

豊浦砂の粒子配向性が液状化、再液状化に及ぼす影響

長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院 正会員
長岡技術科学大学大学院

○岩崎真也
豊田浩史
高田晋

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震において、関東・東北エリアの太平洋側地域に甚大な被害をもたらしたことは記憶に新しい。本災害の特徴として、関東地方の広い範囲に地盤の液状化、再液状化被害をもたらしたことが挙げられる。一般的な液状化の解釈として、地震により液状化が発生すると、粒子間の間隙水は水圧上昇とともに地表面に排水され、同時に地盤の粒子は沈下し、結果として地盤全体の相対密度は増加傾向を示し、その後は液状化しづらい地盤が形成されると考えられてきた。しかしながら、本災害では多数の再液状化現象が報告され、未だそのメカニズム解明には至っていない。現在では、一度液状化した地盤は再液状化しやすいという経験的な認識が一般的であるが¹⁾、今後の被害軽減のためにも経験則によらない再液状化のメカニズム解明が望まれる。そこで、本研究では、液状化強度に起因する要因²⁾(密度、履歴効果、年代効果、粒子配向性)の中で、粒子配向性に着目し、意図的に粒子配向性を与えた供試体を用いて、飽和非排水繰返し三軸試験を行い、各種力学特性に対する配向性の影響を調べた。さらにマイクロ스코プによる液状化前後での粒子配向の変化を読み取ることで、再液状化と粒子配向性の関連性について検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験対象試料

本研究では、山口県から採取した豊浦砂を使用した。表-1 に豊浦砂の物性値を示す。

表-1 豊浦砂の物性値

土試料	豊浦砂
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.650
最小間隙比 e_{min}	0.597
最大間隙比 e_{max}	0.990
細粒含有率 F_c (%)	0
砂含有率 S_c (%)	100
礫含有率 G_c (%)	0

2.2 試験装置

2.2.1 セル水内完全浸水式三軸試験器

本研究では、セル水内完全浸水式三軸試験機(図-1)を用いた。本試験機には、供試体上部のキャップ・ペダスタル中央部にベンダーエレメント(以下 BE)と呼ばれる圧電素子を埋め込んでいる。この BE を振動させ、その伝達速度を読み取ることにより、供試体を破壊することなくせん断波測定試験を行うことが可能となる。

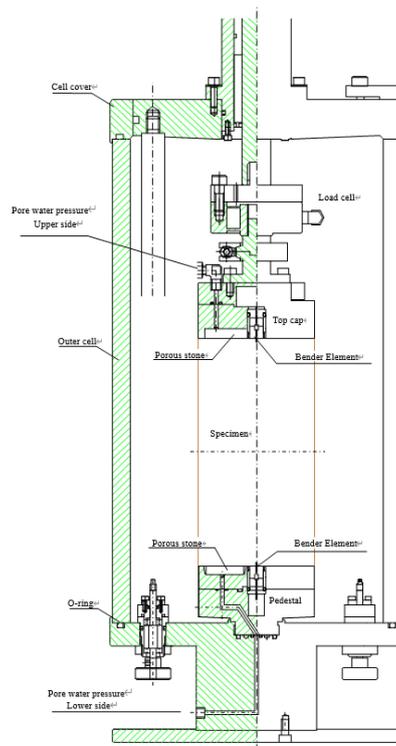


図-1 セル水内完全浸水式三軸試験機

2.2.2 2次元光学顕微鏡

砂粒子の堆積角度に関する配向性を検討するために、2次元光学顕微鏡(以下マイクロSCOPE)を使用した。本研究では、試料の配向を 0° 、 45° 、 90° の3 ケースとし、各ケースで約 200~250 粒の粒子角度を測定した。なお、 0° から 180° まで指定された測定角度 θ を、式(2.1)、式(2.2)及び図-2 に記載された Curray の公式に基づいて測定した。水平軸 X を基準とし、 θ の値は、2次元画像を使用して測定された基準軸 X と粒子の長手方向の角度として識別した(図-2)。

