

砂質土の骨格構造が液状化強度に及ぼす影響に関する実験及び解析的検討

名城大学大学院 学生会員 ○山下隼史
 名城大学 学生会員 夏目将嗣
 名城大学 正会員 小高猛司
 中部土質試験協同組合 正会員 久保裕一
 日本工営株式会社 正会員 李 圭太

1. はじめに

同一地点の砂地盤から採取した試料であっても、室内試験をすると、比較的乱れが生じやすいチューブサンプリングは、凍結サンプリングよりも液状化強度が小さくなることが知られている¹⁾²⁾。これは、サンプリング時の乱れによる土の骨格構造の劣化が原因と考えられる。しかし、骨格構造が液状化強度に及ぼす影響を定量的に評価した研究は少ない。そこで本報においては、液状化強度の低下が骨格構造の劣化によって発生する可能性があることを示す。すなわち同じ間隙比の土でも、骨格構造が劣化すると液状化強度が低下し得ることを示す。同一間隙比 ($e=0.60$, $Dr=71.6\%$) でありながら異なる骨格構造を有する砂質土供試体を用いて、三軸圧縮試験と SYS カムクレイモデル³⁾ によるシミュレーションによって骨格構造の違いを力学的かつ定量的な評価を試みる。次に、小型 1g 振動台実験により、骨格構造の異なる砂地盤の液状化挙動を観察する。最後は、三軸圧縮試験で同定したパラメータを用いて、土-水連成弾塑性解析 GEOASIA⁴⁾ により実地盤スケールでのシミュレーションを行う。

2. 三軸圧縮試験と SYS カムクレイモデルによる要素シミュレーション

試験試料は、三軸試験、振動台実験ともに、三河珪砂 4 号と 6 号、および野間精配砂を質量比 3 : 1 : 3 で配合した混合砂である。供試体を作製する際の含水比（以下、初期含水比）を 0%、5%、10%と変化させる

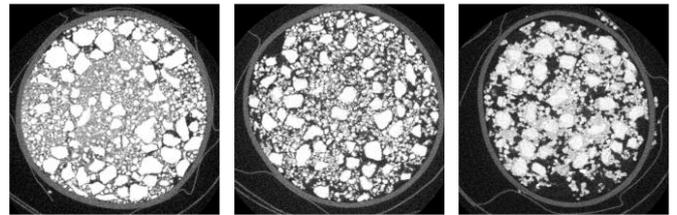


写真 1 骨格構造の X 線 CT 断面

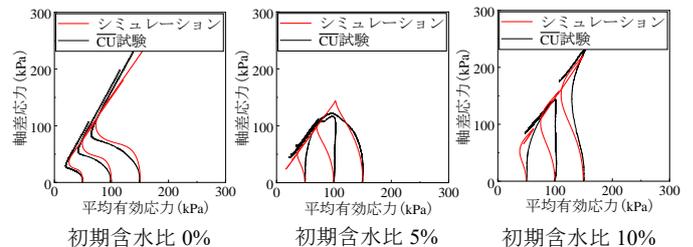


図 1 CU三軸試験の有効応力経路

表1 シミュレーションで得られたパラメータ

	初期含水比	0%	5%	10%
パラメータ	圧縮係数 λ		0.044	
	膨潤指数 κ		0.012	
	限界状態定数 M		1.350	
	NCL の切片 N		1.550	
	ポアソン比 ν		0.300	
パラメータ	構造劣化指数 a ($b=c=1.0$)	8.0	0.70	0.20
	正規圧密土化指数 m		0.03	
	回転硬化指数 b_r		2.00	
	回転硬化限界定数 m_b		0.50	
初期値	初期比体積 v_0		1.60	
	初期の構造の程度 $1/R_0^*$	2.5	20.0	30.0
	初期過圧密度 $1/R_0$		20.0	
	初期異方性 ζ_0		0.01	
	初期平均有効応力 p_0'		20.0	

ことにより、含水状態によって細粒分の団粒化の度合いが変化し、異なる骨格構造が形成される（写真 1）。三軸試験では、初期含水比 5 及び 10%は外部モールドで所定の間隙比になるように 5 層に分けて締め固め、高さ 100mm、直径 50mm の供試体を作製した。一方、初期含水比 0%では三軸試験室内に 2 つ割モールドを設置し、自然乾燥試料を 5 層に分けて空中落下法にて作製した。いずれの供試体も二重負圧法による完全飽和を行うが、飽和後も写真 1 の骨格構造が残存することを別途確認している。図 1 に CU 三軸試験による有効応力経路を黒線で、SYS カムクレイモデルによるシ要素シミュレーションの結果を赤線で示す。表 1 にはシミュレーションで同定したパラメータを示すが、初期含水比が高いほど骨格構造の初期値は高位、その後のせん断で劣化しにくいと設定することによって、三軸試験における力学挙動の大きな違いが説明可能となる。

3. 振動台実験

図2に小型1g振動台模型の寸法を示す。模型地盤は間隙比0.60となるように5層に分けて締固めを行い、地盤内空気をCO₂に置換後、地表面まで水位を上げた。入力加速度は、振幅3.6m/s²、振動数3Hzの正弦波（開始1/3秒間はスイープ波）とした。図3に地盤深さ80mmにおける過剰間隙水圧比を示す。初期含水比0%の過剰間隙水圧比は、初期含水比5%と10%と比べて突出して高く出ており、目視でも液状化に至ったことが確認できた。

