

液状化によるセメンテーション破壊と密実化が再液状化に及ぼす影響

長岡技術科学大学大学院 地盤工学研究室 塚田千広
指導教員 豊田浩史

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地震では、地震の規模が大きく、広い範囲で液状化が発生した。そのため、人々の生活を支えるインフラ設備に対して大きな被害をもたらした。この被害報告によると、過去に液状化が発生した地点において、再度液状化が発生する再液状化現象も見られた。一般には、液状化が発生すると間隙水が排出されて、間隙比が下がり密になることで、液状化が起こりにくくなるとされている¹⁾。そのため、液状化強度に比べ、再液状化強度は上昇すると考えられる。

しかし、東北地方太平洋地震では、過去に液状化が確認された地震よりも小さな震度で再液状化が発生した地点もあった。密度の観点から強度が上昇すると考えられていたにもかかわらず、実際には液状化強度が下がったと考えられ、液状化強度には密度以外の影響があったと考えられる。以上の事から、再液状化のメカニズムについては様々な要因が関連しているため、未解明である。

土の液状化強度に影響を及ぼす要因として、応力履歴や年代効果、粒子配向性、密実化、化学反応などがあり²⁾、これらの要因を再現するための試験が広く行われている³⁾。本研究では、特に年代効果に着目し、セメント添加を行うことで、実際の地盤の年代効果を再現した。

2. 研究概要

本研究では、先行研究でセメント添加を行った年代効果再現試料に対して、繰返し载荷を行い、液状化強度曲線を求めた。この液状化強度曲線から繰返し回数 20 回の際の繰返し強度比を液状化強度 R_L とした。また、液状化判定において、以下の 2 種類を用いた。

- ・判定①平均有効主応力 $p'=0kPa$ →液状化履歴小
- ・判定②両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ →液状化履歴大

図 1 の先行研究⁴⁾より得られた液状化強度比か

ら、液状化履歴の大小によって、液状化強度に違いが発生することが分かる。得られた液状化強度に着目すると、液状化履歴の大きい場合には液状化強度が減少している。一方で、液状化履歴の小さい場合には液状化強度が上昇していることが分かる。このように液状化の判定方法によって液状化強度が変化していることが再液状化のメカニズムが未解明であると考えられる。

そこで、本研究ではセメントを添加した試料を用いて、液状化履歴による力学的特性の変化を検討する。そのために、様々なひずみ領域に対して力学的特性を求める試験を行うことで、液状化強度の変化傾向との比較検討を行う。多角的なアプローチのために大ひずみ領域に対して三軸圧縮試験、微小ひずみ領域に対してベンダーエレメント試験(BE 試験)、中ひずみ領域に対して局所ひずみ測定試験(LSS 試験)を用いて比較する。

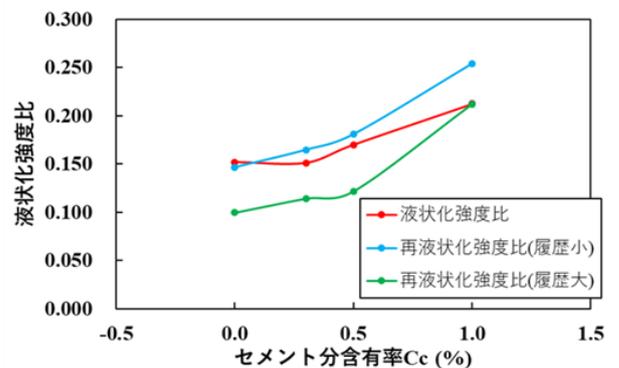


図 1 液状化履歴による液状化強度の違い

3. 試験方法

3. 1 試験装置

本研究で用いる試験機は、セル内完全浸水式三軸試験機である。本試験機の、供試体上部のキャップ、供試体下部のペデスタルにベンダーエレメントを内蔵しており、供試体内部に sin 波を発信し、非破壊のせん断波測定試験を行うことが出来る。また、本試験機には供試体に局所微小ひずみ測定装置を設置することができ、せん断過程において、軸方向と水平方向

