

緩衝材の静的力学特性 (研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33
核燃料サイクル開発機構 東海事業所
運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Information Section,
Administration Division,
Tokai Works,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

緩衝材の静的力学特性

(研究報告)

報告者：高治 一彦*，鈴木 英明**

要 旨

緩衝材には、止水性、自己シール性、核種収着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーバック支持性、応力緩衝性等が長期にわたり維持されることが期待されている。これらの機能を比較的満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目され、中でも圧縮されたベントナイトは、非常に低い透水性による水の動きの抑制、水の浸潤に伴い膨張し圧縮ベントナイト中の間隙や隣接する岩盤中の割れ目への充填、陽イオン核種を収着する陽イオン交換能を有している等の点で優れており、緩衝材として最も有力であると考えられている。

サイクル機構では地層処分研究の一環として、人工バリア技術開発および安全評価の基礎データとするために緩衝材の特性に関する研究を進めている。

本報告書は、緩衝材としての圧縮ベントナイトの力学特性の把握を目的として、圧裂試験、一軸圧縮試験、一次元圧密試験、圧密非排水三軸試験、圧密非排水三軸クリープ試験についての手順、試験条件、結果および考察について、これまで取得されていなかった物性や、既報を補完するための追加試験等に関してまとめたものである。

圧裂試験結果よりケイ砂混合率、乾燥密度と引張強度の関係等、一軸圧縮試験結果より含水比、乾燥密度と一軸圧縮強度、弾性係数の関係等、一次元圧密試験結果より圧密応力と間隙比の関係等、圧密非排水三軸試験結果より有効拘束圧毎の応力経路等、圧密非排水三軸クリープ試験より、載荷応力毎のひずみ速度の経時変化等を把握することができた。

* 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

** 検査開発(株)

Static Mechanical Properties of Buffer Material

Kazuhiko TAKAJI* and Hideaki SUZUKI**

Abstract

The buffer material is expected to maintain its low water permeability, self-sealing properties, radionuclides adsorption and retardation properties, thermal conductivity, chemical buffering properties, overpack supporting properties, stress buffering properties, etc. over a long period of time. Natural clay is mentioned as a material that can relatively satisfy above. Among the kinds of natural clay, bentonite when compacted is superior because (i) it has exceptionally low water permeability and properties to control the movement of water in buffer, (ii) it fills void spaces in the buffer and fractures in the host rock as it swells upon water uptake, (iii) it has the ability to exchange cations and to adsorb cationic radioelements. In order to confirm these functions for the purpose of safety assessment, it is necessary to evaluate buffer properties through laboratory tests and engineering-scale tests, and to make assessments based on the ranges in the data obtained.

This report describes the procedures, test conditions, results and examinations on the buffer material of unconfined compression tests, one-dimensional consolidation tests, consolidated-undrained triaxial compression tests and consolidated-undrained triaxial creep tests that aim at getting hold of static mechanical properties.

We can get hold of the relationship between the dry density and tensile stress etc. by Brazilian tests, between the dry density and unconfined compressive strength etc. by unconfined compression tests, between the consolidation stress and void ratio etc. by one-dimensional consolidation tests, the stress path of each effective confining pressure etc. by consolidated-undrained triaxial compression tests and the axial strain rate with time of each axial stress etc. by consolidated-undrained triaxial creep tests.

* BARRIER PERFORMANCE GROUP
WASTE ISOLATION RESEARCH DIVISION

** INSPECTION and DEVELOPMENT CORPORATION

目 次

1. はじめに	1
2. 圧裂試験	2
2.1 試験手法	2
2.1.1 試験概要	2
2.1.2 試験条件	2
2.2 試験結果	4
2.2.1 引張応力	4
2.2.2 ブロック厚さ	8
2.3 圧裂試験による引張応力の評価上の留意点	8
3. 一軸圧縮試験	9
3.1 試験条件	9
3.2 試験結果	10
3.2.1 一軸圧縮強度, 弾性係数	10
3.2.2 既報データとの比較	15
3.2.3 供試体作成方法の違いに関する検討	20
4. 一次元圧密試験	22
4.1 試験手法	22
4.1.1 試験概要	22
4.1.2 試験条件	22
4.1.3 試験手順	23
4.2 試験結果	24
4.2.1 圧縮成型	24
4.2.2 膨潤応力	25
4.2.3 圧密沈下量の経時変化	26
4.2.4 圧密理論解と試験結果の比較	34
4.2.5 e-log P 関係 (間隙比-圧密応力関係)	38
4.2.6 透水係数	41

5. 圧密非排水三軸圧縮試験（ケイ砂混合ベントナイト）	43
5.1 試験手法	43
5.1.1 試験概要	43
5.1.2 試験条件	44
5.1.3 試験手順	45
5.2 試験結果	47
5.2.1 圧縮成型及び飽和	47
5.2.2 圧密	47
5.2.3 B 値の測定	50
5.2.4 せん断試験結果	54
6. 圧密非排水三軸圧縮試験（粒状ベントナイト OT-9607）	58
6.1 試験手法	58
6.1.1 試験条件	58
6.1.2 試験手順	58
6.2 試験結果	59
7. 圧密非排水三軸クリープ試験	64
7.1 試験手法	64
7.1.1 試験概要	64
7.1.2 試験条件	64
7.1.3 試験手順	64
7.2 試験結果	65
7.2.1 圧縮成型及び飽和	65
7.2.2 圧密	66
7.2.3 B 値の測定	67
7.2.4 クリープ試験結果	69
8. まとめ	72
謝辞	75
参考文献	76

1. はじめに

緩衝材には、止水性、自己シール性、核種収着性、熱伝導性、化学的緩衝性、オーバーパック支持性、応力緩衝性等が長期にわたり維持されることが期待されている。これらの機能を比較的満足し得る材料として、天然に産する粘土が注目され、中でも圧縮されたベントナイト（以下、圧縮ベントナイト）は、非常に低い透水性による水の動きの抑制、水の浸潤に伴い膨張し圧縮ベントナイト中の間隙や隣接する岩盤中の割れ目への充填、陽イオン核種を収着する陽イオン交換能を有している等の点で優れており、緩衝材として最も有力であると考えられている。

人工バリアシステムにおける緩衝材には、処分場の操業段階において、ブロック定置方式の場合、緩衝材ブロックを定置するハンドリング作業中にブロックには自重による引張応力やブロックのアーチ部分にたわみによる引張応力がかかることが考えられ、ハンドリングの成立性を検討する際、緩衝材の引張応力の把握が必要である。また、廃棄体定置後から長期にわたって、緩衝材は岩盤のクリープ変形や飽和後のオーバーパックの腐食膨張変形、また、オーバーパックの自重による沈下等の静的な外力を受けることが予想される。一般に透水性の低い飽和粘土材料は外力により瞬時に発生した過剰間隙水圧が徐々に消散することにより圧縮が進行する圧密現象を示す。緩衝材の長期力学的安定性を検討する場合やオーバーパックの耐圧設計を行う場合、これらの外力に対する緩衝材の圧密特性や時間依存性（クリープ特性）を明らかにすることが重要である。また、緩衝材には、これらの外力により圧密現象と同時にせん断力が発生する。もし、緩衝材がせん断破壊し、破壊領域が広がると、核種の卓越した移行経路が生じるなどの性能評価上有意な影響を及ぼす可能性もある。これらの外力による緩衝材の長期力学的安定性を検討する場合、せん断特性を明らかにすることが重要である。

以上のような力学的要因が関与する検討項目を踏まえ、サイクル機構では緩衝材ベントナイトの種々の力学特性試験を行っている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。本報告書は力学特性に関してこれまで取得されていなかった物性や、既報を補完するための追加試験等に関してまとめたものである。以下の各章は、2章に圧裂試験、3章に一軸圧縮試験、4章に一次元圧密試験、5章にケイ砂混合ベントナイトの圧密非排水三軸圧縮試験、6章に粒状ベントナイトの圧密非排水三軸圧縮試験、7章に圧密非排水三軸クリープ試験についての手順、試験条件、結果および考察について記す。

2. 圧裂試験

2.1 試験手法

2.1.1 試験概要

岩の引張強度を求める試験法としては、一軸引張試験、圧裂試験、曲げ試験等がある。一軸引張試験のような直接的な引張試験は、供試体の製作や試験機に高い精度が要求され、試験の実施が困難である。圧裂試験は、簡便に実施できる間接的な引張試験であることから広く普及している試験方法であり、圧縮ベントナイトの引張強度を求める方法として圧裂引張試験を採用した。

圧裂試験は図 2-1 に示すように、円柱形の供試体を直径方向に上下から圧縮することにより線荷重が載荷され、供試体の中心より両側に向かって分離しようとする引張応力が生じる原理に基づき行われる試験である。

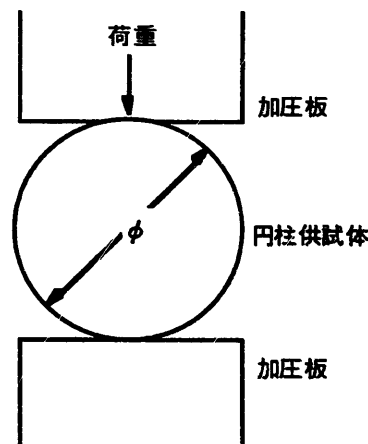


図 2-1 圧裂引張試験

圧裂試験より得られる破壊荷重 P_f から、次式により引張応力 σ_t が求められる。

$$\sigma_t = \frac{2P_f}{\pi\phi l} \quad (2-1)$$

ここで、 ϕ : 供試体の直径
 l : 供試体の長さ

2.1.2 試験条件

供試体は、円筒形の鋼製容器内に投入した粉末状のベントナイトを側方拘束条件で上下二方向から圧縮して作製した。供試体の乾燥密度 ρ_d は $1.4 \sim 2.0 \text{ Mg m}^{-3}$ 、ケイ砂混合率 R_s は $0 \sim 30 \text{ wt}\%$ である。供試体サイズは $\rho_d = 1.4 \sim 1.8 \text{ Mg m}^{-3}$ で直径 $\phi = 49 \text{ mm}$ 、高さ $h = 49 \text{ mm}$ 、 $\rho_d = 2.0 \text{ Mg m}^{-3}$ で直径 $\phi = 30 \text{ mm}$ 、高さ $h = 30 \text{ mm}$ とした。ケイ砂は粒径の異なる 3 号と 5 号の 2 種類のを質量比で 1 対 1 で混合したものを用いた。ベントナイトの含水比 ω は約 7% (自然含水比) である。また、同供試体条件に対して 3 本の試験を実施した。

試験機は、変位制御が可能な一軸圧縮試験機を使用した。ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は約 $1\% \text{ min}^{-1}$ で

ある。試験方法，手順などは基本的に JIS に準拠している⁵⁾。試験条件を表 2-1にまとめる。

表 2-1 圧裂試験条件

供試体条件	ベントナイト	クニゲル V1
	ベントナイト含水比 ω (%)	約 7
	ケイ砂	3号と5号を質量比1対1で混合
	乾燥密度 ρ_d (Mg m ³)	1.4, 1.6, 1.8, 2.0
	ケイ砂混合率 R_s (wt%)	0, 20, 30
	寸法 (mm)	$\phi 49 \times h 49$ ($\phi 30 \times h 30$)
圧裂試験条件	ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ (mm min ⁻¹)	0.5 (0.3)
	試験温度	室温
	同条件による試験本数	3

()内は $\rho_d = 2.0 \text{ Mg m}^3$ の場合の試験条件

2.2 試験結果

2.2.1 引張応力

载荷による破断面は、いずれのケースもほぼ円柱の中心線（直径方向）に沿って二つに割れており、供試体がほぼ均質であったことがうかがえる。

図 2-2(a)~(c)に、ひずみ ϵ_r （=変位置/直径）と引張応力 σ_r の関係を、ケイ砂混合率ごとに分けて示す。ただし、装置のストローク部分の遊びにより载荷初期は変形に荷重が追従せず、変曲点が生じたため、本図は実際のデータの変曲点以降の直線部分を延長し、横軸との交点を原点とすることで初期の立ち上がり部分を補正している。図より、载荷中のひずみ ϵ_r と引張応力 σ_r の関係はほぼ直線関係となり、破壊応力に達すると二つに破断し、脆性破壊により強度を消失することが分かる。また、データの初期部分の補正の影響のため若干のばらつきはあるが、破断時のひずみは乾燥密度 ρ_d が大きいほど大きくなった。

試験結果一覧を表 2-2に、また、乾燥密度 ρ_d と引張応力 σ_r の関係をケイ砂混合率 R_s でまとめたものを図 2-3に示す。図より、乾燥密度 ρ_d が大きいほど、また、ケイ砂混合率 R_s が小さいほど、引張応力 σ_r は大きくなることが分かる。ケイ砂混合率ごとの、 ρ_d (Mg m^{-3}) と σ_r (MPa) の関係は指数近似で次式のように表される。

$$R_s=0\text{wt\%} : \sigma_r = 6.43 \times 10^{-5} \times e^{5.07\rho_d} \quad (2-2)$$

$$R_s=20\text{wt\%} : \sigma_r = 6.62 \times 10^{-6} \times e^{5.90\rho_d} \quad (2-3)$$

$$R_s=30\text{wt\%} : \sigma_r = 7.31 \times 10^{-7} \times e^{6.87\rho_d} \quad (2-4)$$

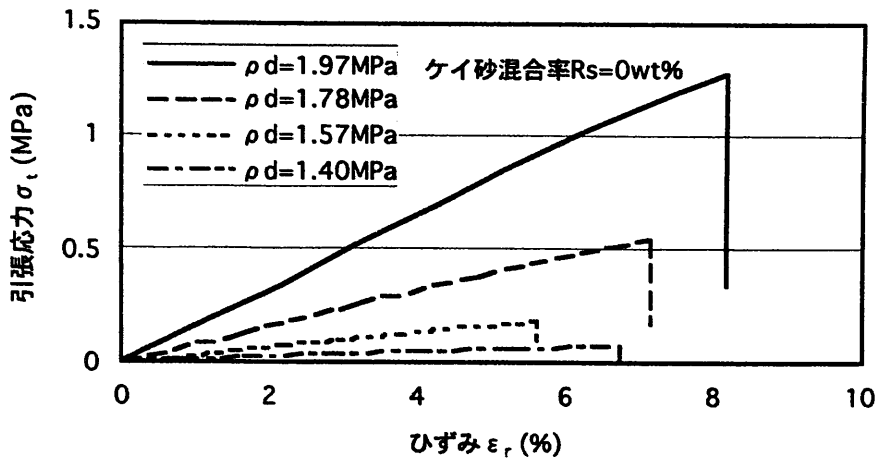
さらに、引張応力 σ_r を次式に示す有効粘土密度 ρ_b との関係で整理したものを図 2-4に示す。有効粘土密度とは、供試体中の砂の体積を除いてベントナイトのみの乾燥密度を求めた指標である。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \frac{R_s}{\gamma_s}} \quad (2-5)$$

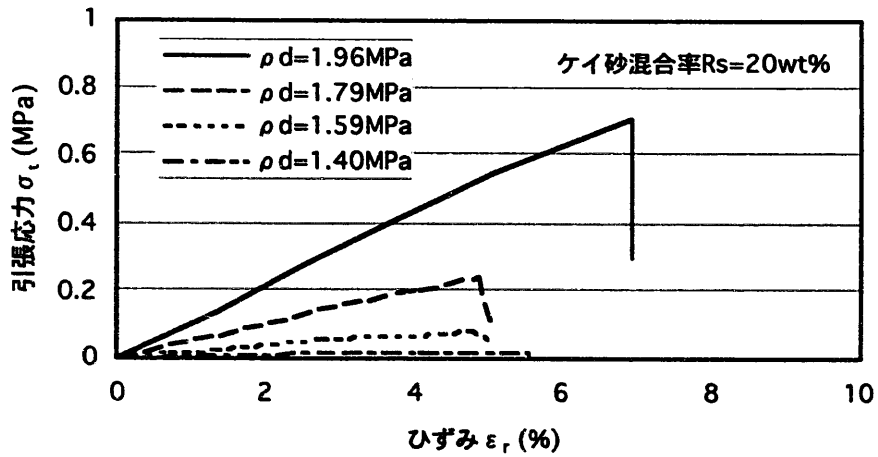
ここで、 γ_s はケイ砂粒子の単位体積重量で、 $\gamma_s = 2.64 \text{ Mg m}^{-3}$ である。

これより、圧縮ベントナイトの引張応力 σ_r (MPa) は有効粘土密度 ρ_b (Mg m^{-3}) との関係において1本の指数曲線によって表現でき、その関係は次式で表せる。

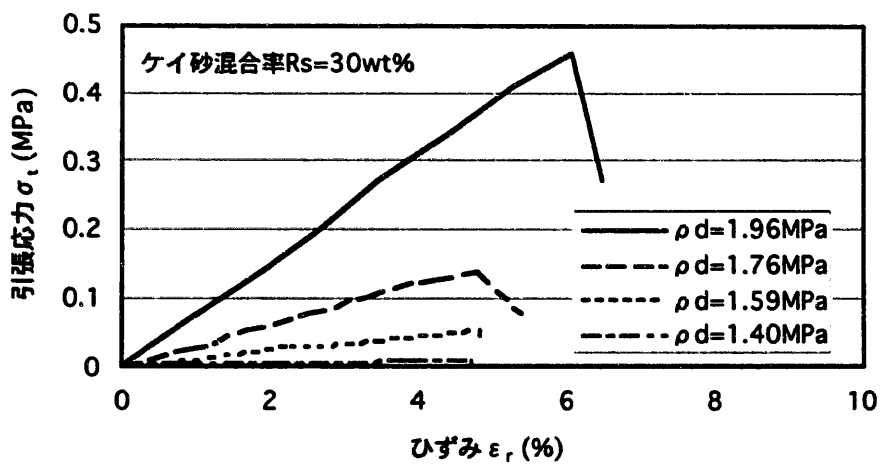
$$\sigma_r = 1.63 \times 10^{-5} \times e^{5.84\rho_b} \quad (2-6)$$



(a) ケイ砂混合率 $R_s=0$ (wt%)



(b) ケイ砂混合率 $R_s=20$ (wt%)



(c) ケイ砂混合率 $R_s=30$ (wt%)

図 2-2 ひずみと引張応力の関係

表 2-2 圧裂試験結果一覧

ケイ砂混合率 Rs (wt%)	乾燥密度 ρ_d (Mg m ⁻³)	含水比 ω (%)	直径 ϕ (cm)	高さ h (cm)	破壊荷重 P_f (kN)	引張応力 σ_c (MPa)
0	1.97	6.75	3.014	3.020	1.835	1.284
	1.96	6.73	3.018	3.020	1.637	1.144
	1.98	6.30	3.018	3.020	2.359	1.648
	1.78	6.87	4.925	4.906	2.093	0.552
	1.78	6.87	4.922	4.908	2.256	0.594
	1.77	6.90	4.926	4.909	2.002	0.527
	1.57	6.77	4.920	4.954	0.693	0.181
	1.57	6.80	4.923	4.953	0.697	0.182
	1.56	6.81	4.921	4.956	0.727	0.190
	1.40	6.92	4.917	4.873	0.274	0.073
	1.40	6.87	4.919	4.880	0.291	0.077
	1.39	6.98	4.919	4.880	0.276	0.073
20	1.96	5.41	3.018	3.025	1.007	0.702
	1.96	5.42	3.020	3.017	1.007	0.704
	1.97	5.41	3.018	3.008	0.988	0.693
	1.79	5.40	4.922	4.912	0.915	0.241
	1.82	5.44	4.923	4.824	1.186	0.318
	1.79	5.42	4.923	4.903	0.985	0.260
	1.59	5.36	4.919	4.902	0.316	0.083
	1.59	5.42	4.919	4.900	0.335	0.089
	1.59	5.38	4.919	4.895	0.304	0.081
	1.39	5.59	4.915	4.898	0.094	0.025
	1.40	5.13	4.911	4.903	0.086	0.023
	1.39	5.54	4.911	4.901	0.088	0.023
30	1.96	4.72	3.018	3.023	0.656	0.458
	1.96	4.65	3.018	3.021	0.653	0.456
	1.96	4.62	3.019	3.022	0.633	0.441
	1.76	4.77	4.925	4.968	0.509	0.132
	1.76	4.74	4.922	4.970	0.524	0.136
	1.78	4.83	4.922	4.920	0.588	0.155
	1.59	4.72	4.918	4.890	0.209	0.055
	1.59	4.75	4.917	4.887	0.205	0.054
	1.59	4.75	4.916	4.893	0.197	0.052
	1.40	4.80	4.907	4.869	0.036	0.010
	1.40	4.77	4.905	4.886	0.033	0.009
	1.40	4.75	4.908	4.887	0.031	0.008

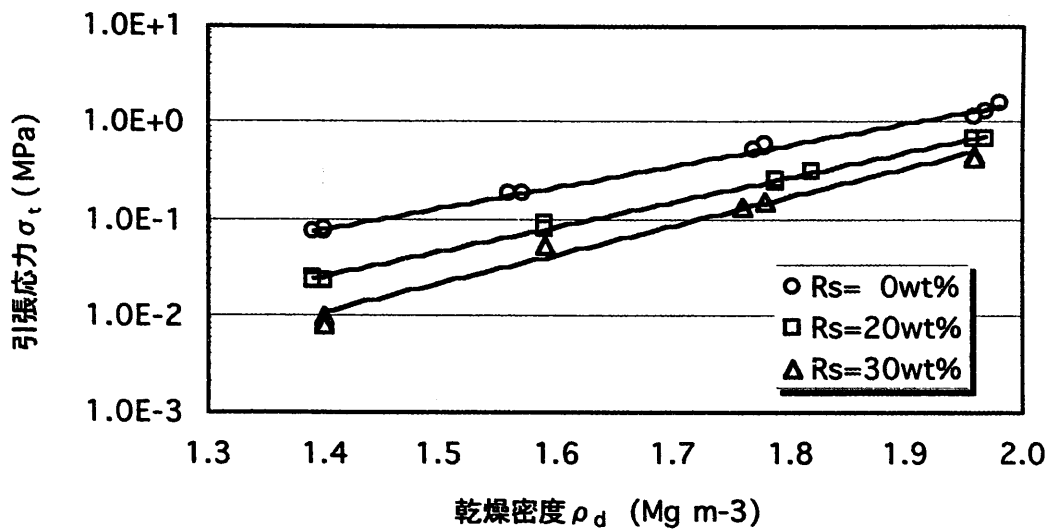


図 2-3 乾燥密度と引張応力の関係

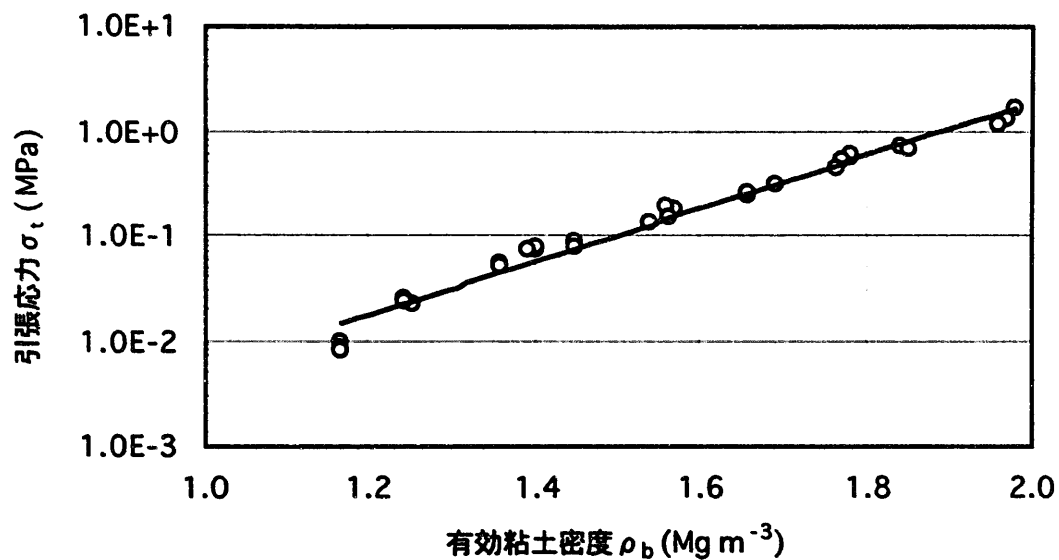


図 2-4 有効粘土密度と引張応力の関係

2.2.2 ブロック厚さ

上記で得られた σ_t より、ブロックを垂直方向に吊り上げた場合に、自重による引張応力によって破損しない最大のブロック厚さ h を次式により求めた。結果を表 2-3 に示す。

$$h = \frac{\sigma_t}{\rho_d(1+\omega)} \quad (2-7)$$

これによると、 σ_t が最も小さい、 $\rho_d=1.4 \text{ Mg m}^3$ 、 $R_s=30\text{wt}\%$ のブロックでも 80cm の厚さなので吊り上げ可能である結果となった。

表 2-3 引張応力より求めた最大ブロック厚さ

乾燥密度 ρ_d (Mg m^3)	ケイ砂混合率 R_s (wt%)	引張応力 σ_t (MPa)*1	ブロック 厚さ h (m)
2.0	0	1.632	77.8
1.8		0.592	31.4
1.6		0.215	12.8
1.4		0.078	5.3
2.0	20	0.886	42.8
1.8		0.272	14.6
1.6		0.084	5.0
1.4		0.026	1.8
2.0	30	0.672	32.7
1.8		0.170	9.2
1.6		0.043	2.6
1.4		0.011	0.8

*1 式(2-2)、(2-3)、(2-4)より算出

2.3 圧裂試験による引張応力の評価上の留意点

圧裂試験は一般に、岩石供試体を対象とした簡便な引張試験であり、荷重の載荷部分は線荷重であるとみなし、引張応力を求めている。しかし、実際は載荷板と供試体の接触部分は面荷重として載荷されるため、拘束条件やスケール効果の影響が大きく、求められる引張応力は一軸引張応力に比べ一般に、1~3割程度大きい値になることが知られている⁶⁾。圧縮ベントナイトのような、岩石に比べてさらに弾性係数が小さい材料においては、この影響がより大きいことが予想され、引張応力の評価には注意が必要である。

3. 一軸圧縮試験

3.1 試験条件

試験は、初期乾燥密度、ケイ砂混合の影響を調べるために、乾燥密度 $\rho_d=1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ のケイ砂混合体（ケイ砂混合率 $R_s=30\text{wt}\%$ ）及び、乾燥密度 $\rho_d=1.6 \text{ Mg m}^{-3}$, 1.8 Mg m^{-3} のベントナイト単体について、供試体の含水比 ω をパラメータとして実施した。含水比は粉末状態で水分調整装置を用いて調整し、自然含水比に相当する約 7% からほぼ飽和に近い約 23% の間で数ケース用意した。供試体は、円筒形の鋼製容器内に投入した粉末状のベントナイトを側方拘束条件で上下二方向から圧縮して作製した。供試体サイズは直径 $\phi=30\text{mm}$ 、高さ $h=60\text{mm}$ である。試験機は、圧裂試験と同じ一軸圧縮試験機を使用した。載荷速度は 0.1mm min^{-1} （軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a \doteq 0.17\% \text{ min}^{-1}$ ）である。試験方法、手順などは基本的に地盤工学会基準⁷⁾JGS T511 に準拠している。試験条件を表 3-1 にまとめる。

表 3-1 一軸圧縮試験条件

		ケイ砂混合体	ベントナイト単体	
供試体条件	ベントナイト	クニゲル V1		
	ケイ砂混合率 R_s (wt%)	30 (3号と5号を質量比1対1で混合)	—	
	乾燥密度 ρ_d (Mg m^{-3})	1.6	1.6	1.8
	含水比 ω (%)	約 7~23	約 10~22.5	約 10~18
	寸法 (mm)	直径 $\phi=30 \times$ 高さ $h=60$		
一軸圧縮試験条件	載荷速度 (mm min^{-1})	0.1 ($\dot{\epsilon}_a \doteq 0.17\% \text{ min}^{-1}$ に相当)		
	試験数	23	12	8
	試験温度	室温		

3.2 試験結果

3.2.1 一軸圧縮強度、弾性係数

各仕様ごとに含水比の異なる代表的な3ケースについて、軸ひずみ ϵ_u と圧縮応力 σ_u の関係を図 3-1(a)~(c)に示す。ただし、圧裂試験同様、変曲点が生じたため、本図は実際のデータの変曲点以降の直線部分を延長し、横軸との交点を原点とすることで初期の立ち上がり部分を補正している。図より、含水比が高くなるにつれて脆性破壊から延性破壊に移行してゆき、ピーク強度（一軸圧縮強度）が小さくなり、また、破壊時のひずみが大きくなるのが分かる。

試験結果一覧を表 3-2にまとめて示す。表より、一軸圧縮強度 q_u と含水比 ω の関係を図 3-2に、弾性係数 E_{50} と含水比 ω の関係を図 3-3に示す。

同じ乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ のベントナイト単体とケイ砂混合体では、同じ含水比条件下で、ケイ砂混合体の方が q_u は 1/3 以下、 E_{50} は 1/4 以下となった。これは、供試体の耐力に寄与するベントナイト量の違いによるものであると思われる。また、いずれの供試体も、 ω が高いほど q_u は小さくなるが、飽和に近づくとつれて、その減少の割合は小さくなる。しかし、 E_{50} の減少の割合は変わらない。これは、図 3-1からも分かるように、ベントナイト供試体の破壊モードが、含水比が高くなるにつれて脆性破壊から延性破壊に移行してゆき、载荷途中の耐力（剛性）は一定の割合で低下するが、破壊点はほぼ一定値に収束することを意味する。

得られた結果から、 q_u と ω の関係を2次曲線で、 E_{50} と ω の関係を直線で近似した。以下に、各ケースにおける近似式を示す。

一軸圧縮強度 q_u

$$\text{ケイ砂混合体} \quad \rho_d=1.6 \text{ Mg m}^{-3} \quad : q_u = 0.0018 \omega^2 - 0.073 \omega + 0.99 \quad (3-1)$$

$$\text{ベントナイト単体} \quad \rho_d=1.6 \text{ Mg m}^{-3} \quad : q_u = 0.0053 \omega^2 - 0.234 \omega + 3.31 \quad (3-2)$$

$$\text{ベントナイト単体} \quad \rho_d=1.8 \text{ Mg m}^{-3} \quad : q_u = 0.0326 \omega^2 - 1.172 \omega + 13.42 \quad (3-3)$$

