

ベントナイト変遷挙動のモデル化のための データ取得Ⅱ

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2003 年 2 月

鹿島建設株式会社

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下さい。

〒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

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)

2003

ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得Ⅱ

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

笹倉 剛*¹ 畔柳 幹雄*¹ 小林 一三*¹ 岡本 道孝*¹

要 旨

本研究では、TRU 廃棄物処分システムの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資するため、ベントナイトの変質（Ca 型化）および体積変化（膨潤）が、その力学的・水理的性能に及ぼす影響を把握することを目的として、同一ロットのベントナイトによる一連の室内試験を実施し、ベントナイトの力学的・水理的性能の変遷に関するデータを体系的に取得した。今年度は主に Ca 型化率 50%ベントナイトの各種室内試験を実施し、昨年度実施した Na 型、及び Ca 型化率 100%ベントナイトの試験結果と比較することにより、Ca 型化を考慮できるモデルを試作した。今年度実施した試験では、所定の膨潤率に相当する間隙比を用いて体積変化がベントナイトの力学挙動に及ぼす影響を検討した。さらに、今後構築していくベントナイトの力学特性変遷評価モデルの妥当性を検証するために昨年度開発した積層ベントナイト膨潤試験を実施し、その適用性、問題点の抽出を行った。

高圧圧密試験、 K_0 ・等方圧密除荷試験、膨潤圧膨潤量試験から、ベントナイトの圧密・膨潤特性に関して以下のような結果を得た。

- 1) Ca 型化率に依らず、その正規圧密曲線は、ほぼ 1 つの線で表せる。
- 2) 膨潤挙動は Ca 型化率が小さいものほど、非線形性が強く、その勾配は過圧密比 (OCR) が大きいほど急になる。但し、Ca 型化の進展に伴い膨潤線は線形的なものになり、この傾向は Ca 型化率 50%程度でも比較的明確に確認できる。また、等方圧密試験から得られた Na 型ベントナイトの膨潤線勾配は標準圧密試験や K_0 圧密試験から得られるものよりも小さい。
- 3) Na 型ベントナイトの K_0 値は 0.95 程度である。また、 K_0 除荷時に応力パスは、 K_0 線よりも下側に逸れる。
- 4) 高圧圧密試験結果から得られる正規圧密線と最大膨潤量～平衡膨潤圧関係はほぼ一致する。

三軸 $\overline{CU}$ 試験より、ベントナイトのせん断特性に関して以下のような結果を得た。

- 5) 土質材料の降伏曲面を決定する限界状態パラメータ M は、間隙比、Ca 型化率に依らず 0.49 程度であり、土質定数として取り扱うことが出来る。
- 6) せん断中の応力パスの形状は、Ca 型化率が大きいものほど過圧密的である。

透水試験より、ベントナイトの水理特性に関して以下のような結果を得た。

- 7) Ca 型化率が大きくなるに従って、透水係数は大きくなる事が確認できた。また Ca 型化率ごとの透水係数と間隙比の関係の近似関数が得られた。

積層ベントナイト膨潤試験に関しては、その適用性の確認と問題点の摘出を目的とし、Na 型ベントナイトのみを用いた予備実験を実施した。以下にその結果をまとめる。

- 8) 一次元的膨潤中のベントナイトの詳細な挙動（鉛直・水平方向の膨潤圧、間隙水圧など）を観測し、定常状態における各状態量を測定できた。
- 9) 供試体内部の局所的膨潤挙動を X 線撮影により観測できた。
- 10) 供試体の飽和に要する時間は、高さ 30mm の供試体に対して約 50 日を要した。飽和時間を短くする、または供試体高さを大きくするためには、改良の余地がある。また、この試験で得られたデータを解析的にシミュレートする場合には、膨潤変形を付加する方法について再検討が必要である。

本報告書は、鹿島建設(株)が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務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)

Studies on mechanical behavior of bentonite for development
of the constitutive model II
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Contract)

T. Sasakura*, M. Kuroyanagi*, I. Kobayashi*, M. Okamoto*

Abstract

To integrate the system for evaluation of long-term hydraulic condition in near field of TRU waste disposal, series of laboratory tests were conducted to investigate the effect of ①cation exchange of Na-bentonite for calcium ion (named calciumization in the first phase) and ②the swelling behavior of bentonite, on its mechanical and hydraulic properties. The same lot of bentonite was used in a series of tests to obtain consistent data. The Ca0 (Na) bentonite and Ca100 bentonite were considered in the first phase, where Ca100 stands for the ratio of calciumization of 100%. The Ca50 bentonite was mainly subjected to the laboratory tests. The physical properties of Ca50 bentonite, such as cation exchange capacity, particle density, grain size distribution, compaction-characteristics and water content, were obtained. To model the effect of the calciumization of bentonite and swelling on its mechanical behavior, the experimental results of Ca0 (Na), Ca50 and Ca100 bentonite were compared with various void ratios. In addition, a model test apparatus, which was developed in the first phase, was improved. The test results will be subjected to the simulation aiming at verification of the model.

The consolidation and swelling behavior was obtained from the highly pressured consolidation test, K0/isotropically consolidation-unloading tests and swelling pressure/deformation tests as follows;

- 1) The normally consolidation line bentonite will not depend on the calciumization but be unique.
- 2) The non-linearity of swelling behavior of the bentonite is decreasing with increasing calciumization. Its gradient becomes larger with increasing the OCR.
- 3) The K0-value of Na bentonite is approximately 0.95. The stress point under K0-unloading does not follow the K0-line but passes between the K0-line and the hydrostatics pressure axis.
- 4) The normally consolidation line obtained from the highly pressured consolidation tests can be almost the same as the relations of the maximum swelling deformation and equilibrium swelling pressure obtained from the swelling pressure/deformation tests.

The following shear behavior of bentonite could be revealed due to the experimental results of triaxial $\overline{CU}$ tests;

- 5) The critical state parameter M of the bentonite, that decides the shape of yield

surfaces, does not depend on the void ratio and calciumization. Its value is approximately 0.49 and it can be treated as material properties.

- 6) The shear behavior of highly calciumized bentonite is similar to the behavior of overconsolidated clays.

The effects of swelling and calciumization on the hydraulic properties of bentonite were acquired by permeability tests as follows;

- 7) The coefficient of permeability becomes larger with increasing the calciumization. The relation between void ratio and coefficient of permeability can be obtained in each calciumized bentonite.

A model test apparatus are summarized as follows;

- 8) The swelling behavior of the stratiform bentonite can be observed and measured.
- 9) The swelling behavior of the calciumization front can be measured by X-ray photograph.
- 10) The saturation process should be improved in the next phase because the apparatus took approximately fifty days for saturation of specimen of 3cm. To shorten the saturation time or to employ the larger specimen, there will be still improvement.

This work was performed by KAJIMA Corporation 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.

目 次

はじめに	1
1. ベントナイト材料の力学的変遷のモデル化のためのデータ取得	3
1.1 試験項目と目的	3
1.2 試験条件	8
1.2.1 配合	8
1.2.2 乾燥密度	8
1.2.3 膨潤率	8
1.2.4 三軸 $\overline{CU}$ 試験における拘束圧	12
1.3 使用材料と供試体作製方法	14
1.3.1 使用材料	14
(1) Na 型ベントナイト	14
(2) Ca 型化ベントナイト	14
1.3.2 供試体の作製方法	16
(1) 静的締固めによる供試体の作製	16
(2) 膨潤による供試体の作製	18
1.4 成分分析（交換性陽イオン量の測定）	19
1.4.1 計量方法	19
1.4.2 計量結果	20
1.5 粒度試験	22
1.5.1 試験方法	22
1.5.2 試験結果	22
1.6 比重試験	24
1.6.1 試験方法	24
1.6.2 試験結果	24
1.7 含水比試験	25
1.7.1 試験方法	25
1.7.2 試験結果	25
1.8 液塑性限界試験	29

1.8.1 試験方法	29
1.8.2 試験結果	29
1.9 締固め試験	31
1.9.1 試験方法	31
1.9.2 試験結果	31
1.10 高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験	35
1.10.1 試験方法	35
1.10.2 試験結果	38
1.11 高圧圧密試験	53
1.11.1 試験方法	53
1.11.2 試験結果	56
1.12 等方圧密除荷試験と K_0 圧密除荷試験	64
1.12.1 試験方法	64
1.12.2 試験結果	68
1.13 透水試験	71
1.13.1 試験方法	71
1.13.2 試験結果	72
1.14 膨潤圧試験	75
1.14.1 試験方法	75
1.14.2 試験結果	76
1.15 膨潤量試験	81
1.15.1 試験方法	81
1.15.2 試験結果	82
参考文献	87
2. ベントナイト系材料の力学的変遷のモデル化のための調査	89
2.1 解析モデルの試作	89
2.2 モデル化の方針	89
2.3 モデル化するパラメータ	90
2.4 既往の研究	90

2.5 圧密・膨潤特性のモデル化	91
2.5.1 高圧圧密試験	91
2.5.2 膨潤量と膨潤圧のモデル化	99
2.6 せん断挙動のモデル化	102
2.6.1 限界状態パラメータ	102
2.7 水理場のモデル化	108
2.7.1 透水係数のモデル化	108
2.8 まとめ	111
2.9 積層ベントナイト膨潤試験	113
2.9.1 昨年度（2001 年度）の研究成果	113
2.9.2 本年度の研究目的	113
2.9.3 実験ケース	113
2.9.4 実験方法	113
(1) 試験装置	113
(2) 供試体寸法	115
(3) 試験手順	115
2.9.5 実験結果	118
(1) 飽和過程	118
(2) 飽和終了の確認と X 線撮影結果	123
(3) 膨潤過程	124
(4) 膨潤終了の確認と X 線撮影結果	128
2.9.6 まとめ	129
2.9.7 課題と今後の対応	129
参考文献	131
おわりに	132
(1) ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得	132
(2) ベントナイト系材料の力学的変遷挙動のモデル化のための調査	134
(3) 今後の課題	135

付録 実験状況等写真	付・1(138)
------------	----------

図 目 次

はじめに

図-1 ニアフィールドの水理場の長期的変遷評価システムの開発に必要な研究項目 2

1. ベントナイト系材料の力学的変遷のモデル化のためのデータ取得

図-1.2.1	想定した処分施設の断面	10
図-1.2.2	静的締固めによる供試体作成	11
図-1.3.1	Ca 型化ベントナイト洗浄装置の模式図	15
図-1.3.2	供試体の飽和方法	16
図-1.3.3	高圧圧密試験の最大膨潤率相当供試体の作成方法	18
図-1.4.1	ベントナイトの Ca 型化率	19
図-1.5.1	粒径加積曲線	23
図-1.8.1	液塑性限界試験結果	30
図-1.9.1	締固め曲線 (Ca 型化率 50%ベントナイト)	33
図-1.9.2	締固め曲線 (Na 型ベントナイト)	33
図-1.9.3	締固め曲線 (Ca 型化率 100%ベントナイト)	34
図-1.10.1	二重負圧法の模式図	35
図-1.10.2	せん断に至るまでの供試体内応力の変遷 (三軸 $\overline{CU}$ 試験)	37
図-1.10.3	三軸 $\overline{CU}$ 試験装置の模式図	37
図-1.10.4	圧密過程における時間～体積ひずみ関係	42
図-1.10.5	圧密過程における時間～体積ひずみ関係 ($\varepsilon_v \sim \ln(t)$ 平面)	42
図-1.10.6	一次圧密終了時刻の決定	43
図-1.10.7	応力～ひずみ関係	46
図-1.10.8	せん断時の間隙水圧挙動	46
図-1.10.9	変形係数 E_{50} と拘束圧の関係	47
図-1.10.10	せん断中のポアソン比の推移	48
図-1.10.11	有効応力パス	51
図-1.10.12	土質材料の降伏曲面の模式図	52
図-1.10.13	典型的な非排水せん断時の応力パスの模式図	52

図-1.11.1	試験を実施した高圧・超高压圧密経路の模式図	53
図-1.11.2	圧密試験装置(左:载荷装置、右:試験容器)	55
図-1.11.3	膨潤による先行圧密圧力 p_c' の過小評価	55
図-1.11.4	e-log p' 曲線 (高圧圧密試験: Ca 型化率 50%)	58
図-1.11.5	e-log p' 曲線 (超高压圧密試験)	59
図-1.11.6	ベントナイトの e-log p' 関係の模式図	60
図-1.11.7	圧密特性の模式図	62
図-1.11.8	透水係数と間隙比の関係 (Na 型ベントナイト)	63
図-1.11.9	透水係数と間隙比の関係 (Ca 型化率 50%)	63
図-1.11.10	透水係数と間隙比の関係 (Ca 型化率 100%)	63
図-1.12.1	等方圧密除荷試験の模式図	65
図-1.12.2	K_0 圧密除荷試験の模式図	65
図-1.12.3	等方・ K_0 圧密除荷時の e-log p' 関係の模式図	65
図-1.12.4	K_0 圧密試験装置模式図	66
図-1.12.5	K_0 圧密リングの詳細図	66
図-1.12.6	e-log p' 曲線 (等方圧密除荷試験)	68
図-1.12.7	e-log p' 曲線 (K_0 圧密除荷試験)	69
図-1.12.8	有効応力径路 (等方圧密除荷試験・ K_0 圧密除荷試験)	70
図-1.13.1	透水試験結果 (経時変化: Ca 型化率 50%)	74
図-1.13.2	透水試験結果 (経時変化: Ca 型化率 100%)	74
図-1.14.1	膨潤圧試験装置	75
図-1.14.2	膨潤圧試験結果 (経時変化: Ca 型化率 50%)	79
図-1.14.3	膨潤圧試験結果 (経時変化: Ca 型化率 100%)	79
図-1.14.4	平衡膨潤圧と間隙比の関係	80
図-1.14.5	無次元化した膨潤圧と間隙比の関係	80
図-1.15.1	膨潤量試験装置	81
図-1.15.2	膨潤量試験結果 (経時変化 1: Ca 型化率 50%)	84
図-1.15.3	膨潤量試験結果 (経時変化 2: Ca 型化率 50%)	84
図-1.15.4	膨潤量試験結果 (経時変化 1: Ca 型化率 100%)	85
図-1.15.5	膨潤量試験結果 (経時変化 2: Ca 型化率 100%)	85

図-1.15.6 Ca 型化率と膨潤率 (=最終間隙比/初期間隙比) の関係	86
--	----

2. ベントナイト系材料の力学的変遷のモデル化のための調査

図-2.5.1 Na 型ベントナイトの $e\text{-log } p'$ 関係	92
図-2.5.2 Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの $e\text{-log } p'$ 関係と Na 型ベントナイトの正規圧密線の関係	92
図-2.5.3 構造を有する地盤材料の $e\text{-log } p'$ 関係	95
図-2.5.4 Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの正規圧密曲線と Na 型ベントナイトの $e\text{-log } p'$ 関係の関係	95
図-2.5.5 上下負荷面関口・太田モデルの降伏曲面	96
図-2.5.6 上負荷面の発展則の模式図	96
図-2.5.7 ベントナイトの膨潤挙動の模式図	98
図-2.5.8 浸透膨潤と OCR の関係の模式図	98
図-2.5.9 過圧密比と膨潤指数の関係	98
図-2.5.10 $e\text{-log } p'$ 関係を用いた膨潤量・膨潤圧試験の解釈	99
図-2.5.11 $e\text{-log } p'$ 平面で整理した膨潤量、膨潤圧試験結果	100
図-2.5.12 $e\text{-log } p'$ 平面で整理した膨潤量、膨潤圧試験結果	101
図-2.5.13 正規圧密曲線と最終間隙比—最大膨潤圧関係	101
図-2.6.1 限界状態線と応力パス (Na 型ベントナイト：膨潤率 0%)	102
図-2.6.2 有効応力パス (再掲)	103
図-2.6.3 初期間隙比 e_i と限界状態パラメータの関係	106
図-2.6.4 初期間隙比 e_i と限界状態パラメータの関係	106
図-2.7.1 透水係数と間隙比の関係	108
図-2.7.2 透水係数と間隙比の関係	109
図-2.7.3 透水係数のモデル化 (係数 A)	110
図-2.7.4 透水係数のモデル化 (係数 B)	110
図-2.8.1 解析システムと各節の関連図	112
図-2.9.1 試験装置 (試験セル)	114
図-2.9.2 試験装置 (試験セル・反力フレーム)	114
図-2.9.3 試験手順のフロー	116

図-2.9.4	供試体およびタングステンターゲットの配置	117
図-2.9.5	計測項目と計測位置	117
図-2.9.6	各計測値の経時変化(飽和過程)	121
図-2.9.7	側方土圧と間隙水圧、軸応力と通水圧の差値の経時変化（飽和過程）	121
図-2.9.8	土圧比の経時変化（飽和過程）	121
図-2.9.9	吸・排水量（累積値）の経時変化（飽和過程）	122
図-2.9.10	透水係数の経時変化（飽和過程）	122
図-2.9.11	飽和終了時のタングステン球の位置	123
図-2.9.12	各計測値の経時変化（膨潤過程）	126
図-2.9.13	側方土圧と間隙水圧、軸応力と通水圧の差値の経時変化（膨潤過程）	126
図-2.9.14	土圧比の経時変化（膨潤過程）	126
図-2.9.15	吸・排水量（累積値）の経時変化（膨潤過程）	127
図-2.9.16	透水係数の経時変化（膨潤過程）	127
図-2.9.17	飽和終了時および膨潤終了時のタングステンターゲットの位置の比較	128
図-2.9.18	改良試験機のイメージ	130

表 目 次

1. ベントナイト系材料の力学的変遷のモデル化のためのデータ取得

表-1.1.1	分析・試験項目	5
表-1.1.2	取得諸量	6
表-1.1.3	取得物性の用途・反映先	7
表-1.2.1	試験を実施したベントナイトの初期膨潤率	8
表-1.2.2	試験を実施するベントナイトの初期膨潤率	9
表-1.2.3	ベントナイト単体に関する既往のデータ	12
表-1.2.4	ベントナイト単体に関する昨年度のデータ	12
表-1.2.5	高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験を実施する拘束圧 σ_c	13
表-1.3.1	使用したベントナイトの品質試験結果	14
表-1.3.2	供試体の寸法一覧	17
表-1.4.1	浸出陽イオン計量結果 (50%Ca 型化ベントナイト)	20
表-1.4.2	浸出陽イオン計量結果 (Na 型ベントナイト)	20
表-1.4.3	浸出陽イオン計量結果 (Ca 型率 100%ベントナイト)	21
表-1.5.1	粒度分布 (Ca 型化率 50%ベントナイト)	23
表-1.6.1	比重試験結果	24
表-1.7.1	含水比試験 (透水試験 Ca 型化率 50%ベントナイト)	26
表-1.7.2	含水比試験 (透水試験 Na 型ベントナイト)	26
表-1.7.3	含水比試験 (透水試験 Ca 型化率 100%ベントナイト)	26
表-1.7.4	含水比試験 (膨潤圧試験 Ca 型化率 50%ベントナイト)	27
表-1.7.5	含水比試験 (膨潤圧試験 Na 型ベントナイト)	27
表-1.7.6	含水比試験 (膨潤圧試験 Ca 型化率 100%ベントナイト)	27
表-1.7.7	含水比試験 (膨潤量試験 Ca 型化率 50%ベントナイト)	28
表-1.7.8	含水比試験 (膨潤量試験 Na 型ベントナイト)	28
表-1.7.9	含水比試験 (膨潤量試験 Ca 型化率 100%ベントナイト)	28
表-1.8.1	液性限界・塑性限界試験結果	30
表-1.9.1	締固め特性 (Ca 型化率 50%ベントナイト)	31
表-1.9.2	締固め特性 (Na 型ベントナイト)	31

表-1.9.3	締固め特性 (Ca 型化率 100%ベントナイト)	32
表-1.9.4	締固め試験結果 (Ca 型化率 50%ベントナイト)	32
表-1.10.1	供試体の諸元	38
表-1.10.2	拘束圧付与過程における観測結果	40
表-1.10.3	試験から得られた二次圧密係数・初期体積ひずみ速度	43
表-1.10.4	試験供試体の B 値、飽和度	44
表-1.10.5	試験から得られた変形係数 E_{50}	47
表-1.10.6	試験から得られた初期ポアソン比 ν_0	48
表-1.11.1	供試体の諸元	56
表-1.11.2	ベントナイトの圧密特性	61
表-1.12.1	水平応力測定用圧密リングの寸法	67
表-1.12.2	供試体の諸元	68
表-1.12.3	ベントナイトの圧密特性 (等方圧密除荷時)	70
表-1.12.4	ベントナイトの圧密特性 (K_0 圧密除荷時)	70
表-1.13.1	透水試験の試験ケース	71
表-1.13.2	供試体の諸元	71
表-1.13.3	透水試験の結果	73
表-1.14.1	膨潤圧試験の試験ケース	75
表-1.14.2	供試体の諸元	77
表-1.14.3	膨潤圧試験結果	77
表-1.14.4	膨潤圧試験の結果 (Na 型ベントナイト、昨年度実施)	78
表-1.15.1	膨潤量試験のケース	81
表-1.15.2	供試体の諸元	83
表-1.15.3	膨潤量試験結果	83
表-1.15.4	膨潤量試験結果 (Na 型、昨年度実施)	84

2. ベントナイト系材料の力学的変遷のモデル化のための調査

表-2.2.1	モデル化の分類	89
表-2.6.1	三軸 $\overline{CU}$ 試験結果の解釈	107
表-2.7.1	近似から得られた係数 A、B (間隙比～透水係数の関係)	109

表・2.8.1	モデル化の分類	111
表・2.9.1	飽和終了時のタングステン球の座標	123
表・2.9.2	飽和終了時および膨潤終了時のタングステンターゲットの座標の比較	128

おわりに

表－1	取得諸量	133
-----	------------	-----

実験状況等写真

1. ベントナイト材料の力学的変遷のモデル化のためのデータ取得

写真-1.3.1	Ca 型化ベントナイト作製（塩化カルシウム溶液の調製）	付-2(139)
写真-1.3.2	Ca 型化ベントナイト作製（塩化カルシウム）	付-2(139)
写真-1.3.3	Ca 型化ベントナイト作製（攪拌混合）	付-2(139)
写真-1.3.4	Ca 型化ベントナイト作製（吸引ろ過）	付-3(140)
写真-1.3.5	Ca 型化ベントナイト作製（ケーキの粗砕）	付-3(140)
写真-1.3.6	Ca 型化ベントナイト作製（粉碎）	付-3(140)
写真-1.3.7	Ca 型化ベントナイト作製（粉碎後ベントナイト）	付-4(141)
写真-1.5.1	粒度試験（試験状況 1）	付-5(142)
写真-1.5.2	粒度試験（試験状況 2）	付-5(142)
写真-1.6.1	土粒子の密度試験（試料計量）	付-6(143)
写真-1.6.2	土粒子の密度試験（脱気）	付-6(143)
写真-1.6.3	土粒子の密度試験（試験後）	付-6(143)
写真-1.8.1	液塑性限界試験（試料調製）	付-7(144)
写真-1.8.2	液塑性限界試験（液性限界試験状況）	付-7(144)
写真-1.8.3	液塑性限界試験（塑性限界試験状況 1）	付-7(144)
写真-1.8.4	液塑性限界試験（塑性限界試験状況 2）	付-8(145)
写真-1.9.1	締固め試験（試料投入）	付-9(146)
写真-1.9.2	締固め試験（締固め状況）	付-9(146)
写真-1.9.3	締固め試験（端面成形後）	付-9(146)
写真-1.9.4	締固め試験（締固め供試体）	付-10(147)
写真-1.10.1	三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（締固め治具）	付-11(148)
写真-1.10.2	三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（締固め状況）	付-11(148)
写真-1.10.3	三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（飽和セル、セット状況 1）	付-11(148)
写真-1.10.4	三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（飽和セル、セット状況 2）	付-12(149)
写真-1.10.5	三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（飽和セル、セット状況 3）	付-12(149)
写真-1.10.6	三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（飽和セル、セット後）	付-12(149)
写真-1.11.1	高圧圧密試験装置	付-13(150)

写真-1.11.2	高圧圧密試験（締固め状況）	付-13(150)
写真-1.11.3	高圧圧密試験（締固め後）	付-13(150)
写真-1.11.4	高圧圧密試験（供試体寸法計測）	付-14(151)
写真-1.11.5	高圧圧密試験（試験状況）	付-14(151)
写真-1.11.6	超高圧圧密試験（試験状況）	付-14(151)
写真-1.12.1	K0 圧密除荷試験（圧密リング）	付-15(152)
写真-1.12.2	K0 圧密除荷試験（水平土圧計測機構、間隙水圧計）	付-15(152)
写真-1.12.3	K0 圧密除荷試験（締固め準備）	付-15(152)
写真-1.12.4	K0 圧密除荷試験（飽和過程）	付-16(153)
写真-1.13.1	透水試験（締固め容器）	付-17(154)
写真-1.13.2	透水試験（締固め状況）	付-17(154)
写真-1.13.3	透水試験（締固め後供試体）	付-17(154)
写真-1.13.4	透水試験（試験状況）	付-18(155)
写真-1.14.1	膨潤圧試験（締固め状況）	付-19(156)
写真-1.14.2	膨潤圧試験（試験状況）	付-19(156)
写真-1.15.1	膨潤量試験（締固め状況 1）	付-20(157)
写真-1.15.2	膨潤量試験（締固め状況 2）	付-20(157)
写真-1.15.3	膨潤量試験（飽和過程）	付-20(157)
写真-1.15.4	膨潤量試験（試験中）	付-21(158)

2. ベントナイト系材料の力学的変遷のモデル化のための調査

写真-2.9.1	積層ベントナイト検証試験（供試体締固め）	付-22(159)
写真-2.9.2	積層ベントナイト検証試験（供試体設置）	付-22(159)
写真-2.9.3	積層ベントナイト検証試験（試験状況）	付-22(159)
写真-2.9.4	供試体状況（飽和過程）	付-23(160)
写真-2.9.5	飽和終了時の X 線撮影写真	付-23(160)
写真-2.9.6	膨潤時の供試体(1)	付-24(161)
写真-2.9.7	膨潤時の供試体(2)	付-24(161)
写真-2.9.8	膨潤完了時の X 線撮影写真	付-24(161)

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¹⁾。その中で、長期的な被曝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（地層処分なら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、バリア材料の劣化による透水係数の把握の重要性が示された²⁾。よって今後、処分システム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、吸着等の核種の移行に係る現象／パラメータを精度よく収集することに加えて、セメント系材料からの浸出液や硝酸塩による各バリア材料の化学的変遷と化学的変質に起因した各バリア材料の透水係数や力学的特性の変遷を定量的に把握するとともに、これら処分場全体の変遷挙動をふまえたニアフィールドの水理場の長期的な変遷評価を可能とするシステムの開発が必要である。バリア材料の変遷挙動を考慮したニアフィールドの水理場の長期的変遷評価システムの開発に必要と考えられる研究項目を図-1 に示す。

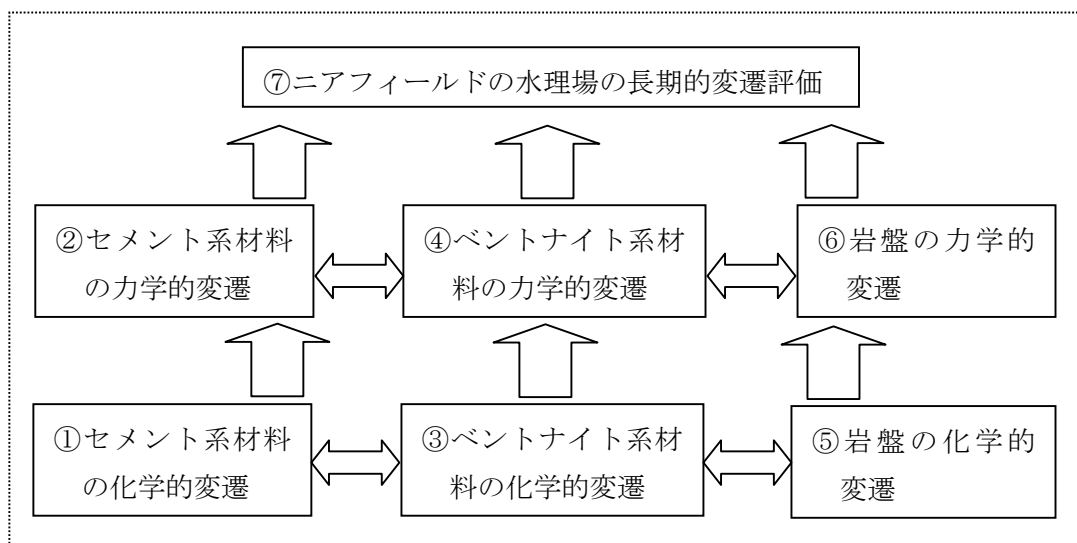
本研究は、図-1の④に相当し、平成13年度より4ヵ年計画で開始したものである。本研究の目的は、セメント系材料からの浸出液によって変質したベントナイト系材料の力学的変遷に関するデータ取得およびモデル化に関する検討を行い、その結果を別途実施している「ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システムの構築」の研究に反映させることである。この目的を達成するためには、現状の処分概念では避けられない現象であるベントナイトのCa型化および体積変化（膨潤）に着目した以下の検討が必要である。

(1) ベントナイトの力学的変遷のモデル化に向けた、Ca 型化率および膨潤率に応じた力学特性（強度、透水性等）の取得

(2) Ca 化および膨潤を考慮したベントナイト力学的変遷モデルの検証試験の実施

昨年度は、Ca 型化率 0%(Na 型)および Ca 型化率 100%のベントナイトについて、異なる膨潤状態で物理・力学試験を行い、膨潤率(間隙比)と力学特性との関係の定式化に反映できるデータを取得した。

本年度は、昨年度別途実施した研究により、ベントナイトの膨潤挙動を考慮した力学挙動変遷モデルは関口・太田モデルを基本に構築すると見通しが示されたことを踏まえ、Ca型化率50%のベントナイトを膨潤させて物理・力学試験を行うほか、Ca型化率0%および100%についても追加確認試験を行い、Ca型化率および膨潤率と力学特性との関係式の精度向上に反映させた。また、力学的変遷モデル検証試験のベンチマークとなる膨潤試験を実施した。



図ー1 ニアフィールドの水理場の長期的変遷評価システムの開発に必要な研究項目

1. ベントナイト材料の力学的変遷のモデル化のためのデータ取得

1.1 試験項目と目的

ニアフィールド水理場の長期的変遷挙動を評価するためには、バリア材料の透水係数把握の重要性が指摘された。想定される期間内においてベントナイトの透水係数に影響を及ぼしうる現象として、ベントナイトの劣化と変形に伴う密度低下を挙げることができる。

ベントナイト系材料の劣化機構としては、陽イオン交換、モンモリロナイトなどの初生鉱物の溶解、そして CSH やゼオライトといった二次鉱物の沈殿が挙げられる。従来の知見によれば、陽イオン交換の現象の一つであるベントナイトの Ca 型化は、現状の処分概念では避けられない現象であり、既往の研究³⁾で指摘されているようにベントナイトが Ca 型化することで透水係数に変化が発生する場合、処分施設の設計に際して、Ca 型化に対する何らかの配慮が必要である。また、TRU 廃棄物処分施設内には、廃棄体の体積減少やセメント成分の溶出に伴う空隙発生が想定される。これらの空隙を緩衝材（ベントナイト）の膨潤によって閉塞することを考える場合、ベントナイトの膨潤に伴うベントナイトの密度の低下、すなわち透水性の増大によって、あるいは十分な膨潤が得られないことによる空隙の不完全閉塞によって、ベントナイト中での拡散支配が担保されない恐れがある。ニアフィールド水理場の長期的変遷挙動の評価に際しては少なくとも上に挙げた二つの現象、すなわちベントナイトの変質（Ca 型化）並びにベントナイトの変形による透水係数の変遷を考慮する必要がある。ここで変形に伴う透水係数の変遷評価に対しては、既往の土水連成地盤変形解析の適用が現実的な手段として挙げられる。

数ある地盤変形解析手法の中で最も適用実績の多い有限要素法では、土質材料の力学特性は構成方程式によって表現される。しかしながらベントナイトの代表的な特性の一つである膨潤挙動を合理的に評価できる構成方程式は現状で見当たらず、ニアフィールド水理場の長期的変遷挙動評価のためには、ベントナイトの膨潤挙動を評価できるモデルの構築が必要である。昨年度は、ベントナイトの膨潤挙動のモデル化に供する既存モデルの絞り込み段階で試験を実施したが、ここでは、限界状態理論⁴⁾に基づくモデルに供することが可能なデータ取得を行った。具体的には、Ca 型化率 0%(Na 型)および Ca 型化率 100%のベントナイトについて、異なる膨潤状態で物理・力学試験を行い、膨潤率(間隙比)と力学特性との関係の定式化に反映できるデータを取得した⁵⁾。また、昨年度別途実施した研究⁶⁾によって、ベントナイトの膨潤挙動を考慮した力学挙動変遷モデルは関口・太田モデル⁷⁾を基本に構築するとの見通しが示されたことを踏まえ、関口・太田モデルに必要な一連の物理・力学試験（表-1.1.1）を実施し、ベントナイトの膨潤挙動の詳細な調査ならびに膨潤に伴う力学性能の変化の把握を行うこととした。具体的には、Ca 型化率 50%のベントナイトを膨潤させて物理・力学試験を行うほか、Ca 型化率 0%および 100%についても追加確認試験を行い、Ca 型化率および膨潤率と力学特性との関係式の精度向上に反映させる。また、力学的変遷モデル検証試験のベンチマークとなる膨潤試験を実施する。

本年度の試験研究においても主たるパラメータは供試体の膨潤率であり、膨潤率がベント

ナイトの水理・力学物性（表-1.1.2）に及ぼす影響の定量的評価、ならびにベントナイトの膨潤挙動の土質力学体系の枠内でのモデル化を試みるものとした。今年度Ca型化率50%のベントナイトの各種試験を行うことで、ベントナイトの変質（Ca型化）に伴う物性の変化についての定量的把握を行い、解析システムへフィードバックするためのデータを取得が可能となる。ここで実施したそれぞれの試験の目的・モデル化の反映先・取得データの用途を表-1.1.3に示す。なお、試験では核燃料サイクル開発機構殿が支給するクニミネ工業（株）製クニゲルV1単体を使用した。

表-1.1.1 分析・試験項目

	数量	内 訳
成分分析	3	Ca 型化率 50% : 3 回
粒度試験	3	〃
比重試験	3	〃
含水比試験	3	〃
液性塑性限界試験	3	〃
締固め試験	3	〃
三軸 $\overline{CU}$ 試験	12	Ca 型化率 50% : 初期膨潤率 0%、圧密圧力(3) × 2 回 Ca 型化率 100% : 初期膨潤率 0%、圧密圧力(3) × 2 回
高圧圧密試験	14	Ca 型化率 50% : 応力経路(4) × 2 回 + 超高圧圧密 × 2 回 Ca 型化率 0%(Na 型) : 超高圧圧密 × 2 回 Ca 型化率 100% : 超高圧圧密 × 2 回
等方圧密除荷試験	2	Ca 型化率 0%(Na 型) : 初期膨潤率 0%、2 回
K ₀ 圧密除荷試験	2	〃
透水試験	8	Ca 型化率 50% : 初期膨潤率(3) × 2 回 Ca 型化率 100% : 初期膨潤率 40% × 2 回
膨潤圧試験	10	Ca 型化率 50% : 初期膨潤率(3) × 2 回 Ca 型化率 100% : 初期膨潤率 10%、40% × 2 回
膨潤量試験	8	Ca 型化率 50% : 初期膨潤率(3) × 2 回 Ca 型化率 100% : 初期膨潤率 40%(1) × 2 回
積層ベントナイト 膨潤試験	1	Ca 型化率 0%(Na 型) : 初期膨潤率(1) × 1 回
合計数量	75	

表-1.1.2 取得諸量

	取 得 諸 量
成分分析	ベントナイトの Ca 型化率、他
粒度試験	粒径加積曲線、有効径(D_{10})、他
比重試験	比重(G_s)
含水比試験	含水比(ω)
液性塑性限界試験	液性限界(ω_L)、塑性限界(ω_p)、コンシステンシー指数 (I_c) 他
締固め試験	最大乾燥密度(ρ_{dmax})、最適含水比(ω_{opt})、他
三軸 $\overline{CU}$ 試験	限界状態パラメータ(M)、変形係数(E_{50})、他
高圧圧密試験	圧縮指数(C_c)、圧密降伏応力(P_c)、他
等方圧密除荷試験	圧縮指数(C_c)、膨潤指数 (C_s) 圧密降伏応力(P_c)、他
K_0 圧密除荷試験	K_0 値、圧縮指数(C_c)、膨潤指数 (C_s) 圧密降伏応力(P_c)、他
透水試験	飽和試料の透水係数(k)
膨潤圧試験	膨潤圧
膨潤量試験	膨潤量
積層ベントナイト膨潤試験	Ca 型化フロントを有するベントナイトの膨潤挙動 ^{注1}

注1) 本年度は Na 型ベントナイトのみを用いて実施する。また、Ca 型化率の異なるベントナイトと積層した時の比較用データを得る。

表-1.1.3 取得物性の用途・反映先

項目	目的・用途	反映先（検討内容）
成分分析	・変質度（Ca型化率）の定量的把握	化学解析と力学解析のインターフェイス ¹ パラメータ取得
粒度試験	・各試験結果をもとに、供試体作製方法・条件を設定する（比重・含水比）。 ・結果を既往データと比較し、使用材料の一般性（或いは特殊性）を確認する（粒度・液塑性限界・締固め）。 ・水理・力学特性の考察に供する基礎データの取得。	比重・含水比は、試験結果の整理に必須 ¹ 。
比重試験		
含水比試験		
液塑性限界試験		
締固め試験		
三軸 $\overline{CU}$ 試験	・せん断時の変形特性の把握（変形係数、ポアソン比）。 ・破壊包絡線、降伏曲面を決定するパラメータを取得する。 ・等方圧密時の圧密挙動把握 ・変質・変形に伴うせん断特性（変形係数・降伏曲面など）の変化を定量的に把握する。	変形係数 ² 、ポアソン比 ³ 限界状態パラメータ M ⁴ 二次圧密係数 α ⁵
高压圧密試験	・圧密・膨潤時の変形特性の把握。 ・土質力学的概念によるベントナイトの膨潤メカニズムの解明	正規圧密線、膨潤線の形状の調査 C_c 、 C_s の取得 ⁴
等方圧密除荷試験	・除荷中の応力状態を把握（ K_0 圧密除荷試験と比較）	膨潤指数 κ ² 、体積弾性係数 K ²
K_0 圧密除荷試験	・除荷中の応力状態を把握（等方圧密除荷試験と比較） ・初期応力状態の把握	膨潤指数 κ ² 、体積弾性係数 K ² K_0 値 ⁴
透水試験	・変質・変形に伴う水理性能（透水係数）変化を定量的に把握する。	膨潤率、Ca型化率～透水係数関係取得 化学解析と力学解析のインターフェイス ¹ パラメータ取得
膨潤圧試験	・変質・変形に伴う膨潤特性変化を定量的に把握する。	膨潤率、Ca型化率～膨潤圧関係取得 ²
膨潤量試験	・土質力学的概念によるベントナイトの膨潤メカニズムの解明	膨潤率、Ca型化率～膨潤量関係取得 ²
積層ベントナイト膨潤試験	・膨潤時の応力状態を把握 ・局所的な膨潤挙動の観察	モデル構築後のベンチマーク

1 例えば間隙比の算出には土粒子比重が必要である。

2 弾性解析などに適用可能なパラメータ

3 全ての変形解析に必要なパラメータ

4 Cam-Clayモデル、関口・太田モデル（弾塑性・弾粘塑性）に必要なパラメータ

5 関口・太田の弾粘塑性モデルに必要なパラメータ

1.2 試験条件

1.2.1 配合

表-1.1.1 に示した試験では、Na 型ベントナイトおよび Na 型ベントナイトを強制的に Ca 型化させた（Ca 型化の方法については「1.3.1 項 使用材料」を参照のこと）Ca 型化ベントナイトを、それぞれ単体で用いた。Ca 型化率はそれぞれ 0（Na 型）、50、100%である。

1.2.2 乾燥密度

表-1.1.1 に示した試験のうち、三軸 $\overline{CU}$ 試験、等方圧密除荷試験、 K_0 圧密除荷試験、積層ベントナイト膨潤試験では、自然含水状態の粉末状のベントナイトを、所定寸法下で乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{Mg/m}^3$ となるよう、電動式ジャッキによって静的に締固めて作製した供試体を用いた。

1.2.3 膨潤率

昨年度実施した三軸 $\overline{CU}$ 試験、高圧圧密試験、透水試験、膨潤圧試験、膨潤量試験では、処分施設の長期的挙動の評価には、初期状態から膨潤過程を経たベントナイトの水理・力学的性能が必要となるという観点から、1.2.2 で述べた方法と同様に、乾燥密度 ρ_d が 1.6Mg/m^3 になるように静的に締固め、その後、所定の膨潤率まで膨潤させ、なおかつ均一化した後に試験を行った。ここでいう膨潤率とは、膨潤によって生ずる体積ひずみ ε_v を百分率標記したもので、例えば膨潤によって膨潤前の 1.2 倍の体積となった供試体の膨潤率は 20%ということである。昨年度実施した試験の初期膨潤率を表-1.2.1 に示す。この膨潤率は図-1.2.1 に示す放射性廃棄物処分施設を想定して、実際に要求されると予想される膨潤性能から膨潤率を設定したものである。

表-1.2.1 試験を実施したベントナイトの初期膨潤率⁵⁾

ベントナイト	初期膨潤率（各 3 水準）
Na 型ベントナイト	0%、20%、40%
Ca 型化ベントナイト	0%、5%、10%

しかしながら、ベントナイトのモデル化という観点から考えれば、表 1.1.1 に示した各種力学試験を膨潤後に行うことはいたずらに複雑な応力履歴を与えることになり、実験結果の解釈、モデル化への反映を複雑にする恐れがある。昨年度の試験結果⁵⁾から、所定の間隙比におけるベントナイトの力学・水理・膨潤性能は初期膨潤率の差を受けないとの知見が得られた。そこで、表-1.1.1 に示した試験のうち、高圧圧密試験（最大膨潤率相当のケースを除く）、透水試験、膨潤圧試験、膨潤量試験では、昨年度の供試体乾燥密度 1.6Mg/m^3 に相当する間隙比 e_1 、所定の膨潤率 $\alpha (\times 100\%)$ (表-1.1.1) と等価な間隙比を静的締固めにより設定し、初期間隙比 e_0 とすることとした(図-1.2.2)。この方法では応力履歴が単純であり、さらに昨年度の方法では現実的な試験期間内では実施が困難であった初期膨潤率 10%を超

える Ca 型化率 100%ベントナイトの供試体も短期間で作成が可能になる。

ここで、ある乾燥密度 γ_d の地盤材料の間隙比 e は、次式で与えられる。

$$e = \frac{\gamma_w G_s}{\gamma_d} - 1 \quad (1.2.1)$$

ただし、 γ_w は水の単位体積重量、 G_s はベントナイトの土粒子の比重であり Ca 型化率によって異なる。さらに、乾燥密度 γ_d が 1.6Mg/m^3 のベントナイトの間隙比が e_1 の場合、膨潤履歴を付与した供試体の初期間隙比 e_0 と膨潤率 α ($\times 100\%$) の関係は、式(1.2.2)で与えられる。

$$e_0 = e_1 + \alpha(1 + e_1) \quad (1.2.2)$$

本年度は、表-1.2.2 に示す膨潤率に相当する間隙比を初期間隙比とした。但し、高圧圧密試験の最大膨潤率相当の間隙比から圧密を行うケース(表-1.2.2 中、full の標記)に関しては、静的締固めによって供試体を作成することが困難であるため、1.3.2 (2)で述べるように、乾燥密度 1.6Mg/m^3 に締固めた供試体に吸水膨潤を生じさせて作成した。

表-1.2.2 試験を実施するベントナイトの初期膨潤率

	試験項目	Ca 型化率(%)	初期膨潤率(%)
1	三軸 $\overline{CU}$ 試験	50 100	0 ² 0 ²
1	高圧圧密試験	0 50 100	40 0 ² 、20、40、full* ³ 40
1	等方圧密除荷試験	0	0 ²
1	K ₀ 圧密除荷試験	0	0 ²
1	透水試験	50 100	0 ² 、20、40 40
1	膨潤圧試験	50 100	0 ² 、20、40 10、40
1	膨潤量試験	50 100	0 ² 、20、40 40
1	積層ベントナイト膨潤試験	0	0 ²

1 表-1.1.1 の番号に対応。

2 膨潤率 0%は乾燥密度 1.6Mg/m^3 相当の間隙比を指す。

3 最大膨潤率まで供試体に自己膨潤を生じさせた後に圧密試験を実施する。

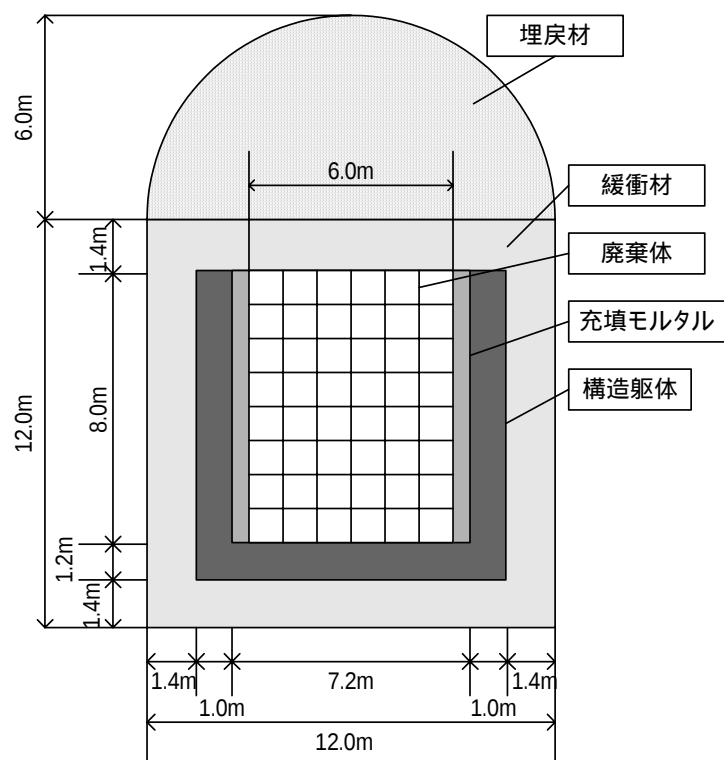


図-1.2.1 想定した処分施設の断面

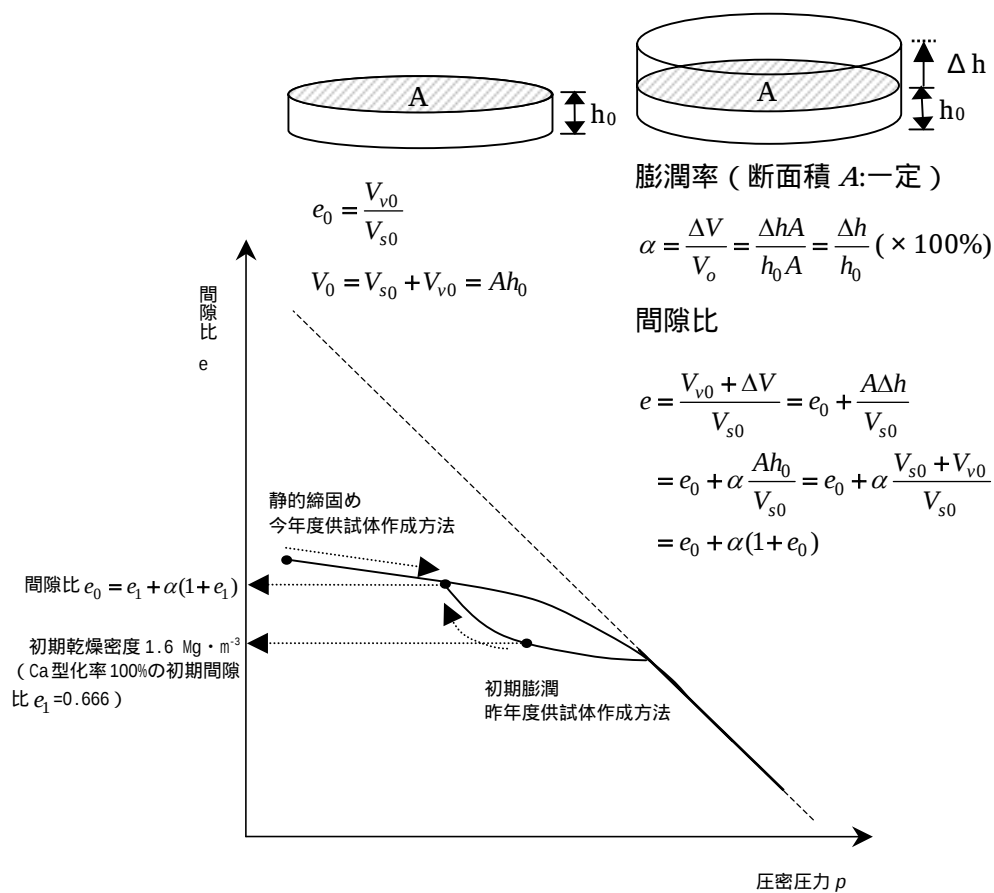


図-1.2.2 静的締固めによる供試体作成

1.2.4 三軸 $\overline{CU}$ 試験における拘束圧

三軸 $\overline{CU}$ 試験は、飽和したベントナイトの非排水せん断時の挙動を把握することを目的としている。緩衝材のせん断挙動は、せん断時に供試体が過圧密状態、あるいは正規圧密状態にあるかで変化する。三軸 $\overline{CU}$ 試験の目的の一つは、限界状態パラメータ M の決定であるが、これを正確に決定するためには、せん断初期から弾塑性挙動を示す正規圧密状態におけるせん断試験を数多く実施しておく必要がある。表-1.1.1 に示したように、本検討では 1 条件につき 3 水準の拘束圧で試験を実施することから、原則として拘束圧は、(過圧密 1、正規圧密 2) となるように設定した。供試体の圧密履歴は、一般に先行圧密圧力と過圧密比 OCR で表される。先行圧密圧力とは供試体が、過去に受けた最大の圧密圧力を指す。一般に締固め土は過圧密状態にあると考えられており、締固めエネルギーに応じた先行圧密圧力を有する場合が多い。過圧密比 OCR は先行時の圧密圧力と現在の圧密圧力 (拘束圧) の比で表され、以下のようにして、その圧密履歴が判定される。

