

人工的にセメンテーションを与えた砂の再液状化について

長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院 正会員
長岡技術科学大学大学院

○藤原涼
長井優之
豊田浩史
高田晋

1. はじめに

1.1 研究背景・目的

2011年に東北地方太平洋沖地震が発生し、大規模な液状化現象や再液状化現象が報告された。それに伴い住宅地や公共道路、河川堤防などのライフラインに甚大な影響を及ぼした。再液状化現象とは過去の液状化発生地点と同一地点で液状化が再確認される現象のことを指し、再液状化現象と呼ばれている。地盤の液状化強度は密度、履歴効果、化学的反応、年代効果など様々な影響を受けるといわれており、東北地方太平洋沖地震では、年代効果の差により液状化被害に差が見られたといわれている。この年代効果とは時間経過に伴って変形強度特性が変化する現象のことを指す。一般的な見解として一度液状化した地盤は排水を伴って密になり、液状化強度が上がることで再液状化しにくくなると考えられている。しかし、液状化が起こった時の地震よりも小さい地震で液状化が発生した事例も確認されており、再液状化のメカニズムは明らかとなっていないのが現状である。

本研究では、セメントを加えることで年代効果を再現した試料において、再液状化時に年代効果がどのように変化しているかについて調べた。非排水繰返し三軸試験で再液状化強度の変化を調べ、ベンダーエレメント(BE)試験と局所微小ひずみ(LSS)試験の結果を用いて、その理由について検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験条件

本研究では、セメンテーションに関する既往研究と比較検討を行うため同条件で試験を実施した。試験に用いる砂は豊浦砂を使用し相対密度を32%、有効応力を50kPaとした。豊浦砂の物性値を

表-1に示す。供試体は円柱供試体とし、漏斗堆積法により作製した(図-1)。セメントは強度の増加が大きく養生期間が短くできることから早強ポルトランドセメントを使用し、セメント分含有率をCc=0%、0.3%、0.5%、1.0%とした。セメンテーション供試体の諸条件を表-2に示す。なお、供試体の養生期間は4日間に統一し試験を実施した。

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)	2.65
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

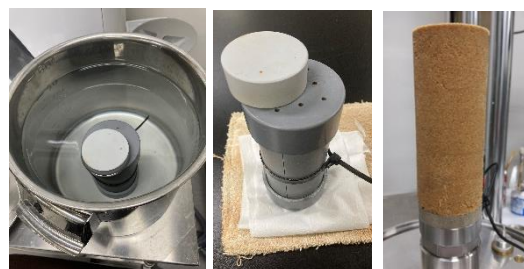


図-1 水中養生用モールド

表-2 セメンテーション供試体の諸条件

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(d)	4
養生温度(°C)	20
相対密度(%)	32
有効拘束圧(kPa)	50

図-2に微小ひずみ測定試験に用いる局所変位計設置概略図と非接触変位計の写真を示す。これらの変位計は非接触型であり、軸方向、半径方向の

変位を高精度に測定することが可能となっている。これらの局所変位計は、接着剤により供試体に固定する構造となっている。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。

初期せん断剛性率 G_0 の算出に関しては、本三軸試験装置にベンダーエレメントが内蔵されているため、供試体内にせん断波を送ることで、非破壊で得ることが可能となっている。

