

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3006号

3

土木研究所資料

コア材料の単調載荷試験と繰返し載荷試験

平成3年3月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (1991) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

コア材料の単調載荷試験と繰返し載荷試験

フィルダム研究室 室 長 松 本 徳 久
主任研究員 安 田 成 夫
大久保 雅 彦
部外研究員 芳 岡 良 一*)

要 旨

本報告はフィルダムの地震時安定を評価する際に必要となるコア材の強度特性を調べる目的で、単調載荷試験と繰返し載荷試験を実施した結果をとりまとめたもので、以下の点について考察した。

- ① 室内試験における載荷様式と結果の整理方法
- ② コア材の静的・動的強度に及ぼす諸要因の影響
- ③ 静的強度と動的強度の関連性

キーワード：コア材、繰返し載荷、単調載荷、せん断強度、三軸試験、締固め

*) 現清水建設(株)〔平成元年9月～平成3年3月の間(財)土木研究センターからの部外研究員として在籍〕

MONOTONIC AND CYCLIC LOADING TESTS OF CORE MATERIALS

Norihisa MATSUMOTO
Head, Filltype Dam Division
Dams Branch
Nario YASUDA
Senior Engineering Researcher
Masahiko OHKUBO
Engineer
Ryo-ichi YOSHIOKA *)

Synopsis

Monotonic and cyclic loading tests were carried out as followings in order to investigate the strength characteristics of core materials which is needed to evaluate the stability of embankment dams during earthquakes.

- ① Evaluation of test results relating to the loading condition in the laboratory tests
- ② Investigation of several factors affecting dynamic strength of rockfill materials
- ③ Relationship between static and dynamic strengths

Keywords : Core materials, monotonic loading, cyclic loading,
shear strenght, triaxial test

*Shimz Coorporation (Formerly visiting researcher from September, 1989 to March, 1991)

ま え が き

フィルダムの耐震設計を考えると、震度法による円弧すべり安定計算が慣用的に用いられているが、それに対して土の強度を正しく評価することが重要な問題の一つとされている。

震度法において、多くの場合、強度については、単調載荷試験による静的強度をそのまま用いているが、これは必ずしも地震時の繰返し載荷条件のもとでの土の強度を正しく評価しているものとは言えない。しかしながら、土の繰返し載荷試験による動的強度に関しては、飽和砂については液化強度特性として、新潟地震以後急速に研究が進んでいるが、フィルダムの堤体材料であるコア材の様な締め固めた礫まじり粘性土については、まだ研究事例が少なく明らかにされていない点が多い。

このような背景を受け、本報告は、まず、コア材の強度特性に関わる既往の研究を整理したうえで、フィルダムコア材を用いた単調載荷試験と繰返し載荷試験結果を示し、礫まじり粘性土の動的強度特性に対する諸要因（繰返し回数、ひずみ量、相対密度、初期拘束圧、初期せん断応力、試験方法）の影響を調べるとともに、静的強度と動的強度の関連性について検討を加えたものである。

記号の説明

本報告書で用いる用語と記号の意味は下記の通りである。

- σ : 全応力(Total stress)
- σ' : 有効応力(Effective stress)
- σ_1 : 最大主応力(Major principal stress)
- σ_2 : 中間主応力(Intermediate principal stress)
- σ_3 : 最小主応力(Minor principal stress)
- σ_{1c} : 圧密終了後の最大主応力(Initial major principal stress after consolidation)
- σ_{2c} : 圧密終了後の中間主応力(Initial intermediate principal stress after consolidation)
- σ_{3c} : 圧密終了後の最小主応力(Initial minor principal stress after consolidation)
- σ_a : 軸圧(Axial pressure)
- σ_r : 側圧(Confining pressure)
- σ_{ac} : 圧密終了後の軸圧(Initial axial pressure after consolidation)
- σ_{rc} : 圧密終了後の側圧(Initial confining pressure after consolidation)
- σ_{af} : 破壊時の軸圧(Axial pressure at failure)
- σ_{rf} : 破壊時の側圧(Confining pressure at failure)
- σ_n : 45° 面上での垂直応力(Normal stress on 45° plane) $= (\sigma_1 + \sigma_3)/2$
- σ_{nc} : 圧密終了後の 45° 面上での垂直応力(Initial normal stress on 45° plane after consolidation)
- σ_{nf} : 45° 面上での破壊時の垂直応力(Normal stress on 45° plane at failure)
- σ_f : 破壊面($45^\circ + \phi/2$)上での垂直応力(Normal stress on failure plane)
- σ_{fc} : 圧密終了後の破壊面($45^\circ + \phi/2$)上での垂直応力(Initial normal stress on failure plane after consolidation)
- σ_{ff} : 破壊面($45^\circ + \phi/2$)上での垂直応力(Normal stress on failure plane)
- p : 平均主応力(Mean principal stress) $= (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
- p_c : 圧密終了後の平均主応力(Initial mean principal stress after consolidation)
- p_f : 破壊時の平均主応力(Mean principal stress at failure)
- q : 軸差応力(Deviator stress) $= \sigma_1 - \sigma_3$
- q_c : 圧密終了後の軸差応力(Deviator stress after consolidation)
- q_f : 破壊時の軸差応力(Deviator stress at failure) $= (\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$
- u_B : バックプレッシャー(Back pressure)
- Δu : 間隙水圧(Pore water pressure)
- Δu_f : 破壊時の間隙水圧(Pore water pressure at failure)
- ε_a : 軸ひずみ (単調載荷), あるいは片振幅軸ひずみ (繰返し載荷) (Axial strain for monotonic loading or Single amplitude axial strain for cyclic loading)

- ϵ_{af} : 破壊時の軸ひずみ (単調載荷) , あるいは動的強度を規定する片振幅軸ひずみ (繰返し載荷)
(Axial strain at failure for monotonic or Single amplitude axial strain which establish dynamic strength for cyclic loading)
- ϵ_p : ピークひずみ (Peak axial strain for cyclic loading)
- ϵ_{pf} : 動的強度を規定するピークひずみ (Peak axial strain which establishes dynamic strength for cyclic loading)
- ϵ_r : 残留ひずみ (Residual axial strain for cyclic loading)
- ϵ_v : 体積ひずみ (Volumetric strain)
- ν : ポアソン比 (Poisson's ratio) $= (1 - \epsilon_v / \epsilon_a) / 2$
- γ : せん断ひずみ (単調載荷) , あるいは片振幅せん断ひずみ (繰返し載荷) $= (1 + \nu) \epsilon_a$
(Shear strain for monotonic loading or Single amplitude shear strain for cyclic loading)
- γ_f : 破壊時のせん断ひずみ (単調載荷) , あるいは動的強度を規定する片振幅せん断ひずみ (繰返し載荷) (Shear strain at failure for monotonic loading or Single amplitude shear strain which establish dynamic strength for cyclic loading)
- γ_p : ピークせん断ひずみ (Peak shear strain for cyclic loading)
- γ_{pf} : 動的強度を規定するピークせん断ひずみ (Peak shear strain which establishes dynamic strength for cyclic loading)
- γ_r : 残留せん断ひずみ (Residual shear strain for cyclic loading)
- N : 繰返し回数 (Number of cycles)
- N_f : 動的強度を規定する繰返し回数 (Number of cycles which establishes dynamic strength for cyclic loading)
- τ : せん断応力 (Shear stress) $= q/2$
- τ_n : 三軸試験における τ (τ for triaxial test)
- τ_t : ねじり試験における τ (τ for torsional test)
- τ_s : 初期せん断応力 (Initial shear stress after consolidation) $= q_c/2$
- τ_c : 三軸試験における τ_s (τ_s for triaxial test)
- τ_{tc} : ねじり試験における τ_s (τ_s for torsional test)
- τ_{sf} : 静的せん断強度 (Static shear strength) $= q_f/2$
- τ_{nf} : 三軸試験における τ_{sf} (τ_{sf} for triaxial test)
- τ_{tf} : ねじり試験における τ_{sf} (τ_{sf} for torsional test)
- τ_f : 破壊面 ($45^\circ + \phi/2$) 上でのせん断応力 (Shear stress on failure plane)
- τ_{fc} : 破壊面 ($45^\circ + \phi/2$) 上での初期せん断応力 (Initial shear stress on failure plane after consolidation)
- τ_{ff} : 破壊面 ($45^\circ + \phi/2$) 上での静的せん断強度 (Static shear strength on failure plane)

τ_d : 繰返しせん断応力 (Cyclic shear stress)

$\tau_{df}, (\tau_d + \tau_s)_f$: 動的せん断強度 (ある繰返し回数 N_f で規準ひずみ ϵ_{af} あるいは ϵ_{pf} に達するせん断応力) (Shear stress at ϵ_{af} or ϵ_{pf} strain in N_f cycles)

ϕ_d : 排水試験によるせん断抵抗角 (Angle of shear resistance by drained shear test)

ϕ_{cu} : 非排水試験によるせん断抵抗角 (Angle of shear resistance by undrained shear test)

ϕ' : せん断抵抗角 (有効応力表示) (Angle of shear resistance in terms of effective stress)

c_d : 排水試験による粘着力 (Cohesion by drained shear test)

c_{cu} : 非排水試験による粘着力 (Cohesion by undrained shear test)

c' : 粘着力 (有効応力表示) (Cohesion in terms of effective stress)

α_f : 破壊面と第 1 主応力の作用面のなす角 (Angle between failure plane and the major principal stress plane)

目 次

まえがき	(i)
記号の説明	(ii)
1. 室内試験における載荷様式と結果の整理方法	1
1.1 動的（繰返し載荷）強度	1
1.1.1 繰返し三軸試験機を使う場合	1
1.1.2 ねじりせん断試験機を使う場合	2
1.2 静的（単調載荷）強度	3
1.2.1 水平面のせん断強度	3
1.2.2 すべり面のせん断強度	6
2. 試験方法	19
2.1 試験装置	19
2.2 試験材料	19
2.3 試験条件	19
2.4 試験方法	19
2.4.1 試供体の作成	19
2.4.2 試供体の飽和	19
2.4.3 試供体の圧密	20
3. 試験結果と考察	27
3.1 単調載荷試験	27
3.1.1 圧密排水試験	27
3.1.2 圧密非排水試験	27
3.1.3 排水強度と非排水強度	28
3.2 繰返し載荷試験	29
3.2.1 試験結果の整理	29
3.2.2 繰返し排水試験	30
3.2.3 繰返し非排水試験	30
3.3 動的強度と静的強度	33
4. 結 論	89
あ と が き	90
参 考 文 献	91

1. 室内試験における載荷様式と結果の整理方法

本章は、フィルダムの堤体材料のせん断強度を室内試験より求める方法を整理したものである。

1.1 動的（繰返し載荷）強度

図-1.1に示すように、堤体中に矩形の要素abcdを考える。堤体は2次元平面ひずみ状態であるとし、地震前の静的な初期有効応力が、 $\sigma'_v, \sigma'_h, \tau_s$ とする。次に堤体が地震動を受け、要素abcdは水平方向の繰返しせん断応力 $\tau_d(t)$ が振動数 f Hzで N 回作用したとする。

$$\tau_d(t) = \tau_d \cdot \sin 2\pi ft \quad \dots\dots\dots(1.1)$$

ただし $t = 0$ から $t = \frac{N}{f}$ まで

このとき要素abcdに生ずる永久ひずみ r_p を室内試験で求めることを考える。また前提として供試体は不攪乱試料あるいは施工状況を再現できる方法で作製されているとする。現地の状況は飽和しており、透水係数を k 、体積圧縮係数を m_v としたとき、地震動の周波数 f が k/m_v に比し早く非排水状態とみなせるとする。

1.1.1 繰返し三軸試験機を使う場合

(1) 軸圧と周圧を同期させて繰返し載荷する方法

まず供試体を周圧 σ_{rc} 、軸圧 σ_{ac} で圧密する。このとき、式(1.2)のように σ_{ac} と σ_{rc} を定める。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ac} &= \sigma'_{ac} = \sigma'_v + \tau_s \\ \sigma_{rc} &= \sigma'_{rc} = \sigma'_v - \tau_s \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.2)$$

圧密時の三軸供試体の45°面上の垂直応力を σ_{nc} 、せん断応力を τ_c とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{nc} &= \frac{1}{2} (\sigma_{ac} + \sigma_{rc}) = \sigma'_v \\ \tau_c &= \tau_s \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.3)$$

次に、周圧および軸圧に繰返し荷重を与える。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a &= \sigma_{ac} + \tau_d \cdot \sin 2\pi ft \\ \sigma_r &= \sigma_{rc} - \tau_d \cdot \sin 2\pi ft \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.4)$$

このとき三軸供試体の45°面上の垂直応力 σ_n 、せん断応力 τ_n は、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{1}{2} (\sigma_a + \sigma_r) = \sigma'_v \\ \tau_n &= \frac{1}{2} (\sigma_a - \sigma_r) = \tau_s + \tau_d \cdot \sin 2\pi ft \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.5)$$

すなわち、初期応力 σ'_v と、地震時の繰返しせん断応力 $\tau_d(t)$ は、三軸供試体の45°面上で近似的に再現されていることになる。

(2) 周圧を一定とし軸圧のみ繰返し載荷する方法

周圧と軸圧を同期させて繰返し載荷する試験機は高価であり、かつ完全に同期をとる技術も難しい。そこで簡略に軸圧のみを繰返し載荷する。初期圧密荷重は、式(1.2)と同様である。次に軸圧のみ繰返し載荷する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a &= \sigma_{ac} + \sigma_{dp} \cdot \sin 2\pi ft \\ \sigma_r &= \sigma_{rc} = \text{const} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.6)$$

ただし、 $\sigma_{dp} = 2\tau_d$

供試体が、飽和非排水であれば供試体に等方応力、 $-\tau_d \cdot \sin 2\pi ft$ を載荷しても間隙水圧に影響するのみで、破壊基準あるいはひずみの累積には影響しない。そこで式(1.6)の σ_a と σ_r に $-\tau_d \cdot \sin 2\pi ft$ を加えて、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a &= \sigma_{ac} + \tau_d \cdot \sin 2\pi ft \\ \sigma_r &= \sigma_{rc} - \tau_d \cdot \sin 2\pi ft \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.7)$$

式(1.7)は式(1.4)と同一である。すなわち式(1.6)の載荷で間隙水圧を除き、永久ひずみは図-1.1の現位置応力を近似的に再現していることになる。

以下、三軸試験では、軸圧のみを繰返し載荷する方法を前提とする。

さて、 N_f 回の載荷で、軸ひずみが許容値 ε_{pf} となったとすると、そのときの τ_d を繰返し荷重による強度とし τ_{df} で表わす。 τ_{df} は、一般に σ'_v 、 σ'_h 、 N 、 τ_s などに影響を受ける。強度については、繰返し載荷分のみの $\tau_{df} (= \frac{1}{2}\sigma_{dpf})$ あるいは初期応力 τ_s を加えて $\tau_s + \tau_{df}$ とする両方法があり得るが、両者とも σ'_v で除し、応力比で議論することにする。

三軸試験の場合には

$$\left. \begin{aligned} \frac{\tau_{df}}{\sigma'_v} &= \frac{\tau_{df}}{\sigma'_{nc}} = \frac{\frac{1}{2}\sigma_{dpf}}{\sigma'_{nc}} \\ \frac{\tau_s + \tau_{df}}{\sigma'_v} &= \frac{\tau_s + \frac{1}{2}\sigma_{dpf}}{\sigma'_{nc}} = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_{amax} - \sigma_r)}{\sigma'_{nc}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.8)$$

なお、三軸試験から得られる強度応力比は、現地条件に比し、主応力の回転、 σ'_h 、平面ひずみ条件などが再現されてないから、補正の必要がある。すなわち、

$$\left[\frac{\tau_{df}}{\sigma'_v} \right]_{\text{FIELD}} = C_{r1} \left[\frac{\tau_{df}}{\sigma'_v} \right]_{\text{TRX}} \dots\dots\dots (1.9)$$

ここで、() FIELD, () TRXはそれぞれ現位置および室内三軸試験を意味する。 C_{r1} について諸専門家の見解を表-1.1に示す。

1.1.2 ねじりせん断試験機を使う場合

圧密荷重は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ac} &= \sigma'_v \\ \sigma_{rc} &= \sigma'_h \\ \tau_{tc} &= \tau_s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1.10)$$

とする。次に繰返しせん断応力 τ_d を τ_{tc} に上乘せして加える。

$$\tau_t = \tau_{tc} + \tau_d \cdot \sin 2\pi f t \quad \dots\dots\dots(1.11)$$

この場合も、許容軸ひずみ ϵ_{pf} あるいはせん断ひずみ γ_{pf} を定めておき、 N_f 回の載荷で許容ひずみに達した τ_d をもって繰返し載荷に対する強度 τ_{df} とする。

以下は三軸試験と同様、応力比 $\frac{\tau_{df}}{\sigma_v'}$ 、 $\frac{\tau_s + \tau_{df}}{\sigma_v'}$ を用いて強度を無次元化する。現位置と室内試験の対応としては三軸試験に比し、 σ_v' 、 σ_h' 、 τ_s が対応しているが、 σ_{rc} を特別に制御しない限り平面ひずみ条件は満足されていないから、補正係数が必要である。

$$\left[\frac{\tau_{df}}{\sigma_v'} \right]_{\text{FIELD}} = C_{r2} \left[\frac{\tau_{df}}{\sigma_v'} \right]_{\text{TS}} \quad \dots\dots\dots(1.12)$$

ただし、() FIELD, () TS はそれぞれ現位置、室内ねじりせん断試験を表わす。 C_{r2} は一般に 1.0 に近いとされている。

1.2 静的（単調載荷）強度

1.2.1 水平面のせん断強度

フィルダムの堤体に水平方向に単調に増加する物体力が作用したとする。図-1.2の要素abcdには、初期応力 σ_v' 、 σ_h' 、 τ_s が作用しており、次に物体力によるせん断応力 $\tau_b(t)$ が働く。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_s + \tau_b(t) \\ \text{ここに} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.13)$$

$$\tau_b(t) = \Delta \tau \cdot t$$

$\Delta \tau$: せん断応力の速度

t : 時間

τ_b が τ_{bf} のとき、要素abcdが破壊するとし、以下 $\tau_{sf} = \tau_s + \tau_{bf}$ を求める。

(1) 三軸試験

圧密荷重は次式で与える。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ac} &= \sigma_v' + \tau_s \\ \sigma_{rc} &= \sigma_v' - \tau_s \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.14)$$

このとき 45° 面では

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{nc} &= \sigma_v' \\ \tau_c &= \tau_s \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.15)$$

であるから、図-1.2の要素abcdの σ_v' と τ_s については三軸供試体の 45° 面上で再現されている。

次に、側圧を除荷し、軸圧を増加する。このとき、現位置条件に合わせて排水又は非排水とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_a &= \sigma_{ac} + \sigma_m \\ \sigma_r &= \sigma_{rc} - \sigma_m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.16)$$

ここに,

$$\sigma_m = \sigma_m(t) = 2 \cdot \Delta \tau \cdot t$$

このとき供試体の45° 面上では,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \sigma'_v = \text{const} \\ \tau_n &= \tau_s + \sigma_m/2 = \tau_s + \Delta \tau \cdot t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.17)$$

すなわち σ_n は一定のまま, τ_n のみ現位置の載荷速度で増加している。

供試体が破壊したときの $\sigma_m, \sigma_a, \sigma_r$ をそれぞれ $\sigma_{mf}, \sigma_{af}, \sigma_{rf}$ とすると, 強度 τ_{nf} がわかる。

$$\tau_{nf} = \tau_s + \sigma_{mf} = (\sigma_{af} - \sigma_{rf}) / 2 \dots\dots\dots(1.18)$$

繰返し試験と同様に τ_{nf} を σ'_v で除し, 無次元化して強度を示すこともある。

$$\frac{\tau_{nf}}{\sigma'_v} = \frac{\sigma_{af} - \sigma_{rf}}{2 \cdot \sigma'_{nc}} \dots\dots\dots(1.19)$$

現位置と三軸試験では, σ'_h や平面ひずみの点で, 対応していないから補正が必要である。

$$\left[\frac{\tau_{nf}}{\sigma'_v} \right]_{\text{FIELD}} = C_{s1} \left[\frac{\sigma_{af} - \sigma_{rf}}{2 \cdot \sigma'_v} \right]_{\text{TRX}} \dots\dots\dots(1.20)$$

(2) ねじりせん断試験

圧密荷重は次式で与える。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ac} &= \sigma'_v \\ \sigma_{rc} &= \sigma'_h \\ \tau_{tc} &= \tau_s \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.21)$$

次にねじり荷重を増加する。

$$\left. \begin{aligned} \tau_t &= \tau_{tc} + \tau_m = \tau_s + \tau_m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.22)$$

ここに

$$\tau_m = \tau_m(t) = \Delta \tau \cdot t$$

供試体が破壊したときの τ_m を τ_{mf} とすると τ_t の強度 τ_{tf} が与えられる。

$$\tau_{tf} = \tau_s + \tau_{mf} \dots\dots\dots(1.23)$$

せん断強度 τ_{tf} を繰返し試験と同様に σ'_v で除し, 無次元化した強度を使うこともある。

$$\frac{\tau_{tf}}{\sigma'_v} = \frac{\tau_s + \tau_{mf}}{\sigma'_{ac}} \dots\dots\dots(1.24)$$

現位置と室内試験では, 平面ひずみ条件の点で差があるから現位置の強度を求めるためには補正が必要である。すなわち,

$$\left[\frac{\tau_{tf}}{\sigma'_v} \right]_{\text{FIELD}} = C_{s2} \left[\frac{\tau_s + \tau_{mf}}{\sigma'_{ac}} \right]_{\text{TS}} \dots\dots\dots(1.25)$$

(3) 結果の整理

以上においてせん断には排水と非排水の両方があり得る。排水と非排水では、強度の特性が基本的に異なるので試験結果の整理方法が異なってくる。

① 排水試験

排水試験でのせん断強度は、第1近似としては、破壊時の間隙比 e_f と有効応力 σ'_{nf} で決まる。

現実には、図-1.2の要素abcdの初期間隙比 e_c に対する強度を求めたいので、初期間隙比 e_c の材料に対して、排水せん断強度 τ_{nf} と σ_{nf} に対して一義的な関係があるとする、試験は簡略化できる。

(a) 三軸試験

τ_s は、排水試験ではせん断強度に影響しないから、式(1.14)とは異なり、等方圧密する。すなわち、

$$\sigma_{ac} = \sigma_{rc} \quad \dots\dots\dots (1.26)$$

次に σ_a のみを単調に増加させ、破壊時の σ_a を σ_{af} とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{nf} &= \frac{\sigma_{af} + \sigma_{rc}}{2} \\ \tau_{nf} &= \frac{\sigma_{af} - \sigma_{rc}}{2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (1.27)$$

以上において、排水試験であるから全応力=有効応力である。

次に σ_{rc} を種々変化させて試験を行い、 σ_{nf}' と τ_{nf} の関係を図-1.3のようにプロットする。 σ_{nf}' と τ_{nf} の関係は一義的であるから、図-1.3の横軸の σ_{nf}' が、図-1.2の σ_v' に読み変えて、これに対応した τ_{nf} が所要のせん断強度である。

(b) ねじりせん断試験

このときも、排水試験では τ_s は強度に影響しない。すなわち、 $\tau_s = 0$ として、ねじり荷重を与え図-1.3の関係を求める。

② 非排水試験

非排水試験におけるせん断強度は、第1近似としては、圧密間隙比 e_c と圧密有効応力 σ_{nc} で決まる。したがって途中の載荷応力の経路は関係しない。ただし排水試験と異なり、 τ_s は関係する。

(a) 三軸試験

τ_s は強度に関係するので式(1.14)で圧密する。載荷応力の経路はせん断強度に関係しないので、 σ_r は σ_{rc} のまま一定とし、 σ_a のみ増加させて、 σ_a が σ_{af} で破壊したとする。

$$\tau_{nf} = \frac{\sigma_{af} - \sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{af} - \sigma_{rc}}{2} \quad \left. \vphantom{\frac{\sigma_{af} - \sigma_r}{2}} \right\} \dots\dots\dots(1.28)$$

圧密時の有効拘束応力 σ_{nc} は式(1.15)で与えられる。すなわち $\sigma_{nc} = \sigma_v'$ でありこの値を種々変化され、 τ_{nf} を求めると、 σ_{nc} と τ_{nf} には一義的な関係図-1.4が得られる。なお、図-1.4の関係は τ_s によって異なるので注意を要する。

(b) ねじりせん断試験

このときも、 τ_s はせん断強度に影響するので、(2)に述べた通りとし特に簡略化できる点はない。

1.2.2 すべり面のせん断強度

以上は単調載荷試験によって、図-1.2における仮想の水平方向物体力に対応した要素abcdのせん断強度 τ_{sf} を求めようとしたわけである。しかし静的な安定問題では、すべり面の安全率を求めることになるから、以上の単調載荷試験から、すべり面上のせん断強度を求める必要がある。

(1) 排水試験

① 三軸試験 (周圧一定, 軸圧単調増加)

排水試験では、前述のように τ_{nf} , σ_{nf}' , e_f の間には一義的な関係がある。実務上は、 e_f でなく e_c を一定とし、供試体を作製し、 σ_{nc} を小さな応力から大きな応力まで数種類変化させて、 τ_{nf} と σ_{nf}' の関係を求め、 e_c に対応した強度とすることが多い。 τ_{nf} と σ_{nf}' の関係が図-1.3に示す直線関係で近似させるとき、Mohr-Coulombの破壊基準となる。

$$\tau_{nf} = C_{cd} \cdot \cos \phi_{cd} + \sigma_{nf}' \cdot \sin \phi_{cd} \quad \dots\dots\dots(1.29)$$

式(1.29)を別の面からみると、 σ_{rc} と σ_{af} でモールの応力円を描き、これに対する包絡線を直線としたとき、 C_{cd} が $\sigma_{nf}' = 0$ での直線の切片、 ϕ_{cd} が直線の傾きの角度を表す。

ロック材料 (花崗岩) の径300mm, 高さ600mmの供試体の一連の三軸試験事例を図-1.5に示す。これから、 σ_{nf}' と τ_{nf} の関係をプロットしたのが図-1.6である。図-1.6から、式(1.29)をあてはめ、最小2乗法で、 C_{cd} と ϕ_{cd} を求めると

$$\left. \begin{aligned} C_{cd} &= 1.43 \text{ kgf/cm}^2 \\ \phi_{cd} &= 39.4^\circ \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.30)$$

が得られる。

式(1.29)では、 $\sigma_{nf}' = 0$ のとき $\tau_{nf} = C_{cd}$ となるが、ロック材料の場合、一軸圧縮強度は極めて零に近いから、 C_{cd} の存在は考えにくい。そこで、破壊時のモールの応力円に原点から引いた接線の角度 ϕ_0 で破壊を定義したとする。

$$\phi_0 = \arcsin \left[\frac{\sigma_a - \sigma_r}{\sigma_a + \sigma_r} \right]_{\max} \quad \dots\dots\dots(1.31)$$

なお、モールの応力円と ϕ_0 の接線の接点を破壊面とすると (図-1.7) 破壊面上の破壊時の垂直応力 σ_{ff} とせん断応力 τ_{ff} は次式により求まる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ff} &= \frac{1}{2} (\sigma_{af} + \sigma_{rf}) - \frac{1}{2} (\sigma_{af} - \sigma_{rf}) \sin \phi_0 \\ \tau_{ff} &= \frac{1}{2} (\sigma_{af} - \sigma_{rf}) \cos \phi_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.32)$$

破壊面と三軸供試体の水平面（第1主応力の作用面）のなす角を α_f とすると、

$$\alpha_f = 45^\circ + \frac{\phi_0}{2} \dots\dots\dots(1.33)$$

図-1.6の三軸試験結果を式(1.31), (1.32)により σ_{ff} と τ_{ff} を求め対数目盛りでプロットすると図-1.8となる。すなわち、近似式として、

$$\tau_{ff} = A (\sigma_{ff})^b \dots\dots\dots(1.34)$$

次に、 ϕ_0 と σ_{ff} の関係を片対数目盛りにプロットすると図-1.9となる。図-1.9では最小の σ_{ff} は0.930kgf/cm²であり、これ以下の σ_{ff} に対して図-1.9の関係が外挿できるかどうかかわからない。文献²⁾によると間隙比0.70の豊浦砂の場合には、 $\sigma_r' < 0.4\text{kgf/cm}^2$ で ϕ_0 は一定で47.7° となるという実験結果がある。

今のところ、低い拘束圧下でロック材料の三軸圧縮試験を精度高く実施することは難しい。しかし砂と同様にある $\sigma_{ff} = \sigma_0$ 以下では ϕ_0 が一定値 $\phi_{\max}$ となることも想定される。拘束圧の増加に伴う ϕ_0 の減少は粒子破碎と関係しており、粒径が増加するほど粒子間接触力が増加する（およそ粒径の2乗に比例）ことを考えると、ロック材料の σ_0 は砂の場合よりもかなり小さいと考えられる。

およそ粒状体において応力が定義されるためには、粒子間接点の数が考えている面積にある程度以上必要である。拘束圧の大きさについても極めて小さいときは、上載の盛土高が平均粒径に等しいような場合となりそれ以下の応力では拘束圧の意味が薄くなる。そのようなことはあるが、ロック材料においては、ある σ_0 以下の σ_{ff} では、 ϕ_0 が一定値 $\phi_{\max}$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} \phi_0 &= \phi_{\max} - a \cdot \log (\sigma_{ff} / \sigma_0) \quad (\sigma_{ff} > \sigma_0) \\ \phi_0 &= \phi_{\max} \quad (\sigma_{ff} \leq \sigma_0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.35)$$

図-1.9に式(1.35)をあてはめ、 $\sigma_0 = 0.3\text{kgf/cm}^2$ と仮定しすると、

$$\phi_{\max} = 64.2^\circ$$

$$a = 6.64$$

$$\sigma_0 = 0.3\text{kgf/cm}^2$$

となる。Barton et al.²⁾は $\phi_{\max}$ を55~65° と推定しているが、これは実験によるものではない。

② ねじりせん断試験

ねじりせん断供試体の主応力 σ_1 , σ_3 は次式によって求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_a + \sigma_r}{2} + \sqrt{\tau_l^2 + \left[\frac{\sigma_a - \sigma_r}{2} \right]^2} \\ \sigma_3 &= \frac{\sigma_a + \sigma_r}{2} - \sqrt{\tau_l^2 + \left[\frac{\sigma_a - \sigma_r}{2} \right]^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.36)$$

主応力 σ_1 と水平面のなす角度 α は

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{2 \tau_l}{\sigma_a - \sigma_r} \dots\dots\dots(1.37)$$

三軸の式(1.31)に対応した、 ϕ_0 をねじりせん断試験から求める式は

$$\phi_0 = \arcsin \left[\frac{2 \sqrt{\tau_l^2 + \{(\sigma_a - \sigma_r)/2\}^2}}{\sigma_a + \sigma_r} \right]_f \dots\dots\dots(1.38)$$

[]_f は破壊時を意味する。

ねじりせん断試験と三軸試験から求めたロック材料の ϕ_0 を比較したものを図-1.10に示す。³⁾ すなわち ϕ_0 は試験法によって異なる。砂による研究によると砂の内部摩擦角 ϕ_0 は、拘束圧、試験方法、材料の構造異方性などに依存しているとされる。

(2) 非排水試験

① 三軸試験 (周圧一定, 軸圧増加)

圧密荷重を式(1.14)で与え、以降非排水で σ_{rc} を一定のまま、 σ_a を増加させる。そして σ_a が σ_{af} のとき破壊したとする。せん断中非排水であるので間隙水圧 u は変化する。破壊時の間隙水圧を u_f とする。

(a) 密なロック材料

密なロック材料の場合、 σ_a の初期の増加では u は増加するが、ある程度以上ひずみが増大するとその後の u は減少し、有効拘束圧が増加し u が負圧となりキャビテーションが生じて破壊する。すなわち、 σ_{af} は初期间隙水圧の大きさに依存する。したがって、フィルダムのロック材料の非排水強度は三軸供試体のバックプレッシャーを貯水深に合わせて試験することになる。

(b) コア材料

まず破壊面がわかったとする。その破壊面と三軸供試体の水平面のなす角を α_f とする。圧密は式(1.14)で与えられるから、破壊面上の圧密時の応力は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{fc} &= \sigma'_{fc} = \frac{1}{2}(\sigma_{ac} + \sigma_{rc}) + \frac{1}{2}(\sigma_{ac} - \sigma_{rc}) \cos 2 \alpha_f \\ \tau_{fc} &= \frac{1}{2}(\sigma_{ac} - \sigma_{rc}) \sin 2 \alpha_f \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.39)$$

破壊時には、

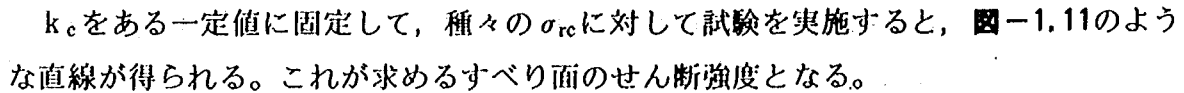
$$\tau_{ff} = \frac{1}{2} (\sigma_{af} - \sigma_{rc}) \sin 2 \alpha_f \quad \dots\dots\dots(1.40)$$

ここで、圧密時の主応力比を k_c とすると、

$$k_c = \sigma_{ac} / \sigma_{rc} \quad \dots\dots\dots(1.41)$$

式(1.39)は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{fc} &= \sigma_{rc} \left\{ \frac{1}{2} (k_c + 1) + \frac{1}{2} (k_c - 1) \cos \alpha_f \right\} \\ \tau_{fc} &= \frac{1}{2} \sigma_{rc} (k_c - 1) \sin 2 \alpha_f \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.42)$$

k_c をある一定値に固定して、種々の σ_{rc} に対して試験を実施すると、 図-1.11 のような直線が得られる。これが求めるすべり面のせん断強度となる。

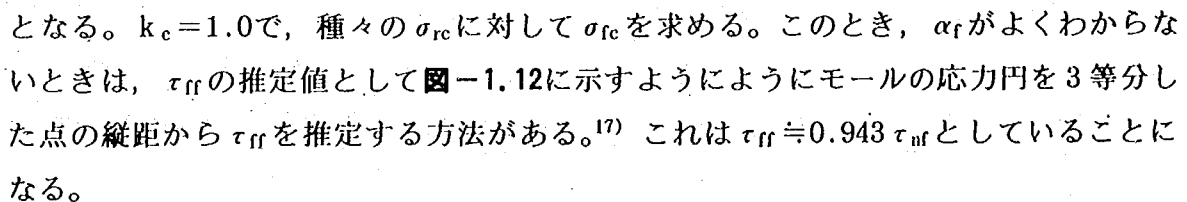
以上では、 α_f を既知としているが実際には α_f はわかりにくい。そのようなときには、一連の非排水試験から有効応力強度 C' 、 ϕ' を求めておき、この ϕ' を用いて

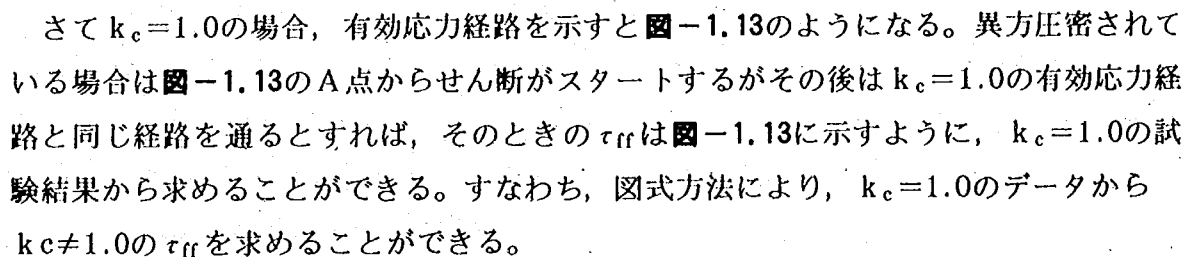
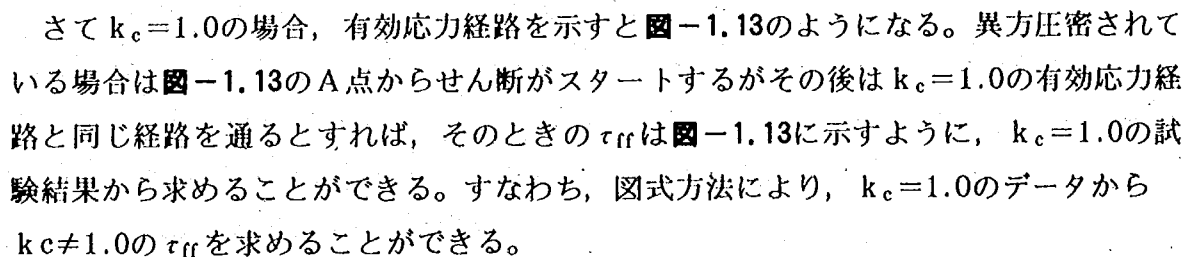
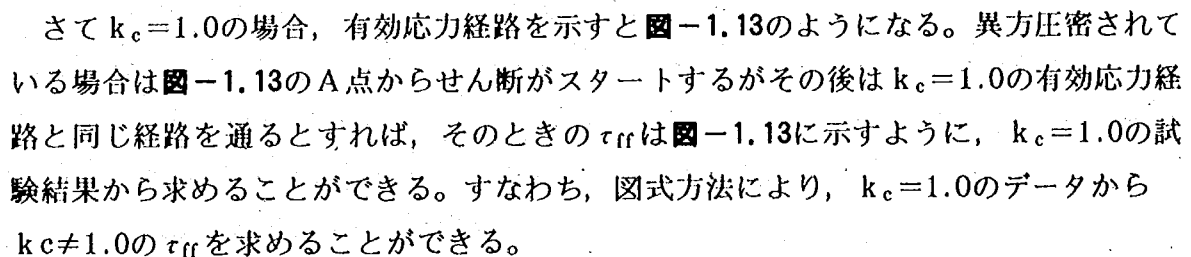
$$\alpha_f = 45^\circ + \frac{1}{2} \phi' \quad \dots\dots\dots(1.43)$$

とする。

以上の試験のうち特別な場合として $k_c = 1.0$ すなわち等方圧密の場合がある。このときは、式(1.42)において $k_c = 1.0$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{fc} &= \sigma_{rc} \\ \tau_{fc} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(1.44)$$

となる。 $k_c = 1.0$ で、種々の σ_{rc} に対して σ_{fc} を求める。このとき、 α_f がよくわからないときは、 τ_{ff} の推定値として 図-1.12 に示すようにようにモールの応力円を3等分した点の縦距から τ_{ff} を推定する方法がある。¹⁷⁾ これは $\tau_{ff} \doteq 0.943 \tau_{nf}$ としていることになる。

さて $k_c = 1.0$ の場合、有効応力経路を示すと 図-1.13 のようになる。異方圧密されている場合は 図-1.13 のA点からせん断がスタートするがその後は $k_c = 1.0$ の有効応力経路と同じ経路を通るとすれば、そのときの τ_{ff} は 図-1.13 に示すように、 $k_c = 1.0$ の試験結果から求めることができる。すなわち、図式方法により、 $k_c = 1.0$ のデータから $k_c \neq 1.0$ の τ_{ff} を求めることができる。

さてフィルダムにおいて、完成後一定期間を経過し、施工中の残留間隙が消散し、かつ定常浸透流になっているとする。そのときのすべりに対する安全率 F_s は、次式により求まる。

$$F_s = \frac{\sum \tau_f}{\sum \tau_s} = \frac{\sum (C' + \sigma' \tan \phi')}{\sum \tau_s} \quad \dots\dots\dots(1.45)$$

Σ は、全スライスにわたって加算する意味であるが平均的なスライスの τ_f を考えると、

$$F_s = \frac{C' + \sigma' \tan \phi'}{\tau_s} \quad \dots\dots\dots(1.46)$$

$C' = 0$ の場合, 式(1.46)から,

$$\frac{\tau_s}{\sigma'} = \frac{\tan \phi'}{F_s} = \frac{K_c - 1}{K_c + 1} \quad \dots\dots\dots(1.47)$$

表-1.2は F_s と ϕ' の値に応じた τ_s / σ' を示す。また, これらの値に対応した k_c は表-1.3のようになる。

② ねじりせん断試験

(a) 密なロック材料

三軸試験と同様に, 初期間隙水圧によって得られるせん断強度が異なる。

(b) コア材料

式(1.21)で圧密し, 以降非排水で τ_f を増加させ τ_{ff} を求める。次に式(1.36)から σ_1 , σ_3 を求め, α_f から τ_{ff} を求める。 τ_{ff} と σ_v' の関係を τ_s をパラメーターとしてプロットすれば図-1.11のような関係が求まる。

