

# セメンテーション及び微小繰返しせん断履歴を与えた砂供試体の力学特性の比較

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  
長岡技術科学大学大学院

○長井優之  
正会員 豊田浩史  
高田 晋  
吉田 岬

## 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。それに伴って住宅、道路、河川堤防、港湾施設等のライフラインに甚大な被害が発生した。この液状化の被害では、同様の埋立地盤でも施工年代の違いにより、被害程度に差がみられた。

土の液状化強度に影響を与える要因として、密度や細粒分含有率、拘束圧などが挙げられるが、その中でも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。しかし、年代効果により土の粒子構造が変化するメカニズムは明らかになっていない。年代効果をもたらすメカニズムの一つとして応力履歴やセメンテーションにより液状化強度が上昇することが知られている<sup>1)</sup>。そのため、応力履歴の影響を考慮し、試料にあらかじめ多くの繰返しせん断履歴を与えて年代効果を再現する試み<sup>2)</sup>や微量のセメント添加により、年代効果によるセメンテーション効果を再現する試み<sup>3)</sup>がなされている。そこで、年代効果を再現した供試体の力学特性の比較検討が必要となっている。

本研究では、セメンテーション効果を与えた試料と微小繰返しせん断履歴を与えた試料により年代効果を再現し、再現試料の力学特性を明らかにすることを目的とし、各供試体に対し、飽和非排水繰返し三軸試験（液状化試験）を実施し、液状化強度に与える影響を調べる。その後、セル圧  $p'$  一定状態での排水三軸圧縮試験から強度特性を調べ、液状化強度と静的強度特性について、比較検討を行う。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験装置

本研究では供試体が直径 5 cm、高さ 12.5 cm の三軸試験装置を用いた。本研究で用いた三軸試験装置を図-1 に示す。

なお、供試体の排水量は、非接触のギャップセンサーを組み込んだフロート式体積計を用いて計測を行った。

### 2.2 供試体作製

本研究で用いた供試体は、標準砂である豊浦砂および豊浦砂にセメントを添加した試料（セメント含有率  $C_c=0.1\%$ 、 $0.3\%$ 、 $0.5\%$ 、 $1.0\%$ ）から作製した。使用するセメントは、セメントを水和反応させる水中養生を考慮し、水中養生期間が短く、強度が安定する早強ポルトランドセメントとした。また、すべての試料において、相対密度  $D_r=40\%$  とした。本研究で用いた供試体の条件を表-1、表-2 に示す。なお、供試体は漏斗体積法により、モールドにゆるく試料を堆積させ、所定の相対密度、間隙になるように作製した。

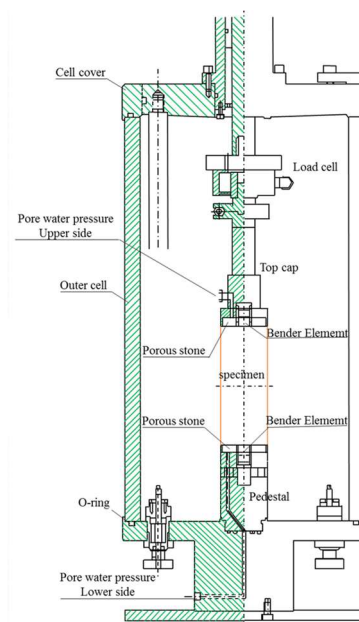


図-1 三軸試験装置概略図

### 2.3 試験概要

本研究では、供試体内外にそれぞれ-100 kPa、-80 kPaの負圧をかける二重負圧法を用いた。間隙圧係数  $B$  が 0.95 を上回り、供試体が十分に飽和していることを確認した後、等方圧密を行い、以下の実験を行った。

また、微小繰返しせん断履歴を与える場合、本圧密終了後、表-3 に示すひずみ振幅で排水繰返し載荷を行った。繰返し載荷は 10, 100, 1000 回載荷し、せん断履歴を与えた。

