

# 飽和砂の非排水繰返しせん断変形・ 強度におよぼす初期せん断応力の影響

兵動正幸\*・村田秀一\*・安福規之\*  
藤井照久\*\*・谷水秀行\*\*\*・長井 正\*\*\*\*

## Effect of Initial Static Shear Stress on Undrained Cyclic Shear Deformation and Strength of Saturated Sand

Masayuki HYODO, Hidekazu MURATA, Noriyuki YASUFUKU  
Teruhisa FUJII, Hideyuki TANIMIZU and Tadashi NAGAI

### Abstract

The present study is to clarify the behaviour of sand under various combination of initial static and cyclic shear stresses and develop a model for evaluating not only cyclic shear strength but also cyclic residual strain during cyclic loading. As the results of cyclic triaxial compression tests, at first, it was found that the tendencies of pore pressure and axial strain were greatly affected by the reversal of cyclic shear stresses. In second, it was found there was a unique relationship between the residual shear strain and effective stress ratio at the end of each stress cycle. In third, a unique relationship was found between effective stress ratio and cyclic strength ratio which was defined by the ratio of the amplitude of cyclic shear stress and cyclic shear strength for a given number of stress cycles. A model which enables to evaluate the development of pore pressure and residual shear strain with various initial static and cyclic stresses was proposed based on the above findings.

### 1. まえがき

斜面や構造物下の飽和砂地盤は、地中要素においてあらかじめ静的なせん断応力（初期せん断応力）が作用しているため、地震時において水平地盤とは異なった挙動を示すであろうことは、室内試験の範囲からも推察される。このような応力条件下の飽和砂の挙動は、初期せん断応力と繰返しせん断応力の相互の大きさによって著しく異なり、複雑なものになることが知られている<sup>1),2),3)</sup>。したがって、これらの定量的な評価は、

まだ十分に行われていないのが現状である。本研究は、異方圧密された飽和砂を対象に非排水繰返し三軸圧縮試験を行うことにより、初期せん断応力作用下の飽和砂の動的強度および変形挙動を明確にすることを第一の目的とする。さらに、任意の大きさの初期及び繰返しせん断応力が、任意の繰返し回数で作用した場合の有効応力状態を評価しうるモデルを作成することにより、様々な外力条件において生じる残留間隙水圧、残留せん断ひずみの定量的な予測を行うことを可能とするものである。

### 2. 実験方法

実験で用いた試料は豊浦標準砂であり、密詰めおよび緩詰め状態で調べるために、相対密度70%、50%の2種類について実験を行った。

\* 建設工学科

\*\* 大学院 建設工学専攻(現 機復建調査設計)

\*\*\* 大学院 建設工学専攻

\*\*\*\* 土木工学科(現 日本道路公団)

飽和砂の非排水繰返しせん断挙動に対する初期せん断応力の影響を調べるために種々の異方圧密条件下の繰返し三軸圧縮試験を行った。比較のために、等方圧密下の実験も行った。さらに、静的試験との対応を調べるために、同じ繰返し三軸圧縮試験機を使用して応力制御式の静的単調載荷試験も行った。

#### a) 非排水繰返し三軸圧縮試験

試験手順は、1987年に土質工学会主催で行われた全国一斉試験仕様に準じて以下のように行った。

- (1) 試料は、空中落下法で充填する。(所定の密度の供試体を作成できるよう事前に管理しておく)
- (2) 供試体を0.3kgf/cm<sup>2</sup>の負圧で自立させ、供試体寸法を測定する。
- (3) 負圧を側圧に置き換え、供試体内の空気を炭酸ガスに置き換えたのち、供試体を飽和させB値の測定を行う。この時、B値が0.96以上ないものは不適とし、実験を中止する。
- (4) 所定の圧力まで等方圧縮を行った後、排水状態で所定のせん断応力に至るまで軸圧を増加させて異方圧密状態にする。この時、全ての試験において異方圧密後の平均有効主応力が一定となるようにする。
- (5) 圧密終了後、非排水状態で0.1Hzの正弦波軸荷重を繰返し載荷する。この時繰返し軸荷重・軸変位・間隙水圧の経時変化の測定も同時に開始する。

実験は、初期平均有効主応力  $p_c = 100\text{kPa}$  のもとで初期せん断応力  $q_s (= \sigma_{1c} - \sigma_{3c})$  ; ここで  $\sigma_{1c}, \sigma_{3c}$  は、圧密後の最大、最小主応力) と繰返しせん断応力  $q_{cyc} (= (P_c + P_E)/2A_c$  ; ここで  $P_c$  は圧縮荷重振幅、 $P_E$  は伸張荷重振幅、 $A_c$  は圧密後の断面積) を種々変化させて行った。このような試験手順で行われた試験条件を Table 1, 2に示す。表中の Stress Reverse の欄で Reverse は、繰返し応力が圧縮側から伸張側へかなり大きく反転するもの、No Reverse は圧縮側だけの繰返しのもの、Intermediate は両者の間で、繰返し応力がわずかに伸張側に反転するか否かの境界的なものをそれぞれ示している。

#### b) 応力制御式静的単調載荷試験

繰返し試験との対応をとるため同じ試験機、同じ条件で供試体を作成した。供試体作成後所定の圧密圧力まで等方圧密を行い、側圧を一定に保ちながら応力制御方式により試験を行った。せん断過程の各応力段階においては、軸ひずみ速度が0.01%/min 以下になることを確認し、次の応力段階に進むという方式をとった。試験は、応力比  $\eta (= p/q)$  がピークに達するか、または

Table 1 Conditions of cyclic triaxial compression tests on Toyoura sand (Relative density  $Dr = 70\%$ )

$q_s$ (kpa)	$q_{cyc}$ (kpa)	$e_c$	$\sigma_{1c}'$ (kpa)	$\sigma_{3c}'$ (kpa)	Stress Reverse
0.0	30.2	0.734	100.0	100.0	Reverse
0.0	31.6	0.724	100.0	100.0	Reverse
0.0	32.8	0.741	100.0	100.0	Reverse
0.0	33.6	0.725	100.0	100.0	Reverse
0.0	36.4	0.721	100.0	100.0	Reverse
0.0	43.8	0.745	100.0	100.0	Reverse
10.0	31.6	0.740	106.7	96.7	Reverse
10.0	36.7	0.740	106.7	96.7	Reverse
10.0	41.1	0.728	106.7	96.7	Reverse
20.0	31.6	0.745	113.3	93.3	Reverse
20.0	34.7	0.735	113.3	93.3	Reverse
20.0	43.3	0.736	113.3	93.3	Reverse
20.0	47.5	0.741	113.3	93.3	Reverse
30.0	31.0	0.740	120.0	90.0	Intermediate
30.0	35.4	0.721	120.0	90.0	Reverse
30.0	39.7	0.721	120.0	90.0	Reverse
30.0	49.8	0.734	120.0	90.0	Reverse
30.0	61.2	0.722	120.0	90.0	Reverse
40.0	32.9	0.745	126.7	86.7	No Reverse
40.0	36.1	0.745	126.7	86.7	Intermediate
40.0	41.5	0.737	126.7	86.7	Intermediate
40.0	47.7	0.740	126.7	86.7	Reverse
40.0	64.9	0.726	126.7	86.7	Reverse
50.0	29.1	0.745	133.3	83.3	No Reverse
50.0	35.7	0.738	133.3	83.3	No Reverse
50.0	41.8	0.748	133.3	83.3	No Reverse
50.0	44.3	0.724	133.3	83.3	Intermediate
50.0	64.3	0.724	133.3	83.3	Reverse
50.0	77.9	0.747	133.3	83.3	Reverse
60.0	28.9	0.735	140.0	80.0	No Reverse
60.0	36.4	0.742	140.0	80.0	No Reverse
60.0	41.4	0.735	140.0	80.0	No Reverse
60.0	47.3	0.739	140.0	80.0	No Reverse
60.0	61.3	0.744	140.0	80.0	Intermediate
60.0	78.0	0.725	140.0	80.0	Reverse
70.0	30.0	0.739	146.7	76.7	No Reverse
70.0	38.1	0.746	146.7	76.7	No Reverse
70.0	40.7	0.737	146.7	76.7	No Reverse
70.0	44.6	0.742	146.7	76.7	No Reverse
70.0	76.6	0.724	146.7	76.7	Intermediate

Table 2 Conditions of cyclic triaxial compression tests on Toyoura sand (Relative density  $D_r=50\%$ )

