

土 木 研 究 所 資 料

ロックフィルダム粗粒材料の 動的せん断強度特性

平成 1 3 年 3 月

国土交通省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (2001) 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。

ロックフィルダム粗粒材料の 動的せん断強度特性

フィルダム研究室	室 長	山口 嘉一
	主任研究員	岩下 友也
	研 究 員	松浦 旬
	元研 究 員	舘野 悟 ^{*)}

要 旨

本資料はロックフィルダムの地震時安定性を評価するために、堤体材料である粗粒材料の動的せん断強度特性についての実験的研究成果をまとめたものである。実験は、実ダムのロック部の堤体材料である碎石および河床砂礫を用いて、単調載荷、および繰返し載荷による三軸試験とねじりせん断試験を実施した。三軸試験の供試体は直径 300mm×高さ 600mm の中実円筒供試体であり、ねじり試験では外径 800mm×内径 400mm×高さ 800mm の中空円筒供試体である。材料の岩種、供試体の密度や粒度分布、拘束圧、排水条件、載荷周波数、初期応力等の試験条件をパラメータとしてそれらが粗粒材料の動的せん断強度特性および静的せん断強度特性に及ぼす影響について評価した。また、繰返し載荷試験による動的せん断強度と単調載荷試験による静的せん断強度を比較評価した。

キーワード：粗粒材料，せん断強度，動的，三軸試験，ねじりせん断試験，ロックフィルダム

*) 現 関東地方整備局利根川下流工事事務所

Dynamic Shear Strength of Rockfill Materials

Yoshikazu YAMAGUCHI
Head, Fill Dam Division
Public Works Research Institute
Ministry of Land, Infrastructure and Transport

Tomoya IWASHITA
Senior Research Engineer, ditto

Jun MATSUURA
Research Engineer, ditto

Satoru TATENO
Former Research Engineer, ditto

Synopsis

Experimental studies on dynamic shear strength of rockfill materials were executed in order to evaluate the seismic stability of rockfill dams. As experiments, triaxial tests and torsional simple shear tests were executed on the rockfill materials such as crashed rocks and riverbed gravels under the both of monotonic loading and cyclic loading condition. The specimen of triaxial test was cylindrical shape of the size with diameter of 300mm and height of 600mm. The specimen of torsional shear test was hollow cylindrical shape of the size with outer diameter of 800mm, inner diameter of 400mm and height of 800mm.

The experiment results were evaluated about the effects of the various test conditions such as density, drainage, initial stress etc. on the characteristics of dynamic and static shear strength of rockfill materials. And dynamic shear strength of rockfill materials was compared with static shear strength adopted in the present design method.

Keywords: coarse material, shear strength, dynamic, triaxial test, torsional shear test, rockfill dam

まえがき

ロックフィルダムの耐震設計において、現行の設計基準では震度法（擬似静的解析法）による円弧すべり安定計算が用いられている。震度法において、ロック材やフィルター材といった透水性材料である粗粒材料の設計強度としては、室内での単調載荷三軸圧縮試験等による排水静的せん断強度を用いている。

ロックフィルダムの耐震設計をより合理的で、精緻なものとするためには、ダム堤体の安定性を大きく担うロック材といった粗粒材料の地震時に発揮され得る動的な強度特性を評価し、設計や耐震性照査に組み込んでいくことが求められる。また、日本においてはロックフィルダムが地震により甚大な被害を受けた例はないが、1995年に発生した阪神・淡路大震災での土木構造物の甚大な被害に鑑み、レベル2地震動のような高レベルの地震動に対する耐震設計・耐震性照査が求められている。レベル2地震動に対しては、安全性と経済性を考慮し、ダムの損傷過程に立ち入ってその耐震性を確認する。そこで、大地震時の粗粒材料の動的強度特性を耐震性能の照査手法に反映していくことが必要である。

地盤の液状化問題で、緩い砂や砂質土の動的せん断強度（液状化強度）については、多くの試験・研究がなされ、液状化判定法等により基礎の実設計に反映されている。しかしながら、ロックフィルや礫といった粗粒材料を締め固めた土質材料の動的せん断強度特性については、試験・研究事例はほとんどなく、明らかにされていないことが多い。

本研究では、ダムサイトより採取した碎石および河床砂礫を用いて、静的（単調載荷）三軸圧縮試験、繰返し三軸試験、静的ねじりせん断試験、繰返しねじりせん断試験を実施した。土木研究所所有の中空ねじりせん断試験装置は、粒径の大きな粗粒材料を対象とした世界的にも他に類を見ない供試体規模（中空円筒供試体：外径 ϕ 800mm，内径 ϕ 400mm，高さ800mm）の大型試験装置である。試験条件は試料岩種、締固め密度、粒度分布、拘束圧、排水条件、せん断応力、載荷周波数、初期応力等をパラメータとして変化させて行い、それらのパラメータが粗粒材料のせん断強度特性に及ぼす影響について評価し、堤体材料である粗粒材料の地震時に発揮されうるせん断強度特性について考察する。また、繰返し載荷試験による動的せん断強度と単調載荷試験による静的せん断破壊強度を比較評価し、震度法で用いる設計せん断強度と地震時の粗粒材料のせん断強度との対応について考察した。

本資料はこれまでに土木研究所で実施してきた大型供試体を用いた粗粒材料の各種動的試験結果を総括的にまとめたものであり、岩下ら（1997, 2001）、松浦・岩下ら（2001a,b）、舘野・岩下ら（1996, 1997）、津國・岩下ら（1996）の発表論文を系統立ててまとめたものである。また、各試験データはリストとともに図化し、巻末資料として付載した。

目 次

まえがき	i
既往の研究	1
1. 試験概要	3
1.1. 材料試験概要	3
1.2. 試験装置	3
1.2.1. 大型三軸試験装置	3
1.2.2. 大型中空ねじりせん断試験装置	3
1.3. 試験材料	
1.3.1. 点载荷圧裂強度	11
1.3.2. 粒形	12
1.3.3. 粒度分布	12
1.3.4. 最大および最小間隙比	15
1.4. 供試体	17
1.4.1. 供試体寸法	17
1.4.2. 投入重量	17
1.4.3. 供試体作成方法	19
1.4.4. 相対密度	23
1.5. 試験方法	24
1.5.1. 三軸試験	24
1.5.2. ねじりせん断試験	24
2. 計測データ整理（算出）方法	25
2.1. 静的試験のデータ整理	25
2.1.1. 三軸試験	25
2.1.2. ねじりせん断試験	26
2.2. 動的試験のデータ整理	27
2.2.1. 三軸試験	27
2.2.2. ねじりせん断試験	29

3. 試験ケース	31
3.1. 静的試験の試験条件	31
3.1.1. 三軸試験	31
3.1.2. ねじりせん断試験	31
3.2. 繰返し試験の試験条件	32
3.2.1. 三軸試験	32
3.2.2. ねじりせん断試験	32
4. 静的試験結果	33
4.1. 排水三軸試験	33
4.1.1. 軸差応力と軸ひずみ	34
4.1.2. 体積ひずみ	35
4.1.3. ダイレイタンスー	36
4.1.4. 内部摩擦角	37
4.1.5. 材料岩種による影響	41
4.2. 非排水三軸試験	42
4.2.1. 軸差応力	43
4.2.2. 過剰間隙水圧	44
4.3. 排水ねじりせん断試験	45
4.3.1. せん断応力とせん断ひずみ	46
4.3.2. 体積ひずみ	48
4.3.3. ダイレイタンスー	51
4.3.4. 内部摩擦角	53
4.4. 非排水ねじりせん断試験	56
4.4.1. せん断応力とせん断ひずみ	57
4.4.2. 過剰間隙水圧	58
4.5. 排水試験と非排水試験	59
4.5.1. 三軸試験	59
4.5.2. ねじりせん断試験	62
4.6. 三軸試験とねじりせん断試験	64
4.6.1. 内部摩擦角	64

5. 繰返し非排水試験結果	65
5.1. 繰返し非排水三軸試験	65
5.1.1. 時刻歴結果	65
5.1.2. 繰返し軸差応力-軸ひずみ関係	67
5.1.3. ストレスパス	67
5.1.4. 繰返し載荷回数による整理結果	69
5.1.5. 密な豊浦砂との比較	72
5.2. 繰返し非排水ねじりせん断試験	73
5.2.1. 時刻歴結果	73
5.2.2. 繰返しせん断応力-せん断ひずみ関係	75
5.2.3. ストレスパス	76
5.2.4. 繰返し載荷回数による整理結果	77
5.2.5. 密な豊浦砂との比較	80
5.3. 過剰間隙水圧比に及ぼす影響因子	81
5.3.1. 繰返し載荷回数	81
5.3.2. 繰返しせん断応力比	82
5.3.3. 相対密度	86
5.3.4. 余裕間隙比	87
5.3.5. ダイレイタンシー特性	88
5.3.6. 最大過剰間隙水圧比と動的非排水せん断強度の関係	89
5.4. 動的非排水せん断強度に及ぼす影響因子	91
5.4.1. 繰返し載荷周波数	91
5.4.2. 繰返し載荷回数	93
5.4.3. 拘束圧	96
5.4.4. 相対密度	103
5.4.5. 余裕間隙比	104
5.4.6. ダイレイタンシー特性	106
5.4.7. 材料岩種（岩質・粒形）	109
5.5. 異方圧密および初期せん断応力の影響	116
5.5.1. 時刻歴結果	116
5.5.2. 繰返し回数による整理結果	118
5.5.3. 動的非排水せん断強度への影響	121
5.6. 粒度分布の影響	128
5.6.1. 試験粒度	128
5.6.2. 試験条件	129
5.6.3. 繰返し載荷回数毎による整理結果	129

6. 繰返し排水試験結果	131
6.1. 繰返し排水三軸試験	131
6.1.1. 時刻歴結果	131
6.2. 繰返し排水ねじりせん断試験	134
6.2.1. 時刻歴結果	134
6.3. 排水と非排水条件による動的せん断強度の比較	136
6.3.1. せん断ひずみ	136
7. 動的せん断強度と静的せん断強度の比較	137
7.1. 三軸試験	138
7.1.1. 静的せん断強度と動的非排水せん断強度	138
7.2. ねじりせん断試験	141
7.2.1. 静的せん断強度と動的非排水せん断強度	141
7.2.2. 静的排水せん断強度と動的排水せん断強度	147
8. 結 論	149
参考文献	152

巻末資料

静的三軸試験結果	(MDTX 試験、MUTX 試験)	1-1
静的ねじりせん断試験結果	(MDTS 試験、MUTS 試験)	2-1
繰返し三軸試験時刻歴	(CDTX 試験、CUTX 試験)	3-1
繰返しねじりせん断試験時刻歴	(CDTS 試験、CUTS 試験)	4-1
繰返し三軸試験回数毎	(CDTX 試験、CUTX 試験)	5-1
繰返しねじりせん断試験回数毎	(CDTS 試験、CUTS 試験)	6-1

既往の研究

1) 砂および粘性土の動的強度特性

安原ら（1979）、平尾ら（1990）は異方圧密粘土の非排水繰返し三軸試験と静的試験を行った。非排水時の動的強度は周波数の影響をほとんど受けないが、せん断前の応力異方性は若干の影響を及ぼした。また、初期せん断応力および主応力の反転の影響について調べ、初期鉛直有効応力に対する動的強度は初期せん断応力が大きくなるに伴って低下した。

松尾ら（1987）は、種々の粘性土に対して繰返し三軸試験を行い、以下の結果を得ている。

- ・ 等方圧密状態では、繰返し回数の小さいところでの動的強度はひずみ基準の大きさの取り方により差が大きい。動的強度／静的強度は塑性指数とともに大きくなる傾向が見られるが、ばらつきは非常に大きい。
- ・ 初期せん断応力が大きくなると動的強度も大きくなり、初期せん断応力が静的強度の 3～5 割を越えると動的強度は静的強度より大きくなる。
- ・ 周波数の 10 倍の変化に対して動的強度は約 3 割大きくなっている。過圧密比の 10 倍の変化に対して動的強度は約 2～3 割大きくなっている。

安田進ら（1980）は、中空三軸ねじりせん断装置を用いて、等方圧密、異方圧密下での不攪乱沖積粘性土の動的強度を求める実験を行った。初期せん断応力比～動的強度比関係に少し差が生じた。異方圧密状態では軸ひずみも生じ、初期せん断応力比との関係も見られた。

兵藤ら（1989）は、異方圧密下の飽和砂の非排水繰返し三軸試験を行い、初期せん断を受ける飽和砂の動的強度特性について調べた。

繰返しせん断応力と初期せん断応力の関係から、載荷パターンを応力反転のあるもの、応力反転のないもの、中間的なものの 3 つに分類した。両振幅軸ひずみで整理すると、初期せん断の増加にともない強度が増加する傾向が認められた。残留ひずみで整理すると、緩詰め砂に対して強度が低下するような境界がある。

山下ら（1990）は、過圧密状態にある試料に対して非排水繰返し三軸試験と中空ねじり試験を行った。正規圧密した再構成供試体において、試験時の拘束圧が低くなるほど液状化強度が高くなる。繰返し三軸と中空ねじり試験による液状化強度にユニークな関係は認められない。

石原ら（1978）は砂および沖積粘性土の不攪乱試料を用いて繰返し三軸試験を行った。不攪乱の稲城砂は有効拘束圧の違いによって液状化応力比が異なり、これは稲城砂が過圧密状態になっていることやセメンテーションが原因している。初期応力 0 の場合の動的強度比は塑性指数が小さいと小さくなる傾向を示した。

関ら(1986)は、繰返し中空ねじりせん断試験機および繰返し三軸試験により、初期せん断力を受けた飽和砂の非排水繰返しせん断強度特性について調べた。初期せん断のある場合は破壊基準をピークひずみで定義したほうが実被害に適していると考えた。繰返しねじりせん断強度は繰返し三軸強度よりも大きいことがわかるが、試験法による応力状態の違いによるものである。繰返し中空ねじりせん断試験では、供試体密度が低いと初期せん断応力の小さい内は若干せん断強度が減少する。供試体密度が高いと初期せん断応力比の増加に伴い繰返しせん断強度も増加する。繰返し三軸試験では、供試体密度が高いと初期せん断応力の増加に伴い繰返しせん断強度も単調に増加する。初期せん断応力を受けた砂質度の動的強度は試験法により明らかに異なる。

龍岡ら（1980）は砂を用いて中空円筒型供試体を用いてねじり単純せん断の非排水繰返し試験を行った。

2) 密に締固めた粗粒材料の動的強度特性

粗粒材料の強度試験は、試験装置が大規模になるため、研究事例が少ない。

Banerjee *et.al.* (1979) は米国カリフォルニア州の Oroville ダム（グラベルフィルのフィルダム）の地震時安定性を検討するために密な粗粒材料（最大粒径 5.1cm (2 inch), 供試体径 30.5cm (12 inch)) について三軸試験を行い、次の点について調査した。

- ・ 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性
- ・ 繰返し応力条件下での応力～ひずみ特性
- ・ 動的な挙動に及ぼす粒度の設定、供試体の作成法、圧密時間の影響

松本ら（1991, 1996）は、最大粒径 63mm の良く締め固められたロック材について繰返し載荷三軸試験（供試体 ϕ 300mm, 高さ $h=600$ mm）及び繰返し載荷ねじりせん断試験（供試体外径 ϕ 800mm, 内径 ϕ 400mm, 高さ $h=800$ mm）を行い、ロック材料の動的強度特性に関する諸要因（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）の影響をしらべ、静的強度と動的強度の関連性を検討した。

國生ら（1999）、原ら（2000）は、砂礫材料（最大粒径 30mm, 供試体高さ $h=200$ mm, 径 ϕ 100mm）を用いて三軸試験機による液状化試験を行い、液状化強度特性に関する諸要因（相対密度、粒度分布）等を検討した。

以上の既往研究を踏まえて、本研究では、最大粒径 63mm の良く締固めた 3 岩種の粗粒材料について、繰返し載荷三軸試験（供試体 ϕ 300mm, $h=600$ mm）及び繰返し載荷ねじりせん断試験（供試体外径 ϕ 800mm, 内径 ϕ 400mm, 高さ $h=800$ mm）を実施し、動的せん断強度特性を検討した。

1 試験概要

1.1 材料試験の概要

本研究では、ロックフィルダム粗粒材料を用い、静的排水三軸断試験（以下 MDTX 試験）静的非排水三軸試験（以下 MUTX 試験）、繰返し排水三軸試験（CDTX 試験）、繰返し非排水三軸試験（CUTX 試験）、静的排水ねじりせん断試験（MDTS 試験）、静的非排水ねじりせん断試験（MUTS 試験）、繰返し排水ねじりせん断試験（CDTS 試験）、繰返し非排水ねじりせん断試験（CUTS 試験）を行った。表 1.1.1 に各試験の略称を表す。

表 1.1.1 試験の略称

	载荷方法	排水条件	
		排水	非排水
三軸試験	単調载荷	MDTX	MUTX
	繰返し载荷	CDTX	CUTX
ねじりせん断試験	単調载荷	MDTS	MUTS
	繰返し载荷	CDTS	CUTS

1.2 試験装置

本研究で用いた試験装置は以下のとおりである。

1.2.1 大型三軸試験装置

1) 大型三軸試験装置 1（図 1.2.1 ダム耐震実験施設）

本装置は、電気油圧サーボ式の正弦波並びに任意の波形で軸方向に一定（圧縮・引張）の繰返し応力を与えることができる。供試体寸法は、径 300mm×高さ 600mm である。主要な性能を表 1.2.1 に示す。

2) 大型三軸試験装置 2（図 1.2.2 土質共同実験施設）

本装置は、電気油圧サーボ式の正弦波並びに任意の波形で軸方向に一定（圧縮・引張）の繰返し応力を与えることができる。供試体寸法は、径 300mm×高さ 600mm である。主要な性能を表 1.2.1 に示す。

3) 大型三軸試験装置 3（図 1.2.3 T B）

本装置は、電気油圧サーボ式の正弦波並びに三角波を軸方向に一定（圧縮・引張）の繰返し応力を与えることができる。供試体寸法は、径 300mm×高さ 600mm である。主要な性能を表 1.2.1 に示す。

4) 大型三軸試験装置 4（図 1.2.4 T D）

本装置は、電気油圧サーボ式の正弦波並びに三角波を軸方向に一定（圧縮・引張）の繰返し応力を与えることができる。供試体寸法は、径 300mm×高さ 600mm である。主要な性能を表 1.2.1 に示す。

1.2.2 大型中空ねじりせん断試験装置

図 1.2.5 に試験装置の概要を示す。本装置は、供試体に与える応力（ τ, σ_a, σ_r ）を独立して制御することが可能である。油圧サーボ式による正弦波並びに任意の波形で水平方向に繰返し（ねじり）応力を与えることのできるものである。主要な性能を表 1.2.1 に示す。本試験装置に適用できる供試体は外径 800mm、内径 400mm、高さ 800mm の中空円筒供試体である。

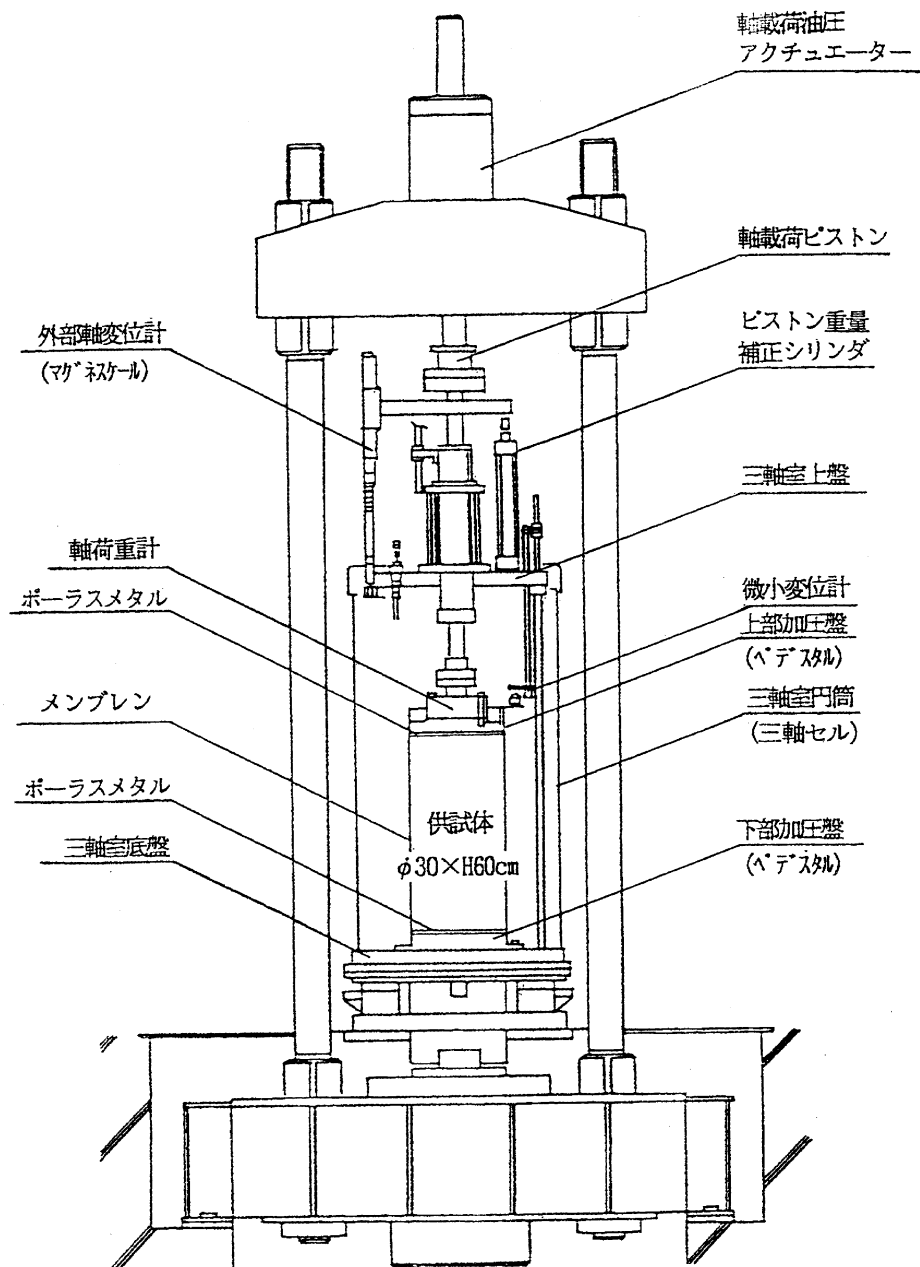


図 1.2.1 大型三軸試験装置 1 ダム耐震実験施設

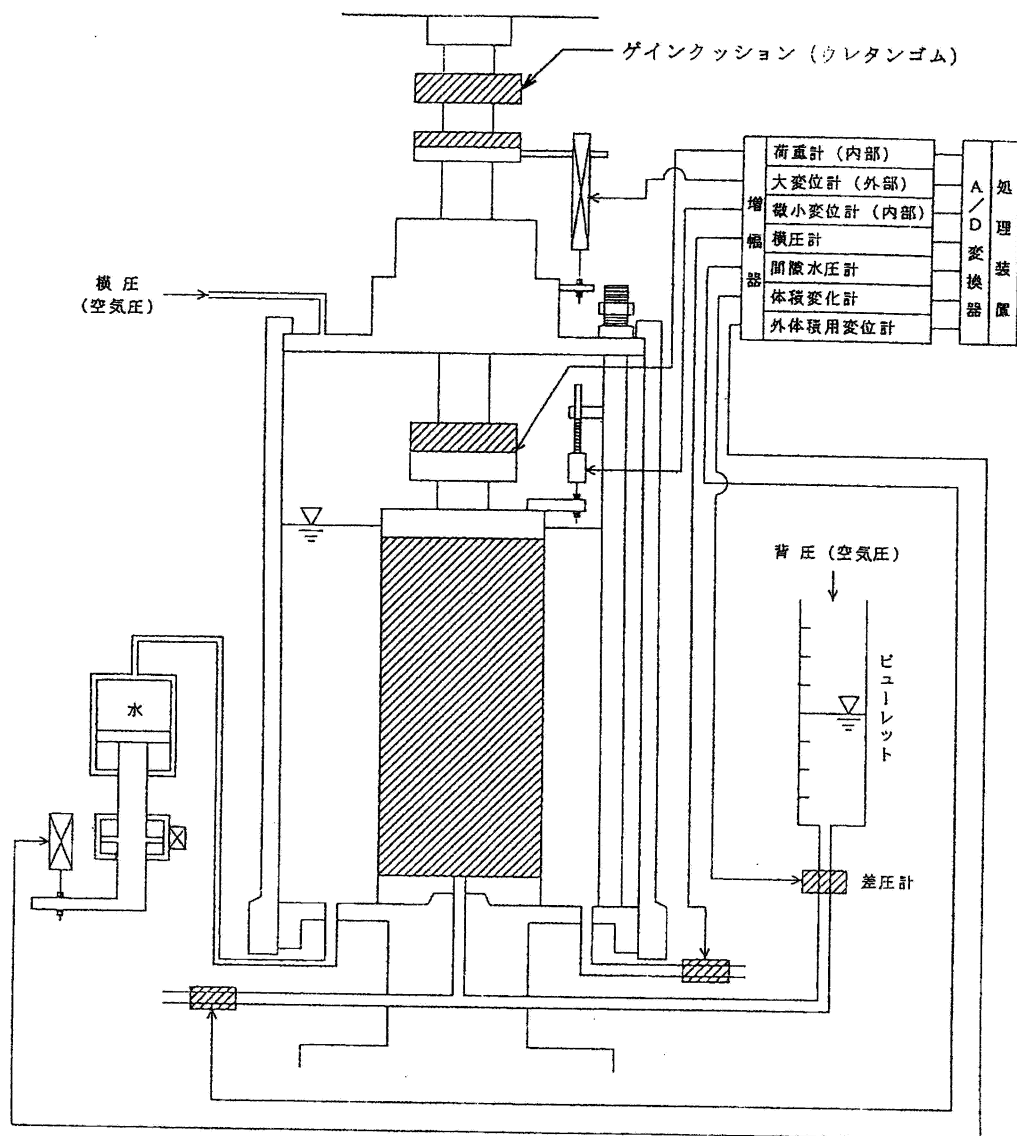


図 1.2.2 大型三軸試験装置 2 土質共同実験施設

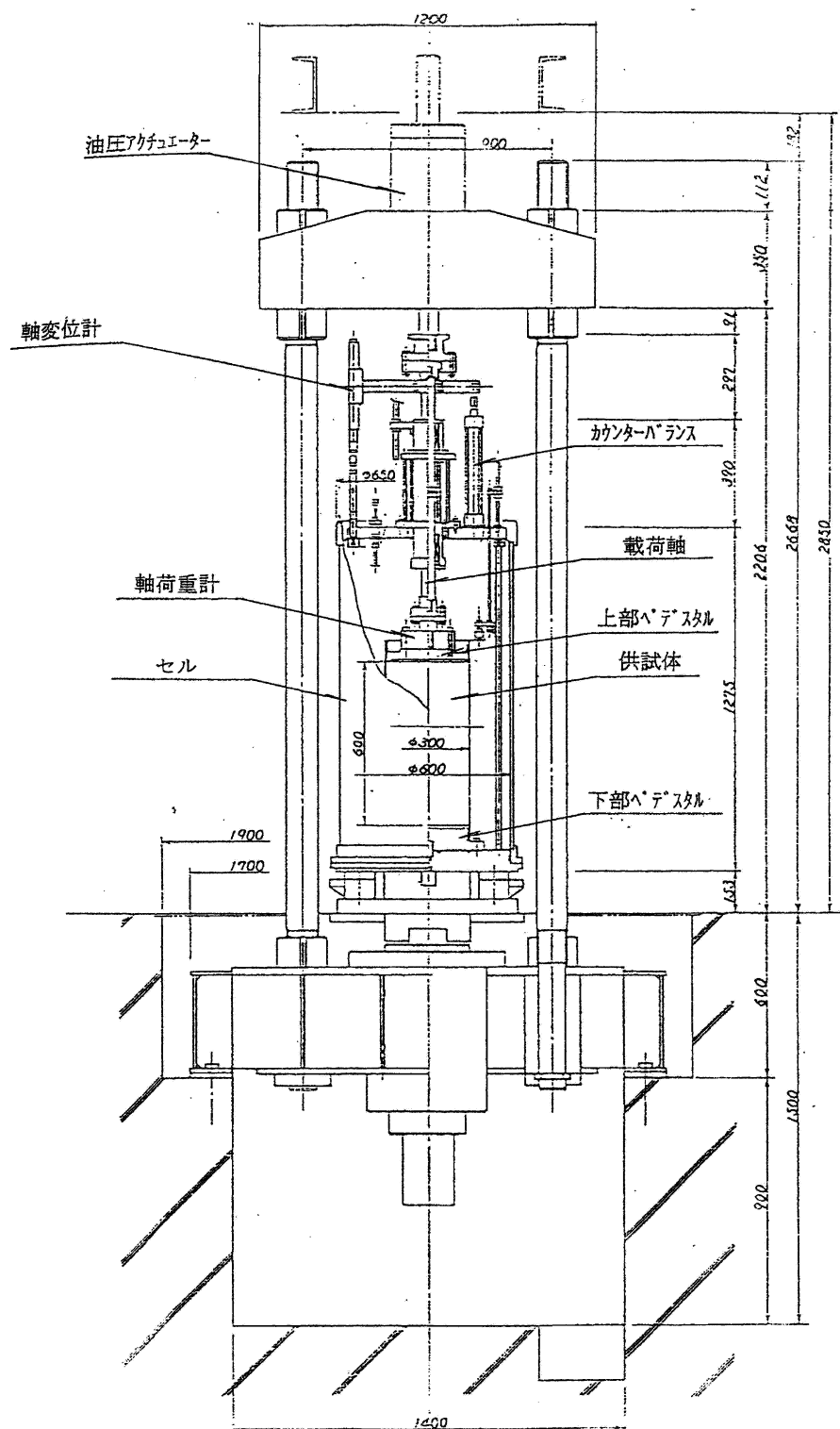


図 1.2.3 大型三軸試験装置 3

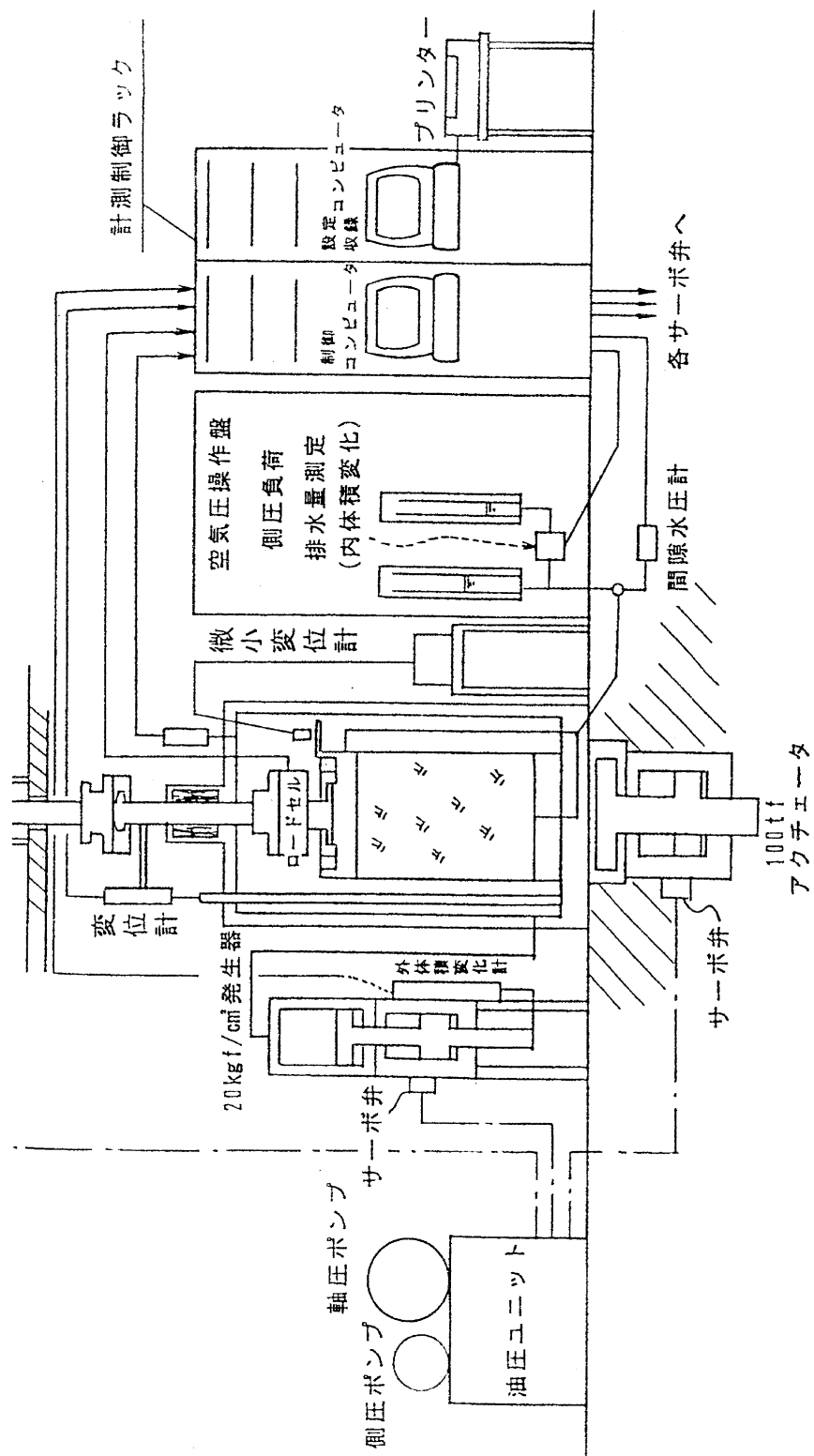


図 1.2.4 大型三軸試験装置 4



写真 1 大型中空ねじりせん断試験装置・供試体の全景



写真 2 大型中空ねじりせん断試験の供試体内部状況

表 1.2.1 試験機仕様一覧

	大型三軸試験装置 1	大型三軸試験装置 2	大型三軸試験装置 3	大型三軸試験装置 4	大型中空ねじりせん断試験装置
供試体寸法(mm)	φ 300, H600	φ 300, H600	φ 300, H600	φ 300, H600	φ ₁ 400, φ ₂ 800, H800
軸圧荷重方式	油圧サーボ 最大 98.1kN	油圧サーボ 最大 196.2kN	油圧サーボ 最大 98.1kN	油圧サーボ 最大 196.2kN	油圧サーボ 最大 294.3kN
側圧荷重方式	空圧荷重 最大 0.98MPa	空圧荷重 最大 1.47MPa	空圧荷重 最大 0.98MPa	空圧荷重 最大 0.78MPa	空圧荷重 最大 0.69MPa
トルク荷重方式	—————	—————	—————	—————	油圧サーボ 最大 19.6kN・m

1.3 試験材料

試験には3種類の粗粒材料を用いた。粗粒 A 材は、三国川ダムの堤体ロック材である斑れい岩碎石、粗粒 B 材は、忠別ダムの堤体シェル材料である安山岩質の河床砂礫、粗粒 C 材は丹生ダムの原石山調査横坑から採取した塊状の輝緑凝灰岩碎石である。それぞれの材料を写真 3～5 に示す。



写真 3 A材 (三国川ダムロック材斑れい岩碎石)



写真 4 B材
(忠別ダムシェル材安山岩質河床砂礫)



写真 5 C材 (丹生ダムロック材塊状輝緑凝灰岩碎石)

1.3.1 点載荷圧裂強度

A, B, C材の各材料毎の点載荷試験の頻度分布結果を図 1.3.1～図 1.3.3 に示す。また、表 1.3.1 に点載荷試験により求めた各材料の点載荷圧裂強度を示す。

表 1.3.1 各材料の点載荷圧裂強度の平均値

粗粒材料	点載荷圧裂強度 (MPa)
A 材	22.33
B 材	14.03
C 材	9.69

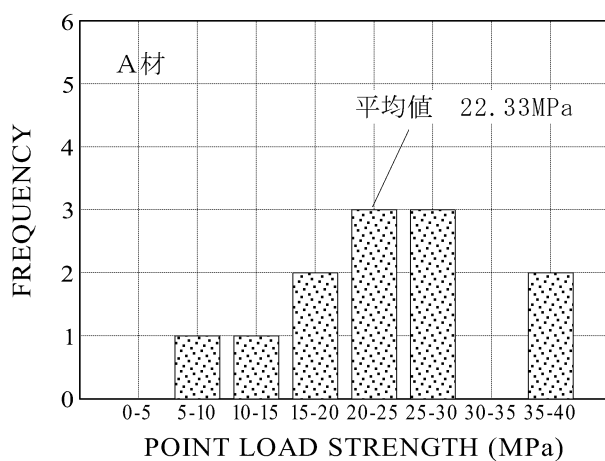


図 1.3.1 点載荷圧裂強度の頻度分布 (A材)

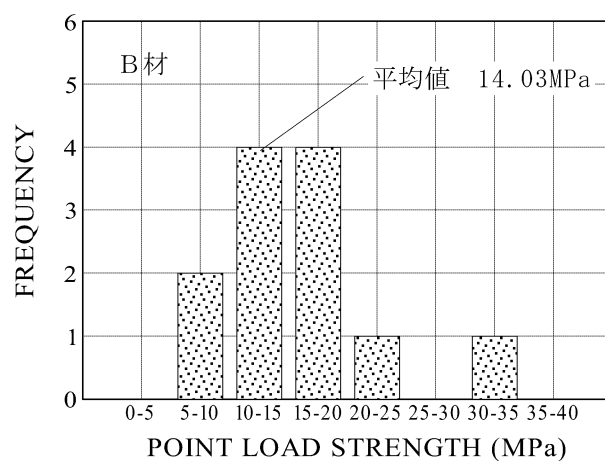


図 1.3.2 点載荷圧裂強度の頻度分布 (B材)

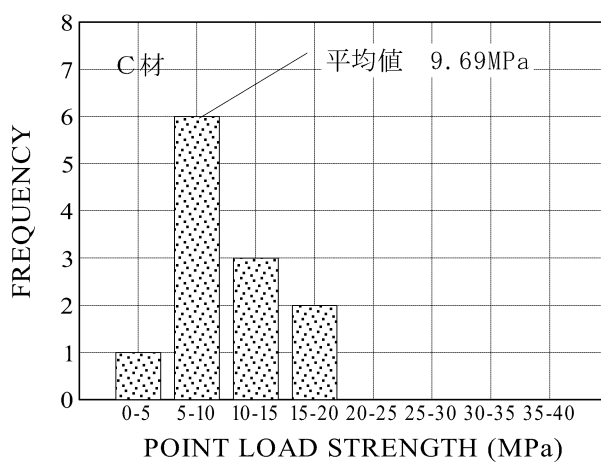


図 1.3.3 点載荷圧裂強度の頻度分布 (C材)

1.3.2 粒形

粒形を表す値として、吉村ら（1993）の提唱する凹凸係数 FU を用いた。FU は、粒子投影断面の外周長が L 、断面積が A の形状係数 $f=A/L^2$ を円の形状係数 $f_c=1/(4\pi)$ で除し、 $FU=f/f_c=4\pi A/L^2$ である。完全球の場合に $FU=1.0$ であり凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなる。FU は粗粒材料の粒子をデジタルカメラで撮影し、パソコンを用いて画像処理を行い算出した。A 材は 9.52mm～63.5mm、B 材は 9.5mm～63.0mm の各粒度毎（計 5 粒度）に 1～6 粒子選び、粒度毎に平均した FU を足し合わせ、平均したものを凹凸係数 FU として用いた。C 材はランダムに 6 粒子選び、平均したものを凹凸係数 FU として用いた。表 1.3.2 に各材料の FU を示す。碎石である A 材、C 材の FU はほぼ同じで、河床砂礫である B 材の FU より小さい。

表 1.3.2 各材料の凹凸係数 (FU)

粗粒材料	凹凸係数 FU
A 材	0.861
B 材	0.911
C 材	0.852

1.3.3 粒度分布

本試験に用いた材料の粒度分布を図 1.3.4、図 1.3.5、図 1.3.6 と表 1.3.3、各粒径毎の土粒子密度 ρ_s と吸水率を表 1.3.3 に示す。この粒度分布は、Banerjee *et al.*(1979)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ときとほぼ相似な粒度分布になっている。粗粒 A 材の最大粒径は、63.5mm、粗粒 B 材及び粗粒 C 材の最大粒径は 63.0mm である。

表 1.3.3 各材料の粒度分布と物性（その 1）

粗粒 A 材

粒径 (mm)	残留率 (%)	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	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	
		合成土粒子密度	合成吸水率
		2.931	0.653

表 1.3.3 各材料の粒度分布と物性（その 2）

粗粒 B 材

粒径 (mm)	残留率 (%)	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	吸水率 (%)
63.0～53.0	6.0	2.549	1.54
53.0～37.5	7.5	2.532	1.91
37.5～26.5	10.5	2.505	2.16
26.5～19.0	8.5	2.500	2.22
19.0～9.50	19.5	2.480	2.68
9.50～4.75	14.0	2.416	3.51
4.75～2.00	15.0	2.679	
2.00～0.85	6.0	2.713	
0.85～0.425	4.0	2.828	
0.425～0.25	2.0	2.838	
0.25～	7.0	2.989	
		合成土粒子密度	合成吸水率
		2.584	2.523

表 1.3.3 各材料の粒度分布と物性（その 3）

粗粒 C 材

粒径 (mm)	残留率 (%)	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	吸水率 (%)
63.0～53.0	6.0	2.800	0.911
53.0～37.5	7.5	2.813	1.060
37.5～26.5	10.5	2.834	0.990
26.5～19.0	8.5	2.852	1.150
19.0～9.50	19.5	2.820	1.490
9.50～4.75	14.0	2.831	1.61
4.75～2.00	15.0	3.025	
2.00～0.85	6.0	3.024	
0.85～0.425	4.0	3.127	
0.425～0.25	2.0	3.048	
0.25～0.106	2.82	3.129	
0.106～0.075	1.14	3.047	
0.075～	3.04	3.001	
		合成土粒子密度	合成吸水率
		2.901	1.291

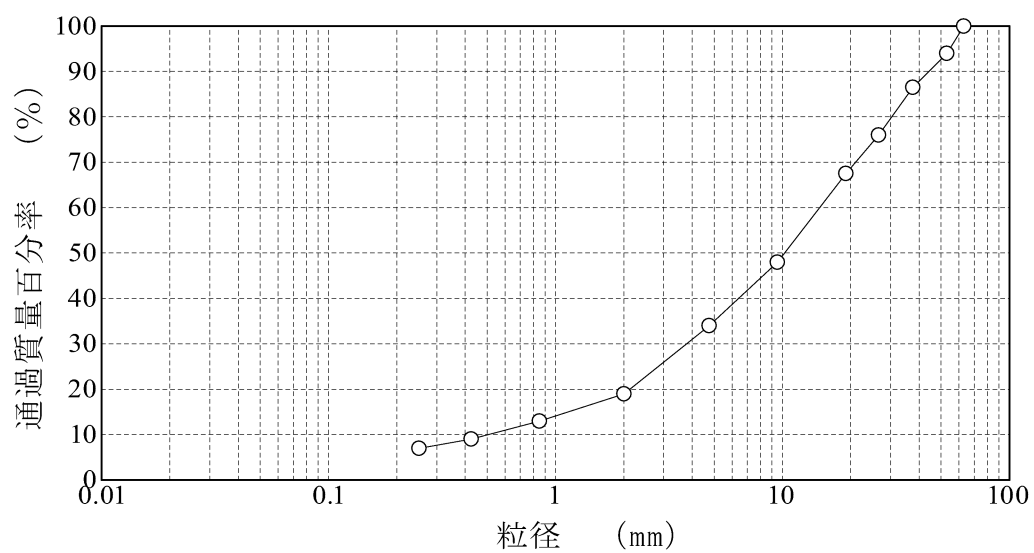


圖 1.3.4 粒度分布曲線 A 材

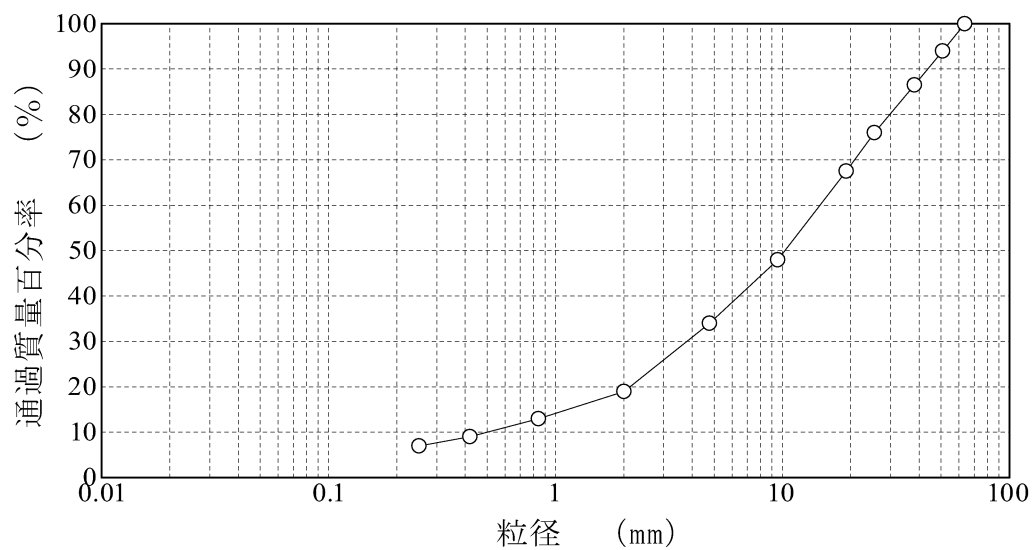


圖 1.3.5 粒度分布曲線 B 材

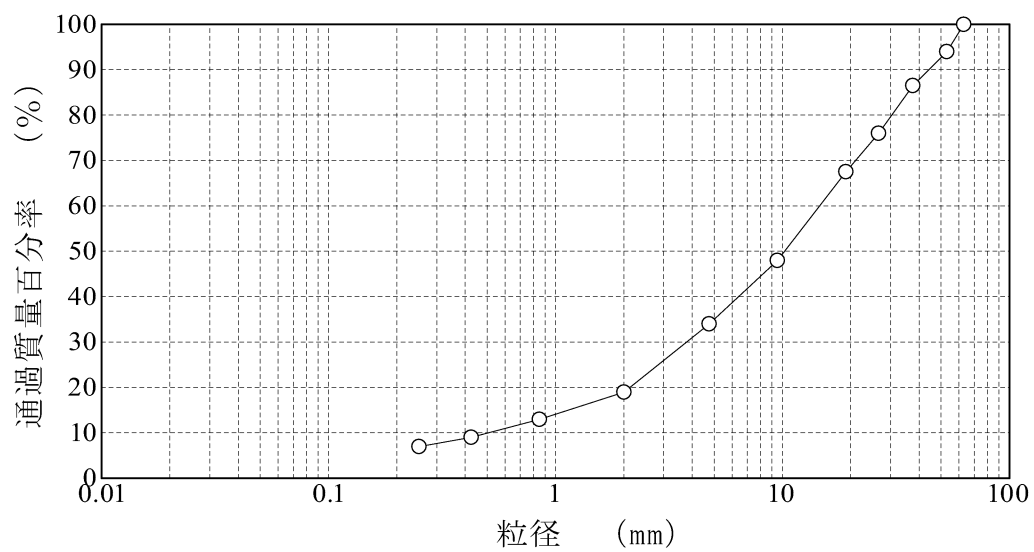


圖 1.3.6 粒度分布曲線 C 材

1.3.4 最大、最小間隙比

最大間隙比 $e_{\max}$ と最小間隙比 $e_{\min}$ は締め固め試験を行い算出した。

締め固め試験は以下の手順で行った。

1) 試料

表 1.3.3 に示した試験粒度分布曲線に従った。

2) 試料投入

φ 30cm のモールドに 6 層分に分けた試料の 1 層分をさらに 16 等分して落差を与えないよう投入した。なお、締め固めた試料は層毎に分離する恐れがあるため、次層投入前に締め固めた表面をかき乱して、次層との馴染みを良くした。

3) 締め固め前の高さ測定

各層毎に締め固め用鉄板を投入後の試料に静かに載せ、締め固め前の高さを 5 点測定し、締め固め前の平均高さを求める。図 1.3.7 に試料高さ測定位置を示す。

4) 締め固め

振動ランマで所定の時間締め固めた。 $e_{\max}$ は材料投入のみ間隙比、 $e_{\min}$ は締め固め時間による間隙比の減少がほぼ収まる $t=300\text{sec}$ (B 材は $t=480\text{sec}$) 時の間隙比とした。

5) 締め固め後の高さ測定

締め固め用鉄板を載せたまま締め固め後の高さを 5 点測定し、締め固め後の平均高さを求める。

6) 2) ～ 5) を繰り返す。

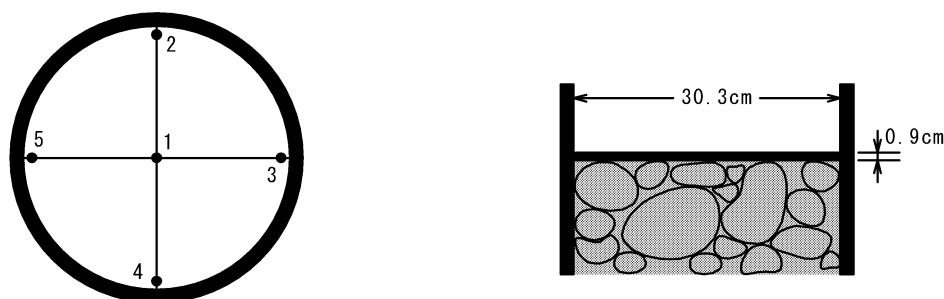


図 1.3.7 試料高さ測定位置

7) 乾燥密度 ρ_d および間隙比 e は以下の式から算出した。

$$\rho_d = W_d / V$$

$$e = (Gb \times \rho_w / \rho_d) - 1$$

ここに、

W_d : 絶乾重量 (g)

V : 試料の体積

Gb : 試料の合成比重

ρ_w : 水の単位体積重量 (g/cm^3)

各材料の締固め時間による間隙比と、乾燥密度を表 1.3.5 に示す。間隙比と締固め時間の関係を図 1.3.8 に示す。投入のみのケースの間隙比を最大間隙比、最も締固め時間が多いケースの間隙比を最小間隙比とした。

また、締固め試験後の試料は Marsal の破砕率を求めた。Marsal の破砕率とは、試料作成前の粒度分布と締固め後の粒度分布の各粒度毎の残留率の差を求め、その各差のうち同符号のものの総和で表される値である。

表 1.3.5 各材料の最大および最小間隙比

試 料	締固め時間	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	Marsal 破砕率 (%)
粗粒 A 材	投入のみ	1.867	$e_{\max}$ 0.569	
	10sec/層×6 層	2.419	0.211	2.1
	20sec/層×6 層	2.470	0.186	1.7
	60sec/層×6 層	2.539	0.154	2.9
	120sec/層×6 層	2.575	0.138	2.9
	300sec/層×6 層	2.633	$e_{\min}$ 0.113	3.4
	$e_{\max} - e_{\min} = 0.456$			
粗粒 B 材	投入のみ	1.798	$e_{\max}$ 0.432	
	5sec/層×6 層	2.031	0.268	1.5
	20sec/層×6 層	2.085	0.235	1.9
	60sec/層×6 層	2.156	0.194	2.3
	120sec/層×6 層	2.193	0.174	3.0
	480sec/層×6 層	2.206	$e_{\min}$ 0.167	5.4
	$e_{\max} - e_{\min} = 0.265$			
粗粒 C 材	投入のみ	1.846	$e_{\max}$ 0.569	
	40sec/層×6 層	2.428	0.193	3.16
	60sec/層×6 層	2.411	0.201	3.01
	120sec/層×6 層	2.465	0.175	4.23
	300sec/層×6 層	2.541	$e_{\min}$ 0.140	5.80
	$e_{\max} - e_{\min} = 0.429$			

締固めに使用した機器の仕様を表 1.3.6 に示す。

表 1.3.6 締固め機器仕様

締固め機器	振動ランマ
振動数	全負荷打撃数 950 打撃/分
締固めエネルギー	本体自重 618N
加圧盤直径	20cm

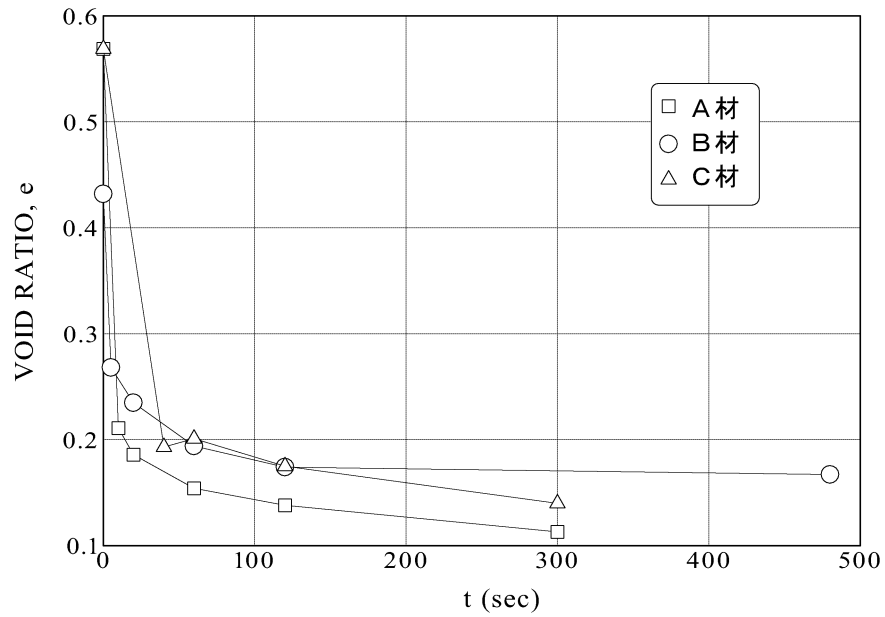


図 1.3.8 間隙比と締固め時間

1.4 供試体

1.4.1 供試体寸法

供試体寸法を表 1.4.1 に示す。

表 1.4.1 供試体寸法

試験方法	供試体寸法
三 軸 試 験（単調載荷、繰返し載荷）	径 φ 300 mm×高さ 600 mm
ねじりせん断試験（単調載荷、繰返し載荷）	外径 φ 800 mm, 内径 φ 400 mm×高さ 800 mm

1.4.2 投入重量

試料の調整は、以下の式により投入重量を算定した。

$$Wt = \sum_{i=1}^n Wt_i$$

ここで、

Wt：供試体試料投入重量(g)

$$Wt_i = \left(1 + \frac{w_i}{100}\right) \times \frac{f_i}{100} \times W_d$$

Wt_i：粒径別所用気乾重量

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(%)

W_d：絶乾重量(g)

$$W_d = V \times \frac{Gb}{e+1}$$

V : 試料の体積(cm³)

Gb : 合成比重

e : 目標間隙比

ただし、中空円筒供試体による大型ねじりせん断試験の場合の投入重量は、ゴムスリーブ（内側・外側）を取り付けた状態を考慮に入れたものである。（中空円筒供試体の内側は、試料作成の締め固めの際に破れた場合、修復不可能な構造となっているため、さらに、もう一枚のゴムスリーブ（厚さ 2mm）を重ねて補強している。このときの供試体寸法は、外径 800mm，内径 404mm，高さ 805mm である。この体積からせん断刃の体積 3.86l を差し引いた値を供試体の初期体積としている。）

1.4.3 供試体作成方法

1) 中実供試体（径 300mm，高さ 600mm）：大型三軸試験

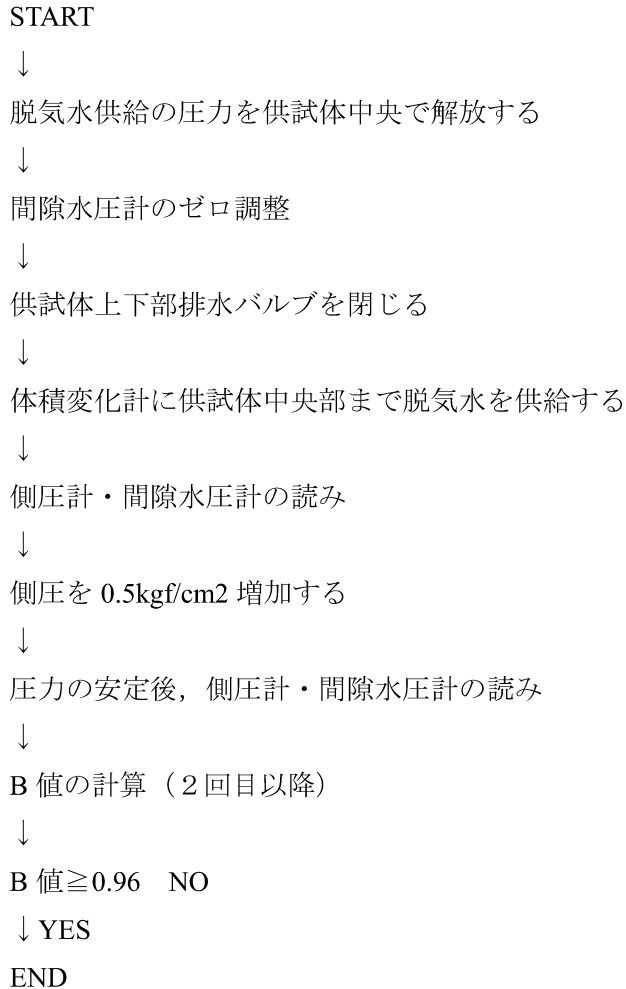
地盤工学会基準 JGS0530「粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法」を参考として、以下の手順で供試体を作成した。6 層で締め固めるものとし、所定の相対密度になるよう作成する。

- a.各粒度階の 1 層当たり必要な湿潤重量を算定し、目標値として計量する。
 - b.厚さ 2mm のゴムスリーブをペディスタルにかぶせ、ビニールテープで仮止めし、ゴム管を巻き付けて固定する。繰返し載荷試験を実施する場合には、2 重にゴム管を巻き付けてしっかり固定する。
 - c.2 つ割のモールドを組立、設置し、負圧によりゴムスリーブをモールドに密着させる。
 - d.ろ紙を敷き、基準高さを測定する。測定位置は、内接する四角形の 4 点と中心 1 点を測定し、平均値を基準高さとする。
 - e.1 層当たりの材料をバットに空け、ほぼ均等になるように 16 等分し、ハンドスコップにより落差をあまり与えないように投入する。その際、大粒径同士の重なりや集中または、細粒分が集中しないよう、意識的に配慮し、投入する。
 - f.1 層分投入後、材料の上に鉄板（厚さ 10mm 程度）を敷き電動ランマを用いて目標高さに締め固める。（その際、締め固め時間および層高さを計測しながら所定の密度に作成する。）締め固めた後、次層とのなじみを良くするため表面をかき乱す。
 - g. e.f.の作業を繰返す。
- 締め固めの際は、供試体下層を目標密度よりやや緩めに締め固め、上層になるに従ってやや密に締め固め、6 層目を締め終わったときに、供試体が均一な密度となるよう配慮した。
- h.6 層目の表面は、繰返し載荷試験でのネッキングを防ぎ、供試体上面の水平にするため、また、ペディスタルとのなじみを良くするために端面の間隙を 2.00mm～0.85mm の同材料を用いて埋めた。
 - i.端面処理後、試料の上にもろ紙を敷き、載荷キャップを静かに載せる。載荷キャップとゴムスリーブをゴム管によりしっかりと固定する。
 - j.モールドに衝撃を与えないようにゆっくりと載荷台へ設置し、下部配水管を接続する。供試体に 0.3kgf/cm^2 の負圧を与え自立させ、モールドを除去する。
 - k.メンブレンペネトレーションの影響を少なくするため、供試体側面の粗粒材料によるスリーブの”くぼみ”には、ベントナイトを埋め側面を平滑にする。その後、さらにもう一枚のゴムスリーブ（厚さ 2.0mm）を空気が入らないようにかぶせ、ゴム管により供試体上・下部のキャップにしっかり固定する。
 - l. 供試体寸法（高さ、直径）を計測する。
 - m.載荷キャップと載荷ピストンを慎重にボルトで固定し、三軸室を組立てる。三軸セルを被せ、供試体自立の際に作用している負圧(-0.3kgf/cm^2)を維持しながら（有効拘束圧 0.3kgf/cm^2 を維持しながら）水を注入する。
 - n.炭酸ガスの供給
- 供試体の急激な負圧の解放がないように炭酸ガスの量を調節し、供試体下部から、炭酸ガスを供給する。負圧の解放と負圧と同程度のセル圧を加えて供試体の自立を保つ。負圧が解放されたら供試体上部を大気圧に解放し、4 時間～6 時間程度、炭酸ガスを供給する。（この際も 0.3kgf/cm^2 の有効拘束圧を維持している。）
- o.脱気水の供給

供試体下部から水頭差（1.5～2.0m 程度）で脱気水をゆっくりと供給する。その際、供試体内に水みちが生じないように流量を微少に調節して供給する。供給時間は、一晚（約 1 2 時間程度以上）かけて供給する。

p. B 値の測定

B 値測定方法を以下のフローチャートに示す。



q. 圧密

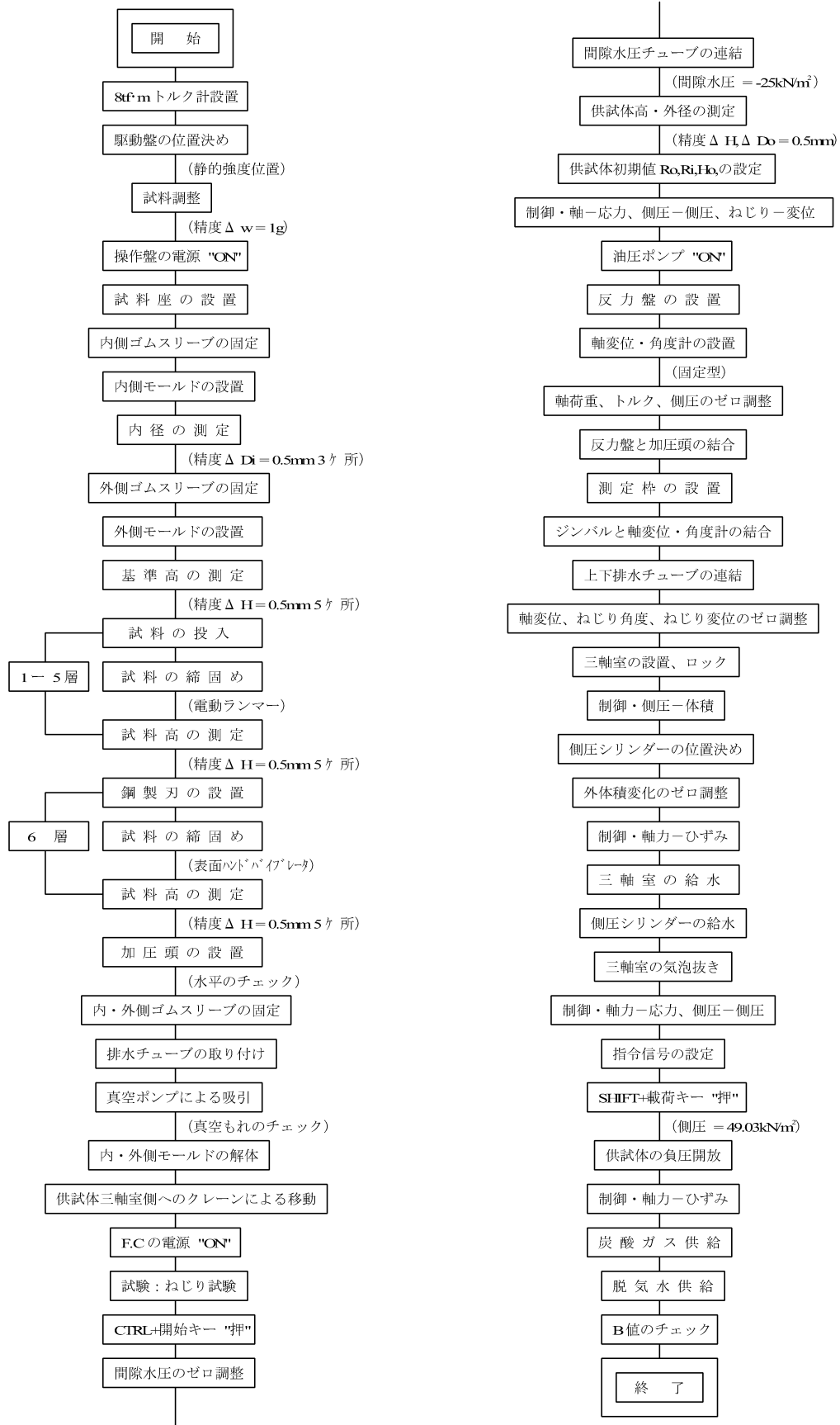
セル圧を毎分 0.5kgf/cm² 程度増加し、圧密を行う。所定の圧密圧力に達したら 30 分～1 時間程度放置し、体積変化および軸変化が認められなくなったら圧密終了とする。

