

微小せん断剛性率の応力依存性を用いたセメンテーション 効果を持つ砂質土の液状化強度の評価

○東京大学生産技術研究所 正会員 志賀 正崇
東京大学生産技術研究所 正会員 清田 隆

1. 研究背景

1964年のアラスカ地震や新潟地震では緩く堆積した砂質土層で液状化が発生し、信濃川の旧河道上で甚大な被害が発生した。これらの地震を契機として液状化発生を事前に予測する手法が開発、改定されてきた。しかしながら堆積年代の古い砂地盤では、粒子の接触点において周辺との応力差による化学ポテンシャルの高まりが粒子を融解させる圧力融解や、間隙水に溶出した鋳物イオンが粒子間に沈殿することによって土粒子間の固着力が強化される現象(セメンテーション)が発生する。Towhata et al.¹⁾やAndrus et al.²⁾は原位置試料を用いてせん断波速度や堆積年代をパラメータとして液状化強度とセメンテーション効果の相関を議論したが、実務での利用に際してはより高い精度が要求される。このため本論文では、セメンテーション効果を表現するパラメータとして圧密過程における微小せん断剛性率の応力依存性の変化に着目し、液状化強度との相関を議論する。

2. 試験方法

本論文では、圧密時の微小せん断剛性率 G_D の変化に着目する。供試体は珪砂7号($\rho_s = 2.617$ 、 $D_{50} = 0.143\text{mm}$ 、 $e_{min} = 1.145$ 、 $e_{max} = 0.671$ 、 $D_r = 65\%$)に早強ポルトランドセメントを添加し、乾燥突き固め法で作製した。供試体のサイズは直径100mm×高さ200mmの円筒供試体であり、ひずみ速度制御による三軸試験装置を用いて試験を実施した。セメント添加率 C は重量比でそれぞれ0、1、2、3%である。供試体作製に当たっては、乾燥状態で指定量の珪砂とセメントを混ぜ合わせた後、漏斗の先端が試料表面に常に触れる状態でモールド内に砂を投下した。この後指定の高さになるまで、ランマーで突き固めを行った。この作業を4層分繰り返した後、モールド側方に開けた穴から徐々に水を浸潤させ、1日水中養生後、6日気中養生を行った。養生後供試体は30kPaの有効拘束圧を保ったまま、二重負圧法により脱気、また通水を行った。通水後背圧を段階的に200kPaまで上昇させ、 B 値が0.95を上回ったことを確認した後、100kPaまで有効拘束圧を上昇させる等方圧密を行った。

圧密中は1kHzの正弦波をキャップ部に水平に設置したアクチュエータに入力し、励起されたねじりせん断波を供試体表面に設置した1組の加速度計で計測しせん断波速度 V_s を計算した。なおせん断波の波の到達はRise-Rise法によって読み取った。微小動的せん断剛性率 G_d は計測された V_s と圧密時の体積変化を考慮した飽和密度 ρ_{sat} を用いて $G_d = \rho_{sat} V_s^2$ から計算した。

3. 試験結果と考察

計測された側方有効拘束圧 σ'_3 と G_d の結果を図-1に示す。図-1ではセメント添加率が上昇するごとに、 G_d の値も上昇していることが見て取れる。これは間隙中に生成されたセメント水和物が土粒子同士を結合させることにより、粒子間のせん断抵抗力が増加したことに起因すると考えられる。

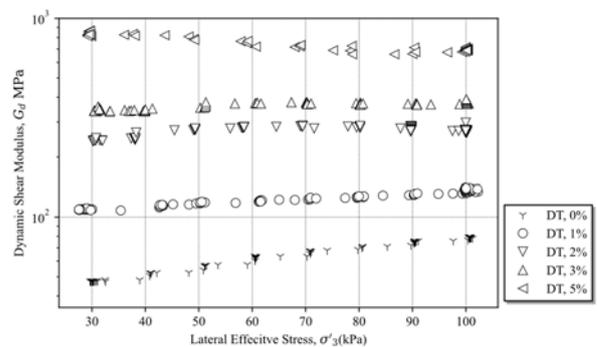


図-1 セメント添加率が σ'_3-G_D 関係に及ぼす影響

図-1で得られた関係に対してIwasaki et al.³⁾のモデル(下式)を適用する。

$$G_d = A(2.17 - e)^2 / (1 + e) \sigma_3'^n \quad 1$$

ここに、 e は間隙比、 A と n はそれぞれ供試体ごとに決定される定数である。本論文ではこれ以降、 n を応力依存性と称する。

図-2は式1を用いて図-1の各結果について非線形回帰を行い、各供試体についてセメント添加率と応力依存性の関係を図示したものである。図-2によれば応力依存性の値はセメント添加率が上昇するごとに減少している。また、セメント添加率が高い供試体では応力依

キーワード 液状化, セメンテーション, 応力依存性, 微小せん断剛性率

連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1 東京大学生産技術研究所 Be-206

存性の値が負の値を取り、有効拘束圧の上昇とともに G_d が減少する傾向も確認された。今回 $n < 0$ が計測された理由については、供試体が大気圧下で養生されたため、あるセメンテーション量を超えると、拘束圧の上昇による土粒子構造の強化よりも、セメンテーションの破壊に起因する土粒子構造の劣化が卓越するためであると考えられる。

