cdot V_{sme} &= \rho_{sme} \cdot \theta \cdot V \\ V_{sme} &= \frac{\rho_{sme} \cdot \theta \cdot V}{G_{sme} - \rho_{sme}} \end{aligned} \quad (2.1.12)$$

また、ケイ砂が長期的に溶解するような現象を想定しなければ、ケイ砂の量は初期から変化しないので、初期のベントナイトの乾燥密度を $\rho_{d0}[\text{Mg}/\text{m}^3]$ 、ケイ砂混合率を $C_{sand0}[-]$ とおくと、

$$V_s = \frac{\rho_{d0} \cdot C_{sand0} \cdot V}{G_s} \quad (2.1.13)$$

以上より、

$$\begin{aligned} V_x &= V - V_s - V_{sme} - V_v \\ &= V - \frac{\rho_{d0} \cdot C_{sand0} \cdot V}{G_s} - \frac{\rho_{sme} \cdot \theta \cdot V}{G_{sme} - \rho_{sme}} - \theta \cdot V \\ &= \left(1 - \frac{\rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_s} - \frac{\rho_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}} - \theta \right) V \end{aligned} \quad (2.1.14)$$

$$\begin{aligned} C_{sx} &= \frac{G_{sme} \cdot V_x + G_s \cdot V_s}{G_{sme} \cdot V_{sme}} \\ &= \frac{G_{sme} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_s} - \frac{\rho_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}} - \theta \right) V + \rho_{d0} \cdot C_{sand0} \cdot V}{G_{sme} \cdot \frac{\rho_{sme} \cdot \theta \cdot V}{G_{sme} - \rho_{sme}}} \\ &= \frac{G_{sme} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_s} - \frac{G_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}} \right) + \rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_{sme} \cdot \frac{\rho_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}}} \end{aligned} \quad (2.1.15)$$

以上の評価フローを図 2.1-25 にまとめる。

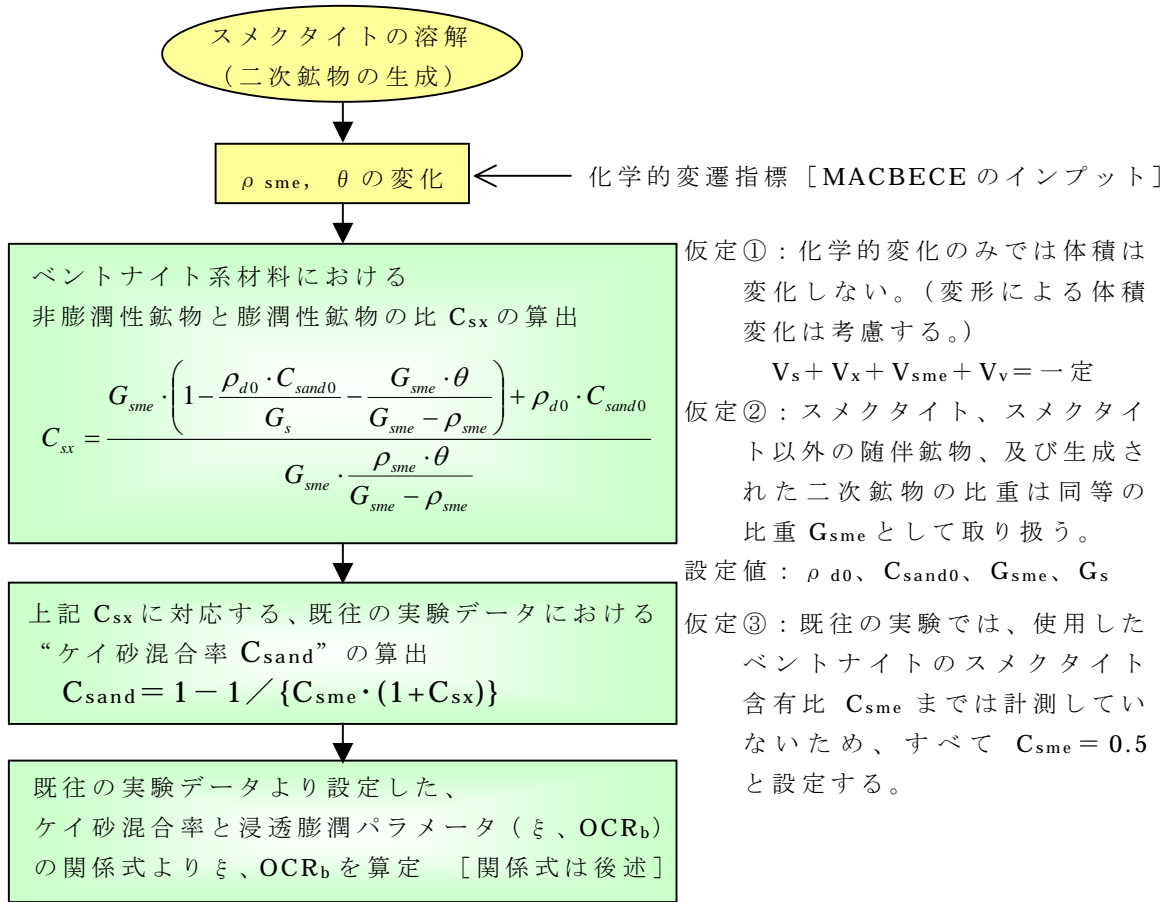


図 2.1-25 スメクタイトの溶解に伴う膨潤特性の変遷評価フロー

(6) の評価式の設定

(4)での ξ 、 OCR_b の概略傾向の検討において、 ξ の方が OCR_b より明確な傾向が確認された。このことから、ここではパラメータ ξ の評価式をまず設定し、次項(7)においてここで設定した ξ に基づいて、 OCR_b をパラメータとして実験結果を再度フィッティングすることとする。

ξ の評価式の設定手順は、(4)での検討結果を踏まえ、以下の(i)~(iv)の手順で実施した。

() (ESP,0.0,0.0)、 (ESP,0.3,0.0)の設定

まず ξ (ESP, C_{sand} , ρ_c) は ESP の影響をあまり受けないことから、実験結果の一次フィッティングによって得られた表 2.1-5 の ξ に基づき、 ξ (ESP,0.0,0.0)、 ξ (ESP,0.3,0.0) を一定値として設定する。

ここでは(4)の(i)で整理したベントナイト単体試料、及びケイ砂 30wt%

混合ベントナイトの ξ について、それぞれ平均値をとることでき
 $(ESP, 0.0, 0.0)$ 、 $\xi (ESP, 0.3, 0.0)$ を設定した。

$$\xi (ESP, 0.0, 0.0) = 0.0198$$

$$\xi (ESP, 0.3, 0.0) = 0.0116$$

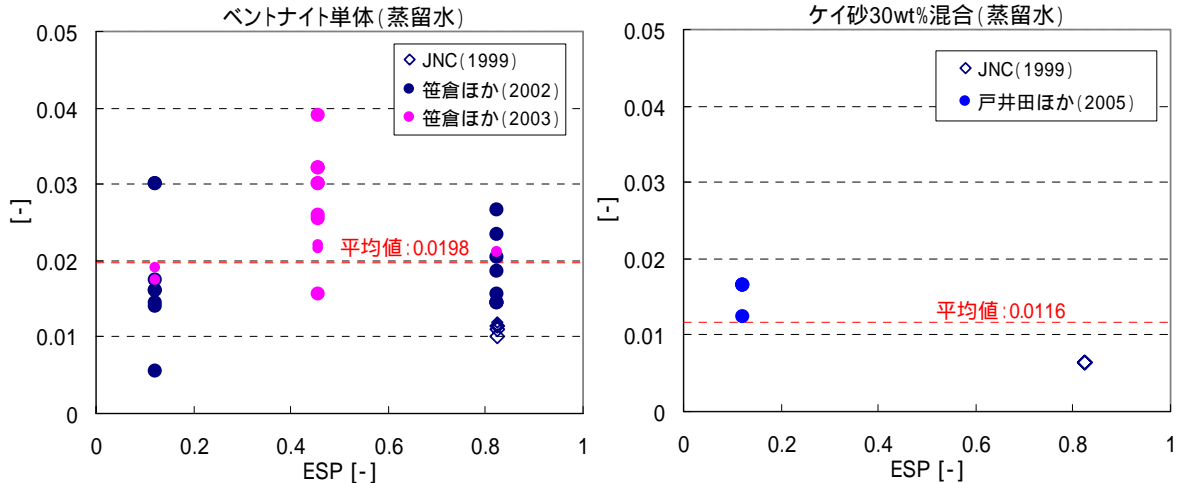


図 2.1-26 $(ESP, 0.0, 0.0)$ 、 $(ESP, 0.3, 0.0)$ の設定

() ケイ砂混合率の ξ への影響評価式の設定

(i) で設定した二つの一定値からケイ砂混合率の ξ への影響評価一次式 ($\xi (ESP, C_{sand}, 0.0) = a1 \times C_{sand} + b1$) を設定する。

$$b1 = \xi (ESP, 0.0, 0.0) = 0.0198 \quad (C_{sand} = 0.0)$$

$$\begin{aligned} a1 &= (\xi (ESP, 0.3, 0.0) - \xi (ESP, 0.0, 0.0)) \div (0.3 - 0.0) \\ &= (0.0116 - 0.0198) \div 0.3 \\ &= -0.0272 \end{aligned}$$

よって、

$$\xi (ESP, C_{sand}, 0.0) = -0.0272 \times C_{sand} + 0.0198 \quad (2.1.16)$$

この評価式と、表 2.1-5 に示した実験結果に基づく ξ の値との比較を図 2.1-27 に示す。この図より、評価式(2.1.16)で、ケイ砂 50% 混合の ξ も評価できることが確認でき、この評価式で特に問題はないものと考えられる。

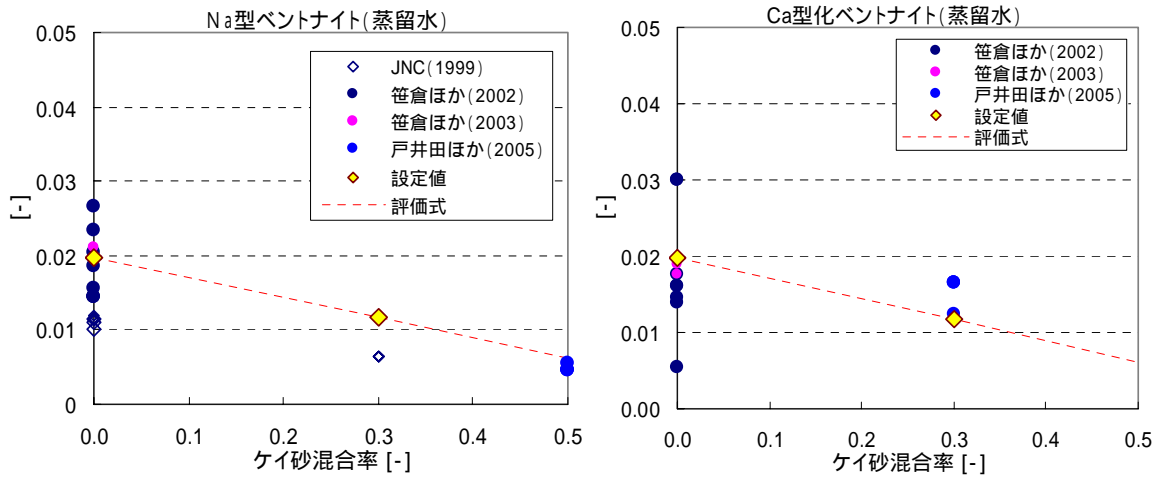


図 2.1-27 の比較(ケイ砂の影響：蒸留水)

() (ESP,0.0, ρ_c)、 (ESP,0.3, ρ_c)の評価式の設定

(ii)で設定した評価式(2.1.16)で与えられる $\rho_c = 0.0$ [eq/l] (蒸留水) の ξ と、 $\rho_c > 0.0$ [eq/l]の実験結果の一次フィッティングによって得られた ξ から、 ξ (ESP,0.0, ρ_c)、 ξ (ESP,0.3, ρ_c)の評価式を設定する。

まず、Na型、及びCa型化ベントナイト単体試料の ξ について、設定した評価式と表 2.1-5 の ξ との関係を図 2.1-28 に示す。図中の黄色のプロットが、評価式(2.1.16)から決まる ξ の値であり、この点を必ず通り、 $\rho_c = 3.0$ [eq/l]の ξ の値から最小二乗法によって直線の評価式を設定した。

$$\begin{aligned} \xi(\text{ESP},0.0, \rho_c) &= a_2 \times \rho_c + b_2 \\ &= -0.0039 \rho_c + 0.0198 \end{aligned} \tag{2.1.17}$$

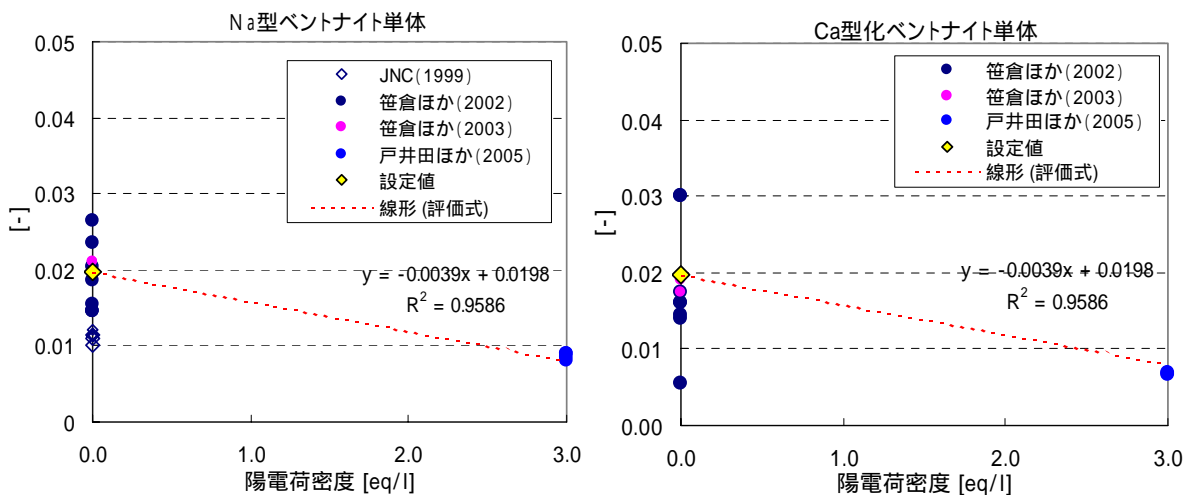


図 2.1-28 の比較(陽電荷密度の影響：ベントナイト単体)

図 2.1-28 より、Na 型、Ca 型化によらず、ベントナイト単体（ケイ砂混合率 0.0）試料については、上記式(2.1.17)で評価できることが分かる。

次に、Na 型ベントナイト、ケイ砂 30wt%混合試料の ξ について、設定した評価式(2.1.16)と表 2.1-5 の ξ との関係を図 2.1-29 に示す。ベントナイト単体試料同様、図中の黄色のプロットが、評価式(2.1.16)から決まる ξ の値であり、この点を必ず通り、 $\rho_c > 0.0[\text{eq/l}]$ の ξ の値から最小二乗法によって直線の評価式を設定した。

$$\begin{aligned} \xi(\text{ESP}, 0.3, \rho_c) &= a3 \times \rho_c + b3 \\ &= -0.0128 \rho_c + 0.0116 \quad (\text{ただし } \xi > 0.0[\text{eq/l}]) \end{aligned} \quad (2.1.18)$$

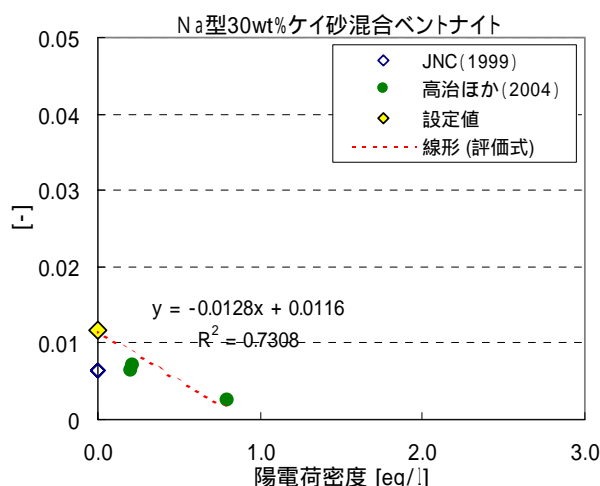


図 2.1-29 の比較(陽電荷密度の影響:ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)

() (ESP, C_{sand} , ρ_c) の評価式の設定

(iii) で設定した評価式(2.1.17)、(2.1.18)の傾き、切片をケイ砂混合率に対し一次式で表すことで、 ξ の評価式を設定する。

$$\begin{aligned} \xi(\text{ESP}, C_{\text{sand}}, \rho_c) &= \{(a3 - a2)/0.3 \times C_{\text{sand}} + a2\} \times \rho_c + (a1 \times C_{\text{sand}} + b1) \\ &= \{(-0.0128 - (-0.0039)) / 0.3 \times C_{\text{sand}} - 0.0039\} \times \rho_c \\ &\quad + (-0.0272 \times C_{\text{sand}} + 0.0198) \\ &= -(0.0297 \times C_{\text{sand}} + 0.0039) \times \rho_c - 0.0272 \times C_{\text{sand}} + 0.0198 \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned} \xi(\text{ESP}, C_{\text{sand}}, \rho_c) \\ &= -(0.0297 \times C_{\text{sand}} + 0.0039) \times \rho_c - 0.0272 \times C_{\text{sand}} + 0.0198 \end{aligned} \quad (2.1.19)$$

(7)OCR_bをパラメータとした実験データの再フィッティング

(6)で実施した ξ の評価式の設定と同様に、表 2.1-5 に示した OCR_b の値から評価式を設定することも可能であるが、 ξ 、OCR_b を互いに独立に評価式を構築した場合、実験結果の評価精度が低下する可能性がある。

ここでは、(6)で設定した評価式(2.1.19)で与えられる ξ に対し、OCR_bをパラメータとして再度実験データのフィッティングを実施した。その結果得られた OCR_b 値を表 2.1-7 に示す。なお、実験の除荷レベルが小さく OCR_b を十分に規定してなかったものについては、OCR_b の値を括弧書で示している。また表 2.1-7 の ξ 、OCR_bで表現される OCR と間隙比増分の関係と実験結果との対応は付録-2 に示す。

表 2.1-7 膨潤曲線の再フィッティングによって得られた OCR_b

θ = 0.0086 として膨潤曲線をフィッティングした、OCR_bの値

引用先	ESP	ゲイ砂混合率	c	[-]	OCR _b
	[-]	[-]	[eq/l]		
核燃料サイクル開発機構 (1999) [HLW2次レポート]	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	0.822	0.3	0.0	0.0116	(6.0)
	0.822	0.3	0.0	0.0116	(6.0)
	0.822	0.3	0.0	0.0116	(6.0)
笹倉ほか (2002)	0.822	0.0	0.0	0.0198	(4.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0198	(4.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0198	(8.5)
	0.822	0.0	0.0	0.0198	(9.0)
	0.822	0.0	0.0	0.0198	11.0
	0.822	0.0	0.0	0.0198	10.0
	0.822	0.0	0.0	0.0198	28.0
	0.822	0.0	0.0	0.0198	28.0
	0.122	0.0	0.0	0.0198	(1.0)
	0.122	0.0	0.0	0.0198	(1.5)
	0.122	0.0	0.0	0.0198	2.5
	0.122	0.0	0.0	0.0198	2.5
	0.122	0.0	0.0	0.0198	2.5
	0.122	0.0	0.0	0.0198	3.2
	0.122	0.0	0.0	0.0198	4.0
0.122	0.0	0.0	0.0198	4.0	
笹倉ほか (2003)	0.457	0.0	0.0	0.0198	(7.0)
	0.457	0.0	0.0	0.0198	(7.0)
	0.457	0.0	0.0	0.0198	2.0
	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.0
	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.0
	0.457	0.0	0.0	0.0198	5.0
	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.5
	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.5
	0.822	0.0	0.0	0.0198	5.0
	0.822	0.0	0.0	0.0198	5.5
	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.5
	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.5
	0.122	0.0	0.0	0.0198	3.6
	0.122	0.0	0.0	0.0198	3.0
戸井田ほか (2005)	0.822	0.5	0.0	0.0062	5.3
	0.822	0.5	0.0	0.0062	5.8
	0.822	0.5	0.0	0.0062	6.2
	0.122	0.3	0.0	0.0116	3.5
	0.122	0.3	0.0	0.0116	4.0
	0.122	0.3	0.0	0.0116	3.0
	0.122	0.3	0.0	0.0116	3.5
	0.912	0.0	3.0	0.0081	3.5
	0.912	0.0	3.0	0.0081	3.8
	0.912	0.0	3.0	0.0081	3.4
	0.912	0.0	3.0	0.0081	3.7
	0.145	0.0	3.0	0.0081	3.8
0.145	0.0	3.0	0.0081	3.6	
高治ほか (2004)	0.822	0.3	0.8	0.0014	25.0
	0.822	0.3	0.2	0.0091	4.5
	0.822	0.3	0.212	0.0089	4.5

(8) 化学的変遷指標と $OCR_b(ESP, C_{sand}, \rho_c)$ の関係の整理と評価式の設定

() ESP の影響

ベントナイト単体試料（蒸留水）、及びケイ砂 30wt%混合ベントナイト試料の OCR_b と ESP の関係を整理する。表 2.1-7 に整理した ESP と OCR_b の値のうち、該当するデータを横軸に ESP、縦軸に OCR_b をとってプロットした図を図 2.1-30 に示す。

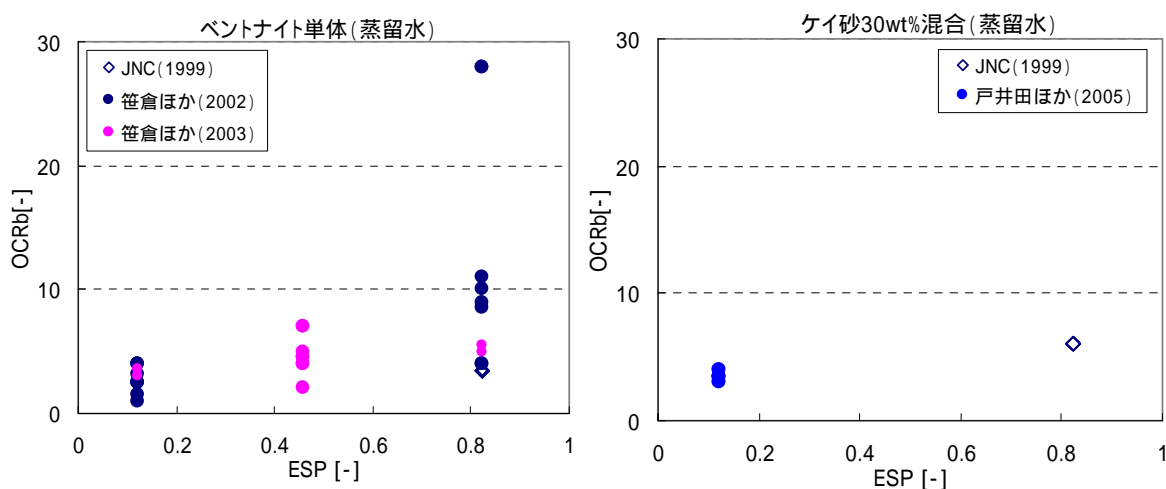


図 2.1-30 ESP と OCR_b の関係（蒸留水）

(4)においても記載したとおり、図 2.1-30 を見ても OCR_b は ESP の増加に伴い増加し、またその増加傾向はケイ砂混合率が低いほど著しいことが分かる。

ここでこれらの ESP と OCR_b の関係を最小二乗法により一次式で表すと以下の式が得られる。

$$OCR_b(ESP, 0.0, 0.0) = 8.1629 \times ESP + 1.5050 \quad (2.1.20)$$

$$OCR_b(ESP, 0.3, 0.0) = 3.5714 \times ESP + 3.0643 \quad (2.1.21)$$

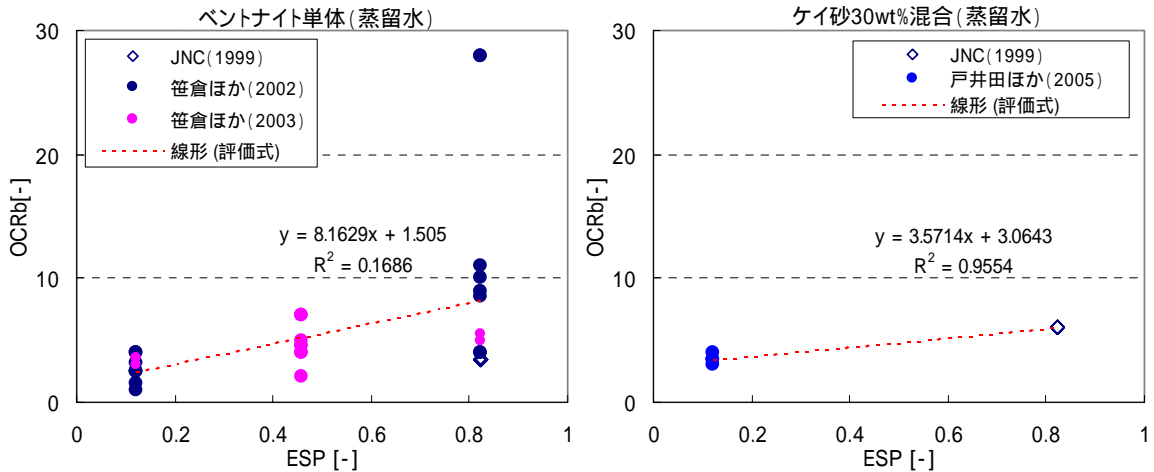


図 2.1-31 ESP と OCR_b の関係の評価式 (蒸留水)

(ii) C_{sand} の影響

表 2.1-7 に整理した OCR_b の値のうち、蒸留水を用いて取得した、Na 型相当、Ca 型化相当のベントナイトの OCR_b を、ケイ砂混合率 C_{sand} を横軸に整理した図を図 2.1-32 に示す。

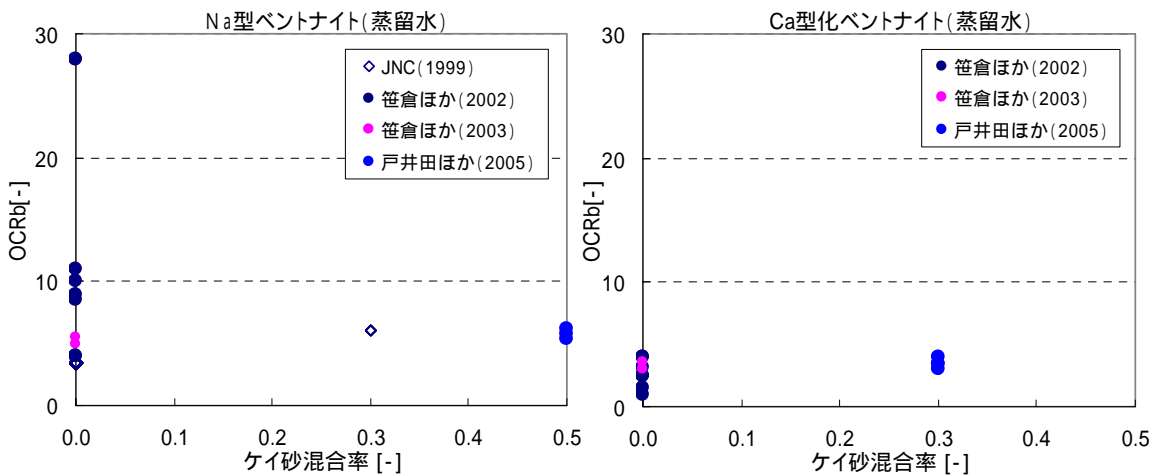


図 2.1-32 ケイ砂混合率と OCR_b の関係 (蒸留水)

図 2.1-32 をみると、Na 型ベントナイトについては、特異値を無視すれば、OCR_b はケイ砂混合率によらずほぼ一定、或いはケイ砂混合率の増加に伴う若干の減少傾向が見受けられる。一方、Ca 型化ベントナイトについては、OCR_b はケイ砂混合率によらずほぼ一定、或いはケイ砂混合率の増加に伴う若干の増加傾向が見受けられる。

ここで (i) で設定した式 (2.1.20)、(2.1.21) より、OCR_b(0.822,0.0,0.0)、

$OCR_b(0.822, 0.3, 0.0)$ 、 $OCR_b(0.122, 0.0, 0.0)$ 、 $OCR_b(0.122, 0.3, 0.0)$ を算出すると、

$$OCR_b(0.822, 0.0, 0.0) = 8.1629 \times 0.822 + 1.5050 = 8.215$$

$$OCR_b(0.822, 0.3, 0.0) = 3.5714 \times 0.822 + 3.0643 = 6.000$$

$$OCR_b(0.122, 0.0, 0.0) = 8.1629 \times 0.122 + 1.5050 = 2.501$$

$$OCR_b(0.122, 0.3, 0.0) = 3.5714 \times 0.122 + 3.0643 = 3.500$$

であり、これを図 2.1-32 にプロットし、またそれぞれ 2 点を通る直線を併記した図を図 2.1-33 に示す。

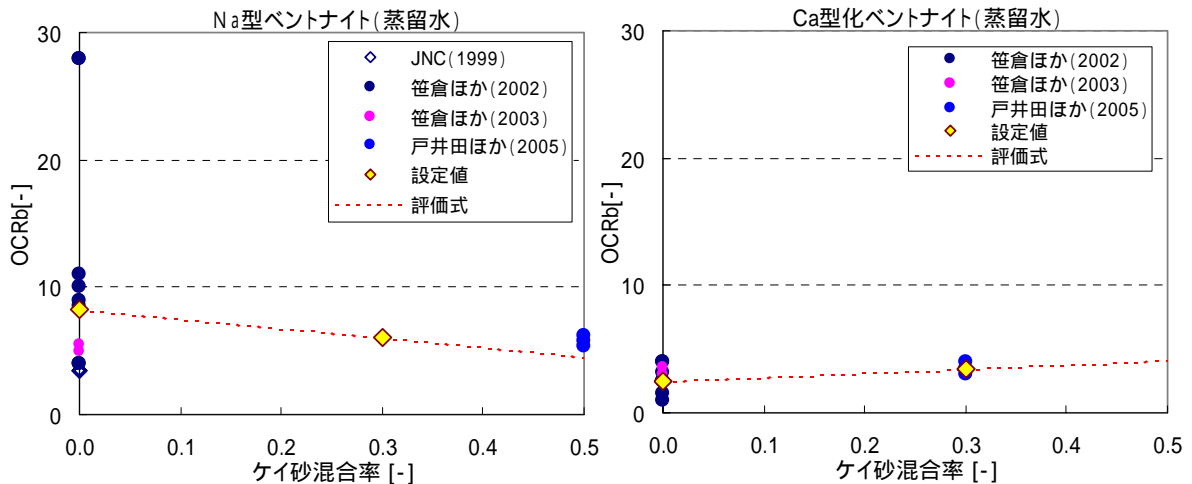


図 2.1-33 ケイ砂混合率と OCR_b の関係の評価式 (蒸留水)

図 2.1-33 より、式(2.1.20)、(2.1.21)より算出される $OCR_b(0.822, 0.0, 0.0)$ 、 $OCR_b(0.822, 0.0, 0.3)$ 、 $OCR_b(0.122, 0.0, 0.0)$ 、 $OCR_b(0.122, 0.0, 0.3)$ で定義される直線の関係式で、ケイ砂混合率と OCR_b の関係をおおよそ評価できることが分かる。

$$\begin{aligned}
 \text{Na 型ベントナイト : } & OCR_b(0.822, C_{sand}, 0.0) \\
 & = \{ (OCR_b(0.822, 0.3, 0.0) - OCR_b(0.822, 0.0, 0.0)) / 0.3 \} \times C_{sand} \\
 & \quad + OCR_b(0.822, 0.0, 0.0) \\
 & = \{ (6.000 - 8.215) / 0.3 \} \times C_{sand} + 8.215 \\
 & = -7.383 \times C_{sand} + 8.215 \tag{2.1.22}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ca 型化ベントナイト : } & OCR_b(0.122, C_{sand}, 0.0) \\
 & = \{ (OCR_b(0.122, 0.3, 0.0) - OCR_b(0.122, 0.0, 0.0)) / 0.3 \} \times C_{sand} \\
 & \quad + OCR_b(0.122, 0.0, 0.0)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \{(3.500 - 2.501)/0.3\} \times C_{\text{sand}} + 2.501 \\
 &= 3.330 \times C_{\text{sand}} + 2.501
 \end{aligned}
 \tag{2.1.23}$$

以上の式について、傾き、及び切片を ESP について線形補間することにより、 $OCR_b(ESP, C_{\text{sand}}, 0.0)$ の関係式を以下のように設定することとする。

$$\begin{aligned}
 &OCR_b(ESP, C_{\text{sand}}, 0.0) \\
 &= \{(-7.383 - 3.330)/(0.822 - 0.122) \times ESP + 3.330 - \\
 &\quad (-7.383 - 3.330)/(0.822 - 0.122) \times 0.122\} \times C_{\text{sand}} \\
 &\quad + (8.215 - 2.501)/(0.822 - 0.122) \times ESP + 2.501 \\
 &\quad - (8.215 - 2.501)/(0.822 - 0.122) \times 0.122 \\
 &= \{-15.3017 \times ESP + 5.1977\} \times C_{\text{sand}} + 8.1629 \times ESP + 1.5050
 \end{aligned}$$

よって

$$\begin{aligned}
 &OCR_b(ESP, C_{\text{sand}}, 0.0) \\
 &= \{-15.3017 \times ESP + 5.1977\} \times C_{\text{sand}} + 8.1629 \times ESP + 1.5050
 \end{aligned}
 \tag{2.1.24}$$

() ρ_c の影響

表 2.1-7 に示す OCR_b のうち、Na 型相当のベントナイト単体、Ca 型相当のベントナイト単体、及び Na 型ケイ砂 30wt% 混合ベントナイトに対する値を、陽電荷密度 ρ_c を横軸にプロットした図を図 2.1-34、35 に示す。

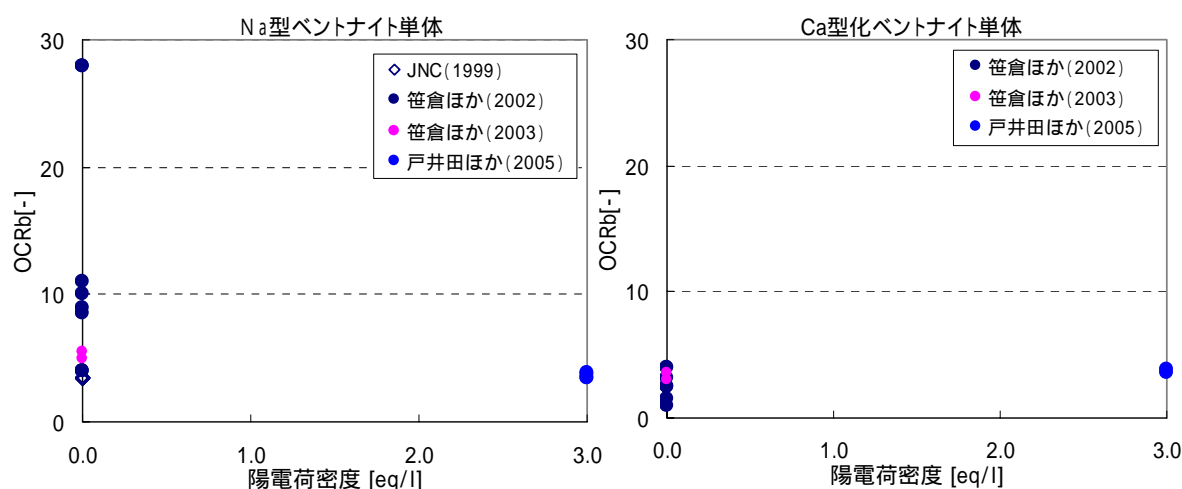


図 2.1-34 陽電荷密度と OCR_b の関係 (ベントナイト単体)

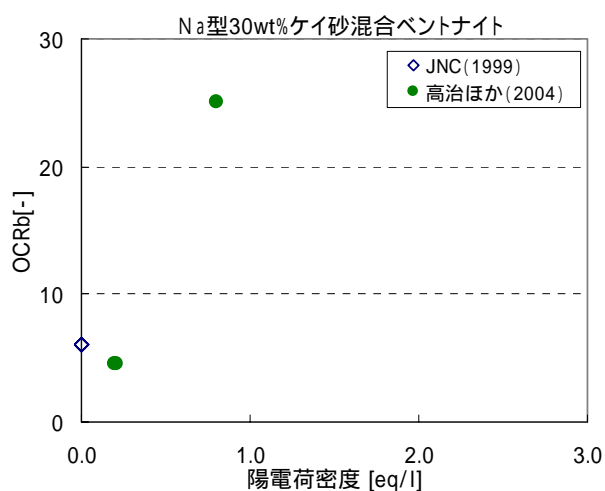


図 2.1-35 陽電荷密度と OCR_b の関係
(Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)

図 2.1-34 より、Na 型ベントナイトでは陽電荷密度の増加に伴い OCR_b は減少傾向、Ca 型化ベントナイトではほぼ一定または若干の増加傾向を示している。一方図 2.1-35 では、陽電荷密度の変化に伴う Na 型 30wt% ケイ砂混合ベントナイトの OCR_b の傾向はよく分からない。

Na 型、及び Ca 型化ベントナイト単体で $\rho_c = 3.0$ [eq/l] の供試体の ESP はそれぞれ 0.912、0.145 と測定されていることから(戸井田ほか、2005)、(ii) で設定した式(2.1.24)より、OCR_b(0.912, 0.0, 0.0)、OCR_b(0.145, 0.0, 0.0) を算出すると、

$$\begin{aligned} \text{OCR}_b(0.912, 0.0, 0.0) &= \{-15.3017 \times 0.912 + 5.1977\} \times 0.0 + 8.1629 \times 0.912 + 1.5050 \\ &= 8.950 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{OCR}_b(0.145, 0.0, 0.0) &= \{-15.3017 \times 0.145 + 5.1977\} \times 0.0 + 8.1629 \times 0.145 + 1.5050 \\ &= 2.689 \end{aligned}$$

が得られる。これを図 2.1-34 にプロットし、この点を通り、かつ $\rho_c = 3.0$ [eq/l] のデータから最小二乗法により定義した直線も併記した図を図 2.1-36 に示す。

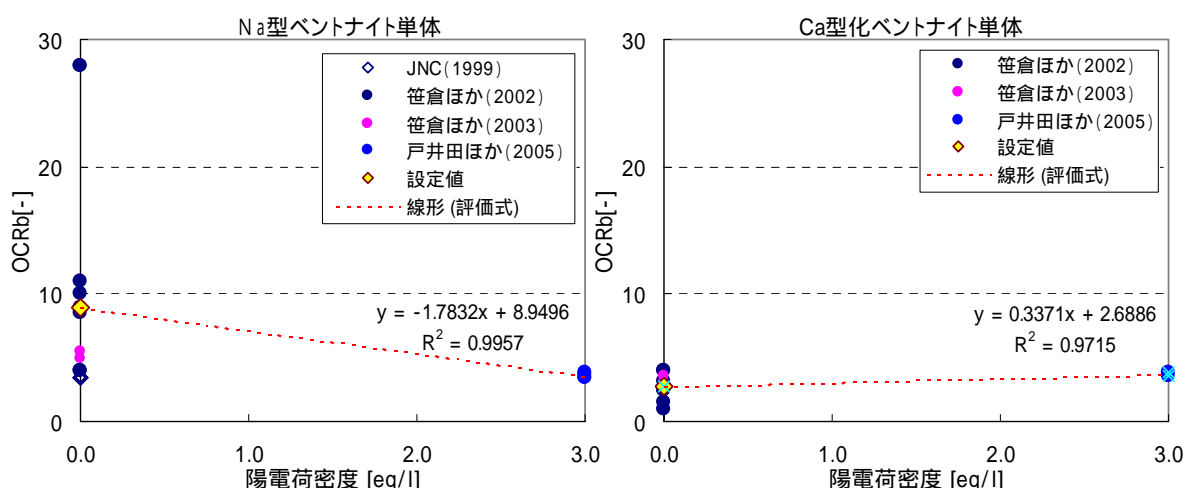


図 2.1-36 陽電荷密度と OCR_b の関係の評価式（ベントナイト単体）

$$\text{OCR}_b(0.912, 0.0, \rho_c) = -1.7832 \times \rho_c + 8.9496 \quad (\rho_c \leq 3.0 \text{ eq/l}) \quad (2.1.25)$$

$$\text{OCR}_b(0.145, 0.0, \rho_c) = 0.3371 \times \rho_c + 2.6886 \quad (\rho_c \leq 3.0 \text{ eq/l}) \quad (2.1.26)$$

これらの直線の傾きを ESP について線形補間することにより、 $C_{\text{sand}}=0$ の場合の ρ_c の変化に伴う OCR_b の評価式を構築すると以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} &\text{OCR}_b(\text{ESP}, 0.0, \rho_c) \\ &= \{(-1.7832 - 0.3371)/(0.912 - 0.145) \times \text{ESP} + 0.3371 \\ &\quad - (-1.7832 - 0.3371)/(0.912 - 0.145) \times 0.145\} \times \rho_c \\ &\quad + \text{OCR}_b(\text{ESP}, 0.0, 0.0) \\ &= \{-2.7644 \times \text{ESP} + 0.7379\} \times \rho_c + 8.1629 \times \text{ESP} + 1.5050 \quad (2.1.27) \end{aligned}$$

ここで、 $C_{\text{sand}} > 0$ の場合も、すなわちケイ砂が混入されたベントナイトについても、 ρ_c の OCR_b への影響の程度はベントナイト単体 ($C_{\text{sand}}=0$) と同様である、と仮定すると、上式等により OCR_b の評価式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} &\text{OCR}_b(\text{ESP}, C_{\text{sand}}, \rho_c) \\ &= \{-2.7644 \times \text{ESP} + 0.7379\} \times \rho_c + \text{OCR}_b(\text{ESP}, C_{\text{sand}}, 0.0) \\ &= \{-2.7644 \times \text{ESP} + 0.7379\} \times \rho_c \\ &\quad + \{-15.3017 \times \text{ESP} + 5.1977\} \times C_{\text{sand}} + 8.1629 \times \text{ESP} + 1.5050 \quad (2.1.28) \end{aligned}$$

この評価式に $C_{sand}=0.3$ 、 $ESP=0.822$ を代入して得られる ρ_c と OCR_b の関係を図 2.1-35 にプロットした図を図 2.1-37 に示す。

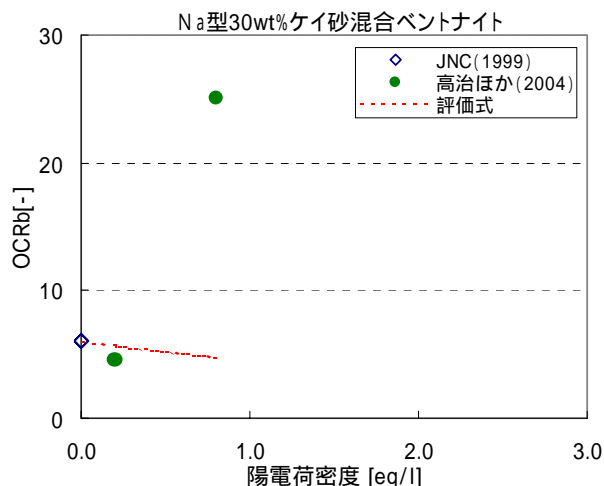


図 2.1-37 陽電荷密度と OCR_b の関係
(Na 型ケイ砂 30wt%混合ベントナイト)

図 2.1-37 をみると、 $\rho_c=0.8$ ではデータと評価値で大きく乖離しているが、データ数が少なく、また前述のとおりデータからは ρ_c と OCR_b の明確な関係が見出せないことから、ここではケイ砂混合ベントナイトについても、 ρ_c の OCR_b への影響の程度はベントナイト単体 ($C_{sand}=0$) と同様である、と仮定し評価することとする。

(9)膨潤挙動評価式のまとめ

(1)～(8)の検討結果より、設定したベントナイト系材料の膨潤挙動評価パラメータの関係式を以下にまとめる。

$$\begin{aligned} \kappa_0 &= 0.0086 \\ \xi(ESP, C_{sand}, \rho_c) &= -(0.0297 \times C_{sand} + 0.0039) \times \rho_c - 0.0272 \times C_{sand} + 0.0198 \end{aligned} \tag{2.1.19}$$

$$\begin{aligned} OCR_b(ESP, C_{sand}, \rho_c) &= \{-2.7644 \times ESP + 0.7379\} \times \rho_c \\ &\quad + \{-15.3017 \times ESP + 5.1977\} \times C_{sand} + 8.1629 \times ESP + 1.5050 \end{aligned} \tag{2.1.28}$$

ここで、

$$C_{sand} = 1 - 1 / \{C_{sme} \cdot (1 + C_{sx})\} \tag{2.1.4}$$

$$C_{sx} = \frac{G_{sme} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_s} - \frac{G_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}} \right) + \rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_{sme} \cdot \frac{\rho_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}}} \quad (2.1.15)$$

(10) 実験結果との比較

(9)でまとめた膨潤挙動評価式で計算される間隙比増分と圧密除荷試験の除荷過程における間隙比増分の関係を、図 2.1-38～44 に示す。

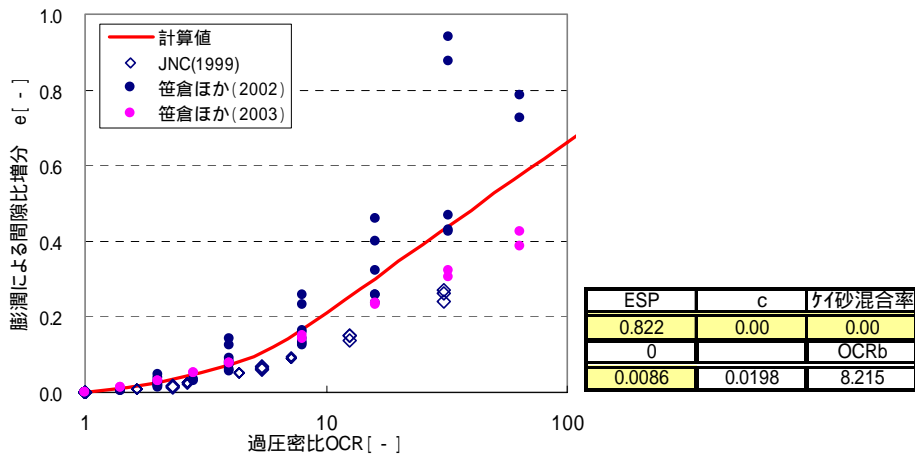


図 2.1-38 評価式と実験値の比較

(Na 型相当、ベントナイト単体、蒸留水)

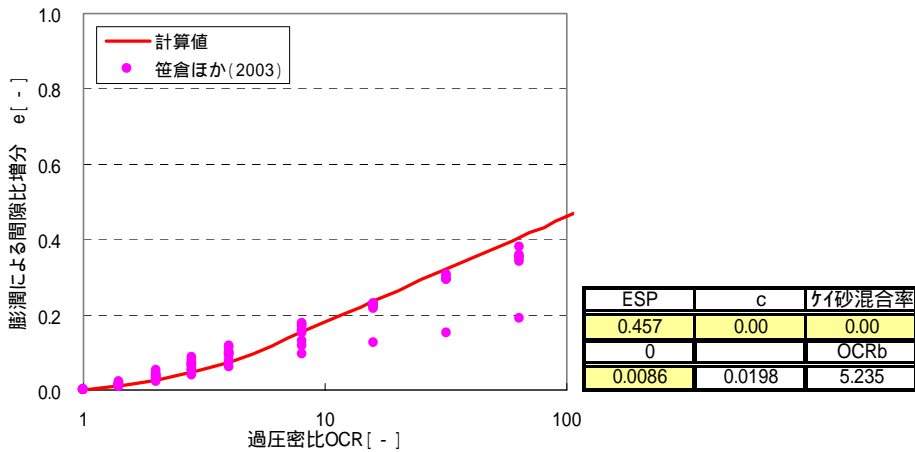


図 2.1-39 評価式と実験値の比較

(Ca 型化 50%相当、ベントナイト単体、蒸留水)

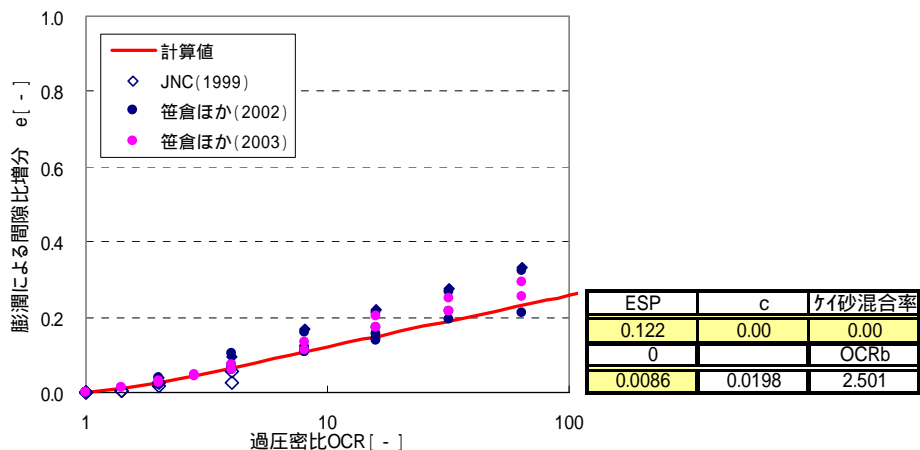


図 2.1-40 評価式と実験値の比較
(Ca型化相当、ベントナイト単体、蒸留水)

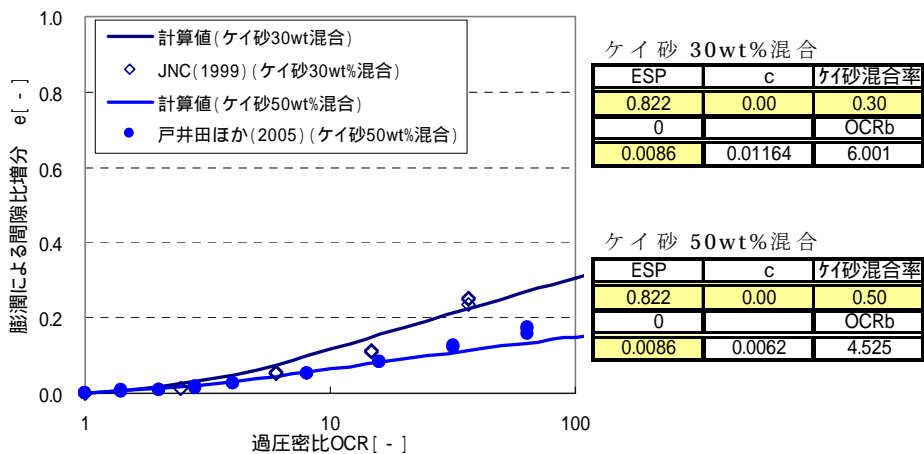


図 2.1-41 評価式と実験値の比較
(Na型相当、ケイ砂混合ベントナイト、蒸留水)

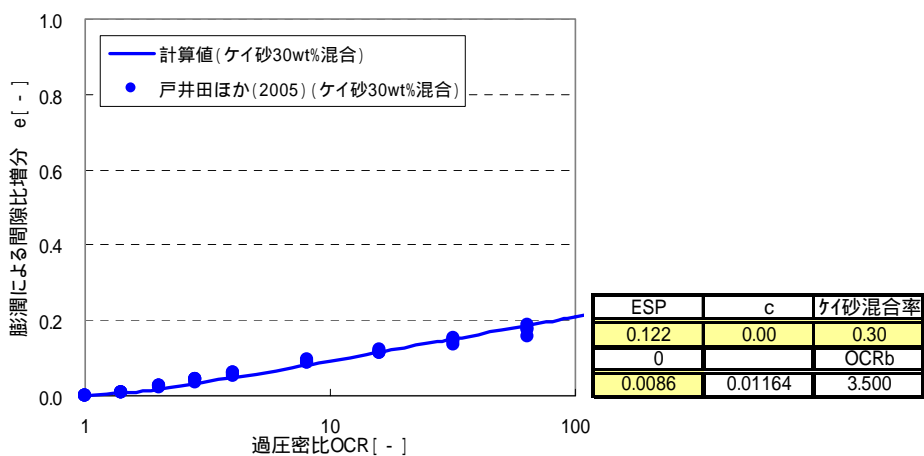


図 2.1-42 評価式と実験値の比較
(Ca型化相当、ケイ砂混合ベントナイト、蒸留水)

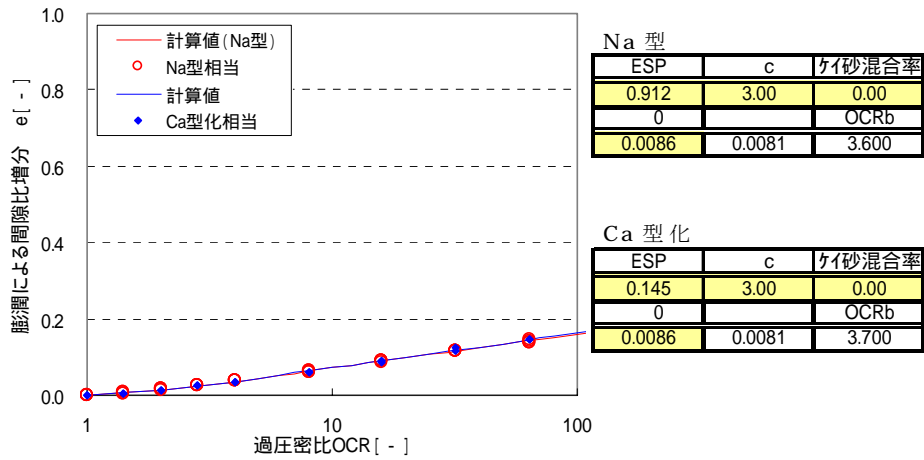


図 2.1-43 評価式と実験値（戸井田ほか、2005）の比較
（ベントナイト単体、 $c = 3.0\text{eq/l}$ ）

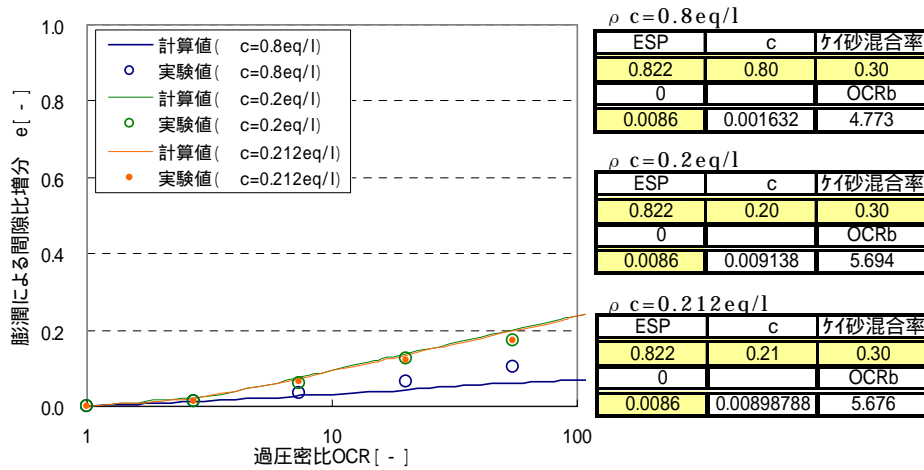


図 2.1-44 評価式と実験値（高治ほか、2004）の比較
（Na 型相当、ケイ砂 30wt% 混合ベントナイト、 $c > 0\text{eq/l}$ ）

2.1.6 限界状態パラメータ (M)

限界状態パラメータ (限界応力比) M は三軸圧縮試験から得られる p - q 面上の破壊線の傾きである。すなわちベントナイト系材料のせん断強度を規定するパラメータである。

既往の研究 (笹倉ほか、2002 等) において取得された限界状態パラメータ M を表 2.1-8 に示す。なお、CEC (陽イオン交換容量) や Na^+ (交換性ナトリウムイオンの当量濃度) を測定していない試料については、他のデータを参考に設定し、また明確に M の値を示さず「～と同等の M である」という表記にとどまっている既往の研究については、「～」に該当する M と同値を括弧書で表 2.1-8 には記載した。

表 2.1-8 限界状態パラメータ M

引用先	ESP [-]	ケイ砂混合率 [%]	初期 e_{same} [-]	液相 [-]	陽電荷密度 [eq/l]	M [-]
核燃料サイクル開発機構 (1999) [HLW二次レポート]	0.900	30	1.945	蒸留水	0.000	0.630
	0.900	0	1.600	蒸留水	0.000	0.580
笹倉ほか (2002)	0.822	0	1.416	蒸留水	0.000	0.491
	0.822	0	2.110	蒸留水	0.000	0.420
	0.822	0	2.795	蒸留水	0.000	0.410
	0.122	0	1.508	蒸留水	0.000	0.479
	0.122	0	1.677	蒸留水	0.000	0.429
笹倉ほか (2003)	0.457	0	1.390	蒸留水	0.000	0.440
	0.122	0	2.649	蒸留水	0.000	0.500
戸井田ほか (2005)	0.822	50	2.695	蒸留水	0.000	0.490
	0.122	30	1.856	蒸留水	0.000	0.470
	0.912	0	1.384	NaCl溶液	3.000	0.800
	0.145	0	1.313	CaCl ₂ 溶液	3.000	1.100
	0.822	50	2.695	蒸留水	0.000	0.490
	0.122	30	1.856	蒸留水	0.000	0.450
高治ほか (2004)	0.912	0	1.396	NaCl	3.000	0.750
	0.900	30	1.852	幌延地下水	0.200	(0.630)
	0.900	30	1.852	NaCl溶液	0.200	(0.630)
	0.900	30	1.852	NaCl溶液	0.400	(0.630)
	0.900	30	1.852	NaCl溶液	0.800	(0.630)
前田ほか(1997)	0.086	0	1.375	蒸留水	0.000	(0.580)

(1)ESP の影響

表 2.1-8 のデータのうち、蒸留水を用いて取得されたベントナイト単体試料、及びケイ砂 30wt%混合ベントナイト試料の M を、ESP を横軸にプロットした図を図 2.1-45 に示す。

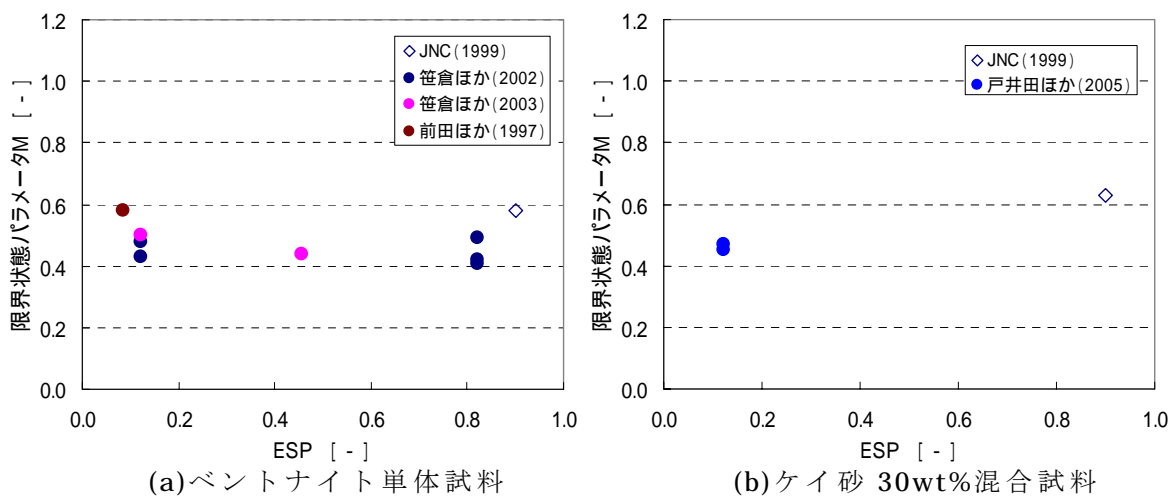


図 2.1-45 ESP と M の関係 (蒸留水)

図 2.1-45 をみると、ベントナイト単体においては ESP よりも M はほぼ一定、ケイ砂 30wt%混合試料についてはやや ESP の増加に伴う M の増加傾向があることが分かる。しかしながら後者についてはデータが少なく、また異なるロットのベントナイトを用いていることから、そもそものベントナイトの鉱物組成の違いによる M の違いということも考えられ、ESP の増加に伴い M が増加するとは言い切れない。それに加え、前述のとおり M はベントナイト系材料のせん断強度を規定するパラメータであるため、保守性を考えれば M の増加はない、と考える方が妥当である。

したがって本検討においては、ESP の変化による M の変化は考えないこととする。

(2) ρ_{sme} の影響

ケイ砂の混合率によって相対的に ρ_{sme} が異なる試料の M を比較することによって検討を加える。

表 2.1-8 のデータのうち、Na 型相当、及び Ca 型化相当のベントナイトに対して、蒸留水を用いて取得された M とケイ砂混合率の関係を図 2.1-46 に示す。

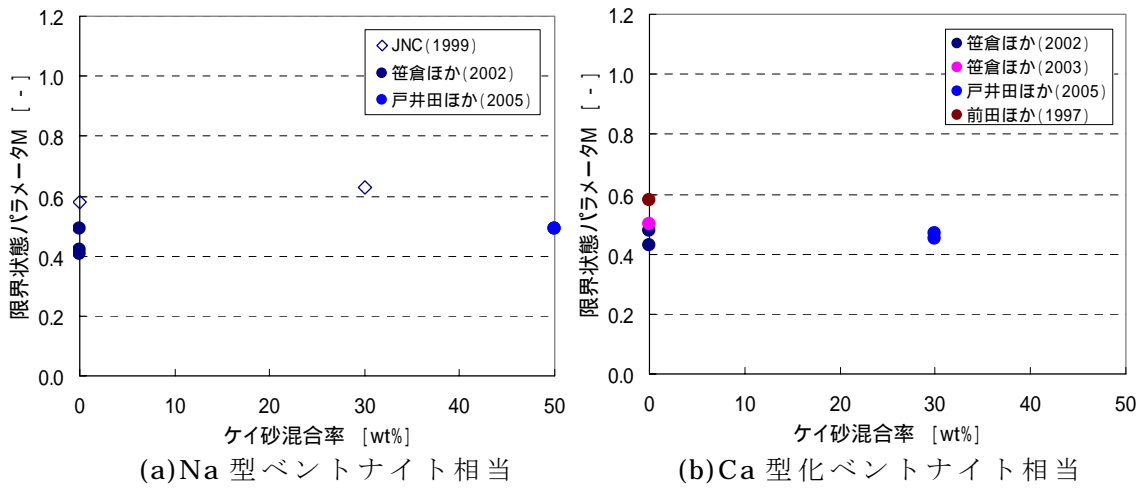


図 2.1-46 ケイ砂混合率と M の関係 (蒸留水)

図 2.1-46 をみると、Na 型ベントナイト相当、Ca 型化ベントナイト相当の双方について、データのバラツキを考慮すれば、ケイ砂混合率によらず M はほぼ一定となっていることが分かる。

以上より、本検討においては、モンモリロナイトの溶解に伴う M の変化はないものとして設定することとする。

(3) の影響

表 2.1-8 のデータのうち、Na 型相当、及び Ca 型化相当のベントナイト単体に対して、陽電荷密度の異なる試験溶液を用いて取得された M と陽電荷密度の関係を図 2.1-47 に示す。

