

# 振動台試験による粒子配向性に着目した液状化強度

長岡技術科学大学 環境社会基盤工学課程 4年  
地盤工学研究室 富士本南美

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、関東地方を中心に液状化や再液状化が確認された。ここで、再液状化とは過去に液状化した地盤が別の地震で再度液状化する現象のことであり、場合によっては液状化した本震より小さい余震によっても再液状化が発生することもある。液状化の過程で緩い砂地盤の間隙は減少するため、一度液状化した地盤は間隙が密になり、液状化しにくくなると考えられている。しかし、実際に再液状化が発生した事例は多く報告されており、再液状化のメカニズムは今もなお不明である。液状化強度に影響を与える要因として密度、履歴効果、年代効果、粒子配向性などがあげられる。これまでのアプローチとして要素試験、模型振動台試験、原位置試験が行われてきた。そこで本研究では粒子配向性に着目し、模型振動台試験にて粒子配向性で液状化強度がどう変化するか、液状化前後での粒子配向の変化と液状化強度との関連性について検討する。そして、得られた結果より再液状化のしやすさを判定し、再液状化のメカニズムの解明に寄与することを目的とする。

## 2. 液状化特性

ゆるい砂地盤や砂礫地盤に限定せず、密な砂地盤や密な砂礫地盤さらに粘性土地盤でも地震などを含む種々の外力によって有効応力が低下し、地盤の強度または剛性の低下により有害な沈下や変形などが起こる現象を広い意味で液状化と呼んでいる。原位置での液状化に影響を及ぼす3要因を表-1<sup>1)</sup>に示す。液状化の起こりやすい地盤は水で飽和した緩い砂質地盤であり、このような地盤に地震動などによるせん断応力が

繰返し作用すると、負のダイレイタンスが生じ、土骨格は体積が減少しようとする。間隙水がなければ実際に体積収縮を起こすが、土が完全に飽和している場合は、粒子間に介在する水が、砂がより密に詰まろうとするのを妨げるため粒子間に間隙水圧が発生し体積収縮を拘束する。これの反作用として土粒子間に作用する応力(有効応力)が減少する。この作用が繰り返されると、最終的には有効応力がゼロになり、土粒子が水中に浮いたような状態となる。その結果、地盤は全体として液体のような挙動を示し、地盤沈下や側方流動などが生じる。

液状化に伴って噴砂・噴射、地盤沈下、側方流動、地盤揺動、斜面の流動的崩壊、地盤の支持力低下、護岸や擁壁の崩壊、埋設構造物の浮き上がりなどの現象が発生する。

液状化の発生に影響を及ぼす要因として密度、粒度、振動数、拘束圧、飽和度があげられる。

表-1 原位置の液状化に影響を及ぼす要因

項目	要因
地盤材料特性	単位体積重量, 粒度特性, 細粒分含有率, 平均粒径, 粒度分含有率, 塑性指数, 土粒子比重, 相対密度, 粒子構造, せん断剛性, 減衰定数, 体積圧縮係数, 透水係数, 飽和度
地盤環境特性	地下水位, 地質年代, 全応力, 有効応力, 過圧密比, 静止土圧係数, 初期せん断応力, 変形拘束条件, 透水境界条件
地震動特性	地表面水平加速度, マグニチュード, ひずみレベル, せん断力の方向, せん断応力の強さと繰返し回数又は継続時間

### 3. 試験概要

#### 3.1 試験試料及び装置

本研究では豊浦砂を使用した。表-2 に豊浦砂の物性値を示す。

図-1 に本試験で用いる模型振動台及び給水槽、表-3 に振動台の仕様を示す。本研究では新たに完全密封型土槽を開発した。完全密封型としたのは真空中で引いて飽和度を高めるためである。土槽の容積は奥行 20cm×幅 50cm×高さ 35cm である。また、初期の粒子配向性をつけるために図-2 に示す通り、液状化土槽を半時計周りに 0°、45°、90° に傾けることが可能である。黒い矢印は砂を入れる箇所を示している。表-3.2 に振動台試験機の仕様を示す。任意の値を入力することで波形を出力し加振させることが可能である。

