

# 種々の珪砂の低拘束圧下における液状化および液状化後の変形挙動

田中 智宏<sup>1</sup>・安田 進<sup>2</sup>・直井 賢治<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京電機大学理工学部理工学科創造工学系 助教  
(〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

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

<sup>2</sup>東京電機大学理工学部建設環境工学科 教授 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

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

<sup>3</sup>東京電機大学理工学研究科建設環境工学専攻 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail:08smg15@ms.dendai.ac.jp

性能設計法における性能照査手法の1つとして模型振動実験と数値解析を組み合わせて行うことがある。小型・中型振動台を用いた模型振動実験では、模型地盤の高さに制約が生じ、模型地盤に作用する拘束圧は低い。模型実験に対する数値解析を実施する際には、低拘束圧下の土の変形挙動把握が必要になってくる。そこで筆者らは模型実験で多用される種々の珪砂について、低拘束圧下での液状化時および液状化後の変形挙動を調べるため繰返し中空ねじりせん断試験を行った。その結果、液状化強度比は拘束圧が低いほど大きくなった。また拘束圧が大きいほど液状化後のせん断剛性は少し大きくなったが、剛性が回復するまでに生じるせん断ひずみは、拘束圧が低いほど小さくなる結果が得られた。

**Key Words :** *liquefaction, post-liquefaction, cyclic torsional shear test, low confining pressure*

## 1. はじめに

近年、各種構造物の設計手法に性能設計の概念が取り入れられつつある。港湾指針<sup>1)</sup>では平成19年の改定において、設計検討手法や形状などの手段を規定された仕様設計法から、構造物に要求される性能のみを規定し、設計成果に至るまでの過程や手段は規定されない性能設計法に移行した。

性能設計法における具体的な性能照査手法として、信頼性に基づく手法、数値解析法、模型実験または現地実験に基づく方法、過去の経験に基づく手法が推奨する方法として挙げられている。但し、これら以外の手法を適用することを妨げているわけではない。レベル2地震動を対象とした耐震設計を行う場合には、これらの方法のうち、数値解析法と模型実験または現地実験に基づく方法が多用されると考えられる。設計する構造物や地盤改良工法が新構造形式であったり、レベル2地震動による被災事例が少ない地盤条件である場合には、これらの方法を組み合わせる方法も考えられる。例えば模型実験による検討を行い、挙動や変形量等について実験結果と解析結果との比較により適用性を確認した上で、数値解析法を用いる方法が挙げられる。

このように構造物の地震時挙動や変形量を調べるための重力場における模型実験では、超大型の振動台装置を用いない限り、模型地盤の高さは高くてもせいぜい1m前後と制約される。このとき、模型地盤に作用する拘束圧は約10kPaと、低い拘束圧の状態にある。土の力学的挙動は拘束圧の影響を大きく受けることから、模型実験に対する数値解析を実施する際には、低拘束圧下の液状化時や液状化後の変形挙動把握が必要になってくる。低拘束圧下にある砂の液状化強度に関しては実験装置が希有なことから、これまでに数多くは実施されていない。その中で望月ら<sup>2)</sup>や金谷ら<sup>3)</sup>や古関ら<sup>4)</sup>は、50~100kPa程度の通常拘束圧下における結果と比較すると、液状化強度が大きくなることを実験的に明らかにしている。しかしながら、液状化後の変形挙動に関する研究はあまり行われていない。

そこで本研究では、低拘束圧状態を再現できる繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いて、低拘束圧下における砂の液状化強度を実施し、液状化強度に与える拘束圧の影響を調べた。また液状化した供試体に静的単調载荷を与えることにより、液状化後の変形挙動についても調べた。本研究で対象とした砂は、模型実験でよく用いられる3種類の珪砂、豊浦

砂・相馬砂・アルバニー砂である。なおアルバニー砂は、2005～2006年に世界最大の震動台Eーディフェンスにおいて実施された地盤・基礎実験<sup>5)</sup>で使用されたものである。

## 2. 実験概要

### (1) 使用した試料

本実験で使用した試料は豊浦砂・相馬砂6号・アルバニー砂の3種類の砂である。前者2つの砂はそれぞれ山口県、福島県産の工場製品で、品質が一定で、大量に入手することが可能なことから、国内における模型実験や室内実験で使用されることが多い。アルバニー砂はオーストラリア産で、前述のようにEーディフェンスにおける模型実験で使用された。これら3種類の砂の粒径加積曲線と物理諸元をそれぞれ図-1と表-1に示す。いずれの砂も細粒分含有率 $F_c$ は0%である。アルバニー砂の粒径は他の2種類の砂と比較して多少大きい。いずれの砂も粒度分布が悪く、粒度による液状化判定<sup>6)</sup>では「特に液状化の可能性がある」と判定される。写真-1には顕微鏡で見た各砂の土粒子を示す。高性能な顕微鏡による撮影ではないため鮮明な写真ではないが、アルバニー砂の土粒子は他の2種類の砂と比較して角が少ない様子が伺える。また、豊浦砂と相馬砂を比較すると、相馬砂の方が長粒状の土粒子が多いように見える。

