

琉球大学学術リポジトリ

飽和粘土の体積一定せん断試験に関する研究

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-08-23 キーワード (Ja): キーワード (En): Saturated Clay, Critical State, State Boundary Surface, Undrained Shear Test, Constant Volume Test, The Distribution of Water Content 作成者: 上原, 方成, 原, 久夫, 大城, 歓, Uehara, Housei, Hara, Hisao, Ooshiro, Kan メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1438

飽和粘土の体積一定せん断試験に関する研究

上原方成* 原久夫** 大城歓***

A Study on Shear Test under Constant Volume Condition of Saturated Clay

Housei UEHARA* Hisao HARA** Kan OOSHIRO***

Abstract

The three shear tests under constant volume condition were carried out to clarify the coincidence of the stress path of the undrained shear test with constant volume test to confirm the introduction of state boundary surface concept. Experimentally those three stress paths of tests were given similarly. As a result, the validity of concept of the state boundary surface was confirmed. Also, the distribution of water content in the specimen during shear were measured to make sure the effect on the shearing behavior. The distribution of internal water content had changed according as the shear progressed, showing high water content in the top and bottom region and low water content in the center of the specimen.

Key Words: Saturated Clay, Critical State, State Boundary Surface, Undrained Shear Test, Constant Volume Test, The Distribution of Water Content

1. まえがき

土の応力状態が p', q で、体積比を f と定義したとき、土要素の状態を状態空間 (p', q, f) の点で表わすと、圧密排水せん断試験、圧密非排水せん断試験の応力経路は図-1 を使って説明できる。正規圧密状態にある土に荷重を加えると、その状態点は排水、非排水経路にかかわらず限界状態線 (CSL) と正規圧密線 (NCL) の間にある状態境界面 (圖で示す部分) を移動する。たとえば非排水経路は、体積比一定であるから、状態境界面と f 一定面との交線 SN で与えられる。

この考え方は、Cambridge 大学の A.N.Schofield らによって提唱され、状態境界面を用いることによって、それまで土質力学において別々に取り扱われてきた変形の問題と破壊の問題を一つの流れに沿って説明し、土の変形挙動を比較的良好に表現できるという特徴を持っている。しかし、状態境界面の概念は導入するにあたって次のような疑問が残されていた。

状態境界面の概念は、せん断中の体積変化を測定する正規飽和粘土の排水試験を行い、等体積比線が非排水せん断試験の応力経路とほぼ一致するという仮定により得られた概念であり、実際に体積一定条件の排水せん断試験 (定体積せん断試験) を行い、両者を直接比較したわけではない。現在まで、定体積せん断試験はその制御の難しさのためほとんど実施されず、定体積せん断試験と非排水せん断試験の応力経路が実際に一致するかどうかを直接確かめた例はない。

本研究では、①非排水せん断試験、②定間隙水圧非排水せん断試験、③定体積せん断試験の3種類の体積一定せん断試験を行った。これらの試験は、粘性土の定体積せん断試験によって体積一定排水せん断経路を求めることと、排水条件の異なる3種類の体積一定せん断試験の結果を比較することにより、間隙水圧の発生や排水、非排水条件の違いが粘土の変形に与える影響を調べることを目的としている。

また、土の変形挙動は、応力だけでなく間隙水圧、体積比とも深くかかわっている。とくに粘性土のように透水性の低い土では、間隙水の移動に時間がかかり、供試体内部

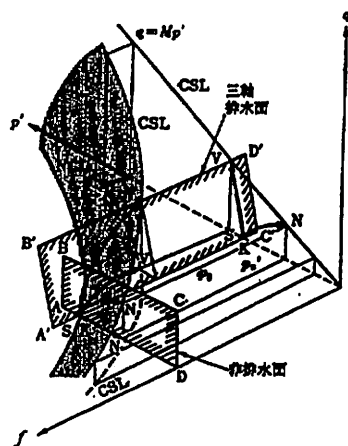


図-1 (p', q, f) 空間における正規圧密粘土の排水経路と非排水せん断経路¹⁾

受理 1996年5月20日

*工学部環境建設工学科 Dept. of Civil Engineering & Architecture, Fac. of Eng.

**工学部環境建設工学科 Dept. of Civil Engineering & Architecture, Fac. of Eng.

***工学部大学院工学研究科建設工学専攻 Graduate student, Architectural and Civil Engineering

の体積変化や間隙水圧の分布は一様でない可能性があり、それがせん断挙動になんらかの影響を与えていることも考えられる。

本研究では、そのようなことを考慮して供試体を細かく分割して含水比を測定する装置を開発し、供試体内部の含水比分布を求めた。さらに、その分布の変化、供試体内部の水の移動を把握し、それを引き起こす圧力差、すなわち間隙水圧の分布についても検討および考察を行った。

2. 実験方法

2.1 島尻層泥岩について

実験では、島尻層泥岩をサンプリングし、粉砕したものを試料として使用した。島尻層泥岩は第三紀中新世から鮮新世にかけての海成堆積物で、琉球石灰岩などの基盤をなし、上載荷重や自重などによって長期間にわたって圧密された半固結～固結泥岩である。沖縄本島においては図2に示すように、具志川市天願から北谷町砂辺に抜ける天願断層以南の地域に分布する²⁾。