のひずみを測定することが出来る。

図 2 に、本研究で用いた試験機を示す。

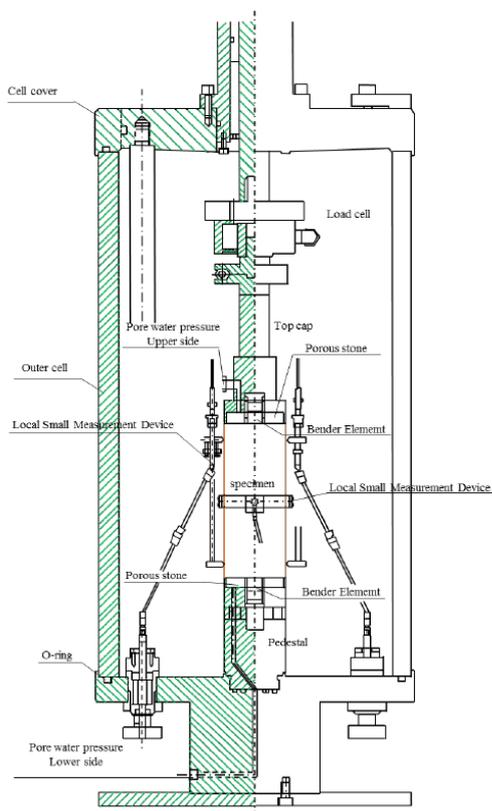


図 2 三軸試験機の概略図

3. 2 供試体作製

本研究で用いる試料は豊浦砂に早強ポルトランドセメントを添加し、供試体は高さ 12.5cm, 直径 5.0cm のものを漏斗落下法で作製する。早強ポルトランドセメントは水中養生 4 日間で強度を発現するため、本研究のセメンテーション供試体は 4 日間の水中養生を行った。本研究で用いた豊浦砂の物性値を表 1 に示す。

本研究では、年代効果による影響を検討するために、セメント含有率 C_c を 0.0%, 0.3%, 0.5%, 1.0% の 4 ケースで実施する。

表 1 豊浦砂の物性値

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
細粒分含有率 F_c (%)	0.0
砂分含有率 S_c (%)	100.0
礫分含有率 G_s (%)	0.0

3. 3 試験手順

本研究では、漏斗堆積法で供試体を作製し、三軸室に設置した後、供試体を飽和させる。飽和の確認をしたのちに、背圧を作用させ、供試体は平均有効主応力 $p'=50kPa$ で圧密を行う。その後、非排水繰返し載荷を行い、供試体の液状化を行う。繰返し載荷終了後には供試体内の間隙水を排水しながら平均有効主応力 $p'=50kPa$ で再圧密を行う。本研究では、再圧密後に以下の 3 種類の試験を行い、再液状化のメカニズムについて検討する。

また、本試験では密実化の影響を検討するために、圧密後、再圧密後の間隙比を計測することで液状化に伴う排水による密度の変化を比較する。

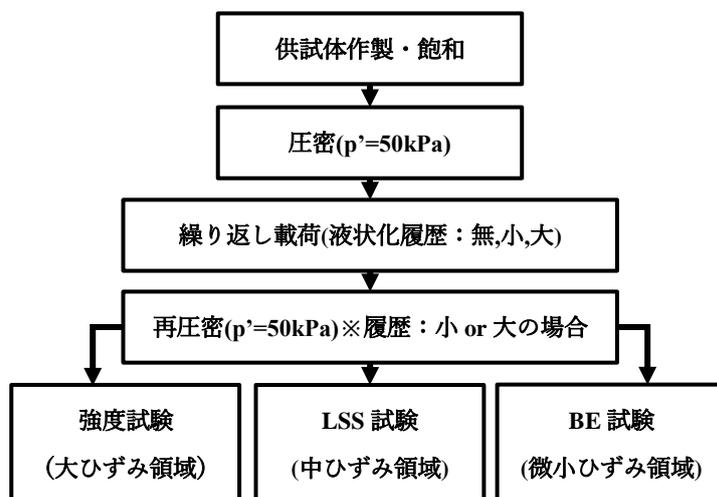


図 3 研究の流れ

3. 3. 1 三軸圧縮試験

本研究で実施した強度試験は、平均有効主応力一定の条件下で 0.20mm/min の圧縮せん断を行う。また、本試験では、せん断時の最大圧縮強度と圧密応力 ($p'=50kPa, 100kPa, 150kPa$)によりモール・クーロンの破壊規準を用いて強度定数を算出する。以下の式を用いて、強度定数(c, φ)を求める。また、本試験では大ひずみ領域における砂の最大圧縮強度も求め、比較検討を行った。

