

粒子配向性を考慮した三軸試験と振動台試験による液状化強度比較

長岡技術科学大学大学院 高縁心
 長岡技術科学大学大学院正会員 豊田浩史
 長岡技術科学大学大学院 高田晋

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することが明らかになっている。しかし、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に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模型地盤で振動台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、三軸試験と比較検討し、粒子配向性が再液状化に及ぼす影響について検討していく必要がある。

2. 実験概要

本研究では、豊浦砂を用い振動台液状化実験を行い、各粒子配向での液状強度比 R_L を求めた。また、液状化前後における粒子配向変化の調査、及び再液状化試験についても実施し、過去の三軸液状化試験との比較を行った。

2.1 供試体製作方法

砂供試体試料は、漏斗堆積法を用いて作製した。また、任意の配向角毎に供試体を作製するため可傾式モールド Fig. 1 を採用し、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 Fig. 2 に示す。

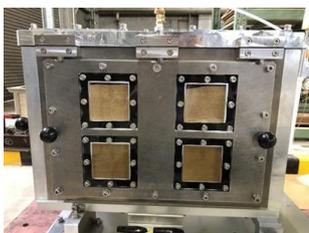


Fig. 1
 Fig. 1 可傾式モールド(正面)

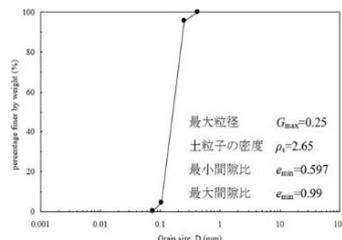


Fig. 2

Fig. 2 豊浦砂の粒径加積曲線

2.2 試験内容

模型振動台で実施した载荷を Table 1 に示す。相対密度に関しては、30%及び60%で試験を実施した。

Table 1 試験内容

载荷 1	粒子配向角毎の液状化強度比 R_L を算出
载荷 2	粒子配向角毎の再液状化強度 R_L を算出

模型振動台実験での試験条件を Table 2 に示す。なお、今回の試験では加振条件として 5Hz, 20Cycle を共通項目としている。また、測定に用いる加速度計及び、間隙水圧計は供試体に対しそれぞれ上中下と 3 か所設置した。

Table 2 試験条件

配向角	試験条件 (5Hz, 20Cycle)				
	Dr (%)	Gal	測定 Dr (%)		
			液状化前	液状化後	再液状化後
0°	Dr=30%	200	36.0	53.2	61.8
		225	36.0	53.2	61.8
		250	36.0	53.2	61.8
	Dr=60%	300	66.5	74.6	87.6
		350	61.6	69.7	74.6
		375	66.5	74.6	82.7
45°	Dr=30%	200	40.0	48.7	57.4
		225	43.7	50.6	60.1
		250	41.8	48.7	60.1
	Dr=60%	300	59.4	67.9	76.3
		350	59.5	68.0	75.5
		375	47.8	56.2	64.6
90°	Dr=30%	200	35.7	62.2	88.6
		225	36.5	62.6	71.3
		250	36.5	62.6	71.3
	Dr=60%	300	60.4	72.0	80.3
		350	59.3	70.8	79.1
		375	57.2	68.9	79.1

3. 試験結果

3.1 測定加速度及び過剰間隙水圧比時刻歴について

加速度計及び間隙水圧計より得られた液状化時の加速度時刻歴、及び過剰間隙水圧比時刻歴を Fig. 3~ Fig. 8 に示す。なお、今回示す結果は、200Gal, Dr=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、間隙水圧計上部及び再液状化時の各種測定は機器の乱れの影響により割愛する。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，液状化到達までの载荷回数 N_c (以下 N_c と呼ぶ) も同値点に到達した時刻より算出を行っている。

