

せん断方式および比表面積比の異なる大型 供試体の繰返し非排水せん断強度の比較

岡本正広*・越智健三**

本論文では、砂礫あるいは粗粒材料を対象とした単純せん断強度を求めるために製作した大型直接単純せん断試験機の適用性について、せん断方式および比表面積比の異なる供試体の非排水繰返しせん断強度を比較することによって検討した。その結果、ロッキング防止構造を強固なものにすれば、単純せん断変形条件の精度、応力の非一様分布およびロッキング等の影響はあるものの、せん断応力比の小さな範囲ではその影響も少なく、直接せん断方式でも実用上有効な単純せん断試験が可能であることが分かった。

Key Words : liquefaction, cyclic undrained, triaxial, torsional, direct shear, sand

1. はじめに

近年、原子力発電施設等の重要構造物が砂礫地盤上に計画されたり、岩塊などの粗粒材料を用いた高盛土などが施工されるようになり、砂礫地盤あるいは粗粒材料などの動的強度・変形特性を定量的に評価する必要性が生じてきた。砂礫地盤は、砂地盤よりも粒径が大きいいため、この種の材料の動的強度・変形特性を求めるには、通常行われている小型の試験機（供試体直径5~10 cm、高さ10~20 cm）よりも供試体寸法の大きい試験機を必要とする。しかも、地震時の破壊モードは、一般に、単純せん断変形が主体であると考えられるので¹⁾、地震時の地盤の動的強度・変形特性を正確に把握するためには、単純せん断状態を室内試験で再現して求めるのが最も直接的である。現在、通常の土質を対象としたインデックス試験としては非排水繰返し三軸試験が基準化²⁾されているものの、土の非排水繰返し試験法に関しては、まだ研究途上であると考えられる³⁾。

従来より単純せん断状態を室内で再現する方法として2つの代表的な方法がある。その1つは、SGI, NGI型およびケンブリッジ型に代表される直接単純せん断試験^{4)~6)}であり、もう一方は、中空薄肉の円筒供試体をねじりせん断することにより、単純せん断変形を再現するねじり単純せん断試験^{7)~9)}である。

ねじり単純せん断試験においては、中空供試体の内・外径および高さを一定に保ちながら、ねじりせん断することによって理想的単純せん断変形を再現しようとする試みがなされ^{10), 11)}、地盤の要素試験としては、比較的理想到近い応力-ひずみ関係が得られるようになった。しかし、不攪乱試料や粗粒材料などの試料が作製しにくく、

また、非排水試験においては不可避的なメンブレンペネトレーションの影響が大きい等の理由で、実務レベルでの適用は限られているのが現状である。

一方、中実供試体による直接せん断試験は、単純せん断条件の厳密な応力とひずみの要件は満足していないが、三軸試験と同様の比較的簡単な試験方法で実施することが可能であり、不攪乱試料や粗粒材料の試料作製が容易であるなどの長所が多い。

したがって、単純せん断試験の結果の解釈と意義を考察することは、実務上非常に有効であると考えられる。

そこで、今回、砂礫地盤にも適用可能なように供試体寸法を大きくした大型の直接単純せん断試験機（中実供試体で、直径30 cm）を製作し、大型の繰返し非排水三軸およびねじり単純せん断試験結果と比較することによって、直接単純せん断試験機の適用性について検討した。

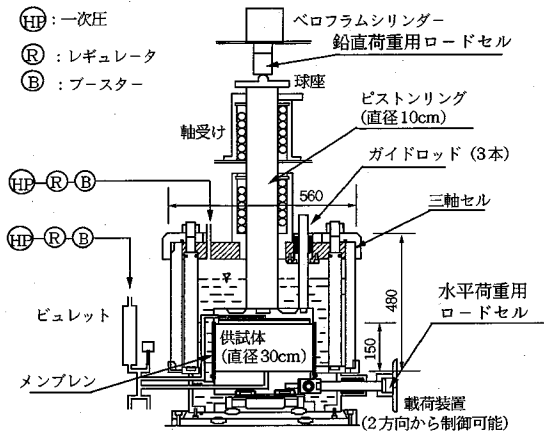
本研究では、まず非排水試験において供試体を大型にすることによって生じる自重の影響について、直径30 cm、高さ65 cmの大型供試体を用いて繰返し非排水三軸試験を実施して検討した。次に、せん断方式および比表面積比の異なるねじり単純せん断と直接単純せん断試験による非排水繰返しせん断強度を、時松・中村の方法¹²⁾に基づいてメンブレンコンプライアンスに対する補正をして比較した。また、直接単純せん断試験においては、不可避的に生じるロッキングおよび応力の非一様分布についても検討した。

2. ねじりおよび直接単純せん断試験装置の概要

試験に用いた2種類の単純せん断試験装置の特徴について、以下概略説明する。図-1および図-2に、それぞれ直接単純せん断試験装置、ねじり単純せん断試験装置を示す。図-1に示すように、直接せん断試験装置の

* 正会員 東急建設(株) 技術本部土木技術部
(〒150 渋谷区渋谷1-15-21 ポーラ渋谷ビル8F)

** 正会員 東急建設(株) 技術本部技術研究所



図一 直接単純せん断試験装置

基本構造は、Silver・龍岡らの基本原理^{13),14)}を取り入れており、拘束リングを用いず三軸セル内で軸対象応力状態を再現した。供試体の寸法は、直径 30 cm、高さ 15 cm (高さ 10 cm も可能) を標準とし、単純せん断条件の再現性を向上させ、粗粒材料への適用性向上を図るとともに、メンブレンペネトレーションの影響を軽減した。

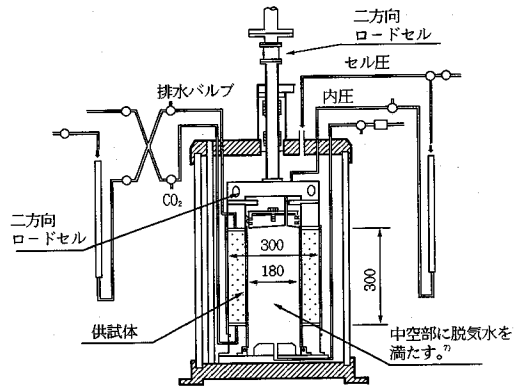
また、ロッキング防止構造を極めて強固なものにした。図一に示すように、供試体に鉛直応力を伝達させるピストンロッドの直径を 10 cm (供試体直径の 1/3) とかなり大きくするとともに、別に 3 本のガイドロッドを設けた。なお、この太さのピストンロッドはかなりの重量となることから中空構造とした。

