

砂粒子配向性に着目した 三軸試験と振動台試験による液状化強度の比較

長岡技術科学大学大学院

○岩崎真也

長岡技術科学大学大学院

豊田浩史

1. はじめに

一度液状化した緩い砂地盤は、その後、排水を伴って密になる。したがって、液状化した地盤は、液状化しにくくなると考えられる。しかし、実際には、過去に液状化した地盤が再液状化した事例が報告されている。その報告の中には、以前に液状化した地震よりも小さい地震で再液状化が発生した事例も示されている。例えば、1983年5月の日本海中部地震¹⁾、2003年5月の三陸南地震²⁾等で実例が報告されている。最近では、2011年2月のクライストチャーチ地震によって、2010年9月の地震と同じエリアで液状化が起きたと報告されている。さらに、若松は、液状化履歴地点約1万6500地点の中の150箇所でも複数地震による繰返し液状化が発生したと報告している³⁾。このように、一度液状化が発生しても、必ずしも液状化しにくくなるとは言いきれない。再液状化に関する既往の研究では、砂質土は液状化後、排水によって密度が増加したにもかかわらず、液状化前よりも著しく液状化しやすくなるという現象が Finn et al.⁴⁾ などによって示されている一方で、砂質土は液状化履歴を受ければ液状化しにくくなるという報告も存在する。

飽和砂地盤における再液状化時の液状化特性を明らかにすることは、過去の地震による液状化の情報に有益に利用するためにも急務であるといえる。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。

本論文では、上記の趣旨に基づき、より原地盤に近い状態で振動を与えられる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 R_L を求めた。加えて、液状化前後における粒子配向変化の調査、及び信濃川河川敷における液状化層の地盤調査(新潟市中央区)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とともに、過去の三軸液状化試験との比較から、各試験で得られた力学特性の違いについても検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、豊浦砂を用い飽和排水振動台実験を行い、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 供試体作製方法

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、振動台試験機及び測定器概略図を Fig. 3 に示す。

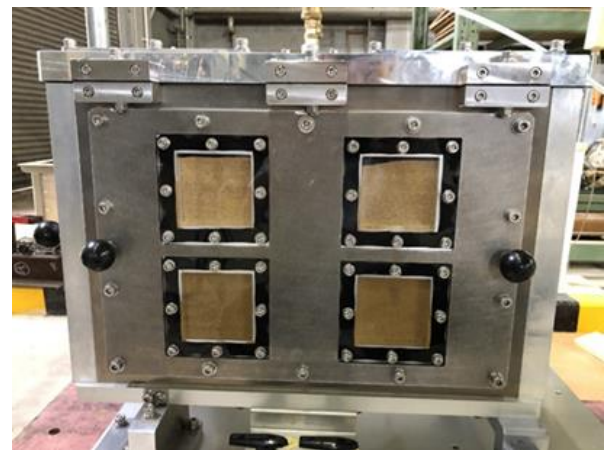


Fig. 1 可傾式モールド(正面)

