

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

地盤工学研究室 長井 優之
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、地震の規模が大きく、強い地震動の継続時間が長かったことや余震の影響により、液状化や再液状化が発生した。それに伴い、住宅、道路、河川堤防、港湾施設などのライフラインに甚大な被害が発生した。この被害報告によれば、過去の液状化発生時点と同一地点でも液状化する現象である再液状化が確認された。また、場所によっては過去に液状化が確認された地震よりも小さい地震で再液状化が発生することも報告された。しかし、一度液状化した地盤は、排水を伴って密になるため、液状化しにくくなるといわれており、再液状化のメカニズムは明らかになっていないのが現状である。

本研究では、土の液状化強度に影響を与える要因の一つである年代効果に着目する。年代効果とは、地盤が堆積年代を経ることによって液状化強度が上昇する現象である。本研究は、砂試料に微量のセメントを添加することにより、セメンテーション効果を与え、年代効果を再現する。年代効果を再現した試料において飽和非排水繰返し三軸試験（以下、液状化試験）や局所ひずみ測定試験（以下、LSS試験）、ベンダーエレメント試験（以下、BE試験）を実施する。

本研究は、液状化による砂のセメンテーションの変化に着目し、年代効果再現試料の液状化特性や波動伝播特性、微小変形特性を把握し、年代効果が液状化および再液状化に与える影響や再液状化のメカニズムの解明を目的とする。そこで、液状化の程度が小さい場合と液状化の程度が大きい場合の両方で試験を実施し、液状化の程度が再液状化特性に与える影響について液状化強度比、相対密度、せん断剛性率に着目して比較検討を行う。

2. 試験方法

2.1 試験装置

本研究には、図-1に示した局所変位計付き三軸試験装置を用いる。この三軸試験装置を用いて、液状化試験、BE試験、LSS試験をそれぞれ実施する。また、図-2に局所変位計設置概略図を示す。供試体横方向の局所変位計は、接着剤により供試体に固定する構造になっている。また、鉛直方向の局所変位計についても、接着剤により供試体を挟み込むように固定している。LSS試験ではこれら局所変位計を用いて、局所軸ひずみ ε_a 、および局所側方ひずみ ε_r を直接測定し、せん断ひずみ ε_s （式(1)）を求める。また、せん断剛性率 G は（式(2)）を用いて算出する。なお、本試験装置は、ペダスタルとキャップにベンダーエレメントを内蔵しており、供試体内に弾性波を発信することで、非破壊でせん断波速度 V_s を測定し、湿潤密度 ρ_t から初期せん断剛性率 G_0 （式(3)）を算出することができる。LSS試験も同一供試体を用いて実施するため、供試体の個体差を受けることなくせん断剛性率を比較することができる。

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_r) \quad (1) \quad G = \frac{q}{3 \cdot \varepsilon_s} \quad (2)$$

$$G_0 = \rho_t V_s^2 \quad (3)$$

2.2 試験条件

本研究では、先行研究と同条件で試験を実施する。試料は豊浦砂およびセメントを用いて、高さ $H=12.5$ cm、直径 $D=5.0$ cmの円柱供試体を作製する。また、供試体は、漏斗堆積法により、相対密度 $D_r=32\%$ となるように作製する。

セメントは、強度の発現が早く、安定する早強ポルトランドセメントを用い、セメント含有率

C_c は乾燥質量に対して、 $C_c=0.0\%, 0.3\%, 0.5\%, 1.0\%$ とする。また、セメンテーション供試体は強度の増加率が大きい4日間の水中養生(養生温度 20°C)を必要とするため、**図-3**に示す水中養生用モールドを用いて水和反応させてから三軸試験装置に設置することとする。本研究に用いる豊浦砂の物性値を**表-1**に、供試体の諸条件を**表-2**に示す。

表-1 豊浦砂の物性値

土試料	豊浦砂
土粒子の密度 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
砂分含有率 S_c (%)	100
礫分含有率 G_c (%)	0

表-2 供試体の諸条件

試料	豊浦砂
セメント	早強ポルトランドセメント
養生期間 (day)	4
養生温度 ($^\circ\text{C}$)	20
相対密度 (%)	32
有効拘束圧 (kPa)	50