### (2) 実験内容と方法

実験では、繰返し中空ねじり試験せん断装置を用いた。供試体に与える拘束圧は低いことを意識して、本装置では拘束圧を水頭差で加えている。また、供試体キャップの軽量化も図っている。低拘束圧下でせん断試験を行う場合、メンブレン張力が試験結果に与える影響が大きいことが明らかになっている<sup>7)</sup>。本試験装置では载荷中に補正を行い、メンブレン張力を考慮して振幅一定で载荷できる機構になっている。

供試体の寸法は外径10cm、内径6cm、高さ10cmとした。メンブレン張力を極力少なくするため、厚さは $t=0.20\text{mm}$ のメンブレンを用いた。供試体作成には細心の注意を払い、漏斗が約12秒で1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。次に供試体を有効拘束圧分の負圧にて自立させ、負圧を側圧に置換した後に2時間以上二酸化炭素を通し、12時間以上かけて通水した。その後 $B$ 値を計測し、 $B$ 値が0.95以上と飽和していることを確認した上で、軸方向変位を固定し、非排水状態で载荷を行った。

液状化時の変形挙動を調べる実験では、応力制御で载荷速度を0.1Hzとした正弦波応力を载荷した。繰返し回数を変化させた実験を複数回行うことにより、液状化強度比(繰返しせん断応力比)を求めた。

一方、液状化後の変形挙動を調べる実験では、载荷は繰返し载荷の後に静的単調载荷を加えた。図-2

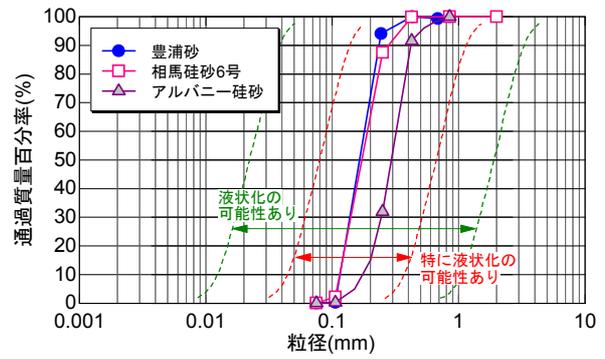
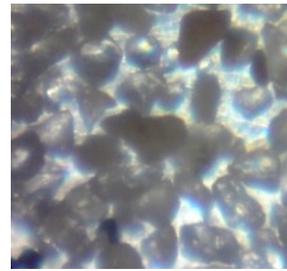


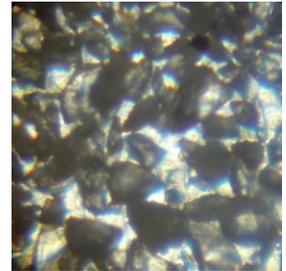
図-1 3種類の砂の粒径加積曲線

表-1 3種類の砂の物理諸元

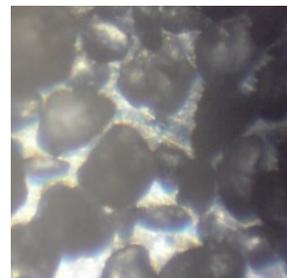
試料名	豊浦砂	相馬砂6号	アルバニー砂
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.650	2.628	2.630
細粒分含有率 $F_c(\%)$	0	0	0
最大間隙比 $e_{max}$	0.996	1.206	0.783
最小間隙比 $e_{min}$	0.613	0.704	0.513
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.167	0.174	0.300
均等係数 $U_c$	1.564	1.658	1.640
曲率係数 $U_c$	0.889	0.914	1.130



(a) 豊浦砂



(b) 相馬砂



(c) アルバニー砂

写真-1 3種類の砂の土粒子写真(100倍拡大)

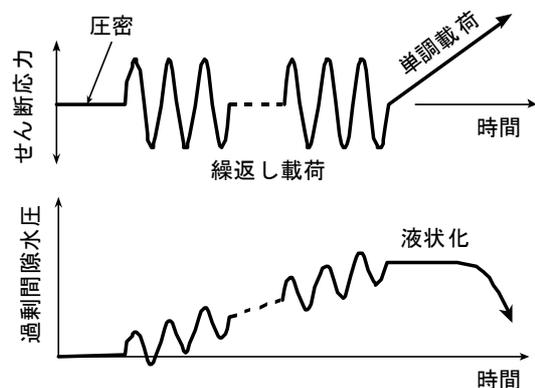


図-2 せん断応力の载荷方法

はせん断応力の載荷方法を模式的に示したものである。非排水状態の供試体に対して繰返し回数20回の正弦波応力を載荷した。その後、非排水状態を保ったまま、静的単調載荷を行った。静的単調載荷はひずみ制御で載荷速度を10~14%/min程度とした。

