

# 砂質土の低拘束圧下における液状化後の変形特性

安田進<sup>1</sup>・小宮真悟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設環境工学科  
(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 東京電機大学大学院 理工学研究科建設工学専攻  
(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: 02smg07@ed.ccs.dendai.ac.jp

近年、液状化に関する研究手法の一つとして重力場での模型振動台実験が行われている。また、それら模型振動台実験の数値解析も行われている。模型振動台実験では模型の高さが制限され、さらに重力場にて行われているので拘束圧が実地盤より小さくなってしまふ。よって、これらの解析を行う際には対象地盤の低拘束圧下での物性把握が必要になってくる。そこで筆者らは低拘束圧領域での砂質土の液状化後の変形特性を調べる目的で、繰返しねじりせん断試験を行った。またその結果を通常拘束圧での結果と比較を行った。比較の結果、液状化強度比は通常拘束圧よりも低拘束圧の方が大きくなった。また液状化後にせん断剛性の低下する割合は低拘束圧の方が通常拘束圧よりも小さくなった。

**Key words** : liquefaction, low confining stress, cyclic torsional share tests

## 1. はじめに

液状化に伴う構造物の挙動や変形量を調べる目的で、模型振動台実験がしばしば行われている。これらの実験では模型の高さが1～6メートル程度と制限される。そのため実地盤と比較した場合、拘束圧が小さくなってしまふという問題点が挙げられる。砂の力学的性質は拘束圧の影響を強く受けるためこれらの実験の解析やそれに伴う数値シミュレーションを行う際には、砂の低拘束圧下での物性把握が必要となる。これまでに砂の低拘束圧下における研究は幾つか行われているが、液状化後の変形特性についての研究はあまり行われていない。本研究では、低拘束圧下でも精度良く試験が行える中空ねじりせん断試験装置を作製し、豊浦砂及び十勝砂における液状化及び液状化後の変形特性を調べた。なお十勝砂は2001年11月に北海道十勝港にて実施された発破による実物大埋設管浮上り実験のサイトより採取し、大型振動台実験<sup>1)</sup>にて使用したものである。

## 2. 実験概要

試料には豊浦砂と前述した十勝砂を用いた。十勝砂の粒径加積曲線は図-1に示した通りであり、平均粒径  $D_{50}$  は0.18mm、細粒分含有率  $F_c$  は7%、最小間隙比  $e_{min}$ ・最大間隙比  $e_{max}$  はそれぞれ0.781・1.291である。拘束圧は通常拘束圧として49kPa、低拘束圧として9.8kPaの等方応力とした。相対密度は十勝砂で70%、85%とし、豊浦

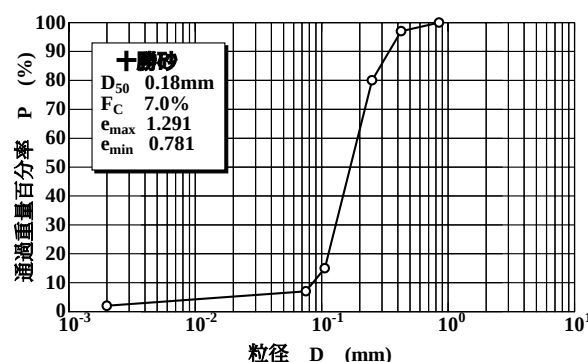


図-1 十勝砂の粒径加積曲線

砂では80%、60%の2パターンとした。

実験装置には中空ねじりせん断試験装置を用いた。低

拘束圧試験ではレギュレータ類が低圧でも精度良く供給できるものを用い、また有効拘束圧が正確に測定できるようにU字管を用いた。供試体作製にあたっては液状化強度に影響を与えないために細心の注意を払った。そのため空中落下法によって、ロータを12秒で一周するような速度で回転させながら投入し、1周したところで反転する箇所をランダムに変化させた。その後タッピング法により外モールドの周囲を均等に木槌で打撃し、所定の相対密度となるようにした。こうすることにより、砂は均一に詰まった。次に供試体を負圧にて自立させた。低拘束圧での試験において作用させる負圧は有効拘束圧分とし、負圧による圧密が終了した段階で供試体寸法を測定した。その寸法より圧密後の供試体体積を算出した。その後2時間以上二酸化炭素を通した後12時間かけて通水させた。この際二酸化炭素、通水共に供試体に影響がないようなゆっくりとした速度でそれぞれ通した。B値が0.96以上であることを確認した上で、軸方向変位を固定して非排水状態で繰返しねじりせん断を行った。一方、通常拘束圧での試験においては通水・圧密後に排水量を測定し、圧密後の供試体体積を算出した。繰返し荷重は通常拘束圧での試験においては0.1Hzの正弦波による荷重制御、低拘束圧での試験においては、荷重速度も液状化強度に影響があると考え、ひずみ速度を毎分1%と一定とした回転制御とした。繰返し回数20回終了後、非排水状態を保ったまま、ひずみ速度が10%/minの速度で静的単調荷重を行った。

