

簡易単純せん断試験装置の試作と 種々の液状化試験への適用

日下部 伸¹・森尾 敏²・岡林 巧³・藤井照久⁴・兵動正幸⁵

¹正会員 工博 奥村組 技術研究所 主任研究員 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂387)

²正会員 工博 奥村組 電算センター 課長 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

³正会員 工修 鹿児島工業高等専門学校助教授 土木工学科 (〒899-5193 鹿児島県始良郡単人町真孝1460-1)

⁴正会員 工修 復建調査設計 主任技術者 (〒732-0052 広島市東区光町2-10-11)

⁵正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

本報告は、試作した簡易単純せん断試験装置の特長とその適用性について述べている。まず、ねじり単純せん断試験装置と本装置による応力振幅一定方式の液状化試験の対応を検討している。その上で未改良砂と超微粒子シリカによる改良砂を対象に、本装置を用いてひずみ振幅漸増方式の液状化試験およびオンライン地震応答実験を実施し、その適用性を検討している。その結果、試作した装置は実用上有効な単純せん断試験が可能であることを示した。

Key Words : *simplified simple shear apparatus, liquefaction, stress controlled test, strain controlled test, on-line test*

1. まえがき

室内せん断試験で単純せん断状態を再現する代表的な方法としては、直接単純せん断とねじり単純せん断が挙げられる。このうち本研究が対象とする直接単純せん断（以下、単純せん断と呼ぶ）装置の原型としては、SGI型¹⁾、ケンブリッジ型²⁾、NGI型³⁾、の3タイプがある。

これらの改良や適用例に関してはSGI型では、供試体内に鉛箔板を設置し変形・破壊挙動を調べた徳江らの⁴⁾、地震時の繰返しせん断による粘土地盤の沈下問題を検討した大原・松田⁵⁾の研究例が挙げられる。ケンブリッジ型では2組の2隅に固定心棒と可動心棒を設置したFinnら⁶⁾の改良がある。NGI型では、供試体の高さとの径の比およびメンブレン剛性の影響を検討したVucetic・Lacasse⁷⁾の研究、そして2供試体の同時せん断により微小ひずみでのせん断剛性と履歴減衰の測定精度の向上を試みたDoroudian・Vucetic⁸⁾による新型装置の開発がある。さらに、初期せん断応力を受けた粘土の繰返し強度に関する横川・安原ら⁹⁾の研究、海成粘土を対象に一面せん断との比較を検討した辻ら¹⁰⁾の研究事例がある。これらとは別に、原田ら¹¹⁾、高田・大島¹²⁾は、より一様なせん断変形を得るための多段せん断箱形式の単純せん断装置を試作している。

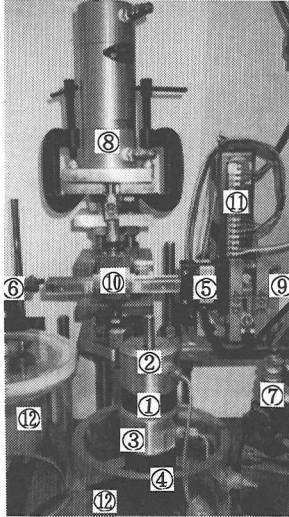
これらの装置では液状化過程における鉛直応力の低下は計測できるが、側方向応力の変化は計測できないという欠点があった。

一方、側方向の応力を制御した試験は、1970年代の斉藤ら¹³⁾、石原ら¹⁴⁾の研究に始まり、80年代の龍岡・Silverら¹⁵⁾、八木・矢田部¹⁶⁾の任意の応力状態におけるせん断が可能な試験へと発展し、90年代に至り岡本・越智¹⁷⁾による大型単純せん断装置を用いた研究へと継承されてきた。

以上の単純せん断試験装置の改良やその適用に関する研究成果をふまえ、著者らは、より簡便な装置構成と試験手順で迅速に任意応力状態の単純せん断を可能とする簡易単純せん断試験装置の試作と実験手順を開発した。これは、数台の試験装置を連動させた実務対応のオンライン地震応答実験の実現を目的としている。本ノートでは、試作した装置の概要を述べるとともに、本装置を用いて実施した応力振幅一定方式および、ひずみ振幅漸増方式の液状化試験、さらにオンライン地震応答実験結果から新型装置の適用性について検討を加えた。

