

模型振動台試験による粒子配向性が液状化特性に与える影響の解明

長岡技術科学大学 ○ 佐々木大貴
長岡技術科学大学 正会員 豊田浩史
長岡技術科学大学 高田晋
長岡技術科学大学 Md.Shohrad Pavel

1. はじめに

飽和砂の再液状化のしやすさは、初回の液状化時に砂に生じるせん断ひずみの大きさ、液状化後の残留ひずみの大きさおよび砂の密度、排水条件などといった多くの因子が関与していることが明らかになっている。

粒子配向性を考慮した再液状化に関する研究はこれまでほとんどなされておらず、数少ない既往研究も、大半が要素試験（三軸液状化試験）に限定されている。そこで、粒子配向性を人為的に与えた供試体について、振動台を用いた液状化試験を実施し、液状化時、再液状化時の液状化強度特性の違いについて比較検討し、粒子配向性が再液状化に及ぼす影響について検討を行った。

2. 研究目的

本研究では、模型振動台を用いた液状化試験を実施し、各粒子配向での液状強度比 RL を求めた。加えて、液状化前後における粒子配向変化の測定、及び再液状化試験を実施し、粒子配向性が再液状化現象に与える影響について検討することを目的とする。

3. 研究方法

3.1 使用材料

試料には豊浦砂を用いた。豊浦砂の粒径加積曲線および物性値を図-1 に示す。

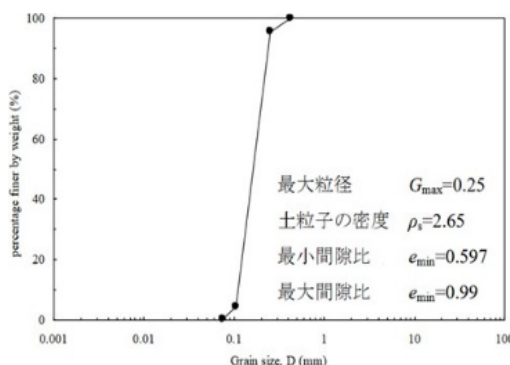


図-1 豊浦砂の粒径加積曲線

3.2 試験装置

3.2.1 可傾式モールド

本研究で使用した可傾式土槽は、任意の配向角での供試体作製できるように設計されており、アルミ合金構造・非貫通ボルト固定・シール処理により、上部蓋や側壁を取り外すことが可能となっている。

3.2.2 模型振動台

本試験装置は、可傾式土槽を振動台の上部に固定し振動できるようになっている。水平振動させることで、模型地盤に直接せん断力を作用させ、実地盤に近い応力状態を再現できる点に特徴を有する。装置には、真空圧および脱気水を供給する経路が設けられ、二重負圧および通水過程を通じて高い飽和度を確保する構造となっている。土槽内部には、深さ方向に3点（1cm, 14cm, 27cm）に、水圧計および加速度センサーが設置できるようになっており、間隙水圧および加速度応答の高精度計測が可能である。図-2 に模型振動台試験機を示す。

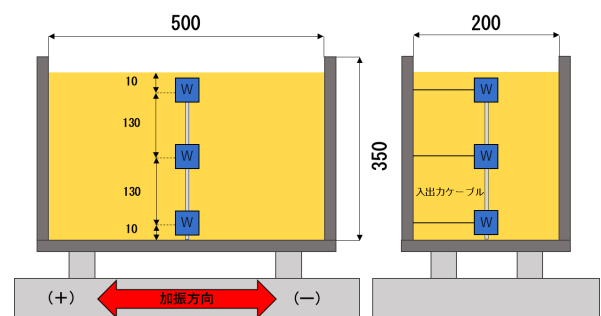


図-2 模型振動台試験機

3.2.3 粒子配向性測定

砂粒子の堆積角度に関する配向性を検討するために、顕微鏡を使用した。本研究では、試料の配向を 0° 、 45° 、 90° の3ケースとした。なお、 0° から 180° まで指定された測定角度 θ を、式(1)、式(2)及び図-3 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次元画像より、基準軸 X と測定されたと粒子の長手方向の角度として求めた¹⁾。