### 3. 試験結果

#### 3.1 液状化強度曲線

豊浦砂、十勝砂共に各せん断応力比でせん断ひずみが両振幅で7.5%発生するまで繰返し荷重し、その時の回数をプロットし、液状化強度曲線とした。その結果を図-2、図-3に示す。この液状化強度曲線より繰返し回数が20回時のせん断応力比を読み取り液状化強度比 $R_L$ とした。このようにして求めた各砂・各相対密度・各拘束圧での $R_L$ を表-1に示す。十勝砂において液状化強度比の比較を行った。表-1に示すように両砂共に液状化強度比は、通常拘束圧より低拘束圧の方が大きくなった。このような結果となったのは、低拘束圧下においては土粒子の噛みあわせがせん断応力に対し大きく影響を及ぼすため、インターロッキングによる見かけの粘着力的な効果が表れている可能性や過圧密の影響があると考えられる。また豊浦砂と十勝砂において相対密度 $Dr$ と液状化強度比 $R_L$ の比較を行った。その関係を図-4に示す。これより両砂とも拘束圧が低い程、同相対密度での液状化強度比 $R_L$ は大きくなった。

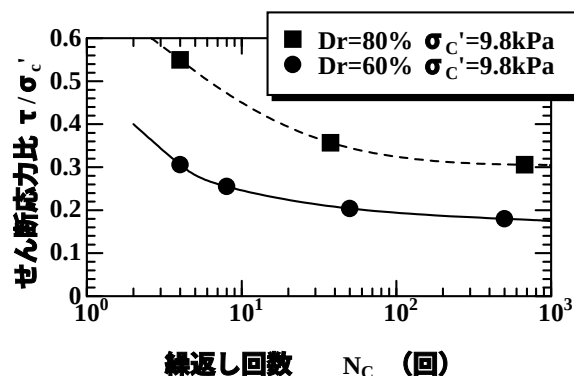


図-2 液状化強度曲線（豊浦砂）

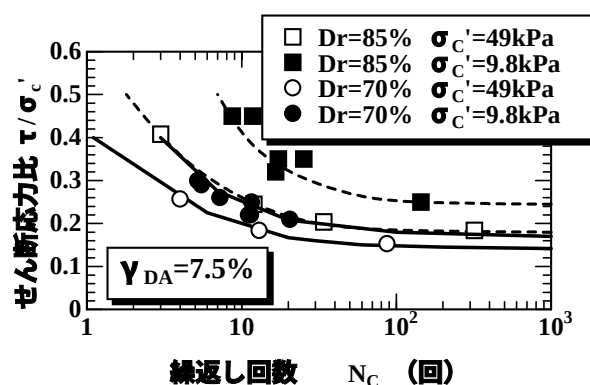


図-3 液状化強度曲線（十勝砂）

表-1 各砂の液状化強度比

|       | 豊浦砂 |       | 十勝砂 |       |
|-------|-----|-------|-----|-------|
|       | Dr  | $R_L$ | Dr  | $R_L$ |
| 低拘束圧  | 60  | 0.225 | 70  | 0.208 |
|       | 80  | 0.393 | 85  | 0.323 |
| 通常拘束圧 | 70  | 0.235 | 70  | 0.167 |
|       | 90  | 0.446 | 85  | 0.217 |