2. 簡易単純せん断装置の概要

試作した装置の構成上の特徴と簡易化された内容を具体的な試験手順に沿って以下に示す。



- ① 供試体 ② キャップ ③ ベDESTAL
- ④ ロードセル (鉛直荷重)
- ⑤ ロードセル (水平荷重)
- ⑥ 非接触変位計 (水平or鉛直)
- ⑦ 差圧計 (側方向有効応力)
- ⑧ ペロフラムシリンダー (鉛直荷重)
- ⑨ ハーモニックギア付ステッピングモーター (水平変位)
- ⑩ クロスガイドリニアモーション
- ⑪ モータードライバ
- ⑫ 二重負圧法実施時のみに使用する仮設セル

写真-1 簡易単純せん断試験装置

(1) 装置構成

本装置では、ゴムスリーブおよびキャップとベDESTALでシールされた供試体に、側方向応力と軸方向応力の等方圧成分の拘束圧を真空ポンプによる負圧で作用させる。さらに軸方向応力の異方圧成分を独立させて載荷する。そのため異方圧密・非排水せん断過程で三軸圧力室を必要としない。加えて、供試体の飽和度を高める方法として二重負圧法のみを採用しているため、通常の二重管ピュレット、セル圧・背圧供給装置も不要である。従って、本試験装置は構成の簡素化を図り、かつ側方向と軸方向応力の計測・制御を可能とするものである。

装置概要の写真-1と詳細を示した図-1の番号によって具体的な構成について以下に述べる。側方向応力は、真空レギュレーターで調整した負圧を②のキャップと③のベDESTALを介し①の供試体に作用させ、⑦の差圧計で計測する。異方圧密時の鉛直荷重は⑧のペロフラムシリンダーに連結されたリニアモーションブロック (図-1, 2参照)

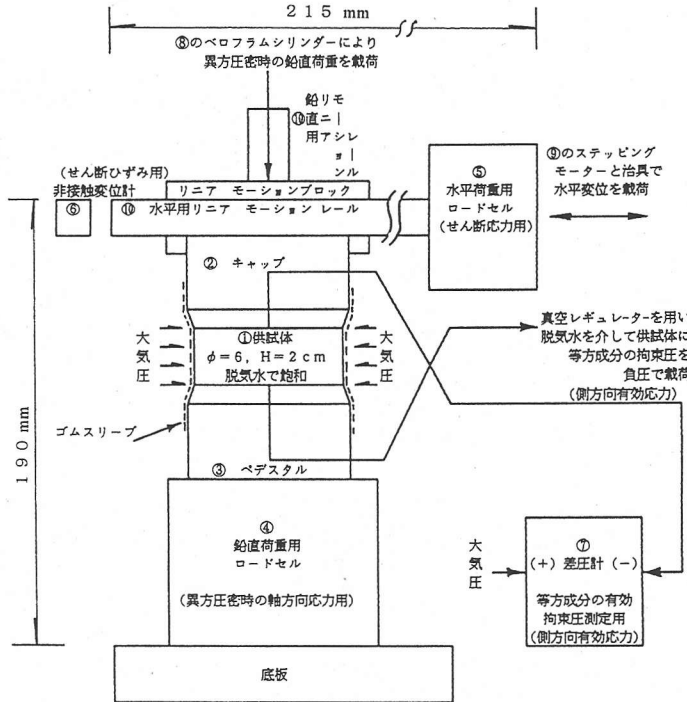


図-1 装置の詳細

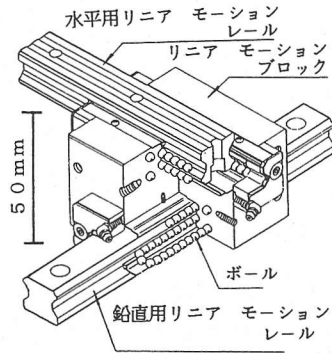


図-2 クロスガイドリニアモーション

に加えられ、⑩のクロスガイドリニアモーションの鉛直動にガイドされキャップを介して供試体に載荷される。鉛直荷重は④のロードセルで計測する。水平方向のせん断変位は⑨のハーモニックギア付ステッピングモーターの回転運動を治具により水平運動に変換し、⑩の水平用リニアモーションレールに固定したキャップを介して供試体に加えられる。そのときの水平荷重は⑤のロードセルで、変位は⑥の非接触変位計で計る。非接触変位計の分解能は $0.6\mu\text{m}$ で、高さ2cmの供試体では 3×10^{-5} のせん断ひずみに相当する。