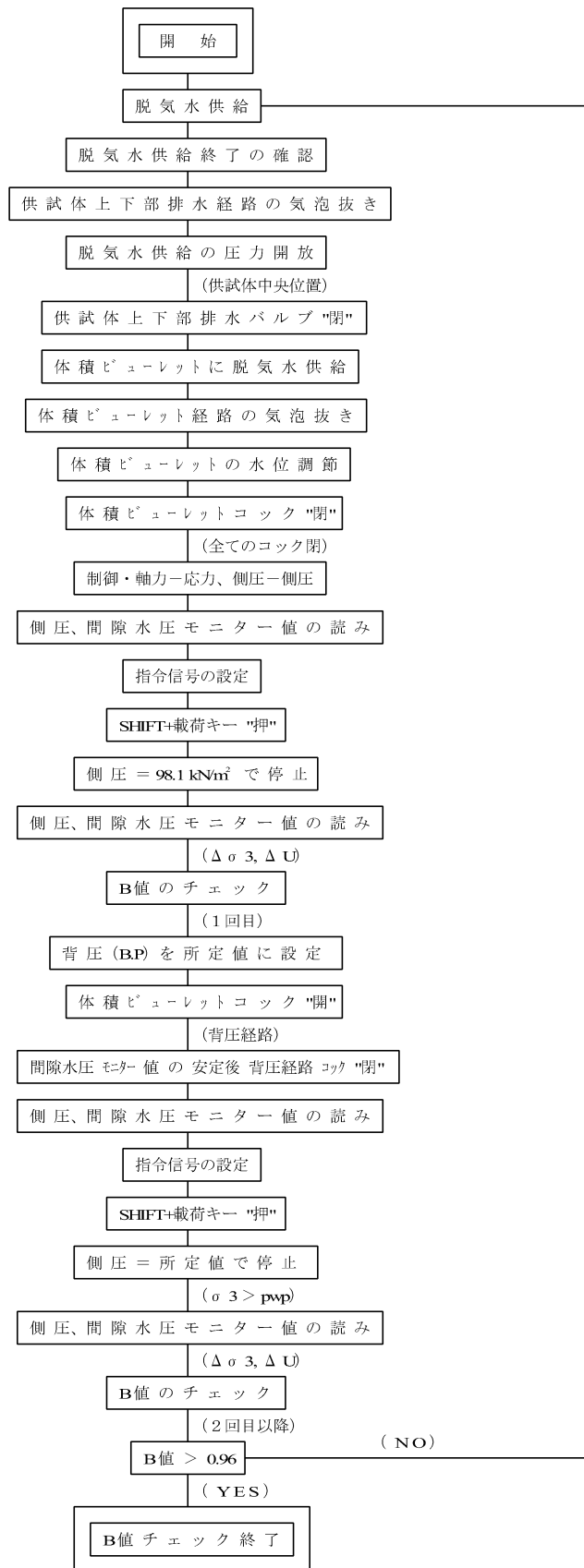
r. 圧密量の測定

圧密終了後、内体積変化計およびダイヤルゲージの値を読み、体積変化量・軸変位量を求める。

2) 中空供試体（外径 800mm，内径 400mm，高さ 800mm）：大型中空ねじりせん断試験

供試体作製方法（静的強度・飽和・排水・ $\phi 800$ ）





1.4.4 相対密度

供試体は相対密度を数種類に変えて作成した。相対密度 D_r は以下の式で表す。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e_0}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (\%)$$

e_0 : 供試体間隙比

$e_{\max}$: 締め固め試験より求めた最大間隙比

$e_{\min}$: 締め固め試験より求めた最小間隙比

	三軸試験 供試体相対密度 (%)	ねじりせん断試験 供試体相対密度 (%)
A材	56, 66, 80, 89	56, 66, 80, 89
B材	60, 70, 85, 95	60, 85, 90
C材	85	

1.5 試験方法

1.5.1 三軸試験

1) 単調載荷試験

所定の応力条件で圧密後、排水または非排水状態で側圧一定とし、ひずみ制御（ひずみ速度一定：0.5%/min）による三軸試験を実施した。また、軸ひずみ 15%以上を試験終了の基準とした。

2) 繰返し載荷試験

所定の応力条件で圧密後、排水または非排水状態で側圧一定とし、応力制御（0.05 又は 0.1Hz）の正弦波による一定振幅を軸方向に繰返し載荷した。ただし、載荷周波数を変化させてその影響をみるために、0.03～1.0Hz に変化させた試験もおこなった。

異方応力条件で圧密後、非排水状態で繰返し載荷を行う場合、応力振幅の制御精度が落ちる。特にマイナス方向（引張り側）の軸荷重は、設定値より小さく制御される。このことは、軸荷重がマイナス方向（引張り側）に行くにしたがって、軸荷重計（ロードセル）にかかる供試体からの反発力が減少するためである。この反発力は、軸荷重を制御するためにフィードバックされるものであるが、荷重計への反発力（荷重）が小さいことから荷重計及びサーボゲインを高感度にしなければ高精度の制御ができないものとなっている。よって、本試験では以下のように応力振幅の制御精度の向上を目的とした工夫をし、試験を実施している。

- ①荷重計からのフィードバック値を試験応力条件内でできる限り増幅させ、できる限り荷重計の感度を上げて実施した。
- ②なるべくサーボゲインを高感度に設定するために載荷ロードにウレタンゴム製のクッション（以下、ゲインクッションという）を設置して試験を実施した。

1.5.2 ねじりせん断試験

1) 単調載荷試験

所定の応力条件で圧密後、排水または非排水状態で側圧一定とし、せん断ひずみ制御（せん断ひずみ速度一定：0.5%/min）によるねじりせん断試験を実施した。また、せん断ひずみ 15%以上を試験終了の基準とした。

2) 繰返し載荷試験

所定の応力条件で圧密後、排水または非排水状態で、中空供試体の外圧と内圧および軸圧を一定とし、せん断応力制御で水平方向に一定振幅の正弦波（0.05 又は 0.1Hz）の繰返しねじり力を載荷した。ただし、載荷周波数を変化させてその影響をみるために、0.03～0.2Hz に変化させた試験もおこなった。

2 計測データ整理（算出）方法

2.1 静的試験のデータ整理

2.1.1 三軸試験

静的三軸試験では計測データを以下の項目で整理した。

σ_{dev} : 軸差応力(DEVIATOR STRESS)

ε_a : 軸ひずみ(AXIAL STRAIN)

ε_v : 体積ひずみ(VOLUMETRIC STRAIN)

$-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$: ダイレイタンスー係数(DILATANCY INDEX) (排水試験)

PWP : 過剰間隙水圧(EXCESS PORE WATER PRESSURE) (非排水試験)

ここに、

$$\sigma_{dev} = \sigma_a - \sigma_c' \quad (\text{式 2.1.1})$$

σ_a : 軸圧 (axial pressure)

σ_c' : 拘束圧

$$\varepsilon_a = \frac{y}{H} \quad (\text{式 2.1.2})$$

y : ひずみ量

H : 圧密後の供試体高さ

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{式 2.1.3})$$

ΔV : 排水量

V : 圧密後の供試体体積

2.1.2 ねじりせん断試験

静的ねじりせん断試験では計測データを以下の項目で整理した。

τ : せん断応力(SHEAR STRESS)

γ : せん断ひずみ(SHEAR STRAIN)

ε_v : 体積ひずみ(VOLUMETRIC STRAIN)

PWP: 過剰間隙水圧(EXCESS PORE WATER PRESSURE)

$-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$: ダイレイタンスー係数(DILATANCY INDEX)

ここに、

$$\gamma = \frac{r}{H} \bullet \frac{\pi}{180} \bullet \theta \quad (\text{式 2.1.4})$$

H : 圧密後の供試体高さ

r : 供試体中心半径

θ : 角度計測定値(deg)

2.2 動的試験のデータ整理

2.2.1 三軸試験

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（波）と数え、 N 周期を N 回（波）とする。

2) 載荷周波数

載荷周波数は繰返し載荷の1周期に1秒かかる場合に1Hzとした。動的試験においてはほとんどの場合0.05Hz（1周期20秒）で載荷を行った。

3) 応力

繰返しせん断応力を次式で算定する。

$$\tau_d = \frac{\sigma_d}{2} \quad (\text{式 2.2.1})$$

$$\sigma_d = \frac{P_C + P_E}{2A} \quad (\text{式 2.2.2})$$

$$SR = \frac{\tau_d}{\sigma_m'} \quad (\text{式 2.2.3})$$

τ_d : 繰返しせん断応力

σ_d : 繰返し軸差応力

P_C : 圧縮時による繰返し荷重

P_E : 伸張時による繰返し荷重

A_C : 圧密後の供試体断面積

SR : 繰返しせん断応力比

σ_m' : 圧密時の平均有効主応力

σ_c' : 拘束圧

なお、繰返し非排水試験における有効主応力は、後述するメンブレンペネトレーションの影響をうけるため、 SR を算定時に一律10%低減している。

4) ひずみ

軸ひずみは、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。

$$\varepsilon = \frac{d}{H_c} \quad (\text{式 2.2.4})$$

軸ひずみ量については図を参考に次のように定義する。

ε_{DA} : 両振幅軸ひずみ

ε_{sa} : 片振幅軸ひずみ

- ϵ_p : ピーク軸ひずみ
 ϵ_{sa} : 最小軸ひずみ
 ϵ_{res} : 残留軸ひずみ（最大値と最小値の平均）

等方圧密状態からの試験では、原理上残留ひずみが生じないため、両振幅軸ひずみを用いて結果の整理を行った。

異方圧密状態からの試験では、ピーク軸ひずみを用いて結果の整理を行った。

5) 過剰間隙水圧比

最大過剰間隙水圧比は次式で表される。

$$\frac{PWP_{\max}}{\sigma'_c} \quad (\text{式 2.2.5})$$

$PWP_{\max}$: 最大過剰間隙水圧（1 周期での過剰間隙水圧の最大値）

6) 動的強度

ここでいう動的強度とは、大ひずみに対する抵抗を表すものであり、10 回の繰返し載荷時に、 γ のひずみを生じる繰返しせん断応力比をいい、以下のように表す。

$$SR_{10}(\gamma)$$

通常残留ひずみの大きいことが被害として認識されるが、等方圧密した供試体にはこれが生じないため、等方非排水試験による動的強度として、片振幅軸ひずみ ϵ_{sa} を用いて、以下のように表す。

$$SR_{10}(\epsilon_{sa}) : \text{三軸試験}$$

ここで

$$\epsilon_{sa} : \text{繰返し } N \text{ 回目における片振幅軸ひずみ (\%)}$$

また、三軸試験における異方圧密状態および、ねじりせん断試験における初期せん断応力載荷状態からの試験では、一定の方向にひずみが進行するため、異方圧密状態の動的強度としてはピークひずみを用いて、以下のように表す。

$$SR_{10}(\epsilon_p) : \text{三軸試験}$$

$$\epsilon_p : \text{繰返し } N \text{ 回目における圧縮側の最大ピーク軸ひずみ}$$

三軸試験では ϵ_{sa} および ϵ_p を 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5%で整理した。

一般に砂の液状化強度は、20 回の繰返しで 5%ひずみが生じるせん断応力比で表されるが、今回のような密な粗粒材料では 5%までのひずみが生じにくかったため、5%の半分を最大のひずみとした。

せん断応力比は、メンブレンコンプライアンスの影響を補正する。Banerjee et al.(1979) が、Oroville ダム堤体材料を用いた粒度分布においての非排水の繰返し三軸試験を実施した結果では、メンブレンペネトレーションの補正は、100%の間隙水圧に達するときの繰返しせん断応力比を一律 10%低減としている。本研究の試験では同様の粒度分布を用いることで、メンブレンペネトレーションの補正としてせん断応力比を一律 10%減とした。

7) 体積ひずみ

体積ひずみは排水試験において測定し、以下の式で表される。

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta d}{V} \quad (\text{式 2.2.6})$$

ε_v : 繰返し N 回目における最大の体積ひずみ (%)

Δd : 繰返し N 回目における最大の排水量

V : 圧密後の供試体体積

2.2.2 ねじりせん断試験

1) 繰返し回数

三軸試験と同様。

2) 載荷周波数

三軸試験と同様。

3) 応力

繰返しせん断応力は以下のように定義する。

τ_d : 繰返しせん断応力 (せん断応力振幅の 1 / 2)。

さらに

σ_e' : 拘束圧

τ_s : 初期せん断応力

SR : 三軸試験と同様。

4) ひずみ

ねじりせん断ひずみは、静的試験と同様ねじり角度 θ から次式で定める。

$$\gamma = \frac{r}{H} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \theta \quad (\text{式 2.2.7})$$

軸ひずみ量については、次のように定義する。

γ_{DA} : 両振幅せん断ひずみ

γ_{sa} : 片振幅せん断ひずみ

γ_p : ピークせん断ひずみ

等方圧密状態からの試験では、原理上は残留ひずみが生じないので、両振幅軸ひずみを用いて結果の整理を行った。

異方圧密状態からの試験では、ピークせん断ひずみを用いて結果の整理を行った。

5) 過剰間隙水圧比

三軸試験と同様。

6) 動的強度

ねじりせん断試験においては片振幅せん断ひずみ γ_{sa} を用いて、以下のように表す。

$$SR_{10}(\gamma_{sa})$$

ここで

γ_{sa} : 繰返し N 回目における片振幅せん断ひずみ (%)

また、ねじりせん断試験における初期せん断応力載荷状態からの試験では、一定の方向にひずみが行進するため、初期せん断応力載荷状態の動的強度としてはピークひずみを用いて、以下のように表す。

$SR_{10}(\gamma_p)$: ねじりせん断試験

γ_p : 繰返し N 回目におけるプラス側のピークせん断ひずみ

ねじりせん断試験では γ_{sa} および γ_p を 0.75, 1.5, 2.25, 3.0, 3.75%で整理した。これは軸ひずみに相当するせん断ひずみを考慮し、以下の式より、せん断ひずみは軸ひずみの 1.5 倍であることによる。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{式 2.2.8})$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\varepsilon} \quad G = \frac{\Delta\tau}{\gamma} \quad \Delta\tau = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (\text{式 2.2.9, 2.2.10, 2.2.11})$$

三軸試験と同様せん断応力比は、メンブレンコンプライアンスの影響を補正する。メンブレンコンプライアンスは供試体の表面積 A_s と体積 V の比に大きく関わっていると考えられる。本研究における三軸試験では $A_s/V=0.13$ であり、ねじりせん断試験では $A_s/V=0.10$ であることから、ねじりせん断試験においてもせん断応力比を一律 10%低減することとした。

7) 体積ひずみ

三軸試験と同様

$$\gamma = 1.5\varepsilon$$

3 試験ケース

3.1 静的試験の試験条件

3.1.1 三軸試験

表 3.1.1 静的三軸試験ケース

材料	排水条件	試験記号	相対密度 Dr (%)	拘束圧 σ'_c (MPa)	試験機
A 材	排水	MDTX	56	0.1, 0.39, 0.59	大型三軸 2
〃	〃	MDTX	66	0.1, 0.39, 0.59	〃
〃	〃	MDTX	80	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	〃
〃	〃	MDTX	89	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	〃
〃	非排水	MUTX	80	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	〃
〃	〃	MUTX	89	0.1, 0.39	〃
B 材	排水	MDTX	85	0.1, 0.2, 0.39	〃
C 材	排水	MDTX	85	0.1, 0.39	〃

3.1.2 ねじりせん断試験

表 3.1.2 静的ねじりせん断試験ケース

材料	排水条件	試験記号	相対密度 Dr (%)	拘束圧 σ'_c (MPa)
A 材	排水	MDTS	56	0.1, 0.2, 0.39
〃	〃	MDTS	80	0.1, 0.2, 0.29, 0.39
〃	〃	MDTS	89	0.1, 0.2, 0.39
〃	非排水	MUTS	80	0.1, 0.39
B 材	排水	MDTS	60	0.39
〃	〃	MDTS	85	0.1, 0.2, 0.39
〃	〃	MDTS	90	0.1, 0.2, 0.39
〃	非排水	MUTS	85	0.1, 0.39

3.2 繰返し試験の試験条件

3.2.1 三軸試験

表 3.2.1 繰返し三軸試験ケース

材料	排水条件	試験記号	相対密度 Dr (%)	平均拘束圧 σ'_c (MPa)	圧密応力比 σ_a / σ_r	実施試験機
A材	非排水	CUTX	56	0.1, 0.39, 0.59	1.0	大型三軸 1
〃	〃	CUTX	66	0.1, 0.39, 0.59	1.0	大型三軸 1
〃	〃	CUTX	80	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	1.0	大型三軸 3
〃	〃	CUTX	〃	0.39	1.5	大型三軸 3
〃	〃	CUTX	〃	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	2.0	大型三軸 3
〃	〃	CUTX	〃	0.39	3.143	大型三軸 2
〃	〃	CUTX	89	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	1.0	大型三軸 4
〃	〃	CUTX	〃	0.39	1.5	大型三軸 4
〃	〃	CUTX	〃	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	2.0	大型三軸 4
〃	排水	CDTX	56	0.1	2.0	大型三軸 2
B材	非排水	CUTX	70	0.39	1.0	大型三軸 2
〃	〃	CUTX	85	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	1.0	大型三軸 2
〃	〃	CUTX	〃	0.1, 0.59	2.0	大型三軸 2
〃	〃	CUTX	95	0.1, 0.2, 0.39, 0.59	1.0	大型三軸 2
C材	非排水	CUTX	85	0.1, 0.39	1.0	大型三軸 2

3.2.2 ねじりせん断試験

表 3.2.2 繰返しねじりせん断試験ケース

材料	排水条件	試験記号	相対密度 Dr (%)	拘束圧 σ'_c (MPa)	初期せん断応力 τ_s (MPa)
A材	非排水	CUTS	56	0.1, 0.39	0
〃	〃	CUTS	66	0.1	0
〃	〃	CUTS	80	0.1, 0.2, 0.29, 0.39	0
〃	〃	CUTS	〃	0.1	0.03
〃	〃	CUTS	〃	0.39	0.05, 0.1, 0.25, 0.3
〃	〃	CUTS	89	0.1, 0.2, 0.39	0
	排水	CDTS	80	0.1, 0.39	0
B材	非排水	CUTS	60	0.39	0
〃	〃	CUTS	85	0.1, 0.2, 0.39	0
〃	〃	CUTS	〃	0.1	0.03
〃	〃	CUTS	〃	0.39	0.13, 0.20, 0.29
〃	〃	CUTS	90	0.1, 0.2, 0.39	0

4 静的試験結果

4.1 排水三軸試験

図 4.1.1 に MDTX 試験結果の軸ひずみ ε_a と諸要素の関係の一例を示す。なお、詳細な試験結果は巻末資料に掲載している。

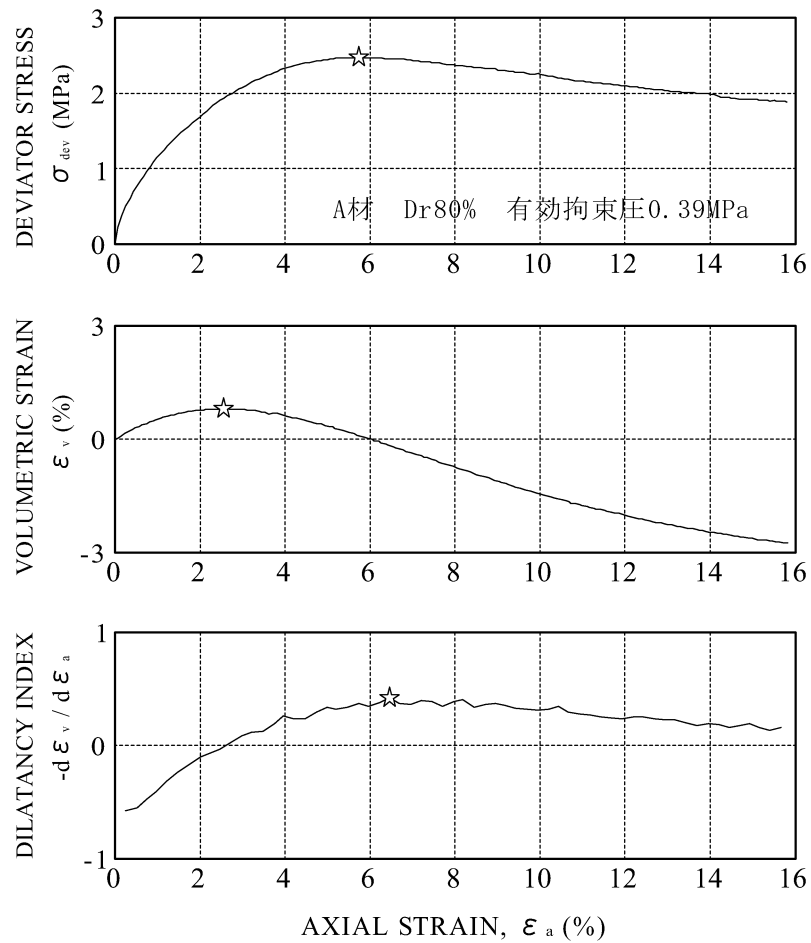


図 4.1.1 静的排水三軸試験結果の例

4.1.1 軸差応力と軸ひずみ

A材、B材及びC材の試験結果における、最大軸差応力 σ_{devmax} と σ_{devmax} 発生時の軸ひずみ $\varepsilon_{\sigma devmax}$ の関係を図 4.1.2 および表 4.1.1 に示す。また、同拘束圧条件下の結果を線でつないで示した。

A材では、相対密度 56%では最大時軸ひずみが 9%程度なのに対して、相対密度 89%では 3%程度と、相対密度の高いほうが最大時の軸ひずみが少ない。

拘束圧との関係は、拘束圧が高いほど最大軸差応力は大きく、最大時軸ひずみは大きい。

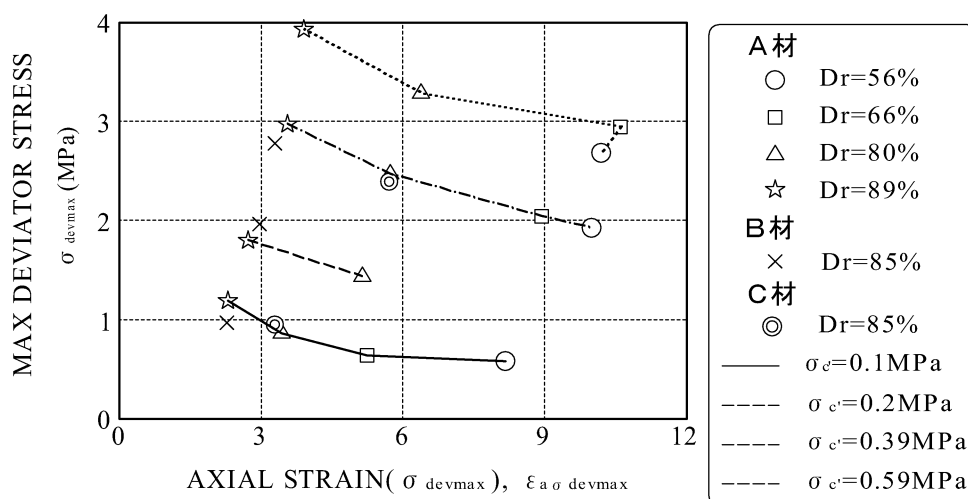


図 4.1.2 最大軸差応力と最大軸差応力時軸ひずみ

表 4.1.1 最大軸差応力と最大軸差応力時軸ひずみ

A材	Dr=56%		Dr=66%		Dr=80%		Dr=89%	
$\sigma_{c'}$ (MPa)	σ_{devmax} (%)	$\varepsilon_{adevmax}$ (%)	σ_{devmax} (%)	$\varepsilon_{adevmax}$ (%)	σ_{devmax} (%)	$\varepsilon_{adevmax}$ (%)	σ_{devmax} (%)	$\varepsilon_{adevmax}$ (%)
0.1	0.579	8.162	0.636	5.238	0.860	3.428	1.194	2.303
0.2					1.429	5.145	1.796	2.715
0.39	1.923	10.000	2.044	8.934	2.472	5.725	2.972	3.555
0.59	2.678	10.201	2.938	10.613	3.284	6.377	3.928	3.894

B材, C材	B材 Dr=85%		C材 Dr=85%	
$\sigma_{c'}$ (MPa)	σ_{devmax} (%)	$\varepsilon_{adevmax}$ (%)	σ_{devmax} (%)	$\varepsilon_{adevmax}$ (%)
0.1	0.972	2.275	0.945	3.285
0.2	1.964	2.961		
0.39	2.776	3.284	2.388	5.713

4.1.2 体積ひずみ

最大収縮体積ひずみ ε_{vmax} と ε_{vmax} 発生時の軸ひずみ $\varepsilon_{a\varepsilon_{vmax}}$ の関係を図4.1.3および表4.1.2に示す。 ε_{vmax} が大きいほど $\varepsilon_{a\varepsilon_{vmax}}$ も大きく、ほぼ比例の関係が見られる。また、その傾きは相対密度によらず一定である。

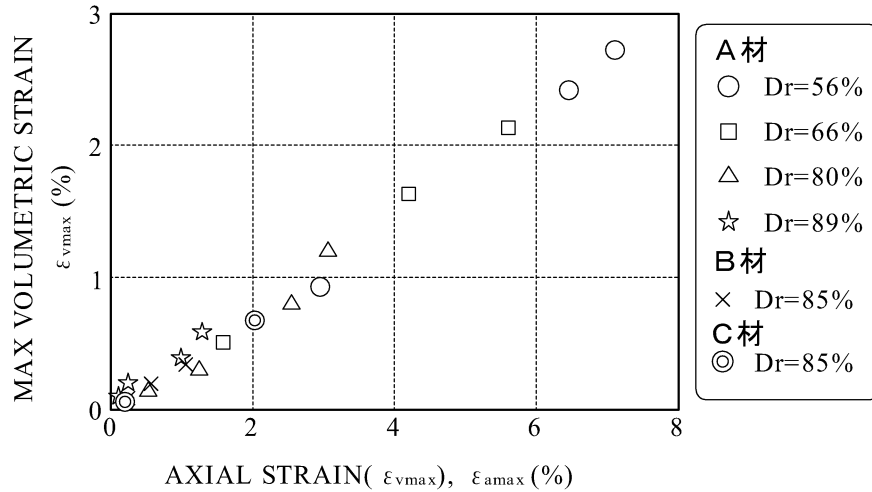


図 4.1.3 最大体積収縮ひずみと最大体積収縮時軸ひずみ

ε_{vmax} と拘束圧 σ_c' の関係を図 4.1.4 に表す。 σ_c' が大きいほど ε_{vmax} が大きい。また、相対密度が大きいほど ε_{vmax} が小さい。

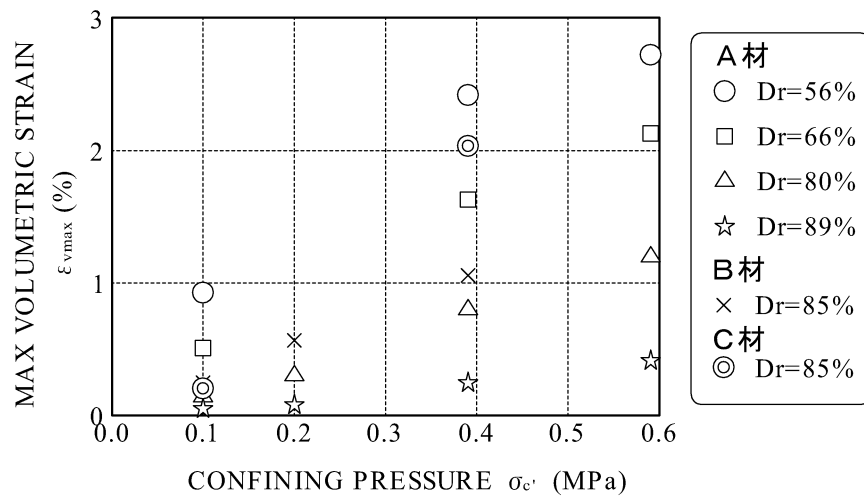


図 4.1.4 最大体積収縮ひずみと拘束圧

表 4.1.2 最大体積収縮ひずみと最大時軸ひずみ

A 材	Dr=56%		Dr=66%		Dr=80%		Dr=89%	
σ_c' (MPa)	ε_{vmax} (%)	$\varepsilon_{a\varepsilon vmax}$ (%)	ε_{vmax} (%)	$\varepsilon_{a\varepsilon vmax}$ (%)	ε_{vmax} (%)	$\varepsilon_{a\varepsilon vmax}$ (%)	ε_{vmax} (%)	$\varepsilon_{a\varepsilon vmax}$ (%)
0.1	0.926	2.957	0.506	1.588	0.137	0.532	0.115	0.053
0.2					0.300	1.246	0.250	0.083
0.39	2.417	6.464	1.631	4.198	0.798	2.552	0.985	0.243
0.59	2.719	7.107	2.13	5.615	1.197	3.056	1.291	0.416

B 材, C 材	B 材 Dr=85%		C 材 Dr=85%	
σ_c' (MPa)	ε_{vmax} (%)	$\varepsilon_{a\varepsilon vmax}$ (%)	ε_{vmax} (%)	$\varepsilon_{a\varepsilon vmax}$ (%)
0.1	0.09	0.247	0.061	0.203
0.2	0.196	0.567		
0.39	0.339	1.053	0.677	2.035

4.1.3 ダイレイタンスー

最大ダイレイタンスー係数 ($-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$) max と、最大ダイレイタンスー係数発生時の軸ひずみ $\varepsilon_{aDI_{max}}$ を図 4.1.5、最大ダイレイタンスー係数と拘束圧の関係を図 4.1.6 に示し、値を表 4.1.3 に表す。最大ダイレイタンスー係数が大きいほど、 $\varepsilon_{aDI_{max}}$ が小さくなっており、相対密度によらず、同一曲線上にのっている。ただし、B 材の同一 $\varepsilon_{aDI_{max}}$ 時の最大ダイレイタンスー係数は、他より大きい傾向がある。

また、拘束圧が大きいほど最大ダイレイタンスー係数は大きく、相対密度が大きいほど最大時ひずみは大きい。また、B 材の同一拘束圧時の最大ダイレイタンスー係数は最も大きい。

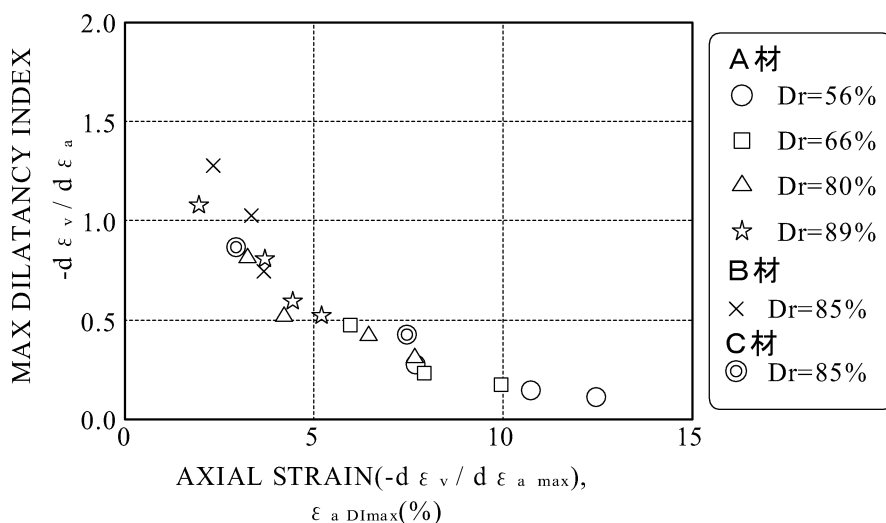


図 4.1.5 最大ダイレイタンスー係数と最大ダイレイタンスー発生時軸ひずみ

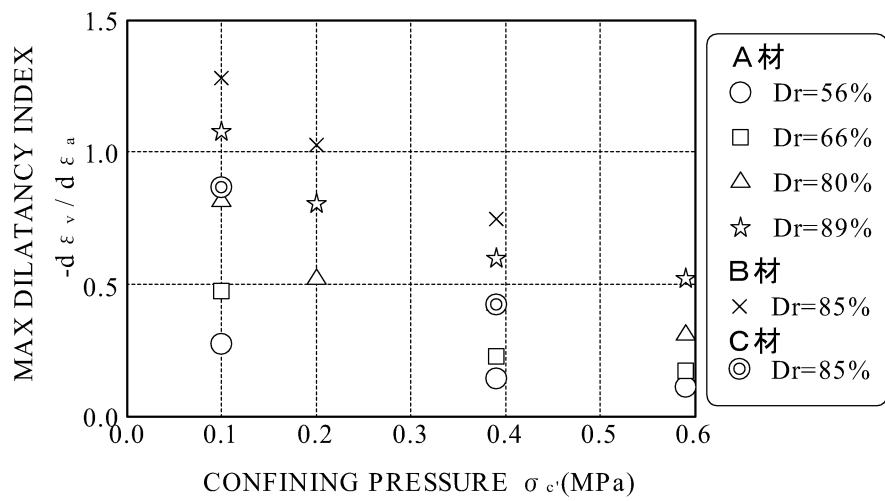


図 4.1.6 最大ダイレイタンス係数と拘束圧

表 4.1.3 最大ダイレイタンス係数と最大ダイレイタンス発生時軸ひずみ

A材	Dr=56%		Dr=66%		Dr=80%		Dr=89%	
σ'_c (MPa)	$-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$	ε_{aDmax} (%)	$-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$	ε_{aDmax} (%)	$-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$	ε_{aDmax} (%)	$-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$	ε_{aDmax} (%)
0.1	0.277	7.688	0.476	5.98	0.812	3.246	1.077	1.964
0.2					0.517	4.212	0.806	3.71
0.39	0.145	10.756	0.23	7.92	0.419	6.451	0.597	4.437
0.59	0.113	12.478	0.176	9.953	0.308	7.671	0.523	5.212

B材, C材	B材 Dr=85%		C材 Dr=85%	
σ'_c (MPa)	$-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$	ε_{aDmax} (%)	$-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a$	ε_{aDmax} (%)
0.1	1.279	2.342	0.867	2.935
0.2	1.026	3.341		
0.39	0.747	3.671	0.424	7.461

4.1.4 内部摩擦角

MDTX 試験のモール円を図 4.1.7、図 4.1.8 に示す。

試験によって得られた内部摩擦角 ϕ と見かけの粘着力 c を表 4.1.4 に示す。なお、表中の圧密後相対密度とは、供試体の圧密終了後の各試験供試体の相対密度の平均値である。

表 4.1.4 排水三軸試験による内部摩擦角と見かけの粘着力

	目標相対密度	圧密後相対密度	$\phi (^{\circ})$	c (MPa)
A材	56%	61.4%	43.1	0.040
A材	66%	68.6%	44.6	0.037
A材	80%	80.2%	45.5	0.085
A材	89%	88.7%	47.7	0.127
B材	85%	84.4%	48.0	0.686
C材	85%	85.6%	45.8	0.082

また、内部摩擦角と相対密度の関係を図 4.1.9 に示す。同一材料では、相対密度が大きいほうが内部摩擦角は大きい。また、B材の $Dr=85\%$ における内部摩擦角は、A材の $Dr=85\%$ 程度の内部摩擦角より大きく、C材の $Dr85\%$ における内部摩擦角は、A材の $Dr85\%$ 程度の内部摩擦角より小さい。

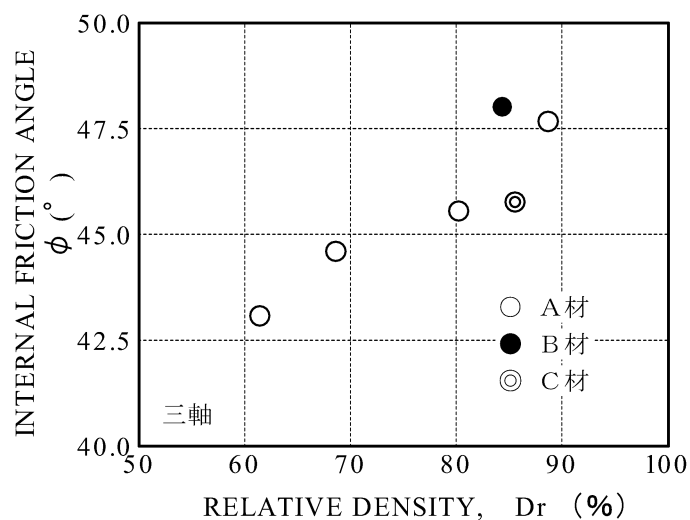


図 4.1.9 内部摩擦角と相対密度

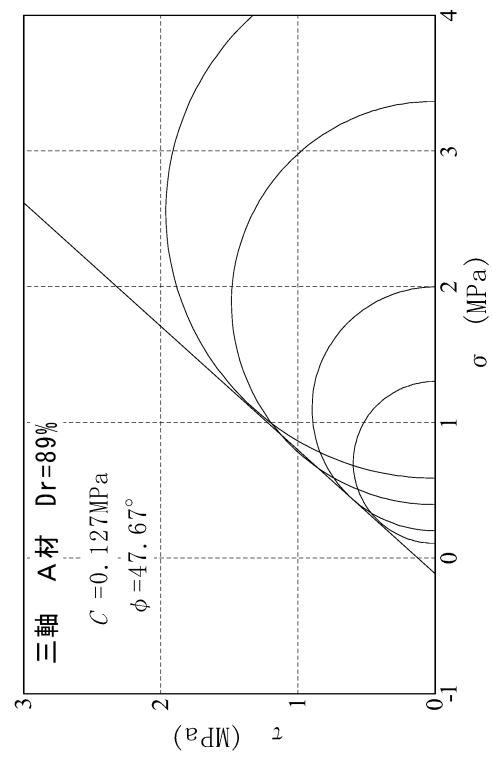
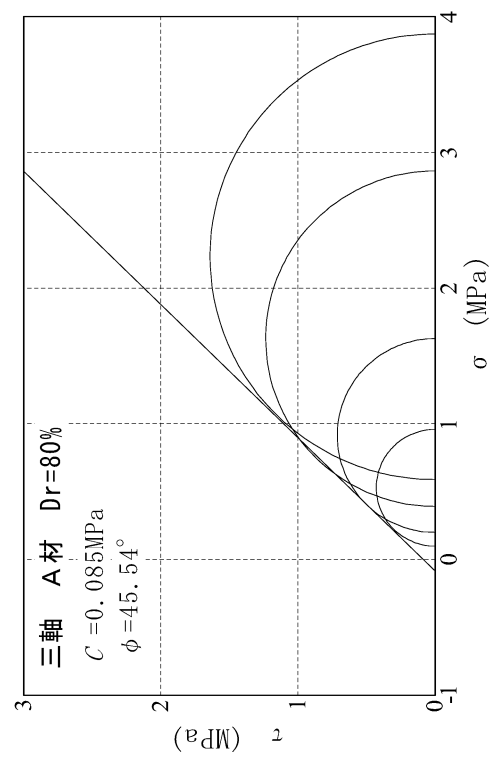
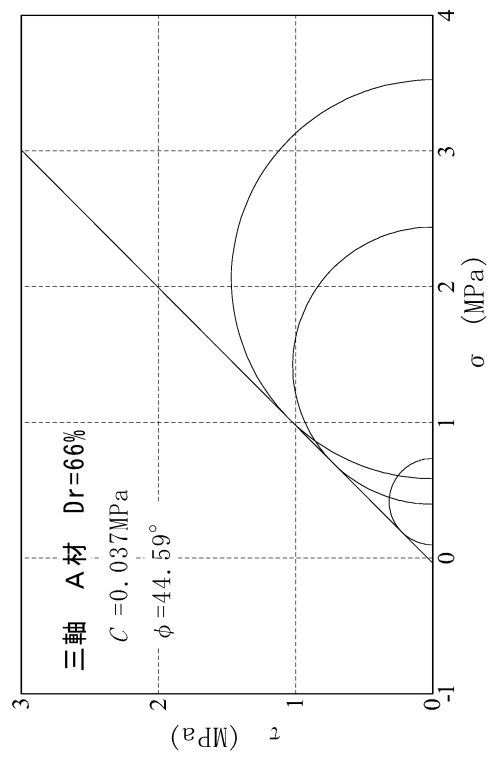
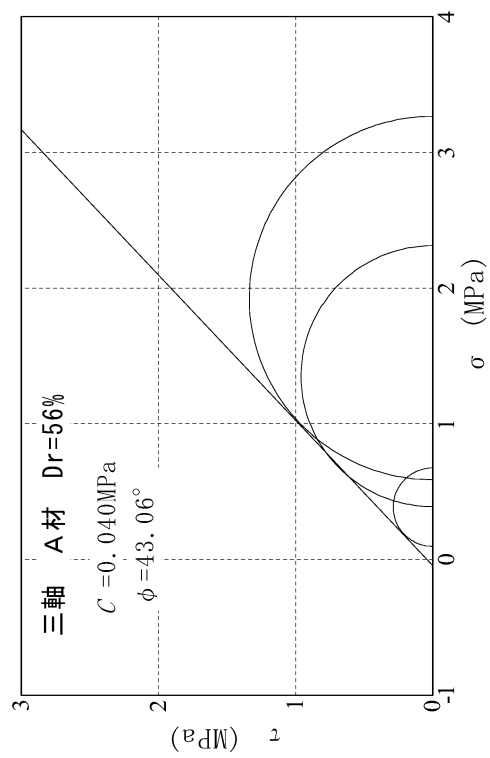


図 4.1.7 モールの応力円 MDTX 試験 A 材

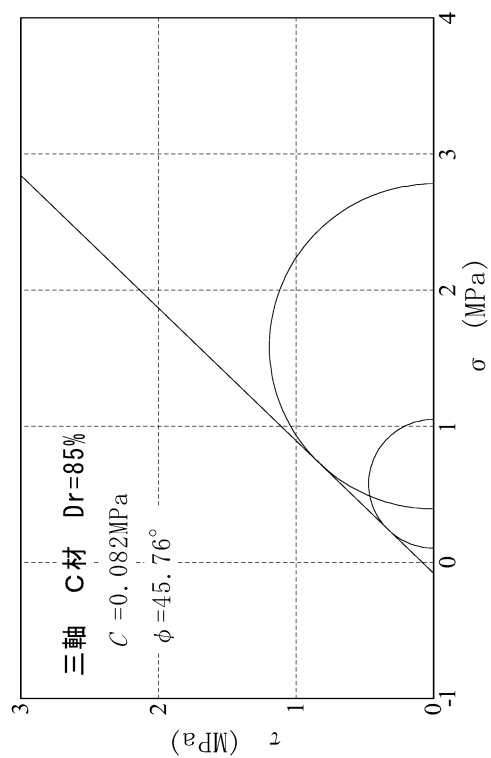
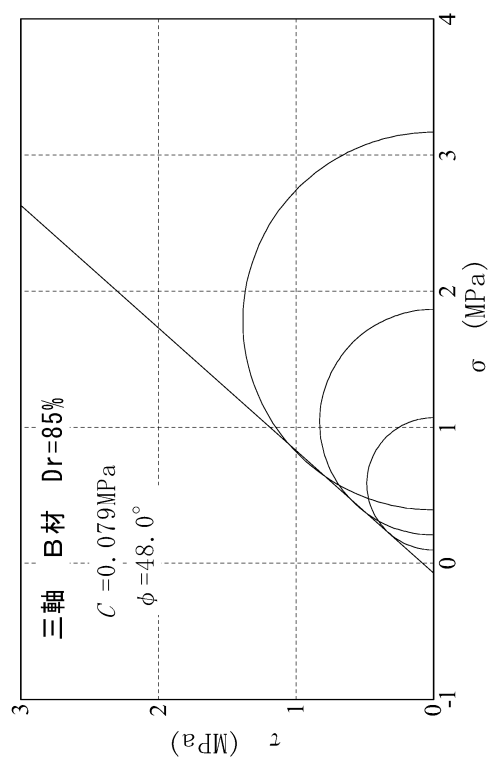


図 4.1.8 モールの応力円 MDTX 試験 B, C 材

4.1.5 材料岩種による影響

1) 凹凸係数

MDTX 試験での同程度の相対密度におけるピーク強度 τ_f と材料の凹凸係数 FU の関係を図 4.1.10 に示す。FU の大小に関わらず、 τ_f に差はあまり見られない。

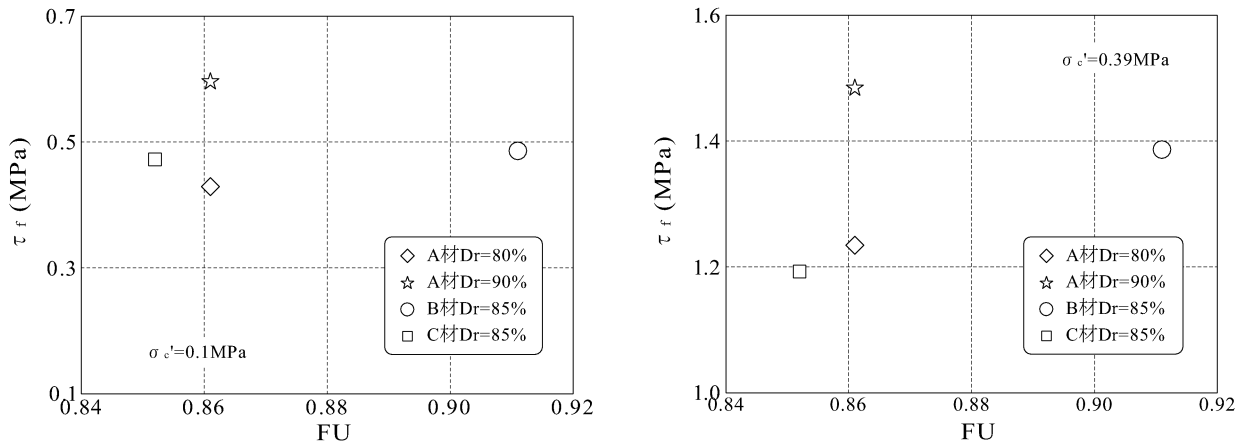


図 4.1.10 静的ピーク強度と凹凸係数

2) 点載荷圧裂強度

MDTX 試験での同程度の相対密度におけるピーク強度 τ_f と材料の点載荷圧裂強度の関係を図 4.1.11 に示す。拘束圧 $\sigma_{c'} = 0.1 \text{ MPa}$ の比較的低い範囲では τ_f は点載荷圧裂強度に影響しないが、拘束圧の比較的高い $\sigma_{c'} = 0.39 \text{ MPa}$ では点載荷圧裂強度が大きいほど τ_f が大きい傾向がある。

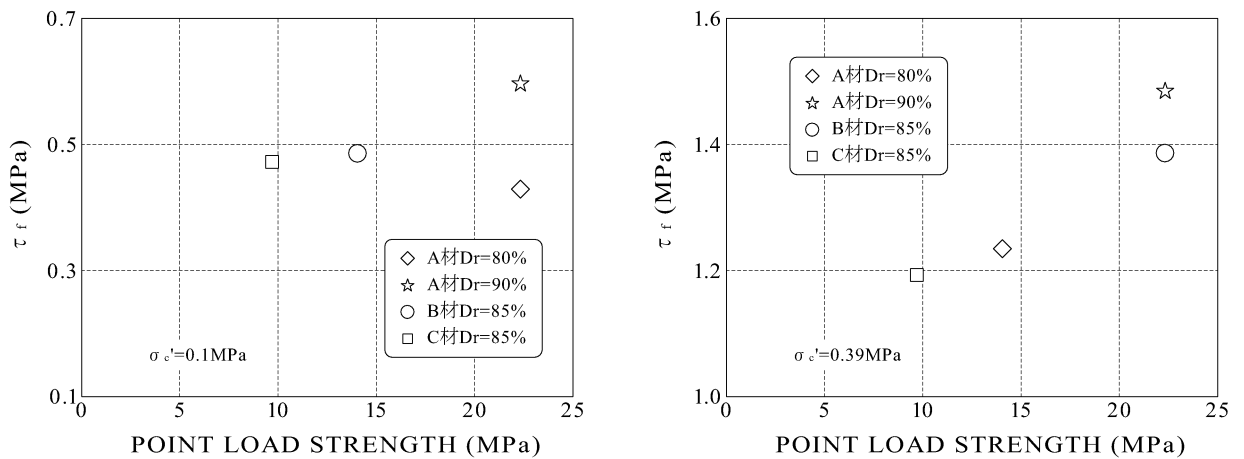


図 4.1.11 静的ピーク強度と点載荷圧裂強度

4.2 非排水三軸試験

図 4.2.1 に圧密非排水三軸試験結果の軸ひずみと諸要素の関係の一例を示す。なお、各試験ケースの詳細な結果は巻末資料に掲載している。

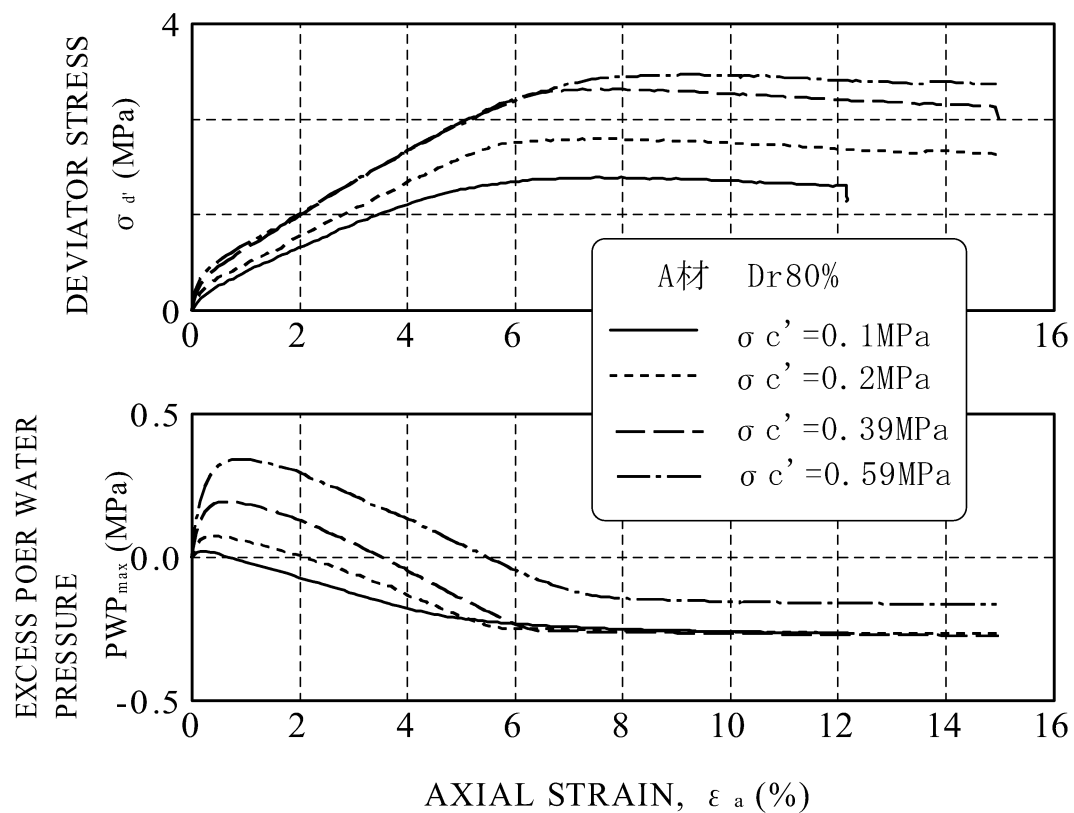


図 4.2.1 静的非排水三軸試験結果の例

4.2.1 軸差応力

非排水試験の結果で、最大軸差応力 σ_{dev} と最大軸差応力時軸ひずみ $\varepsilon_{a\sigma dev}$ の関係を図 4.2.2 に示した。また、最大軸差応力と拘束圧の関係を図 4.2.3 に示した。

拘束圧が高いほど σ_{dev} が大きく、相対密度が大きいほど $\varepsilon_{a\sigma dev}$ が小さい傾向にある。

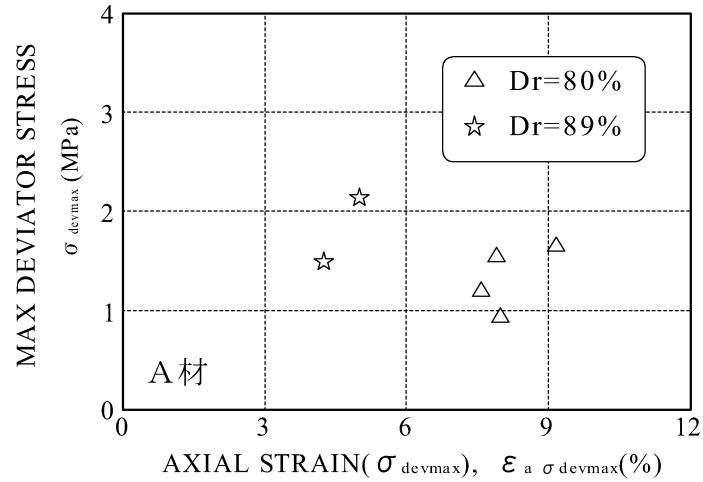


図 4.2.2 最大軸差応力と最大軸差応力時軸ひずみ

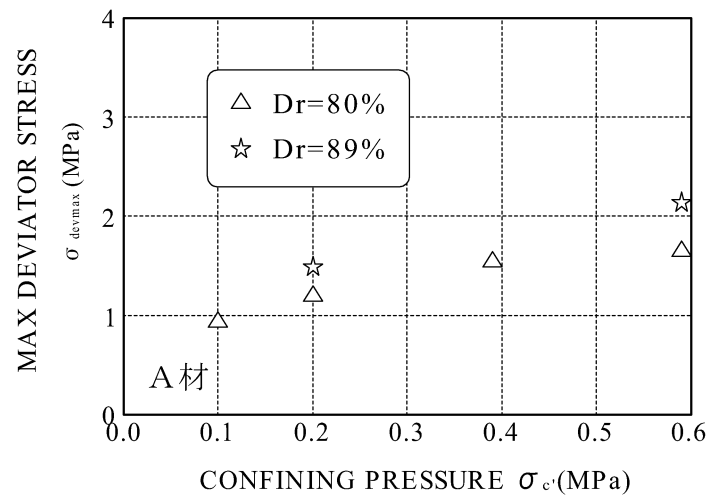


図 4.2.3 最大軸差応力と拘束圧

表 4.2.1 最大軸差応力と最大軸差応力時軸ひずみ

A材 $\sigma_{c'}$ (MPa)	Dr=80%		Dr=89%	
	σ_{dev} (MPa)	$\varepsilon_{a\sigma dev}$ (%)	σ_{dev} (MPa)	$\varepsilon_{a\sigma dev}$ (%)
0.1	0.928	7.979	1.492	4.244
0.2	1.193	7.578		
0.39	1.537	7.910	2.137	4.997
0.59	1.641	9.166		

4.2.2 過剰間隙水圧

最大過剰間隙水圧 PWP_{max} と最大過剰間隙水圧発生時軸ひずみの関係を図 4.2.3、最大過剰間隙水圧と拘束圧の関係を図 4.2.4 および表 4.2.2 に示す。相対密度が大きいほうが、最大時軸ひずみが小さい傾向にある。最大過剰間隙水圧発生時の軸ひずみは、同相対密度では拘束圧が 0.39MPa 以上では PWP_{max} は大きく、0.2MPa 以上での同一拘束圧下では相対密度が小さいほうが PWP_{max} が若干高めである。

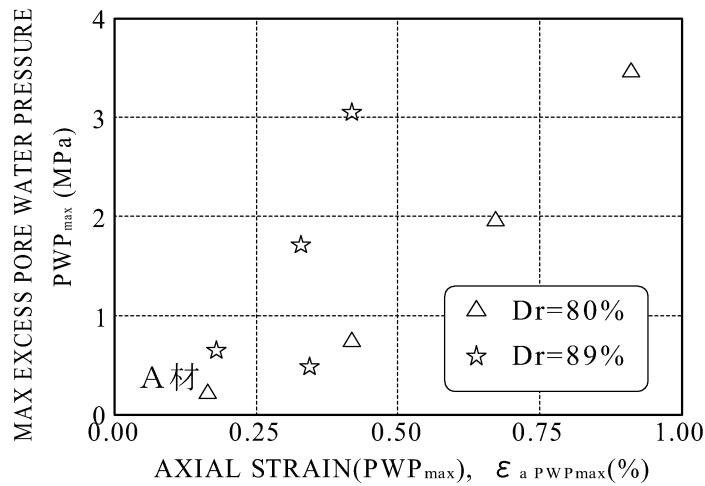


図 4.2.4 最大過剰間隙水圧と最大時軸ひずみ

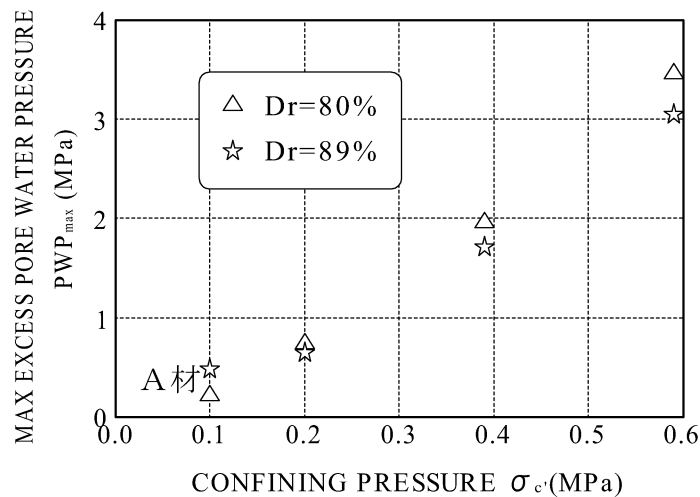


図 4.2.5 最大過剰間隙水圧と拘束圧

表 4.2.2 最大過剰間隙水圧と最大過剰間隙水圧時軸ひずみ

A材 σ_c' (MPa)	Dr=80%		Dr=89%	
	PWP_{max} (MPa)	$\varepsilon_{a:PWPmax}$	PWP_{max} (MPa)	$\varepsilon_{a:PWPmax}$
0.1	0.217	0.163	0.483	0.313
0.2	0.735	0.417	0.644	0.479
0.39	1.953	0.672	1.708	0.328
0.59	3.458	0.910	3.045	0.418

4.3 排水ねじりせん断試験

静的排水ねじりせん断試験結果の1例として、A材 $Dr=80\%$ 、拘束圧 $\sigma_c'=0.1, 0.2, 0.29, 0.39\text{MPa}$ の結果を図 4.3.1 に示す。

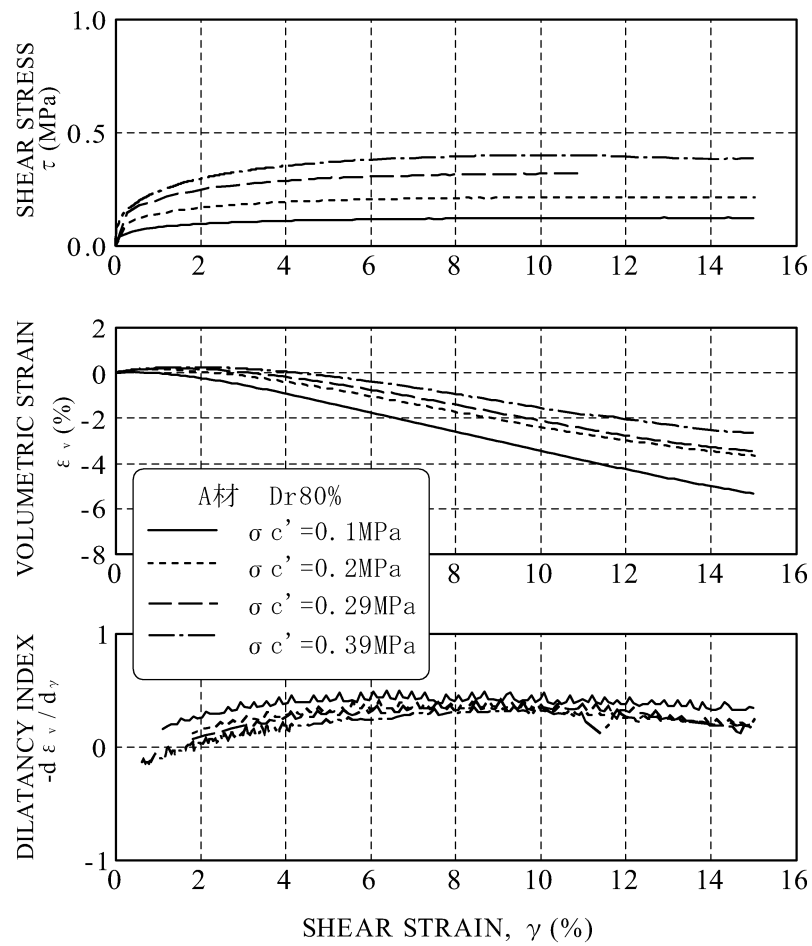


図 4.3.1 静的排水ねじりせん断試験結果の一例

4.3.1 せん断応力とせん断ひずみ

1)角礫材

A材を用いた MDTs 試験による最大せん断応力と最大時せん断ひずみの関係を図 4.3.2、最大時せん断ひずみと拘束圧の関係を図 4.3.3 に示し、数値を表 4.3.1 に表す。MDTs 試験結果では、相対密度 89%が最も最大時ひずみが小さいと言えるが、MDTX 試験のようなはっきりとした違いはみれず、相対密度 80%と 56%での最大時軸ひずみの大小は判定出来ない。拘束圧での比較では、0.2MPa 以上では相対密度が小さいほうが最大時軸ひずみが大きい、0.1MPa での相対密度 80%は 56%より大きい値になっている。