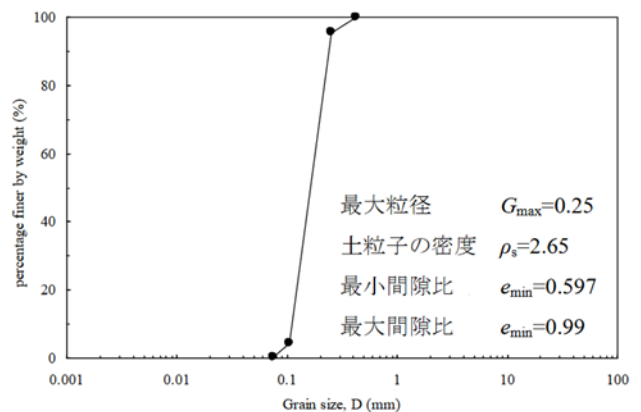


Fig. 2 豊浦砂の粒径加積曲線

キーワード 液状化, 再液状化, 砂粒子配向性, 液状化強度

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 TEL0258-47-9618

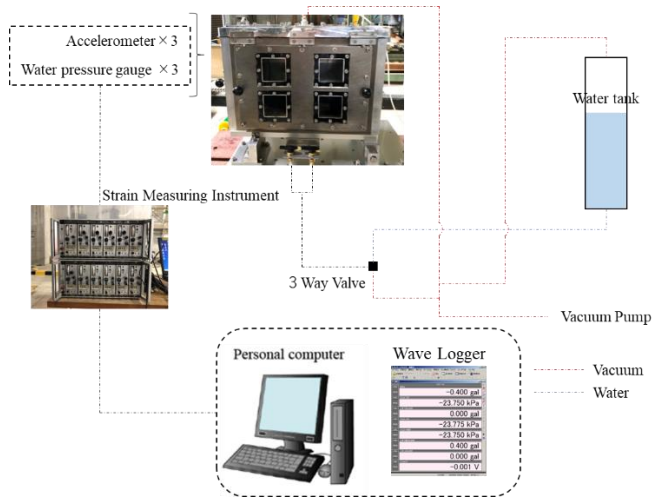


Fig. 3 振動台試験機及び測定器概略図

2.2 試験内容・条件

2.2.1 試験内容

模型振動台で実施した試験内容を Table. 1 に示す。なお、試験 1～試験 3 に関しては相対密度 30%及び 60% で試験を実施している。

Table 1 試験内容

試験 1	粒子配向角毎の液状化強度比 R_L 算出
試験 2	粒子配向角毎の再液状化強度
試験 3	液状化前後での粒子配向性変化
試験 4	信濃川河川敷における液状化層の地盤調査

2.2.2 試験条件

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、Fig. 4, Fig. 5 に測定で使用した加速度計及び間隙水圧計の設置位置を示す。

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

Fig. 4, Fig. 5 で示した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. 6～Fig. 11 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) も同地点に到達した時刻より算出を行っている。

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

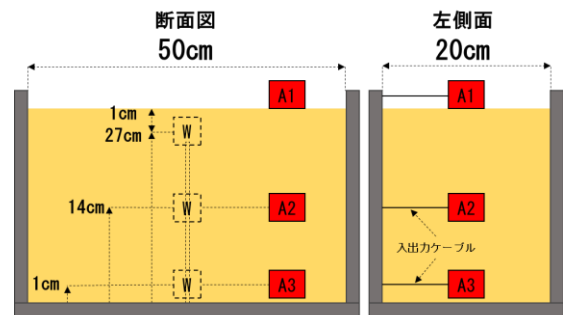


Fig. 4 加速度計設置位置 (※別途振動台に 1 箇所設置)

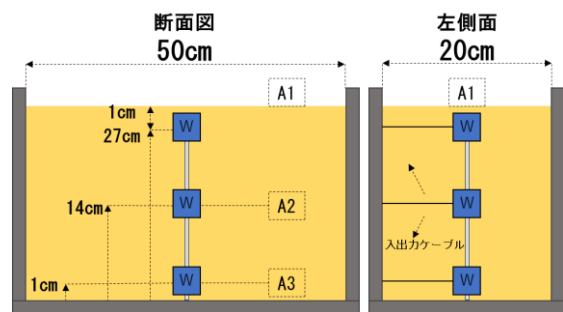


Fig. 5 間隙水圧計設置位置

キーワード 液状化, 再液状化, 砂粒子配向性, 液状化強度

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 TEL0258-47-9618

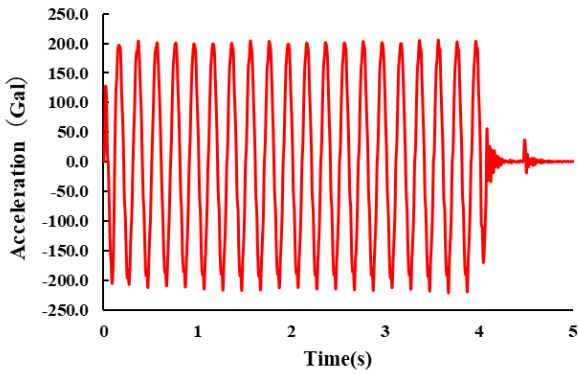


Fig 6 振動台加速度計時刻歴(200Gal)

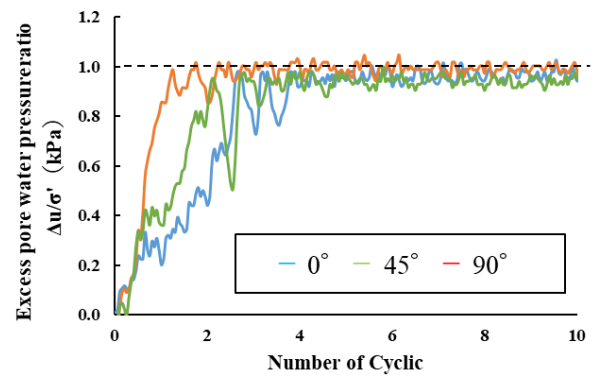


Fig 10 供試体中間部間隙水圧計 (200Gal)

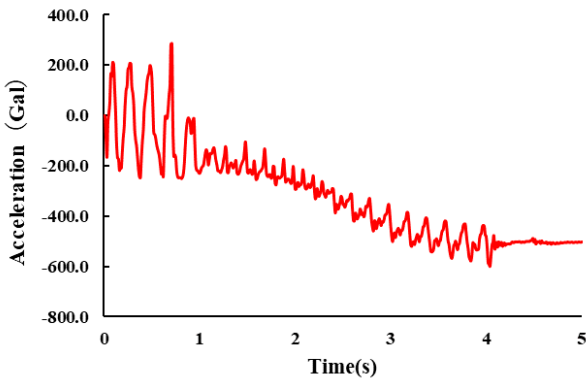


Fig 7 供試体上部加速度計 A1 時刻歴(200Gal)