4. 弾塑性FEMによる実地盤のシミュレーション

振動台実験と三軸圧縮試験では有効応力レベルが大きく異なるため、要素シミュレーションで同定した弾塑性パラメータを用いたFEM解析では振動台実地盤の結果を十分に表現することが困難であった。そのため、実地盤スケールの解析を行い、骨格構造の違いによる液状化現象の発生の度合いの検証を行った。図4に有限要素メッシュを示す。底面と側面は非排水条件、上面は排水条件とし、地盤両端の同一高さにある接点に等変位境界を課した。図5にGEOASIAによる解析結果を示す。図5は、図4における要素46~50の過剰間隙水圧比を示している。初期含水比0%は模型底面に近い要素46~49において過剰間隙水圧比がほぼ1に達しており、液状化したことを示す。一方、初期含水比5%と10%においては、過剰間隙水圧の上昇スピードが抑制されていることがわかる。以上の結果から、三軸試験によって骨格構造の違いを把握することによって、その土で構成される地盤の液状化挙動の違いが評価可能であることが示された。

5. まとめ

骨格構造を人為的に変えた砂供試体の三軸試験結果は大きく異なり、その違いは、骨格構造のパラメータのみを変えた要素シミュレーションによって再現可能であることが示された。さらに、小型振動台実験、ならびに三軸試験で得た弾塑性パラメータを用いた実地盤スケールのFEM解析それぞれによって、骨格構造の違いによる液状化現象の発生度合いの違いが評価できた。これは、サンプリング時の乱れによる骨格構造の劣化によって液状化強度の低下が発生する可能性を示唆するものである。

謝辞：X線CTの撮影では、京都大学肥後陽介教授ならびに木戸隆之祐助教に大変お世話になりました。SYSカムクレイモデルによる要素挙動の解析にあたっては名古屋大学中井健太郎准教授に、GEOASIAによる解析にあたってはジオアジア研究会事務局長高稲敏浩博士に大変お世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献：1) 水口ら：凍結サンプリングの液状化試験を用いた港湾施設設計事例報告，平成22年度土木学会年講，2010。2) 吉見吉昭：砂の乱さない試料の液状化抵抗～N値～相対密度関係，土と基礎，Vol.42, No.4 pp.63-67, 1994。3) 例えば，A.Asaka et al：An elastoplastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), 2002。4) 例えば，T.Noda et al：Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, S&F, 48(6), 2008。

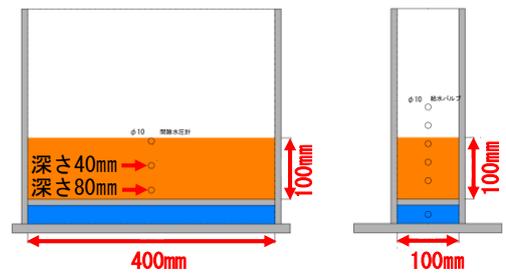


図2 小型1g振動台模型の概要

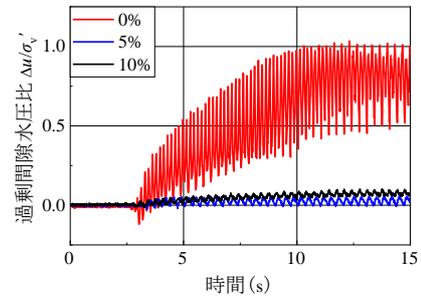


図3 小型1g振動台実験における過剰間隙水圧比の経時変化（深さ80mm）

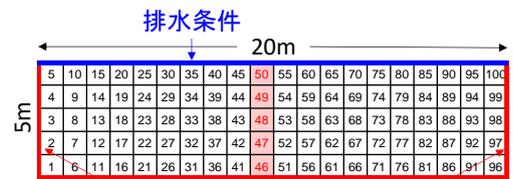
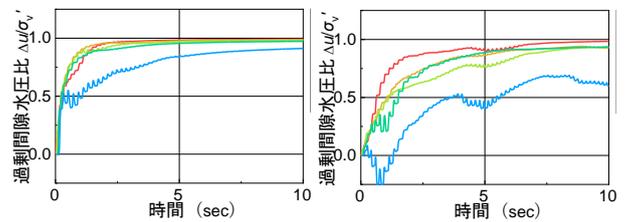
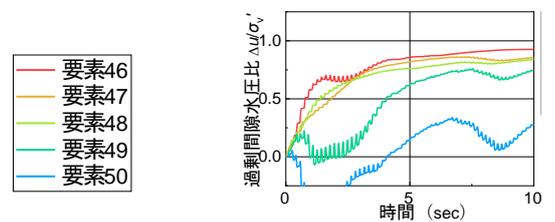


図4 有限要素メッシュ



(a) 初期含水比0%

(b) 初期含水比5%



(c) 初期含水比10%

図5 GEOASIAによる解析結果
（過剰間隙水圧比の経時変化）