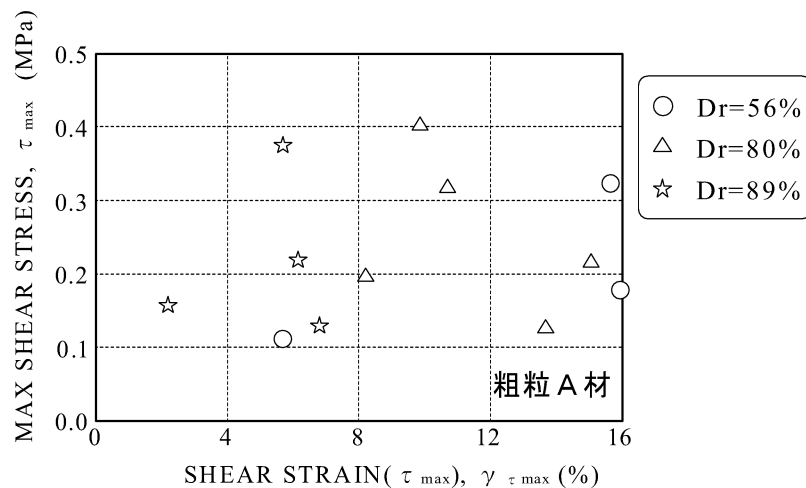


図 4.3.2 最大せん断応力と最大時せん断ひずみ (A材)

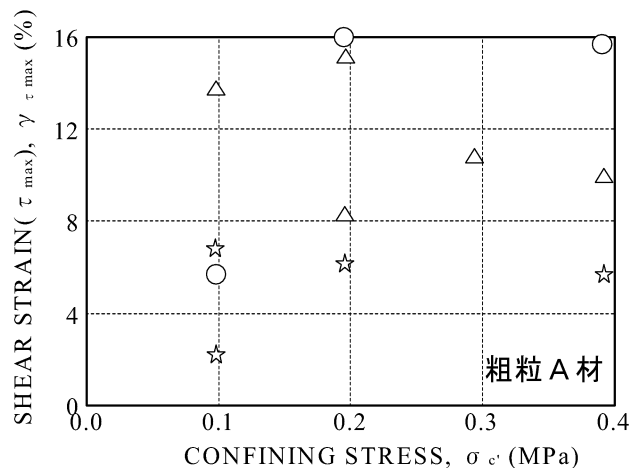


図 4.3.3 最大時せん断ひずみと拘束圧 (A材)

表 4.3.1 最大せん断応力と最大せん断応力時せん断ひずみ (A材)

A 材	Dr=56%		Dr=80%		Dr=89%	
	σ_c' (MPa)	$\tau_{\max}$ MPa	$\tau_{\max}$ MPa	$\gamma_{\tau_{\max}}$ (%)	$\tau_{\max}$ MPa	$\gamma_{\tau_{\max}}$ (%)
0.1		0.112	0.125	13.68	0.157	2.19
					0.130	6.803
0.2		0.177	0.215	15.06	0.219	6.142
			0.195	8.209		
0.29			0.317	10.71		
0.39		0.323	0.401	9.87	0.375	5.695

2)円礫材

B材を用いた試験による最大せん断強度 $\tau_{\max}$ と最大時せん断ひずみ $\gamma_{\tau_{\max}}$ の関係を図 4.3.4 に表す。B材では、A材に比べ $\gamma_{\tau_{\max}}$ が 4～8%程度の低ひずみ域の狭い範囲に集まっている。

最大時せん断ひずみと拘束圧の関係を図 4.3.5 に示す。最大時せん断ひずみはA材と同様に拘束圧が大きくなるにつれて大きくなる傾向にあるが、相対密度 Dr との相関はあまりない。

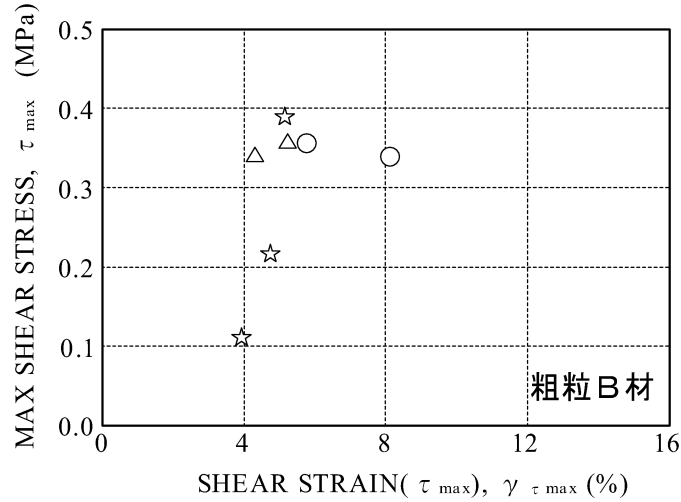


図 4.3.4 最大せん断応力と最大せん断応力時せん断ひずみ (B材)

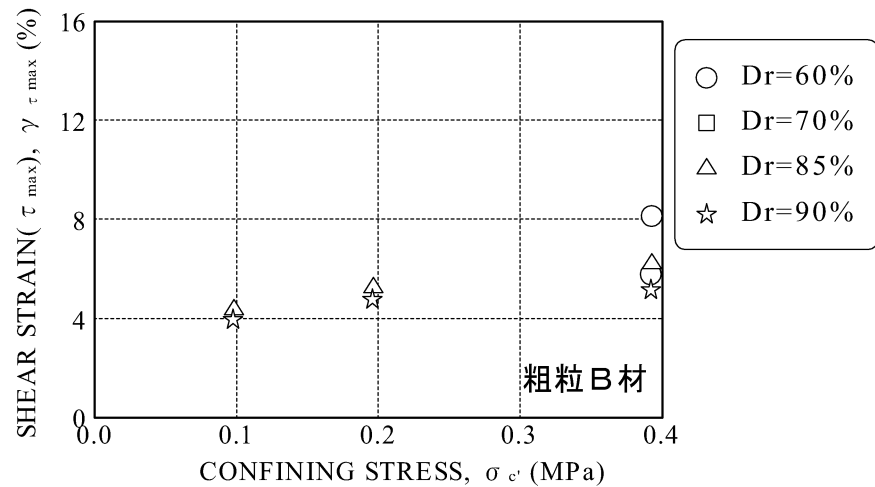


図 4.3.5 最大時せん断ひずみと拘束圧 (B材)

表 4.3.2 最大せん断応力と最大時せん断ひずみ (B材)

σ_c' (MPa)	Dr=60%		Dr=85%		Dr=90%	
	$\tau'_{\max}$ (MPa)	$\gamma_{\tau'_{\max}}$ (%)	$\tau'_{\max}$ (MPa)	$\gamma_{\tau'_{\max}}$ (%)	$\tau'_{\max}$ (MPa)	$\gamma_{\tau'_{\max}}$ (%)
0.1			0.126	4.32	0.112	3.934
0.2			0.225	5.226	0.217	4.754
0.29						
0.39	0.338	8.115	0.408	6.21	0.389	5.156
	0.356	5.769				

3)角礫材と円礫材の試験結果の違い

a)最大強度とせん断ひずみの関係

最大強度時のせん断ひずみの範囲は角礫材（A材）が $\gamma_{\tau \max}=3\sim 16\%$ であるのに対し、円礫材（B材）では $\gamma_{\tau \max}=4\sim 8\%$ 。とかなりせまい。

b)せん断ひずみと拘束圧の関係

角礫材（A材）では相対密度が小さいほど最大時のせん断ひずみが小さい傾向にある。拘束圧が大きいほど最大時せん断ひずみが大きい傾向がある。

円礫材（B材）では拘束圧が大きいほど最大時せん断ひずみが若干大きくなる傾向があるが、A材ほどは大きくない。最大時ひずみが相対密度への依存は少ない。

4.3.2 体積ひずみ

1)角礫材

A材のMDTS試験による最大収縮体積ひずみと最大時せん断ひずみの関係を図4.3.6に表す。最大体積ひずみと拘束圧の関係を図4.3.7に示す。最大体積ひずみが大きいほど最大時せん断ひずみも大きい。相対密度Drが小さくなるほど、最大体積ひずみは大きくなり、その増加率は拘束圧 σ_c' が大きいほど大きくなる傾向がある。

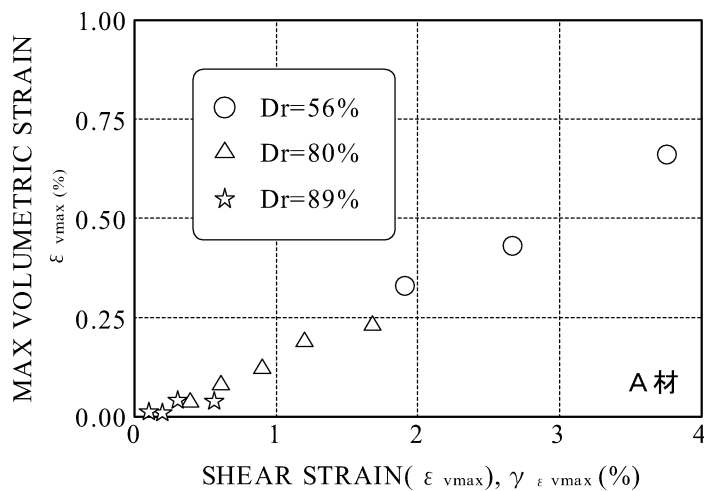


図 4.3.6 最大体積ひずみと最大時せん断ひずみ（A材）

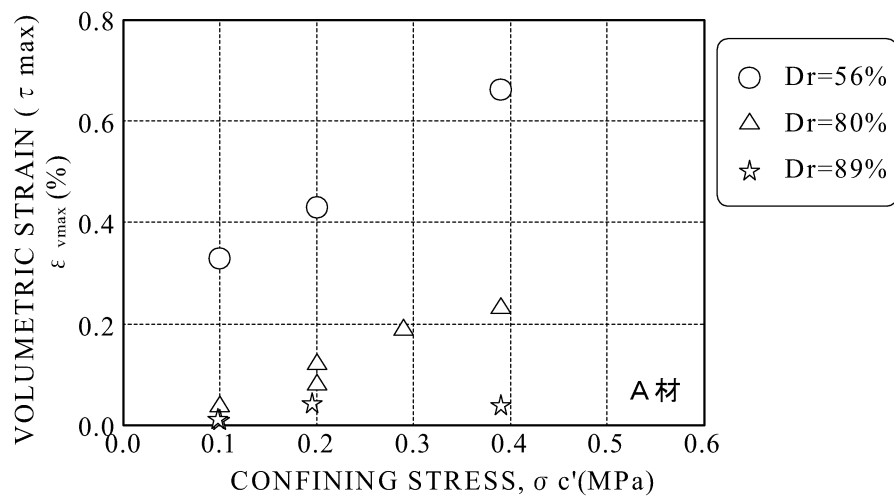


図 4.3.7 最大時体積ひずみと拘束圧（A材）

表 4.3.3 最大体積ひずみと最大時せん断ひずみ（A材）

A材 σ_c' (MPa)	Dr=56%		Dr=80%		Dr=89%	
	ϵ_{vmax} (%)	$\gamma_{\epsilon_{vmax}}$ (%)	ϵ_{vmax} (%)	$\gamma_{\epsilon_{vmax}}$ (%)	ϵ_{vmax} (%)	$\gamma_{\epsilon_{vmax}}$ (%)
0.1	0.329	1.908	0.037	0.390	0.009 0.011	0.198 0.103
0.2	0.430	2.666	0.120 0.080	0.900 0.609	0.042	0.302
0.29			0.188	1.200		
0.39	0.661	3.761	0.231	1.680	0.038	0.565

2)円礫材

円礫材であるB材のMDTS試験による最大体積ひずみと最大時せん断ひずみの関係を図4.3.8に表す。体積ひずみと拘束圧の関係を図4.3.9に表す。最大体積ひずみが大きいほど最大時軸歪も大きい。拘束圧が大きいほど最大時体積ひずみが大きい。また、相対密度が小さいほど体積ひずみが大きい。総じて関係は角礫材と同様であるが最大体積ひずみも最大時せん断ひずみも角礫材の場合より小さい。

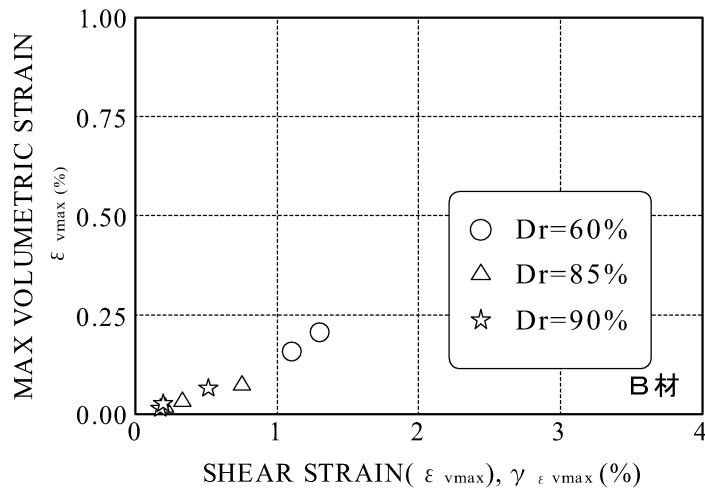


図 4.3.8 最大体積ひずみと最大時せん断ひずみ (B材)

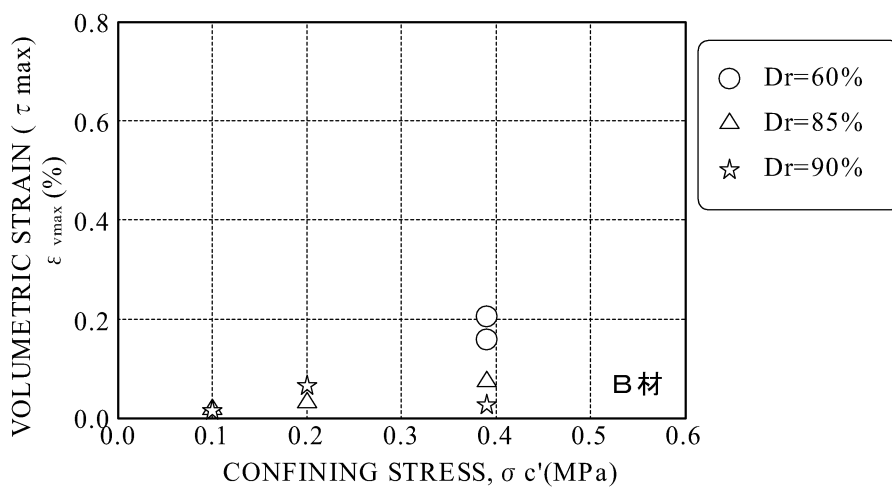


図 4.3.9 最大時体積ひずみと拘束圧 (B材)

表 4.3.4 最大体積ひずみと最大時せん断ひずみ (B材)

σ_c' (MPa)	Dr=60%		Dr=85%		Dr=90%	
	ϵ_{vmax} (%)	$\gamma_{\epsilon_{vmax}}$ (%)	ϵ_{vmax} (%)	$\gamma_{\epsilon_{vmax}}$ (%)	ϵ_{vmax} (%)	$\gamma_{\epsilon_{vmax}}$ (%)
0.1			0.017	0.210	0.015	0.174
0.2			0.031	0.333	0.065	0.516
0.29						
0.39	0.158 0.204	1.101 1.299	0.073	0.750	0.027	0.194

4.3.3 ダイレイタンスー

1) 角礫材

MDTS 試験によるA材の最大ダイレイタンスー係数と、最大時のせん断ひずみを図 4.3.10 に示す。最大ダイレイタンスー係数と拘束圧の関係を図 4.3.11 に示す。相対密度 Dr が大きくなるほど最大ダイレイタンスー係数は大きくなる。また、最大ダイレイタンスー係数が小さくなるほど最大時せん断ひずみが大きくなっている。これらは、4.1.3 の MDTX 試験結果と同じである。しかし図 4.1.5、図 4.1.6 の MTXD 試験に比べると、その傾向は明瞭ではない。これは中空ねじりせん断試験機の内体積計測の精度に起因していると考えられる。

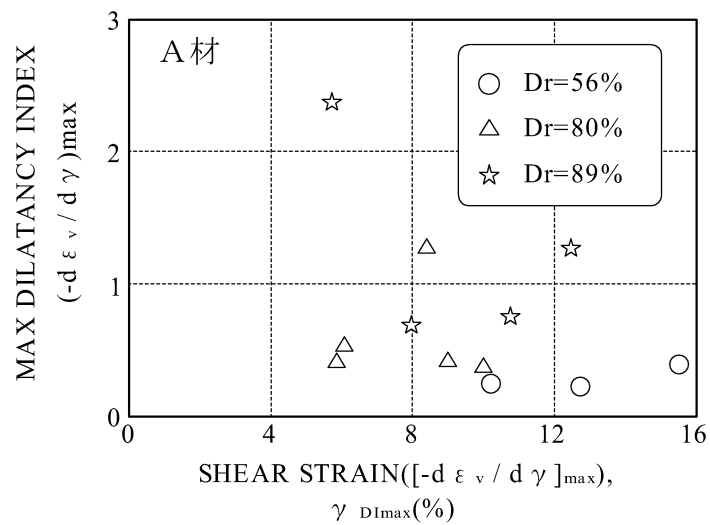


図 4.3.10 最大ダイレイタンスー係数と最大時せん断ひずみ (A材)

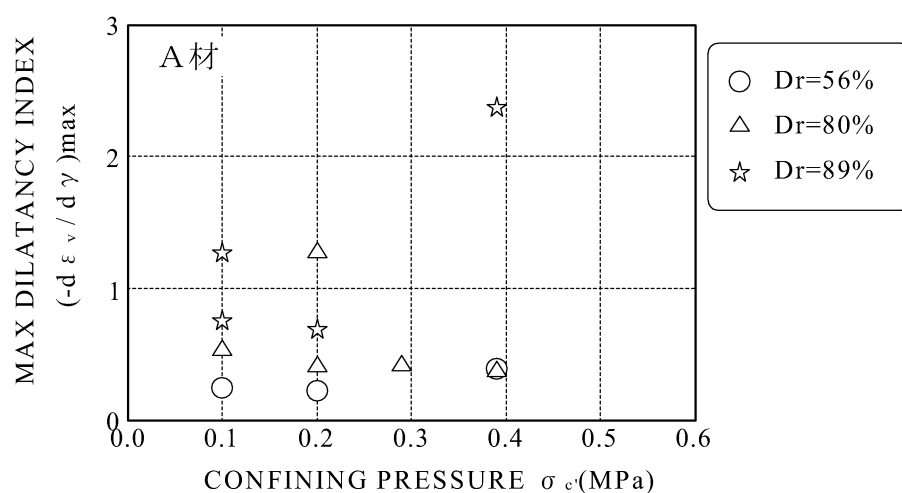


図 4.3.11 最大ダイレイタンスー係数と拘束圧 (A材)

表 4.3.5 最大ダイレイタンシー係数と最大時せん断ひずみ（A材）

σ_c' (MPa)	Dr=56%		Dr=80%		Dr=89%	
	$(-d\varepsilon_v/d\gamma)_{\max}$	$\gamma_{Dl_{\max}}$ (%)	$(-d\varepsilon_v/d\gamma)_{\max}$	$\gamma_{Dl_{\max}}$ (%)	$(-d\varepsilon_v/d\gamma)_{\max}$	$\gamma_{Dl_{\max}}$ (%)
0.1	0.250	10.208	0.503	6.060	0.756 1.270	10.761 12.463
0.2	0.225	12.726	0.408 1.270	5.850 8.409	0.690	7.962
0.29			0.417	9.000		
0.39	0.393	15.511	0.372	9.990	2.370	5.715

2) 円礫材

MDTS 試験によるA材の最大ダイレイタンシー係数と、最大時のせん断ひずみを図 4.3.12 に示す。最大ダイレイタンシー係数と拘束圧の関係を図 4.3.13 に示す。A材の場合と同様に、Dr が大きいほど最大ダイレイタンシー係数が小さい傾向がある。また、A材と比べてダイレイタンシー係数が最大となる時のせん断ひずみが 3～6%に集まり、小さい傾向にある。

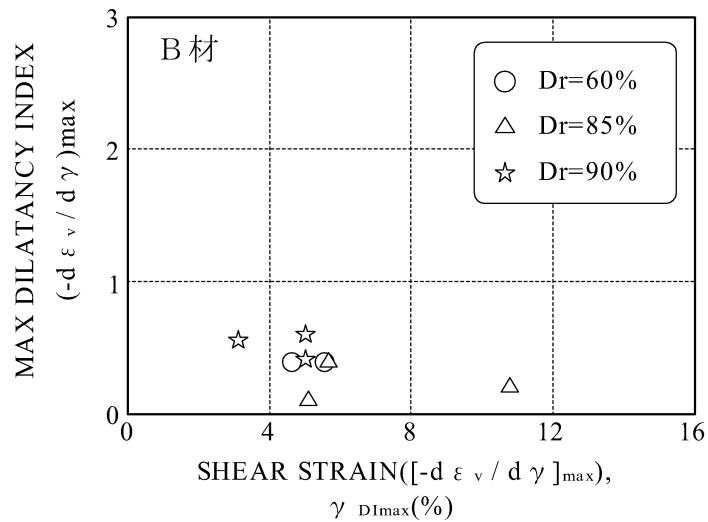


図 4.3.12 最大ダイレイタンシー係数と最大時せん断ひずみ（B材）

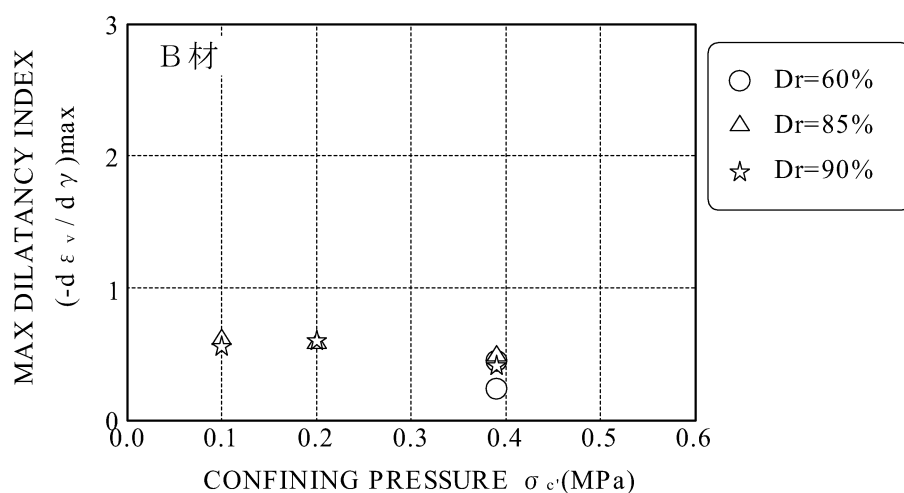


図 4.3.13 最大ダイレイタンス係数と拘束圧（B材）

表 4.3.6 最大ダイレイタンス係数と最大時せん断ひずみ（B材）

$\sigma' c'$ (MPa)	Dr=60%		Dr=85%		Dr=90%	
	$(-d \varepsilon_v / d \gamma)_{\max}$	$\gamma_{Dl_{\max}}$ (%)	$(-d \varepsilon_v / d \gamma)_{\max}$	$\gamma_{Dl_{\max}}$ (%)	$(-d \varepsilon_v / d \gamma)_{\max}$	$\gamma_{Dl_{\max}}$ (%)
0.1			0.611	5.100	2.250	3.104
0.2			0.584	10.788	1.013	5.004
0.29						
0.39	0.238 0.451	5.547 4.635	0.483	5.670	1.688	5.006

4.3.4 内部摩擦角

図 4.3.14 および 4.3.15 に試験結果のモール円を示す。試験によって得られた内部摩擦角と見かけの粘着力を表 4.3.7 に示す。なお、表中の圧密後相対密度とは、供試体の圧密終了後の相対密度の平均値である。

表 4.3.7 試験により得られた c, ϕ

	相対密度 Dr	圧密後 相対密度	$\phi (^{\circ})$	$c(\text{MPa})$
A材	56%	56.2%	46.1	0.61
A材	80%	81.0%	71.4	0.94
A材	89%	88.7%	48.0	1.27
B材	85%	87.2%	72.9	1.13
B材	90%	92.7%	70.4	0.61

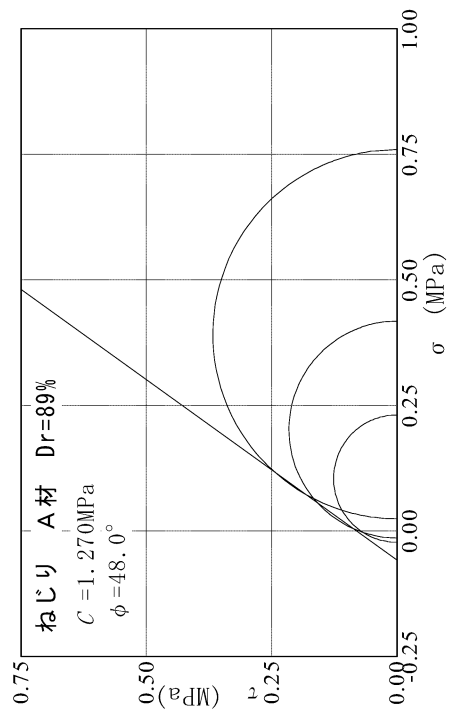
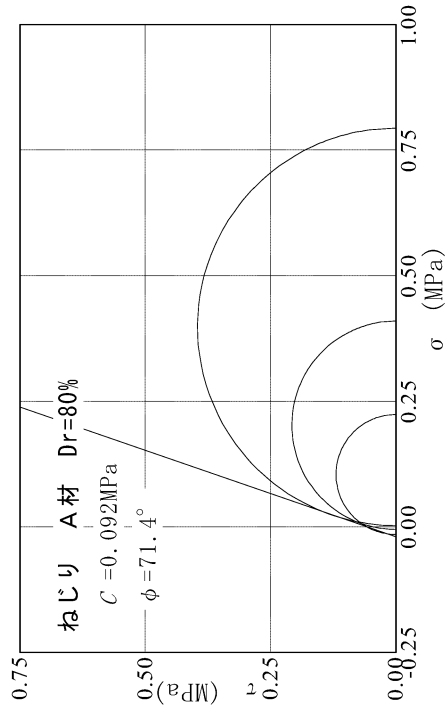
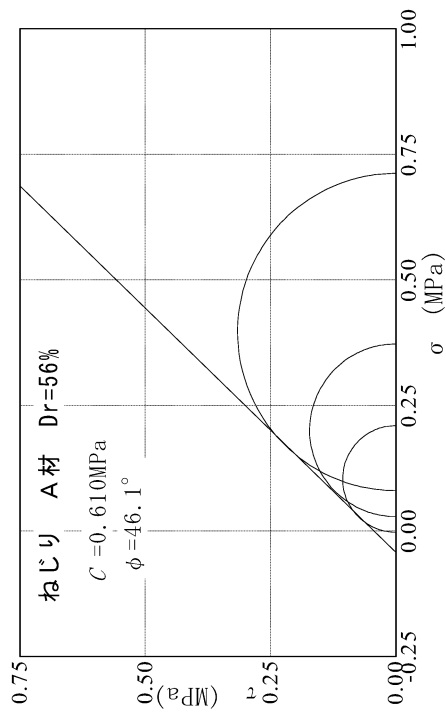


図 4.3.14 モーフル円 MDTs 試験 (A 材)

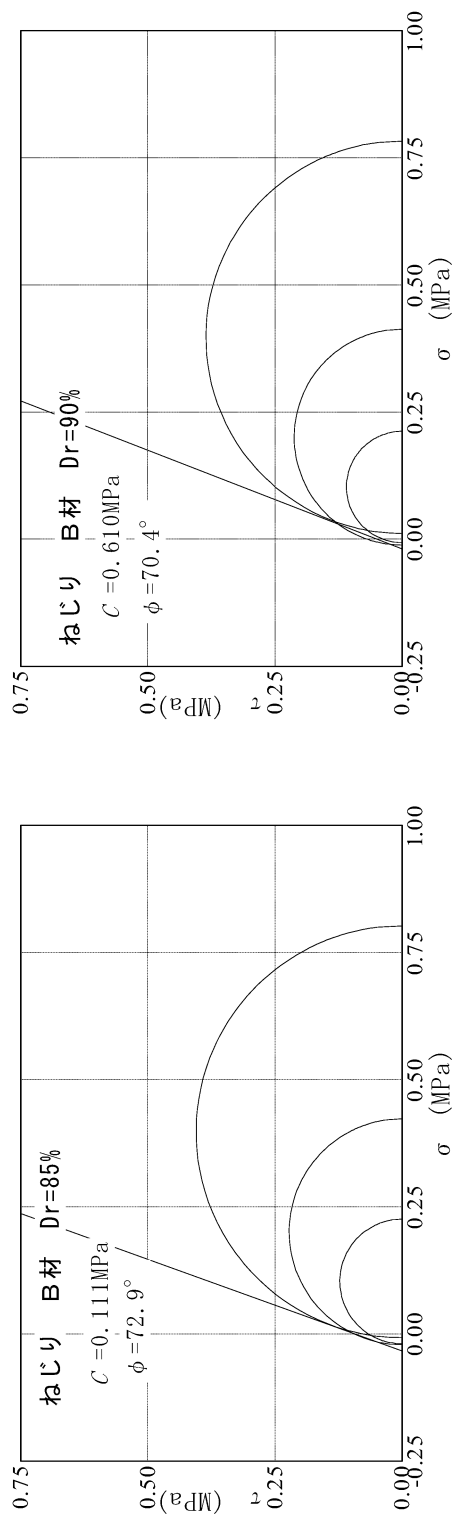


図 4.3.15 モール円 MDTs 試験 (B 材)

4.4 非排水ねじりせん断試験

図 4.4.1 に MUTS 試験結果の諸要素と軸ひずみとの関係の一例を示す。なお、詳細な試験結果は巻末資料に掲載している。

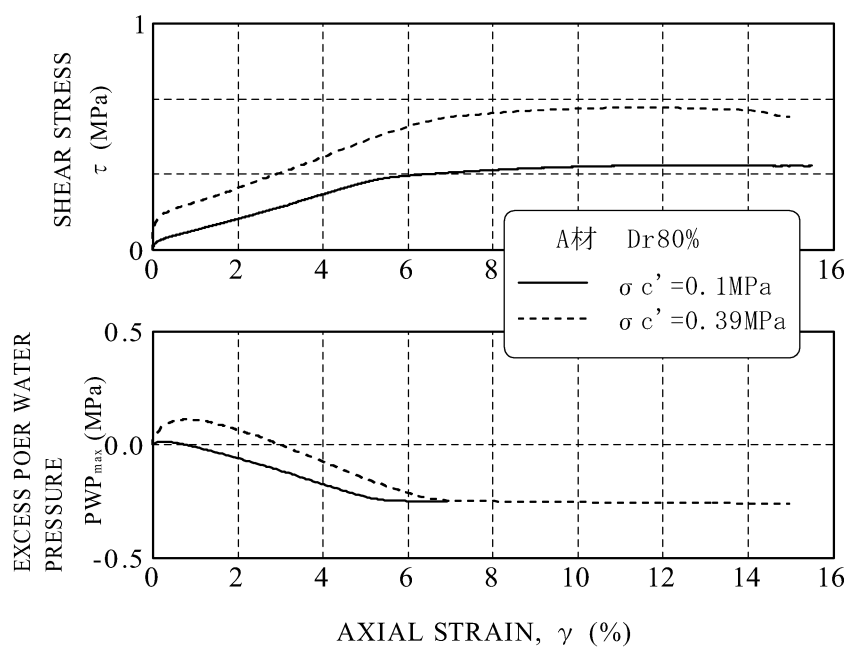


図 4.4.1 静的非排水ねじりせん断試験結果の一例

4.4.1 せん断応力とせん断ひずみ

A材 Dr=80%、B材 Dr=85%の試験結果における最大せん断応力と、最大せん断応力発生時のせん断ひずみの関係を図 4.4.2 に示す。

拘束圧が高いほど最大せん断応力が大きい。また、拘束圧が高いほど、 $\gamma_{\tau_{\max}}$ が小さい傾向がある。また、A材 Dr=80%とB材 Dr=85%の $\tau_{\max}$ は同拘束圧においてほぼ同じ値であった。

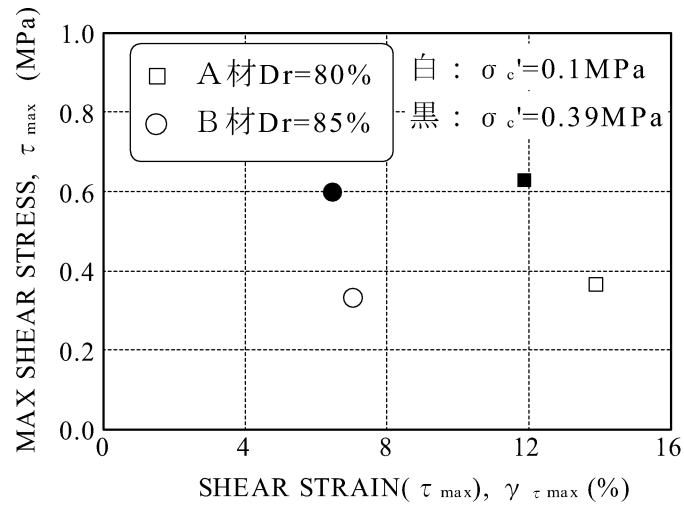


図 4.4.2 最大せん断応力と最大せん断応力発生時せん断ひずみ

4.4.2 過剰間隙水圧

A材 $D_r=80\%$ 、B材 $D_r=85\%$ の試験結果における最大過剰間隙水圧 PWP_{max} と、最大間隙水圧発生時のせん断ひずみ $\gamma_{PWP_{max}}$ の関係を図 4.2.3 に示す。拘束圧が高いほど、最大過剰間隙水圧が大きく、また、 $\gamma_{PWP_{max}}$ も大きい。

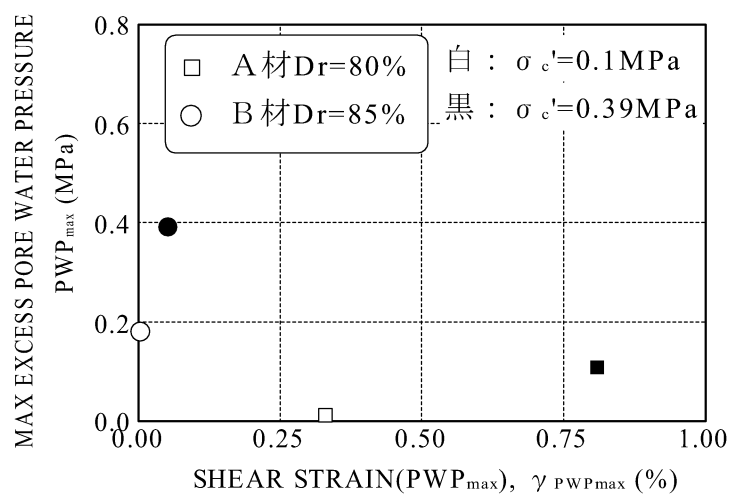


図 4.4.3 最大過剰間隙水圧と最大過剰間隙水圧発生時せん断ひずみ

4.5 排水試験と非排水試験

4.5.1 三軸試験

A材における排水試験と非排水試験の軸差応力と軸ひずみの関係を図 4.5.1 に示す

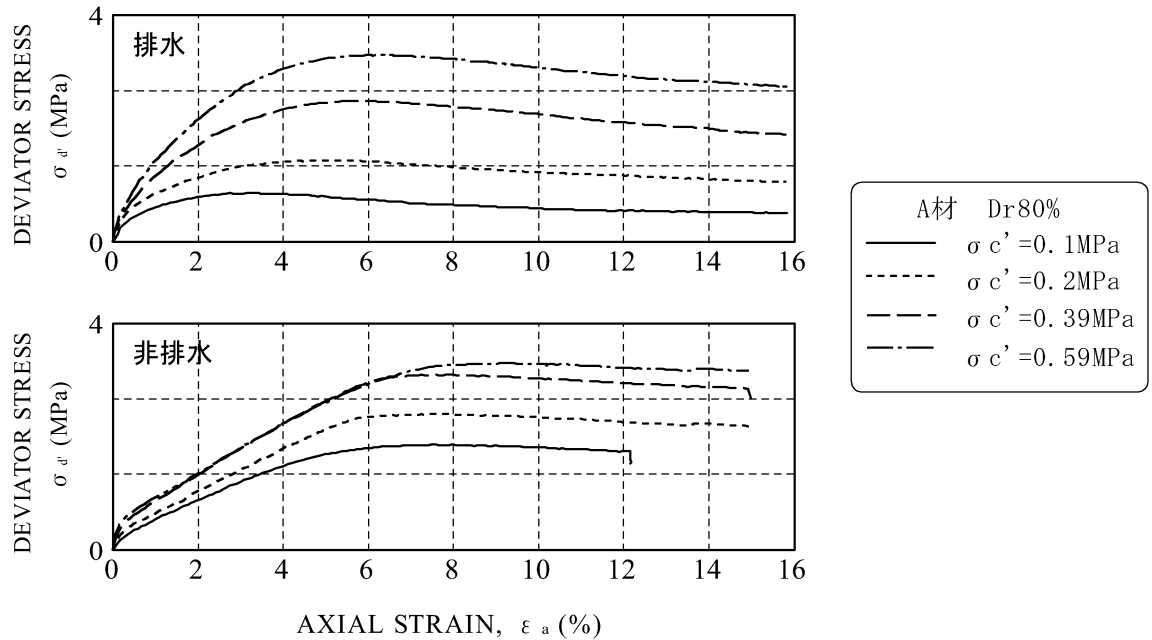


図 4.5.1 排水試験と非排水試験の軸ひずみと軸差応力の関係

排水に比べて、非排水では、最大時の軸ひずみが大きい。低拘束圧では特に最大時の軸差応力
が大きい。非排水は、初期の軸ひずみとせん断応力の関係が比較的直線に近い形である。

1)最大軸差応力

低拘束圧 0.1MPa において、非排水では排水に比べ最大軸差応力が大きい。しかし、拘束圧 0.59MPa
では、最大軸差応力の差は少ない。

2)最大時軸ひずみ

排水に比べ非排水は、最大時軸ひずみが大きく、その差は低拘束圧条件において顕著である。

3)排水試験の体積ひずみと非排水試験の過剰間隙水圧比

図に MUTX 試験による A 材の過剰間隙水圧と軸ひずみ及び MDTX 試験による A 材の体積ひずみと軸ひずみの関係を図 4.5.2 に示す。

同拘束圧で比較すると、過剰間隙水圧のピークは体積収縮ひずみのピークは軸ひずみの小さい領域で生じている。

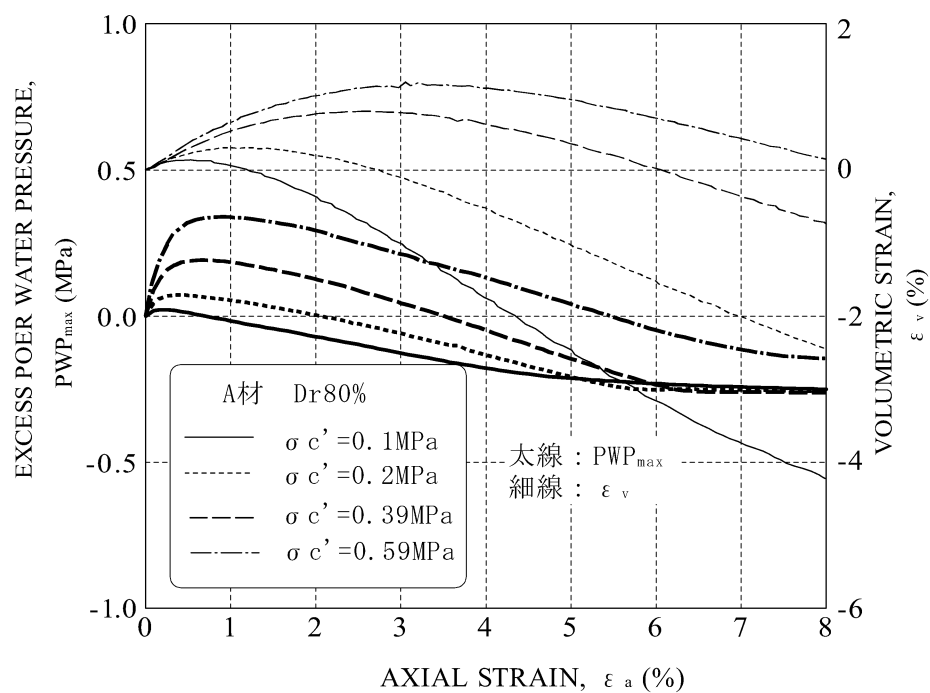


図 4.5.2 MUTX 試験の過剰間隙水圧と MDTX 試験の体積ひずみ

4)内部摩擦角

静的非排水三軸試験の結果のモール円を図 4.5.3、排水試験の結果のモール円を図 4.5.4 に示す。非排水試験では、最大軸差応力時には負の過剰間隙水圧が発生するため拘束圧が上昇している。

排水試験と比べて、粘着力は増えているが、内部摩擦角は低下している。

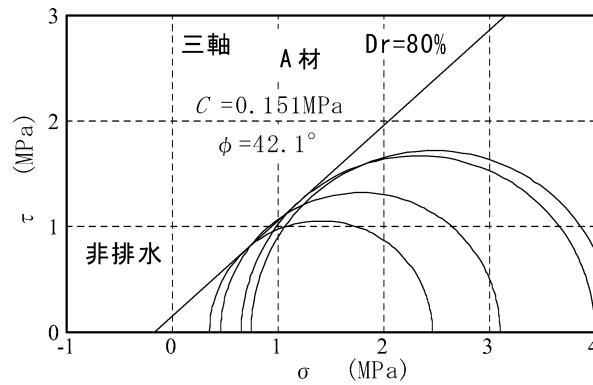


図 4.5.3 MUTX 試験のモール円

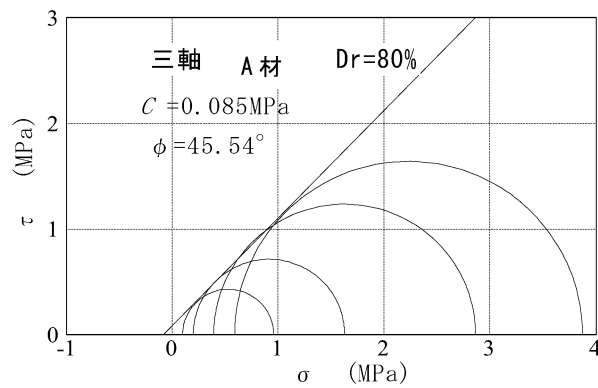


図 4.5.4 MDTX 試験のモール円

4.5.2 ねじりせん断試験

1)せん断応力 A材

A材における排水試験と非排水試験の軸差応力と軸ひずみの関係を図 4.5.5 に示す。

図 4.5.6 に MDTS 試験と MUTS 試験における $\tau_{\max}$ と $\gamma_{\tau_{\max}}$ の関係を示す。MUTS 試験結果の $\tau_{\max}$ と $\gamma_{\tau_{\max}}$ は、MDTS 試験の値より大きい。

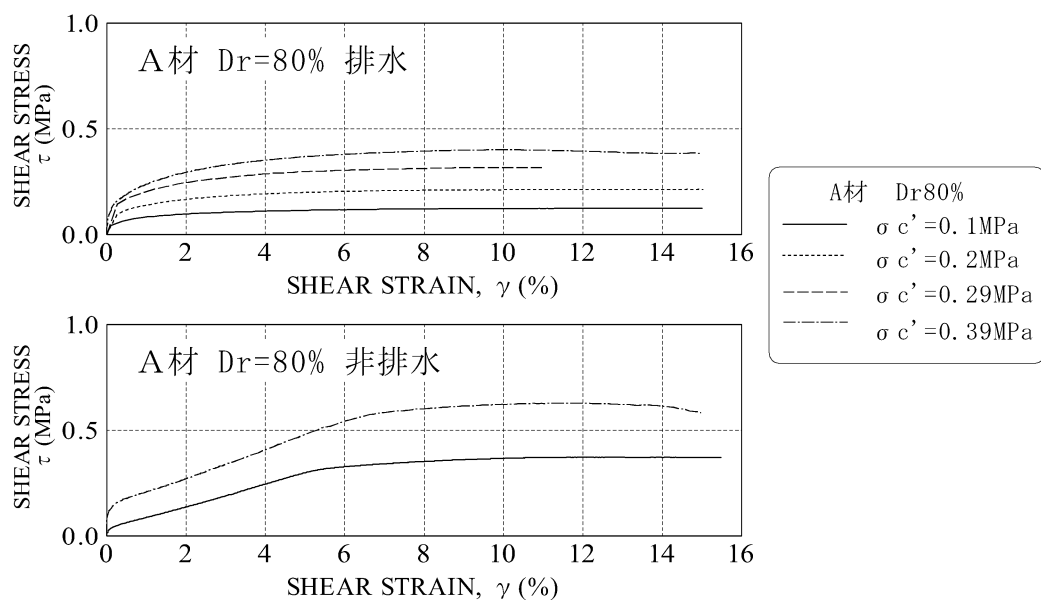


図 4.5.5 MDTS 試験と MUTS 試験のせん断応力とせん断ひずみの関係 A材

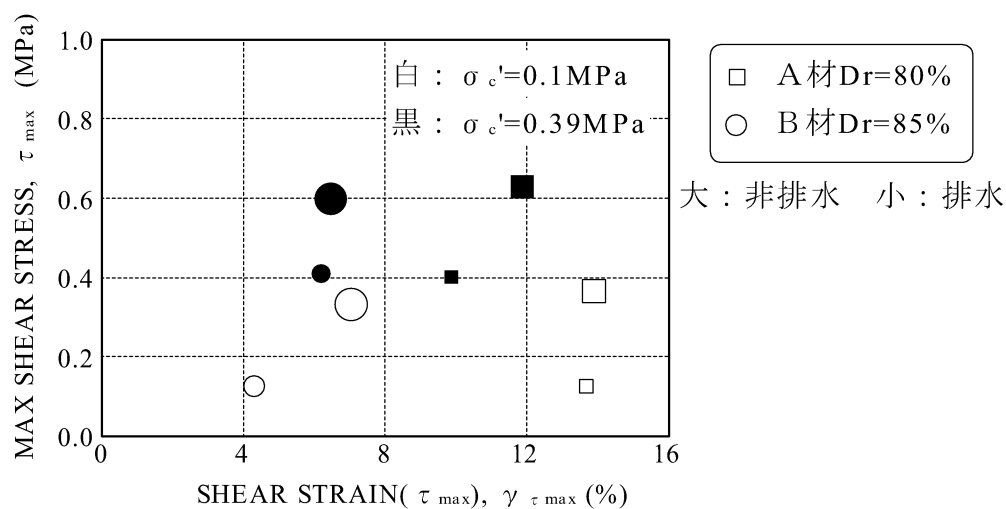


図 4.5.6 MDTS 試験と MUTS 試験のせん断応力とせん断ひずみ

2) 内部摩擦角

MUTS 試験の結果のモール円を図 4.5.7、MDTS 試験の結果のモール円を図 4.5.8 に示す。非排水試験では、最大軸差応力時には負の過剰間隙水圧が発生しているため有効拘束圧が上昇している。

MUTS 試験の結果は MDTS 試験の結果と比べ、内部摩擦角は低下している。

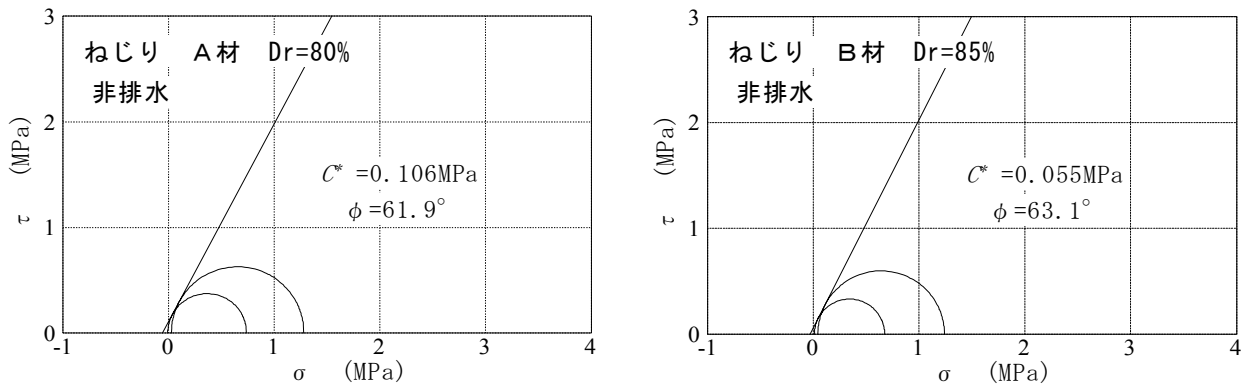


図 4.5.7 MUTS 試験のモール円

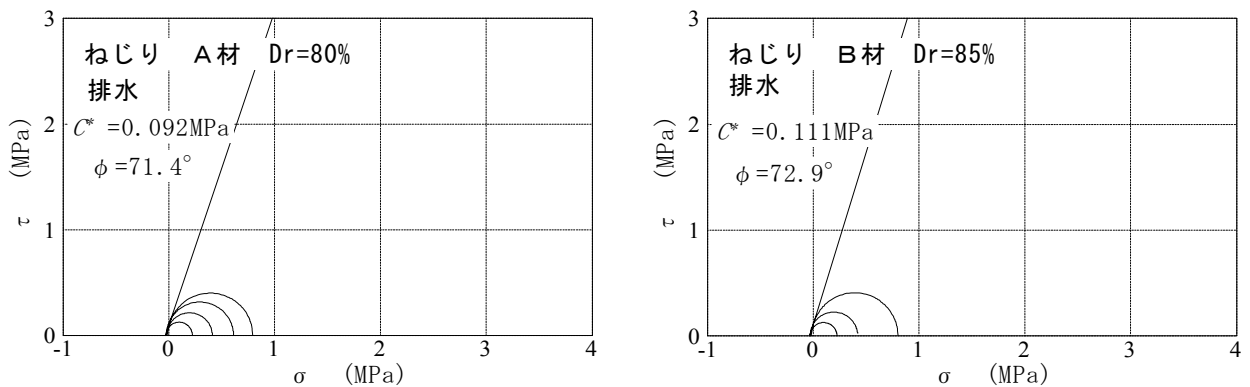


図 4.5.8 MDTS 試験のモール円

4.6 三軸試験とねじりせん断試験

4.6.1 内部摩擦角

MDTX 試験および MDTS 試験にて得られた内部摩擦角 ϕ と相対密度の関係を図に示す。MDTS 試験の ϕ は MDTX 試験の ϕ と比べると非常に大きい傾向がある。MDTS 試験では、MDTX 試験にくらべ破壊時応力 σ_f が非常に低い範囲の試験であることも影響したものと考えられる。

図 4.6.2 に A 材、B 材の MDTX 試験と MDTS 試験での破壊崩落線を比較したものを示す。

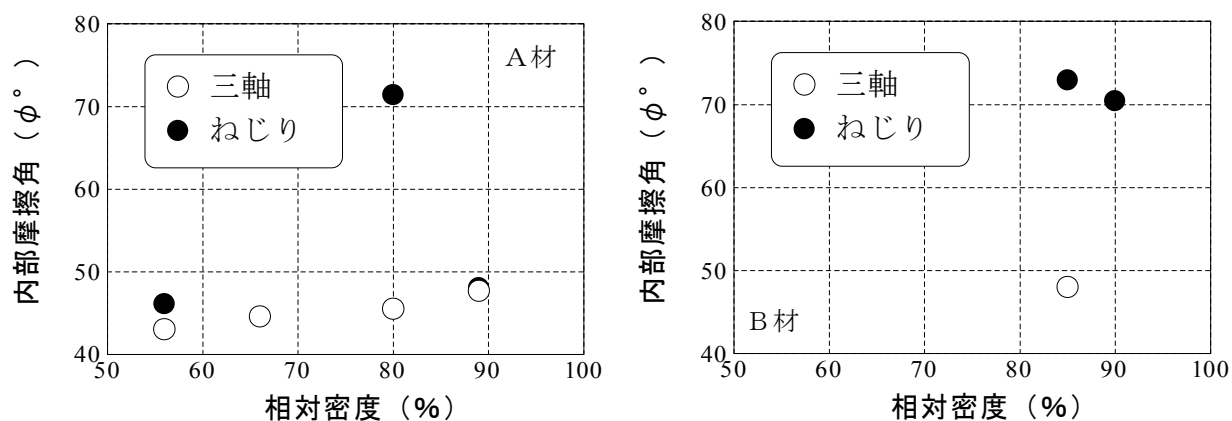


図 4.6.1 MDTX 試験と MDTS 試験での内部摩擦角と相対密度軸差応力の関係

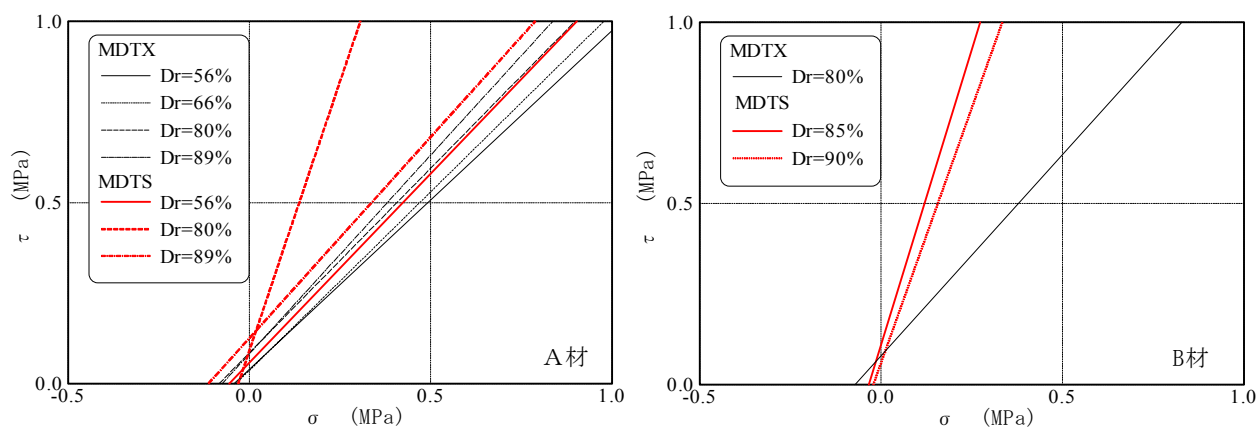


図 4.6.2 MDTX 試験と MDTS 試験による破壊崩落線の比較

5 繰返し非排水試験結果

5.1 繰返し非排水三軸試験

5.1.1 時刻歴結果

CUTX 試験結果の時刻歴の一例として、A材の密詰め ($Dr=80\%$) 供試体 (図 5.1.1) およびゆる詰め ($Dr=56\%$) 供試体 (図 5.1.2) の試験結果によるものを示す。

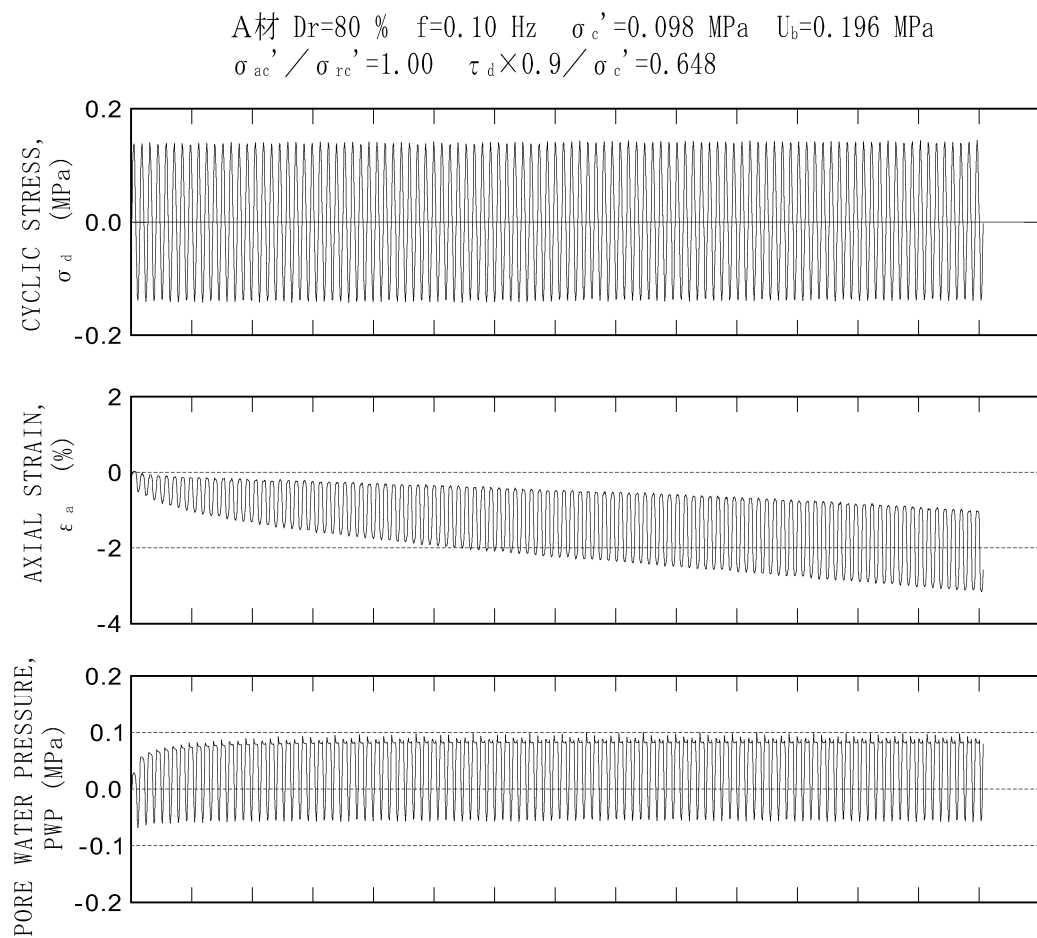


図 5.1.1 CUTX 試験時刻歴の一例 (A材 密詰め $Dr=80\%$)

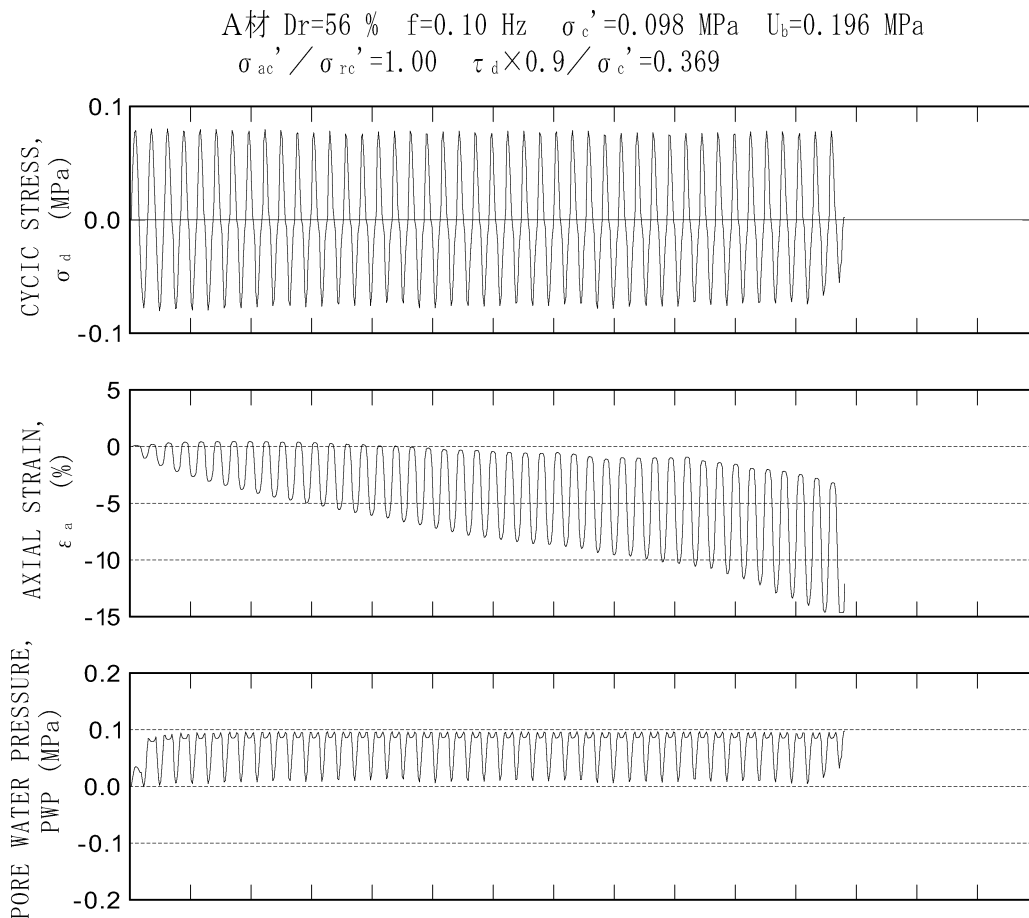


図 5.1.2 CUTX 試験時刻歴の一例 (A材ゆる詰め Dr=56%)

1) 軸差応力時刻歴

一定振幅の正弦波を応力制御で負荷している。

2) 軸ひずみ時刻歴

载荷が進むにつれ軸ひずみ振幅が大きくなるが、ゆるい砂の液状化試験のように、ある回数から急激にひずみが大きくなるようなことはない。圧伸張側にひずんでおり、伸張側の絶対値の最大は繰り返し载荷がすすむにつれ大きくなっている。ゆる詰め粗粒材料では、繰り返し载荷初期ではひずみが圧縮側に達しているが、密詰め粗粒材料では、载荷初期回数から、ひずみは圧縮側にはいかず、伸張側にのびている。

3) 過剰間隙水圧時刻歴

密詰めでは、過剰間隙水圧は1波毎に正と負の値をとり、負の間隙水圧が作用している。ゆる詰めでは、負の過剰間隙水圧が作用している。1波毎の正の最大値は、初期回数で急激に大きくなり、一定になる。ゆる詰めでは、過剰間隙水圧が拘束圧と同値まで達するが、密詰めでは载荷回数が増えても拘束圧と同値には達しない。ゆる詰めでは、間隙水圧が上昇してほぼ一定になるのが、密詰めのものとは傾向にある。