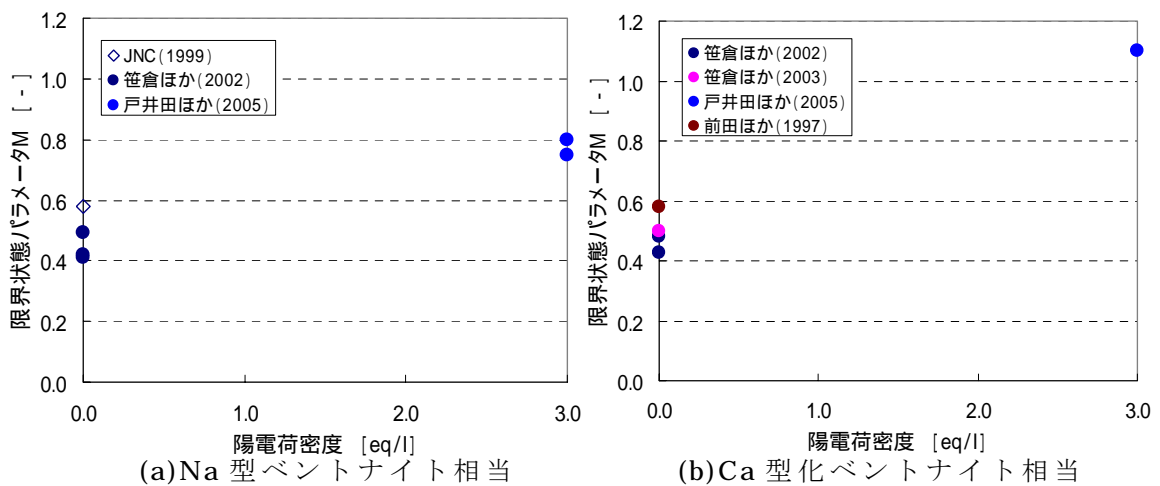


図 2.1-47 試験溶液の陽電荷密度と M の関係 (ベントナイト単体)

図 2.1-47 をみると、Na 型、Ca 型化ベントナイト相当の双方について、陽電荷密度の増加に伴う M の増加傾向が見受けられる。

また高治ほか (2004) は、ケイ砂 30wt%混合ベントナイトに対し、NaCl 溶液 0.2、0.4、0.8mol/l、及び幌延地下水を試験溶液として用いた非排水三軸圧縮試験を実施しており (図 2.1-48)、この結果をみても、降水系の M より NaCl 等が溶解している試験溶液を用いた方が M が大きくなる傾向が見られてはいるものの、この影響の明確な考察は与えることができず、降水系の M と同等の M を解析上設定するにとどまっている。

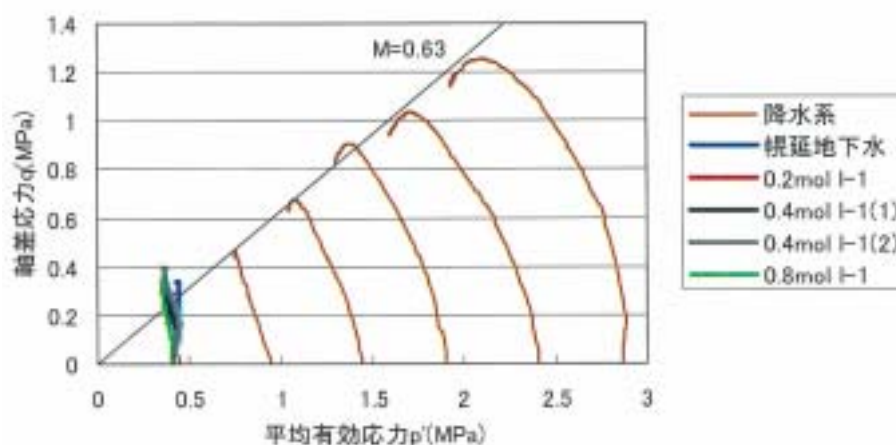


図 2.1-48 試験溶液の M への影響 (高治ほか, 2004)

以上より、陽電荷密度が上がることでベントナイト系材料の M は増加する可能性が高いと考えられるが、断定できるほどデータが豊富にないこと、また M の増加を見込まない方が保守的な強度を設定することになることから、本検討においては液相の陽電荷密度の変化に伴う M の変化はないものとして設定することとする。

(4) M の設定

(1)～(3)の検討結果より、本検討においては限界状態パラメータ M は ESP 、 ρ_{sme} 、及び ρ_c によって変化しない、一定値として取り扱うこととする。

本検討において対象とするベントナイト系材料は、表 2.1-1、2 に示した仕様の緩衝材であり、保守性も考慮し、表 2.1-8 に示したケイ砂 30wt% 混合ベントナイトの M の最小値を、本検討に用いる M として設定することとした。

$$M = 0.450$$

2.1.7 初期間隙比 (e₀)

初期間隙比は、表 2.1-1 に示した緩衝材の仕様、及び表 2.1-2 に示したベントナイト、ケイ砂の諸元より、以下のように算定、設定する。

$$\begin{aligned}
 e_0 &= \frac{V_v}{V_{sme} + V_x + V_s} && (\text{図 2.1-49 参照}) && (2.1.29) \\
 &= \frac{V_v}{\frac{W_{sme}}{G_{sme}} + \frac{W_x}{G_x} + \frac{W_s}{G_s}} && (\text{図 2.1-49 参照}) \\
 &= \frac{1 - \rho_{d0} \left(\frac{C_b \times C_{sme}}{G_{sme}} + \frac{C_b \times (1 - C_{sme})}{G_x} + \frac{C_{sand0}}{G_s} \right)}{\rho_{d0} \left(\frac{C_b \times C_{sme}}{G_{sme}} + \frac{C_b \times (1 - C_{sme})}{G_x} + \frac{C_{sand0}}{G_s} \right)} && (\text{緩衝材 } 1\text{m}^3 \text{ 当たり}) \\
 &= \frac{1}{\rho_{d0} \left(\frac{C_b \times C_{sme}}{G_{sme}} + \frac{C_b \times (1 - C_{sme})}{G_x} + \frac{C_{sand0}}{G_s} \right)} - 1 \\
 &= \frac{1}{1.6 \left(\frac{0.7 \times 0.5}{2.7} + \frac{0.7 \times 0.5}{2.7} + \frac{0.3}{2.7} \right)} - 1 \\
 &= 0.688
 \end{aligned}$$

ここで、

G_{sme}, G_x, G_s : スメクタイト、スメクタイト以外のベントナイト鉱物、ケイ砂の比重 [-]

C_b, C_{sand0} : 緩衝材中のベントナイト、ケイ砂の混合率 [wt%]

C_{sme} : ベントナイト中のスメクタイト含有率 [wt%]

ρ_{d0} : 緩衝材の乾燥密度 [Mg/m³]

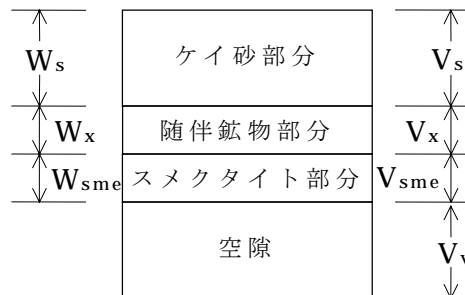


図 2.1-49 緩衝材の構成

2.1.8 透水係数の評価に関わるパラメータ

(1) 透水係数評価式

本検討において必要となる、ESP、 ρ_{sme} (または e_{sme})、 ρ_c に応じたベントナイト系材料の透水係数の評価式について、伊藤ほか(2005)は、1章において示した透水係数評価モデル、

$$k = \alpha \cdot e^\beta \quad (e : \text{間隙比}) \quad (1.1.3)$$

の考え方にに基づき、既往の実験データを ESP、 e_{sme} 、 ρ_c の影響ごとに整理し、以下の式を提案している。

$$K = 10^{1.30 \cdot \rho_c} \cdot e_{sme}^{3.48 \rho_c} \cdot K_0$$

ただし、 $\rho_c > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、 $\rho_c = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$

$$10^{1.30 \cdot \rho_c} \cdot e_{sme}^{3.48 \rho_c} > 10^{1.63 \cdot e_{sme}^{-0.24}}$$

のとき、 $K = 10^{1.63 \cdot e_{sme}^{-0.24}} \cdot K_0$

$$K > 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ のとき、 } K = 1.0 \cdot 10^{-5}$$

$$K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e_{sme}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \cdots e_{sme} \leq 7.0 \\ K_0|_{e_{sme}=7.0} \cdot \left(\frac{e_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} \cdots e_{sme} > 7.0 \end{cases} \quad (2.1.30)$$

ただし、 $K_0 < K_0|_{ESP=1}$ のとき、 $K_0 = K_0|_{ESP=1}$

また、実験値と上記評価式の比較の例を図 2.1-50、図 2.1-51 に示す。

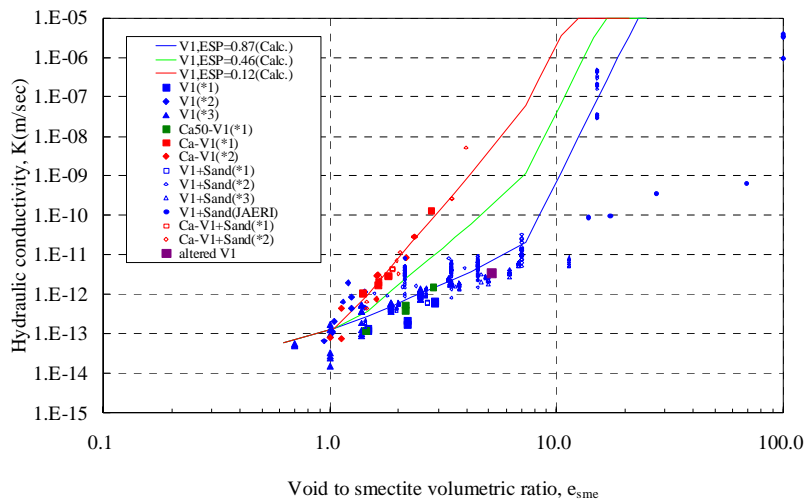


図 2.1-50 実験値と評価式の比較の例(1) (伊藤ほか,2005)

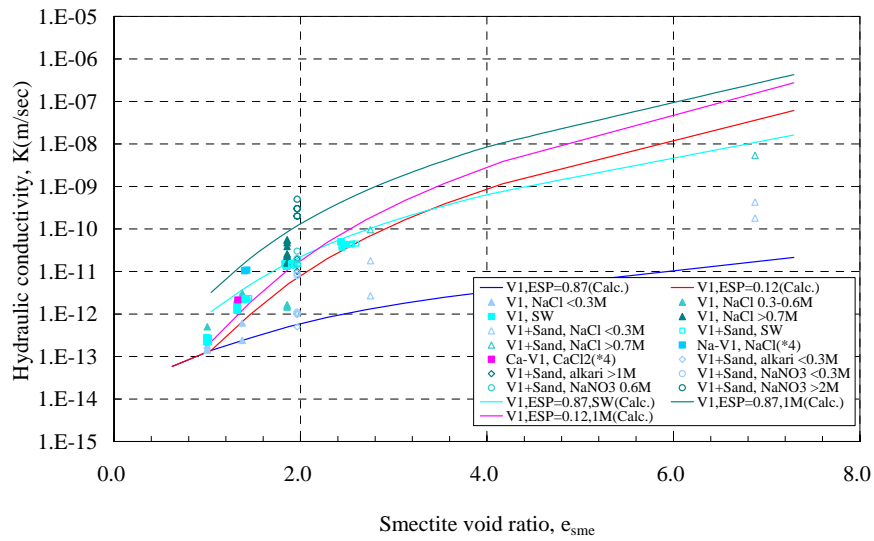


図 2.1-51 実験値と評価式の比較の例(2) (伊藤ほか,2005)

図 2.1-50、図 2.1-51 を見ると、伊藤ほか (2005) が提案した透水係数評価式(2.1.30)の評価精度が十分に高いものであることが分かる。

したがって本検討においても,透水係数の評価式として式(2.1.30)を採用することとする。

(2)変形を考慮した e'_{sme} の算定

図 2.1-52 に概念図を示すとおり、スメクタイト部分間隙比 e_{sme} は、化学・水理解析結果にもとづき設定された e_{sme} から力学的な変形によって変化する値である。なお、図中の「変換プログラム」については 3 章において取り扱う。

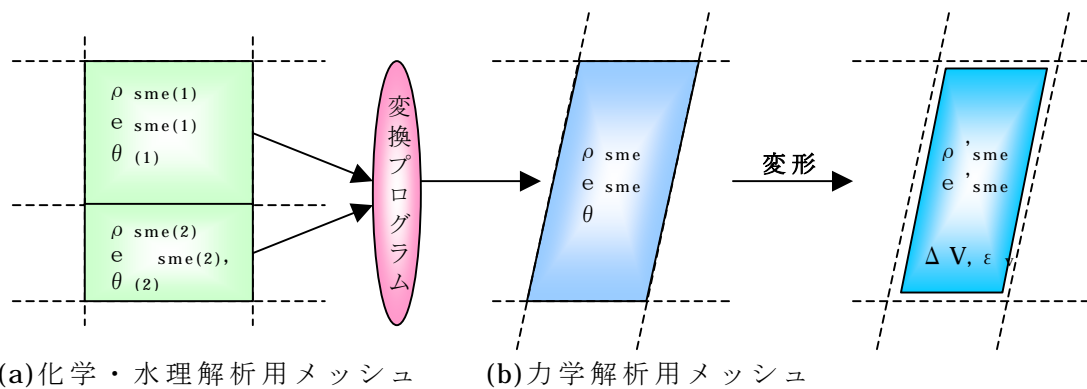


図 2.1-52 変形による e_{sme} 、 e'_{sme} の変化の概念図

よってここでは、変形を考慮したスメクタイト間隙比を e'_{sme} とおき、その算定方法を整理する。

- ・変形を考慮したスメクタイト部分間隙比 e'_{sme}

$$e'_{sme} = \frac{V'_v}{V_{sme}} \quad (2.1.31)$$

(V'_v : 変形を考慮した各力学メッシュにおける空隙量[m³])

(V_{sme} : 各力学メッシュにおけるスメクタイト量[m³])

$$= \frac{V_v + \Delta V_v}{V_{sme}}$$

(V_v : 変形を考慮しない各力学メッシュ空隙量[m³])

(ΔV_v : 変形による各力学メッシュ空隙変化量[m³]※増加が正)

$$= e_{sme} + \frac{\Delta V_v}{V_{sme}}$$

(e_{sme} : 変形を考慮しない各力学メッシュのスメクタイト部分間隙比[-] ← 変換プログラムからのインプット)

$$= e_{sme} + \frac{\frac{\Delta V_v}{V}}{\frac{V_{sme}}{V}}$$

(V : 各力学要素の初期体積[m³])

= 各力学メッシュの初期面積[m²・m])

$$= e_{sme} - \varepsilon_v \cdot \frac{V}{V_{sme}}$$

(ε_v : 各力学要素の体積ひずみ[-] ※圧縮が正)

$$= e_{sme} - \varepsilon_v \cdot \frac{e_{sme}}{V_v} \cdot V$$

(V_v : 変形を考慮しない各力学メッシュ空隙量[m³])

$$= \left(1 - \varepsilon_v \cdot \frac{V}{V_v}\right) e_{sme}$$

$$= \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{\theta}\right) e_{sme}$$

(θ : 変形を考慮しない各力学メッシュの空隙率[-])

← 変換プログラムからのインプット)

以上より、変形を考慮したスメクタイト部分間隙比は、

$$e'_{sme} = \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{\theta}\right) e_{sme} \quad (2.1.32)$$

(3) 透水係数の評価式のまとめ

(1)、(2)の結果をまとめ、図 2.1-53 にベントナイト系材料の透水係数の評価フローを示す。

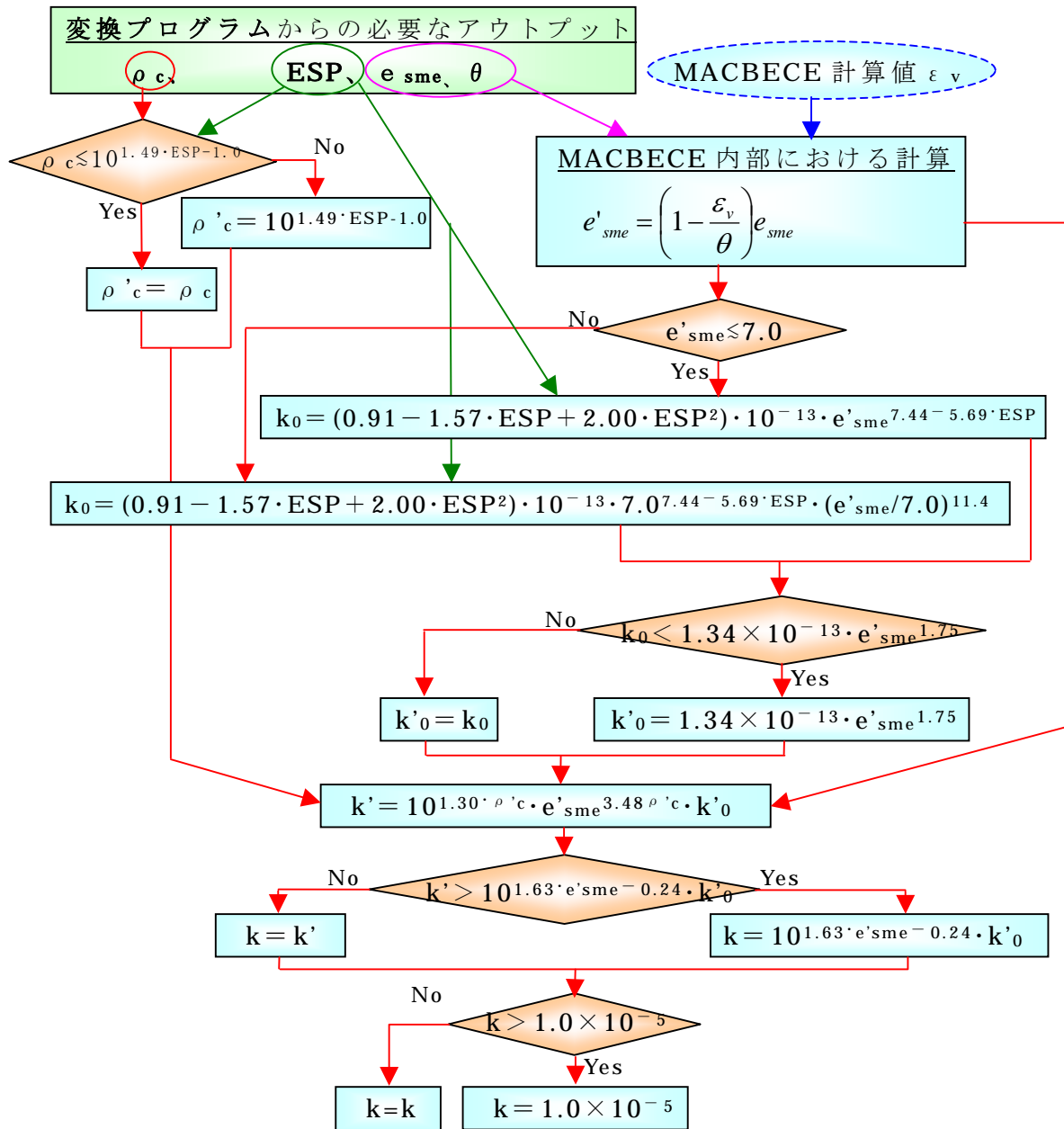


図 2.1-53 透水係数評価フロー

2.1.9 発揮すべき膨潤圧 (P_{bal})

ベントナイト系材料が、ESP、 ρ_{sme} 、 ρ_c に応じて発揮すべき膨潤圧を推定する評価式が必要であることを1章において示した。ここではその評価式を、既往の研究（戸井田ほか、2005等）において実施された膨潤圧試験の結果（付録-3参照）を元に構築する。

(1)モデル化の方針

膨潤圧を評価するための膨潤圧試験は今までに数多く実施されてきた。しかしながら、あまり体系立てて実施された実績はなく、本検討において必要としている膨潤圧評価式の構築には以下のような問題点がある。

- ・ ESP (CEC) やモンモリロナイト含有量等の詳細データまで計測している試験結果はあまりない
- ・ データにバラツキがある

一方、これらのデータ、および既往の研究成果から以下のようなことが傾向として伺える。

- ①) ESP、 ρ_{sme} 、 ρ_c では、膨潤圧に及ぼす影響は ρ_{sme} が一番大きい。
- ②) ESP、 ρ_c によらず、膨潤圧と ρ_{sme} との関係は、データのバラツキ等を考えれば、概略的にはほぼ同一の関係（膨潤圧の対数値と ρ_{sme} が直線関係）で表しうる。
- ③) しかしながら、「ESP、 ρ_c には膨潤圧は全く依存しない」という考えは、以下のような事実と矛盾する。
 - 1) 少なくとも低い乾燥密度（小さい ρ_{sme} ）においては、ESPが大きいほど膨潤圧は大きい。（前田ほか、1998、等）
 - 2) 人工海水等を用いた膨潤圧試験では、人工海水濃度が高いほど、膨潤圧が小さい。ただし、Ca型ベントナイト（クニボンド）はNa型ベントナイト（クニゲルV1）よりその影響が小さい。（田中ほか、2002、2003等）

以上のことから、本検討においては、以下のような想定のもとに関係式を構築することとする。

- ρ_{sme} が小さい場合は、ESPが小さく、 ρ_c が大きいほど膨潤圧が小さく、 ρ_{sme} が大きい場合はESP、 ρ_c に膨潤圧はあまり依存しない

ここで、既往の膨潤圧試験に用いられたベントナイトのESP等の足りない情報については、他のデータを参考に設定した。

なお、上記の考え方については、既往の Ca イオン含有率（交換性陽イオンの状態を表すパラメータで ESP と同じ位置付け）をパラメータとした圧密試験結果（膨潤曲線）にも整合し（図 2.1-54）、また HLW 二次とりまとめに記載されている、試験溶液として蒸留水、人工海水をした膨潤圧のそれぞれの評価式の関係等にも整合する（図 2.1-55）。

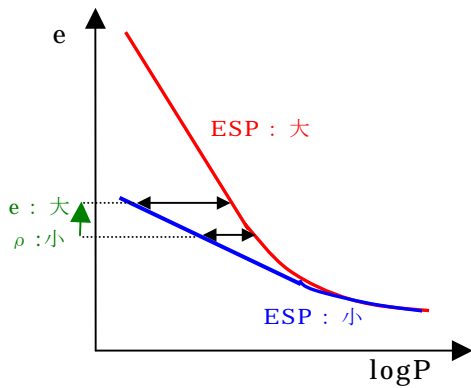


図 2.1-54 膨潤曲線の概念

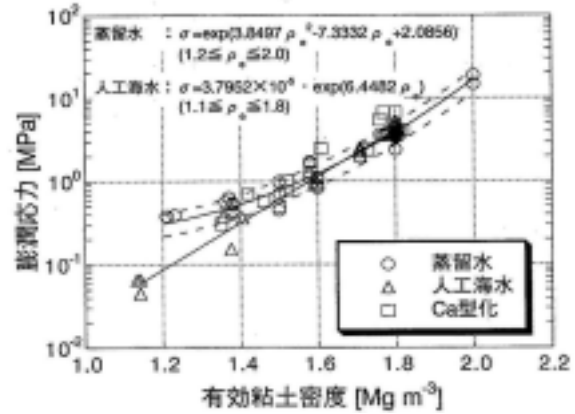


図 2.1-55 有効ベントナイト密度
～ 膨潤応力

また、海外における海水系地下水条件下における緩衝材の膨潤能力に関する知見とも整合する内容である。

- ・ Waste Disposal in Rock (Pusch, R. (1994))
緩衝材の乾燥密度が $1,800\text{kg/m}^3$ 以上であれば塩の影響は小さい
- ・ SKB/POSIVA 共同研究報告書 (Karnland, 1998 等)
高密度の緩衝材であれば塩濃度の影響は少ない
- ・ POSIVA 報告書 (Vieno and Nordman, 1999)
飽和密度が $2,000\text{kg/m}^3$ 以上であれば地下水環境に関わらず膨潤応力 5MPa を達成できる

以上より、前述の想定にしたがい、本検討においては以下のような関係式を想定し、膨潤圧評価式を構築することとした。

$$\text{平衡膨潤圧 } P_{\text{bal}} = g(\text{ESP}, \rho_{\text{sme}})^{h(\rho_c)} \cdot f(\rho_{\text{sme}}) \quad [\text{MPa}] \quad (2.1.33)$$

$f(\rho_{\text{sme}})$: で評価される最小の膨潤圧を定義する関係式

$g(\text{ESP}, \rho_{\text{sme}})$: ESP の影響を評価する関係式

$h(\rho_c)$: ρ_c の影響を評価する関係式

(2)最小膨潤圧の評価式 $f(\rho_{sme})$

ここでは、ESP が小さい場合、膨潤圧に寄与する ρ_c の影響は小さいという傾向に従い、 ρ_{sme} によって定義される最小の膨潤圧の評価式 $f(\rho_{sme})$ を構築する。

()陽電荷密度の影響を受けたベントナイトの膨潤圧

既往のデータ（付録-3 参照）より、ある程度の ρ_c を超えると ESP によらず膨潤圧が収束する傾向がある。

また、 ρ_c が 0.5eq/l 程度以上においてほぼその収束値になる結果が得られているため、 ρ_c が 0.5eq/l 以上（最大 7.7eq/l）の既往のデータ（ESP の値は無視）をプロットし、回帰線を引くと以下の関係式が得られる（図 2.1-56）。

$$P1 = 0.00168 \times \exp(5.81258 \rho_{sme}) \quad [\text{MPa}] \quad (2.1.34)$$

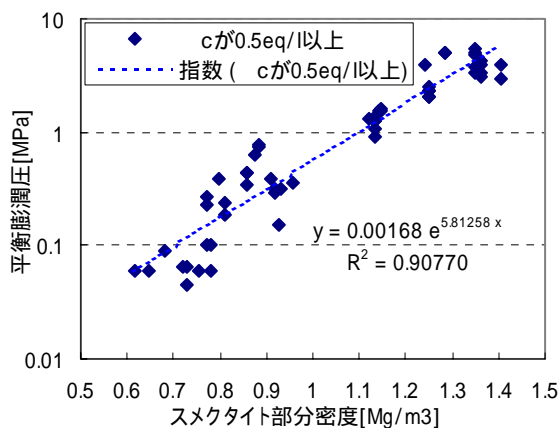


図 2.1-56 ρ_{sme} と平衡膨潤圧 ($\rho_c > 0.5\text{eq/l}$) の関係

()Ca 型化ベントナイトの膨潤圧

一方、試験溶液として蒸留水を用いた Ca 型化相当ベントナイト（ESP が 0.1 前後）の膨潤圧とスメクタイト部分密度の関係をプロットし、回帰線を引くと以下の関係式が得られる（図 2.1-57）。

$$P2 = 0.00008 \times \exp(6.5144 \rho_{sme}) \quad [\text{MPa}] \quad (2.1.35)$$

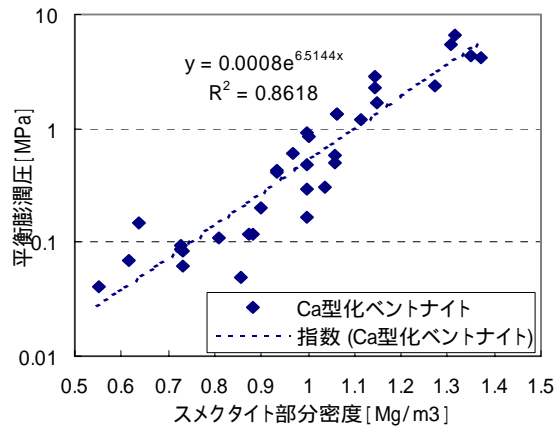


図 2.1-57 ρ_{sme} と平衡膨潤圧 (ESP が 0.1 前後 : 蒸留水) の関係

() 最小膨潤圧

図 2.1-56 と図 2.1-57 を同図上に示すと図 2.1-58 のとおりである。これより、 ρ_c が 0.5eq/l 程度以上のベントナイトと Ca 型化ベントナイト (蒸留水) の膨潤圧はほぼ同一に評価しうることが分かる。

このことから、これらのデータを全て用いた回帰線を最小膨潤圧 ($f(\rho_{sme})$) として設定することとする (図 2.1-59)。(データの範囲 : 0.589 eq/l < ρ_c < 7.7eq/l)

$$\text{最小膨潤圧 } f(\rho_{sme}) = 0.00126 \times \exp(6.05730 \rho_{sme}) \text{ [MPa]} \quad (2.1.36)$$

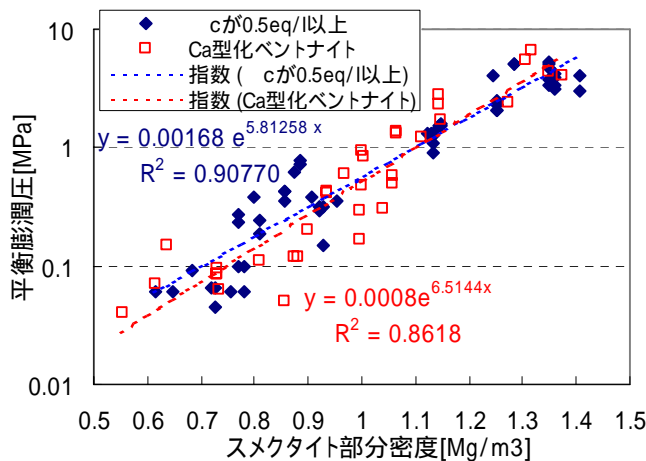


図 2.1-58 図 2.1-56,57 の重合せ

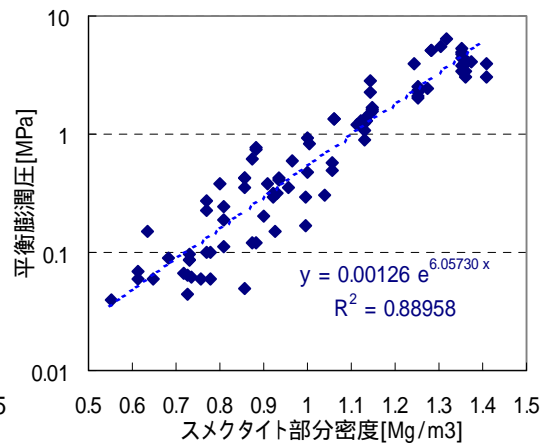


図 2.1-59 ρ_{sme} ~ 最小膨潤圧

(3)ESP の影響を評価する関係式 $g(\text{ESP}, \rho_{\text{sme}})$

ここでは、有効ベントナイト乾燥密度が小さい場合、すなわち有効スメクタイト部分乾燥密度 ρ_{sme} 小さい場合、ESP が大きいほど膨潤圧が大きく、 ρ_{sme} 大きい場合は膨潤圧に寄与する ESP の影響は小さいという傾向に従い、 ρ_{sme} 及び ESP によって定義される ESP の影響評価式 $g(\text{ESP}, \rho_{\text{sme}})$ を構築する。

本検討においては、以下の式形状で $g(\text{ESP}, \rho_{\text{sme}})$ を構築することとする。

$$g(\text{ESP}, \rho_{\text{sme}}) = L(\text{ESP}) (J(\rho_{\text{sme}}) - 1) + 1 \tag{2.1.37}$$

$L(\text{ESP})$: ESP の影響評価係数

$J(\rho_{\text{sme}})$: Na 型ベントナイト (ESP は最大) の最小膨潤圧 $f(\rho_{\text{sme}})$ に対する膨潤圧増分比

()Na 型ベントナイト (ESP は最大) の膨潤圧増分 ($J(\rho_{\text{sme}})$)

図 2.1-60 のプロットは、既往の研究における Na 型ベントナイト (ESP が 0.8 程度以上) の膨潤圧 (試験溶液は蒸留水) であり、赤線は(2)で定義された最小膨潤圧の線である。これよりスメクタイト部分密度が高い領域においてはおおそ両者は一致するが、低い領域については、Na 型の膨潤圧が、(2)で定義した最小膨潤圧よりもやや大きくなる傾向が見受けられる。

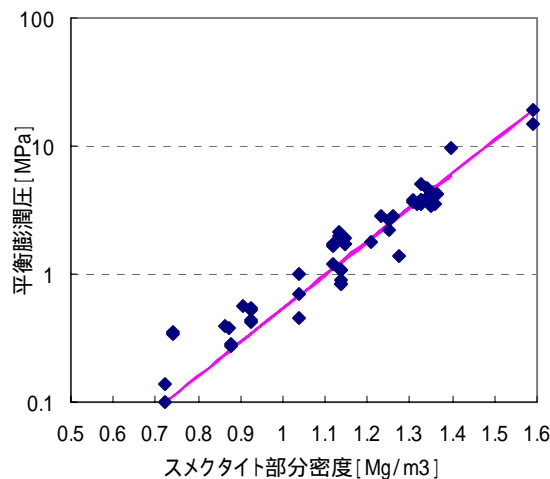


図 2.1-60 Na 型ベントナイトの膨潤圧と $f(\rho_{\text{sme}})$ の比較

図 2.1-61 は両者の比をプロットしたものであり、この関係を 2 次関数でフィッティングすると以下の回帰式が得られる。

Na 型膨潤圧と最小膨潤圧の比：

$$J(\rho_{sme}) = 2.1272 \rho_{sme}^2 - 6.126 \rho_{sme} + 5.3114 \quad (2.1.38)$$

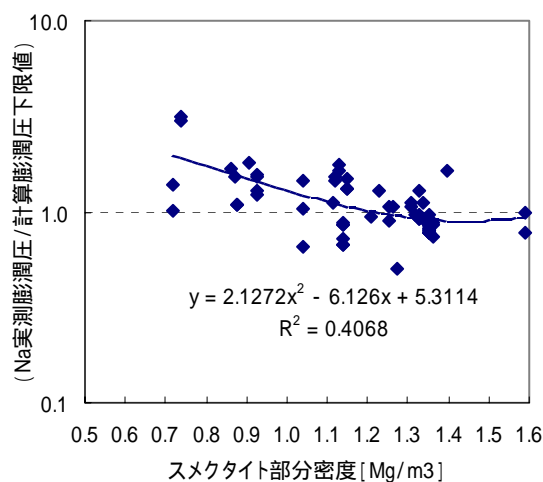


図 2.1-61 Na 型膨潤圧と最小膨潤圧の比

上記の式(2.1.38)は、① ρ_{sme} が約 1.22 Mg/m^3 で $J(\rho_{sme})$ が 1 となり、それ以上の ρ_{sme} で $J(\rho_{sme})$ が 1 以下となり Na 型ベントナイトの膨潤圧が膨潤圧下限値を下回る、②スメクタイト部分密度が 1.44 Mg/m^3 で $J(\rho_{sme})$ が最小となり、それ以上の ρ_{sme} になると逆に $J(\rho_{sme})$ が増加する等の不具合がある。

しかしながら、本研究で対象とするベントナイト系材料の初期の ρ_{sme} が 0.92 程度（乾燥密度 1.6 Mg/m^3 、ケイ砂 30wt%混合、クニゲル V1 中のスメクタイト含有率 50%に相当）であること、さらに長期的にはスメクタイトが高アルカリ溶液によって溶解し、 ρ_{sme} が低下する方向であることから、 ρ_{sme} が 1.2 Mg/m^3 以上の膨潤圧の評価精度をあげる必要が低いと考え、本研究においては上記の式を採用することとした。

()ESP の影響評価係数 $L(\text{ESP})$

式(2.1.37)と想定した場合、 $L(\text{ESP}=0.898) = 1$ (Na 型ベントナイト相当)、 $L(\text{ESP}=0.086) = 0$ (Ca 型化ベントナイト相当)である。Ca 型化率 50% ($\text{ESP} = 0.457$) の L の値については、式(2.1.33)、(2.1.36)、(2.1.37)、(2.1.38)で $h(\rho_c) = 1$ (蒸留水相当)として計算される計算値と実験データを比較し、最小二乗法により $L(\text{ESP}=0.457) = 1$ と設定した (図 2.1-62 参照)。

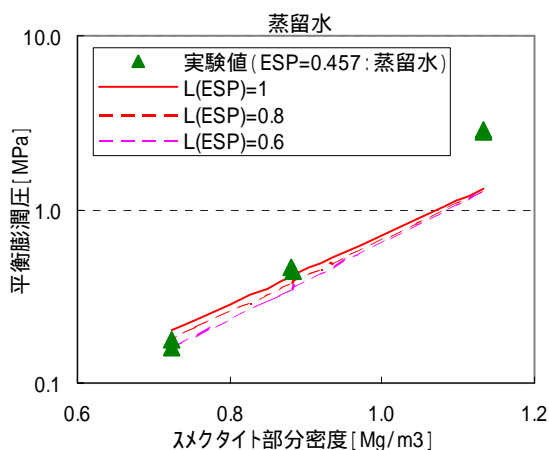


図 2.1-62 L(ESP=0.457)の設定

これより、 $L(ESP=0.086) = 0$ 、 $L(ESP=0.457) = 1$ 、 $L(ESP=0.898) = 1$ の 3 点を通る直線関係として、式(2.1.39)、図 2.1-63 のような $L(ESP)$ と ESP の関係式を設定した。

$$L(ESP) = 2.985 \cdot ESP - 0.364$$

ただし、 $L(ESP) < 0$ の時 $L(ESP) = 0$

$L(ESP) > 1$ の時 $L(ESP) = 1$

$$(2.1.39)$$

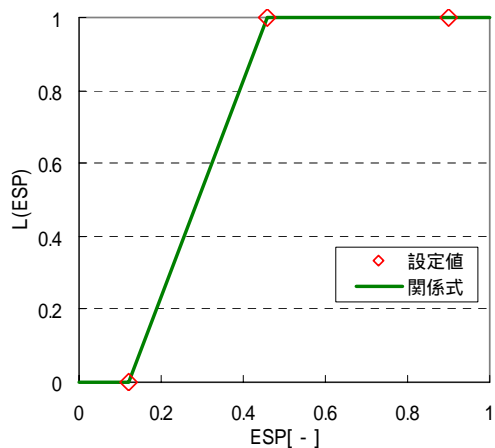


図 2.1-63 ESP と L(ESP)の関係

(4)陽電荷密度の影響 $h(\rho_c)$

ここでは陽電荷密度 ρ_c の影響に関する評価式 $h(\rho_c)$ を構築する。

$$P_{bal} = g(ESP, \rho_{sme})^{h(\rho_c)} \cdot f(\rho_{sme}) \quad [MPa] \quad (2.1.33)$$

式(2.1.33)を想定した場合、 $h(\rho_c=0)=1$ 、 $h(\rho_c>0.5)=0$ である。 $0 < \rho_c < 0.5$ にはデータが無いため、 $h(\rho_c=0)=1$ 、 $h(\rho_c>0.5)=0$ を通る直線関係として、式(2.1.40)のように設定することとした。

$$h(\rho_c) = -1.698 \cdot \rho_c + 1$$

ただし、 $h(\rho_c) < 0$ の時 $h(\rho_c) = 0$ (2.1.40)

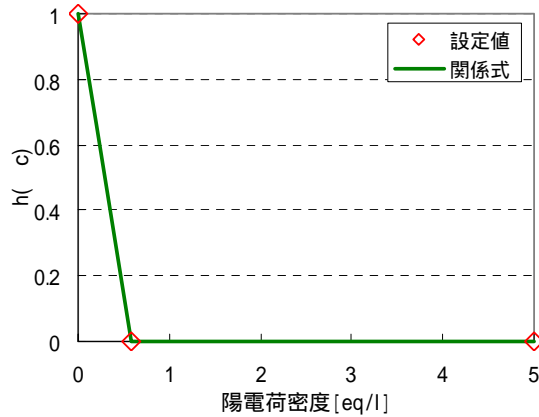
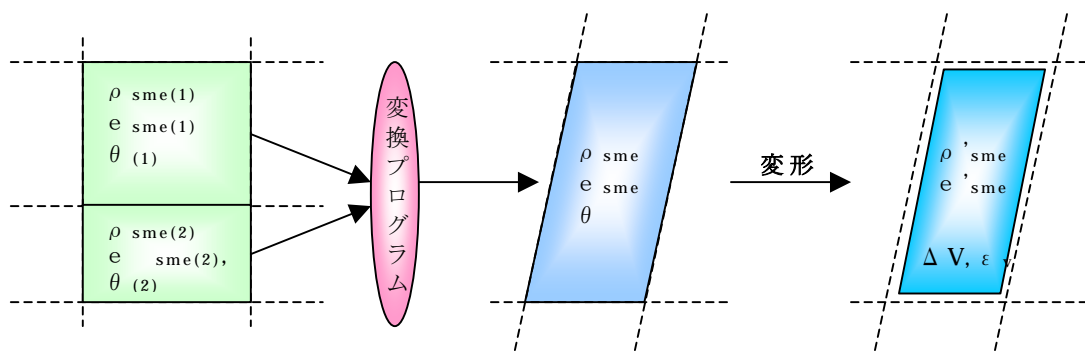


図 2.1-64 c と $h(c)$ の関係

(5)変形を考慮した ρ'_{sme} の算定

前述した図 2.1-52 の概念図のとおり、スメクタイト部分乾燥密度 ρ_{sme} は、化学・水理解析結果にもとづき設定された ρ_{sme} から力学的な変形によって変化する値である。なお、図中の「変換プログラム」については 3 章において取り扱う。



(a)化学・水理解析用メッシュ (b)力学解析用メッシュ

図 2.1-52 変形による ρ_{sme} の変化の概念図 (再掲)

よってここでは、変形を考慮したスメクタイト部分乾燥密度を ρ'_{sme} とおき、その算定方法を整理する。

- ・変形を考慮したスメクタイト部分密度 ρ'_{sme}

$$\frac{1}{\rho'_{sme}} = \frac{V'_v + V_{sme}}{W_{sme}} \quad (2.1.41)$$

(V'_v : 変形を考慮した各力学メッシュにおける空隙量[m³])

(V_{sme} : 各力学メッシュにおけるスメクタイト量[m³])

(W_{sme} : 各力学メッシュにおけるスメクタイト重量[m³])

$$= \frac{V_v + V_{sme} + \Delta V_v}{W_{sme}}$$

(V_v : 変形を考慮しない各力学メッシュ空隙量[m³])

(ΔV_v : 変形による各力学メッシュ空隙変化量[m³] ※増加が正)

$$= \frac{1}{\rho_{sme}} + \frac{\Delta V_v}{W_{sme}}$$

(ρ_{sme} : 変形を考慮しない各力学メッシュのスメクタイト部分密度[Mg/m³] ← 変換プログラムからのインプット)

$$= \frac{1}{\rho_{sme}} + \frac{\Delta V_v}{\gamma_{sme} V_{sme}}$$

(γ_{sme} : スメクタイトの単位体積重量[Mg/m³])

← 設定値 2.7[Mg/m³])

$$= \frac{1}{\rho_{sme}} + \frac{\frac{\Delta V_v}{V}}{\gamma_{sme} \frac{V_{sme}}{V}}$$

(V : 各力学要素の初期体積[m³])

= 各力学メッシュの初期面積[m²・m])

$$= \frac{1}{\rho_{sme}} - \frac{\varepsilon_v}{\gamma_{sme}} \cdot \frac{V}{V_{sme}}$$

(ε_v : 各力学要素の体積ひずみ[-] ※圧縮が正)

$$= \frac{1}{\rho_{sme}} - \frac{\varepsilon_v}{\gamma_{sme}} \cdot \frac{e_{sme}}{V_v} \cdot V$$

(e_{sme} : 変形を考慮しない各力学メッシュのスメクタイト部分
間隙比[-] ← 変換プログラムからのインプット)

(V_v : 変形を考慮しない各力学メッシュ空隙量[m³])

$$= \frac{1}{\rho_{sme}} - \frac{\varepsilon_v}{\gamma_{sme}} \cdot \frac{e_{sme}}{\theta}$$

(θ : 変形を考慮しない各力学メッシュの空隙率[-])

← 変換プログラムからのインプット)

以上より、変形を考慮したスメクタイト部分密度は、

$$\rho'_{sme} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{sme}} - \frac{\varepsilon_v}{\gamma_{sme}} \cdot \frac{e_{sme}}{\theta}} \quad [\text{Mg/m}^3] \quad (2.1.42)$$

(6)膨潤圧評価式のまとめ

(1)～(4)をまとめると、膨潤圧の評価式は以下のとおりである。

$$P_{bal} = g(\text{ESP}, \rho_{sme})^{h(\rho_c)} \cdot f(\rho_{sme}) \quad [\text{MPa}] \quad (2.1.33)$$

$$f(\rho_{sme}) = 0.00126 \times \exp(6.05730 \rho_{sme}) \quad (2.1.36)$$

$$g(\text{ESP}, \rho_{sme}) = L(\text{ESP}) (J(\rho_{sme}) - 1) + 1 \quad (2.1.37)$$

$$L(\text{ESP}) = 2.985 \cdot \text{ESP} - 0.364$$

ただし、 $L(\text{ESP}) < 0$ の時 $L(\text{ESP}) = 0$

$$L(\text{ESP}) > 1 \text{ の時 } L(\text{ESP}) = 1 \quad (2.1.39)$$

$$J(\rho_{sme}) = 2.1272 \rho_{sme}^2 - 6.126 \rho_{sme} + 5.3114 \quad (2.1.38)$$

$$h(\rho_c) = -1.698 \cdot \rho_c + 1$$

ただし、 $h(\rho_c) < 0$ の時 $h(\rho_c) = 0$ (2.1.40)

以上の評価式と実験値の対応を図 2.1-65～図 2.1-71 に示す。なお、図中のプロット凡例の数値は ESP の値を示しており、青系は Na 型相当、赤系は Ca 型化相当、緑は Ca 型化 50%相当のベントナイトの膨潤圧である。

また上記の式に加え、変形による ρ_{sme} の変化も考慮した、膨潤圧の評価フローを図 2.1-72 に示す。

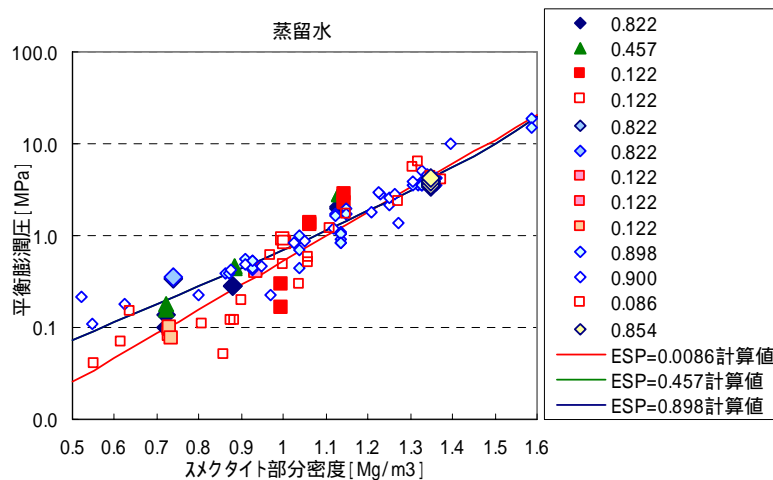


図 2.1-65 膨潤圧評価式と実験値の比較 (蒸留水)

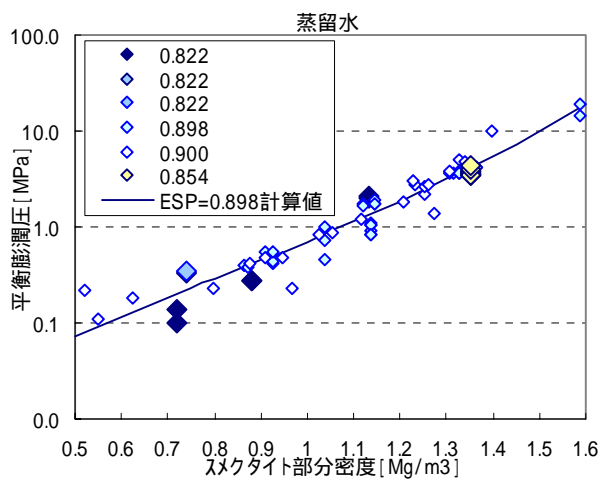


図 2.1-66 膨潤圧評価式と実験値の比較 (Na型相当：蒸留水)

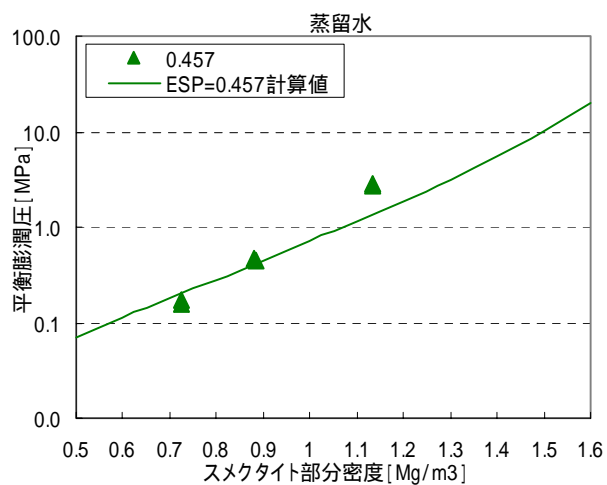


図 2.1-67 膨潤圧評価式と実験値の比較 (Ca型化50%相当：蒸留水)

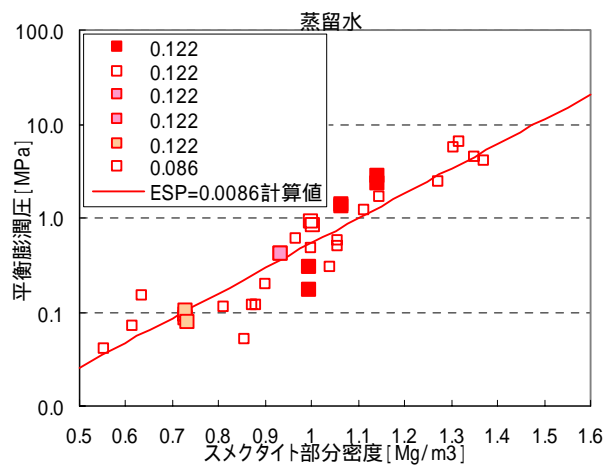


図 2.1-68 膨潤圧評価式と実験値の比較 (Ca型化相当：蒸留水)

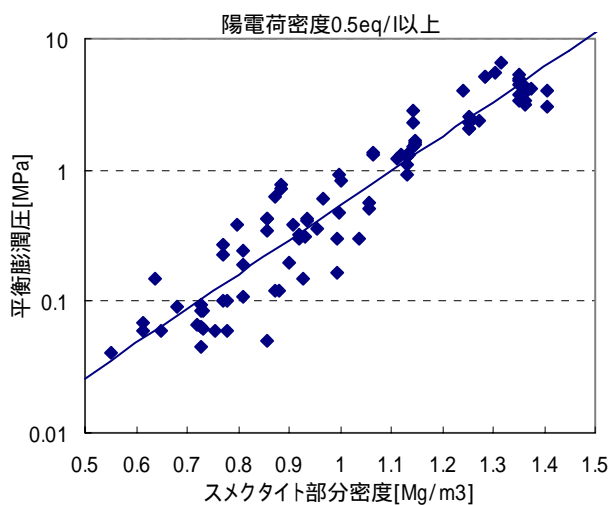


図 2.1-69 膨潤圧評価式と実験値の比較 ($c > 0.5 \text{ eq/l}$)

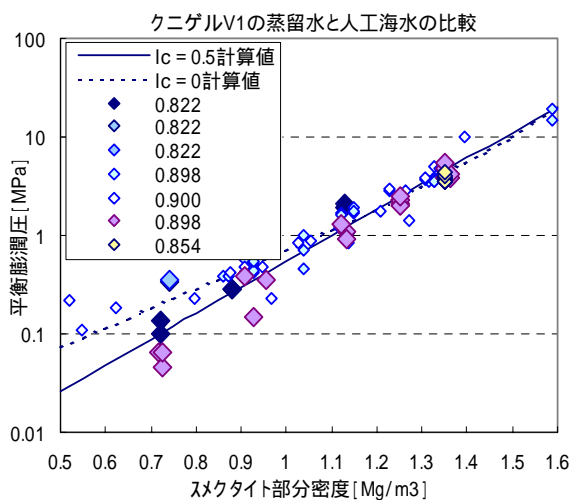


図 2.1-70 膨潤圧評価式と実験値の比較 (Na型相当)

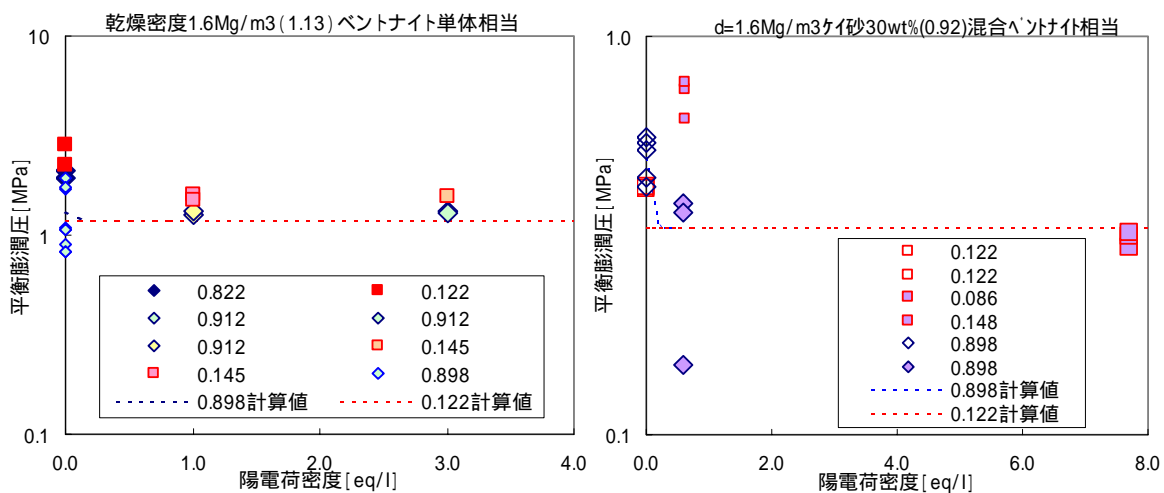


図 2.1-71 膨潤圧評価式と実験値の比較 (陽電荷密度の影響)

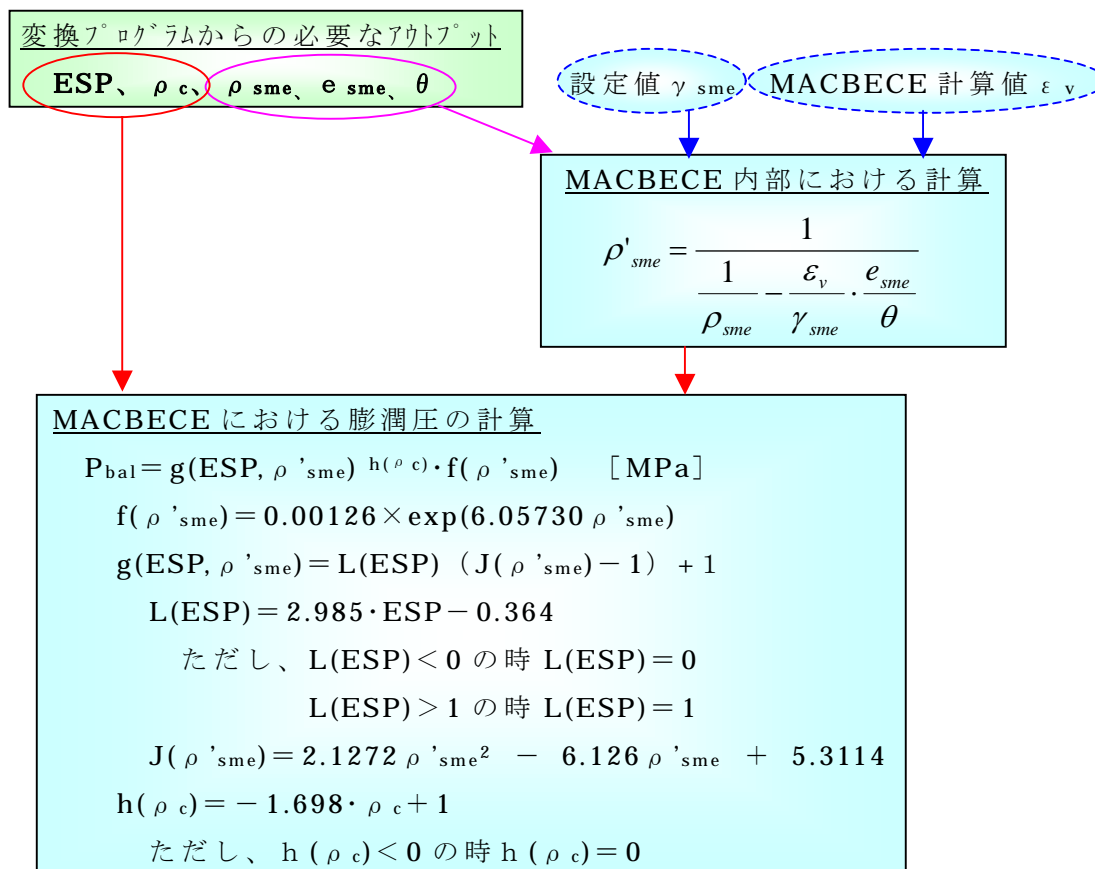


図 2.1-72 変形による変化を考慮した膨潤圧評価フロー

2.1.10 ベントナイト系材料のパラメータのまとめ

2.1.4～2.1.9 の検討、設定した内容を表 2.1-9、10 にまとめる。

表 2.1-9 ベントナイト系材料のパラメータの設定(1)

パラメータ	関係式
材料	緩衝材
ケイ砂混合率	初期仕様：30wt% ($C_{sand0}=0.3$)
乾燥密度	初期仕様：1.6Mg/m ³ ($\rho_{d0}=1.6$ Mg/m ³)
圧縮指数 λ	0.0842
膨潤指数 κ	$\kappa_0 + \xi(OCR)\exp\{\xi(OCR-1)\}$ [$1 < OCR < OCR_b$]
	$\kappa_0 + \xi(OCR_b)\exp\{\xi(OCR_b-1)\}$ [$OCR > OCR_b$]
	κ_0 ：初期膨潤指数(0.0086)
非可逆比 Λ	$1 - \kappa / \lambda$ (λ 、 κ は上記の式)
浸透膨潤パラメータ ξ	$-(0.0297 \times C_{sand} + 0.0039) \times \rho_c - 0.0272 \times C_{sand} + 0.0198$ (ただし $\xi < 0$ の場合は $\xi = 0$)
	C_{sand} ：実験データに対応するケイ砂混合率
	$C_{sand} = 1 - 1 / \{C_{sme} \cdot (1 + C_{sx})\}$ (C_{sme} ：ベントナイト中のスメクタイト含有率(0.5))
	C_{sx} ：非膨潤性・膨潤性鉱物(スメクタイト)の比 $C_{sx} = \frac{G_{sme} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_s} - \frac{G_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}}\right) + \rho_{d0} \cdot C_{sand0}}{G_{sme} \cdot \frac{\rho_{sme} \cdot \theta}{G_{sme} - \rho_{sme}}}$ (G_{sme} ：ベントナイト構成鉱物・生成二次鉱物の比重(2.7) G_s ：ケイ砂の比重(2.7))
浸透膨潤パラメータ OCR_b	$\{-2.7644 \times ESP + 0.7379\} \times \rho_c$ $+ \{-15.3017 \times ESP + 5.1977\} \times C_{sand} + 8.1629 \times ESP + 1.5050$ C_{sand} 、及びそれに付随するパラメータは上記と同様
限界状態パラメータ M	0.450
ダイレタンシ一係数 D	$\frac{\lambda \Lambda}{\{M(1+e_0)\}}$ (λ 、 Λ 、 M は上記の式、 e_0 ：初期間隙比(0.688))

※化学的変遷指標(インプットとして与えられるパラメータ)は以下のとおり。

- ・ ESP：交換性ナトリウム率 [-]
- ・ ρ_{sme} ：スメクタイト部分乾燥密度 [Mg/m³]
- ・ e_{sme} ：スメクタイト部分間隙比 [-]
- ・ ρ_c ：陽電荷密度 [eq/l]
- ・ θ ：空隙率

表 2.1-10 ベントナイト系材料のパラメータの設定(2)

パラメータ	関係式
透水係数 k [m/sec]	$K = 10^{1.30 \cdot \rho_c} \cdot e'_{sme}{}^{3.48 \rho_c} \cdot K_0$ <p>ただし、$\rho_c > 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$ のとき、$\rho_c = 10^{1.49 \cdot ESP - 1.0}$</p> $10^{1.30 \cdot \rho_c} \cdot e'_{sme}{}^{3.48 \rho_c} > 10^{1.63 \cdot e'_{sme} - 0.24}$ のとき、 $K = 10^{1.63 \cdot e'_{sme} - 0.24} \cdot K_0$ $K > 1.0 \cdot 10^{-5}$ のとき、 $K = 1.0 \cdot 10^{-5}$ $K_0 = \begin{cases} (0.91 - 1.57 \cdot ESP + 2.00 \cdot ESP^2) \times 10^{-13} \times e'_{sme}{}^{7.44 - 5.69 \cdot ESP} \dots e'_{sme} \leq 7.0 \\ K_0 _{e_{sme}=7.0} \cdot \left(\frac{e'_{sme}}{7.0}\right)^{11.4} \dots e'_{sme} > 7.0 \end{cases}$ <p>ただし、$K_0 < K_0 _{ESP=1}$ のとき、$K_0 = K_0 _{ESP=1}$</p> <p>e'_{sme} : 変形を考慮したスメクタイト部分間隙比</p> $e'_{sme} = \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{\theta}\right) e_{sme}$ <p>(ε_v : 力学解析によって求まる体積ひずみ [-])</p>
発揮すべき 膨潤圧 P_{bal} [MPa]	$P_{bal} = g(ESP, \rho'_{sme})^{h(\rho_c)} \cdot f(\rho'_{sme}) \quad [\text{MPa}]$ $f(\rho'_{sme}) = 0.00126 \times \exp(6.05730 \rho'_{sme})$ $g(ESP, \rho'_{sme}) = L(ESP) (J(\rho'_{sme}) - 1) + 1$ $L(ESP) = 2.985 \cdot ESP - 0.364$ <p>ただし、$L(ESP) < 0$ の時 $L(ESP) = 0$</p> $L(ESP) > 1$ の時 $L(ESP) = 1$ $J(\rho'_{sme}) = 2.1272 \rho'_{sme}{}^2 - 6.126 \rho'_{sme} + 5.3114$ $h(\rho_c) = -1.698 \cdot \rho_c + 1$ <p>ただし、$h(\rho_c) < 0$ の時 $h(\rho_c) = 0$</p> <p>ρ'_{sme} : 変形を考慮したスメクタイト部分乾燥密度</p> $\rho'_{sme} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{sme}} - \frac{\varepsilon_v}{G_{sme}} \cdot \frac{e_{sme}}{\theta}}$ <p>(G_{sme} : スメクタイトの比重(2.7))</p> <p>ε_v : 力学解析によって求まる体積ひずみ [-])</p>

※化学的変遷指標 (インプットとして与えられるパラメータ) は以下のとおり。

- ESP : 交換性ナトリウム率 [-]
- ρ_{sme} : スメクタイト部分乾燥密度 [Mg/m³]
- e_{sme} : スメクタイト部分間隙比 [-]
- ρ_c : 陽電荷密度 [eq/l]
- θ : 空隙率

2.2 セメント系材料の力学パラメータの設定

ここでは、既往の研究（システム構築Ⅰ～Ⅲ）において構築した、セメント系材料の力学挙動評価モデルに用いられる各パラメータについて、既往の研究、及びサイクル機構殿で実施中の研究成果に基づき、化学的変遷指標との関係を定式化する。また、セメント系材料の海水環境における化学的変質機構に関する文献を調査し、起こりうる変質機構とその生起可能性、及び力学特性に及ぼす影響度について整理する。

2.2.1 セメント系材料の力学挙動評価モデル

まず、既往の研究（システム構築Ⅰ～Ⅲ）において構築した、セメント系材料の力学挙動評価モデルの概要について以下に記述する。

(1)背景

鉄筋コンクリート等のセメント系材料の変形挙動は、鉄筋とコンクリートの付着すべり、ひび割れを挟むコンクリート間の骨材のかみ合い、鉄筋の降伏など、個々の素材の非線性が複雑にかみ合って成り立っている。任意の応力状態にあるセメント系材料が示す複雑な応力-ひずみ挙動はいくつかあるが、数値解析に用いられる主な数値モデルは大きく次の3つのグループに分類することができる。