OCR > 1.0 : 過圧密

OCR = 1.0 : 正規圧密

OCR : 過圧密比 (= 先行圧密圧力 / 圧密圧力 (拘束圧))

ベントナイトの圧密履歴は、先行圧密圧力の他に (平衡) 膨潤圧の影響を強く受けるものと推測される。以上のことから表-1.2.3、1.2.4 に示す既往データと昨年度の結果を参考に、三軸 $\overline{CU}$ 試験を実施する拘束圧を表-1.2.5 に示すように決定した。なお、拘束圧の最大値は 5.0MPa としたが、既往の研究^{7)・10)}において試験が実施されていない応力レベルでの試験結果を得ることを考慮したためである。さらに、昨年度は拘束圧ごとに膨潤率を変化させた試験を行っていたが、拘束圧の変化によってせん断初期の間隙比が変化するため、膨潤率を変化させることと同様の結果が得られることが昨年度の試験結果で確認されたことから、本年度は膨潤率を変化させた試験は行わず初期乾燥密度を変化させて試験に供することとした。

表-1.2.3 ベントナイト単体に関する既往のデータ

ベントナイト	先行圧密圧力 p_c'	膨潤圧	せん断時挙動
Na 型	1.5 MPa ⁸⁾ 0.77 ~ 0.94MPa ⁹⁾	0.8 ~ 2.0MPa ⁸⁾ 0.2 ~ 0.5MPa ¹⁰⁾	$\sigma_c=1.0\text{MPa}$ で過圧密挙動 ⁸⁾
Ca 型化	既往データなし	1.0MPa 程度 ¹¹⁾	$\sigma_c=0.5 \sim 1.0\text{MPa}$ で過圧密挙動 ¹²⁾

表-1.2.4 ベントナイト単体に関する昨年度のデータ⁵⁾

ベントナイト	先行圧密圧力 p_c'	膨潤圧	せん断時挙動
Na 型	0.03 ~ 3.13 MPa	0.119 ~ 2.03MPa	$\sigma_c=1.0\text{MPa}$ で過圧密挙動
Ca 型化	0.013 ~ 5.45 MPa	0.223 ~ 2.55MPa	拘束圧に依らず軽 ~ 重過圧密挙動

表-1.2.5 三軸 $\overline{CU}$ 試験を実施する拘束圧 σ_c

Ca 型化率(%)	膨潤率(%)	拘束圧 σ_c (MPa)
50	拘束圧を変化させることで、せん断初期の間隙比を変化させる	1.0 (過圧密) 3.0、5.0 (正規圧密)
100		0.5 (過圧密) 3.0、5.0 (正規圧密)

1.3 使用材料と供試体作製方法

1.3.1 使用材料

(1) Na 型ベントナイト

本検討で使用したベントナイトは、核燃料サイクル機構殿から支給されたクニミネ工業(株)製のクニゲル V1 (ロット No.304464) で既往の研究⁵⁾で使用したのと同じロットのものである。表-1.3.1 にクニミネ工業(株)が実施した品質試験の結果を示す。

表-1.3.1 使用したベントナイトの品質試験結果⁵⁾

試験項目	試験結果
水分(%)	6.4
粒度(%/-250M)	97.6
膨潤力(ml/2g)	20
pH	10.0
見掛比重	0.66

(2) Ca 型化ベントナイト

本検討で使用した Ca 型化ベントナイトは、上述の Na 型ベントナイト (クニゲル V1) を下記の方法で強制的に Ca 型化させたものである。Ca 型化率 100%のベントナイト作成方法は昨年度⁵⁾と同様であるが、Ca 型化率 50%のベントナイトは、支給された Na 型ベントナイト (クニゲル V1) を下記の方法で作成した。

ベントナイトの陽イオン交換容量 (C.E.C. : Cation Exchange Capacity) の 50% に相当する Ca^{2+} イオンを含む溶液 A を蒸留水と塩化カルシウム (CaCl_2) を用いて作成する。

溶液 A をベントナイト粉末に添加し、泥水状のベントナイト (ベントナイトスラリー) を作製する。作製時の攪拌を 30 ~ 40 分継続した後、ベントナイトの Ca 型化が確実に生ずるようスラリーを 24 時間静置する。

静置後のベントナイトスラリーに対し、図-1.3.1 に示す装置を用いてイオン交換水を絶えず通水させ、間隙中に残存しているベントナイトから溶出した Na^+ イオンおよび Cl^- イオンを洗浄する。

までの過程を終了したベントナイトを 60 ℃ で乾燥させる (低温乾燥)。

乾燥したベントナイトを粉砕して粉末化し、Ca 型化率 50%ベントナイトとして使用する。

処分施設の成立性で問題とされているベントナイトの Ca 型化は、構造躯体などに使用されるセメント系材料から溶出する Ca^{2+} イオンがベントナイト中の Na^+ イオンを置換する現象とされている。一般にセメント系材料近傍は高 pH 環境であり、セメント材料から溶出する Ca^{2+} イオンは水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 水溶液の形をとるものと考えられている。

従って実現象を忠実に模擬しようとする場合、水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を用いてベントナイトを Ca 型化させることが望ましいが、水酸化カルシウム水溶液は、空気との接触によって水への溶解度が極端に低い炭酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) を生成する。ここで生成した炭酸カルシウム ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) によってベントナイトの成分組成が変化することを回避するために、本検討では、ベントナイトの Ca 型化に塩化カルシウム (CaCl_2) 水溶液を用いることとした。一方、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトは特定の高温条件で変質することが指摘されており、この温度条件の一つは $150 \sim 200^\circ\text{C}$ (層間水の脱水反応) とされている¹³⁾。よって高温条件下におけるベントナイトの変質の回避と、乾燥の効率化を考慮し、Ca 型化ベントナイトの乾燥は 60°C で実施することとした。

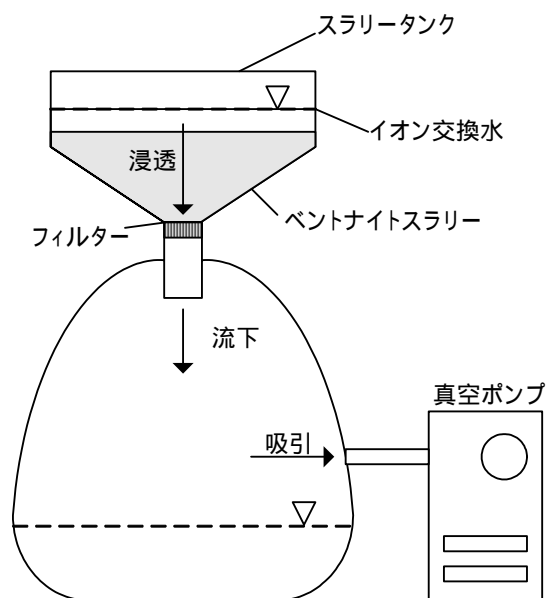


図-1.3.1 Ca 型化ベントナイト洗浄装置の模式図

1.3.2 供試体の作製方法

(1) 静的締固めによる供試体の作製

高圧圧密試験、 K_0 圧密除荷試験、透水試験、膨潤圧試験、膨潤量試験、積層ベントナイト膨潤試験で用いる試験装置は、すべてリング状であり、供試体の半径方向の変位を許容しない構造となっている。仮に供試体を試験装置リングの外部で作製し、これを改めて試験装置内に設置する場合、リングと供試体の摩擦によって供試体側部に乱れを与える可能性が高い。よって上記の 6 試験のうち、積層ベントナイト膨潤試験を除く全ての試験で、試験装置内に投入した試料を静的に締固めて供試体を作製し、上下端を密閉して体積変化を完全に拘束した状態で、これに加圧給水して飽和させた。(積層ベントナイト膨潤試験に関しては、「2.9 節 積層ベントナイト膨潤試験」を参照。) 一方、三軸 $\overline{CU}$ 試験、等方圧密除荷試験に用いる供試体は、直径 50mm、高さ 100mm の円筒形であり、その他の試験供試体寸法(直径 40~60mm、高さ 5~20mm)と比較して大型である。仮に上下端を給排水条件としても排水距離が 50mm と他の試験供試体と比べて大きく、飽和により長期間を要すると推測された。これらを考慮し、三軸 $\overline{CU}$ 試験用供試体、等方圧密除荷試験用供試体は飽和用鋼製容器(鋼製飽和セル)内にこれを納め、供試体の体積変化を完全に拘束した状態で 3 方向(上下端および周面)から加圧給水して飽和させた。供試体に直接接触する透水性多孔体は二つ割りの構造を有しており、供試体を鋼製飽和セル内に挿入する際に、側部に乱れを与えることはない。

供試体の飽和方法の模式図を図-1.3.2 に示す。また、各試験の供試体寸法を表-1.3.2 に示す。

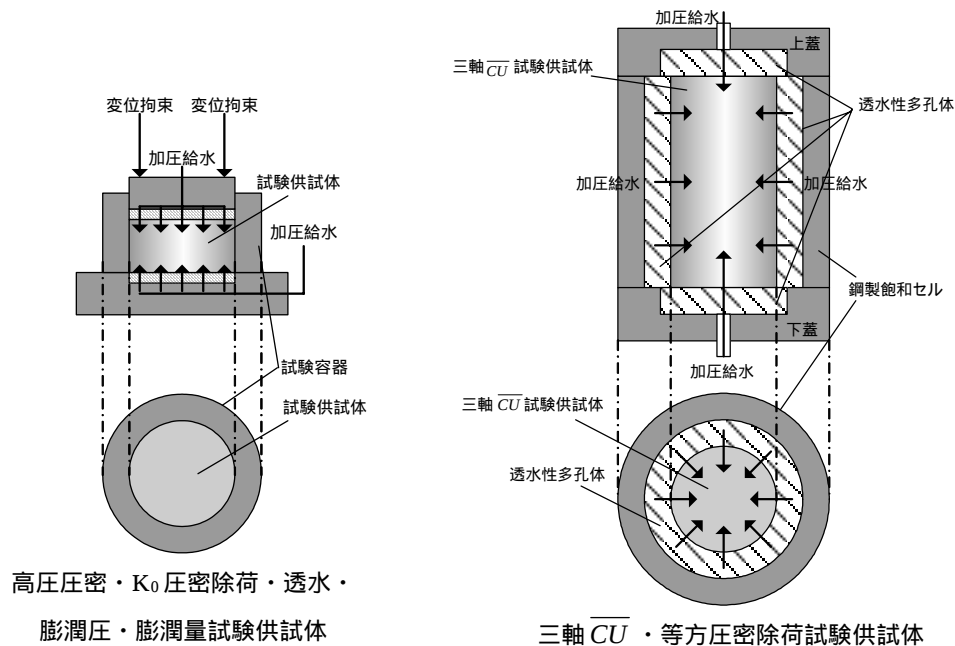


図-1.3.2 供試体の飽和方法

表-1.3.2 供試体の寸法一覧

試験名	Ca 型化率(%)	試験開始時供試体寸法(mm)
三軸 $\overline{CU}$ 試験	50	$\phi 50 \times h100$
	100	
高圧圧密試験	50	$\phi 60 \times h20$ 、 $\phi 30 \times h10$ (超高圧圧密試験)
	0(Na 型)	$\phi 30 \times h10$ (超高圧圧密試験)
	100	$\phi 30 \times h10$ (超高圧圧密試験)
等方圧密除荷試験	0(Na 型)	$\phi 50 \times h100$
K_0 圧密除荷試験	0(Na 型)	$\phi 60 \times h25$
透水試験	50	$\phi 40 \times h20$
	100	
膨潤圧試験	50	$\phi 40 \times h20$
	100	
膨潤量試験	50	$\phi 60 \times h5$
	100	
積層ベントナイト膨潤試験	0(Na 型)	$\phi 80 \times h30$

(2) 膨潤による供試体の作製

ここでは Ca 型化率 50%ベントナイトの高压圧密試験における最大膨潤率相当から圧密を行うケースの供試体作製方法について述べる。当試験で用いる最大膨潤率相当の間隙比を有する供試体は、前述の静的締固めによって作成することが困難であると予想されたため、昨年度⁵⁾と同様、所定の密度に締固めた試料に自己膨潤を生じさせて作成した。まず、試験容器内に撒き出した Ca 型化率 50%のベントナイト粉末を厚さ 6mm、乾燥密度 1.6Mg/m^3 となるように静的に締固めた後、体積変化を外部治具によって完全に拘束した上で給水・飽和させた。供試体上部からの排水を確認した時点で飽和が完了したと見なし、外部治具による拘束を解除して、供試体に膨潤変形を生じさせた。拘束解除直後から供試体に生じた膨潤変形量を計測し、計測値に変化が見られなくなった時点をもって膨潤完了と判断し、次いで高压圧密試験を行った。供試体の作成方法を図-1.3.3 に示す。

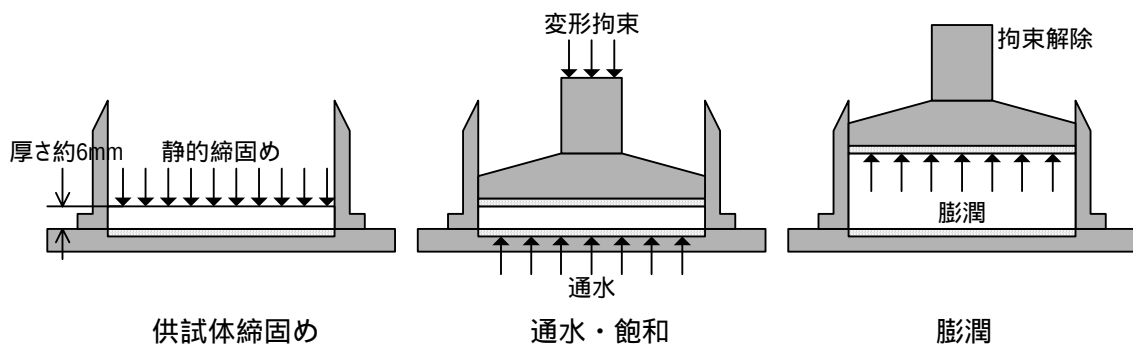


図-1.3.3 高压圧密試験の最大膨潤率相当供試体の作成方法

1.4 成分分析（交換性陽イオン量の測定）

1.4.1 計量方法

Na 型および Ca 型化ベントナイトの化学特性を調べるため、交換性陽イオン量の測定を行った。測定は、【土壤環境分析法第 7】¹⁴⁾に則り、1M 酢酸アンモニウム浸透液中の各イオン濃度（ Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ ）を定量した。

今回の計量対象は Ca 型化率 0% の Na 型ベントナイト、Ca 型化率 100% のベントナイト、ならびに Ca 型化率 50% のベントナイトである。ここで Ca 型化率 100% とは Na 型ベントナイトに含まれている Na^+ イオンが完全（あるいは完全に近い状態まで）に Ca^{2+} イオンに置換された状態を指す。

なお Ca^{2+} イオン含有率、Ca 型化率の定義は昨年度定義した次式によるものとする。

$$\text{Ca}^{2+}\text{イオン含有率} : \alpha_0 = \frac{\text{Ca}_{\text{int}}^{2+}}{\text{Ca}_{\text{int}}^{2+} + \text{Na}_{\text{int}}^+}, \quad \alpha_{100} = \frac{\text{Ca}_{\text{fin}}^{2+}}{\text{Ca}_{\text{fin}}^{2+} + \text{Na}_{\text{fin}}^+}, \quad \alpha = \frac{\text{Ca}^{2+}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+}$$

$$\text{Ca 型化率}(\%) = \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha_{100} - \alpha_0} \times 100 \quad (1.4.1)$$

ここで、

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

$\text{Ca}_{\text{fin}}^{2+}$: Ca 型化処理後のベントナイトに含まれる交換性 Ca^{2+} イオン総量 (meq/100g)

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

Na_{fin}^+ : Ca 型化処理後のベントナイトに含まれる交換性 Na^+ イオン総量 (meq/100g)

α_0 : Ca 型化率 0% と定義したベントナイト (Na 型ベントナイト) の Ca^{2+} イオン含有率

α_{100} : Ca 型化率 100% と定義したベントナイトの Ca^{2+} イオン含有率

α : ベントナイトの Ca^{2+} イオン含有率

図-1.4.1 に上式の模式図を示す。

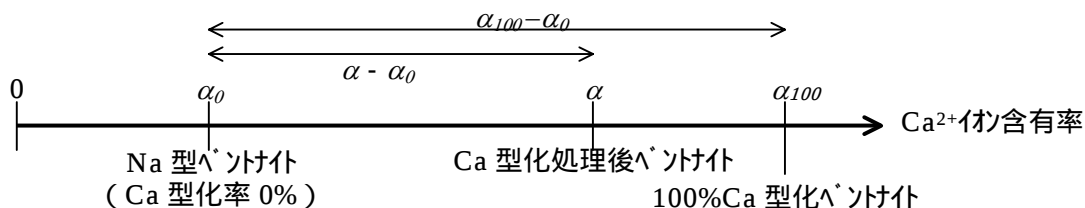


図-1.4.1 ベントナイトの Ca 型化率

1.4.2 計量結果

計量の結果を表-1.4.1 に示す。Ca 型化率 50%のベントナイトの場合、交換性陽イオン量の平均値は、 Ca^{2+} イオンが 66.4(meq/100g)、 Na^{+} イオンが 32.5(meq/100g)であった。昨年度用いた Na 型および Ca 型化率 100%ベントナイトの浸出陽イオン量の計量結果⁵⁾を表-1.4.2、1.4.3 に示す。表-1.4.1、と表-1.4.2、1.4.3 を比較すると、Ca 型化率 50%のベントナイトの Ca^{2+} イオン、 Na^{+} イオンがそれぞれ、Na 型ベントナイトと Ca 型化率 100%ベントナイトの中間に位置していることが確認された。式(1.4.1)に示す Ca 型化率を算出すると、その平均値は 49.2%であり、便宜上、このベントナイトを Ca 型化率 50%のベントナイトと呼称することとした。

表-1.4.1 浸出陽イオン計量結果 (50%Ca 型化ベントナイト)

試験項目 \ 材料		50%Ca 型化ベントナイト (50%Ca 型化クニゲル V1)			
		No.1	No.2	No.3	平均
浸出陽イオン (meq/100g)	Ca^{2+}	68.2	65.5	65.6	66.4
	Mg^{2+}	7.2	3.4	3.6	4.6
	K^{+}	1.6	2.2	2.1	2.0
	Na^{+}	30.6	34.6	32.4	32.5
α		0.690	0.654	0.669	0.671
Ca 型化率(%)		53.1	45.7	48.8	49.2

表-1.4.2 浸出陽イオン計量結果 (Na 型ベントナイト)⁵⁾

試験項目 \ 材料		Na 型ベントナイト (Na 型クニゲル V1)				2 次取りまとめ ⁸⁾
		No.1	No.2	No.3	平均	
浸出陽イオン (meq/100g)	Ca^{2+}	45.9	48.8	43.1	45.9	41.9
	Mg^{2+}	3.6	3.8	3.4	3.6	6.6
	K^{+}	2.3	1.8	1.8	2.0	1.3
	Na^{+}	63.6	55.8	63.0	60.8	54.6
α		—	—	—	0.43	0.43
Ca 型化率(%)		—	—	—	0	0

表-1.4.3 浸出陽イオン計量結果 (Ca 型率 100%ベントナイト)⁵⁾

試験項目 \ 材料		Ca 型化ベントナイト (Ca 型化クニゲル V1)				既往研究 ¹¹⁾
		No.1	No.2	No.3	平均	
浸出陽イオン (meq/100g)	Ca ²⁺	96.8	97.9	97.6	97.4	102.8
	Mg ²⁺	13.3	15.0	4.8	11.0	7.0
	K ⁺	1.4	1.5	1.6	1.5	1.4
	Na ⁺	9.6	7.9	7.5	8.3	5.2
α		—	—	—	0.92	0.95
Ca 型化率(%)		—	—	—	100	106

*Ca 型化率 100%を超えるが、本検討における値を 100%とした場合の数値であり、比較のために記載した。

1.5 粒度試験

1.5.1 試験方法

ベントナイトの粒度分布試験は沈降分析【JGS0131-2000：地盤工学会基準 土の粒度試験方法】¹⁵⁾に則り実施した。

1.5.2 試験結果

使用材料の粒度分布を表-1.5.1 に、粒径加積曲線を図-1.5.1 に示す。粒径区分（砂分：シルト分：粘土分）の平均値は、昨年度の結果から Ca 型化率 0%ベントナイトで（0.1：19.2：80.7）、Ca 型化率 100%ベントナイトで（0.2：23.7：76.1）であったのに対し、Ca 型化率 50%ベントナイトでは（0.0：12.8：87.2）であった。Ca 型化率 50%ベントナイトは、他のベントナイトと比べ、細粒分がやや多い傾向にあるが、粒度分布は概ね同様となった。土質分類法【JGS0051-2000：地盤工学会基準 地盤材料の工学的分類方法】によれば、Na 型および Ca 型化率 50、100%ベントナイトは、いずれも「粘土{CH}」に分類される。

試験結果から試料の粒度分布の良否の指標である均等係数 $U_c(=D_{60}/D_{10})$ 及び曲率係数 $U_c'(=D_{30}^2/D_{10} \cdot D_{60})$ と、試料の透水係数を表す指標である D_{20} の算出を試みた。しかし、粒径 0.0013mm 以下の細粒分の占める割合が大きく、沈降分析ではこの範囲の粒度分布の測定が不可能であったため、これらの値を得ることはできなかった。

表-1.5.1 粒度分布 (Ca 型化率 50%ベントナイト)

試験項目		材料	Ca 型化ベントナイト (Ca 型化クニゲル V1)			
		No.1	No.2	No.3	平均	
最大粒径 D _{max} (mm)		0.075	0.075	0.075	—	
粒度 組成	礫分(%)	0	0	0	0	
	砂分(%)	0	0	0	0	
	シルト分(%)	10.7	11.8	15.8	12.8	
	粘土分(%)	89.3	88.2	84.2	87.2	
	D ₁₀ (mm) ¹	—	—	—	—	
	D ₂₀ (mm) ¹	—	—	—	—	
	D ₃₀ (mm) ¹	—	—	—	—	
	D ₆₀ (mm) ¹	—	—	—	—	
	均等係数 Uc= D ₆₀ / D ₁₀	—	—	—	—	
	曲率係数 Uc'= D ₃₀ ² / D ₁₀ ・D ₆₀	—	—	—	—	

1 0.001mm 通過粒径が 60%を超過しているため、 D_{10} 、 D_{20} 、 D_{30} 、 D_{60} の同定は不可能であった。

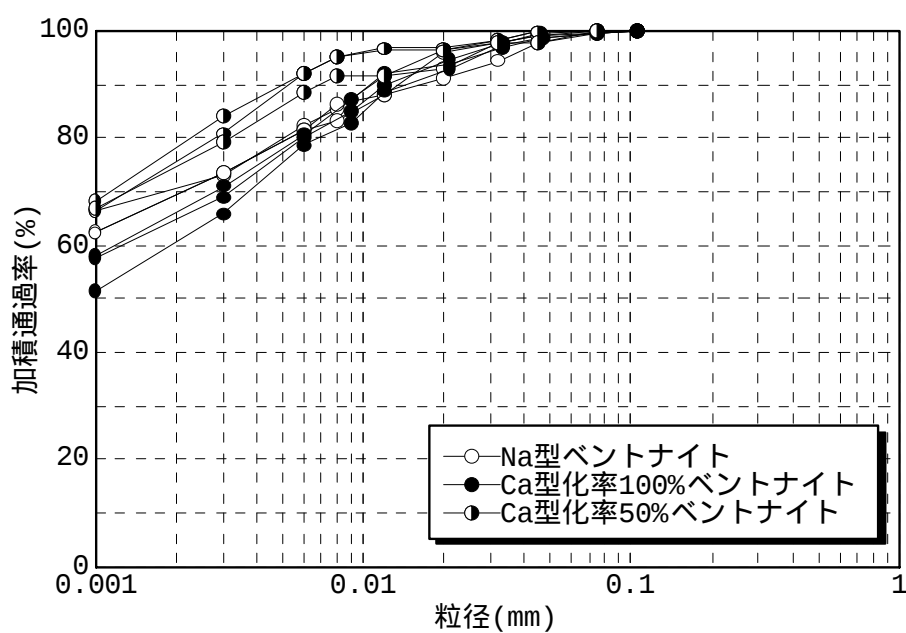


図-1.5.1 粒径加積曲線

1.6 比重試験

1.6.1 試験方法

ベントナイトの土粒子密度試験は、【JGS0111-2000：地盤工学会基準 土の粒度試験方法】¹⁵⁾に則り実施した。

1.6.2 試験結果

土粒子密度試験から得られた Ca 型化率 50%ベントナイトの土粒子密度 ρ_s を表-1.6.1(網かけした枠内)に示す。表-1.6.1 には、昨年度、得られた Na 型および Ca 型化率 100%ベントナイトの土粒子密度も併記した⁵⁾。土粒子密度は Ca 型化率 50%ベントナイトで 2.705 Mg/m³であるのに対し、Na 型ベントナイトで平均 2.733 Mg/m³、Ca 型化率 100%ベントナイトで平均 2.666Mg/m³であり、Ca 型化率 50%ベントナイトの土粒子比重が、Na 型ベントナイトと Ca 型化率 100%ベントナイトの中間の値をとることが確認された。ベントナイトの土粒子密度は、Ca 型化の進行に伴って低下する傾向にあることがわかった。

表-1.6.1 比重試験結果

材料		土粒子密度 ρ_s (Mg/m ³)
Na 型ベントナイト (昨年度結果 ⁵⁾)	No.1	2.733
	No.2	2.731
	No.3	2.734
	平均値	2.733
Ca 型化率 50% ベントナイト (本検討)	No.1	2.678
	No.2	2.719
	No.3	2.717
	平均値	2.705
Ca 型化率 100% ベントナイト (昨年度結果 ⁵⁾)	No.1	2.638
	No.2	2.691
	No.3	2.668
	平均値	2.666

1.7 含水比試験

1.7.1 試験方法

含水比試験では、透水試験、膨潤圧試験および膨潤量試験に用いる供試体の各試験前後の値を測定した。含水比測定は【JIS A 1203 土の含水比試験】¹³⁾に則り実施した。

1.7.2 試験結果

今年度実施したベントナイトの透水試験、膨潤圧試験および膨潤量試験を行った際の試験前後の含水比測定結果を表-1.7.1、4、7 に示す。ここでいう試験前の含水比とは試験供試体作成に用いたベントナイト粉末の含水比であり、試験後の含水比とは透水試験、膨潤圧試験、膨潤量試験など各試験の終了後、供試体を解体した際に計測した含水比である。さらに、参考として昨年度実施した Na 型ベントナイト及び Ca 型化率 100%ベントナイトの含水比試験結果⁵⁾を併せて示す。表-1.7.1～3 が透水試験、表-1.7.4～6 が膨潤圧試験、表-1.7.7～9 が膨潤量試験の各試験前後の含水比測定結果である。昨年度の結果に関しては、予備的に作成した供試体の含水比も併せて示した。表中の網かけした数値が、試験に使用した供試体の結果である。

透水試験および膨潤圧試験は試験前後の供試体の寸法が同じであるため、両試験における Ca 型化率 50%ベントナイトの実験後の含水比（表-1.7.1 と表-1.7.4 の比較）は概ね等しい。両試験の試験前の含水比は 2.5～4.8%程度に分布し、試験後は膨潤率が大きくなるに従って含水比も増加し、概ね 30～55%程度になった。

Ca 型化率 50%ベントナイトの膨潤量試験では、試験前の含水比は 3.1～4.5%の範囲にあった。試験後の含水比は 152～156%程度であった。

試験条件（供試体寸法）が同じであれば試験後の含水比は、土粒子密度、間隙比、透水性などによって決まると考えられる。さらに、膨潤量試験後の含水比には膨潤性能も大きく影響すると考えられる。Ca 型化率 50%ベントナイトの膨潤量試験後の含水比は、Na 型ベントナイトと Ca 型化率 100%ベントナイトの間の値を示しており、他の試験結果と照らし合わせても妥当だと思われる。

表-1.7.1 含水比試験（透水試験 Ca 型化率 50%ベントナイト）

試料 No. / 初期膨潤率		実験前			実験後		
		0%	20%	40%	0%	20%	40%
含水比 (%)	1	2.5	3.8	3.8	28.1	40.2	52.9
	2	2.5	3.8	3.8	27.4	41.4	52.3
	平均	2.5	3.8	3.8	27.8	40.8	52.6

表-1.7.2 含水比試験（透水試験 Na 型ベントナイト）⁵⁾

試料 No. / 初期膨潤率		実験前			実験後		
		0%	20%	40%	0%	20%	40%
含水比 (%)	1	7.0	7.0	7.0	27.9	44.2	57.6
	2	7.0	7.0	7.0	29.2	43.6	55.0
	3	7.0	7.0	7.0	28.7	43.5	53.9
	平均	7.0	7.0	7.0	28.6	43.8	55.5

1 網かけした数値が昨年度結果のうち、実際に試験に供した供試体を指す。

表-1.7.3 含水比試験（透水試験 Ca 型化率 100%ベントナイト）⁵⁾

試料 No. / 初期膨潤率		実験前				実験後			
		0%	5%	10%	40%	0%	5%	10%	40%
含水比 (%)	1	8.6	8.0	8.0	8.0	23.9	30.9	32.2	55.6
	2	8.6	8.0	8.0	8.0	23.6	35.9	33.2	55.4
	3	8.6	8.0	8.0	—	24.0	30.2	46.4	—
	平均	8.6	8.0	8.0	8.0	23.8	32.3	37.3	55.5

1 膨潤率 40%のみ本年度の結果

2 網かけした数値が昨年度結果のうち、実際に試験に供した供試体を指す。

表-1.7.4 含水比試験（膨潤圧試験 Ca 型化率 50%ベントナイト）

試料 No. / 初期膨潤率		実験前			実験後		
		0%	20%	40%	0%	20%	40%
含水比 (%)	1	4.8	3.8	3.8	29.9	40.8	53.7
	2	4.8	3.8	3.8	30.2	41.1	54.6
	平均	4.8	3.8	3.8	30.1	41.0	54.1

表-1.7.5 含水比試験（膨潤圧試験 Na 型ベントナイト）

試料 No. / 初期膨潤率		実験前			実験後		
		0%	20%	40%	0%	20%	40%
含水比 (%)	1	7.0	7.0	7.0	29.1	41.5	51.9
	2	7.0	7.0	7.0	30.3	44.1	51.1
	3	7.0	7.0	7.0	28.4	41.5	50.2
	平均	7.0	7.0	7.0	29.3	42.4	51.1

1 網かけした数値が昨年度結果のうち、実際に試験に供した供試体を指す。

表-1.7.6 含水比試験（膨潤圧試験 Ca 型化率 100%ベントナイト）

試料 No. / 初期膨潤率		実験前					実験後				
		0%*1	5%*1	10%*1	10%*2	40%*2	0%*1	5%*1	10%*1	10%*2	40%*2
含水比 (%)	1	8.9	8.4	8.0	8.0	8.0	31.1	34.1	37.0	36.9	52.1
	2	8.9	8.4	8.0	8.0	8.0	29.5	32.1	34.7	37.4	51.9
	3	8.9	8.4	—	—	—	28.7	35.2	—	—	—
	平均	8.9	8.4	8.0	8.0	8.0	29.8	33.8	35.9	37.2	52.0

1 昨年度結果 ⁵⁾

2 本年度の結果

3 網かけした数値が昨年度結果のうち、実際に試験に供した供試体を指す。

表-1.7.7 含水比試験（膨潤量試験 Ca 型化率 50%ベントナイト）

初期膨潤率 試料 No.		実験前			実験後		
		0%	20%	40%	0%	20%	40%
含水比 (%)	1	4.5	3.1	3.1	156.3	152.1	154.2
	2	4.5	3.1	3.1	154.5	151.5	151.3
	平均	4.5	3.1	3.1	155.4	151.8	152.8

表-1.7.8 含水比試験（膨潤量試験 Na 型ベントナイト）⁵⁾

初期膨潤率 試料 No.		実験前			実験後		
		0%	20%	40%	0%	20%	40%
含水比 (%)	1	7.0	7.0	7.0	235.3	234.7	286.6
	2	7.0	7.0	7.0	138.4	226.1	254.9
	3	—	7.0	7.0	—	214.5	245.3
	平均	7.0	7.0	7.0	186.9	225.1	262.3

1 網かけした数値が昨年度結果のうち、実際に試験に供した供試体を指す。

表-1.7.9 含水比試験（膨潤量試験 Ca 型化率 100%ベントナイト）⁵⁾

初期膨潤率 試料 No.		実験前				実験後			
		0%	5%	10%	40%	0%	5%	10%	40%
含水比 (%)	1	9.1	8.0	8.0	8.0	47.8	53.9	27.4	38.1
	2	9.1	8.0	8.0	8.0	48.6	54.3	—	39.2
	3	9.1	—	8.0	—	48.8	—	25.8	—
	平均	9.1	8.0	8.0	8.0	48.4	54.1	26.6	38.7

1 膨潤率 40%のみ本年度の結果

2 網かけした数値が昨年度結果のうち、実際に試験に供した供試体を指す。

1.8 液塑性限界試験

1.8.1 試験方法

ベントナイトの液塑性限界試験は【JGS0141-2000：地盤工学会基準 土の液性限界、塑性限界試験方法】¹³⁾に則り実施した。

1.8.2 試験結果

液塑性限界試験から求めた Ca 型化率 50%ベントナイトの液性限界 W_L 、塑性限界 W_P 、塑性指数 I_p 、コンシステンシー指数 I_c を表-1.8.1(網かけした数値)に示す。表には昨年度行った Na 型ベントナイトと Ca 型化率 100%ベントナイトの結果⁵⁾も併せて示している。

塑性限界 W_P の平均値は Na 型ベントナイトが 28.5%、Ca 型化率 100%ベントナイトが 31.4%に対して、Ca 型化率 50%ベントナイトは 26.4%であった。しかし、液性限界 W_L の平均値は Na 型ベントナイトで平均 474.7%、Ca 型化率 100%ベントナイトで 113.6%なのに対し、Ca 型化率 50%ベントナイトは 443.5%であった。液性限界は Ca 型化率の増加に伴い、低下する傾向にあるのに対し、塑性限界は Ca 型化率に関わらず、ほぼ一定の値をとることがわかる。塑性指数 I_p は、Na 型ベントナイトが平均 446.3%、Ca 型化率 100%ベントナイトが 82.3%に対して、Ca 型化率 50%ベントナイトは 415.0%で、液性限界と同様に Ca 型化率の増加に伴い低下する傾向にあった。コンシステンシー指数 I_c の算出では、ベントナイトの自然含水比 w_n として、表-1.7.1～1.7.9 に記載した実験前含水比の平均値 (Ca 型化率 50%ベントナイト $w=3.69\%$ 、Na 型ベントナイト $w=7.00\%$ 、Ca 型化率 100%ベントナイト $w=8.30\%$) を用いた。コンシステンシー指数に関しては、Na 型ベントナイトと Ca 型化率 50%ベントナイトでほぼ同等の値となる一方で、Ca 型化率 100%ベントナイトのそれが比較的大きくなるという結果が得られた。

表-1.8.1 液性限界・塑性限界試験結果

材料		塑性限界 $W_p(\%)$	液性限界 $W_L(\%)$	塑性指数 $I_p(\%)$	コンシステンシー指数 $I_c(\%)$
Na 型 ベントナイト (昨年度結果 ⁵⁾)	No.1	29.8	457.0	427.0	1.053
	No.2	28.1	475.0	447.0	1.047
	No.3	27.6	492.0	465.0	1.043
	AVE.	28.5	474.7	446.3	1.047
Ca 型化率 50% ベントナイト (本検討)	No.1	26.1	442.0	415.9	1.054
	No.2	29.5	438.4	408.9	1.063
	No.3	27.3	453.3	444.4	1.012
	AVE.	26.4	444.6	423.1	1.043
Ca 型化率 100% ベントナイト (昨年度結果 ⁵⁾) *	No.1	29.8	113.0	83.2	1.258
	No.2	32.0	117.1	85.0	1.278
	No.3	32.3	110.8	79.0	1.306
	AVE.	31.4	113.6	82.3	1.281

*Ca 型化率 100%ベントナイトに関しては、今年度結果も考慮した自然含水比を用いたため、コンシステンシー指数を一部改定した。

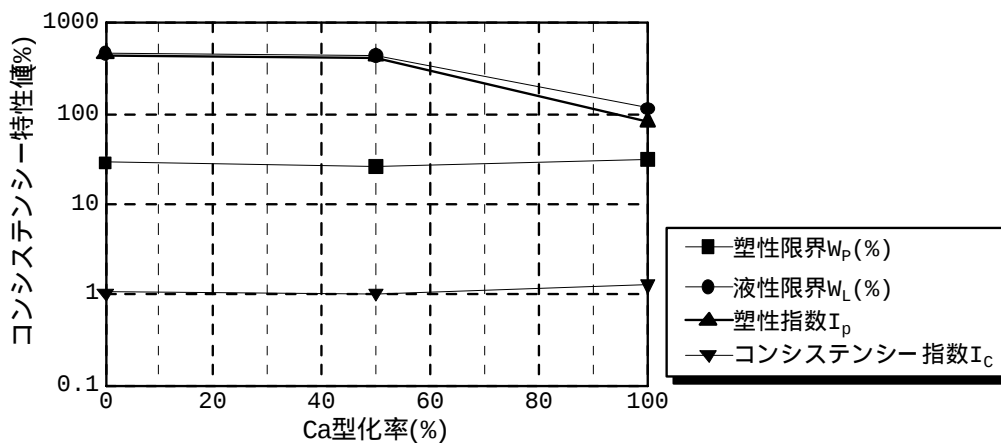


図-1.8.1 液塑性限界試験結果

1.9 締固め試験

1.9.1 試験方法

締固め試験は、【JGS0711-2000：地盤工学会基準 突固めによる土の締固め試験方法】¹⁵⁾の乾燥非繰返し法（モールド容量：1000cm³、締固めエネルギー：1Ec）に則り実施した。

1.9.2 試験結果

Ca 型化率 50%ベントナイトと昨年度実施した Na 型および Ca 型化率 100%の締固め特性⁵⁾および試験結果を表-1.9.1～1.9.4 に、締固め曲線を図-1.9.1～1.9.3 に示す。最適含水比の平均値は、Na 型ベントナイトで 28.9%、Ca 型化率 100%ベントナイトで 23.9%であったのに対して、Ca 型化率 50%ベントナイトは 29.8%であった。Ca 型化率 0%（Na 型）と 50%の最適含水比に大きな変化が見られないことから、Ca 型化が進行し、Ca 型化率 50%を超えた辺りから最適含水比は急激に小さくなる傾向があると推察される。また、最大乾燥密度においても、Na 型ベントナイトが平均 1.340(Mg/m³)、Ca 型化率 100%ベントナイトが 1.267(Mg/m³)であるのに対して、Ca 型化率 50%ベントナイトは 1.349(Mg/m³)となり、最大乾燥密度も Ca 型化率が 50%を超えた辺りから急激に小さくなる傾向が明らかとなった。

表-1.9.1 締固め特性（Ca 型化率 50%ベントナイト）

材料 試験項目	Ca 型化ベントナイト (Ca 型化率 50%)			
	No.1	No.2	No.3	平均
最適含水比 $w_{opt}(\%)$	30.8	29.7	28.9	29.8
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{Mg/m}^3)$	1.350	1.345	1.353	1.349

表-1.9.2 締固め特性（Na 型ベントナイト）⁵⁾

材料 試験項目	Na 型ベントナイト (Na 型クニゲル V1)			
	No.1	No.2	No.3	平均
最適含水比 $w_{opt}(\%)$	28.5	29.7	28.4	28.9
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{Mg/m}^3)$	1.354	1.333	1.332	1.340

表-1.9.3 締固め特性 (Ca 型化率 100%ベントナイト) ⁵⁾

試験項目 \ 材料	Ca 型化率 100%ベントナイト (Ca 型化クニゲル V1)			
	No.1	No.2	No.3	平均
最適含水比 $w_{opt}(\%)$	23.0	23.7	25.0	23.9
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{Mg/m}^3)$	1.263	1.289	1.250	1.267

表-1.9.4 締固め試験結果 (Ca 型化率 50%ベントナイト)

測定 No.		1	2	3	4	5	6	7
供試体 番号	測定項目							
No.1	w(%)	17.5	21.8	24.9	27.3	30.8	34.3	39.4
	$\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	1.298	1.305	1.329	1.339	1.350	1.343	1.283
No.2	w(%)	17.3	22.1	24.0	26.6	29.7	34.9	39.8
	$\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	1.289	1.299	1.311	1.343	1.345	1.335	1.294
No.3	w(%)	17.5	22.0	24.5	26.9	28.9	34.6	38.9
	$\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	1.293	1.302	1.325	1.346	1.353	1.342	1.276

表中において w は含水比、 ρ_d は乾燥密度。

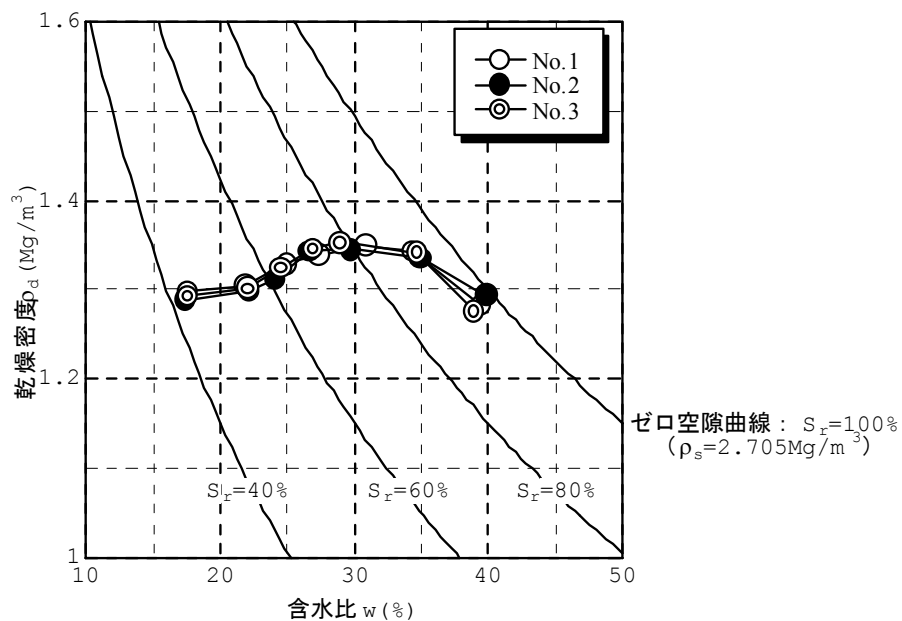


図-1.9.1 締固め曲線 (Ca 型化率 50%ベントナイト)

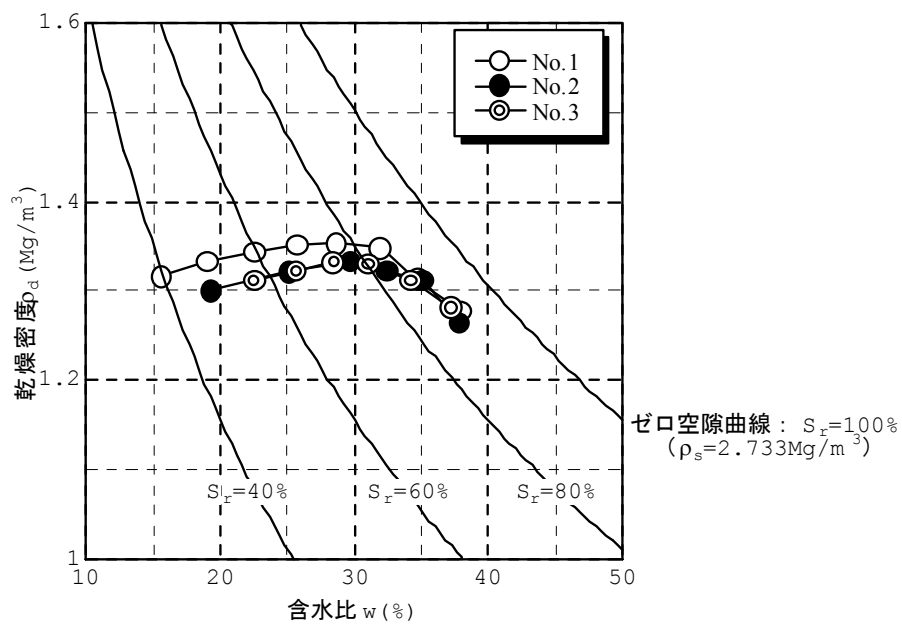


図-1.9.2 締固め曲線 (Na 型ベントナイト) 5)

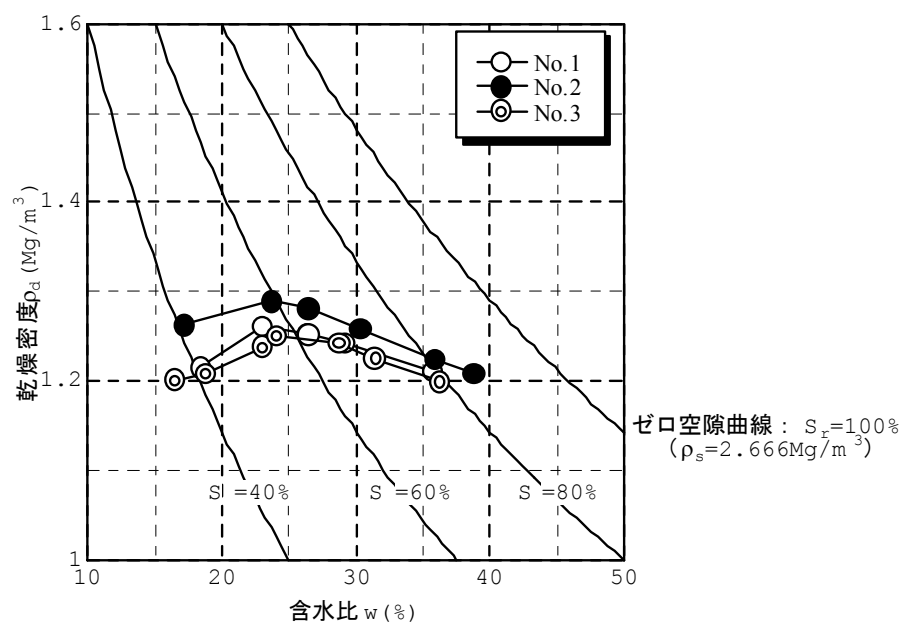


図-1.9.3 締固め曲線 (Ca 型化率 100%ベントナイト) 5)

1.10 高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験

1.10.1 試験方法

三軸 $\overline{CU}$ 試験は、飽和したベントナイトの非排水せん断時の挙動を把握することを目的として実施した。原則として、試験方法は【JGS 0523-2000：地盤工学会基準：土の圧密非排水 $\overline{CU}$ 三軸圧縮試験法】¹⁵⁾に則して行った。

供試体の飽和は前述(1.3.2 項)した鋼製飽和セル内で実施した。この過程では供試体内部の空隙が水によって充填されていくため、飽和の進展に伴い供試体の重量が増加していくと考えられる。そこで、飽和セルの重量を定期的に計測し、重量の増加が認められなくなった時点で、飽和が完了したものと見なした。その後、鋼製飽和セルから脱型した供試体を三軸セル内のペDESTAL上に設置し、メンブレンを被せた。この時、メンブレンと供試体間に存在する空気の排出、並びに供試体のより確実な飽和化を図ることを目的として三軸セル内においても、二重負圧法による飽和を実施した。一般的な試験方法では、飽和過程において供試体の体積変化（膨潤）を生じる可能性があったことから、今回実施した一連の試験では二重負圧法によって供試体を飽和させた。二重負圧法は本来、三軸セル内と供試体内を同一の負圧にして供試体を飽和させる方法であるが、この場合においても、飽和中に供試体の体積変化が生ずる可能性を否定することはできない。そこで、図-1.10.1 に示すように、三軸セル内で剛性の高い二つ割りモールドを用いて供試体の体積変化を強制的に拘束し、さらに軸方向の変形も完全に拘束した状態で供試体に給水した。この時、供試体内部とモールド～メンブレン間には等しい圧力が作用するため、理論上、供試体内部の有効応力は変化しないものと考えられる。

