

### 3.3.2 大型土槽実験の地盤物性の試験

## 目 次

### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成17年度業務目的

### (2) 平成17年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
  - 1) 実験装置
  - 2) 実験条件および方法
- (d) 結論ならびに今後の課題
  - 1) 液状化強度特性
  - 2) 液状化後の変形特性
  - 3) その他の特性
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

### (3) 平成18年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目：大型土槽実験の地盤物性の試験

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京電機大学理工学部建設環境工学科	教授	安田 進	yasda@g.dendai.ac.jp
同 上	学生	斉藤盛文	
同 上	学生	鈴木聡司	
同 上	学生	小見允久	
同 上	学生	清水優匡	
同 上	学生	柳沢昭彦	
同 上	学生	鈴木幹二	

(c) 業務の目的

E ディフェンスで平成 17 年度から実施されている地盤・基礎構造物の大型土槽実験では、試料としてアルバニー硅砂が用いられている。この実験の結果の評価を行う際、試料土であるアルバニー硅砂の動的変形特性(地盤剛性と減衰)、液状化特性、液状化後の変形特性、液状化後の体積圧縮特性等の特性を知っておく必要がある。このような土質特性は試料の密度や排水条件、拘束圧などによって大きく変化する。また、室内試験装置によっても少し異なることもある。

そこで、実験が行われる密度や排水条件に対し、繰返しねじりせん断試験装置、繰返し三軸試験装置を用いて動的変形特性、液状化強度特性、液状化後の変形特性、液状化後の体積圧縮特性などを求めることとする。この際、長さ 16m、幅 4m、高さ 5m の直方体剛体土槽を用いる側方流動の実大実験では液状化地盤(地盤高さ：4.5m)の地下水位が GL-0.5m と計画されており、その地下水位以下の液状化層の最低有効上載圧を考慮して 10kPa といった低拘束圧から 50kPa 程度の拘束圧まで実験を行うこととする。低拘束圧では実験装置や方法に特別な考慮が必要であり、特殊な繰返しねじりせん断試験装置を用いて実験を行って特性を求める。

(d) 2 ヶ年の年次実施計画(過去年度は、実施業務の要約)

1) 平成 17 年度：

E ディフェンスの大型土槽実験で予定されている 70% の相対密度に関し、繰返しねじりせん断試験や繰返し三軸試験を行って、液状化強度特性、液状化後の変形特性、体積圧縮特性などを求める。そして、これらの特性に拘束圧や試験装置の違いなどが与える影響を調べる。また、これらの室内実験結果と中型振動台を用いた実験の結果の比較も行う。

2) 平成 18 年度：

平成 17 年度と同じ密度で繰返しねじりせん断試験により動的変形特性を求める。ま

た、平成 17 年度の大型土槽実験の結果や平成 18 年度の実大実験の計画を受けて、繰返しねじりせん断試験装置により液状化特性や液状化後の変形特性などの追加実験を行う。そして、実大実験結果の評価に役立てるとともに、数値シミュレーションの解析定数の設定データとする。

#### (e) 平成 17 年度業務目的

低拘束圧用の繰返しねじりせん断試置を用いて、大型土槽実験用に用いる予定のアルバニー砂について液状化特性、液状化後の変形特性などを求める実験を行う。この際、相対密度は実験を行う予定の 70%とし、拘束圧は 10kPa から 100kPa の間の数段階で実験を行う。また、通常の拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置や繰返し三軸試験装置を用いた実験も行い、装置の違いが液状化強度特性に与える影響を調べる。さらに、中型振動台による液状化の模型実験を行って、液状化強度に関し繰返しねじりせん断試験結果と比較を行う。

### (2) 平成 17 年度の成果

#### (a) 業務の要約

繰返しねじりせん断試験装置と繰返し三軸試験装置を用いて、大型土槽実験用に用いたアルバニー砂の液状化特性、液状化後の変形特性、液状化後の体積圧縮特性を求める実験を行った。その結果、アルバニー砂の液状化強度比や液状化後の変形特性が明らかになり、また、これらの特性に拘束圧や実験装置の違いが与える影響が明らかになった。次に、中型振動台による模型地盤の実験も行い、液状化発生限界加速度などを求めた。そして中型振動台から得られた液状化発生加速度から液状化発生せん断力を推定し、繰返しねじりせん断試験で得られた液状化強度比と比較した。

#### (b) 業務の実施方法

##### 1) 実験装置

###### a) 通常の拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置

通常の拘束圧用の繰返しねじりせん断装置を写真 1 に示す。供試体は外形 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の円筒状である。この供試体の上部から繰返しねじりせん断力を与えるようになっている。この繰返しねじり力は、空気圧式のペロフラムシリンダーによる水平方向の押し引き力を、ラック・ピニオンにより回転運動に変えて加えるようになっている。また、繰返し載荷で液状化した供試体に対して、その後単調載荷を行ってせん断応力～せん断ひずみ関係を求めるために、モータによる水平力も加え得ようになっている。

なお、本装置では通常 50kPa 程度以上の拘束圧で実験を行っている。後述するように本装置を用いた液状化試験では、一般に行われている繰返しせん断力振幅一定の試験を行った。この実験データの例を図 1 に示す。

###### b) 低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置

低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置を写真 2、3 に示す。



写真 1 通常の拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置



写真 2 低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置のセル



写真 3 低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置の载荷部

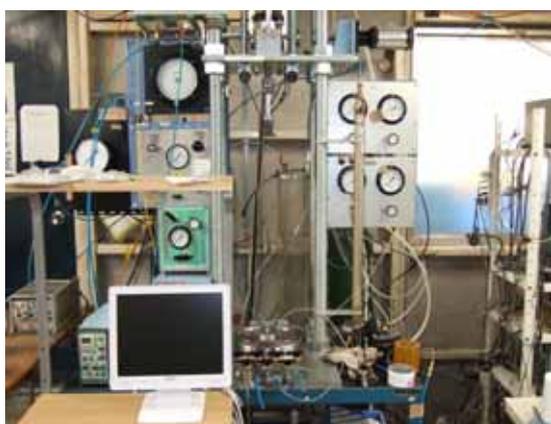


写真 4 载荷部を改良した低拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置



写真 5 繰返し三軸試験装置

供試体の寸法は通常の拘束圧用試験装置と同様で、外形 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の円筒状である。また、上部から供試体へねじりせん断力を与えることも、通常の拘束圧の装置と同じである。ただし、低拘束圧の場合には供試体のせん断抵抗も小さくなってゴムスリーブの張力の影響を無視できないことや、低い圧力をコントロールせねばならないため、以下の点に特別な配慮がされている。

i) 円筒形の供試体を用いたねじりせん断試験では、供試体の外側と内側にゴムスリーブを設ける必要がある。そして、供試体と同時にこのゴムスリーブもねじられるためその張力も発生し、供試体上部に設置したトルク計には、供試体のせん断抵抗とゴムスリーブの張力を合わせたトルクが計測されることになる。供試体と与える拘束圧が大きい時には、供試体のせん断抵抗も大きいため、このゴムスリーブの張力の影響は無視できるが、10kPa といった低拘束圧になり、しかも液状化して大きな回転角が発生する場合にはこの張力が大きく影響してくる。このため、トルク計で計測された値からゴムスリーブの張力を差し引いて供試体に加わったせん断応力を計算することはもとより、一般に行われるせん断応力振幅一定の繰返しせん断試験を行う場合には、繰返し载荷中にゴムスリーブ張力を常に補正しながら载荷する必要がある。

このため、本装置では、まず、ゴムスリーブの張力を補正しながら繰返し载荷を行い易いように、载荷装置としてメガトルクモータを用いた。この場合、メガトルクモータは回転速度一定の制御とした。一般に行われている繰返しせん断力振幅一定の液状化試験を行った例を図 2 に示す。液状化試験では繰返し载荷とともにせん断ひずみ振幅は徐々に大きくなっていき、過剰間隙水圧比が 60% 程度になった後から急速に振幅が大きくなる。そこで、回転速度一定の試験を行うと、1 サイクルに要す時間が次第に長くなっていく。そのため横軸に時間をとると、図 2 に示すように一定の周期にはならない。また、せん断力の方向を変転するのをなめらかにに行いにくいいため、三角波の繰返しせん断力を与えざるを得なかった。

なお、ゴムスリーブの張力を考慮せずに一定の振幅のトルクを与えた場合、試験後にゴムスリーブの張力を差し引いて実際に供試体に加わったせん断応力を計算してみたのが図 3 である。図 2 と比較すると、液状化が発生し始めてひずみ振幅が大きくなったあたりから、供試体に加わるせん断応力が小さくなっていっているのがわかる。

さて、図 2 のような载荷方法で行うと、通常行っている液状化試験より 10 倍程度も長い時間を要した。その結果、後述するように液状化強度が小さくなったのではないかと思われた。そこで、この点を明らかにするために、特別な载荷装置を平成 17 年度の末に作製した。これは、写真 1 と同様の空気圧式ペロフラムシリンダーを用い、発生するトルクをフィードバックしてコントロールするとともに、さらに、载荷途中でゴムスリーブの張力を差し引きできるようにコンピュータで制御するようにしたものである。この装置を写真 3 に示す。この装置を用いて行った実験の例を図 4 に示す。これに示すように、ゴム張力を考慮しても振幅一定で正弦波の繰返しせん断応力が得られている。