現在表層に見られる島尻層泥岩は琉球層群の堆積後に地殻変動や海面変動、上層部分の風化などにより昇降が繰り返され（上載荷重が除荷）過圧密状態にある。

島尻層泥岩は構造物基礎の良好な支持層とされているが比較的軟質であり、大気中にさらされたり自由水と接触するとスレーキングを起こし、吸水膨張により強度が著しく低下するなどの泥岩に共通に見られる性質をもっている。なおpHは8以上でアルカリ性である。

2.2 供試体の作成

- ① 搬入した固結状態の島尻泥岩を木づちで打ち砕き、 $2000\mu\text{m}$ ふるい通過分を水に浸す。
- ② 液性限界の2倍以上の含水比を保って攪拌機で十分に練り返す。
- ③ 1.5cm 径モールドに練り返した試料の $425\mu\text{m}$ ふるい通過分を満し、1～2日間放置する。
- ④ 高圧圧密試験装置を用いて鉛直圧密圧力 49kPa で圧密沈下が終了するまで（20日間） K_0 圧密する。

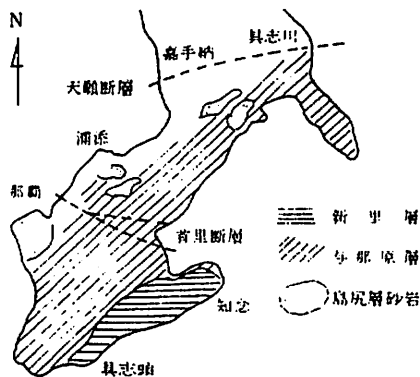


図-2 島尻層の分布概略図²⁾

⑤ 圧密終了後モールドから油圧ジャッキを用いて試料を取り出し、直径 5cm 、高さ 10cm の円柱供試体が取れるように4等分する。

⑥ 試験を行うまでに含水比に変化が無いように供試体を養生箱で養生する。

表-1に島尻粘土の物理的性質を示す。

表-1 島尻粘土の物理的性質

液性限界	L.L=53.7%
塑性限界	L.L=26.1%
塑性指数	1.P=27.6
土粒子の密度	2.74g/cm^3
粒度分布	砂礫分 10.2%
	シルト分 44.6%
	粘土分 45.2%

2.3 体積一定せん断試験³⁾

2.3.1 試験の種類

体積一定せん断試験は、通常为非排水せん断試験と特殊な非排水試験である定間隙水圧非排水試験、特殊な非排水せん断試験である定体積せん断試験の三種類である。図-3を用いてその三種類の試験を説明する。

a. 非排水せん断試験

これは通常的非排水せん断試験であり、排水コックを閉じることにより排水を抑え、供試体内の体積を一定にしてせん断を行う試験である。（図-3.a）

b. 定間隙水圧非排水せん断試験

せん断時に三軸試験機の排水コックを閉じ、体積一定の条件（非排水条件）を満たす。定間隙水圧非排水せん断試験では側圧を制御（減圧）して内部の過剰間隙水圧の発生を抑えて間隙水圧を一定に保ちながらせん断する。この試験は過剰間隙水圧を発生させない非排水せん断試験といえる。（図-3.b）

c. 定体積せん断試験

せん断時に三軸試験機の排水コックを開いてせん断を行う。側圧を制御（減圧）することにより間隙水の移動を抑えて、体積一定の条件を満たそうとするものである。この試験は排水させない（体積一定）排水せん断試験といえる。（図-3.c）

また、このような三種類のせん断試験によって次のようなことが比較、検討できる。

- ① 過剰間隙水圧が発生する非排水せん断試験と発生しない定間隙水圧非排水せん断試験を比較することにより、間隙水圧の発生が応力径路に与える影響を調べることができる。
- ② 定体積せん断試験から、粘性土の体積一定排水せん断時の応力径路が求まる。また、これと非排水せん断試験、定間隙水圧非排水せん断試験を比較することにより、排水、非排水条件の違いによる影響について調べることができる。