### 2.4 試験概要

本研究では、供試体内に-100 kPa、三軸セルに-80 kPaの圧力をかける二重負圧法で飽和化を行った。間隙圧係数  $B$  が 0.95 を上回り、供試体が十分に飽和していることを確認した後、等方圧密を行い、以下の実験を行った。

#### 2.4.1 液状化試験（飽和非排水繰返し三軸試験）

軸ひずみ速度 0.5 mm/min で、ひずみ制御により繰返しせん断載荷を行った。供試体に与える拘束圧は、初期平均有効主応力  $p' = 50$  kPa（背圧  $U_b = 200$  kPa）とした。試験は、 $p' = 50$  kPa の等方圧密状態からひずみ制御のもと、繰返しせん断する方法で行った。なお、軸方向ひずみ  $DA = 5\%$ （圧縮方向と伸長方向の総和）に達した段階を液状化状態と判断した。

#### 2.4.2 セル圧 $p'$ 一定排水三軸圧縮試験

排水単調載荷（軸ひずみ速度：0.1 mm/min）で、自動制御によりせん断を行った。供試体に与える拘束圧は、初期平均有効主応力  $p' = 50, 100, 150$  kPa（背圧  $U_b = 200$  kPa）とした。試験は、等方圧密状態からひずみ制御のもと、せん断する方法で行った。せん断中は有効拘束圧  $p'$  が一定となるように制御した。初期平均有効主応力の各ケースで得られた圧縮強さを近似直線で結び、その傾きを  $M$ 、切片を  $f_0$  とし、この値に数式(1)(2)(3)を用いて、粘着力  $c$  (kN/m<sup>2</sup>)、内部摩擦角  $\varphi$  (deg) を算出した。

$$\text{rad} = \sin^{-1} \left( \frac{3 \times M}{6 + M} \right) \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{\text{rad} \times 180}{\pi} \quad (2)$$

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

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
吸水率 (%)	-
砂分含有率 $S_c$ (%)	100
礫分含有率 $G_c$ (%)	0