ii) 低拘束圧の場合、レギュレータで拘束圧を制御するとその精度が問題となる。そこで、水頭差により精度良く拘束圧を加えるようにした。

iii) 供試体キャップを軽くするなど、セル全体で低拘束圧を意識した軽量化、高精度化をした。

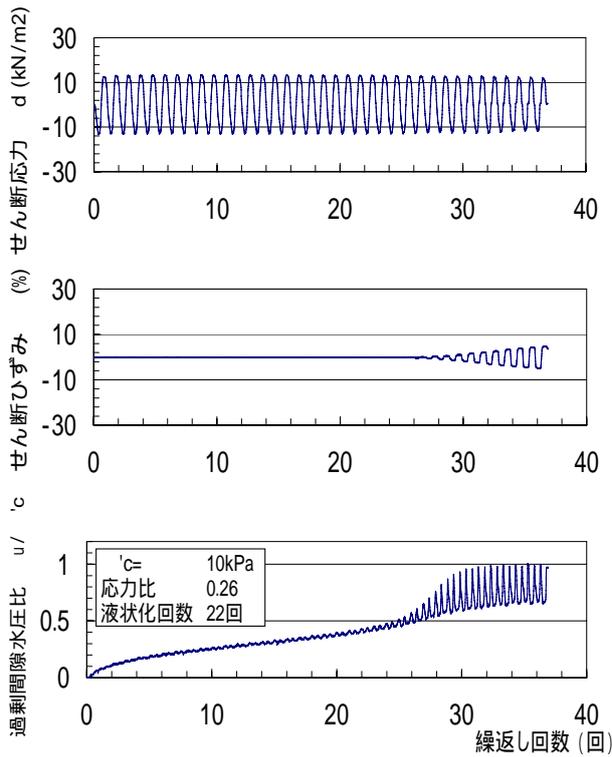


図 1 通常拘束圧繰返しねじりせん断試験の生データ例

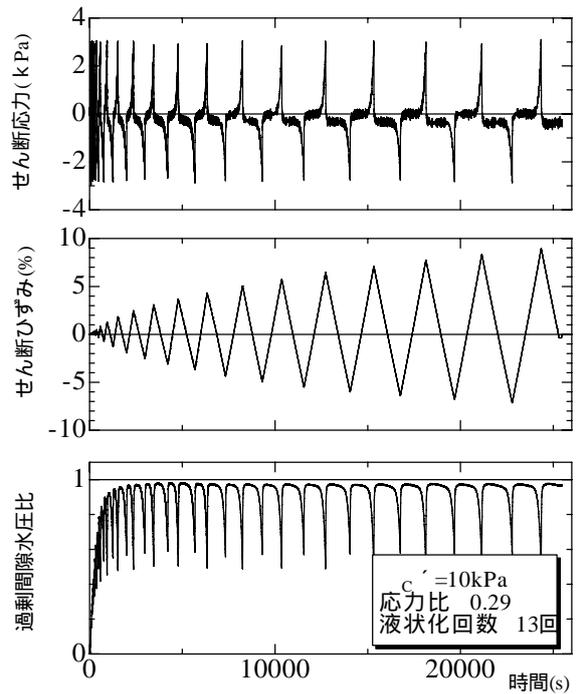


図 2 低拘束圧繰返しねじりせん断試験の生データ例

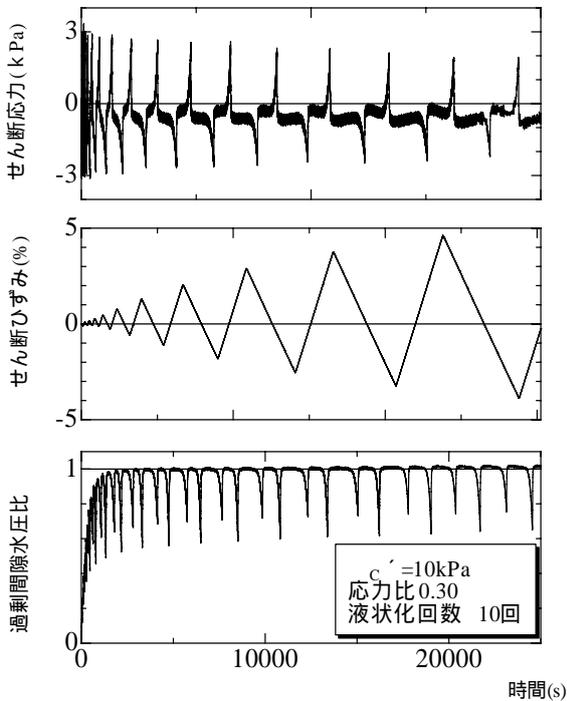


図 3 低拘束圧繰返しねじりせん断試験でゴムスリーブ張力を考慮せず載荷した生データ例

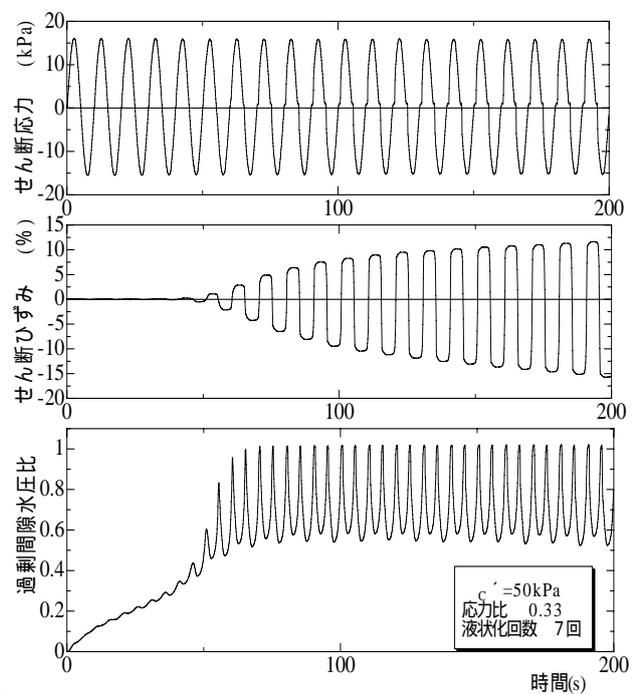


図 4 低拘束圧用繰返し試験装置で載荷部を改良して行った試験の生データ例

c) 通常の拘束圧用の繰返し三軸試験装置

通常の拘束圧用の繰返し三軸試験装置を写真 5 に示す。供試体は直径 5cm、高さ 10cm の円柱状である。この供試体の上部から繰返し軸応力を加えた。その軸応力は空気圧式ベロフレームシリンダーによって加えた。

なお、本試験装置では通常 50kPa 程度以上の拘束圧で実験を行っている。

d) 中型振動台とせん断土槽

使用した中型振動台を写真 6 に示す。テーブルの寸法は 2m×3m で水平二方向に加振用できる。今回はこの上に幅 1.2m、奥行き 0.8m、高さ 1.0m のせん断土槽を載せて実験を行った。このせん断土槽は 15 個の矩形の枠をボールベアリングを介して重ねて作製してある。



写真 6 中型振動台とせん断土槽

2) 実験条件および方法

a) 用いた試料の物理特性

本研究では E ディフェンスの大型土槽実験で使用されるアルバニー硅砂#48 を用いた。また、豊浦砂なども一部用いた。実験に先立ち、このアルバニー硅砂の土粒子の密度試験、最小・最大密度試験、粒度試験を行った。その結果を表 1 と図 5 に示す。

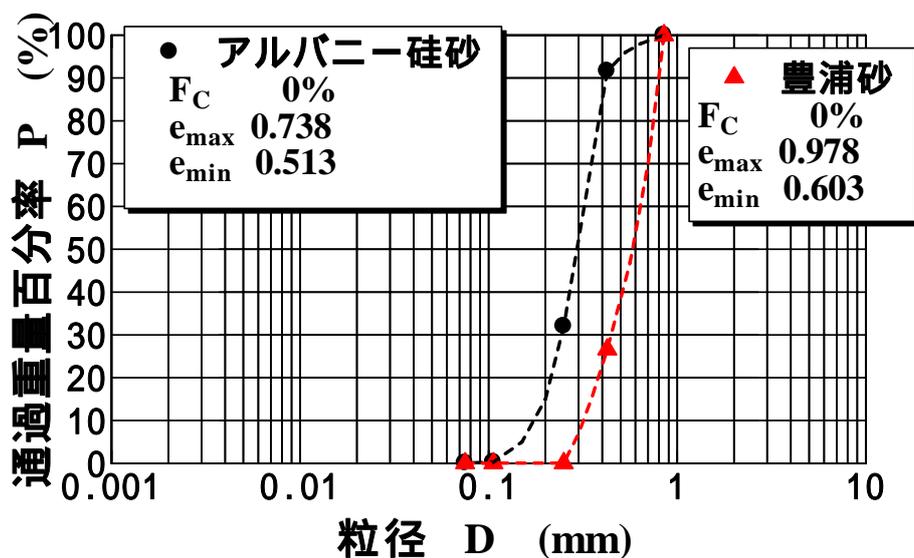


図 5 アルバニー硅砂と豊浦砂の粒径加積曲線

表 1 用いたアルバニー-硅砂の土粒子密度試験、最小・最大密度試験結果

試験名称	複数回行った実験値	平均値
土粒子の密度試験	$s : 2.628, 2.633, 2.630 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$s = 2.630 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
最小密度試験	$d_{\min} : 1.544, 1.518, 1.511, 1.517, 1.512 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$d_{\min} = 1.513 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ $e_{\max} = 0.738$
最大密度試験	$d_{\max} : 1.747, 1.760, 1.742, 1.723, 1.719 \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$d_{\max} = 1.738 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ $e_{\min} = 0.513$

b) 液状化試験

液状化の試験は一般に行われているように、繰返しせん断応力振幅一定で、液状化が発生するまで繰返し载荷を行う方法で行った。試験装置は前述したように 3 種類のものを用いた。そして、低拘束圧用繰返し载荷装置では载荷を回転速度一定（せん断ひずみ速度で  $0.716\%/min$ ）で行ったものを基本とし、さらに正弦波で試験するように改良した装置でも試験を行った。この試験と通常拘束圧の繰返しねじりせん断試験・繰返し三軸試験は  $0.1\text{Hz}$  の正弦波で繰返し载荷を行った。これらの試験条件を表 2 に示す。大型土槽実験ではアルバニー-硅砂を用いて 70% の相対密度で実験が行われることになったため、この密度でこれらの試験を行った。

液状化発生時点の判断は、繰返しねじりせん断試験ではせん断ひずみ両振幅が  $7.5\%$  ( $D_A = 7.5\%$ )、繰返し三軸試験では軸ひずみ両振幅が  $5\%$  ( $D_A = 5\%$ ) とした。また、液状化強度比  $R_L$ （非排水繰返し強度比）としては、20 波の繰返しでこれらのひずみに達するせん断応力比とした。これらの値は繰返しねじりせん断試験では  $R_L(N_L=20, D_A=7.5\%)$ 、繰返し三軸試験では  $R_L(N_L=20, D_A=5\%)$  と表すこととする。

なお、繰返し三軸試験では 20 波で载荷を止め、その後排水して体積圧縮量を求める試験も行った。この場合、c) で後述するように繰返しせん断力の振幅を変えて、液状化に対する安全率（液状化に対する抵抗率） $R_L$  を変える方法をとった。

表 2 液状化試験の条件

試験装置	拘束圧 (kPa)	繰返し载荷
低拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置（回転速度一定）	10, 20, 50	回転速度一定の三角波（せん断ひずみ速度で $0.716\%/min$ ）
通常の拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置	50, 100	正弦波（ $0.1\text{Hz}$ ）
通常の拘束圧用繰返し三軸試験	50, 100	正弦波（ $0.1\text{Hz}$ ）
低拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置（正弦波で载荷）	50	正弦波（ $0.1\text{Hz}$ ）