$$rad = \sin^{-1}(3 \times M/6 + M)$$

$$\varphi = rad \times 180/\pi$$

$$c = \frac{\{3 - \sin(rad)\} \times f_0}{6 \times \cos(rad)}$$

ここで、 M, f_0 : 圧縮強度—圧密応力の近似式の傾き及び切片、 φ : 内部摩擦角($^\circ$)、 c : 粘着力(kN/m²)とする。

3. 3. 2 ベンダーエレメント(BE)試験

本研究で実施する BE 試験は、図 4 に示すように供試体内部に上部のキャップから sin 波を発信し、ペダスタルで受信する。この時の供試体内部の波の伝播速度と砂の湿潤密度から以下の式のように、初期せん断剛性率を求めることができる。

$$G_0 = \rho_t \times V_s^2 \times 10^{-3}$$

ここで、 G_0 ：初期せん断剛性率(MPa)、 ρ_t ：湿潤密度(g/cm^3)、 V_s ：せん断波速度(m/s)とする。

本研究では、せん断波速度の測定のために、入力波と受信波から、せん断波の到達時間を判定する T.D.法を用いる。また、受信波の立ち上がり点の読み取り位置は、start-to-start 法⁶⁾によるものを利用して、せん断波到達時間とする。

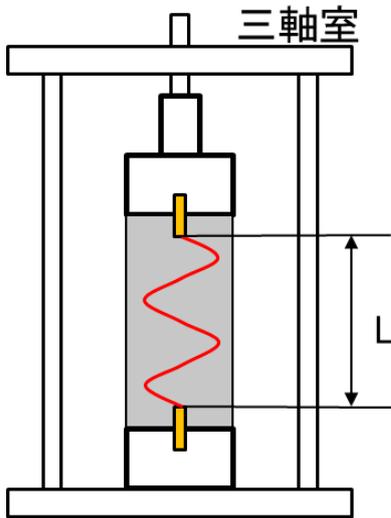


図 4 BE 試験の概略図

3. 3. 3 局所微小ひずみ(LSS)試験

本研究で実施する LSS 試験は、供試体に設置された微小ひずみ測定装置を用いて直接ひずみを求める試験である。供試体軸方向のひずみを測定する装置を 2 か所、供試体水平方向のひずみを測定する装置を 1 か所設置する。図 2 にひずみ測定装置の設置個所を示す。

本研究では、軸方向ひずみ ε_a と水平方向ひずみ ε_r からせん断ひずみ ε_s を算出し、せん断時の軸差応力 q から割線せん断剛性率を求める。

$$\varepsilon_s = 2/3 \times (\varepsilon_a - \varepsilon_r)$$

$$q = \sigma'_a - \sigma'_r$$

$$G = \frac{q}{3 \times \varepsilon_s \times 10}$$

ここで、 ε_a ：軸方向ひずみ(%), ε_r ：水平方向ひずみ(%), ε_s ：せん断ひずみ(%), σ'_a ：軸方向応力(kPa), σ'_r ：水平方向応力(kPa), q ：軸差応力(kPa), G ：割線せん断剛性率(MPa)とする。