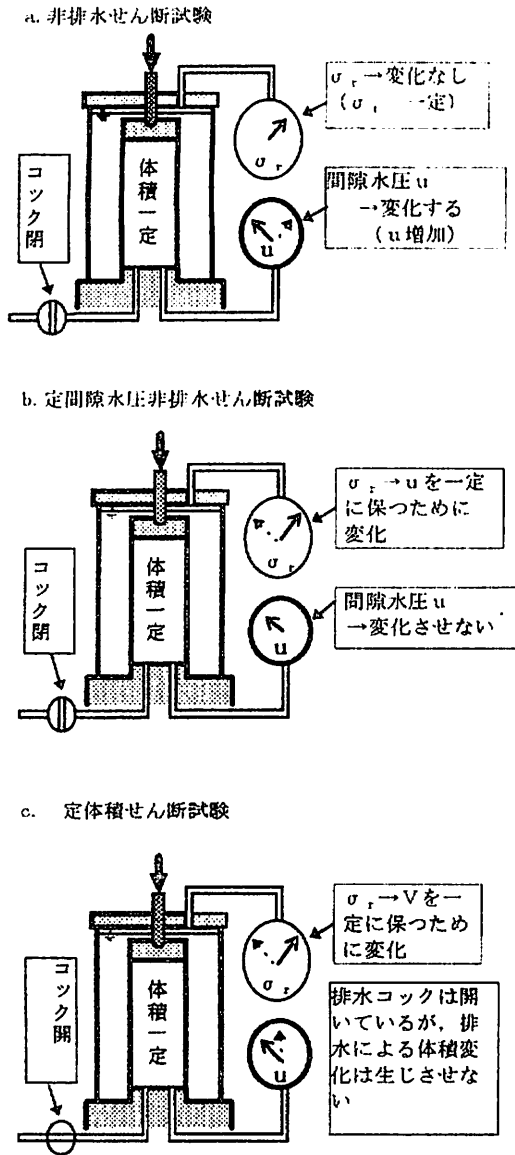


図-3 三種類の体積一定せん断試験の概要

2.3.2 試験手順

体積一定せん断試験は次の手順に従って行う。(図-4 参照)

(1) 等方圧密過程

所定の有効側圧 ($\sigma_v = 98.1 \text{ kPa}$) を載荷して24時間等方圧密を行う。(経路O→A)

(2) せん断過程 (経路A→F)

a. 非排水せん断試験

ひずみ速度 $0.01\%/min$ で非排水せん断する。

b. 定間隙水圧非排水せん断試験

ひずみ速度 $0.01\%/min$ で定間隙水圧非排水せん断試験を行う。

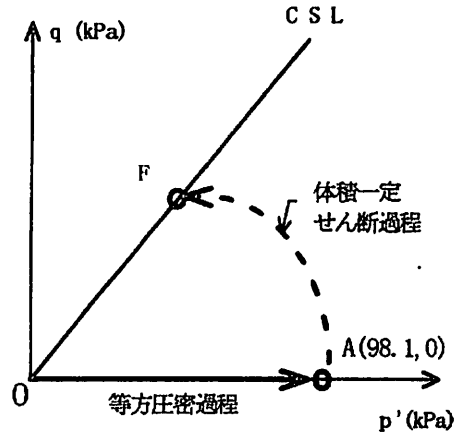
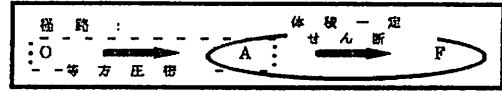


図-4 試験応力経路概念図

c. 定体積せん断試験

ひずみ速度 $0.01\%/min$ で定体積せん断試験を行う。

2.4 供試体内部含水比分布測定試験⁴⁾

供試体を分割し、含水比を測定してその分布を求める際には、次の三つの問題が生じる。

- ① 詳しい含水比分布を得るためには、土を細分割する必要があるが、その場合土の質量は小さくなるので、サンプリング時の乱れや表面からの水分の蒸発等が測定値に大きな影響を及ぼす。
- ② 含水比分布を正しく求めるためには供試体からのサンプリング位置を正確に知ることが必要である。
- ③ サンプリングする幅や個々の試料の量がほぼ等しくなることが望まれる。

本研究の実験ではこの三つの問題を克服するためにチューブ貫入式含水比分布測定装置を開発し、測定に用いた。その概要は次のようなものである。

土の取り出しは小さく軽量のサンプリングチューブを買入して行い、その土の入ったチューブをチューブケースに入れ質量を測定する。これにより試料の乱れ、測定中の土の欠落、および表面乾燥を防ぎ、速やかに質量を測定することができる。

また、チューブとチューブケースにはナンバーが刻印されており、チューブはあらかじめ決まった配列でホルダーに固定され、供試体に所定の位置でまとめて買入されるので、個々のサンプリング位置を正しく知ることができる。この装置を用いることにより含水比分布を迅速かつ比較的容易に行うことが可能となる。

2.4.1 含水比分布測定試験の測定点

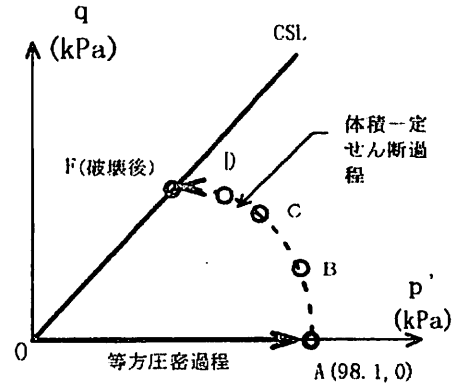
含水比分布測定試験を行う供試体は2.3節で説明した三つの体積一定せん断試験での供試体である。その測定を行う状態は基本的には初期状態、等方圧密後、体積一定せん断過程の途中の供試体（せん断破壊前の状態）とせん断終了時の供試体（せん断破壊後の状態）を設定した。

まず供試体の初期状態の内部状態を調べるため、等方圧密試験前の供試体に対して測定を行う。（図-5, 0点）

次に、せん断前の供試体内部状態を調べるために、等方圧密後の供試体について測定を行う。（図-5, A点）

この2つの状態での測定は3つの体積せん断試験で共通である。

表-2に、含水比分布測定試験の測定点の一覧表を示す。



(a) 応力経路概念図

2.4.2 試験方法

①供試体を厚さ 1.5cm（供試体にせん断面が見られる場合は、真横から見てせん断面が分かるように）になるように縦方向にトリミングした後、上下に二分割する（図-6）。