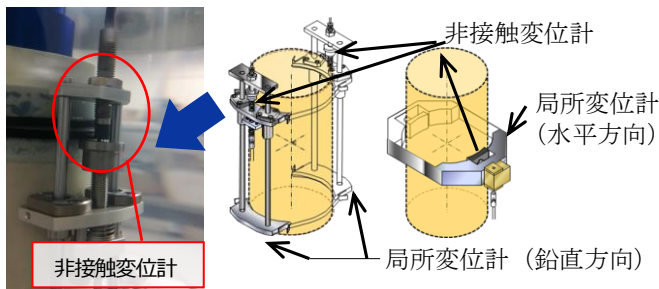


図-2 局所変位計設置概略図、非接触変位計写真

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

2.2 試験方法

養生した供試体を試験機に設置し、飽和度を高めるため二重負圧、通水を行い、供試体が十分に飽和(間隙圧係数 $B \geq 0.95$)を確認した後、圧密を行い、せん断剛性率を調べるため BE 試験を実施する。その後、液状化試験を実施する。このときの条件を非排水状態(軸ひずみ速度: 0.5 mm/min)で繰返し載荷し、両振幅ひずみ $DA=5\%$ で液状化したと判断する。この液状化試験を行った後、再液状化試験を実施する。この時の両振幅ひずみ DA は圧縮方向と伸張方向の総和とする。再液状化を実施する前に変位が残ることによる異方性を取り除くため液状化試験で発生した軸ひずみ ε_a を 0 に戻す。この状態で、排水を行いながら等方力状態を保ちつつ、圧密を行う。このように一度液状化し液状化履歴を与えた供試体に対して、以下の再液状化試験を実施する。

2.2.1 液状化試験(再液状化試験)

前述と同様、非排水状態(軸ひずみ速度:

0.5mm/min)で、繰返し載荷によるせん断を行う。なお、再液状化試験も 1 回目の液状化試験と同様に両振幅ひずみ ε_a (圧縮方向と伸張方向の総和)が 5%以上になった時を液状化状態と判断し、試験を終了することとする。また、液状化強度比 RL は両振幅ひずみ $DA=5\%$ における繰返し載荷回数 $N_c=20$ 回と定義する。

2.2.2 BE 試験²⁾

本圧密終了後、および各試験の圧密終了後に実施する。本試験装置には、キャップとペDESTAL にベンダーエレメントを内蔵しているため、供試体中に弾性波を発生させることで、非破壊で初期せん断剛性率 G (式 (3)) を求めることができる。

$$G_0 = \rho_t V_s^2 \quad (\text{式 } 3)$$

ここで、 G : せん断剛性率(MPa), V_s : せん断波速度(m/s)
 ρ_t : 湿潤密度(g/cm³),

2.2.3 LSS 試験

図-2 の微小ひずみ測定試験に用いる局所変位計を用いて、排水単調載荷(軸ひずみ速度: 0.025mm/min)でせん断を行う。ひずみが 0.001%以下の時、砂は弾性体であるといわれていることから、この時のせん断剛性率 G を初期せん断剛性率 G_0 とする。

2.2.4 p' 一定排水三軸圧縮試験

排水単調載荷(軸ひずみ速度: 0.1mm/min)でせん断を行う。せん断中、有効拘束圧 p' は一定となるように制御した。局所変位計を設置した状態で行ったため、せん断ひずみは 4%までとし、そこまでのピーク強度をせん断強度とした。

3. 試験結果および考察

3.1 液状化強度と再液状化強度

セメントを 0%, 0.3%, 0.5%, 1.0% 添加させたときの液状化強度曲線を図-3 に示し、再液状化強度曲線を図-4 に示す。それぞれ縦軸に繰返し応力比、縦軸に液状化時の繰返し回数を表している。この図は、強度曲線が右上に行くほど液状化強度が高いことを示している。図-3、図-4 を確認するとセメント含有率 0.0% と 0.3% では強度曲線及び再液状化曲線に違いは見られなかった。0.5% 以上ではセメントを増

加させるほど、液状化強度曲線及び再液状化曲線が右上に位置していることから液状化強度が増加していることがわかる。液状化強度曲線と再液状化強度曲線のグラフを比べると液状化強度曲線よりも再液状化強度曲線の方が、傾きが急になっていることがわかる。図-3、図-4の結果より、液状化が起こった時の地震よりも小さい地震でも液状化が起こる可能性があると考えられる。液状化曲線上で繰返し載荷回数20回のせん断応力比を液状化強度比RLとし、セメント含有率との関係を図-5に示す。図-5より、セメントを0.5%以上添加することで液状化強度が増加することがわかる。また、再液状化強度は液状化履歴を受けることで減少するが、セメントを1.0%添加した場合はほとんど変化しないことが確認できた。