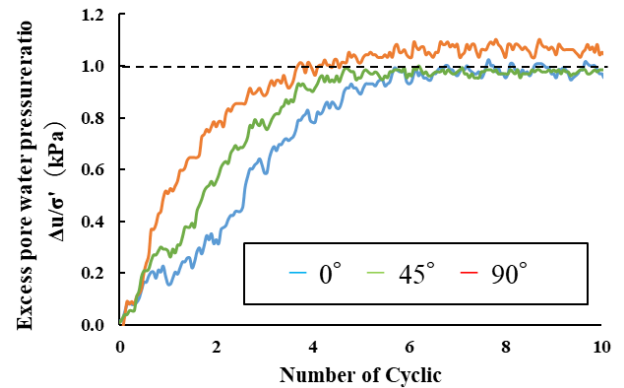


Fig 11 供試体下部間隙水圧計 (200Gal)

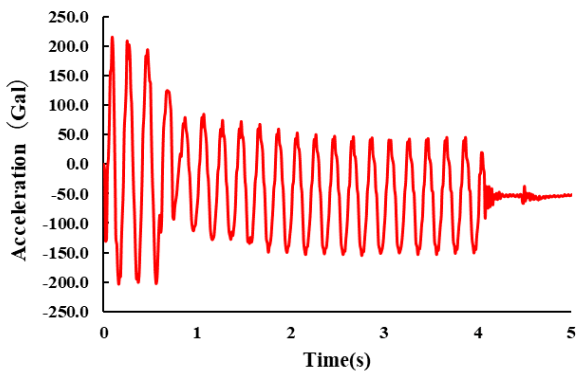


Fig 8 供試体中間部加速度計 A2 時刻歴(200Gal)

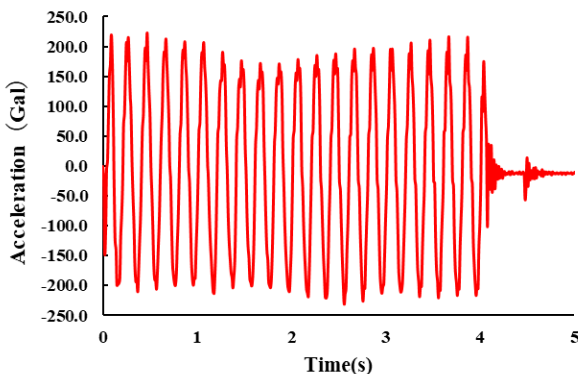


Fig 9 供試体下部加速度計 A3 時刻歴(200Gal)

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振幅比を算出する過程を示す.

中間部せん断力 τ_M は次式で求めた.

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

下部せん断力 τ_B は次式で求めた.

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

中間部有効上載圧 σ'_{dM} は次式で求めた.

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

下部有効上載圧 σ'_{dB} は次式で求めた.

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

ここに,

A1 : 上部せん断加速度 (m/s²)

A2 : 中間部せん断加速度 (m/s²)

- A3 : 下部せん断加速度 (m/s²)
- ρ_{sat} : 供試体湿潤密度 (kg/m³)
- ρ_w : 水の密度 (1000kg/m³)
- H1 : 中間部深さ (m)
- H2 : 中間部～下部までの深さ (m)
- g : 重力加速度 (9.8m/s²)

※A1～A3 は各振幅の最大加速度の平均値

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. 12, Fig. 13 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

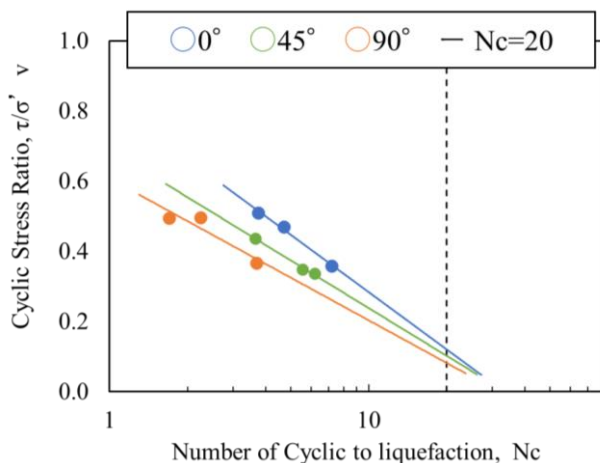


Fig. 12 模型振動台液状化強度曲線 (Dr=30%)

