

緩衝材のせん断特性 1

1997年2月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1997

緩衝材のせん断特性 1

実施責任者 石川博久*、石黒勝彦*
報告者 並河 努*、菅野 毅*

要旨

人工バリアシステムを構成する緩衝材ベントナイトには、オーバーパックの自重や腐食膨張、周辺岩盤のクリープ変形などにより、長期的な外力が作用すると予測されている。緩衝材の力学的安定性を評価するためには、これら外力に対する緩衝材の力学的変形挙動を明らかにする必要がある。

本報告書は緩衝材ベントナイトの力学特性試験の一環として行なわれた、飽和した圧縮ベントナイトの圧密非排水3軸せん断試験についてまとめたものである。試験では、ベントナイト試料クニゲルV1 (100%) を乾燥密度 ρ_d が 1.6g/cm^3 になるように圧縮成型し飽和させた供試体を用いた。試験は3軸試験装置を用いて行い、飽和供試体を 0.8MPa から 3.0MPa の圧密応力で圧密後、非排水条件でせん断試験を行った。せん断方法には、応力制御方式とひずみ制御方式の2通りの方法を用いて試験を行った。

試験結果より、各圧密応力での軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a の関係が得られた。その関係は非線形関係となり、軸ひずみ ϵ_a が7%前後で軸差応力 q が最大となり供試体が破壊することがわかった。そして、応力制御せん断試験では、一定軸荷重載荷下において軸ひずみが経過時間とともに増加するクリープ現象が認められた。また、圧密応力により供試体の状態を正規圧密と過圧密に分類した場合、両者のせん断挙動は過剰間隙水圧の発生状況等の点で異なるものとなった。正規圧密状態と考えられる供試体では、せん断中負のダイランシーの影響と考えられる過剰間隙水圧の上昇が認められ、破壊時の応力比 q/p' もほぼ一定となった。そして、その応力比 q/p' より破壊線（限界状態線）の傾き $M=0.58$ が得られた。それに対し過圧密状態と考えられる供試体には、せん断中過剰間隙水圧の上昇は認められず、破壊時の応力比 q/p' は正規圧密よりも大きな値となった。また、正規圧密、過圧密に関係なく、試験後（破壊後）の各供試体には肉眼で確認できる破壊すべり面は認められなかった。

*環境技術開発部 地層処分開発室

目次

1. はじめに	1
2. 試験手法	
2.1 試験概要	2
2.2 試験装置	2
2.3 試験条件	5
2.4 試験手順	6
3. 圧縮成型及び飽和	
3.1 圧縮成型	7
3.2 飽和	7
4. 圧密及びB値測定結果	
4.1 圧密	10
4.2 B値の測定	15
5. せん断試験結果	
5.1 応力制御せん断試験結果	19
5.2 ひずみ制御せん断試験結果	42
6. 考察	
6.1 有効応力経路	47
6.2 軸差応力-軸ひずみ関係	50
6.3 除荷及び再載荷時の変形挙動	52
7. まとめ	55
謝辞	56
参考文献	56

1. はじめに

現在までのところ、高レベル廃棄物の地層処分における緩衝材として、圧縮ベントナイトが有望な候補材料と考えられている。緩衝材には止水性、核種吸着性、力学安定性などの性能が要求されており、圧縮ベントナイトについて、これらの性能を定量的に評価するために、動燃事業団ではベントナイトに関する各種の基本特性試験を行ってきた。

人工バリアシステムにおける緩衝材には、オーバーパックの自重及び腐食膨張、周辺岩盤のクリープ変形などにより、長期的な外力が作用すると予測されている。緩衝材の力学的安定性に関する性能評価には、これらの外力に対する緩衝材の変形挙動を明らかにする必要がある。緩衝材として用いるベントナイトのような粘土材料の力学的変形挙動を調べる試験には、圧密試験や3軸試験などの要素試験があり¹⁾、動燃事業団においても、これまでに緩衝材の3軸試験(UU試験)などが行われている²⁾。

本報告書は緩衝材ベントナイトの力学特性試験の一環として行われた、飽和圧縮ベントナイトの圧密非排水3軸せん断試験についてまとめたものである。圧密非排水3軸せん断試験は飽和した粘土材料などのせん断特性を調べる試験で、試験結果として各拘束圧下での非排水せん断強度、応力経路、応力-ひずみ関係等が得られる。本試験ではベントナイト試料にクニゲルV1(100%)を用いた。クニゲルV1を乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ に圧縮成型した供試体に対し、0.8MPaから3.0MPaの応力で圧密を行い、その後非排水条件下で3軸せん断試験を行った。せん断方法としてはひずみ制御方式と応力制御方式の2種類の方法を用いた。供試体作成後の圧密、せん断の試験方法、試験手順に関しては、地盤工学会の土質試験の基準に従い試験を行った¹⁾。

2. 試験手法

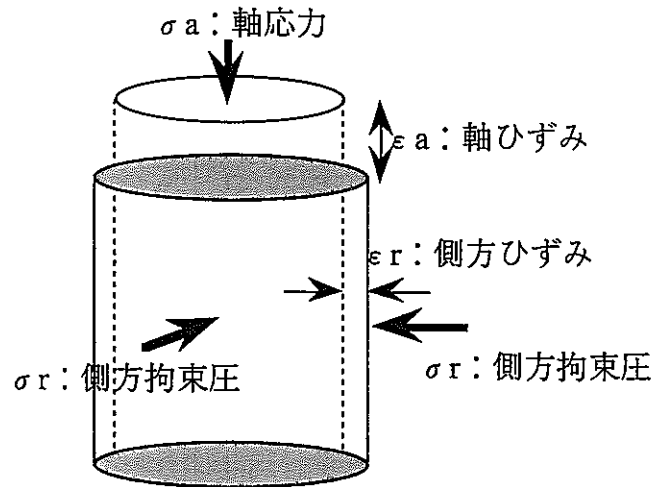
2.1 試験概要

3軸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。3軸せん断試験において、供試体に作用する応力の概念を図2-1に示す。圧密非排水3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 $\sigma_a = \sigma_r = \sigma_c$ (圧密応力) を負荷し等方圧密する。圧密後、側方応力 σ_r を一定に保ち軸方向応力 σ_a を増加させることにより、供試体にせん断力 $(\sigma_a - \sigma_r)/2$ 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。

本試験では、一定乾燥密度 $\rho_d = 1.6\text{g/cm}^3$ の飽和したベントナイト供試体を作成し、3軸試験装置を用いてせん断試験を行った。飽和ベントナイト供試体は乾燥状態で圧縮成型した後、変形を拘束した状態で給水することにより作成した。その後、飽和した供試体を3軸試験装置にセットし、圧密後非排水条件でせん断試験を行った。せん断過程では2種類の3軸試験装置を用いて、ひずみ制御と応力制御の2種類のせん断方法で試験を行った。ひずみ制御方式の試験では3軸せん断試験装置 (TRIAX) を、応力制御方式の試験では応力制御3軸クリープせん断試験装置 (クリープ試験装置) を用いた。両試験装置はせん断方法は異なるが、供試体寸法や排水経路の仕組みはほぼ同じである。本試験で用いた3軸試験装置の概要を図2-2に示す。

2.2 試験装置

3軸せん断試験装置 (TRIAX) と応力制御3軸クリープせん断試験装置 (クリープ試験装置) の外観を写真2-1、写真2-2に示す。TRIAXは油圧サーボにより側圧と軸圧を制御する仕組みになっており、クリープ試験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、ベロフラムシリンダーを用いた空気圧で軸圧をそれぞれ载荷する仕組みとなっている。また、TRIAXはピストンと供試体キャップが分離型となっており、クリープ試験装置は両者一体型となっている。



平均応力 : $p = \sigma_m = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$
 軸差応力 : $q = \sigma_a - \sigma_r$
 せん断応力 : $\tau = (\sigma_a - \sigma_r)/2$ 体積ひずみ : $v = 1 - (1 - \epsilon_a)(1 - \epsilon_r)(1 - \epsilon_r)$

図2-1 軸対称3軸せん断試験概念図

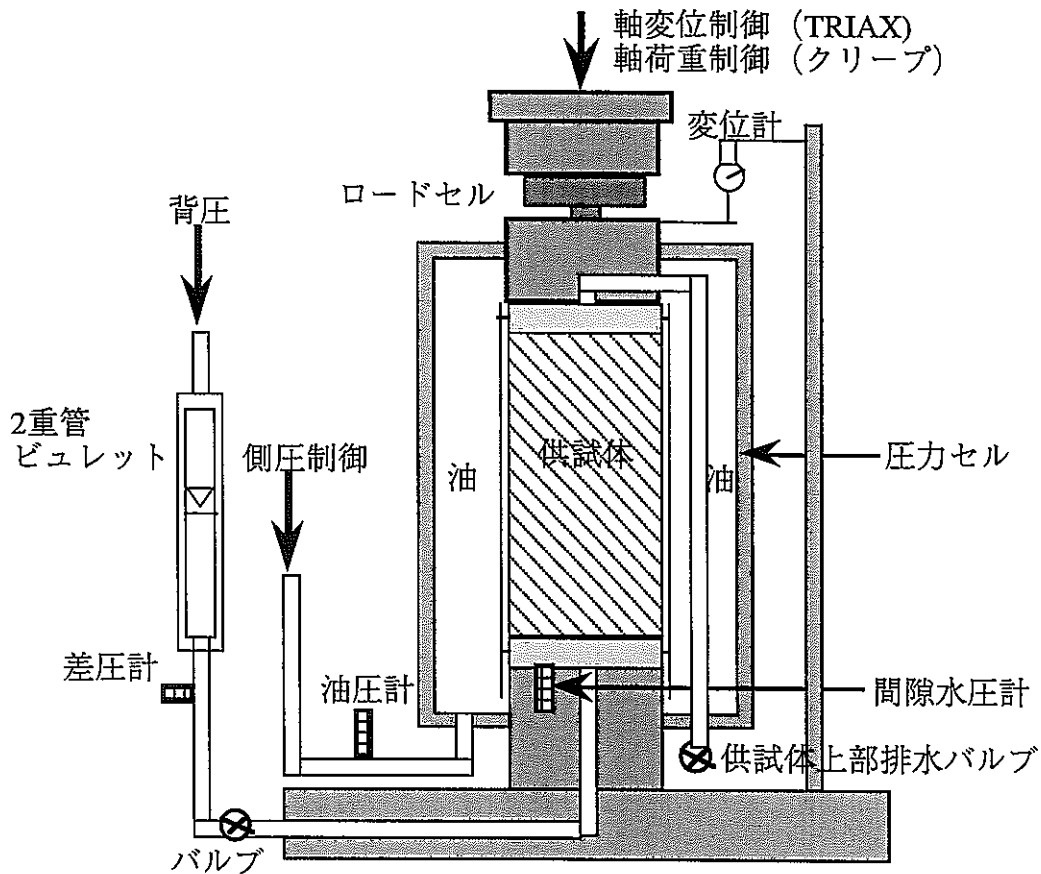


図2-2 3軸試験装置概要断面図

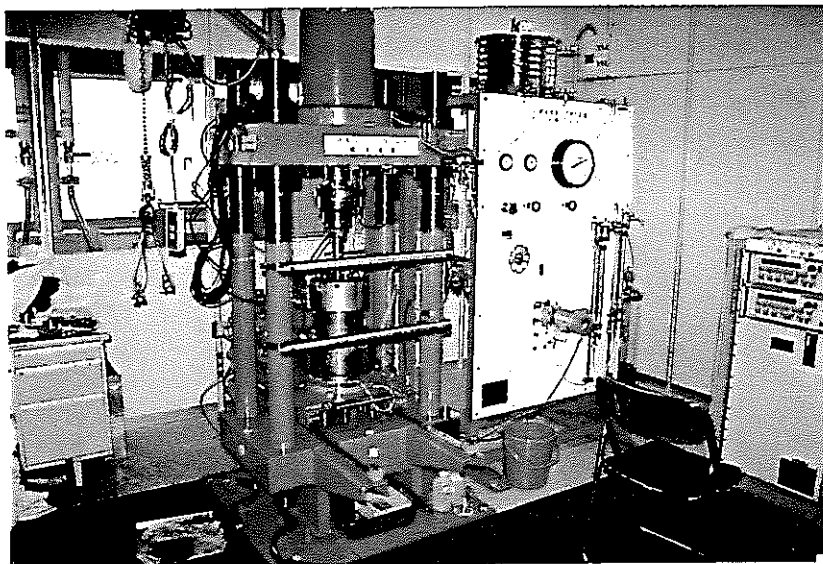


写真2-1 3軸せん断試験装置 (TRIAX)

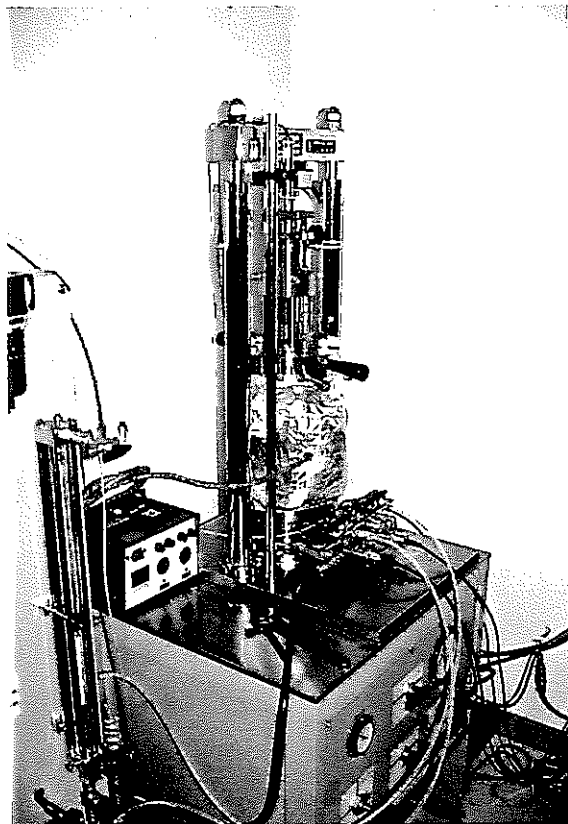


写真2-2 応力制御3軸せん断試験装置

2.3 試験条件

今回の試験条件を以下に示す。圧密前の乾燥密度 ρ_d が 1.6g/cm^3 (間隙比 $e=0.688$) の供試体について、異なる有効拘束圧 (圧密応力) で計9回のせん断試験を行った。各試験の試験番号および試験条件を表2-1-1、表2-1-2に示す。なお、試験CU0-2、CU0-3においてはせん断途中で、除荷および再載荷を行っている。また、すべての試験は室温 24°C の恒温室で実施された。

- ・ 供試体： 試料 クニゲル V1 (100%)
 - 寸法 高さ H=100mm
 - 直径 $\phi = 50\text{mm}$
 - 初期乾燥密度 $\rho_d = 1.6\text{g/cm}^3$ (間隙比 $e=0.688$)
(圧縮成型時)
 - 初期含水比 $w=9.3 - 12\%$
(圧縮成型時)

・ 計測項目と計測装置

- 側圧 : 油圧計
- 軸荷重 : ロードセル
- 間隙水圧 : 間隙水圧計
- 軸変位 : 変位計
- 排水量 : 差圧計

表2-1-1 試験条件 (応力制御試験)

試験番号	CU0-1	CU0-2	CU0-3	CU0-4
有効拘束圧 (圧密応力)	0.784MPa	0.98MPa	2.05MPa	2.97MPa
せん断速度	0.05MPa/step 1step=1day	0.08MPa/step 1step=1day	0.10MPa/step 1step=1day	0.15MPa/step 1step=5-15days

注) せん断速度における各stepの増分応力は概略、
詳細は表5-1-1から表5-1-4を参照のこと

表2-1-2 試験条件 (ひずみ制御試験)

試験番号	CU1-1	CU1-2	CU1-3	CU1-4	CU1-5
有効拘束圧 (圧密応力)	0.98MPa	1.47MPa	1.96MPa	2.45MPa	2.94MPa
せん断速度	0.01mm/min (約0.01%/min)				

2.4 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数ヵ月かけて給水し、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3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(約0.7MPa)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)(0.735-0.88MPa)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数日間供試体を放置し、間隙水圧を計測する。
- (10) 非排水状態で拘束圧を上昇させ間隙水圧を測定する。(B値の測定)
- (11) 拘束圧を圧密時の圧力まで戻した後せん断試験を開始する。
- (12) 応力制御試験の場合、段階的に軸荷重を増加させる。CU0-2、CU0-3では、除荷、再載荷を行う。
ひずみ制御試験の場合、軸方向に0.01mm/minの変位速度でせん断を行う。
- (13) 軸方向ひずみが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。
- (14) 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し、乾燥重量を測定する。

3. 圧縮成型及び飽和

3.1 圧縮成型

オートグラフを用いて側方拘束条件で、粉末状のクニゲルV1試料を圧縮成型することにより、供試体を作成した。圧縮成型後の供試体サイズは $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ 、H100mm $\times\phi$ 50mmである。この時の最大圧縮成型圧は約20-30MPaであった。

3.2 飽和

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。飽和セルの外観を写真3-1に示す。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、セルにサクシヨンポンプをつなぎ数時間セル内の空気を引いた。その後、セルよりサクシヨンポンプを外し、水圧0.5MPaで供試体に給水を行った。

数ヵ月後セルより供試体を取り出し、3軸試験装置にセットした。セット前の各供試体の寸法及び重量の一覧を表3-1-1、表3-1-2に示す。但し、表中の乾燥重量は試験終了時に計測したものである。3軸試験装置セット時の各供試体の間隙比 e は0.703から0.725で、乾燥密度 ρ_d に換算すると1.59g/cm³から1.57g/cm³となっている。

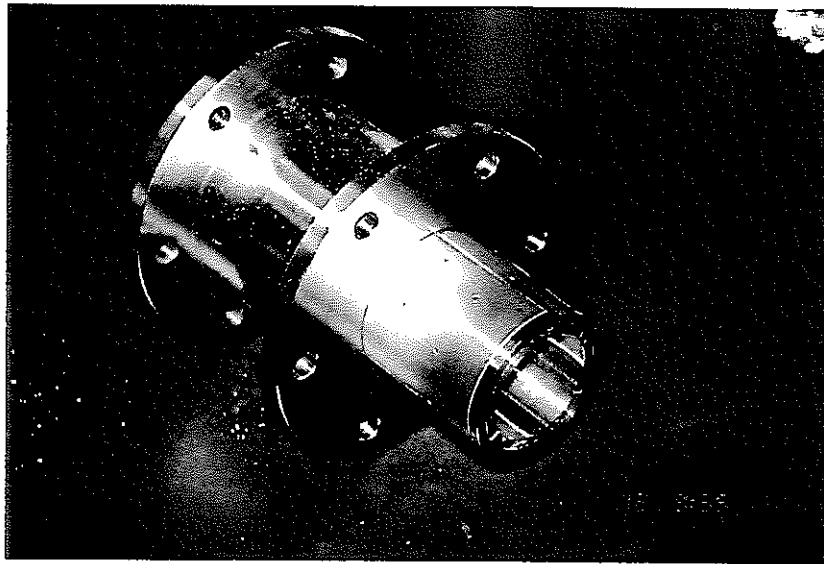
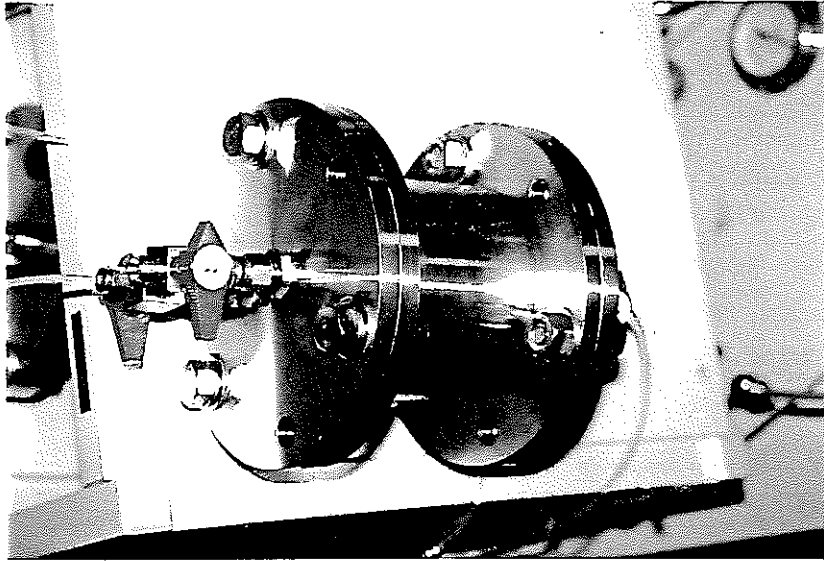