2.3 試験方法

漏斗堆積法によって作製した供試体を試験装置に設置し、二重負圧、通水、予備圧密を行う。供試体が十分に飽和(間隙圧係数 $B \geq 0.95$)していることを確認したうえで、平均有効主応力 $p' = 50 \text{ kPa}$ で等方圧密を1.5時間行う。その後、BE試験を実施し、液状化試験を行う。液状化試験では、セル圧一定、軸ひずみ速度 $0.5 \text{ mm}/\text{min}$ 一定のもと、非排水繰返し载荷によるせん断を行う。液状化状態に達したら、液状化試験を終了することとする。続いて、再液状化試験において、変形が残ることによる異方性を取り除くため、液状化した供試体の軸変位を元の状態(軸ひずみ $\epsilon_a=0$)に戻す。この状態からできるだけ等方変形を保ちつつ、ゆっくりと排水し、再び等方圧密を行う。液状化履歴を与えた供試体に対し、再度BE試験を

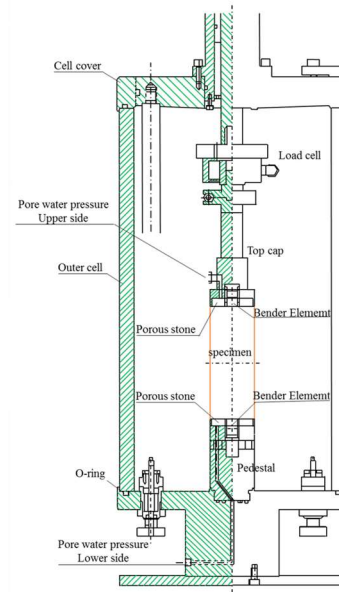


図-1 局所変位計付き三軸試験装置

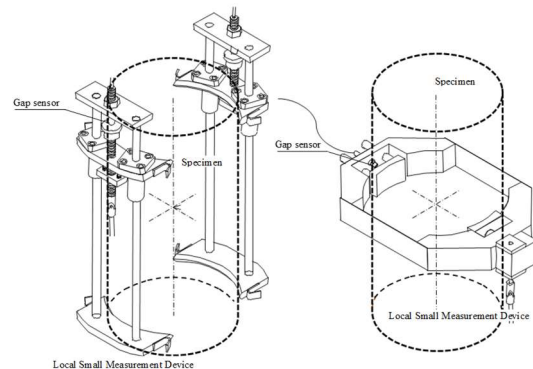


図-2 局所変位計設置概略図

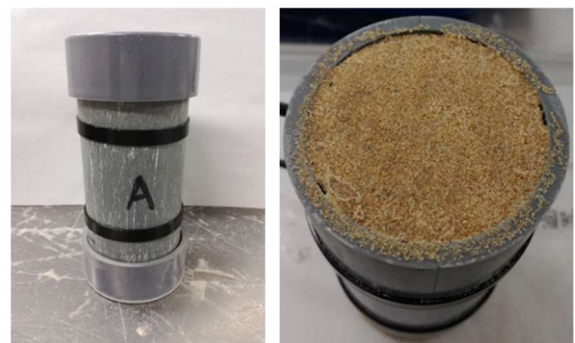


図-3 水中養生用モールド

実施し、再液状化試験を行う。再液状化試験は液状化試験同様、セル圧一定、軸ひずみ速度 $0.5\text{mm}/\text{min}$ 一定のもと、非排水繰返し载荷によるせん断を行う。

本研究では1回目の液状化試験は、繰返し载荷過程において、平均有効主応力 $p'=0\text{ kPa}$ に達した段階を液状化状態と判断する。先行研究では両振幅ひずみ $DA=5\%$ に達した段階を液状化状態と判断した。前者を液状化の程度が小さい場合、後者を液状化の程度が大きい場合とする。なお、2回目の液状化試験では本研究、先行研究ともに両振幅ひずみ $DA=5\%$ に達するまで試験を継続した。ただし、2回目の液状化の判定は、1回目の液状化試験と同様とした。このように液状化履歴のなかでも、液状化の程度が小さい場合と液状化の程度が大きい場合で結果を比較検討する。液状化強度比 R_L は液状化強度曲線における繰返し载荷回数 $N_c=20$ 回のときの $\sigma_d'/2\sigma_c'$ と定義する。

LSS 試験は図-2 に示した局所変位計を用いて、軸ひずみ速度は $0.025\text{mm}/\text{min}$ のもと、排水状態で単調载荷によるせん断を行う。LSS 試験は、液状化履歴の有無による比較を行う。なお、ひずみが 0.001% 以下で線形弾性体の挙動を示しているときのせん断剛性率 G を初期せん断剛性率 G_0 とする。