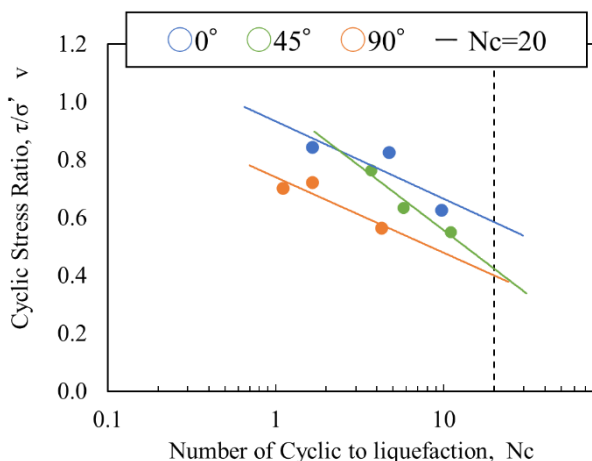


Fig. 13 模型振動台液状化強度曲線 (Dr=60%)

配向 0° の方が強くなる傾向を示した。

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. 14 に再液状化試験フローを、Fig. 15 及び Fig. 16 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。

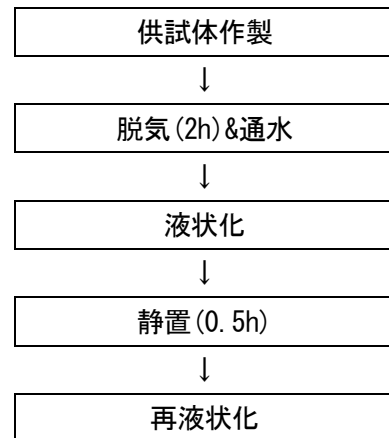


Fig. 14 再液状化試験フロー

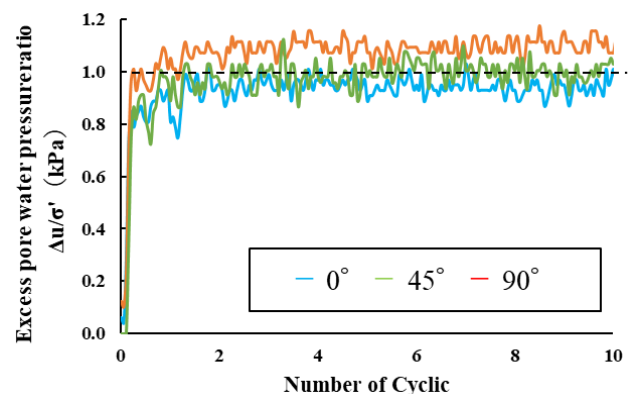


Fig. 15 供試体中間部間隙水圧計 (200Gal)

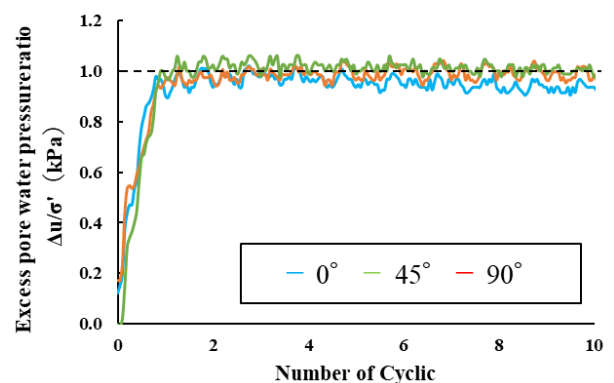


Fig. 16 供試体下部間隙水圧計 (200Gal)

以上の結果より、各相対密度での強度関係はいずれも

キーワード 液状化, 再液状化, 砂粒子配向性, 液状化強度

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 TEL0258-47-9618

以上の結果より、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。

3.4 液状化前後での粒子配向性変化について

本研究では、模型振動台での液状化履歴前後における各供試体の粒子配向性変化を測定した。Fig. 17に測定に用いたデジタルマイクローブを示す。なお、測定角から算出される代表角 ϕ と集中度V.Mの算出方法については次章に示すとおりである。



Fig 17 デジタルマイクローブ

3.4.1 代表角 ϕ (°)

代表角とは、供試体内での卓越角度のことである。本研究では、Curry (1956)⁵⁾によって提案された以下の式を基に算出を行っている。

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sin 2\theta}{\sum_{i=1}^n \cos 2\theta} \right) \quad (3.5)$$

3.4.1 集中度V.M(%)

集中度とは、ベクトル集合に対して合成されたベクトルの大きさ(または長さ)のことを示す。したがって、V.Mの値が大きい場合、各ベクトル成分が同一の方向を向いている可能性が高く、値が小さい場合は各ベクトル成分がランダムで非体系的な分布をしている可能性が高いことを示す。

$$V.M = \frac{100}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\sin 2\theta)^2 + \sum_{i=1}^n (\cos 2\theta)^2} \quad (3.6)$$