供試体の目標相対密度：70%

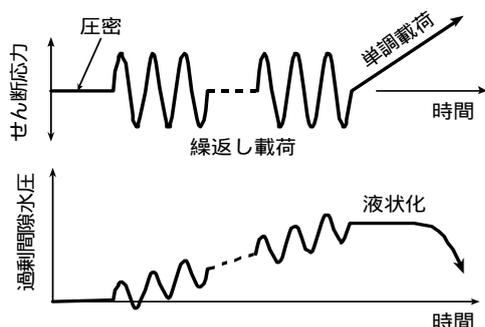
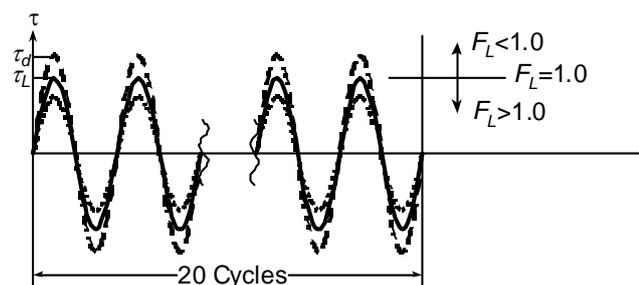


図 6 液状化後の変形特性を求める  
載荷方法

方法 2：繰返し回数  $N$  を 20 波とする



$$F_L = \tau_L / \tau_d$$

$\tau_L$ : 20 回の繰返しで液状化するせん断応力振幅  
 $\tau_d$ : せん断応力振幅

図 7 液状化に対する安全率（液状化に対する抵抗率） $F_L$  の計算方法

c) 液状化後の変形特性を求める試験

繰返し載荷を受けた土の液状化や軟化にともなうせん断剛性の低下を調べるために、安田らは、繰返し載荷後に単調載荷を行い、その時のせん断応力～せん断ひずみ関係を求める方法をとっている<sup>1)</sup>。そしてその関係を用いて静的有限要素法で液状化に伴う地盤や構造物の変形を簡易に求める方法を提案している。そこで、本研究でも同様の載荷方法をとって試験を行った。

この方法を図 6 と 7 に示す。20 波ほど繰返し載荷を行ったあと非排水状態を保ったまま、単調載荷を行った。そして、液状化強度比  $R_L$  を載荷した繰返しせん断力比で除して、液状化に対する安全率（液状化に対する抵抗率） $F_L$  と定義した。

この試験を行った条件を表 3 に示す。なお、このような試験は繰返し三軸試験では行い難いので、繰返しねじりせん断試験のみ行っている。

表 3 液状化後の変形特性を求める試験の条件

試験装置	拘束圧 (kPa)
低拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置 (回転速度一定)	10, 20, 50
通常の拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置	50, 100

供試体の目標相対密度：70%

d) 中型振動台とせん断土槽による実験

せん断土槽を用いた模型地盤の実験では、試料として豊浦砂を用いた。そして相対密度が 50%、70%、90% のもとで 2Hz と 5Hz で加振し、加振加速度と液状化した回数関係を求めた。

(c) 業務の成果

1) 液状化強度特性

a) 液状化強度に与える拘束圧の影響

低拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置(回転速度一定)を用いて液状化試験を行った生データ例は図2に示したが、これに見られるように今回の供試体は相対密度が70%と中密なため、過剰間隙水圧比が60%程度以上になっても一気にせん断ひずみ振幅が急増するのではなく、徐々に大きくなる結果となった。そこで、繰返しせん断応力比  $R = \sigma'_v / \sigma'_c$  とせん断ひずみ両振幅  $D_A$  が1.5%、3.0%、7.5%となる回数の関係(液状化強度曲線)をとって示すと図8~10となった。これらの図に見られるように、中密な供試体のために1.5%~7.5%のせん断ひずみが発生する回数は数回異なる結果となった。

図8~10のうち、せん断両ひずみ振幅が7.5%の関係だけを取り出して、拘束圧の影響を見るために重ねて示すと図11となった。この図に見られるように、拘束圧が50kPa、

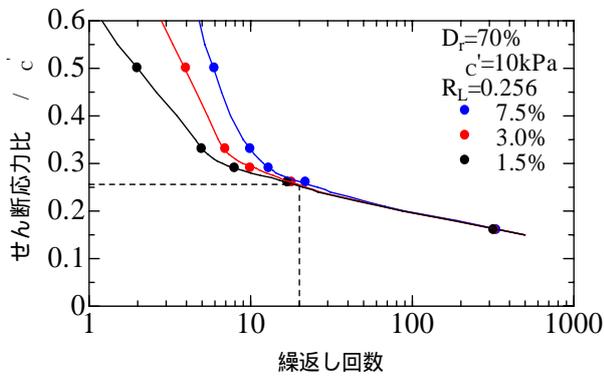


図8 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験(回転速度一定)で求めた液状化強度曲線( $c' = 10\text{kPa}$ )

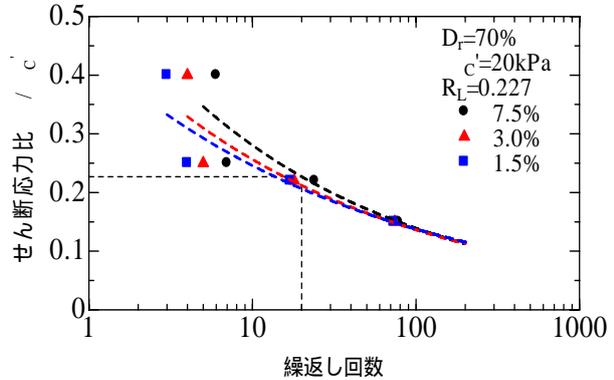


図9 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験(回転速度一定)で求めた液状化強度曲線( $c' = 20\text{kPa}$ )

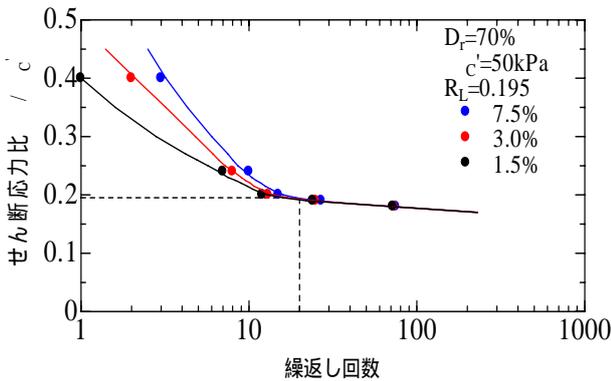


図10 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験(回転速度一定)で求めた液状化強度曲線( $c' = 50\text{kPa}$ )

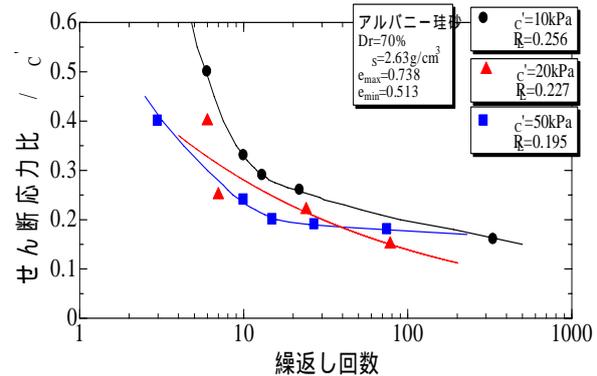


図11 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験(回転速度一定)で求めた液状化強度曲線に与える拘束圧の影響

20kPa、10kPaと小さくなるとともに液状化強度比は少し大きくなった。20波で液状化する液状化強度比  $R_L(N_L=20, DA=7.5\%)$  を読み取ると、10、20、50kPa それぞれに対して0.256、0.227、0.195となった。

b) 試験装置による液状化強度曲線の違い

次に、通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験と通常拘束圧用繰返し三軸試験で行った、50kPa、100kPaの拘束圧のもとでの液状化強度曲線を示すと、図12~15となる。これらを図10と比較してみると、ひずみ振幅の大きさによる曲線の違いの傾向は同程度と言える。つまり、試験装置の違いはあまり見られない。

ところが、50kPaのもとでの液状化強度比  $R_L(N_L=20, DA=7.5\%)$ 、 $R_L(N_L=20, DA=5\%)$

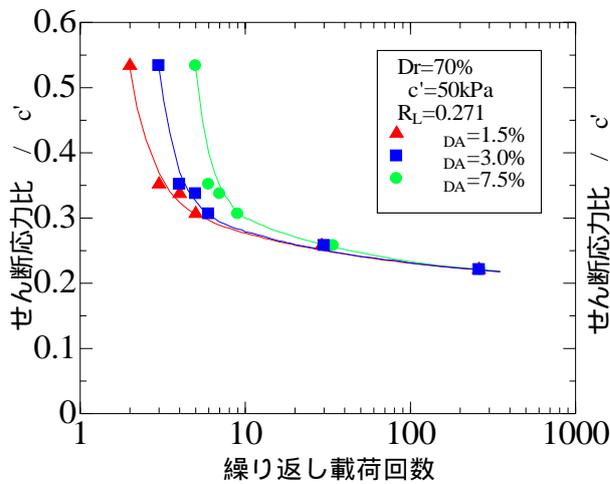


図12 通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験で求めた液状化強度曲線 ( $c' = 50\text{kPa}$ )

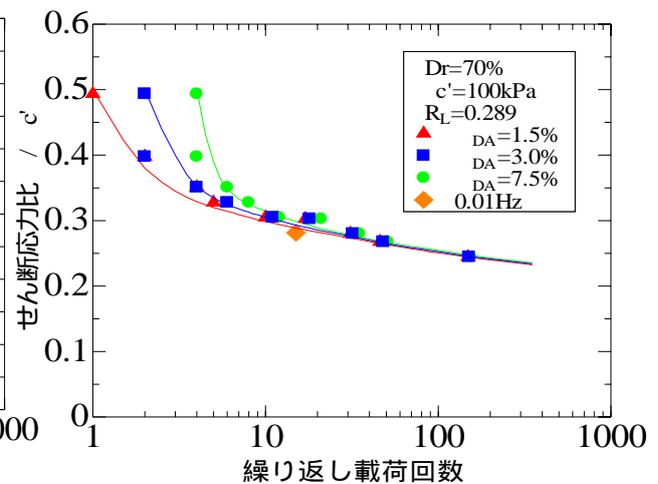


図13 通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験で求めた液状化強度曲線 ( $c' = 100\text{kPa}$ )

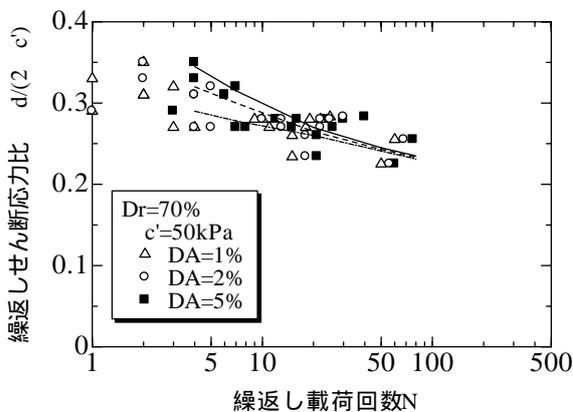


図14 通常拘束圧用繰返し三軸試験で求めた液状化強度曲線 ( $c' = 50\text{kPa}$ )