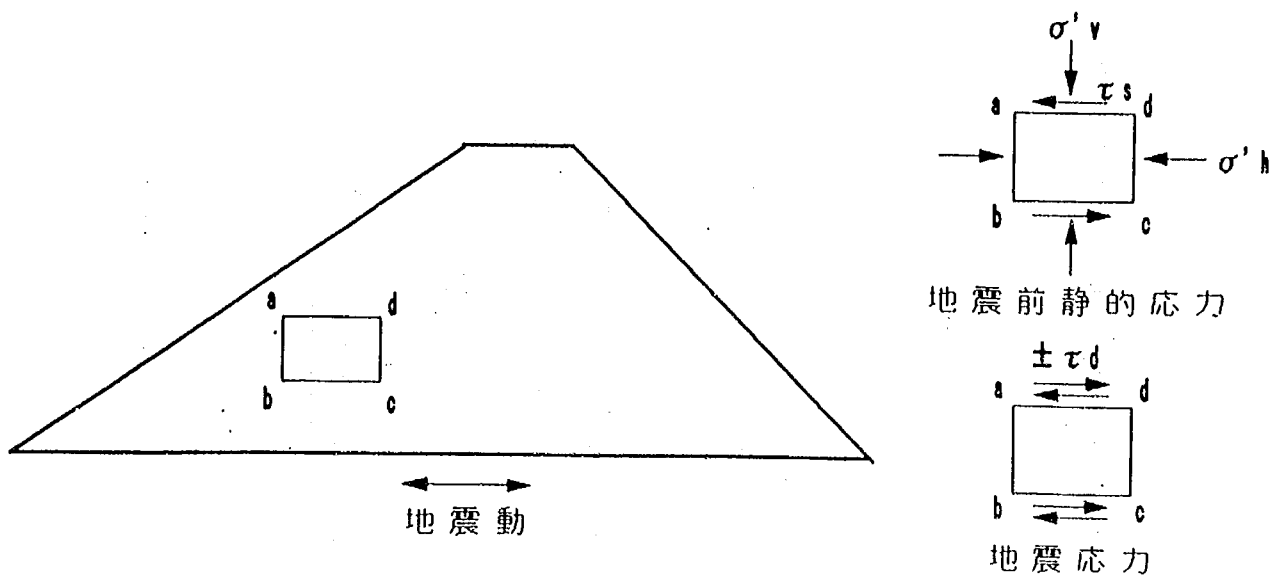


図-1.1 堤体中の要素と作用応力

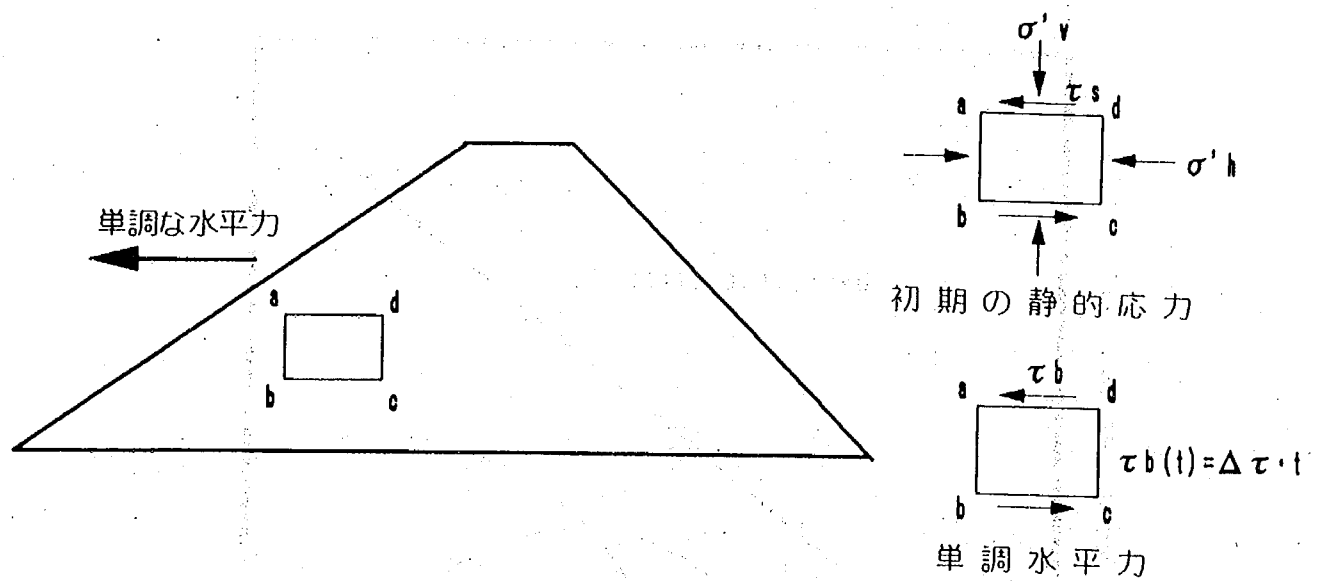


図-1.2 堤体中の要素と作用応力

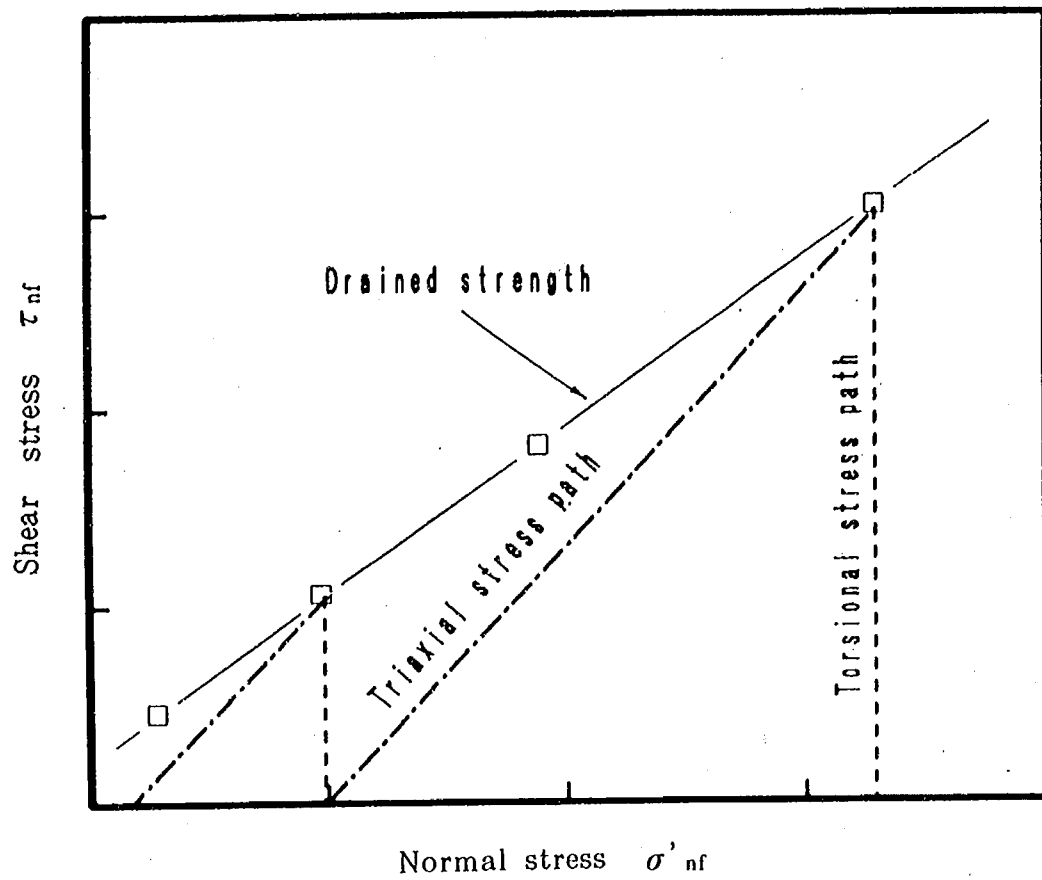


図-1.3 排水試験における破壊時応力

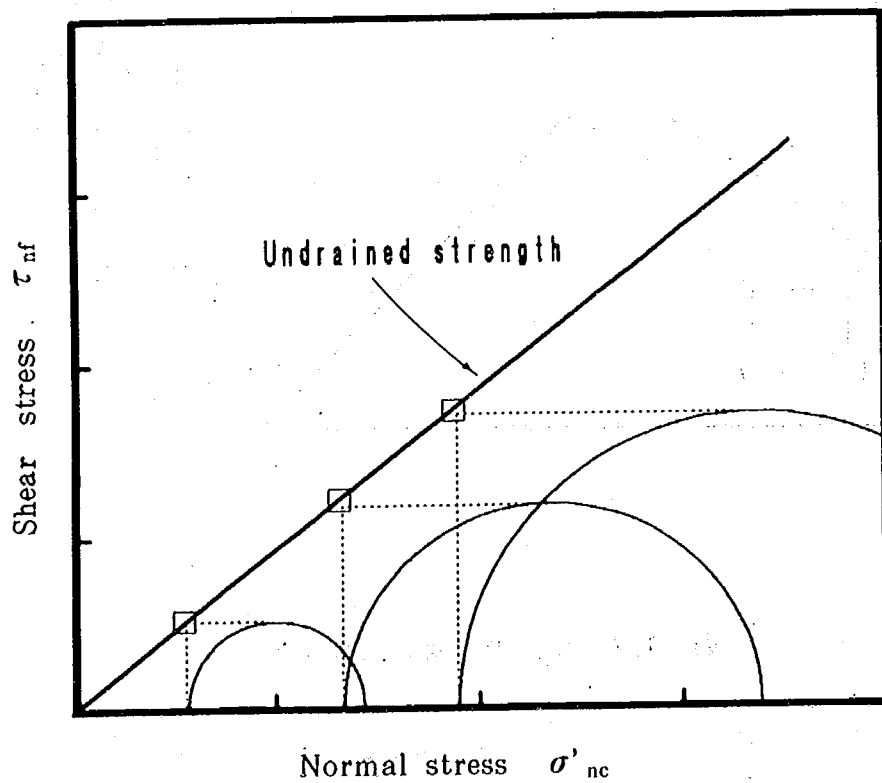


図-1.4 非排水試験における破壊時応力

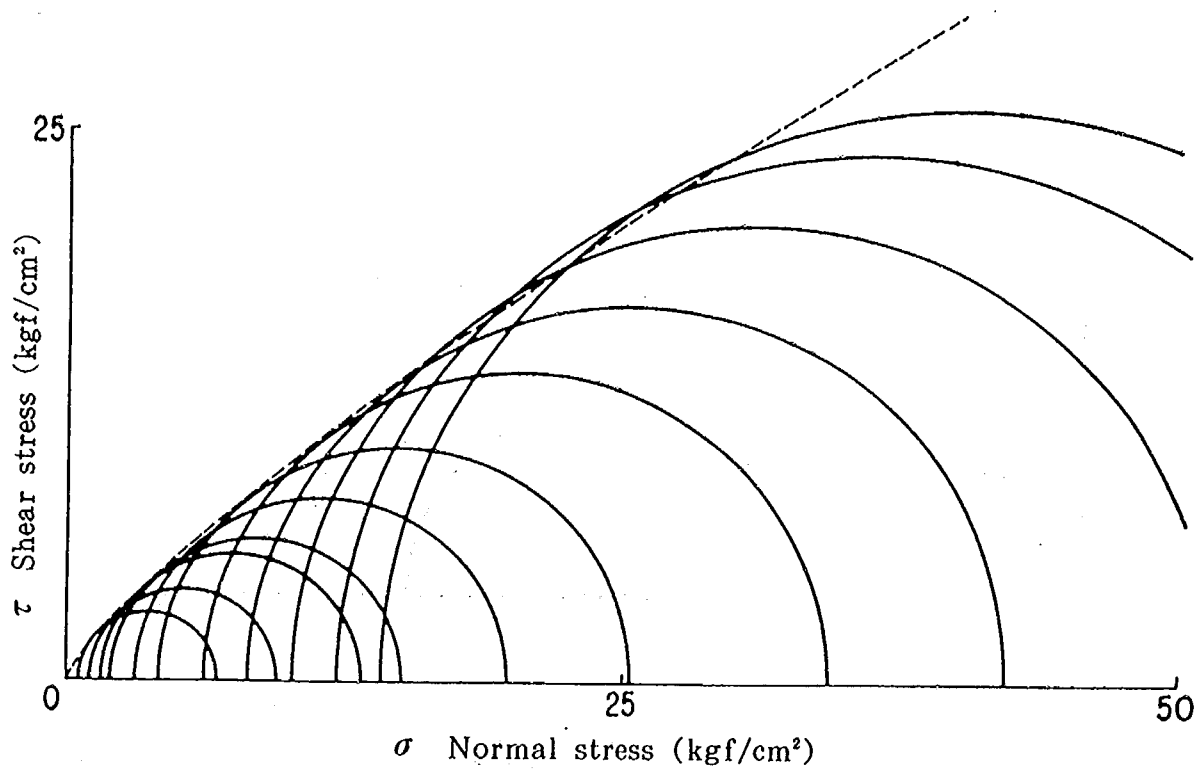


図-1.5 ロック材料の排水三軸試験結果

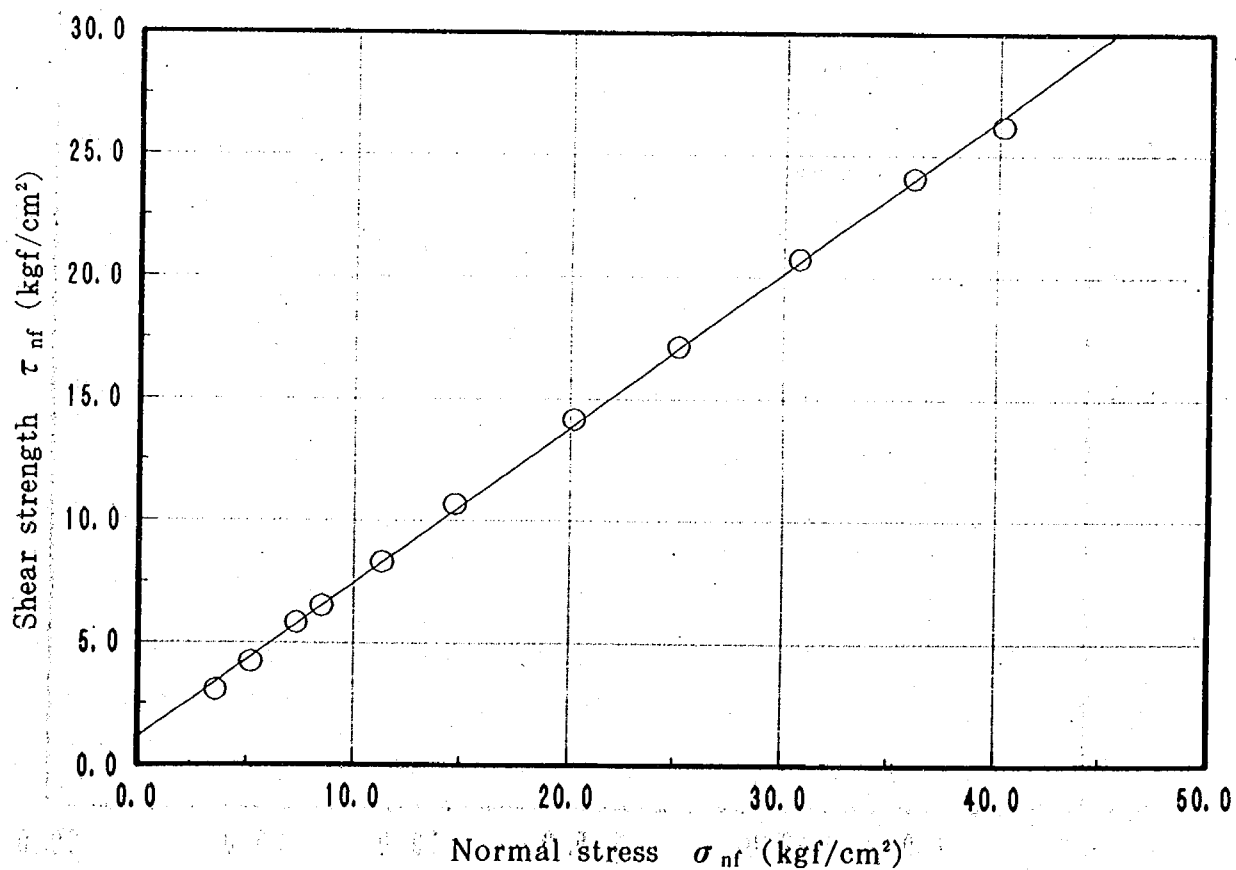


図-1.6 ロック材料の $\tau_{nf} \sim \sigma_{nf}$ 関係 (排水試験)

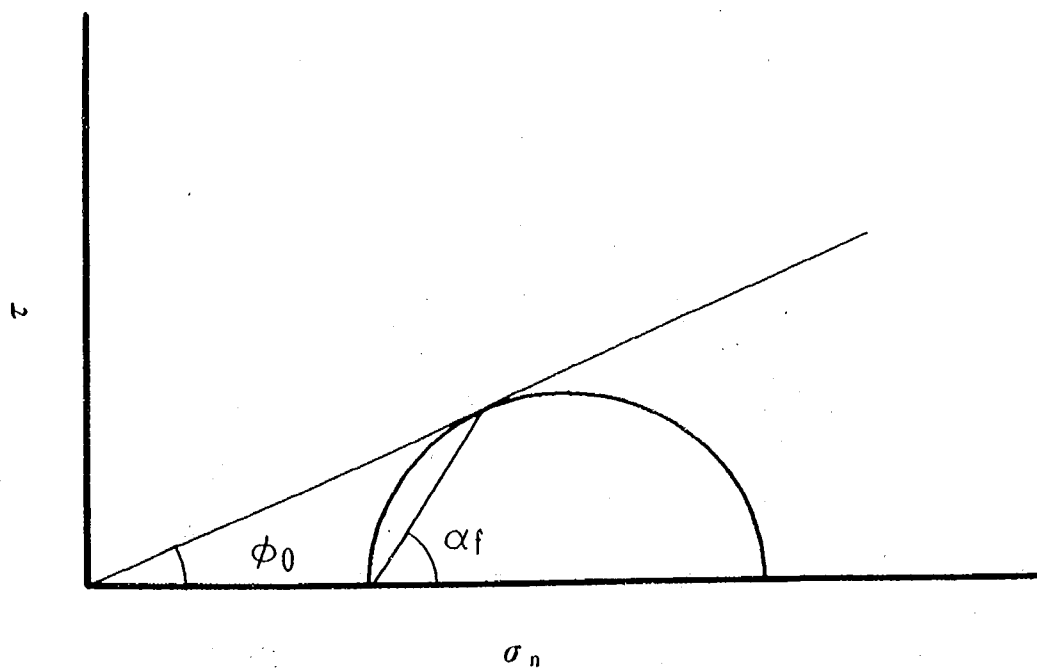


図-1.7 ϕ_0 , α_f の定義

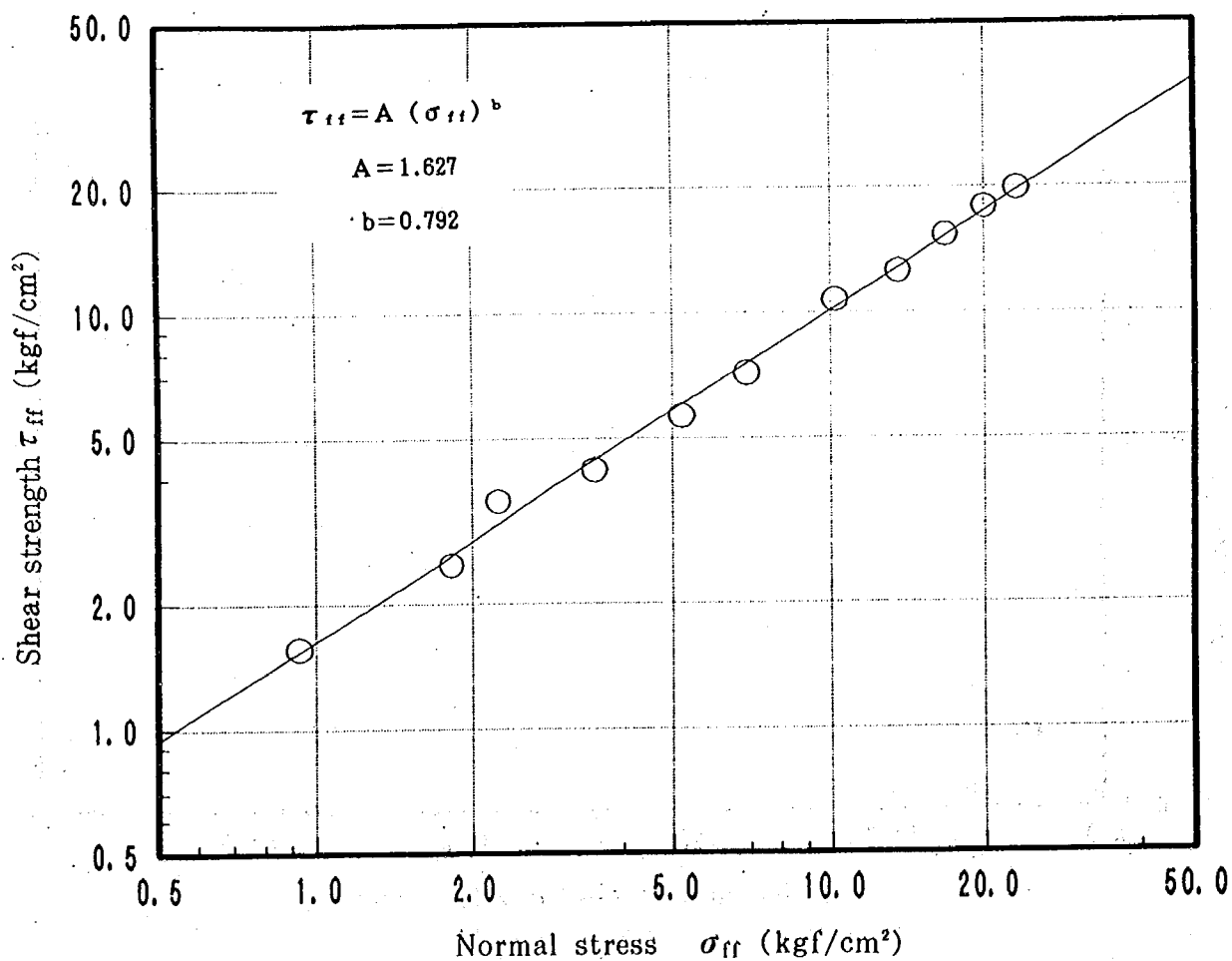


図-1.8 ロック材料の $\tau_{ff} \sim \sigma_{ff}$ 関係 (排水試験)

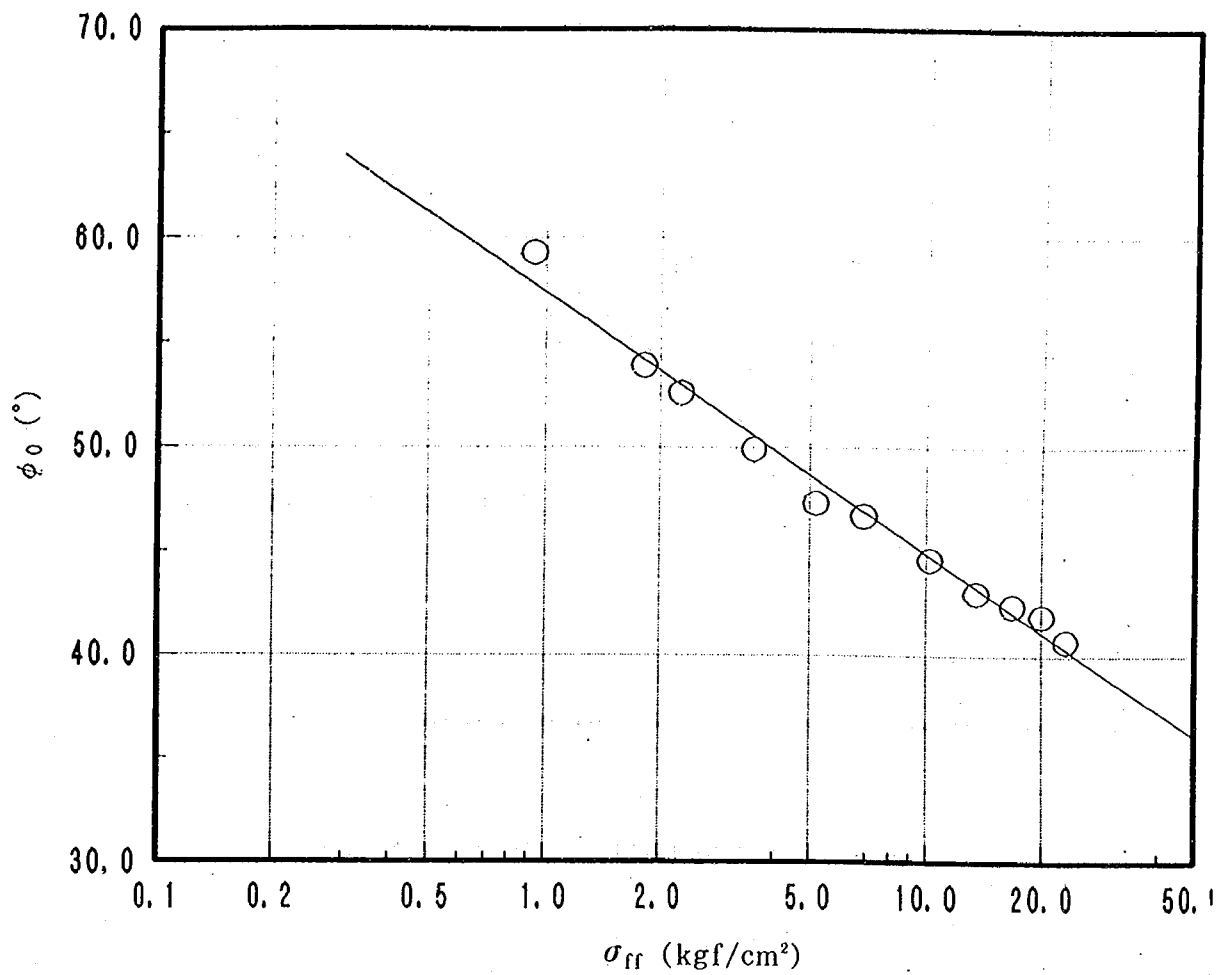


図-1.9 ロック材料の $\phi_0 \sim \sigma_{3r}$ 関係 (排水試験)

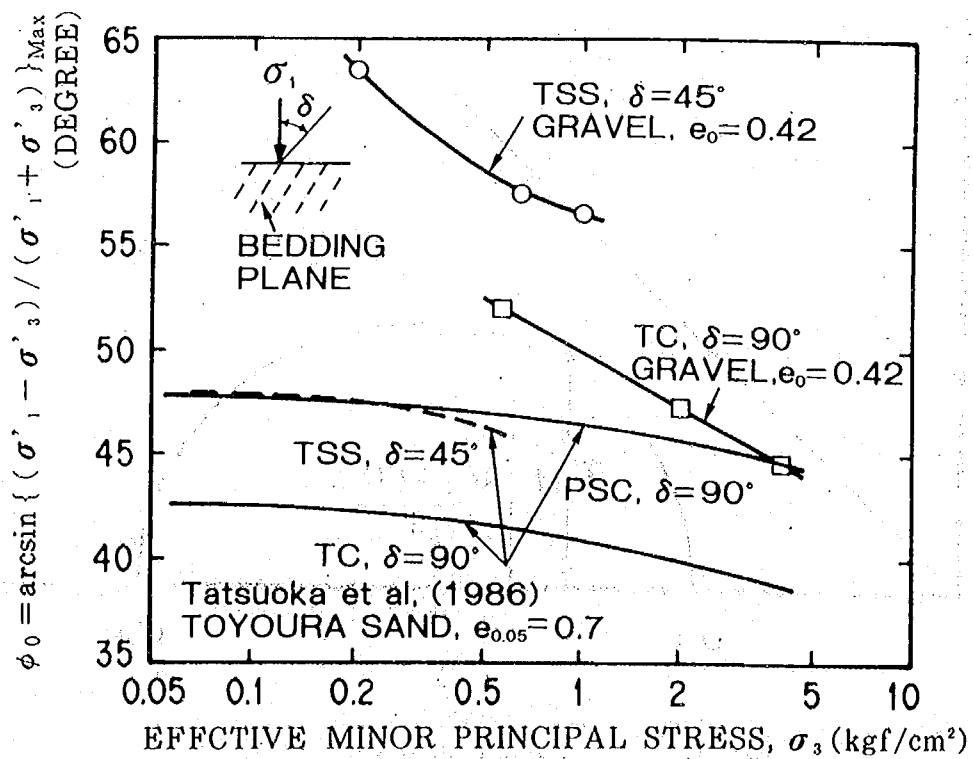


図-1.10 三軸試験とねじり試験による ϕ_0 の比較

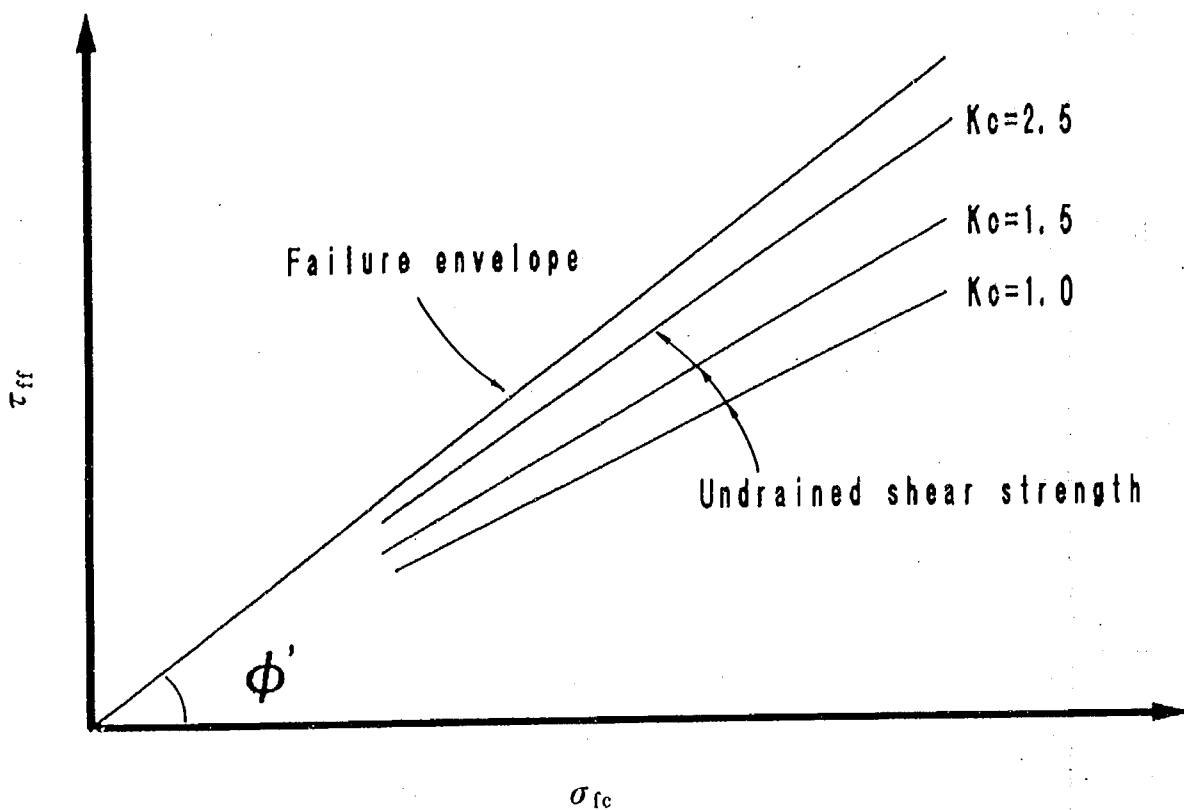


図-1.11 異方圧密時の非排水せん断強度

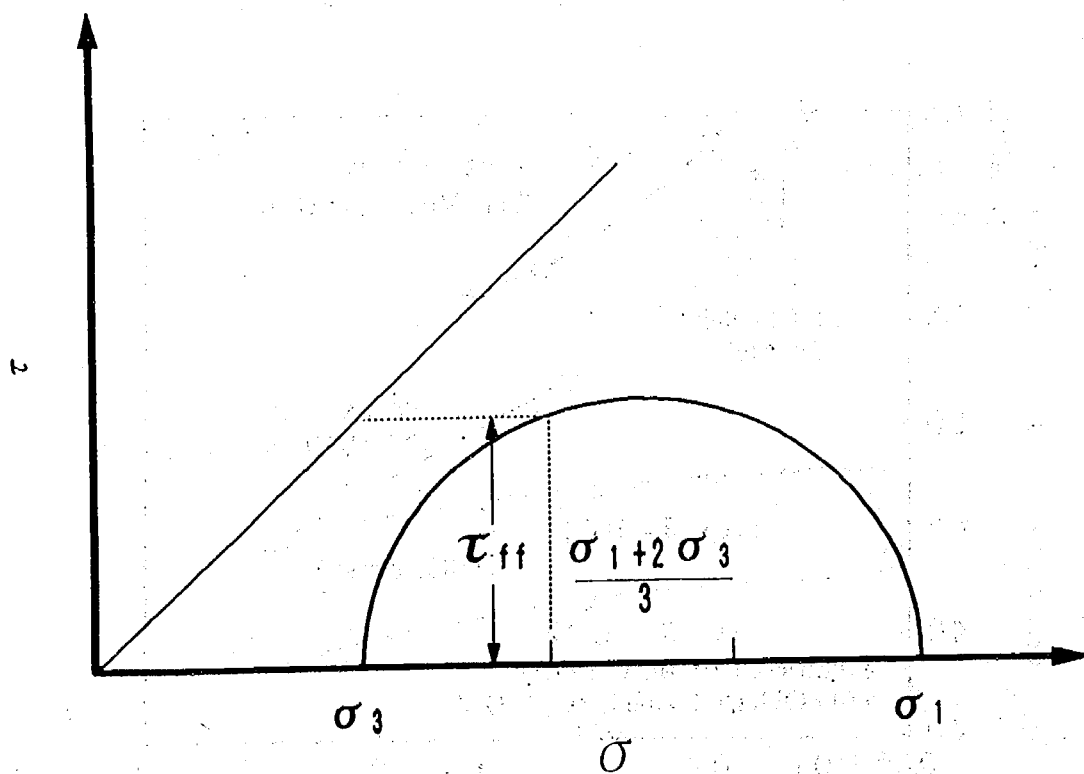


図-1.12 三等分法による τ_{ff} の推定

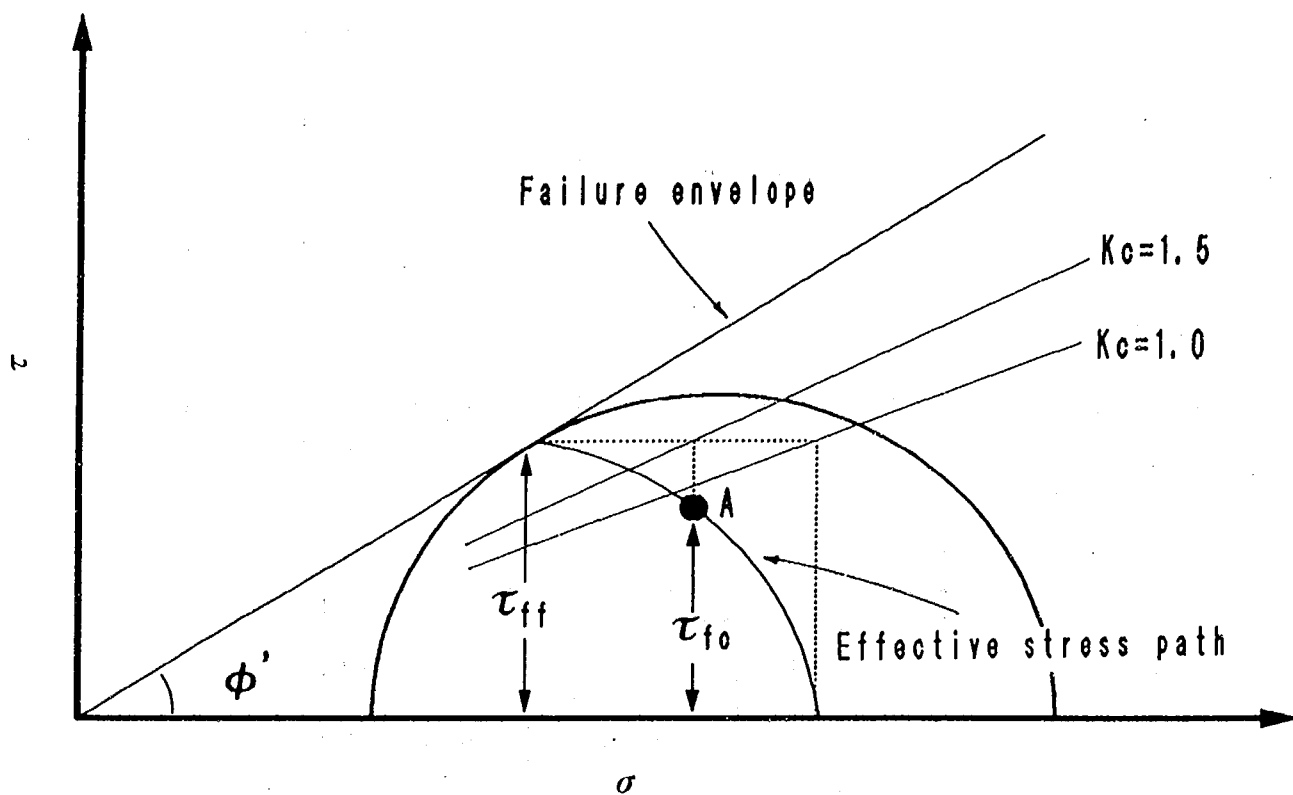


図-1.13 異方圧密時の非排水せん断強度の推定

表-1.1 諸研究における C_{r1}

	Equations	C_{r1} for $K_0=0.4$	C_{r1} for $K_0=1.0$
Finn, et al. ⁵⁾	$C_{r1}=(1+K_0)/2$	0.70	1.0
Seed and Peacock ⁶⁾	Varies	0.55~0.72	1.0
Castro ⁷⁾	$C_{r1}=2(1+2K_0)/3\sqrt{3}$	0.69	1.15
石原、李 ⁸⁾	$C_{r1}=(1+2K_0)/3$	0.60	1.0

表-1.2 Fs , ϕ' に応じた τ_s/σ'

		Fs					
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
ϕ' (°)	10	0.35	0.18	0.12	0.09	0.07	0.06
	20	0.73	0.36	0.24	0.18	0.15	0.12
	30	1.15	0.58	0.38	0.29	0.23	0.19
	40	1.68	0.84	0.56	0.42	0.34	0.28
	50	2.38	1.19	0.79	0.60	0.48	0.40
	60	3.46	1.73	1.15	0.87	0.69	0.58

表-1.3 Fs , ϕ' に応じた Kc

		Fs					
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
ϕ' (°)	10	2.08	1.44	1.27	1.20	1.15	1.13
	20	6.40	2.13	1.63	1.44	1.35	1.27
	30	—	3.76	2.23	1.82	1.60	1.47
	40	—	11.5	3.55	2.45	2.03	1.78
	50	—	—	8.52	4.00	2.85	2.33
	60	—	—	—	14.4	5.45	3.76

2. 試 験 方 法

2.1 試 験 装 置

本試験では、主に、単調載荷試験は供試体径20cm、高さ40cmの三軸試験機、繰返し載荷試験は供試体径30cm、高さ60cmの大型繰返し三軸試験機⁹⁾を使用している。各々の試験機の主要諸元を表-2.1に、概略図を図-2.1に示す。

2.2 試 験 材 料

試験に用いた材料は、北陸地方建設局が建設中の三国川ダムのコア材で、細粒材料と粗粒材料の混合材料であり、細粒材料は段丘堆積物、粗粒材料は堅硬かつ良質な班れい岩からなる。設定粒度は図-2.2に示すとおりで、最大粒径38.1mm、平均粒径 1.2mmに粒度調整したものであり、日本統一分類法では{GF}礫質土に分類される。また、材料の物理試験結果は表-2.2に、突固め試験結果は図-2.3に示すとおりで、供試体の密度および含水比は以下の値とした。

乾燥密度 $\rho_d = \rho_{d_{max}} \times 0.95 = 1.95 \text{ kgf/cm}^3$

含水比 $w = w_{opt} + 1.0 = 12.0\%$

また、突固め試験および三軸せん断試験後の供試体でMarsalの破碎率を求めた結果(表-2.3)、破碎率は1%~3%程度であった。

2.3 試 験 条 件

単調載荷試験の試験条件は表-2.4に、繰返し載荷試験の試験条件は表-2.5に示す。 $\phi 200$ の供試体で静的強度特性(排水条件、異方圧密、せん断速度の影響)を把握し、動的強度特性の把握および静的強度との比較は $\phi 300$ の供試体で行った。また、全試験を通してバックプレッシャーは 2.0 kgf/cm^2 である。

2.4 試 験 方 法

2.4.1 供試体の作成

試料は所定の含水比に調整し、ビニール袋に入れ、24時間以上養生してから使用した。

供試体はモールド内で5層で突固めて作成するものとし、1層毎に所定の重量の試料を投入し、密度が試験密度($\rho_d = 1.95 \text{ kgf/cm}^3$)となる高さまでランマあるいは突棒で突固めた。また、各層の突固め後の上面は十分に掻き起こした。