⑩は、XY運動用のリニアモーションガイド2

本を直交させた一体型でコンパクトであると同時に、極めて高い直交精度と高剛性が得られ、静摩擦と動摩擦の差もほとんど無い。摩擦抵抗は標準的な直径6cmの供試体の場合、せん断応力で0.005 kgf/cm²(0.49kPa)に相当する。非排水せん断過程でこのクロスガイドの鉛直方向の変位を固定することにより、簡便な方法で単純せん断条件の再現が可能となる。

⑨のモーターは、減速比 1/100のハーモニックギアを装着しており、一般の平歯車に見られる歯の噛み合い誤差が無く、0.0036度/ステップの高い位置決め精度が可能である。そのため、このモーターと⑥の非接触変位計、⑤の水平荷重用ロードセルおよびコンピューターにより形成されるクローズドループにより、ひずみ制御と応力制御の試験が実施できる。

全ての部品が調達された後の圧力系の配管、電気系の配線および本体の組立・調整所要時間は、一人の場合で4日程度である。写真-1に示した本体部は縦・横40cm・高さ60cmの空間に収まる。

(2) 試験手順

全ての試験手順はコンピューター画面との対話形式で実行される。まず、供試体のタイプが空中落下法等による再構成砂か塊状の粘土や固結させた改良土の供試体かを選択する。供試体作製法や設置方法は、通常の三軸試験と同様である。

次に供試体の飽和度を上げるために二重負圧法を適用する。この時だけ、写真-1の⑫の上一組の仮設セルを使用する。このセルは、上下の接合部分に真空グリスを塗布し、外周をビニールテープでシールするだけで、金具による組立が無いため作業が簡便である。さらに、セル内に水を入れないので試験時間が短縮される。

二重負圧法を実施後、供試体を非排水状態にし、仮設セルを利用してセルに供給している負圧のみを変化させ間隙水圧係数B値を計測する。この方法で得られるB値は、空中落下法で作製された相対密度70%の豊浦砂の場合、0.94~0.97である。

仮設セルを撤去後、図-1に示す②のキャップと⑩の水平用リニアモーションレールを固定し、⑥の非接触変位計を鉛直方向にセットし異方圧密過程にはいる。モニター画面の圧密荷重~時間~沈下量より所定の圧密打ち切り方法に従って圧密過程を終了させる。二重管ピューレットによる排水量を測定しない方式であるため、圧密後の供試体高さは、②と③の上下端距離をデジタルノギスで計測して算出するとともに、圧密後の供試体直径は小型のπ(パイ)テープで求める。

非排水せん断過程では、せん断方式を単調載荷か繰返し載荷かを選択する。繰返し載荷の場合は、通常の応力振幅一定方式かひずみ振幅漸増方式かオンライン地震応答実験かを選択する。いずれのせん断方式においても排水バルブは閉じられ、飽和供試体を非排水条件でせん断する。

せん断過程終了後、セル水の排出、三軸圧力室の解体等の作業が不要のため、片付けに要する時間は、わずか5分である。以上が試作した装置の構成上の特徴と簡易化された内容である。

(3) 供試体のひずみ条件と応力状態

非排水せん断時の供試体のひずみ条件と応力状態は、文献15)と同様で以下ようになる。

非排水状態で鉛直方向の変位が生じないようにし、側圧一定(大気圧)でせん断している。そのため、体積ひずみゼロ、鉛直ひずみゼロという条件から水平方向ひずみがゼロとなり、単純せん断条件となる。有効側方向応力 σ'_{hs} は、側圧(ゼロ;大気圧)から間隙水圧(負圧)を引いた値となる。異方圧密時の有効軸方向応力 σ'_{vc} は、 σ'_{hs} に軸方向の全応力を加えた値である。従って、せん断中は鉛直ひずみゼロの条件から軸方向の全応力は、液状化の進行とともに減少する。