供試体の密度は中密と密の条件とした。また、拘束圧は、10kPa程度の低拘束圧条件と、50kPa程度の通常拘束圧条件である。表-2 に各砂供試体の密度条件と拘束圧条件を一覧にして示す。

### 3. 実験結果

#### (1) 液状化実験

液状化の実験では、繰返しせん断応力振幅を一定で液状化が発生するまで繰返し載荷を行った。供試体に発生したせん断ひずみ両振幅が7.5%に至ったときに、液状化発生と判断した。このせん断ひずみ両振幅が7.5%に至ったときの繰返し回数 $N_c$ とせん断応力比 $\tau_d/\sigma'_c$ の関係を液状化強度曲線とした。これより、繰返し回数が20回の際のせん断応力比を液状化強度比 $R_L$ とした。

図-3 に各砂の液状化強度曲線を示す。また表-3 に各砂の液状化強度比を示す。図-3 に示すようにいずれの試料においても、繰返しせん断応力比は拘束圧が低いほど大きくなる結果となった。また、液状化強度比についても同様の傾向である。相対密度が大きいくほど低拘束圧下では土粒子の噛み合わせがせん断応力に対し大きく影響を及ぼし、インターロッキングによる見掛けの粘着力のような影響を受け、液状化強度比が増加したと考えられる。

液状化強度比を拘束圧50kPaで得られた液状化強度比で正規化したものと拘束圧の関係を図-4 に示す。この図より拘束圧10kPaにおける液状化強度比は、拘束圧50kPaにおけるそれより約1.1~1.3倍増加

表-2 実施した実験条件一覧

砂の種類	実験の種類	液状化 (繰返し載荷)		液状化後 (繰返し-単調載荷)	
		中密	密	中密	密
豊浦砂	相対密度 (%)	50	70	—	70
	拘束圧 (kPa)	10, 50	10, 50	—	10, 50
相馬砂	相対密度 (%)	52	82	52	82
	拘束圧 (kPa)	10, 50	10	10	10
アルバニー砂	相対密度 (%)	—	70	—	70
	拘束圧 (kPa)	—	10, 20, 50	—	10, 50

表-3 各砂の液状化強度比

拘束圧 $\sigma'_c$	豊浦砂		相馬砂		アルバニー砂	
	$D_r$ (%)	$R_L$	$D_r$ (%)	$R_L$	$D_r$ (%)	$R_L$
10kPa	50	0.187	52	0.205	70	0.330
	70	0.278	82	0.565		
20kPa	—	—	—	—	70	0.310
50kPa	50	0.172	52	0.156	70	0.261
	70	0.220				