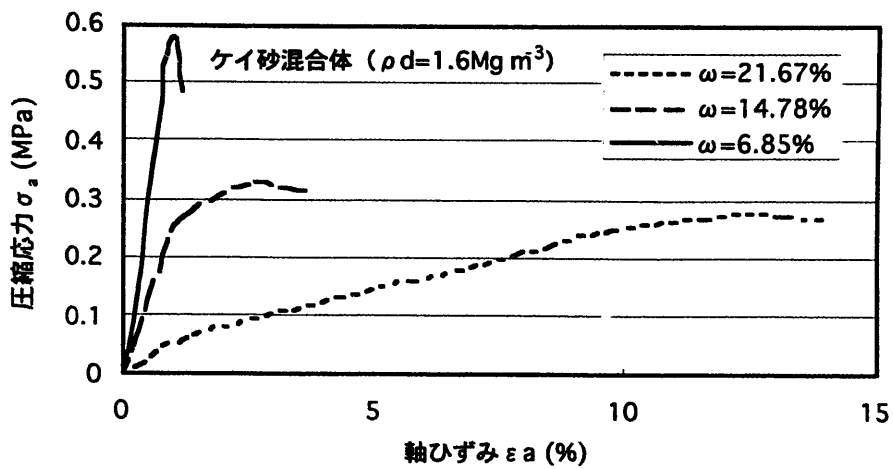
弾性係数 E_{50}

$$\text{ケイ砂混合体} \quad \rho_d=1.6 \text{ Mg m}^{-3} \quad : E_{50} = -3.744 \omega + 84.34 \quad (3-4)$$

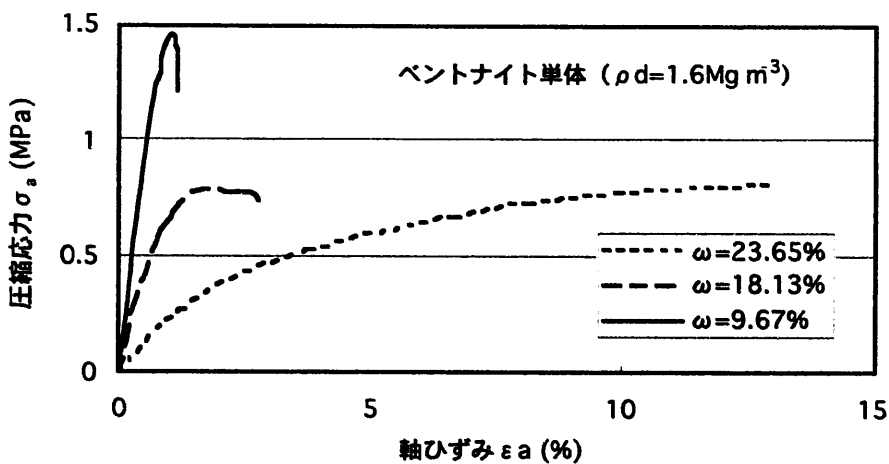
$$\text{ベントナイト単体} \quad \rho_d=1.6 \text{ Mg m}^{-3} \quad : E_{50} = -13.650 \omega + 333.46 \quad (3-5)$$

$$\text{ベントナイト単体} \quad \rho_d=1.8 \text{ Mg m}^{-3} \quad : E_{50} = -43.513 \omega + 944.67 \quad (3-6)$$

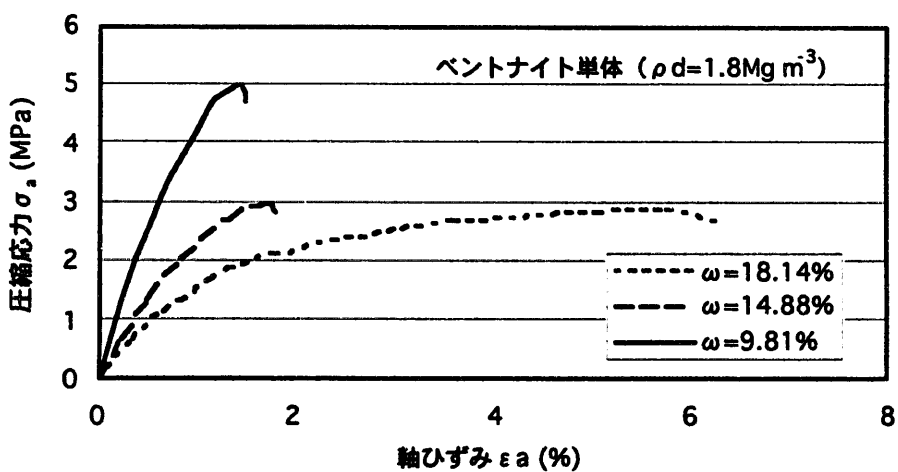
また、含水比との関係では、乾燥密度によって含水比の最大値が異なる。各データを同じレンジで比較するため、 q_u 、 E_{50} を飽和度 S_r との関係でまとめたものを図 3-4、図 3-5に示す。この図からも、飽和に近づくとつれて q_u の減少の割合は小さくなるが、 E_{50} の減少の割合がほぼ一定であることが把握できる。



(a) ケイ砂混合体 ($\rho_d=1.6\text{Mg m}^{-3}$)



(b) ベントナイト単体 ($\rho_d=1.6\text{Mg m}^{-3}$)



(c) ベントナイト単体 ($\rho_d=1.8\text{Mg m}^{-3}$)

図 3-1 軸ひずみと圧縮応力の関係

表 3-2 一軸圧縮試験結果一覧

	乾燥密度 ρ_d (Mg m^{-3})	含水比 ω (%)	直径 ϕ (cm)	高さ h (cm)	一軸圧縮強度 q_u (MPa)	弾性係数 E_{50} (MPa)
ケイ砂混合体	1.59	6.81	3.014	6.008	0.535	53.671
	1.60	6.83	3.015	6.013	0.525	52.596
	1.59	6.85	3.016	5.998	0.584	55.124
	1.57	8.22	3.018	6.023	0.545	54.547
	1.59	8.22	3.006	6.004	0.584	62.199
	1.59	8.23	3.013	6.007	0.584	62.617
	1.59	10.26	3.006	6.000	0.426	45.795
	1.59	10.28	3.012	6.000	0.405	50.427
	1.59	10.29	3.007	6.000	0.416	56.243
	1.59	11.82	3.004	6.006	0.306	38.217
	1.59	12.54	3.006	5.992	0.325	28.656
	1.59	12.79	3.004	6.000	0.344	34.447
	1.58	12.82	3.010	6.010	0.325	34.658
	1.58	14.71	3.005	6.023	0.331	23.590
	1.58	14.78	3.003	6.037	0.331	28.270
	1.57	14.8	3.006	6.044	0.311	26.561
	1.58	15.78	3.009	6.022	0.332	27.480
	1.60	17.07	3.004	5.977	0.306	17.600
	1.58	17.18	3.014	6.015	0.258	16.964
	1.57	17.21	3.004	6.051	0.297	22.342
	1.57	21.67	3.000	6.050	0.280	2.920
	1.59	22.37	3.000	6.020	0.255	3.591
	1.58	22.53	3.000	6.022	0.270	2.953
ベントナイト単体	1.59	9.61	3.013	6.076	1.436	186.78
	1.59	9.67	3.013	6.067	1.455	181.27
	1.59	11.65	3.011	6.052	1.524	189.23
	1.59	11.66	3.010	6.052	1.467	207.46
	1.60	14.70	3.004	6.026	0.998	116.50
	1.59	14.73	3.009	6.021	1.009	145.49
	1.59	18.18	3.001	6.000	0.753	77.013
	1.59	18.13	3.001	6.014	0.782	85.898
	1.60	21.19	3.000	6.037	0.727	48.623
	1.60	20.99	3.000	6.036	0.734	48.323
	1.60	23.65	3.000	6.018	0.797	15.840
	1.61	22.39	3.000	6.024	0.821	16.226
	1.75	9.81	3.015	6.095	4.996	504.16
	1.76	9.80	3.014	6.089	4.903	519.12
	1.76	11.88	3.011	6.072	4.386	447.98
	1.76	11.94	3.013	6.072	4.309	455.41
	1.78	14.85	3.003	6.078	2.980	261.49
	1.79	14.88	3.002	6.032	3.019	270.57
	1.79	18.14	3.000	6.024	2.884	160.07
	1.79	18.12	3.000	6.017	3.023	177.36

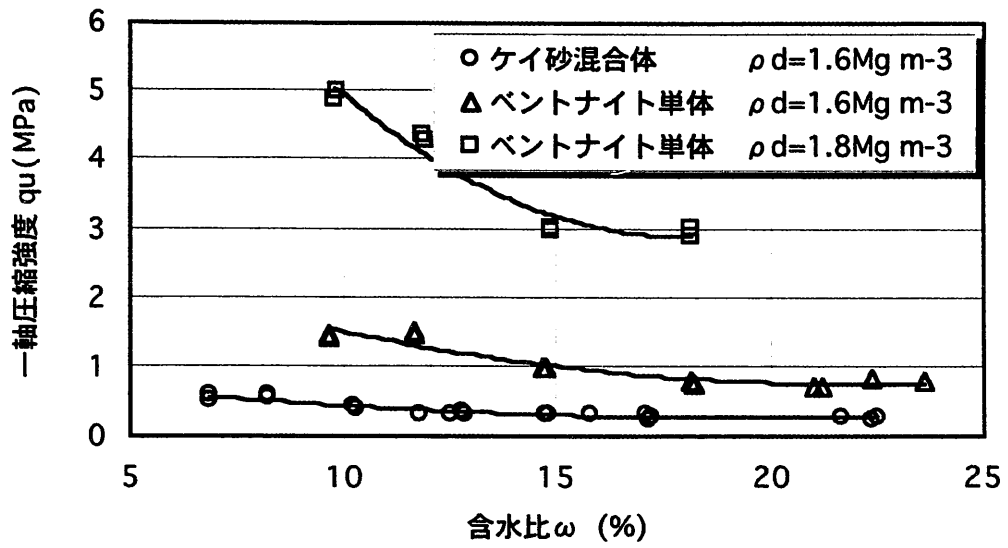


図 3-2 含水比と一軸圧縮強度の関係

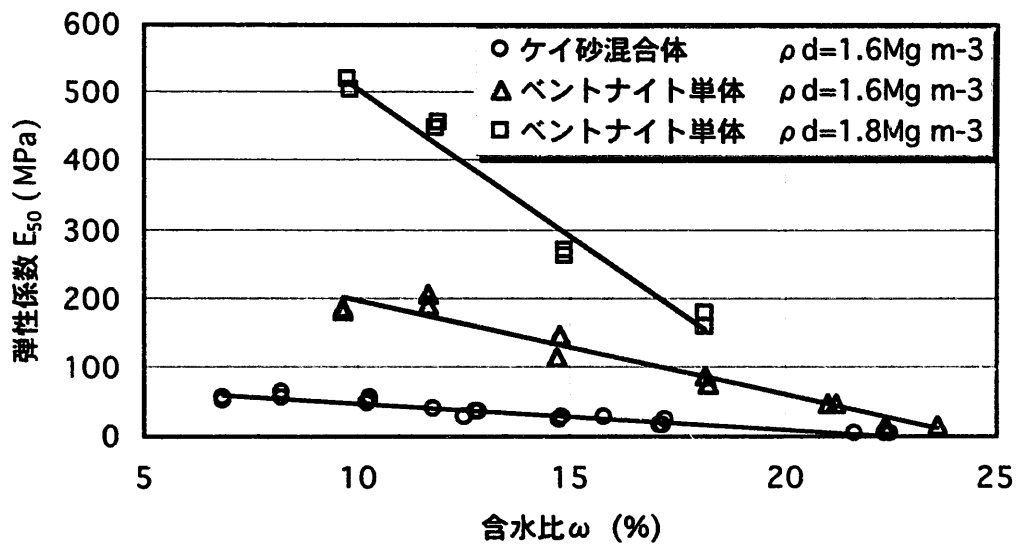


図 3-3 含水比と弾性係数の関係

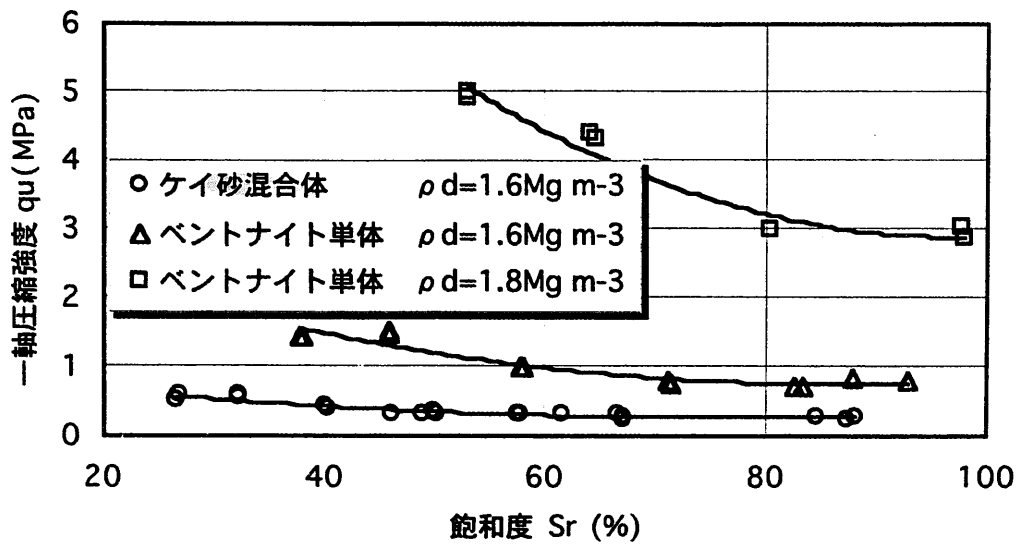


図 3-4 飽和度と一軸圧縮強度の関係

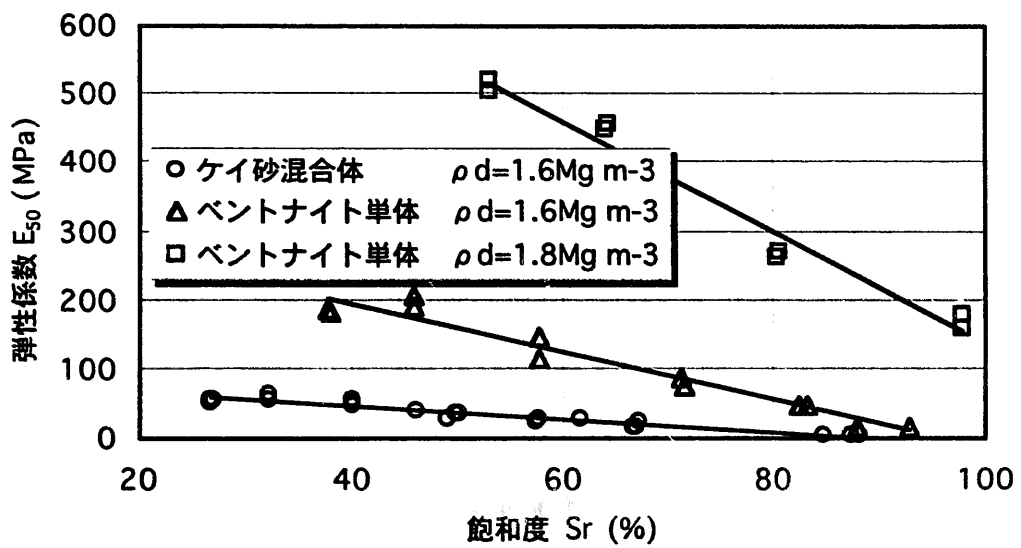
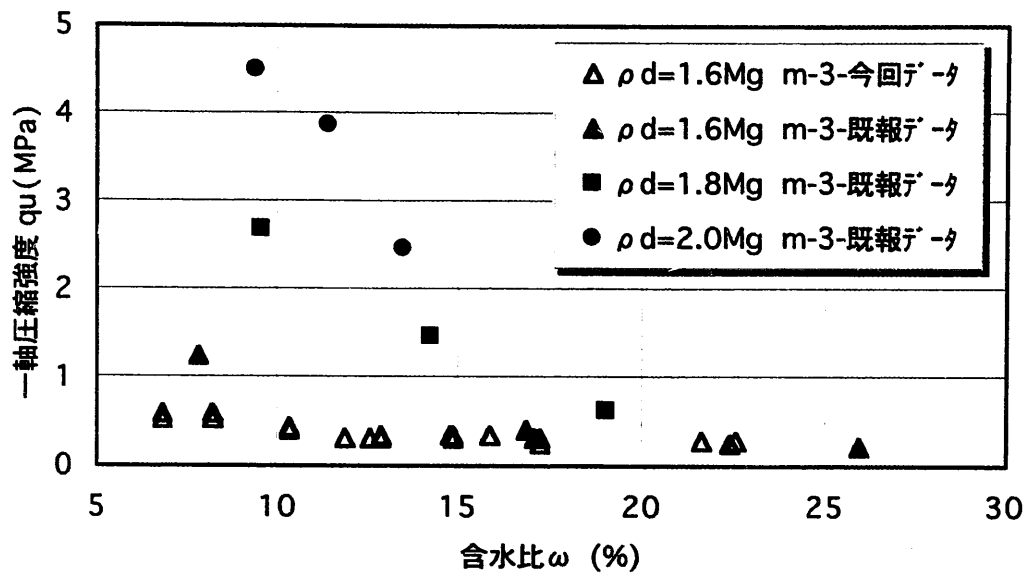


図 3-5 飽和度と弾性係数の関係

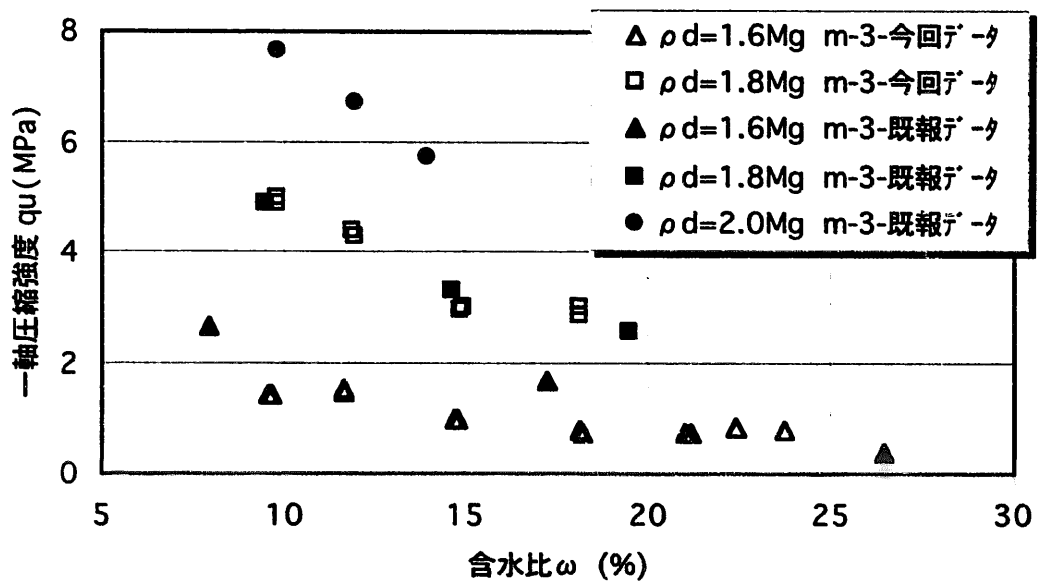
3.2.2 既報データとの比較

今回取得したデータに既報のデータ²⁾を追加して比較を行った。既報データは非圧密非排水三軸圧縮試験データであるが、このうち拘束圧 0 のケースは一軸圧縮試験に相当することから、拘束圧 0 のケースを抜粋して今回取得したデータと比較した。既報データの供試体仕様はベントナイト単体、30wt%ケイ砂混合体それぞれ、 $\rho_d=1.6, 1.8, 2.0\text{Mg m}^{-3}$ で、含水比は自然含水比、飽和含水比、そのおよそ中間の3ケース、1本ずつである。図 3-6に ω と q_u の関係、図 3-7に ω と E_{50} の関係、図 3-8に S_r と q_u の関係、図 3-9に S_r と E_{50} の関係を、ベントナイト単体とケイ砂混合体をそれぞれ分けて示す。

図より、今回取得した仕様と同じ仕様に関しては、若干のばらつきはあるものの、ほぼ同じような傾向を示しており、両試験によるデータは定量的にも妥当であると言える。また、既報データを追加すると、一軸圧縮強度および弾性係数の含水比（飽和度）依存性ならびに乾燥密度依存性が、より明確に把握できる。

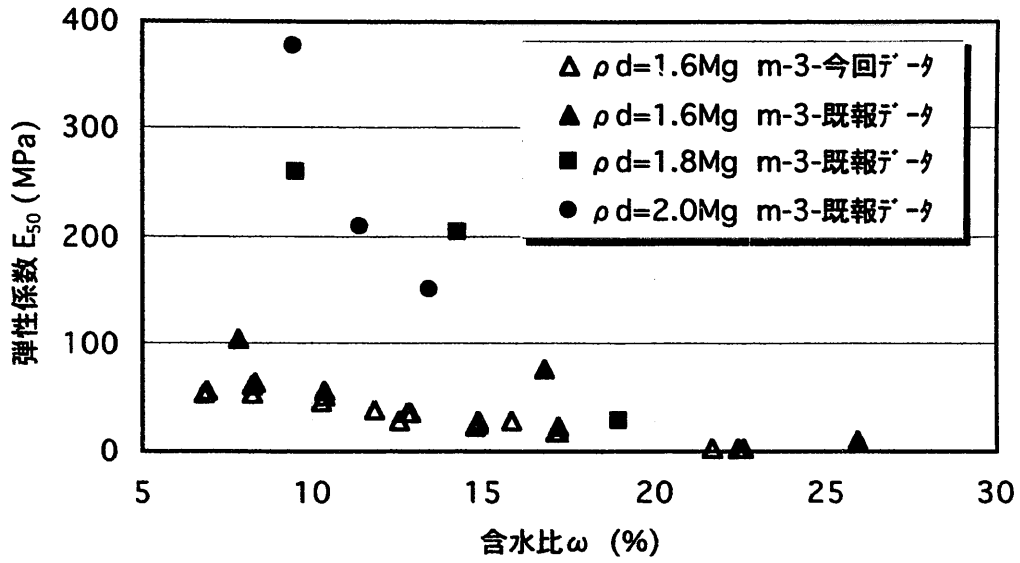


(1) ケイ砂混合体

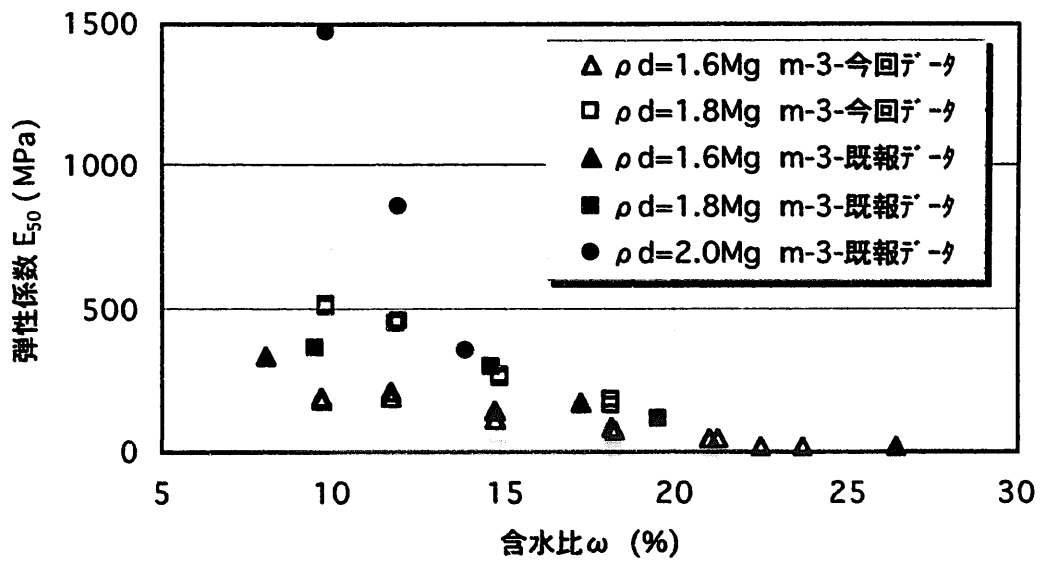


(2) ベントナイト単体

図 3-6 含水比と一軸圧縮強度の関係 (既報データを追加)

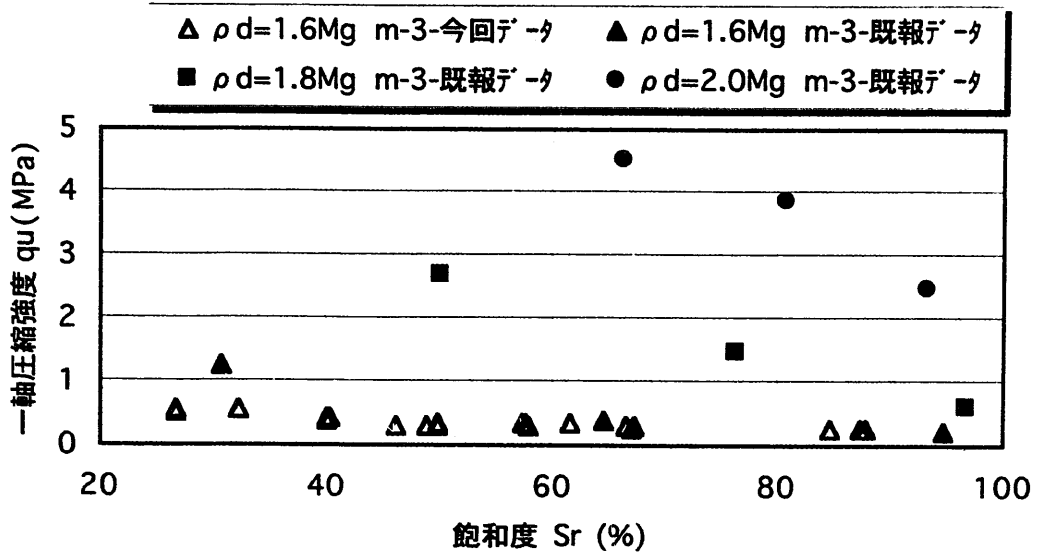


(1) ケイ砂混合体

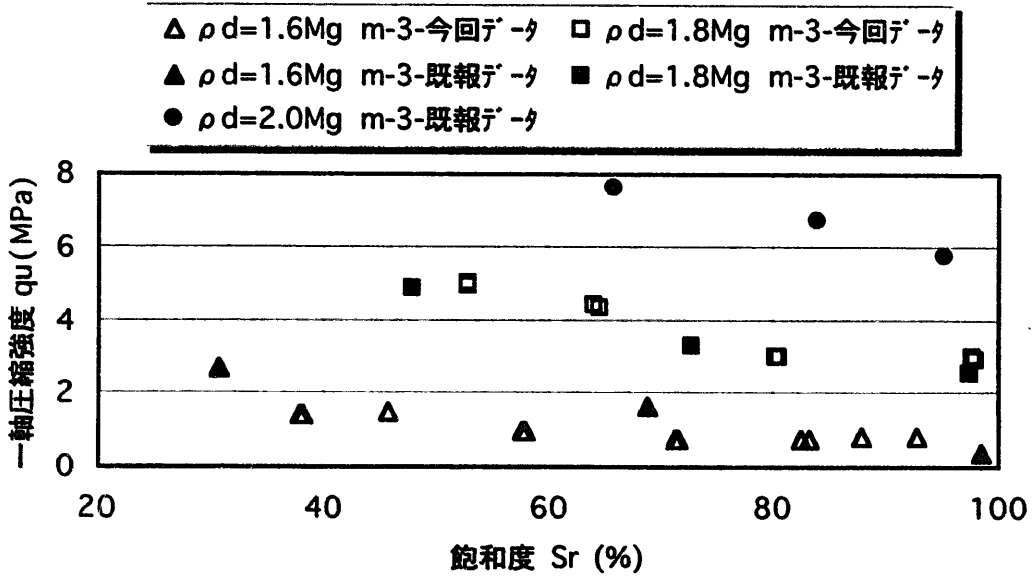


(2) ベントナイト単体

図 3-7 含水比と弾性係数の関係 (既報データを追加)

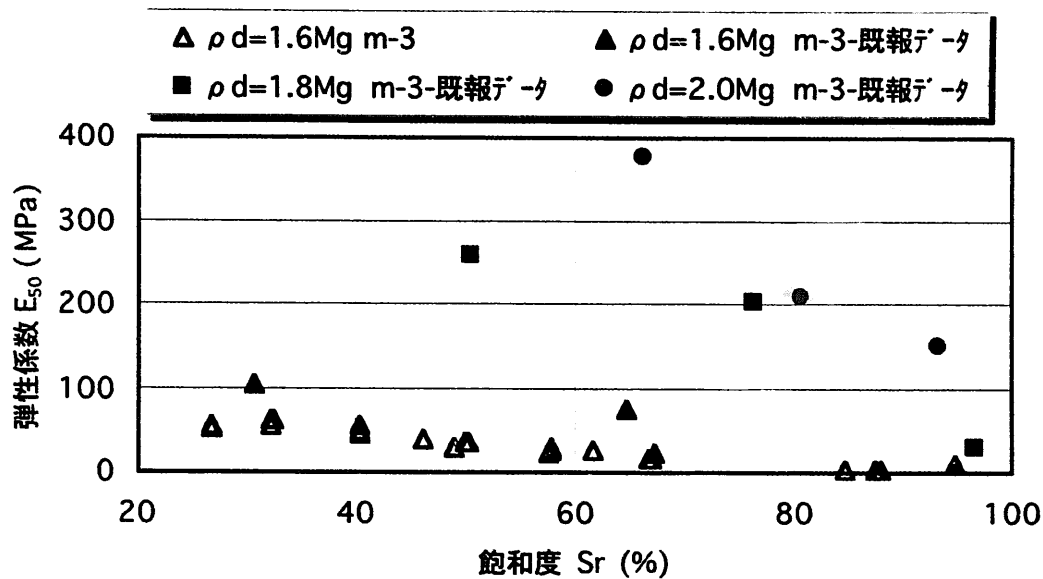


(1) ケイ砂混合体

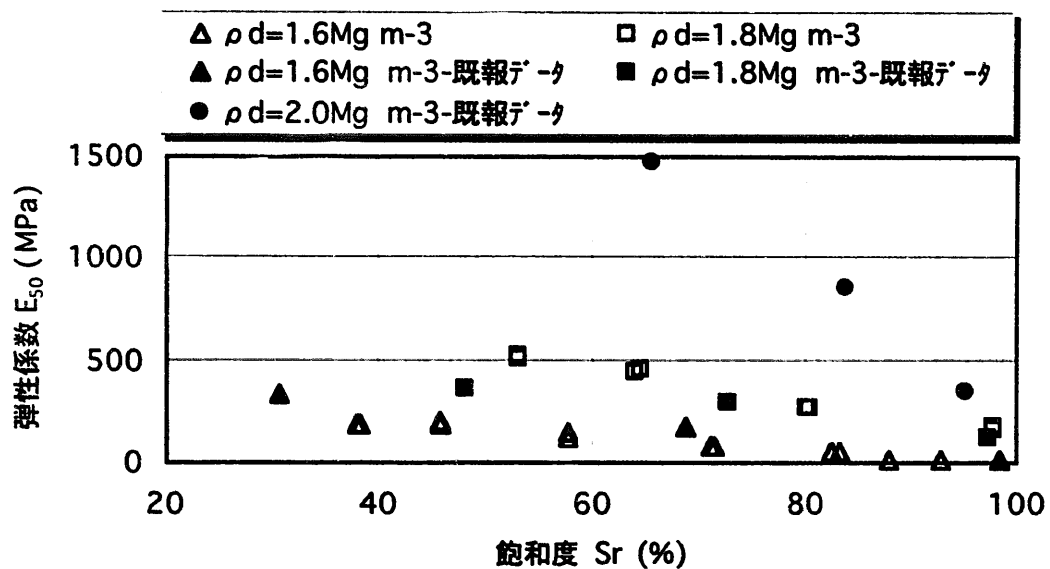


(2) ベントナイト単体

図 3-8 飽和度と一軸圧縮強度の関係 (既報データを追加)



