

# 軽度なセメンテーションを有する砂の非排水繰返しせん断挙動 に対する FLIP プログラムの適用性検討

上田 恭平\*

## 1. 研究の目的

自然地盤において堆積期間が十分経過することで、地盤の密度増加を伴わずに液状化強度が増加する「年代効果」と呼ばれる現象が東日本大震災の液状化被害で確認されており<sup>1)</sup>、その要因の一つとしてセメンテーション効果が挙げられる。セメンテーション効果が砂質土の液状化特性に及ぼす影響は不明な点が多く、三軸試験等の室内試験による研究<sup>例えば、2)</sup>が進められているが、中空ねじり試験での研究事例は少ない。また、地盤・構造物系の液状化挙動の評価に用いられる有限要素法において、セメンテーション効果の影響を組み込んだ数値解析の事例も多くない。そこで本研究では、軽度なセメンテーション効果を有する砂質土を対象に、中空ねじり試験および有効応力解析による要素シミュレーションを行い、液状化特性に与える影響を評価することを目的とする。

## 2. 研究の方法

### (1) 中空ねじり試験

京都大学防災研究所所有の振動試験システムを用いた。高さ 100 mm、外径 100 mm、内径 60 mm のセメント添加供試体を作製するにあたり、試料として珪砂 6 号と早強ポルトランドセメントを使用した。珪砂とセメントをよく混合した後、空中落下法にてセメント混合砂との付着を防ぐために表面にフィルムを巻き付けたモールド内に、砂を堆積させる。次に、モールドごと供試体を水に浸し、1 日水中で養生した後、供試体の安定性を確認しモールドから脱型し、所定の期間空中養生を行った。以上のように作製したセメント供試体を用いて、せん断応力比 (CSR) とセメント添加率 (C=0%, 1%, 3%)、養生期間 (7, 31 日間) を変化させた計 14 ケースの非排水繰返しせん断試験を実施した。

### (2) 要素シミュレーション

構成則としてひずみ空間多重せん断モデル<sup>3)</sup>を用い、まず中空ねじり試験の結果をもとにセメント添加のない砂質土のパラメータを決定した。そして、一部パラメータにセメンテーションによる影響を組み込むことによって、数値解析上で軽度なセメンテーション効果をもたらす液状化特性の再現を試みた。具体的には、セメンテーション効果によって、粒子間の接触力が増加すると考える。接触力の増分は、有効応力の等方成分と仮想単純せん断応力に寄与し、内部摩擦角や初期せん断剛性といった物性値、ダイレイタンス成分に影響を及ぼす。また、構成式上で液状化時の体積弾性係数の低減は等方応力成分  $p$  に依存し、 $K_{Lu} = n_k K_{uo}(p/p_0)^{k_k}$  で与えられる。物性値、ダイレイタンス成分のパラメータに加えて、液状化時の体積弾性係数の拘束圧依存性パラメータ  $k_k$  を修正することで、セメンテーション効果の再現を試みた。

## 3. 得られた成果

### (1) 中空ねじり試験

セメント添加 C=0% とセメント添加率 C=3%、養生期間 7 日のケースを比較する。図-1 に示す CSR = 0.30 における過剰間隙水圧比の時刻歴を見ると、セメント添加率が 3% のケースでは過剰間