3. ねじり単純せん断試験との対応

ねじり単純せん断試験は、より理想的な単純せん断変形状態を再現することが可能とされている。そこで、試作した簡易単純せん断試験装置を種々の液状化試験に適用するに先立ち、龍岡ら¹⁹⁾が実施したねじり単純せん断試験結果との対応を調べた。

(1) 試料および試験方法

試料は、文献18)と同様の豊浦砂であり、供試体作製方法も同じ空中落下法である。単純せん断試験の供試体寸法は、直径が6cm、高さが2cmであり、ねじり単純せん断試験では、外径10cm、内径6cm、高さ10cmの供試体が用いられた¹⁹⁾。単純せん断試験での異方圧密条件は、有効側方向応力 $\sigma'_{hs}=0.10$ kgf/cm²(9.8kPa)、有効軸方向応力 $\sigma'_{vc}=0.25$ kgf/cm²(24.5kPa)である。龍岡らによるねじり単純せん断試験では、有効側方向応力 $\sigma'_{hs}=0.67$ kgf/cm²(65.7kPa)、有効軸方向応力 $\sigma'_{vc}=1.67$ kgf/cm²(164kPa)である。圧密後の相対密度はいずれも70%である。せん断過程では、供試体を非排水状態にするるとともに、軸方向変位を拘束し、単純せん断変形モードの再現を試みている。ねじり単純せん断

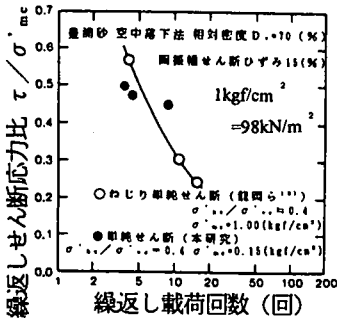


図-3 繰返しせん断応力比と载荷回数との関係

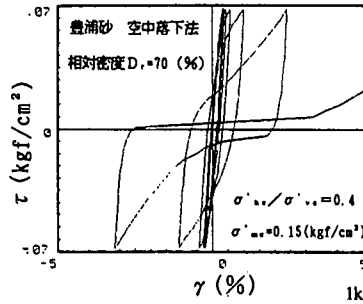


図-4 \$\tau \sim \gamma\$ 関係

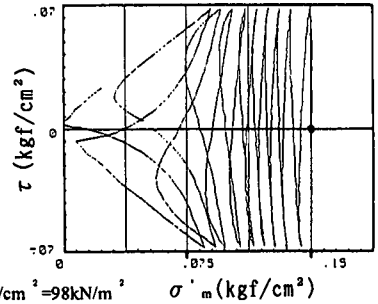


図-5 有効応力経路

試験では周波数=0.1Hzの応力制御により载荷が行われているが、本単純せん断試験ではせん断ひずみ速度=0.2%/min.の定ひずみ速度により繰返しせん断応力振幅一定方式の液状化試験を行った。

(2) 応力振幅一定方式の液状化試験結果

図-3は、繰返しせん断応力比 τ/σ'_{vc} と载荷回数との関係を示している。ここに、平均有効主応力 σ'_{vc} は、 $(\sigma'_{vc}+2\sigma'_{vs})/3$ である¹⁹⁾、¹⁶⁾。図中の○印はねじり単純せん断試験の結果を、●印は簡易単純せん断試験の結果を示す。単純せん断試験による繰返し強度は、繰返し回数5回以下ではねじり単純せん断試験のそれよりもやや小さく、10回あたりでは逆にやや大き目の結果を与えているものの、両者は概ね良い対応を示しているようである。

図-4は、本単純せん断試験で得られたせん断応力 τ ～せん断ひずみ γ 関係の一例を示している。同じく図-5は、 $\tau \sim \sigma'_m$ 表示の有効応力経路を示している。本実験は $\sigma'_{vc}=0.15 \text{ kgf/cm}^2$ (14.7kPa)という比較的低い初期有効応力状態から、小さな繰返しせん断応力を载荷させた事例である。両図に見られるように、繰返しせん断応力の対称性や応力・ひずみ関係のループ形状、および有効応力の減少過程はなめらかであり、液状化に至るまでの挙動がうまく現れている。以上の検討から試作した簡易単純せん断試験装置は、実用上有効な非排水単純せん断試験が可能であると判断される。

