

ISSN 0386—5878

土木研究所資料第2996号

3

土木研究所資料

ロック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。」

MONOTONIC AND CYCLIC LOADING TESTS OF ROCKFILL MATERIALS

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

Synopsis

Monotonic and cyclic loading tests were carried out as followings in order to investigate the strength characteristics of rockfill materials which are 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; Rockfill materials, monotonic loading, cyclic loading, shear strength, triaxial test

*Shinz Corporation (Formerly visiting researcher from September, 1989 to March, 1991)

ロック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ロック材料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あり、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 ロック材料の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：ロック材料・繰返し載荷・単調載荷・せん断強度・三軸試験

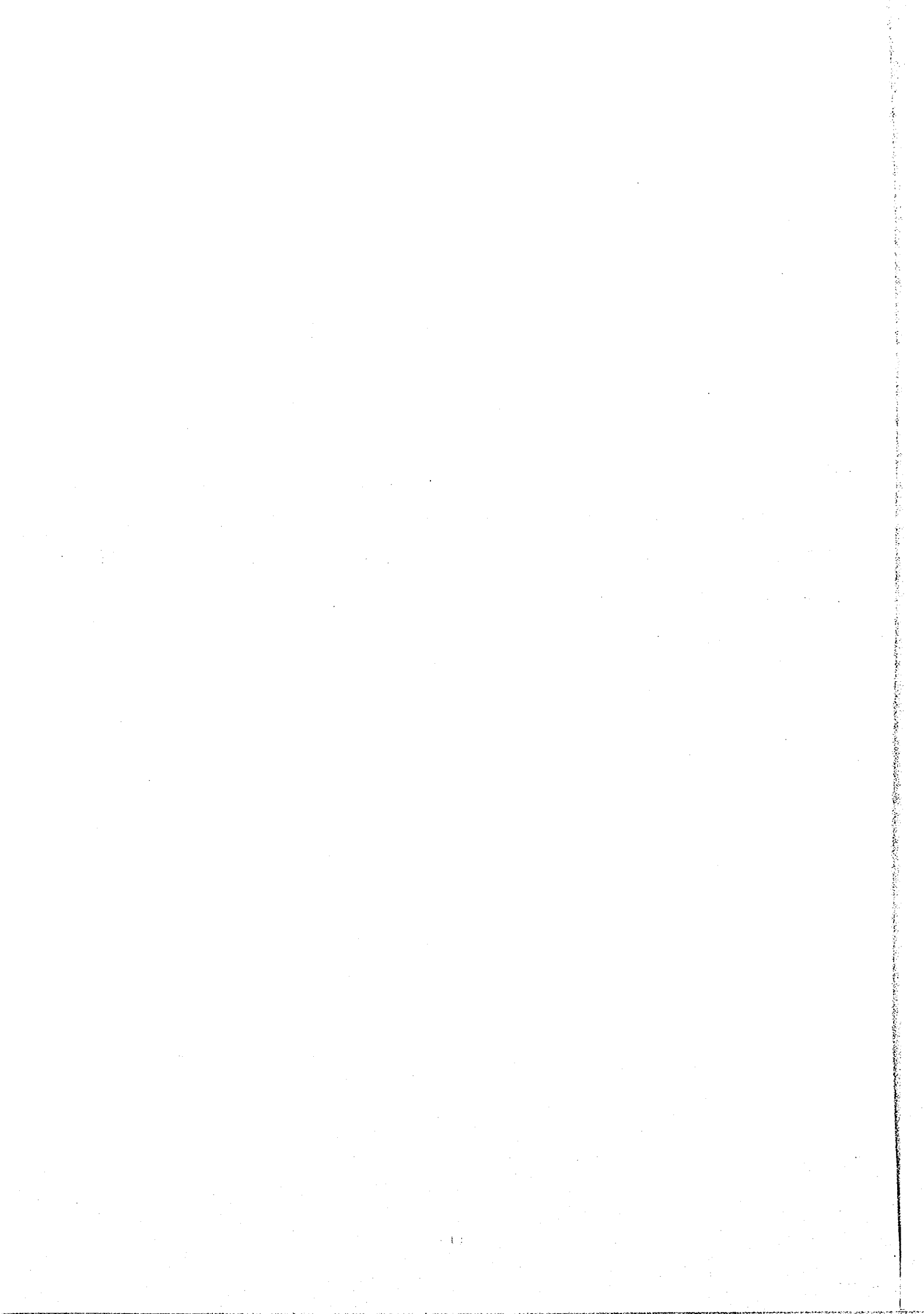
*) 現清水建設(株)〔平成元年9月～平成3年3月の間(財)土木研究センターからの部外研究員として在籍〕

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きているが、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粗粒材料については、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、フィルダム堤体材料の室内試験によるせん断強度の求め方について整理したうえで、フィルダムロック材料を用いた単調載荷試験と繰返し載荷試験結果を示し、粗粒材料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 ($45^\circ + \phi/2$) 上での破壊時の垂直応力 (Normal stress on failure plane at failure)
- 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_{nf} : 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) $= (1 - \epsilon_v / \epsilon_n) / 2$
- 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) $= (1 + \nu) \epsilon_n$
(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_{nf} あるいは ϵ_{pf} に達するせん断応力) (Shear stress at ϵ_{nf} 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	(iii)
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 供試体の作成	20
2.4 試験条件	21
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
既 往 の 研 究	93

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。

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

$$\text{ただし } t = 0 \text{ から } t = \frac{N}{f} \text{ まで}$$

このとき要素abcdに生ずる永久ひずみ γ_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、

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

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。

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

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、

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_s + \tau_b(t) \\ \text{ここに} \\ \tau_b(t) &= \Delta \tau \cdot t \\ \Delta \tau &: \text{せん断応力の速度} \\ t &: \text{時間} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1.13)$$

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。

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

このとき45° 面では

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

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。

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

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 σ_m , σ_n , σ_r をそれぞれ σ_{mf} , σ_{af} , σ_{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。

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

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_r の間には一義的な関係がある。実務上は、 e_r 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_{nf} 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。龍岡ら¹⁾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 の減少は粒子破砕と関係しており、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、

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

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} は初期間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、

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

ここで、圧密時の主応力比を k_c とすると、

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

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。

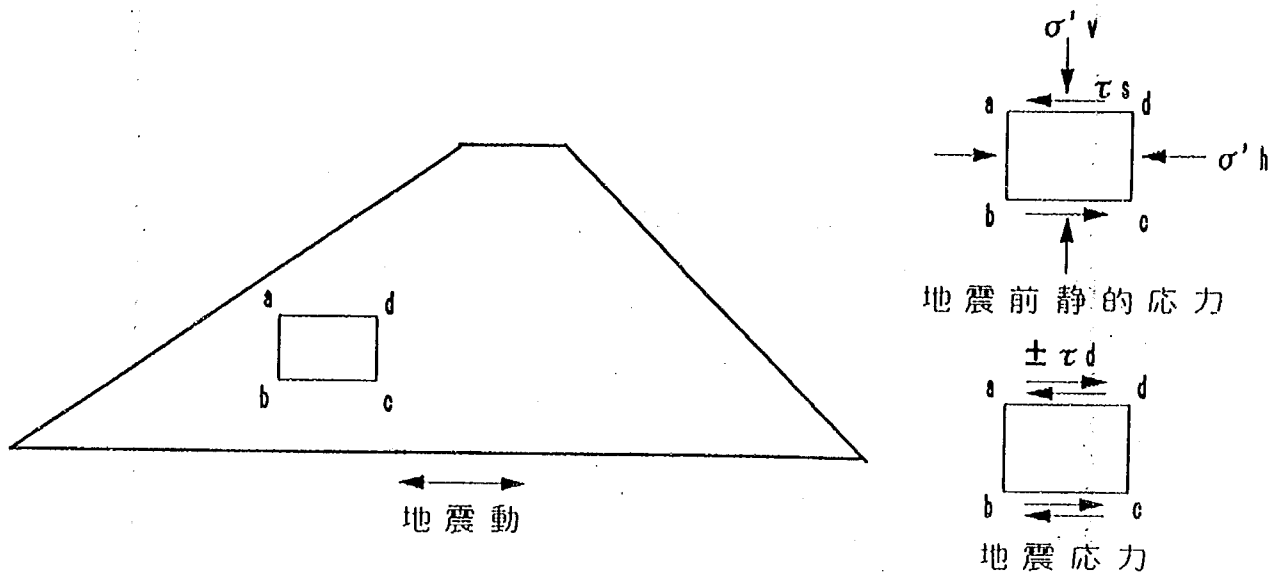


図-1.1 堤体中の要素と作用応力

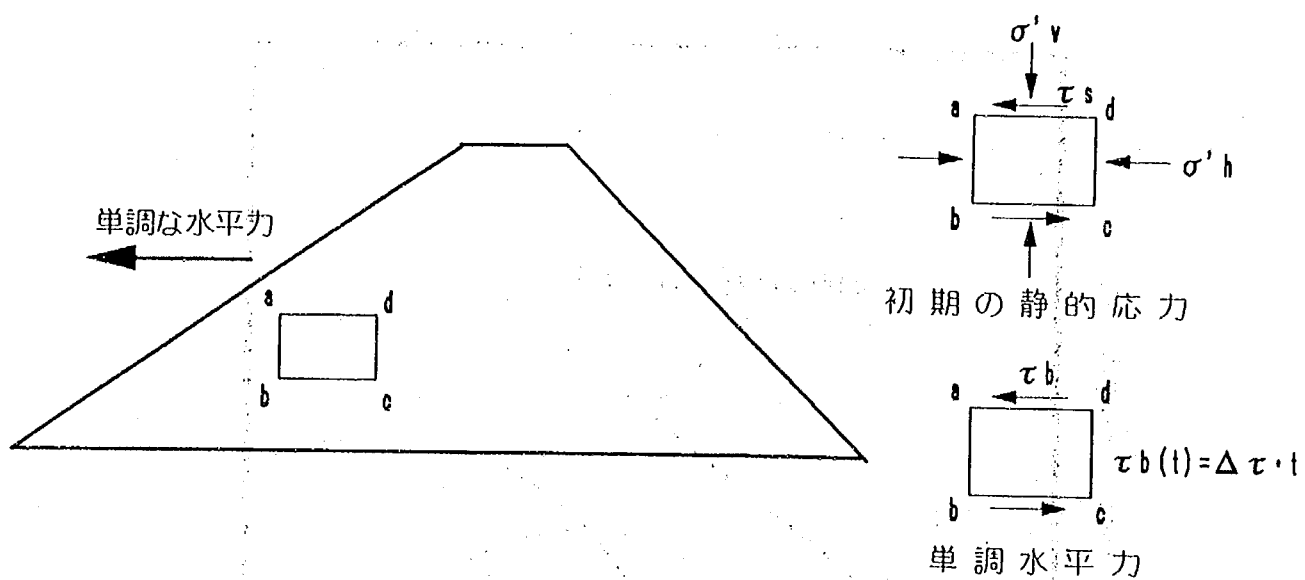


図-1.2 堤体中の要素と作用応力

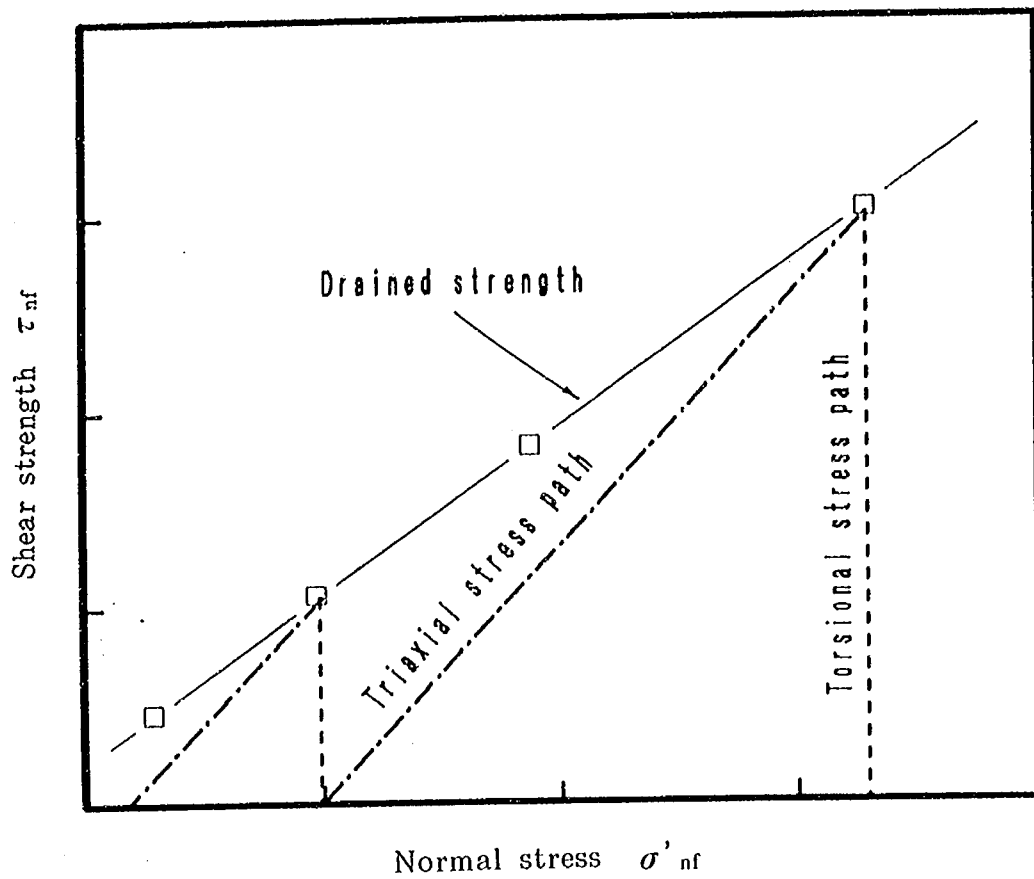


図-1.3 排水試験における破壊時応力

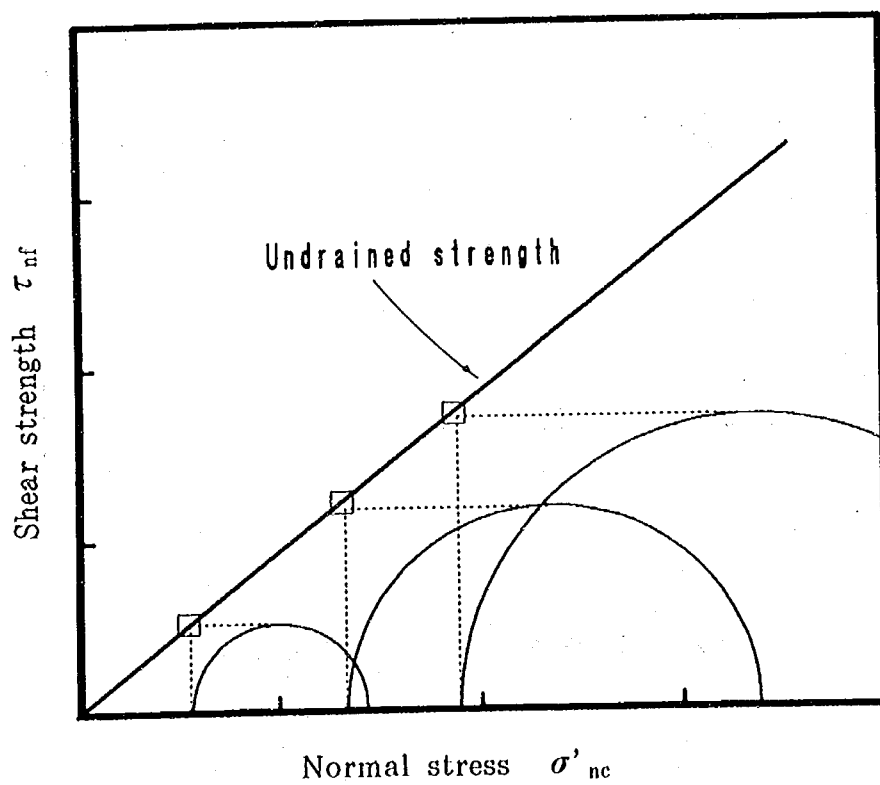


図-1.4 非排水試験における破壊時応力

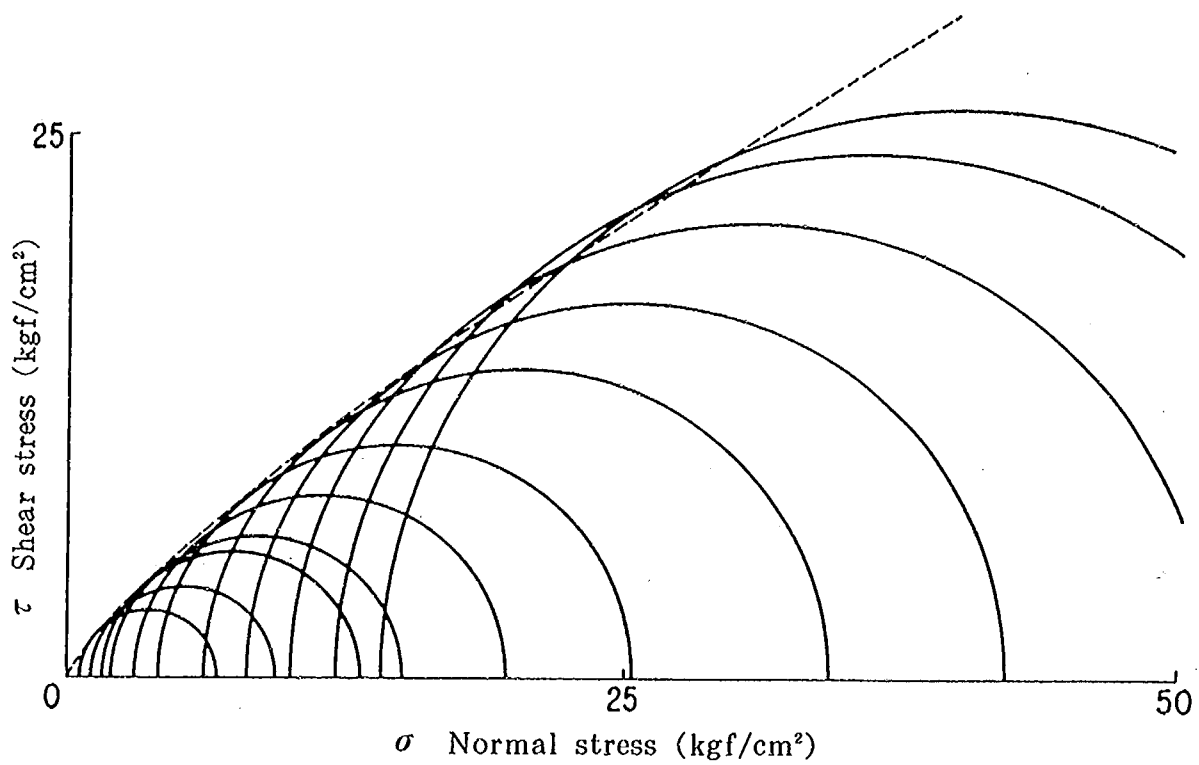


図-1.5 ロック材料の排水三軸試験結果

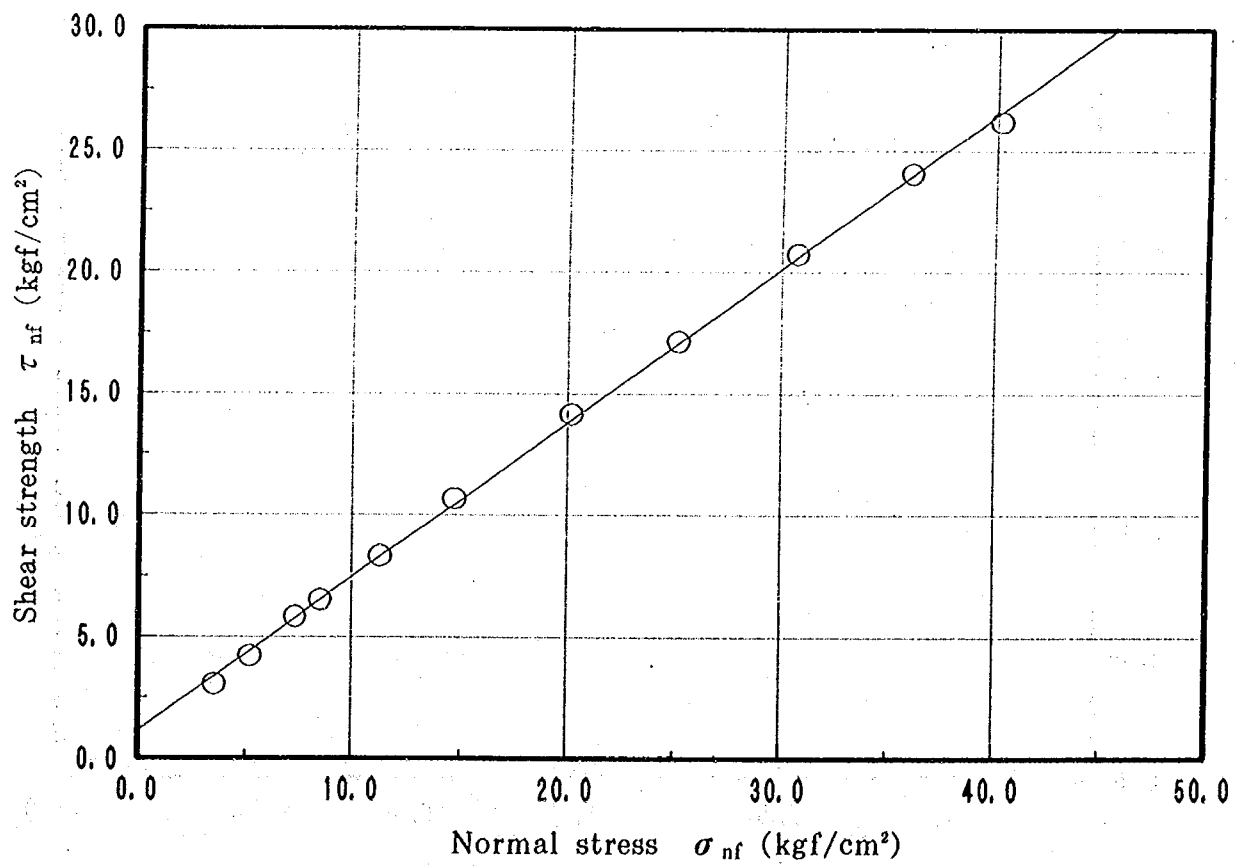


図-1.6 ロック材料の $\tau_{nf} \sim \sigma_{nf}$ 関係 (排水試験)

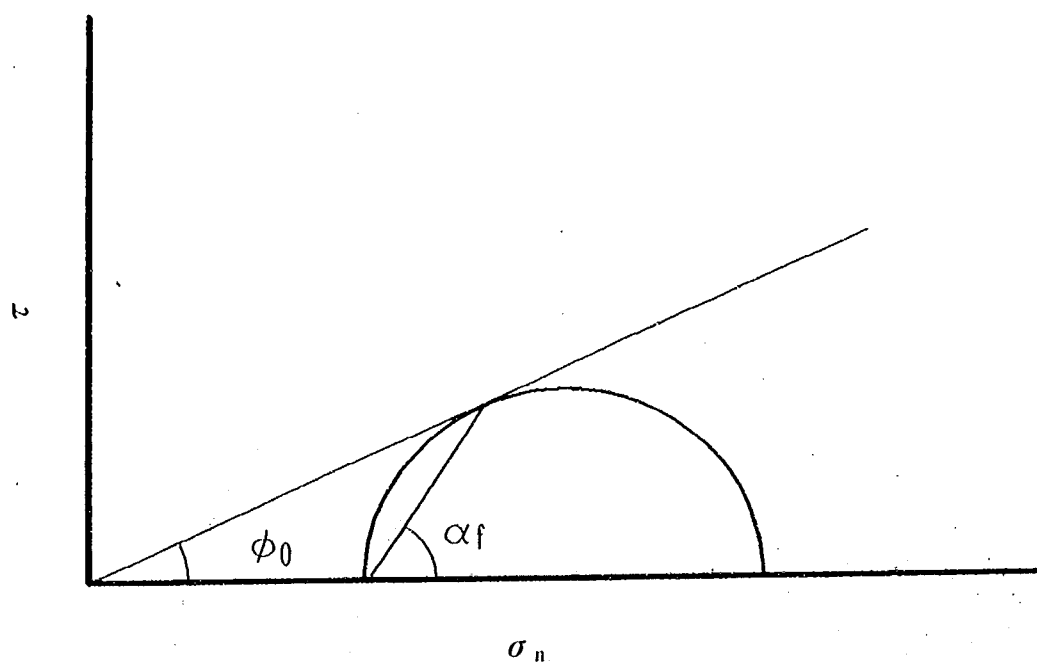


図-1.7 ϕ_0 , α_f の定義

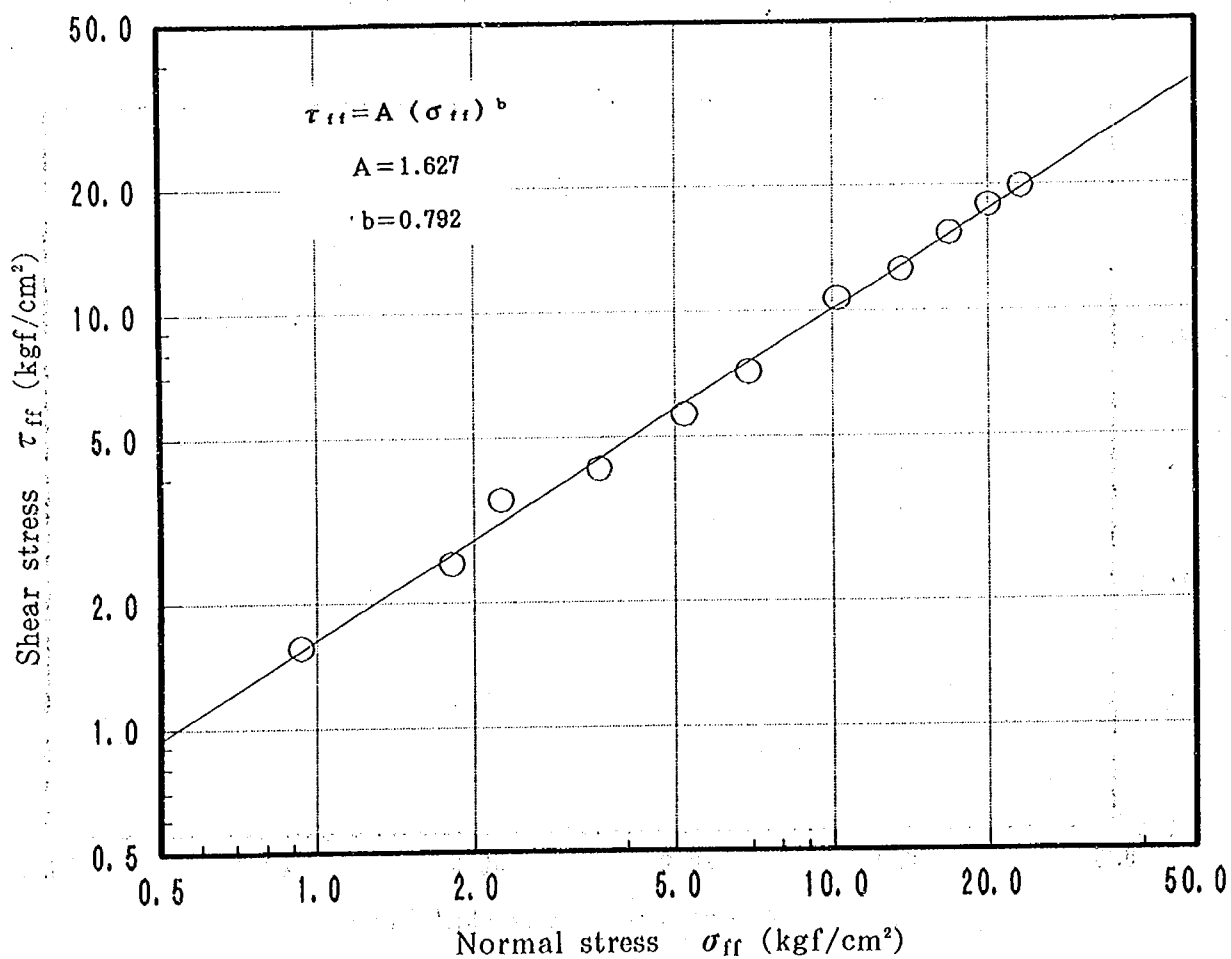


図-1.8 ロック材料の $\tau_{ff} \sim \sigma_{ff}$ 関係 (排水試験)

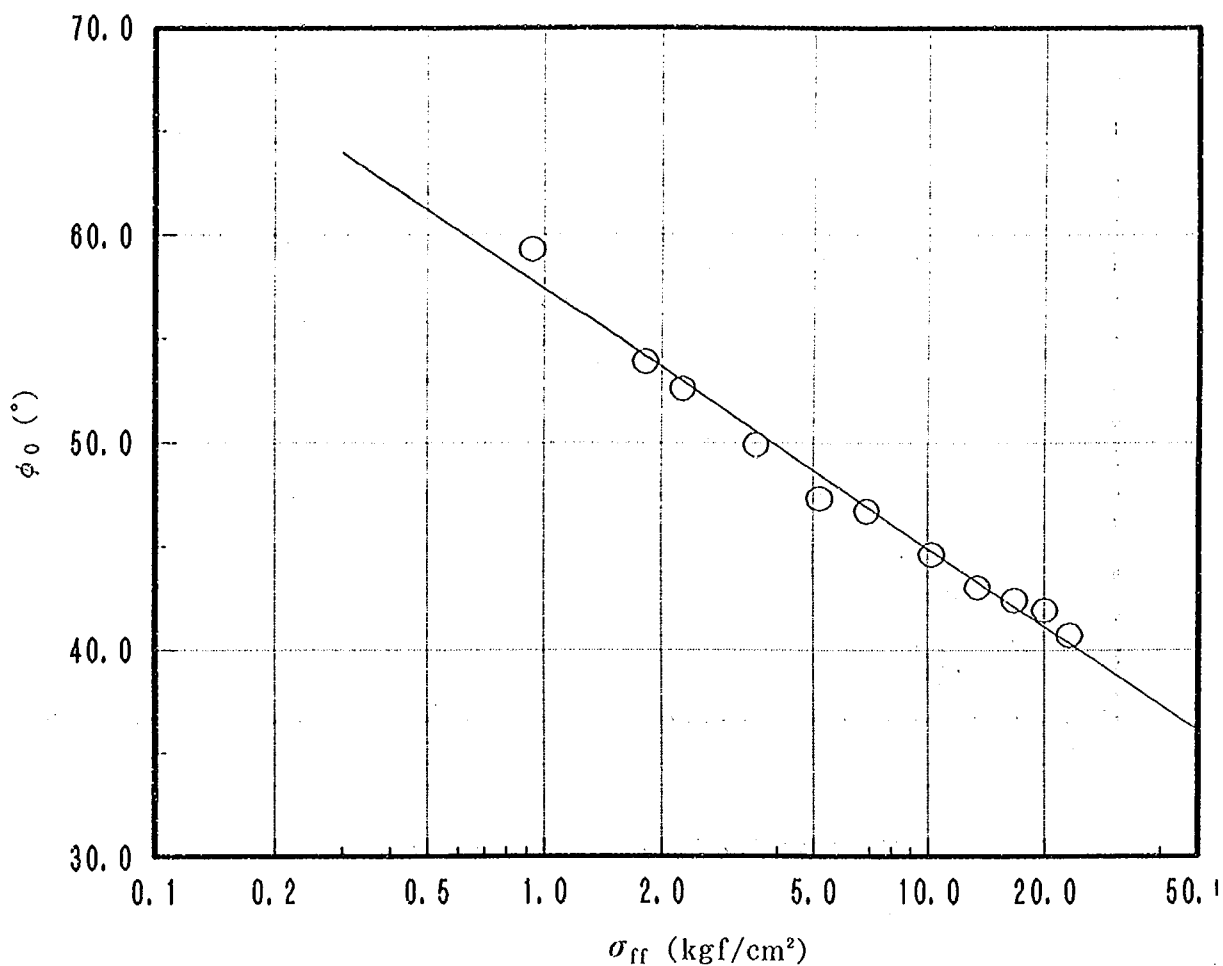


図-1.9 ロック材料の $\phi_0 \sim \sigma_{3r}$ 関係 (排水試験)

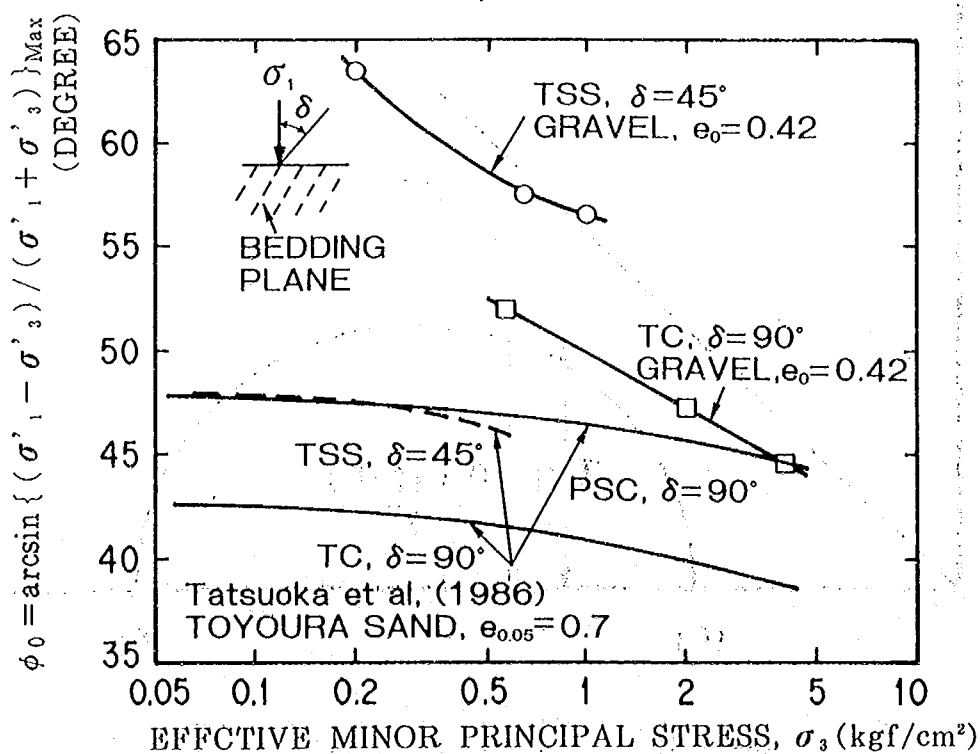


図-1.10 三軸試験とねじり試験による ϕ_0 の比較

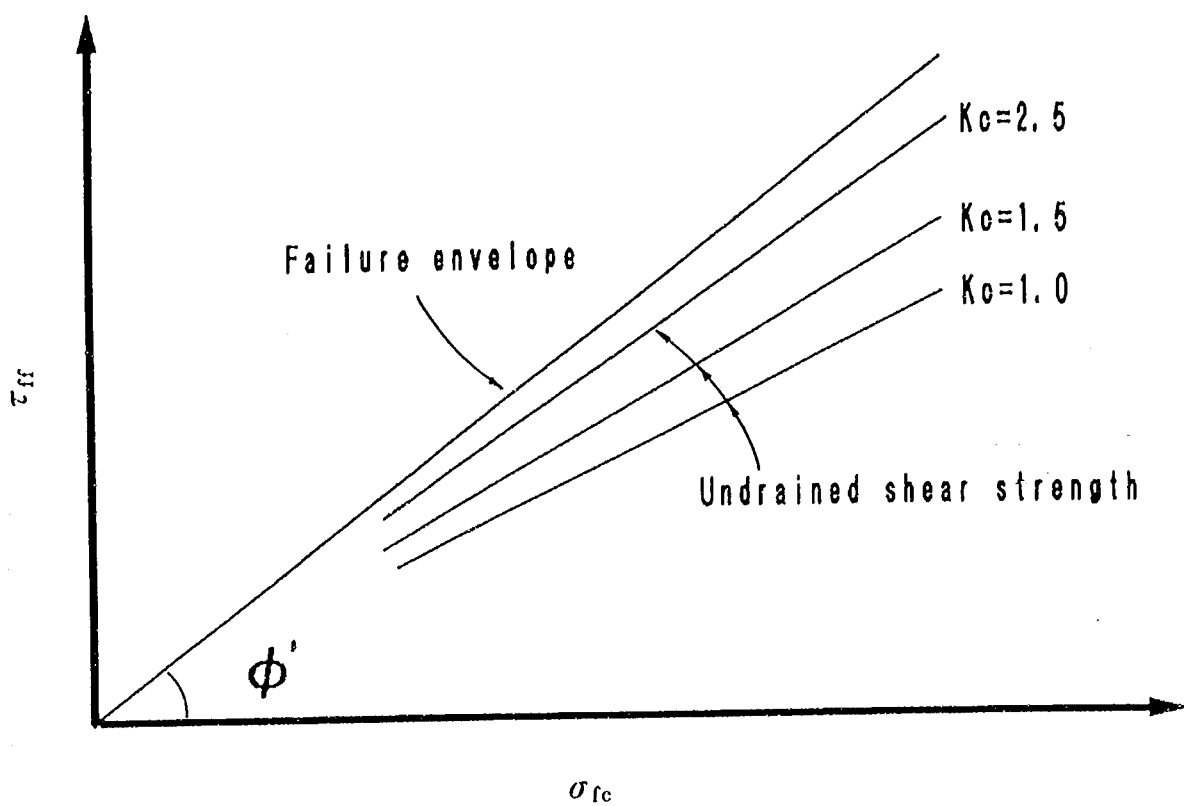


図-1.11 異方圧密時の非排水せん断強度

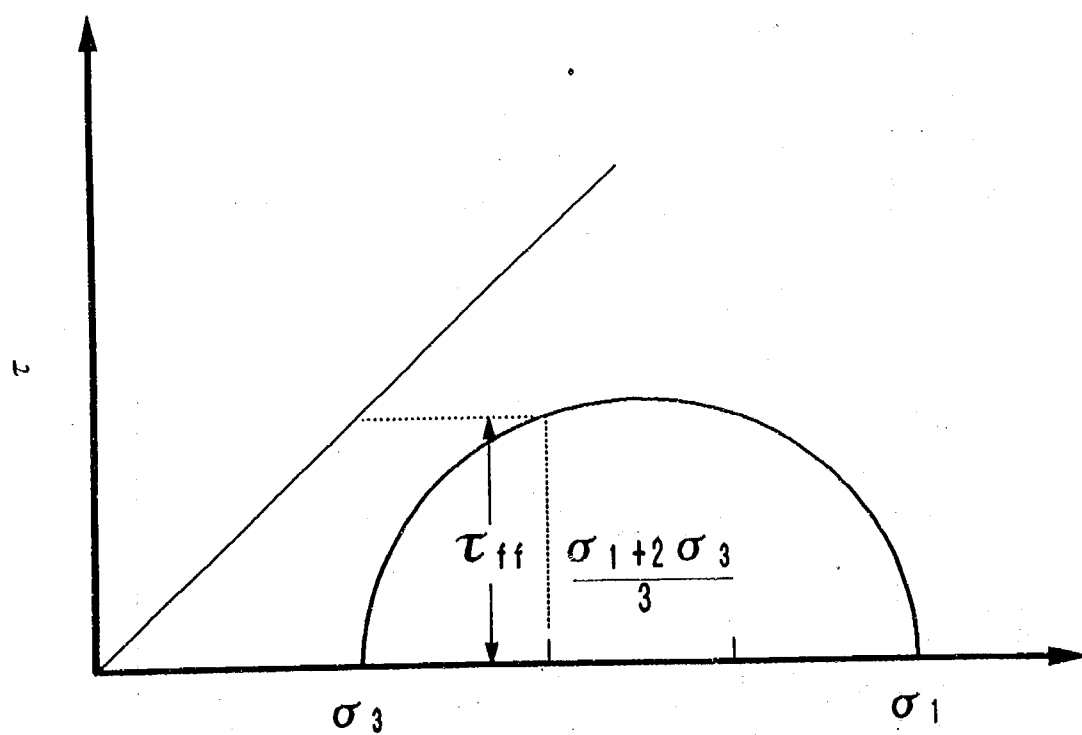


図-1.12 三等分法による τ_{ff} の推定

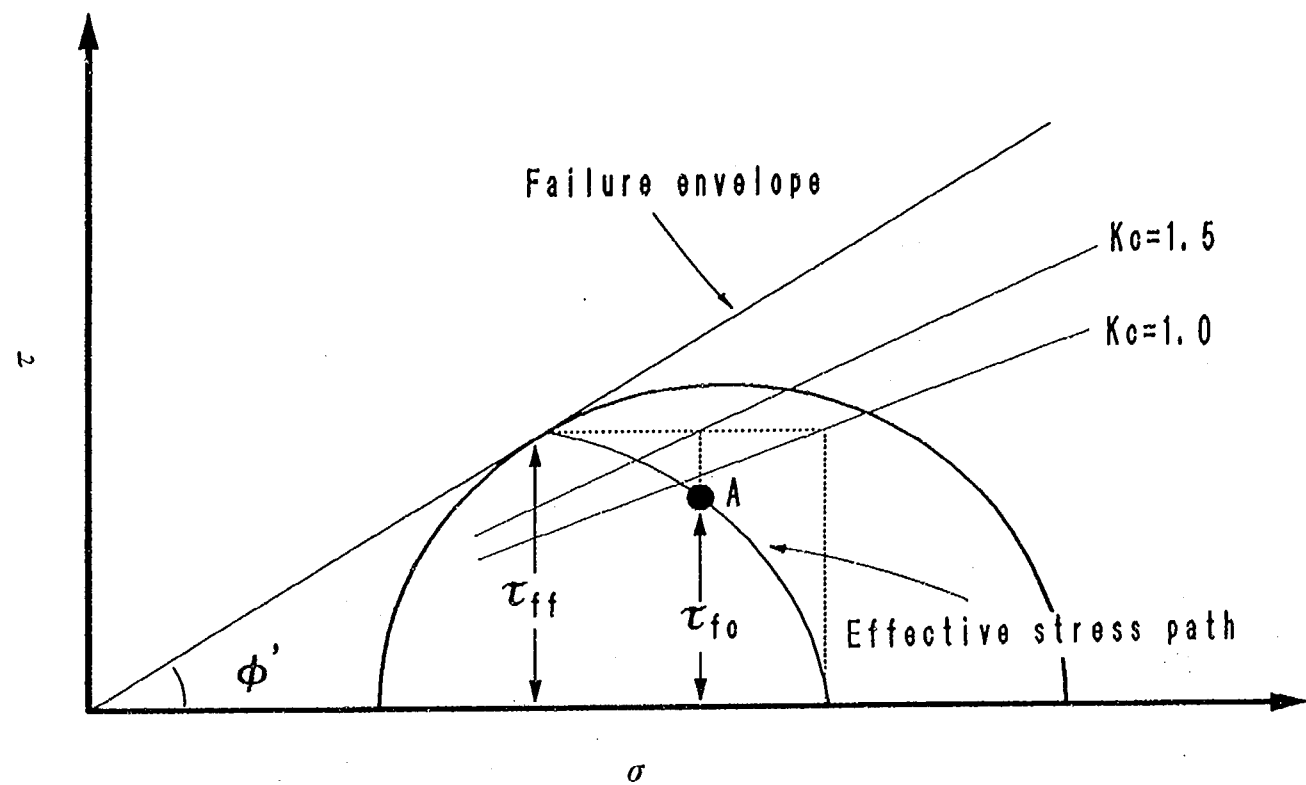


図-1.13 異方圧密時の非排水せん断強度の推定

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

本試験に用いた三軸試験装置は、単調載荷試験は供試体径40cm、高さ80cmの大型多目的せん断試験機⁹⁾で、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¹⁰⁾である。また、先の大型多目的せん断試験機で外径80cm、内径40cm、高さ80cmの中空ねじり繰返しせん断試験を行っている。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ロック材で、非常に堅硬かつ良質な斑れい岩である。

設定粒度は図-2.2に示す通りで、最大粒径63.5mm、均等係数30とした。一般にフィルダムで使用されているロック材に比べると均等係数が大きくなっているが、これは繰返し非排水試験におけるメンブレンコンプライアンスの影響を出来るだけ小さくするためである。

同図にはBanerjee et al.¹¹⁾がOrovilleダムの堤体材料を用いて非排水の繰返し試験を実施した時の粒度分布曲線も示しており、最大粒径は50.8mmではあるが、今回の試験材料とほぼ同じ粒度分布である。彼らによれば、非排水の繰返し三軸試験に伴うメンブレンペネトレーションの補正としては、 $D_{50}=9.5\text{mm}$ の材料の場合、メンブレン貫入に伴うメンブレンコンプライアンス比 C_{RM} (有効拘束圧除荷時の供試体骨格の膨張量 ϵ_v に対するメンブレン貫入量の変化 ϵ_{vm} の比 ϵ_{vm}/ϵ_v) は0.18~0.30であり、100%の間隙水圧に達するときのせん断応力比の補正は一律10%としている。

Martin et al.¹²⁾は、 C_{RM} を用いると間隙水圧の変化量がメンブレンペネトレーションが無い場合に比べ、一義的に $1/(1+C_{RM})$ 倍になることを示しており、さらに中村ら¹³⁾は異なる種類の砂や相対密度、平均粒径の試料で行われた実験結果、並びに解析結果に対して図-2.3の関係が成り立つと報告している。

本試験結果でせん断応力比を一律10%低減した場合と、 $C_{RM}=0.24$ として図-2.3の関係から繰返し回数を補正した場合を比較すると両者はほぼ一致している(図-2.4)。したがって、本報告においてもメンブレンペネトレーションの補正としては、せん断応力比の一律10%の低減が適当であると考えた。

材料の物性値は表-2.2に、締固め試験結果は図-2.5に示す通りで、合成絶乾比重および最大、最小間隙比としては以下の値を採用した。

合成絶乾比重 $G_b=2.930$

最大間隙比 $e_{\max}=0.596$

最小間隙比 $e_{\min}=0.142$

また、破碎率は300秒締固めた場合でも5%程度となっており、せん断試験中に強度に及ぼす粒子

破碎の影響は小さい材料であると考えられる¹⁴⁾。

2.3 供試体の作製

三軸試験の供試体作製手順を以下に示す。

- ① 下式により粒径別の所要気乾重量 (W_i') を計算する。

$$\text{試験密度} \quad : \rho_d = \frac{\rho_{dmin}}{1 - D_r \left(1 - \frac{\rho_{dmin}}{\rho_{dmax}} \right)}$$

$$\text{絶乾重量} \quad : W_s = \rho_d \cdot V$$

$$\text{粒径別所要気乾重量} \quad : W_i' = \left(1 + \frac{W_i}{100} \right) \cdot f_i \cdot W_s$$

ここで ρ_{dmin} , ρ_{dmax} : 最小・最大密度

D_r : 相対密度 (85%, 95%)

V : 供試体体積

W_i : 各粒度階における含水比

f_i : 各粒度階における残留率

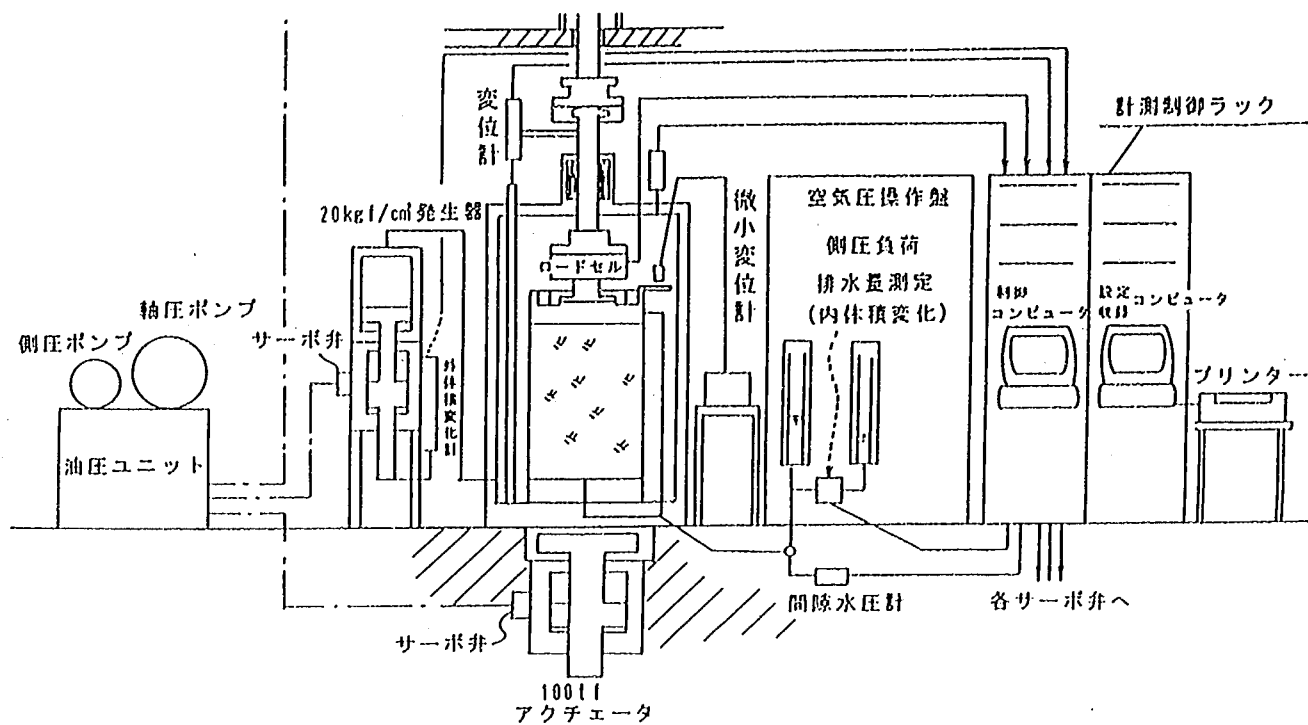
- ② 粒径別の所要気乾重量 (W_i') を6等分して1層当りの必要量を求め、計量する。
- ③ 下部加圧板にゴムスリーブ (厚さ2mm) を取付けた後、モールドをセットし、真空吸引によってゴムスリーブをモールドに密着させる。
- ④ ②で準備した試料層分を良く混合し、16等分してハンドスコップで静かにモールド内に投入する。投入は、良く分散するよう慎重に行う。
- ⑤ 試料の表面に厚さ9~12mm, 直径29cmの円平板 (鉄板) を載せ、その上面を振動ランマにて締固める。
- ⑥ 各層の締固め後に供試体の高さを測定し、次層とのなじみを良くするため締固め表面をかき乱す。
- ⑦ 最終層 (6層) の高さを測定した後、供試体を三軸室底盤にセットする。
- ⑧ 上部加圧板をセットし、供試体下部より負圧 (0.3kgf/cm²) を与えた後、モールドを解体する。
- ⑨ 供試体の直径を π テープを用いて6点測定し、ゴムスリーブの寸法を考慮して供試体直径を算出する。
- ⑩ ゴムスリーブ表面のくぼみにベントナイトを埋めて、表面をなめらかにする。 (図-2.6)
- ⑪ ゴムスリーブ拡大器を用いて、ゴムスリーブ (厚さ2.0mm) をもう一枚装着する。
- ⑫ 供試体を圧力室にセットし、室内を水で満たす。側圧計は、水位が供試体中央に達した時をゼロとする。
- ⑬ 側圧を0.3kgf/cm²に段階的に上げながら、供試体内の負圧を解除する。尚、供試体の飽和は炭酸ガスを約6時間供給し、その後、脱気水を12時間通水して、B値0.95以上を確保した。

2.4 試 験 条 件

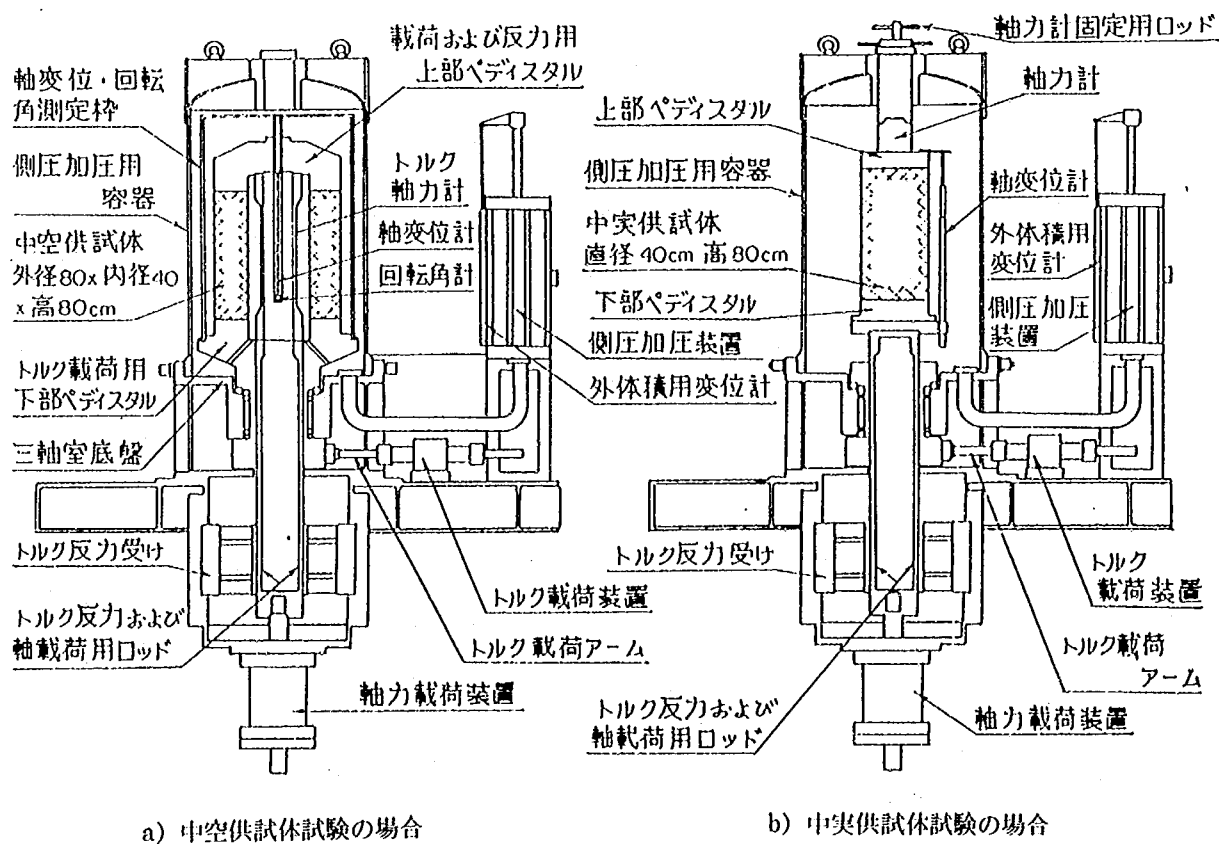
単調載荷試験の試験条件を表-2.3に、繰返し載荷試験の試験条件を表-2.4に示す。

圧密は、所定の側圧まで $1.0\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ の速度で上げ、排水量（気乾試料は外体積変化量）が供試体体積の0.01%以下になり、かつ圧密時間が20分を経過した時、圧密終了とした。また、異方圧密の場合は、側圧 1.0kgf/cm^2 ごとに軸圧不足分を加えた。圧密、せん断を通して非排水試験における背圧（B.P.；バックプレッシャー）は、 2.0kgf/cm^2 とした。

繰返し試験は、各試験条件について繰返しせん断応力比を変えて4ないし3試験実施している。また、試験装置の制限により、両振幅ひずみ10%または繰返し回数100をもって試験の終了条件とした。