(1) ケイ砂混合体



(2) ベントナイト単体

図 3-9 飽和度と弾性係数の関係 (既報データを追加)

3.2.3 供試体作成方法の違いに関する検討

実際の処分環境では、ブロック定置方式でも現場締固め方式であっても、緩衝材はまず、乾燥状態で圧縮成型、現場に定置された後、地下水の浸潤に伴い飽和に至る。前述の一軸圧縮試験に用いた供試体は、粉末状態で含水比調整されてから圧縮成型されたため、実際の処分環境とは飽和に至るプロセスが異なる。よって、自然含水比状態で圧縮成型したのち、飽和させた供試体による一軸圧縮試験を行い、飽和状態についてのみ結果との比較を行う。

(1) 試験条件

本試験は、乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{Mg m}^{-3}$ の 30wt% 供試体について行った。供試体の作成は、後述の三軸試験、クリープ試験用供試体と同様、自然含水比状態で所定の密度となるよう圧縮成型したのち飽和セルに入れ、2ヶ月以上かけて給水し、飽和させた。飽和度はいずれの供試体も 100% であった。供試体サイズは直径 $\phi=50\text{mm}$ 、高さ $h=100\text{mm}$ である。供試体本数は 3 本で、そのうち 2 本は載荷速度 1mm min^{-1} 、1 本は 0.1mm min^{-1} で試験を行った。

試験結果を表 3-3 に示す。一軸圧縮強度、弾性係数とも、変位速度の影響はほとんどなかった。

表 3-3 飽和セルによって飽和させた供試体の一軸圧縮試験結果一覧

変位速度 (mm min^{-1})	乾燥密度 ρ_d (Mg m^{-3})	含水比 ω (%)	直径 ϕ (cm)	高さ h (cm)	一軸圧縮強度 q_c (MPa)	弾性係数 E_{50} (MPa)
1.0	1.60	25.2	4.995	10.03	0.313	40.456
	1.59	25.9	5.000	10.03	0.284	27.847
0.1	1.60	25.5	5.000	10.04	0.300	25.080

前述の試験結果との比較を行うため、同じ仕様である 30wt% ケイ砂混合体に限って、一軸圧縮強度、弾性係数の両結果を図 3-10、図 3-11 に示す。一軸圧縮強度は、飽和状態における前述の結果とほぼ同程度であったが、弾性係数は、飽和状態における前述の結果に比べ、10 倍以上大きな値となった。この挙動については、さらに検討が必要であるが、供試体作成方法の違いが弾性係数に大きな影響を及ぼすことが分かった。よって、弾性解析等を行う際には弾性係数の取扱い、ひずみの適用範囲等に注意する必要がある。

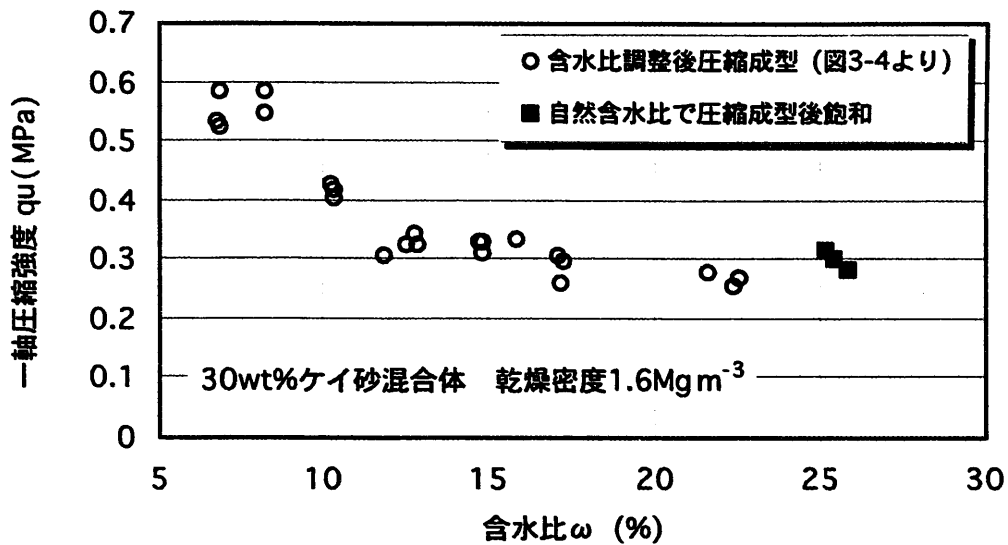


図 3-10 供試体作成方法の違いによる一軸圧縮強度の比較

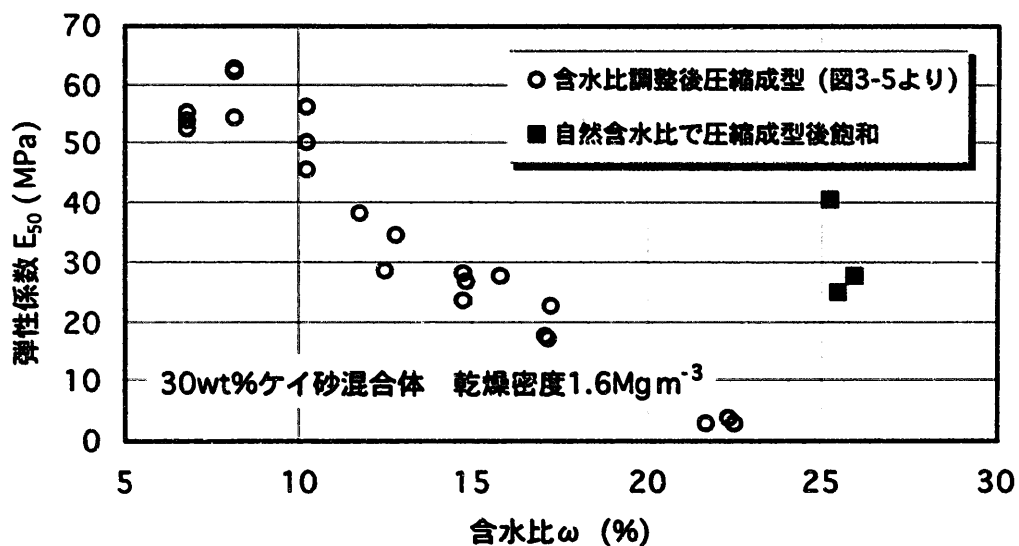


図 3-11 供試体作成方法の違いによる弾性係数の比較

4. 一次元圧密試験

4.1 試験手法

4.1.1 試験概要

一次元圧密試験は、側方拘束条件下で試料の圧縮—膨潤に対する変形挙動を調べる試験である。側方変位を拘束した飽和供試体に段階的に荷重を載荷し、その変位を計測することにより、圧密沈下量と時間の関係 (Δd - $\log t$ 曲線) や、間隙比と圧密応力の関係 (e - $\log P$ 曲線) 等が得られる。

本試験は、高圧圧密試験装置を用いて行った。装置の概略断面図を図 4-1 に示す。本装置は、ペロフラムシリンダーを用いた空気圧で軸荷重を載荷する仕組みとなっている。

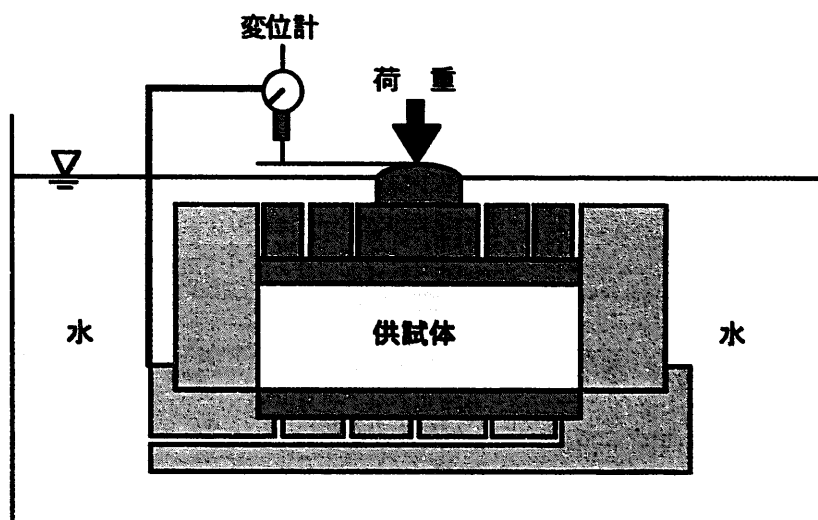


図 4-1 試験装置概略断面図

4.1.2 試験条件

試験は、初期乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ の 30wt% ケイ砂混合体について実施した。所定の含水比のクニゲル V1 を側方拘束条件下で圧縮成型した後、体積拘束条件下で給水し、飽和供試体を作成した。供試体寸法は直径 $\phi = 60\text{mm}$ 、高さ $h = 20\text{mm}$ 、試験は 3 本同時に実施した。

給水により発生する膨潤応力がほぼ一定になった時点初期条件とし、19.6MPa まで 8 段階で荷重を載荷し、その後、初期膨潤応力相当まで 4 段階で除荷し、再び 19.6MPa まで 4 段階で再載荷した。各段階の載荷応力は対数軸上で載荷応力の間隔が等しくなるよう設定した。また、各載荷段階での圧密終了は 3t 法により判断した。試験方法、手順などは基本的に地盤工学会基準⁷⁾ JGS T411 に準拠しているが、上記載荷応力などについて若干の変更を行った。試験条件を以下にまとめる。

なお、 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ と 1.8 Mg m^{-3} のベントナイト単体については、既報³⁾にて報告済みである。

● 供試体仕様

- | | |
|-----|-------------------------------|
| 材 料 | : ケイ砂混合ベントナイト |
| 配合比 | : ベントナイト クニゲル V1 (重量比: 70wt%) |

ケイ砂3号 (重量比: 15wt%)

5号 (重量比: 15wt%)

寸法 : 直径 ϕ 60mm \times 高さ h 20mm初期乾燥密度 ρ_d : 1.6 Mg m⁻³ (間隙比 $e=0.676$: 圧縮成型時)初期含水比 ω : 8.48% (圧縮成型時)

供試体本数 : 3本

- 計測項目

軸荷重 : ロードセル

軸変位 : 変位計

- 試験条件

温度 : 24℃一定制御

載荷条件 : 表 4-1参照

圧密終了判定 : 3t法

表 4-1 各ステップの載荷条件

載荷過程

載荷 step	初期	step1	step2	step3	step4	step5	Step6	step7	step8
載荷応力(MPa)	膨潤応力	0.84	1.32	2.08	3.25	5.10	7.98	12.50	19.6

除荷過程

載荷 step	stepu1	stepu2	stepu3	stepu4
載荷応力(MPa)	7.98	3.25	1.32	0.54

再載荷過程

載荷 step	stepr1	stepr2	stepr3	stepr4
載荷応力(MPa)	1.32	3.25	7.98	19.6

4.1.3 試験手順

試験の概略手順を以下に示す。3 供試体に対し全て同条件で試験を行なった。

- 1) 所定の含水比のケイ砂混合クニゲル V1 試料をオートグラフを用いて所定の供試体寸法および密度となるよう圧縮成型する。
- 2) 変形を拘束した状態で、供試体に給水し、膨潤応力を測定する。
- 3) 膨潤応力の経時変化より、供試体が飽和したかどうか確認する。
- 4) 飽和確認後、膨潤応力を解放せず、一次元圧密試験を開始する。
- 5) 供試体に 8step で 19.6MPa まで載荷を行なう。各 step において供試体の軸変位の経時

- 変化を計測する。各載荷 step での圧密終了の確認は 3t 法により行なう。
- 6) 19.6MPa より圧密試験開始時の膨潤応力付近まで 4step で除荷を行なう。
 - 7) 再び 19.6MPa まで 4step で載荷を行なう。
 - 8) 試験終了後供試体を取り出し、乾燥させ乾燥重量を計測する。

4.2 試験結果

4.2.1 圧縮成型

粉末状のベントナイト（クニゲル V1）を一定速度（1mm/min）で圧縮成型することにより、圧密試験に用いる供試体を作成した。圧縮成型時の含水比 $\omega=8.48\%$ である。3 供試体それぞれの圧縮成型時における圧縮成型応力（軸方向圧縮応力）—間隙比関係を図 4-2 に示す。3 供試体の圧縮応力—間隙比の関係はほぼ同じであり、載荷時において軸応力の対数と間隙比がほぼ線形関係となっている。

それぞれの供試体の最大成型圧と、各供試体の乾燥重量、乾燥密度および間隙比を表 4-2 に示す。ただし、乾燥重量と乾燥密度は、供試体作成時と試験終了後の両方の値を示している。表より、供試体作成時には目標の乾燥密度 1.6g/cm^3 を満たしていたが、試験中のベントナイト分の流出等により、試験後の乾燥重量は約 $1\text{g}\sim 2.5\text{g}$ 減少していることが分かる。なお、載荷中の間隙比等の計算には、載荷前の重量を用いている。

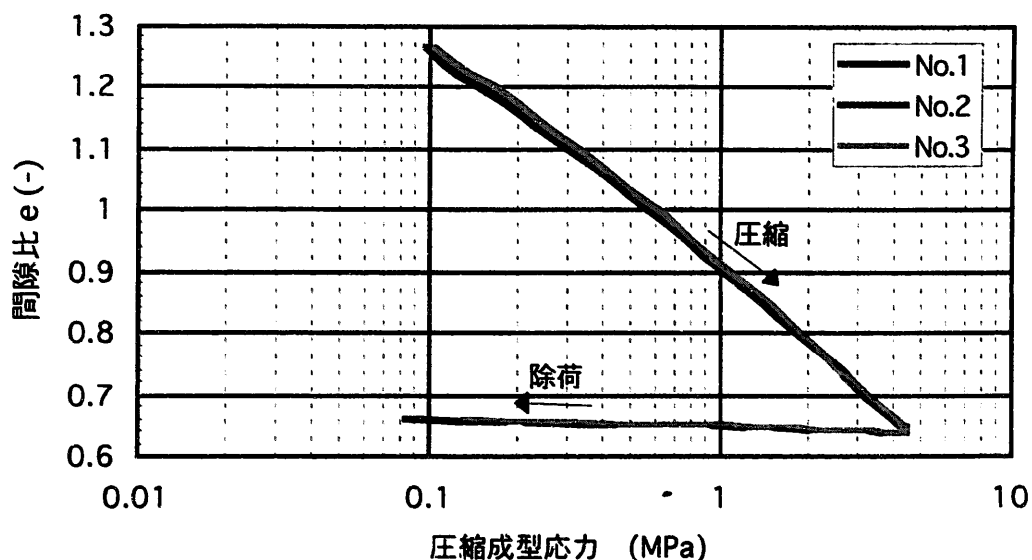


図 4-2 圧縮成型応力と間隙比の関係

表 4-2 各供試体の最大成型圧と初期間隙比

供試体 No.	1	2	3
最大成型圧 (MPa)	4.5	4.4	4.4
載荷前乾燥重量 (g)	90.5	90.4	90.4
載荷前乾燥密度 (g/cm ³)	1.60	1.60	1.60
圧密前間隙比	0.675	0.675	0.675
載荷後乾燥重量 (g)	89.39	87.91	88.67
載荷後乾燥密度 (g/cm ³)	1.58	1.55	1.57

注) 間隙比の計算ではクニゲル V1 の真比重を 2.7g/cm³, ケイ砂の真比重を 2.64g/cm³ とした。

4.2.2 膨潤応力

圧密を行なう前に、圧縮成型した供試体に給水を行ない飽和させた。その時それぞれの供試体の軸方向の荷重をロードセルにより測定した。給水開始後、各供試体には膨潤応力が発生した。各供試体に発生した膨潤応力の経時変化を図 4-3 に示す。図より、各供試体とも給水直後から膨潤応力は上昇していき、ピークに達した後低下し、再び上昇しており、1500 時間経過時においても、膨潤応力はゆるやかながら上昇傾向にあった。また、給水直後を除き、No.2 供試体は他に比べてやや高めの応力で推移した。このような膨潤応力のばらつきは、載荷板と供試体との接触具合や容器側面に発生する摩擦などが原因として考えられるが、これまでの膨潤応力測定試験でもこの程度のばらつきは確認されている¹⁾⁸⁾。1500 時間経過時において、膨潤応力はまだ若干上昇傾向であったが、供試体はほぼ飽和したと判断し、圧密試験に移行することとした。それぞれの供試体の圧密直前の膨潤応力 (以後、膨潤応力とはこの値をさす。) は、供試体 No.1 で 0.43MPa, No.2 で 0.56MPa, No.3 で 0.43MPa であり、別途実施した膨潤応力測定試験⁸⁾ で得られた値に対し妥当であった。

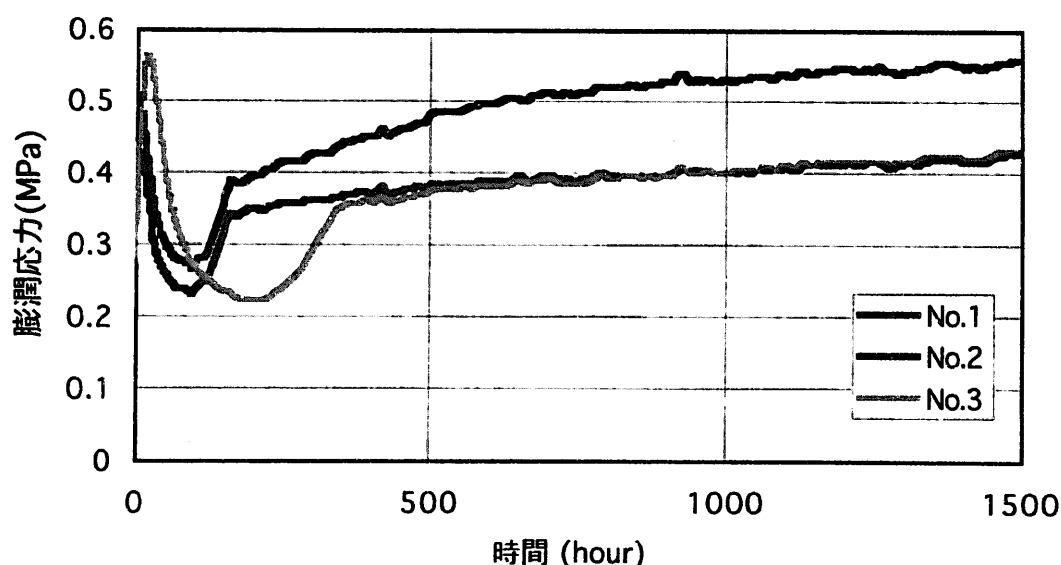


図 4-3 膨潤応力の経時変化

4.2.3 圧密沈下量の経時変化

(1) 載荷過程

圧密試験では、膨潤応力から 19.6MPa まで 8step に分けて軸方向に圧密応力を載荷した。各 step での圧密終了は 3t 法⁷⁾により確認した。各 step に要した載荷軸応力と載荷時間を表 4-3 に示す。1step の載荷期間は約 5 日間～24 日間である。

各載荷 step での供試体の沈下量 Δd の経時変化（時間軸は対数軸としている）を図 4-4～図 4-11 にそれぞれ示す。各 step とも圧密沈下量 Δd と時間 t の関係の傾向はほぼ同じであり、一般の粘土の圧密現象と同様な関係となっていることがわかる⁷⁾。圧密の前半では 1 次圧密が生じ、1 次圧密が終了した後も 2 次圧密に相当すると考えられる経過時間の対数にほぼ比例する沈下が認められる。ただし、2 次圧密についての議論を行うには、今回の試験では各 step での載荷時間が短いと考えられる。2 次圧密の詳細な検討を行うには、載荷時間のより長い圧密試験を行う必要がある。1 次圧密に対しては Terzaghi の圧密理論との比較という観点で後述する。

供試体間の差であるが、最初の 2step で No.2 供試体のみ沈下量が小さい。これは、先の膨潤過程で、No.2 供試体のみ膨潤応力が高かったことが要因と思われる。それ以降の各 step では、3 供試体はほぼ同じ挙動となっている。若干の試験結果のバラツキは試験装置の微妙な違いや、供試体と容器側面に発生する摩擦の違いなどによるものと考えられる。

表 4-3 各載荷 step の載荷応力と載荷時間（載荷過程）

載荷 step	初期	step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8
載荷応力(MPa)	膨潤応力	0.84	1.32	2.08	3.25	5.10	7.98	12.50	19.60
載荷時間 (hour)		380	310	297	478	498	661	651	578

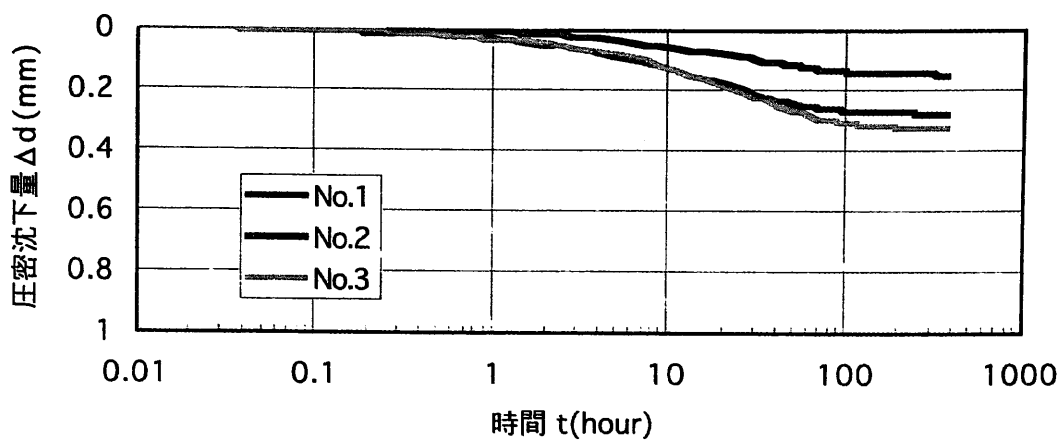


図 4-4 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step1 : 膨潤応力→0.84MPa)

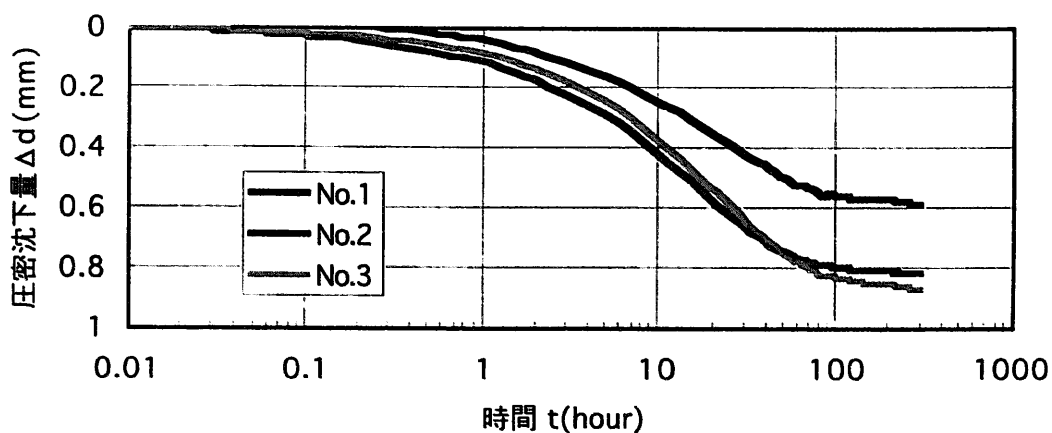


図 4-5 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step2 : 0.84→1.32MPa)

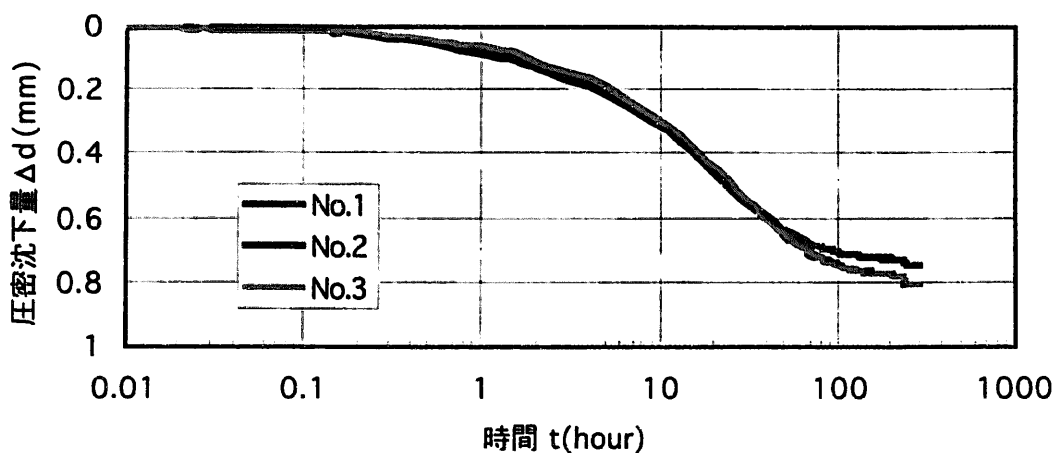


図 4-6 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step3 : 1.32→2.08MPa)

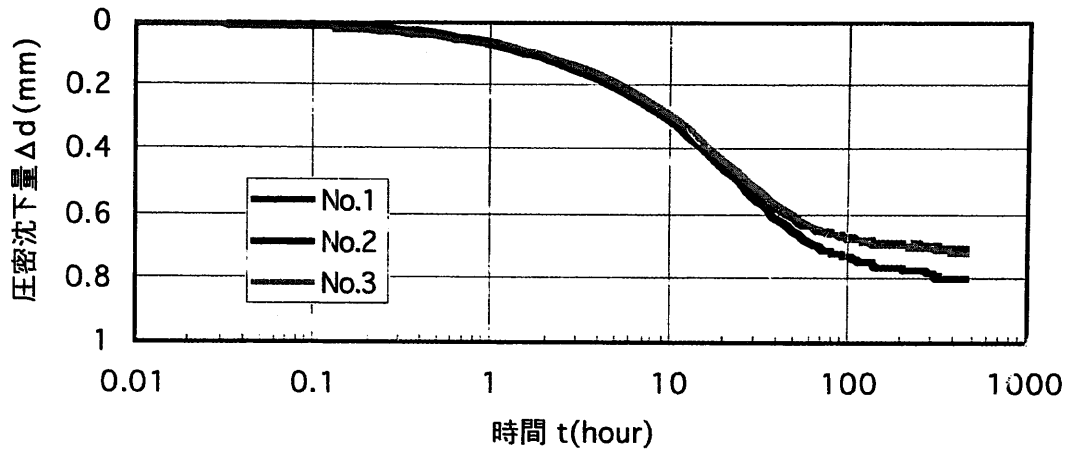


図 4-7 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step4 : 2.08MPa \rightarrow 3.25MPa)

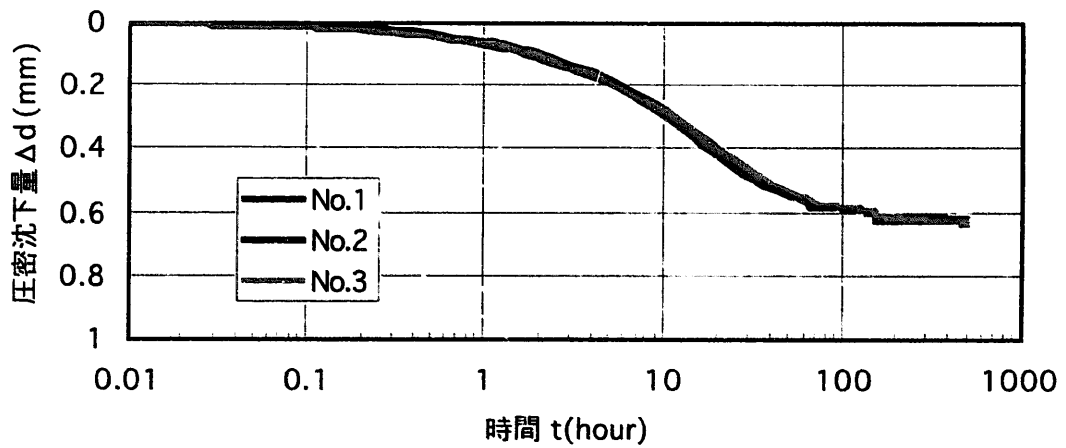


図 4-8 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step5 : 3.25MPa \rightarrow 5.1MPa)