3.4.2 試験結果

Fig. 18~Fig. 21に粒子配向分布図、Table 4に各供試体での代表角 ϕ と集中度V.Mの結果を示す。

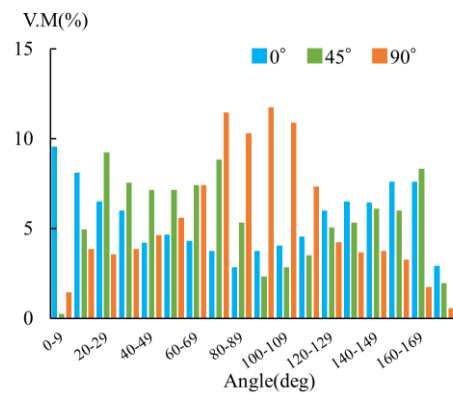


Fig. 18 液状化前粒子配向分布図(Dr=30%)

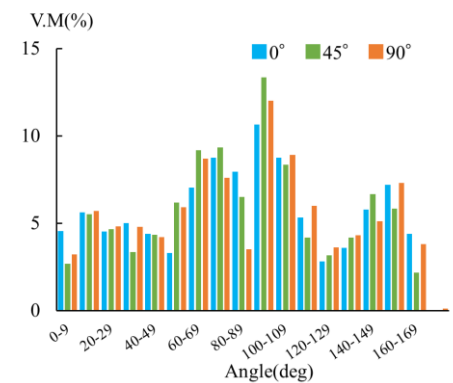


Fig. 19 液状化後粒子配向分布図(Dr=30%)

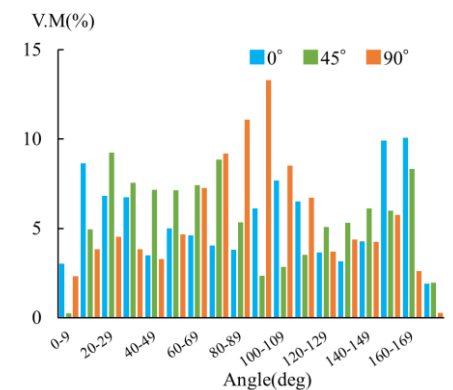


Fig. 20 液状化前粒子配向分布図(Dr=60%)

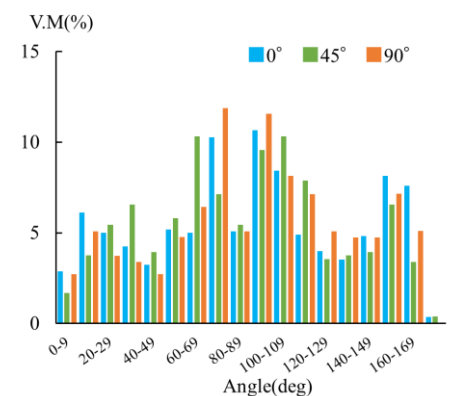


Fig. 21 液状化後粒子配向分布図(Dr=60%)

Table 4 配向角測定結果

Dr (%)	配向角	加振	ϕ ($^{\circ}$)	V. M (%)	
30%	0 $^{\circ}$	有	試験 1	89.8	26.49
			試験 2 (再現性)	86.1	16.09
		無	試験 1	172.9	16.98
	45 $^{\circ}$	有	試験 1	85.4	27.77
			試験 2 (再現性)	83.1	38.1
		無	試験 1	47.6	12.4
	90 $^{\circ}$	有	試験 1	88.4	19.54
			試験 2 (再現性)	89.2	7.13
		無	試験 1	87.0	40.6
60%	0 $^{\circ}$	有	試験 1	88.4	9.92
			試験 2 (再現性)	95.4	14.56
		無	試験 1	113.6	1.75
	45 $^{\circ}$	有	試験 1	80.8	26.3
			試験 2 (再現性)	86.3	25.9
		無	試験 1	47.6	12.4
	90 $^{\circ}$	有	試験 1	87.7	19.55
			試験 2 (再現性)	93.8	14.02
		無	試験 1	90.2	33.91

液状化前は各配向角付近へ集中的に粒子が分布、代表角 ϕ も配向角と概ね同値を示した一方、液状化後は全体的に液状化前の堆積角から 90 $^{\circ}$ 方向への変化が確認された(代表角 ϕ も同様)。これは液状化履歴が粒子の堆積角度に対して何らかの影響を及ぼしている可能性が高く、今後さらなる検討が必要とされる。

3.5 信濃川河川敷における液状化層の地盤調査

本調査では、1964年に発生した新潟地震における液状化被害エリアを対象に地盤調査を実施し、採取試料の粒子配向性の検討を行った。

3.5.1 調査区域, 調査期間

調査区域は Fig. 22 に示すとおり、新潟市中央区一番堀通町昭和橋上流側(信濃川本川下流左岸 5.6k 付近河川敷)である。調査期間は、令和4年1月17日～令和4年2月28日である。