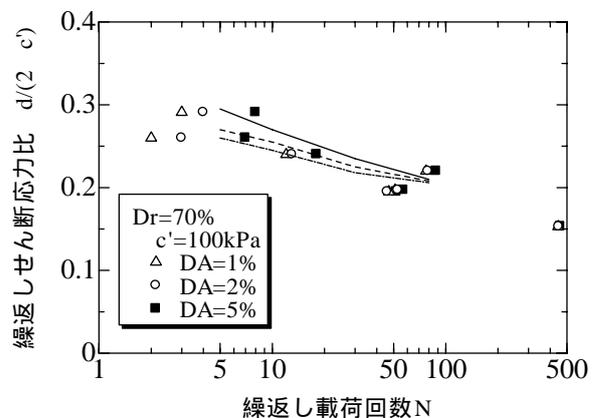


図15 通常拘束圧用繰返し三軸試験で求めた液状化強度曲線 ( $c' = 100\text{kPa}$ )

を比べてみると、かなり違った値となった。低拘束圧用繰返しねじりせん断試験（回転速度一定）での液状化強度比は 0.195 だったのに対し、通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験では 0.271、通常拘束圧用繰返し三軸試験では 0.270 となった。また、100kPa の拘束圧のもとでの液状化強度比も通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験で 0.289、通常拘束圧用繰返し三軸試験で 0.250 となった。繰返しねじりせん断試験と繰返し三軸試験では土粒子の堆積方向とせん断方向が異なるなど、多少本質的に異なることがあるので、液状化強度比が少し異なることはあってもおかしくないが、同じ繰返しねじりせん断試験どうして、低拘束圧用と通常拘束圧用で液状化強度が異なるのはあまり考えにくい。

そこで、両者がこととなった原因を詳細に検討したところ、繰返し载荷方法の違いに主な原因があるのではないかと考えられた。通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験装置ではゴム張力の補正を考えなくて良いので、図 1 に示したように、0.1Hz の正弦波の繰返しせん断応力を与えている。これに対し、前述したように、低拘束圧用ねじりせん断試験ではゴム張力の補正を考慮できるように、回転速度を一定にして遅い速度で载荷している。その結果、図 2 に見られるように、波形は三角波や尖った波となり、また、ひずみ振幅が大きくなるにつれて 1 サイクルに要する時間がどんどん長くなった。そして、全载荷に 8000 秒といった大変長い時間を要している。これは通常拘束圧用の繰返しねじりせん断試験の 10~20 倍程度も長い時間をかけて载荷していることになる。このため、供試体に加わったエネルギーは大きくなり、結果として同じ振幅の繰返しせん断応力を与えても液状化し易くなったのではないかと考えられた。これに伴って液状化強度比も小さくなったのではないかと考えられた。

そこで、この考えの妥当性を確かめるために、通常拘束圧用の繰返しねじりせん断試験装置を用いて、繰返し载荷速度を 1/10 に落とし、0.01Hz で試験を行ってみたのが図 13 中の である。図ではあまり違いははっきりとはしないが、そしてこの用に 1/10 の载荷速度にすると、約半分の回数で液状化が発生した。

このような低拘束圧用繰返しねじりせん断試験の载荷方法の特徴が明らかになったので、载荷装置を改良することとした。そして 1)b) や写真 4 で前述したようにコンピュータで制御するようにした。これが完成したのが平成 17 年度の末近くであったため、とり急ぎ表 2 に示したように 50kPa だけの拘束圧で液状化試験を行ってみた。試験結果の生データ例は図 4 に示した通りであり、これから得られた液状化強度曲線を示すと図 16 のようになる。これによると液状化強度比は 0.3 程

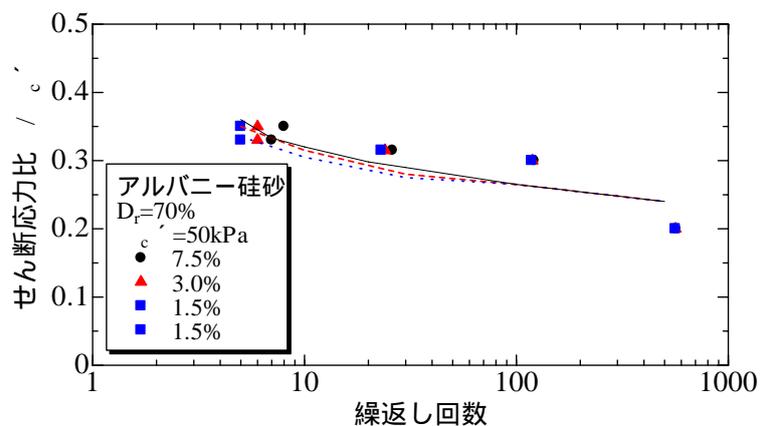


図 16 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験(正弦波で载荷)で求めた液状化強度曲線( $\sigma'_{c0} = 50\text{kPa}$ 、暫定値)

度と確かに高くなった。ただし、通常の拘束圧用繰返しねじりせん断試験から得られた値よりも多少大きくなっている。この試験は限られた時間で行ったため、データが少なくまた十分な吟味は行えていない。従って、図 16 はとりあえず載荷速度の影響が明らかになったと見ておいて、液状化強度に関しては暫定値と見ておきたい。今後追加で試験を多く行ってから液状化強度曲線を確定したいと考えている。

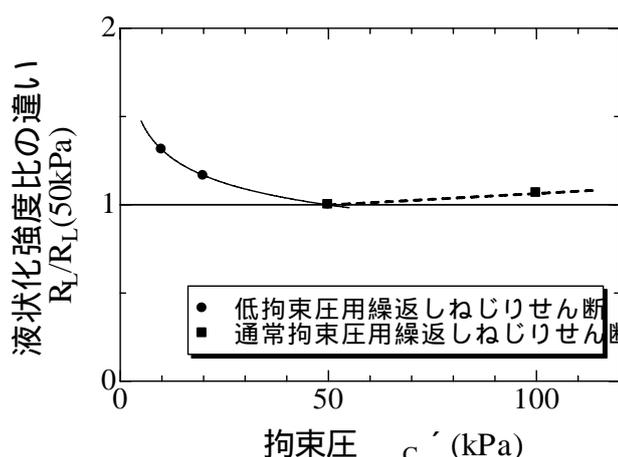


図 17 50kPa の拘束圧を基準にした各試験における液状化強度に与える拘束圧の影響

さて、b)で見たように低拘束圧領域では拘束圧が小さくなると  $R_L$  は大きくなった。そこで、50kPa での  $R_L$  を基準とした 2 種類の試験結果を正規化して示すと図 17 となった。これにみられるように通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験で得られた 100 ~ 50kPa での液状化強度比は、拘束圧にあまり影響されなかった。これに対し、低拘束圧用繰返しねじりせん断試験で得られた 50 ~ 10kPa での液状化強度比は拘束圧が小さくなるにつれて大きくなる結果となった。

#### c) 他の試料との液状化強度特性の違い

今回用いたアルバニー硅砂と他の砂液状化強度を比較するため、通常拘束圧用ねじりせん断試験装置で得られた液状化強度比と相対密度の関係を示すと、図 18 となる。ここでは、豊浦砂と 2005 年福岡県西方沖地震の際に液状化が発生した海の中道海浜公園《光と風の広場》で採取した砂の試験結果を比較している。アルバニー硅砂の試験結果は 70% の相対密度の 1 点しかないが、明らかに豊浦砂や海浜公園の砂に比べて同じ相対密度でも液状化強度が大きくなっている。この原因としては土粒子の形状がある。写真 7 にアルバニー硅砂と豊浦砂、海浜公園の砂の土粒子形状を比較して示す。明らかにアルバニー硅砂の方が丸い形状をしている。これは最大・最小間隙比の値にも影響していると思われる。表 4 に両者の値を比較して示すが、同じような粒径の細粒分を含まない均一な砂であっても、アルバニー硅砂の方が最大・最小密度とも 0.1 ~ 0.2 小さい。一般に粒径が丸いと良く詰まるため、このように最大・最小間隙比が豊浦砂に比べて小さいものと考えられる。そして、このために同じ相対密度 70% といっても、アルバニー硅砂の方が間隙比は小さいため、液状化強度比も大きくなったのではないかと考えられる。

表 4 最大・最小密度の比較

		豊浦砂	アルバニー硅砂	海浜公園
土粒子の密度	$s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	2.63	2.644
最大間隙比	$e_{max}$	0.978	0.738	1.664
最小間隙比	$e_{min}$	0.603	0.513	1.302
細粒分含有率	$F_c$ (%)	0	0	7

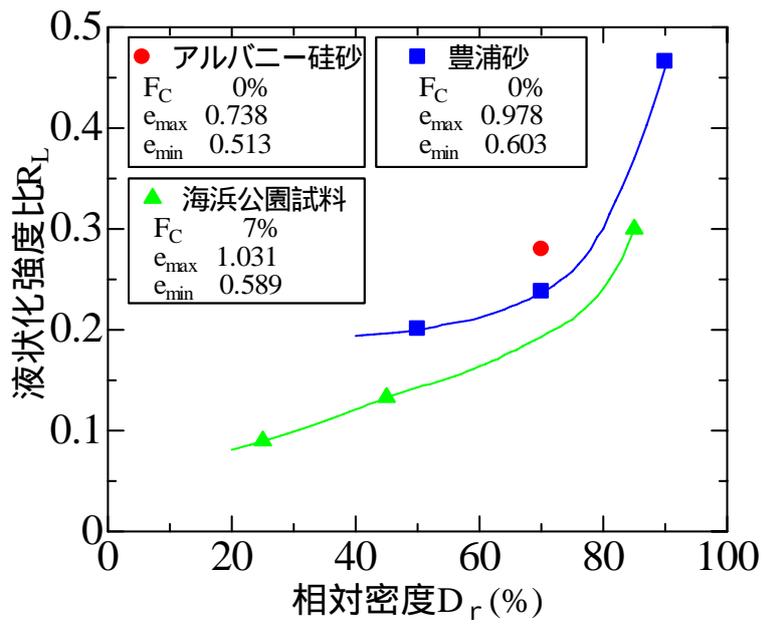
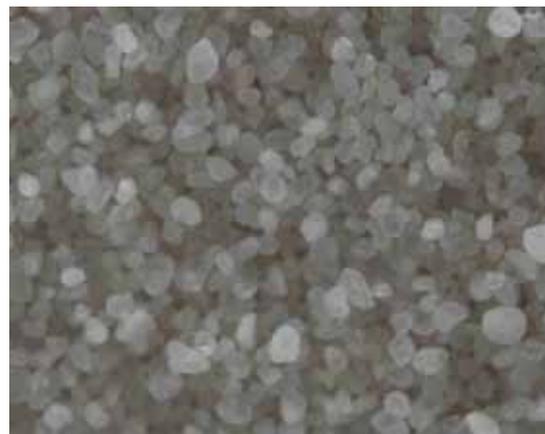