$q_s$ (kpa)	$q_{cyc}$ (kpa)	$e_c$	$\sigma_{1c}'$ (kpa)	$\sigma_{3c}'$ (kpa)	Stress Reverse
0.0	18.4	0.795	100.0	100.0	Reverse
0.0	18.9	0.795	100.0	100.0	Reverse
0.0	19.9	0.804	100.0	100.0	Reverse
0.0	22.0	0.791	100.0	100.0	Reverse
0.0	22.8	0.792	100.0	100.0	Reverse
10.0	25.2	0.790	106.7	96.7	Reverse
10.0	29.8	0.798	106.7	96.7	Reverse
10.0	33.6	0.798	106.7	96.7	Reverse
10.0	35.1	0.798	106.7	96.7	Reverse
20.0	25.8	0.801	113.3	93.3	Reverse
20.0	30.2	0.799	113.3	93.3	Reverse
20.0	32.9	0.792	113.3	93.3	Reverse
20.0	33.7	0.805	113.3	93.3	Reverse
30.0	30.2	0.836	120.0	90.0	No Reverse
30.0	31.7	0.806	120.0	90.0	Reverse
30.0	35.0	0.787	120.0	90.0	Reverse
30.0	41.9	0.809	120.0	90.0	Reverse
40.0	33.3	0.793	126.7	86.7	No Reverse
40.0	35.5	0.799	126.7	86.7	No Reverse
40.0	44.6	0.804	126.7	86.7	Reverse
40.0	48.9	0.797	126.7	86.7	Reverse
50.0	30.8	0.794	133.3	83.3	No Reverse
50.0	32.8	0.799	133.3	83.3	No Reverse
50.0	35.7	0.806	133.3	83.3	No Reverse
50.0	44.7	0.807	133.3	83.3	No Reverse
50.0	48.4	0.794	133.3	83.3	No Reverse
50.0	58.8	0.818	133.3	83.3	Reverse
60.0	27.6	0.791	140.0	80.0	No Reverse
60.0	32.9	0.791	140.0	80.0	No Reverse
60.0	45.7	0.794	140.0	80.0	No Reverse
60.0	50.8	0.800	140.0	80.0	No Reverse
60.0	60.9	0.831	140.0	80.0	Reverse
70.0	27.2	0.788	146.7	76.7	No Reverse
70.0	32.9	0.795	146.7	76.7	No Reverse
70.0	35.1	0.793	146.7	76.7	No Reverse
70.0	46.1	0.795	146.7	76.7	No Reverse
70.0	50.8	0.811	146.7	76.7	No Reverse
70.0	60.4	0.797	146.7	76.7	No Reverse
80.0	25.7	0.801	153.3	73.3	No Reverse
80.0	30.3	0.795	153.3	73.3	No Reverse
80.0	36.0	0.803	153.3	73.3	No Reverse
80.0	44.7	0.806	153.3	73.3	No Reverse
80.0	51.5	0.809	153.3	73.3	No Reverse
80.0	59.9	0.798	153.3	73.7	No Reverse

軸荷重が200kgf (ロードセルの精能上) に達したところで終了とした。実験は、相対密度70%、50%のもとで圧密圧力30, 50, 100kPa の3種類を行った。

### 3. 実験結果

#### 3.1 等方及び異方圧密下の繰返しせん断挙動

Table 1, 2 で分類したように、異方圧密下における非排水繰返し三軸圧縮試験における挙動は主応力が反転するかどうかで大きく変化する<sup>5)</sup>。Fig. 1 に、Reverse, Intermediate, そして No Reverse の3通りについて、軸変位・軸荷重・間隙水圧経時変化の典型的な例をそれぞれ示す。これら3つのケースについて比較を行うと、まず軸ひずみは、Reverse の場合圧縮・伸張両側に繰返し変動しているのに対し、Intermediate, No Reverse は圧縮側片方向に残留していく形となることが認められる。また、Intermediate と No Reverse の両者を比較すると、Intermediate の方が No Reverse のものよりかなり大きく、数%のひずみを生じている。次に、間隙水圧は Reverse の場合、初期拘束圧にほぼ等しくなるまで上昇し液状化が生じているが、残りの2つのケースについては間隙水圧は途中までしか上昇せず、液状化は起こさないようである。

Table 3 にこれら載荷パターン毎の、典型的な波形、有効応力経路、破壊の特徴の例を相対密度別にそれぞれ示す。

#### 3.2 残留間隙水圧, 残留軸ひずみの上昇に対する初期せん断応力の影響

本研究では、時々刻々変化する間隙水圧や軸ひずみの各サイクル終了時点における残留値に着目し整理を行う。Fig. 2 は、その残留間隙水圧, 残留軸ひずみを繰返し回数との関係において、まとめたものである。図は、繰返しせん断応力がほぼ同一で、初期せん断応力の異なる試験結果を相対密度別に示したものである。図中において、相対密度70%では  $q_s=10, 20, 30\text{kPa}$  が Reverse,  $q_s=50, 60, 70\text{kPa}$  が No Reverse そして  $q_s=40\text{kPa}$  が Intermediate である。また、相対密度50%では  $q_s=10, 20\text{kPa}$  が Reverse,  $q_s=40, 50, 60, 70\text{kPa}$  が No Reverse そして  $q_s=30\text{kPa}$  が Intermediate に属する。初期せん断応力が大きいほど破壊状態に近いにも拘らず、初期せん断応力の小さいものつまり等方状態に近いものほど、間隙水圧や軸ひずみの上昇がみられる。図中の、Reverse 領域では、もちろんすべて液状化を起こしており、 $q_s=0$  すなわち p 軸上において間隙水圧は拘束圧に等しくなっている。しかしながら、

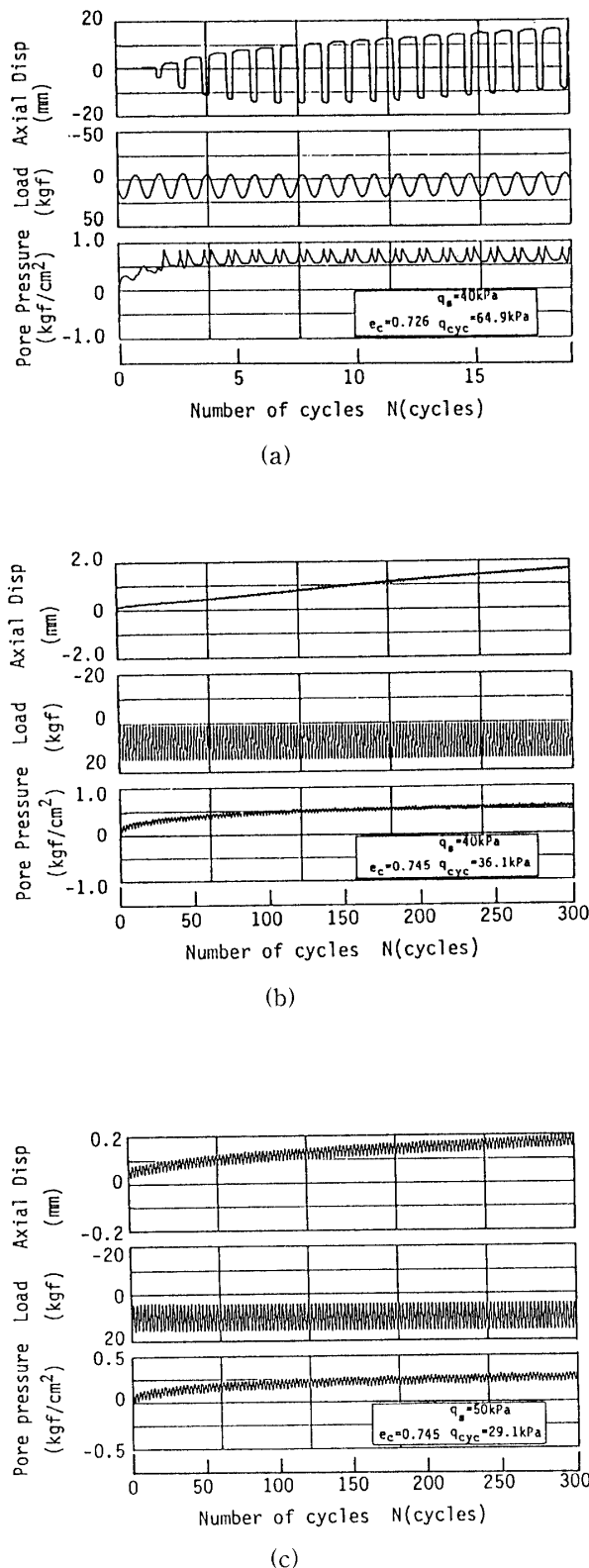


Fig. 1 Typical records of cyclic triaxial compression tests' results, in the case of (a) : Reverse, (b) : Intermediate, (c) : No Reverse

図中では液状化を起こしているにもかかわらず、残留間隙水圧が拘束圧まで上昇しない。しかも、初期せん断応力が大きいほど低めで平衡状態に至る傾向がみられる。この平衡状態に達したときの値を  $u_r$  とした (Fig. 3 参照)。この  $u_r$  を初期せん断応力比ごとに他の試験結果も交えて示すと Fig. 4 のように表せる。

図中プロットしている点はすべて液状化を起しており、 $p$  軸上 ( $q=0$ ) において当然間隙水圧は拘束圧に等しくなっている。この図より  $u_r$  は初期せん断応力が大きくなるに伴い減少していることが認められる。さらにこの図中に静的試験で得られた破壊線を引いてみると両者がほぼ一致していることが分かる。この表示は Vaid ら<sup>6)</sup> によって最初になされており、図中に Vaid らが行った Ottawa Sand の結果についても示した。

