

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

松本 徳久¹・安田 成夫²・芳岡 良一³

¹正会員 工博 (財)ダム技術センター 技術第一部 (〒106 東京都港区麻布台 2-4-5 メソニック 39 森ビル 7F)

²正会員 博 (工) 建設省土木研究所 企画部企画課長 (〒305 つくば市大字旭一番地)

³正会員 工修 清水建設(株) 北海道支店 土木部美生ダム作業所 (〒082-03 北海道河西郡芽室町字上美生)
(前 建設省土木研究所 ダム部フィルダム研究室 交流研究員)

本論文は、フィルダム堤体材料の室内試験によるせん断強度の求め方について整理し、ロック材料を用いた単調載荷試験と繰返し載荷試験結果を示し、ロック材料の動的強度特性に対する諸要因(繰返し回数、ひずみ量、相対密度、初期拘束圧、初期せん断応力)の影響を調べ、静的強度と動的強度の関連性を検討した。非排水繰返し載荷試験では、繰返し回数の増加に伴いひずみが増大し、間隙水圧は90%~100%近くまで急激に上昇するが、液状化のようなflow failureは起こらない。なおロック材料の単純せん断試験は国内外を通じて他に例がない。以上のことから、ロックフィルダムの耐震設計に用いるべきロック材料の強度特性を明らかにした。一方、ねじり単純せん断試験による繰返しせん断応力比は平均主応力・初期せん断応力の大きさによらず三軸試験のそれよりも小さい。

Key Words: rockfill materials, large-scale triaxial test, large-scale torsional simple shear test, cyclic loading, monotonic loading, undrained strength

1. はじめに

フィルダムは、大きく分類すると土質材料を主体とするアースフィルダムと岩石質材料を主体とするロックフィルダムからなる。アースフィルダムでは、地震時に基礎あるいは堤体に液状化を生じた例がある。堤体そのものの液状化による被害としては、1971年 San Fernando地震における Lower San Fernandoダムがあげられる¹⁾。本ダムは、重機による締固めがなされず、堤体材料を水と一緒にパイプ内を運搬する方法である水締め工法を採用している。したがって、堤体材料の粒子の大きさは送水管の内径と送水量により制約を受ける。また、締固めがなされていないため、堤体材料の密度は低い状態にある。

一方、ロックフィルダムは、1850年代のカリフォルニアに端緒をなすとされるが、液状化のような被害は出していない。我が国でロックフィルダムが築造されたのは1950年代の後半からで、以来およそ200のロックフィルダムが建設された。建設当初は耐震性が危惧されたが1964年の新潟地震から1995年の兵庫県南部地震に至るまで、亀裂程度の軽微な被害はあっても決壊のような重大な被害は生じていない。耐震設計の実務では震度法が使われており²⁾、既往の地震に対してロックフィルダムが満足すべき挙動を示してきたということは、震度

法が設計法としての役割を果たしてきたと言える。しかし震度法は地震荷重を堤高方向に一定としていることおよび堤体材料の強度として静的強度を用いており、耐震設計上高度化すべき課題もあり、地震荷重については他の報文³⁾に譲るとして、本報文ではロックフィル材料の動的強度特性を明らかにし、動的強度と静的強度の関係も整理した。すなわち、よく締固められたロック材料について繰返し載荷試験結果を示し、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)の影響をとりまとめた。これらの結果は修正震度法によるロックフィルダムの耐震設計指針(案)⁴⁾に採り入れられた。

2. 供試体作製条件および試験手順

試験に用いた試料は、三国川ダムのロック原石山から採取して運搬してきたものである。盛立てロックの岩質は、堅硬な斑れい岩である。斑れい岩は、Fig.1の間隙比と締固め時間の関係に示すように供試体作製時に電気ハンマで300秒程度締固め、密度がかなり高くなった状態で破碎率は5%となっており、繰返しせん断試験中に動的強度に及ぼす粒子破碎の影響が少ない材料と言える。

供試体は、繰返し三軸試験では、直径30cm・高さ

Table 1 Physical properties of material.

Specific gravity	G_s	2.933
Water content	w	0.54(%)Air-dry
Maximum void ratio	e_{max}	0.569
Minimum void ratio	e_{min}	0.142
maximum grain size	D_{max}	63.5mm
Coefficient of uniformity	U_c	30
Dry density of specimen	ρ_d	2.46, 2.53g/cm ³

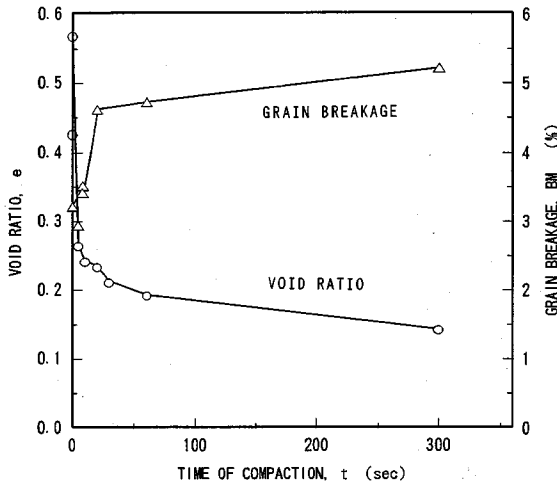


Fig.1 Void ratio and grain breakage versus compaction time relationship.

60cm である。繰返しねじり単純せん断試験では外径 80cm・内径 40cm・高さ 80cm の中空供試体である⁹⁾。試験材料の物性値は Table 1 に示す。試料の粒度分布曲線を Fig. 2 に示す。

図中の最大粒径は、従来の単調載荷試験の最大粒径が供試体直径の 1/5 程度とされていることを考慮して 63.5mm とした。同図には Banerjee et al.⁹⁾ が Oroville ダム堤体材料を用いて非排水の繰返し載荷試験を実施した供試体の粒度分布曲線も示しており、今回の試験材料とほぼ同じ粒度分布になっている。彼らによれば、 $D_{50}=9.5\text{mm}$ の材料の場合、メンブレン貫入に伴うメンブレン・コンプライアンス比 C_{RM} (有効拘束圧時の供試体骨格の体積ひずみ ϵ_v に対するメンブレン貫入量による体積ひずみ ϵ_{vm} の比 ϵ_{vm}/ϵ_v) は、0.18-0.30 であり、100%の間隙水圧に達するときのせん断応力比の補正は、一律 10%低減している。

間隙水圧測定装置によるコンプライアンスは、Banerjee et al.⁹⁾ は 12 インチ直径(約 30cm)の供試体では無視できるほど小さいと指摘しており、ここでも補正

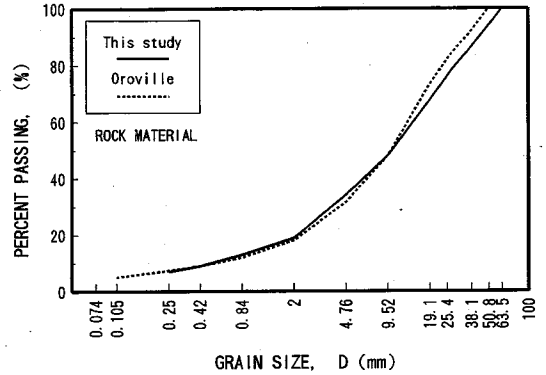


Fig.2 Grain size distribution curve.

