

# 砂質土の液状化後の変形特性に与える再構成および試験装置の違いの影響

安田進<sup>1</sup>・稲垣太浩<sup>2</sup>・出野智之<sup>3</sup>・桜井裕一<sup>4</sup>・石川敬祐<sup>5</sup>

<sup>1</sup>東京電機大学理工学部(〒350-0394埼玉県比企郡鳩山町石坂) E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

<sup>2</sup>日本道路公団試験研究所土工研究室(〒194-8508町田市忠生1-4-1) E-mail: Motohiro.Inagaki@jfnnet.go.jp

<sup>3</sup>不動建設(株)ジオエンジニアリング事業本部(〒101-0016東京都台東区台東1-2-1) E-mail: ideno@fudoco.jp

<sup>4</sup>日本基礎工業(株)技術本部(〒107-0052東京都港区赤坂4-9-17) E-mail: nkiso@sf6.so-net.ne.jp

<sup>5</sup>東京電機大学大学院学生(〒350-0394埼玉県比企郡鳩山町石坂) E-mail: 03smg03@edccs.dendai.ac.jp

筆者達は、液状化した土の応力-ひずみ関係を求めるため、いくつかの土に対し繰返しねじりせん断試験を行っている。これに加えて、今回は徳島の沖積砂層から不攪乱試料を採取して同様の試験を行い、既往の試験結果と比較した。ここで用いた試料は細粒分含有率が少ないものから多いものまでであった。さらに、その試験後の試料を同じ密度に詰め直して実験を行いエイジングの影響を調べた。また、同じ不攪乱試料に対して、繰返し三軸試験でも液状化後の変形特性を求めた。これらの実験結果と既往の実験結果を比較し、試料の再構成や試験装置の違いが液状化によるせん断剛性の低下に与える影響に関し検討を行った。その結果、細粒分が多いと三軸試験でもねじりせん断試験と同様のせん断剛性低下率が得られる事などが分かった。

*Key Words*: Liquefaction, sandy soil, deformation, laboratory test

## 1. はじめに

筆者達は液状化による地盤や構造物の変形量を推定するために、種々の土について液状化後の変形特性を繰返しねじり試験により求めてきている。これに加えて、徳島の吉野川下流域の表層に堆積しているゆるい沖積砂層から不攪乱試料を採取して、同様の試験を行った。また、液状化後の変形特性に与えるエイジングの影響を調べるために、再構成した試料でも試験を行い、不攪乱試料での実験結果と比較した。さらに、より簡易な試験である繰返し三軸試験でも試験を行い、繰返しねじりせん断試験結果と比較した。

## 2. 試料および試験方法

今回用いた試料は徳島の吉野川周辺の4箇所から採取したものである。これらの箇所ではG.L.-1.0mからG.L.-20.0mまでの深さの土層に対し、 $N$ 値10以下の場合にはシンウォールサンプラーで、 $N$ 値10以上の場合はトリプルチューブサンプラーで連続的に不攪乱

試料を採取した。これらの試料は細粒分含有率を10%から100%まで含んでいた。これらの試料を用いて繰返しねじり試験、繰返し三軸試験を行った。代表的な試料の粒径加積曲線を図-1に示す。ここに示した五つの試料は繰返し三軸試験において局所ひずみ測定装置を付けて試験を行った試料である。