- ・線形弾性モデル
- ・非線形弾性モデル
- ・弾塑性モデル

これらのカテゴリーに属するコンクリートの力学解析モデルは多数存在し、また数値解析においても、ひび割れを含め、かなり高い精度でシミュレーションすることができるようになりつつある。

一方、本検討において評価すべきセメント系材料の力学挙動の特徴は、以下のとおりである。

- ・Ca成分に代表される成分溶出等によって剛性や強度が低下するという、非線形性を有する。
- ・通常解析で評価する、応力の増加に伴う塑性・軟化挙動ではなく、Ca成分の溶出等に伴う剛性や、強度の低下によるひずみの増加を評価する。現状において取得されている限られたデータからでは、応力-ひずみ関係を詳細にモデル化することは困難である。
- ・セメント系材料が使用される、構造躯体、充填材、廃棄体の中には、鉄筋や鋼製容器、廃棄体容器内の未充填部等が存在する。鉄筋や鋼製

容器は、地下水の流入によって長期的には腐食膨張を起こすことが考えられるが、これらの配置や仕様は現段階で確定したものではなく、ここで詳細にモデル化することは困難であり、かつ有意なことではない。

以上のような背景のもと、本研究においては、Ca成分が溶出することによって、セメント系材料の剛性、強度が徐々に低下し、体積圧縮やせん断変形が発生するといった現象を、弾塑性モデルと比べより取り扱いやすく、既存の、或いは取得する見込みのあるCa成分の溶出したセメント系材料の強度、弾性係数等をモデルに反映しやすい、非線形弾性モデルでモデル化した。また、1章で述べたベントナイト系材料の構成方程式との調和性の観点から、増分形式の解析手法を採用した。

(2)評価モデル・手法の概要

想定されるセメント系材料の変形挙動（図 2.2-1）を、1)自重と再冠水による膨潤圧の増加による変形、2)剛性低下による変形、3)強度と剛性低下による変形の3段階に区分し、等価節点外力はそれぞれ下式のように定式化した。

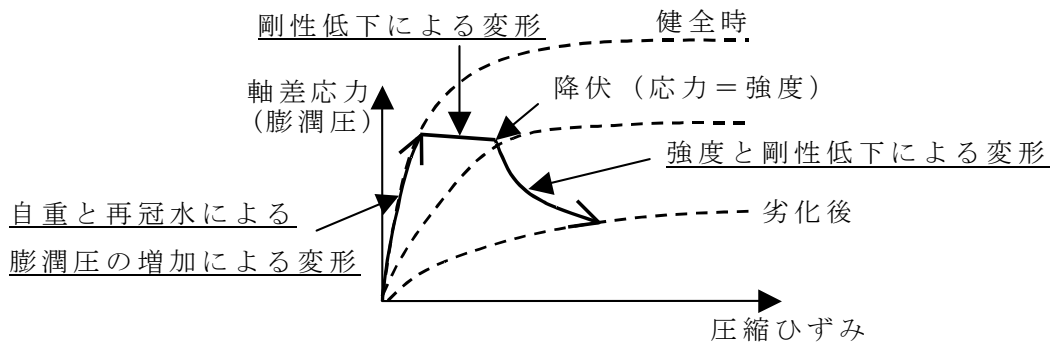


図 2.2-1 想定されるセメント系材料の変形挙動（応力 - ひずみ関係）

1)自重と再冠水による膨潤圧の増加による変形

$$\{F_0\} = \int_V [B]^T \{\sigma_s\} dV \tag{2.2.1}$$

2)剛性低下による変形

$$\{F_c\} = \int_V [B]^T [D_1] \{\varepsilon\} dV \tag{2.2.2}$$

$$\{\varepsilon\} = \left[[D_1^{-1}] - [D_0^{-1}] \right] \{\sigma\}$$

3) 強度と剛性低下による変形

$$\{F_e\} = \int_V [B]^T \{\Delta\sigma\} dV \quad (2.2.3)$$

ここで、

$[B]$: 変位-ひずみマトリックス

σ_s : ベントナイトの膨潤圧

$[D_0]$: 初期剛性 E_0 から算出される応力-ひずみマトリックス

$[D_1]$: 初期剛性 E_1 から算出される応力-ひずみマトリックス

σ, ε : セメント系材料の応力, ひずみ

$\Delta\sigma$: セメント系材料の超過応力 (図 2.2-2)

なお破壊条件に関しては、**Mohr-Coulomb** の破壊基準を用い、前述の「3 強度と剛性低下による変形」については、応力再配分法を用いることとした。なお応力の再配分にあたっては、評価の保守性を考慮し、システム構築Ⅲで追加した手法、すなわち最小主応力を変化させないように強度内に収まる応力状態に変化させる手法を採用した (図 2.2-2 参照)。

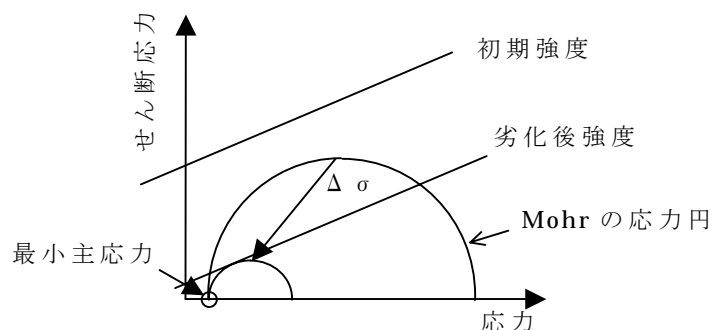


図 2.2-2 強度低下と Mohr の応力円の関係

(3)必要な力学パラメータ

まず(2)に示した評価モデルにおいて必要なパラメータは以下のとおりである。

- a)内部摩擦角 (Mohr-Coulomb の破壊基準を規定)
- b)粘着力 (Mohr-Coulomb の破壊基準を規定)
- c)弾性係数 (破壊前の変形量の算定)

これに加え、力学的変遷評価システムによる解析において必要なパラメータとして以下のものがある。

- d)ポアソン比 (2次元の変形特性を規定)
- e)単位体積重量 (自重による応力場の算定)

さらに、最終的に水理場の変遷の評価を実施することから

- f)透水係数 (水理場の評価)

も必要となり、合わせて a)～f)の 6つのパラメータが、解析上必要となる。

2.2.2 各パラメータの設定

ここでは、図 2.2-3 に示したパラメータの設定フローに従い、前述の 6つのパラメータを具体的に設定する。

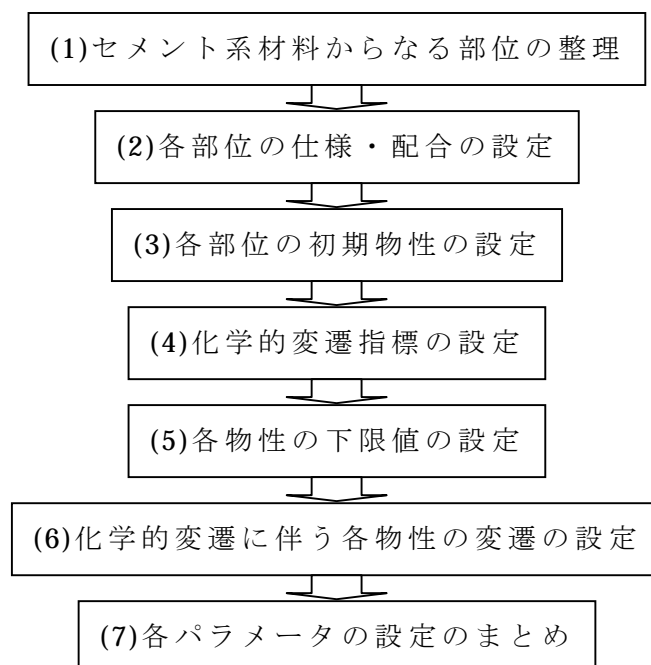


図 2.2-3 各パラメータの設定フロー

(1)セメント系材料からなる部位の整理

2.3 において解析対象とする処分坑道は堆積岩系の円形坑道（廃棄体 Gr1）である。図 2.2-4 がその概念図であり、セメント系材料からなる部位は次のとおりである。

- ・ 支保工（一次覆工（吹付）＋二次覆工）：コンクリート
- ・ インバート：コンクリート
- ・ 廃棄体パッケージ（廃棄体定置領域）：鋼材＋モルタル

※鋼製の構造躯体の中に廃棄体パッケージが定置されている（図 2.2-4）。廃棄体 Gr 1 の場合、廃棄体パッケージの中には 4 本のドラム缶（セメント固化体）があり、ドラム缶とパッケージの隙間がモルタルで充填されている。

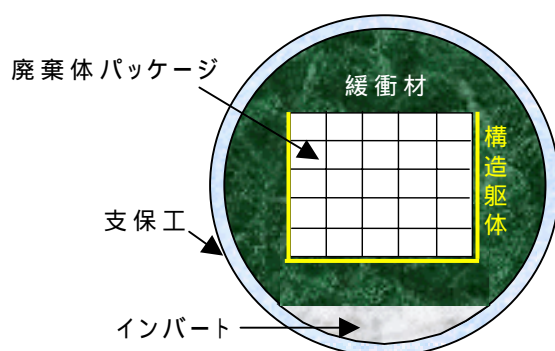


図 2.2-4 処分坑道概念図（堆積岩系）

厳密には一次覆工（吹付）、二次覆工、及びインバートでは、構成材料、配合等が異なる可能性があるが、簡単のため、これらの部位は一つの物性として取り扱うこととした。また実際の構成材料は、コンクリートと鋼材（鉄筋等）となりうるが、

- ・ 腐食膨張等に伴う鋼材のコンクリートの力学物性への影響が不明確なこと
- ・ 現状で実施されている化学的変遷解析において、鋼材の影響までは加味されていないこと
- ・ セメント系材料という観点では、Ca 成分の溶出による力学物性の低下を伴わない材料（鋼材）が入っていないと想定する方が安全側の評価となりうること

等の理由から、ここでは支保工（一次・二次覆工）とインバートは「コン

クリート」)として取り扱うこととした。

また同様の理由によって、廃棄体部については、解析上モルタルとして取り扱うこととした。

以上より、セメント系材料の物性としては、表 2.2-1 に示す 2 種類を設定することとした。

表 2.2-1 セメント系材料の物性の種類

種類	解析・評価上の材料種	対象部位	実際の構成材料
i	コンクリート	・支保工 ・インバート	・コンクリート ・鋼材(鉄筋等)
ii	モルタル	・廃棄体定置領域 (鋼製構造躯体+廃棄体パッケージ)	・モルタル ・鋼材(構造躯体,廃棄体パッケージ,ドラム缶)

(2)各部位の仕様、配合の設定

()コンクリート(支保工・インバート)

耐久性を向上させる観点から、鉄筋コンクリートの土木構造物については、水セメント比を 55%以下にすることが求められている。また、TRU 次期レポートにおける空洞の安定性評価において設定されている設計基準強度は 36MPa であり、材料のばらつきなどを考慮した安全係数を考慮して、コンクリートの安全係数を 1.2 とすると、コンクリートの圧縮強度は 43MPa 以上となる。既往のセメント水比と圧縮強度の関係(セメント協会)より、水セメント比 45%のコンクリートを想定することとする。単位セメント量を 367kg, セメントの真密度を 3.16g/cm³と細・粗骨材の真密度を 2.70g/cm³, 空気量を 4.5%として配合を設定すると表 2.2-2 のようになる。このコンクリート 1m³あたりに細・粗骨材の占める割合は約 67% となり、この配合にてコンクリート 1m³あたりの空隙率、真密度、及び飽和単位体積重量を算出すると表 2.2-3 のとおりとなる。

表 2.2-2 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	細・粗骨材量 (kg/m ³)
45	367	165	1820

表 2.2-3 コンクリートの空隙率と密度

空隙率 (%)	真密度 (Mg/m ³)	単位容積質量 (Mg/m ³)	飽和密度 (Mg/m ³)
13	2.62	2.28	2.41

$$\text{※(単位容積質量)} = 2.62 \times (1 - 0.13) = 2.28 \text{ Mg/m}^3$$

$$\text{(飽和密度)} = 2.62 \times (1 - 0.13) + 1.0 \times 0.13 = 2.41 \text{ Mg/m}^3$$

()モルタル (廃棄体定置部)

モルタルについては水セメント比を 55%とする。セメントと砂の重量比を 1 : 3 と設定し、コンクリートでの設定と同様な密度及び空気量を設定すると配合は表 2.2-4 のようになる。このモルタル 1m³あたりに細骨材の占める割合は 54%となり、この配合にてモルタル 1m³あたりの空隙率、真密度、及び飽和単位体積重量を算出すると表 2.2-5 のとおりとなる。

表 2.2-4 モルタルの配合

水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	細骨材量 (kg/m ³)
55	483	266	1449

表 2.2-5 モルタルの空隙率と密度

空隙率 (%)	真密度 (Mg/m ³)	単位容積質量 (Mg/m ³)	飽和密度 (Mg/m ³)
19	2.58	2.09	2.28

$$\text{※(単位容積質量)} = 2.58 \times (1 - 0.19) = 2.09 \text{ Mg/m}^3$$

$$\text{(飽和密度)} = 2.58 \times (1 - 0.19) + 1.0 \times 0.19 = 2.28 \text{ Mg/m}^3$$

(3)各部位の初期物性の設定

()コンクリート (支保工・インパート)

a)内部摩擦角

内部摩擦角 Φ は Mohr-Coulomb の破壊基準を規定するパラメータであり、一般的に骨材を含む健全なセメント系材料には 25° ~50° と言われている。しかしながら、下記の理由のため、本検討においては、

$$\Phi = 0 [^\circ]$$

と設定することとした。

- ・ Ca 成分の溶出に伴うコンクリートの内部摩擦角の推移に資するデータ (劣化供試体の三軸試験結果) がない。
- ・ システム構築Ⅲにおいて、内部摩擦角 Φ の長期力学挙動への影響評

価を実施し、想定した形状、応力場においては、という限定付きではあるが、内部摩擦角を 0° と設定する方が安全側の評価となることが確認された。

b)粘着力

内部摩擦角をゼロと考えた場合、粘着力 c は一軸圧縮強度の半分の値（モール円の半径）であり、ほとんど強度と同義である。

$$c_{c0} = \sigma_{c0}/2 \quad (2.2.4)$$

c_{c0} : コンクリートの初期（健全時）の粘着力

σ_{c0} : コンクリートの初期（健全時）の一軸圧縮強度

(2)で設定した水セメント比45%のコンクリートの28日材齢の一軸圧縮強度を下式（セメント協会）によって評価すると

$$\begin{aligned} \sigma_{28} &= 131 + 136 \cdot (C/W) \quad [\text{kg/cm}^2] \quad (0.40 \leq (W/C) \leq 0.50) \quad (2.2.5) \\ &= 131 + 136/0.45 \\ &= 433.2 \quad [\text{kg/cm}^2] \\ &= 43.3 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

（式出典：コンクリート工学ハンドブック，1981）

であり、TRU次期レポートの空洞安定解析における支保工の設計基準強度36MPaに、前述の安全係数1.2を乗じた43MPa程度を満足する。実際発揮しうる強度は28日強度以上となると考えられるが、ここでは保守性を考慮し、コンクリートの初期強度は28日強度相当として設定することとした。

$$\sigma_{c0} = 43 \quad [\text{MPa}] \quad \rightarrow \quad c_{c0} = 21.5 \quad [\text{MPa}]$$

c)弾性係数

設計基準強度(F_c)を36MPa、28日圧縮強度(σ_{28})、圧縮強度(f_c)を43MPaとし、土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編,2002]、建築学会式(1991年度版)、CEB-FIP式、NewRC式で弾性係数(の設計値)を推定、算定すると以下のようなになる。

[既往のコンクリートの弾性係数の推定式・設計値

(コンクリート便覧[第二版])]

・土木学会： $E_{c0} = 3.0 \times 10^4$ MPa程度 [設計値]

(設計基準強度36MPa相当)

・建築学会式(1991年度版)

$$: E_{c0} = 21000 \cdot (\gamma / 2.3)^{1.5} \cdot (F_c / 20)^{0.5} \quad (2.2.6)$$

$$= 21000 \cdot (2.28 / 2.3)^{1.5} \cdot (36 / 20)^{0.5}$$

$$= 2.78 \times 10^4 \text{ MPa} \quad [\text{設計値}]$$

$$\cdot \text{CEB-FIP 式} : E_{c0} = 0.9 \cdot 21500 \cdot (\sigma_{28} / 10)^{1/3} \quad (\text{骨材は石灰岩})$$

$$= 0.9 \cdot 21500 \cdot (43 / 10)^{1/3}$$

$$= 3.15 \times 10^4 \text{ MPa} \quad [\text{推定値}]$$

$$\cdot \text{NewRC 式} : E_{c0} = 1.2 \cdot 33500 \cdot (\gamma / 2.4)^2 \cdot (f_c / 600)^{1/3} \quad (\text{骨材は石灰岩})$$

$$= 1.2 \cdot 33500 \cdot (2.28 / 2.4)^2 \cdot (43 / 600)^{1/3}$$

$$= 1.51 \times 10^4 \text{ MPa}$$

以上の推定式のうち、建築学会式と NewRC 式が使用される実績が多く、また両式について、圧縮強度、弾性係数の実測値を用いて検証すると圧縮強度が 36MPa 程度以下の場合では、前者の方がより精度が高いことが報告されている（コンクリートの調合設計指針・同解説、日本建築学会）。このような背景もあり、後述する(6)の「化学的変遷に伴う弾性係数の設定」において建築学会式を採用することから、本検討においてはコンクリートの初期の弾性係数を、初期強度と単位容積質量から、建築学会式(1991年度版)を用いて設定することとした。

$$E_{c0} = 21000 \cdot (\gamma / 2.3)^{1.5} \cdot (\sigma_{c0} / 20)^{0.5} \quad (2.2.6)$$

$$= 21000 \cdot (2.28 / 2.3)^{1.5} \cdot (43 / 20)^{0.5}$$

$$= 3.04 \times 10^4 \text{ MPa}$$

d) ポアソン比

コンクリート標準示方書 [構造性能照査編, 2002] では、コンクリートのポアソン比は、その配合、仕様等によらず、弾性範囲内では、一般に 0.2 としてよい、としている。本検討においてもこれを採用し、

$$\nu_0 = 0.2$$

と設定する。

e) 単位体積重量

2.3 で実施する長期力学挙動解析では、再冠水後が解析対象となるため、単位体積重量としては飽和密度を用いることとする。表 2.2-3 より、

$$\gamma_{c0} = 2.41 \quad [\text{Mg/m}^3]$$

と設定する。

f) 透水係数

コンクリート便覧（第二版）では、コンクリートの水密性の評価指標として透水係数を扱い、図 2.2-5 のような水セメント比とコンクリートの透水係数の関係を記載している。

W/C = 45%、骨材最大寸法 75mm を想定し、図 2.2-5 から保守的なコンクリートの透水係数を読み取ると、

$$\begin{aligned} k_{c0} &= 10 \times 10^{-12} \text{ [ft/sec]} \\ &= 10 \times 0.305 \times 10^{-12} \text{ [m/sec]} \\ &= 3.05 \times 10^{-12} \text{ [m/sec]} \\ &\rightarrow k_{c0} = 3.1 \times 10^{-12} \text{ [m/sec]} \end{aligned}$$

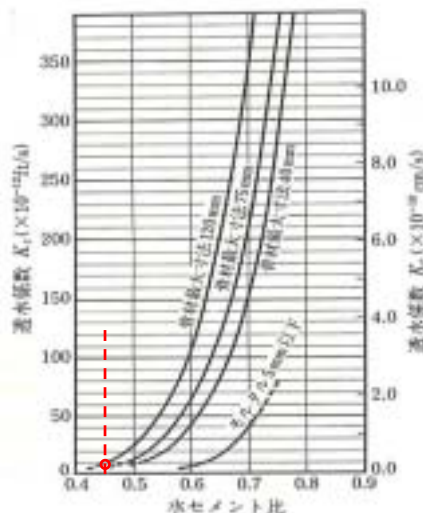


図 2.2-5 透水係数

一方戸井田ほか(2005)は、セメントペースト供試体を用いた浸漬試験、及び通水劣化試験の結果より式(2.2.7)の透水係数評価式を提示している。

$$k_p = 10^{-6.23+9.30 \times \log(\theta_p)} \text{ [m/sec]} \quad (2.2.7)$$

k_p : セメントペーストの透水係数 [m/sec]

θ_p : セメントペーストの空隙率 [-]

ここでコンクリートの初期の空隙率は表 2.2-3 より 13%であり、これを骨材の体積(67%)を無視したペーストベースの空隙率に換算すると、

$$\theta_p = 0.13 / (1.0 - 0.67) = 0.394 \text{ [-]} \quad (\text{後述する式(2.2.29)参照})$$

これを、式(2.2.7)に代入すると、

$$\begin{aligned} k_p &= 10^{-6.23+9.30 \times \log(0.394)} \\ &= 1.02 \times 10^{-10} \text{ [m/sec]} \end{aligned}$$

また三原ほか(2003)は同実験結果に対し、式(2.2.8)の透水係数評価式を提示しており、こちらで透水係数を算出すると以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} k_p &= 4.34 \times 10^{-9} \times \theta_p^3 / (1 - \theta_p)^2 \text{ [m/sec]} \quad (2.2.8) \\ &= 4.34 \times 10^{-9} \times 0.394^3 / (1 - 0.394)^2 \\ &= 7.23 \times 10^{-10} \text{ [m/sec]} \end{aligned}$$

式(2.2.7)、式(2.2.8)を用いて算出したセメントペーストベースの透水係数は、骨材は難透水性の物質であるため、コンクリートの透水性は骨材を除いたセメントペーストの透水性によって支配されると考えれば、コンクリートの透水係数とほぼ等価なものとも考えることもできる。

よってここでは、保守性も考慮し、コンクリートの初期の透水係数は、式(2.2.8)で算出した値を採用することとする。

$$k_{c0} = 7.23 \times 10^{-10} \quad [\text{m/sec}]$$

()モルタル (廃棄体定置領域)

a)内部摩擦角

コンクリート同様、

$$\Phi = 0 \quad [^\circ]$$

と設定した。

b)粘着力

コンクリートの場合と同様に、内部摩擦角をゼロと考えた場合、粘着力 c は一軸圧縮強度の半分の値 (モール円の半径) であり、ほとんど強度と同義である。

$$c_{m0} = \sigma_{m0}/2 \quad (2.2.9)$$

c_{m0} : モルタルの初期 (健全時) の粘着力

σ_{m0} : モルタルの初期 (健全時) の一軸圧縮強度

(2)で設定した水セメント比 55%のモルタルの 28 日材齢の一軸圧縮強度を下式 (セメント協会) によって評価すると、

$$\begin{aligned} \sigma_{28} &= -195 + 300 \cdot (C/W) \quad [\text{kg/cm}^2] \quad (0.50 \leq (W/C) \leq 0.70) \quad (2.2.9a) \\ &= -195 + 300/0.55 \\ &= 350.5 \quad [\text{kg/cm}^2] \\ &= 35.1 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

(式出典 : コンクリート工学ハンドブック, 1981)

実際発揮しうる強度は 28 日強度以上となると考えられるが、ここでは保守性を考慮し、モルタルの初期強度は 28 日強度相当として設定することとした。

$$\sigma_{m0} = 35 \quad [\text{MPa}] \quad \rightarrow \quad c_{m0} = 17.5 \quad [\text{MPa}]$$

c)弾性係数

仮に設計基準強度 F_c 、28 日圧縮強度 (σ_{28})、圧縮強度 (f_c) を 35MPa とし、コンクリートの場合と同様に、土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編, 2002]、建築学会式、CEB-FIP 式、NewRC 式で弾性係数を

推定すると以下のようなになる。

- ・ 土木学会： $E_{m0} = 3.0 \times 10^4$ MPa 程度
- ・ 建築学会式： $E_{m0} = 21000 \cdot (\gamma / 2.3)^{1.5} \cdot (F_c / 20)^{0.5}$
 $= 21000 \cdot (2.09 / 2.3)^{1.5} \cdot (35 / 20)^{0.5}$
 $= 2.41 \times 10^4$ MPa
- ・ CEB-FIP 式： $E_{m0} = 0.9 \cdot 21500 \cdot (\sigma_{28} / 10)^{1/3}$ (骨材は石灰岩)
 $= 0.9 \cdot 21500 \cdot (35 / 10)^{1/3}$
 $= 2.94 \times 10^4$ MPa
- ・ NewRC 式： $E_{m0} = 1.2 \cdot 33500 \cdot (\gamma / 2.4)^2 \cdot (f_c / 600)^{1/3}$ (骨材は石灰岩)
 $= 1.2 \cdot 33500 \cdot (2.09 / 2.4)^2 \cdot (35 / 600)^{1/3}$
 $= 1.18 \times 10^4$ MPa

以上は、コンクリートについての推定式、設定値であるが、後述する(6)の「化学的変遷に伴う弾性係数の設定」においては、セメントペーストの劣化供試体のデータから構築した弾性係数と圧縮強度の定式化形状にもとづき、既往のモルタル供試体のデータ（安田ほか，2002）を用いて構築した下式の評価モデル（戸井田ほか，2005）を採用している。

$$E_m = 1.999 \times 10^3 \times \sigma_m^{0.610} \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.10)$$

この式を用いた場合、

$$\begin{aligned} E_{m0} &= 1.999 \times 10^3 \times \sigma_{m0}^{0.610} \quad [\text{MPa}] \\ &= 1999 \times 35^{0.610} \\ &= 1.75 \times 10^4 \quad [\text{MPa}] \end{aligned}$$

ここで本検討においては、長期的なモルタルの弾性係数の遷移評価とも整合することから、モルタルの初期弾性係数を、初期強度から式(2.2.7)を用いて設定することとした。

$$E_{m0} = 1.75 \times 10^4 \quad [\text{MPa}]$$

d)ポアソン比

コンクリートと同様に、

$$\nu_0 = 0.2$$

と設定する。

e)単位体積重量

モルタルのみの飽和密度は、表 2.2-5 より、

$$\gamma_{m0} = 2.28 \quad [\text{Mg/m}^3]$$

である。

しかしながら、前述のとおり廃棄体部にはモルタル以外にパッケージ等の鋼材が少なからず含まれており、上記の値よりも密度が高いと考えられる。よってここでは、TRU 概念検討書（核燃料サイクル開発機構・電気事業連合会、2000）における「緩衝材の圧密・粘弾塑性変形解析」で設定している廃棄体の単位体積重量を参考に、

$$\gamma_{m0} = 3.85 \quad [\text{Mg/m}^3]$$

と設定することとした。

f) 透水係数

前述の図 2.2-5 においては、水セメント比 55% のモルタルの透水係数は定義されていないため、保守性も考慮し、W/C = 60% として透水係数を算出すると以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} k_{m0} &= 5.0 \times 10^{-12} \quad [\text{ft/sec}] \\ &= 5.0 \times 0.305 \times 10^{-12} \quad [\text{ft/sec}] \\ &= 1.525 \times 10^{-12} \\ \rightarrow k_{m0} &= 1.6 \times 10^{-12} \quad [\text{m/sec}] \end{aligned}$$

またコンクリートの場合と同様に、式(2.2.7)、式(2.2.8)を用いてセメントペーストベースの透水係数を算出すると、

$$\theta_p = 0.19 / (1.0 - 0.54) = 0.413 \quad [-] \quad (\text{後述する式(2.2.40)参照})$$

$$k_p = 10^{-6.23+9.30 \times \log(0.413)} = 1.58 \times 10^{-11} \quad [\text{m/sec}] \quad (2.2.7)$$

$$k_p = 4.34 \times 10^{-9} \times 0.413^3 / (1 - 0.413)^2 = 8.87 \times 10^{-10} \quad [\text{m/sec}] \quad (2.2.8)$$

よってコンクリートの場合と同様に、保守性も考慮し、モルタルの初期の透水係数は、式(2.2.8)で算出した値を採用することとする。

$$k_{m0} = 8.87 \times 10^{-10} \quad [\text{m/sec}]$$

(4) 化学的変遷指標の設定

セメント系材料の溶解に伴う発生事象の概要は図 2.2-6 のとおりである。

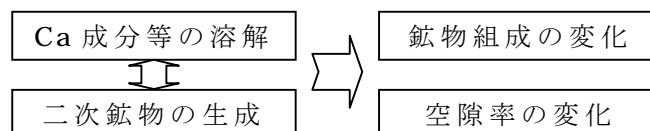


図 2.2-6 セメント系材料における事象

システム構築Ⅱ、Ⅲにおいては、化学的変遷からセメント系材料の物性を予測する手法として、以下の2通りのアプローチを実施した。

- ①) Ca 溶出率 → ビッカース硬度 → 弾性係数、強度
 ※水化組成・空隙率の変化の影響を、ビッカース硬度という指標（測定値）により評価
- ②) Ca 溶出率 → 空隙率 → 弾性係数、圧縮強度

①については、浸漬後の不均質な供試体における Ca 溶出率、ビッカース硬度の双方を場所ごとに細かく計測できるため、より広範囲な Ca 溶出率に対するデータを反映した関係式の設定が可能であるが、ビッカース硬度そのもののバラツキが大きいという問題がある。一方②については、Ca 溶出率が 100%に近いようなデータがないため限られた範囲ということではあるが、取得されているデータに対し①より相関の高い関係式が得られている。

以上のことも鑑み、さらに空隙率の方が物理現象としても感覚的に分かり易いことから、本検討においては空隙率を介在させて弾性係数、圧縮強度を予測する手法を採用することとした。ただし前述のとおり、Ca 溶出率が 100%に近いようなデータがないこと、さらにこの領域における弾性係数、圧縮強度の設定が解析結果に及ぼす影響が大きいことがシステム構築Ⅲにおいて示されているため、それぞれの物性の下限値（Ca 溶出率が 100%になったときの物性）については、別途次項(5)において検討、設定するものとする。

前述のとおりシステム構築Ⅲにおいては、実験値に基づき Ca 溶出率から空隙率を算出し、その空隙率から各物性を推定する式を設定した。この算定式を用いる場合、化学的変遷指標（化学・水理解析結果から読み込むデータ）は「Ca 溶出率」ということになる。しかしながら、化学・水理解析結果からはアウトプットとして「空隙率」も得られることから、この

空隙率を直接物性の推定・設定に使用することも考えられる。しかし、以下に示すように、Ca 溶出率から算出する「空隙率」と化学・水理解析結果から得られる「空隙率」は意味合いが異なる。

- ・ Ca 溶出率から算定する「空隙率」は、セメントペーストの実験値に基づく関係式であるため、セメントペーストにおける「空隙率」である。
- ・ 化学・水理解析により得られる「空隙率」は、設定したセメント系材料（コンクリート、モルタル等）の単位体積あたりの空隙の体積であり、骨材の体積も考慮された「空隙率」である。
- ・ 化学・水理解析により得られる「空隙率」は、新たに生成された二次鉱物分の空隙の低下が加味された「空隙率」である。

セメント系材料の Ca 成分の溶出に伴う物性変遷の詳細は(6)にて記載するが、弾性係数、圧縮強度、透水係数については、

- ・ セメントペーストで取得されたデータに基づき、モルタル、コンクリートの物性の変遷を設定する

ことを基本とするため、まずセメントペーストの物性を空隙率から設定する必要がある。ここで用いるセメントペーストベースの空隙率としては、以下の四つの設定方法が考えられる。

- ① 化学・水理解析結果に基づく「Ca 溶出率」から、セメントペーストの実験結果に基づき空隙率を算出する（二次鉱物は無視：システム構築Ⅱ、Ⅲと同様の方法）。
- ② 化学・水理解析結果に基づく「Ca 溶出率」から、セメントペーストの実験結果に基づき空隙率を算出し、さらに化学・水理解析結果に基づく「二次鉱物濃度（量）」から、セメントペーストベースの空隙率を補正する。
- ③ 化学・水理解析結果に基づく「空隙率」と「二次鉱物濃度（量）」から「二次鉱物を無視した空隙率」を算出し、さらにセメントペーストベースの「空隙率」に換算する（二次鉱物は無視）。
- ④ 化学・水理解析結果に基づく「空隙率」から、セメントペーストベースの「空隙率」に換算する。

ここで、化学・水理解析に用いる解析コードが、実験結果と十分に整合することを検証できていれば、本来であれば①と③、或いは②と④は同じ結果になるはずであるが、その検証ができていないため、本検討においてどれを採用するかを判断する必要がある。

まず弾性係数、圧縮強度については、双方の物性の大きい二次鉱物が生成されれば、セメント系材料の弾性係数、圧縮強度も大きくなる可能性がある。しかしながら、二次鉱物の物理特性が不明であること、また二次鉱物を考えない、すなわち二次鉱物は生成されない、と考える方が物性を保守的に設定することになることから、弾性係数、圧縮強度の推定については、「二次鉱物は無視した空隙率」を用いることとした。

この場合、前述の①と③に対応する空隙率が考えられる。③の場合は二段階の計算が必要となり、また生成される二次鉱物を仮定して実施する化学・水理解析結果には不確実性が含まれることから、本研究においてはより簡易である①の手法によって算出したセメントペーストベースの空隙率 θ_{p1} を用いて、弾性係数、及び圧縮強度を推定することとした。この時、化学的変遷指標は「Ca 溶出率(%)」となる。

- 弾性係数・圧縮強度：化学・水理解析結果に基づく「Ca 溶出率」
 - 「セメントペーストベースの空隙率 θ_{p1} 」
(実験結果に基づく関係式 [(6)] より)
 - 弾性係数・圧縮強度の推定
(実験結果等に基づく関係式 [(6)] より)

一方、透水係数については、生成された二次鉱物の物性に関わらず、二次鉱物はセメント系材料の空隙中の液相の移動を抑制するものと考えられるため、透水係数の推定については、「二次鉱物を考慮した空隙率」を用いることとした。

この場合、前述の②と④に対応する空隙率が考えられる。②の場合は二段階の計算が必要となることから、本研究においてはより簡易である④の手法によって算出したセメントペーストベースの空隙率 θ_{p2} (二次鉱物考慮) を用いて、透水係数を推定することとした。この時、化学的変遷指標は「空隙率(%)」である。

- 透水係数：化学・水理解析結果に基づく「空隙率 θ_c 、又は θ_m 」
 - 「セメントペーストベースの空隙率 θ_{p2} 」
(初期仕様に基づく換算式 [(6)] より)
 - 透水係数の推定
(実験結果等に基づく関係式 [(6)] より)

(5)弾性係数、強度の下限値の設定

前述のとおり、空隙率を用いて弾性係数、強度を推定する場合の、Ca成分がほとんど抜けた状態（Ca 溶出率が 100%近傍）における値については不確実性が高く、また解析結果に及ぼす影響も大きい。

そこで各物性の最小値をより妥当な値に設定するために、関連する既往の研究を調査したが、有用な参考文献はほとんど見当たらなかった。

戸井田ほか（2005）は、数年にわたって取得したデータをもとに、ビッカース硬度を用いたセメントペーストの弾性係数推定式を下記のとおり提案している。

$$\sigma_p = 1.626 \cdot H_v \quad (2.2.11)$$

σ_p : セメントペーストの圧縮強度 [MPa]

H_v : ビッカース硬度 [-]

$$H_v = H_{v0} \cdot H_v \text{ 比} \quad (2.2.12)$$

H_{v0} : ビッカース硬度の初期値 [-]

H_v 比 : ビッカース硬度比 [-]

(ビッカース硬度の初期値と変遷後の値の比)

$$H_{v0} = 198583 \cdot (W/C)^{-2.316} \quad (2.2.13)$$

$$H_v \text{ 比} = 0.930 \cdot \exp(-0.022L_c) \quad (2.2.14)$$

W/C : 水セメント比 [%]

Lc : Ca 溶出率 [%]

ここで、Lc = 100%を考えた場合、

$$\begin{aligned} H_v \text{ 比} &= 0.930 \times \exp(-0.022 \times 100) \\ &= 0.930 \times \exp(-2.2) \\ &= 0.10 \end{aligned}$$

となり、上記式に従えば、セメントペーストの圧縮強度 σ_p は初期の 1/10 程度になることになる。

また横関（2003）は、Ca成分の溶出したセメントペースト、モルタル、コンクリートのビッカース硬度を計測し、Ca 残存率とビッカース硬度比の関係を図 2.2-7 のように整理している。この図からも、Ca成分が全て溶出しても初期の 1 割程度のビッカース硬度、すなわち初期の 1 割程度の圧縮強度を発揮しうることが分かる。これは、Ca成分がすべて溶解しても Si 等の成分が残存しているためだと考えられる。

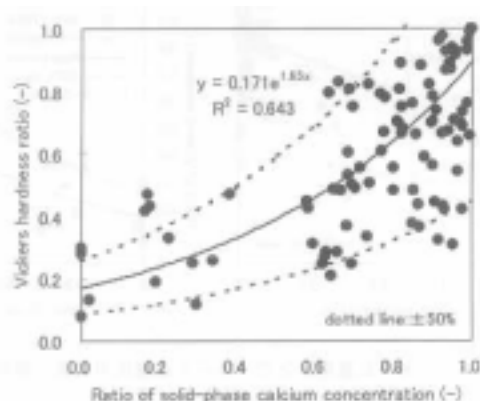


図 2.2-7 Ca 残存率とビッカース硬度比の関係 (横関, 2003)

以上より、圧縮強度の下限值は初期の 1/10 程度になると考えられるが、断定できるほどデータが豊富にあるわけではないことと、この下限値が MACBECE を用いた解析結果に大きな影響を与えることがシステム構築Ⅲで分かっていることから、保守性を考慮し、ここでは圧縮強度の下限值は初期の 1/100 として設定することとした。

$\sigma_{c(\min)}$: コンクリート (支保工、インバート) の圧縮強度の最小値
(= 0.43 MPa)

$\sigma_{m(\min)}$: モルタル (廃棄体定置部) の圧縮強度の最小値
(= 0.35 MPa)

また、式(2.2.6)、式(2.2.10)を用いて、圧縮強度の最小値に対応する弾性係数の最小値を算出すると、以下のとおりとなる。

$E_{c(\min)}$: コンクリート (支保工、インバート) の弾性係数の最小値

$$E_{c(\min)} = 21000 \cdot (2.28/2.3)^{1.5} \cdot (0.43/20)^{0.5}$$

$$= 3.039 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$E_{m(\min)}$: モルタル (廃棄体定置部) の弾性係数の最小値

$$E_{m(\min)} = 1.999 \times 10^3 \times 0.35^{0.610}$$

$$= 1.054 \times 10^3 \text{ MPa}$$

(6) 化学的変遷に伴う各物性の変遷の設定

ここでは、(1)～(5)における整理、設定に基づき、2 つのセメント系材料 (コンクリート、モルタル) に対して、解析上必要となる前述の 6 つのパラメータが Ca 成分の溶出に伴ってどのように推移するかの設定を行う。

()コンクリート (支保工・インバート)

a)内部摩擦角

(3)における初期物性の設定と同様の理由により、本検討においては、コンクリートの内部摩擦角 Φ_c は Ca 成分の溶出によらず一定値として、

$$\Phi_c = 0 [^\circ]$$

と設定した。

b)粘着力

内部摩擦角 Φ_c をゼロとした場合、前述のとおりコンクリートの粘着力 c_c は一軸圧縮強度 σ_c の 1/2 である。

$$c_c = \sigma_c / 2 \quad (2.2.4)$$

一軸圧縮強度については、基本的にはシステム構築Ⅲ同様、Ca 成分の溶出に伴うコンクリートの圧縮強度の変遷は、セメントペーストの圧縮強度の低下率と同等であるという仮定に基づき、その関係式を設定した。ただし、Ca 溶出率が 100%に達した時に、(5)で設定した圧縮強度の下限値になるように、補正関数 α_{sc} を導入した。

$$\sigma_c = \sigma_{c0} \times R_{sc} \quad (2.2.15)$$

σ_c : コンクリートの圧縮強度 [MPa]

σ_{c0} : コンクリートの初期の圧縮強度 [MPa]

(= 36 MPa : (3)初期物性より)

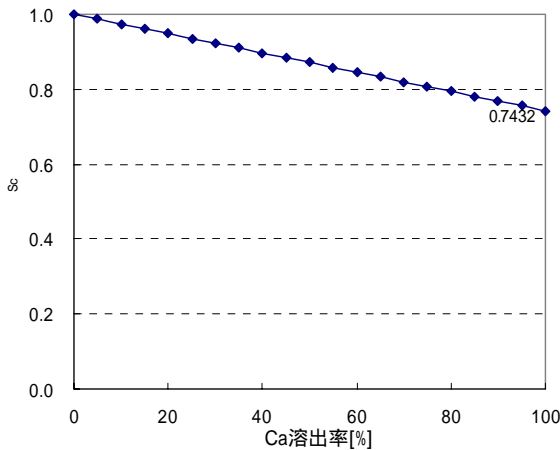
R_{sc} : Ca 溶出等に伴うコンクリートの圧縮強度の低下率 [-]

$$R_{sc} = \alpha_{sc} \times R_{sp} \quad (2.2.16)$$

α_{sc} : コンクリートの圧縮強度の下限値に関する補正関数

R_{sp} : Ca 溶出等に伴うセメントペーストの圧縮強度の低下率 [-]

$$\alpha_{sc} = 1 - (1 - R_{sc(LC=100)} / R_{sp(LC=100)}) \times (LC/100) \quad (2.2.17)$$



※Ca 溶出率に対し、 α_{Sc} を一次関数で設定

$$\begin{aligned} R_{Sc(Lc=100)} / R_{Sp(Lc=100)} &= 0.01/0.0135 \\ &= 0.7432 \end{aligned}$$

図 2.2-8 補正関数 α_{Sc}

$$\begin{aligned} R_{Sp} &= \sigma_p / \sigma_{p(LC=0)} \\ &= [308.09 \times \exp(-0.0762 \times \theta_{p1})] \\ &\quad \div [308.09 \times \exp(-0.0762 \times \theta_{p1(LC=0)})] \\ &= \exp(-0.0762 \times (a \times Lc + b)) \div \exp(-0.0762 \times b) \\ &= \exp(-0.0762 \times a \times Lc) \\ &= \exp(-0.0762 \times 1.038 \times \exp(-0.0135 \times W/C) \times Lc) \quad (2.2.18) \\ &= \exp(-0.0791 \times \exp(-0.0135 \times 45) \times Lc) \quad [W/C = 45\% \text{ の場合}] \\ &= \exp(-0.0791 \times \exp(-0.6075) \times Lc) \\ &= \exp(-0.0431 \times Lc) \end{aligned}$$

(戸井田ほか(2005)が示した関係式より)

Lc : Ca 溶出率 [%]

$$(\text{= 「溶出した Ca の量」} \div \text{「初期の Ca の量」} \times 100)$$

$R_{Sc(LC=100)}$: LC = 100% (固相の Ca 成分が全て抜けた状態) の時の、初期状態からのコンクリートの圧縮強度の低下率 [-]

$$(\text{= } \sigma_{c(LC=100)} / \sigma_{c(LC=0)} = \sigma_{c(\min)} / \sigma_{c0} = 0.01 \quad ;$$

(3)初期物性、(4)各物性の下限値より)

$R_{Sp(LC=100)}$: LC = 100% (固相の Ca 成分が全て抜けた状態) の時の、初期状態からのセメントペーストの圧縮強度の低下率 [-]

$$(\text{= } \exp(-0.0431 \times 100) = 0.0135)$$

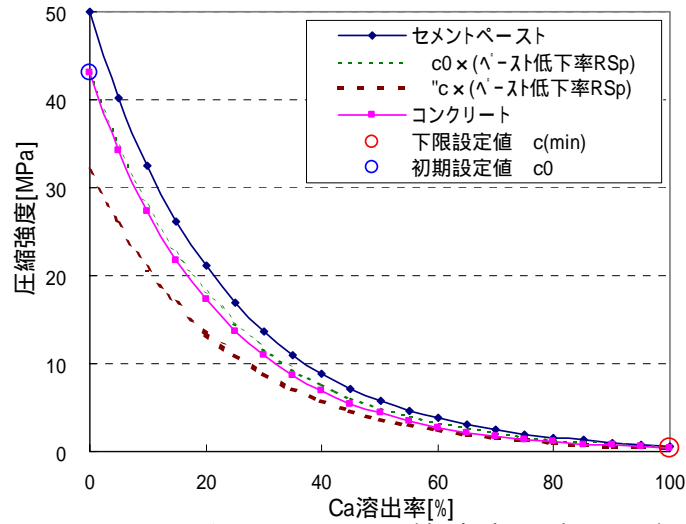


図 2.2-9 コンクリートの圧縮強度の変遷の設定

注)・「セメントペースト」は、下式により算定（戸井田ほか(2005)）。

$$\begin{aligned} \sigma_p &= 308.09 \times \exp(-0.0762 \times \theta_{p1}) \\ &= 308.16 \times \exp(-0.0762 \times (a \times Lc + b)) \\ a &= 1.038 \cdot \exp(-0.0135 \times (W/C)) \\ b &= 36.41 \cdot \ln(W/C) - 114.72 \end{aligned}$$

- ・「 $\sigma_{c0} \times (\text{ペースト低下率})$ 」は、システム構築Ⅲにおける関係式に対応
- ・「 $\sigma''_c \times (\text{ペースト低下率})$ 」は、システム構築Ⅲと同様の思想で、下限値 $\sigma_{c(\min)}$ を通るような σ''_c を逆算し、求めた曲線

c)弾性係数

戸井田ほか(2005)は、一連のセメントペーストの溶出試験をとりまとめ、セメントペーストの強度、弾性係数の評価モデルをとりまとめるとともに、既往のデータを参考にモルタル、コンクリートの弾性係数の評価モデルを整理、提示した。この中でコンクリートの弾性係数については、実績が豊富であり、かつ低強度領域においてより精度が高いと考えられる日本建築学会 1991年版 RC 構造計算規準式を援用することを推薦している。本検討においても、この式を採用し、弾性係数は、強度、及び単位容積質量から算出することとした。

$$E_c = 21000 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \times (\sigma_c / 20)^{0.5} \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.19)$$

γ : 単位容積質量 (= 2.28 Mg/m³)

σ_c : 圧縮強度 (式(2.2.15)で評価)

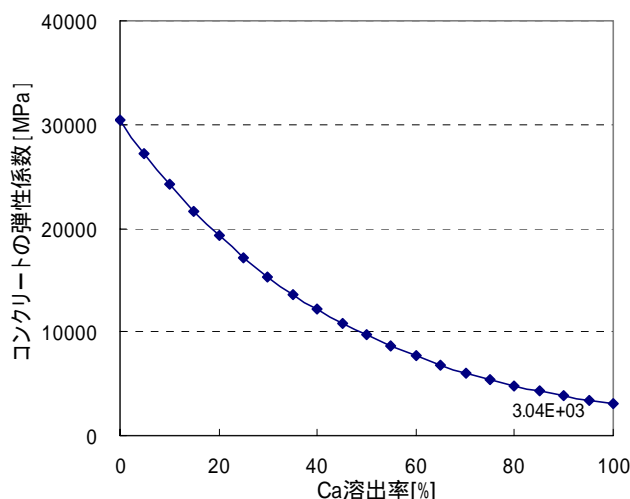


図 2.2-10 コンクリートの弾性係数の変遷の設定

d) ポアソン比

ポアソン比については、2.2.1 で記述したセメント系材料の評価モデルにおいて、

- 1) 自重と再冠水による膨潤圧の増加による変形
- 2) 剛性低下による変形

の領域、すなわちコンクリートの応力が強度に達していない状況においては、コンクリートは弾性域内にあると見なすこととした。その時、コンクリートのポアソン比は、健全時同様

$$\nu_c = \nu_{c0} = 0.2$$

と設定する。

また、コンクリートの応力が強度に達し、降伏した後のポアソン比については、健全時の値より大きな値になるものと推定される。本検討においては、システム構築Ⅲと同様、既往の研究において整理、設定された各種岩石の設計用破壊時ポアソン比（土屋,1986）を参考に、

$$\nu_c = 0.45$$

と設定した。

e) 単位体積重量

コンクリートの Ca 成分が溶出した場合、同要素内の液相の溶解 Ca 陽イオンがとどまっていれば、飽和単位体積重量は変わらないことになるが、厳密には溶解 Ca イオンが拡散や移流によって移動するため、厳密には単位体積重量は長期的には変遷する。しかしながら、その影響は小さいと考えられ、またその影響取り入れることも現実的には困難であると考えられることから、本検討においては、単位体積重量は初期から変わらないもの

として、

$$\gamma_c = \gamma_{c0} = 2.41 \quad [\text{Mg/m}^3]$$

と設定することとした。

f) 透水係数

透水係数については、基本的にはシステム構築Ⅲ同様、Ca成分の溶出に伴うコンクリートの透水係数の変遷は、セメントペーストにおける透水係数の増加率と同等であるという仮定に基づき、その関係式を設定した。

$$k_c = \beta_c \cdot k_p \quad [\text{m/sec}] \quad (2.2.20)$$

ただし、 $k_c \geq 10^{-5} [\text{m/sec}]$ の場合 $k_c = 10^{-5} [\text{m/sec}]$ (細粒砂相当)

k_c : コンクリートの透水係数 [m/sec]

β_c : 補正係数

k_p : セメントペーストの透水係数 [m/sec]

ここで k_p の評価式としては、前述のとおり戸井田ほか(2005)、三原ほか(2003)によって以下の式が提示されている。なお、ここで扱う空隙率は θ'_p は、変形による変化も考慮したセメントペーストベースの空隙率[-]である。

$$k_p = 10^{-6.23+9.30 \times \log(\theta'_p)} \quad [\text{m/sec}] \quad (2.2.21)$$

$$k_p = 4.34 \times 10^{-9} \times \theta'_p{}^3 / (1 - \theta'_p)^2 \quad [\text{m/sec}] \quad (2.2.22)$$

θ'_p : 変形による空隙率変化を考慮したセメントペーストベースの空隙率[-]

この両式による空隙率と k_p の関係を図 2.2-11 に示す。これを見るとセメントペーストの空隙率がおおよそ 0.6~0.8 の範囲においては式(2.2.21)の方が透水係数をやや安全側を評価し、それ以外の範囲においては式(2.2.22)の方がより大きい透水係数となる。これより、本検討においてはより安全側の評価になると考えられる式(2.2.22)を k_p の評価式として採用することとする。

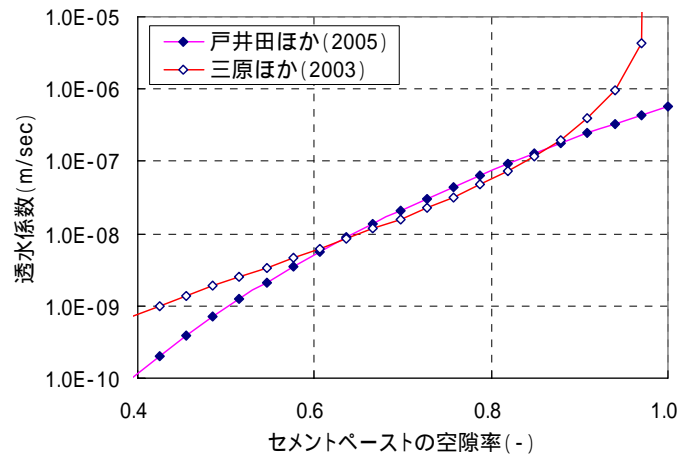


図 2.2-11 k_p の評価式の比較

また、 θ'_p について整理すると以下のとおりである。

$$\theta'_p = \theta_p + \theta_{pf} \quad [-] \quad (2.2.23)$$

θ_p : 化学的変遷による変化量を含むセメントペーストベースの空隙率 [-]

θ_{pf} : 変形によるセメントペーストベースの空隙率変化量 [-]

$$\theta_p = \theta_c / (1.0 - V_c/100 - \epsilon_v) \quad [-] \quad (\text{図 2.2-12 参照}) \quad (2.2.24)$$

θ_c : 化学的変遷による変化量を含むコンクリートの空隙率 [-]

← 化学解析結果からのインプット

V_c : コンクリート中の細・粗骨材の占める体積割合 [%]

(= 67% : (2) の仕様より)

ϵ_v : 体積ひずみ (圧縮が正) [-]

$$\theta_{pf} = \theta_{cf} / (1.0 - V_c/100 - \epsilon_v) \quad [-] \quad (\text{図 2.2-12 参照}) \quad (2.2.25)$$

θ_{cf} : 変形によるコンクリートの空隙率変化量 [-]

$$\theta_{cf} = -\epsilon_v \quad [-] \quad (2.2.26)$$

よって、

$$\theta'_p = (\theta_c - \epsilon_v) / (1.0 - V_c/100 - \epsilon_v) \quad (2.2.27)$$

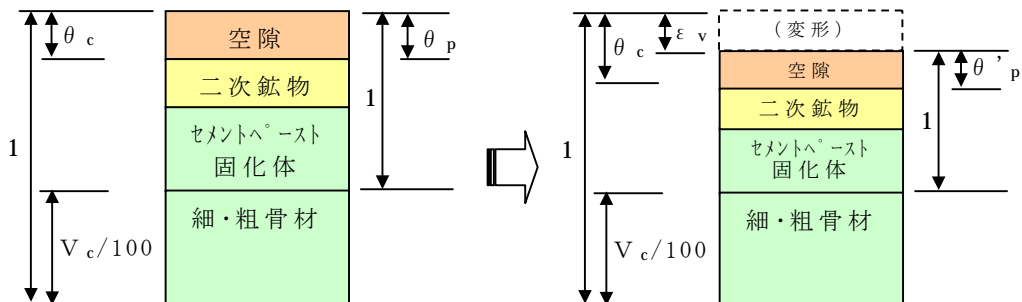


図 2.2-12 c と p 、及び $'_p$ の関係

また、 β_c については式(2.2.28)で定義することとする。

$$\beta_c = k_{c0} / k_{p0} \quad (2.2.28)$$

k_{c0} : コンクリートの初期透水係数 [m/sec]

(= 7.23×10^{-10} : (3)の初期物性より)

k_{p0} : セメントペーストの初期透水係数

(= $k_p(\theta'_{p0} = \theta'_{p0})$ [m/sec])

θ'_{p0} : 初期のセメントペーストベースの空隙率 [-]

$$\theta'_{p0} = \theta_{p0} = \theta_{c0} / (1.0 - V_c/100) \quad [-] \quad (2.2.29)$$

θ_{c0} : 初期のコンクリートの空隙率[-]

(= 0.13 : (2)の仕様より)

ここで k_{c0} の設定においては、(3)において式(2.2.22)と同様の式で設定しているため、本検討においては、

$$\beta_c = 1$$

となる。

()モルタル(廃棄体定置領域)

a)内部摩擦角

コンクリートと同様、本検討においては、モルタルの内部摩擦角 Φ_m は Ca 成分の溶出によらず一定値として、

$$\Phi_m = 0 \quad [^\circ]$$

と設定した。

b)粘着力

内部摩擦角 Φ_m をゼロとした場合、前述ととおりモルタルの粘着力 c_m は一軸圧縮強度 σ_m の 1/2 である。

$$c_m = \sigma_m / 2 \quad (2.2.9)$$

一軸圧縮強度についてもコンクリート同様、Ca 成分の溶出に伴うモルタルの圧縮強度の変遷は、セメントペーストの圧縮強度の低下率と同等であるという仮定に基づき、その関係式を設定した。ただし、Ca 溶出率が 100%に達した時に、(5)で設定した圧縮強度の下限値になるように、補正関数 α_{sm} を導入した。

$$\sigma_m = \sigma_{m0} \times R_{sm} \quad (2.2.30)$$

σ_m : モルタルの圧縮強度 [MPa]

σ_{m0} : モルタルの初期の圧縮強度 [MPa]

(= 35 MPa : (3)初期物性より)

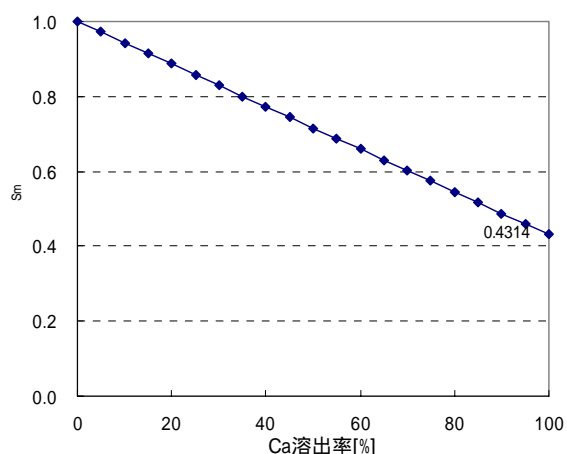
R_{Sm} : Ca 溶出等に伴うモルタルの圧縮強度の低下率[-]

$$R_{Sm} = \alpha_{Sm} \times R_{Sp} \quad (2.2.31)$$

α_{Sm} : モルタルの圧縮強度の下限値に関する補正関数

R_{Sp} : Ca 溶出等に伴うセメントペーストの圧縮強度の低下率[-]

$$\alpha_{Sm} = 1 - (1 - R_{Sm(LC=100)} / R_{Sp(LC=100)}) \times (Lc/100) \quad (2.2.32)$$



※Ca 溶出率に対し、 α_{Sm} を一次関数で設定

$$\begin{aligned} R_{Sm(LC=100)} / R_{Sp(LC=100)} &= 0.01 / 0.0233 \\ &= 0.4314 \end{aligned}$$

図 2.2-13 補正関数 α_{Sm}

$$R_{Sp} = \sigma_p / \sigma_{p(LC=0)}$$

$$= \exp(-0.0762 \times 1.038 \times \exp(-0.0135 \times W/C) \times Lc) \quad (2.2.15)$$

$$= \exp(-0.0791 \times \exp(-0.0135 \times 55) \times Lc) \quad [W/C = 55\% \text{ の場合}]$$

$$= \exp(-0.0376 \times Lc)$$

(戸井田ほか(2005)が示した関係式より)

Lc : Ca 溶出率[%]

(= 「溶出した Ca の量」 ÷ 「初期の Ca の量」 × 100)

$R_{Sm(LC=100)}$: LC = 100% (固相の Ca 成分が全て抜けた状態) の時の、初期状態からのコンクリートの圧縮強度の低下率[-]

$$(= \sigma_{m(LC=100)} / \sigma_{m(LC=0)} = \sigma_{m(\min)} / \sigma_{m0} = 0.01 \quad :$$

(3)初期物性、(4)各物性の下限値より)

$R_{Sp(LC=100)}$: LC = 100% (固相の Ca 成分が全て抜けた状態) の時の、初期状態からのセメントペーストの圧縮強度の低下率[-]

$$(= \exp(-0.0376 \times 100) = 0.0233)$$

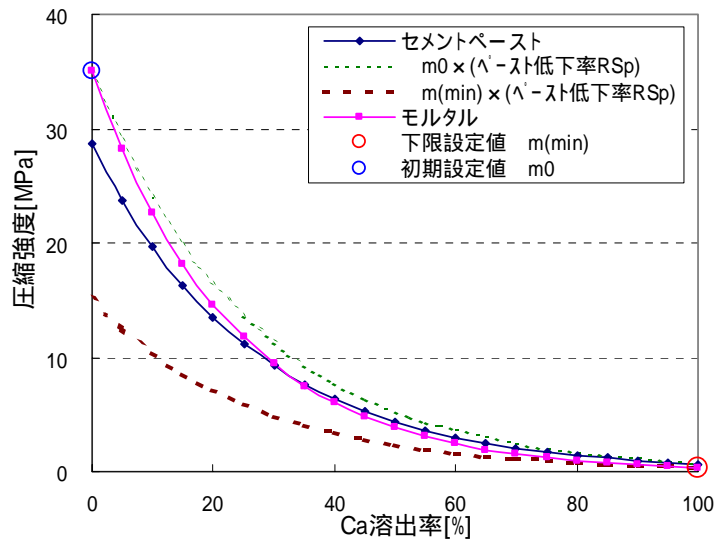


図 2.2-14 モルタルの圧縮強度の変遷の設定

注)・「セメントペースト」は、下式により算定（戸井田ほか(2005)）。

$$\begin{aligned} \sigma_p &= 308.09 \times \exp(-0.0762 \times \theta_{p1}) \\ &= 308.16 \times \exp(-0.0762 \times (a \times Lc + b)) \end{aligned}$$

$$a = 1.038 \cdot \exp(-0.0135 \times (W/C))$$

$$b = 36.41 \cdot \ln(W/C) - 114.72$$

- ・「 $\sigma_{m0} \times (\text{ペースト低下率})$ 」は、システム構築Ⅲにおける関係式に対応
- ・「 $\sigma''_m \times (\text{ペースト低下率})$ 」は、システム構築Ⅲと同様の思想で、下限値 $\sigma_{c(min)}$ を通るような σ''_c を逆算し、求めた曲線

c)弾性係数（破壊前の変形量の算定）

戸井田ほか(2005)は、一連のセメントペーストの溶出試験をとりまとめ、セメントペーストの強度、弾性係数の評価モデルをとりまとめるとともに、既往のデータを参考にモルタル、コンクリートの弾性係数の評価モデルを整理、提示した。この中でモルタルの弾性係数については、セメントペーストの評価モデル式を参考に、既往のモルタルデータ（安田ほか，2002）をもとにモルタルの弾性係数評価モデルを提示している。本検討においても、この式を採用し、弾性係数は強度から算出することとした。

$$E_m = 1.999 \times 10^3 \times \sigma_m^{0.610} \quad [\text{MPa}] \quad (2.2.33)$$

σ_m ：圧縮強度（式(2.2.26)で評価）

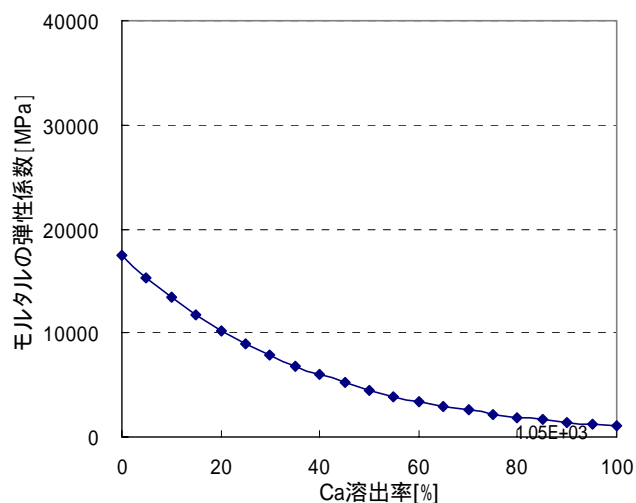


図 2.2-15 モルタルの弾性係数の変遷の設定

d) ポアソン比

コンクリート同様、モルタルが降伏するまでは、

$$\nu_m = \nu_{m0} = 0.2$$

と設定し、降伏した後のポアソン比については、各種岩石の設計用破壊時ポアソン比（土屋,1986）を参考に、

$$\nu_m = 0.45$$

と設定した。

e) 単位体積重量（自重による応力場の算定）

コンクリートと同様に、本検討においては単位体積重量は初期から変わらないものとして、

$$\gamma_m = \gamma_{m0} = 3.85 \quad [\text{MPa}]$$

と設定することとした。

f) 透水係数

透水係数についても、コンクリート同様、Ca成分の溶出に伴うコンクリートの透水係数の変遷は、セメントペーストにおける透水係数の増加率と同等であるという仮定に基づき、その関係式を設定した。

$$k_m = \beta_m \cdot k_p \quad [\text{m/sec}] \quad (2.2.34)$$

ただし、 $k_m \geq 10^{-5} [\text{m/sec}]$ の場合 $k_m = 10^{-5} [\text{m/sec}]$ （細粒砂相当）

k_m : モルタルの透水係数 [m/sec]

β_m : 補正係数

k_p : セメントペーストの透水係数 [m/sec]

k_p の評価式については、コンクリートの場合と同様、本検討においては式(2.2.22)を採用することとする。

$$k_p = 4.34 \times 10^{-9} \times \theta'_p{}^3 / (1 - \theta'_p)^2 \quad [\text{m/sec}] \quad (2.2.22)$$

θ'_p : 変形による空隙率変化を考慮したセメントペーストベースの空隙率[-]

また、コンクリートと場合と同様、 θ'_p について整理すると以下のとおりである。

$$\theta'_p = \theta_p + \theta_{pf} \quad [-] \quad (2.2.23)$$

θ_p : 化学的変遷による変化量を含むセメントペーストベースの空隙率[-]