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

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

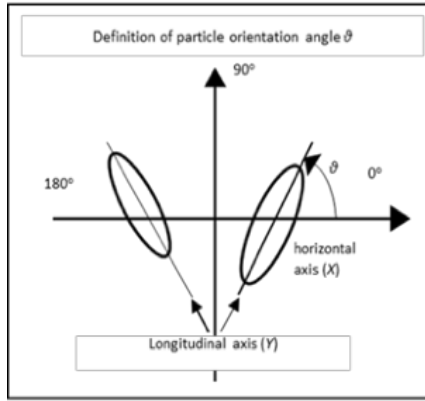


図-3 粒子の配向角度の定義

3.3 試験手順及び方法

3.3.1 試験体作製

本研究では、可傾式土槽を用いて人為的に粒子配向性を与えた供試体を作製した。緩詰めおよび密詰め供試体を作製し、傾斜状態でも均一な堆積が得られる漏斗を用いた空中落下法を採用した。供試体の高さは土槽内で一定（28cm）とし、相対密度 D_r は投入砂重量から算出した。

3.3.2 液状化・再液状化試験

本試験は、供試体作製、飽和過程（供試体の脱気および脱気通水法）、振動試験（加速度・間隙水圧の測定）、圧密過程、再度の振動試験（加速度・間隙水圧の測定）の手順で実施した。また、供試体の相対密度 D_r は 30% および 60% の 2 条件とした。加振条件は、振動数 5Hz、20 サイクルを共通条件として設定した。

3.3.3 粒子配向性の撮影

飽和過程（供試体の脱気および脱気通水法）、振動試験（加速度・間隙水圧の測定）、脱水、粒子配向性撮影の手順で実施した。

撮影はマクロスコープを用いて行った。また、本試験における角度定義を図-4に示した。図-4より、測定角度は基準軸（赤色ライン）と粒子長軸方向で構成される角度とし、測定される全ての粒子に関して 0° から 180° の間で位置づけられるものとしている。基準面は可傾式モールド正面から観察した場合である。

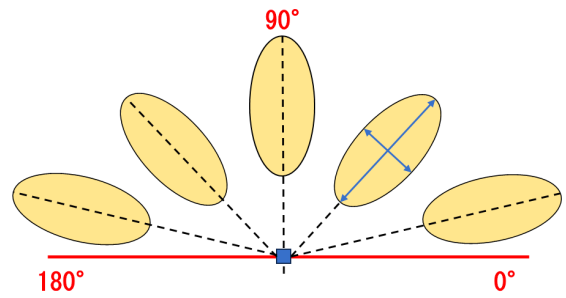


図-4 角度定義

4. 試験結果

4.1 液状化試験結果

4.1.1 加速度と過剰間隙水圧比の時刻歴

液状化時の加速度時刻歴、及び過剰間隙水圧比時刻歴を図5～図10に示す。なお、今回示す結果は、200Gal, $D_r=30\%$ の液状化試験であり、加速度に関しては、配向角 0° のみとする。また、間隙水圧計上部の測定結果は、ノイズが大きいため割愛する。本研究における液状化判定は、すべて過剰間隙水圧比 1.0 地点を基準としており、液状化到達までの載荷回数 N_c （以下 N_c と呼ぶ）は、同値点に到達した時刻で、加速度計の結果より算出を行っている。

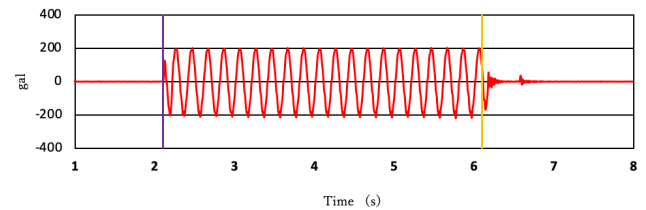


図-5 振動台加速度計時刻歴(200Gal)