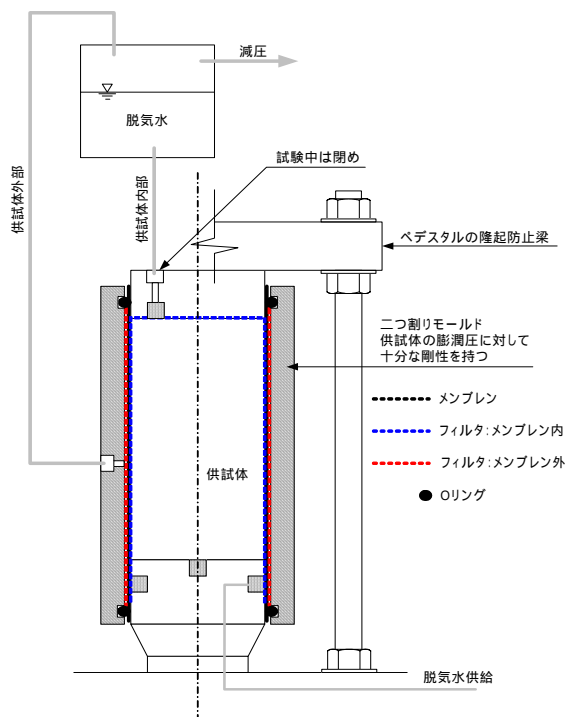


図-1.10.1 二重負圧法の模式図

二重負圧法によって供試体への通水・脱気を行った後、鋼製モールドを取り外し、供試体に生じたサクションを解消するために背圧を付与した。背圧付与時は一時的に供試体に給水を行うことになるため、この段階で供試体に体積変化を許容することになる。このことから背圧付与は可能な限り短時間（５分程度）で行うよう配慮した。背圧付与後、ただちに供試体を非排水条件にし、段階的に拘束圧（圧密圧力）を上昇させた。拘束圧上昇過程は非排水条件で行うため、この過程においても間隙水压の応答を確認できるが、目標とする拘束圧を付与した際に供試体内に負圧が発生している場合、圧密を開始しても供試体に吸水膨潤が生じ、試験条件を不明確化させることが懸念されたため、目標拘束圧付与時に供試体内に負圧が発生している場合については圧密を実施せず、ただちにせん断を開始した。一方、ここで正常な間隙水压応答が確認された場合には、供試体を排水条件とし、圧密を開始した。圧密は地盤工学会の標準圧密試験法¹⁵⁾に倣い、時間～排水量曲線から予測した 90%排水完了時間を超過した段階で終了した。圧密完了後、再度供試体を非排水条件として、拘束圧増分を付与した際の間隙水压増分を計測し、間隙水压係数 B 値を確認した。ここで B 値 0.95 を確認できた場合は供試体の飽和度は十分に確保されていると判断し、せん断を開始した。試験終了に至るまでの供試体内応力の変遷を図-1.10.2 に示す。なお、せん断はひずみ制御方式とし、既往の報告⁸⁾に倣い、軸ひずみ速度 0.01%/min で実施した。以下に三軸 $\overline{CU}$ 試験の手順を示す。

鋼製飽和セルを解体し、供試体を取り出す。この時に供試体の直径、高さ、重量を計測する。

供試体側面、上下面にナイロンメッシュと濾紙を組み合わせたフィルターを取り付ける。この状態で供試体をペDESTALに設置し、メンブレンを被せ、O リングで止水する。

鋼製モールドを取り付け、二重負圧法によって供試体の飽和化を図る（図-1.10.1）。供試体の飽和が完了した後、非排水条件で鋼製モールドを取り外し、図-1.10.3 に示す三軸試験装置を組み立て、セル内に給水する。

非排水状態で背圧（0.1MPa）を作用させる。

所定の圧密圧力まで段階的に圧密圧力を上昇させる。各段階である程度の放置時間を設定し、間隙水压の応答を確認する。圧密圧力を作用させた時に負圧が生じている場合は、後述の圧密過程を実施せず、直ちにせん断を実施する。

供試体を排水条件に移行させ、圧密を開始する。

圧密終了後、非排水条件において拘束圧を微かに上昇させ、間隙水压増分 Δu を観測し、間隙水压係数 B 値（ $=\Delta u / \Delta \sigma_c$ ）を求める。 B 値測定後、拘束圧を所定の値まで戻す。 B 値が 0.95 を下回る場合、適宜、背圧および拘束圧を上昇させ、上述の手順によって B 値を計測する。

供試体の圧密完了を確認後、非排水条件でひずみ速度 0.01%/min で軸ひずみ ε_a を付与し、せん断を実施する。せん断は軸ひずみ約 15%で終了する。

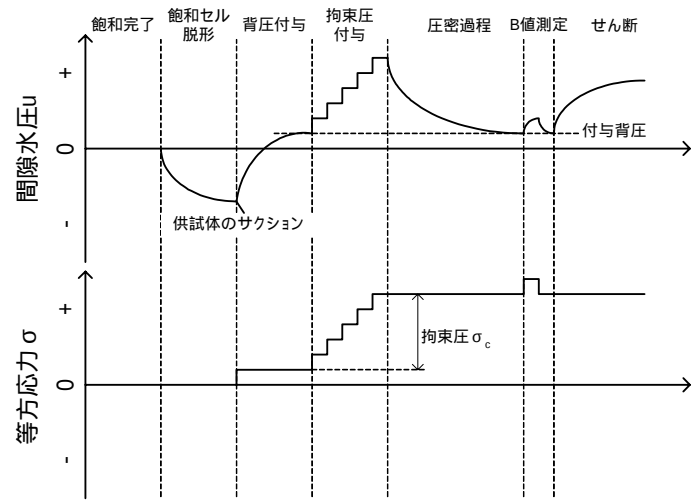


図-1.10.2 せん断に至るまでの供試体内応力の変遷（三軸 $\overline{CU}$ 試験）

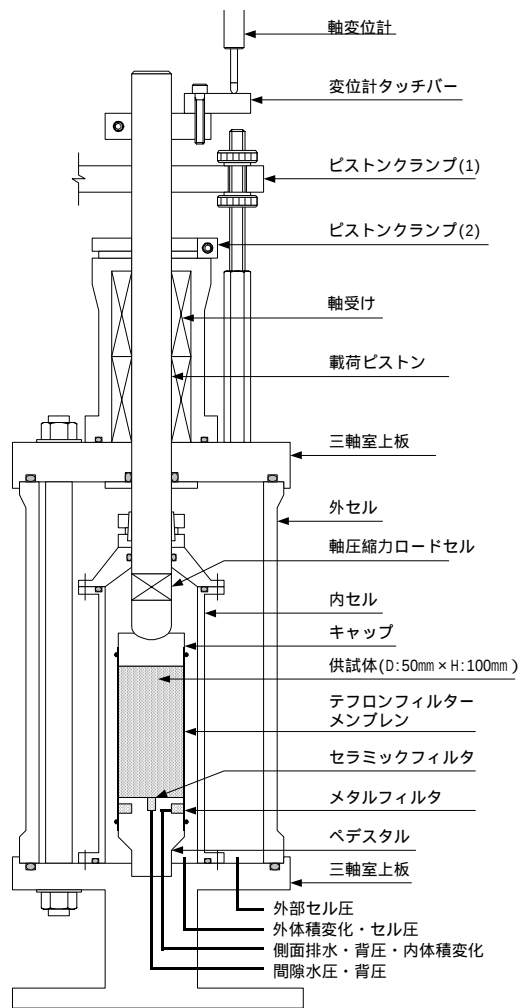


図-1.10.3 三軸 $\overline{CU}$ 試験装置の模式図

1.10.2 試験結果

a) 供試体の諸元

表-1.10.1 に三軸 $\overline{CU}$ 試験の供試体諸元を示す。乾燥密度 ρ_d が目標値の $1.6(\text{Mg}/\text{m}^3)$ に比べやや大きい傾向があるが、おおむね計画どおり（表-1.3.2）の供試体を作製することができた。

表-1.10.1 供試体の諸元

ペントナイト	想定 膨潤率	初期間隙比 e_0 (目標)	供試 体 No.	拘束圧 $\sigma_c(\text{MPa})$	直径 ϕ (mm)	高さ h (mm)	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg}/\text{m}^3)$	初期間隙比 e_0 (実績)
Ca 型化率 50%	0%	0.691	1	1.0	49.8	99.8	1.620	0.670
			2	1.0	49.8	99.6	1.616	0.674
			3	3.0	49.8	99.6	1.621	0.669
			4	3.0	49.8	99.5	1.622	0.668
			5	5.0	49.8	99.8	1.619	0.671
			6	5.0	49.8	99.5	1.620	0.670
Ca 型化率 100%	0%	0.666	1	0.5	49.8	99.9	1.611	0.655
			2	0.5	49.8	99.6	1.622	0.644
			3	3.0	49.8	99.6	1.622	0.644
			4	3.0	49.8	99.3	1.628	0.638
			5	5.0	49.8	99.0	1.632	0.634
			6	5.0	49.8	99.7	1.621	0.645

b) 拘束圧の付与

拘束圧付与時の観測結果を表-1.10.2 にまとめる。一部の例外が認められるものの、初期間隙水圧はおおむね負圧となっている。供試体内部に負圧が発生する原因として、飽和セルからの脱型による応力解放、ベントナイトの膨潤性に起因する負圧の二つが挙げられる。

供試体が完全に飽和している場合、非排水条件で拘束圧を付与することで、供試体の間隙水圧は拘束圧と等しくなると考えられる。しかしながら拘束圧付与後に観測された間隙水圧（最終間隙水圧）は大きくばらついており、また作用させた拘束圧より小さい場合が殆どであった。拘束圧を最も小さく設定したシリーズについては、拘束圧負荷後も負の間隙水圧が観測されたため、この状態で供試体を排水条件とした場合、ベントナイトに膨潤が生じると推測された。供試体に膨潤に伴う体積変化が生じた場合、試験の初期条件が不明確化すると考えられることから、顕著な負圧が観測された Ca 型化率 100%ベントナイト、拘束圧 0.5MPa の No.1、2 供試体に関しては、等方圧密を実施せず、直ちにせん断試験を行うものとした。

なお Ca 型化率 50%のベントナイトに関しては、表-1.10.2 に示すように、拘束圧負荷後に間隙水圧は正值を示した。但し、昨年度の試験（Na 型ベントナイト膨潤率 0%、Ca 型化率 100%ベントナイト膨潤率 0%）で、最低拘束圧条件で圧密を実施していないことから、膨潤率 0%での試験条件を統一することを考慮し、ここでも圧密を実施せず、直ちにせん断試験を行うものとした。

表-1.10.2 拘束圧付与過程における観測結果

ペントナイト	想定 膨潤率	供試体 No.	初期間隙水圧 (kPa)	拘束圧 σ_c (kPa)	観測時間 (min)	最終間隙水圧 (kPa)
Ca 型化率 50%	0%	1	-67.1	1012.0	1370.0	11.0*
		2	-91.1	980.2	1420.0	14.8*
		3	72.0	3062.6	93.0	2235.1
		4	-10.2	3549.0	109.0	2627.6
		5	-30.1	5486.5	79.0	5047.9
		6	-21.6	5420.9	82.0	4794.3
Ca 型化率 100%	0%	1	-45.9	498.3	1320.0	-34.9
		2	-53.0	498.6	1370.0	-34.8
		3	-85.4	3007.9	75.0	1686.2
		4	-58.3	3057.0	80.5	1716.0
		5	-85.7	5006.5	77.2	3689.1
		6	-58.6	5054.2	90.0	3458.4

*付与背圧と同等の値。

c) 圧密過程

図-1.10.4 に等方圧密過程における、時間～体積ひずみの関係を示す。圧縮ひずみは負の値が供試体の圧縮、正の値が供試体の膨張を示す。等方圧密過程における圧縮量は、Ca 型化率 100%ベントナイトで最大でも体積ひずみ 6.0%程度であるのに対し、Ca 型化率 50%ベントナイトでは最大で 10%程度の体積ひずみが観測された。昨年度実施した試験では、Na 型ベントナイトで、最大 40%程度の体積ひずみが観測されたケースもあったことから、Ca 型化率が大きなものほど体積圧縮係数 m_v は小さく（体積弾性係数は大きく）なる傾向が見られる。

今回の試験における圧密時間は短いもので 1500min（1 日：Ca 型化率 100%、No.4）長いもので 30000min（20 日：Ca 型化率 50%、No.5）であった。観測された時間～排水量関係を双曲線近似して最終圧縮量を予測し、その 90%以上の排水量が確認された時点で圧密終了と見なし、せん断を開始した。図-1.10.5 は圧密過程における供試体の圧縮挙動を時間（自然対数 $\ln(t)$ ）に対し、体積ひずみ ε_v （圧縮側を負）標記で再整理したものである。粘性土の弾粘塑性構成方程式の一つである関口・太田モデルでは、粘塑性体積ひずみ ε_v^{vp} は、

$$\varepsilon_v^{vp} = \alpha \ln \left\{ 1 + \frac{\dot{v}_0 t}{\alpha} \exp \left(\frac{f}{\alpha} \right) \right\} \quad (1.10.1)$$

ただし、 α ：二次圧密係数、

$\dot{v}_0$ ：一次圧密終了時の初期体積ひずみ速度

t ：時間

f ：弾塑性条件の降伏曲面を定めるスカラー関数 $f = MD \ln \frac{p'}{p_c'} + D\eta^*$

M ：限界状態パラメータ

D ：ダイレイタンシー係数

p' ：平均有効主応力

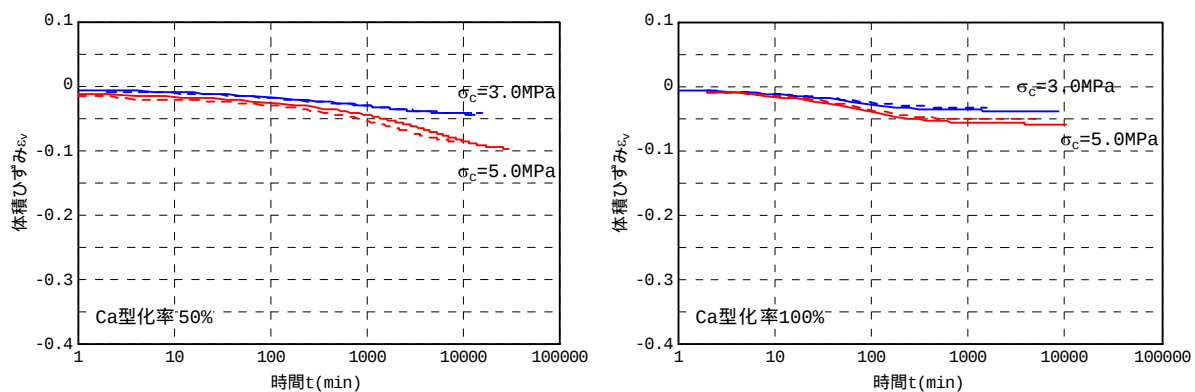
p_c' ：先行圧密圧力

η^* ：一般化応力比

で表される¹⁶⁾。ここで α は $\varepsilon_v \sim \ln(t)$ 平面における二次圧密曲線の勾配であり、 $\dot{v}_0$ は一次圧密終了時間 t_c と α の比

$$\dot{v}_0 = \frac{\alpha}{t_c} \quad (1.10.2)$$

で表される。表-1.10.3 に図-1.10.5 から得られた α 、 t_c 、 $\dot{v}_0$ をまとめる。なお t_c は、図-1.10.6 に示すように、二次圧密線と $\varepsilon_v \sim \ln(t)$ 曲線状の最急勾配線の交点から決定した。また α の決定には十分な二次圧密領域のデータが必要であるが、今回の試験では上述のように長期的な圧密挙動の観測は行っていない。よって α の決定には今後の十分なデータの取得が必要と考えられる。

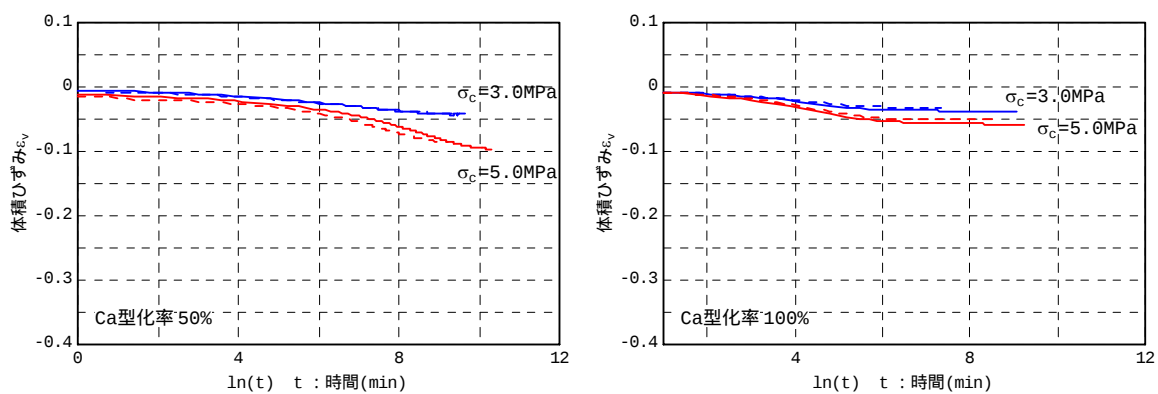


凡例 実線：No.3,5 破線：No.4,6

青： $\sigma_c = 3.0$ MPa

赤： $\sigma_c = 5.0$ MPa

図-1.10.4 圧密過程における時間～体積ひずみ関係



凡例 実線：No.3,5 破線：No.4,6

青： $\sigma_c = 3.0$ MPa

赤： $\sigma_c = 5.0$ MPa

図-1.10.5 圧密過程における時間～体積ひずみ関係 ($\varepsilon_v \sim \ln(t)$ 平面)

表-1.10.3 試験から得られた二次圧密係数・初期体積ひずみ速度

ペントナイト	拘束圧 $\sigma_c(\text{MPa})$	供試体 No.	二次圧密係数 α	一次圧密終了時刻 $t_c(\text{min})$	初期体積ひずみ速度 $v_0(\text{min}^{-1})$
Ca 型化率 50%	1.0	1	圧密を実施せず		
	1.0	2	圧密を実施せず		
	3.0	3	-0.0020	5740.98	3.445e-07
	3.0	4	-0.0008	5525.82	1.413e-07
	5.0	5	-0.0070	14570.88	4.811e-07
	5.0	6	-0.0015	6528.10	2.299e-07
	平均値		-0.0028	8091.4	2.992e-07
Ca 型化率 100%	0.5	1	圧密を実施せず		
	0.5	2	圧密を実施せず		
	3.0	3	-0.0008	290.85	2.809e-06
	3.0	4	-0.0004	307.99	1.175e-06
	5.0	5	-0.0012	333.33	3.633e-06
	5.0	6	-0.0012	333.10	3.630e-06
	平均値		-0.0009	316.32	2.812e-06

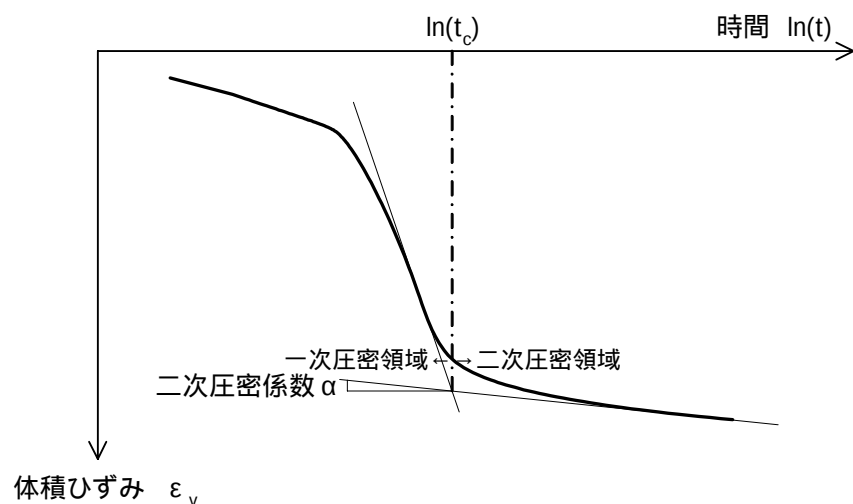


図-1.10.6 一次圧密終了時刻の決定

d) 飽和度の測定

供試体の飽和度の目安として間隙水圧係数 B 値がある。今回実施した一連の試験では、B 値の計測を圧密終了時に実施した。また圧密を実施しなかった試験では試験後の供試体の含水比から飽和度の確認を行った。表-1.10.4 に B 値の計測結果および試験後の供試体の含水比から推定した飽和度を示す。B 値は 0.95 以上、飽和度も 95%以上確保されており、ほぼ完全に飽和した供試体を用いて試験を実施できたことが確認できた。

表-1.10.4 試験供試体の B 値、飽和度

ペントナイト	拘束圧 σ_c (MPa)	供試体 No.	$\Delta \sigma$ (kPa)	Δu (kPa)	測定時間 (min)	B 値	含水比 w(%)	飽和度 Sr(%)
Ca 型化率 50%	0.5	1	圧密未実施				29.4	118.7
	0.5	2	圧密未実施				30.9	124.0
	3.0	3	50.0	48.01	1	0.96	26.5	107.2
	3.0	4	50.0	47.15	2	0.94	26.3	106.5
	5.0	5	50.0	48.41	1	0.97	24.6	99.2
	5.0	6	50.0	49.15	3	0.98	27.6	111.5
Ca 型化率 100%	0.5	1	圧密未実施				31.7	129.1
	0.5	2	圧密未実施				30.8	127.6
	3.0	3	50.0	49.06	2	0.98	24.9	103.1
	3.0	4	50.0	47.91	1	0.96	27.4	114.6
	5.0	5	50.0	49.08	1	0.98	25.4	106.9
	5.0	6	50.0	47.67	2	0.95	25.5	105.5

$$B \text{ 値} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma}、\text{飽和度 } Sr = \frac{w}{1/\rho_d - 1/G_s}$$

e) せん断過程

せん断はひずみ速度 0.01%/min のひずみ制御方式で実施し、地盤工学会基準 JGS0523-2000 に基づき軸ひずみ $\varepsilon_a=15\%$ となるまで載荷を継続した。図-1.10.7 に応力～ひずみ曲線を示す。拘束圧 σ_c の小さいもの (Ca 型化率 50%: 1.0MPa、Ca 型化率 100%: 0.5MPa) は、過圧密領域におけるせん断挙動の把握を目的として実施した試験である。Ca 型化率 100%ベントナイトは重過圧密粘土に見られる軸差応力がピーク強度を有するような応力～ひずみ曲線となっているが、Ca 型化率 50%では、軸差応力が漸増するような挙動となっている。正規圧密領域におけるせん断挙動を把握することを目的とした試験 ($\sigma_c = 3.0, 5.0\text{MPa}$) において Ca 型化率 50%ベントナイトでは、 $\sigma_c = 3.0, 5.0\text{MPa}$ ともに正規圧密粘土に類似したせん断挙動を示しているが、Ca 型化率 100%ベントナイトでは、 $\sigma_c = 3.0, 5.0\text{MPa}$ では重過圧密粘土の挙動を示している。但し、同じ圧密圧力の場合の Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの残留強度を比較すると、残留強度は Ca 型化率に依らずほぼ一定となる傾向がわかる。これは、限界状態パラメータが Ca 型化率に大きく依存しないことを示唆している。

せん断時の間隙水圧挙動を図-1.10.8 に示す。Ca 型化率 50%のケースにおいて、圧密圧力 3.0、5.0MPa では間隙水圧がせん断中に漸増する傾向が見られており、せん断中、常に体積圧縮傾向が示されていたことがわかる。これは正規圧密粘土のせん断時の挙動に類似している。これに対して圧密圧力 1.0MPa では間隙水圧の変化は顕著ではない。また、Ca 型化率 100%のベントナイトでも、ほぼ類似した傾向がうかがえるが、圧密圧力が高いケースでは軸差応力のピークが発現した軸ひずみ以降、水圧が微減するような挙動も確認することができる。

表-1.10.1 に示したように、Ca 型化率 50%と Ca 型化率 100%は、ほぼ同じ乾燥密度 (1.6Mg/m^3) であるにも関わらず、間隙比は後者のほうが小さい。同一密度下における間隙比の違いは、ベントナイトの Ca 型化による土粒子密度の低下 (Ca 型化率 50%ベントナイト: $\rho_s = 2.705\text{Mg/m}^3$ 、Ca 型化率 100%ベントナイト: $\rho_s = 2.666\text{Mg/m}^3$) に起因するが、これがベントナイトの Ca 型化による力学挙動の違いの原因であるかは、更なる詳細な検討が必要である。

図-1.10.9、表-1.10.5 に変形係数 E_{50} と拘束圧の関係を示す。 E_{50} は破壊 (最大) 応力 ($\sigma_1 - \sigma_3)_f$ の 50%の応力に対応する軸ひずみ ε_{50} に対し、

$$E_{50} = \frac{0.5 \cdot (\sigma_1 - \sigma_3)_f}{\varepsilon_{50}} \quad (1.10.3)$$

として求めた。若干ばらつきの大きいデータではあるが、総じて E_{50} は Ca 型化率 100%ベントナイトのほうが大きく、また、拘束圧の増加 (初期間隙比の低下) に伴う変形係数の増加も Ca 型化率 100%の方が大きいという結果が得られた。

表-1.10.6 は、図-1.10.10 に示すせん断中のポアソン比の挙動から得られたせん断初期のポアソン比である。ポアソン比は内部セルからの水の出入によって計測される体積ひ

ずみ ε_v と軸ひずみ ε_a から換算した半径方向ひずみ ε_r 、

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2 \varepsilon_r$$

$$\varepsilon_r = (\varepsilon_v - \varepsilon_a) / 2 \quad (1.10.4)$$

をもとに、

$$\nu = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \quad (1.10.5)$$

として算出した。試験結果の全平均値はおよそ 0.42 であり、既往の報告¹⁴⁾でベントナイトのポアソン比として用いられた値 0.4 ~ 0.49 とほぼ同等の値となった。

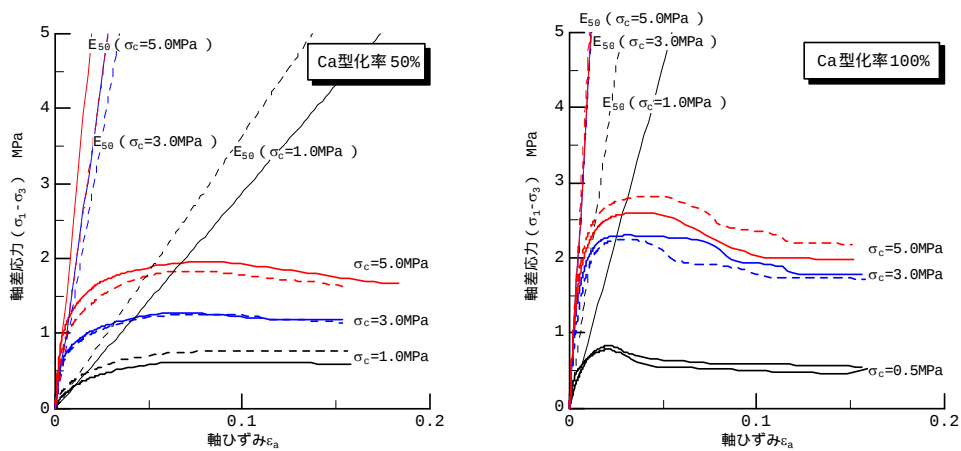


図-1.10.7 応力～ひずみ関係

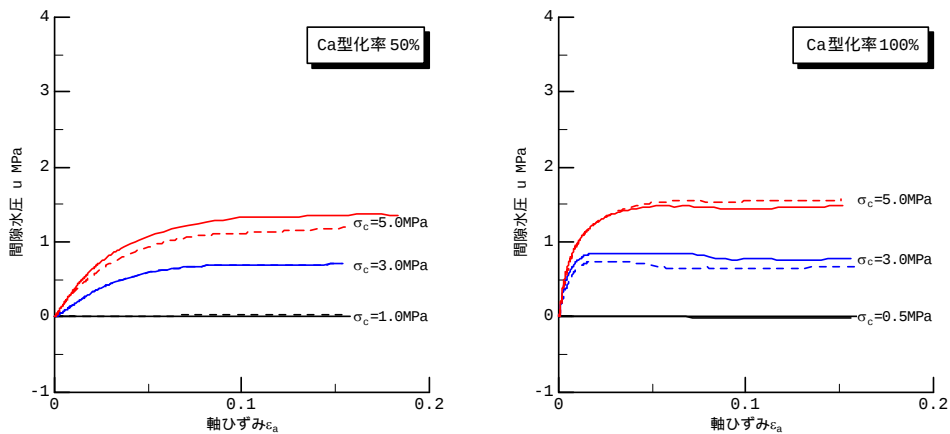


図-1.10.8 せん断時の間隙水圧挙動

凡例 実線：No.1,3,5 破線：No.2,4,6

黒： $\sigma_c=0.5\text{MPa}$ 、 1.0MPa

青： $\sigma_c=3.0\text{MPa}$

赤： $\sigma_c=5.0\text{MPa}$

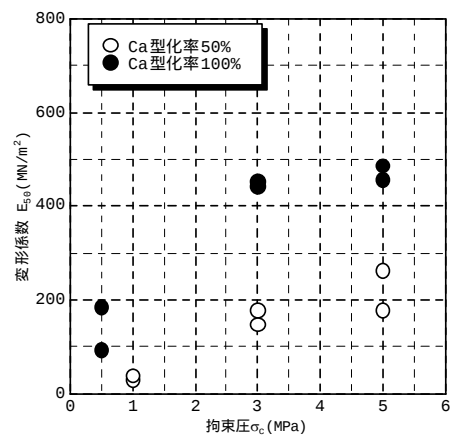


図-1.10.9 変形係数 E_{50} と拘束圧の関係

表-1.10.5 試験から得られた変形係数 E_{50}

Ca 型化率 50%			Ca 型化率 100%		
σ_c (MPa)	No.	E_{50} (MN/m ²)	σ_c (MPa)	No.	E_{50} (MN/m ²)
1.0MPa	1	28.8	0.5MPa	1	91.3
	2	36.4		2	183.3
3.0MPa	1	177.0	3.0MPa	1	451.9
	2	146.7		2	441.5
5.0MPa	1	261.6	5.0MPa	1	455.3
	2	176.9		2	486.4

表-1.10.6 試験から得られた初期ポアソン比 ν_0

拘束圧 σ_c (MPa)	No.	Ca 型化率 50%	Ca 型化率 100%
0.5、1.0	1	0.416	0.476
	2	0.469	0.441
3.0	3	0.465	0.416
	4	0.311	0.468
5.0	5	0.313	0.433
	6	0.476	0.446
平均値		0.398	0.447
全平均値		0.422	

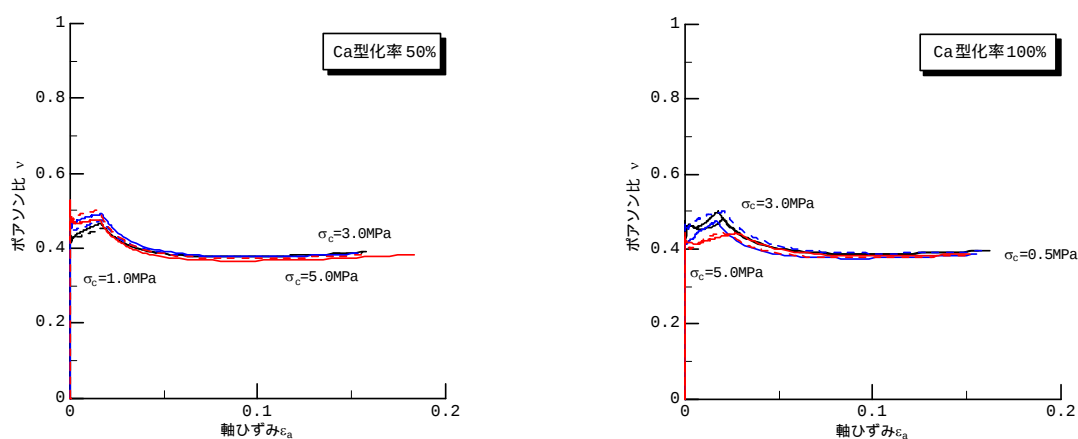


図-1.10.10 せん断中のポアソン比の推移

凡例 実線：No.1,3,5 破線：No.2,4,6

黒： $\sigma_c=0.5\text{MPa}$ 、 1.0MPa

青： $\sigma_c=3.0\text{MPa}$

赤： $\sigma_c=5.0\text{MPa}$

図-1.10.11 にせん断中の有効応力パスを示す。図中に示した各線は、式(1.10.1)によって表される $e - q - p'$ 空間に構成される土質材料の状態曲面（図-1.10.12）の頂点を $q - p'$ 平面上への投影した線（限界状態線：式（1.10.6））を、試験結果をもとに推定した結果である。

$$q = M \times p' \quad (1.10.6)$$

ただし、 q ：軸差応力 $= \sigma_1 - \sigma_3$

$$p' : \text{平均有効主応力} = \frac{(\sigma_1' + 2\sigma_3')}{3}$$

M ：限界状態パラメータ

σ_1' ：最大有効主応力（＝軸応力－間隙水圧）

σ_3' ：最小有効主応力（＝セル圧－間隙水圧）

三軸条件下では、限界状態パラメータは有効内部摩擦角 ϕ' を用いて、

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (1.10.7)$$

で表せるため、図中には式（1.10.7）をもとに算出した内部摩擦角も併記した。

限界状態理論では、状態曲面の頂点における拘束圧よりも小さな拘束圧の場合、必ず軟化挙動を示し、その後に限界状態に至るため、重過圧密の場合は残留強度をもって限界状態と判断するほうが、理論的な整合性が取れる（図-1.10.13）。拘束圧（間隙比）の違いに着目すれば、試験で得られた応力パスの形状と図-1.10.13 を比較すると、Ca 型化率に依らず、拘束圧が 0.5 または 1.0MPa の場合、明確な重過圧密的挙動を示し、Ca 型化率 50% ベントナイトでは拘束圧が 3.0、5.0MPa と大きくなるに従って正規圧密的な挙動となっていく傾向が見られる。以上のことを勘案し、Ca 型化率 50% のケースでは、限界状態線の推定に正規～軽過圧密領域と想定される試験（ $\sigma_c = 3.0, 5.0\text{MPa}$ ）の最大軸差応力と、重過圧密領域と想定される試験（ $\sigma_c = 1.0\text{MPa}$ ）の残留強度から限界状態線を推定した。

一方、Ca 型化率 100% の試験では、図-1.10.7 から明らかなように、全ての試験において、軸差応力にピークが発現する挙動が観測されており、また、拘束圧によらずストレスパスが過圧密的なものであることから、 M の推定は残留強度をもとにして実施した。

M は軸差応力を拘束圧で無次元化した量であり、間隙比の違いは、軸差応力と拘束圧に反映される（すなわち、間隙比：小→軸差応力、拘束圧：大、間隙比：大→軸差応力、拘束圧：小）。よって、通常の地盤材料では、 M は間隙比に依存せず、それぞれの土質についてただ一つのみ定められるものである。しかしながら、昨年度実施した試験結果から、Ca 型化率 100% ベントナイトでは、膨潤率 5～10% における M が膨潤率 0% の約 50% まで低下するという結果となっていた。この要因の一つとして Ca 型化率 100% ベントナイト膨潤率 0% の試験のみ、他とは異なる粉碎方法（ボールミルによる粉碎）によって作成したベントナイト粉末を用いた試料であったことなどが考えられ、データの信頼性を再度確認する必要があった。今回の試験で得られた Ca 型化率 100% ベントナイトの M は、昨年度の結果（Ca 型化率 100%、膨潤率 0%）と比較して小さなものとなっており、昨年度のデータ（ $M=0.43$

～0.48) や既往データ⁸⁾ ($M=0.49$) とほぼ同等の値といえる。同時に、このことは粉碎の仕方によってベントナイトの強度性能が変わり得ることを示唆する結果ともいえる。

一方、Ca 型化率 50%のベントナイトに関しては、昨年度の試験結果 (Na 型ベントナイトなど) とほぼ同等の値が得られた。これまでに得られているベントナイトの限界状態パラメータ M は、0.4～0.5 程度であり、この中で最も大きい限界状態パラメータを与えている今年度の Ca 型化率 100%ベントナイトに関していえば、地盤工学会基準 JGS0523-2000 に基づき、軸ひずみ ε_a が 15%程度となった時点で試験を終了したため、図-1.10.7 で確認する限り、完全な残留状態には至っていないケースも見られる。このことから限界状態パラメータの推定結果が実際よりもやや大きめになっている可能性があり、実際は、これよりも若干小さな値と推察することもできる。以上のことからベントナイトの限界状態パラメータ M は、Ca 型化率に依らず、一定値と見なすのが妥当と考えられる。

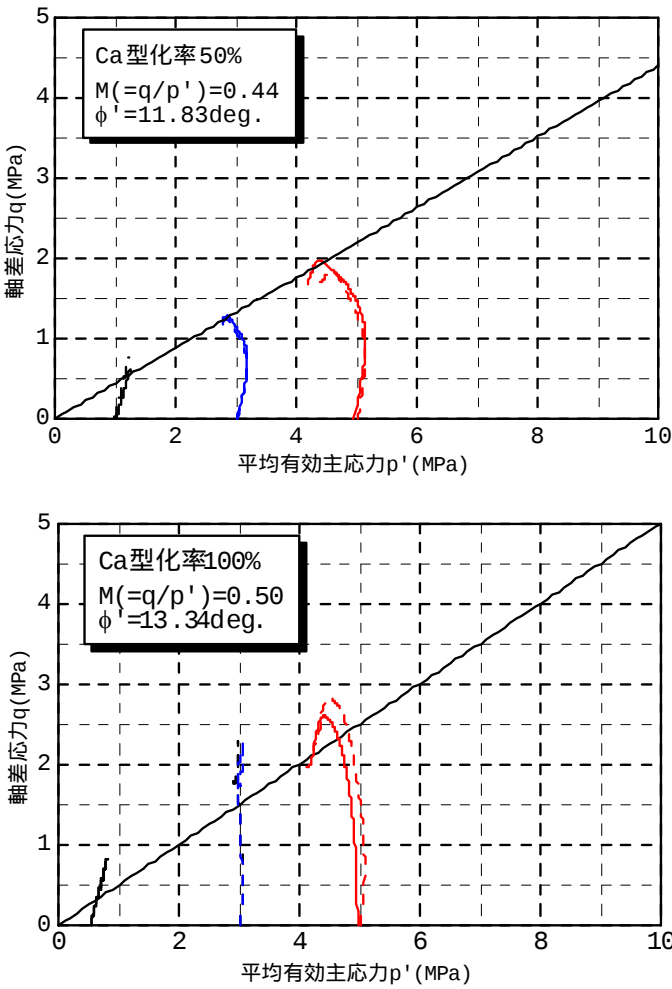


図-1.10.11 有効応力パス

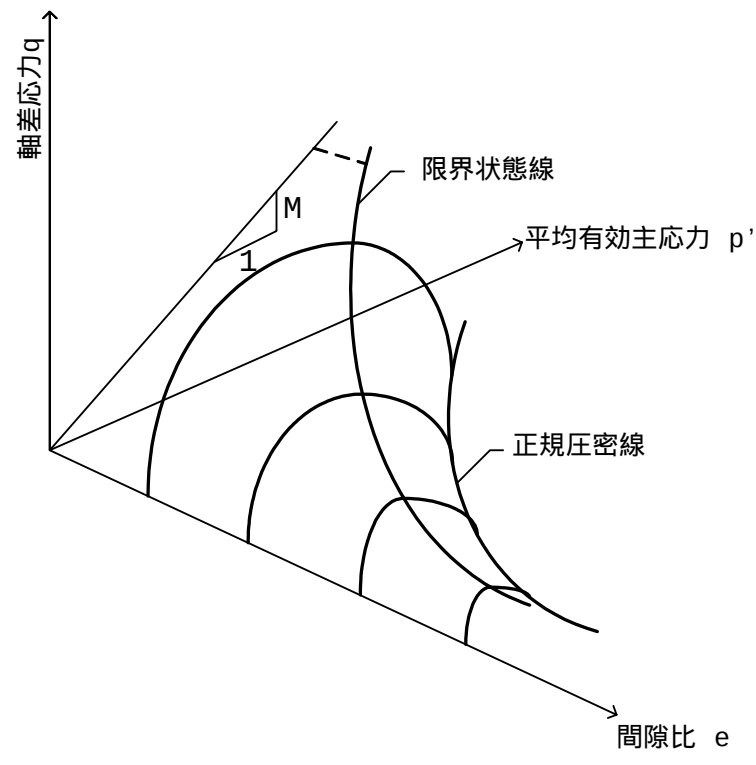


図-1.10.12 土質材料の降伏曲面の模式図

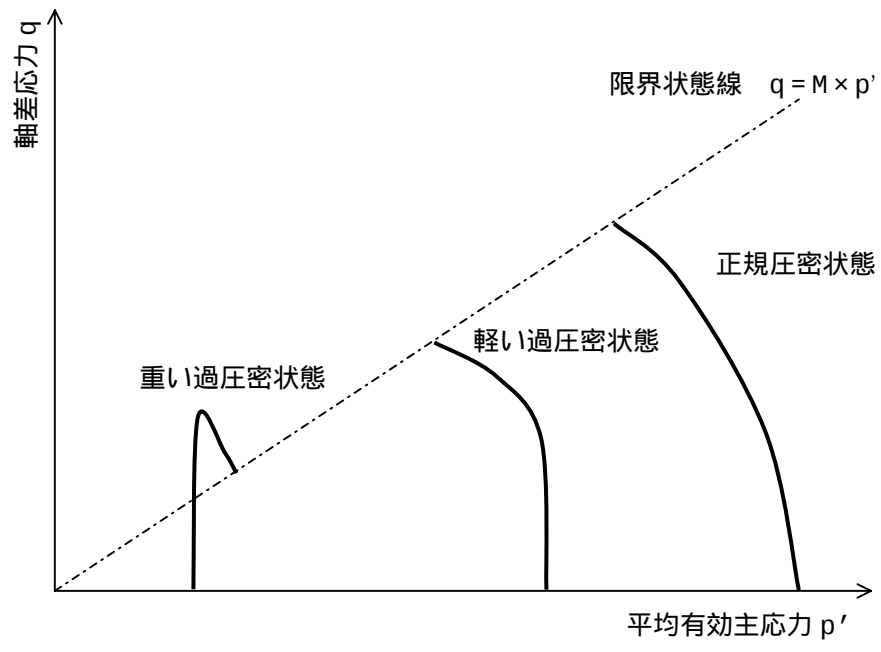


図-1.10.13 典型的な非排水せん断時の応力パスの模式図 ¹⁷⁾

1.11 高圧圧密試験

1.11.1 試験方法

高圧圧密試験はベントナイトの圧密特性の把握を目的として実施した。圧密試験から得られる正規圧密線は e - q - p' 空間に構成される Cam-clay 型の土の状態曲面と e - p' 面（若しくは p' - q 平面に垂直に K_0 線で交わる面）との交差線であり、ベントナイトの膨潤が降伏曲面（状態曲面を p' - q 平面に投影した曲面）の形状に与える影響を直接確認することが可能である。高圧圧密試験は供試体の膨潤率（初期間隙比）が正規圧密線の勾配である圧縮指数 C_c や先行圧密圧力（圧密降伏応力） p_c に及ぼす影響を検討するためのデータを取得することを目的として実施した。またすべての高圧圧密試験において最大圧密圧力（10MPa）を作用させた後に除荷を実施した。

さらに、Na 型ベントナイト、Ca 型化率 50、100%ベントナイトで膨潤率が 40%に相当する初期間隙比のケースに対しては、超高圧圧密試験も別途実施した。高圧圧密試験では、圧密圧力が膨潤圧を超えた時点を降伏点とみなしており、限界状態理論における降伏点の解釈とは異なる可能性がある。そこで超高圧圧密試験では、高圧圧密試験よりも高い応力レベル（最大圧密圧力 40MPa）における、現在試験を行っている応力レベルよりも高いレベルで降伏点の有無を確認することを目的としている。

図-1.11.1 に試験を実施した圧密経路の模式図を示す。図中の は Ca 型化率 50%ベントナイトで乾燥密度 1.6Mg/m^3 の状態（0%膨潤に相当する間隙比）の場合、 、 、 はそれぞれ Ca 型化率 50%ベントナイトで乾燥密度 1.6Mg/m^3 の状態から 20%、40%、最大膨潤率まで膨潤させた場合に相当する間隙比の場合の e - $\log p'$ 曲線の模式図を示している。さらに、超高圧圧密試験は、Na 型ベントナイト、Ca 型化率 50%、100%ベントナイトで膨潤率 40%相当の間隙比で行い、図中の で示してある。

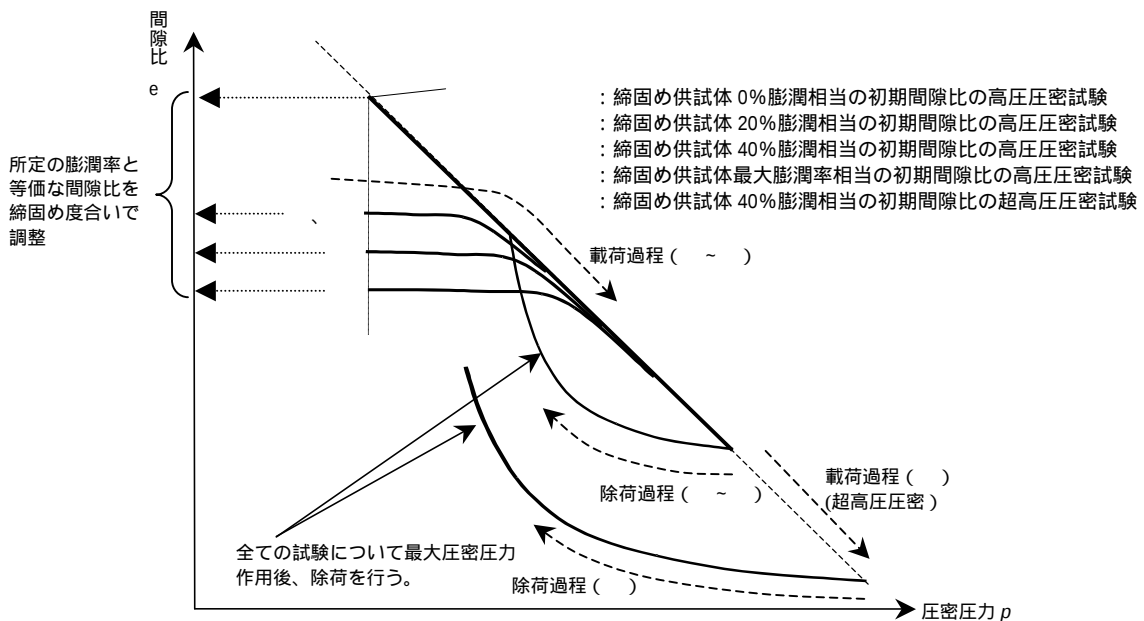


図-1.11.1 試験を実施した高圧・超高圧圧密経路の模式図

試験装置の模式図を図-1.11.2 に示す。供試体は目標の膨潤率に相当する間隙比となるように静的に締固めを行い、内部を密閉した後に加圧給水して供試体を飽和させた。供試体は完全な密閉容器に設置されており、供試体の体積変化を拘束した状態で飽和を実施した。また図-1.11.2 の試験容器の図に示すように、ここで実施した試験では軸受け部と載荷盤の間に供試体厚制御盤を設置しており、供試体が高さ 20mm（超高圧圧密の場合は 10mm）以上にならないようにしている。これは飽和中の供試体の膨潤を防ぐだけではなく、供試体膨潤圧よりも小さな圧密圧力の領域での供試体の膨潤を防ぐことによって、供試体の初期条件を不明確にすることを回避するための措置である。例えば図-1.11.3 に示すように、過圧密領域において供試体の膨潤を不用意に許容した場合、先行圧密圧力 p_c' を過小に評価する可能性が生ずる。このように供試体に 20mm 以上の膨潤を許容しないという点で今回採った試験手法は【JGS 0411-2000：土の段階載荷による圧密試験方法】¹⁵⁾とは異なる。

なお圧密圧力を作用させても殆ど沈下を生じなかった場合（過圧密領域、あるいは圧密圧力 < 供試体膨潤圧の領域）については、沈下量が微量であることを確認した後、直ちに次段階の荷重に移行した。一方、圧密沈下が生ずるような領域（正規圧密領域）では、正規の試験法¹⁵⁾に倣い、90%圧密終了時（ t_{90} ）に求められる沈下量（ d_{90} ）をもとに算出した100%圧密沈下量（ d_{100} ）を確認した段階で、圧密圧力の変更を行った。