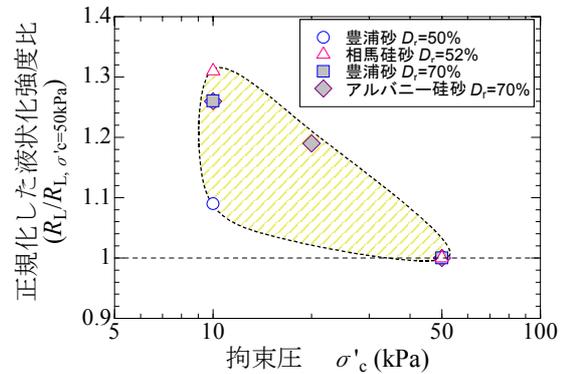


図-4 拘束圧と正規化した液状化強度比の関係

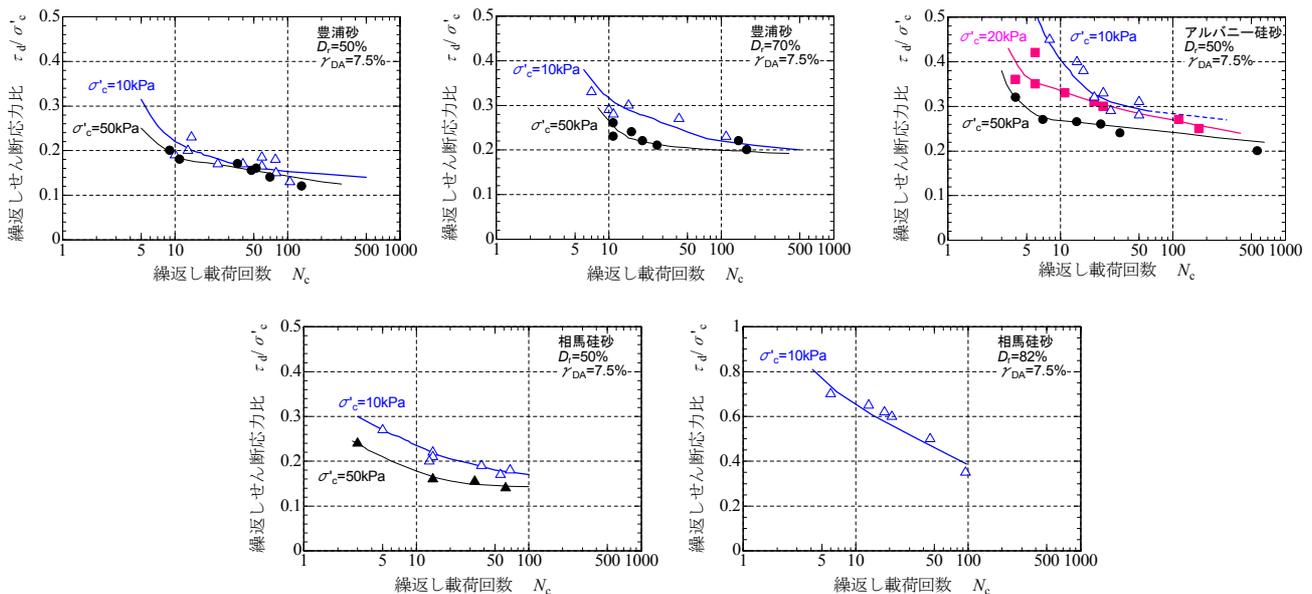


図-3 各砂の液状化強度曲線

していることがわかる。相対密度70%の豊浦砂とアルバニー砂砂における液状化強度比の増加率はほぼ同程度であった。相対密度52%の相馬砂砂における液状化強度比増加率は、相対密度50%の豊浦砂と比較すると大きい。これは写真-1で観察したように土粒子形状の違いと、若干ではあるが相対密度が大きいことに起因すると推察される。

## (2) 液状化後の変形挙動

繰返し載荷後の供試体に対して静的単調載荷を加えた際のせん断ひずみ $\gamma$ とせん断応力 $\tau$ および過剰間隙水圧 $\Delta u$ の関係を図-5に示す。図中の“static”とは、繰返し載荷を経ずに静的単調載荷のみを加えたときの結果である。

液状化した地盤にせん断応力を加えると、非常に小さな応力で大きなせん断ひずみが発生した。せん断ひずみがある値でせん断応力は急増し、強度は回復した。過剰間隙水圧は強度の回復後と共に減少した。強度が回復するのは、ひずみ変形が大きくなると土粒子同士が再び噛み合っており、正のダイレイタンスが発生したためと考えられる。ここで、液状化の程度の指標として液状化安全率 $F_L$ を用いている<sup>8)</sup>。 $F_L$ は先に求めた液状化強度比 $R_L$ を各実験でのせん断応力比 $L$ で除して定義される。この $F_L$ が小さい程、激しく液状化していると言える。強度が回復するまでのせん断ひずみの大きさは $F_L$ によって異なり、 $F_L$ が小さい程強度が回復するまでのせん断ひずみが大きくなった。このような傾向は通常の拘束圧下での既往の研究<sup>9)</sup>と同様であった。

図-5(a)に示す異なる相対密度の相馬砂砂に関する低拘束圧下の静的単調載荷試験結果において、同程度の $F_L$ と比較すると、供試体の相対密度が小さいほど供試体の剛性が回復するまでに生じるせん断ひずみは大きくなった。また図-5(b)に示す同一相対密度のアルバニー砂砂に関する異なる拘束圧下の静的単調載荷試験結果において、同程度の $F_L$ と比較すると、低拘束圧のときほど供試体の剛性が回復するまでに生じるせん断ひずみは若干小さく、また剛性回復の度合いが大きくなった。これは拘束圧が低いほど土粒子の噛み合わせがせん断応力に与える影響を大きく受けていると考えられる。

## (3) 液状化後の変形挙動に関する諸定義

静的単調載荷時のせん断ひずみ $\gamma$ とせん断応力 $\tau$ を図-6に模式的に示す。液状化後の地盤の強度が回復する前における割線勾配をせん断剛性 $G_1$ 、強度回復後の勾配をせん断剛性 $G_2$ と定義した。両割線の交点を抵抗変曲点とし、抵抗変曲点までのせん断ひずみを微小抵抗領域 $\gamma_L$ 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 $G_{0,i}$ と定義し、前述の $G_1$ を $G_{0,i}$ で除した値をせん断剛性低下率とした。