は行わない。さらに、供試体の不飽和によるコンプライアンスは Martin et al.⁷⁾ がシリカ砂について供試体の飽和度との関連を報告しているが、原位置の状況を考えると Skempton の B 値が 0.95 以上であれば問題がないとしており、ここでは 0.96 以上とした。

供試体は、相対密度 $D_r=60\%, 70\%, 85\%, 95\%$ の 4 種類設定した。直径 30cm、高さ 60cm のモールドを使用し、最大間隙比(0.569)は一定重量の材料を投入のみした際の体積から、最小間隙比(0.142)は投入した材料の間隙比が変化しなくなるまで電気ハンマーにより締固めた時の体積から求めた。

繰返し載荷試験の手順は次の通りである。

①まず、19.6kPa の真空圧で自立させていた供試体に、19.6kPa の拘束圧をかけ、真空圧を解放している。

②次に、供試体間隙内に圧力 4.9kPa の二酸化炭素を 24 時間通して空気と置換する。これは、二酸化炭素が空気と比べはるかに水に溶けやすい性質を利用して、供試体の飽和度を高めるためである。

③置換が終了したなら、あらかじめ用意しておいた供試体の空隙 3 本分の脱気水をやはり 24 時間通し供試体を飽和させる。

④飽和度は、Skempton の B 係数によりチェックし、B 係数が 0.96 以上の供試体を試験に用いた。

⑤圧密は、圧密時の体積変化量が 0.05%/min 以下になったら終了し、繰返し載荷試験を開始する。圧密には平均約 45 分要した。

試験は荷重振幅制御により周波数 0.1Hz の正弦波で非排水条件で行った。なお供試体には、0.2MPa の背圧を作用させた。繰返し載荷試験は、各試験条件について繰返しせん断応力比を変えて 3~4 試験実施している。また、三軸試験装置の制限により、両振幅軸ひずみ 10% または繰返し回数 100 をもって試験の終了条件とした。試験データは、1.0Hz のローパスフィルターをかけてノイズを消去している。その後デジタル変換し、パーソ

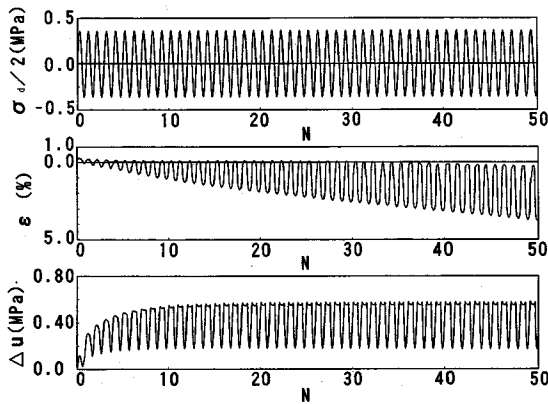


Fig.3 Time histories of deviator stress, axial strain and porewater pressure at cyclic triaxial tests under undrained isotropic consolidation condition ($D_r=85\%$, $\sigma'_m=0.1\text{MPa}$, $\sigma'_1/\sigma'_3=1.0$).

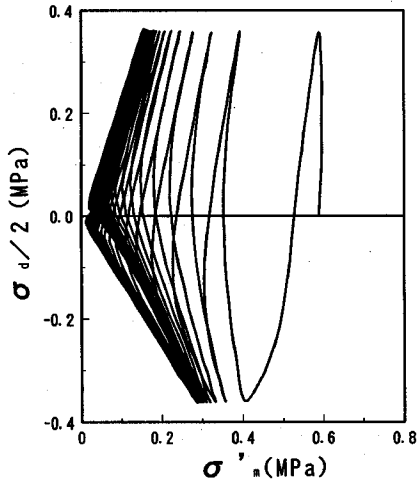
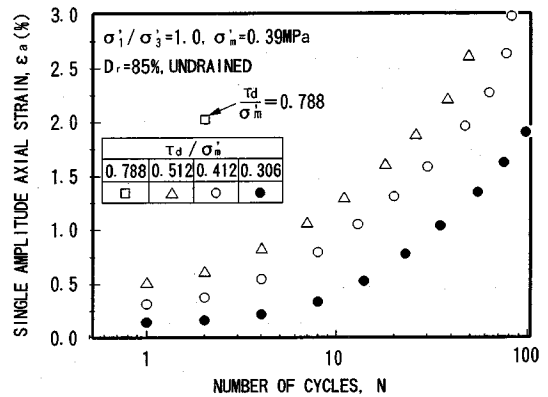


Fig.4 Stress path of rockfill materials at cyclic loading test under undrained isotropic consolidation condition.

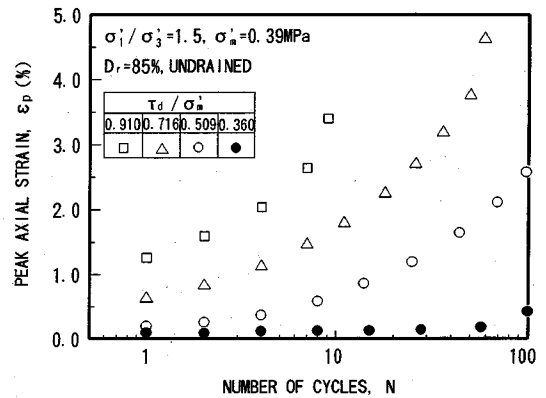
ナルコンピュータを介してプロッターにより図化を行った。

3. ロック材料の動的強度

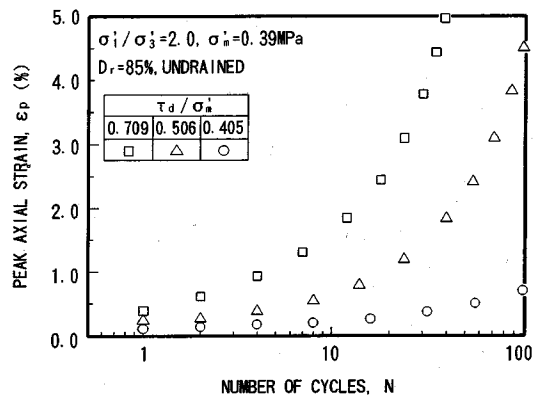
ロックフィルダムは堤体の大部分を粗粒材料が占めており、過去に地震によって亀裂程度の軽微な被害はあっても破壊に至るような大きな被害を受けたことはない。十分に締固められた粗粒材料では、密度が高く粒子間のかみ合せが良好なこと、その排水性が良いことなどから一般に地震荷重に対して液状化を起さないと考えられている。一方、密な砂では、繰返し载荷によって間



(a) ($\sigma'_1/\sigma'_3=1.0$).



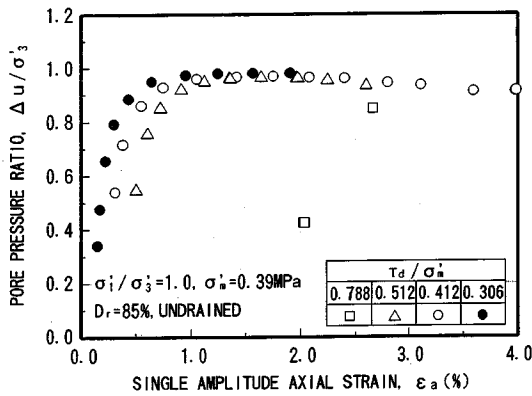
(b) ($\sigma'_1/\sigma'_3=1.5$).



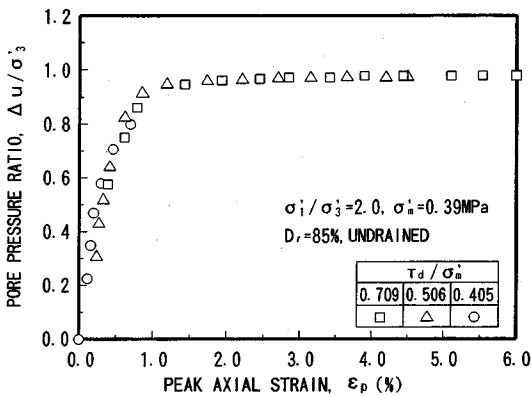
(c) ($\sigma'_1/\sigma'_3=2.0$).