5.1.2 繰返し軸差応力－軸ひずみ関係

繰返し応力 σ_d と軸ひずみ ε_a の関係の 1 例を図 5.1.3 に示す。+の σ_d では、圧縮側にひずみ、－の σ_d では、引張側に伸長している。

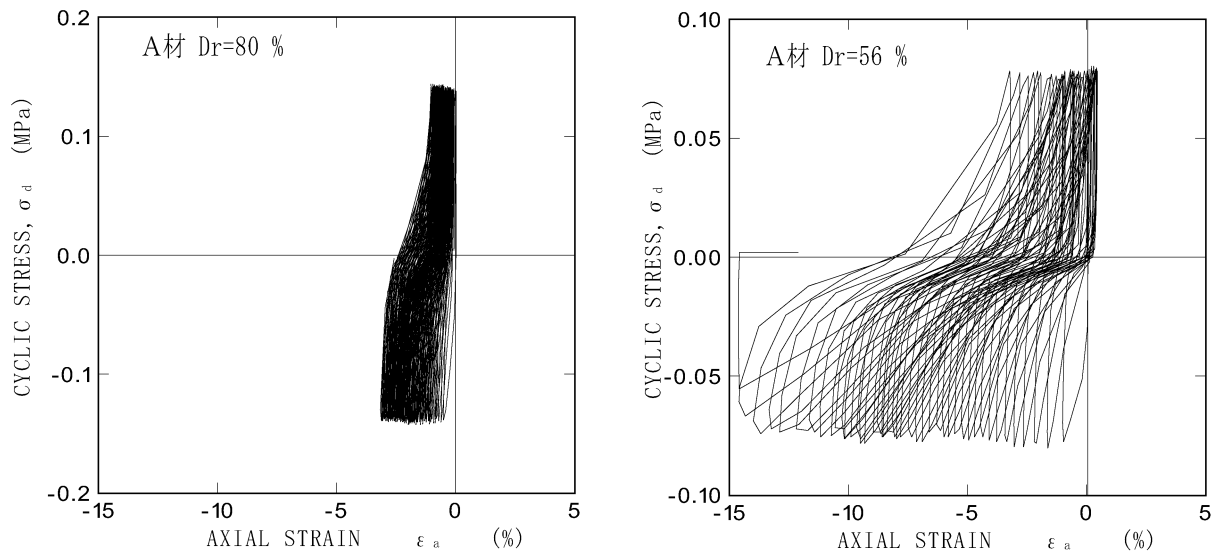


図 5.1.3 繰返し応力と軸ひずみの関係

5.1.3 ストレスパス

密詰め供試体およびゆる詰め供試体を用いた試験の 1 例における繰返し応力 σ_d と平均有効主応力 σ_m' の関係（ストレスパス）を図 5.1.4 に示す。

繰返し载荷が進むに従い、繰返し载荷により過剰間隙水圧 PWP が上昇することにより σ_m' が低下している。

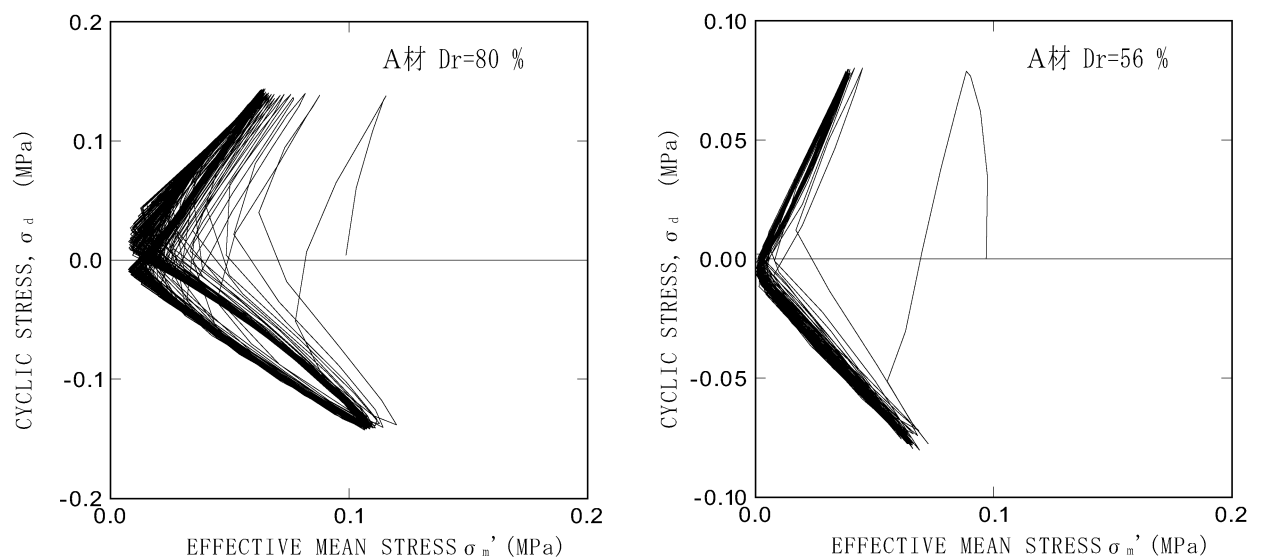


図 5.1.4 ストレスパス

また、サイクリックモビリティが出現している。引張り時には伸張に伴う **PWP** の低下が生じ、圧縮時にはダイレイションに伴う **PWP** の低下が生じるためである。

密な粗粒材料で、繰返し載荷しても σ_m' の最小値は、0 まで低下することはない。密な場合は、繰返し荷重を受けて σ_c' を支えうる供試体の骨格がある程度保たれることがわかる。一方、ゆる詰め供試体では、繰返し載荷により σ_m' は 0 まで低下している。

5.1.4 繰返し载荷回数による整理結果

1) 片振幅軸ひずみと载荷回数

载荷回数 N と片振幅軸ひずみ ε_{sa} の関係を、繰返し応力比をパラメータとして比較したものを図 5.1.5、相対密度 Dr をパラメータとして比較したものを図 5.1.6 に表す。 ε_{sa} は、 N が増すにつれ大きくなっているが、同载荷回数において、繰返し応力比が大きいほど ε_{sa} が大きく、相対密度が大きい方が ε_{sa} は小さい。

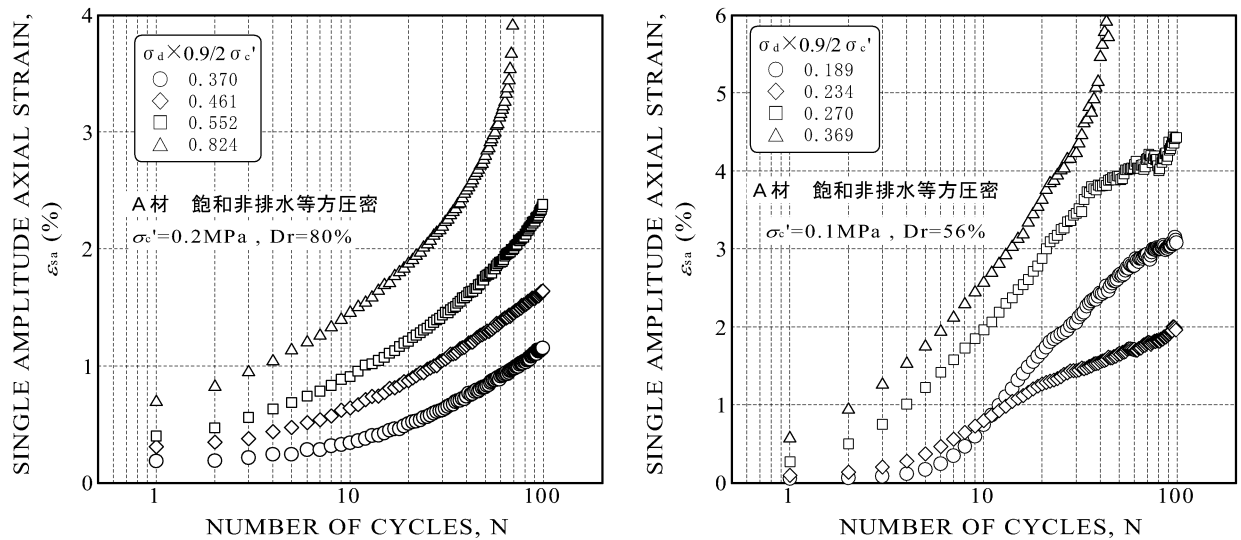


図 5.1.5 片振幅軸ひずみと载荷回数（繰返し応力比で比較）

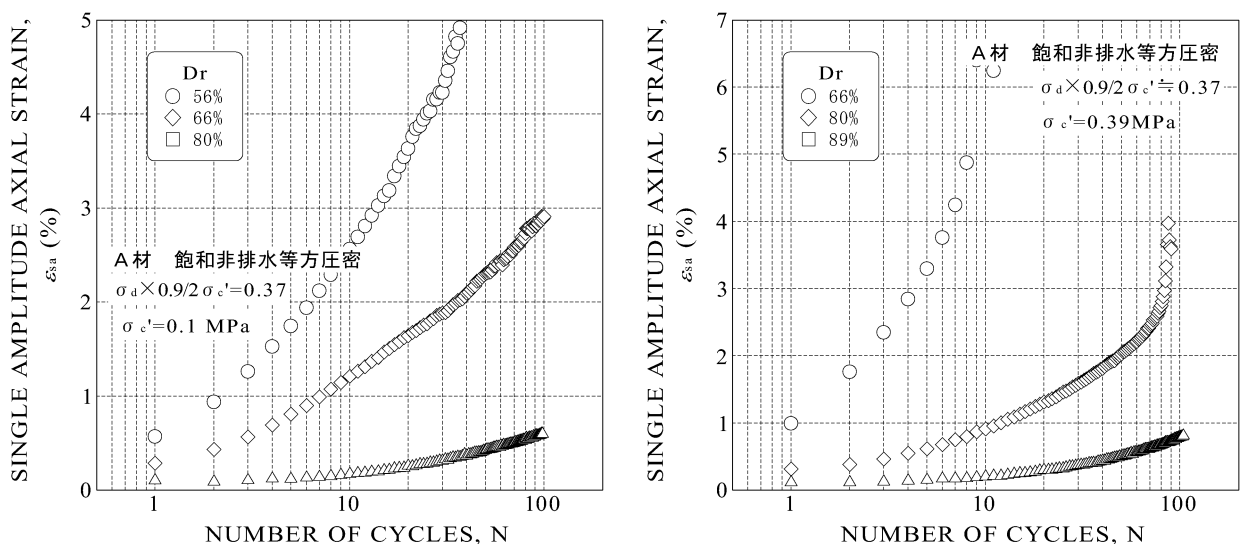


図 5.1.6 片振幅軸ひずみと载荷回数（相対密度で比較）

2) 最大過剰間隙水圧と載荷回数

載荷回数 N と各回数毎の過剰間隙水圧比ピーク値 $PWP_{\max}/\sigma_c'$ の関係を、繰返し応力比をパラメータとして比較したものを図 5.1.7 に、相対密度をパラメータとして比較したものを図 5.1.8 に表す。 $PWP_{\max}/\sigma_c'$ は、 N が増すにつれ大きくなり、 $PWP_{\max}/\sigma_c'=1$ に漸近していく。繰返し応力比が大きい方が、 $PWP_{\max}/\sigma_c'$ の上昇が早い。また、相対密度の小さいほうが $PWP_{\max}/\sigma_c'$ の上昇がはやい。Dr がおおきいほど $PWP_{\max}/\sigma_c'$ の漸近線は 1 に達しない。

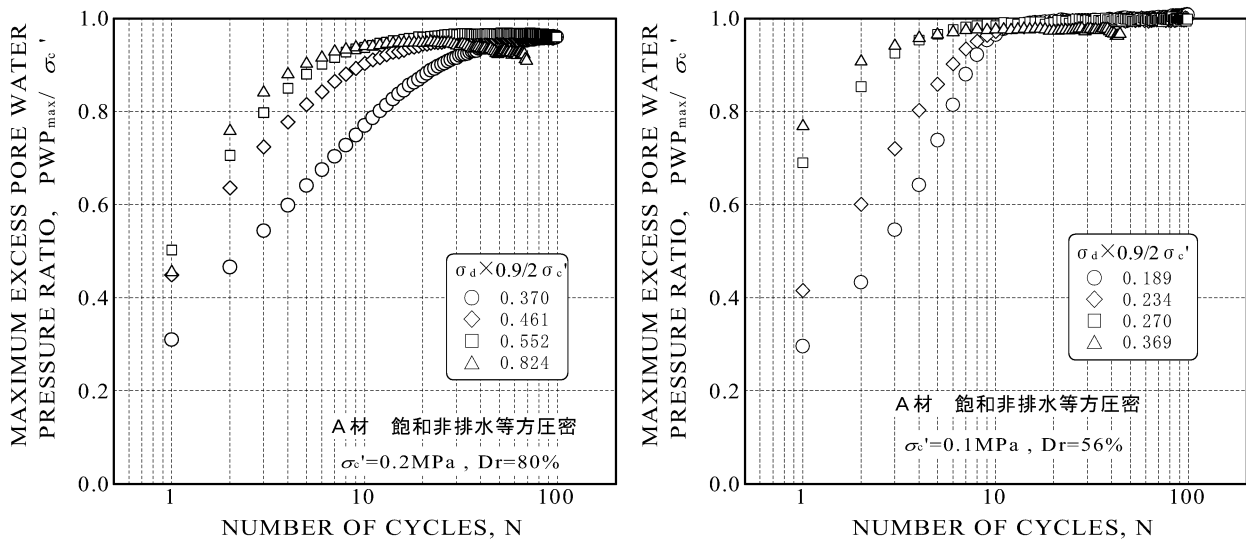


図 5.1.7 過剰間隙水圧比と載荷回数（繰返し応力比で比較 A材）

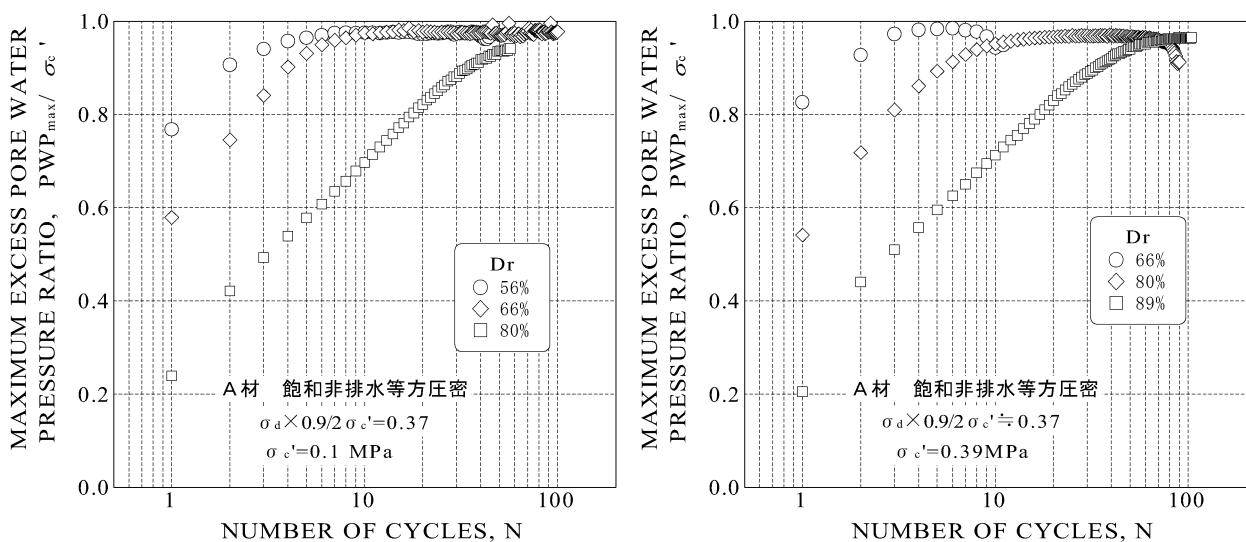


図 5.1.8 過剰間隙水圧比と載荷回数（相対密度で比較 A材）

3) 繰返し応力比と各ひずみにおける載荷回数

各繰返し応力比載荷時でのある片振幅軸ひずみ ε_{sa} 発生時の載荷回数 N の 1 例を図 5.1.9 に示す。繰返し応力比が大きいほど、少ない N で同じ ε_{sa} が発生する。

例えば、0.5%ひずみ時の値を近似線で結んだ線と $N=10$ の交点の繰返し応力比が 10 回の繰返し載荷で 0.5%の ε_{sa} を生じさせる繰返し応力比 $SR_{10}(\varepsilon_{sa}=0.5\%)$ で表し、動的せん断強度とする。

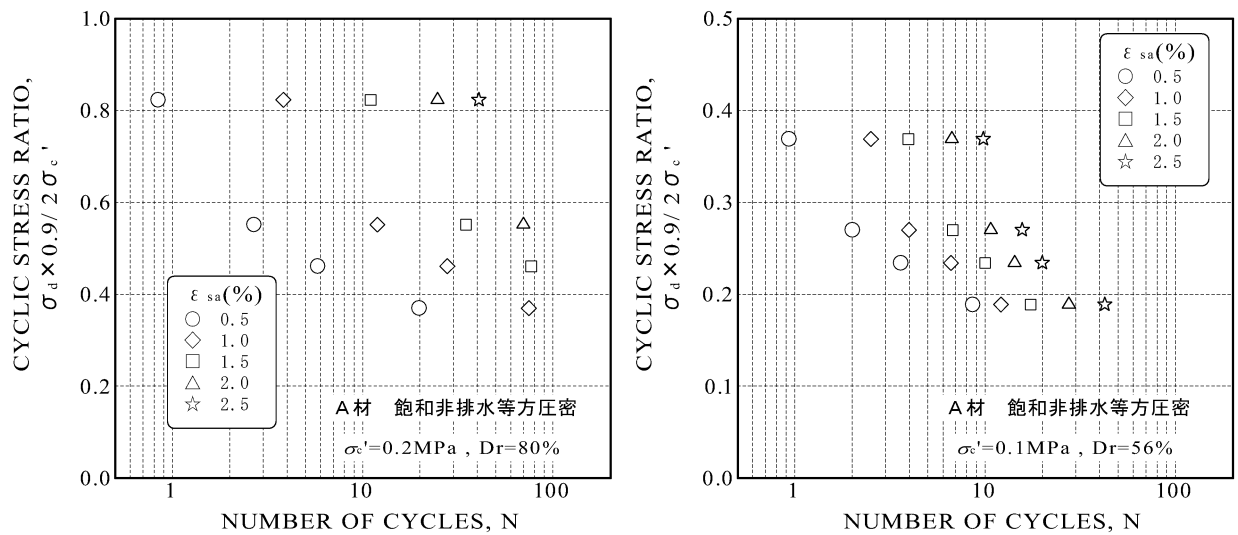


図 5.1.9 繰返し応力比と所定のひずみが生じた載荷回数

5.1.5 密な豊浦砂との比較

豊浦砂を供試体に用いた繰返し非排水三軸試験結果でのストレスパスおよび応力-ひずみの関係を図 5.1.10 に示す。豊浦砂では、密詰め ($Dr=90\%$) 供試体においても有効応力 σ_m' が 0 まで低下する。

砂と粗粒材料の違いは、粒径や粒形の違いであるため、有効応力の低下に粒径や粒形の違いが影響を及ぼしたと考えられる。有効応力 σ_m' の低下すなわち過剰間隙水圧 PWP の発生は、初期には供試体骨格が支えていた拘束圧が、繰返し载荷にともなう供試体の粒子骨格構成の変化に伴い、供試体内部水に伝わることによってもたらされることが考えられる。ゆる詰めの状態では間隙が多いため、砂も粗粒材料も粒子移動が起こりやすく供試体骨格が保てなくなることが有効応力を 0 まで低下させ、密詰めの場合は、粗粒材料は粒子同士のかみ合わせ等の影響で拘束圧を受け持つ供試体骨格が有る程度保たれ有効応力が 0 まで低下しないのに対し、砂は粒径が小さく粒子移動が比較的起こりやすく有効応力が 0 まで低下すると考えられる。

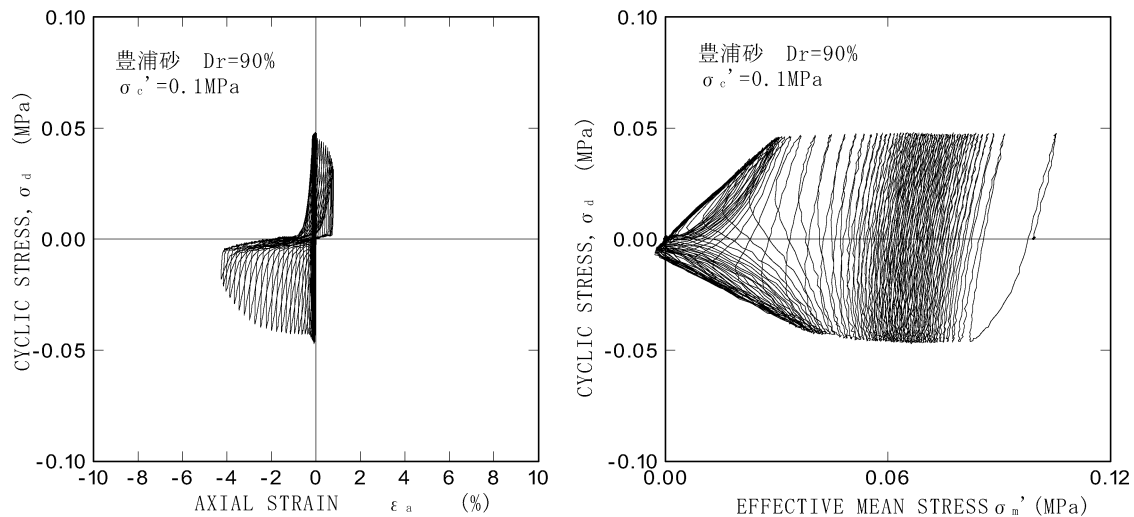


図 5.1.10 密な砂の CUTX 試験結果

5.2 繰返し非排水ねじりせん断試験（CUTS 試験）

5.2.1 時刻歴結果

A材の密詰め（Dr=89%）供試体とゆる詰め（Dr=66%）供試体の CUTS 試験結果の時刻歴の一例をそれぞれ図 5.2.1 および 5.2.2 に示す。なお各試験ケースの詳細は巻末資料に掲載する。

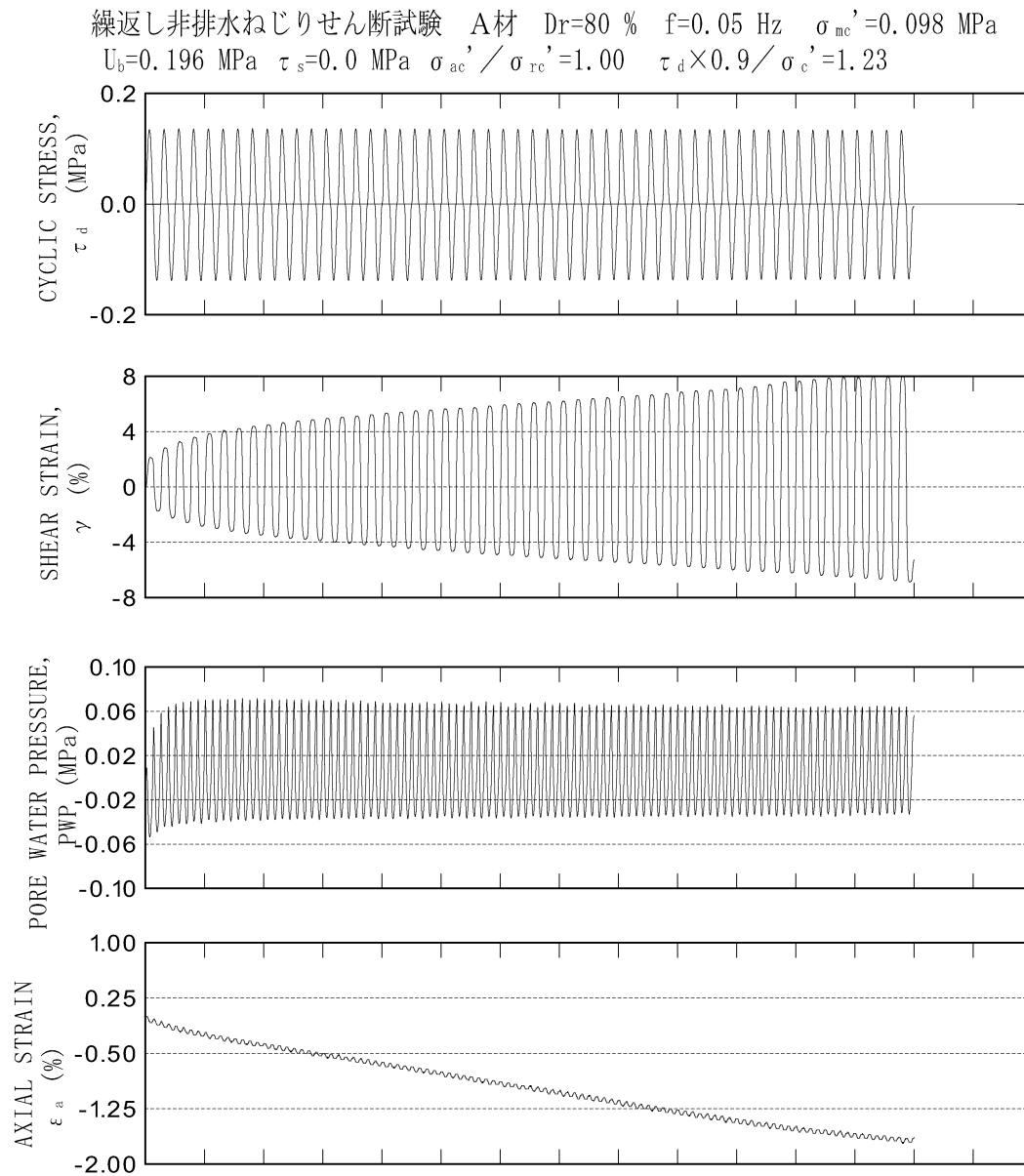


図 5.2.1 CUTS 試験時刻歴の一例（A材 密詰め Dr=80%）

繰返し非排水ねじりせん断試験 A材 Dr=56 % f=0.05 Hz

$\sigma_c' = 0.096$ MPa $U_b = 0.196$ MPa $\tau_s = 0.0$ MPa $\sigma_{ac}' / \sigma_{rc}' = 1.00$ $\tau_d \times 0.9 / \sigma_c' = 0.45$

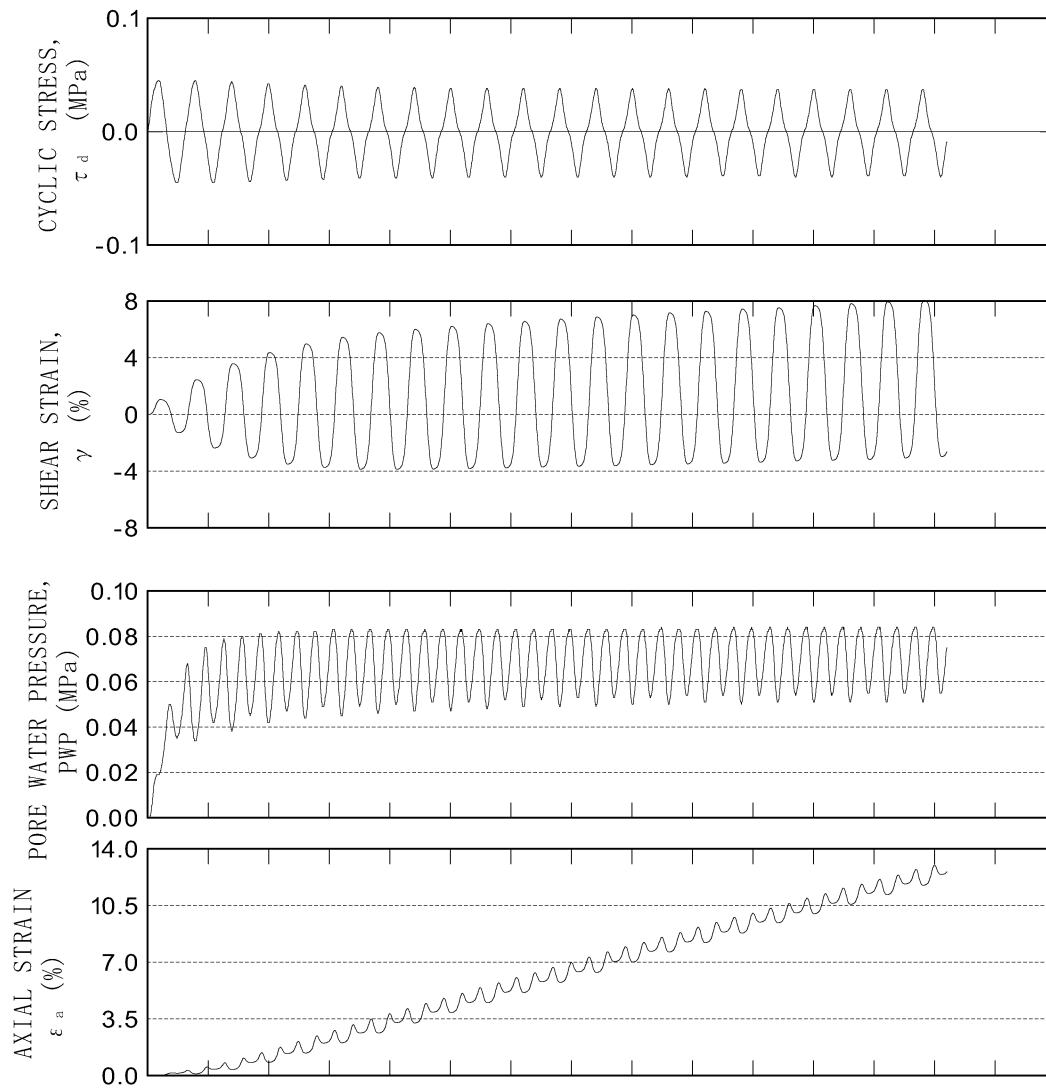


図 5.2.2 CTS 試験時刻歴の一例 (A材 ゆる詰め Dr=56%)

1) せん断応力

正弦波で繰返し载荷がされており、せん断応力 τ_d の振幅はほぼ一定である

2) せん断ひずみ

载荷が進むにつれせん断ひずみ γ の振幅が大きくなっている。最初にトルクを負荷した方向（+側）のせん断ひずみ振幅のひずみ量と一側のひずみ量は同一ではなく、+側にやや多くひずんでいる。

3) 軸ひずみ

この例では载荷が進むにつれ-の軸ひずみ ε_a が現れているが、なかには+の ε_a が現れたケースもあった。

4) 過剰間隙水圧

過剰間隙水圧 **PWP** は1波毎の+側の最大値は、初期は载荷が進むにつれ大きくなっているが、载荷がさらに進むと1波毎の最大値はほぼ一定となる。その最大値は密詰めでは、**PWP** が σ_c' まで上昇しない。

5.2.2 繰返しせん断応力-せん断ひずみ関係

図 5.2.3 にせん断応力 τ_d とせん断ひずみ γ の時刻歴の一例を示す。 τ_d が+側と-側で同値に载荷しているにもかかわらず、 γ は片側の振幅が増大する傾向がみられた。

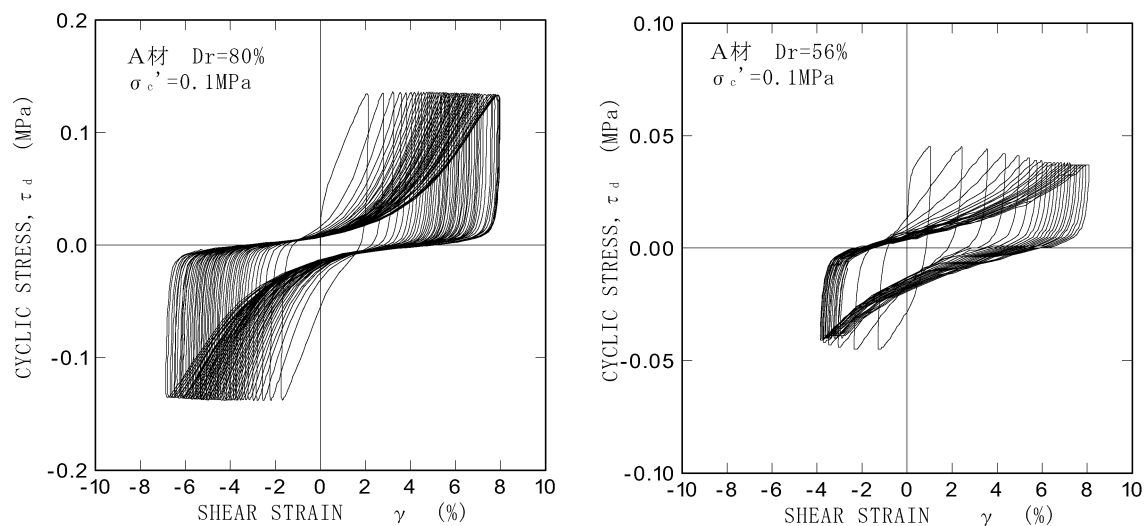


図 5.2.3 繰返し応力とせん断ひずみ時刻歴

5.2.3 ストレスパス

有効主応力 σ_m' とせん断応力 τ_d の関係の一例を図 5.2.4 に示す。

繰返し载荷が進むに従い、 σ_m' が低下している。これは、CUTX 試験同様に繰返し载荷により拘束圧を支えていた供試体の材料構成が変形し、供試体内部の間隙水でも拘束圧を支えるようになり、過剰間隙水圧が上昇することによると推測される。

さらに、サイクリックモビリティ状態になっている。

CUTX 試験同様、密詰め時の σ_m' は 0 まで低下せず、ある程度低下するとそれ以上低下せず、また、ゆる詰めでは σ_m' は 0 まで低下している。

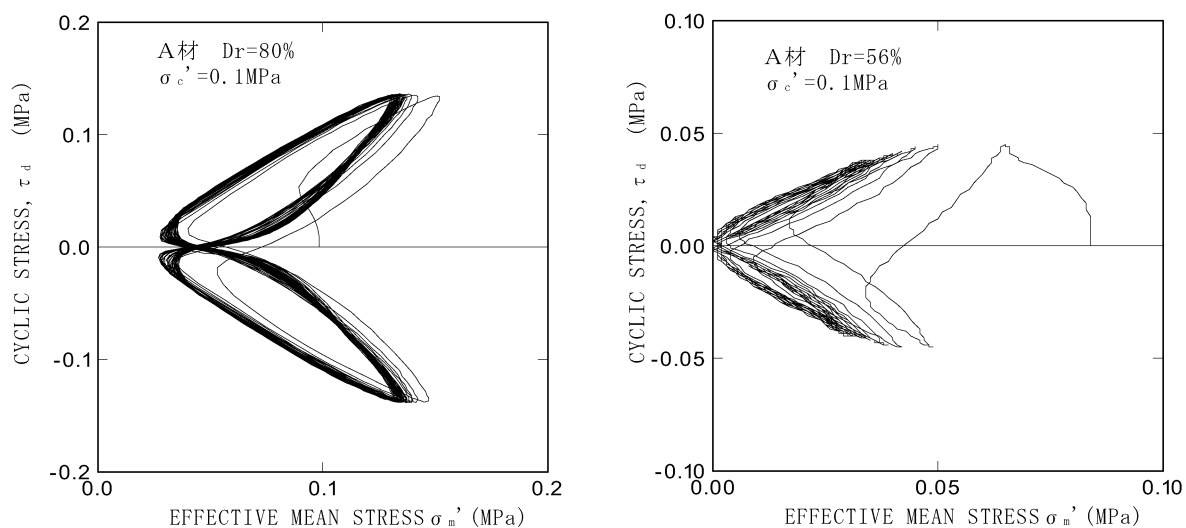


図 5.2.4 ストレスパス

5.2.4 繰返し载荷回数による整理結果

1) 载荷回数と片振幅せん断ひずみ

载荷回数 N と片振幅せん断ひずみ γ_{sa} の関係をせん断応力比で比較したものを図 5.2.5、相対密度で比較したものを図 5.2.6 に表す。また、同载荷回数においてせん断応力比が大きいほど γ_{sa} が大きく、相対密度が大きいほど、 γ_{sa} は小さい傾向にある。

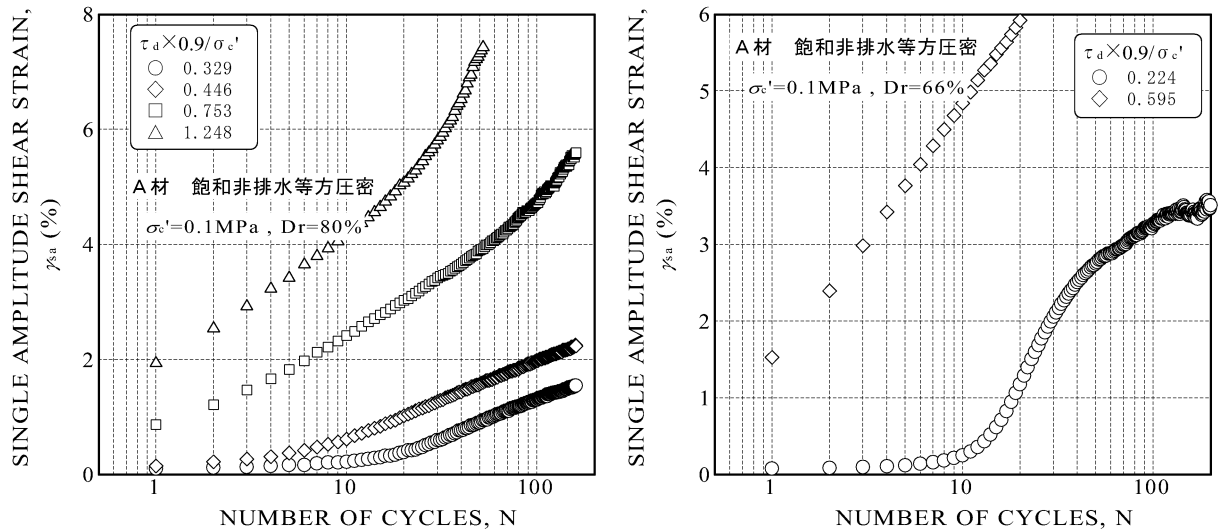


図 5.2.5 片振幅せん断ひずみと载荷回数（せん断応力比で比較）

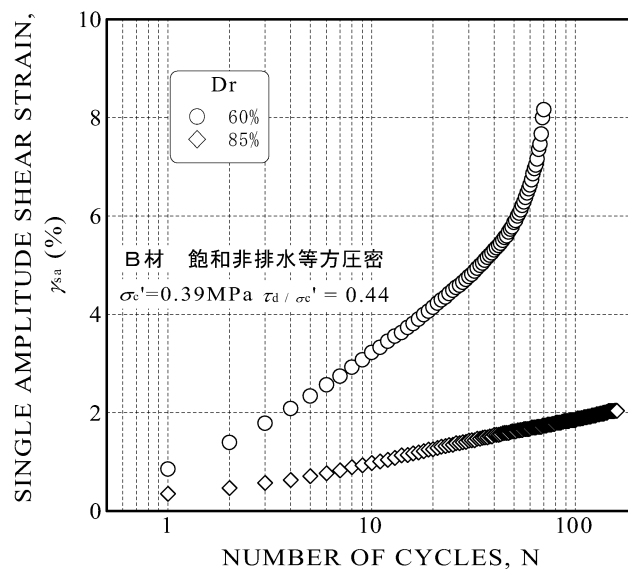


図 5.2.6 片振幅せん断ひずみと载荷回数（相対密度で比較）

2) 載荷回数と最大過剰間隙水圧比

載荷回数 N と過剰間隙水圧比 $PWP_{\max}/\sigma'_c$ の関係を、A材についてのせん断応力比で比較したものを図 5.2.7 に示す。また、B材についての相対密度 Dr で比較したものを図 5.2.8 に表す。 N が増すにつれて $PWP_{\max}/\sigma'_c$ は大きくなるが、 σ'_c が 0.1MPa と小さく、相対密度 Dr が 66%程度に小さいときは $PWP_{\max}/\sigma'_c$ は 1 にまで上昇するが、 Dr が 80%程度に密詰めるときは、 $PWP_{\max}/\sigma'_c$ は 1 にまで達しない。せん断応力が大きい方が $PWP_{\max}/\sigma'_c$ の上昇がはやく、また Dr が小さい方が、 $PWP_{\max}/\sigma'_c$ の上昇がはやい。

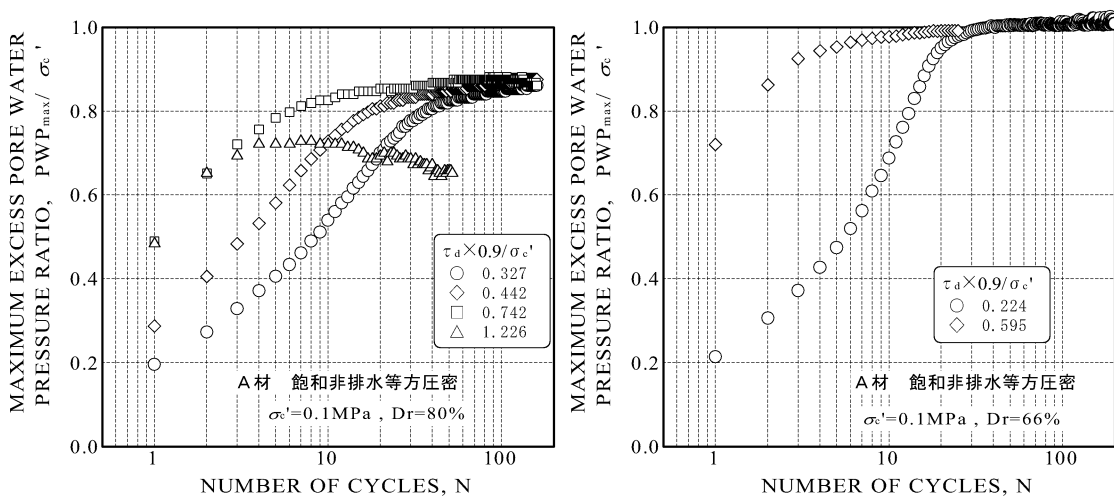


図 5.2.7 最大過剰間隙水圧比と載荷回数（せん断応力比で比較）

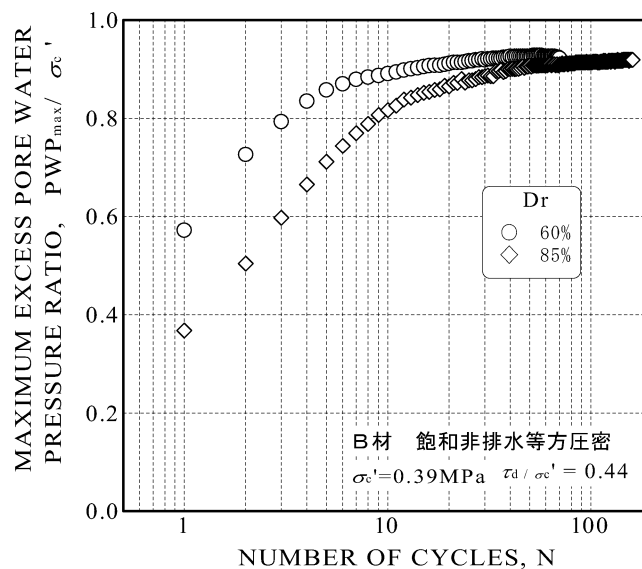


図 5.2.8 最大過剰間隙水圧比と載荷回数（相対密度で比較）

3) せん断応力比と各ひずみにおける載荷回数

各せん断応力比載荷時でのある片振幅軸ひずみ γ_{sa} 発生時の載荷回数 N の一例を図 5.2.9 に示す。

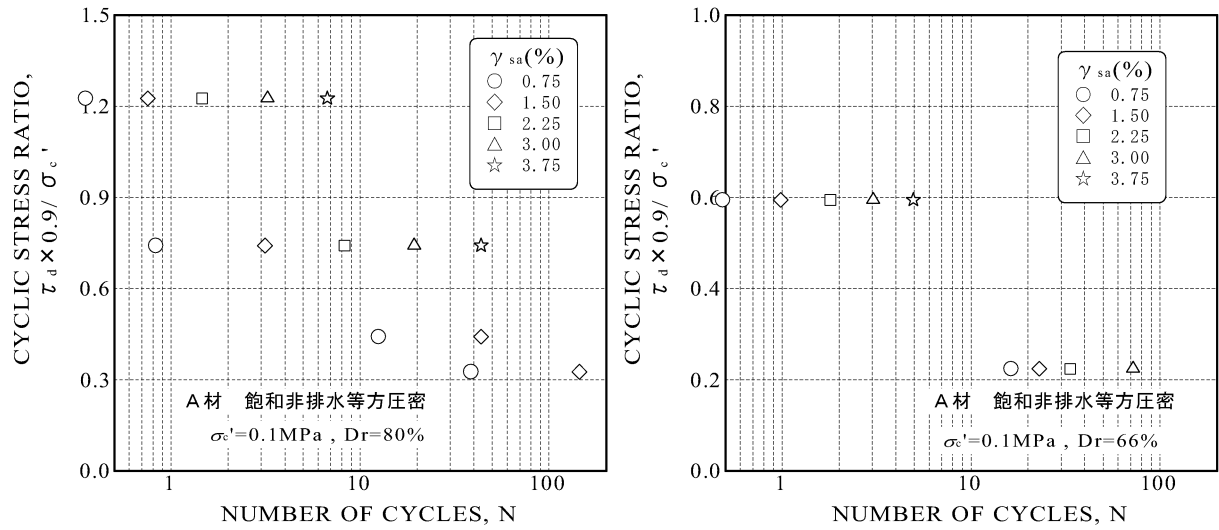


図 5.2.9 せん断応力比と所定のひずみが生じた載荷回数

5.2.5 密な豊浦砂との比較

豊浦砂を供試体に用いた繰返し非排水ねじりせん断試験結果でのストレスパスおよび応力-ひずみの関係を図 5.2.10 に示す。CUTX 試験と同様に、粗粒材料とは異なり、豊浦砂では密詰め ($Dr=85\%$) 供試体においても有効応力 σ_m' が 0 まで低下する。

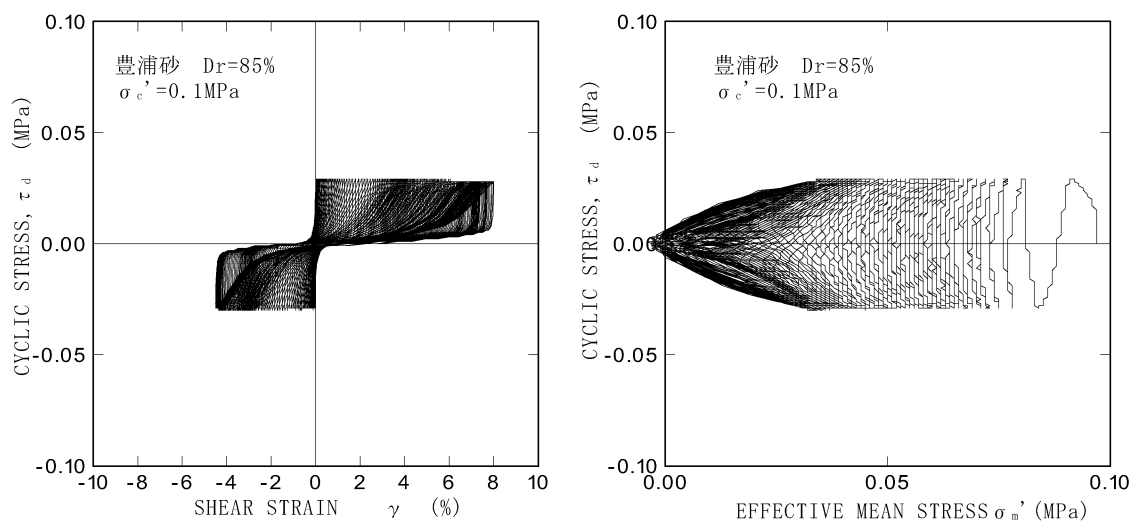


図 5.2.10 密な砂の CUTS 試験結果

5.3 過剰間隙水圧比に及ぼす影響因子 (岩下ら, 1997)

5.3.1 繰返し载荷回数

図 5.3.1 は、CUTX 試験による A 材、B 材の粗粒材料および砂の過剰間隙水圧比 $PWP/\sigma'c'$ の上昇過程を示す。縦軸の過剰間隙水圧比は、繰返し载荷 1 波毎の過剰間隙水圧 PWP を拘束圧 $\sigma'c'$ で割ったものである。横軸は繰返し载荷波数 N と両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ を発生させるのに必要な繰返し载荷波数 NL の比 N/NL である。図中の①～④は、ゆる詰め A 材のケースと密詰めの A,B 材のケースを示し、⑤,⑥は密詰めの宮城砂のケース (今井ら, 1979) を示す。⑦～⑬は、ゆる詰め A 材の宮城砂と豊浦砂Ⅱのケース (今井ら, 1979、石原, 1982) を示す。ゆる詰め A 材(①,②)、密詰め A,B 材 (③,④) および密な宮城砂 (⑤,⑥) の $PWP/\sigma'c'$ は、载荷初期段階で急激に上昇している。その後、 $N/NL=0.5$ 付近でゆる詰め A 材(①,②)と密な宮城砂 (⑤,⑥) の $PWP/\sigma'c'$ は 1 に達して、有効応力は 0 まで低下している。しかし、密詰め A 材及び B 材 (③,④) では $PWP/\sigma'c'$ は 1 にまで達していない。一方、ゆる詰め A 材の砂 (⑦～⑬) の $PWP/\sigma'c'$ の上昇過程は、A,B 材(①～④)や密な宮城砂 (⑤,⑥) とは異なり、载荷初期段階では PWP はあまり増加せず、 $N/NL>0.6$ の後半で急激に上昇し、 $PWP/\sigma'c'$ は 1 に達する。

	材料	平均粒径(mm)	均等係数	Dr (%)	e_0-e_{min}	$\tau d/\sigma'c'$
①	粗粒 A 材	10	30	56	0.2	0.19
②	粗粒 A 材			56	0.2	0.27
③	粗粒 A 材			80	0.09	1.31
④	粗粒 B 材	10	30	85	0.04	0.77
⑤	宮城砂	0.2	—	89.6	—	0.818
⑥	宮城砂			90.5	—	0.578
⑦	宮城砂			36.7	—	0.205
⑧	宮城砂			33.5	—	0.156
⑨	宮城砂			52.0	—	0.228
⑩	宮城砂			41.6	—	0.246
⑪	宮城砂			43.2	—	0.178
⑫	豊浦砂Ⅱ	0.17~0.2	1.44~1.65	21.1	0.24~0.3	0.145
⑬	豊浦砂Ⅱ			49.8	0.8	0.174

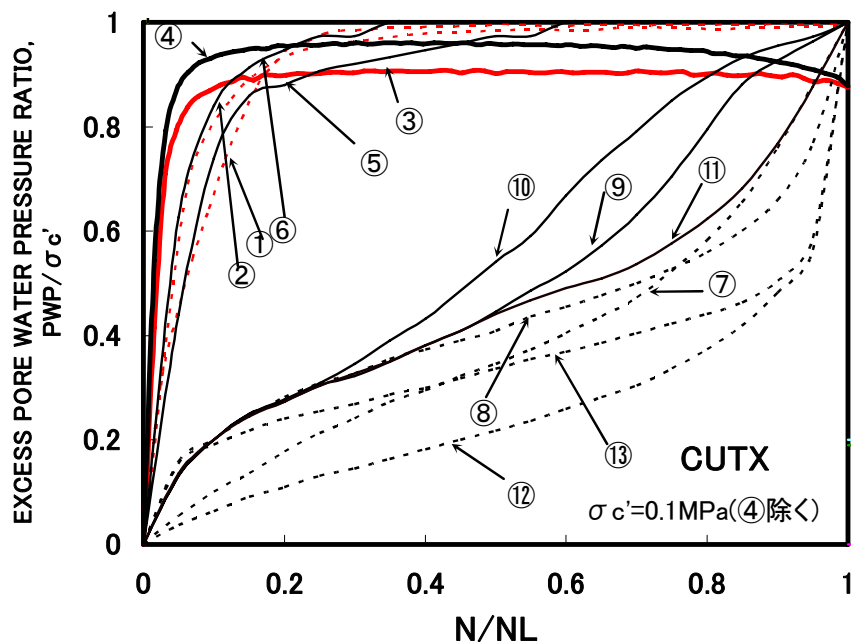


図 5.3.1 過剰間隙水圧の上昇過程比較 (CUTX 試験)

5.3.2 繰返しせん断応力比

1) 繰返し非排水三軸試験 (CUTX 試験)

図 5.3.2 に A 材の CUTX 試験におけるせん断応力比と最大過剰間隙水圧比 PWP_{max}/σ'_c の関係と同相対密度ごとに示す。また、図 5.3.3 に B 材についてのものを示す。

比較的ゆる詰めである相対密度 $Dr=56, 66\%$ においては、すべてのケースで PWP_{max}/σ'_c が 0.98 程度以上であり、拘束圧 $\sigma'_c=0.1\text{MPa}$ では、1 に達しているケースもある。

$Dr=80\%$ 以上の密詰めのケースでは PWP_{max}/σ'_c が 1 に達することではなく、せん断応力比が大きいほど、 PWP_{max}/σ'_c が小さくなる傾向がある。せん断応力比が大きいほど PWP_{max}/σ'_c が小さくなる理由として、せん断応力 τ_d が大きく軸ひずみ ε_a の量が多いほど圧縮、引張り時にダイレイションに伴い材料骨格が再構成されやすく、供試体が σ'_c を支え得る強度の低下が少なくなり、過剰間隙水圧の上昇が抑えられることが考えられる。また密詰め供試体では σ'_c が高いほど PWP_{max}/σ'_c が大きい傾向にあり、 σ'_c が低いほど密な供試体の骨格変形による σ'_c を支えうる強度低下に与える影響は小さく、比較的過剰間隙水圧が発生しにくくなると考えられる。

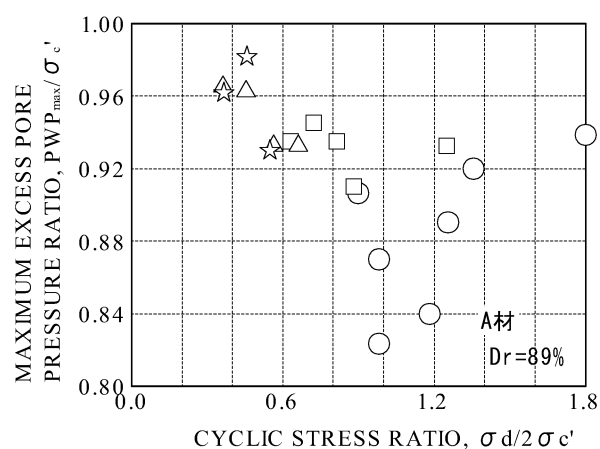
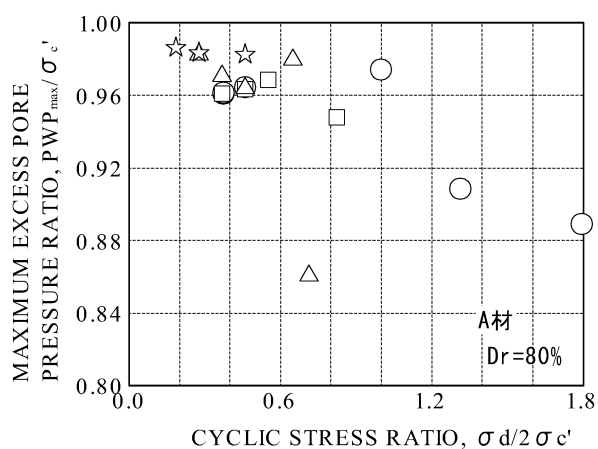
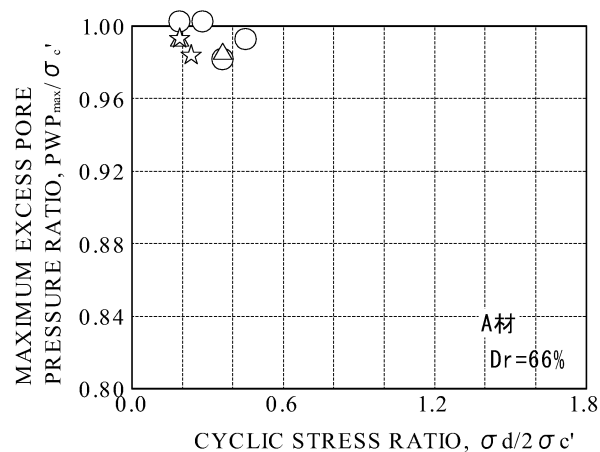
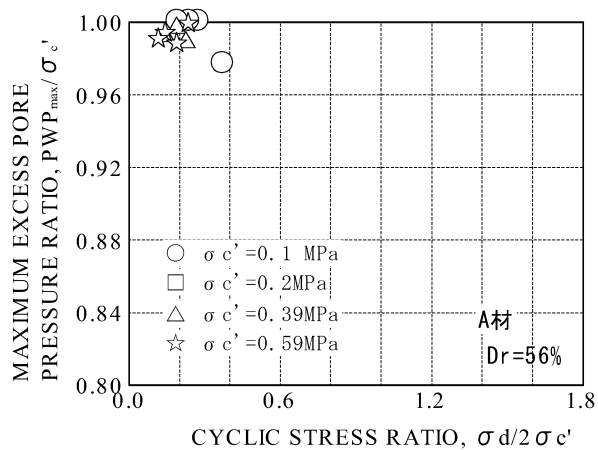


図 5.3.2 最大過剰間隙水圧比とせん断応力比（CUTX 試験 A 材）

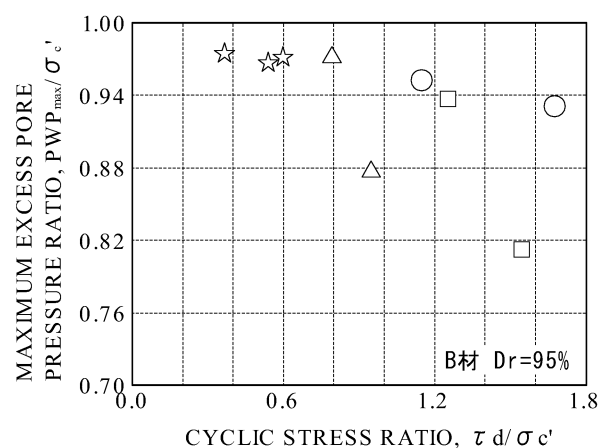
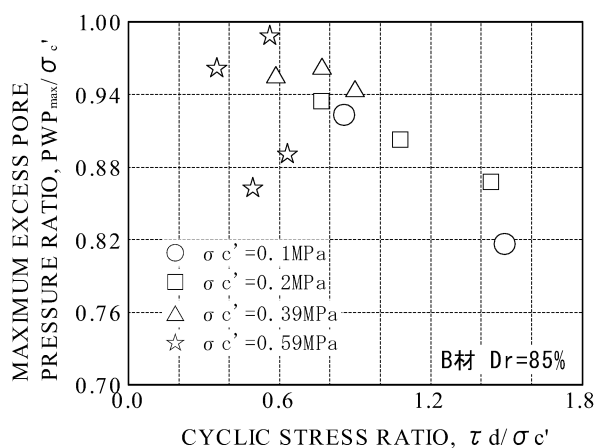


図 5.3.3 最大過剰間隙水圧比とせん断応力比（CUTX 試験 B 材）

2) 繰返し非排水ねじりせん断試験 (CUTS 試験)

図 5.3.4 に A 材の CUTS 試験におけるせん断応力比と PWP_{max}/σ_c' の関係を同相対密度毎に示す。

CUTX 試験結果と同様に、ゆる詰めでは PWP_{max}/σ_c' は 1 に近い。密詰めの $Dr=80,89\%$ のケースでは PWP_{max}/σ_c' が 1 に達したケースは少なく、せん断応力比が大きいほど、 PWP_{max}/σ_c' が小さくなる傾向がある。また、 σ_c' が高いほど PWP_{max}/σ_c' が大きい傾向にある。

図 5.3.5 に B 材を用いた CUTS 試験による結果 (ゆる詰め、密詰め) を図に示す。ゆる詰めの材料 ($Dr=60\%$) で、A 材を用いた試験とは異なり、 PWP_{max}/σ_c' は 1 に達したケースがない。後述の余裕間隙比の項で述べるが、B 材は円礫材であり、礫のかみ合わせが小さく、 e_{max} と e_{min} の差が小さい。そこで同じ相対密度 $Dr60\%$ でも A 材よりも B 材の方が間隙比 e は小さくなるため、比較的過剰間隙水圧が発生しにくくなると考えられ、 PWP_{max}/σ_c' が 1 まで達しないと考えられる。せん断応力比が大きいほど、 PWP_{max}/σ_c' が小さくなる傾向があることは、A 材と同様である。

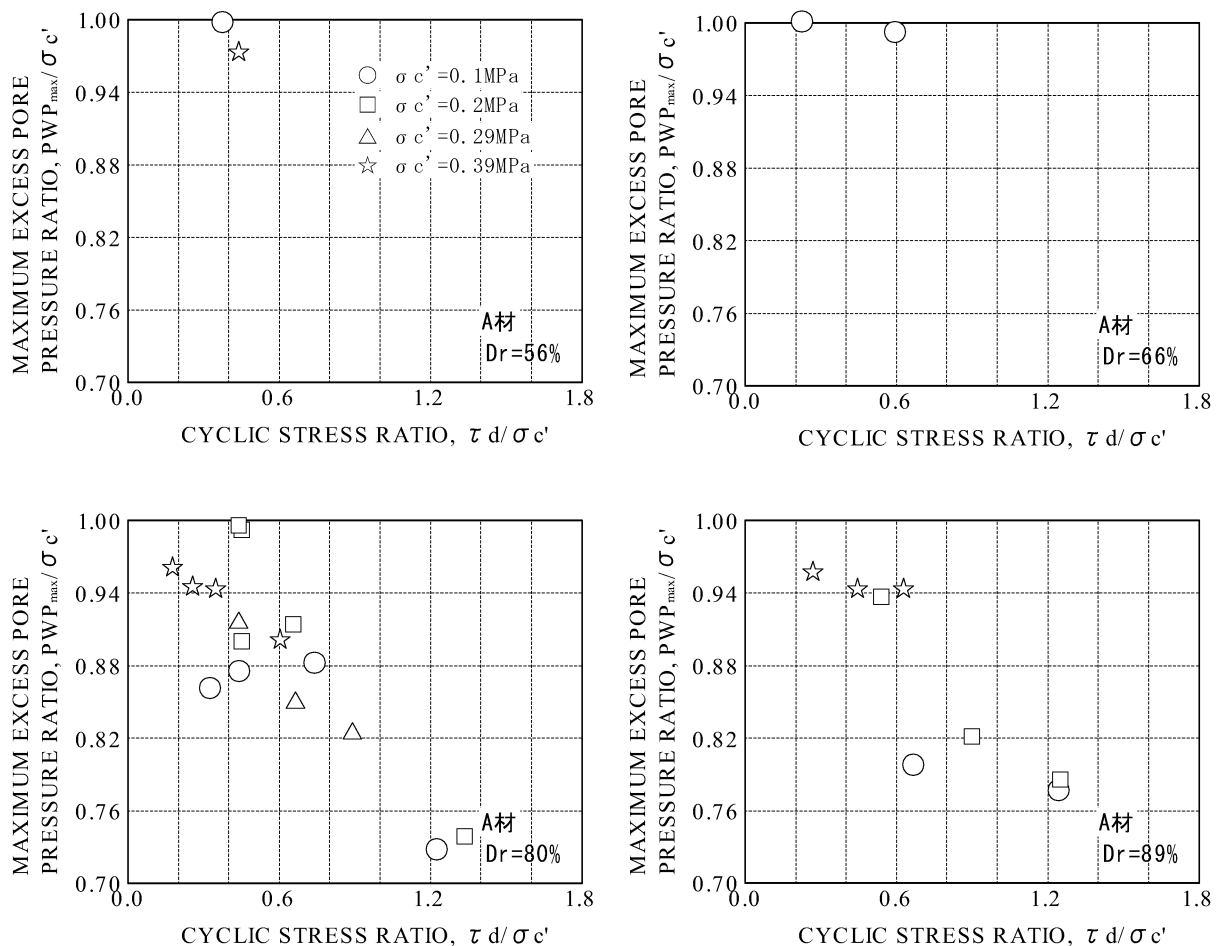


図 5.3.4 最大過剰間隙水圧比とせん断応力比 (CUTS 試験 A 材)