## (4) 液状化後のせん断剛性および微小抵抗領域

液状化安全率 $F_L$ と液状化後のせん断剛性 $G_1$ 、 $G_2$ および微小抵抗領域 $\gamma_L$ の関係を図-7に示す。最初に

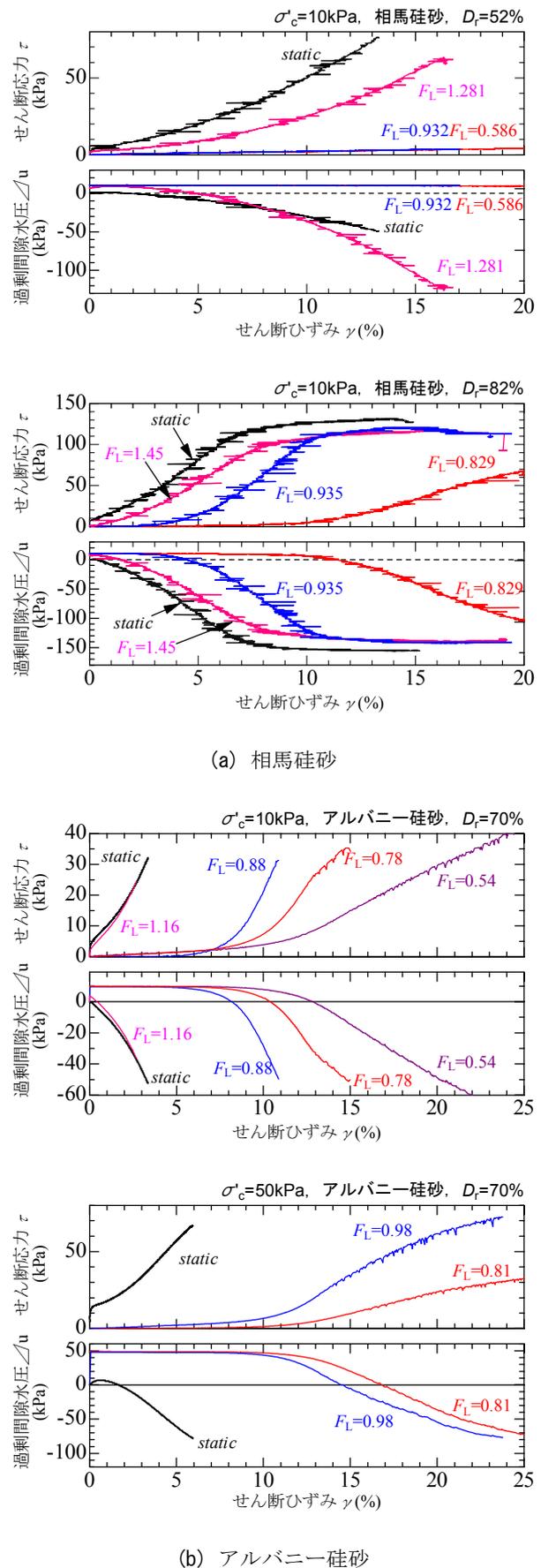


図-5 静的単調載荷後のせん断ひずみとせん断応力および過剰間隙水圧の関係

拘束圧が同一で相対密度を変化させた相馬硅砂の結果(図-7(a))について見ると、液状化後のせん断剛性 $G_1$ 、 $G_2$ は、 $F_L$ が小さくなるほど、つまり激しく液状化するほど小さくなることわかる。一方、微小抵抗領域 $\gamma_L$ は、 $F_L$ が小さくなるほど大きくなり、剛性回復までに発生するせん断ひずみが大きいことがわかる。これは激しく液状化した供試体ほど土粒子の噛み合わせがはずれるため、強度が回復するまでに生じるひずみの量が大きくなったためと考えられる。これらの傾向は中密と密の供試体で同様の傾向にあり、また密な方が液状化後のせん断剛性 $G_1$ 、 $G_2$ の値は大きくなり、微小抵抗領域 $\gamma_L$ は小さくなった。