Fig.5 Single axial strain versus number of cyclic loading relationship at undrained cyclic loading test under isotropic consolidation condition.

隙水圧が上昇しひずみが累積するが、流動を起さずに Cyclic Mobility[®]状態となる。密な粗粒材料についても密な砂と同様の挙動を呈すると考えられる。すなわち、相対密度にしておおよそ 85%以上で施工されるロックフィルダムのロック材料では、繰返し载荷試験中に過剰



(a) ($\sigma'_1/\sigma'_3=1.0$).



(b) ($\sigma'_1/\sigma'_3=2.0$).

Fig.6 Porewater pressure versus single axial strain relationship at undrained cyclic loading test under isotropic condition.

間隙水圧が発生し、有効応力が0になっても流動化することがない。その際にひずみはゆっくりと累積するところの Cyclic Mobility 状態となる。このような材料の動的強度は、流動化を伴う液状化強度とは異なるが、一般に繰返し回数と発生が予想されるひずみに着目し求められ、本研究でもこれに沿った整理を行っている。

非排水の繰返し載荷試験において、繰返し回数は、制御に用いられる荷重の1周期を1回と数え、N周期をN回とする。また、所定の軸ひずみが生じたときの繰返し回数 N は地盤工学会基準「土の繰返し非排水三軸試験方法」(T541)⁹⁾に準じて算定した。

(1) 繰返し三軸試験によるロック材料の動的強度

繰返し載荷時の累積ひずみの定義は、初期せん断応力の有無により累積のし易さが異なるから、等方圧密と異方圧密では定義を変えている。すなわち、等方圧密状態では両振幅ひずみを半分にした片振幅ひずみで、異方圧密状態では、ひずみ振幅がほぼ一定で圧縮の方向にひず

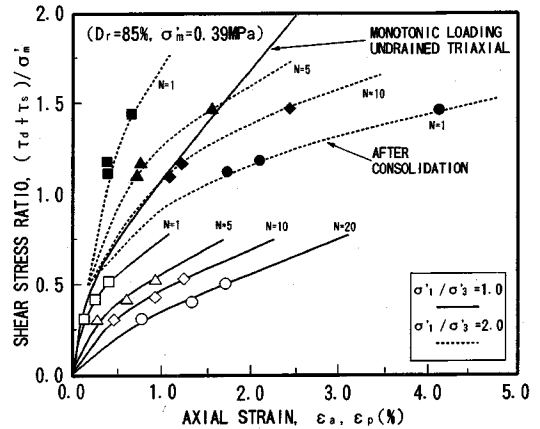


Fig.7 Shear stress ratio versus axial strain relationship at undrained cyclic loading test under isotropic and anisotropic consolidation condition ($\sigma'_m = 0.39\text{MPa}$, $\sigma'_1/\sigma'_3=1.0, 2.0$, $D_r=85\%$).

みが累積するためその最大ピークひずみで定義している。ここでは、繰返しせん断応力比は次式で表している。

$$(\tau_d + \tau_s) / \sigma'_m \quad (1)$$

ここで、 τ_d : 繰返しせん断応力、 τ_s : 初期せん断応力、 σ'_m : 初期有効平均主応力である。

Fig.3 に繰返し非排水試験の応力、ひずみ、間隙水圧の時刻歴、**Fig.4** に有効応力経路の一例を示す。

時刻歴を見ると、等方圧密の場合、繰返し載荷によりひずみ振幅が増大しながら残留ひずみは伸張側に進行する傾向を示している。また、間隙水圧も繰返し載荷に伴い上昇し、その最大値は比較的初期の時点で拘束圧に対して100%近くに達し、その後はほぼ一定値(間隙水圧振幅)を保っており、液状化のようなひずみの急増は見られない。**Fig.3** は等方圧密の場合のみを示しているが、異方圧密により初期せん断応力を加えた場合は、ひずみはある時点で伸張側の振幅の増加が止まり、その後はほぼ一定振幅のまま軸ひずみが圧縮側に進行する傾向にある。また、間隙水圧は等方圧密の場合と同様100%近くに達している。

有効応力経路は間隙水圧の上昇に伴い平均有効応力の減少側に移動し、最終的に破壊線に沿ってループを描いており、密な砂で見られる挙動と同じである。

今回の試験で明らかになったロック材料の非排水繰返しせん断特性を以下のようにまとめる。

a) ひずみ発生特性

Fig.5 に繰返し回数と発生ひずみ量の関係を示す。繰返し回数の増加に伴いひずみも増加しているが、100程度程度の繰返しでは緩詰め砂に見られるような液状化には至っていない。ただし、せん断応力比が大きい場合に

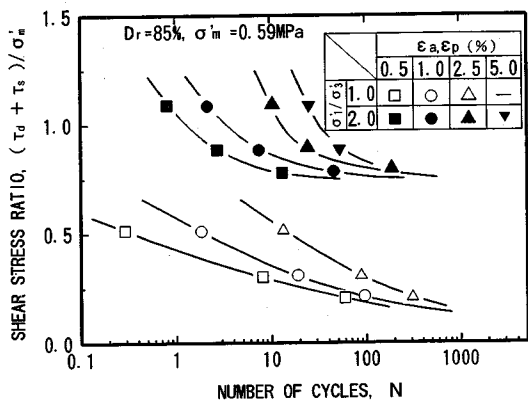


Fig.8 Shear stress ratio versus number of cyclic loading relationship at undrained cyclic loading test with isotropic and anisotropic consolidation conditions.

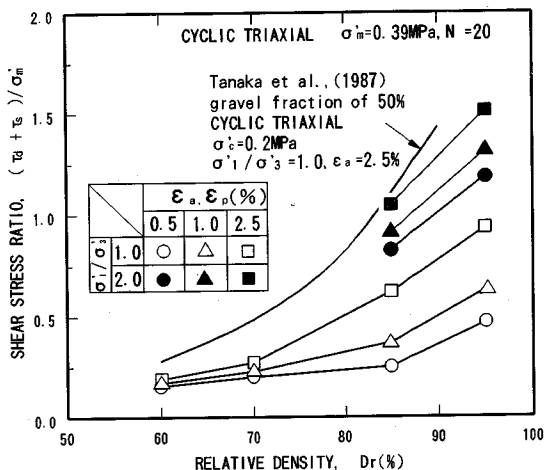


Fig.10 Shear stress ratio versus relative density of rockfill material relationship at undrained cyclic loading test with $\sigma'_1/\sigma'_3=1.0, 2.0$.

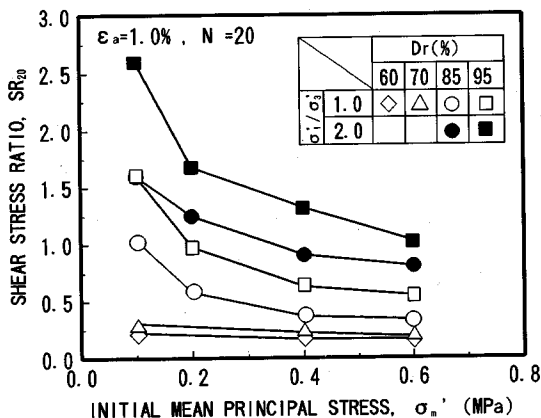


Fig.9 Shear stress ratio versus initial mean principal stress relationship at undrained cyclic loading test with $\sigma'_1/\sigma'_3=1.0, 2.0$ and $D_r=60\%, 70\%, 85\%$ and 95% .