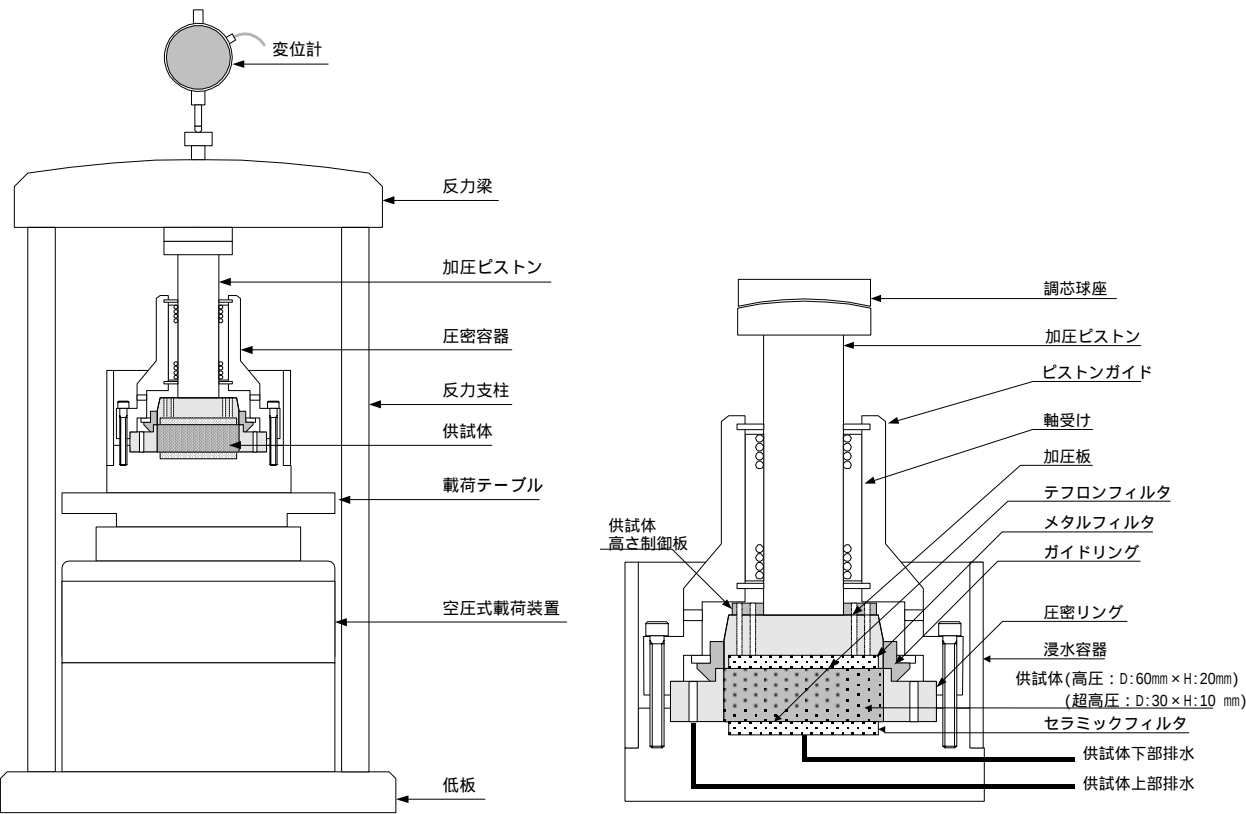


図-1.11.2 圧密試験装置（左：載荷装置、右：試験容器）

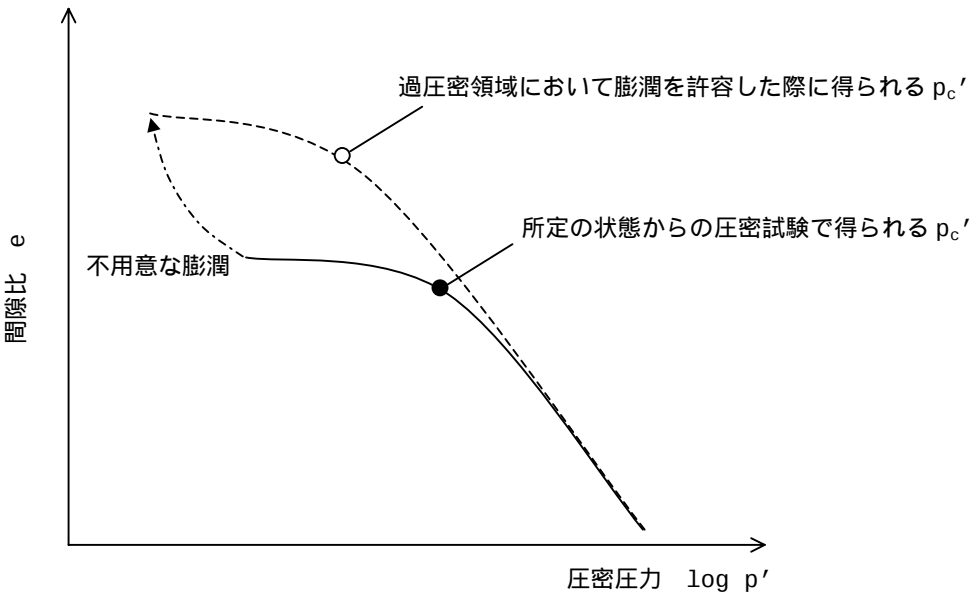


図-1.11.3 膨潤による先行圧密圧力 p_c' の過小評価

1.11.2 試験結果

圧密試験に用いた供試体の諸元を表-1.11.1 に示す。最大膨潤率発生を目標とした供試体で得られた最大膨潤率は Ca 型化率 50%ベントナイトで 150～200%であり、後述する膨潤量試験結果とほぼ整合する結果となった。

表-1.11.1 供試体の諸元

ベントナイト	想定膨潤率	初期間隙比 e_0 (目標)	供試体 No.	高さ h (mm)	直径 ϕ (mm)	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	初期間隙比 e_0 (実績)
Na 型	40%	1.391	1	9.36	30**	1.143	1.391
			2	9.34	30**	1.143	1.391
Ca 型化率 50%	0%	0.691	1	19.37	60	1.601	0.690
			2	19.48	60	1.600	0.691
	20%	1.029	1	19.46	60	1.334	1.028
			2	19.71	60	1.334	1.028
	40%	1.367	1	19.38	60	1.144	1.365
			2	19.64	60	1.143	1.367
			3	9.58	30**	1.145	1.362
			4	9.56	30**	1.144	1.365
	最大膨潤率	-	1	18.26	60	0.548	3.938
			2	16.03	60	0.622	3.346
Ca 型化率 100%	40%	1.332	1	9.12	30**	1.143	1.333
			2	9.22	30**	1.143	1.333

最大膨潤率相当の間隙比を有する供試体を静的締固めによって作製することは困難であるため、乾燥密度 1.6Mg/m^3 の供試体に吸水膨潤させて作製した。それぞれの供試体に生じた膨潤率は、

No.1 191.7% No.2 160.2%

であった。

** 超高压圧密試験用

高圧圧密試験から得られた $e-\log p'$ 関係を図-1.11.4、超高圧圧密試験結果を図-1.11.5 に示す。先行圧密圧力 p_c' は過圧密領域での圧縮線と正規圧密線の交点をもとに定めたもので、図中に示した値は同一条件における試験結果の平均値である。

本試験で得られたベントナイトの $e-\log p'$ 曲線の模式図を図-1.11.6 に示す。前述したように供試体厚さが 20mm（超高圧圧密の場合は 10mm）以上になるような膨潤を拘束して試験を実施したため、過圧密領域においては沈下も膨張も発生せず、圧密降伏点を超過するまで体積変化は、おおむね 0 のままで推移した。その後、圧密降伏点を越えた段階で、 $e-\log p'$ 曲線は正規圧密線を示すようになるが、初期間隙比が大きい場合では、非線形的な正規圧密線が確認された。この傾向は、昨年度試験を実施した、Na 型ベントナイト、Ca 型化率 100%ベントナイトと同じである。最大圧密圧力（10.0MPa 程度）作用後の除荷過程においては、例えば、昨年度試験を行った Na 型ベントナイトでは、明確な非線形性を有する下向き凸の膨潤線が確認されたが、Ca 型化率 50%ベントナイトに関しては、Na 型ベントナイトほどの顕著な非線形性は認められない。これは、Ca 型化の進行に伴う膨潤性能の低下を示唆する結果といえる。即ち、除荷時の膨潤線は、Ca 型化率が大きいほど線形的となり、除荷によって回復する間隙比は相対的に小さなものとなった。

超高圧圧密試験では、40MPa 程度の応力レベルまで載荷を行ったが、0.2～0.3MPa 程度に確認されている明確な降伏点のほかには、10MPa を超えるような応力レベルにおいても降伏を示す挙動を確認することは出来なかった。この結果をもって高圧圧密試験から得られる $e-\log p'$ 曲線の変曲点を降伏点と見なしてもよいと断言することはできないが、高圧圧密試験から得られる変曲点を降伏点と見なしてモデル化を行うということが現実的と判断することに足るデータを取得することができた。

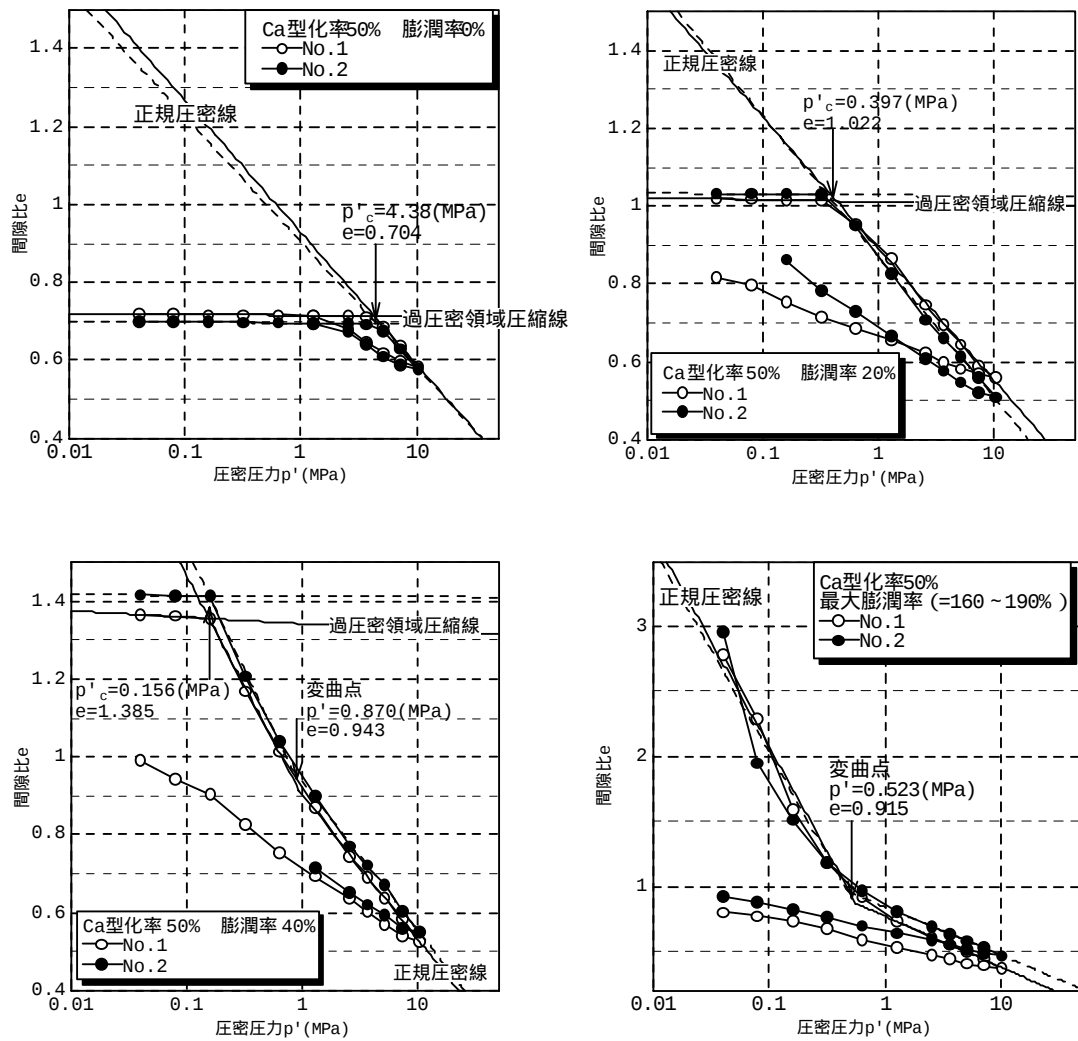
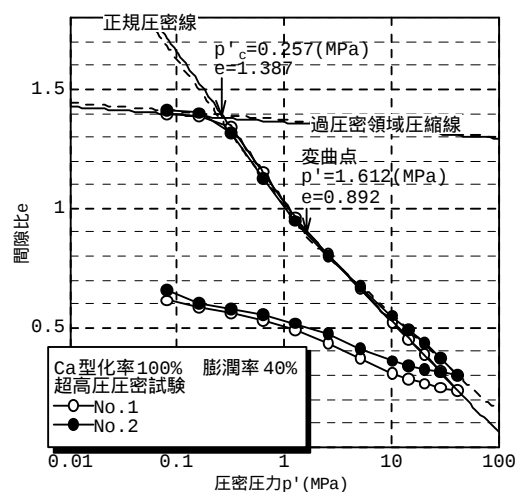
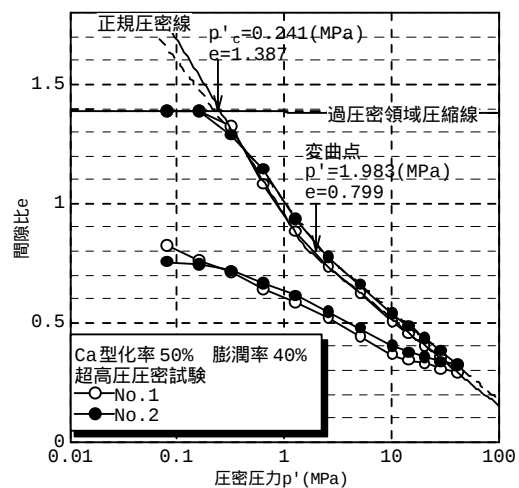
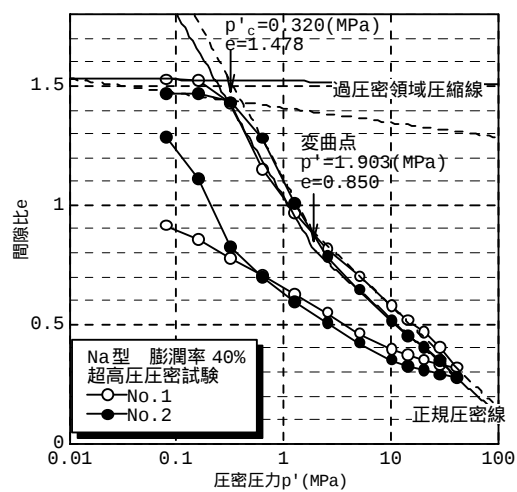


図-1.11.4 e -log p' 曲線 (高压圧密試験 : Ca 型化率 50%)

図-1.11.5 e -log p' 曲線 (超高压圧密試験)

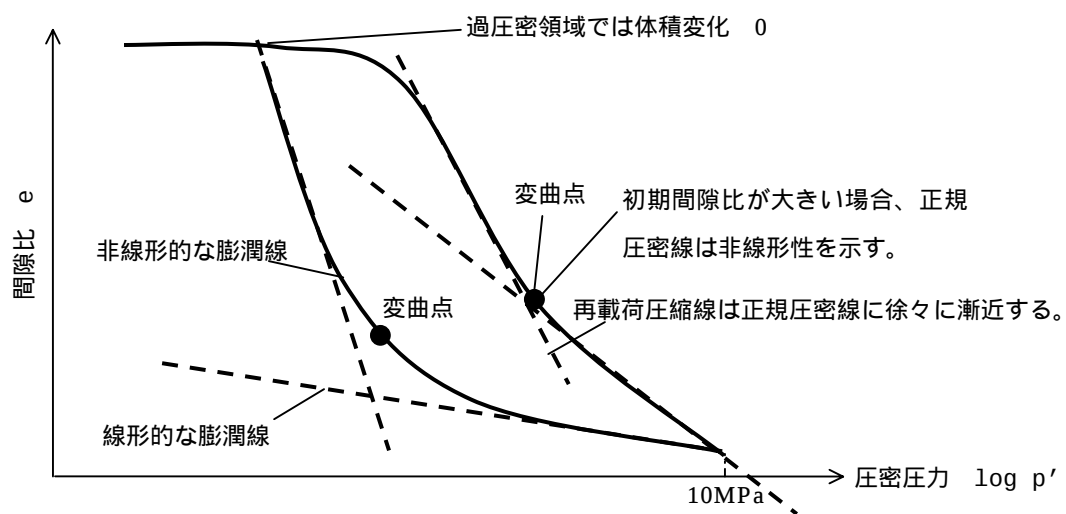


図-1.11.6 ベントナイトの e - $\log p'$ 関係の模式図

表-1.11.2 に試験から得られた圧密物性値をまとめる。なお、過圧密領域の圧縮線の勾配に関しては従来の手法²⁾に倣い、除荷時の膨潤線勾配と同じく膨潤指数と標記することとした(図-1.11.7)。また、正規圧密曲線に非線形性が認められたケースに関しては、変曲点を設定し、その前後の圧縮指数を示した。今回、超高圧圧密試験に関しては Na 型、Ca 型化率 50%、Ca 型化率 100%のベントナイトに関するデータが得られているが、変曲点前の圧縮指数 C_c は、Ca 型化の進展に伴い低下する傾向があるのに対し、変曲点以後の C_c に明確な傾向を認めることは出来ない。このことから正規圧密線の変曲点後の勾配(圧縮指数 C_c 、図-1.11.7)に対する Ca 型化の影響は小さいと推察することができる。

一方、除荷膨潤過程で観測された膨潤指数 C_s (除荷)に関しては、最大および最小の観測値を示した。除荷時の膨潤指数の最大値は Ca 型化率の増加に伴い減少し、最小値は増加する傾向にある。このことは、ベントナイトの膨潤線は Ca 型化率が大きいものほど線形的になることを示唆する結果といえる。

これら正規圧密曲線、膨潤線の変曲点のモデル化に関しては次章で詳述する。

表-1.11.2 ベントナイトの圧密特性

	ベントナイト	膨潤率	No.	膨潤指数 C _s (初期)	先行圧密圧力 p _c '(MPa)	先行圧密圧力 平均値(MPa)	圧縮指数 C _c	膨潤指数 C _s (除荷)	
高圧圧 密試験	Ca 型化 率 50%	0%	1	0.0023	4.278	4.377	0.339	0.080 ~ 0.213	
		0%	2	0.0027	4.477		0.322	0.066 ~ 0.213	
		20%	1	0.0056	0.433	0.397	0.340	0.053 ~ 0.146	
		20%	2	0.0002	0.360		0.363	0.086 ~ 0.266	
		40%	1	0.0166	0.156	0.156	0.568 → 0.375	0.099 ~ 0.256	
		40%	2	0.0017	0.156		0.621 → 0.384	0.066 ~ 0.226	
		full	1	確認不能				1.610 → 0.392	0.093 ~ 0.289
		full	2					1.573 → 0.370	0.139 ~ 0.212
超高压 圧密試験	Na 型	40%	1	0.0066	0.230	0.320	0.771 → 0.401	0.086 ~ 0.269	
		40%	2	0.0615	0.410		0.827 → 0.428	0.093 ~ 0.943	
	Ca 型化 率 50%	40%	1	0.0033	0.256	0.241	0.731 → 0.368	0.073 ~ 0.292	
		40%	2	0.0033	0.226		0.590 → 0.375	0.086 ~ 0.256	
	Ca 型化 率 100%	40%	1	0.0332	0.278	0.258	0.626 → 0.470	0.073 ~ 0.219	
		40%	2	0.0365	0.237		0.615 → 0.411	0.073 ~ 0.196	

圧縮指数に関して、正規圧密線が非線形の場合は(変曲点前) → (変曲点后)で示してある。

膨潤指数に関しては、最終除荷段階を除く(膨張抑止治具の影響があるため)、除荷膨潤過程において観測された膨潤指数のうち、最大値、最小値を示した。

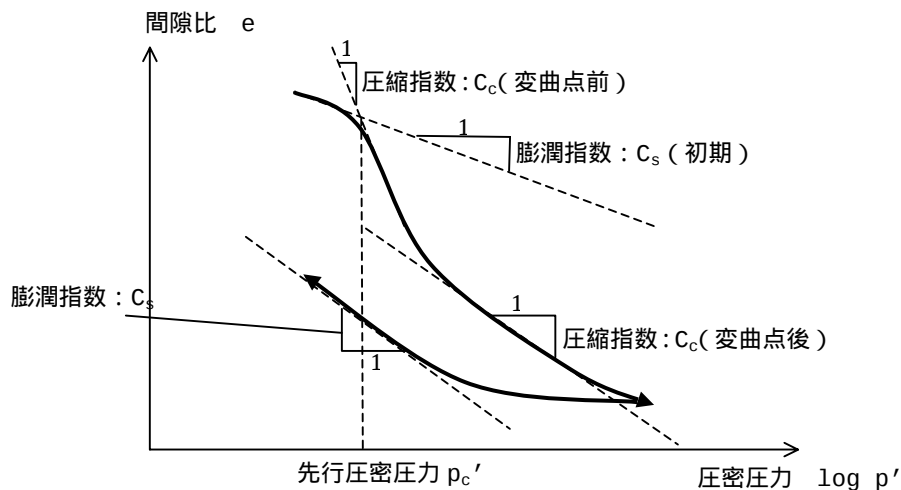


図-1.11.7 圧密特性の模式図

図-1.11.8、9、10 に間隙比と地盤工学会基準¹⁵⁾に基づき圧密試験結果から求めた透水係数の関係を示す。Na 型ベントナイト、Ca 型化率 100%ベントナイトについては、昨年度の結果に今年度実施した超高压圧密試験の結果を併記したが、両者はほぼ等しい間隙比～透水係数関係を示している。また全てのベントナイトについて、間隙比の増加（乾燥密度の低下）に従って、透水係数が増加する傾向が確認された。Ca 型化率 100%ベントナイトでは、間隙比が 1.5 を超過すると透水係数が $1.0 \times 10^{-10} \text{m/sec}$ を上回るような結果も得られているのに対し、Ca 型化率 50%、Na 型ベントナイトでは間隙比が 1.5 を超過した段階で、透水係数の増加傾向が鈍化し、間隙比増分に対する透水係数の増分が急激に小さくなる傾向が見られる。Ca 型化率 50%ベントナイト、Na 型ベントナイトは間隙比 3.0 程度で、それぞれ $1.0 \times 10^{-10} \text{m/sec}$ 、 $1.0 \times 10^{-11} \text{m/sec}$ オーダーの透水係数を示しており、Ca 型化率が増加するとともに、透水係数の増加傾向は顕著になっていることがわかる。

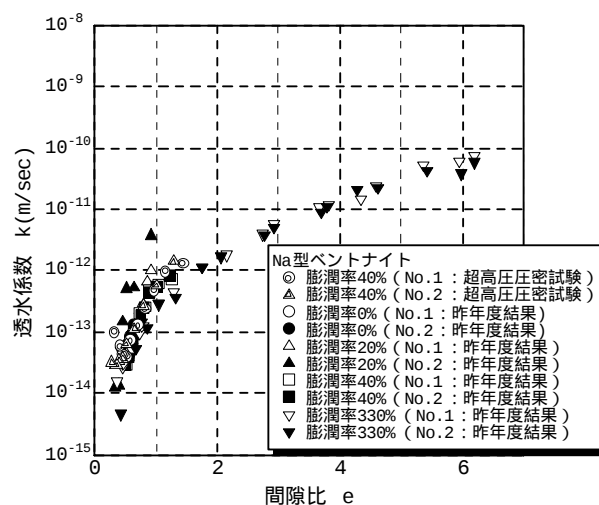


図-1.11.8 透水係数と間隙比の関係 (Na 型ベントナイト)

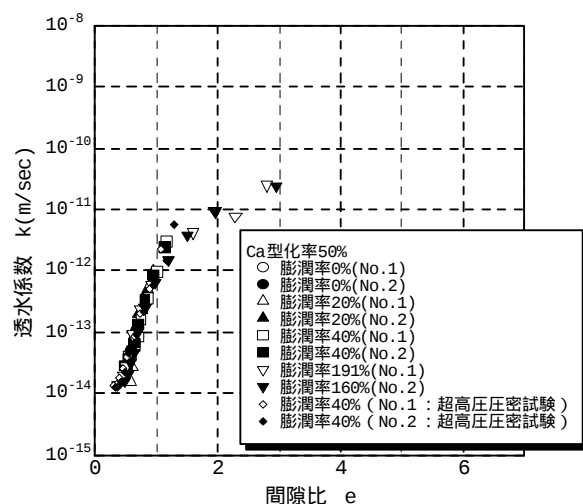


図-1.11.9 透水係数と間隙比の関係 (Ca 型化率 50%)

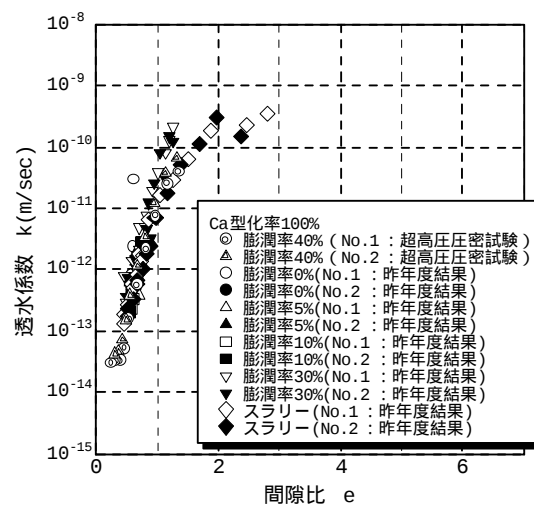


図-1.11.10 透水係数と間隙比の関係 (Ca 型化率 100%)

1.12 等方圧密除荷試験と K_0 圧密除荷試験

1.12.1 試験方法

等方圧密除荷試験と K_0 圧密除荷試験は、ベントナイトの著しい膨潤挙動がどのようなメカニズムによって生じているのかを確認することを目的として実施した。

図-1.12.1、1.12.2 に等方圧密除荷、 K_0 圧密除荷試験における有効応力経路の模式図を示す。通常のベントナイトの膨潤挙動は、 K_0 状態（側方ひずみ増分ゼロ条件下）で観察されている。過去の実験事実から（例えば、Ladd, et al.¹⁸⁾） K_0 除荷時には、 K_0 線を辿らずに、 K_0 線の下側に逸れる傾向があることが知られている。 K_0 線を逸れて、除荷、さらに伸張されれば、応力状態は降伏曲面に達し得る（図-1.12.2 中の点 B ~ C' ~ C）。ベントナイトの応力状態が膨潤時に降伏曲面に達していることが確認されれば、ベントナイトの著しい膨潤挙動には塑性変形を含む可能性がある。また、等方圧密された粘土は除荷時に静水圧軸を戻り、降伏曲面に達し得ない（図-1.12.1 中の点 B ~ A ~ O）。そこで膨潤特性の著しい Na 型ベントナイトで膨潤率 0% に相当する間隙比の供試体に対して、等方圧密除荷試験と K_0 圧密除荷試験を行い、除荷時の有効応力経路を取得することにより、ベントナイトの膨潤挙動メカニズムを調べた。

等方圧密除荷試験の試験方法は、1.10 節で述べた三軸 $\overline{CU}$ 試験とほぼ同様である。まず、供試体の乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 となるように静的締固めによって作製し、体積変化をさせずに（膨潤率 0% に相当する）飽和を行った。供試体寸法は表-1.3.2 に示したように $\phi 50 \text{ mm} \times h 100 \text{ mm}$ である。尚、処女載荷過程における過圧密領域での不用意な膨潤を回避するため、第一段階の荷重を比較的大きめ（膨潤圧相当）に設定した。この措置は、 K_0 圧密試験でも同様とした。その後、多段階で明確な正規圧密線が得られるまで（4 MPa 程度）圧密試験を行い（図-1.12.1 中の点 A ~ B）図-1.12.3 に示すような $e\text{-log} p'$ 関係で明確な正規圧密挙動が現れた段階で等方応力下での多段階除荷試験を実施した（図-1.12.1 中の点 B ~ O）。除荷過程は、膨潤線が確認できた時点で終了することとした。

一方、 K_0 圧密除荷試験は、図-1.12.4 に示す試験機を作製して行った。まず、供試体の乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 となるように静的締固めによって作製し、体積変化をさせずに（膨潤率 0% に相当する）飽和を行った。この時の供試体寸法は表-1.3.2 に示したように $\phi 60 \text{ mm} \times h 25 \text{ mm}$ である。この寸法は、圧密中に供試体が図-1.12.4 に示す水平応力測定センサの位置を下まわらないように、また、除荷後の膨潤した供試体がリング寸法を超えないように昨年度の膨潤試験結果から決定した。 K_0 圧密除荷試験用のリングの詳細図を図-1.12.5、寸法を表-1.12.1 にまとめて示す。飽和を図-1.12.5 に示す間隙水圧計で確認した後、多段階で圧密圧力が 5.0 MPa 程度まで圧密試験を行い（図-1.12.2 中の点 A ~ B）図-1.12.3 に示すような $e\text{-log} p'$ 関係で明確な正規圧密挙動が現れた段階で K_0 応力（半径方向ひずみが常にゼロ）下で多段階除荷試験を行った（図-1.12.2 中の点 B ~ C'）。除荷過程は、膨潤線が確認できた時点で除荷試験を終了した。試験中、図 1.12.4、1.12.5 に示す水平応力センサで土圧を、間隙水圧計で間隙水圧をそれぞれ計測し、鉛直有効応力と水平有効応力の比から K_0 を

取得した。鉛直荷重測定の際には、図-1.12.4 に示すように圧密リング下面に設置したロードセルによってリング内周面摩擦を測定し、摩擦の影響を考慮した鉛直荷重を用いた。

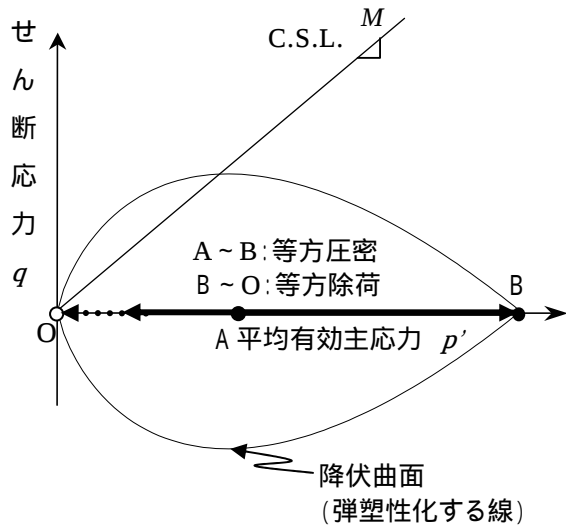


図-1.12.1 等方圧密除荷試験の模式図

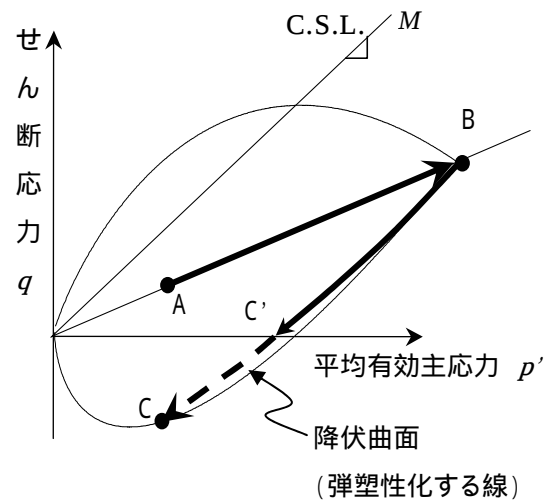


図-1.12.2 K_0 圧密除荷試験の模式図

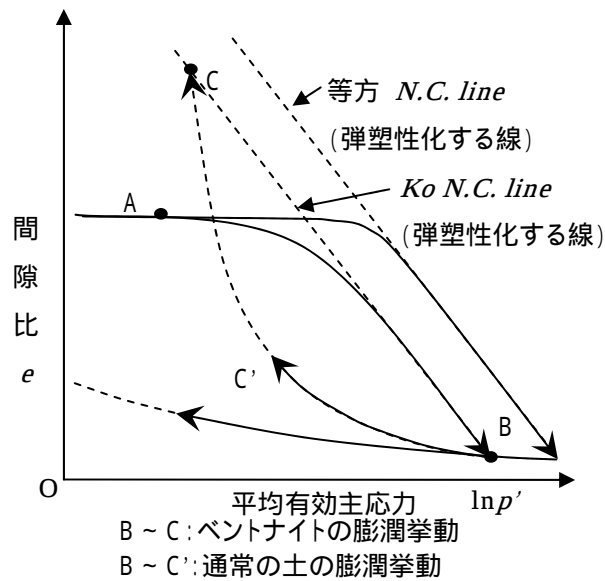


図-1.12.3 等方・ K_0 圧密除荷時の e - $\log p'$ 関係の模式図

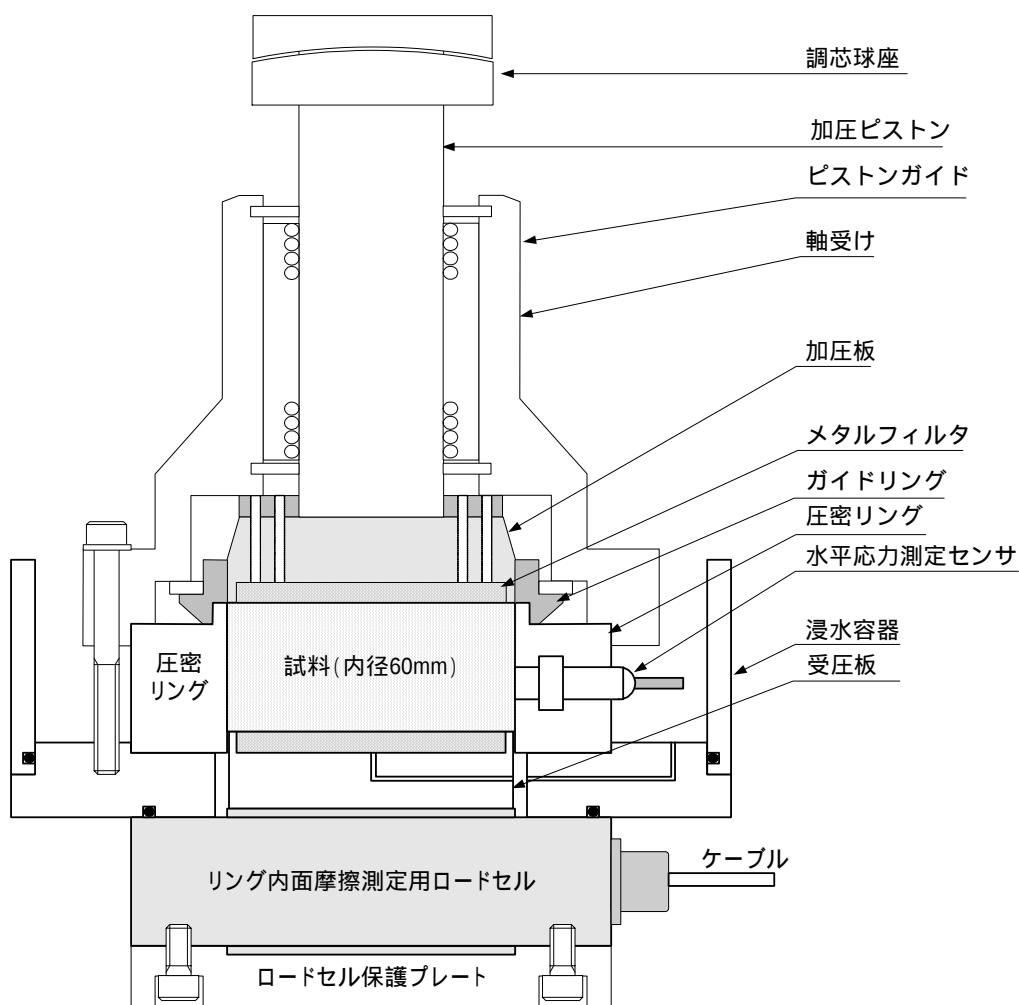


図-1.12.4 K₀ 圧密試験装置模式図

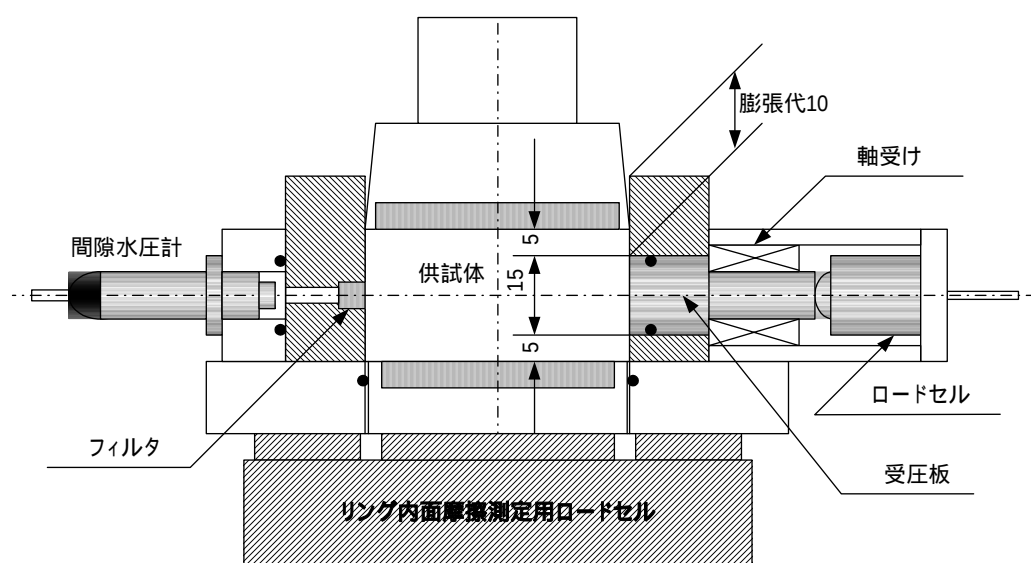


図-1.12.5 K₀ 圧密リングの詳細図

表-1.12.1 水平応力測定用圧密リングの寸法

内径	60mm	
高さ	35mm	土圧計直径 : 15mm 土圧計下部-載荷版 : 5mm 土圧計上部-初期高さ位置 : 5mm 膨張可能高さ : 10mm

1.12.2 試験結果

等方圧密・ K_0 圧密除荷試験の供試体の諸元を表-1.12.2 に示す。供試体寸法はほぼ計画通りとなっている。しかしながら、等方圧密試験の工程上、等方圧密試験用供試体を飽和セルから脱型しなければならないために、脱型による除荷の影響で初期間隙比が目標値 0.708 に対して平均 0.768 となった。

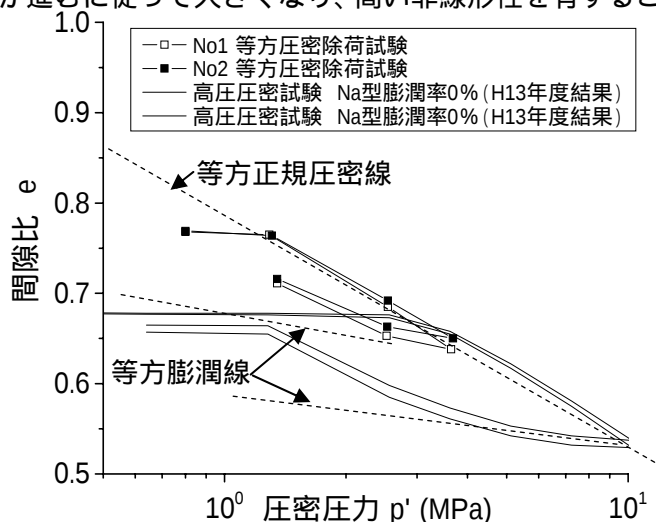
表-1.12.2 供試体の諸元

試験条件	想定 膨潤率	初期間隙比 e_0 (目標)	供試体 No.	高さ h (mm)	直径 ϕ (mm)	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	初期間隙比 e_0 (実績)
等方	0%	0.708	1	100.6	50.4	1.546	0.767
			2	100.7	50.4	1.546	0.768
K_0	0%	0.708	1	24.8	60.0	1.612	0.696
			2	24.9	60.0	1.605	0.702

図-1.12.6、1.12.7 に両試験から得られた e - $\log p'$ 関係を示す。図-1.12.6、1.12.7 には 1.11 節で述べた高圧圧密試験結果を併せて示している。

正規圧密線に着目すれば、等方圧密試験、高圧圧密試験から得られる正規圧密線はほぼ一致している。高圧圧密試験の K_0 値は側圧を計測していないため不明であるが、 $K_0=1.0$ (等方応力状態、 $(\text{圧密圧力 } \sigma_v')=(\text{平均有効主応力 } p'))$ に近いと考えられる。また、 K_0 圧密試験から得られる正規圧密線は高圧圧密試験の正規圧密線からほぼ平行にシフトしているが、高圧圧密試験を等方応力状態と仮定すると、等方圧密時と K_0 圧密時の同材料の正規圧密線は理論上 p' 軸方向に $3/(1+2K_0)$ 倍だけ平行にずれること(図-1.12.3) と整合している。

一方、膨潤線に着目すれば、等方圧密除荷試験の方が除荷初期にほぼ線形的であるのに対して、 K_0 圧密除荷試験から得られる膨潤線は、除荷初期段階の勾配は等方圧密試験と同程度であるが、除荷が進むに従って大きくなり、高い非線形性を有することが確認された。

図-1.12.6 e - $\log p'$ 曲線 (等方圧密除荷試験)

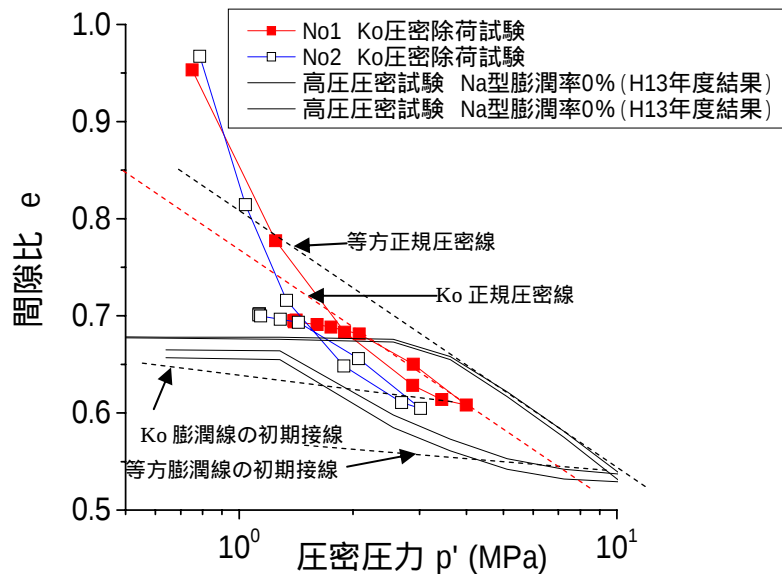
図-1.12.7 e-log p' 曲線 (K_0 圧密除荷試験)

図-1.12.8 に除荷時の応力パスを示す。図-1.12.8 には三軸 $\overline{CU}$ 試験から得られる限界状態パラメータ M 、 K_0 圧密時除荷試験から得られる K_0 値を用いた Na 型ベントナイトの降伏曲面を併せて示してある。ただし、応力経路と降伏曲面の関係を調べるために先行圧密荷重 σ_{vo}' を K_0 圧密試験の最大圧密圧力とした場合 (図-1.12.8 降伏曲面(青)) と初期応力とした場合 (図-1.12.8 降伏曲面(赤)) の 2 つの降伏曲面を示してある。また、 K_0 値と (q/p') の関係は $(q/p') = 3(1 - K_0)/(1 + 2K_0)$ で与えられる ($K_0 = 1.0$ の場合、 $(q/p') = 0.0$ 、 p' 軸となる) が、No.2 供試体では載荷・除荷過程において常に伸張側 ($q < 0$) であったため K_0 値は定まらなかった。

等方圧密除荷時では、載荷過程、除荷過程ともに応力点が p' 軸上を逸脱することがないのに対して、 K_0 圧密時除荷試験中の有効応力は複雑な経路を辿っていることがわかる。 K_0 圧密・除荷試験体 No1、2 とともに載荷過程で K_0 線の下側から K_0 線に漸近し (図-1.12.8 茶線) 除荷時に K_0 線の下側へ逸れ、伸張側でピーク強度を示した後に最終的に原点に向う傾向を示している (図-1.12.8 緑線)。降伏曲面と応力経路の關係に着目すると、最大圧密圧力で定義した降伏曲面を仮定すると (降伏曲面(青))、初期応力状態が負荷後の降伏曲面の外側に存在することになり、オリジナル関口・太田モデルを用いて解釈することは難しい。さらに供試体が静的締固め後、体積変化を拘束された状態で飽和されていることを考慮し、降伏曲面が初期応力を通る (初期応力で降伏曲面の大きさが決まる) と仮定する (降伏曲面(赤)) と、図-1.12.7 に示した e -log p' 關係で正規圧密線が現れたことに矛盾することになる。このベントナイトの膨潤挙動を矛盾なく説明するためには、さらに詳細な実験的な検討、モデルの硬化則の検討をする必要がある。ただし、ベントナイトの膨潤量・膨潤圧試験、高圧圧密試験、さらには処分坑道内の膨潤挙動で想定される K_0 膨潤状態の応力点が、

K₀ 線の下側を通り、伸張側でピーク強度を発現した後に何らかの曲面に沿って移動していく傾向が得られた。仮にこの曲面が降伏曲面であれば、ベントナイトの膨潤挙動には、境界条件によっては塑性成分が含まれる（除荷時に応力点が降伏曲面に達する）ことが予想される。除荷によって塑性化するということは、一見、奇異に思えるが、ベントナイトは膨潤することにより化学的な現象（スメクタイトの層間にまで水分子を取り込む、浸透膨潤）が生じ、その時の化学的作用が外力として作用するものと考えられる。

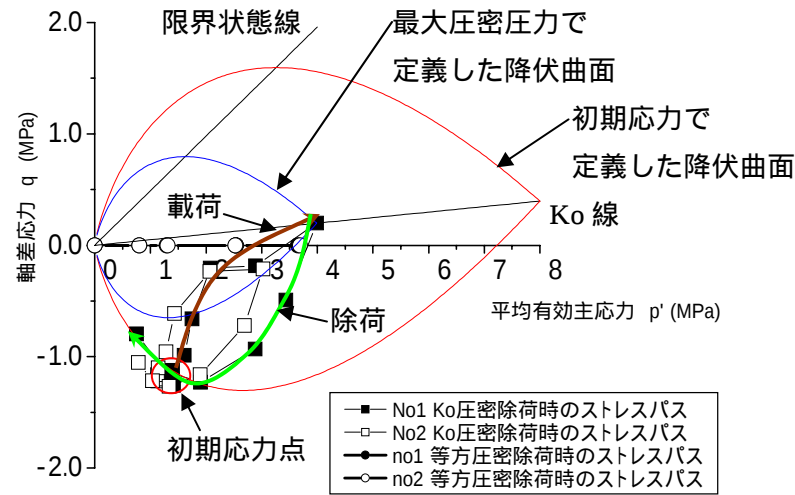


図-1.12.8 有効応力径路（等方圧密除荷試験・K₀ 圧密除荷試験）

試験結果から得られたベントナイトの諸量を表-1.12.3、1.12.4 に示す。K₀ 除荷時の膨潤指数（表-1.12.4）には初期の値と最終的な値を示している。

表-1.12.3 ベントナイトの圧密特性（等方圧密除荷時）

ベントナイト	No.	膨潤指数 C _s （初期）	先行圧密圧力 p _c '(MPa)	先行圧密圧力 平均値(MPa)	圧縮指数 C _c	膨潤指数 C _s （除荷）
Na 型	1	0.016	1.376	1.389	0.294	0.094
	2	0.022	1.401		0.261	0.082

表-1.12.4 ベントナイトの圧密特性（K₀ 圧密除荷時）

ベントナイト	No.	膨潤指数 C _s （初期）	先行圧密圧力 p _c '(MPa)	先行圧密圧力 平均値(MPa)	圧縮指数 C _c	膨潤指数 C _s （除荷）	K ₀ 線の 傾き	K ₀
Na 型	1	0.005	2.570	2.165	0.281	0.088→0.796	0.050	0.952
	2	0.004	1.760		0.347	0.118→1.262	—	—