供試体作成後は、供試体をモールドから取り外し、供試体寸法を測定してから三軸試験機にセットした。また、供試体には排水用の濾紙を短冊状に巻き、その上からゴムスリーブ($\phi 200$ は厚さ1.5mm、 $\phi 300$ は厚さ2.0mm)を2枚かぶせた。

2.4.2 供試体の飽和

供試体の飽和からB値チェックまでのフローチャートを図-2.4に示す。ただし、 $\phi 300$ 供

試体の通水は真空方式（供試体内外の圧力差を 0.2kgf/cm^2 程度に保ったまま供試体内を真空にした状態で、水頭差で脱気水を通水する）を採用して飽和度を高めた。

2.4.3 供試体の圧密

等方圧密の場合、側圧を毎分 1.0kgf/cm^2 で所定の圧まで上げた後、バルブ開放し圧密をスタートした。圧密は $\log t$ 法で判定すると、ほぼ24時間以内に終了していた。（図-2.5 参照）

異方圧密の場合は、載荷によりせん断応力を加えるのと同様な状態になるため、変形による破壊あるいは、部分的な圧密とならないように以下の点に留意し、慎重に実施した。

- 1) 供試体の排水バルブは、圧密全工程において排水状態とする。
- 2) 上載荷重 (σ_1) の載荷速度は $0.1\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ 以下とする。
- 3) 平均主応力 1.0kgf/cm^2 毎に圧密工程 1 段階とし、1 段階を24時間圧密とする。
- 4) 圧密工程 1 段階での載荷は、さらに10段階に細分化して載荷する。異方圧密の載荷応力図を図-2.6 に示す。

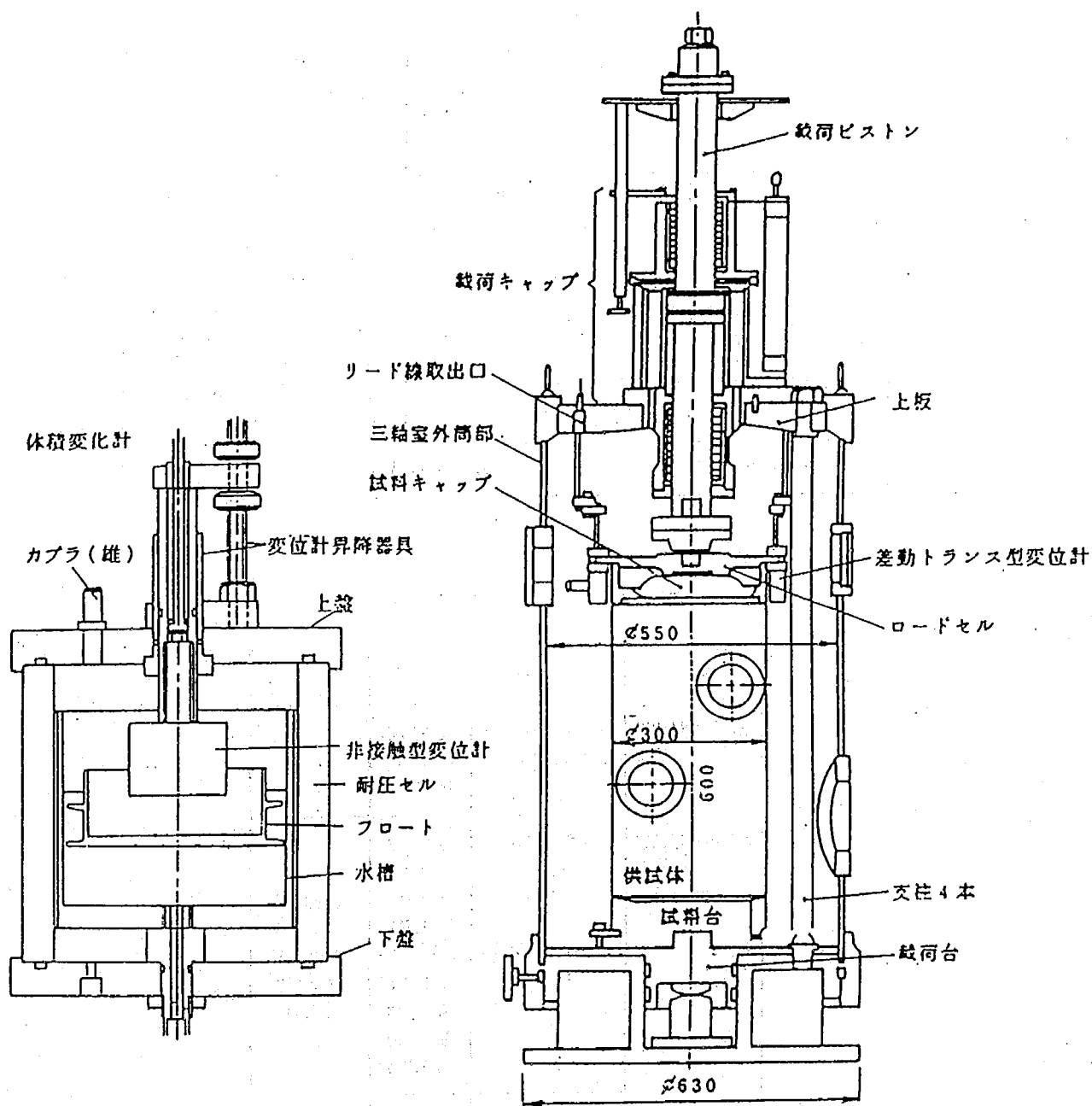


図-2.1 動的三軸試験機概要

表-2. 1 試験機の主要諸元

		中型三軸試験装置	大型三軸試験装置
供試体寸法 (mm)		φ200, H400	φ300, H600
軸圧荷方式	異方圧密	油圧ジャッキ (上方載荷) 最大 50tf	油圧サーボ方式 (上方載荷) 最大 60tf
	せん断	モーター方式 (下方載荷) 最大 20tf	
側圧荷方式		空圧荷 最大 15kgf/cm ²	
軸荷重の測定		ひずみゲージ型ロードセル (セル外設置)	ひずみゲージ型ロードセル (セル内設置)
軸ひずみの測定		パルスカウンター方式	差動トランス型ひずみ計
体積変化の測定		差圧計によるビューレット 水位測定	差動トランス型体積変化計
間隙水圧の測定		ひずみゲージ式間隙水圧計	

表-2. 2 物理試験結果一覧表

試験項目	規 格	結 果	備 考
液性・塑性限界試験	JIS A 1205 JIS A 1206	WL 38.9% Wp 18.1% Ip 20.8	
比重吸水量試験	JIS A 1110 25.4mm	Ga 2.863 Gb 2.829 Gg 2.982 Q 1.20%	合成比重 Ga=2.860 Gb=2.811 Gg=2.873 Q=1.74%
	19.1mm	Ga 2.885 Gb 2.848 Gg 2.959 Q 1.32%	
	9.52mm	Ga 2.882 Gb 2.837 Gg 2.970 Q 1.58%	
	4.76mm	Ga 2.828 Gb 2.763 Gg 2.956 Q 2.36%	
比重試験	JIS A 1202	2.830	4.76mm以下

コア材試験粒度分布

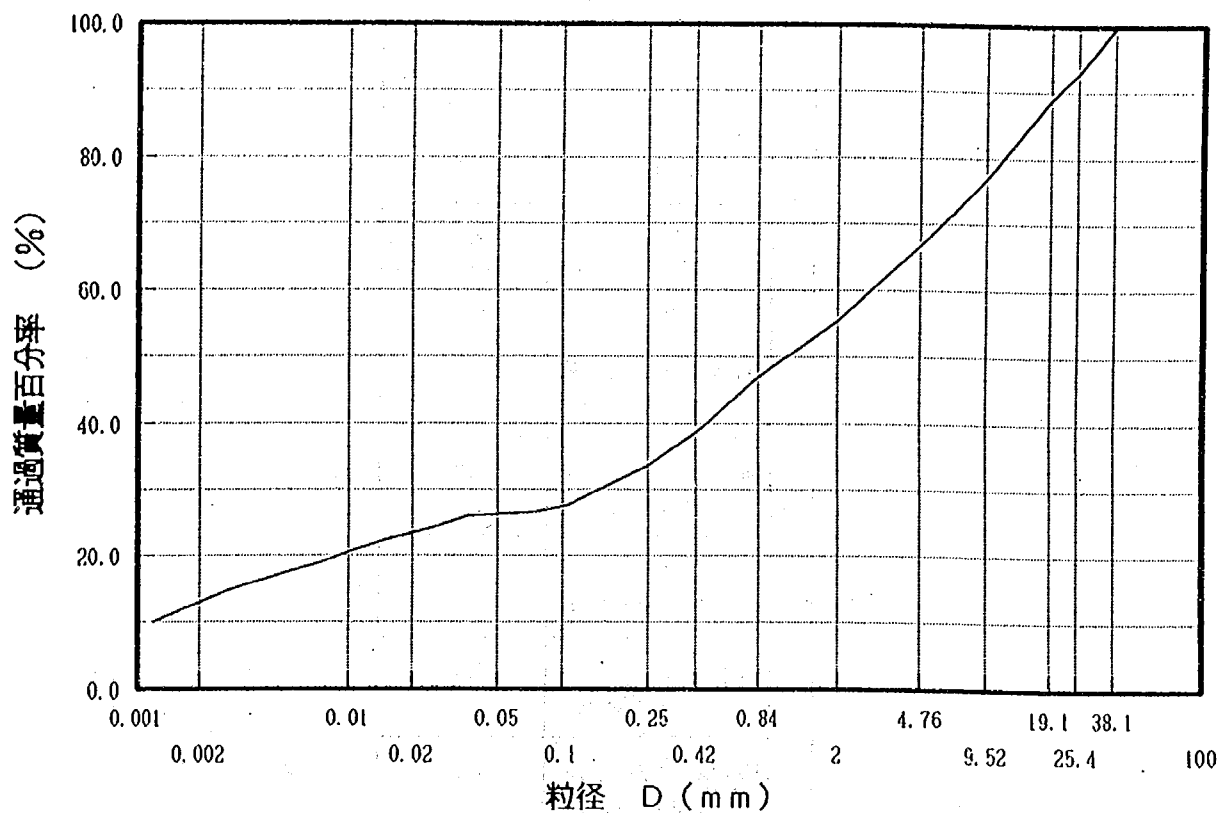


図-2.2 試験粒度分布

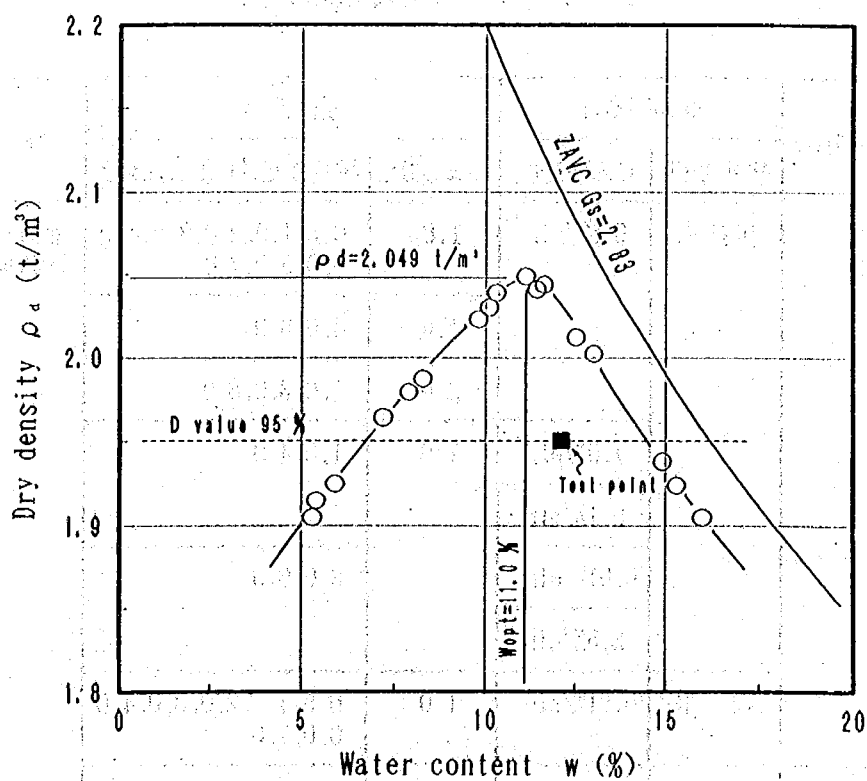


図-2.3 突固め試験結果

表-2.3 Marsalの破碎率

試料		Marsalの破碎率 BM(%)
突 固 め 後	No.1	1.9
	No.2	3.6
	No.3	2.7
三 軸 後	CU試験 $\sigma_1/\sigma_3=1.0$ $p_c=6.0 \text{ kgf/cm}^2$	1.3
	CU試験 $\sigma_1/\sigma_3=1.5$ $p_c=6.0 \text{ kgf/cm}^2$	1.3
	CU試験 $\sigma_1/\sigma_3=2.0$ $p_c=6.0 \text{ kgf/cm}^2$	2.2
	CD試験 $\sigma_1/\sigma_3=1.0$ $p_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$	1.7
	CD試験 $\sigma_1/\sigma_3=1.0$ $p_c=6.0 \text{ kgf/cm}^2$	2.2

表-2.4 単調載荷試験条件

供試体寸法	せん断条件		圧密条件		備 考
	排水条件	せん断速度	主応力比	平均主応力 (kgf/cm ²)	
φ200 H400	非排水	0.5%/min	1.0	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 5.0, 6.0, 7.0	側圧一定 ひずみ制御
			1.5	3.0, 6.0	
			2.0	1.0, 3.0, 6.0	
		1.0%/min	1.0	1.0, 4.0	
		0.1%/min		3.0, 6.0	
		0.01%/min			
		2.5%/min			
	排 水	0.01%/min	1.0	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 6.0, 7.0	
φ300 H600	非排水	0.5%/min	1.0	1.0, 2.0, 4.0, 6.0 10.0	

表-2. 5 繰返し載荷試験条件

供試体寸法	せん断条件		圧密条件		備 考
	排水条件	せん断速度	主応力比	平均主応力 (kgf/cm ²)	
φ300 H600	非排水	0.1 Hz (正弦波)	1.0	1.0, 2.0, 4.0, 6.0	側圧一定 荷重制御
			1.5	1.0	
			2.0	1.0, 4.0	

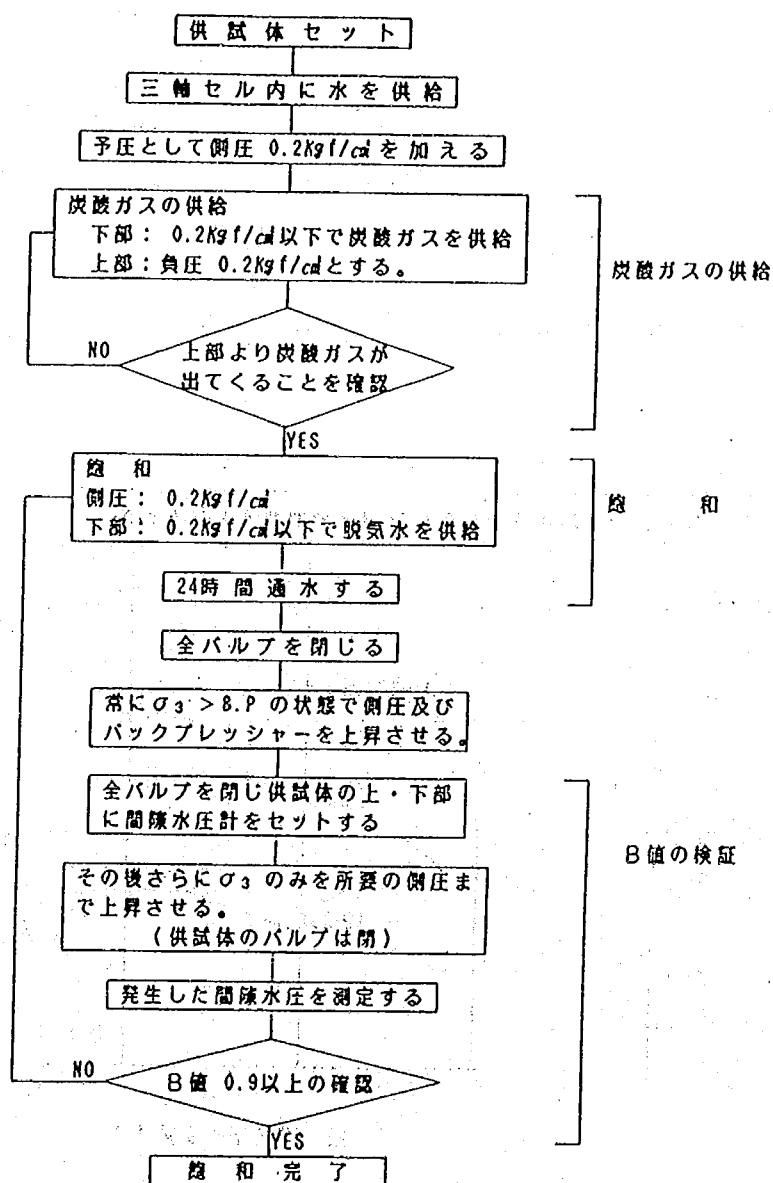


図-2. 4 飽和作業のフローチャート

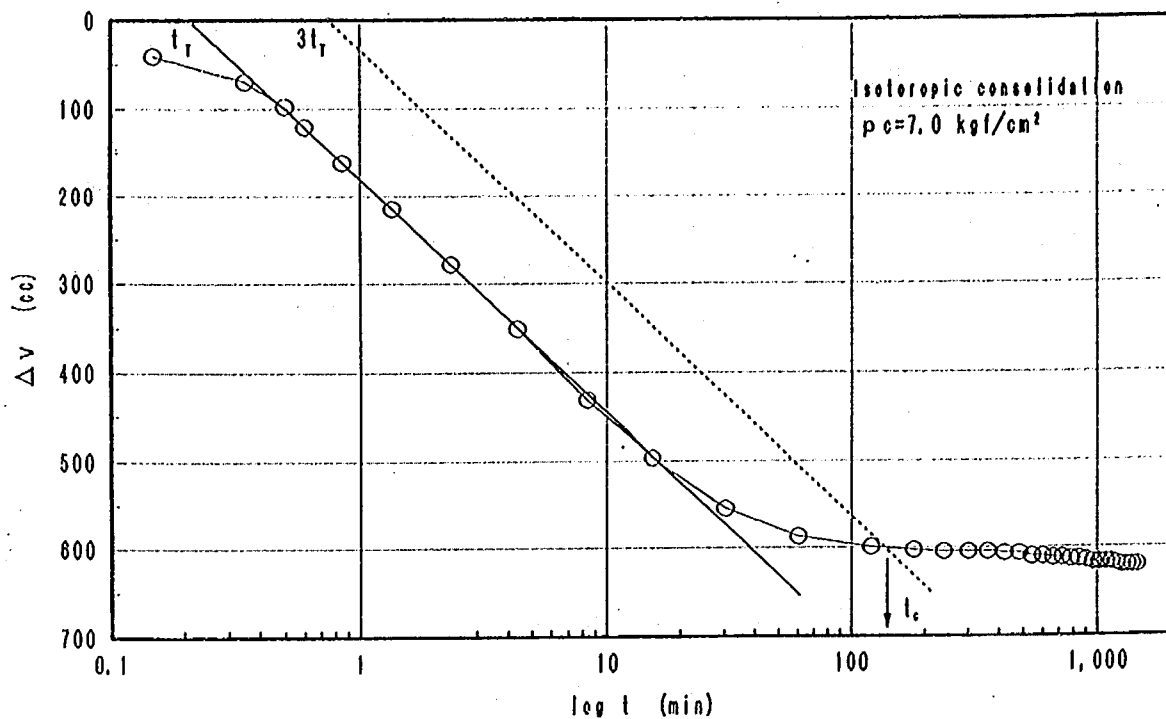


図-2. 5 圧密時の体積変化と時間の関係，等方圧密， $p_c = 7.0 \text{ kgf/cm}^2$

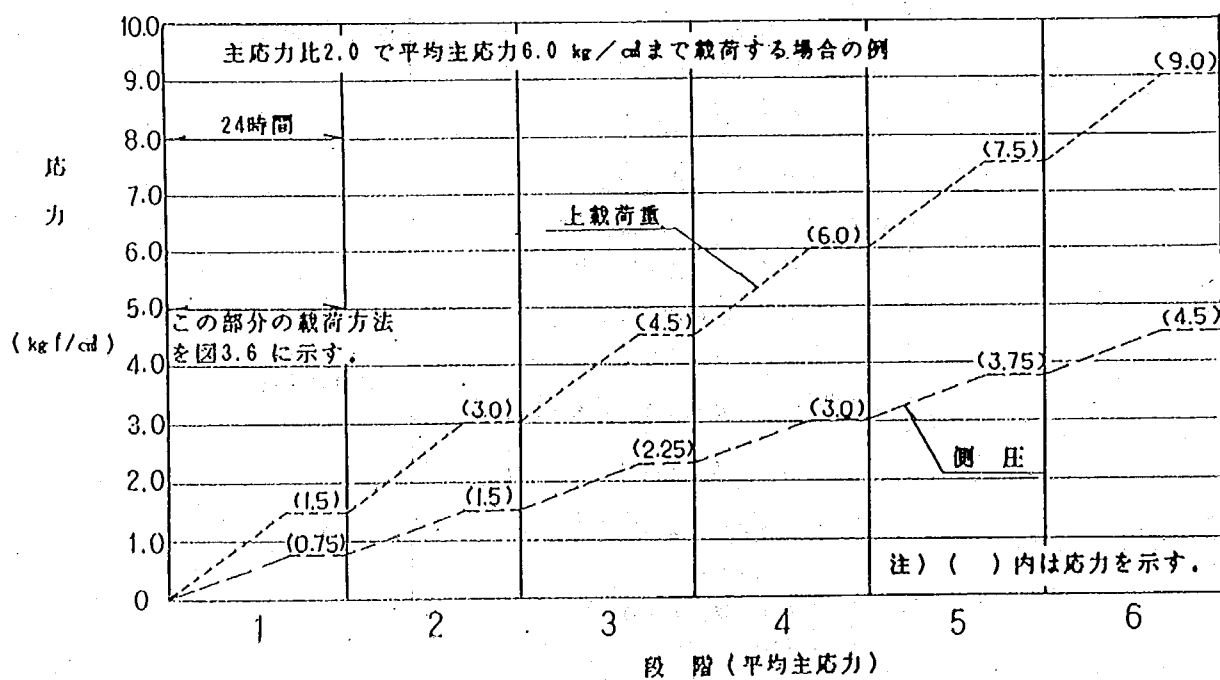


図-2. 6 異方密圧における圧密工程

3. 試験結果と考察

3.1 単調載荷試験

3.1.1 圧密非排水試験

(I) 等方圧密非排水試験 (ICU試験)

ICU試験による応力～ひずみ特性および載荷速度の影響について以下に述べる。

ひずみ速度 $0.5\%/min$ の試験の軸差応力 q ～軸ひずみ ε の関係を図-3.1(a)に、間隙水圧 Δu と軸ひずみ ε の関係を図-3.1(b)に、応力経路を図-3.1(c)に示す。

せん断中の軸差応力は軸ひずみ 1% 程度までは急増しており、その後は緩やかに増加する傾向を示し、応力のピークは現れていない。一方、間隙水圧もあるひずみレベルまで急増し、その後の変化量は僅かである。また、拘束圧が $2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下の試験では、途中から間隙水圧が減少している。

有効応力経路に関しては、軸差応力の増加とともに、間隙水圧の変化に伴い有効平均主応力 p' は減少あるいは増加し、C L S (限界状態線) に到達している。また、C L S に達した後もさらに C L S に沿って上昇している。この様な傾向は、太田ら¹⁰⁾ が指摘しているように、コア材料は、粗粒材を含むものの粒度分布が良く粗粒材どうしが接触する可能性が低いため、せん断当初は粘性土的な挙動を示すが、せん断が進むにつれ粗粒材どうしが接触するようになり強度が増加することにより、応力経路が上昇していくものと考えられる。

図-3.2(a), 3.2(b), 3.2(c)は、軸差応力、間隙水圧、および平均有効主応力を圧密圧力 p_c で正規化して整理したものである。 $p_c = 2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以上の場合においては拘束圧によらず応力、間隙水圧～ひずみ曲線及び応力経路はほぼ一致しているのに対して、 $p_c = 1.0, 0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ ではかなり異なる形状を示している。これは、一般に正規圧密粘土に対する過圧密粘土が示す傾向に類似しており、供試体を締固めて作成していることによる疑似過圧密領域の存在を示している¹¹⁾。

図-3.3～3.4は $\phi 300$ の供試体での結果を整理したものであり、上述の $\phi 200$ での結果と同様の傾向を示しており、やはり $p_c = 1.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ の試験では過圧密的な挙動が見られる。

図3.5(a), 3.5(b), 3.5(c)にはせん断速度が異なる試験でのそれぞれ応力～ひずみ曲線、間隙水圧～ひずみ曲線、応力経路を示す。せん断速度が速いほど明らかに大きな軸差応力が発生していることがわかるが、間隙水圧の発生を見ると立ち上がりはせん断速度が速いほど間隙水圧の発生が遅れているが、最終的にはひずみ 15% 付近で発生間隙水圧はせん断速度によらずほぼ同じ値を示した。有効応力経路を見るとせん断速度が速いほど、経路が立ち上がる傾向を示しているが、どの速度でも同一の C S L 上で破壊に至っている。

飽和粘性土では、この様な載荷速度の影響はよく知られており、明石ら¹²⁾ はダイレイタンスの時間依存性に着目し、カムクレイモデルでこの載荷速度効果を説明している。また、細粒分が多い粘性土の場合には、せん断速度が $1\%/min$ 以上になると供試体端部で測定され

る間隙水圧の時間遅れのために、CSL（破壊線）の傾き（ ϕ' ）が小さくなるという報告¹³⁾もあるが、本報告のコア材の場合はせん断速度2.5%/minの場合でも ϕ' は一致している。

以上述べたように、コア材の応力～ひずみ特性は総じて一般の粘土のものと類似したものであった。川上ら¹⁴⁾は礫（2mm以上）混入率50%以下の礫混り粘土では、粘土領域のせん断特性を示すと指摘しており、本報告のコア材（礫混入率45%）もこれに類するものと考えられる。

(2) 異方圧密非排水試験（ACU試験）

圧密時の主応力比 σ_1/σ_3 が1.5あるいは2.0の試験結果を図-3.6～3.7に示す。また、圧密圧力 $p_c=6.0\text{kgf/cm}^2$ での等方圧密の場合との比較を図-3.8に示す。

軸差応力～軸ひずみ曲線を見ると、主応力比1.5の場合は等方圧密の場合同様、軸差応力が増加一辺倒であるのに対して、主応力比が2.0になると、せん断初期（ $\varepsilon_a=1.0\%$ 付近）に応力のピークが現れ、その後は一旦応力が減少し、いわゆる残留強度状態に近い挙動を示している。また、 $\varepsilon_a=15\%$ までの最大応力は等方圧密により異方圧密の方が大きくなっている。（図-3.8(a)）間隙水圧の発生特性は、主応力比が大きいほど立ち上がりが緩やかで、破壊時の発生間隙水圧も小さくなっている。（図-3.8(b)）

有効応力経路は、主応力比の違いによりスタート点が異なるわけであるが最終点はICU試験から得られたCSL上に到達している。また、主応力比2.0の場合を見ると、軸差応力のピークはCSLに到達する以前に現れている。

3.1.2 圧密排水試験

等方圧密による排水試験（ICD試験）の軸差応力～軸ひずみ関係、体積ひずみ～軸ひずみ関係を図-3.9(a), (b)に示す。

排水試験の場合、 $p_c=2.0\text{kgf/cm}^2$ 以上では軸ひずみ15%以内ではピーク応力は現れず、特に $p_c=6.0, 7.0\text{kgf/cm}^2$ では軸ひずみ15%以降もかなりの応力（強度）増分が期待される。一方、体積ひずみ（圧縮を正）はやはり $p_c=2.0\text{kgf/cm}^2$ 以上の試験では $\varepsilon_a=5\%$ 以内で単調に増加する傾向を示しているが、 $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$ 以下では $\varepsilon_a=5\%$ 程度で体積ひずみが圧縮から膨張側へ転じている。このことは、非排水試験の項で述べた過圧密的な挙動の現れであると考えられる。

軸差応力 q を p_c で正規化したものが図-3.10である。拘束圧が大きいほど応力の立ち上がりが緩やかであるが、ひずみが進行して最終的には q/p_c は同一値に近づくと推測される。

3.1.3 静的強度特性

排水および非排水試験によるせん断強度と破壊時の有効垂直応力の関係を図-3.11に示す。本報告の応力範囲では等方圧密の非排水あるいは排水試験から得られる破壊線は、ほぼ原点を通る直線を示したが、一般に言われているような両直線の一致は見られていない。その理由としては、排水試験のせん断中にも供試体内部に間隙水圧が残留して見かけ上強度が小さくでたものと考えられることから、以後、本報告では非排水試験の有効応力表示で得られた強度直線

の方を破壊線としている。

非排水試験において異方圧密試料の結果を見ると、主応力比 1.5 の異方圧密の場合は等方圧密と同じ破壊線上に載っているが、主応力比 2.0 の異方圧密では異なる破壊線を示している。この原因は破壊の定義に関連しており、有効応力経路（図-3.8(c)）を見れば明らかである。等方圧密および主応力比 1.5 の異方圧密の場合は、応力経路が CSL に到達して破壊に至っており、破壊を $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ 、 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ の何れで定義しても得られる破壊線は CSL にほぼ一致するのに対して、主応力比 2.0 の異方圧密の場合は、応力経路が CSL に到達する前に軸差応力のピークが現れており、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ での破壊線は CSL とは明らかに異なる。しかし、主応力比 2.0 の異方圧密の破壊を $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ で定義すれば図-3.11 の矢印で示すように等方圧密の破壊線に一致するようになる。破壊を $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ か $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ のどちらで定義するかは、議論の多いところであり、 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{max}$ で定義した ϕ' のほうが排水試験の ϕ_d に良く一致するという報告も多い。しかし、本報告ではすべり安定性を評価するための強度を対象としており、また、動的強度との比較という観点からも $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ を破壊の定義として採用している。

図-3.12 は非排水せん断強度と初期有効垂直応力の関係を示したものである。強度曲線は $\sigma_{nc} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 以上では直線で近似することができる。また、異方圧密の強度は等方圧密の強度より大きく、有効応力強度から得られた破壊線（排水強度直線）と等方圧密の強度直線の中間を示した。

初期含水比が等しければ応力履歴によらず非排水強度は等しくなる¹⁵⁾と仮定すると、正規圧密粘土では異方圧密での非排水強度は圧密時の主応力比が大きいほど大きくなり、排水強度に近くなるはずである（図-3.13）。そこで、等方圧密の有効応力経路から異方圧密（主応力比 2.0）の非排水強度を図-3.14 のように推定¹⁶⁾したところ、同図の破線のようになった。実測値とはあまり一致していない。この原因としては、礫が混入していることによるダイレクションシーの違いによる影響が考えられるが、今後の検討が必要である。

次に、 $\sigma_{nc} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 以下の非排水強度に着目すると、 $\sigma_{nc} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ を境に強度線が折れており、いわゆる強度増加率 ($C_u / P_c = \tau_{s1} / \sigma_{nc}$) が急増している。これは前の項でも述べたように締固めによって疑似過圧密の領域ができているためである。過圧密状態を考えると何らかの先行圧密荷重が存在するわけであり、締固めによって加えられた疑似先行圧密荷重の大きさは、締固めエネルギーによって異なると考えられる。過圧密粘土の特性として、強度増加率 C_u / P_c と過圧密比 OCR は両対数紙上で直線関係を示す¹⁷⁾とされているが、本試験の場合も強度直線の折れ点である $\sigma_{nc} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ を先行圧密荷重として OCR を計算すると同様の直線関係が得られた（図-3.15）。

ロックフィルダムコア材のように現場で十分に締固められた材料の非排水強度を考えると、このような締固めエネルギーに対応した疑似過圧密領域の存在は疑似先行圧密荷重の前後では強度の評価が異なってくることを示唆するものである。

図-3.16は、せん断速度の非排水強度に及ぼす影響をまとめたものである。せん断速度1%/min以下では強度の変化は少ないが、それ以上になると強度が急増することが分かる。

ここまでは、モール円の頂点でのせん断応力すなわち主応力方向に対して45°面上の破壊応力で強度特性を述べてきたが、実際のすべり安定性評価に必要な、破壊面上の強度定数は以下のとおりである。

c' 、 ϕ' および c_d 、 ϕ_d は、図-3.17の近似直線より次式で求まる。

$$\tau_{s,r} = \sin \phi' \cdot \sigma'_{n,r} + c' \cdot \cos \phi' \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\tau_{s,r} = \sin \phi_d \cdot \sigma'_{n,r} + c_d \cdot \cos \phi_d \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

$$c' = 0.054 \text{ kgf/cm}^2, \quad \phi' = 39.7^\circ$$

$$c_d = 0.038 \text{ kgf/cm}^2, \quad \phi_d = 36.4^\circ$$

全応力の強度定数 c_{cu} 、 ϕ_{cu} は、モール円の包絡線から求めると

$$c_{cu1} = 0.223 \text{ kgf/cm}^2, \quad \phi_{cu1} = 16.5^\circ$$

また、図-3.18(b)のように破壊面の角度を $45^\circ + \phi'/2$ と仮定して、破壊面とモール円の交点のせん断応力 $\tau_{r,r}$ と初期垂直応力 $\sigma_{r,c}$ の関係から求めると、

$$c_{cu2} = 0.230 \text{ kgf/cm}^2, \quad \phi_{cu2} = 16.9^\circ$$

あるいは、図-3.18(c)のようにモール円の3等分点（平均主応力面上）でのせん断応力を $\tau_{r,r}$ として初期垂直応力 $\sigma_{r,c}$ との関係から求めると、

$$c_{cu3} = 0.281 \text{ kgf/cm}^2, \quad \phi_{cu3} = 20.5^\circ$$

となる。旧土質試験法¹⁸⁾によれば、破壊面の角度が決定できれば c_{cu2} 、 ϕ_{cu2} が正しい強度の評価と考えられるが、そうでなければ c_{cu3} 、 ϕ_{cu3} が誤差が少ないとしているが、本報告では、 c_{cu3} 、 ϕ_{cu3} は危険側であるように思われる。

3.2 繰返し載荷試験

3.2.1 試験結果の整理

1) 繰返し回数

繰返し回数は、制御に用いられる荷重の1周期を1回と数え、N周期をN回とする。また、所定の軸ひずみが生じたときの繰返し回数Nは土質工学会基準「土の繰返し非排水三軸試験方法」(T541)に準じて算定した¹⁸⁾。

2) 応力振幅

試験は荷重振幅一定を目標に行われるが、三軸試験で実際には多少のドリフトおよび変動が生じる。従って、繰返しせん断応力の片振幅 τ_d を次式で算定した。

$$\tau_d = \sigma_d / 2, \quad \sigma_d = \frac{P_c + P_e}{2 \cdot A_c} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

ここに、 P_c 、 P_e はそれぞれ圧縮および伸張繰返し軸荷重片振幅で、繰返し載荷中の供試体断面積 A_c の変化は無視する。

3) ひずみ

軸ひずみ ε は圧密後供試体高さ H_c 、軸変位 d (圧縮を正) から次式で定める。

$$\varepsilon = d / H_c$$

また、軸ひずみ量については図-3.19を参考に次のように定義した。

ε_{da} : 両振幅ひずみ

ε_a : 片振幅ひずみ

ε_p : ピークひずみ

ε_b : 最小ひずみ

ε_{res} : 残留ひずみ (ε_p と ε_b の平均)

動的強度を規定するひずみとしては、初期せん断応力の有無による不都合や静的強度との間の整合性を考えピークひずみ ε_p ($= \varepsilon_a + \varepsilon_{res}$) を採用した¹⁹⁾。ただし、等方圧密の繰返し試験のように残留ひずみ ε_{res} が負になり ε_p が減少する場合がある。これは三軸繰返し試験ではせん断応力が圧縮・伸張側で非対称になるためであり、その欠点を補うために残留ひずみが負の場合は、 $\varepsilon_p = \varepsilon_a$ として片振幅ひずみ ε_a をもって動的強度を与えることとした²⁰⁾。

4) 間隙水圧

N波目の最大間隙水圧 ($u_{max} - u_0$) をもって Δu (kgf/cm²) とする。

3.2.2 繰返し非排水試験

図-3.20に応力、ひずみ、間隙水圧の時刻歴、図-3.21に応力～ひずみ関係(ヒステリシスループ)、図-3.22に有効応力経路(ストレスパス)の一例を示す。

時刻歴を見ると、軸ひずみに関して等方圧密の場合は繰返しにより間隙水圧が上昇しある値をこえると、ひずみ振幅が急激に増大している、また残留ひずみは若干伸張側にでている。一方、初期せん断応力を加えた場合(異方圧密)は、振幅の増大は僅かであり、残留ひずみだけが圧縮側へ増大していく傾向を示した。また、間隙水圧の発生量も等方圧密に比べ小さい。

ヒステリシスループをみると、繰返しにより等方圧密ではロック材のような極端なひずみの伸張側への進行²¹⁾は見られない。

ストレスパスは間隙水圧の上昇に伴い左側に移動し、最終的に破壊線に沿ってループを描いている。

今回の試験で明らかになったコア材の非排水繰返しせん断特性を以下のようにまとめる。

① ひずみ発生特性

図-3.23(a)～(g)に繰返し回数と発生ひずみ量の関係を示す。

繰返し回数の増加に伴いひずみが発生し、ある回数を越えると急激に増大しており、液状化に近い挙動を示しているがflow failureは生じていない。また、この傾向は等方圧密の方が異方圧密よりも顕著であり、次に示す間隙水圧の発生と密接に関係しているものと考えられる。

② 間隙水圧発生特性

図-3.24(a)~(g)にひずみと間隙水圧係数の関係を示す。

間隙水圧はひずみが1.0%程度までは急増し、その後の増加は緩やかである。言い替えると、間隙水圧が急増して間隙水圧係数がある値(0.8~1.0)に近づくとひずみが急速に進行するようになる。

繰り返しせん断応力比の違いによる間隙水圧の発生状況を見ると、典型的な例として図-3.24(b)に見られるように、せん断応力比が大きいほど間隙水圧の立ち上がりが緩やかになる傾向にある。同じ周波数で繰り返し試験を行う場合、せん断応力比が大きいほど応力の載荷速度が速く、単調載荷試験のせん断速度の速い場合と同様に時間的な遅れが現れているものと考えられる。

等方圧密と異方圧密を比較すると図-3.25に示すように、等方圧密では間隙水圧係数は1.0に達するのに対して、異方圧密で初期せん断応力が高いほど発生間隙水圧は小さくなっており、主応力比2.0の異方圧密での間隙水圧係数は最大でも0.8程度であった。これは、繰り返し載荷時の主応力反転の有無に影響されるもので、主応力が反転しない場合の間隙水圧係数は1.0に達しない。飽和した砂や粘土でも同様の報告^{22) 23)}が見られる。

③ 応力~ひずみ特性

図-3.26(a)~(g)にある繰り返し回数でのせん断応力比とひずみの関係を示す。また、図中の実線はべき関数による近似曲線を示している。

動的強度を定義する場合、この繰り返しせん断応力~ひずみ曲線のピークをもって動的強度とする考えがある²⁴⁾。今回の試験では繰り返し回数10回以上では、ひずみ5.0%でほぼピークのせん断応力比に近い値に達していることが分かる。

④ 動的強度特性

繰り返し載荷に対する強度をどう定義するかは大きな問題である。一つの方法としては水平地盤での液状化に対する定義²⁵⁾で、繰り返し試験中に間隙水圧が100%に達した(初期液状化)状態を破壊と見なすものがある。しかし、フィルダムなどの斜面の安定を考える場合に想定される初期せん断応力を受けている試料に関しては、間隙水圧が100%に達しない場合があることを考えると、間隙水圧ではなく発生したひずみの大きさを破壊を定義する方法が現実的である。したがって、本報告では所定の繰り返し回数で所定のひずみに達する繰り返しせん断応力 τ_d と初期せん断 τ_s との和($\tau_d + \tau_s$)を動的強度と定義した。

図-3.27(a)~(g)は発生するひずみごとのせん断応力比と繰り返し回数の関係から動的強度比曲線を示す。繰り返し回数が多い程、また規準ひずみが小さい程、動的強度は小さくなっている。また、異方圧密の動的強度曲線は、応力反転の境界線($\sigma_1/\sigma_3 = 2$ で $\tau_d/p_c = 0.75$, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.5$ で $\tau_d/p_c = 0.43$)を下回っている。

図3-28は、圧密後の初期平均主応力 p_c とその p_c で正規化した動的強度比($\tau_d + \tau_s$)/ p_c の関係を示したものである。単調載荷試験の場合同様、 $p_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 以下で動的強度

比が増加しており、締固めによる過圧密の影響が見られる。過圧密粘土の動的強度比の増加については松尾ら¹⁹⁾が過圧密比が大きいほど動的強度比が大きくなると報告しており、砂に関しても同様な傾向が報告²⁰⁾されている。