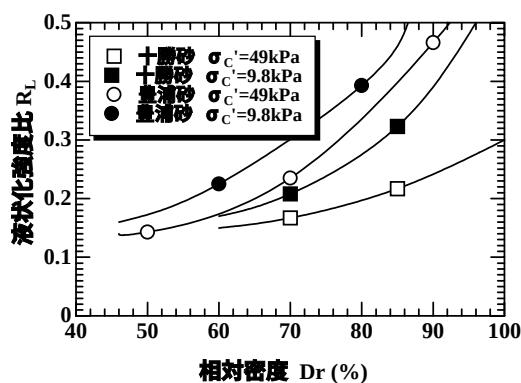


図-4  $Dr$ - $R_L$  関係

### 3.2 静的単調載荷時のせん断ひずみとせん断応力・間隙水圧の関係

低拘束圧において繰返し載荷後に行った静的単調載荷時のせん断ひずみとせん断応力・間隙水圧の関係を図-5に示す。比較のために通常拘束圧での結果を図-6に示す。図中のstaticとは繰返し載荷を行わずに静的単調載荷のみを行った時の結果である。また  $F_L$  とは液状化安全率で、液状化強度比  $R_L$  を各試験の繰返しせん断応力比で除したもので定義され、液状化の程度の指標として用いている。低拘束圧、通常拘束圧共に液状化安全率  $F_L$  が小さい程、供試体剛性の回復は遅くなった。また剛性の回復に伴っ

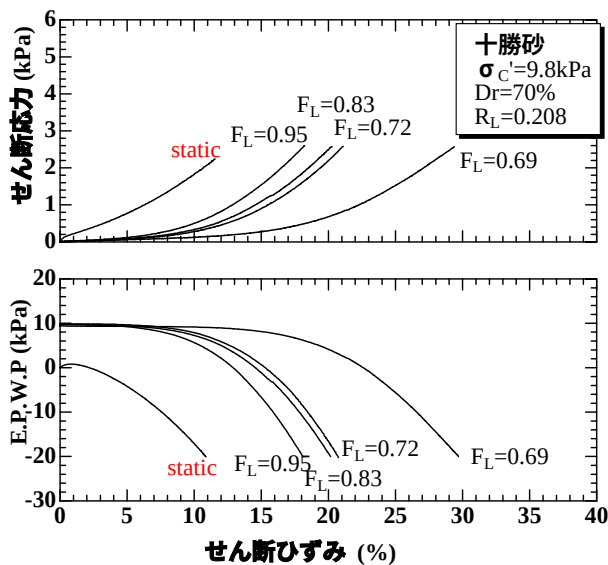


図-5 静的単調載荷時の  $\gamma$ - $\tau$ ・ $\Delta u$  関係 (低拘束圧)

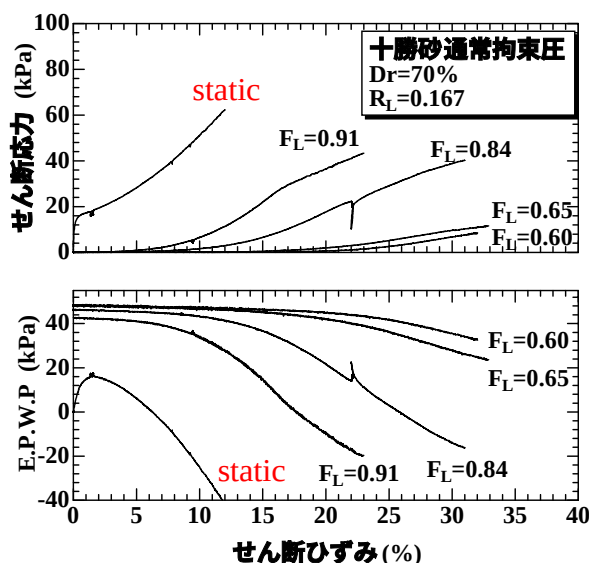


図-6 静的単調載荷時の  $\gamma$ - $\tau$ ・ $\Delta u$  関係 (通常拘束圧)

た間隙水圧の減少も遅くなった。図-5、図-6 のせん断応力を 1kPa まで拡大した時の  $\gamma$ - $\tau$  関係を図-7 に示す。これより、同程度の  $F_L$  で比較すると供試体剛性が回復し始める点は低拘束圧の方が遅くなった。また供試体剛性の