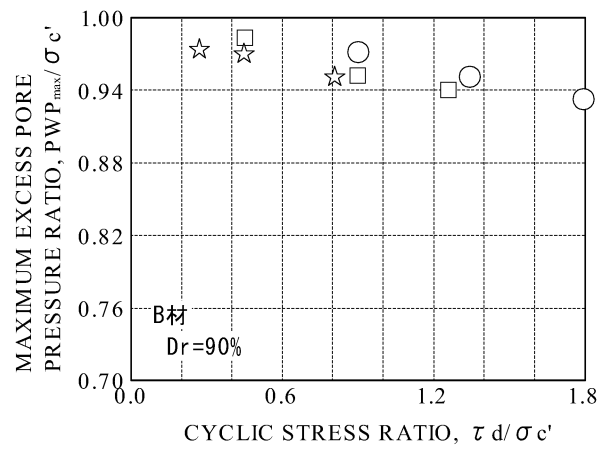
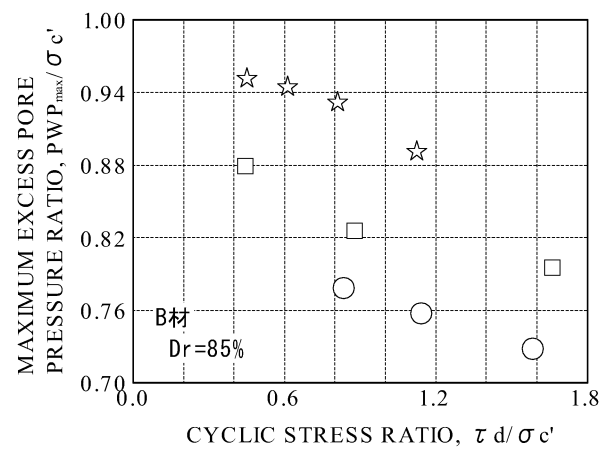
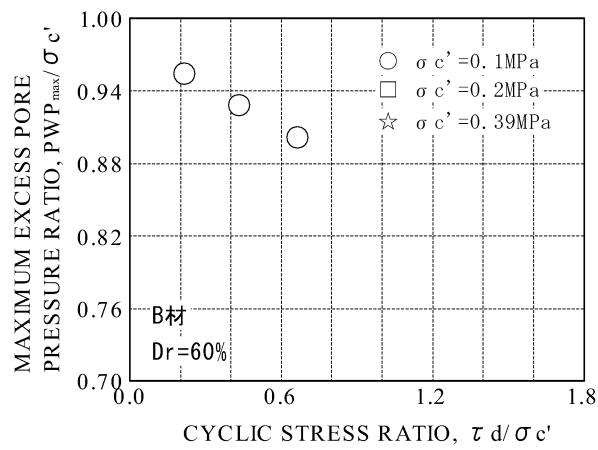


図 5.3.5 最大過剰間隙水圧とせん断応力比 (CUTS 試験 B材)

5.3.3 相対密度

A材についての CUTX 試験における最大過剰間隙水圧比 PWP_{max}/σ_c' とせん断応力比の関係を相対密度 Dr で比較したものを図 5.3.6 に示す。また、CUTS 試験の結果を図 5.3.7 に示す。同せん断応力比では、ゆる詰め ($Dr=56,66\%$) と密詰め ($Dr=80,89\%$) の差は見られるものの、ゆる詰め同士、密詰め同士での差はほとんどない。 PWP_{max}/σ_c' はせん断応力比による影響に比べ、 Dr と PWP_{max}/σ_c' の関係は明確ではない。

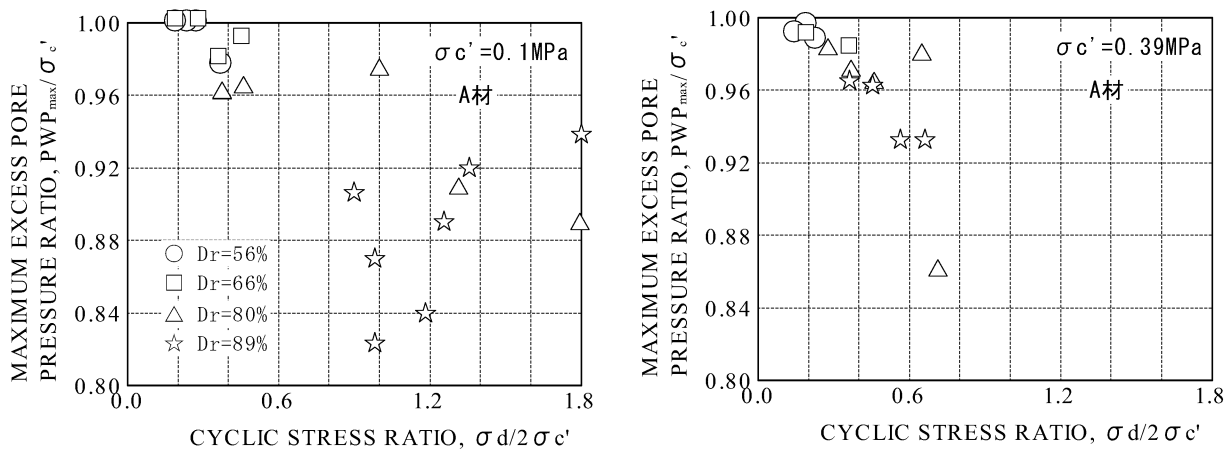


図 5.3.6 相対密度と最大過剰間隙水圧比 (CUTX 試験 A材)

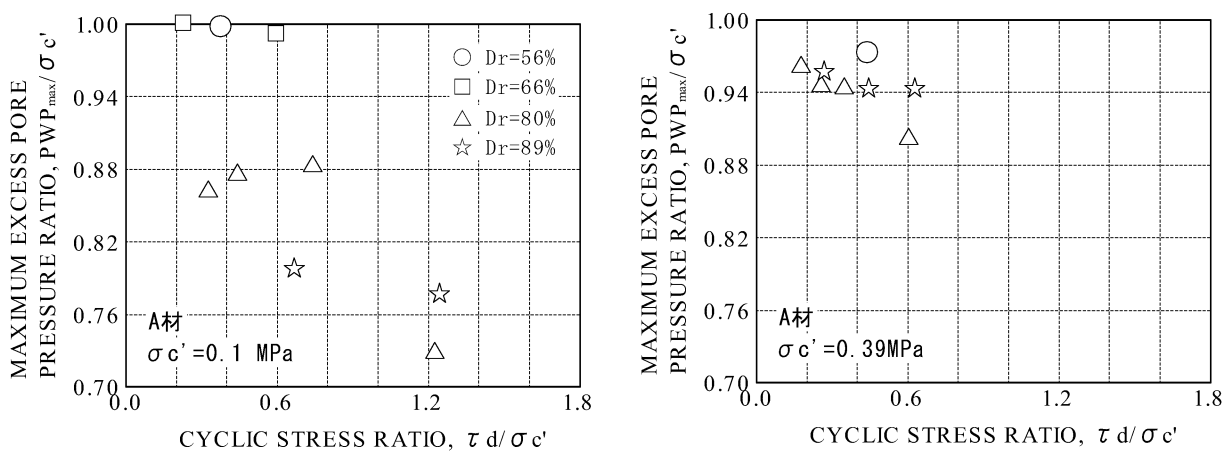


図 5.3.7 相対密度と最大過剰間隙水圧比 (CUTS 試験 A材)

5.3.4 余裕間隙比

過剰間隙水圧の上昇によって生じる有効応力の低下は、排水条件の繰返し载荷による体積収縮量と表裏一体の関係にある。乾燥状態で繰返しせん断による体積収縮の限界（最小間隙比 $e_{\min}$ ）に達するまでに残された体積収縮の余裕量（余裕間隙比 $(e_0 - e_{\min})$ ）が大きいとき、それを飽和非排水状態でせん断を加えたならば間隙水圧の上昇量も大きい。この余裕間隙比 $e_0 - e_{\min}$ は、 $(1 - Dr) \cdot (e_{\max} - e_{\min})$ と書き換えられ、締まりぐあいで決まる量と材料自体の密度特性で決まる量の積で表される（石原，1982）。

CUTX 試験における余裕間隙比 $e_0 - e_{\min}$ と最大過剰間隙水圧比 $PWP_{\max} / \sigma_c'$ の関係を図 5.3.8 に、CUTS 試験の結果を図 5.3.9 に示す。なお、A材は白シンボル、B材は黒シンボルで表している。また、ここでの $PWP_{\max} / \sigma_c'$ は同相対密度、同拘束圧の数ケースの平均値である。A材では、拘束圧 σ_c' が大きく、 $e_0 - e_{\min}$ が大きくなるほど $PWP_{\max} / \sigma_c'$ が大きくなり、1 に漸近していく。B材は $e_{\max} - e_{\min}$ も小さく、相対密度 Dr を変化させても余裕間隙比は大きく変わらないが、 $PWP_{\max} / \sigma_c'$ のばらつきは大きい。

CUTS 試験においても、CUTX 試験と同様 A 材では、 $e_0 - e_{\min}$ が小さくなるほど $PWP_{\max} / \sigma_c'$ が大きい傾向がある。B 材においては $e_0 - e_{\min}$ の範囲は狭いが、 $e_0 - e_{\min}$ が小さくなるほど $PWP_{\max} / \sigma_c'$ が大きい傾向があるが、ばらつきがある。

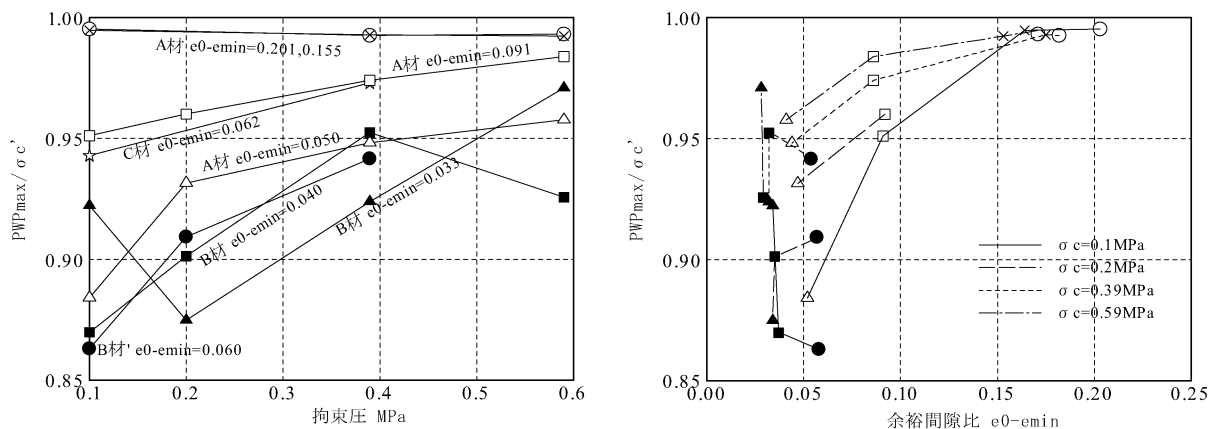


図 5.3.8 余裕間隙比と最大過剰間隙水圧比（CUTX 試験）

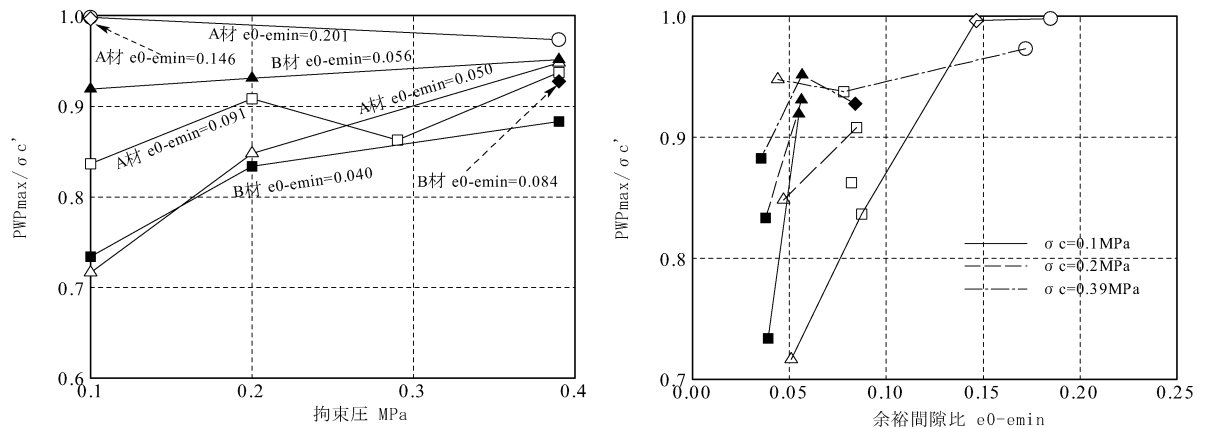


図 5.3.9 余裕間隙比と最大過剰間隙水圧比（CUTS 試験）

5.3.5 ダイレイタンシー特性

MDTX 試験での最大ダイレイタンシー係数 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_{\max}$ と CUTX 試験での最大過剰間隙水圧比 $PWP_{\max}/\sigma'_c$ も平均値（同拘束圧の試験ケースの平均）の関係を図 5.3.10 に示す。 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_{\max}$ と最大過剰間隙水圧比の平均は直線的な関係の傾向がある。なお、最大過剰間隙水圧比はせん断応力比の影響が見られるため、試験ケースによって最大過剰間隙水圧比は異なるが、単純に平均したものを図 5.3.10 に用いた。

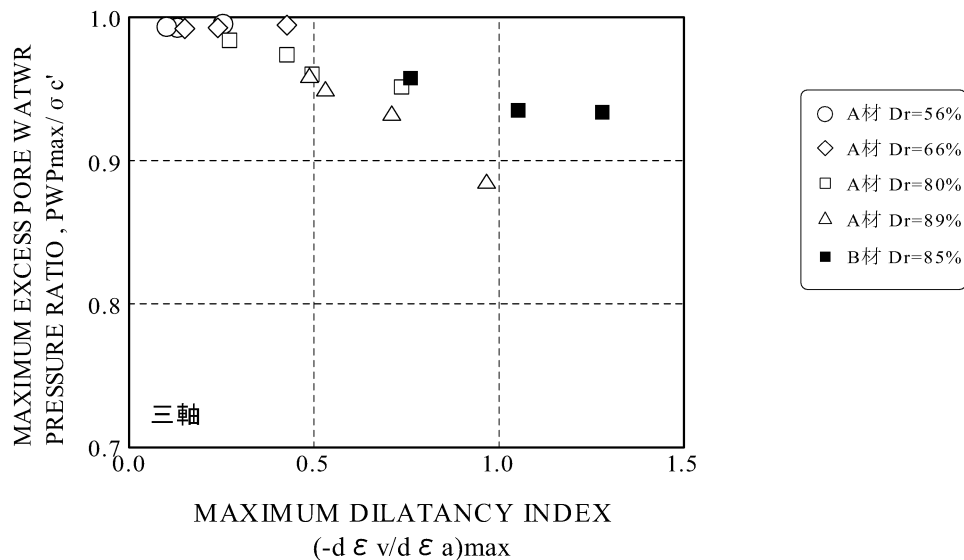


図 5.3.10 最大ダイレイタンシー係数と最大過剰間隙水圧比（MDTX,CUTX 試験）

MDTS 試験での最大ダイレイタンシー係数 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_\gamma)_{\max}$ と CUTS 試験での最大過剰間隙水圧比 $PWP_{\max}/\sigma'_c$ の平均値の関係を図 5.3.11 に示す。A材の $Dr=80\%$ と B材 $Dr=85\%$ では $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_\gamma)_{\max}$ と最大過剰間隙水圧比の平均は直線的な関係があるが、相対密度のより大きいA材の $Dr=89\%$ と B材 $Dr=90\%$ ではばらつきが大きく、他のケースのような直線的な関係は見られなかった。

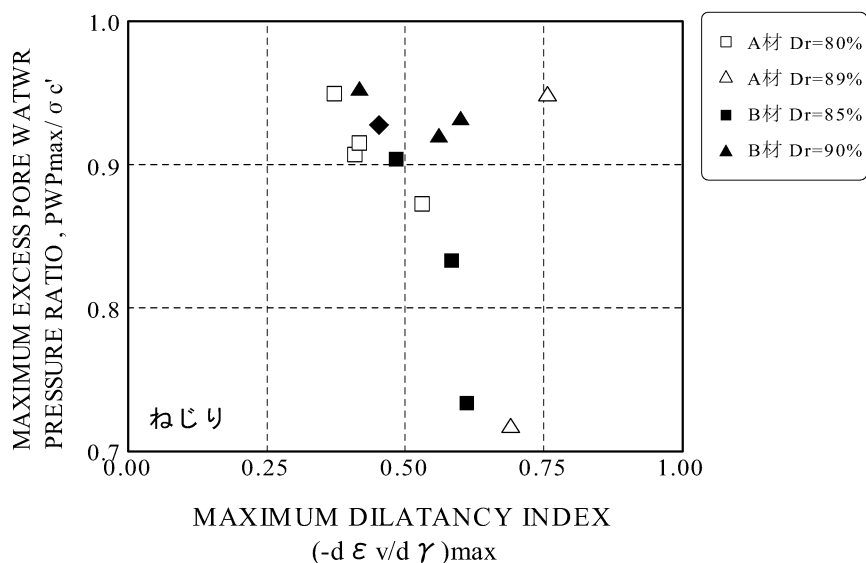


図 5.3.11 最大ダイレイタンシー係数と最大過剰間隙水圧比（MDTS,CUTS 試験）

5.3.6 最大過剰間隙水圧比と動的せん断強度の関係

1) 繰返し非排水三軸試験 (CUTX 試験)

CUTX 試験での最大過剰間隙水圧比 PWP_{max}/σ_c' と動的せん断強度 SR_{10} の関係を図 5.3.12 に示す。なお、動的せん断強度 SR_{10} を決定するためには同相対密度、同拘束圧条件にて繰返し応力を変えて数ケースの試験を行っているため、ここで示されている各最大過剰間隙水圧比の値は、当該動的せん断強度値を決定した試験による最大過剰間隙水圧比の平均値である。

図 5.3.12 より、A材、B材ともに PWP_{max}/σ_c' が高いほど動的せん断強度が小さくなっており、A材はA材同士、B材はB材同士で、相対密度 Dr に関わらずほぼ直線の関係にある。

同 PWP_{max}/σ_c' で $SR_{10}(\varepsilon_{sa}=1.0\%以下)$ ではB材が大きいのに対し、 $SR_{10}(\varepsilon_{sa}=2.0\%以上)$ ではA材のほうが大きくなっている。

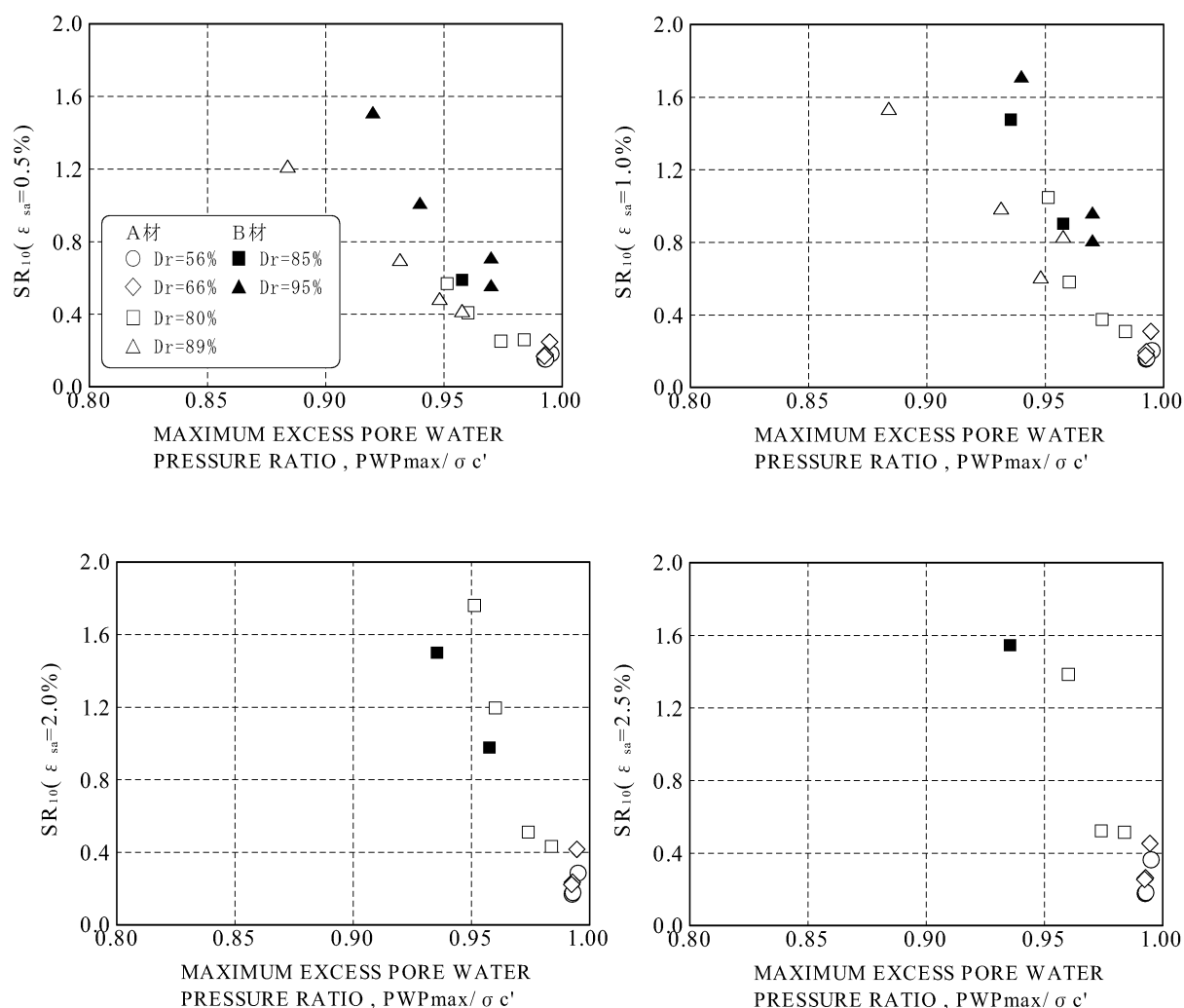


図 5.3.12 最大過剰間隙水圧比と動的せん断強度 (CUTX 試験)

2) 繰返し非排水ねじりせん断試験 (CUTS 試験)

PWP_{max}/σ'_c をと動的せん断強度の関係を図 5.3.13 に示す。ここで示されている各最大過剰間隙水圧比の値は、三軸同様に、当該動的せん断強度を決定した試験にて得られた最大過剰間隙水圧比の平均値である。

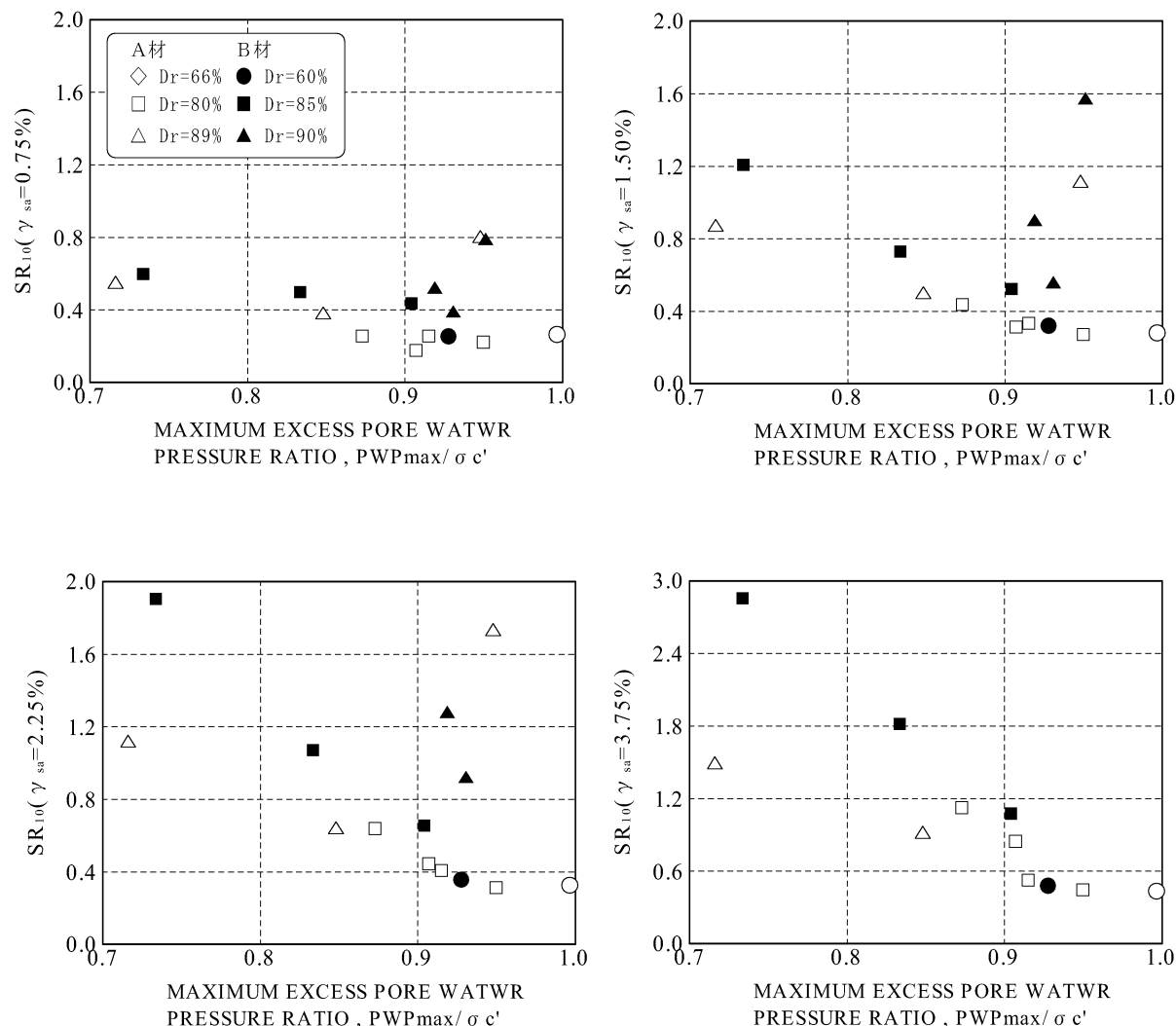


図 5.3.13 最大過剰間隙水圧比と動的せん断強度 (CUTS 試験)

CUTX 試験結果と同様に、A 材は A 材同士、B 材は B 材同士で、 Dr に関わらず直線的関係にあるが、CUTX 試験結果よりばらつきが大きい。

特に B 材の $Dr=90\%$ の値が比例関係とはいえない。なお、B 材 $Dr=90\%$ のデータはばらつきが大きい。試験材料は試験後に乾燥させ、ふるい分けを行い、別の試験供試体に再利用していた。B 材 $Dr=90\%$ の試験は他の試験の 3 年後に実施されたもので、締固め曲線（密度～締固め時間）が若干異なっており、材料が締め固まりやすくなっていた。試験に繰返し使用しているうちに、材料表面や粒形等に何らかの変化がでていた可能性も否めない。

5.4 動的非排水せん断強度に及ぼす影響因子

5.4.1 繰返し载荷周波数

ダムが影響を受ける地震の振動数領域は数 Hz 程度であり、動的試験でもその程度の周波数領域を想定するのが最良である。吉見ら(1991)は、砂の液状化試験（リングねじりせん断試験）では 0.05Hz～12Hz の正弦波の周波数範囲では液状化に周波数の影響はないとしている。石原ら(1976)は、粗粒材料の強度についても砂と同様载荷速度の影響はないとしているが、本研究では、密に締固めた A 材 (Dr80%) と B 材 (Dr85%) の繰返し载荷時の動的強度と载荷周波数の影響を検討した。

载荷周波数の影響を調べるため、繰返し载荷周波数を正弦波 0.03Hz～1.0Hz (CUTX 試験)、0.03Hz～0.2Hz (CUTS 試験) とした。そして、飽和非排水状態で、拘束圧 0.1MPa (CUTX 試験)、0.2MPa (CUTS 試験) とした。

1) 三軸試験 (CUTX 試験)

せん断応力比 0.8 で、周波数を 0.03～1.0Hz で変化させた繰返し三軸試験の载荷回数と両振幅軸ひずみの関係を図 5.4.1 に示す。この周波数範囲では周波数による差は見られない。また、载荷周波数と動的せん断強度 SR の関係を図 5.4.2 に示す。0.03Hz と 0.2Hz において動的せん断強度に差は見られない。1.0Hz 以上の高周波での試験は試験機の応力制御能力の限界から実施をすることは出来なかったが、今回試験の载荷周波数 0.03Hz～1.0Hz の範囲では、载荷周波数の粗粒材料の動的せん断強度への影響はほとんどみられない。

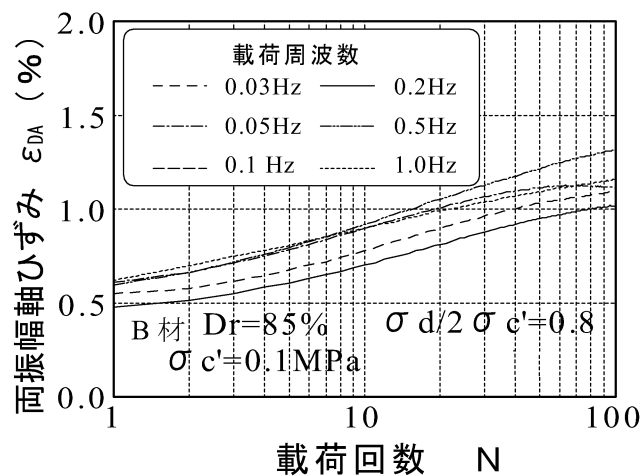


図 5.4.1 繰返し载荷周波数の違いによる载荷回数と片振幅軸ひずみの関係 (B 材)

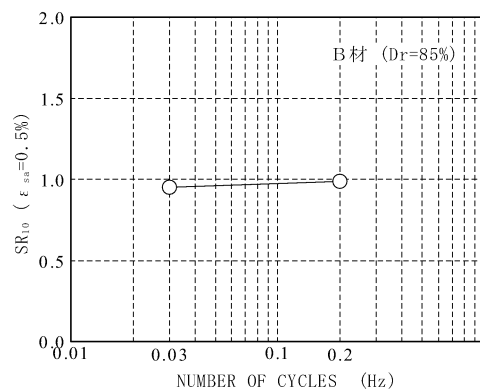


図 5.4.2 载荷周波数と動的せん断強度 (CUTX 試験)

2) ねじりせん断試験 (CUTS 試験)

せん断応力比 0.45 で 0.03~0.2Hz でねじり載荷周波数を変化させた繰返しねじりせん断試験 (CUTS 試験) における載荷回数 N と両振幅せん断ひずみの関係を図 5.4.3 に示す。載荷回数と過剰間隙水圧比の関係を図 5.4.4 に示す。図 5.4.3 において同一の載荷回数における両振幅せん断ひずみの最大値と最小値の差は、 $N=1$ で 0.1%、 $N=10$ で 0.7%、 $N=100$ では 1.5%と、多少差が見られるが、載荷周波数の違いによる傾向的な変化は見られない。図 5.4.4 においても、載荷周波数の違いによる過剰間隙水圧比の傾向的な変化は見られない。よって、今回の試験における、載荷周波数範囲では、繰返しねじり載荷によるせん断ひずみの増加は載荷周波数の影響はほとんどみられない。

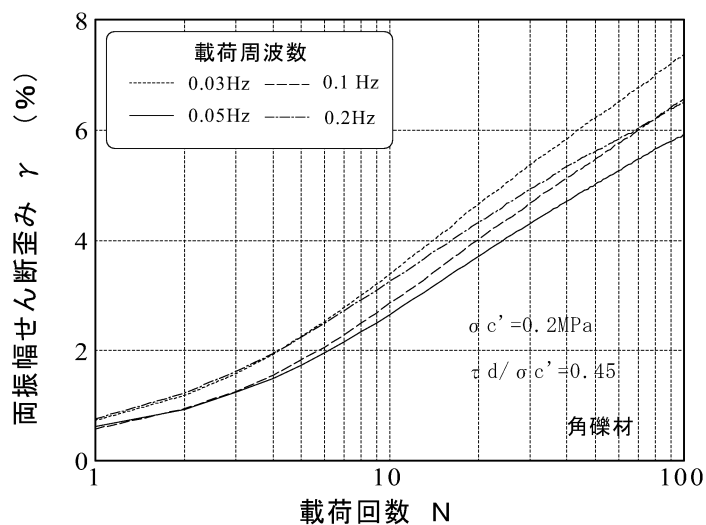


図 5.4.3 載荷周波数と両振幅せん断ひずみ (CUTS 試験) (A 材 Dr80%)

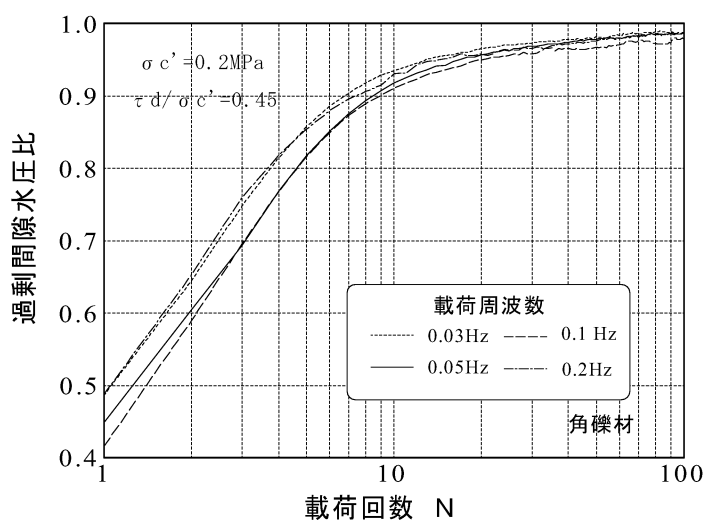


図 5.4.4 載荷周波数と過剰間隙水圧比 (CUTS 試験) (A 材 Dr80%)

5.4.2 繰返し载荷回数

動的せん断強度を決定する際に規定する繰返し载荷回数（ $N=10,20$ ）の違いで、動的せん断強度にどのくらい差があるのかを比較するため、 SR_{10} と SR_{20} の比率を図 5.4.5～図 5.4.7 に示す。

1) 繰返し非排水三軸試験（CUTX 試験）

拘束圧 σ_c' 、片振幅軸ひずみ ε_{sa} の違いによる $SR_{10}(\varepsilon_{sa})/SR_{20}(\varepsilon_{sa})$ の違いに明確な差違はみられなかった。相対密度 Dr が大きいほど、 $SR_{10}(\varepsilon_{sa})/SR_{20}(\varepsilon_{sa})$ は若干小さくなり、動的せん断強度に対する载荷回数の違いの影響も若干小さくなる傾向にある。

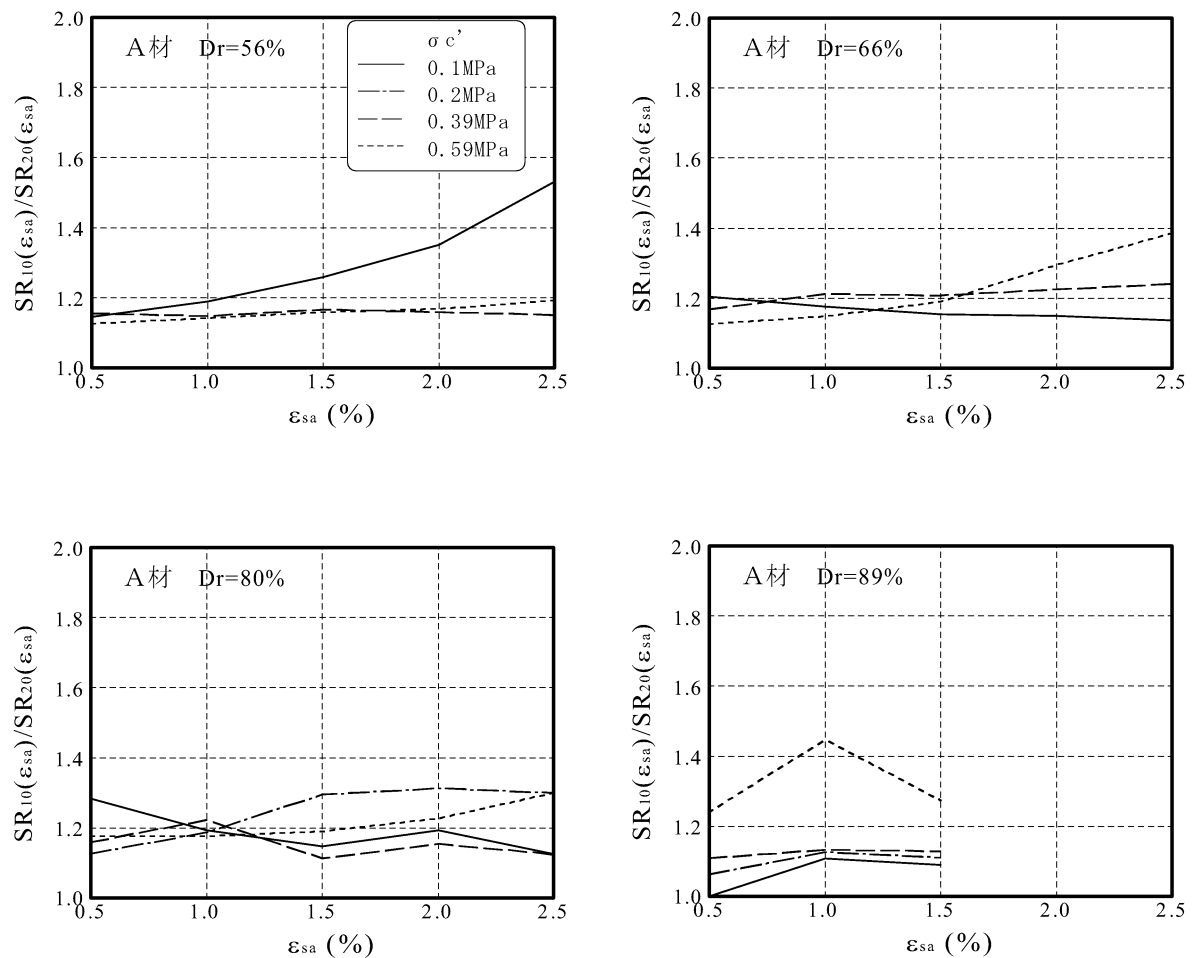


図 5.4.5 動的せん断強度に対する規定繰返し载荷回数の影響

(SR_{10} と SR_{20} の比較 : CUTX 試験 A材)

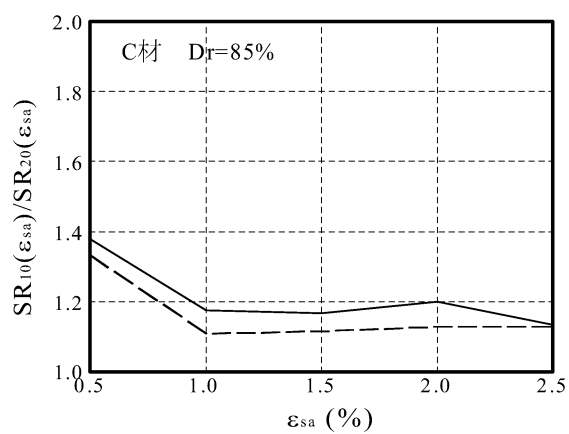
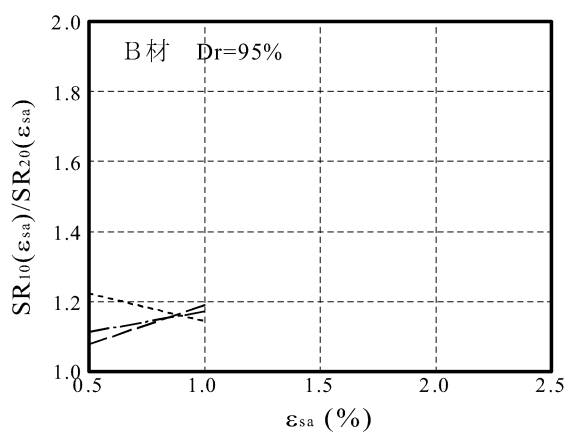
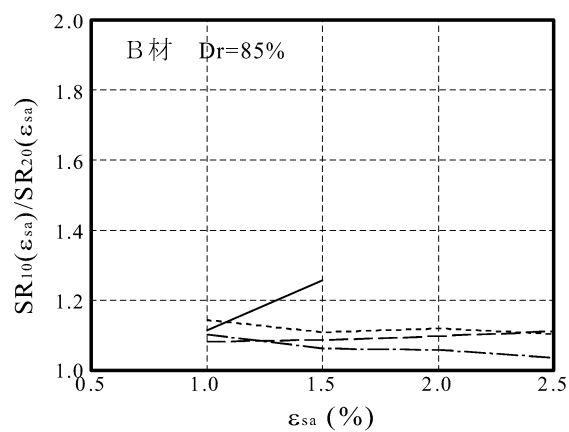
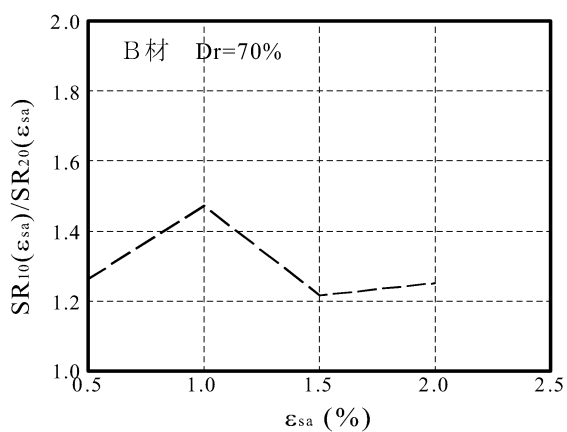


図 5.4.6 動的せん断強度に対する規定繰返し载荷回数の影響

(SR_{10} と SR_{20} の比較 : CUTX 試験 B 材, C 材)

2) 繰返し非排水ねじりせん断試験 (CUTS 試験)

CUTS 試験における $SR_{10}(\gamma_{sa})/SR_{20}(\gamma_{sa})$ を図 5.4.7 示す。CUTX 試験結果と同様 σ_c' 、 γ_{sa} の違いで $SR_{10}(\gamma_{sa})/SR_{20}(\gamma_{sa})$ への明確な影響はみられない。

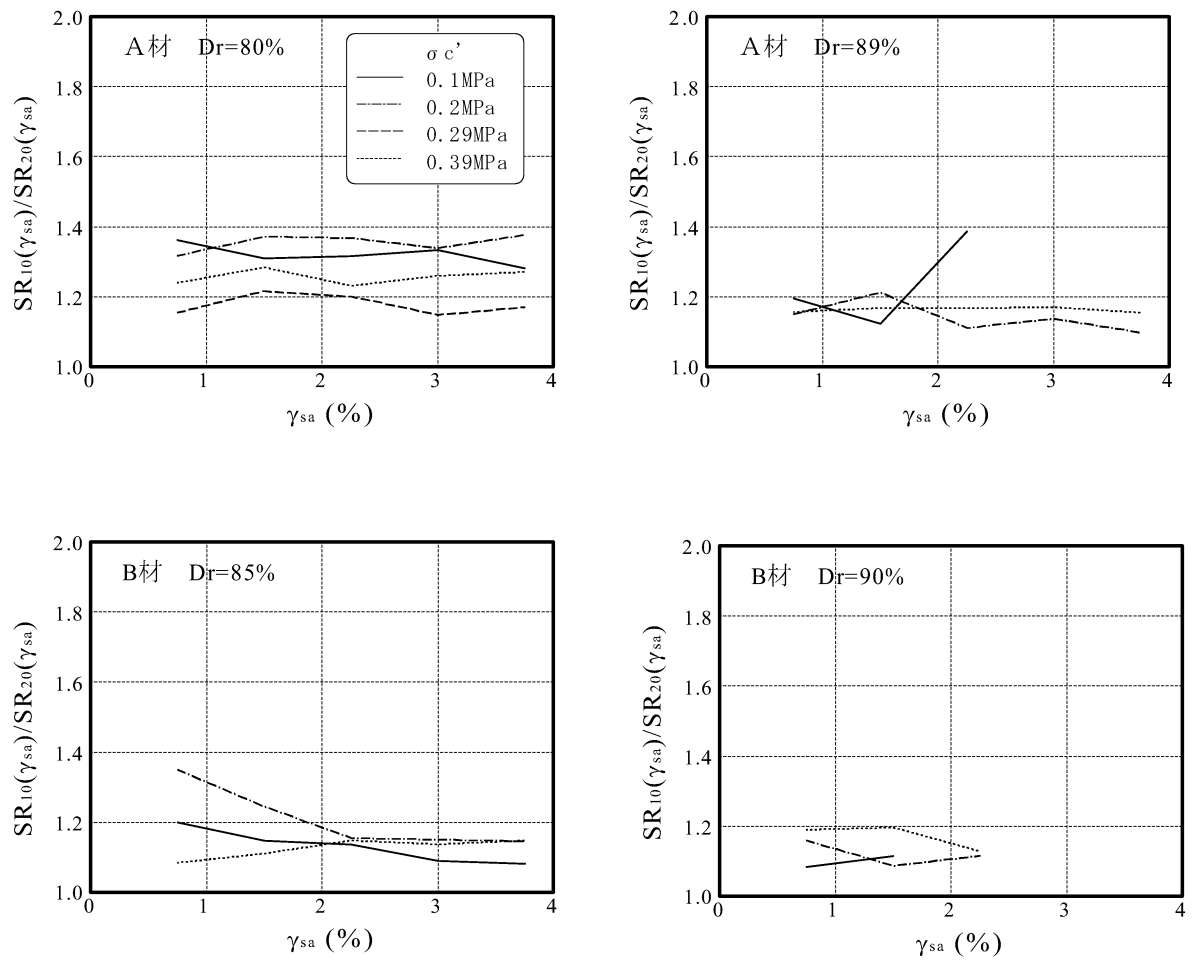


図 5.4.7 動的せん断強度に対する規定繰返し载荷回数の影響

(SR_{10} と SR_{20} の比較 : CUTS 試験 A材)

5.4.3 拘束圧

1) 繰返し非排水三軸せん断試験 (CUTX 試験)

等方圧密状態の供試体の CUTX 試験から、横軸に σ'_c をとり、同材料、同相対密度条件での動的せん断強度 $SR(\epsilon_{sa})$ を比較したものを図 5.4.8 に示す。

A 材においては、低拘束圧時に $SR(\epsilon_{sa})$ は大きく、拘束圧条件が大きくなるにつれ、 $SR(\epsilon_{sa})$ は小さくなる。 $\sigma'_c=0.39$ と $\sigma'_c=0.59$ での動的せん断強度はほぼ同程度となっている。一方、B 材においては動的せん断強度の比は、拘束圧が大きくなるほど小さくなっている。

$\sigma_{ac}/\sigma_r=2.0, 3.14$ の異方圧密させた供試体で CUTX 試験を行い、その各有効拘束圧条件における動的せん断強度 SR を図 5.4.9 に表す。

この異方応力条件下では、等方圧密状態のものとは異なり、拘束圧が大きいほど動的せん断強度は小さくなっている。等方圧密状態で拘束圧依存が顕著でなかった拘束圧範囲であっても、異方圧密状態では、明確な拘束圧依存が現れている。

2) 繰返し非排水ねじりせん断試験 (CUTS 試験)

図 5.4.10 に CUTS 試験における動的せん断強度と拘束圧の関係を示した。CUTS 試験では CUTX 試験と同様に、拘束圧が大きくなるに従い動的せん断強度 SR は小さくなり、拘束圧依存がみられる。

1) CUTX 試験

a). 等方応力状態の供試体

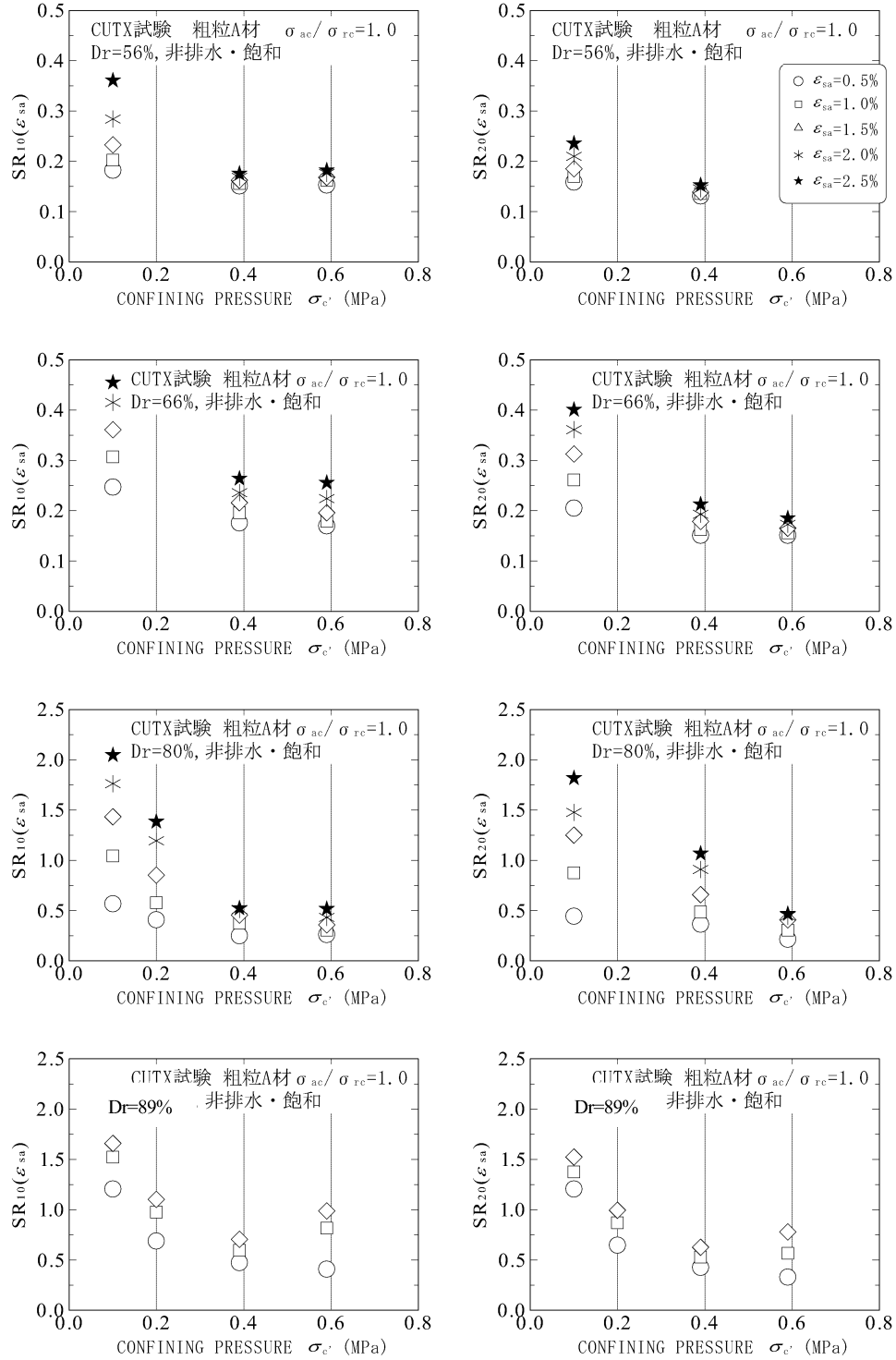


図 5.4.8 拘束圧と動的せん断強度の関係（等方圧密 CUTX 試験）（その 1）

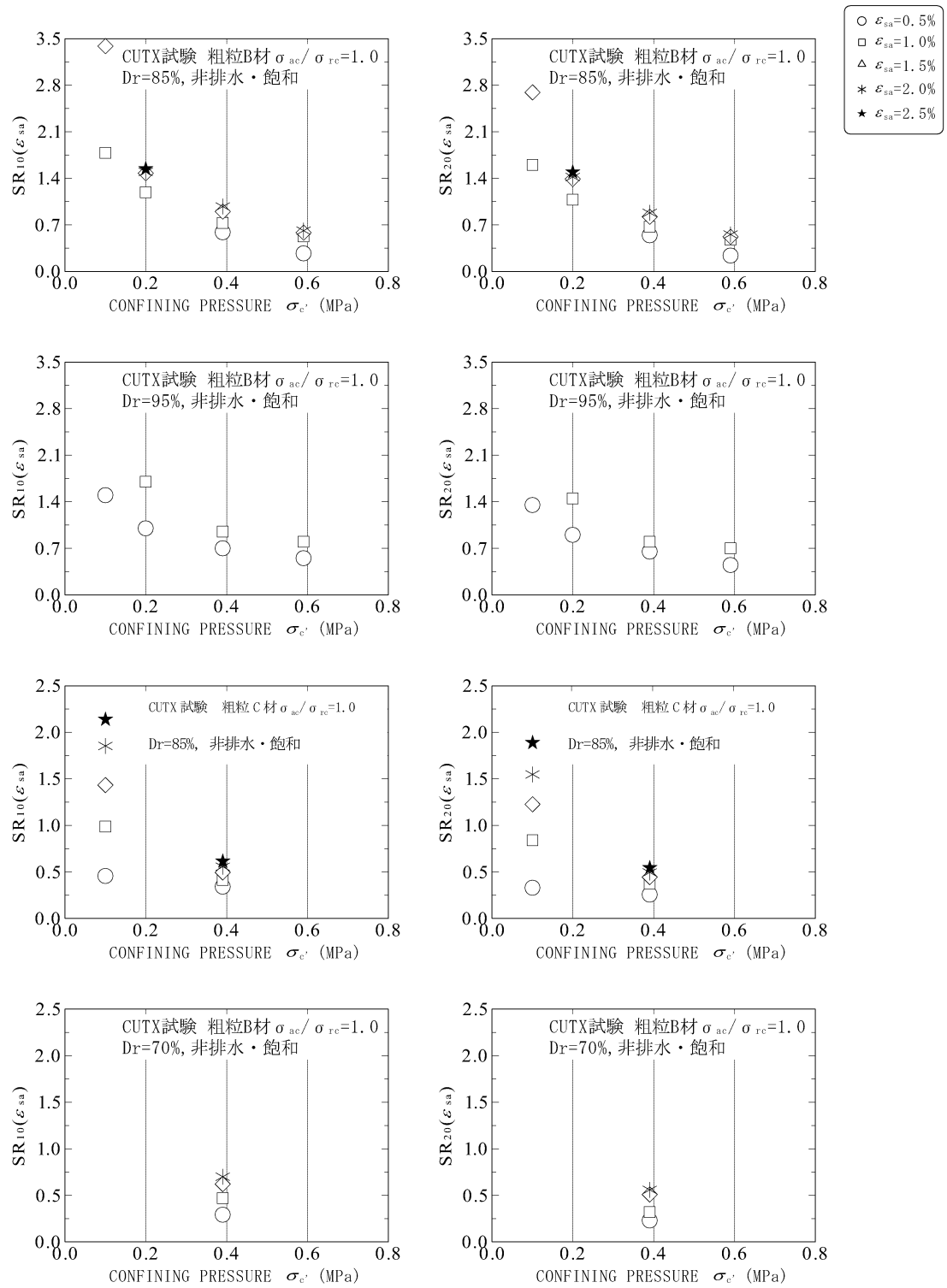


図 5.4.8 拘束圧と動的せん断強度の関係（等方圧密 CUTX 試験）（その 2）

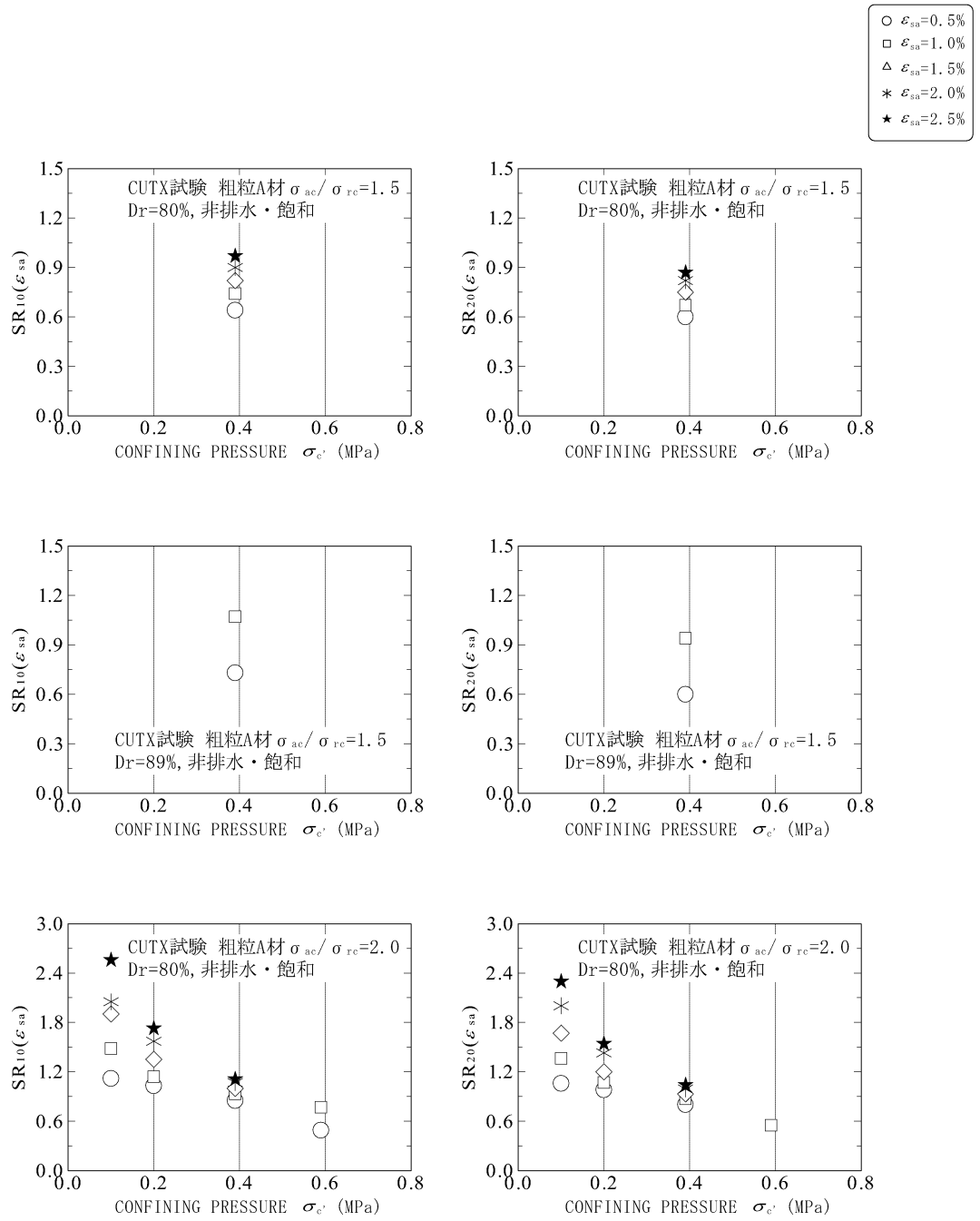


図 5.4.9 拘束圧と動的せん断強度の関係（異方圧密 CUTX 試験）（その 1）

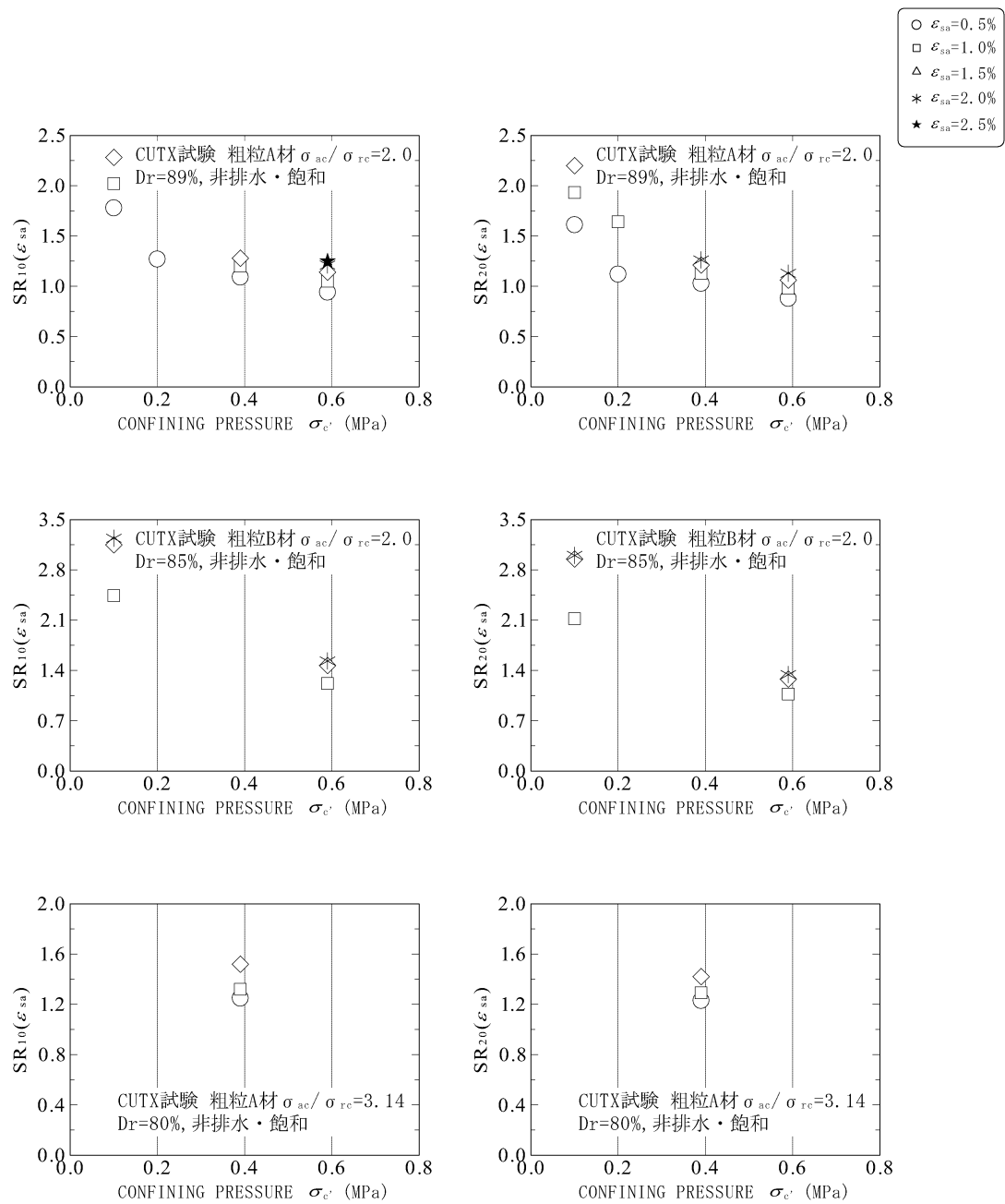


図 5.4.9 拘束圧と動的せん断強度の関係（異方圧密 CUTX 試験）（その 2）

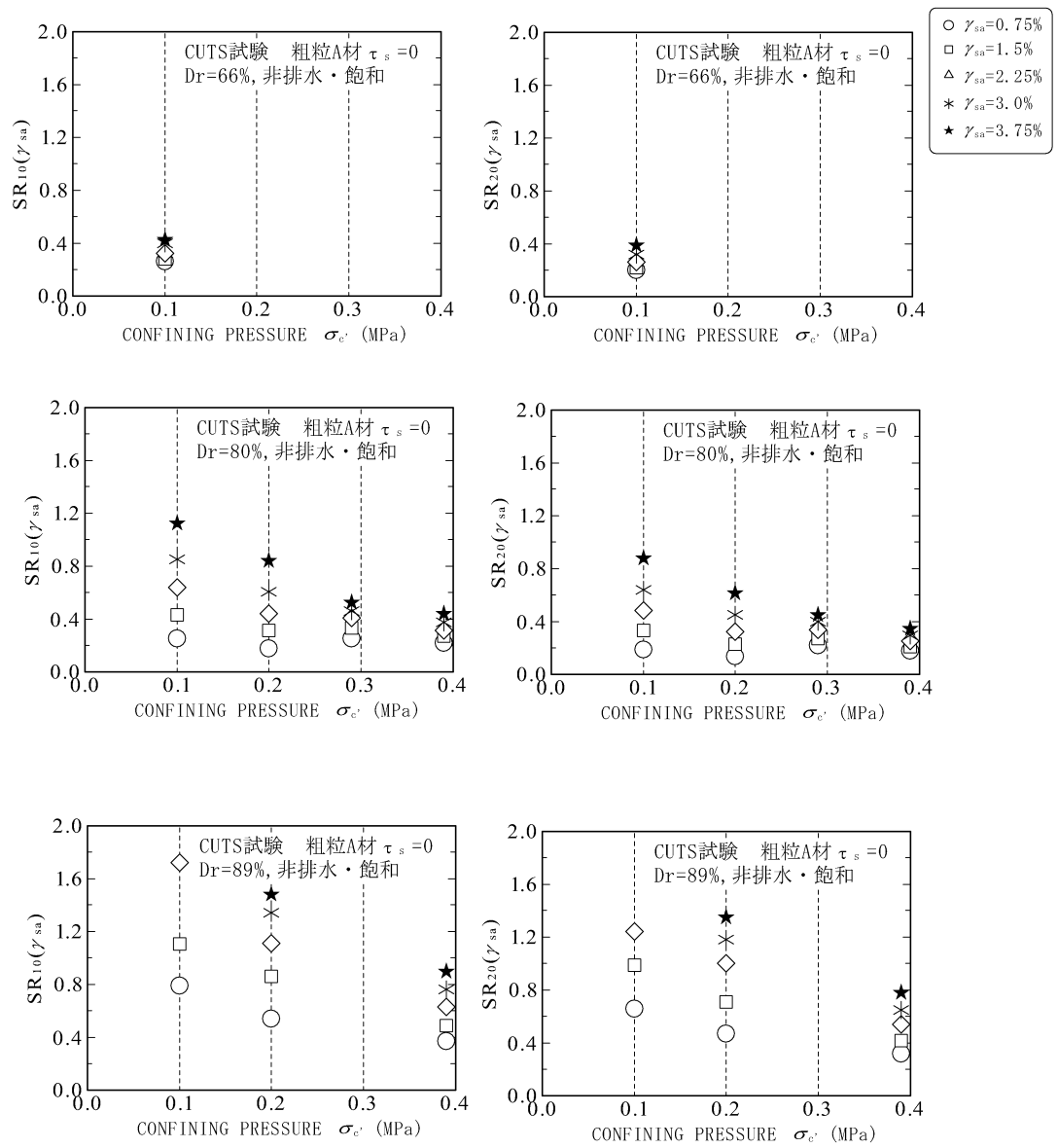


図 5.4.10 拘束圧と動的せん断強度の関係（CTS 試験）（その 1）

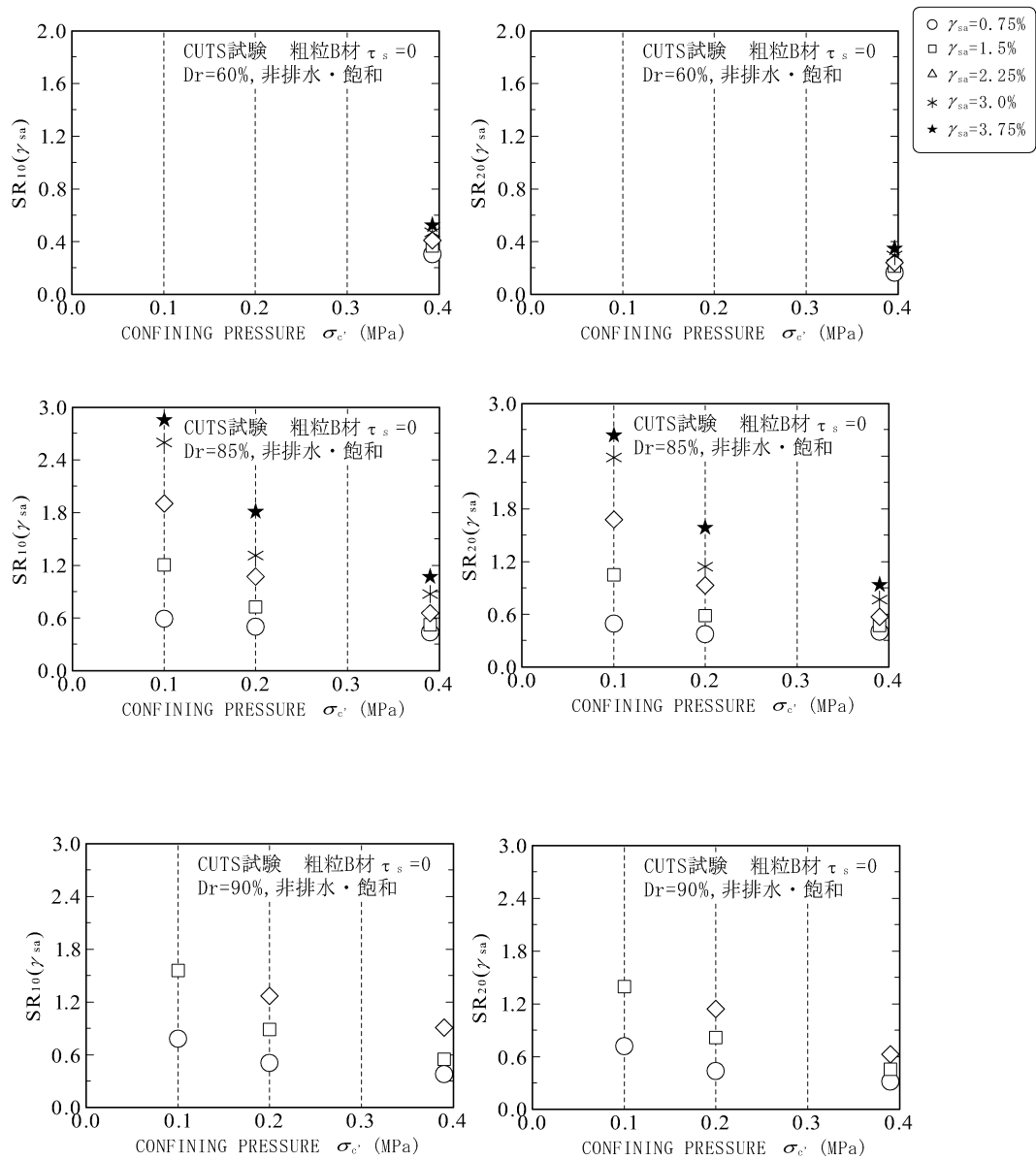


図 5.4.10 拘束圧と動的せん断強度の関係 (CUTS 試験) (その 2)