写真3-1 飽和セル

表3-1-1 供試体寸法 (応力制御試験)

試験番号	CU0-1	CU0-2	CU0-3	CU0-4
含水比 [%] (圧縮成型時)	11.5	10.2	9.5	9.3
乾燥重量 [g]	312.5	314.7	311.4	312.3
湿潤重量 [g]	397.2	398.8	398.2	395.5
高さ、直径 [mm]	101.0, 50.1	100.4, 50.3	101.0, 50.0	100.0, 50.1
体積 [cm ³]	199.1	199.5	198.3	197.1
間隙比	0.720	0.712	0.719	0.703

注) 乾燥重量は試験終了後に計測

表3-1-2 供試体寸法 (ひずみ制御試験)

試験番号	CU1-1	CU1-2	CU1-3	CU1-4	CU1-5
含水比 [%] (圧縮成型時)	12.2	11.5	10.1	12.7	9.5
乾燥重量 [g]	315.2	311.4	314.2	315.1	311.3
湿潤重量 [g]	398.1	396.3	397.9	398.1	396.76
高さ、直径 [mm]	100.8, 50.2	100.9, 50.1	100.8, 50.1	100.9, 50.1	100.9, 50.1
体積 [cm ³]	199.5	198.9	198.7	198.9	198.9
間隙比	0.710	0.725	0.719	0.705	0.725

注) 乾燥重量は試験終了後に計測

4. 圧密及びB値測定結果

4.1 圧密

(1) 供試体の3軸装置へのセット

飽和セルより取り出した供試体を、3軸せん断試験装置にセットした。飽和セルより取り出された供試体の例を写真4-1に示す。

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0.735MPaの拘束圧を負荷し余分な水を排出した。拘束圧負荷後、0.049MPa刻みで0.735MPa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1.47MPa、間隙水圧（背圧）は0.735MPaで有効拘束圧は0.735MPaとなる。

(2) 圧密過程

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の例（CU0-4）を図4-1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、2週間から2カ月である。

各試験の圧密終了後すなわちせん断時の供試体の体積、高さ、直径及び間隙比を表4-1-1、表4-1-2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3-1-1及び表3-1-2に示す3軸試験装置セット時の供試体体積より、圧密による体積ひずみ v を次式により計算できる。

$$\text{体積ひずみ} \quad v = \frac{V - V_0}{V_0} \quad (4-1)$$

（ V_0 ：試験装置セット時の供試体体積、 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。

$$\text{軸方向、半径方向ひずみ} \quad \varepsilon_a = \varepsilon_r = 1 - \sqrt[3]{1 - v} \quad (4-2)$$

表4-1-1、表4-1-2に示すせん断時の供試体高さ及び直径は、表3-1-1及び表3-1-2に示す各供試体の初期高さ及び直径と、(4-2)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。

表4-1-1及び表4-1-2からわかるように、圧密応力が約1.0[MPa]の試験（CU0-2, CU1-1,）

では供試体の体積変化はほとんどなく、膨潤応力と圧密応力がほぼ釣り合っている。そして、それ以上の圧密応力で圧密された試験（CU0-3, CU0-4, CU1-2, CU1-3, CU1-4, CU1-5）では、供試体の体積は圧密排水により収縮し、それ以下の圧密応力の試験では（CU0-1）、供試体は吸水し膨張していることがわかる。

間隙比と圧密応力より求めた圧密後の各供試体の e - $\log p$ 関係を図4-2に示す。図には1次元圧密試験の結果を併せて示している³⁾。図より、1次元圧密試験より得られた e - $\log p$ 関係と比較し、各試験の圧密結果はほぼ妥当な値であるといえる。

また、1次元圧密試験結果より、乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ に圧縮成型した供試体の圧密降伏応力 p_c' は1.5[MPa]から2.0[MPa]の間にあると考えられる。このことより、この圧密降伏応力 p_c' 以上の圧密応力での試験では供試体は正規圧密状態にあるといえ、それ以下の圧密応力での試験では供試体は過圧密状態にあるといえる。本試験においては、CU0-1, CU0-2, CU1-1の各試験の供試体は過圧密状態にあり、CU1-2の供試体は過圧密正規圧密中間の状態、そしてCU0-3, CU0-4, CU1-3, CU1-4, CU1-5の各試験の供試体は正規圧密状態にあると考えられる。一般の粘土では、供試体が過圧密状態か正規圧密状態かで、そのせん断挙動は大きく異なることが知られている⁵⁾。圧縮ペントナイトにおいても、過圧密、正規圧密の違いがせん断挙動に与える影響は大きいと考えられたため、以下の5章 試験結果、6章 考察ではこの点に着目した議論を行っている。



写真4-1 飽和セル取り出し時の供試体

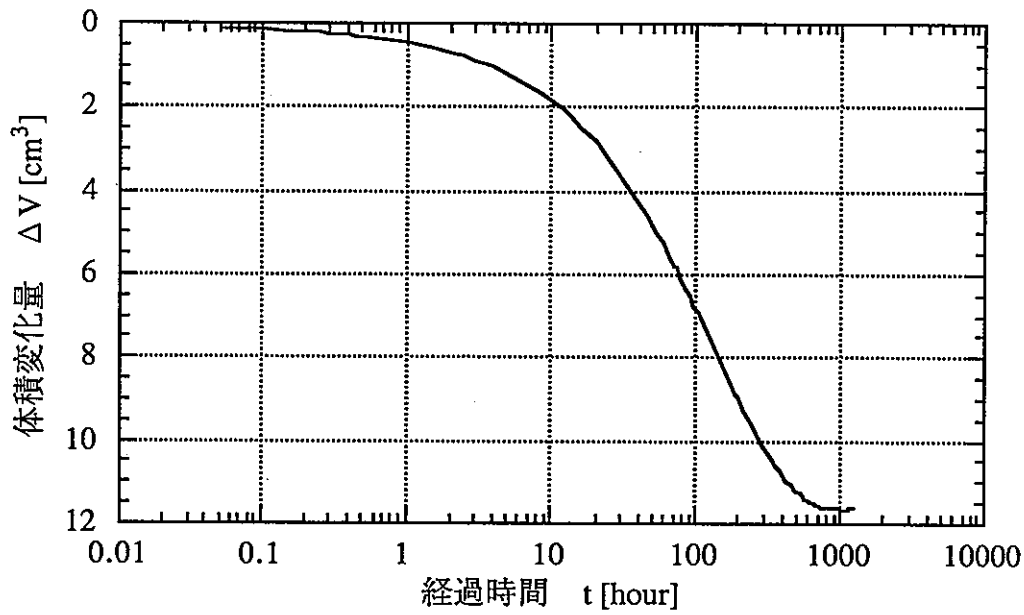


図4-1 圧密時における供試体体積の経時変化例 CU0-4
圧密応力 2.97MPa

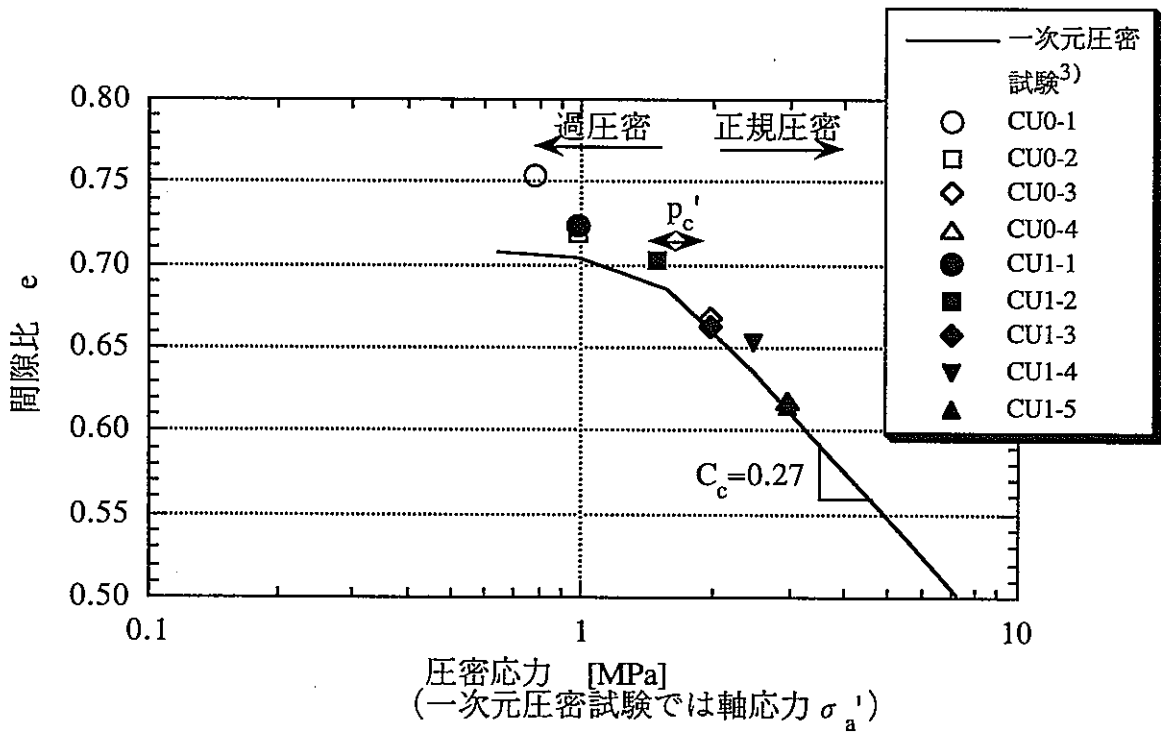


図4-2 せん断前（圧密後）の各供試体のe-logp関係

表4-1-1 せん断時（圧密後）の供試体寸法（応力制御試験）

試験番号	CU0-1	CU0-2	CU0-3	CU0-4
圧密応力[MPa]	0.784	0.98	2.05	2.97
体積 [cm ³]	203.0	200.3	191.7	187.1
体積変化[cm ³]	-3.9	-0.74	7.0	12.0
体積ひずみ	-0.0194	-0.0037	0.0352	0.0603
高さ、直径[mm]	101.7,50.4	100.7,50.4	99.6,49.5	99.0,49.1
間隙比	0.754	0.718	0.668	0.618

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

表4-1-2 せん断時（圧密後）の供試体寸法（ひずみ制御試験）

試験番号	CU1-1	CU1-2	CU1-3	CU1-4	CU1-5
圧密応力[MPa]	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94
体積[cm ³]	201.2	196.3	193.6	192.7	186.2
体積変化[cm ³]	-1.7	2.7	5.1	6.2	12.7
体積ひずみ	-0.0085	0.0133	0.0258	0.0312	0.0637
高さ、直径[mm]	101.1,50.3	100.5,49.9	99.9,49.7	99.9,49.6	98.8,49.0
間隙比	0.723	0.702	0.663	0.651	0.615

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

4.2 B値の測定

(1) 圧密後の間隙水圧の変化

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。通常の粘土材料の圧密非排水3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⁶⁾。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、応力制御試験では1週間前後、ひずみ制御試験では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B値の測定及び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4-2-1及び表4-2-2に示す。

表4-2-1 せん断時の初期平均有効応力 p_0' (応力制御試験)

試験番号	CU0-1	CU0-2	CU0-3	CU0-4
圧密応力[MPa]	0.784	0.98	2.05	2.97
初期平均有効応力[MPa]	0.786	1.05	2.04	2.96

表4-2-2 せん断時の初期平均有効応力 p_0' (ひずみ制御試験)

試験番号	CU1-1	CU1-2	CU1-3	CU1-4	CU1-5
圧密応力[MPa]	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94
初期平均有効応力[MPa]	1.00	1.49	1.96	2.43	2.92

(2) B値の測定結果

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0.4[MPa]前後上昇させ、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。B値測定時の拘束圧と間隙水圧の経時変化の例(CU1-4の結果)を図4-3に示す。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。

$$B \text{ 値} = \Delta p.p. / \Delta \sigma_c \quad (4-3)$$

$\Delta p.p.$: 間隙水圧の変化量

$\Delta \sigma_c$: 拘束圧の変化量

各試験での拘束圧、間隙水圧の変化量及びB値を表4-3-1、表4-3-2に示す。表中に示

すように各供試体のB値は0.91-0.96であった。土質試験の基準において¹⁾B値は0.95以上というのが目安となっているが、今回の試験ではこの目安より少し下回るものがあった。このことは非排水せん断時において、間隙水圧の変化を過小に評価する等の影響が考えられる。しかしながらこれ以上B値を上げることは本試験方法では困難であること、また0.9以上のB値が得られていることより、この状態でせん断試験を行うこととした。

(3) 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¹⁾。

$$B = \frac{1}{1 + \frac{n \cdot \left\{ (p.p. + 0.098) \cdot S_r \cdot \frac{K_s}{K_w} + (1 - S_r) \cdot K_s \right\}}{(p.p. + 0.098)}} \quad (4.4)$$

- 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、(4.4)式は次式となる。

$$B = \frac{1}{1 + \frac{n \cdot (1 - S_r) \cdot K_s}{(p.p. + 0.098)}} \quad (4.5)$$

上式を飽和度 S_r について解くと次式となる。

$$S_r = 1 - \frac{(1 - B)(p.p. + 0.098)}{nBK_s} \quad (4.6)$$

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(前出 図4-2の結果)より求めた圧縮係数 $C_c=0.27$ と各試験での初期平均有効応力 p_0' を用い次式により計算した。

$$K_s = \frac{2.3(1+e)}{C_c} p_0' \quad (4-7)$$

各試験での圧密終了時における、飽和度Srを表4-3-1、表4-3-2に示す。各供試体の飽和度Srは99.1%から99.6%となっている。

表4-3-1 各供試体のB値（応力制御試験）

試験番号	CU0-1	CU0-2	CU0-3	CU0-4
△拘束圧(MPa)	0.386	0.388	0.407	0.265
△間隙水圧(MPa)	0.370	0.364	0.385	0.240
B値	0.96	0.94	0.95	0.91
飽和度(%)	99.1	99.2	99.6	99.2

表4-3-2 各供試体のB値（ひずみ制御試験）

試験番号	CU1-1	CU1-2	CU1-3	CU1-4	CU1-5
△拘束圧(MPa)	0.353	0.505	0.382	0.363	0.480
△間隙水圧(MPa)	0.344	0.477	0.363	0.344	0.450
B値	0.97	0.94	0.95	0.95	0.94
飽和度(%)	99.4	99.2	99.4	99.6	99.4

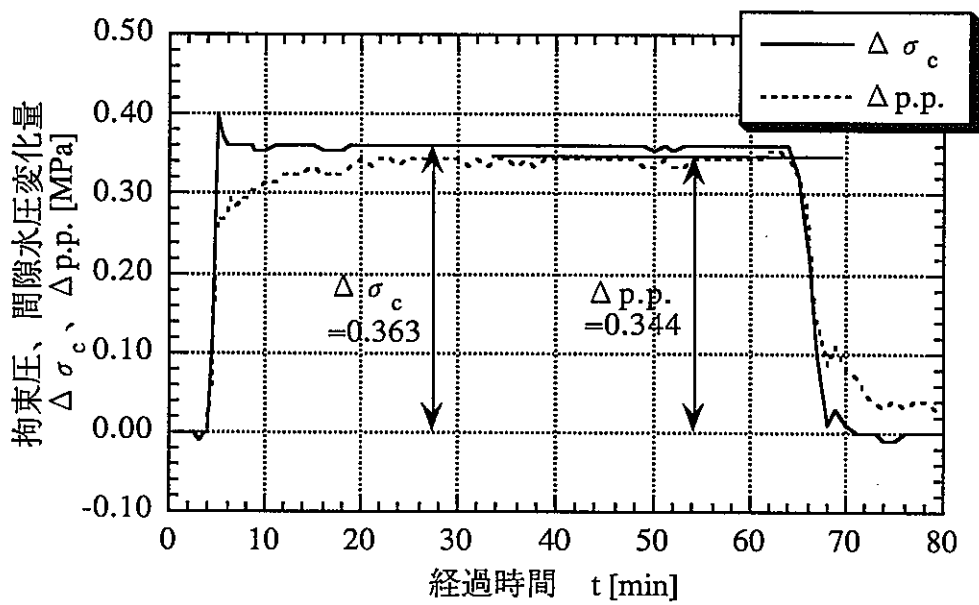


図4-3 B値測定結果例 CU1-4

5. せん断試験結果

5.1 応力制御せん断試験結果

(1) 試験条件

応力制御せん断試験では、非排水及び側圧一定条件で供試体に段階的に軸方向荷重を載荷した。各試験の載荷step、載荷荷重及び載荷時間を表5-1-1から表5-1-4に、それをグラフ化したものを図5-1-1から図5-1-4にそれぞれ示す。載荷は軸方向荷重を一定の大きさで増加させていく方法で行った。ただし前述したように、CU0-2, CU0-3の試験では、載荷途中（軸ひずみが約1%となった時点）で除荷及び再載荷を行い、応力履歴の影響を調べている。なお以下では除荷後の載荷過程において、載荷荷重が除荷前の載荷荷重以下の部分（step r1からstep r6）のみを再載荷過程と呼ぶことにする。各stepの載荷時間は、CU0-1, CU0-2, CU0-3では1日、CU0-4では5日から15日である。また、各試験とも軸ひずみ ε_a が15%を超えた時点で試験を終了した。

(2) 軸方向変位の経時変化

各試験における、各載荷stepでの軸変位の経時変化を図5-2-1a,b（CU0-1）、図5-2-2a,b,c,d（CU0-2）、図5-2-3a,b,c,d（CU0-3）、図5-2-4a,b（CU0-4）にそれぞれ示す。

図5-2-1a,bより、CU0-1での載荷過程の各stepでは、軸変位は経過時間とともに増加していくことがわかる。また他の試験においても、図5-2-2a,d、図5-2-3a,d、図5-2-4a,bに示すように、載荷過程において各stepの軸変位の経時変化が同様の傾向を示していることがわかる。4.1章で各試験の圧密応力により各供試体を過圧密状態（CU0-1, CU0-2）、正規圧密状態（CU0-3, CU0-4）と区別したが、これらの状態に関係なく、一定軸荷重下における各供試体の軸ひずみは時間とともに増加している。このことより、圧縮ベントナイトのせん断変形挙動は、過圧密、正規圧密にかかわらず、クリープと呼ばれる時間依存性挙動となっているといえる。そしてこの経過時間ともなう軸変位量の増加量は、各試験とも載荷stepが大きくなるにともない大きくなっていることがわかる。