大型繰返し三軸試験装置



大型多目的せん断試験装置

図-2.1 試験装置概略

ロック材試験粒度分布

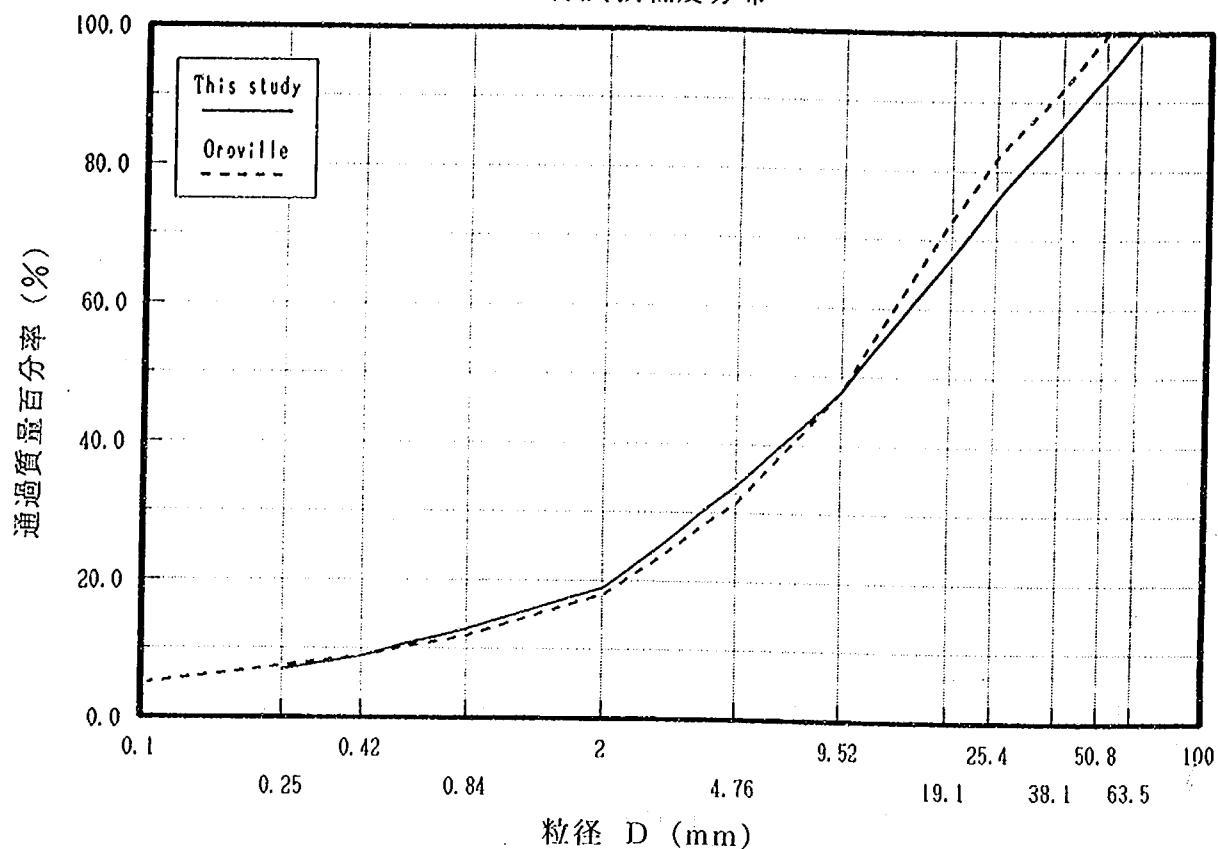


図-2.2 試験材料の粒度分布

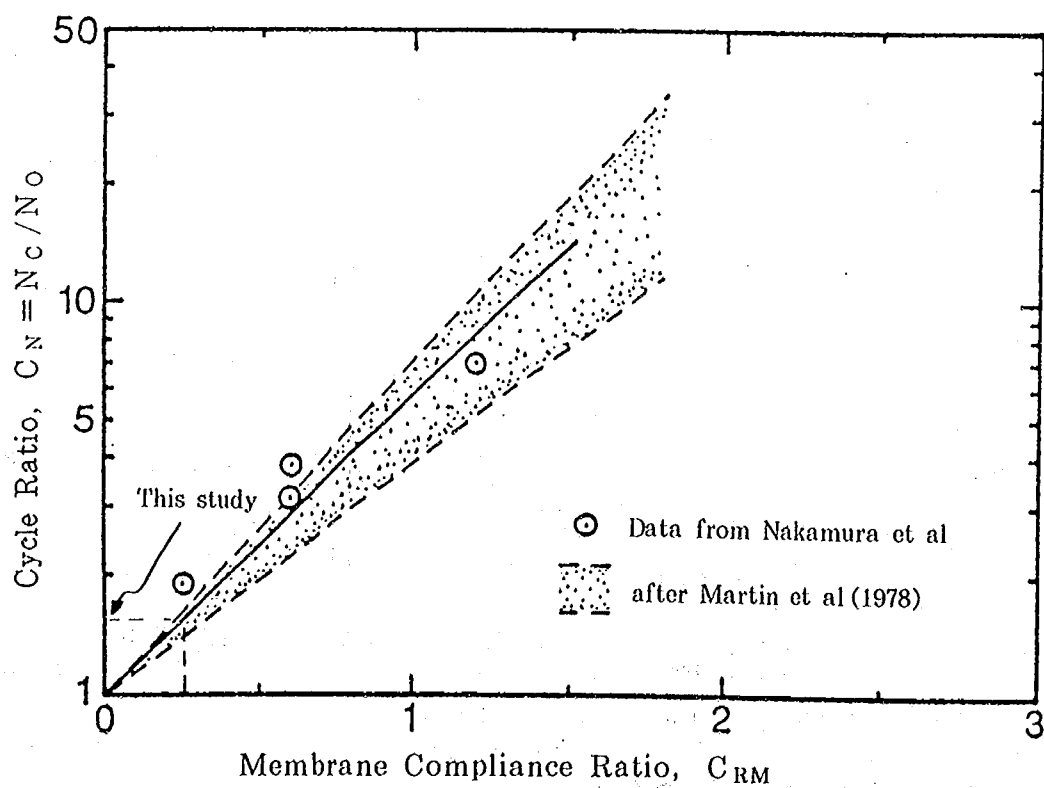


図-2.3 C_N と C_{RM} の関係¹³⁾

Cyclic loading test for rock

(Dr=85%, pc=2.0kgf/cm²)

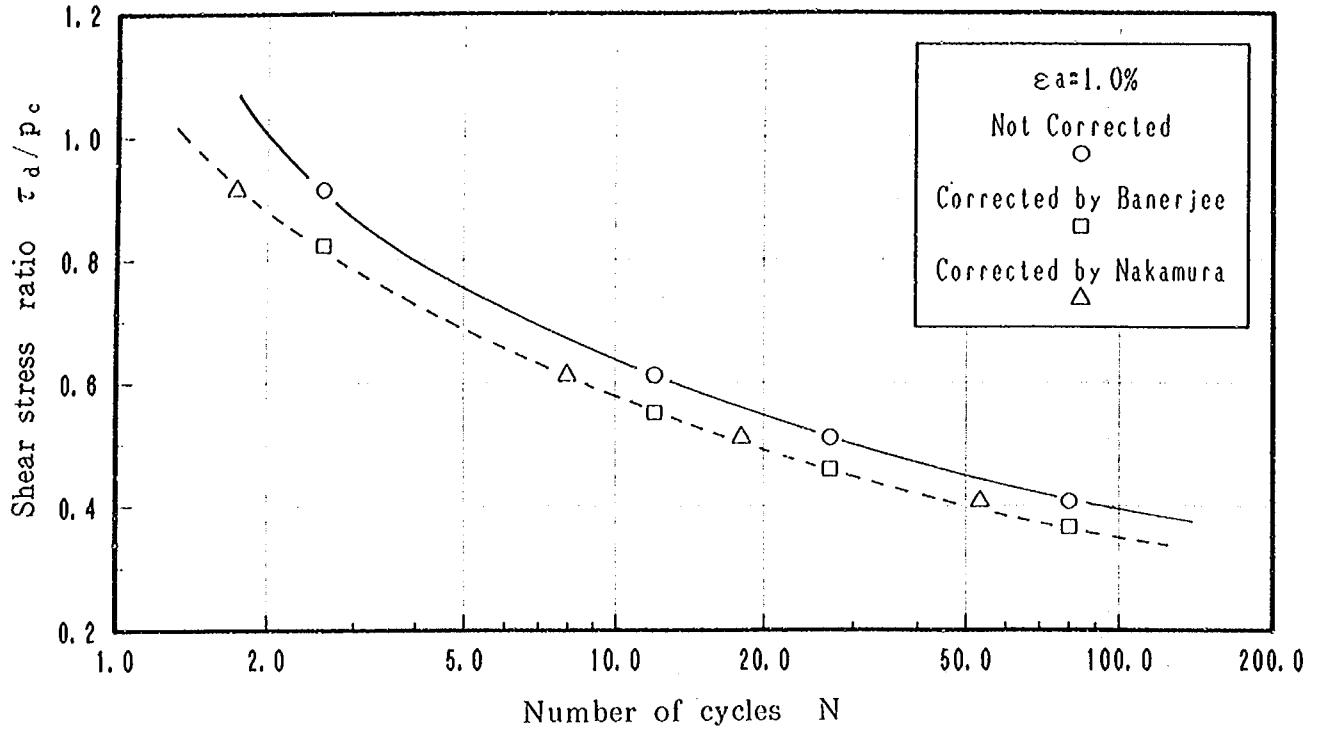


図-2.4 せん断応力比と繰返し回数
(相対密度85%, 平均主応力2.0 kgf/cm²)

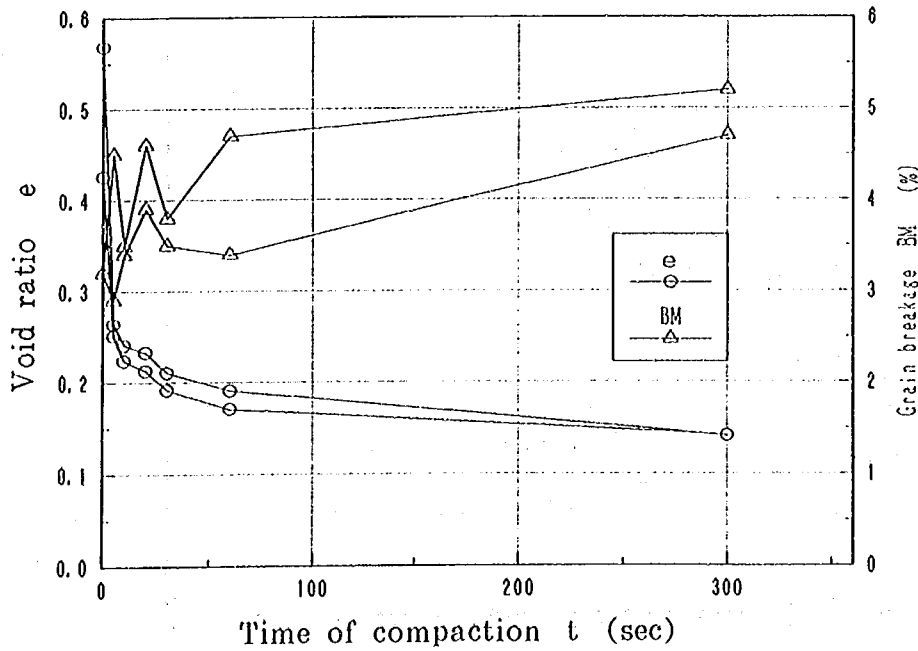


図-2.5 締固め試験結果

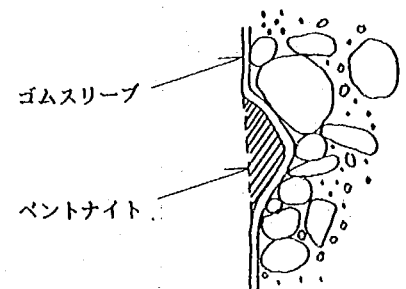


図-2.6 メンブレン表面の平滑化

表-2.1 試験機の主要諸元

	大型繰返し三軸 試験装置	大型多目的せん断試験装置	
		中実三軸試験	中空ねじり試験
供試体寸法 (cm)	φ 30, H60	φ 40, H80	φ ₁ 40 φ ₂ 80, H80
軸圧荷荷方式	油圧サーボ方式 上方荷荷 最大 ± 20tf	油圧サーボ方式 下方荷荷 最大 80tf	油圧サーボ方式 下方荷荷 最大 30tf
側圧荷荷方式	空圧荷荷 最大 10kgf/cm ²	空圧荷荷 最大 7kgf/cm ²	
トルク荷荷方式	—————	—————	油圧サーボ方式 最大 2tf・■
軸荷重の測定	ひずみゲージ型ロードセル		
トルクの測定	—————	—————	ひずみゲージ型 トルク計
軸ひずみの測定	差動トランス型ひずみ計		
ねじり変位の測定	—————	—————	ポテンシヨメー タ式変位計
体積変化の測定	差圧計式 外体積変化計	ポテンシヨメータ式 外体積変化計	
間隙水圧の測定	ひずみゲージ式間隙水圧計		

表-2.2 材料の物性値

粒径 (mm)	残留率 (%)	絶乾比重	吸水率 (%)
63.5~50.8	6.0	2.955	0.49
50.8~38.1	7.5	2.959	0.54
38.1~25.4	10.5	2.934	0.66
25.4~19.1	8.5	2.914	0.76
19.1~9.52	19.5	2.911	0.92
9.52~4.76	14.0	2.885	1.18
4.76~2.00	15.0	2.986	—
2.00~0.84	6.0	2.948	—
0.84~0.42	4.0	2.939	—
0.42~0.25	2.0	2.923	—
0.25~	7.0	2.905	—

表-2.3 単調載荷試験仕様

	排水試験	非排水試験
供試体寸法	直径40cm、高さ80cm	
供試体密度	相対密度85%,95%	
供試体状態	気乾	飽和
圧密条件	等方圧密 ($p_c=1.0, 2.0, 4.0, 6.0 \text{ kgf/cm}^2$)	
排水条件	排気	非排水
せん断条件	側圧一定、ひずみ制御	
載荷速度	0.5 %/min	

表-2.4 繰返し載荷試験仕様

	繰返し排水試験	繰返し非排水試験
供試体寸法	直径30cm、高さ60cm	
供試体密度	相対密度85%,95%	
供試体状態	気乾	飽和
圧密条件	$\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$ ($p_c=1, 4 \text{ kgf/cm}^2$)	$\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$ ($p_c=1, 2, 4, 6 \text{ kgf/cm}^2$) $\sigma_1/\sigma_3=1.5$ ($p_c=4 \text{ kgf/cm}^2$)
排水条件	排気	非排水
せん断条件	側圧一定、荷重制御	
載荷速度	0.1 Hz (正弦波)	

3. 試験結果と考察

3.1 単調載荷試験

3.1.1 圧密排水試験

図-3.1に軸差応力と軸ひずみの関係を示す。ひずみ5%以下で応力のピークが現れ、その後ひずみの進行に伴い応力が漸減し、残留応力状態に近づいている。また、相対密度が高いほうがピーク応力と残留応力の差が大きい。

図-3.2は体積ひずみと軸ひずみの関係を示したものである。ダイレイタンスーによりせん断初期から吸水膨張に転じ、軸ひずみの進行に伴い負の体積ひずみが増大している。また、拘束圧が小さく、相対密度が高いほうが、大きなダイレイションを起こしている。

図-3.3は45°面上の破壊応力として τ_{sf} と σ_{nf} の関係をまとめたものである。せん断応力の最大値で規定したピーク強度と軸ひずみ15%での残留強度を共に直線回帰すると次式で C_d , ϕ_d が求まる。

$$\tau_{sf} = C_d \cdot \cos \phi_d + \sigma_{nf} \cdot \sin \phi_d \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$D_r = 85\% \quad \phi_d = 50.9^\circ \quad C_d = 0.7 \text{ kgf/cm}^2$$

$$D_r = 95\% \quad \phi_d = 51.5^\circ \quad C_d = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$$

残留強度 ($D_r = 85\%, 95\%$)

$$\phi_d = 45.4^\circ \quad C_d = 0 \text{ kgf/cm}^2$$

また、 $C_d = 0$ とした時のせん断抵抗角 ϕ_0 と破壊面に作用する垂直応力 σ_{ff} の関係は図-3.4に示す通りで、 σ_{ff} の対数に対して右下がりの直線関係を示した。このように拘束圧の増加に伴って ϕ_0 が減少する現象は、破壊時のダイレイタンスー特性の変化および粒子破碎の増大と密接な関係を持ち、ロック材料、礫そして密詰めの砂ほど著しく、Leps¹⁵⁾やロックフィル材料による試験で同様の結論を得ている¹⁶⁾。

3.1.2 圧密非排水試験

図-3.5に軸差応力と軸ひずみの関係を示す。非排水試験においても応力～ひずみ曲線に応力のピークが現れており、ピーク応力を発生するひずみは相対密度が小さいほうが大きくなっている。一方、せん断中に発生した間隙水圧(図-3.6)を見ると、ひずみが1%以下の段階で間隙水圧は増加から減少に転じバックプレッシャー(背圧)を0.5~1.0kgf/cm²程度下回り供試体に負圧が発生したところではほぼ一定値を示すようになり、この時、軸差応力もピークに達している。したがって、本試験のように密詰め試料でせん断時の間隙水圧がダイレイションにより減少する場合、その大きさはバックプレッシャーに依存しており、結果として強度も試験時のバックプレッシャーに左右されるものと考えられる。Banerjee et al.¹¹⁾はバックプレッシャーが拘束圧に比べ十分に大きければ非排水せん断強度は拘束圧によらず一定になるとしている。

図-3.7に非排水試験における有効応力経路を示す。有効応力経路は密詰め砂に見られるも

のと同様、破壊線に沿って強度が増大する形状を示している。

図-3.8は45°面上の破壊応力として τ_{sf} と σ_{nf} の関係をまとめたものである。 σ_{nf} としては破壊時の全応力と有効応力の両方があり、この $\tau_{sf} \sim \sigma_{nf}$ の直線回帰より次式で強度定数 C 、 ϕ を求める。

$$\begin{aligned}\tau_{sf} &= C' \cdot \cos \phi' + \sigma_{nf}' \cdot \sin \phi' \\ &= C_{cu1} \cdot \cos \phi_{cu1} + \sigma_{nf} \cdot \sin \phi_{cu1} \quad \dots\dots\dots (3.2)\end{aligned}$$

$D_r = 85\%$	$\phi' = 40.2^\circ$	$C' = 1.6 \text{ kgf/cm}^2$	(①による方法)
	$\phi_{cu1} = 42.1^\circ$	$C_{cu1} = 3.4 \text{ kgf/cm}^2$	
$D_r = 95\%$	$\phi' = 40.4^\circ$	$C' = 3.1 \text{ kgf/cm}^2$	
	$\phi_{cu1} = 41.7^\circ$	$C_{cu1} = 5.2 \text{ kgf/cm}^2$	(①による方法)

破壊面の角度を $45^\circ + \phi'/2$ と仮定すると破壊面上のせん断強度 τ_{ff} は次式より求まる。

$$\tau_{ff} = 2 \tau_{sf} \times \sin(45^\circ - \phi'/2) \times \cos(45^\circ - \phi'/2)$$

土の非排水強度は初期状態が同じであれば載荷応力経路によらず一定値を示し、全応力経路によらずせん断強度は全て上式の τ_{ff} に等しくなると考えられる。したがって、せん断中に破壊面上の垂直応力が全応力として変化しないと仮定すると、 $\sigma_{ff} = \sigma_{fc}$ (等方圧密の場合 = p_c) であり、この時の τ_{ff} と σ_{fc} の関係をプロットし直線回帰することにより (図-3.9) 次式で強度定数が求まる。

$$\begin{aligned}\tau_{ff} &= C_{cu2} + \sigma_{ff} \cdot \tan \phi_{cu2} \\ D_r = 85\% \quad \phi_{cu2} &= 47.9^\circ \quad C_{cu2} = 6.7 \text{ kgf/cm}^2 \\ D_r = 95\% \quad \phi_{cu2} &= 51.7^\circ \quad C_{cu2} = 9.3 \text{ kgf/cm}^2\end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \tau_{ff} &= C_{cu2} + \sigma_{ff} \cdot \tan \phi_{cu2} \\ D_r = 85\% \quad \phi_{cu2} &= 47.9^\circ \quad C_{cu2} = 6.7 \text{ kgf/cm}^2 \\ D_r = 95\% \quad \phi_{cu2} &= 51.7^\circ \quad C_{cu2} = 9.3 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}} \right\} \text{(②による方法)}$$

CU試験から強度定数を求める方法としてはいくつかの方法があるが土質試験法¹⁷⁾によると、モール円の包絡線として ϕ_{cu1} 、 C_{cu1} を求める方法①は本質的に意味がなく安全側すぎる傾向があり、破壊面上の応力と圧密応力から ϕ_{cu2} 、 C_{cu2} を求める②の方法が正しい整理法と考えられる。ただし、破壊面を決定するのが困難な場合 (例えば間隙水圧を測定していない場合) は、実用上、平均主応力面上での整理法③も有効である (図-3.10参照)。③の方法で ϕ_{cu3} 、 C_{cu3} を求めると

$$\begin{aligned}D_r = 85\% \quad \phi_{cu3} &= 53.9^\circ \quad C_{cu3} = 8.3 \text{ kgf/cm}^2 \\ D_r = 95\% \quad \phi_{cu3} &= 57.5^\circ \quad C_{cu3} = 11.5 \text{ kgf/cm}^2\end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} D_r = 85\% \quad \phi_{cu3} &= 53.9^\circ \quad C_{cu3} = 8.3 \text{ kgf/cm}^2 \\ D_r = 95\% \quad \phi_{cu3} &= 57.5^\circ \quad C_{cu3} = 11.5 \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned}} \right\} \text{(③による方法)}$$

となる。

3.1.3 排水強度と非排水強度

単調載荷試験の結果から計算で得られた破壊面上のせん断強度と垂直応力の関係を図-3.11に示す。

非排水強度の大きさは、バックプレッシャーに依存しており一概には評価できないが、せん断中に発生する負圧の影響を大きく受け全応力の非排水強度が最も大きくなった。また、同一のバックプレッシャーのもとでは相対密度が高いほど排水強度に対して非排水強度は大きくなっ

ている。

ϕ_d と ϕ' を比較すると、砂における試験でも密詰めになるほど ϕ_d は ϕ' より大きくなると報告¹⁸⁾されている様に、ロック材料でも同様の傾向がみられる。

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)に準じて算定する¹⁾。

(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 を次式で算定する。

$$\tau_d = \sigma_d / 2, \quad \sigma_d = \frac{P_C + P_E}{2 \cdot A_C} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

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。

$$\epsilon = d / H_c$$

また、軸ひずみ量については図-3.12を参考に次のように定義する。

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(最大値と最小値の平均)

動的強度を規定するひずみとしては、残留ひずみを考えると初期せん断応力が作用していない場合は原理上残留ひずみは生じないので強度が規定できない。また、砂の液状化強度を求めるのに両振幅ひずみがよく用いられるが、これでは静的強度との整合性がとれない。したがって、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 $\epsilon_p (= \epsilon_a + \epsilon_{res})$ でひずみを定義する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。これは三軸での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、 $\epsilon_{res} = 0$ ($\epsilon_p = \epsilon_a$)として片振幅ひずみ ϵ_a でひずみを定義した。

せん断ひずみ γ についても軸ひずみと同様に定義する。

(4) 間隙水圧

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

(5) システムコンプライアンス

非排水の繰返し載荷試験結果を整理する上で以下のシステムコンプライアンスの影響が考えられ、必要に応じて補正する。

a) メンブレンペネトレーション

b) 間隙水圧測定装置によるコンプライアンス

c) 不飽和によるコンプライアンス

a) に関しては試験材料の項で述べたように、繰返しせん断応力比を一律10%低減することとし、b) に関してはBanerjee et al.¹¹⁾ は12 inch径の供試体では無視できるほど小さいと指摘しており、本報告でも補正は考えない。また、c) に関してはMartin et al.¹²⁾ がシリカ砂について飽和度との関連を報告しているが、原位置の状況を考えるとB値が0.95以上であれば問題ないと考えた。

3.2.2 繰返し排水（排気）試験

図-3.13に載荷応力及び軸ひずみの時刻歴の一例を示す。また、図-3.14~3.15には繰返し回数と片振幅ひずみの関係を示す。

三軸排水繰返し試験の場合、繰返しせん断応力比 τ_d/p_c が等方圧密で0.5、異方圧密 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$) で0.75以上になると軸圧 σ_1 が負になることから、供試体とキャップが離れ、実質的に試験が困難であった。また、非排水試験の応力経路は圧縮・伸張側で非対称であることから（図-3.16）ひずみは伸張側に進行しており、応力比が0.5あるいは0.75を僅かに下回る場合でも、試験中に破断したケースがあった。

今回実施した繰返しせん断応力比の範囲では、排水試験による静的な残留強度に対して、最大で圧縮側に55%、伸張側に95%（圧縮・伸張強度が等しいと仮定）の載荷応力が加えられたことになり、伸張側への破壊が卓越していることは応力経路を見ても明かである。しかしながら、発生するひずみ片振幅は、1.0%以下であり、伸張側の載荷応力が残留強度の90%以下（せん断応力比が等方で0.47、異方で0.73以下）では繰返しによるひずみの増幅は見られず、僅かに振幅が減少する傾向にある。

伸張側載荷応力が残留強度の90%を越えるものでは繰返しによるひずみの増幅が見られるものもあるが（図-3.14(b), 14(d), 15(b), 15(d)）、この場合、軸圧がゼロに近い供試体上端付近でネッキング（キャップ付近の供試体に隙間ができる。）が生じている可能性が高い。

以上の結果から、排気条件での繰返し試験では少なくとも残留強度に近いそれ以上の載荷応力を加えなければひずみの増幅はないと考えられるが、それ以上の載荷応力に関しては、主応力が反転する三軸試験での検証は困難である。

3.2.3 繰返し非排水試験

図-3.17に繰返し非排水試験の応力、ひずみ、間隙水圧の時刻歴、図-3.18に応力～ひずみ

関係（ヒステリシスループ），図-3.19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，等方圧密の場合，繰返し載荷によりひずみ振幅が増大しながら残留ひずみは伸張側に進行する傾向を示している。また，間隙水圧も繰返し載荷に伴い上昇し，その最大値は比較的初期の段階で拘束圧に対して100%近くに達し，その後はほぼ一定値（振幅）を保っており，100%近くに達したときにも液状化のようなひずみの急増は見られない。一方，異方圧密で初期せん断応力を加えた場合は，ひずみはある時点で振幅の増大が止まり，その後は一定振幅のまま残留ひずみが圧縮側に進行する傾向にある。また，間隙水圧は等方圧密の場合と同様100%近くに達している。

ヒステリシスループは，繰返しにより等方圧密では伸張側，異方圧密では圧縮側にひずみが進行していくのが良く分かり，動弾性係数としては小さくなる傾向にある。

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おり，密な砂でみられる挙動と同じである。

図-3.20は，ねじり単純せん断試験（等方圧密）による時刻歴の一例である。等方圧密の三軸試験と比較して，残留ひずみは殆どゼロで，三軸試験の場合のような伸張側へのひずみの進行はない。また，間隙水圧の発生特性も異なっているが，ピーク値は100%に達している。

今回の試験で明らかになった粗粒材料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-3.21～25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も増大しているが，100回程度の繰返しでは緩詰め砂に見られるような流動状態（液状化）には至っていない。ただし，一部には図-3.22(a)のようなひずみの急速な進行が見られるが，これは時刻歴と対比してみるとネッキングによる伸張破断が生じたものと考えられる。

今回の試験では繰返し回数100回以内でのひずみの発生量が小さい（特に $D_r=95\%$ ）場合が多いため，100回以降のひずみ量を100回までの実測値から曲線近似（べき関数）の外挿で推定し（図中の破線），以後の結果の整理において参考にしている。

② 間隙水圧発生特性

図-3.26～3.31にひずみと間隙水圧係数の関係を示す。

ひずみの増大に伴い間隙水圧係数（ $\Delta u / \sigma_{3c}$ ）も上昇し，ひずみが1.0%程度でほぼピークに達しており，その後はほぼ一定値のままでひずみだけが增大している。間隙水圧係数の最大値は等方圧密，異方圧密にかかわらず0.9～1.0で，拘束圧が大きいほど1.0に近づく傾向にあるが，1.0に達したケースは少ない。兵動ら²⁰⁾は飽和砂による試験で，間隙水圧の発生特性はせん断中の主応力の反転の有無によって異なり，異方圧密による初期せん断応力が大きく主応力の反転のない場合の間隙水圧係数は小さくなる（密詰め砂で0.3～0.5）と指摘しているが，本報告では，主応力比2.0の異方圧密でも1.0%程度のひずみが発生するには主応力が反転する載荷応力が必要であり（図-3.41参照），結果として間隙水圧係数は異方圧密

でも0.9以上になっている。

③ 応力～ひずみ特性

図-3.32～3.35にある繰返し回数での繰返しせん断応力比とひずみの関係を示す。また、図中の破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、この繰返しせん断応力比～ひずみ曲線のピークをもって動的強度とする考え²¹⁾もあるが、今回の試験 ($Dr=85\%$ 以上の粗粒材) では繰返し回数100回をもってしてもピークは現れていないようである。

等方と異方圧密 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$) を比較すると、同じひずみに達するのに必要な繰返しせん断応力比は異方圧密の方が明らかに大きくなっている。谷口ら²²⁾は密な砂に関して、このような初期せん断応力比によるひずみ発生特性の違いはひずみレベルによって異なると指摘しているが、ひずみレベルの大きい範囲では本報告の傾向と一致している。(図-3.36)

④ 動的強度特性

繰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²³⁾で、繰返し試験中に間隙水圧が拘束圧に対して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、本報告のような密詰めの粗粒材料に関しては、間隙水圧が100%に達しない場合が多く、また、100%近く発生した状態でも、その後にひずみを与えれば強度は回復しかなりの抵抗力を示すことが確認²⁴⁾されており、Cyclic Mobility状態²⁷⁾になっている。したがって、このような材料に対しては間隙水圧ではなく発生したひずみの大きさで破壊を定義する方法が現実的である。本報告では所定の回数の繰返し載荷により所定のひずみに達する繰返しせん断応力 τ_d と初期せん断応力 τ_s の和($\tau_d + \tau_s$)で動的強度を定義し、圧密時の有効平均主応力 p_c で除したものを動的強度比とした。

図-3.37～3.38は発生するひずみごとのせん断応力比と繰返し回数の関係から求めた動的強度比曲線を示す。繰返し回数が多い程、また規準ひずみが小さい程、動的強度比は小さくなっている。また、異方圧密の動的強度比曲線は、応力反転の境界線

$$\sigma_1/\sigma_3 = 2 : (\tau_d + \tau_s)/p_c = 0.75, \quad \sigma_1/\sigma_3 = 1.5 : (\tau_d + \tau_s)/p_c = 0.43$$

に漸近する傾向が見られる。すなわち、主応力の反転が無ければ、ひずみはほとんど発生しないと見える。

図-3.39は、圧密時の初期平均有効主応力 p_c と動的強度比 $(\tau_d + \tau_s)/p_c$ の関係を示したもので、初期せん断応力の有無に係わらず、 p_c が大きいほど動的強度比が小さくなっている。このような動的強度比の拘束圧依存性は密な砂においても報告²⁵⁾されており、単調載荷試験による破壊強度の拘束圧依存性と同様、粒子間接点で生じる破碎による粒子間摩擦角の減少²⁶⁾あるいは供試体作製時の締固めによって作られた過圧密領域の影響²⁷⁾等が原因として考えられる。

図-3.40は、動的強度比と相対密度との関係を示したもので、規準ひずみの大きさや初期

せん断応力の有無に係わらず相対密度が高いほど動的強度比も大きくなっている。田中ら²⁸⁾は、粗粒材料の動的強度比は相対密度および粒度に大きく影響されると指摘しており（図-3.41）、同一粒度に対しては本報告と同様の傾向を報告しているが、粒度が異なるものどうしでは相対密度は動的強度を表す適切な指標ではないと考えられる。

図-3.42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、相対密度の高い（ $Dr=85\%$ 以上）ロック材料では異方圧密時の主応力比（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。同様の関係は、粗粒材料では保田ら²⁹⁾が報告している。また、砂については既に多くの報告^{30) 31) 32)}で初期せん断応力の影響を取り上げており、関ら³³⁾や兵動ら³⁴⁾は軟化挙動を示さない高い相対密度では初期せん断応力の増加にともない動的強度比が増加すると報告している。

図-3.43は中空ねじりせん断試験の動的強度比曲線を示したもので、三軸試験の動的強度比とほぼ一致している。この結果は、中空ねじりせん断試験は等方応力状態で実施しており、表-1.1で $K_0=1.0$ と考えるとFinn, et al.や石原らの提唱する C_{r1} に一致するものである。ただし、龍岡ら³⁵⁾は、飽和砂による試験で両者の関係は供試体の作製法の違いや相対密度によって異なると指摘しており、山下ら³⁶⁾は空中落下法によって作製した密な砂では中空ねじりせん断試験の液化化強度のほうが三軸試験より大きくなると報告している。

今後は、より現位置に近い強度を把握するのに、 K_0 値を変化させて異方応力状態での中空ねじりせん断試験を実施し、三軸試験との関係を明らかにする必要があるが、永瀬ら³⁷⁾は砂による試験で、動的強度比を平均主応力との比（ τ_d/p_c ）で表せば、中空ねじりせん断試験の動的強度比は K_0 値によらず一致すると報告している。

3.3 動的強度と静的強度

強度を定めるとき、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-3.44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。尚、動的強度は繰返し回数20回で規準ひずみ 2.5% での値で、メンブレンコンプライアンスの影響を補正（一律 10% 減）したものである。一方、静的強度はひずみ 15% 以内でのピーク応力で定めている。

単調載荷試験による静的非排水強度に比べ動的強度は非常に小さいことが分かるが、静的排水強度と比較すると垂直応力が 5.0kgf/cm^2 以下では異方圧密での動的強度の方が大きくなった。

動的強度を規定する規準ひずみ量のとり方には、決まった判断基準はなく、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、今回の場合、繰返し載荷試験では、試験装置の機構上、測定可能なひずみ量が制限されていたため、データの信頼性から規準ひずみ 2.5% で整理した。したがって、フィルダムなどの安定を考える上で、 5.0% 程度のひずみを許容すると、動的強度はさらに大きくなるので、異方圧密の動的強度が排水強度を上回る傾向は、さらに明確になると推定される。

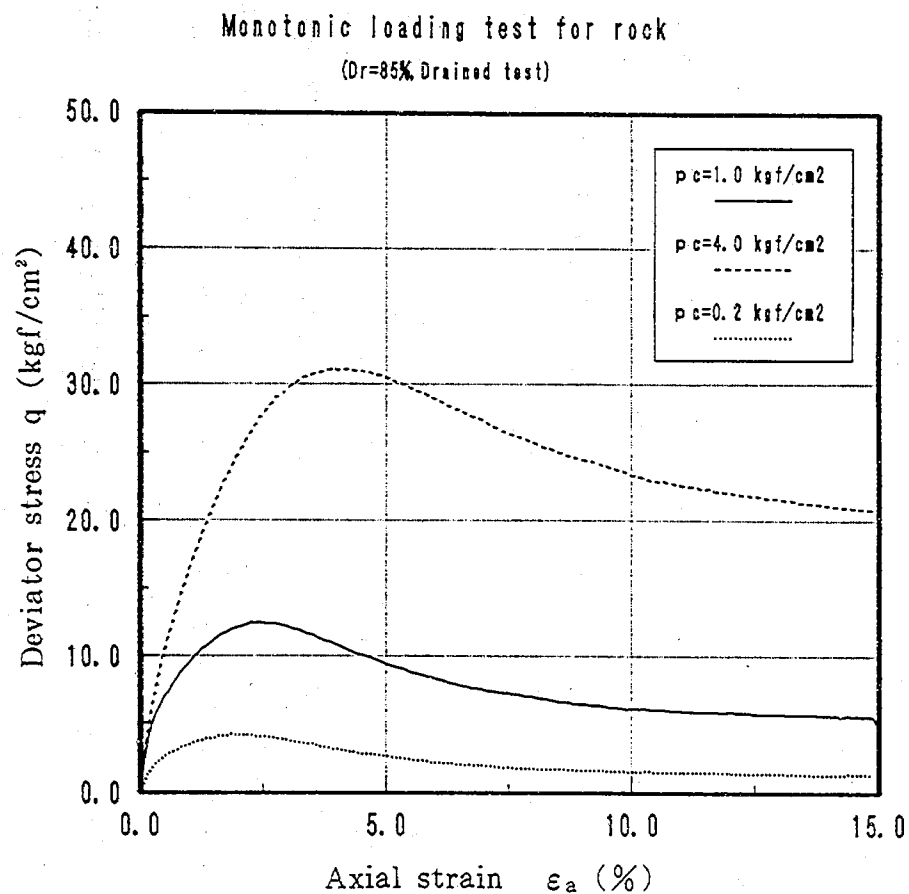


図-3.1(a) ロック材料の排水単調載荷試験,
軸差応力～軸ひずみ (相対密度85%)

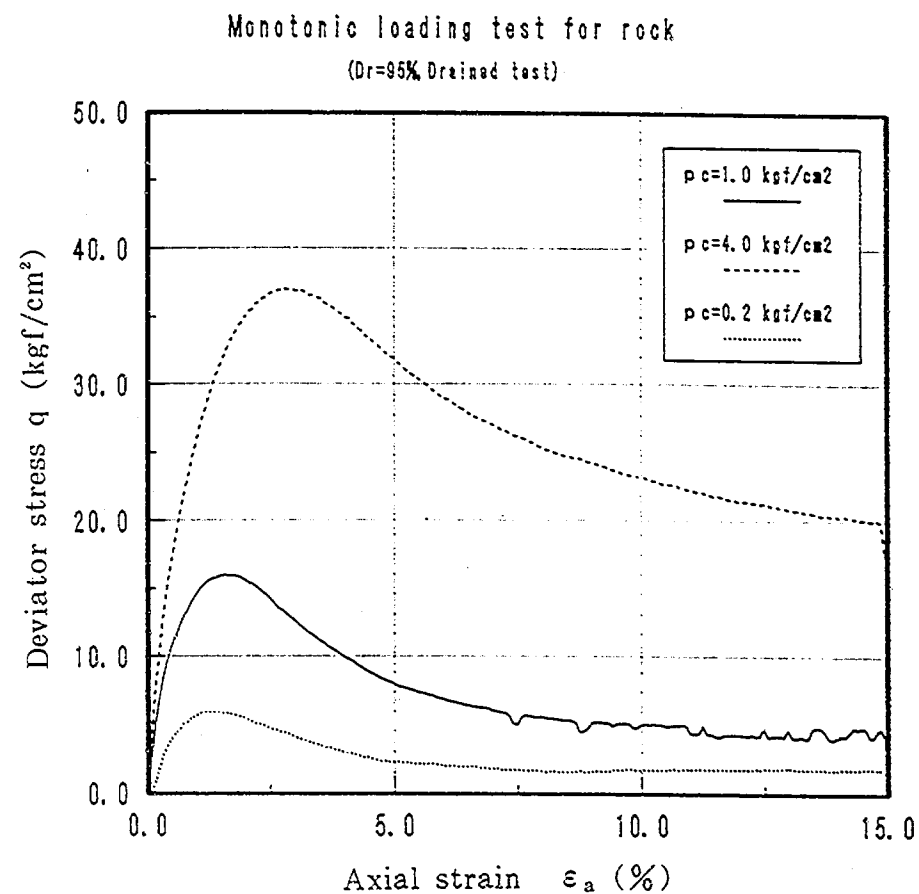


図-3.1(b) ロック材料の排水単調載荷試験,
軸差応力～軸ひずみ (相対密度95%)

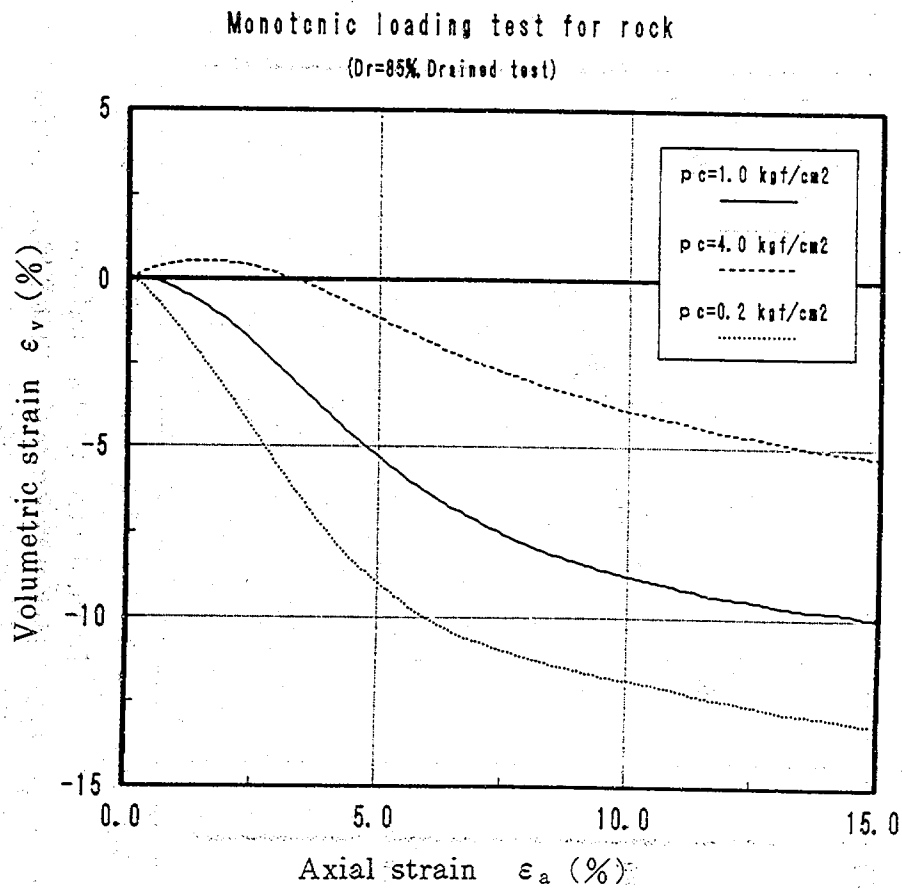


図-3.2(a) ロック材料の排水単調載荷試験、
体積ひずみ～軸ひずみ (相対密度85%)

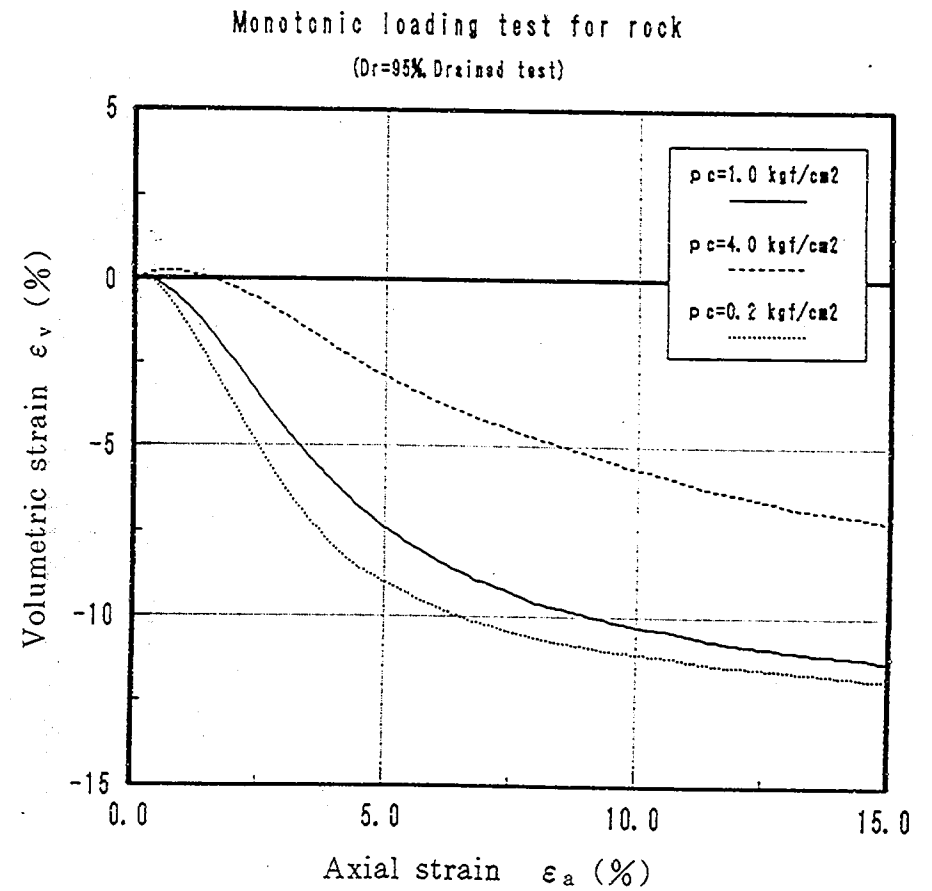


図-3.2(b) ロック材料の排水単調載荷試験、
体積ひずみ～軸ひずみ (相対密度95%)

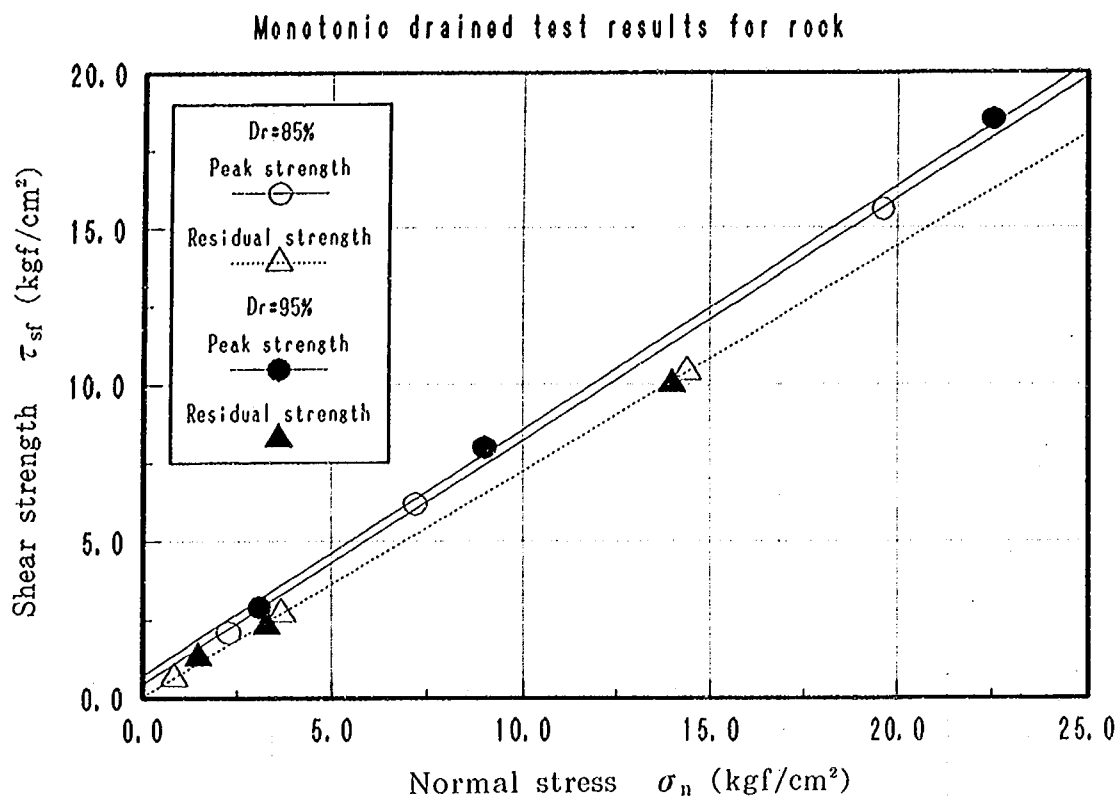


図-3.3 ロック材料の排水単調載荷試験，破壊面上のせん断強度～垂直応力（相対密度85%・95%）

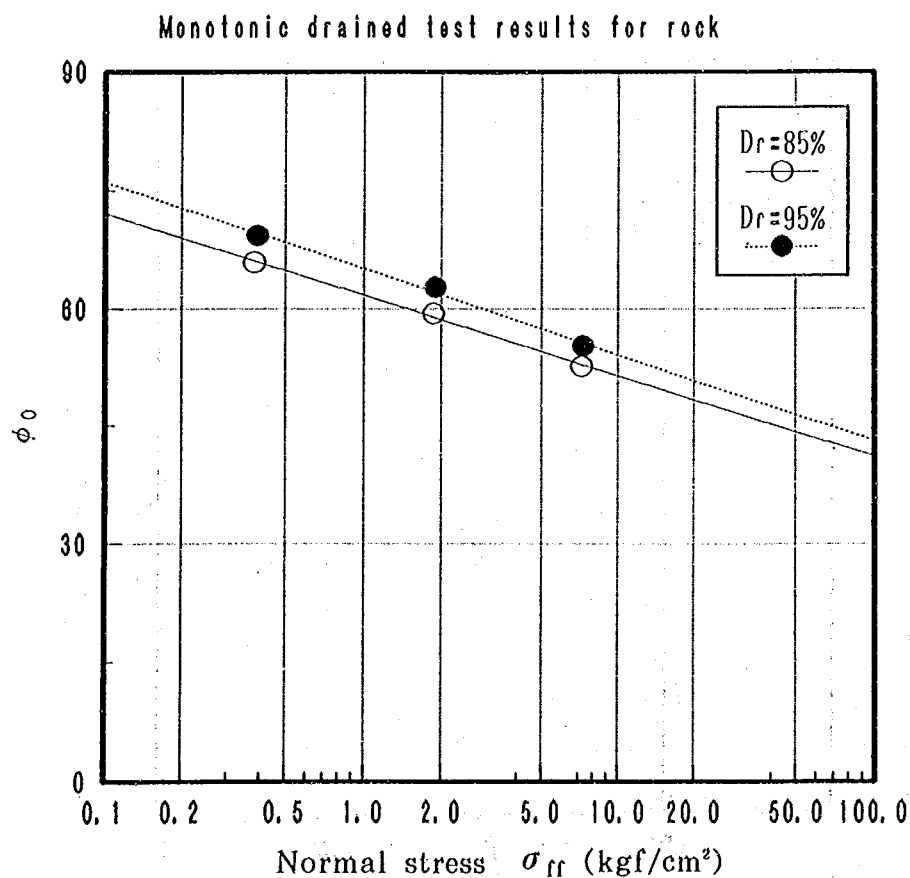
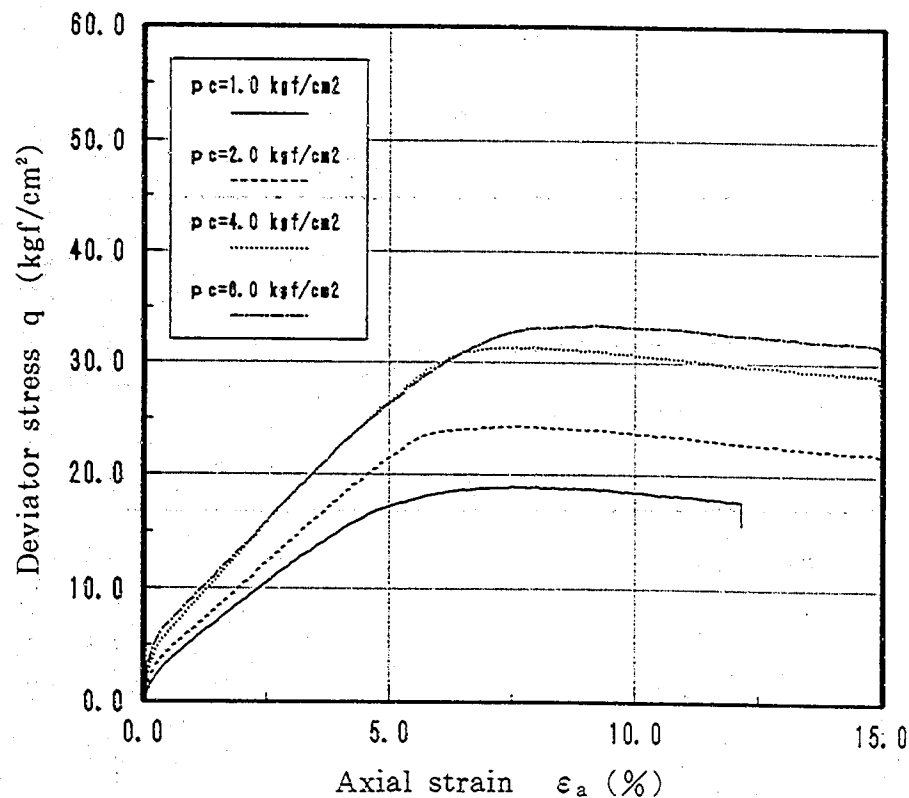


図-3.4 ロック材料の排水単調載荷試験，内部摩擦角と破壊面上の垂直応力（相対密度85%，95%）

Monotonic loading test for rock

(Dr=85% Undrained test)

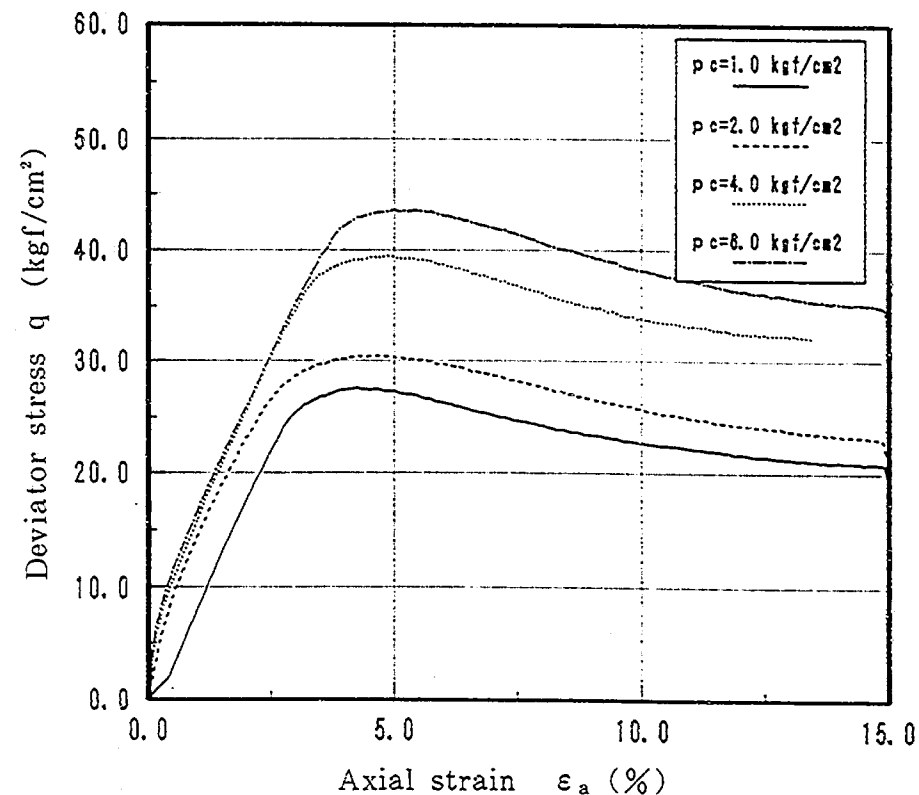


$p_c = 1.0, 2.0, 4.0$ kgf/cm² on $u_B = 2.0$ kgf/cm²
 $p_c = 6.0$ kgf/cm² on $u_B = 1.0$ kgf/cm²

図-3.5(a) ロック材料の非排水単調載荷試験,
軸差応力～軸ひずみ (相対密度85%)

Monotonic loading test for rock

(Dr=95% Undrained test)



$p_c = 1.0, 2.0, 4.0$ kgf/cm² on $u_B = 2.0$ kgf/cm²
 $p_c = 6.0$ kgf/cm² on $u_B = 1.0$ kgf/cm²

図-3.5(b) ロック材料の非排水単調載荷試験,
軸差応力～軸ひずみ (相対密度95%)