一方、ねじりせん断試験装置は、軸受け、载荷軸、キャップ、ペダスタルを交換するだけで中実の三軸試験機から中空のねじりせん断試験機に変更でき、供試体は、外径 $D_0=30$ cm、内径 $D_i=18$ cm を標準とし、内外径比は $D_i/D_0=0.6$ である。他に内外径比 0.87、0.33 が可能であり、半径方向に生じる応力ひずみ分布の不均一を軽減した実験や粗粒材料の実験も可能である。

また、非排水試験で重要なメンブレンペネトレーションの影響は、従来の小型のねじりせん断試験機と比較すると、同一の内外径比 0.6 の場合、外径 30 cm、内径 18 cm であるので、比表面積比 A_m/V (A_m :メンブレンに覆われた表面積、 V :供試体体積) は、 $4/(D_0-D_i)=4/(30-18)=0.33$ であり、 $4/(10-6)=1$ に比べて 3 分の 1 になっている。

平面ひずみ状態を再現するためには軸方向変位を拘束し、さらに図二に示すように、中空部分に脱気水を満たし、基本的には外圧と内圧を独立に制御しているが、非排水試験においては、せん断時に排水バルブを閉じることによって中空部分の等体積条件を確保している¹⁰⁾。

なお、载荷枠は、単調载荷と繰返し载荷の 2 つがそれぞれ独立している。繰返し载荷は、小型のねじりせん断



図二 ねじり単純せん断試験装置

試験機の場合と同様に空圧式载荷装置を採用しており、複動式ベロフラムシリンダーの直接運動をワイヤーを介して回転運動に変換し、ボールスプライン軸を介して供試体に加えられる¹¹⁾。大型供試体でもこの方式でせん断応力比 $SR=\tau_{cy}/\sigma_{mc}'=0.5$ 程度までの载荷は可能である。

3. 試料および試験方法

図三に今回行った試験の種類および試験条件を示す。

試験に用いた砂は、豊浦砂 ($e_{max}=0.977$, $e_{min}=0.605$, $G_s=2.64$) である。供試体は空中落下法により作製した。有効拘束圧 $\sigma_c'=0.3$ kgf/cm² (29.4 kPa) で CO₂ を十分流した後、脱気水を満たし、その後背圧を三軸試験では $\sigma_{BP}=2.0$ kgf/cm² (196.2 kPa)、ねじりせん断試験および直接せん断試験では $\sigma_{BP}=1.0$ kgf/cm² (98.1 kPa) を加え、スケンプトンの B 値を、 $B \geq 0.96$ とした。メンブレンの厚さは、供試体直径 $D=5 \sim 10$ cm の場合、 $t_m=0.2$ mm であり、 $D=30$ cm の場合、 $t_m=0.3$ mm (ラテックス) である。

等方圧密は、平均有効応力 $\sigma_{mc}' = \sigma_{vc}' = \sigma_{hc}' = 1.0$ kgf/cm² (98.1 kPa) (σ_{vc}' :有効鉛直応力、 σ_{hc}' :有効側方応力) で行い、また異方圧密は $\sigma_{vc}' = \sigma_{hc}'$ で等方圧密後、鉛直荷重を増加させて $\sigma_{mc}' = (\sigma_{vc}' + 2\sigma_{hc}')/3 = 1.0$ kgf/cm² (98.1 kPa) ($\sigma_{hc}' = K_0 \cdot \sigma_{vc}'$, $K_0 = 0.52 \cdot e_i^{1.5}$) で行った。せん断は非排水状態にし、周波数 $f=0.1$ Hz の正弦波で行った。また、ねじりおよび直接せん断試験においては、軸方向変位を拘束した平面ひずみ状態で行った。他の試験方法は、文献^{16),17)}の一斉試験の要領にしたがった。

4. 非排水試験における自重による変形の非一様性について

大型供試体を用いた非排水試験においては、メンブレン

試験の種類:略称	圧密方法	応力状態	高さ (cm)	直径 (cm)	比表面積比	$C_{RM} = \varepsilon_{vm} / \varepsilon_v^{1/2}$	備考
繰返し三軸 (CTX)			10	5	0.8	0.40	比表面積比 = A_m/V A_m : 供試体の比表面積 V : 供試体体積 中実供試体: $4/D$ 中空供試体: $4/(D_o-D)$
			15	7.5	0.53	0.27	
			20	10	0.4	0.20	
			65	30	0.13	0.07	
等方圧密繰返し ねじりせん断 (CTS-I)			10	外径10 内径6	1.00	0.50	C_{RM} : メンブレン コンプライアンス比 ¹⁹⁾ $C_{RM} = S(A_m/V)/C$ S : 正規化された メンブレン貫入量 (= 0.001) C : メンブレンリバンド指数 (= 0.002)
			30	外径30 内径18	0.33	0.17	
異方圧密繰返し ねじりせん断 (CTS-A)			10	外径10 内径6	1.00	同上	
			30	外径30 内径18	0.33		
等方圧密繰返し 直接せん断 (CDS-I)			15	30	0.13	0.07	
異方圧密繰返し 直接せん断 (CDS-A)							

図-3 繰返し非排水試験の種類および試験条件^{18), 20), 21)}

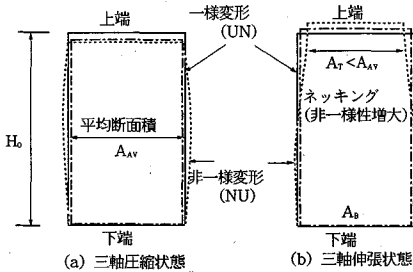
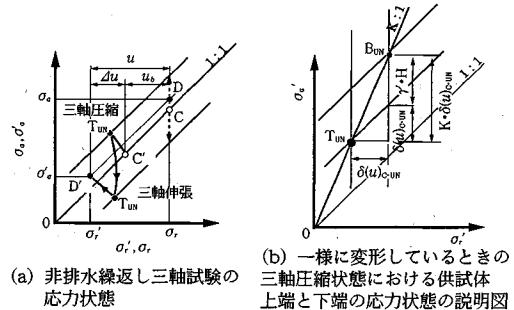


図-4 供試体に生じる非一様性変形の模式図

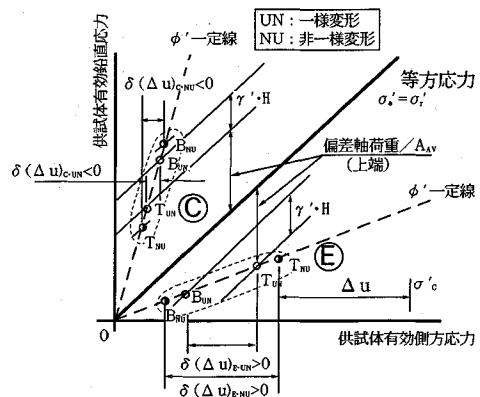
ペネトレーションの影響が軽減される反面、自重による応力比 (σ'_1/σ'_3) の違いによって、供試体の上部と下部では変形特性が違うために供試体が非一様に変形する恐れがある。そこで、2種類の単純せん断試験機による繰返し非排水強度を比較する前に、大型供試体を用いる非排水試験における自重の影響を大型供試体の繰返し三軸試験を実施して検討した。

