

## 液状化履歴が地盤の再液状化に与える影響についての一考察 (Influence of liquefaction history on reliquefaction of sand)

西村 望<sup>1</sup>, 鈴木 薫<sup>2</sup>, 張 鋒<sup>3</sup>, 岩井 裕正<sup>4</sup>,

- 1 名古屋工業大学・大学院工学研究科 E-mail 30415070@stn.nitech.ac.jp  
 2 ジェイアール東海コンサルタンツ(株) E-mail kaoru.1028-k.y.k@docomo.ne.jp  
 3 名古屋工業大学・大学院工学研究科 E-mail cho.ho@nitech.ac.jp  
 4 名古屋工業大学・大学院工学研究科 E-mail iwai.hiromasa@nitech.ac.jp

### 概 要

液状化履歴を経験した地盤の再液状化に関する研究は最近少しずつ注目されるようになった。再液状化の発生要因の一つとして「地盤の応力誘導異方性」が考えられている。本研究では、中拘束圧環境下において液状化履歴により異なる大きさの残留ひずみを与えた豊浦砂供試体に対して、非排水単調・繰返し載荷試験を実施することにより、この応力誘導異方性が地盤の再液状化特性に与える影響を検討した。また、今までの研究では、残留ひずみの影響を調べる際、軸ひずみが0%である地点を基準として考察を行ってきたが、明確の傾向を見出すことには至らなかった。そこで今回は、液状化履歴を与える際の両振幅ひずみの中間地点を基準として残留ひずみを考えることにより、再液状化特性に関する有意な傾向を見出すことに前進があった。

キーワード：液状化履歴、再液状、三軸圧縮試験、残留ひずみ

### 1. はじめに

今後極めて高い確率で発生する大地震によって誘発される液状化の被害は甚大なものと予想される。液状化とは、緩く堆積した飽和砂地盤に地震動、波浪などの短時間の繰返し荷重が作用することによって、砂粒子間の接触が切れて有効応力が消失する結果、地盤は強さを失い、土被り圧に等しい間隙水圧が発生して液体状になる現象をいう。つまり、液状化を引き起こす条件としては、砂地盤のように粘着力がない地盤や高間隙の地盤のように土粒子間の接触力が弱い地盤であること、地盤が飽和しており間隙水圧の上昇が起りやすいこと、短時間の繰返し荷重を受けることで疑似的な非排水状態となり間隙水圧が上昇する条件下にあること等が挙げられる。2011年に発生した東日本大震災では、関東地方だけでも約17,000棟の住宅の液状化による被害が発生しており、地震による被害は世界最大規模のものであった。また、一般的な液状化被害だけでなく再液状化の被害も多く見受けられた。再液状化とは、過去に液状化を経験した地盤が、再び短時間の繰返し荷重を受けることによって液状化する現象をいう。東日本大震災では再液状化の被害が一般的な液状化による被害よりも大きくなる事例が確認されている。千葉県浦安市では本震時に発生した過剰間隙水圧が消散する前に余震の影響を受けた結果、市の86%の面積で液状化した。

そのため、液状化被害を抑えるために、液状化発生時の地盤の挙動や再液状化の可能性を正確に予測し、対策を施すことが求められている。そこで、本研究では特に再液状化に着目した。その発生要因として「地盤の応力誘導異方性」<sup>2) 3)</sup>が考えられている。そのため中拘束圧環境下において、液状化履歴を与え、異なる残留ひずみのもとで再度等方圧密した豊浦砂供試体に対し、非排水単調・繰返し三軸試験を実施することにより、この応力誘導異方性が地盤の再液状化特性に与える影響を検討した。

### 2. 試験概要

試験では、三軸試験機(図1)を用いて液状化履歴を受けた砂質土を対象に非排水繰返し三軸試験を行った。試験には豊浦砂を試料とした直径5cm、高さ10cmの円柱供試体を使用し、表1に豊浦砂の物理特性を示す。供試体は水中落下法で作製され、3層に分けて15回ずつ突き固めることで中密な状態( $D_r=60\%$ )となっている。