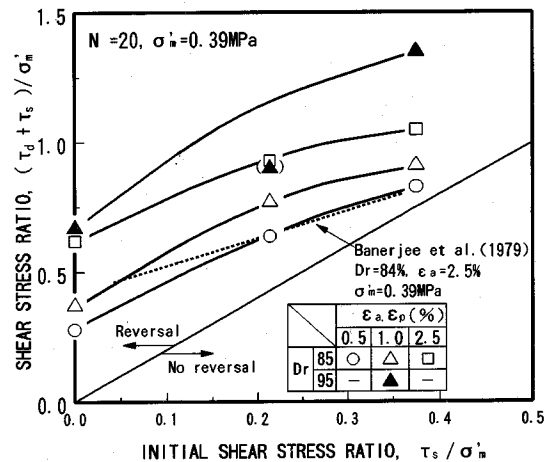


Fig.11 Shear stress ratio versus initial stress ratio relationship at $D_r=85\%$ and 95% .

Fig.5 のようなひずみの急速な進行が見られる。異方圧密の Figs.5(b), 5(c)で軸ひずみが5%に達しているものは、繰返し载荷に伴い供試体上端とキャップとの密着が悪くなることによる、伸張側のネッキングが原因と考えられる。

b) 間隙水圧発生特性

Fig.6 にひずみと間隙水圧比の関係を示す。ひずみの増加に伴い間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_s$) も上昇し、ひずみが1.0%程度でほぼピークに達しており、その後はほぼ一定値のままでひずみだけが增大している。間隙水圧比の最大値は等方圧密、異方圧密にかかわらず0.9~1.0で、拘束圧が大きいほど1.0に近づく傾向にある。飽和砂による試験で、間隙水圧の発生特性はせん断中の主応力の反転の有無によって異なり、異方圧密による初期せん断

応力が大きく主応力の反転のない場合の間隙水圧比は小さくなる(兵動ら¹⁰⁾によると密詰め砂で0.3~0.5である。)。本研究では、主応力比2.0の異方圧密でも、間隙水圧比は0.9以上になっている。

c) 応力・ひずみ特性

ある繰返し回数での繰返しせん断応力比と軸ひずみの関係を Fig.7 に示す。等方圧密と異方圧密 ($\sigma'_1/\sigma'_3=2.0$) を比較すると、同じひずみに達するのに必要な繰返しせん断応力比は異方圧密の方が2倍程度以上大きくなっている。密な砂では一般に、所定のひずみに達するのに必要な繰返しせん断応力比は、初期せん断応力が大きい程大きくなり(例えば谷口ら¹¹⁾)、これは本論文の傾向に一致している。Fig.7には拘束圧0.39MPa、等

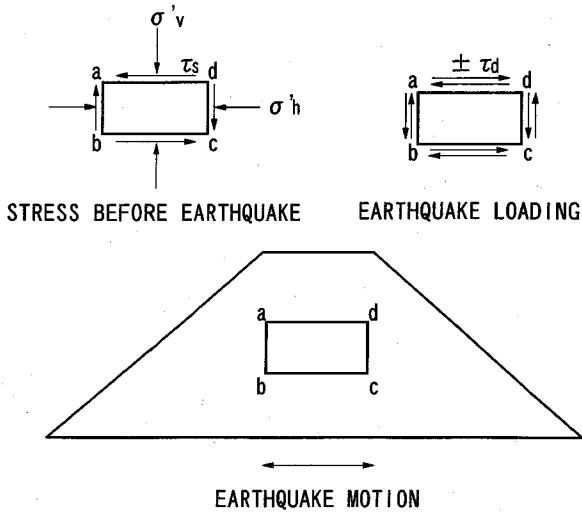


Fig.12 Stress and strain condition inside the embankment dam body.

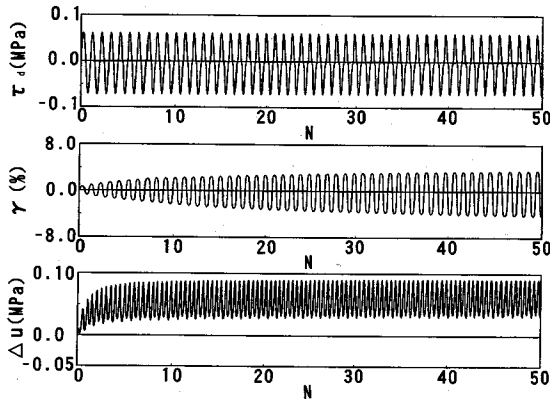


Fig.13 Time histories of shear stress, porewater pressure and shear strain at cyclic torsional simple shear test ($\sigma'_m = 0.1\text{MPa}$, $\sigma'_1/\sigma'_3 = 1.0$, $D_r = 85\%$).

方圧密状態の非排水単調載荷試験のせん断応力比と軸ひずみの関係を併せて示している。この単調載荷試験において静的強度（最大せん断応力比）を与える軸ひずみは6%を越えている。等方圧密の繰返し載荷試験結果は、非排水単調載荷試験によるせん断応力比よりも全体に小さくなっている。一方、非排水単調載荷試験および非排水繰返し載荷試験（ただし異方圧密 $\sigma'_1/\sigma'_3 = 2.0$ ）を比べると、繰返し載荷試験において $N = 5 \sim 10$ のとき、両者は同じせん断応力比（ $(\tau_a + \tau_s) / \sigma'_m = 1.25$ ）で、ほぼ同じ軸ひずみ（1.5%）を生じている。つまり非排水強度を規定するひずみを1.5%としたときには、単調載荷試験の結果は異方圧密の繰返し載荷試験の結果の $N = 5 \sim 10$ に相当する。

d) 動的強度特性

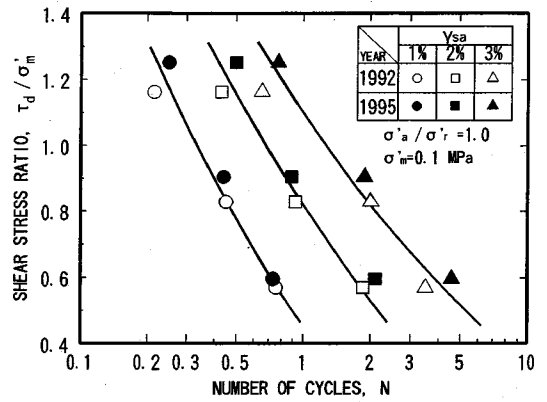


Fig.14 Undrained cyclic torsional simple shear test.

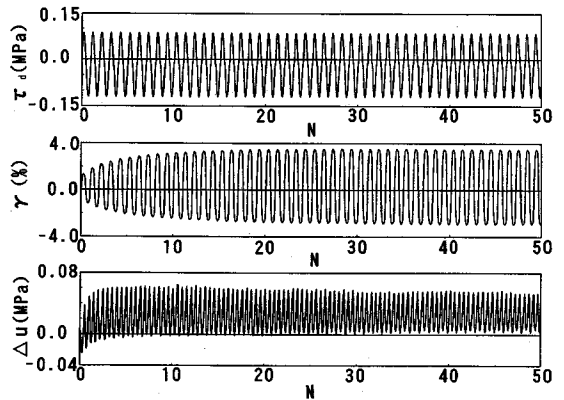


Fig.15 Time histories of shear stress, porewater pressure and shear strain at cyclic torsional simple shear test under anisotropic consolidation condition ($\sigma'_m = 0.1\text{MPa}$, $\sigma'_1/\sigma'_3 = 1.7$, $D_r = 85\%$).