試料は繰返しねじりせん断試験では外形7cm、内

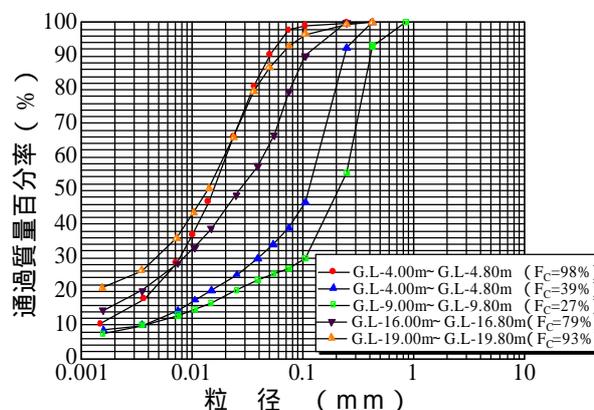


図-1 代表的な試料の粒径加積曲線

径3cm, 高さ7cmの中空円筒形に, 繰返し三軸試験では直径5cm, 高さ10cmの円柱状に成形して試験に供した。B値が0.95以上となるように飽和し, 原位置の有効上載圧で等方圧密した後に, 非排水状態で正弦波荷重を20波繰返した。その後, 非排水状態を保ったまま静的単調荷重を行った。静的単調荷重はひずみ制御で行い, 荷重速度は10%/minとした。

繰返しねじり試験装置を用いた動的変形特性試験も行った。この場合は振幅一定で周波数 0.1Hz の正弦波荷重を非排水状態のもとで 11 回加え, 振幅幅を段階的に増加させた。なお, 各ステージ間で排水し, 過剰間隙水圧を消散させている。この動的変形特性試験の結果と PS 検層の結果と比較し, 試料が乱れているかどうか検証した。その結果, 図-2 に示すように繰返しねじりせん断試験から得られた  $=10^6$  付近での  $G_{max}$  は, PS 検層から得られた  $G_0$  に近い値となった。そこで, 今回用いた不攪乱試料の乱れは少ないと判断した。