### 3.3 単調載荷試験 (静的試験) 結果との対応

Fig. 5 は、応力制御式単調載荷試験結果におけるモールの応力円を相対密度別に示したものである。この結果より、両者の破壊線は相対密度70%の方では内部摩擦角  $\phi = 36.9^\circ$  ( $\eta_i = 1.51$ )、相対密度50%の方では  $\phi = 35.0^\circ$  ( $\eta_i = 1.42$ ) と相対密度50%の方がやや小さな強度を示している。

次に、単調載荷試験の有効応力比~軸ひずみ関係を相対密度別に Fig. 6 に示す。この結果から、この圧力領域では拘束圧依存性がほとんど見られず、どの拘束圧下においてもほぼ同一の経路を示している。また、相対密度50%の方が相対密度70%に比べ、やや小さな応力比で同一のひずみを発生するということがいえる。

## 4. 残留軸ひずみ~有効応力比関係

### 4.1 密詰め砂 (相対密度70%) の残留軸ひずみ~有効応力比関係

各サイクル終了時点における有効応力比と残留軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係を主応力反転の有無による載荷パターン別に調べた。Fig. 7 が Reverse、そして Fig. 8 が Intermediate 領域における残留軸ひずみ~有効応力比関係である。No Reverse については、軸ひずみがほとんど生じないためここでは省略した。

これらの図から、各サイクル終了時点の残留軸ひずみと残留間隙水圧は、初期せん断応力や繰返しせん断応力の組合せによりかなり複雑に変化するにもかかわらず、有効応力比~軸ひずみ関係においては Reverse と Intermediate 共に初期せん断応力や繰返しせん断応力に依存せず次式のような一本の双曲線をたどる傾向に

Table 3 Classification of cyclic behaviour of sand with initial static shear stresses by additional loading pattern

Pattern of cyclic stress		Effective stress ratio		Characteristic of failure	
Stress reversal	Wave form	$D_r=70\%$	$D_r=50\%$	$D_r=70\%$	$D_r=50\%$
Reverse $q_s < q_{cyc}$				Liquefaction	Liquefaction
No reverse $q_s > q_{cyc}$				No liquefaction	Residual deformation
Intermediate $q_s \approx q_{cyc}$				Residual deformation	Liquefaction or Residual deformation

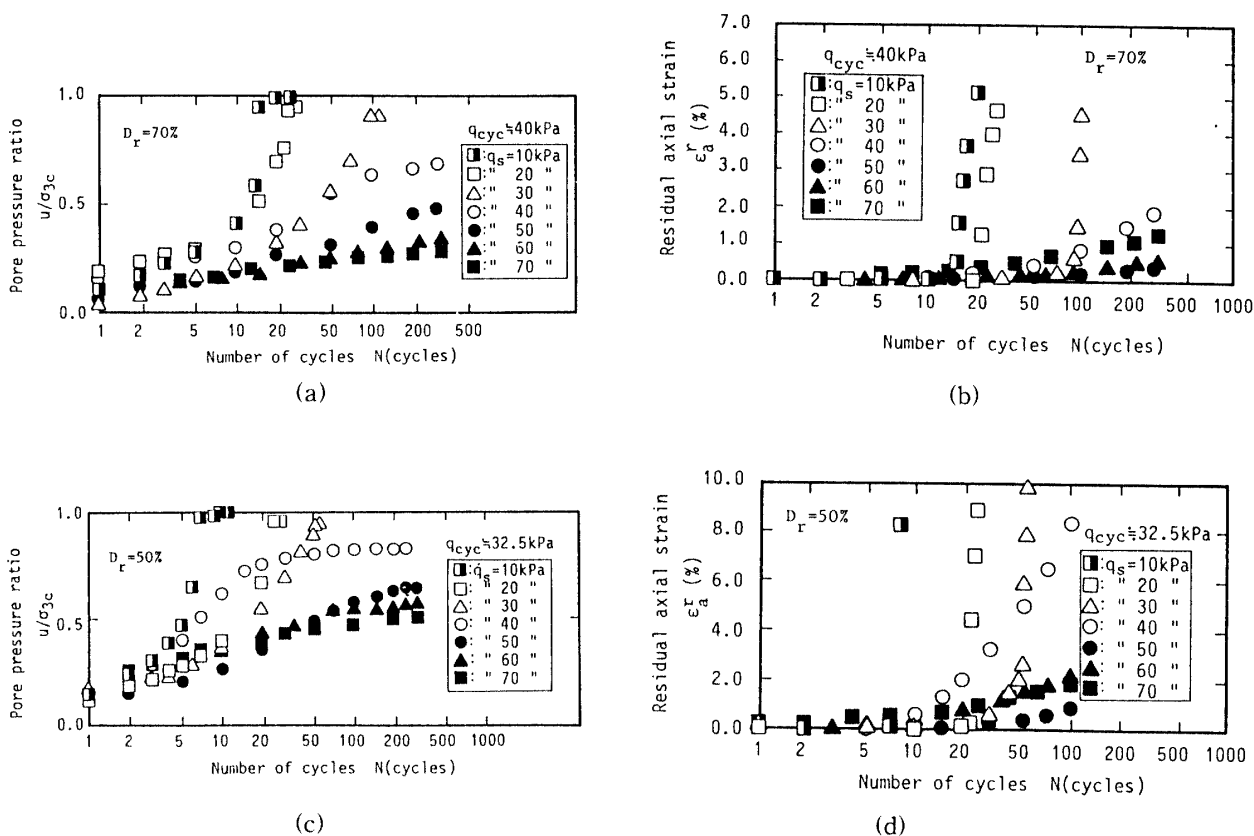


Fig. 2 Buildup of residual pore pressure and axial strain with number of stress cycles, (a) : Pore pressure ( $D_r=70\%$ ), (b) : Axial strain ( $D_r=70\%$ ), (c) : Pore pressure ( $D_r=50\%$ ), (d) : Axial strain ( $D_r=50\%$ )

あることが認められる。

(Reverse)  $\epsilon_a^r = \eta_r / (11.594 - 7.264 \eta_r) \quad (1)$

(Intermediate)  $\epsilon_a^i = \eta_r / (3.860 - 2.860 \eta_r) \quad (2)$

ここで、Reverse の応力比～軸ひずみ関係は静的試験結果 (3.3) と非常によく似ており、Reverse の試験結果のばらつきの中に静的試験結果は含まれそうである。

また、Reverse と Intermediate の両者を比較すると、Intermediate の方が Reverse のものよりやや内側でひずみが急増している。これは、Intermediate の有効応

力経路からも明らかのように、Intermediate においては圧縮載荷時のピーク時1点で破壊線に接し、除荷時において破壊線から離れたところで平衡状態になっているからである。

4.2 緩詰め砂 (相対密度50%) の残留軸ひずみ～有効応力比関係

緩詰め砂に対しても密詰め砂と同様に、除荷時における残留軸ひずみ～有効応力比関係を示した、Fig. 9 が、Reverse, Intermediate, そして Fig.10 が No Reverse の結果である。この結果、密詰め砂の時と同様に、初期せん断応力や繰返しせん断応力に依存せず、

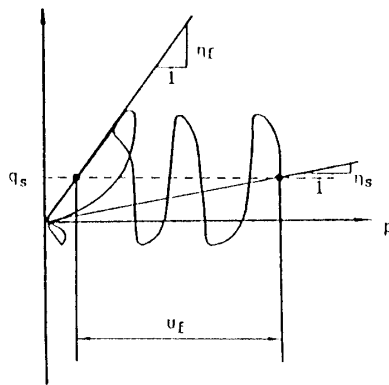


Fig. 3 Concept of effective stress path in cycling with initial static shear stress

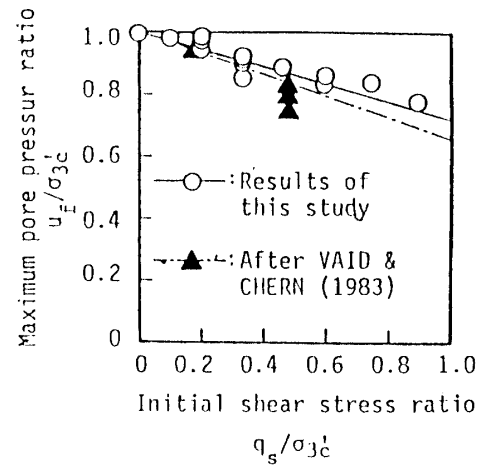
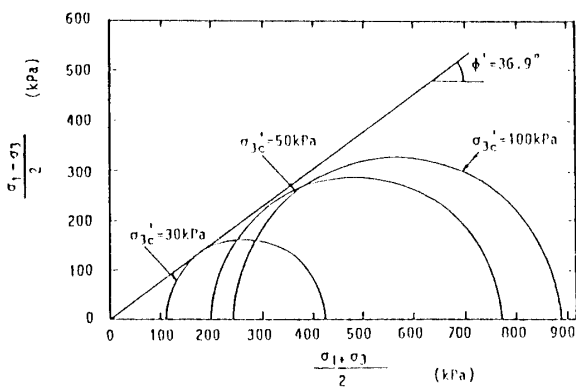
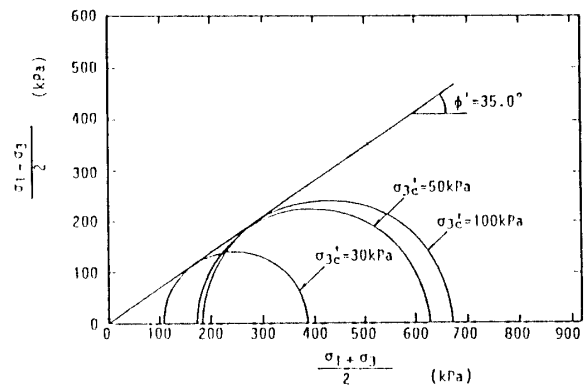