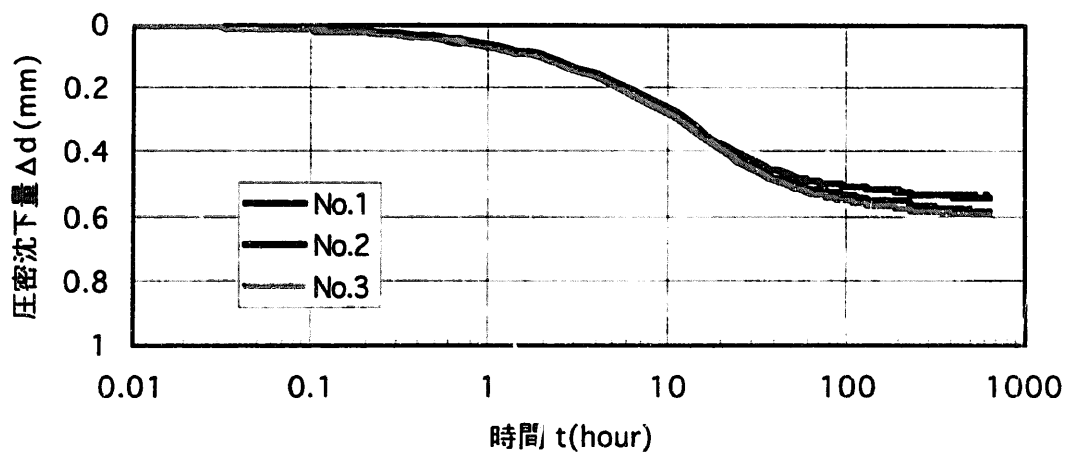


図 4-9 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step6 : 5.1MPa \rightarrow 7.98MPa)

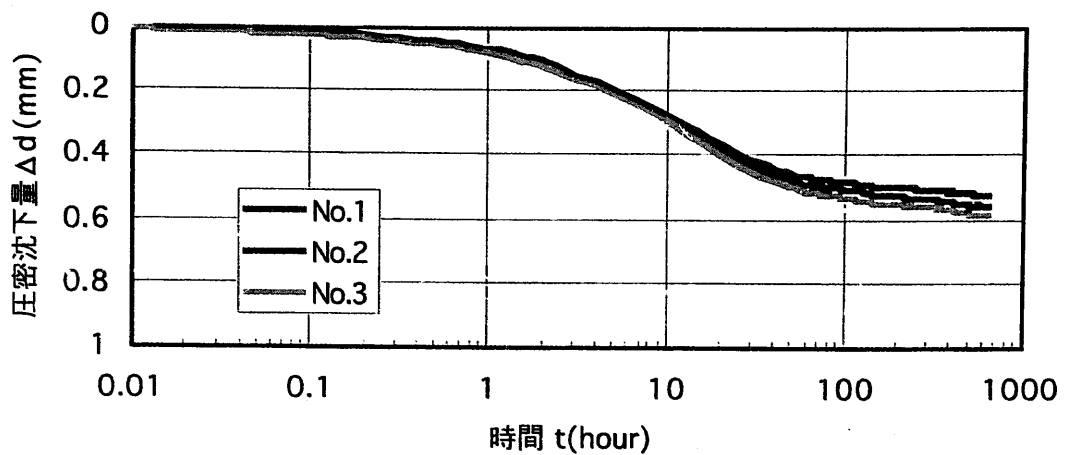


図 4-10 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step7 : 7.98MPa→12.5MPa)

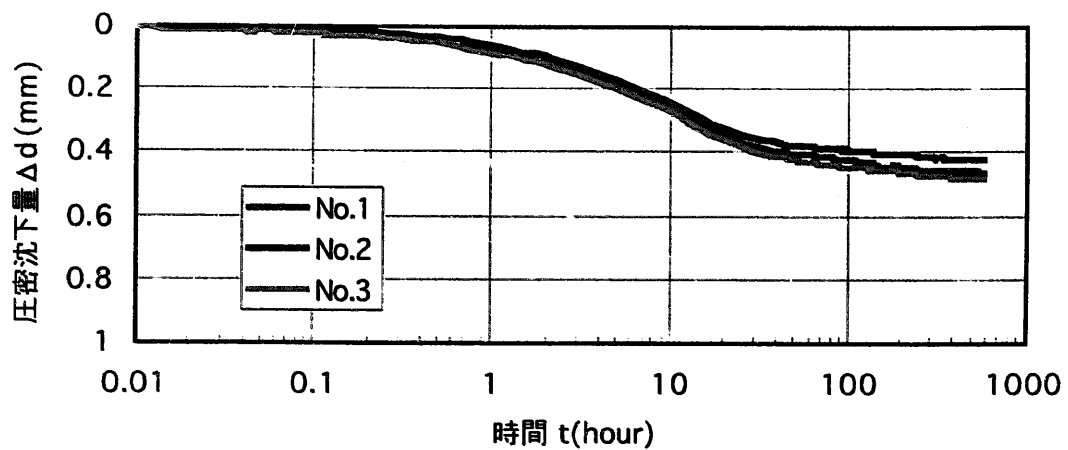


図 4-11 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (载荷 step8 : 12.5MPa→19.6MPa)

(2) 除荷過程

供試体に 19.6MPa まで圧密応力を載荷した後, 4step に分けてもとの膨潤応力にほぼ等しい 0.54MPa まで除荷を行った(No.2 供試体の膨潤応力を元に設定)。各 step での載荷軸応力と除荷時間を表 4-4 に示す。1step の除荷期間は約 18 日間～77 日間である。

各載荷 step での圧密沈下量 Δd (リバウンド量) の経時変化を図 4-12～図 4-15 にそれぞれ示す。各 step におけるリバウンド量 Δd と時間 t の関係は, 載荷過程同様, 定性的に同じ傾向を示しており, 載荷過程における関係の変形量のプラスとマイナスを逆にしたのと同じ挙動を示している。ただし各 step 間でリバウンド量は大きく異なっており, 除荷 step が大きくなるにつれリバウンド量は大きくなっていることがわかる。特に最終の除荷 step では, 2 ヶ月以上の長時間を要した。

表 4-4 各載荷 step の載荷応力と載荷時間 (除荷過程)

載荷 step	Step u1	Step u2	Step u3	Step u4
載荷応力 (MPa)	7.98	3.25	1.32	0.54
載荷時間 (hour)	434	666	703	1846

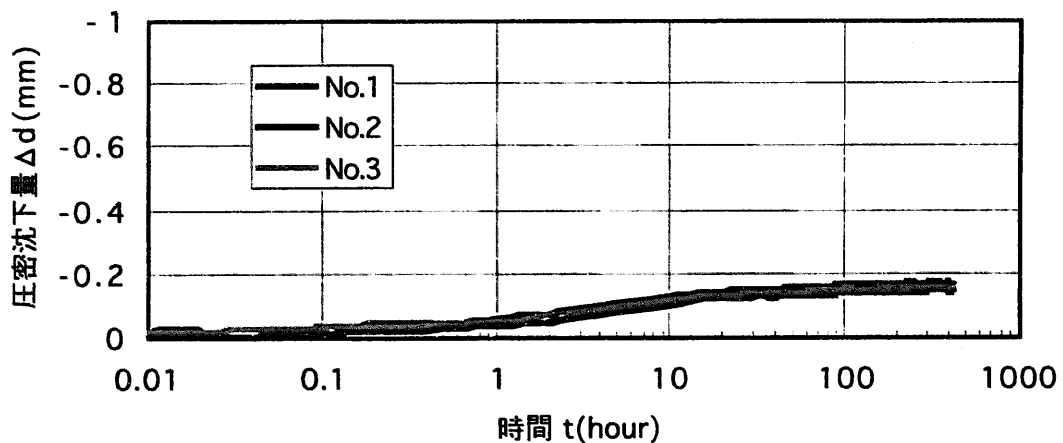


図 4-12 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (除荷 step u1 : 19.6MPa→7.98MPa)

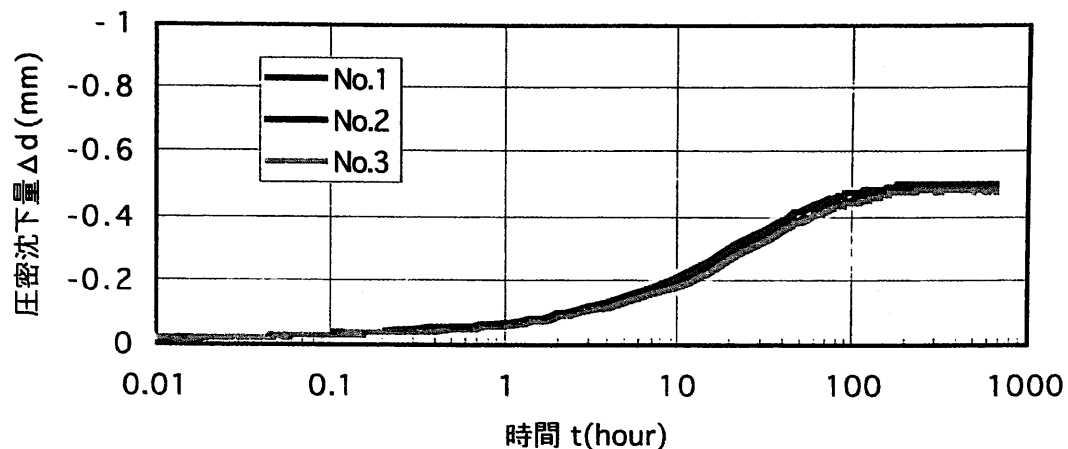


図 4-13 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (除荷 step u2 : 7.98MPa→3.25MPa)

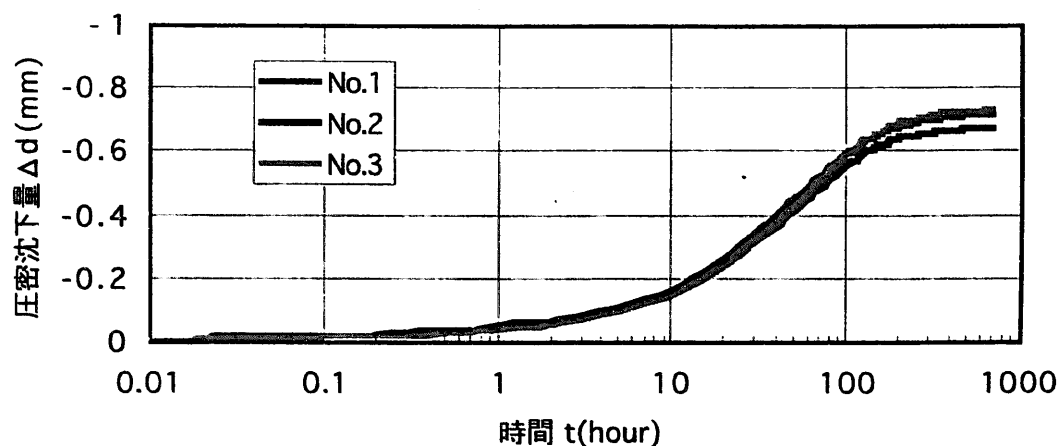


図 4-14 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (除荷 step u3 : 3.25MPa→1.32MPa)

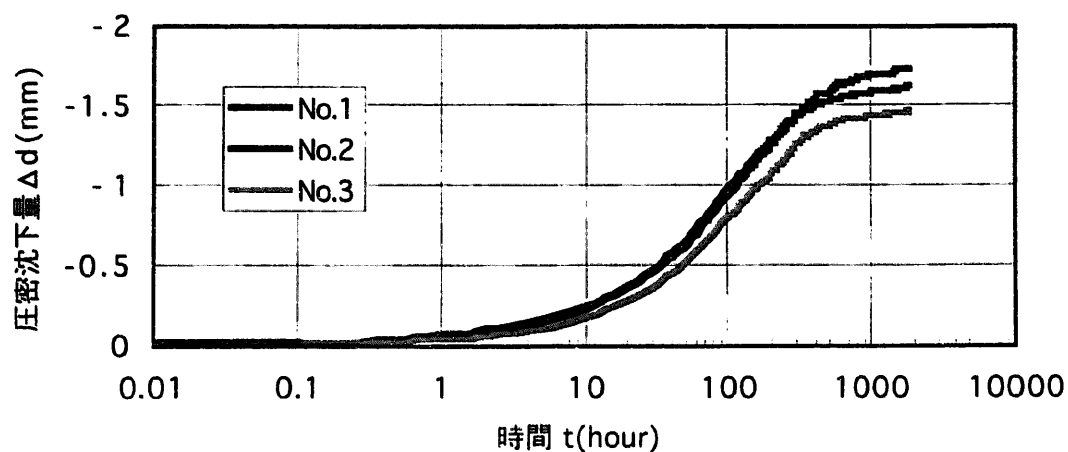


図 4-15 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (除荷 step u4 : 1.32MPa→0.54MPa)

(3) 再載荷過程

膨潤応力まで除荷した後に、再び 19.6MPa まで 4step に分けて再載荷を行った。各 step での載荷軸応力と載荷時間を表 4-5に示す。1step の載荷期間は約 22 日間～30 日間である。

各載荷 step での供試体の沈下量 Δd の経時変化を図 4-16～図 4-19に示す。各 step における圧密沈下量 Δd と時間 t の関係は、載荷過程・除荷過程同様、定性的に同じ傾向を示している。ただし、1 次圧密終了後の 2 次圧密と考えられる部分の沈下量は、応力履歴を受けている影響で、載荷過程に比較して若干小さくなっている。

表 4-5 各載荷 step の載荷応力と載荷時間 (再載荷過程)

載荷 step	Step r1	Step r2	Step r3	Step r4
載荷応力 (MPa)	1.32	3.25	7.98	19.6
載荷時間 (hour)	728	554	640	527

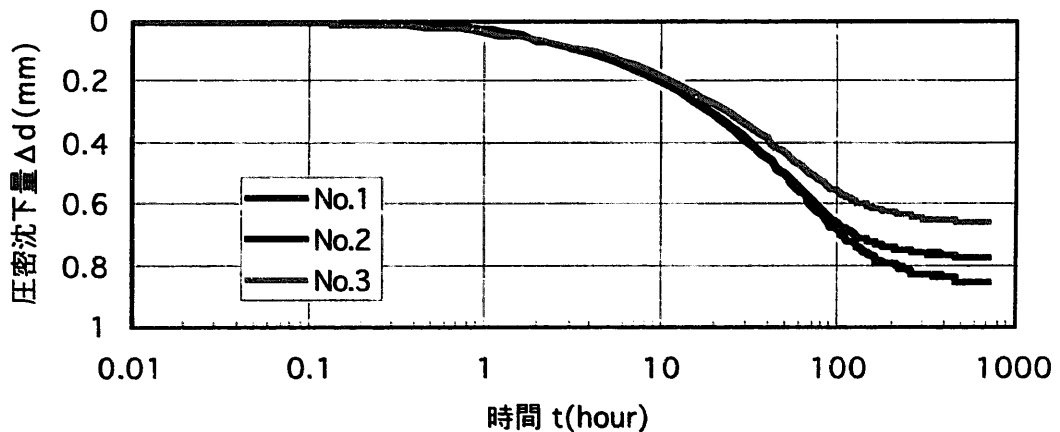


図 4-16 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (再載荷 step r1 : 0.54MPa→1.32MPa)

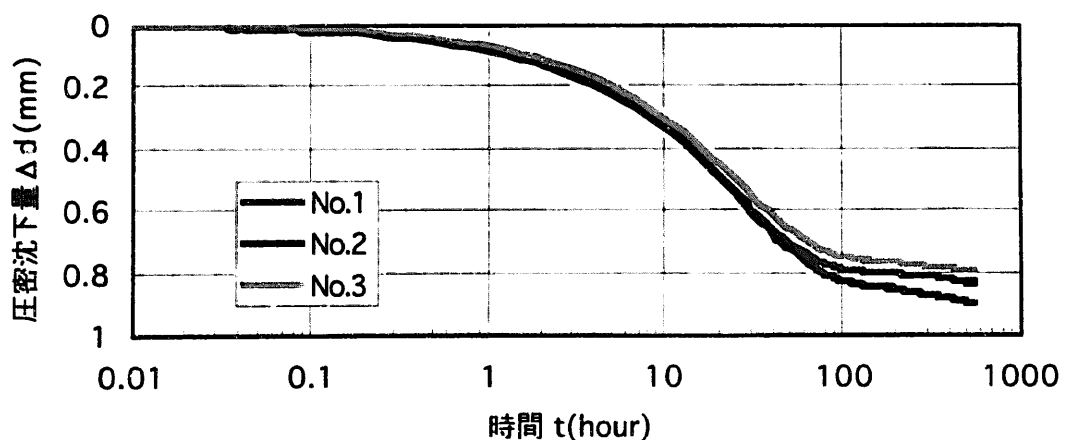


図 4-17 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (再載荷 step r2 : 1.32MPa→3.25MPa)

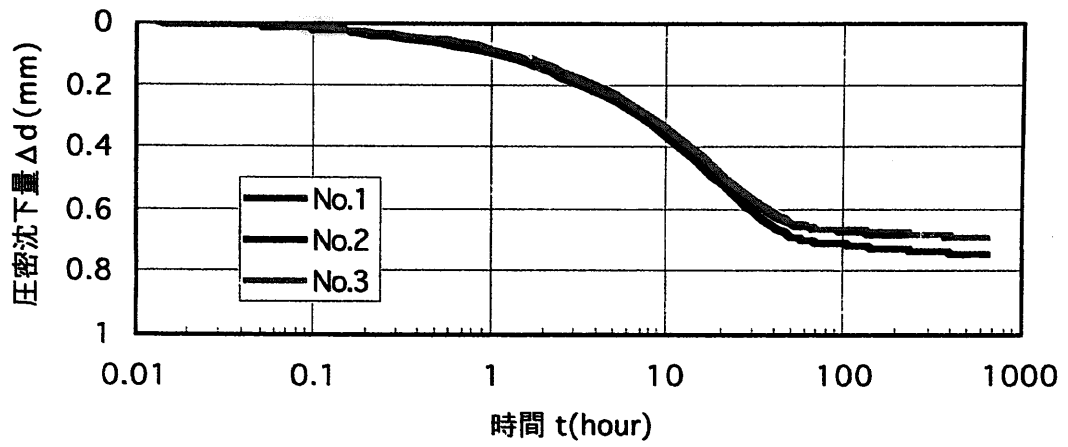


図 4-18 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (再載荷 step r3 : 3.25MPa→7.98MPa)

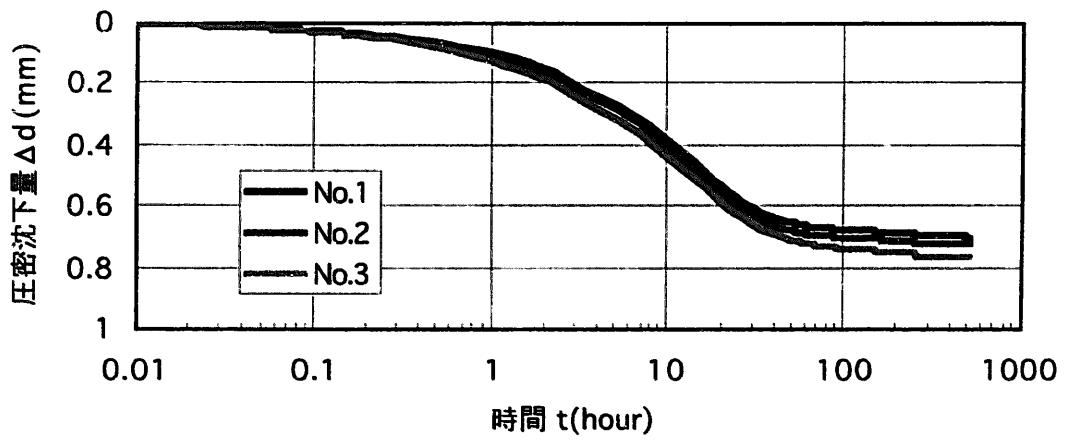


図 4-19 圧密沈下量と時間 (log t) の関係 (再載荷 step r4 : 7.98MPa→19.6MPa)

4.2.4 圧密理論解と試験結果の比較

4.2.3項の圧密沈下量 Δd と時間 t の関係に関して、Terzaghi の圧密理論解⁹⁾¹⁰⁾と試験結果の比較を行う。今回の試験のような一次元圧密条件での Terzaghi の圧密理論方程式は以下のようになる¹⁰⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4-1)$$

- u : 間隙水圧
- t : 時間
- C_v : 圧密係数
- z : 排水面からの距離

排水距離が H と仮定した境界条件で、式を解くと圧密沈下量と経過時間の関係は次式で表現することができる。

$$d = d_{100} \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_n \cdot C_v \cdot t}{H^2}\right) \right\} \quad (4-2)$$

$$\lambda_n = \left(\frac{2n+1}{2} \cdot \pi \right)^2 \quad (4-3)$$

- d : 沈下量
- d_{100} : 圧密度 100%の時の沈下量
- H : 排水距離

比較には、供試体 No.1 の step4 , step u3, step r3 での結果を用いた。Terzaghi の圧密理論解の計算には式中の圧密係数 C_v の値が必要となるが、ここでは Taylor 法¹⁰⁾¹¹⁾ (\sqrt{t} 法)により各試験結果の圧密係数 C_v の値を決定した。

試験結果の圧密沈下量 Δd と \sqrt{t} の関係を図 4-20～図 4-22に示す。 Δd - \sqrt{t} 関係において、圧密理論解は圧密初期 (圧密度 $U < 53\%$) の部分で原点を通る直線となる。試験結果では図に示すように、圧密初期において Δd - \sqrt{t} 関係は圧密理論どおりほぼ直線となっていることがわかる。しかし、その直線は原点より若干右方向にずれている。これは荷重初期において、理論解に比較して試験では供試体の沈下が遅れて発生していることを示している。供試体からの排水が排水面の焼結メタルを通過するのに時間がかかることが原因の 1 つと推測されるが、今回の試験から明らかな原因は分からなかった。

試験結果における荷重初期の沈下の遅れの原因は明らかでないが、この沈下の遅れを補正した場合の Terzaghi の圧密理論解と試験結果との比較を行なった。図 4-20～図 4-22に示す Δd - \sqrt{t} 関係において圧密初期の直線部分を延長し、 $\Delta d=0$ 軸との交点を求めると step 4

では $\sqrt{t}=0.30$, step u3 では $\sqrt{t}=0.97$, step r3 では $\sqrt{t}=0.26$ となる。これを初期補正值とし、この点を通り試験結果の初期部分とラップする直線 1 を引き、この傾きの 1/1.15 倍の直線 2 を引く。直線 2 と試験結果の $\Delta d-\sqrt{t}$ 関係の交点が圧密度 90% の位置となる。圧密度 90% の時点のそれぞれの圧密沈下量 Δd_{90} と、その値より計算した Δd_{100} および、図から得られる $\sqrt{t_{90}}$, また、 $\sqrt{t_{90}}$ から初期補正值を引き、2乗することにより得られる t_{90} を表 4-6に示す。次に、補正後の t_{90} の値より式中の C_v/H^2 を次式により求めることができる。

$$\frac{C_v}{H^2} = \frac{0.848}{t_{90}} \quad (4.4)$$

それぞれの C_v/H^2 は表 4-6に示す値となった。

表 4-6 理論解の計算に用いた値 (供試体 No.1)

	Δd_{90} (mm)	Δd_{100} (mm)	$\sqrt{t_{90}}$	補正 t_{90} (hour)	C_v/H^2
step4	0.59	0.66	6.40	37.2	0.0227
stepu3	-0.60	-0.67	10.25	86.1	0.0098
stepr3	0.61	0.68	6.16	34.8	0.0244

これらの値を式に代入し、求めた圧密理論解と試験結果を $\Delta d-\log t$ 関係で比較したものを図 4-23～図 4-25に示す。図より、載荷過程、除荷過程では、圧密の後半を除いて、理論解と試験結果はよく一致していることがわかる。また、圧密の後半において試験結果の沈下量が理論値より大きくなっているのは、一般の粘土の圧密挙動にも見られる 2 次圧密が原因であると考えられる。通常圧密現象において上記圧密理論で表現できる圧密現象を 1 次圧密、それ以後の圧密現象を 2 次圧密と呼んでいる。2 次圧密はクリープに起因する挙動で上記の圧密理論では表現できない挙動である。再載荷過程では、全般にわたり理論解と試験結果はよく一致しており、他に比べて 2 次圧密挙動の量が小さくなっている。以上のことより、試験における載荷直後の沈下の遅れを補正すると、通常粘土と同様に 1 次圧密の範囲において、ベントナイトの圧密挙動は式で表わされる Terzaghi の圧密理論で表現可能であることがわかる。

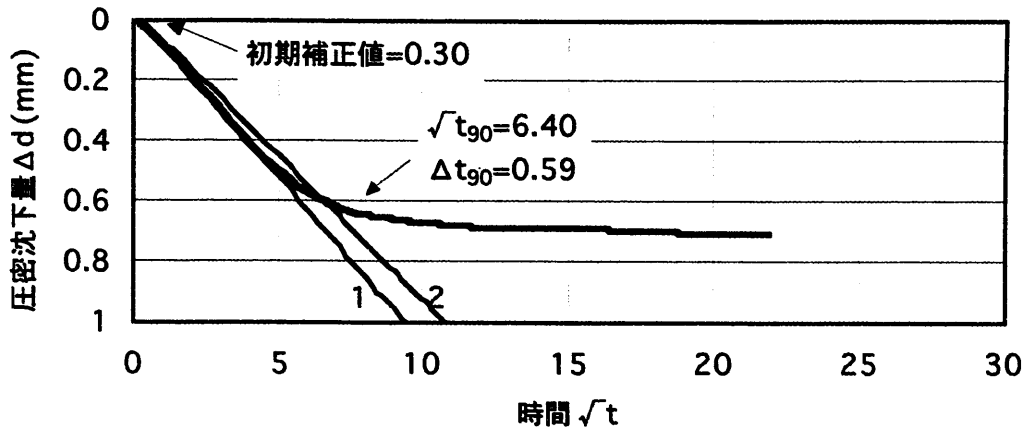


図 4-20 圧密沈下量と時間 (\sqrt{t}) の関係 (供試体 No.1 : step 4)

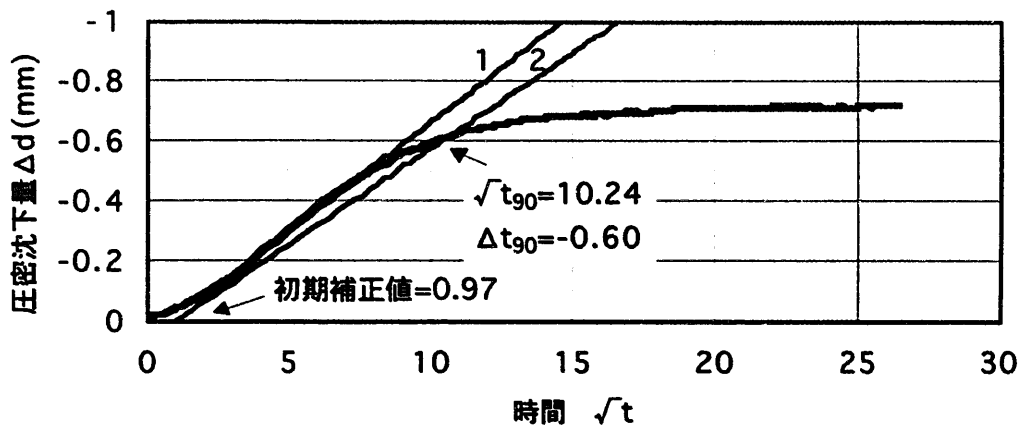


図 4-21 圧密沈下量と時間 (\sqrt{t}) の関係 (供試体 No.1 : step u3)

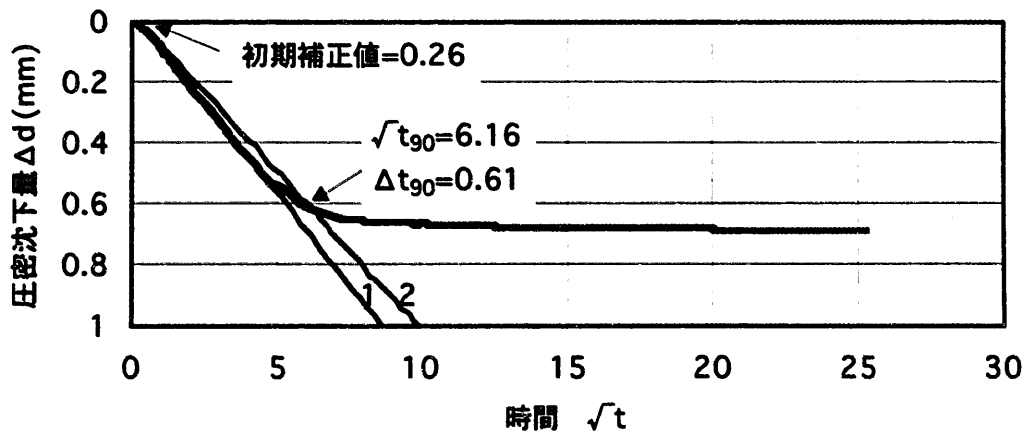


図 4-22 圧密沈下量と時間 (\sqrt{t}) の関係 (供試体 No.1 : step r3)

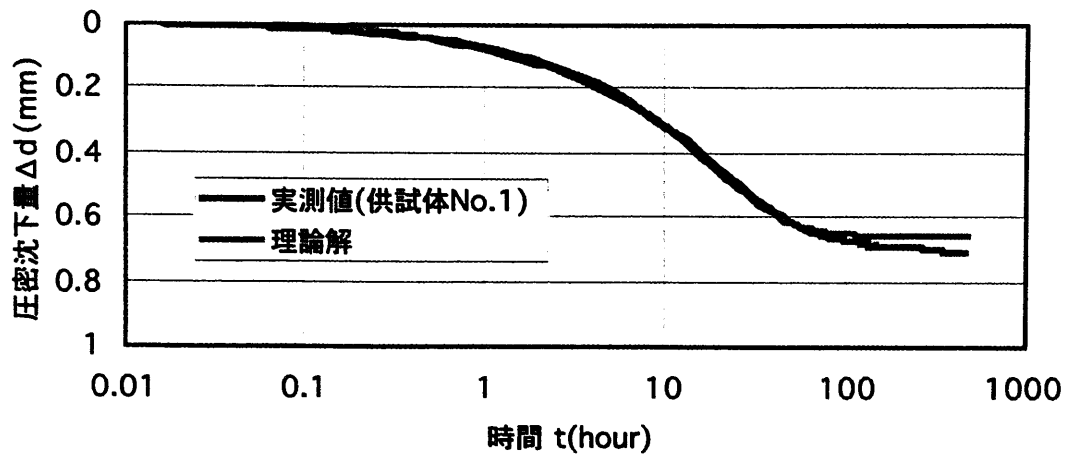


図 4-23 試験結果と Terzaghi の理論解の比較 (供試体 No.1 : step 4)