CU0-2, CU0-3では、除荷及び再載荷を行っている。図5-2-2b,c及び図5-2-3b,cからわかるように、除荷時における各stepのリバウンド量の経時変化は、CU0-2、CU0-3とも同様の傾向を示している。その値は時間と共に増加しており、除荷時における変形挙動にも時間依存性が認められる。ただし、両試験ともリバウンド量は載荷時の変位量よりかなり小さい値となっている。再載荷時における軸変位の経時変化についても両試験結果は同じ傾向を示しており、軸変位は時間とともに増加する傾向にあり、その量は除荷過程のリバウンド量と同程度となっている。載荷荷重が除荷前の荷重を超えると（step7以降）、図5-2-2d、図5-2-3dに示すように各stepごとの軸変位量は急激に増加し、通常の載荷試験（CU0-1, CU0-4）と同様の傾向を示すことがわかる。

(3) 軸差応力－軸ひずみ関係

(2)で述べた各載荷stepでの軸変位より、各試験の軸差応力 ($q = \sigma_a - \sigma_c$) と軸ひずみ ϵ_a の関係をまとめたものを図5-3-1 (CU0-1)、図5-3-2 (CU0-2)、図5-3-3 (CU0-3)、図5-3-4 (CU0-4) に示す。なお、軸差応力 q は各stepで軸ひずみ ϵ_a より半径方向ひずみ ϵ_r 、供試体半径 ϕ 、断面積を計算し、軸荷重を断面積で割ることにより計算している。過圧密状態 (CU0-1, CU0-2)、正規圧密状態 (CU0-3, CU0-4) に関係なく、各試験とも同様の傾向を示しており、軸ひずみ ϵ_a が1%を超えた辺りより、軸差応力 q －軸ひずみ ϵ_a 関係の非線形性が大きくなることがわかる。そして、軸ひずみ ϵ_a が7%を超えた辺りで軸差応力 q が最大に達しており、その後軸差応力 q はほぼ一定となっている。

CU0-2, CU0-3における除荷及び再載荷過程の軸差応力 q －軸ひずみ ϵ_a 関係は、ほぼ線形挙動となっていることがわかる。また、供試体が正規圧密状態にあるCU0-3のみならず、過圧密状態にあるCU0-2においても、軸差応力 q を除荷した時の軸ひずみ ϵ_a は載荷前の状態に戻っておらず、塑性ひずみが生じていることがわかる。

(4) 間隙水圧の経時変化

各stepにおける間隙水圧の経時変化を図5-4-1a,b (CU0-1) 図5-4-2a,b,c,d (CU0-2) 図5-4-3a,b,c,d (CU0-3) 図5-4-4a,b (CU0-4) に示す。

図5-4-1a,bより、供試体が過圧密状態であるCU0-1のstep1からstep10の載荷過程では、間隙水圧は載荷と同時に上昇し、その後はほぼ一定となっていることがわかる。また、破壊前後のstep12以降では、間隙水圧は時間とともに減少している。また図5-4-2a,dより、供試体がCU0-1と同様に過圧密状態であると考えられるCU0-2では、載荷過程の各stepにおいて間隙水圧は載荷直後若干増加するが、その後減少する傾向となっている。また、破壊後のstep r13ではCU0-1の結果と同様に、間隙水圧は時間とともに減少していることがわかる。

一方供試体が正規圧密状態であるCU0-3, CU0-4では異なる結果となっている。図5-4-3a,d、図5-4-4a,bより、CU0-3, CU0-4の載荷過程では各stepとも間隙水圧は時間と共に増加していることがわかる。ただし、各stepの載荷時間の長いCU0-4の結果より、間隙水圧の増加は載荷後10000[min] (1週間) ぐらいまでで、その後は一定もしくは若干減少することがわかる。また、破壊後のstep (CU0-3: step12, CU0-4: step11) では、間隙水圧は時間と共に減少している。

図5-4-2b,c、図5-4-3b,cより、CU0-2, CU0-3の除荷過程、再載荷過程における各stepの間隙水圧の経時変化は同様の傾向を示していることがわかる。除荷過程の場合、各stepとも載荷直後に間隙水圧は低下するが、載荷後100[min]を経過したあたりよりその変化はほとんどない。また再載荷過程 (step r1からstep r6) では、間隙水圧は載荷直後から若干上昇するが、除荷過程と同様に100[min]を経過したあたりよりその値はほぼ一定となっている。

(5) 有効応力経路

各試験でのせん断過程における有効応力経路を図5-5に示す。供試体が過圧密状態であるCU0-1、CU0-2の両試験では、せん断試験中平均有効応力 p' はほぼ一定で、過剰間隙水圧の上昇は認められない。一方供試体が正規圧密状態であるCU0-3, CU0-4では、有効応力経路において過剰間隙水圧が上昇し、平均有効応力 p' が減少していることがわかる。これらの過剰間隙水圧は、せん断に伴う負のダイラタンシーによる体積変化が、非排水条件により抑制されることにより発生したと考えられる。

CU0-2, CU0-3における除荷及び再載荷過程では、過圧密状態での通常載荷過程と同様に平均有効応力 p' はほぼ一定で、過剰間隙水圧の増減は認められない。

(6) 供試体の破壊状況

各試験において、軸ひずみ ϵ_a が15%を超えた時点で試験を終了した。試験終了時の供試体の破壊状況の外観例(CU0-1)を写真5-1に示す。写真からわかるように、本供試体には肉眼で明確なせん断破壊面が見られなかった。他の試験結果も同様の傾向を示しており、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なかった。

表5-1-1 各載荷stepの載荷軸荷重と載荷時間 CU0-1
(載荷過程)

載荷step	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
載荷軸荷重(kN)	0.098	0.196	0.294	0.392	0.490	0.588	0.696	0.794	0.902	1.009	1.098	1.166
軸差応力(MPa)	0.049	0.098	0.147	0.197	0.245	0.294	0.347	0.395	0.446	0.498	0.537	0.564
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

載荷step	13	14	15
載荷軸荷重(kN)	1.264	1.333	1.382
軸差応力(MPa)	0.605	0.614	0.610
載荷時間(day)	1	1	0.125

注) 軸差応力は軸荷重及び載荷時における供試体の半径方向断面積より計算

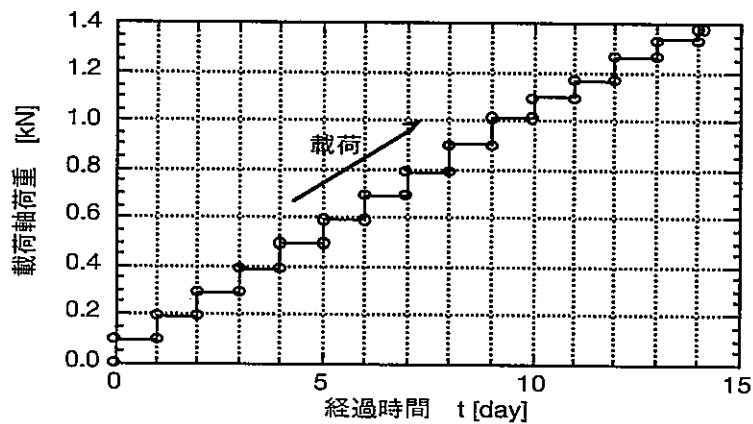


図5-1-1 載荷step CU0-1

表5-1-2 各載荷stepの載荷軸荷重と載荷時間 CU0-2
(載荷過程)

載荷step	1	2	3	4	5	6
載荷軸荷重(kN)	0.147	0.294	0.441	0.588	0.725	0.862
軸差応力(MPa)	0.074	0.148	0.221	0.300	0.363	0.431
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	1

(除荷過程)

載荷step	u1	u2	u3	u4	u5	u6
載荷軸荷重(kN)	0.764	0.588	0.461	0.323	0.167	0.098
軸差応力(MPa)	0.380	0.293	0.229	0.161	0.083	0.049
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	1

(再載荷過程)

載荷step	r1	r2	r3	r4	r5	r6
載荷軸荷重(kN)	0.186	0.333	0.470	0.617	0.745	0.872
軸差応力(MPa)	0.093	0.166	0.235	0.308	0.371	0.434
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	1

(載荷過程)

載荷step	7	8	9	10	11	12	13
載荷軸荷重(kN)	1.019	1.156	1.254	1.333	1.431	1.548	1.646
軸差応力(MPa)	0.507	0.573	0.617	0.650	0.691	0.734	0.751
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	1	1

注) 軸差応力は軸荷重及び載荷時における供試体の半径方向断面積より計算

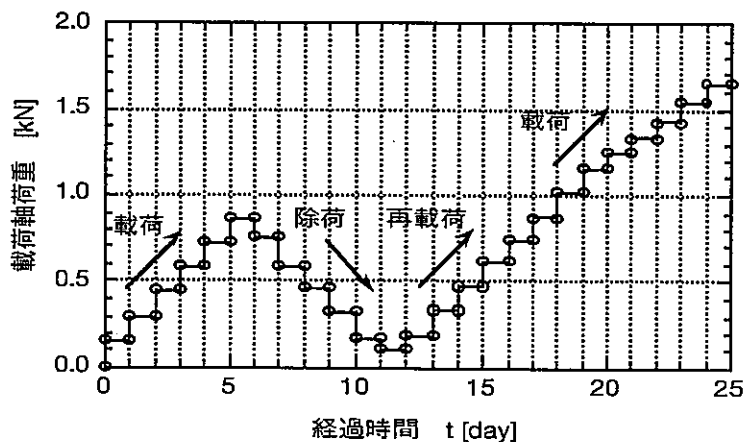


図5-1-2 載荷step CU0-2

表5-1-3 各載荷stepの載荷軸荷重と載荷時間 CU0-3
(載荷過程)

載荷step	1	2	3	4	5	6
載荷軸荷重(kN)	0.216	0.421	0.617	0.843	1.049	1.245
軸差応力(MPa)	0.112	0.219	0.320	0.436	0.543	0.643
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	1

(除荷過程)

載荷step	u1	u2	u3	u4	u5	u6	u7
載荷軸荷重(kN)	1.113	0.951	0.755	0.568	0.392	0.196	0.098
軸差応力(MPa)	0.580	0.489	0.388	0.293	0.202	0.101	0.051
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	1	1

(再載荷過程)

載荷step	r1	r2	r3	r4	r5	r6
載荷軸荷重(kN)	0.196	0.441	0.637	0.833	1.049	1.235
軸差応力(MPa)	0.101	0.228	0.329	0.429	0.540	0.636
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	1

(載荷過程)

載荷step	7	8	9	10	11	12
載荷軸荷重(kN)	1.441	1.646	1.842	2.048	2.185	2.274
軸差応力(MPa)	0.740	0.844	0.937	1.027	1.066	1.064
載荷時間(day)	1	1	1	1	1	0.208

注) 軸差応力は軸荷重及び載荷時における供試体の半径方向断面積より計算

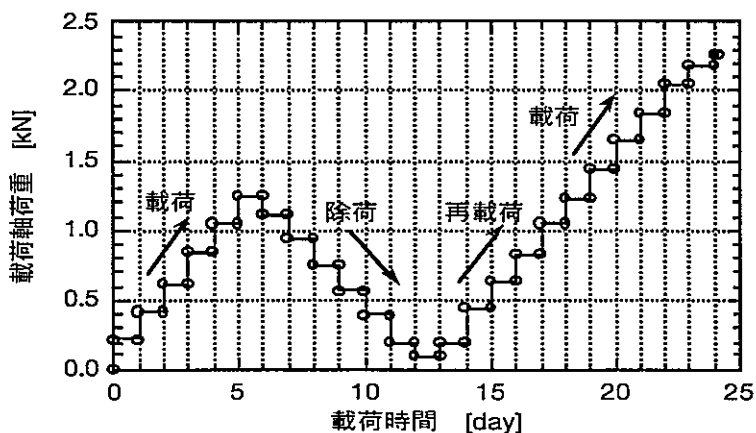


図5-1-3 載荷step CU0-3

表5-1-4 各載荷stepの載荷軸荷重と載荷時間 CU0-4
(載荷過程)

載荷step	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
載荷軸荷重(kN)	0.343	0.637	0.931	1.215	1.499	1.793	2.019	2.313	2.587	2.881	3.126
軸差応力(MPa)	0.182	0.338	0.493	0.642	0.791	0.943	1.055	1.204	1.337	1.470	1.556
載荷時間(day)	5	7	14	10	11	10	12	14	13	15	3