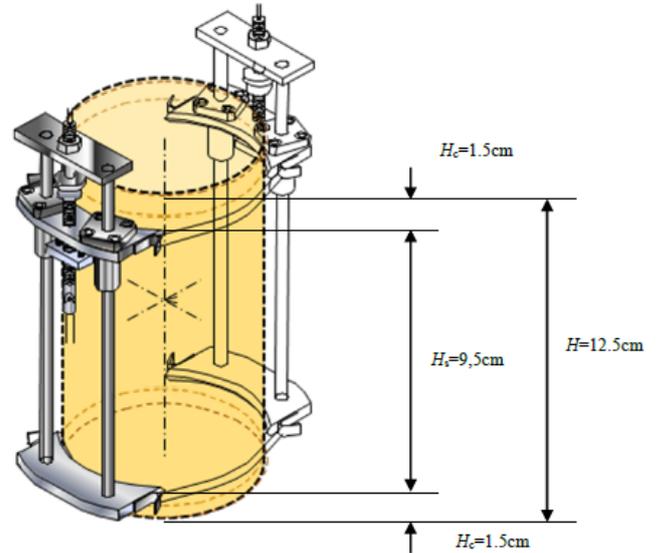


図 5 供試体及びひずみ測定装置の概略図

4. 試験結果および考察

本研究で得られた結果について考察する。本研究では、液状化試験から得られた液状化強度比と関連のある力学的特性の検討のため、以下の 4 つの指標の比較を行った。

① 相対密度(密実化の影響)

はじめに、密実化による影響を検討する。本研究では、繰返し载荷の後に間隙水の排水を行い、再圧密を行った。その際の供試体の間隙比から、相対密度を算出することで検討する。図 6 に示した相対密度に着目すると、液状化履歴無に比べ、履歴小では相対密度が約 3.0% 上昇、履歴大では約 7.5% の密度上昇となった。一般に密度の上昇に従い、液状化強度は上昇するが、液状化試験から得られた液状化強度は履歴大で減少しており、違った傾向にあることが確認された。そのため、液状化履歴による液状化強度の変化には、密度以外の要因が関連していると考えられる。

② 圧縮強度(大ひずみ領域の力学的特性)

三軸圧縮試験から得られた圧縮強度と液状化強度の比較を行う。図 7 より圧縮強度は液状化履歴によって変化する傾向があり、液状化に伴う土粒子構造の変化や密度による影響があると考えられる。ま

た、圧縮強度はセメント添加によって増加する傾向にあるが、セメント添加 $C_c=1.0\%$ の場合でも大きく強度が上昇することはない。大きな上昇が見られなかった要因として、最大圧縮強度 q_{max} の際のひずみは軸ひずみ 5.0% 以上となっており、セメント添加による土粒子間の固結が破壊された状態にあるためであると考えられる。

次に液状化試験から得られた液状化強度との比較を行うと、液状化履歴無と履歴小、履歴大ともに変化傾向が大きく違っており、直接的な相関はない。要因としては、大きくひずみが発生しており、要素破壊の影響が大きく発生しているからであると考えられる。

③初期せん断剛性率(微小ひずみ領域の力学的特性)

次に、BE 試験から得られた初期せん断剛性率 G_0 について検討する。初期せん断剛性率には、液状化に伴う密実化による間隙比の影響が考えられる。そこで、間隙比関数 $F(e)=(2.17-e)^2/(1+e)$ で G_0 を除することで、間隙比の影響を無くし検討する。間隙比の影響を除いた正規化せん断剛性率に着目すると、セメント添加によってせん断剛性が上昇していることが分かる。また、正規化せん断剛性率は液状化履歴によって減少しており、液状化による土粒子間の固結の破壊が考えられる。そこで、液状化によるセメンテーションの破壊を定量的に示すため、以下の式を用いてセメンテーション破壊率を算出する。

セメンテーション破壊率(%)

$$= \frac{\text{液状化にともなうせん断剛性率の低下}}{\text{セメント添加によるせん断剛性率の増加}} \times 100$$

図 9 に示したセメンテーション破壊率から、セメント添加が多い程、セメンテーション破壊が減少していることが分かる。また、液状化履歴で比較した場合、履歴大に比べ履歴小では半分程度の破壊となっていることが分かる。要因としては、粒子間の固結が、履歴小では完全に破壊されなかったためであると考えられる。

液状化強度の変化傾向と比較を行うと、液状化履歴無と比べ、履歴小・履歴大ともにせん断剛性が減少しており、液状化試験から得られた液状化強度の変化傾向と違った結果となった。そのため、微小ひずみ領域の力学的特性にはセメンテーション破壊が