次に供試体の相対密度が同一で拘束圧を変化させた豊浦砂およびアルバニー硅砂の結果(図-7(b))、

(c))について見ると、 $F_L$ が小さくなるほど液状化後のせん断剛性 $G_1$ 、 $G_2$ も小さく、微小抵抗領域 $\gamma_L$

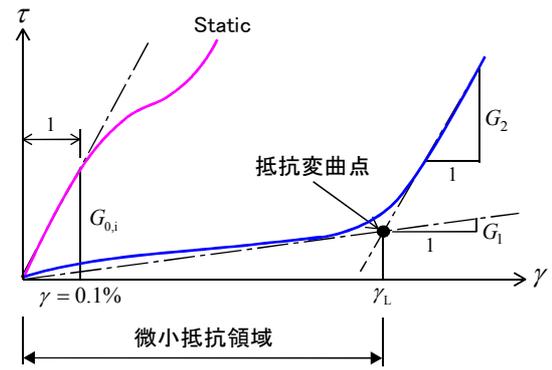


図-6 液状化後の変形挙動に関する諸定義

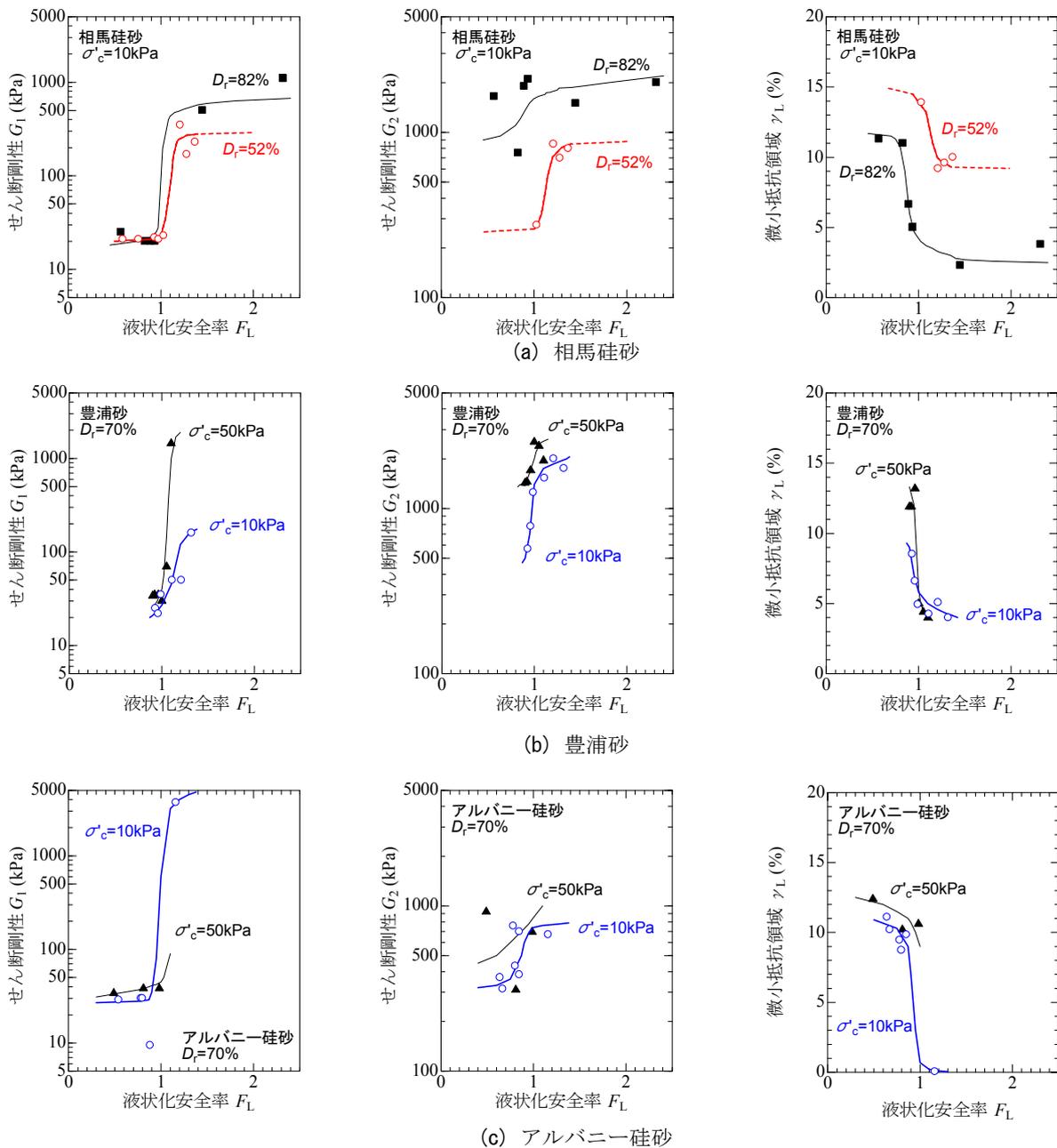


図-7 各硅砂の液状化安全率  $F_L$  と液状化後のせん断剛性  $G_1$ 、 $G_2$  および微小抵抗領域  $\gamma_L$  の関係

は大きい傾向は相馬硅砂と同様である。拘束圧別に比較すると、データ数が少なくばらつきが大きいものの、 $F_L$ が1より小さい範囲では両砂とも拘束圧が高い方が液状化後のせん断剛性 $G_1$ 、 $G_2$ の値は少し大きくなった。一方、微小抵抗領域 $\gamma_L$ は拘束圧が高い方が大きい。このことより、液状化後のせん断剛性の大きさは拘束圧の大きさに依存するが、低拘束圧下では供試体の剛性が回復するまでに生じるせん断ひずみは小さくなるのがわかる。拘束圧によるせん断剛性低下率を比較するために図-8には豊浦砂とアルバニー硅砂の液状化安全率 $F_L$ とせん断剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ の関係を示す。これより拘束圧が10kPaのときには拘束圧50kPaと比較すると、せん断剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ が大きくなるのがわかる。