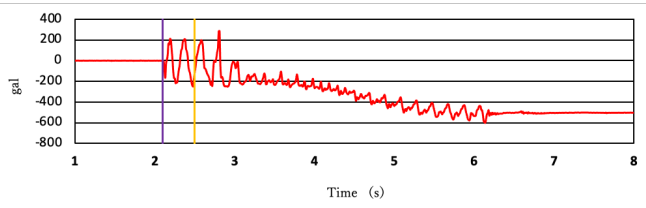


図-6 供試体上部加速度計 A1 時刻歴(200Gal)

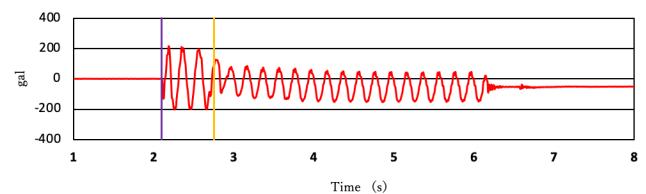


図-7 供試体中間部加速度計 A2 時刻歴(200Gal)

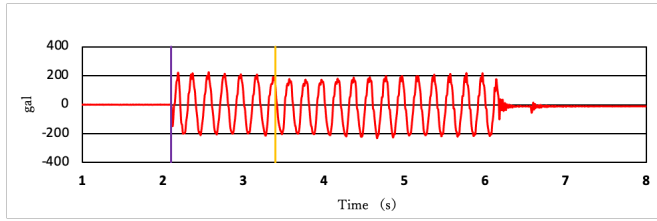


図-8 供試体下部加速度計 A3 時刻歴(200Gal)

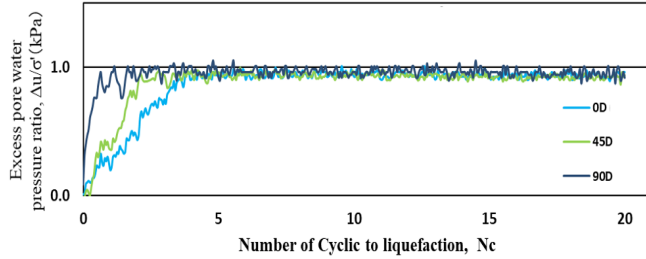


図-9 供試体中間部間隙水圧計

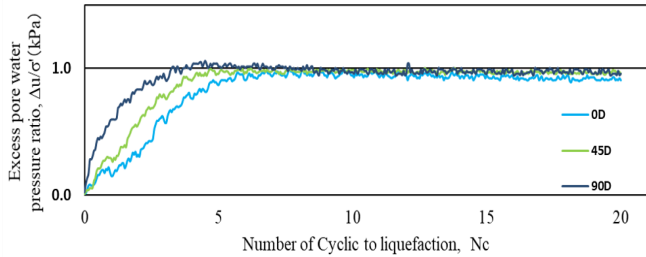


図-10 供試体下部間隙水圧計

過剰間隙水圧比が 1 となる液状化発生時の水圧上昇過程および載荷回数に着目すると、90° 供試体は最も脆弱であり、液状化に至りやすい傾向を示した。一方、0° 供試体は液状化発生時に至るまでの水圧上昇過程および載荷回数が他の角度に比べて多く、より高い抵抗性を有する傾向が確認された。

4.1.2 繰り返し応力振幅比 τ/σ_d の算出

以下に、測定されたせん断加速度から繰り返し応力幅比を算出する過程を示す。中間部せん断力 τ_M を求めた。

$$\tau_M = \frac{(A1+A2)}{2} \rho_{sad} H1 \quad (3.1)$$

下部せん断力 τ_B は次式で求めた。

$$\tau_B = \frac{(A1+A2)}{2} \rho_{sad} H1 + \frac{(A2+A3)}{2} \rho_{sad} H2 \quad (3.2)$$