θ_{pf} : 変形によるセメントペーストベースの空隙率変化量[-]

$$\theta_p = \theta_m / (1.0 - V_m/100 - \epsilon_v) \quad [-] \quad (\text{図 2.2-16 参照}) \quad (2.2.35)$$

θ_m : 化学的変遷による変化量を含むモルタルの空隙率[-]

← 化学解析結果からのインプット

V_m : モルタル中の細骨材の占める体積割合[%]

(= 54% : (2)の仕様より)

ϵ_v : 体積ひずみ (圧縮が正) [-]

$$\theta_{pf} = \theta_{mf} / (1.0 - V_m/100 - \epsilon_v) \quad [-] \quad (\text{図 2.2-16 参照}) \quad (2.2.36)$$

θ_{mf} : 変形によるモルタルの空隙率変化量[-]

$$\theta_{mf} = -\epsilon_v \quad [-] \quad (2.2.37)$$

よって、

$$\theta'_p = (\theta_m - \epsilon_v) / (1.0 - V_m/100 - \epsilon_v) \quad (2.2.38)$$

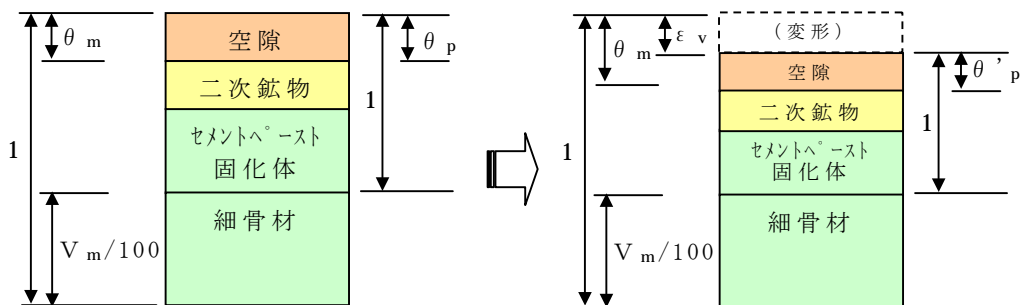


図 2.2-16 θ_m と θ_p 、及び θ'_p の関係

また、 β_m については式(2.2.39)で定義することとする。

$$\beta_m = k_{m0} / k_{p0} \quad (2.2.39)$$

k_{m0} : モルタルの初期透水係数 [m/sec]

(= 4.51×10^{-10} : (3)の初期物性より)

k_{p0} : セメントペーストの初期透水係数

(= $k_p(\theta'_{p0})$ [m/sec])

θ'_{p0} : 初期のセメントペーストベースの空隙率 [-]

$$\theta'_{p0} = \theta_{p0} = \theta_{m0} / (1.0 - V_m/100) \quad [-] \quad (2.2.40)$$

θ_{m0} : 初期のコンクリートの空隙率[-]

(= 0.19 : (2)の仕様より)

ここで k_{m0} の設定においては、(3)において式(2.2.22)と同様の式で設定しているため、本検討においては、

$$\beta_m = 1$$

となる。

(7)各物性の設定のまとめ

(1)～(6)において整理、設定した各物性の値、関係式を表 2.2-6 にまとめる。そのうち、Ca 成分の溶出（空隙率の増加）の程度ごとに、連続的に変化させる圧縮強度（=粘着力×2）、弾性係数、及び透水係数については、変遷形状を図 2.2-17～19 に示す。

表 2.2-6 各物性のまとめ

設定材料		コンクリート	モルタル
対象部位		支保工・インバート	廃棄体定置領域
配合	水セメント比	45%	55%
	骨材体積割合	V _c = 67%	V _m = 54%
	単位容積重量	γ = 2.28 [→弾性係数の推定]	(γ = 2.09)
境界物性	初期弾性係数	E _{c0} = 3.04 × 10 ⁴ MPa	E _{m0} = 1.75 × 10 ⁴ MPa
	最小弾性係数	E _{c(min)} = 3.039 × 10 ³ MPa	E _{m(min)} = 1.054 × 10 ³ MPa
	初期圧縮強度	σ _{c0} = 43 MPa	σ _{m0} = 35 MPa
	最小圧縮強度	σ _{c(min)} = 0.43 MPa	σ _{m(min)} = 0.35 MPa
	初期透水係数	k _{c0} = 7.23 × 10 ⁻¹⁰ m/sec	k _{m0} = 8.87 × 10 ⁻¹⁰ m/sec
	初期空隙率	θ _{c0} = 0.13	θ _{m0} = 0.19
解析パラメータ	a) 内部摩擦角	Φ _c = 0°	Φ _m = 0°
	b) 粘着力	c _c = σ _c /2 MPa	c _m = σ _m /2 MPa
		σ _c = σ _{c0} × α _{Sc} × R _{Sp} MPa	σ _m = σ _{m0} × α _{Sm} × R _{Sp} MPa
		α _{Sc} = 1 - (Lc/100) × (1 - R _{Sc(LC=100)} / R _{Sp(LC=100)})	α _{Sm} = 1 - (Lc/100) × (1 - R _{Sm(LC=100)} / R _{Sp(LC=100)})
		R _{Sc(LC=100)} = σ _{c(min)} / σ _{c0}	R _{Sm(LC=100)} = σ _{m(min)} / σ _{m0}
		R _{Sp} = exp(-0.0762 × a × Lc)	R _{Sp} = exp(-0.0762 × a × Lc)
	a = 1.038 exp(-0.0135 × (W/C))	a = 1.038 exp(-0.0135 × (W/C))	
	← 化学的変遷指標 = Ca 溶出率 Lc[%]		
	c) 弾性係数	E _c = 21000 × (γ/2.3) ^{1.5} × (σ _c /20) ^{0.5} MPa	E _m = 1.999 × 10 ³ × σ _m ^{0.610} MPa
	d) ポアソン比	[降伏前] ν _c = 0.20 [降伏後] ν _c = 0.45	[降伏前] ν _m = 0.20 [降伏後] ν _m = 0.45
e) 単位体積重量	γ _c = 2.41 Mg/m ³	γ _m = 3.85 Mg/m ³	
f) 透水係数	k _c = β _c · k _p [m/sec] (ただし k _c ≥ 10 ⁻⁵ のとき k _c = 10 ⁻⁵)	k _m = β _m · k _p m/sec (k _c ≥ 10 ⁻⁵) (ただし k _m ≥ 10 ⁻⁵ のとき k _m = 10 ⁻⁵)	
	β _c = k _{c0} / k _{p0} = 1 k _p = 4.34 · 10 ⁻⁹ · θ ^{'p} / (1 - θ ^{'p}) ² [m/sec]	β _m = k _{m0} / k _{p0} = 1 k _p = 4.34 · 10 ⁻⁹ · θ ^{'p} / (1 - θ ^{'p}) ² [m/sec]	
	θ ^{'p} = (θ _c - ε _v) / (1.0 - V _c /100 - ε _v) [-] (ε _v : 変形による体積歪)	θ ^{'p} = (θ _m - ε _v) / (1.0 - V _m /100 - ε _v) [-] (ε _v : 変形による体積歪)	
← 化学的変遷指標 = 空隙率 θ _c [-]		← 化学的変遷指標 = 空隙率 θ _m [-]	

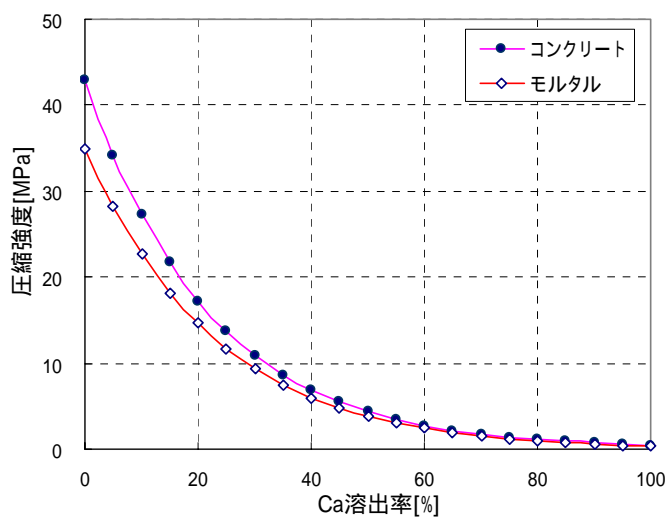


図 2.2-17 圧縮強度の変遷

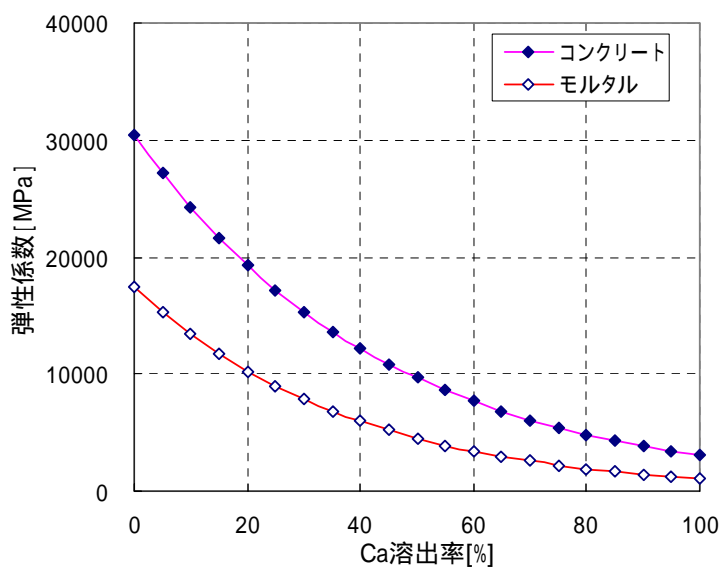


図 2.2-18 弾性係数の変遷

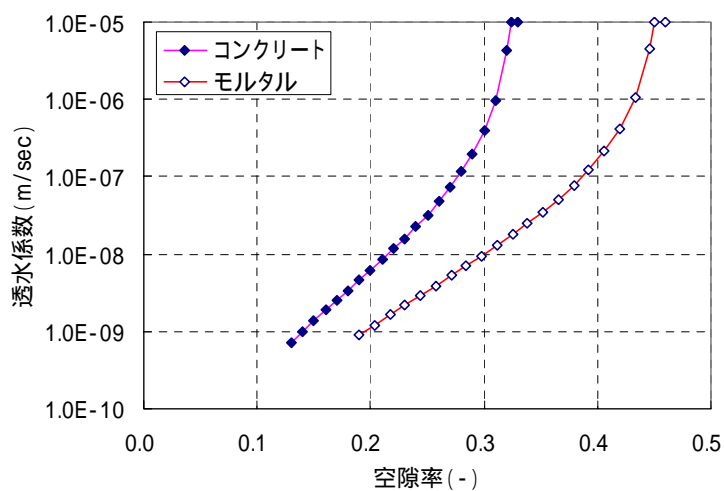


図 2.2-19 透水係数の変遷

2.2.3 海水環境におけるセメント系材料の変質機構とその影響

海水はコンクリートの各種物性に大きな影響を与えると考えられている。しかしながら、コンクリート種類もセメント種類、配合、使用骨材によって大きく異なるため、海水がコンクリートに与える影響も条件によって異なる。ここでは、それらをふまえて、使用材料などの条件を明確にしながら、海水がコンクリートの耐久性に与える影響について文献調査、整理を行った。

(1)対象とした文献

表 2.2-7(a)、(b)に調査対象とした文献の一覧を示す。なお論文の検索は、JICST を用いて以下のキーワード検索によって行った。

キーワード①：コンクリート or モルタル
or ペースト or セメント
キーワード②：海水？ or 塩水？
キーワード③：溶出 or 溶脱 or 変質 or 力学？
or 強度？ or 生成？ or 水和物
or 析出 or 空隙？ or 水理？ or 透水？

注) ここで「？」は任意の文字列を示す。

表 2.2-7(a) 調査対象とした文献一覧

No	題目	著者名	文献名	ページ	報告年
1	コンクリートの長期耐久性[小樽港百年耐久性試験に学ぶ]	長瀧重義ほか	—	—	1995
2	人工バリア及び岩盤の長期挙動に関する研究	油井三和、神徳敬、平井卓、棚井憲治、谷口直樹、伊藤彰、宮野前俊一	核燃料サイクル開発機構公開資料 JNC-TN-1400-2003-006	389-404	2003
3	地層処分 人工バリアのナチュラルアナログ研究	油井三和、吉川英樹、上野健一、宮本純司	核燃料サイクル開発機構公開資料 JNC-TN-1400-2002-013	295-299	2002
4	海洋環境下におけるコンクリートの長期耐久性 長期暴露試験結果より得られたこと	浜田秀則、山路徹、渡辺弘子、MOHAMMED T U	コンクリート工学 VOL.39 NO.10	17-24	2001
5	海水と凍融解の作用を受けるモルタルの細孔構造と飽水度	WANG X、鮎田耕一、小野定	コンクリート工学年次論文集 VOL.23 NO.2	637-642	2001
6	膨張コンクリートの耐海水性について	笹川幸男、真下昌章、福手勤、坂井悦郎	土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部 VOL.53rd	234-235	1998
7	膨張コンクリートの耐海水性に関する研究	笹川幸男、真下昌章、福手勤、坂井悦郎	コンクリート工学年次論文集 VOL.20 NO.2	157-162	1998
8	海洋環境下に30年間曝されたコンクリートの物理化学的評価	神谷昌文、国田淳、関口信一郎、下林清一	土木学会論文集 NO.592	131-145	1998
9	模擬海水中でのコンクリートの劣化現象	竹村友之、横本誠一、藤原愛、勝山邦久	コンクリート工学年次論文報告集 VOL.15 NO.1	823-828	1993
10	水和生成相組成や細孔構造の変化からみたセメント混合物の変質	藤原靖、大脇英司、丸屋剛	大成建設技術研究所報 NO.24	389-394	1991
11	明治時代に建造されたコンクリート製港湾構造物の耐久性について	風間亨、上杉忠男、飯田勲、守分敦郎	土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部 VOL.45th	466-467	1990
12	塩水水質で地中環境にあるコンクリートの変質に関する研究	藤原靖、丸屋剛、大脇英司	コンクリート工学年次論文集 VOL.13 NO.1	677-682	1991
13	海洋環境下におけるコンクリート部材の耐久性に及ぼす海水の影響	大即信明	別冊化学工業 VOL.29 NO.13	329-334	1985
14	特集 コンクリート構造物と化学海洋環境におけるコンクリート部材の耐久性に及ぼす海水の影響	大即信明	化学工業 VOL.35 NO.8	683-688	1984

表 2.2-7(b) 調査対象とした文献一覧

No	題目	著者名	文献名	ページ	報告年
15	石炭灰を原料とした高 C3A コンクリート	内田清彦、福林幸雄、山下純成、秋谷健二、奥田徹	セメント技術年報 NO.37	514-517	1983
16	セメント硬化体の内部組織への侵食性物質の作用機構と耐久性	岸谷孝一	コンクリート工学 VOL.19 NO.11	29-35	1981
17	コンクリートの海水に対する水密性	岸谷孝一	セメント技術年報 NO.34	303-306	1980
18	コンクリートの耐海水性に関する研究	西晴哉、大塩明、曾根徳明、城国省二	セメント技術年報 NO.34	299-302	1980
19	コンクリートの海水による侵食に関する研究	西林新蔵、矢村潔、井上正一、林昭富	セメント技術年報 NO.34	295-298	1980
20	コンクリートの耐海水性 その研究の現状と将来	西林新蔵	セメント・コンクリート NO.410	2-9	1981
21	コンクリートの耐海水性	新崎義幸	エンサイクロペディア	201-203	1996
22	海水系地下水水中におけるカルシウムシリケート水和物の化学的変質	杉山大輔	電中研報告 03-050	—	2003
23	Concrete After 30 Years of Exposure-Part I :Mineralogy Microstructures、 and Interfaces	Tarek Uddin Mohammed、Hidenori Hamada、 and Toru Yamaji	ACI Materials Journal/no.101-M01、 January-February	3-12	2004
24	Concrete After 30 Years of Exposure-Part II :Chloride Ingress and Corrosion of Steel Bars	Tarek Uddin Mohammed、Hidenori Hamada、 and Toru Yamaji	ACI Materials Journal/no.101-M02、 January-February	13-18	2004

(2)調査結果

海水およびコンクリートの空隙中の組成を表 2.2-8 に示す。海水中に溶解している陰イオンは Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- の順で多く存在し、その濃度は 550、28、2mmol/L である。また、陽イオンは、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} の順で多く存在し、その濃度は 470、53、10mmol/L である。一方で、コンクリート中の細孔溶液の組成は、濃度の高いものから、 OH^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} となる。これらを比較し、海水中の濃度の方が大きい Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} などは、その濃度差によってコンクリート内部に浸透するものと考えられる。一方で、 Na^+ 、 K^+ の溶出が終了した後には細孔溶液中の Ca^{2+} が上昇するため、 Ca^{2+} などはコンクリートから海水中に溶出するものと考えられる。これら各イオンの移動と各種化学反応によって、海水とコンクリートの界面もしくはコンクリート中に変質が生じる。

表 2.2-8 海水およびコンクリート中の液相組成

液相種 イオン種	イオン濃度 (mmol/L)	
	海水	コンクリート細孔溶液
Cl^-	550	0
SO_4^{2-}	28	2
HCO_3^-	2	—
Mg^{2+}	53	0
Ca^{2+}	10	5
K^+	10	168
Na^+	470	249

1)化学的变化

Conjeaud は人工海水を用いた実験によって海水がモルタルに及ぼす作用のメカニズムに関する検討を行った。圧縮強度、X 線回析、化学分析、電子顕微鏡観察などから海水のイオン交換によりモルタル表面に保護層が形成されると結論している。保護層はブルーサイトとアラゴナイトである。これらの保護層は非常に緻密であったのでモルタル中の C_3A 含有量の影響はなかったと述べている。しかしながら実際の環境においては保護層の損傷、剥離が生じることを指摘している。【文献 No1、p.28】

Regourd は C_3A 含有量の異なる各種セメントを用いて作製したコンクリート、モルタル、ペーストの海水に対する抵抗性を評価した。結論として、海水による有害な化学作用はセメント量が少なく、水セメント比が大

大きく、浸透性の高いコンクリートで生じるとしている。また、 C_4AF はこれによってエトリンガイトは形成されるものの、大きく成長しないため、 C_3A と違って有害にならないとしている。 C_3A が 10% を超えると大きな膨張を引き起こす可能性が高く、65% 以上の高炉スラグ微粉末を含むセメントは海水に対して大きな耐久性を示すこと、ポゾランを 20% 含むセメントの海水に対する耐久性は、ポゾランの鉱物学的成分およびポゾランの反応性に依存するとしている。【文献 No1、p.27】

Smolczyk はコンクリートに対する海水の作用について基礎的な検討結果について報告している。 C_3A 含有量の異なるセメントを用いたモルタルを $MgCl_2$ 溶液に 2 年間浸漬した。スラグ 47% 置換のモルタルはわずかに損傷を受け、62~80% 置換のモルタルは 2 年間変化がなかった。一方、スラグを添加していないモルタルは著しい損傷が生じた。さらに、50 年間干潮部に置かれたコンクリートブロックを調査した結果、損傷部においては、エトリンガイトの増加、塩化アルミネートの崩壊、水酸化カルシウムの消失、カルサイト、水酸化マグネシウムの析出が生じていることを示している。【文献 No1、p.27】

新垣によってまとめられた、海水とコンクリートが接触した際に生じる変化の概念図を図 2.2-20 示す。海水に接した面に向けてコンクリート内部から順に、①カルシウムクロロアルミネート水和物（フリーデル氏塩）の析出、②アルミネート水和物（エトリンガイト）の析出、③水酸化マグネシウム ($Mg(OH)_2$; ブルーサイト) の析出、④炭酸カルシウム ($CaCO_3$; アラゴナイト) の析出が生じると考えられている。【文献 No21】

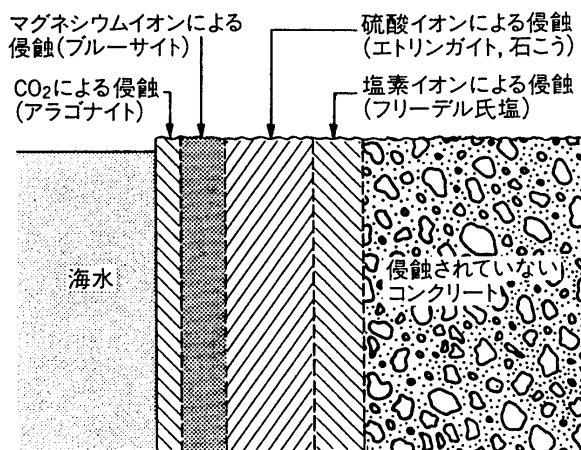


図 2.2-20 変化の概念図

竹村らは、濃度の異なる模擬海水及びイオン交換水にコンクリート供試体を 30 ヶ月浸漬し、化学的分析を実施している。X 線回析の結果、模擬海水に浸漬したコンクリートの表面の主要構成鉱物は、ブルーサイト ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)、石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、及びアラゴナイト (CaCO_3) であった、一方、イオン交換水に浸漬したコンクリートの表面からはカルサイト (CaCO_3) が検出された。これは図 2.2-19 に示した新垣らの検討結果と合致する。【文献 No9】

風間らは明示時代に建設され 80 年以上を経過したコンクリートの分析を実施している。コンクリートの配合推定を実施し、水セメント比が約 42% であった。このコンクリートの硫酸塩の浸透深さを測定したところ、図 2.2-21 に示すように表面から 3cm の位置では海水の影響が確認されなかった。その結果から海水の影響は比較的緩やかであると結論している。【文献 No11】

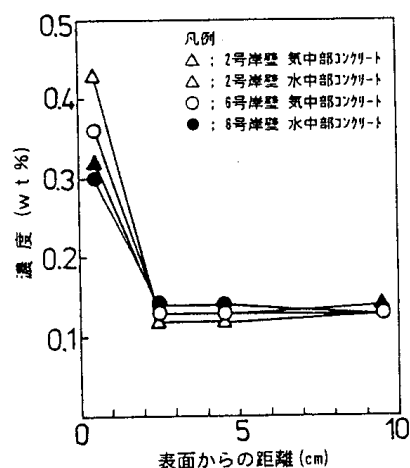


図-5 SO₃分析結果
図 2.2-21 60 年間の S の浸透

藤原らは、海水系地下水の影響を受け続けて約 60 年経過したコンクリート護岸について分析を行った。その結果、60 年前の初期の物性が取得されていないものの、透水係数が $4.2 \times 10^{-10} (\text{m/s})$ と大きな値を示していること、地下水との境界部に近づくほど、 $0.01 \mu\text{m}$ 付近の空隙が減少し、 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ の空隙が増加し、結果として空隙率が大きくなることを示している。この現象の考察として、炭酸化による密実化、ポルトランドイトとセメント水和物からのカルシウム溶脱が同時に進行しており、溶脱の影響が卓越していると推測している。また海水中においても炭酸化は進行し、図

2.2-22 に示すように炭酸カルシウムとフリーデル氏塩の生成量には負の関係がある。これは、アルミネート相の炭酸化によってフリーデル氏塩が分解し、炭酸カルシウムやアルミナゲルが生成しているとしている。

【文献 No10】

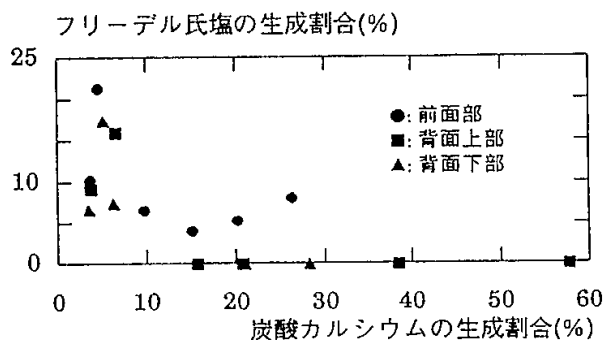


図 2.2-22 炭酸カルシウムとフリーデル氏塩の生成量の関係

内田らはフライアッシュを原料の一つとして製造した高 C3A セメントと高炉スラグもしくは高炉スラグセメント B 種を混合したセメントとさらに普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを人工海水に浸漬してその変化を観察している。その結果全てコンクリート表面に、ブルーサイトとアラゴナイトの生成を X 線回析にて確認している。【文献 No15】

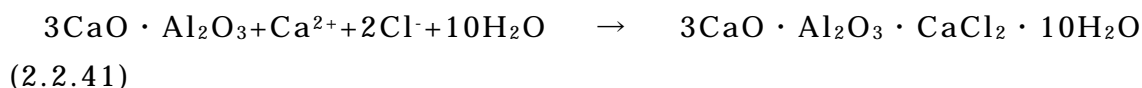
Tarek らは一方で、普通ポルトランドセメント、早強セメント、高炉スラグセメント B 種、アルミナセメントを用いて作製したコンクリートを 30 年間海洋環境下に暴露し、X 線回析で鉱物組成を確認している。その結果、全てのセメントにおいて $Mg(OH)_2$ が確認されなかったことを報告している。【文献 No23、24】

大即は、コンクリートの海水養生において、フリーデル氏塩、エトリンガイトの生成を確認している。【文献 No13、14】

以下に生成されると推定される鉱物についてまとめる。

①カルシウムクロロアルミネート水和物

各イオンの移動度を比較すると Cl^- が最も移動度が大きいいため、コンクリート内部により深く移動することとなる。そのため、最も内部に①カルシウムクロロアルミネート水和物（フリーデル氏塩）の析出が生じる。この反応は式(2.2.41)に示される。



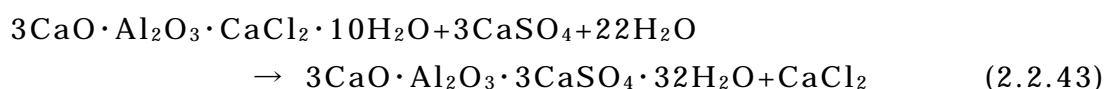
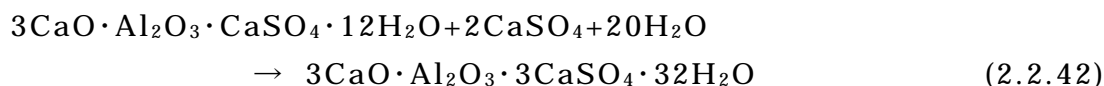
フリーデル氏塩とはセメント鉱物のアルミネート水和物に塩化カルシウムが結合したものである。フリーデル氏塩の物性についてまとめると表 2.2-9 のようになる。

表 2.2-9 フリーデル氏塩の物性

項目	内 容
	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
塩化物イオン吸着量	セメント重量の 0.4% の塩化物イオンを吸着
溶解度	$K_{sp} = -29.16$
硫酸イオンに対する安定性	硫酸イオンによって容易にエトリンガイトに変わる
二酸化炭素に対する安定性	二酸化炭素によって容易に崩壊する $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} + 2\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{CaCl}_2 + 7\text{H}_2\text{O}$ の崩壊を生じる
相組成	α - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ と β - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ が存在する。 $28 \pm 2^\circ\text{C}$ で α から β に可逆的に転化する。 β - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ は 200°C まで健全に存在しうる。 500°C までは β - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の組成を保持する。
転化	混和剤種類 ナフタレン系 > プレーン > ポリカルボン酸系 混和材種類 炭酸カルシウム > 高炉スラグ > プレーン > フライアッシュ の順に転化の量が増加する。

②アルミネート水和物（エトリンガイト）の析出

各イオンの移動度を比較すると Cl^- の次に SO_4^{2-} の移動度が大きいいため、フリーデル氏塩の外部に②アルミネート水和物（エトリンガイト）の析出が生じる。この反応は式(2.2.42)に示されるようにモノサルフェートからの転化によって生じる場合と①のフリーデル氏塩と硫酸イオンによる生成が考えられる。



エトリンガイトの物性についてまとめると表 2.2-10 のようになる。

表 2.2-10 エトリンガイトの物性

項目	内 容
化学式	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
溶解度	$\text{Ksp} = -44.55$
硫酸イオンに対する安定性	硫酸イオンによってモノサルフェートに変わる
組成	エトリンガイトの約 46% が水であり、100℃以下の加熱または真空などによる脱水によって結晶構造がゆがむ

③水酸化マグネシウムの析出

海水中のマグネシウムがコンクリート中の水酸化物イオンと反応すると(2.2.44)に示すように溶解度の小さい $\text{Mg}(\text{OH})_2$ を生成し、表 2.2-11 に示す物性の析出が生じる。

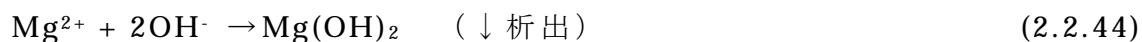


表 2.2-11 ブルーサイトの物性

項目	内 容
化学式	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
飽和溶解濃度	0.37mmol/L
組成	水の存在下で二酸化炭素を吸収し、炭酸マグネシウムを生成する

④アラゴナイトの析出

海水中の炭酸イオンとマグネシウムの作用によって、淡水系に見られるカルサイトではなくアラゴナイトが析出する。これは、海水中の Mg^{2+} の影響によるものである。表 2.2-12 に物性を示す。

表 2.2-12 アラゴナイトの物性

項目	内 容
化学式	CaCO_3
飽和溶解濃度	4mmol/L
組成	アラゴナイトの結晶構造は斜方晶系であり、カルサイトは三方晶系。

2)物理的变化

①強度

Gjφrv は、海水がコンクリートに与える影響を 30 年間の実験から述べている。一般的にコンクリートの圧縮強度は低下しなかった。しかしながら C_3A 含有量の多いコンクリートにおいては質量損失が大きくなり強度低下も著しい結果となった。普通コンクリートの曲げ強度は 5～10 年で低下し始めたものの、アルミナセメント、スラグセメントの一部においては低下が少なかった。原因として化学分析も実施しており、 $Ca(OH)_2$ の減少、 $Mg(OH)_2$ の増加が生じていることを確認している。またコンクリートに微細なひび割れ網が生じていることを確認しており、このひび割れによって曲げ強度が大きく低下していると指摘している。またコンクリートの空隙中もしくはひび割れ中に、エトリンガイト、ブルーサイト、石膏、アラゴナイトなどの結晶を確認しており、これは 1)の化学的变化で示した現象が実験でも確認されていたことを示すものである。【文献 No1、p.20】

長瀧らは小樽港百年耐久性試験を通じ、各種環境にて保存されているモルタルの抗張力を測定している。その結果、試験方法にばらつきがあるものの、大気中>海水≧淡水であり、大気中での保存の方が約 5 割程度大きな抗張力を示した。これは、海水の成分による化学的侵食よりも、水分の存在による可溶性成分の溶脱の影響が大きいためとしている。

【文献 No1、p.20】

濱田らは、長瀧らの小樽港百年耐久性試験を踏襲して、海水にて保存したコンクリートの圧縮強度の傾向を図 2.2-23 に示す概念図によって示した。【文献 No4】

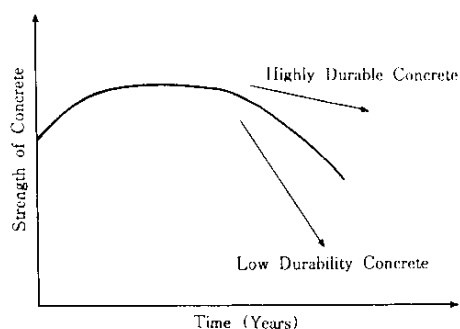


図 2.2-23 海洋環境下における長期強度の推移

岸谷は、総論において、図 2.2-24 に示すように、10 年間海水に浸漬した後の圧縮強度を標準養生場合と比較して紹介している。海水の浸食による強度低下は 5 年後により顕著になるとしている。【文献 No16、17】

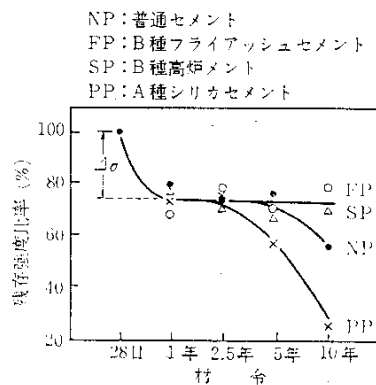


図 2.2-24 海水浸漬中の残留強度

②空隙

長瀧らは、小樽港百年耐久性試験を通じ、海水保存と淡水保存での空隙径分布を比較している。海水保存の場合、淡水保存に比べて、細孔直径が 30～3,000nm の細孔量が多くなり、これは硫酸イオン浸透によるエトリンガイト生成および塩化物イオン浸透による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶脱が原因としている。【文献 No1】

王らは、サイズの異なる数種類のモルタル供試体を用いて、海水と淡水に浸漬した後、空隙径分布を測定している。その結果、海水保存の場合、淡水保存に比べて細孔半径が 100～1,000nm の細孔が多くなり、総細孔量が増加することを明らかにした。【文献 No5】

西らはコンクリートに水道水、人工海水を用いて透水試験を行い、透水係数および試験後の空隙率について作用水の影響を評価している。なお西らの実験は試験期間 7 日と短期にて実施されていることに留意されたい。その結果、人工海水のほうが水道水よりコンクリートに浸透しにくく、これは試験開始初期に人工海水の成分とコンクリートの成分が反応し表面に緻密な硬化体を生成するためとしている。一方イオン交換水はコンクリート接触面の空隙率を増加させるため、透水性に相違がじるとしている。なお、図 2.2-25 に示すように、この考察を空隙率の測

定で実証している。【文献 No18】

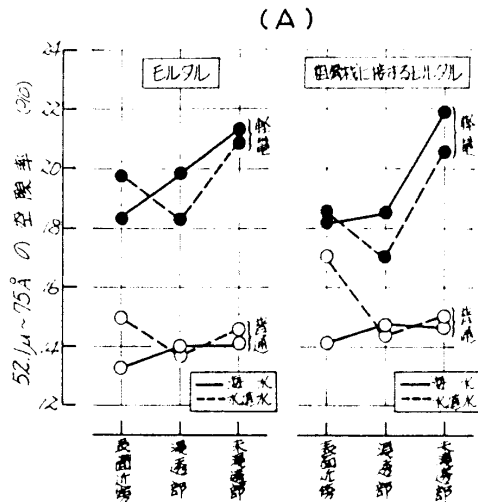


図 2.2-25 溶脱による空隙率の増加

藤原らは海水の影響を受けた間隙水組成を持つ土に接触し、材齢の経過したコンクリートの空隙を測定している。図 2.2-26 に示すように、内部ほど $0.01 \mu\text{m}$ 付近の細孔量が多くなり、この細孔は接触面付近に近づくにしながら減少する、逆に $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 付近の大きさの細孔量は増加している。接触面付近では、微細空隙が減少し、比較的粗な空隙が増加している。これは、炭酸化による緻密化と溶脱によるポーラス化が並行して生じており、特に調査環境においては溶脱の影響が大きかった。

【文献 No12】

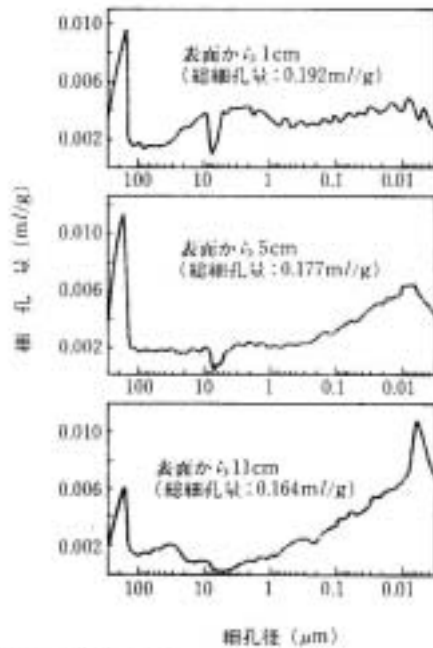


図 2.2-26 空隙率の変化

③ 相対動弾性係数

西林らは各種セメントを用いたコンクリートを作製し、海水と水道水に浸漬し各種物性の変化と化学分析結果を関連付けて考察している。図 2.2-27 に動弾性係数および長さ変化と X 線回析から得られた鉱物組成との関係を示す。長さ変化とカルシウムクロロアルミネート相の生成に極めて明確な関係が認められることを示している。さらに、石膏と相対動弾性係数の間にも明確な相関関係が認められ、相対動弾性係数が 60～70% 程度から小さくなるにつれて石膏のピーク強度が大きくなることを示している。【文献 No19、20】

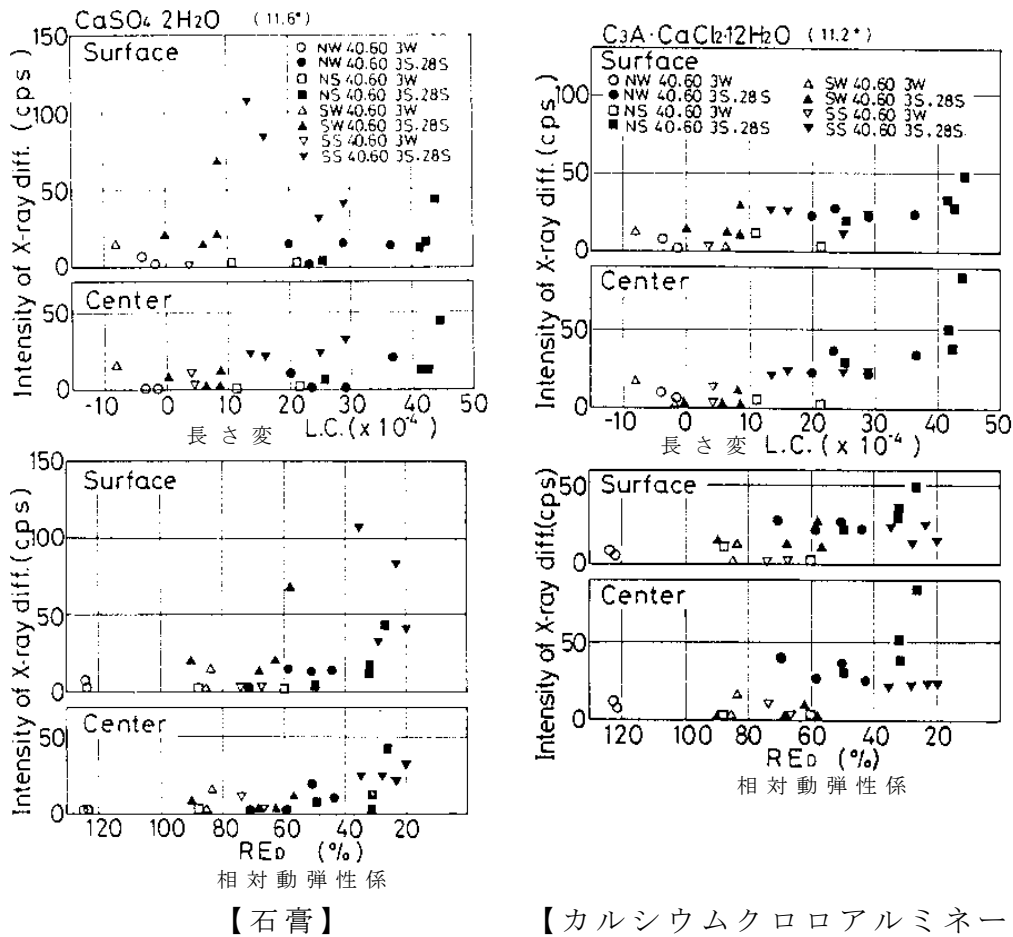


図 2.2-27 コンクリート物性と鉱物組成の関係

④クリープ、膨張

Mijnsbergen らによって Ca(OH)_2 飽和水溶液と海水にコンクリートを浸漬し物性を評価している。セメントは普通ポルトランドセメント 100%、高炉スラグで 68%置換した高炉スラグセメント、フライアッシュ 25%で置換したフライアッシュセメントの 3 種類を単位セメント量 350kg/m^3 にて比較した。その結果、普通ポルトランドセメントの膨張量は海水浸漬の場合、 Ca(OH)_2 飽和水溶液の約 6~10 倍、高炉スラグセメントの海水浸漬の膨張量は Ca(OH)_2 飽和水溶液の約 2 倍と海水の方が著しく膨張量が大きくなることを示している。またクリープは、普通ポルトランドセメント > 高炉スラグセメント = フライアッシュセメントの順に大きくなり、水セメント比が大きいほどクリープも大きくなることを示している。【文献 No1、p.14】

長瀧らは C_3A 含有量の少ないセメントを用いることで膨張を低減することが可能であるとしている。しかしながら C_3A 含有量の低減は同時に Cl の吸着量の減少となることから塩化物イオンの浸透量は増加するとしている。また小樽港百年耐久性試験を通じ、海水 > 淡水 > 大気の順で膨張量が大きくなっているとしている。【文献 No1】

3) 溶脱

長瀧らは、小樽港百年耐久性試験を通じ、モルタルの外観上の劣化程度から海水 > 淡水 > 大気の順で影響が大きいとしている。また炭酸化深さについては、火山灰含有モルタル（海水保存） > セメント単味モルタル（海水保存） > 火山灰含有モルタル（淡水保存）でそれぞれ炭酸化深さは 350、150~200、50~100 μm だったと報告されている。海水作用に対するセメント種類の影響については、以下のように考察している。セメント単味のモルタルでセメント中の C_3S （エーライト）が多いモルタルが海水に場合接触した場合、比較的多量の Ca(OH)_2 が生成し、 Ca(OH)_2 の溶脱とともに海水中のマグネシウムと反応しブルーサイトを生成する。溶脱する Ca(OH)_2 が比較的多いことからブルーサイトは均一な層を形成し、さらに炭酸化とエトリンサイト生成も相まってバリア層を形成し、結果として Ca の溶脱が表面部のみに留まったものと考えられた。一方で、セメント単味のモルタルでセメント中の C_3S （エーライト）が少ないモルタルやポゾランを添加したモルタルは、 Ca(OH)_2 の生成量が比較的少ない。そのため、 Ca(OH)_2 は徐々に溶脱し、その量も少ないために、ブルーサイトは均一な層を形成できず、部分的な層となるため、溶脱を抑制するまでには至

らない。【文献 No1】

杉山は、海水へのセメント硬化体の溶解性を把握するために、薬品合成した C-S-H の NaCl 水溶液に対する溶解平衡関係を測定している。その結果、C-S-H 中の Ca が Na とイオン交換することを明らかにし、Na のイオン濃度が増加するにしたがい、C-S-H の溶解度も上昇することを示した。

【文献 No22】

濱田らは、骨材種類が海洋環境下におけるコンクリートの耐久性に与える影響について検討している。骨材として濁沸石（ローモンタイト： $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ）を使用した場合、エトリンガイトの生成を促進し膨張破壊を生じる可能性があることを示している。【文献 No4】

4)その他

笹川らは、遊離石灰-アウイン-遊離セッコウ系膨張剤を用いた膨張コンクリートの耐海水性について実構造物を対象に評価を行った。圧縮強度は普通コンクリートと同等、塩化物イオン浸透量は普通コンクリートより少なく、細孔量は普通コンクリートより小さく、特に半径約 $0.5\ \mu\text{m}$ 以上の径が少ない傾向を確認している。水和物の組成は普通コンクリート、膨張コンクリート共にフリーデル氏塩が確認され、普通コンクリートの方がフリーデル氏塩含有量は多いと推定された。総じて普通コンクリートと膨張コンクリートの耐海水性は同等であると論じている。【文献 No6、7】

(3)まとめ

文献調査の結果を表 2.2-13 にまとめる。

表 2.2-13 文献調査結果

項 目		内 容						
析出物		コンクリート内部から海水界面に向かって ① カルシウムクロロアルミネート水和物（フリーデル氏塩） ② アルミネート水和物（エトリンガイト） ③ 水酸化マグネシウム（ $Mg(OH)_2$ ；ブルーサイト） ④ 炭酸カルシウム（ $CaCO_3$ ；アラゴナイト） の析出が生じる						
物理特性	強度	<ul style="list-style-type: none"> 海水に浸漬した場合セメント種類によっては強度低下が生じる C_3A の含有量の多いコンクリートにおいては質量減少が大きくなり強度低下も顕著となる その低下が顕著になるのは、一般に浸漬から 5 年程度経過した後となる 海水と淡水に浸漬した場合の抗張力への影響を評価すると海水成分の化学的浸食よりも、可溶性成分の溶脱の影響の方が大きい（セメント硬化体に十分な耐海水性がある場合） 						
	空隙	<ul style="list-style-type: none"> 28 日程度の養生期間（短期）においては、海水に浸漬した方が淡水に浸漬した場合より総空隙量が大きくなる 海水保存の場合、淡水保存に比べて細孔直径が 30～3、000nm の細孔量が多くなる 						
	膨張	<ul style="list-style-type: none"> カルシウムクロロアルミネート相の生成に極めて明確な関係が認められる 						
溶出速度		<ul style="list-style-type: none"> 食塩水に浸漬した場合、軟水に浸漬した場合よりも溶出速度は大きくなる 海水に浸漬した場合と軟水に浸漬した場合の溶出速度の比較は各種条件によって異なる <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">条 件</th> <th style="width: 50%;">溶出速度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>比較的多量の $Ca(OH)_2$ を含有するセメント硬化体の場合</td> <td>海水 < 軟水 (ブルーサイトによる緻密化と難溶化)</td> </tr> <tr> <td>比較的 $Ca(OH)_2$ 含有量が少ない、混合セメントや C_3S の少ないセメント硬化体の場合</td> <td>海水 > 軟水 (ブルーサイトの生成が生じない)</td> </tr> </tbody> </table>	条 件	溶出速度	比較的多量の $Ca(OH)_2$ を含有するセメント硬化体の場合	海水 < 軟水 (ブルーサイトによる緻密化と難溶化)	比較的 $Ca(OH)_2$ 含有量が少ない、混合セメントや C_3S の少ないセメント硬化体の場合	海水 > 軟水 (ブルーサイトの生成が生じない)
条 件	溶出速度							
比較的多量の $Ca(OH)_2$ を含有するセメント硬化体の場合	海水 < 軟水 (ブルーサイトによる緻密化と難溶化)							
比較的 $Ca(OH)_2$ 含有量が少ない、混合セメントや C_3S の少ないセメント硬化体の場合	海水 > 軟水 (ブルーサイトの生成が生じない)							

2.3 ニアフィールドの力学挙動の長期的変遷評価

ここでは、1.1～2.2で検討した力学的変遷評価システムを用いて、実際に想定される処分システムの形状を用いて解析評価を実施する。本検討で想定する処分システムは表 2.3-1 の通りである。

表 2.3-1 処分システム諸元

対象岩盤	坑道形状	処分深度	掘削径	廃棄体種類
SR-C	円形	500m	13.2m	Gr1

また、本検討において、力学的変遷評価システムに組み込み、考慮する内容は以下の通りである。なお 6)～8)は本年度新たに加わった検討項目である。

- 1) ベントナイトの浸透膨潤を考慮した弾塑性構成方程式
- 2) セメント系材料の剛性・強度の低下を考慮した非線形弾性モデル
- 3) ベントナイト系材料の化学的変遷指標に対するモデル
- 4) セメント系材料の化学的変遷指標に対するモデル
- 5) 力学的変化および化学的変遷指標に対する透水係数評価
- 6) モンモリロナイト溶解等による膨潤圧の変化
- 7) 岩盤クリープ解析を基にしたクリープ変位量
- 8) 岩盤掘削時に発生する支保応力

2.3.1 解析モデルと境界条件

図 2.3-1 に解析に用いる解析モデルを示す。本検討では、岩盤クリープによる変位量を強制変位として、支保工吹付け部の外側から作用させる。クリープ変位量は 1.2 で検討した値を用いる。

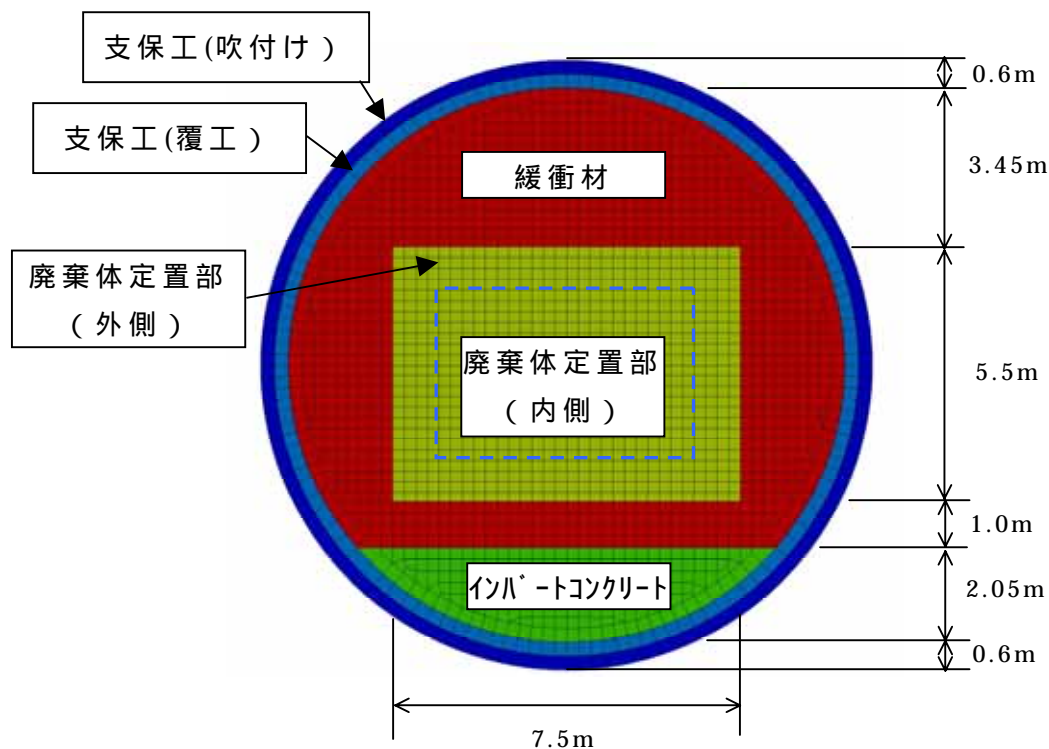


図 2.3-1 解析モデル図

2.3.2 解析ステップと解析ケース

表 2.3-2 に解析ステップを、表 2.3-3(a) にセメント系材料の化学的変遷指標の値を、表 2.3-3(b) にベントナイト系材料の化学的変遷指標の値を、図 2.3-2(a) にセメント系材料の化学的変遷指標分布を、図 2.3-2(b) にベントナイト系材料の化学的変遷指標を示す。

本年度は支保（吹付け、覆工）、インバートコンクリート、緩衝材は材料内で一様な化学的変遷を想定し、廃棄体定置部のみ内側、外側の 2 領域に分けて化学的変遷指標を与えるものとする。また、化学的変遷は初期、中間、最終の 3 段階で与える。

表 2.3-4 に解析ケースを示す。CaseA は堅固な岩盤を想定し、岩盤クリープを考慮しない。また坑道掘削による支保の応力は発生しないとして考慮しない。CaseB は脆弱な岩盤を想定し、岩盤クリープによる影響を検討する。また、坑道掘削時に発生する支保の応力も考慮する。岩盤クリープ

に相当する強制変位は 1.2 で検討した値を、力学的変遷解析のメッシュに左右対称として与える。なお、力学変遷解析における最終段階は岩盤クリープ解析における 1,000,000 年後の変位分布とし、中間段階は最終段階の坑道天端変位の半分時点の変位分布とする

表 2.3-2 解析ステップ

ステップ	内容
1	初期応力計算、初期支保応力の設定
2	ベントナイト系材料の初期膨潤圧計算(=0.49MPa)
3	初期の化学的変遷指標の設定
4～23	初期から中間までの化学的変遷、岩盤クリープ変位による計算
24～43	中間から最終までの化学的変遷、岩盤クリープ変位による計算

)表 2.1-2 の諸元に基づき 2.1 で設定した膨潤圧評価式によって算出した膨潤圧

表 2.3-3(a) 化学的変遷指標 (セメント系材料)

	廃棄体定置部				支保工 (吹付け、覆工)	
	内側		外側			
	Ca 溶出率 LC (%)	空隙率 (%)	Ca 溶出率 LC (%)	空隙率 (-)	Ca 溶出率 LC (%)	空隙率 (-)
初期	0.0	19.0	0.0	0.19	0	0.13
中間	0.0	19.0	12.5	0.215	50	0.23
最終	0.0	19.0	25.0	0.24	100	0.33

表 2.3-3(b) 化学的変遷指標 (ベントナイト系材料)

	空隙率 (-)	スメクトン部分密度 s_{me} (eq/l)	スメクトン部分間隙比 e_{sme}	交換性ナトリウム率 ESP	陽電化密度 c (Mg/cm ³)
初期	0.40	0.92	1.94	0.85	0.0
中間	0.40	0.74	2.92	0.85	0.0
最終	0.40	0.55	3.89	0.85	0.0

表 2.3-4 解析ケース

ケース名	想定岩盤	岩盤クリープの有無	初期支保応力の有無
CaseA	健固な岩盤	なし	なし
CaseB	脆弱な岩盤	あり	あり

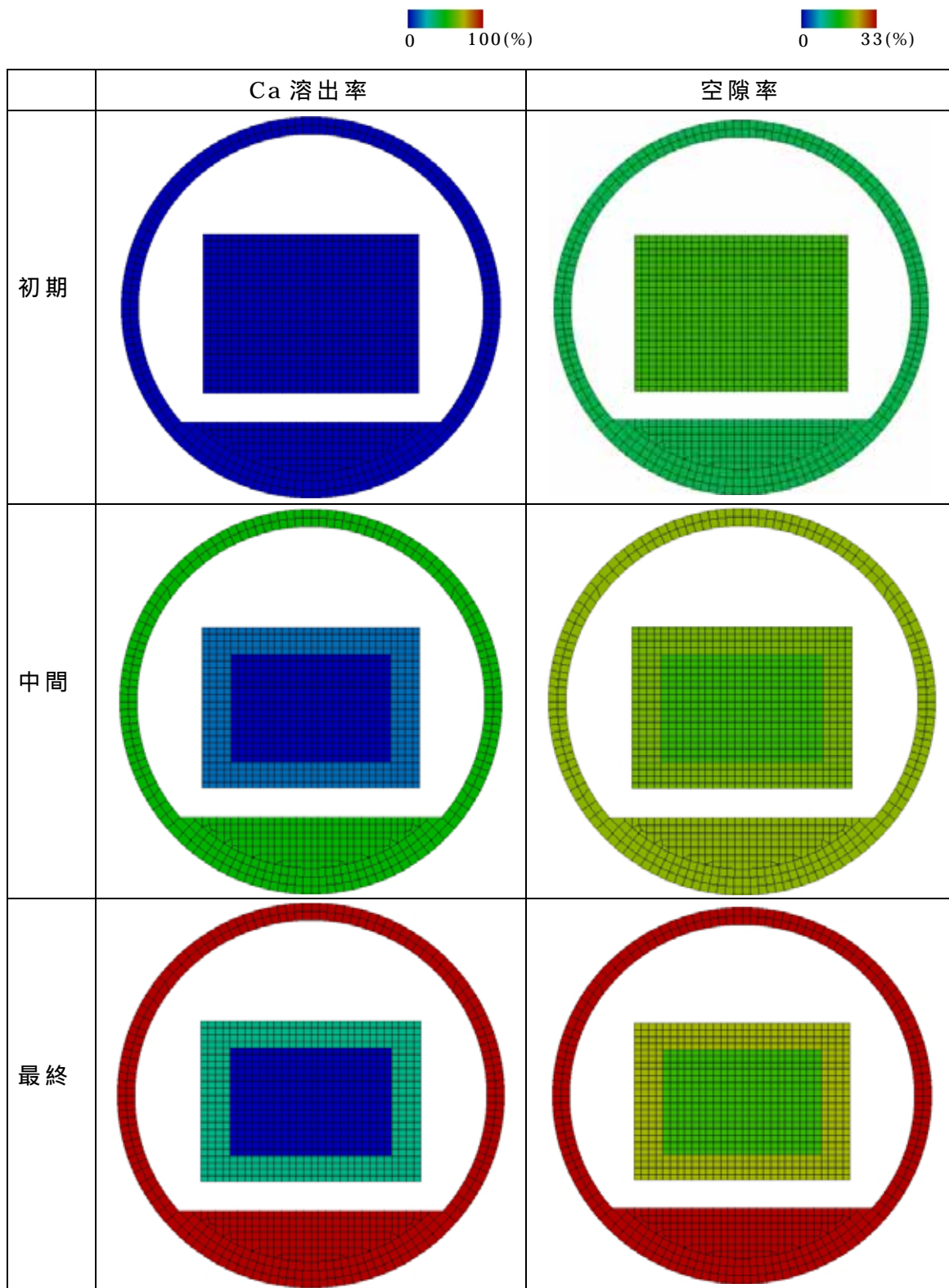
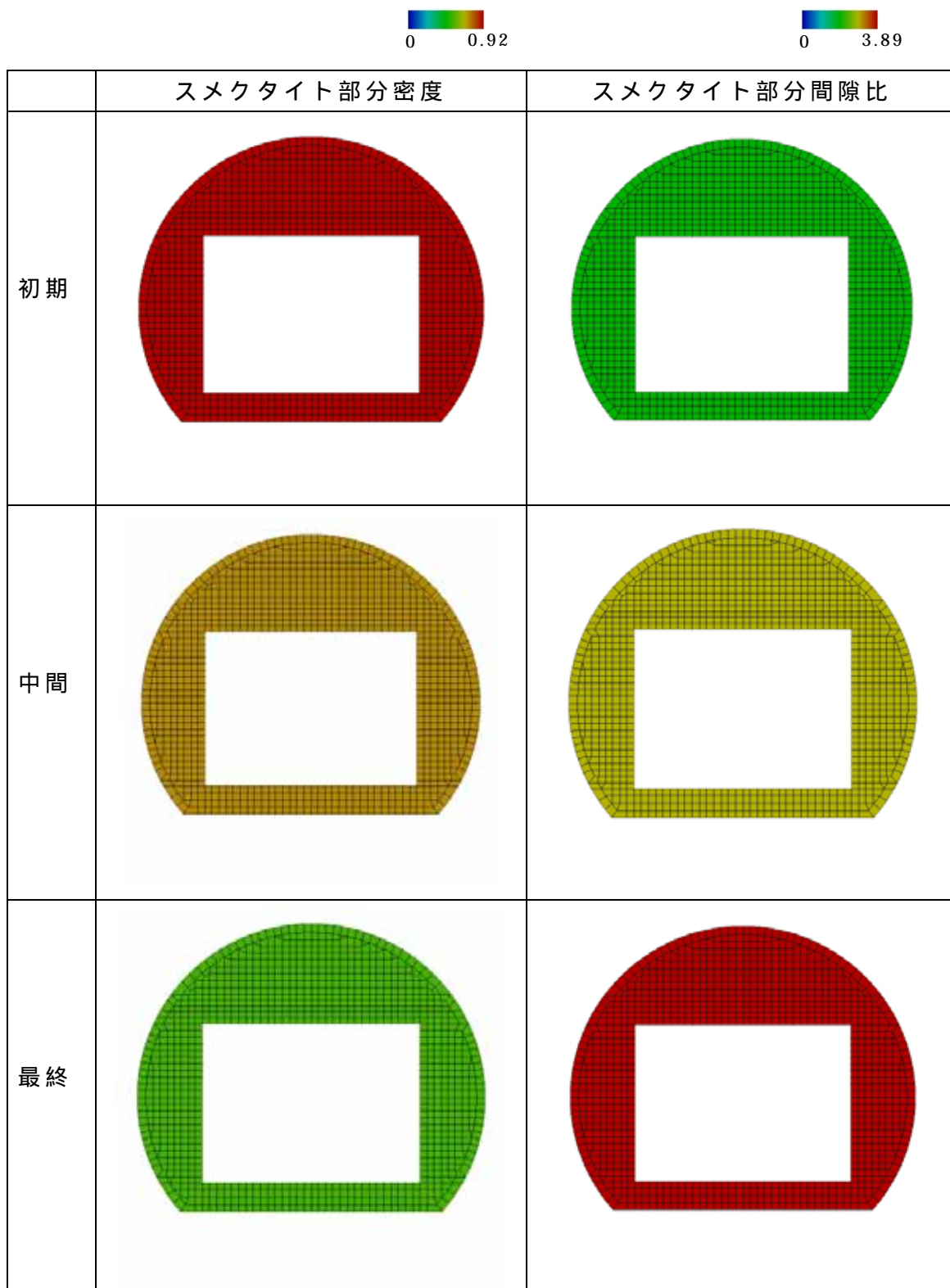


図 2.3-2(a) 化学的変遷指標分布 (セメント系材料)



) 交換性ナトリウム率、陽電化密度、空隙率は初期から変化なし

図 2.3-2(b) 化学的変遷指標分布 (ベントナイト系材料)

2.3.3 岩盤掘削時に発生する支保応力の導入

大断面の掘削や比較的脆弱な岩盤の掘削では、坑道掘削時の解放力は支保（吹付け）が負担することになっている。支保に発生する軸力は比較的大きく、無視できない。これに関連してサイクル機構殿より提示された空洞安定解析結果によると、岩盤掘削時に掘削解放力によって支保（吹付け）に最大で 26MPa 程度の応力が発生している（図 2.3-3）。

そこで、力学的変遷解析における初期条件として、CaseB ではこの支保（吹付け）に発生している応力を初期に導入することとする。

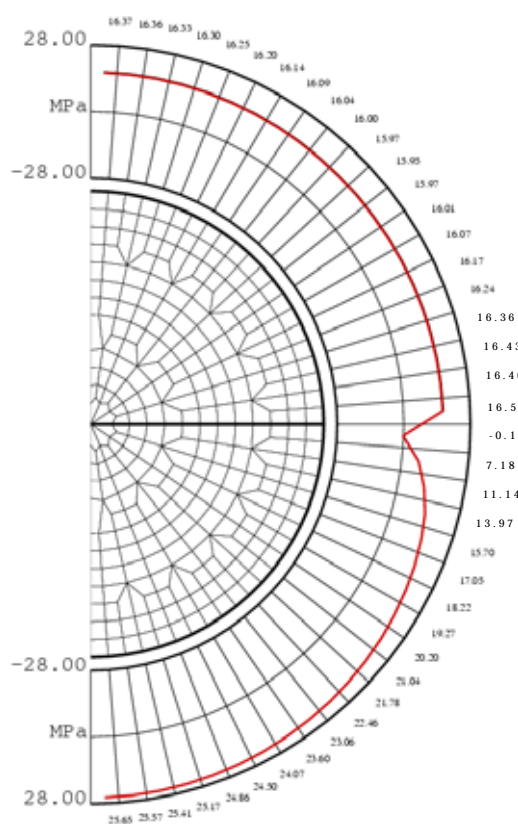


図 2.3-3 岩盤掘削による支保の応力(掘削径 13.2m、深度 500m、SR-C)

提示された応力は、掘削を上半と下半に分けそれぞれ掘削解放力の35%を支保導入時に作用させた解析の結果である。また、支保はトラス要素でモデル化しているため、軸力のみが評価されている。

そこで、上半、下半の軸力を力学的変遷解析における支保（吹付け）の周方向の応力として導入する事とした。その際の周直角方向の応力は0とした。解析メッシュが異なるため、図 2.3-3 における上半と下半の軸力を力学的変遷解析における解析メッシュに合うように補間した。また引張の軸力は発生している部分に関しては 0MPa とした。

2.3.4 解析用物性値

ベントナイト系材料、及びセメント系材料の想定した仕様を表 2.3-5、表 2.3-6 に示す。また、これらの仕様に相当する、2 章において検討した解析用物性値を表 2.3-7、表 2.3-8(a),(b)に示す。

表 2.3-5 ベントナイト系材料の想定仕様

部位	配合	乾燥密度	初期間隙比
緩衝材	ベントナイト 70wt%, 珪砂 30wt%	1.6Mg/m ³	0.688

表 2.3-6 セメント系材料の想定仕様

対象部位	設定材料	水セメント比	骨材体積割合	単位容積重量
支保工 インハートコンクリート	コンクリート	45%	67%	2.28
廃棄体定置 領域	モルタル	55%	54%	2.09

表 2.3-7 解析用物性値 [初期応力・初期膨潤圧計算 (1STEP・2STEP)]