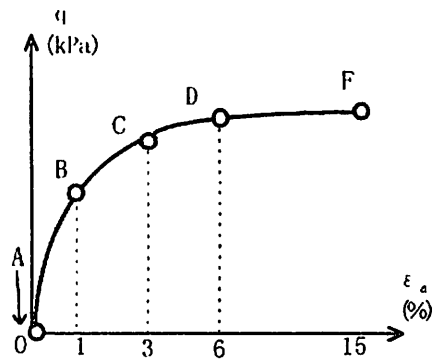
②上下に分割した切り口がガイドの目印に合うように供試体の上半分を置き、もう半分は乾燥を防ぐため、あらかじめ用意した湿潤箱に入れておく。

③ホルダーに固定したチューブをガイドに沿って供試体に押し込む。その後、ホルダーをガイドから外す。

④もう半分にも②、③を繰り返す。土を押し込んだチューブは測定するまでホルダーごと湿潤箱に入れ乾燥を防ぐ。

⑤ホルダーのねじをゆるめチューブを取り出し、チューブのまわりに付着した試料をきれいに拭き取り、土粒子のサンプリングを行う。

⑥もう半分についても同様にサンプリングする。



(b) 応力-ひずみ関係概念図

次にそれぞれの試験のチューブの配列を図-7に示す。チューブには番号が刻印されており、その本数は120本である（図-7(a)）。せん断破壊後の供試体では径方向のふくらみと高さの減少を考え、122本である（図-7(b)）。

図-5 含水比測定点概念図

表-2 含水比分布測定試験の測定点

体積一定 せん断の種類	軸ひずみ速度 (%/min)	初期状態	等方圧密後	測定点の軸ひずみ			
				1%	3%	6%	15%
非排水せん断試験	0.01	○	○	○	○	○	○
高速非排水 せん断試験	1.00	○	○	-	○	-	○
定間隙水圧 非排水せん断試験	0.01	○	○	-	○	-	○
定体積せん断試験	0.01	○	○	-	○	-	○

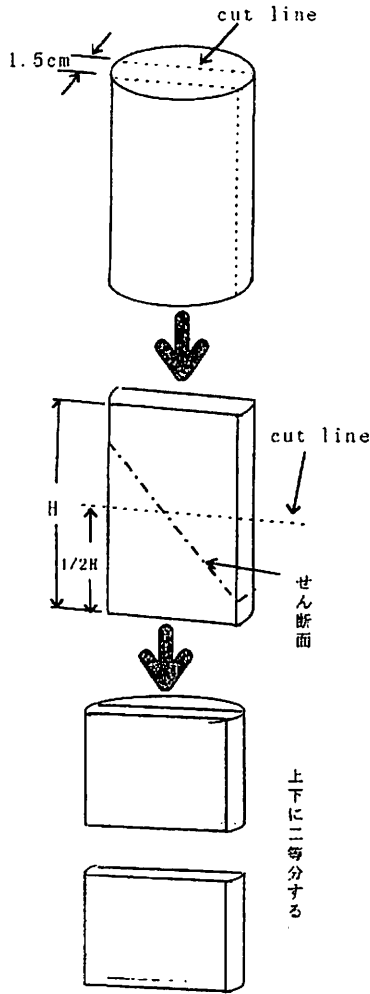
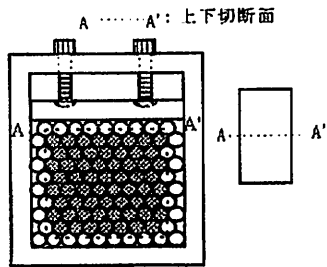
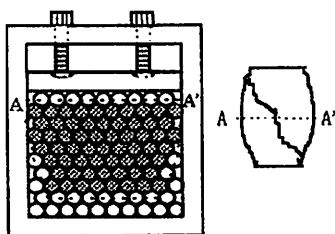


図-6 供試体のカット



(a) 等方圧密後, およびせん断途中



(b) せん断破壊後

図-7 チューブの配列と供試体の位置

3. 結果と考察

まず最初に三種類の体積一定せん断試験の試験結果および考察を, 続いて 供試体内部含水分布試験について試験結果および考察を述べる.

3.1 定体積せん断試験の体積一定条件の確認

図-8 に定体積せん断試験のせん断過程での, せん断ひずみ γ と体積ひずみ ϵ_v の関係を示す. 図により, 体積ひずみは, せん断過程の全体をを通じてほとんど発生していないため体積一定条件の下で試験が行われたことが確認される.