3. 試験結果および考察

3.1 液状化強度特性

液状化の程度が小さい場合の液状化強度曲線を図-4、再液状化強度曲線を図-5 に示す。また、液状化の程度が大きい場合の液状化強度曲線を図-6、再液状化強度曲線を図-7 に示す。セメント含有率と液状化強度比の関係(液状化の程度の違いによる比較)を表-3 に示す。

図-4 より液状化の程度が小さい場合では、セメント含有率 $C_c=0.0\%$ 、 0.3% では液状化強度曲線はほぼ同じ傾向を示した。また、セメント含有率 $C_c=0.5\%$ 以上で液状化強度が増加することが確認された。これは、セメンテーション効果によ

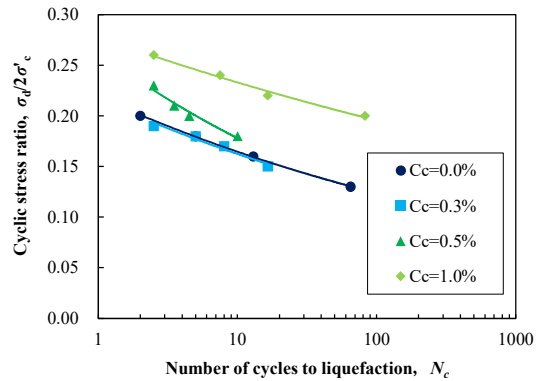


図-4 液状化強度曲線 (液状化の程度が小さい場合)

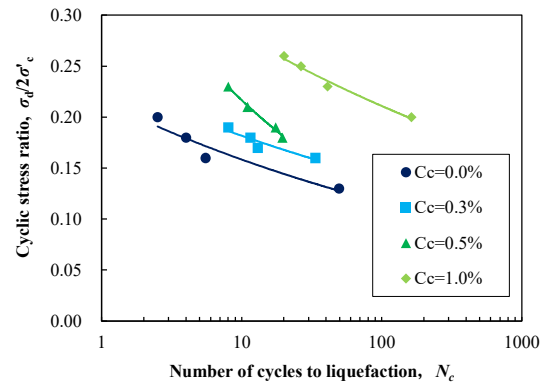


図-5 再液状化強度曲線 (液状化の程度が小さい場合)

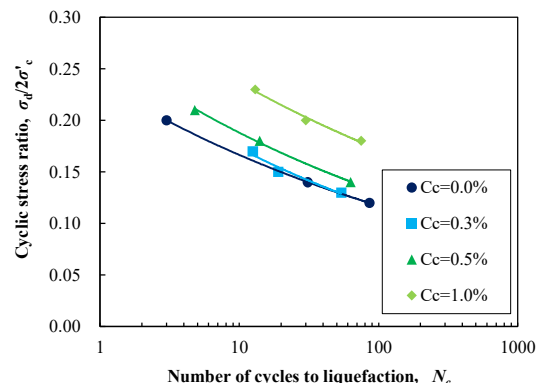


図-6 液状化強度曲線 (液状化の程度が大きい場合)

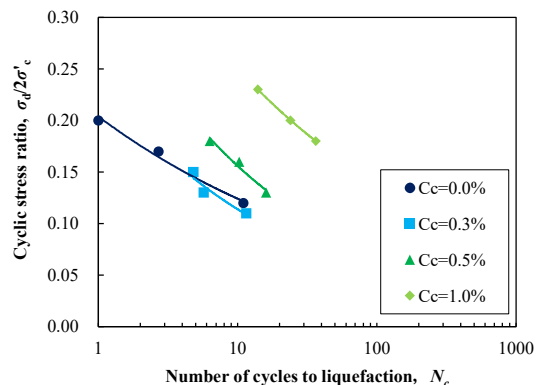


図-7 再液状化強度曲線 (液状化の程度が大きい場合)

り砂粒子間の結合が強まり、土粒子構造が安定したためであると考えられる。図-5より、液状化の程度が小さい場合では、セメント含有率が高くなるほど、再液状化強度は高くなる傾向を示した。また、図-6、図-7より、液状化の程度が大きい場合では、セメント含有率 $C_c=0.5\%$ 以上で液状化強度及び再液状化強度が増加する傾向が見られた。また、図-6、図-7を比較すると、液状化強度曲線に比べ、再液状化強度曲線のほうが近似曲線の傾きは急になっていることから、液状化が起こった時の地震よりも小さい地震でも再液状化が起こる可能性があると考えられる。