図-3.29は、異方圧密すなわち初期せん断応力による動的強度比への影響を見たもので、締固めたコア材では初期せん断応力が大きいほど動的強度比も大きくなる傾向を示しているが、初期せん断応力比(τ_v/p_v)が0.3程度で動的強度比はピークを示し、さらに初期せん断応力比が大きくなると、主応力が反転しない領域で繰り返し載荷している。

また、動的強度比を繰り返し載荷応力成分 τ_v/p_v のみで考えると、主応力が反転する領域では初期せん断応力によらずほぼ一定値を示しており、粘性土では平尾ら²⁷⁾も同様な傾向を報告している。しかし、砂の場合の報告では比較的緩詰めの砂でも主応力が反転する領域では初期せん断応力比 τ_v/p_v が大きくなれば動的強度比 τ_d/p_v も大きくなっている²²⁾。

3.3 静的強度と動的強度

強度を議論する場合、対象とするせん断面の仮定の仕方でその大きさが変わってくるが、図-3.30では水平面上のせん断強度として、主応力の方向に対して45°面上の破壊応力をもって動的強度と静的強度との比較を行った。なお、動的強度は繰り返し回数10回で規準ひずみ5.0%での値である。一方、静的強度はひずみ15%以内でのピーク応力で定めており、 $\phi 300$ の供試体での結果である。動的強度を規定する規準ひずみ量のとり方には、決まった判断規準はなく、構造物の安定・不安定の境となる変形量から定められるものであるが、本報告ではひずみとせん断応力比の関係で既に述べたように、ひずみ5.0%でせん断応力比はほぼピークに近い値に達していることから、5.0%で動的強度を定義しておけば安全側であると考えられる。

図-3.30によれば、等方圧密での動的強度は静的非排水強度を下回っており、繰り返しによる弱化傾向が明らかである。これは、繰り返し載荷時の主応力の反転の影響が大きいと考えられ、主応力反転の割合が小さいかあるいは反転しない異方圧密の動的強度は逆に静的非排水強度を上回っており、静的排水強度と静的非排水強度の中間の大きさを示した。

図-3.31は、初期せん断応力と動的強度の関係を静的強度との比で整理したものである。初期せん断応力がない時は動的強度は静的強度を下回るが、初期せん断応力の増大に伴って動的強度比も増大し動的強度が静的強度を上回るようになるが、主応力反転の有無を示す境界付近で動的強度比はピークを示し、それ以降は減少傾向に転じ $\tau_v = \tau_{v,r}$ で動的強度比 $(\tau_d + \tau_v)_r / \tau_{v,r} = 1$ となる。したがって、初期せん断応力が大きく主応力の反転がない場合は、動的強度は静的強度を上回ると言える。また、繰り返し回数が多いほど動的強度比は小さくなるので、動的強度が静的強度を上回る初期せん断応力は大きくなっている。

飽和粘性土を対象とした繰り返し三軸試験でも同様の傾向が報告^{28) 29) 30)}されている。また、安田ら³¹⁾は中空ねじり試験でも同様な傾向を報告しているが、この様な関係は試料の作成方法、飽和度、塑性指数、試験方法あるいは繰り返し回数によっては異なるようである。

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

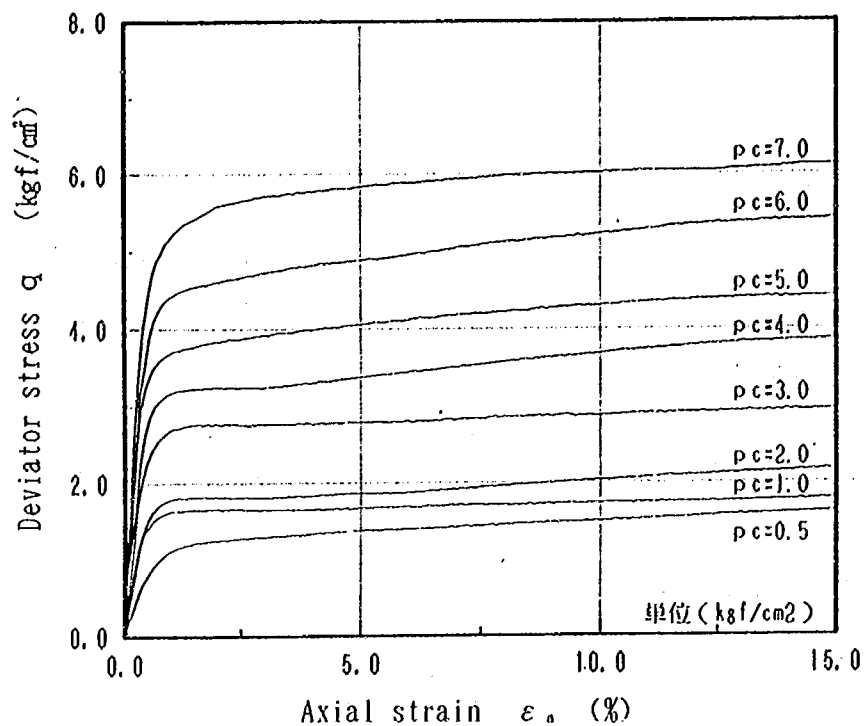


図-3. 1(a) 軸差応力と軸ひずみの関係 (非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

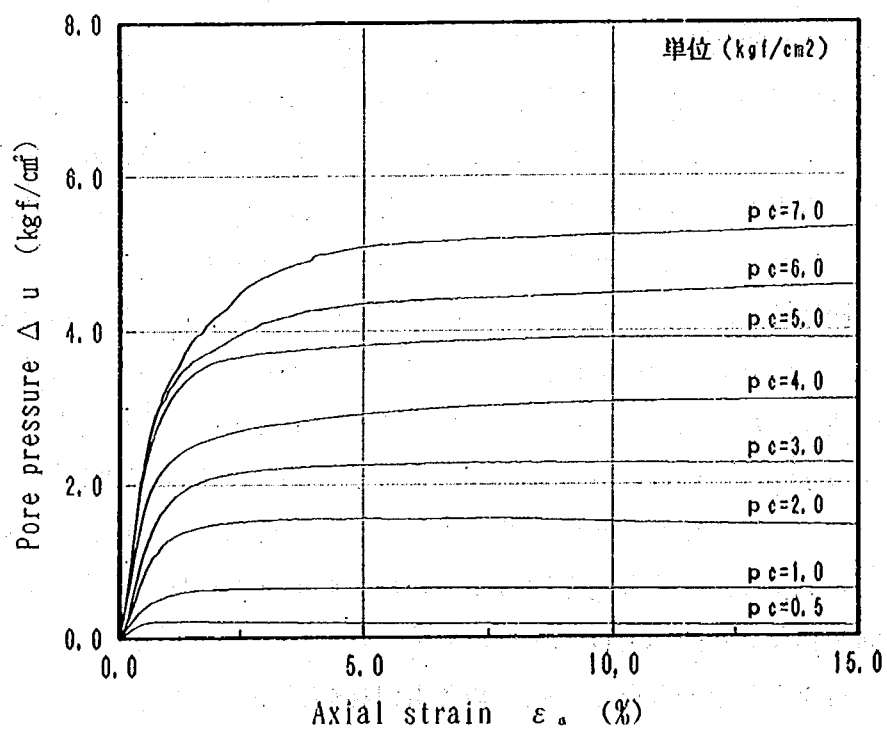


図-3. 1(b) 間隙水圧と軸ひずみの関係 (非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

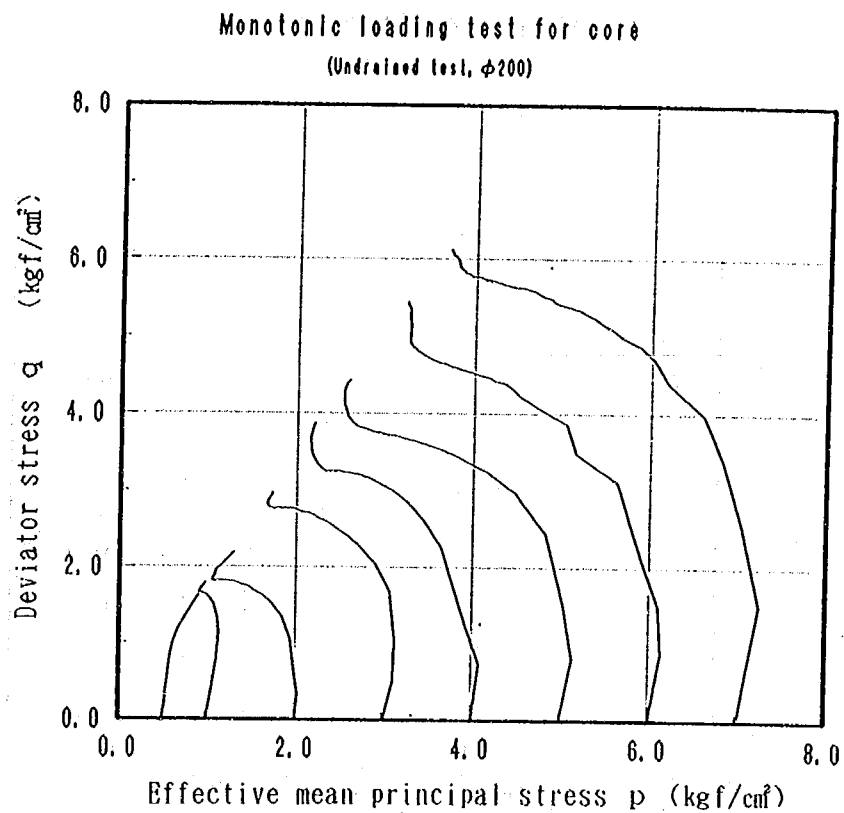


図-3. 1(c) 有効応力経路 (非排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

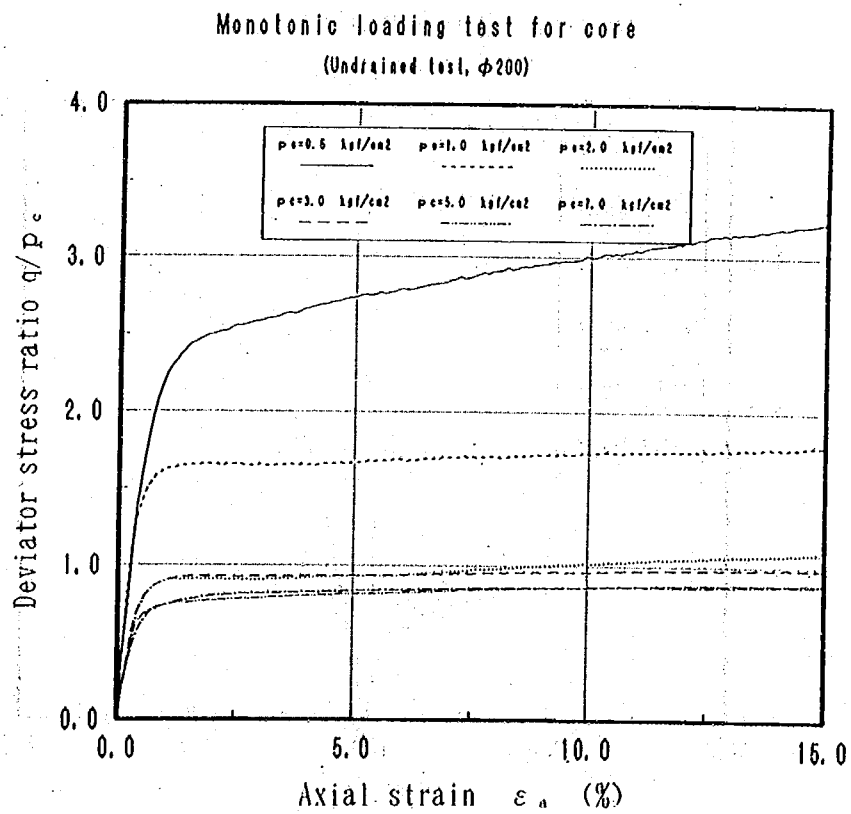


図-3. 2(a) 正規化した軸差応力と軸ひずみの関係 (非排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

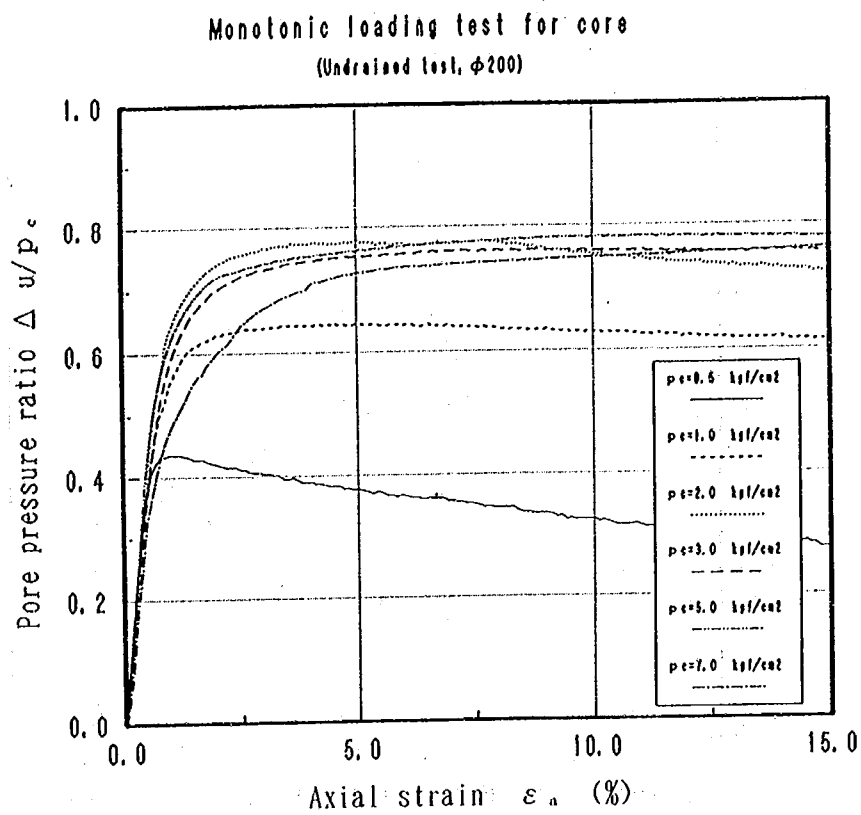


図-3. 2(b) 正規化した間隙水圧と軸ひずみの関係 (非排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

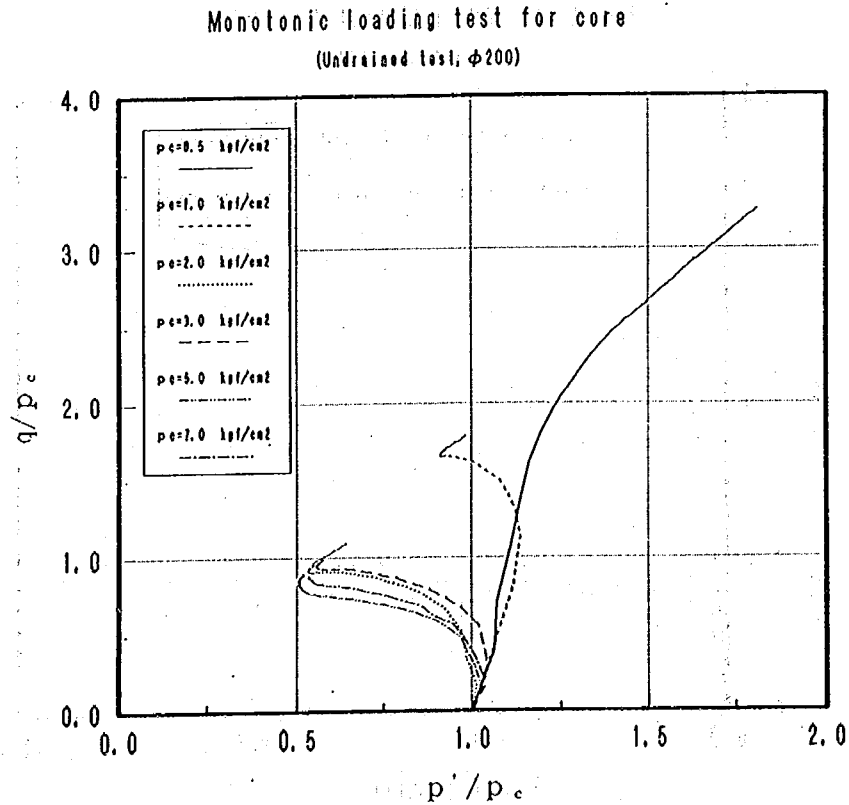


図-3. 2(c) 正規化した有効応力経路 (非排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

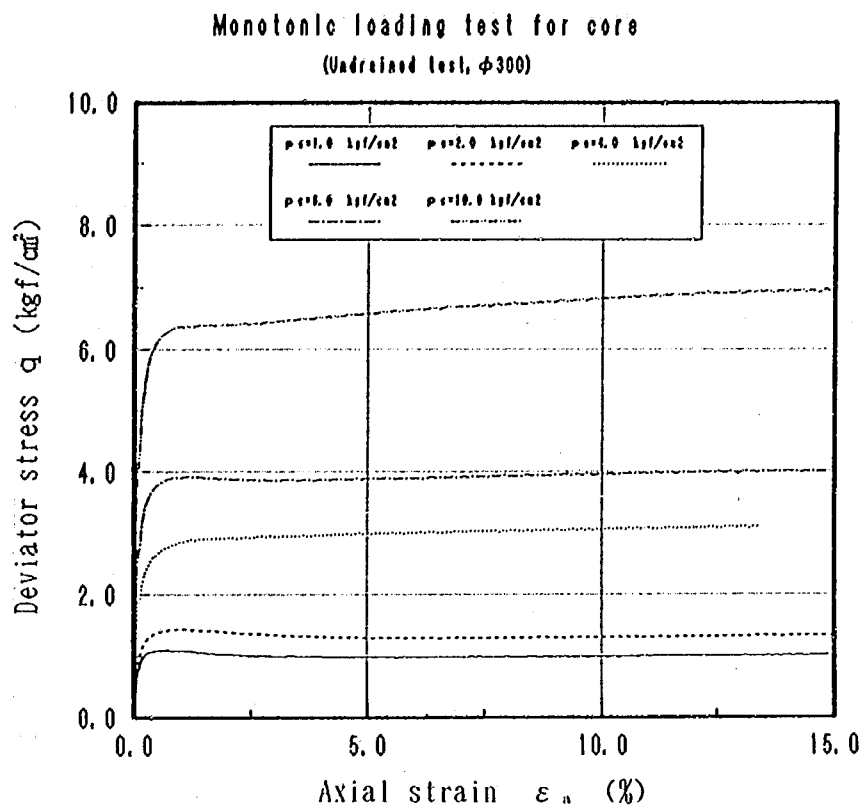


図-3. 3(a) 軸差応力と軸ひずみの関係 (非排水単調載荷・ $\phi 300$ mm)

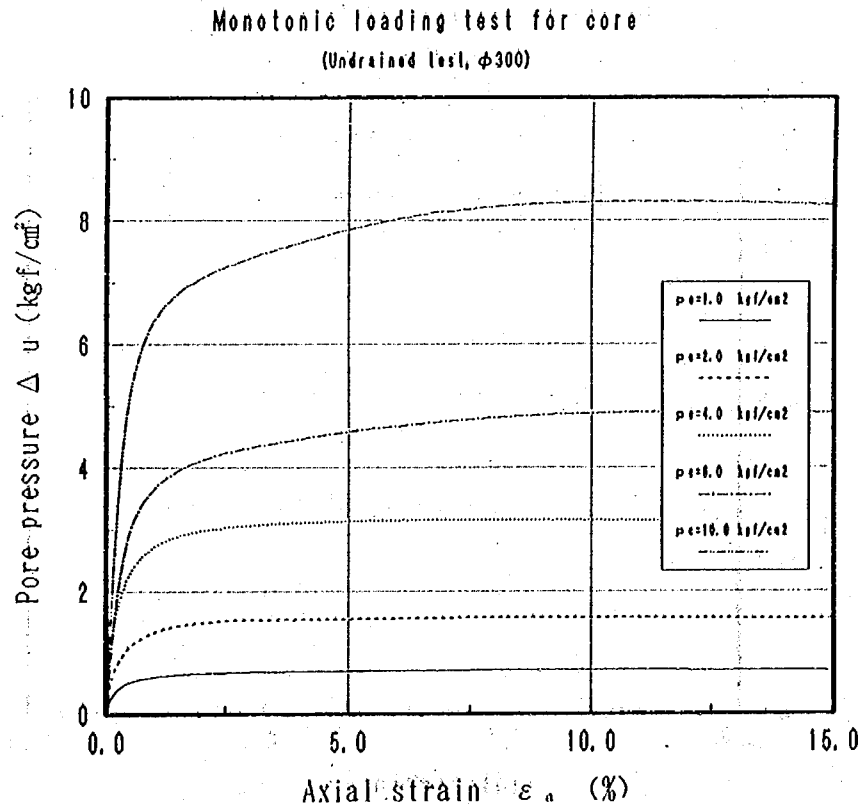


図-3. 3(b) 間隙水圧と軸ひずみの関係 (非排水単調載荷・ $\phi 300$ mm)

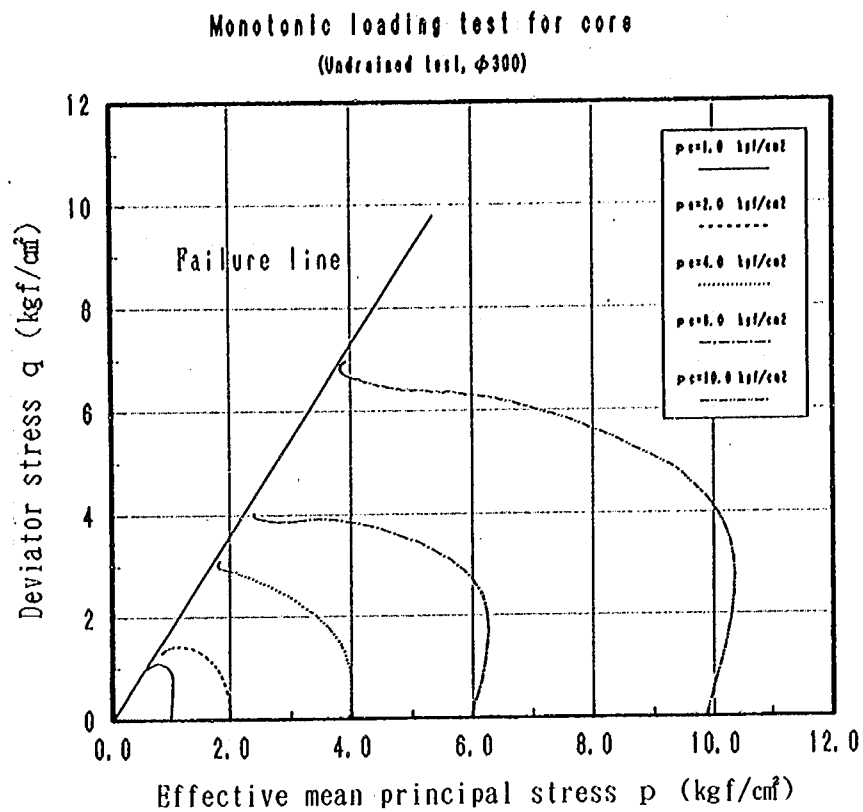


図-3. 3(c) 有効応力経路 (非排水単調載荷・ $\phi 300$ mm)

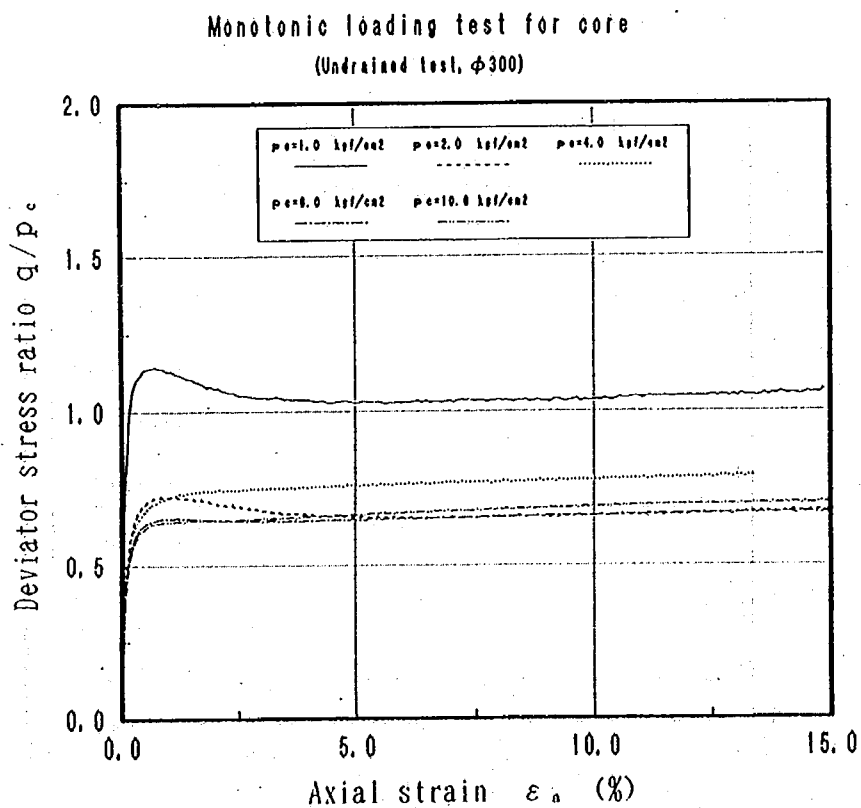


図-3. 4(a) 正規化した軸差応力と軸ひずみの関係 (非排水単調載荷・ $\phi 300$ mm)

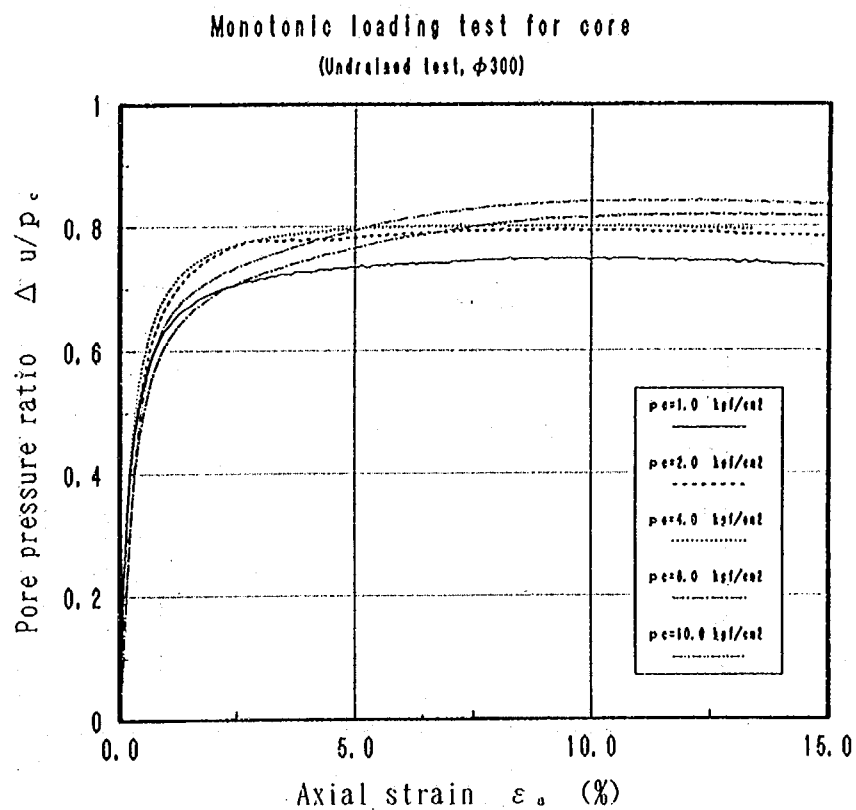


図-3. 4(b) 正規化した間隙水圧と軸ひずみの関係 (非排水単調載荷・ $\phi 300$ mm)

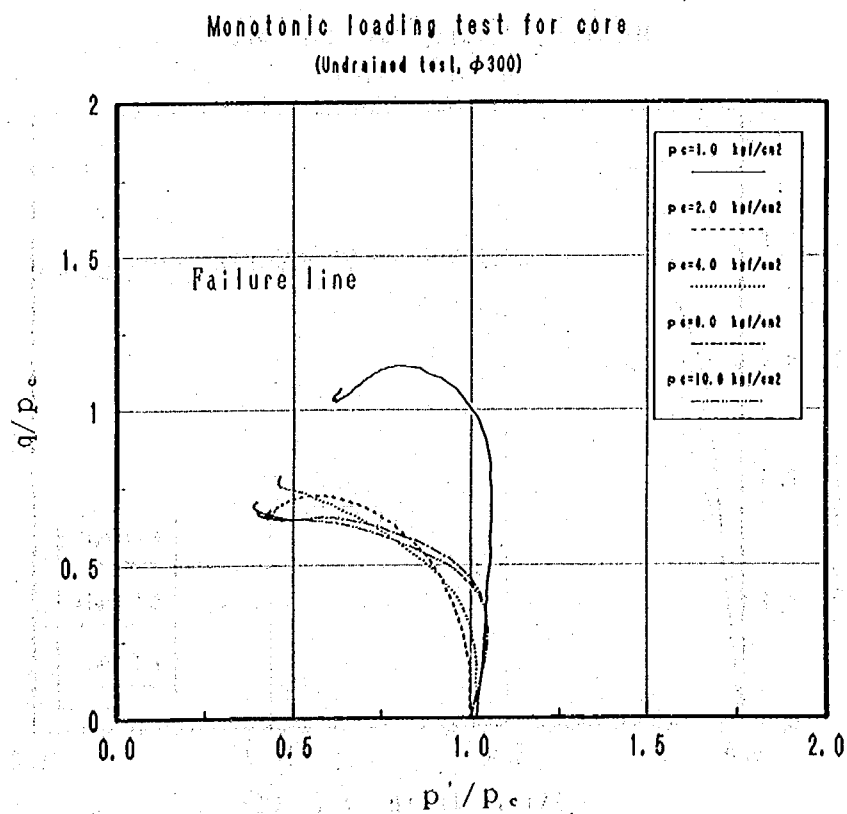


図-3. 4(c) 正規化した有効応力経路 (非排水単調載荷・ $\phi 300$ mm)

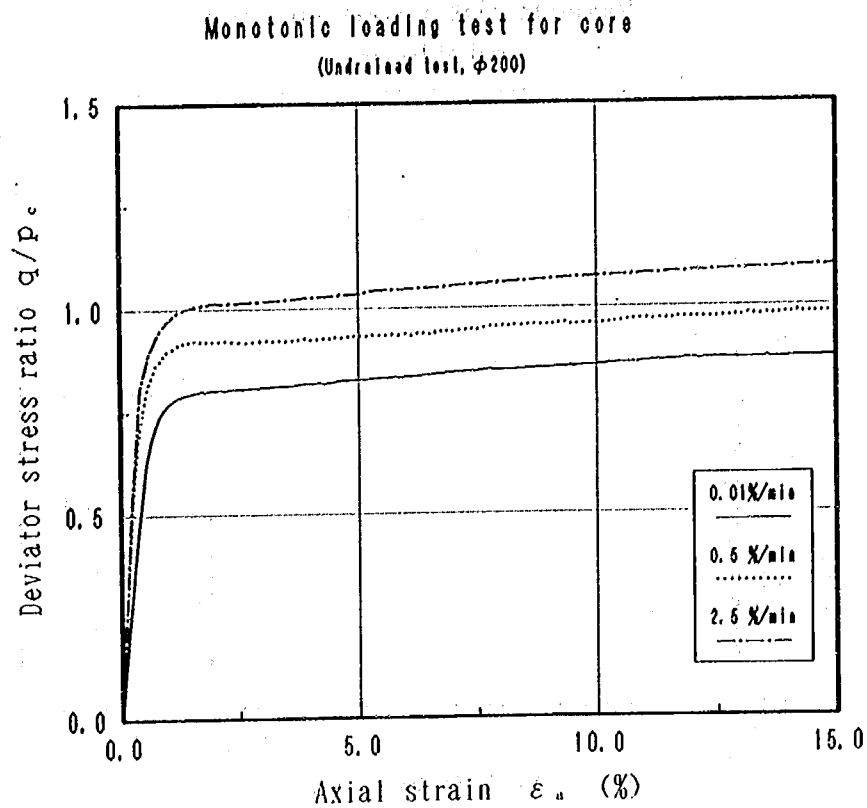


図-3. 5(a) 正規化した軸差応力と軸ひずみの関係, 荷重速度の影響
(非排水単調荷重・ $\phi 200\text{mm}$)

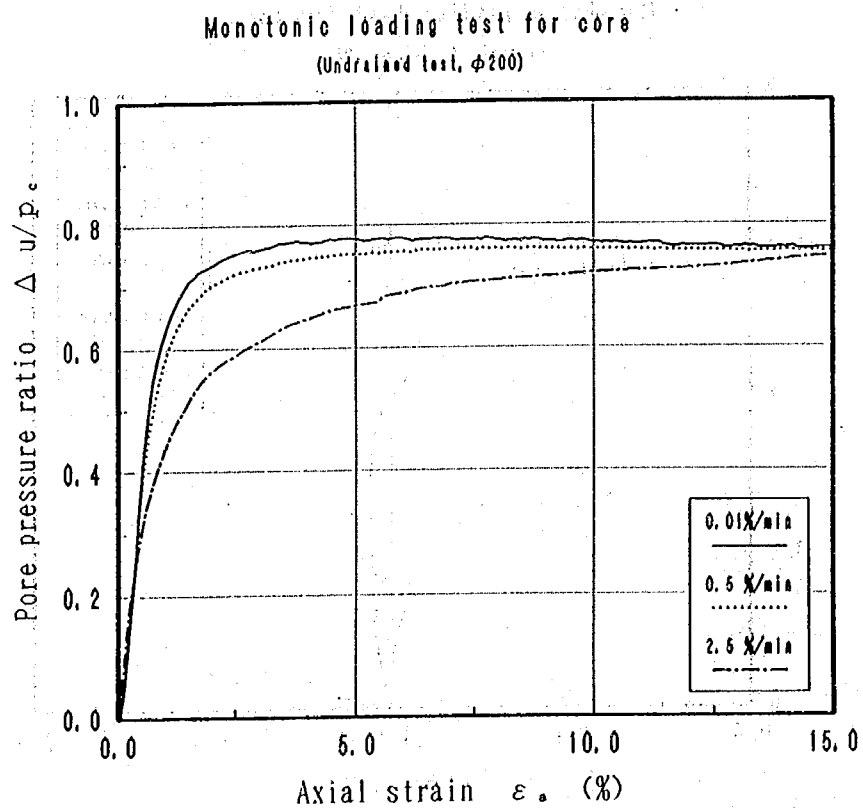


図-3. 5(b) 正規化した間隙水圧と軸ひずみの関係, 荷重速度の影響
(非排水単調荷重・ $\phi 200\text{mm}$)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

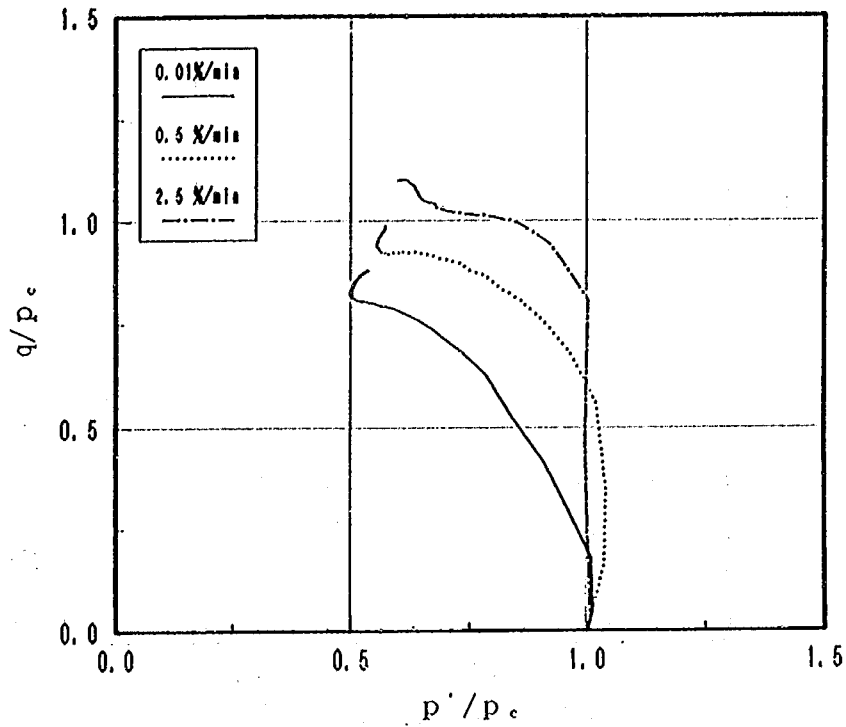


図-3. 5(c) 正規化した有効応力経路, 載荷速度の影響
(非排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

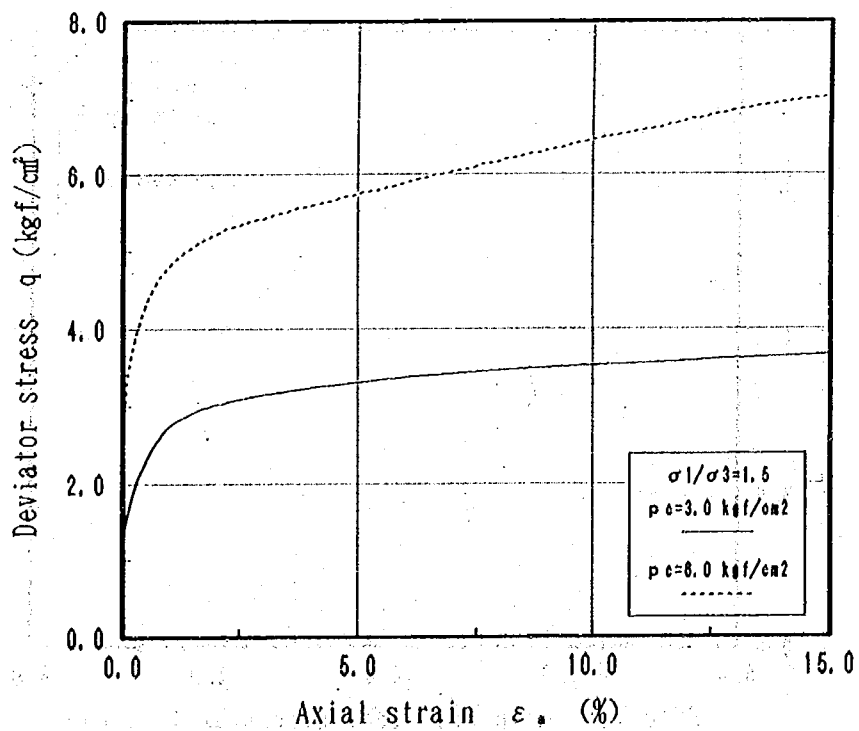


図-3. 6(a) 軸差応力と軸ひずみの関係 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.5$
(非排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

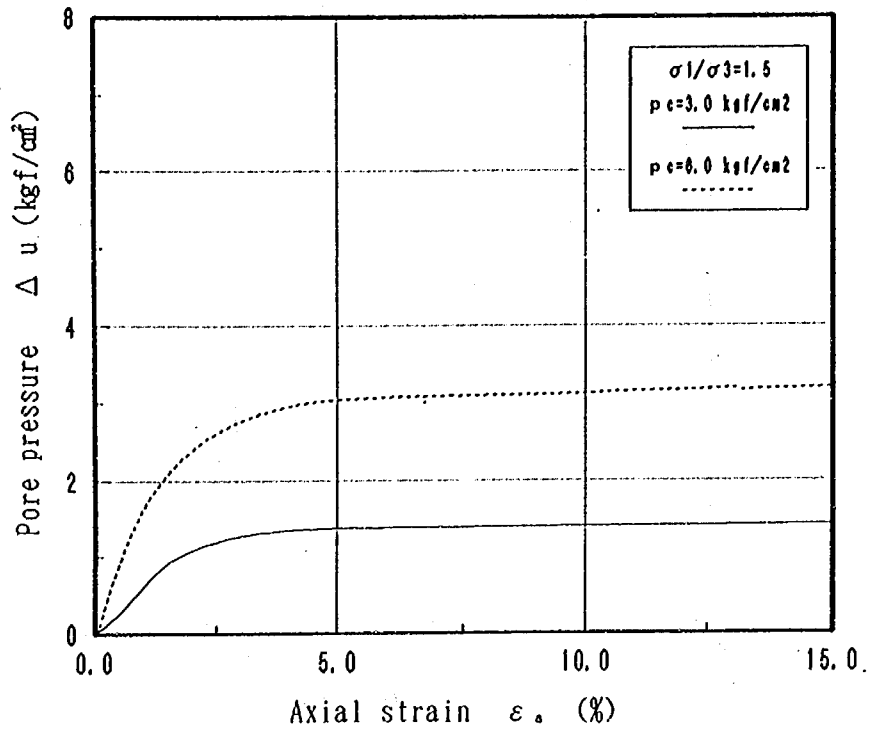


図-3. 6(b) 間隙水圧と軸ひずみの関係 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.5$
(非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