Fig.8 は、軸ひずみ $\epsilon_a = 0.5, 1.0, 2.5, 5.0\%$ に達したときの繰返しせん断応力比曲線であり、繰返しせん断応力比と繰返し回数 N との関係を示したものである。繰返し回数が多いほど、また規定ひずみが小さいほど、繰返しせん断応力比は小さくなっている。また、異方圧密のせん断応力比曲線は、圧縮・引張の交番応力となる応力反転の境界線（ $\sigma'_1/\sigma'_3 = 2 : (\tau_a + \tau_s) / \sigma'_m = 0.75$ ）に漸近する傾向が見られる。さて、等方圧密状態と異方圧密状態を比較すると繰返しせん断応力比は、異方圧密状態の方が2～3倍程度大きくなっている。

Fig.9 は繰返しせん断応力比曲線から20回の繰返し回数で、所定のひずみ（ここでは軸ひずみが1%）に達するときの繰返しせん断応力比 SR_{20} を求め、相対密度60%, 70%, 85%と95%について初期平均主応力との関係を示したものである。相対密度85%と95%については繰返しせん断応力比は、等方および異方圧密のいずれも相対密度の高い方が1.5～2.0倍強くなっている。ま

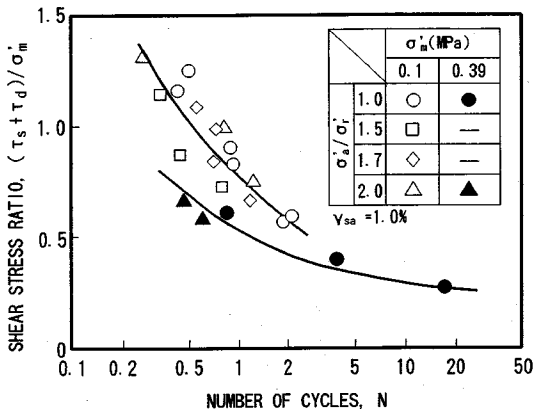
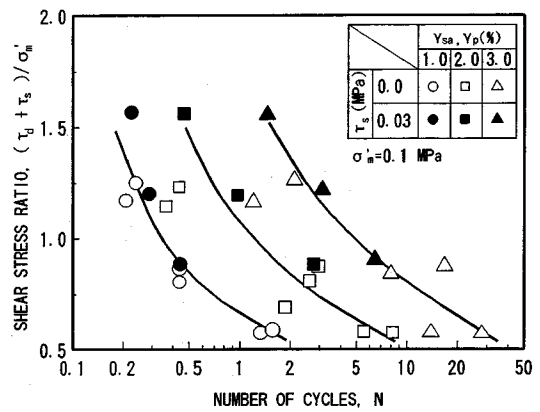


Fig.16 Shear stress ratio versus number of cyclic loading relationship under isotropic and anisotropic consolidation condition.

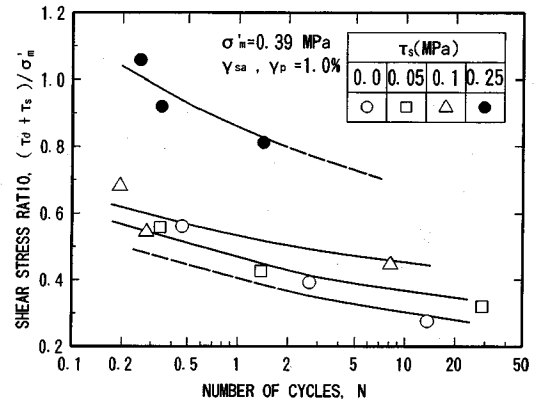
た、図から繰返しせん断応力比は、 σ'_m が低くなる程大きく、拘束圧の依存性がある。しかしながら、相対密度が比較的低い60%、70%では繰返しせん断応力比は低く、しかも拘束圧の依存性も非常に小さい。このことは、柚木ら¹²⁾が密な砂について繰返しせん断応力比の拘束圧依存性を報告しているように、単調載荷試験による破壊強度の拘束圧依存性と同様、粒子間接点で生じる破砕による粒子間摩擦角の減少が一因として考えられる。

Fig.10は繰返しせん断応力比と相対密度の関係を示したものである。相対密度85、95%の試験については、等方圧密の場合、どの軸ひずみレベルにおいても密度の増加に伴う繰返しせん断応力比の増分は、ほぼ同じである。異方圧密では、 $\epsilon_a = 2.5\%$ でせん断応力比を比べると、密度の増加に伴う繰返しせん断応力比増分は著しい。相対密度が60、70%については、密度の増加に伴う繰返しせん断応力比の増加は少なく、繰返し回数20回で所定のひずみに達する繰返しせん断応力比の差も少ない。今回使用している材料は角礫材料であり、相対密度が高い場合粒子間の噛み合わせ効果が大きい、低い相対密度ではその効果が小さいために繰返しせん断応力比に差が表れなかったと考えられる。Fig.10には参考のため砂礫¹³⁾の結果を記入してある。

Fig.11は、異方圧密すなわち初期せん断応力による繰返しせん断応力比への影響を見たもので、相対密度の高い($D_r = 85\%$ 以上)ロック材料では異方圧密時の主応力比(初期せん断応力)が大きいほど繰返しせん断応力比も大きくなる傾向を示している。同様の関係は、粗粒材料では保田ら¹⁴⁾が報告している。砂については既にも多くの研究^{15)~19)}で初期せん断応力の影響を取り上げており、軟化挙動を示さない高い相対密度では初期せん断応力の増加にともない繰返しせん断応力比が増加すると報告されている。いま、 $\epsilon_a = 1.0\%$ に着目すると相対密度



(a) $\sigma'_m = 0.1$ MPa.



(b) $\sigma'_m = 0.39$ MPa.

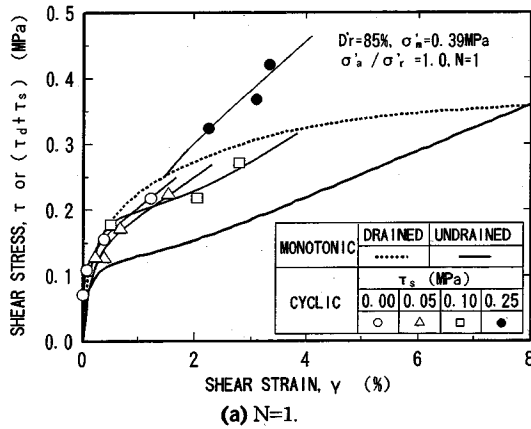
Fig.17 Effect of initial shear stress to relationship between shear stress ratio and number of cyclic loading.

が大きい程繰返しせん断応力比も大きくなっており、全体的に上に凸の曲線を呈している。同図にはBanerjee, et al.⁹⁾が円礫材料を用いた結果も示してあるが、同一条件の今回の試験結果よりも低くなっている。主たる要因としては、ここでは角礫材料を用いており粒子形状の相違による粒子間のかみ合わせ程度の差が現れたものと考えられる。

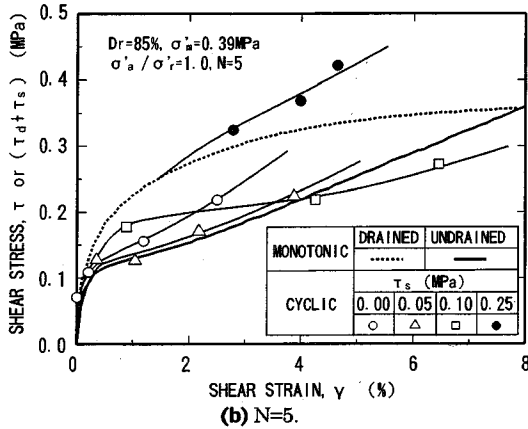
(2) 繰返しねじり単純せん断試験による動的強度特性

実際のフィルダム堤体の地震時における応力・ひずみ状態を考えると、地震による不規則な繰返し荷重により、堤体内ではせん断応力が増減し、これは主応力方向が変化する単純せん断変形で近似される(Fig.12参照)。これに対して、前述の繰返し三軸試験の場合、主応力方向は水平と鉛直に固定され軸対称変形が繰返される状態であることから、実際のひずみ状態と異なっている。原位置の応力状態を室内でより良く再現できる試験としては、繰返しねじり単純せん断試験がある。

等方圧密条件のねじりせん断試験におけるせん断応



(a) N=1.