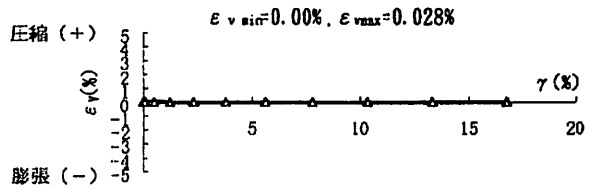


図-8 定体積せん断試験の体積一定せん断過程のせん断ひずみと体積ひずみの関係

3.2 破壊点と限界状態の応力状態, および応力経路

図-9 は応力経路図である. 限界状態線の勾配の値 $M=1.436$ は, 本実験シリーズの結果より求めたものである. その決定方法は, 応力比 η の最大値 η_{max} を M とする方法を採用した. この M の決定方法は, 既往の研究^{5) 6)} において供試体の応力異方性や非排水せん断時のひずみ速度などの影響の少ないことが確認されている.

それぞれの結果から求めた M と破壊点 (最大強度点) の応力比 η_r , および, η_r と M の比 η_r/M の値を表-3 に示す. 図-9 と表-3 より, 限界状態線の勾配と破壊点の応力比は, 近い値を示していることがわかる. また, それぞれの値を比較すると, 非排水せん断試験, 定体積せん断試験の場合 M と η_r はかなり近い値を示している. 一方, 定間隙水圧非排水せん断試験の場合, M , η_r は両者とも, 他の二試験と比して一割程度高い値を示しているが, これはばらつきの範囲内であると考えられる.

3.3 体積一定せん断過程での応力経路の比較

次に, 三種類の体積一定せん断過程の応力経路の比較を, 図-10 に示す. ここで, p'_c は, 圧密応力である. 最大強度付近を除けば, 非排水せん断試験と定間隙水圧非排水せん断試験の応力経路はほとんど一致している.

定体積せん断試験も, これらの経路とかなり近い経路を示しているが, 先の二種類の非排水せん断試験よりも, わずかに p'/p'_c 軸の負の方向にシフトしたような, 偏差応力のやや低い応力経路となっている.

表-3 三種類の体積せん断試験の破壊時の応力比 η_r と限界状態線の勾配 M の比較

体積一定せん断試験名	破壊時のせん断ひずみ γ_r (%)	破壊時の応力比 η_r	限界状態線の勾配 $M (= \eta_{max})$	破壊点の相対応力比 η_r / M
非排水せん断試験	7.14	1.345	1.368	0.983
定間隙水圧非排水せん断試験	10.67	1.492	1.552	0.961
定体積せん断試験	8.02	1.374	1.388	0.989
三者の平均値	---	1.404	1.436	0.977

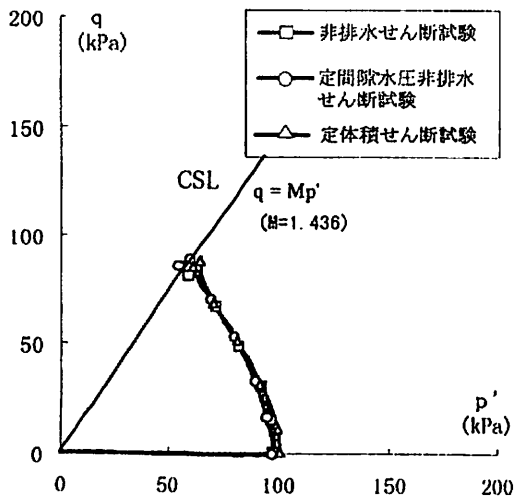


図-9 三種類の応力経路の比較

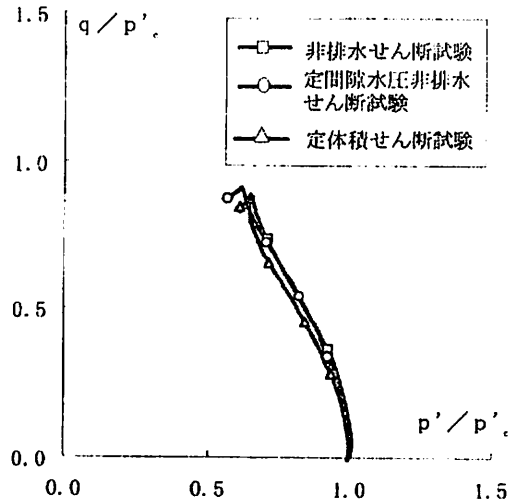


図-10 三種類の体積一定せん断過程の応力経路の比較

3.4 体積一定せん断過程での応力-ひずみ関係

図-11のせん断ひずみと偏差応力の関係に示すように、せん断初期の部分は、ほとんど一致している。その後の破壊点やその後の偏差応力の最大値による多少の差はあるものの、三試験の応力-ひずみ曲線に大きな違いは見られず、破壊後に大きなひずみ軟化が起こらない破壊点の明瞭でないような応力-ひずみ曲線となっている。

破壊時のひずみは表-3に示したように、定間隙水圧非排水せん断試験の γ_r がやや高めの値を示しているものの、前述したように破壊点とその後の限界状態の偏差応力の差は小さいことから、この応力-ひずみ関係について、三種類の体積一定せん断試験の間には、顕著な差はないと考えられる。