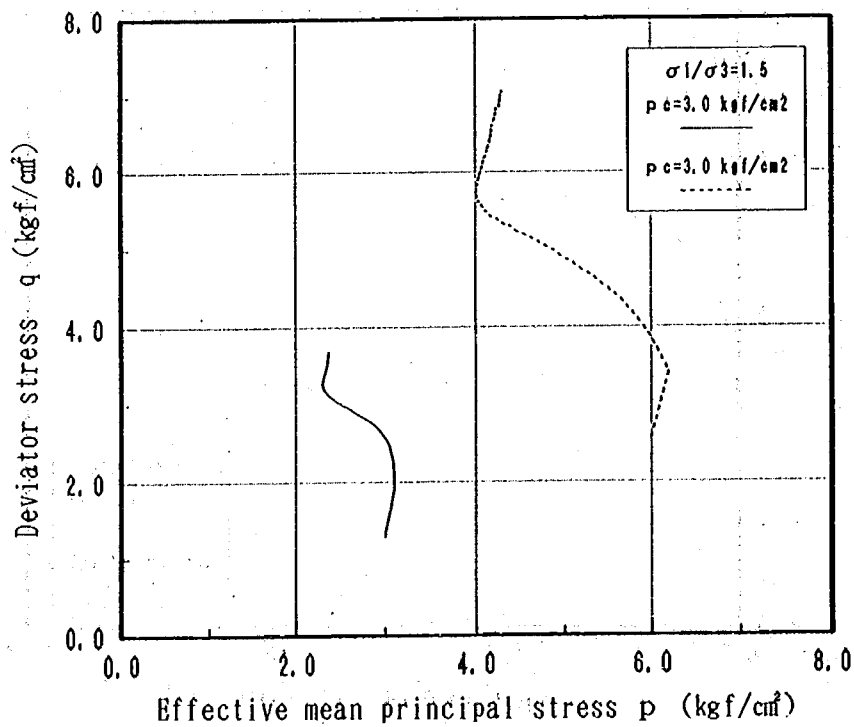


図-3. 6(c) 有効応力経路, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.5$
(非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

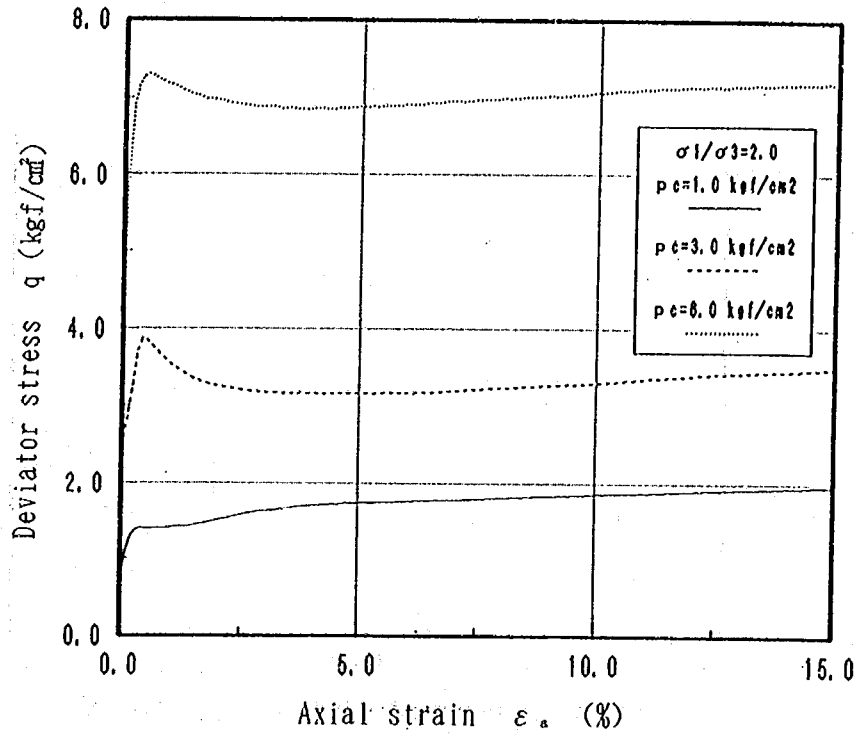


図-3. 7(a) 軸差応力と軸ひずみの関係 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$
(非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

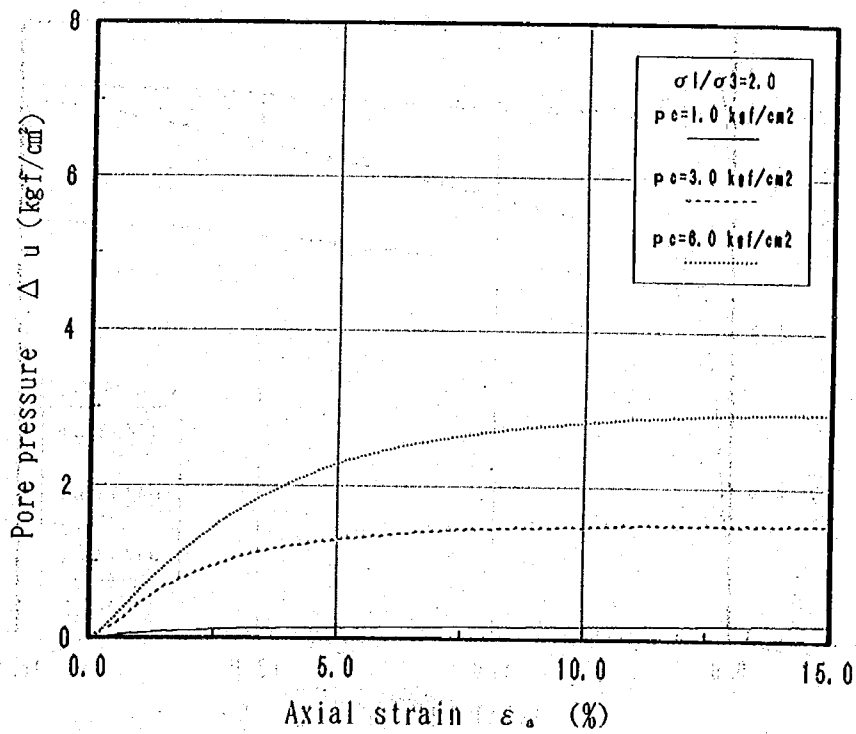


図-3. 7(b) 間隙水圧と軸ひずみの関係 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$
(非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

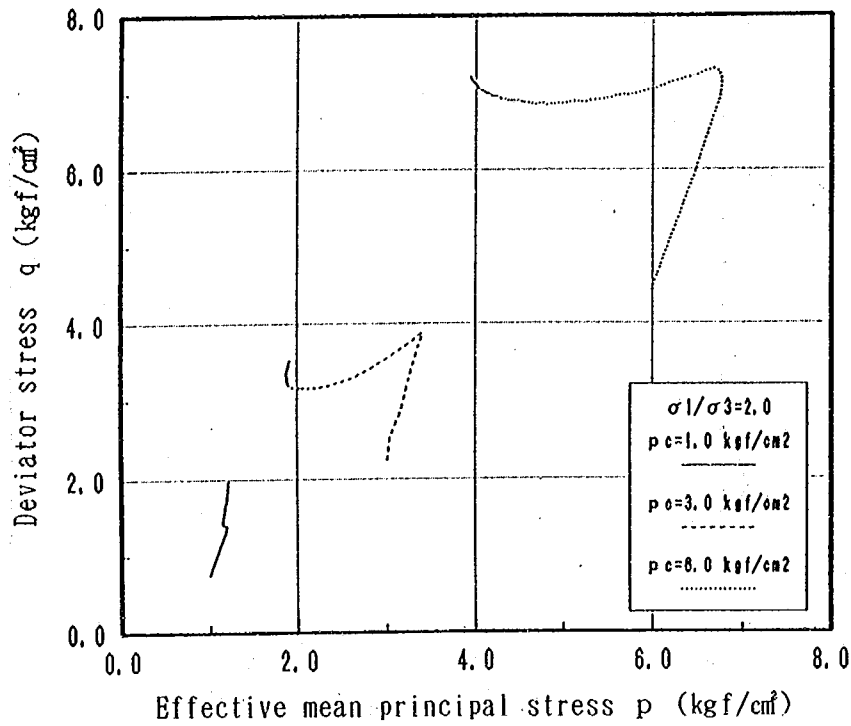


図-3. 7(c) 有効応力経路, $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$
(非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

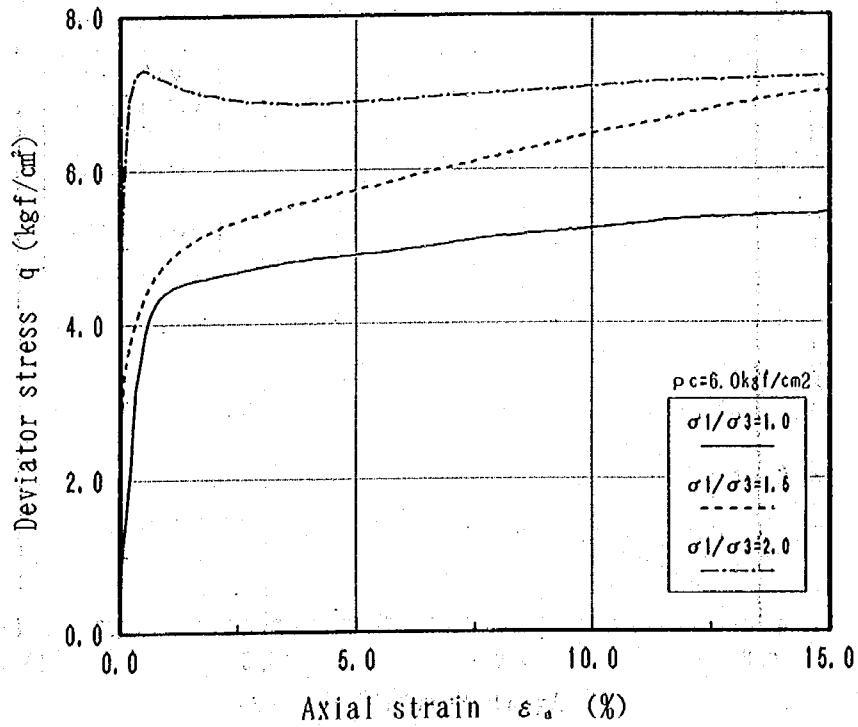


図-3. 8(a) 軸差応力と軸ひずみの関係, 主応力比の影響
(非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

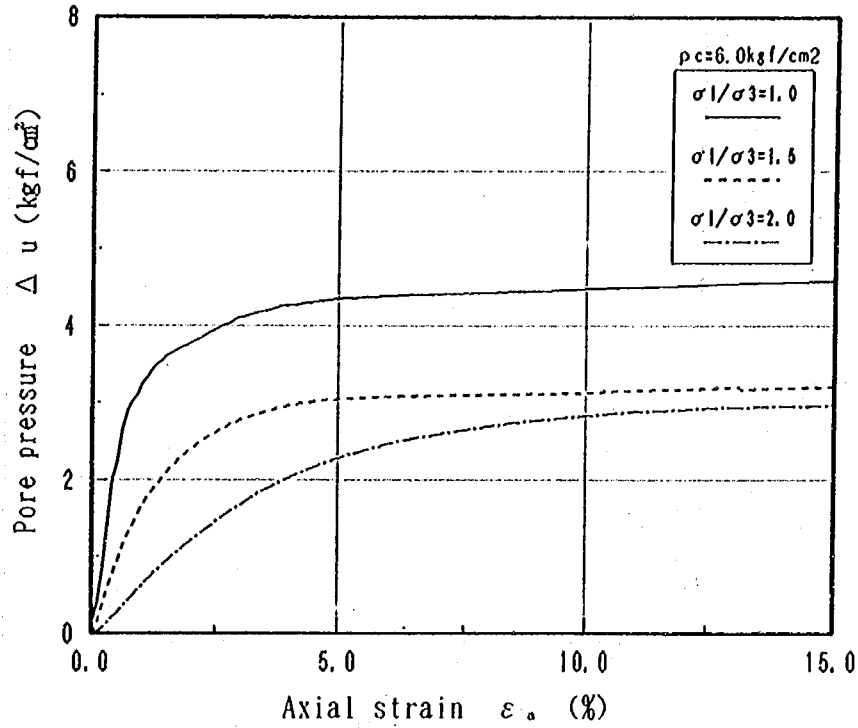


図-3. 8(b) 間隙水圧と軸ひずみの関係，主応力比の影響
(非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

Monotonic loading test for core
(Undrained test, $\phi 200$)

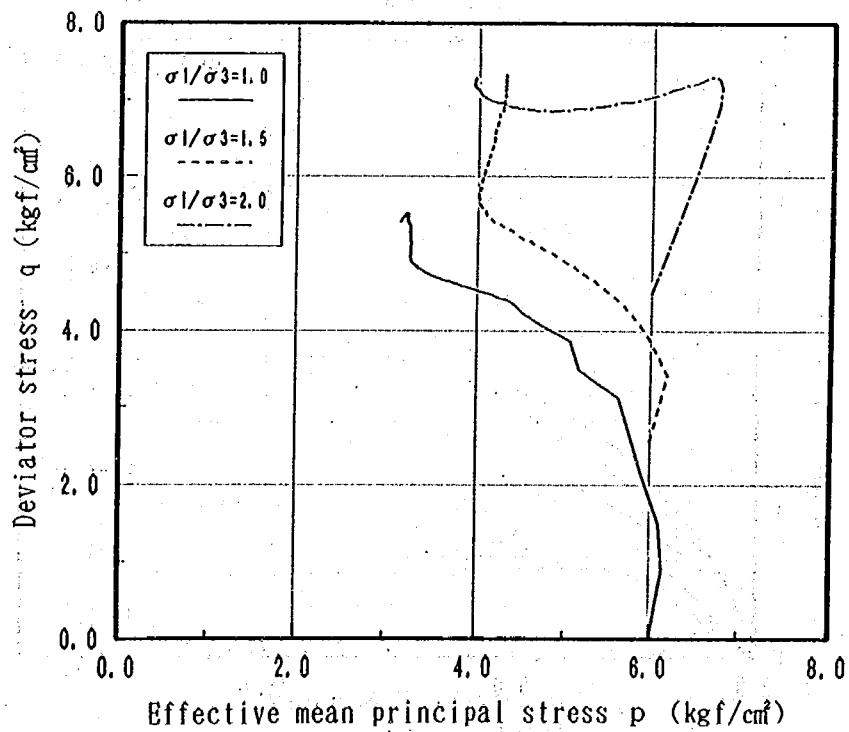


図-3. 8(c) 有効応力経路，主応力比の影響
(非排水単調載荷・ $\phi 200$ mm)

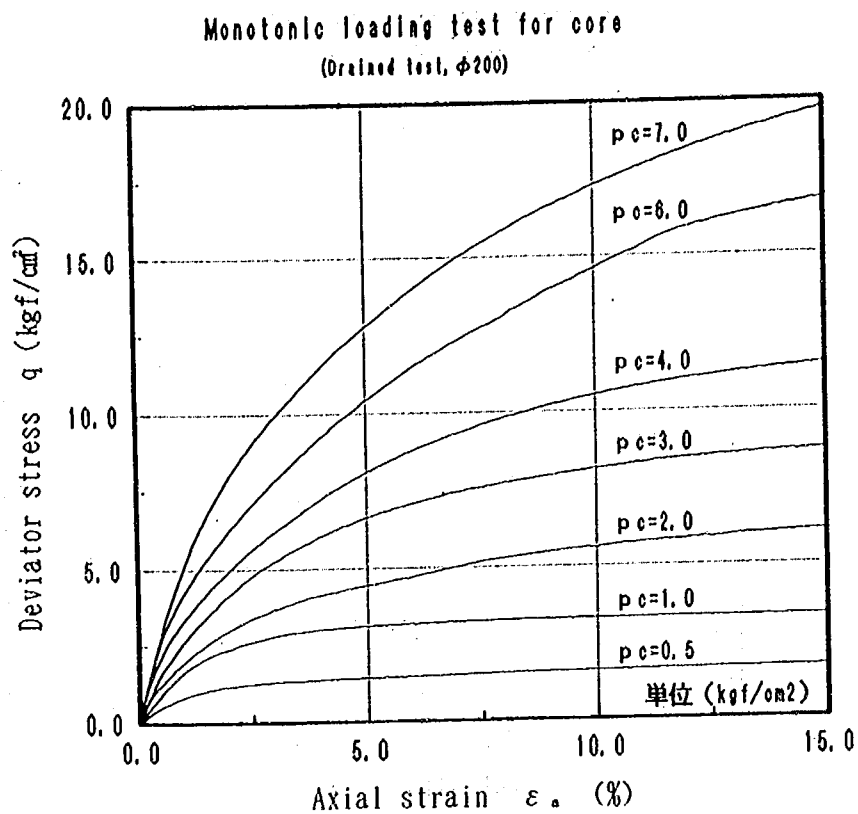


図-3. 9(a) 軸差応力と軸ひずみの関係 (排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

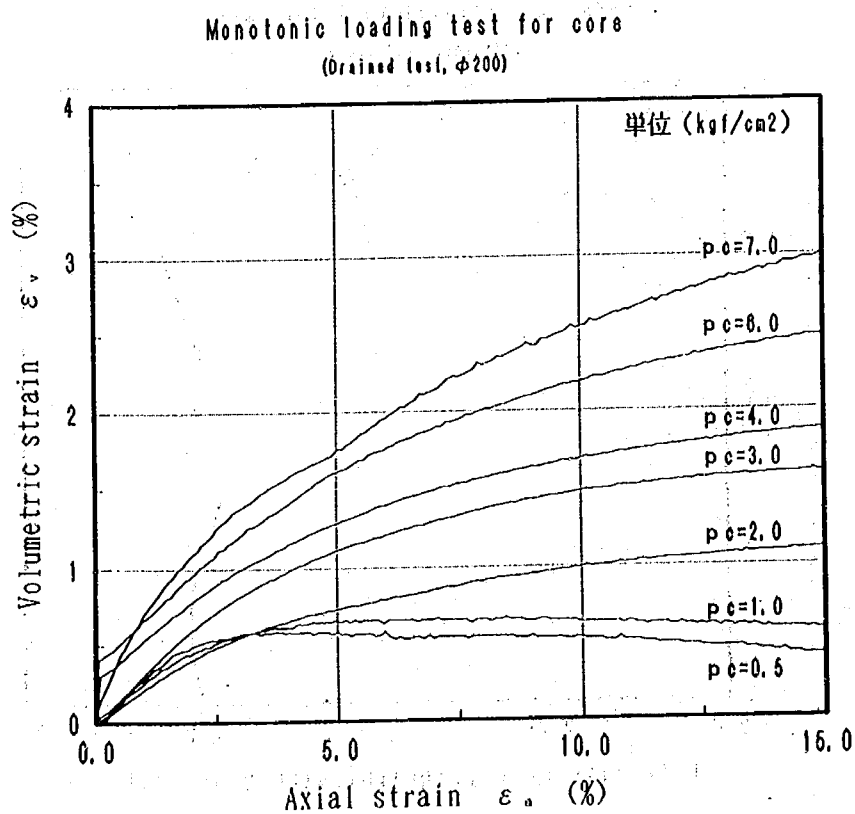


図-3. 9(b) 体積変化と軸ひずみの関係 (排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

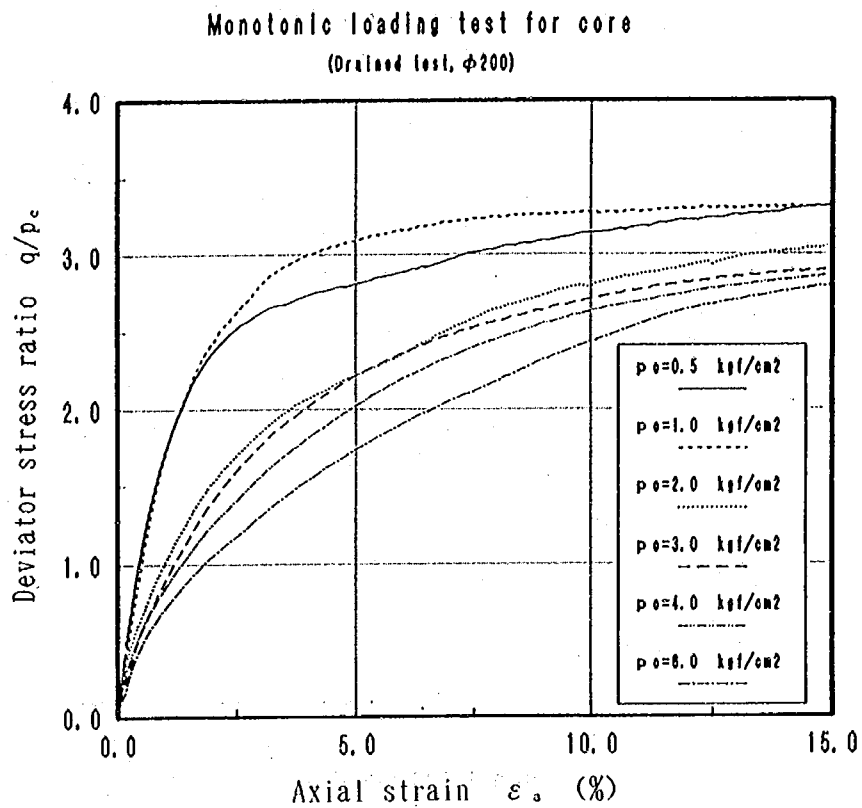


図-3.10 正規化した軸差応力と軸ひずみの関係 (排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

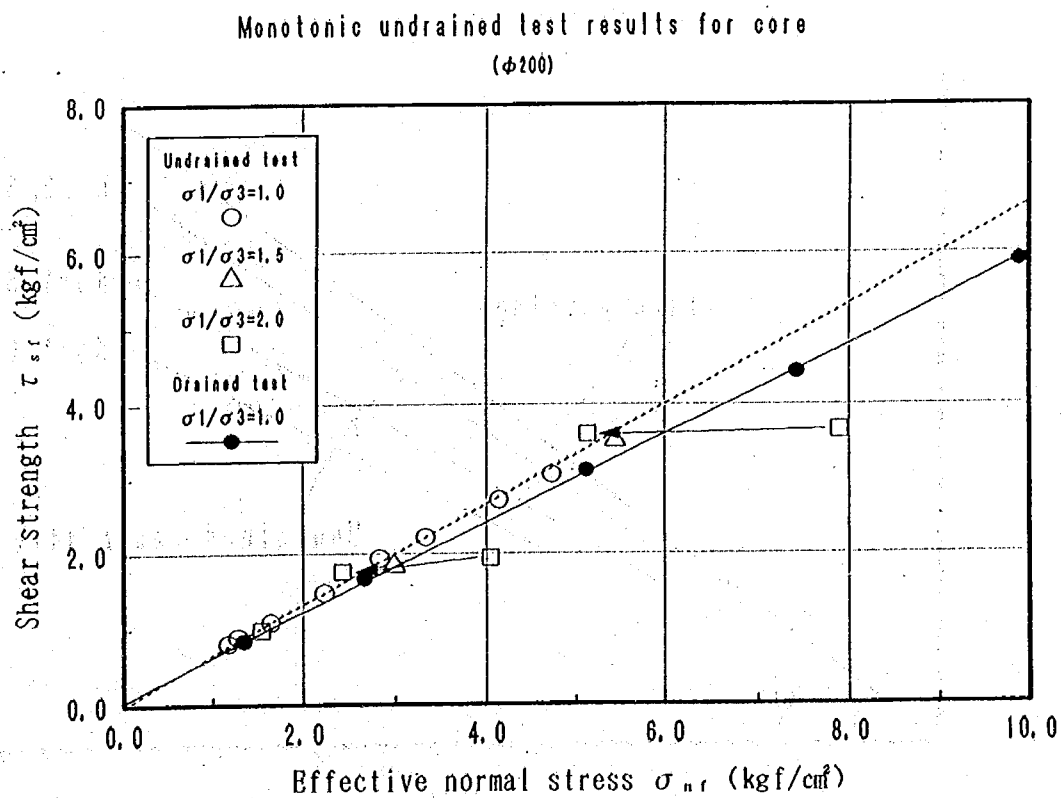


図-3.11 せん断強度と破壊時の有効垂直応力との関係, 主応力比の影響
(非排水及び排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

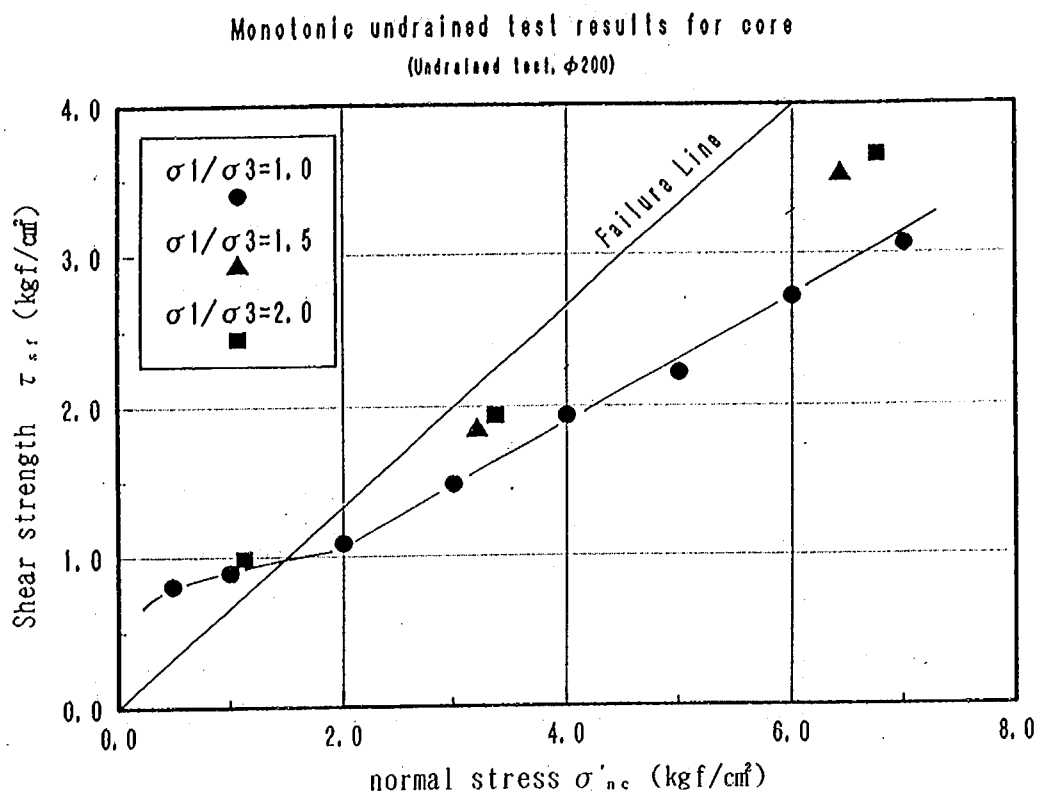


図-3.12 非排水せん断強度と初期有効垂直応力との関係，主応力比の影響
(非排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

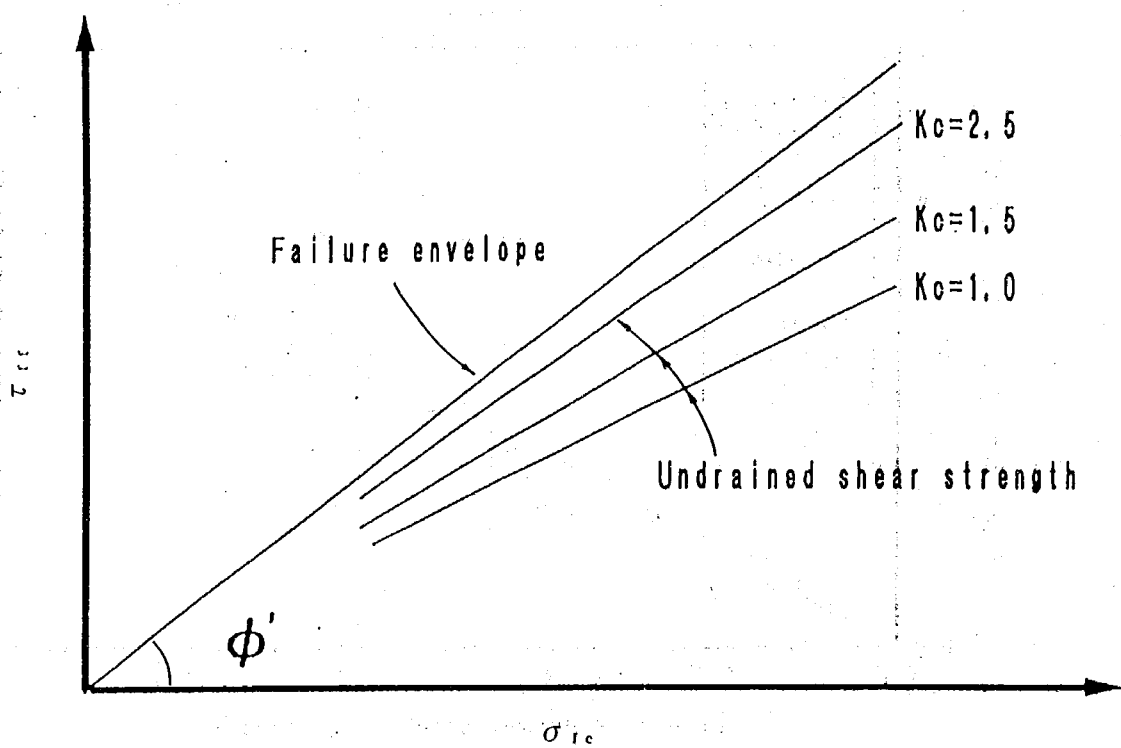


図-3.13 $(45^\circ + \phi/2)$ の破壊面上におけるせん断強度と垂直応力の関係，主応力比の影響

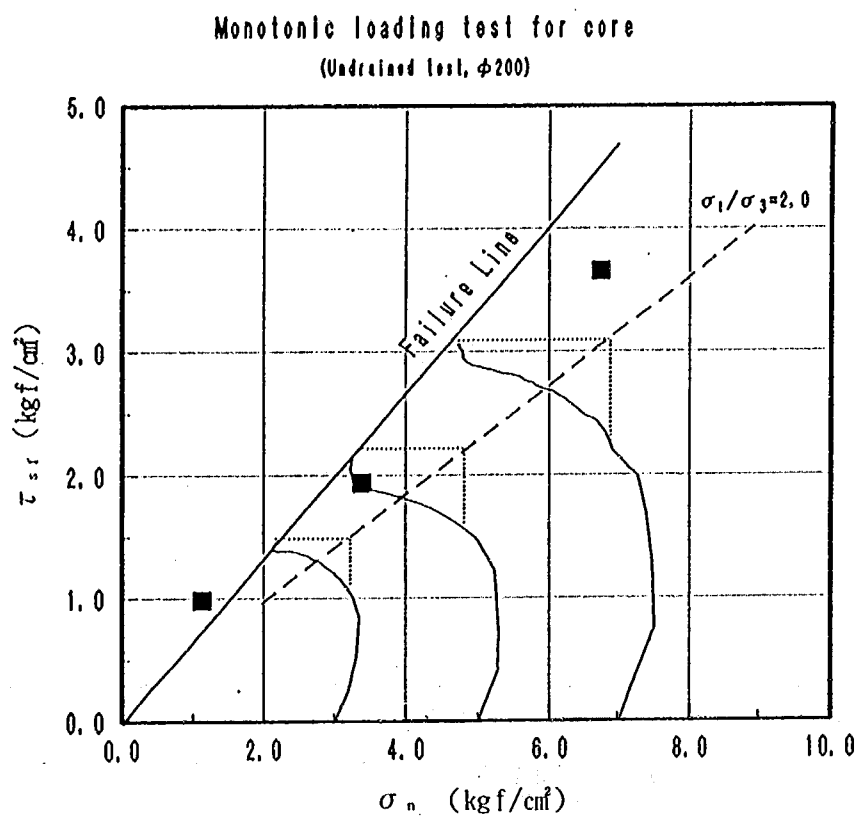


図-3.14 有効応力経路 (非排水単調載荷・ $\phi 200\text{mm}$)

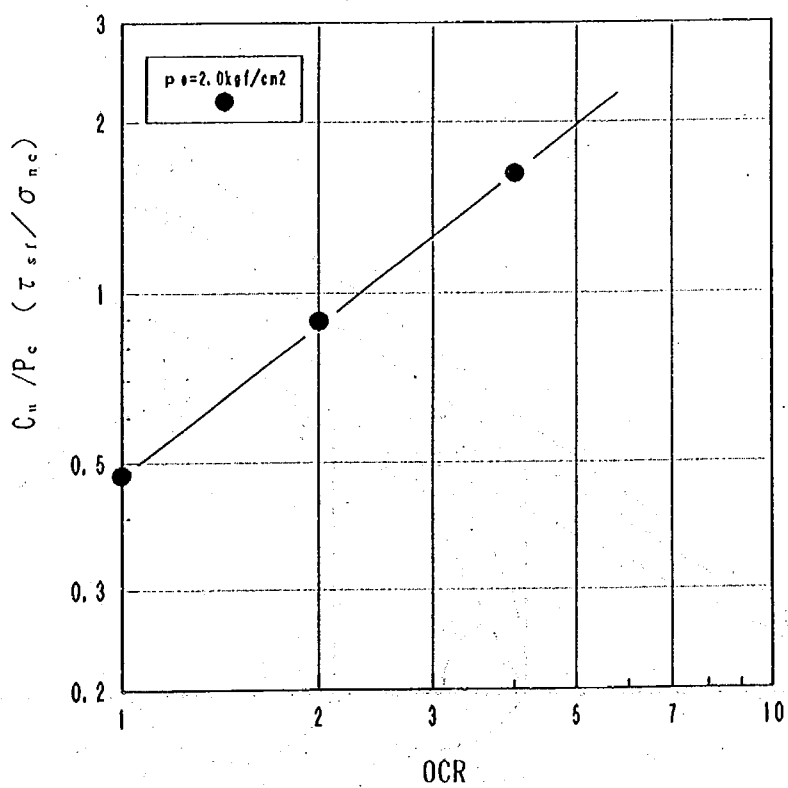


図-3.15 強度増加率と過圧密比

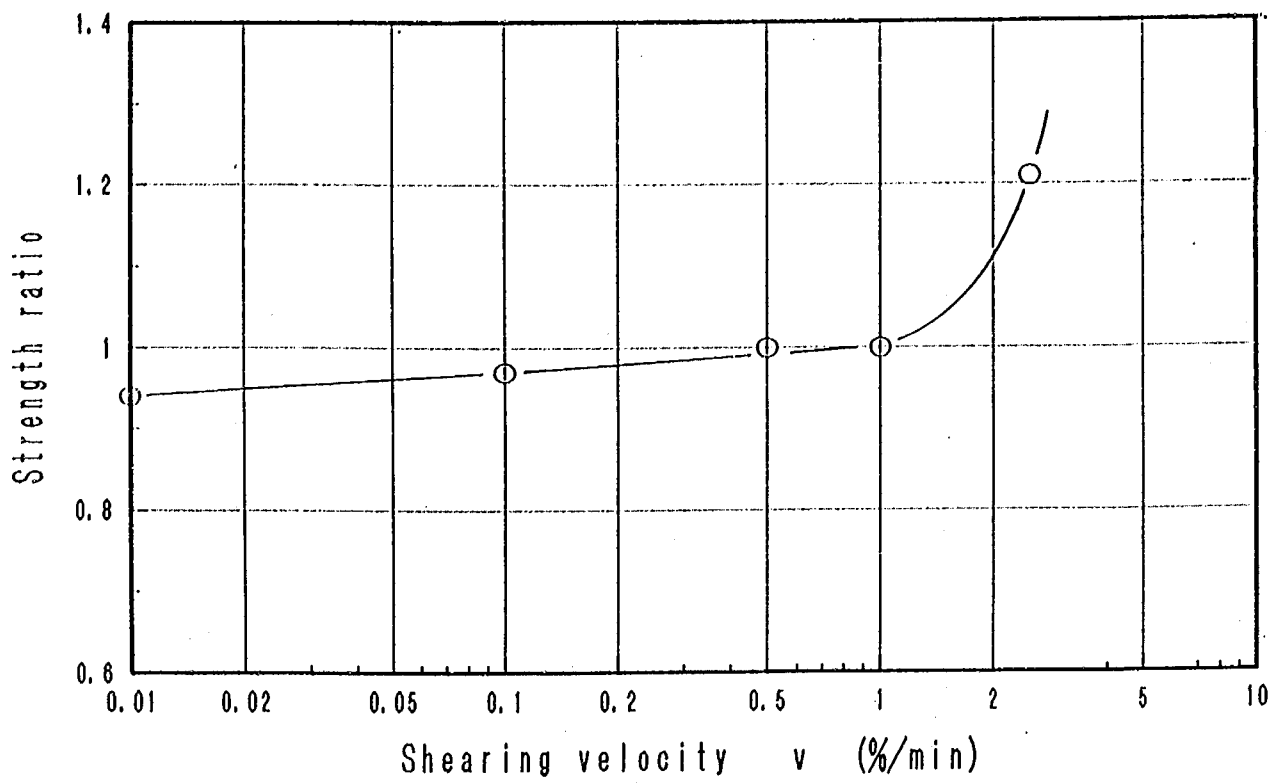


図-3.16 せん断強度のせん断ひずみ速度による影響
(1%/minを基準とした場合)