載荷・除荷過程において常に伸張側(q<0)であったため K₀ 値は定まらない。

1.13 透水試験

1.13.1 試験方法

試験は、圧力法を用いた定水位透水試験方法によって実施した。供試体は、透水試験機の内部において、表-1.13.1 に示す膨潤率に相当する間隙比に静的に締固めて作製した（供試体の作製方法は 1.3.2 項「供試体の作製方法」を参照のこと）。昨年度のようにベントナイトの自己膨潤によって供試体に所定の膨潤率を与える方法では、Ca 型化に伴う膨潤性能の劣化のため、現実的な試験期間内では Ca 型化率 100%ベントナイトでは 10%程度の初期膨潤率を有する供試体までしか作成できなかった。しかしながら今回採用した静的締固めによる供試体作製法を採用することによって、Ca 型化率 100%ベントナイトでも、初期膨潤率 40%に相当する間隙比での透水試験が可能となった。透水試験の試験ケースを表-1.13.1 に示す。また、本検討で作成した供試体の諸元を表-1.13.2 に示す。

表-1.13.1 透水試験の試験ケース

ベントナイト	膨潤率(%)	備 考
Ca 型化率 50%	0、20、40	再現性確認のため各試験とも 2 回ずつ実施する。
Ca 型化率 100%	40	

表-1.13.2 供試体の諸元

ベントナイト	想定膨潤率	初期間隙比 e_0 (目標)	供試体 No.	高さ h (mm)	直径 ϕ (mm)	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	初期間隙比 e_0 (実績)
Ca 型化率 50%	0%	0.691	1	20.00	40.00	1.599	0.692
			2	20.00	40.00	1.601	0.690
	20%	1.029	1	20.00	40.00	1.332	1.031
			2	20.00	40.00	1.332	1.031
	40%	1.367	1	20.00	40.00	1.143	1.367
			2	20.00	40.00	1.143	1.367
Ca 型化率 100%	40%	1.333	1	20.00	40.00	1.140	1.339
			2	20.00	40.00	1.140	1.339

1.13.2 試験結果

Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの透水試験結果を表-1.13.3 にまとめる。図-1.13.1、1.13.2 に試験開始から終了までの透水係数の経時変化を示す。透水係数の経時変化において、試験開始から 10 日程度は、透水係数にばらつきが見られるが、それ以降では、透水係数はほぼ一定に推移しており、透水が定常状態になっていることが分かる。

Ca 型化率 50%ベントナイトの透水係数は $10^{-12} \sim 10^{-13}(\text{m/sec})$ のオーダーであり、初期膨潤率が大きくなるに従って透水係数が増加する。一方、Ca 型化率 100%ベントナイトの透水係数は昨年度の試験によれば、膨潤率 0～10%の範囲では透水係数が $1.0 \times 10^{-12}(\text{m/sec})$ 付近に分布するという結果であったが、膨潤率が 40%になると透水係数が $1.0 \times 10^{-10}(\text{m/sec})$ まで大きくなることがわかった。Ca 型化率 50%ベントナイトと Ca 型化率 100%ベントナイトを比較しても、後者の透水係数が前者のそれを大きく上回っており、Ca 型化によって透水係数が大きくなる傾向が確認できた。

表-1.13.3 透水試験の結果

ベントナイト	想定 膨潤率	供試体 No.	初期間隙比 e_0 (実績)	透水係数 k (m/sec)	備考
Ca 型化率 50%	0%	1	0.692	1.16×10^{-13}	本検討
		2	0.690	1.22×10^{-13}	本検討
	20%	1	1.031	3.94×10^{-13}	本検討
		2	1.031	5.48×10^{-13}	本検討
	40%	1	1.367	1.51×10^{-12}	本検討
		2	1.367	1.60×10^{-12}	本検討
Ca 型化率 100%	0%	1	0.665	1.08×10^{-12}	昨年度結果
		2	0.669	1.07×10^{-12}	昨年度結果
	5%	1	0.783	2.04×10^{-12}	昨年度結果
		2	0.778	1.74×10^{-12}	昨年度結果
	10%	1	0.862	3.06×10^{-12}	昨年度結果
		2	0.862	2.85×10^{-12}	昨年度結果
	40%	1	1.339	1.33×10^{-10}	本検討
		2	1.339	1.32×10^{-10}	本検討

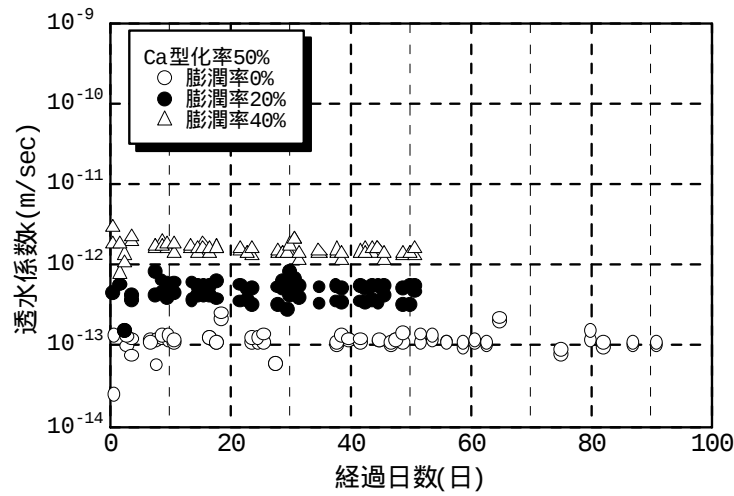


図-1.13.1 透水試験結果（経時変化：Ca 型化率 50%）

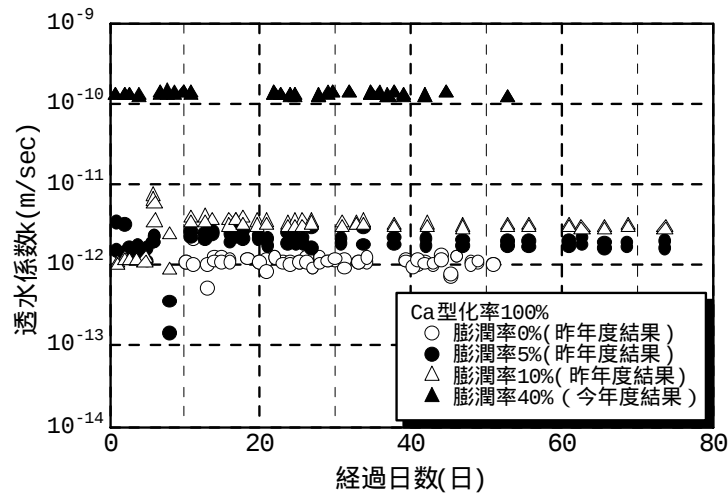


図-1.13.2 透水試験結果（経時変化：Ca 型化率 100%）

1.14 膨潤圧試験

1.14.1 試験方法

膨潤圧試験ではベントナイトの一次元的な膨潤挙動を把握することを目的とし、リング容器とシリンダーを用いた図-1.14.1 のような試験装置を用いて実施した。

供試体は、膨潤圧試験機の内部において、表-1.14.1 に示す初期膨潤率に相当する間隙比となるように静的に締固めて作製した（供試体の作製方法は 1.3.2 項「供試体の作製方法」を参照のこと）。供試体の初期間隙比は、Ca 型化率 50%ベントナイトで 0、20、40%相当の、Ca 型化率 100%ベントナイトで 10、40%相当の初期膨潤率となるように設定した。昨年度実施した自己膨潤による供試体の作製方法では、現実的な試験期間において Ca 型化率 100%ベントナイトで初期膨潤率 10%以上の供試体を作製することは困難であった。1.3.2 項に示す静的締固めによる作製方法によって Ca 型化率 100%ベントナイトで初期膨潤率 40%相当の供試体を用いた膨潤圧試験が可能となった。膨潤圧試験の試験ケースを表-1.14.1 に示す。

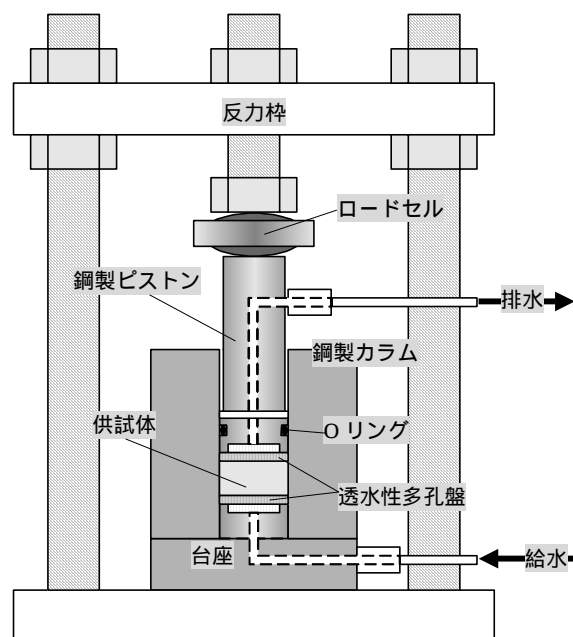


図-1.14.1 膨潤圧試験装置

表-1.14.1 膨潤圧試験の試験ケース

ベントナイト	初期膨潤率(%)	備考
Ca 型化率 50%	0、20、40	再現性確認のため各試験とも2回ずつ実施する。
Ca 型化率 100%	10、40	

1.14.2 試験結果

膨潤圧試験結果を表-1.14.2、1.14.3 に示す。表-1.14.3 には昨年度実施した Ca 型化率 100%ベントナイトの結果も併記した。さらに表-1.14.4 には、昨年度実施した Na 型ベントナイトの膨潤圧試験結果を参考として示した。なお、本検討の目的はベントナイトの長期的な力学的変遷のモデル化であるため、ここに示した膨潤圧はすべて最大膨潤圧ではなく、平衡膨潤圧である。

図-1.14.2、1.14.3 に Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの膨潤圧の経時変化を示す。図-1.14.3 には昨年度実施した Ca 型化率 100%の結果も併記した。また、図-1.14.4 にベントナイトの間隙比と平衡膨潤圧の関係を示す。

膨潤圧の経時変化に関して見ると、Ca 型化率が大きくなるほど、平衡膨潤圧に達するまでの期間が短くなる傾向が見られる。すなわち、Ca 型化率 100%の場合では通水開始から平衡膨潤圧の発現まで 3 日程度を要するのに対し、Ca 型化率 50%の場合では 5 日程度の通水で平衡膨潤圧に達するという結果となった。

図-1.14.4 に示すように、Ca 型化率によらず平衡膨潤圧と間隙比には何らかの相関があることが示唆されている。但し、昨年度の結果では、初期膨潤率 0%での平衡膨潤圧は、Na 型ベントナイトで平均 2.03(MPa)、Ca 型化率 100%ベントナイトで平均 2.55(MPa)であった。これに対し、Ca 型化率 50%ベントナイトの初期膨潤率 0%時の平衡膨潤圧は平均で 2.82 (MPa)である。昨年度の結果では、Ca 型化が進むと膨潤圧は大きくなる傾向であったが、Ca 型化率 50%ベントナイトの平衡膨潤圧は、Ca 型化率 100%ベントナイトの平衡膨潤圧を上回っており、Ca 型化率と膨潤率 0%時の平衡膨潤圧には有意な関係は存在しないという結果になった。

この原因として、図-1.5.1 に示したように、Ca 型化率 50%ベントナイトでは全体的に粒径が他のベントナイトよりも小さいことが考えられる。また、他の原因として供試体の作製方法（膨潤供試体と静的締固めによる供試体）も考えられるが、初期膨潤率 0%に関しては、作成方法の違いによる影響は認められず、この影響は小さいと考えられる。そこで粒径の影響や各ケースの実験手法的誤差を除去するために、横軸に間隙比、縦軸に初期膨潤率 0%時の平衡膨潤圧で無次元化した膨潤圧をとってまとめると図-1.14.5 のようになる。図-1.14.4、5 に見られるように、全ての Ca 型化率において間隙比が 0.7～1.1 の間で膨潤圧は急激に減少する傾向が明確に見られる。また、Ca 型化率 100%で若干のばらつきがあるものの、Na 型ベントナイトと Ca 型化率 50%ベントナイトは、ほぼ同じ傾向を示しており、無次元化した膨潤圧と間隙比にも、一定の関係があることが示唆されている。このまとめ方の有効性を確認するためには、間隙比が 0.7～1.1 の範囲における更なるデータの蓄積が必要と考えられる。

表-1.14.2 供試体の諸元

ﾊﾞﾝﾄｳｲ	想定初期 膨潤率	初期間隙比 e_0 (目標)	供試体 No.	高さ h (mm)	直径 ϕ (mm)	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	初期間隙比 e_0 (実績)
Ca 型化率 50%	0%	0.691	1	2.005	4.000	1.596	0.695
			2	2.005	4.000	1.596	0.695
	20%	1.029	1	2.001	4.000	1.333	1.029
			2	2.006	4.000	1.330	1.034
	40%	1.367	1	2.001	4.000	1.142	1.369
			2	2.004	4.000	1.141	1.371
Ca 型化率 100%	10%	0.834	1	2.001	4.000	1.454	0.834
			2	1.997	4.000	1.457	0.830
	40%	1.333	1	1.995	4.000	1.145	1.328
			2	1.993	4.000	1.147	1.324

表-1.14.3 膨潤圧試験結果

ﾊﾞﾝﾄｳｲ	想定初期 膨潤率	供試体 No.	初期間隙比 e_0 (実績)	平衡膨潤圧 (MPa)	備考
Ca 型化率 50%	0%	1	0.695	2.878	本検討
		2	0.695	2.762	本検討
	20%	1	1.029	0.441	本検討
		2	1.034	0.460	本検討
	40%	1	1.369	0.159	本検討
		2	1.371	0.176	本検討
Ca 型化率 100%	0%	1	0.675	2.27	昨年度結果
		2	0.675	2.82	昨年度結果
	5%	1	0.781	1.36	昨年度結果
		2	0.775	1.33	昨年度結果
	10%	1	0.857	0.168	昨年度結果
		2	0.855	0.297	昨年度結果
	10%	1	0.834	0.923	本検討
		2	0.830	0.843	本検討
	40%	1	1.328	0.095	本検討
		2	1.324	0.085	本検討

表-1.14.4 膨潤圧試験の結果（Na 型ベントナイト、昨年度実施）

初期 膨潤率	No.	初期間隙比 e_0 (実績)	膨潤圧 P_t (MPa)	膨潤圧平均値 P_{λ} (MPa)
0%	1	0.711	2.10	2.03
	2	0.712	1.95	
20%	1	1.040	0.278	0.280
	2	1.037	0.281	
40%	1	1.425	0.137	0.119
	2	1.414	0.100	

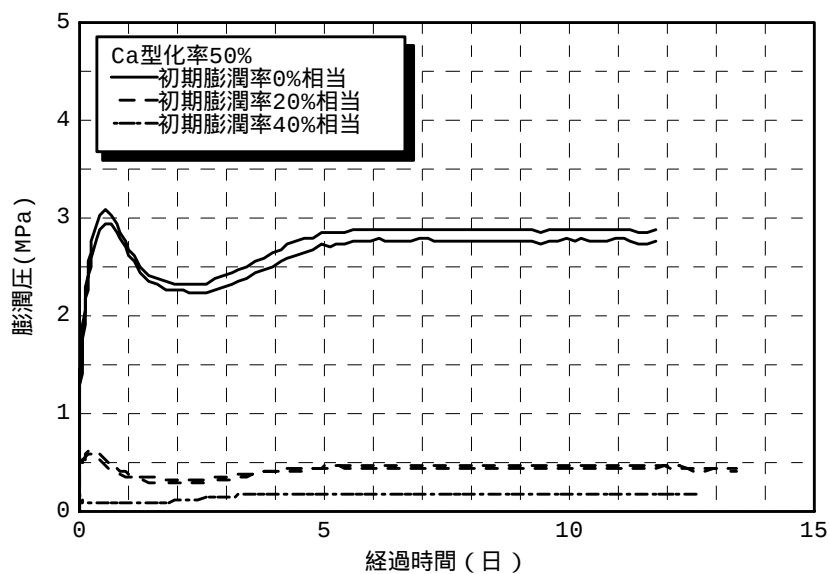


図-1.14.2 膨潤圧試験結果 (経時変化: Ca 型化率 50%)

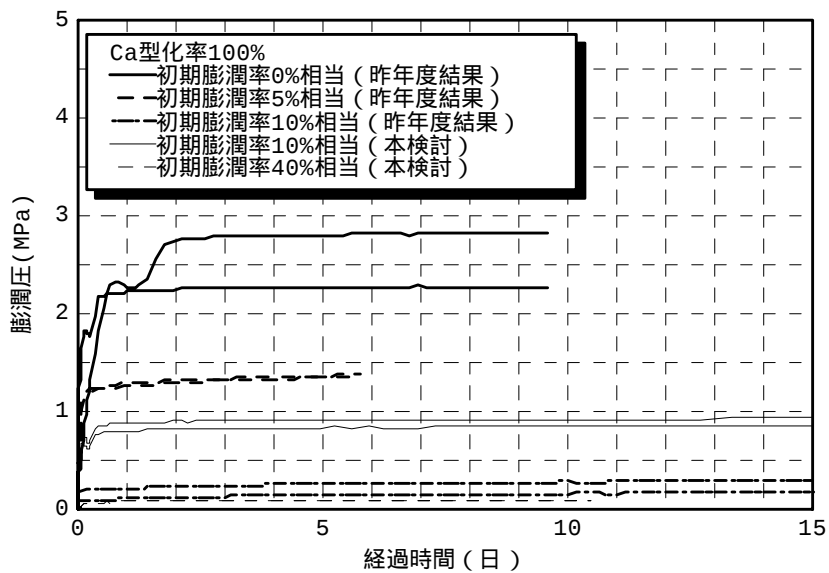


図-1.14.3 膨潤圧試験結果 (経時変化: Ca 型化率 100%)

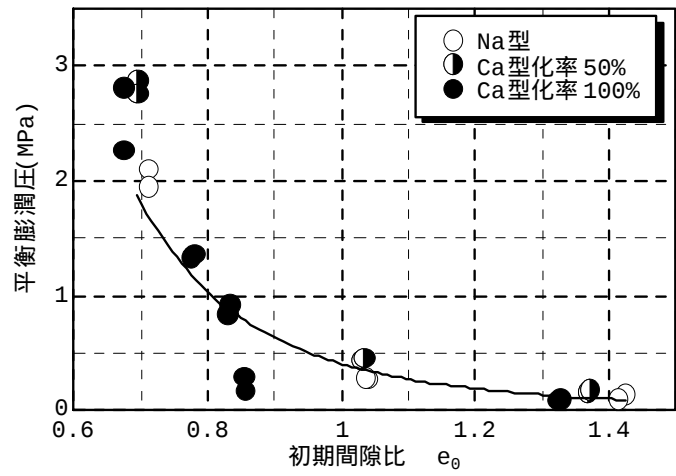


図-1.14.4 平衡膨潤圧と初期間隙比の関係

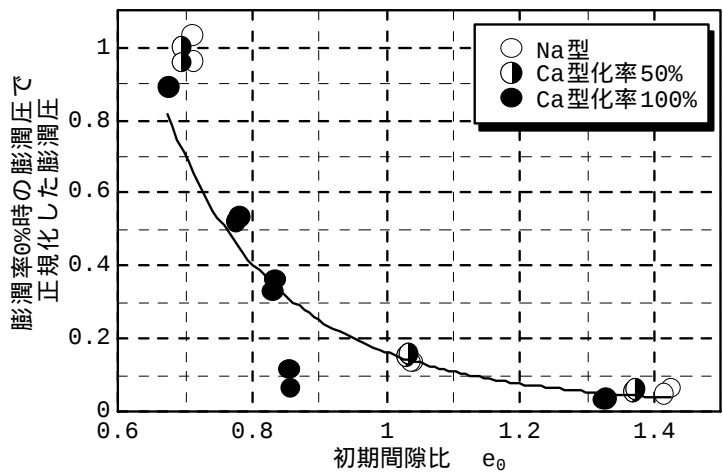


図-1.14.5 無次元化した膨潤圧と初期間隙比の関係

1.15 膨潤量試験

1.15.1 試験方法

膨潤量試験ではベントナイトの一次元的な膨潤挙動を把握することを目的とし、リング容器とシリンダーを用いた図-1.15.1 のような試験装置を用いて実施した。

供試体は、膨潤量試験機の内部において、表-1.15.1 に示す初期膨潤率に相当する間隙比となるように静的に締固めて作製した（供試体の作製方法は 1.3.2 項「供試体の作製方法」を参照のこと）。供試体の初期間隙比は、Ca 型化率 50%ベントナイトで 0、20、40%相当の、Ca 型化率 100%ベントナイトで 40%相当の初期膨潤率を有するように設定した。昨年度実施した自己膨潤による供試体の作製方法では、現実的な試験期間中に Ca 型化率 100%ベントナイトで初期膨潤率 10%以上の供試体を作製することは困難であったが、1.3.2 項に示す静的締固めによる作製方法により Ca 型化率 100%ベントナイトで初期膨潤率 40%相当の供試体を用いた膨潤量試験が可能となる。膨潤量試験の試験ケースを表-1.15.1 に示す。

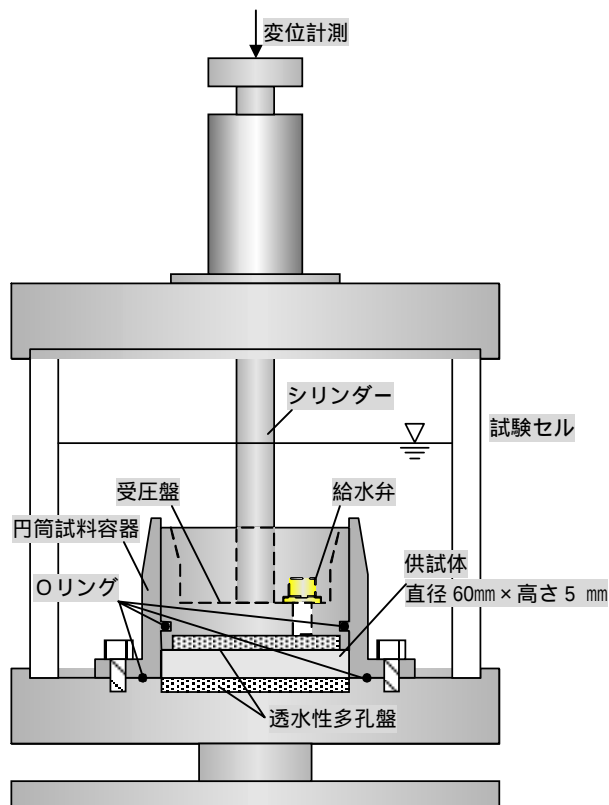


図-1.15.1 膨潤量試験装置

表-1.15.1 膨潤量試験のケース

ベントナイト	初期膨潤率(%)	備考
Ca 型化率 50%	0、20、40	再現性確認のため各試験とも 2 回ずつ実施する。
Ca 型化率 100%	40	

1.15.2 試験結果

膨潤量試験結果を表-1.15.2、1.15.3 に示す。表-1.15.3 には昨年度実施した Ca 型化率 100%ベントナイトの結果も併せて示した。さらに、表-1.15.4 には昨年度実施した Na 型ベントナイトの結果を参考として示した。図-1.15.2～1.15.5 に膨潤量の経時変化を示す。ここで、検討する物理量として膨潤体積ひずみ（いわゆる膨潤率）と間隙比を採用した。

Ca 型化率 50%ベントナイトが最大膨潤量に達するのに要する時間は、10 日程度であるが、Ca 型化率 100%ベントナイトでは、最大膨潤量まで 1 日程度しか要しなかった。これは Ca 型化に起因する遮水性能劣化によって、ベントナイト中の間隙水移動が早くなるのが一因と考えられる。

最大膨潤量に着目すれば、昨年度実施した Na 型ベントナイトの最大膨潤率は、初期膨潤率 0%時で平均 297%であった。初期膨潤率が大きくなるに従って、最大膨潤率は直線的に減少し、初期膨潤率 40%時では最大膨潤率は平均 215%となり、初期膨潤率 0%時の最大膨潤率の 72%程度となった。Ca 型化率 100%ベントナイトでも同様に、初期膨潤率 0%時で平均 31.3%に対して、初期膨潤率が大きくなるに従って最大膨潤率は減少し、今年度実施した初期膨潤率 40%の試験で観測された最大膨潤率は平均 4.4%となった。これは、初期膨潤率 0%時の最大膨潤率の 14%程度に相当する。Ca 型化率 50%ベントナイトの場合、初期膨潤率 0%時で平均 141%で、他のベントナイトと同様に初期膨潤率（初期間隙比）が大きくなるに従って、最大膨潤率は減少し、初期膨潤率 40%では平均 88%となった。これは初期膨潤率 0%時の最大膨潤率の約 70%である。これらを図-1.15.6 にまとめる。縦軸は最大膨潤時の間隙比と初期間隙比の比であり、横軸は初期間隙比である。初期間隙比が大きければ、最大膨潤量は減少し、さらに Ca 型化が進むほど膨潤性能が低くなる傾向が、明確に現れている。

表-1.15.2 供試体の諸元

ペントナイト	初期想定 膨潤率	初期間隙比 e_0 (目標)	供試体 No.	高さ h (mm)	直径 ϕ (mm)	乾燥密度 $\rho_d(\text{Mg/m}^3)$	初期間隙比 e_0 (実績)
Ca 型化率 50%	0%	0.691	1	5.03	60.00	1.595	0.695
			2	4.98	60.00	1.610	0.680
	20%	1.029	1	5.02	60.00	1.323	1.037
			2	5.00	60.00	1.337	1.022
	40%	1.367	1	5.04	60.00	1.138	1.376
			2	4.99	60.00	1.148	1.357
Ca 型化率 100%	40%	1.333	1	5.00	60.00	1.140	1.340
			2	4.99	60.00	1.146	1.327

表-1.15.3 膨潤量試験結果

ペントナイト	想定初期 膨潤率	供試 体 No.	上載圧 p ¹ (MPa)	初期間隙比 e ₀ (実績)	最大膨潤率 (%)	最終間隙比 e	備考
Ca 型化率 50%	0%	1	0.003	0.695	122.3	2.769	本検討
		2		0.680	141.0	3.048	本検討
	20%	1		1.037	138.6	3.862	本検討
		2		1.022	111.0	3.269	本検討
	40%	1		1.376	88.9	3.490	本検討
		2		1.357	87.2	3.410	本検討
	平均					3.308	全平均
Ca 型化率 100%	0%	1	0.002	0.699	44.7	1.455	昨年度結果
		2		0.668	17.9	0.967	昨年度結果
	5%	1		0.712	25.7	1.152	昨年度結果
		2		0.747	17.5	1.046	昨年度結果
	10%	1		0.805	16.0	1.094	昨年度結果
		2		0.830	20.7	1.206	昨年度結果
	40%	1	0.003	1.340	4.20	1.438	本検討
		2		1.327	4.61	1.434	本検討
	平均					1.222	全平均

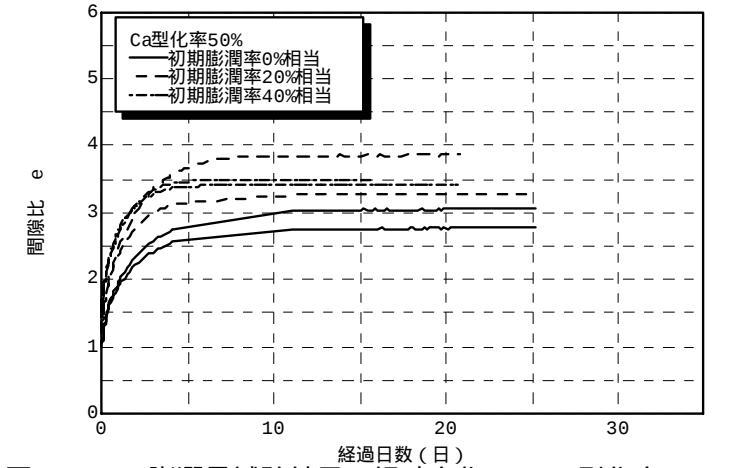
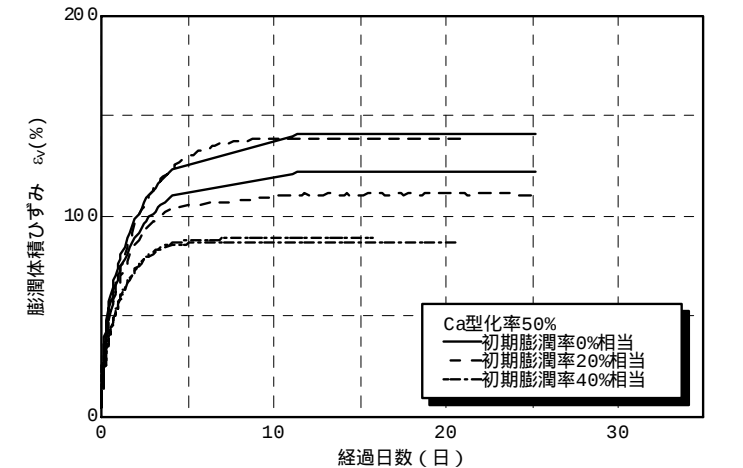
1 受圧盤、シリンダー等の自重による上載圧

2 本表に示した最終間隙比に関する数値は初期間隙比の実績値を元に算出しているため、昨年度報告書⁵⁾に示した数値と若干異なる。

表-1.15.4 膨潤量試験結果（Na 型、昨年度実施）

ベントナイト	想定初期 膨潤率	供試体 No.	上載圧 p ¹ (MPa)	初期間隙比 e ₀ (実績)	最大膨潤率 (%)	最終間隙比 e	
Na 型	0%	1	0.002	0.740	253	5.141	
		2		0.674	342	6.393	
	20%	1		1.043	254	6.232	
		2		1.047	252	6.202	
	40%	1		1.425	215	6.651	
		2		1.444	214	6.663	
	平均					6.214	

- 1 受圧盤、シリンダー等の自重による上載圧
- 2 本表に示した最終間隙比に関する数値は初期間隙比の実績値を元に算出しているため、昨年度報告書⁵⁾に示した数値と若干異なる。



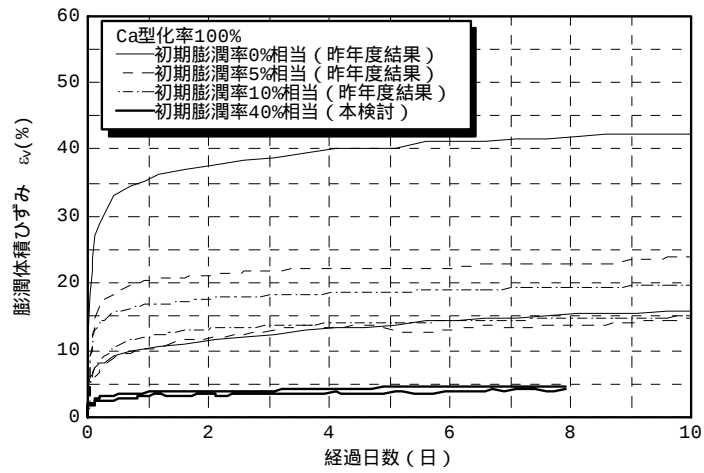


図-1.15.4 膨潤量試験結果（経時変化 1：Ca 型化率 100%）

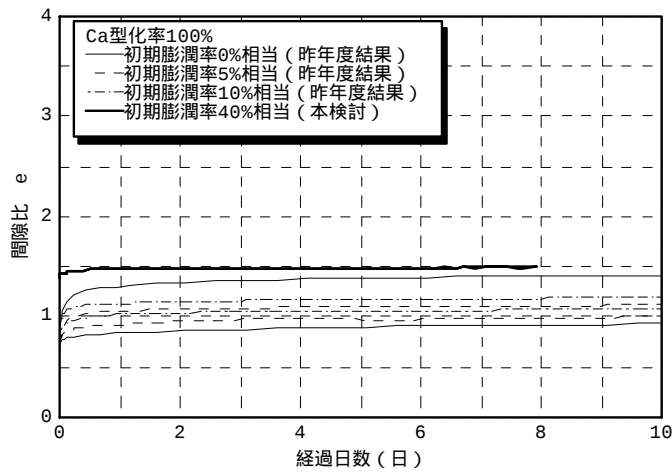


図-1.15.5 膨潤量試験結果（経時変化 2：Ca 型化率 100%）

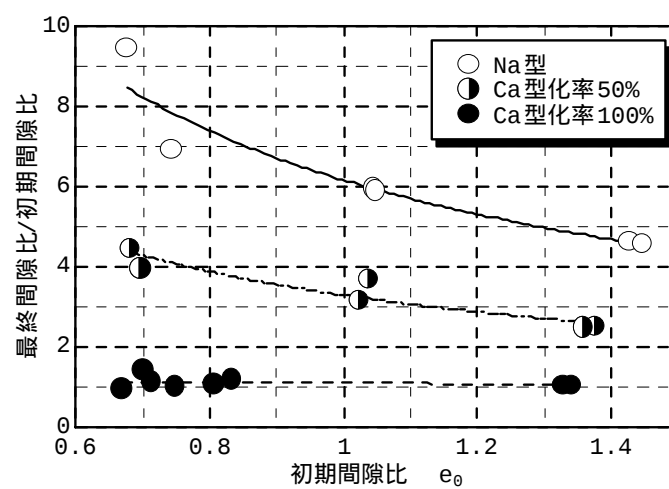


図-1.15.6 Ca 型化率と膨潤率 (=最終間隙比/初期間隙比) の関係

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構、電気事業連合会、共同作業チーム：“TRU 廃棄物処分概念検討書” JNC TY1400 2000-001 TRU TR-2000-01, (2000)
- 2) 大井貴夫, 三原守弘, 高瀬博康, 稲垣学, 三木崇史,：“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 - ”(社)日本原子力学会「2002 年秋の大会」, 予稿集, F41, (2002)
- 3) 田中益弘, 山本博之, “Na 型ベントナイトの Ca 化による透水係数と最大膨潤圧の変化”, 日本原子力学会 1997 秋の大会, I32, pp.674, (1997)
- 4) 例えば、Atkinson, J.H., Bransby, P.L.: The Mechanics of Soils-An Introduction to Critical State Soil Mechanics-, McGraw-Hill, London, pp.129, (1977)
- 5) 笹倉剛, 畔柳幹雄, 岡本道孝：“ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び調査”, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TJ8400-2002-025 (2002)
- 6) 奥津一夫, 森川誠司, 高村尚, 羽根幸司, 田部井和人, 青柳孝義, 村上武志, 松中亮治, 高瀬博康, Savage, D., 稲垣学, 野口俊英：“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委託研究報告書, JNC TJ8400 2002-031, (2002)
- 7) Sekiguchi, H., Ohta, H.: “Induced an isotropy and time dependency in clays”, Proc. Specially Session9, 9th Int. Conf. Soil Mech. & Foundation Engrg. pp.475-484, (1977)
- 8) 核燃料サイクル開発機構：“地層処分研究開発第二次取りまとめ - 分冊 2 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022, (1999)
- 9) 高治一彦, 鈴木英明：“緩衝材の静的力学特性”, サイクル機構技術資料, pp.38, JNC TN8400 99-041, (1999)
- 10) 鈴木英明, 藤田朝雄：“緩衝材の膨潤特性”, サイクル機構技術資料, pp.23, JNC TN8400 99-038, (1999)
- 11) 前田宗宏, 棚井憲治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘：“カルシウム型化およ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、一軸圧縮強度および弾性係数 - ”, 動燃公開資料, pp.3, PNC TN8410 98-021, (1998)
- 12) 前田宗宏, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘：“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”, 動燃公開資料, pp.31, PNC TN8410 97-314, (1997)
- 13) 岩生周一, 長沢敬之助 編：粘土の辞典, 第一版, 朝倉書店, pp.431, (1985)
- 14) (社)日本土壌肥料学会監修 土壌環境分析法編集委員会編：土壌環境分析法, 博友社, pp.215-219, (1997)
- 15) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説 - 第一回改訂版 -, (2000)
- 16) 飯塚敦：“軟弱地盤の変形・安定解析に関する基礎的研究”, 京都大学学位申請論文, pp.23, (1988)

- 17) 石原研而，木村孟：土木工学大系 8 土質力学，第一版，報国社，pp.95，(1977)
- 18) Ladd, C.C. , Foott, R. , Ishihara,K. , Schlosser,F. , Poulos, H.G. : “ Stress – deformation and strength characteristics ” , Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. & Foundation Engrg. , Vol.2 , pp.421-494 , (1977)

2. ベントナイト系材料の力学的変遷のモデル化のための調査

2.1 解析モデルの試作

前章では、ベントナイト系材料の水理・力学特性に対する Ca 型化率、膨潤の影響を明らかにすることを目的として実施した試験の内容、および取得したデータについて述べた。本章では、これらの影響を考慮した処分施設の長期挙動評価解析への入力データとして供することを目的として、前章で得られた試験結果をもとにそれぞれの Ca 型化率を有するベントナイトに関して各種土質定数と膨潤率の関係の定式化を行った。また、今回取得したデータの妥当性を検証するために既往の研究結果との比較検討も併せて行った。

2.2 モデル化の方針

昨年度のベントナイトの力学特性のデータ取得²⁾は初期膨潤率をパラメータとしていたが、昨年度別途実施した研究¹⁾により、ベントナイトの膨潤挙動を考慮した力学挙動変遷モデルは関口・太田モデルを基本に構築するとの見通しが示されたことを踏まえ、本検討では所定の膨潤率に相当する間隙比 e をパラメータとした。これは、関口・太田モデルは、限界状態理論に基づいて構築されており、 p' (平均有効主応力)・ q (軸差応力)・ e (間隙比) 空間上で表される状態曲面によって土質材料の弾塑性挙動を表現しているからである。従って、ベントナイトの特性変化指標として間隙比を採用すれば、これを関口・太田モデルへ反映することは容易となる。そこで、本章においても、間隙比 e を用いて、それぞれの Ca 型化率を有するベントナイトの水理・力学挙動の定式化 (モデル化) を行うこととした。

関口・太田モデルの導出の過程では、物体の変形を圧密変形とせん断変形に分けて考えているため、本章でも、前章で行った実験結果を圧密変形とせん断変形に分けてモデル化を考える。さらに、土水連成場を考える場合、全体系を土骨格場と水理場とに分けて考えることが出来る。この分類においては、前述の関口・太田モデルは土骨格場の支配方程式の一つである。また、ベントナイトの止水性能のパラメータとなる透水係数は、水理場の支配方程式である Darcy 則に必要な物性値である。ここでモデル化すべきパラメータを大別すると、表-2.2.1 のようになる。本章では、この分類にしたがってモデル化を行う。

表-2.2.1 モデル化の分類

分類		試験項目	パラメータ
土骨格場	圧密特性	高圧圧密試験 膨潤量・膨潤圧試験	p_c' 、 C_c 、 C_s 、 e など p' 、 e
	せん断特性	三軸 CU 試験	M 、 p' 、 q
水理場		透水試験	k

2.3 モデル化するパラメータ

表-2.2.1 に示す通り、ベントナイトの膨潤性能（膨潤圧、膨潤量）および止水性能（透水係数）、力学的性質（正規圧密線、限界状態パラメータ）についてモデル化の検討を行った。

2.4 既往の研究

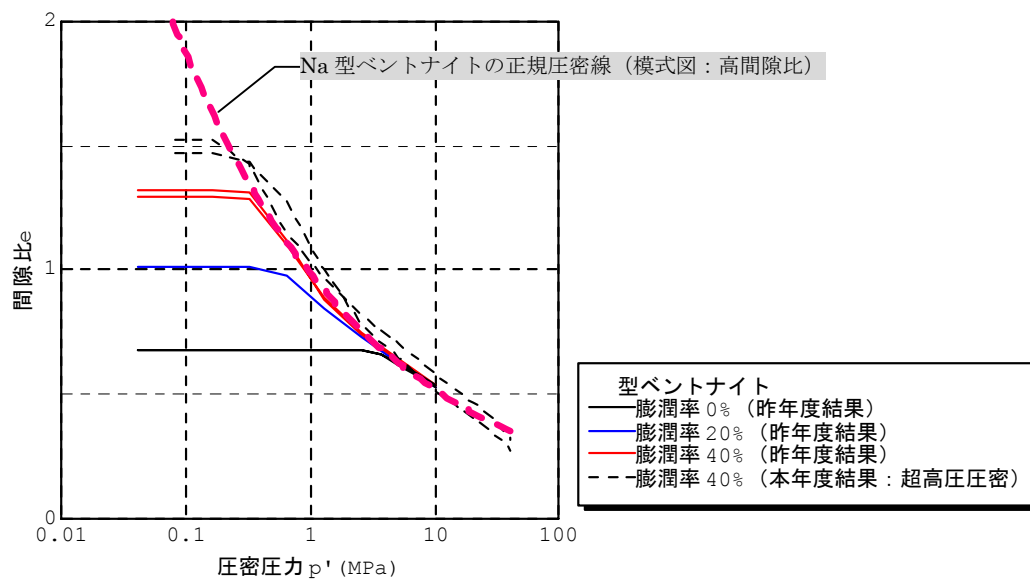
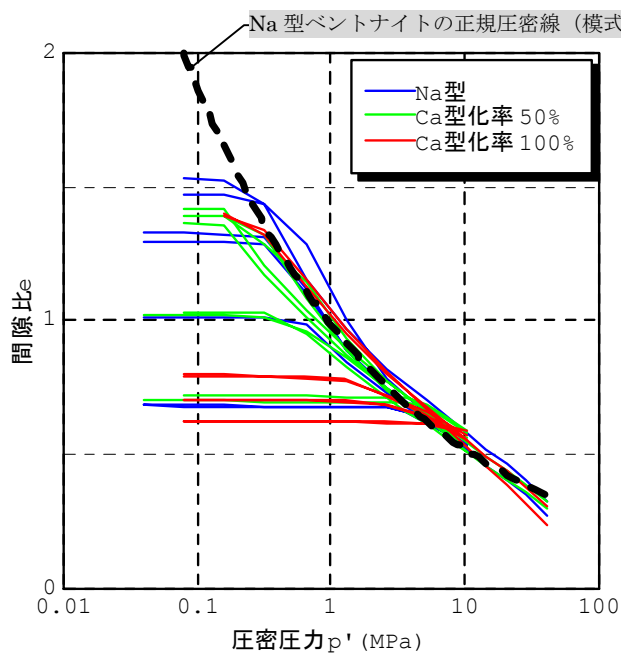
ベントナイトは核種緩衝材としての適用が比較的早期から検討されており、各種土質試験結果も徐々に整備されてきている。また、昨年度は、Na 型（Ca 型化率 0%）、Ca 型化率 100%のベントナイトに関して試験を実施した²⁾。本検討では、Ca 型化率 50%を中心に試験を行っており、Ca 型化の進展に伴うベントナイトの性能変化に関するデータはほぼ整備できたといえる。本検討では弾塑性構成モデルに関する既往の知見³⁾⁴⁾や緩衝材に関する研究結果^{5)~10)}と前章で述べた試験結果を比較することで、今回取得したデータの妥当性を検討すると同時に、モデル化に際してのデータとして用いることとした。

2.5 圧密・膨潤特性のモデル化

2.5.1 高圧圧密試験

図-2.5.1 は昨年度実施した高圧圧密試験から得られた Na 型ベントナイトの $e\text{-log } p'$ 関係（処女載荷過程）を示している²⁾。ここでは、初期膨潤率を変化させて圧密試験を行ったが、最終的に得られる正規圧密線はほぼ同一であるという結果が得られた。また、Na 型ベントナイトの正規圧密線には変曲点が存在することも実験的に明らかとなった。さらに本検討で取得した Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの $e\text{-log } p'$ 関係（処女載荷過程）を図-2.5.2 に示す。図-2.5.2 には図-2.5.1 に示した Na 型ベントナイトの正規圧密線も併せて示してある。Na 型ベントナイトで得られた正規圧密線と、Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの正規圧密線は、同図中に示す間隙比の範囲内ではほぼ一致するという傾向が得られた。このことは、正規圧密線は Ca 型化率に依らず唯一存在する、ということを示唆している。

土質力学では、通常対象とされる応力レベル（間隙比）が工学的に決まっており、その間隙比の範囲では $e\text{-log } p'$ 関係は直線と仮定できる。このため、関口・太田モデルにおいても正規圧密曲線は直線を仮定している。しかしながら、放射性廃棄物処分施設におけるベントナイトは、通常の地盤材料よりもかなり大きな間隙比になることが予想されており、圧密挙動のモデル化に際しては、何らかの方策を考えておく必要がある。そこで、その方策の一つとして、構造を有する地盤材料の構成モデルの概念³⁾をベントナイトの圧密挙動に援用することが考えられる。

図-2.5.1 Na 型ベントナイトの e -log p' 関係図-2.5.2 Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの e -log p' 関係と
Na 型ベントナイトの正規圧密線の関係

地盤材料の構造とは、地盤が堆積してから現在に至るまでの過程で受ける続成作用によって発生する粒子の配向や化学的なセメンテーションなどの効果に起因する。構造を有する地盤材料は、高間隙比の割に降伏荷重が大きい、一旦乱されると構造を失うため降伏荷重は低くなるという、非常に鋭敏な性質を有する。この性質を $e\text{-log } p'$ 関係で表すと図-2.5.3 のようになる。図-2.5.3 は、構造を有する地盤材料と良く練り返すことで構造を喪失させた地盤材料の $e\text{-log } p'$ 関係を模式的に表したものである。この両者は、構造の有無だけが異なり、基本的には同じ材料であるが、図に示すように、構造を有する地盤材料は、擬似的に大きな降伏応力を有し、最終的には練り返した地盤材料の正規圧密線に至る（圧密現象の突出）。構造を有する地盤材料の $e\text{-log } p'$ 関係だけを見れば、正規圧密線が直線ではないように見えるが、練り返した地盤材料の正規圧密線と併せてみれば実際には直線であって、変曲点前の部分はあくまでも構造による擬似的なものであることが分かる。ここで、構造を有する地盤材料を膨潤を生じていないベントナイト、練り返した地盤材料を膨潤後のベントナイトと見なし、膨潤履歴の効果を構造の発達と置き換えて図-2.5.2 を再度検討するとベントナイトの圧密特性の解釈に、構造を有する地盤材料の挙動モデルを援用することが可能となる。図-2.5.4 に Na 型ベントナイトの低間隙比領域における $e\text{-log } p'$ 関係から求めた正規圧密線と図-2.5.2 を併せたものを示す。低間隙比領域における正規圧密線を真の正規圧密曲線と仮定すれば、膨潤率 40% 程度の高間隙比から圧密されたベントナイトの $e\text{-log } p'$ 関係は正規圧密線よりもかなり突出しており、圧密開始時の初期間隙比が低下するに従って、突出の割合が低下していることが分かる。この突出の割合は圧密開始直前の間隙比に依存し、あたかも構造の劣化の度合いを表しているかのようにみなすことができる。そもそも大間隙比から圧密されるベントナイトの圧密降伏応力が、比較的大きいのは、高い膨潤性能に起因すると考えられ、膨潤による間隙比の増加を構造の発達と見なし、上述の構造を有する地盤材料の構成モデルの概念を援用することが圧密挙動のモデル化を行う上で一つの有効な手法と考えられる。

構造を有する土の構成モデルとしては、上下負荷面の概念が挙げられる。上下負荷面の概念は構成モデルではなく、構造による圧密現象の突出（上負荷面）³⁾と過圧密領域の地盤材料の挙動を精緻に表す概念（下負荷面）⁴⁾であり、既存のモデルに付加することが可能である。図-2.5.5 に関口・太田モデルに上下負荷面の概念を導入した場合の模式図を示す。上負荷面は関口・太田モデルの降伏曲面に対して外側に、下負荷面は内側に相似形で存在し、相似の中心点が原点にある。

また、降伏関数は、現応力が常に下負荷面上にあるものとして下負荷面で規定して、

$$f_s = MD \ln \frac{p'}{p'_0} + D\eta^* - MD \ln R + MD \ln R^* + \varepsilon^p_v = 0 \quad (2.5.1)$$

で表される。式(2.5.1)中の R 、 R^* は図-2.5.5 に示すように、上負荷面と正規降伏曲面、上負荷面と下負荷面の比である。最終的に得られる応力ひずみ関係は、

$$\dot{\sigma}' = \left[\mathbf{E}^e - \frac{\mathbf{E}^e \frac{\partial f_s}{\partial \mathbf{T}'} \frac{\partial f_s}{\partial \mathbf{T}'} \mathbf{E}^e}{\frac{\partial f_s}{\partial \mathbf{T}'} \mathbf{E}^e \frac{\partial f_s}{\partial \mathbf{T}'} + H^*} \right] \dot{\varepsilon} \quad (2.5.2)$$

となる。ここで、オリジナルの関口・太田モデルと異なる箇所は、式(2.5.2)中の H^* （ハードニングパラメータに関する項）のみである。よって、改良箇所も少なく、膨潤による力学性能の変化を表す概念に援用し易い概念といえる。式(2.5.2)の導出にあたっては、上負荷面の発展則 $\dot{R}^*$ を決定する必要がある。この上負荷面の発展則を圧密開始前の間隙比の関数とすることで、上負荷面の概念をベントナイトの構成モデルに導入可能となる（図-2.5.6）。