5.4.4 相対密度

1) CUTX 試験

A材 CUTX 試験結果より、相対密度 Dr (=Drc 圧密後の相対密度) を横軸にとり、 $SR(\epsilon_{sa})$ を比較したものを図 5.4.11 示す。相対密度 Dr が大きい方が $SR(\epsilon_{sa})$ は大きくなっている。

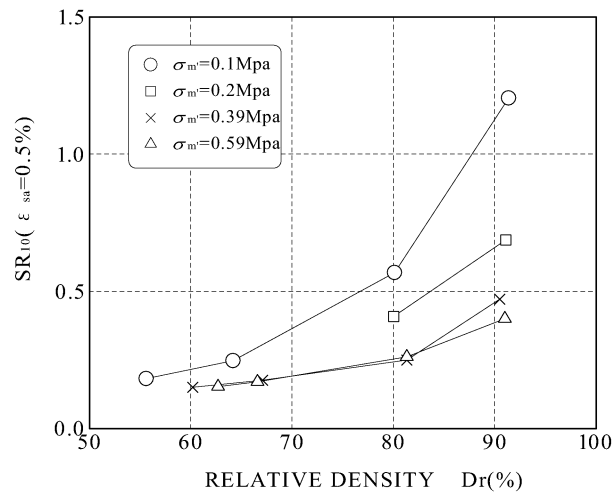


図 5.4.11 相対密度と動的せん断強度の関係 (CUTX 試験 A材)

2) CUTS 試験

CUTS 試験における相対密度 Dr と $SR(\gamma_{sa})$ の関係を図 5.4.12 示す。CUTX 試験と同様、相対密度 Dr が大きいほうが $SR(\gamma_{sa})$ が大きくなっている。

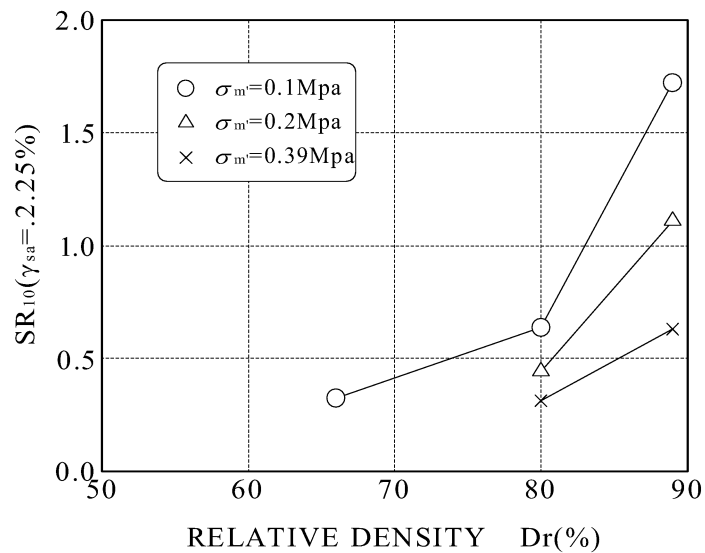


図 5.4.12 相対密度と動的せん断強度の関係 (CUTS 試験 A材)

5.4.5 余裕間隙比 (岩下ら, 1997)

1) CUTX 試験

図 5.4.13 に CUTX 試験での動的せん断強度 SR_{10} と余裕間隙比の関係を示す。余裕間隙比が小さいほど動的せん断強度が大きい。

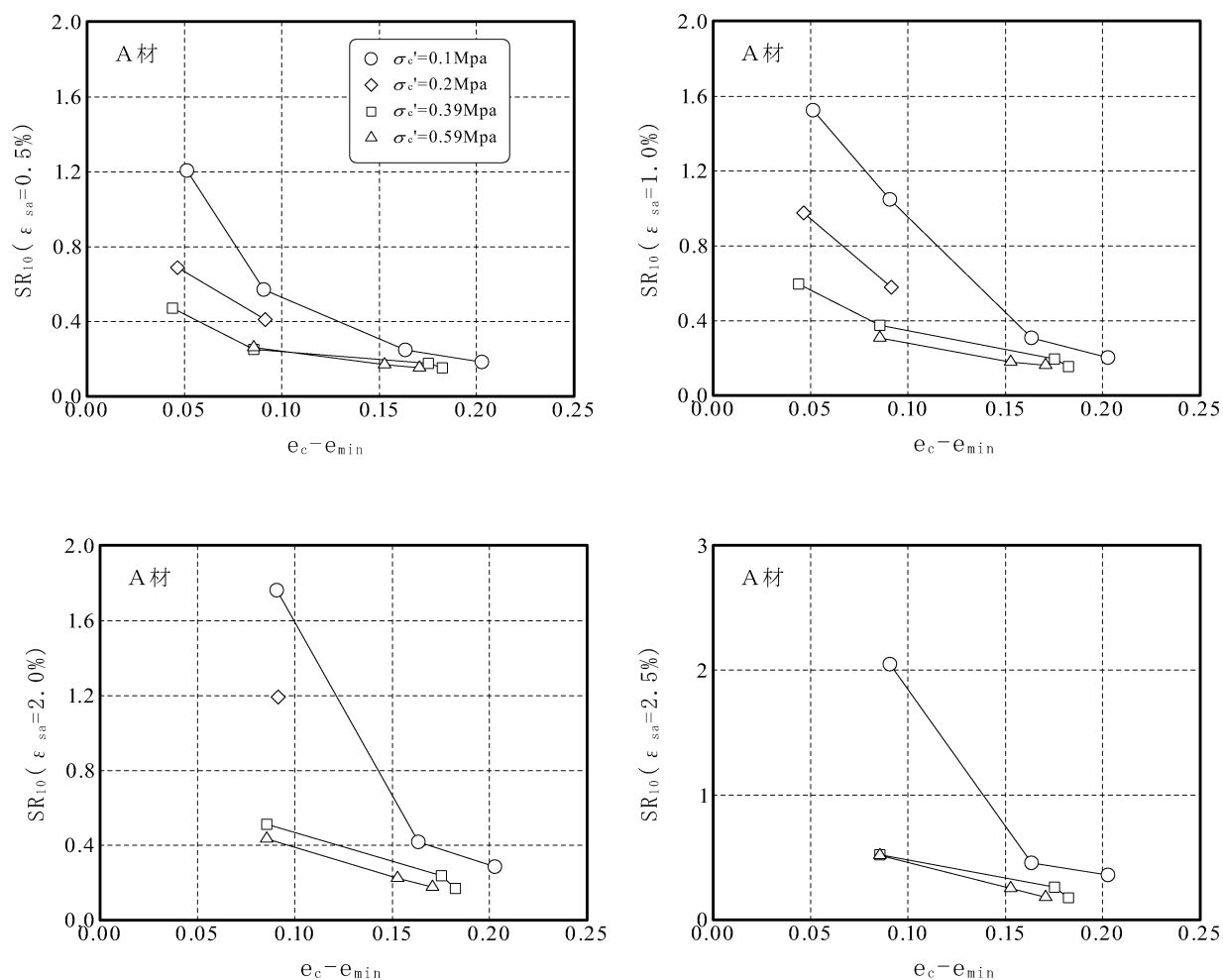


図 5.4.13 動的せん断強度と余裕間隙比 (CUTX 試験)

2) CUTS 試験

図 5.4.14 に CUTS 試験での動的せん断強度 SR_{10} と余裕間隙比の関係を示す。余裕間隙比が小さいほど動的せん断強度が大きい。

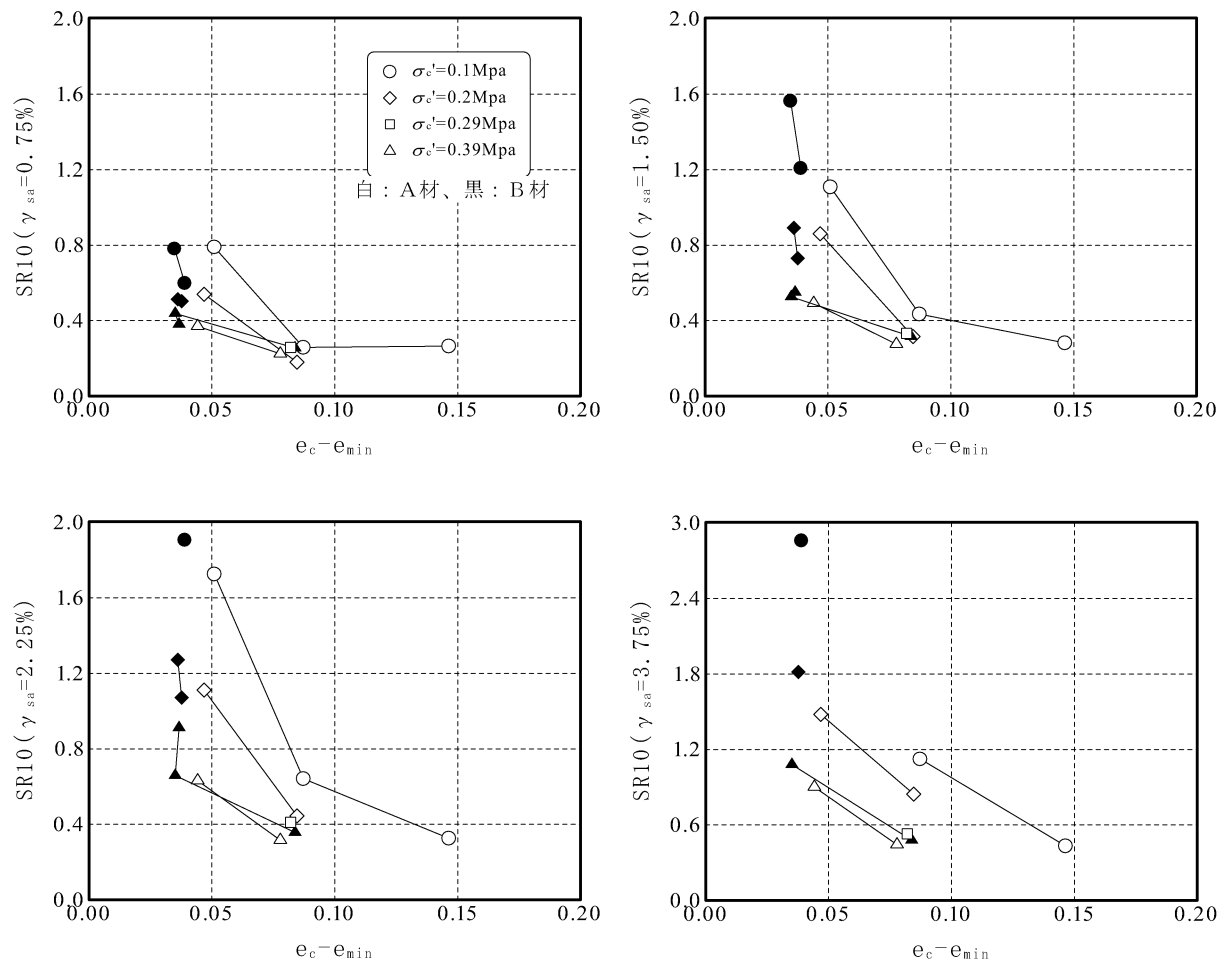


図 5.4.14 動的せん断強度と余裕間隙比 (CUTS 試験)

5.4.6 ダイレイタンシー特性 (岩下ら, 1997)

1) CUTX 試験

MDTX 試験で得られた最大ダイレイタンシー係数 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_{\max}$ と、動的せん断強度 $SR(\varepsilon_{sa})$ の関係を図 5.4.15 に示す。同材料では相対密度 Dr に関わらず $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_{\max}$ が大きいほど $SR(\varepsilon_{sa})$ が大きく、比例の傾向がみられ、ダイレイションが $SR(\varepsilon_{sa})$ に大きく影響すると推測される。

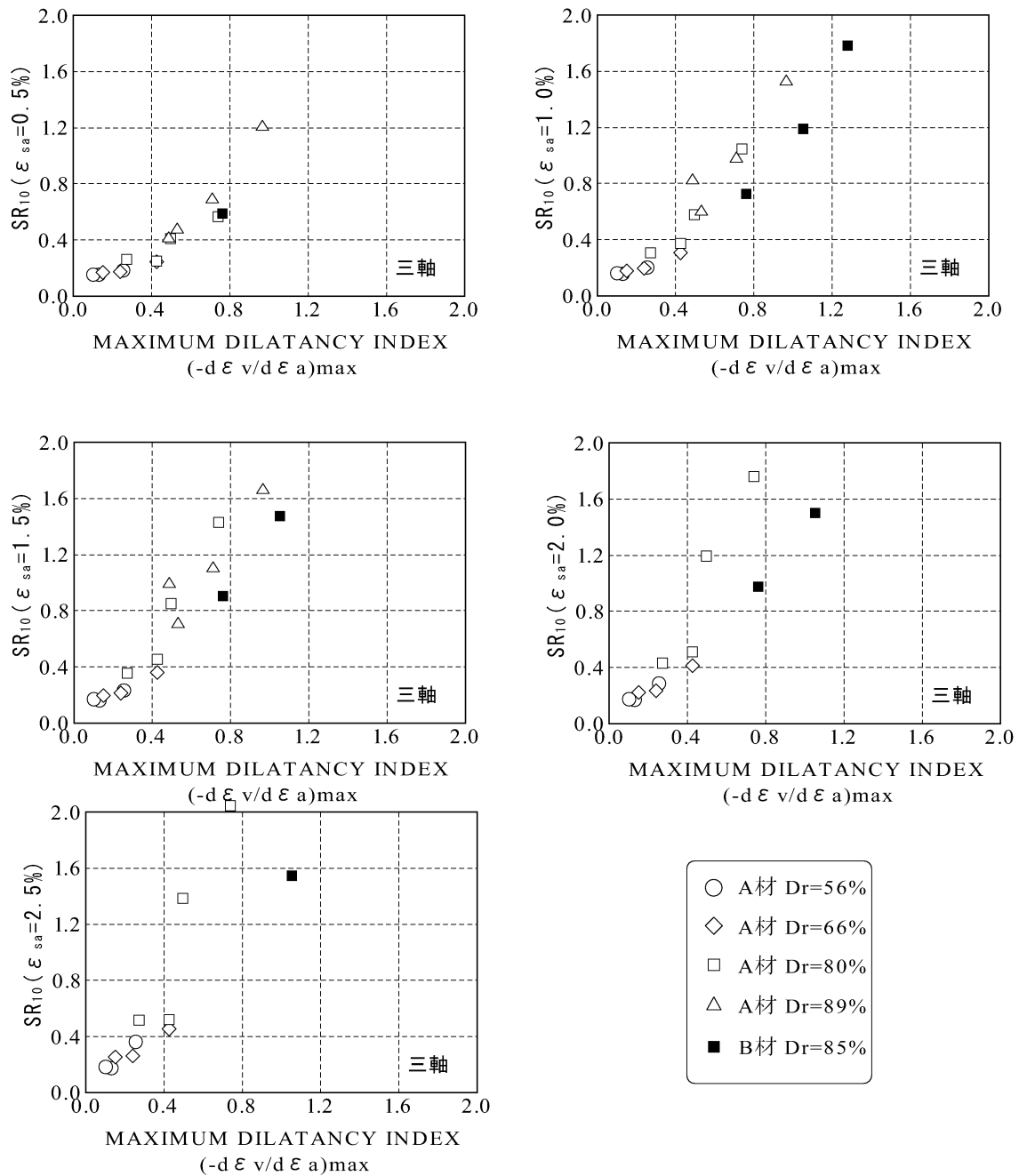


図 5.4.15 動的せん断強度と最大ダイレイタンシー係数 (三軸試験 CUTX)

2) CUTS 試験

MDTS 試験における最大ダイレイタンス係数 $(-d\varepsilon_v/d\gamma)_{\max}$ と、動的せん断強度 $SR(\gamma_{sa})$ の関係を図 5.4.16 に示す。三軸試験同様に、相対密度 Dr に関わらず、 $(-d\varepsilon_v/d\gamma)_{\max}$ と $SR(\gamma_{sa})$ には比例の傾向が見られ、ダイレイションが $SR(\gamma_{sa})$ に大きく影響すると推測される。

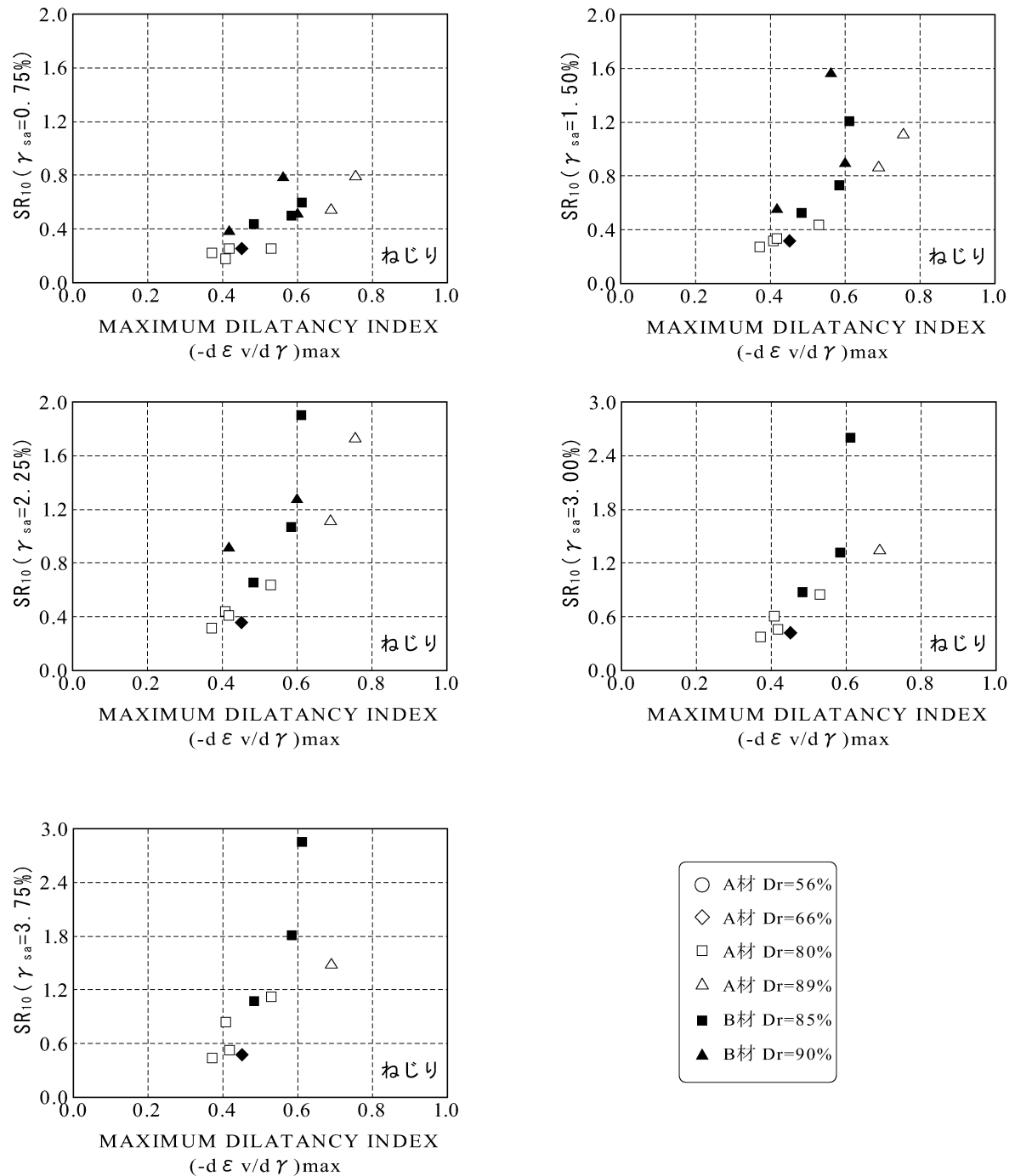


図 5.4.16 動的せん断強度と最大ダイレイタンス係数（ねじりせん断試験 CUTS）

図 5.4.15 および図 5.4.16 より動的せん断強度 SR_{10} は、供試体のダイレイタンシー特性に影響を受け、最大ダイレイタンシー係数と直線的な関係にある。最大ダイレイタンシー係数は、余裕間隙比 $e_0 - e_{min}$ と拘束圧 σ'_c で整理できる。また、 $e_0 - e_{min}$ は、 $(1 - Dr) \cdot (e_{max} - e_{min})$ と表現できることより、供試体の締まり具合と材料自体の密度特性によって決まる。以上のことより、粗粒材料の動的せん断強度は、拘束圧(σ'_c)、締まり具合(Dr)および材料自体の密度特性($e_{max} - e_{min}$)から推定できるといえる。

5.4.7 材料岩種（岩質・粒形）

1) 相対密度

CUTX 試験における粗粒A材（班れい岩，角礫）、B材（花崗岩，円礫）、C材（輝緑凝灰岩，角礫）の動的せん断強度と相対密度の関係を図 5.4.17 に示す。同一岩種では、相対密度が大きいほど動的せん断強度 SR は大きくなる。同一相対密度でも、材料が異なれば動的せん断強度は異なっていることがわかる。ほとんどの場合でB材のほうが動的せん断強度がA材より大きく、C材は、最も低い結果が得られた。

CUTS 試験における動的せん断強度と相対密度の関係を図 5.4.18 に示す。傾向は CUTX 試験結果と同様である。

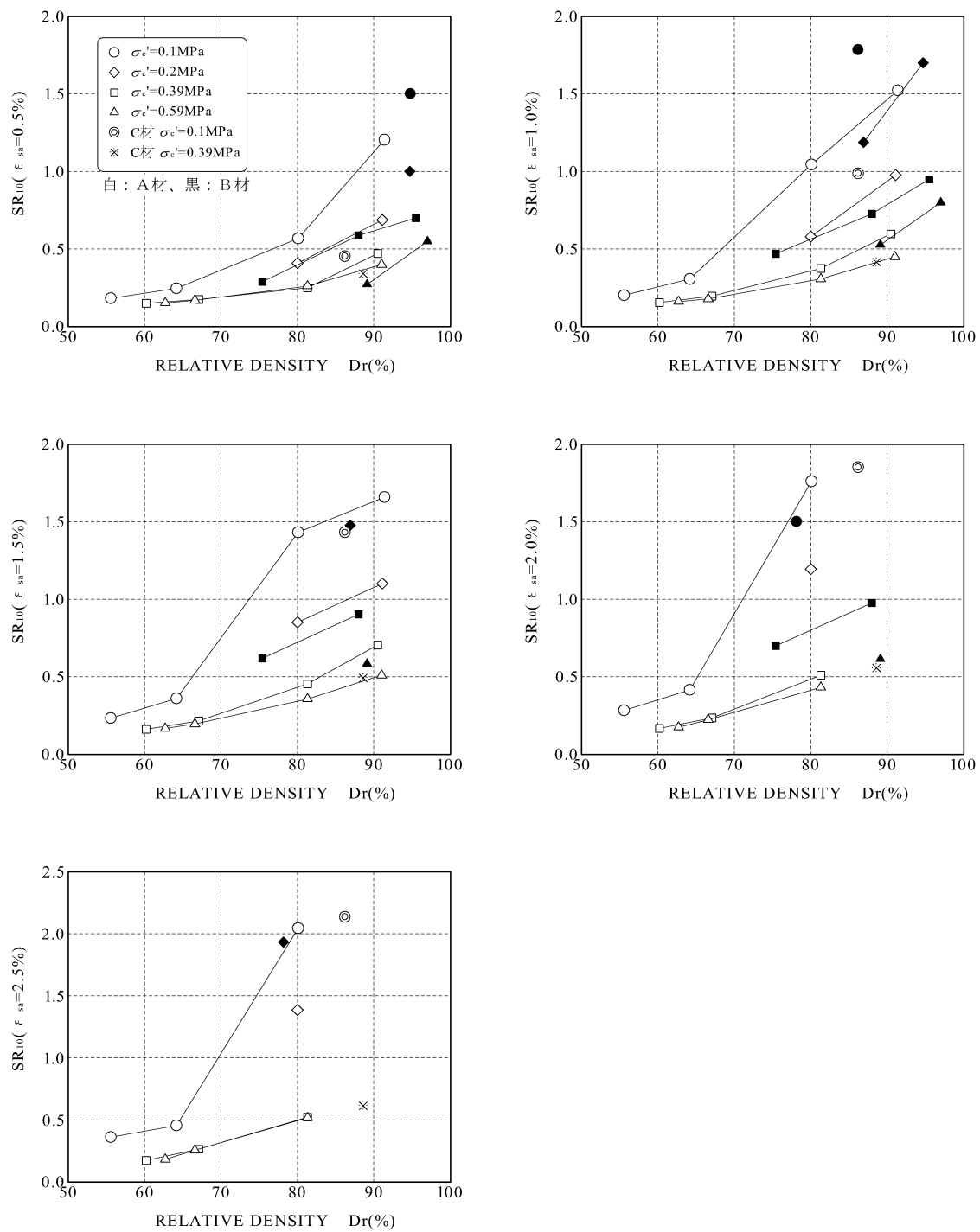


図 5.4.17 3材料の相対密度と動的せん断強度の関係 (CUTX 試験)

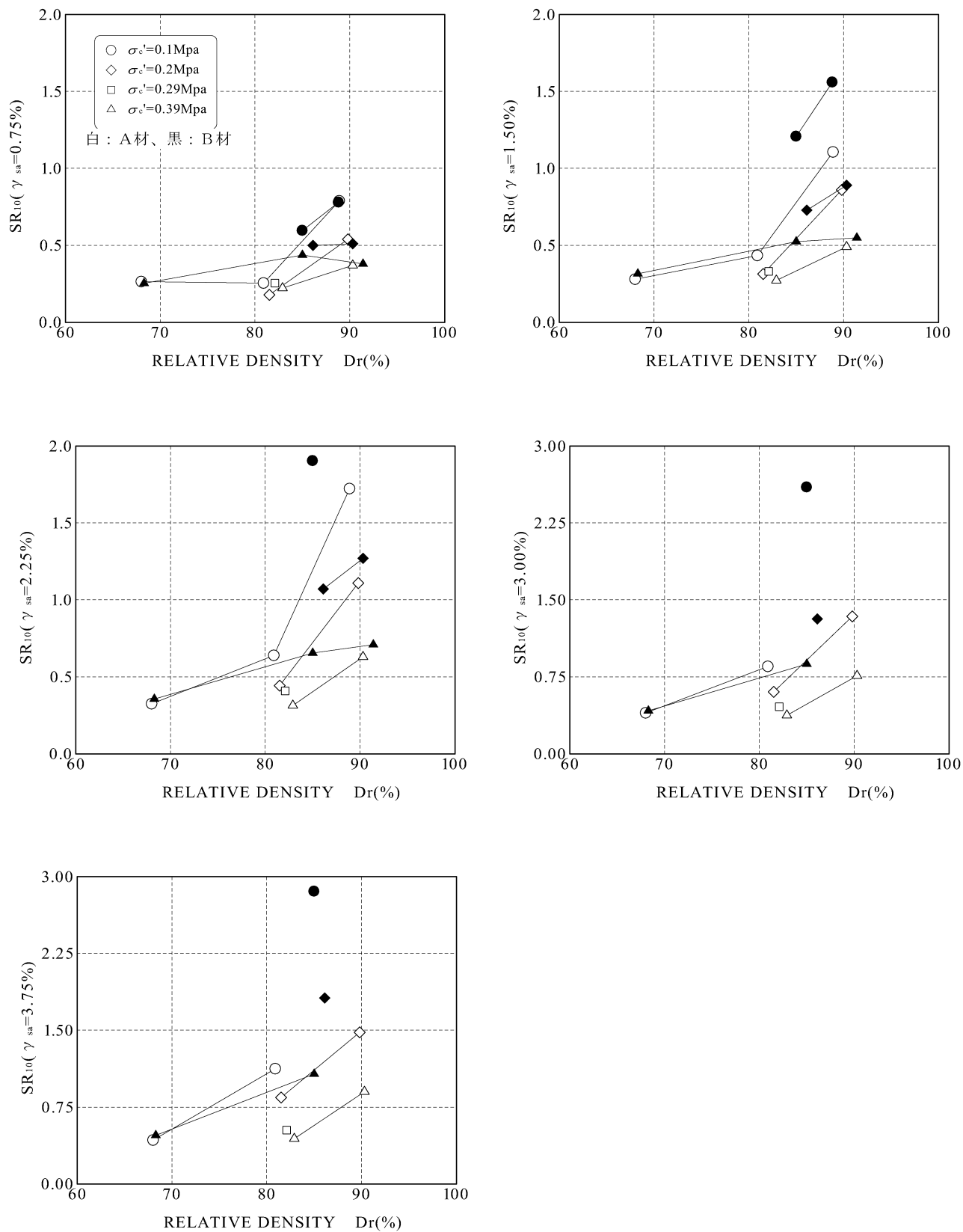


図 5.4.18 2材料の相対密度と動的せん断強度の関係 (CUTS 試験)

2) 余裕間隙比

A材とB材の動的せん断強度を余裕間隙比で比較したものを図 5.4.19 に示す。同余裕間隙比における各材料の動的せん断強度は、A材とB材の値がほぼ同じで、C材の値が小さい傾向が見られた。

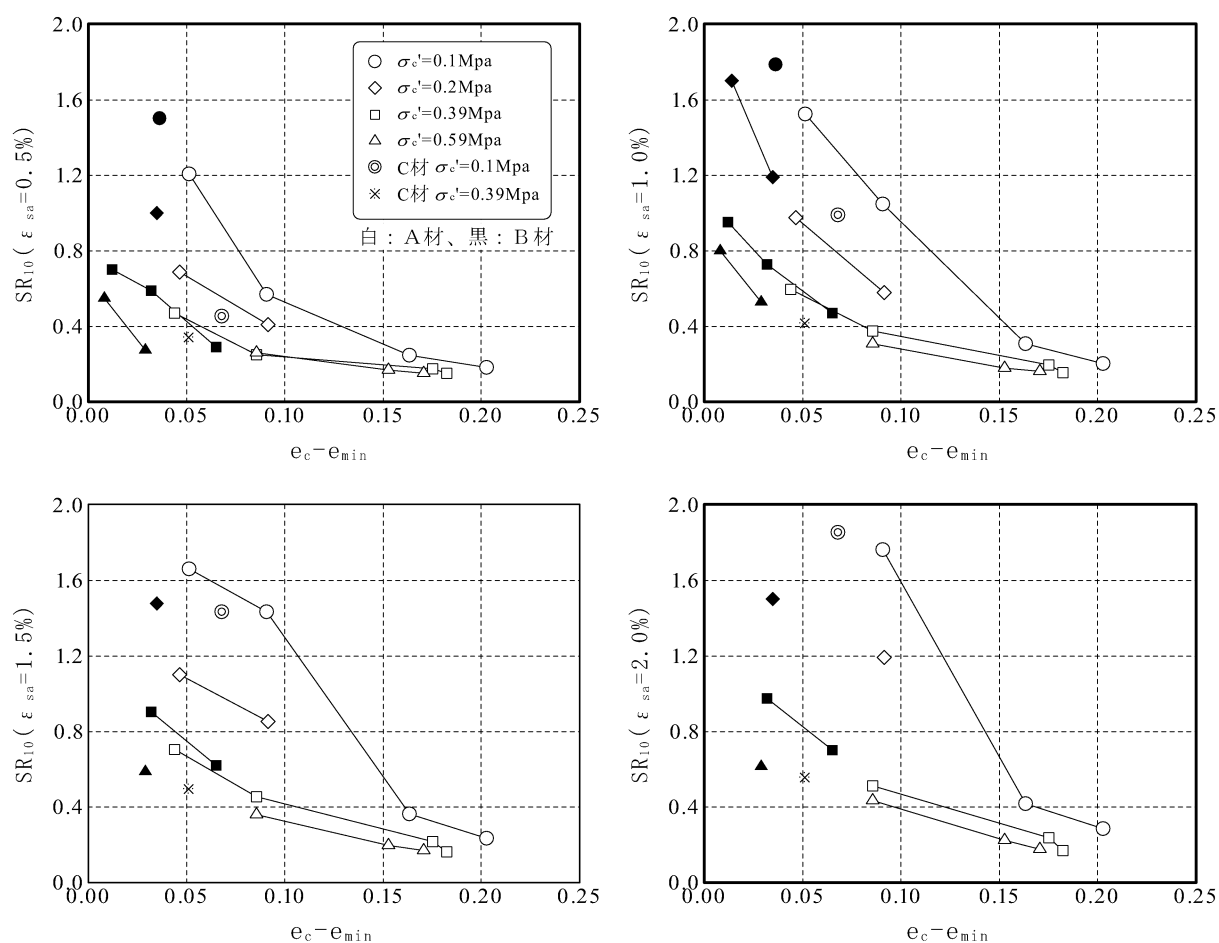


図 5.4.19 A材とB材の余裕間隙比と動的せん断強度の関係 (CUTX 試験)

3) 凹凸係数（粒形）（松浦・岩下ら，2001a）

動的せん断強度に及ぼす粒形の影響の度合いを見るため、1.3.2 項に示した凹凸係数 FU（表 1.3.2）を用いて整理する。CUTX 試験による $SR_{10}(\varepsilon_{sa}=1.0\%)$ と凹凸係数 FU の関係を図 5.4.20、CUTS 試験による $SR_{10}(\gamma_{sa}=3.75\%)$ FU の関係を図 5.4.21 に整理した。FU が小さい A 材及び C 材に比べて FU が大きい B 材の SR_{10} が大きい傾向にある。

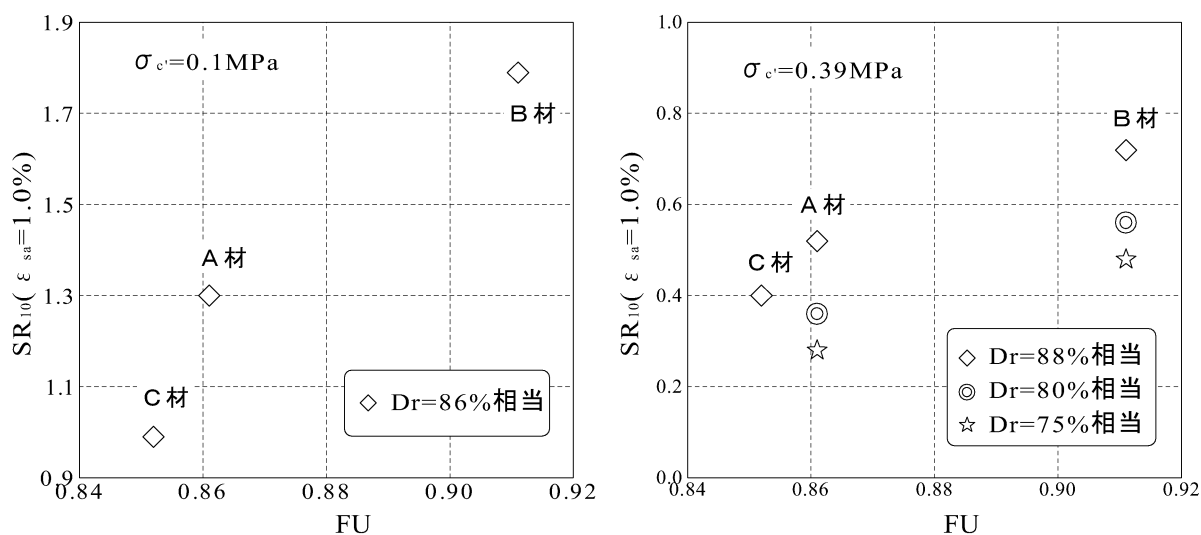


図 5.4.20 動的せん断強度と凹凸係数（CUTX 試験）

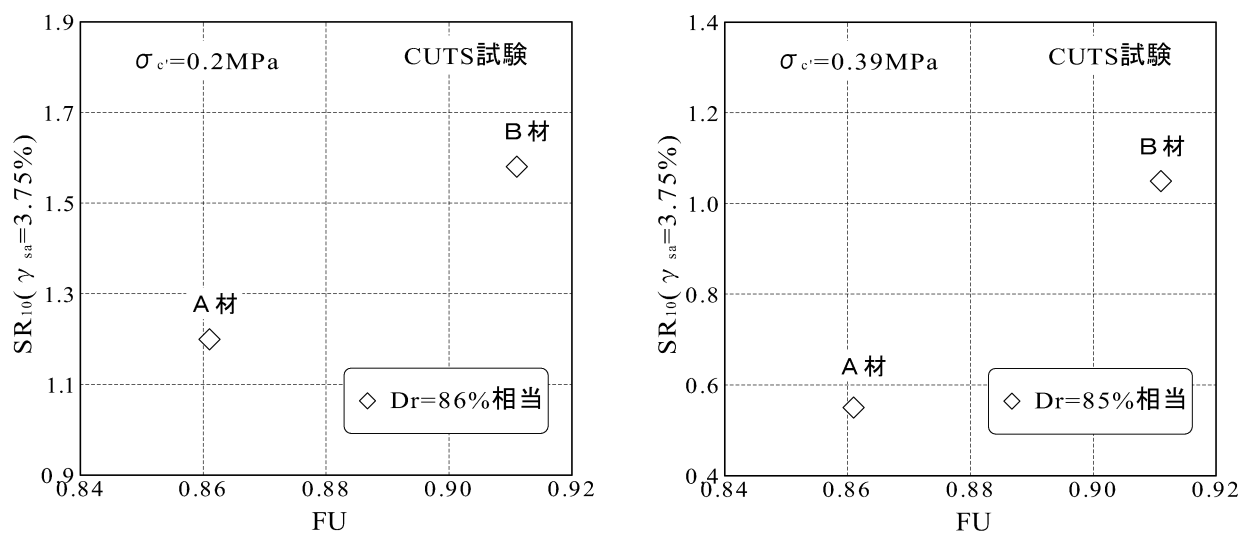


図 5.4.21 動的せん断強度と凹凸係数（CUTS 試験）

動的せん断強度 $SR_{10}(\varepsilon_{sa})$ は、粗粒材料のダイレイタンシー特性に関連している。異なる粒形の粗粒材料における傾向を見るため、3材料のMDTX試験によって得られた $Dr=80\sim 90\%$ の最大ダイレイタンシー係数 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_a)_{\max}$ と凹凸係数 FU の関係を図 5.4.22 に示す。 FU の大きいB材は、A, C材より最大ダイレイタンシー係数が大きい。 FU の大きいB材は、図 5.2.23 に示すように $e_{\max}-e_{\min}$ が小さく、つまり体積収縮の余地が小さいため、ダイレイションによる体積膨張が大きくなり、 $SR_{10}(\varepsilon_{sa})$ が大きくなると考えられる。

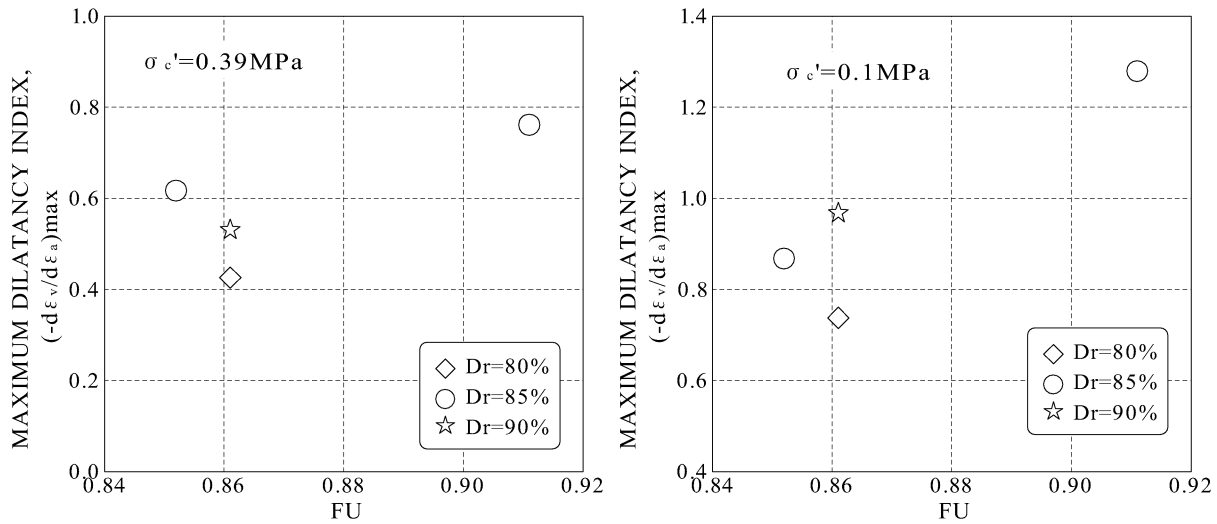


図 5.4.22 凹凸係数と最大ダイレイタンシー係数

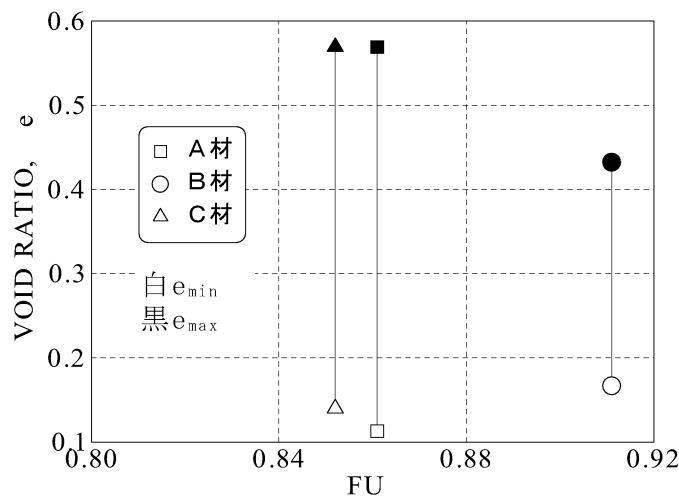


図 5.4.23 各材料の最大・最小間隙比と凹凸係数

MDTX 試験によるせん断破壊強度 τ_f と FU の関係を図 5.4.24 に示す。図 5.4.23 に示した FU の大きな B 材の繰返しせん断強度 $SR_{10}(\varepsilon_{sa})$ が A, C 材に比べ明らかに大きいのに対し、せん断破壊強度 τ_f は同一の Dr 条件で比べると材料の FU との明瞭な関連は見られない。 $SR_{10}(\varepsilon_{sa})$ を規定した片振幅軸ひずみ ε_{sa} は 1.0% であるが、MDTX 試験における破壊時の軸ひずみ ε_a は 3%~6% である。ひずみレベルが大きくなると、载荷による材料の破砕が生じやすくなる。 $SR_{10}(\varepsilon_{sa})$ が試験材料の粒形に大きく影響するのに対し、 τ_f は、粒形の違いだけではなく、岩石強度（例えば、点载荷圧裂強度 表 1.3.1 より：A 材>B 材>C 材）や破砕性（1.3.4 節で示した表 1.3.5 より C 材>B 材>A 材：図 5.4.25 に A, B, C 材の破砕率と凹凸係数の関係を示す）にも影響されと考えられる。

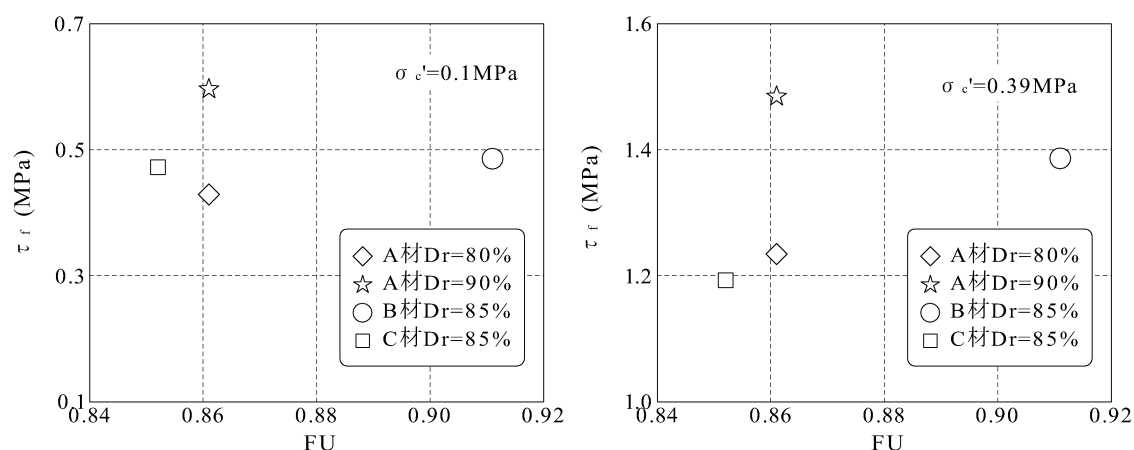


図 5.4.24 静的せん断破壊強度（MDTX 試験）と凹凸係数

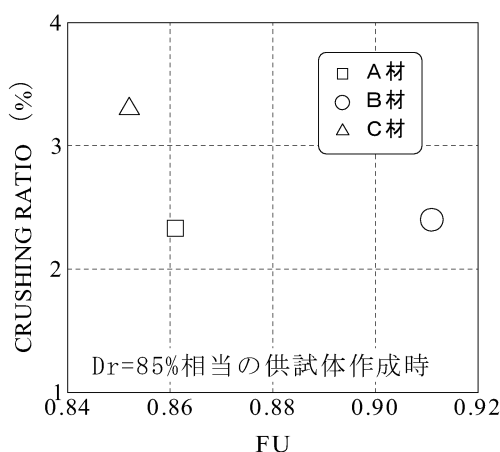


図 5.4.25 相対密度 Dr85%相当の供試体作成時 Marsal 破砕率と凹凸係数

表 1.3.1 各材料の点载荷圧裂強度

粗粒材料	点载荷圧裂強度 (MPa)
A 材	22.33
B 材	14.03
C 材	9.69

5.5 異方圧密および初期せん断応力の影響

5.5.1 時刻歴結果

1) 異方圧密 CUTX 試験

異方圧密した状態での CUTX 試験時刻歴の一例を図 5.5.1 に示す。繰返し载荷に伴い軸ひずみ ε_a は圧縮側に増大している。ただし、図 5.5.2 のように比較的低い異方圧密応力状態の試験では、 ε_a は伸張側に増大している。

繰返し非排水三軸試験 A材 $Dr_c=80.9\%$ $f=0.10$ Hz $\sigma_c'=0.294$ MPa $\sigma_{mc}'=0.392$ MPa $U_b=0.196$ MPa

$$\sigma_{ac}' / \sigma_{rc}' = 2.00 \quad \sigma_d \times 0.9 / 2 \sigma_{mc}' = 0.638 \quad (\sigma_d \times 0.9 + \sigma_s) / 2 \sigma_{mc}' = 1.012 \quad \text{P U 4 2 2}$$

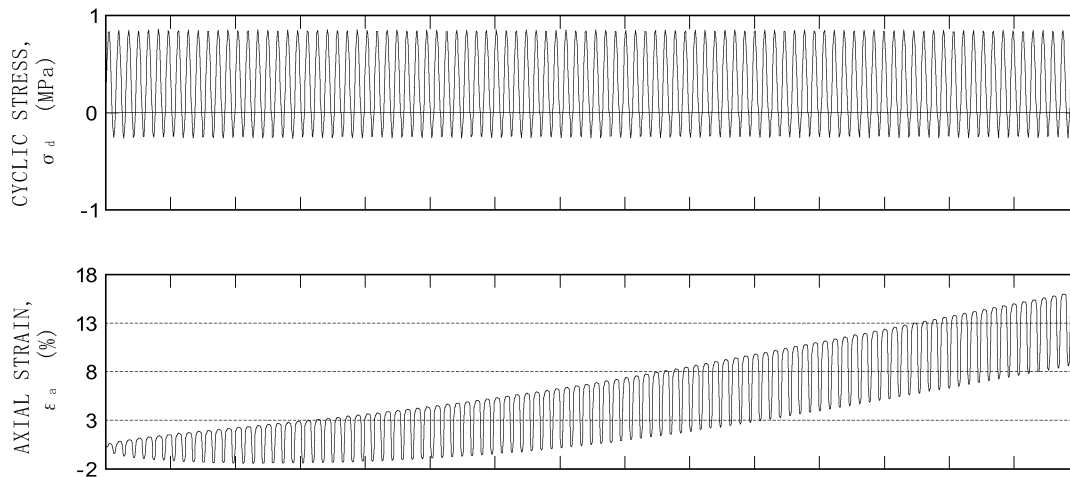


図 5.5.1 異方圧密 CUTX 試験時刻歴 (異方圧密応力比 $\sigma_{ac}' / \sigma_{rc}' = 2.0$)

繰返し非排水三軸試験 A材 $Dr_c=80.6\%$ $f=0.10$ Hz $\sigma_c'=0.336$ MPa $\sigma_{mc}'=0.392$ MPa $U_b=0.196$ MPa

$$\sigma_{ac}' / \sigma_{rc}' = 1.50 \quad \sigma_d \times 0.9 / 2 \sigma_{mc}' = 0.643 \quad (\sigma_d \times 0.9 + \sigma_s) / 2 \sigma_{mc}' = 0.858 \quad \text{P U 4 5 1}$$

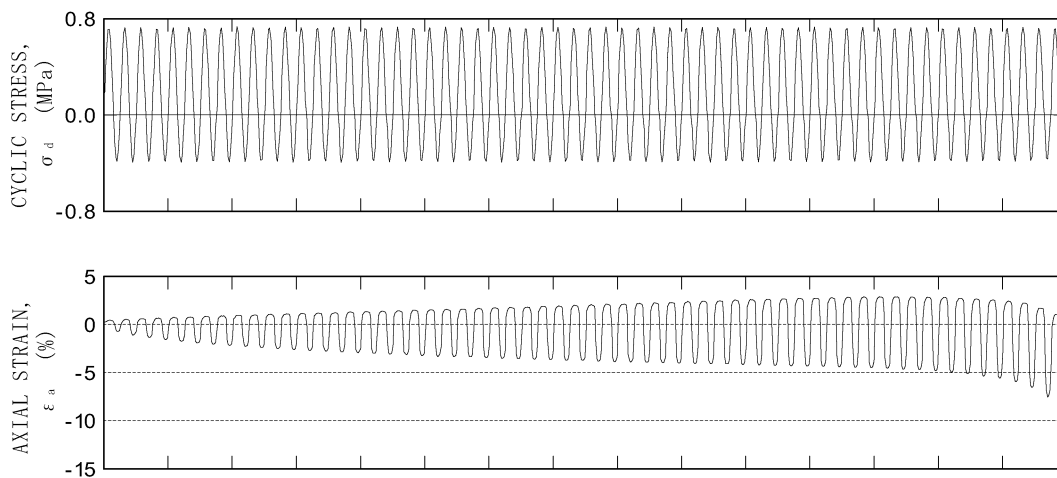


図 5.5.2 異方圧密 CUTX 試験時刻歴 (異方圧密応力比 $\sigma_{ac}' / \sigma_{rc}' = 1.5$)

2) 初期せん断応力載荷 CUTS 試験

排水条件で初期せん断応力載荷した CUTS 試験を実施した。結果の時刻歴の一例を図 5.5.3 に示す。図 5.5.3 に示されているせん断応力 $\tau_d=0$ は初期せん断応力 τ_s が載荷された状態であり、つまり、 τ_d には τ_s は含まれていない。せん断ひずみ γ は τ_s の載荷方向（+側）に大きく伸びている。

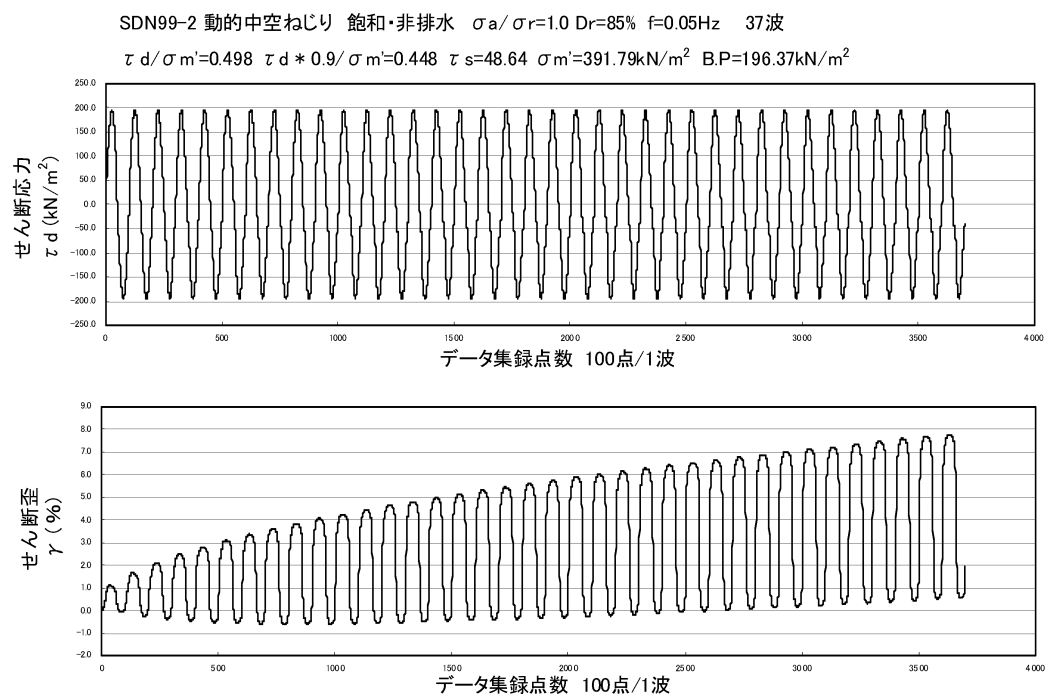


図 5.5.3 初期せん断応力載荷 CUTS 試験時刻歴（初期せん断応力 $\tau_s=0.05\text{MPa}$ ）

5.5.2 繰返し回数による整理結果

1) CUTX 試験による载荷回数と軸ひずみの関係

異方圧密の試験では、圧縮側に軸ひずみ ε_a が増加することが想定され、ピーク（圧縮側の）軸ひずみ ε_p を比較するのが妥当と考えられるが、図 5.5.4 に示すように CUTX 試験においては、試験条件によってピークひずみが圧縮側で増加するケースと、軸ひずみが伸張側に大きくひずむことによりピークひずみが途中から減少するケースがあり軸ひずみ方向が異なる。

異なる異方圧密応力比で同繰返しせん断応力比にて行った CUTX 試験における ε_{sa} と载荷回数 N の関係の一例を図 5.5.5 に示す。同载荷回数において異方圧密応力比が大きいほど ε_{sa} が小さい。