図 18 三種類の砂における相対密度と液状化強度比の関係の比較



(a)アルバニー-珪砂



(b)豊浦砂

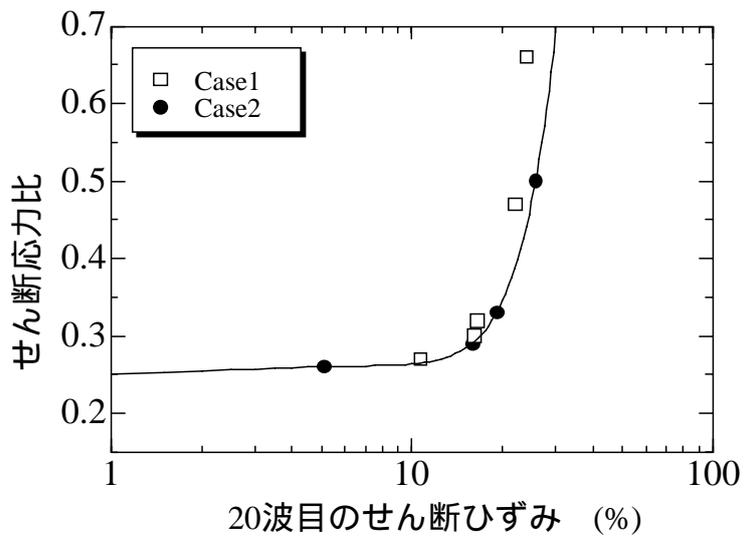


(c)海浜公園の砂

写真 7 アルバニー-珪砂と豊浦砂、海浜公園の砂の土粒子形状の比較

d) ゴムスリーブの張力を補正しながら載荷した効果について

図 3 にも示したように、低拘束圧用繰返しねじりせん断試験では、ゴムスリーブの張力の補正せずに繰返しねじりせん断力振幅を一定にした載荷も行った。図 3 はその試験結果からゴム張力の補正を差し引いてせん断応力を計算したものである。このように載荷時にゴム張力の補正を考慮しなかった場合は、液状化が発生し始める頃までは繰返しせん断応力振幅は余り下がってはきていないが、その後、ひずみ振幅の急増とともにせん断応力振



Case1: ゴムスリーブの張力を補正しないで載荷した実験  
Case2: ゴムスリーブの張力を補正しながら載荷した実験

図 19 ゴムスリーブの張力を補正しながら載荷した効果

幅もどんどん下がってきている。従って、ゴムスリーブの張力を補正しないで載荷しても、液状化時点を 7.5%の両せん断ひずみ振幅に達した時点程度と判断している場合には、液状化強度曲線には余り差は生じなかった。ただし、それより大きなひずみになると結果に差が出てきた。例えば、図 19 は 10kPa の拘束圧で試験を行った供試体で、繰返しせん断応力比と 20 波目において生じていたせん断ひずみの関係を示している。応力比が大きくて 20 波前に液状化した供試体ではその後のひずみが大きく生じているため、このような関係にすると、ゴムスリーブの張力を補正しないで載荷した場合は、補正した場合に比べて同じせん断応力比でも 20 波で生じるひずみは小さくなった。

2) 液状化後の変形特性

a) 液状化後のせん断ひずみ～せん断応力、間隙水圧関係

液状化後のせん断ひずみ～せん断応力、間隙水圧関係について、10～50kPa の拘束圧のもとで低拘束圧用ねじりせん断試験（回転速度一定）で行った試験結果を図 20～22 に示す。また、50・100kPa の拘束圧のもとで通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験で行った試験結果を図 23、24 に示す。なお、図中 static と示した曲線は繰返し載荷を行わず単調載荷だけ行った供試体の試験結果である。

これらの図に見られるように、拘束圧が 10kPa から 100kPa と異なっても液状化した ( $F_L < 1$ ) 供試体では下に凸な応力～ひずみ関係となった。また、 $F_L$  が小さくなるにつれて小さなせん断応力で大きなひずみが発生する傾向となった。

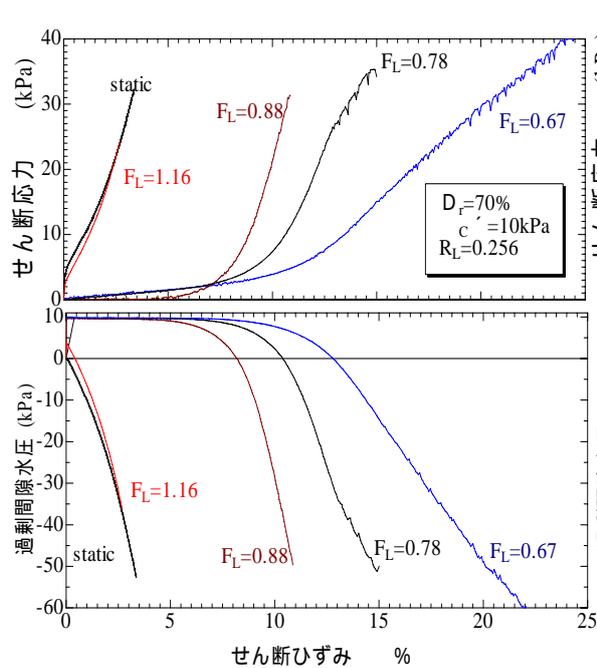


図 20 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験（回転速度一定）による繰返し載荷後の単調載荷時のせん断ひずみ～せん断応力・間隙水圧関係（ $c' = 10\text{kPa}$ ）

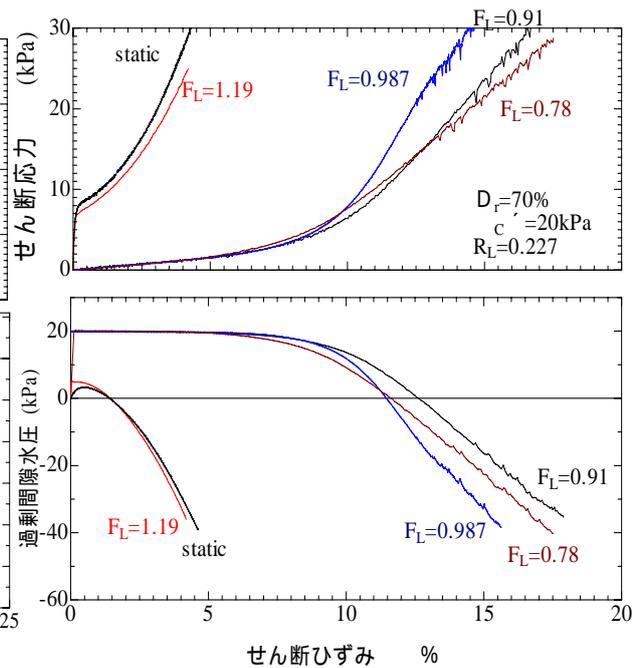


図 21 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験（回転速度一定）による繰返し載荷後の単調載荷時のせん断ひずみ～せん断応力・間隙水圧関係（ $c' = 20\text{kPa}$ ）

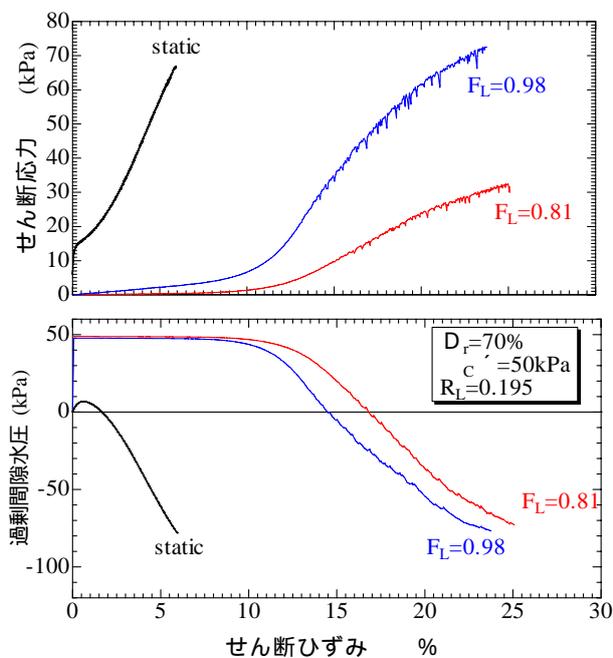


図 22 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験（回転速度一定）による繰返し載荷後の単調載荷時のせん断ひずみ～せん断応力・間隙水圧関係（ $c' = 50\text{kPa}$ ）

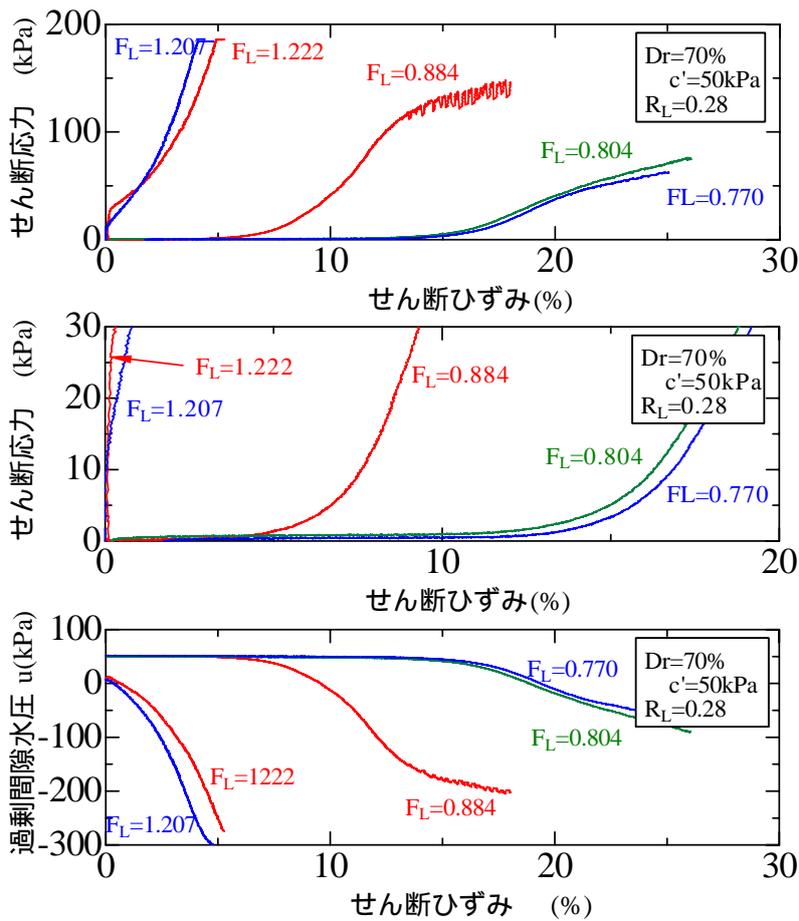


図 23 通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験による繰返し載荷後の単調載荷時のせん断ひずみ～せん断応力・間隙水圧関係 ( $c' = 50\text{kPa}$ )