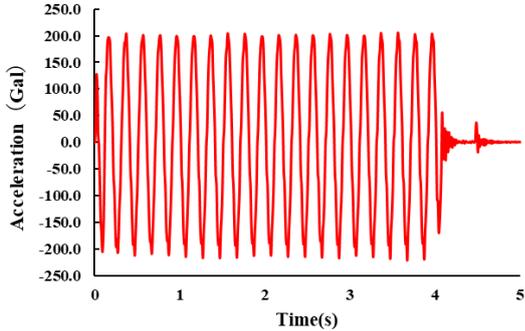


Fig. 3 振動台加速度計時刻歴 (200Gal)

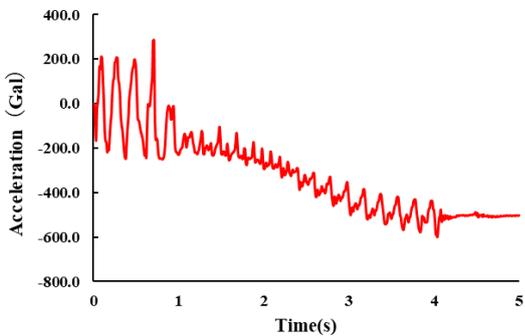


Fig. 4 供試体上部加速度計 A1 時刻歴 (200Gal)

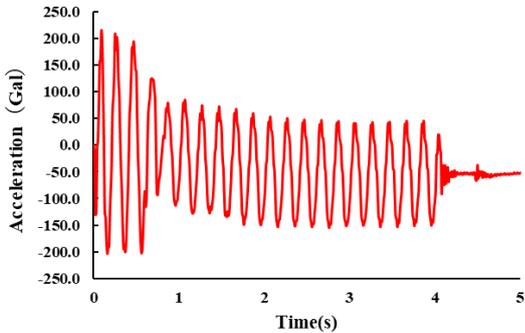


Fig. 5 供試体中間部加速度計 A2 時刻歴 (200Gal)

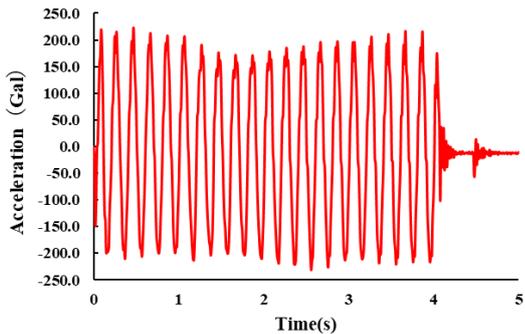


Fig. 6 供試体下部加速度計 A3 時刻歴 (200Gal)

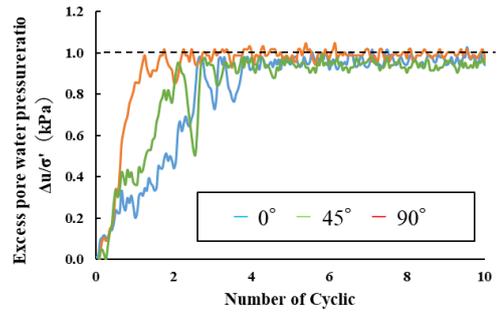


Fig. 7 供試体中間部間隙水圧計 (200Gal)

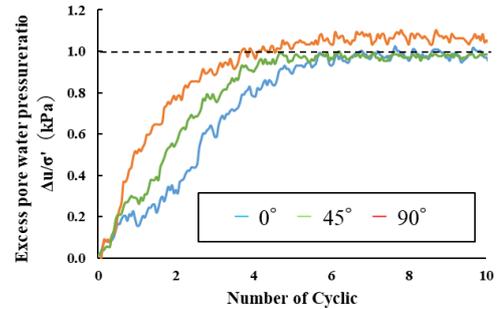


Fig. 8 供試体下部間隙水圧計 (200Gal)

3.2 粒子配向角毎の液状化強度比 R_L について

3.1 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。以下に繰返し応力振幅比 τ/σ_d の算出方法及び試験結果を示す。

3.2.1 繰返し応力振幅比 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 求めた。

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

下部せん断力 r_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_{dM} は次式で求めた。

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

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/s²)

※A1～A3 は各サイクルの加速度振幅の平均値

3.2.2 試験結果

Table 3 に各試験で得られた液状化強度比 R_L を, Fig. 9, Fig. 10 に液状化強度曲線を示す.

