

# セメンテーションを与えた砂の再液状化に関する研究

長岡技術科学大学大学院

○塚田千広

長岡技術科学大学大学院 正会員

豊田浩史

長岡技術科学大学大学院 正会員

高田晋

## 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、各地で液状化や再液状化が見られた。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、液状化が起りにくくなるとされている。また、古い埋立地盤においては、年代効果によって液状化強度が高くなるため、液状化が起りにくくなると考えられている。しかしながら、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る。そのため、再液状化のメカニズムを明らかにすることを本研究の目的とする。

土の年代効果をもたらす要因として、応力履歴やセメンテーションによって液状化強度の上昇がある<sup>1)2)</sup>。年代効果に影響を与えるセメンテーションの再現のために微量のセメントを添加して、強度を測定する試験が行われている<sup>3)</sup>。

本研究では、年代効果の再現のために微量のセメントを添加した試料を用いて、繰返し载荷による液状化履歴が非排水繰返し载荷試験(液状化試験, 再液状化試験), ベンダーエレメント(BE)試験, 局所微小ひずみ(LSS)試験を実施し, 力学的特性の変化を把握する。

## 2. 試験方法

### 2.1 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DESTAL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出来、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 1 に、本研究で用いた試験機を示す。

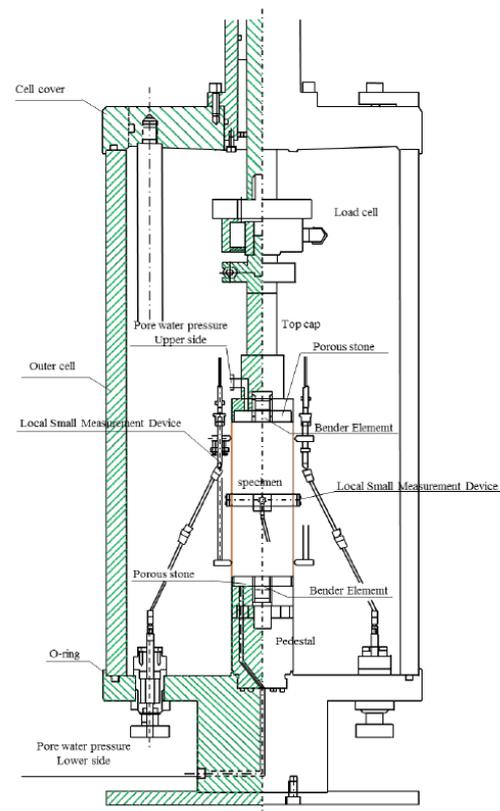


図 1 三軸試験機の概略図

### 2.2 試験手順

本研究で用いる試料は豊浦砂及び早強ポルトランドセメントとし、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、本研究の供試体作製時において、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、セメント添加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
砂分含有率 $S_c$ (%)	100
礫分含有率 $G_c$ (%)	0

### 2. 3 試験概要

本研究では、空中落下法で供試体を作製し、三軸室に設置した後、二重負圧、脱気水の通水、等方予備圧密を行い、供試体を飽和させる。飽和の確認をしたのちに、供試体内部に背圧の载荷をし、供試体に平均有効主応力  $p'=50\text{kPa}$  で圧密を行う。その後、供試体に非排水繰返し载荷を行い、供試体の液状化を行う。また、平均有効主応力  $p'=0\text{kPa}$  となった時点を液状化と判定した。载荷終了後には再度平均有効主応力  $p'=50\text{kPa}$  で圧密を行う(再圧密)。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。

#### 2. 3. 1 再液状化試験

本研究で実施した再液状化試験は、任意の繰返し応力比で载荷を行う。再液状化過程においては、両振幅ひずみ  $DA=5\%$  を液状化と判断した。再液状化試験から得られた繰返し载荷回数と繰返し応力比から液状化強度曲線を作成する。液状化強度比は液状化強度曲線における繰返し载荷回数 20 回の時の繰返し応力比とする。

#### 2. 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、供試体内部に上部のキャップから  $\sin$  波を発信し、ペDESTAL 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、せん断剛性率を求めることが出来る。

$$G = \rho_t \times V_s^2$$

ここで、 $G$ :せん断剛性率(kPa),  $\rho_t$ :湿潤密度(g/cm<sup>3</sup>),  $V_s$ :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断定する 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<sup>4)</sup>によるものを利用して、せん断波到達時間とする。

#### 2. 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  $\epsilon_a$  と水平方向ひずみ  $\epsilon_r$  からせん断ひずみ  $\epsilon_s$  を算出し、せん断時の軸差応力  $q$  からせん断剛性率を求める。

$$\epsilon_s = 2/3 \times (\epsilon_a - \epsilon_r)$$

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

$$G = \frac{q}{3 \times \epsilon_s}$$

ここで、 $\epsilon_a$ :軸方向ひずみ(%),  $\epsilon_r$ :水平方向ひずみ(%),  $\epsilon_s$ :せん断ひずみ(%),  $\sigma'_a$ :軸方向応力(kPa),  $\sigma'_r$ :水平方向応力(kPa),  $q$ :軸差応力(kPa),  $G$ :せん断剛性率(kPa)とする。