ここでは、圧密現象におけるベントナイトの弾塑性的挙動に及ぼす、圧密開始直前の間隙比の影響について主に言及してきた。これは図-2.5.4 に示す間隙比領域において、Ca 型化率が正規圧密線に及ぼす影響は少ないと判断されるためである。但し、ベントナイトの最大膨潤時の間隙比は Ca 型化の進展に伴い低下する傾向にあり、最大膨潤率が発揮されているような大間隙比領域について考慮する場合には、Ca 型化率がベントナイトの状態曲面に及ぼす影響について検討を行う必要がある。

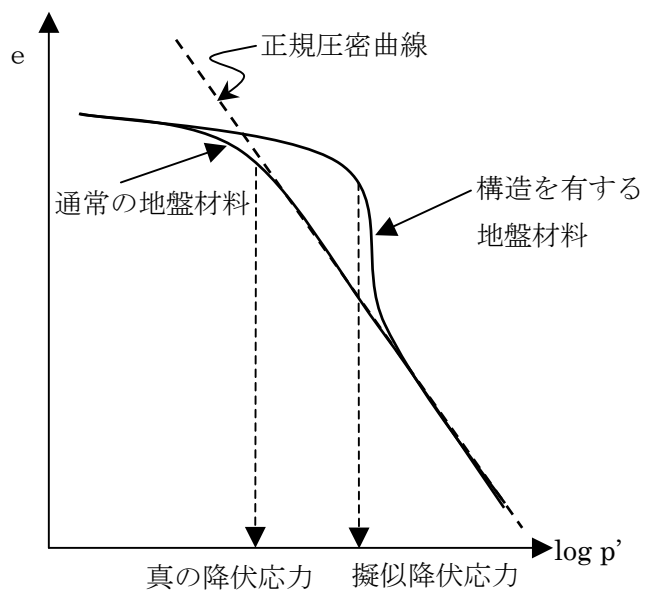


図-2.5.3 構造を有する地盤材料の e - $\log p'$ 関係

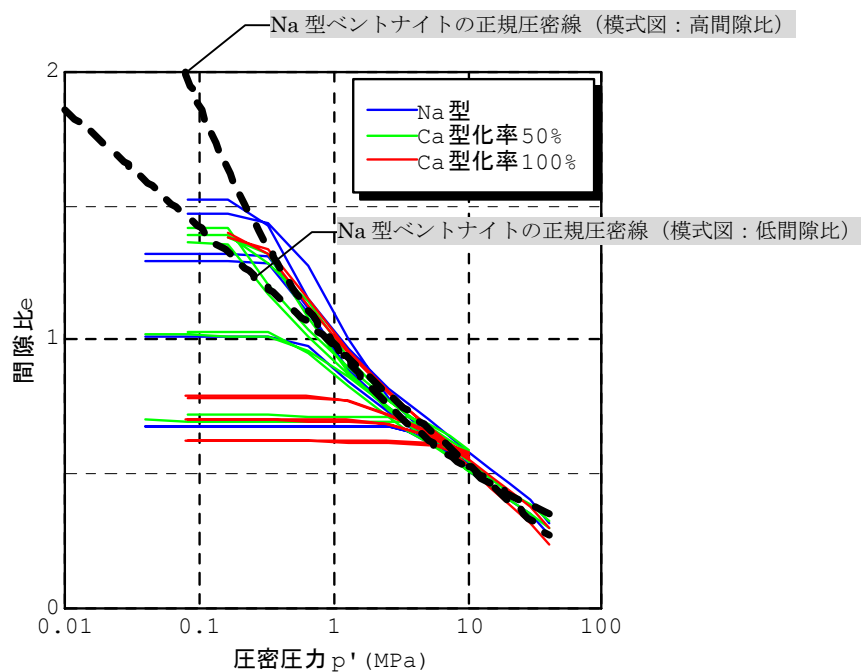


図-2.5.4 Ca 型化率 50%、100%ベントナイトの正規圧密線と Na 型ベントナイトの e - $\log p'$ 関係の関係

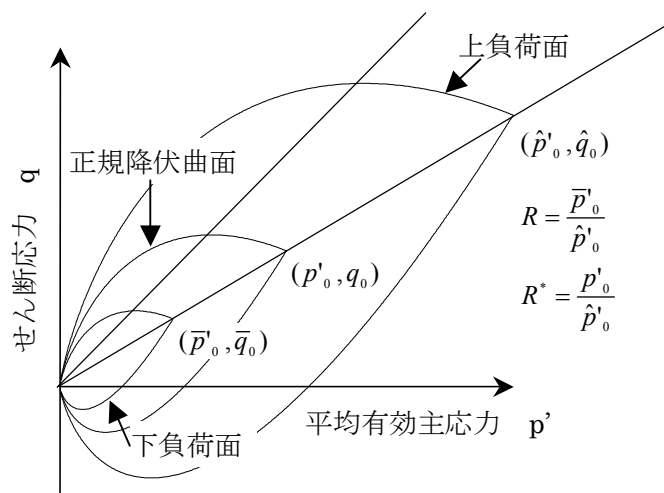


図-2.5.5 上下負荷面関口・太田モデルの降伏曲面

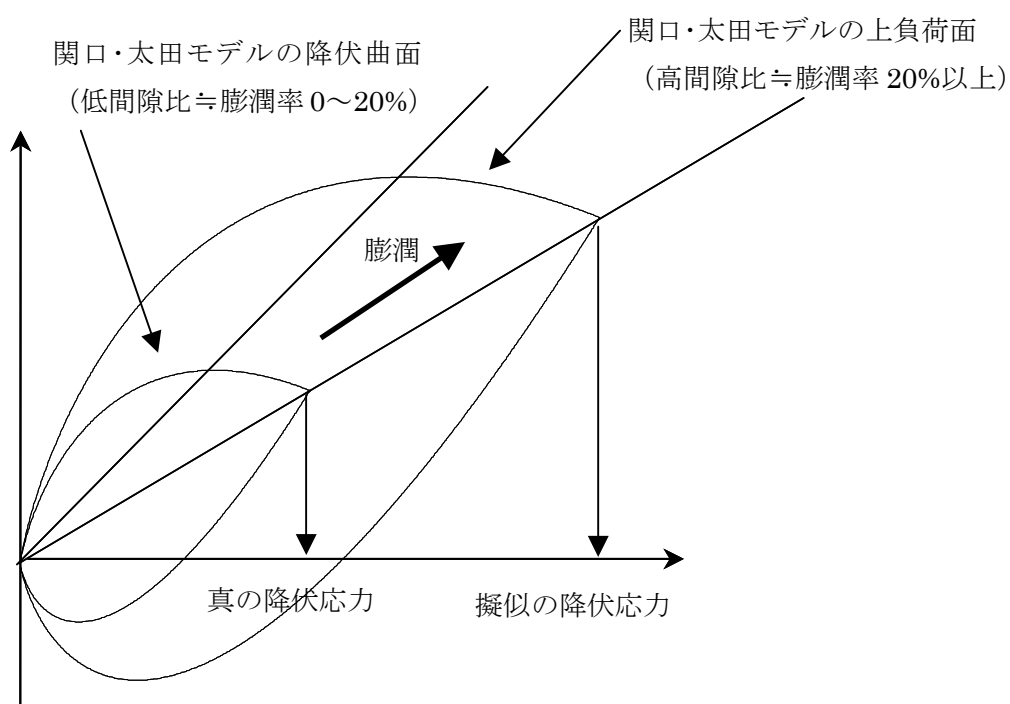


図-2.5.6 上負荷面の発展則の模式図

以上が、高圧圧密試験から得られる正規圧密領域（弾塑性領域）のモデル化の検討であるが、高圧圧密試験では除荷（膨潤）時に過圧密領域（弾性領域）の挙動も調べている。そこで、過圧密領域（膨潤挙動）のモデル化について検討を行う。図-2.5.7 に典型的なベントナイトの膨潤挙動を示す。ここでは、先行圧密圧力 p'_0 （図中点 O）まで圧密を行い、そこから除荷をする場合を考える。一般の自然堆積粘土であれば、図中点 A まで、ほぼ直線的に傾き κ で膨潤するのに対して、ベントナイトは膨潤中に刻々と膨潤線の勾配を大きくさせながら点 B に至る。これは、通常の粘性土では膨潤時に粘土粒子同士の隙間に水を取り込むが、ベントナイトはさらに粘土粒子を構成するスメクタイトの層間にまで水を取り込もうとするためである。両膨潤挙動を区別するために本検討では、スメクタイトの層間における膨潤を浸透膨潤と呼び、通常の膨潤を力学的膨潤と呼ぶ。ここで、膨潤によるベントナイトの間隙比変化は、

$$e = e_s + e_m \quad (2.5.3)$$

として、浸透膨潤による間隙比変化量 e_s と力学的な除荷による間隙比変化量 e_m の線形和で表せると仮定する。微視的には e_s はスメクタイトの層間で定義される間隙比であり、 e_m はスメクタイトのベッド間で定義される間隙比である。このように仮定すると、図-2.5.7 に示した膨潤挙動の中で、浸透膨潤挙動のみを分けて考えることができ、図-2.5.8 のように表すことができる。但し、図-2.5.8 の横軸は、図-2.5.7 の横軸 $\ln p'$ を先行圧密荷重 p'_0 を用いて無次元化している。さらに、OCR は過圧密比であり、次式で与えられる。

$$OCR = \frac{p'_0}{p'} \quad (2.5.4)$$

図-2.5.8 に示すような浸透膨潤挙動を表す関数として、

$$e_s = \exp\{\xi(OCR - 1)\} - 1 \quad (2.5.5)$$

を用いる。ただし、 ξ は材料定数であるが、実験より直接求めるものではなく、 ξ をパラメータとして変化させ、室内試験結果のフィッティング解析を行い決定するものである。また、この関数は唯一ではなく、図-2.5.8 に示す膨潤挙動を表すことができる関数形は無限にあることに注意が必要である。この関数形のメリットは、定式化が比較的容易であり、また入力パラメータが一つのみであるという点である。図-2.5.9 から 2.5.11 に OCR と膨潤指数 $C_s (= \kappa / 0.434)$ の関係を示す。但し、試験機構上、供試体厚さが 20mm 以上にならないよう、体積変化を拘束して圧密試験を行っているケースもあり、それらのケースでは最終除荷段階において、膨潤指数が低下する傾向が見られたことから、これらの図には最終除荷段階における膨潤指数はプロットしていない。しかしながら Na 型ベントナイトの OCR と膨潤指数の関係には相関性が伺え、OCR が大きくなるほど膨潤指数が大きくなり、ある程度の OCR に達した段階で膨潤指数は一定値に収束する傾向を示す。これに対し、Ca 型化が進行するに従って膨潤指数は一定値となる（膨潤線は線形的になる）傾向があり、この影響は Ca 型化率 50% の場合にも OCR が小さい領域において比較的顕著に見られる。

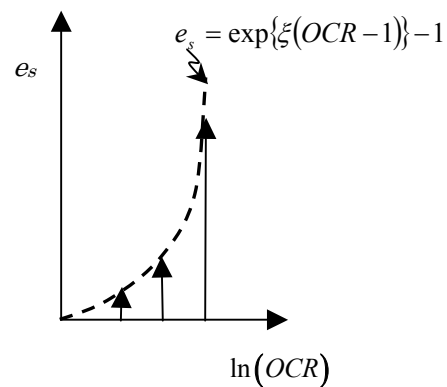
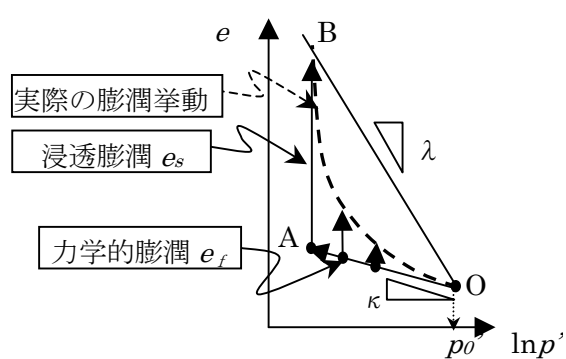
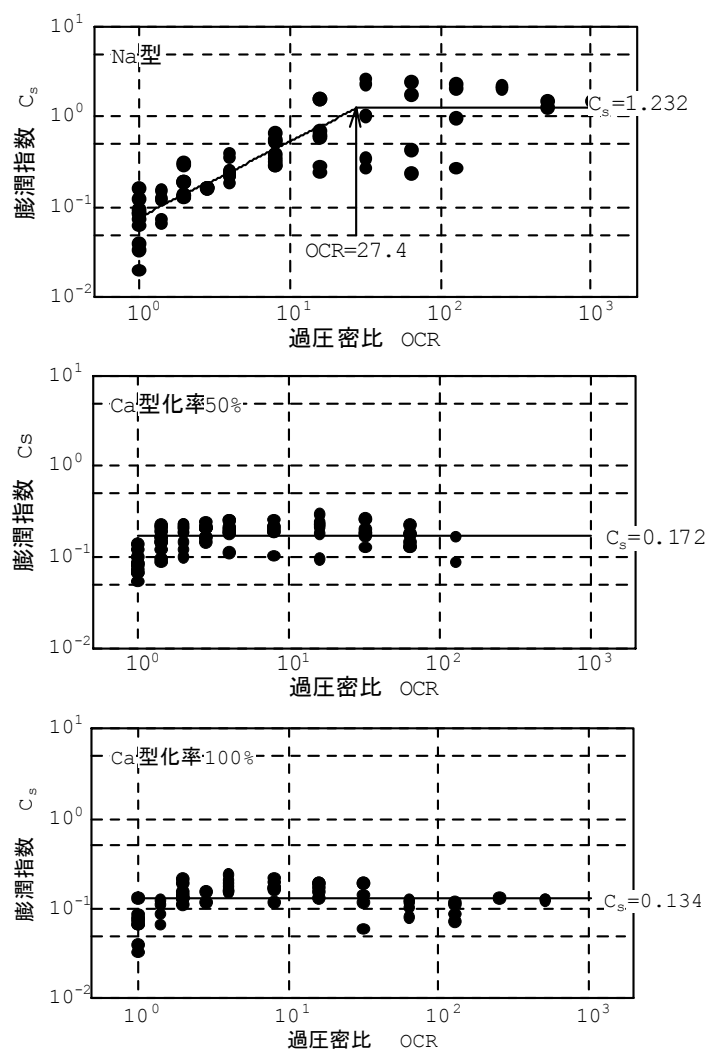


図-2.5.7 ベントナイトの膨潤挙動の模式図 図-2.5.8 浸透膨潤と OCR の関係の模式図



(上 : Na 型、中 : Ca 型化率 50%、右 : Ca 型化率 100%)

図-2.5.9 過圧密比と膨潤指数の関係

2.5.2 膨潤量と膨潤圧のモデル化

昨年度行った膨潤量、膨潤圧試験²⁾では、ある膨潤率のベントナイトの最終膨潤率と膨潤圧を調べ整理を行った。2.2節で述べたように、膨潤圧、膨潤量試験の結果をモデル化に反映させること目的と考えれば、試験結果は間隙比を用いて整理したほうが便利である。そのために、昨年度行った Na 型、Ca 型化率 100%ベントナイトと Ca 型化率 50%のベントナイトの試験結果をまとめて間隙比を用いて整理し、モデル化を試みる。

モデル化を行うにあたり、膨潤量、膨潤圧試験を $e\text{-log } p'$ 関係で解釈すると図-2.5.10 のようになる。供試体の初期状態が図中 A であったとする。膨潤量試験中は、供試体に作用する荷重は一定であるから、 $e\text{-log } p'$ 平面上では図中 A~B の径路をたどり、最終膨潤量は、最終間隙比として得られる。膨潤圧試験の場合、試験中供試体の体積は変化しないため、間隙比一定条件と見なすことができる。つまり、膨潤量試験を $e\text{-log } p'$ 平面上で考えれば、図中 A~C の径路をたどり、最終膨潤圧が得られる。

このようにまとめれば、膨潤圧・膨潤量試験結果と圧密試験結果を関連付けることが可能であり、関口・太田モデルへの反映が容易となる。

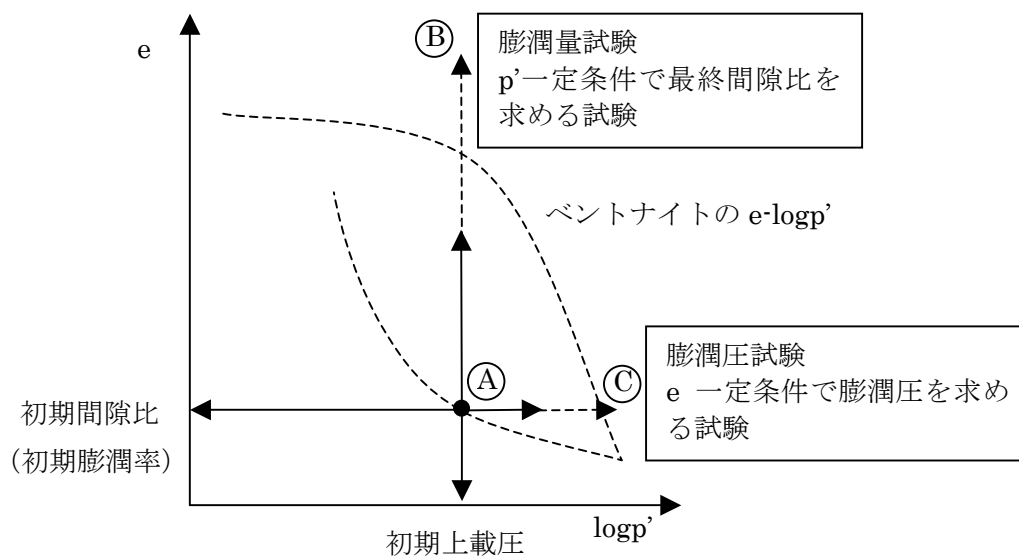


図-2.5.10 $e\text{-log } p'$ 関係を用いた膨潤量・膨潤圧試験の解釈

図-2.5.11 に膨潤量、膨潤圧試験から得られた供試体の膨潤率を $e\text{-log } p'$ 平面で整理した結果を示す。膨潤圧試験結果は計測した平衡膨潤圧と供試体体積から換算した間隙比によって、膨潤量試験結果は観測された最終間隙比と試験に用いる鋼製ピストンの上載圧によって $e\text{-log } p'$ 平面上に整理している。このように整理すると、膨潤量、膨潤圧試験から得られる間隙比と膨潤圧の関係は、一つの線で表すことができそうである。

ここで、図-2.5.11 に圧密試験結果を併せて示すと図-2.5.12 のようになる。荷重レベルが圧密試験と膨潤量試験で大きく異なるため、圧密試験結果との比較が難しいが、Na 型ベントナイトに関しては、膨潤圧試験結果、膨潤量試験結果は曲線的な正規圧密線の近傍に位置している。今後試験結果の蓄積がなされ両者の高い相関を確認できれば、ベントナイトは自己膨潤によって正規化（塑性化）することといえる。さらに、圧密試験から得られる正規圧密曲線は最大膨潤量～平衡膨潤圧の関係を表す線という解釈も可能となる。この結果の意味することは重要である。すなわち、圧密試験から正規圧密曲線を求めておけば、間隙比が分かれば平衡膨潤圧が分かり、逆に上載荷重が分かれば最大膨潤率が分かることになる(図-2.5.13)。さらに、このことが検証できれば、膨潤量、膨潤圧試験結果を $e\text{-log } p'$ 関係としてモデルに反映させることも容易である。

一方、Ca 型化ベントナイトに関しては、膨潤圧試験結果は正規圧密線近傍に位置するものの、膨潤量試験結果は Na 型ベントナイトの正規圧密線からやや乖離した箇所に位置しており、Ca 型化ベントナイトの膨潤量試験結果と圧密試験結果を比較するためには、今後上載圧レベルをパラメータとした膨潤量試験を実施する必要があると考えられる。

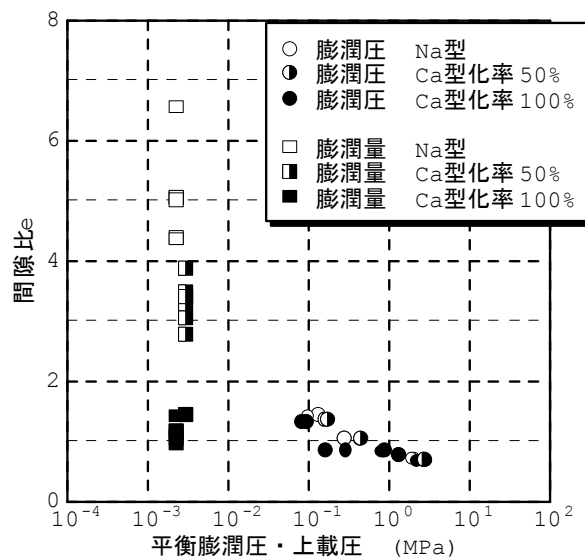


図-2.5.11 $e\text{-log } p'$ 平面で整理した膨潤量、膨潤圧試験結果

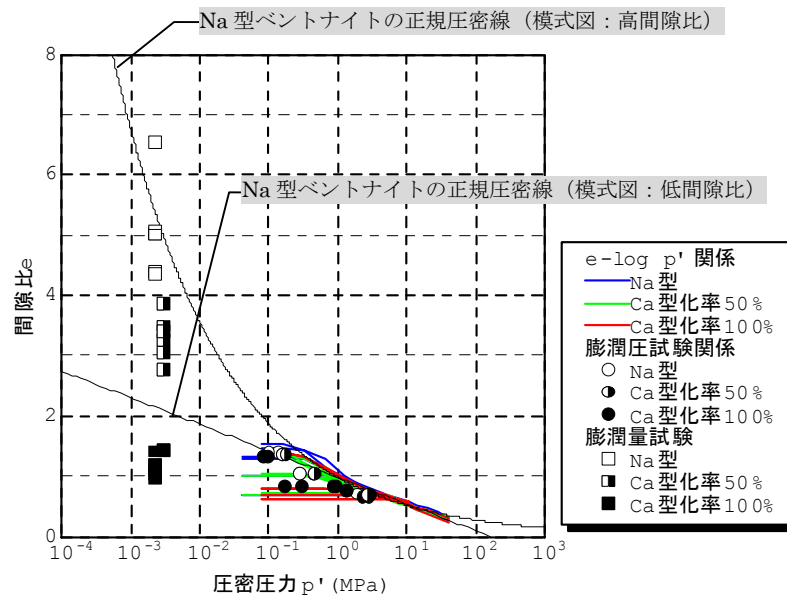
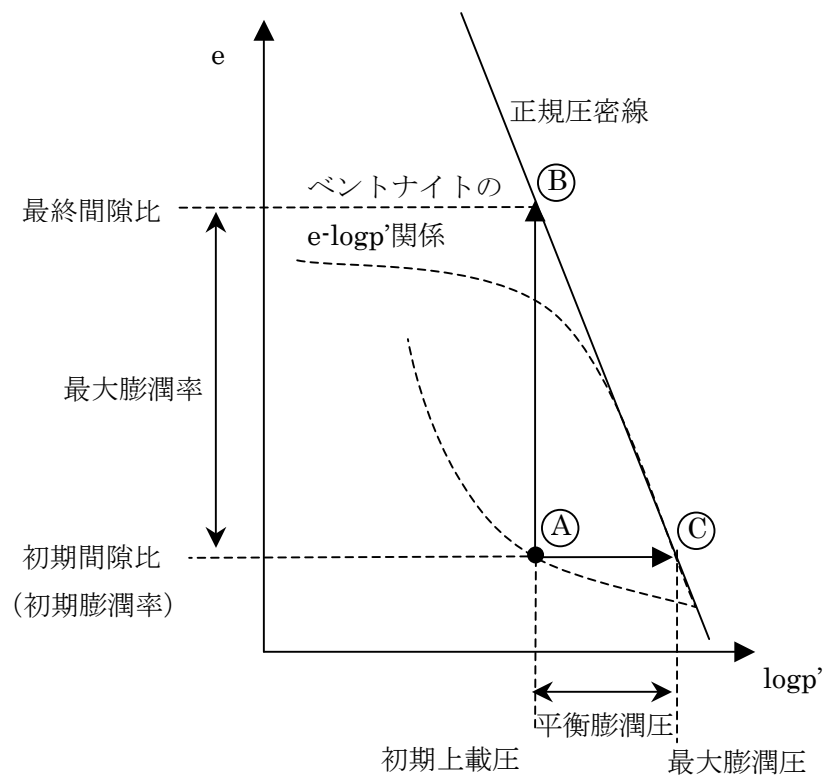
図-2.5.12 e-log p' 平面で整理した膨潤量、膨潤圧試験結果

図-2.5.13 正規圧密線と最終間隙比－最大膨潤圧関係

2.6 セン断挙動のモデル化

2.6.1 限界状態パラメータ

前章で述べた三軸 $\overline{CU}$ 試験では、ベントナイトの様々な物性（表-1.1.2、表-1.1.3）を得ることができる。しかしながら、関口・太田モデルにおいて重要な物性値は M 、 Λ 、 D である。

$\Lambda (=1 - C_s/C_c)$ は圧密試験から得られるパラメータであり、 M はせん断試験から得られるパ

ラメータである。 $D (= \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0)M})$ は Λ 、 M 、さらに圧密試験より初期の間隙比 e_0 が分かれば

理論的に導かれるパラメータであるため、本項では限界状態パラメータ M に関してモデル化を行う。

図-2.6.1に昨年度実施したNa型ベントナイトに関して、高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験から得られた膨潤率0%時の応力パスを示す²⁾。Na型ベントナイトに関して得られた限界状態パラメータ M は既往の結果⁵⁾をやや下回っているが、各試験から得られている応力パスの中には、既往研究から得られた限界状態線近傍において破壊点を示すものもあり、双方の結果の妥当性を伺うことができる。

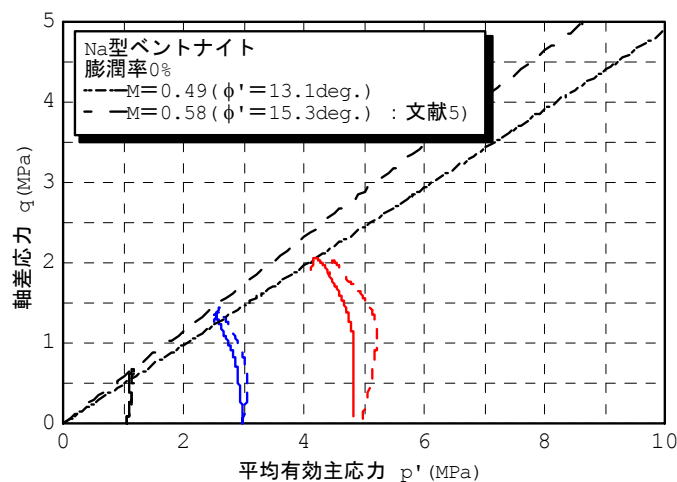


図-2.6.1 限界状態線と応力パス (Na型ベントナイト：膨潤率0%)

高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験から得られた Ca 型化率 50%,100%ベントナイトの応力パスを示した図-1.10.11 を再掲する。図-2.6.1 と図-2.6.2 (図-1.10.11 の再掲) を比較すると、限界状態パラメータは、Ca 型化率に依らずほぼ一定値 (0.49 程度) であることが分かる。また、各ベントナイトで 5 MPa の圧密圧力で正規状態と思われる応力パスの形状を比較すると、Na 型ベントナイトは正規圧密粘土、Ca 型化率 50%ベントナイトは軽い過圧密粘土、Ca 型化率 100%ベントナイトは重い過圧密の挙動と似た形状を示していることが分かる。

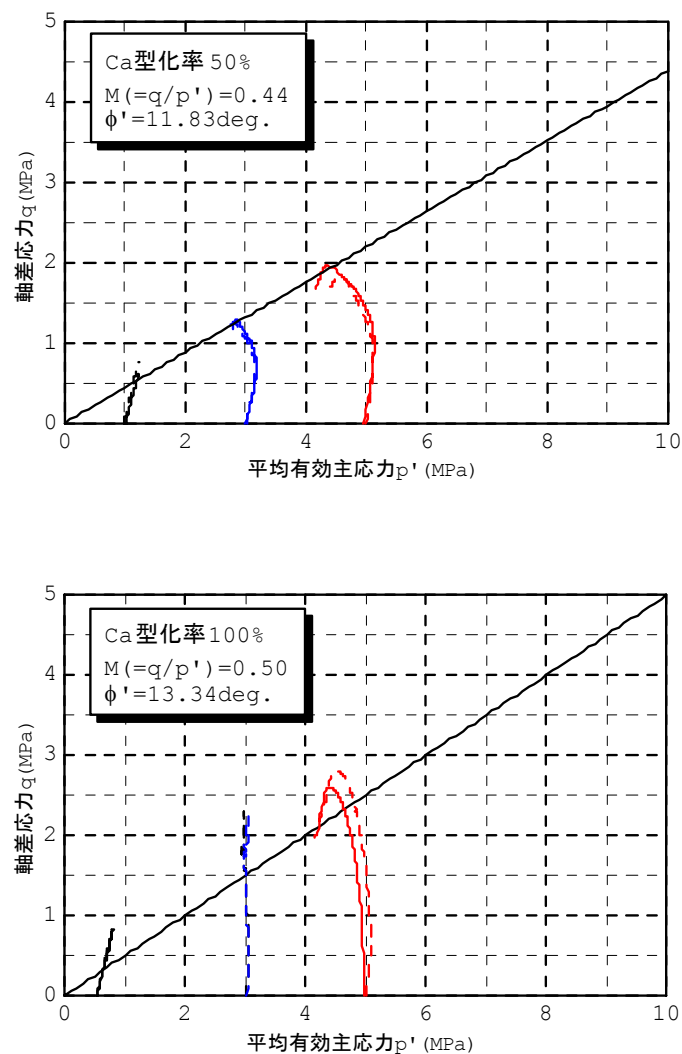


図-2.6.2 有効応力パス (再掲)

昨年度実施した Na 型ベントナイトと Ca 型化率 100%ベントナイトの高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験では、図-2.6.3 に示すように Ca 型化率によって M が異なる傾向を示していた。このため、Ca 型化の進行に伴うベントナイトのせん断挙動の違いは、Ca 型化率によって M が異なるためと考えた。しかしながら、図-2.6.4 に示すように、今年度の検討における再試験を含めた高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験の結果では、Ca 型化率によって M は変化せずほぼ一定と解釈することも可能という結果が得られた。ただし、この解釈を採用するためには、前述の Ca 型化率によるベントナイトのせん断挙動の違いを説明する上で、M 以外の Ca 型化率によって変化する物性値、例えば K_0 値（降伏曲面の回転）などを特定する必要がある。

そもそも、Ca 型化の進行に伴うベントナイトのせん断挙動の違いは、同じ応力履歴を経ているのにもかかわらず、Na 型は正規圧密粘土、Ca 型化ベントナイトは軽～重過圧密粘土の挙動を示すということである。そこで Ca 型化の進展に伴うベントナイトのせん断挙動の違いを表す一つのアイデアとして、2.5 節で述べた上下負荷面関口・太田モデルを用いた高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験の解釈を行ってみる。上下負荷面の概念は、正規状態にある構造を持たない粘土（正規圧密粘土の挙動）と構造を持った粘土（擬似的な過圧密挙動）の違いを説明するための概念であり、Ca 型化率の違いによるせん断挙動の違いを説明するのにも適用可能であると考えられる。表-2.6.1 に Na 型ベントナイトと Ca 型化率 100%ベントナイトの拘束圧 5MPa の場合の結果を用いて、高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験中の応力パスと、各応力状態において考えられる上下負荷面図と正規降伏曲面の位置関係を示す。

高圧三軸 $\overline{CU}$ 試験は、先ず等方圧密（拘束圧 5MPa）を行っているため、応力点は等方圧軸に存在する。このとき、等方圧密によって異方性が失われていなければ、関口・太田モデルの降伏曲面の尖り点は K_0 軸上にあるため、関口・太田モデルの降伏曲面は等方圧軸が 5MPa を通るように存在する。ただし、高圧圧密試験結果から、Na 型ベントナイトは正規状態であっても上負荷面が存在する（拘束圧の大きさに依る）。Ca 型化ベントナイトには上負荷面が存在しない（表中①）。次に、せん断初期には、応力点は降伏曲面内を横切るようなパスとなるため、降伏曲面が縮小することになる。ただし、Na 型ベントナイトはせん断挙動が正規圧密粘土のような挙動であることから、せん断によって上下負荷面と正規降伏曲面ともに縮小する（構造を失う）ものとする。一方、Ca 型化ベントナイトはせん断挙動が過圧密粘土のような挙動であるから、せん断によって上負荷面と正規降伏曲面は縮小せず、下負荷面のみが縮小するものとする（表中②）。このようなモデル化をすれば、せん断～限界状態（表中③～④）における、Na 型ベントナイトの正規圧密粘土のようなせん断挙動と Ca 型化ベントナイトの過圧密粘土のようなせん断挙動を説明できる。すなわち、Ca 型化したベントナイトは、構造を持たない（上負荷面は正規降伏曲面と一致）が、過圧密領域の喪失速度が遅く（下負荷面がせん断によって正規降伏曲面と一致する速度が遅い）、逆に Na 型ベントナイトは、構造を持つ（上負荷面は正規降伏曲面と一致）が、過圧密領域の喪失速度が速い（下負荷面がせん断によって正規降伏曲面と一致する速度が速い）とすることで、Ca 型化による圧密とせん断挙動を表現できると考えられる。

但し、上下負荷面を導入することによって、実験的に求められないパラメータが少なくとも 3 つ必要となる (m : 過圧密土の正規化速度に関するパラメータ、 m^* : 構造の劣化に関するパラメータ、 R^*_0 : 初期構造状態を規定するパラメータ)。通常、これらのパラメータは室内試験結果を解析によってパラメトリックにフィッティングして求められる。

その一方で、同一の拘束圧で圧密されたベントナイトの M が Ca 型化によって変化しないということは、強度が Ca 型化によって変化しないことを意味している。同時に圧密挙動のモデル化 (2.5.1 項) でも述べたように、膨潤率 0~40% の間隙比領域におけるベントナイトの正規圧密線は Ca 型化率の影響を受けないという試験結果が得られており、圧密挙動については、 Ca 型化の進展が構造の発達に及ぼす影響はせん断過程ほど顕著には見られない。これらのことを考えれば、オリジナル関口・太田モデルのもつ「入力パラメータをすべて標準的な室内試験から求められる」という長所を捨ててまで、せん断途中の挙動を厳密に表現できる上下負荷面の概念を導入する必要があるのか、ということに関しては熟慮する必要がある。せん断途中の挙動に厳密性を欠いても、強度が予測可能であるというモデル (オリジナル関口・太田モデル) は、十分に現実的な選択肢の一つであると考えられる。

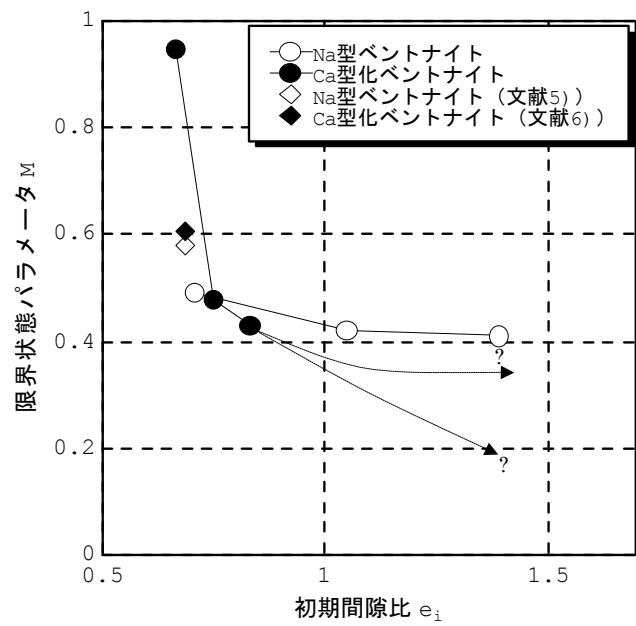


図-2.6.3 初期間隙比 e_i と限界状態パラメータの関係 2)

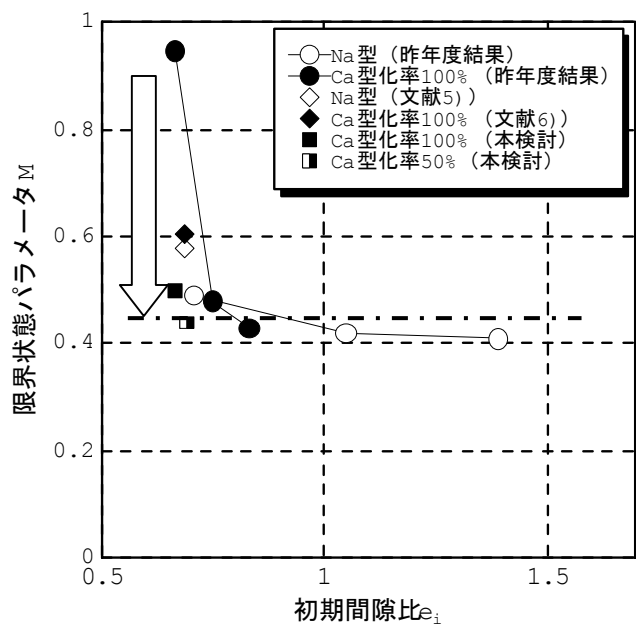
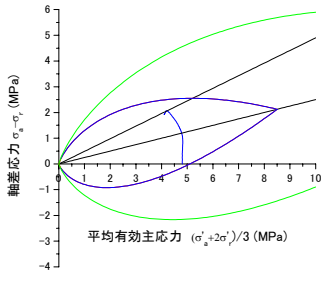
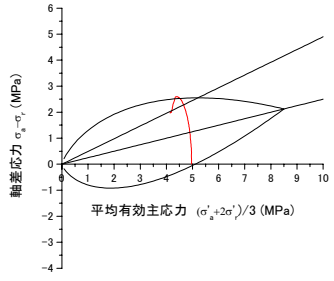
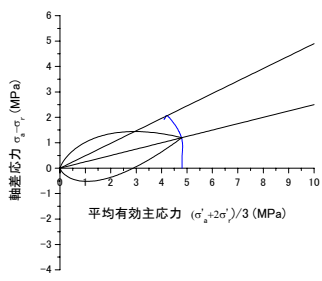
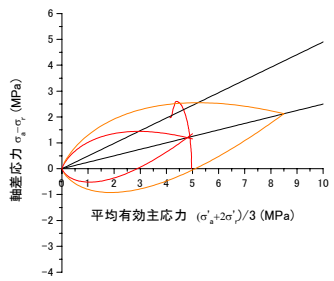
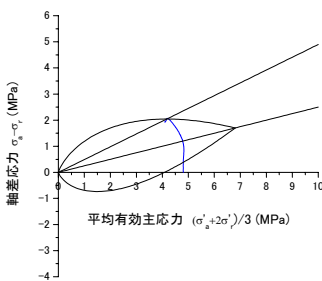
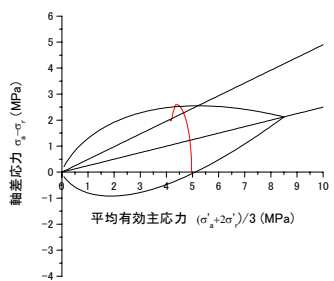
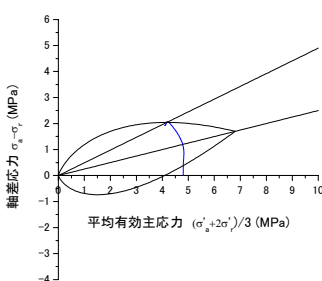
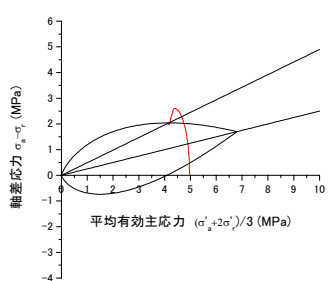


図-2.6.4 初期間隙比 e_i と限界状態パラメータの関係

表-2.6.1 三軸 $\overline{CU}$ 試験結果の解釈

三軸 $\overline{CU}$ 試験の径路と説明	Na 型ベントナイト	Ca 型化率 100%ベントナイト
①圧密終了時 Na 型: 等方軸で 5MPa を通る関口・太田モデルの降伏曲面上に応力点が存在、上負荷面が別途存在 ($e-\log p'$ の突出、参 2.5) Ca100: 等方軸で 5MPa を通る関口・太田モデルの降伏曲面上に応力点が存在、上負荷面と正規降伏曲面と下負荷面が一致	 平均有効主応力 $(\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ (MPa) 上 $\neq$ 正 = 下	 平均有効主応力 $(\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ (MPa) 上 = 正 = 下
②せん断初期 (等方軸～K0 軸) Na 型: 応力点が負荷状態で降伏曲面の内側 (弾性域) を横切るので、弾性挙動を示しつつ、応力点が K0 軸に至るまで上下負荷面と正規降伏曲面が縮小 Ca100: 応力点が負荷状態で降伏曲面の内側 (弾性域) を横切るので、弾性挙動を示しつつ、応力点が K0 軸に至るまで下負荷面のみ縮小、正規降伏曲面と上負荷面は一致したまま	 平均有効主応力 $(\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ (MPa) 上 = 正 = 下	 平均有効主応力 $(\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ (MPa) 上 = 正 $\neq$ 下
③せん断中後期 (K0 軸～限界状態線) Na 型: せん断に応じて上下負荷面と正規降伏曲面が一体のまま拡大し、応力点は硬化挙動を示しながら限界状態に達する Ca100: せん断に応じて下負荷面が硬化し、応力点が見かけ上、限界状態線を越え、正規降伏曲面に達する。この間、過圧密的な挙動	 平均有効主応力 $(\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ (MPa) 上 = 正 = 下	 平均有効主応力 $(\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ (MPa) 上 = 正 = 下
④限界状態 (限界状態線上) Na 型: 限界状態線上に応力点が留まる Ca100: 正規降伏曲面と上下負荷面が一体となって縮小し、応力点は軟化挙動を示しながら限界状態に達する	 平均有効主応力 $(\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ (MPa) 上 = 正 = 下	 平均有効主応力 $(\sigma_1' + 2\sigma_2')/3$ (MPa) 上 = 正 = 下

※ せん断中の K_0 、 M は一定と仮定した。

※ 図中、上=上負荷面、正=正規降伏曲面、下=下負荷面である。

2.7 水理場のモデル化

2.7.1 透水係数のモデル化

透水係数のモデル化は、2.2 節で述べたように放射性廃棄物処分システムの評価システムの中では土骨格場のモデル化（ベントナイトのモデル化）ではなく、水理場のモデル化という位置付けである。そのため、他の試験結果との関連性にとらわれることなく、透水係数のモデル化を行うことが可能である。ただし、土水連成場においては体積変化量（間隙比変化）を連成させることになるため、本年度も、昨年度実施した透水係数のモデル化²⁾同様に間隙比で整理を行う。昨年度実施した透水試験から得られた透水係数に加えて、高圧圧密試験から得られた透水係数、および既往研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾の試験結果を間隙比 e に対してプロットしたものを図-2.7.1 に、また昨年度提案した間隙比と透水係数の関係式を式(2.7.1)に示す。

これらから、近似結果は試験データの傾向を比較的精度良く表していることがわかる。ただし、間隙比の大きい領域の透水係数は、非定常浸透場である圧密試験の結果から求めたもので、定常浸透場での透水係数である透水試験結果と基本的に意味合いが異なるということに留意する必要がある。

$$k = A \times e^B \quad (2.7.1)$$

$$(\log k = \log A + B \log e)$$

ただし k : 透水係数、 e : 間隙比、 A 、 B : 定数

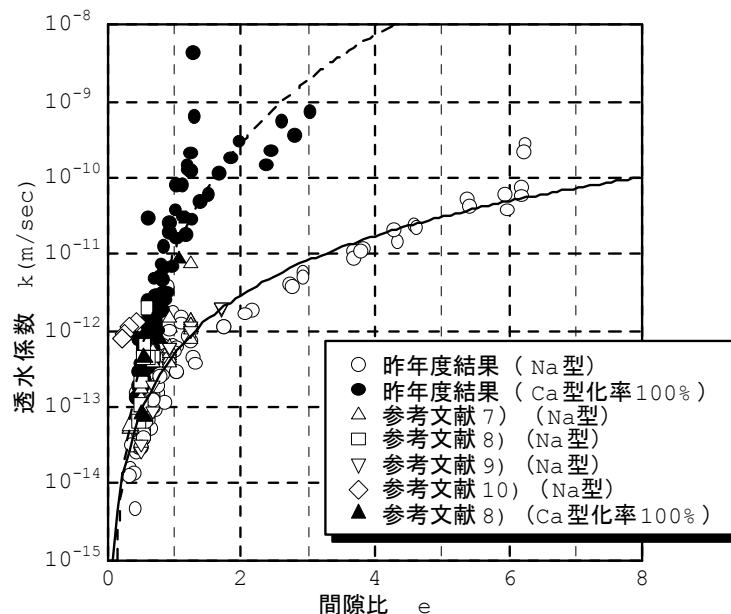


図-2.7.1 透水係数と間隙比の関係²⁾

さらに本検討で実施した Ca 型化率 50%ベントナイトの透水試験および高圧圧密試験から得られた透水係数結果を上図に追加プロットすると図-2.7.2 が得られる。Na 型ベントナイトと Ca 型化率 50%ベントナイトの結果を比較すると、間隙比が 0.5～1.0 程度の範囲では、ほぼ同等の透水係数となっているのに対し、間隙比がこれよりも大きい範囲 ($e > 1.0$) では、Ca 型化率 50%ベントナイトの透水係数は Na 型ベントナイトのそれを、明らかに上回るようになり、Ca 型化の進展に伴い、透水係数が大きくなる傾向が顕在化することがわかる。同時に Ca 型化の進展によって、間隙比の変化に対する透水係数の変化量も大きくなる傾向が見られる。(2.7.1)による近似式から得られた各係数を表-2.7.1 に示す。

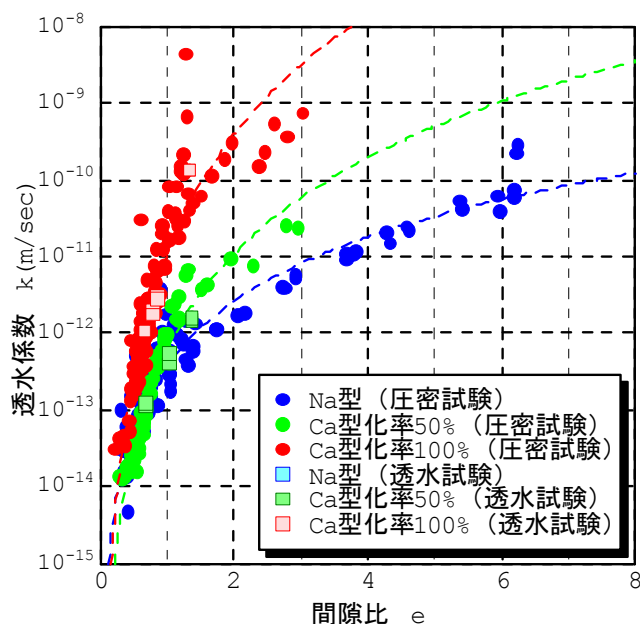


図-2.7.2 透水係数と間隙比の関係（昨年度結果²⁾に加筆）

表-2.7.1 近似から得られた係数 A、B（間隙比～透水係数の関係）

係数	Na 型 ベントナイト	Ca 型化率 50% ベントナイト	Ca 型化率 100% ベントナイト
A	3.91×10^{-13}	6.31×10^{-13}	1.07×10^{-11}
B	2.788	4.211	5.170

注) 本試験で得たデータも含めた近似であるため、昨年度報告書²⁾の値とは異なる。

透水係数のモデル化は、表-2.7.1 に示した係数 A、B が Ca 型化率の関数として定義され
ると考えることによって可能となる。図-2.7.3、2.7.4 に係数 A、B と Ca 型化率の関係を示
す。図には各係数の近似関数を併記した。

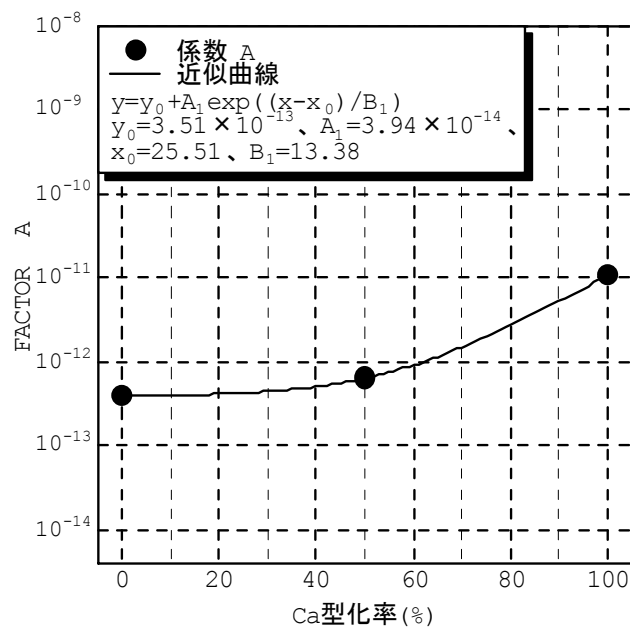


図-2.7.3 透水係数のモデル化 (係数 A)