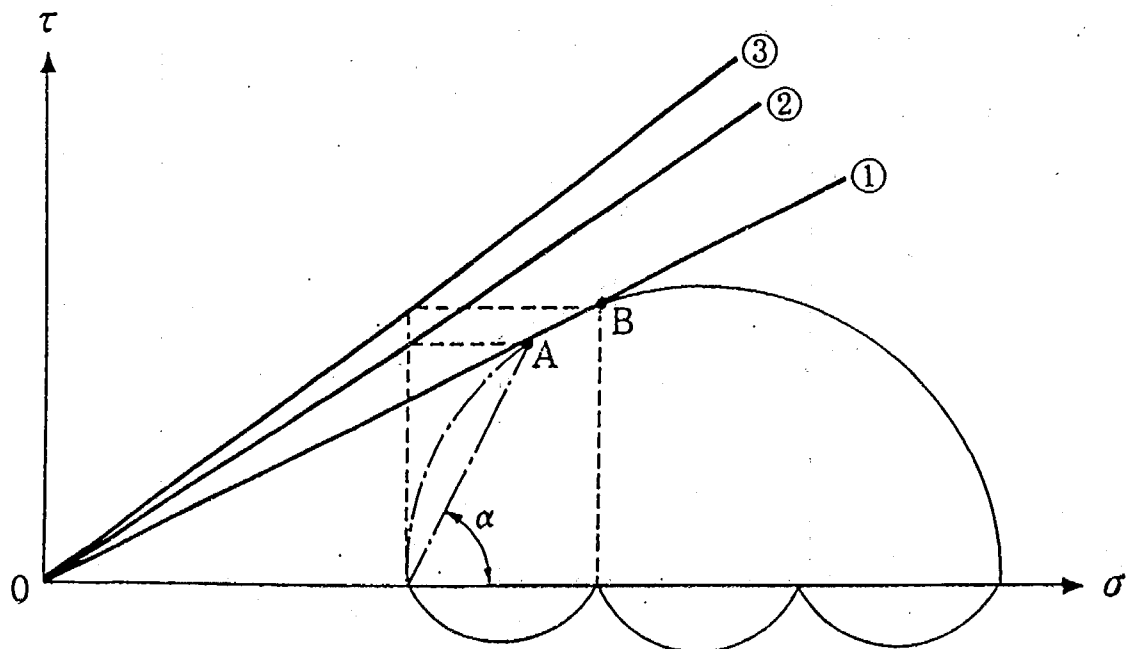
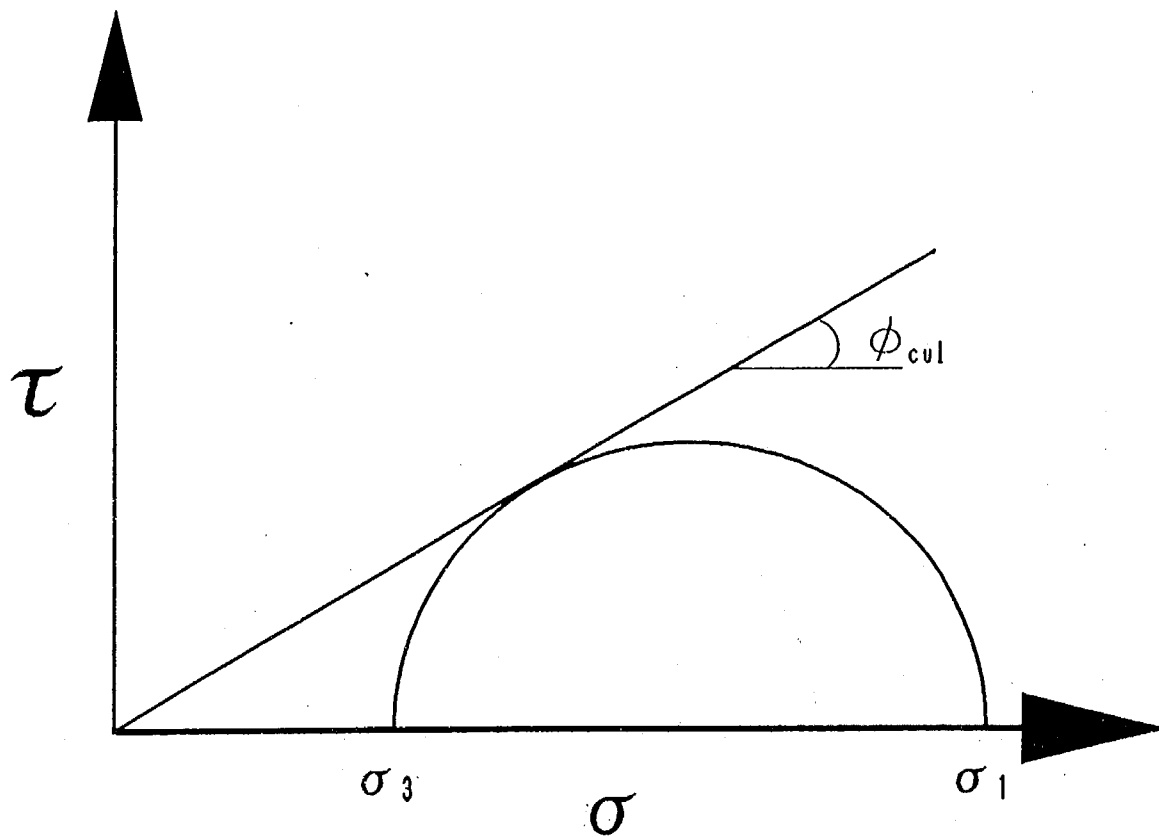
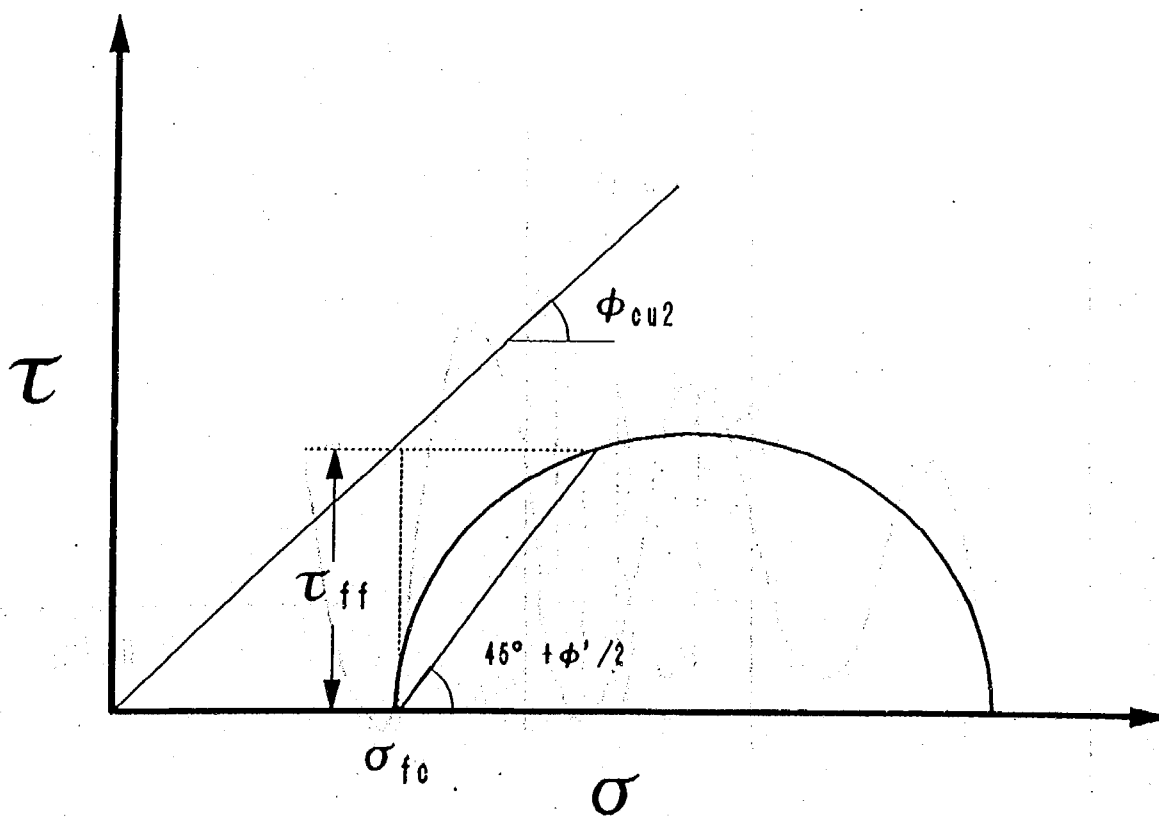


図-3.17 CU試験結果の3通りの整理方法



図－3. 18(a) CU試験結果の整理方法（第1の方法）



図－3. 18(b) CU試験結果の整理方法（第2の方法）

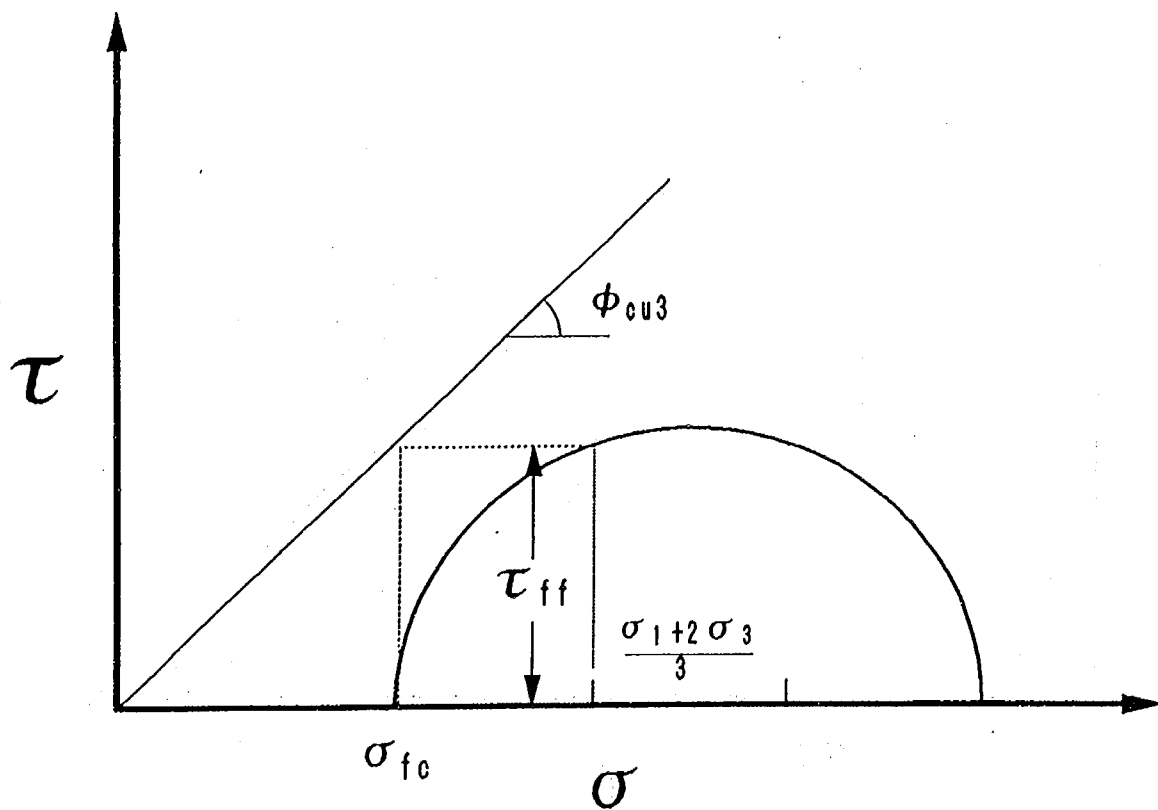


図-3.18(c) CU試験結果の整理方法 (第3の方法)

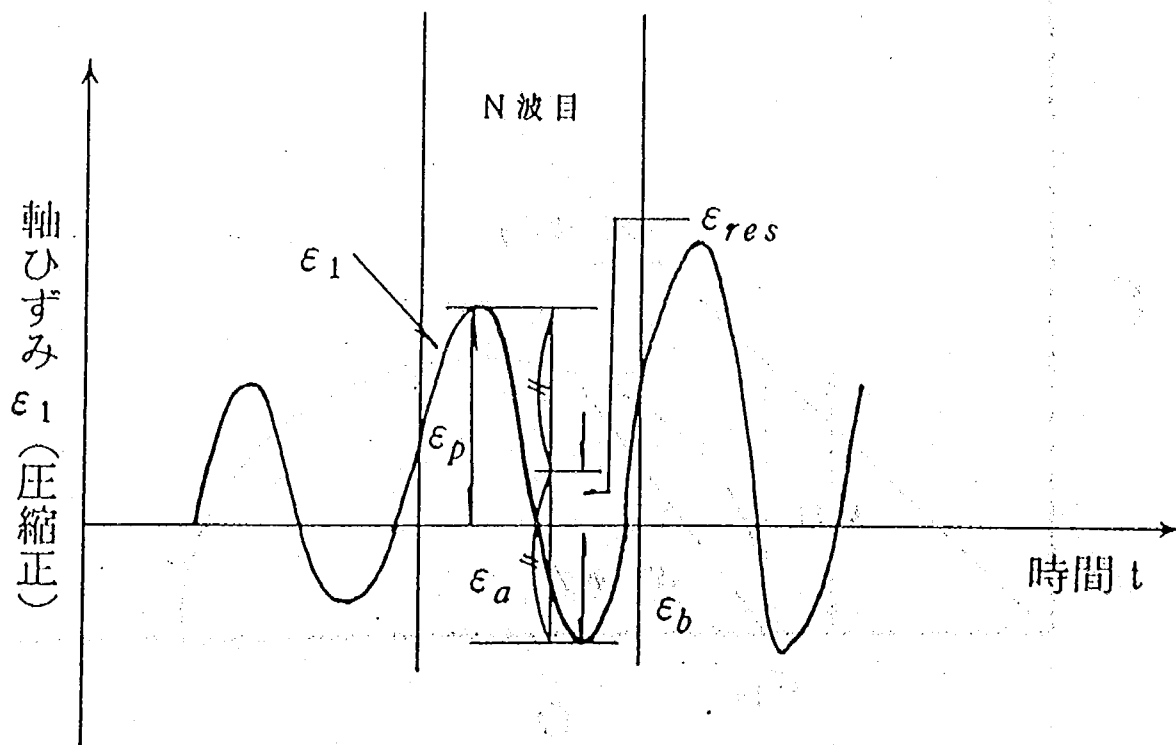
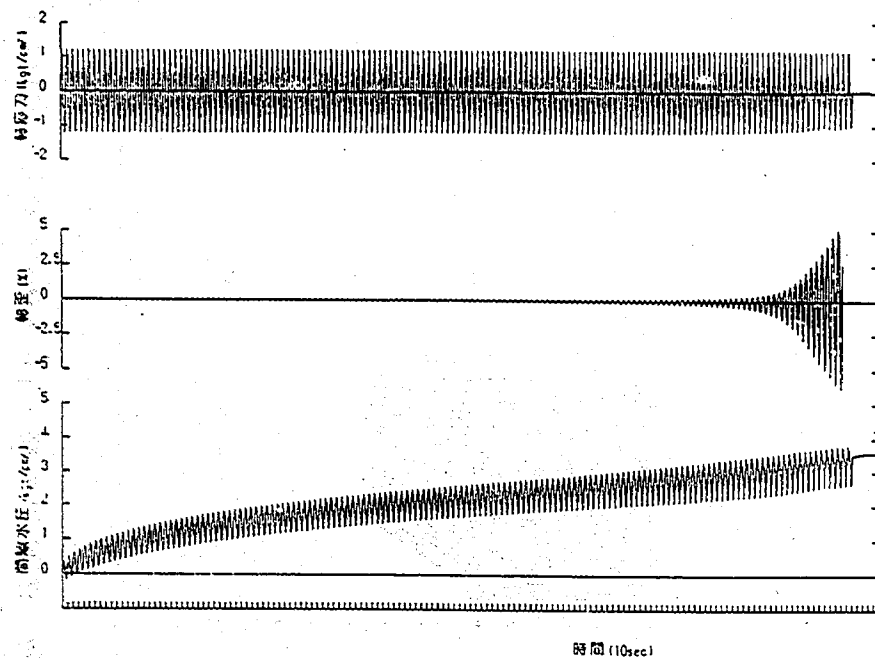


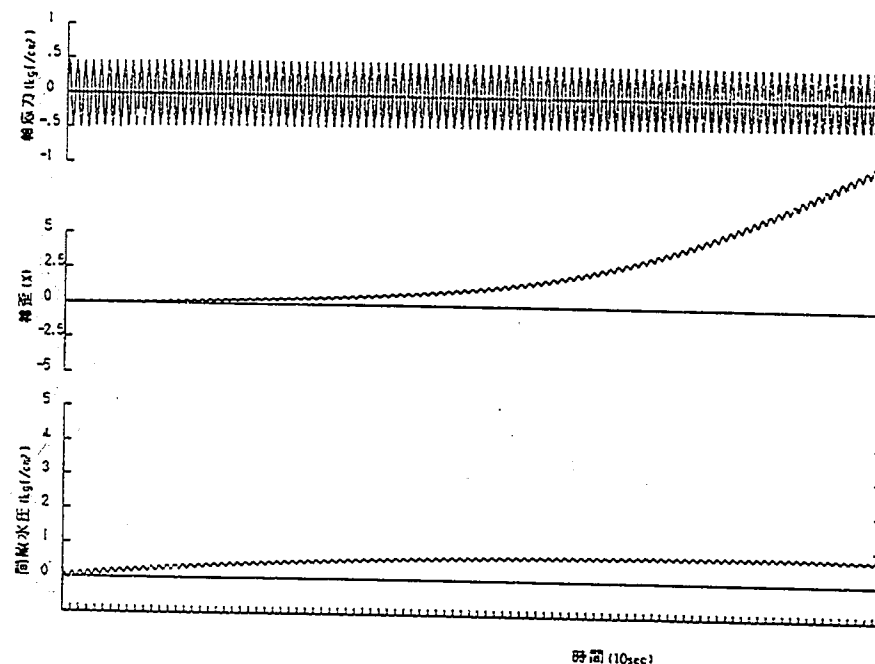
図-3.19 軸ひずみ量の定義

$$\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$$



$$(a) \sigma_1/\sigma_3 = 1.0$$

$$\sigma_1/\sigma_3 = 1.5$$



$$(b) \sigma_1/\sigma_3 = 1.5$$

図-3.20 時刻歴図 (非排水繰返し載荷・ $\phi 300mm$)

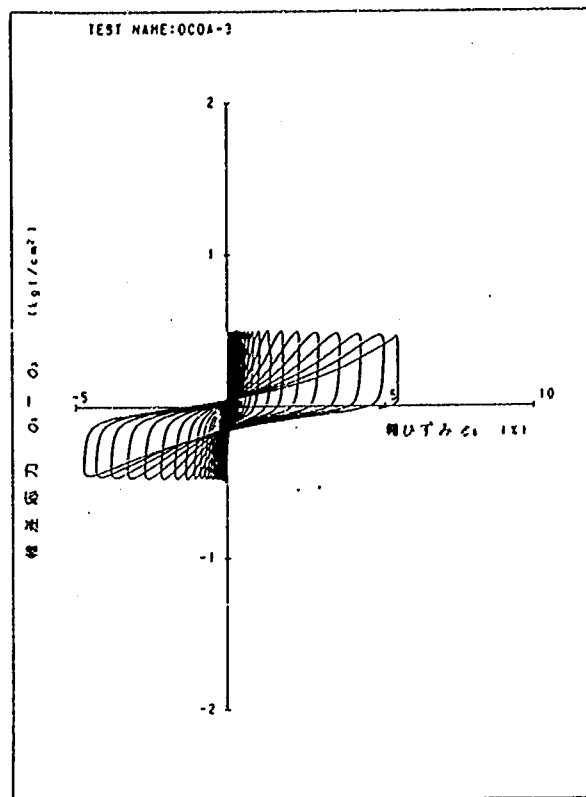


図-3.21 軸差応力と軸ひずみの関係（非排水繰返し載荷・ $\phi 300\text{mm}$ ）

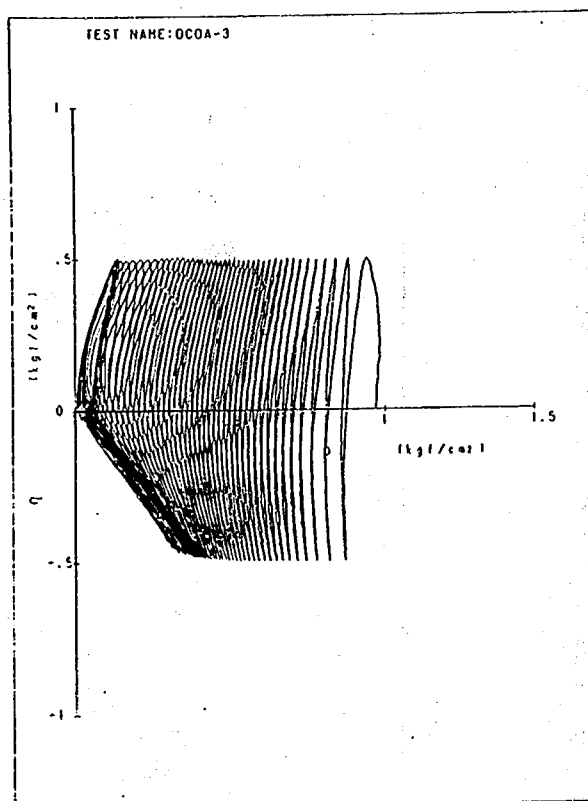


図-3.22 有効応力経路（非排水繰返し載荷・ $\phi 300\text{mm}$ ）

Cyclic loading test for core

($\sigma_1/\sigma_3=1.0, p_c=1.0$)

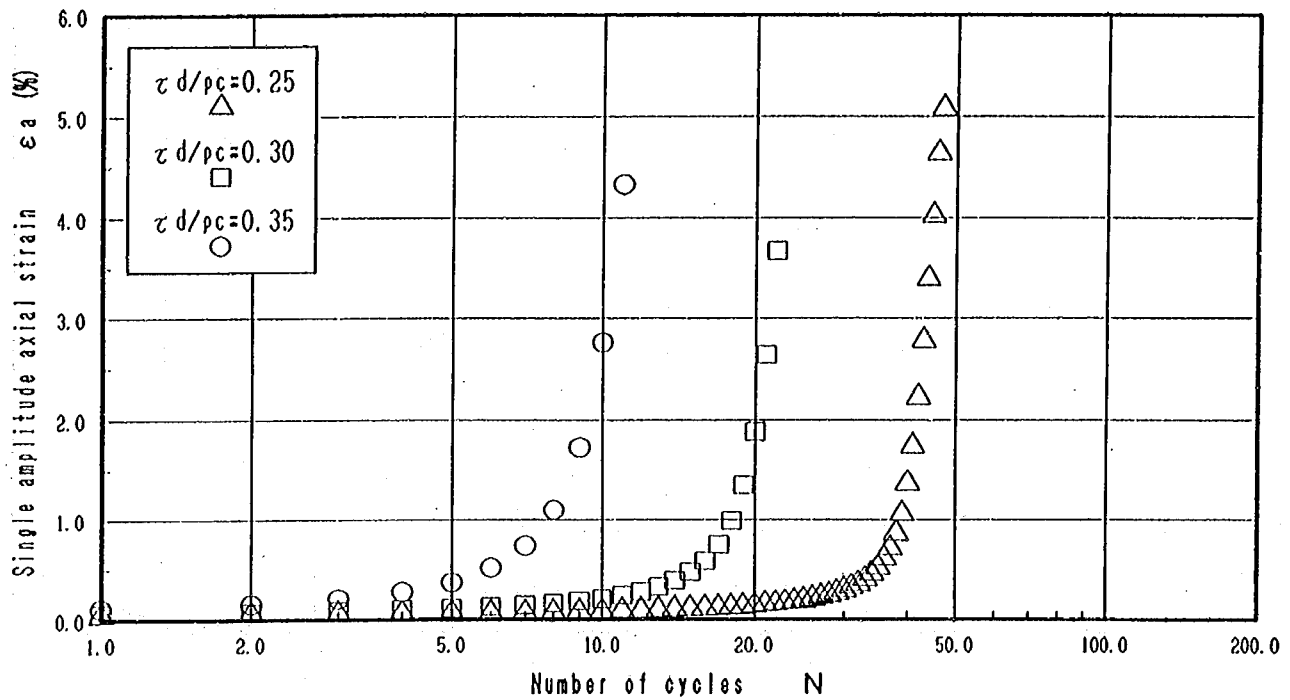


図-3. 23(a) 片振幅軸ひずみと繰返し回数の関係

(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

Cyclic loading test for core

($\sigma_1/\sigma_3=1.0, p_c=2.0$)

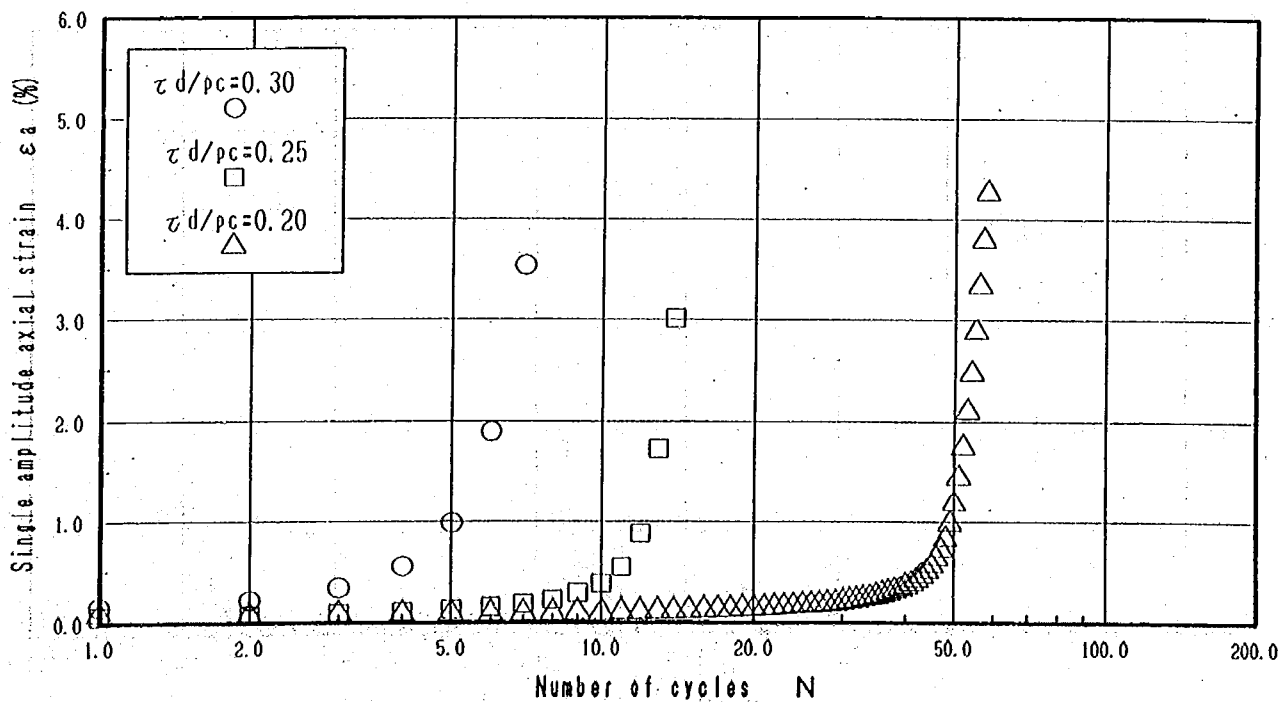


図-3. 23(b) 片振幅軸ひずみと繰返し回数の関係

(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

Cyclic loading test for core
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, p_c=4.0$)

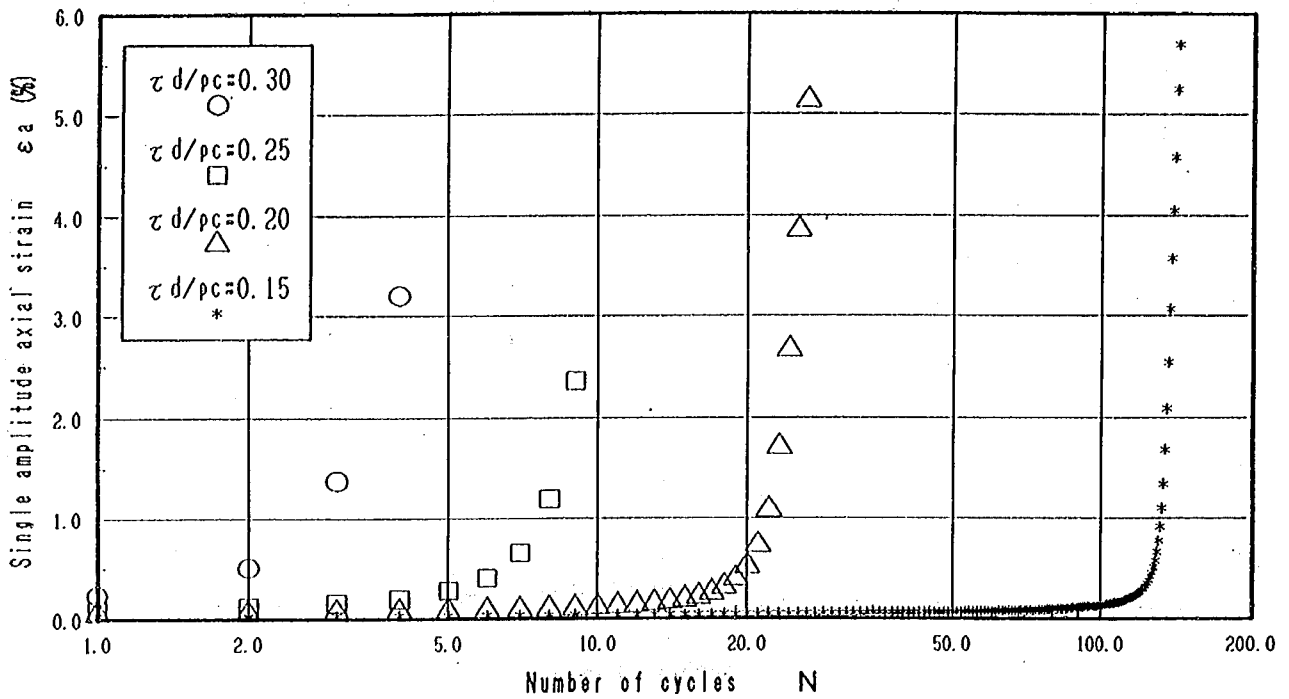


図-3. 23(c) 片振幅軸ひずみと繰返し回数の関係

(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

Cyclic loading test for core
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, p_c=6.0$)

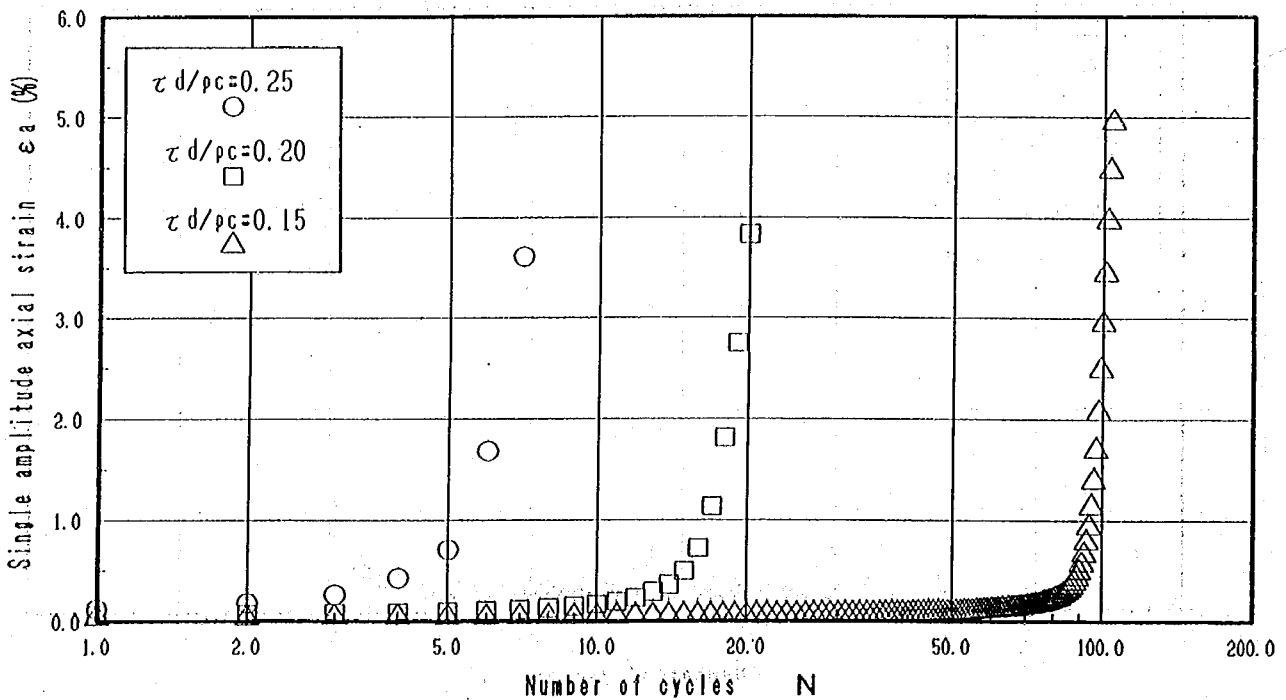


図-3. 23(d) 片振幅軸ひずみと繰返し回数の関係

(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

Cyclic loading test for core
($\sigma_1/\sigma_3=1.5$, $p_c=1.0$)

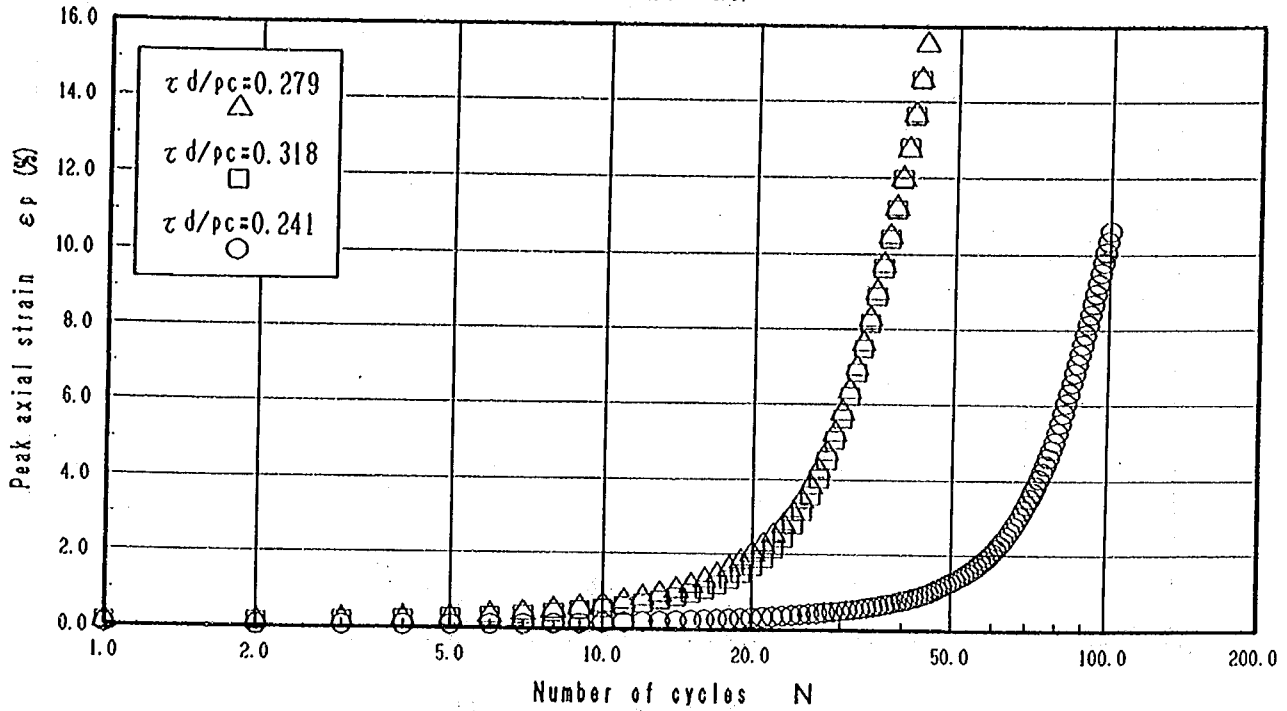


図-3. 23(e) ピーク軸ひずみと繰返し回数の関係

(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.5$, $p_c = 1.5 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

Cyclic loading test for core
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=1.0$)

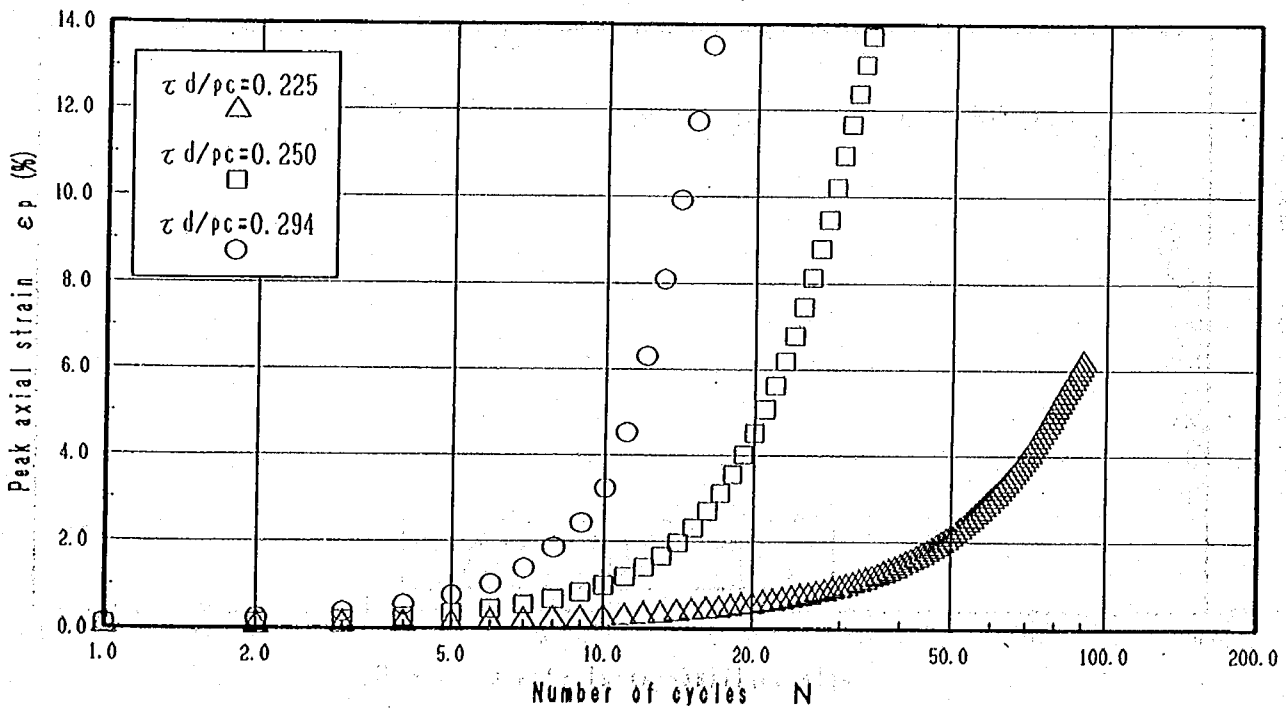


図-3. 23(f) ピーク軸ひずみと繰返し回数の関係

(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

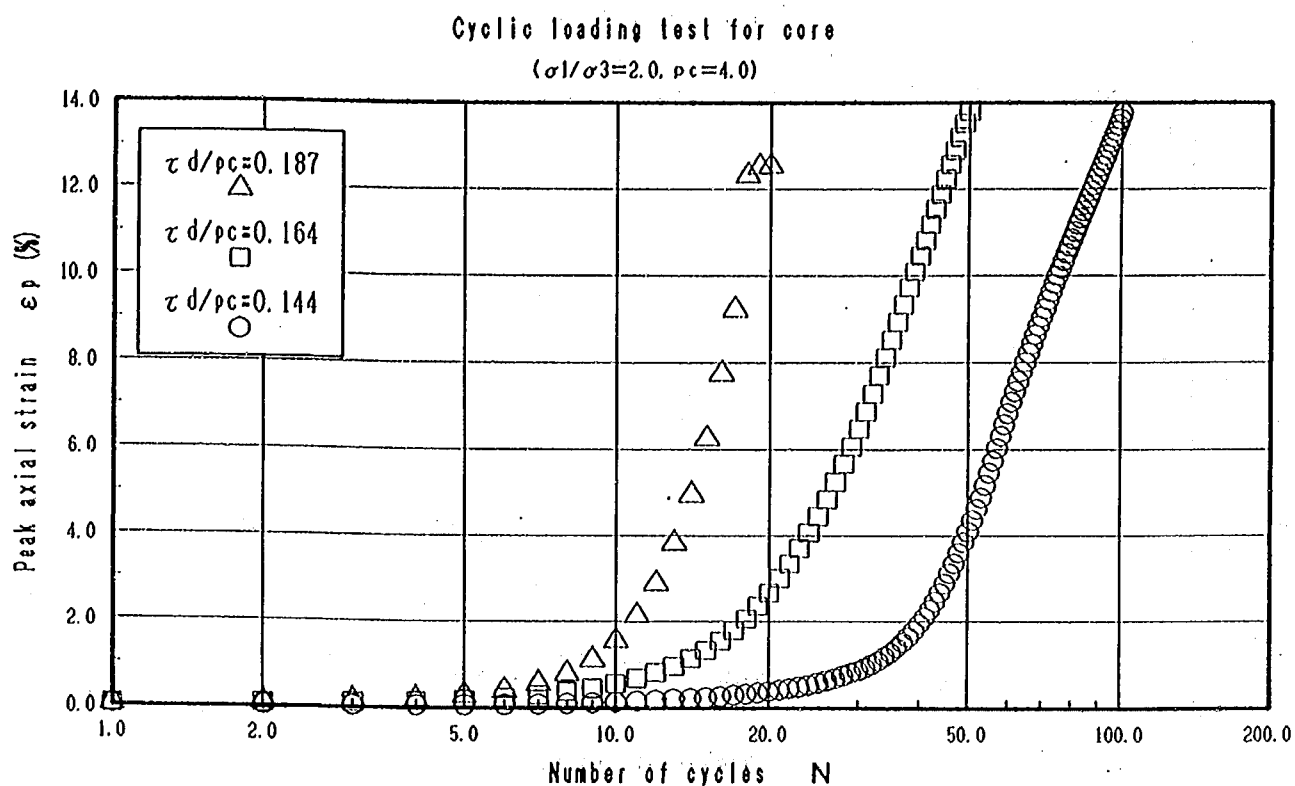


図-3. 23(g) ピーク軸ひずみと繰返し回数の関係

(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$, $p_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