ここで、式(2.1)に示す θ は 0° から 180° まで変化し、 n は各ケースの観測粒子数である。(式2.2)に示す $V.M$ は粒子の集中度を表しており、 $V.M$ の値は、0% (粒子配向性が完全にランダムで非体系的な分布状態)から、100% (全粒子の配向が同一の状態)の値を取る。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sin 2\theta_i}{\sum_{i=1}^n \cos 2\theta_i} \right) \quad (2.1)$$

$$V.M = \frac{100}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sin 2\theta_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\cos 2\theta_i)^2} \quad (2.2)$$

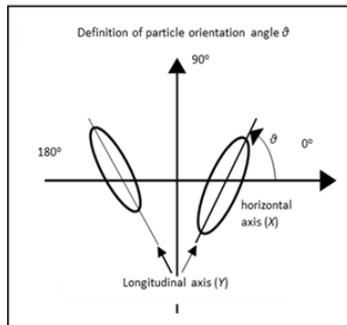


図-2 粒子の配向角度

2.3 試験手順

2.3.1 供試体作製

1) 試料ブロックの作製に関しては図-3aに示すような金属モールドを用いた。モールドは6つの分離した金属プレートで構成された長方形の容器であり、各層に25mmの試料材料を最大10層まで堆積させることが可能である。加えて、図-3bに示す金属フレームを用いて金属モールドの角度を調整することが可能で、これらを用いて 0° 、 45° 、 90° の堆積角度を再現した(図-4)。



a) 金属モールド



b) 金属フレーム

図-3 供試体作成機



図-4 モールド組み立て (0° と 45°)

- 2) 供試体作製方法には、主に空中落下法、水中落下法、及びウェットタンピング法があり、作製方法ごとに供試体の挙動に大きな違いがあると言われている³⁾。本研究では、空中落下法を採用し、全供試体相対密度を $Dr=60\%$ とした。
- 3) 試料ブロックを真空ポンプで脱水し、マイクロ스코プで配向性を撮影した後、高さ125mm、直径50mmの円柱状に成形して、メンブレンを被せて、試験機に設置した。

2.3.2 試験機設置～圧密

供試体の飽和度を高めるために、二重負圧、通水、予圧を行う。供試体が十分に飽和されたことを確認した後(間隙圧係数が0.95以上を条件)、供試体内部に背圧を載荷し、平均有効主応力 $P' = 50\text{kPa}$ で圧密を行った(1時間)。

2.3.3 液状化試験

液状化試験は、非排水繰返し載荷(軸ひずみ速度: 0.5mm/min)とし、平均有効主応力 $p' = 0\text{kPa}$ で液状化に達したと判断した。液状化試験後は再びマイクロ스코プで配向性を撮影した。

2.3.4 再圧密

液状化試験により発生した軸ひずみ ϵ_a を0に戻す。この状態で排水を行いながら、等方応力状態を保持し、再度、平均有効主応力 $p' = 50\text{kPa}$ で圧密を行った(1時間)。

2.3.5 再液状化試験

再圧密後、再び液状化させ、両振幅ひずみ DA (圧縮方向と伸張方向の総和) $=5\%$ に達した時点を試験終了の条件とした。再液状化試験後は再びマイクロ스코プで配向性を撮影した。

3. 試験結果

3.1 液状化試験による粒子配向の変化

2.3.1に示した方法で、意図的に粒子配向を与えた供試体を作製し、供試体内部をマイクロ스코プで撮影した。さらに、同条件で再び粒子配向を与えた供試体を作製し、液状化試験を実施した。同じく砂粒子をマイクロ스코プにより撮影し、液状化試験前後において粒子配向の変化を調べた。

表-2、表-3に、供試体配向 0° 及び 90° での液状化前、液状化後、再液状化後の各行程における代表角 ϕ ($^\circ$)と集中度(%)を示す。表-2(配向 0°)におい

て、 $\phi = 6.6^\circ$ (液状化前)から $\phi = 74.4^\circ$ (液状化後)、 $\phi = 88.7^\circ$ (再液状化後)と、液状化させることで粒子配向が 90° に近づく傾向が確認できた。一方、表-3 (配向 90°)においては、各行程での代表角 ϕ ($^\circ$)に大きな違いは見られなかった。