図-4に三軸圧縮・伸張状態における供試体に生じる非一様変形の模式図を示す。また、図-5には、大型供試体を用いた非排水繰返し三軸試験の応力状態の説明図を示す。図中の(c)は、非排水せん断中で有効応力が増加している過程での三軸圧縮(図中のC)および伸張(図中のE)状態のときの、供試体上端(Top, T)と下端(Bottom, B)の有効応力状態を示したものである。

供試体が一様に(Uniform, UN)に変形していても、自重の影響 ($\gamma \cdot H$) で上端と下端で有効応力 σ'_e あるいは過剰間隙水圧 Δu が異なってくる。三軸圧縮状態のC



(a) 非排水繰返し三軸試験の応力状態
(b) 一様に変形しているときの三軸圧縮状態における供試体上端と下端の応力状態の説明図



(c) 三軸圧縮および伸張状態における供試体上端と下端に発生する過剰間隙水圧の差 $\delta(\Delta u) = (\Delta u)_e - (\Delta u)_t$ の説明図¹⁸⁾

図-5 大型供試体を用いた非排水繰返し三軸試験の応力状態の説明図

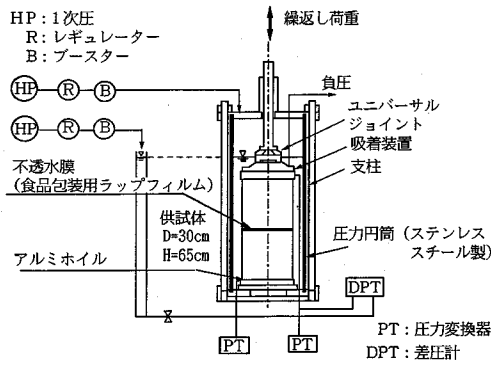


図-6 三軸試験装置

では、供試体の上端と下端の過剰間隙水圧の差 $\delta(\Delta u) = (\Delta u)_{\text{Bottom}} - (\Delta u)_{\text{Top}}$ は負で、伸張状態の E では逆に正になる。そのために非一様変形が生じるが、三軸圧縮状態の C より伸張状態の E の方が、 $|\delta(\Delta u)|$ は大きくなるので、伸張状態での非一様性はより大きくなり、いわゆるネッキングが生じることになる。

そうすると NU の添字で示すように、非一様に変形し始めたときの $\delta(\Delta u)_{NU}$ は、更に大きくなり、非一様性は加速されることになる。すなわち、 $\delta(\Delta u)$ の発生とその変化は、非一様性変形の原因と発達の指標となる。

そこで、図-6 に示すように内径 2 cm の穴を開けた不透水膜（食品包装用ラップフィルム）を供試体中央部に設置して、供試体の上部と下部を分離し、供試体上端と下端の過剰間隙水圧の差 $\delta(\Delta u)$ を純粋に差圧計（富士電機製造：FFF35）を用いて測定した。

供試体の上部と下部を分離するために、不透水膜を設置したが、完全に水の流れを遮断してしまうと供試体内の水の上下方向の動きが発生せず、非一様変形が緩和される可能性があり、また、差圧計の応答性も考慮して、直径 2 cm の穴を開けて水の流れを緩和するとともに、二酸化炭素や脱気水を流して供試体を飽和するためにも利用した。

図-7 に典型的な非排水繰返し三軸試験結果例を示す。繰返し荷重は、ひずみが増加してもほぼ一定であり、荷重の低下はない。図-7 (b) より繰返し回数 $N_c = 20$ 付近から圧縮ひずみが生じにくくなって来る。さらに、 $N_c = 25$ を過ぎると圧縮ひずみが減少し、伸びひずみに片寄ようになっており、非一様な変形が生じ始めている。（図-4 参照）このときの軸ひずみは両振幅で $DA = 7\%$ であることより、両振幅軸ひずみ $DA = 5\%$ まで、供試体は一様に変形していると判断できる。また、図-7 (c) より過剰間隙水圧の最小値 $(\Delta u)_{\text{min}}$ も $N_c = 25$ 付近から減少し始めている。

図-7 (d) には供試体上端と下端に発生する過剰間隙水圧の差 $\delta(\Delta u)$ を示す。同図によれば、伸張時に

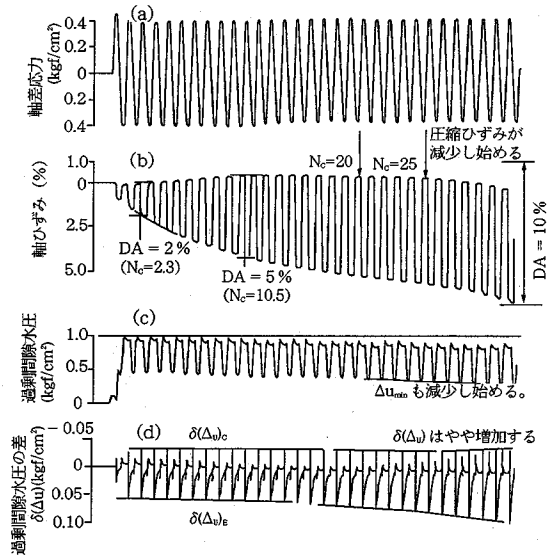


図-7 典型的な三軸液状化試験結果例¹⁸⁾

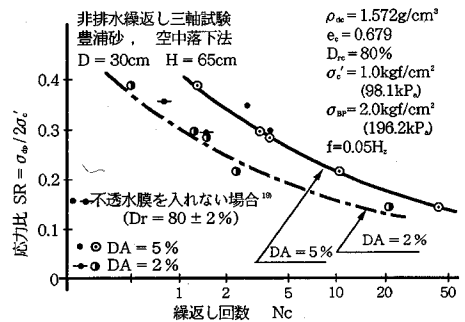


図-8 大型供試体を用いた三軸液状化試験における応力比～繰返し回数関係¹⁸⁾

$\delta(\Delta u)$ は、 $N_c = 2$ で $+0.06 \text{ kgf/cm}^2$ (5.9 kPa) 程度生じ、 $N_c = 15$ 程度までほぼ同値を示し、以下徐々に増加している。また圧縮時には $\delta(\Delta u) = -0.03 \text{ kgf/cm}^2$ (2.9 kPa) 程度生じ、以後伸張時と同様にやや増加している。この $\delta(\Delta u)$ の変化は、変形の一様性を示していると考えられる。