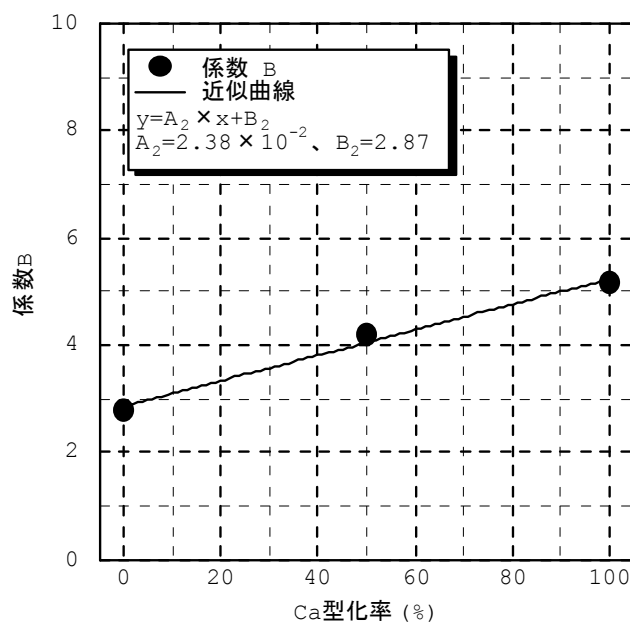


図-2.7.4 透水係数のモデル化 (係数 B)

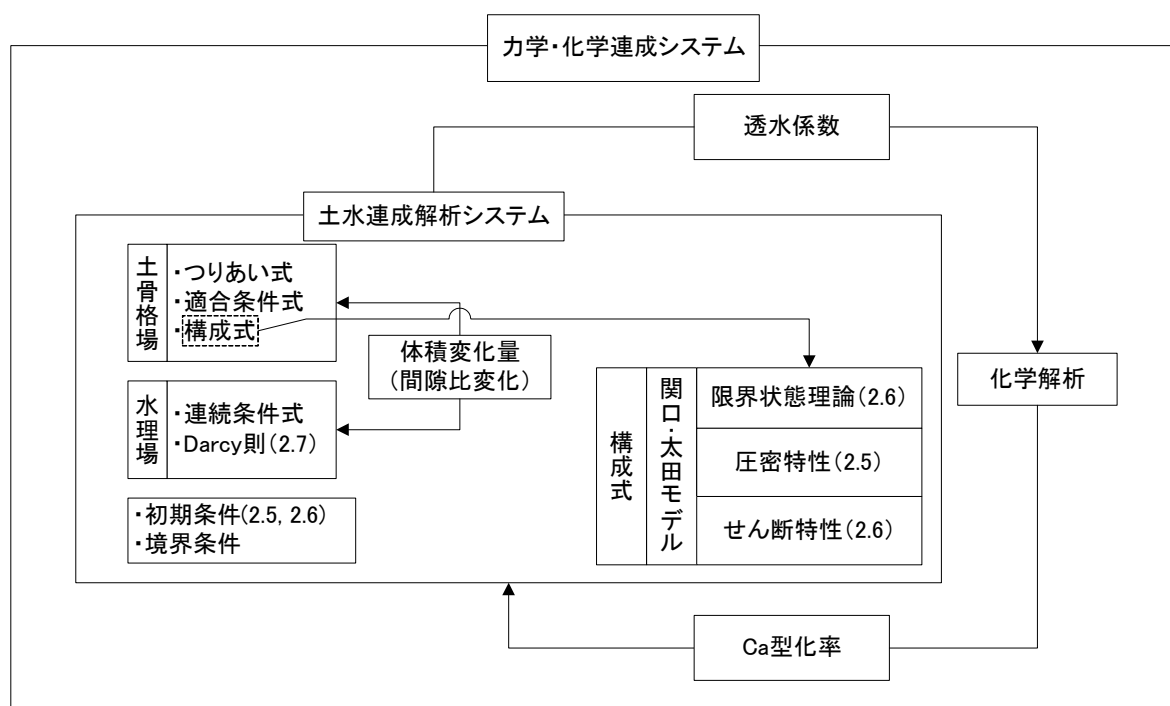
2.8 まとめ

前章「ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得」で述べた実験結果と既往の研究結果を用いてベントナイトの水理・力学挙動のモデル化を試みた。土水連成解析システムにおいて土骨格場は関口・太田モデル、水理場は Darcy 則の各パラメータと Ca 型化率の関係を検討した。関口・太田モデルでは弾塑性挙動を $p'-q-e$ 空間で記述される状態曲面で表現するため、各試験結果を $p' \sim e$ 、 $p' \sim q$ 平面でまとめ、これらをパラメータとした。また、水理場では Darcy 則で用いられる透水係数を、 e をパラメータとしてまとめた。これは、土骨格場と水理場の連成は、体積変化量（間隙比変化量）を共通のパラメータとしてなされるためである。表 2.8.1 にモデル化の検討結果をまとめて示す。

表-2.8.1 モデル化の分類

分類		試験項目	モデル化	パラメータ
土骨格場	圧密特性	膨潤量・膨潤圧試験	弾塑性挙動 最大膨潤量・平衡膨潤圧の関係と正規圧密曲線の関係	p' 、 e 、 C_c
		高圧圧密試験	弾塑性挙動 正規圧密曲線と Ca 型化率の関係 (上下負荷面の概念の援用可能性検討)	p' 、 e 、 C_c
			弾性挙動 一般土の膨潤挙動に浸透膨潤による間隙比変化量を付加	p' 、 e 、 C_s
	せん断特性	三軸 $\overline{CU}$ 試験	弾塑性挙動（限界状態） 限界状態パラメータと Ca 型化率の関係 (せん断途中の挙動の表現に上下負荷面の概念の援用可能性検討)	M 、 p' 、 q
水理場		透水試験	透水係数と間隙比の関係式の提案、および関係式の係数と Ca 型化率の関係	k 、 e

各節と解析システムの関連を図-2.8.1に示す。膨潤圧は緩衝材内部の初期応力状態算出に反映され、これをもとに決定した応力状態の下で変形解析（せん断・圧密・膨潤）を行う。ここで求められた変形量（すなわち間隙比の変化）をもとに、緩衝材内の透水係数分布を決定することが可能になる。なお、図中の土水連成解析システムにおいて、節番号がつかない支配方程式は理論的に導出されるものであり、普遍的に成立しなければならない性質のものである。また、本研究が対象としている TRU 地層処分施設が冠水した後の非常にゆっくりとした変形に対しては、過剰間隙水圧はほとんど発生しないと考えられる。この場合、土水連成解析は全応力解析とほぼ等しくなる。



※図中の数字は、節の番号を表す。

図-2.8.1 解析システムと各節の関連図

2.9 積層ベントナイト膨潤試験

2.9.1 昨年度（2001 年度）の研究成果²⁾

2001 年度の研究では、試験方法を考案し、試験装置の設計・開発を行った。また試験装置の動作確認としての予備試験を実施した。

検討の結果、ベントナイトの長期的な膨潤挙動を把握するため、セメント系材料から溶出する Ca^{2+} イオンによって Ca 型化したベントナイトと Na 型ベントナイトが隣接する状態、またはコンクリートとの接触面から離れるに従って、徐々に Ca 型化率が減少する状態を再現し、これらのベントナイトが一体として一次的に膨潤した場合、異なる Ca 型化率のベントナイトの膨潤挙動をそれぞれ把握することが可能な試験方法を考案し、試験装置を設計・製作した。さらに、本試験に先立って予備試験を実施し、必要なデータを得られることが確認できた。

予備試験ではほぼ自然給水の状態で飽和・膨潤させたが、供試体寸法が $\phi 80\text{mm} \times \text{h}100\text{mm}$ と大きかったため、供試体の飽和や膨潤後の均一化に長期間を要し、現実的な期間内に試験を完了するための対策が必要であることが明らかとなった。

2.9.2 本年度の研究目的

本年度の研究目的を以下に示す。

- ① 昨年度の成果および問題点を踏まえて、試験方法等の改善を行う。
- ② 解析モデルの検証にフィードバックするデータ取得を行う。
- ③ 試験装置、試験方法の改善の必要性を検討する。

積層ベントナイト検証試験の主目的は、ベントナイトが膨潤を完了した定常状態における応力状態や体積再配分の状況などの確認である。ただし、現象理解のため膨潤過程についてもデータを取得した。

2.9.3 実験ケース

実験ケース数は 1 ケースとした。供試体は厚さ 15mm ($\phi 80\text{mm}$) で、Na 型ベントナイトを乾燥密度 $1.6(\text{Mg}/\text{m}^3)$ となるように締固めて作成した。実験では装置内にこれを 2 層積層して、試験を行った。

2.9.4 実験方法

(1) 試験装置

試験装置の概要（試験セル）を図-2.9.1 に、試験セル、及び外側の反力フレームの寸法を図-2.9.2 に示す。図-2.9.1 のように、円筒型アクリルセルによって、供試体の膨潤は鉛直方向にのみ許容する構造となっており、上部のピストンを移動させることで供試体に付与する膨潤量を調整できる。同図は供試体として Na 型ベントナイトを 2 層、積層した場合の例であるが、この場合、下部ベントナイト層の飽和過程および膨潤過程における側方土圧（水

平方向の膨潤圧)、間隙水圧が計測可能である。その他、試験中は通水圧、鉛直方向の膨潤圧（上部ピストンに作用する軸力）、供試体からの排水量などの測定を行った。

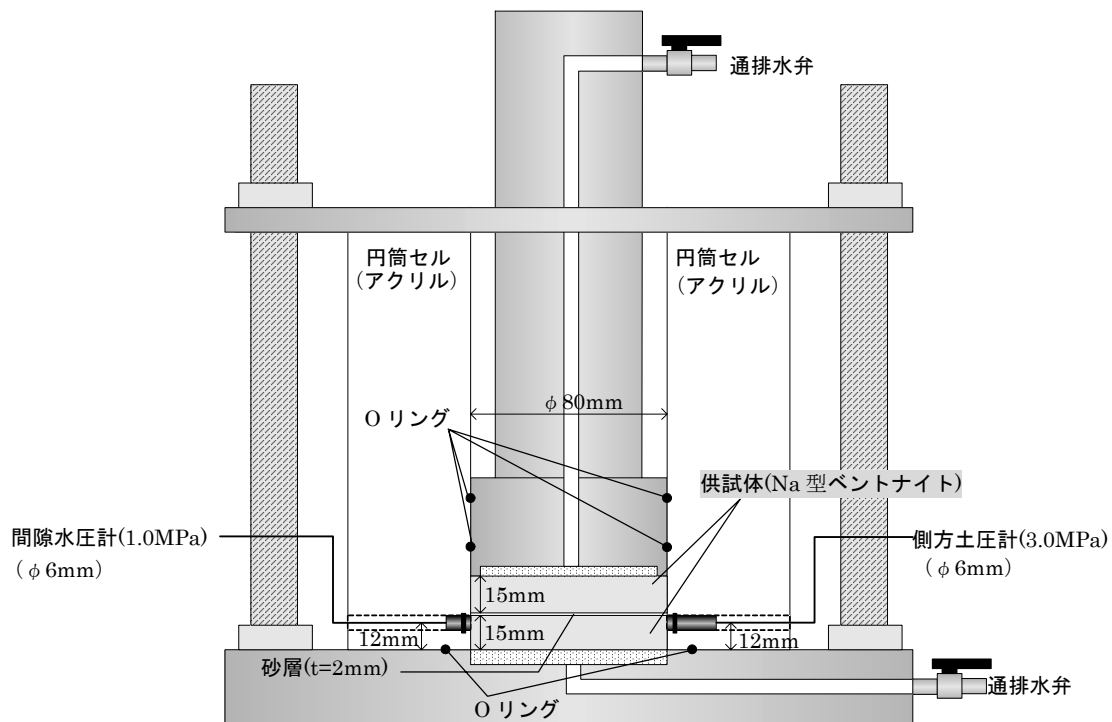


図-2.9.1 試験装置（試験セル）

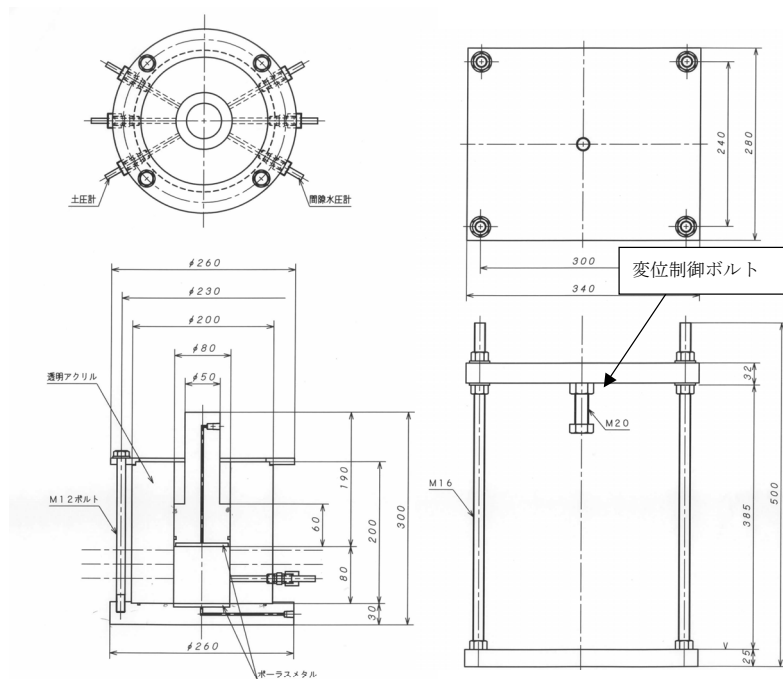


図-2.9.2 試験装置（試験セル・反力フレーム）

(2) 供試体寸法

昨年度の実験から供試体高さが大きい場合、非常に長い試験時間を要するため、本年度は供試体高さを小さくする方針で検討した。また、0.65MPa の通水圧による加圧通水による飽和を行うことで、試験期間の短縮化を図った。

この通水圧において飽和に要する時間を、供試体厚さをパラメータとして試算し、現実的な期間内で試験結果を得るために、積層した供試体高さを 30mm と決定した。

(3) 試験手順

試験手順のフローを図-2.9.3 に示す。

①供試体作成

供試体は前述のように、 $h15\text{mm} \times \phi 80\text{mm}$ 、乾燥密度 $1.6(\text{Mg}/\text{m}^3)$ に締固めた Na 型ベントナイト 2 個を作成し、2 層に積層した状態で試験セル内に設置した。X 線撮影によってベントナイト層境の位置の移動量を計測するために、層境にはタングステンターゲットを設置した。画像解析用の不動点は、アクリル円筒セル自体の内部に埋め込んだタングステンターゲットを用いた。供試体とタングステンターゲットの配置を図-2.9.4 に示す。また、本試験では層境に厚さ 2.0mm の砂層（豊浦砂）も設置し、セルの外側から境界の動きを目視観察できるようにした。

②飽和過程

供試体の膨潤を許容しないよう、上部ピストンを拘束した状態で、真空ポンプによってセル内を 1 日間脱気した後、供試体下面から通水圧 0.65MPa で通水を行い、供試体を飽和させた。ただし、急激な水圧増加を避けるため、通水圧は 0.1MPa/day 程度の速度で増加させた。

飽和過程では、間隙水圧、側方土圧、上部ピストンの軸力および排水側の排水量の計測を行い、供試体内が飽和されるまで放置した。飽和終了時間は、各計測値の定常状態をもって判断した。飽和が終了した時点で、層境の初期位置を確認するため X 線撮影を行い、タングステンターゲットの位置を画像解析によって算出した。

③膨潤過程

飽和が終了した後、供試体に膨潤率 50% に相当する膨潤体積変化を与えるため、ピストンを 15mm 上昇させ、供試体の膨潤を開始させた。このとき、供試体が上方へ移動するのを防ぐため、供試体上面から通水圧 0.65MPa を作用させた。

この状態で、間隙水圧、側方土圧、軸力および排水側の流量の計測を行い、供試体の膨潤が終了するまで放置した。膨潤終了のタイミングは、飽和時と同様に各計測値の定常状態をもって判断した。膨潤が終了した時点で、層境変位を確認するため、X 線撮影を行い、タングステンターゲットの位置を画像解析によって算出した。

本試験の飽和過程および膨潤過程における、計測項目と計測位置を図-2.9.5 に示す。

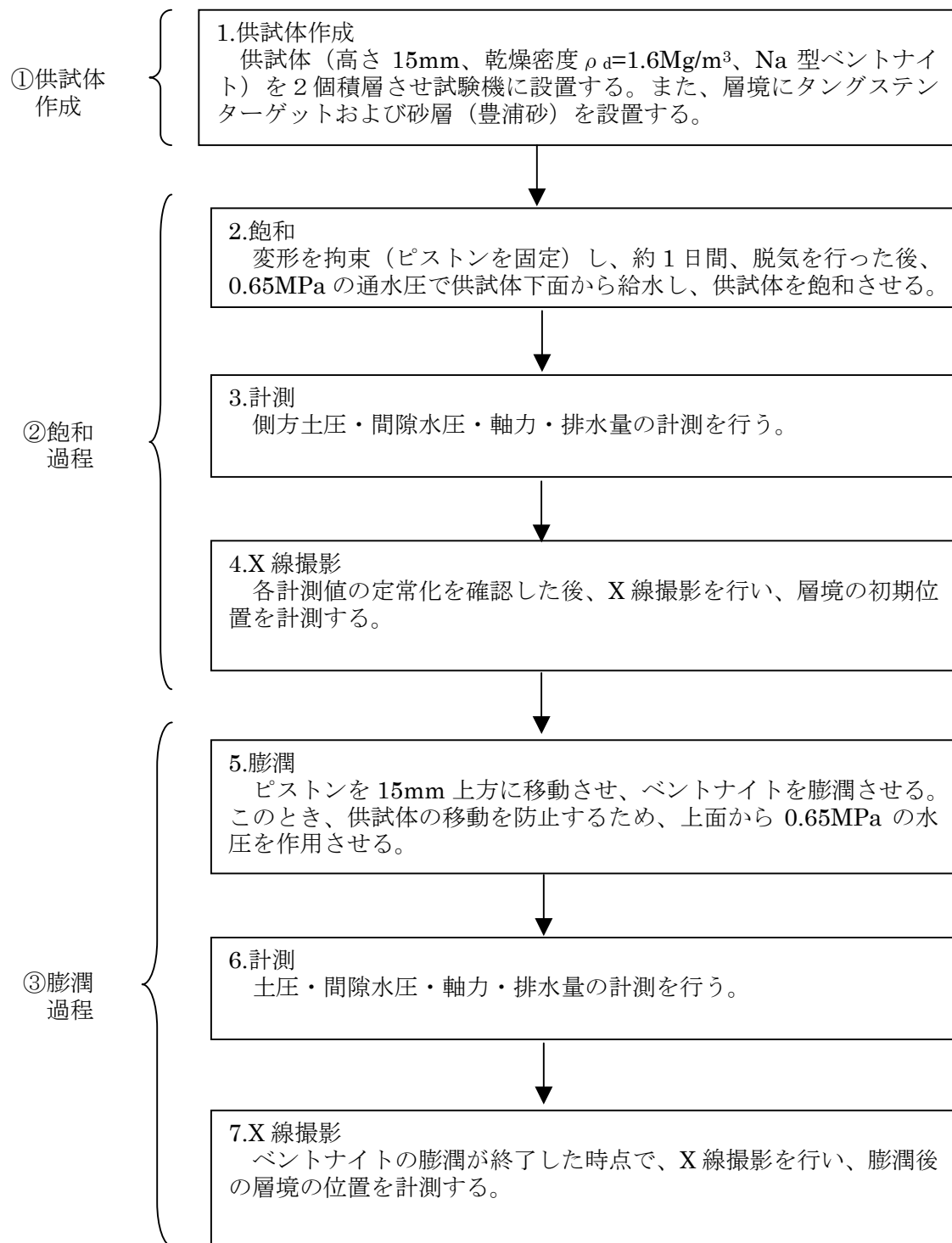


図-2.9.3 試験手順のフロー

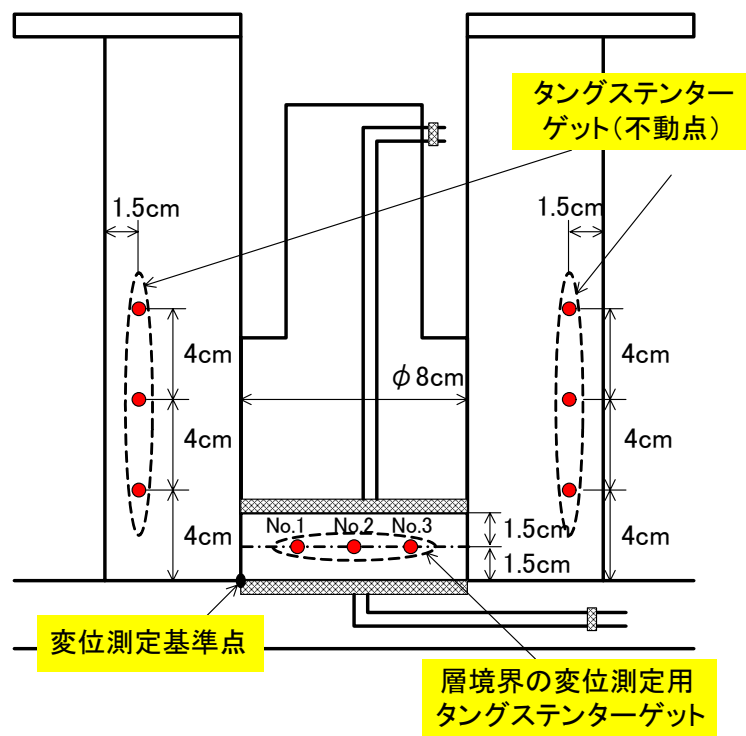


図-2.9.4 供試体およびタングステンターゲットの配置

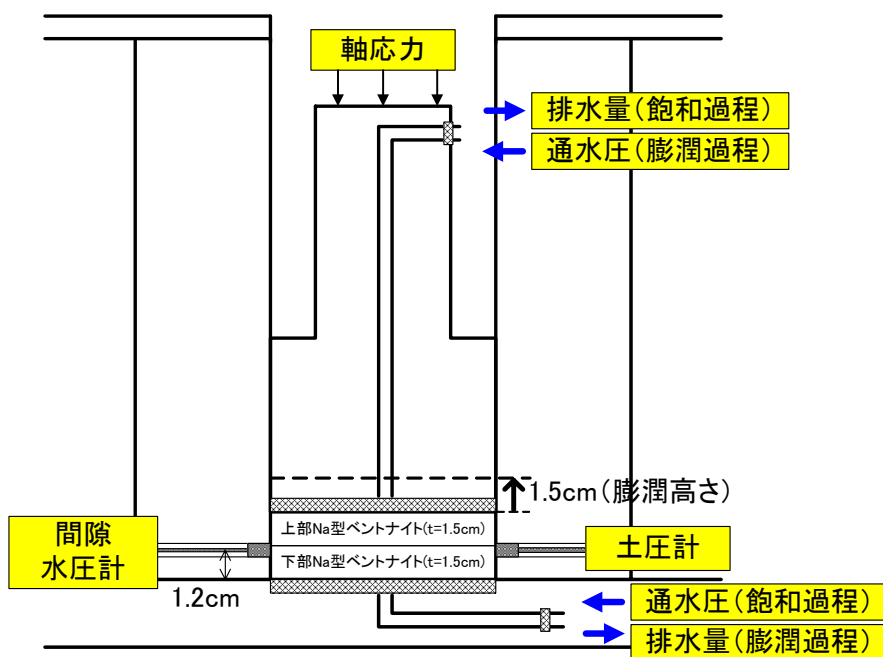


図-2.9.5 計測項目と計測位置

2.9.5 実験結果

(1) 飽和過程

飽和過程では、供試体への通水開始から約 52 日間の計測を実施した。各センサー（側方土圧計、軸応力、通水圧、間隙水圧計）の経時変化を図-2.9.6 に示す。また、図-2.9.7 に側方土圧の観測値と間隙水圧の観測値との差値（有効応力に相当する側方土圧）、軸応力の観測値と通水圧の観測値の差値（有効応力に相当する軸応力）、図-2.9.8 にそれらの比（静止土圧係数 K_0 に相当する値）の経時変化を示す。図-2.9.8 には側方土圧観測値と静水圧観測値による土圧比の経時変化も参考として示す。また、図-2.9.9、図-2.9.10 は、それぞれ排水量および排水量から算定された透水係数の経時変化である。これらの図から確認できたことを以下にまとめる。

・通水圧

通水圧は、供試体下面から作用させ、通水開始から 3 日目から 0.1MPa/day で段階的に上昇させ、その 8 日後に 0.65MPa まで上昇させた。それ以降は、通水圧 0.65MPa を保持した。

・側方土圧

側方土圧の計測値は、飽和開始から 1 日目で膨潤圧に起因すると考えられる最初のピーク値（1.15MPa）を示した。ただし、その後の通水圧の増加とともに側方土圧も増加傾向に転じ、通水圧を一定に保った状態では、約 2.0MPa の一定値で推移した。

・軸応力

軸応力は、飽和開始から 1 日目で膨潤圧に起因すると考えられるピーク値（1.23MPa）が発生した。側方土圧と同様に通水圧の増加とともに軸応力も増加傾向に転じ、通水圧を一定に保った状態では、軸応力は約 1.8MPa の一定値で推移した。通水圧作用初期においては、軸応力が側方土圧を上回っていたが、通水圧作用後は逆転し、側方土圧が軸応力を上回るようになった。これは、側方土圧計の観測値にはベントナイトの膨潤圧と間隙水圧が含まれるが、軸応力には水圧はほとんど含まれていないためと考えられる。

・間隙水圧

間隙水圧は、飽和開始から 7 日目まで最小で -0.06MPa 程度の負の間隙水圧が観測された。これは供試体の透水性が非常に低く、通水と同時に発生するベントナイトの吸水膨潤に水の供給が追いつかないために、供試体内に負圧が生じたためと推測される。その後、間隙水圧の計測値は通水開始から 45 日目で一定値（約 0.33MPa）に収束した。この値は、通水圧 0.65MPa の約 50%に相当する。これは、供試体内部が飽和し、通水が定常状態に至り、供試体内の間隙水圧が、供試体底面を最大値とする三角形分布の定常状態に至ったためと考えることができる。なお、通水初期段階において、間隙水圧の計測値が通水圧と同等まで上昇したのは、供試体設置時に微小な隙間が生じやすい供試体と試験セルの境界に水が浸入したためと解釈できる。

・水圧を考慮した膨潤圧

図-2.9.7には側方土圧から間隙水圧の計測値を引いた値、ならびに軸応力から通水圧を引いた値をプロットした。但し、間隙水圧が負値を示している期間（計測開始から7日程度まで）に関しては、差値ではなく、計測値をそのままプロットしている。これらの値は本来、有効応力換算の膨潤圧に相当する値で、側方土圧の計測位置と間隙水圧の計測位置は等しい高さにあり、これに関しては有効応力に換算された膨潤圧と見なしても問題ない。但し、供試体軸方向には、前述のように間隙水圧に分布が生じていることが予想され、上面で測定した軸応力と下面で観測した通水圧の差を有効応力であると考えすることは出来ないが、同値を有効応力的な指標として扱うこととして考察を行った。

有効側方土圧は、計測開始から7日目で明確なピークを顕した。これは間隙水圧が負値から正值に転ずるのと時期をほぼ一にする。その後、間隙水圧の減少に伴い、漸増し、間隙水圧が一定値になる（45日目）と、ほぼ一定の値に収束した。一方、通水圧を考慮した軸応力は若干の変動が見られるものの、通水開始から概ね一定の値を示した。この間の平均値は約1.2MPaであり、昨年度得られた膨潤率0%のNa型ベントナイトの膨潤圧（平均2.03MPa）を下回っている。これは、前述のように供試体内に間隙水圧分布が生じているため、軸応力が有効応力に適切に換算されていないこと、供試体設置時にセルと供試体の境界に存在した微小空隙を充填するために、飽和過程で微小な膨潤が生じたことなどが原因と考えられる。

・土圧比

図-2.9.8は、図-2.9.7に示した側方土圧と間隙水圧の差分と、軸応力と通水圧の差分の比として求めた土圧比（換算値による土圧比）、並びに図-2.9.6に示した側方土圧、軸圧力の計測値から求めた土圧比（計測値による土圧比）の経時変化を示した結果である。軸応力と通水圧の差が有効応力と考えるならば、換算値による土圧比は静止土圧係数 K_0 に相当する値であるが、前述のとおり、軸応力の観測値と通水圧の観測値の差を有効応力であると考えすることは出来ないため、あくまで静止土圧係数に類する指標という位置付けとなる。土圧比は有効側方土圧が最大値を示した時（通水開始から7日目）と同時にピークを発現し、その後一時的に減少した後、漸増し、間隙水圧が一定となった時期（通水開始から45日目）にはほぼ一定値となった。45日目以降の平均値は、1.454であり、 K_0 圧密試験から得られた静止土圧係数（0.952）を上回った。このことは、軸応力（観測値）と通水圧の差が、供試体内部に作用している有効応力よりも小さいことを示唆している。参考までに図-2.9.8には軸応力と側方土圧の観測値の比（観測値による土圧比）も併記したが、こちらは通水開始から比較的早い段階で、ほぼ一定値（平均値1.118）を示した。こちらの方が換算値から示した土圧比より幾分小さく、 K_0 圧密試験結果に比較的近い値となった。

・排水量

飽和開始直後では供試体の吸水作用に供試体下面からの水の供給が追いつかず、9日目までは排水側経路に設置したメスシリンダー内の水が吸水された。約20mlの吸水が生じた後、

供試体下面からの水の供給量が、供試体の吸水量を上回り始め、排水量が徐々に増加し、通水開始から 11 日目以降は、ほぼ一定の流量で、排水量が増加するようになった。

・透水係数

透水係数は、上述の排水量の増加が認められた時点以降の期間のデータを用いて算定した。その期間中、透水係数は $1.0 \times 10^{-13} \sim 5.0 \times 10^{-13} \text{ m/sec}$ の範囲を推移した。飽和過程において得られた透水係数の平均値は $3.08 \times 10^{-13} \text{ m/sec}$ であったが、昨年度に実施した Na 型ベントナイトの透水試験結果（膨潤率 0% 時の平均値 $1.29 \times 10^{-13} \text{ m/sec}$ ）²⁾と比較して、若干大きい。但し、既往の研究結果^{7) 8) 9) 10)}なども併せて考えると、膨潤率 0% の Na 型ベントナイトの透水係数としては、概ね妥当な値と判断できる。

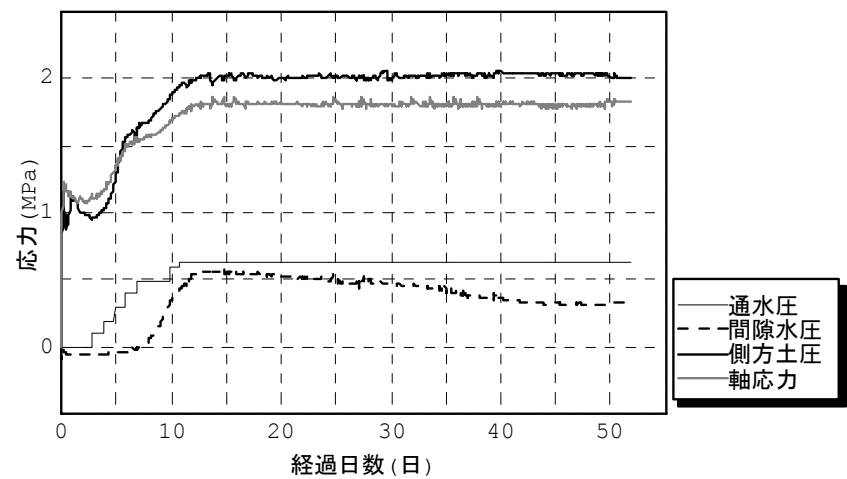


図-2.9.6 各計測値の経時変化（飽和過程）

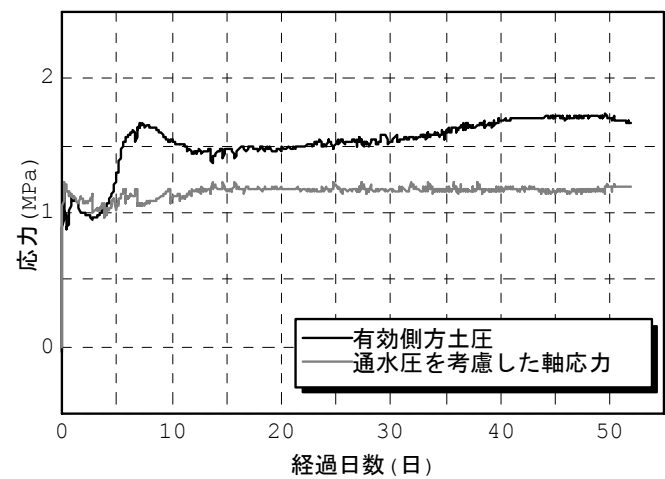


図-2.9.7 側方土圧と間隙水圧、軸応力と通水圧の差値の経時変化（飽和過程）

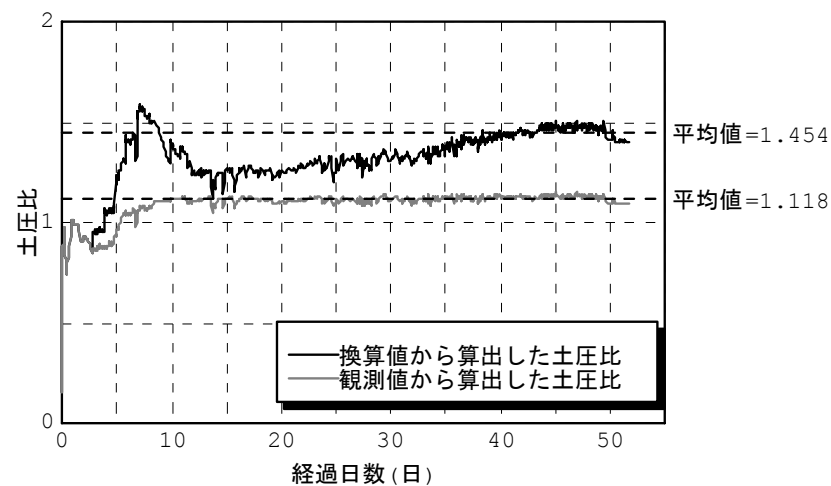


図-2.9.8 土圧比の経時変化（飽和過程）

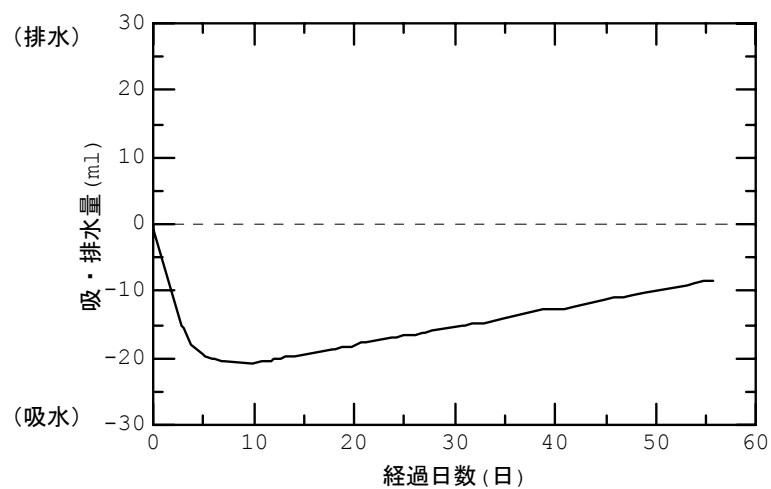


図-2.9.9 吸・排水量（累積値）の経時変化（飽和過程）

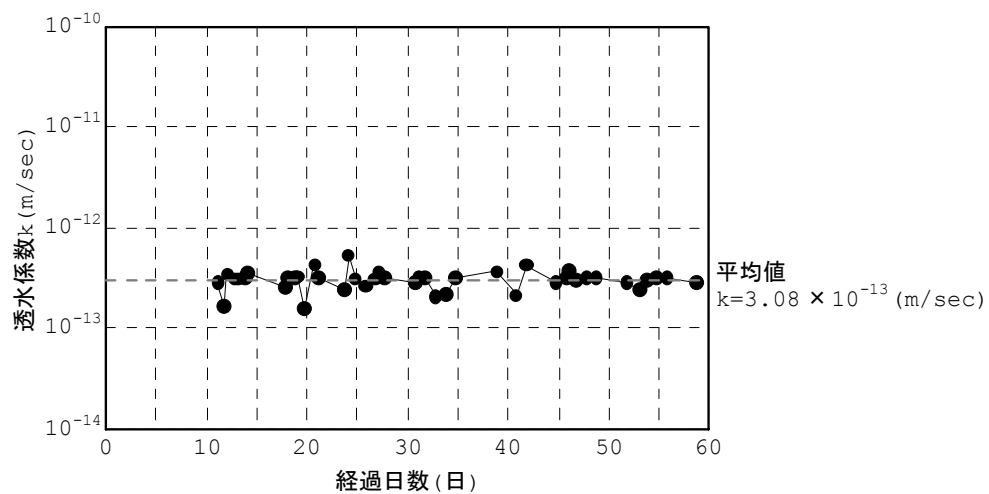


図-2.9.10 透水係数の経時変化（飽和過程）

(2) 飽和終了の確認と X 線撮影結果

飽和過程における各計測値の経時変化から、各計測値が一定値に収束したことを確認した時点で飽和終了（約 50 日目）と判断した。その後、供試体の層境に配置したタングステンターゲットの位置を確認するため、X 線撮影を行った。供試体の左下端を基準点（原点）とし、X 線写真を画像解析することによりタングステンターゲットの位置を求めた結果を表-2.9.1、および図-2.9.11 に示す。これらより以下のことが分かる。

- ・ 3 つのタングステンターゲットの位置は、供試体下面から平均 15.6mm の位置にあり、供試体中心からわずかに上側に位置している。
- ・ 中心のタングステンターゲットの位置は、ほぼ供試体の中間高さにあるが、外側の 2 つのタングステンターゲットは中心のものと比較して 1mm 程度上側に位置している。これは、通水直後は水が供試体と試験機の境界に浸入しやすく、供試体の外側から吸水が生じ、徐々に供試体内側に水が浸透していくことで均一に飽和することによると推測される。そのため、供試体内に膨潤圧の差異が生じ、外側の 2 つのタングステンターゲットが移動したものと推測される。

表-2.9.1 飽和終了時のタングステン球の座標

飽和終了時 (0 日)	タングステン No.	X 座標(mm)	Y 座標(mm)
	1	20.8	16.0
	2	41.3	15.0
	3	62.7	15.8
	(平均)	41.6	15.6

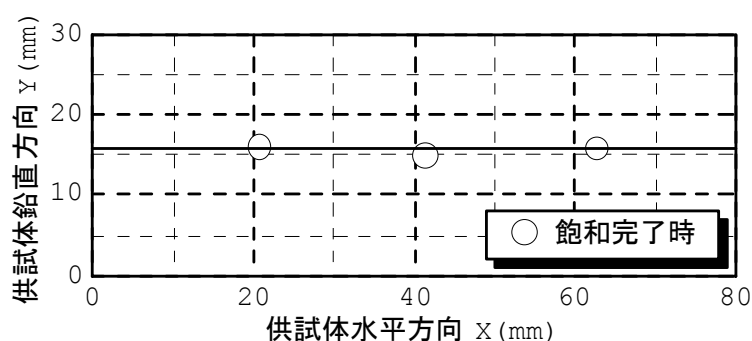


図-2.9.11 飽和終了時のタングステン球の位置

(3) 膨潤過程

膨潤過程ではまずピストンを上方に上げた際に、供試体が下方からの通水圧により上方に移動しないよう、供試体上面から通水圧を作用させた。その後、ピストンを 15mm 上方に引き上げた後に、これを固定し、供試体に膨潤を開始させた。

膨潤過程ではピストンを上方に移動させた後、排水量の計測は 50 日、各センサー（側方土圧計、軸応力、通水圧、間隙水圧計）を用いた計測は約 140 日間、実施した。各センサーによって得られた観測値の経時変化を図-2.9.12 に示す。飽和過程と同様、側方土圧と間隙水圧、軸応力と通水圧の差値の経時変化を図-2.9.13 に、両値の比（土圧比）の経時変化を図-2.9.14 に示す。図-2.9.14 には側方土圧観測値と静水圧観測値による土圧比の経時変化も参考として示す。また、吸・排水量の累積値、および排水量から求めた透水係数の経時変化を、図-2.9.15、図-2.9.16 に示す。なお、この間、通水圧は、ピストン側から 0.65MPa の一定値で作用させた。これらの図から確認できたことを以下にまとめる。

・側方土圧

側方土圧は、ピストンを上方に移動させた直後に 0.89MPa まで減少した。変形拘束の解除にともなう応力解放によると考えられる。しかし、膨潤開始から 3 日後に供試体がピストンに接した際に増加し、膨潤開始から 80 日目以降で概ね一定の値（平均 0.95MPa）をとるようになった。

・軸応力

ピストンを上方に移動させた際、ベントナイトとの接触が一時的に喪失したため、この段階で、軸応力は通水圧と同程度の 0.61MPa まで減少した。ただし、供試体とピストンの接触が再度回復した後、軸応力が増加に転じ、側方土圧と同様に膨潤開始から 80 日以降で平均 0.8MPa と、ほぼ一定の値を示した。

・間隙水圧

間隙水圧は、ピストンの移動直後に 0.21MPa まで減少した。その後、供試体の膨潤とともに間隙水圧も徐々に上昇し、80 日目で約 0.55MPa で一定となった。これは通水圧の約 85%に相当し、通水加压面（供試体上面）から供試体下面に向かって徐々に水圧が損失していくような膨潤完了後の定常状態の間隙水圧分布を考えた場合、想定される間隙水圧である約 0.22MPa と比較して過大な値である。飽和過程においては供試体下面を最大値とする水圧分布が発生していたが、膨潤過程は通水方向を逆にしたため、非一様な分布をもつ非定常な水圧分布が生じた可能性、或いは膨潤過程において、水みちが形成された可能性などが考えられる。但し、時間を経るに従って水圧分布は正規なものに移行していくため、より長い試験期間をとることで、間隙水圧の観測値は正規の水圧分布に近づいていくと推測される。

・水圧を考慮した膨潤圧

図-2.9.13 には、飽和過程と同様に、側方土圧と間隙水圧の差、および軸応力と通水圧の差の経時変化を示した。両値とも膨潤開始と同時に急速に低下したが、間隙水圧が一定を

示した時期（通水開始から 80 日経過後）にほぼ一定の値を示すようになった。80 日目から計測を終了した 136 日目の間の平均値は有効側方土圧で 0.4MPa、通水圧を考慮した軸応力で 0.15MPa であった。通水圧を考慮した軸応力に関して言えば昨年度実施した膨潤率 40% 相当の Na 型ベントナイトの膨潤圧 0.119MPa よりも小さいが、積層ベントナイト試験で供試体に付与した膨潤率が 50%であることを考慮すると、妥当な結果と言える。

・土圧比

図-2.9.14 は、飽和過程と同様に、図-2.9.13 に示した側方土圧と間隙水圧の差分と、軸応力と通水圧の差分の比として求めた土圧比（換算値による土圧比）、並びに図-2.9.12 に示した側方土圧、軸応力の計測値から求めた土圧比（計測値による土圧比）の経時変化を示した結果である。換算値から求めた土圧比は、膨潤開始直後に軸応力が 0 程度になるために、非常に大きな値となるが、膨潤変形の進展に伴う軸応力の回復に従って減少し、間隙水圧がほぼ一定となった 80 日経過以降は、同様にほぼ一定の値（2.650：平均値）となった。一方、計測値から直接求めた土圧比は、換算値から求めたそれと比較して、変化量は小さい。間隙水圧が一定となった 80 日目以降の平均値は 1.206 であり、飽和過程で得られた値（1.118）とほぼ同等であった。

・排水量

膨潤開始直後ではベントナイトの吸水作用のため、排水側経路に設置したメスシリンダー内の水が約 3ml 吸水された。その後、ベントナイトの吸水量よりも水の供給量が上回るようになると、排水が確認されるようになり、排水量は、ほぼ一定の速度で増加した。

・透水係数

透水係数は、供試体の膨潤直後に増加した。これは初期のデータに吸水と排水が均衡していた状態から、徐々に排水が卓越し始めた点、つまり、供試体内部の浸透が定常状態に至る前の値が含まれているためである。透水係数は一時的に増加した後、ほぼ一定の数値を示し、その平均値は $8.41 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ であった。これは、昨年度実施した膨潤率 40% の Na 型ベントナイトの透水係数 ($6.34 \times 10^{-13} \text{m/sec}$) よりやや大きめの値であり、膨潤率 50% の Na 型ベントナイトの透水係数としては妥当な数値と考えることが出来る。

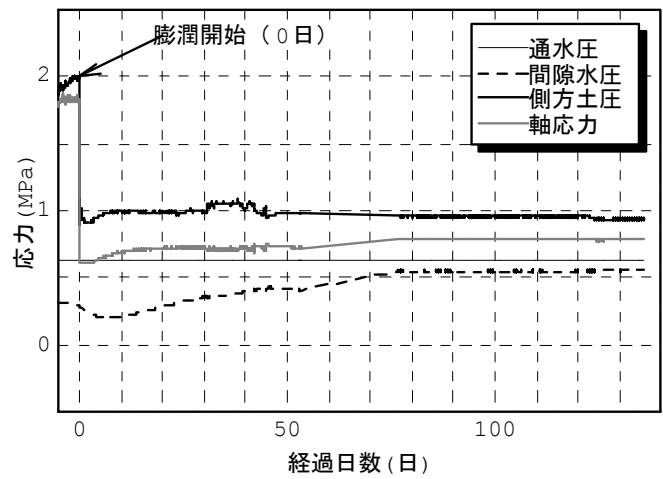


図-2.9.12 各計測値の経時変化（膨潤過程）

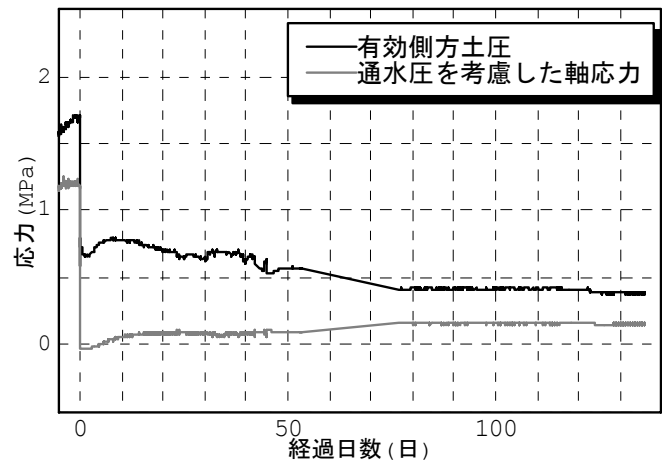


図-2.9.13 側方土圧と間隙水圧、軸応力と通水圧の差値の経時変化（膨潤過程）

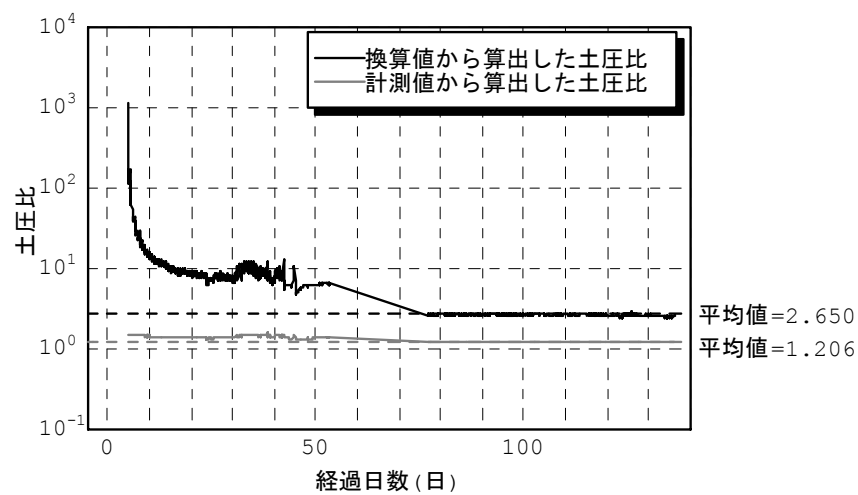


図-2.9.14 土圧比の経時変化（膨潤過程）

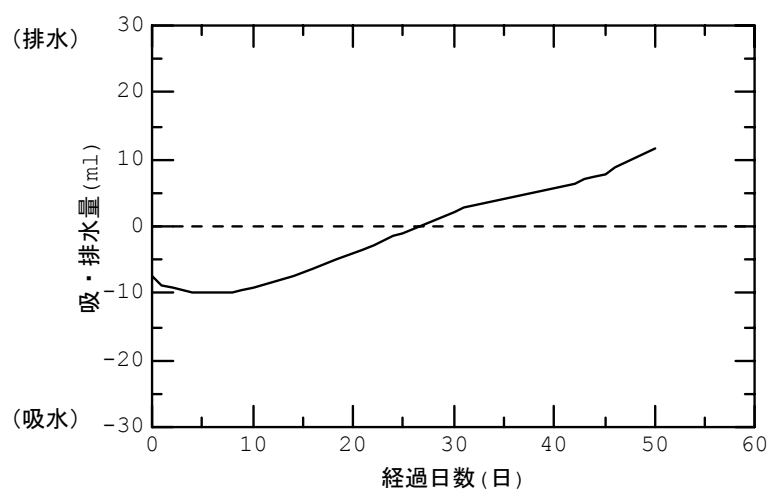


図-2.9.15 吸・排水量（累積値）の経時変化（膨潤過程）

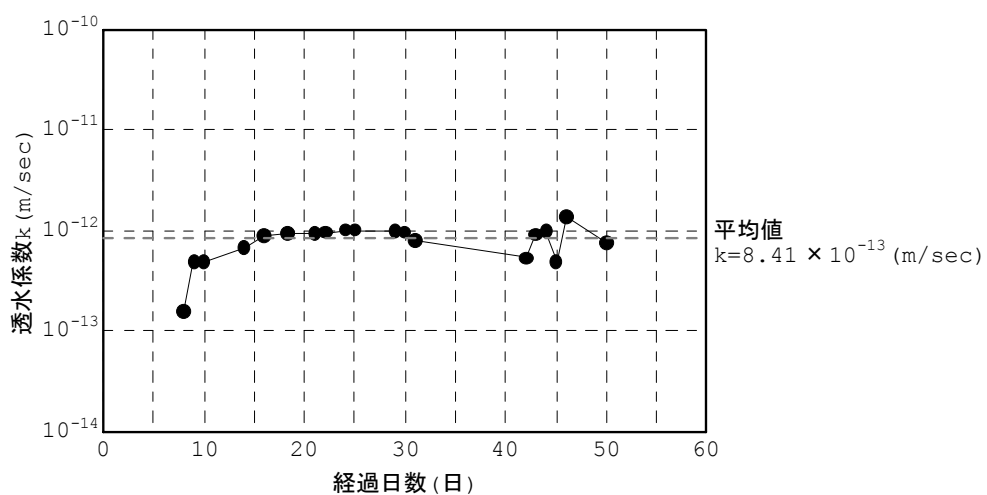


図-2.9.16 透水係数の経時変化（膨潤過程）

(4) 膨潤終了の確認と X 線撮影結果

膨潤過程における供試体層境変位を計測するために膨潤開始から 65 日、136 日目に、供試体の層境に配置したタングステンターゲットの位置を確認するための X 線撮影を行った。膨潤前後のタングステンターゲットの位置を比較した結果を表-2.9.2、および図-2.9.17 に示す。