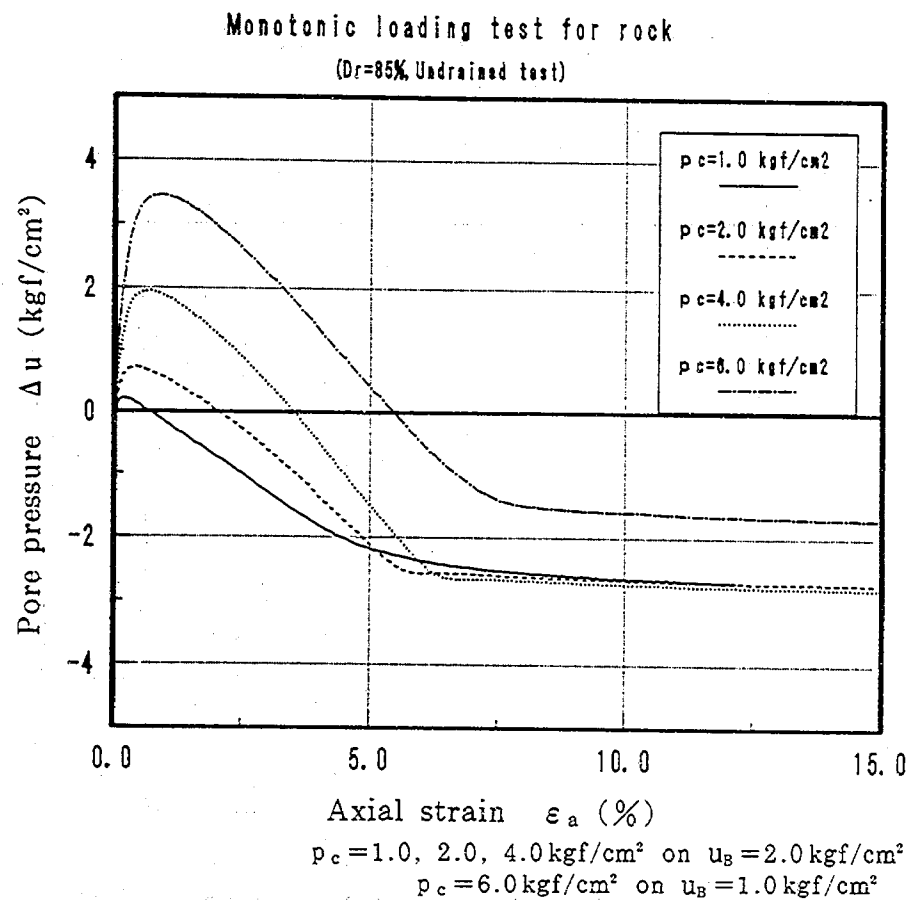


図-3.6(a) ロック材料の非排水単調載荷試験,
間隙水圧～軸ひずみ (相対密度85%)

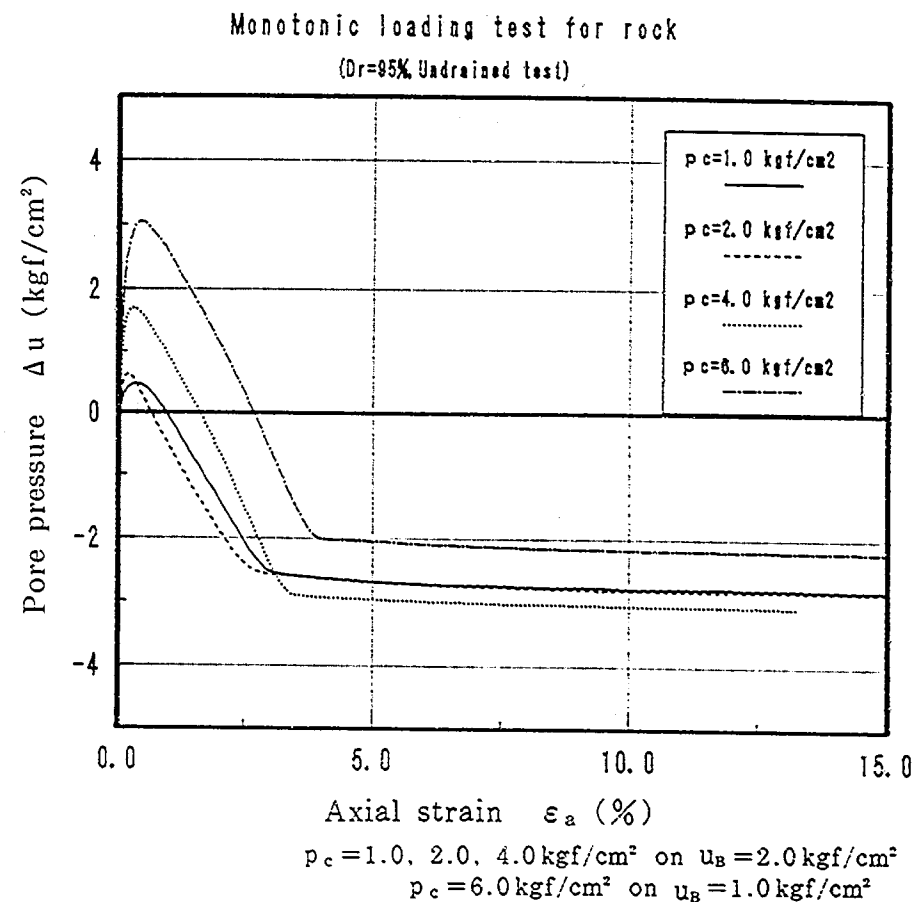


図-3.6(b) ロック材料の非排水単調載荷試験,
間隙水圧～軸ひずみ (相対密度95%)

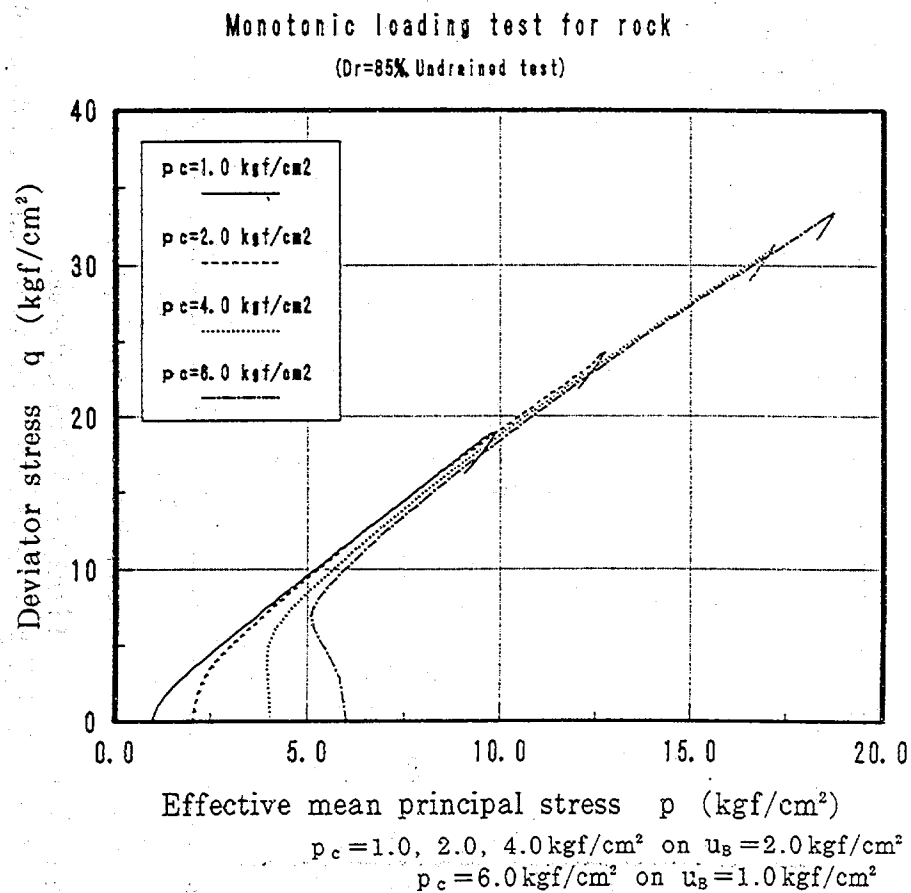


図-3.7(a) ロック材料の非排水単調載荷試験,
軸差応力～平均有効主応力 (相対密度85%)

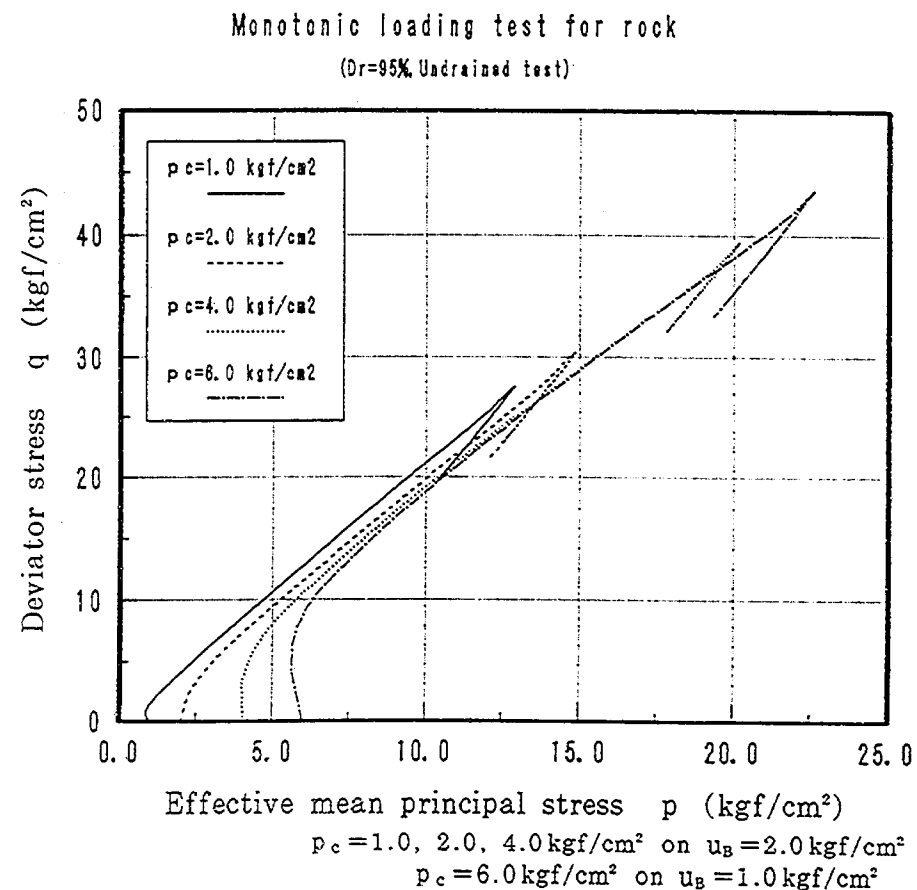


図-3.7(b) ロック材料の非排水単調載荷試験,
軸差応力～平均有効主応力 (相対密度95%)

Monotonic undrained test results for rock

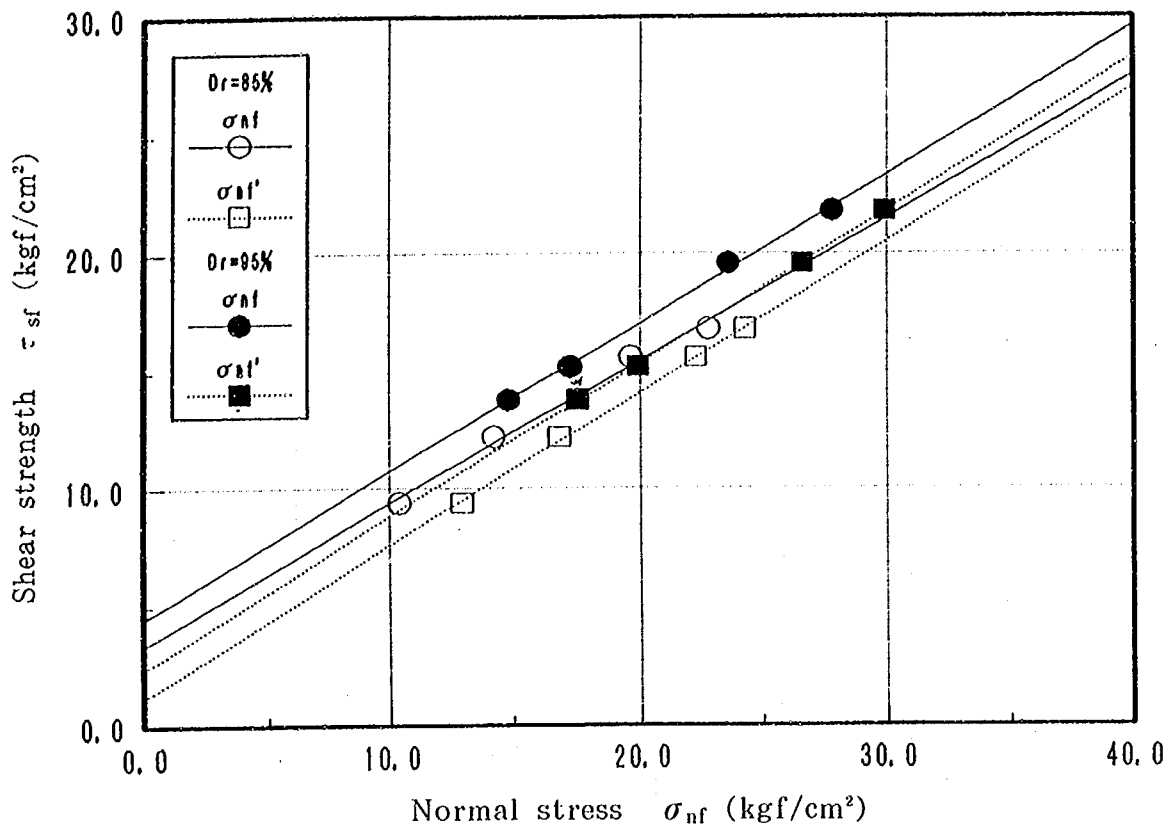


図-3.8 ロック材料の非排水単調載荷試験,
45°面上のせん断強度～垂直応力 (相対密度85%・95%)

Monotonic undrained test results for rock

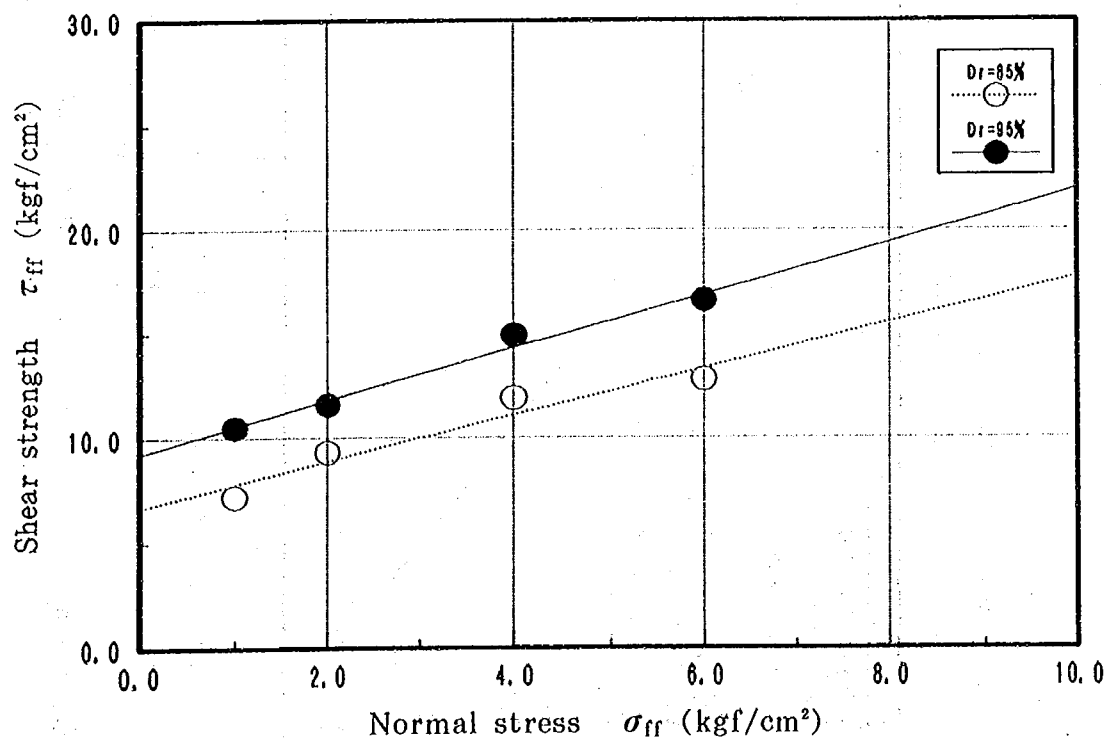


図-3.9 ロック材料の非排水単調載荷試験,
破壊面上のせん断強度と垂直応力 (相対密度85%・95%)

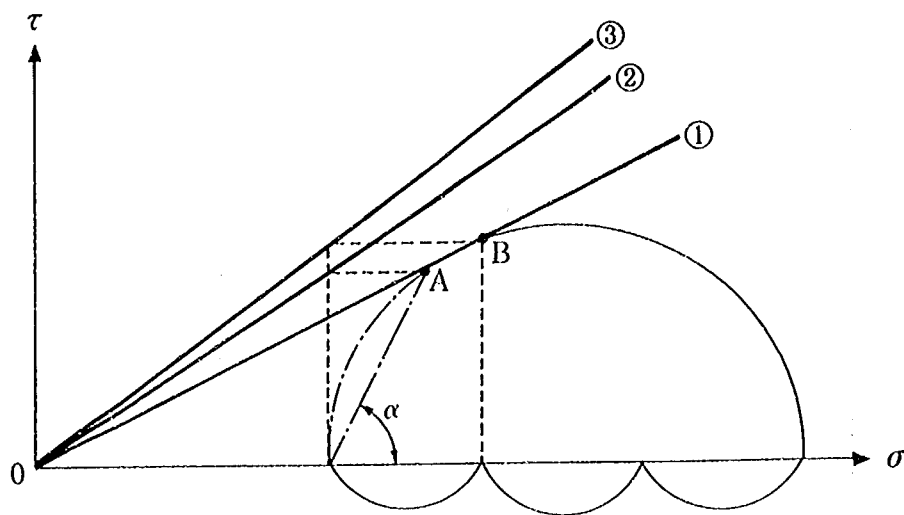
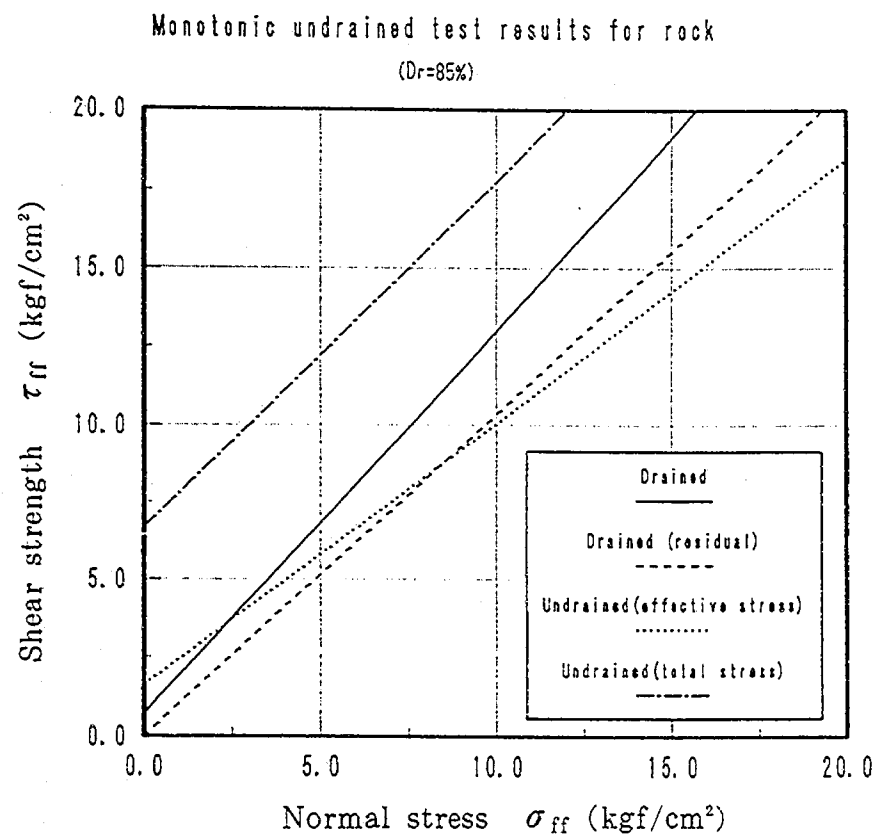
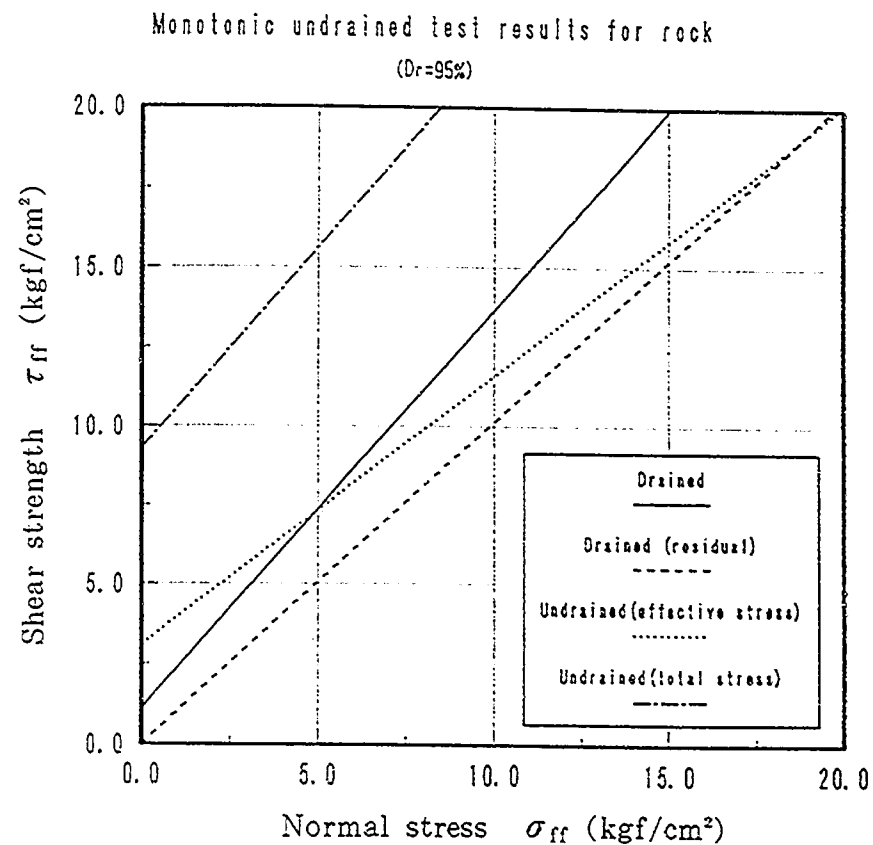


図-3.10 C U 試験結果の 4 通りの整理方法



(a) Dr=85%



(b) Dr=95%

図-3.11 ロック材料の非排水単調載荷試験，破壊面上のせん断強度～垂直応力

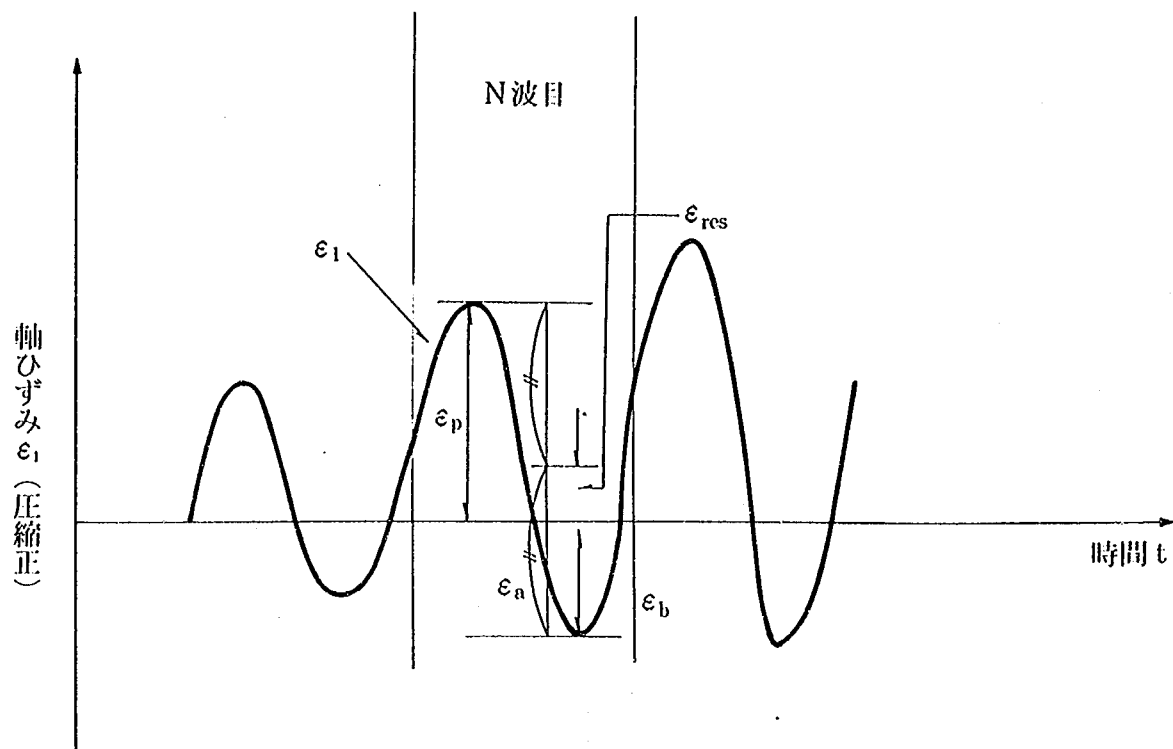
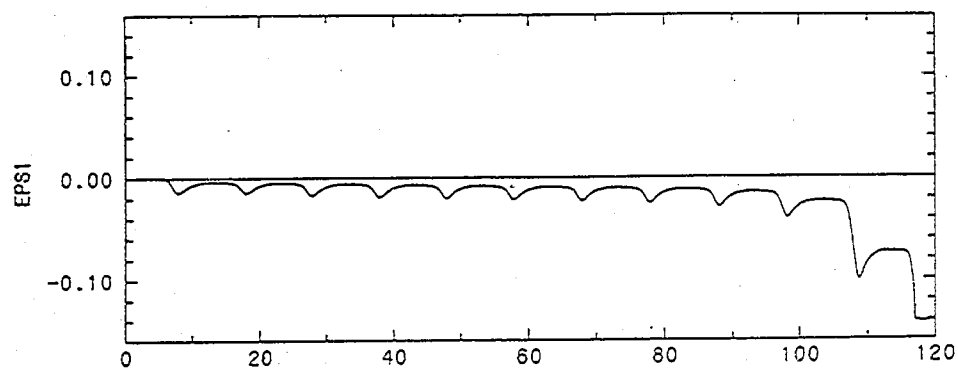
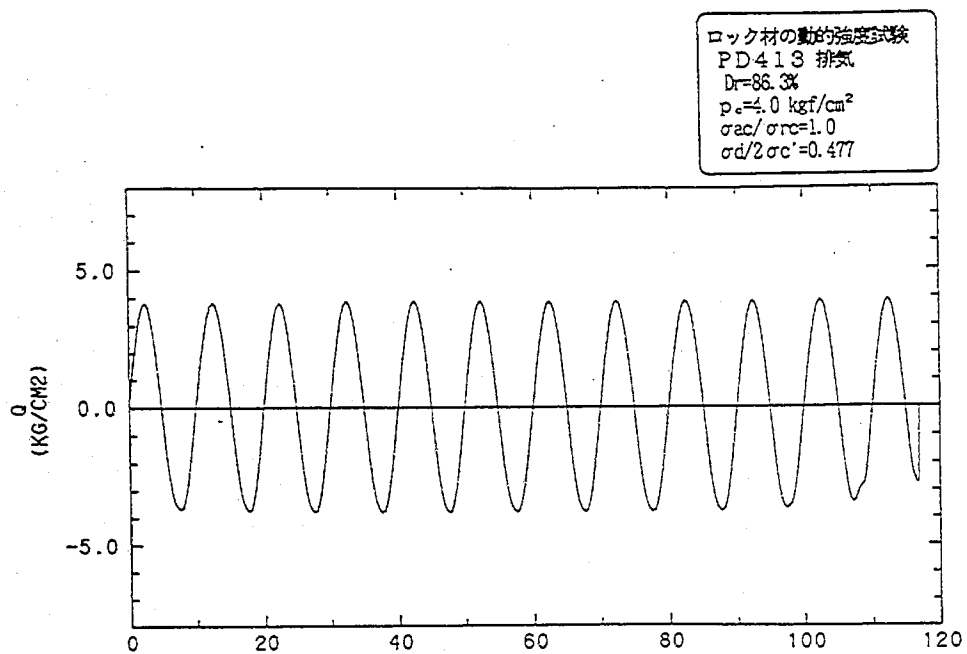
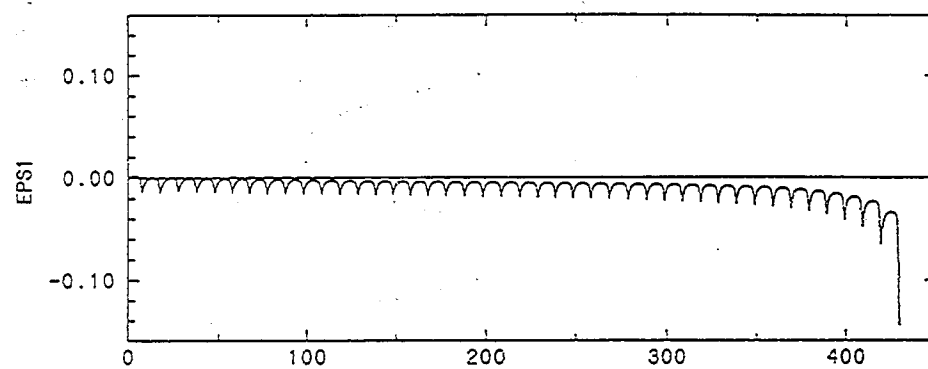
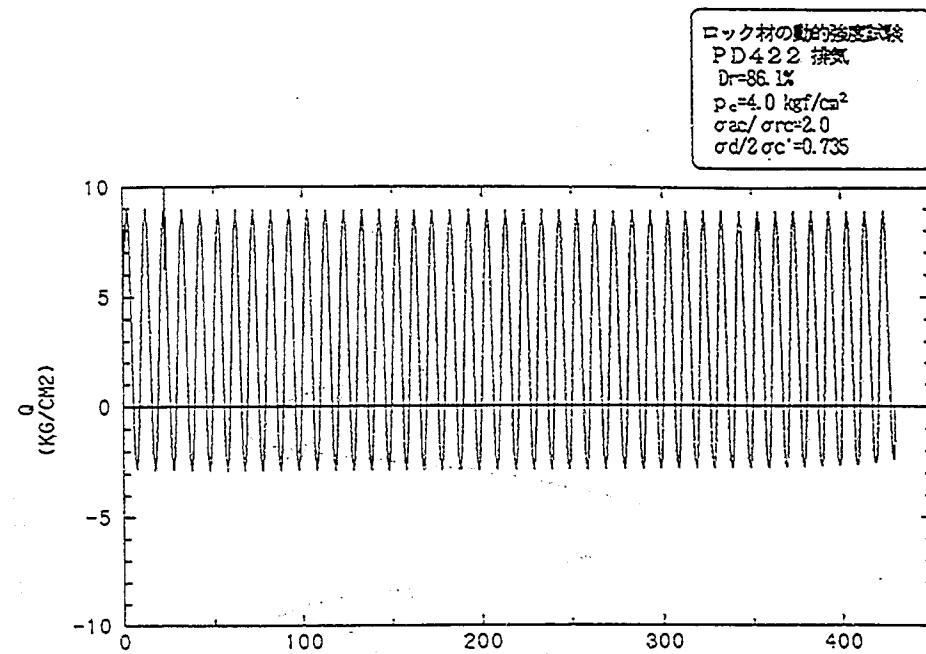


図-3.12 ひずみの定義



(a) 等方状態



(b) 異方状態

図-3.13 排水繰返し試験における時刻歴

Cyclic loading test for rock (Drained)

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=1.0\text{ kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

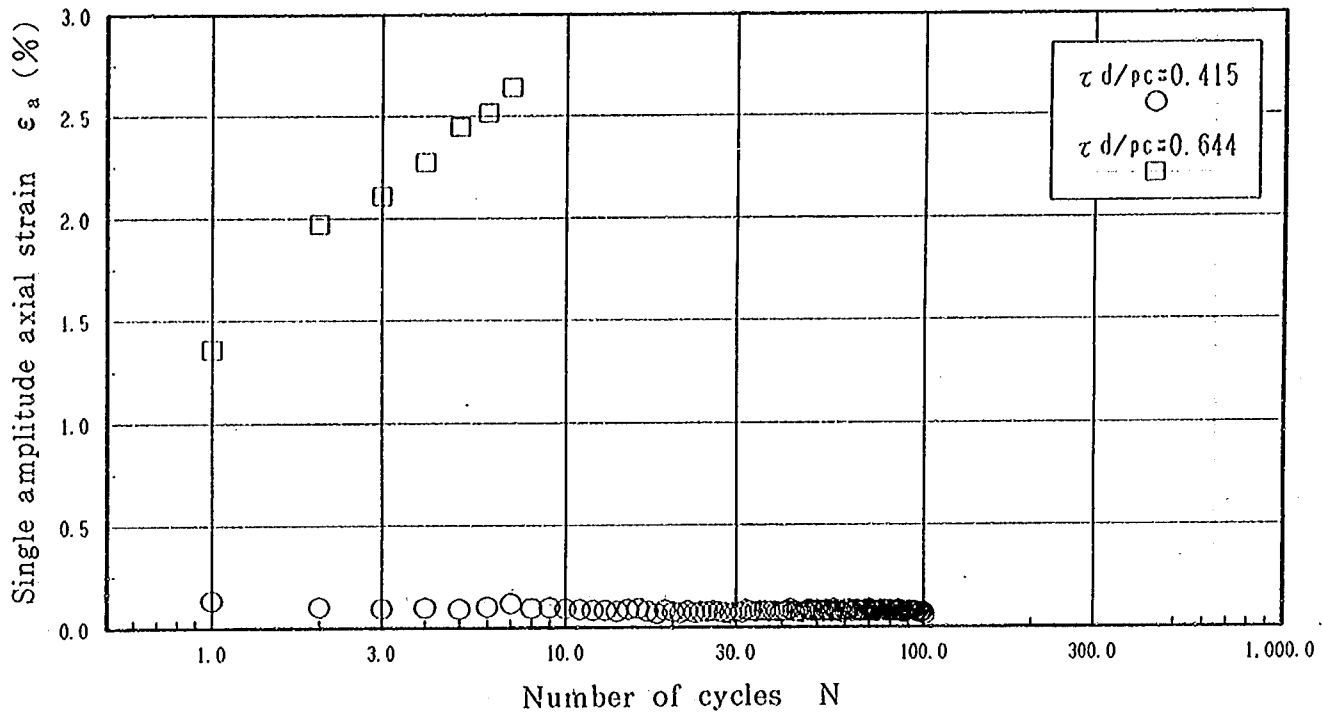


図-3.14(a) ロック材料の排気繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 1.0 kgf/cm^2 ，相対密度 85%)

Cyclic loading test for rock (Drained)

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=4.0\text{ kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

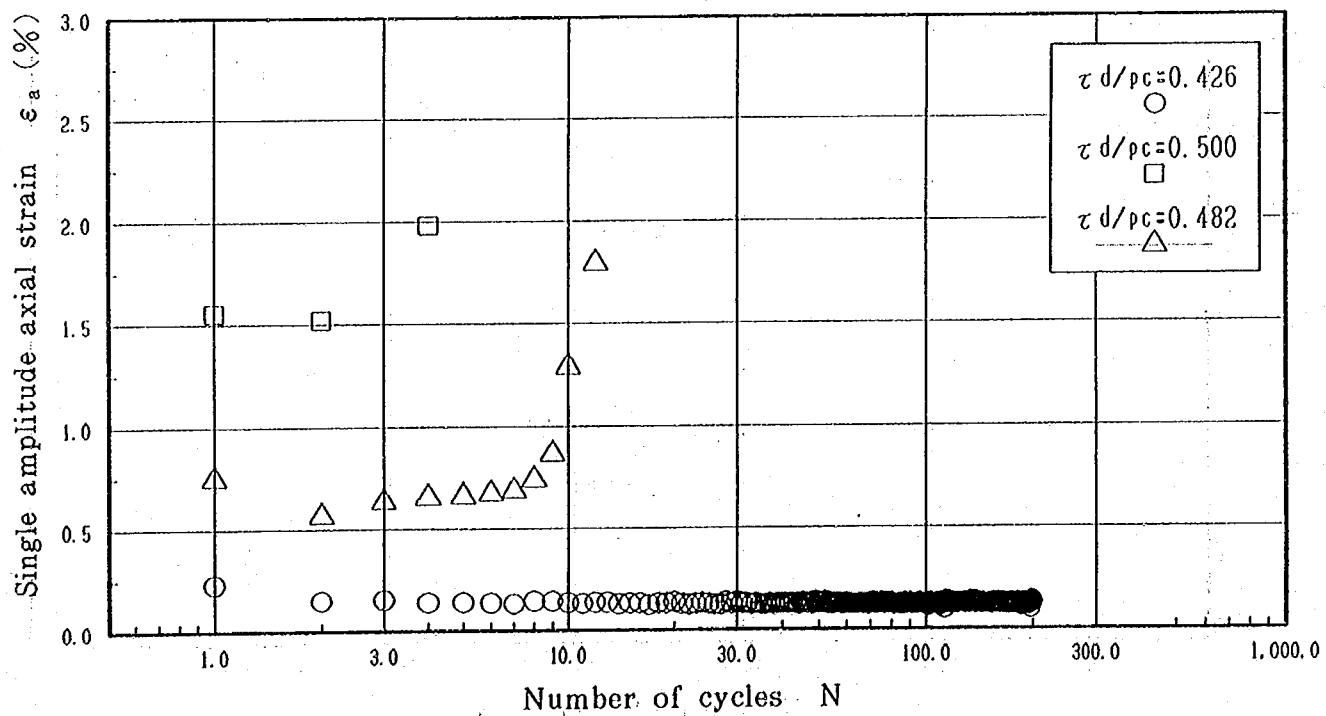


図-3.14(b) ロック材料の排気繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0 kgf/cm^2 ，相対密度 85%)

Cyclic loading test for rock (Drained)

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

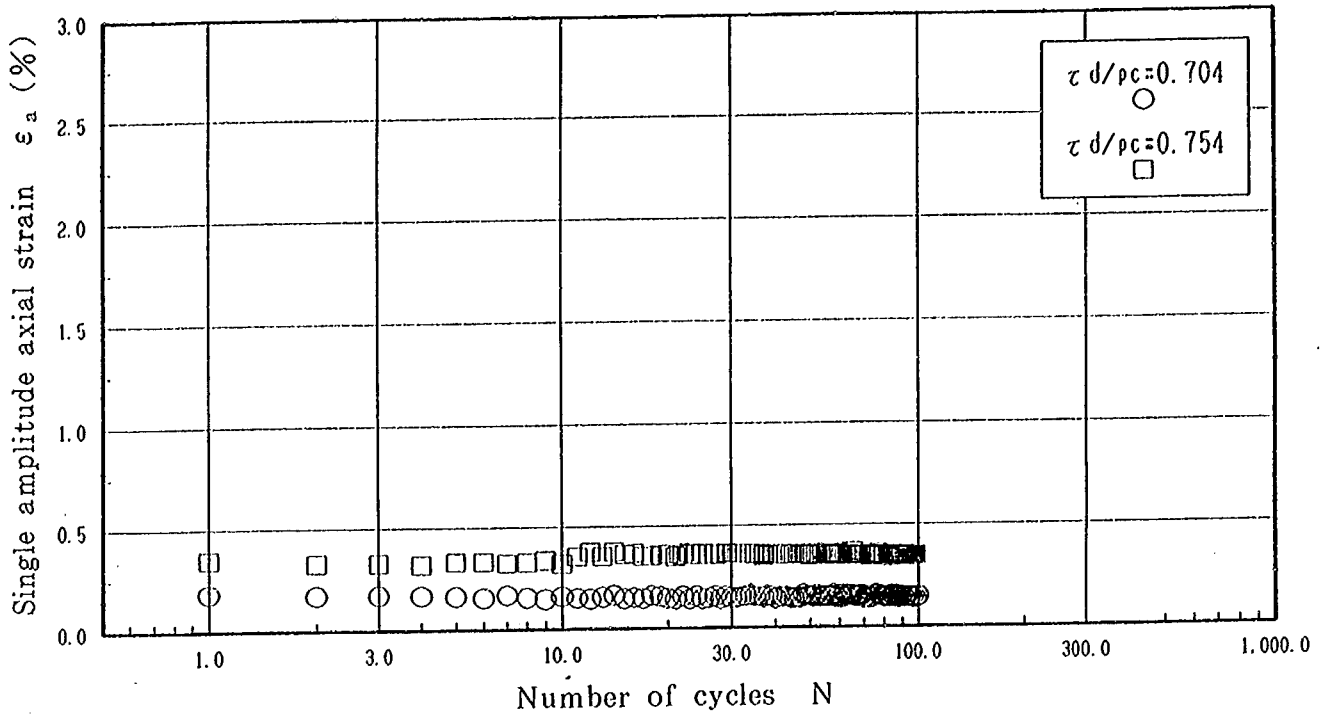


図-3.14(c) ロック材料の排気繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ，相対密度 85%)

Cyclic loading test for rock (Drained)

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=4.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

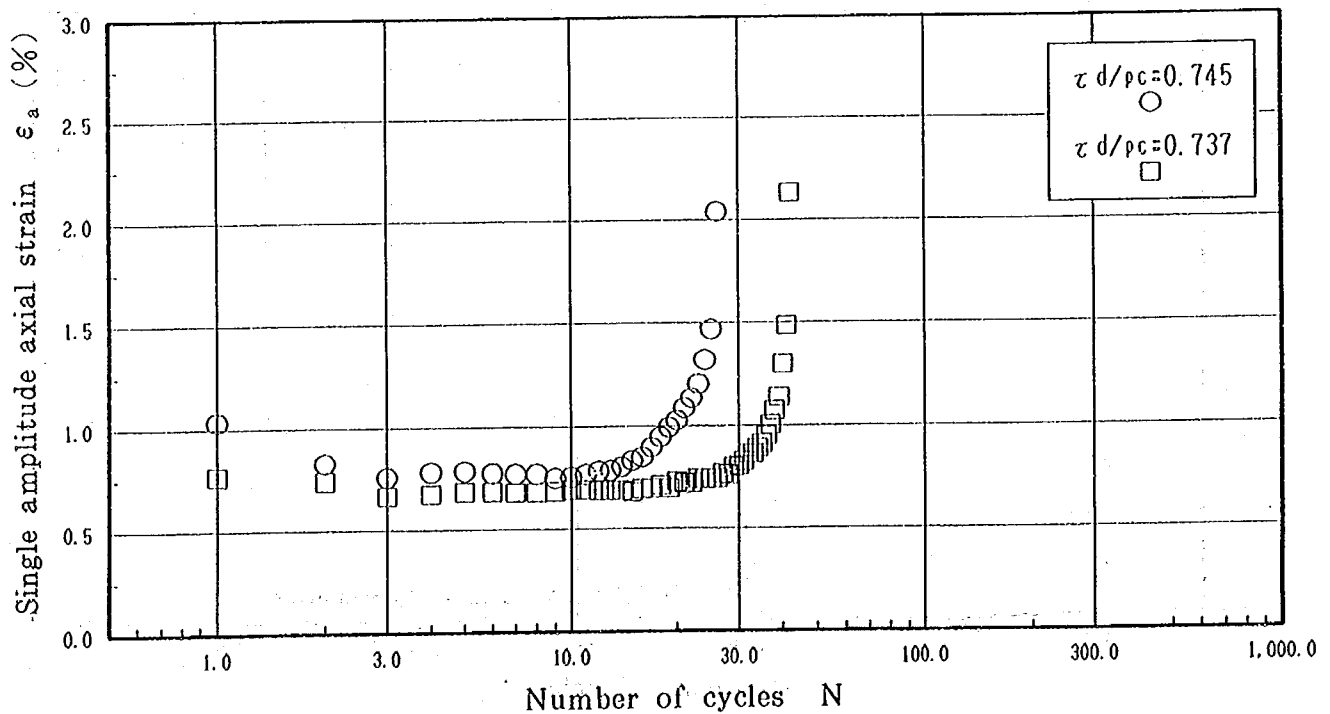


図-3.14(d) ロック材料の排気繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock (Drained)

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

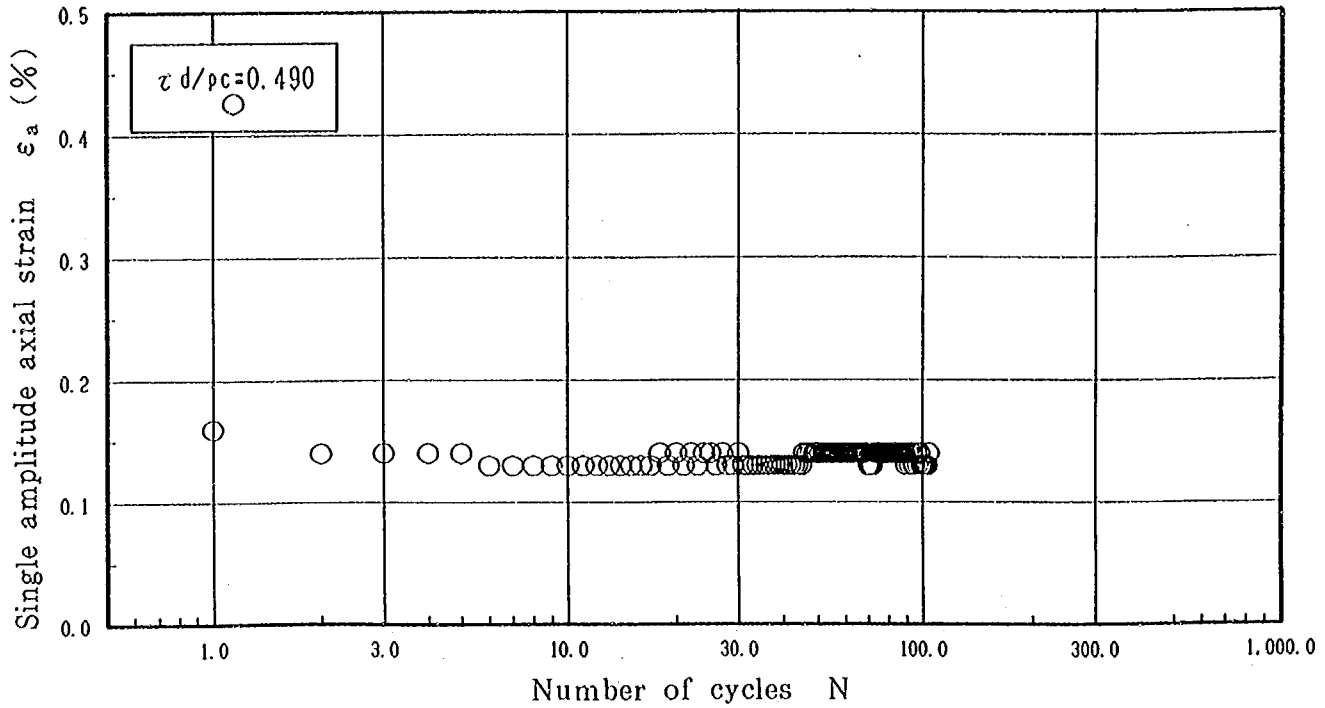


図-3.15(a) ロック材料の排気繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock (Drained)

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=4.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

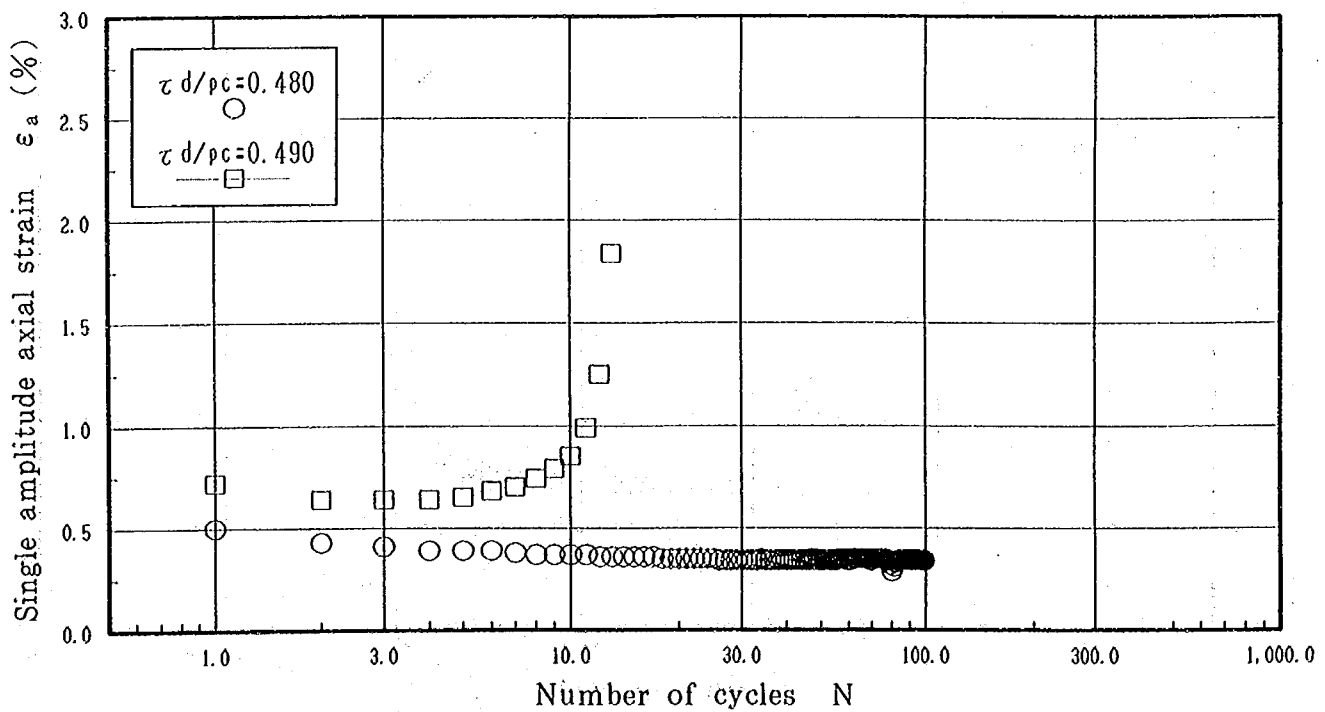


図-3.15(b) ロック材料の排気繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock (Drained)

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

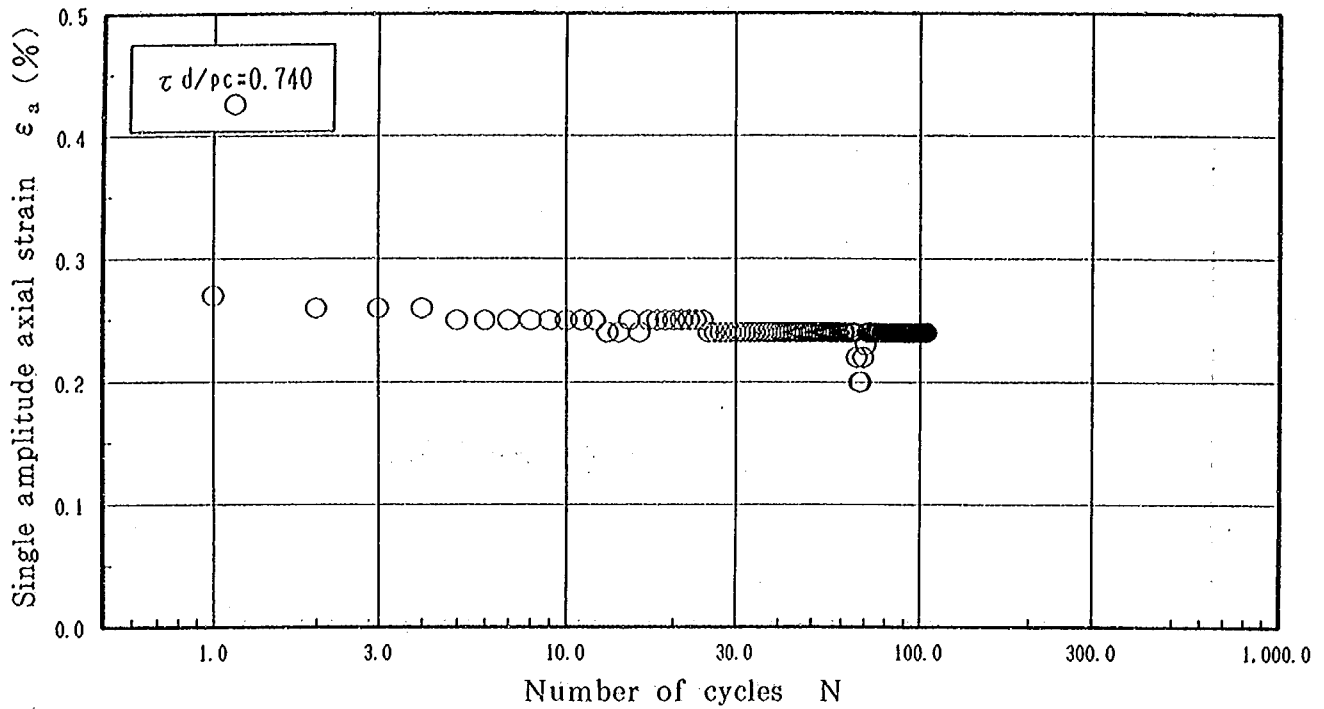


図-3.15(c) ロック材料の排気繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock (Drained)

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=4.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