安田・稲垣ら<sup>10)</sup>はこれまでに十数種類の試料について、液状化強度比と液状化後のせん断剛性 $G_1$ を拘束圧で除したせん断剛性比 $G_1/\sigma'_c$ を纏め、それらの関係式を提唱している。図-9に示したこの関係式は主に通常拘束圧下のデータが基に導出されたものであるが、同図に拘束圧10kPaである一連の硅砂によるデータを重ねると、この関係式と同様の傾向を示す結果となった。

図-10には微小抵抗領域 $\gamma_L$ と液状化後のせん断剛性 $G_1$ 、 $G_2$ の関係を示す。なお、同図には豊浦砂に関する既往のデータ<sup>11)</sup>を併せて示した。多少のばらつきは認められるが、微小抵抗領域 $\gamma_L$ が大きくなると、液状化後のせん断剛性は小さくなっている。これは拘束圧98.1kPaにおけるまさ土や豊浦砂の実験<sup>12)</sup>でも同様の傾向を示しており、拘束圧が10kPaと低い場合でも同様の傾向が得られた。

#### 4. まとめ

豊浦砂・相馬硅砂・アルバニー硅砂の3種類の硅砂を用いて、繰返し中空ねじりせん断試験を実施し、液状化時および液状化後の変形挙動を検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 繰返しせん断応力比は拘束圧が低いほど大きくなった。また、液状化強度比 $R_L$ は拘束圧50kPaのときと比較すると、拘束圧10kPaでは約1.1~1.3倍になった。
- (2) 液状化した地盤にせん断応力を加えると、非常に小さな応力で大きなせん断ひずみが発生し、せん断ひずみがある値でせん断応力は急増した。過剰間隙水圧は強度の回復後と共に減少した。強度が回復するのは、ひずみ変形が大きくなると土粒子同士が再び噛み合っ、正のダイレイタンシーが発生したためと考えられる。
- (3) 強度が回復するまでのせん断ひずみの大きさは液状化の激しさによって異なり、液状化安全率 $F_L$ が小さい程強度が回復するまでのせん断ひずみが大きくなった。このような傾向は通常の拘束圧下での既往の研究と同様であっ

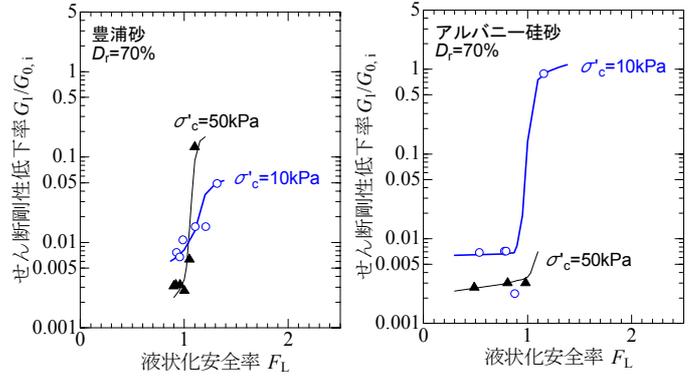


図-8 豊浦砂とアルバニー硅砂の液状化安全率  $F_L$  とせん断剛性低下率  $G_1/G_{0,i}$  の関係

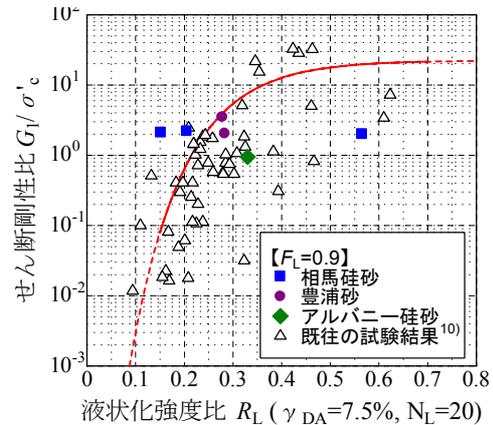
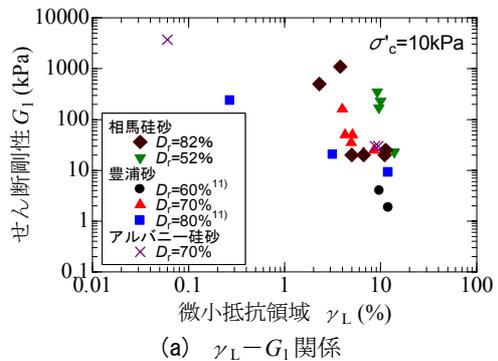
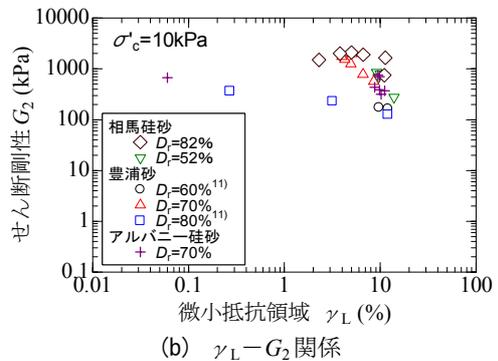