4. 種々の液状化試験への適用

既設構造物直下や周辺地盤の耐震性能を向上させるため、恒久グラウトである溶液型の超微粒子シリカを用いた浸透注入による液状化防止工法の開発が進められている¹⁹⁾。そこで、液状化に対する対策実施前の未改良砂と対策後の改良砂を対象に、ひずみ振幅漸増方式およびオンライン地震応答実験を実施し、本装置の実務的な適用性につい

て検討を加えた。

(1) 未改良砂と改良砂の供試体作製法

用いた試料は、豊浦砂である。未改良砂の場合は、空中落下法で相対密度60%の供試体を作製し、前述の液状化試験を実施した。改良砂では、まず空中落下法により型枠内に相対密度60%の豊浦砂の供試体を作製後、飽和度を高めるために -0.95 kgf/cm^2 (93kPa)の負圧を作用させた状態で溶液型の超微粒子シリカを浸透注入させて固結した改良砂を作製した。ここでは、水60g当たり超微粒子シリカ原液を15g使用する配合としている。ゲル化後の改良砂の一軸圧縮強さ q_u は、材令7日以降はあまり変化が無く、おおむね 0.5 kgf/cm^2 (49kPa)である。この改良砂について、材令7日以降に3種類の液状化試験を実施した。供試体寸法は、未改良砂、改良砂とも直径6cm、高さ2cmである。

(2) ひずみ振幅漸増方式の液状化試験

未改良砂と改良砂について3. (1)と同様の方法で異方圧密後、ひずみ振幅漸増方式²⁰⁾の非排水繰返し単純せん断試験を行った。この試験では、第一波目のせん断ひずみ片振幅を $\pm 5 \times 10^{-2}$ とし、第二波目以降、順次せん断ひずみ片振幅を1.5倍間隔で漸増させるひずみ制御の正弦波を用いる。この方法は、ひずみが徐々に増加し、せん断応力も変化しながら液状化に至るという点で、応力振幅一定方式の試験よりも、より地震時の挙動に近いと言えよう。ただし、密詰め砂のように剛性の大きな材料に対して、常に1.5倍のひずみ増分を与え続けると現実の地震応答挙動よりもせん断抵抗を過大評価する恐れもあり得る。

図-6, 7は、未改良砂のせん断応力 τ ～せん断ひずみ γ 関係、および有効応力経路を示したものである。両図から、両振幅せん断ひずみが約1.5%に達した直後に有効応力がほぼゼロになり液状化が発生し、せん断抵抗が極めて小さい状態が継続し、いわゆ

表-1 解析条件

深度 (m)	土層分割	湿潤密度 (t/m ³)	せん断剛性 G (kgf/cm ²)
0~1	(1) M1	1.8	218
1~2	(2) M2	1.8	218
2~4	(3) M3	1.9	428
4~6	(4) S2	1.9	オンライン
6~9	(5) M4	1.9	650
9~12	(6) M5	1.9	650
12~15	(7) M6	1.9	1111
15~18	(8) M7	1.9	1111

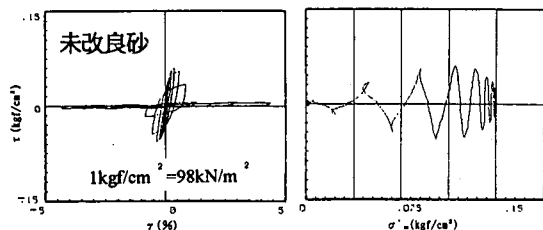


図-6 τ ~ γ 関係

図-7 有効応力経路

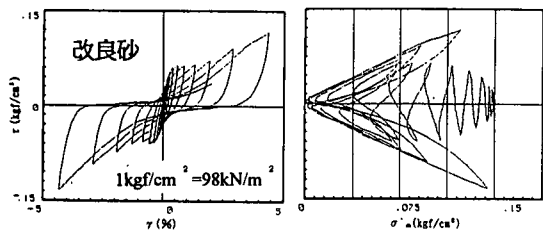


図-8 τ ~ γ 関係

図-9 有効応力経路

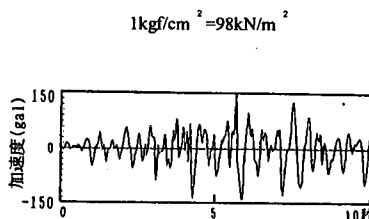


図-10 入力加速度波形 (川岸町モデル)