3.5.2 調査内容

調査内容は、Table 5 と下記に示すとおりである。

- 1) 機械ボーリング 20m (10m \times 2 孔)
- 2) 標準貫入試験 10 回 (5 回 \times 2 孔)
- 3) 乱れの少ない試料採取 10 本 (5 本 \times 2 孔)
- 4) 表面波探査 93m (70m \times 1 測線、23m \times 1 測線)
- 5) 室内土質試験用試料作成 1 式
 - ・凍結試料の押し出し観察：10 本
 - ・押し出し試料の写真撮影：10 本
 - ・凍結供試体の押し抜き：24 供試体 (ϕ 50mm)

Table 5 調査内容詳細

機械ボーリング	掘削孔径 ϕ 116mm (ノンコア)
原位置試験	標準貫入試験
試料採取	GS サンプルング
足場仮設	平坦地(陸上)
給水仮設	(ポンプ運転: 20m 以下)
調査孔閉塞	(CB グラウト材注入)

3.5.3 採取深度とボーリング調査結果

乱れの少ない試料の採取深度を Fig. 23 に、ボーリング調査から判明した各地層の特徴を地質層序表として簡易的に整理したものを Table 6 に示す。

なお、自然水位は令和4年1月下旬時点で深度 0.9m \sim 1.0m (標高+0.3m \sim +0.4m) である。

Table 6 地質層序表

区分	地層記号	土質	N 値 (平均 N 値)	色調
沖積層	As1-1 (深度 3 \sim 8m)	シルト混り細砂	3 \sim 6 (4.9)	暗灰
	As1-2 (深度 6m \sim)	中砂, 細砂	13 \sim 21 (15.8)	暗灰

※平均 N 値は相加平均



Fig 22 調査区域(新潟市中央区一番堀通町昭和大橋上流側)

3.5.4 As1-1 層 (砂質土) における地盤概要

- 1) 完新世沖積層の上部層 A1 に属する氾濫原堆積物の砂質土層、やや粒子均一な細砂より構成
- 2) 所々で中砂～粗砂を不規則に少量混入する。細粒分を不規則に少量混入し、所々でシルト薄層～ラミナ状で挟在
- 3) 含水量は多い～中位
- 4) N 値は 3～6 (平均 N 値=4.9) を示し、相対密度は緩いと評価される

3.5.5 As1-2 層 (砂質土) における地盤概要

- 1) 完新世沖積層の上部層 A1 に属する氾濫原堆積物の砂質土層、やや粒子不均一な細砂より構成
- 2) 所々で粗砂、及び礫径 $\phi 5\text{mm}$ 程の細礫を不規則に少量混入する。細粒分を不規則に少量混入し、所々でシルトを薄層～シーム状で挟在、または塊状で混入する。
- 3) 含水量はやや多い。
- 4) N 値は 13～21 (平均 N 値=15.8) を示し、相対密度は中位と評価される。

3.5.6 採取試料における粒子配向性の測定

本研究では、GS サンプリングにより得られた乱れの少ない採取試料を用いて 3.4 と同様に粒子配向性の測定を実施した。なお、試料は凍結状態のまま長さ 15cm に切り分けたものを使用しており、15cm に満たない端片については、物理試験等に供する予備試料とした。