いま、豊浦砂の $G_s = 2.64$ 、 $e_c = 0.679$ ($D_r = 80\%$) であることより、 $\gamma' = 0.98 \text{ (tf/m}^3)$ であり、また、 $K = (1 + \sin\phi') / (1 - \sin\phi')$ 、 $\phi' = 40^\circ$ とすると、供試体が一様に変形しているときの三軸圧縮状態での $\delta(\Delta u)_{C-UN}$ は、図-5 (b) より、

$$K \cdot \delta(\Delta u)_{C-UN} - \delta(\Delta u)_{C-UN} = \gamma' \cdot H$$

同様に、三軸伸張状態での $\delta(\Delta u)_{E-UN}$ は

$$\delta(\Delta u)_{E-UN} = \gamma' \cdot H + \frac{\delta(\Delta u)_{E-UN}}{K}$$

の関係より、下記に示す式 (1)、(2) が得られる。

$$\delta(\Delta u)_{E-UN} = \frac{\gamma' \cdot H}{1 - 1/K} \dots \dots \dots (1)$$

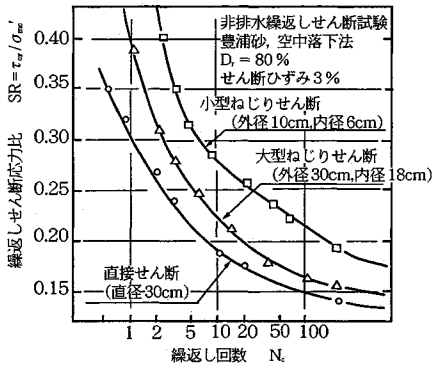


図-9 繰返し非排水ねじりせん断および直接せん断強度の比較 (せん断ひずみ両振幅3% DA)

$$\delta(\Delta u)_{C-UN} = \frac{\gamma' \cdot H}{(K-1)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $K = (1 + \sin\phi') / (1 - \sin\phi') = 4.60$ であるから式(1)、(2)は、下式の通りとなり、実験値は、理論値ともほぼ同値である。

$$\delta(\Delta u)_{E-UN} = \frac{0.98 \times 0.65 \times 0.1}{0.78} \approx +0.08 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (7.8 kPa)}$$

$$\delta(\Delta u)_{C-UN} = -\frac{0.98 \times 0.65 \times 0.1}{3.60} \approx -0.02 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (2.0 kPa)}$$

図-8には両振幅軸ひずみがそれぞれ2.5% DAのときの応力比と繰返し回数との関係を示す。前述したように供試体は、両振幅軸ひずみが5%程度までは非一様に変形していないことから本データは信頼できるものと判断される。

5. 非排水繰返し直接およびねじりせん断強度の比較

図-9には、これぞ、相対密度 $D_v = 80\%$ において両振幅せん断ひずみ3%が生じるときのせん断応力比 $SR = \tau_{cv} / \sigma_{mc}'$ と繰返し回数 N_c との関係を示す。同図には外径10cm、内径6cmの小型ねじりせん断試験結果も示してある²⁰⁾。図-9によれば、3種類の強度曲線はかなり異なっており、直接せん断試験強度が最も低い値を示している。

この原因としては、直接せん断試験における単純せん断変形の精度、ロッキングの影響など種々の要因が考えられるが、その1つとしてメンブレンペネトレーションの影響が考えられよう。

この影響の程度は、比表面積比と正の相関があるとすると、図-3に示したように比表面積比が、直径30cmの直接せん断が0.13、外径30cmのねじりせん断が0.33、外径10cmのねじりせん断が1.0と大きく異なることによって強度曲線に差異が生じたとも考えられよ

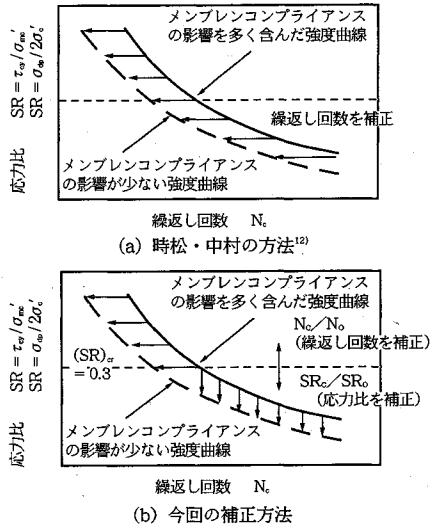


図-10 メンブレンコンプライアンスの補正方法

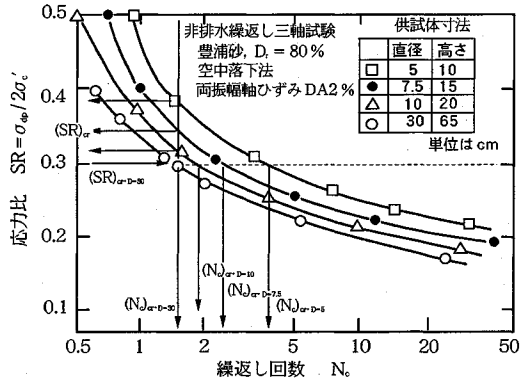


図-11 供試体寸法が違う三軸液状化試験結果¹⁷⁾⁻¹⁹⁾

う。

そこで、メンブレンペネトレーションに対する補正をすることにした。メンブレンコンプライアンスの補正方法の一つに時松・中村の方法¹²⁾がある。この方法は、図-10(a)に示すように対数軸上の繰返し回数を補正するものであるが、今回は、同図(b)に示すように龍岡ら²¹⁾が提案している限界繰返し回数 $(N_c)_{cr}$ に対応するせん断応力比を境に繰返し回数の比と応力比の比に分けて補正した。

龍岡らが提案している限界繰返し回数 $(N_c)_{cr}$ とは、特定の応力比 (限界応力比 $(SR)_{cr}$) に対応する繰返し回数であるが、限界繰返し回数を用いて砂の繰返し非排水強度曲線を整理すると、砂の種類、供試体作製法、密度などによらず一義的に表すことができ^{20), 21)}、強度曲線が最も異なったように見える部分の特徴を捕らえた方法である。この方法では、不規則荷重に対する液状化の可能性は、応力比が、大略 $SR \geq 0.3$ では応力比 SR よりも繰返し回数 N_c の方が重要であり、大略 $SR < 0.3$ で