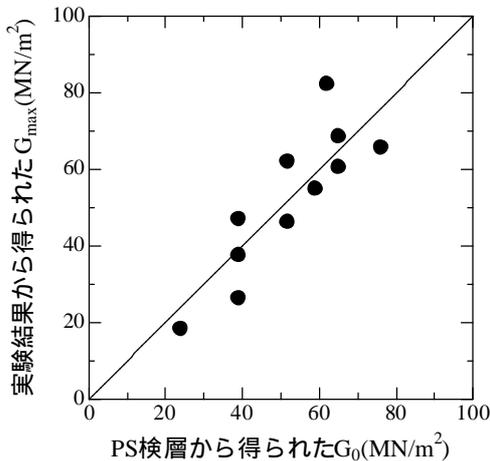


図-2 PS 検層で得られたせん断剛性と繰返しねじりせん断試験で得られたせん断剛性の比較

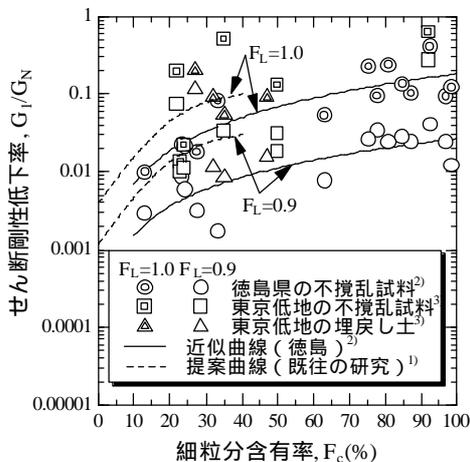


図-3 不攪乱試料におけるせん断剛性低下率と細粒分含有率との関係

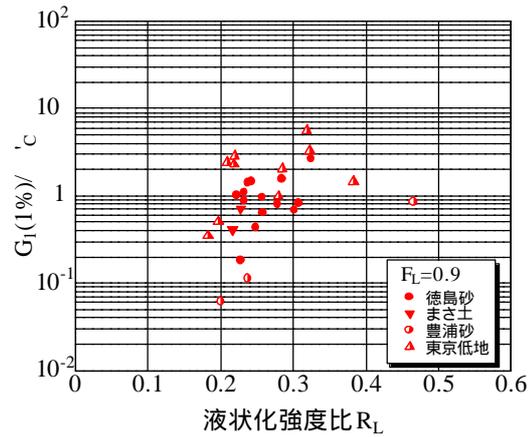


図-4 液状化後のせん断剛性比と液状化強度比の関係

### 3. 不攪乱試料におけるせん断剛性低下率

液状化後の単調荷重試験結果では不攪乱試料, 再構成試料とも, 既往の実験結果<sup>1)3)</sup>と同様に, 非常に小さな応力でひずみはかなり大きく発生し, その後間隙水圧の低下とともに強度が回復する傾向を示した。その際の応力 ひずみ関係は下に凸となった。そこで, 強度が回復する前(つまり微小抵抗領域)におけるせん断剛性  $G_l$  を読みとり, 液状化に伴うせん断剛性の低下率  $G_l/G_N, G_l/G_{0i}$  を計算した。ここで,  $G_N$  は  $N$  値から  $2800 \times N(\text{kN/m}^2)$  で求めた値で,  $G_{0i}$  は静的ねじりせん断試験や静的三軸試験から求めた  $=10^{-3}$  の割線せん断剛性である。

このようにして求めたせん断剛性低下率と細粒分含有率の関係を図-3 に示す。図に示すように細粒分含有率が多くなるとせん断剛性の低下が少なくなる傾向となった。ただし, 図に示した既往の関係<sup>1)3)</sup>とは少し異なる結果となった。

今回の試料は細粒分含有率が 100% 以下のものが大半であった。これに対し, さらに細粒まで含めようとする, 図-3 のように横軸を細粒分含有率にしておく整理できなくなる。また, 縦軸もせん断剛性低下率よりは  $G_l$  そのものの絶対値で整理しておいた方が種々の土のデータを統一し易い可能性がある。そこで, 図-3 に代わってこれらの全部のデータをより統一して表現できる方法として, 横軸に液状化強度比をとり, 縦軸に  $G_l$  を有効拘束圧で割った値をプロットしてみた。これが図4である。データのばらつきは多少あるが, 左下がり傾向となった。今後, さらに細粒土での実験結果もこのようにまとめてみたいと考えている。

### 4. 不攪乱試料と再構成試料におけるせん断剛性低下率の比較

不攪乱試料の試験で用いた試料を詰め直して, 不攪乱試料と同様の手順で繰返しねじりせん断試験を行った。ただし, 供試体の密度は不攪乱のそれと等

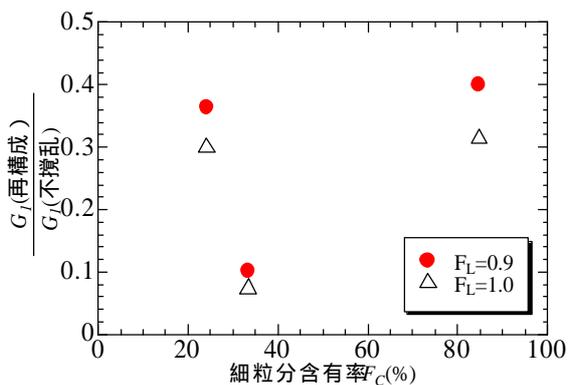


図-5 不攪乱試料と再構成試料での液状化後のせん断剛性の違い

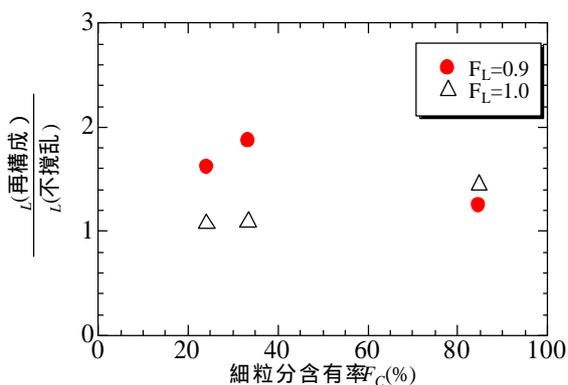


図-6 不攪乱試料と再構成試料での液状化後の応力~ひずみ関係での微小抵抗領域の違い

しくするようにした。これを再構成試料と呼ぶことにする。三つの試料に対して試験を行った結果を図-5, 6に示す。前者は微小抵抗領域内でのせん断剛性 $G_L$ を不攪乱試料のそれと比較したものであり、後者は微小抵抗領域について同様に比較したものである。これらの図を見ると、再構成試料では不攪乱試料に比べて微小抵抗領域が少し広くなり、せん断剛性 $G_L$ は半分に以下に小さくなった。横軸に細粒分含有率をとっているため図-5では右下がり、図-6では右上がりになるのではないかとと思われるが、まだデータが少なく傾向は分からない。今後もデータを付け加えていきたいと考えている。