Fig. 4 Relationship between maximum residual pore pressure ratio and initial static shear stress



(a)



(b)

Fig. 5 Static failure envelope to Mohr's circles of  $\overline{CU}$  tests,

(a) :  $Dr=70\%$ , (b) :  $Dr=50\%$

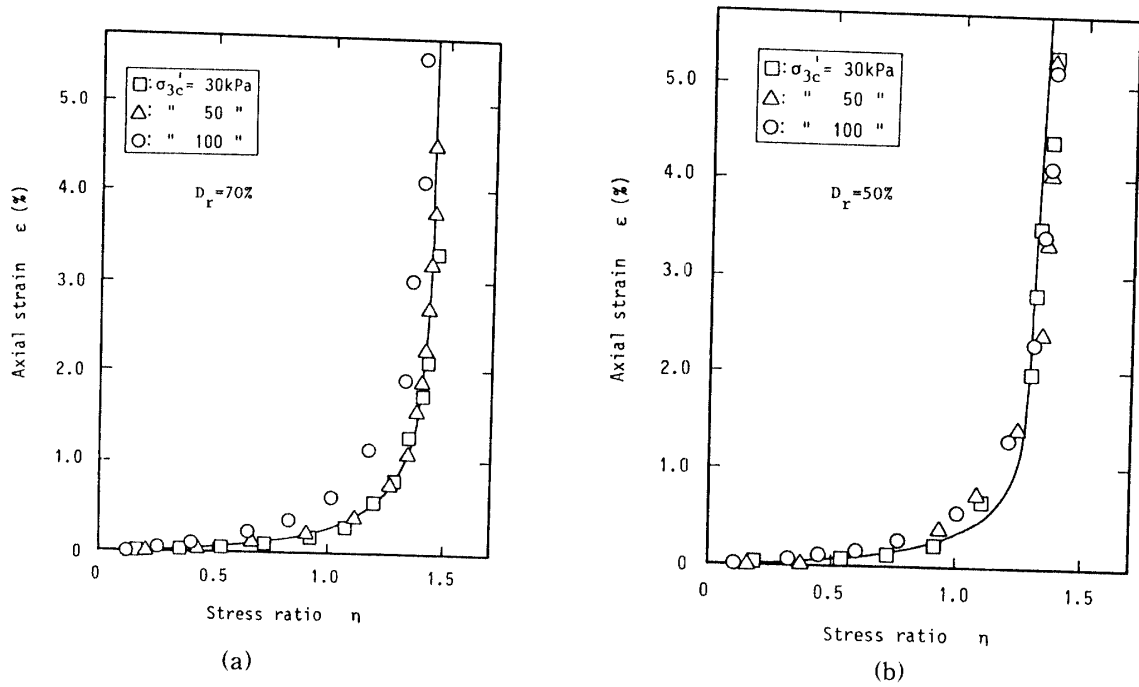


Fig. 6 Relationship between Axial strain and effective stress ratio in static triaxial compression tests, (a) :  $D_r=70\%$ , (b) :  $D_r=50\%$

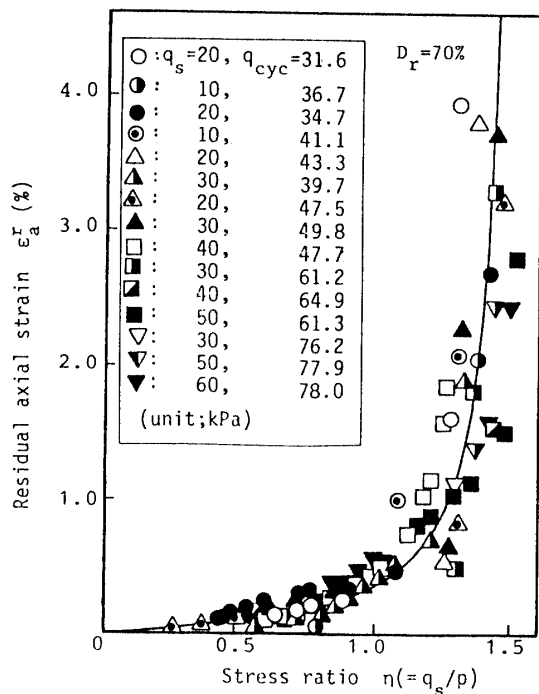


Fig. 7 Relationship between residual axial strain and effective stress ratio in cycling with stress reversal condition ( $D_r=70\%$ )

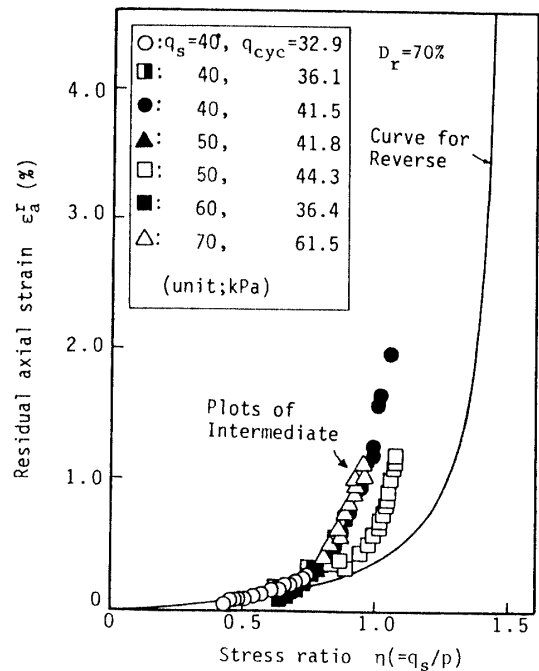


Fig. 8 Relationship between residual axial strain and effective stress ratio in cycling with intermediate condition ( $D_r=70\%$ )

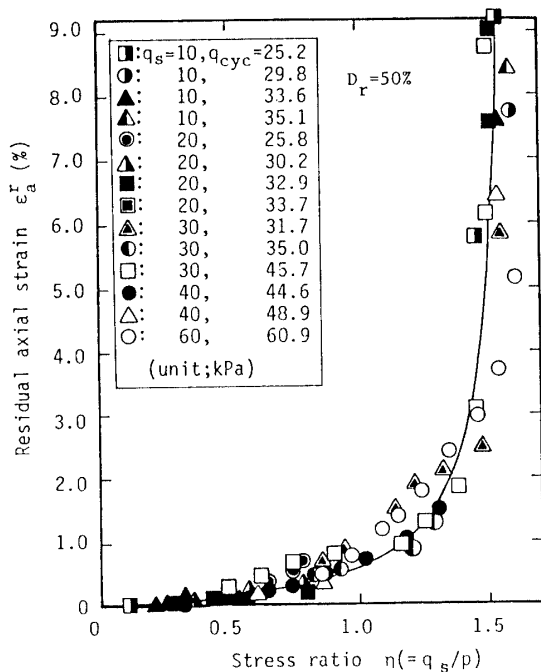


Fig. 9 Relationship between residual axial strain and effective stress ratio in cycling with reversal and intermediate stress condition (Dr=50%)

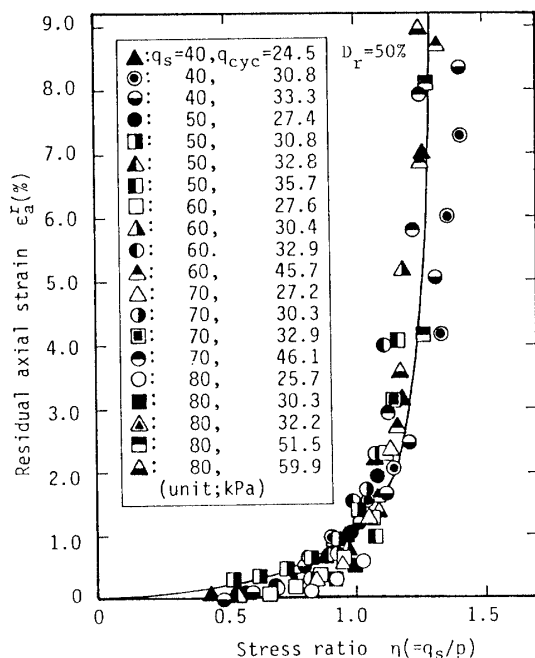


Fig. 10 Relationship between residual axial strain and effective stress ratio in cycling with no reversal condition (Dr=50%)