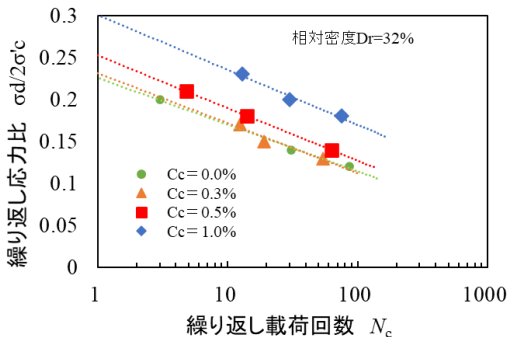


図-3 液状化強度曲線

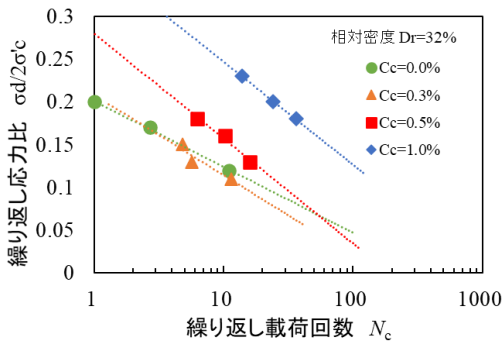


図-4 再液状化強度曲線

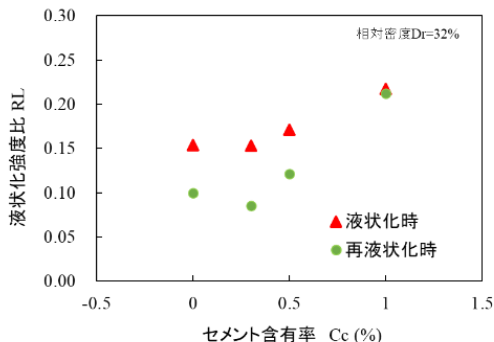


図-5 各セメント含有率の液状化強度

3.2 BE試験とLSS試験によるせん断剛性率

BE試験より得られたせん断剛性率Gを液状化履歴ありとなしで比較したものを図-6に示す。図-6を確認すると液状化履歴を与えることで、セメント含有量が多いほどせん断剛性率が低下する傾向があった。一般的に、豊浦砂のような比較的土粒子が小さく、均等係数の低い均一な砂では、動的および静的な弾性変形係数の値にそれほど大きな違いはないと認識されている。再液状化強度の低下傾向とせん断剛性率の低下傾向が異なるため、せん断剛性率から再液状化強度を推定することは困難である。

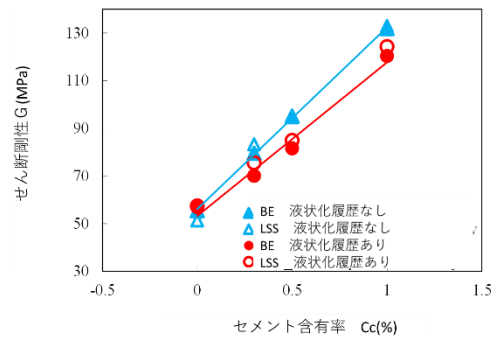


図-6 液状化履歴の有無によるせん断剛性率の比較

3.3 相対密度

液状化履歴を与える前後で相対密度を比較したものを図-7に示す。セメントの有無に関わらず、すべてのケースで相対密度は約10%増加した。しかし、再液状化強度が低下することから、再液状化強度に対する相対密度の影響は小さい。

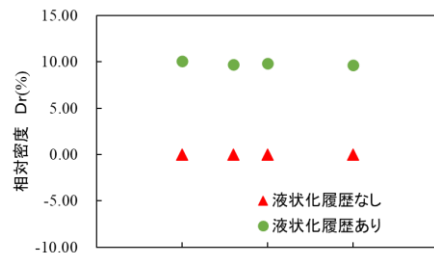


図-7 液状化履歴の有無による相対密度の比較

3.4 せん断強度

液状化履歴を与える前と後の4%までのピーク強度を比較したものを図-8に示す。図-8よりセメント含有率0.3%を除き、軸差応力qは液状化履歴なし、ありともにセメントを添加することで上昇していることがわかる。しかし、液状化履歴なしとありを比較すると液状化履歴ありの軸差応力が液