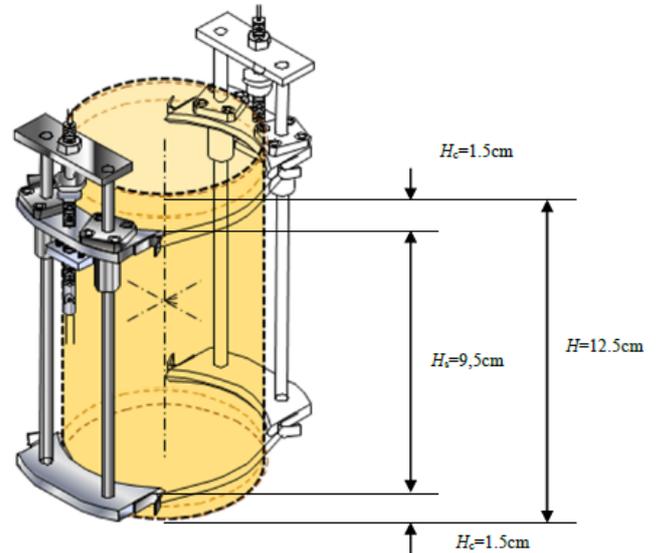


図 2 供試体及びひずみ測定装置の概略図

### 3. 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。液状化強度曲線を図 3、再液状化強度曲線を図 4 に示す。図 3 から、セメント分含有率  $Cc=0.0\%$ ,  $0.3\%$  の場合には、液状化強度曲線には大きな変化が見られず、セメント分含有率  $Cc=0.5\%$ ,  $1.0\%$  の場合には液状化強度

曲線が上方にシフトしている。このことから、セメント分含有率を多くすると液状化強度は上昇することがわかる。

図4の再液状化強度曲線から、液状化強度曲線のシフトはあるが、セメント分含有率による大小関係に着目すると変化がないことがわかる。

表2より、液状化強度比と再液状化強度比の比較を行う。前述のとおり、液状化強度はセメント分含有率  $C_c=0.0\%$ 、 $0.3\%$ の場合には液状化強度比にも大きな変化はなく、セメント分含有率  $C_c=0.5\%$ 、 $1.0\%$ と多くなるほど、液状化強度比が上昇している。一方で、再液状化強度比に着目すると、セメントを添加した場合は、再液状化強度比が液状化履歴を与えることで上昇しており、セメント分含有率が大きいほど再液状化強度比の上昇が大きくなっている。つまり、セメンテーションのある供試体ほど、再液状化強度が上昇している。これは、セメンテーションの破壊により、再液状化強度は減少すると考えた当初の予想に反する結果である。

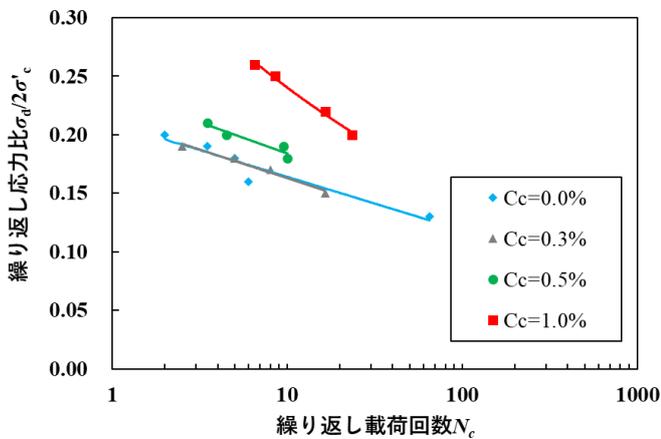


図3 液状化強度曲線

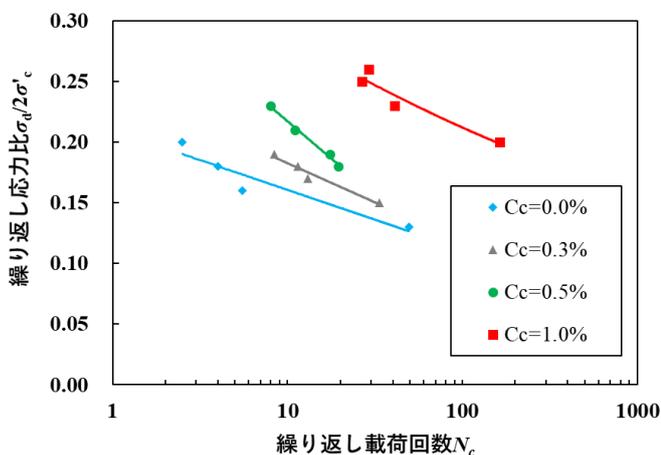


図4 再液状化強度曲線

表2 液状化強度及び再液状化強度比

セメント分含有率	液状化強度比	再液状化強度比
$C_c(\%)$	$R_L$	$R_L$
0.0	0.151	0.144
0.3	0.149	0.168
0.5	0.158	0.181
1.0	0.221	0.257