表1 豊浦砂の物理特性

土粒子の比重 $G_s$	2.65	最大間隙比	0.975
最大粒径 (mm)	0.425	最小間隙比	0.609
最小粒径 (mm)	0.102	均等係数 $U_c$	1.65

まず上記の砂供試体に拘束圧 100kPa になるまで等方圧密した後、応力制御の非排水繰返し三軸試験を行うことで供試体を初期液状化させた。このとき、繰返し応力比  $q/2\sigma'_{m0} = 0.25$ 、载荷周波数  $f = 0.005\text{Hz}$  とした。両振幅ひずみが 5% 生じたことを確認した後、繰返し载荷を様々な残留ひずみでロードを閉めて停止させることにより液状化後の供試体の異方性の発達度合いを再現した。本稿では、軸ひずみが -5.0%、-3.0%、-2.0%、0.0%、+1.5% 程度の 5 点で载荷を停止させた (図 2)。その後、変位を固定した状態で排水させた後ロードを開放し、再び非排水状態にして繰返し三軸試験を実施することにより再液状化を発生させた。

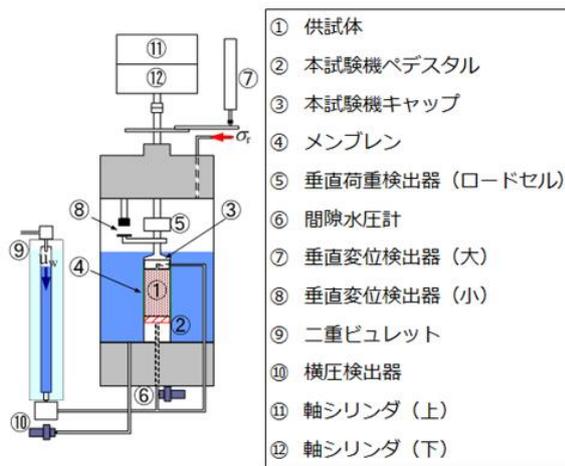


図 1 使用した三軸試験機概要

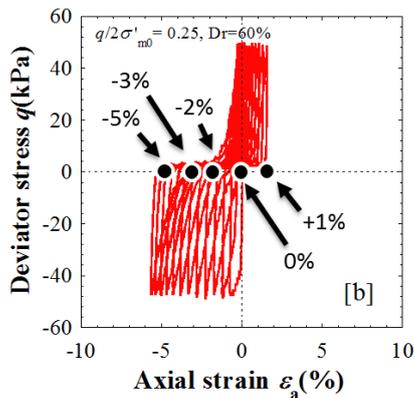


図 2 初期液状化時の残留ひずみの与え方

### 3. 試験結果

#### 3.1 既往の考察

以前我々は、液状化履歴によりさまざまな大きさの残留ひずみを与えた供試体の再液状化試験に関して以下のような考察を行ってきた。試験条件は上記に示した通りであり、残留ひずみはひずみ 0% を基準に、圧縮側 +1%, 0%, 伸張側 -5% 程度とした。再液状化試験における有効応力経路と応力ひずみ関係を図 4、供試体条件を表 2 に示す。

図 3 から、圧縮側および原点に残留ひずみを与えたとき、繰返し载荷開始直後に平均有効応力はわずかしこ減少し

ていないが、伸張側に残留ひずみを与えた場合には、平均有効応力は大きく減少している。また表 2 から、軸ひずみが 5% に達したときの繰返し回数  $N_c$  ( $DA=5\%$ ) に着目すると、伸張側 (-5%) に残留ひずみを与えた場合が 11.5 回と最も少なく、圧縮側 (+1%), 原点に残留ひずみを与えた場合では、それぞれ 13.7 回、16.2 回となった。

以上のことから、ひずみ 0% を基準として残留ひずみを大きく与えると、少ない繰返し回数で再液状化が発生することから、液状化強度が低下すると考えられる。よって、応力誘導異方性の発達度合いが再液状化強度に影響を与えると考察を行った。