	単位体積重量 (g/cm ³)	弾性係数 E (MPa)	ポアソン比	初期膨潤圧 p(MPa)
緩衝材	1.80 ¹	39.0 ¹	0.4 ¹	0.49 ²
支保工・インハートコンクリート	2.41	3.04 × 10 ⁴	0.2	
廃棄体定置領域	3.85	1.75 × 10 ⁴	0.2	

1) システム構築と同様の値を設定した。

2) 表 2.1-2 の諸元に基づき 2.1 で設定した膨潤圧評価式によって算出した膨潤圧

表 2.3-8(a) 解析用物性値 (緩衝材) [長期力学挙動解析]

ダイルトン係数 D	非可逆比	膨潤指数	限界応力比 M	ポアソン比 ν	初期間隙比 e
0.10	0.898	0.0086	0.45	0.42 ¹⁾	0.688

1) システム構築と同様の値を設定した。

表 2.3-8(b) 解析用物性値 (セメント系材料) [長期力学挙動解析]

	ポアソン比 [降伏前]	ポアソン比 ν_f [降伏後]	初期空隙率 (%)	内部摩擦角 ($^{\circ}$)	初期透水係数 k_0 (m/s)
支保工 インハートコンクリート	0.2	0.45	13	0	3.1×10^{-12}
廃棄体 定置領域	0.2	0.45	19	0	1.6×10^{-12}

) 弾性係数・圧縮強度は表 2.3-6 に示す仕様から、2.2 における関係式より算定される

なお、表 2.3-8(a)に示した、長期力学挙動解析における緩衝材のポアソン比については、本検討において設定した限界応力比 $M=0.45$ を用いて、システム構築と同様の下式で計算をすると $\nu=0.45$ となる。しかしながら、本検討においては M を安全側に小さい値を設定していること、また HLW2 次とりまとめ (核燃料サイクル開発機構, 1999) において採用している値 $\nu=0.40$ と有意に異なること等の理由から、システム構築と同様の値 $\nu=0.42$ を用いることとした。

$$\nu = \sin^{-1}(3M / (6+M)) \quad (2.3.1)$$

$$K_0 = 1 - \sin \theta \quad (2.3.2)$$

$$K = K_0 / (K_0 + 1) \quad (2.3.3)$$

2.3.5 解析結果

CaseA、CaseB の解析結果を図 2.3-4 ~ 図 2.3-10 に示す。

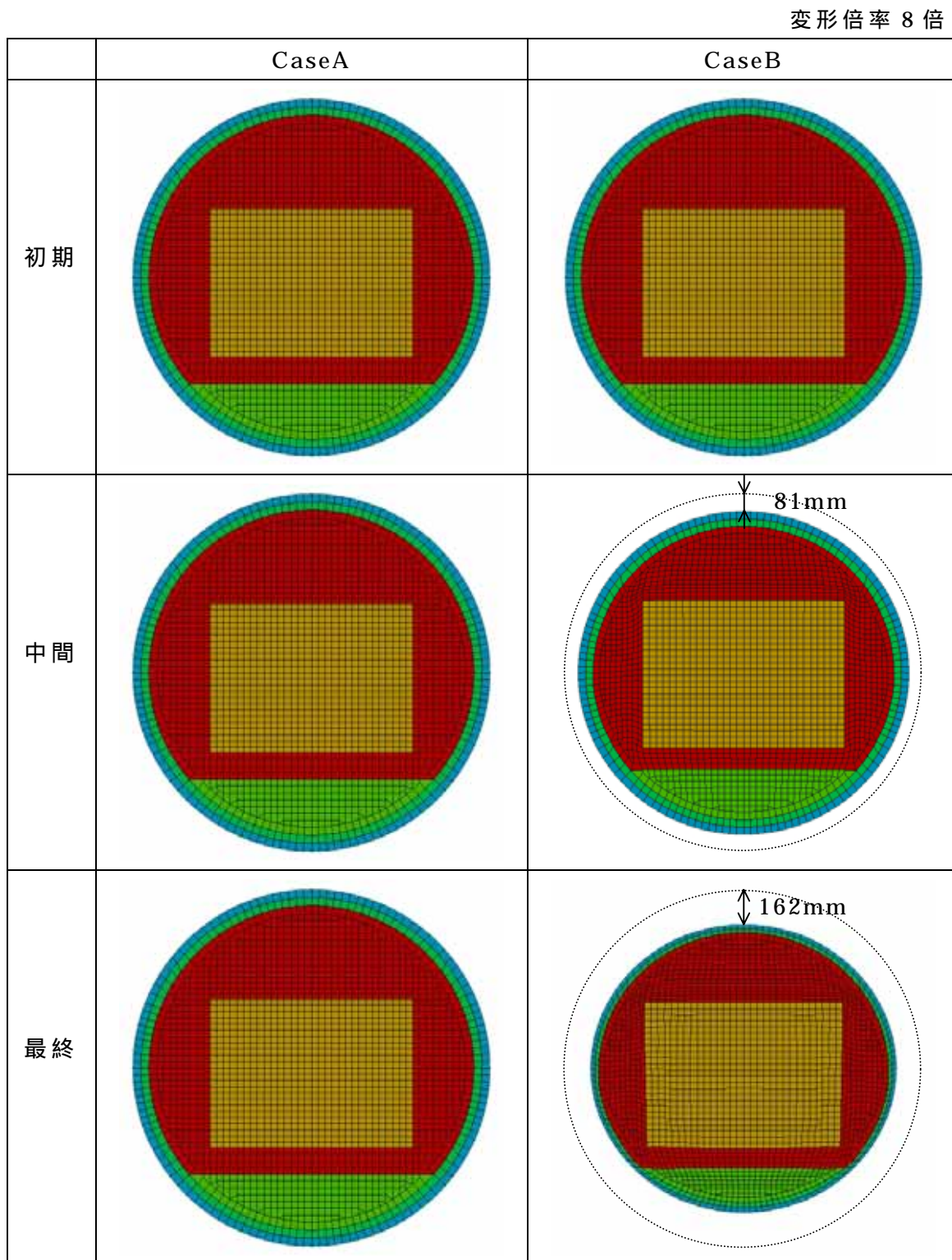


図 2.3-4 変形図

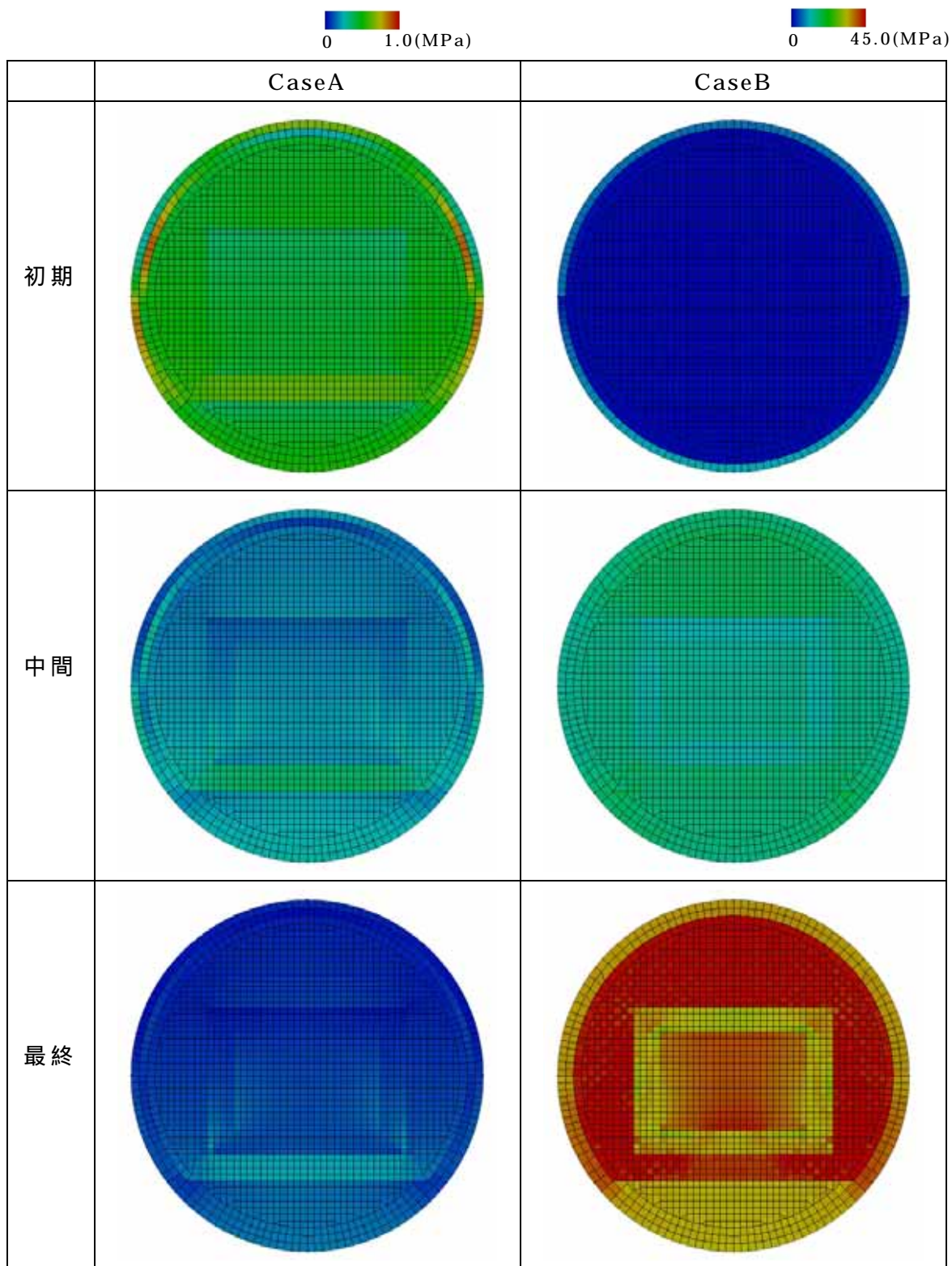


图 2.3-5 平均应力分布

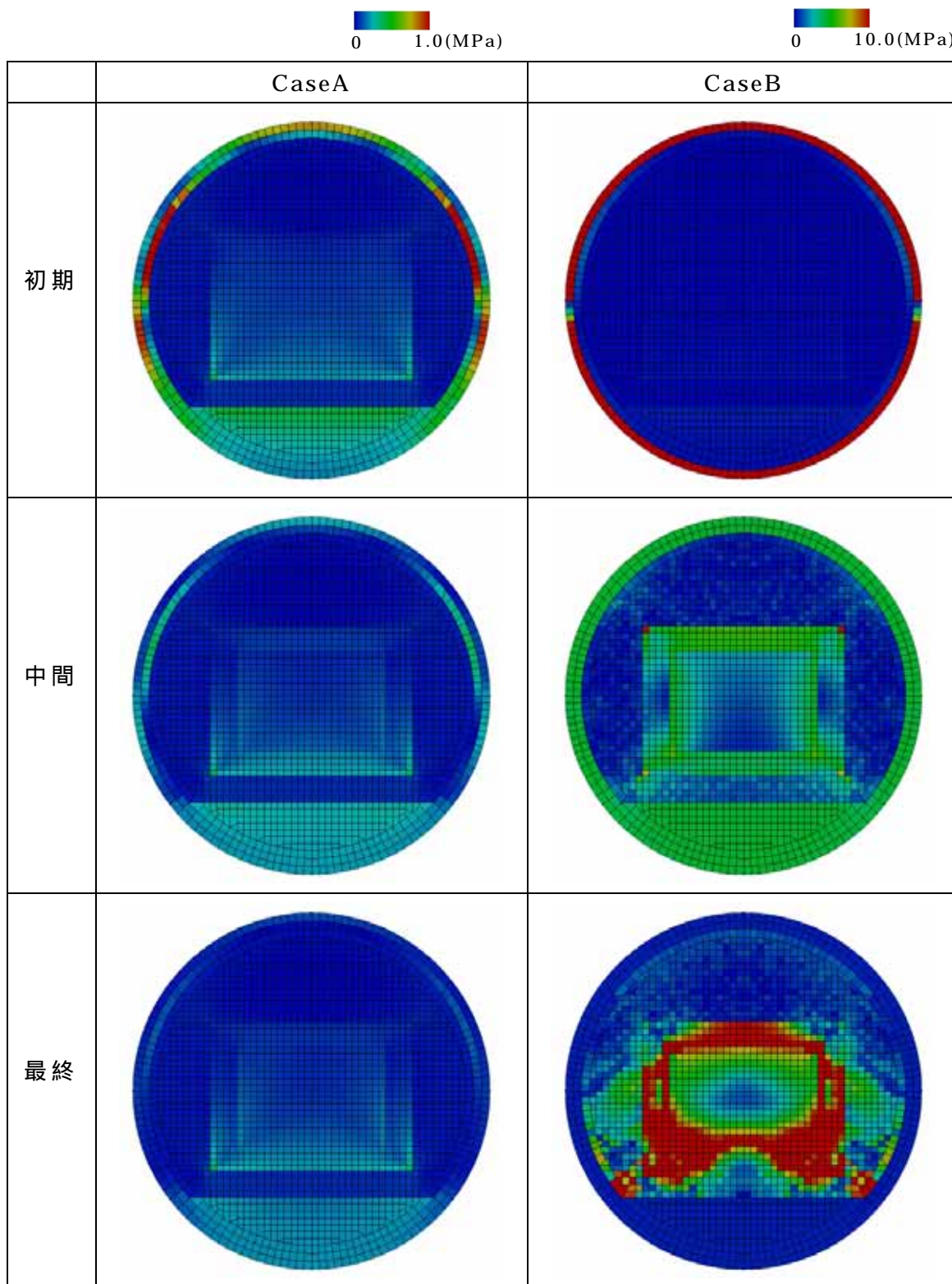


图 2.3-6 軸差応力分布

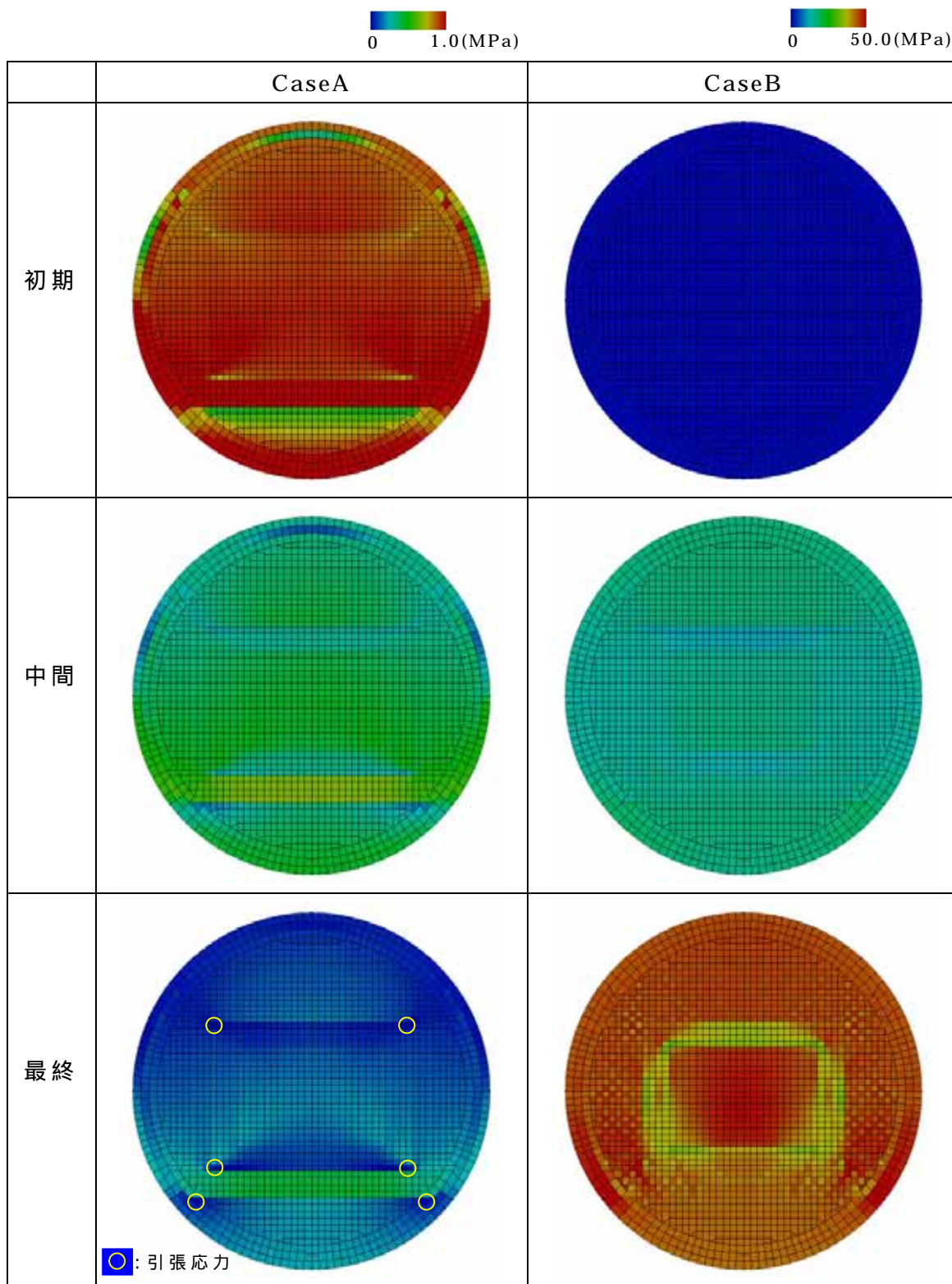


図 2.3-7 最小主応力分布

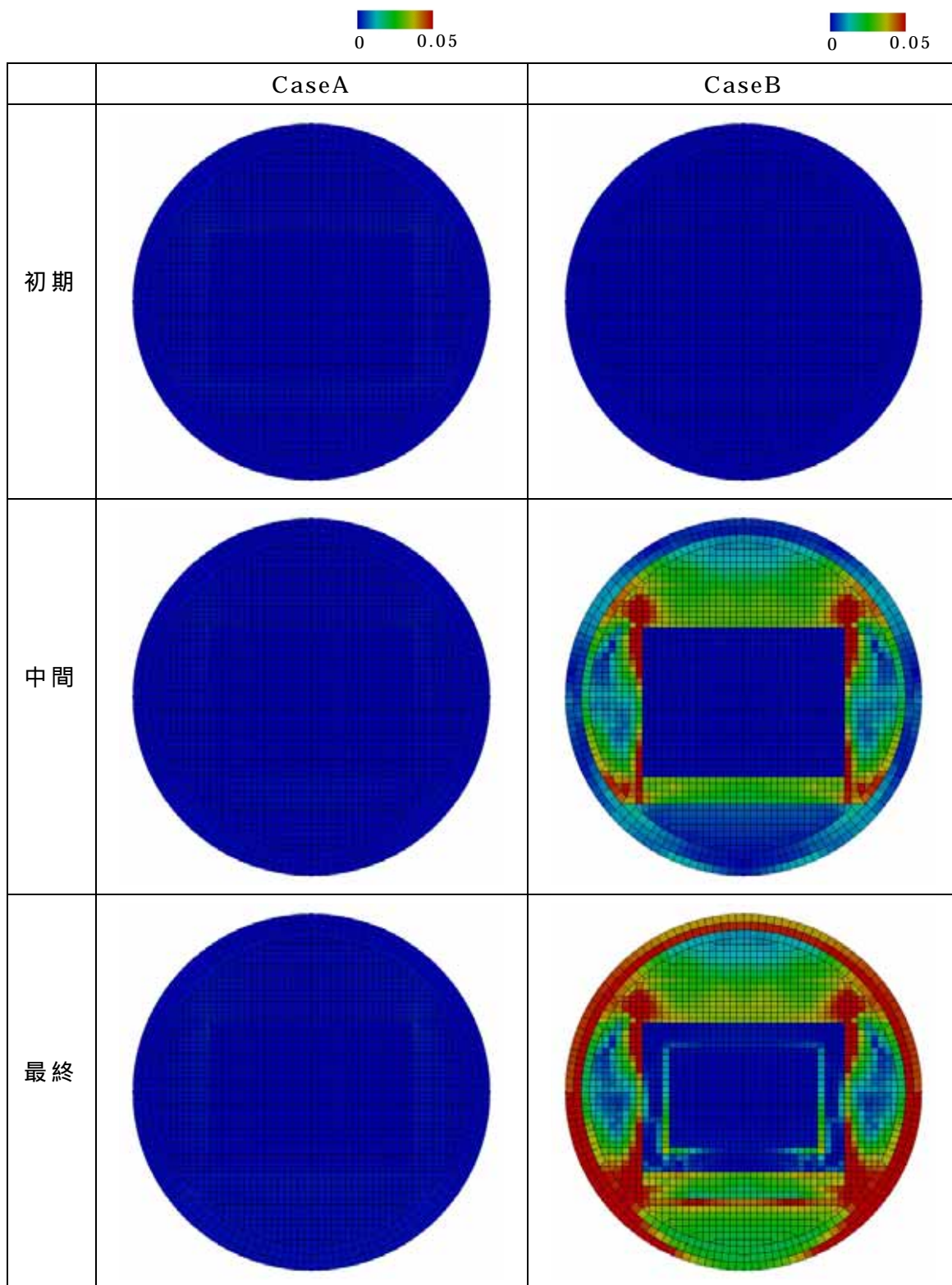


図 2.3-8 最大せん断ひずみ分布

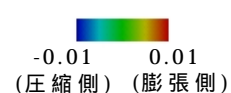
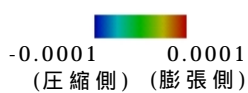
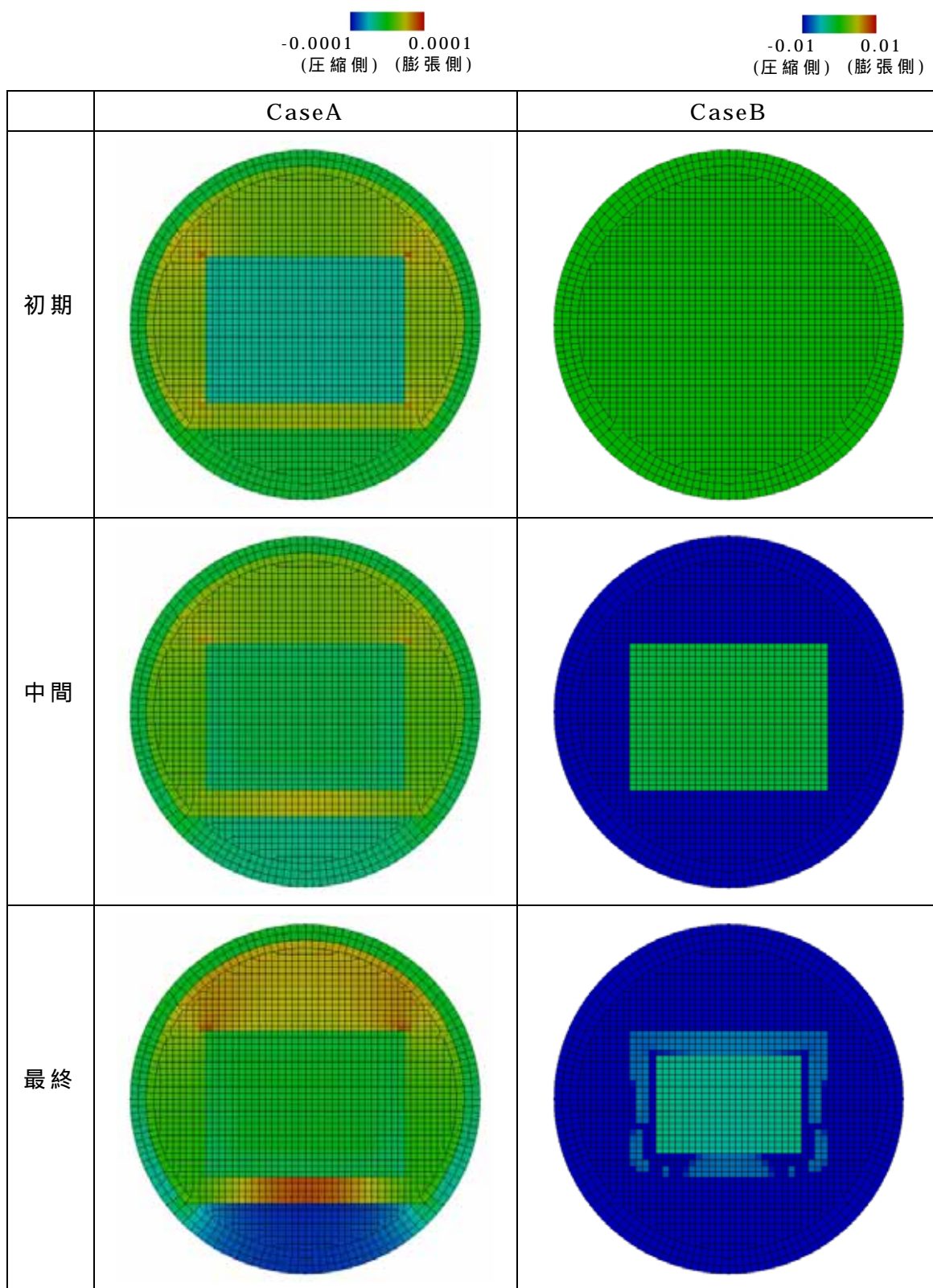


図 2.3-9 体積ひずみ分布

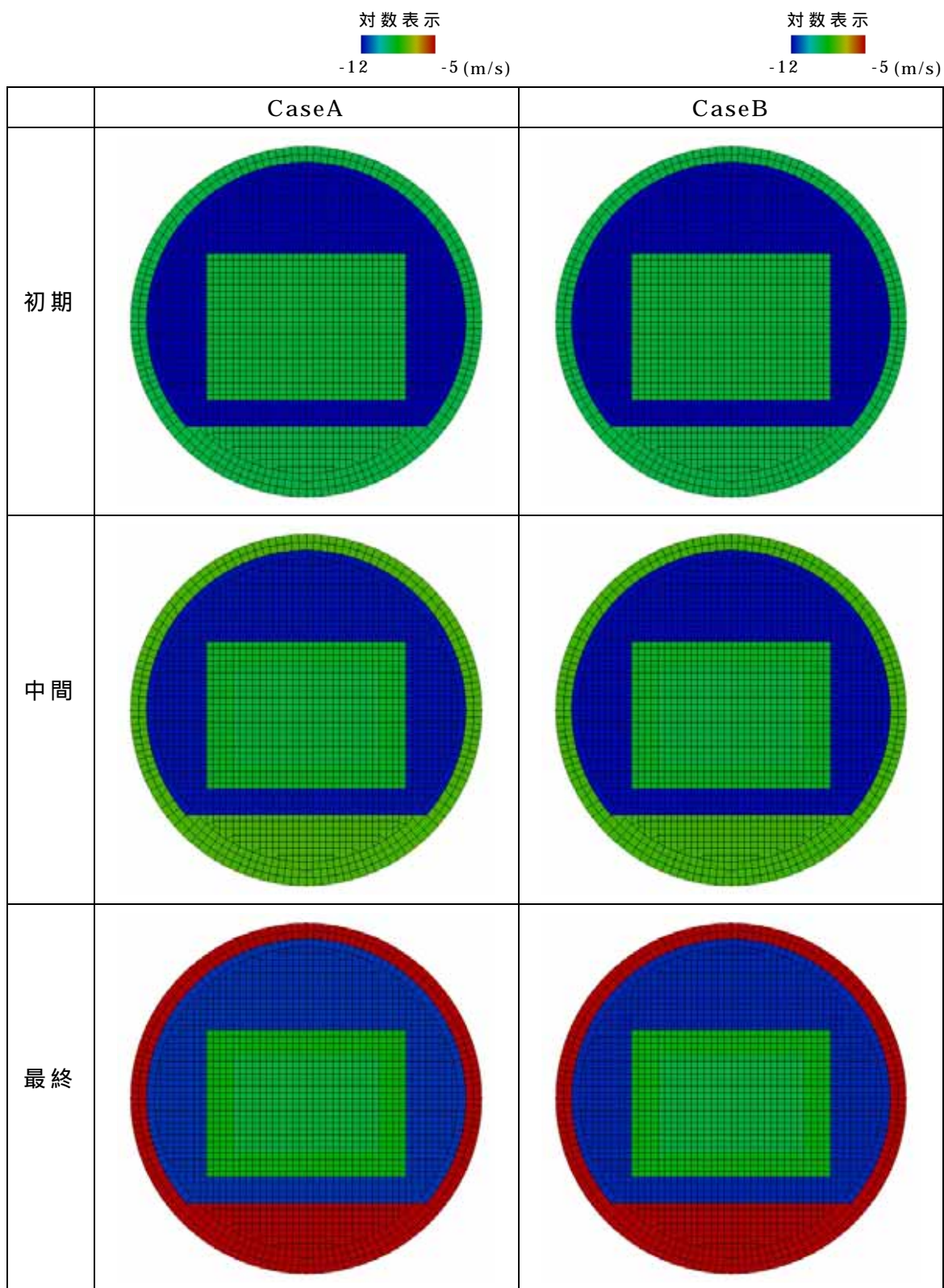
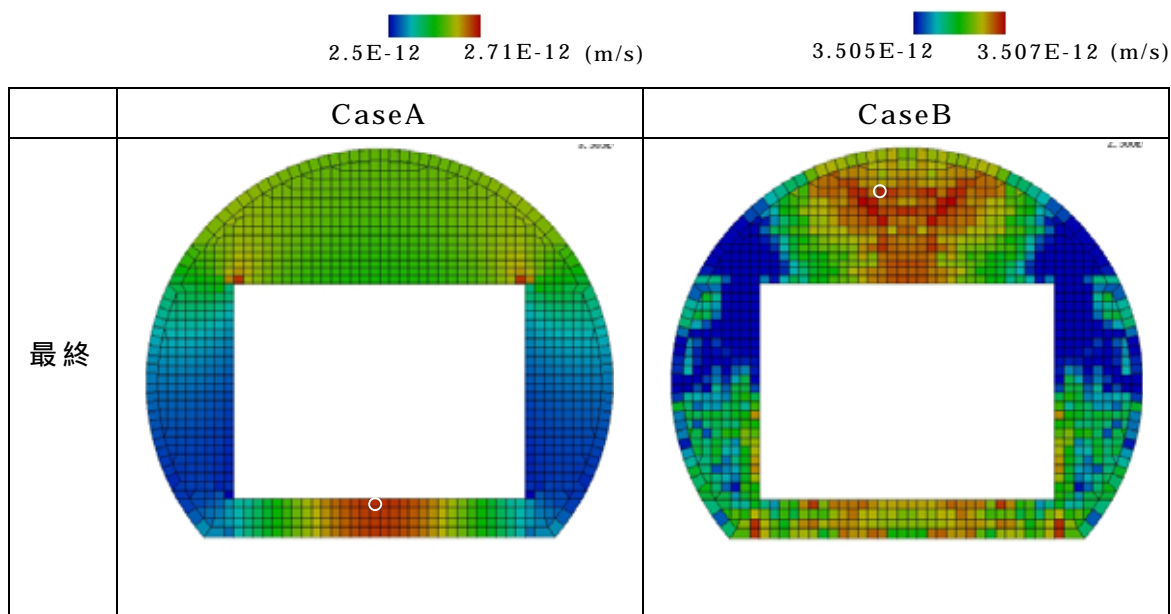


図 2.3-10 透水係数分布



白丸は最終ステップで最大の透水係数を示す要素

図 2.3-11 最終ステップの緩衝材の透水係数分布

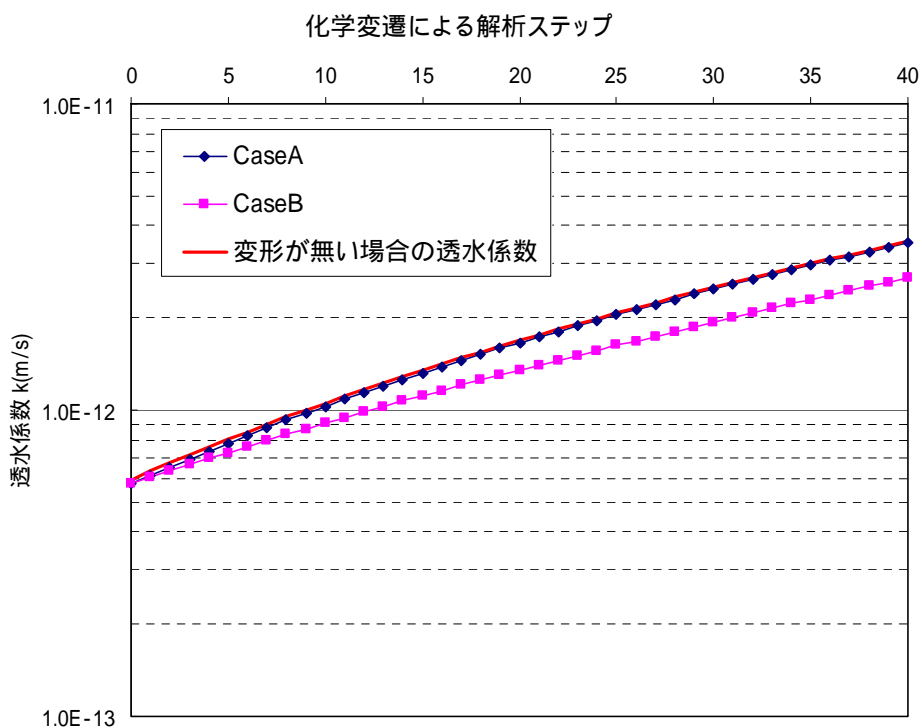
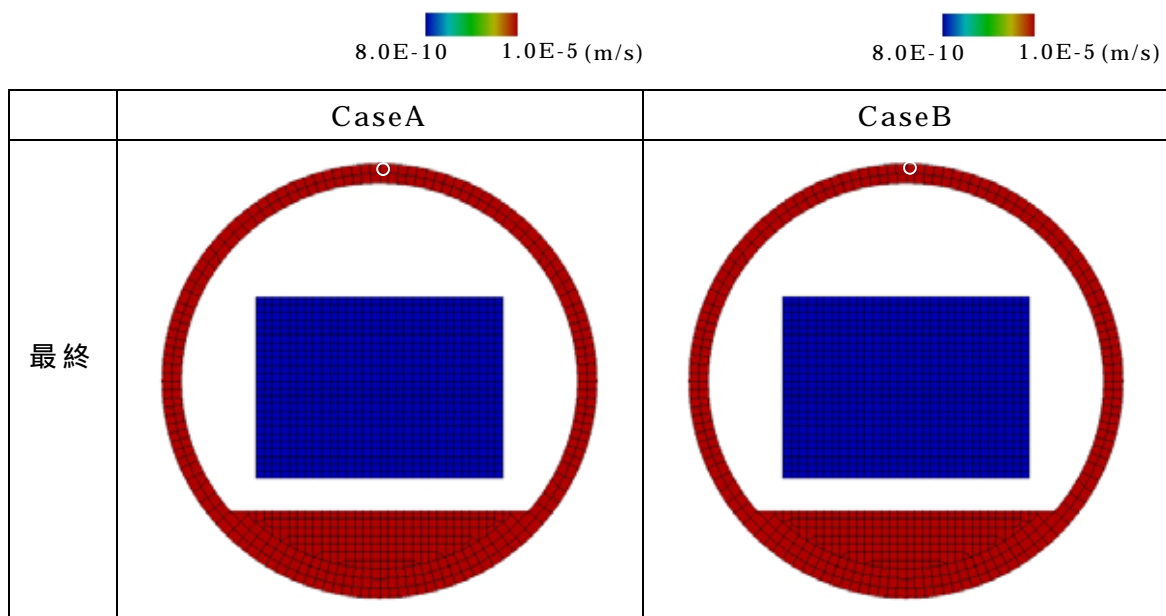


図 2.3-12 透水係数の変遷 (図 2.3-11 における白丸の要素)



白丸は最終ステップで最大の透水係数を示す要素

図 2.3-13 最終ステップのセメント系材料の透水係数分布

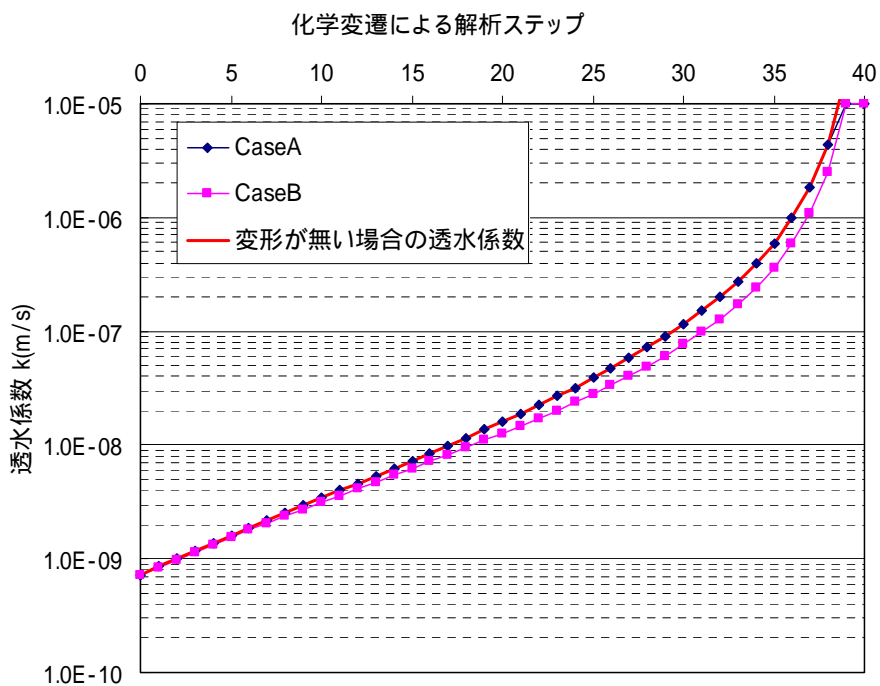


図 2.3-14 透水係数の変遷 (図 2.3-13 における白丸の要素)

2.3.6 結果のまとめと考察

図 2.3-4 に CaseA と CaseB の変形図を示す。CaseA は岩盤クリープ、支保の初期応力を考慮していなく、ほとんど変形していない。一方、CaseB は岩盤クリープによる強制変位量を支保外側から作用させているため、坑道が全体的に圧縮され、小さくなっている。また、廃棄体定置部の外側部分が僅かに変形している。

図 2.3-5 に CaseA と CaseB の平均応力分布を示す。コンターのレンジは CaseA は 0～1MPa、CaseB は 0～45MPa で表示している。CaseA は岩盤クリープを考慮しておらず、全体的に応力はステップが進むにつれ、低下傾向にある。CaseB は最終的に、緩衝材部分で 45MPa 程度の平均応力が発生している。岩盤クリープによる緩衝材の体積圧縮ひずみは 4% 程度であり、この圧縮ひずみと設定した化学的変遷指標から、2.1 で設定した膨潤圧評価式によって算出される平行膨潤圧は約 0.1MPa である。したがって、緩衝材に発生している大きな平均応力は、1.3 において考察した力学的応力（膨潤圧以外の土粒子のかみ合いによる応力）が大幅に増加したことによるものと考えられる。

図 2.3-6 に CaseA と CaseB の軸差応力分布を示す。コンターのレンジは CaseA は 0～1MPa、CaseB は 0～10MPa で表示している。CaseB は廃棄体定置部の下部の隅角部から緩衝材に大きな軸差応力が伝播している様子がわかる。また廃棄体部分にも比較的大きな軸差応力が発生している。最終ステップでは支保工及び廃棄体部分の一部は降伏状態に至っている。

図 2.3-7 に CaseA と CaseB の最小主応力分布を示す。コンターのレンジは CaseA は 0～1MPa、Case2 は 0～50MPa で表示している。CaseA は廃棄体隅各部及びインパート隅部（図中黄色丸印位置）に最小主応力で引張領域が見られる。CaseB は岩盤クリープによって徐々に最小主応力も大きくなり、引張応力が発生している個所は見られない。

図 2.3-8 に CaseA と CaseB の最大せん断ひずみ分布を示す。コンターのレンジは CaseA、CaseB 共に 0～0.05 で表示している。CaseA は変形が少なく、大きなせん断ひずみ発生個所は見られない。CaseB は緩衝材と廃棄体定置部隅角部が接する緩衝材部分および支保工で比較的大きなせん断ひずみが発生している。

図 2.3-9 に CaseA と CaseB の体積ひずみ分布を示す。コンターのレンジは CaseA は -0.0001～0.0001、CaseB は -0.01～0.01 で表示している。CaseA は緩衝材上部と底部で膨張側、インパートコンクリート部分で圧縮方向の体積ひずみが発生している。CaseB は全ての領域で圧縮側のひずみ

が発生している。

図 2.3-10 に CaseA と CaseB の透水係数分布を示す。コンターのレンジは CaseA、CaseB 共に対数表示で $-12 \sim -5$ で表示している。両ケースともに、支保工およびインバートコンクリート部分で -5 乗オーダーの値となっている。CaseA、CaseB では変形のモードが違うにも係わらず、透水係数分布はほぼ同じとなっており、透水係数を決定するのは化学的変遷の寄与が大きいという結果となった。

図 2.3-11 に CaseA と CaseB の緩衝材の最終ステップでの透水係数分布を、図 2.3-12 に最終ステップで透水係数が最も大きくなる要素の解析ステップと透水係数の関係を示す。図中には変形が無い場合の(化学的変遷のみの)透水係数の変遷を併せて示す。まず図 2.3-12 をみると、CaseA は変形が無い場合の透水係数とほぼ同じであり、透水係数は化学的な変遷に依存していることがわかる。一方 CaseB は CaseA と比較して透水係数が小さく、岩盤クリープの影響で緩衝材が圧縮されている傾向が伺える。また、CaseA、CaseB の双方において、緩衝材は最終ステップにおいても -12 乗オーダーを保持していることが確認できる。

また図 2.3-11 をみると、CaseA、CaseB 共に緩衝材内での透水係数の分布はわずかではあるものの、CaseA では底部緩衝材部分で比較的大きな透水係数を、CaseB では緩衝材上部が比較的大きな透水係数を示していることが分かる。これは、本検討においては自重による底部緩衝材の密度変化を考慮していないこと、及び設定した人工バリアの形状と化学的変遷指標の影響、という二つの要因が考えられる。以下のその内容の詳細を示す。

まず本検討では、廃棄体定置部の自重による変形を見越して、底部緩衝材厚さを自重沈下後の想定厚さ 1m としてメッシュを作成し、解析を実行している。また、自重による応力状態を再現するために、1 ステップ目に自重解析を行っているが、自重による変形をクリアしている。したがって、底部緩衝材は自重による応力状態は再現されているものの、ひずみ(自重による密度変化)は考慮されていない。ペントナイト系材料の透水係数は化学的変遷指標によるものと、変形による密度変化に起因するものがあるが、本検討では自重による密度変化分が考慮されていないことになり、底部緩衝材位置での透水係数が実際よりも大きめに算出されているといえる。

また図 2.3-15、16 に、変形倍率を大きくした CaseA、CaseB の変形図を示す。ここで、CaseA では比較的大きく膨張している部分に、CaseB で比較的圧縮量が少ない部分に白丸印を示している。CaseA ではセメント系材料の劣化に伴い、廃棄体定置部が沈下している。しかし、廃棄体定置部はインバート部に比べ剛性が高いために、底部緩衝材の中央部がインバ

ートの軟化に追従できずに膨張側のひずみを発生している。これによって透水係数が他の部位と比較し大きめの値となっている。一方、CaseBでは、岩盤クリープにより、坑道内すべてが圧縮側のひずみとなっている。廃棄体上部は他の部位と比較し、緩衝材の量が多いため圧縮ひずみ量が少なくなり、透水係数が大きめの値となっている。

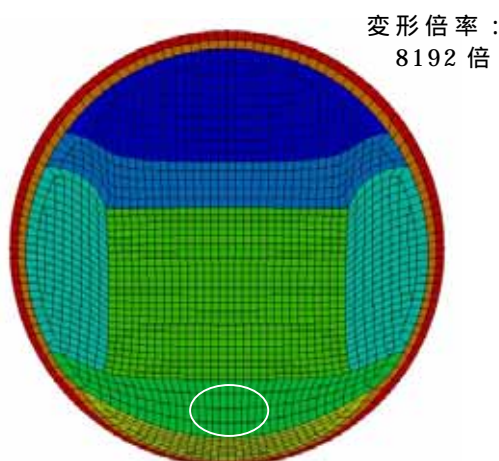


図 2.3-15 CaseA 変形図

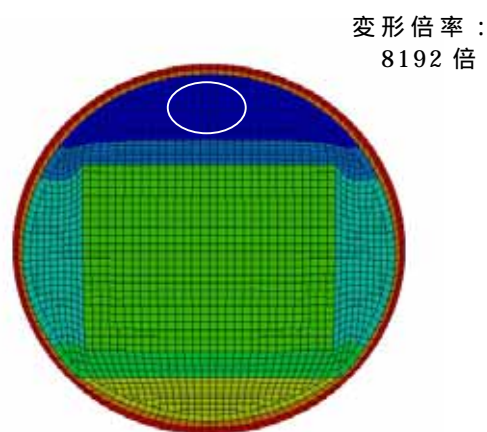


図 2.3-16 CaseB 変形図

緩衝材と同様に、図 2.3-13 に CaseA と CaseB のセメント系材料の最終ステップでの透水係数分布を、図 2.3-12 に最終ステップで透水係数が最も大きくなる要素のステップと透水係数の関係を示す。CaseA、CaseB 共に化学的変遷の大きい支保工・インバートコンクリートの透水係数が大きく、分布はほとんど見られない。図 2.3-14 を見ると、緩衝材と同様、CaseBの方が透水係数が小さく、岩盤クリープにより圧縮されていることが分かる。

以上より、堅固な岩盤で岩盤クリープを考慮しない CaseA と、脆弱な岩盤で岩盤クリープを考慮した CaseB では、変形モードや透水係数分布等において有意に異なる結果が得られたが、両ケースにおいて緩衝材は -12 乗オーダーの透水係数を保持し、双方拡散場を担保できると考えられる結果となった。

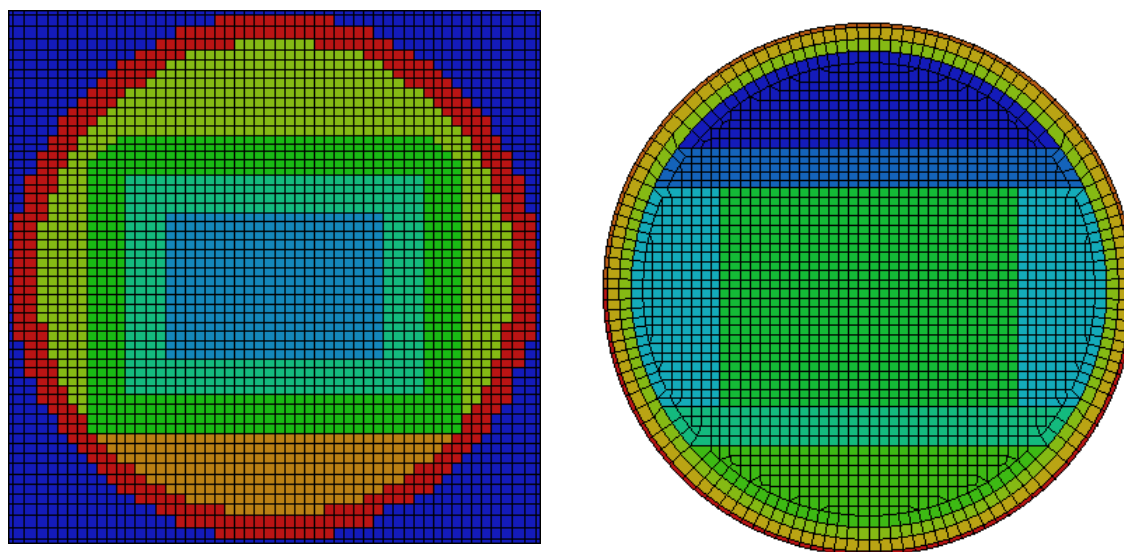
3. 水理場変遷評価システムの構築に関する検討

3.1 力学的変遷挙動解析システムと化学・物質移動解析システムの統合

3.1.1 システムの統合

化学・物質移動解析ではシステム上の制約から、その適用は構造格子メッシュに限定されている。一方、力学的変遷挙動解析においては円形の坑道断面を解析するために、詳細な有限要素メッシュを用いることが必要となっている。このため、化学・物質移動解析システムと力学的変遷挙動解析システムを統合する場合、互いのメッシュ上の変数を適切に変換することが必要となる。

図 3.1-1 に化学・物質移動解析システム及び力学的変遷挙動解析システムで使用する坑道断面のメッシュの例を示す。化学・物質移動解析システムで使用するメッシュは構造格子である。一方、力学的変遷挙動解析システムで使用するメッシュは有限要素メッシュである。



(a)化学・物質移動解析システムのメッシュ (b) 力学的変遷挙動解析システムのメッシュ

図 3.1-1 メッシュの例

3.1.2 変数の変換方法

図 3.1-2 にあるひとつの化学・物質移動解析のメッシュに含まれる力学的変遷挙動解析のメッシュの例を示す。

この、化学・物質移動解析のメッシュ内の変数の値は、この中に含まれる力学的変遷挙動解析の要素での変数の値を面積比に応じて足し合わせることによって算出するので、力学的変遷挙動解析の変数から化学・物質移動解析の変数への変換は、

$$u_i = \sum_j \frac{a_j}{A_j} v_j \quad (3.1.1)$$

となる。ただし、 u_i は化学・物質移動解析のメッシュに含まれる力学解析の要素について足し合わせる。 a_j は力学解析の第 j 要素の化学・物質移動解析のメッシュ中に含まれる面積、 A_j は力学解析の第 j 要素の全面積、 v_j は力学解析の第 j 要素の変数の値である。

逆に、化学・物質移動解析の変数から力学解析の変数への変換は、

$$v_i = \frac{a_j}{A_j} v_{j0} \frac{u_j}{u_{j0}} \quad (3.1.2)$$

ただし、 u_{i0} は化学・物質移動解析の第 i 節点での変数の初期値を、 v_{j0} は力学解析の第 j 要素の変数の初期値である。ただし、力学解析の第 j 要素の変数 v_j は関連しているすべての化学・物質移動解析の節点からの影響を足し合わせる。

図 3.1-3 に変換の例を示す。図 3.1-3(a)はコンクリート鉍物濃度のプロファイルで、力学の廃棄体、支保（外側と内側）、インバートコンクリートに相当する要素で濃度を 1 とした。このときの分布は図 3.1-3(a)の右側である。これを、式(3.1.1)を用いて化学メッシュ上のプロファイルに変換したものが図 3.1-3 (a)の左側である。化学メッシュ上のプロファイルは式(3.1.2)により力学のプロファイルに再変換することが可能で、このときの分布は再度図 3.1-3 (a)の右側となる。

図 3.1-3(b)は緩衝材鉍物濃度のプロファイルで、力学の緩衝材（埋め戻

し)、上部・側部・低部緩衝材に相当する要素で濃度を 1 とした。このときの分布は図 3.1-3(b)の右側である。同様に、式(3.1.1)を用いて化学メッシュ上のプロファイルに変換したものが図 3.1-3(b)の左側である。また、化学メッシュ上のプロファイルを式(3.1.2)により力学のプロファイルに再変換した分布は再度図 3.1-3 (b)の右側となる。

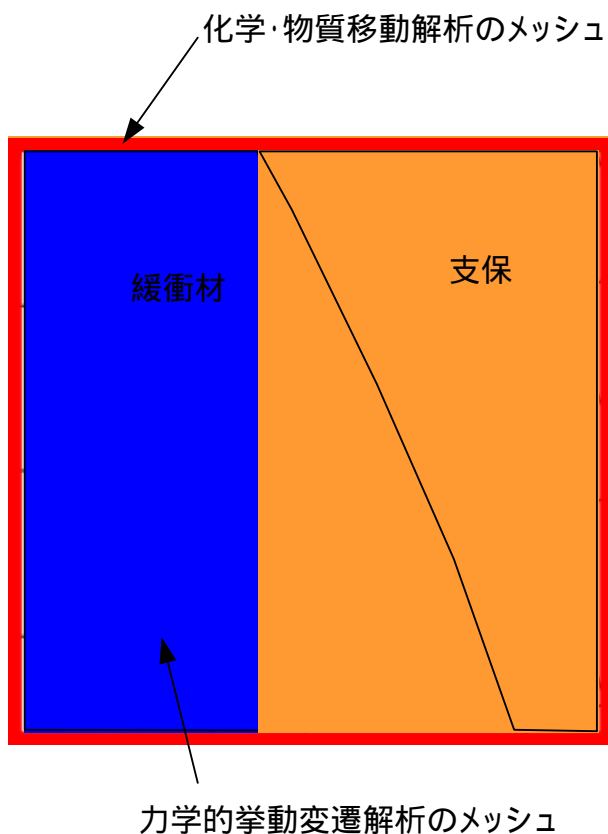


図 3.1-2 力学メッシュと化学・物質移動解析メッシュの関係の拡大図

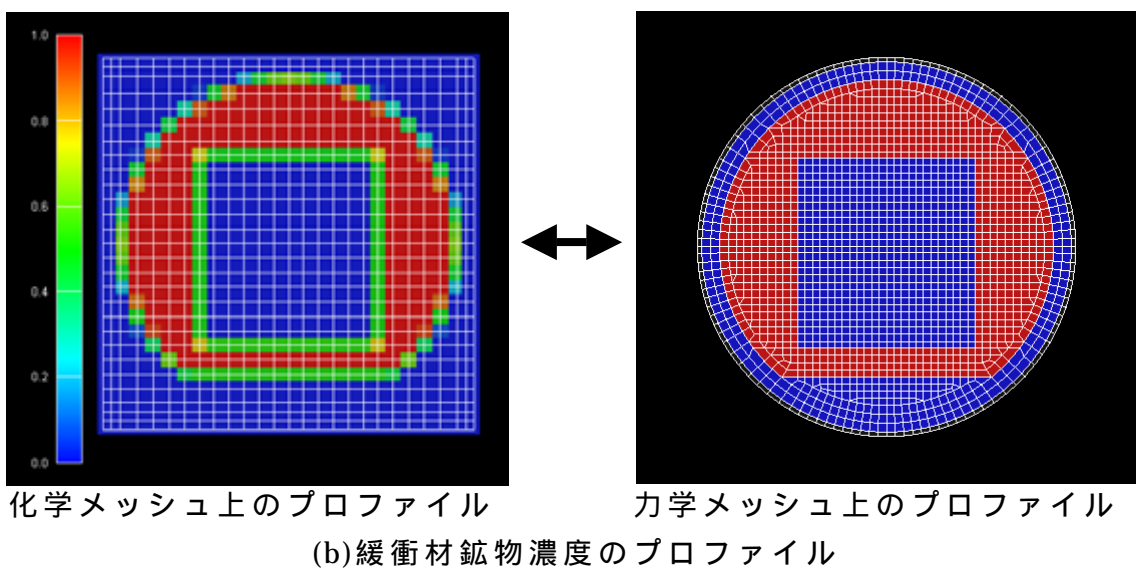
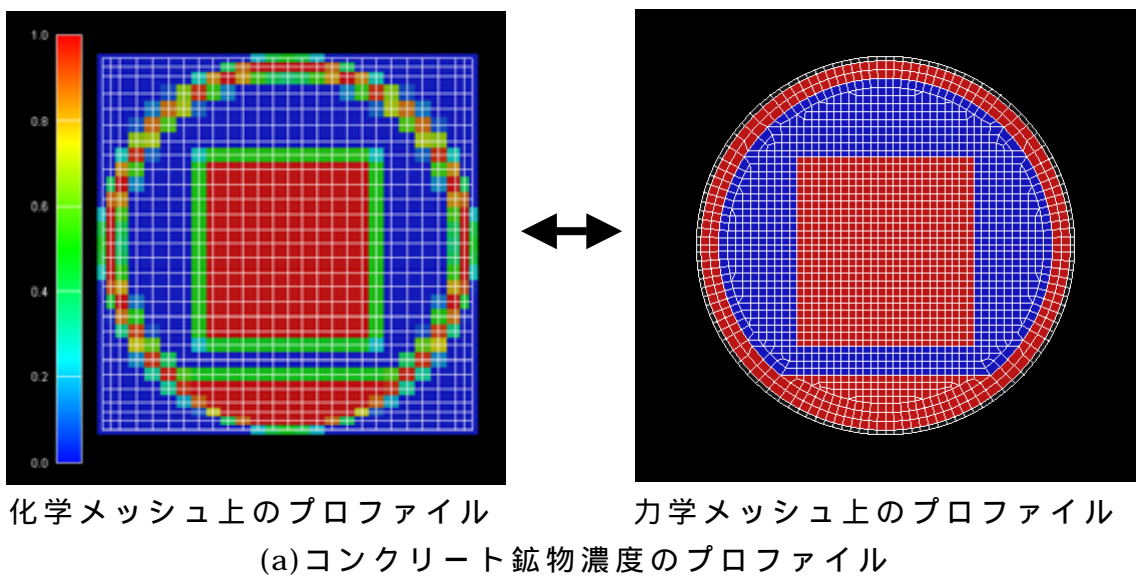


図 3.1-3 化学メッシュと力学メッシュ間の鉍物濃度の変換例

3.2 メッシュデータの変換

3.2.1 化学・物質移動解析結果の力学的変遷挙動解析システムメッシュへの変換

開発した変換ツールは鉱物の濃度あるいは鉱物の濃度に基づいて定義される諸量を変換することを目的としている。しかし、本年度は化学・物質移動解析が得られないことから、仮に定義したデータを用いて変換を行う。

まず、もともになる力学的変遷挙動解析システムのメッシュを図 3.2-1 に示す。これに対応する化学・物質移動解析のメッシュを力学的変遷挙動解析システムのメッシュと合わせて図 3.2-2 に示す。

この化学・物質移動解析のメッシュに対して、図 3.2-3 のように領域に分割して、各領域で変数を設定する。設定する変数はセメント系材料について Ca 溶出率と空隙率、ベントナイト系材料について交換性 Na 率、陽電荷密度、スメクタイト部分密度、スメクタイト部分空隙比、空隙率とする。それぞれの値を表 3.2-1 に示す。表 3.2-1 の領域番号は図 3.2-4 に示す通りである。

この設定に基づく時刻 1、2、3 における空隙率の分布を図 3.2-5、図 3.2-6、図 3.2-7 に示す。各図の(a)は化学・物質移動解析のメッシュに対して行った設定における空隙率の分布、各図の(b)は力学的変遷挙動解析メッシュに変換した空隙率分布である。化学・物質移動解析のメッシュに対して行った設定をもとに力学的変遷挙動解析メッシュでの空隙率を算出しているため、境界部分でばらつきがみられる。

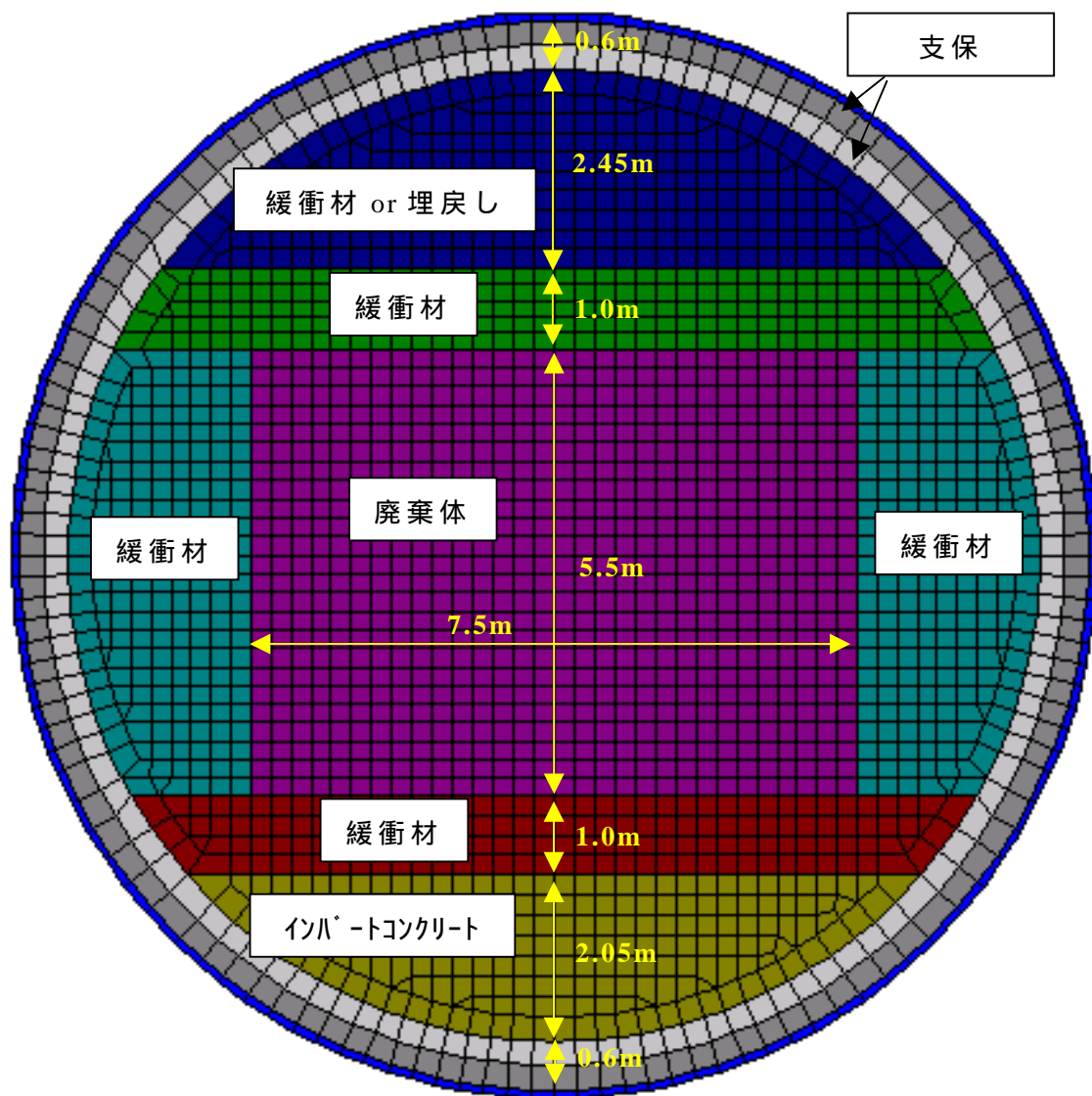


図 3.2-1 力学的変遷挙動解析システムのメッシュ

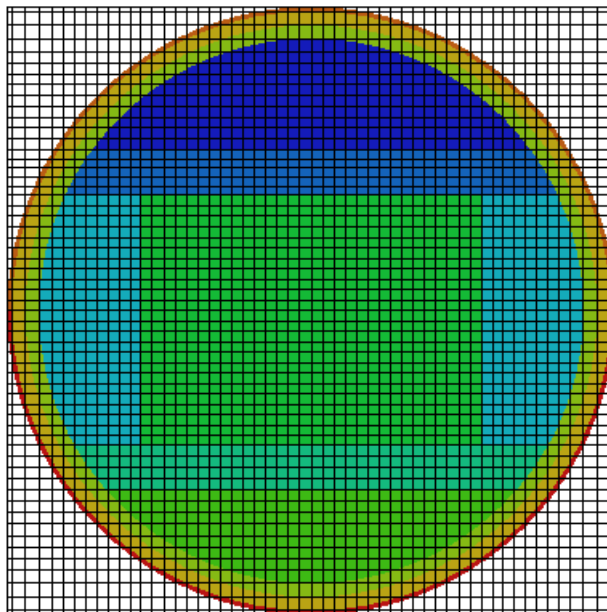


図 3.2-2 化学・物質移動解析のメッシュ

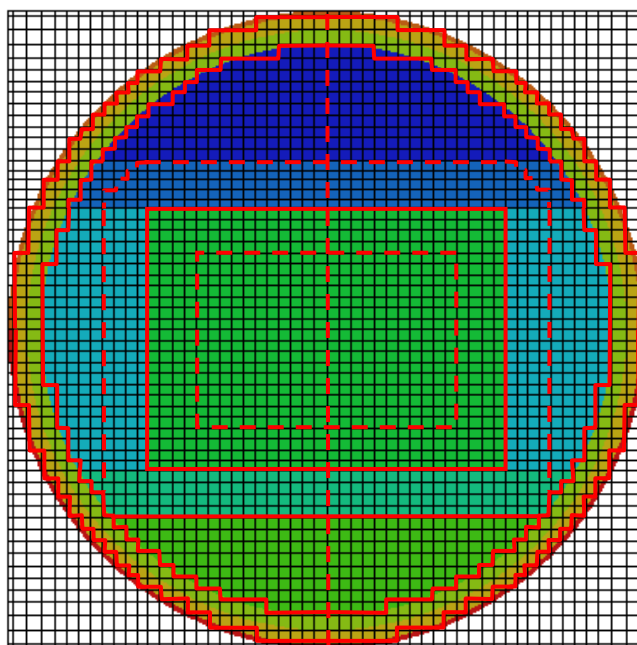


図 3.2-3 化学・物質移動解析メッシュの領域への分割

表 3.2-1 物性値の設定

領域 番号	1, 11		2, 12		3, 4, 13, 14					5, 6, 15, 16	
領域 名称	廃棄体定置 層(内側)		廃棄体定置層 (外側)		緩衝材(内側、外側)					インバート、 支保工	
変数	Ca 溶 出 率	空 隙 率	Ca 溶 出 率	空 隙 率	交 換 性 Na 率	ス メ ク タ イ ト 部 分 密 度	ス メ ク タ イ ト 部 分 間 隙 比	陽 電 荷 密 度	空 隙 率	Ca 溶 出 率	空 隙 率
時刻 1	0.0	0.19	0.0	0.19	0.85	0.92	1.94	0.0	0.40	0.0	0.13
時刻 2	0.0	0.19	0.125	0.215	0.85	0.67	3.02	0.0	0.45	0.5	0.23
時刻 3	0.0	0.19	0.25	0.24	0.85	0.45	4.99	0.0	0.50	1.0	0.33