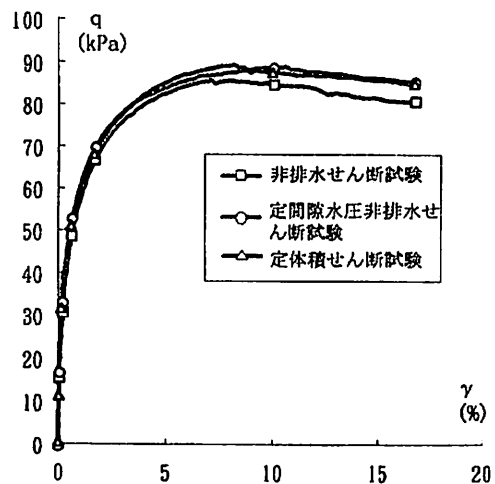


図-11 体積一定せん断過程の偏差応力とせん断ひずみの関係

3.5 体積一定せん断過程の過剰間隙水圧とせん断ひずみの関係

図-12は、体積一定せん断過程のせん断ひずみ γ と過剰間隙水圧 Δu の関係を示したものである。非排水せん断試験では、せん断が進むにつれて過剰間隙水圧 Δu が増大し、定間隙水圧非排水せん断試験では Δu はほとんど発生せず、間隙水圧一定の試験条件が成立していること確認できる。また、定体積せん断試験においても、定間隙水圧非排水せん断試験と同様に、 Δu はほとんど発生していない。これより、定体積せん断試験が、排水条件（排水コックは開放）の下で、せん断中に過剰間隙水圧の発生しない排水せん断試験として行われたことが確認できる。

3.2から3.5に示した結果から、非排水せん断試験、定間隙水圧非排水せん断試験、定体積せん断試験の応力経路、応力ひずみ関係の一致が確認でき、非排水せん断試験と定体積せん断試験の応力経路が一致するという状態境界面の妥当性を実験的に確認できた。

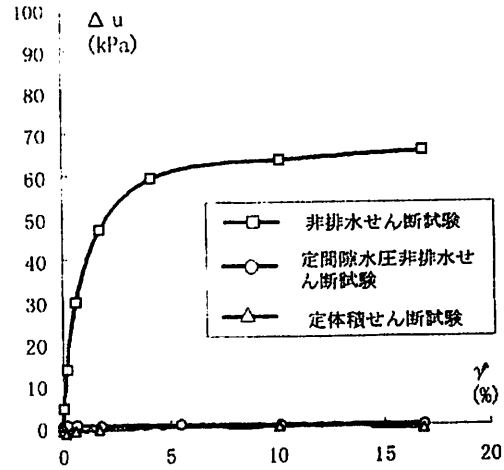


図-12 体積一定せん断過程のせん断ひずみと過剰間隙水圧の関係

3.6 供試体内部の含水比分布測定試験結果

含水比分布測定試験で得られた含水比の平均値とその標準偏差を表-4に示す。この表から等方圧密によって、含水比の平均値は初期状態から8.6%減少しているがわかる。

含水比分布の標準偏差は軸ひずみの状態によって変化し、多少のばらつきはあるものの、軸ひずみの増加に伴って、各試験の供試体の含水比の分布の標準偏差も増加する傾向があるように見える。

次に、図-13~16に四種類の体積一定せん断試験の供試体の含水比分布の一覧を示す。図中には、各せん断試験で測定を行った供試体の等含水比線図を示している。

図中の等含水比線は0.5%刻みで描いている。

表-4 含水比分布測定試験結果

試験の種類	測定点の軸ひずみ (%)	平均含水比 \bar{w} (%)	標準偏差 σ_w (%)
初期状態	-	48.8	0.669
等方圧密後	0	40.2	0.709
非排水せん断試験 ($\dot{\epsilon}_v = 0.01\%/min$)	1	40.1	0.590
	3	39.7	0.484
	6	39.0	0.626
高速非排水せん断試験 ($\dot{\epsilon}_v = 1.00\%/min$)	15	38.9	0.746
	3	39.4	0.579
定間隙水圧非排水せん断試験 ($\dot{\epsilon}_v = 0.01\%/min$)	15	38.9	0.740
	3	39.6	0.819
	15	38.7	0.678