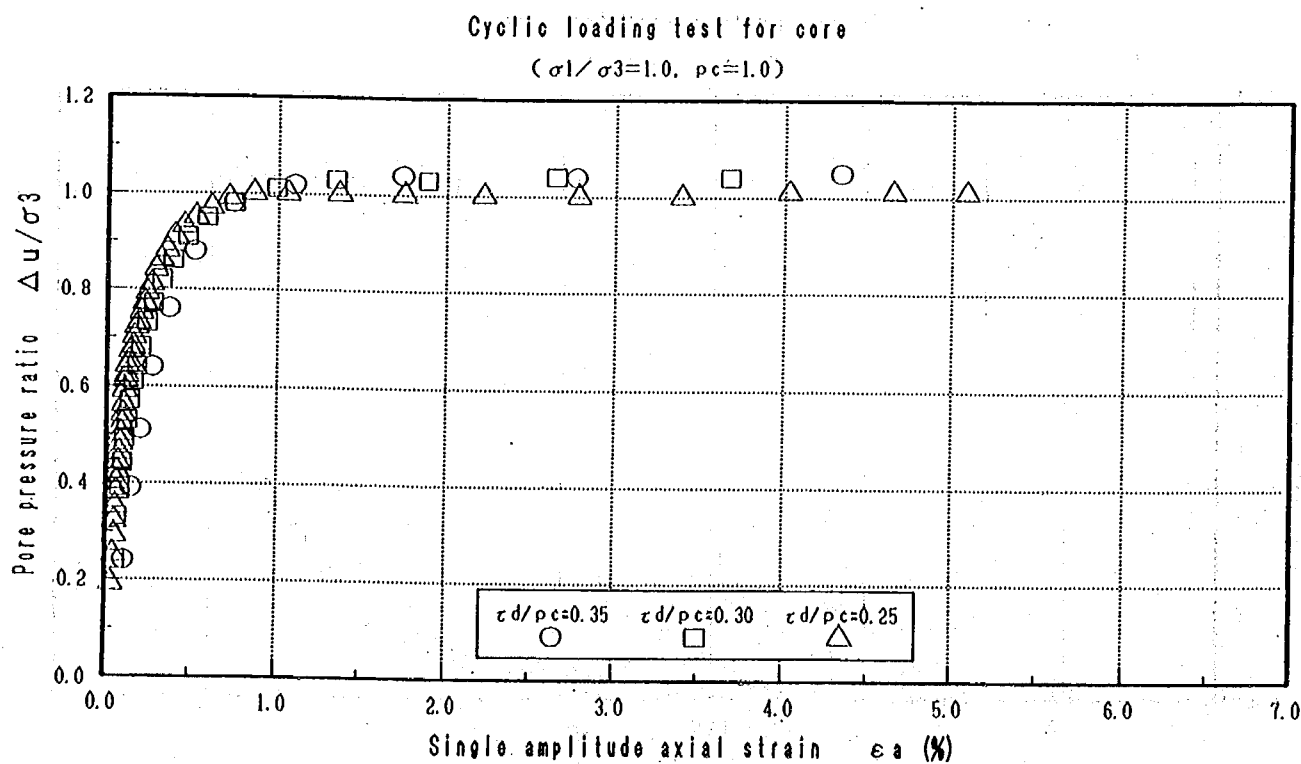


図-3. 24(a) 間隙水圧比と片振幅軸ひずみの関係

(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

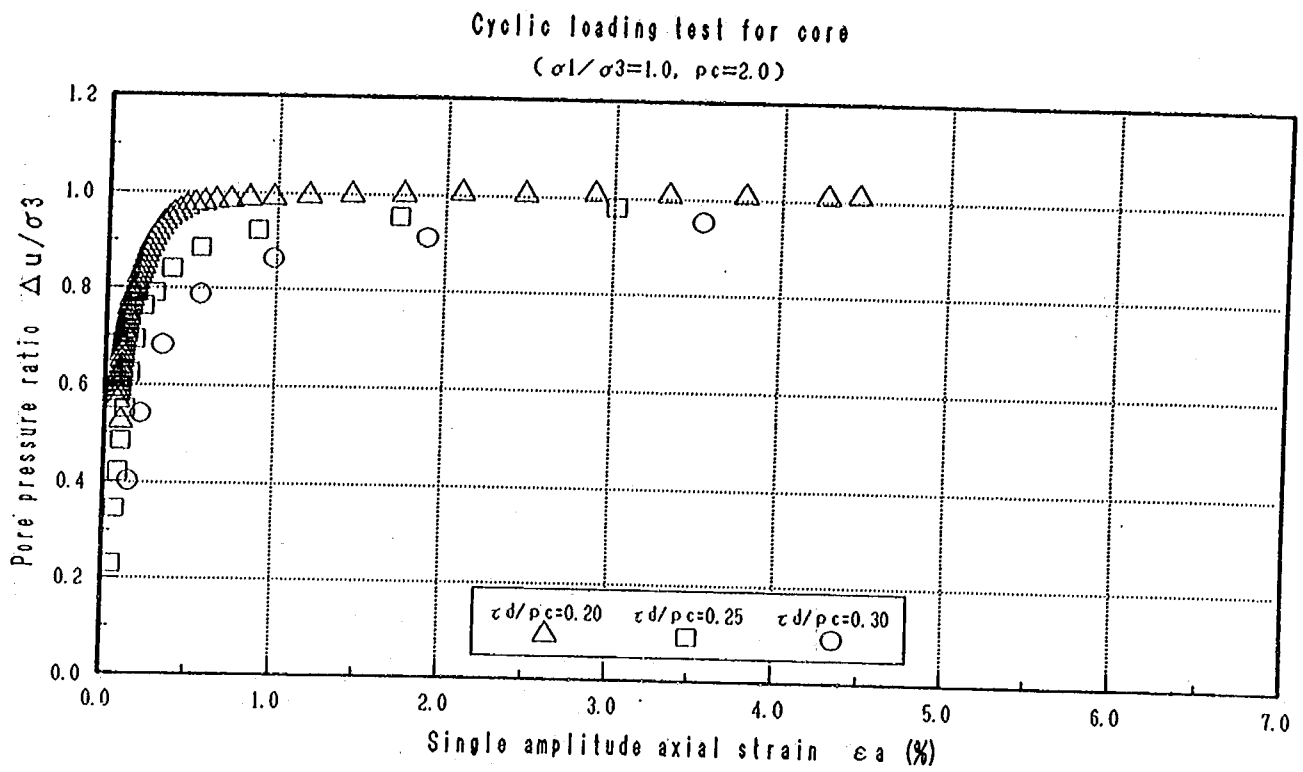


図-3. 24(b) 間隙水圧比と片振幅軸ひずみの関係
(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

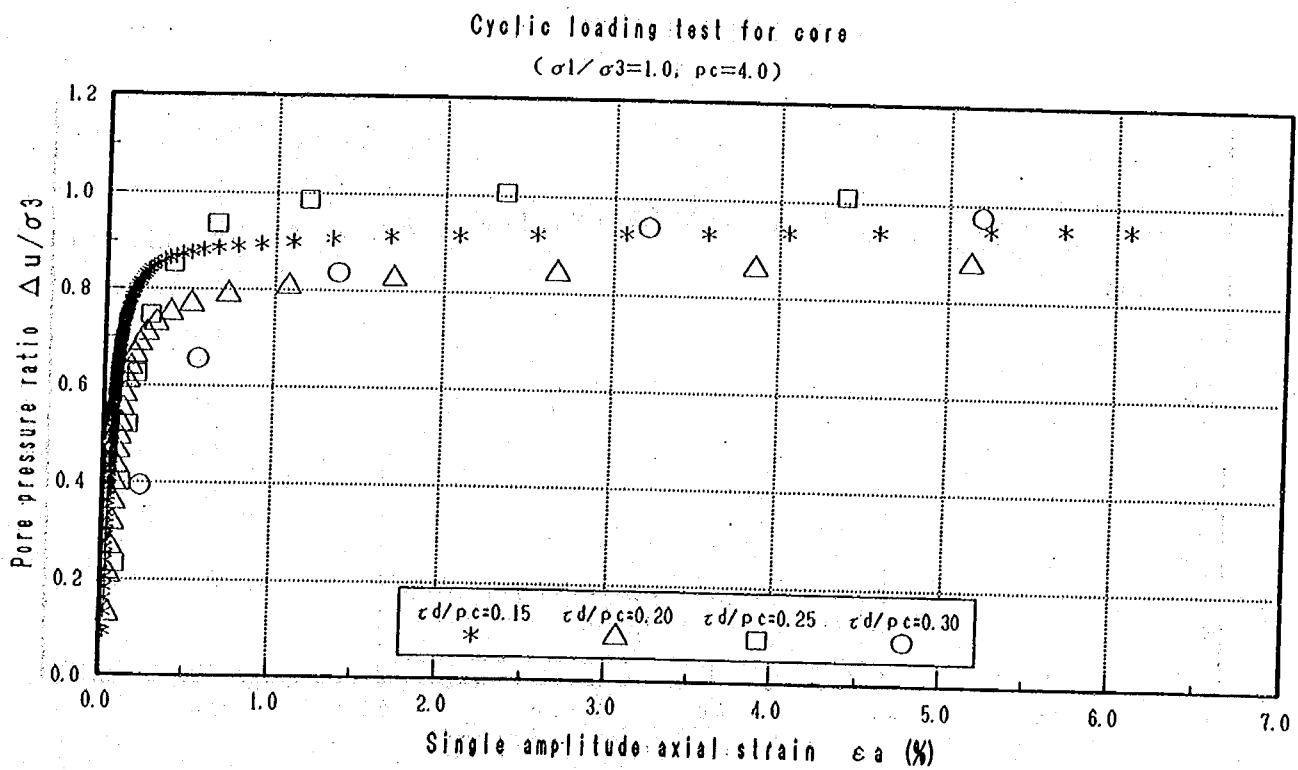


図-3. 24(c) 間隙水圧比と片振幅軸ひずみの関係
(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

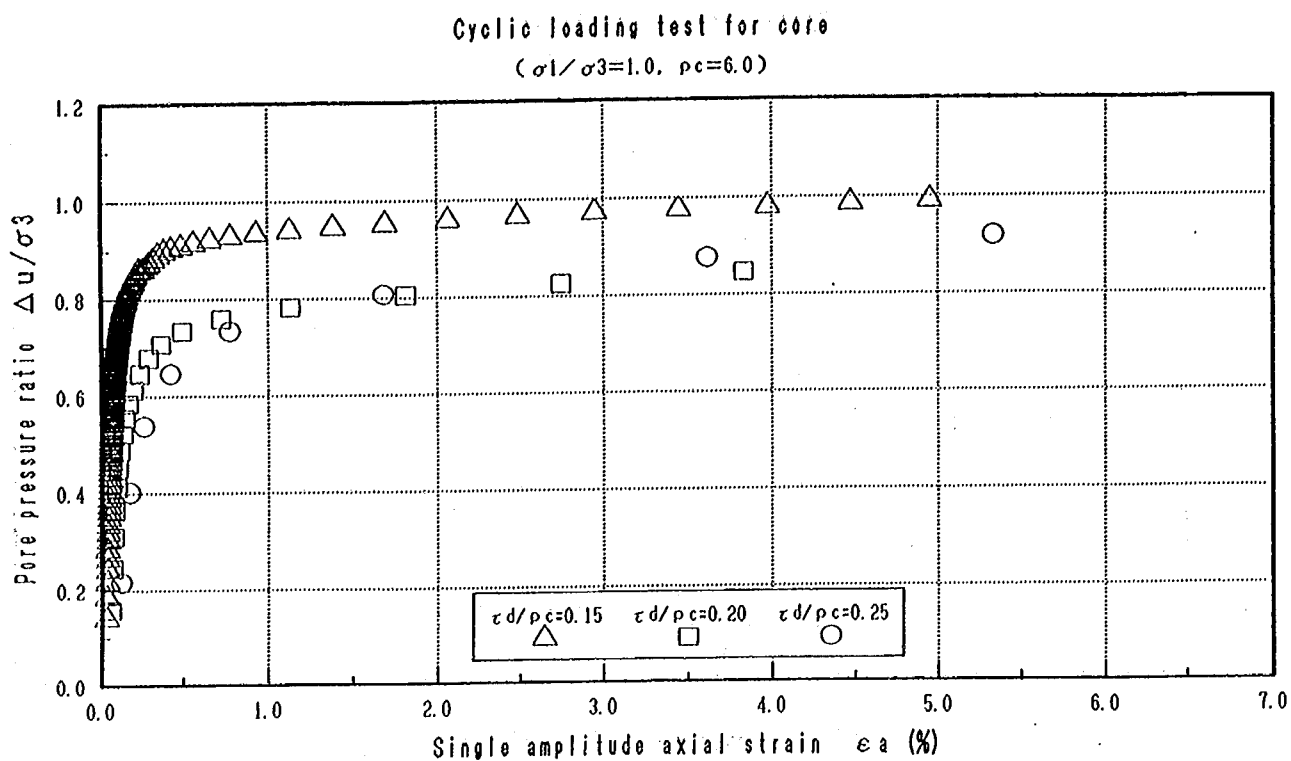


図-3. 24(d) 間隙水圧比と片振幅軸ひずみの関係
(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

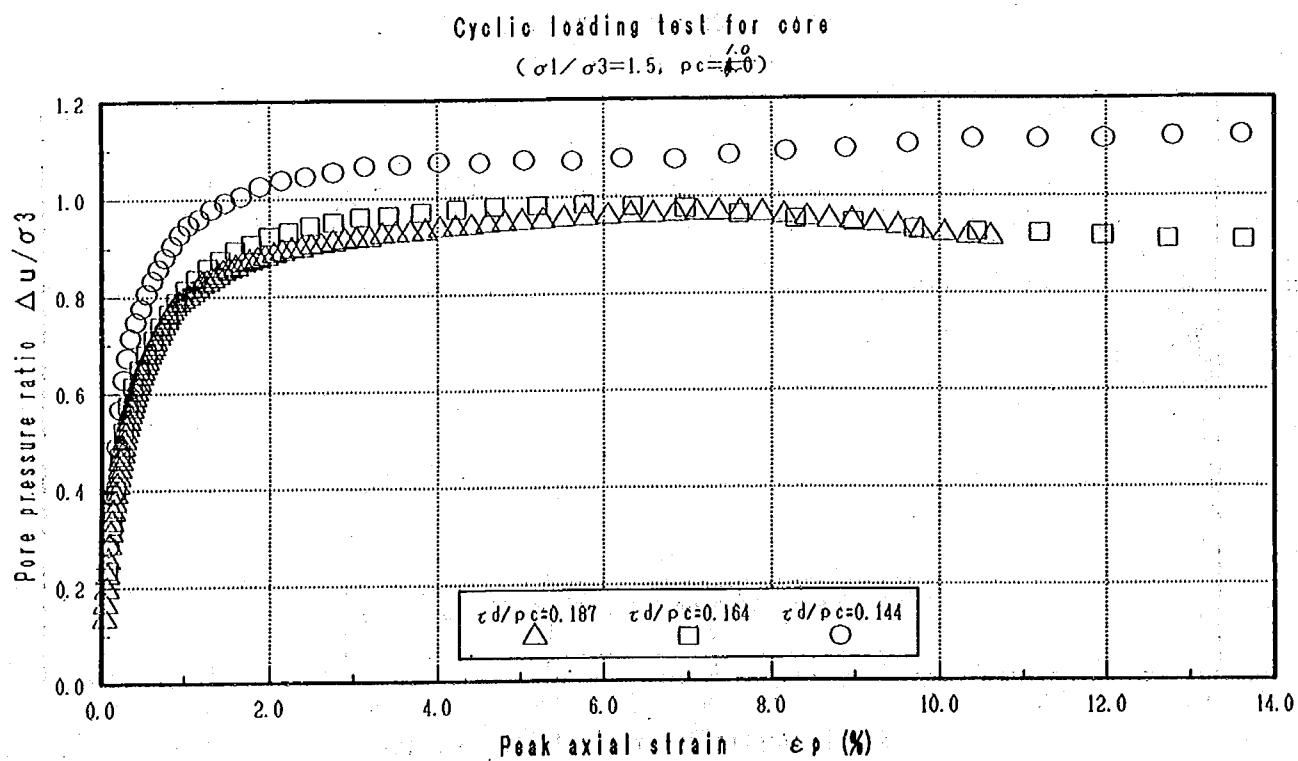


図-3. 24(e) 間隙水圧比とピーク軸ひずみの関係
(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.5$, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

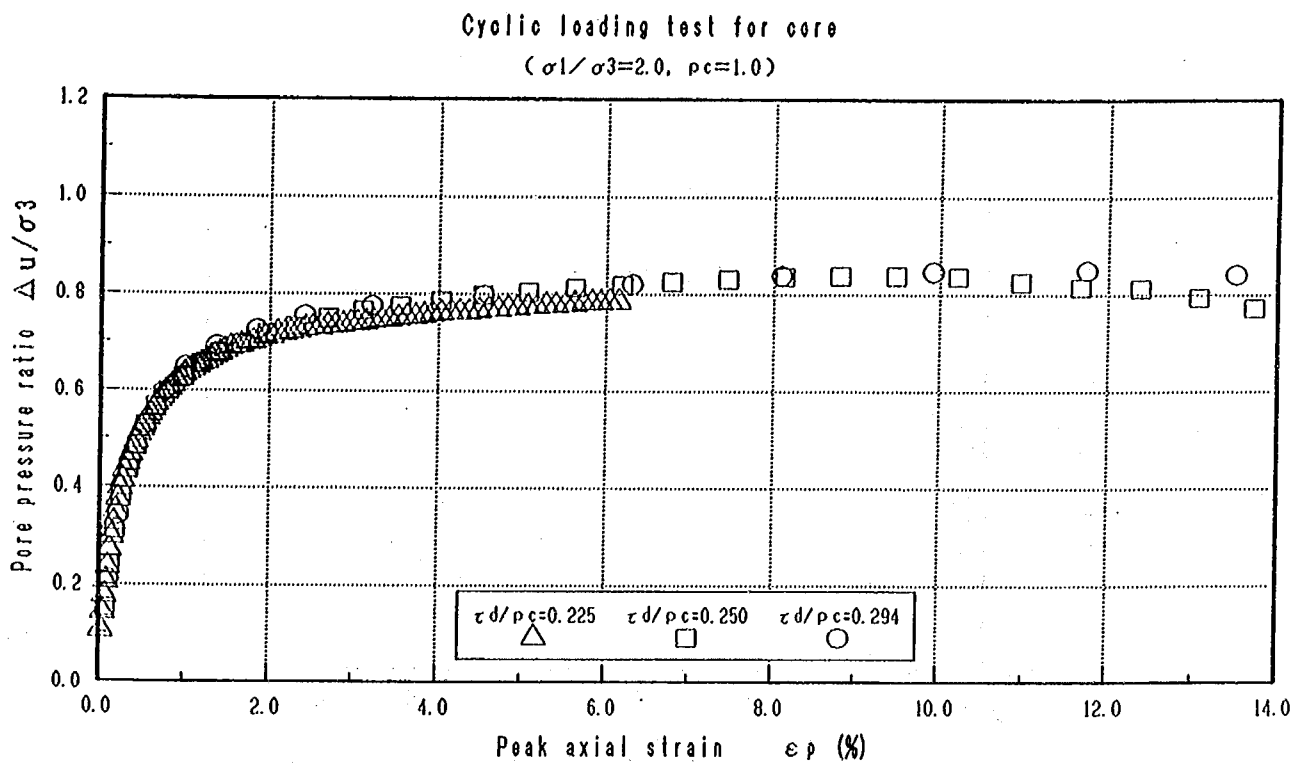


図-3. 24(f) 間隙水圧比とピーク軸ひずみの関係
(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

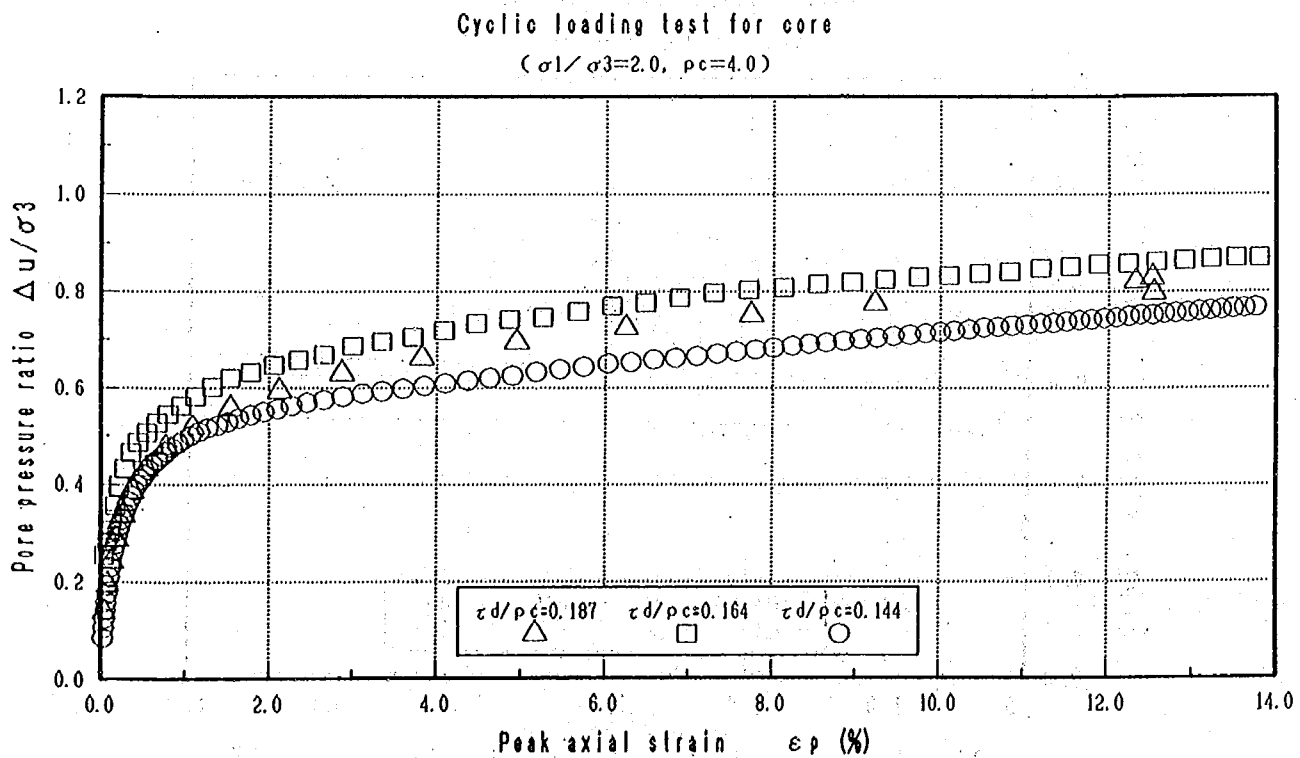


図-3. 24(g) 間隙水圧比とピーク軸ひずみの関係
(非排水繰返し載荷, $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$, $p_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi 300\text{mm}$)

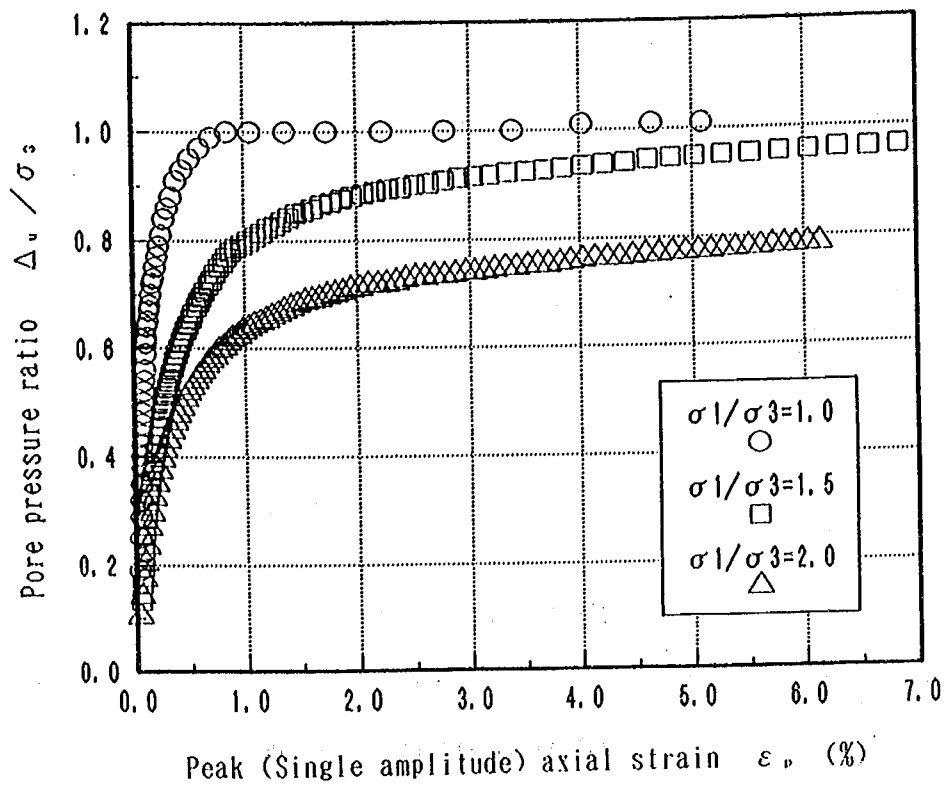


図-3.25 間隙水圧比と軸ひずみの関係，主応力比の影響
(非排水繰返し載荷， $p_c = 1.0$ ， $\phi 300\text{mm}$)

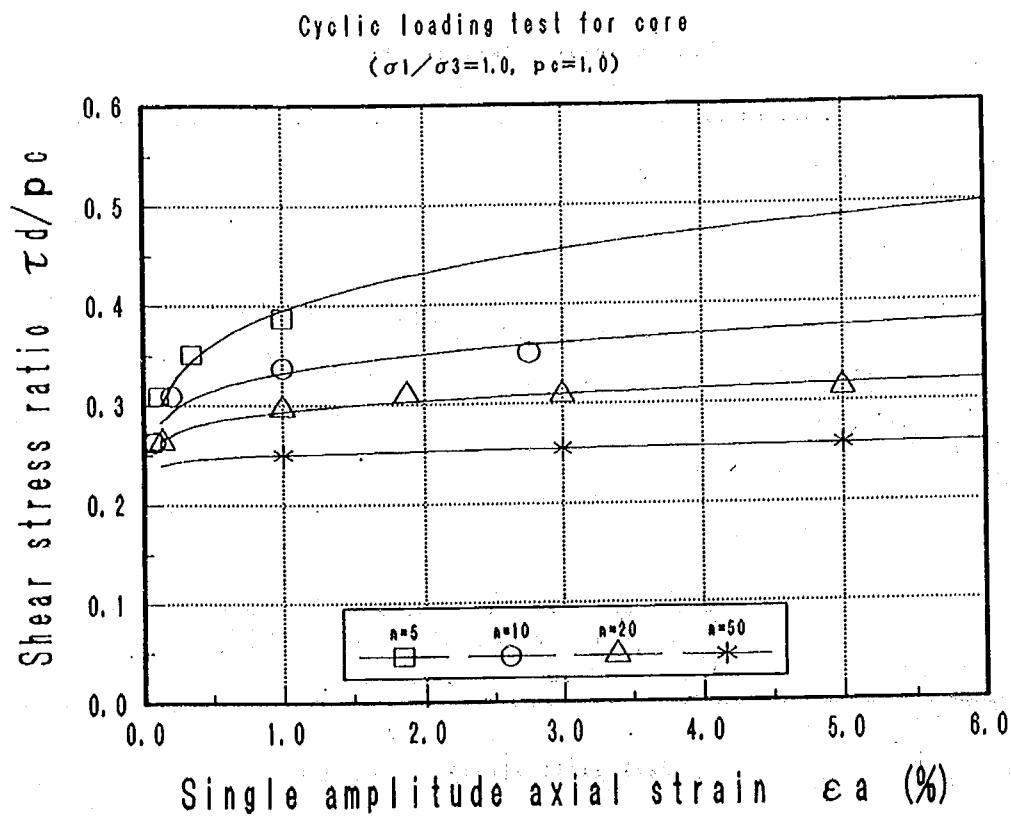


図-3.26(a) せん断応力比と片振幅軸ひずみの関係，繰返し回数の影響
 $\sigma_1 / \sigma_3 = 1.0$ ， $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ，(非排水繰返し載荷， $\phi 300\text{mm}$)

Cyclic loading test for core

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=2.0$)

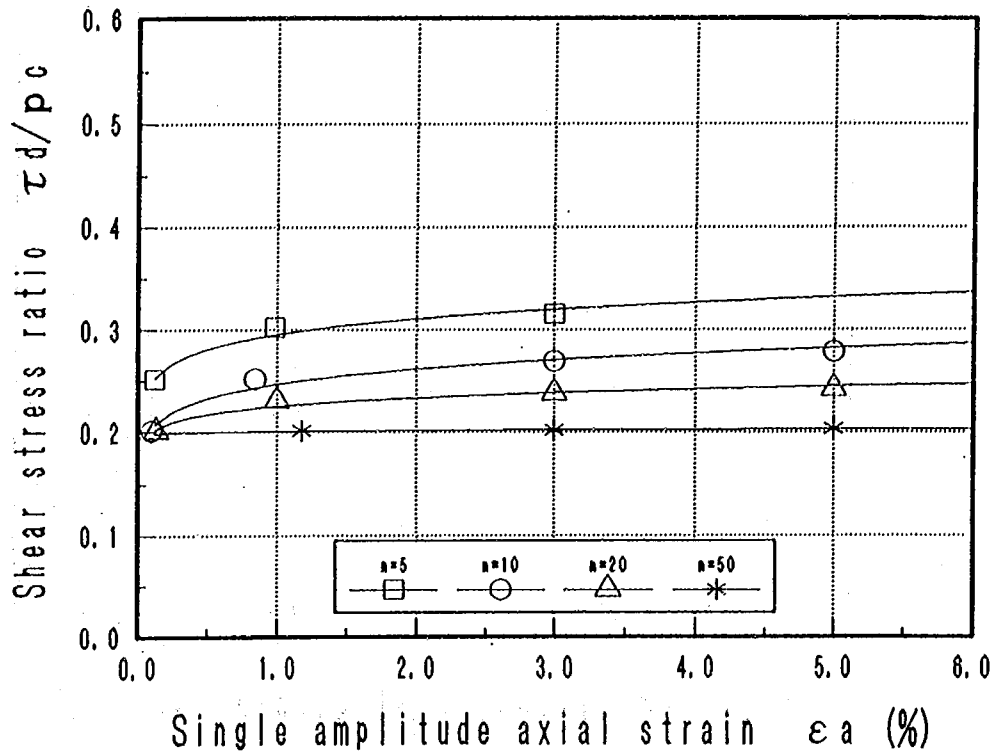


図-3. 26(b) セン断応力比と片振幅軸ひずみの関係，繰返し回数の影響
 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$, (非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

Cyclic loading test for core

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=4.0$)

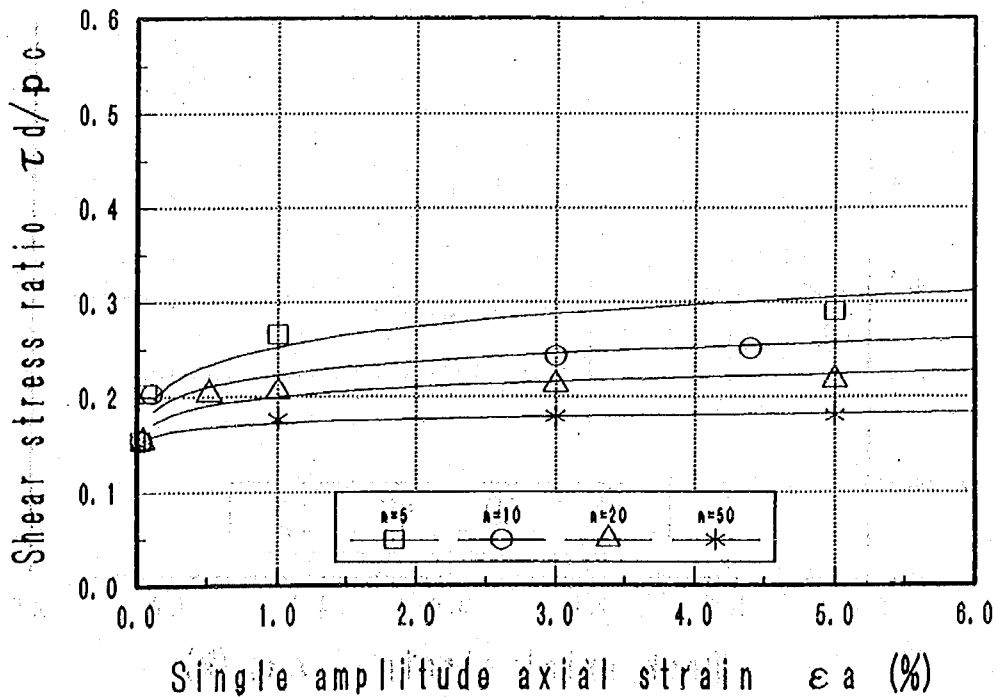


図-3. 26(c) セン断応力比と片振幅軸ひずみの関係，繰返し回数の影響
 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, (非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

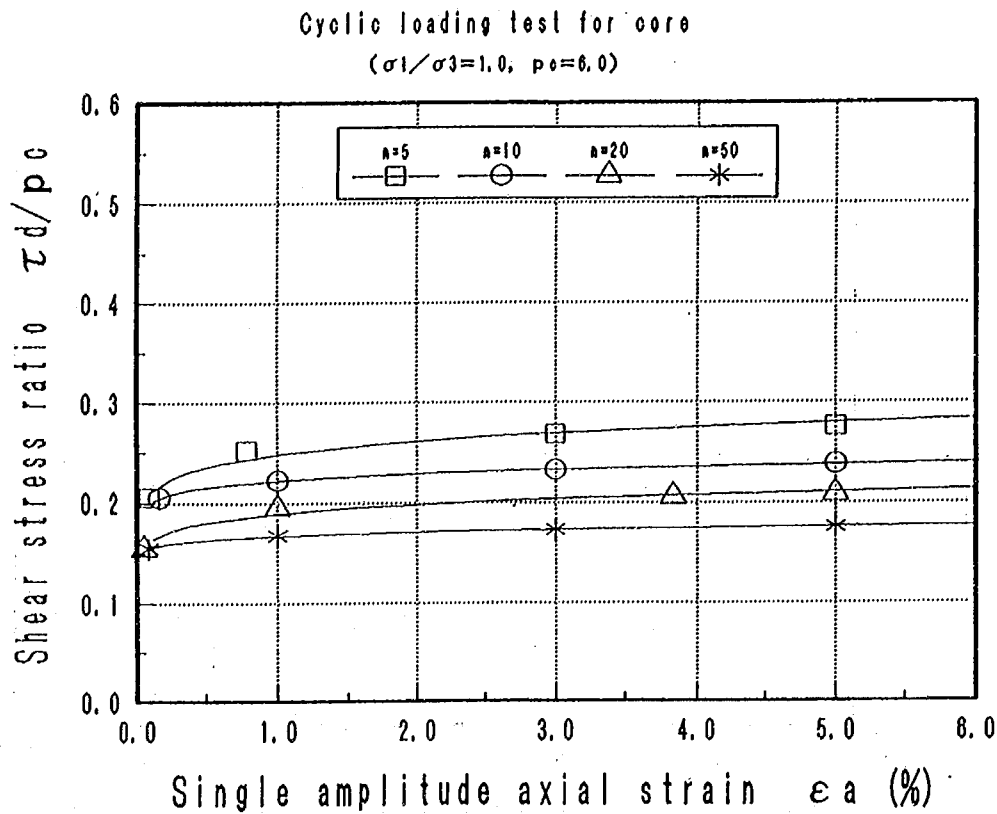


図-3. 26(d) せん断応力比と片振幅軸ひずみの関係，繰返し回数の影響
 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$ ， $p_c = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ ，（非排水繰返し載荷， $\phi 300\text{mm}$ ）

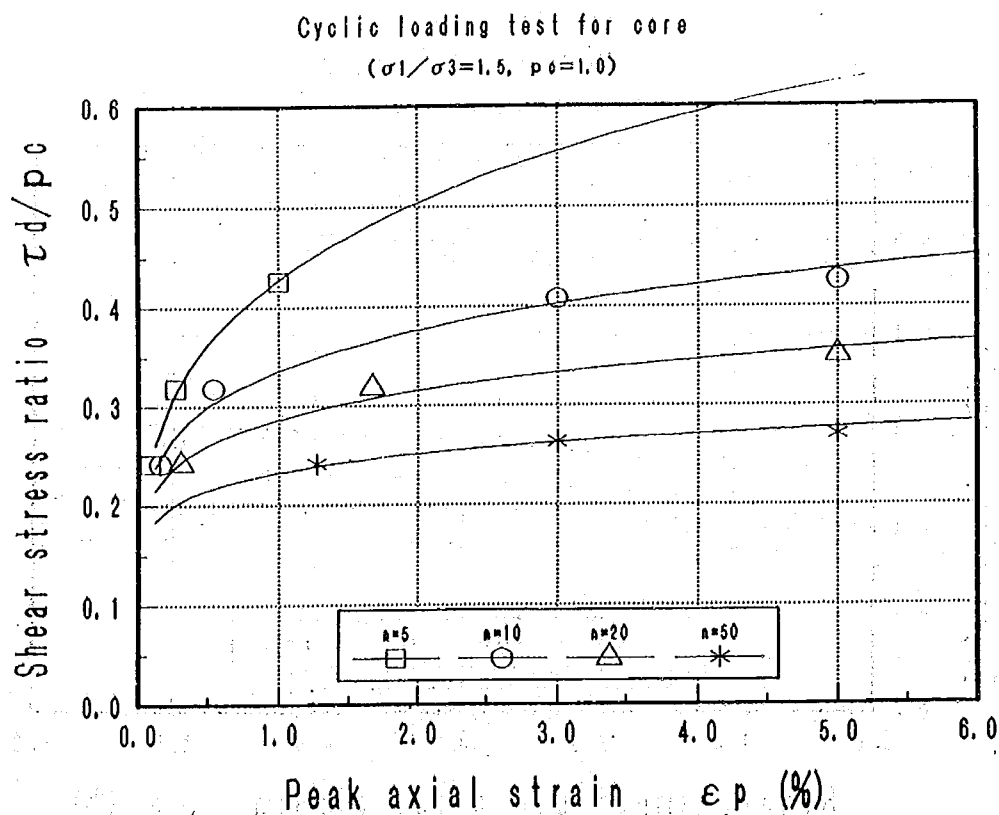


図-3. 26(e) せん断応力比とピーク軸ひずみの関係，繰返し回数の影響
 $\sigma_1/\sigma_3 = 1.5$ ， $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ，（非排水繰返し載荷， $\phi 300\text{mm}$ ）

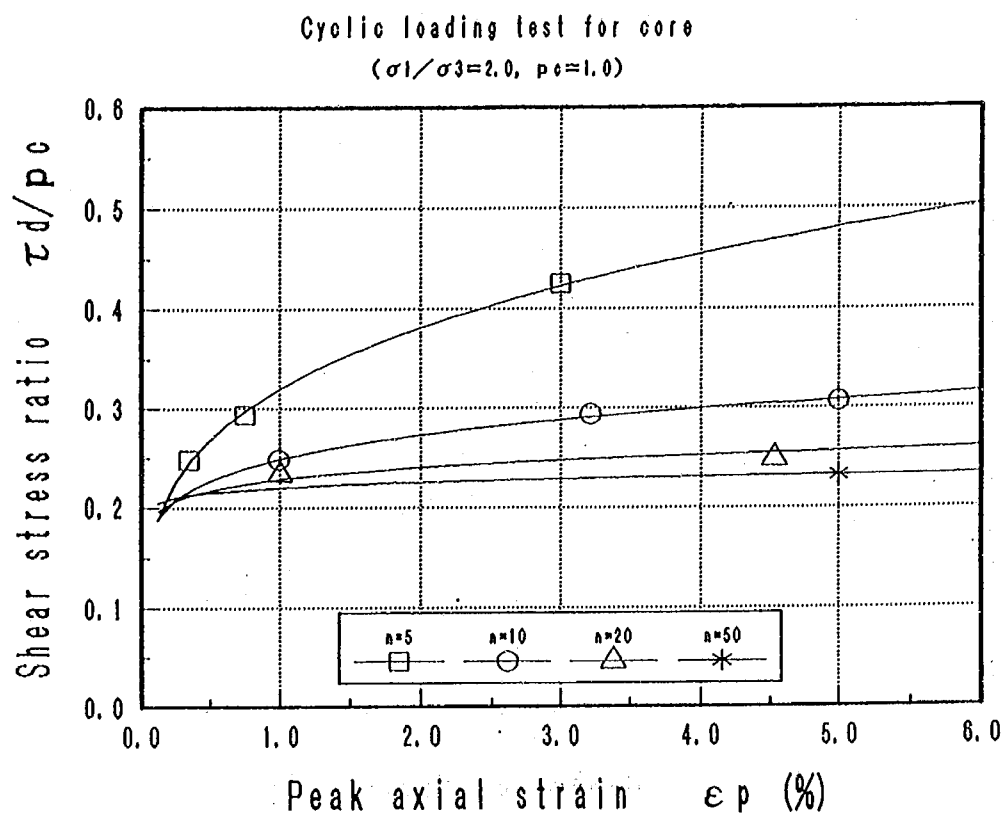


図-3. 26(f) せん断応力比とピーク軸ひずみの関係，繰返し回数の影響
 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$, (非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

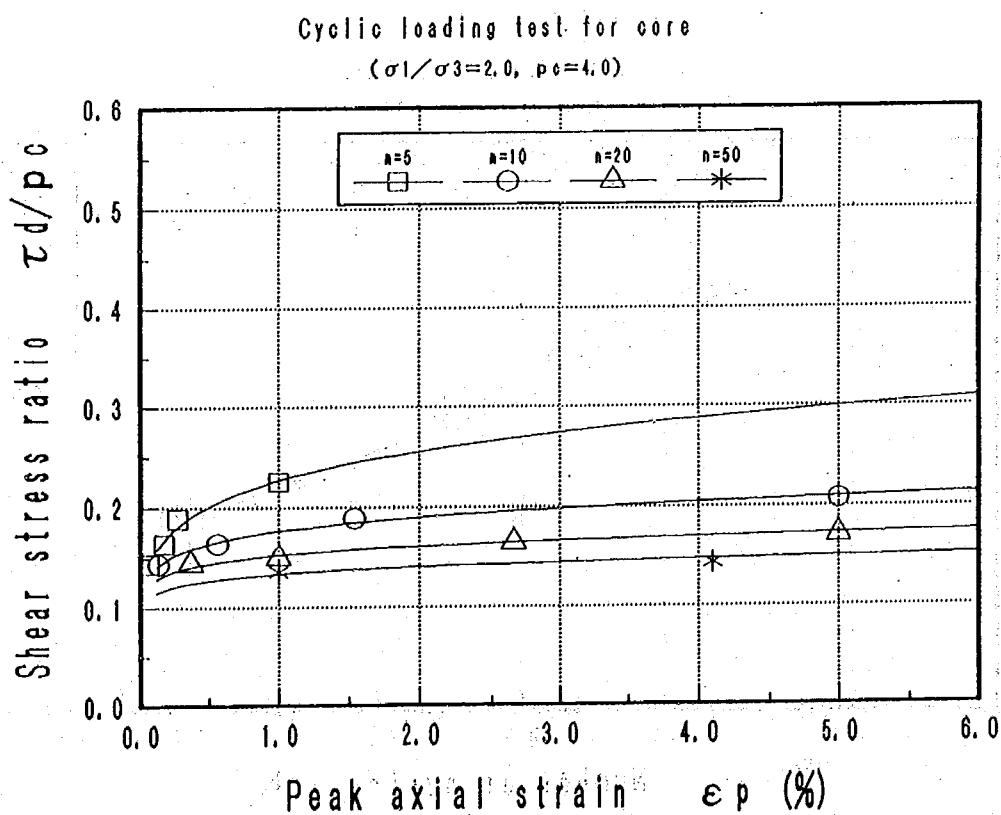


図-3. 26(g) せん断応力比とピーク軸ひずみの関係，繰返し回数の影響
 $\sigma_1/\sigma_3 = 2.0$, $p_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$, (非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