状化履歴なしに比べ、すべてのセメント含有率において大きな値となっている。これは液状化履歴を与えることで、相対密度が増加したためと考えられる。

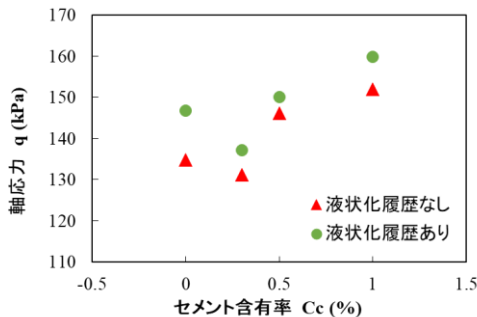


図-8 セン断強度とセメント分含有率の関係

3.5 微小変形特性

液状化履歴を与える前と後の LSS 試験のせん断剛性率 G とせん断ひずみ ϵ_s の関係を図-9、図-10 に示す。図-9、図-10 を確認するとセメント含有率が高いほどせん断剛性率 G が増加する傾向が見られた。しかし、セメントを添加しているもので液状化履歴なしとありを比較するとせん断剛性率 G が液状化履歴を与えることで減少している傾向がみられる。これは、一度液状化させ、液状化履歴を与えることで、砂どうしを結合させていたセメンテーション効果が失われるため、液状化履歴ありとなしではせん断剛性率が減少すると考えられる。このせん断剛性率の減少により、再液状化が減少したと考えられる。また、液状化履歴を与えることで相対密度が増加し、供試体が密になったことと、土粒子間のセメンテーションが壊されることが関連し合って、このような結果が得られると考えられる。

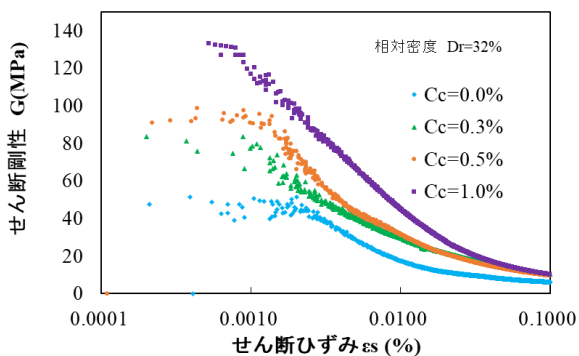


図-9 セン断剛性率 G とせん断ひずみ ϵ_s の関係 (液状化履歴なし)

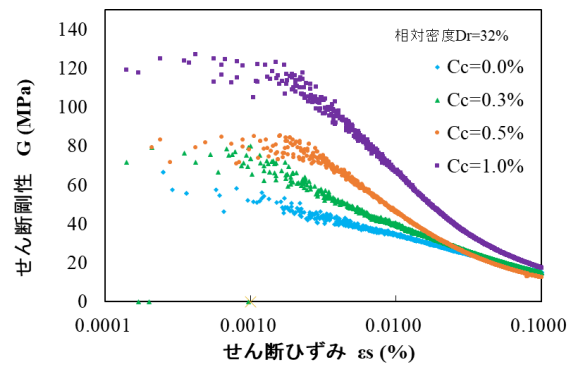


図-10 セン断剛性率 G とせん断ひずみ ϵ_s の関係 (液状化履歴あり)

4. まとめ

液状化強度と再液状化強度を比較した場合、再液状化強度は液状化強度に比べ減少する傾向が分かった。 $C_c=0.3\%$ 以下では、セメント含有量による液状化強度の増加は見られなかったが、 $C_c=0.5\%$ 以上では、セメント含有量により液状化強度は増加した。また、セメント含有率が大きい 1.0% では、液状化強度と再液状化強度に差は見られない。

再液状化強度の推定を行うにあたり、相対密度とせん断剛性率の2つの観点から検討を行い相対密度とせん断剛性率から再液状化強度の推定は困難であると考えられる。試験実施で得られた知見として、液状化履歴を与えることにより相対密度は約 10% 増加しせん断剛性率はセメント含有率が大きいほど、減少する傾向にあることが分かった。また、液状化履歴を与えることで、セメント含有量が多いほどせん断剛性率が低下する傾向があることがわかった。また、再液状化強度の低下傾向とせん断剛性率の低下傾向が異なるため、せん断剛性率から再液状化強度を推定することは難しいと考える。

参考文献

- 1) 平川亮太：セメンテーション及び微小繰返しせん断履歴が砂の力学特性に与える影響，長岡技術科学大学修士論文，2018。
- 2) 川口貴之，三田地俊之，澁谷啓，佐野侖房：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。