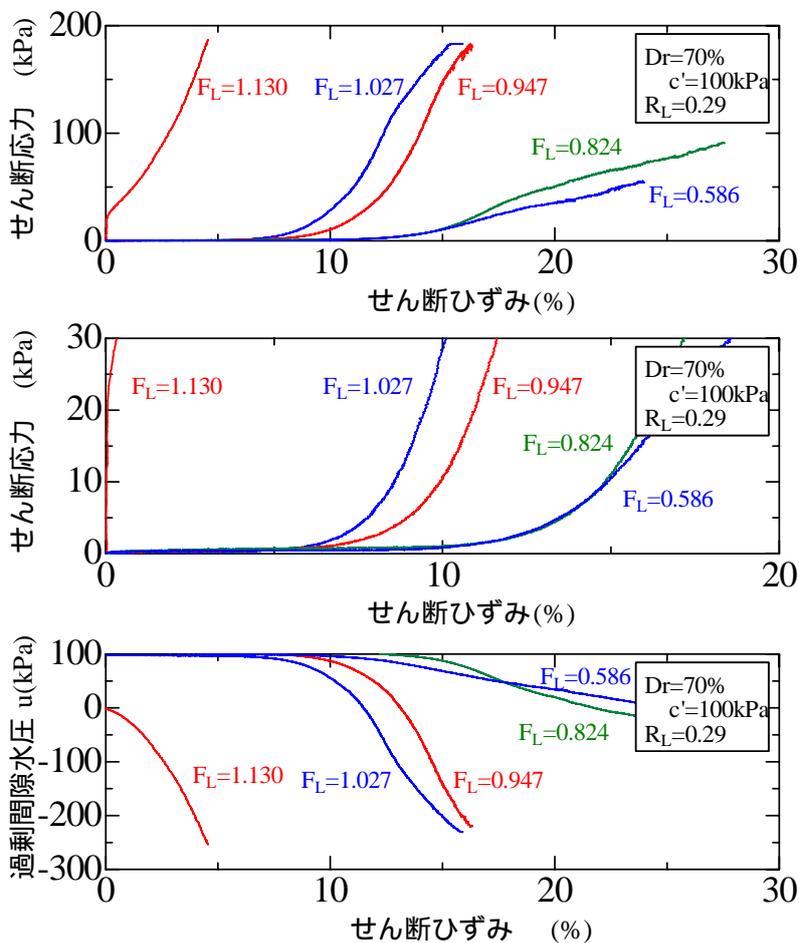


図 24 通常拘束圧用繰返しねじりせん断試験による繰返し載荷後の単調載荷時のせん断ひずみ～せん断応力・間隙水圧関係 ( $c' = 100\text{kPa}$ )

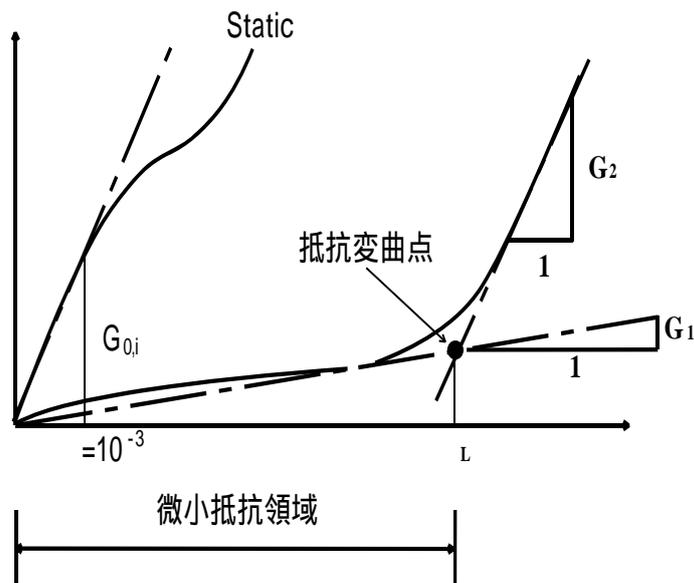


図 25. 静的単調載荷時のせん断ひずみ - せん断応力関係による  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_{0i}$ 、 $L$  の定義

そこで、図 23 に示すようにこの下に凸な曲線をバイリニアで近似し<sup>1)</sup>、第 1 勾配を  $G_1$ 、第 2 勾配を  $G_2$ 、static の供試体の接線勾配を  $G_{0i}$ 、剛性が回復するまでのせん断ひずみを  $L$  と定義することとした。

#### b) 液状化後のせん断剛性の低下等に与える $F_L$ と拘束圧の影響

図 20 ~ 24 から  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_{0i}$ 、 $L$  を読みとり、これらと液状化に対する安全率  $F_L$  との関係性を求めた。図 26 ~ 28 に低拘束圧用の繰返しねじりせん断試験におけるこれらの関係性を示す。これに見られるように、 $F_L$  が 1 より小さくなると  $G_1$  は急に小さくなり、 $L$  は急に大きくなった。これに対し、 $F_L$  が 1 より小さくなくても  $G_2$  は少し小さくなるだけであった。この傾向は 10kPa ~ 50kPa まで同様であった。図 29 に拘束圧と  $G_1$ 、 $F_L$  の関係性を示す。 $F_L$  が 1 の時は拘束圧に応じて  $G$  が大きくなる傾向を示した。これは液状化していない通常の土と同じ傾向である。これに対し、今回の試料では  $F_L$  が 1 より小さくなると拘束圧の影響が小さくなる傾向となった。また、図 30 には拘束圧とせん断剛性比  $G_1/c'$ 、 $F_L$  関係性を示す。これに見られるように拘束圧が小さいとせん断剛性比は大きくなり、 $F_L$  にも影響される傾向となった。

次に、せん断剛性の低下率  $G_1/G_{0i}$  と  $F_L$  の関係性を示したのが図 31 ~ 33 である。これらを見ると、 $F_L$  が 1 を下回るとせん断剛性の低下率は 1/100 より小さくなった。そして、拘束圧が大きいほど低下が激しい傾向となった。

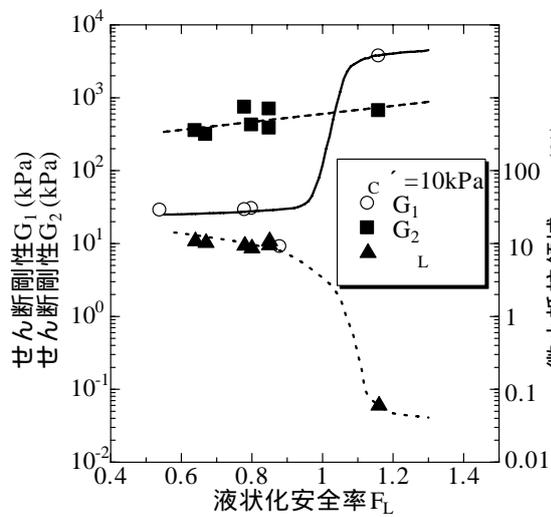


図 26 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験における  $F_L$  と  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $L$  関係 ( $c' = 10\text{kPa}$ )

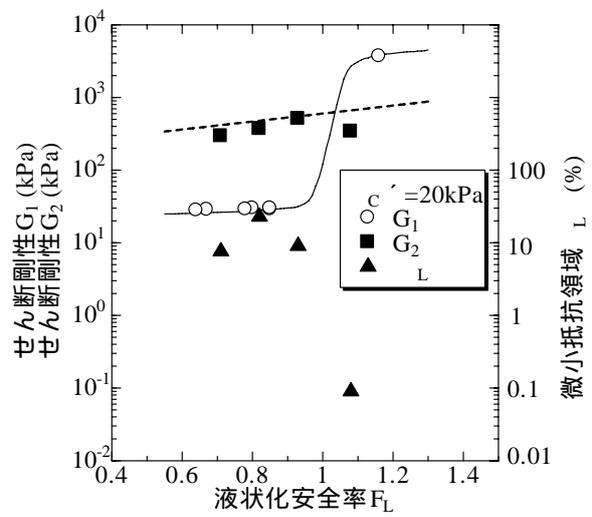


図 27 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験における  $F_L$  と  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $L$  関係 ( $c' = 20\text{kPa}$ )

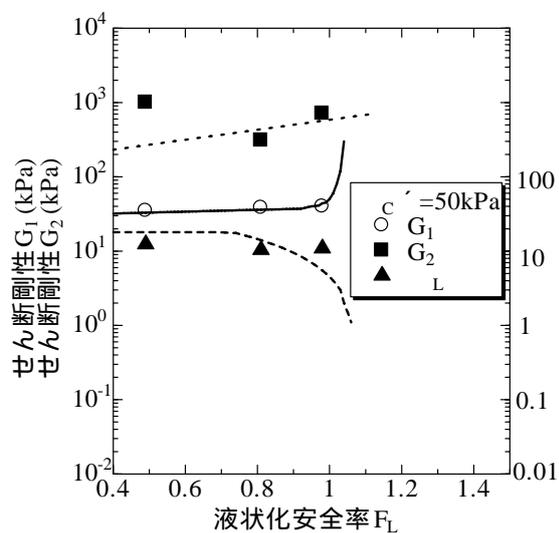


図 28 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験における  $F_L$  と  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $L$  関係 ( $c' = 50\text{kPa}$ )

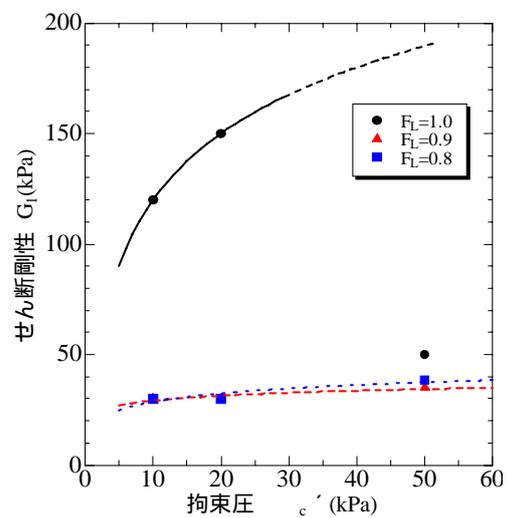


図 29 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験における拘束圧と  $G_1$ 、 $F_L$