表-2 セメンテーションを与える供試体の諸条件

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 (°C)	20
相対密度 $D_r$ (%)	40

表-3 微小繰返しせん断履歴試験ケース

	case1	case2	case3	case4
繰返し振幅ひずみ $\varepsilon_a$ (%)	履歴なし	0.001	0.005	0.010

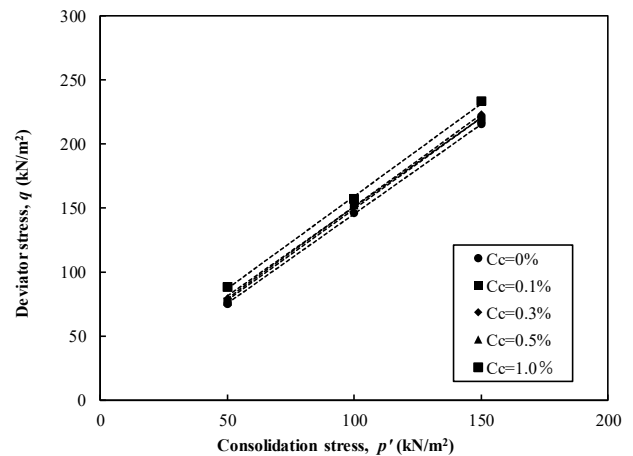


図-2 セメント混合砂の圧密応力-圧縮強さ関係

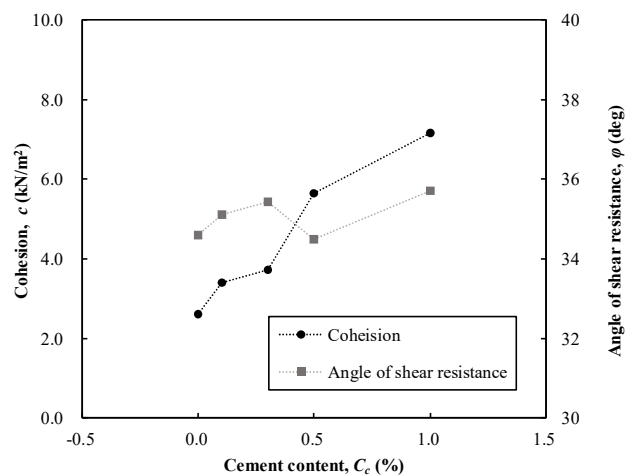


図-3 粘着力および内部摩擦角に与えるセメント含有率の関係

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 セメント混合砂のせん断特性

$p'$ 一定排水三軸圧縮試験によって得られたせん断強さ  $q_{max}$  と有効拘束圧  $p'$  の関係を図-2 に示す。また、拘束圧を変更した  $p'$ 一定状態での圧縮強さの近似直線から得られた粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  に与えるセメント含有率  $C_c$  の関係を図-3 に示す。

セメントを 0.5% 添加したゆるい正規圧密砂では、粘着力  $c$  が微量ながら増加することが確認できる。これは、微量のセメント添加により、砂粒子同士の接合点が固結作用により強化された影響だと考えられる。しかし、セメントを 0.5% 添加しても、 $\phi$  にはほとんど変化が見られない結果となった。これにより、セメント添加の影響は、粘着力の増加が卓越しており、 $\phi$  への影響は小さいといえる。

#### 3.2 セメント混合砂の液状化特性

液状化試験によって得られた液状化強度曲線を図-4 に示す。セメント含有率  $C_c$  と前項で示した粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  および液状化強度  $R_L$  との関係を表-3 に示す。なお、 $DA=5\%$ での、繰返し回数  $N_c = 20$  回に相当する繰返しせん断応力比  $\sigma_d/2\sigma'_c$  を、液状化強度  $R_L$  とした。

図-4 より、正規圧密ではセメントを 0.3% 添加しても  $R_L$  にはあまり変化が見られないことが確認できる。セメントを 0.5% 添加すると、 $R_L$  が約 1.15 倍になることが確認された。また、セメントを 1.0% 添加すると、 $R_L$  が約 2 倍に増加した。液状化強度が増加した要因として、セメント量が増えることで、砂粒子同士の結合が強化され、粒子構造が外力に対してさらに安定となったためだと考えられる。地震外力に対して粒子構造が安定していれば、過剰間隙水圧の発生が抑制され、液状化が起こりにくくなる。

液状化状態では、変形の少ないときは、液体としてふるまうが、よほど小さな密度の砂でない限り、変形が大きくなると固体の性質をある程度取り戻すことが知られている。緩い砂では、液体としてふるまうせん断変形の範囲が密な砂に比べて広い。ここには示していないが、応力-ひずみ関係を比較すると、 $C_c=0.5\%$ ではサイクリック・モビリティーに達した後、ひずみが小さく進行しており、密な砂に近い挙動が確認できる。

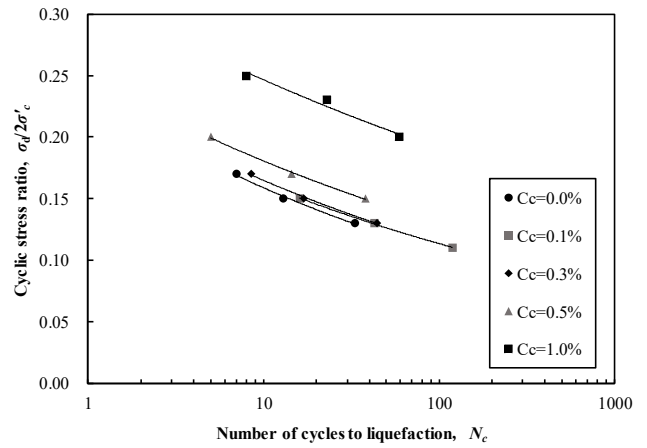


図-4 セメント混合砂の液状化強度曲線

表-3 セメント含有率の違いによる力学特性の比較

セメント含有率 $C_c$ (%)	粘着力 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )	内部摩擦角 $\phi$ (deg)	液状化強度 $R_L$
0.0	3.13	34.4	0.141
0.1	3.41	35.1	0.145
0.3	3.73	35.4	0.148
0.5	5.64	34.5	0.164
1.0	7.16	35.7	0.280