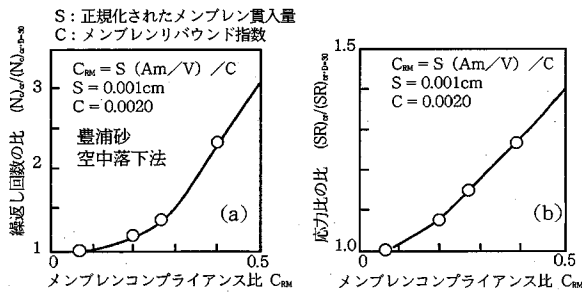


図-12 三軸液状化試験における繰返し回数の比および応力比の比とコンプライアンス比との関係

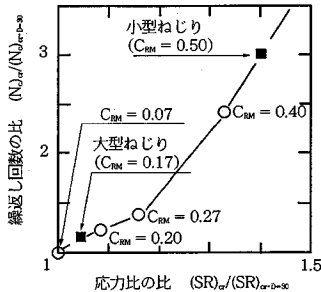


図-13 繰返し回数の比と応力比の比との関係

は N_c より SR の方が重要であるとしており、ねじりせん断試験の場合の特定の応力比として $SR=0.3$ を規定している。そこで今回も、この応力比 $SR=0.3$ を境に繰返し回数と応力比に分けて補正した。

図-11 は、4種類の直径 (5 cm, 7.5 cm, 10 cm, 30 cm) の異なる供試体による繰返し非排水三軸試験結果であり、龍岡らのデータ¹⁹⁾に今回新たに追加実験を行い整理したものである。このデータを基にメンブレンペネトレーションに対する補正を行った。

今回は、図-10(b)に示すように、限界応力比 $(SR)_{cr} = 0.30$ を境に応力比の比と繰返し回数の比に分けて、それぞれの値とメンブレンコンプライアンス比 C_{RM} との関係求めた。メンブレンコンプライアンス比 C_{RM} は、次式で与えられる¹²⁾。

$$C_{RM} = S(A_m/V)/C \quad \dots \dots \dots (3)$$

S: 正規化されたメンブレン貫入量 (=0.001)

C: メンブレンリバウンド指数 (=0.0020)

A_m : 供試体の比表面積

V: 供試体の体積

なお、今回の補正は、直径 30 cm の供試体のコンプライアンス比 $C_{RM} = 0.001 \times 0.13 / 0.002 = 0.065 \approx 0.07$ を基準としている。図-12 に応力比の比とコンプライアンス比との関係および繰返し回数の比とコンプライアンス比との関係を示す。また、図-13 には繰返し回数の比と応力比の比との関係を示す。

図-12, 13 を用いて、コンプライアンス比 0.17 と 0.50 のねじりせん断試験結果を補正したものが図-14

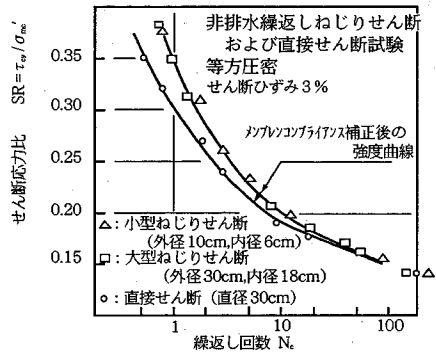


図-14 繰返し等体積単純せん断試験におけるメンブレンペネトレーションに対する補正後の強度曲線

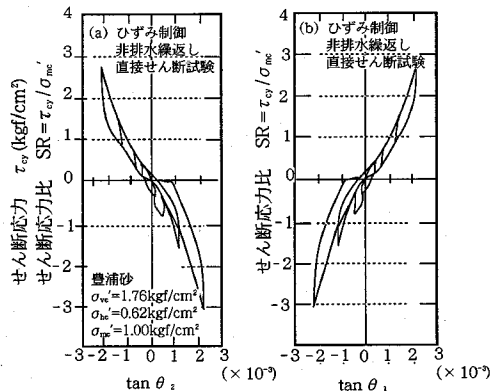


図-15 ひずみ制御非排水繰返し直接せん断試験におけるロッキング発生状況

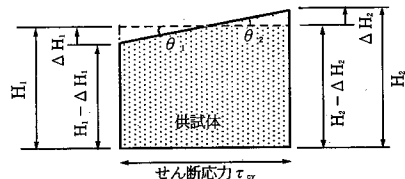
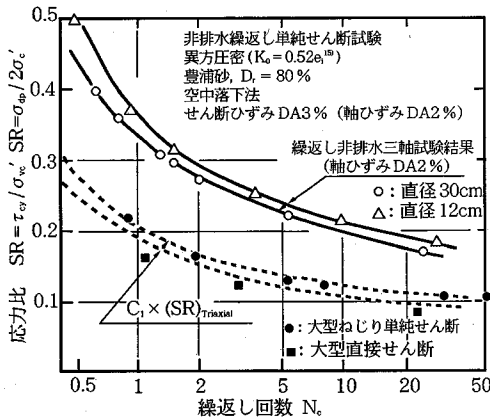


図-16 直接単純せん断試験におけるロッキングの説明図

である。図-9 と比較して、メンブレンコンプライアンスに対する補正を行うと、ねじり単純せん断試験による強度曲線はよく一致している。しかし、直接せん断試験は、ねじり試験結果に比べ若干弱く、特に応力比が大きくなるとその傾向は大きい。

この主たる要因は、応力比が大きいために顕著であることから、メンブレンペネトレーション以外のものであり、上述した直接せん断試験では避けられないロッキングの影響であると考えられる。

図-15 には、直接せん断試験機のロッキング現象を調べるために行ったひずみ制御非排水繰返し単純せん断試験結果におけるロッキングの発生状況を示す。ロッキング角 θ は、キャップに取り付けた変位形によって測定したが、ロッキング角 θ は、図-16 に示すように定義した。図-1 に示したように、本研究に用いた直接せ



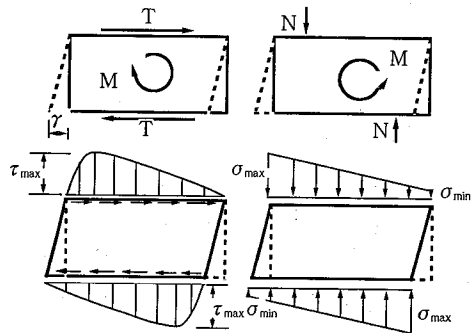
図一七 三軸状態から単純せん断状態への補正係数 C_1 の比較結果

ん断試験装置には、非常に強固なロッキング防止構造を施したにもかかわらず、若干のロッキングが生じている。例えば、応力比 $SR = 0.5$ のときには $\tan\theta = 0.5 \times 10^{-3}$ 程度のロッキングが生じており、結果として、軸ひずみ 0.05% に相当する圧縮・伸張試験も繰返し直接せん断試験と同時に進んでいることになり、応力比の増加とともに直接せん断強度曲線が若干弱くなる主たる原因と考えられよう。しかし、図一四は、縦軸のせん断応力比が $SR = 0.15 \sim 0.35$ の範囲に限定してあるために、ねじりせん断強度と直接せん断強度の違いが強調されていること、また、液状化強度を定義するのに用いられている繰返し回数の範囲では、対象とするせん断応力比は比較的小さいことからロッキングの影響も少なく、実用上有効な非排水繰返し単純せん断試験が、今回製作したような構造型式の直接せん断方式で可能であると判断される。しかし、強固なロッキング防止構造を採用していないタイプの直接せん断方式の装置では、かなり強度曲線を過小評価している可能性がある。