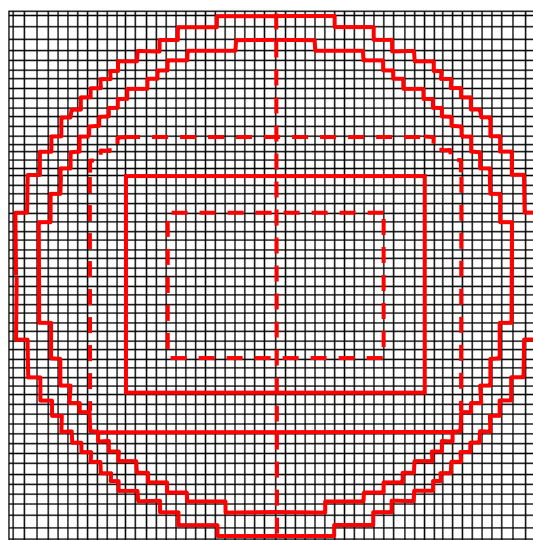
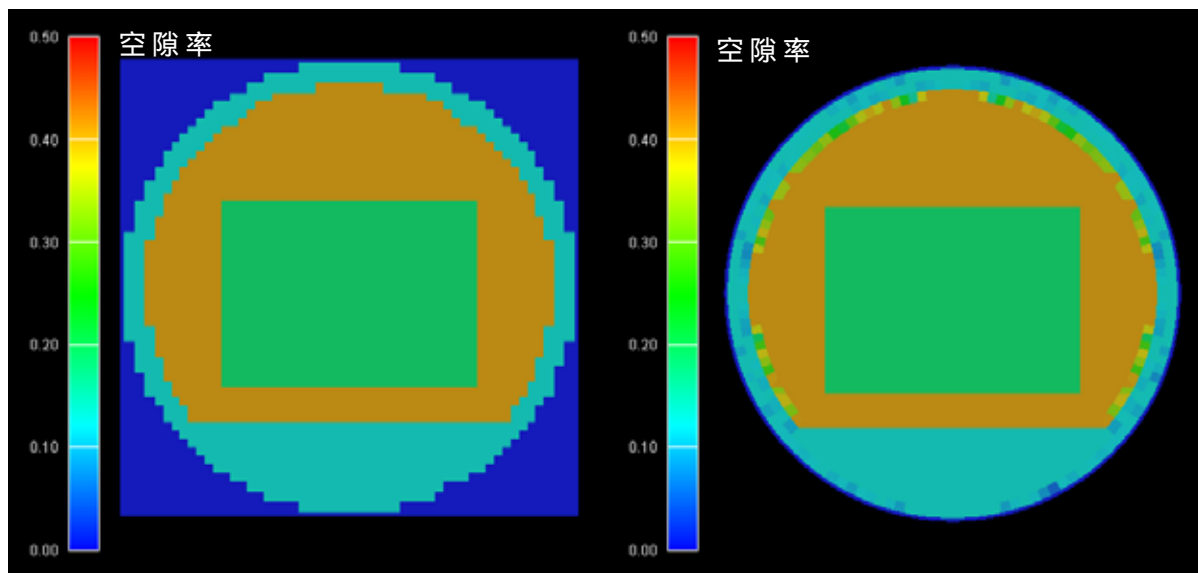
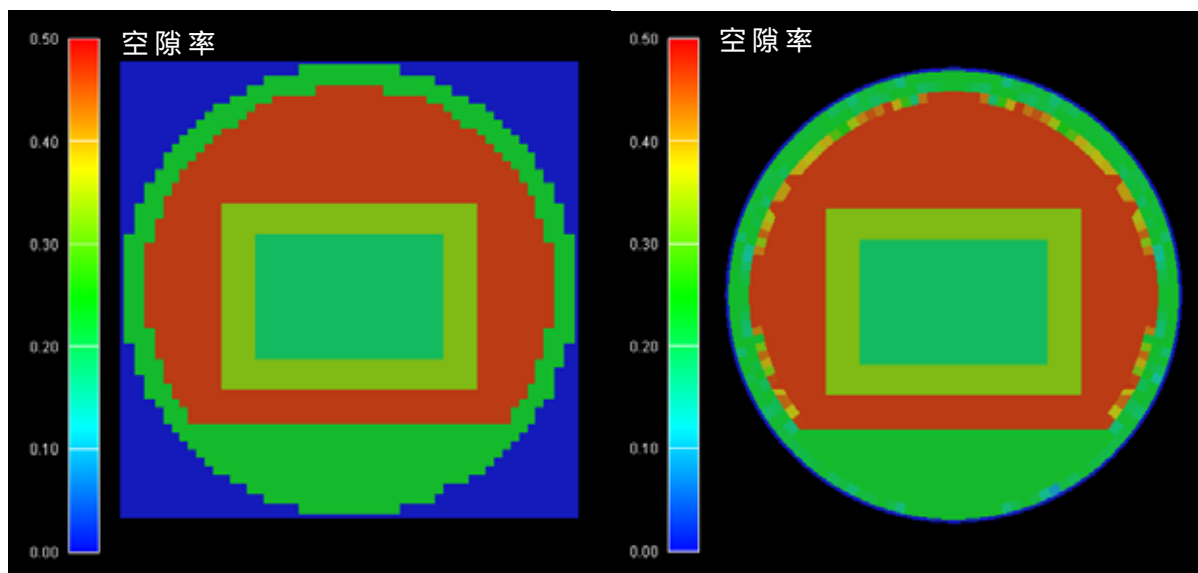


図 3.2-4 各領域の番号



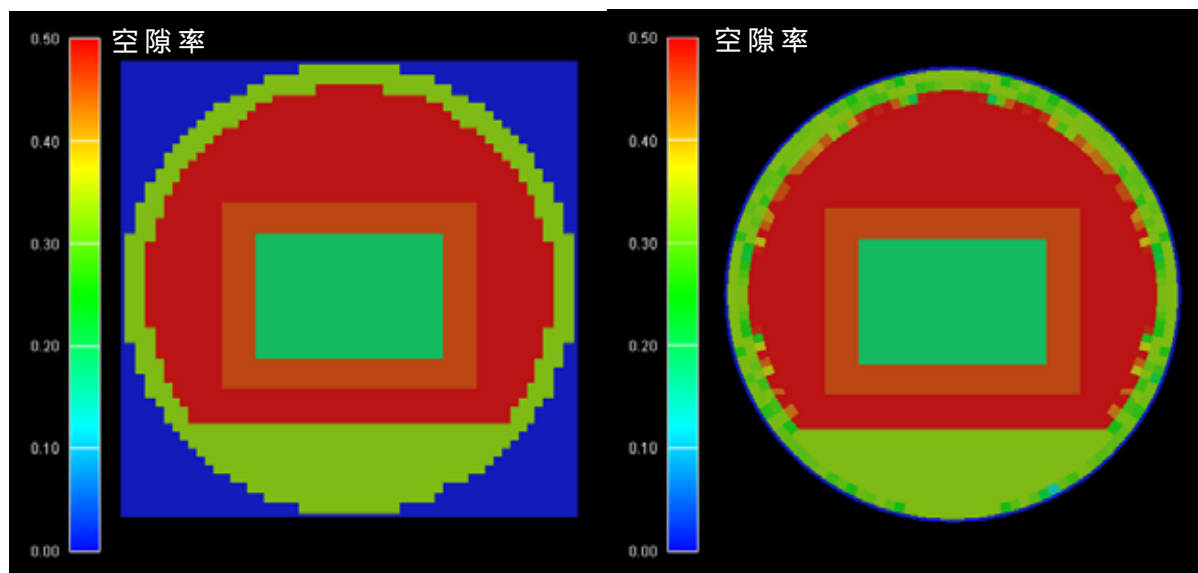
(a)化学メッシュでの空隙率分布 (b)力学メッシュでの空隙率分布

図 3.2-5 時刻 1 における空隙率の分布



(a)化学メッシュでの空隙率分布 (b)力学メッシュでの空隙率分布

図 3.2-6 時刻 2 における空隙率の分布



(a)化学メッシュでの空隙率分布 (b)力学メッシュでの空隙率分布

図 3.2-7 時刻 3 における空隙率の分布

3.2.2 力学的変遷挙動解析システムから物質移動解析システムへの変換

坑道領域の力学的変遷挙動解析で求められた透水係数と岩盤領域のクリープの解析により求められた体積ひずみに基づいて、坑道及び岩盤を含むニアフィールド全体の水理場を解析するための透水係数場を作成する。

岩盤領域についてはクリープ解析により岩盤部の体積ひずみが求められる。体積ひずみと透水係数の関係は、

$$K = K_0 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{7.54} \quad (3.2.1)$$

で求める。ただし、 K_0 は初期透水係数で健岩部で 10^{-9} m/sec、ゆるみ域で 10^{-7} m/secとする。 θ_0 は初期空隙率で 0.3 とする。また Δx は、

$$\theta = \frac{\theta_0 + \Delta x}{1 + \Delta x} \quad (3.2.2)$$

とする。ただし、 Δx は体積ひずみ増分とする。ゆるみ域は坑道外部の半径 3 m の範囲とする。図 3.2-8、図 3.2-9、図 3.2-10 にクリープの解析により求められた体積ひずみに基づいて算出した時刻 1、2、3 における岩盤領域の透水係数分布を示す。ただし、ここでは坑道内については仮の値を代入して表示した。

坑道領域については力学的変遷挙動解析により透水係数が算出されているので、これをそのまま適用する。クリープを考慮した場合の時刻 1、2、3 における透水係数分布を図 3.2-11、図 3.2-12、図 3.2-13 に示す。また、クリープを考慮しない場合の時刻 1、2、3 における透水係数分布を図 3.2-14、図 3.2-15、図 3.2-16 に示す。

以上の岩盤領域の透水係数と坑道内の透水係数をそれぞれ用いることにより水理解析のための透水係数場を作成した。図 3.2-17 に水理解析のメッシュを示す。坑道部はメッシュが細かいため図では黒く塗りつぶされている。図 3.2-18 に坑道周辺部の拡大図を示す。坑道及びゆるみ域を含む領域のメッシュが細かく設定されている。

クリープを考慮した場合の時刻 1、2、3 における水理解析のための透水係数場を図 3.2-19、図 3.2-20、図 3.2-21 に示す。また、クリープを考慮しない場合の時刻 1、2、3 における透水係数場を図 3.2-22、図 3.2-23、図 3.2-24 に示す。クリープを考慮しない場合、岩盤領域の透水係数は初期値から変化しないものとした。

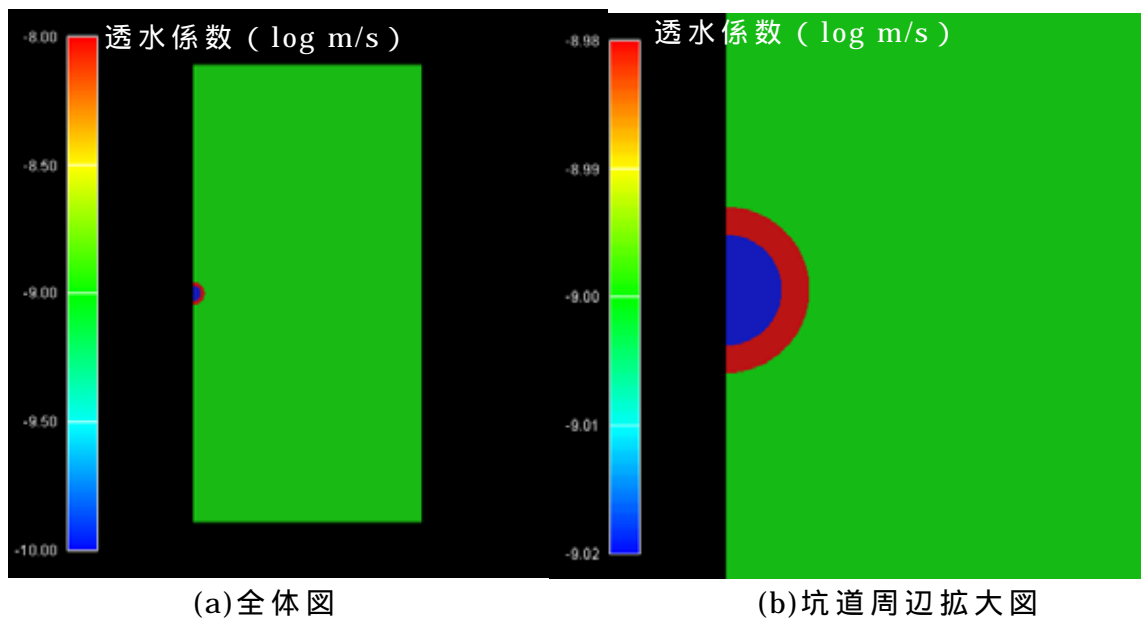


図 3.2-8 時刻 1 における岩盤の透水係数分布

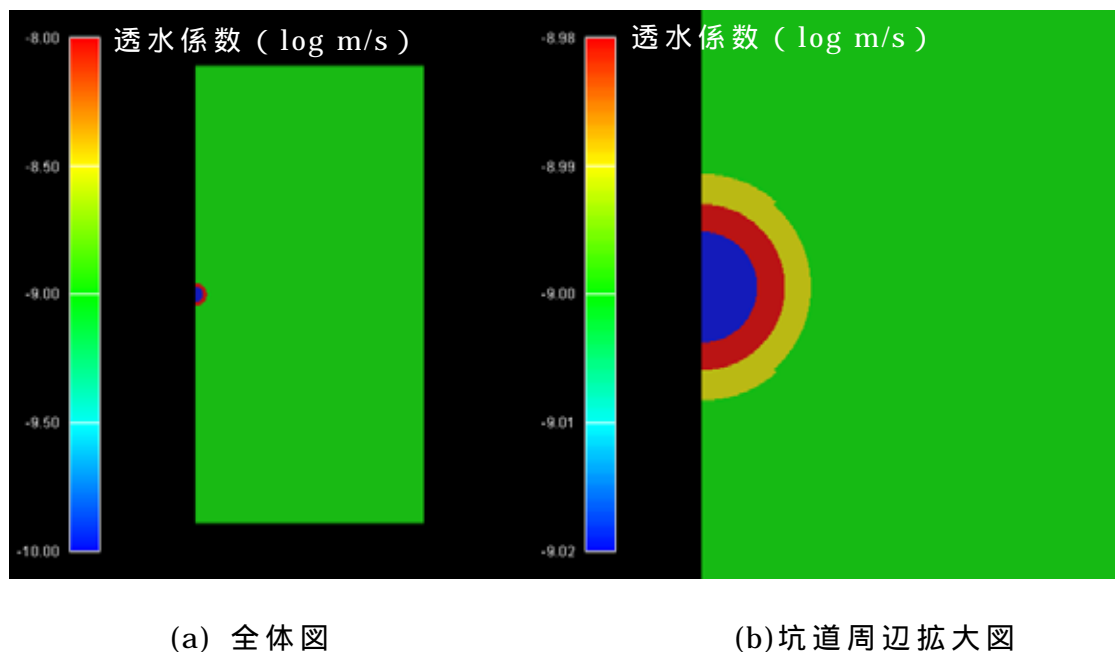


図 3.2-9 時刻 2 における岩盤の透水係数分布

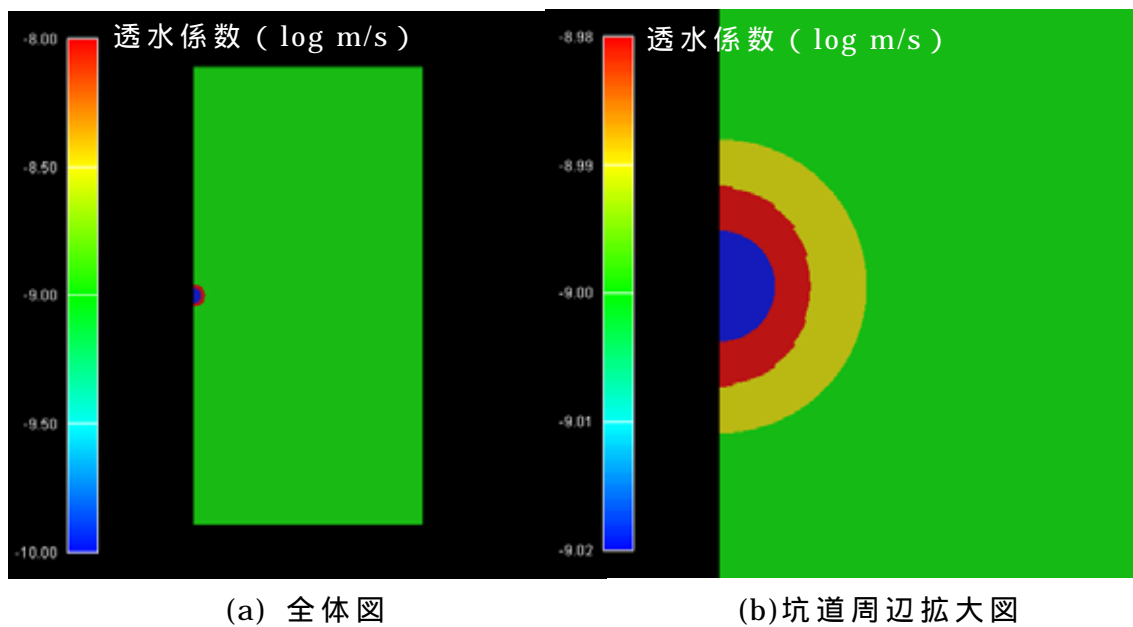


図 3.2-10 時刻 3 における岩盤の透水係数分布

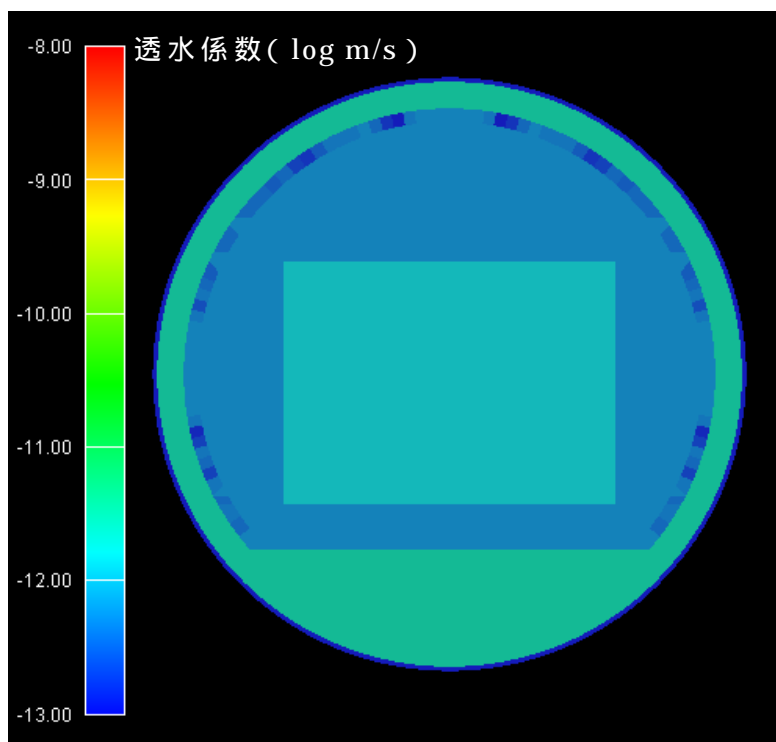


図 3.2-11 時刻 1 における坑道内の透水係数分布 (クリープを考慮)

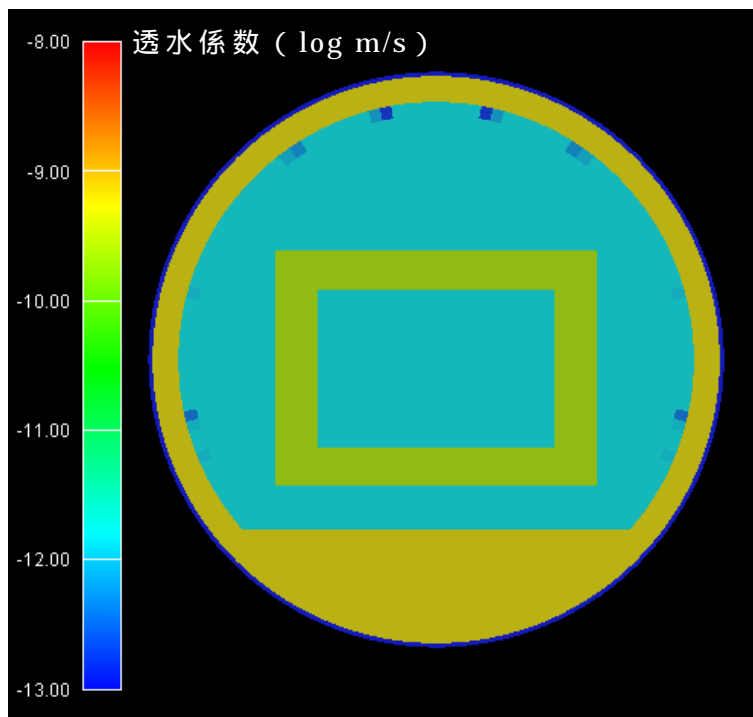


図 3.2-12 時刻 2 における坑道内の透水係数分布 (クリープを考慮)

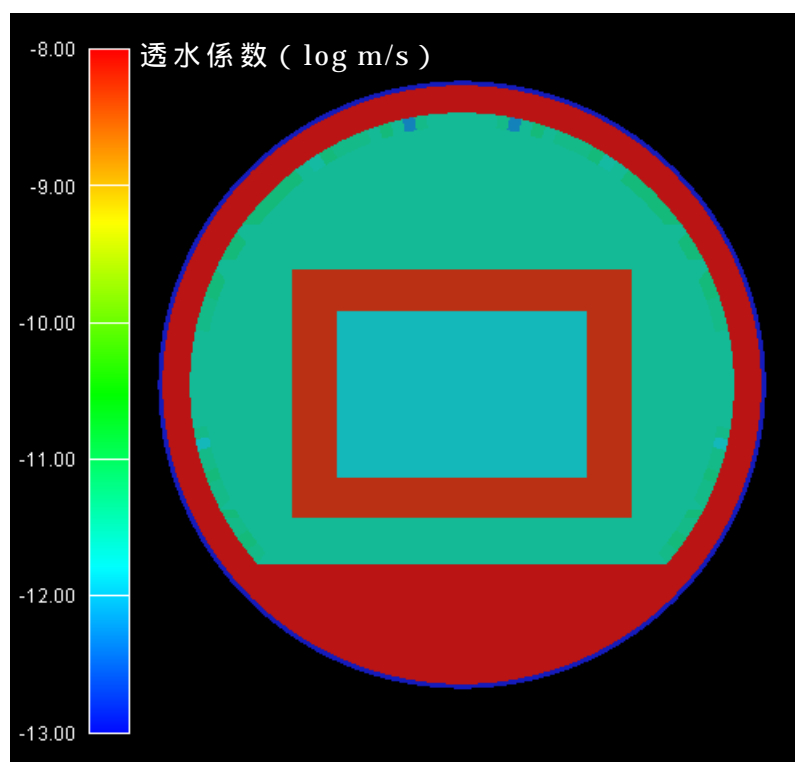


図 3.2-13 時刻 3 における坑道内の透水係数分布 (クリープを考慮)

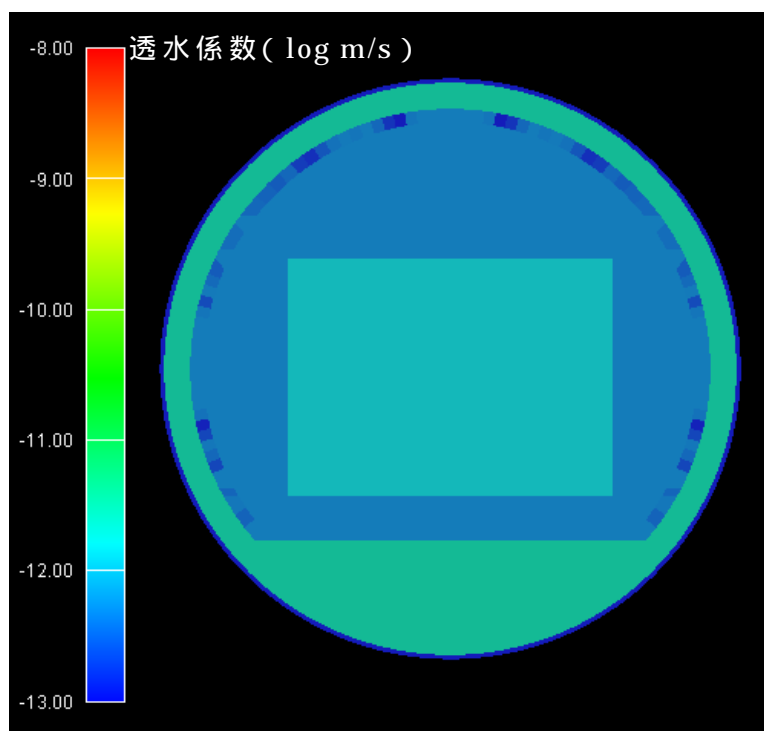


図 3.2-14 時刻 1 における坑道内の透水係数分布 (クリープなし)

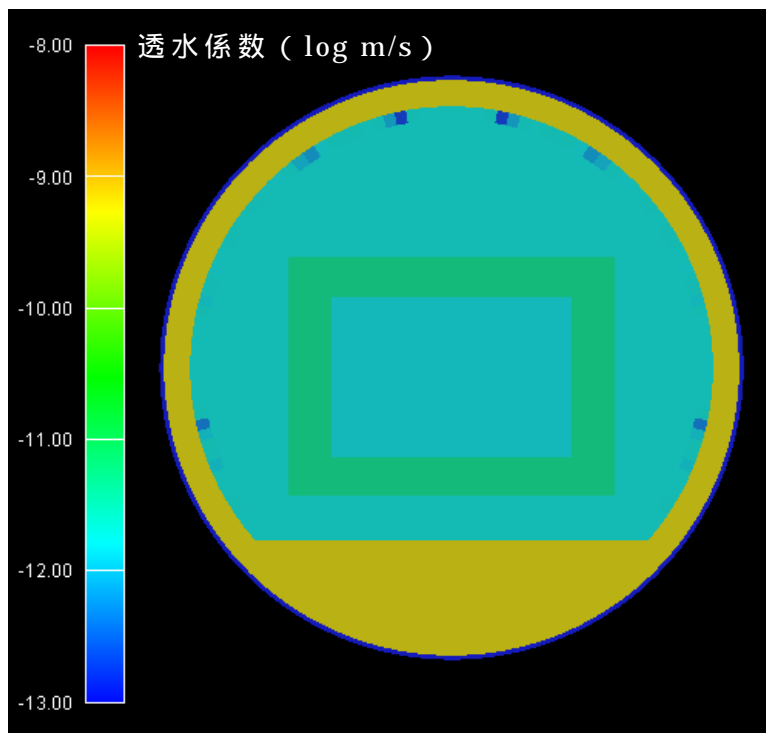


図 3.2-15 時刻 2 における坑道内の透水係数分布 (クリープなし)

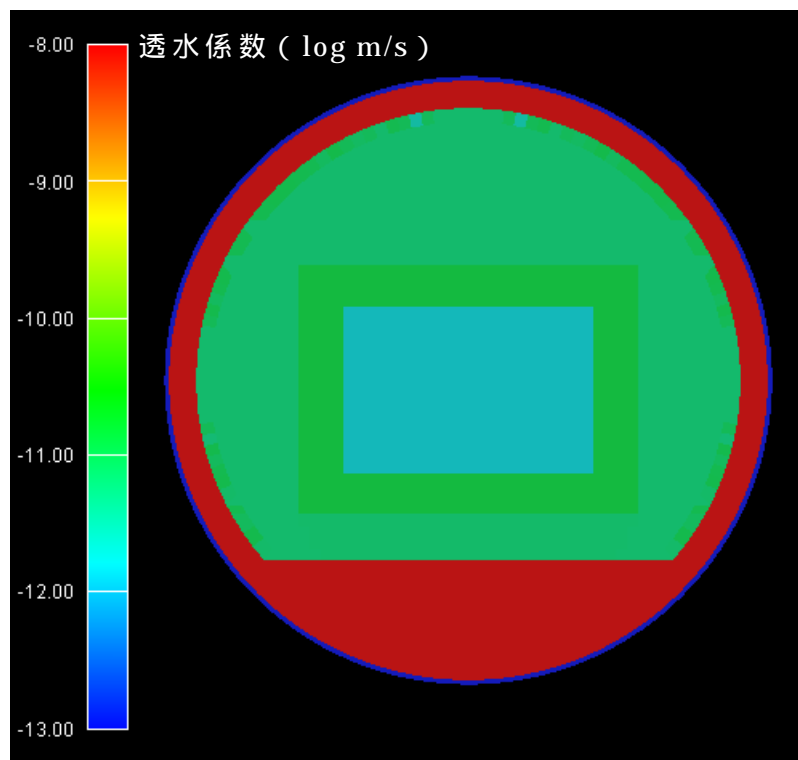


図 3.2-16 時刻 3 における坑道内の透水性係数分布 (クリープなし)

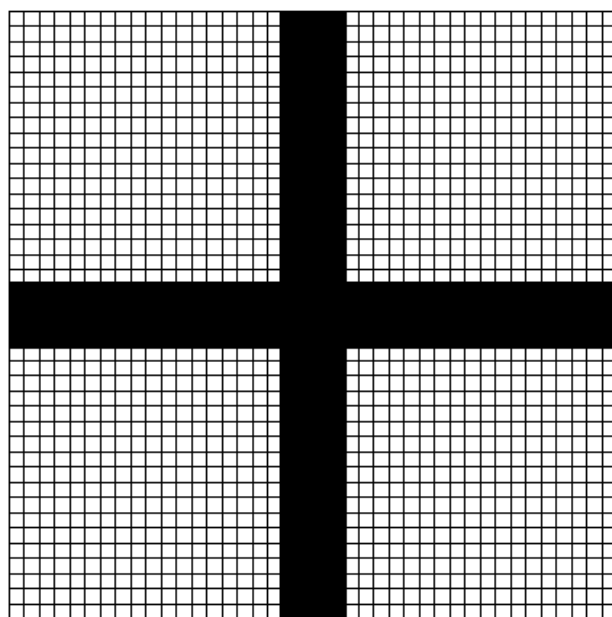


図 3.2-17 水理解析メッシュ

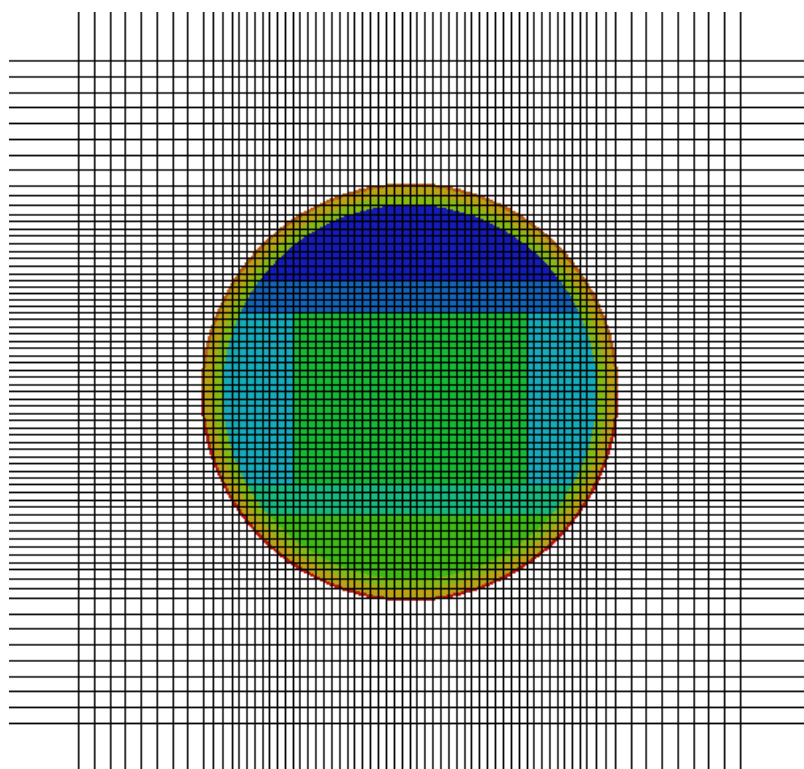
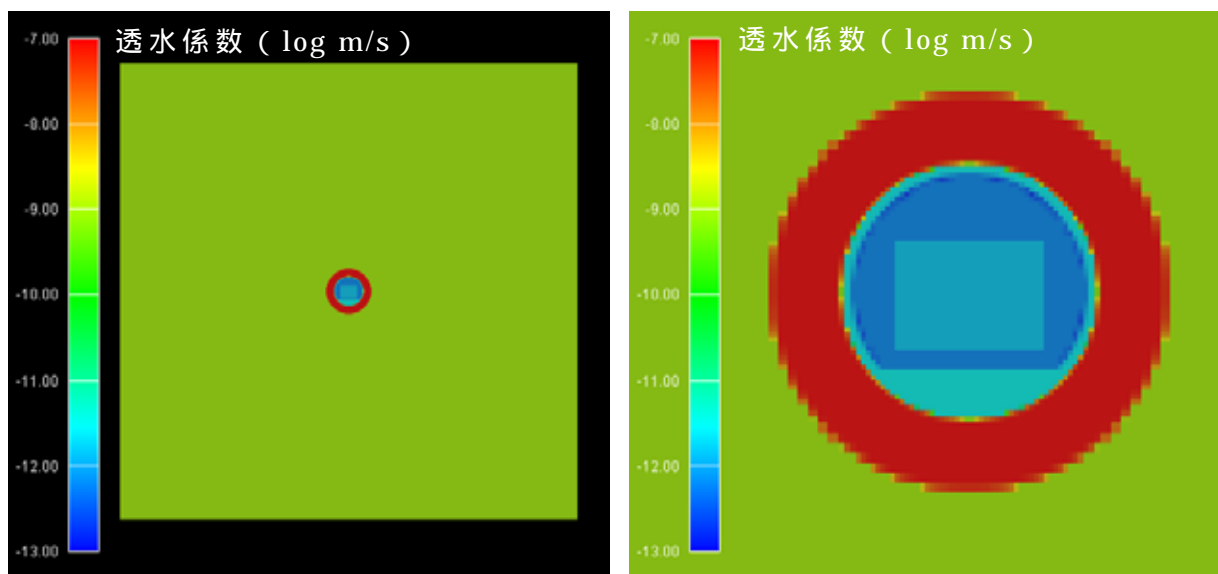


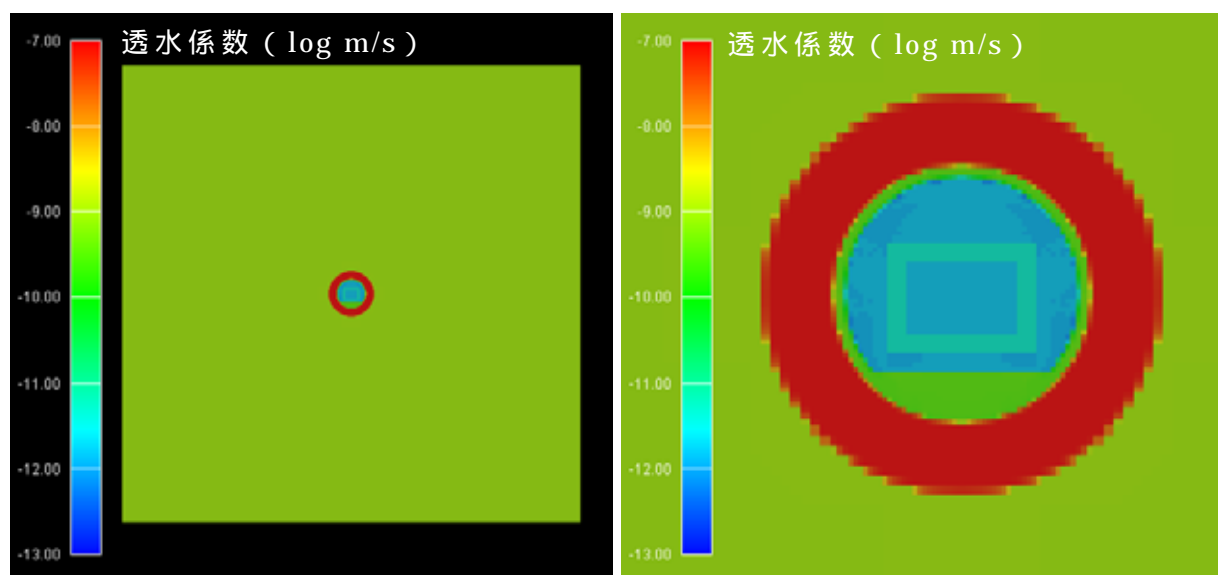
図 3.2-18 水理解析メッシュ坑道周辺部拡大図



(a)全体図

(b)坑道周辺拡大図

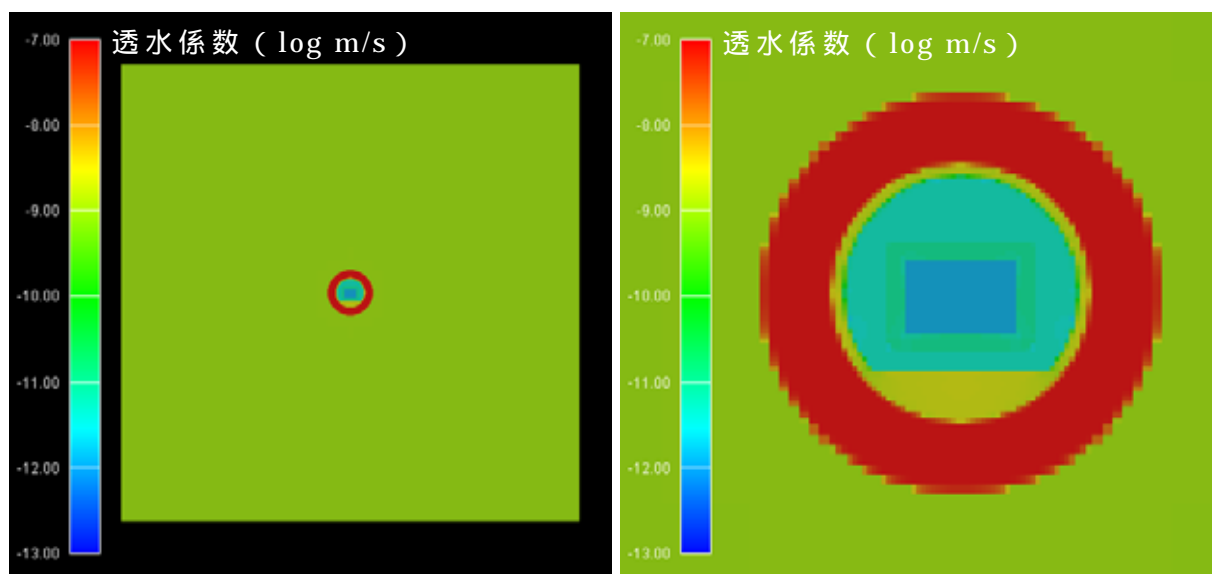
図 3.2-19 時刻 1 における水理解析のための透水係数場(クリープを考慮)



(a)全体図

(b)坑道周辺拡大図

図 3.2-20 時刻 2 における水理解析のための透水係数場(クリープを考慮)



(a)全体図

(b)坑道周辺拡大図

図 3.2-21 時刻 3 における水理解析のための透水係数場(クリープを考慮)

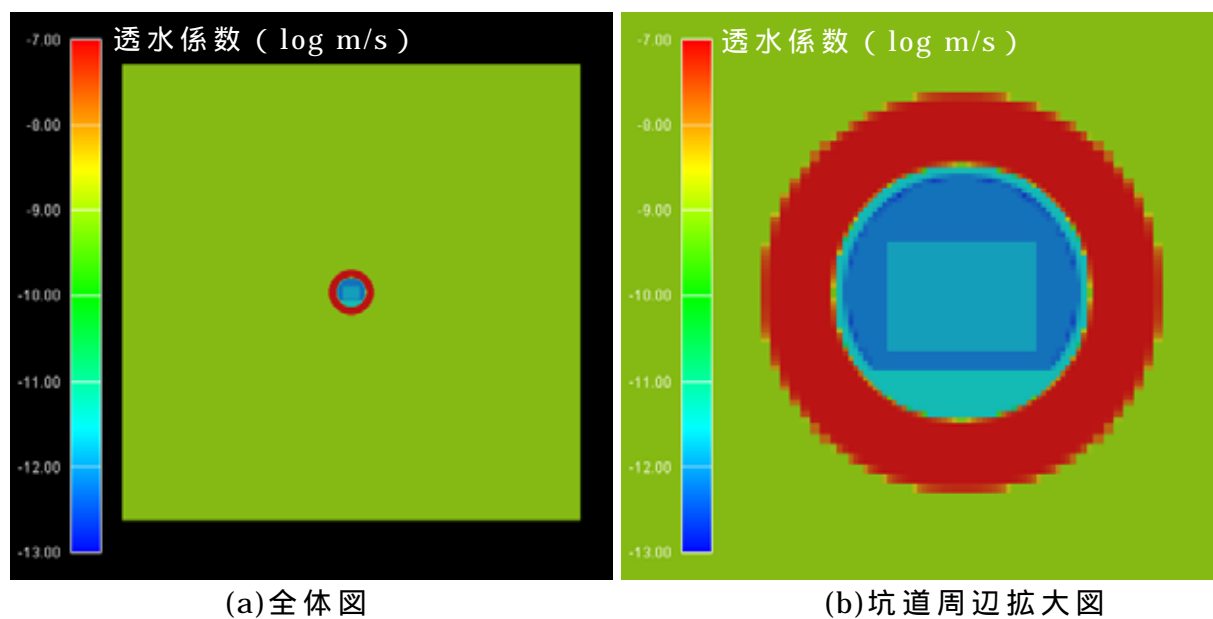


図 3.2-22 時刻 1 における水理解析のための透水係数場 (クリープなし)

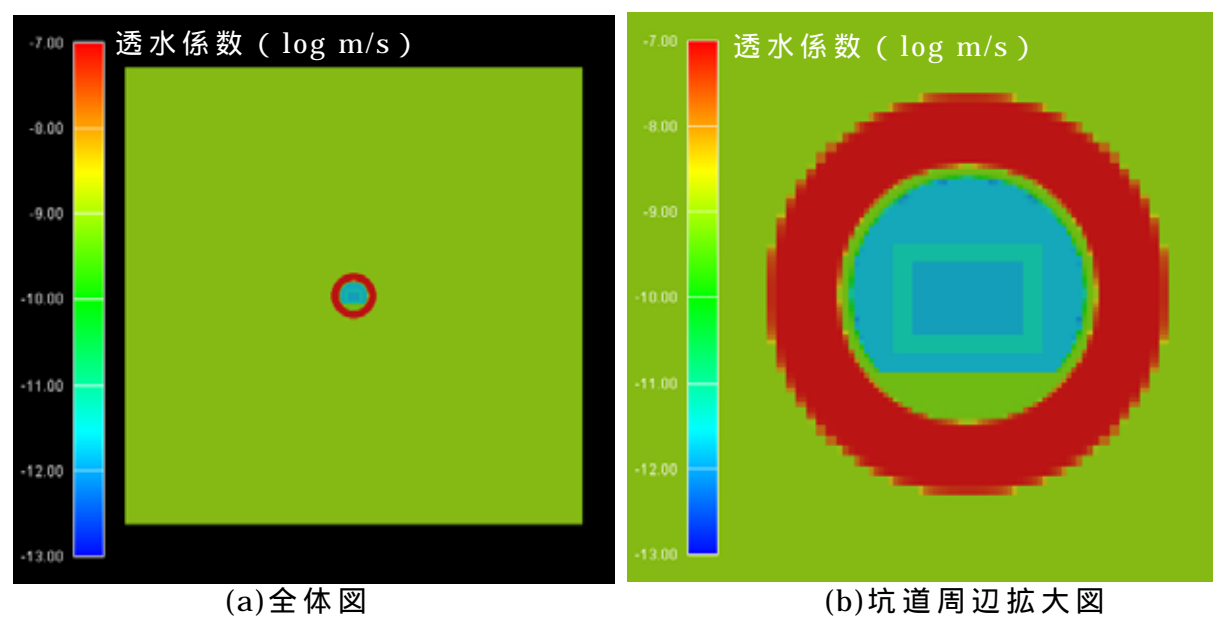
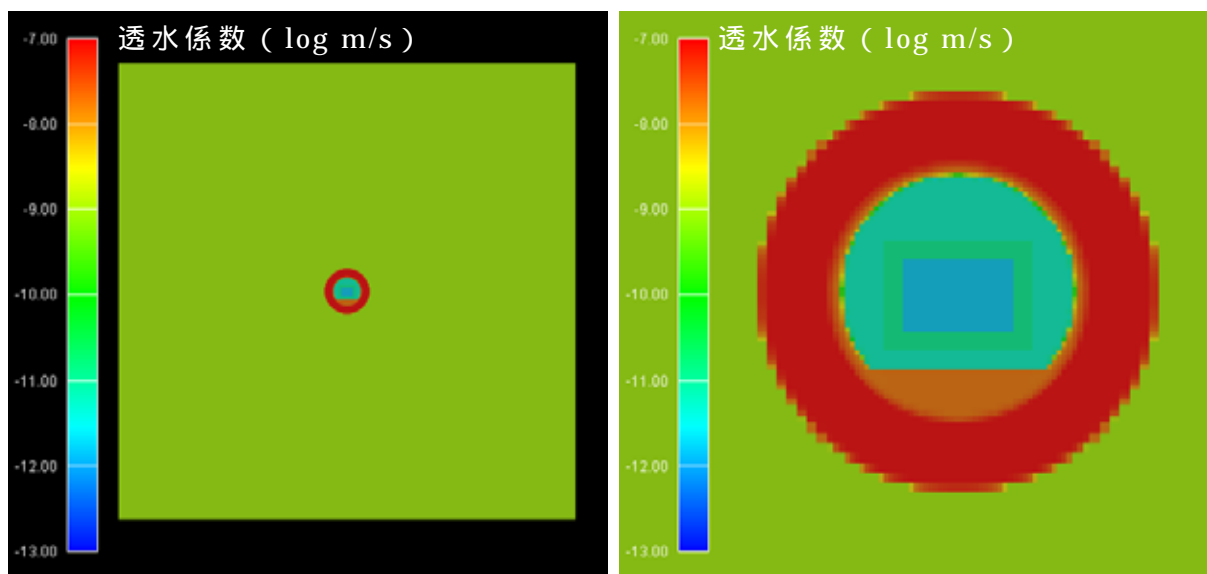


図 3.2-23 時刻 2 における水理解析のための透水係数場 (クリープなし)



(a)全体図

(b)坑道周辺拡大図

図 3.2-24 時刻 3 における水理解析のための透水係数場 (クリープなし)

3.3 水理解析

化学・物質移動解析に含まれる水理解析機能により力学的変遷挙動解析から得られた透水係数場における水理解析を実施した。図 3.3-1 に概念図を示す。解析領域は坑道を中心に 200 m×200 m の範囲とする。左右の境界を水頭固定境界とし、左側を水頭 2 m、右側を水頭 0 m とする。上下の境界は不透水境界とする。

クリープを考慮した場合の時刻 1 の水頭分布を図 3.3-2 に示す。また、流速分布の全体図及び坑道近傍の拡大図を図 3.3-3 に示す。同様にクリープを考慮した場合の時刻 2 及び時刻 3 の水頭分布と流速分布を図 3.3-4、図 3.3-5、図 3.3-6、図 3.3-7 に示す。

クリープを考慮しない場合の時刻 1、2、3 の水頭分布と流速分布を図 3.3-8、図 3.3-9、図 3.3-10、図 3.3-11、図 3.3-12、図 3.3-13 に示す。

クリープを考慮した場合及びしない場合の時刻 1、2、3 における地下水流量を表 3.3-1 に示す。

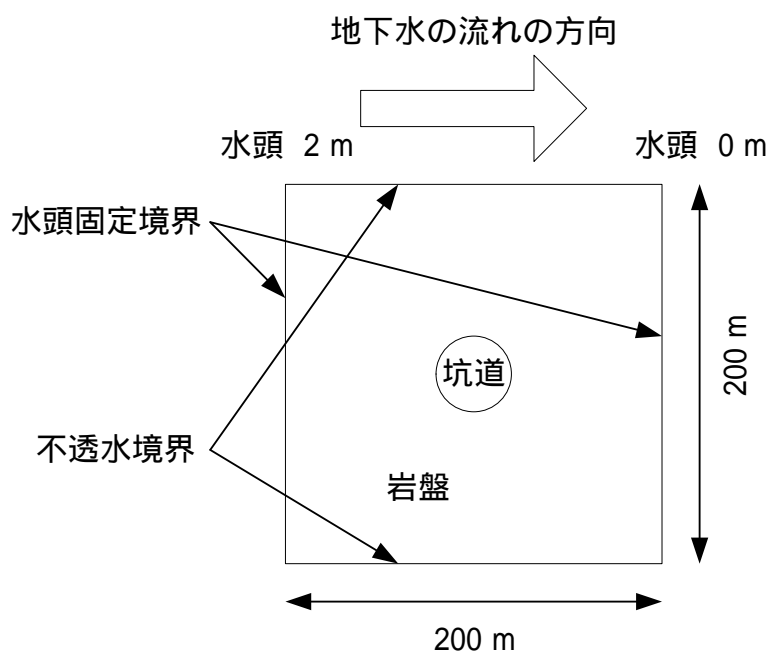


図 3.3-1 水理解析の概念図

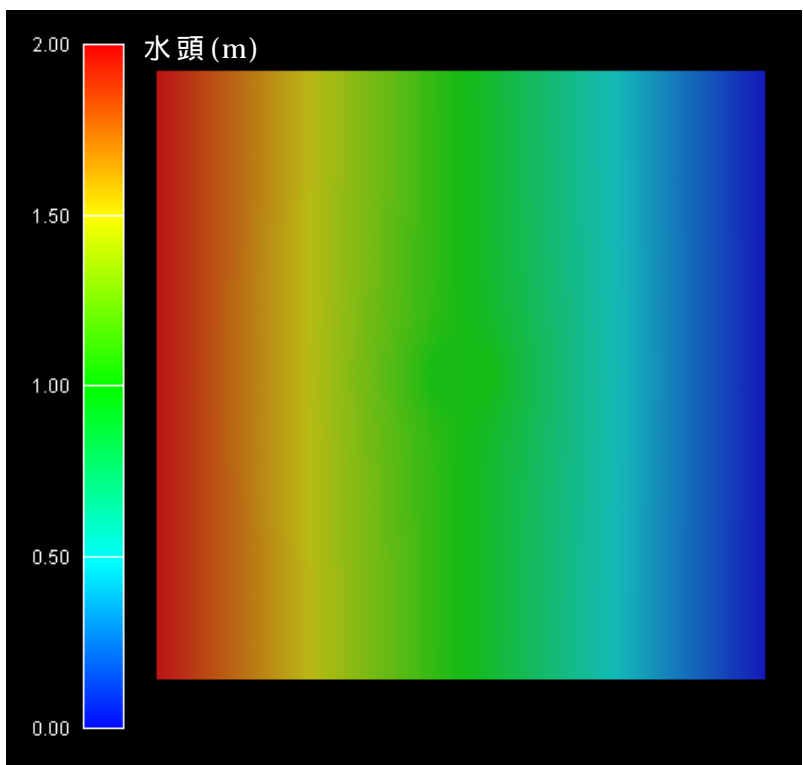
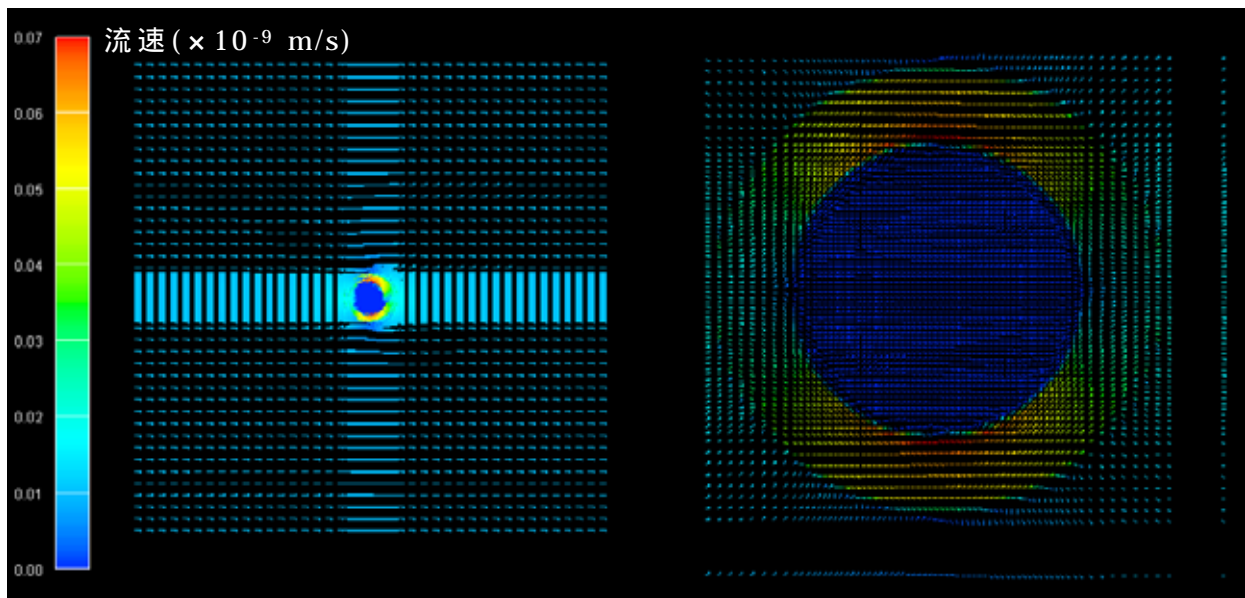


図 3.3-2 時刻 1 の水頭分布 (クリープを考慮)



(a)全体図

(b)坑道近傍拡大図

図 3.3-3 時刻 1 の流速分布 (クリープを考慮)

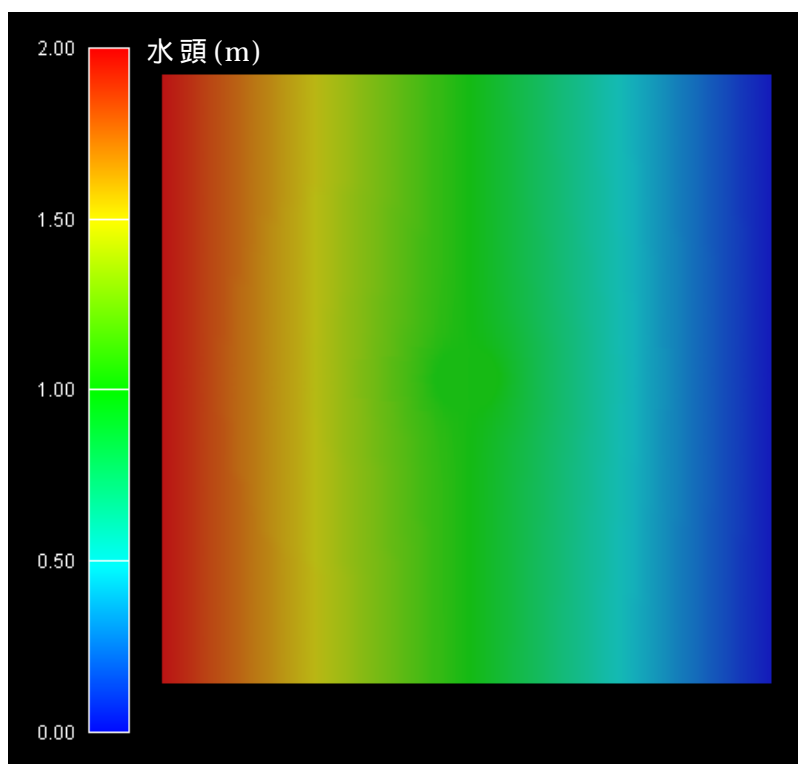
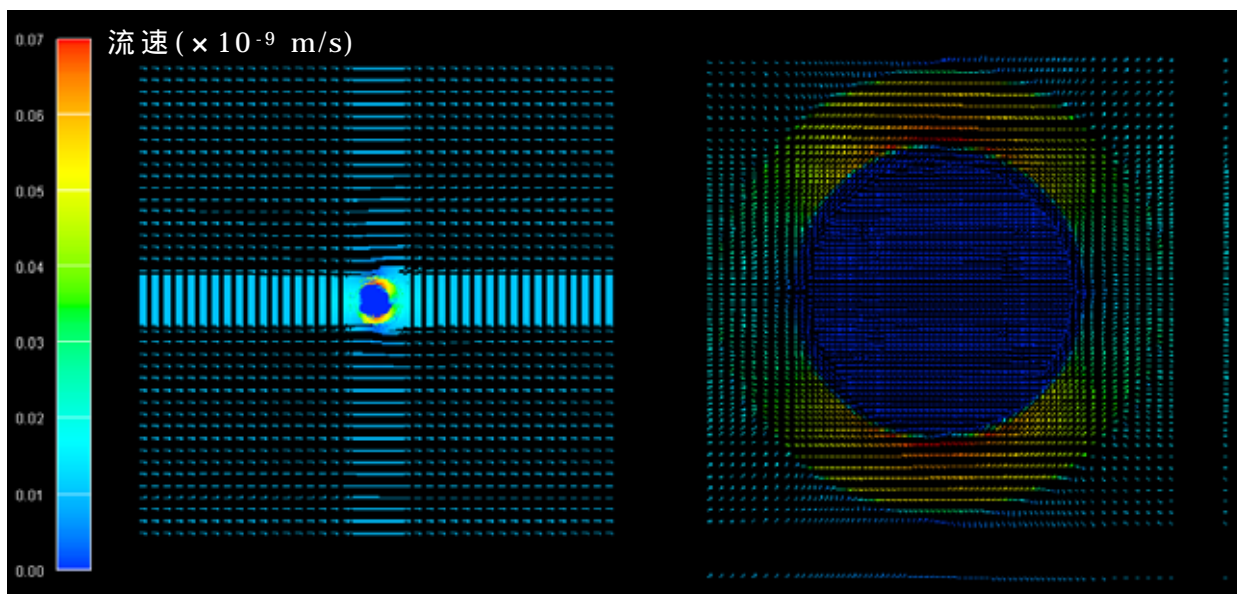


図 3.3-4 時刻 2 の水頭分布 (クリープを考慮)



(a)全体図

(b)坑道近傍拡大図

図 3.3-5 時刻 2 の流速分布 (クリープを考慮)

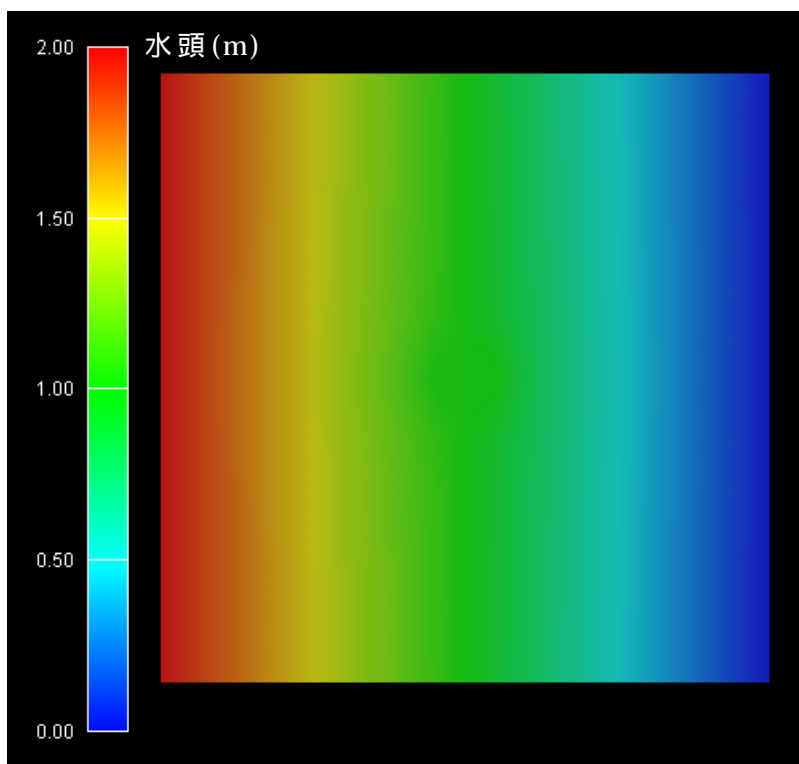
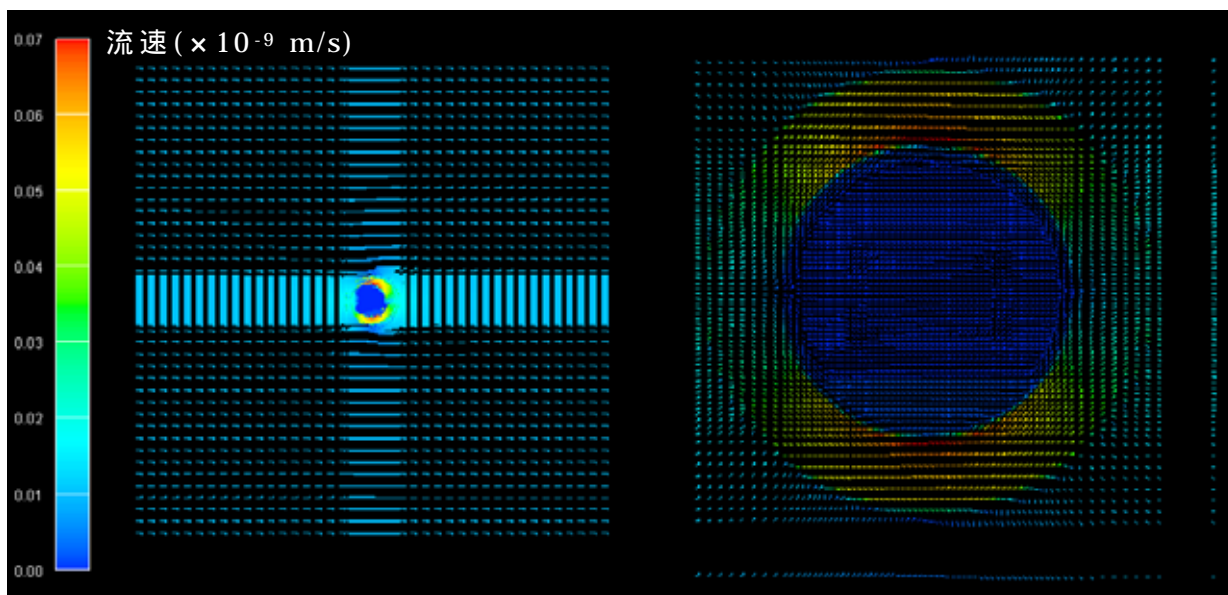