影響しているが、直接的な相関は無い。

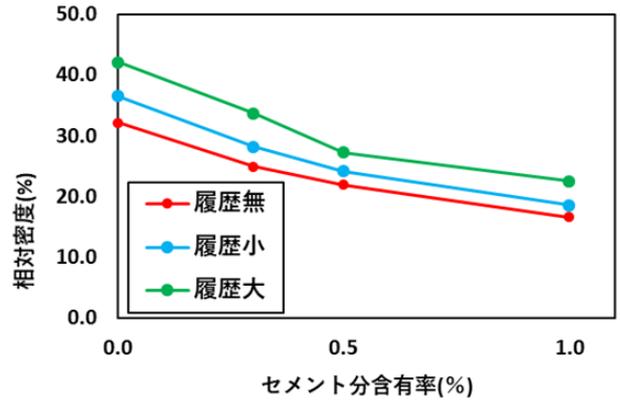


図 6 相対密度の変化

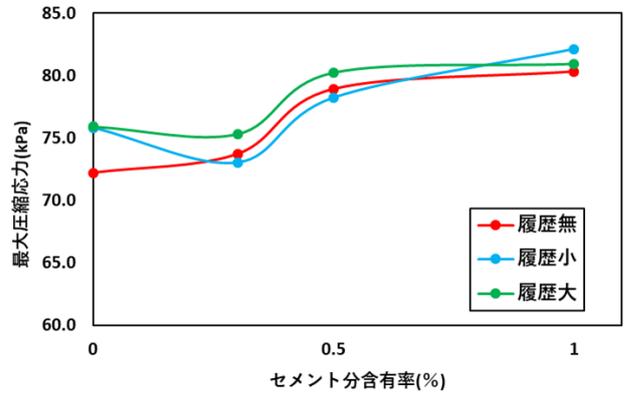


図 7 LSS 試験結果 ($G_c=0.3\%$)

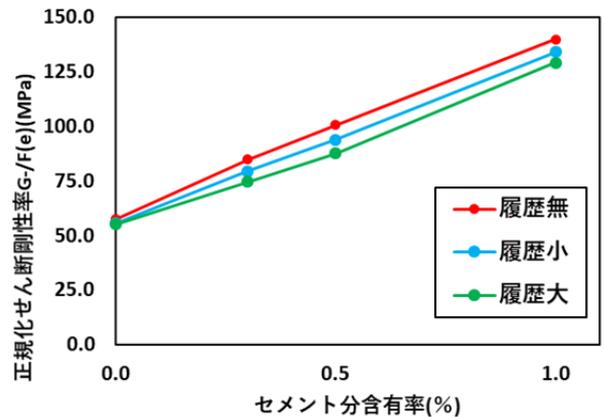


図 8 正規化せん断剛性率の計算結果

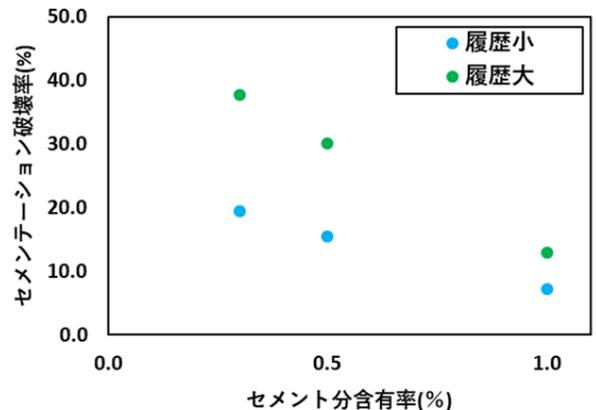


図 9 セメンテーション破壊率の計算結果

④局所ひずみ測定試験(中ひずみ領域の力学的特性)