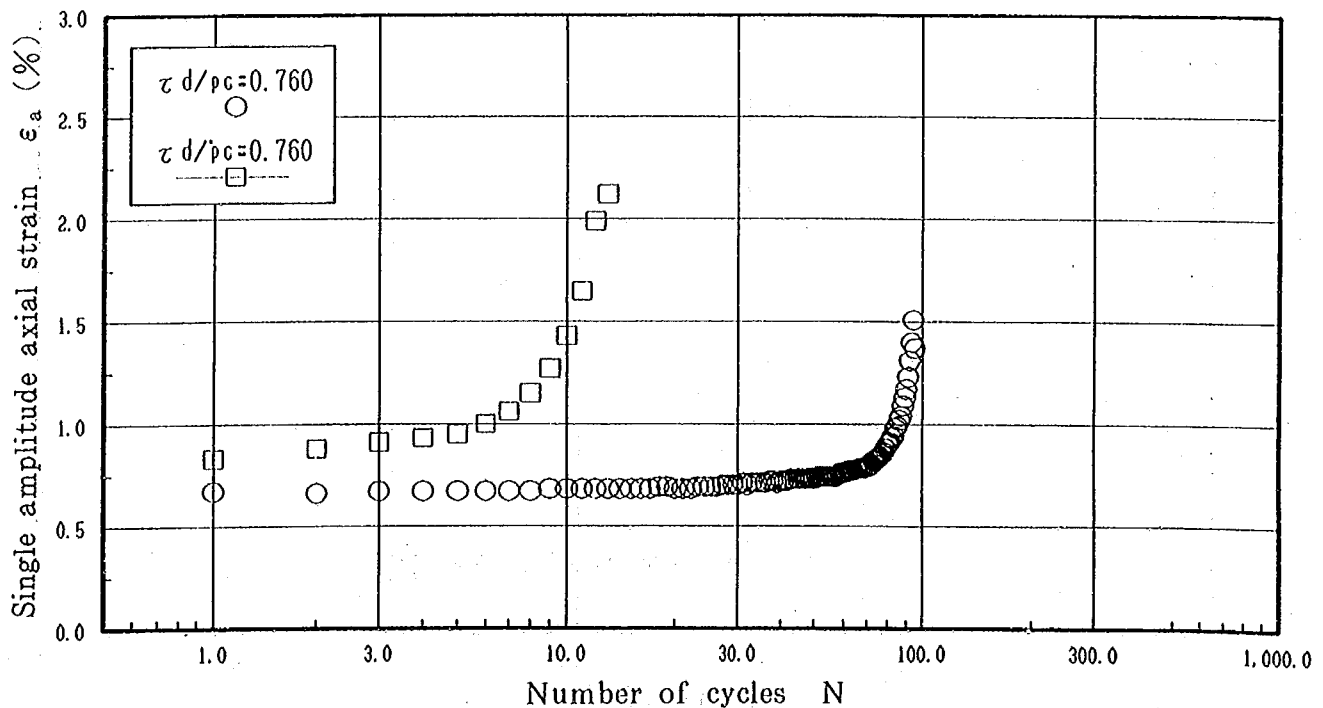


図-3.15(d) ロック材料の排気繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

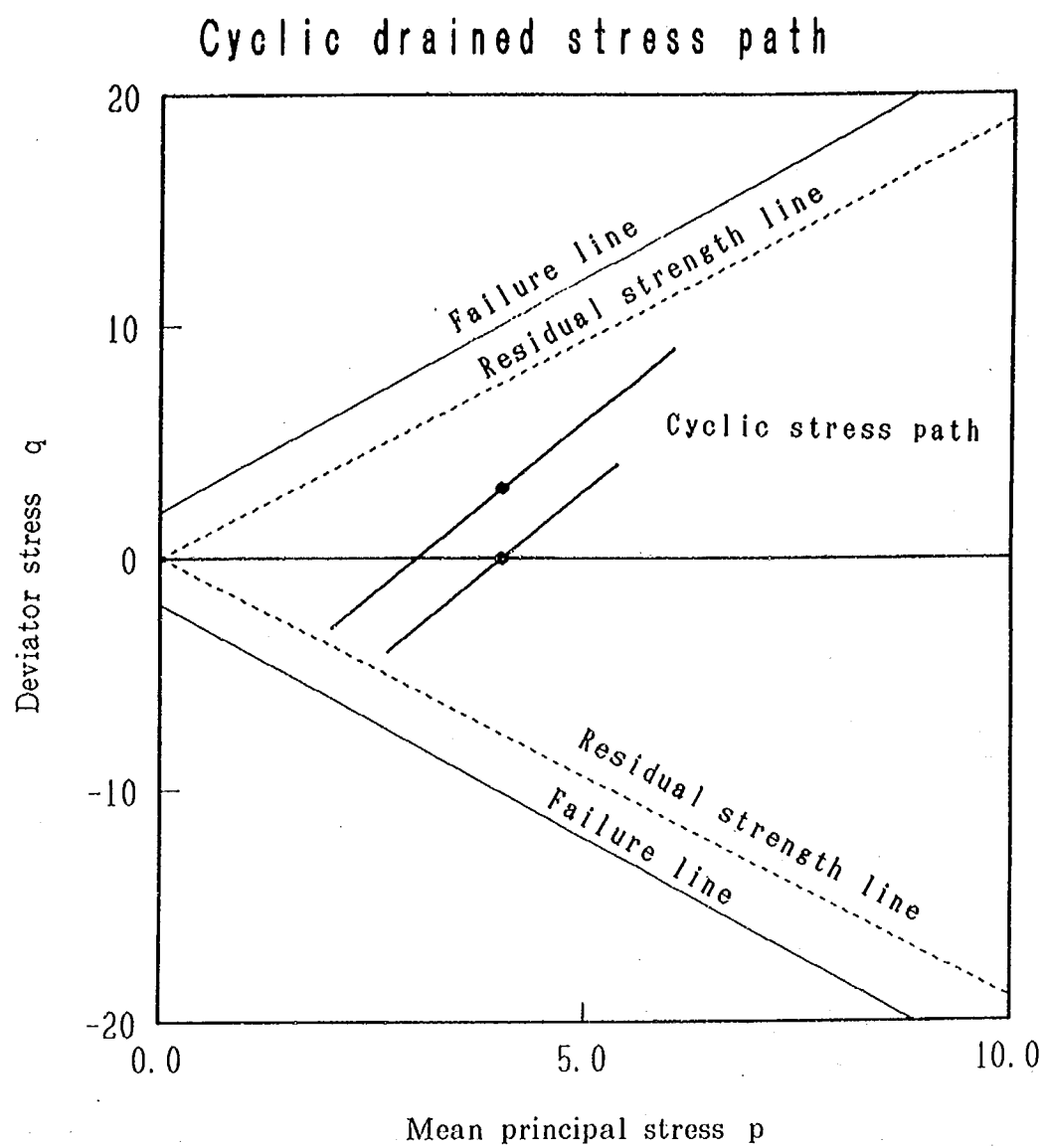
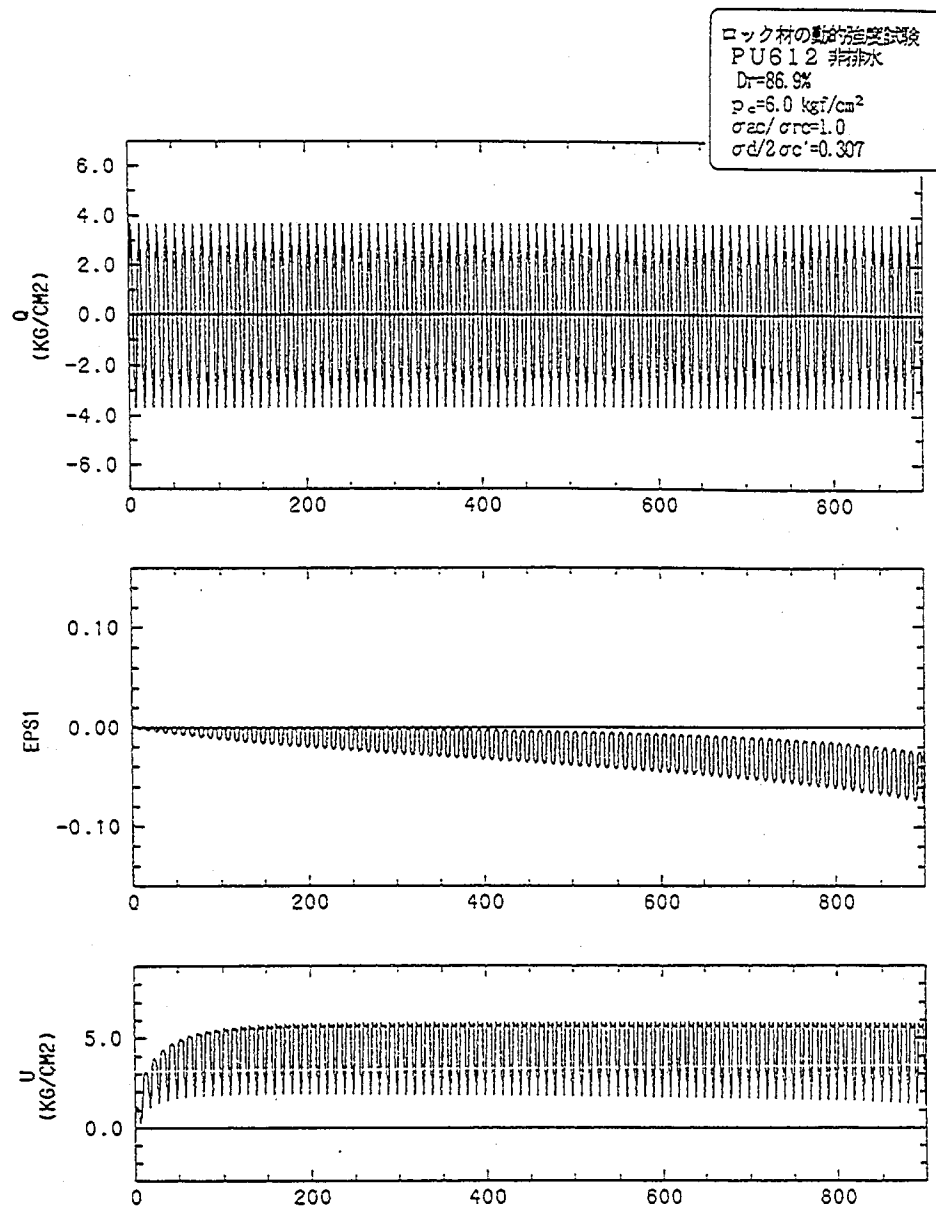
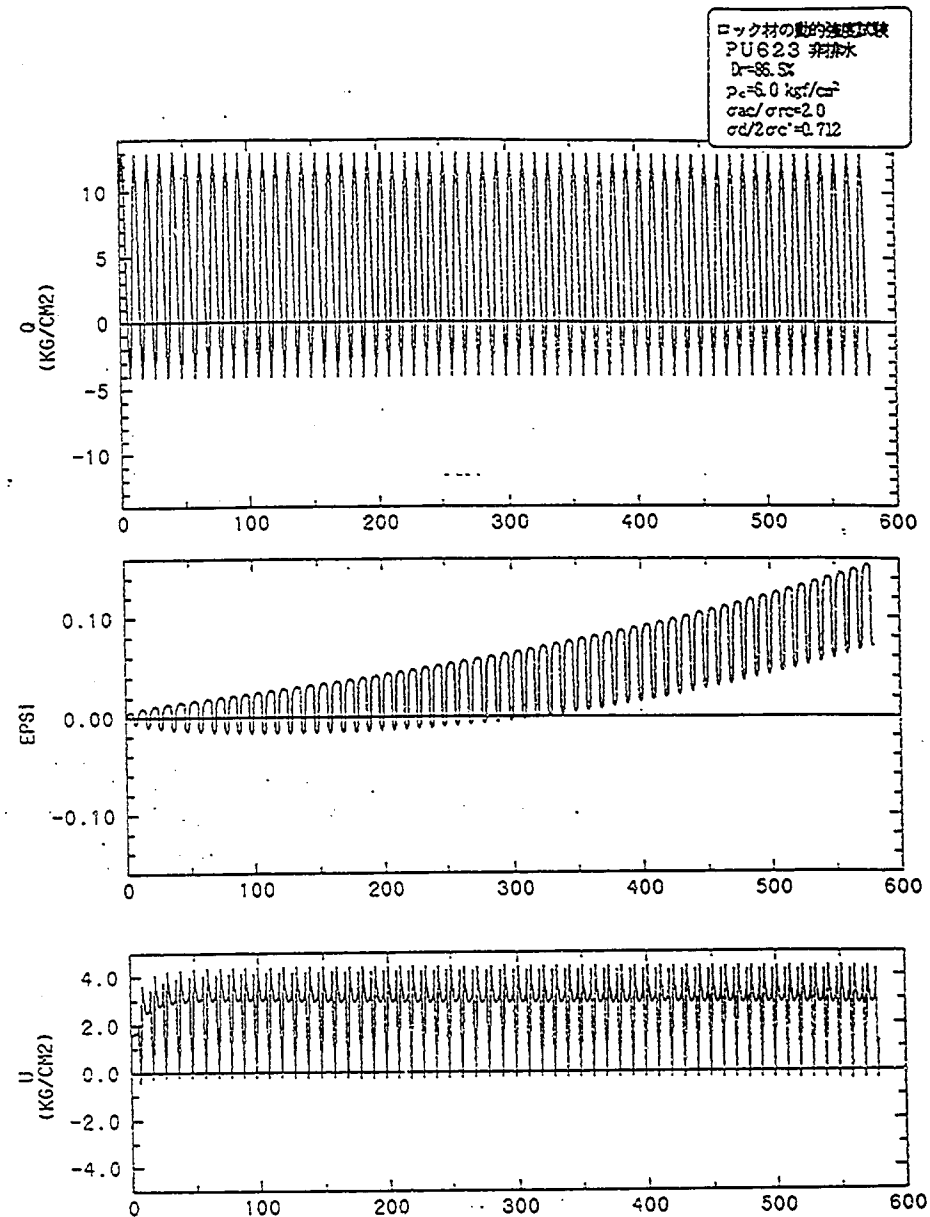


図-3.16 排水繰返し試験における応力経路

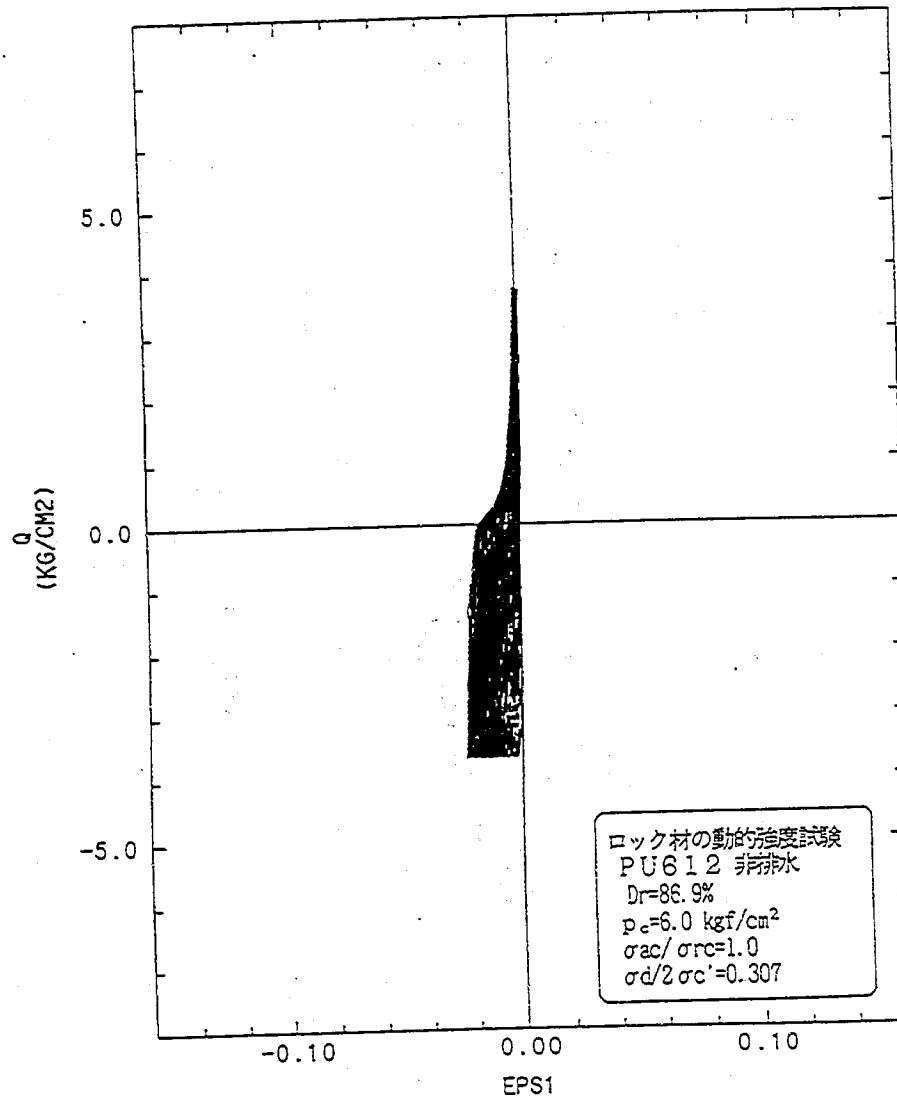


(a) 等方状態

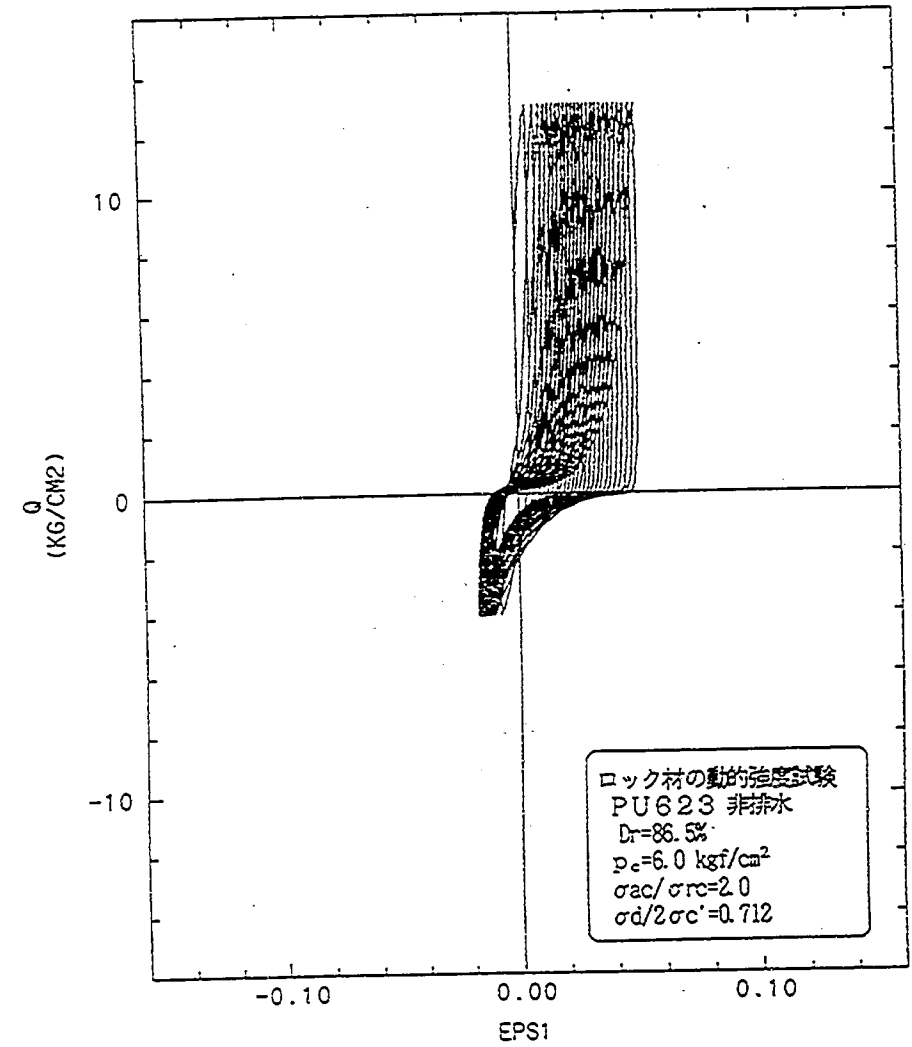


(b) 異方状態

図-3.17 ロック材料の非排水繰返し試験における時刻歴

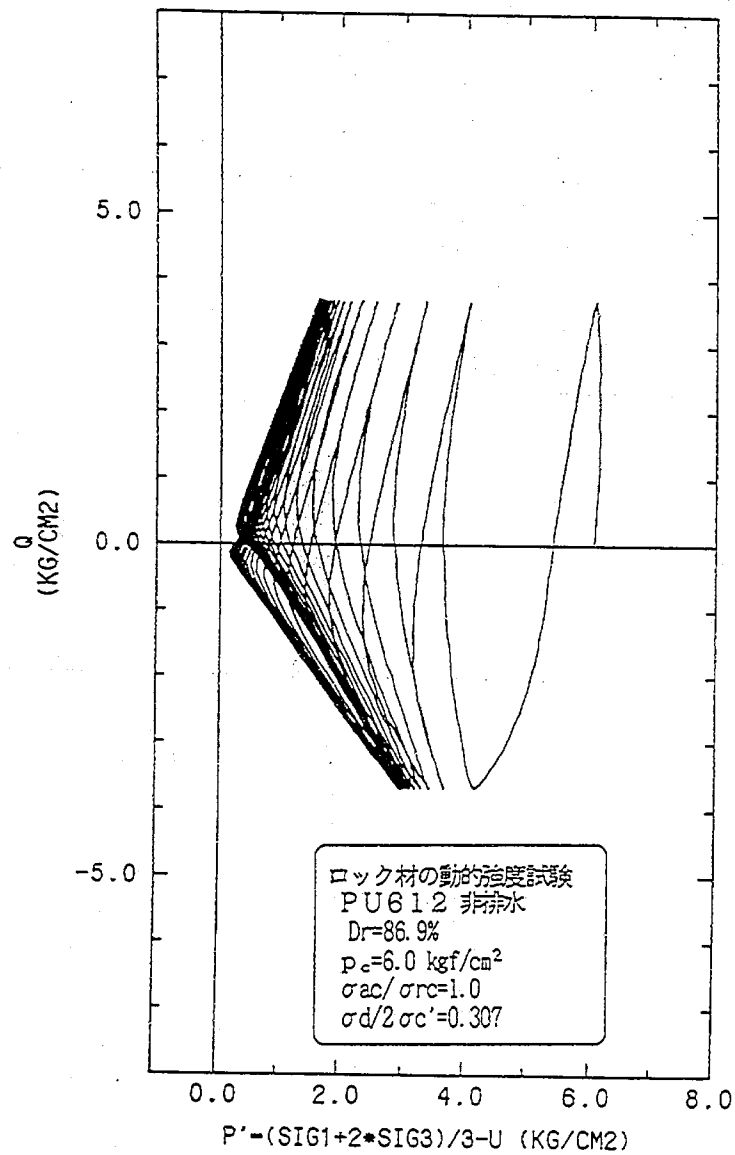


(a) 等 方 状 態

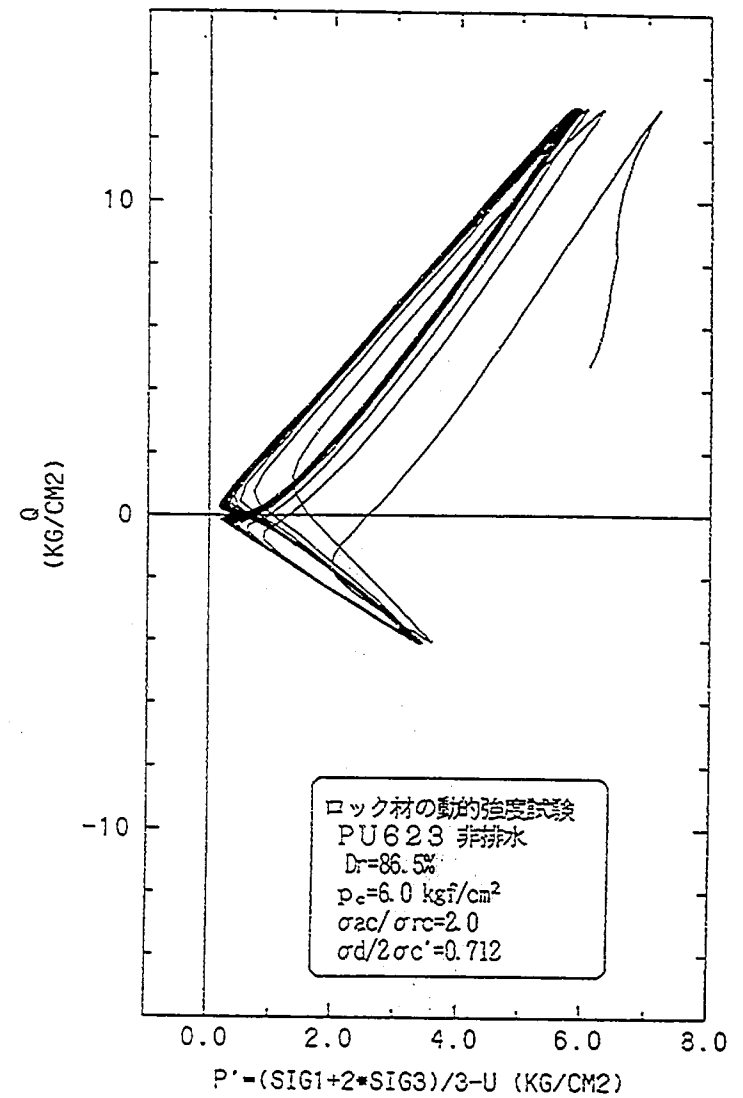


(b) 異 方 状 態

図-3.18 ロック材料の非排水繰返し試験におけるヒステリシスループ

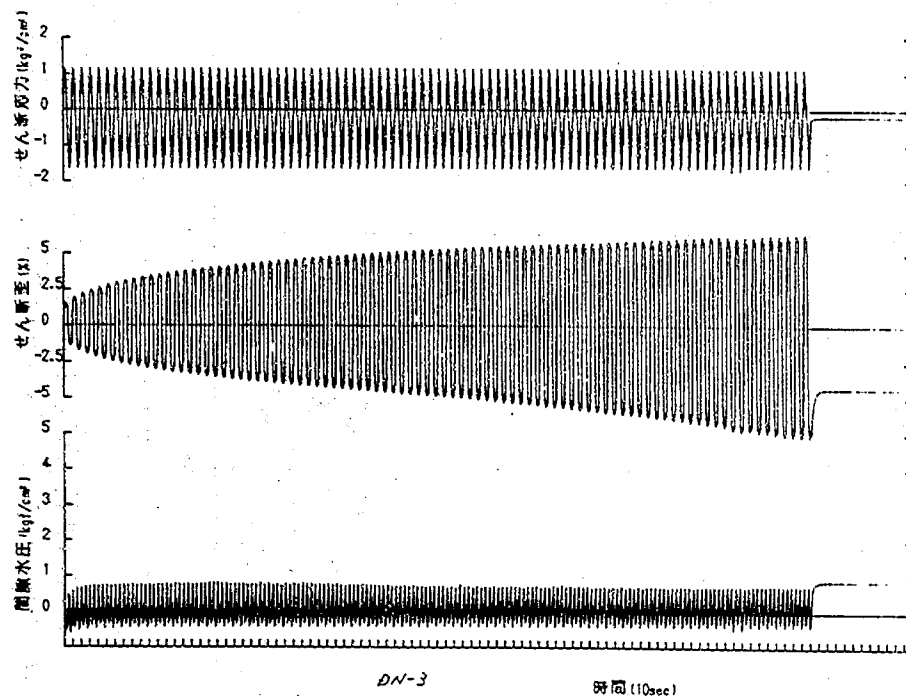


(a) 等方状態

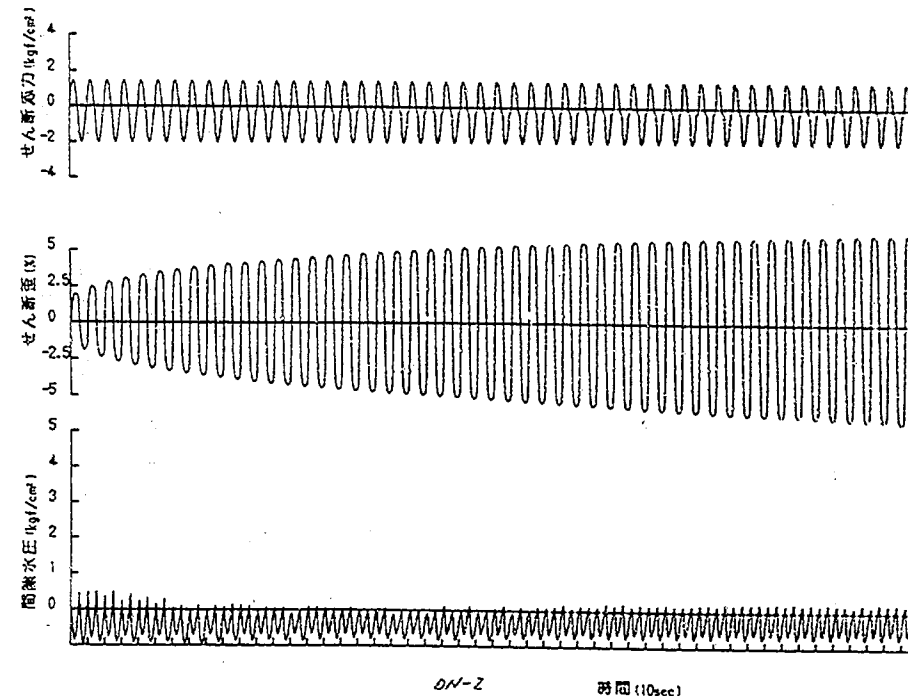


(b) 異方状態

図-3.19 ロック材料の非排水繰返し試験におけるストレスパス



(a) $\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $\tau/\sigma=1.4$
平均主応力 1.0 kgf/cm^2 , $Dr=85\%$



(b) $\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $\tau/\sigma=1.72$
平均主応力 1.0 kgf/cm^2 , $Dr=85\%$

図-3.20 ロック材料の非排水繰返し試験における時刻歴，ねじり単純せん断

Cyclic loading test for rock
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

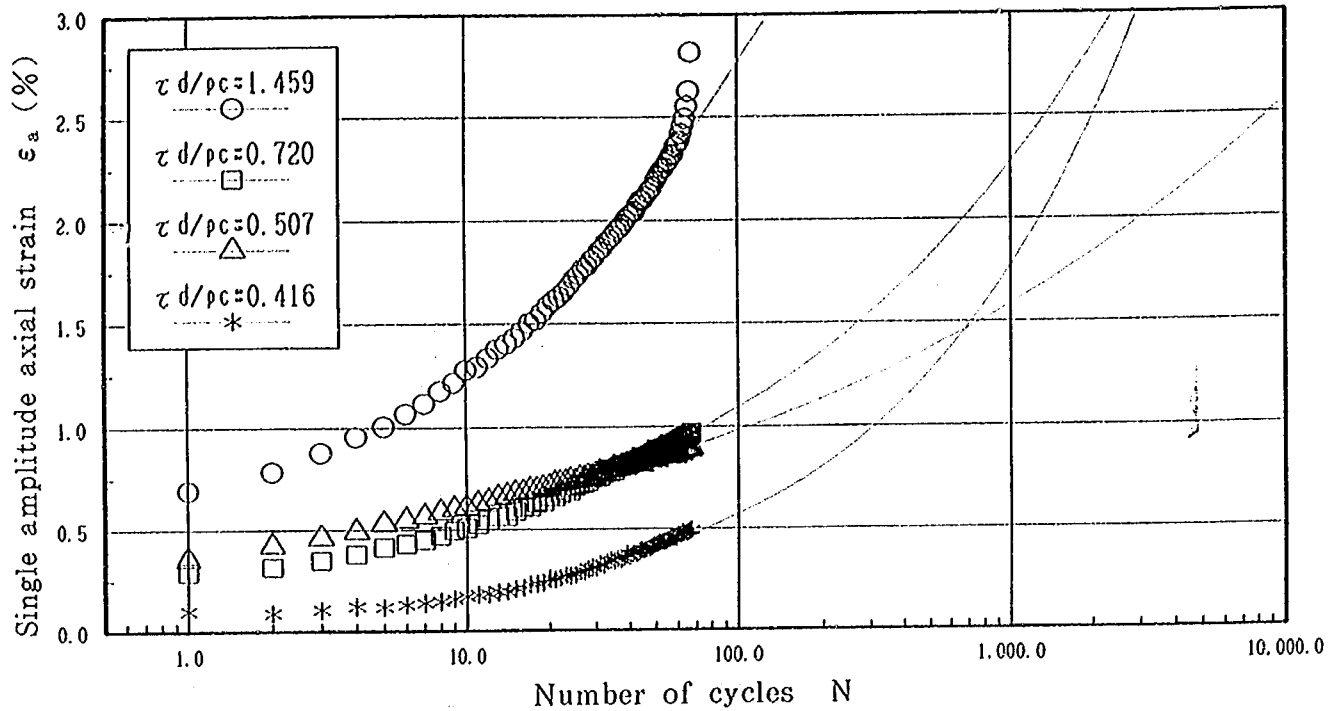


図-3.21(a) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=2.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

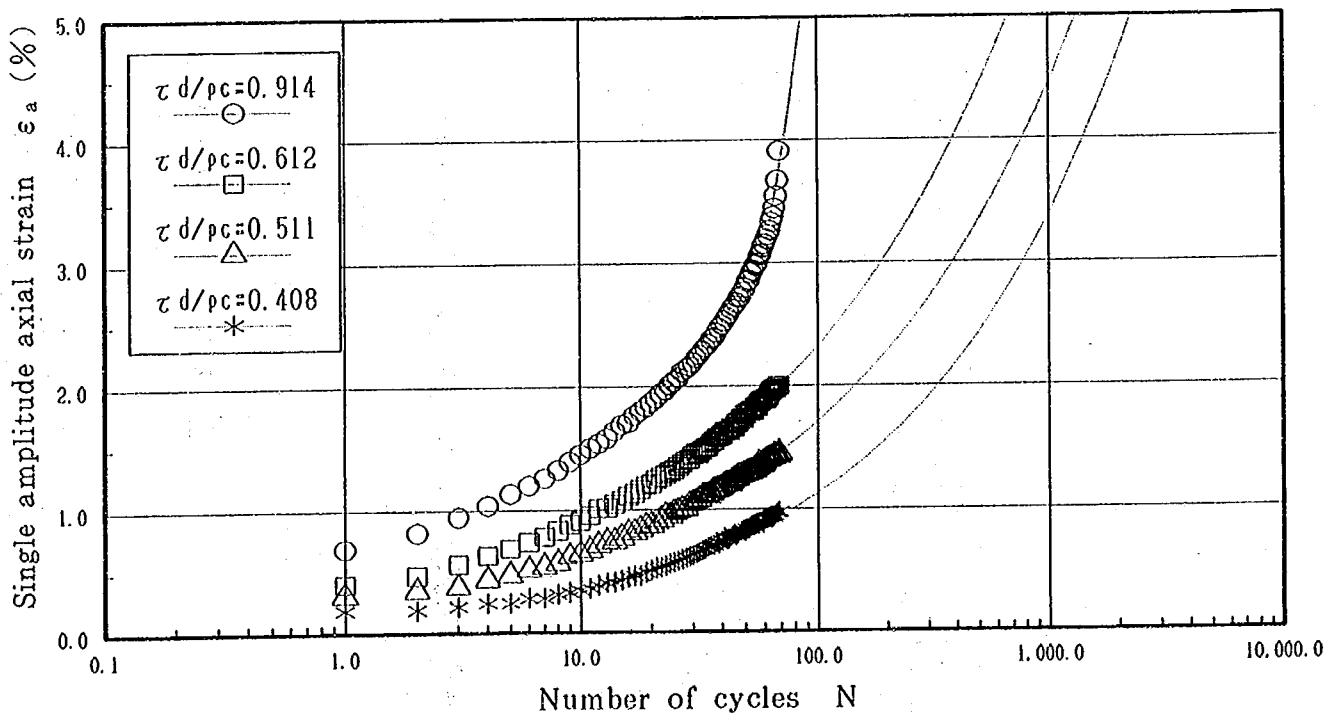


図-3.21(b) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=4.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

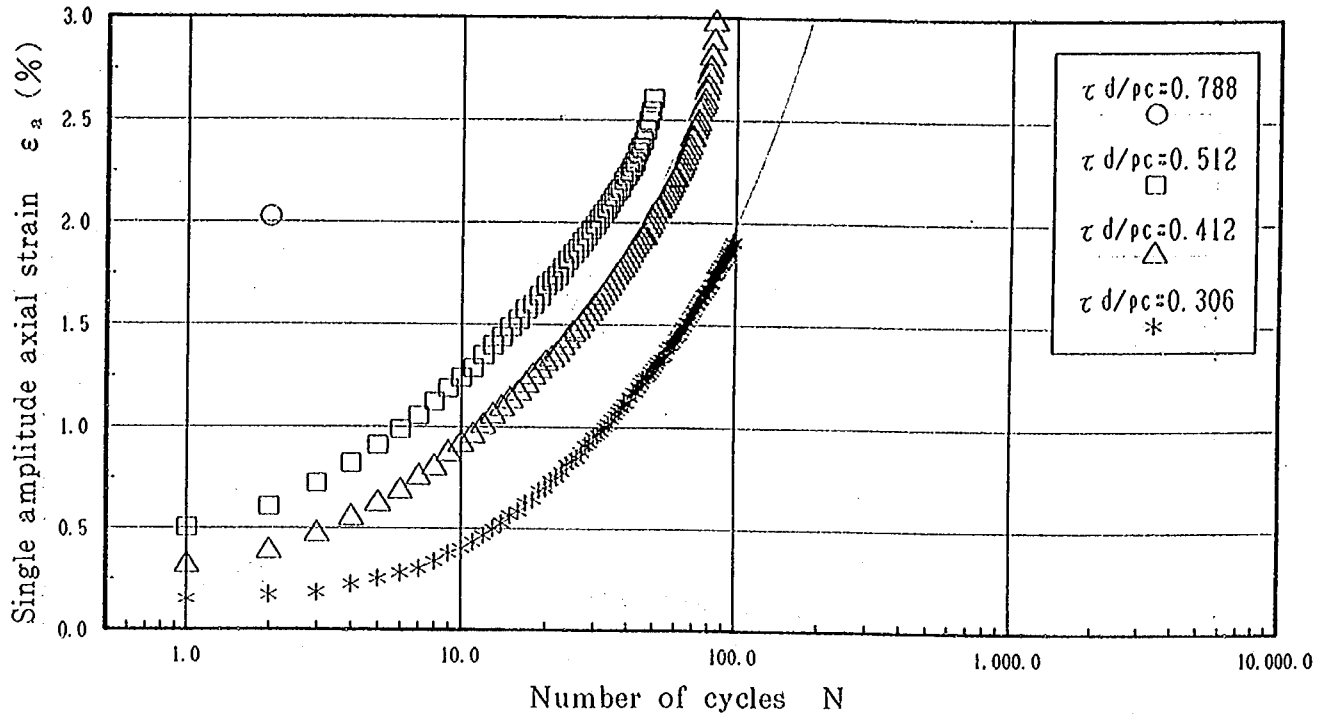


図-3.21(c) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=6.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

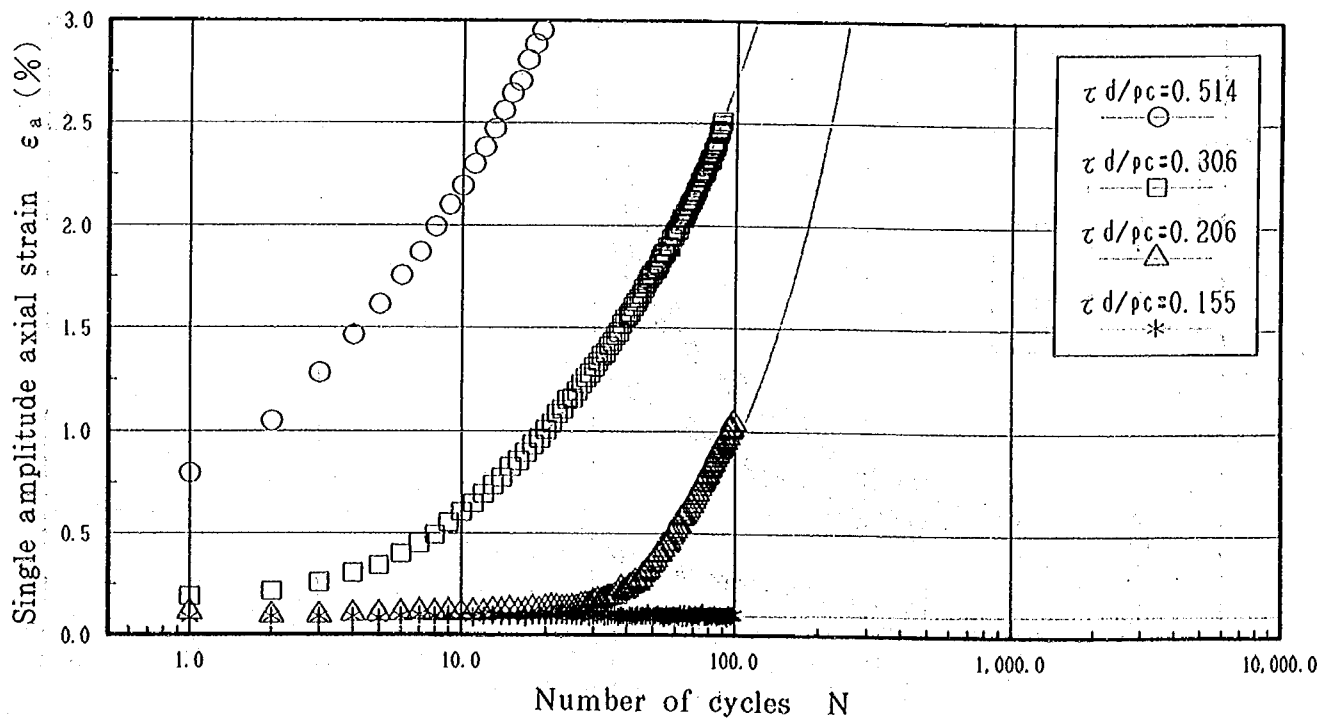


図-3.21(d) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.5$, $p_c=4.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

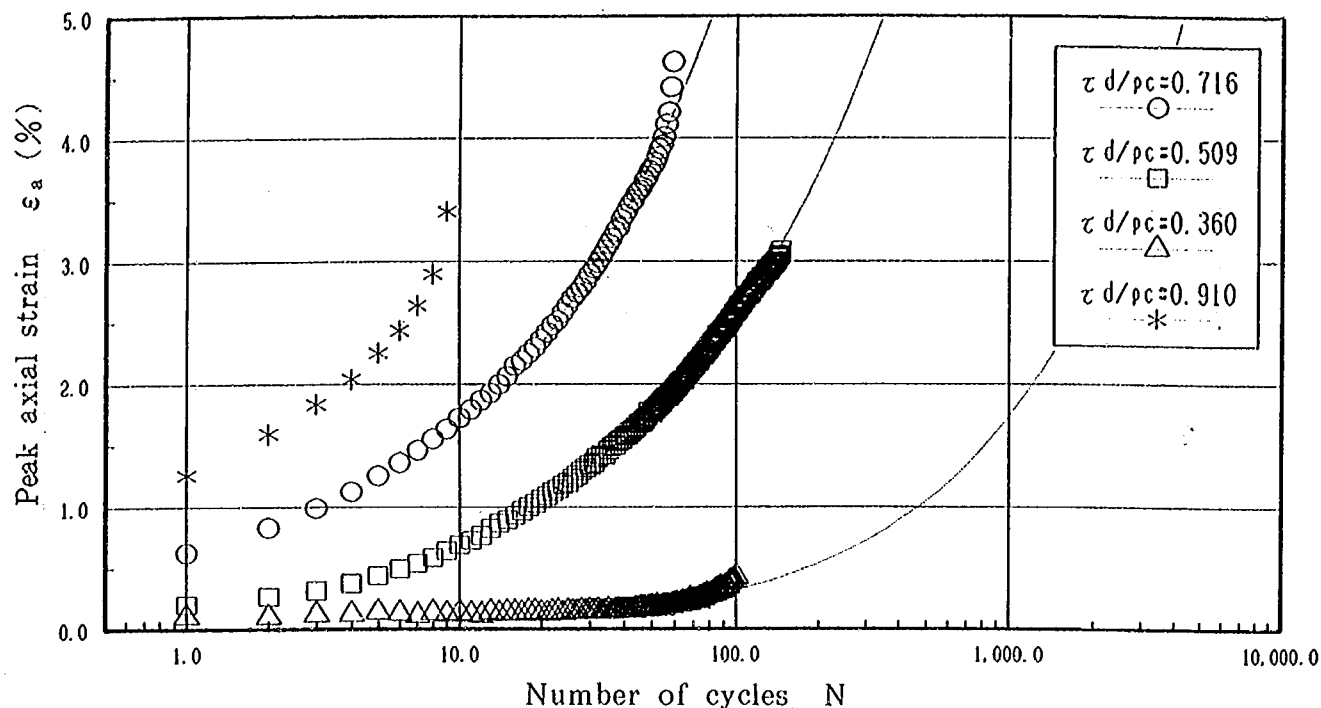


図-3.22(a) ロック材料の非排水繰返し载荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数 ($\sigma_1/\sigma_3=1.5$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

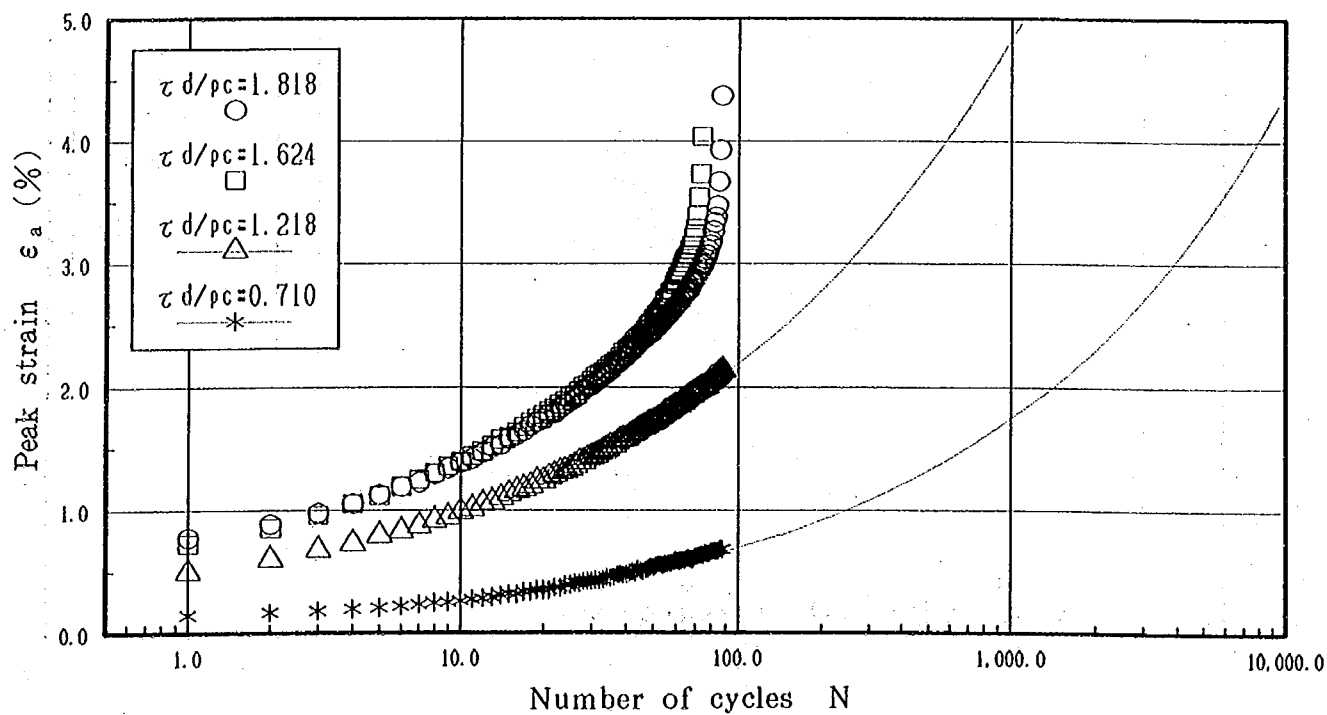


図-3.22(b) ロック材料の非排水繰返し载荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

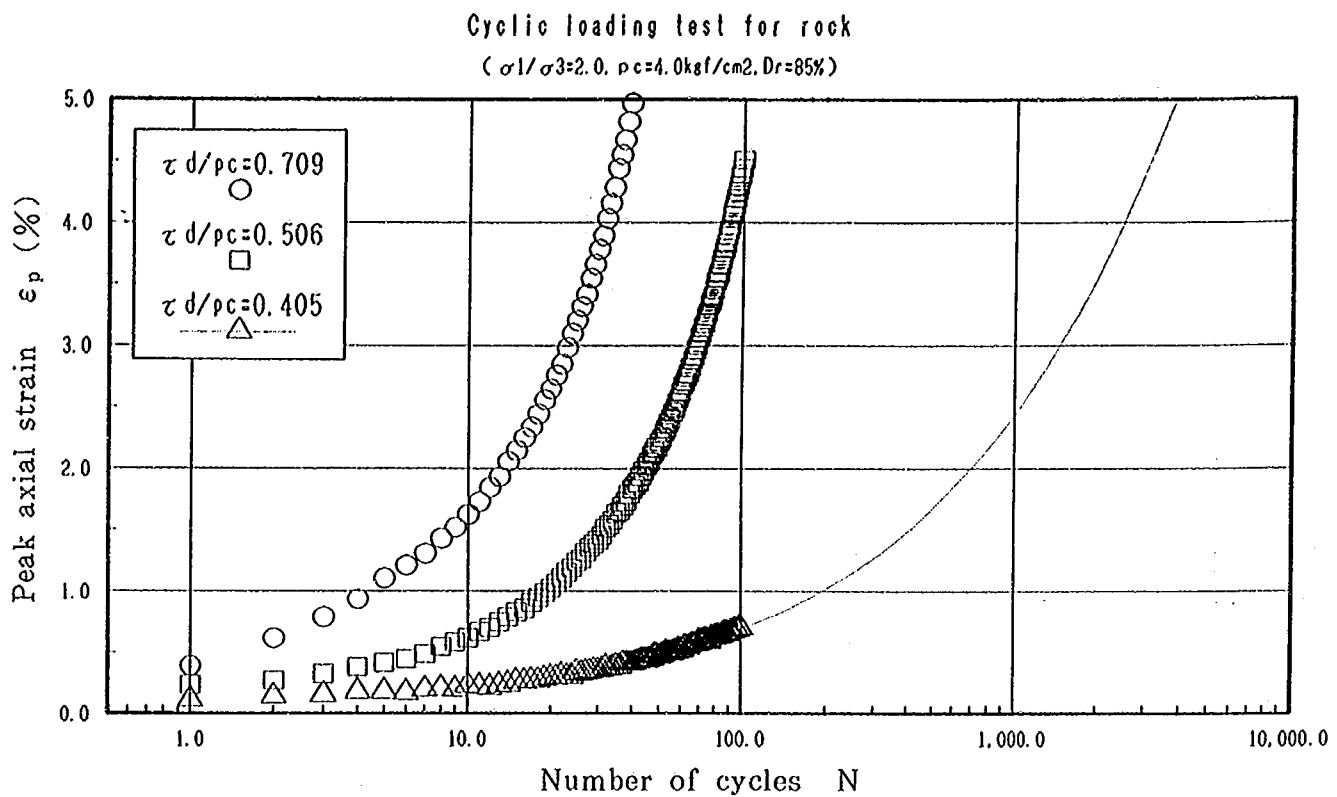


図-3.22(c) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 4.0 kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

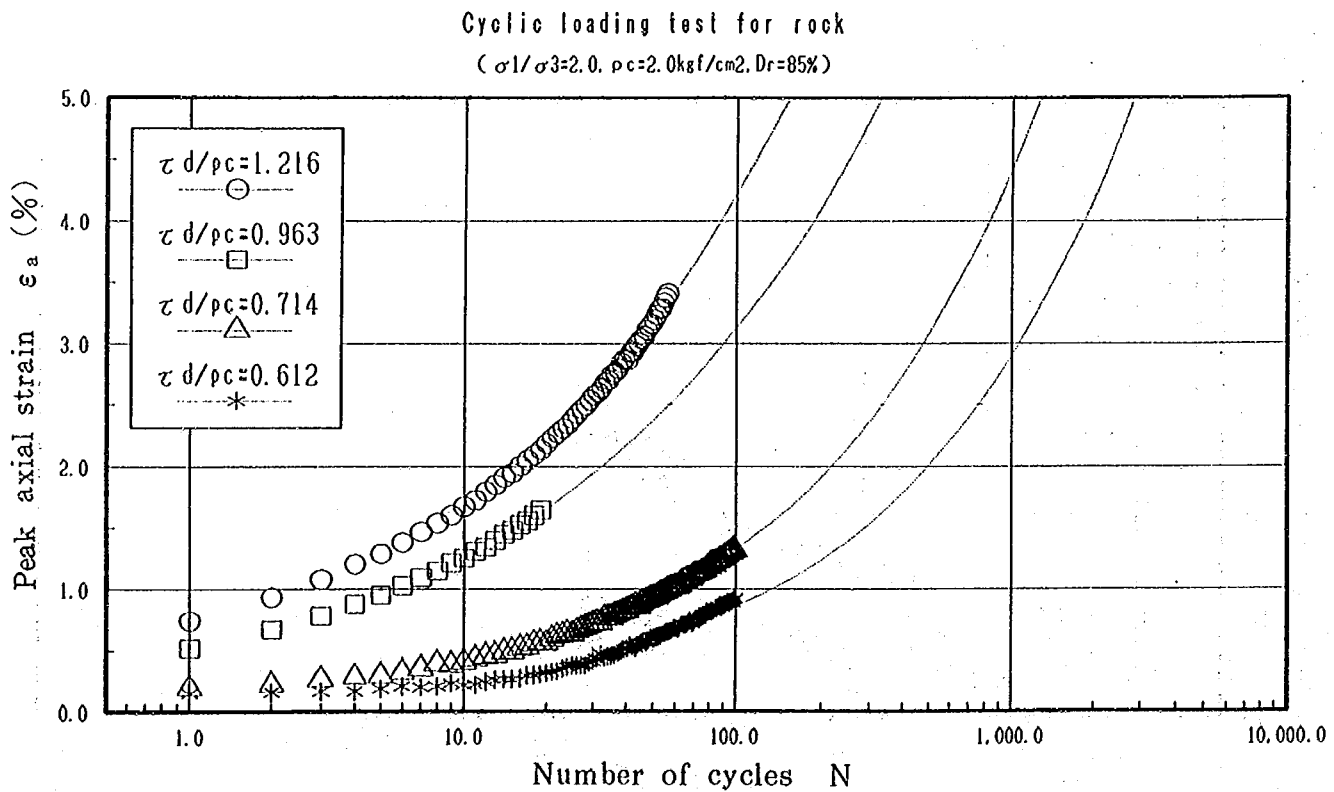


図-3.22(d) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 2.0 kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=6.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

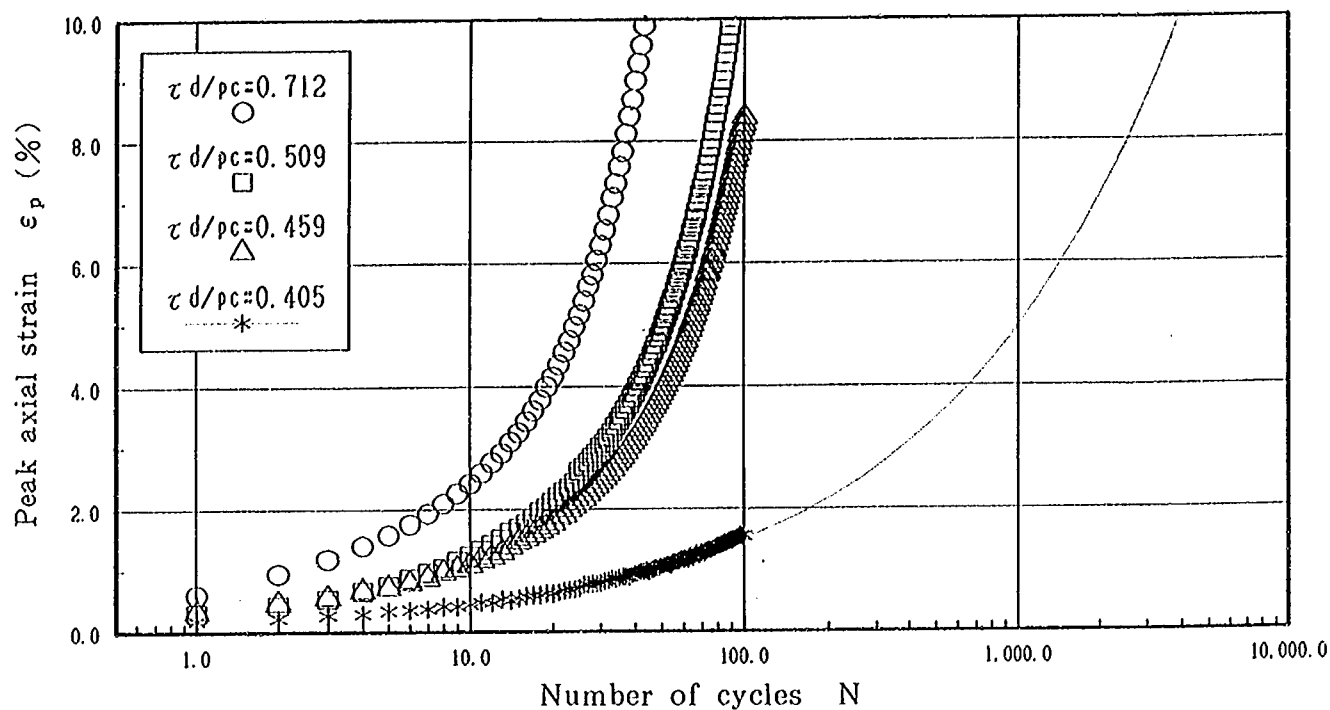


図-3.22(e) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

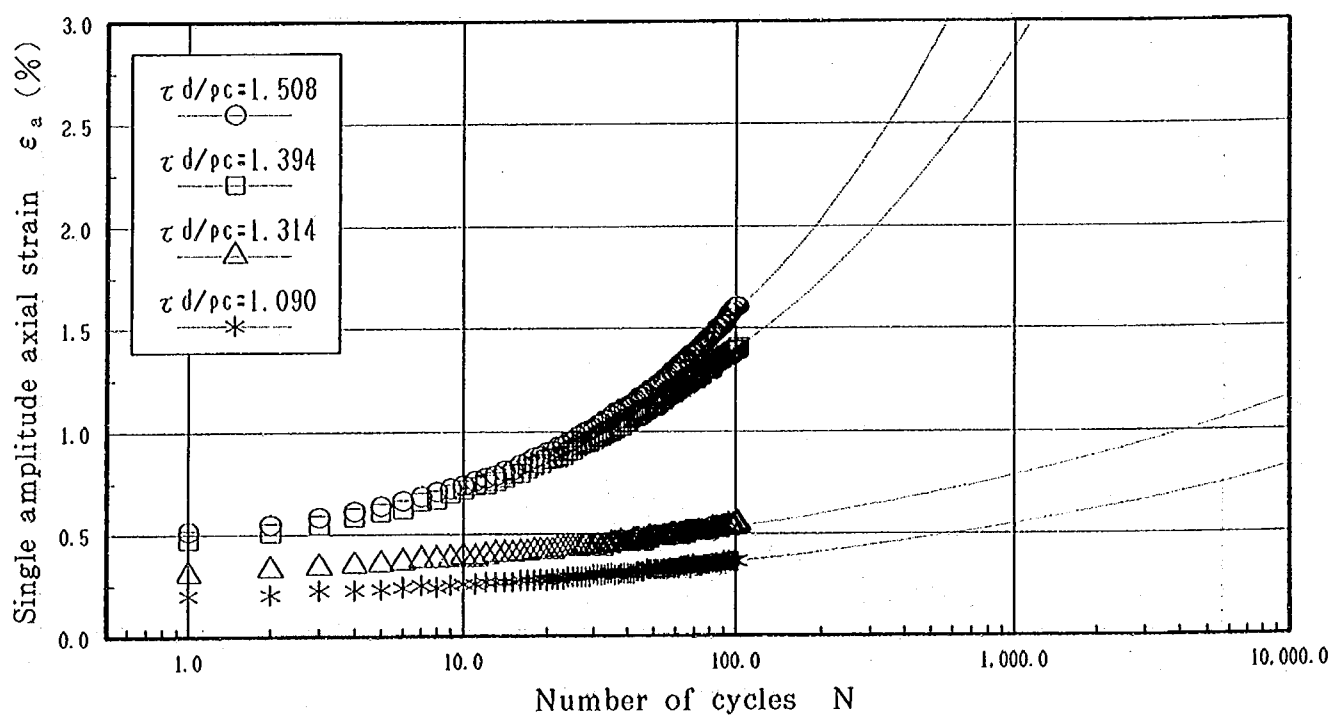


図-3.23(a) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock
 $(\sigma_1/\sigma_3=1.0, p_c=2.0\text{kgf/cm}^2, D_r=95\%)$