本研究で行った液状化の程度が小さい場合と、先行研究で行った液状化の程度が大きい場合で液状化強度比を比較した。表-3より、液状化の程度の違いに関わらず、セメント含有率 $C_c=0.0\%$ では、液状化強度比よりも再液状化強度比のほうが小さくなった。また、液状化の程度が小さい場合、セメント混合砂では、液状化強度比よりも再液状化強度比のほうが大きくなった。一方、液状化の程度が大きい場合、セメント混合砂において、液状化強度比よりも再液状化強度比のほうが小さくなった。

3.2 せん断剛性率（波動伝播特性）

本節では、BE試験の結果より得られたせん断剛性率について述べる。液状化履歴の有無によるせん断剛性率の比較を図-8に示す。なお、図-8は液状化の程度が小さい場合の試験結果である。また、図-9にセメント含有率とせん断剛性率の関係（液状化の程度の違いによる比較）を示す。なお、図-9は再圧密後に実施したBE試験の結果である。図-8より砂（セメント含有率 $C_c=0.0\%$ ）では、液状化履歴の有無でせん断剛性率はほぼ変わらなかったが、セメント混合砂（セメント含有率 $C_c=0.3\%$ 以上）では、液状化履歴を与えることで、せん断剛性率が減少することが確認された。これは前節で述べた液状化強度特性の傾向とは異なるため、せん断剛性率と液状化強度に相関はないと考えられる。

表-3 セメント含有率と液状化強度比の関係

セメント分含有率 $C_c(\%)$	液状化の程度が小さい場合 ($p'=0\text{kPa}$ で液状化と判断)		液状化の程度が大きい場合 ($DA=5\%$ で液状化と判断)	
	液状化強度比 R_L	再液状化強度比 R_L	液状化強度比 R_L	再液状化強度比 R_L
0.0	0.151	0.144	0.150	0.107
0.3	0.149	0.168	0.153	0.091
0.5	0.158	0.181	0.169	0.123
1.0	0.221	0.257	0.215	0.210

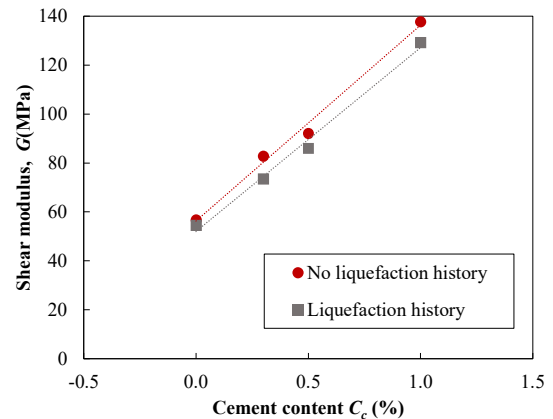


図-8 液状化履歴の有無によるせん断剛性率の比較

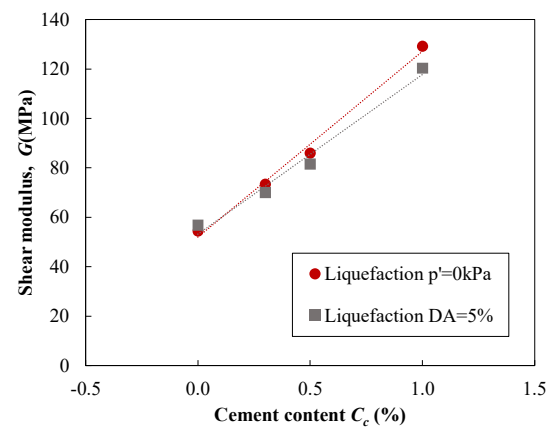


図-9 液状化の程度の違いによるせん断剛性率の比較

また、図-9より砂（セメント含有率 $C_c=0.0\%$ ）では、液状化の程度が小さい場合のほうが液状化の程度が大きい場合よりもせん断剛性率が小さくなったが、セメント混合砂（セメント含有率 $C_c=0.3\%$ 以上）では、液状化の程度が小さい場合のほうが液状化の程度が大きい場合よりもせん断剛性率が大きくなった。