6. 三軸状態から単純せん断状態への補正係数 C_1 ⁽²²⁾ について

図一七には、図一三に示す条件で異方圧密した供試体の非排水繰返しねじり単純せん断および直接単純せん断試験結果を示す。また、同図に示す実線は、直径 12 cm と 30 cm の三軸液状化強度であり、破線は、三軸状態から単純せん断状態に変換するための補正係数 C_1 の値を三軸液状化強度に掛けた値を示したものである。

補正係数 C_1 を求める場合、繰返し非排水強度に及ぼすメンブレンペネトレーションの影響は、かなり大きいことから三軸とねじり供試体のメンブレンペネトレーションの影響を同程度にして比較する必要がある。外径 30 cm、内径 18 cm の中空供試体の比表面積比は、 $4/(D_o - D_i) = 4/(30 - 18) = 0.33 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ であり、これと同等



図一八 単純せん断試験における供試体の応力状態の模式図^{(24), (25)}

の比表面積比をもつ中実供試体のそれは $4/D$ より、中実供試体の直径は $D = 12 \text{ cm}$ となる。

そこでここでは、外径 30 cm、内径 18 cm のねじり単純せん断強度と比較するために直径 10 cm の三軸液状化強度を直径 12 cm の供試体の三軸液状化強度になるよう補正し、図一七には、このように直径 10 cm の三軸液状化強度を補正したデータと図一四に示す直径 30 cm の三軸液状化強度に補正係数 C_1 の値を掛けたものが破線として示してある。補正係数 C_1 は、式 (4) に示す石原らの理論式⁽²³⁾から求めた。

$$C_1 = \frac{1 + 2K_0}{3} \dots \dots \dots (4)$$

ねじりせん断試験における異方圧密のデータと理論値はよく一致しており、三軸とねじり供試体のメンブレンペネトレーションの影響を同程度にし、理想的な等体積単純せん断状態を再現すれば、三軸強度から単純せん断強度へ変換する補正係数は、空中落下法で作製した供試体の場合には、石原・李の理論値⁽²³⁾ $C_1 = (1 + 2K_0)/3$ で表すことができる。

一方、中実供試体の直接せん断試験では、直径 30 cm の三軸液状化強度曲線に補正係数 C_1 の値を掛けた曲線より、応力比の大きいところで一致しておらず、ロッキングあるいは単純せん断変形精度の影響を若干受けている。

ここに、今回のねじり試験における異方圧密は、大河内⁽¹⁵⁾の $K_0 = 0.52 \cdot e_i$ で行っており、初期間隙比は $e_i = 0.679$ であることより、 $K_0 = 0.35$ である。

したがって、補正係数 C_1 は下式に示す通りである。

$$C_1 = \frac{1 + 2K_0}{3} = 0.57 \dots \dots \dots (4)'$$

7. 直接せん断試験における応力の非一様分布

前述したように、直接せん断試験においては、せん断に伴い不可避免的にロッキングが生じ、供試体の応力・ひずみ分布は不均一になる。その状況は、徳江らによれば^{(24), (25)} 図一八に示すごとくなる。この傾向は、ロッ

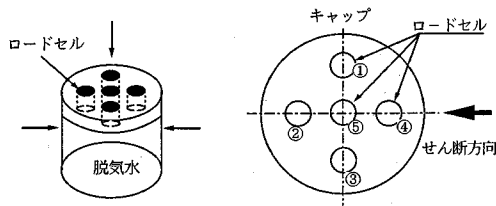


図-19 キャップに埋込んだロードセルの取り付け位置

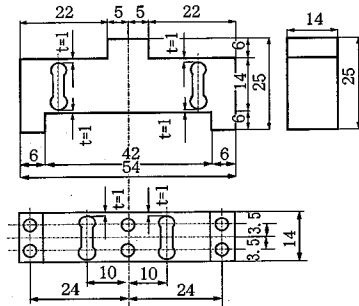


図-20 実験に用いた2方向ロードセルの構造

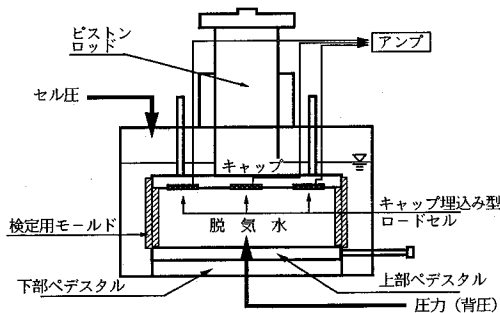


図-21 鉛直応力測定用ロードセルの検定方法の模式図

キング防止構造が簡易なほど大きい。

図-1に示す直接せん断試験機のロッキング防止構造は、供試体に鉛直応力を伝えるピストンロッドを直径10cmとかなり太くし(供試体の直径の1/3)、また、これとは別に3本のガイドロッドも設けており、ロッキング防止構造としては、極めて強固なものとなっている。しかし、前述したように繰返しせん断応力比 $SR=0.5$ のときにロッキングが $\tan\theta=0.5 \times 10^{-3}$ 程度生じている。

そこで、ロッキングが生じた場合、供試体には応力の不均一がどの程度生じているのかを定量的に把握するために、直接せん断装置のキャップに小型の2方向ロードセル²⁶⁾を設置して、せん断に伴い供試体に作用するせん断力・鉛直応力を直接測定した。

図-19にはキャップに埋込んだロードセルの取付位置を、また図-20にはロードセルの構造・寸法を示す。ロードセルの検定は、図-21に示すように直接せん断試験装置のセル内に検定用モールドを設置して、セル圧