LSS 試験から得られた割線せん断剛性率 G について検討する。LSS 試験はせん断ひずみ約 0.001%~1.0%のせん断剛性率を連続歴に計測することができ、本試験でもせん断ひずみの増加と共に変化する割線せん断剛性率が確認された。図 10~図 13 のグラフに着目すると、すべてのセメント添加のケースにおいてせん断ひずみが増加するにしたがって割線せん断剛性率は減少することが分かる。理由として、ひずみが大きくなるほど要素破壊が発生し、剛性が失われるためであると考えられる。また、液状化履歴の有無や大小によって、割線せん断剛性率の減少の傾向は違っていることが分かる。一方で、せん断ひずみ 1.0%付近では割線せん断剛性率が同程度となっている。

液状化強度の変化傾向と比較を行うと、部分的に液状化強度の変化傾向と一致するところの確認された。Cc=0.3%, 0.5%, 1.0%ではせん断ひずみ 0.003%~0.1%の部分で傾向の一致が見られ、Cc=0.0%では 0.005%付近での一致が見られた。

5. 比較検討

以上の①~④の検討結果と液状化強度の変化傾向を表 2, 3 にまとめる。比較結果から、中ひずみ領域の力学的特性である割線せん断剛性率の液状化履歴による変化傾向が最も液状化強度の変化傾向と一致している部分が多いことが分かる。特に液状化履歴小では全ケースの傾向が一致している。また、液状化履歴大の場合でも、Cc=0.0%以外では傾向の一致が見られる。一方で、履歴大の Cc=0.0%のせん断ひずみ 0.005%付近では、変化傾向と一致している。

他の項目の比較では、多くのケースで液状化強度の変化傾向と一致しない。そのため、液状化強度の変化には密実化や大ひずみ領域における力学的特性、微小ひずみ領域の力学的特性は直接的には相関がないと考えられる。

以上の結果から、液状化強度の変化傾向は、せん断ひずみ 0.005%付近の力学的特性と関連があると考えられる。

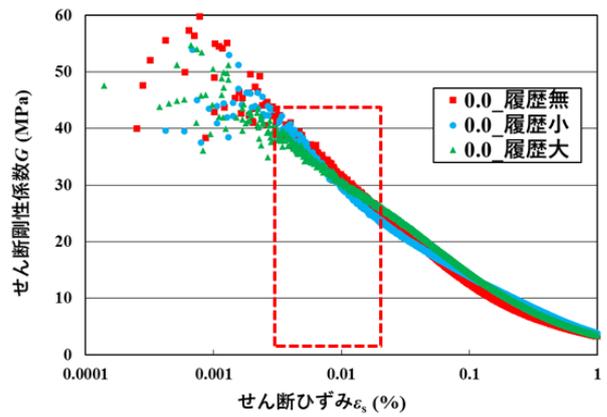


図 10 LSS 試験結果 (Cc=0.0%)

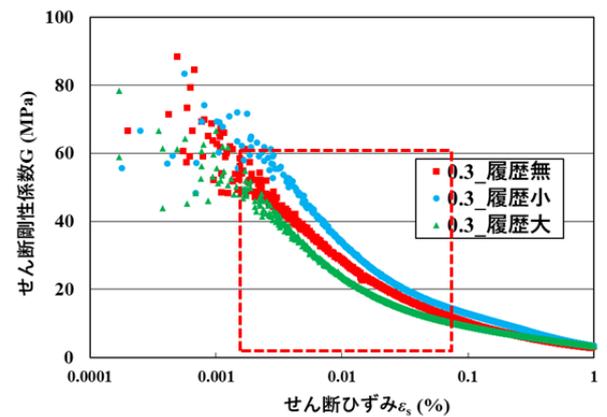


図 11 LSS 試験結果 (Cc=0.3%)

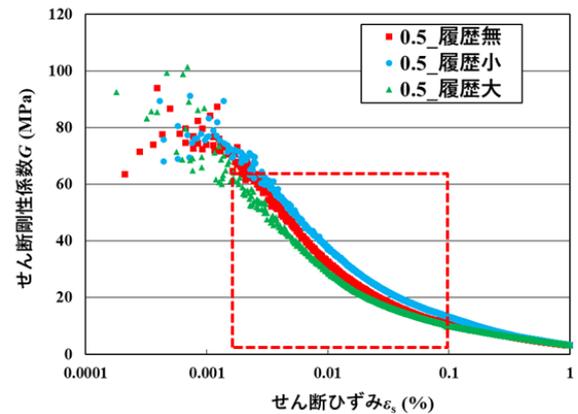


図 12 LSS 試験結果 (Cc=0.5%)