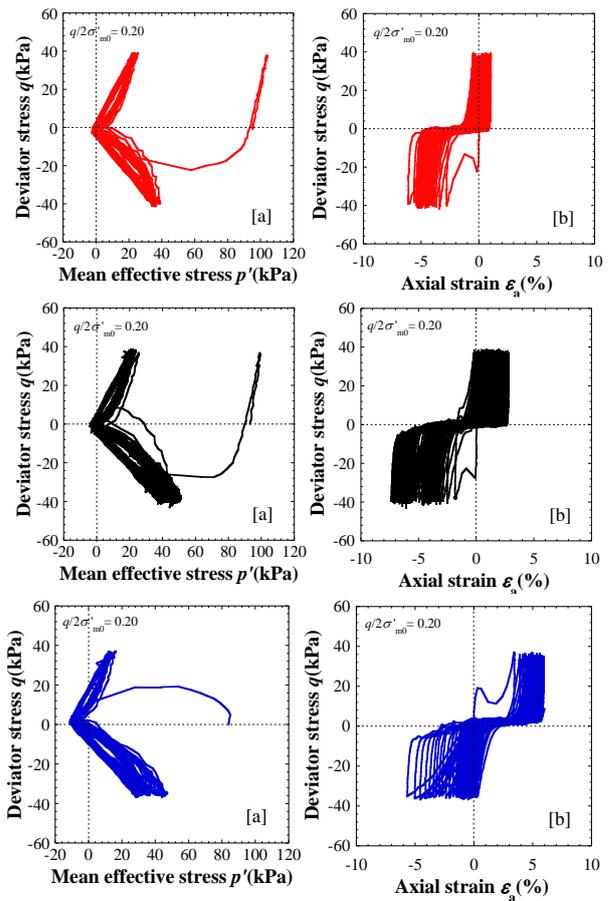


図 3 再液状化試験結果

(上：残留ひずみ+1%, 中：0%, 下：-5%)

表 2 供試体条件

	残留ひずみ					
	+1%		-5%		0%	
排水	前	後	前	後	前	後
$e$	0.74	0.72	0.77	0.74	0.8	0.76
$Dr(\%)$	64	70	57	64	50	60
$N_c$ ( $DA=5\%$ )	13.7		11.5		16.2	

#### 3.2 新たな考察

上の「3.1 既往考察」で、残留ひずみを大きく与えるほど液状化強度が低下すると考察を行った。しかし、初期液状化時の残留ひずみが -2% 程度のケースにおいて、再液

状化が発生しにくくなるという傾向が多くみられた。図4に残留ひずみを与えた再液状化試験の有効応力経路と過剰間隙水圧比を示す。グラフ内の数字は残留ひずみの大きさを表している。既往の考察通りであれば、残留ひずみが大きくなるほど液状化強度が低下するはずだが、実際の実験結果はこれに一致しない。残留ひずみ-2%程度の場合に最も有効応力の減少が小さく、過剰間隙水圧比の上昇が緩やかになっていることが確認できる。そこから、両振幅ひずみの中間地点付近に残留ひずみを与える場合に再液状化強度が大きくなるという推測の下、ひずみ0%を基準に残留ひずみの大きさを決定するのではなく、初期液状化時の両振幅ひずみの中間地点を基準とする新たな考察を行った。そこで、「両振幅ひずみの中間地点」と「与えた残留ひずみ」の差を $\Delta$ とした。図5に $\Delta$ の求め方を示す。