Table 3 液状化強度比 R_L

Dr (%)	0°	45°	90°
30%	0.121	0.102	0.082
60%	0.585	0.424	0.404

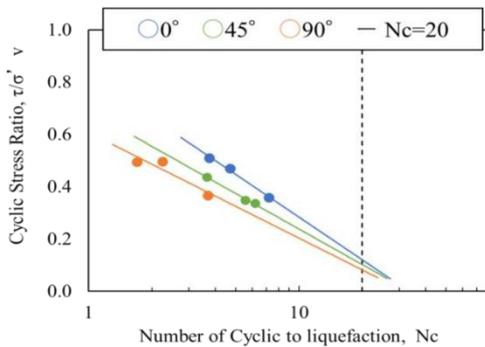


Fig.9 模型振動台液状化強度曲線 (Dr=30%)

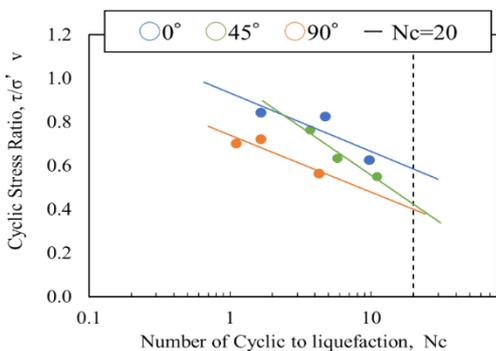


Fig.10 模型振動台液状化強度曲線 (Dr=60%)

以上の結果より, 各相対密度での強度関係はいずれも配向角0°の方が強くなる傾向があった.

3.3 粒子配向角毎の再液状化強度について

本研究では, 3.2で示した液状化試験に加えて, 再液状化試験を実施した. Fig. 11及び Fig. 12 に再

液状化試験結果を示す(Dr=30%, 200Gal 加振時のみ). なお, 再液状化試験時は加速度計の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. 再液状化は, 液状化試験後30分間静置して, 再液状化試験を行った.

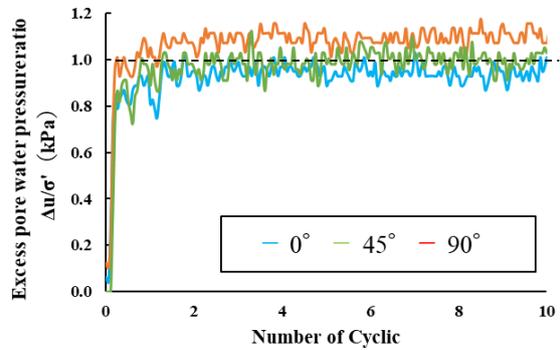


Fig. 11 供試体中間部間隙水圧計 (200Gal)

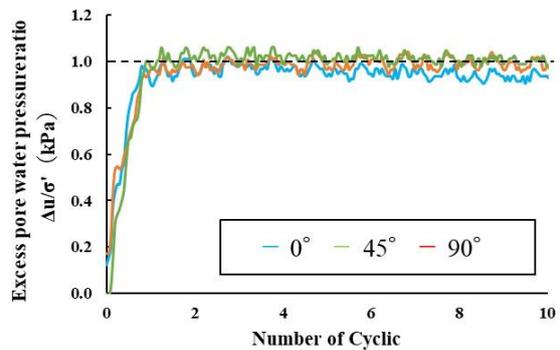


Fig. 12 供試体下部間隙水圧計 (200Gal)

これらの結果とFig. 7, Fig. 8の結果を比較すると, Table 2 で全体的な密度増加が確認されたにも関わらず再液状化強度の大幅な低下 (間隙水圧の上昇が早い) が認められ, さらに液状化時のような各粒子配向角での強度関係の差は確認されなかった.