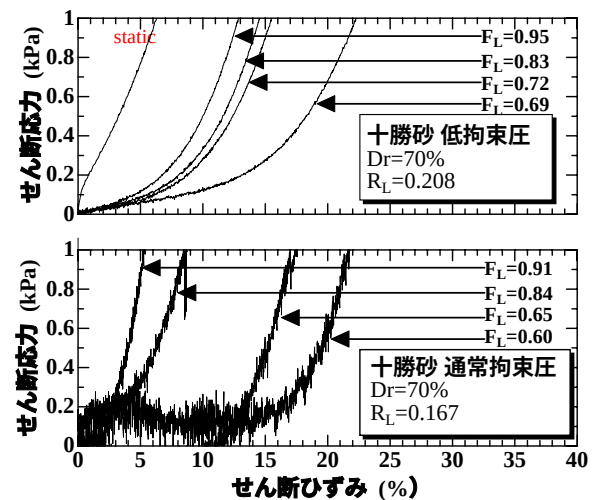


図-7 静的単調載荷時の  $\gamma$ - $\tau$  関係の比較

回復の度合いは通常拘束圧の方が大きくなった。

### 3.3 液状化前後の変形特性に関する諸定義

静的単調載荷時の  $\gamma$ - $\tau$  関係を模式的に図-8 に示す。剛性回復前までの割線勾配を  $G_1$ 、剛性回復域での割線勾配を  $G_2$  と定義した。各割線の交点を抵抗変曲点とし、抵抗変曲点までの領域を微小抵抗領域  $\gamma_L$  と定義した。また static におけるせん断ひずみ 0.1% 時の割線勾配を初期せん断剛性  $G_{0i}$  と定義し、 $G_1$  を  $G_{0i}$  で除したものを液状化に

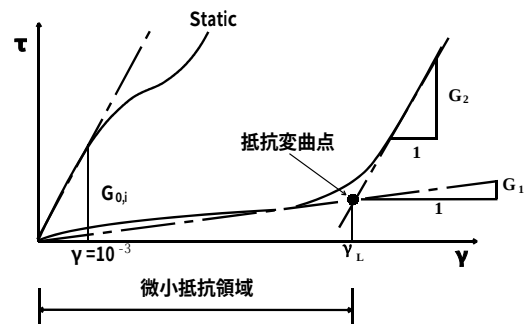


図-8  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $\gamma_L$ 、 $G_1/G_{0i}$  の定義

伴うせん断剛性低下率  $G_1/G_{0i}$  と定義した。

### 3.4 $F_L$ 、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $\gamma_L$ 、 $G_1/G_{0i}$ の関係

$F_L$  と  $G_1$  の関係を図-9 に示す。両拘束圧とも  $F_L$  が小さくなると  $G_1$  も小さくなった。拘束圧による違いを比較すると両砂とも拘束圧が小さくなると  $G_1$  は大きくなった。その程度は豊浦砂で約 10000 倍、十勝砂で約 100 倍とな