Table 7 に配向性測定試料詳細を、Fig. 24～Fig. 27 に粒子配向分布図を、Fig. 28～Fig. 31 に試料写真をそれぞれ示す。

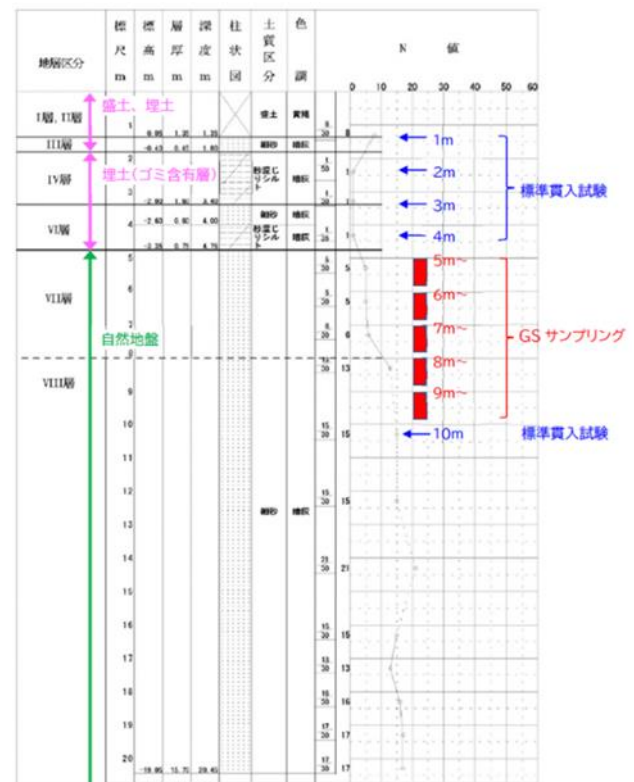


Fig 23 乱れの少ない試料の採取深度

Table 7 配向性測定試料詳細

試料 No.	採取深度 (GL-m)		液状化履歴*	ϕ (°)
T1-1 (No5)	-5.29	～ -5.14	可能性大	91.0
T1-2 (No2)	-6.55	～ -6.40	可能性大	97.8
T1-4 (No2)	-8.71	～ -8.56	可能性低	109.9
T1-5 (No2)	-9.62	～ -9.47	可能性低	57.6

*新潟地震(1964年)での液状化の推定。推定は評価N値によるもの

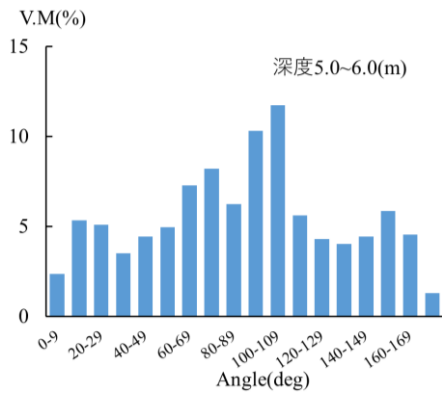


Fig. 24 T1-1 (No. 5) 粒子配向分布図



Fig. 28 T1-1 (No. 5) 試料写真

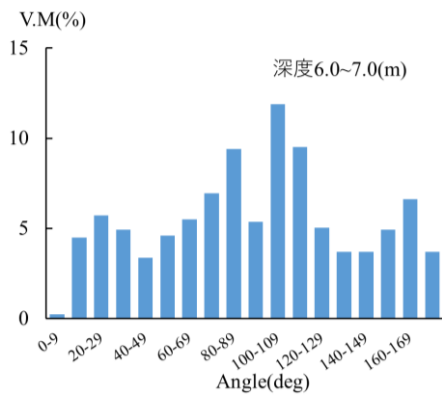


Fig. 25 T1-2 (No. 2) 粒子配向分布図



Fig. 29 T1-2 (No. 2) 試料写真

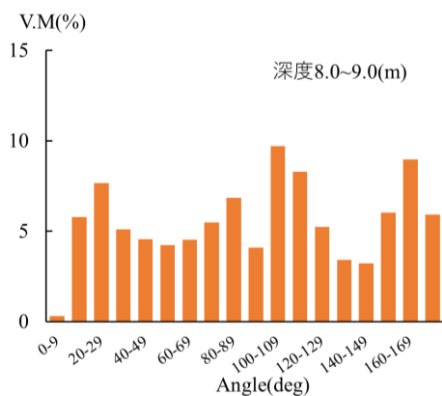


Fig. 26 T1-4 (No. 2) 粒子配向分布図



Fig. 30 T1-4 (No. 2) 試料写真

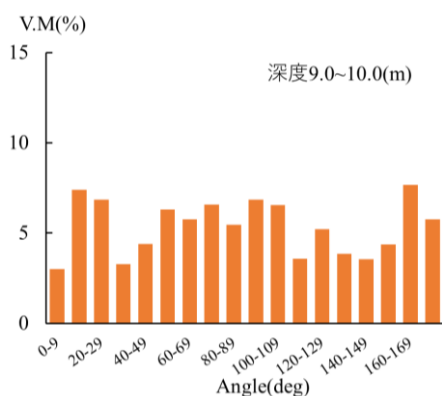


Fig. 27 T1-5 (No. 2) 粒子配向分布図



Fig. 31 T1-5 (No. 2) 試料写真

以上の結果より、深度 5.0～8.0(m) 試料の配向性においては全体的に粒子配向が 90° 方向へ集中する傾向が確認された。一方、深度 8.0～10.0(m) 試料の配向性に関しては粒子配向が局所的に集中する傾向は弱く、全体に広く分散する傾向が確認された。今回、各層の測定 N 値から新潟地震時の液状化履歴の有無を推定しているが、Table 7 に示したような液状化履歴の可能性別に試料を評価した場合、3.4 で示した模型振動台実験での粒子配向性の変化傾向と概ね一致する傾向となっている。

本調査での測定 N 値から液状化有無の断定はできないものの、ボーリング調査時に T1-1 試料、T1-2 試料から液状化痕 (Fig. 32, Fig. 33) が確認されており、今回の N 値による区分けは新潟地震時の液状化の有無と概ね一致していると考えられる。したがって、調査結果を総合的に判断すると今回の実地盤試料における配向性の傾向は概ね妥当であると判断できる。