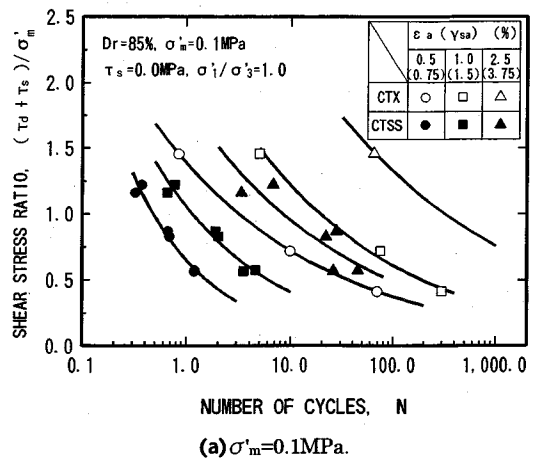
(b) N=5.

Fig.18 Comparison of cyclic and monotonic torsional simple shear tests ($\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$).

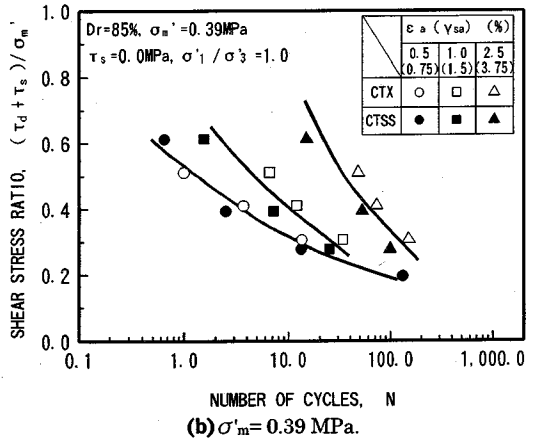
力・間隙水圧・せん断ひずみの時刻歴を Fig.13 に示す。過剰間隙水圧が繰返し回数 2~3 回で最大値を示し、有効応力が 0 近くになるが、供試体はその構造を失うことなく、せん断ひずみがゆっくと増加している。等方圧密の三軸試験とは異なり、一方向へ残留するひずみは殆どゼロである。

大型のねじり単純せん断試験を用いてロック材料の動的強度特性を検討した事例は過去にない。まず、本研究では試験の再現性を確認する目的で同一条件の供試体により繰返し載荷試験を実施した。Fig.14 は、有効平均主応力 $\sigma'_m = 0.1 \text{ MPa}$ の等方圧密状態で 3 種類の繰返しせん断応力比について 1992 年と 1995 年に 1 供試体ずつ繰返し載荷試験を行った結果であるが、良く一致している。

フィルダム堤体内の応力は、埋設された土圧計によれば主応力比 σ'_1/σ'_3 が 1.0~2.0 の範囲に分布しており、内部ほど異方性が強い状態にある。これらの応力状態に対して地震時にせん断力が繰返し作用することになる。圧密応力比 $\sigma'_1/\sigma'_3 = 1.7$ の異方圧密時の時刻歴を Fig.15



(a) $\sigma'_m = 0.1 \text{ MPa}$.



(b) $\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$.

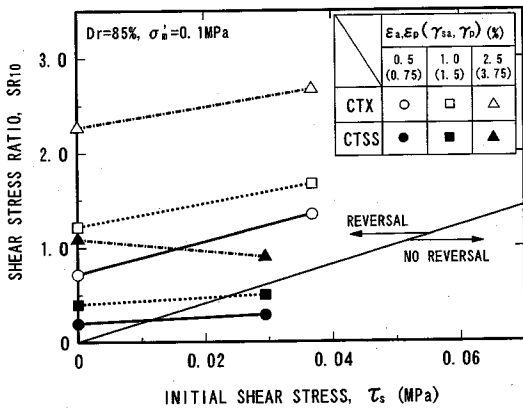
Fig.19 Comparison of cyclic and triaxial and torsional simple shear tests.

に示す。せん断ひずみは、等方圧密の場合と異なり、漸増する傾向にはない。また、この試験は $\sigma'_m = 0.1 \text{ MPa}$, $\sigma'_1 = 0.08 \text{ MPa}$ であるが、間隙水圧は最大で 0.064 MPa となっている。

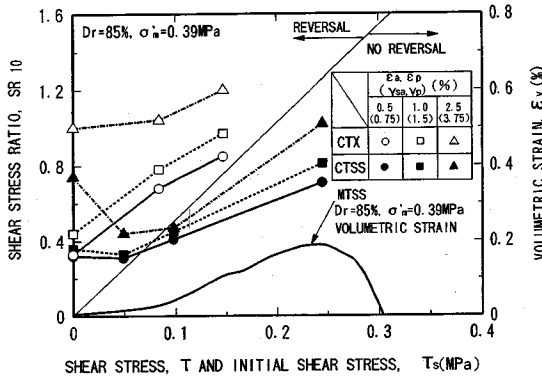
圧密応力比 1.0~2.0 の範囲について、1.0% の片振幅ひずみに着目した際の繰返しせん断応力比と繰返し載荷回数の関係を Fig.16 に示す。いずれの圧密応力比においても同一繰返しせん断応力比に着目した場合、 $\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$ の試験値が少ない回数で片振幅せん断ひずみ 1.0% に達しており、拘束圧依存性が認められる。また、圧密応力比の影響は、0.39 MPa, 0.1 MPa いずれの平均主応力においてもほぼ同じ回数で所定のひずみに達しており、顕著ではない。

次に初期せん断応力の影響を示すが、今回の研究において試験時の初期せん断応力は、予じめ単調載荷試験を行い、破壊せん断応力未達となるように設定している。

$\sigma'_m = 0.1 \text{ MPa}$ についてピークせん断ひずみ γ_p (ただし、初期せん断応力 τ_s が 0 の場合は片振幅せん断ひず



(a) $\sigma'_m = 0.1 \text{ MPa}$.



(b) $\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$.

Fig.20 Comparison of relationship between SR_{10} and initial shear stress of cyclic triaxial and torsional simple shear tests.

み γ_{sa} である。)をパラメータとして初期せん断応力の影響を示したのが Fig.17(a)である。各 γ_p に着目した繰返しせん断応力と繰返し回数に及ぼす τ_s の影響は次に示す $\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$ の場合よりも小さい。Fig.17(b)に $\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$ について、初期せん断応力 τ_s をパラメータとし、繰返しせん断応力比とピークせん断ひずみ γ_p が 1.0% に達したときの繰返し載荷回数の関係を示す。 $\tau_s < 0.1 \text{ MPa}$ では、 τ_s とせん断応力比 $(\tau_a + \tau_s) / \sigma'_m$ の関係は明瞭ではないが、 $\tau_s = 0.25 \text{ MPa}$ の場合には $\tau_s < 0.1 \text{ MPa}$ の場合に比べ、明らかにせん断応力比が増加している。 Fig.18 は、単調載荷試験結果と繰返し載荷試験結果を示す。繰返し載荷試験は載荷回数は 1 および 5 回である。載荷回数が 1 回の場合 τ_s が 0.1 MPa までは、 τ_s の増加に対し、繰返し載荷試験の応力・ひずみ関係は排水単調載荷試験の応力に同じか下回っているが、 $\tau_s = 0.25 \text{ MPa}$ では排水単調載荷試験の応力を上回っている。また、載荷回数が 5 回になると、応力・ひずみ関係は排水単調載荷試験よりも非排水単調載荷試験結果に近付いている。このときも $\tau_s = 0.25 \text{ MPa}$ では