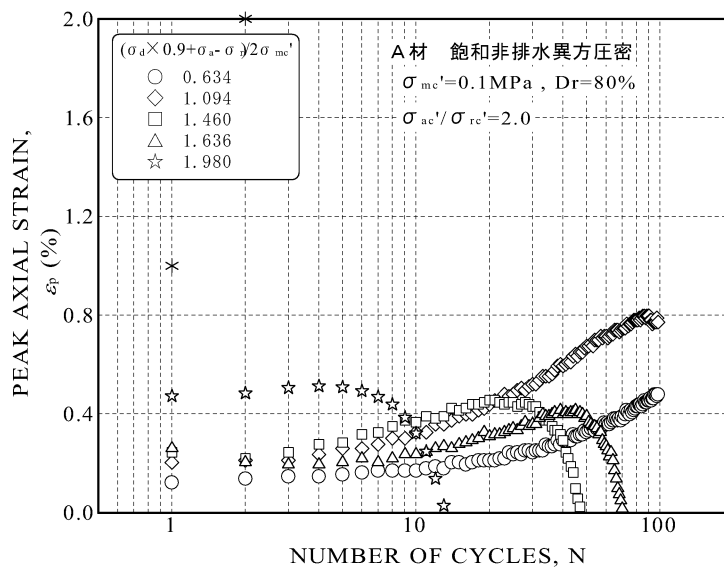


図 5.5.4 ピーク軸ひずみと载荷回数（繰返しせん断応力比で比較）

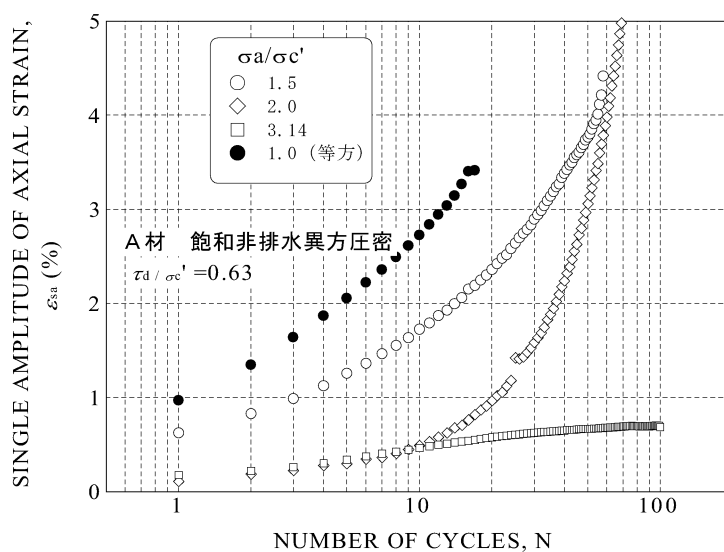


図 5.5.5 片振幅軸ひずみと载荷回数（異方圧密応力比で比較）

CUTX 試験による同繰返しせん断応力にて異方圧密応力比 $\sigma_{ac}'/\sigma_{rc}'$ を変えたケースにおける ε_p と N の関係の 1 例を図 5.5.6 に示す。異方圧密応力比の比較的小さい異方圧密比 1.5 や、等方圧密のケースでは引張り側に軸ひずみが増加しており、その影響で載荷回数が増加すると ε_p が減少する。また、異方圧密応力比 2.0 と 3.14 とでは同載荷回数での ε_p が逆転している。図 5.5.5 から異方圧密応力比 3.14 のケースでは載荷回数の増加に伴う片振幅軸ひずみの伸びが小さいことによると考えられる。

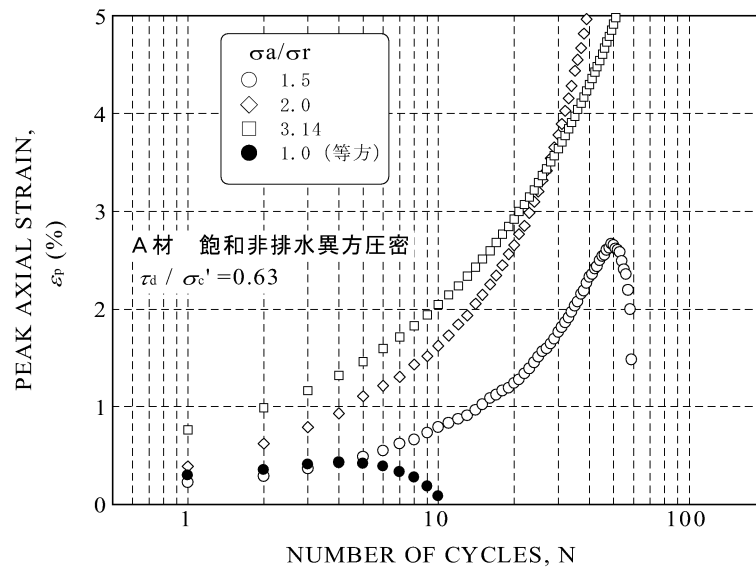


図 5.5.6 ピーク軸ひずみと載荷回数 (異方圧密応力比で比較)

2) CUTS 試験による載荷回数とせん断ひずみの関係

図 5.5.7 に A 材 CUTS 試験によるピークせん断ひずみ γ_p と繰返し載荷回数 N の関係を異なる初期せん断応力ケースごとに示す。繰返し応力載荷により応力反転する $\tau_s=0\sim 0.1\text{MPa}$ で比較すると、 τ_s が大きいほど γ_p が大きくなり、繰返し応力載荷中も応力非反転の $\tau_s=0.25, 0.3\text{MPa}$ のケースで比較すると τ_s が大きいほど γ_p は小さい。同載荷回数でのピークせん断ひずみの伸張は、応力反転する場合には初期せん断応力の影響が強く、応力非反転の場合は逆に影響が弱くなると考えられる。

図 5.5.8 には、A 材 CUTS 試験による片振幅せん断ひずみ γ_{sa} と繰返し載荷回数 N の関係を異なる初期せん断応力ケースごとに示す。応力反転、非反転に関係なく τ_s が大きいほど γ_{sa} は小さくなっている。

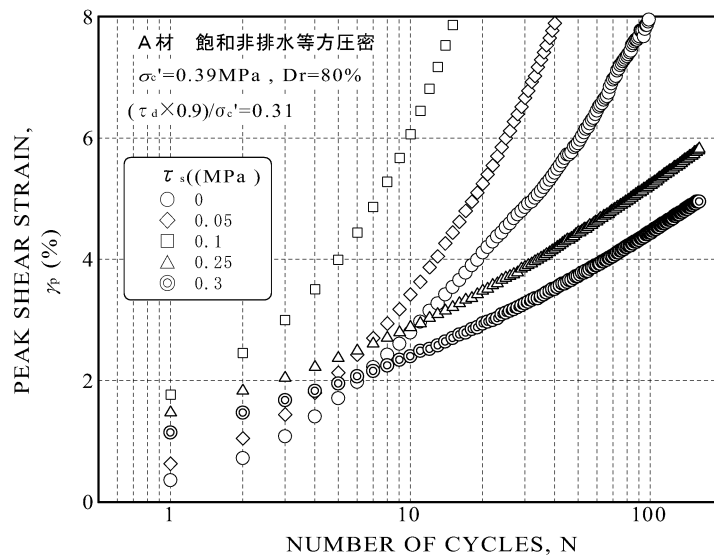


図 5.5.7 ピークせん断ひずみと載荷回数 (初期せん断応力で比較)

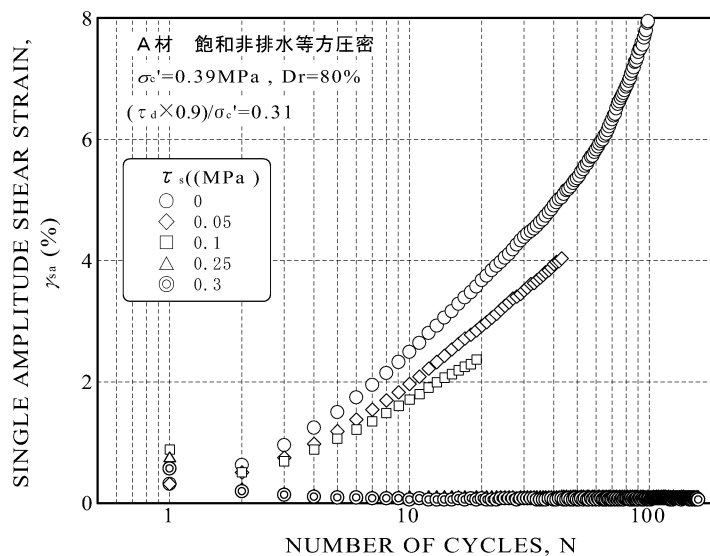


図 5.5.8 片振幅せん断ひずみと載荷回数 (初期せん断応力で比較)

5.5.3 動的非排水せん断強度への影響 (松浦・岩下ら, 2001b)

1) CUTX 試験

図 5.5.9～図 5.5.11 に動的せん断強度 $SR(\epsilon_{sa})$ と異方圧密応力比 $\sigma_{ac}'/\sigma_{rc}'$ の関係を示す。等方圧密の $SR(\epsilon_{sa})$ は片振幅軸ひずみで求めたものである。異方圧密応力比が大きいほど $SR(\epsilon)$ は大きくなっている。 $SR(\epsilon_{sa})$ は異方圧密応力比が大きいほど大きくなっている。 $SR(\epsilon_{sa})$ の決定時に、異方圧密応力を加味したせん断応力比を用いることが異方圧密応力比が大きいほど $SR(\epsilon_{sa})$ が大きくなる要因であると思われる。

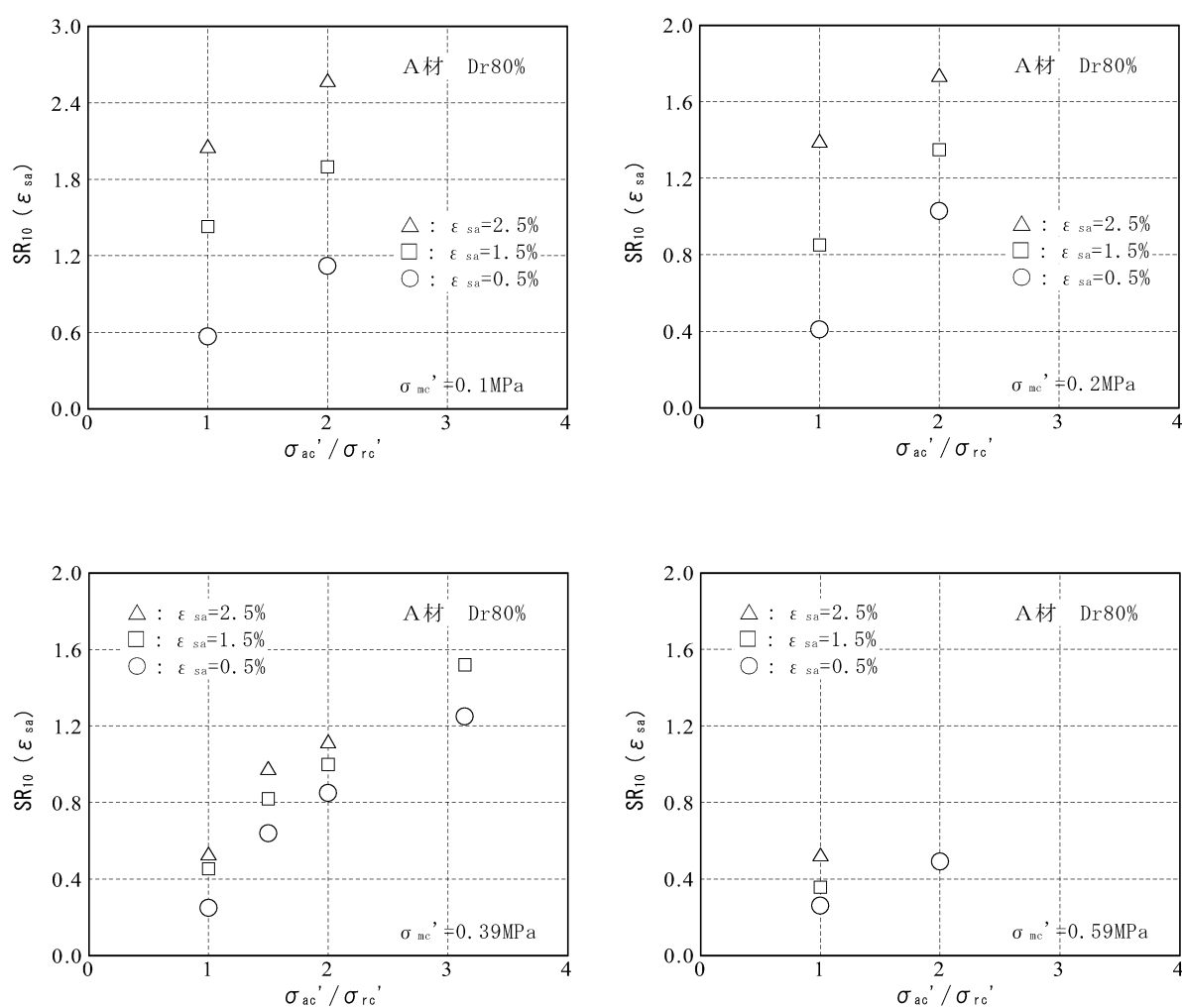


図 5.5.9 動的せん断強度と異方圧密応力比 (A材 Dr=80%)

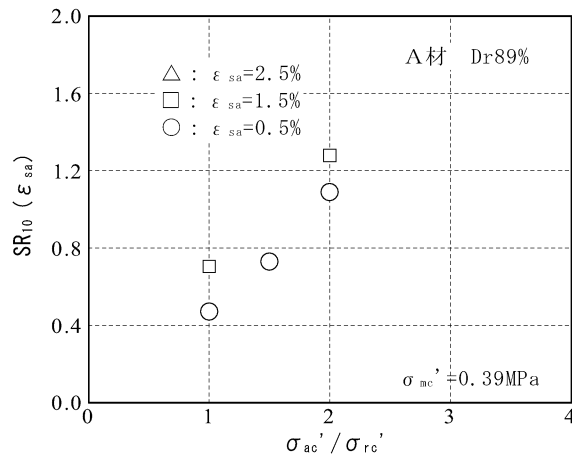
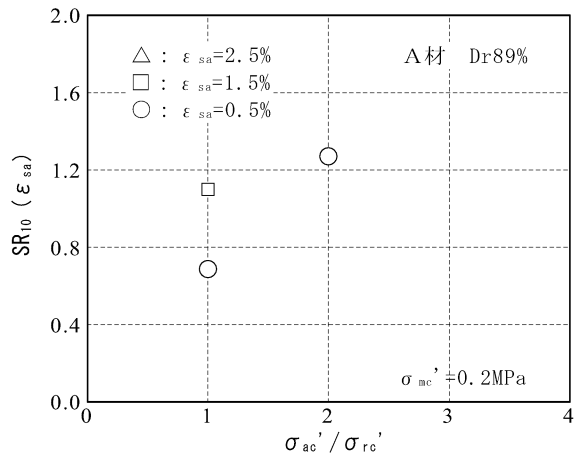
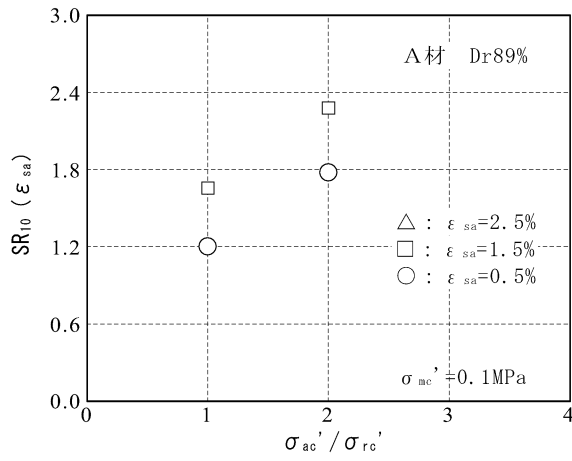


図 5.5.10 動的せん断強度と異方圧密応力比 (A材 Dr=89%)

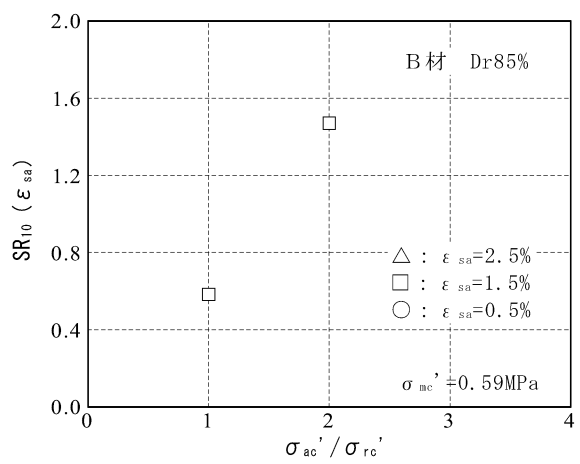
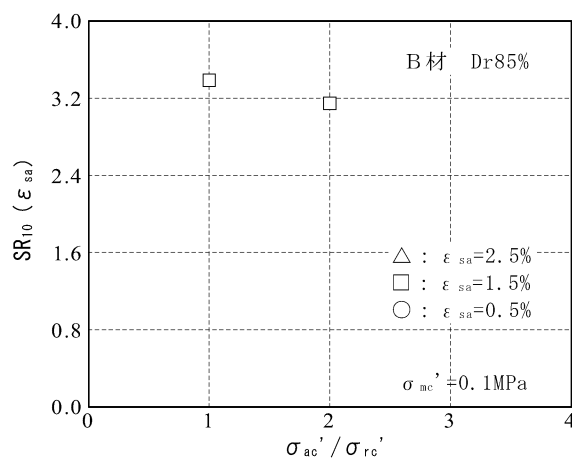


図 5.5.11 動的せん断強度と異方圧密応力比 (B材 Dr=85%)

図 5.5.12 に動的せん断強度と初期せん断応力比の関係を示す。図 5.5.13 に動的せん断強度と初期せん断応力比（静的排水強度との比）を示す。また、応力反転の境界を実線で示している。CUTS 試験による動的せん断強度と初期せん断応力比の関係のプロットはほぼ応力反転領域にある。

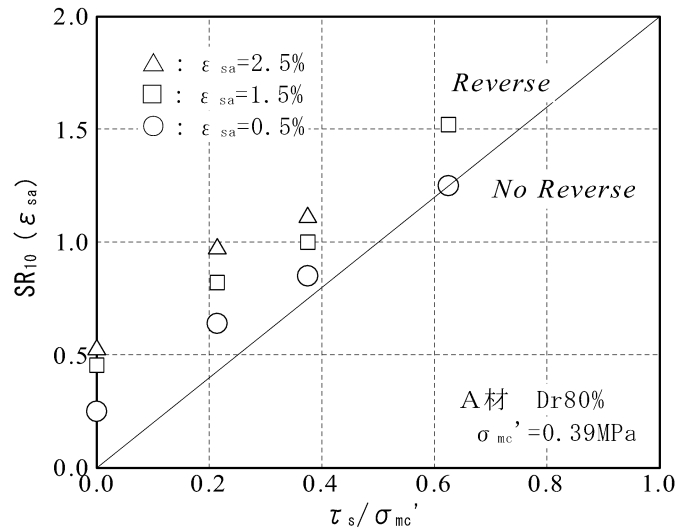


図 5.5.12 動的せん断強度と初期せん断応力比

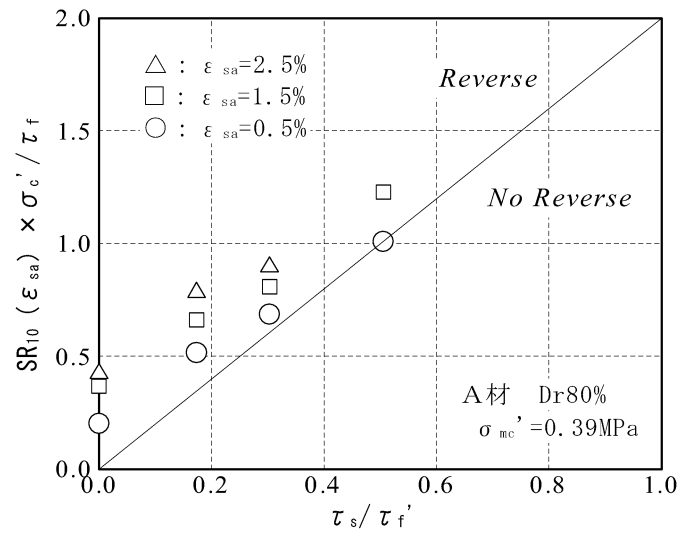
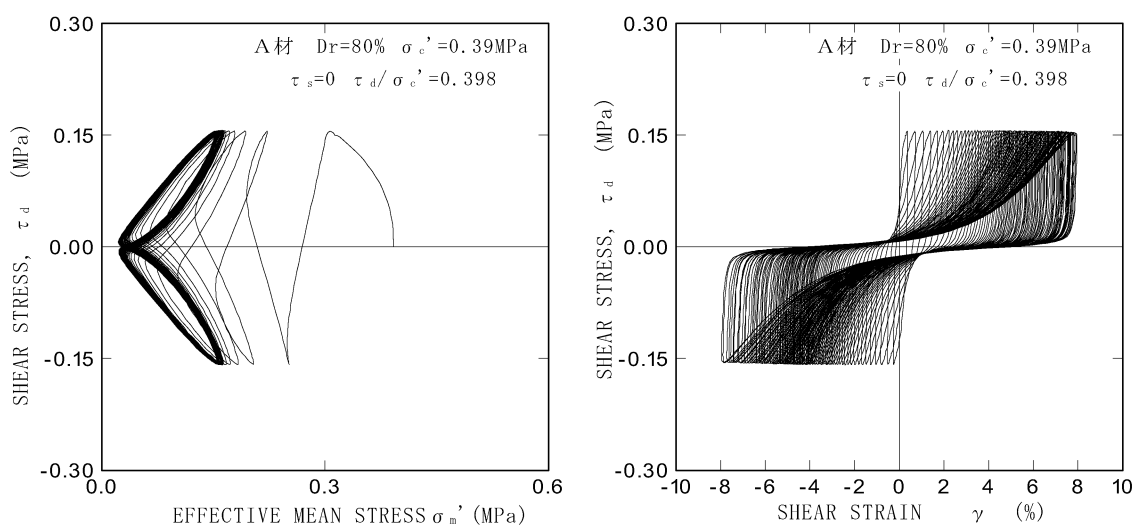


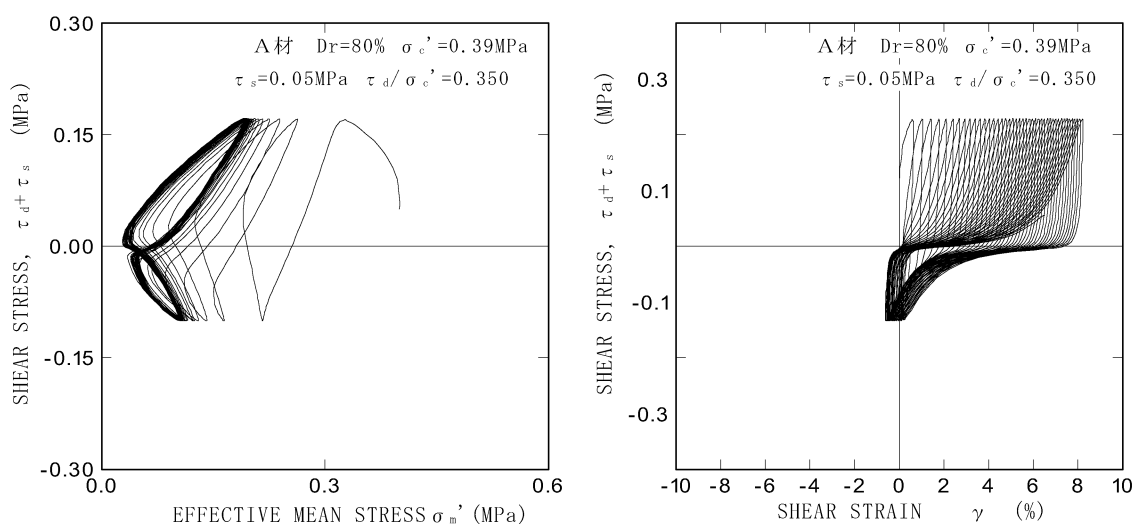
図 5.5.13 動的せん断応力比と初期せん断応力比（静的排水強度との比）

2) CUTS 試験

図 5.5.14 に A 材の初期せん断応力が異なり、繰返しせん断応力が反転する試験ケースと反転しない試験ケースのストレスパス及びせん断応力($\tau_d + \tau_s$)とせん断ひずみ γ の関係の例を示す。応力非反転とは、せん断応力の正負の交番がなく、 $\tau_d + \tau_s$ が常に正（応力载荷開始方向）であることを表す。応力反転する $\tau_s = 0, 0.05, 0.1 \text{ MPa}$ のケースでは、サイクリックモビリティ状態になっており、有効主応力の低下が大きい。また、有効主応力が低下している時のせん断ひずみ量が大きい。一方、応力非反転の $\tau_s = 0.25, 0.3 \text{ MPa}$ のケースではサイクリックモビリティには達しておらず、有効主応力は低下してもわずかである。



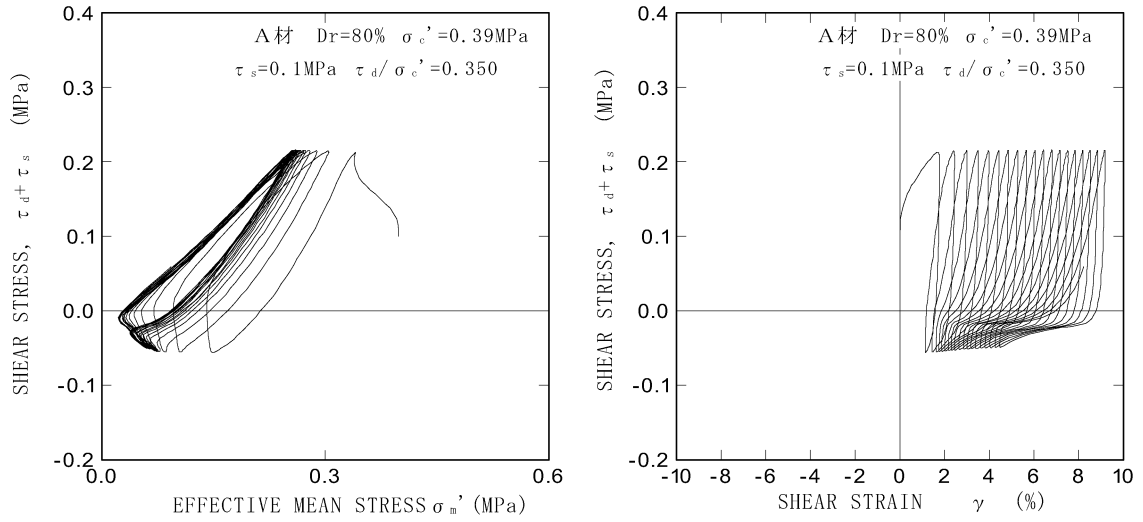
(a) $\tau_s = 0$ 応力反転



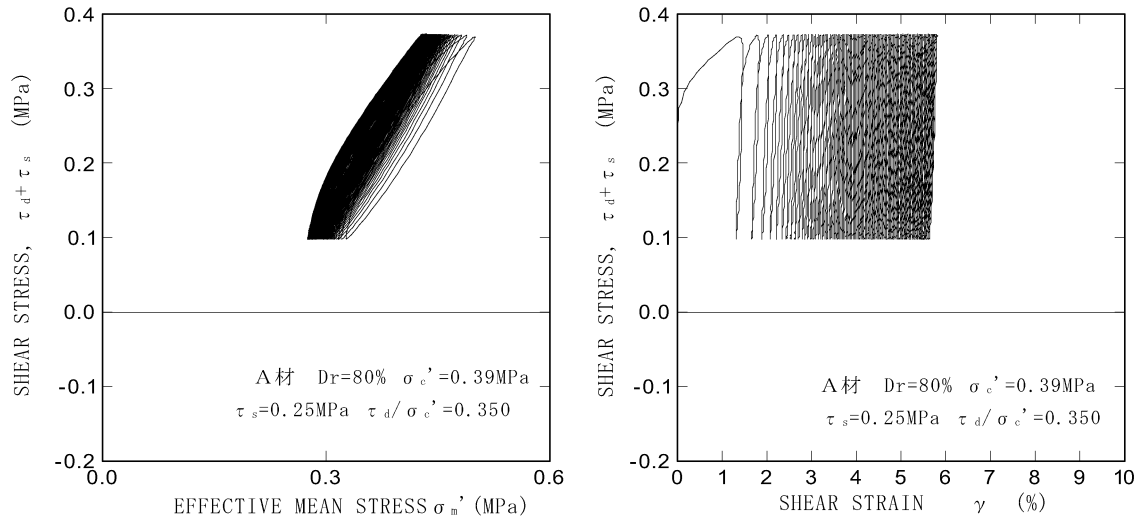
(b) $\tau_s = 0.05 \text{ MPa}$ 応力反転

図 5.5.14 初期せん断応力载荷 CUTS 試験における

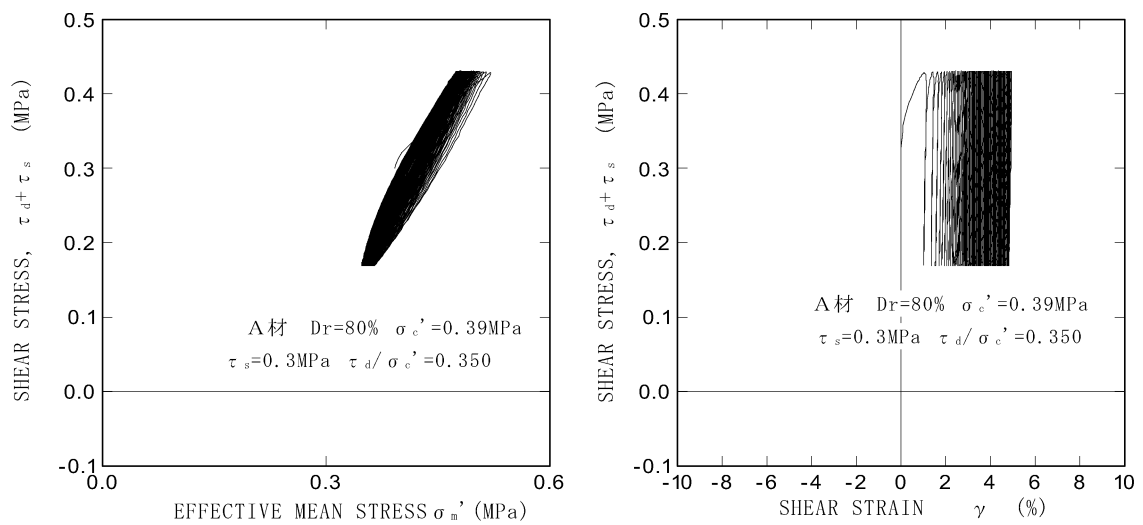
ストレスパスおよびせん断応力～せん断ひずみ関係（その 1）



(c) $\tau_s=0.1\text{MPa}$ 応力反転



(d) $\tau_s=0.25\text{MPa}$ 応力非反転



(e) $\tau_s=0.3\text{MPa}$ 応力非反転

図 5.5.14 初期せん断応力载荷 CUTS 試験における

ストレスパスおよびせん断応力～せん断ひずみ関係 (その2)

図 5.5.15 に、繰返し载荷回数毎の最小平均有効応力 $\sigma_{m,min}'$ の推移、図 5.5.16 に繰返し载荷回数毎の最大のせん断ひずみである、ピークせん断ひずみ γ_p の推移をそれぞれ異なる初期せん断応力 τ_s の試験ケース毎に示す。

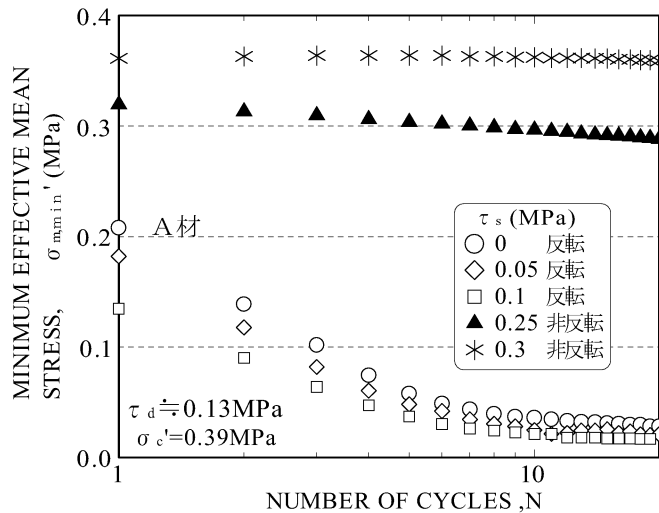


図 5.5.15 繰返し载荷回数毎の最小平均有効応力(A材, $\tau_d=0.13\text{MPa}$)

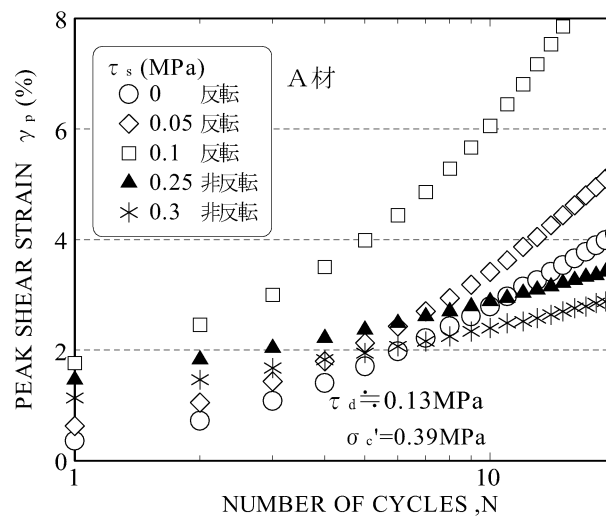


図 5.5.16 繰返し载荷回数毎のピークせん断ひずみ(A材, $\tau_d=0.13\text{MPa}$)

応力反転する $\tau_s=0, 0.05, 0.1\text{MPa}$ の試験ケースでは、 $\tau_d + \tau_s = 0$ 付近で、 σ_m' が 0 近くまで低下することにより剛性が低下し、繰返し载荷回数 N が増加するにつれ、せん断ひずみ量が大きく増加する。一方、応力非反転の $\tau_s=0.25, 0.3\text{MPa}$ の試験ケースでは σ_m' は 0 近くまでは低下せず、 N が増加してもひずみの増加は少ない。このように τ_s の違いによる応力反転、非反転の試験条件により、供試体の非排水せん断挙動は大きく異なり、生じるせん断ひずみ特性も異なる。これらの現象は初期せん断力が大きいほど初期応力状態が変相線に近くなることから説明できる。サイクリックモビリティ状態ではせん断応力が 0 付近で最も有効応力が低下する。応力反転の試験ケースでは、 τ_s を载荷すると少ない N でサイクリックモビリティ状態になり、最小平均有効応力 $\sigma_{m,min}'$ は 0 に近くなり、剛性低下を

生じる。ところが、応力非反転の試験ケースでは τ_s が大きいことから繰返し载荷直後にサイクリックモビリティ状態に入るものの、 $\tau_d + \tau_s = 0$ にせん断応力が達しないため、 $\sigma_{m,min}'$ は0近くまでは低下せず、剛性の低下が小さい。

A材、B材についての動的せん断強度（繰返しせん断応力比 τ_d/σ_c' ）と初期せん断応力比 τ_s/σ_c' を $\sigma_c' = 0.1, 0.39\text{MPa}$ の試験ケースの各々を図5.5.17に示す。ここに、動的せん断強度は $N=10$ 回の繰返し载荷で、基準ピークせん断ひずみ γ_p が生じるのに必要な繰返しせん断応力比とした。なお、2.2.2で述べたとおり、粒径の大きな粗粒材料の試験であるため、メンブレン・コンプライアンスの補正として、繰返しせん断応力比を一律10%低減した。また、応力反転と非反転の境を図中に示した。応力反転の領域では τ_d/σ_c' がある程度の範囲までは、動的せん断強度 τ_d/σ_c' は減少して極小値をとっている。その理由は図5.5.15での説明のように応力反転内で τ_s が载荷されると少ない载荷回数 N でサイクリックモビリティ状態となり、急激に $\sigma_{m,min}'$ が減少するからである。ただし、図5.5.17では基準千案ひずみを規定する载荷回数 $N=10$ としたケースを示したが、基準せん断ひずみを規定する载荷回数 N の設定をより大きくとれば、図5.5.15での各 τ_s に対応する $\sigma_{m,min}'$ の差が小さいことから、 τ_s による動的せん断強度 τ_d/σ_c' の減少傾向は小さくなる。一方、応力非反転の領域では τ_s が大きくなるほど、全範囲で動的せん断強度 τ_d/σ_c' は増加している。これは、図5.5.15の説明で述べたように τ_s が大きいほど、 $\sigma_{m,min}'$ の低下が小さいためである。また、応力反転の試験ケースとは異なり、図5.5.15に示すように、 τ_s 毎の $\sigma_{m,min}'$ の差に N による変化はない。したがって、応力非反転領域では規定载荷回数 N を変えても、 τ_s による動的せん断強度 τ_d/σ_c' の増加傾向は変わらない。本研究で用いた粒子形状の異なるA材、B材の2種類の粗粒材料では、動的せん断強度に及ぼす初期せん断力の影響の傾向に差はなかった。また、砂の繰返し非排水ねじりせん断試験による結果と比較すると、応力反転領域における τ_d/σ_c' が極小値をとる動的せん断強度 τ_s/σ_c' については粗粒A,B材の方が砂よりも大きくなったが、全体的な傾向はほぼ同じであった。

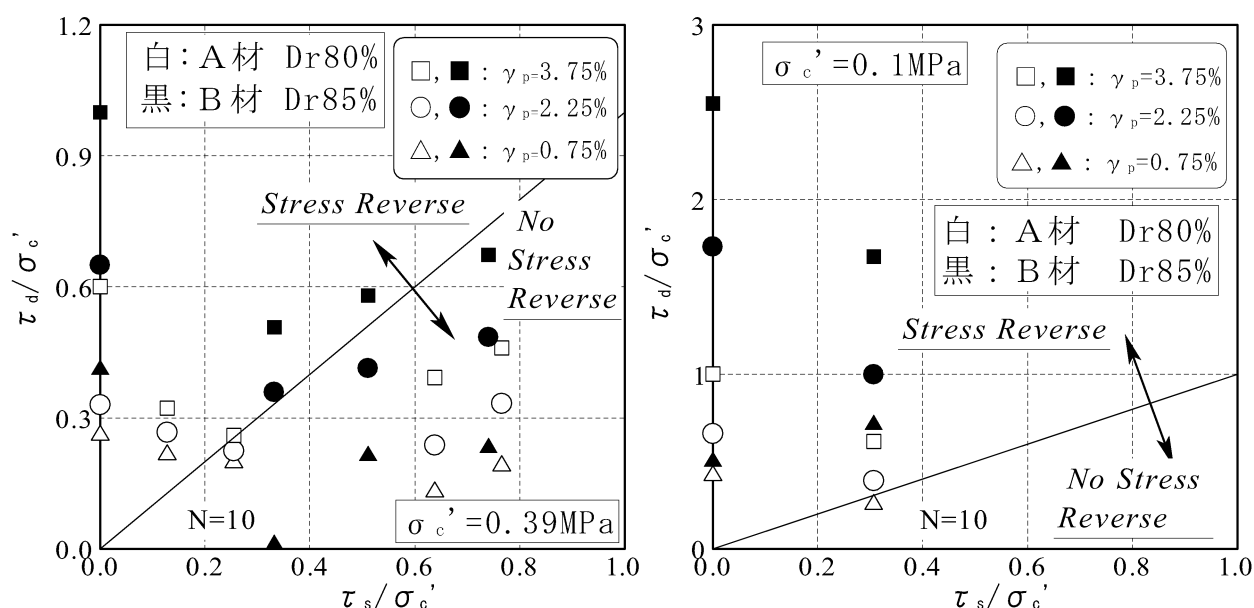


図 5.5.17 動的せん断強度（基準ひずみ規定载荷回数 $N=10$ ）と初期せん断応力比の関係

5.6 粒度分布の影響

5.6.1 試験粒度

粒度分布の違いが、CUTS 試験結果に及ぼす影響を検討するため、粗粒 A 材にて、これまでの試験で用いられている粒度（粒度分布 1）、細かめの粒度（粒度分布 2）、粗めの粒度（粒度分布 3）の 3 種類の粒度分布の材料を用いて試験を行った。試験粒度分布を表 5.6.1 に示す。粒度分布曲線を図 5.6.1 に示す。最大・最小間隙比を表 5.6.2 に示す。

表 5.6.1 各粒度分布の通過質量百分率

粒径 (mm)	粒度分布 1 通過質量百分率 (%)	粒度分布 2 通過質量百分率 (%)	粒度分布 3 通過質量百分率 (%)
0.25	7	7	5
0.425	9	20	7
0.85	13	33	9
2	19	52	13
4.75	34	73	22
9.5	48	82	35
19	67.5	89	54
26.5	76	92	68
37.5	86.5	95	80
53	94	98	94
63	100	100	100

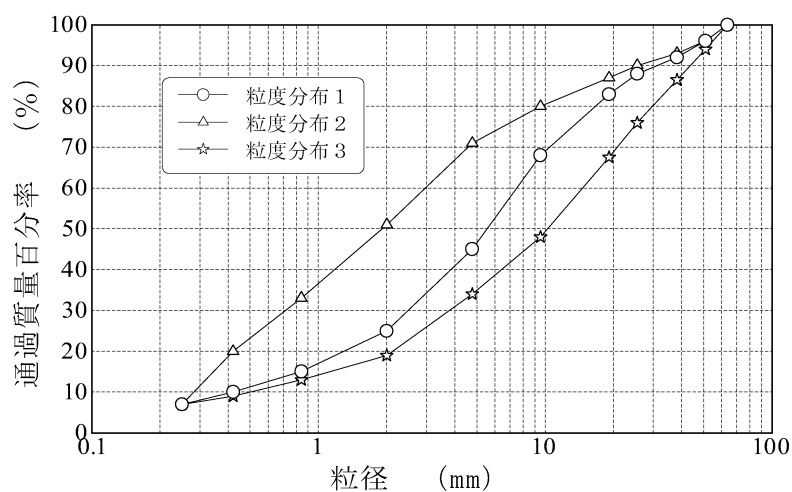


図 5.6.1 3 種の粒度分布曲線 (A 材)

表 5.6.2 各粒度分布の最大・最小間隙比

	粒度分布 1	粒度分布 2	粒度分布 3
最大間隙比	0.569	0.517	0.496
最小間隙比	0.113	0.191	0.167
$e_{\max}-e_{\min}$	0.456	0.326	0.329

5.6.2 試験条件

表 5.6.3 に示す試験ケースで比較を行った。

表 5.6.3 比較試験ケース(CUTS 試験)

	相対密度 $D_r(\%)$	$\sigma'_c(\text{MPa})$	せん断応力比
粒度分布 1	80	0.39	0.36
粒度分布 1	89	0.39	0.45
粒度分布 2	85	0.39	0.36
粒度分布 3	85	0.39	0.36

5.6.3 繰返し载荷回数毎による整理結果

図 5.6.2 に载荷回数 N と過剰間隙水圧比 $PWP_{\max}/\sigma'_c$ の関係を示す。細かめである粒度分布 2 は、過剰間隙水圧比が大きく、粗らめである粒度分布 3 の過剰間隙水圧比は小さい。

図 5.6.3 に载荷回数 N と片振幅せん断ひずみ γ_{sa} の関係を示す。粒度分布 2 と粒度分布 3 の同载荷回数での片振幅せん断ひずみを比較すると、過剰間隙水圧比が大きい粒度分布 2 のほうが片振幅せん断ひずみが大きい。なお、粒度分布 2 の片振幅せん断ひずみより粒度分布 1 の値が大きい、相対密度が異なるため、単純に比較出来ない。

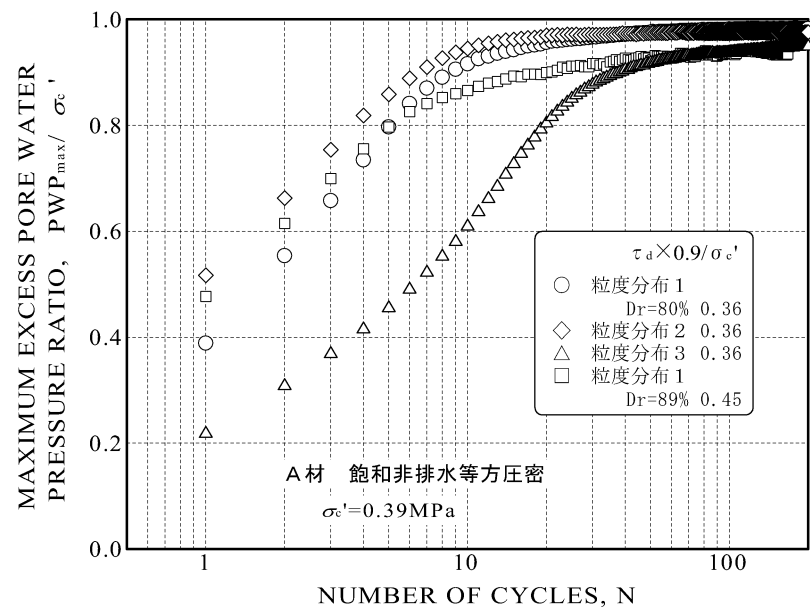


図 5.6.2 過剰間隙水圧比と繰返し载荷回数

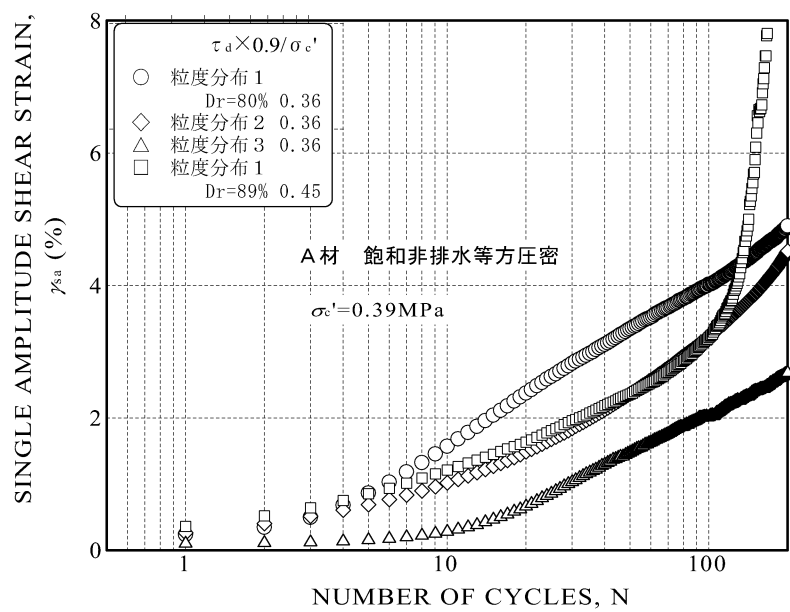


図 5.6.3 片振幅せん断ひずみと繰返し载荷回数

6 繰返し排水試験結果

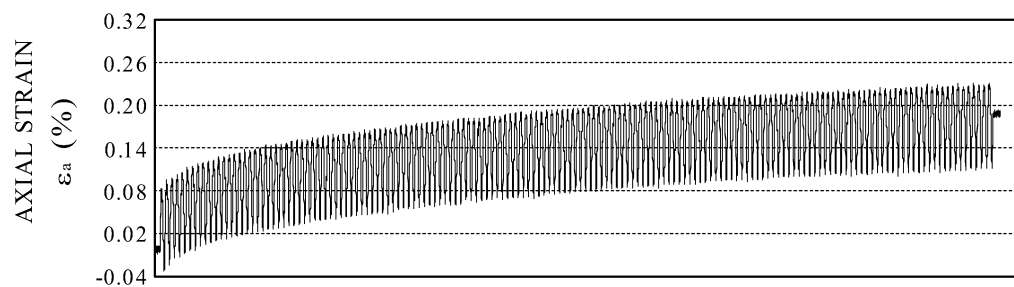
6.1 繰返し排水三軸試験（CDTX 試験）

6.1.1 時刻歴結果

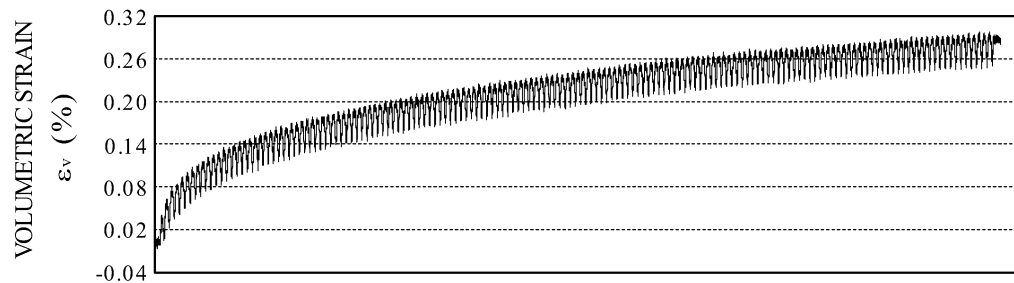
排水条件にて、繰返し載荷を行った結果の一例を図 6.1.1 に表す。

繰返し荷重による引張り張力の負荷による供試体の伸張により供試体上端部がネッキングを起こしやすいため、供試体軸方向にバイアスをかけ、異方圧密状態（ $\sigma_a/\sigma_v'=2.0$ ）の供試体に繰返し荷重を載荷した。

飽和排水条件にて応力制御を行い CDTX 試験の軸ひずみ ε_a と体積ひずみ ε_v の時刻歴を図 6.1.1 に示す。繰返し載荷回数とともに、 ε_a は圧縮方向に、堆積ひずみ ε_v は体積収縮していく。載荷の初期に比較的大きく残留ひずみ変化が生じ、載荷が進むにつれて残留ひずみ変化量が小さくなっていく。



軸ひずみ時刻歴



体積ひずみ時刻歴

図 6.1.1 排水試験時刻歴の例（CDTX 試験）

1) 荷重回数と両振幅軸ひずみ

荷重回数毎の両振幅軸ひずみ ε_{DA} を図 6.1.2 に示す。回数が進むにつれて若干ではあるが ε_{DA} は大きくなっている。

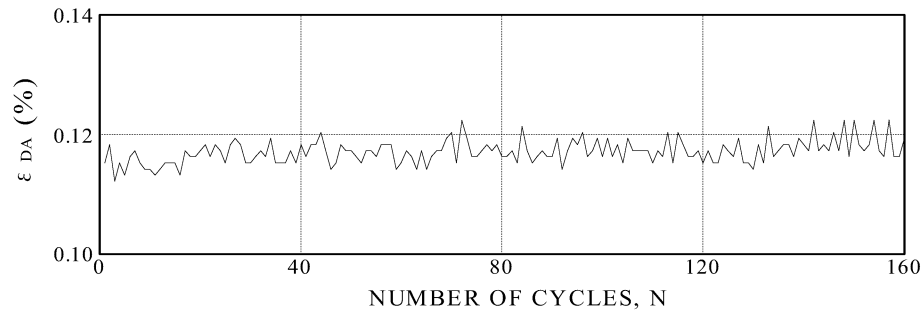


図 6.1.2 荷重回数と両振幅軸ひずみ (CDTX 試験)

2) 荷重回数と体積ひずみ

荷重回数毎の体積ひずみ振幅 ε_{vDA} を図 6.1.3 に示す。回数が進むにつれて ε_{vDA} はわずかに大きくなっているがほぼ一定である。

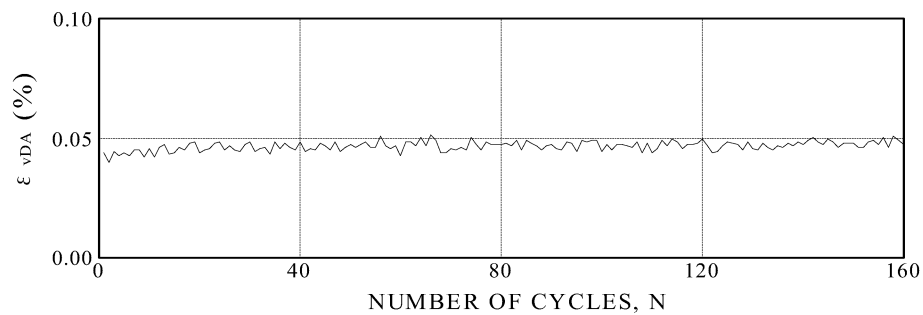


図 6.1.3 荷重回数と体積ひずみ (CDTX 試験)

3) 軸ひずみと体積ひずみの関係

軸ひずみ ε_a と体積ひずみ ε_v の時刻歴の関係を図 6.1.4 に示す。

排水試験 99SA-DY06 2000/8/23 $\sigma_1=0.196$ MPa $\sigma_3=0.098$ MPa $\sigma_1/\sigma_3=2.00$
 $\sigma_m=0.131$ MPa $U_b=0.196$ MPa $\tau_d/\sigma_m=0.547$

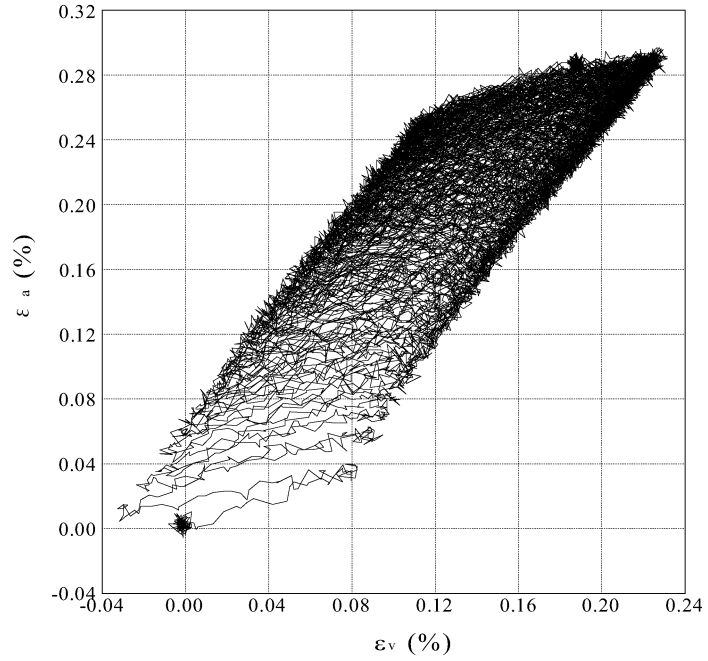


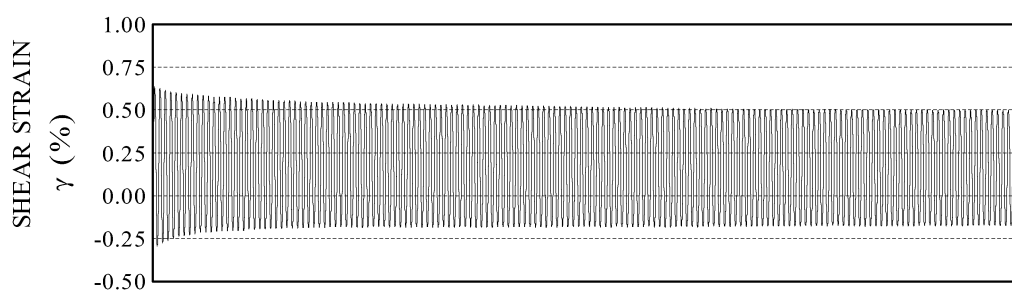
図 6.1.4 軸ひずみと体積ひずみ (CDTX 試験)

6.2 繰返し排水ねじりせん断試験 (CDTS 試験)

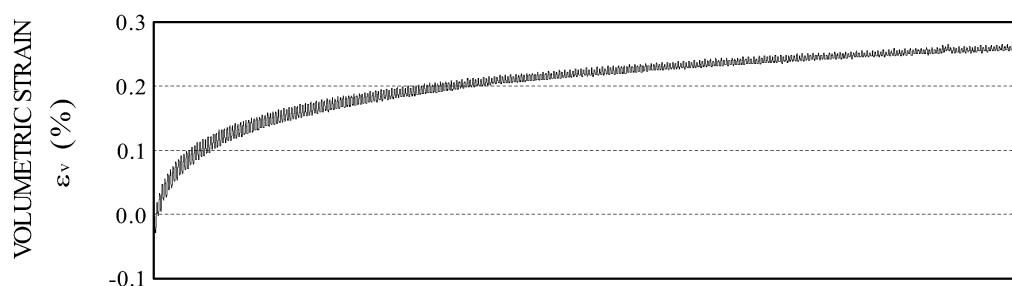
6.2.1 時刻歴結果

繰返し排水ねじりせん断試験 CDTS 試験の一例として、A 材 ($Dr=80\%$, 拘束圧 $\sigma'_c=0.1\text{MPa}$) の試験結果として、せん断ひずみ γ 、体積ひずみ ε_v 、軸ひずみ ε_a の時刻歴を図 6.2.1 に示す。

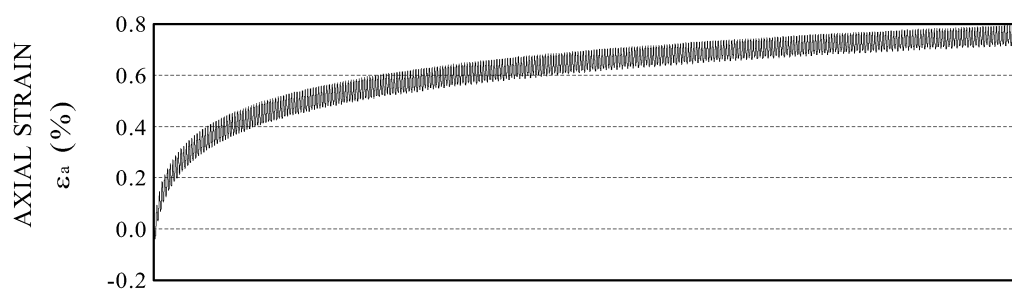
CDTS 試験においては、载荷が進むにつれて体積ひずみおよび軸ひずみともに圧縮方向に進む。また、その変化量は、载荷初期において大きい。せん断ひずみ振幅は、载荷回数が多くなるにつれて、供試体の密度も大きくなることもあり、徐々に減少する傾向にある。



せん断ひずみ時刻歴



体積ひずみ時刻歴



軸ひずみ時刻歴

図 6.2.1 排水試験時刻歴の例 (CDTS 試験)

1) せん断ひずみと体積ひずみ

図 6.2.2 に、気乾状態での A 材 ($D_r=80\%$) の 2 拘束圧条件 ($\sigma_c'=0.1, 0.39\text{MPa}$) における CDTs 試験による体積ひずみとせん断ひずみの時刻歴の関係を示す。繰返しせん断応力載荷により、載荷 1 周期内での体積ひずみの増減を繰り返しながら、残留体積ひずみが増加していき、供試体は密に詰まっ
ていく。それに伴い、せん断ひずみ振幅は減小していく。載荷を重ねる毎に 1 載荷毎の体積ひずみ ε_v の変化は小さくなり、収束する。

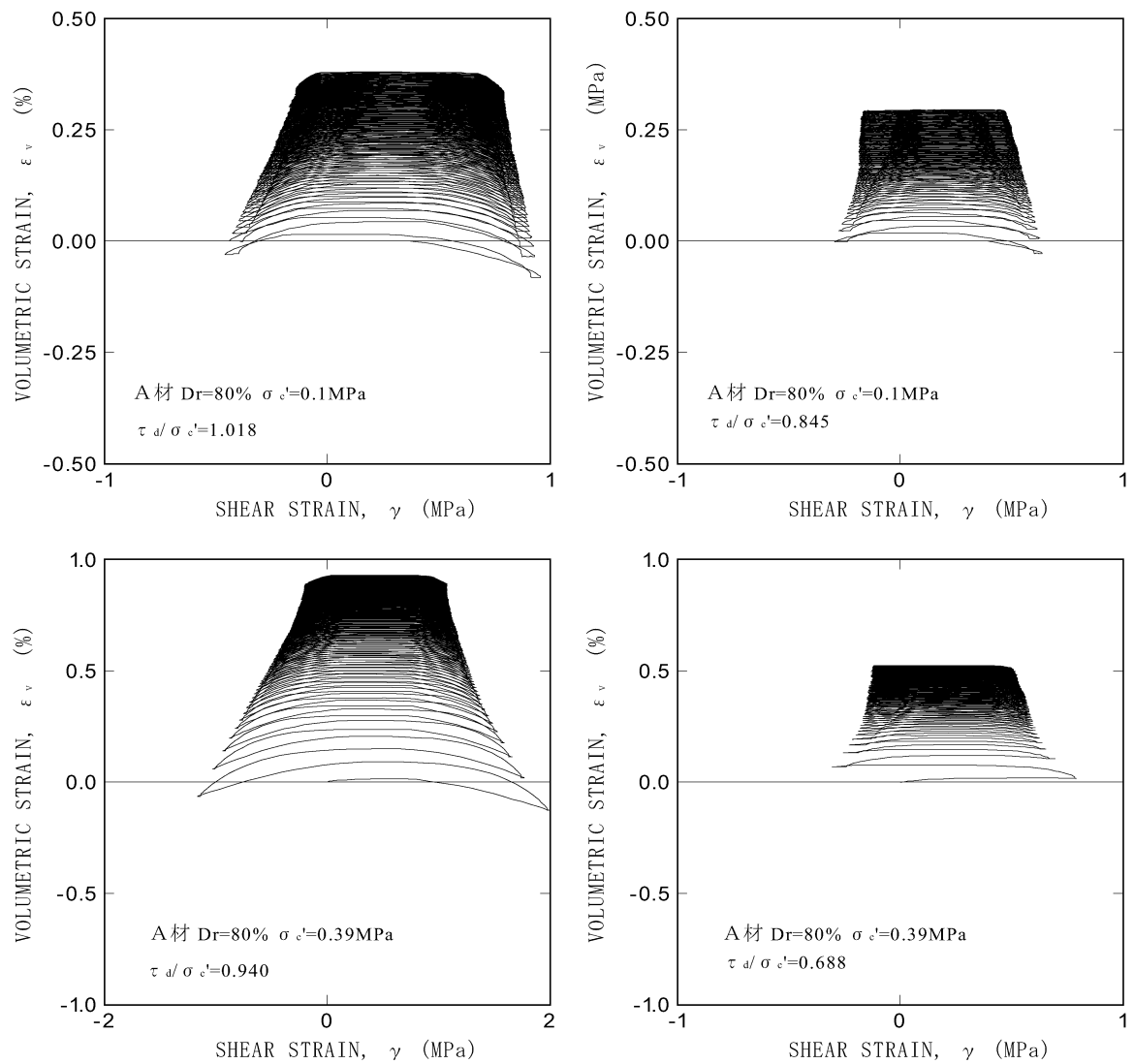


図 6.2.2 せん断ひずみと体積ひずみの関係 (CDTS 試験)