### 5. 繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験における液状化後の変形特性の比較

液状化後の変形特性を比較する前に、液状化強度比  $R_L$ (20回の繰返しで液状化する応力比)を求め、ねじりと三軸の試験結果を比較すると図-7のようになった。これには徳島の不攪乱試料以外の試料のデータも同時に示している。試料多少のばらつきがあるが両試験結果はよく一致した。

次に、 $F_L=0.9$ の時の両試験でのせん断剛性低下率

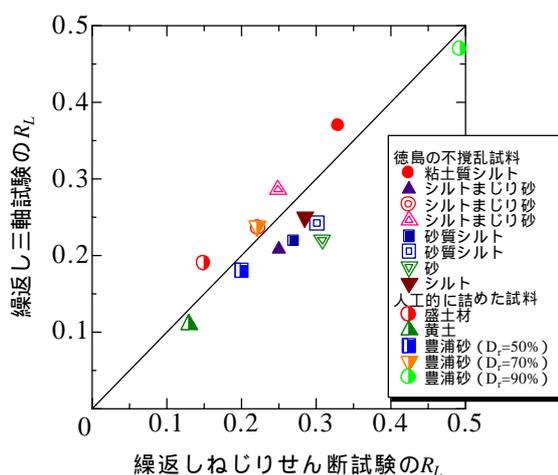


図-7 繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験における液状化強度比の比較

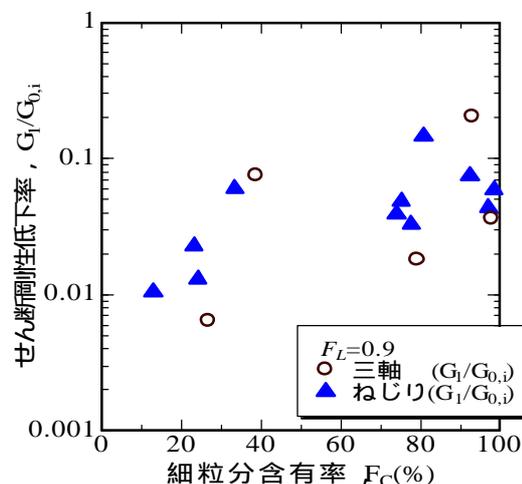


図-8 繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験におけるせん断剛性低下率(  $=10^{-3}$  でせん断剛性との比)の比較

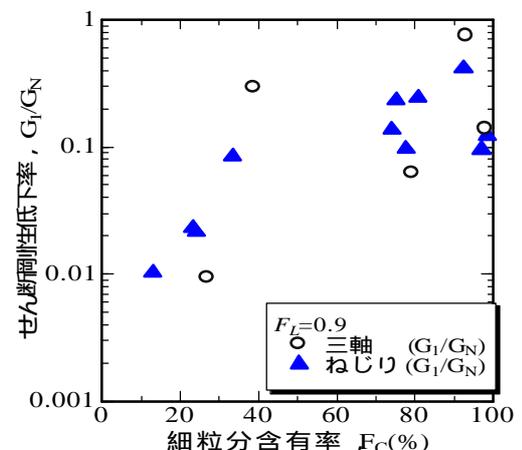


図-9 繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験におけるせん断剛性低下率(N 値から求めたせん断剛性との比)の比較