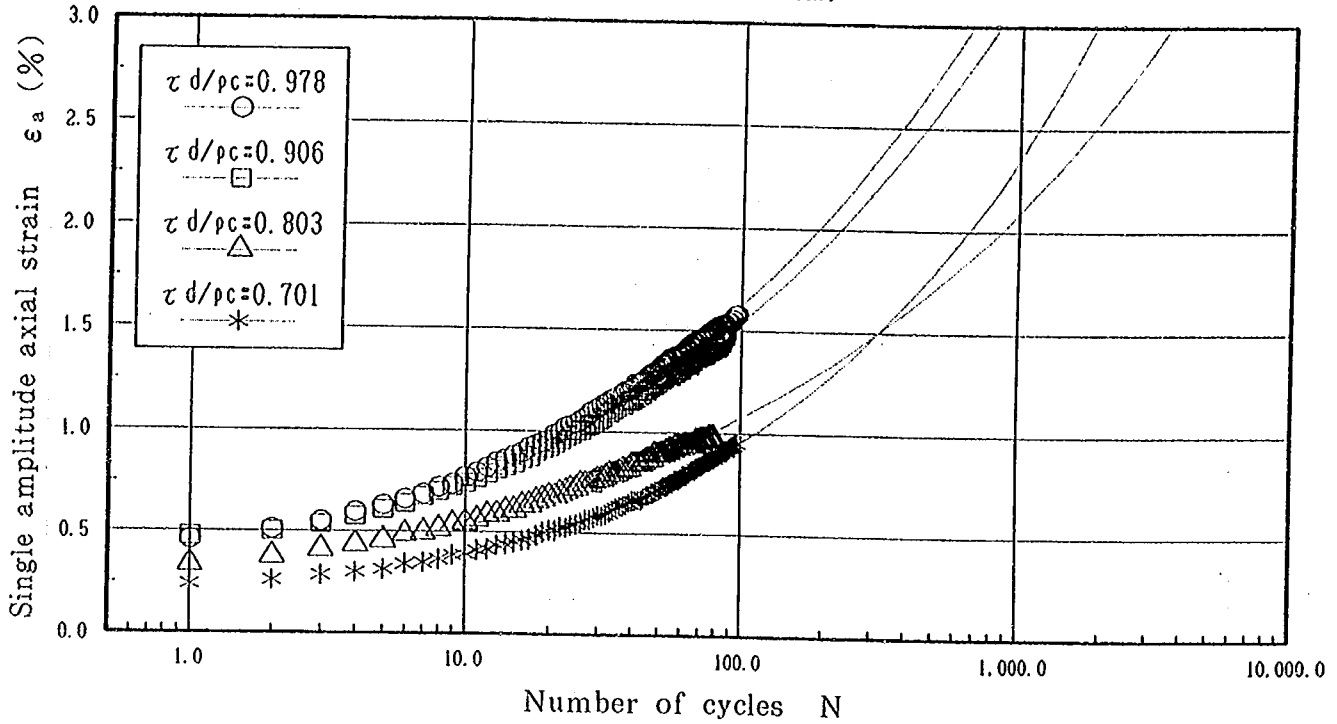


図-3.23(b) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
 $(\sigma_1/\sigma_3=1.0, \text{平均主応力}2.0\text{kgf/cm}^2, D_r=95\%)$

Cyclic loading test for rock
 $(\sigma_1/\sigma_3=1.0, p_c=4.0\text{kgf/cm}^2, D_r=95\%)$

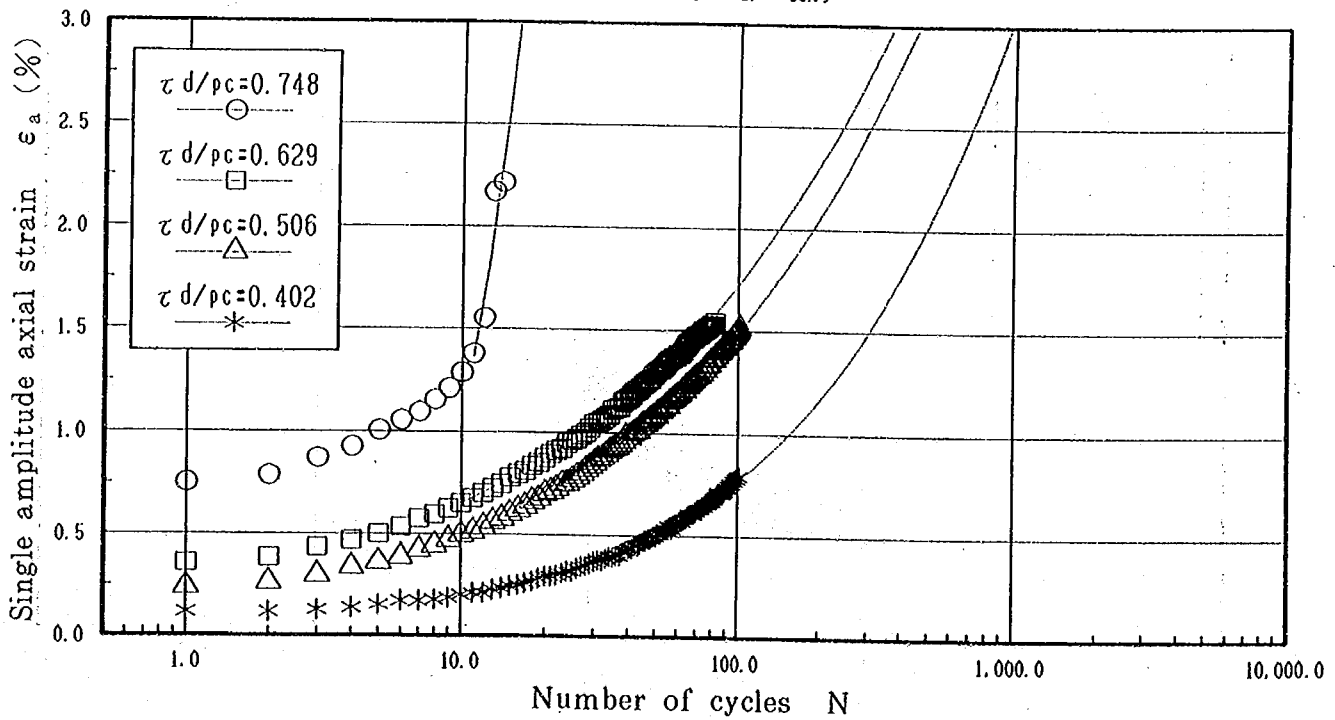


図-3.23(c) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
 $(\sigma_1/\sigma_3=1.0, \text{平均主応力}4.0\text{kgf/cm}^2, D_r=95\%)$

Cyclic loading test for rock
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=6.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

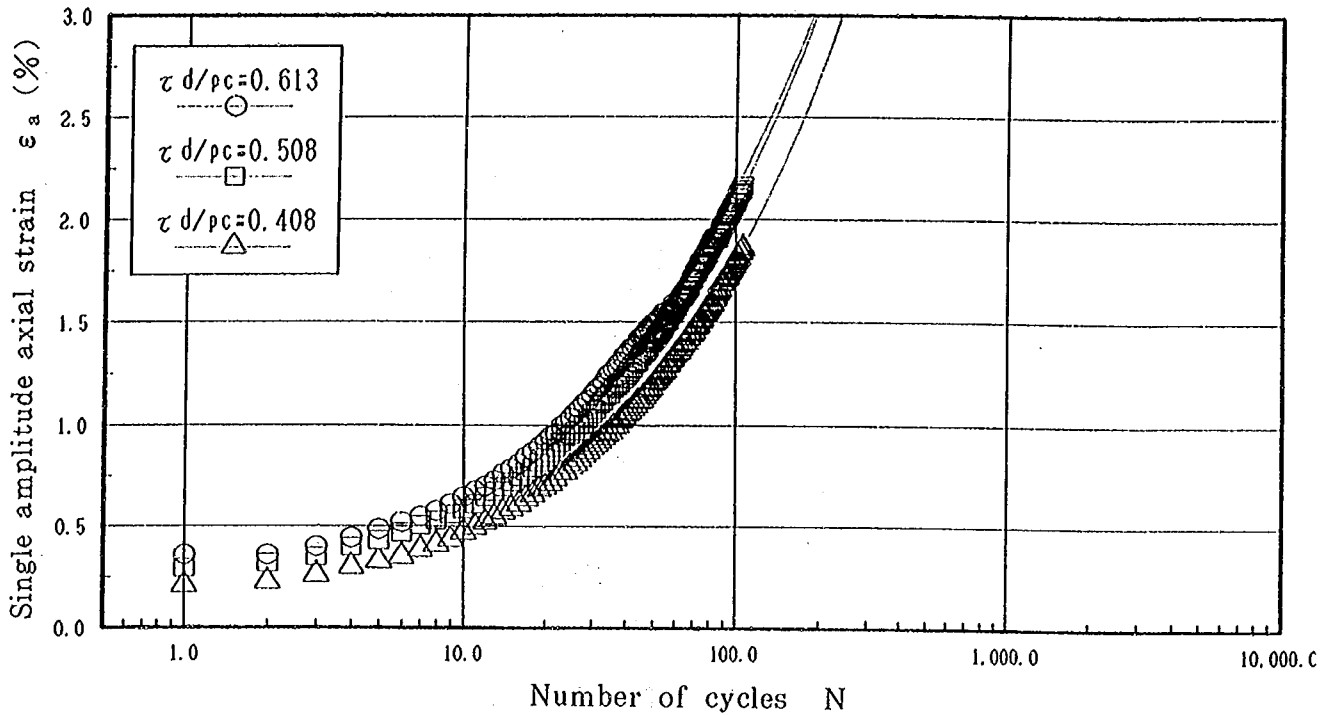


図-3.23(d) ロック材料の非排水繰返し载荷試験，片振幅軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

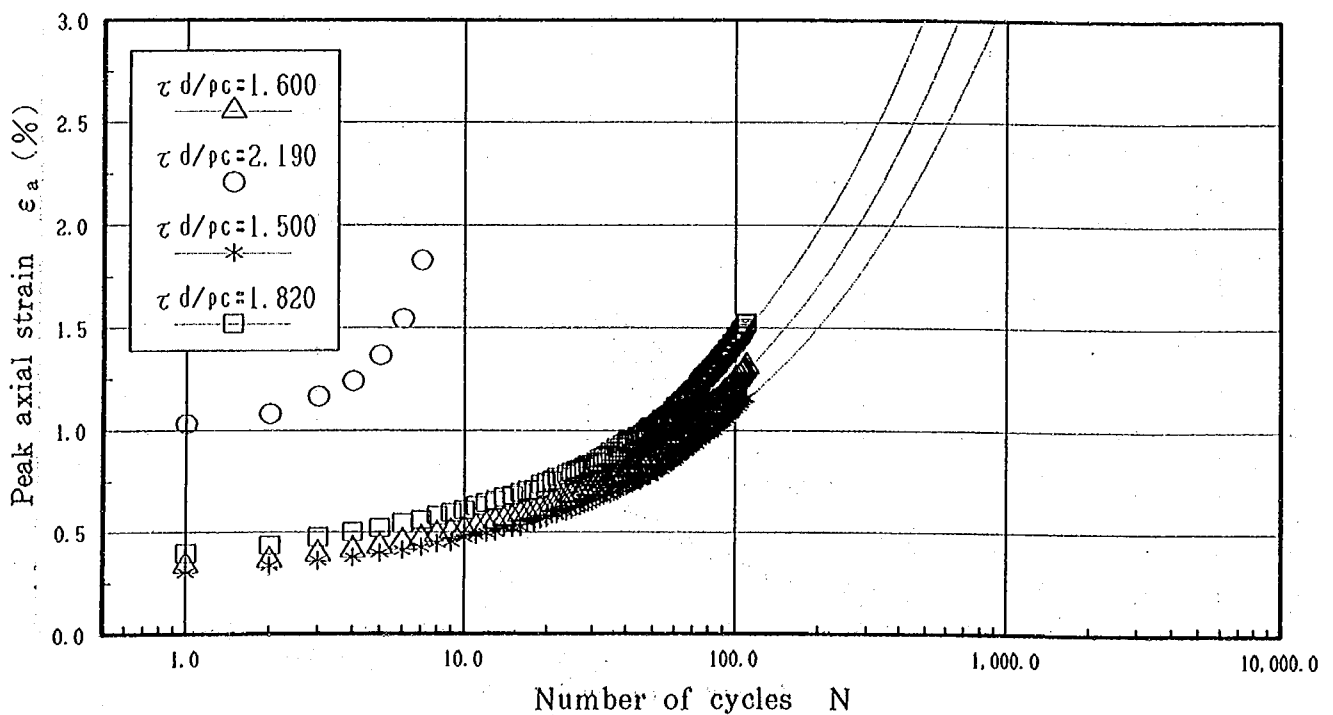


図-3.24(a) ロック材料の非排水繰返し载荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

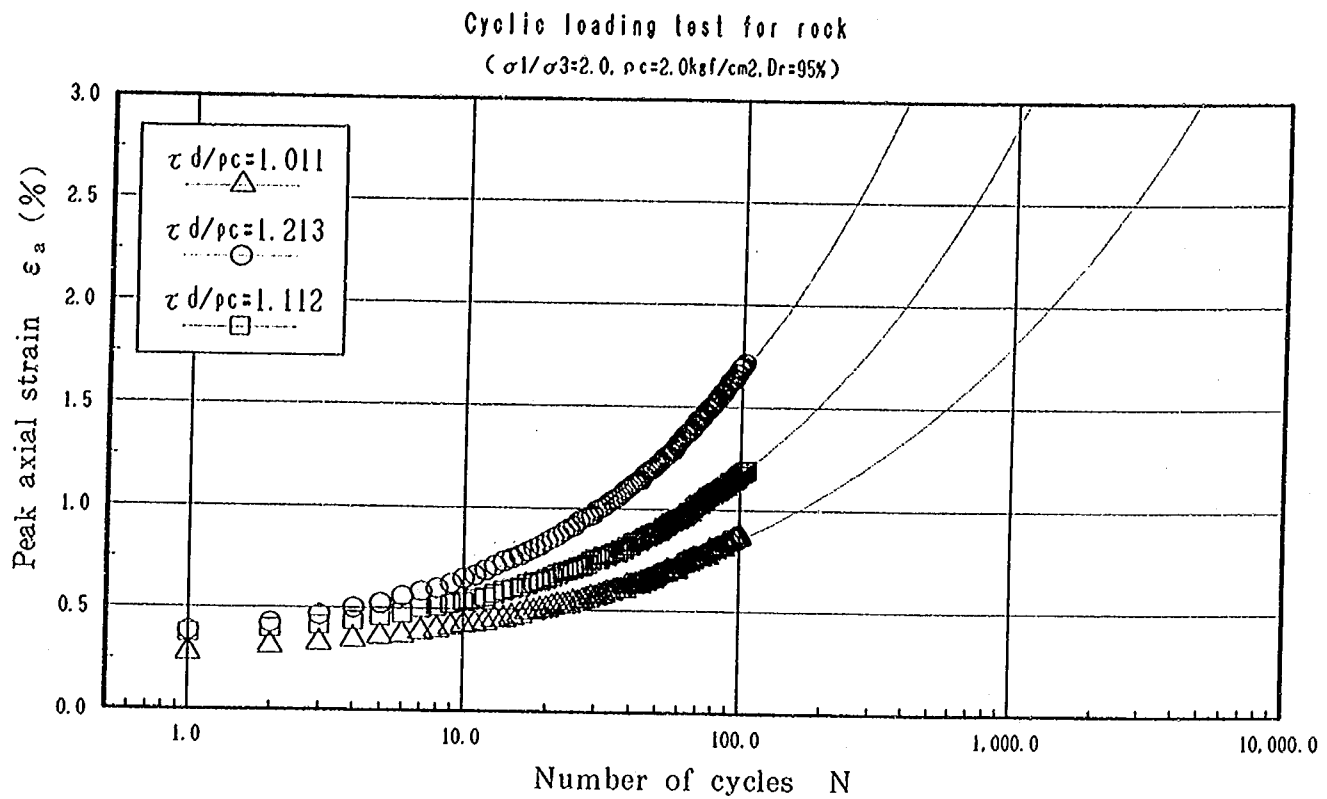


図-3.24(b) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

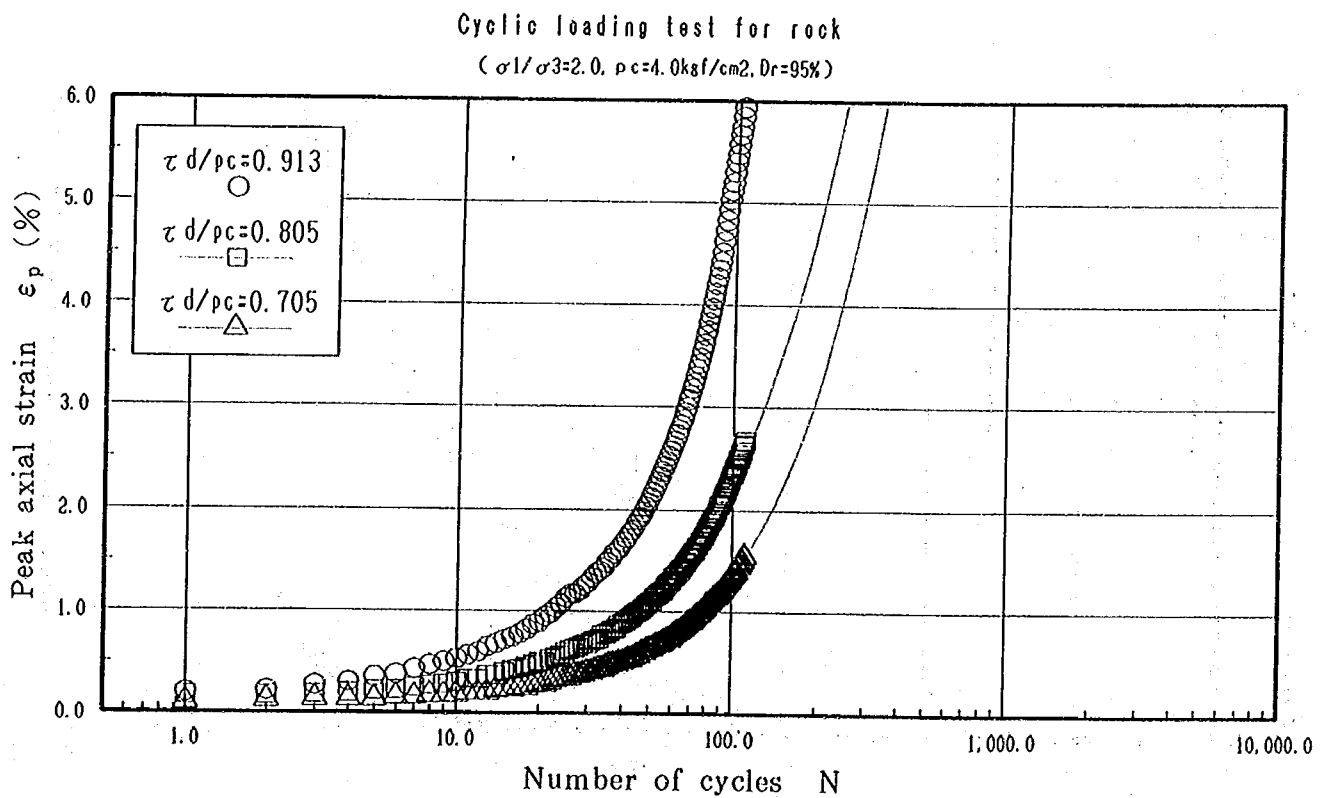


図-3.24(c) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=6.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

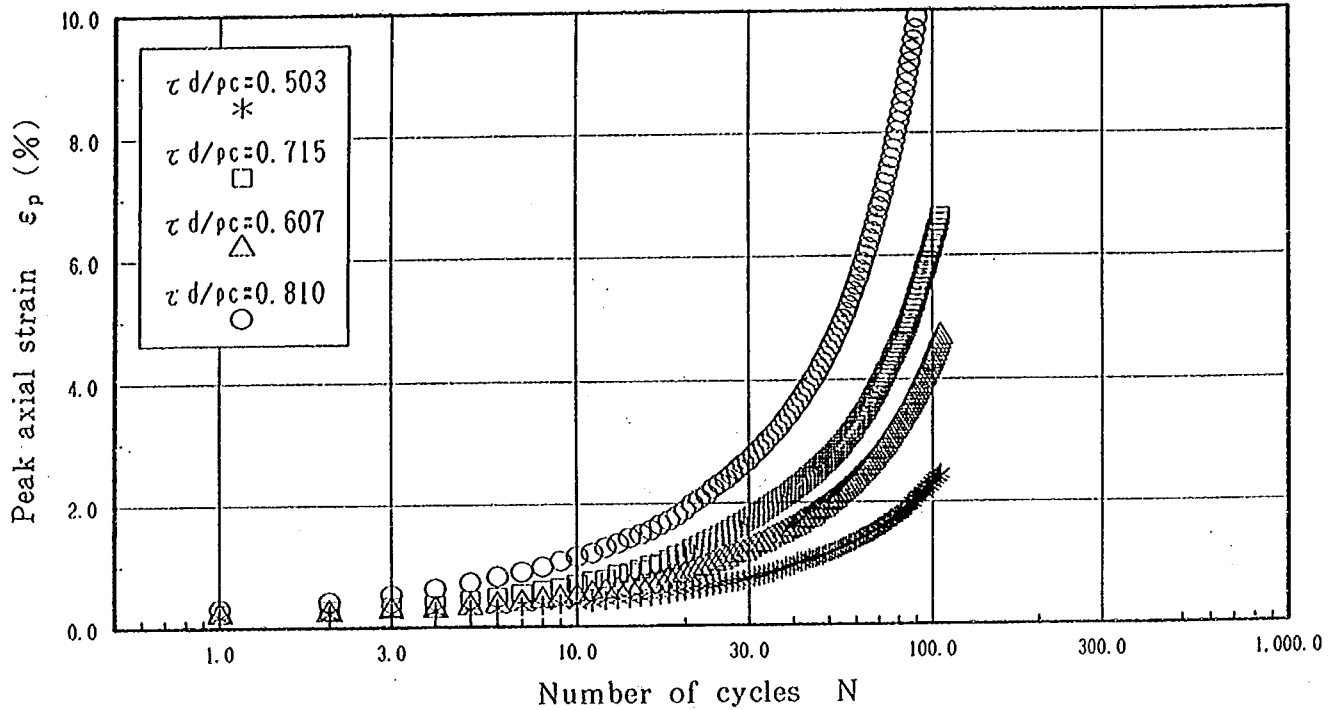


図-3.24(d) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，ピーク軸ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Torsional cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=4.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

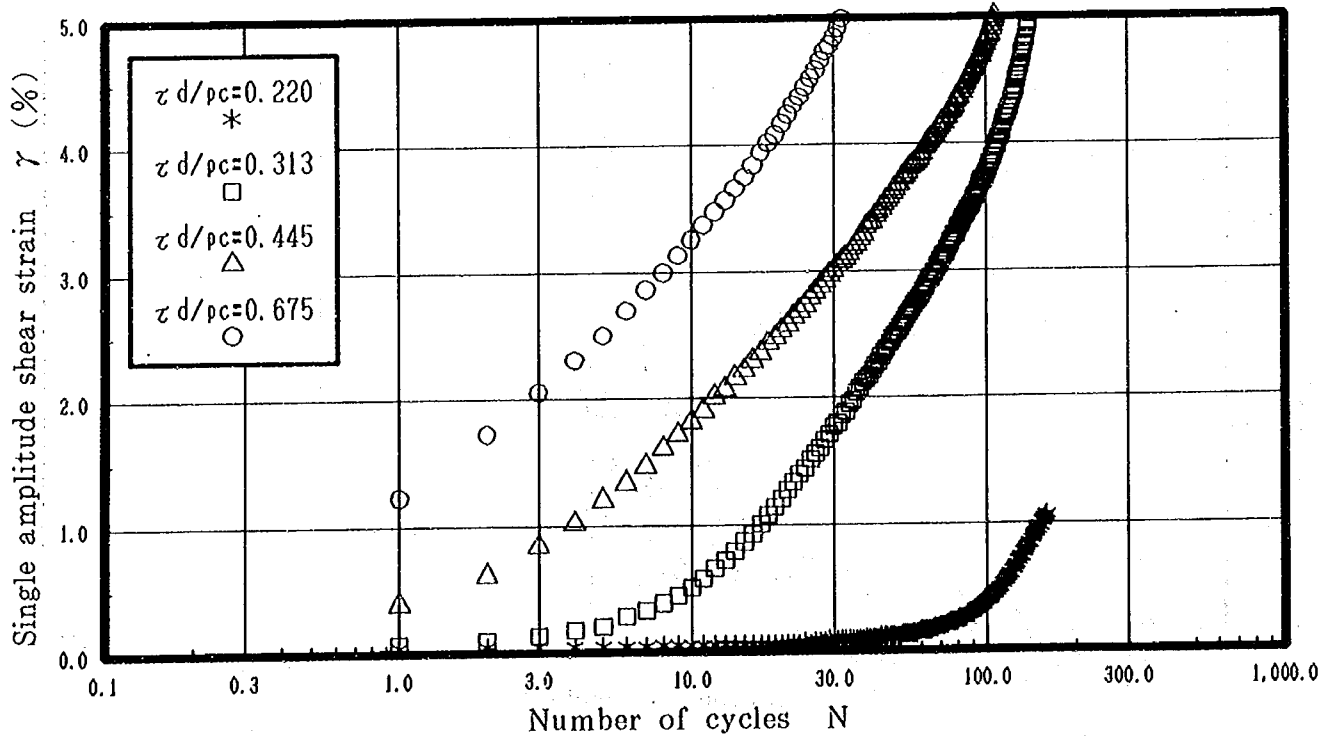


図-3.25 ロック材料の非排水繰返し載荷試験，ねじり単純試験，
片振幅せん断ひずみ～繰返し回数
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

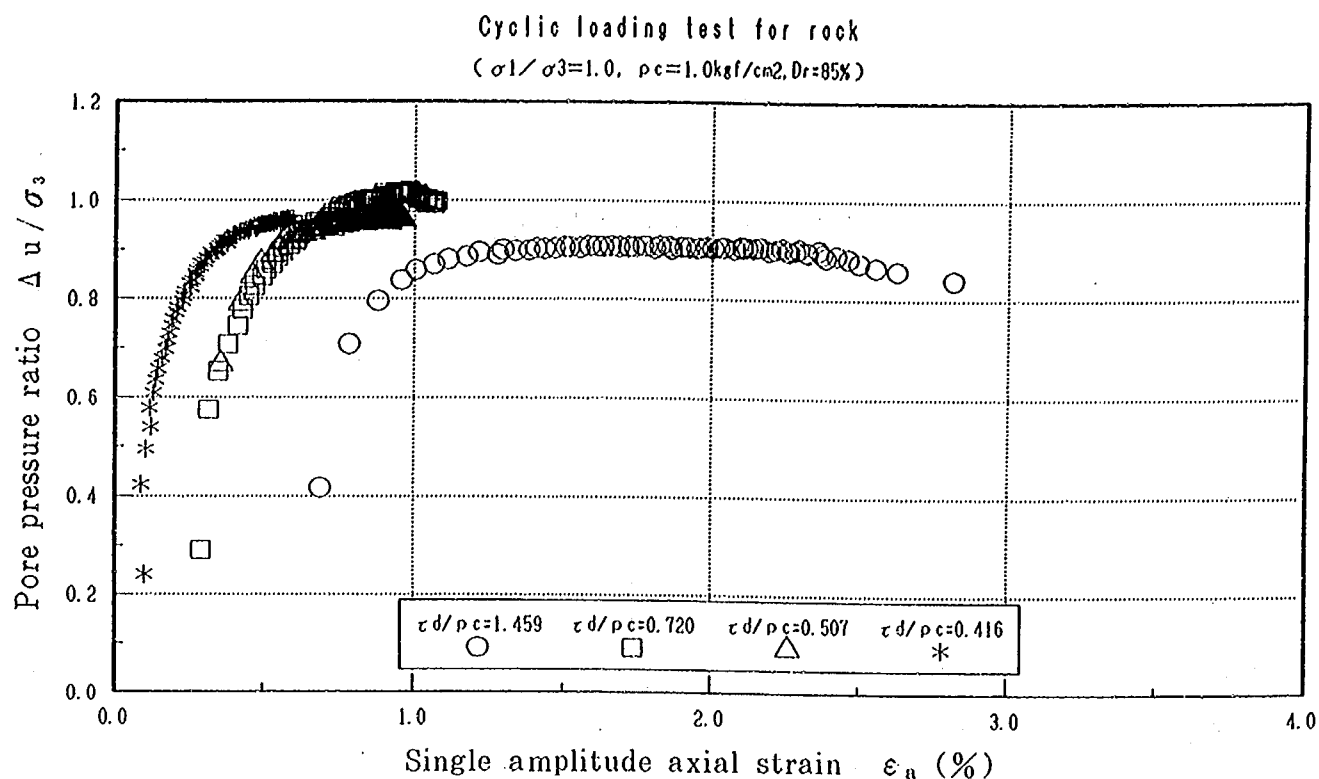


図-3.26(a) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～片振幅軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

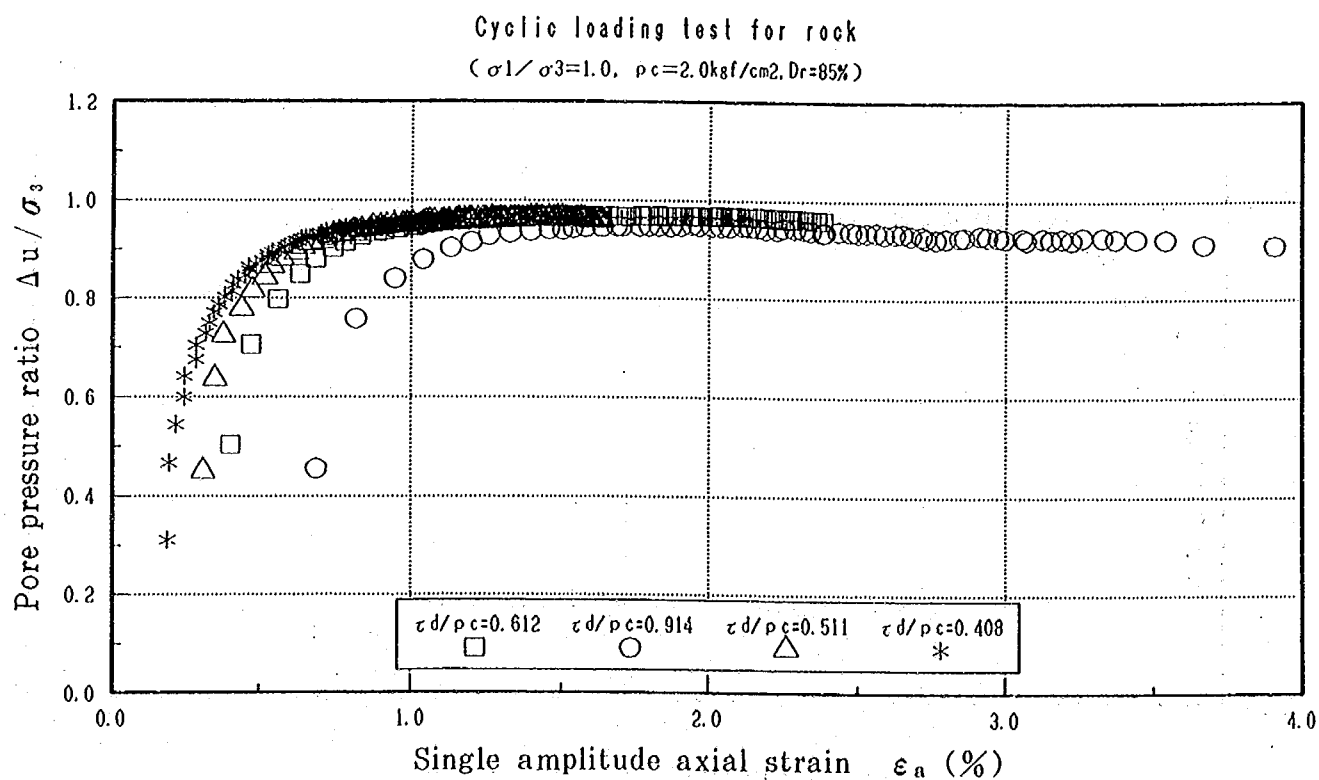


図-3.26(b) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～片振幅軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

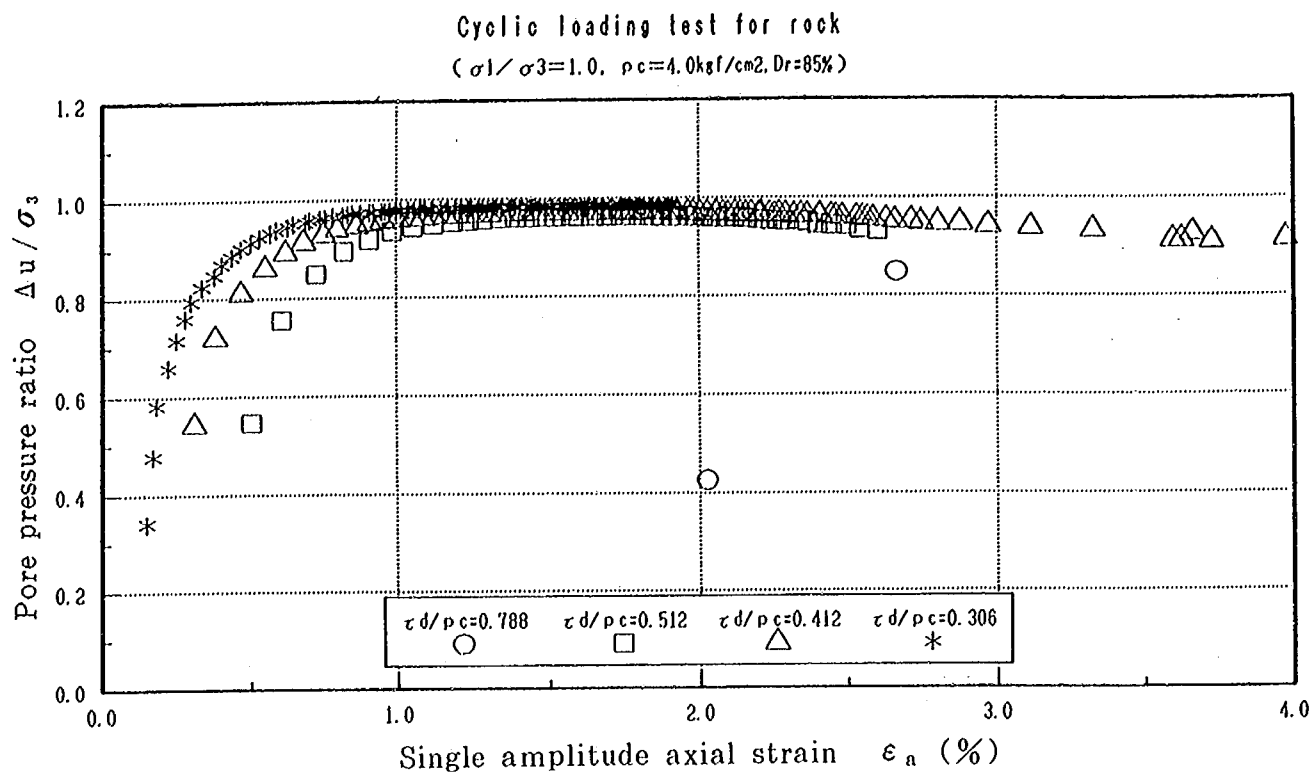


図-3.26(c) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～片振幅軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

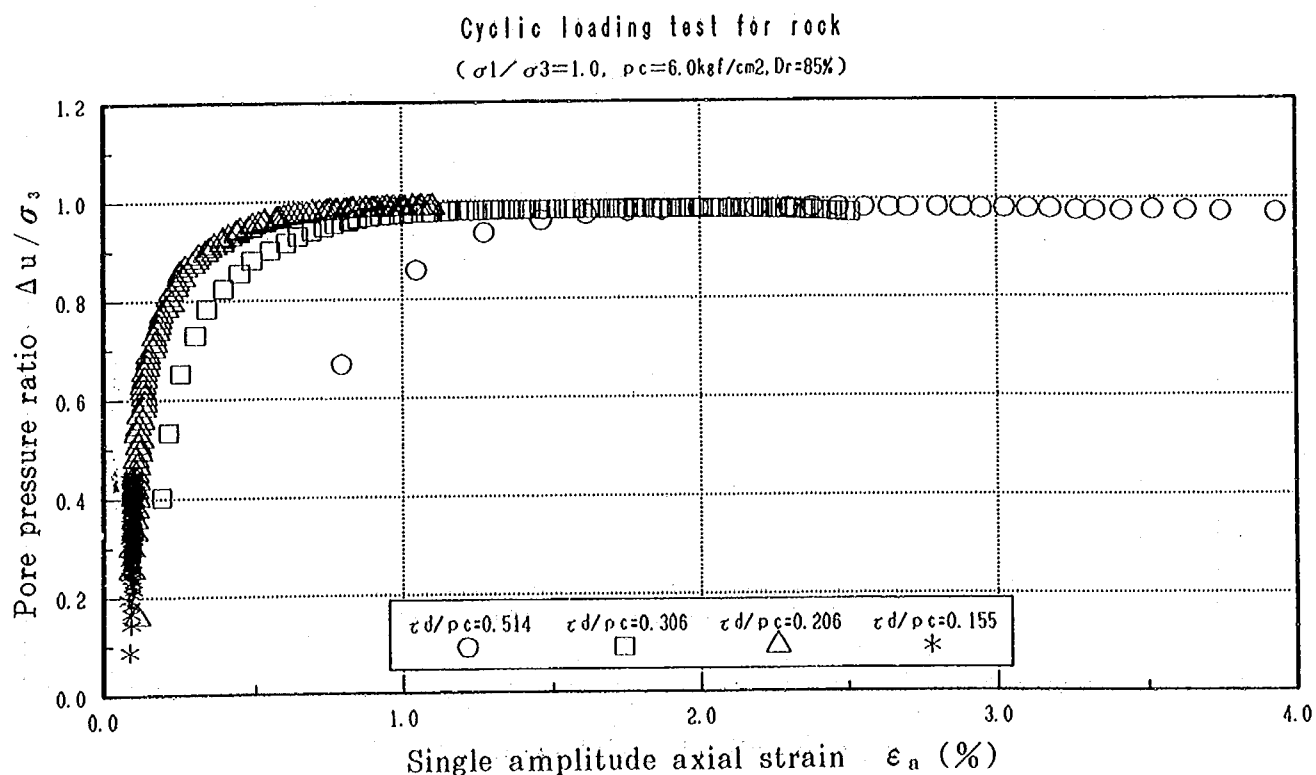


図-3.26(d) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～片振幅軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

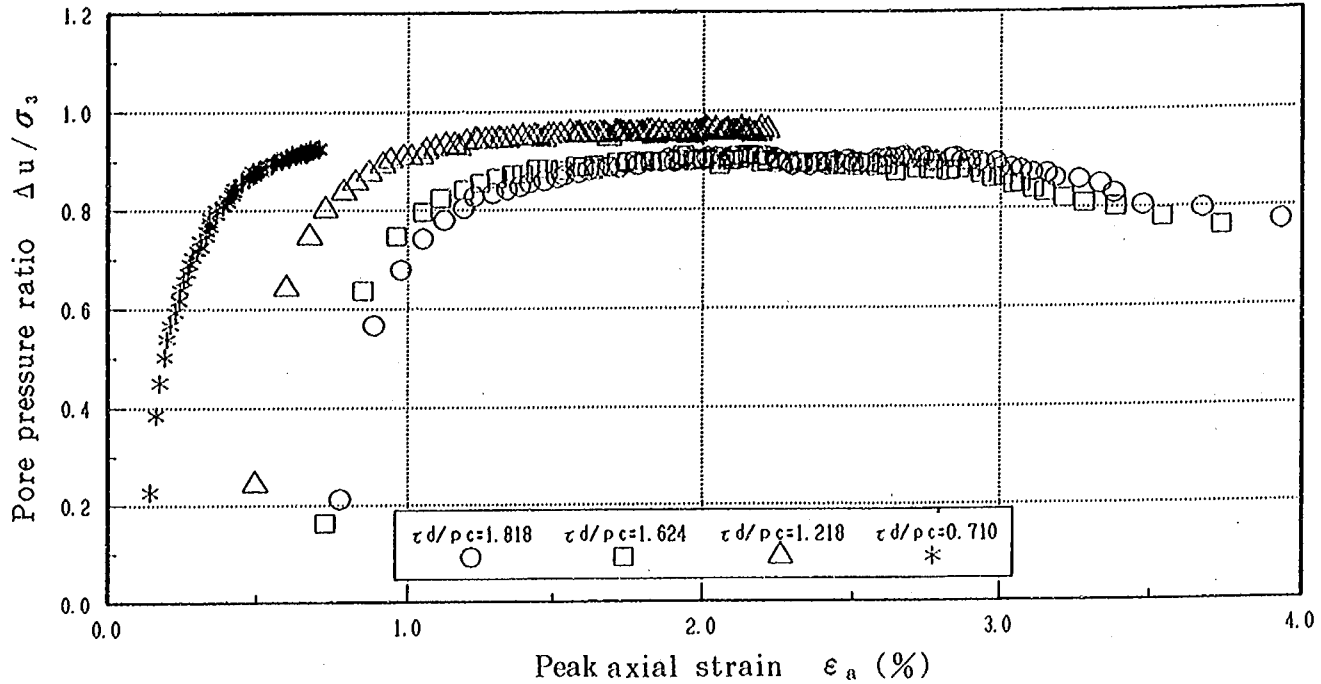


図-3.27(a) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～ピーク軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=2.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

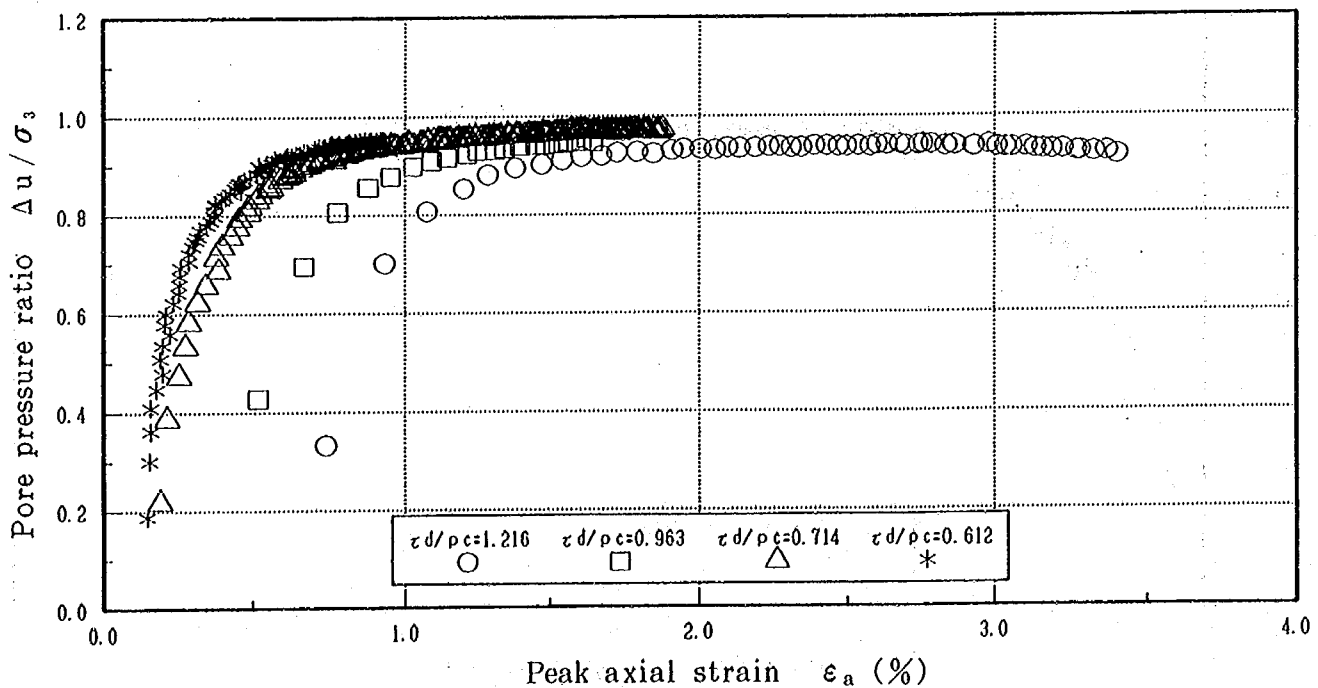


図-3.27(b) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～片振幅軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock
 $(\sigma_1/\sigma_3=2.0, p_c=4.0 \text{ kgf/cm}^2, Dr=85\%)$

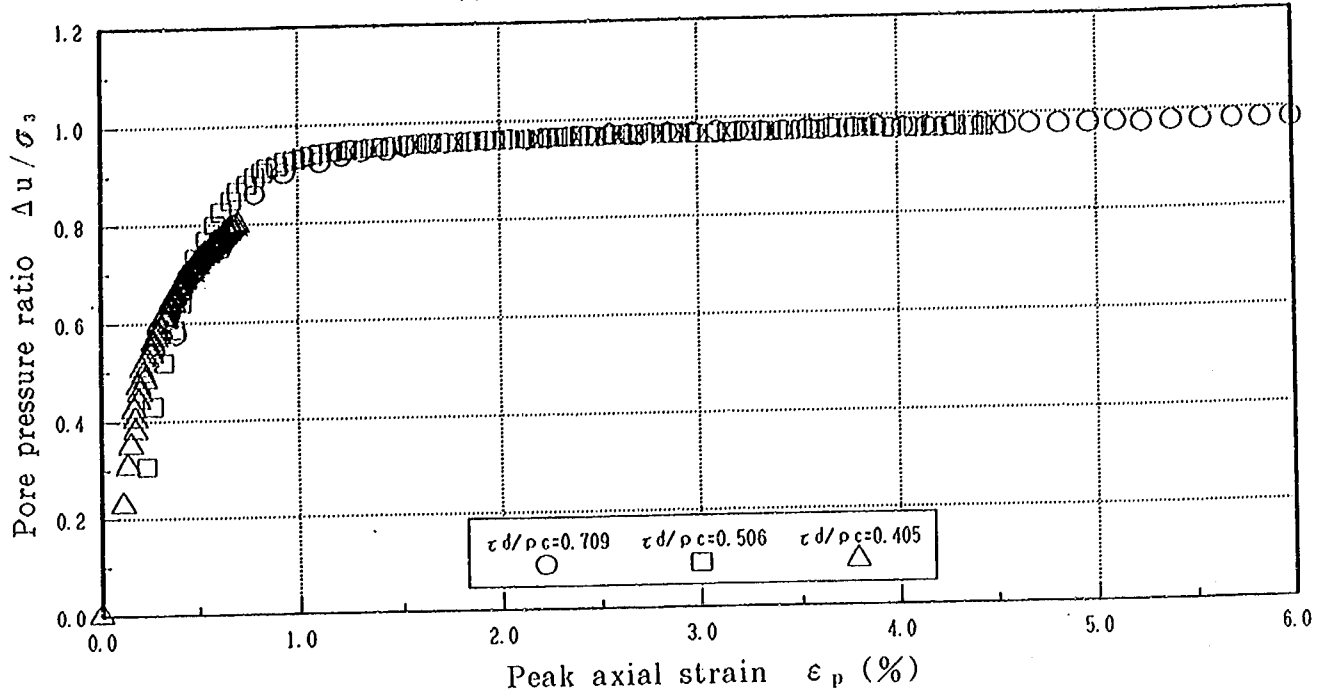


図-3.27(c) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～ピーク軸ひずみ
 $(\sigma_1/\sigma_3=2.0, \text{平均主応力} 4.0 \text{ kgf/cm}^2, Dr=85\%)$

Cyclic loading test for rock
 $(\sigma_1/\sigma_3=2.0, p_c=6.0 \text{ kgf/cm}^2, Dr=85\%)$

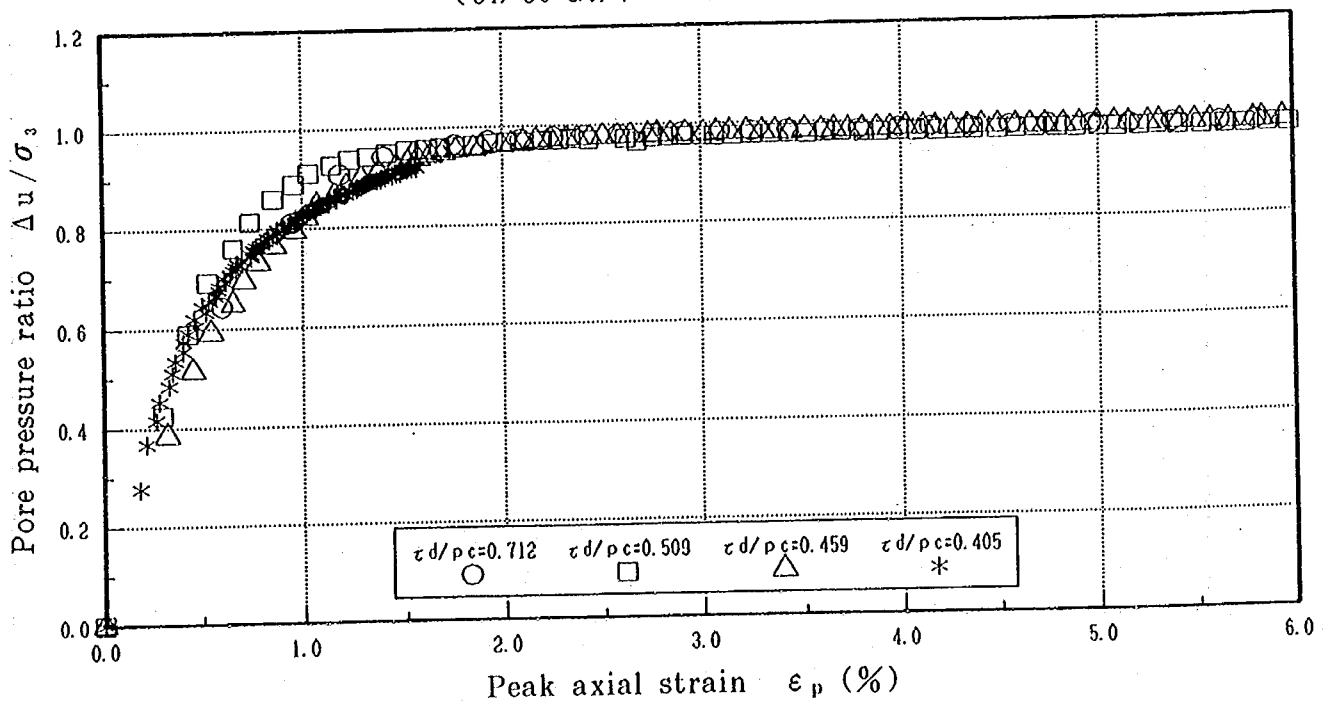


図-3.27(d) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～ピーク軸ひずみ
 $(\sigma_1/\sigma_3=2.0, \text{平均主応力} 6.0 \text{ kgf/cm}^2, Dr=85\%)$

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

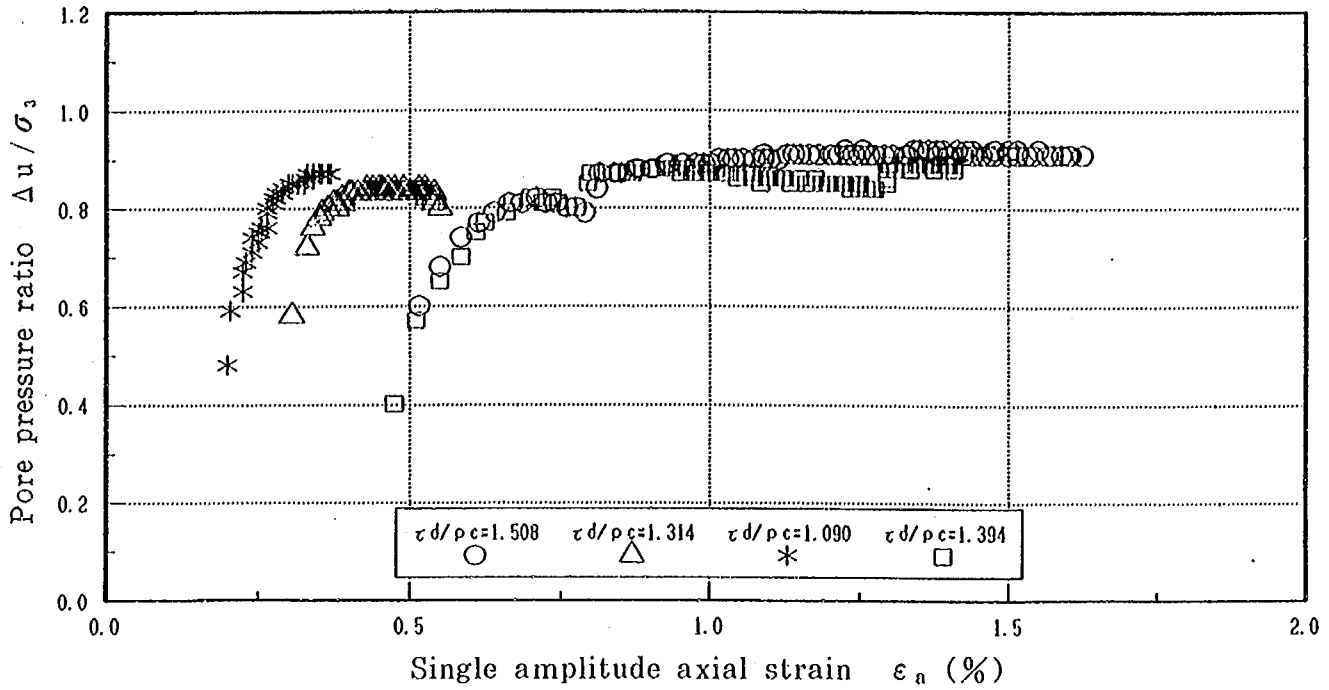


図-3.28(a) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～片振幅軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=2.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