次式のような一本の双曲線で近似できそうである。

(Reverse, Intermediate)

$$\epsilon_a^r = \eta_r / (4.290 - 2.681 \eta_r) \quad (3)$$

(No Reverse)

$$\epsilon_a^r = \eta_r / (3.860 - 2.860 \eta_r) \quad (4)$$

緩詰め砂の場合、密詰め砂と比較して小さな応力比でやや大きめの軸ひずみを生じるという結果が得られた。これは、静的試験の結果と同様の傾向である。また、No Reverseの領域においては密詰め砂のIntermediate領域と同様に、Reverse領域よりやや小さな目の応力比でひずみが急増している。

このように、各サイクル終了時点における有効応力比と残留軸ひずみの関係が示されていれば、繰返し載荷過程の有効応力比が何らかの方法で求められたときに、残留軸ひずみを決定することができる。

### 5. 初期せん断応力を受ける飽和砂の動的強度

#### 5.1 軸ひずみ両振幅による強度評価

軸ひずみ両振幅（圧縮側と伸張側の軸ひずみの和）による強度の評価方法は、一般によく液状化強度の評価法として使用されるものであり、所定の大きさの軸ひずみ両振幅DAを発生させるのに必要な繰返しせん断応力比 $q_{cyc}/p_c$ と繰返し回数 $N_c$ の関係により定義するものである。一般に、DAは次式のより求められる<sup>7)</sup>。

$$DA = (\Delta H / H_c) \times 100 \quad (\%) \quad (5)$$

ここで、 $\Delta H$ は供試体の両振幅変位、 $H_c$ は圧密終了時の供試体高さである。本研究で対象とするDAの値は、DA=2、5%であり、ここで挙げた試験結果はこのひずみを生じる付近で全て液状化を起こした。Fig. 11は、軸ひずみ両振幅DA=2、5%を繰返し回数10回で生じさせるために必要な初期せん断応力比と繰返しせん断応力比との関係を相対密度別に示したものである。図の中央を横切っている斜線は、主応力の反転の有無を示す境界線である。図中の左上半分では $q_{cyc} > q_s$ であるので主応力の反転を伴うReverseの領域を示し、右下半分は $q_{cyc} < q_s$ であるから主応力の反転がないNo Reverseの領域を示している。この図より、強度 $q_{cyc}/p_c$ は相対密度を問わず初期せん断応力比の増加と共に増大している傾向にあるが、その増加率は初期せん断応力比の増加に伴い減少している傾向が認められる。また、相対密度70%、50%共に図中のReverse領域に属しており、DA=2、5%のひずみを生じさせ



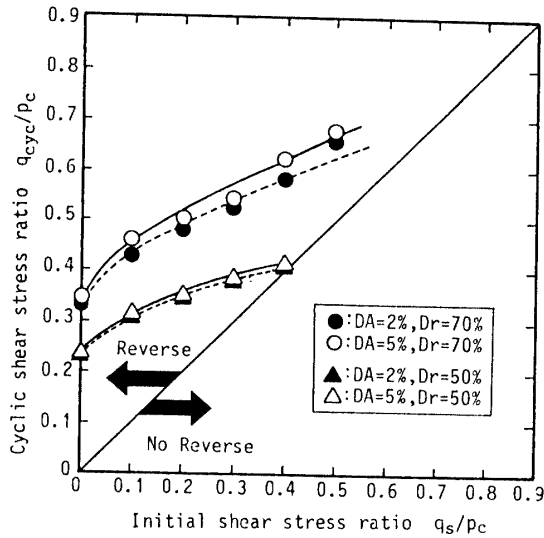


Fig.11 Influence of initial shear stress ratio on cyclic stress ratio required to cause a specified double amplitude of axial strain in 10 stress cycles

るためには、主応力の反転が不可欠であることが分かる。相対密度別にみると相対密度70%の方が、50%のものよりかなり強度が大きいということが明確に現れている。

### 5.2 残留軸ひずみによる強度評価

軸ひずみ両振幅による評価方法では、No ReverseあるいはIntermediate領域のようなサイクリックなひずみがほとんど生じず、残留軸ひずみが蓄積することにより破壊に至るような挙動下の強度評価を行うことができない。そこで、このような場合の強度評価を行うために、繰返し载荷1サイクル終了時点のひずみ、つまり残留軸ひずみRSを用いてその強度評価を行ってみた。ここでRSは、次式のように定義した。

$$RS = (H_r / H_c) \times 100 \quad (\%) \quad (6)$$

ここで、 $H_r$ は任意サイクル終了時における供試体の変位量である。Fig.12は、所定の残留軸ひずみRS(本研究では、RS=2, 5, 10%とした)を繰返し回数10回で生じさせるために必要な初期せん断応力比と繰返しせん断応力比との関係を示したものである。これらの図から、相対密度70%では初期せん断応力の増加に伴い強度が増加する傾向となり、またRS=2, 5, 10%を生じさせるには、ここで取り扱った初期せん断応力域において、Reverse領域でなければならないことが分かる。一方、相対密度50%では初期せん断応力の大きいところ(RS=2%では $q_s/p_c = 0.5$ 以上の領域)

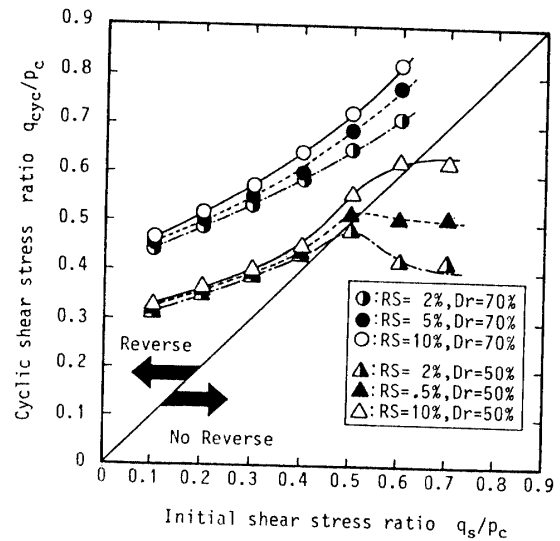


Fig.12 Influence of initial stress ratio on cyclic stress ratio to cause a specified residual axial strain in 10 stress cycles

において、No Reverseの領域でも大きなRSが生じている。また、RS=2, 5%においてはReverse領域とNo Reverse領域の境目で強度上昇が逆転し、低下に移行している。このことから、動的強度を残留ひずみで定義した場合、強度は初期せん断応力比の増加に対して、必ずしも大きくならない場合があることが認められる。

### 5.3 動的強度の統一的评价

先に2つの異なる破壊の定義で強度評価を行ったが、Reverse, No Reverse, Intermediate領域における全ての载荷パターンに対して統一的な破壊強度が評価されたわけではない。従ってここでは、全ての载荷パターンにおいて統一的に評価できる強度の定義を行う。そこでまず、軸ひずみ両振幅と残留軸ひずみのそれぞれによる二つの強度の比較を行う。Fig.13は、DA=5%とRS=5, 10%に至るに必要な繰返しせん断応力比と繰返し回数との関係を初期せん断応力比 $q_s/p_c$ 一定の条件で相対密度別に示したものである。これらの図より、相対密度70, 50%共にDA=5%による強度が最も小さいという傾向がみられる。この傾向は、他の初期せん断応力比下についても同様の傾向がみられた。また図中、相対密度50%においてはNo Reverseの領域でもRS=5, 10%のプロットが存在し、応力の反転がなくても破壊に至っていることを示している。以上の比較を基に、各载荷パターンに適した強度の定義を行う。まず、Reverse領域において最終的な破壊とは液

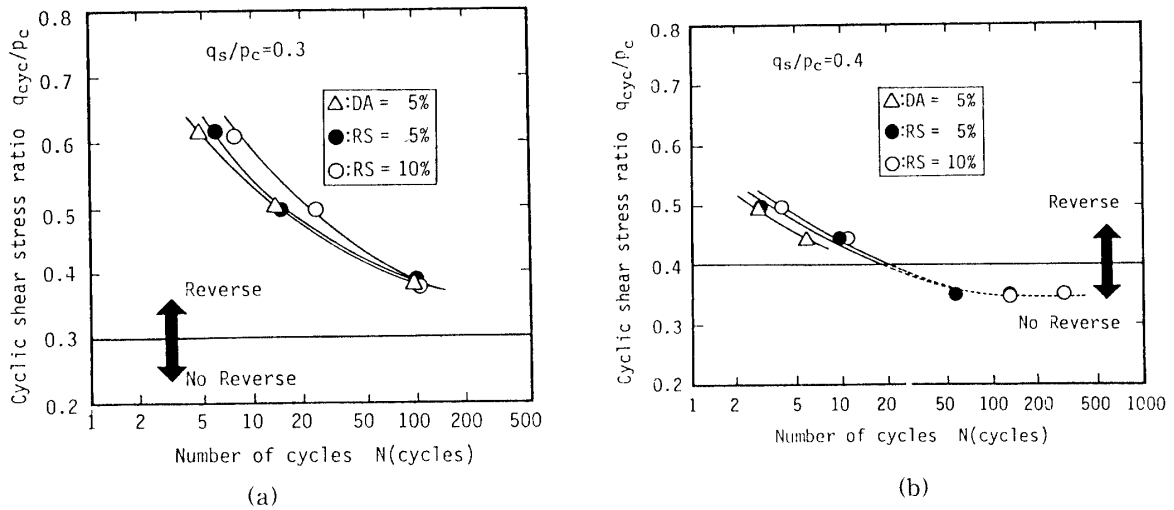


Fig.13 Cyclic shear stress ratio required to cause a specified double amplitude and residual axial strain with various number of stress cycles in a given initial stress condition, (a) : Dr=70%, (b) : Dr=50%