注) 軸差応力は軸荷重及び載荷時における供試体の半径方向断面積より計算

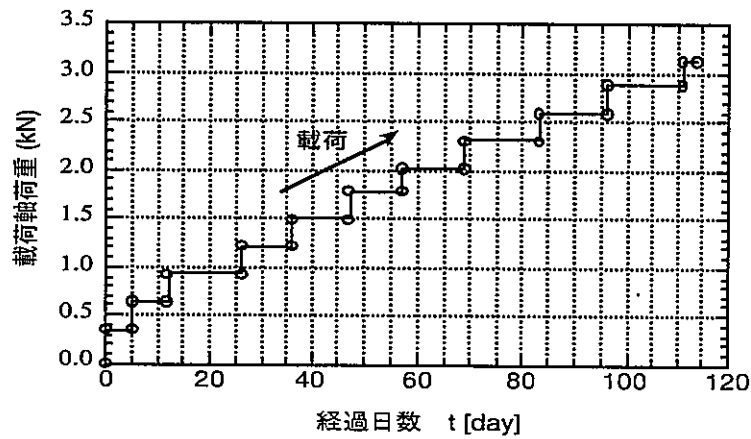


図5-1-4 載荷step CU0-4

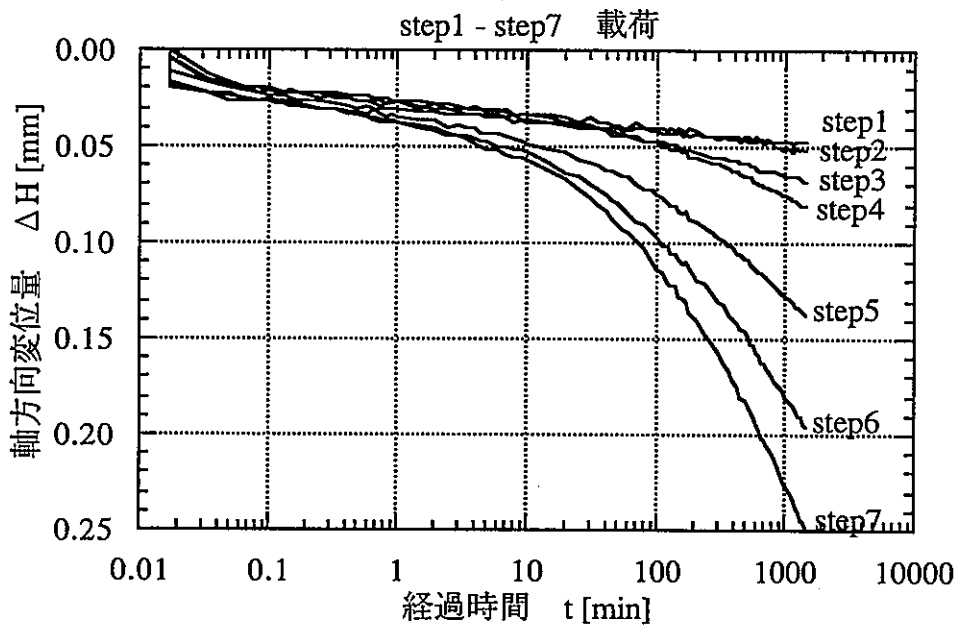


図5-2-1a 応力制御せん断試験結果 CU0-1
各stepにおける軸方向変位の経時変化1a

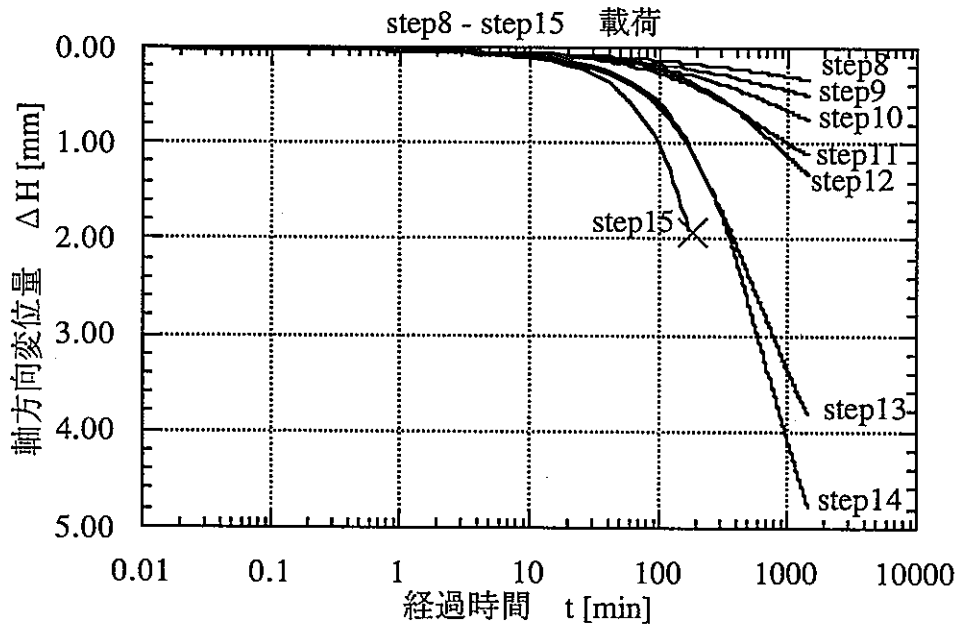


図5-2-1b 応力制御せん断試験結果 CU0-1
各stepにおける軸方向変位の経時変化1b

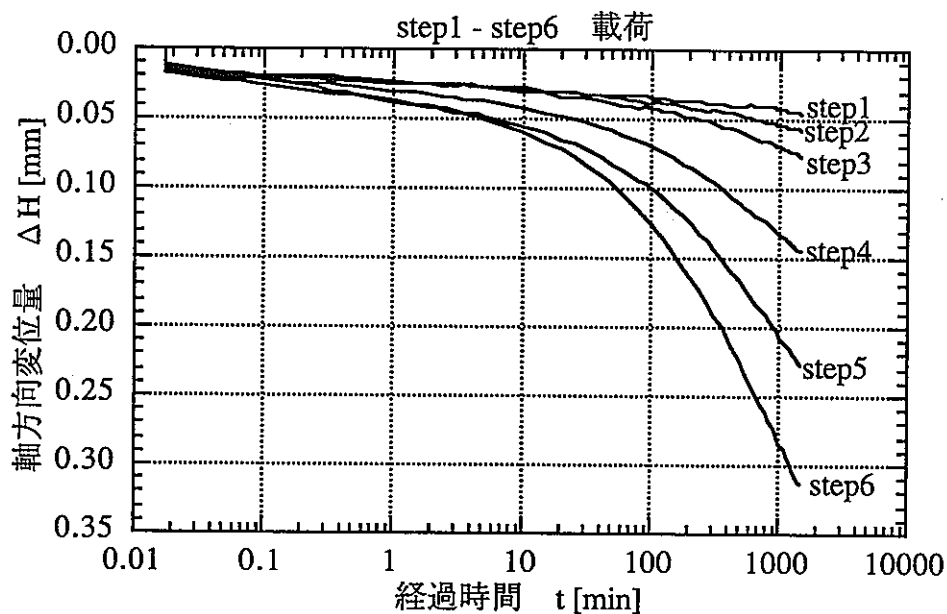


図5-2-2a 応力制御せん断試験結果 CU0-2
各stepにおける軸方向変位の経時変化2a

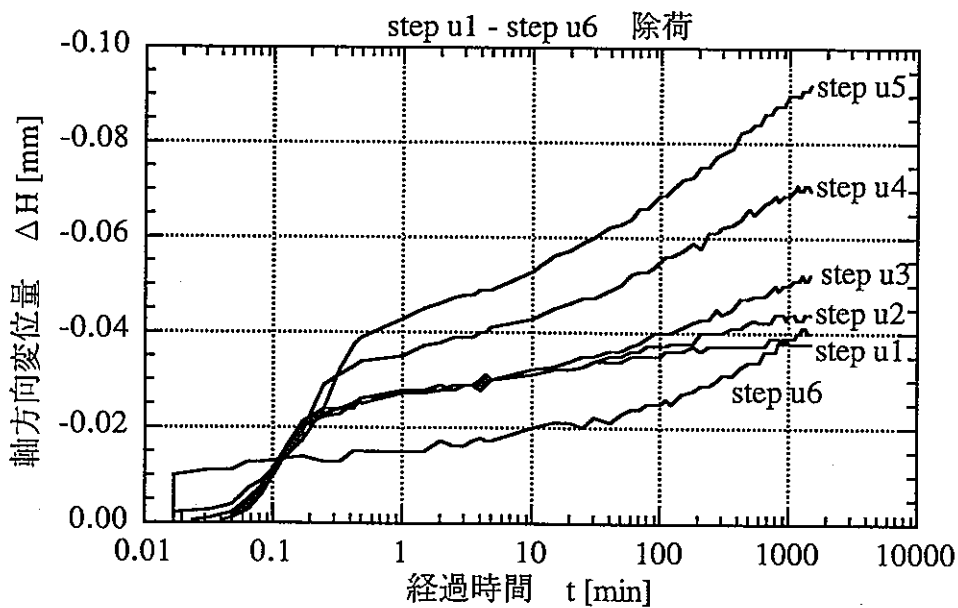


図5-2-2b 応力制御せん断試験結果 CU0-2
各stepにおける軸方向変位の経時変化2b

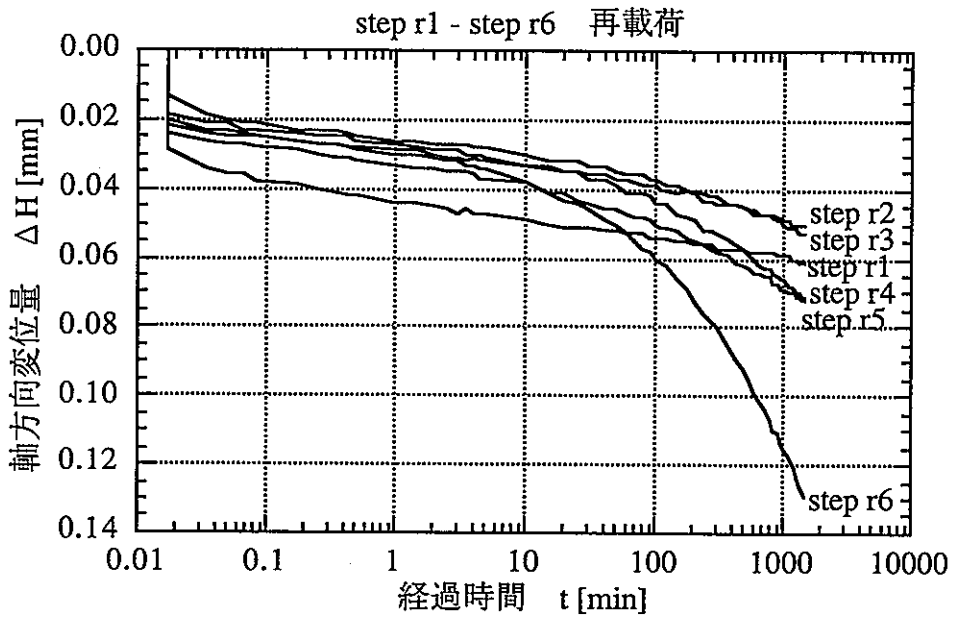


図5-2-2c 応力制御せん断試験結果 CU0-2
各stepにおける軸方向変位の経時変化2c

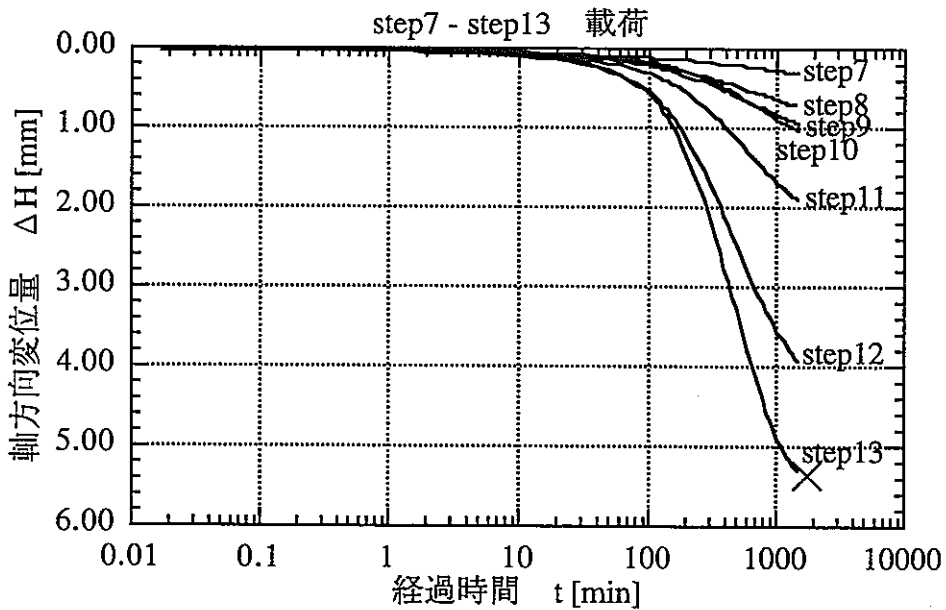


図5-2-2d 応力制御せん断試験結果 CU0-2
各stepにおける軸方向変位の経時変化2d

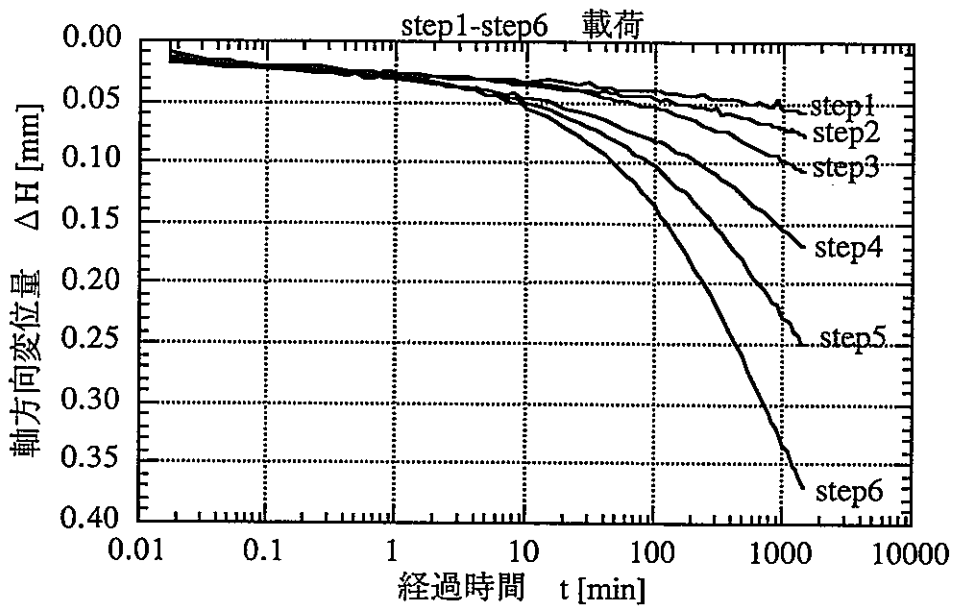


図5-2-3a 応力制御せん断試験結果 CU0-3
各stepにおける軸方向変位の経時変化3a

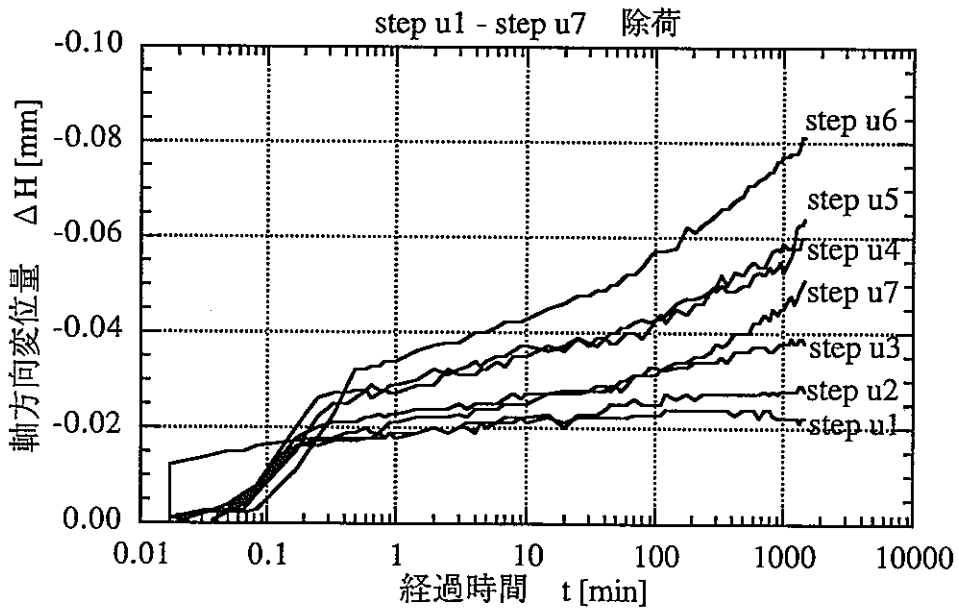


図5-2-3b 応力制御せん断試験結果 CU0-3
各stepにおける軸方向変位の経時変化3b

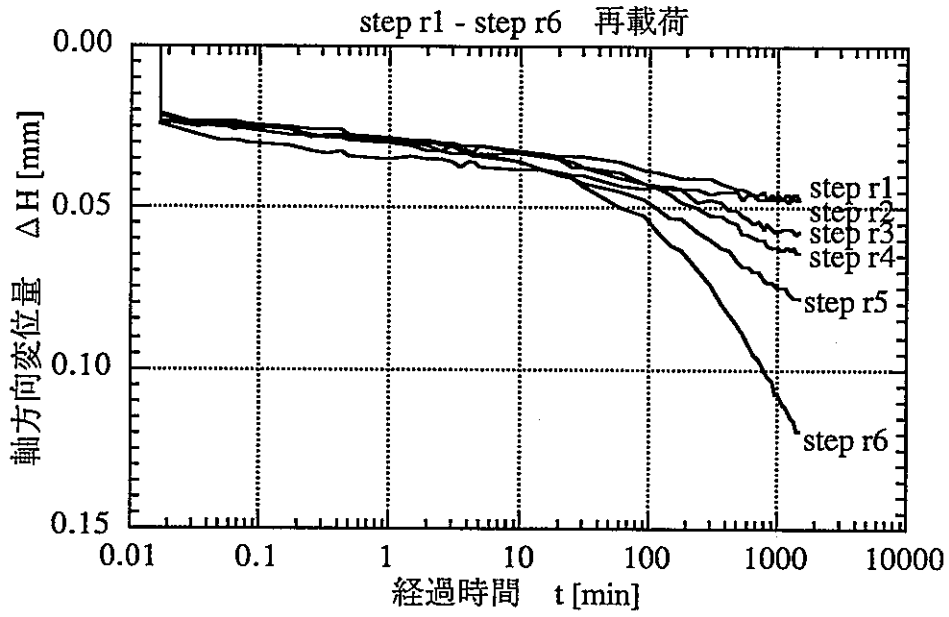


図5-2-3c 応力制御せん断試験結果 CU0-3
各stepにおける軸方向変位の経時変化3c

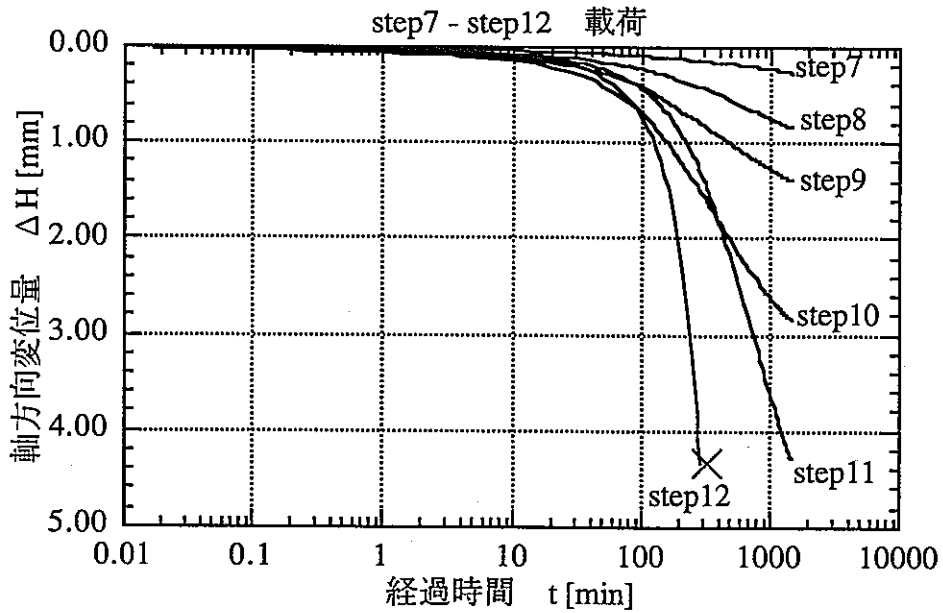


図5-2-3d 応力制御せん断試験結果 CU0-3
各stepにおける軸方向変位の経時変化3d

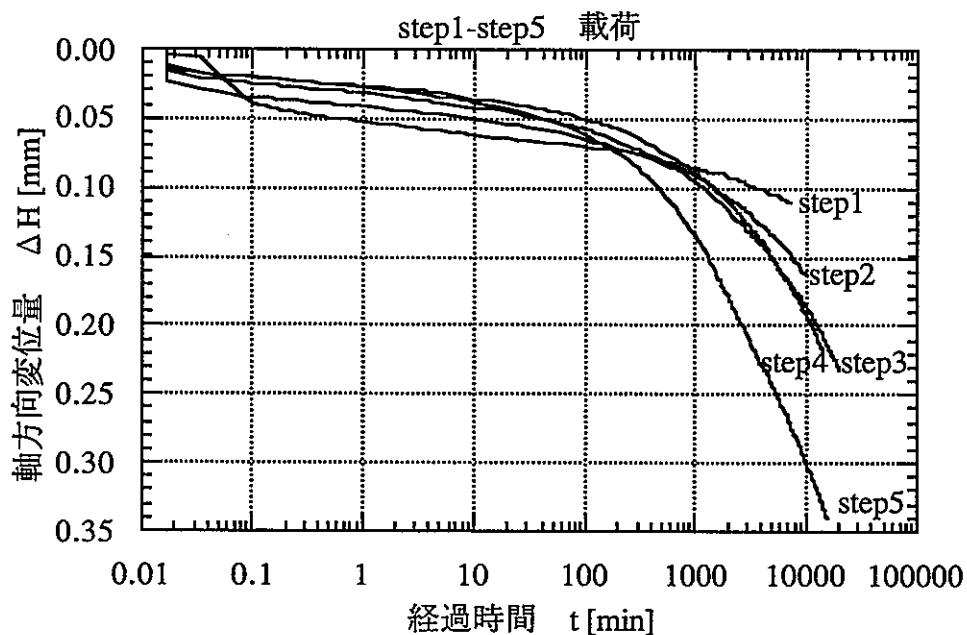


図5-2-4a 応力制御せん断試験結果 CU0-4
各stepにおける軸方向変位の経時変化4a

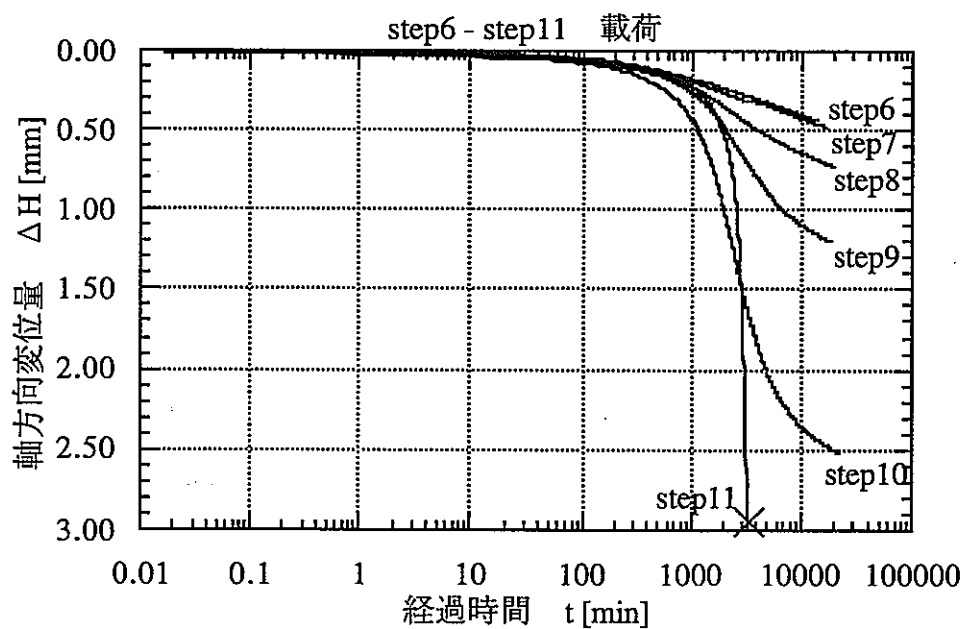


図5-2-4b 応力制御せん断試験結果 CU0-4
各stepにおける軸方向変位の経時変化4b