同様のことが図-5、図-6に示した粒子配向分布図からも言える。粒子配向分布図は、横軸に測定した粒子角度($0^\circ \sim 180^\circ$)を、縦軸にその角度における粒子の集中率(%)を示しており、液状化試験前後の粒子配向角の分布状況及び配向傾向を視覚的に確認することができる。図-5、図-6より、配向性 0° の供試体は液状化試験を行うことで粒子配向が 90° に近づく傾向が強く、配向性 90° の供試体は試験前後で粒子配向に目立った変化が確認されなかった。

このように、液状化試験によって粒子配向が 90° へ近づいていく現象は、山口ら¹⁾が述べているような、液状化時に発生する間隙水による上向きの浸透流が原因であると考えられる。

表-2(上表) 液状化前後での粒子配向変化(配向 0°)

表-3(下表) 液状化前後での粒子配向変化(配向 90°)

	供試体作成時角度	データ数	ϕ ($^\circ$)	V.M(%)
液状化前		248	6.6	18.5
液状化後	0°	231	74.4	13.5
再液状化後		226	88.7	10.4

	供試体作成時角度	データ数	ϕ ($^\circ$)	V.M(%)
液状化前		246	79.8	16.3
液状化後	90°	194	76.7	10.3
再液状化後		229	77.7	19.7

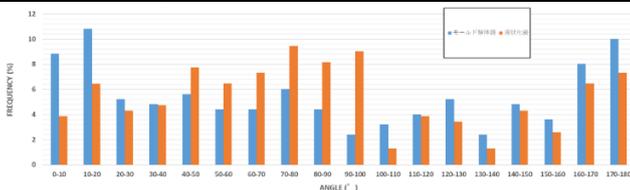


図-5(上図) 粒子配向分布図(配向 0°)

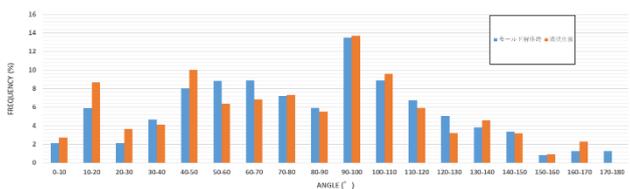


図-6(下図) 粒子配向分布図(配向 90°)

3.2 粒子配向の違いによる液状化強度の変化

2.3.1でも述べたように、金属製のモールドとフレームを使用することにより、粒子へ意図的に配向性を与えることができる。本研究では、フレームの角度を変え、粒子配向 0° 、 45° 、 90° の3ケースで液状化試験を行った。液状化の判定は、平均有効主応力 $p' = 0\text{kPa}$ の時点とした。表-4に各ケースでの繰返し载荷回数 $N_c = 20$ 回に相当する繰返し応力比 $\sigma_d/2\sigma'$ (以下液状化強度比 R_L)を、図-9に各配向ケースでの液状化強度曲線の結果を示す。

表-4及び図-9より、配向性 90° のケースが最も液状化強度比 R_L が大きく、配向性が 0° に近づくにつれて液状化強度比 R_L が減少していく傾向が確認できた。

表-4 各粒子配向での液状化強度比 R_L

配向角	液状化試験後 R_L
0°	0.2307
45°	0.2475
90°	0.2576

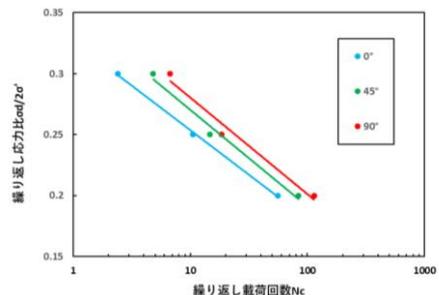


図-9 各粒子配向での液状化強度曲線

3.3 各粒子配向での再液状化試験及び比較

本研究では、3.2で示した3ケースでの液状化試験に続けて再液状化試験を実施した。図10～図12に、3ケースでの液状化強度曲線と再液状化強度曲線の比較結果を示す。また、表-5に R_L 、図10～図12より算出した液状化強度比 R'_L 及び R_L からの増減を示す。

図10～図12、及び表-5より、3ケース全てにおいて、 R'_L が R_L を上回る結果となった。また、 R_L からの増減を比較してみると、配向 0° のケースが最も大きい結果となった。これらの結果は、液状化履歴のある地盤において再液状化が起こりやすいという当初の認識と反する結果である。この結果から、再液状化は小さな地震動でも発生する現象について説明することはできず、他の力学的要因を検討する必要がある。