図 3.3-6 時刻 3 の水頭分布 (クリープを考慮)



(a)全体図

(b)坑道近傍拡大図

図 3.3-7 時刻 3 の流速分布 (クリープを考慮)

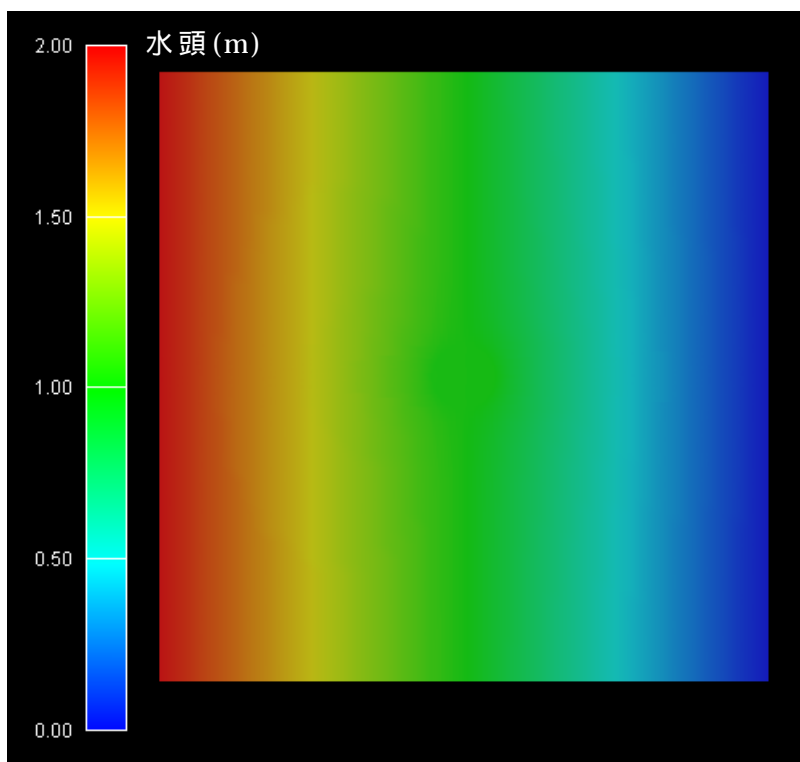
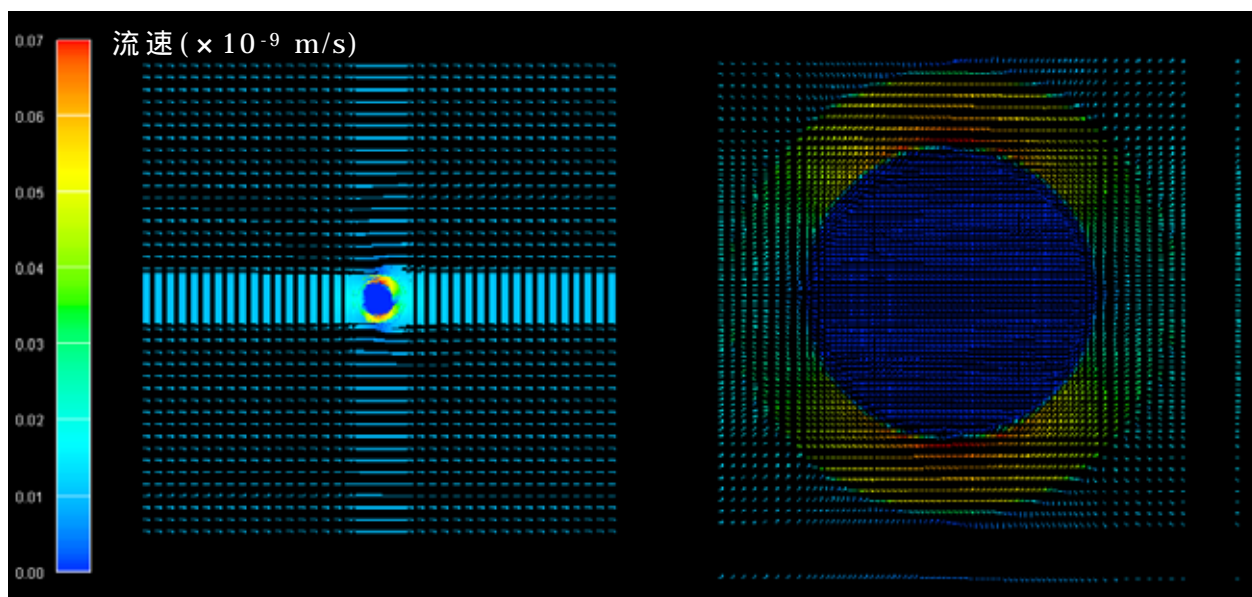


図 3.3-8 時刻 1 の水頭分布 (クリープなし)



(a)全体図

(b)坑道近傍拡大図

図 3.3-9 時刻 1 の流速分布 (クリープなし)

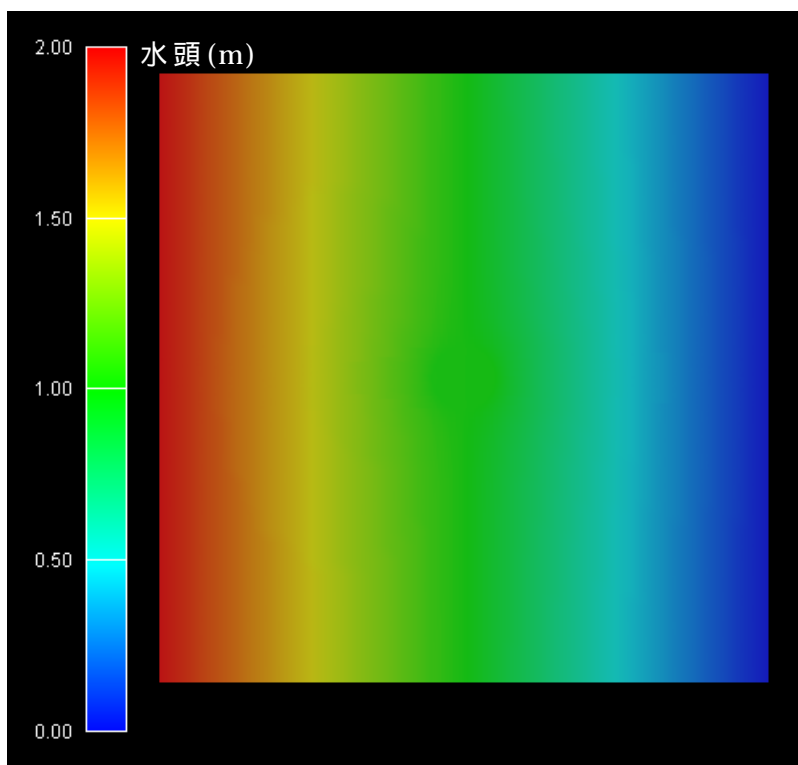
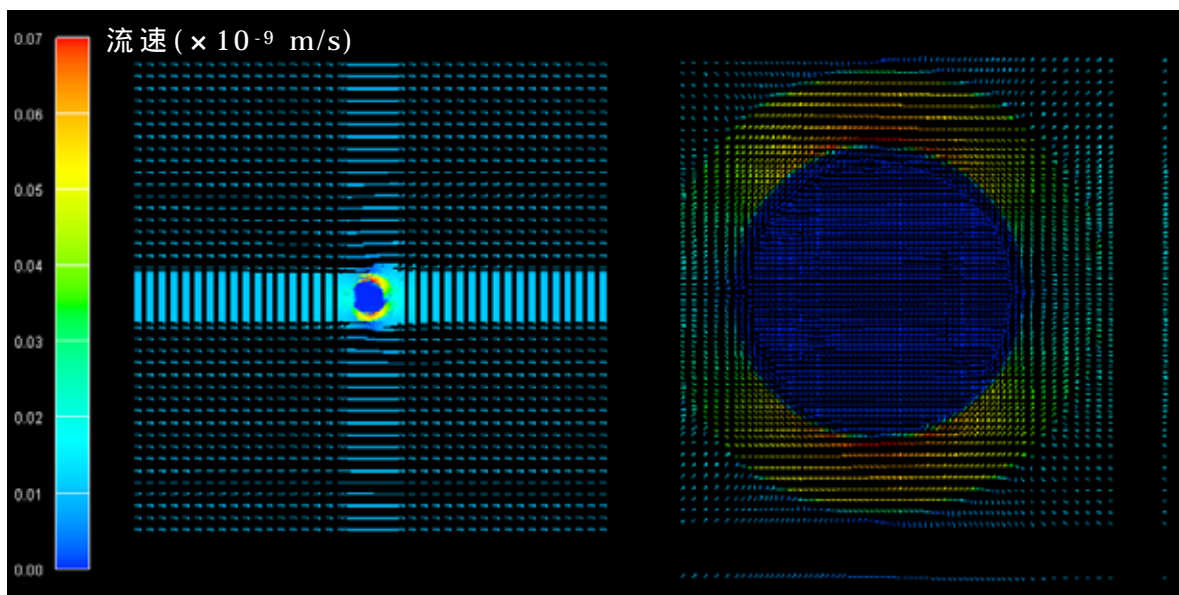


図 3.3-10 時刻 2 の水頭分布 (クリープなし)



(a)全体図

(b)坑道近傍拡大図

図 3.3-11 時刻 2 の流速分布 (クリープなし)

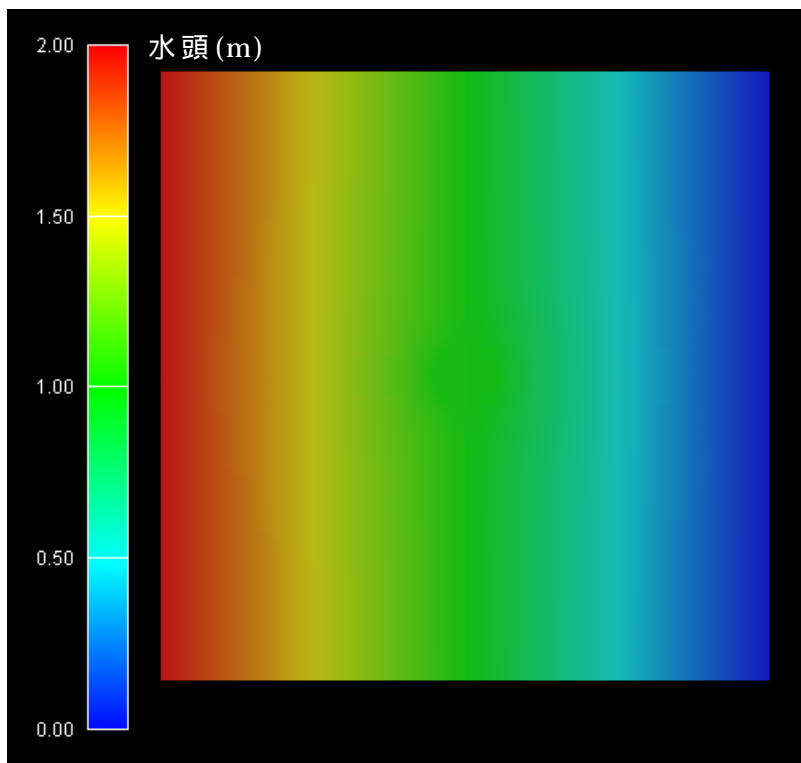
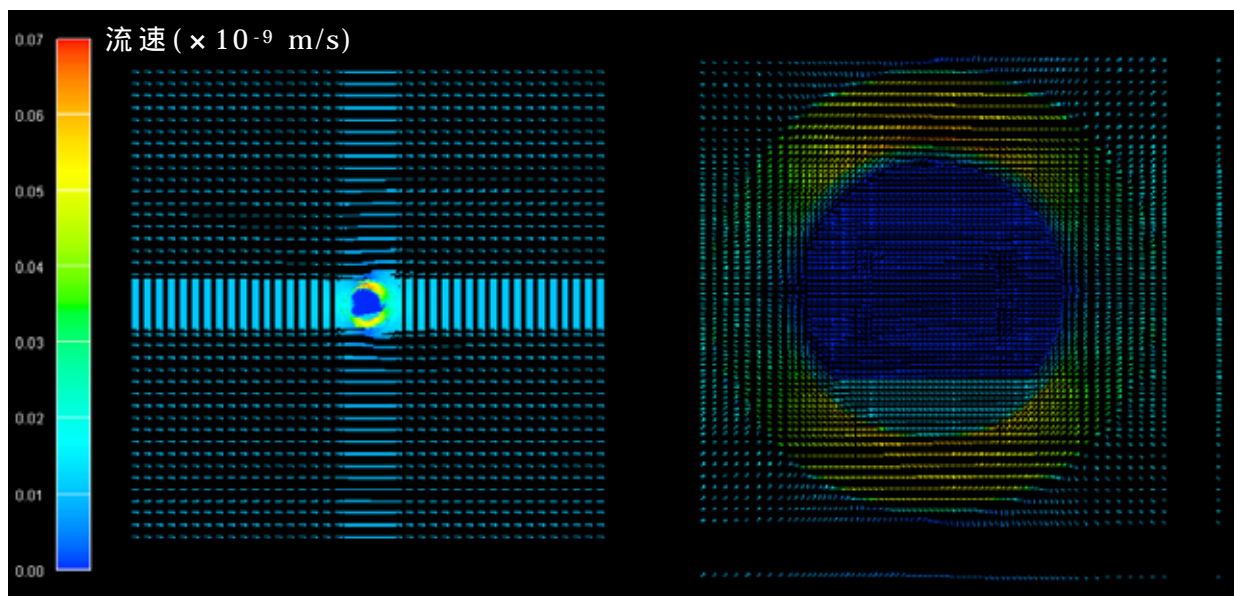


図 3.3-12 時刻 3 の水頭分布 (クリープなし)



(a)全体図

(b)坑道近傍拡大図

図 3.3-13 時刻 3 の流速分布 (クリープなし)

表 3.3-1 部材境界を通過する地下水流量

クリープ の設定	時刻	流量 (m ³ / s)		
		EDZ 母岩	緩衝材 支保工	廃棄体 緩衝材
考慮	1	8.49×10^{-10}	7.20×10^{-15}	5.37×10^{-15}
	2	8.48×10^{-10}	2.18×10^{-13}	1.05×10^{-14}
	3	8.48×10^{-10}	1.15×10^{-12}	2.39×10^{-14}
なし	1	8.49×10^{-10}	7.20×10^{-15}	5.37×10^{-15}
	2	8.47×10^{-10}	2.17×10^{-13}	1.23×10^{-14}
	3	7.91×10^{-10}	1.09×10^{-11}	3.29×10^{-14}

*モデル全体の流量は 2.031×10^{-9} m³ / sである。

3.4 解析のフロー

図 3.4-1 に解析のフローを示す。解析の手順は以下の通りである。

化学・物質移動解析システムあるいは解析結果設定ツール (data_gen) により化学解析結果を作成する。

化学解析結果を化学力学変換ツール (convert) により力学入力データを作成する。

力学的変遷挙動解析により坑道部については透水係数を岩盤部について体積ひずみを計算する。

力学化学変換ツールにより坑道部、岩盤部それぞれの結果から水理解析用の透水係数を計算する。

坑道部、岩盤部の透水係数を足し合わせることによって水理解析用の透水係数を作成する。

水理解析システムにより水頭、流速を計算する。

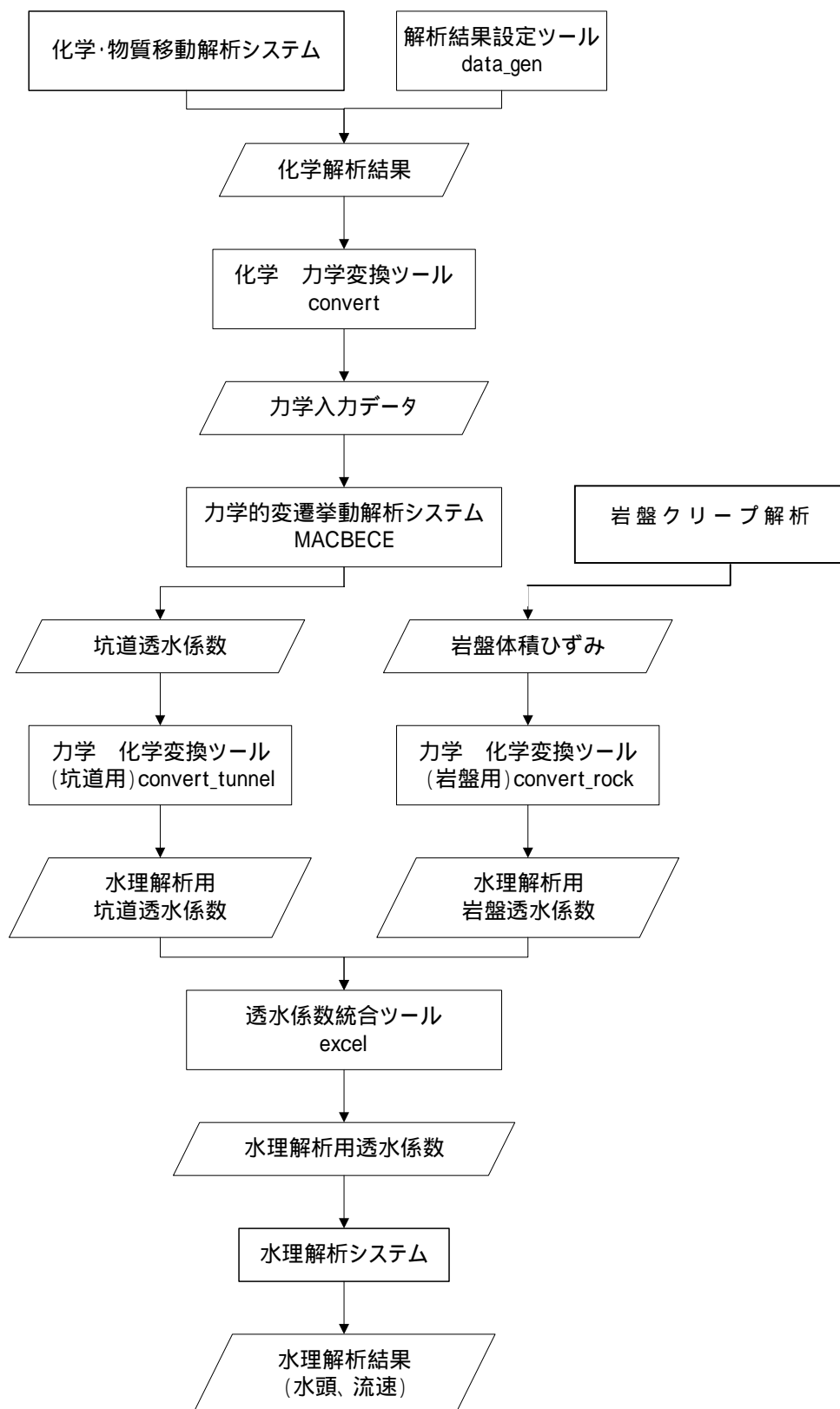


図 3.4-1 解析のフロー

おわりに

本研究では、ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システムの構築に向けた検討として、この長期的変遷評価システムの構成要素となる力学的変遷挙動解析システム（MACBECE）について、昨年度までに構築したシステムのさらなる高度化を検討、実施し（1章、2章）、また別途開発中の化学・物質移動解析システムとの連成、及び水理解析へのデータの受渡に寄与する補間プログラムの一部を開発した（3章）。

1章においては、昨年度までに構築したMACBECEに対し、ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの溶解、及び液相中の溶解イオンの影響による変形を概略評価できるように高度化した。また、大久保モデルによる岩盤クリープ解析を数ケース実施し、クリープ変形の程度を把握した上で、MACBECEによる力学的変遷挙動解析に考慮すべき変形の代表ケースを選定した。同時に、その岩盤クリープの影響も評価できるように、昨年度の研究成果も踏まえて、MACBECEを高度化した。

2章においては、1章で高度化したMACBECEで必要となる、ベントナイト系材料、及びセメント系材料の力学、水理パラメータについて、既往のデータ、研究を化学的変遷指標との関係を念頭に整理し、物性値、物性評価式を検討、設定した。またセメント系材料については、海水環境下における変質やそれに伴う力学的な影響についても調査、整理した。

さらに長期的な化学的変遷を設定し、上記クリープ変形、物性の変遷を考慮したMACBECEによる力学的変遷挙動解析を実施し、クリープ変形を考慮した方が緩衝材の止水性が担保されること、またクリープ変形を考慮しなくても拡散場が担保されると推察される結果が得られた。

3章においては、力学的変遷挙動解析システムと化学・物質移動解析システム統合するため、両解析から得られる異なるメッシュ上での鉱物濃度などの変数を相互に変換するツールを開発した。本ツールを媒介として、化学・物質移動の影響を考慮した力学的変遷挙動解析を実施し、また、力学的変遷挙動解析とクリープ解析の結果より、水理解析のための透水係数場を作成した。

今後、未だ課題として残されている部分に対し、必要に応じて更なる高度化を実施していくとともに、要素技術の進捗に応じた新たな知見を取り入れる等、より信頼性の高い評価システムを構築していく必要がある。

参考文献

核燃料サイクル開発機構,電気事業連合会:“ TRU 廃棄物処分概念検討書 ”, JNC TY1400 2000-001, TRU TR-2000-01, (2000)

大井貴夫,他:“ TRU 廃棄物処分における N.F.水理場の変遷に関する研究(1) 包括的感度解析手法に基づく重要研究課題の抽出について ”, 日本原子力学会 2002 年秋の大会予稿集, 第 分冊, p.641-642, (2002)

(1. 力学的変遷評価システムの構築に関する検討)

奥津一夫,他:“ ニアフィールド水理場の長期変遷評価システム構築に関する研究 ”, JNC TJ8400 2002-031, (2002)

奥津一夫,他:“ ニアフィールド水理場の長期変遷評価システム構築に関する研究 II ”, JNC TJ8400 2003-049, (2003)

奥津一夫,他:“ ニアフィールド水理場の長期変遷評価システム構築に関する研究 ”, JNC TJ8400 2003-086, (2004)

飯塚 敦:“ 軟弱地盤の変形・安定解析に関する基礎的研究 ”, 学位論文(京都大学), (1988)

柴田 徹:“ 粘土のダイレイタンスーについて ”, 京大防災研究所年報, 第 6 号, p.128~134, (1963)

Duncan, J.M. :“ The role of advanced constitutive relation in practical applications ”, 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol 5, pp.31~48, (1994)

Henkel D.J. :“ The shear strength of saturated remolded clays ”, On shear Strength of Cohesive Soils, pp.533~544, (1960)

Ohta H. et al. :“ Anisotropic stress strain relation in clay and its application to finite element analysis ”, Soils and Foundations, Vol.15, No.4, pp.61~79, (1975)

Roscoe , K.H , et al. :“ Yielding of clays in states wetter than critical ” ,
Geotechnique , Vol.13 , No.3 , pp.221~240 , (1963)

Sekiguchi H. Ohta H. :“ Induced anisotropy and time dependency in
clays ” ,Proc. Specialty Session 9 ,Ninth International Conference on Soil
Mechanics and Foundations Engineering(Tokyo) , pp.229-239 , (1977)

笹倉剛 ,他 :“ ベントナイト変遷挙動のモデル化のデータ取得及び調査 ” ,JNC
TJ8400 2002-025 , (2002)

笹倉剛 , 他 :“ ベントナイト変遷挙動のモデル化のデータ取得 ” , JNC
TJ8400 2003-048 , (2003)

戸井田克 , 他 :“ 人工バリア材料の力学的物性取得試験 ” , JNC TJ8400
2004-036 , (2005)

核燃料サイクル開発機構 :“ わが国における高レベル放射性廃棄物、地層処
分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次とりまとめ - 分冊2 地層処
分の工学技術 ” , JNC TN1400 99-022 , (1999)

小田治恵 , 他 :“ ベントナイト - 水相互作用の実験とモデル化 ” , JNC
TJ8400 99-032 , (1999)

足立泰久 , 他 :“ 土のコロイド現象 - 土・水環境の物理化学と工学的基礎 ” ,
学会出版センター , (2003)

前田宗宏 , 他 :“ カルシウム型化及びカルシウム型化ベントナイトの基本特
性 - 膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数 ” ,PNC TN8410 98-021 ,
(1998)

鈴木英明 , 他 :“ 緩衝材の膨潤特性 ” , JNC TN8400 99-038 , (1999)

田中幸久 , 他 :“ ベントナイトの膨潤性に及ぼす人工海水濃度の影響 ” ,土木
学会第57回年次学術講演会 , p.455 ~ 456 , (2002)

田中久幸，他：“人工海水濃度の影響を考慮したベントナイトの膨潤特性の表示方法”，土木学会第 58 回年次学術講演会，p.351～352，(2003)

早川幸恵，他：“ベントナイトの膨潤特性に与える NaCl 濃度の影響”，土木学会第 58 回年次学術講演会，p.349～350，(2003)

核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会：“TRU 廃棄物処分概念検討書”，JNC TY1400 2000-001，TRU TR-2000-01，(2000)

青柳孝義，他：“TRU 廃棄物処分システムに関する大空洞長期挙動の検討 非線形粘弾性モデルによる二次元解析（研究報告）”，JNC TN8400 2001-024，(2001)

(2. 力学的変遷挙動評価に関する検討)

奥津一夫，他：“ニアフィールド水理場の長期変遷評価システム構築に関する研究 II ”，JNC TJ8400 2003-049，(2003)

奥津一夫，他：“ニアフィールド水理場の長期変遷評価システム構築に関する研究 ”，JNC TJ8400 2003-086，(2004)

笹倉剛，他：“ベントナイト変遷挙動のモデル化のデータ取得及び調査”，JNC TJ8400 2002-025，(2002)

笹倉剛，他：“ベントナイト変遷挙動のモデル化のデータ取得 ”，JNC TJ8400 2003-048，(2003)

核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物、地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次とりまとめ - 分冊 2 地層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022，(1999)

並河努，他：“緩衝材の圧密特性”，PNC TN8410 97-051，(1997)

高治一彦，他：“緩衝材の静的力学特性”，JNC TN8400 99-041，(1999)

高治一彦，他：“幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性に関する研究”，JNC TJ5400 2003-007，(2004)

前田宗宏，他：“カルシウム型化ベントナイトの圧密非排水三軸圧縮試験”，PNC TJ8410 97-314，(1997)

伊藤弘之，他：“ベントナイト系材料の飽和透水係数の変遷評価式”，核燃料サイクル開発機構技術資料，公開準備中

戸井田克，他：“人工バリア材料の力学的物性取得試験”，JNC TJ8400 2004-036，(2005)

飯塚敦：“軟弱地盤の変形・安定解析に関する基礎的研究”，博士論文，(1988)

田中益弘，他：“TRU廃棄物処分概念の検討(V)”，JNC TJ8400 2000-036，(2000)

鈴木英明，他：“緩衝材の膨潤特性”，JNC TN8400 1999-038，(1999)

前田宗宏，他：“カルシウム型化及びカルシウム型ベントナイトの基本特性 膨潤圧、透水係数、一軸圧縮強度及び弾性係数”，PNC TN8410 1998-021，(1998)

青柳孝義，他：“飽和水酸化カルシウム溶液を用いたベントナイトの膨潤圧及び透水係数の評価”，JNC TN8400 98-002，(1998)

鈴木英明，他：“緩衝材の特性試験()”，PNC TN8410 92-057，(1992)

菊地広人，他：“緩衝材の基本特性データベース(データ集・記録集)”，JNC TN8400 2003-010，(2004)

田中幸久，他：“ベントナイトの膨潤性に及ぼす人工海水濃度の影響”，土木学会第57回年次学術講演会，p.455～456，(2002)

田中久幸，他：“人工海水濃度の影響を考慮したベントナイトの膨潤特性の表示方法”，土木学会第58回年次学術講演会，p.351～352，(2003)

川上進，他：“高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア等の性能保証に関わる研究の進め方と反映先”，JNC TN8400 2002-026，(2003)

関根一郎，他：“岩石・ベントナイト混合材料の膨潤・浸潤特性について”，土木学会第58回年次学術講演会，p.339～340，(2003)

早川幸恵，他：“ベントナイトの膨潤特性に与えるNaCl濃度の影響”，土木学会第58回年次学術講演会，p.349～350，(2003)

松本一浩，他：“緩衝材の飽和透水特性”，動燃事業団公開技術資料，PNC TN8410 97-296，(1997)

菊地広人，他：“海水条件下における圧縮ベントナイトの透水性”，土木学会第58回年次学術講演会，p.343～344，(2003)

武井明彦，他：“セメント系材料の水理・力学特性の変遷に関する研究”，JNC TJ8400 2002-028，(2002a)

武井明彦，他：“セメント系材料の水理・力学特性の変遷に関する研究”，JNC TJ8400 2003-046，(2003a)

武井明彦，他：“セメント系材料の水理・力学特性の変遷に関する研究”，JNC TJ8400 2004-024，(2004)

横関康祐：“コンクリートからの成分溶出を対象とした千年レベルの長期耐久性設計に関する研究”，博士論文，(2003)

安田和弘，他：“カルシウム溶出に伴うコンクリートの物理性能及び物質移動性能の変化に関する検討”，セメントコンクリート論文集，No.56，p.492-498，(2002)

国分正胤，他：“コンクリート便覧[第二版]”，日本コンクリート工学協会，(1976)

柳屋健治，他：“土木設計の要点 改訂版 設計の基本知識”，鹿島出版会，(1998)

核燃料サイクル開発機構，電気事業連合会：“TRU廃棄物処分概念検討書”，JNC TY1400 2000-001，TRU TR-2000-01，(2000)

(3.水理場変遷評価システムの構築に関する検討)

奥津一夫，他：“ニアフィールド水理場の長期変遷評価システム構築に関する研究 ” ， JNC TJ8400 2003-086 ， (2004)

核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物、地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次とりまとめ - 分冊 3 地層処分システムの安全評価 ” ， JNC TN1400 99-023 ， (1999)

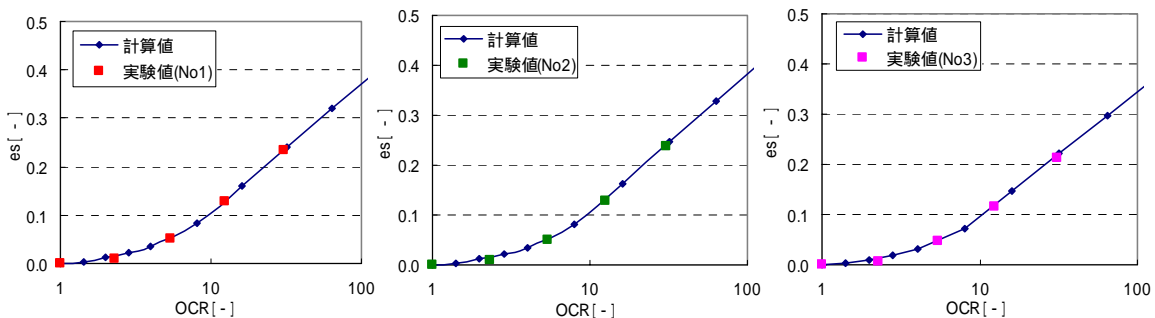
核燃料サイクル開発機構，電気事業連合会：“TRU 廃棄物処分概念検討書 ” ， JNC TY1400 2000-001 ， TRU TR-2000-01 ， (2000)

付録-1 膨潤挙動の一次フィッティング結果

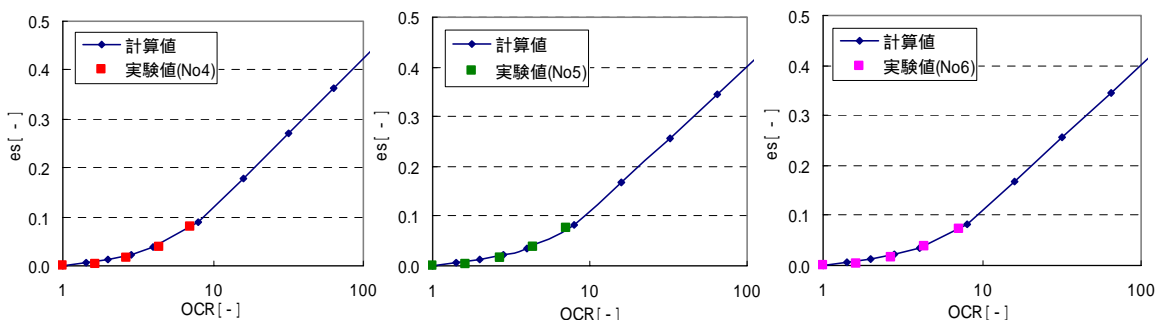
本資料は、既往の実験データから、 OCR_b の概略値を設定するために（本編2.1(3)）実施した一次的フィッティング結果（実験値との対応）をとりまとめたものである。

付表 1-1 膨潤曲線の一次フィッティングによって得られた OCR_b の値

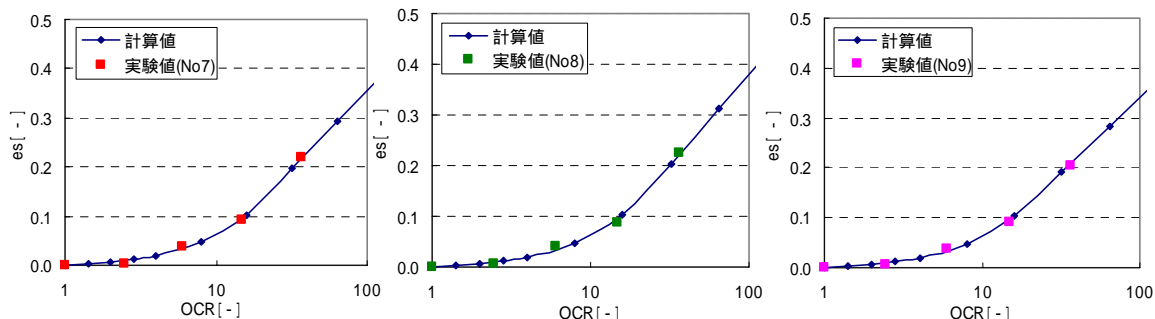
引用先	No	0 = 0.0086 として膨潤曲線をフィッティングした OCR_b の値			
		ESP [-]	ゲイ砂混合率 [-]	c [eq/l]	OCR_b [-]
核燃料サイクル開発機構 (1999) [HLW2次レポート]	1	0.822	0.0	0.0	0.0115 (9.0)
	2	0.822	0.0	0.0	0.011 (10.0)
	3	0.822	0.0	0.0	0.0100 (10.0)
	4	0.822	0.0	0.0	0.0120 (10.0)
	5	0.822	0.0	0.0	0.0115 (10.0)
	6	0.822	0.0	0.0	0.0115 (10.0)
	7	0.822	0.3	0.0	0.0065 (19.0)
	8	0.822	0.3	0.0	0.0065 (21.0)
	9	0.822	0.3	0.0	0.0065 (18.0)
	笹倉ほか (2002)	10	0.822	0.0	0.0
11		0.822	0.0	0.0	0.0145 (10.0)
12		0.822	0.0	0.0	0.0185 (8.5)
13		0.822	0.0	0.0	0.0205 (9.0)
14		0.822	0.0	0.0	0.0155 17.0
15		0.822	0.0	0.0	0.0145 16.5
16		0.822	0.0	0.0	0.0235 22.0
17		0.822	0.0	0.0	0.0265 19.5
18		0.122	0.0	0.0	0.0055 (3.0)
19		0.122	0.0	0.0	0.0160 (2.5)
20		0.122	0.0	0.0	0.0140 4.0
21		0.122	0.0	0.0	0.0160 3.5
22		0.122	0.0	0.0	0.0145 4.0
23		0.122	0.0	0.0	0.0175 4.0
24		0.122	0.0	0.0	0.0300 2.5
25		0.122	0.0	0.0	0.0300 2.5
笹倉ほか (2003)	26	0.457	0.0	0.0	0.0255 (7.0)
	27	0.457	0.0	0.0	0.0260 (7.0)
	28	0.457	0.0	0.0	0.0155 2.5
	29	0.457	0.0	0.0	0.0300 2.5
	30	0.457	0.0	0.0	0.0320 2.5
	31	0.457	0.0	0.0	0.0300 3.0
	32	0.457	0.0	0.0	0.0320 2.5
	33	0.457	0.0	0.0	0.0390 2.0
	34	0.822	0.0	0.0	0.0210 4.5
	35	0.822	0.0	0.0	0.0210 5.0
	36	0.457	0.0	0.0	0.0215 4.0
	37	0.457	0.0	0.0	0.0220 4.0
	38	0.122	0.0	0.0	0.0190 4.0
	39	0.122	0.0	0.0	0.0175 3.5
戸井田ほか (2005)	40	0.822	0.5	0.0	0.0045 9.5
	41	0.822	0.5	0.0	0.0045 10.5
	42	0.822	0.5	0.0	0.0045 10.5
	43	0.122	0.3	0.0	0.0125 3.0
	44	0.122	0.3	0.0	0.0165 2.5
	45	0.122	0.3	0.0	0.0165 1.9
	46	0.122	0.3	0.0	0.0165 2.4
	47	0.912	0.0	3.0	0.0090 3.1
	48	0.912	0.0	3.0	0.0080 3.8
	49	0.912	0.0	3.0	0.0085 3.4
	50	0.912	0.0	3.0	0.0090 3.3
	51	0.145	0.0	3.0	0.0067 5.0
	52	0.145	0.0	3.0	0.0069 4.5
	高治ほか (2004)	53	0.822	0.3	0.8
54		0.822	0.3	0.2	0.0065 7.8
55		0.822	0.3	0.212	0.007 6.5



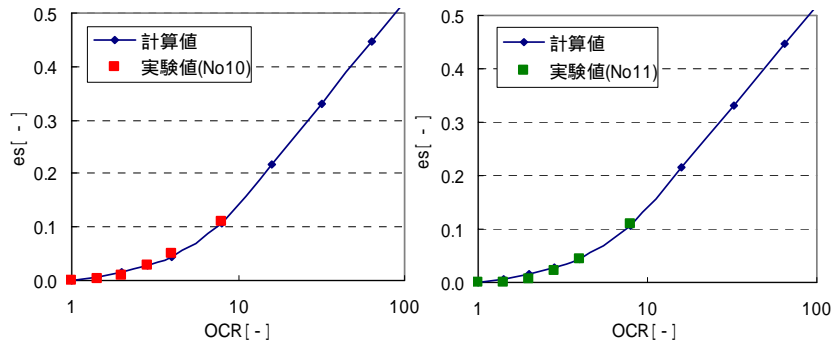
付図 1-1 一次フィッティング結果 (No1~3)



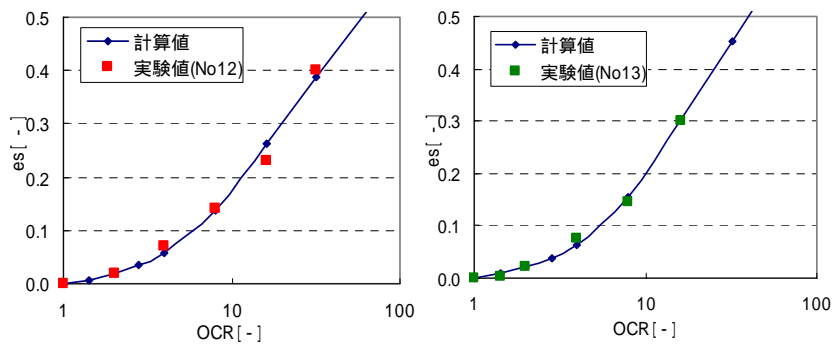
付図 1-2 一次フィッティング結果 (No4~6)



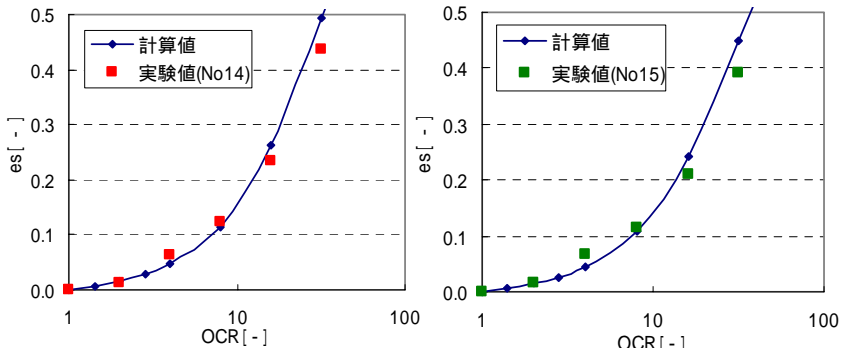
付図 1-3 一次フィッティング結果 (No7~9)



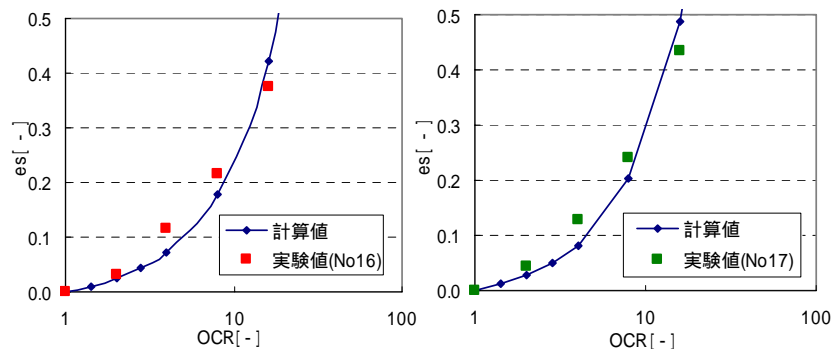
付図 1-4 一次フィッティング結果 (No10~11)



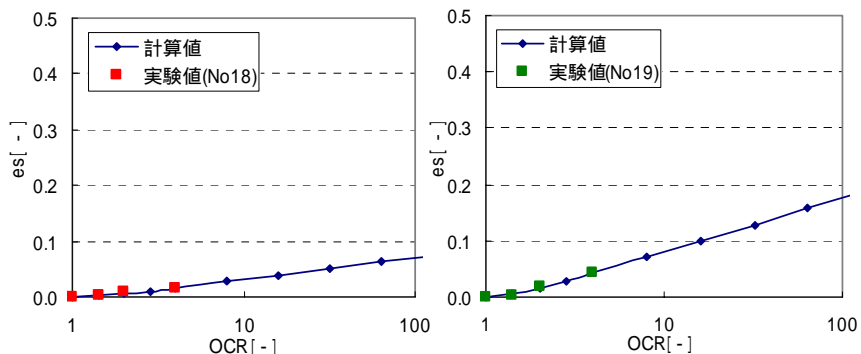
付図 1-5 一次フィッティング結果 (No12~13)



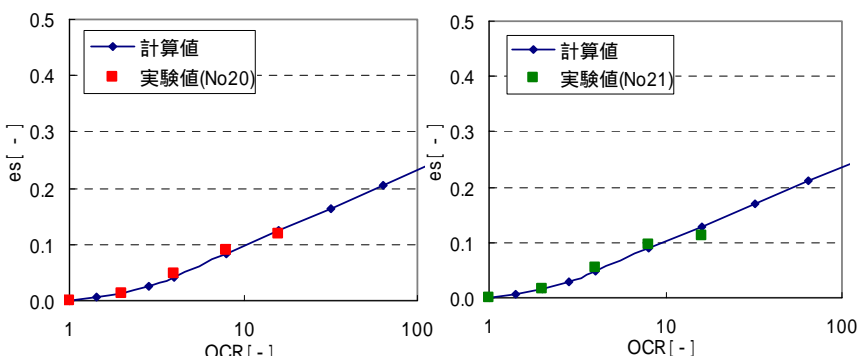
付図 1-6 一次フィッティング結果 (No14~15)



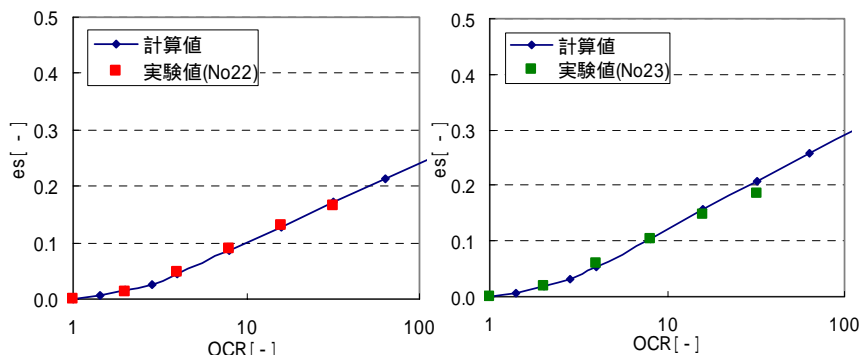
付図 1-7 一次フィッティング結果 (No16~17)



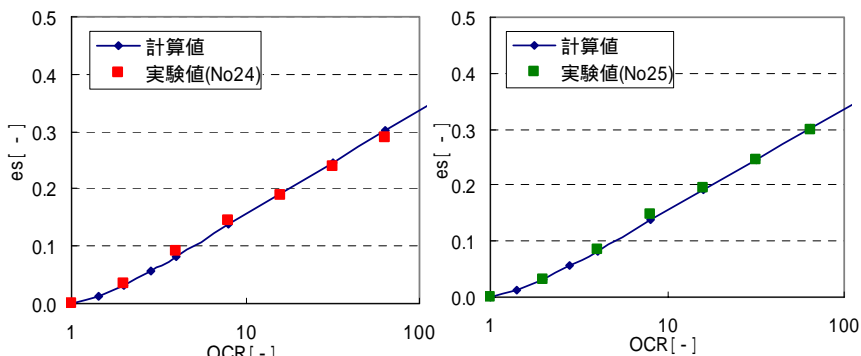
付図 1-8 一次フィッティング結果 (No18~19)



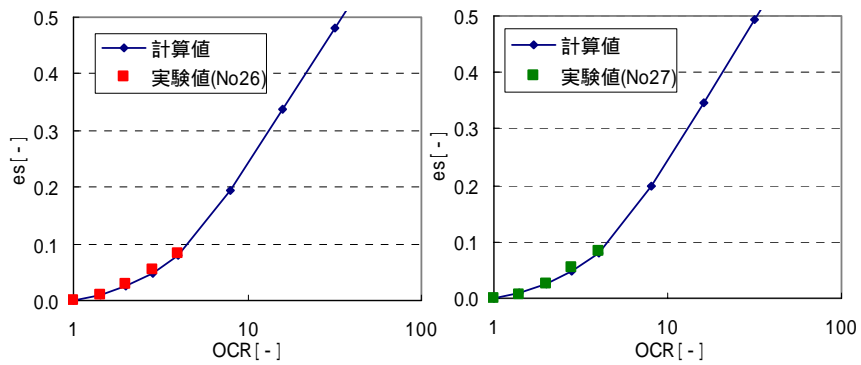
付図 1-9 一次フィッティング結果 (No20~21)



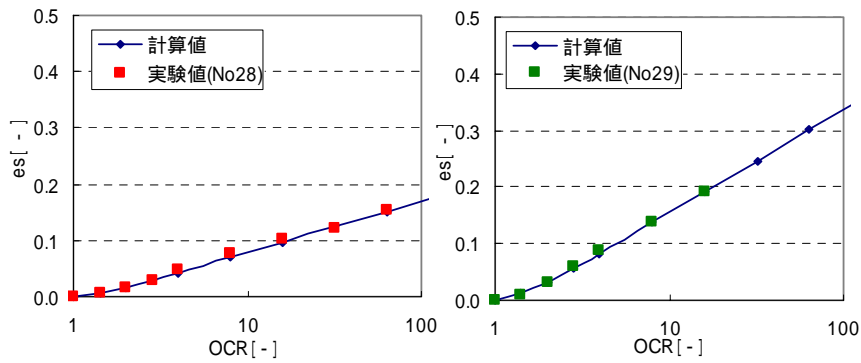
付図 1-10 一次フィッティング結果 (No22~23)



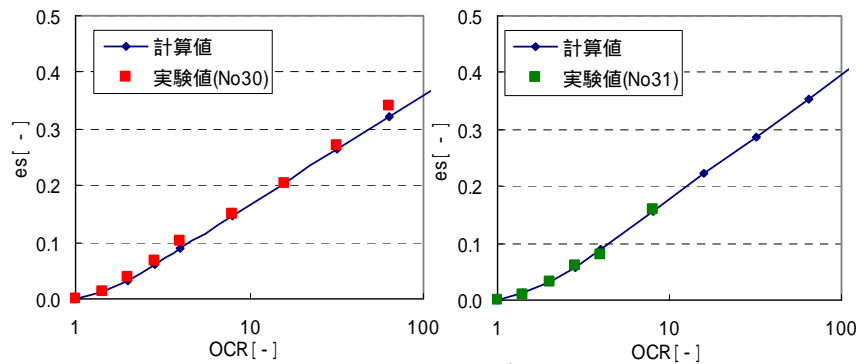
付図 1-11 一次フィッティング結果 (No24~25)



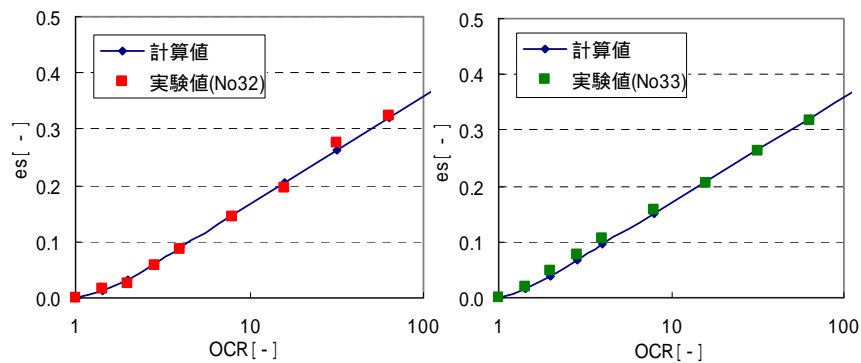
付図 1-12 一次フィッティング結果 (No26~27)



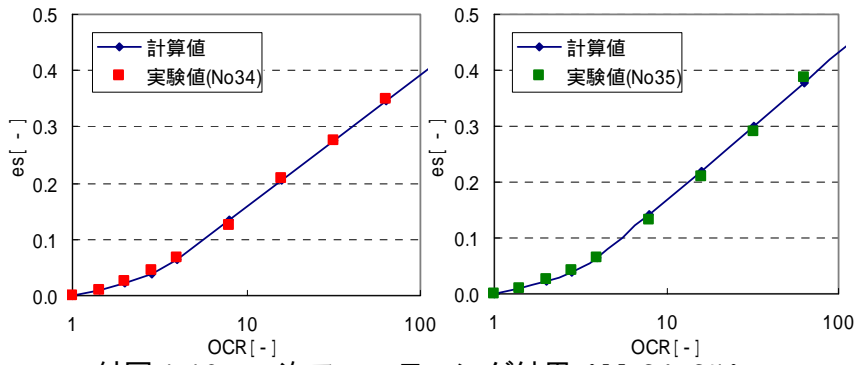
付図 1-13 一次フィッティング結果 (No28~29)



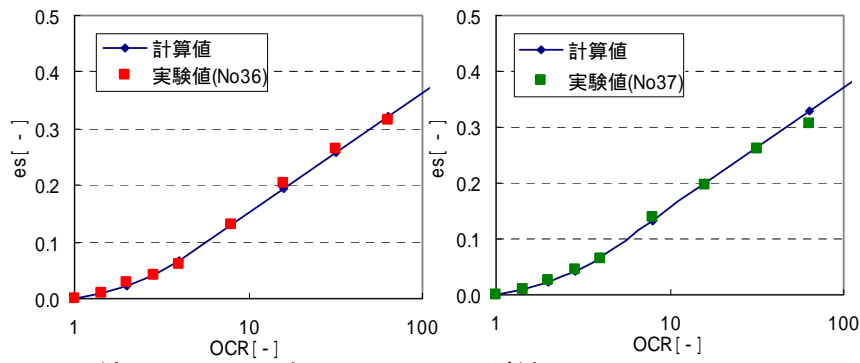
付図 1-14 一次フィッティング結果 (No30~31)



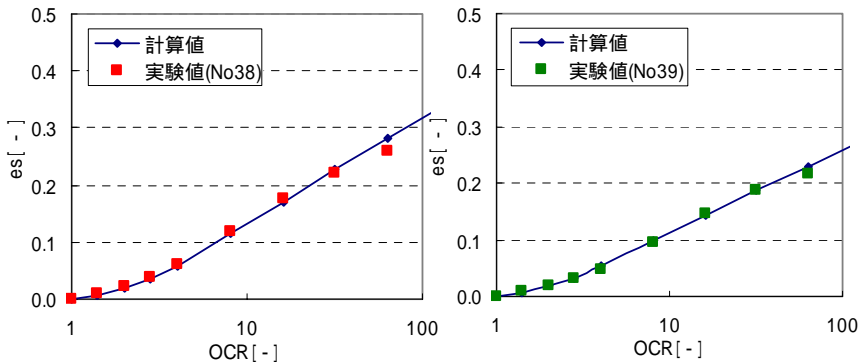
付図 1-15 一次フィッティング結果 (No32~33)



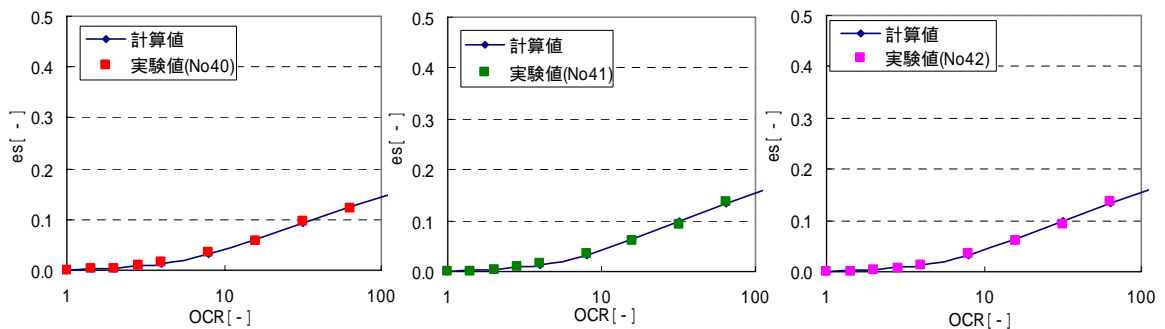
付図 1-16 一次フィッティング結果 (No34~35)



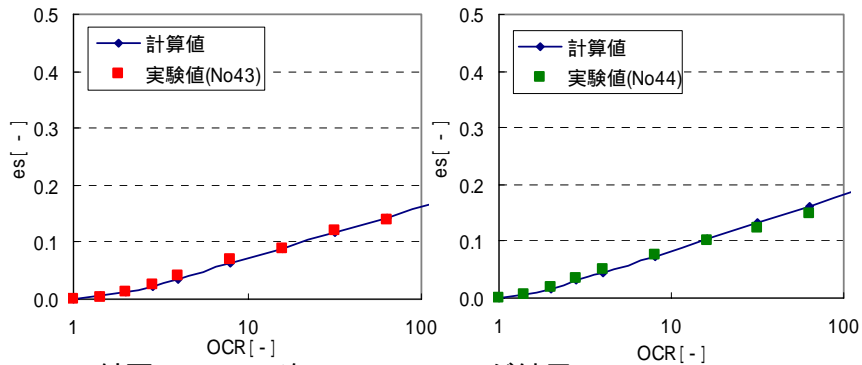
付図 1-17 一次フィッティング結果 (No36~37)



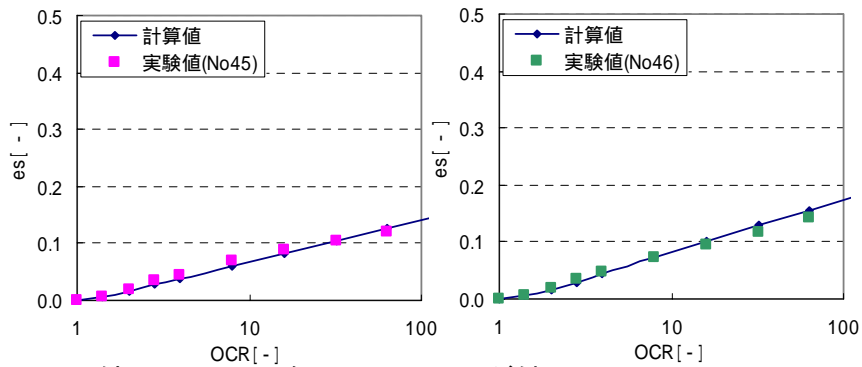
付図 1-18 一次フィッティング結果 (No38~39)



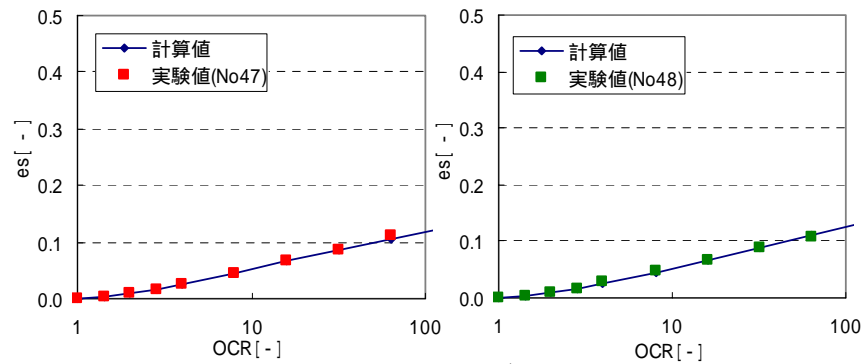
付図 1-19 一次フィッティング結果 (No40~42)



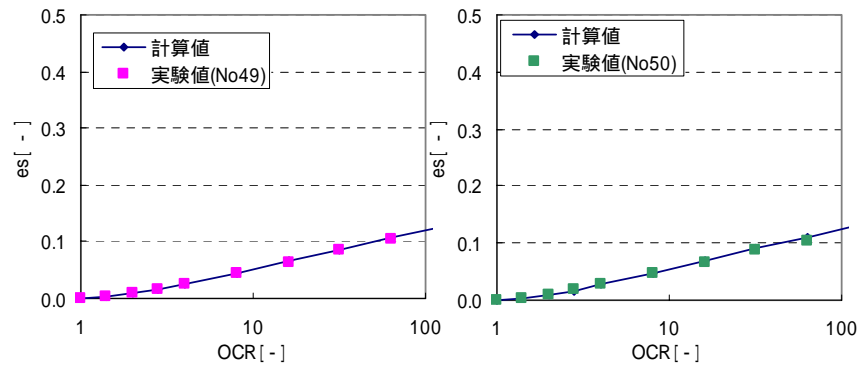
付図 1-20 一次フィッティング結果 (No43~44)



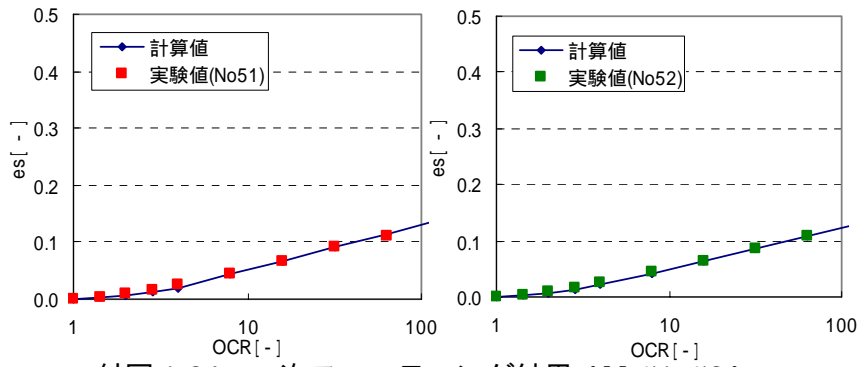
付図 1-21 一次フィッティング結果 (No45~46)



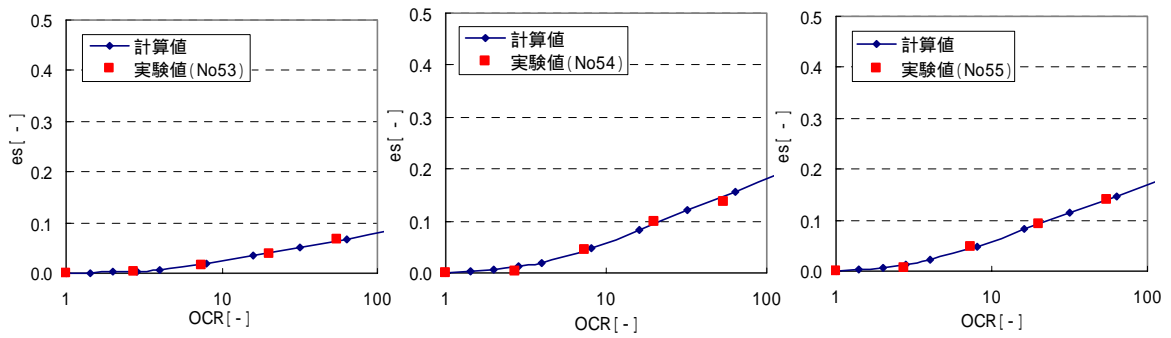
付図 1-22 一次フィッティング結果 (No47~48)



付図 1-23 一次フィッティング結果 (No49~50)



付図 1-24 一次フィッティング結果 (No51~52)



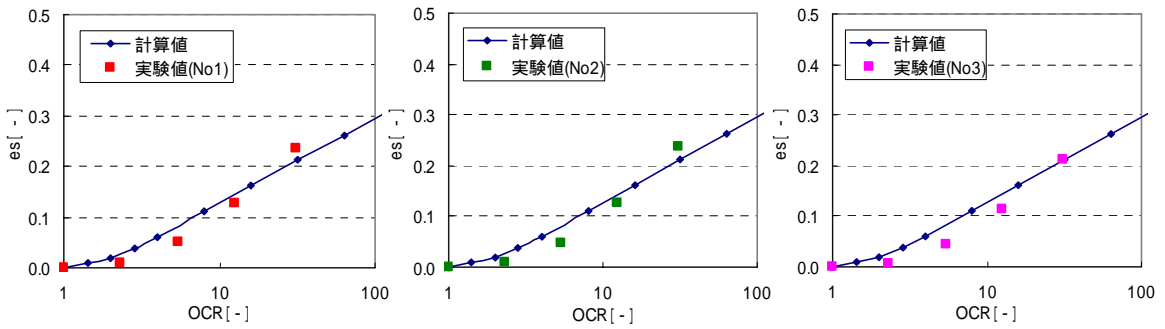
付図 1-25 一次フィッティング結果 (No53~55)

付録-2 膨潤挙動の再フィッティング結果

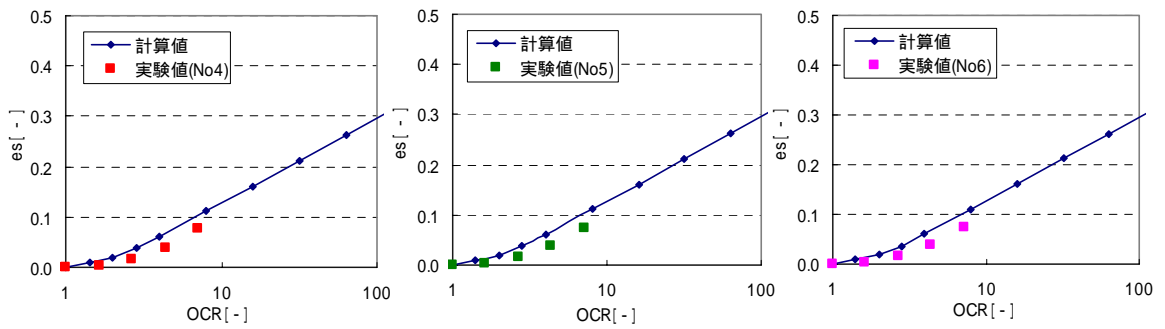
本資料は、本編 2.1(6)で設定した の評価式によって決まる を用いて、 OCR_b の
 みをパラメータとして、既往の実験データ（圧密除荷試験）を再度フィッティング
 した結果（実験値との対応）をとりまとめたものである。