状化という、極限的な状態が生じるわけである。したがって、強度の安全側の評価になることも考慮に入れ、最も一般的に使用されている DA = 5% で破壊を定義する。一方、No Reverse 及び Intermediate の領域において最終的な破壊というのは、Reverse 領域とは異なり、液状化は起こらず残留ひずみが蓄積することにより生じるわけであるから、静的問題と同様な形で破壊を規定できると考えられ、このようなことも加味して RS = 10% で破壊を定義した。この二つの強度の規定を、それぞれの応力域の境界で相互に結合することにより、これを全ての載荷パターンに対する統一的な破壊強度とした。Fig.14にこのように決定した強度曲線を両対数表示により相対密度別に示した。図中、実線で示しているのが Reverse 領域で、破線で示しているのが No Reverse, Intermediate 領域である。相対密度 70% において破線部が水平になっているのは、この領域で RS = 10% に達するものがなかったからである。

これらの図より、各応力領域で繰返しせん断応力  $q_{cyc}/p_c$  と破壊に達するまでの繰返し回数  $N$  との関係が直線で近似できると仮定すると、それらの関係は次式のように表せる。

$$q_{cyc}/p_c = \alpha \cdot N^\beta \quad (7)$$

この直線関係を初期せん断応力比毎にそれぞれ最小二乗法により回帰し、実線部及び破線部の勾配  $\beta$ 、切辺を表す値 ( $N = 1$  の時の値)  $\alpha$  を相対密度別にそれ

ぞれ求めた。その結果は以下の通りであり、直線の傾きは、初期せん断応力比に依存せず一定値となり、切辺は、初期せん断応力比の一次関数で表せることが明らかになった。

(相対密度70%)

$$\begin{aligned} \beta &= -0.115 \quad (\text{Reverse}) \\ &= 0 \quad (\text{Intermediate}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\alpha = 0.470 + 0.737q_s/p_c \quad (9)$$

(相対密度50%)

$$\begin{aligned} \beta &= -0.115 \quad (\text{Reverse}) \\ &= -0.08 \quad (\text{Intermediate, No Reverse}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\alpha = 0.297 + 0.804q_s/p_c \quad (11)$$

### 6. 応力比 ( $\eta^*$ ) ~ 強度比 ( $R/R_f$ ) 関係

前節で、全ての載荷パターンで統一的に評価が可能なた動的強度  $R_f$  を定義した。ここでは、この強度  $R_f$  と繰返しせん断応力  $R$  との比で表せる強度比  $R/R_f$  という概念を新たに導入する。この強度比は、安全率の逆数に相当するものであり、ある任意振幅の繰返しせん断応力 (Fig.15 (a) 参照) を得た場合、その繰返しせん断応力と所定の繰返し回数において破壊を引き起こすのに必要な強度  $R_f$  (Fig.15 (b) 参照) との比で表されるものである。いま、一様振幅応力  $R$  の繰返し載

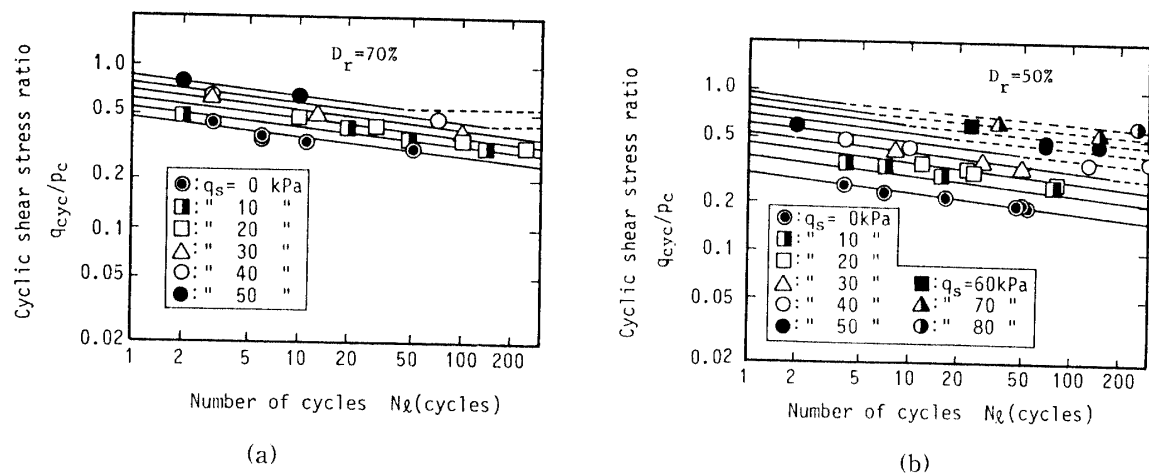


Fig.14 Relationship between cyclic shear stress ratio and number of cycles to cause dynamic failure in various initial stress conditions, (a) :  $D_r=70\%$ , (b) :  $D_r=50\%$

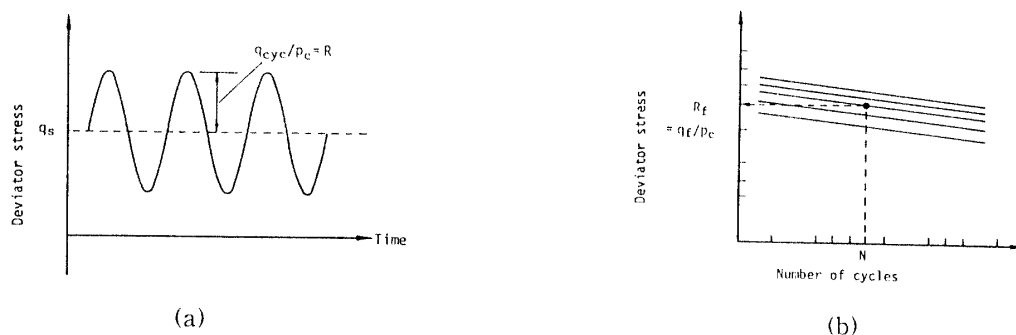


Fig.15 Schematic diagram for sinusoidal shear stress deviated to initial static shear stress and dynamic strength curves for various initial stresses, (a) : Wave form of shear stress, (b) : Dynamic shear strength

荷を想定した場合、 $R$ は一定であるが  $R_f$ が繰返し回数の増加に伴って減少して行くので  $R/R_f$ は増加し、最終的に  $R/R_f = 1$ に至って供試体の破壊を意味する。

次に、この強度比と次式で定義する新しい応力比  $\eta^*$ との関係を調べてみる。

$$\eta^* = (\eta_f - \eta_s) / (\eta_f - \eta_s) \quad (12)$$

ここで、 $\eta_f$ は任意の繰返し応力作用後の残留応力比、 $\eta_s$ は初期状態における応力比、 $\eta_f$ は静的試験から求めた破壊時の応力比である。各々の  $\eta$ に関する位置関係を Fig.16に示す。したがって、この新しい応力比  $\eta^*$ は任意の繰返し回数における応力比が初期状態と破壊状態の相対的にどの位置にあるかということを表すものである。

この応力比  $\eta^*$ と強度比  $R/R_f$ との関係を繰返し回数  $N=10, 20, 30$ について、そして相対密度別に調べ

てみた。その結果が、Fig.17である。これらの関係から、相対密度70%、50%共に応力比  $\eta^*$ と強度比  $R/R_f$ の関係は、繰返し回数や繰返しせん断応力に依存しないことが認められる。そして、これらは初期せん断応力比のみで決定されるユニークな曲線となり、次式のような双曲線表示が可能となる。

$$\eta^* = \frac{R/R_f}{a - (a-1)R/R_f} \quad (13)$$

この双曲線のパラメータである  $a$ の値を初期せん断応力比毎に示したのが Fig.18である。

これらの図から、相対密度70%においてパラメータ  $a$ の値は、初期せん断応力比の増加と共に直線的に減少していることが分かる。この直線を最小二乗法により回帰を行った結果、 $a$ と  $\eta_s$ の関係は次式のように表せる。