膨潤前と比較して、タングステンターゲットの平均位置は、膨潤開始から 65 日目に鉛直方向上方に 2.6mm、136 日目に 5.2mm 移動していることがわかった。供試体は上方に 15mm 膨潤しているため、層境の位置は初期位置（供試体下面から 15.0mm）の 7.5mm 上方の 22.5mm の位置まで上昇することが予想された。136 日経過時の層境座標は供試体下面から 20.8mm（平均）に位置している。タングステンターゲットは X 線の透過率が低くこの種の計測には向いているものの、ベントナイトより比重が高いためターゲットがベントナイトの膨潤挙動に完全には追従できない可能性がある。ただし、一方で各種計測値はほぼ一定値に収束していることを考えれば、層境は概ね最終平衡状態に到達したものと推測される。

表-2.9.2 飽和終了時および膨潤終了時のタングステンターゲットの座標の比較

経過 日数	タングステン No.	X 座標 (mm)	Y 座標 (mm)	初期からの水平変 位量 $\Delta x(\text{mm})$	初期からの鉛直変 位量 $\Delta y(\text{mm})$
65 日	1	18.7	18.4	2.0	2.4
	2	41.0	17.7	0.3	2.8
	3	61.5	18.5	1.3	2.7
	(平均)	40.4	18.2	1.2	2.6
136 日	1	18.3	21.0	2.5	5.0
	2	39.5	20.2	1.8	5.3
	3	59.8	21.0	2.9	5.2
	(平均)	39.2	20.8	2.4	5.2

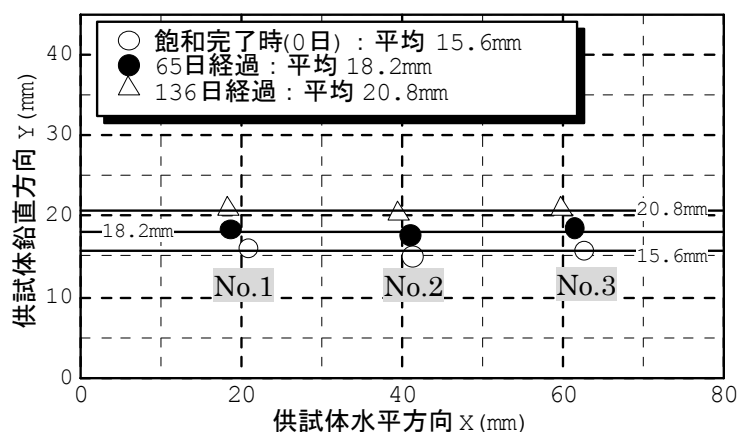


図-2.9.17 飽和終了時および膨潤終了時のタングステンターゲットの位置の比較

2.9.6 まとめ

以上の試験の結果、次のようなことが確認できた。

- ① 試験時間の制約から供試体厚さ 15mm の、Na 型ベントナイトを 2 層に積層した実験を行った（積層供試体厚さ 30mm）。その結果、試験時間は飽和、膨潤を併せ約 200 日程度で終了することが出来た。
- ② 各センサーにより飽和過程および膨潤過程における供試体の土圧・間隙水圧等の経時変化を把握し、供試体内の応力状態や排水量などを把握しながら試験を行うことが出来た。また、これにより飽和および膨潤終了時の判断を適切に行うことが出来た。
- ③ 膨潤前後のベントナイト層境の変位を X 線撮影後の画像解析により確認した結果、層境が膨潤後の供試体のほぼ中央まで移動していることが確認できた。

2.9.7 課題と今後の対応

以下に今回の試験で挙げられた課題と考えられる対応策を示す。

- ・ 現状の試験機では飽和・膨潤が終了するまでの間、非常に長い試験時間を要する。今回の実験では、2 層合わせた供試体厚さを 30mm としたことで、全試験に約 200 日を要した。今後、供試体の高さを大きくする必要がある場合は、試験時間をこれよりも長期で見込む必要がある。また、試験時間短縮のため通水を供試体上・下面からだけでなく、側方からも行えるように試験機を改良するなどの方策も考えられる。
- ・ 今回は鉛直ピストンに急激な変位を与えて、供試体に膨潤を生じさせたが、ここで得られたデータを解析的にシミュレートしようとする場合、境界条件の設定が困難である。したがって、ピストンを急激に移動させるのではなく、一定の軸応力を掛けたまま、供試体に膨潤を生じさせる機構を付加する（応力制御）、供試体上面に一定速度で膨潤変位を与える（変位制御）などの方策が必要である。但し、供試体の膨潤変形速度は、ベントナイトの膨潤変形速度に依存し、その速度を制御することは困難と予想されるため、圧密試験と同様、応力制御方式での試験を行うことがより現実的であると判断される。
- ・ 本試験は長期の試験となるため、ベントナイトからのイオン溶脱が生ずる可能性がある。Ca 型化率の異なるベントナイトを積層して試験を実施する場合には、供試体各層からのイオン溶出を抑制する工夫、あるいは試験前後にイオン交換の影響を把握しておくなどの対策が必要である。

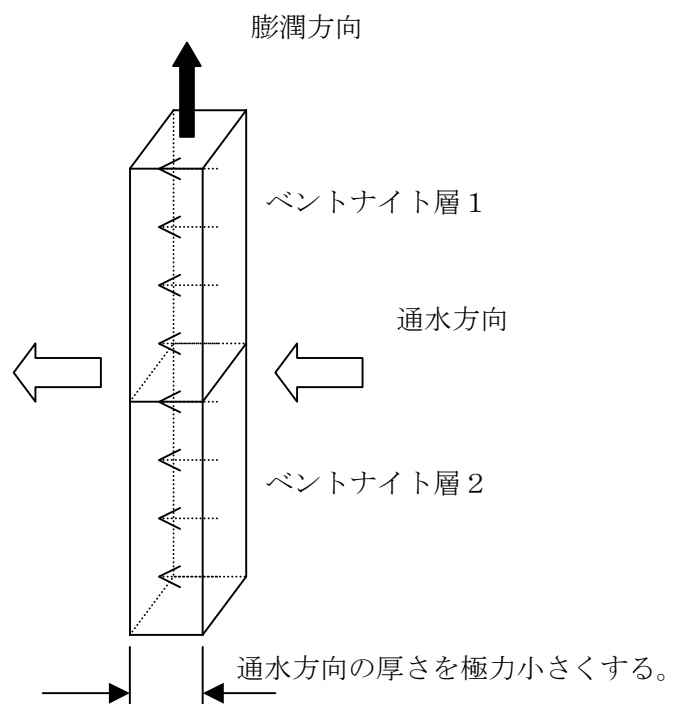


図-2.9.18 改良試験機のイメージ

参考文献

- 1) 奥津一夫, 森川誠司, 高村尚, 羽根幸司, 田部井和人, 青柳孝義, 村上武志, 松中亮治, 高瀬博康, Savage,D., 稲垣学, 野口俊英: “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委託研究報告書, JNC TJ8400 2002-031, (2002)
- 2) 笹倉剛, 畔柳幹雄, 岡本道孝: “ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び調査”, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TJ8400-2002-025, (2002)
- 3) Asaoka,A., Nakano,M, Noda,T.: “Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior”, Soils and Foundations, Vol.40, No.2, pp.99-110, (2000)
- 4) Hashiguchi,K.: “Subloading surface model in unconventional plasticity”, International Journal of Solids and Structures, Vol.25, pp.917-945, (1989)
- 5) 並河努, 菅野毅: “緩衝材のせん断特性 1”, 動燃公開資料, PNC TN8410 97-074, (1997)
- 6) 前田宗宏, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘: “カルシウム型ベントナイトの圧密非排水三軸圧縮試験”, 動燃公開資料, PNC TN8410 97-314, (1997)
- 7) 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬: “緩衝材の特性試験 (I)”, 動燃公開資料, PNC TN8410 92-057, (1992)
- 8) 前田宗宏, 棚井賢治, 伊藤勝, 三原守弘, 田中益弘: “カルシウム型化およ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、一軸圧縮強度および弾性係数—”, 動燃公開資料, PNC TN8410 98-021, (1998)
- 9) 松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明: “緩衝材の飽和透水特性”, 動燃公開資料, PNC TN8410 97-296, (1997)
- 10) 末岡徹, 小林淳志, 今村聡: “高圧縮ベントナイトの土質工学的特性 (高レベル放射性廃棄物地層処分の基礎的研究 その1)”, 大成建設技術研究所報, No.22, pp.85~104, (1989)

おわりに

(1) ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得

ベントナイト系材料の長期変形挙動を評価するため、ベントナイトの Ca 型化率および膨潤率をパラメータとした分析、試験を実施し、物理特性および力学特性など力学的変遷のモデル化に資する物性値を取得した。

分析、試験は表-1 に示す 14 項目に渡り、合計 75 の試験を実施した。すなわち、Ca 型化率 50%のベントナイトについては、使用材料の基本特性を把握するための物理試験 (①～⑥)、異なる膨潤状態での圧縮・膨潤特性およびせん断挙動を把握するための力学試験 (⑦～⑧)、異なる膨潤状態での透水係数を把握するための透水試験 (⑪)、ベントナイトの特徴でもある著しい膨潤挙動を把握するための性能試験 (⑫～⑬) である。

さらに、Ca 型化率 0%(Na 型)および Ca 型化率 100%のベントナイトについては、昨年度実施した試験結果を踏まえた追加確認試験を行った。すなわち、三軸 $\overline{CU}$ 試験では限界状態パラメータの間隙比依存性について、また、高圧圧密試験では正規圧密領域について確認した (⑦～⑧)。等方/ K_0 圧密除荷試験では、得られる有効応力経路から圧密・膨潤時の挙動をより詳細に把握し、モデル化概念の妥当性の確認を行った。また、力学挙動モデルに必要な K_0 値の直接的な取得を試みた (⑨～⑩)。

Ca 型化率 100%のベントナイトの透水試験、膨潤圧/膨潤量試験では、昨年度は試験期間の制約から膨潤率を最大 10%として実施したが、試験結果は膨潤履歴の影響を受けない可能性が示唆された。このため、本年度は、膨潤状態の調整方法を膨潤後の乾燥密度 (間隙比) に相当する状態に締固める方法に変更し、昨年度実施できなかった Na 型の状態での膨潤後に Ca 型化した場合に相当する膨潤率 10%以上について実施するとともに、この初期間隙比による調整方法でも試験結果には影響しないことを確認した (⑪～⑬)。

積層ベントナイト膨潤試験では、別途実施している研究において試作する力学挙動モデルを検証するためのデータ取得を目的として、Na 型ベントナイトのみを用いた膨潤試験を実施し、膨潤挙動の詳細な調査を行った。当試験の主目的である異なる Ca 型化率を有するベントナイトが接触している系を模した試験の実施に向け、試験手法の妥当性を確認するとともに、同試験と比較可能なデータを得ることができた (⑭)。

表-1 取得諸量

	数量	取 得 諸 量
①成分分析	3	ベントナイトの Ca 型化率、他
②粒度試験	3	粒径加積曲線、有効径(D10)、他
③比重試験	3	比重(Gs)
④含水比試験	3	含水比(ω)
⑤液性塑性限界試験	3	液性限界(ω_L)、塑性限界(ω_p)、コンシステンシー指数 (I_c)、他
⑥締固め試験	3	最大乾燥密度(ρ_{dmax})、最適含水比(ω_{opt})、他
⑦三軸 $\overline{CU}$ 試験	12	限界状態パラメータ(M)、変形係数(E_{50})、他
⑧高圧圧密試験	14	圧縮指数(C_c)、圧密降伏応力(P_c)、他
⑨等方圧密除荷試験	2	圧縮指数(C_c)、膨潤指数 (C_s)、圧密降伏応力(P_c)、他
⑩ K_0 圧密除荷試験	2	K_0 値、圧縮指数(C_c)、膨潤指数 (C_s)、圧密降伏応力(P_c)、他
⑪透水試験	8	飽和試料の透水係数(k)
⑫膨潤圧試験	10	膨潤圧
⑬膨潤量試験	8	膨潤量
⑭積層ベントナイト 膨潤試験	1	膨潤中のベントナイトの挙動に関する各種データ
	75	

(2) ベントナイト系材料の力学的変遷挙動のモデル化のための調査

・ 解析モデルの試作

1 章において得られたデータを昨年度実施した研究結果、及び既往の研究結果と比較し、結果の妥当性について検討するとともに、得られた結果を用いて、

a)ベントナイトの膨潤性能に関わる物性値（膨潤率、膨潤圧）

b)止水性能に関わる物性値（透水係数）

c)せん断挙動、圧密挙動およびそれらに関わる物性値（限界状態パラメータ、正規圧密線、膨潤線）

に、ベントナイトの膨潤率および Ca 型化率が及ぼす影響を定量的に評価した。

また、ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システムにフィードバックするために、土の状態量の一つである間隙比を指標とした簡易な数式による解析モデルの試作、またはモデル化手法の提示をした。

・ 検証試験方法の検討

数値解析モデルを実規模施設の予測解析に適用する前段階として、モデルの妥当性の検証、および精度の高いモデル化のためのフィードバックデータの入手を目的とした、積層ベントナイト膨潤試験を実施した。この試験の主目的は、セメント系材料から溶出する Ca^{2+} イオンによって Ca 型化したベントナイトと Na 型ベントナイトが隣接する状態を再現し、これらのベントナイトが一体として一次元的に膨潤した場合、それぞれのベントナイトの膨潤挙動を把握することである。

本検討では試験手法の妥当性検証のために、Na 型ベントナイトのみを用いた試験を実施した。その結果、飽和過程から膨潤過程に至るまでの試験方法に関して、試験時間の短縮や境界条件の与え方などについて若干の検討の余地があるものの、目視および X 線を用いた観察により供試体内の微視的な膨潤挙動を把握することができた。

(3) 今後の課題

以下に今後の課題をまとめる。

- ・ ベントナイトの正規圧密曲線

昨年度と今回実施した高圧圧密試験結果から、ベントナイトの正規圧密線が Ca 型化率によらず、ほぼ 1 つの線で表現できるという知見を得た。しかしながら、既存の構成モデルでは通常扱う地盤材料の間隙比の幅に限られるため、 $e\text{-log } p'$ 面上で正規圧密線は直線と仮定されている。放射性廃棄物処分施設において、ベントナイトがとり得る間隙比（膨潤率）の値が広範囲になることが予想されていることを考えれば、この正規圧密曲線の $e\text{-log } p'$ 平面における非線形性を考慮することが望ましい。本検討では、この非線形性をあらわすアイデアとして、構造を持った地盤材料の挙動評価に適用されている上下負荷面の概念の援用に関して述べた。Ca 型化率が異なるベントナイトの圧密挙動は 1 つの正規圧密曲線で表せることを明確にするためには、また、その正規圧密曲線の形状を把握するためには、同条件で実施した試験結果の更なる蓄積によって実験結果の信頼性を高める必要がある。

- ・ 最大膨潤量～平衡膨潤圧関係と正規圧密線

膨潤量、膨潤圧試験結果をモデル化に反映させるために、最大膨潤量と平衡膨潤圧を $e\text{-log } p'$ 平面で整理を行ったところ（2.5.2 項）、高圧圧密試験結果から得られる正規圧密曲線と最大膨潤量～平衡膨潤圧関係がほぼ一致するという知見を得た。ただし、2.5.1 項で述べたように正規圧密曲線の解釈が確定していないため、更なるデータの蓄積が重要である。仮に正規圧密曲線と最大膨潤量～平衡膨潤圧関係が一致するのであれば、圧密試験から得た正規圧密曲線とベントナイトの現在の間隙比と応力状態を得るだけ平衡膨潤圧や最大膨潤量が推定できることになり、設計などに非常に有用な情報を与えることになる。ただし、膨潤量試験においては、荷重が供試体に載っている鋼製ピストンのみであるため、載荷重をパラメータとした膨潤量試験を行う必要がある。

- ・ Ca 型化率によるせん断中の応力パスの違い

本検討で、Cam-clay モデルや関口・太田モデルにおいて、土質材料の降伏曲面を決定する限界状態パラメータ M は、従来の研究と同様に間隙比に依存しない土質定数として取り扱うことが出来るという結果を得た。しかしながら、Ca 型化率によってせん断中の応力パス形状が異なることが分かった。Ca 型化率が大きいものほど過圧密的であり、精度良くベントナイトの変遷挙動を表すためにはこの応力パスの違いを表す必要がある。このアイデアとして、上下負荷面の概念を援用する方法に関して述べた。ただし、強度に関しては、オリジナル関口・太田モデルでも推定可能であること、上下負荷面の導入には実験から直接求めることが出来ないパラメータの導入が避けられないことなどから、評価システムの要求精度とモデル化の精度のバランスを考える必要がある。

システムの精度を上げるためには、モデルの精緻化の他に次のような課題が挙げられる。これまで地盤力学で対象としていた粘土材料と地層処分におけるベントナイトは応力履歴が大きく異なると予想される。ベントナイトは、本研究が対象としている冠水飽和の前に、施工初期状態では比較的低含水比で締固められた不飽和締固め土であると考えられる。このような複雑な応力履歴を経た材料を精度良く弾・(粘) 塑性解析するシステムを構築するためには、精度良く初期応力を推定する方法の開発が不可欠となる。この初期応力状態を推定するためには、不飽和締固め土が飽和する間の各種力学試験を実施する必要があると考えられる。

精緻なモデル化を目指すには、上述した上下負荷面の導入の他に次のような課題が考えられる。まず、降伏曲面の形状として、関口・太田モデルと同様の関数形を暗黙の内に仮定しているが、 q/p' をパラメータとした q/p' 一定排水せん断試験を実施すれば、降伏曲面の形状を実験結果として取得することが可能である。また、関口・太田モデルでは、 p' 一定の排水せん断試験から得られる $e \sim q/p'$ 関係からダイレイタンシーが塑性成分であるとして組み立てられているが、ベントナイトにおいても成立することを実験的に求めた例は無いため、その実施が必要と考えられる。

- ・ 検証試験（積層ベントナイト膨潤試験）方法の高度化

本検討では、昨年度の検討結果を踏まえて、供試体の飽和に要する時間を勘案

し、供試体の寸法をφ80mm×h30mmとした。約200日間にわたる試験の結果、膨潤中のベントナイトの挙動に関するデータを取得することができた。但し、同試験結果を数値解析でシミュレートしようとする場合、現行の試験方法では、膨潤開始時に供試体に付与すべき境界条件を解析的に再現できない可能性が高い。したがって、今後は供試体に膨潤変形を付与する方法として応力制御方式の導入などを検討する必要がある。

- その他の配合の検討

今回の検討ではベントナイト単体に関する試験を実施した。しかしながら実際の処分施設の施工を考えた場合、ベントナイト単体の利用のみならず、コストダウン、強度向上を図ることが可能な他の配合についてもデータを取得しておくことが望ましい。検討を行う配合の候補としては、TRU 処分施設概念検討書などでも取り扱われた 30wt%ケイ砂混合体や埋戻材として想定されている 50wt%ケイ砂混合体が挙げられる。

さらに、これまでに実施した試験で用いた間隙水は蒸留水であるが、海水、地下水や、廃棄体からの溶出成分の溶液などを間隙水として試験に供することで、より実際の使用環境に近い状態でベントナイトの変遷挙動を試験することも検討課題として挙げることができる。

付録
実験状況等写真



写真-1.3.1 Ca 型化ベントナイト作製（塩化カルシウム溶液の調製）

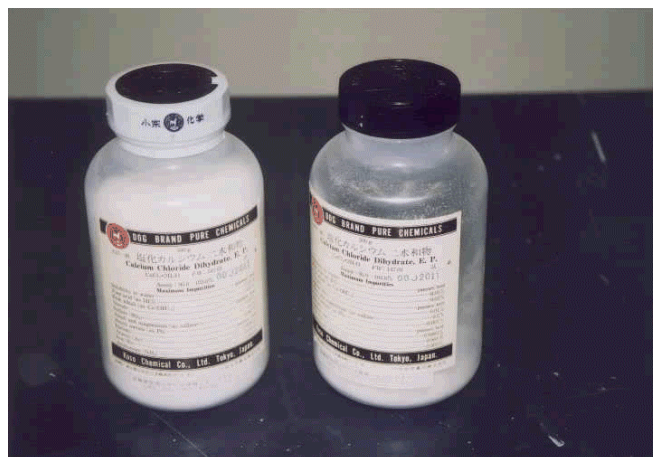


写真-1.3.2 Ca 型化ベントナイト作製（塩化カルシウム）



写真-1.3.3 Ca 型化ベントナイト作製（攪拌混合）



写真-1.3.4 Ca 型化ベントナイト作製（吸引ろ過）



写真-1.3.5 Ca 型化ベントナイト作製（ケーキの粗砕）



写真-1.3.6 Ca 型化ベントナイト作製（粉碎）



写真-1.3.7 Ca 型化ベントナイト作製（粉碎後ベントナイト）

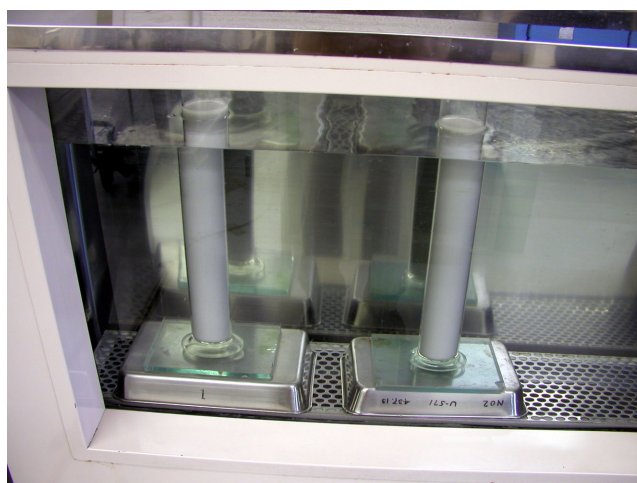


写真-1.5.1 粒度試験（試験状況 1）

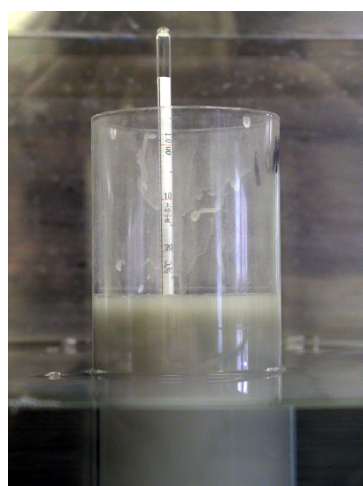


写真-1.5.2 粒度試験（試験状況 2）



写真-1.6.1 土粒子の密度試験（試料計量）



写真-1.6.2 土粒子の密度試験（脱気）

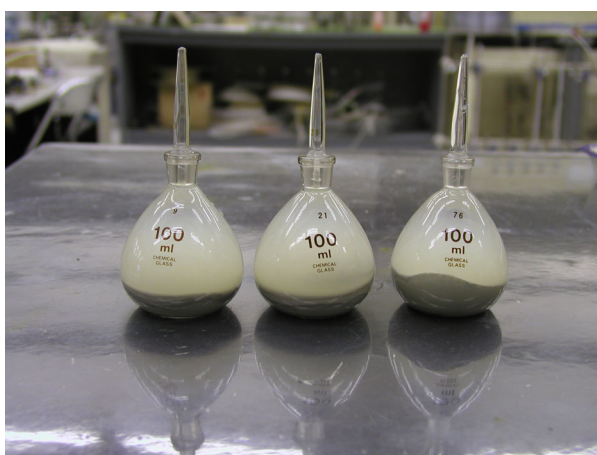


写真-1.6.3 土粒子の密度試験（試験後）



写真-1.8.1 液塑性限界試験（試料調製）



写真-1.8.2 液塑性限界試験（液性限界試験状況）



写真-1.8.3 液塑性限界試験（塑性限界試験状況 1）

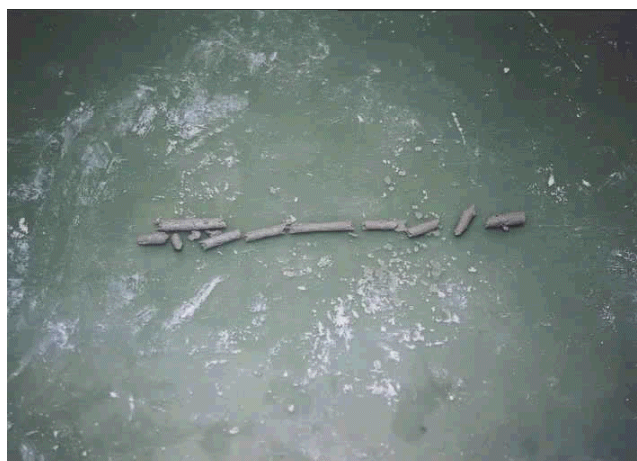


写真-1.8.4 液塑性限界試験（塑性限界試験状況 2）



写真-1.9.1 締固め試験（試料投入）



写真-1.9.2 締固め試験（締固め状況）

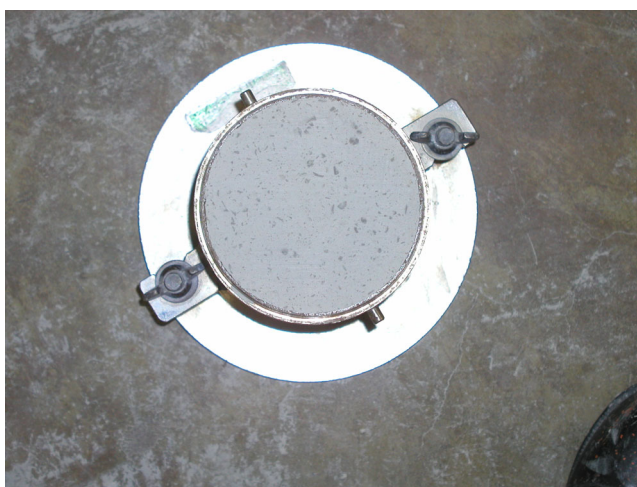


写真-1.9.3 締固め試験（端面成形後）



写真-1.9.4 締固め試験（締固め供試体）



写真-1.10.1 三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験 (締固め治具)

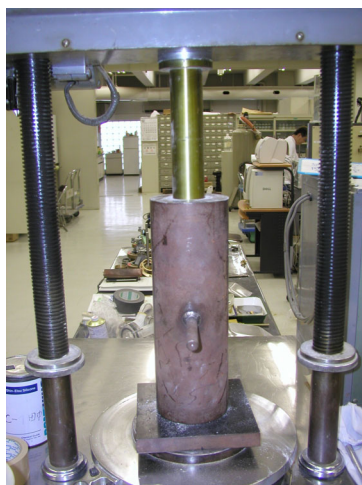


写真-1.10.2 三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験 (締固め状況)

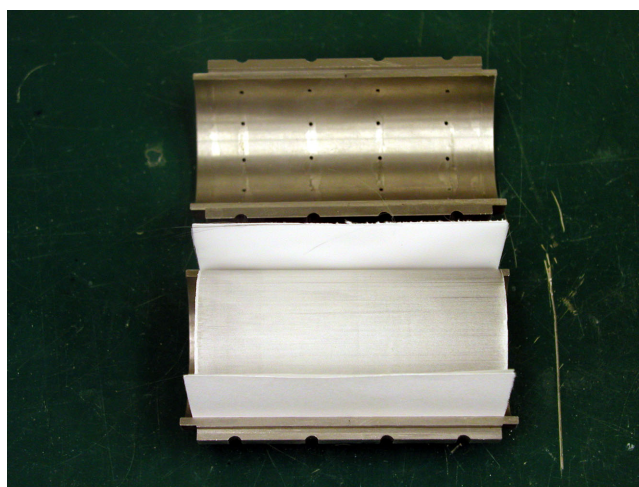


写真-1.10.3 三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験 (飽和セル、セット状況 1)

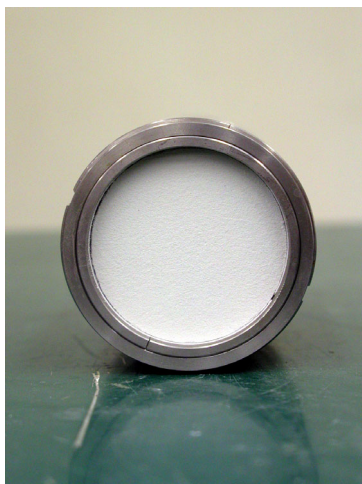


写真-1.10.4 三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（飽和セル、セット状況 2）

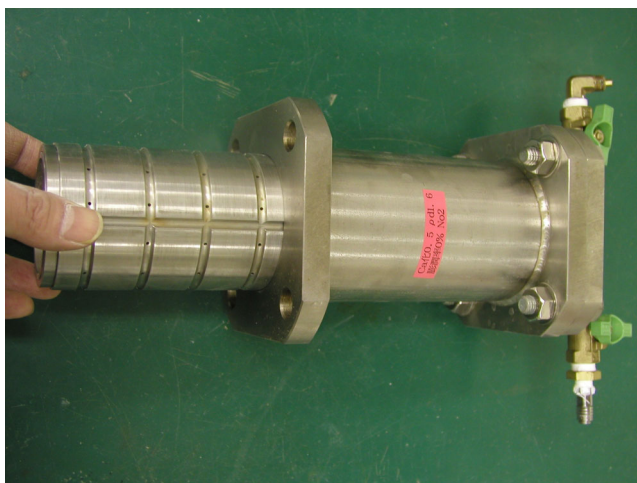


写真-1.10.5 三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（飽和セル、セット状況 3）

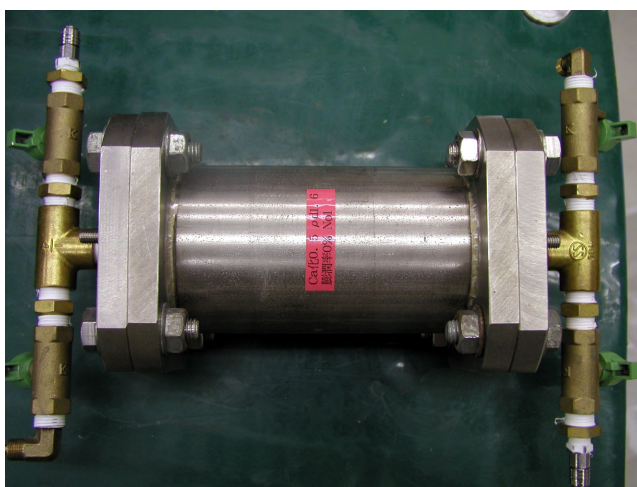


写真-1.10.6 三軸 $\overline{CU}$ 試験/等方圧密除荷試験（飽和セル、セット後）



写真-1.11.1 高圧圧密試験装置

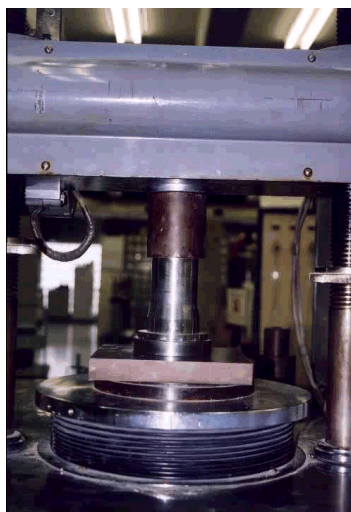


写真-1.11.2 高圧圧密試験（締固め状況）

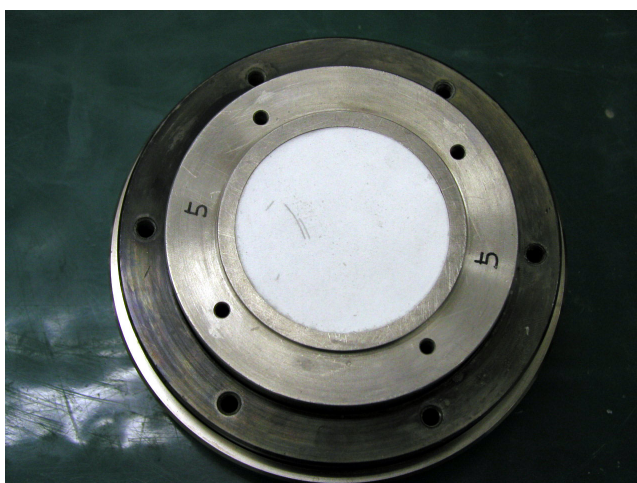


写真-1.11.3 高圧圧密試験（締固め後）



写真-1.11.4 高圧圧密試験（供試体寸法計測）

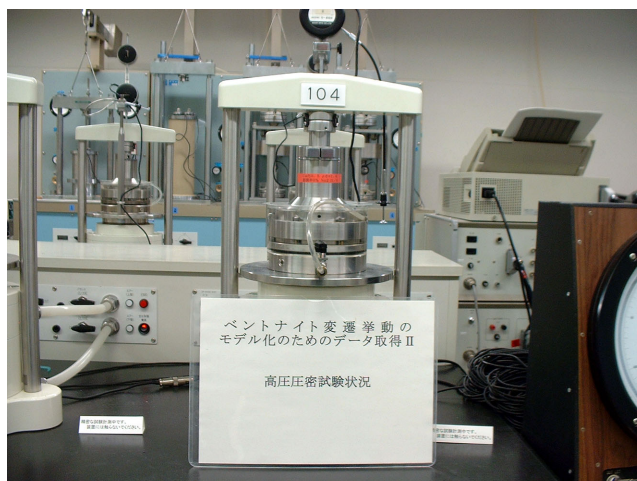


写真-1.11.5 高圧圧密試験（試験状況）

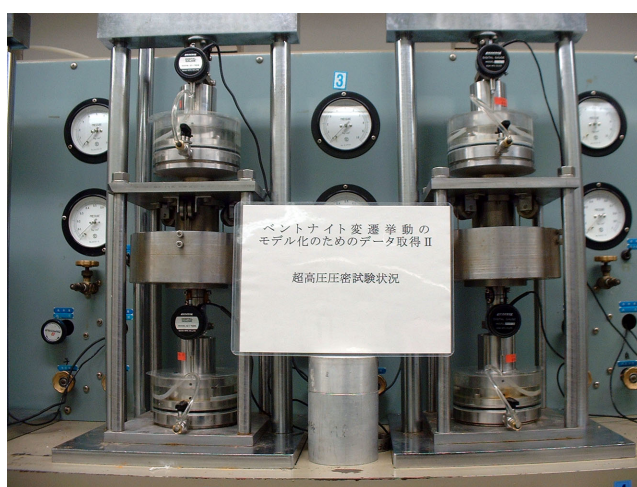


写真-1.11.6 超高圧圧密試験（試験状況）

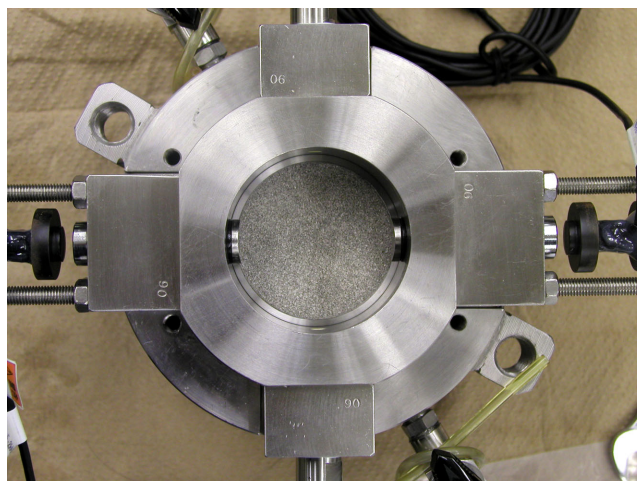


写真-1.12.1 K0 圧密除荷試験（圧密リング）

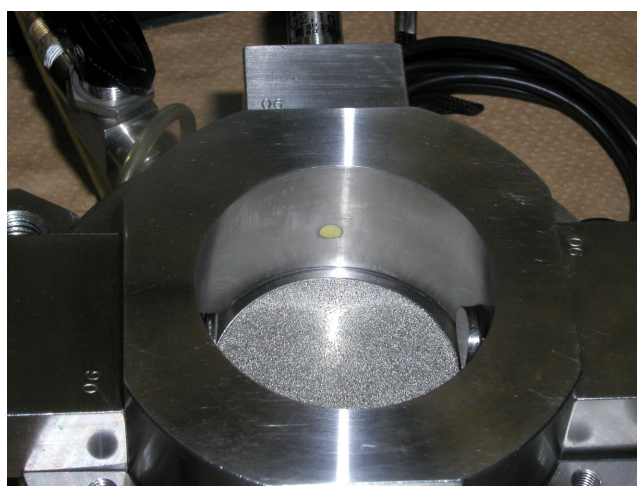


写真-1.12.2 K0 圧密除荷試験（水平土圧計測機構、間隙水圧計）



写真-1.12.3 K0 圧密除荷試験（締固め準備）

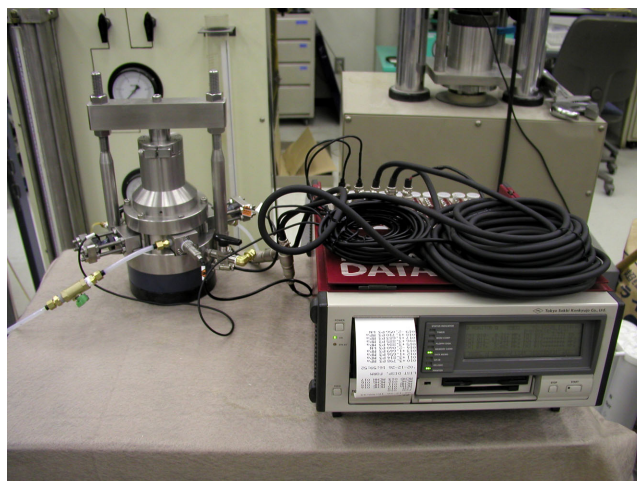


写真-1.12.4 K0 圧密除荷試験（飽和過程）



写真-1.13.1 透水試験（締固め容器）



写真-1.13.2 透水試験（締固め状況）

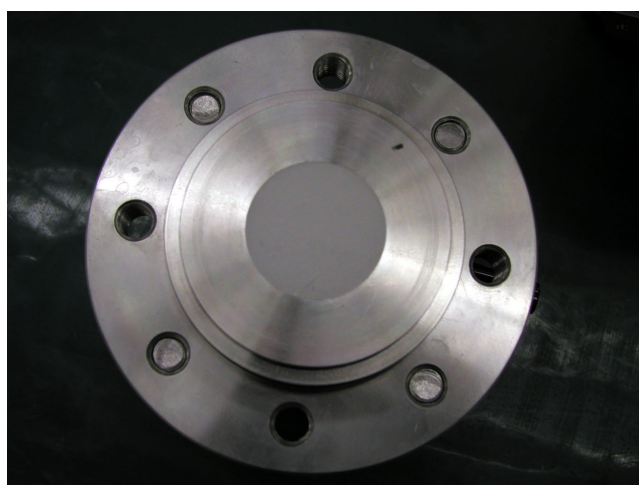


写真-1.13.3 透水試験（締固め後供試体）



写真-1.13.4 透水試験（試験状況）



写真-1.14.1 膨潤圧試験（締固め状況）



写真-1.14.2 膨潤圧試験（試験状況）



写真-1.15.1 膨潤量試験（締固め状況 1）

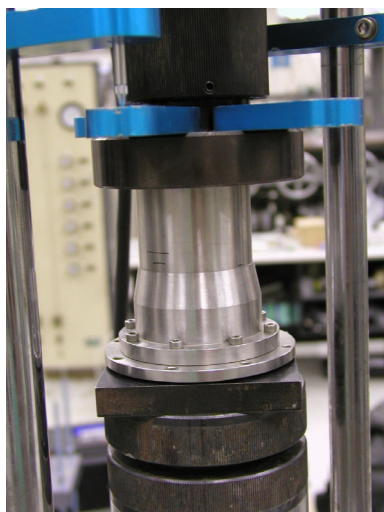


写真-1.15.2 膨潤量試験（締固め状況 2）



写真-1.15.3 膨潤量試験（飽和過程）

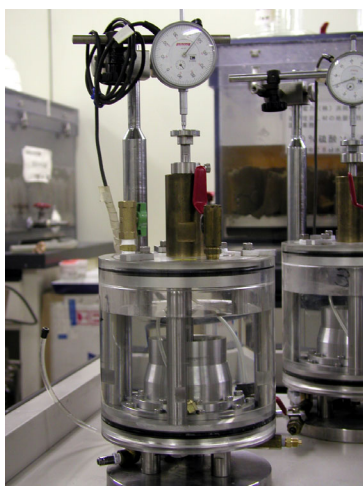


写真-1.15.4 膨潤量試験（試験中）

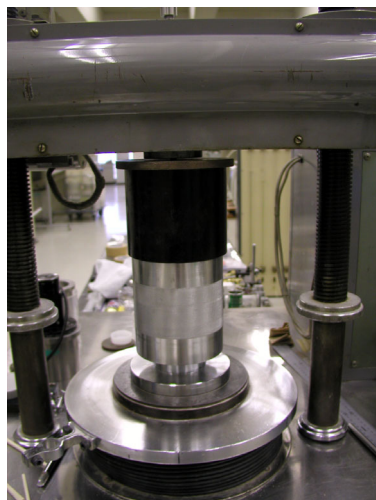


写真-2.9.1 積層ベントナイト検証試験（供試体締め）



写真-2.9.2 積層ベントナイト検証試験（供試体設置）

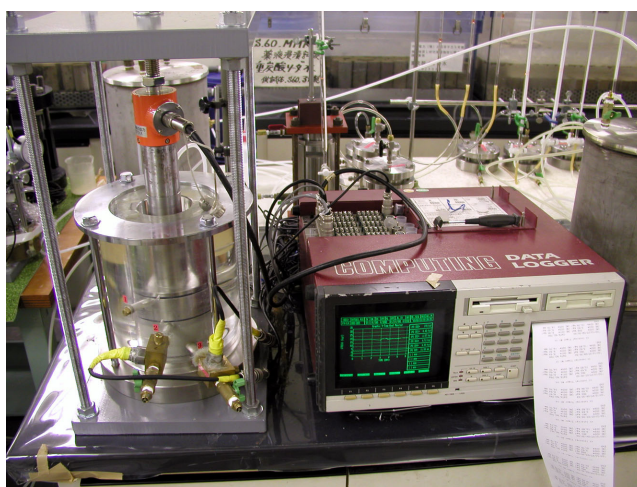


写真-2.9.3 積層ベントナイト検証試験（試験状況）



写真-2.9.4 供試体状況（飽和過程）

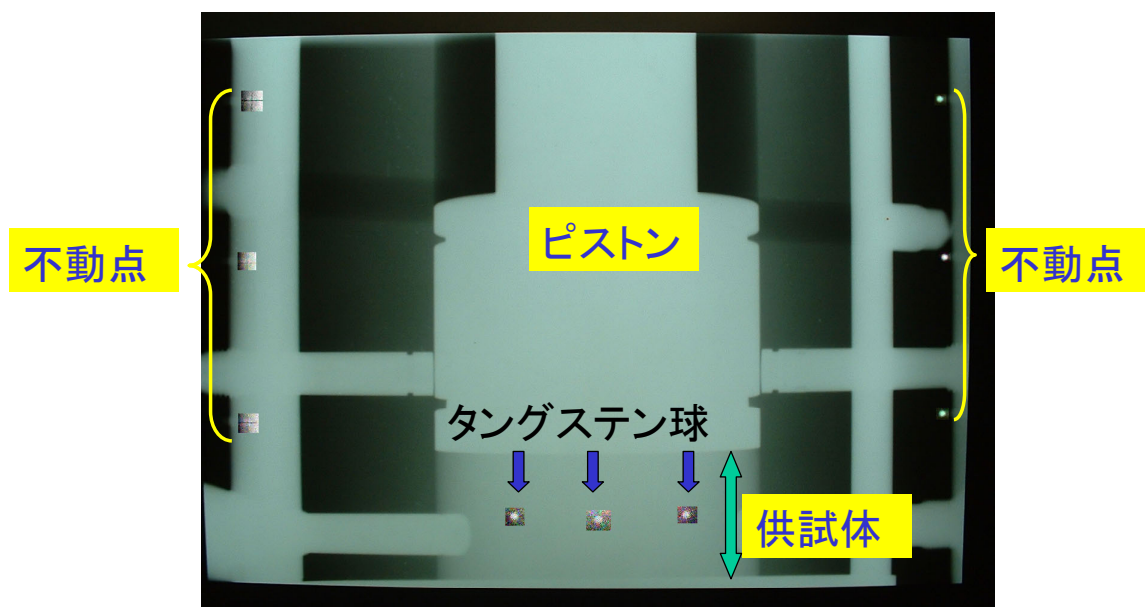


写真-2.9.5 飽和終了時の X 線撮影写真



写真-2.9.6 膨潤時の供試体(1)

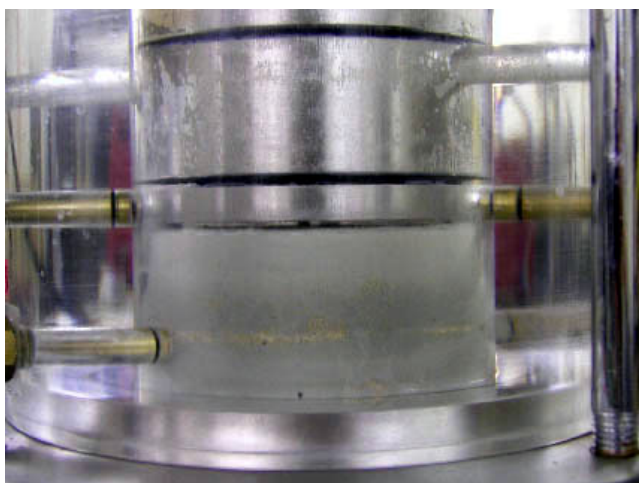


写真-2.9.7 膨潤時の供試体(2)

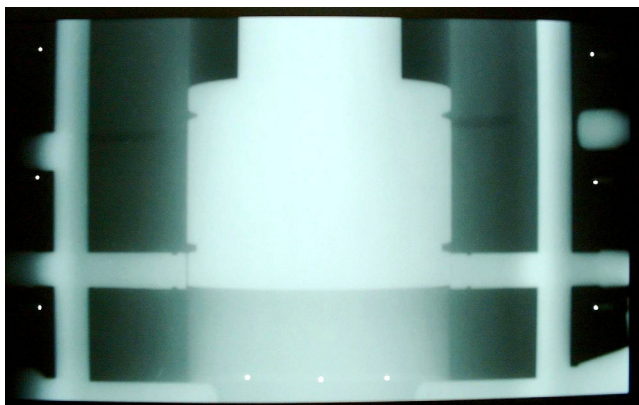


写真-2.9.8 膨潤完了時の X 線撮影写真