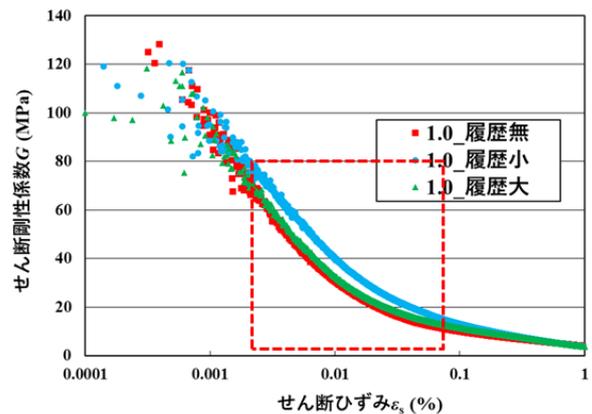


図 13 LSS 試験結果 (Cc=1.0%)

6. まとめ

本研究から得られた知見をまとめる.

- 液状化に伴う密実化には液状化履歴により違う
- 液状化履歴による密度上昇による強度上昇はなく、液状化強度には密度以外の要因が関連する
- 大ひずみ領域における力学的特性は、密実化とセメンテーション破壊の影響が関連している
- 初期せん断剛性率はセメント添加による、土粒子間の固結により上昇する
- 液状化履歴の大小により、セメンテーション破壊の程度は変化する
- LSS 試験より得られた割線せん断剛性率の減少傾向は、液状化履歴により異なる
- せん断ひずみ 0.005%付近における力学的特性が、液状化強度と相関がある

7. 今後の展望

本研究から得られた結果より、今後の展望を示す. 中ひずみ領域の力学的特性が液状化強度と相関があると考えられるため、今後は要素試験以外のアプローチを行い、液状化強度との相関を検討する必要がある. そこで、原位置試験の一種であるプレッショメータ試験を行い、実際の地盤の力学的特性を検討することが効果的であると考えられる.

参考文献

- 1) 東畑郁生, 他: 砂の液状化抵抗が年代とともに増加する現象, 日本地震工学会論文集, 第 15 巻, 第 7 号, pp.121-130, 2015
- 2) 半澤秀郎, 岸田隆夫: 年代効果を受けた粘土の非排水強度特性, 土と基礎, Vol.30, No.12, pp. 5-10, 1982.
- 3) 奥村哲夫・成田国朝・大根義男: 人工的にセメンテーション効果を与えた砂の非排水繰返し強度, 土木工学会論文報告書, Vol.29, No.2, pp.169-180, 1989.
- 4) 吉田岬: 人工的にセメンテーションを与えた砂の再液状化に関する研究, 令和 2 年度長岡技術科学大学大学院修士論文, 2020
- 5) 長井優之: 液状化による砂のセメンテーションの変化に関する研究, 令和 3 年度長岡技術科学大学大学院修士論文, 2021
- 6) 川口貴之, 三田地俊之, 澁谷啓, 佐野侑房: 室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 G の評価, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp. 195-207, 2001.

表 2 液状化強度の変化傾向との比較(履歴小)

			0.0	0.3	0.5	1.0
履歴 無 ↓ 小	R_L	液状化強度	→	↗	↗	↗
	D_r	相対密度	↗	↗	↗	↗
	q_{max}	最大圧縮応力	↗	↘	↘	↗
	G_0	初期せん断剛性率	↘	↘	↘	↘
	G	割線せん断剛性率	→	↗	↗	↗

表 3 液状化強度の変化傾向との比較(履歴大)

			0.0	0.3	0.5	1.0
履歴 無 ↓ 大	R_L	液状化強度	↘	↘	↘	→
	D_r	相対密度	↗	↗	↗	↗
	q_{max}	最大圧縮応力	↗	↗	↗	↗
	G_0	初期せん断剛性率	↘	↘	↘	↘
	G	割線せん断剛性率	→	↘	↘	→