る流動的な変形が生じていることが見て取れる。

一方、改良砂のせん断応力～せん断ひずみ関係および有効応力経路を示した図-8, 9では、両振幅せん断ひずみが約1.5%前後で、せん断応力の増加が頭打ち状態になる。しかし、その後、再びせん断応力は増加傾向に転じ、有効応力がほぼゼロになっても未改良砂のような流動的な変形は見られない。この様に、未改良砂と改良砂の液状化に対するねばりは、著しく異なる。

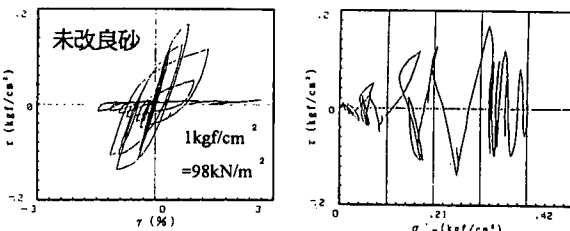


図-11 τ ~ γ 関係

図-12 有効応力経路

(3) オンライン地震応答実験

オンライン地震応答実験は、応答解析とその解析で用いる材料の復元力を求める繰返し载荷実験をコンピューターオンラインで結びつけた仮動的実験・解析手法である²¹⁾。この実験での異方圧密条件は、有効側方向応力 $\sigma'_{vc} = 0.315 \text{ kgf/cm}^2$ (30.9 kPa)、有効軸方向応力 $\sigma'_{ve} = 0.630 \text{ kgf/cm}^2$ (61.7 kPa) である。表-1の解析条件が示すように、オンライン実験は深度4~6mの第(4)層S2のみで、他の土層は全て線形弾性計算とし土層全体の応答計算を実施している。図-10は用いた入力加速度波形を示している。図-11, 12は、第(4)層の未改良砂のせん断応力～せん断ひずみ関係、および有効応力経路を示したものである。両図から、両振幅せん断ひずみが約2%に達したあたりで有効応力がほぼゼロになり液状化が発生し、せん断抵抗が極めて小さい状態が継続し、流動的な変形が生じている様子が観察できる。一方、図-13, 14に見られるように、第(4)層の改良砂の場合はこの地震が終了するまで十分な復元力を保持しており、液状化が生じないことがわかる。

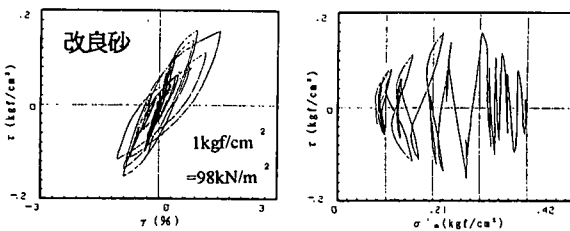


図-13 τ ~ γ 関係

図-14 有効応力経路

5. まとめ

試作した簡易単純せん断試験装置の特長を述べるとともに、その適用性を検討した。得られた主要な知見をまとめると以下ようになる。

- 1) 本実験装置は真空吸引による負圧载荷により供試体に等方成分の拘束圧を与えるものであり、セルが不要である等、従来の装置を簡素化することが可能である。
- 2) 龍岡らが実施した応力振幅一定方式の非排水繰返しねじり単純せん断試験結果との対応を調べることで、試作した簡易単純せん断試験装置で実用上、有効な単純せん断試験が実施でき