3.7 体積一定せん断試験別の含水比分布

①非排水せん断試験の含水比分布

せん断開始点である等方圧密後の供試体の含水比の分布は図-13のようであり、供試体の側面以外の部分の含水比

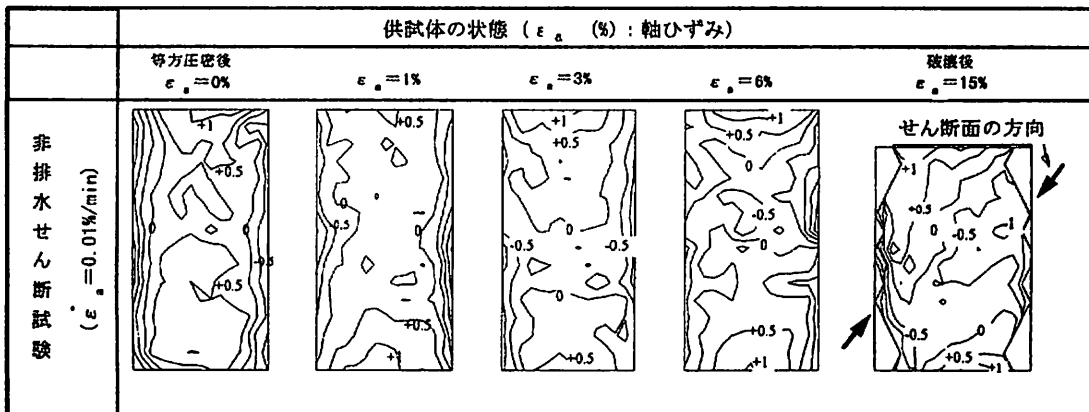


図-13 非排水せん断試験における供試体内部の含水比分布

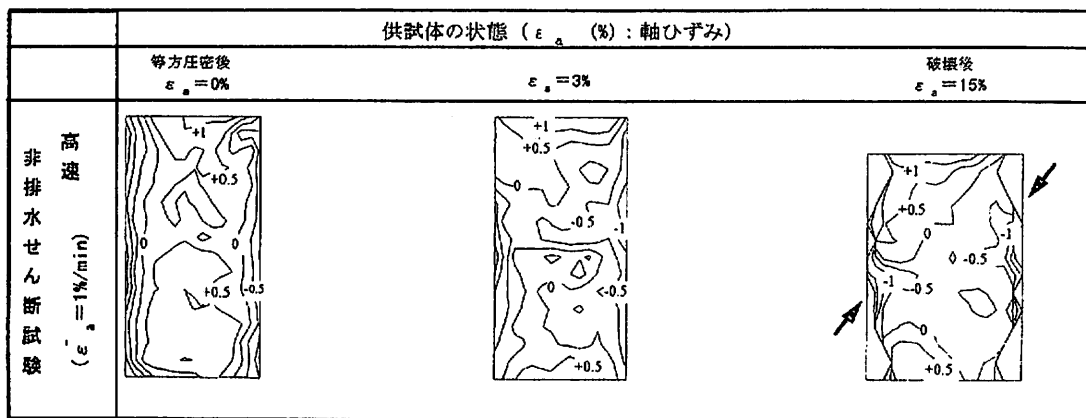


図-14 高速非排水せん断試験における供試体内部の含水比分布

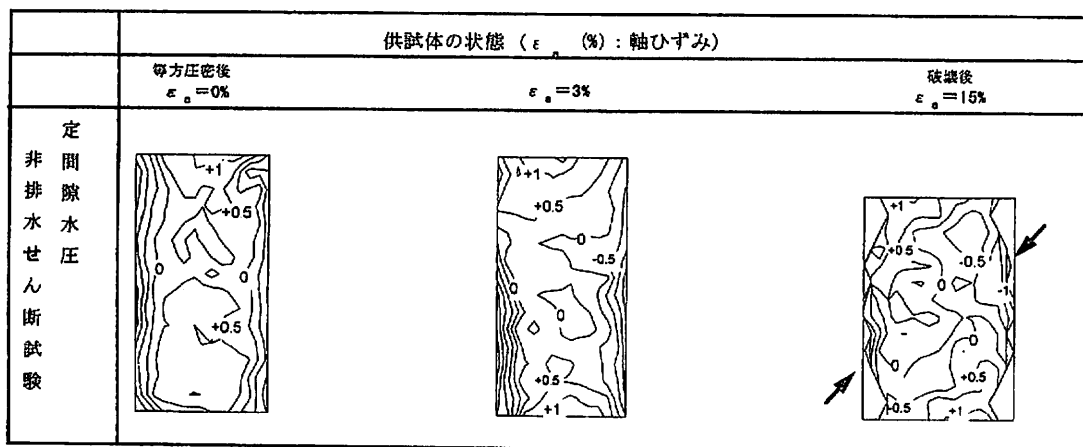


図-15 定間隙水圧非排水せん断試験における供試体内部の含水比分布

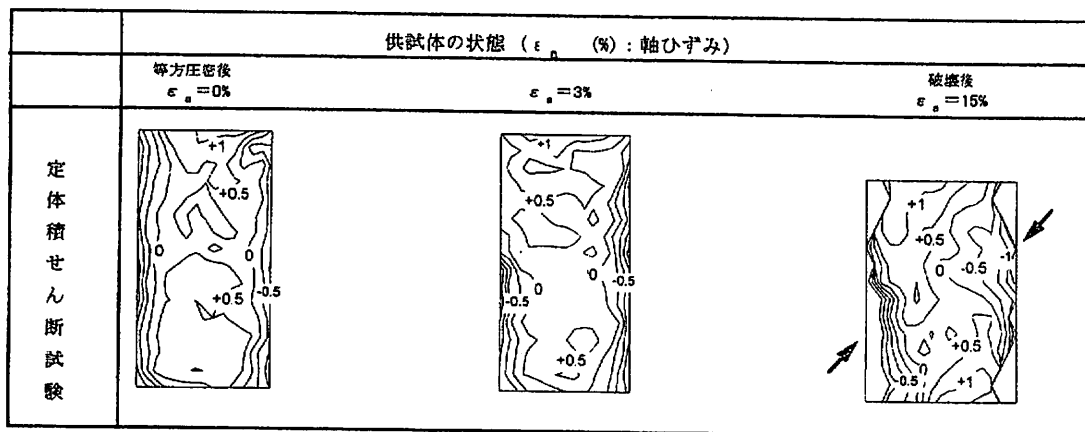


図-16 定体積せん断試験における供試体内部の含水比分布

が高く、側面以外の部分でほぼ一様な分布となっている。両側面部分の含水比が低くなっている原因は、等方圧密による排水方向が径方向であることによると考えられる。供試体の側面付近の含水比が低くなる傾向は、測定したほとんどの含水比分布で見られるものである。