4. まとめ

本研究で実施した室内試験及び実地盤調査から得られた結果を以下にまとめる。

4.1 粒子配向角毎の液状化強度比 R_L 算出

模型振動台実験での液状化履歴により、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、強度関係は配向角 0° > 45° > 90° となった。

4.2 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 (過剰間隙水圧比の上昇過程)、強度関係は各配向角でほぼ等しい結果となった。

4.3 液状化前後での粒子配向性変化

模型振動台実験での粒子配向性測定試験により、液状化によって粒子配向性は 90° 方向へ変化する傾向が確認された。

4.4 信濃川河川敷における液状化層の地盤調査

新潟地震時の液状化被害エリアである信濃川本川下流左岸 5.6k 付近河川敷において、液状化履歴の可能性が高い層及び可能性が著しく低い層で粒子配向性の比較を実施した結果、液状化履歴の可能性が高い層では配向角 90° 方向への集中を確認した。一方、液状化の可能性が低い層では全体的に配向が広く分散する

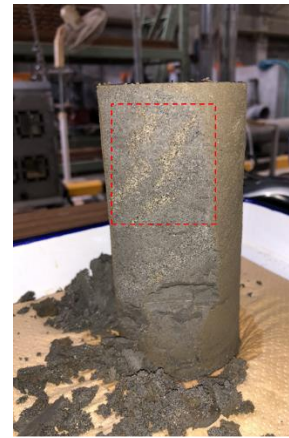


Fig. 32 T1-1 (No. 5) 試料における液状化痕



Fig. 33 T1-2 (No. 2) 試料における液状化痕傾向が確認された。

5. 結論

本研究における結論を以下に記す。

- 1) 室内試験結果及び実地盤試料採取から、液状化履歴を受けた地盤は全体的に配向性 90° 方向への堆積が認められる。
- 2) 1) より、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。

6. 今後の展望

Fig. 34, Fig. 35 に既往研究⁶⁾で得られた三軸液状化試験での液状化強度曲線を、Table 8 に Fig. 34 における液状化強度比 R_L を示す。Fig. 12, Fig. 13 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機での繰返しせん断載荷方法の違いによるものと推測される。つまり、異方性

を有する供試体の場合は、せん断方向を考慮した液状化試験の実施が重要であることが明らかとなった。

～参考文献～

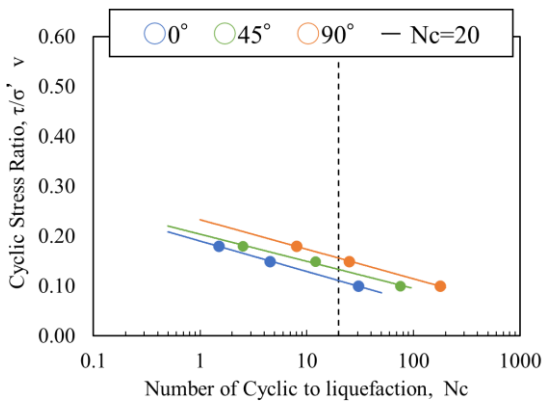


Fig. 34 三軸試験⁶⁾での液状化強度曲線 (Dr=30%)

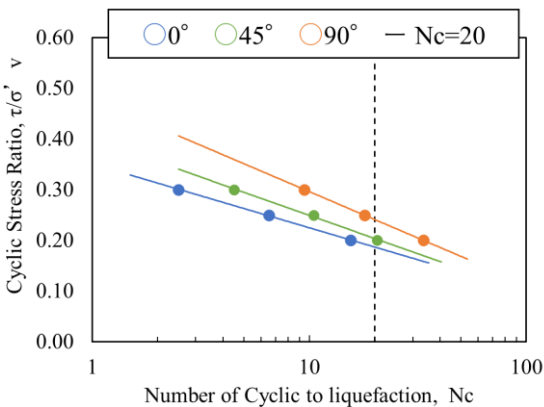


Fig. 35 三軸試験⁶⁾での液状化強度曲線 (Dr=60%)

Table 8 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

- 1) Yasuda, S. and Tohno, I. : sites of reliquefaction caused by the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake, Soils and Foundations, Vol. 28, No. 2, pp. 61-72, 1998.
- 2) 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.
- 3) 若松加寿江：2009年までの最新データによる再液状化地点および液状化発生の限界震央距離の検討，第46回地盤工学発表会，pp. 1721-1722, 2011.
- 4) Finn, W. D. L., Bransby P. L. and Pickering D. J. : Effects of strain history on liquefaction of sand, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 96, No. 6, pp. 1917-1934, 1970.
- 5) Curry, J. R. The Analysis of Two-Dimensional Orientation Data, The Journal of Geology, Volume 64, Number 2, 1956.
- 6) 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，