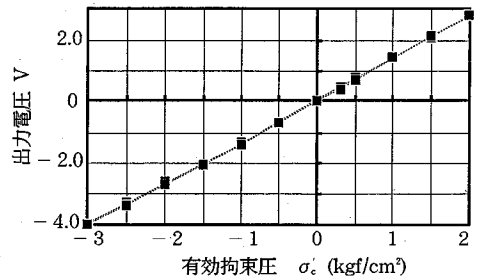
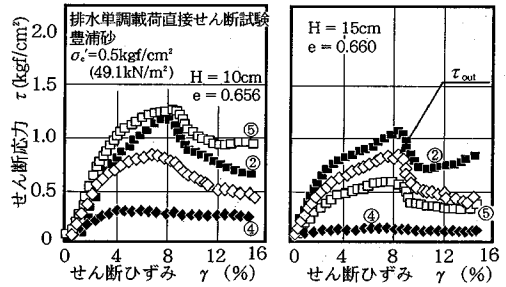
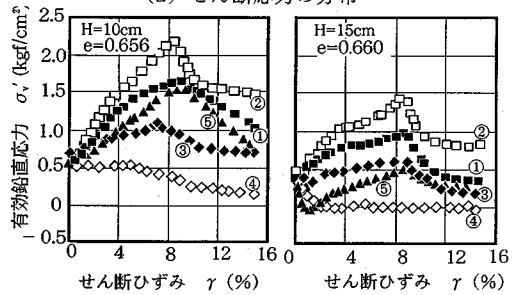


図-22 典型的なロードセル検定結果 (鉛直荷重, No.5)



(a) せん断応力の分布



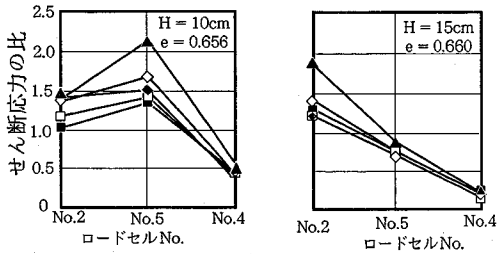
(b) 有効鉛直応力の分布

図-23 直接せん断試験における応力の非一様性 ($\sigma'_c=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ (49.1 kN/m²) の場合)

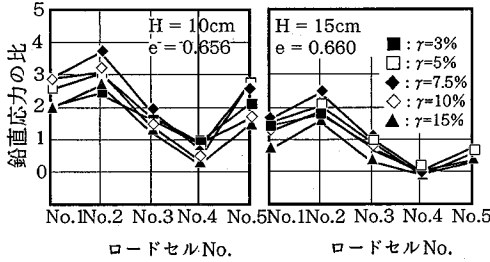
と背圧を調整することによって行った。典型的な検定結果を図-22に示す。図-22に示すように今回製作したロードセルは荷重方向が逆転していても直線性が保たれている。

図-23(a), (b)には典型的な試験結果例として供試体高さが、 $H=10$ および 15 cm で、有効拘束圧 $\sigma'_c=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ (49.1 kPa) の場合のせん断力および鉛直応力分布を示す。また、図-24(a), (b)には三軸セルの外側で測定したせん断力・鉛直応力で、各々の位置の2方向ロードセルで測定した値を除して正規化した値を示す。

これらの図より、直接せん断試験においてはせん断ひずみの進行に伴い、かなり大きな応力の不均一が生じていることが分かる。せん断ひずみが15%程度になると、三軸セルの外側で測定した値と比較すると、せん断力では0.2~2.2倍程度、また鉛直応力については0.05~3.7倍程度の範囲がある。



(a) せん断応力の分布



(b) 鉛直応力の分布

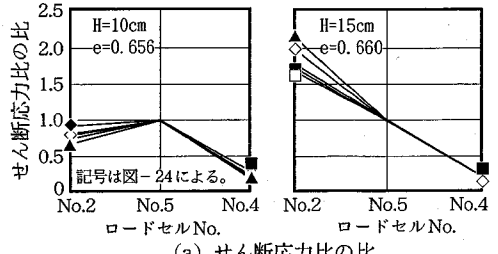
図-24 三軸セルの外側で測定した値で正規化したせん断力・鉛直力分布

図-25 (a), (b) には供試体中心のロードセル No.5 で測定したせん断力・鉛直応力でせん断方向のロードセル No.2, No.4 で測定した値を除いて正規化した値を示す。同図より供試体高さが高いとせん断力・鉛直応力共に応力の不均一性が著しい傾向を示す。

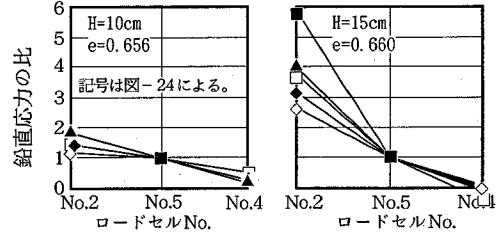
8. 結 論

礫あるいは粗粒材などの粒径の大きい材料の単純せん断強度を把握する目的で製作した大型直接単純せん断試験機の適応限界を把握するために実施した非排水繰返し試験結果をねじり単純せん断および三軸試験結果と比較した結果、以下のことが分かった。

- (1) 非排水試験においてメンブレンコンプライアンスの影響を少なくするために供試体寸法を大きくすると、自重の影響で非一様に変形する可能性があるが、直径 30 cm, 高さ 65 cm の三軸供試体では両振幅軸ひずみ 5% 程度までは一様に変形している。
- (2) 供試体寸法の大きい非排水繰返し三軸試験においては供試体が一様に変形していても、自重の影響で供試体の上端と下端で有効応力あるいは過剰間隙水圧が異なるために非一様変形が生じる。供試体上端と下端の応力比 (σ_1'/σ_3')、あるいは過剰間隙水圧の差は、三軸圧縮状態より三軸伸長状態の方が大きいことから、伸張状態の非一様性はさらに大きくなり、いわゆるネッキングが生じる。
- (3) ねじりせん断試験では、メンブレンコンプライアンスを補正しないと小型 (外形 10 cm, 内径 6 cm) 供試体の非排水繰返し強度は、大型供試体 (外形 30 cm, 内径 18 cm) と比較するとかなり過大評価する可能性が



(a) せん断応力比の比



(b) 鉛直応力の比

図-25 供試体中心位置の測定値で正規化したせん断力・鉛直力分布

高い。

(4) しかし、メンブレンコンプライアンスを時松・中村の方法を用い、龍岡らが提案している限界応力比を境に繰返し回数とせん断応力比に分けて補正すると、両者の強度曲線はよく一致する。

(5) 直接せん断試験では、かなり強固なロッキング防止構造を施してもせん断応力比が大きい範囲ではロッキングが生じ、供試体の応力分布は、かなり不均一になる。その傾向は、供試体高さが高い方が大きく、供試体中心位置での値と比較すると、せん断力で 0.2~2.2 倍程度、また鉛直応力では 0.05~3.7 倍程度の応力の不均一が生じる。