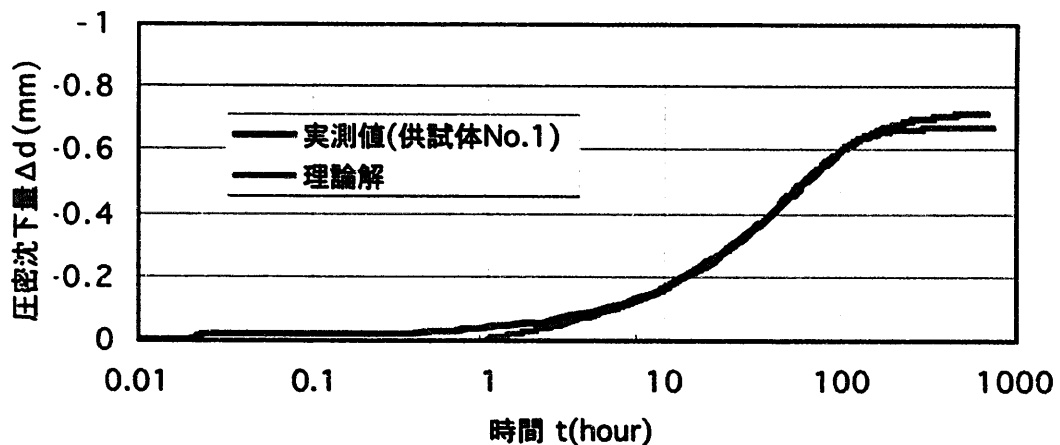


図 4-24 試験結果と Terzaghi の理論解の比較 (供試体 No.1 : step u3)

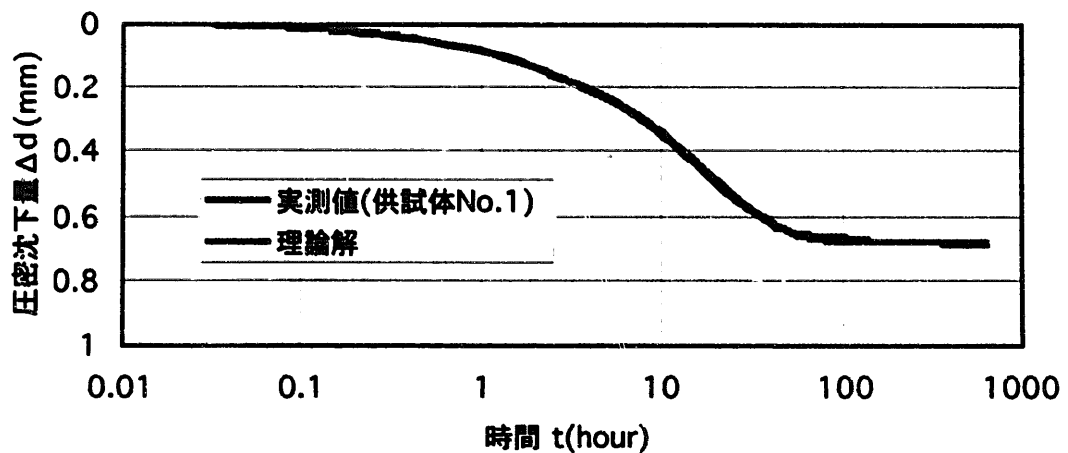


図 4-25 試験結果と Terzaghi の理論解の比較 (供試体 No.1 : step r3)

4.2.5 e-log P 関係 (間隙比-圧密応力関係)

4.2.3で述べた試験結果を、 e -log P 関係にまとめたものを図 4-26に示す。3 供試体間に若干のばらつきがあり、特に No.3 供試体は、載荷途中から他の 2 供試体に比べて圧密沈下量が相対的に大きくなり、除荷、再載荷過程は全体的に下にシフトしたような挙動となったが、これは、装置の特性、側面摩擦などの要因によるものと思われる。また、膨潤応力が他と比べて高かった No.2 供試体は、先にも述べたように、最初の 2step で圧密沈下量が相対的に小さかったが、載荷後半では他の供試体とほぼ同じ挙動を示していることが図よりわかる。以上のような供試体間の若干のばらつきはあるが、全体的には定量的にほぼ同じ挙動であるといえる。

載荷過程の step3 以降は直線関係とならず、荷重が大きくなるほど傾きは小さくなった。一般に圧縮曲線の形状は、荷重の増加率や圧密時間、荷重の絶対量などの影響を受ける。今回の試験では各 step の荷重増加率が標準圧密試験の荷重増加率 $\Delta p/p=1$ より小さかったことや、各 step の圧密終了は基本的には 3t 法によって判定したが、3t 法による到達点より若干長時間載荷した step も多くなってしまったため、二次圧密の影響を受けてしまったこと、また、一般の粘土に比べ密度が高く、間隙比が比較的小さい上に、最終的に 19.6MPa という大きな荷重をかけたことなどが原因で圧密曲線は若干下に凸の形状となったものと思われる。

載荷過程での step3～step6 あたりを直線とみなし、各試験での圧密降伏応力 pc' を Casgrande の方法¹⁰⁾¹²⁾で求めた。3 供試体の圧密降伏応力 pc' の値は、供試体 No.1, 2, 3 でそれぞれ 0.82MPa, 0.94MPa, 0.77MPa であった。圧密降伏応力 pc' は、圧密開始時の各膨潤応力より若干大きな値となっており、本試験の供試体は圧密初期の段階では過圧密状態にあったことがわかる。各供試体の過圧密比 OCR は、1.7～1.9 であった。このことは、不飽和状態で圧縮成型され、体積拘束条件下で給水され飽和した圧縮ベントナイトの初期状態は過圧密状態にあることを意味している。

図 4-26には圧縮成型時の最大成型圧を併せて示している。図より、乾燥時の成型圧は、飽和後の圧密降伏応力 pc' に比べかなり大きいことがわかる。圧縮成型時の最大成型圧はベントナイトの含水比に大きく依存することが知られている¹⁾。また、その含水比及び成型圧により膨潤応力も変化すると考えられる。今回はすべての供試体をほぼ同一含水比で圧縮成型したため、含水比の影響は明らかにできなかった。圧縮成型時の含水比、成型圧、膨潤応力、圧密降伏応力 pc' のそれぞれの関係を明らかにするには、圧縮成型時の含水比の異なる供試体を用いた試験を行う必要があると考えられる。

除荷、再載荷における e -log P 関係はヒステリシスな関係となっている。このような除荷、再載荷のヒステリシス挙動は、一般の粘土の次元圧密試験にも認められる挙動であるが、今回用いたベントナイト供試体はややそのヒステリシス挙動が大きい。本試験は次元圧密で圧密応力を軸方向応力としたため、静止土圧係数 K_0 の非線形的な挙動が影響したことなどが、このようにヒステリシスループを描いた原因と推測できるが、明確な原因を追究するためには、より詳細な検討が必要である。

試験の結果を元に、図中に引いた直線の傾きより求めた圧縮指数 C_c 及び膨潤指数 C_s は、

$C_c=0.27$, $C_s=0.16$ となった。ただし、前述のように載荷、除荷、再載荷時の $e\text{-log } P$ 関係は非線形性を示したため、どこの傾きを取るかで、圧縮指数 C_c , 膨潤指数 C_s は大きく異なることに留意する必要がある。圧縮指数 C_c , 膨潤指数 C_s については非線形性等の問題も踏まえて、さらに詳細に検討していく必要があると考えられる。

図 4-27には、今回のケイ砂混合体の試験結果とベントナイト単体³⁾の試験結果を比較したもの(代表的な1供試体の結果)を示す。乾燥密度は同じ 1.6Mg m^{-3} である。ケイ砂混合体に比べ、ベントナイト単体の膨潤応力は大きく、したがって圧密降伏応力も同様に大きいことがわかる。また、同じ載荷応力下では、全過程でケイ砂混合体の間隙比の方が小さくなるが、前述のように、ケイ砂混合体の載荷過程は若干下に凸の形状をしているものの、 $e\text{-log } P$ 曲線の形状はほぼ同じであり、ケイ砂混合体の $e\text{-log } P$ 曲線はベントナイト単体の $e\text{-log } P$ 曲線を下にシフトさせたような形となった。これは、ベントナイト単体の圧縮指数 C_c が 0.27, 膨潤指数 C_s が 0.18 であり、ケイ砂混合体の C_c , C_s とほぼ同等の値であることからもうかがえる。また、膨潤圧測定試験結果¹⁸⁾より、ケイ砂混合ベントナイトとベントナイト単体の乾燥密度と膨潤圧(対数)の関係がほぼ平行であることも密接に関連していると思われ、今後、圧密特性と膨潤特性の統合的な検討も必要である。

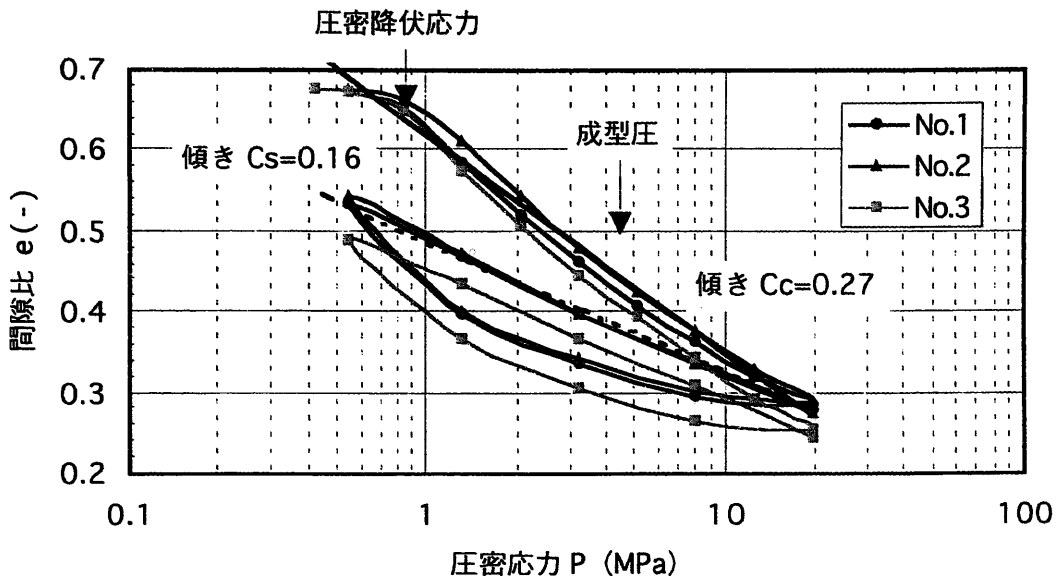


図 4-26 e - $\log P$ 関係

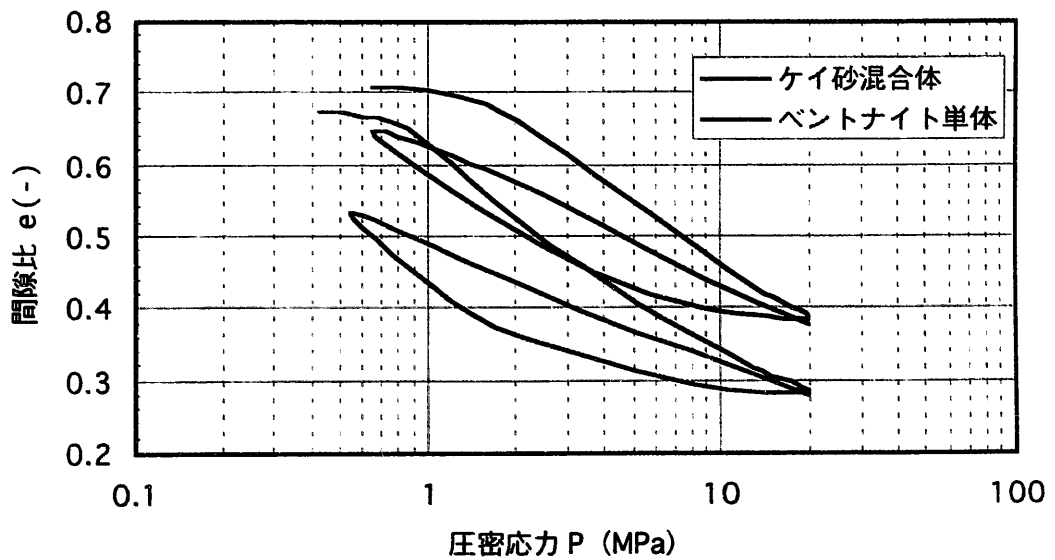


図 4-27 ケイ砂混合体とベントナイト単体の e - $\log P$ 関係の比較 (乾燥密度 1.6 Mg m^{-3})

4.2.6 透水係数

供試体 No.1 の圧密試験結果より、各 step での透水係数を計算した。透水係数 k は、4.2.4 で述べた Taylor 法を用い、 $\Delta d-\sqrt{t}$ 関係より得られる圧密係数 C_v より次式によって計算した。

$$k = C_v \cdot \gamma_w \cdot m_v \quad (45)$$

k : 透水係数
 γ_w : 水の単位体積重量
 m_v : 体積圧縮係数

ここで、体積圧縮係数 m_v は、 $\Delta d-\sqrt{t}$ 関係より得られる d_{100} より軸ひずみ増分 $\Delta \epsilon_a$ を算出し、次式により計算した。

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon_a}{\Delta \sigma_a} \quad (46)$$

$\Delta \epsilon_a$: 軸ひずみ増分
 $\Delta \sigma_a$: 軸応力増分

式により計算した供試体 No.1 の各 step (載荷過程 step1, step2 を除く) での乾燥密度 ρ_d と透水係数 k の関係を図 4-28 に示す。図には透水試験で得られた結果¹³⁾も併せて示している。

圧密試験より得られた透水係数と透水試験の結果とは、乾燥密度がラップする部分が少ないが、乾燥密度が大きくなるにつれて透水係数が小さくなる傾向はほぼ同じであり、乾燥密度 ρ_d と透水係数 k の対数はほぼ直線関係となっているのがわかる。よって、本圧密試験で得られた透水係数は、透水試験結果と比較してほぼ妥当な結果となっているといえる。

圧密試験結果より計算される載荷過程、除荷過程、再載荷過程の乾燥密度と透水係数の関係は、除荷過程の透水係数が若干小さくなっているが、3 者ともほぼ同じ結果となっているといえる。このことより、圧縮ベントナイトの透水係数の変化は乾燥密度に依存するが、載荷や除荷などの応力状態や応力履歴の影響をあまり受けないといえる。

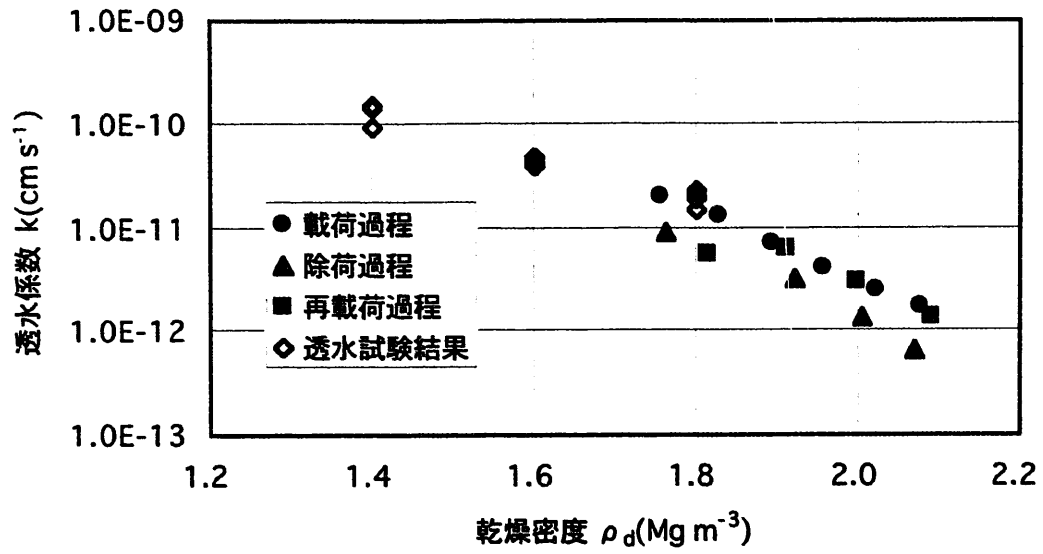


図 4-28 圧密試験結果より計算した透水係数 (供試体 No.1)

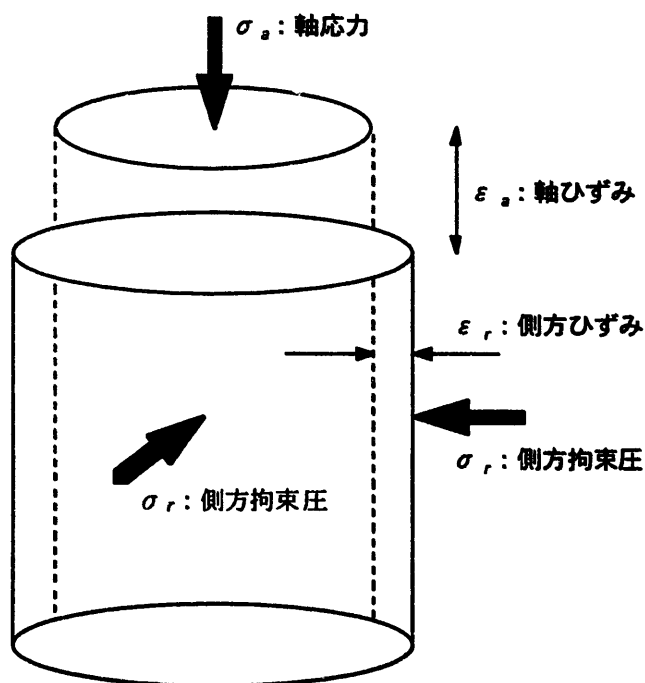
5. 圧密非排水三軸圧縮試験（ケイ砂混合ベントナイト）

5.1 試験手法

5.1.1 試験概要

三軸圧縮試験は軸対称応力境界条件下で、材料の圧縮特性やせん断特性を調べる要素試験である。三軸せん断試験において、供試体に作用する応力、ひずみの概念を図 5-1に示す。圧密非排水三軸せん断試験では供試体を圧密した後せん断を行う。せん断前の圧密段階では、供試体に σ_a （軸応力） = σ_r （側方拘束圧） = σ_c （圧密応力）を負荷し等方圧密する。圧密後、 σ_r を一定に保ち σ_a を増加させることにより、供試体にせん断力 $\tau = (\sigma_a - \sigma_r)/2$ を作用させ、供試体のせん断特性および強度を調べるのである。今回の試験のような非排水せん断試験の場合、せん断中供試体内の体積は一定となるため、体積ひずみ v は 0 となる。

本試験は三軸せん断試験装置を用いて行った。装置の概要断面図を図 5-2に示す。本装置は、空気圧をブースターにより増圧した油圧で側圧を、また、メカニカルジャッキにより軸荷重を載荷する仕組みとなっており、軸荷重は荷重制御と変位制御により載荷が可能である。



$$\text{平均応力} : p = \sigma_m = (\sigma_a + 2\sigma_r) / 3$$

$$\text{軸差応力} : q = \sigma_a - \sigma_r$$

$$\text{せん断応力} : \tau = (\sigma_a - \sigma_r) / 2$$

$$\text{体積ひずみ} : v = 1 - (1 - \epsilon_a)(1 - \epsilon_r)^2$$

図 5-1 軸対称三軸せん断試験概念図

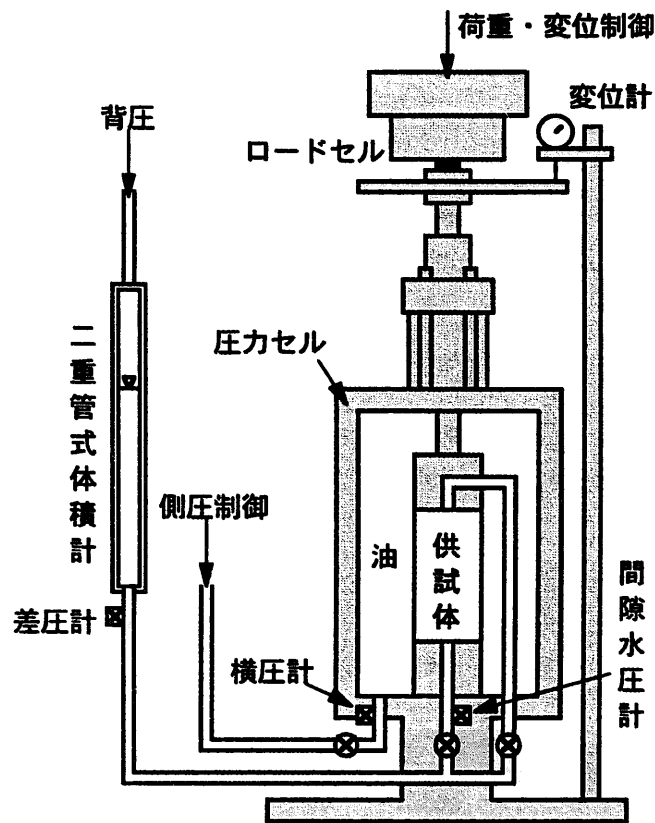


図 5-2 三軸試験装置概要図

5.1.2 試験条件

試験は、乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ のケイ砂混合体（ケイ砂混合率 30wt%）について行った。供試体は側方拘束条件で上下二方向から圧縮成型した後、体積拘束条件で給水し、飽和供試体を作成した。供試体寸法は直径 $\phi = 50\text{mm}$ 、高さ $h = 100\text{mm}$ である。

背圧は 0.49MPa 、有効拘束圧は 0.49MPa から 0.49MPa 毎に 2.94MPa までの 6 ケース、載荷速度は 0.01mm min^{-1} （ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a \doteq 0.01\% \text{ min}^{-1}$ ）で軸ひずみ $\epsilon_a = 15\%$ に達するまで載荷した。試験方法、手順などは基本的に地盤工学会基準⁷⁾JGS T 523 に準拠している。試験条件を以下にまとめる。

なお、 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ のベントナイト単体については、既報⁴⁾にて報告済みである。

● 供試体仕様

材 料	: ケイ砂混合ベントナイト
配合比	: ベントナイト クニゲル V1 (70wt%)
	ケイ砂 3号 (15wt%)
	5号 (15wt%)
寸 法	: 直径 $\phi = 50\text{mm}$ 、高さ $h = 100\text{mm}$
初期乾燥密度	: 1.6 Mg m^{-3} (間隙比 $e = 0.676$: 圧縮成型時)
初期含水比	: $7.2 \sim 8.5\%$ (圧縮成型時)

- 計測項目と計測装置性能

- 側 圧 : 油圧計 (capacity : 100kgf cm⁻²)
- 軸 荷 重 : ロードセル (capacity : 5tonf)
- 間隙水圧 : 間隙水圧計 (capacity : 100kgf cm⁻²)
- 軸 変 位 : 変位計 (capacity : 25mm)
- 排 水 量 : 差圧計 (capacity : 25ml)

- 試験条件

温度 : 室温 25℃ 一定制御

圧密条件 : 表 5-1 参照

せん断方法 : 軸変位速度制御 (軸変位速度 = 0.01mm min⁻¹, $\dot{\epsilon}_a \doteq 0.01\% \text{ min}^{-1}$ に相当)

表 5-1 圧密条件

試験番号	CU2-0	CU2-1	CU2-2	CU2-3	CU2-4	CU2-5
有効拘束圧 (圧密応力)	0.49MPa (5kgf/cm ²)	0.98MPa (10kgf/cm ²)	1.47MPa (15kgf/cm ²)	1.96MPa (20kgf/cm ²)	2.45MPa (25kgf/cm ²)	2.94MPa (30kgf/cm ²)

5.1.3 試験手順

試験の概略手順を以下に示す。

- 1) 所定の含水比のケイ砂混合クニゲル V1 試料をオートグラフを用いて所定の供試体寸法および密度となるよう圧縮成型する。
- 2) 圧縮成型した供試体を飽和セルに入れ, 2 ヶ月以上かけて給水し, 供試体を飽和させる。
- 3) 飽和セルから供試体を取り出し, 重量を計測し簡易的に飽和を確認する。
- 4) 飽和した供試体を三軸試験装置にセットし, 排水経路を水で満たす。
- 5) 膨潤圧相当(0.49MPa)の側圧を載荷し, 試験装置セット時に供試体が吸収した余分な水を排水させる。
- 6) 段階的に背圧(間隙水圧)(0.49MPa)を負荷する。これに合わせて側圧も背圧相当分増圧する。
- 7) 供試体からの水の出入りが収まったのを確認し, 所定の圧密荷重を供試体に載荷し圧密を開始する。
- 8) 数日~数週間圧密を行い, 圧密終了を 3t 法により確認し排水バルブを閉じる。
- 9) 排水バルブを閉じた状態で, 間隙水圧が定常状態になるまで数日間供試体をそのままにしておく。
- 10) 非排水状態で拘束圧を上昇させ B 値を測定する。
- 11) 拘束圧を圧密時の圧力まで戻した後, 軸方向に 0.01mm min⁻¹ の変位速度でせん断試験を開始する。

- 12) 軸ひずみが15%を超えた時点を目安に、供試体は破壊したとみなし、せん断試験を終了する。
- 13) 供試体破壊後セルより供試体を取り出し、破壊状況を写真撮影及び観察する。
- 14) 恒温槽で乾燥させ、乾燥重量を測定する。

5.2 試験結果

5.2.1 圧縮成型及び飽和

粉末状のクニゲル VI 試料とケイ砂をよく攪拌し、オートグラフを用いて側方拘束条件で圧縮成型することにより供試体を作成した。この時の圧縮成型圧は約 6.5~9MPa であった。

圧縮成型した供試体を透水性のテフロンシートで包み、飽和セルにセットした。セルは供試体の全面から水を供給できるような仕組みとなっている。飽和セルに供試体をセットした後、セルにサクシオンポンプをつなぎ数時間セル内の空気を引き、その後セルからサクシオンポンプを外し、水圧約 0.2MPa で供試体に給水を行った。

2 ヶ月以上経過した後、セルより供試体を取り出し、三軸試験装置にセットした。飽和セル取出し時（三軸試験装置セット前）の各供試体の物性一覧を表 5-2、に示す。ただし、表中の乾燥重量は試験終了時に計測したものである。

表 5-2 供試体の物性一覧

	CU2-0	CU2-1	CU2-2	CU2-3	CU2-4	CU2-5
供試体重量(g)	392.46	394.75	392.26	395.35	394.23	392.42
乾燥重量(g)	312.17	313.93	313.21	313.71	312.56	312.75
高さ(mm)	100.90	100.40	100.57	100.67	100.29	101.28
直径(mm)	50.15	50.11	50.05	50.19	50.18	50.05
体積(cm ³)	199.28	197.98	197.83	199.19	198.36	199.26
乾燥密度(Mg m ⁻³)	1.566	1.586	1.583	1.575	1.576	1.570
間隙比	0.712	0.691	0.694	0.703	0.702	0.709

注) 乾燥重量は試験終了後に計測

5.2.2 圧密

飽和セルより取り出した供試体を試験装置にセットした。供試体セット後、排水経路を水で満たし、膨潤圧相当と考えられる 0.49MPa の拘束圧を負荷し余分な水を排出した。拘束圧負荷後、0.49MPa まで背圧を負荷した。この時、拘束圧も背圧相当分の圧力を負荷した。結局、背圧負荷終了時における拘束圧は 0.98MPa、間隙水圧（背圧）は 0.49MPa で有効拘束圧は 0.49MPa となる。

背圧負荷後、各試験条件の有効拘束圧（圧密応力）を供試体に等方圧で負荷した。圧密時における供試体体積の経時変化を図 5-3 に示す。各試験の圧密終了は、経時体積変化に対して 3t 法を適用することにより確認した。圧密に要した期間は、約 3 日間~2 週間であった。各試験の圧密終了後、すなわちせん断開始時の供試体の体積、高さ、直径及び間隙比を表 5-3 に示す。

通常圧密終了時の供試体体積は、初期供試体体積（圧密前供試体体積）と圧密時の体積変化より計算するが、本試験では排水経路の飽和等の作業の過程で圧縮ベントナイト供試体が若干の水を吸収し、圧密前の供試体体積が正確に把握できなかった。そこで本試験では、せん断過程が非排水であるので、圧密後（せん断時）の供試体の体積をせん断終了時

に計測した供試体の湿潤重量と乾燥重量より算出することとした。このせん断時の供試体体積と表 5-2に示す飽和セル取出し時（三軸試験装置セット前）の供試体体積より、圧密による体積ひずみ v を次式により計算できる。

$$v = \frac{V - V_0}{V_0} \quad (5-1)$$

V_0 ：試験装置セット前の供試体体積

V ：せん断試験時の供試体体積

またこの時の軸方向ひずみ ϵ_a 、半径方向ひずみ ϵ_r は次式により計算できる。

$$\epsilon_a = \epsilon_r = 1 - \sqrt[3]{1 - v} \quad (5-2)$$

表 5-3に示すせん断時の供試体高さ及び直径は、表 5-2に示す各供試体の初期高さ及び直径と、(5-2)式により算出された圧密時の軸方向ひずみ ϵ_a 、半径方向ひずみ ϵ_r より計算した。

結果的には膨潤圧相当と考えられた有効拘束圧 0.49MPa のみを与えた CU2-0 のケースでも供試体は排水していることから、実際は膨潤圧はこれより若干小さいものと予想される。

図 5-4に圧密過程終了時の e -log P 関係を、4章のケイ砂混合体の一次元圧密試験結果と併せて示す。各圧密応力での間隙比は、一次元圧密試験による e -log P 曲線に対してほぼ妥当な値であることが分かる。また、図より CU2-1~5 は正規圧密領域であると考えられる。CU2-0 は e -log P 曲線上では過圧密領域であるが、圧密により排水していることや後述のせん断試験結果から明確な過圧密挙動を示しておらず、結果的には過圧密と正規圧密の中間の状態であったと言える。