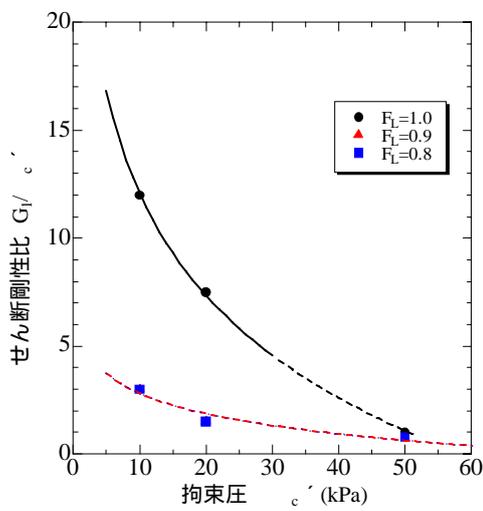


図 30 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験における拘束圧とせん断剛性比関係

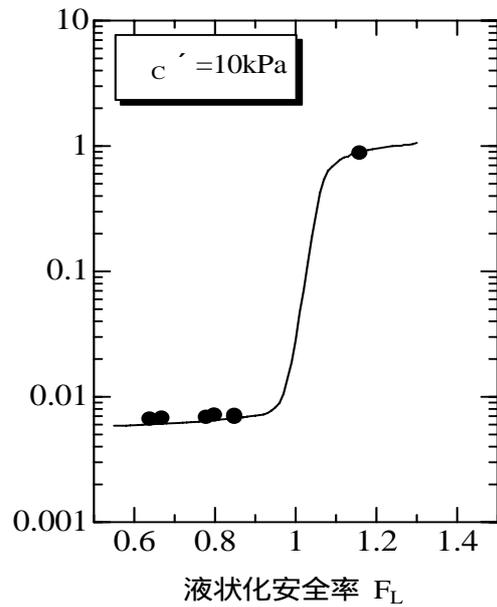


図 31 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験における  $F_L$  とせん断剛性低下率関係 ( $c' = 10\text{kPa}$ )

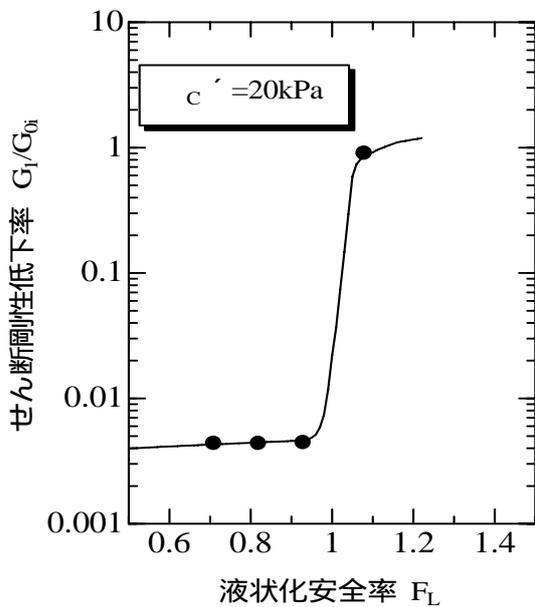


図 32 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験における  $F_L$  とせん断剛性低下率関係 ( $c' = 20\text{kPa}$ )

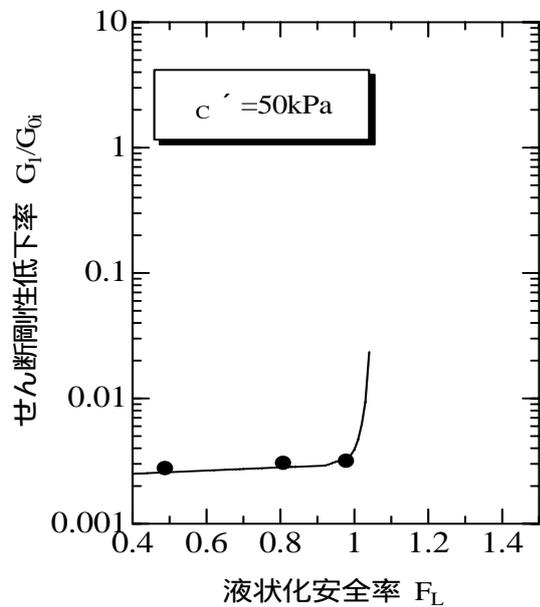


図 33 低拘束圧用繰返しねじりせん断試験における  $F_L$  とせん断剛性低下率関係 ( $c' = 50\text{kPa}$ )

### 3) その他の特性

#### a) 液状化後の体積圧縮特性

液状化後の体積圧縮特性を求めるため、繰返し三軸試験において 20 波繰返した後に排水をし、その時の排水量から堆積ひずみを求めた。そして、繰返し軸差応力振幅をいくつか変えた試験を行い、図 7 と同様の方法で  $F_L$  を求めた。このようにして求めた  $F_L$  ~ 体積圧縮ひずみ関係を図 34 に示す。

図に見られるようにデータはかなりばら

ついたが、一応  $F_L$  が 1 以下の液状化した状態では体積圧縮ひずみは 1.5~2.5%程度となった。相対密度が 70%のため、これくらいの体積圧縮ひずみなのであろう。

一般に緩い砂が液状化すると 3~5%程度の圧縮ひずみとなると言われている。この値と図 32 を比較すると今回の値はかなり小さいものとなった。これは相対密度が 70%とあまり緩くないことや、表 4 に示したようにアルバニー砂の最大間隙比と最小間隙比の差が豊浦砂などに比べて小さいことに関係しているのではないと思われる。

#### b) 小型土槽実験における液状化強度比との対比

小型土槽を振動台に載せて加振した液状化実験は、試料の都合でアルバニー砂では行わず豊浦砂で行った。この実験では相対密度を 50%、70%、90%の三種類の密度で行った。加振振動数は 2Hz と 5Hz とした。

図 35、36 にそれぞれ 2Hz と 5Hz の振動数で加振して 10 波で液状化した回数と加速度の関係を示す。ただし、加速度としては入力(台)加速度と地表加速度をとってある。これに見られるように、10 波で液状化が発生する加速度は相対密度が 70%の場合、入力加速度と地表加速度の両者ともあまり差がなかった。また、2Hz と 5Hz とでも殆ど差がなかった。そこで、これらの 4 つの関係図の平均的な値として、10 波で液状化する加速度は約 60Gal 程度と考えることにした。

この実験では特に地盤内で発生した繰返しせん断応力を測定する工夫はしていない。そこで、一般的に簡易液状化予測方法で用いられている Seed & Idriss の方法<sup>2)</sup>で加速度から

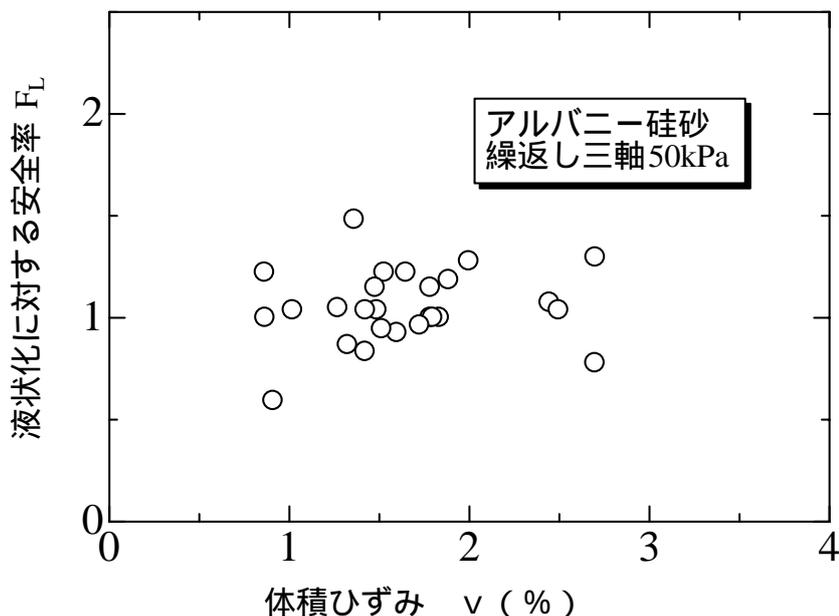


図 34 繰返し三軸試験から求めた繰返し载荷後の体積ひずみと  $F_L$  の関係

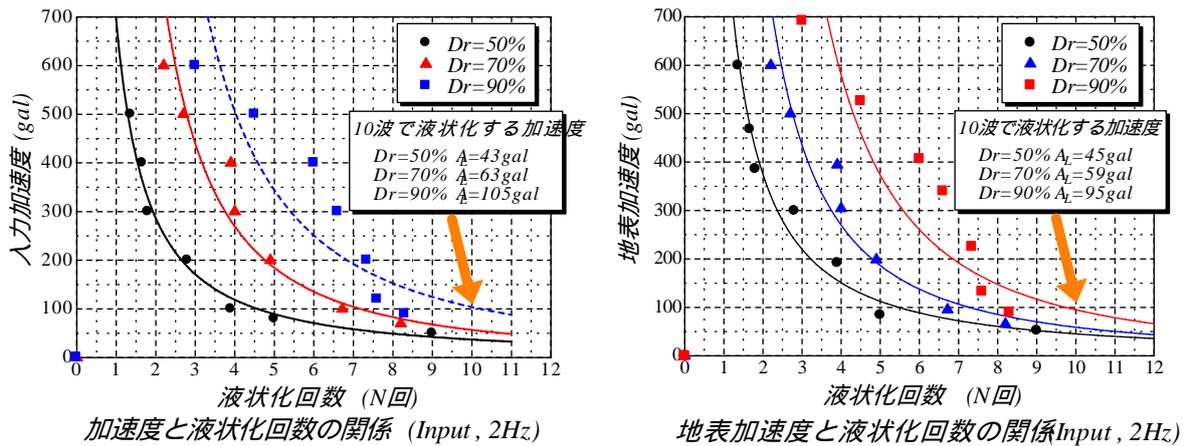


図 35 振動台実験における入力（台）加速度、地表加速度と液状化回数（加振振動数 2Hz）

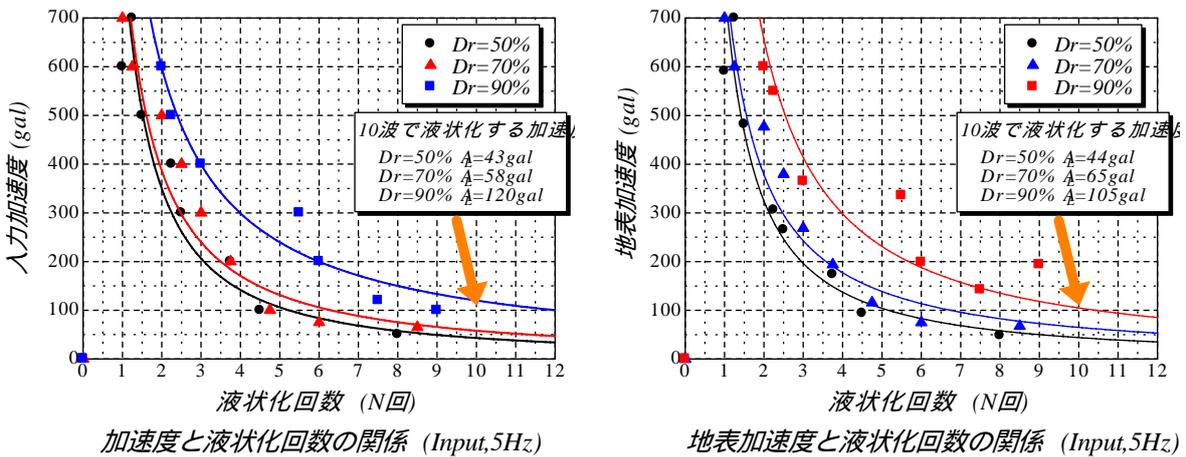


図 36 振動台実験における入力（台）加速度、地表加速度と液状化回数（加振振動数 5 Hz）

繰返しせん断力比を推定してみた。このモデル地盤は地下水位は地表にあり、飽和単位体積重量は 19.2kN/m<sup>3</sup> である。深さ 90cm と浅いので深さ方向の低減係数は  $r_d=1$  と仮定すると、60Gal の場合には 10 波で液状化する繰返しせん断力比  $R_G = \sigma'_v / \sigma'_v$  は 0.125 となる。