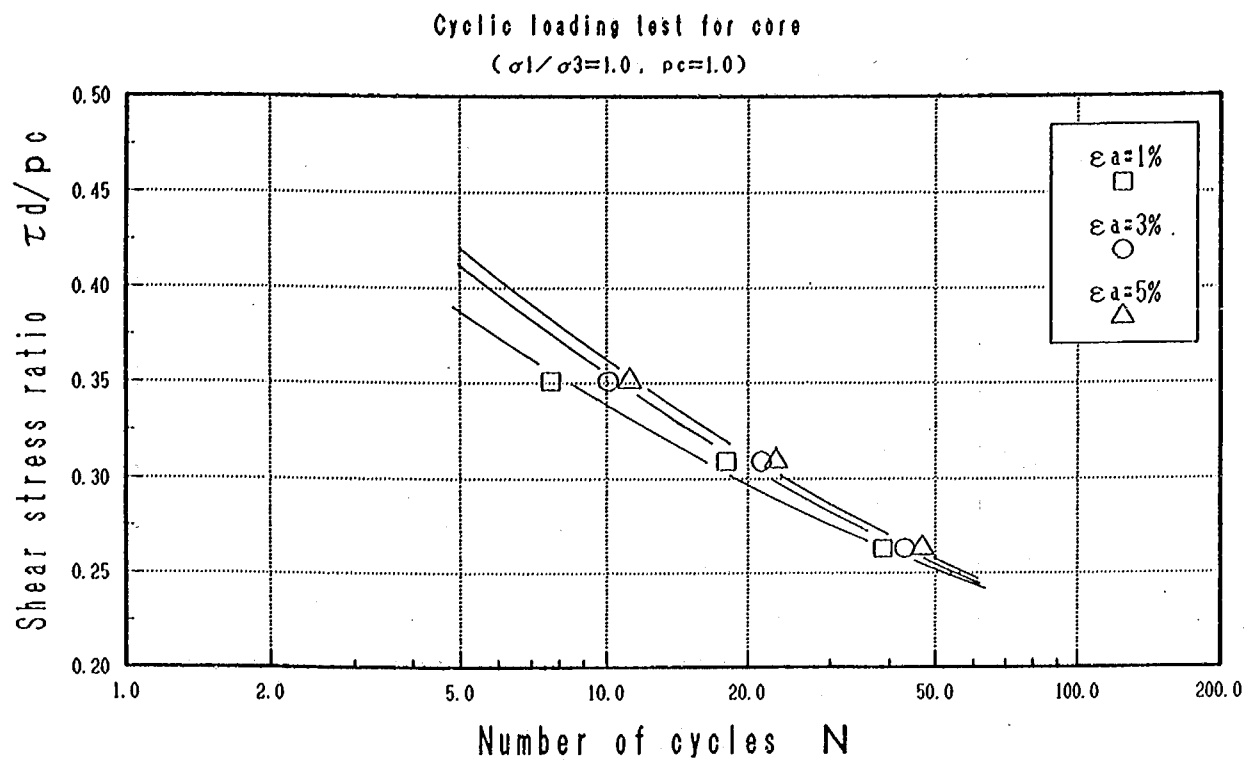


図-3. 27(a) せん断応力比と繰返し回数の関係, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$
(非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

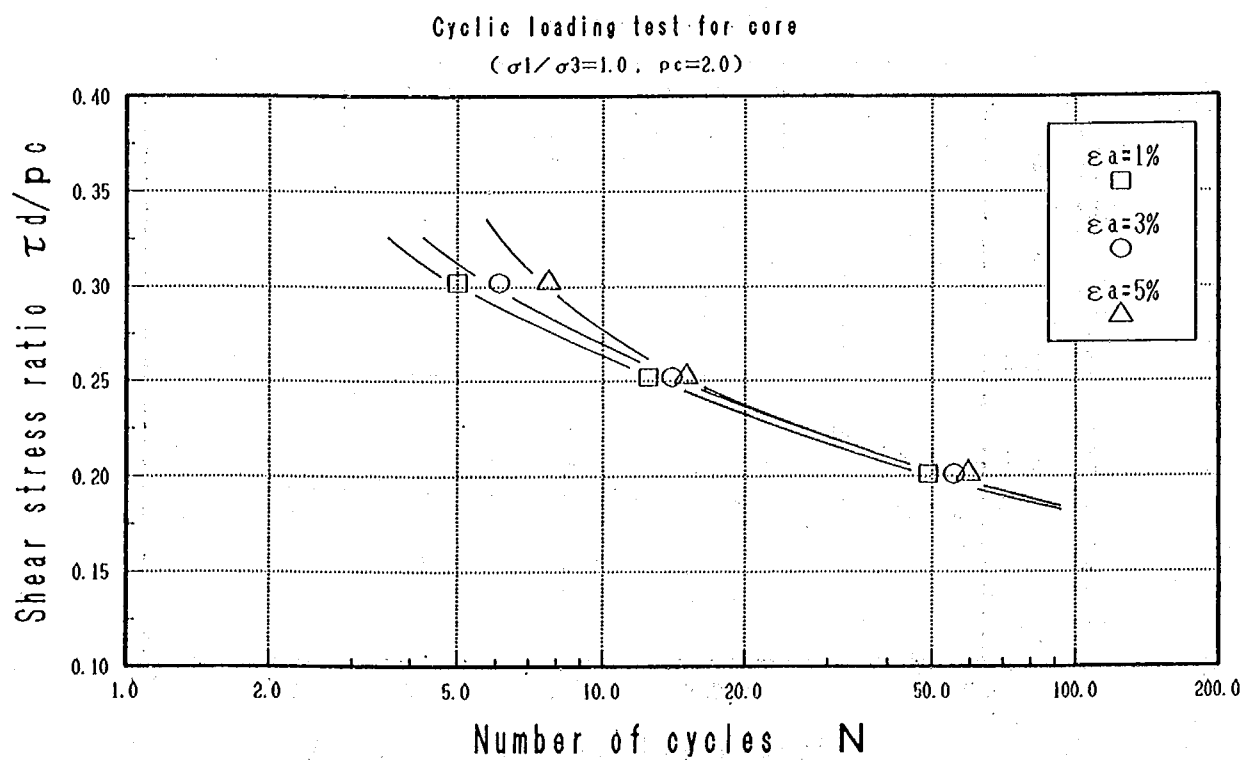


図-3. 27(b) せん断応力比と繰返し回数の関係, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$
(非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

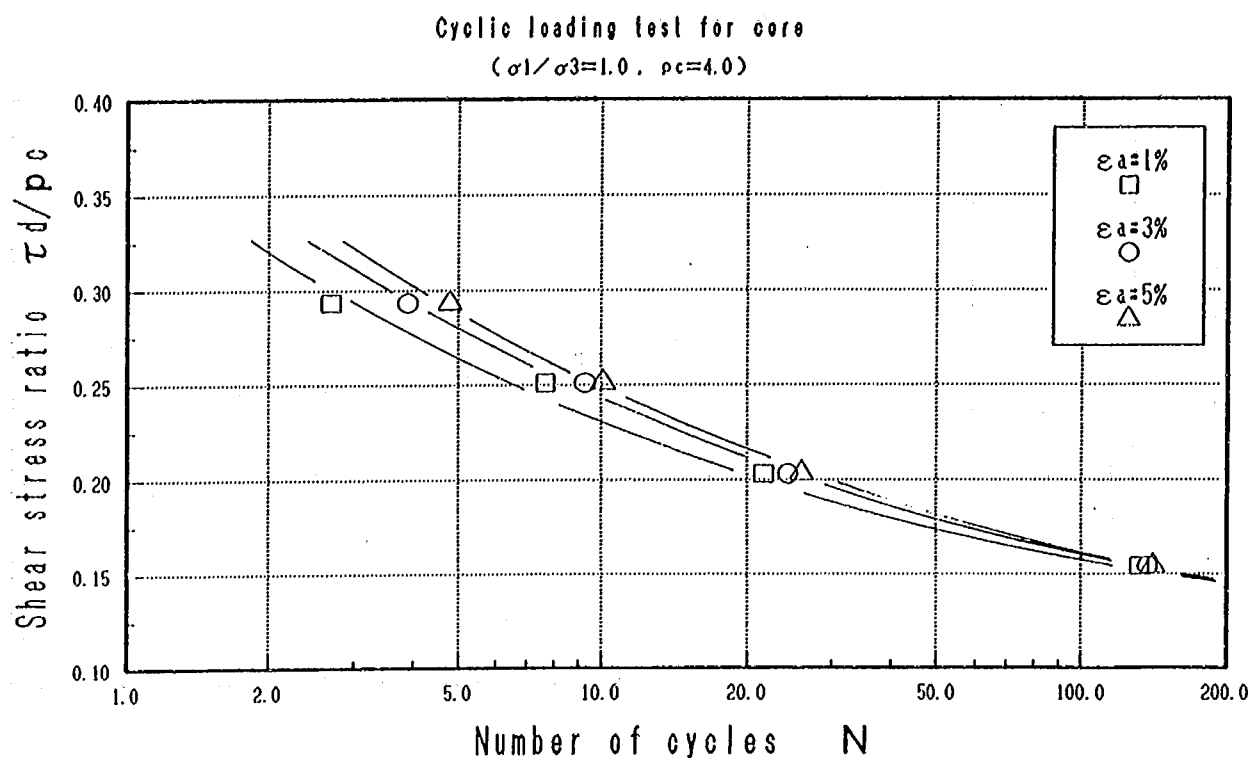


図-3. 27(c) セン断応力比と繰返し回数の関係, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$
(非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

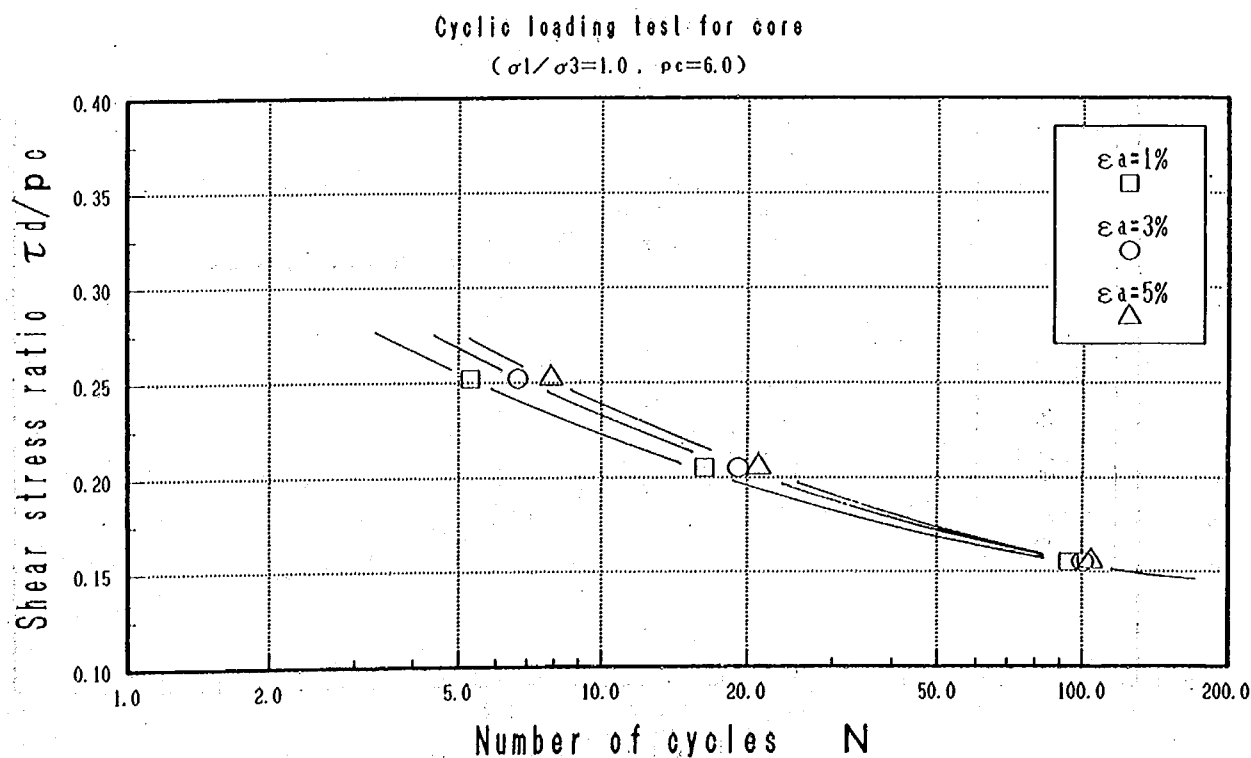


図-3. 27(d) セン断応力比と繰返し回数の関係, $\sigma_1/\sigma_3 = 1.0$, $p_c = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$
(非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

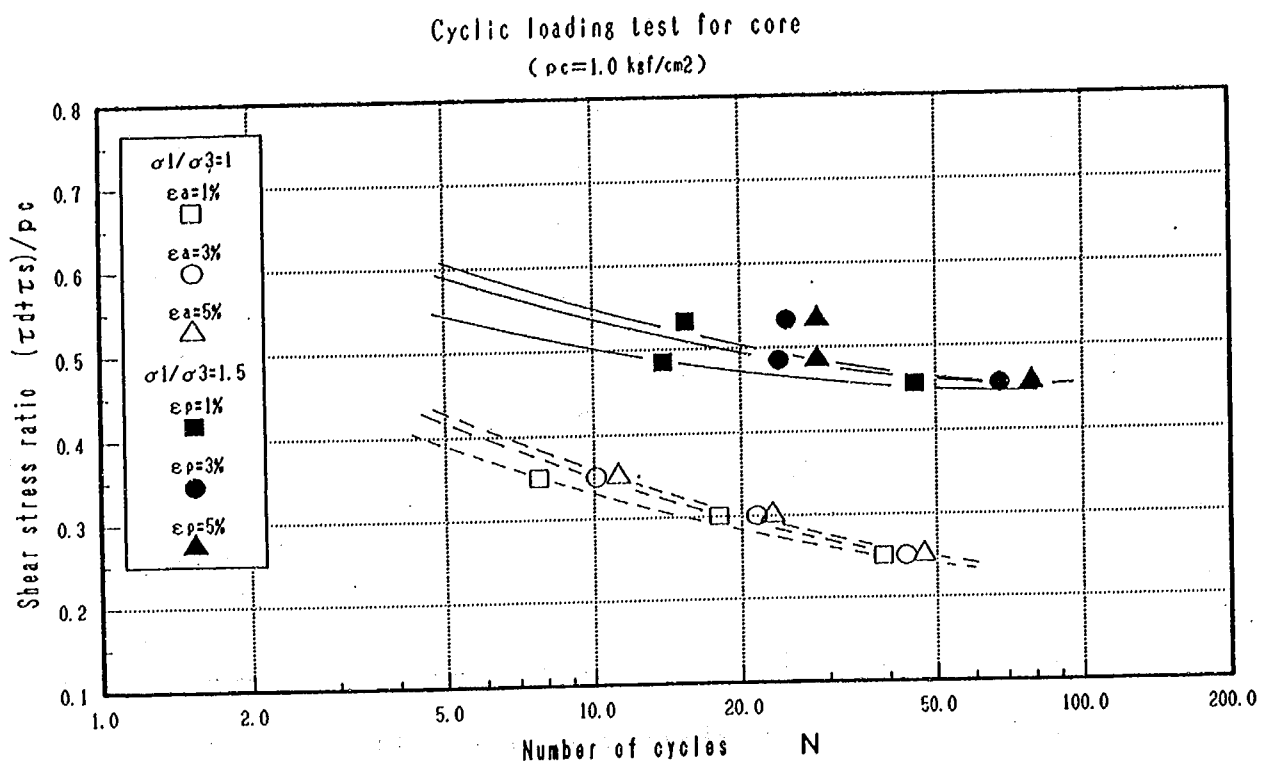


図-3. 27(e) せん断応力比と繰返し回数の関係, 主応力比の影響, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$
(非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

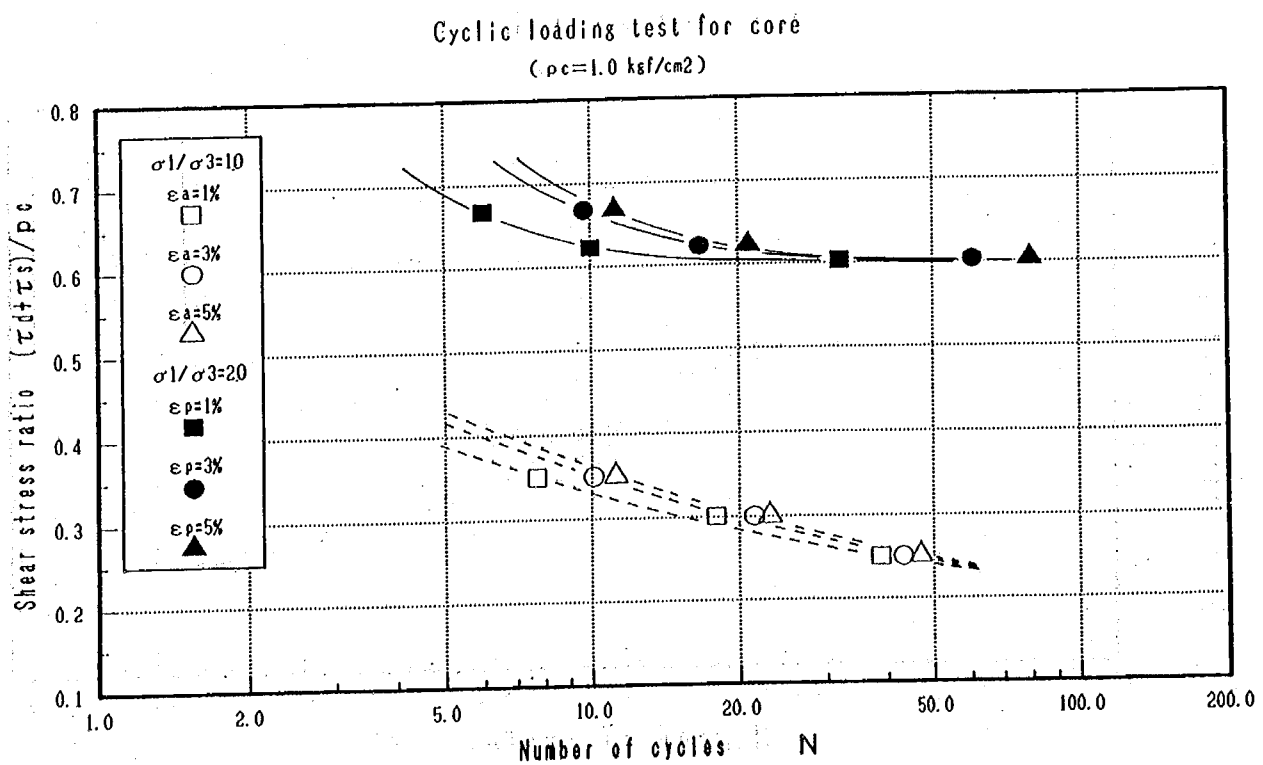


図-3. 27(f) せん断応力比と繰返し回数の関係, 主応力比の影響, $p_c = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$
(非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

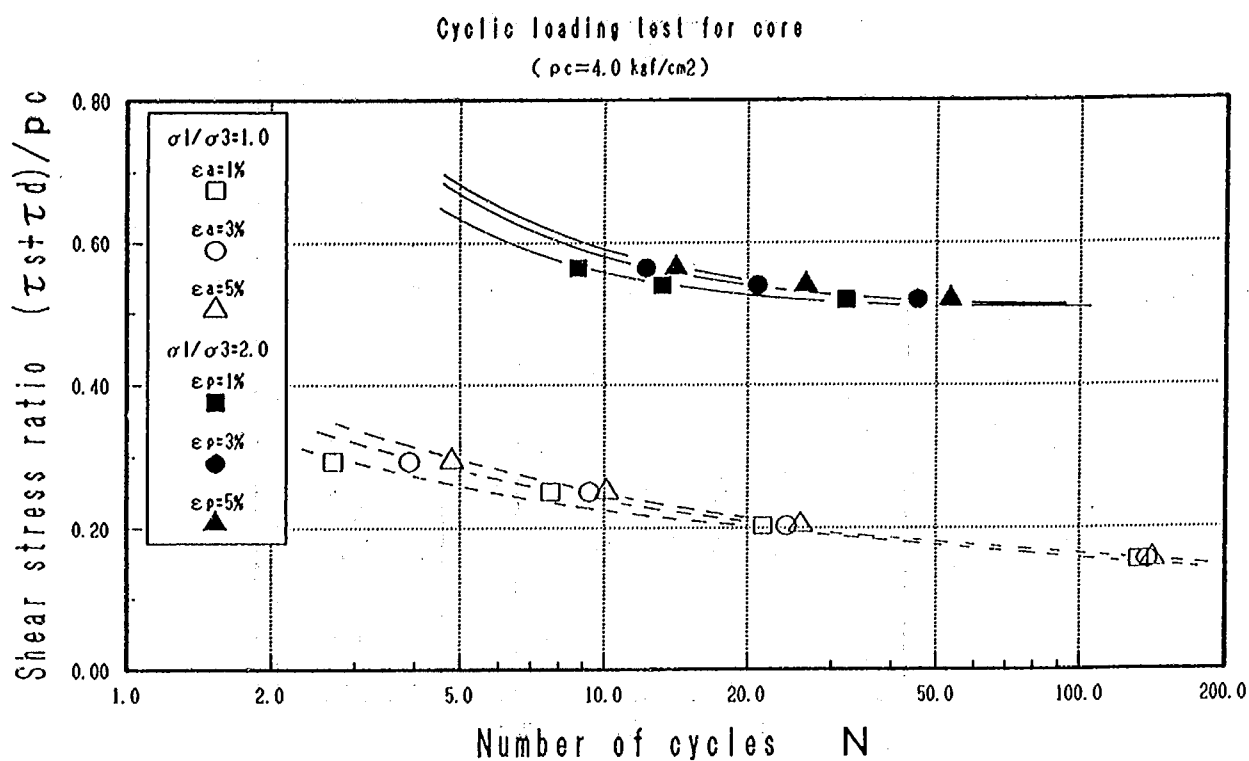


図-3. 27(g) せん断応力比と繰返し回数の関係, 主応力比の影響, $p_c = 4.0 \text{ kgf/cm}^2$
(非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

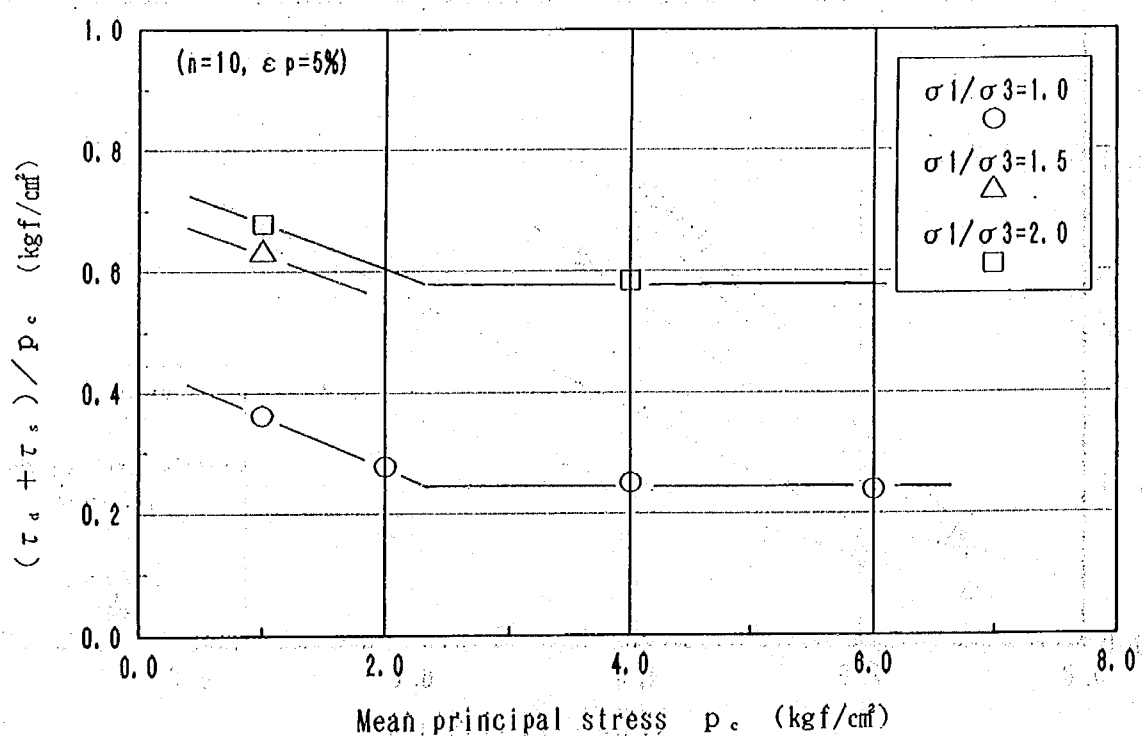


図-3. 28 せん断強度比と平均主応力の関係, 主応力比の影響
 $N=10$ 回, $\varepsilon_p = 5.0\%$, (非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

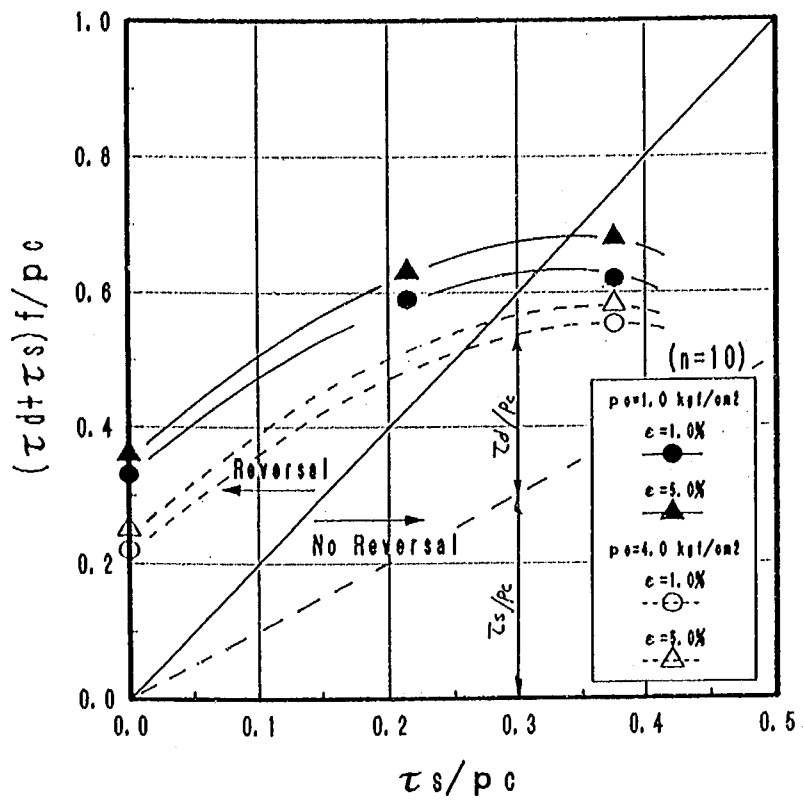


図-3.29 初期せん断応力比とせん断強度比の関係,
N=10回, (非排水繰返し載荷, ϕ 300mm)

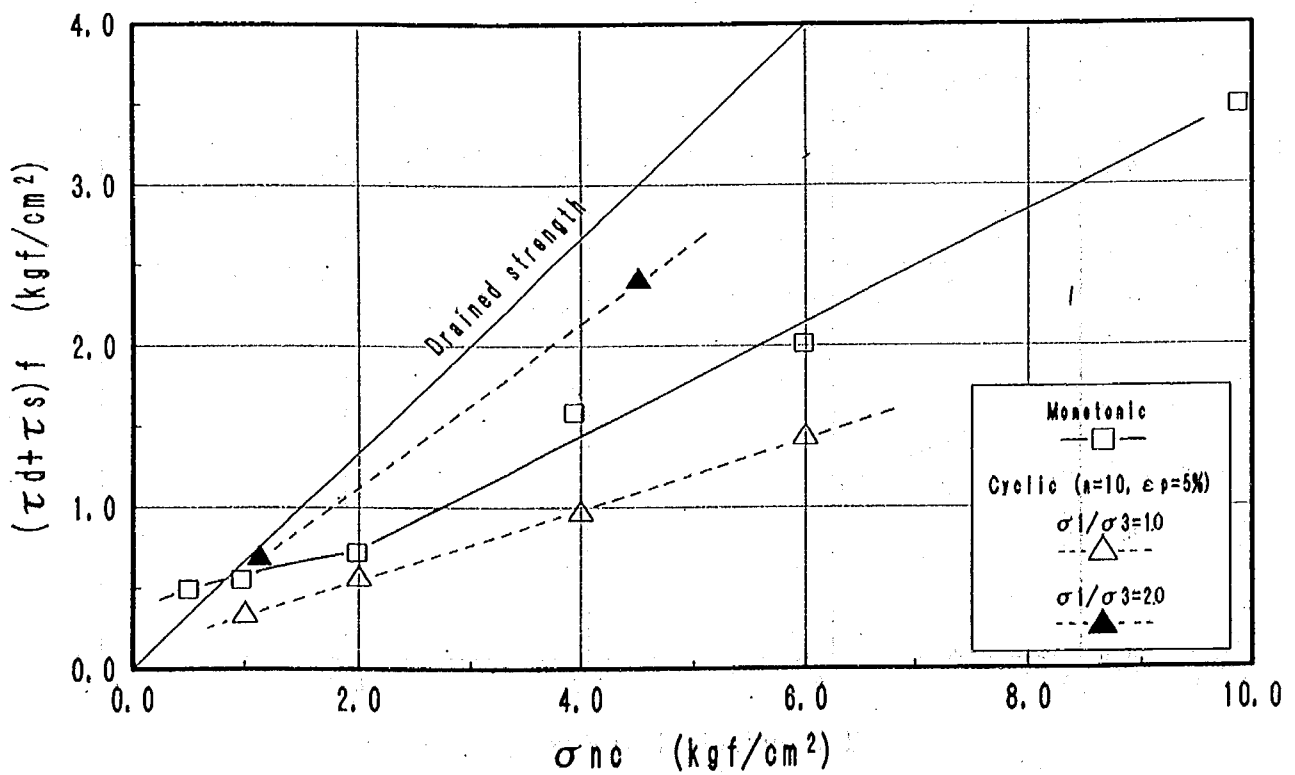


図-3.30 静的強度と動的強度の比較, 非排水単調載荷と非排水繰返し載荷
($\sigma_3/\sigma_3 = 1.0$ と 2.0)

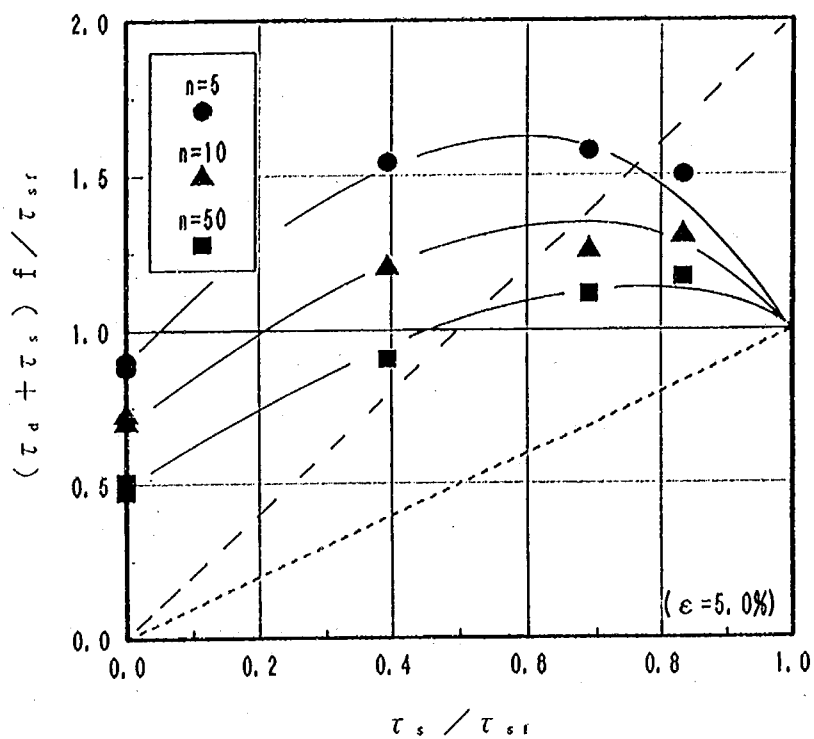


図-3.31 初期せん断応力比とせん断強度比の関係 (τ_{sr} で正規化), 繰返し回数の影響,
(非排水繰返し載荷, $\phi 300\text{mm}$)

4. 結

論

本報告では、ロックフィルダムを対象に考え、良く締固められた（最大乾燥密度の95%）コア材に対して単調載荷試験と繰返し載荷試験を行い、次の事項が明らかになった。

- 1) 非排水の単調載荷試験において応力～ひずみ関係、間隙水圧発生特性、強度特性は圧密圧力 $p_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ を境に異なっており、 $p_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 以下の応力範囲では過圧密的な挙動を示した。
- 2) 供試体作成時の締固めによって疑似先行圧密荷重が存在する。
- 3) 排水試験による ϕ_d は非排水試験による ϕ' を下回った。これは、せん断速度 $0.01\%/min$ では間隙水圧が十分に消散しきれなかったためである。
- 4) 単調載荷試験で異方圧密の非排水強度は等方圧密の非排水強度よりも大きく、圧密時の主応力比 $1.5 \sim 2.0$ においては約20%割増しである。
- 5) 非排水の単調載荷試験において、せん断速度が $1\%/min$ を越えると強度が急増する。
- 6) 繰返し載荷試験の結果、繰返し回数が増えると共にひずみと間隙水圧も増大する。特に、等方圧密の場合は間隙水圧が100%付近に達すると歪が急増しており、砂の液状化に近い挙動を示す。
- 7) 繰返し試験により発生する間隙水圧は、等方圧密では拘束圧に対してほぼ100%に近い値であるのに対して、異方圧密では100%には達せず、圧密時の主応力比 2.0 においては約80%である。
- 8) 繰返し回数が10回以上では、ひずみ 5.0% 以内に繰返しせん断応力比はほぼピークに達する。
- 9) 動的強度にも締固めによる疑似過圧密効果が見られ、 $p_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 以下で動的強度比は増加している。
- 10) せん断中、主応力の反転がある領域では、初期せん断応力の増大に伴い動的強度も大きくなるが、反転がない領域に入ると減少傾向に変わる。
- 11) 初期せん断応力が大きく、主応力の反転がなければ動的強度は静的強度を上回る。
- 12) 等方圧密の動的強度は静的非排水強度より小さくなるが、異方圧密（主応力比 2.0 ）での動的強度はそれを上回り、静的排水強度の約80%である。

あ と が き

今回、コア材の試験を本格的に実施することによって、種々の圧密条件あるいは繰返し载荷条件のもとでの、強度特性がある程度明確になった。

ただし、試験装置の機構上の制約や、時間の関係で、材料の物性や応力条件において限られた範囲での結果であることも確かであり、今後、試験装置の改良及び追加試験の実施により、せん断速度や初期せん断応力あるいは締固めエネルギーに着目した広い範囲での強度特性、特に静的強度と動的強度との関連性を明らかにしていく必要があると考えられる。

最後に、本試験を実施されてきた方々に対し、深い敬意を表すとともに、コア材料を御提供頂いた三国川ダム工事事務所の関係各位に敬意を表します。

参 考 文 献

- 1) 龍岡文夫ほか：各種せん断試験による砂の内部摩擦角，土と基礎，Vol. 35-12, 1987
- 2) N. Barton, B. Kjaernsli: Engineering and design stability of earth and rock-fill dam, Proc. ASCE, Jour. of GT, Vol. 107, 1981
- 3) 松本徳久ほか：粗粒材のせん断強度と動的変形特性，土木学会論文集，第424号，1990
- 4) 土質工学会：土質試験の方法と解説，p430
- 5) L. Finn, J. Emery, P. Gupta: A Shaking Table Study of the Liquefaction of Saturated Sands during Earthquakes, Proc. Third European Symposium on Earthquake Engineering, 1970
- 6) B. Seed, H. Peacock: Test Procedures for Measuring Soil Liquefaction Characteristics, Proc. ASCE, Jour. of SM, Vol. 97, 1971
- 7) G. Castro: Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands, Proc. ASCE, Jour. of SM, Vol. 97, 1971
- 8) K. Ishihara, I. Li: Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test, S&F, Vol. 12, No. 3
- 9) 松本，安田，境野：大型繰返し三軸試験機を用いた粗粒材料の動的物性試験，土木研究所資料 2146号
- 10) 太田秀樹ほか：締固めた土の力学特性について(その1)，第22回土質工学会研究発表会，1988
- 11) 成田国朝ほか：締固め土の先行応力と強度特性について，第19回土質工学会研究発表会，1985
- 12) 明石勝ほか：飽和粘土の載荷速度効果とカムクレイモデル，第22回土質工学会研究発表会，1988
- 13) 永津忠治ほか：ひずみ速度を変化させた有明粘土の三軸圧縮試験結果，第22回土質工学会研究発表会，1988
- 14) 川上，阿部：飽和れき混り粘土のせん断特性，土木学会論文報告集 第183号，1970
- 15) T. W. Lambe, R. V. Whitman: Soil Mechanics, 1969, p447-448
- 16) DEPARTMENT OF THE ARMY: Engineering and Design Stability of Earth and Rock-fill Dams, 1970, Appendix VIII-20
- 17) 三田地利之：粘性土の三軸圧縮試験における応力履歴の影響について，第20回土質工学シンポジウム，1975
- 18) 土質工学会：土質試験法—第二回改訂版—，p521, 522
- 19) 松尾，唐沢，古賀：粘土の動的強度特性に関する繰返し三軸試験，土木研究所資料第2160号，1985
- 20) Banerjee, Seed, Chan: Cyclic behavior of dense coarse-grained materials in relation to the seismic stability of dam
- 21) 松本徳久ほか：ロック材の単調載荷試験と繰返し載荷試験，土木研究所資料第2996号，1991
- 22) 兵動正幸ほか：初期せん断を受ける飽和砂の動的強度について，第24回土質工学会研究発表会，

1979

- 24) 石原研而：土の動的強度，土と基礎20-7（1972），p73
- 25) H. B. Seed: Design problems in liquefaction. Jour. of GT. Vol. 113. 1987
- 26) 山下，土岐，三浦：過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液化強度，第25回土質工学会研究発表会，

1990

- 27) 平尾，安原：異方圧密粘土の動的強度，第45回土木学会年次学術講演会講演概要集，1990
- 28) H. B. Seed, C. K. Chan: Clay strength under earthquake loading condition. Jour. of SM. Vol. 92.

1966

- 29) 石原研而ら：多摩ニュータウンに分布する稲城砂および粘性土の動的性質，第13回土質工学会研究発表会，1978
- 30) 松尾，唐沢，古賀：種々の粘性土の動的強度特性とその考察，第22回土質工学会研究発表会，

1987

- 31) 安田，山口，曾我：中空三軸ねじりせん断装置による粘土の動的強度実験，第35回土木学会年次学術講演会講演概要集，1980

コア材料の単調載荷試験と
繰返し載荷試験

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3006号
平成3月3月(1991)

松本徳久・安田成夫・大久保雅彦
芳岡良一

要 旨

本報告はフィルダムの地震時安定を評価する際に必要となるコア材の強度特性を調べる目的で、単調載荷試験と繰返し載荷試験を実施した結果をとりまとめたもので、以下の点について考察した。

- ① 室内試験における載荷様式と結果の整理方法
- ② コア材の静的・動的強度に及ぼす諸要因の影響
- ③ 静的強度と動的強度の関連性

キーワード：コア材、繰返し載荷、単調載荷、せん断強度、三軸試験、締固め

郵便はがき

305-□□

41円切手
をはって
下さい。

建設省土木研究所
フィルダム研究室

茨城県つくば市大字旭一番地

No. 3

No. 3

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3006号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

印