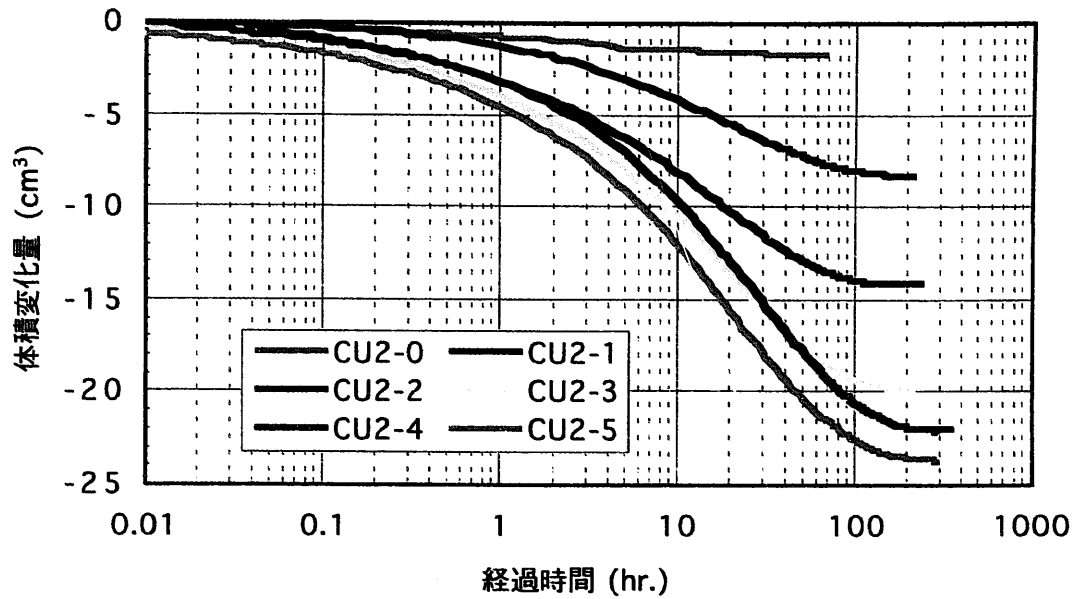


図 5-3 圧密曲線

表 5-3 せん断時（圧密後）の供試体寸法

	CU2-0	CU2-1	CU2-2	CU2-3	CU2-4	CU2-5
圧密応力(MPa)	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94
体積(cm³)	196.15	189.20	180.66	177.14	174.03	171.21
体積変化(cm³)	3.13	8.77	17.17	22.04	24.33	28.05
体積ひずみ	0.016	0.044	0.087	0.111	0.123	0.141
高さ(mm)	100.37	98.89	97.57	96.81	96.01	96.29
直径(mm)	49.88	49.36	48.56	48.27	48.04	47.58
間隙比	0.685	0.616	0.547	0.514	0.493	0.468

注 1) 体積変化およびひずみは圧縮方向が正

注 2) せん断時体積はせん断終了後の供試体重量より算出

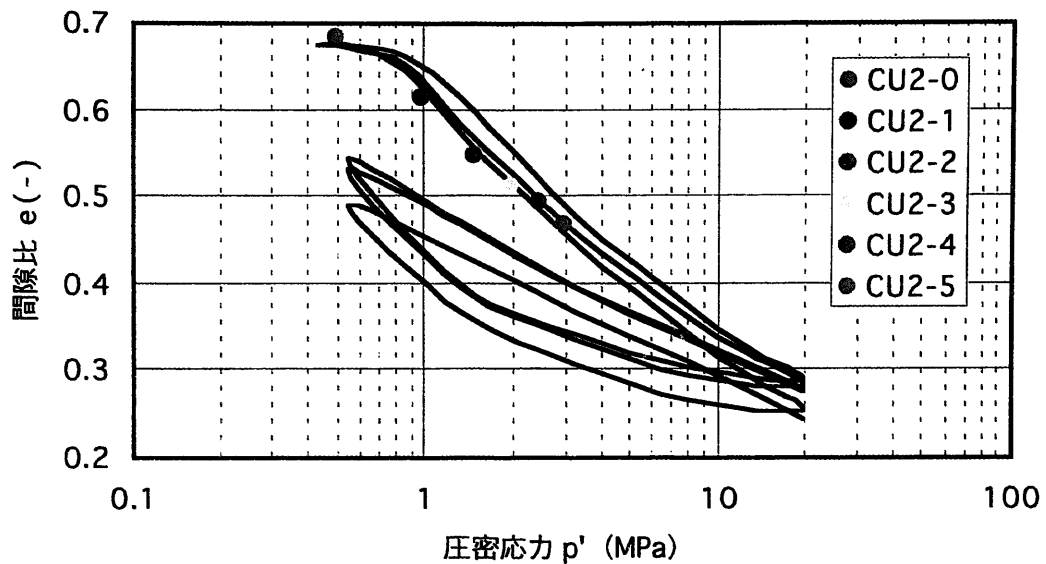


図 5-4 圧密試験結果との e - $\log P$ 関係の対応

5.2.3 B 値の測定

(1) B 値の測定結果

3t 法により圧密終了を確認した後、排水バルブを閉じ供試体を非排水状態とした。間隙水圧の安定性を確認した後、B 値の測定を行った。B 値の測定は、非排水状態で拘束圧を CU2-0 については約 0.2MPa、その他については約 0.4MPa 上昇させ、その時の間隙水圧の上昇を測定するという方法で行った。このようにして求めた拘束圧と間隙水圧の変化量より、B 値を次式により計算した。

$$B \text{ 値} = \Delta p.p. / \Delta \sigma_c \quad (5-3)$$

$\Delta p.p.$: 間隙水圧の変化量

$\Delta \sigma_c$: 拘束圧の変化量

各試験での $\Delta \sigma_c$ 、 $\Delta p.p.$ の経時変化を図 5-5～図 5-10 に、 $\Delta \sigma_c$ 、 $\Delta p.p.$ 及び B 値の一覧を表 5-4 に示す。表中に示すように各供試体の B 値は 0.96 以上であり、土質試験における B 値=0.95 以上という基準⁷⁾を達成しており、この状態でせん断試験を行うこととした。

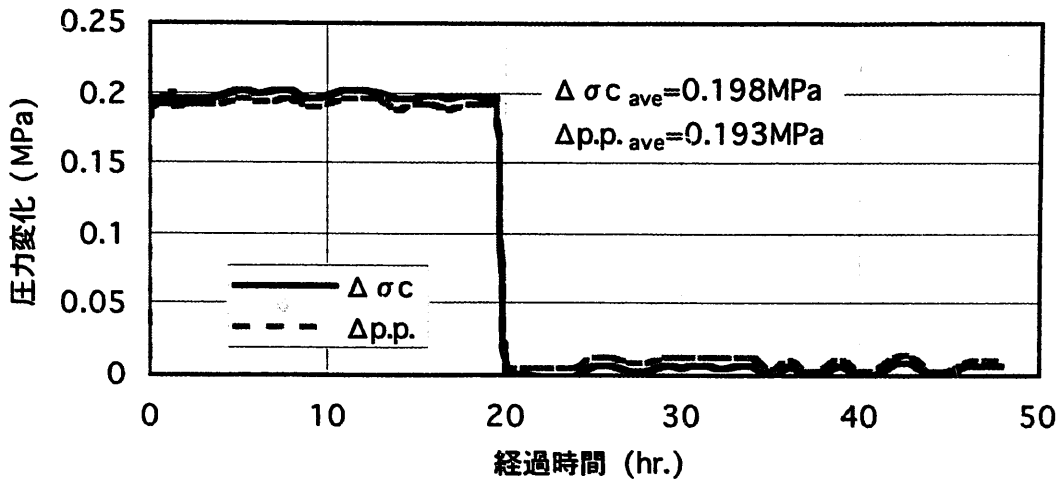


図 5-5 B 値計測結果 (CU2-0)

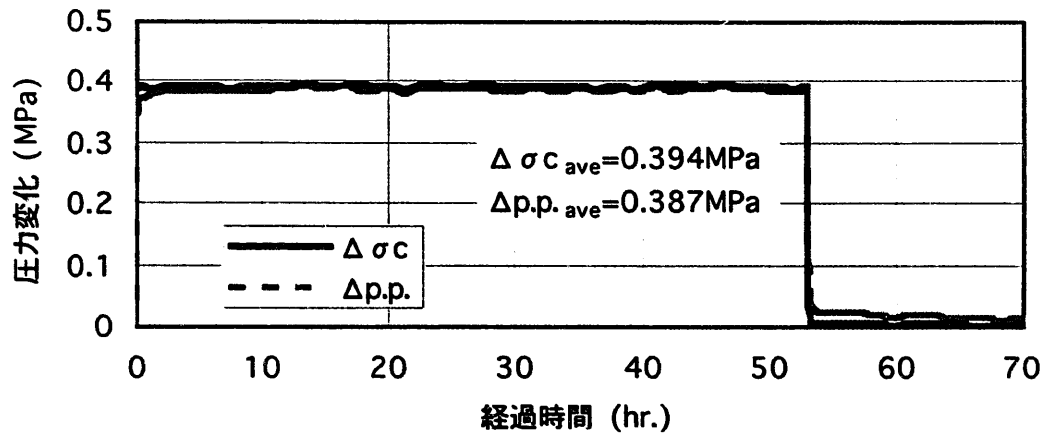


図 5-6 B 値計測結果 (CU2-1)

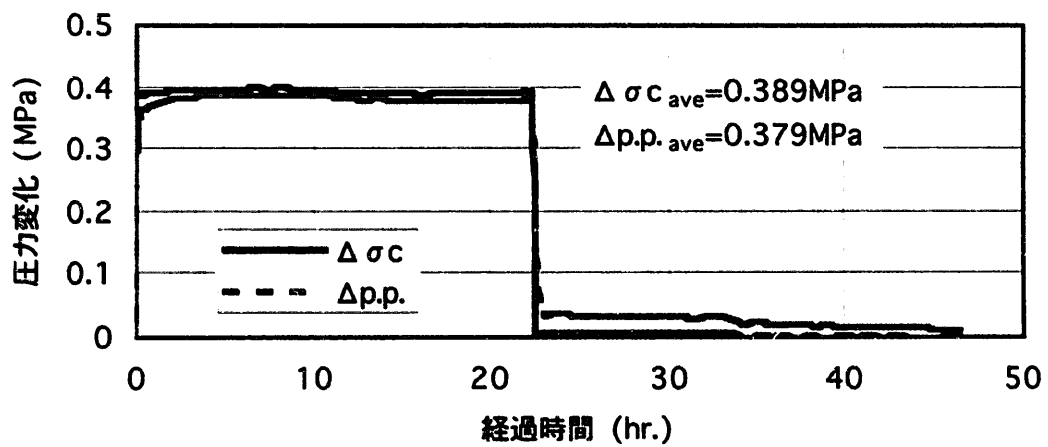


図 5-7 B 値計測結果 (CU2-2)

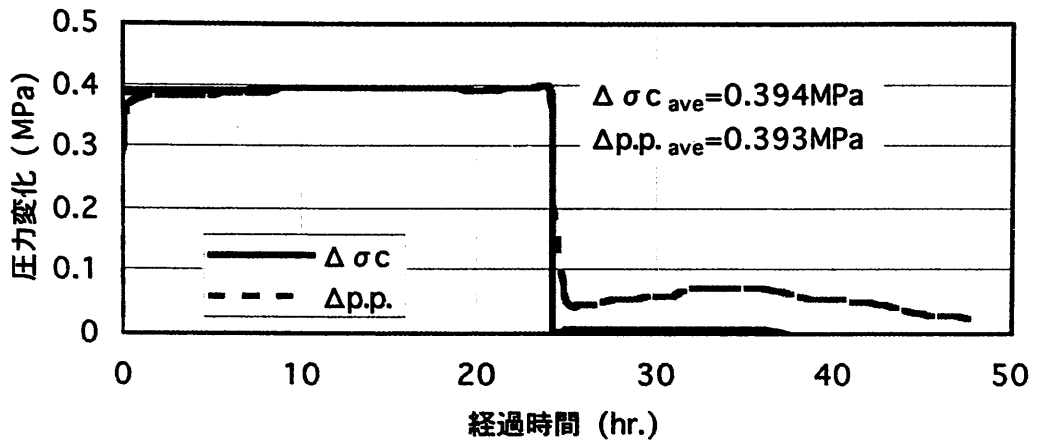


図 5-8 B 値計測結果 (CU2-3)

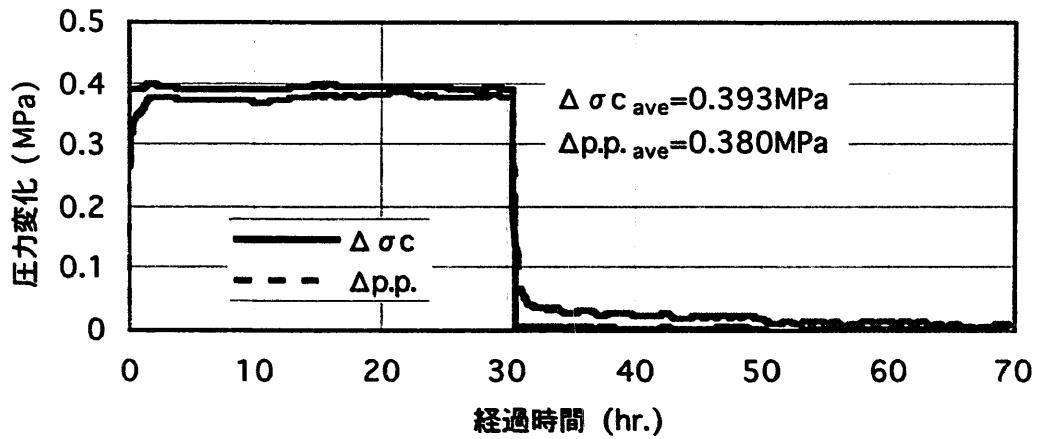


図 5-9 B 値計測結果 (CU2-4)

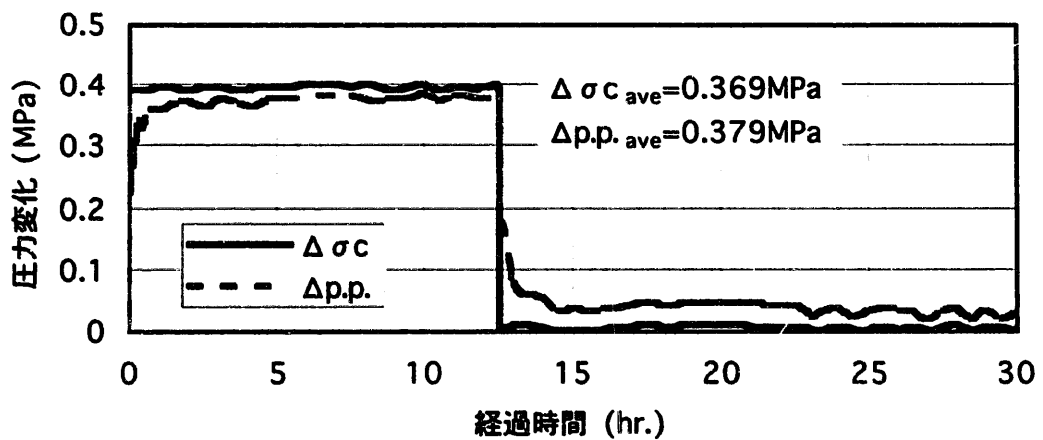


図 5-10 B 値計測結果 (CU2-5)

表 5-4 各供試体の B 値, 飽和度

	CU2-0	CU2-1	CU2-2	CU2-3	CU2-4	CU2-5
$\Delta \sigma_c$ (MPa)	0.198	0.394	0.389	0.394	0.393	0.396
$\Delta p.p.$ (MPa)	0.193	0.387	0.379	0.393	0.380	0.379
B 値	0.97	0.98	0.97	1.00	0.97	0.96
飽和度 S_r (%)	99.2	99.7	99.6	100.0	99.7	99.6

(2) 飽和度の計算

上記で得られた B 値より飽和度を計算する。B 値計測時において、間隙水圧測定経路の変形量、メンブレンペネトレーション、ベントナイトの体積クリープ変形、測定経路からの水漏れ等が非常に小さく無視できるとした場合、B 値と飽和度 S_r は以下の関係となる。

$$B = \frac{1}{1 + \frac{n \cdot \left\{ (p.p. + 0.098) \cdot S_r \cdot \frac{K_s}{K_w} + (1 - S_r) \cdot K_s \right\}}{(p.p. + 0.098)}} \quad (5-4)$$

- n : 間隙率
 $p.p.$: 間隙水圧
 S_r : 飽和度
 K_s : ベントナイトの構造の体積圧縮係数
 K_w : 水の体積圧縮係数

ここで、 K_w が K_s に比べ非常に大きいとし、 $K_s/K_w=0$ とすると、(5-4)式は次式となる。

$$B = \frac{1}{1 + \frac{n \cdot (1 - S_r) \cdot K_s}{(p.p. + 0.098)}} \quad (5-5)$$

上式を S_r について解くと次式となる。

$$S_r = 1 - \frac{(1 - B)(p.p. + 0.098)}{n \cdot B \cdot K_s} \quad (5-6)$$

上式を用いて試験での供試体の飽和度を求めた。体積圧縮係数 K_s は一次元圧密試験より求めた圧縮係数 $C_c=0.27$ を用い、また、各試験での初期平均有効応力 p_o' を用いて次式により計算した。

$$K_s = \frac{2.3(1+e)}{C_c} p_0 \quad (5-7)$$

各試験での圧密終了時における、飽和度を表 5-4に示す。各供試体の飽和度は 99.2%～100%となっており、ほぼ完全な飽和状態と言える。

5.2.4 せん断試験結果

(1) 圧密後の間隙水圧の変化

通常の粘土材料の圧密非排水三軸せん断試験において、3t 法により圧密終了を確認しても、2 次圧密の影響により排水バルブを閉めた後に間隙水圧が若干上昇することが知られている¹⁴⁾。本試験では、この2 次圧密の影響が非排水せん断時に発生しないように、B 値計測後、約 1 日間排水バルブを閉めた状態で供試体を放置し、あらかじめ間隙水圧を変化させた。そして、間隙水圧がある程度一定となった状態でせん断試験を行った。このためせん断時の初期平均有効応力 p_0' は圧密応力より若干変化した。せん断開始時の各供試体の初期平均有効応力 p_0' を表 5-5に示す。

表 5-5 せん断時の初期平均有効応力

	CU2-0	CU2-1	CU2-2	CU2-3	CU2-4	CU2-5
圧密応力(MPa)	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94
初期平均有効応力(MPa)	0.49	0.97	1.47	1.93	2.45	2.89

(2) 軸力の載荷およびピストン摩擦力の補正

B 値測定後、非排水及び側圧一定条件下で、供試体を軸ひずみ制御でせん断した。せん断中、軸方向変位速度は一定とし、各試験とも変位速度を 0.01mm min^{-1} (軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a \doteq 0.01\% \text{min}^{-1}$) として試験を行った。そして、軸ひずみ $\epsilon_a = 15\%$ の時点で試験を終了した。

また、せん断過程において載荷ピストンの軸摩擦の影響が無視しえないことから、事前に軸摩擦力の計測をし、データの整理にあたって修正を加えた。実際は、軸摩擦力はピストンが変位するとともに徐々に増加し、ある力で平衡すると予想されるが、載荷初期の軸摩擦力の漸増挙動を試験結果から取り除くことは不可能であるので、事前に種々の拘束圧下での平衡する軸摩擦力を計測、評価し、同じ拘束圧下で実施した試験結果における軸荷重の出力値から、その軸摩擦力を初期状態から一律差し引いた。すなわち、載荷開始時は軸差応力が負となっていると仮定している。

(3) 軸差応力と軸ひずみの関係

せん断中の軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a の関係を図 5-11に示す。なお、軸差応力 q は軸ひずみ ϵ_a から半径方向ひずみ ϵ_r 、供試体半径 ϕ 、断面積を計算し、軸荷重と断面積より算出している。

図より q と ϵ_a の関係は非線形関係となっており、各試験とも ϵ_a が 5% に達したあたりで

q が最大となり、その後はほぼ一定もしくは若干低下している。 q を平均有効応力 p' で正規化 (応力比) した図を図 5-12 に示す。図より、CU2-0 以外の正規圧密状態の供試体の正規化軸差応力 q/p' と ϵ_a の関係は、ほぼひとつの曲線で表現できることが分かる。過圧密と正規圧密の中間的な状態である CU2-0 は、正規圧密のそれより若干大きくなった。

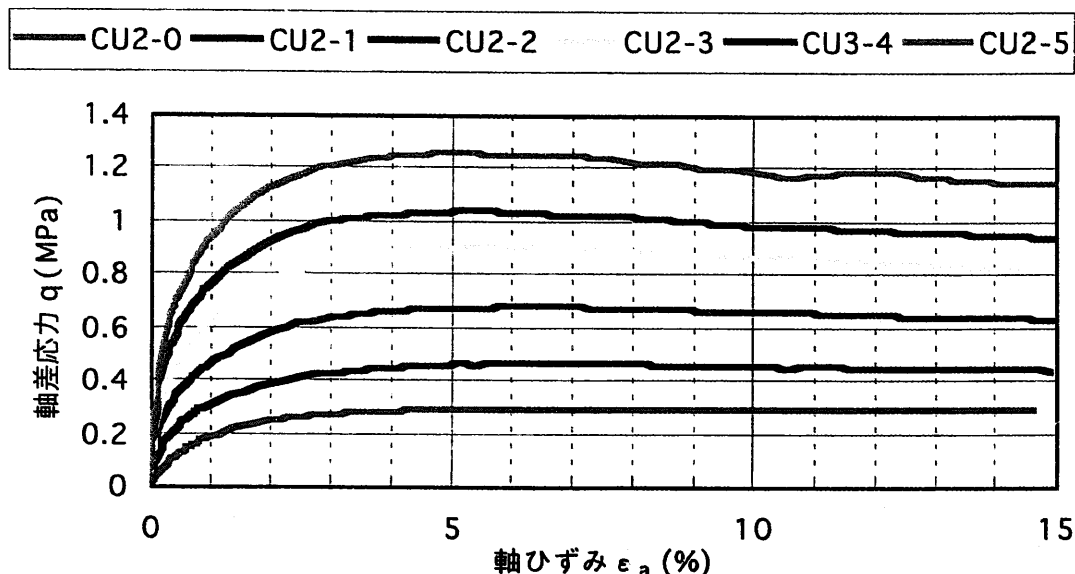


図 5-11 軸差応力と軸ひずみの関係

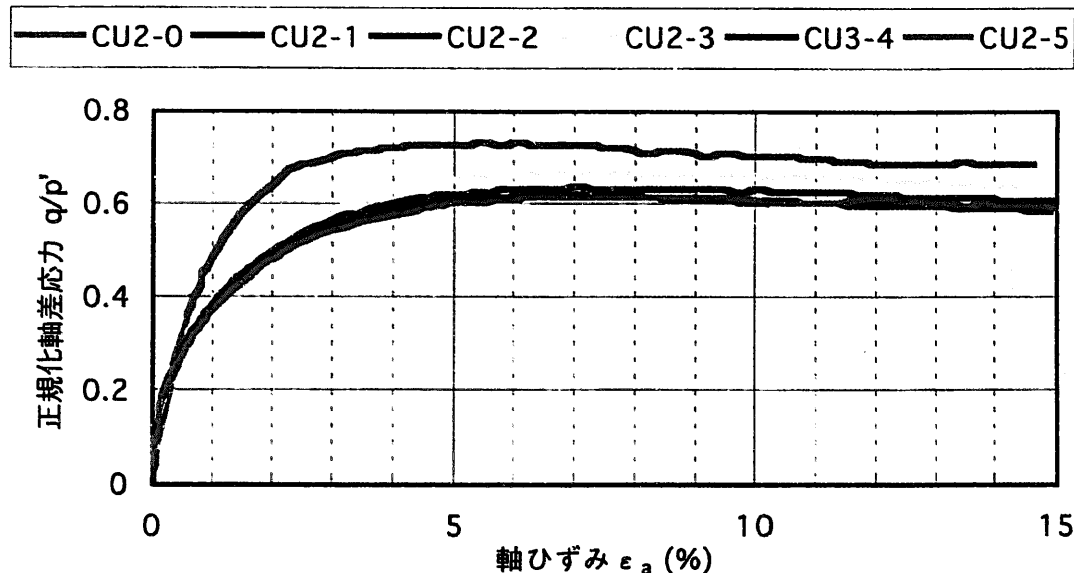


図 5-12 正規化軸差応力と軸ひずみの関係

(4) 過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

せん断中の過剰間隙水圧 Δu と軸ひずみ ϵ_a の関係を図 5-13 に示す。ここでいう過剰間隙水圧 Δu は、载荷により発生する間隙水圧増分 Δu_{all} から試験材料を弾性体とした場合の軸差応力による間隙水圧発生分 Δu_E を差し引いた値である。つまり、

$$\Delta u = \Delta u_{all} - \Delta u_E = \Delta u_{all} - q/3 \quad (5-8)$$

せん断初期より ϵ_a が増加するのに伴い、 Δu が上昇していき、CU2-1 では $\epsilon_a \doteq 5\%$ あたりでほぼ一定となっているが、CU2-2～5 ではせん断中全般にわたって Δu は上昇していることがわかる。これらの供試体は正規圧密状態であり、このような正規圧密状態にある供試体の非排水せん断時における Δu の上昇は、せん断に伴う負のダイランシーが原因と考えられる。また、過圧密と正規圧密の中間的な状態である CU2-0 については Δu が若干上昇した後、 $\epsilon_a \doteq 2\%$ 以降漸減している。

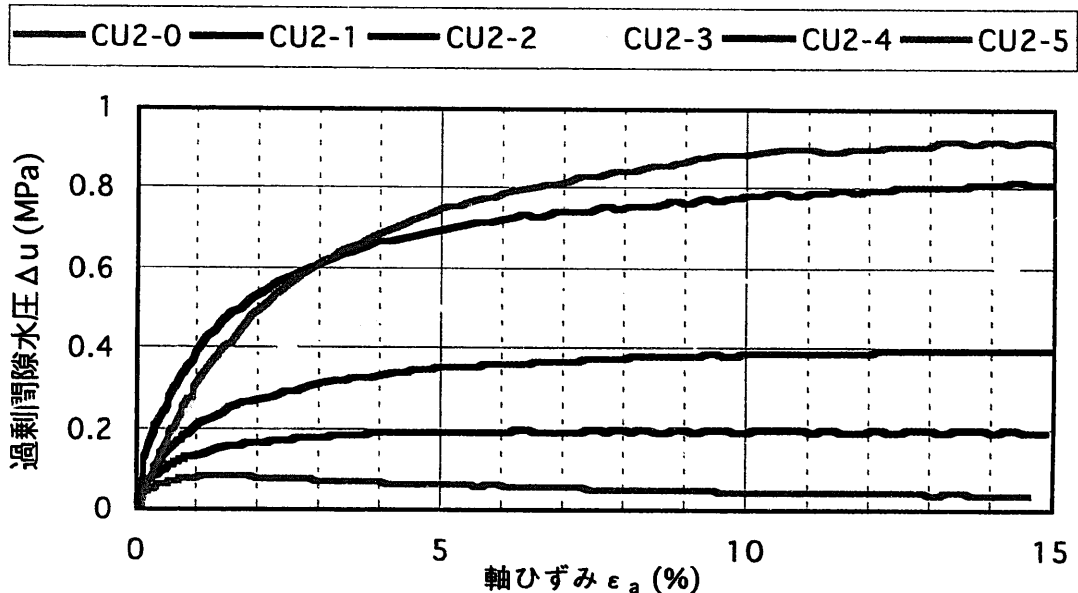


図 5-13 過剰間隙水圧

(5) 有効応力経路

せん断過程における有効応力経路を図 5-14 に示す。図からわかるように、CU2-1～2-5 では、 Δu が上昇し、平均有効応力 p' が減少していることがわかる。ただし、過圧密状態に近い CU2-0 に関しては、他と若干挙動が異なっている。

本結果より、限界状態パラメータ M は 0.63 と設定できる。また、粘着力を 0 とした場合の内部摩擦角を求めると 16.6° となる。

また、図 5-15 に正規化応力経路を示す。図より CU2-0 を除き、正規圧密領域にある応力経路はほぼ相似形であり、一般の粘土や、ベントナイト単体で実施された実験結果⁴⁾と同様の傾向が見られた。

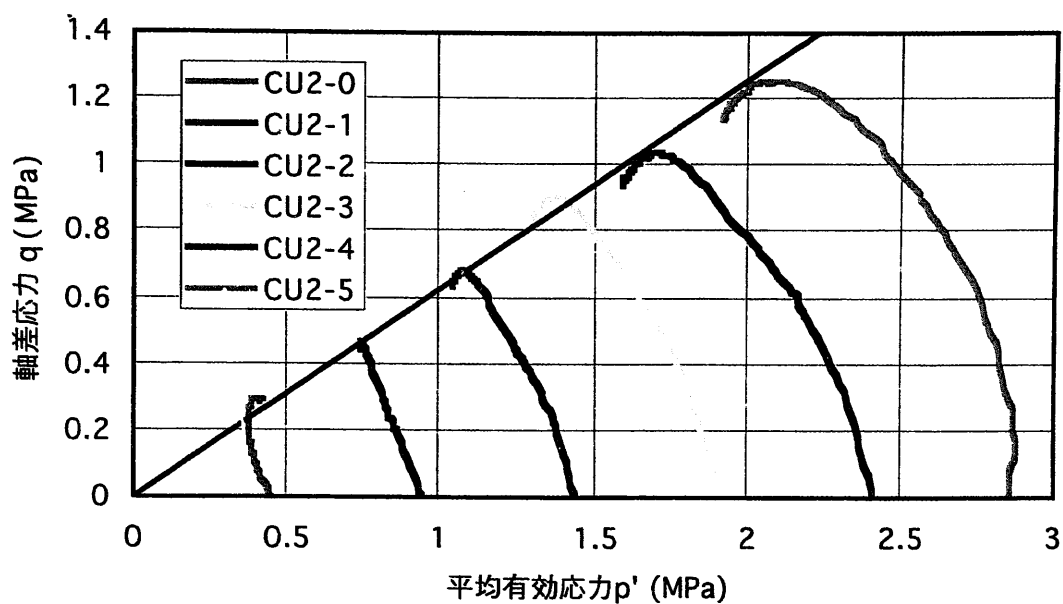


図 5-14 有効応力経路

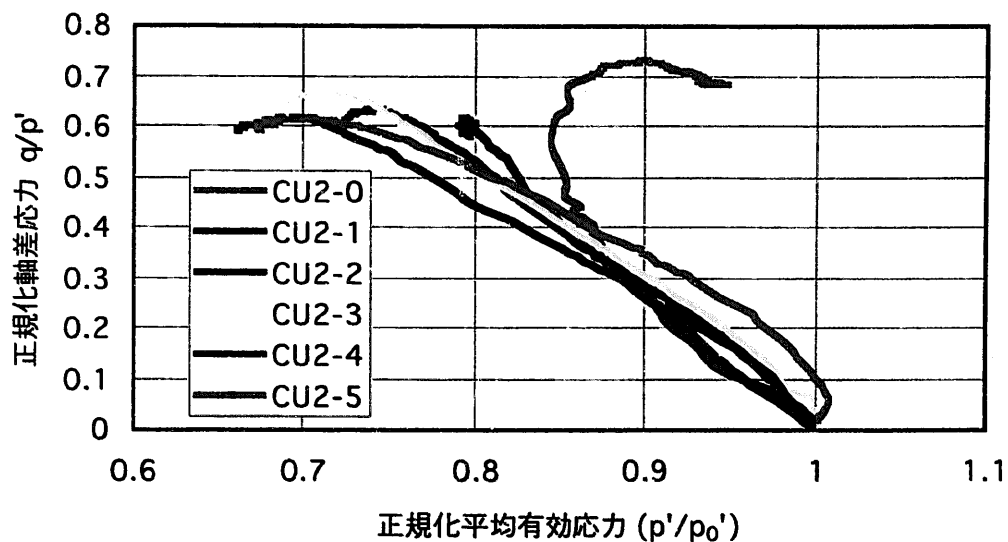


図 5-15 正規化応力経路

(6) 供試体の破壊

せん断終了後の各供試体には肉眼で識別できるような明確な破壊面は認められず，樽状の変形をしていた。

6. 圧密非排水三軸圧縮試験（粒状ベントナイト OT-9607）

6.1 試験手法

6.1.1 試験条件

試験は、乾燥密度 $\rho_d=1.65 \text{ Mg m}^{-3}$ ¹⁵⁾の粒状ベントナイト OT-9607¹⁶⁾について実施した。含水比を 15%程度に調整した後、内径 5cm, 高さ 10cm のモールドに入れ、所定の乾燥密度付近になるように突き固めた。そして、モールドから供試体を取り出し、飽和用のセルに入れ、水圧を加えることにより飽和させた。