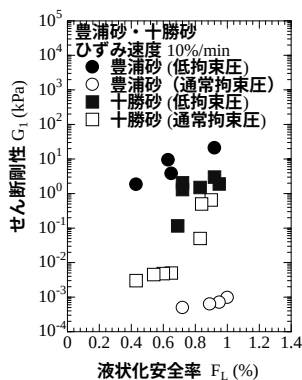


図-9  $G_1$ - $F_L$ 関係

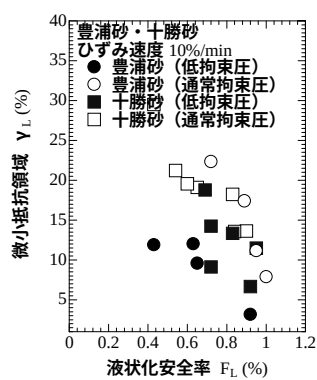


図-10  $\gamma_L$ - $F_L$ 関係

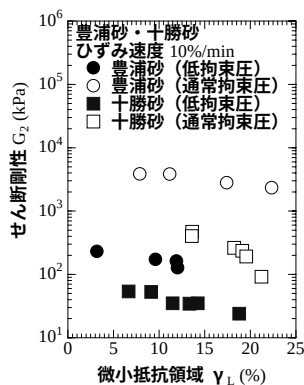


図-11  $G_2$  -  $\gamma_L$  関係

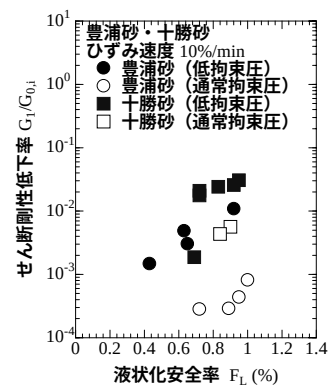


図-12  $G_1/G_{0i}$ - $F_L$ 関係

った。 $F_L$ と $\gamma_L$ の関係を図-10に示す。 $F_L$ が小さくなる程 $\gamma_L$ は大きくなり、液状化の程度が大きいほど供試体剛性の回復し始める点は遅くなった。また両砂とも拘束圧が小さくなると $\gamma_L$ は小さくなった。その程度は豊浦砂より十勝砂の方が小さかった。 $\gamma_L$ と $G_2$ の関係を図-11に示す。 $\gamma_L$ が大きくなると剛性回復域での立ち上がり小さくなった。液状化の程度が大きい、つまり $F_L$ が1より小さい供試体ほど、剛性の回復の程度は小さいと言える。また拘束圧が小さくなると剛性の回復が遅くなった。その程度は豊浦砂より十勝砂の方が小さかった。 $F_L$ と $G_1/G_{0i}$ の関係を図-12に示す。 $F_L$ が小さくなると $G_1/G_{0i}$ は小さくなり、せん断剛性の低下の割合は大きくなった。また通常拘束圧下での $G_1/G_{0i}$ は低拘束圧下での $G_1/G_{0i}$ に比べ両砂とも約1/100程度小さくなった。

以上見てきたように、液状化後の変形特性は低拘束圧と通常拘束圧でかなり異なってきた。つまり低拘束圧になると $G_1$ は大きく、 $\gamma_L$ は小さく、また $G_1/G_{0i}$ は大きくなった。このように低拘束圧で異なった挙動を示した原因としては、インターロッキングによる見かけの粘着力的な効果が現れている可能性や、過圧密、相対密度の定義（拘束圧に関係なく最大・最小間隙比を設定していることに起因した）などが考えられるが、今後検討していきたい。なお、豊浦砂と十勝砂で拘束圧の影響が異なったが、これは細粒分の違いに起因しているであろう。

#### 4. まとめ

豊浦砂と十勝砂において繰返しねじりせん断試験を行い、液状化および液状化後の変形特性を検討した。その結果、両砂とも液状化強度比 $R_L$ は通常拘束圧に比べ、低拘束圧の方が大きくなった。繰返し载荷後に行った静的単調载荷時のせん断ひずみとせん断応力・間隙水圧の関係では液状化の程度が大きい（液状化安全率 $F_L$ が小さい）程、供試体の剛性回復、間隙水圧の減少は遅くなる事が

わかった。さらに液状化後の変形特性としてせん断剛性の低下する割合を求め、比較検討を行った。液状化安全率 $F_L$ が小さくなる程、せん断剛性の低下する割合は小さくなった。 $F_L$ が小さくなる程、液状化後の供試体せん断剛性の回復が遅く、また微小抵抗領域 $\gamma_L$ が大きくなる程、回復域におけるせん断剛性は小さくなる事がわかった。拘束圧下での試験と比べると低拘束圧下での試験の方がせん断剛性の低下する割合は約1/100程度大きくなった。豊浦砂、十勝砂共にこのような傾向は同様であったが、その程度は大きく異なった。その要因は細粒分の影響が考えられる。

**謝辞：**本研究は文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環として行った。関係各位に感謝する次第である。また実験にあたっては山下丈二（前年度東京電機大学大学院修了）、深谷成司（東京電機大学理工学部建設環境工学科）両君に手伝っていただいた。両君に深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- 1) 中瀬仁, 毛利栄征, 安田進, 末広俊夫: 大型振動台による地中埋設構造物の浮上実験と浮上予測解析, 第38回地盤工学研究発表会, No.924/E-08, pp.1847-1848, 2003
- 2) 安田進, 吉田望, 規矩大儀, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.77-89, 1999
- 3) 龍岡文夫, 福島伸二, 生原修: 低拘束圧における砂の三軸圧縮試験と模型支持力試験, 土と基礎, Vol.32, No.2, pp.57, 1984
- 4) 天谷宗徳, 佐藤剛司, 古閑潤一, 真栄城徳泰: 豊浦砂の低拘束圧非排水繰返しせん断特性, 土木学会第52回年次学術講演会, III-A65, pp.130-131, 1997

(2003 5.2 受付)

## THE MODIFICATION CHARACTERISTIC AFTER LIQUEFACTION UNDER LOW CONFINING STRESS OF FINE SAND

The shaking table test at 1G place is conducted as one of the research about liquefaction. And analysis of shaking table test is also performed. In these shaking table tests, since the height of a model is restricted and it is carried out further at 1G place, confining stress will become smaller than the real foundation. In case these analyses are performed, to grasp the physical properties of sand under low confining stress of the object foundation. Then, we performed the cyclic torsional share tests to research the modification characteristic after liquefaction under low confining stress of fine sand. As a result of comparing the result in usually confining stress with the result in low confining stress, the strength ratio causing liquefaction by low confining stress is larger than the one by usually confining stress.