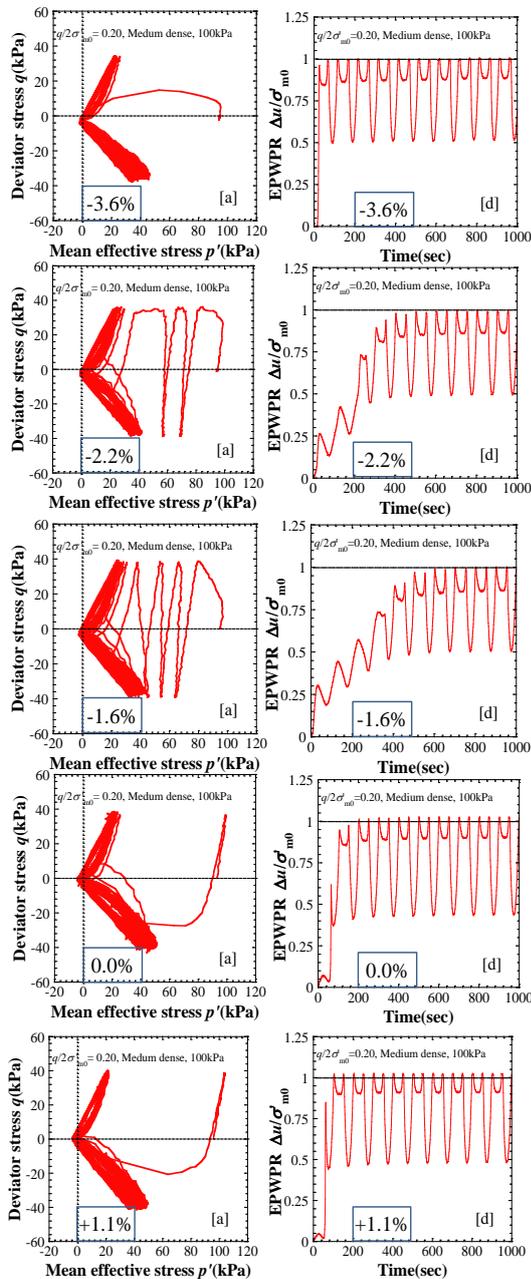


図4 残留ひずみごとの再液状化試験  
(有効応力経路, 過剰間隙水圧比)

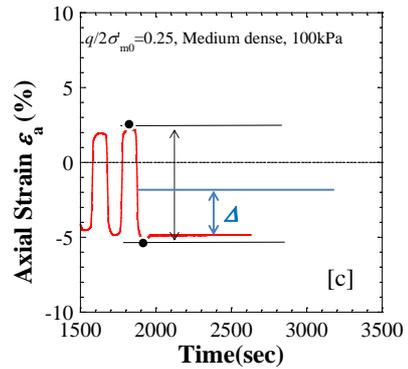


図5  $\Delta$ の求め方

図6は $\Delta$ が小さい順に整理した再液状化試験の有効応力経路と過剰間隙水圧比、表3は各 $\Delta$ のケースにおける $N_c$  ( $DA=5\%$ )をまとめたものである。

図6に着目すると、 $\Delta=-1.4\%$ のケースで最も有効応力の減少が大きく、過剰間隙水圧比の上昇が急になっている。そして、 $\Delta=0.0\%$ に近づくに従って有効応力の減少が小さくなり、過剰間隙水圧比の上昇が緩やかになっていることが確認できる。つまり、 $\Delta$ の絶対値が小さいほど液状化強度が大きくなると推測される。しかし、 $\Delta=+3.0\%$ のケースにおいては $\Delta$ の絶対値が大きいかに関わらず、 $\Delta=-1.4\%$ 、 $-1.0\%$ のケースと比較すると液状化強度が大きくなっている。これは残留ひずみの正負と繰返し試験が圧縮側の荷重から始まるのが原因だと考える。 $\Delta=3.0\%$ のケースは残留ひずみを圧縮側に与えており、圧縮側に残留ひずみを与えると圧縮に対する剛性が大きくなることがわかっている。そのため $\Delta=+3.0\%$ のケースにおける繰返し荷重開始直後に、液状化は大きく発展しなかった。反対に、伸張側に残留ひずみを与えたケースでは、繰返し荷重開始直後の圧縮で大きく液状化が発達したと考えられる。

また、表4から $N_c$  ( $DA=5\%$ )に着目すると、有効応力経路と過剰間隙水圧比の挙動と同様に、 $N_c$  ( $DA=5\%$ )=39.6回であることから、 $\Delta=0.0\%$ のケースが最も液状化強度が大きくなっていることが確認できる。

以上のことから、液状化履歴で両振幅ひずみの中間地点に残留ひずみを与えるとときに最も再液状化強度が大きくなると考えられる。

表3  $\Delta$ と繰返し回数の関係

$\Delta$	$N_c$ ( $DA=5\%$ )
-1.40%	3.3
-1.00%	14.2
-0.65%	18.8
-0.15%	23.7
0.00%	39.6
+3.00%	22.2