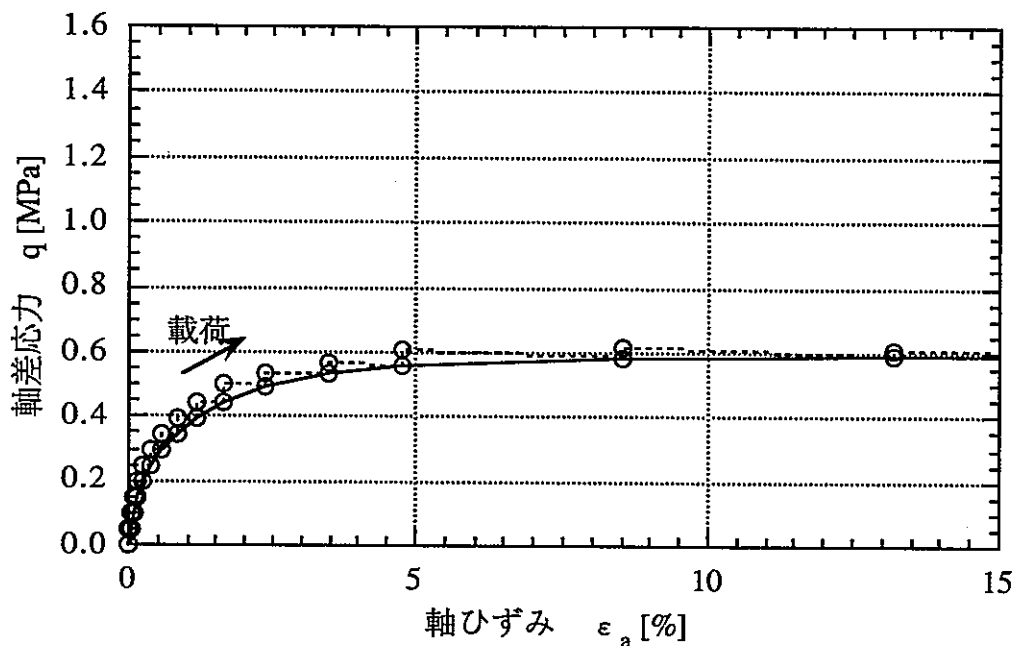


図5-3-1 応力制御せん断試験結果 CU0-1
軸差応力-軸ひずみ関係

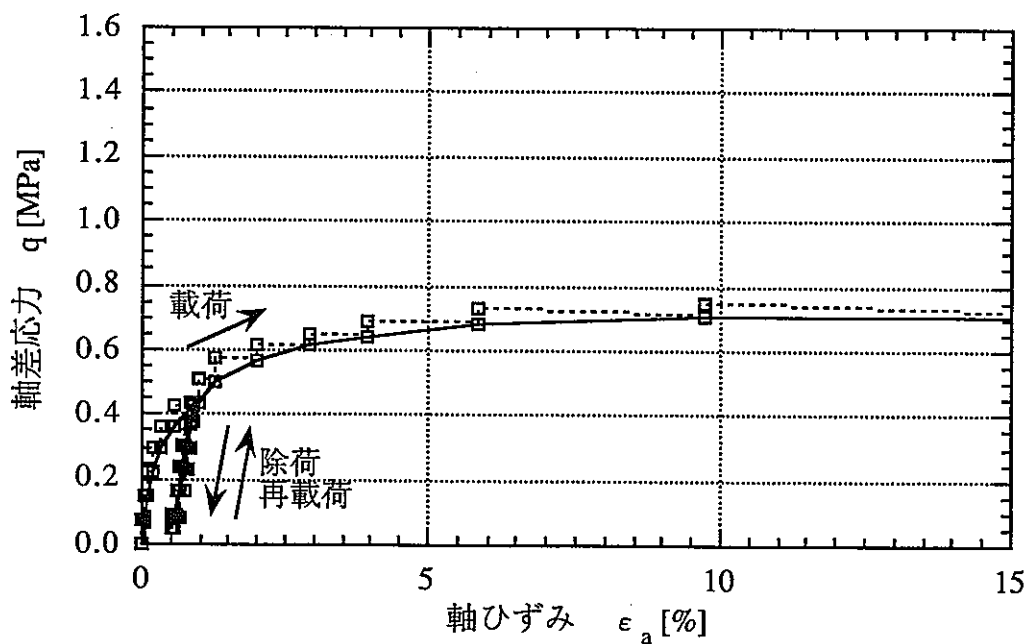


図5-3-2 応力制御せん断試験結果 CU0-2
軸差応力-軸ひずみ関係

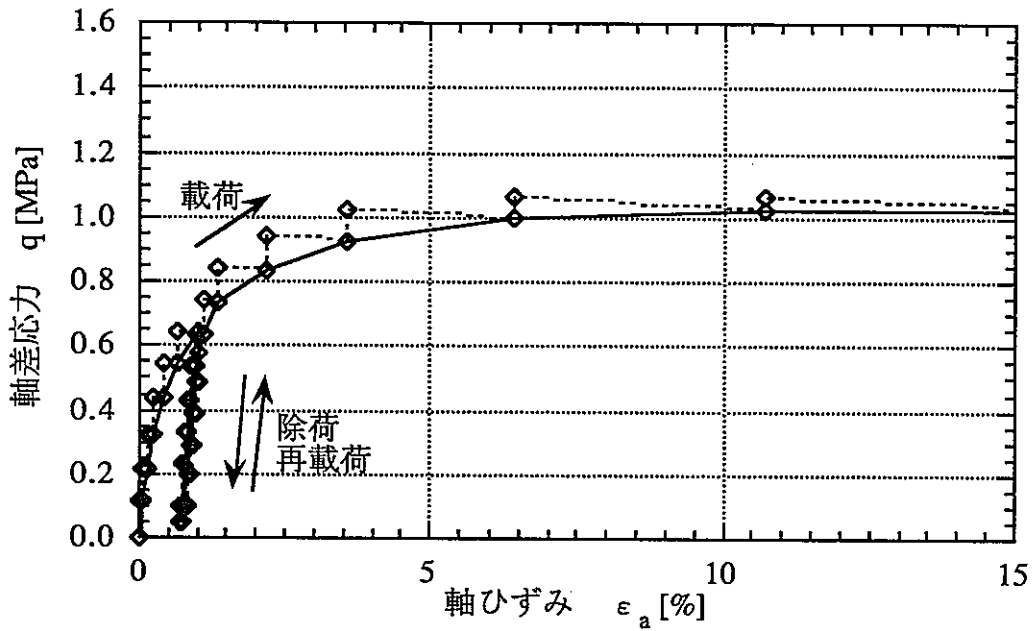


図5-3-3 応力制御せん断試験結果 CU0-3
軸差応力-軸ひずみ関係

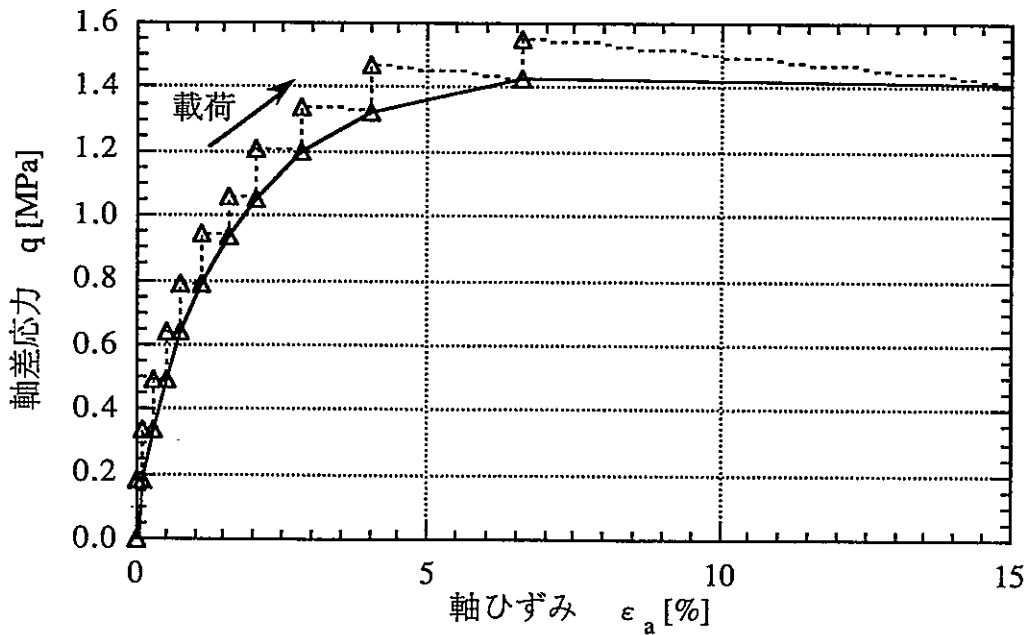


図5-3-4 応力制御せん断試験結果 CU0-4
軸差応力-軸ひずみ関係

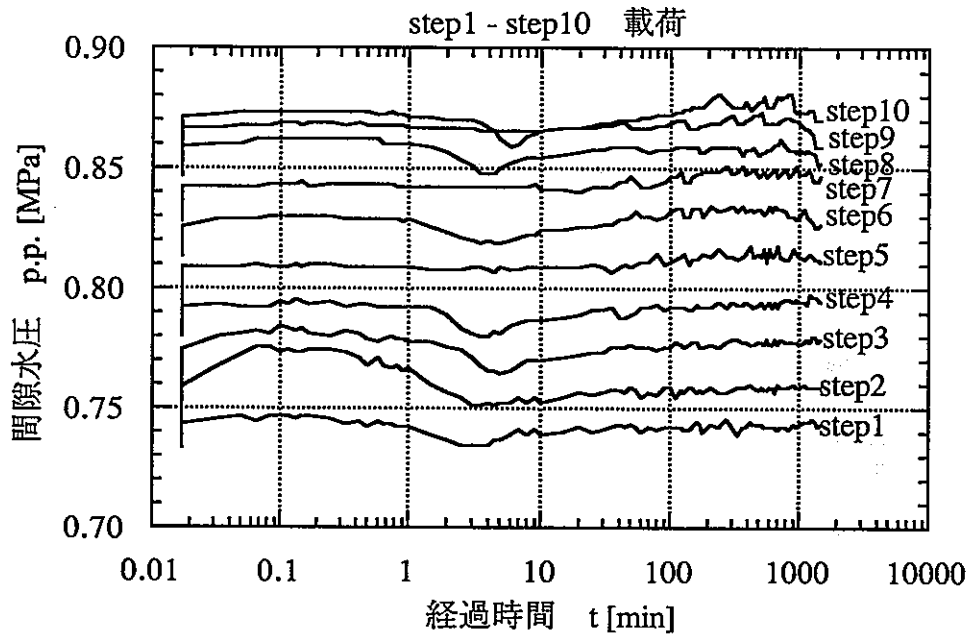


図5-4-1a 応力制御せん断試験結果 CU0-1
各stepにおける間隙水圧の経時変化1a

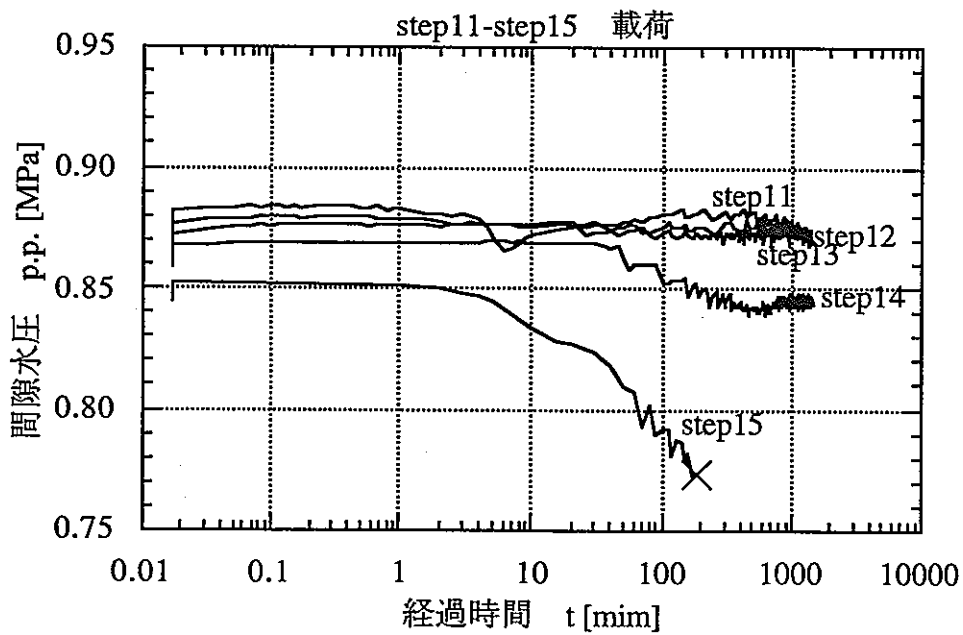


図5-4-1b 応力制御せん断試験結果 CU0-1
各stepにおける間隙水圧の経時変化1b

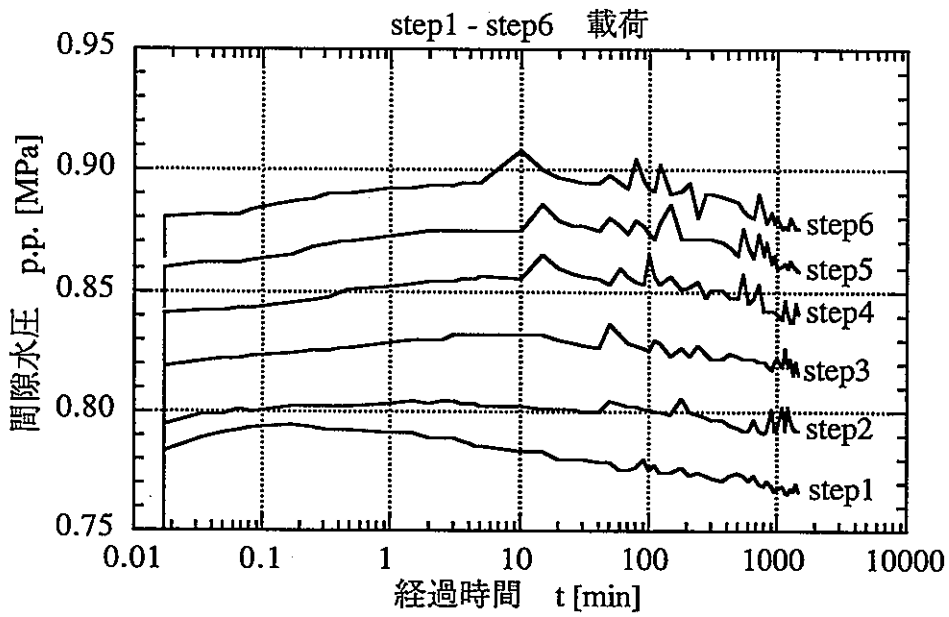


図5-4-2a 応力制御せん断試験結果 CU0-2
各stepにおける間隙水圧の経時変化2a

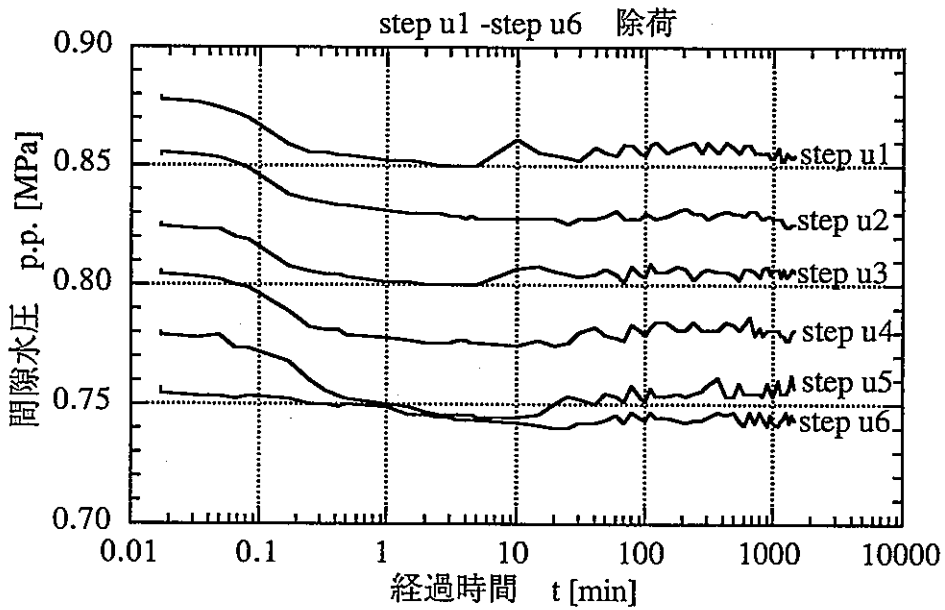


図5-4-2b 応力制御せん断試験結果 CU0-2
各stepにおける間隙水圧の経時変化2b

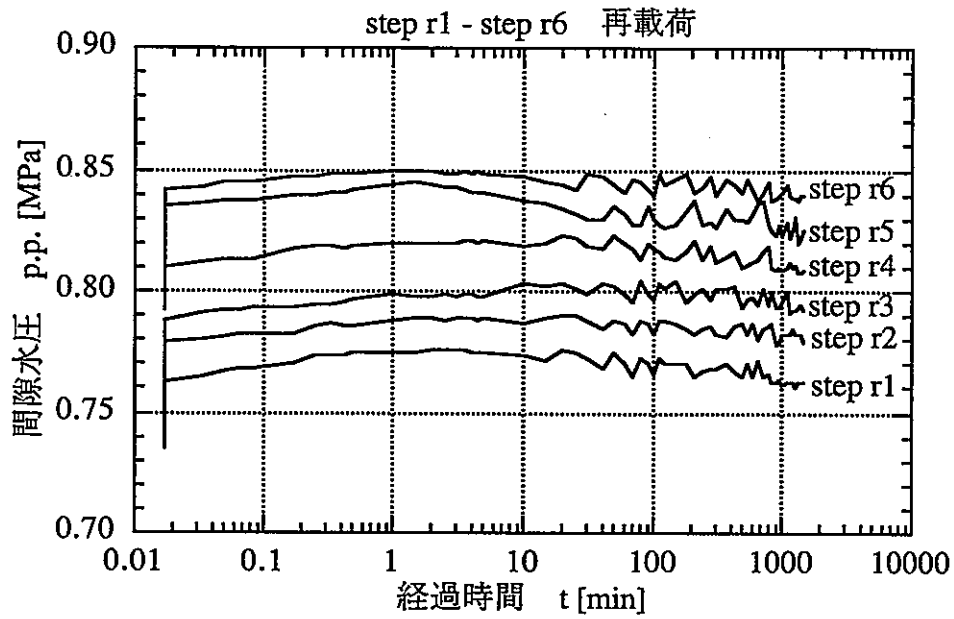


図5-4-2c 応力制御せん断試験結果 CU0-2
各stepにおける間隙水圧の経時変化2c

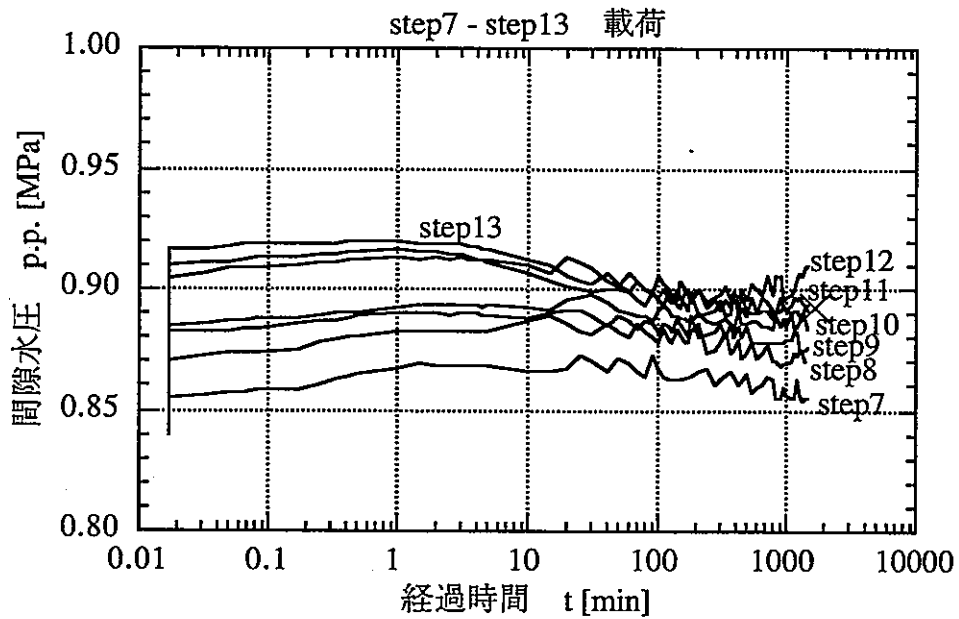


図5-4-2d 応力制御せん断試験結果 CU0-2
各stepにおける間隙水圧の経時変化2d

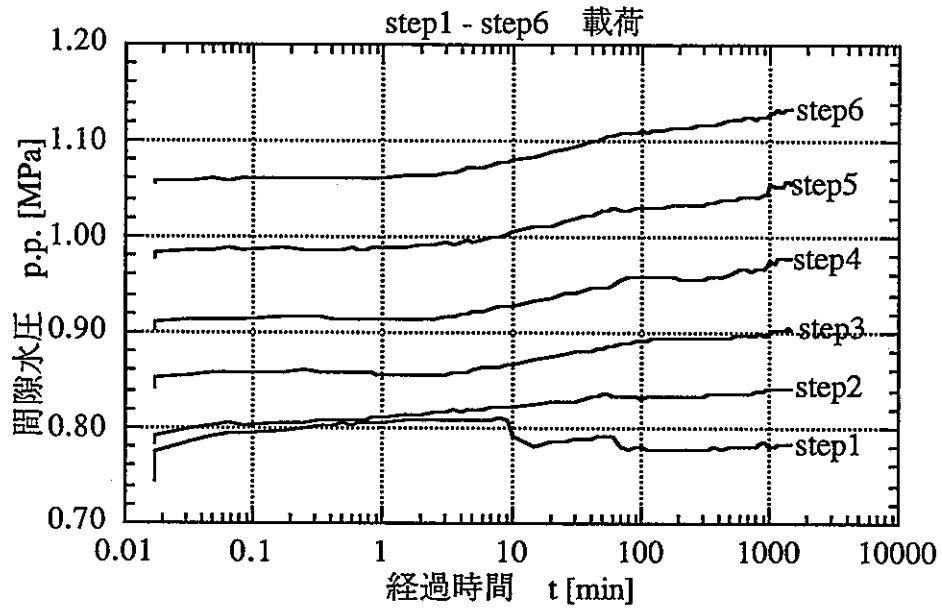


図5-4-3a 応力制御せん断試験結果 CU0-3
各stepにおける間隙水圧の経時変化3a

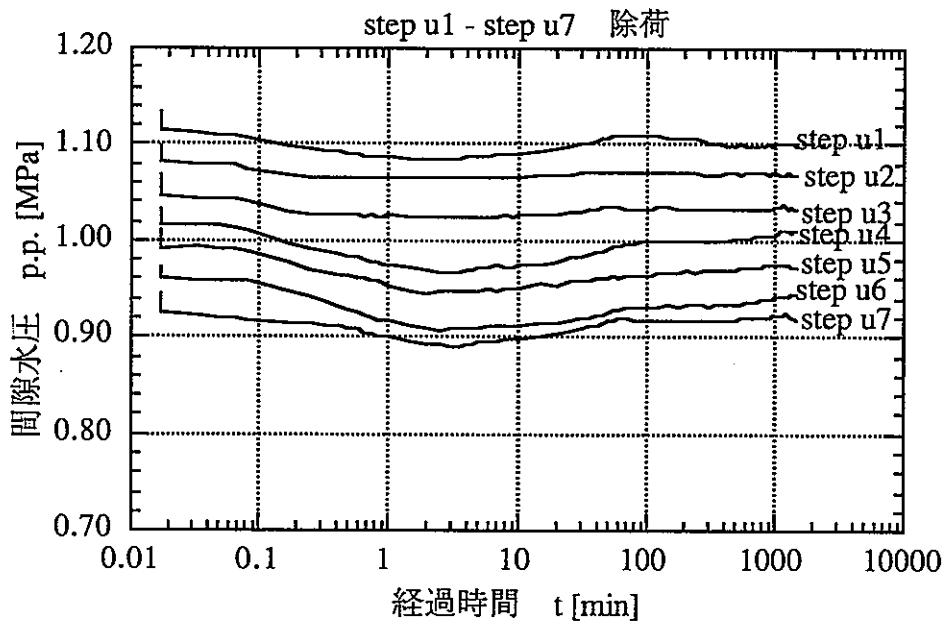


図5-4-3b 応力制御せん断試験結果 CU0-3
各stepにおける間隙水圧の経時変化3b

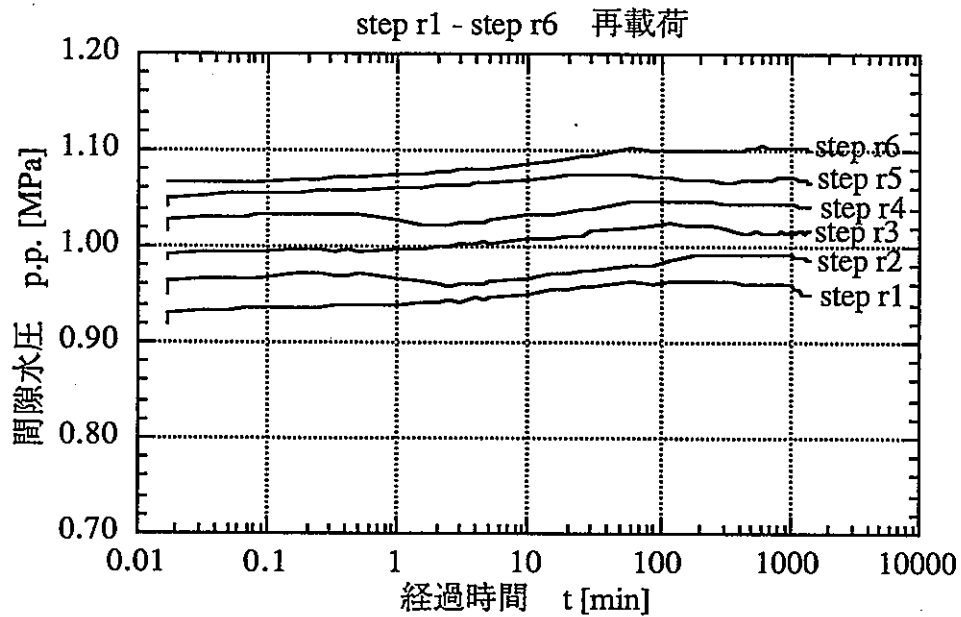


図5-4-3c 応力制御せん断試験結果 CU0-3
各stepにおける間隙水圧の経時変化3c

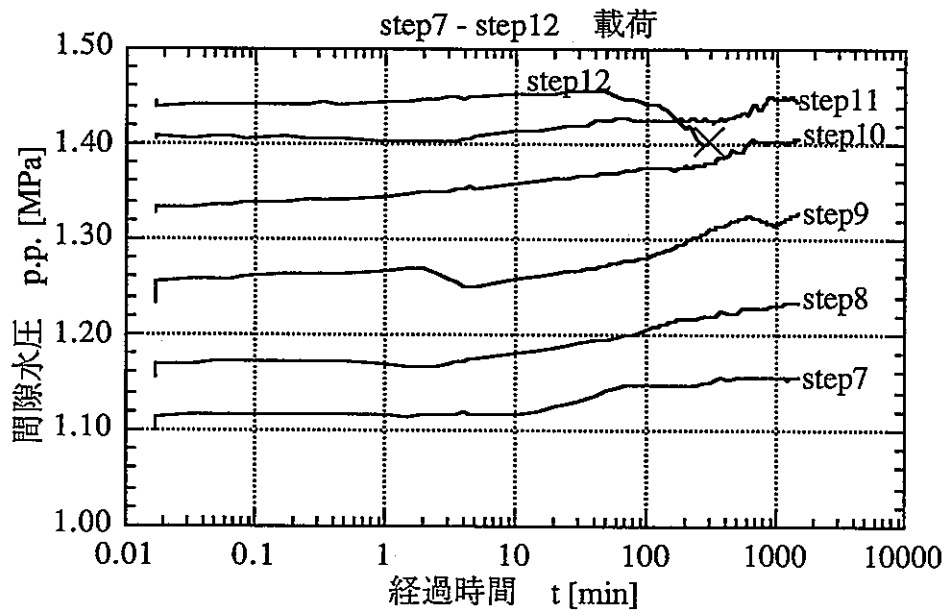


図5-4-3d 応力制御せん断試験結果 CU0-3