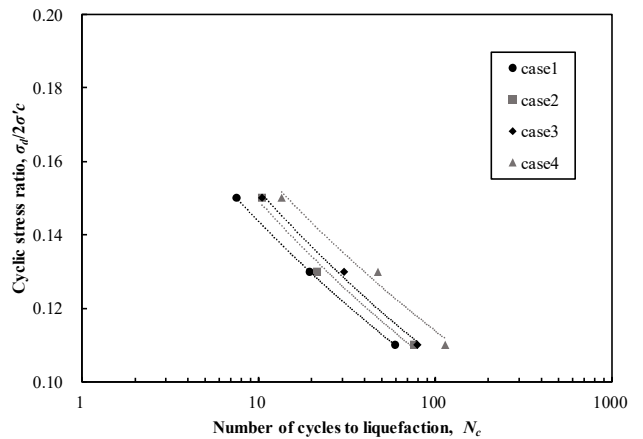


図-5 液状化強度曲線（繰返し載荷 10 回）

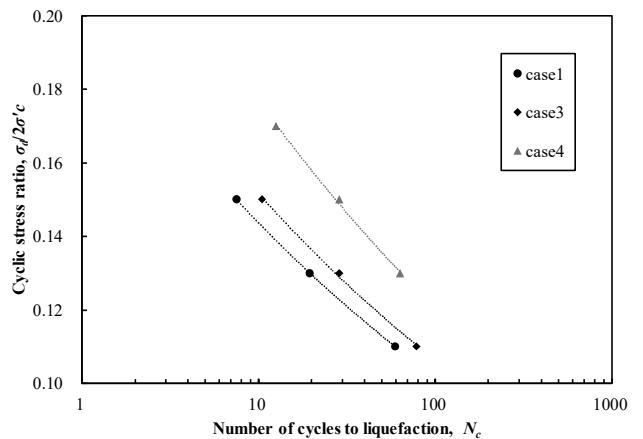


図-6 液状化強度曲線（繰返し載荷 100 回）

### 3.3 微小繰返しせん断履歴を与えた砂の液状化特性

繰返し載荷を 10, 100, 1000 回行った時の砂の液状化曲線を図-5, 図-6, 図-7 に示す. また, 繰返しせん断履歴を与えた砂供試体の液状化強度を図-8 に示す. 図-8 より, 本圧密では  $\varepsilon_a = 0.005\%$  までは液状化強度にあまり変化が見られないことが確認できる. しかし,  $\varepsilon_a = 0.010\%$  で  $R_L$  の値に影響を与えることが確認された. また, 繰返し載荷 10 回~100 回の液状化強度の値がさらに増加したが, 100 回~1000 回では液状化強度の値に変化がない結果が得られた.

### 3.4 微小繰返しせん断履歴を与えた砂のせん断特性

微小繰返しせん断履歴試料では, 間隙比  $e$  に着目し, 相対密度  $D_r$  の変化によりせん断特性に与える影響を検討した. 繰返し載荷を 1000 回行ったケースの繰返し履歴中の相対密度の変化を図-9 に示す. 初期状態に相対密度の違いが見られるものの, 微小繰返しせん断履歴の影響が最も大きいと考えられる case4 で相対密度  $D_r$  の増加は 1.0% 以下であった. 相対密度  $D_r$  の増加が 5.0% 程度ないと粘着力  $c$  と内部摩擦角  $\phi$  が変化しないと考えられているため, この程度の繰返しひずみ履歴では, 強度特性への影響は殆どないと考えられる.