次に、BE試験から得られたせん断剛性率について検討する。図5のせん断剛性率から、液状化履歴無しの場合も液状化履歴ありの場合も、セメント分含有率が多いほどせん断剛性率が高くなることがわかる。このようにせん断剛性率が上昇する要因として、セメンテーションによる固結力の上昇が考えられる。また、液状化履歴を与えることでせん断剛性率が減少する傾向にある。これは、セメンテーションの破壊に起因したものと考えられる。

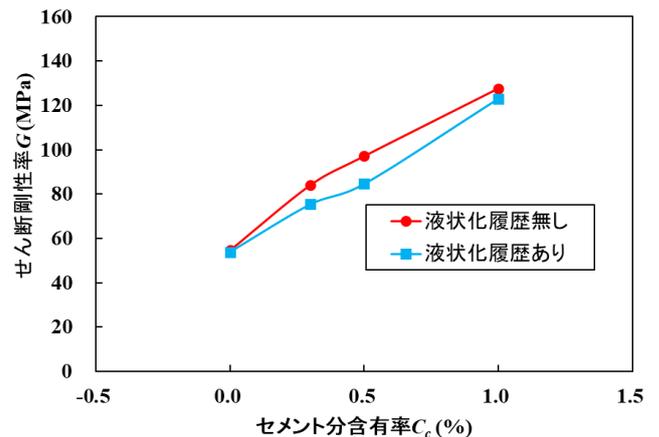


図5 BE試験から得られたせん断剛性率

図6および図7のLSS試験から得られた割線せん断剛性率を比較すると、BE試験の結果と同じく、液状化履歴の有無に依らず、セメント分含有率が多いほどせん断剛性率が高い傾向にあることがわかる。ここで、せん断剛性率の減少の経路について着目すると、液状化履歴を与えることでせん断剛性率の減少がみられるが、減少の程度は同様ではない。

BE試験、LSS試験から得られた再液状化後のせん断剛性率と再液状化試験による再液状化強度比の増減の傾向は異なっているため、せん断剛性率と再液状化強度比には相関がないことと考えられる。LSS

試験によるせん断剛性率のひずみ依存性に着目すると、液状化履歴無しのものより、液状化履歴ありの方が、割線せん断剛性率のひずみによる低下が急激であるように見える。今後は、初期せん断剛性率だけでなく、割線せん断剛性率にも着目して、再液状化のメカニズムを検討していく必要がある。

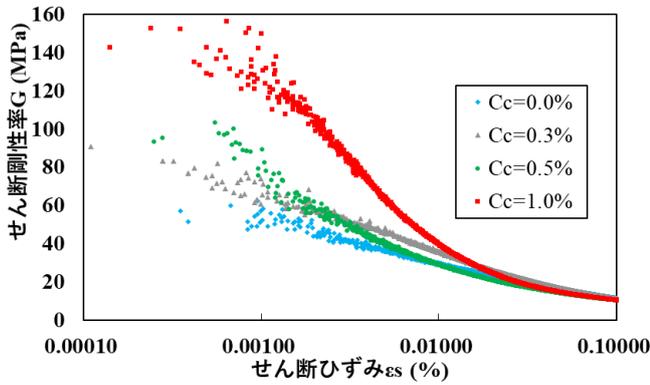


図 6 LSS 試験結果 (液状化履歴無し)

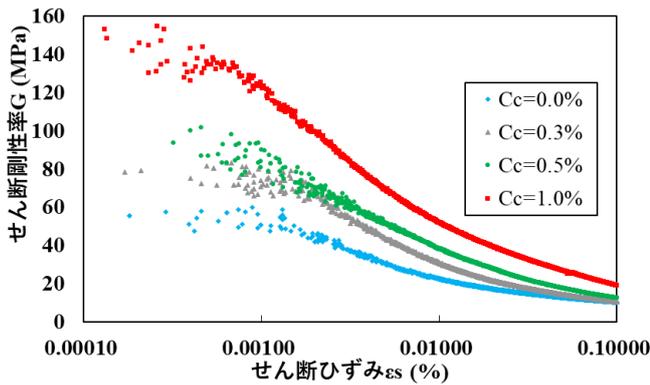


図 7 LSS 試験結果 (液状化履歴あり)

#### 4. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- ① 液状化強度比、再液状化強度比ともにセメント分含有率が多いほど高くなる。セメント含有があると、液状化履歴を与えることで、再液状化強度比は上昇する。
- ② BE 試験、LSS 試験より、セメント分含有率が多いほどせん断剛性率が上昇する。また、液状化履歴を与えることで初期せん断剛性率は低下する。
- ③ LSS 試験より、液状化履歴があると、割線せん断剛性率のひずみによる低下が小さくなる傾向が見られた。この結果を利用して、再液状化強度比の変化を説明できる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 土田孝, 湯怡新: 粘性土のセメンテーションによる強度発現メカニズム, 港湾技術研究所報告, Vol.38, No.2, pp.99-129, 1999.
- 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) 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.