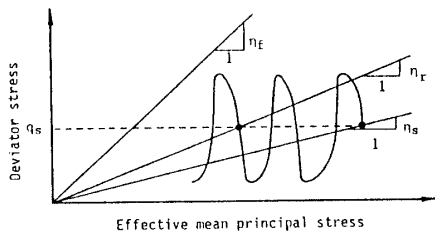
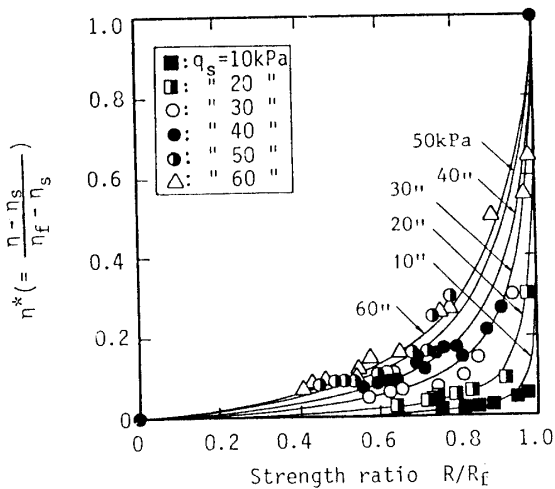
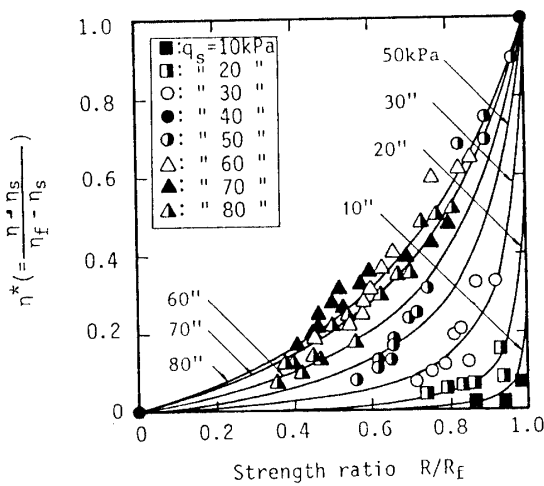


Fig.16 Sketch of effective stress path during cyclic shear loading

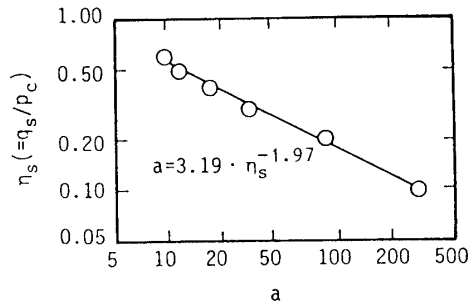


(a)

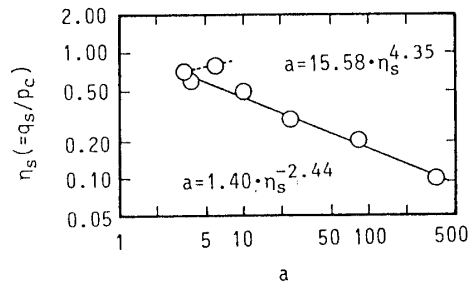


(b)

Fig.17 Relationship between relative stress ratio  $\eta^*$  and strength ratio  $R/R_f$ , (a) :  $Dr=70\%$ , (b) :  $Dr=50\%$



(a)



(b)

Fig.18 Relationship between parameter  $a$  and initial stress ratio  $\eta_s$ , (a) :  $Dr=70\%$ , (b) :  $Dr=50\%$

$$a = 3.19\eta_s^{-1.97} \quad (14)$$

相対密度50%において  $a$  の値は、 $\eta_s \leq 0.7$  では初期せん断応力比の増加と共に直線的に減少する傾向を示しているが、 $\eta_s$  がそれ以上大きくなると逆に増加に転じている。これら二つの挙動を表すために  $\eta_s = 0.7$  を境界に次式の二本の直線で表した。

$$(\eta_s \leq 0.7 \text{ の場合}) \quad a = 1.40\eta_s^{-2.44} \quad (15)$$

$$(\eta_s > 0.8 \text{ の場合}) \quad a = 15.58\eta_s^{4.35} \quad (16)$$

## 7. 残留空隙水圧および残留軸ひずみの予測

### 7.1 一様繰返しせん断応力下における予測手法および予測結果

残留空隙水圧及び残留軸ひずみの予測を、応力比  $\eta^*$  ~ 強度比  $R/R_f$  関係、さらに残留軸ひずみ ~ 有効応力比関係を利用することにより、以下に述べるような方法で行った。

① 動的強度を表す応力比 ~ 繰返し回数関係より各繰返し回数毎に破壊強度  $R_f$  を定め、対象となる繰返

しせん断応力比  $R$  に対する強度比  $R/R_f$  を求める。

- ②求められた強度比を、応力比  $\eta^*$  ~ 強度比  $R/R_f$  関係に代入して、所定の繰返し応力終了後の残留応力比  $\eta_r$  を求める。なお、応力比  $\eta^*$  から残留応力比  $\eta_r$  へ変換させるには式(12)を変形した次式を用いる。

$$\eta_r = \eta^* (\eta_i - \eta_s) + \eta_s \quad (17)$$

- ③残留応力比  $\eta_r$  が求めれば、残留軸ひずみは相対密度70%では式(1), (2), また相対密度50%では式(3), (4)を用い、さらに残留間隙水圧は次式を用いることにより予測できる。

$$u_r = p_c - q_s / \eta_r \quad (18)$$

この手順により算出される各実験に対する残留間隙水圧および残留軸ひずみの予測結果を相対密度別に実験結果と共にまとめたのが Fig.19である。

図において、実験結果と予測結果を比較すると、以

下のような傾向が認められる。まず、残留間隙水圧では、繰返し初期の値、ある繰返し回数で定常状態に収束していく様子、そして Reverse 領域 (相対密度70%, 50%共に、 $q_s = 10, 20, 30 \text{ kPa}$ ) で液化化に近づくにつれ残留間隙水圧が急増する様子など、いずれの载荷パターンについてもうまく捕らえている。また、残留ひずみにおいても Reverse における急激な軸ひずみの発生、そして Intermediate, No Reverse における残留ひずみの漸増過程をうまくと捕らえている。このような実験および予測結果の良好な対応から、ここで提案した方法は、妥当なものであると判断される。

### 7.2 変動繰返しせん断応力下における予測手法および予測結果

次に、提案モデルが不規則波に対して適応性があるかどうかを調べるため、Fig.20に示すような簡単な変動繰返しせん断応力を加えて試験を行った。予測は次のような手順に基づき行った。

- ①まず、最初の振幅のせん断応力  $q_{cyc,i}$  载荷において

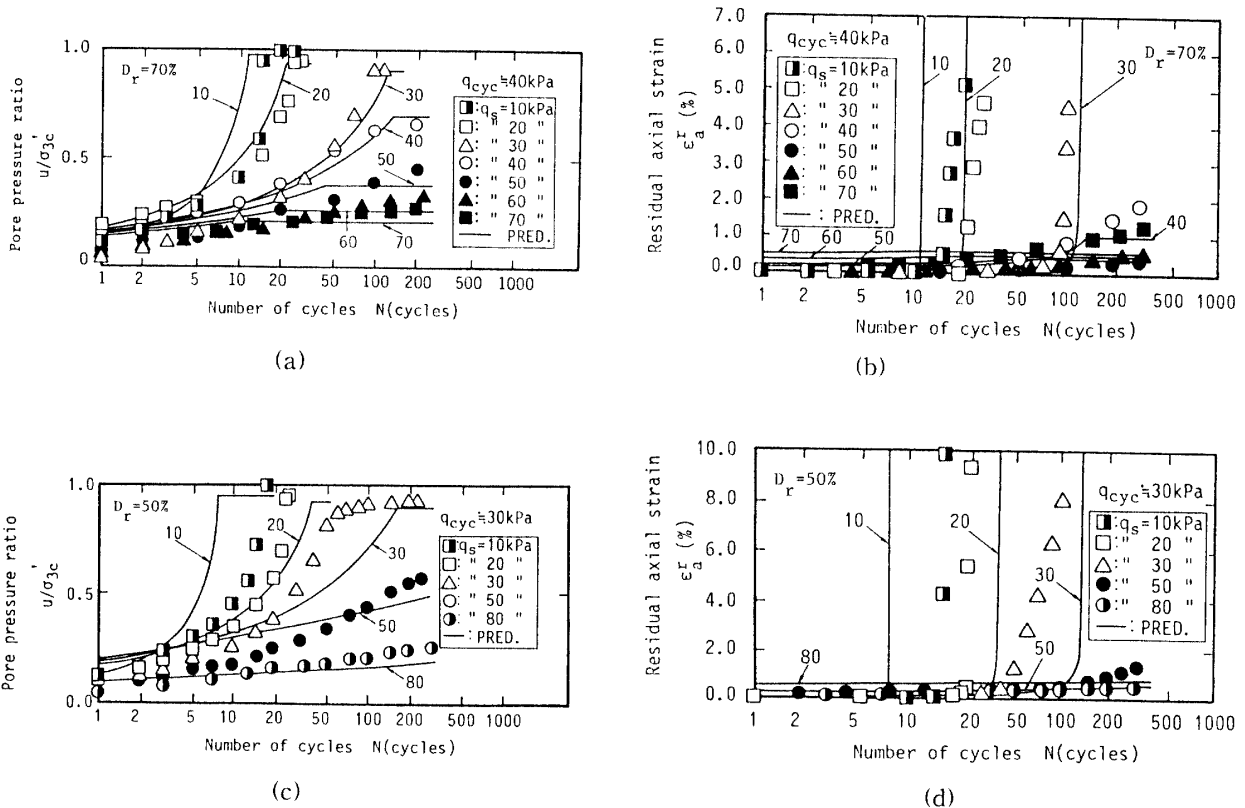


Fig.19 Comparison between predicted and experimental pore pressure and residual shear strain during cycling of shear stress, (a) : Pore pressure ( $D_r=70\%$ ), (b) : Residual strain ( $D_r=70\%$ ), (c) : Pore pressure ( $D_r=50\%$ ) (d) : Residual strain ( $D_r=50\%$ ),