付表 2-1 膨潤曲線の再フィッティングによって得られた OCR_b

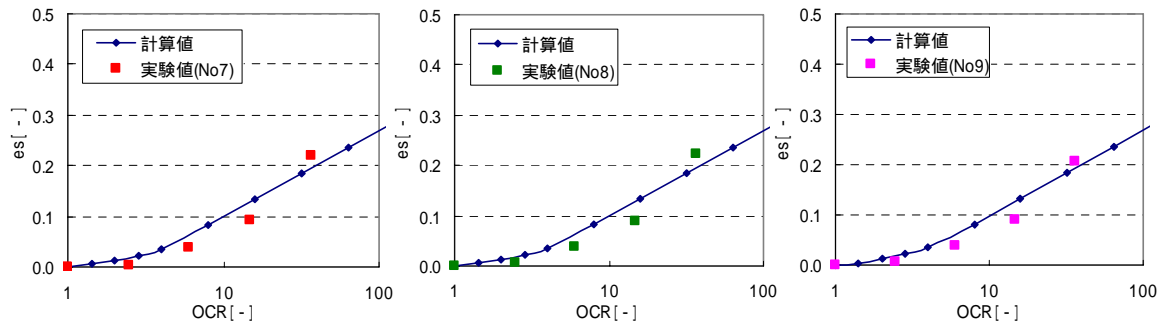
引用先	No	ESP	ゲイ砂混合率	c		OCR_b
		[-]	[-]	[eq/l]	[-]	[-]
核燃料サイクル開発機構 (1999) [HLW2次レポート]	1	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	2	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	3	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	4	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	5	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	6	0.822	0.0	0.0	0.0198	(3.5)
	7	0.822	0.3	0.0	0.0116	(6.0)
	8	0.822	0.3	0.0	0.0116	(6.0)
	9	0.822	0.3	0.0	0.0116	(6.0)
笹倉ほか (2002)	10	0.822	0.0	0.0	0.0198	(4.0)
	11	0.822	0.0	0.0	0.0198	(4.0)
	12	0.822	0.0	0.0	0.0198	(8.5)
	13	0.822	0.0	0.0	0.0198	(9.0)
	14	0.822	0.0	0.0	0.0198	11.0
	15	0.822	0.0	0.0	0.0198	10.0
	16	0.822	0.0	0.0	0.0198	28.0
	17	0.822	0.0	0.0	0.0198	28.0
	18	0.122	0.0	0.0	0.0198	(1.0)
	19	0.122	0.0	0.0	0.0198	(1.5)
	20	0.122	0.0	0.0	0.0198	2.5
	21	0.122	0.0	0.0	0.0198	2.5
	22	0.122	0.0	0.0	0.0198	2.5
	23	0.122	0.0	0.0	0.0198	3.2
	24	0.122	0.0	0.0	0.0198	4.0
25	0.122	0.0	0.0	0.0198	4.0	
笹倉ほか (2003)	26	0.457	0.0	0.0	0.0198	(7.0)
	27	0.457	0.0	0.0	0.0198	(7.0)
	28	0.457	0.0	0.0	0.0198	2.0
	29	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.0
	30	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.0
	31	0.457	0.0	0.0	0.0198	5.0
	32	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.5
	33	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.5
	34	0.822	0.0	0.0	0.0198	5.0
	35	0.822	0.0	0.0	0.0198	5.5
	36	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.5
	37	0.457	0.0	0.0	0.0198	4.5
	38	0.122	0.0	0.0	0.0198	3.6
	39	0.122	0.0	0.0	0.0198	3.0
戸井田ほか (2005)	40	0.822	0.5	0.0	0.0062	5.3
	41	0.822	0.5	0.0	0.0062	5.8
	42	0.822	0.5	0.0	0.0062	6.2
	43	0.122	0.3	0.0	0.0116	3.5
	44	0.122	0.3	0.0	0.0116	4.0
	45	0.122	0.3	0.0	0.0116	3.0
	46	0.122	0.3	0.0	0.0116	3.5
	47	0.912	0.0	3.0	0.0081	3.5
	48	0.912	0.0	3.0	0.0081	3.8
	49	0.912	0.0	3.0	0.0081	3.4
	50	0.912	0.0	3.0	0.0081	3.7
	51	0.145	0.0	3.0	0.0081	3.8
	52	0.145	0.0	3.0	0.0081	3.6
高治ほか (2004)	53	0.822	0.3	0.8	0.0014	25.0
	54	0.822	0.3	0.2	0.0091	4.5
	55	0.822	0.3	0.212	0.0089	4.5



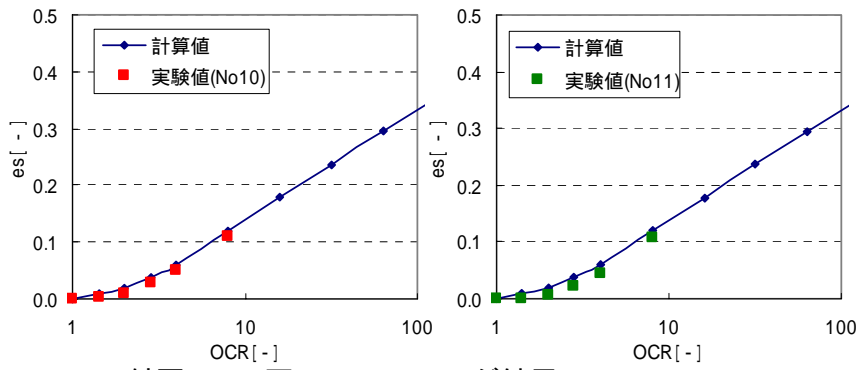
付図 2-1 再フィッティング結果 (No1~3)



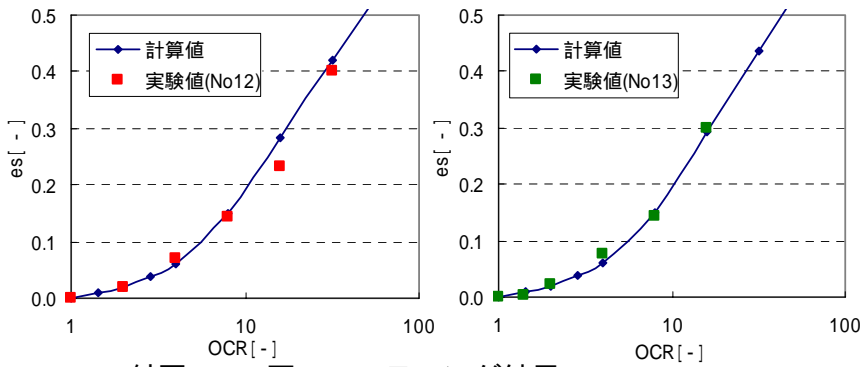
付図 2-2 再フィッティング結果 (No4~6)



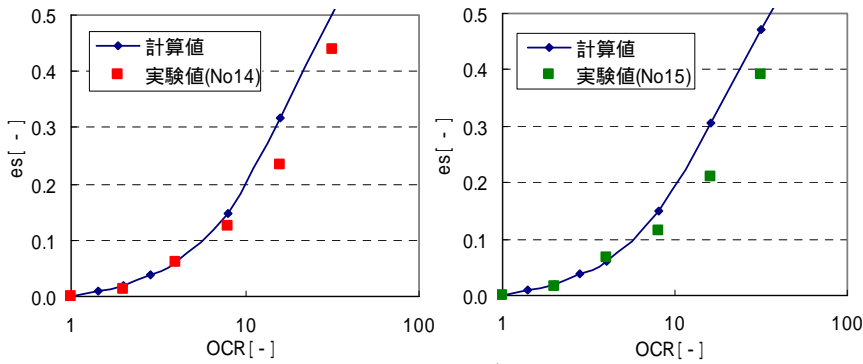
付図 2-3 再フィッティング結果 (No7~9)



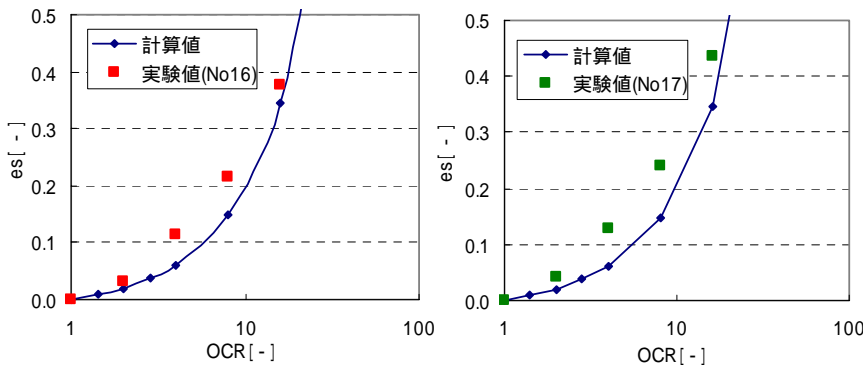
付図 2-4 再フィッティング結果 (No10~11)



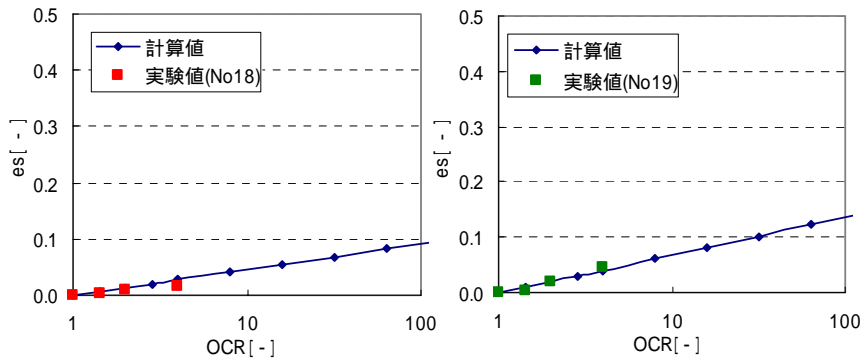
付図 2-5 再フィッティング結果 (No12~13)



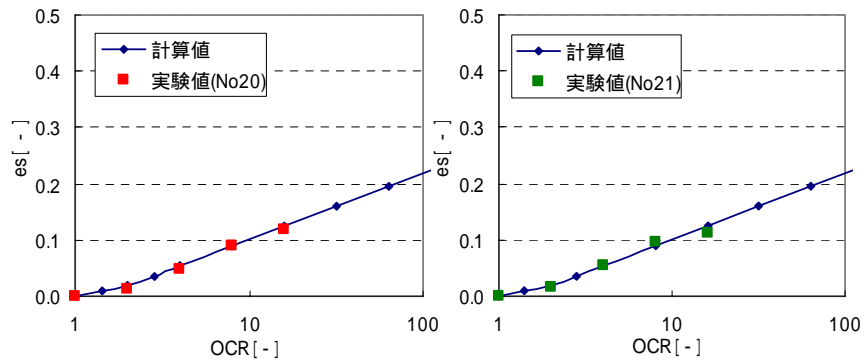
付図 2-6 再フィッティング結果 (No14~15)



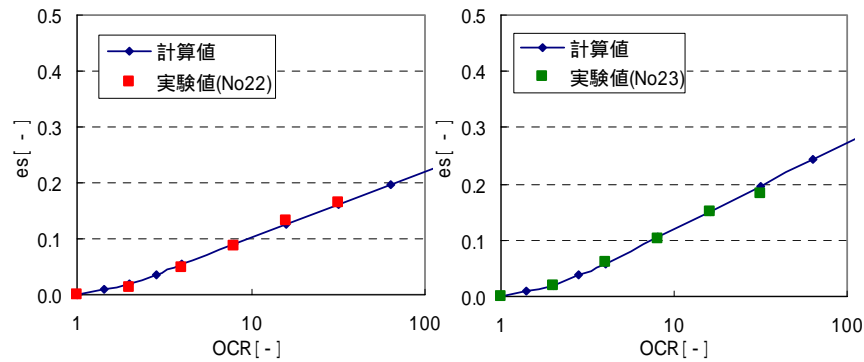
付図 2-7 再フィッティング結果 (No16~17)



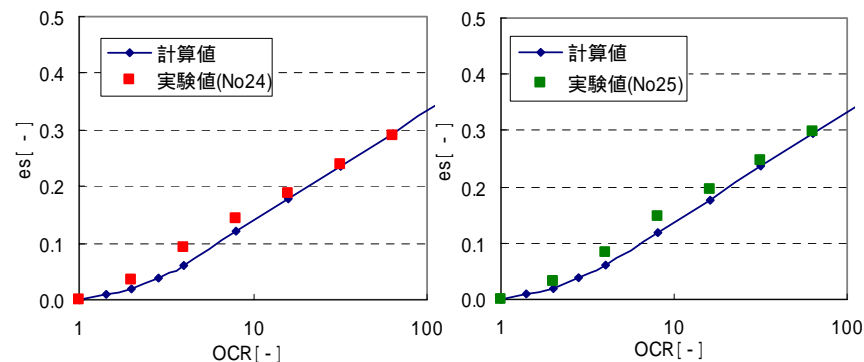
付図 2-8 再フィッティング結果 (No18~19)



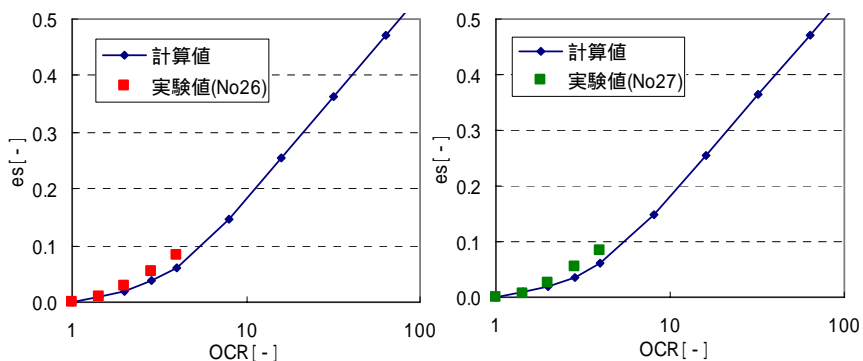
付図 2-9 再フィッティング結果 (No20~21)



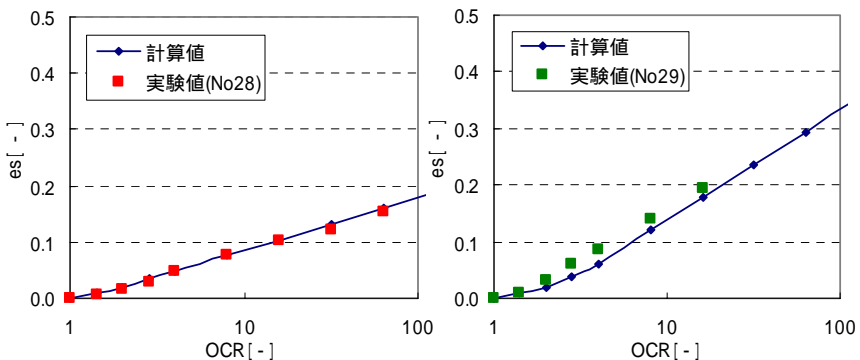
付図 2-10 再フィッティング結果 (No22~23)



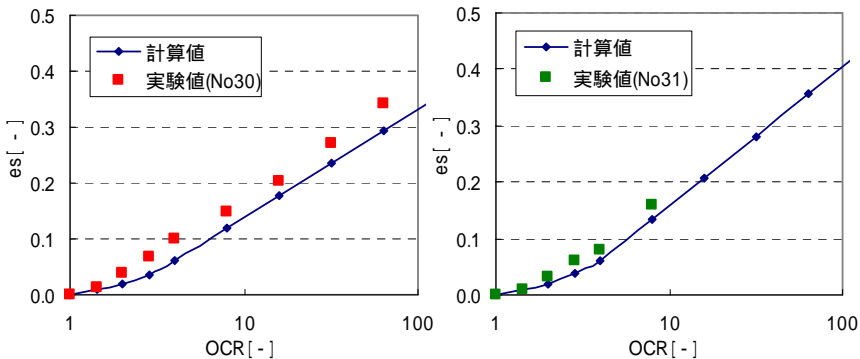
付図 2-11 再フィッティング結果 (No24~25)



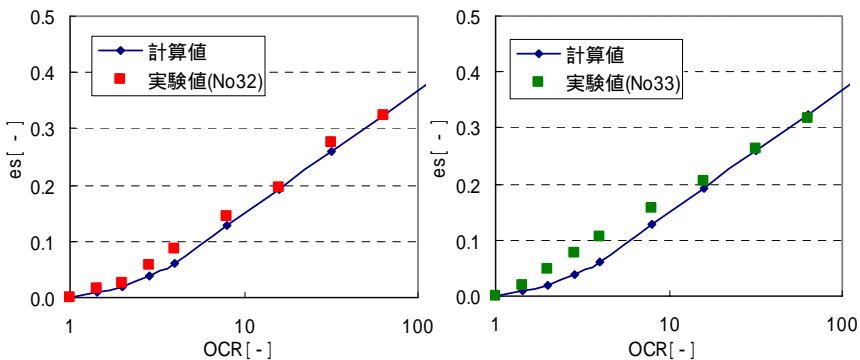
付図 2-12 再フィッティング結果 (No26~27)



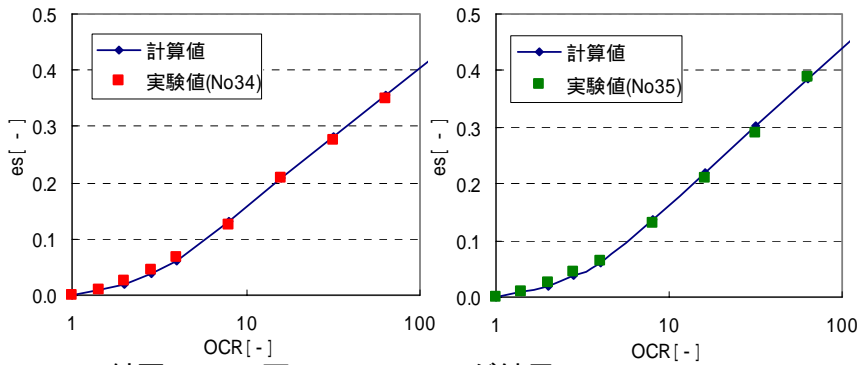
付図 2-13 再フィッティング結果 (No28~29)



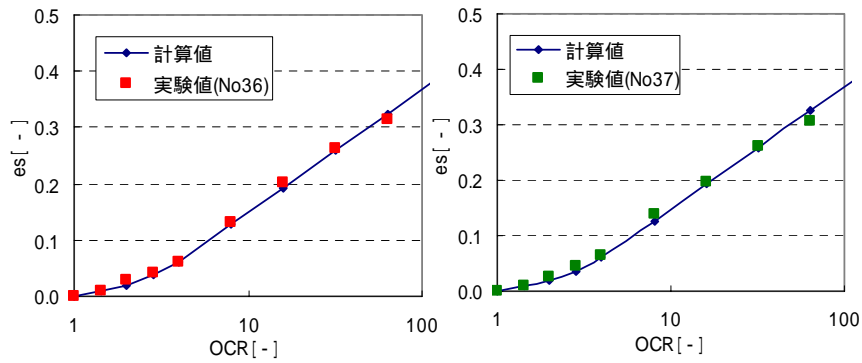
付図 2-14 再フィッティング結果 (No30~31)



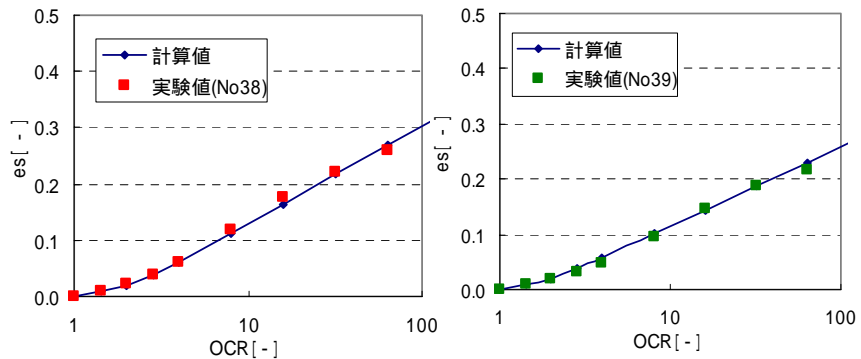
付図 2-15 再フィッティング結果 (No32~33)



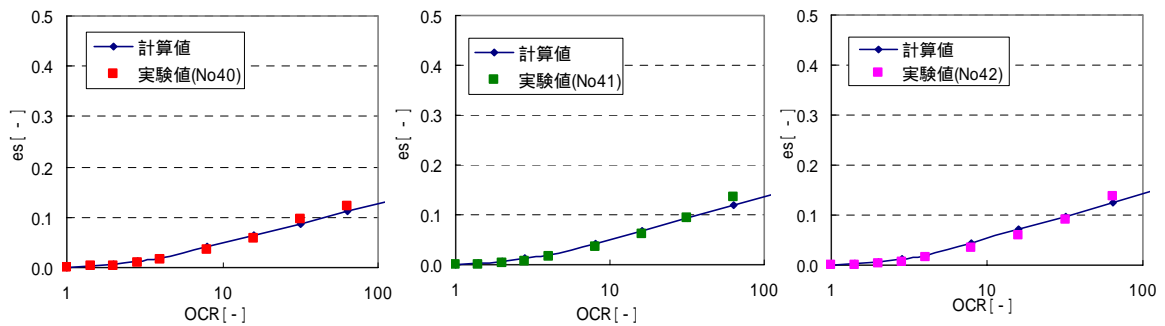
付図 2-16 再フィッティング結果 (No34~35)



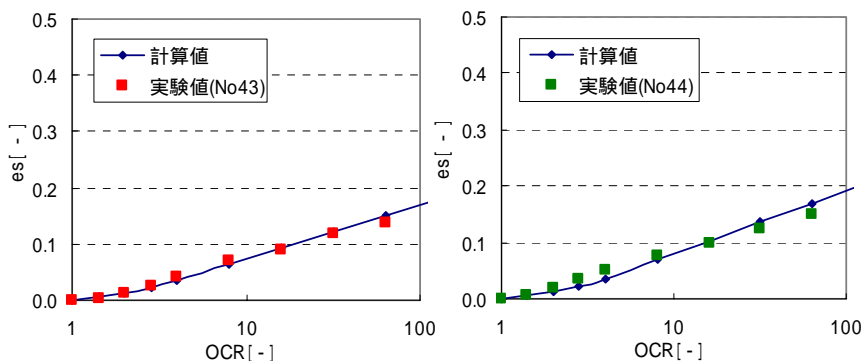
付図 2-17 再フィッティング結果 (No36~37)



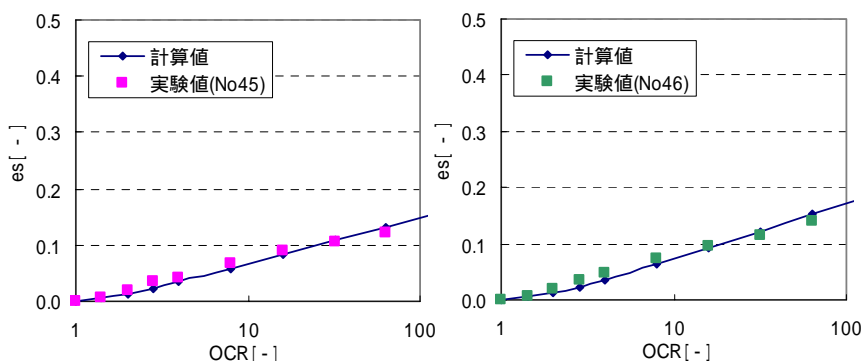
付図 2-18 再フィッティング結果 (No38~39)



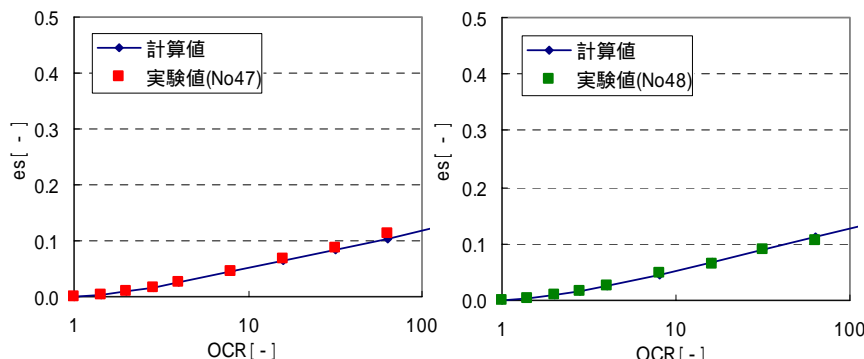
付図 2-19 再フィッティング結果 (No40~42)



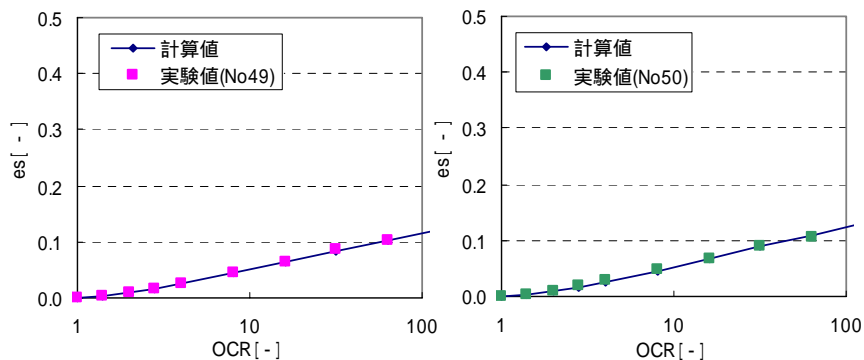
付図 2-20 再フィッティング結果 (No43~44)



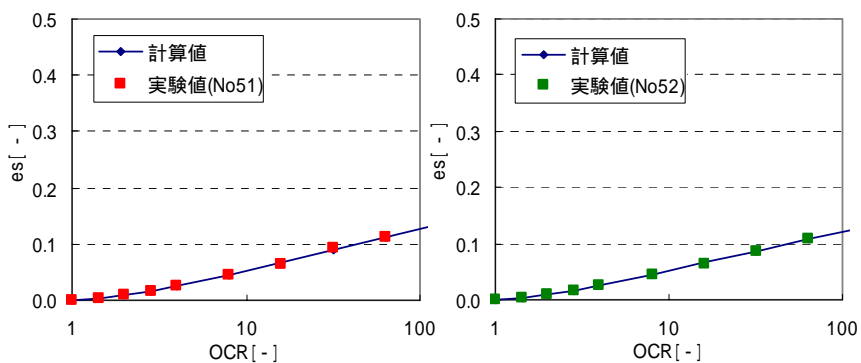
付図 2-21 再フィッティング結果 (No45~46)



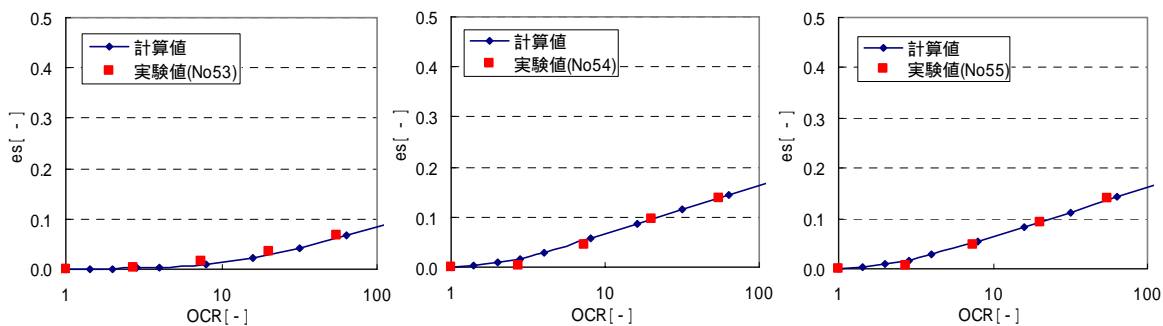
付図 2-22 再フィッティング結果 (No47~48)



付図 2-23 再フィッティング結果 (No49~50)



付図 2-24 再フィッティング結果 (No51~52)



付図 2-25 再フィッティング結果 (No53~55)

付録-3 既往の膨潤圧試験結果

本資料は、本編 2.1.9 で膨潤圧の評価式を構築した際に用いた、既往の研究において実施されたベントナイト（クニゲルV1）の膨潤圧試験の結果をとりまとめたものである。なお、CEC（陽イオン交換容量）や Na^+ （交換性ナトリウムイオンの当量濃度）、クニゲルV1 中のスメクタイトの比率等については、実際に測定されているデータは少なく、ここでは便宜上他のデータを参考に設定した。

付表 3-1 既往の膨潤圧試験結果(1)

出典	(a)陽イオン交換			(b)モンモリロナイト溶解											(c)液相のイオンの影響				実験値(膨潤圧)		
	No	Na+ [meq/100g]	CEC [meq/100g]	ESP [-]	乾燥 密度 [Mg/m ³]	ケイ砂 混合率 [%]	ヘントナイト 比重 [Mg/m ³]	ケイ砂 比重 [Mg/m ³]	スマクタイト 比重 [Mg/m ³]	ヘントナイト 体積比 [-]	間隙比 e [-]	有効 ヘントナイト 密度 [Mg/m ³]	e _{be} [-]	ヘントナイト中の スマクタイト 含有率 [-]	スマクタイト 部分密度 [Mg/m ³]	e _{amo} [-]	溶液種 [-]	濃度 [mol/l]	陽イオン 密度 [eq/l]	最大 膨潤圧 [MPa]	平衡 膨潤圧 [MPa]
笹倉ほか (2002)	1	60.8	74.0	0.822	1.600	0	2.733	2.619	2.733	1.00	0.708	1.60	0.708	0.50	1.13	1.416	蒸留水	0.0	0.0	-	2.100
	2	60.8	74.0	0.822	1.600	0	2.733	2.619	2.733	1.00	0.708	1.60	0.708	0.50	1.13	1.416	蒸留水	0.0	0.0	-	1.950
	3	60.8	74.0	0.822	1.330	0	2.733	2.619	2.733	1.00	1.055	1.33	1.055	0.50	0.88	2.110	蒸留水	0.0	0.0	-	0.278
	4	60.8	74.0	0.822	1.330	0	2.733	2.619	2.733	1.00	1.055	1.33	1.055	0.50	0.88	2.110	蒸留水	0.0	0.0	-	0.281
	5	60.8	74.0	0.822	1.140	0	2.733	2.619	2.733	1.00	1.397	1.14	1.397	0.50	0.72	2.795	蒸留水	0.0	0.0	-	0.137
	6	60.8	74.0	0.822	1.140	0	2.733	2.619	2.733	1.00	1.397	1.14	1.397	0.50	0.72	2.795	蒸留水	0.0	0.0	-	0.100
	7	8.3	68.2	0.122	1.600	0	2.666	2.619	2.666	1.00	0.666	1.60	0.666	0.50	1.14	1.333	蒸留水	0.0	0.0	-	2.270
	8	8.3	68.2	0.122	1.600	0	2.666	2.619	2.666	1.00	0.666	1.60	0.666	0.50	1.14	1.333	蒸留水	0.0	0.0	-	2.820
	9	8.3	68.2	0.122	1.520	0	2.666	2.619	2.666	1.00	0.754	1.52	0.754	0.50	1.06	1.508	蒸留水	0.0	0.0	-	1.360
	10	8.3	68.2	0.122	1.520	0	2.666	2.619	2.666	1.00	0.754	1.52	0.754	0.50	1.06	1.508	蒸留水	0.0	0.0	-	1.330
	11	8.3	68.2	0.122	1.450	0	2.666	2.619	2.666	1.00	0.839	1.45	0.839	0.50	1.00	1.677	蒸留水	0.0	0.0	-	0.168
	12	8.3	68.2	0.122	1.450	0	2.666	2.619	2.666	1.00	0.839	1.45	0.839	0.50	1.00	1.677	蒸留水	0.0	0.0	-	0.297
笹倉ほか (2003)	13	32.5	71.1	0.457	1.596	0	2.705	2.619	2.705	1.00	0.695	1.60	0.695	0.50	1.13	1.390	蒸留水	0.0	0.0	3.072	2.878
	14	32.5	71.1	0.457	1.596	0	2.705	2.619	2.705	1.00	0.695	1.60	0.695	0.50	1.13	1.390	蒸留水	0.0	0.0	2.947	2.762
	15	32.5	71.1	0.457	1.333	0	2.705	2.619	2.705	1.00	1.029	1.33	1.029	0.50	0.88	2.059	蒸留水	0.0	0.0	0.588	0.441
	16	32.5	71.1	0.457	1.330	0	2.705	2.619	2.705	1.00	1.034	1.33	1.034	0.50	0.88	2.068	蒸留水	0.0	0.0	0.628	0.480
	17	32.5	71.1	0.457	1.142	0	2.705	2.619	2.705	1.00	1.369	1.14	1.369	0.50	0.72	2.737	蒸留水	0.0	0.0	0.176	0.159
	18	32.5	71.1	0.457	1.141	0	2.705	2.619	2.705	1.00	1.371	1.14	1.371	0.50	0.72	2.741	蒸留水	0.0	0.0	0.187	0.176
	19	8.3	68.2	0.122	1.454	0	2.666	2.619	2.666	1.00	0.834	1.45	0.834	0.50	1.00	1.667	蒸留水	0.0	0.0	0.940	0.923
	20	8.3	68.2	0.122	1.457	0	2.666	2.619	2.666	1.00	0.830	1.46	0.830	0.50	1.00	1.660	蒸留水	0.0	0.0	0.862	0.843
	21	8.3	68.2	0.122	1.145	0	2.666	2.619	2.666	1.00	1.328	1.15	1.328	0.50	0.73	2.657	蒸留水	0.0	0.0	0.101	0.095
	22	8.3	68.2	0.122	1.147	0	2.666	2.619	2.666	1.00	1.324	1.15	1.324	0.50	0.73	2.649	蒸留水	0.0	0.0	0.092	0.085
戸井田 ほか (2005)	23	60.8	74.0	0.822	1.612	50	2.733	2.619	2.733	0.49	0.659	1.16	1.347	0.50	0.74	2.695	蒸留水	0.0	0.0	0.336	0.336
	24	8.3	68.2	0.122	1.611	30	2.666	2.619	2.666	0.70	0.646	1.38	0.928	0.50	0.93	1.856	蒸留水	0.0	0.0	0.695	0.421
	25	67.5	74.0	0.912	1.606	0	2.717	2.619	2.717	1.00	0.692	1.61	0.692	0.50	1.14	1.384	NaCl	3.0	3.0	1.647	1.311
	26	9.87	68.2	0.145	1.603	0	2.655	2.619	2.655	1.00	0.656	1.60	0.656	0.50	1.15	1.313	CaCl ₂	1.5	3.0	2.419	1.553
	27	60.8	74.0	0.822	1.612	50	2.733	2.619	2.733	0.49	0.659	1.16	1.347	0.50	0.74	2.695	蒸留水	0.0	0.0	0.351	0.351
	28	8.3	68.2	0.122	1.611	30	2.666	2.619	2.666	0.70	0.646	1.38	0.928	0.50	0.93	1.856	蒸留水	0.0	0.0	0.609	0.414
	29	67.5	74.0	0.912	1.600	0	2.717	2.619	2.717	1.00	0.698	1.60	0.698	0.50	1.13	1.396	NaCl	3.0	3.0	1.631	1.303
	30	67.5	74.0	0.912	1.601	0	2.730	2.642	2.730	1.00	0.705	1.60	0.705	0.50	1.13	1.410	NaCl	1.0	1.0	1.686	1.272
	31	67.5	74.0	0.912	1.599	0	2.730	2.642	2.730	1.00	0.707	1.60	0.707	0.50	1.13	1.415	NaCl	1.0	1.0	1.732	1.327
	32	9.87	68.2	0.145	1.602	0	2.655	2.642	2.655	1.00	0.657	1.60	0.657	0.50	1.15	1.315	CaCl ₂	0.5	1.0	2.146	1.592
	33	9.87	68.2	0.145	1.599	0	2.655	2.642	2.655	1.00	0.660	1.60	0.660	0.50	1.14	1.321	CaCl ₂	0.5	1.0	2.084	1.514
	34	8.3	68.2	0.122	1.598	50	2.666	2.642	2.666	0.50	0.661	1.15	1.328	0.50	0.73	2.655	蒸留水	0.0	0.0	0.101	0.086
	35	8.3	68.2	0.122	1.602	50	2.666	2.642	2.666	0.50	0.657	1.15	1.319	0.50	0.73	2.639	蒸留水	0.0	0.0	0.078	0.062
田中ほか (2000)	36	5.2	60.8	0.086	1.61	30	2.7	2.7	2.700	0.70	0.677	1.37	0.967	0.50	0.92	1.934	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.478	0.295
	37	5.2	60.8	0.086	1.62	30	2.7	2.7	2.700	0.70	0.667	1.38	0.952	0.50	0.93	1.905	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.563	0.316
	38	5.2	60.8	0.086	1.61	30	2.7	2.7	2.700	0.70	0.677	1.37	0.967	0.50	0.92	1.934	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.563	0.322
	39	9.0	60.8	0.148	1.57	30	2.7	2.7	2.700	0.70	0.720	1.33	1.028	0.50	0.88	2.056	人工海水	0.621	0.621	0.741	0.732
	40	9.0	60.8	0.148	1.56	30	2.7	2.7	2.700	0.70	0.731	1.32	1.044	0.50	0.87	2.088	人工海水	0.621	0.621	0.628	0.620
41	9.0	60.8	0.148	1.57	30	2.7	2.7	2.700	0.70	0.720	1.33	1.028	0.50	0.88	2.056	人工海水	0.621	0.621	0.795	0.766	

付表 3-2 既往の膨潤圧試験結果(2)

出典	(a)陽イオン交換			(b)モンモリロナイト溶解											(c)液相のイオンの影響				実験値(膨潤圧)		
	Na+	CEC	ESP	乾燥密度	ケイ砂混合率	ヘントナイト比重	ケイ砂比重	スメクタイト比重	ヘントナイト体積比	間隙比 e	有効ヘントナイト密度	e _{be}	ヘントナイト中のスメクタイト含有率	スメクタイト部分密度	e _{ame}	溶液種	濃度	陽電荷密度	最大膨潤圧	平衡膨潤圧	
	[meq/100g]	[meq/100g]	[-]	[Mg/m ³]	[%]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[mol/l]	[eq/l]	[MPa]	[MPa]	
鈴木ほか(1999)	42	54.6	60.1	0.908	1.50	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.50	1.04	1.600	蒸留水	0.0	0.0	-	0.990
	43	54.6	60.1	0.908	1.50	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.50	1.04	1.600	蒸留水	0.0	0.0	-	0.710
	44	54.6	60.1	0.908	1.50	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.50	1.04	1.600	蒸留水	0.0	0.0	-	0.450
	45	54.6	60.1	0.908	1.60	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	-	1.080
	46	54.6	60.1	0.908	1.60	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	-	0.900
	47	54.6	60.1	0.908	1.60	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	-	0.830
	48	54.6	60.1	0.908	1.60	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	-	1.060
	49	54.6	60.1	0.908	1.60	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	-	1.060
	50	54.6	60.1	0.908	1.60	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	-	0.830
	51	54.6	60.1	0.908	1.61	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.677	1.61	0.677	0.50	1.15	1.354	蒸留水	0.0	0.0	-	1.720
	52	54.6	60.1	0.908	1.61	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.677	1.61	0.677	0.50	1.15	1.354	蒸留水	0.0	0.0	-	1.940
	53	54.6	60.1	0.908	1.61	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.677	1.61	0.677	0.50	1.15	1.354	蒸留水	0.0	0.0	-	1.740
	54	54.6	60.1	0.908	1.78	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.517	1.78	0.517	0.50	1.33	1.034	蒸留水	0.0	0.0	-	3.810
	55	54.6	60.1	0.908	1.79	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.508	1.79	0.508	0.50	1.34	1.017	蒸留水	0.0	0.0	-	3.890
	56	54.6	60.1	0.908	1.80	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	-	3.650
	57	54.6	60.1	0.908	1.77	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.525	1.77	0.525	0.50	1.32	1.051	蒸留水	0.0	0.0	-	3.550
	58	54.6	60.1	0.908	1.76	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.534	1.76	0.534	0.50	1.31	1.068	蒸留水	0.0	0.0	-	3.620
	59	54.6	60.1	0.908	1.78	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.517	1.78	0.517	0.50	1.33	1.034	蒸留水	0.0	0.0	-	3.730
	60	54.6	60.1	0.908	1.78	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.517	1.78	0.517	0.50	1.33	1.034	蒸留水	0.0	0.0	-	3.590
	61	54.6	60.1	0.908	1.79	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.508	1.79	0.508	0.50	1.34	1.017	蒸留水	0.0	0.0	-	3.880
	62	54.6	60.1	0.908	1.81	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.492	1.81	0.492	0.50	1.36	0.983	蒸留水	0.0	0.0	-	3.540
	63	54.6	60.1	0.908	1.78	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.517	1.78	0.517	0.50	1.33	1.034	蒸留水	0.0	0.0	-	3.570
	64	54.6	60.1	0.908	2.00	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.350	2.00	0.350	0.50	1.59	0.700	蒸留水	0.0	0.0	-	18.900
	65	54.6	60.1	0.908	2.00	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.350	2.00	0.350	0.50	1.59	0.700	蒸留水	0.0	0.0	-	14.700
	66	54.6	60.1	0.908	1.59	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.687	1.36	0.988	0.50	0.91	1.975	蒸留水	0.0	0.0	-	0.560
	67	54.6	60.1	0.908	1.61	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.666	1.38	0.957	0.50	0.93	1.915	蒸留水	0.0	0.0	-	0.520
	68	54.6	60.1	0.908	1.61	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.666	1.38	0.957	0.50	0.93	1.915	蒸留水	0.0	0.0	-	0.420
	69	54.6	60.1	0.908	1.61	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.666	1.38	0.957	0.50	0.93	1.915	蒸留水	0.0	0.0	-	0.440
	70	54.6	60.1	0.908	1.61	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.666	1.38	0.957	0.50	0.93	1.915	蒸留水	0.0	0.0	-	0.540
	71	54.6	60.1	0.908	1.54	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.741	1.31	1.066	0.50	0.86	2.133	蒸留水	0.0	0.0	-	0.390
72	54.6	60.1	0.908	1.55	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.730	1.32	1.050	0.50	0.87	2.100	蒸留水	0.0	0.0	-	0.380	
73	54.6	60.1	0.908	1.80	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.490	1.58	0.705	0.50	1.12	1.409	蒸留水	0.0	0.0	-	1.710	
74	54.6	60.1	0.908	1.80	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.490	1.58	0.705	0.50	1.12	1.409	蒸留水	0.0	0.0	-	1.640	
75	54.6	60.1	0.908	2.00	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.341	1.81	0.490	0.50	1.36	0.981	蒸留水	0.0	0.0	-	4.150	
76	54.6	60.1	0.908	2.00	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.341	1.81	0.490	0.50	1.36	0.981	蒸留水	0.0	0.0	-	4.210	
77	54.6	60.1	0.908	1.71	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.579	1.71	0.579	0.50	1.25	1.158	人工海水	0.589	0.589	-	2.070	
78	54.6	60.1	0.908	1.71	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.579	1.71	0.579	0.50	1.25	1.158	人工海水	0.589	0.589	-	2.330	
79	54.6	60.1	0.908	1.71	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.579	1.71	0.579	0.50	1.25	1.158	人工海水	0.589	0.589	-	2.290	
80	54.6	60.1	0.908	1.71	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.579	1.71	0.579	0.50	1.25	1.158	人工海水	0.589	0.589	-	2.030	
81	54.6	60.1	0.908	1.71	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.579	1.71	0.579	0.50	1.25	1.158	人工海水	0.589	0.589	-	2.520	
82	54.6	60.1	0.908	1.80	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	人工海水	0.589	0.589	-	3.790	
83	54.6	60.1	0.908	1.80	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	人工海水	0.589	0.589	-	4.730	
84	54.6	60.1	0.908	1.81	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.492	1.81	0.492	0.50	1.36	0.983	人工海水	0.589	0.589	-	3.880	
85	54.6	60.1	0.908	1.81	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.492	1.81	0.492	0.50	1.36	0.983	人工海水	0.589	0.589	-	4.270	
86	54.6	60.1	0.908	1.80	0	2.7	2.64	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	人工海水	0.589	0.589	-	5.330	
87	54.6	60.1	0.908	1.37	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.957	1.14	1.377	0.50	0.72	2.754	人工海水	0.589	0.589	-	0.066	
88	54.6	60.1	0.908	1.38	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.943	1.15	1.357	0.50	0.73	2.713	人工海水	0.589	0.589	-	0.045	
89	54.6	60.1	0.908	1.38	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.943	1.15	1.357	0.50	0.73	2.713	人工海水	0.589	0.589	-	0.065	
90	54.6	60.1	0.908	1.59	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.687	1.36	0.988	0.50	0.91	1.975	人工海水	0.589	0.589	-	0.380	
91	54.6	60.1	0.908	1.64	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.635	1.41	0.914	0.50	0.96	1.827	人工海水	0.589	0.589	-	0.360	
92	54.6	60.1	0.908	1.61	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.666	1.38	0.957	0.50	0.93	1.915	人工海水	0.589	0.589	-	0.150	
93	54.6	60.1	0.908	1.81	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.482	1.60	0.693	0.50	1.13	1.385	人工海水	0.589	0.589	-	1.080	
94	54.6	60.1	0.908	1.81	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.482	1.60	0.693	0.50	1.13	1.385	人工海水	0.589	0.589	-	0.910	
95	54.6	60.1	0.908	1.80	30	2.7	2.64	2.700	0.70	0.490	1.58	0.705	0.50	1.12	1.409	人工海水	0.589	0.589	-	1.320	

付表 3-3 既往の膨潤圧試験結果(3)

出典	(a)陽イオン交換			(b)モンモリロナイト溶解										(c)液相のイオンの影響				実験値(膨潤圧)		
	Na+	CEC	ESP	乾燥密度	ケイ砂混合率	ヘントナイト比重	ケイ砂比重	スマクタイト比重	ヘントナイト体積比	間隙比e	有効ヘントナイト密度	e _{be}	ヘントナイト中のスマクタイト含有率	スマクタイト部分密度	e _{ame}	溶液種	濃度	陽電荷密度	最大膨潤圧	平衡膨潤圧
	[meq/100g]	[meq/100g]	[-]	[Mg/m ³]	[%]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[mol/l]	[eq/l]	[MPa]	[MPa]
96	5.2	60.8	0.086	1.30	0	2.70	2.68	2.700	1.00	1.077	1.30	1.077	0.50	0.86	2.154	蒸留水	0.0	0.0	0.10	0.050
97	5.2	60.8	0.086	1.32	0	2.70	2.68	2.700	1.00	1.045	1.32	1.045	0.50	0.87	2.091	蒸留水	0.0	0.0	0.16	0.120
98	5.2	60.8	0.086	1.33	0	2.70	2.68	2.700	1.00	1.030	1.33	1.030	0.50	0.88	2.060	蒸留水	0.0	0.0	0.15	0.120
99	5.2	60.8	0.086	1.50	0	2.70	2.68	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.50	1.04	1.600	蒸留水	0.0	0.0	0.50	0.300
100	5.2	60.8	0.086	1.52	0	2.70	2.68	2.700	1.00	0.776	1.52	0.776	0.50	1.06	1.553	蒸留水	0.0	0.0	1.00	0.570
101	5.2	60.8	0.086	1.52	0	2.70	2.68	2.700	1.00	0.776	1.52	0.776	0.50	1.06	1.553	蒸留水	0.0	0.0	0.76	0.500
102	5.2	60.8	0.086	1.73	0	2.70	2.68	2.700	1.00	0.561	1.73	0.561	0.50	1.27	1.121	蒸留水	0.0	0.0	2.40	2.400
103	5.2	60.8	0.086	1.76	0	2.70	2.68	2.700	1.00	0.534	1.76	0.534	0.50	1.31	1.068	蒸留水	0.0	0.0	5.50	5.500
104	5.2	60.8	0.086	1.77	0	2.70	2.68	2.700	1.00	0.525	1.77	0.525	0.50	1.32	1.051	蒸留水	0.0	0.0	6.70	6.500
105	5.2	60.8	0.086	1.80	0	2.70	2.68	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	6.70	4.400
106	5.2	60.8	0.086	1.82	0	2.70	2.68	2.700	1.00	0.484	1.82	0.484	0.50	1.37	0.967	蒸留水	0.0	0.0	4.10	4.100
107	5.2	60.8	0.086	1.69	30	2.70	2.68	2.700	0.70	0.594	1.46	0.851	0.50	1.00	1.701	蒸留水	0.0	0.0	0.58	0.480
108	5.2	60.8	0.086	1.80	30	2.70	2.70	2.700	0.70	0.500	1.58	0.714	0.50	1.11	1.429	蒸留水	0.0	0.0	1.51	1.200
109	5.2	60.8	0.086	1.83	30	2.70	2.68	2.700	0.70	0.472	1.61	0.676	0.50	1.15	1.352	蒸留水	0.0	0.0	2.47	1.700
110	5.2	60.8	0.086	1.70	50	2.70	2.68	2.700	0.50	0.582	1.24	1.169	0.50	0.81	2.338	蒸留水	0.0	0.0	0.11	0.110
111	5.2	60.8	0.086	1.80	50	2.70	2.70	2.700	0.50	0.500	1.35	1.000	0.50	0.90	2.000	蒸留水	0.0	0.0	0.31	0.200
112	5.2	60.8	0.086	1.86	50	2.70	2.68	2.700	0.50	0.446	1.42	0.896	0.50	0.97	1.792	蒸留水	0.0	0.0	0.70	0.600
113	5.2	60.8	0.086	1.70	70	2.70	2.68	2.700	0.30	0.580	0.92	1.943	0.50	0.55	3.887	蒸留水	0.0	0.0	0.04	0.040
114	5.2	60.8	0.086	1.79	70	2.70	2.70	2.700	0.30	0.508	1.00	1.695	0.50	0.62	3.389	蒸留水	0.0	0.0	0.07	0.070
115	5.2	60.8	0.086	1.81	70	2.70	2.68	2.700	0.30	0.484	1.03	1.622	0.50	0.64	3.243	蒸留水	0.0	0.0	0.15	0.150
116	53.9	59.9	0.900	1.10	0	2.70	2.70	2.700	1.00	1.455	1.10	1.455	0.50	0.69	2.909	蒸留水	0.0	0.0	0.10	-
117	53.9	59.9	0.900	1.40	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.929	1.40	0.929	0.50	0.95	1.857	蒸留水	0.0	0.0	0.50	-
118	53.9	59.9	0.900	1.71	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.579	1.71	0.579	0.50	1.25	1.158	蒸留水	0.0	0.0	2.30	2.200
119	53.9	59.9	0.900	1.78	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.517	1.78	0.517	0.50	1.33	1.034	蒸留水	0.0	0.0	-	5.000
120	53.9	59.9	0.900	1.71	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.579	1.71	0.579	0.50	1.25	1.158	蒸留水	0.0	0.0	2.70	2.600
121	53.9	59.9	0.900	1.73	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.561	1.73	0.561	0.50	1.27	1.121	蒸留水	0.0	0.0	-	1.400
122	53.9	59.9	0.900	1.72	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.570	1.72	0.570	0.50	1.26	1.140	蒸留水	0.0	0.0	3.20	2.800
123	53.9	59.9	0.900	1.76	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.534	1.76	0.534	0.50	1.31	1.068	蒸留水	0.0	0.0	-	3.800
124	53.9	59.9	0.900	1.58	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.709	1.58	0.709	0.50	1.12	1.418	蒸留水	0.0	0.0	1.66	1.210
125	53.9	59.9	0.900	1.67	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.617	1.67	0.617	0.50	1.21	1.234	蒸留水	0.0	0.0	2.35	1.780
126	53.9	59.9	0.900	1.69	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.598	1.69	0.598	0.50	1.23	1.195	蒸留水	0.0	0.0	-	2.800
127	53.9	59.9	0.900	1.79	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.508	1.79	0.508	0.50	1.34	1.017	蒸留水	0.0	0.0	4.95	4.720
128	53.9	59.9	0.900	1.84	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.467	1.84	0.467	0.50	1.40	0.935	蒸留水	0.0	0.0	-	9.800
129	53.9	59.9	0.900	1.66	20	2.70	2.70	2.700	0.80	0.627	1.51	0.783	0.50	1.05	1.566	蒸留水	0.0	0.0	1.12	0.890
130	53.9	59.9	0.900	1.66	30	2.70	2.70	2.700	0.70	0.627	1.42	0.895	0.50	0.97	1.790	蒸留水	0.0	0.0	0.23	0.230
131	53.9	59.9	0.900	1.66	40	2.70	2.70	2.700	0.60	0.627	1.32	1.044	0.50	0.87	2.088	蒸留水	0.0	0.0	0.45	0.420
132	53.9	59.9	0.900	1.69	50	2.70	2.70	2.700	0.50	0.598	1.23	1.195	0.50	0.80	2.391	蒸留水	0.0	0.0	0.23	0.230
133	53.9	59.9	0.900	1.62	60	2.70	2.70	2.700	0.40	0.667	1.01	1.667	0.50	0.62	3.333	蒸留水	0.0	0.0	0.18	0.180
134	53.9	59.9	0.900	1.70	70	2.70	2.70	2.700	0.30	0.588	0.91	1.961	0.50	0.55	3.922	蒸留水	0.0	0.0	0.11	0.110
135	53.9	59.9	0.900	1.63	30	2.70	2.63	2.700	0.69	0.643	1.40	0.926	0.50	0.95	1.853	蒸留水	0.0	0.0	0.69	0.470
136	53.9	59.9	0.900	1.71	30	2.70	2.63	2.700	0.69	0.566	1.49	0.816	0.50	1.03	1.631	蒸留水	0.0	0.0	0.99	0.840
137	53.9	59.9	0.900	1.89	30	2.70	2.63	2.700	0.69	0.417	1.69	0.601	0.50	1.23	1.202	蒸留水	0.0	0.0	3.32	2.990
138	53.9	59.9	0.900	2.04	85	2.70	2.67	2.700	0.15	0.311	0.87	2.093	0.50	0.52	4.186	蒸留水	0.0	0.0	0.22	0.220
139	53.9	59.9	0.900	1.80	50	2.70	2.66	2.700	0.50	0.489	1.36	0.985	0.50	0.91	1.970	蒸留水	0.0	0.0	0.48	0.480

付-3(248)

前田ほか(1998)

[ケイ砂+礫]

付表 3-4 既往の膨潤圧試験結果(4)

出典	(a)陽イオン交換			(b)モンモリロナイト溶解											(c)液相のイオンの影響			実験値(膨潤圧)		
	Na+	CEC	ESP	乾燥密度	ケイ砂混合率	ヘントナイト比重	ケイ砂比重	スマクタイト比重	ヘントナイト体積比	間隙比 e	有効ヘントナイト密度	e _{be}	ヘントナイト中のスマクタイト含有率	スマクタイト部分密度	e _{ame}	溶液種	濃度	陽電荷密度	最大膨潤圧	平衡膨潤圧
	[meq/100g]	[meq/100g]	[-]	[Mg/m ³]	[%]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[mol/l]	[eq/l]	[MPa]	[MPa]
140	53.9	59.9	0.900	1.20	0	2.70	2.7	2.700	1.00	1.250	1.20	1.250	0.50	0.77	2.500	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.27	0.270
141	53.9	59.9	0.900	1.20	0	2.70	2.7	2.700	1.00	1.250	1.20	1.250	0.50	0.77	2.500	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.14	0.100
142	53.9	59.9	0.900	1.20	0	2.70	2.7	2.700	1.00	1.250	1.20	1.250	0.50	0.77	2.500	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.23	0.230
143	53.9	59.9	0.900	1.85	0	2.70	2.7	2.700	1.00	0.459	1.85	0.459	0.50	1.41	0.919	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	4.4	4.000
144	53.9	59.9	0.900	1.81	0	2.70	2.7	2.700	1.00	0.492	1.81	0.492	0.50	1.36	0.983	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	3.21	3.100
145	53.9	59.9	0.900	1.85	0	2.70	2.7	2.700	1.00	0.459	1.85	0.459	0.50	1.41	0.919	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	3.19	3.000
146	5.2	60.8	0.086	1.21	0	2.70	2.70	2.700	1.00	1.231	1.21	1.231	0.50	0.78	2.463	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.06	0.080
147	5.2	60.8	0.086	1.21	0	2.70	2.70	2.700	1.00	1.231	1.21	1.231	0.50	0.78	2.463	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.10	0.100
148	5.2	60.8	0.086	1.18	0	2.70	2.70	2.700	1.00	1.288	1.18	1.288	0.50	0.75	2.576	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.06	0.060
149	5.2	60.8	0.086	1.80	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	4.39	3.400
150	5.2	60.8	0.086	1.80	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	7.18	5.000
151	5.2	60.8	0.086	1.81	0	2.70	2.70	2.700	1.00	0.492	1.81	0.492	0.50	1.36	0.983	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	4.48	3.400
152	5.2	60.8	0.086	1.87	70	2.70	2.70	2.700	0.30	0.444	1.09	1.480	0.50	0.68	2.959	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.11	0.090
153	5.2	60.8	0.086	1.83	70	2.70	2.70	2.700	0.30	0.475	1.04	1.585	0.50	0.65	3.169	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.07	0.060
154	5.2	60.8	0.086	1.79	70	2.70	2.70	2.700	0.30	0.508	1.00	1.695	0.50	0.62	3.389	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.09	0.060
155	5.2	60.8	0.086	1.99	70	2.70	2.70	2.700	0.30	0.357	1.23	1.189	0.50	0.80	2.379	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.50	0.380
156	5.2	60.8	0.086	2.00	70	2.70	2.70	2.700	0.30	0.350	1.25	1.167	0.50	0.81	2.333	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.31	0.240
157	5.2	60.8	0.086	2.00	70	2.70	2.70	2.700	0.30	0.350	1.25	1.167	0.50	0.81	2.333	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.27	0.190
158	18.1	86.5	0.209	0.99	0	2.64	2.70	2.640	1.00	1.667	0.99	1.667	0.80	0.86	2.083	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.45	0.430
159	18.1	86.5	0.209	0.99	0	2.64	2.70	2.640	1.00	1.667	0.99	1.667	0.80	0.86	2.083	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.44	0.430
160	18.1	86.5	0.209	0.99	0	2.64	2.70	2.640	1.00	1.667	0.99	1.667	0.80	0.86	2.083	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	0.35	0.350
161	18.1	86.5	0.209	1.43	0	2.64	2.70	2.640	1.00	0.846	1.43	0.846	0.80	1.28	1.058	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	5.18	5.100
162	18.1	86.5	0.209	1.39	0	2.64	2.70	2.640	1.00	0.899	1.39	0.899	0.80	1.24	1.124	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	4.12	4.000
163	18.1	86.5	0.209	1.43	0	2.64	2.70	2.640	1.00	0.846	1.43	0.846	0.80	1.28	1.058	Ca(OH) ₂	飽和	7.7	5.18	5.100

注) 158 ~ 163 : クニボンドの膨潤圧試験結果であり、本研究における膨潤圧評価式には考慮しなかった。

付表 3-5 既往の膨潤圧試験結果(5)

出典	(a)陽イオン交換			(b)モンモリロナイト溶解											(c)液相のイオンの影響			実験値(膨潤圧)		
	Na+	CEC	ESP	乾燥密度	ケイ砂混合率	ヘントナイト比重	ケイ砂比重	スメクタイト比重	ヘントナイト体積比	間隙比 e	有効ヘントナイト密度	e _{be}	ヘントナイト中のスメクタイト含有率	スメクタイト部分密度	e _{smo}	溶液種	濃度	陽電荷密度	最大膨潤圧	平衡膨潤圧
	[meq/100g]	[meq/100g]	[-]	[Mg/m ³]	[%]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[Mg/m ³]	[-]	[-]	[mol/l]	[eq/l]	[MPa]	[MPa]
164	51.3	60.1	0.854	1.50	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.50	1.04	1.600	蒸留水	0.0	0.0	1.11	0.990
165	51.3	60.1	0.854	1.50	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.50	1.04	1.600	蒸留水	0.0	0.0	0.95	0.710
166	51.3	60.1	0.854	1.50	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.50	1.04	1.600	蒸留水	0.0	0.0	0.81	0.450
167	51.3	60.1	0.854	1.60	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	1.69	1.080
168	51.3	60.1	0.854	1.60	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	1.56	0.900
169	51.3	60.1	0.854	1.60	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.688	1.60	0.688	0.50	1.14	1.375	蒸留水	0.0	0.0	1.6	0.830
170	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.99	3.720
171	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	5.3	3.850
172	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.93	3.610
173	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.7	3.510
174	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.92	3.570
175	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.41	3.680
176	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	5.35	3.450
177	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.84	3.820
178	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.62	3.500
179	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.93	3.500
180	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	5.14	3.930
181	51.3	60.1	0.854	1.80	0	2.7	2.80	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.50	1.35	1.000	蒸留水	0.0	0.0	4.5	4.320
182	51.3	60.1	0.854	2.00	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.350	2.00	0.350	0.50	1.59	0.700	蒸留水	0.0	0.0	18.9	18.900
183	51.3	60.1	0.854	2.00	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.350	2.00	0.350	0.50	1.59	0.700	蒸留水	0.0	0.0	14.7	14.700
184	107.9	119.0	0.907	1.50	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.99	1.49	0.808	蒸留水	0.0	0.0	-	4.200
185	107.9	119.0	0.907	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.99	1.79	0.505	蒸留水	0.0	0.0	-	37.300
186	107.9	119.0	0.907	2.00	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.350	2.00	0.350	0.99	1.99	0.354	蒸留水	0.0	0.0	-	76.300
187	56	79.0	0.709	1.50	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.800	1.50	0.800	0.75	1.31	1.067	蒸留水	0.0	0.0	-	3.100
188	56	79.0	0.709	1.80	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.500	1.80	0.500	0.75	1.62	0.667	蒸留水	0.0	0.0	-	24.700
189	56	79.0	0.709	2.00	0	2.7	2.70	2.700	1.00	0.350	2.00	0.350	0.75	1.84	0.467	蒸留水	0.0	0.0	-	60.200
190	107.9	119.0	0.907	1.80	20	2.7	2.70	2.700	0.80	0.500	1.66	0.625	0.99	1.66	0.631	蒸留水	0.0	0.0	-	19.100
191	107.9	119.0	0.907	1.80	30	2.7	2.70	2.700	0.70	0.500	1.58	0.714	0.99	1.57	0.722	蒸留水	0.0	0.0	-	10.400
192	107.9	119.0	0.907	1.80	30	2.7	2.70	2.700	0.70	0.500	1.58	0.714	0.99	1.57	0.722	蒸留水	0.0	0.0	-	12.000
193	107.9	119.0	0.907	1.80	40	2.7	2.70	2.700	0.60	0.500	1.47	0.833	0.99	1.47	0.842	蒸留水	0.0	0.0	-	4.600
194	107.9	119.0	0.907	1.80	50	2.7	2.70	2.700	0.50	0.500	1.35	1.000	0.99	1.34	1.010	蒸留水	0.0	0.0	-	3.500
195	107.9	119.0	0.907	1.80	50	2.7	2.70	2.700	0.50	0.500	1.35	1.000	0.99	1.34	1.010	蒸留水	0.0	0.0	-	2.200
196	107.9	119.0	0.907	1.80	50	2.7	2.70	2.700	0.50	0.500	1.35	1.000	0.99	1.34	1.010	蒸留水	0.0	0.0	-	2.700
197	107.9	119.0	0.907	1.80	60	2.7	2.70	2.700	0.40	0.500	1.20	1.250	0.99	1.19	1.263	蒸留水	0.0	0.0	-	1.400
198	107.9	119.0	0.907	1.80	60	2.7	2.70	2.700	0.40	0.500	1.20	1.250	0.99	1.19	1.263	蒸留水	0.0	0.0	-	1.700

注) 164～169、182～183：付表 3-2 にデータとして含まれる。

184～186、190～198：クニピア F のデータであり、膨潤圧評価式の設定においては考慮しなかった。

187～189：MX - 80 のデータであり、膨潤圧評価式の設定においては考慮しなかった。