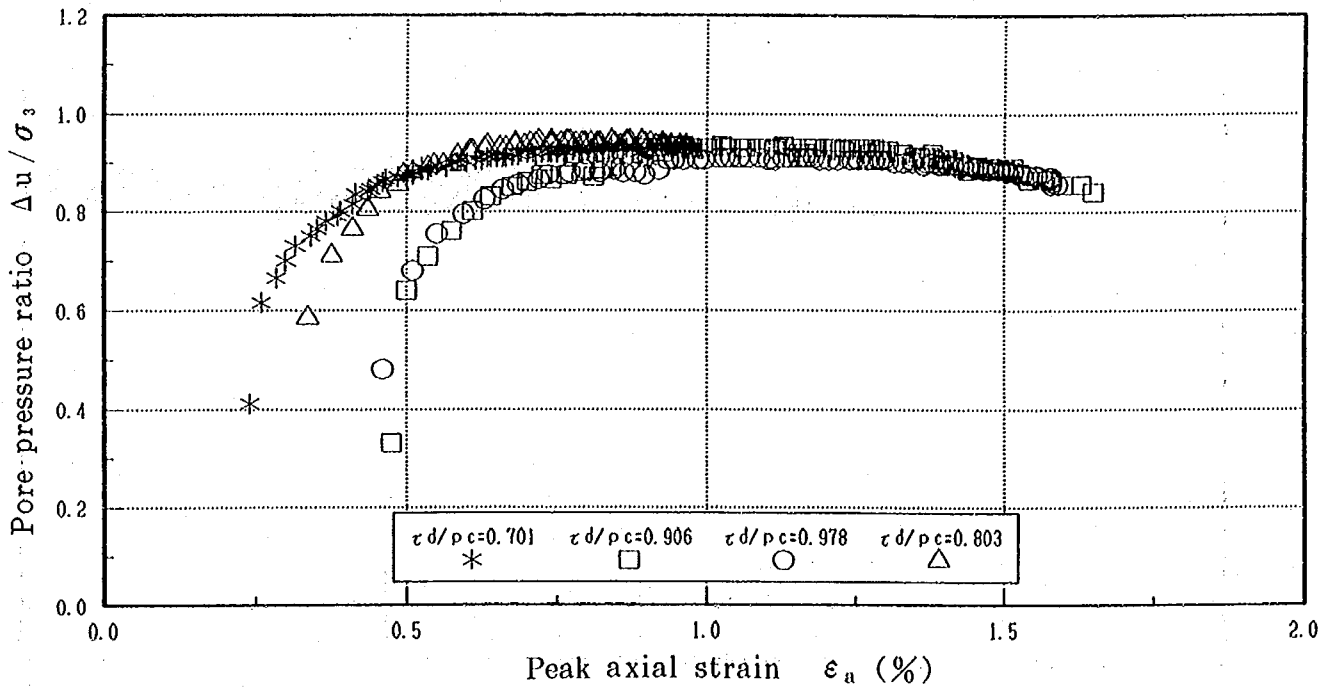


図-3.28(b) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～ピーク軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=4.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

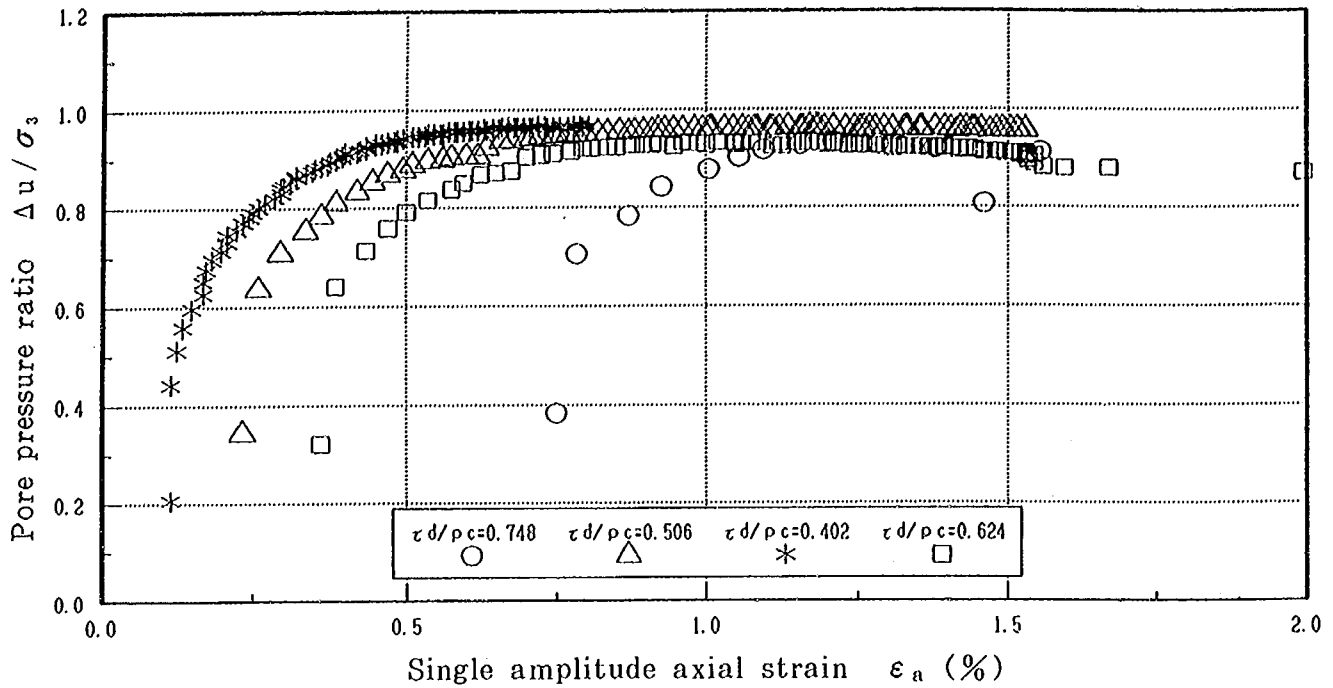


図-3.29(a) ロック材料の非排水繰返し载荷試験，間隙水圧比～片振幅軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=6.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

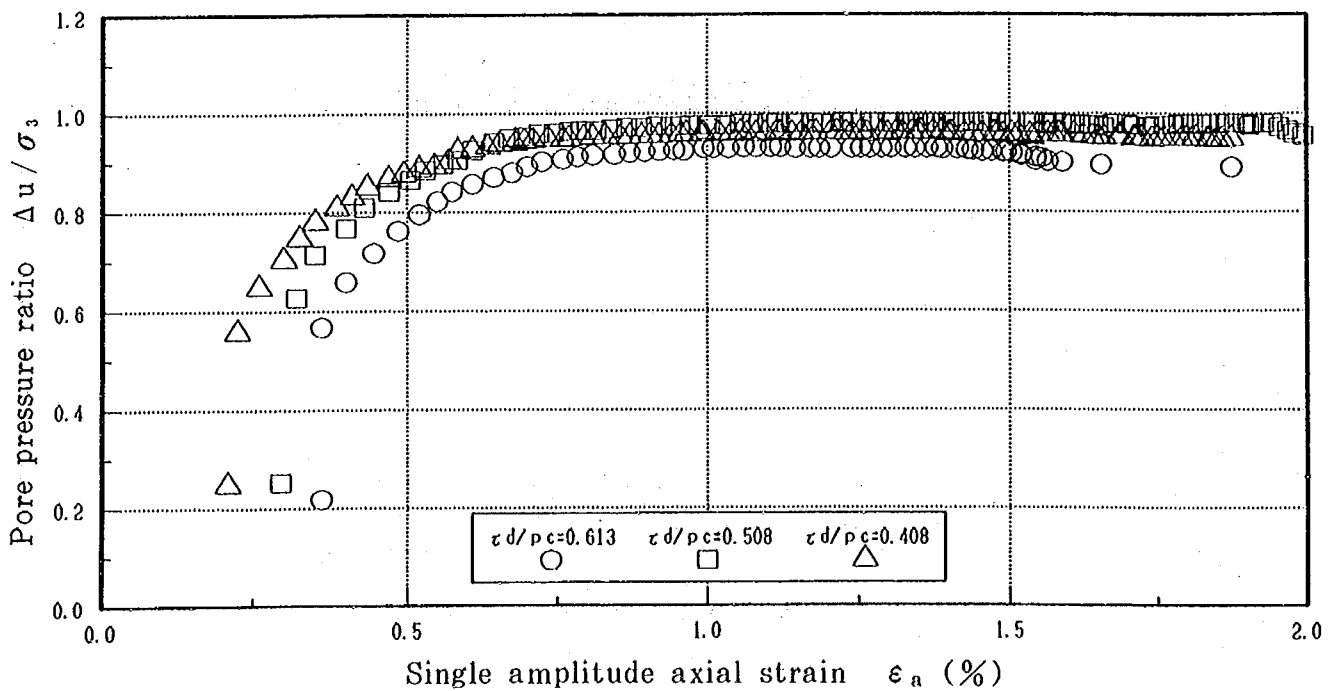


図-3.29(b) ロック材料の非排水繰返し载荷試験，間隙水圧比～片振幅軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

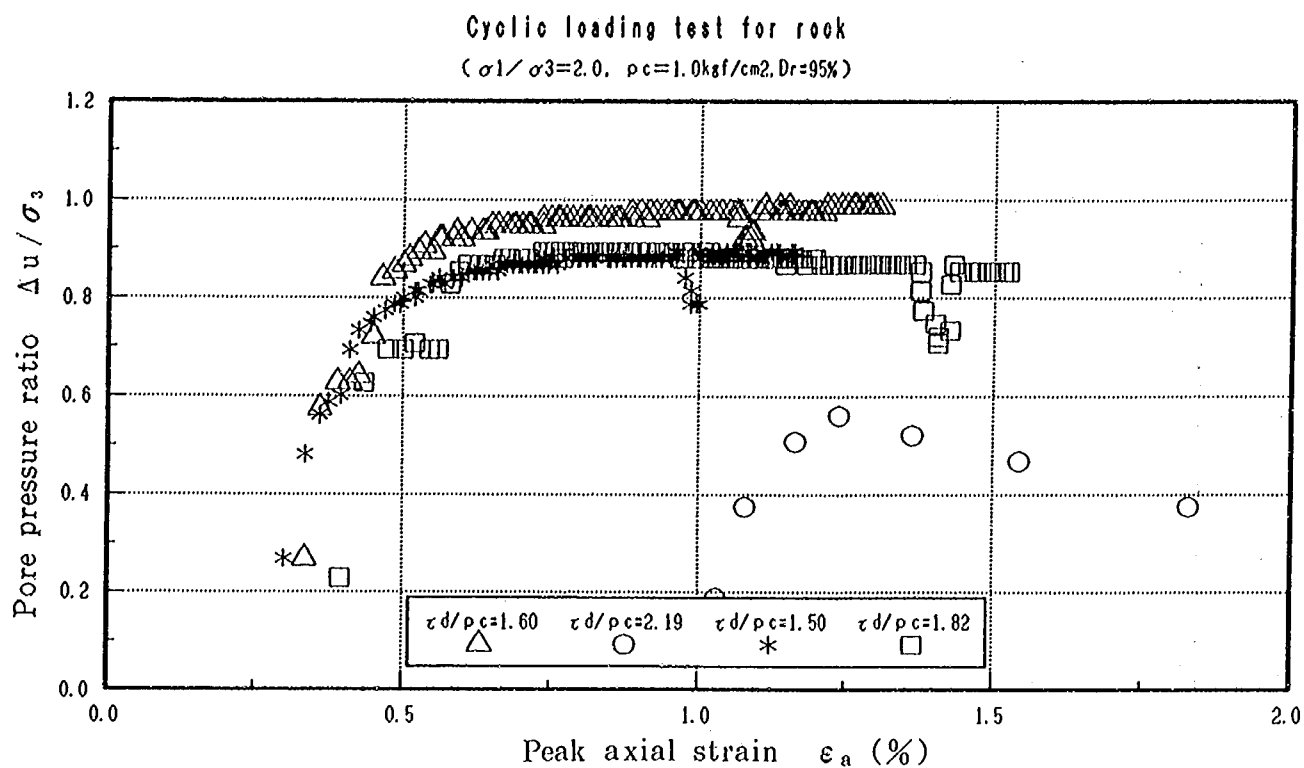


図-3.30(a) ロック材料の非排水繰返し载荷試験，間隙水圧比～ピーク軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

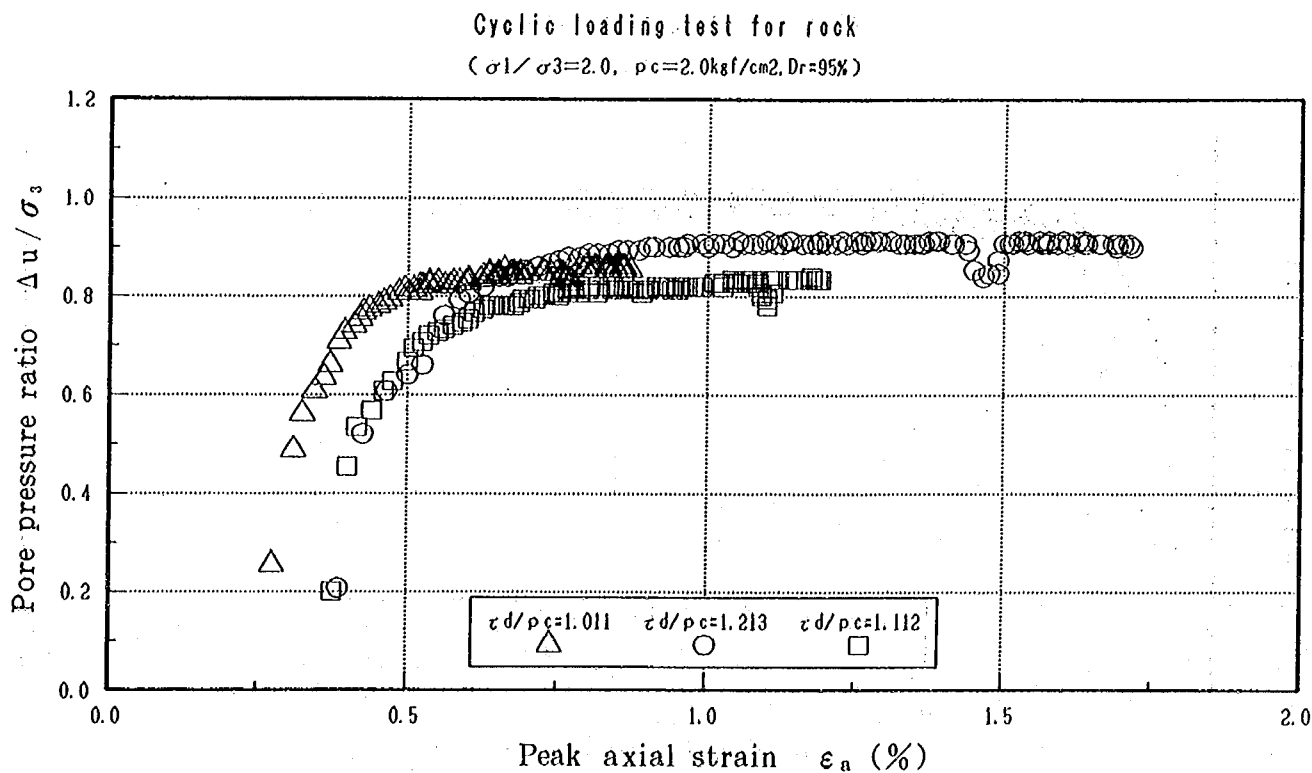


図-3.30(b) ロック材料の非排水繰返し载荷試験，間隙水圧比～ピーク軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

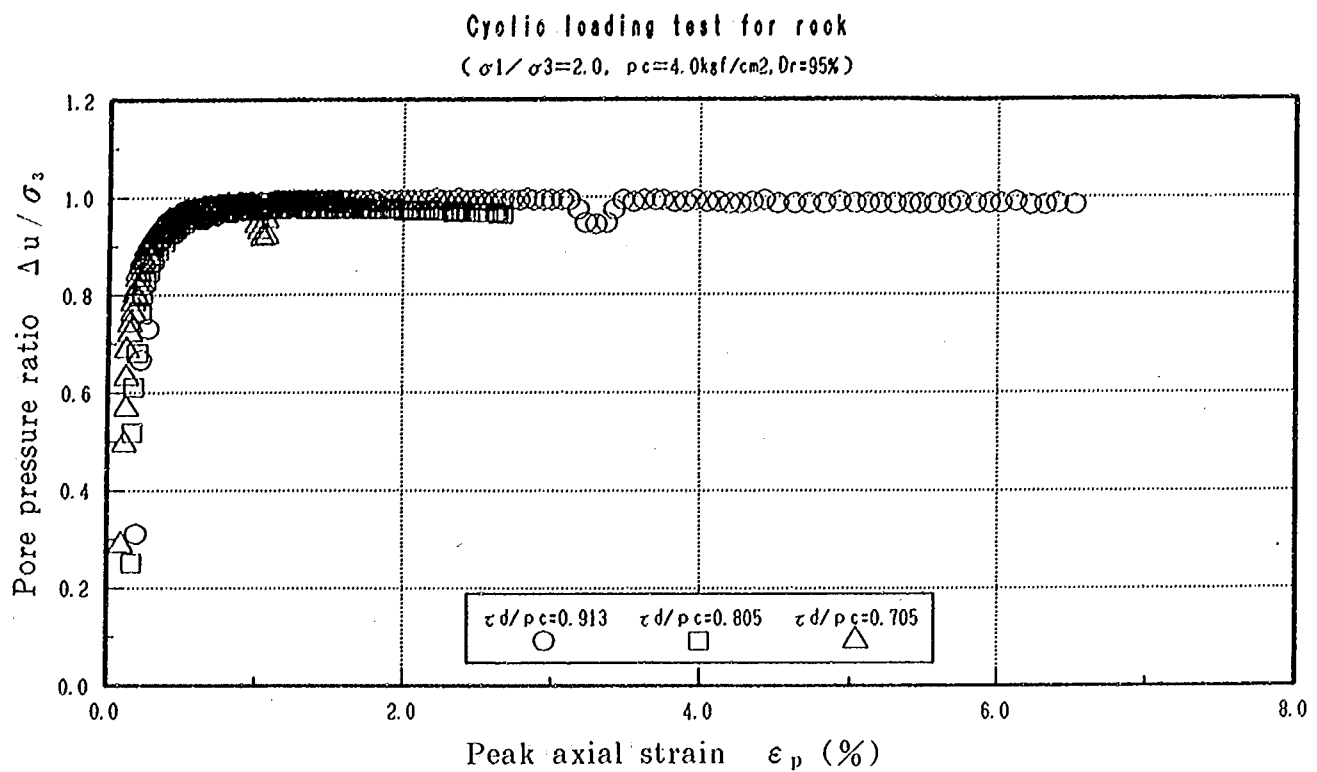


図-3.30(c) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～ピーク軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

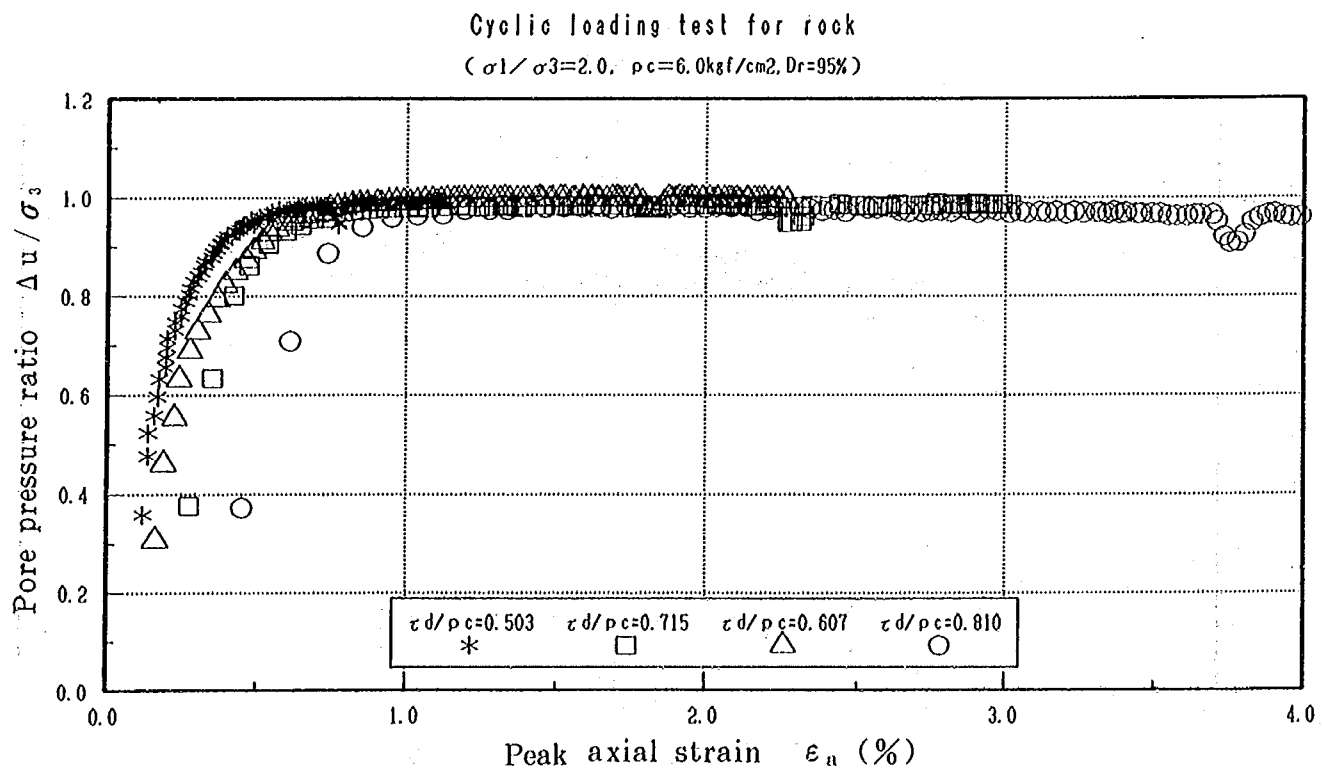


図-3.30(d) ロック材料の非排水繰返し載荷試験，間隙水圧比～ピーク軸ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Torsional cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=4.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

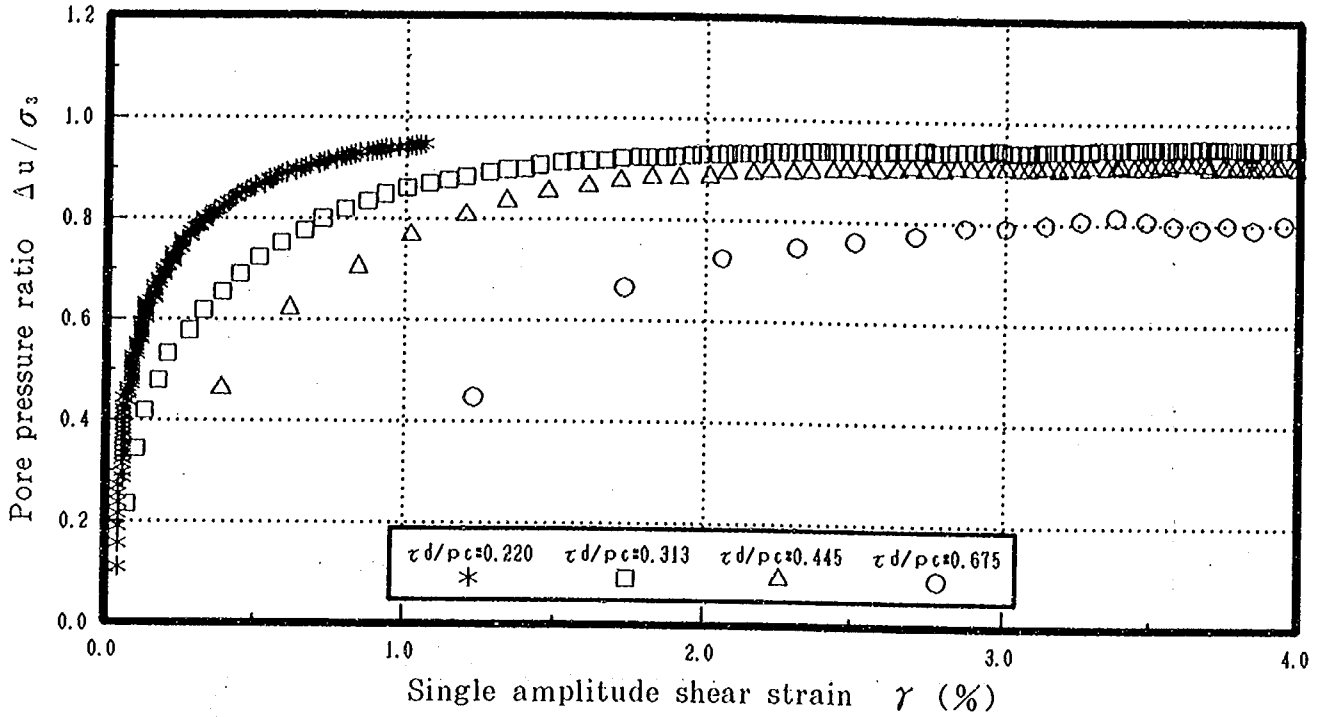


図-3.31 ロック材料の非排水繰返し載荷試験，ねじり単純試験，
間隙水圧比～片振幅せん断ひずみ
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=85\%$)

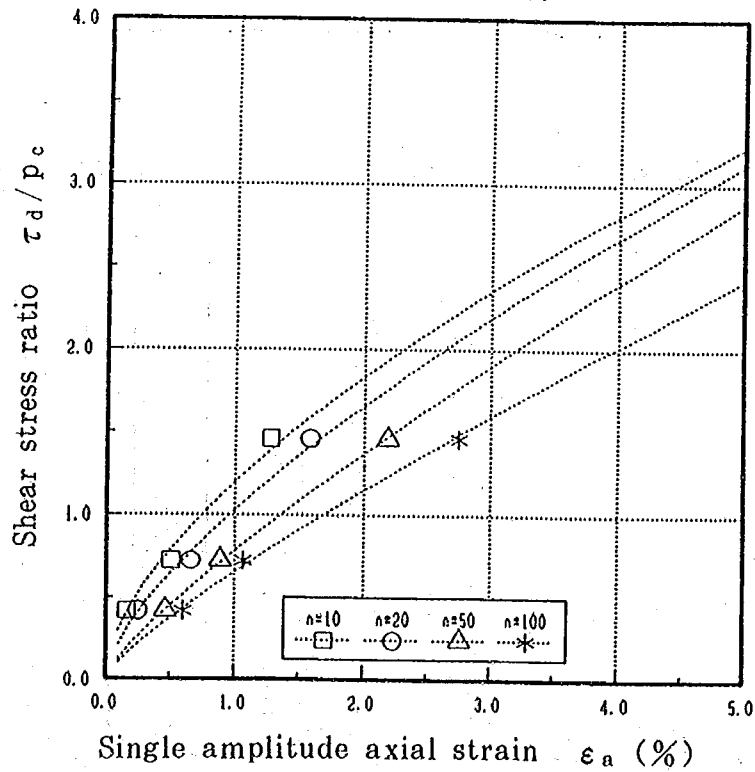


図-3.32(a) せん断応力比～片振幅軸ひずみ，非排水繰返し載荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

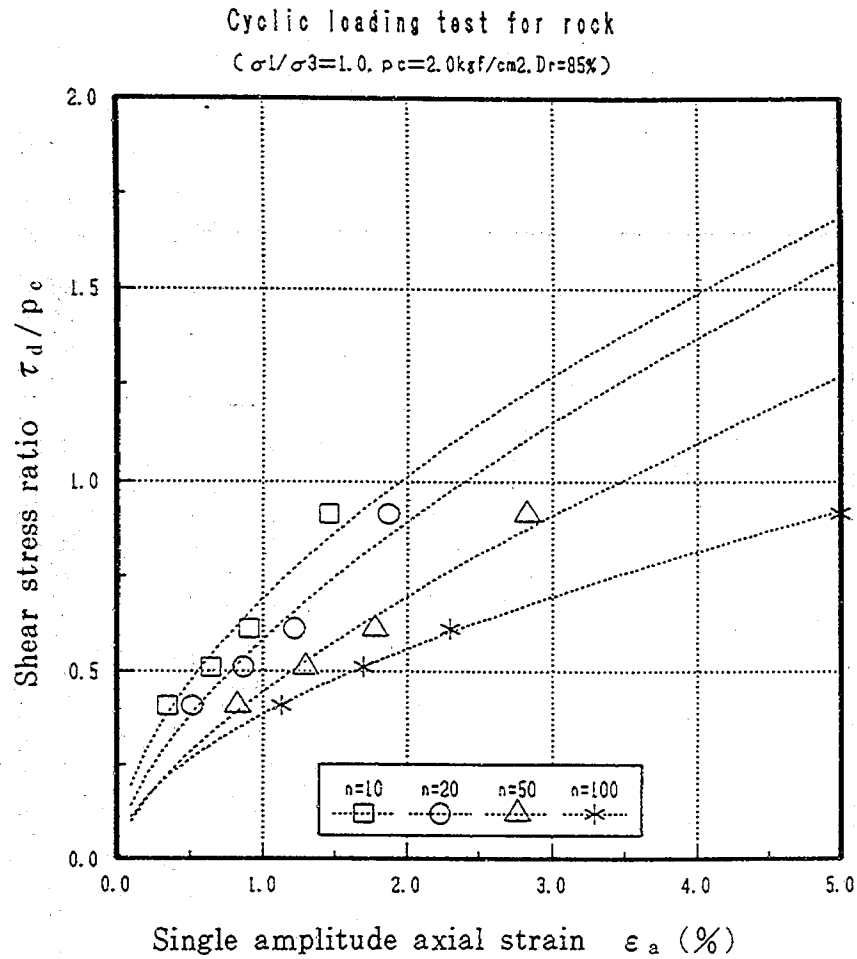


図-3.32(b) せん断応力比～片振幅軸ひずみ，非排水繰返し
 載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ，
 $Dr=85\%$)

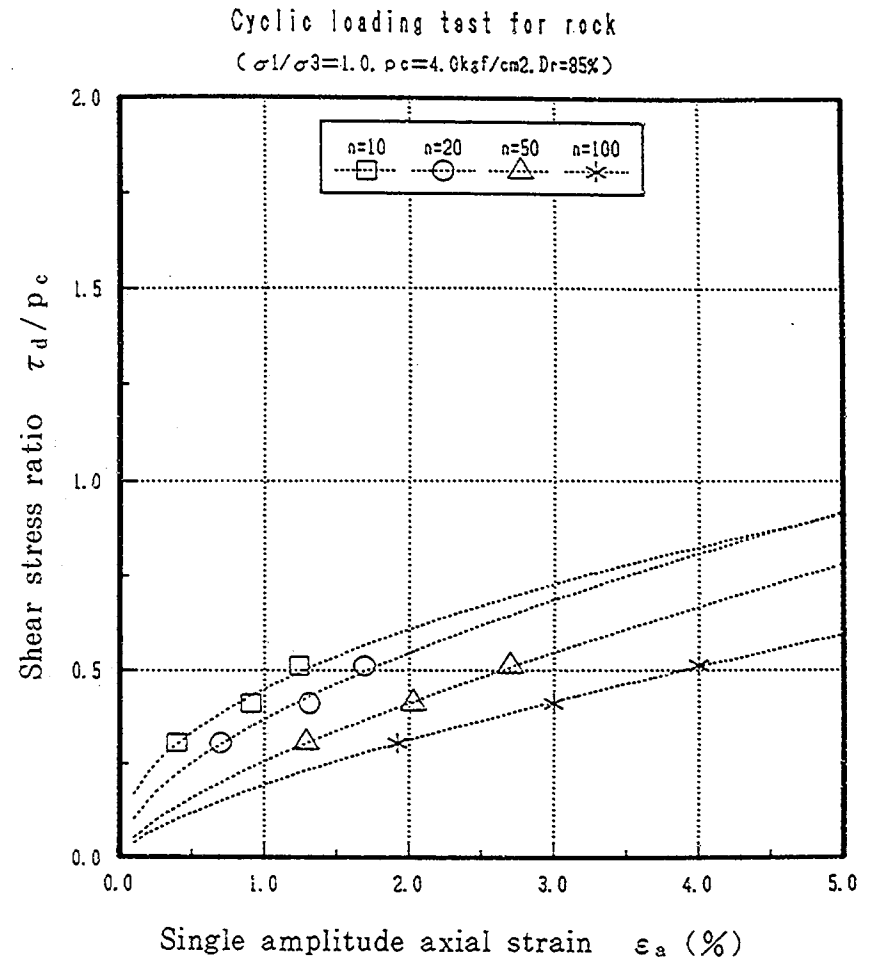


図-3.32(c) せん断応力比～片振幅軸ひずみ，非排水繰返し
 載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ，
 $Dr=85\%$)

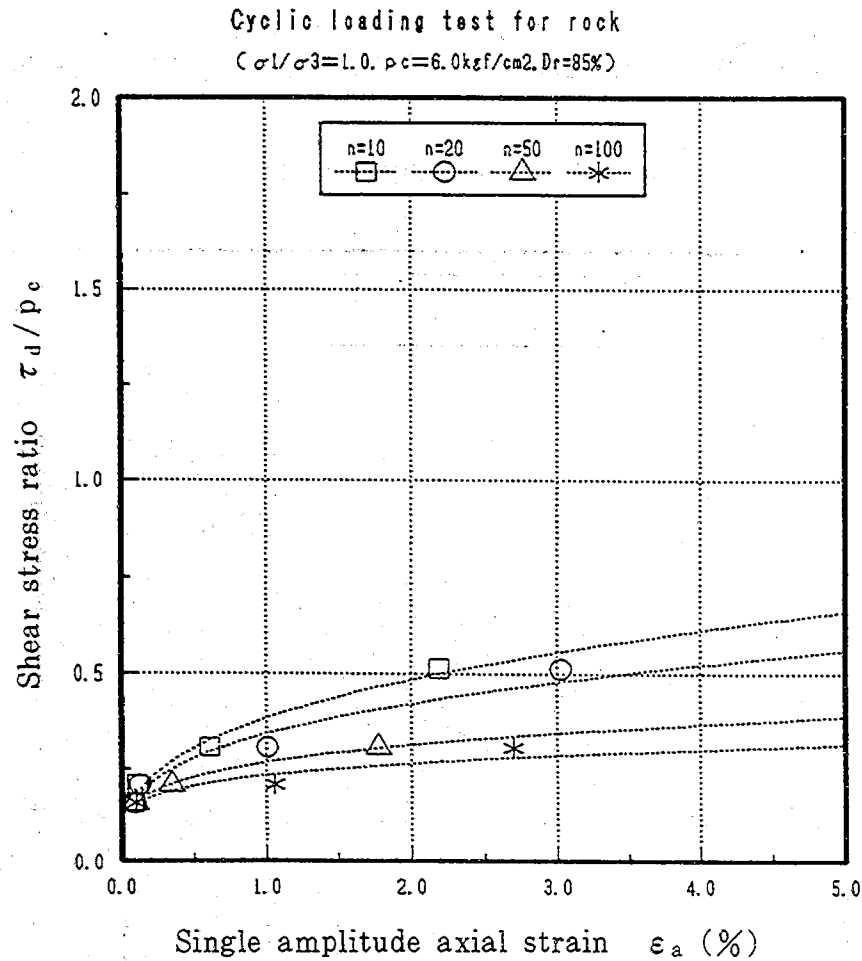


図-3.32(d) せん断応力比～片振幅軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

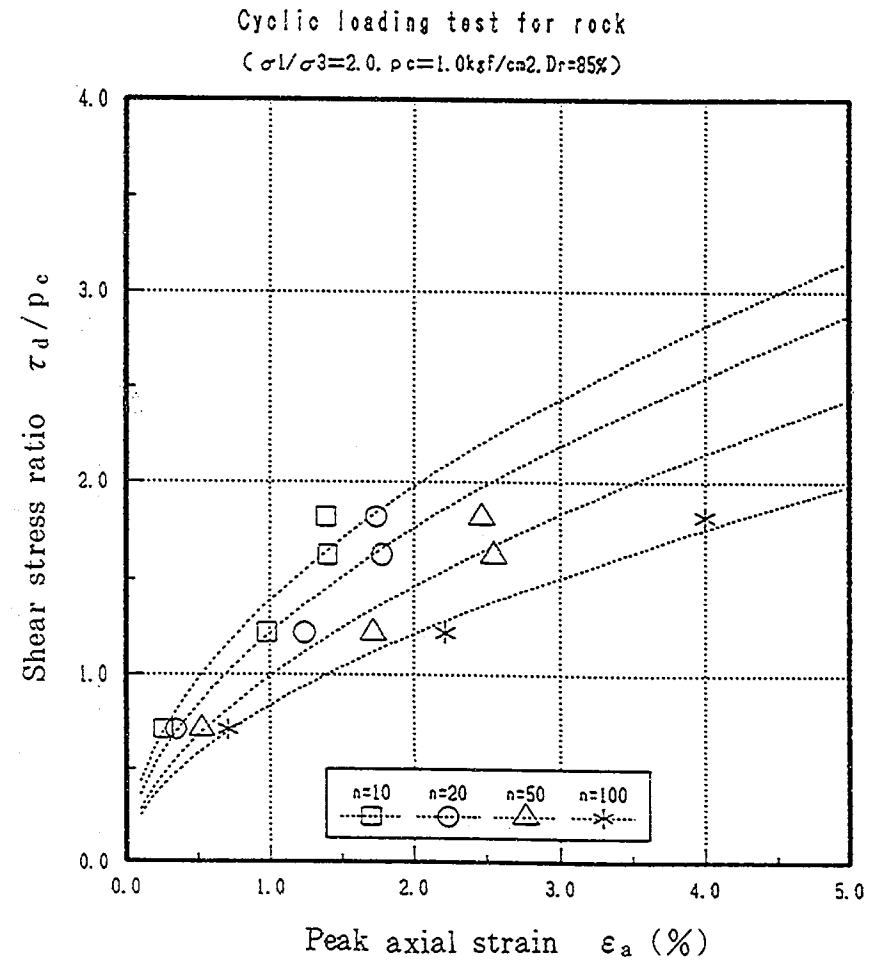


図-3.33(a) せん断応力比～ピーク軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

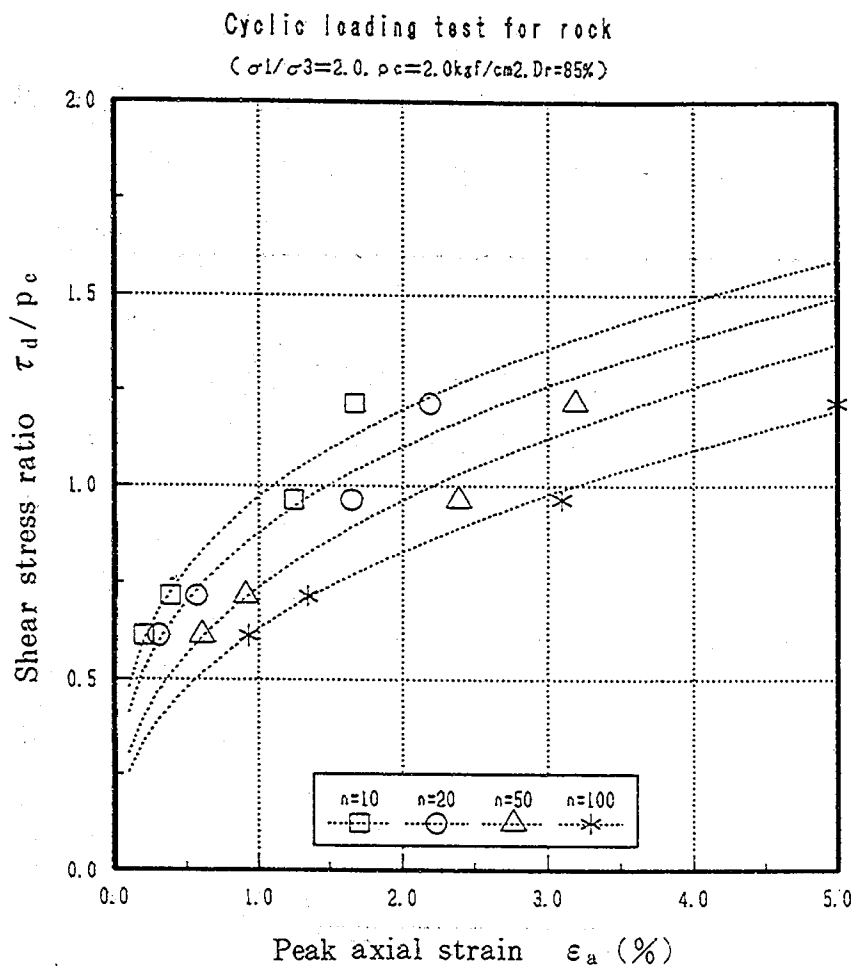


図-3.33(b) せん断応力比～ピーク軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ，
 $Dr=85\%$)

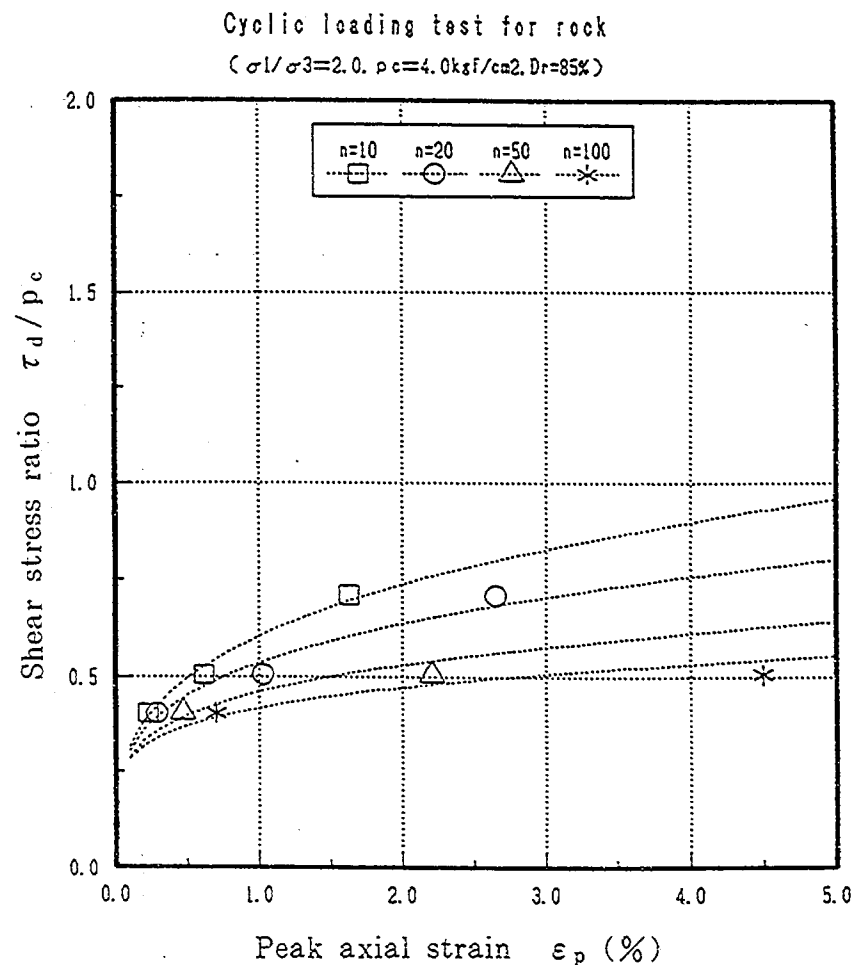


図-3.33(c) せん断応力比～ピーク軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ，
 $Dr=85\%$)

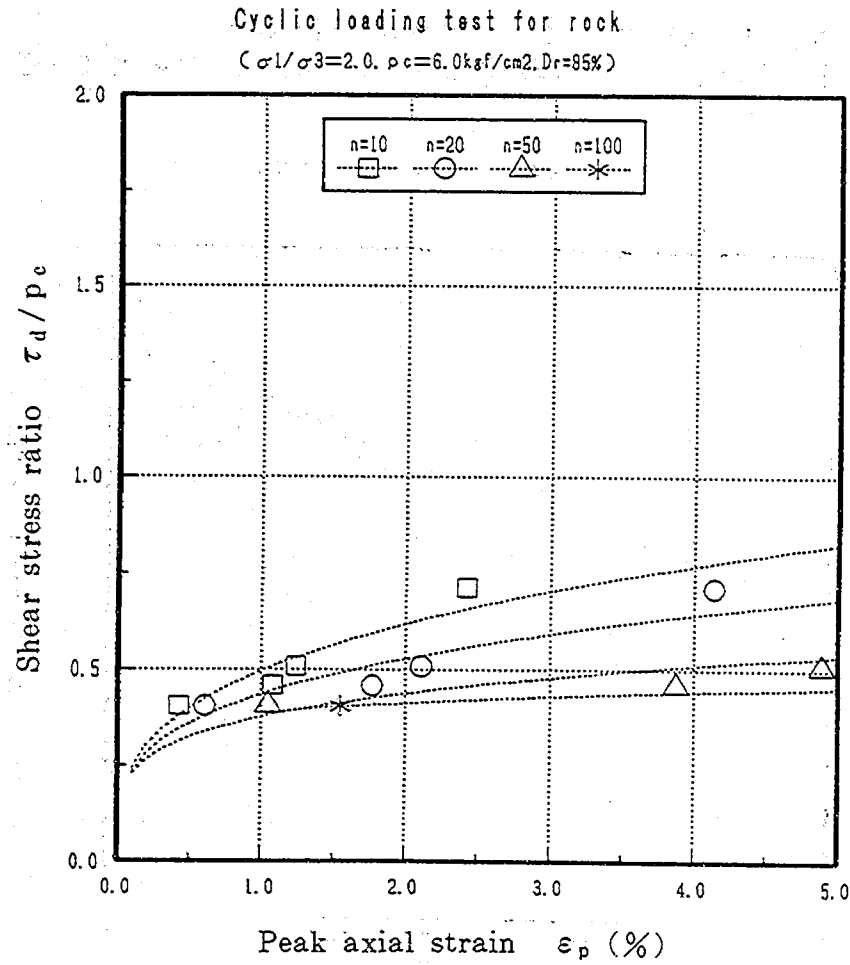


図-3.33(d) せん断応力比～ピーク軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

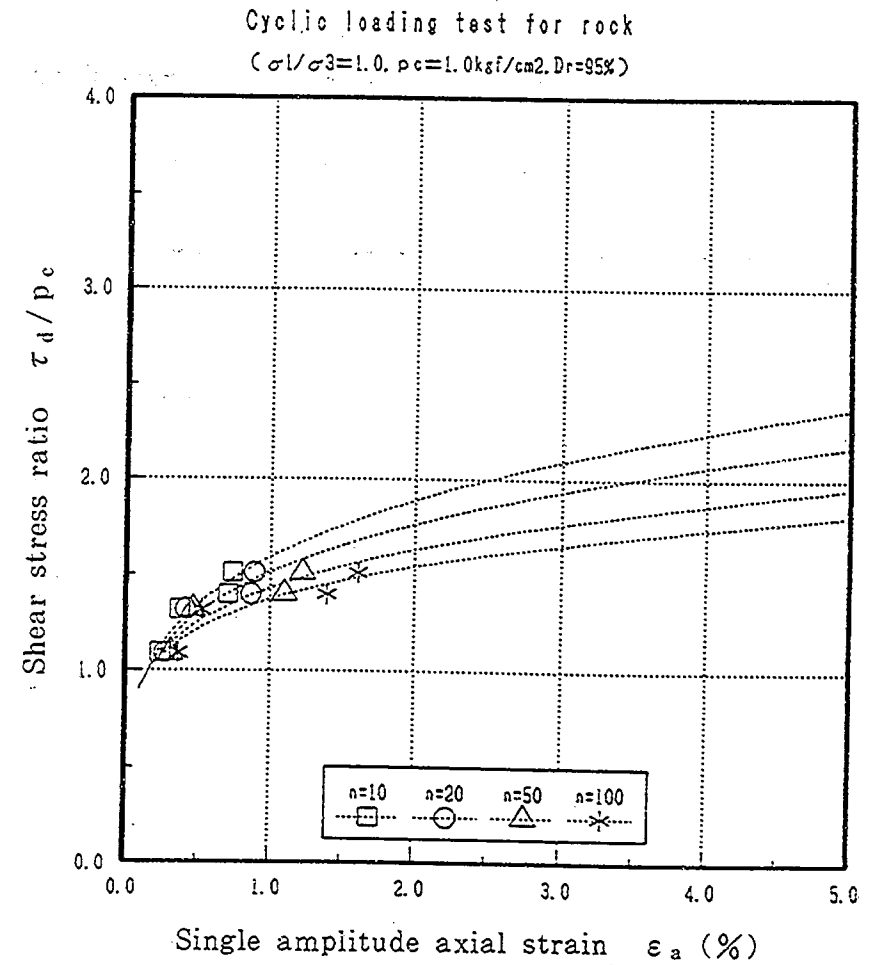


図-3.34(a) せん断応力比～片振幅軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

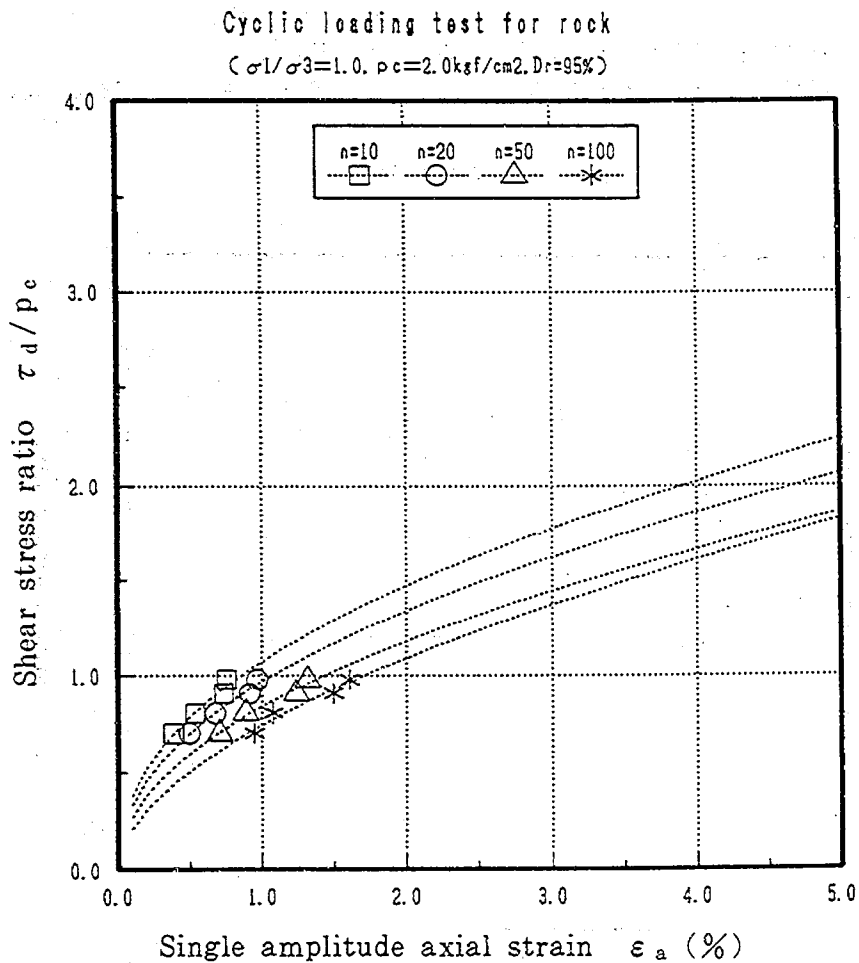


図-3.34(b) せん断応力比～片振幅軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ， $D_r=95\%$)

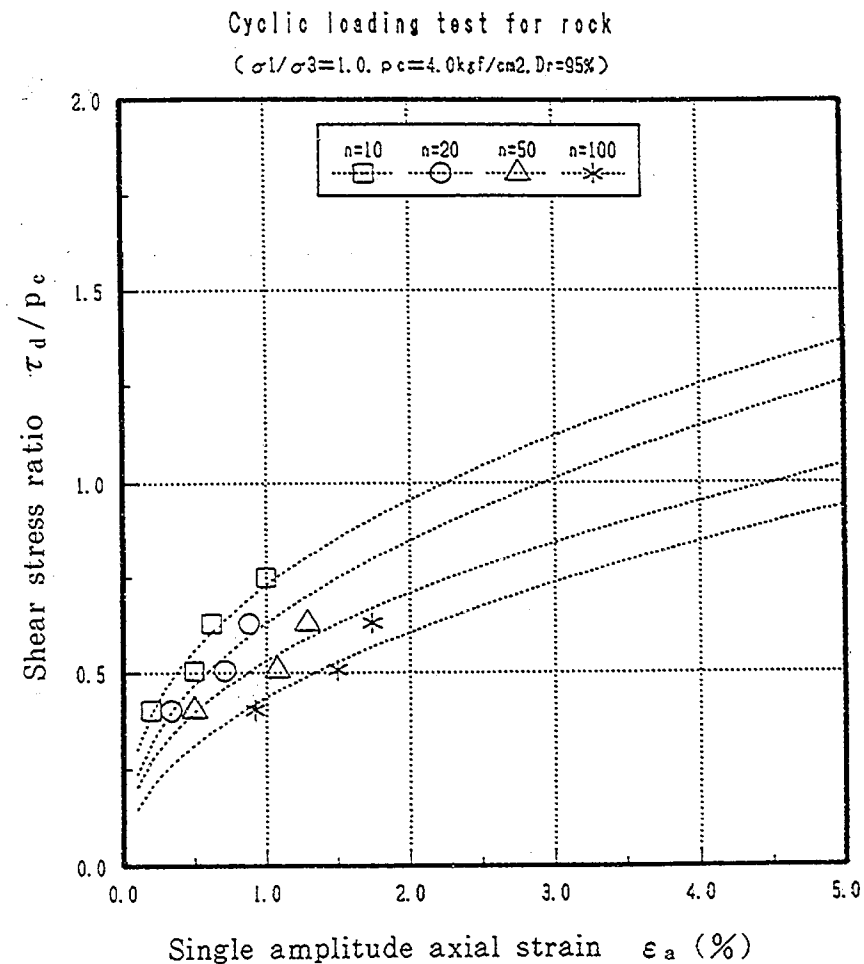


図-3.34(c) せん断応力比～片振幅軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $D_r=95\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=1.0$, $p_c=6.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

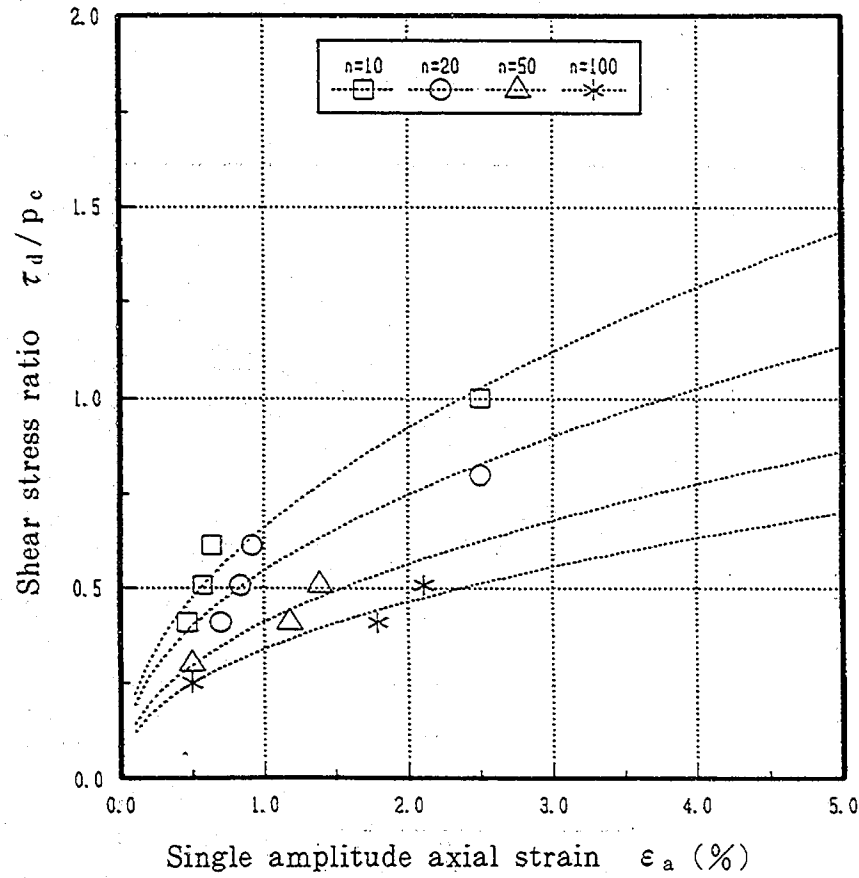


図-3.34(d) せん断応力比～片振幅軸ひずみ，非排水繰返し
 載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic loading test for rock