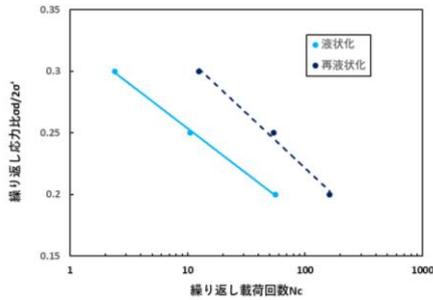


図-10 液状化強度曲線と再液状化強度曲線の比較
(配向 0°)

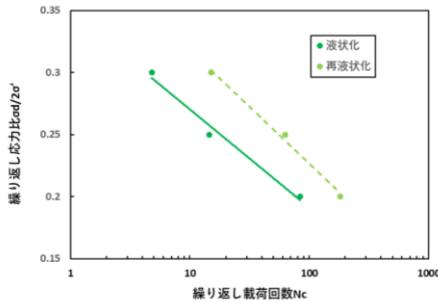


図-11 液状化強度曲線と再液状化強度曲線の比較
(配向 45°)

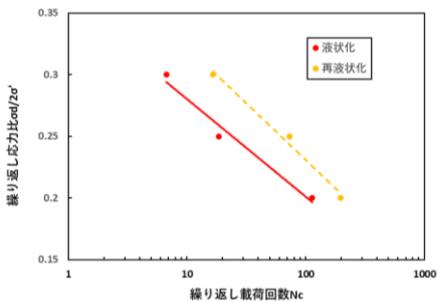


図-12 液状化強度曲線と再液状化強度曲線の比較
(配向 90°)

表-5 液状化強度比の変化

配向角	液状化試験後 R_L	再液状化試験後 R'_L	$R'_L - R_L$
0°	0.2307	0.2831	+0.0523
45°	0.2475	0.2900	+0.0424
90°	0.2576	0.2949	+0.0372

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

4.1 粒子配向性に関して

- ・ 配向性 0° で供試体を作製して液状化試験を行うと、液状化後に配向性は 90° へ向かう傾向がある。
- ・ 配向性 90° で供試体を作製して液状化試験を行うと、液状化後に配向性は大きく変化しない。

4.2 液状化強度に関して

- ・ 0° , 45° , 90° の 3 ケースで作製した供試体の

中で、配向性 90° の供試体が最も液状化強度が大きかった。

- ・ 0° , 45° , 90° の 3 ケース全てにおいて、再液状化強度が液状化強度を上回る結果となった。
- ・ 0° , 45° , 90° の 3 ケースで液状化試験, 再液状化試験を行った結果, 液状化強度の増加は配向性 0° が最も大きい結果となった。

5. 今後の予定

液状化被害と比較し, 再液状化による被害が甚大であったケースが多数報告されている. この現象については, 本研究で得られた実験結果からでは説明できず, 他の力学的要因が含まれている可能性が高い。

今回の結果は, 三軸供試体内での現象であるため, 現地盤採取により, 粒子配向性を確認する必要がある. 配向性 0° の粒子が多く確認された場合, 液状化強度が低下している可能性があることから, 対象地盤においては液状化対策を検討するべきである。

室内においては, 以下のような実験を実施予定である。

- ・ 液状化前後で割線せん断剛性率 G を比較し, せん断剛性率 G に与える液状化履歴の影響を把握する。
- ・ より原位置に近い状態と考えられる模型液状化実験を行い, 粒子配向性を確認する。

参考文献

- 1) 山口晶, 吉田望, 飛田善雄: 土粒子の水中落下が再液状化に与える影響, 土木学会論文集 C, Vol.1.66 No2, 407-417, 2010.6
- 2) 杉本光隆, 河邑眞, 佐藤勝久, 土居正信, 豊田浩史, 吉村優治: 土の力学, 朝倉書店, pp. 111-112, 2002
- 3) Ladd, R. S.: Specimen preparation and liquefaction of sands, Journal of Geotechnical Engineering, 100(10), 1180-1184, 1974.