3.3 微小変形特性

本節では、LSS 試験によって得られたせん断剛性率のひずみ依存性について述べる。図-10 に液状化履歴を与える前のせん断ひずみとせん断剛性率の関係を示し、図-11 に液状化履歴（液状化の程度が小さい場合）を与えた後のせん断ひずみとせん断剛性率の関係を示す。なお、砂とセメント混合砂でせん断剛性率を比較するため、セメント含有率 $C_c=0.0\%$ と 0.5% の結果を抜粋した。

図-10、図-11 より、液状化の履歴の有無によって、せん断剛性率の低下率が異なっていることがわかる。 $C_c=0.5\%$ の場合、液状化履歴なしのほうが、液状化履歴ありに比べ、せん断ひずみの増加によってせん断剛性率が急激に低下しており、特に 0.001% から 0.010% のひずみ区間でその傾向が顕著であることが確認できる。これは液状化履歴を与えることで、ある程度セメンテーションが壊れたため、急激なせん断剛性率の低下を示さなくなったと考えられる。

3.4 相対密度

試験過程において圧密後（液状化前）と再圧密後（液状化後）で供試体の相対密度を比較した。表-4 にセメント含有率と相対密度の関係を示した。

表-4 より液状化履歴を与えることで、セメントの有無にかかわらず、供試体の密度は増加していることがわかる。また、液状化の程度に着目すると、液状化の程度が小さい場合は、相対密度が約 4% 増加した。また、液状化の程度が大きい場合は、相対密度が約 10% 増加した。液状化の程度が大きい場合、液状化強度比よりも再液状化強度比のほうが小さくなることから、相対密度の変化からは説明できない強度増加がある。

4. 結論

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 液状化の程度が大きい場合、液状化強度よりも再液状化強度のほうが小さくなった。
- 2) 液状化の程度が小さい場合、セメント混合砂

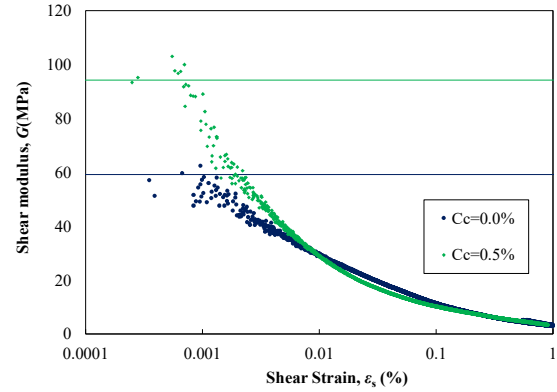


図-10 せん断ひずみとせん断剛性率の関係
(液状化履歴なし)

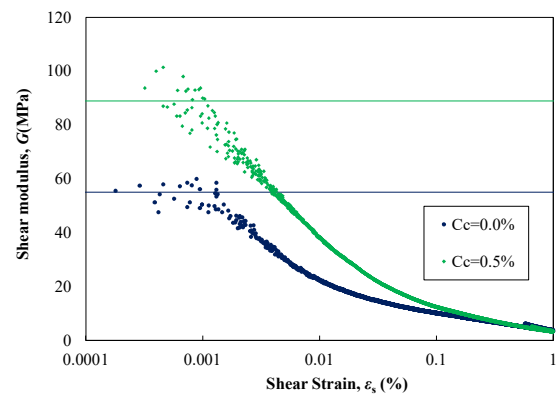


図-11 せん断ひずみとせん断剛性率の関係
(液状化履歴あり)

表-4 セメント含有率と相対密度の関係

セメント分含有率 C_c (%)	液状化の程度が小さい場合 ($p'=0\text{kPa}$ で液状化と判断)		液状化の程度が大きい場合 (DA=5%で液状化と判断)	
	圧密後相対密度 D_r	再圧密後相対密度 D_r	圧密後相対密度 D_r	再圧密後相対密度 D_r
0.0	32.3	36.0	31.7	41.4
0.3	25.0	28.8	23.9	33.7
0.5	26.0	29.5	24.3	34.0
1.0	22.3	25.2	19.8	29.4

において液状化強度よりも再液状化強度のほうが大きくなった。

- 3) セメント混合砂において、液状化履歴を与えることで、せん断剛性率は減少する傾向が見られた。

以上より、再液状化の評価には、液状化の程度が重要であるという結論が得られた。