は、一様繰返しせん断応力と同じ予測方法により行う。

②次に、最初の振幅の応力がN回作用後にこれまでと異なった繰返しせん断応力振幅  $q_{cyc,2}$  が作用する場合、 $q_{cyc,1}$  によって生じた  $\eta^*$  と同じ  $\eta^*$  となるよ

う  $q_{cyc,2}$  の作用に対する繰返し回数  $N'$  を求める必要がある。 $q_{cyc,1}$  がN回生じたときの強度比を  $q_{f1}/p_c$  としたとき、 $N'$  は次式のように求められる。

$$N' = \{ (q_{cyc,2} q_{f1}) / (q_{cyc,1} p_c) \} \quad (19)$$

この  $N'$  は最初の応力振幅による最終繰返し回と等価なものを見なされ、2番目の応力振幅は  $N'+1$  から始まるものと解釈される。

Fig.21は、これらの手法により予測を行った結果を示したものである。

これらの図より、予測結果は実験結果で見られる急激な間隙水圧および残留軸ひずみの上昇傾向をうまく捕らえている。したがって、提案モデルはこのように繰返しせん断応力が変動するような場合に対しても、十分適応可能であることが認められる。

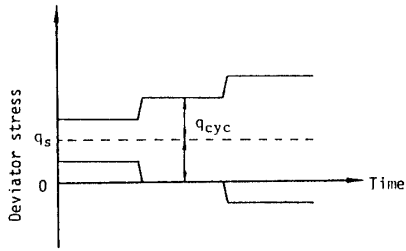


Fig. 20 Variable amplitude of cyclic shear stress applied to cyclic triaxial compression test

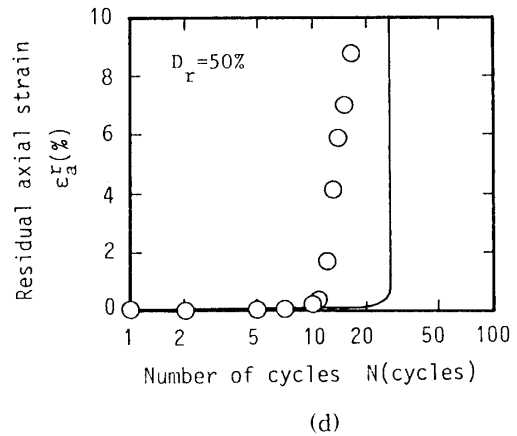
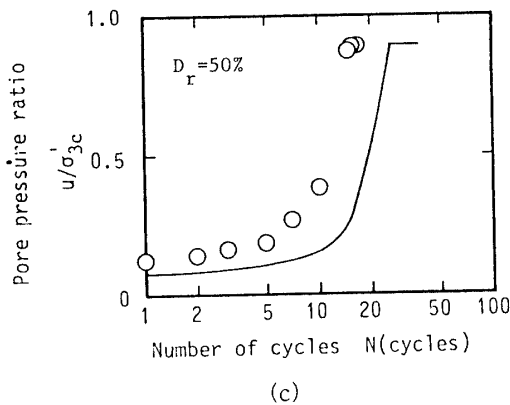
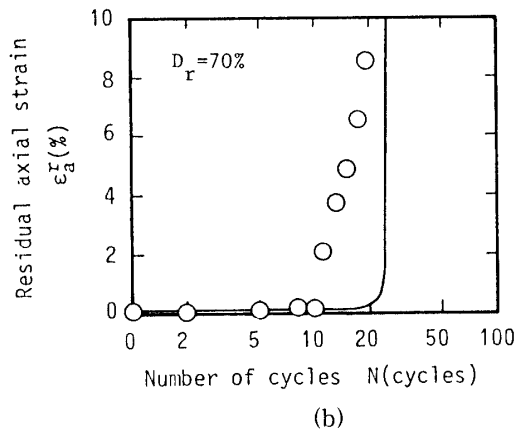
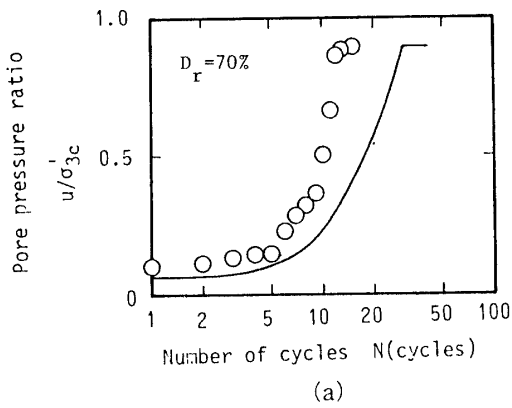


Fig. 21 Predicted and experimental results of cyclic triaxial test applied the variable amplitude of cyclic shear stress. (a) : Pore pressure ( $D_r=70\%$ ), (b) : Residual strain ( $D_r=70\%$ ), (c) : Pore pressure ( $D_r=50\%$ ), (d) : Residual strain ( $D_r=50\%$ ),

## 8. 結 論

- ①初期せん断応力を受ける飽和砂の動的挙動をその載荷パターンの違いより、主軸の反転を伴う場合 (Reverse)、伴わない場合 (No Reverse)、その中間的な場合 (Intermediate) の3つに分類した。
- ②繰返し載荷過程の除荷時における有効応力比と軸ひずみの関係について調べてみると、両者の関係は初期せん断応力や繰返しせん断応力に関係なく一義的な関係となり、一本の双曲線で表せることが明かとなった。
- ③初期せん断応力を受ける飽和砂の動的強度を表すために、所定の軸ひずみ両振幅および残留軸ひずみに対して整理を行った。その結果、軸ひずみ両振幅で整理を行うと、初期せん断応力比が大きくなるに伴い強度が増加する傾向を示したが、残留軸ひずみ  $R/S$  で整理を行うと、相対密度50%において  $R/S = 2, 5\%$  による強度評価の場合に、初期せん断応力比の増加に対して強度が低下することがあることが確認された。
- ④ Reverse, No Reverse, Intermediate 全ての載荷パターンに対して統一的に評価できる動的強度を定義した。
- ⑤本研究で定義した強度比  $R/R_i$  と新しい応力比  $\eta^*$  の間には、繰返し回数や繰返しせん断応力に関係なく、初期せん断応力比別にユニークな関係があることが分かった。
- ⑥残留軸ひずみ～有効応力比関係、応力比  $\eta^*$ ～強度比

$R/R_i$  関係を用いて、一樣繰返しせん断応力および変動せん断応力作用下における残留軸ひずみ、間隙水圧の予測を行った結果、実験結果との間に良い整合性が得られた。

## 参 考 文 献

- 1) Lee, K. and Seed, H.B.: Dynamic Strength of Anisotropically Consolidated Sand, Proc. ASCE, Vol.93, No.SM5, pp.169-190, 1967.
- 2) Castro, G. and Poulos, S.J.: Factors Affecting Liquefaction and Cyclic Mobility, Proc. ASCE, Vol.103, No.GT6, pp.501-516, 1977.
- 3) Mohamad, R. and Dobry, R.: Undrained Monotonic and Cyclic Triaxial Strength of Sand, Proc. ASCE, Vol.112, No.GT10, pp.941-958, 1986.
- 4) 土質工学会(飽和砂の非排水繰返し三軸試験方法に関する研究委員会): 飽和豊浦砂の共通使用に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験仕様, 1987.
- 5) 兵動正幸・村田秀一・安福規之・藤井照久: 飽和砂の非排水繰返し変形に及ぼす初期せん断の影響, 土の非排水繰返し一室内試験, 現位置及び試験結果の利用ーに関するシンポジウム論文集, pp.199-204, 1988.
- 6) Vaid, Y.P. and Chern, J.C.: Effect of Static Shear on Resistance to Liquefaction, Soils and Foundation, Vol.23, No1, pp.47-60 1983.
- 7) 龍岡文夫: 室内土質せん断試験ー理論と実際ー, 生研セミナーテキスト, 東京大学生産技術研究所, 1985.

(平成元年4月12日受理)