

# 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

地盤工学研究室 吉田 岬

指導教員 豊田 浩史

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景・目的

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、地震の規模が大きかったため、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、港湾施設等のライフラインに多大な被害が発生した。この被害報告によれば、過去の液状化発生地点と同一地点でも液状化(再液状化)現象が確認された。場所によっては過去に液状化し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ている。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されていないのが現状である。

本研究では、年代効果再現試料において、液状化時と再液状化時の力学特性の違いについて比較検討を行う。年代効果に影響を及ぼす要因の中で、セメンテーション効果に着目し、セメンテーション再現試料が再液状化により、砂の力学特性がどのように変化するか調査する。微量のセメント添加により、セメンテーションを与えた砂試料において、非排水繰返し三軸試験(液状化試験)やベンダーエレメント(BE)試験を実施する。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験条件

本研究では既往研究<sup>1)</sup>と比較するため、同条件で試験を実施する。供試体は豊浦標準砂およびセメントを混ぜ合わせた試料(セメント混合砂)から作製し、高さ  $H=12.5\text{cm}$ 、直径  $D=5\text{cm}$  の円柱供試体とする。また、漏斗堆積法により、相対密度  $D_r=32\%$  とする。

セメントは養生期間が短く、強度が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  $C_c$  は自然地盤における効果再現のため、微量(乾

燥質量に対して、 $C_c=0\%$ 、 $0.3\%$ 、 $0.5\%$ 、 $1.0\%$  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、水中養生させるため、水中養生用モールド(図-1)を用いて、十分に水和反応をさせてから三軸試験装置に設置することとする。本研究に用いる供試体の諸条件を表-1、表-2に示す。

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。局所微小ひずみ(LSS)試験ではこれら局所変位計を用いて、局所軸ひずみ  $\epsilon_a$ 、および局所側方ひずみ  $\epsilon_r$  を直接測定し、せん断ひずみ  $\epsilon_s$  (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。さらに、本三軸試験装置にはベンダーエレメント(BE)が内蔵されており、供試体内にせん断波を送ることで、非破壊で、せん断剛性率  $G_0$  を算出できる。



図-1 水中養生用モールド

表-1 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

表-2 豊浦砂の物性値

土試料	豊浦砂
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	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
吸水率 (%)	-
砂分含有率 $S_c$ (%)	100
礫分含有率 $G_c$ (%)	0

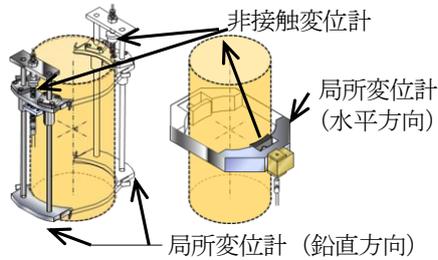


図-2 局所変位計設置図

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

$$G = \frac{q}{3 \cdot \varepsilon_s} \quad (2)$$

## 2.2 試験方法

供試体作製後、二重負圧、通水、予圧を行い、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上で自動制御により、有効応力  $p' = 50\text{kPa}$  で等方圧密を 1.5 時間行う。その後、液状化試験に移行し、セル圧一定、軸ひずみ速度  $0.5\text{mm/min}$  制御のもと、非排水繰返し载荷によるせん断を行う。この 1 回目の液状化試験は、両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$  に達した段階(圧縮方向と伸張方向の総和)を液状化状態と判断し、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  $\varepsilon_a=0$ )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。この様に一度液状化し液状化履歴を与えた供試体に対して、以下の試験を行う。

### 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： $0.5\text{mm/min}$ )で、繰返し载荷によるせん断を行う。なお、2 回目の液状化試験も一回目同様、両振幅軸ひ

ずみ  $DA=5\%$  に達した段階(圧縮方向と伸張方向の総和)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  $DA=5\%$  における繰返し载荷回数  $N_c=20$  回と定義する。

### 2.2.2 BE 試験<sup>2)</sup>

本圧密終了後、および各試験の圧密終了後、実施する。本試験装置には、ペDESTALとキャップにベンダーエレメントを内蔵しており、供試体中に弾性波を発信させることで、非破壊で初期せん断弾剛性率  $G$  (式(3)) を求める。

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

ここで、 $G$ ：せん断剛性率(MPa)、 $V_s$ ：せん断波速度(m/s)  
 $\rho_t$ ：湿潤密度(g/cm<sup>3</sup>)、

### 2.2.3 LSS 試験

図-2 の局所変位計を用いて、排水単調载荷(軸ひずみ速度： $0.025\text{mm/min}$ )でせん断を行う。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。