次に、軸ひずみ $\epsilon_v = 1\%$ の供試体での含水比分布は、等方圧密後の状態とほとんど変わらず、せん断による変化は見られない。

$\epsilon_v = 3\%$ の供試体では、等方圧密後の分布が中央部がやや低くなり、逆に上下部で高くなるような変化していることが確認できる。このことは、中央部の間隙水が上下方向に移動していることを意味し、中央部の間隙水圧は高く、上下部では低くなっていることが推定できる。

$\epsilon_v = 6\%$ の供試体では、 $\epsilon_v = 3\%$ の供試体で見られた中央部の含水比が低く上部と下部では低いという傾向がより顕著なものとなり、供試体の含水比測定の際に確認された初期のせん断面とみられる部分とその付近の含水比が低くなっている。

破壊後の供試体でも、中央部は低く上下端付近は高くなる傾向は変わらない。しかし、供試体を斜めに切るように生じるせん断面に沿った部分での含水比がより低くなっていることが確認できる。

これらの結果より、せん断が進行するのに伴って、供試体内部の含水比分布は上下端で高く、中央部で低くなり、供試体内部の間隙水は、中央部から上下へ向うように移動することがわかる。このことから、供試体内部の過剰間隙水圧は中央部で高く、上下で低い状態となっており、せん断初期からせん断終了時までその傾向が続いていると推定できる。

②高速非排水せん断試験

供試体内部の含水比分布を図-14に示す。含水比分布は非排水せん断試験の結果と同様で、ひずみ速度の違いによる影響はあまりみられない。

従来、非排水せん断試験では供試体内の点すべてが非排水条件を満たしながらせん断変形すると考えられていたが、二つの非排水せん断試験に関する含水比分布測定試験の結果から内部では非排水条件を満たしていないことがわかった。

③定間隙水圧非排水せん断試験の含水比分布

供試体内部の含水比分布を図-15に示す。含水比分布の変化、傾向は非排水せん断試験と同様なものとなっており、非排水せん断試験との過剰間隙水圧の発生による目立った影響は、含水比分布にあらわれない。

④定体積せん断試験の含水比分布

供試体内部の含水比分布を図-16に示す。含水比分布の変化、傾向は非排水せん断試験と同様なものとなっており、排水条件制御、体積一定条件の差による目立った影響は、含水比分布にあらわれない。

他の三種類の非排水せん断試験とこの定体積せん断試験の供試体内部の間隙水の移動は同じ傾向を示すことから、内部の圧力差の傾向も同様なものとなることを推測できる。

4. 結論

以上の結果をまとめると次のようになる。

1. 三種類の体積一定せん断試験の応力経路、応力-ひずみ関係はほとんど一致し、これらは間隙水圧の発生に影響されない。
2. このことより、非排水せん断試験と定体積せん断試験の応力経路が一致するという状態境界面の概念の妥当性が実験的に確認できた。
3. 含水比分布測定試験の結果、体積一定せん断試験では、せん断の進行に伴い供試体内の含水比は中央部で低く、上下で高くなり、供試体内の間隙水は中央から上方または下方に向けて移動することが明確になった。したがって、せん断が進むにつれ供試体内の間隙水圧は中央部で高く上下で低くなるものが推測される。
4. せん断破壊後では、供試体内の含水比はせん断面に沿うように低くなるのがわかった。このことは、各体積一定せん断試験に共通にみられる。
5. このような現象は応力変動がほとんどない、せん断ひずみ $\epsilon_v = 3 \sim 15\%$ の間に生じることがわかった。
6. 従来の非排水せん断試験では、供試体の内部において完全には非排水条件が満たされていないことが明らかとなった。この結果は今後の非排水せん断試験の評価に対する問題点と思われる。

おわりに

今回、本研究を行うにあたり、又吉康之（沖縄県）、木原和明（日本舗道（株））の両氏には実験遂行において多大なご協力を頂きました。ここに厚く謝意を表します。

<<参考文献>>

- 1) 土木工学体系編集委員会（彰国社）；土木工学体系 8 土質力学, pp83~133, 1980年
- 2) 土質工学会九州支部編；九州・沖縄における特殊土, pp227, 1983年
- 3) 又吉 康之（1995）；正規圧密粘土の体積一定せん断試験に関する研究, 琉球大学大学院平成7年度, 修士論文
- 4) 木原 和也（1995）；飽和粘土供試体内部の含水比に関する研究, 琉球大学平成7年度, 卒業論文
- 5) 下地 浩之（1988）；正規飽和圧密粘土のせん断特性に関する研究, 琉球大学大学院, 昭和63年度, 修士論文
- 6) 呉屋 健一（1992）；静的な繰返し排水せん断試験における正規圧密粘土の変形特性に関する実験的研究, 琉球大学大学院平成4年度, 修士論文