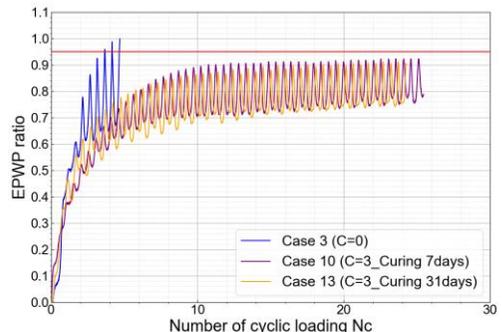


図-1 過剰間隙水圧比の時刻歴

\*京都大学防災研究所・准教授

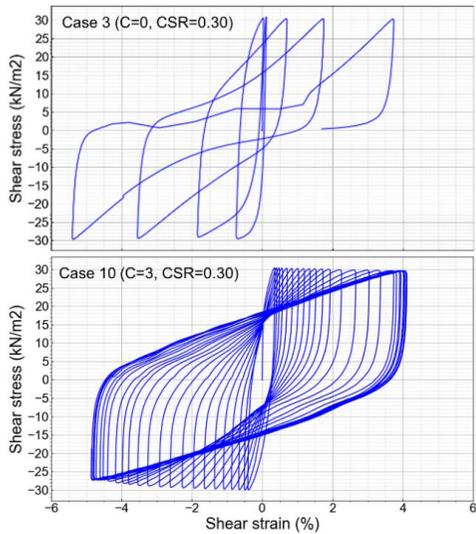


図-2 せん断応力-せん断ひずみ関係

隙水圧比が 1.0 に到達せず、値が収束していることがわかる。図-2 に示すせん断応力-ひずみ関係をみると、 $C = 0\%$  のケースでは繰返し荷重を受けてせん断ひずみが伸び続けるのに対し、 $C = 3\%$  では大ひずみが生じた後値が収束し、平行四辺形のような形状のひずみループを描いている。セメント水和物による粒子間の固着力により土粒子構造が安定することで、繰返し荷重を受けてせん断ひずみは増進するものの有効応力は 0 まで低減しないものと考えられる。また、図-3 に示すように、セメント添加率の差異による物性値の変化も確認できた。

(2) 要素シミュレーション

物性値とダイレイタンス成分、 $l_k$  を調整して得られた液状化強度曲線と有効応力経路を、実験結果と比較して図-4、図-5 に示す。 $l_k$  の値が増加することで有効体積ひずみが生じやすくなり、せん断ひずみ発達後の過剰間隙水圧の上昇が抑えられると解釈できる。以上のように、モデルパラメータを適切に調整することで、セメンテーション効果による液状化強度の増加を含めた中空ねじり試験結果を解析において表現できることがわかった。

参考文献

1) Towhata, I., Taguchi, Y., Hayashida, T., Goto, S., Shintaku, Y., Hamada, Y. and Aoyama, S.: Liquefaction perspective of soil ageing, *Géotechnique*, 67(6), 468-478, 2017. 2) 志賀正崇, 清田隆, 片桐俊彦: セメンテーションを付加した砂試料の圧密時におけるせん断波速度の変化と液状化特性, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, 77(4), I\_557-I\_563, 2021. 3) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of Granular Materials in a Strain Space Multiple Mechanism Model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(3), 360-392, 2011.

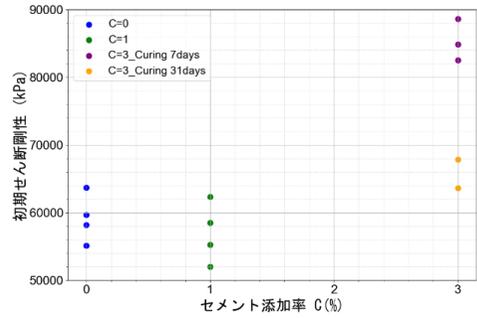


図-3 セメント添加率毎の初期せん断剛性

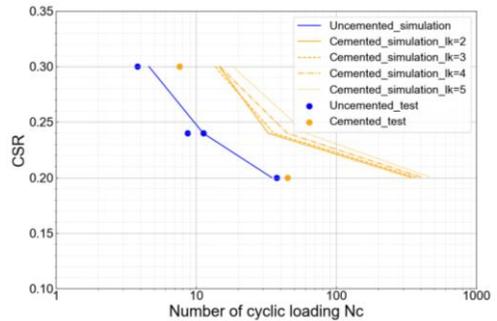


図-4 パラメータ調整後の液状化強度曲線

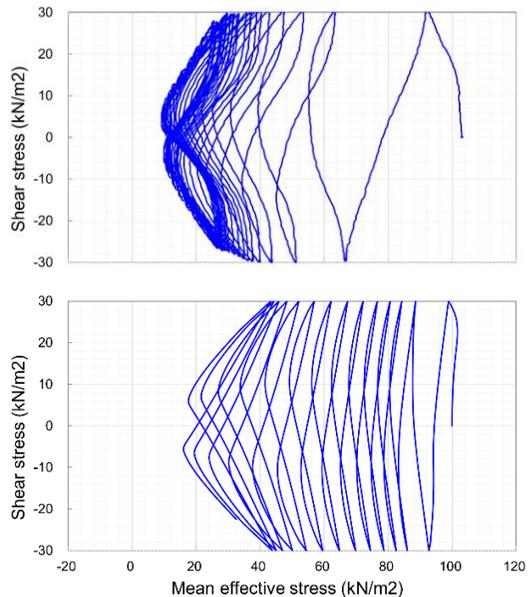


図-5 有効応力経路の比較 (上: 試験, 下: 解析)