(6) 今回製作したような構造型式の直接せん断試験装置を用いれば、ロッキングや単純せん断変形の精度が液化強度に及ぼす影響は比較的少なく、直接せん断方式でも実用上有効な非排水繰返し単純せん断試験が可能である。

(7) 強固なロッキング防止構造を施していないタイプの直接せん断試験装置では、繰返し直接せん断試験と同時に圧縮・伸張試験を実施していることから、非排水繰返しせん断強度は、かなり過小評価している可能性がある。

＜謝辞＞ 本研究を行うにあたり、東京大学生産技術研究所龍岡文夫教授ならびに横浜国立大学プラダグテンテージ B.S. 助教授に御指導を頂きました。末筆ながら感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 足立紀尚・龍岡文夫：新体系土工学 18, 土の力学 (III)

- 庄密・せん断・動的解析, 土木学会, p. 282, 1981.
- 2) 土質工学会編: 土質試験の方法と解説, 第10章土の繰返し非排水三軸試験, pp. 421~450, 1990.
 - 3) 土質工学会編: 土質試験の方法と解説, 第11章基準化されていない繰返し試験, pp. 451~457, 1990.
 - 4) Kjellman, W.: Testing of the shear strength of clay in Sweden, *Geotechnique*, Vol.2, No.3, pp.225~232, 1951.
 - 5) Roscoe, K. H.: An apparatus for the application of simple shear to soil samples, *Proc. 3rd ICSMFE*, Vol.1, pp.186~191, 1953.
 - 6) Bjerrum, L. and A. Landva: Direct simple shear tests on a Norwegian quick clay, *Geotechnique*, Vol.16, No.1, pp.1~20, 1966.
 - 7) 堀井宜幸・ブラダンテージ B.S.・龍岡文夫: ねじりせん断試験における砂の変形・強度特性, 土木学会第42回年次学術講演会, pp. 228~229, 1987年.
 - 8) ブラダンテージ B.S.・龍岡文夫・堀井宜幸: 単純せん断における砂の応力-ひずみ関係, 土木学会第42回年次学術講演会, pp. 244~245, 1987年.
 - 9) ブラダンテージ B.S.・龍岡文夫・堀井宜幸: ねじり単純せん断における砂の変形特性, 第22回土質工学研究発表会, pp. 355~358, 1987年.
 - 10) 堀井宜幸・ブラダンテージ B.S.・龍岡文夫: 中空ねじりせん断による砂の自動単純せん断試験, 第22回土質工学研究発表会, pp. 363~366, 1987年.
 - 11) 龍岡文夫・佐藤剛司・大河内保彦・福島伸二: 三軸およびねじりせん断試験装置の設計と製作における若干の経験, 土と基礎, Vol. 31, No. 7, pp. 41~48, 1983.
 - 12) Tokimatsu, F. and Nakamura, K.: A simplified correction for membrane compliance in liquefaction tests, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.4, pp.111~122, 1987.
 - 13) Silver, M. L., F. Tatsuoka, A. Phukunhaphan and A.S. Avramidis: Cyclic undrained strength of sand by triaxial test and simple shear test, *Proc. of the 7th World Conference on Earthquake Engineering*, No.3, pp.281~288, Istanbul, 1980.
 - 14) 龍岡文夫・M.L. Silver・A. Phukunhaphan・A.S. Avramidis: 振動三軸試験と動的単純せん断試験による砂の液状化強度, 第15回土質工学研究発表会, pp. 569~572, 1980.
 - 15) Okouchi, Y. and Tatsuoka, F.: Some factors affecting K_G -Values of sand measured in triaxial cell, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.3, pp.52~68, 1984.
 - 16) 土質工学会飽和砂の非排水繰返し三軸試験法に関する研究委員会(委員長 土岐祥介): 飽和豊浦砂の共通仕様に基づく全国一斉非排水繰返し三軸試験について, 土の非排水繰返し試験に関するシンポジウム, pp. 1~35, 1988.
 - 17) 土質工学会砂地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会(委員長 土岐祥介): 飽和豊浦砂の繰返し非排水三軸試験における変形特性に及ぼす諸要因に関する共同研究報告, 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシンポジウム論文集, p. 33, 1984.
 - 18) 岡本正広・早川富夫・黒田栄三・龍岡文夫: 大型供試体(直径30 cm, 高さ65 cm)による砂の液状化強度, 第19回土質工学研究発表会, pp. 395~396, 1984年.
 - 19) 岡本正広・龍岡文夫・山田真一・鳥居 剛: 非排水繰返し三軸試験結果に及ぼす各種の要因について, 第17回地震工学研究発表会講演概要集, pp. 275~278, 1983.
 - 20) Tatsuoka, F., Ochi, K., Fujii, S. and Okamoto, M.: Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.23~41, 1986.
 - 21) 越智健三・龍岡文夫: 埋立て砂地盤の液状化防止締固め密度の設定方法について, 砂質土および砂地盤の変形・破壊強度の評価に関するシンポジウム論文集, pp. 65~70, 1984.
 - 22) 日本道路協会: 道路橋示方書V耐震設計編, 1990.
 - 23) Ishihara, K. and S. Li: Liquefaction of saturated sand in triaxial torsion shear test, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.2, pp.19~39, 1972.
 - 24) 徳江俊秀・栗津 誠・木村 勝: SGI型単純せん断試験機の供試体変形・破壊に関する基礎的研究, 第19回土質工学研究発表会, pp. 381~382, 1984年.
 - 25) 徳江俊秀・廣島 実: 単純せん断試験機の供試体変形・破壊に関する基礎的研究, 第24回土質工学研究発表会, pp. 517~518, 1989.
 - 26) 谷 泰広: 切削加工分野で使用されるロードセルについて, 生産研究, 34巻, 6号, pp. 35~42, 1982.
 - 27) 岡本正広・小林 司: 直接せん断試験における応力の非一様分布, 土木学会第45回年次学術講演会, pp. 410~411, 1990年.

(1993.6.2 受付)

COMPARISON OF CYCLIC UNDRAINED STRENGTH OF LARGE SCALE SPECIMENS OF SAND WITH DIFFERENT SPECIFIC AREAS AND TESTING METHODS

Masahiro OKAMOTO and Kenzo OCHI

The effects of shearing methods and specific areas on the cyclic undrained stress-strain behavior of sand were investigated by means of triaxial, torsional shear and direct shear tests using large scale specimens. It was found from test results that the liquefaction strength curves for specimens with different diameter almost coincide after making correction for the effect due to membrane penetration. But the liquefaction strength curves in direct shear tests decreases to some extent with the increase in stress ratio due to rocking of the cap. This phenomena become predominant in the direct shear test until the shear strain becomes around 3% in double amplitude.