

# セメント添加年代効果再現試料の液状化による力学特性の変化

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

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、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。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、液状化が起こりにくくなると考えられている<sup>1)</sup>。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り、液状化により年代効果が消失した可能性もある。

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>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>。本研究においても、セメントを添加することで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、液状化試験により繰返し載荷を行い、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。

- ・液状化判定方法①平均有効主応力  $p' = 0 \text{ kPa}$   
→液状化履歴小とする。
- ・液状化判定方法②両振幅軸ひずみ  $DA = 5\%$   
→液状化履歴大とする。

図 1 の液状化強度比から、液状化履歴の大小により、液状化強度の違いがみられる。前述のとおり、一般には液状化の発生に伴い排水があるため、密に

なり液状化強度は上昇すると考えられる。しかしながら、試験から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。また、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。そのため、この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。

そのため、本研究ではセメントを添加した試料を用いて、繰返し載荷による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、大ひずみ領域においては、三軸圧縮試験を行い、微小ひずみ領域においてはベンダーエレメント試験(BE 試験)を用いて把握する。

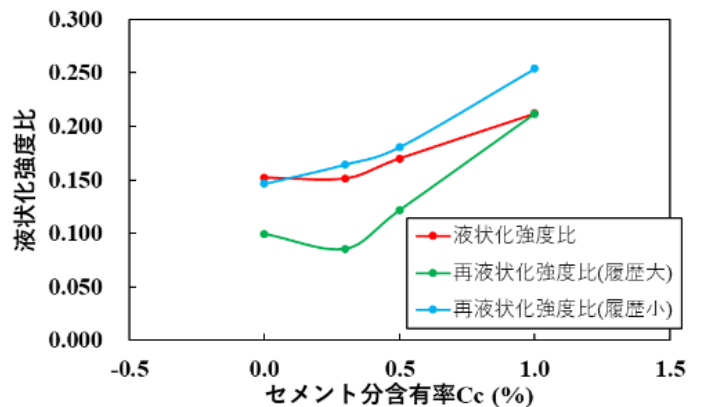


図 1 液状化履歴ごとの液状化強度

## 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、非破壊でせん断波速度を測定出来る。

図 2 に、本研究で用いた試験機を示す。

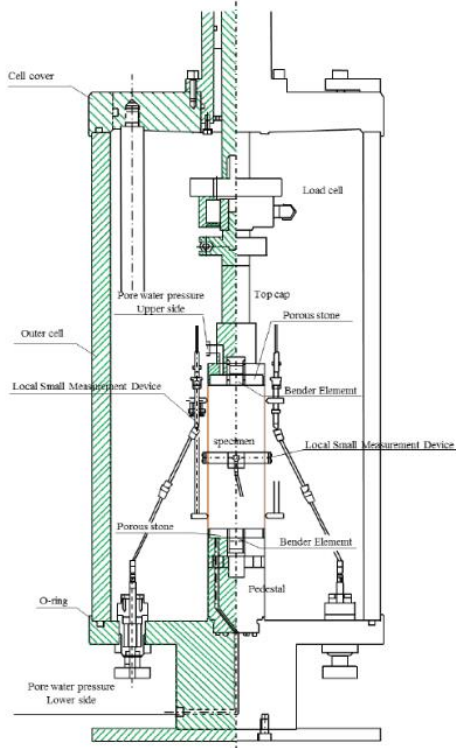


図2 三軸試験機の概略図

### 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 のものを漏斗堆積法で作製する。早強ポルトランドセメントは水中養生 4 日間で十分な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、セメント分含有率  $C_c$  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 $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 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     |

### 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。繰返し载荷

終了後には平均有効主応力  $p'=50\text{kPa}$  で再圧密を行う。本研究では、再圧密後に以下の 2 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。

- ・液状化判定方法①平均有効主応力  $p'=0\text{kPa}$   
⇒液状化履歴小とする。
- ・液状化判定方法②両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$   
⇒液状化履歴大とする。