各stepにおける間隙水圧の経時変化3d

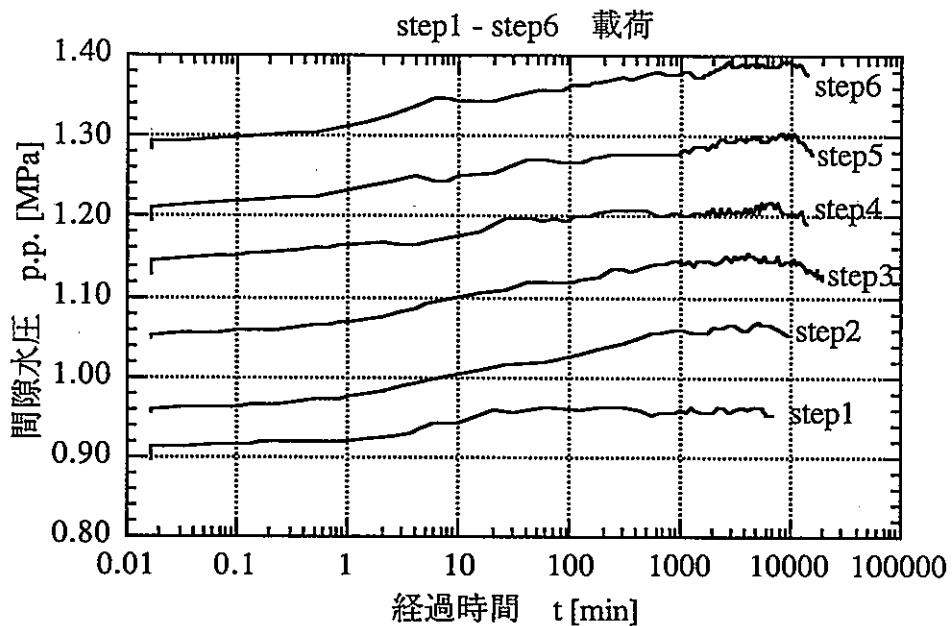


図5-4-4a 応力制御せん断試験結果 CU0-4
各stepにおける間隙水圧の経時変化4a

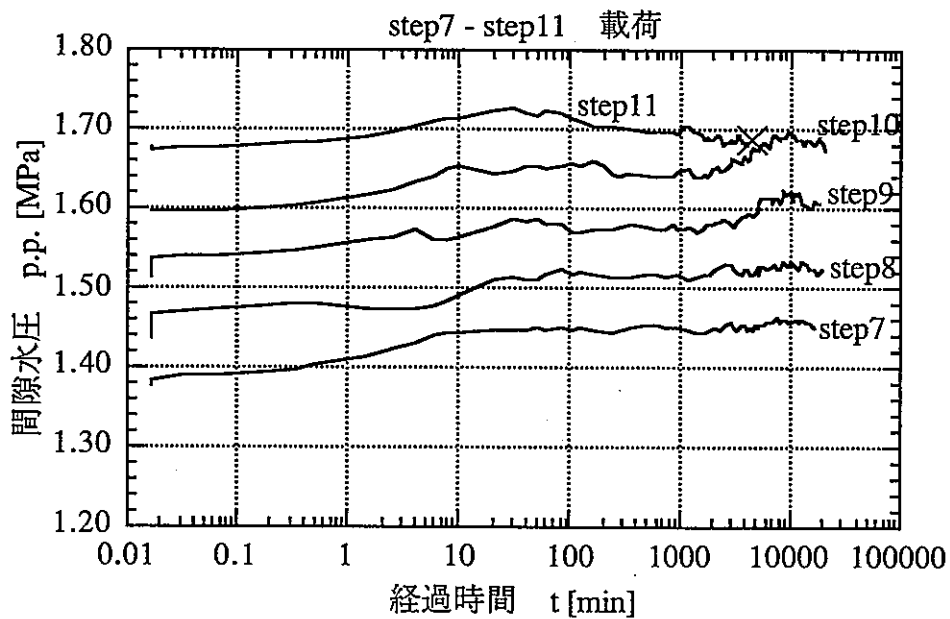


図5-4-4b 応力制御せん断試験結果 CU0-4
各stepにおける間隙水圧の経時変化4b

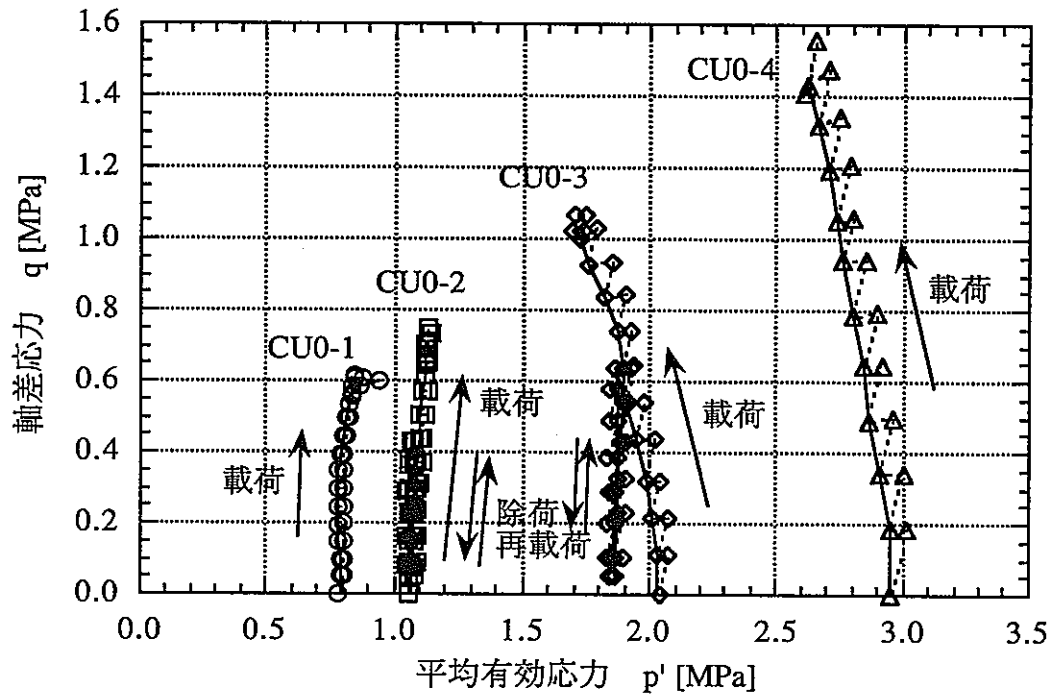


図5-5 応力制御せん断試験結果
有効応力経路

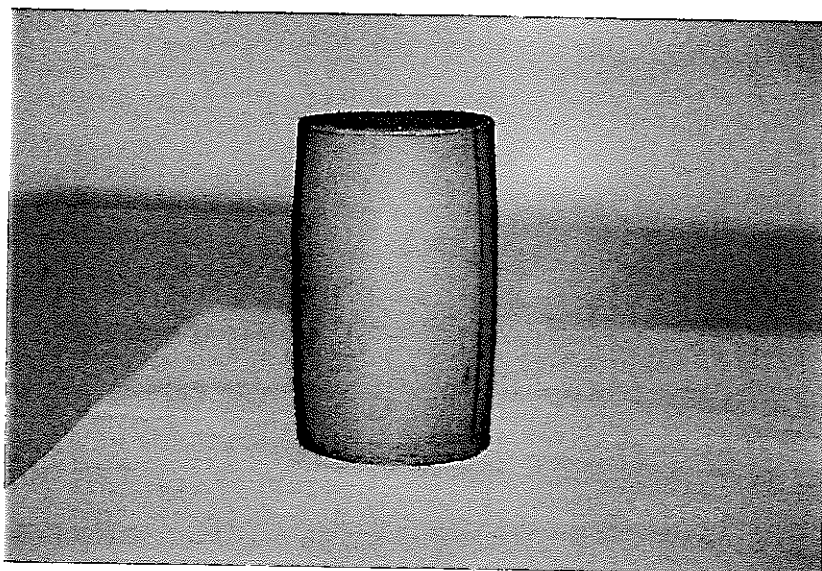
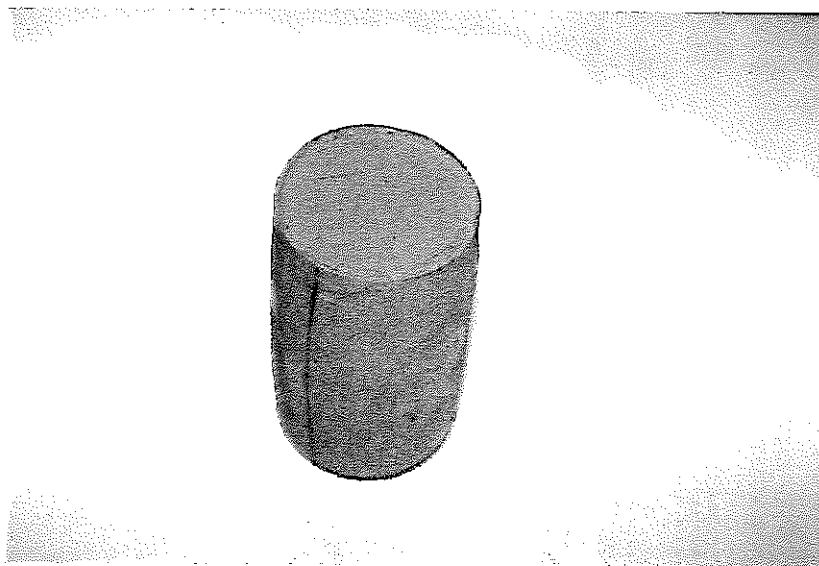


写真5-1 破壊後（試験終了後）の供試体外観例 CU0-1

5.2 ひずみ制御せん断試験結果

(1) 試験条件

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/mim（軸ひずみ速度は約0.01%/min）とし試験を行った。そして、軸ひずみ ϵ_a が15%を超えた時点で試験を終了した。（CU1-2のみ軸ひずみ ϵ_a が10%を超えた時点で試験を終了した。）

(2) 軸差応力-軸ひずみ関係

せん断中の軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a の関係を図5-6に示す。なお、軸差応力 q は軸ひずみ ϵ_a より半径方向ひずみ 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。図からわかるように、圧密応力が大きい供試体ほど同一軸ひずみ ϵ_a に対する軸差応力 q が大きくなっている。また、5.1章で述べた応力制御試験の結果と同様に、各試験結果とも軸差応力 q -軸ひずみ ϵ_a 関係が非線形関係となっている。そして、各試験とも軸ひずみ ϵ_a が7%に達したあたりで軸差応力 q が最大となっており、その後はほぼ一定もしくは若干低下している。

(3) 過剰間隙水圧-軸ひずみ関係

せん断中の過剰間隙水圧と軸ひずみ ϵ_a の関係を図5-7に示す。CU1-1を除く4試験では、せん断初期より軸ひずみ ϵ_a が増加するのに伴い、過剰間隙水圧が上昇していき、軸ひずみ ϵ_a が7-10%のあたりでほぼ一定となることがわかる。これら4供試体は正規圧密状態もしくは正規圧密と過圧密の中間の状態と考えられる。応力制御試験結果のところでも述べたが、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過剰間隙水圧の上昇は、せん断に伴う負のダイラタンシーが原因と考えられる。