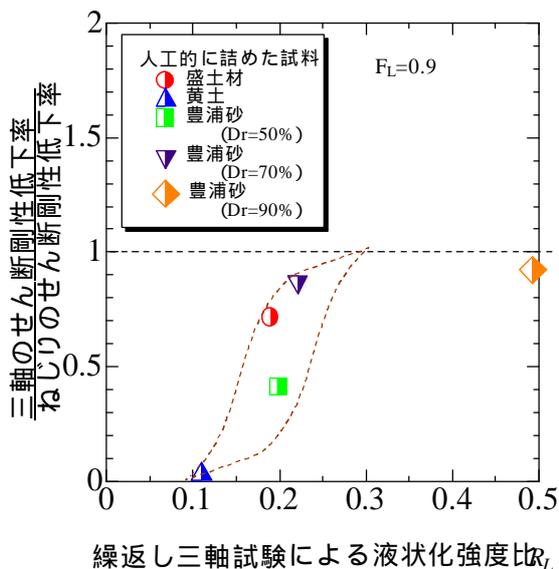


図-10 人工的に詰めた試料にでのせん断剛性率についての繰返しねじり試験結果と繰返し三軸試験結果との比較

と細粒分含有率の関係をプロットすると図-8, 9となった。せん断剛性低下率の分母として前者は $=10^{-3}$ での値を、また、後者は $N$ 値から求めた値をとっている。両図とも細粒分が多いと両者の結果はかなり良く一致し、細粒分含有率が20%程度以下では三軸試験の方が剛性が大きく低下する傾向を示した。ただし、データが多くないのではっきりとは言えない。

なお、徳島の不攪乱試料では同じ土層内の試料での試験結果の比較は行えても完全には同じ試料の比較は行えない。これに対し、同じ試料で比較するために、豊浦砂(相対密度が 50%, 70%, 90%の 3 種類)、道路盛土材、中国蘭州の黄土を人工的に詰めて試験を行った。両試験での剛性低下率の比を液状化強度比との関係で図-10 に示す。これに見られる

ように、液状化強度比が小さい場合には三軸試験のせん断剛性が小さいが、液状化強度比が 0.25 程度以上であれば両試験結果に有意な差がなくなってくるようである。これは、液状化強度比が小さい試料の場合、三軸試験では液状化が発生した時圧縮側の載荷で供試体がビヤ樽状になり、その後伸張側へ移るとトップキャップと供試体上部の間に間隙水が溜まる事が起きるためと考えられる。液状化強度比が大きい試料はこのような現象が生じないため、両試験で同じような結果が得られたものと考えられる。

## 6. まとめ

徳島で採取した不攪乱試料およびそれを再構成した試料を用いて、繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験を行って液状化後の変形特性を求めた。その結果、試料を再構成すると液状化によるせん断剛性の低下割合が大きくなることや、細粒分含有率が多いと三軸試験でもせん断剛性の低下率を求め得ることなどが分かった。本文中に述べているように今後も試験を続けてデータをさらに蓄積していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化にともなう流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638/ -49, pp.71-89, 1999.
- 2) 安田進, 緒方建治, 稲垣太浩, 出野智之: 吉野川周辺の不攪乱試料における液状化後の変形特性, 第38回地盤工学研究発表会講演集, No.242, 2003.
- 3) 小笠原政文, 牧田篤弘, 安田進, 黛廣志, 原田克之: 液状化した地盤のせん断剛性低下率評価, 地盤工学会地震時の地盤・構造物の流動性と永久変形に関するシンポジウム発表論文集, pp.321-324, 1998.

(2003. 10. 13 受付)

## EFFECT OF REMOLDING AND DIFFERENCE OF TEST EQUIPMENTS ON POST-LIQUEFACTION BEHAVIOR OF SANDS

Susumu YASUDA, Tokyo Denki University  
 Motohiro INAGAKI, Japan Highway Public Corporation  
 Tomoriho IDENO, Fudo Construction Co., Ltd.  
 Yuuichi SAKURAI, Nihonkiso Co., Ltd.  
 Keisuke ISHIKAWA, Tokyo Denki University

The authors conducted cyclic torsional shear tests to obtain the post cyclic behavior of sands. Undisturbed samples taken at four sites in Tokushima and their remolded samples were used for the tests. Shear modulus of undisturbed samples reduced due to liquefaction. And, more severe reduction occurred if the samples were remolded. Cyclic triaxial tests were also conducted for the undisturbed samples. If the samples have much fines, reduction rate of shear modulus were almost same as the rate obtained by the cyclic torsional tests.