砂粒子の堆積角度測定には図-3 に示すマイクロスコープを使用した。

表-2 豊浦砂の物性値

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.650
最小間隙比 $e_{min}$	0.597
最大間隙比 $e_{max}$	0.990
細粒分含有率 $F_c$ (%)	0
砂分含有率 $S_c$ (%)	100
礫分含有率 $G_c$ (%)	0



図-1 模型振動台及び槽

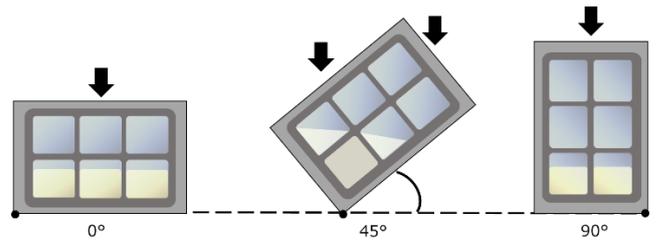


図-2 液状化土槽 (0° , 45° , 90° )

表-3 振動台仕様

制御方式	パルスモーター制御方式
振動台テーブル寸法(mm)	700×400
積載重量(kg)	70
最大加振加速度(gal)	1000
最大加振変位(mm)	±70
消費電力(kW)	1



図-3 マイクロスコープ

#### 3.2 角度の読み取り

本研究では試料の配向を 0°、45°、90° とし、液状化前後を異なる模型で読み取るため、6 ケースの実験を行った。各ケースにおいて約 1200 粒の粒子角度を測定した。なお、粒子は図-4 に示すように  $0^\circ \leq \theta_i \leq 180^\circ$  の範囲で読み取る。代表角及び集中度を算出する際は式 (3.1) 及び式 (3.2) のクーレーの公式を用いる。ここで、式 (3.1) に示す  $\theta$  は 0° から 180° の範囲で表され、式 (3.2) の  $n$  は各ケースにおける粒子の測定数である。集中度  $V.M$  は 0% から 100% の範囲で表され、 $V.M=0\%$  の場合は完全にランダムな粒子配向であ

り、 $V.M=100\%$ の場合は全粒子の向きが同じであることを示す。

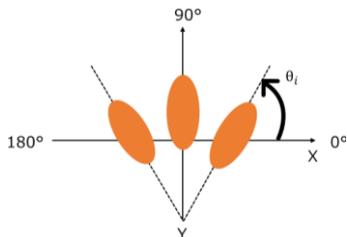


図-4 粒子の読み取り

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i} \right) \quad \text{式 (3.1)}$$

$$V.M = \frac{100}{n} \sqrt{(\sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i)^2 + (\sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i)^2} \quad \text{式 (3.2)}$$

## 4. 試験方法

### 4.1 試験手順

#### 4.1.1 初期の配向性

液状化土槽を半時計周りに傾けることで初期の粒子の配向性を付ける。(0°, 45°, 90°)

#### 4.1.2 供試体作製

漏斗堆積法により落下高さ 0 で供試体を作製する。供試体作製終了後、45° 及び 90° については土槽を元の位置に戻す。

#### 4.1.3 飽和促進

真空ポンプを用いて約-70kPa から約-80kPa で約 1 時間脱気を行う。この際、液状化土槽の上下から脱気を行い、飽和を促進させていく。また、通水で使用する蒸留水についても脱気を行う。

脱気完了後、給水槽の真空は解除し、振動台本体は約-70kPa から約-80kPa で真空をかける。この状態で液状化土槽下部より通水を開始する。この際、粒子の配向性への影響を小さくするために、通水速度を液状化土槽下部のバルブで調整する。供試体の半分までに水位が達したら真空を-10kPa に落とし、供試体上部まで通水させる。