一方過圧密状態と考えられるCU1-1では、他の試験と異なる結果となっている。せん断初期においては、他の試験と同様に過剰間隙水圧は上昇しているが、軸ひずみ ϵ_a が2%を超えたあたりより減少し始め、軸ひずみ ϵ_a が5%以上では過剰間隙水圧は負の値となっている。

(4) 有効応力経路

せん断過程における有効応力経路を図5-8に示す。図からわかるように、その結果は5.1章(5)で述べた応力制御せん断試験で得られた結果と同様の傾向を示している。供試体が正規圧密状態もしくは過圧密と正規圧密の中間の状態であると考えられるCU1-2, CU1-3, CU1-4, CU1-5の4試験の有効応力経路では、(3)で述べた負のダイラタンシーの影響と見られる過剰間隙水圧の上昇により、せん断に伴い平均有効応力 p' が減少していることがわかる。

一方供試体が過圧密状態であると考えられるCU1-1の試験では、せん断初期において平均有効応力 p' は若干減少しているが、軸差応力 q が0.5MPaを超えた辺りより平均有効応力 p' は上昇に転じている。そして、破壊時の平均有効応力 p' は初期平均有効応力 p_0' より大きい値となっている。

(5)供試体の破壊

各試験において、軸ひずみ ϵ_a が15%を超えた時点で試験を終了した（CU1-2のみ軸ひずみ $\epsilon_a=10\%$ で試験終了）。試験終了時の供試体の破壊状況の外観例（CU1-4）を写真5-2に示す。写真からわかるように、応力制御試験の結果と同様に、本供試体にも肉眼で明確なせん断破壊面が見られなかった。他の試験結果も同様の傾向を示しており、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なかった。

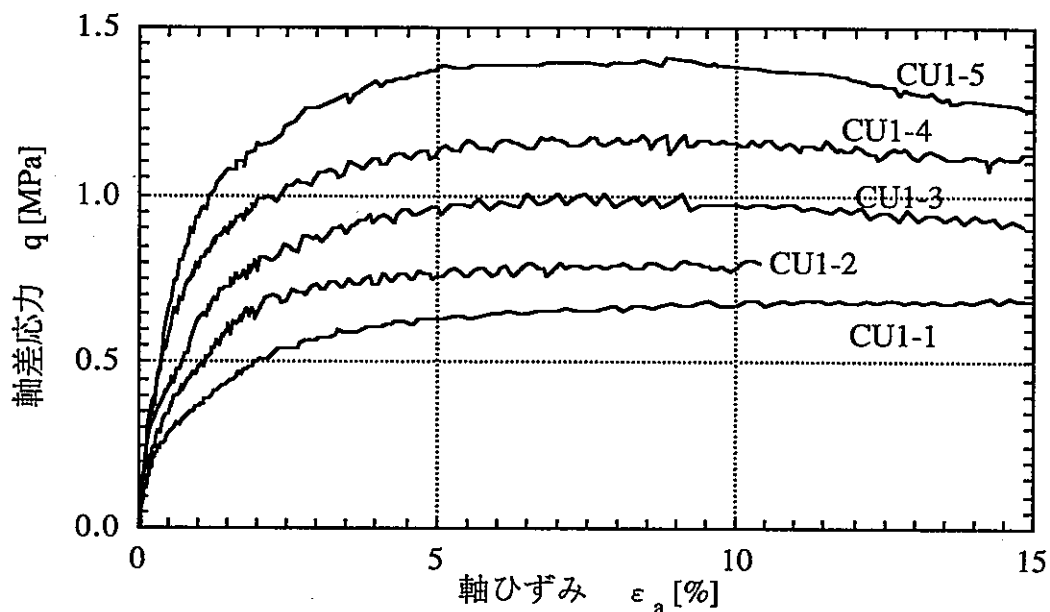


図5-6 ひずみ制御せん断試験結果
軸差応力-軸ひずみ関係

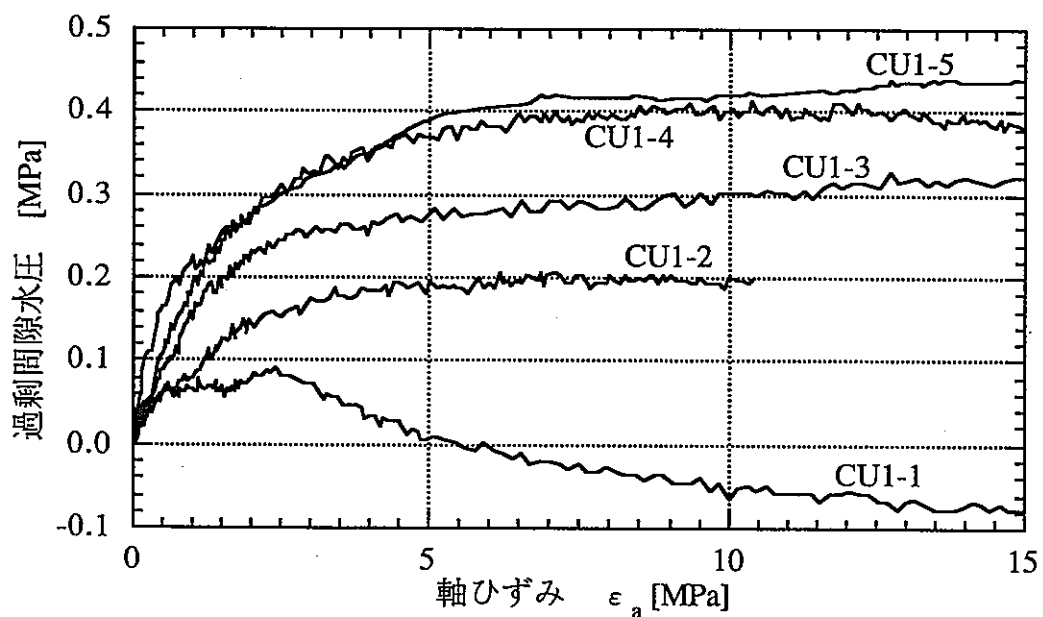


図5-7 ひずみ制御せん断試験結果
過剰間隙水圧-軸ひずみ関係

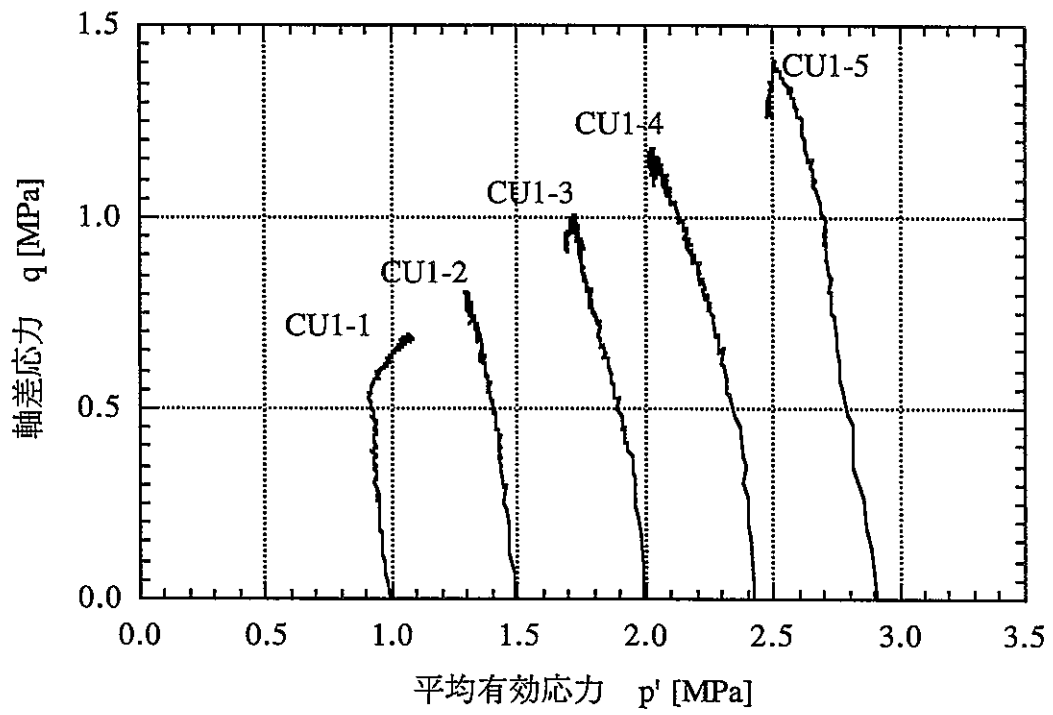


図5-8 ひずみ制御せん断試験結果
有効応力経路

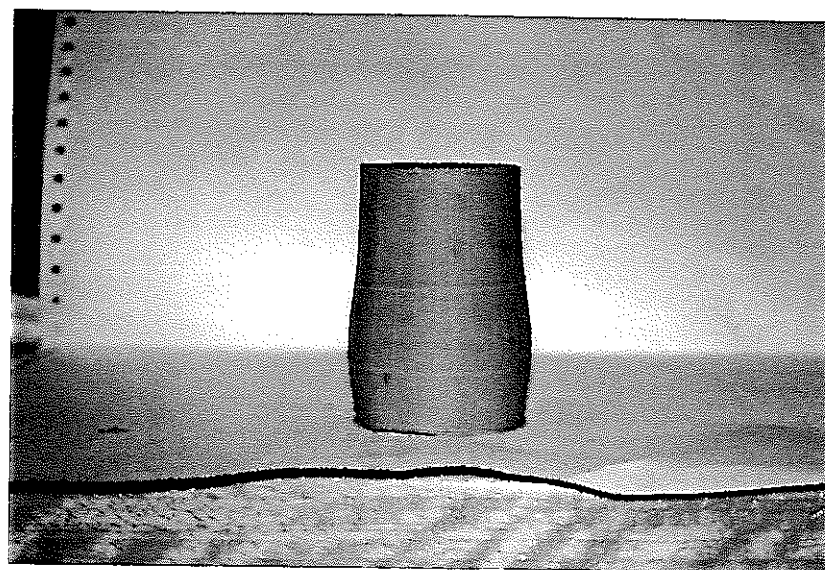
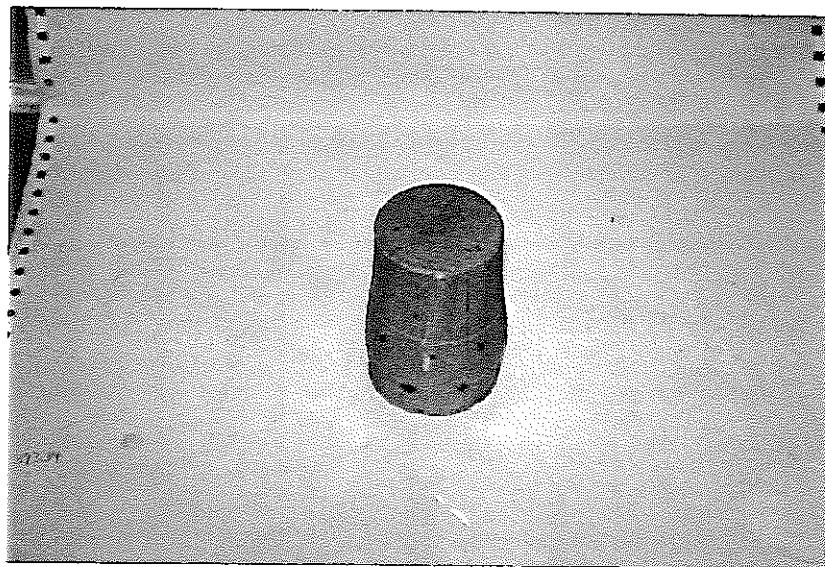


写真5-2 破壊後（試験終了後）の供試体外観例 CU1-4

6. 考察

6.1 有効応力経路

各試験における、せん断時の平均有効応力 p' と軸差応力 q の関係（応力経路）をまとめたものを図6-1に示す。ただし本図では、CU0-2, CU0-3の除荷及び再載荷過程の結果を省略している。以下では供試体が正規圧密状態で試験が行なわれたと考えられる試験（CU0-3, CU0-4, CU1-3, CU1-4, CU1-5）と、過圧密状態で行なわれたと考えられる試験（CU0-1, CU0-2, CU1-1）に分けて考察する。なお、その中間の状態と考えられるCU1-2については、正規圧密状態の結果とほぼ同様の傾向にあると考えられるが、その状態が明確でないのでここでは議論を行わない。

(1) 正規圧密状態での試験（CU0-3, CU0-4, CU1-3, CU1-4, CU1-5）

図6-1より、正規圧密状態と考えられる各供試体の有効応力経路は同じ傾向を示していることがわかる。各試験ともせん断中、軸差応力 q の増加に伴い過剰間隙水圧が発生し、平均有効応力 p' が減少している。5章でも述べたが、この過剰間隙水圧の上昇は、ベントナイト供試体がせん断中負のダイレタンシー挙動を起こしていることが原因と考えられる。つまり、せん断中ベントナイト供試体は負のダイレタンシーにより体積収縮しようとするが、非排水条件のため体積変化が抑制され、それが過剰間隙水圧の上昇を招いていると考えられるのである。

次に破壊時の応力比 q/p' であるが、正規圧密状態にあると考えられる各試験の供試体とも図6-1に示す傾き $M=0.58$ の限界状態線上で軸差応力 q はほぼ最大となり破壊していることがわかる。このように、拘束圧の異なる供試体がほぼ同一直線上で破壊するという挙動は、一般の正規圧密粘土にも認められる挙動である⁵⁾。この限界状態線の傾き M より粘着力 c を0とした場合の内部摩擦角 ϕ' を次式により求めることができる。

$$\phi' = \sin\left(\frac{3M}{6+M}\right)^{-1} \quad (6-1)$$

$M=0.58$ より、内部摩擦角 $\phi'=15.3^\circ$ が得られる。

次にCU0-3, CU0-4, CU1-3, CU1-4, CU1-5の有効応力経路を正規化したものを図6-2に示す。ただし本図でも、CU0-2, CU0-3の除荷及び再載荷過程の結果を省略している。ここでは、平均有効応力 p' は初期平均有効応力 p_0' で、軸差応力 q は平均有効応力 p' でそれぞれ正規化している。図から、各試験の結果はほぼ等しく、各応力経路は正規化することにより単一の曲線でほぼ表現可能であることがわかる。このような圧密応力が異なる試験での各有効応力経路の相似性は、一般の正規圧密粘土の試験期間（ひずみ制御試験の場合ひずみ速度）が同じ非排水せん断試験に認められる特徴である⁵⁾。

次に有効応力経路の時間依存性挙動について議論を行う。一般の正規圧密粘土の場合、試験期間（ひずみ制御試験の場合ひずみ速度）が有効応力経路に与える影響は大きく、通常試験期間が長いほど過剰間隙水圧の上昇は大きくなり、平均有効応力 p' が

減少することが報告されている⁵⁾⁶⁾。図6-2に示すように本試験結果では、試験期間が約4カ月のCU0-4の応力経路と、試験期間が約25時間のひずみ制御で行なわれた各試験の有効応力経路がほぼ同じ形状となっている。試験期間が非排水状態での有効応力経路に与える影響の原因のひとつとして、せん断前の圧密による2次圧密の影響が指摘されている⁷⁾。本試験では4.2章で述べたように、圧密後せん断前に数日間の期間、供試体を非排水状態で放置し、間隙水圧の変化がほぼ一定となった時点よりせん断を開始している。このことより、本試験のせん断中の過剰間隙水圧の上昇に対し、2次圧密による間隙水圧上昇の影響は小さいといえる。そしてこれがせん断期間が有効応力経路の形状に与える影響が小さい原因のひとつとなっていると考えられる。以上まとめると、2次圧密の影響がほとんどない場合、非排水せん断時における圧縮ベントナイトの有効応力経路は、せん断時間の影響をほとんど受けないといえることができる。

(2) 過圧密状態での試験 (CU0-1, CU0-2, CU1-1)

図6-1の有効応力経路より、供試体が過圧密状態にある試験では、(1)で述べた正規圧密状態での結果と異なり、せん断中平均有効応力 p' の変化はほとんどないことがわかる。このことより、過圧密状態にある供試体は、せん断による正負ダイレタンシー挙動を示さないことがわかる。また、各供試体は(1)で述べた傾き $M=0.58$ の限界状態線より上方で破壊している。このような挙動は、一般の過圧密粘土にも見られる挙動⁵⁾である。

以上(1)、(2)の結果を踏まえると、非排水せん断時の応力経路の結果の解釈において、4.1章での1次元圧密試験結果の圧密降伏応力 p_c' による過圧密か正規圧密かの判断はほぼ妥当であったといえ、圧縮ベントナイトにも通常の粘土と同様に、過圧密及び正規圧密の概念を適用できると考えられる。

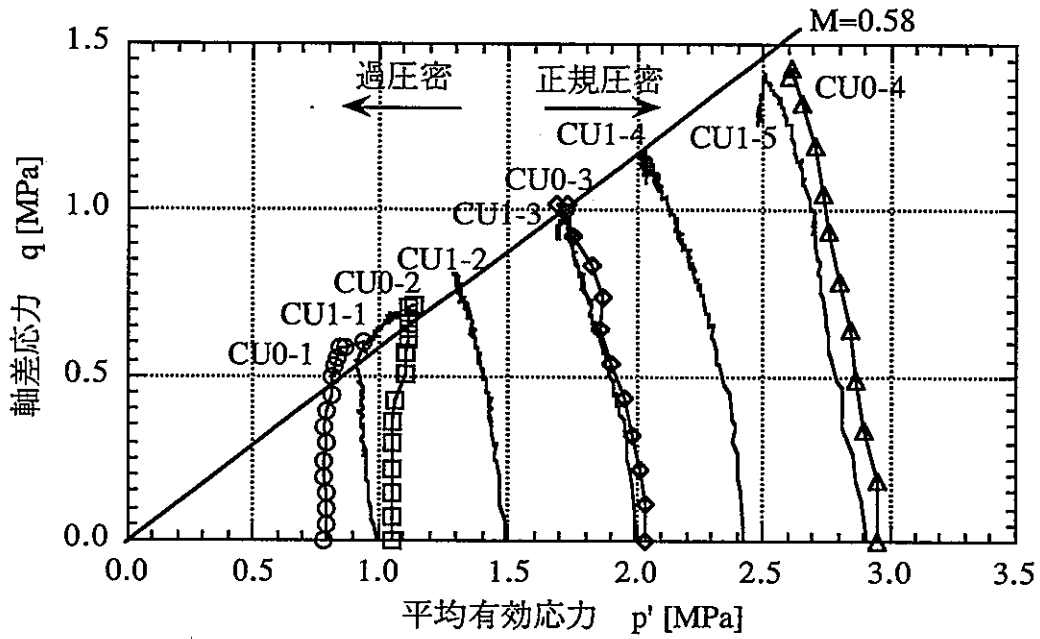


図6-1 有効応力経路まとめ
(CU0-2, CU0-3では除荷、再載荷過程省略)