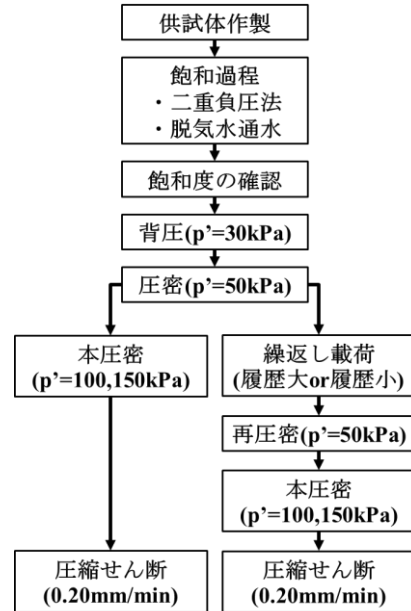


図3 試験の手順

#### 3.3.1 強度試験

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  $0.20\text{mm}/\text{min}$  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 ( $p'=50\text{kPa}, 100\text{kPa}, 150\text{kPa}$ ) 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 ( $c, \varphi$ ) を求める。

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

$$\varphi = \text{rad} \times 180/\pi$$

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

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、 $\varphi$  : 内部摩擦角 ( $^\circ$ )、 $c$  : 粘着力 ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ) 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、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、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)、 $\rho_t$ ：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。

#### 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。粘着力の変化を図4、内部摩擦角の変化を図5に示す。図4から、液状化履歴を与えていない供試体の土粒子間の粘着力は、セメント添加によって上昇していることが分かる。理由としては、セメンテーションによる土粒子間の固結力によるものであるとわかる。同様の傾向が液状化履歴の小さい供試体でも見られる。しかしながら、液状化履歴の大きい供試体では、 $C_c=0.0\%$ 、 $0.3\%$ では上昇傾向にあるが、 $C_c=0.5\%$ になり減少している。また、 $C_c=0.0\%$ 、 $0.3\%$ において、液状化履歴の無い結果に比べて粘着力が高くなっており、予想と反する結果となった。理由として考えられるものは、 $C_c=0.0\%$ 、 $0.3\%$ の液状化履歴の大きいケースでは、液状化に伴う密実化による強度増加の影響が大きくなって、計算上、粘着力が大きくなったと考えられる。しかしながら、他のケースでは密実化による説明が出来ないため、さらなる検討が必要である。

次に、図5の内部摩擦角の変化について検討する。

図5から、内部摩擦角はどのセメント分含有率においても、液状化履歴の無い場合において内部摩擦角が小さい結果となっている。内部摩擦角には、砂の密度が大きく関係する。液状化の発生によって間隙水の排水が起こり、それに伴う密実化により、内部摩擦角が上昇したと考えられる。

以上から、大ひずみ領域( $\epsilon=1.0\%$ 以上)における力学特性の変化と液状化強度の変化の傾向が一致していないことより、再液状化強度のメカニズムを説明できない。そのため、大ひずみ領域よりも小さいひずみの力学特性を検討する必要がある。

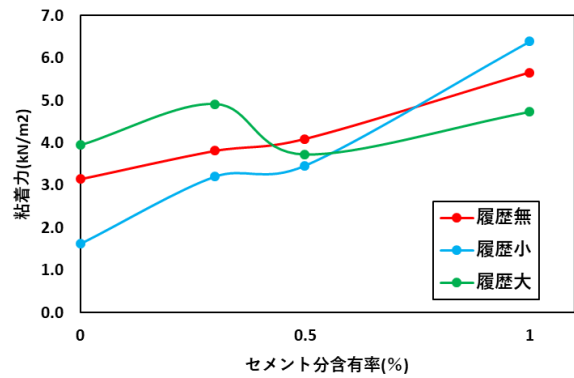


図4 液状化強度曲線

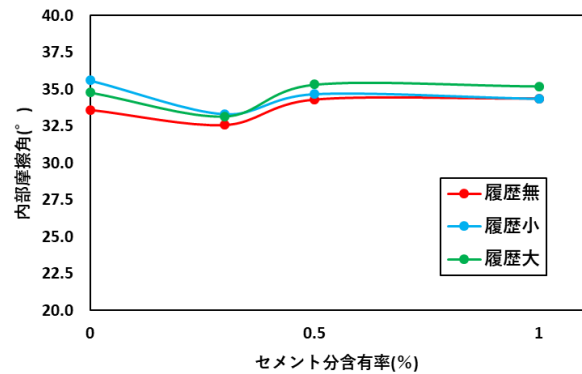


図5 再液状化強度曲線

表2 強度試験から得られた粘着力  $c$

|     | 0.0%   | 0.3%   | 0.5%   | 1.0%   |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| 履歴無 | 3.1495 | 3.8140 | 4.0959 | 5.6547 |
| 履歴小 | 1.6191 | 3.2094 | 3.4651 | 6.3923 |
| 履歴大 | 3.9442 | 4.9153 | 3.7267 | 4.7289 |