ることを確認した。

- 3) 液状化に対する未改良砂と改良砂を対象に、ひずみ振幅漸増方式、およびオンライン地震応答実験を実施し、本装置が実務的な問題に十分、適用可能なことを示した。

謝辞：本装置の試作にあたり、筑波テクニカ（株）の小林幹郎氏から貴重な助言を頂きました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kjellman, W.: Testing of the Shear Strength of Clay in Sweden, *Geotechnique*, Vol. 2, No. 3, pp. 225-232, 1951.
- 2) Roscoe, K. H.: An Apparatus for the Application of Simple Shear to Soil Samples, *Proc. 3rd ICSMFE*, Vol. 1, pp. 186-191, 1953.
- 3) Bjerrum, L. and Landva, A.: Direct Simple Shear Tests on a Norwegian Quick Clay, *Geotechnique*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-20, 1966.
- 4) 徳江俊秀, 粟津 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検討, 第19回土質工学研究発表会, pp. 381-382, 1984.
- 5) Ohata, S. and Matsuda, H.: Study on the Settlement of Saturated Clay Layer Induced by Cyclic Shear, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 3, pp. 103-113, 1988.
- 6) Finn, W. D. L., Pickering, D. J. and Bransby, P. L.: Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests, *Proc. ASCE, SM 4*, pp. 639-659, 1971.
- 7) Vucetic, M. and Lacasse, S.: Specimen Size Effect in Simple Shear Test, *ASCE*, Vol. 108, No. GT12, pp. 1567-1585, 1982.
- 8) Doroudian, M. and Vucetic, M.: A Direct Simple Shear Device for Measuring Small-Strain Behavior, *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol. 18, No. 1, pp. 69-85, 1995.
- 9) 横川啓児, 安原一哉, 村上 哲, 喜渡基弘: 単純せん断試験による初期せん断応力を受けた粘性土の繰返し強度評価, 土木学会第51回年次学術講演会, (III-A), pp. 172-173, 1996.
- 10) 辻 清, 湯 怡新, Tom LUNNE: 一面せん断試験と単純せん断試験から得られた海成粘土のせん断強度の比較, 土木学会論文集, No. 589/III -42, pp. 275-285, 1998.
- 11) 原田次夫, 打田靖夫, 大長昭雄: 大型単純せん断型液状化試験機の開発と液状化実験例, 第12回土質工学研究発表会, pp. 401-404, 1977.
- 12) 高田直俊, 大島昭彦: 一面せん断試験と単純せん断試験の比較, 直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム, (社)土質工学会, pp. 173-180, 1995.
- 13) 斉藤 彰, 松田栄一, 石神公一, 荻野弘雄, 米山利治.: 埋立造成地盤の液状化予測について, 土と基礎, Vol. 22, No. 3, pp. 25-32, 1974.
- 14) 石原研而, 関 元治, 竹氏 彰, 坂上 実: 砂のくり返し単純せん断に及ぼす堆積構造の異方性, 第14回土質工学研究発表会, pp. 597-600, 1979.
- 15) 龍岡文夫, Silver, M. L., Phukunhaphan, A. and Avramidis, A. S.: 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.
- 16) 八木則男, 矢田龍一: 応力の制御が可能な単純せん断試験機の試作, 土と基礎, Vol. 31, No. 7, pp. 23-27, 1983.
- 17) 岡本正広, 越智健三: 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, 土木学会論文集, No. 505/III -29, pp. 69-78, 1994.
- 18) 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.
- 19) 善 功企, 山崎 浩之, 林 健太郎, 吉川 立一, 藤澤 伸行, 名越 崇: 薬液注入による液状化防止工法 -新潟実証実験報告-, 第32回地盤工学研究発表会, pp. 2347-2348, 1997.
- 20) 日下部伸, 森尾 敏, 兵動 正幸, 村田 秀一: 砂粒子表面形状が非排水ねじり単純せん断時の変相線と破壊線に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 541/III -35, pp. 223-232, 1996.
- 21) Kusakabe, S. and Morio, S.: The Development of a Substructure On-Line Testing System for Seismic Response Analysis of a Geotechnical System, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 2, pp. 117-125, 1995.

(1998. 5. 15. 受付)

DEVELOPMENT OF A SIMPLIFIED SIMPLE SHEAR APPARATUS AND ITS APPLICATION TO VARIOUS LIQUEFACTION TESTS

Shin KUSAKABE, Satoshi MORIO, Takumi OKABAYASHI,
Teruhisa FUJII and Masayuki HYODO

A simplified simple shear apparatus and its test procedures were developed in this study. The reliability of the system was verified by comparing the test results of this system with those of the torsional simple shear tests conducted by Tatsuoka et al. (1986). Using this verified system, several types of liquefaction tests, such as stress controlled, strain controlled and on-line were conducted. The test results proved that this system was relevant to perform practical liquefaction tests.