#### 4.1.4 液状化

図-1 に示した振動台を用いて供試体を任意の

加速度、振動数で加振する。加振時の液状化判定については間隙水圧の測定と目視によって行う。

#### 4.1.5 脱水

液状化土槽下部より脱水を行う。脱水による粒子の配向性への影響を小さくするために、脱水速度を液状化土槽下部のバルブで調整する。

#### 4.1.6 配向性撮影

供試体を 9 分割し手前側と奥側の 18ヶ所について顕微鏡を用いて、1 区画 3 箇所ずつ撮影する。供試体表面を削るにあたり粒子の配向性が乱れるのを防ぐために掃除機で吸引する。



図-5 供試体分割図



図-6 配向性撮影

#### 4.1.7 角度の読み取り

撮影した画像について DinoCapture 2.0 を用いて角度を読み取る。

ここで、液状化前の配向性を撮影する際は上記に示した手順の 4.1.4 を省く。

## 4.2 水圧計

供試体を作製する前に水圧計を深さ 5cm, 14cm, 28cm の 3ヶ所に設置する。通水完了後、動ひず

みアンプと接続する。

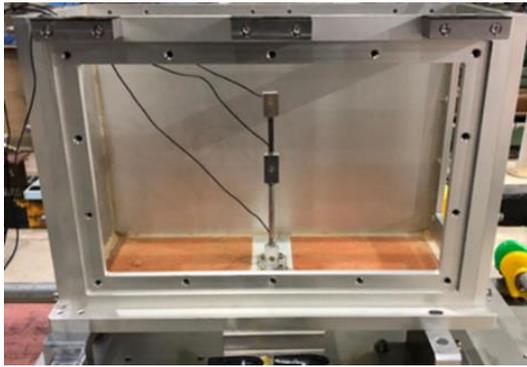


図-7 水圧計の設置

## 5. 試験結果

### 5.1 水圧計

図-8 に加速度計，図-9 から図-11 に過剰間隙水圧比の結果を示す。試験条件は表-4 に示す通りである。加速度計及び過剰間隙水圧比のグラフより，加振の開始と同時に過剰間隙水圧比の上昇が始まっている。続いて加振中は過剰間隙水圧比が緩やかに上昇していき，加振終了時には1に近づいている。よって，水圧計及び目視にて液状化が発生したことが確認できた。