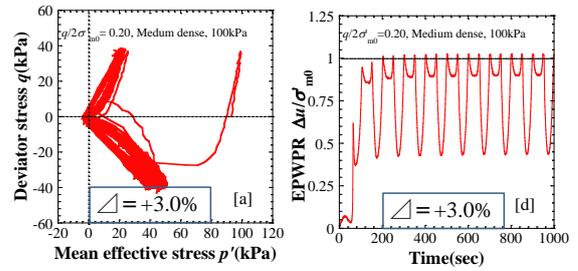
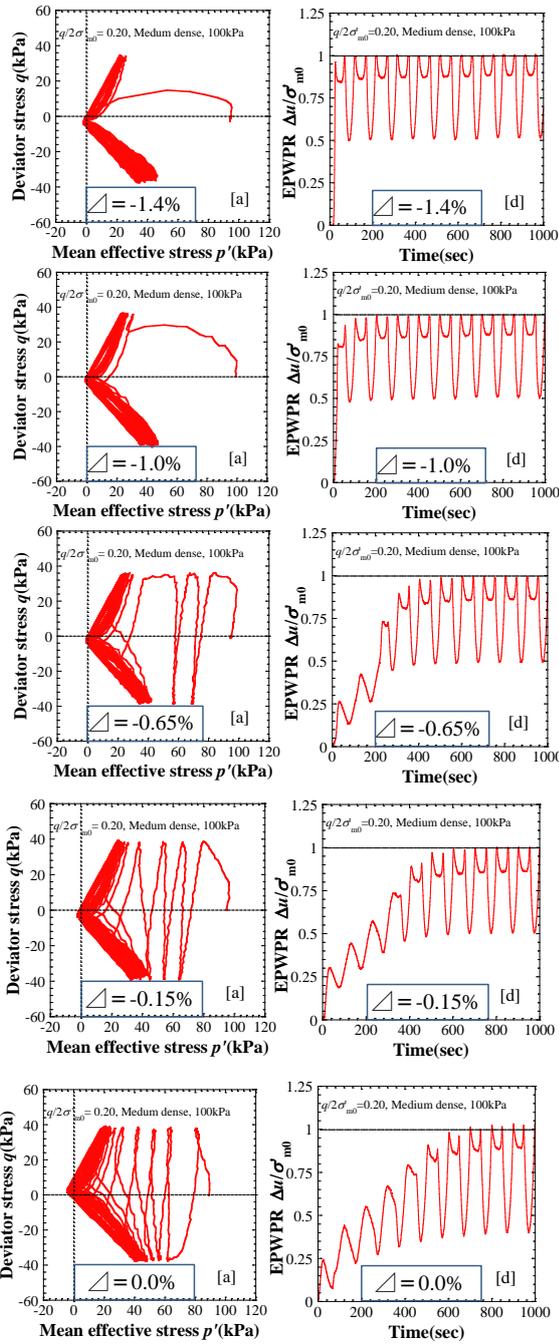


図6 残留ひずみごとの再液化化試験  
(有効応力経路, 過剰間隙水圧比)

#### 4. まとめ

液化履歴により残留ひずみを与えた供試体の再液化化試験において、与える残留ひずみが両振幅ひずみの中間地点から離れると液化化強度が低下し、中間地点に近いほど残留ひずみを与えると液化化強度が大きくなることを確認できた。このことから、液化履歴を与える際の両振幅ひずみと残留ひずみの関係が、再液化挙動を把握する上で重要であることがわかった。本研究では5%を超える大きな両振幅ひずみにより液化履歴を与えているケースのみに着目していた。今後は与える両振幅ひずみの大きさを変化させることにより、さらなる検討を行ってきたい。

#### 参考文献

- 1) 浦安市, “浦安市復興計画,” 浦安市, 2012.
- 2) 山田正太郎, 高橋智子, 佐藤研一, “液化履歴に伴う液化化抵抗の減少メカニズム,” 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集.
- 3) Ye Bin, 2007: Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, Doctoral Dissertation, Gifu University.