($\sigma_1/\sigma_3=2.0$, $p_c=1.0\text{kgf/cm}^2$, $Dr=95\%$)

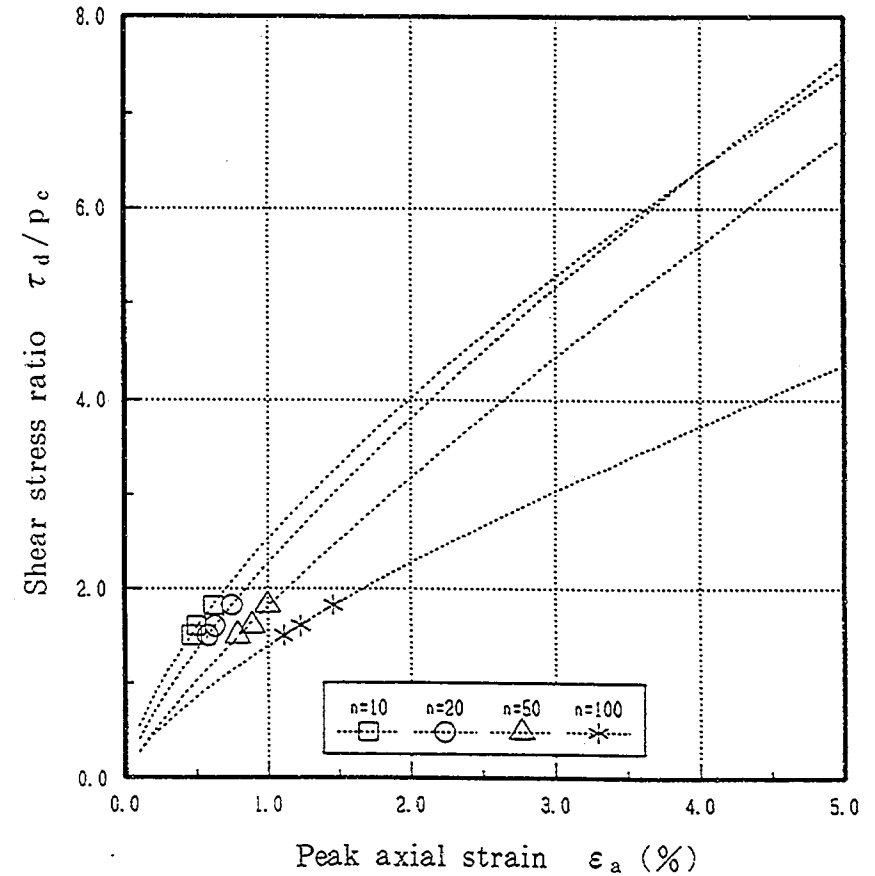


図-3.35(a) せん断応力比～ピーク軸ひずみ，非排水繰返し
 載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 1.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

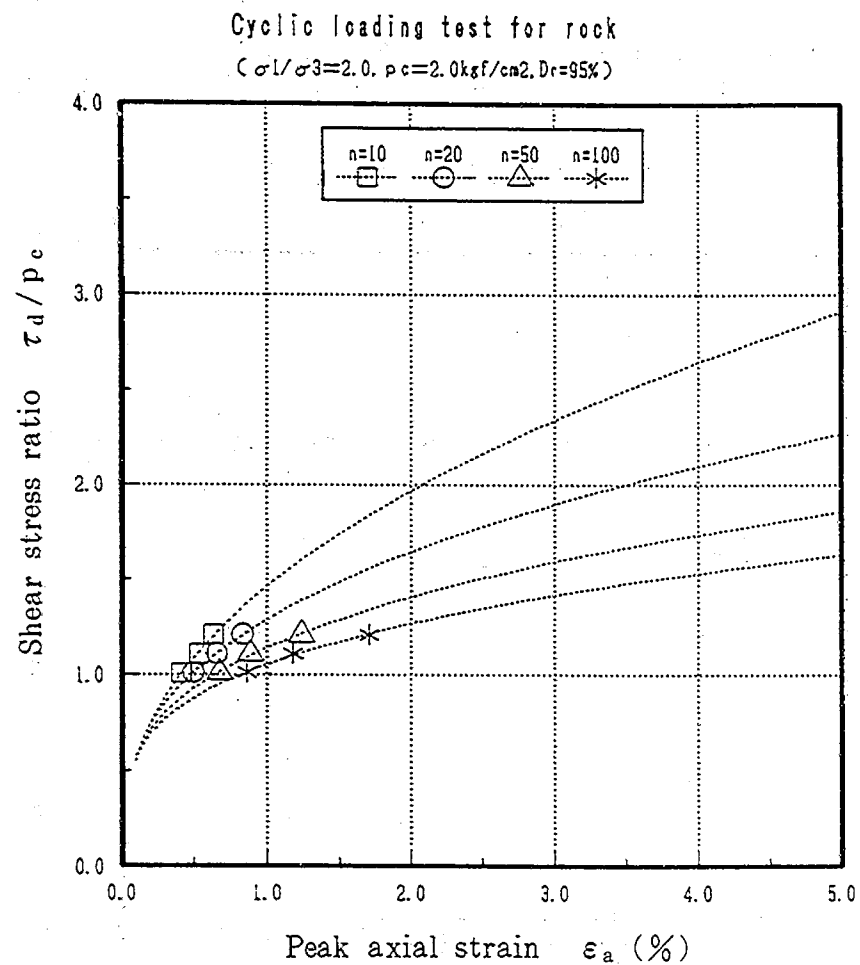


図-3.35(b) せん断応力比～ピーク軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 2.0kgf/cm^2 ，
 $Dr=95\%$)

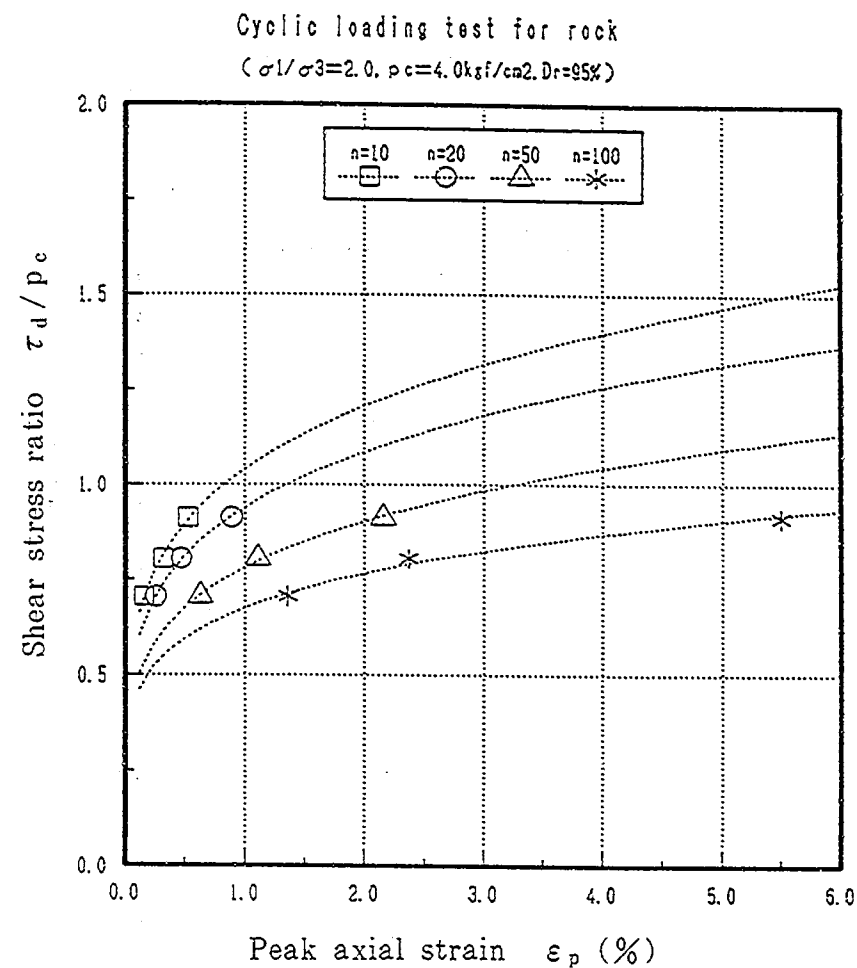


図-3.35(c) せん断応力比～ピーク軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 4.0kgf/cm^2 ，
 $Dr=95\%$)

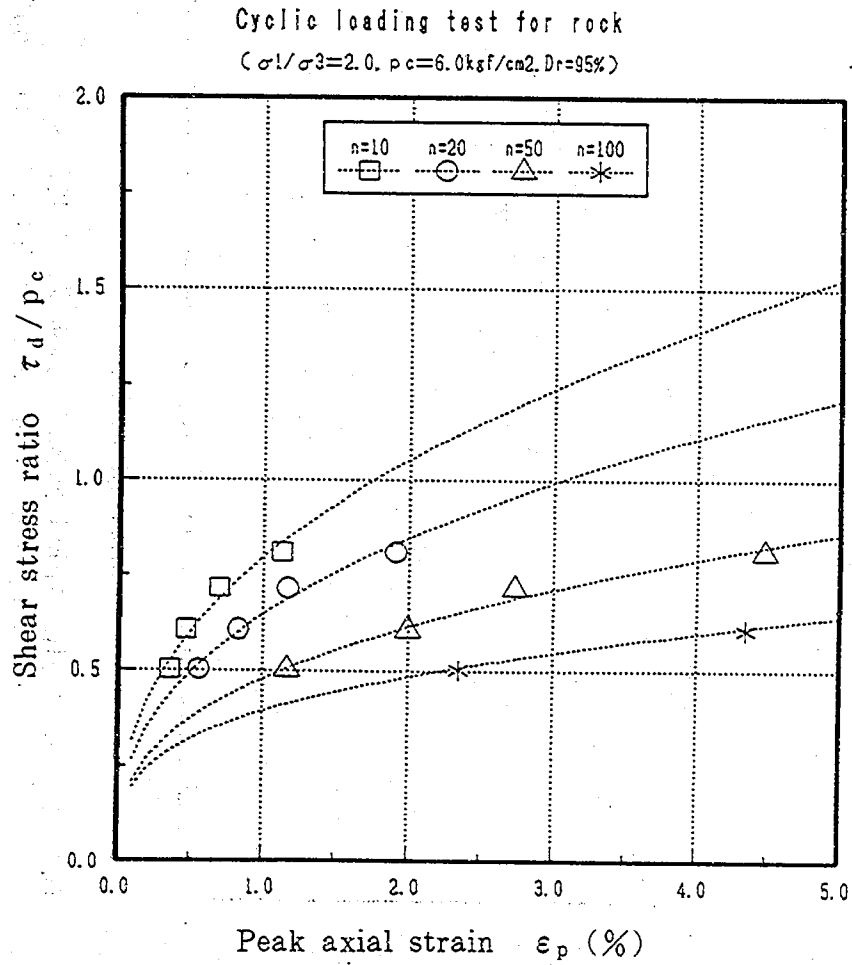


図-3.35(d) せん断応力比～ピーク軸ひずみ，非排水繰返し
載荷試験 ($\sigma_1/\sigma_3=2.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

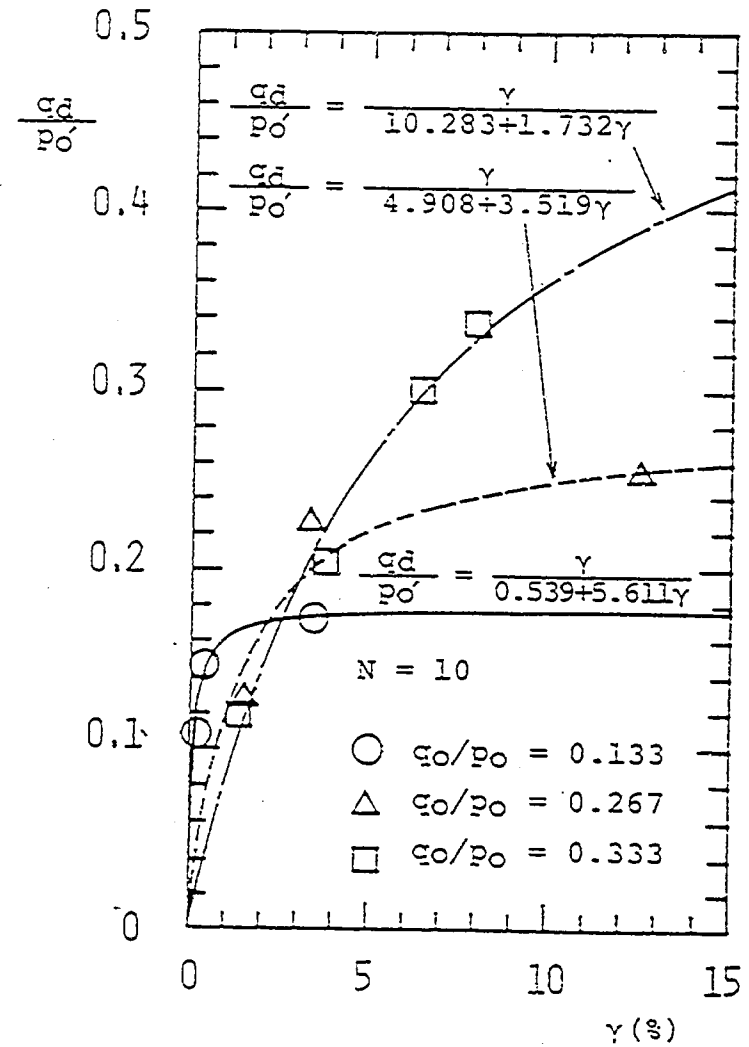


図-3.36 せん断応力比～せん断ひずみ
非排水繰返し載荷試験

Cyclic loading test for rock

(Dr=85%, p_c=1.0kgf/cm²)

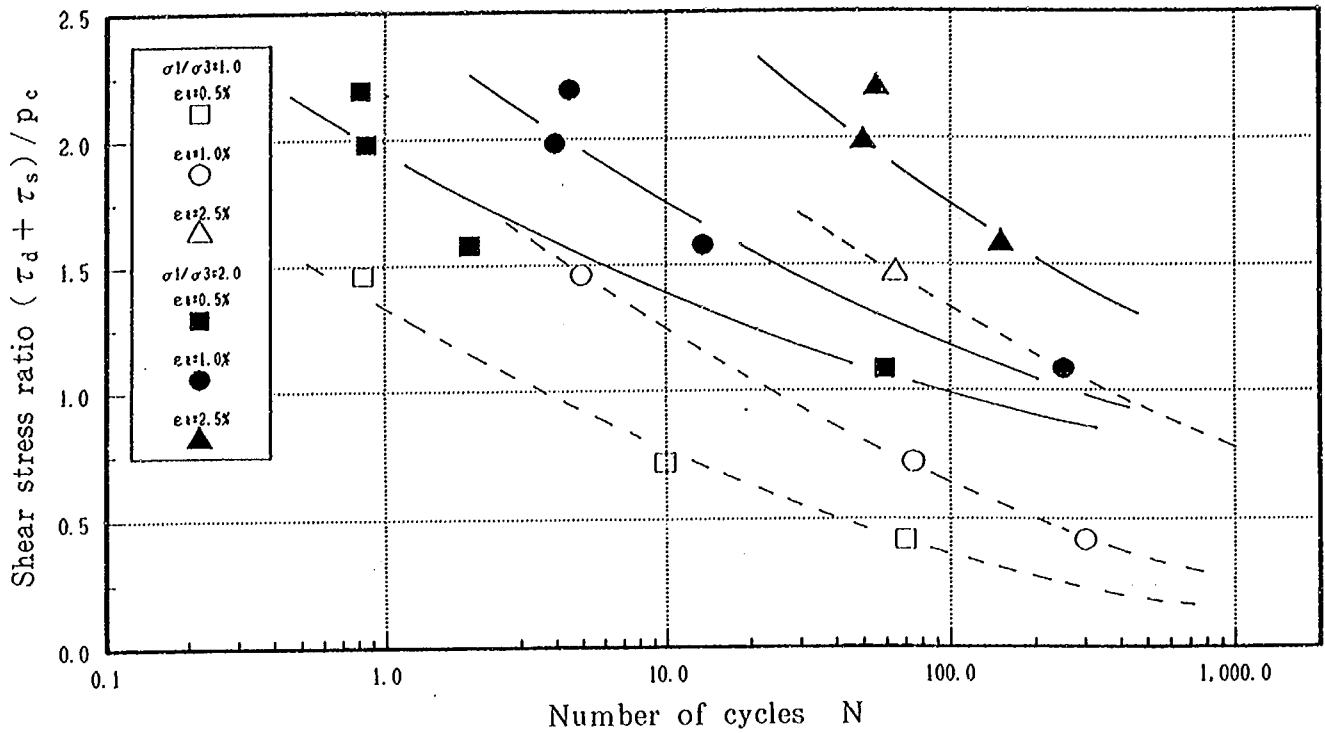


図-3.37(a) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し載荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$ ，平均主応力1.0kgf/cm²，Dr=85%)

Cyclic loading test for rock

(Dr=85%, p_c=2.0kgf/cm²)

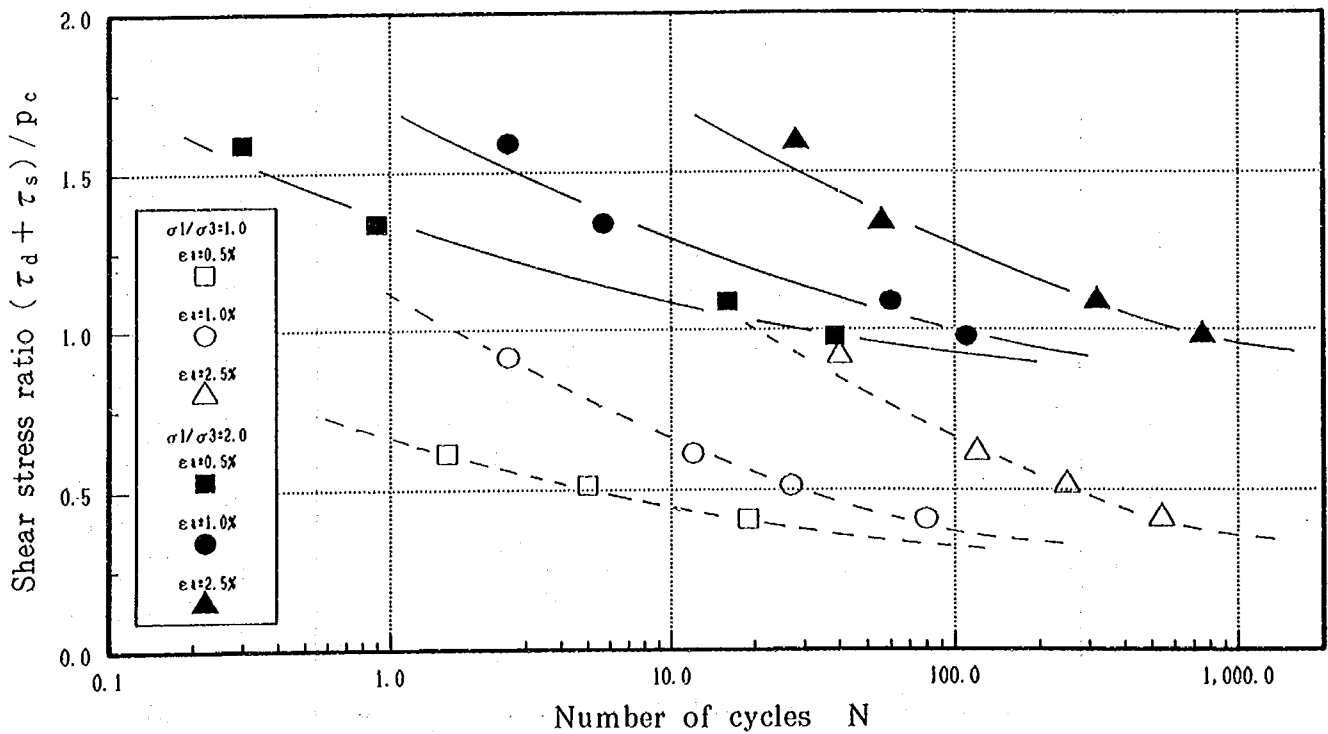


図-3.37(b) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し載荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$ ，平均主応力2.0kgf/cm²，Dr=85%)

Cyclic loading test for rock

(Dr=85%, $p_c=4.0 \text{ kgf/cm}^2$)

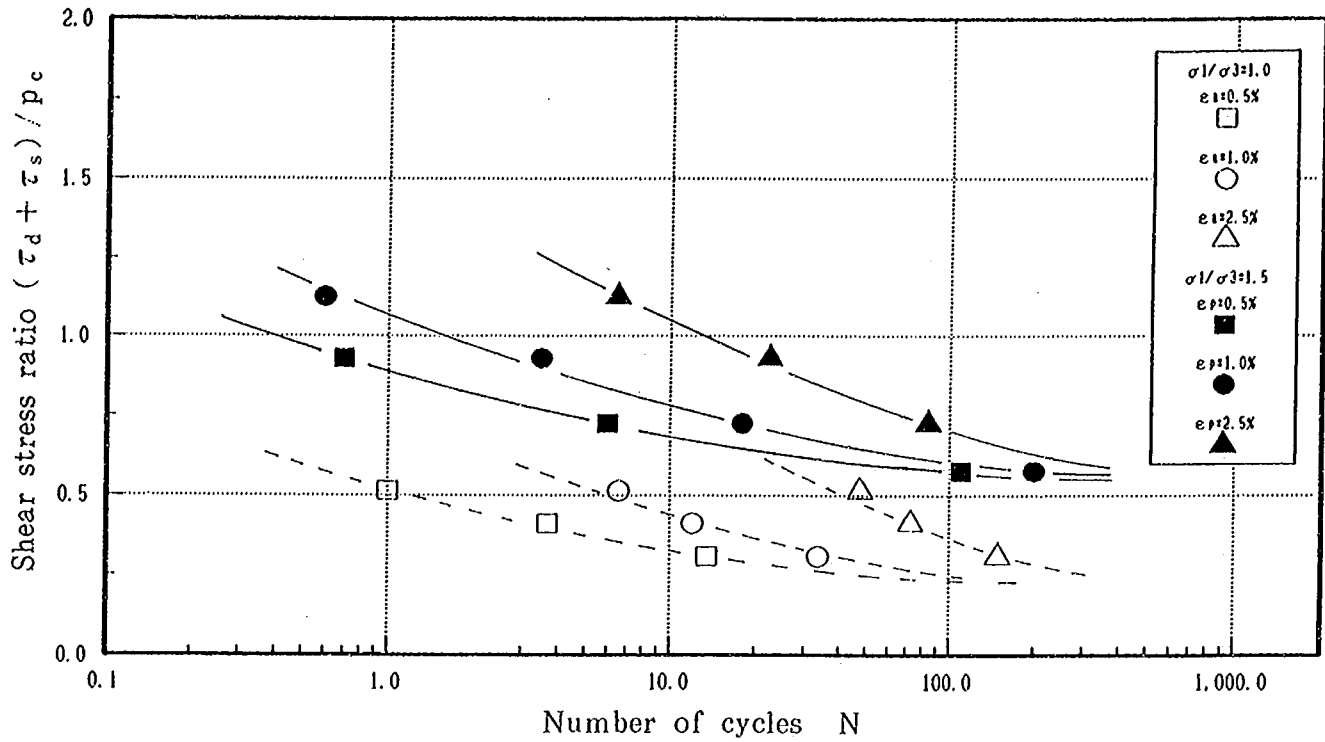


図-3.37(c) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し载荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 1.5$, 平均主応力 4.0 kgf/cm^2 , $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

(Dr=85%, $p_c=4.0 \text{ kgf/cm}^2$)

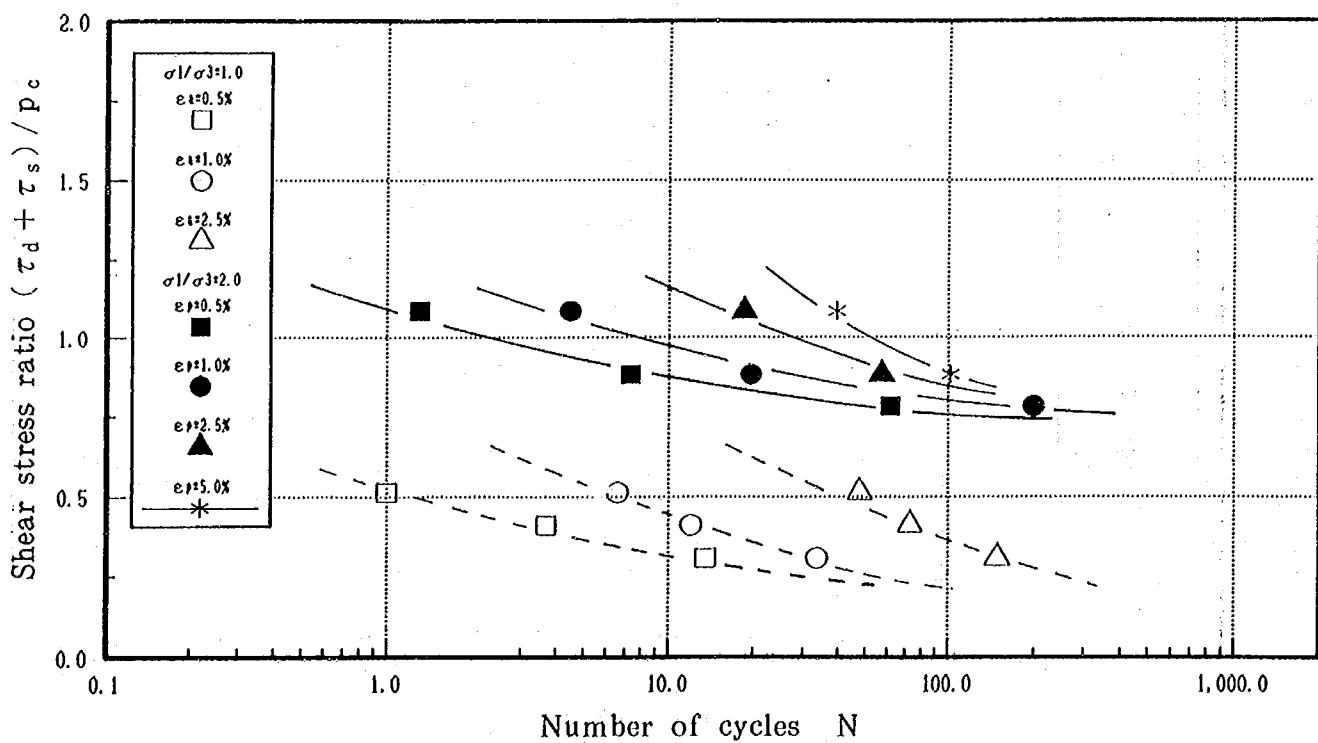


図-3.37(d) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し载荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$, 平均主応力 4.0 kgf/cm^2 , $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

(Dr=85%, $p_c=6.0 \text{ kgf/cm}^2$)

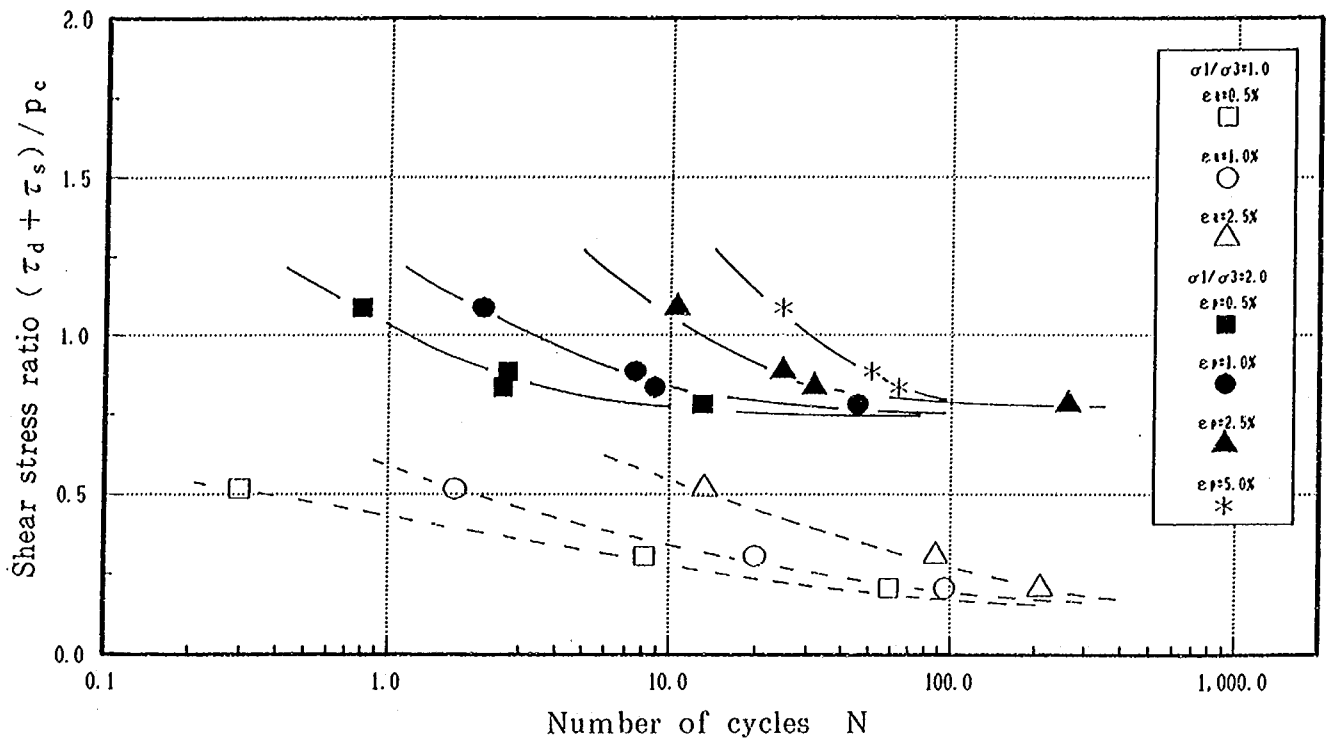


図-3.37(e) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し载荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$, 平均主応力 6.0 kgf/cm^2 , $Dr=85\%$)

Cyclic loading test for rock

(Dr=95%, $p_c=1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

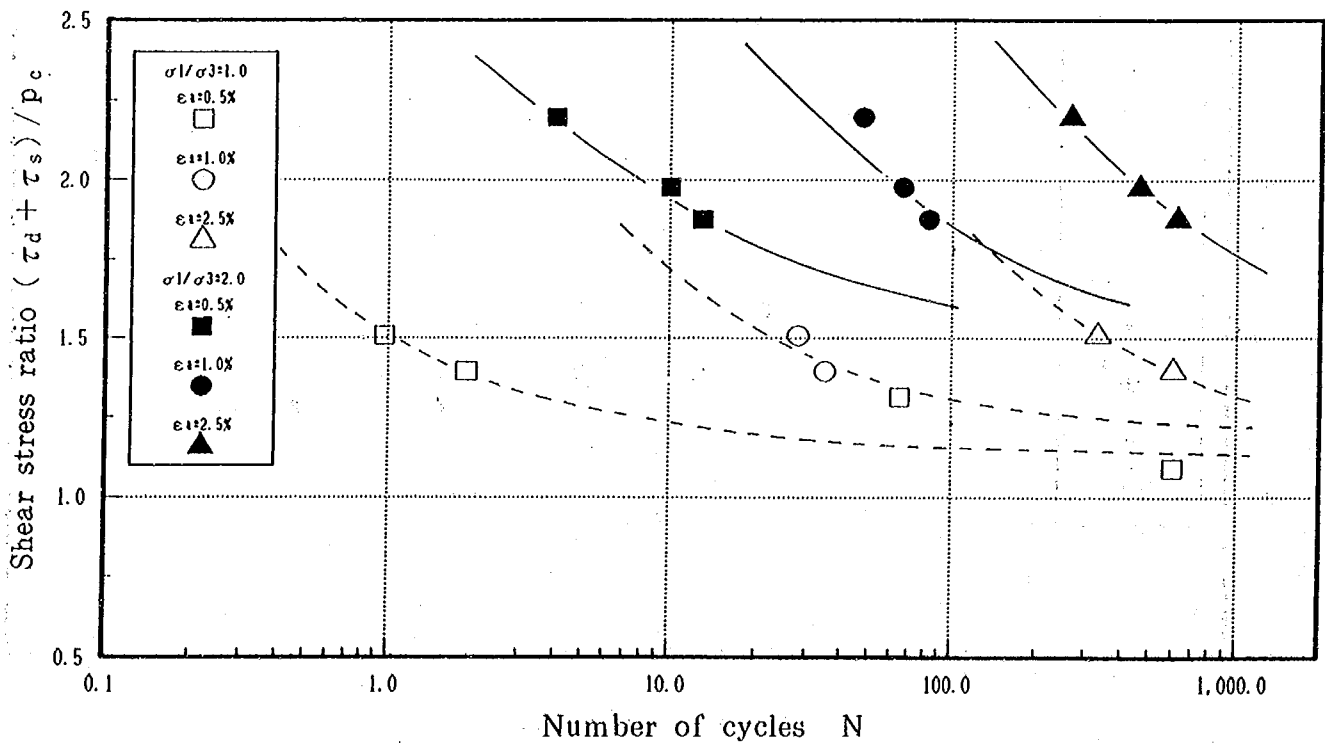


図-3.38(a) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し载荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$, 平均主応力 1.0 kgf/cm^2 , $Dr=95\%$)

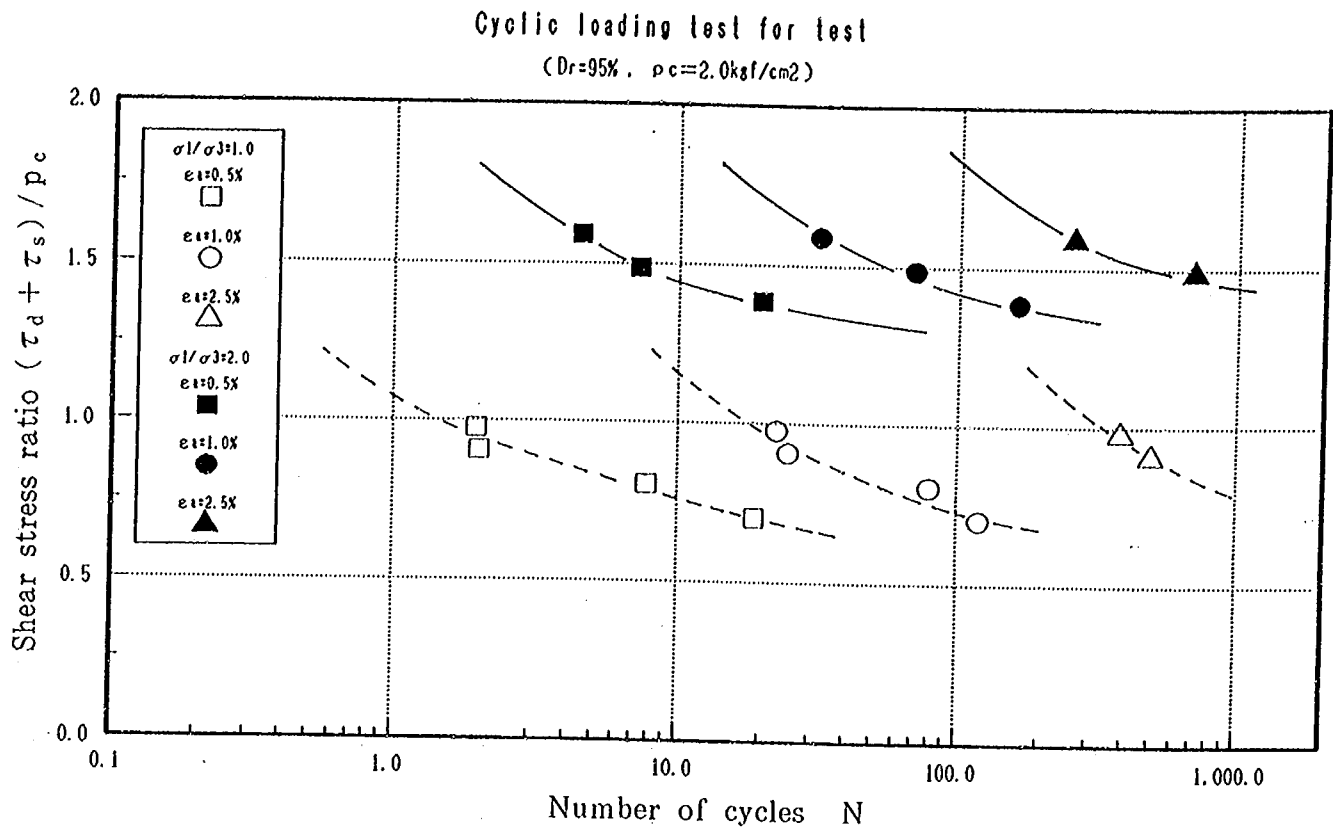


図-3.38(b) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し载荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$, 平均主応力 2.0kgf/cm^2 , $D_r=95\%$)

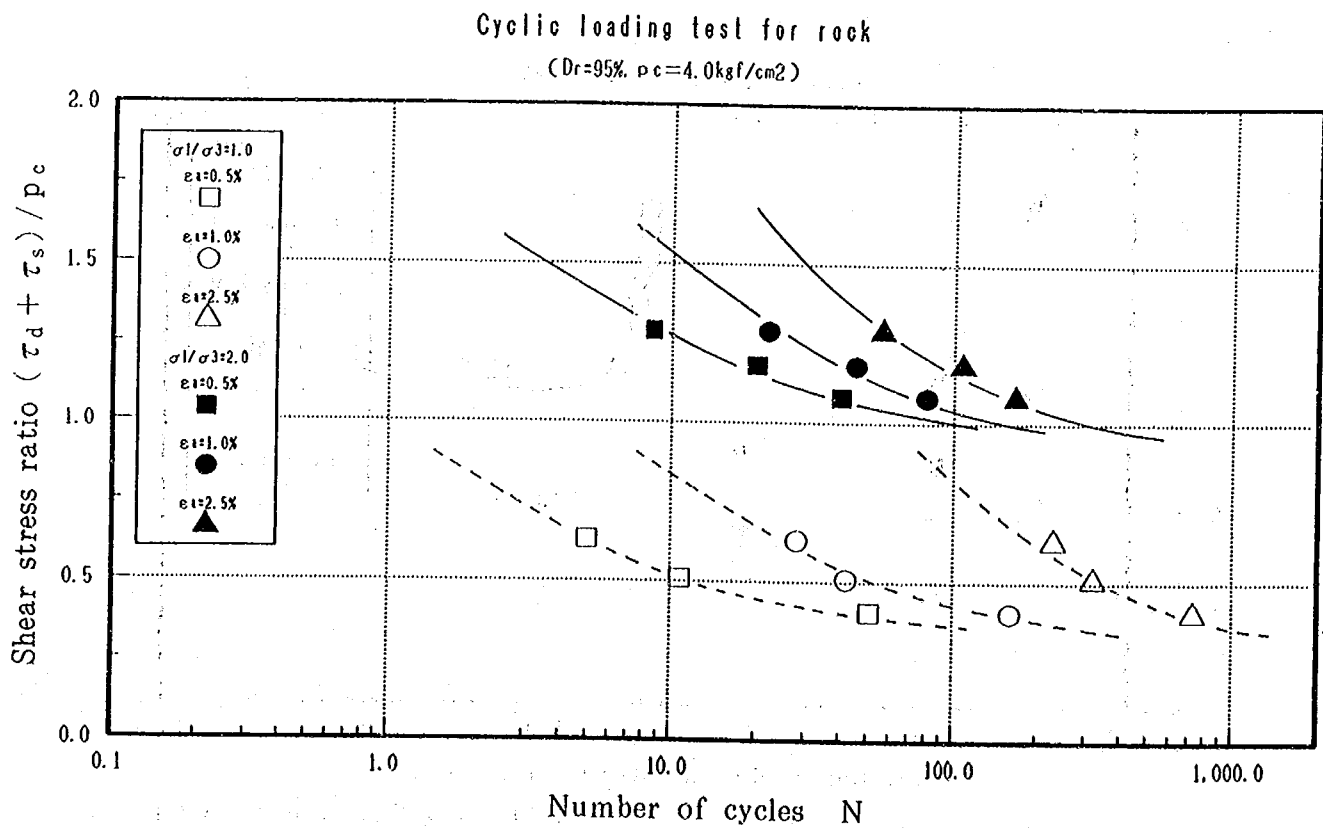


図-3.38(c) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し载荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$, 平均主応力 4.0kgf/cm^2 , $D_r=95\%$)

Cyclic loading test for rock

(Dr=95%, $p_c=6.0\text{kgf/cm}^2$)

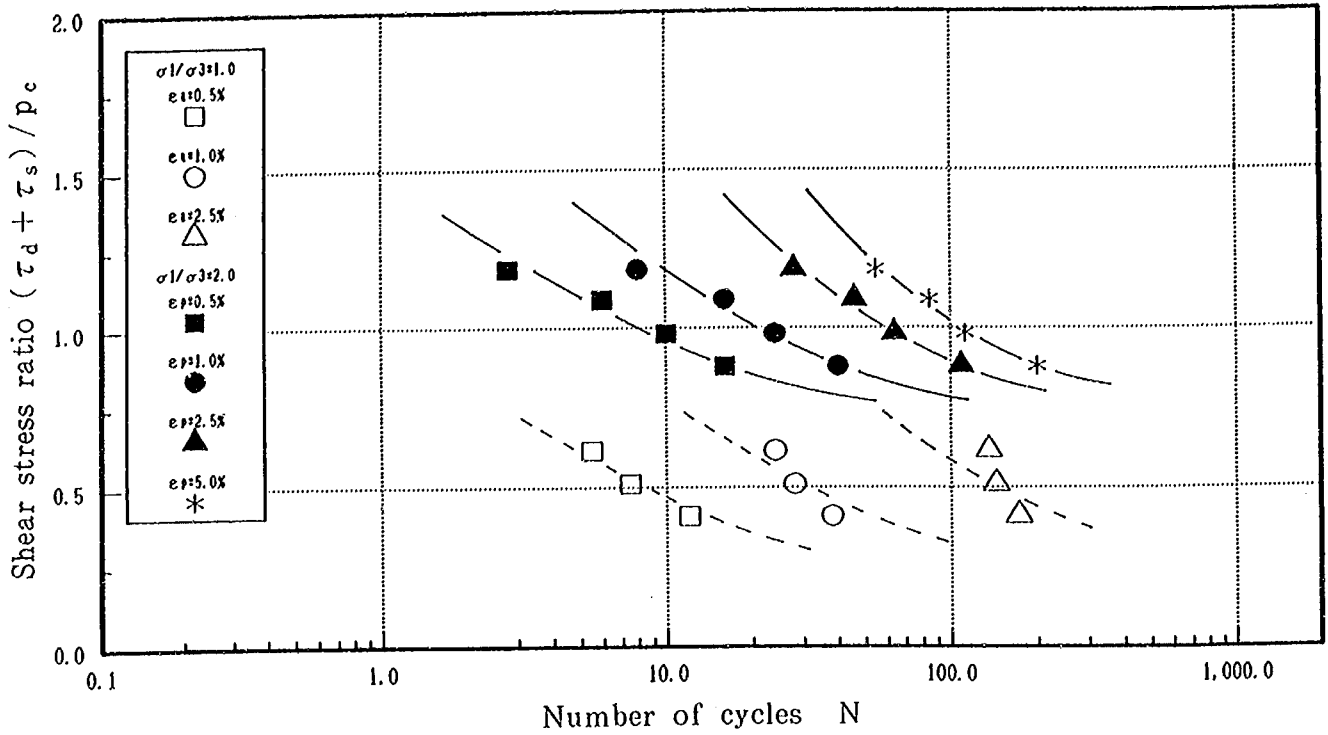


図-3.38(d) せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し載荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$ ，平均主応力 6.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$)

Cyclic test results for rock

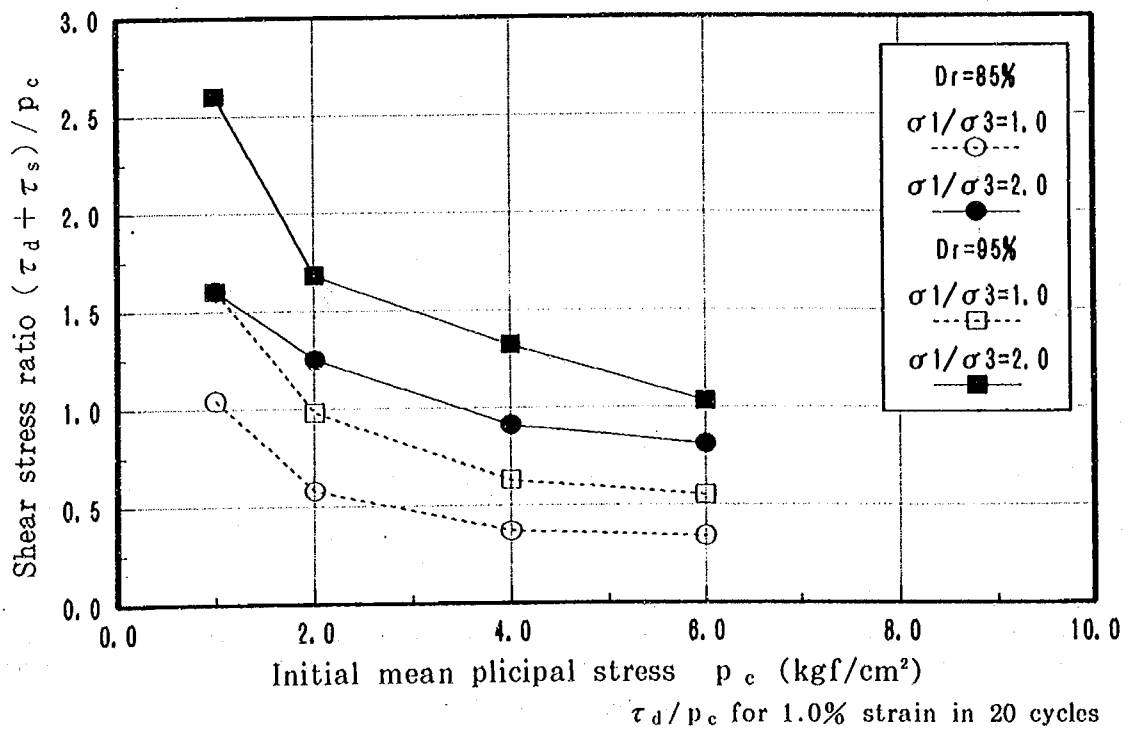


図-3.39 せん断応力比～初期平均主応力，非排水繰返し載荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$ ， $Dr=85\%$ ， 95%)

Cyclic loading test for rock
($p_c=2.0\text{ kgf/cm}^2$, $n=20$)

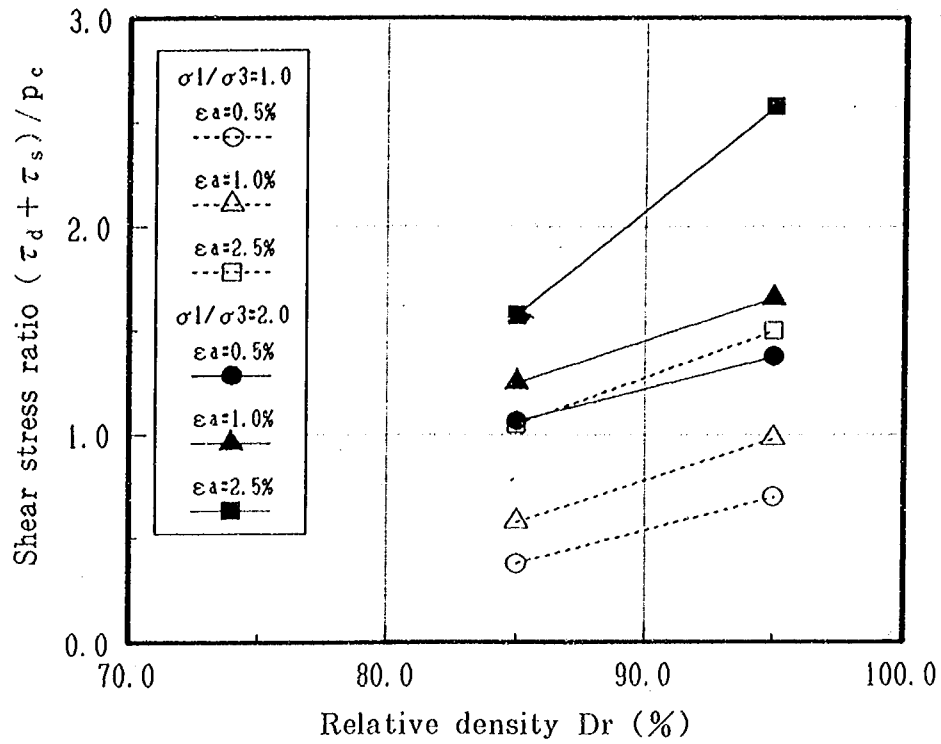


図-3.40 せん断応力比～相対密度，非排水繰返し载荷試験
($\sigma_1/\sigma_3=1.0, 2.0$ ，平均主応力 2.0 kgf/cm^2 ，繰返し回数20)

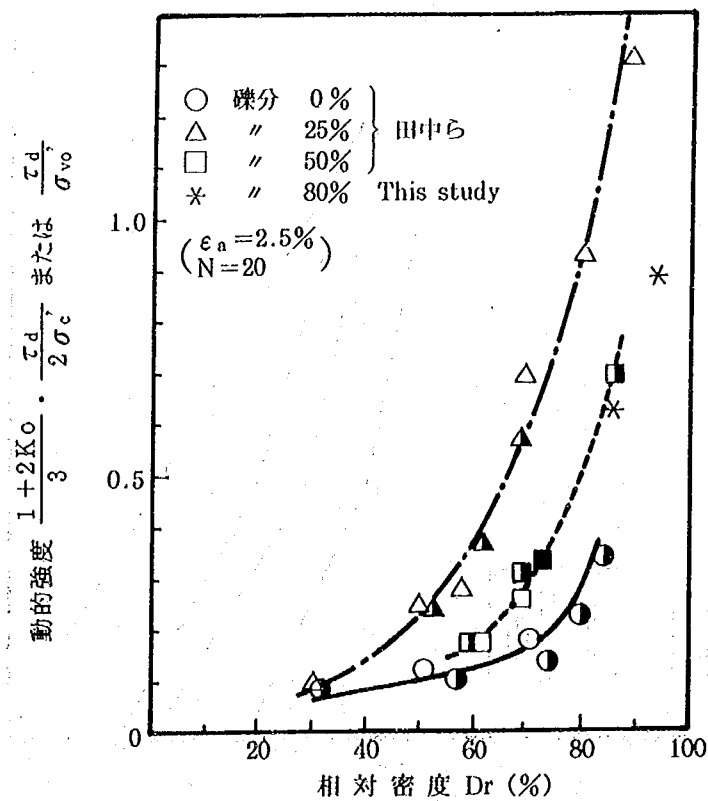


図-3.41 動的強度と相対密度の関係²⁹⁾

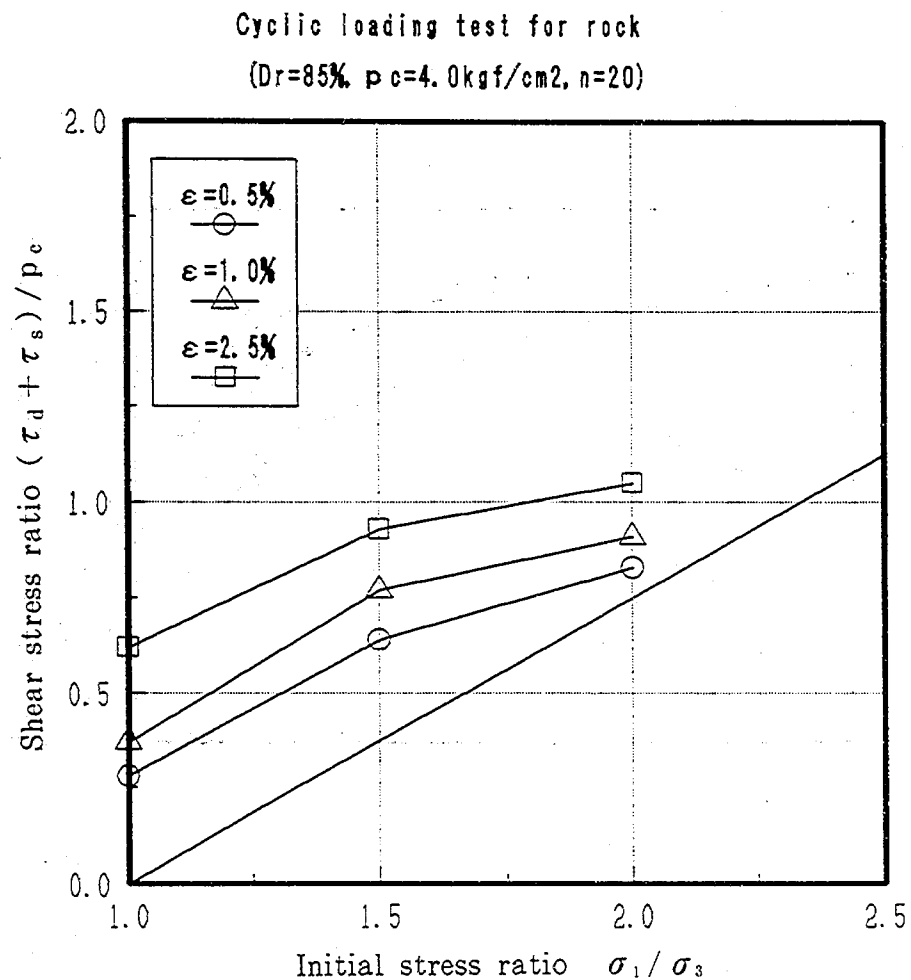


図-3.42(a) せん断応力比～初期主応力比，非排水繰返し
載荷試験（平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$ ，
繰返し回数20）