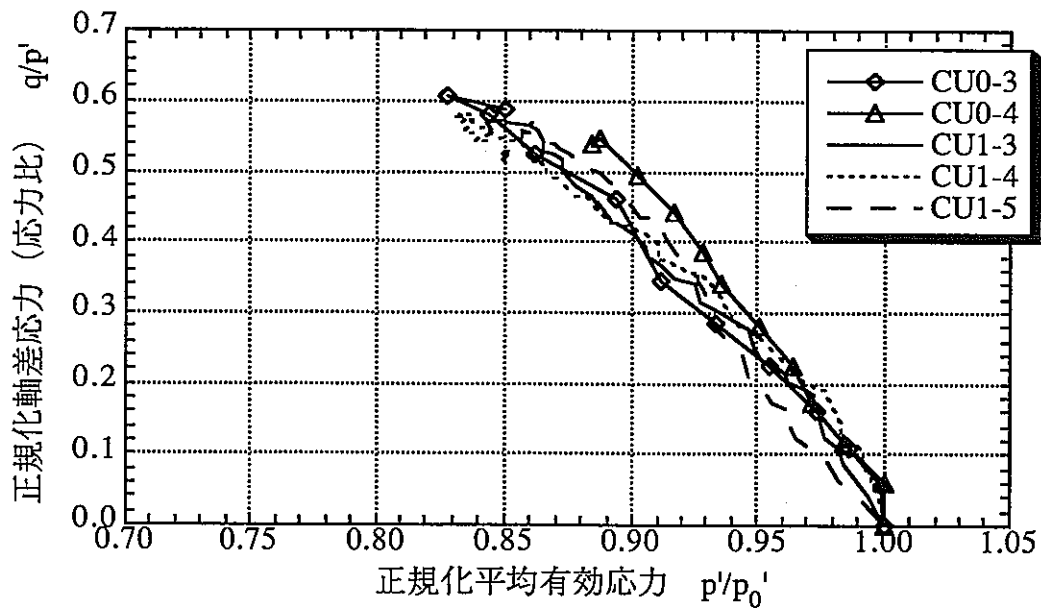


図6-2 正規化有効応力経路 正規圧密領域での試験
(CU0-3では除荷、再載荷過程省略)

6.2 軸差応力－軸ひずみ関係

せん断時における軸ひずみ ϵ_a と正規化した軸差応力（応力比） q/p' の関係を図6-3に示す。ただし本図では、CU0-2, CU0-3の除荷及び再載荷過程の結果を省略している。図より、正規化軸差応力 q/p' －軸ひずみ ϵ_a 関係においても、過圧密か正規圧密かで2つのグループに分けることができることがわかる。正規圧密状態で試験が行われたCU0-3, CU1-3, CU1-4, CU1-5の4試験の軸差応力 q －軸ひずみ ϵ_a は、平均有効応力 p' で正規化することによりほぼ一つの曲線で表現できるといえる。一方、過圧密状態で試験が行われたCU0-1, CU0-2, CU1-1の3試験の正規化軸差応力 q/p' －軸ひずみ ϵ_a 関係は、正規圧密供試体のそれより正規化軸差応力 q/p' の値が大きくなっていることがわかる。

しかしながら図6-3より、供試体が正規圧密状態にあると考えられるCU0-4の試験結果と、その他の正規圧密状態での試験結果が若干異なっていることがわかる。この相違は試験期間（ひずみ速度）の違いが主な原因であると考えられる。前述したが、ひずみ制御せん断試験の試験時間が約25時間、CU0-3の試験期間が13日（除荷過程及び除荷前の載荷荷重以下での再載荷過程を除く）であるのに対し、CU0-4の試験時間は約4ヵ月である。試験期間の長いCU0-4では、試験期間の短いひずみ制御せん断試験などに比較し、同じ正規化軸差応力 q/p' に対するひずみ量が大きくなっている。5.1章の応力制御せん断試験結果の軸変位の経時変化（図5-2-1aから図5-2-4b）からわかるように、軸荷重一定の場合、軸変位は時間とともに増加する。このような現象は、一般の粘土の変形挙動にも認められ、クリープ挙動として知られている⁵⁾。以上のことより、圧縮ベントナイトのせん断挙動にもクリープ挙動が認められ、このクリープ挙動は軸差応力 q －軸ひずみ ϵ_a 関係にも影響を与えることがわかる。

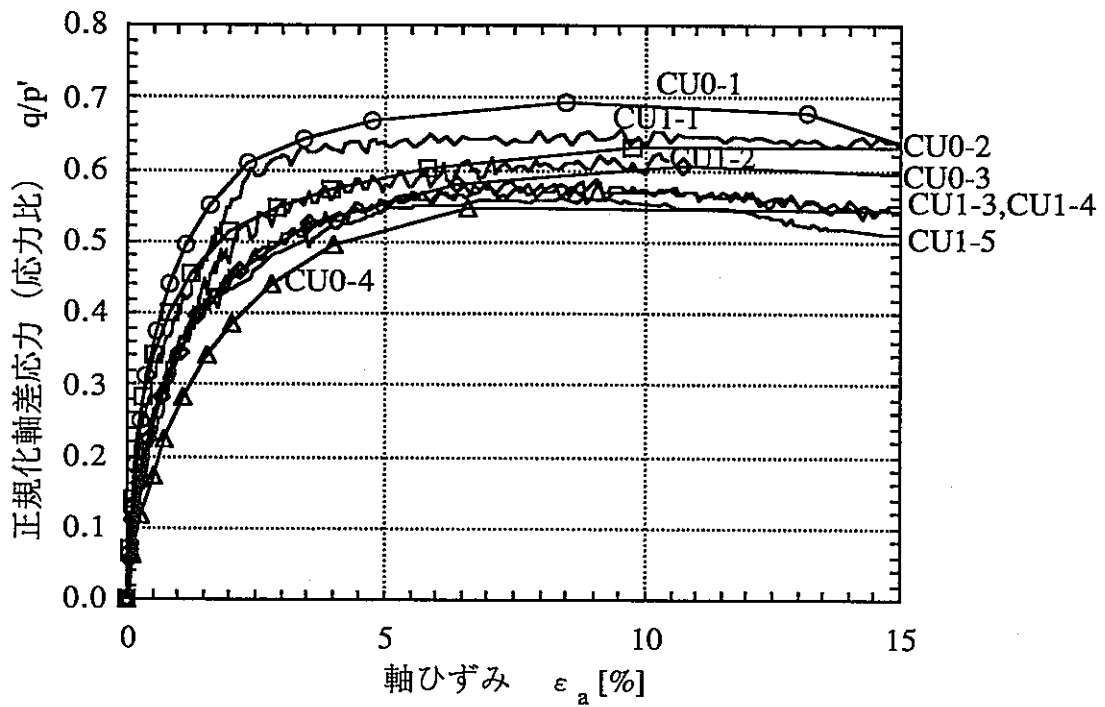


図6-3 正規化軸差応力-軸ひずみ関係
(CU0-2, CU0-3では除荷、再載荷過程省略)

6.3 除荷及び再載荷時の変形挙動

応力制御せん断試験CU0-2及びCU0-3では、せん断途中に除荷及び再載荷を行い、応力履歴が圧縮ベントナイトのせん断挙動に与える影響を調べた。前述しているが、CU0-2の供試体は過圧密状態、CU0-3の供試体は正規圧密状態にあると考えられる。両試験の有効応力経路を図6-4に示す。5.1章でも述べたが、両試験とも除荷過程及び再載荷過程では、平均有効応力 p' はほぼ一定で、過剰間隙水圧の増減は認められない。このことより、除荷及び再載荷過程では、ダイレタンシーなどのせん断による供試体の体積変化はほとんど発生していないことがわかる。

次にCU0-2及びCU0-3の軸差応力 q －軸ひずみ ϵ_a 関係を図6-5-1及び図6-5-2に示す。5.1章でも述べたが、両試験の軸差応力 q －軸ひずみ ϵ_a 関係はほぼ線形挙動となっている。そして、供試体が正規圧密状態にあるCU0-3のみならず、過圧密状態にあるCU0-2においても、軸差応力 q を除荷した時の軸ひずみ ϵ_a は載荷前の状態に戻っておらず、軸方向に塑性ひずみが生じていることがわかる。

この除荷及び再載荷過程において供試体が弾性体であると仮定した場合、軸差応力 q －軸ひずみ ϵ_a 関係より、そのせん断弾性係数 G を求めることができる。非排水3軸条件での弾性体のせん断弾性係数 G と軸差応力 q 及び軸ひずみ ϵ_a の関係は次式となる。

$$G = \frac{1}{3} \frac{dq}{d\epsilon_a} \quad (6-1)$$

本式より、軸差応力 q －軸ひずみ ϵ_a 関係において、直線の傾きの1/3がせん断弾性係数 G となることがわかる。図6-5-1、図6-5-2よりそれぞれの供試体の除荷及び再載荷過程におけるせん断弾性係数 G を計算すると、CU0-2の場合は $G=3.14 \text{ kN/cm}^2$ となり、CU0-3の場合は $G=4.98 \text{ kN/cm}^2$ となった。

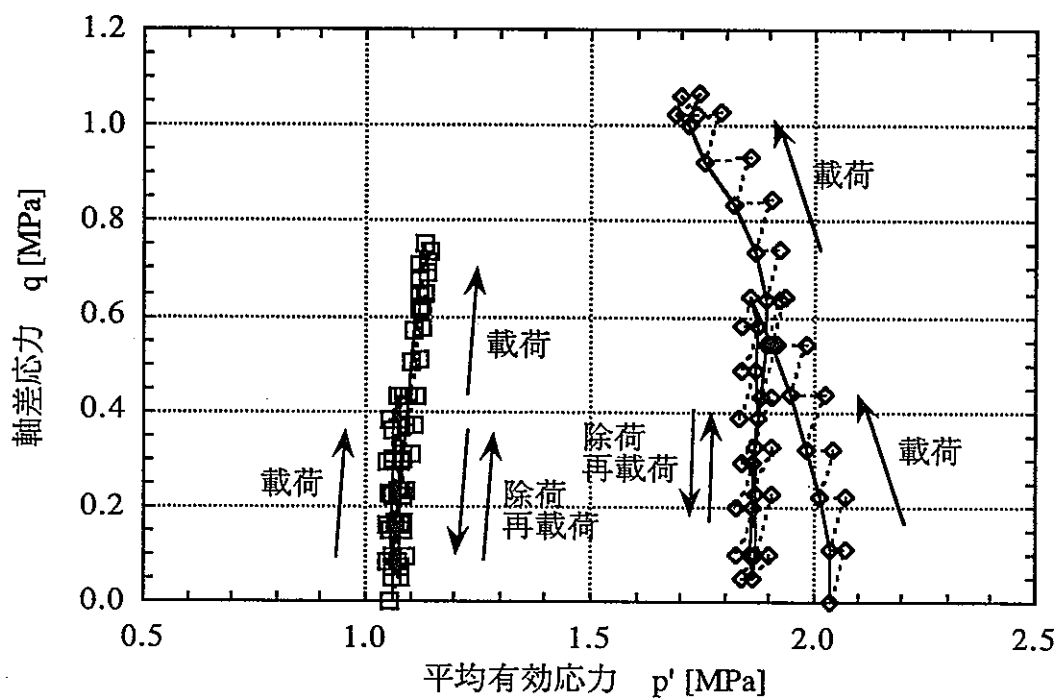


図6-4 有効応力経路 CU0-2, CU0-3
除荷、再載荷過程

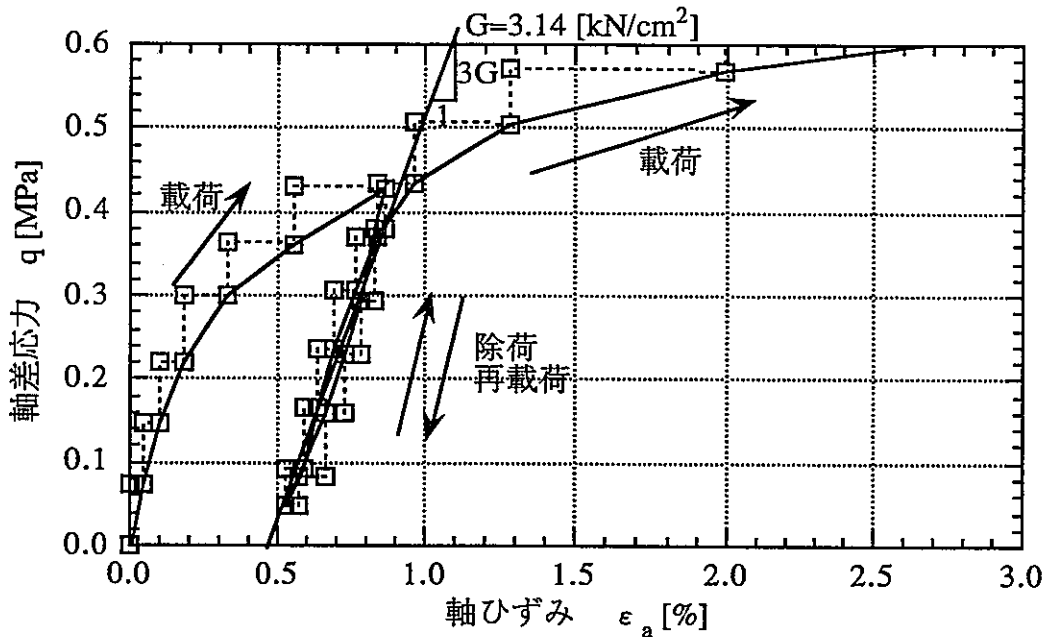


図6-5-1 軸差応力-軸ひずみ関係 CU0-2
除荷、再載荷過程

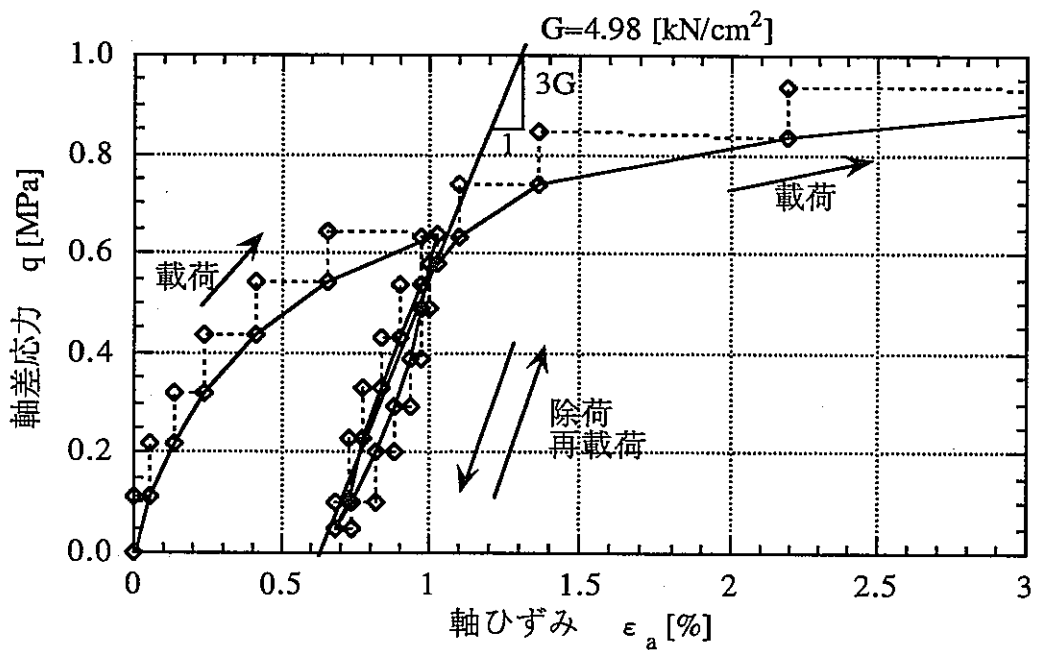


図6-5-2 軸差応力-軸ひずみ関係 CU0-3
除荷、再載荷過程

7. まとめ

飽和した圧縮ベントナイトの力学変形挙動を調べるために、圧密非排水3軸せん断試験を行い以下のことが明かとなった。

- (1) せん断前に圧密を行ったが、各試験での圧密後の供試体の e - $\log p$ 関係は1次元圧密試験の結果に比較して妥当なものであった。また、1次元圧密試験より得られた圧密降伏応力 p_c' と各試験での圧密応力より、正規圧密状態の供試体と過圧密状態の供試体に分けることができた。
- (2) 各試験でのせん断過程における軸ひずみ ϵ_a と軸差応力 q の関係は、過圧密、正規圧密にかかわらず非線形関係となった。各供試体とも軸ひずみ ϵ_a が7%前後で破壊に達し、その後軸差応力 q は一定もしくは若干減少した。
- (3) 正規圧密状態での各試験では、せん断過程における平均有効応力(p')と軸差応力(q)の関係(有効応力経路)は、各試験とも同様の傾向を示した。各試験とも、せん断中負のダイレタンシーが原因と考えられる過剰間隙水圧の上昇が認められた。また、正規化することで拘束圧の異なる試験での有効応力経路を一つにまとめることができたことがわかった。また、2次圧密の影響を小さくした本試験の場合、その有効応力経路の形状にあたる時間依存性の影響は小さいことがわかった。
- (4) 正規圧密状態での各試験では、 q - p' 関係において同一の破壊線(限界状態線)上で供試体がほぼ破壊した。その破壊線(限界状態線)の傾き M は0.58で、内部摩擦角 ϕ に換算すると 15.3° であった。
- (5) 試験期間がほぼ同じ正規圧密状態での各試験において、軸差応力 q を平均有効応力 p' で正規化した q/p' と軸ひずみ ϵ_a の関係を一つの曲線で表現できることがわかった。
- (6) 過圧密状態での各試験では、せん断中における過剰間隙水圧の上昇は認められず、平均有効応力 p' はほぼ一定であった。
- (7) 応力制御せん断試験での除荷及び再載荷過程において、軸差応力 q -軸ひずみ ϵ_a 関係はほぼ線形関係となった。また、過圧密、正規圧密にかかわらず除荷時のリバウンド量は載荷時の変位量の半分以下で、軸方向に塑性ひずみが発生していることが認められた。
- (8) 応力制御せん断試験での除荷及び再載荷過程において、過剰間隙水圧の増減はほとんどなく、平均有効応力 p' はほぼ一定であった。
- (9) 応力制御せん断試験結果において、軸荷重一定下で軸ひずみが経過時間とともに増加するクリープ現象が認められた。また、正規化軸差応力 q/p' -軸ひずみ ϵ_a 関係においても、時間依存性挙動の影響が認められた。
- (10) 試験後の各供試体には肉眼で確認できるような破壊すべり面は存在しなかった。

謝辞

本試験の実施にあたっては、鈴木英明氏の御協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土質試験の方法と解説 土質工学会
- 2) 藤田朝雄、五月女敦、原啓二；緩衝材の力学試験、動燃技術資料 PNC TN8410 92-170、1992
- 3) 並河努、菅野毅；緩衝材の圧密特性、動燃技術資料 PNC TN8410 97-051、1997
- 4) 関口秀雄；カムクレイに学ぶ 6.カムクレイとその後の発展、土と基礎Vol.41、No.11、pp.97-102、1993
- 5) 足立紀尚、龍岡文夫；新体系土木工学18 土の力学(3) - 圧密・せん断・動的解析 技報堂出版
- 6) Sekiguchi,H ; THEORY OF UNDRAINED CREEP RUPTURE OF NORMALLY CONSOLIDATED CLAY BASED ON ELASTO-VISCOPLASTICITY,SOILS AND FOUNDATIONS,Vol.24,No.1,pp.129-147,1984
- 7) ARULANANDAN,K. SHEN,C.K. YOUNG,R.B. ; UNDRAINED CREEP BEHAVIOUR OF A COASTAL ORGANIC SILTY CLAY, Geotechnique 21,No.4,pp.359-375,1971