排水単調載荷試験の応力を上回っている。このことは、せん断試験時の供試体の体積膨張(ダイレイション)により説明される。すなわち、 τ_s が 0.1 MPa 以下では供試体は収縮する領域であるため、発生するひずみが大きいに対し、 $\tau_s = 0.25 \text{ MPa}$ はダイレイションを生じる状況にあり、発生するひずみが小さいことによると考えられる。

(3) 三軸試験とねじり単純せん断試験の比較

ねじり単純せん断試験は、原位置の応力・ひずみ関係を他の試験方法に比べて良く再現していると考えられる。しかしながらロック材料等のいわゆる粗粒材料を扱う場合には、試験が大がかりになることから多用されていないのが現状である。一方、三軸試験は、原位置の応力・ひずみ状態を忠実に再現していないものの、試験自体がねじり単純せん断試験に比べ簡易である。以上のことから、三軸試験が数多く実施されているが、ここでは動的強度特性に関して試験方法の違いによる影響を明確にする。

繰返し三軸試験における繰返しせん断応力比から、原位置地盤の応力状態に近いねじり単純せん断試験による繰返しせん断応力比は補正係数によって関連付けられる。非排水試験において、ポアソン比 $\nu = 0.5$ であることから、次式をもとにせん断ひずみ γ と軸ひずみ ϵ_a を対比した。

$$\gamma = (1 + \nu) \cdot \epsilon_a \quad (2)$$

Figs.19(a), 19(b)は三軸試験(CTX)とねじり単純せん断試験(CTSS)のせん断応力比曲線を示したもので、 $\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$ の等方圧密では若干下回るものの三軸試験のせん断応力比とほぼ等しくなっている。Ishihara and Yasuda²⁰⁾は、緩詰めの富士砂を用いた三軸試験とねじりせん断試験の結果は一致するとしている。ただし、今回の研究において $\sigma'_m = 0.1 \text{ MPa}$ では、ねじり単純せん断試験の結果が三軸試験の結果を下回っている。

次に、10 回の繰返し回数で所定のひずみに達するのに要するせん断応力比 SR_{10} と初期せん断応力 τ_s の関係を Figs.20(a), 20(b)に示す。 $\sigma'_m = 0.1 \text{ MPa}$ では、三軸試験(CTX)はいずれのピークひずみについても初期せん断応力が作用すると SR_{10} が増加している。一方、ねじり単純せん断試験(CTSS)の場合、初期せん断応力の作用により SR_{10} が僅かに増加するが大きなひずみでは減少している。一方、 $\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$ では、ねじり単純せん断試験の SR_{10} は、初期せん断応力 τ_s の作用により $\tau_s = 0$ の時に比べ一旦減少するが τ_s の増加に伴い、増加する傾向にあり、 $\tau_s = 0.25 \text{ MPa}$ の場合特に著しい。 Fig.20(b)には、 $\sigma'_m = 0.39 \text{ MPa}$ における単調載荷のねじり単純せん断試験(MTSS)の体積ひずみ ϵ_v とせん断応

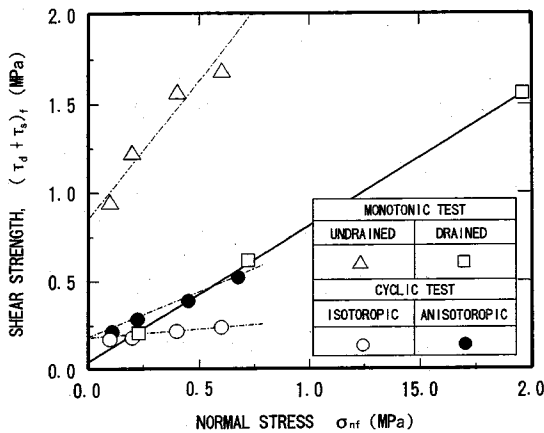


Fig.21 Comparison of strength from cyclic and monotonic loading tests (triaxial).

力 τ の関係も併せて示してある。せん断応力により、体積が収縮し、せん断応力が0.25MPa付近から体積の膨張に転じている。すなわち、供試体の体積ひずみが膨張に転じるまで、初期せん断応力が作用した場合、大きなSR₁₀が期待される。飽和砂について、三軸試験とねじり単純せん断試験結果の比較検討がTatsuoka et al.²¹⁾、山下ら²²⁾、永瀬ら²³⁾、越智ら²⁴⁾によってなされているが、せん断応力比の大小関係は明確ではない。しかしながら、ロック材料では、平均主応力・初期せん断応力の大小にかかわらず、ねじり単純せん断試験の結果は、変形量の観点から強度を定める場合、三軸試験の結果にほぼ同じか、下回ると考えられる。

(4)静的強度と動的強度の比較

強度を定めるとき、対象とするせん断面の仮定の仕方とその大きさが変わってくるが、Fig.21ではせん断強度として、主応力の方向に対して45°面上の応力をもって動的強度と静的強度との比較を行った。なお、動的強度は三軸試験によって求めたものであり、繰返し回数20回かつ規準ひずみ2.5%での値で、メンブレンコンプライアンスの影響を補正(一律10%減)したものである。一方、静的強度はひずみ15%以内でのピーク応力で定めている。

単調載荷試験による静的非排水強度に比べ動的強度は小さいことが分かる。フィルダムの設計²⁾ではロック材料は静的排水強度が用いられており、動的強度と静的排水強度を比較すると規定せん断面上の垂直応力が0.49MPa以下では異方圧密での動的強度の方が大きくなった。

動的強度を規定するひずみ量のとり方には、決まった判断基準はなく、構造物の安定・不安定の境となる変形量から定められるものではあるが、今回の場合、繰返し

載荷試験では、試験装置の機構上、測定可能なひずみ量が制限されていたため、データの信頼性から基準ひずみ2.5%で整理した。したがって、フィルダムなどの安定を考える上で、5.0%程度のひずみを許容すると、動的強度はさらに大きくなるので、異方圧密の動的強度が排水強度を上回る傾向は、さらに明確になると推定される。

4. 結論

ロックフィルダムの耐震設計の実務では、材料の強度は三軸試験による排水強度(静的強度)が使われてきた。今回三軸試験およびねじり単純せん断試験による一連の非排水繰返し載荷試験を実施した。その結果締固めたロック材料は繰返し載荷に対して液状化のようにひずみは急増せず、拘束圧の小さな領域では動的強度は静的強度を上回っており地震時に強度を失うことはなく、実務で静的強度を使用することは安全側の設計になっていることがわかった。しかしながら、原位置の応力ひずみ状況を再現していると考えられるねじり単純せん断試験では、動的強度は三軸試験のそれを若干下回っており、静的強度とのさらなる比較検討が必要である。

以下に、今回実施した良く締固めたロック材料の繰返し載荷試験の結果を示す。

- ①非排水繰返し載荷試験では、繰返し回数の増加に伴いひずみが増大し、間隙水圧は90%~100%近くまで急激に上昇しているが、液状化のようなflow failureは起こらない。
 - ②密なロック材料の非排水三軸繰返し試験では、等方圧密の場合累積ひずみは伸張側に進行する。
 - ③密なロック材料の応力~ひずみ特性は載荷条件によらず定性的には密な砂の特性と類似している。
 - ④非排水繰返し試験では、繰返しにより間隙水圧が上昇し、ひずみも増大する。所定のひずみに達するのに必要なせん断応力比は、相対密度が大きい程、平均主応力が小さい程、初期せん断応力が大きい程大きな値を示し、その傾向は定性的には密な砂に関する報告に一致している。
 - ⑤ねじり単純せん断試験におけるせん断応力比は平均主応力・初期せん断の大きさに依らず三軸試験のそれを下回る傾向にある。
 - ⑥ねじり単純せん断試験の場合、所定のひずみに達するのに必要なせん断応力比は、平均主応力が小さい程大きい。また、等方圧密時のせん断応力比は、異方圧密時のそれよりも大きい傾向にある。さらに、初期せん断応力が供試体の体積膨張を生じさせる場合、せん断応力比の増加は著しい。
- なお、本研究は筆者らが建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室在籍時に取りまとめられたもので、同研究