### 2.2.4 $p'$ 一定排水三軸圧縮試験

排水単調载荷(軸ひずみ速度： $0.1\text{mm/min}$ )でせん断を行う。せん断中、有効拘束圧  $p$  は一定となるよう制御した。局所変位計を用い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。液状化曲線上で繰返し载荷回数 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-3、図-4 よりセメントを  $0.5\%$  以上添加させることで液状化強度及び再液状化強度が増加した。また、図-3、図-4 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方が、傾きが急となっていることから、繰返し

回数が増えれば、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りやすくなる可能性があると考えられる。図-5よりセメント含有率が小さい(0.0%, 0.3%, 0.5%)とき、再液状化強度は液状化強度と比較して減少するが、セメント含有率1.0%の再液状化強度はあまり変化しない。

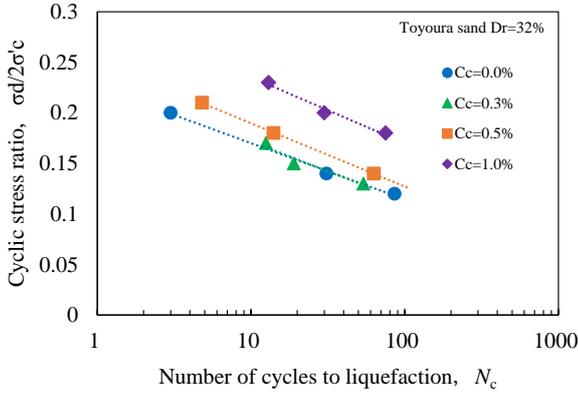


図-3 液状化強度曲線

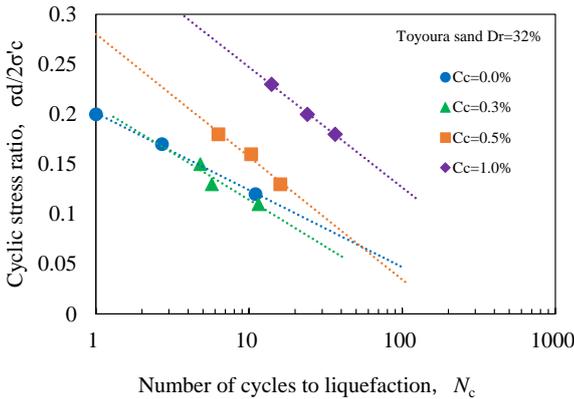


図-4 再液状化強度曲線

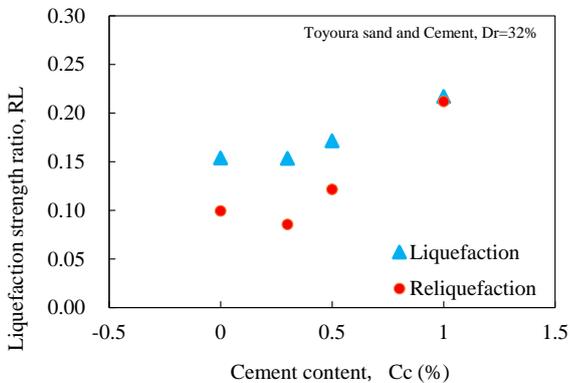


図-5 各セメント含有率の液状化強度

### 3.2 BE試験とLSS試験から得られたせん断剛性

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より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。これは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、低下する傾向になったと考えられる。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難しい。

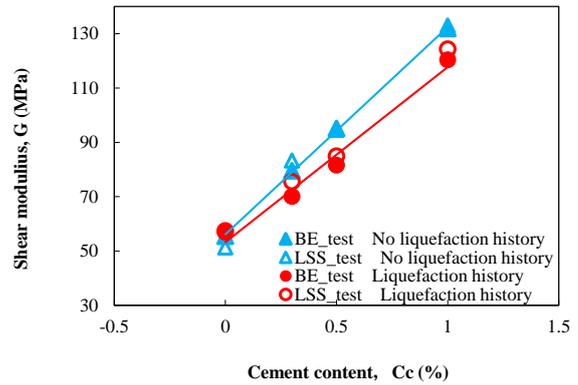


図-6 液状化履歴の有無によるせん断剛性率の比較

### 3.3 相対密度

液状化履歴を与える前と後の相対密度を比較したものを図-7に示す。図-7より液状化履歴を与えることで、セメントのありなし関わらず、すべてのケースで供試体の相対密度が約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。