以上をまとめると,

粒子配向角毎の液状化強度比 R_L 算出

模型振動台実験で, 配向角 0° , 45° , 90° のそれぞれで液状化強度比 R_L を算出した結果, R_L の大きさは, 配向角 0° > 45° > 90° の順となった.

粒子配向角毎の再液状化強度

模型振動台実験での再液状化試験により、配向角 0° , 45° , 90° のそれぞれで再液状化強度を比較した結果、強度関係は各配向角でほぼ等しい結果となった。

4. 結論

本研究における結論を以下に記す。

1. 液状化履歴を受けた地盤は液状化強度として脆弱な地盤へと変化するため、密度が増加するにも関わらず再液状化の発生が懸念される。
2. Fig. 13, Fig. 14に既往研究³⁾で得られた三軸液状化試験で液状化強度曲線を示す。Table 4に、これらの液状化強度比 R_L を示す。Fig. 9, Fig. 10で示した模型振動台実験での液状化強度曲線との比較から、各供試体(配向角 0° , 45° , 90°)での強度関係が逆転していることがわかる。現状、両試験機での結果相違について明確な原因は明らかになっていないものの、これは模型振動台と三軸試験での繰返しせん断载荷方法の違いによるものだと推測される。繰返しせん断時、三軸試験では、軸方向応力と半径方向応力の差による軸差応力が作用しているが、模型振動台試験では、水平振動により、水平面にせん断力が作用することになる。今後、载荷方法の違いによる液状化強度の違いについて、詳細に調べる予定である。

Table 4 液状化強度比 R_L

Dr (%)	0°	45°	90°
30%	0.111	0.133	0.156
60%	0.187	0.204	0.241

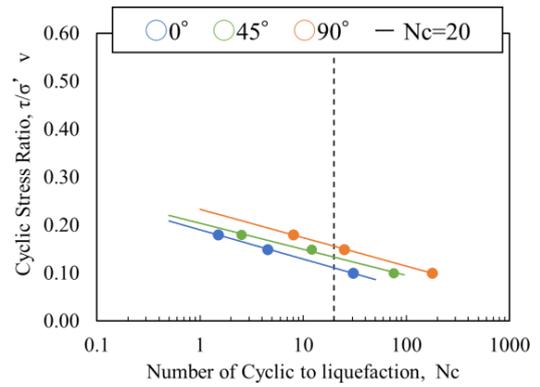


Fig. 13 三軸試験³⁾の液状化強度曲線(Dr=30%)

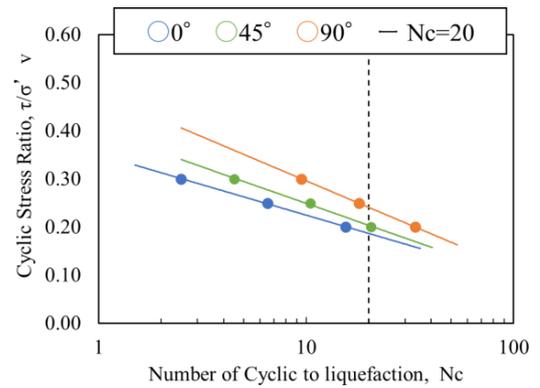


Fig. 14 三軸試験³⁾の液状化強度曲線(Dr=60%)

参考文献

- 1) 地盤工学会：2003 年三陸南地震・宮城県北部地震災害報告書，2003。
- 2) Curry,J.R: The Analysis of Two-Dimensional Orientation Data, The Journal of Geology, Volume64, Number 2, 1956.
- 3) 藤原涼：三軸試験を用いた液状化による砂粒子配向性の変化，令和4 年度長岡技術科学大学大学院工学研究科修士論文，2022。