6.3 排水と非排水条件による動的せん断強度の比較

6.3.1 せん断ひずみ

A材 $Dr=80\%$ における気乾状態の CDTS 試験と飽和状態の CUTS 試験の片振幅せん断ひずみ γ_{sa} と 載荷回数 N の関係を図 6.3.1 に示す。

非排水試験では、ねじりせん断載荷が進むにつれ片振幅せん断ひずみが大きくなっていくのに対して、排水試験では片振幅せん断ひずみは小さくなっていく。排水試験では載荷が進むにつれ体積収縮し、供試体が密になっていくため、ひずみが出にくくなると考えられる。

繰り返し載荷回数 1 波目をみると、非排水試験のせん断応力比 1.36 と排水試験のせん断応力比 1.14、また、非排水試験のせん断応力比 0.82 と排水試験のせん断応力比 1.00 では片振幅せん断ひずみがほぼ同じになっている。このことから同せん断応力比で 1 波目の片振幅せん断ひずみを考えると、片振幅せん断ひずみが比較的大きい範囲での場合は排水試験による片振幅せん断ひずみが大きい。

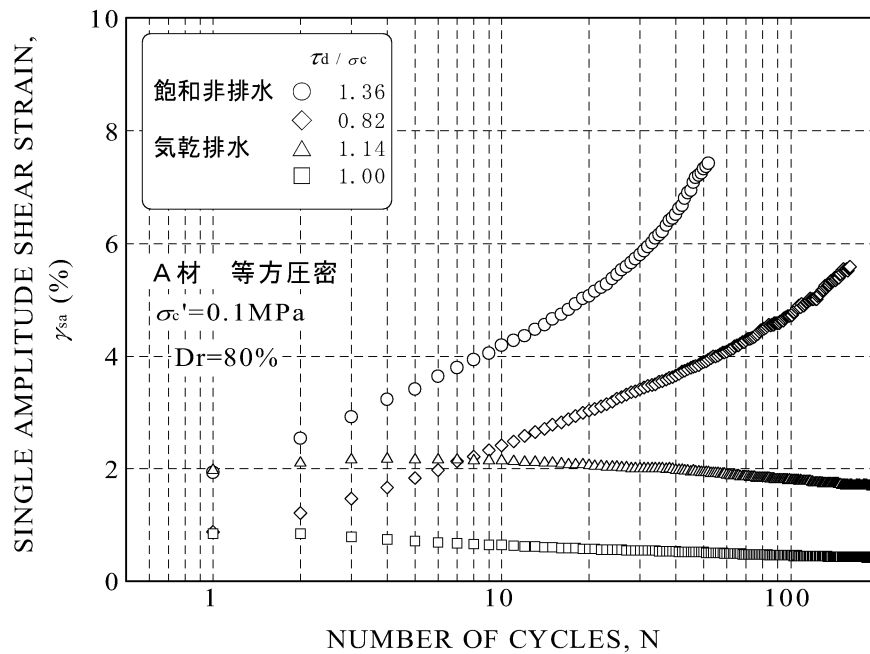


図 6.3.1 載荷回数と片振幅せん断ひずみの関係 (CDTS 試験と CUTS 試験の比較)

7 動的せん断強度と静的せん断強度の比較

河川管理施設等構造令に基づく現行のロックフィルダムの耐震設計法である震度法では、地震力を等価な静的水平力に置き換え、粗粒材料の強度は静的排水せん断強度を用いてすべりに対する安定計算を行う。より合理的な手法の1つとして常時と地震時を分けて、安定性を評価することが考えられる。その際には、地震時にはより精緻な安定性評価を行うため、材料の動的強度を用いるべきである。そのためには、粗粒材料の材料強度の静的特性と動的特性の違いを明らかにする必要がある。また、飽和した多孔質媒体に繰返し载荷を行うと、载荷周波数と排水路長によって媒体中の間隙水の排水状態は異なる (Zienkiewicz *et al.*, 1980)。ロックフィルダムに地震動のような動的荷重が加わると、貯水池側の堤体ロック部の表層付近では排水状態、堤体深部では非排水状態、その中間域に部分排水状態となると考えられる。そこで、粗粒材料について载荷方法と排水条件を変えた三軸試験及びねじりせん断試験を行い、静的せん断強度と非排水および排水条件下の繰返しせん断強度との比較を行った。

7.1 三軸試験

7.1.1 静的せん断強度と動的非排水せん断強度

静的試験（MDTX 試験および MUTX 試験）の主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）～軸ひずみ ε_a の関係と繰返し載荷試験（CUTX 試験）のせん断載荷応力と載荷回数 N 毎の片振幅軸断ひずみ ε_{sa} の関係を図 7.1.1 及び図 7.1.2 にて比較する。静的試験における主応力差の 1/2（半分）がせん断応力 τ に相当するので、静的試験結果の主応力差を半分に考え、CUTX 試験結果のせん断応力と比較すると、CUTX 試験の ε_{sa} は同せん断応力の MUTX 試験の ε_a と比べて大きく、せん断応力が大きいほどその差が顕著である。これは、静的試験（MDTX 試験および MUTX 試験）が圧縮側のひずみなのに対して、動的試験（CUTX 試験）では大きく引張側に伸長することによると考えられる。

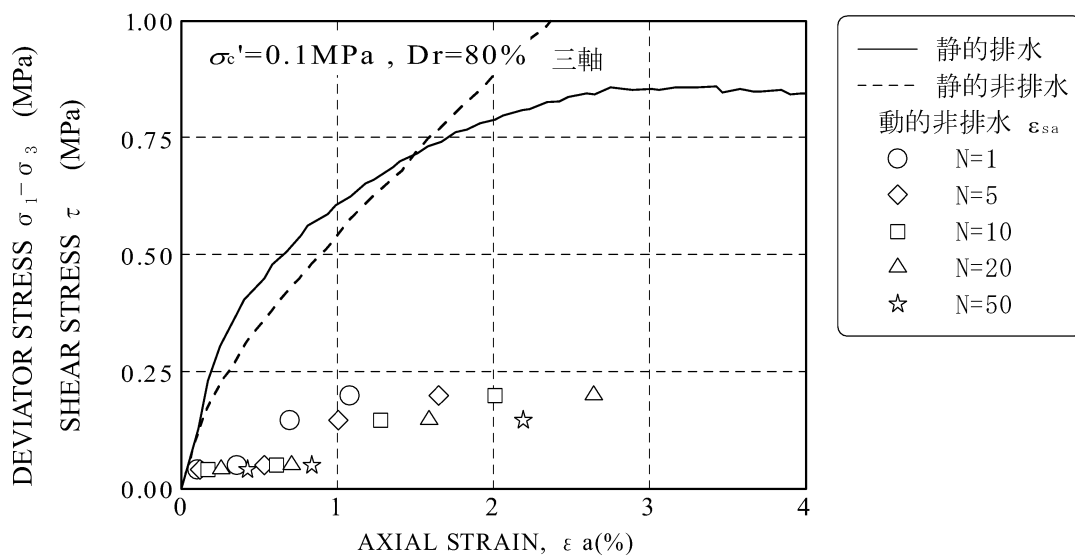


図 7.1.1 静的試験と動的繰返し回数と軸ひずみ（A 材 $Dr=80\%$ $\sigma_c'=0.1MPa$ ）

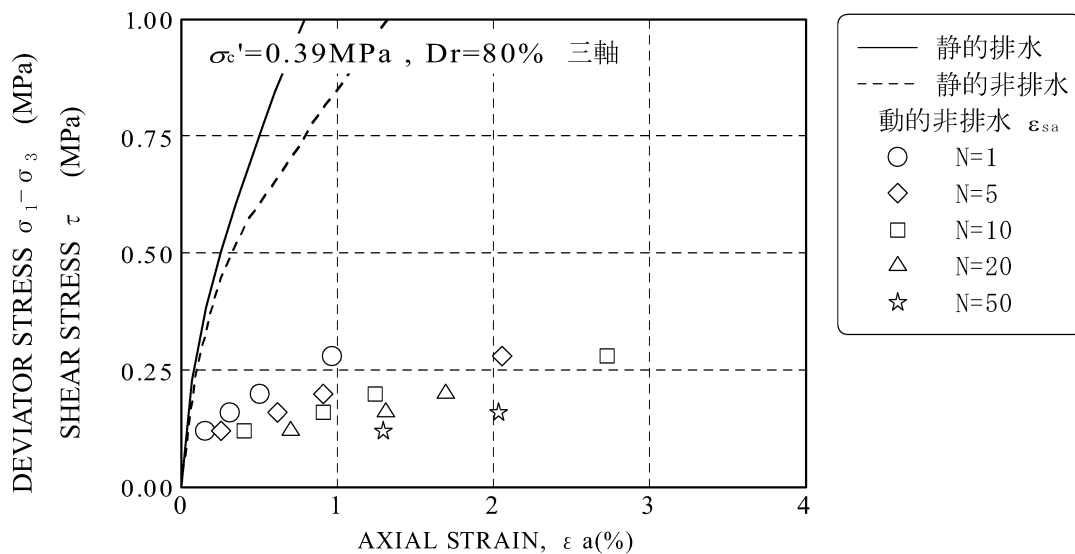
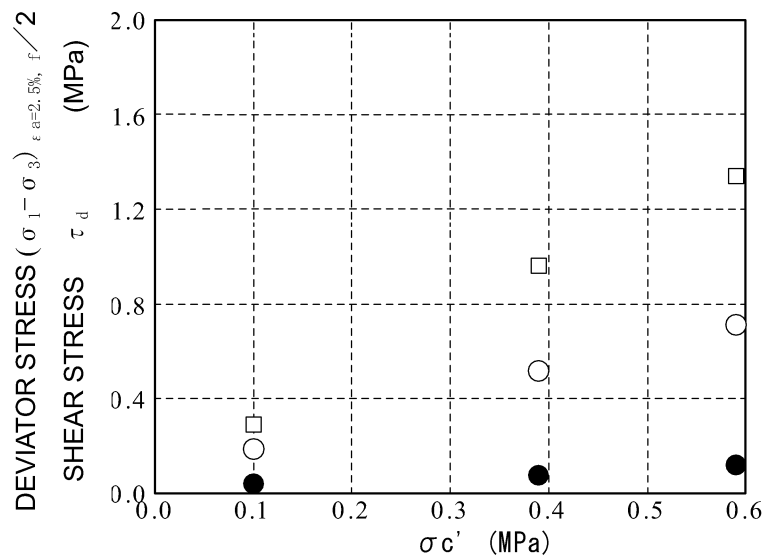


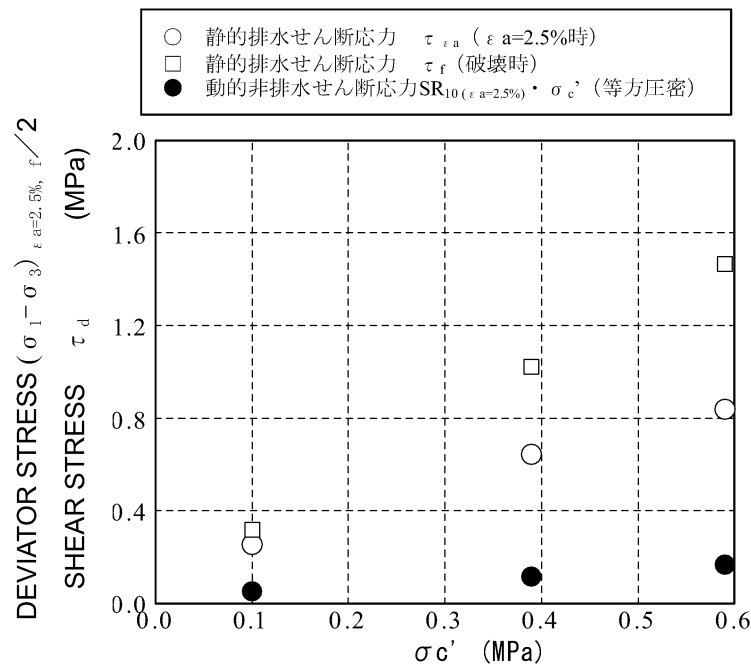
図 7.1.2 静的試験と動的繰返し回数と軸ひずみ（A 材 $Dr=80\%$ $\sigma_c'=0.39MPa$ ）

繰返し試験結果と静的試験結果を比較する 1 つの方法として、CUTX 試験による $SR_{10}(\varepsilon_{sa}=2.5\%$ または 1.5%) に拘束圧 σ_c' を乗じたもの τ_d と σ_c' の関係、並びに静的試験 (MDTX 試験、MUTX 試験) の $\varepsilon_a=2.5\%$ 時のせん断応力 $\tau_{\varepsilon_a}((\sigma_1-\sigma_3)_{\varepsilon_a}/2)$ 及び破壊時せん断応力 $\tau_f((\sigma_1-\sigma_3)_f/2)$ と σ_c' の関係を図 7.1.3 及び図 7.1.4 に示す。

MDTX 試験では、供試体が圧縮され圧縮方向の軸ひずみが生じていくのに対して、CUTX 試験では、供試体の伸張により引張側に軸ひずみが生じており、ひずむ方向が異なるためであり単純に比較は出来ないが、静的強度 (排水及び非排水条件ともに) と基準ひずみ ($\varepsilon_a=2.5\%$ または 1.5%) 時の動的強度 (非排水条件) を比較すると、静的強度の方が上回っている。

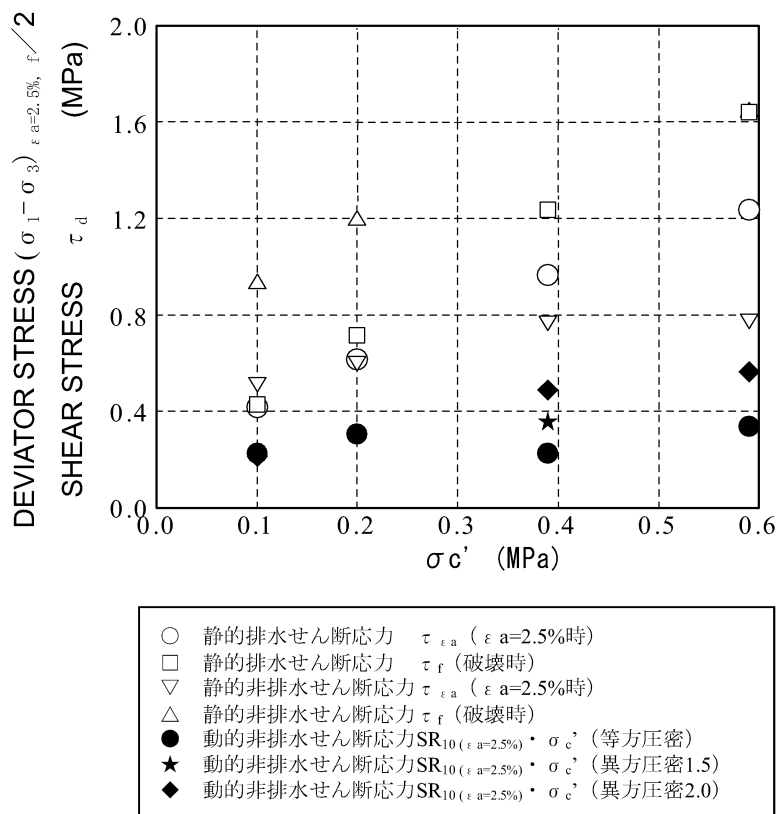


(1) A 材 Dr=56%

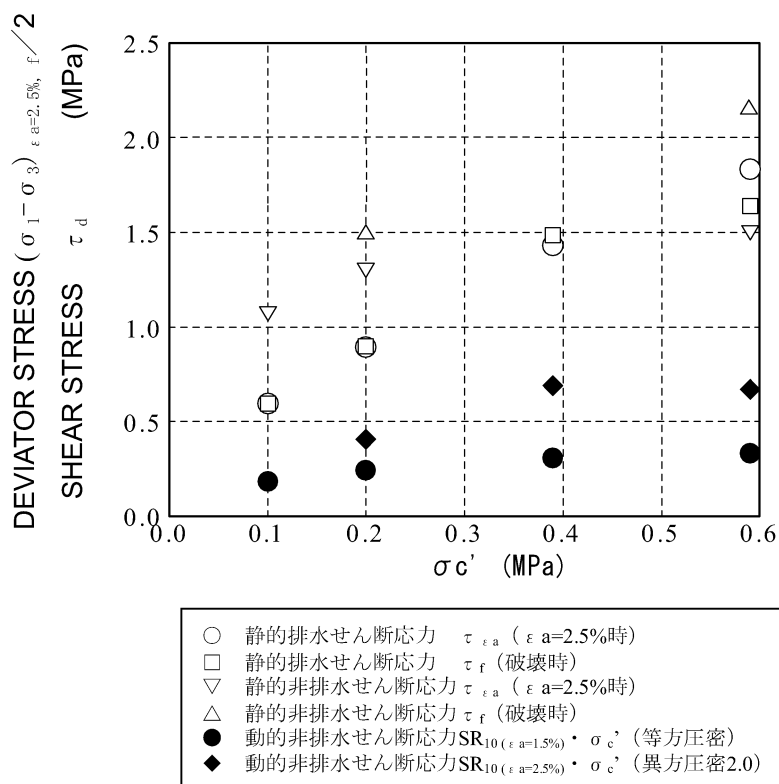


(2) A 材 Dr=66%

図 7.1.3 静的排水強度 (MDTX) と動的非排水せん断強度 (CUTX) (三軸試験)



(1) A材 Dr=80%



(2) A材 Dr=89%

図 7.1.4 静的強度 (MDTX, MUTX) と動的非排水せん断強度 (CUTX) (三軸試験)

7.2 ねじりせん断試験

7.2.1 静的せん断強度と動的非排水せん断強度 (岩下ら, 2001)

静的ねじりせん断試験(MDTS 試験及び MUTS 試験)によるせん断応力 τ ~せん断ひずみ γ 曲線と、繰返しねじりせん断試験 (CUTS 試験) による繰返し载荷回数 N 毎の载荷せん断応力振幅 τ_d と片振幅せん断ひずみ γ_{sa} の関係を図 7.2.1~図 7.2.3 に示す。CUTS 試験の繰返し载荷の 1 波目 ($N=1$) の片振幅せん断ひずみは、MUTS 試験とほぼ一致している。 $N=1$ 波目においては、繰返し試験と静的試験の違いは载荷速度のみであり、繰返し試験では応力制御の周波数 0.05Hz の正弦波荷重载荷、静的試験ではひずみ制御でひずみ速度 0.05%である。

図 7.2.1~図 7.2.3 において CUTS 試験の N 毎の $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係に注目すると、小さなせん断ひずみレベルでは、MDTS 試験における τ よりも τ_d は大きく、 $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係は MDTS 試験の $\tau \sim \gamma$ 曲線を下回っているが、あるせん断ひずみレベル以上では、 $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係のほうが $\tau \sim \gamma$ 曲線より大きくなっている。

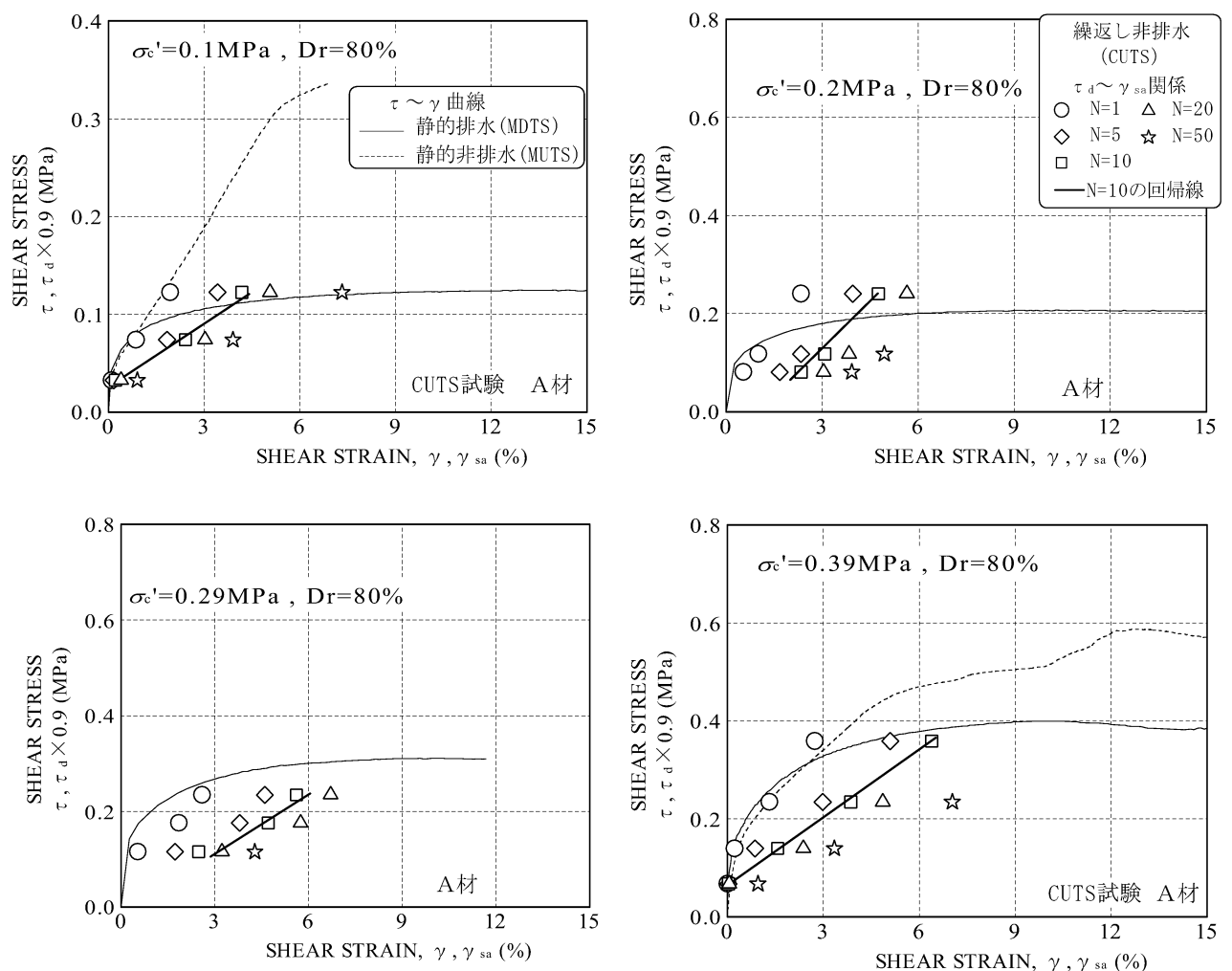


図 7.2.1 静的試験のせん断応力~せん断ひずみ曲線と繰返し試験の各繰返し载荷回数での繰返しせん断応力~片振幅せん断ひずみ関係の比較 (A材 $Dr=80\%$)

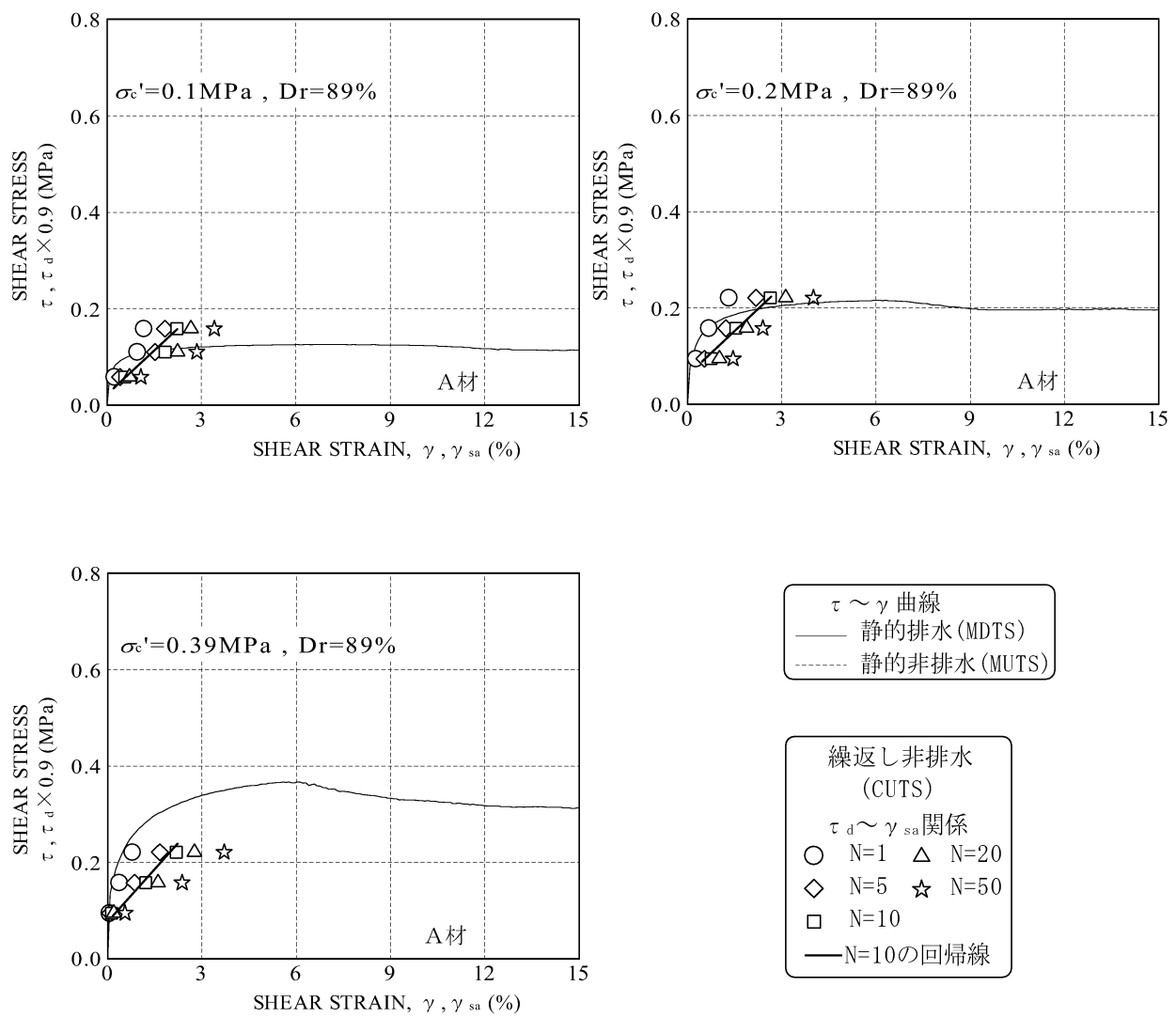


図 7.2.2 静的試験のせん断応力～せん断ひずみ曲線と繰返し試験の各繰返し
 載荷回数での繰返しせん断応力～片振幅せん断ひずみ関係の比較
 (A材 $Dr=89\%$)

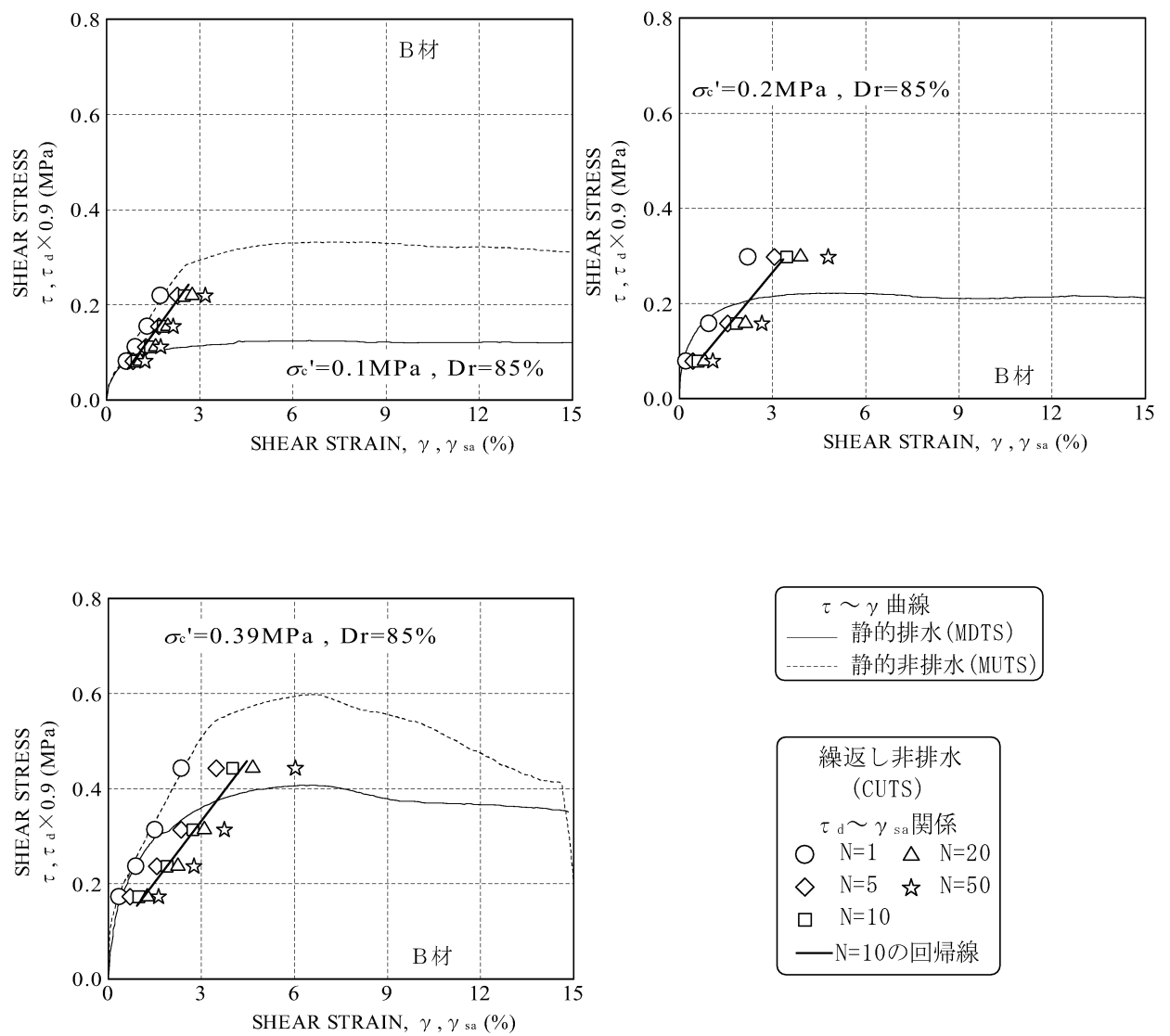


図 7.2.3 静的試験のせん断応力～せん断ひずみ曲線と繰返し試験の各繰返し
 載荷回数での繰返しせん断応力～片振幅せん断ひずみ関係の比較
 (B 材 $Dr=85\%$)

図 7.2.4 は A 材 $Dr=80\%$ および B 材 $Dr=85\%$ の供試体の MDTs 試験の結果である。ピークをとる点にシンボルを付けており、その時のピークせん断応力を τ_f 、せん断ひずみを γ_f とする。 γ_f は、A 材で 10% 程度、B 材で 6% 程度である。図 7.2.1 及び図 7.2.3 で示した A、B 材のそれぞれ 2 種の拘束圧条件下における MDTs 試験および MUTs 試験によるせん断応力 τ ～せん断ひずみ γ 曲線と、CUTs 試験による繰返し载荷回数 N 毎の载荷せん断応力振幅 τ_d と片振幅せん断ひずみ γ_{sa} の関係について、 τ と τ_d は τ_f で、 γ と γ_{sa} は γ_f で除して無次元化した関係図を図 7.2.5 に示す。

図 7.2.5 において CUTs 試験の各 N 毎の $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係に注目すると、小さなせん断ひずみレベルでは、MDTs 試験における τ/τ_f よりも τ_d/τ_f は大きく、 $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係は MDTs 試験の $\tau \sim \gamma$ 曲線を下回っているが、あるせん断ひずみレベル以上では、 $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係のほうが $\tau \sim \gamma$ 曲線より大きくなる。ここで、 $N=10$ 波目（図 7.2.5 に回帰線を記入）に着目してみると、 $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係が $\tau \sim \gamma$ 曲線と交わるせん断ひずみ γ_{sa} は拘束圧 $\sigma_c' = 0.39\text{MPa}$ のとき A 材では $0.8\gamma_f$ 、B 材では $0.5\gamma_f$ である。 $\sigma_c' = 0.1\text{MPa}$ のときは A 材では $0.3\gamma_f$ 、B 材では $0.2\gamma_f$ である。つまり、 σ_c' が小さいほど小さいひずみレベルで $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係が $\tau \sim \gamma$ 曲線より大きくなる。また、 $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係が $\tau \sim \gamma$ 曲線より大きくなるひずみは γ_f より大きくなることはなく、たとえ $N=50$ 波目でも A 材の $\sigma_c' = 0.39\text{MPa}$ のケース以外は γ_f より小さいひずみレベルで $\tau_d \sim \gamma_{sa}$ 関係が上回っている。また、CUTs 試験では、MDTs 試験の τ_f よりも大きな τ_d を加えることが出来る。これは、CUTs 試験は非排水状態であるため、ダイレイションに伴う負の過剰間隙水圧が発生し、せん断抵抗が高まることによる。

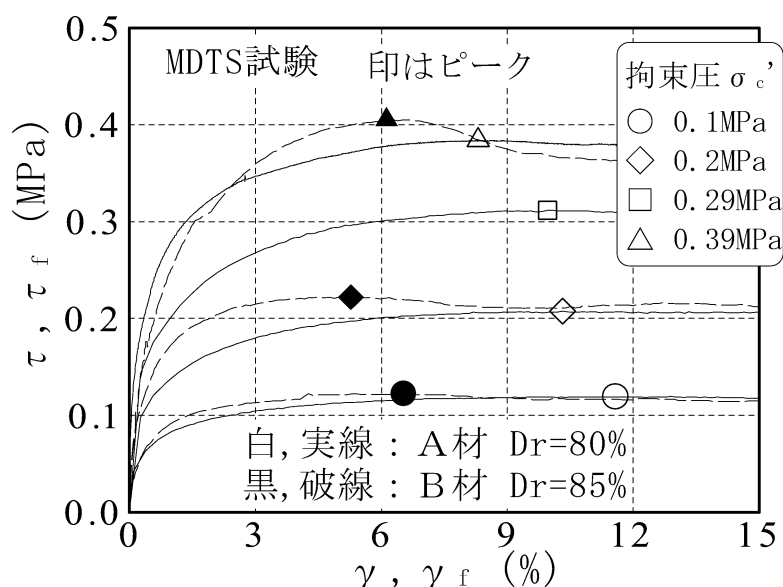


図 7.2.4 排水静的試験（MUTs 試験）のせん断応力～せん断ひずみの関係（A 材，B 材）

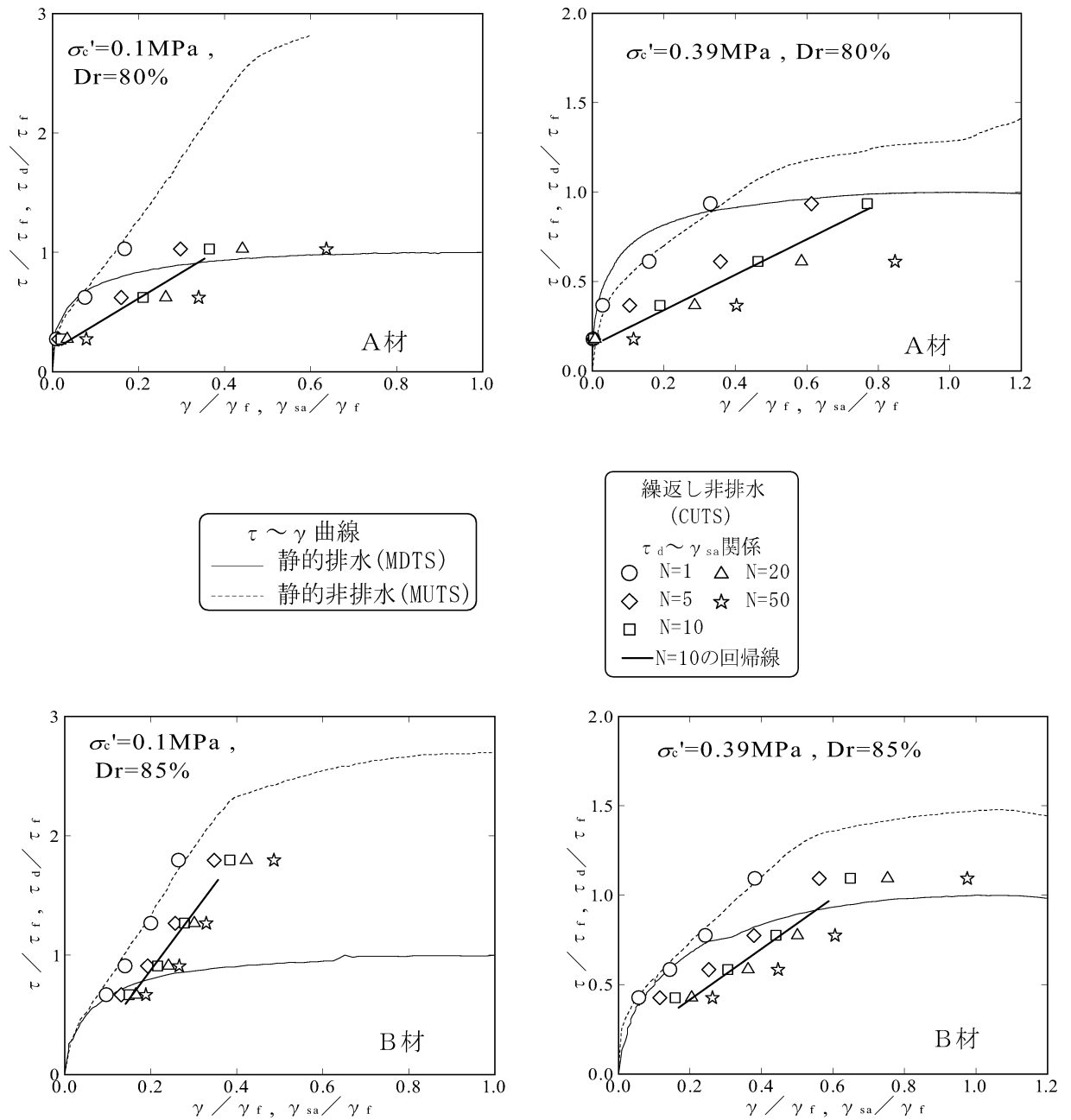


図 7.2.5 無次元化した静的試験のせん断応力～せん断ひずみ曲線と繰返し試験の各繰返し载荷回数での無次元化した繰返しせん断応力～片振幅せん断ひずみ関係の比較 (A 材 $Dr=80\%$, B 材 $Dr=85\%$)

CUTS 試験において $N=10$ 回の繰返し载荷で、規定した片振幅軸ひずみ γ_{sa} を発生させるのに必要なせん断応力を、繰返し非排水せん断強度 $\tau_{d10}(\gamma_{sa})$ とする。 $\tau_{d10}(\gamma_{sa})$ を規定する γ_{sa} としては MDTS 試験によるピーク時せん断ひずみ γ_f とした。つまり、現行の震度法によるすべり安定計算で用いられる MDTS 試験によるピークせん断強度 τ_f 時のせん断ひずみ γ_f における CUTS 試験による $\tau_{d10}(\gamma_{sa}=\gamma_f)$ と τ_f (静的せん断強度) を比較するものである。 $\tau_{d10}(\gamma_f)$ 値は、図 7.2.1～図 7.2.3 における $N=10$ の回帰線と γ_f の交点より求めた。A 材 $Dr=80, 89\%$ 、B 材 $Dr=85\%$ における $\tau_{d10}(\gamma_f)$ と MDTS 試験の τ_f を拘束圧 σ_c' 毎に比較したものを図 7.2.6 に示す。A 材、B 材とも全てのケースで $\tau_{d10}(\gamma_f)$ は τ_f を上回っている。また、 σ_c' が大きくなるほど、 $\tau_{d10}(\gamma_f)$ と τ_f の差は小さくなる傾向にある。以上より密に締まったロックフィルダムのロック部の拘束圧の小さい表層部では、地震時には現行設計法における静的排水せん断強度よりも大きな非排水動的せん断強度が見込まれると考えられる。しかし、地震時には非排水状態を呈する砂地盤と異なり、ロックフィルダムのロック部の透水性は、建設中の実ダムで高粘性流体を用いた精緻な現場計測結果からは透水係数 0.1m/s 程度であり、かなりの高透水性を有する(岩下ら, 2002)。Zienkiewicz *et al.* (1980) は弾性体の多孔質媒体をモデル化し、数値計算により簡便的に振動特性、境界条件及び媒体の振動体積変化特性と動的排水特性との相関を求めている。その相関図では透水係数が 0.1m/s オーダーでは、周波数 1Hz の正弦波振動を受けても表層から数 m 程度の深さでは排水状態を保つことになる。そこで、表層部(低拘束圧状態)においては、7.1 節及び 7.2 節の検討結果は完全非排水条件の動的せん断強度であることに留意しておく必要がある。

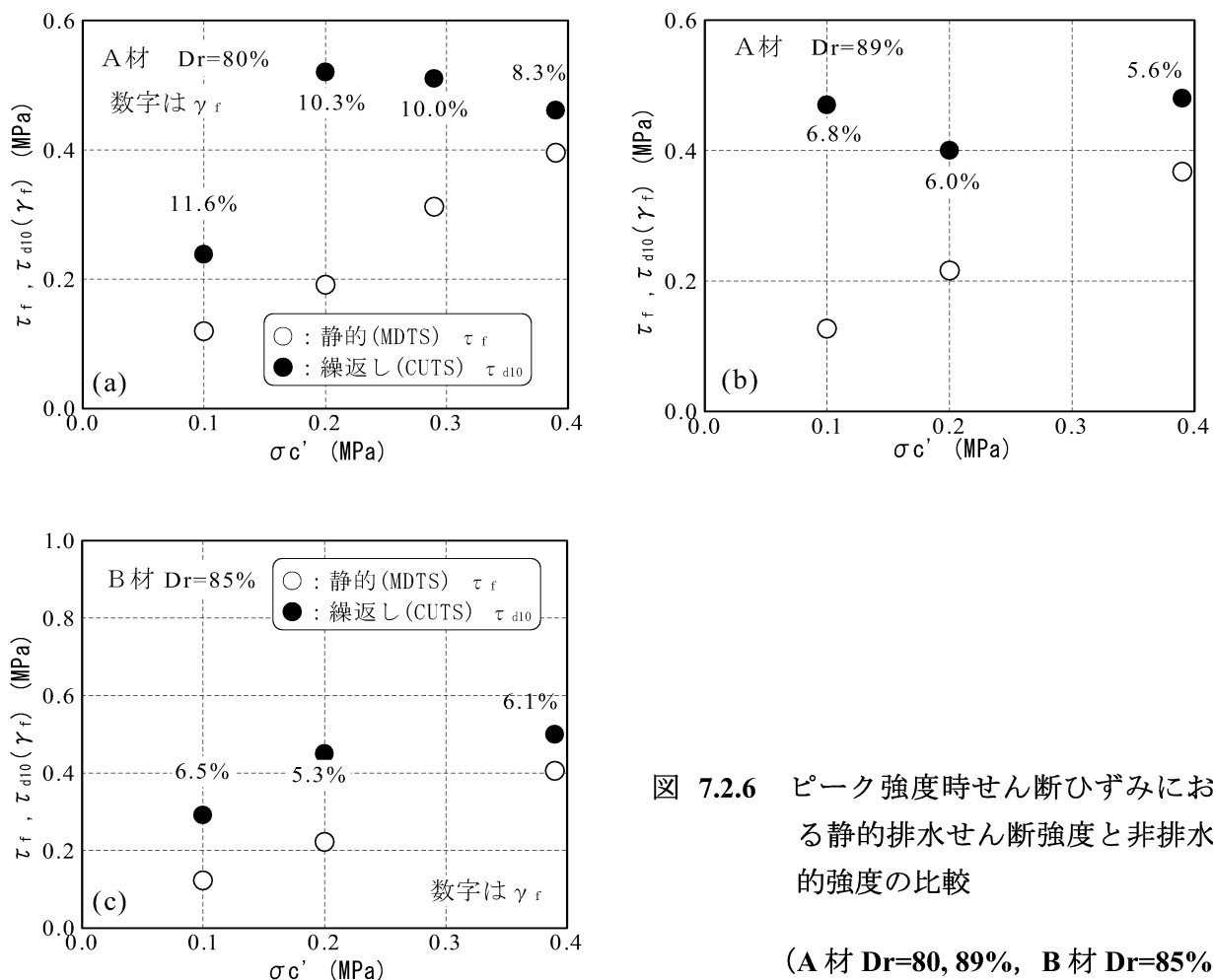


図 7.2.6 ピーク強度時せん断ひずみにおける静的排水せん断強度と非排水動的強度の比較

(A 材 $Dr=80, 89\%$, B 材 $Dr=85\%$)

7.2.2 静的排水せん断強度と動的排水せん断強度 (岩下ら, 2001)

A材の気乾状態の供試体を用いた CDTs 試験による片振幅せん断ひずみ γ_{sa} 及び 1 波毎の最小体積ひずみ $\varepsilon_{v,min}$ と繰返し载荷回数 N の関係を図 7.2.7 に示す。繰返しせん断応力振幅 $\tau_d=0.10, 0.11\text{MPa}$ のケースでは N が進むにつれて γ_{sa} は減少し、収束傾向にある。ただし、 $\tau_d=0.11\text{MPa}$ のように、繰返し応力振幅が大きい場合は、初期段階の载荷回数時には、 $\varepsilon_{v,min}$ が負に大きく、つまり体積膨張が顕著であり、 γ_{sa} も若干増加するが、 N が進むにつれ $\varepsilon_{v,min}$ も収縮方向に転じ、 γ_{sa} は減少していく。 $\tau_d=0.12\text{MPa}$ のケースでは 2 波目で γ_{sa} が試験機の性能限界である 8%を超えたため、これ以上の τ_d を载荷することは試験機性能上不可能であった。MDTS 試験による $\tau \sim \gamma$ 曲線と、CDTS 試験による繰返し応力 τ_d と最大片振幅せん断ひずみ $\gamma_{sa,max}$ の関係を図 7.2.8 に示す。MDTS 試験ではせん断ひずみ制御で载荷速度 0.05%であり、CDTS 試験では、せん断応力制御で正弦波周波数 0.05Hz の载荷速度であるので、両試験において载荷速度の違いはあるが、CDTS 試験による $\tau_d \sim \gamma_{sa,max}$ 関係は、MDTS 試験の $\tau \sim \gamma$ 曲線からほとんどずれてはいない。つまり、排水条件では、繰返し試験において载荷した τ_d は静的試験において $\gamma = \gamma_{sa,max}$ となるせん断応力 τ とほぼ等しいといえる。ピークせん断強度 τ_f より小さい繰返し応力を载荷時するケースでは、繰返し载荷回数が進むにつれ γ_{sa} は減少し、収束していくため、進行性のせん断破壊に至ることはないと考えられる。

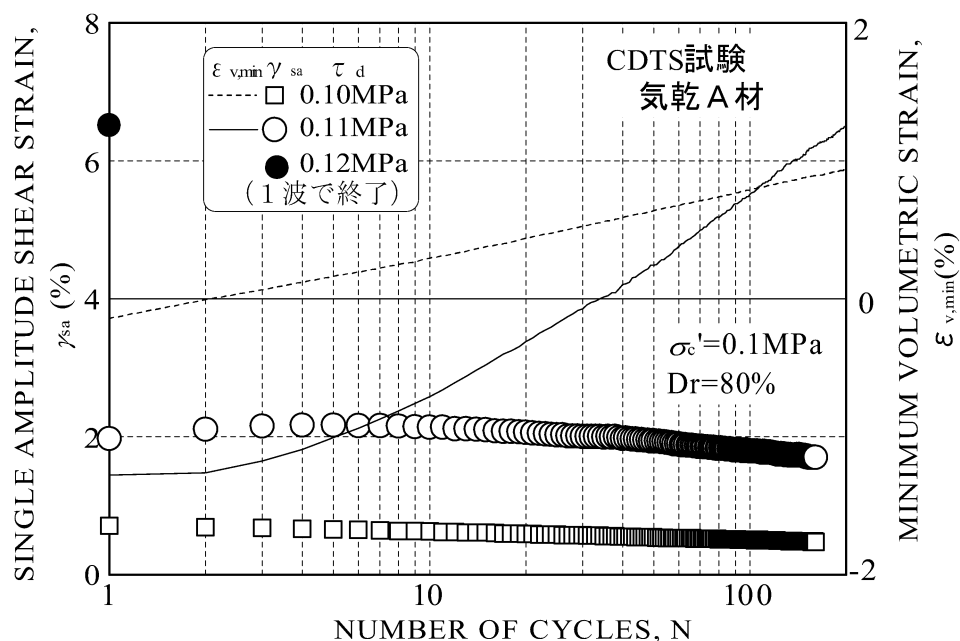


図 7.2.7 片振幅せん断ひずみおよび最小体積ひずみと繰返し载荷回数 (CDTS 試験)

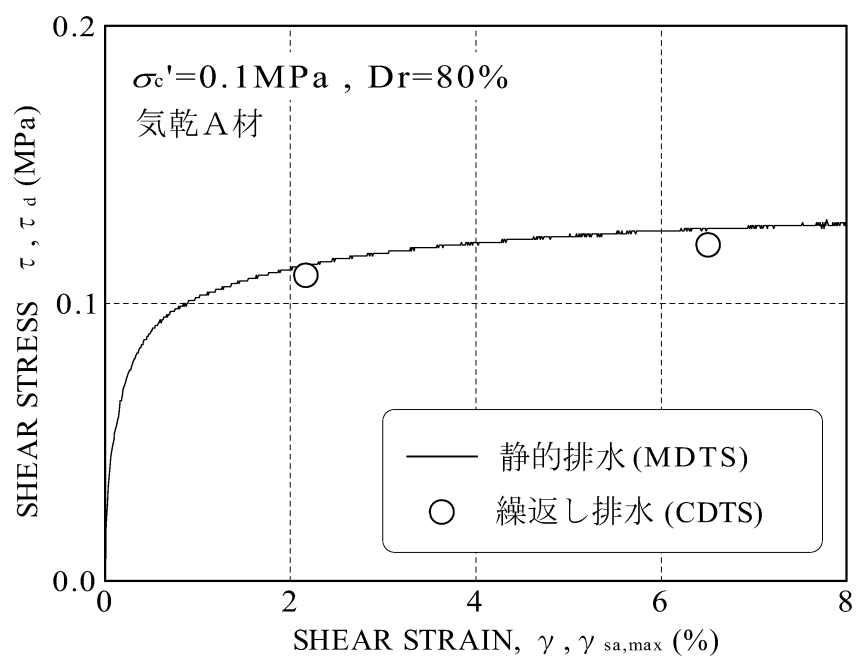


図 7.2.8 MDTS 試験と CDTS 試験のせん断応力～せん断ひずみ関係の比較

8 結 論

ロックフィルダムの透水性材料である粗粒材料を用いて繰返し載荷および単調載荷による大型三軸試験および大型ねじりせん断試験を実施し、粗粒材料の繰返しせん断強度特性および静的せん断強度特性に関して以下にまとめる。

8.1 粗粒材料の締固め特性

1) 凹凸係数と締固め特性

凹凸係数 FU が大きい円礫材は角礫材に比べ、材料投入のみの締め固め無し状態では、凹凸が少ないため空隙を生じづらいのに対して、長時間締め固める場合には凹凸が多いほど噛み合わせが良くなるので、凹凸が少ない円礫材はあまり締め固まらない。そのため、円礫材は最大間隙比と最小間隙比の差 ($e_{\max}-e_{\min}$) が小さい。

8.2 静的排水試験による静的せん断強度特性

1) 排水試験の体積ひずみと非排水試験の過剰間隙水圧

同材料、同相対密度、同拘束圧の排水試験の体積ひずみのピークを生じた時の軸ひずみは、非排水試験の過剰間隙水圧のピークを生じた時の軸ひずみより大きいひずみレベルとなっている。

2) 静的ピーク強度

相対密度が高いほど静的ピーク強度が大きい。異なる岩種材料の比較では、拘束圧が高い領域では点載荷圧裂強度が大きいほど静的ピーク強度が大きい傾向が見られた。

3) 角礫材と円礫材の内部摩擦角

静的排水三軸試験において角礫材と円礫材では同相対密度での内部摩擦角は円礫材の方が大きい。これは、円礫材の方が $\sigma_c'=0.1\text{MPa}$ 程度の低拘束圧における静的破壊強度が角礫材の値に比べ大きいことが影響している結果となっている。

4) 三軸試験とねじりせん断試験の内部摩擦角

静的排水ねじりせん断試験で得られる内部摩擦角は静的排水三軸試験で得られる内部摩擦角よりも大きい傾向がある。それは、両試験の初期拘束圧は同じであるが、静的排水ねじりせん断試験ではねじり載荷とともに最小主応力が低減するため、拘束圧依存性が表れたものとも考えられる。

8.3 繰返し非排水試験による動的な非排水せん断強度特性

1) 載荷周波数の影響

三軸試験では、正弦波軸荷重の繰返し載荷周波数が $0.03\text{Hz}\sim 1.0\text{Hz}$ の範囲で実験比較したが、動的せん断強度には繰返し載荷周波数の影響はみられない。

ねじりせん断試験では、正弦波せん断荷重の繰返し載荷周波数が $0.03\text{Hz}\sim 0.2\text{Hz}$ の範囲で実験比較したが、動的せん断強度には繰返し載荷周波数の影響はみられない。

2) 動的せん断強度に影響を及ぼす因子

拘束圧及び余裕間隙比が小さく、また相対密度及びダイレイタンス係数が大きいほど、動的せん断強度は大きくなる傾向にある。

動的せん断強度は本研究で用いた3岩種の材料においては、岩石材料の引張強度を表す点載荷圧裂強度との相関は小さかったが、粒形(凹凸係数 FU)の影響が大きい。同相対密度における動的せん断強度は、角礫材より円礫材のほうが大きい。 FU の大きいB材は、 $e_{\max}-e_{\min}$ が小さく、つまり体積収縮の余地が小さいため、ダイレイションによる体積膨張が大きくなり、動的せん断強度が大きくなると考えられる。

3) 過剰間隙水圧

繰返しせん断応力比及びダイレイタンシー係数が大きくなるほど、また余裕間隙比が小さいほど、最大過剰間隙水圧比が小さくなる傾向が見られた。

最大過剰間隙水圧比と動的せん断強度の関係は、相対密度 Dr によることなく、直線的関係にある。ねじり試験の結果は三軸試験結果よりばらつきが大きい結果となった。

三軸試験結果から、最大過剰間隙水圧比は相対密度 $Dr=56\sim66\%$ 程度のゆる詰めの粗粒材料では1に達したが、 $Dr=80\sim95\%$ 程度の密詰めの粗粒材料では0.95程度までには上昇するが、1には達しない。一方、密詰めの砂では最大過剰間隙水圧比は1に達する。

4) 三軸試験における異方圧密の影響

異方圧密した繰返し非排水三軸試験では、同異方応力においてせん断応力比が大きいほどピーク軸ひずみ大きい。また、動的せん断強度は異方圧密応力が大きいほど大きくなる。

5) ねじりせん断試験における初期せん断力载荷の影響

・ ひずみへの影響

初期せん断応力载荷した繰返し非排水ねじりせん断試験では、同じ初期せん断応力においては、せん断応力比が大きいほど片振幅せん断ひずみが小さい。応力反転しない領域でそれは顕著である。

同様に、同じせん断応力比において初期せん断応力が0に近い範囲では初期せん断応力の増加にともないピークせん断ひずみが増加し、ある程度の初期せん断応力以上の範囲では初期せん断応力の増加にともないピークせん断ひずみが減少する傾向が見られた。これはダイレイタンシー特性にともなう材料のせん断強度の増加によるものと考えられる。

・ 過剰間隙水圧への影響

初期せん断応力が大きいほど、繰返し载荷に伴い生じる最大過剰間隙水圧は小さくなる。

・ 動的せん断強度への影響

応力反転の領域では初期せん断応力比 τ_d/σ'_c がある程度の範囲までは、せん断応力比 τ_d/σ'_c は減少して極小値をとっている。それは、応力反転内で初期せん断応力が载荷されると少ない载荷回数でサイクリックモビリティ状態となり、急激に最小有効応力比が減少するからである。基準ひずみを規定する载荷回数の設定をより大きくとれば、初期せん断応力によるせん断応力比の減少傾向は小さくなる。一方、応力非反転の領域では初期せん断応力が大きくなるほど、全範囲でせん断応力比は増加している。これは、初期せん断応力が大きいほど、最小有効応力比の低下が小さいためである。また、応力反転の試験ケースとは異なり、初期せん断応力毎の最小有効応力比の差に载荷回数による変化はない。従って、応力非反転領域では規定载荷回数を変えても、初期せん断応力によるせん断応力比の増加傾向は変わらない。

8.4 繰返し排水試験による動的排水せん断強度特性

1) 軸ひずみ、せん断ひずみ

繰返し排水三軸試験では、片振幅軸ひずみは載荷回数が増加しても変わらないが、残留軸ひずみは増加（収縮）する。

繰返し排水ねじりせん断試験では、載荷回数の増加にともない、片振幅せん断ひずみは減少する。

2) 体積ひずみ

繰返し排水試験では、繰返し載荷が進むにつれて体積が収縮し、体積ひずみはあるところで収束する。

8.5 動的せん断強度と静的せん断強度の比較

1) 動的非排水せん断強度と静的排水せん断強度の比較

繰返し三軸試験では、軸ひずみが伸張するのに対して、単調載荷三軸試験は軸ひずみが圧縮方向にひずむため、単純な比較は出来ない。

ねじりせん断試験においては、繰返し非排水試験による動的非排水せん断強度は、静的排水ねじりせん断試験による静的せん断破壊強度を比較すると、静的破壊時のせん断ひずみレベル程度では、動的せん断強度が静的せん断強度を上回っている。これにより、動的せん断強度の定義や対象ひずみレベルの設定等の課題はあるが、現行の耐震設計基準で用いている静的排水せん断強度は、地震時には安全側のせん断強度を与えたものと見込むことができる。

2) 動的排水せん断強度と静的排水せん断強度

繰返し排水ねじりせん断試験においては、単調載荷試験によるピークせん断強度よりも小さい繰返し応力を載荷する場合には、繰返し載荷回数が進むにつれて片振幅せん断ひずみは減小し、収束していくため、進行性のせん断破壊に至ることはないと考えられる。

参考文献

- Banerjee, N.G, *et al.* (1979): Cyclic behavior of dense coarse-grained materials in relation to the seismic stability of dams, UCB/EERC-79/13
- 土質工学会編: 岩の調査と試験, pp.293-298
- 原 忠・國生剛治 (2000): 砂礫の液状化強度および液状化後の非排水せん断強度に及ぼす粒度分布の影響, 土木学会論文集, No.645/III-50, pp.245-253
- 平尾和年・安原恭一 (1990): 異方圧密粘土の動的強度, 土木学会第 45 回年次学術講演会, 45III
- 兵藤正幸・村田秀一他 (1989): 初期せん断を受ける飽和砂の動的強度について, 第 24 回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.797-798
- 今井常雄・横田耕一郎 (1978): 動的くり返しせん断による砂質土の間隙水圧上昇過程, 第 5 回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.601-608
- 石原研而他 (1978): 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 回土質工学研究発表会, 土質工学会
- 石原研而 (1982): 土質動力学の基礎, 鹿島出版会
- 岩下友也・館野 悟・吉田 等・津國正一 (1997): 粗粒材料の繰返しせん断強度とダイレイタンスー特性の影響, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, pp.529-532
- 岩下友也・松浦 旬・山口嘉一 (2001): 繰返しおよび単調載荷ねじりせん断試験による粗粒材料のせん断強度, 第 36 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.561-562
- 岩下友也・稲垣謙司 (2002): 高粘性流体を用いたロックフィルダムの透水性材料部の現場透水試験, 第 37 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.1217-1218
- 國生剛治他 (1999): 繰返し単純せん断試験による礫質土の沈下特性, 第 34 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会
- 松尾 修・唐沢安秋・古賀泰之 (1987): 種々の粘性土の動的強度特性とその考察, 第 22 回土質工学研究発表会, 土質工学会
- 松本徳久・安田成夫他 (1991): ロック材料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
- 松本徳久・安田成夫・芳岡良一 (1996): ロック材料の三軸試験およびねじり単純せん断試験による非排水動的強度, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.173-184
- 松浦 旬・岩下友也・山口嘉一 (2001a): 粗粒材料の非排水繰返しせん断強度特性に及ぼす粒形の影響, 第 28 回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会, pp.370-371
- 松浦 旬・岩下友也・山口嘉一 (2001b): 粗粒材料の繰返しせん断強度特性に及ぼす初期せん断応力の影響, 土木学会第 56 回年次学術講演会, 56III(A), pp.124-125
- 関 眞一・松尾 修・古賀泰之 (1989): 初期せん断を受けた飽和砂の動的強度特性, 第 24 回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.795-796
- 館野 悟・岩下友也・津國正一・中村 昭 (1996): 礫形状の異なる密な粗粒材料の動的強度特性, 土木学会第 51 回年次学術講演会, 51III, pp.224-225

- ・ 舘野 悟・岩下友也・吉田 等・津國正一 (1997) : 粗粒材料の動的せん断強度特性に及ぼすダイレイタンシー特性の影響, 土木学会第 52 回年次学術講演会, 52Ⅲ(A), pp.178-179
- ・ 龍岡文夫・村松正重他 (1981) : 砂の平面ひずみ繰返しねじり単純せん断非排水試験, 第 16 回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.585-588
- ・ 津國正一・岩下友也・舘野 悟・中村 昭 (1996) : 初期せん断が作用する密な粗粒材料の動的強度特性, 第 31 回地盤工学研究発表会, 地盤工学会, pp.1077-1078
- ・ 山本陽一・兵藤正幸他 (2000) : 粘性土の繰返しせん断特性に及ぼす載荷速度の影響, 土木学会論文集, No.645/Ⅲ-50, pp.63-76
- ・ 山下 聡・土岐祥介他 (1990) : 過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液状化強度, 第 25 回土質工学研究発表会, 土質工学会
- ・ 安原一哉・平尾和年他 (1979) : 繰返し荷重をうける異方圧密粘土の挙動, 第 14 回土質工学研究発表会, 土質工学会
- ・ 安田成夫・中村 昭・高橋三津彦・多賀恭一 (1993) : 繰返しねじり単純せん断試験による粗粒材料の動的強度, 第 29 回土質工学研究発表会, 土質工学会, pp.895-896
- ・ 安田 進・山口 勇・曾我 誠 (1980) : 中空三軸ねじりせん断装置による粘土の動的強度実験, 土木学会第 35 回年次学術講演会, 35Ⅲ
- ・ 吉見吉昭 (1991) : 砂地盤の液状化, 技報堂出版
- ・ 吉村優治・松岡 元 (1993) : 砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法, 土木学会論文集, No.463/Ⅲ-22, pp.95-103
- ・ Zienkiewicz, O.C., Chang, C. T. & Bettess, P. (1980): Drained, undrained, consolidating and dynamic behavior assumptions in soils, *Geotechnique* 30, No.4, pp.385-395

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.3817, March 2001

編集・発行 ©国土交通省土木研究所