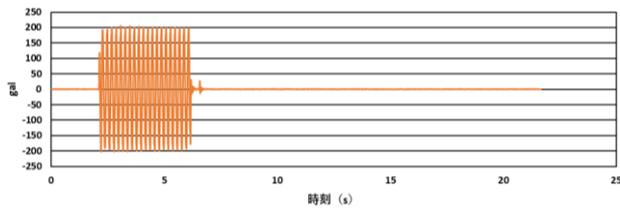


図-8 加速度計

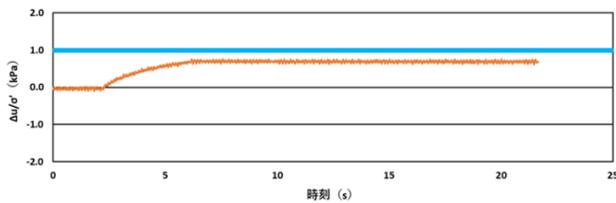


図-9 過剰間隙水圧比（深さ 5cm）

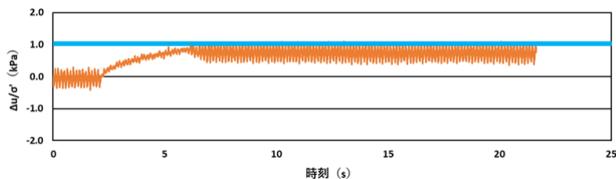


図-10 過剰間隙水圧比（深さ 14cm）

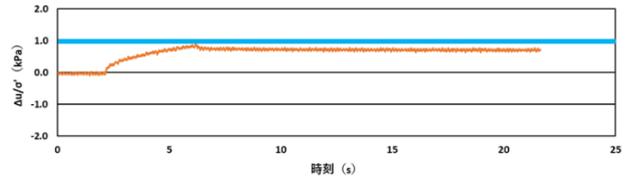


図-11 過剰間隙水圧比（深さ 28cm）

表-4 試験条件

波形	正弦波
配向	90°
振動数	5Hz
gal	200gal
サイクル	20回

### 5.2 液状化による粒子配向の挙動

図-12 から図-14 に供試体作製時の角度が 0°，45°，90° の場合の液状化前後の粒子配向分布図，表-5 に配向性読み取り結果を示す。粒子配向分布図及び代表角より，すべてのケースにおいて液状化後に粒子配向が 90° 付近へ近づいたことが確認できる。また，集中度の値も液状化によって大きくなっており，ランダムな方向を向いていた粒子が液状化によって向きが揃ったといえる。液状化後に図-15 に示すように水の吹き出したような跡が確認できた。これは上向き浸透流の発生と関連性があると推測できる。以上より，液状化により粒子の配向が 90° に近づいたのは上向き浸透流が影響していると考えられる。

全てのケースにおいて TOP, MIDDLE, BOTTOM の高さ方向の場所ごとに粒子配向に違いは見られたが，手前側と奥側の奥行方向に関する違いはさほど見られなかった。TOP, MIDDLE, BOTTOM で粒子配向分布に違いが生じたのは，場所によって上向き浸透流の影響の大きさの違いがあったためと推測される。

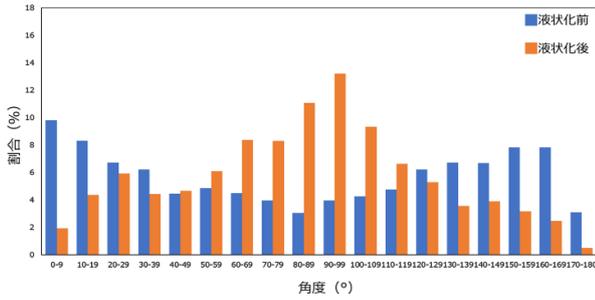


図-12 粒子配向分布図(0°)

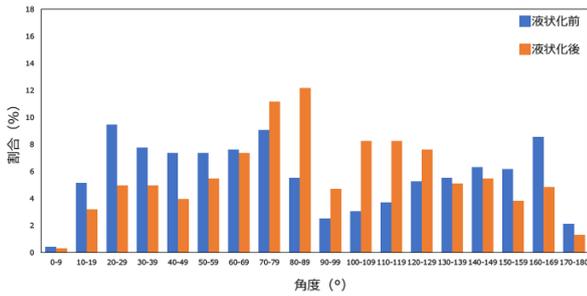


図-13 粒子配向分布図(45°)

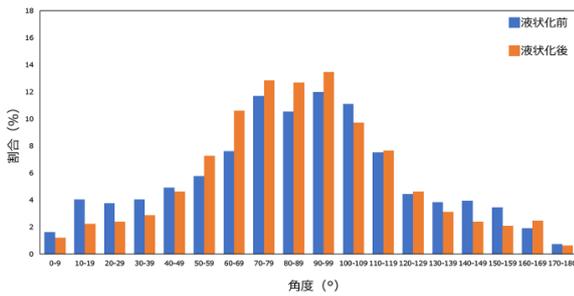


図-14 粒子配向分布図(90°)

表-5 試験結果

液状化	配向 (°)	データ数 (個)	代表角 $\theta$ (°)	集中度 V.M(%)
前	0	1986	172.9	16.98
後		1267	85.3	36.48
前	45	764	47.6	12.43
後		791	91.5	30.38
前	90	1031	87.0	40.60
後		1253	85.4	51.63



図-15 液状化後の供試体表面

### 5.3 液状化強度

図-16 から図-18 に配向 45° と 90° における時間経過に伴う過剰間隙水圧比を比較したものを示す。これらの試験条件は表-6 に示すとおりである。

液状化強度は液状化が発生するまでの時間で比較することができ、液状化が発生するまでの時間が速いと液状化強度は弱く、遅いと液状化強度は強いということになる。深さ 14cm 及び 28cm のグラフに着目すると、配向 45° の方が配向 90° よりも速く過剰間隙水圧比が 1 に近づいていることが読み取れる。したがって、液状化強度は配向 90° の方が強いと推測できる。しかし、土槽内を完全真空にすることができず、試験によって真空の値が違っていたため完全飽和していたか不明である。よって信頼性の面より、今回は液状化強度の比較は行わない。