中間部有効上載圧 σ_{dB} は次式で求めた。

$$\sigma'_{dB} = (\rho_{sad} - \rho_w) g H1 \quad (3.3)$$

下部有効上載圧 σ_{dB} は次式で求めた。

$$\sigma'_{dB} = (\rho_{sad} - \rho_w) g (H1 + H2) \quad (3.4)$$

ここで、A1：上部加速度 (m/s^2)，A2：中部加速度 (m/s^2)，A3：下部加速度 (m/s^2) ρ_{sat} ：供試体湿潤密度， ρ_w ：水の密度 ($1000kg/m^3$)，H1：中間部の深さ (m)，H2：中間部～下部までの深さ(m)，重力加速度($9.8m/s^2$)

※A1～A3 は各サイクルの加速度振幅の平均値

4.1.3 粒子配向角毎の液状化強度曲線について

試験で得られた加速度及び N_c を用いて粒子配向角毎の液状化強度比 R_L の算出を行った。また各試験で得られた液状化強度曲線を図-11、図-12 に示す。

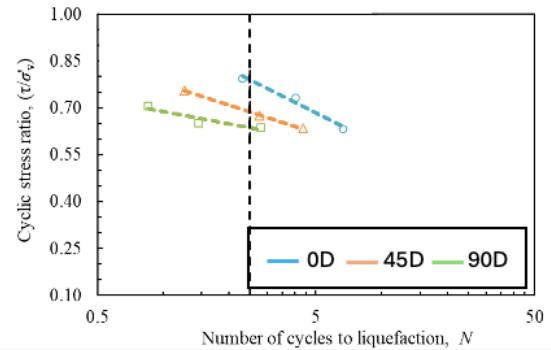


図-11 液状化強度曲線 (Dr=60%)

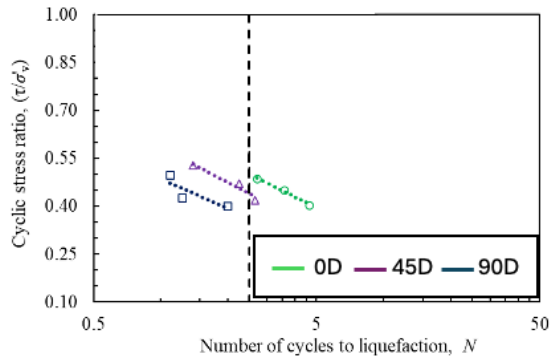


図-12 液状化強度曲線 (Dr=30%)

4.2 粒子配向角毎の再液状化強度について

本研究では、4.1 で示した液状化試験に加えて、再液状化試験を実施した。図-13 及び 図-14 に再液状化試験結果を示す(Dr=30%，200Gal 加振時のみ)。なお、再液状化試験時は、液状化試験で加速度計が傾き、信頼性が得られないといった問題があるため過剰間隙水圧比のみでの強度評価を行っている。