背圧は 0.636MPa, 有効拘束圧は 0.9, 1.4, 1.9, 2.9MPa の 4 ケース, 載荷速度は 0.01 mm min^{-1} (ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a \doteq 0.01\% \text{ min}^{-1}$) で軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ に達するまで載荷した。試験方法, 手順などは基本的に地盤工学会基準⁷⁾ JGS T 523 に準拠している。試験条件を以下にまとめる。

- 供試体仕様

材 料	: 粒状ベントナイト OT-9607
寸 法	: 直径 $\phi=50\text{mm}$, 高さ $h=100\text{mm}$
初期乾燥密度	: 1.65 Mg m^{-3}
初期含水比	: 15% (圧縮成型時)

- 試験条件

圧密条件 : 表 6-1 参照

せん断方法 : 軸変位速度制御 (軸変位速度 $=0.01 \text{ mm min}^{-1}$, $\dot{\epsilon}_a \doteq 0.01\% \text{ min}^{-1}$ に相当)

表 6-1 圧密条件

試験番号	CU-1	CU-2	CU-3	CU-4
有効拘束圧 (圧密応力)	0.9MPa	1.4MPa	1.9MPa	2.9MPa

6.1.2 試験手順

試験の概略手順を以下に示す。

- 1) 所定の含水比の試料を所定の供試体寸法および密度となるよう圧縮成型する。
- 2) 圧縮成型した供試体を飽和セルに入れ、数ヶ月かけて給水し、供試体を飽和させる。
- 3) 供試体を三軸セルにセットする。供試体上下端面には、ろ紙を敷き、側面には短冊状のろ紙を巻き、ゴムスリーブを被せ上下端をシールする。
- 4) 三軸セルを組み立て、セル内を満水にする。
- 5) 二重負圧により供試体を飽和させる。
- 6) 供試体内に背圧 (0.636MPa) を負荷し、これに合わせて側圧も増加させる。
- 7) 所定の圧密応力で数週間圧密を行ない、圧密終了を 3t 法により確認する。

- 8) 排水バルブを閉じ、非排水状態で拘束圧を下げ、間隙水圧を測定する。
- 9) B値を測定する。
- 10) 拘束圧を圧密時の圧力まで戻した後、0.01%/min の速度でせん断を開始する。
- 11) 軸ひずみが15%を超えた時点でせん断試験を終了する。
- 12) 供試体を取り出し、写真撮影後、供試体を乾燥させ乾燥重量を測定する。

注) 二重負圧法は真空圧を利用し、供試体間隙および排水経路をいったん真空状態にし、真空を解除すると同時に、空隙を水で置き換える方法である。試験手順は、

- (1) 供試体上下部の排水経路から水タンクを介し、-0.04MPa の負圧を与える。
- (2) 0.04MPa の差圧を保ちながら、供試体内を-0.1MPa、セル圧を-0.06MPa に徐々に下げ、24時間放置する。
- (3) 水タンク下部より泡が出なくなるのを確認し、負圧を徐々に解除し、供試体内を-0.04MPa、セル圧を0.0MPaに戻す。
- (4) セル内の水を非排水にし、供試体内を0.0MPaにし、24時間放置する。

6.2 試験結果

表 6-2に試験結果一覧を示す。供試体の湿潤密度は $\rho_t = 2.03 \sim 2.05 \text{g/cm}^3$ 、乾燥密度は $\rho_d = 1.63 \sim 1.66 \text{g/cm}^3$ で、目標の $\rho_d = 1.65 \text{g/cm}^3$ 付近になっている。含水比は $\omega = 23 \sim 25\%$ で、飽和度は計算上100%以上となっており、供試体は飽和となっていた。

表 6-2 試験結果一覧

供試体番号	CU-1	CU-2	CU-3	CU-4
圧密応力 [MPa]	0.90	1.40	1.90	2.90
供試体高さ [cm]	10.02	10.15	10.04	10.03
供試体直径 [cm]	5.00	5.00	5.00	5.00
湿潤密度 [g/cm^3]	2.041	2.027	2.045	2.041
乾燥密度 [g/cm^3]	1.629	1.626	1.659	1.648
含水比 [%]	25.3	24.6	23.3	24.2
間隙比 [-]	0.657	0.661	0.627	0.638
飽和度 [%]	103.9	100.5	100.3	102.4
最大軸差応力 [MPa]	0.786	0.962	1.223	1.668
軸ひずみ [%]	10.181	15.082	14.237	14.980
間隙水圧 [MPa]	-0.047	0.274	0.402	0.602

間隙比、飽和度は土粒子の密度を $\rho_s = 2.70 \text{g/cm}^3$ として算出した。

また、表 6-3には間隙水圧とB値の変化を示す。いずれの供試体においても、せん断試験前に非排水状態でB値を測定した結果、1日後には $B=95\%$ に達した。

表 6-3 間隙水圧とB値の変化

時間 [min]	増分拘束圧 [MPa]	間隙水圧変化量 [MPa]				B 値			
		CU-1	CU-2	CU-3	CU-4	CU-1	CU-2	CU-3	CU-4
0.1	-0.29	-0.21	-0.22	-0.20	-0.19	0.72	0.75	0.69	0.65
0.15	-0.29	-0.25	-0.23	-0.23	-0.23	0.83	0.79	0.79	0.78
0.25	-0.29	-0.26	-0.25	-0.24	-0.24	0.88	0.83	0.82	0.82
0.5	-0.29	-0.27	-0.26	-0.25	-0.25	0.92	0.87	0.85	0.85
1	-0.29	-0.28	-0.26	-0.26	-0.25	0.94	0.88	0.88	0.85
2	-0.29	-0.28	-0.27	-0.27	-0.26	0.94	0.9	0.91	0.88
4	-0.29	-0.28	-0.27	-0.27	-0.27	0.95	0.92	0.92	0.92
8	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.94	0.94	0.95
15	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.96	0.95	0.95	0.95
30	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.96	0.95	0.95	0.95
60	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.96	0.96	0.95	0.95
120	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.96	0.96	0.95	0.95
240	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.95	0.95	0.95
480	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.95	0.95	0.95
900	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.95	0.95	0.95
1440	-0.29	-0.28	-0.28	-0.28	-0.28	0.95	0.95	0.95	0.95

図 6-1, 図 6-2にはせん断応力円を示す。図 6-1は最大軸差応力時におけるせん断応力円, 図 6-2は応力比最大時におけるせん断応力円である。また, それぞれ(a)は全応力, (b)は有効応力である。なお, 各値は以下のように定義されている。

軸ひずみ : $\varepsilon_1 = \Delta H / H \times 100$

軸差応力 : $q = \sigma_1 - \sigma_3$

有効拘束圧 : $\sigma_3' = \sigma_3 - u$

u : 間隙水圧

平均主応力 : $p' = (\sigma_1 + 2\sigma_3')/3$

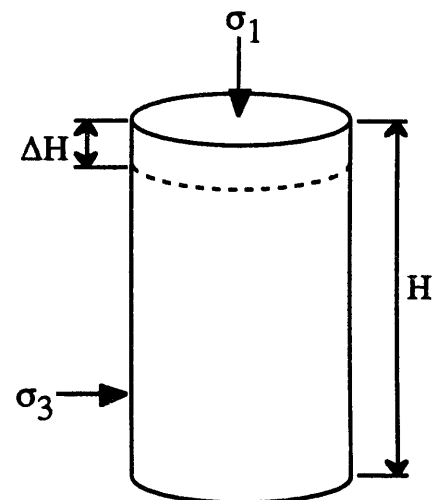
せん断応力 : $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$

間隙比 : $e = \rho_s / \rho_d - 1$

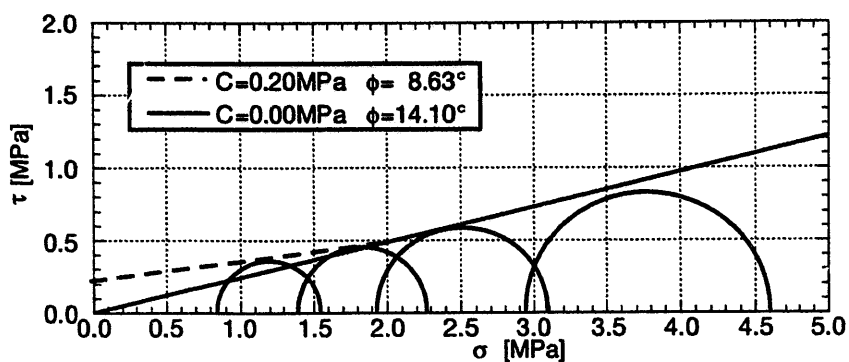
ρ_s : 土粒子の密度, ρ_d : 乾燥密度

飽和度 : $S_r = \rho_s \omega / e$

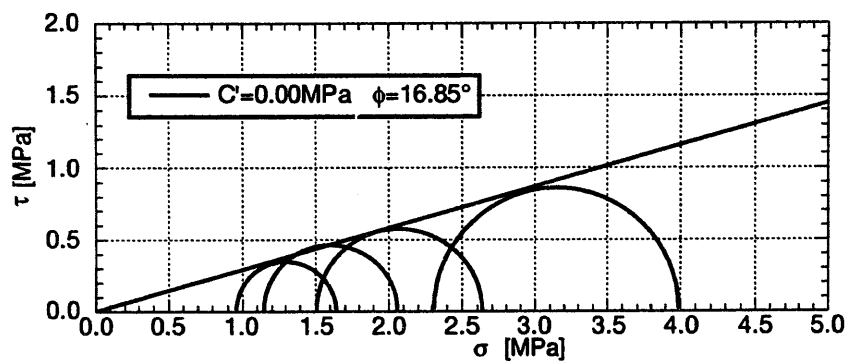
ω : 含水比



最大軸差応力時と応力比最大時に対する応力円から推定した摩擦角はほぼ同等で, 全応力に対する摩擦角は $\phi = 14.1 \sim 14.5^\circ$, 有効応力時における有効摩擦角は $\phi' = 16.9^\circ$ となっている。

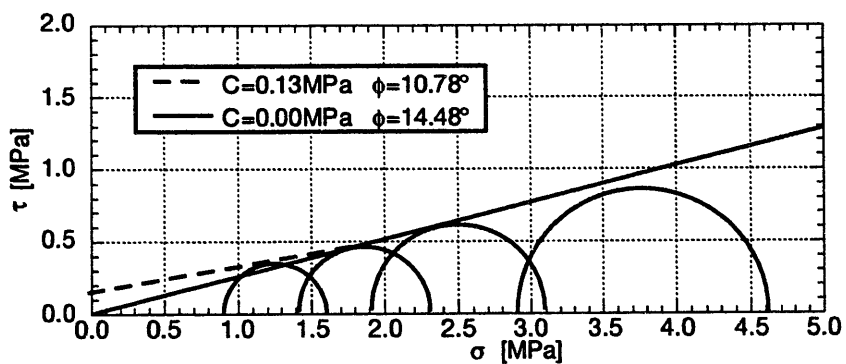


(a) 全応力

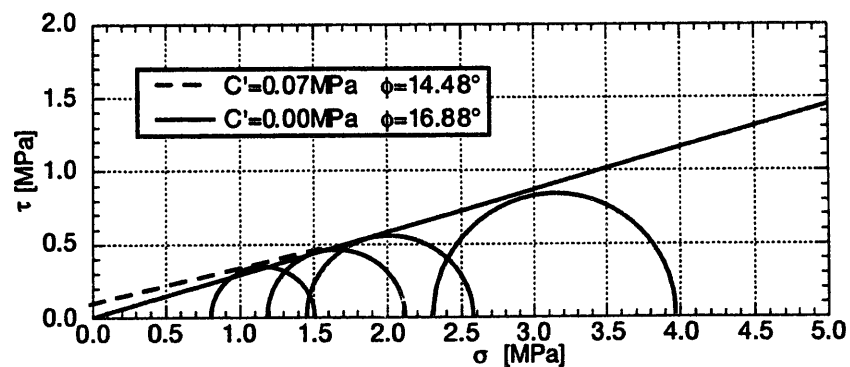


(b) 有効応力

図 6-1 最大軸差応力時におけるせん断応力円



(a) 全応力



(b) 有効応力

図 6-2 応力比最大時におけるせん断応力円

図 6-3に軸差応力と平均有効応力の関係を示す。同図に示すように、軸差応力と平均有効応力とを直線で結んでM値を求めると、 $M=0.64$ となった。また、各供試体の応力経路から推測すると、CU-1 は過圧密状態、CU-2、CU-3 は正規圧密状態、CU-4 はやや未圧密状態を示していた。図 6-4には、正規化軸差応力と軸ひずみの関係を示している。

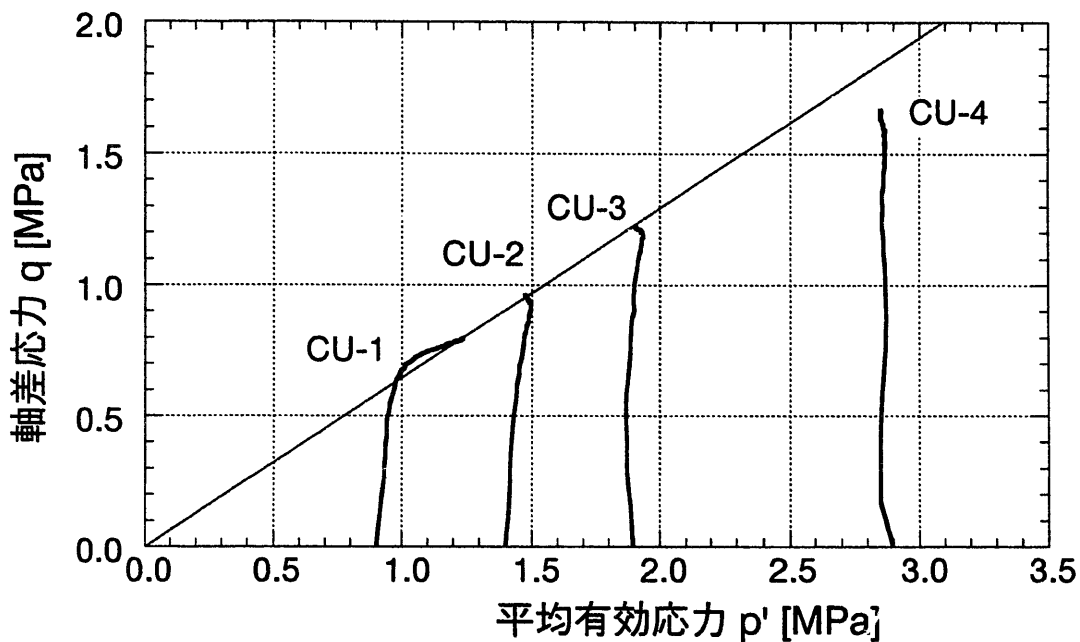


図 6-3 軸差応力と平均有効応力の関係

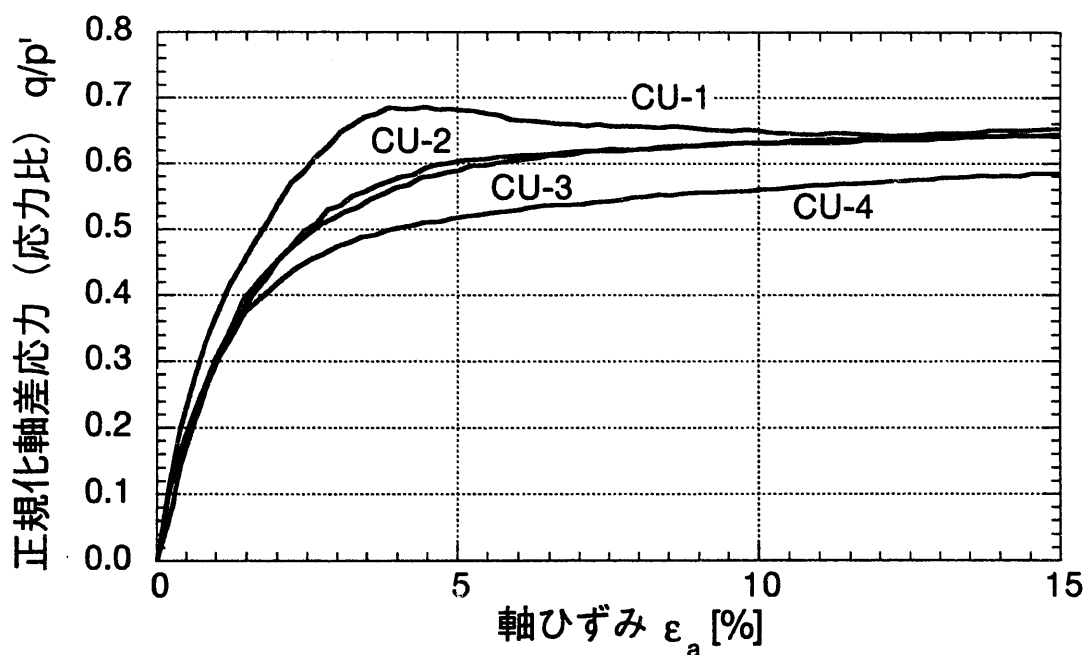


図 6-4 正規化軸差応力と軸ひずみの関係

図 6-5, 図 6-6には正規化有効拘束圧と正規化軸差応力, 軸応力比の関係をそれぞれ示す。拘束圧条件に関係なく, いずれの供試体もほぼ同じ傾向を示す。

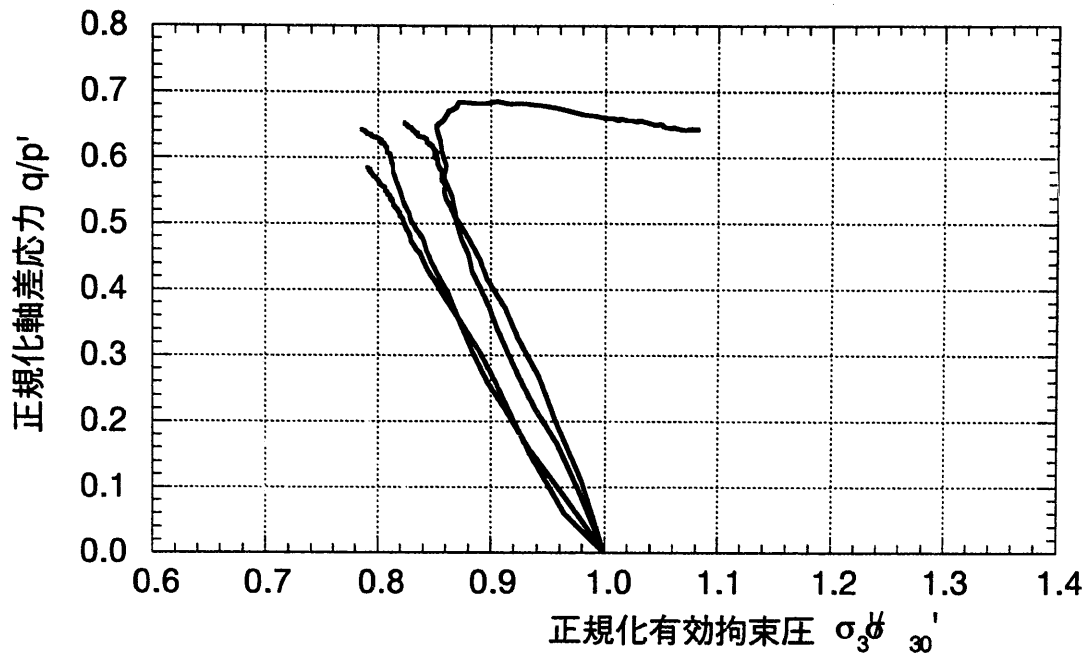


図 6-5 正規化軸差応力と正規化有効拘束圧の関係

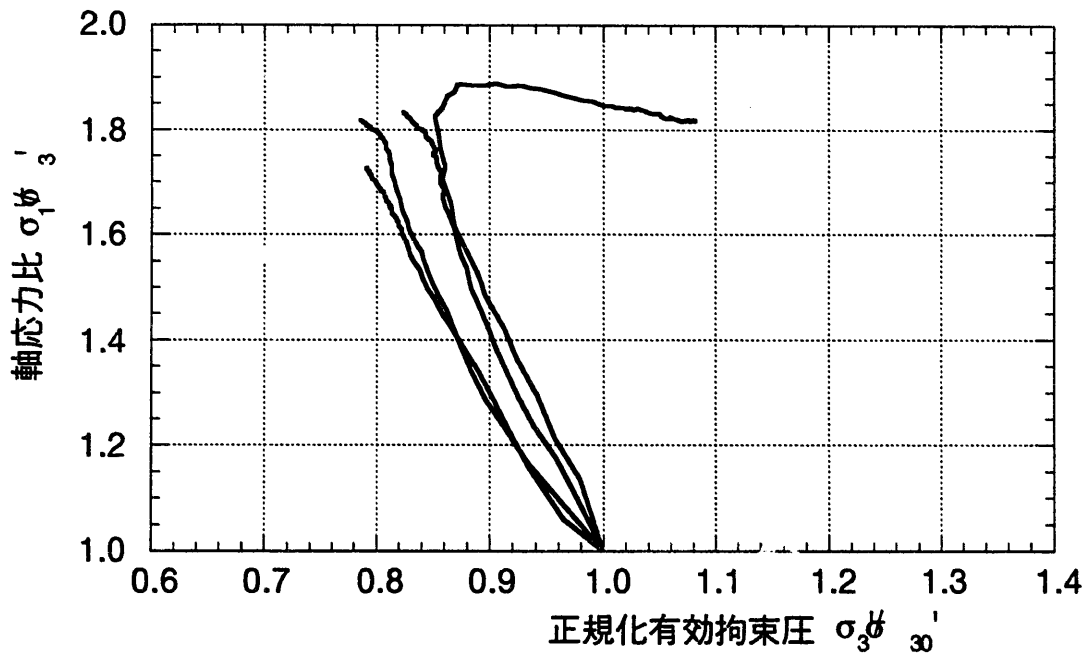


図 6-6 軸応力比と正規化有効拘束圧の関係

7. 圧密非排水三軸クリープ試験

7.1 試験手法

7.1.1 試験概要

三軸クリープ試験は軸対称応力境界条件下で、材料のせん断クリープ特性を調べる要素試験である。圧密非排水三軸クリープ試験では供試体を圧密した後、クリープ載荷を行う。せん断前の圧密段階では、三軸せん断試験同様、供試体に載荷応力 σ_a (軸応力) = σ_r (側方拘束圧) = σ_c (圧密応力) を負荷し等方圧密する。圧密後、 σ_r を一定に保ち、設定した σ_a を瞬時に与え、長期間保持することにより、供試体にせん断力 $\tau = (\sigma_a - \sigma_r) / 2$ を作用させ、供試体のせん断クリープ特性を調べるのである。今回の試験のような非排水せん断試験の場合、せん断中供試体内の体積は一定となるため体積ひずみは 0 となる。

本試験には、圧密非排水三軸せん断試験と同じ試験装置を用いた。

7.1.2 試験条件

試験は、乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg m}^{-3}$ のケイ砂混合体 (ケイ砂混合率 30wt%) について実施した。供試体は側方拘束条件で上下二方向から圧縮成型した後、体積拘束条件で給水し、飽和供試体を作成した。供試体寸法は直径 $\phi = 50\text{mm}$ 、高さ $h = 100\text{mm}$ である。

背圧は 0.49MPa、有効拘束圧は 2.94MPa、載荷応力は有効拘束圧が 2.94MPa の条件下で行われた $\bar{\text{CU}}$ 試験 (CU2-5: 5 章参照) より得られた破壊応力の 30, 50, 70% の 3 ケースを設定した。載荷期間は約 5 ヶ月である。せん断過程を除き、圧密過程までの試験方法、手順などは基本的に地盤工学会基準 ⁷⁾ JGS T 523 に準拠している。

● 供試体仕様

材 料	: ケイ砂混合ベントナイト
配合比	: ベントナイト クニゲル V1 (70wt%)
	ケイ砂 3号 (15wt%)
	5号 (15wt%)
寸 法	: 直径 $\phi = 50\text{mm}$ 、高さ $h = 100\text{mm}$
初期乾燥密度	: 1.6 Mg m^{-3} (間隙比 $e = 0.676$: 圧縮成型時)
初期含水比	: 7.3 % (圧縮成型時)

● 試験条件

温度	: 室温 25℃ 一定制御
載荷条件	: $\sigma_c = 2.94\text{MPa}$ の条件下で行われた $\bar{\text{CU}}$ 試験 (CU2-5) より得られた破壊応力 (1.25MPa) の 30% (CR2-30), 50% (CR2-50), 70% (CR2-70) の 3 ケース

7.1.3 試験手順

試験の概略手順を以下に示す。

- 1) 所定の含水比のケイ砂混合クニゲル V1 試料をオートグラフを用いて所定の供試体寸法および密度となるよう圧縮成型する。
- 2) 圧縮成型した供試体を飽和セルに入れ、2 ヶ月以上かけて給水し、供試体を飽和させる。
- 3) 飽和セルから供試体を取り出し、重量を計測し簡易的に飽和を確認する。
- 4) 飽和した供試体を三軸試験装置にセットし、排水経路を水で満たす。
- 5) 膨潤圧相当(0.49MPa)の側圧を載荷し、試験装置セット時に供試体が吸収した余分な水を排水させる。
- 6) 段階的に背圧（間隙水圧）(0.49MPa)を負荷する。これに合わせて側圧も背圧相当分増圧する。
- 7) 供試体からの水の出入りが収まったのを確認し、所定の圧密荷重を供試体に載荷し圧密を開始する。
- 8) 数週間圧密を行い、圧密終了を 3t 法により確認し排水バルブを閉じる。
- 9) 排水バルブを閉じた状態で、間隙水圧が定常状態になるまで数日間供試体をそのままにしておく。
- 10) 非排水状態で拘束圧を上昇させ B 値を測定する。
- 11) 拘束圧を圧密時の圧力まで戻した後、所定のクリープ荷重を載荷する。
- 12) 約 5 ヶ月でクリープ載荷を終了する。
- 13) 供試体破壊後セルより供試体を取り出し、破壊状況を観察する。
- 14) 恒温槽で乾燥させ、乾燥重量を測定する。

7.2 試験結果

7.2.1 圧縮成型及び飽和

粉末状のクニゲル V1 試料とケイ砂をよく攪拌し、オートグラフを用いて側方拘束条件で圧縮成型することにより供試体を作成した。この時の圧縮成型圧は約 6.5~7.5MPa であった。

圧縮成型した供試体を透水性のテフロンシートで包み、飽和セルにセットした。セルは供試体の全面から水を供給できるような仕組みとなっている。飽和セルに供試体をセットした後、セルにサクシオンポンプをつなぎ数時間セル内の空気を引き、その後セルからサクシオンポンプを外し、水圧約 0.2MPa で供試体に給水を行った。

2 ヶ月以上経過した後、セルより供試体を取り出し、三軸試験装置にセットした。飽和セル取出し時（三軸試験装置セット前）の各供試体の物性一覧を表 7-1 に示す。ただし、表中の乾燥重量は試験終了時に計測したものである。

表 7-1 供試体の物性一覧

	CR2-30	CR2-50	CR2-70
供試体重量(g)	395.61	396.85	395.61
乾燥重量(g)	314.50	314.22	313.88
高さ(mm)	100.41	100.60	100.26
直径(mm)	50.11	50.14	50.11
体積(cm ³)	197.99	198.64	197.75
乾燥密度(g/cm ³)	1.588	1.582	1.587
間隙比	0.688	0.695	0.690

注) 乾燥重量は試験終了後に計測

7.2.2 圧密

飽和セルより取り出した供試体を試験装置にセットした。供試体セット後、排水経路を水で満たし、膨潤圧相当と考えられる 0.49MPa の拘束圧を負荷し、余分な水を排出した。拘束圧負荷後、0.49MPa まで背圧を負荷した。この時、拘束圧も背圧相当分の圧力を負荷した。結局、背圧負荷終了時における拘束圧は 0.98MPa、間隙水圧（背圧）は 0.49MPa で有効拘束圧は 0.49MPa となる。

背圧負荷後、各試験条件の有効拘束圧（圧密応力）を供試体に等方圧で負荷した。圧密時における供試体体積の経時変化を図 7-1 に示す。各試験の圧密終了は、経時体積変化に対して 3t 法を適用することにより確認した。圧密に要した期間は、約 2 週間であった。各試験の圧密終了後、すなわちせん断開始時の供試体の体積、高さ、直径及び間隙比を表 7-2 に示す。

通常圧密終了時の供試体体積は、初期供試体体積（圧密前供試体体積）と圧密時の体積変化より計算するが、本試験では排水経路の飽和等の作業の過程で圧縮ベントナイト供試体が若干の水を吸収し、圧密前の供試体体積が正確に把握できなかった。そこで本試験では、せん断開始時の供試体の体積、体積ひずみ、直径、高さ、間隙比を 5 章の圧密非排水三軸試験と同様、圧密後（せん断時）の供試体の湿潤重量と乾燥重量より算出することとした。（5.2.2 項参照）