室の関係各位に謝意を表します。

付 録

C_{RM} ; メンブレン貫入に伴うメンブレン・コンプライアンス比

CTSS; 繰返し載荷のねじり単純せん断試験

CTX; 繰返し載荷の三軸試験

D_{max} ; 最大粒径

D_r ; 相対密度

D_{50} ; 平均粒径

e ; 間隙比

G_s ; 土粒子の比重

MTSS; 単調載荷のねじり単純せん断試験

N ; 繰返し回数

SR_{10} ; 10 回の繰返し回数において所定のひずみに達するのに要するせん断応力比

SR_{20} ; 20 回の繰返し回数において所定のひずみに達するのに要するせん断応力比

U_c ; 均等係数

Δu ; 間隙水圧

w ; 含水比

γ ; せん断ひずみ

γ_{sa} ; 片振幅せん断ひずみ

γ_p ; 最大ピークせん断ひずみ

ϵ_a ; 軸ひずみ (単調載荷), あるいは片振軸ひずみ (繰返し載荷)

ϵ_p ; 最大ピーク軸ひずみ

ϵ_v ; 体積ひずみ

ϵ_{vm} ; メンブレン貫入量

ν ; ボアソン比 $(1 - \epsilon_v / \epsilon_a) / 2$

ρ_d ; 供試体の乾燥密度

σ'_1 ; 有効最大主応力

σ'_3 ; 有効最小主応力

σ'_a ; 有効軸応力

σ'_r ; ねじり単純せん断試験の有効側応力

σ'_m ; 有効平均主応力 $= (\sigma'_1 + 2\sigma'_3) / 3$

$\tau_d, \sigma'_d / 2$; 繰返しせん断応力

τ_s ; 初期せん断応力

参考文献

- 1) Jennings, P.C.: Engineering features of the San Fernando Earthquake, February 9, 1971, *Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology*, 1971.
- 2) 建設省河川局監修: 建設省河川砂防技術基準 (案) 設計編 [I], (社)日本河川協会編, 山海堂, pp.201-206, 1985.
- 3) 松本徳久, 安田成夫, 山邊建二: フィルダムに作用する地震力およびその簡易推定法, 土木学会論文集, No.459

/ I - 22, pp.103-112, 1993.

- 4) ロックフィルダム耐震調査委員会: ロックフィルダムの耐震設計(案), (財)国土開発技術センター, 1992.
- 5) Yasuda, N. and Matsumoto, N.: Dynamic deformation characteristics of sands and rockfill materials, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.30, No.4, pp.747-757, 1993.
- 6) Banerjee, N.G., Seed, H.B. and Chan, C.K.: Cyclic behavior of dense coarse-grained materials in relation to the seismic stability of dams, UCB/EERC-79/13, 1979.
- 7) Martin, G.R., Finn, W.D.L. and Seed, H.B.: Effects of system compliance on liquefaction tests, *Proceedings of ASCE, Journal of GT*, Vol.104, pp.463-479, 1978.
- 8) Castro, G.: Liquefaction and cyclic mobility of saturated sands, *Proceedings of ASCE*, Vol.101, No.GT6, pp.551-569, 1975.
- 9) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, p.430.
- 10) 兵動正幸, 村田秀一, 安福規之, 藤井照久, 谷水秀行: 初期せん断を受ける飽和砂の動的強度について, 第 24 回土質工学会研究発表会, pp.797-800, 1989.
- 11) 谷口栄一, 鷲田修三, 古賀泰之, 森下 義: 繰返し荷重による密な砂の変形・強度特性, 第 20 回土質工学会研究発表会, pp.561-564, 1985.
- 12) 柚木裕二, 石原研而, 関 元治, 米田吉博: 密な砂の繰返し三軸せん断挙動に与える初期有効拘束圧の影響, 第 17 回土質工学研究発表会, pp.1649-1652, 1982.
- 13) 田中幸久, 工藤康二, 松井家孝, 国生剛治, 久保田博: 砂礫材の動的強度に及ぼす密度, 粒度の影響, 第 22 回土質工学会研究発表会, pp.605-606, 1987.
- 14) 保田雅彦, 山田真一, 山下哲郎, 龍岡文夫: 明石層砂礫試料の繰返し非排水試験による変形・強度特性, 第 24 回土質工学研究発表会, pp.817-820, 1989.
- 15) Lee, K. and Seed, H.B.: Dynamic strength of anisotropically consolidated sand, *Proceedings of ASCE, Journal of Soil Mechanics*, Vol.93, pp.169-190, 1967.
- 16) Vaid, Y.P. and Chern, J.C.: Effect of static shear on resistance to liquefaction, *Soils and Foundations*, Vol.23, pp.47-60, 1983.
- 17) 国生剛治, 加藤 進, 嶋田光明: 初期せん断応力を受けた密な砂の非排水繰返しせん断特性, 第 16 回土質工学会研究発表会, pp.581-584, 1981.
- 18) 関 真一, 松尾 修, 古賀泰之: 初期せん断を受けた飽和砂の動的強度特性, 第 24 回土質工学会研究発表会, pp.795-796, 1989.
- 19) 兵動正幸, 村田秀一, 安福規之, 小浪岳治, 谷水秀行: 異方圧密砂の非排水せん断強度に及ぼす密度の影響, 第

- 25 回土質工学会研究発表会, pp.747-750, 1990.
- 20) Ishihara, K. and Yasuda, S.: Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation, *Soils and Foundations*, Vol.15, No.1, pp.45-59, 1975.
- 21) Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M.: Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sand for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.23-41, 1986.
- 22) 山下 聡, 土岐祥介, 三浦均也: メンブレン貫入の影響を考慮した非排水繰返し三軸強度とねじりせん断強度, 第 24 回土質工学会研究発表会, pp.777-780, 1989.
- 23) 越智健三, 龍岡文夫, 山本博之: ねじりせん断液状化強度と三軸液状化強度と関係について, 第 19 回土質工学会研究発表会, pp.583-586, 1984.
- 24) 永瀬英生, 石原研而, 篠崎友利: 異方圧密下における砂の繰返し中空ねじりせん断試験, 第 19 回土質工学会研究発表会, pp.589-590, 1984.

(1996.1.12 受付)

UNDRAINED CYCLIC STRENGTH OF COMPACTED ROCKFILL MATERIAL FROM TRIAXIAL AND TORSIONAL SIMPLE SHEAR TESTS

Norihisa MATSUMOTO, Nario YASUDA and Ryo-ichi YOSHIOKA

The dynamic strength by cyclic loading testing is compared with the static strength by monotonic loading testing using triaxial and torsional simple shear tests as for cyclic number, shear strength, relative density of specimen, confining pressure and initial shear stress. The results show that during an undrained cyclic loading test, the increase in the cyclic number is accompanied by rising axial strain and a rapid buildup of the porewater pressure to between 90% and 100%, but that liquefaction or flow failure does not occur. The cyclic shear stress ratio obtained from a torsional simple shear test is smaller than that obtained from a triaxial test, regardless of the mean principal stress or initial shear stress.