表3 強度試験から得られた内部摩擦角  $\phi$

|     | 0.0%   | 0.3%   | 0.5%   | 1.0%   |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| 履歴無 | 33.597 | 32.590 | 34.283 | 34.352 |
| 履歴小 | 35.610 | 33.300 | 34.672 | 34.352 |
| 履歴大 | 34.787 | 33.167 | 35.313 | 35.198 |

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。図6の初期せん断剛性率から、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。しかしながら、図6のせん断剛性率には、液状化による密実化による間隙比の影響があると考えられる。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て検討する。また、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、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7に上記で計算したセメンテーション破壊率を示す。どのケースにおいても、液状化履歴が小さい場合に比べ、液状化履歴の大きい場合の方が、セメンテーション破壊率が大きい結果となった。理由として、液状化による土粒子の骨格構造が破壊されて剛性が減少していると考えられる。一方で、セメント分含有率によってセメンテーション破壊率に差があるため、セメンテーションによる固結力の違いが表れている。また、セメント分含有率が大きい程、履歴大と履歴小のセメンテーション破壊率の差が小さくなっているため、骨格構造の破壊傾向に固結力の大きさによる影響があると考えられる。

微小ひずみ領域における力学特性の変化から、履歴小の場合にせん断剛性率が低下したにもかかわらず、再液状化強度が上昇してしまっている。

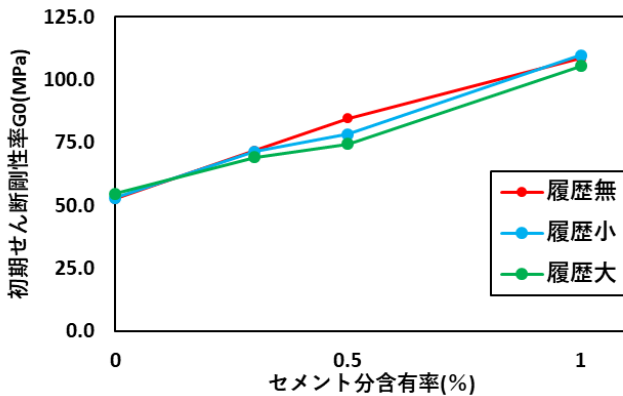


図6 BE試験から得られたせん断剛性率

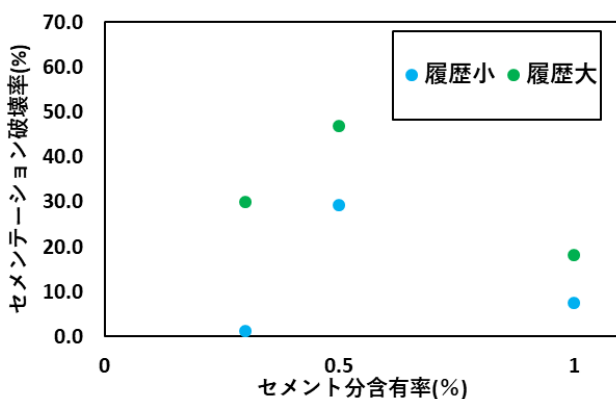


図7 BE試験から得られたせん断剛性率

表4 セメンテーション破壊率

|     | 0.3%    | 0.5%     | 1.0%     |
|-----|---------|----------|----------|
| 履歴小 | 1.2058  | 29.21512 | 7.48114  |
| 履歴大 | 29.9132 | 46.97456 | 18.13723 |

強度試験、BE試験から得られた力学特性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、強度定数  $c, \phi$  及び初期せん断剛性率  $G_0$  と再液状化強度比には相関が見られなかった。今後は、大ひずみ領域と微小ひずみ領域における力学特性だけでなく、その間の力学特性にも着目して、再液状化のメカニズムを検討していく必要がある。

### 5. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- ① 強度定数  $c, \phi$  より考察した大ひずみ領域における力学特性は、密実化による影響とセメンテーションの破壊による影響が関連して現れる結果となった。
- ② BE試験では、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、液状化履歴の大小によりセメンテーションの破壊の程度は変化する。
- ③ 強度試験及びBE試験では、再液状化強度を説明できないところがあるため、液状化強度の変化を大ひずみ領域と微小ひずみ領域の間のひずみ領域での検討が必要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) 川口貴之, 三田地俊之, 澁谷啓, 佐野侷房: 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.