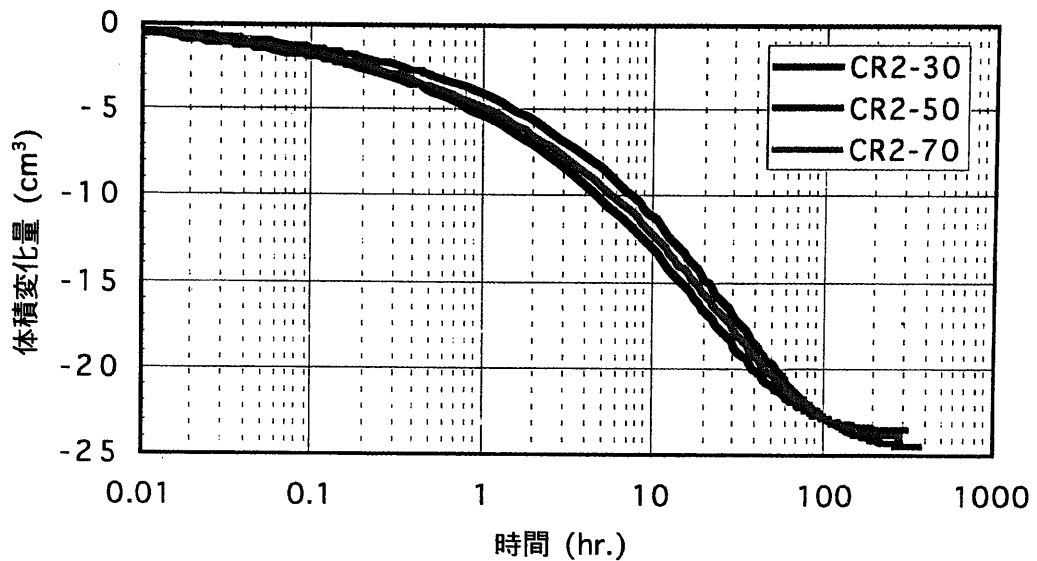


図 7-1 圧密曲線

表 7-2 せん断時（圧密後）の供試体寸法

	CR2-30	CR2-50	CR2-70
圧密応力(MPa)	2.94	2.94	2.94
体積(cm ³)	172.315	173.061	172.39
体積変化(cm ³)	25.67	25.57	25.37
体積ひずみ	0.130	0.129	0.128
高さ(mm)	95.86	96.08	95.78
直径(mm)	47.84	47.89	47.87
間隙比	0.469	0.477	0.473

注 1) 体積変化およびひずみは圧縮方向が正

注 2) せん断時体積はせん断終了後の供試体重量より算出

7.2.3 B 値の測定

(1) B 値の測定結果

3t 法により圧密終了を確認した後、排水バルブを閉じ供試体を非排水状態とした。間隙水圧の安定性を確認した後、B 値の測定を行った。B 値の測定も 5 章の圧密非排水三軸試験と同様である。

各試験での $\Delta \sigma_c$ 、 $\Delta p.p.$ の経時変化を図 7-2～図 7-4 に、 $\Delta \sigma_c$ 、 $\Delta p.p.$ 及び B 値の一覧を表 7-3 に示す。表中に示すように各供試体の B 値は 0.95 以上であり、土質試験における B 値=0.95 以上という基準⁷⁾を達成しており、この状態でせん断試験を行うこととした。

(5.2.3(1)項参照)

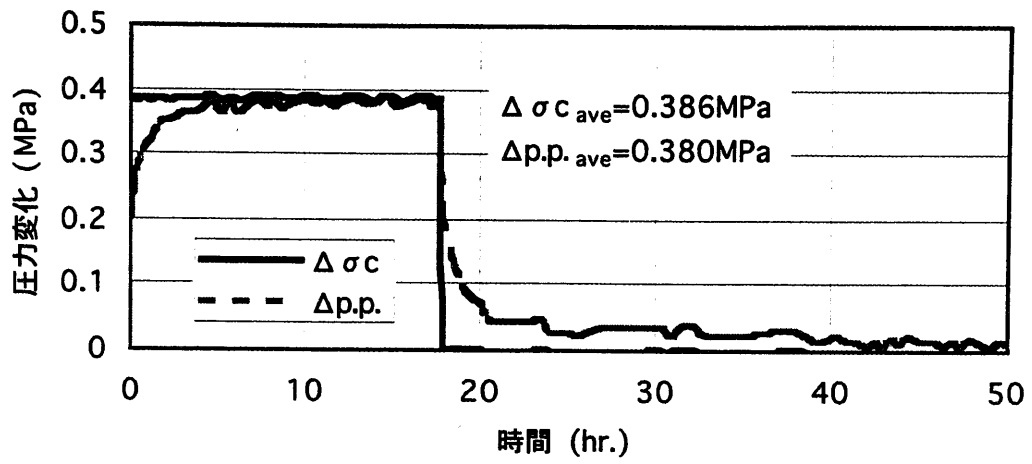


図 7-2 B 値計測結果 (CR2-30)

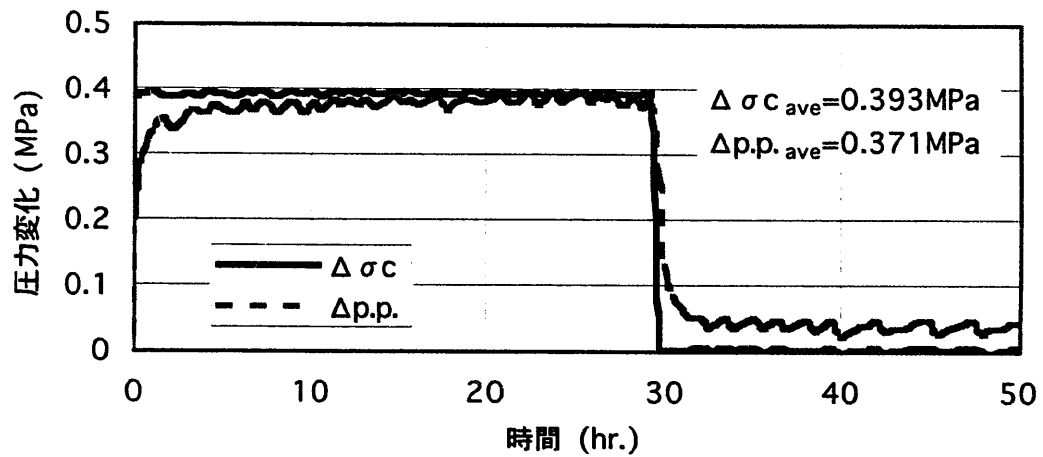


図 7-3 B 値計測結果 (CR2-50)

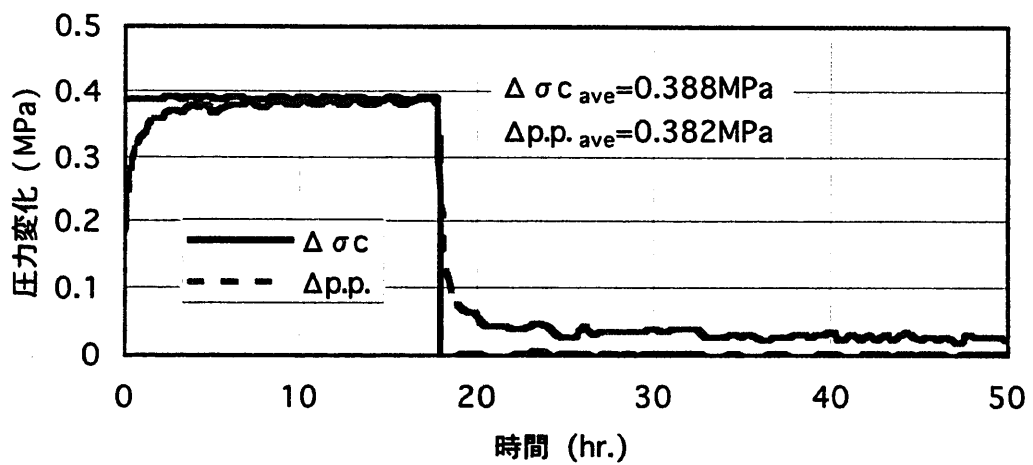


図 7-4 B 値計測結果 (CR2-70)

表 7-3 各供試体の B 値, 飽和度

	CR2-30	CR2-50	CR2-70
$\Delta \sigma_c$ (MPa)	0.386	0.393	0.388
$\Delta p.p.$ (MPa)	0.380	0.371	0.382
B 値	0.98	0.95	0.99
飽和度 S_r (%)	99.9	99.5	99.9

(2) 飽和度の計算

5章の圧密非排水三軸試験と同様の方法で、上記で得られた B 値より飽和度を計算する。

(5.2.3 (2)項参照)

各試験での圧密終了時における、飽和度 S_r を表 7-3に示す。各供試体の飽和度 S_r は 99.5% ~ 99.9% となっており、ほぼ完全な飽和状態と言える。

7.2.4 クリープ試験結果

(1) 圧密後の間隙水圧の変化

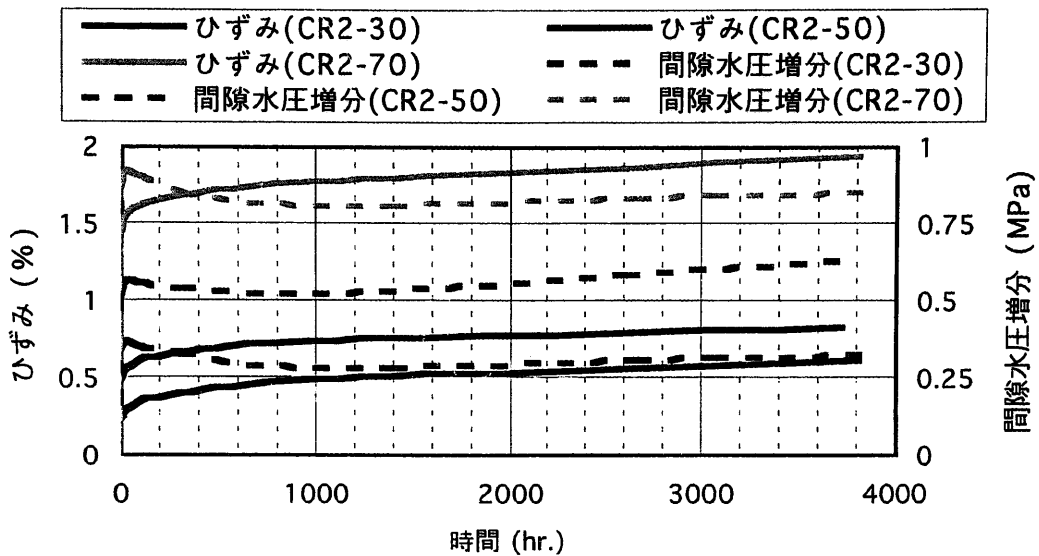
5章の圧密非排水三軸試験と同様、2次圧密の影響により排水バルブを閉めた後に間隙水圧が若干上昇するため、B 値計測後、約 1 日間排水バルブを閉めた状態で供試体を放置しあらかじめ間隙水圧を変化させた。そして、間隙水圧がある程度一定となった状態でクリープ試験を行った。せん断開始時の各供試体の初期平均有効応力 p_0' を表 7-4に示す。

表 7-4 せん断時の初期平均有効応力

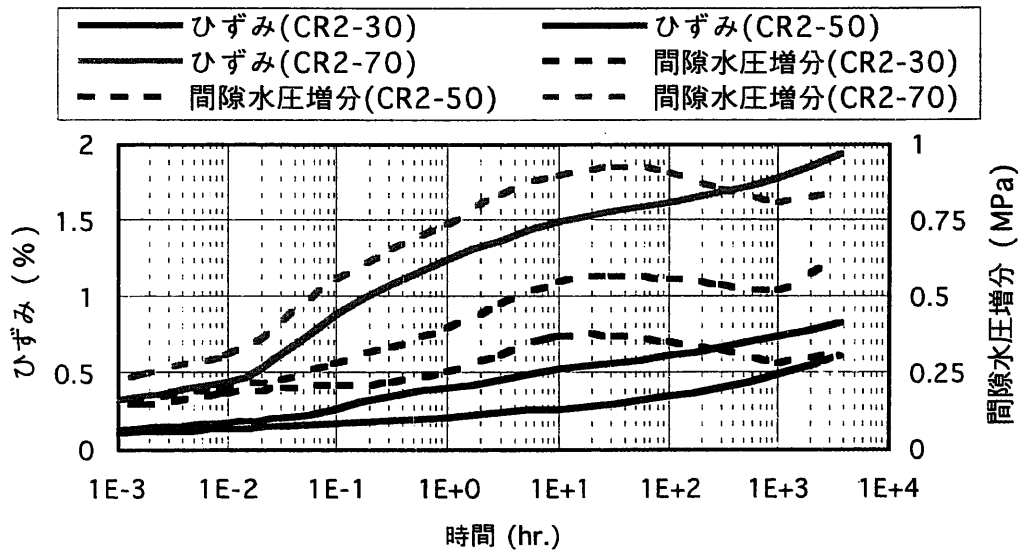
	CR2-30	CR2-50	CR2-70
圧密応力 (MPa)	2.94	2.94	2.94
初期平均有効応力 (MPa)	2.93	2.87	2.88

(2) 時間とひずみ、間隙水圧増分の関係

時間とひずみ、間隙水圧増分の関係を図 7-5に示す。図は(a)普通目盛と(b)対数目盛で表示している。5ヶ月間の载荷で、いずれの供試体も2次クリープ(定常クリープ)状態であり、軸ひずみは漸増しているが、CR2-30で0.6% CR2-50で0.8%、CR2-70で1.9%程度にしか達しなかった。また、間隙水圧増分は、ほぼ一定の変動幅内で、漸減、漸増している。しかしこれらの変動は、3供試体間で定性的に同じ挙動であること、また、5ヶ月という長期の試験であったことから、温度制御が室外の寒暖の影響を若干受けてしまったことが原因と思われ、物理的なメカニズムによるものではない。



(a) 普通目盛



(b) 対数目盛

図 7-5 時間とひずみの関係

(3) 時間とひずみ速度の関係

時間の対数とひずみ速度の対数の関係を図 7-6に示す。载荷初期においては、载荷応力
 が大きいほどひずみ速度も大きい
 が、時間が経過するにつれて一定の
 関係に収束した。つまり、破壊に
 至らないクリープ応力条件下では、
 定常クリープ状態の挙動は载荷
 応力に依存しない結果となったが、
 この挙動についてはさらに詳細に
 検討する必要がある。

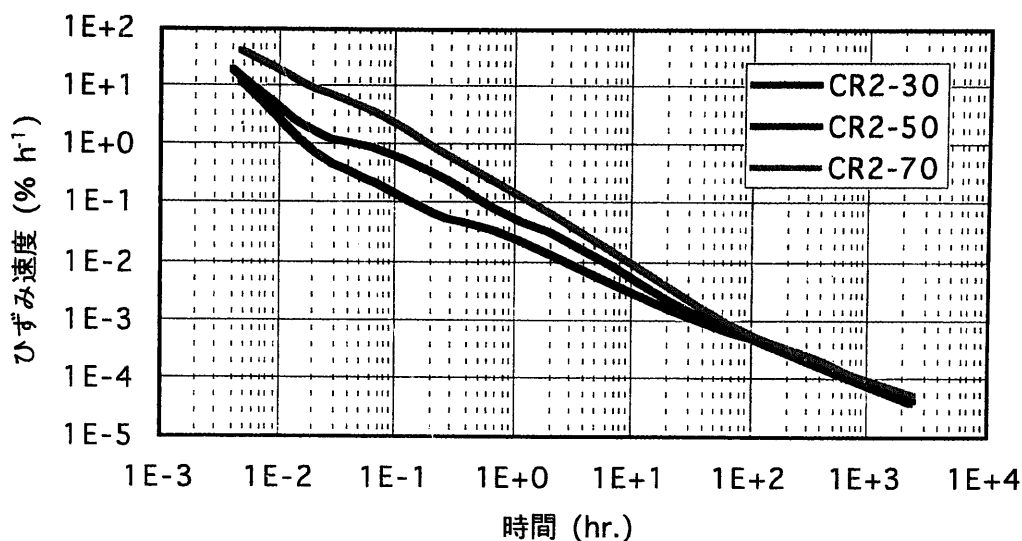


図 7-6 時間とひずみ速度の関係

(4) 有効応力経路

載荷中の有効応力経路を図 7-7に示す。図中には、同じ拘束圧下での三軸試験結果 (CU2-5)も併せて示す。各クリープ載荷による応力経路が平衡状態となる点を結んだ線は、すなわち、ひずみ速度がほぼ0で行われたせん断試験の応力経路に相当する。本試験では間隙水圧の増減が試験終了時においても一定にならなかったため明確な平衡状態を特定出来なかったが、ここでは間隙水圧増分が最大となる応力経路の端点とし、図中に●印で示す。ひずみ速度が0で行われたせん断試験の応力経路を推測、定義するには試験数が不十分であるが、初期平均有効応力および●印を結んだ点は明らかにCU2-5の応力経路より左側に倒れており、応力経路にひずみ速度依存性が認められる。

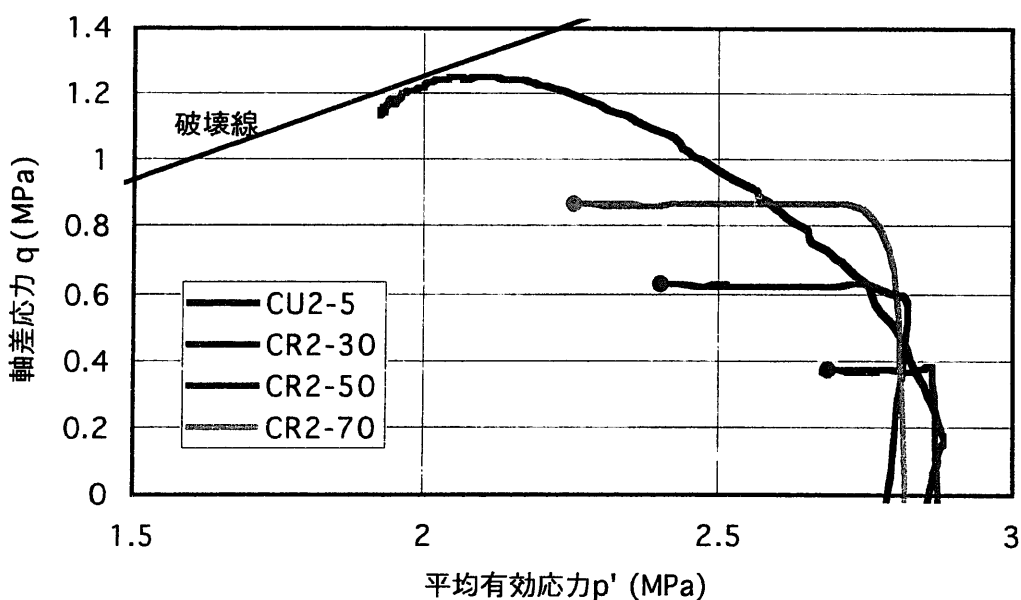


図 7-7 有効応力経路

8. まとめ

力学特性に関する各種試験を実施し、結果についてとりまとめた。以下に各試験毎の結果を要約する。

【圧裂試験】

ケイ砂混合率 0～30wt%，乾燥密度 $1.4\sim 2.0\text{Mg m}^{-3}$ で圧裂試験を行った結果、

- 1) ケイ砂混合率が小さいほど、また乾燥密度が大きいほど引張強度は大きくなり、ケイ砂混合率毎に引張強度と乾燥密度の関係は指数近似できることが分かった。
- 2) また、引張強度を有効粘土密度との関係で整理すると、1本の指数曲線で表現できることが分かった。
- 3) ブロックを垂直方向に吊り上げた場合、引張強度が最も小さい乾燥密度 1.4Mg m^{-3} 、ケイ砂混合率 30wt% の場合でも、計算上 80cm の厚さで吊り上げが可能である結果となった。

【一軸圧縮試験】

自然含水比から飽和状態の間で、乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のケイ砂混合体、乾燥密度 $1.6, 1.8\text{Mg m}^{-3}$ のベントナイト単体の一軸圧縮試験を行った結果、

- 1) 同じ乾燥密度条件ではケイ砂混合体の方が一軸圧縮強度、弾性係数とも小さくなった。
- 2) いずれのケースも、含水比が高いほど一軸圧縮強度、弾性係数とも小さくなった。
- 3) 含水比と一軸圧縮強度の関係は2次曲線で、含水比と弾性係数の関係は直線で近似できることが分かった。
- 4) 本結果を、同じような仕様で行った既報データと比較しても、定量的に妥当であった。

【一次元圧密試験】

乾燥密度 1.6Mg m^{-3} のケイ砂混合体の一次元圧密試験を行った結果、

- 1) 載荷、除荷、再載荷の全過程において、圧密沈下量と時間の対数の関係 ($\Delta d - \log t$ 関係) は、一般の粘土の圧密挙動と同様の傾向を示した。1次圧密部分と考えられる圧密前半の $\Delta d - \log t$ 関係は、Terzaghi の圧密理論によりほぼ表現できることが分かった。また、圧密後半においては2次圧密と見られる挙動が観察された。
- 2) $e - \log P$ 関係は、除荷時におけるリバウンド量は大きいものの、一般の粘土のそれと定性的に同じ傾向を示した。載荷過程の圧密降伏応力以降において、 $e - \log P$ 関係は直線関係とはならず、若干したに凸の形状となった。また、除荷過程、再載荷過程も $e - \log P$ 関係は非線形となった。
- 3) $e - \log P$ 関係において、圧密降伏応力 pc' は膨潤応力よりやや大きな値となった。このことより、不飽和状態で圧縮成型した後に、体積拘束条件下で飽和させた供試体の初期状態は過圧密状態であることが分かった。
- 4) 圧縮指数は 0.27、膨潤指数は 0.16 となった。
- 5) ベントナイト単体の結果との比較すると、同じ載荷応力下では、全過程でケイ砂混合

体の間隙比の方が小さくなるが、 e - $\log P$ 曲線の形状はほぼ同じであり、载荷初期を除き、ケイ砂混合体の e - $\log P$ 曲線はベントナイト単体の e - $\log P$ 曲線を下にシフトさせたような形となった。

- 6) 圧密結果より得られた透水係数と乾燥密度の関係は、透水試験により得られた結果と比較し妥当なものであった。また、载荷過程もしくは除荷過程などの载荷状態や、応力履歴が透水係数に与える影響は小さいことが分かった。

【圧密非排水三軸圧縮試験-ケイ砂混合ベントナイト】

乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} のケイ砂混合体の圧密非排水三軸圧縮試験を圧密応力 $0.49 \text{ MPa} \sim 2.94 \text{ MPa}$ で行った結果、

- 1) せん断前に行った圧密の結果、 e - $\log P$ 関係は一次元圧密試験結果と比較して妥当なものであった。
- 2) 各供試体の B 値は 0.96 以上であり、土質試験における B 値 $= 0.95$ 以上という基準を達成していた。
- 3) 軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a の関係は全般にわたり非線形関係となっており、各試験とも $\epsilon_a \doteq 5\%$ に達したあたりで q が最大となり、その後はほぼ一定もしくは若干低下した。 q を平均有効応力 p' で正規化すると、正規圧密状態の q/p' と ϵ_a の関係はほぼひとつの曲線で表現できることが分かった。
- 4) 過剰間隙水圧 Δu はせん断初期より、軸ひずみ ϵ_a が増加するのに伴い上昇していき、正規圧密領域の試験ではせん断中全般にわたって Δu は上昇、もしくはある時点で一定になった。正規圧密状態にある供試体の非排水せん断時における過剰間隙水圧の上昇は、せん断に伴う負のダイランシーが原因と考えられる。過圧密と正規圧密の中間の状態の供試体は $\epsilon_a \doteq 2\%$ 以降、 Δu は漸減した。
- 5) 正規圧密状態の有効応力経路は、せん断中、過剰間隙水圧が上昇するため、平均有効応力 p' が減少した。本結果より、限界状態パラメータ M は約 0.63 、内部摩擦角 $\phi = 16.6^\circ$ となった。また、正規圧密状態での応力経路の形状は、ほぼ相似形であった。

【圧密非排水三軸圧縮試験-粒状ベントナイト】

粒状ベントナイトの圧密非排水三軸圧縮試験を圧密応力 $0.9 \text{ MPa} \sim 2.9 \text{ MPa}$ で行った結果、

- 1) 各供試体の B 値は 0.95 以上であり、土質試験における B 値 $= 0.95$ 以上という基準を達成していた。
- 2) 各供試体の応力経路から、圧密応力 0.9 MPa の場合は過圧密状態、圧密応力 1.4 MPa 、 1.9 MPa の場合は正規圧密状態、また圧密応力 2.9 MPa ではやや未圧密状態であった。
- 3) 限界状態パラメータ M は約 0.64 、内部摩擦角 $\phi = 16.9^\circ$ となった。また、正規圧密状態での応力経路の形状は、ほぼ相似形であった。

【圧密非排水三軸クリープ試験】

ケイ砂混合体の圧密非排水クリープ試験を载荷応力を破壊応力の 30 、 50 、 70% で行った

結果,

- 1) 各供試体の B 値は 0.95 以上であり, 土質試験における B 値=0.95 以上という基準を達成していた。
- 2) 5ヶ月間のクリープ载荷を行ったが, いずれの供試体も 2次クリープ(定常クリープ)状態で, 破壊応力の 70% 载荷でも, 最終的に軸ひずみは 1.9% 程度であった。
- 3) 時間とひずみ速度の関係は, 载荷初期においては, 载荷応力が大きいほどひずみ速度も大きい, 時間が経過するにつれて一定の関係に収束し, 定常クリープ状態の挙動は载荷応力に依存しない結果となった。
- 4) 応力経路を同じ拘束圧下で行った三軸試験と比較すると, 明確なひずみ速度依存性が認められた。

これらの力学特性データは, 人工バリアシステムの設計や安全性評価に用いられる重要なデータであるが, ベントナイトの飽和条件下の試験(特に一次元圧密試験, 三軸圧縮試験, 三軸クリープ試験)は 1つの試験に長時間を必要とするため, データ数はまだ十分とは言えない。今後も引き続きデータの充実を図り, より精度の高い検討を行う必要がある。また, 特に重要と思われる検討課題としては以下のようなものが考えられる。

・温度依存性

地層処分環境においては, 緩衝材は地熱やガラス固化体からの発熱により, 高温環境下にさらされるが, 得られたデータはすべて室温条件下での結果である。上ら¹⁷⁾は, 圧密試験で二次圧密状態にある粘土を室温から高温に変化した場合, 温度の上昇とともに圧密が促進されて体積収縮することを実験的に示し, 東畑ら¹⁸⁾もベントナイトを用いた同様の試験により, 同様の結果を示している。これらは, 温度が高くなるほど粘土粒子間の吸着水層が減少し, 水の粘性が低下することにより粘土粒子間の結合力が低下し, 圧密が促進されるためであると考えられている¹⁹⁾。また, 東畑ら¹⁸⁾は, ベントナイト以外の粘土を用いて常温と高温で圧密排水試験を行い, 同じ拘束圧条件では加熱された供試体は圧密が促進されるため, 室温の供試体より変形係数, 強度が大きくなることを示している。このように力学特性は温度依存性を有するため, 高温条件下でのデータの取得が必要である。

・力学的異方性

緩衝材の定置方式がブロック方式にせよ現地締め固め方式にせよ, 一次的に圧縮成型された緩衝材は力学的異方性を有する可能性があり, この点も検討が必要であると思われる。

・長期粘性挙動

長期の力学挙動を検討するためには粘性挙動(クリープ挙動)の評価が重要であるが, 今回実施したクリープ試験は 5ヶ月という短期の試験であり, 先に示した温度依存性と併せて, さらに長期のクリープデータが必要である。

謝辞

一次元圧密試験の実施にあたり、長期間にわたり(株)東京ソイルリサーチの阿部秋男氏及び根本晃氏の御協力を得た。ここに感謝の意を記します。

【参考文献】

- 1) 鈴木英明, 柴田雅博, 山形順二, 広瀬郁郎, 寺門一馬 (1992) : 緩衝材の特性試験 (I), 動燃技術資料 PNC TN8410 92-057
- 2) 藤田朝雄, 五月女敦, 原 啓二 (1992) : 緩衝材の力学試験, 動燃技術資料 PNC TN8410 92-170
- 3) 並河 努, 菅野 毅 (1997) : 緩衝材の圧密特性, 動燃技術資料 PNC TN8410 97-051
- 4) 並河 努, 菅野 毅 (1997) : 緩衝材のせん断特性, 動燃技術資料 PNC TN8410 97-074
- 5) JIS M 0303 (1975) : 岩石の引張強さ試験方法
- 6) 稲田善紀 (1997) : 岩盤工学, 森北出版
- 7) 地盤工学会 (1996) : 土質試験の方法と解説
- 8) 鈴木英明, 藤田朝雄 (1999) : 緩衝材の膨潤特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-038
- 9) Terzaghi, K. (1924) : Die Theorie der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen und Ihr Eedbautechnisches Anwendungsgebiet, Proc. Int. Cong. Appl. Mech., pp.1-288
- 10) 足立紀尚, 龍岡文夫 (1981) : 新体系土木工学 18 土の力学(III)-圧密・せん断・動的解析-
- 11) Taylor, D.W. (1948) : Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York
- 12) Casagrande, A. (1932) : The structure of clay and its importance in foundation engineering, Contributions to Soil Mechanics, J.BSCE, pp.72-112
- 13) 松本一浩, 菅野 毅, 藤田朝雄, 鈴木英明 (1997) : 緩衝材の飽和透水特性, 動燃技術資料 PNC TN8410 97-296
- 14) Sekiguchi, H. (1984) : Theory of undrained creep rupture of normally consolidated clay based on elasto-viscoplasticity, Soils and Foundations, Vol.24, No.1, pp.129-147
- 15) 杉田 裕, 千々松正和, 藤田朝雄 (1998) : 粘土充填・熱負荷試験における緩衝材充填技術の検証, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 98-003
- 16) Fujita, T., Chijimatsu, M., Ishikawa, H., Suzuki, H. and Matsumoto, K. (1997) : Fundamental Properties of Bentonite OT-9607, Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Experiment at Kamaishi Mine, Technical Note 11-96-04, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation, PNC TN8410 97-071.
- 17) 上 俊二, 藤原東雄, 勝村雅子 (1996) : 二次圧密時に温度効果を受けた粘土の圧密特性, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.47-55
- 18) 東畑郁生, ピシット クンティワタナクン, 大石幹太, 竹内直樹 (1998) : 粘土の工学的性質に及ぼされる高温環境の影響, 土と基礎, Vol.46, No.10, pp.27-30
- 19) 軽部大蔵 (1991) : せん断特性 (粘性土) の展望, 土と基礎, Vol.39, No.11, pp.9-11