各供試体の過剰間隙水圧比時刻歴を確認すると、概ね上昇具合が一致している傾向が見て取れる。

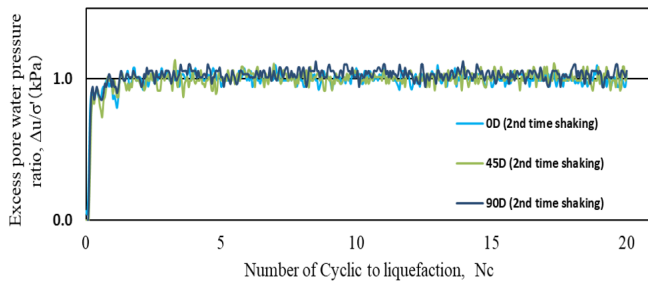


図-13 供試体中間部間隙水圧計

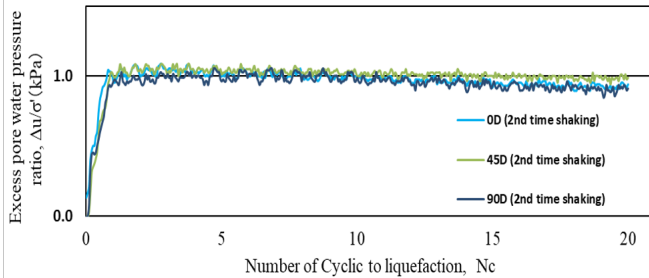


図-14 供試体下部間隙水圧計

4.3 液状化試験による粒子配向の変化

可傾式土槽を用いて、意図的に粒子配向を付与した供試体を作製し、砂粒子をマイクロスコープで観察した。さらに、同条件で作製した別の供試体で液状化試験を実施し、粒子配向性の変化をマイクロスコープで確認した。これにより、液状化前後での粒子配向性を比較した。図-15、図-16に相対密度 30%における液状化前後の粒子配向の比較、図-17、図-18に相対密度 60%における液状化前後の粒子配向の比較を示す。

結果より、相対密度 30%および 60%のいずれにおいても、液状化試験後には粒子配向が 90° 方向へ近づく傾向が顕著に見られた。また、初期配向が 90° である供試体については、試験前後で粒子配向に大きな変化は認められなかった。

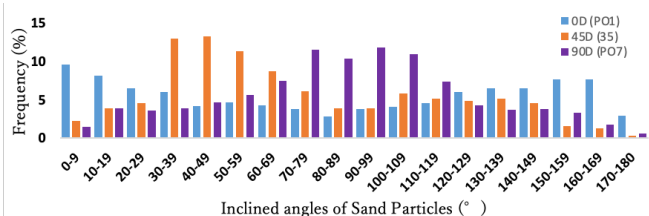


図-15 液状化前の相対密度 30%試料の粒子配向

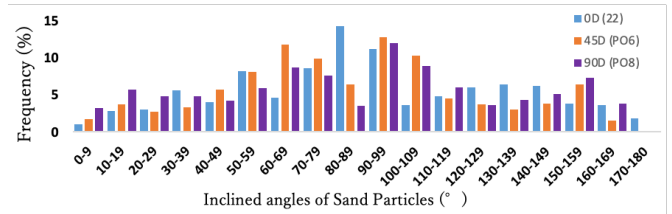


図-16 液状化後の相対密度 30%試料の粒子配向

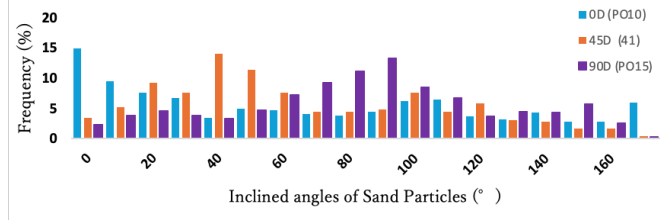


図-17 液状化前の相対密度 60%試料の粒子配向

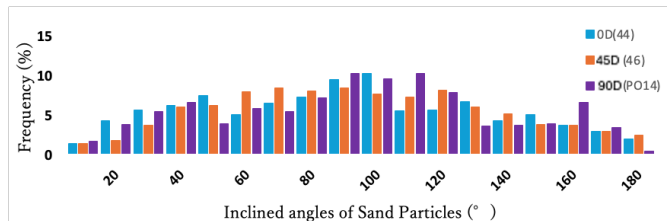


図-18 液状化後の相対密度 60%試料の粒子配向

5. まとめ

- (1) 過剰間隙水圧比が 1 となる液状化発生時の水圧上昇過程および載荷回数に着目すると、90° 供試体は最も脆弱であり、液状化に至りやすい傾向を示した。
- (2) 再液状化試験では、各供試体の過剰間隙水圧比時刻歴を確認すると、概ね上昇具合が一致している傾向が見て取れる。
- (3) 液状化試験による粒子配向の変化として、相対密度 30%および 60%のいずれにおいても、液状化試験後には粒子配向が 90° 方向へ近づく傾向が顕著に見られた。再液状化試験で過剰間隙水圧の上昇傾向が、すべてのケースで一致したのは、これが原因と考えられる。

参考文献

- 1) Curry,J.R: The Analysis of Two-Dimensional Orientation Data, The Journal of Geology, Volume64, Number 2, 1956.