龍岡ら⁴⁾は複数の堆積軟岩と風化軟岩に対し、等方応力状態での微小繰り返し載荷によるヤング率 E_0 の応力依存性について議論を行った。龍岡らはセメンテーション効果の高い堆積泥岩や凝灰岩では、応力依存性の値が 0 に近い値を取る一方、セメンテーション効果の少ない堆積砂岩、風化岩では高い値が報告されている。静的計測と動的計測による違いやヤング率とせん断剛性率の違いによる結果の解釈には留意する必要があるものの、セメンテーション効果が高いほど応力依存性が低くなるという試験結果は、本研究の結果と整合している。以上の議論から同一試料同一密度から成るセメンテーション効果のない再構成供試体(no-cem)とセメンテーションを保持する不攪乱供試体(cem)の二つについて、それぞれの応力依存性の比 $D_{cem} = n_{cem} / n_{no-cem}$ は、セメンテーション効果の程度を示す指標となると考えられる。

図-3 は、圧密終了後を正規化したせん断波速度 V_s/V_s^* と正規化した液状化強度 CRR/CRR^* の関係を示したものである。ここで V_s^* と CRR^* はそれぞれセメンテーションが存在しない供試体(C=0%)のせん断波速度と液状化強度である。本研究では圧密終了後の相対密度を 65% で統一したため、 G_d と V_s は同じパラメータとして議論が可能である。なお CRR は、過剰間隙水圧比が 95% となる繰り返し回数 $N_c(\Delta u/\sigma'_c=0.95)$ と繰り返し応力比 CSR の関係をプロットし、繰り返し回数 20 回で定義した。また図中の点線は Kiyota et al.⁵⁾ で示されたセメンテーションを持たない砂質土の V_s と CRR の関係式を、本研究の C=0% の供試体の結果を用いて引いたものである。

図-3 からはセメント添加率の上昇とともに、 V_s および CRR は上昇するが、その上昇の割合は既存の提案式と比較して下回ることが見て取れる。Kiyota et al.⁵⁾ はセメンテーション効果の無い地盤に対し、原位置 V_s 、室内試験による再構成試料の V_s^* 、と液状化強度 CRR^* を用いて、原位置液状化強度 CRR を推定する手法を提案している。しかしながら図-3 の結果はセメンテーション効果を持つ原地盤に対して同手法を適用すると、 CRR は過大評価に繋がる危険性を示している。

図-4 は D_{cem} と、計測された V_s から Kiyota et al. の提案式を用いて推定される CRR と実際の CRR の比 (R_{CRR}) を示したものである。結果として D_{cem} と R_{CRR} はよい線形

の相関関係があり、供試体のセメンテーションによる CRR 推定値との差異を表現する可能性を示すといえる。

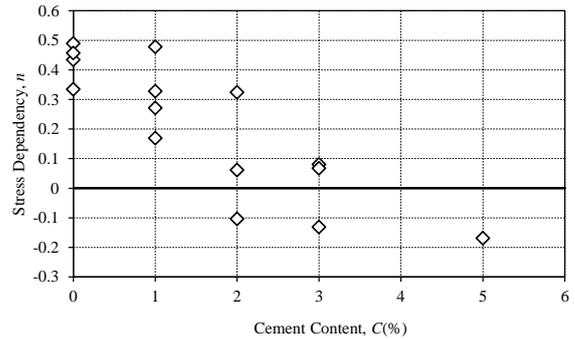


図-2 セメント添加率が $\sigma'_3 - G_D$ 関係に及ぼす影響

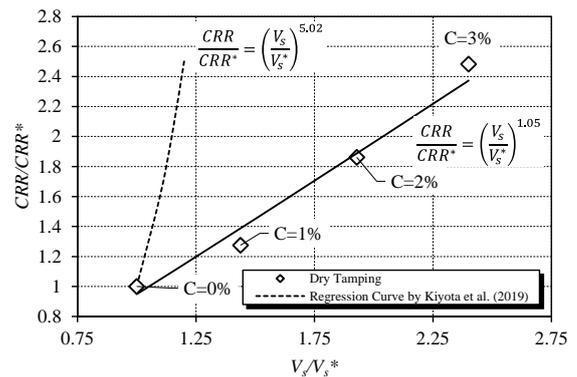


図-3 セメンテーションの有無が $V_s - CRR$ 関係に及ぼす影響

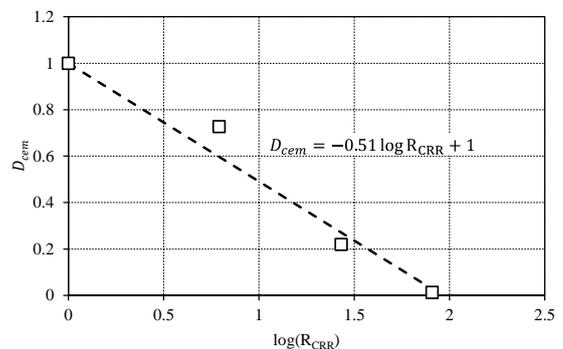


図-4 R_{CRR} と D_{cem} の関係

4. まとめ

本論文では圧密過程における微小せん断剛性率の応力依存性の変化に着目し、液状化強度との相関の議論を行った。セメンテーション効果が高いほど応力依存性が減少し、応力依存性の比とセメンテーションの有無による液状化強度の差異を表現可能であることが分かった。

参考文献

- 1) I., Towhata, et al., *Geotechnique*, 67(6), 467-478, 2017
- 2) R., Andrus, et al., *J. of Geotech. and Geoen. Eng.*, 135(6), 735-744, 2009
- 3) T., Iwasaki, et al., *Proc. Second Int. Conf. Microzonation Safer Construction Research Application*, 2, 885-896, 1978
- 4) 龍岡ら, 土木学会論文集, 561(38), 1-17, 1997
- 5) T., Kiyota, et al., *SDEE*, 117, 164-173, 2019