図-9 液状化強度比  $R_L$  とせん断剛性比  $G_1/\sigma'_c$  の関係



(a)  $\gamma_L - G_1$  関係



(b)  $\gamma_L - G_2$  関係

図-10 微小抵抗領域  $\gamma_L$  と液状化後のせん断剛性  $G_1$ 、 $G_2$  の関係

た。

- (4) 液状化後のせん断剛性 $G_1$ ,  $G_2$ は, 液状化安全率 $F_L$ が小さくなるほど, 小さくなった. 微小抵抗領域 $\gamma_L$ は, 液状化安全率 $F_L$ が小さくなるほど大きくなり, 剛性回復までに発生するせん断ひずみが大きくなった.
- (5) 液状化安全率 $F_L$ が1より小さい範囲では拘束圧が高い方が液状化後のせん断剛性 $G_1$ ,  $G_2$ の値は少し大きくなった. 微小抵抗領域 $\gamma_L$ は拘束圧が高い方が大きくなった. このことより, 液状化後のせん断剛性の大きさは拘束圧の大きさに依存するが, 低拘束圧下では供試体の剛性が回復するまでに生じるせん断ひずみは小さくなることがわかった.

**謝辞**：本研究のうち, アルバニー珪砂に関する実験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. 関係各位に深甚の意を表す次第である. また実験の遂行にあたり, 齋藤盛文, 鈴木秀明, 船越あゆみの各氏の協力を得た. ここに感謝の意を表す.

#### 参考文献

- 1) (社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) 望月美登志, 福島伸二：低拘束圧領域における砂の液状化特性, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp. 917-918, 1993.
- 3) 金谷守, 西好一：低拘束圧下における砂の繰返し非排水せん断強度, 第29回土質工学研究発表会発表講演集,

pp. 741-742, 1994.

- 4) 古関潤一, 河上定弘：繰返し中空ねじり試験による低拘束圧下での砂の液状化特性 (その2), 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, III-A78, pp. 156-157, 2000.
- 5) 文部科学省研究開発局, (独) 防災科学技術研究所：大都市大震災軽減化特別プロジェクトII 震動台活用による建造物の耐震性向上研究, 平成18年度成果報告書, pp. 465-546, 2007.
- 6) (財) 沿岸開発技術研究センター：埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), pp. 114~136, 1997.
- 7) 天谷宗徳, 佐藤剛司, 古関潤一, 真栄城徳泰：豊浦砂の低拘束圧下における非排水繰返しせん断特性, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集, III-A65, pp. 130-131, 1997.
- 8) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 71-89, 1999.
- 9) 安田進, 小林利雄, 寺内哲也：液状化したまさ土の変形特性, 土木学会第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 469-472, 1997.
- 10) 安田進, 稲垣太浩, 長尾和之, 山田真一, 石川敬祐：液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性, 第40回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 525-526, 2005.
- 11) 安田進, 小宮真悟, 深谷成司：低拘束圧下における液状化後の変形特性に与える細粒分の影響, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 417-418, 2004.
- 12) 安田進, Ayfer Erken, 寺内哲也, 森本弘光：液状化後の変形特性に与える粒度の影響, 第10回日本地震工学シンポジウム講演論文集, No. D1-10, pp. 1355-1358, 1998.

## LIQUEFACTION AND POST-LIQUEFACTION DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SOME SILICA SANDS UNDER LOW CONFINING PRESSURE

Tomohiro TANAKA, Susumu YASUDA and Kenji NAOI

When numerical analysis was conducted to evaluate seismic deformation in performance-based design, it is required to confirm the accuracy and applicability of method for analysis by using model test results. In model tests at 1G gravity field, since the height of model is restricted, confining pressure will become smaller than the real ground. Then, to study effect of confining pressure on the liquefaction and post-liquefaction deformation characteristics of silica sand, cyclic torsional shear tests under low confining pressure were conducted with several soil densities and severity of liquefaction.

Test results show that liquefaction strength under low confining pressure is larger than the one by usually confining pressure. And the shear modulus during monotonic loading decreased heavily due to liquefaction.