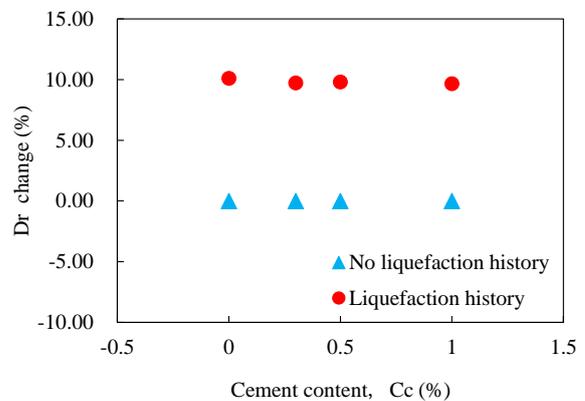


図-7 液状化履歴の有無による相対密度の比較

### 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 $q$ は液状化履歴なし及び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。しかし、局所変位計をつけていることにより、せん断ひずみが4%までしか実験できないため、実際の最大強度まで至っていないことに注意が必要である。

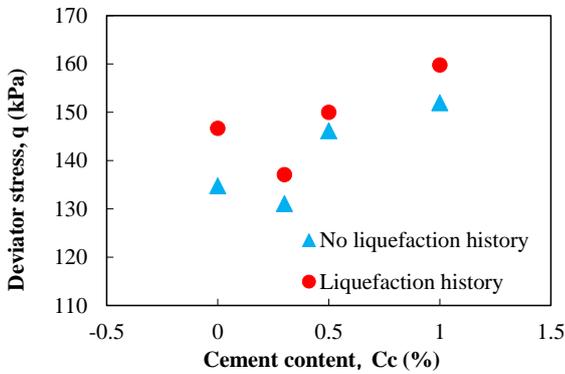


図-8 せん断強度とセメント分含有率の関係

### 3.5 微小変形特性

液状化履歴を与える前のLSS試験のせん断剛性率 $G$ とせん断ひずみ $\epsilon_s$ の関係を図-9に示し、液状化履歴を与えた後のLSS試験のせん断剛性率 $G$ とせん断ひずみ $\epsilon_s$ の関係を図-10に示す。

液状化履歴なしとありの挙動に着目すると、液状化履歴なしとありでせん断剛性率 $G$ の低下率が異なっている。液状化履歴ありに比べ液状化履歴なしの方がせん断ひずみの増加で $G$ が急激に低下しており、特に0.001%から0.01%ひずみで $G$ が急激に低下する挙動を確認できる。また、弾性域( $\epsilon = 0.001\%$ )とされているひずみより弾性域が伸びたことも確認できる。これは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ためと考えられる。それに加え、液状化履歴を与えることで、それ以下のひずみでは変形しにくくなったことも考えられる。

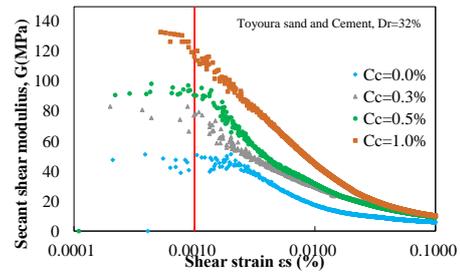


図-9 せん断剛性率 $G$ とせん断ひずみ $\epsilon_s$ の関係 (液状化履歴なし)

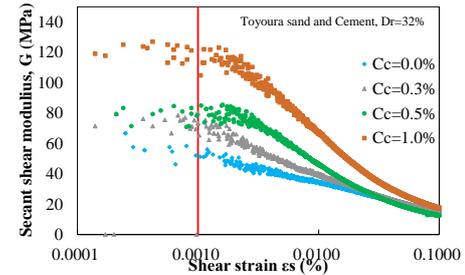


図-10 せん断剛性率 $G$ とせん断ひずみ $\epsilon_s$ の関係 (液状化履歴あり)

## 4. まとめ

- 1)  $C_c=0.3\%$ 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。
- 2) 液状化履歴を与えることで、 $C_c=0.0\%$ 、 $0.3\%$ 、 $0.5\%$ では再液状化強度は液状化強度に比べ低下するが、 $C_c=1.0\%$ では液状化強度と再液状化強度にほとんど差が見られなかった。
- 3) 液状化履歴を与えることで、供試体の相対密度が約10%増加したが、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。
- 4) 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した。
- 5) 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。

## 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，修士論文
- 2) 川口貴之，三田地俊之，澁谷啓，佐野信房：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, pp195~207, 2001.