一方、繰返しねじりせん断試験によって求めた相対密度が 70% の豊浦砂の液状化強度比  $R_L$  は 0.26 程度である。ただし、この値は等方応力の拘束圧を加えて行われているので、上記の  $R_G$  と比較するには地盤内の異方応力状態での応力比に換算する必要がある。そこで静止土圧を 0.5 と仮定してみると、地盤内の異方応力での液状化強度比  $R_T = \sigma'_v / \sigma'_v = 0.173$  となる。これと上記の  $R_G$  とを比較してみると、 $R_T$  の方が 1.4 倍程度大きくなった。今回の実験は 0.9m と浅い土槽で行っただけなので、これだけから結論は言えないが、このような比較では室内実験で得られた液状化強度比と、振動台実験の加速度から推定した液状化強度比とは多少違ってきたことになる。

c) 小型土槽実験結果を利用した液状化した地盤の透水係数の推定の試み

土が液状化すると透水係数が変化するのではないかとの議論が良く行われる。ただし、一般に行われている透水試験装置により液状化した土の透水係数を求めることは困難である。そこで、小型土槽実験において、液状化発生後の過剰間隙水圧の低下と地表面の沈下量の時間変化を利用して透水係数を推定することを試みてみた。

b)で述べた豊浦砂の70%の相対密度の実験において、過剰間隙水圧、地表面の沈下量を5分間測定してみた。この結果のうち、1分までの地表面沈下量の時間変化を示すと図37となる。これに見られるように40秒あたりで沈下は止まった。なお、加振は約6秒まで行っており、10秒あたりから沈下が始まっている。次に、40秒まで

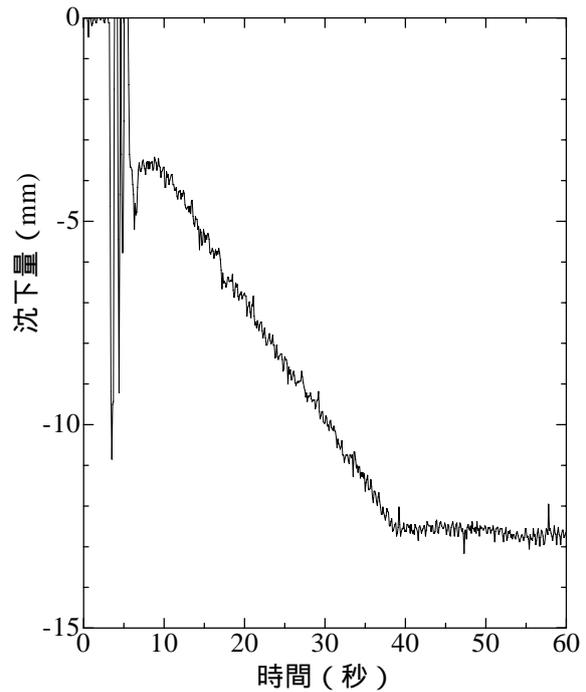


図 37 時間～地表面沈下量関係（60秒まで）

の地表面沈下量と、間隙水圧比を図38、39に示す。間隙水圧計はGL-10cm、-30cm、-50cm、-70cmの深さに設置した。図38に示すように時間にほぼ比例して地表面は沈下した。また、過剰間隙水圧はGL-70cmでは10秒あたりから低下し始めた。この時間は地表面の沈下が始まった時点とほぼ一致していた。そして、徐々に上部でも間隙水圧の低下が始まった。

以上の結果を用いて、まず、時間～

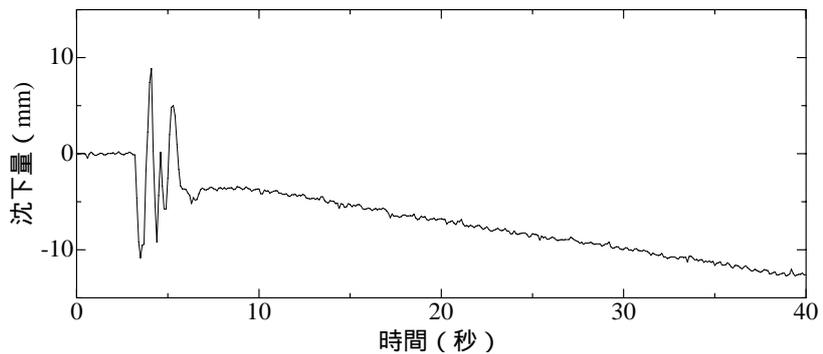


図 38 時間～地表面沈下量関係（40秒まで）

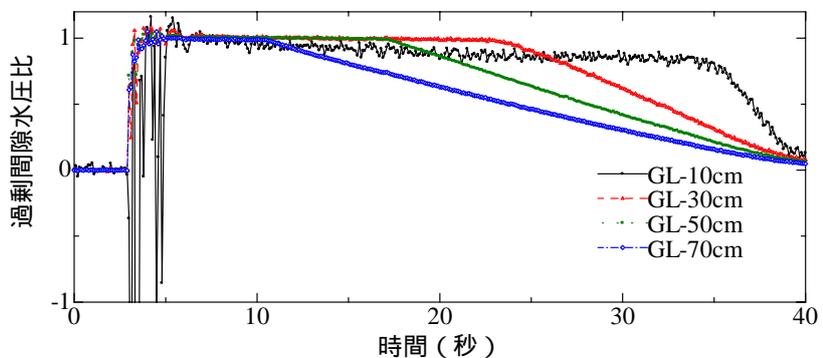


図 39 時間～過剰間隙水圧関係（40秒まで）

沈下量関係の時間軸を平方根にして、 $\sqrt{t}$  法によって沈下が始まってからの  $t_{90}$  を求めてみたところ 35 秒となった。この実験では片面排水なので排水距離を 0.9m とすると圧密係数  $c_v$  は  $0.0196\text{m}^2/\text{秒}$  となった。次に、図 39 のうち 25 秒から 35 秒の間の間隙水圧の変化を計算すると、GL-30cm で  $1.67\text{kN/m}^2$ 、GL-50cm で  $1.99\text{kN/m}^2$  となった。深さ方向にこの値は異なるが中央の 2 点のこれらの圧力変化で代表することにして、図 38 からこの間のモデル地盤全体の体積ひずみを求め ( $v_s=0.00368$ ) 体積圧縮係数  $m_v$  を求めたところ、GL-30cm で  $0.00221\text{m}^2/\text{kN}$ 、GL-50cm で  $0.00185\text{m}^2/\text{kN}$  となった。これに上記の圧密係数を考慮すると、結局、透水係数  $k$  はそれぞれの深さで  $0.042\text{cm}/\text{秒}$ 、 $0.036\text{cm}/\text{秒}$  となった。このように求めてみると、液状化しても通常の透水係数とあまり変わらない値となった。

なお、室内試験によると相対密度が 70% 程度の場合には一般に液状化した砂の体積ひずみは 2% 程度となる。拘束圧を  $100\text{kPa}$  とすると、体積圧縮係数は  $0.0002\text{m}^2/\text{kN}$  となり、上記の値より一桁小さくなって、透水係数も一桁小さくなる。今回行った模型実験は小さいものであり、液状化した地盤の透水係数に関して今後も検討が必要と考えている。

(d) 結論ならびに今後の課題

E-ディフェンスで行われる大型土槽実験に用いられるアルバニー硅砂の土質特性を求めるため、繰返しねじりせん断試験、繰返し三軸試験などを行った。平成 17 年度には特に液状化強度および液状化後の変形特性に関して研究を行ってきた。

その結果、液状化強度や液状化後の変形特性に与える拘束圧や試験装置の違いの影響などがわかってきた。ただし、試験装置によって試験結果が異なる点に関しては、年度末に一部試験装置を改良した事もあり、今後補足試験を行う必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫: 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No. 638/III-49, 1999, pp. 71-89
- 2) Seed, H.B. and Idriss, I.M.: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *J. SMFD, ASCE*, Vol.97, No.SM 9, pp.1249-1273, 1971.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
安田 進 斉藤盛文 鈴木聡司	低拘束圧領域における拘束圧の違いが液状化変形特性に与える影響について	第 61 回土木学会年次学術講演会	平成 18 年 9 月 (発表予定)

(g) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願  
なし

2)ソフトウェア開発

なし

3)仕様・標準等の策定

なし

**(3) 平成18年度業務計画案**

平成17年度と同じ密度で繰返しねじりせん断試験により動的特性を求める。また、平成17年度の大型土槽実験の結果や平成18年度の実大実験の計画を受けて、繰返しねじりせん断試験装置により液状化特性や液状化後の変形特性などの追加実験を行う。そして、実大実験結果の評価に役立てるとともに、数値シミュレーション解析の解析定数の設定データとする。いずれも載荷装置を改良した繰返しねじりせん断試験装置を主体に下記のような試験を行う。

(a) 動的特性試験

動的特性試験は70%の相対密度の供試体に対し、微小ひずみ～大ひずみの間で行う。拘束圧は10kPa、20kPa、50kPaと変え、また、乾燥状態と飽和状態で試験する。試験結果は $G$ ～、 $h$ ～ 関係にまとめ、さらに拘束圧や飽和の影響などについて考察する。

(b) 液状化試験

液状化強度試験に関しては、70%の相対密度の供試体に対し50kPaでの試験を追加すると同時に、20kPa、10kPaでの試験を行う。また、平成18年度のE-ディフェンスでの大型土槽実験の計画などの必要に応じて、他の密度での同様の試験も行う。

(c) 液状化後の変形特性試験

液状化後の変形特性の実験は平成18年度のE-ディフェンスでの大型土槽実験の計画などの必要に応じて、他の密度での同様の実験も行う。

(d) その他

その他、透水係数などの解析に必要な物性を求める試験を行う。