## 4. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである.

- (1) セメント 0.5% 混合砂は, 粘着力の微増があり, 液状化強度が増加し, 液状化後のひずみの進行が小さくなった.
- (2) セメント 0.1% 混合砂は, せん断強度, 液状化強度とも豊浦砂と差は見られない.
- (3) 緩い正規圧密土の砂質土において,  $\varepsilon_a = 0.010\%$  を 10 回載荷すると, 液状化強度が増加する.
- (4) 緩い正規圧密土の砂質土において, 弾性域のひずみを繰返し載荷しても, 液状化強度の増加は見込めない.

### 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, 30-12, pp.5-10, 1982.

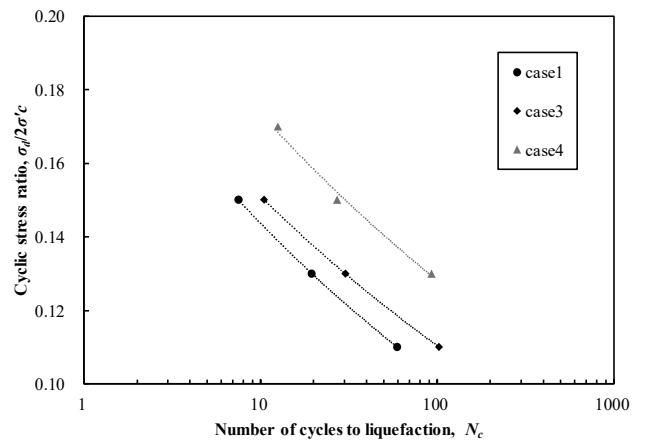


図-7 液状化強度曲線 (繰返し載荷 1000 回)

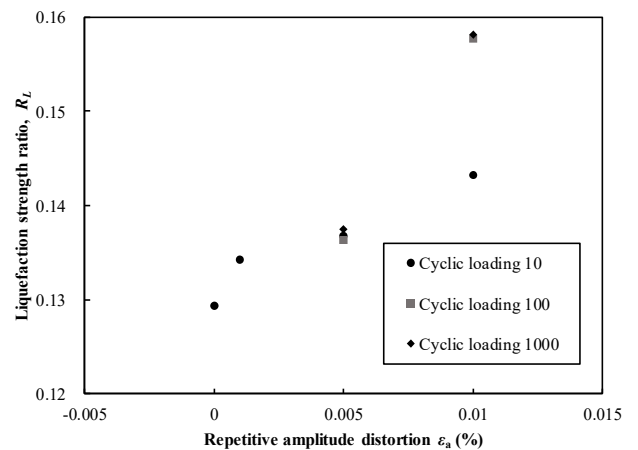


図-8 繰返し載荷を与えた砂供試体の液状化強度

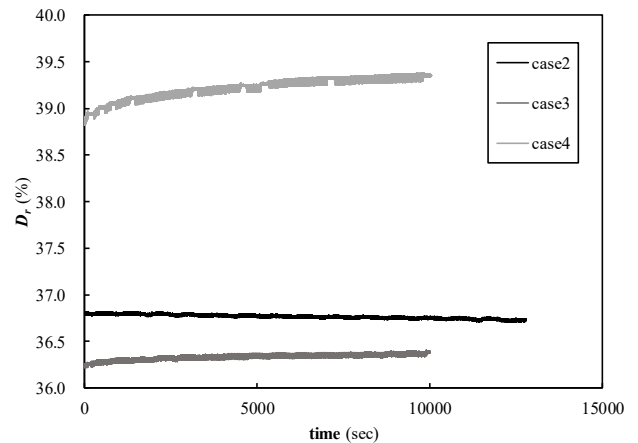


図-9 微小繰返しせん断履歴による相対密度の変化

- 2) 谷本俊輔・佐々木哲也・石原雅規: 液状化判定法の課題—年代効果の問題を中心に—, 地盤工学会誌, Vol.64, No.8, Ser, No.703, 2016
- 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.