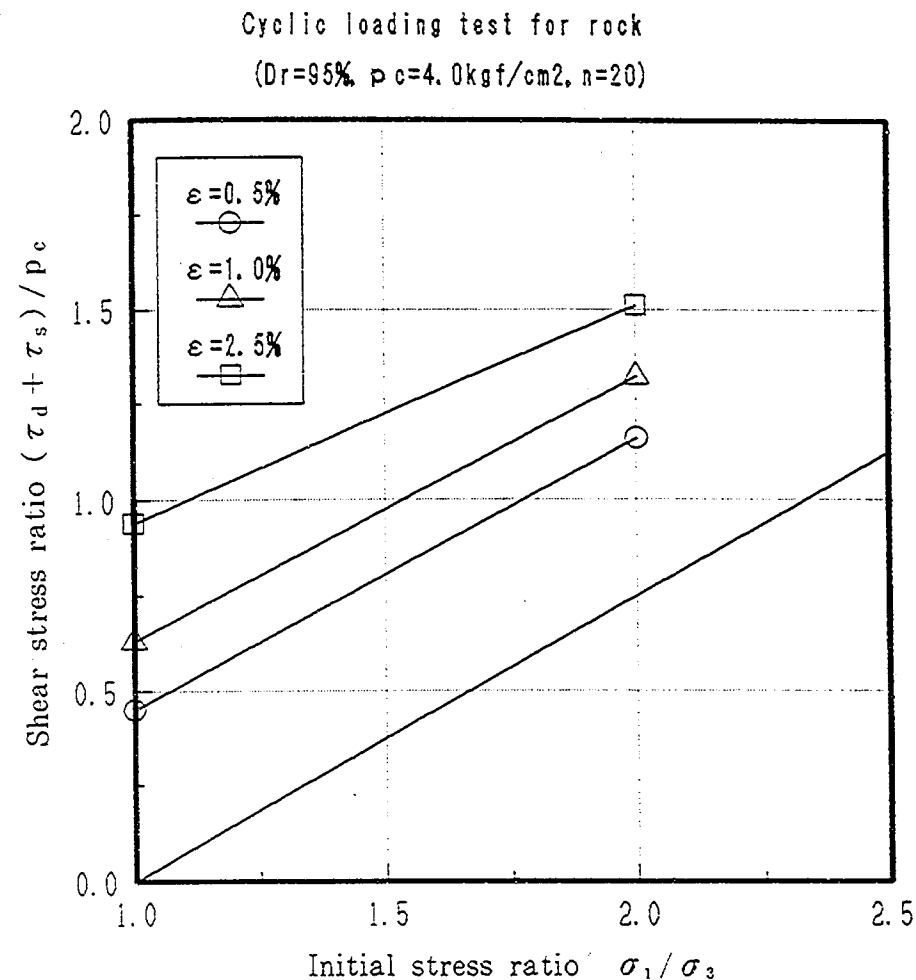


図-3.42(b) せん断応力比～初期主応力比，非排水繰返し
載荷試験（平均主応力 4.0kgf/cm^2 ， $Dr=95\%$ ，
繰返し回数20）

Cyclic loading test for rock

(Dr=85%, $p_c=4.0 \text{ kgf/cm}^2$, $\sigma_1/\sigma_3=1.0$)

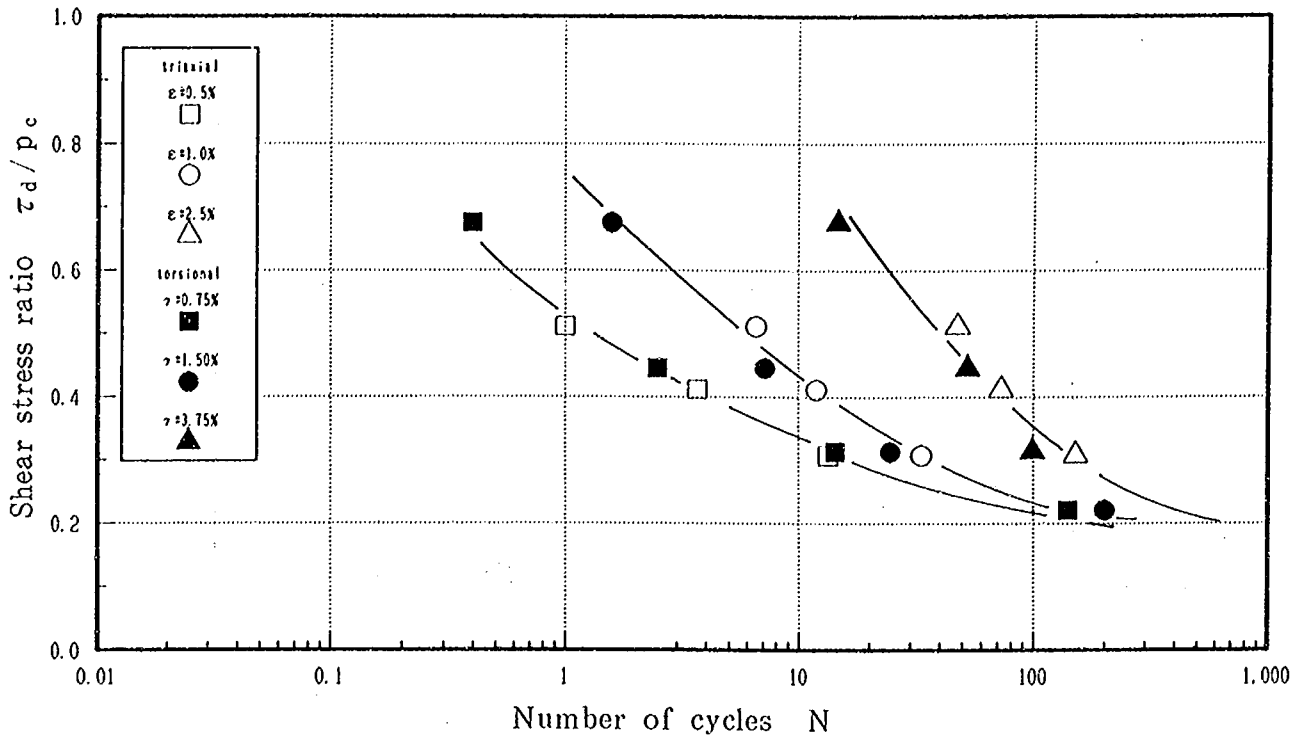
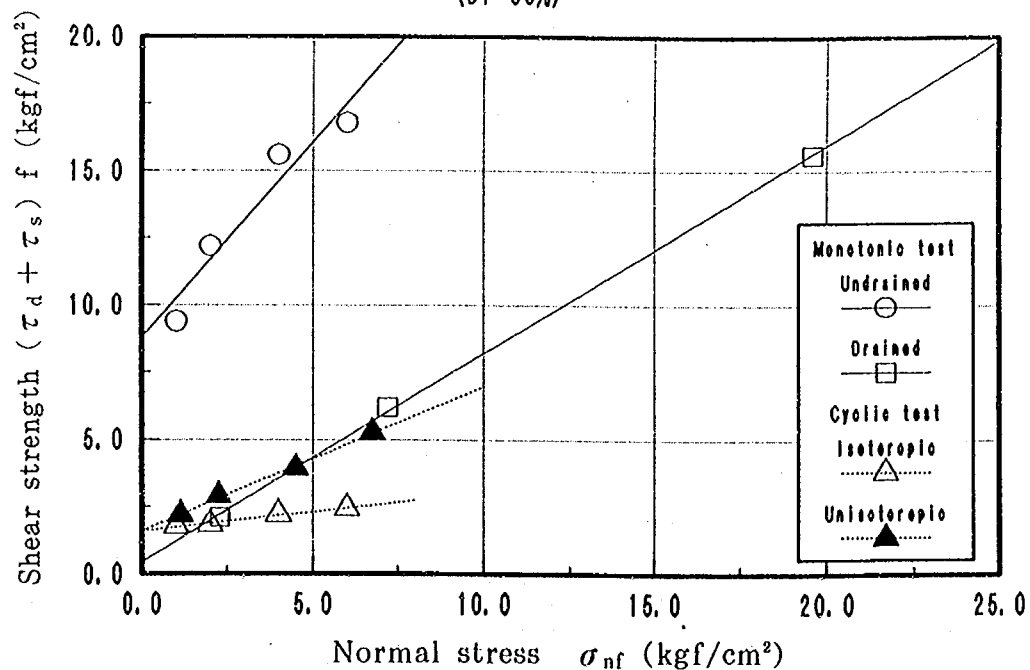


図-3.43 せん断応力比～繰返し回数，非排水繰返し載荷試験，三軸とねじり単純せん断 ($\sigma_1/\sigma_3=1.0$ ，平均主応力 4.0 kgf/cm^2 ， $Dr=85\%$)

Cyclic and monotonic test results for rock

(Dr=85%)



cyclic test : 2.5% strain in 20 cycles

Monotonic test : τ_{max}

図-3.44(a) せん断強度～破壊面の垂直応力，(非排水・排水)単調載荷と(等方，異方)繰返し載荷試験，($Dr=85\%$)

Cyclic and monotonic test results for rock
(Dr=95%)

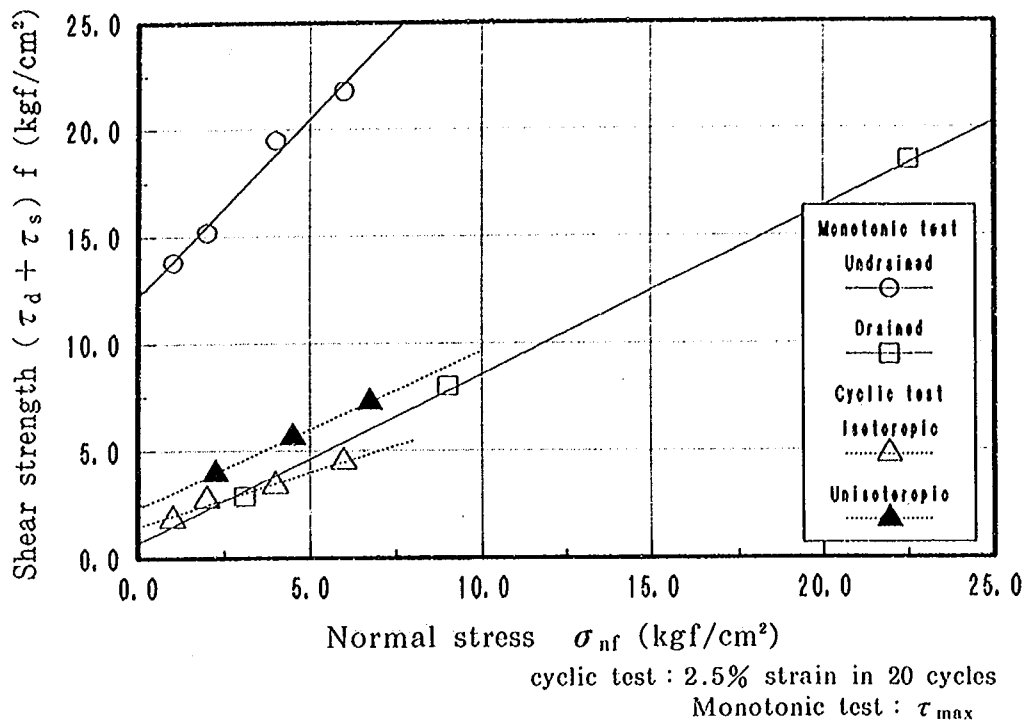


図-3.44(b) せん断強度～破壊面の垂直応力, (非排水・排水) 単調載荷と
(等方, 異方) 繰返し載荷試験, (Dr=95%)

4. 結 論

本報告では、ロックフィルダムを対象に考え、良く締固めた（相対密度85%、95%）ロック材料の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) 排水条件の単調載荷試験においては、大きなひずみ領域では残留応力状態に達しており、その残留強度の見かけの粘着力はゼロで、せん断抵抗角は相対密度85%、95%では一致した。
- 2) 非排水条件の単調載荷試験においては、バックプレッシャーに依存してダイレイションによる負の間隙水圧が発生し、結果として、排水強度を上回る大きな非排水強度が得られた。
- 3) 排水条件での繰返し載荷試験では、単調載荷試験（排水試験）で得られた残留強度を下回る応力範囲において、繰返し載荷によるひずみの増幅は微小である。
- 4) 非排水繰返し載荷試験では、繰返し回数の増加に伴いひずみが増大し、間隙水圧は90%~100%近くまで急激に上昇しているが、液状化のようなflow failureは起こらない。
- 5) 非排水三軸繰返し試験で、等方圧密の試験では残留ひずみは伸張側に進行する。
- 6) 非排水三軸繰返し試験のメンブレンペネトレーションの補正は、動的強度比を一律10%低減する。
- 7) 繰返し回数が小さく、規準ひずみが大きく、相対密度が高く、初期拘束圧が小さく、初期せん断応力が大きいほど動的強度比は大きくなる。
- 8) 等方応力状態のもとでは、三軸試験の動的強度と中空ねじりせん断試験の動的強度は一致する。
- 9) 密なロック材の応力~ひずみ特性は載荷条件によらず定性的には密な砂の特性と類似している。
- 10) 動的強度と静的強度を比較すると、フィルダムの地震時安定性を考えるうえでは（相対密度85%以上、繰返し回数20回以下、規準ひずみ量2.5%以上、垂直応力5.0kgf/cm²以下の条件）、異方圧密条件での動的強度は静的排水強度を上回る。

あ　と　が　き

今回、粗材の繰返し試験を本格的に実施してきて、繰返し載荷条件のもとでの、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、広い範囲での動的強度特性、特に静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、ロック材料を御提供頂いた三国川ダム工事事務所の関係各位並びに直接実験に携ったアイ・エヌ・エー筑波研究所(株)沼尻喜英、飛鳥建設(株)境野典夫、日本国土開発(株)鈴木正人の各氏に深い敬意とともに謝意を表します。

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，pp55-60
- 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，p95-104
- 4) 土質工学会：土質試験の方法と解説，p 430
- 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, p1099-1119
- 7) G. Castro : Liquefaction and Cyclic Mobility of Saturated Sands, Proc. ASCE, Jour. of GT, Vol.101, 1975, p551-569
- 8) K. Ishihara, I. Li : Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test, S & F, Vol.12, No.2, p19-39
- 9) 松本，渡辺，大野：大型せん断試験装置を用いた標準砂とロック材料の動的変形特性試験，土木研究所資料2132号
- 10) 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
- 11) N. G. Banerjee, et al. : Cyclic behavior of dense coarse-grained materials in relation to the seismic stability of dams, UCB/EERC-79/13, 1979
- 12) G. R. Martin, et al. : Effects of system compliance on liquefaction tests, Proc. ASCE, Jour. of GT, Vol.104, 1978, p463-479
- 13) 中村，時松，吉見：非排水せん断強度に与えるMembrane Penetrationの影響：第22回土質工学会研究発表会，1987，p563-564
- 14) R. J. Marsal : Mechanical properties of rockfill, Casagrande Volume, John Wiley & Sons, 1972, p 109-200
- 15) T. M. Leps : Review of Shearing Strength of Rockfill, Proc. ASCE, Jour. of SM, Vol.36, 1970
- 16) 土質工学会：ロックフィル材料の試験と設計強度，p 24
- 17) 土質工学会：土質試験法—第二回改訂版—，p521-522
- 18) 龍岡文夫：三軸せん断装置による砂の変形特性に関する基礎的研究，東京大学博士論文，p205, 1973
- 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2160号，1985

- 20) 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，1989，p797-800
- 21) 石原研而：土の動的強度，土と基礎20-7(1972)，p73
- 22) 谷口栄一ほか：繰返し荷重による密な砂の変形・強度特性，第20回土質工学会研究発表会，1985，p561-564
- 23) H. B. Seed : Design problems in liquefaction, Proc. ASCE, Jour. of GT, Vol.113, 1987, p827-845
- 24) H. B. Seed : Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams, Geotechnique 29, No.3, 1979, p215-263
- 25) 柚木裕二ほか：密な砂の繰返し三軸せん断挙動に与える初期有効束圧の影響，第17回土質工学会研究発表会，1982，p1649-1652
- 26) 三浦均也ほか：砂の変形・破壊挙動の拘束圧依存性，第25回土質工学会研究発表会，1990，p511-514
- 27) 国生剛治ほか：密な砂の非排水くり返しせん断特性に及ぼす微視的構造の影響，第17回土質工学会研究発表会，1982，p1625-1628
- 28) 田中幸久ほか：砂礫材の動的強度に及ぼす密度，粒度の影響，第22回土質工学会研究発表会，1987，p605-606
- 29) 保田雅彦ほか：明石層砂礫試料の繰返し非排水試験による変形・強度特性，第24回土質工学会研究発表会，1989，p817-820
- 30) K. Lee, H. B. Seed : Dynamic strength of anisotropically consolidated sand, Proc. ASCE, Jour. of SM, Vol.93, 1967, p169-190
- 31) Y. P. Vaid, J. C. Chern : Effect of static shear on resistance to liquefaction, S & F, Vol.23, 1983, p47-60
- 32) 国生，加藤，嶋田：初期せん断応力を受けた密な砂の非排水繰返しせん断特性，第16回土質工学会研究発表会，1981，p581-584
- 33) 関，松尾，古賀：初期せん断を受けた飽和砂の動的強度特性，第24回土質工学会研究発表会，1989，p795-796
- 34) 兵動正幸ほか：異方圧密砂の非排水せん断強度に及ぼす密度の影響，第25回土質工学会研究発表会，1990，p747-750
- 35) Tatsuoka, F, et al. : Cyclic Undrained Triaxial and Torsional Shear Strength of Sand for Different Sample Preparation Methods, S & F, Vol.26, No.3, p23-41
- 36) 山下，土岐，三浦：メンブレン貫入の影響を考慮した非排水繰返し三軸強度とねじりせん断強度，第24回土質工学会研究発表会，1989，p777-780
- 37) 永瀬，石原，篠崎：異方圧密下における砂の繰返し中空ねじりせん断試験，第19回土質工学会研究発表会，1984，p589-590

“ Cyclic Behavior of Dense Coarse-Grained Materials in The Seismic Stability of Dam ”

by N. G. Banerjee

H. B. Seed

C. K. Chan

本報告は、Oroville(Gravel-fill)ダムの地震時安定性を検討するために、密な粗粒材に関して次の点について調査し、考察を加えている。

- (1) 等方、異方応力状態における体積変化あるいは間隙水圧の発生特徴
- (2) 繰り返し応力条件下での応力～ひずみ特性
- (3) 動的な挙動に及ぼす粒度の設定、供試体の作製法、圧密時間の影響

以下は、Seedらが上記の目的で実施した試験および結果についてまとめたものである。

1. 試験条件

試験材料に粒度は図-A.1に示すとおりで、径が2.8 n, 12 nの2種類の三軸試験装置で、表-A.1, 表-A.2に示す条件を設定して繰り返し試験を行っている。また、12 n供試体では、繰り返し载荷前後の単調载荷試験も行っている。

2. 繰り返し試験結果の整理

- (1) メンブレン強度補正は、図-A.2の補正曲線を採用。
- (2) 間隙水圧測定誤差の補正は、100%間隙水圧で誤差が5%以下として無視。
- (3) メンブレンコンプライアンスの補正は、12in供試体で応力比を一律10%減じた。
- (4) 基準ひずみは、等方圧密ではひずみ振幅、異方圧密では残留ひずみで整理した。

3. 繰り返し試験結果

- (1) 密なOroville gravelの繰り返し条件下での応力～ひずみ特性は密な砂の特性に類似する部分が多い。
- (2) 等方圧密の試験に関しては、ひずみが伸張側に進行する。
- (3) 等方圧密の試験では、発生ひずみの限界値が存在する。(図-A.3)
- (4) Oroville gravelでは、砂の場合と異なり間隙水圧が急激に上昇し、その後上昇率が小さくなる傾向を示す。
- (5) 異方圧密の繰り返し载荷による残留間隙水圧比 ru は100%には達せず、 $K_c (= \sigma_1 / \sigma_3)$ が大

きいほど、 ru のピークが小さくなった。(図-A.4)

(6) 繰り返しせん断強度は、ひずみレベル5%までは拘束圧に比例する。(図-A.5)

図-A.6は破壊時の軸差応力 q_r と破壊時の平均主応力 $\bar{p}_r$ (排水試験)あるいは圧密後の平均主応力 $\bar{p}_c$ (非排水試験)で図-A.5を再整理したものである。

(7) 繰り返し試験による粒子破砕は単調排水試験の約半分であった。

(8) システムコンプライアンスの影響を考慮していれば、材料の最大粒径、供試体サイズは動的強度に影響しない。(図-A.7)

(9) 平均粒径が大きいほど繰り返し载荷によるひずみが大きい。(図-A.7)

(10) 時間効果(圧密)により動的強度の増加が見られる。(図-A.8)

図-A.8で最大粒径0.5 in, 供試体径2.8 inでの10週間は実際のダムに相当する。

4. 単調载荷試験結果

密な粗粒材では、限界拘束圧(せん断中、間隙水圧が変化しない)が存在し、(図-A.9)限界拘束圧以上では、せん断抵抗角は一定値を示す。(図-A.10)

$D_r=84\%$ のOroville gravelでの限界拘束圧は、約80kgf/cm²であり、それ以下の拘束圧では、繰り返し载荷後の単調载荷試験による破壊時の間隙水圧は繰り返しを受けない場合より大きく、それに伴い、強度も小さくなっている。一方限界圧以上では、両者の破壊時の間隙水圧と強度はほぼ一致する。(図-A.9)

图-A.1 GRAIN SIZE DISTRIBUTION OF OROVILLE GRAVEL

表-A.1 (ϕ 12in specimen)

Field Conditions	Parameter Selected for Laboratory Tests	Test Variable/Constant
1. Relative Density of Fill "as built" (86%)	Modeled Material Relative Density = 84%	Constant
2. Depth of Soil Elements (0~772')	Effective Confining Pressures. 2, 8, 14, and 26 kg/cm ²	Variable
3. Initial Stresses in Soil Elements under Level Ground and Sloping Ground	Isotropic ($K_c = \sigma'_{1c}/\sigma'_{3c} = 1$) and Anisotropic Consolidation ($K_c = 1.5$ and 2.0)	Variable
4. Depth of Water Table	Back Pressure, u_p (4-8 kg/cm ²)	Constant
5. Dynamic Shear Stress Caused by Different Magnitude Earthquakes	Cyclic Deviator Stress, σ_{dc}	Variable
6. Slope Submerged under Reservoir Water	Fully Saturated Sample under Back Pressure	Constant
7. No Drainage during Earthquake Loading	Undrained Test	Constant

表-A.2 (ϕ 2.8in specimen)

Group	Method of Sample Preparation	σ'_{3c} kg/cm ²	K_c	Consolidation Period (days)
I	Dry Vibration	14	1	0-1
II	Wet Vibration	14	1	0-1
III	Dry Vibration	26	1	0-1
IV	Wet Vibration	26	1	0-1
V	Wet Vibration	14	1	73

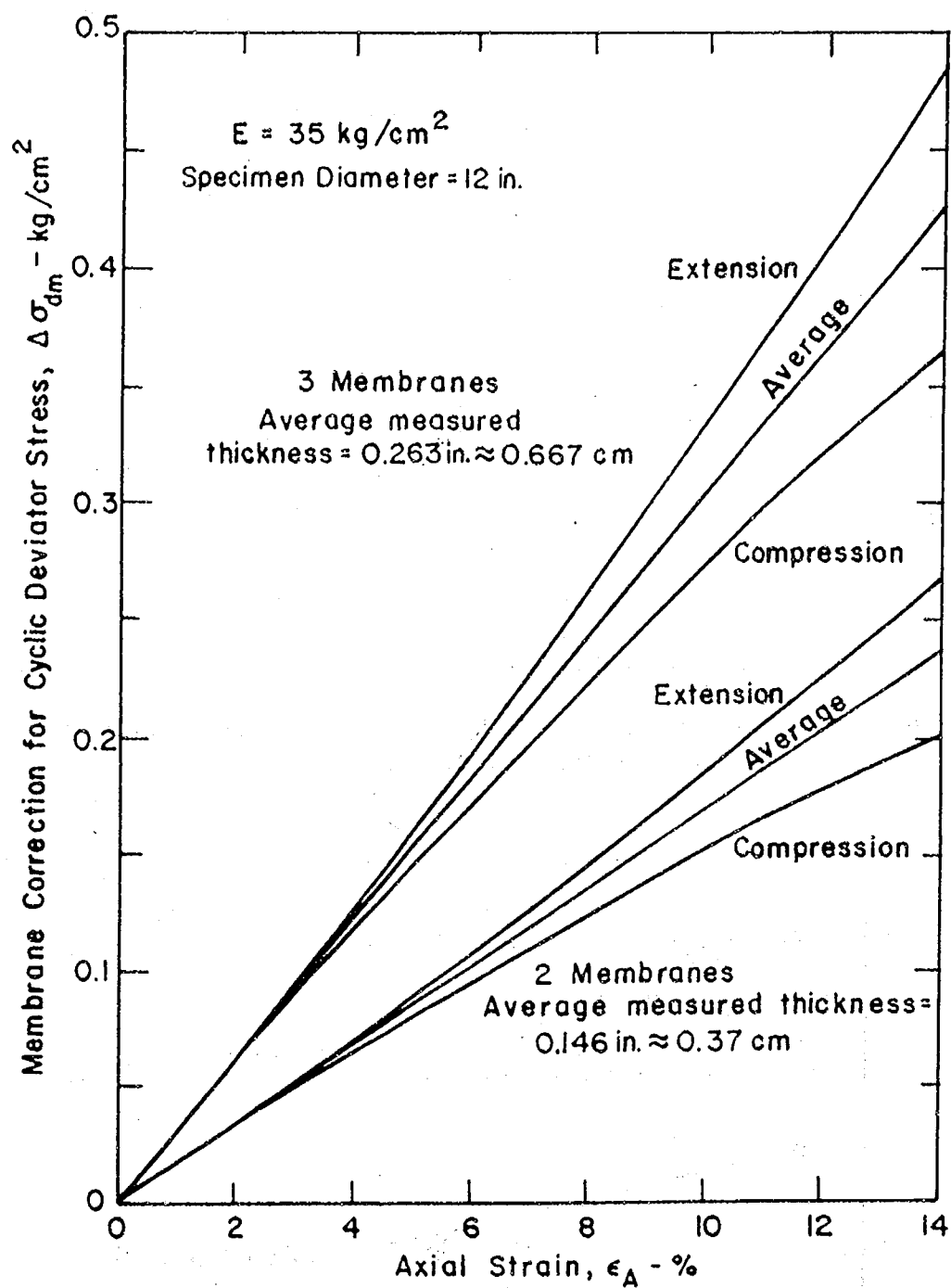
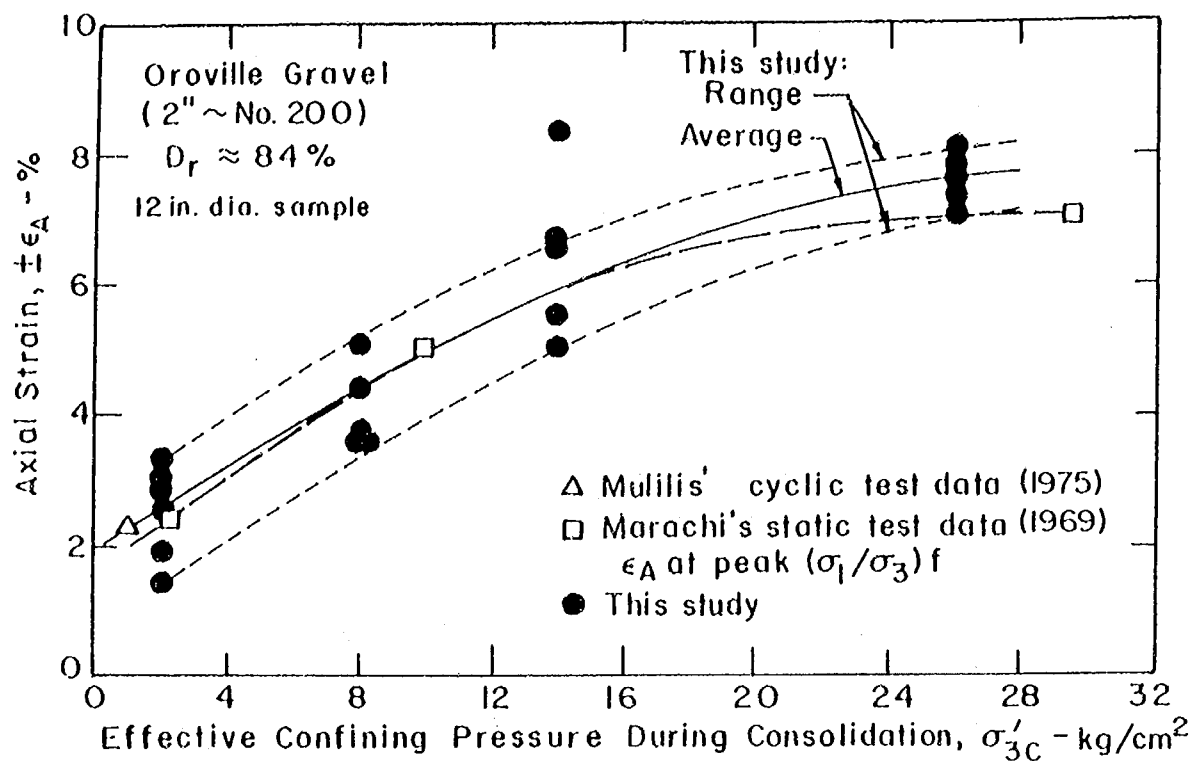
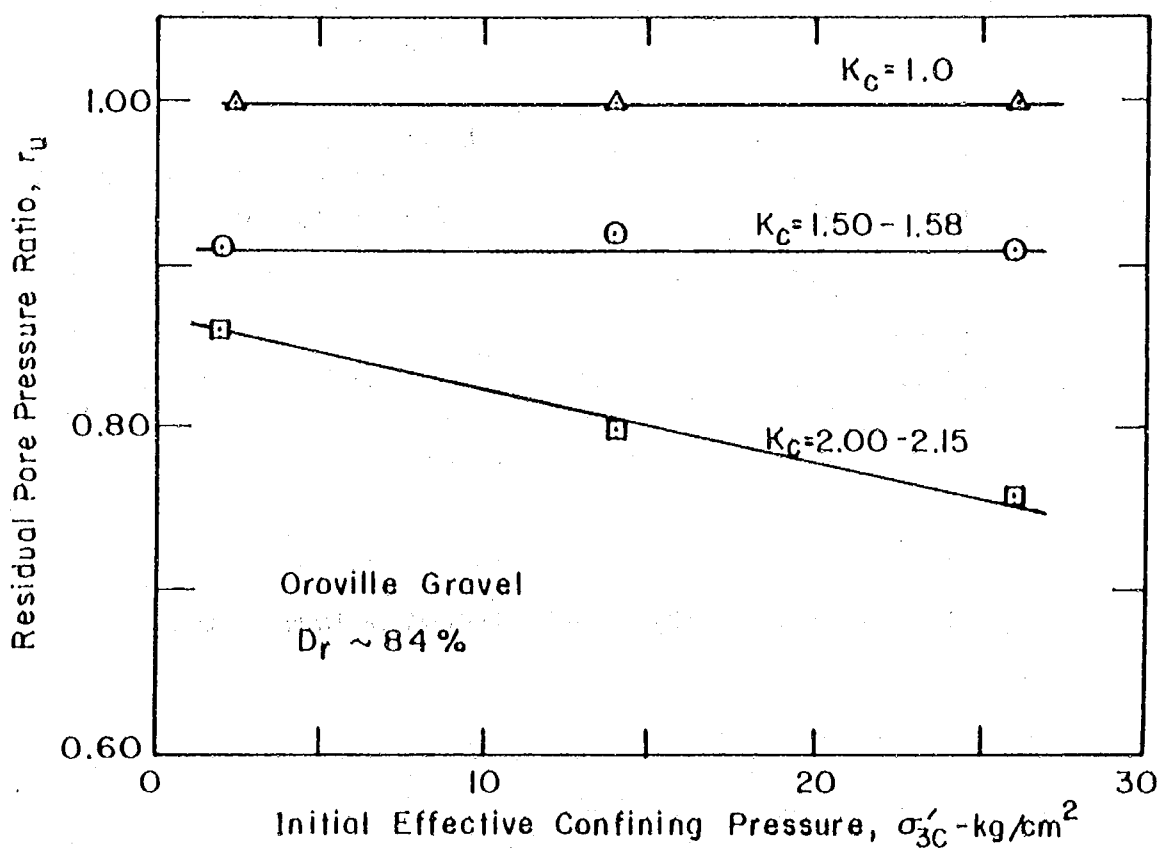


图-A.2 CORRECTION CURVE FOR MEMBRANE STRENGTH



FIG—A.3 LIMITING AXIAL STRAIN IN ISOTROPICALLY CONSOLIDATED CYCLIC TRIAXIAL TEST SPECIMENS



FIG—A.4 DEVELOPMENT OF RESIDUAL PORE-WATER PRESSURES IN CONSOLIDATED UNDRAINED CYCLIC TRIAXIAL TESTS

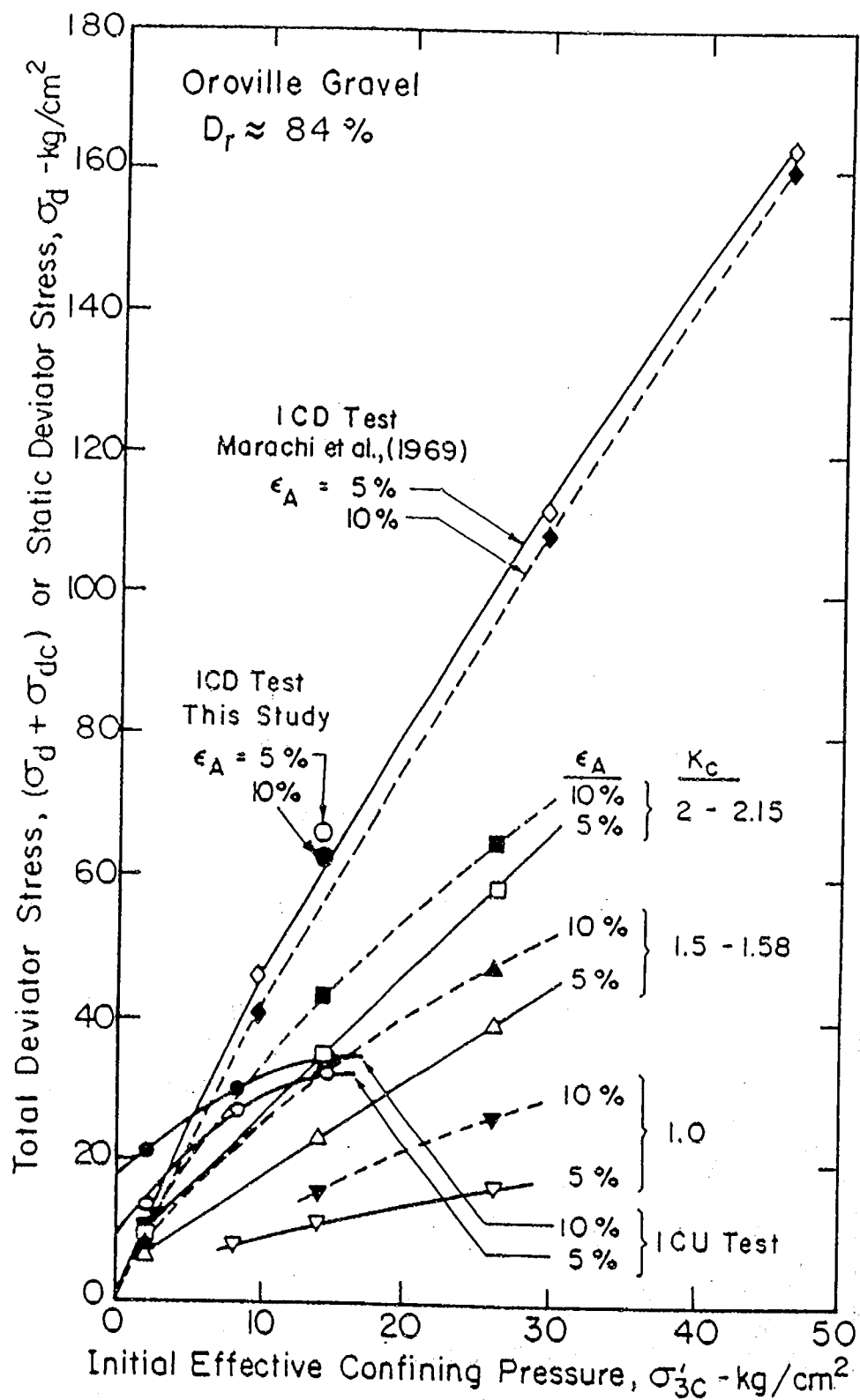


图-A.5 比较研究奥罗维尔砾石在5个周期内相对于其静态强度的循环强度

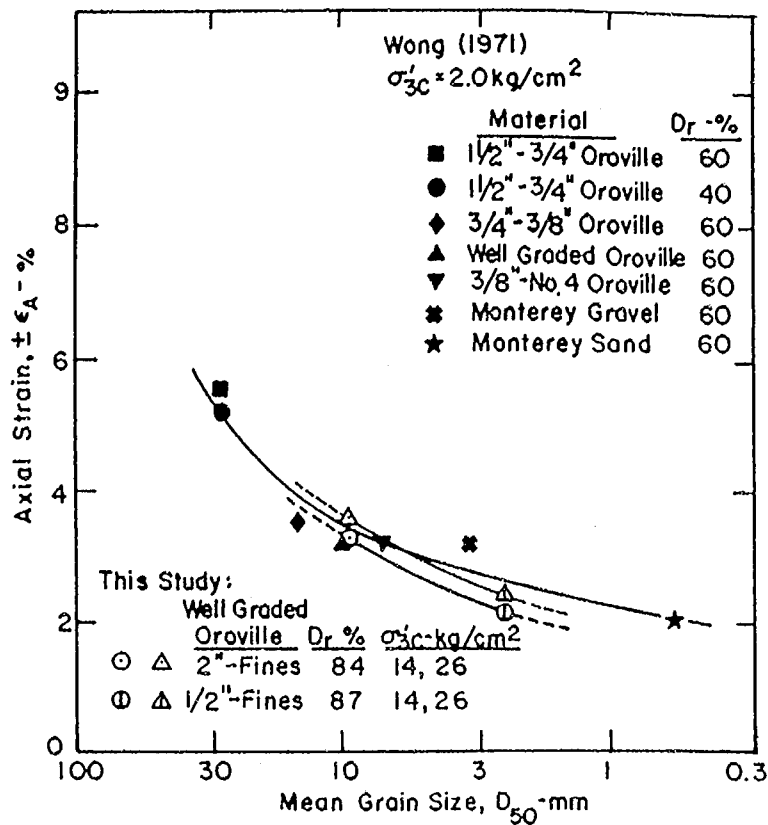


图-A. 7 AXIAL STRAIN REQUIRED TO CAUSE 100% PORE-WATER PRESSURE RATIO WITH DIFFERENT MEAN GRAIN SIZE

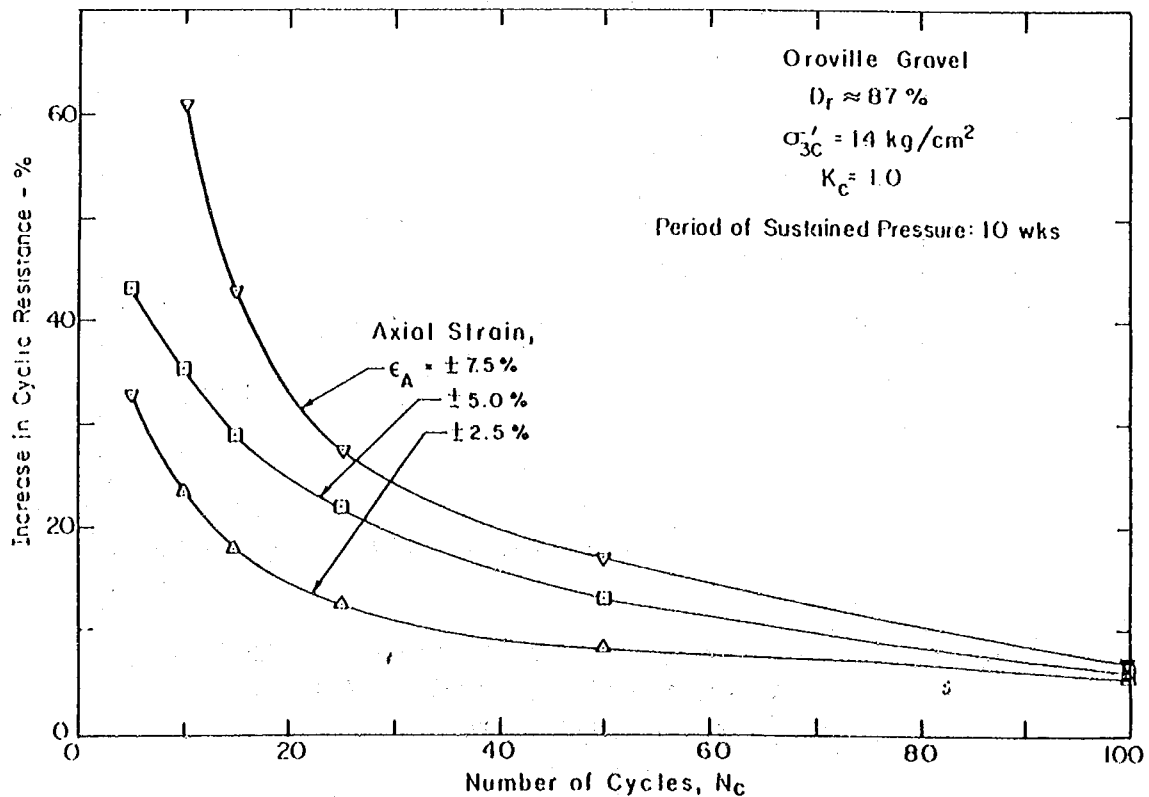


图-A. 8 INCREASE IN CYCLIC RESISTANCE DUE TO SUSTAINED PRESSURE EFFECTS

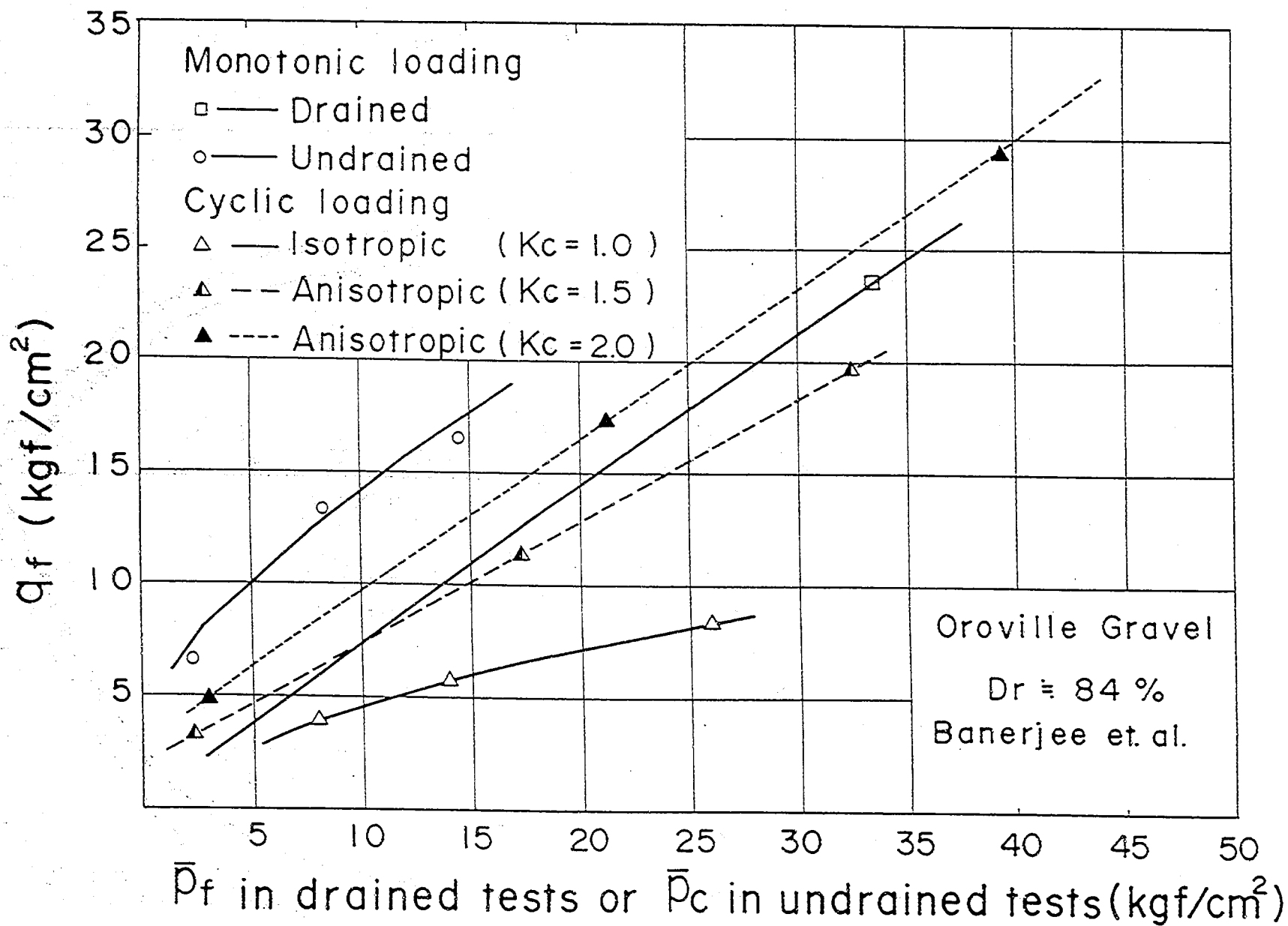


図-A. 6 破壊時の軸差応力 q_f と破壊時の平均主応力 $\bar{p}_f$ (排水試験)あるいは圧密後の平均主応力 $\bar{p}_c$ (非排水試験)で Oroville Gravel の各種強度の整理

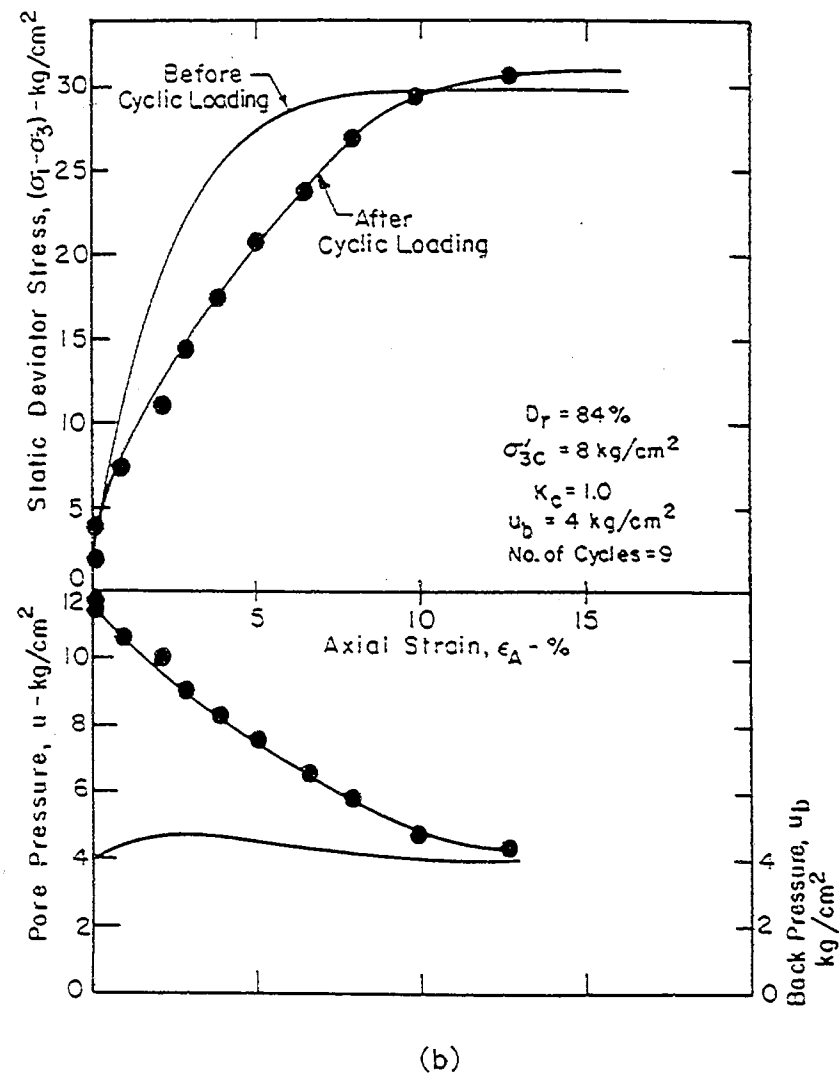
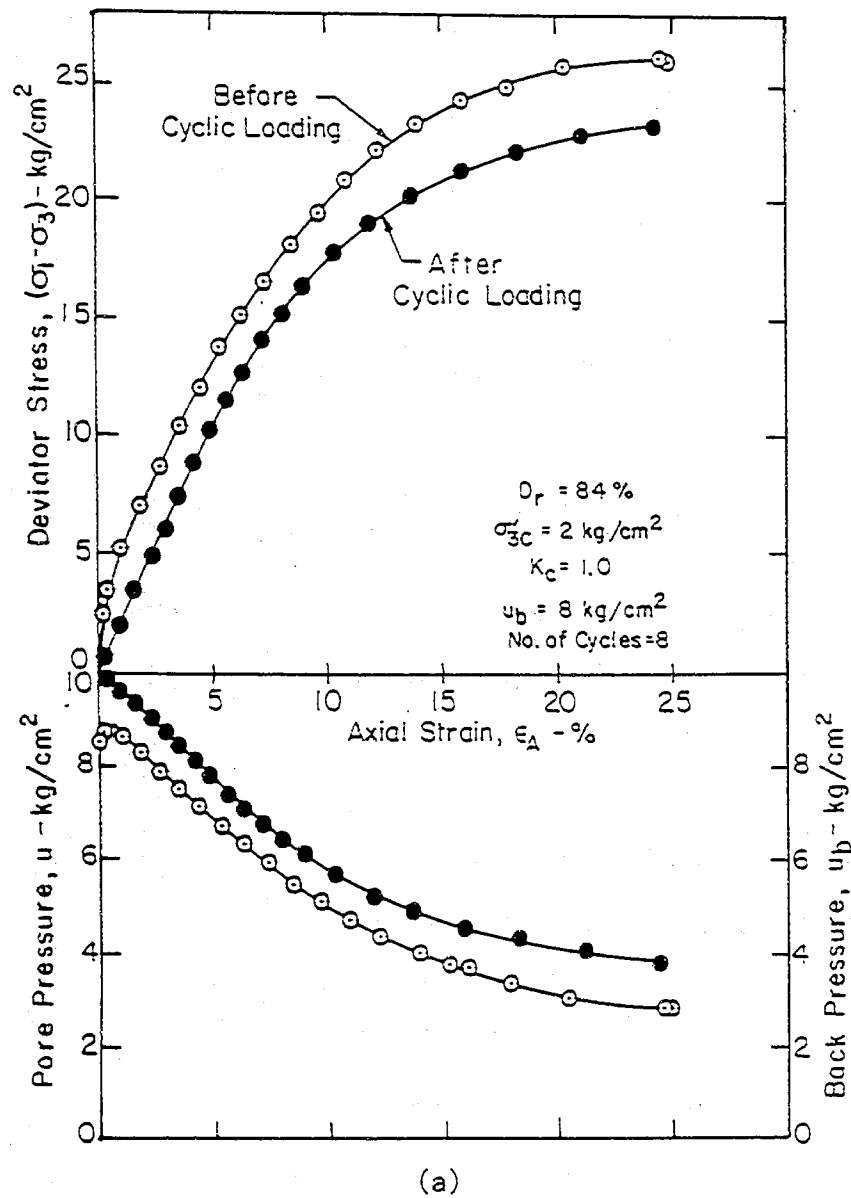


图-A. 9 STATIC STRESS VS. STRAIN BEHAVIOR OF OROVILLE GRAVEL IN ISOTROPICALLY CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST

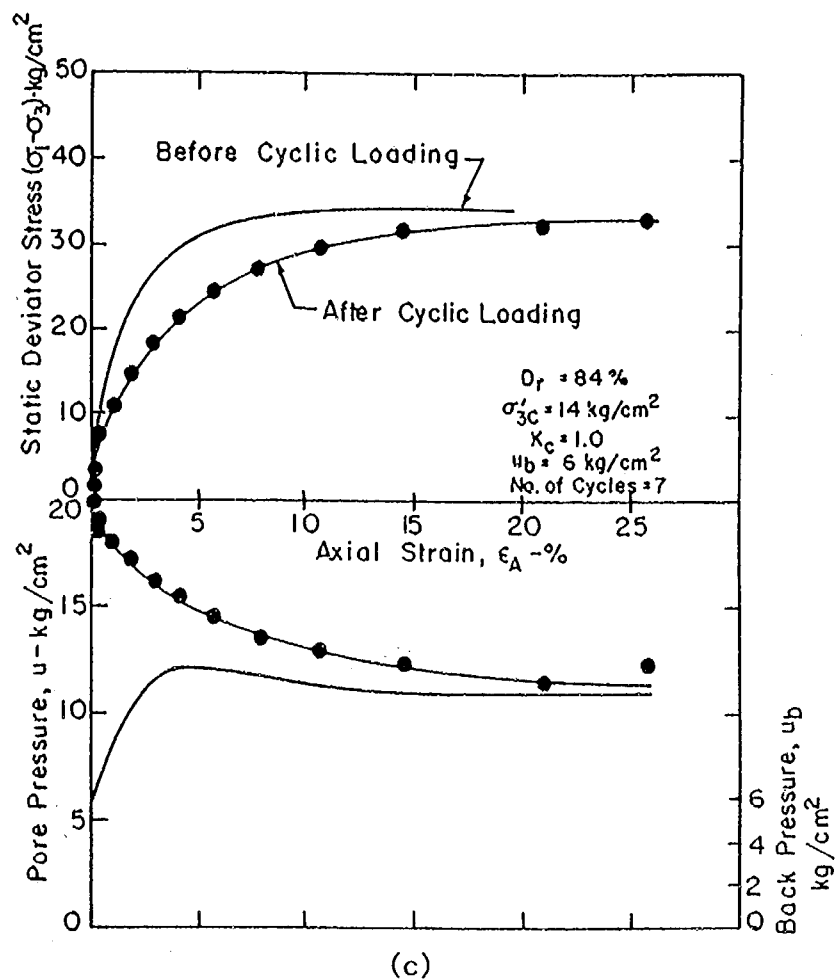


图-A. 10 STATIC STRESS VS. STRAIN BEHAVIOR OF OROVILLE GRAVEL IN ISOTROPICALLY CONSOLIDATED UNDRAINED TRIAXIAL TEST

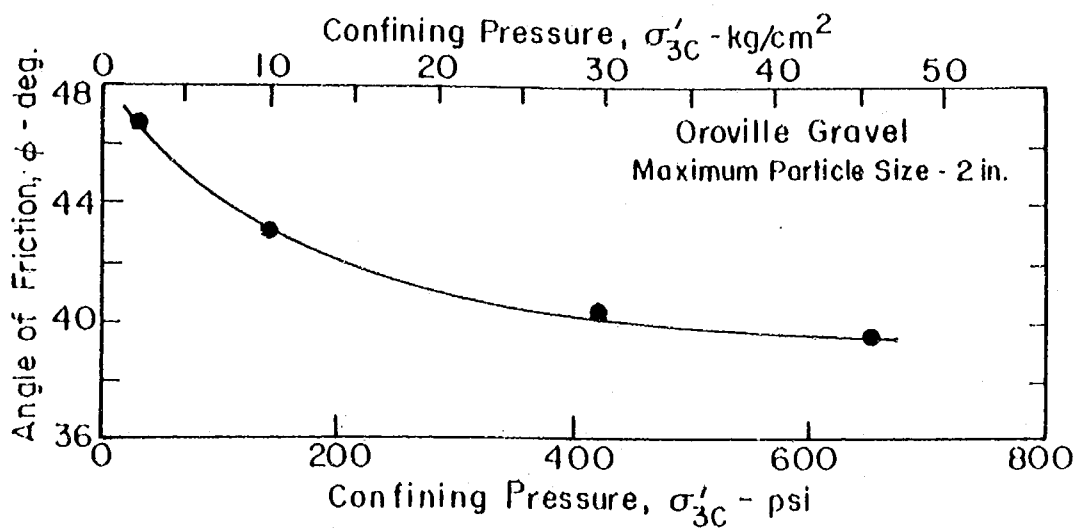


图-A. 11 ANGLE OF INTERNAL FRICTION OF OROVILLE GRAVEL AT DIFFERENT CONFINING PRESSURES
(Data after Becker et al., 1972)

ロック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2996号
平成3年3月(1991)
フィルダム研究室

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ロック材料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あり、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 ロック材料の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：ロック材料・繰返し載荷・単調載荷・せん断強度・三軸試験



郵便はがき

3 0 5 - □ □

四十一円切
手をはって
下さい

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

フィルダム研究室

御中

No. 3

No. 3

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2996号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印

土木研究所資料第2996号

ロック材料の単調載荷試験と繰返し載荷試験