図-17 に示す深さ 14cm に設置した水圧計の結果に着目すると、加振前にノイズが発生していることが確認できる。これは、動ひずみアンプのノイズを除去するフィルターがうまく働いていなかったことが考えられる。ノイズが確認されたが、水圧上昇の傾向は確認できる。

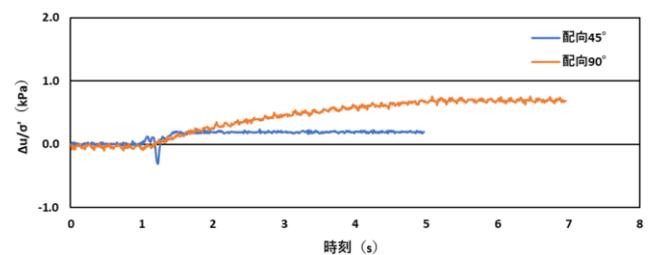


図-16 過剰間隙水圧比の比較 (5cm)

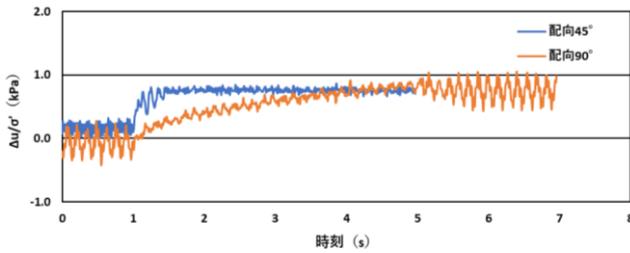


図-17 過剰間隙水圧比の比較 (14cm)

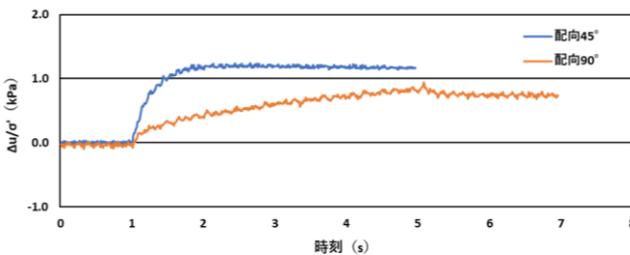


図-18 過剰間隙水圧比の比較 (28cm)

表-6 試験条件

配向	45°	90°
波形	正弦波	
振動数	5Hz	
gal	200gal	
サイクル	20回	

## 6. まとめ

目視及び水圧計の結果より液状化が発生したことが確認できた。

配向 0° , 45° , 90° すべてのケースについて、液状化により粒子の配向は 90° 付近に近づいたことが確認できた。また、液状化後には集中度が高くなっており、ランダムな方向を向いていた粒子が液状化により向きが揃ったといえる。これは、上向き浸透流が影響していると推測される。高さ方向の場所ごとに粒子配向に違いは見られたが、奥行き方向に関する違いはさほど見られなかった。高さ方向の場所によって違いが生じたのは、上向き浸透流の影響の大きさに違いがあったためと考えられる。

水圧計の結果より液状化強度を比較すること

ができるが、本研究では完全飽和ができていたか不明であるために信頼できる結果は得られず、液状化強度の判断は行わなかった。そのため、再液状化のしやすさについても判断できない。

## 7. 今後の展望

本研究で用いた液状化土槽は 6 個の窓からの真空漏れや漏水が発生したため、液状化土槽の改良が必要である。改良案として前パネル、横パネル及びアクリル窓の固定方法を見直すことなどがあげられる。

また、相対密度を変更して試験を行う。相対密度の違いが液状化による粒子配向にどのような影響を与えるのかを調べる。

液状化した模型地盤の供試体をサンプリングして力学的特性を調べる。その力学的特性より液状化強度との関連性について検討する。

## 参考文献

- 1) 社団法人 土質工学会：液状化対策の調査・設計から施工まで -現場技術者のための土と基礎シリーズ 20-, 1993