

砂質土の骨格構造が液状化挙動に及ぼす影響

砂質土 骨格構造 液状化

名城大学大学院

正会員

○山下隼史, 夏目将嗣

名城大学

国際会員

小高猛司

中部土質試験共同組合

国際会員

久保裕一

日本工営

国際会員

李 圭太

1. はじめに

供試体作製方法の違いにより砂の液状化強度が異なるという試験結果は古くから報告されている(例えば 1)2)。また、原位置の砂において、凍結サンプリングと通常のチューブサンプリングによる品質の違いについてもかつて活発に議論された(例えば 3)。また、近年では、それら砂質土の液状化強度の違いは、砂粒子が形成する骨格構造の影響によると考える研究も出てきている(例えば 4)。それらの研究の多くは、細粒分を多く含まないきれいな砂を対象としてきた。一方、本研究グループでは、細粒分を適度に含む砂地盤に形成される骨格構造が力学特性に及ぼす影響に着目してきた(例えば 5)~8)。本報では、細粒分を含む砂質土に形成される骨格構造の違いをマイクロ스코プによる供試体表面の観察と、X 線 CT による内部観察により示す。次に、砂質土の骨格構造を定量的かつ力学的に評価するため実施した、三軸 $\overline{\text{CU}}$ 試験と骨格構造を記述出来る弾塑性構成式による数値シミュレーション結果を示す。加えて、その骨格構造の違いが液状化特性に及ぼす影響を評価するため実施した、繰返し載荷三軸試験による液状化強度試験結果を示す。最後に要素試験から得られたパラメータを用いて実施した実地盤スケールでの FEM 解析結果を示す。

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 で配合した細粒分を 15%程度含む混合砂である。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 $\overline{\text{CU}}$ 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 9)による要素シミュレーションの結果を赤線で示す。

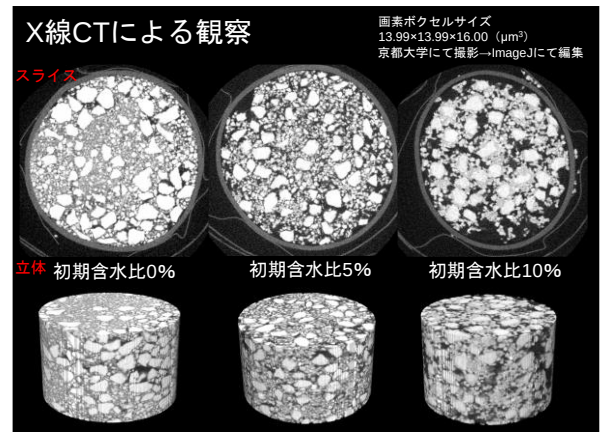


写真 1 マイクロフォーカス X 線 CT 画像

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。初期含水比 0%はせん断初期に大きな塑性圧縮挙動を示すが、初期含水比 5%と 10%は有効応力経路が鉛直に立ち上がる弾性が卓越した挙動を示す。このような三軸試験における力学挙動の大きな違いは、初期含水比が高いほど骨格構造の初期値は高位、その後のせん断で構造が劣化しにくいとパラメータを設定しモデル化することによって、説明可能となる。

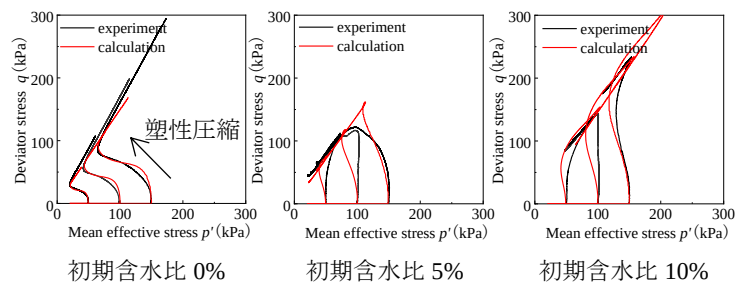


図 1 三軸 $\overline{\text{CU}}$ 試験の有効応力経路

3. 繰返し載荷試験結果

図 2 に繰返し載荷試験から得られた液状化強度曲線を示す。液状化強度曲線から、初期含水比 0%の液状化強度が明らかに低いことが分かる。このような液状化強度の違いは、図 1 で示した $\overline{\text{CU}}$ 試験における初期の挙動の違いが影響していると考えられる。図 3 に繰返し応力比 0.175 で載荷した 3 ケースの有効応力経路を示す。初期含水比 0%のケースは繰返し回数 3 回、初期含水比 5%のケースは繰返し回数 6 回、初期含水比 10%のケースは繰返し回数 17 回と液状化判定している。繰返し載荷の 1 サイクル目に着目すると、初期含水比 0%のケースは大きな塑性圧縮挙動を示し、平均有効応力が大きく減少している。これは $\overline{\text{CU}}$ 試験において、初期含水比 0%のケースのみ大きな塑性圧縮を示した事と整合する。

4. FEM 解析

要素シミュレーションで得られたパラメータを用いて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も行った。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。入力加速度は振幅 3m/s^2 、周波数 3Hz の正弦波とした。図5にSYSカムクレイモデルを搭載した解析コード GEOASIA¹⁰⁾による解析結果を示す。図5は、図4における中心付近の要素48番の出力結果を示している。初期含水比0%のケースは1サイクル目から大きな塑性圧縮を示し、平均有効応力が減少するスピードが速い。最終的には有効応力が0に近づき完全な液状化に至っている。一方、初期含水比5%と10%の挙動はCU試験や繰返し載荷試験等の要素試験と同様に、大きな塑性圧縮挙動を示さ

表1 シミュレーションパラメータ

パラメータ	初期含水比	0%	5%	10%
		圧縮係数 λ	0.044	
弾塑性		膨潤指数 κ	0.012	
		限界状態定数 M	1.350	
		NCLの切片 N	1.550	
		ボアソン比 ν	0.300	
発展則	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 $1/R_0$	4.67	37.3	56.0
	初期異方性 ζ_0	0.01		
	初期平均有効応力 p_0'	20.0		

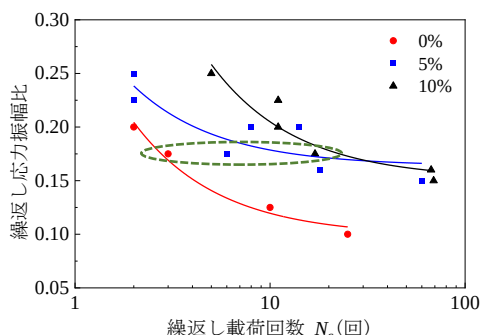


図2 液状化強度曲線 ($\Delta u/\sigma_0' = 95\%$ で判定)

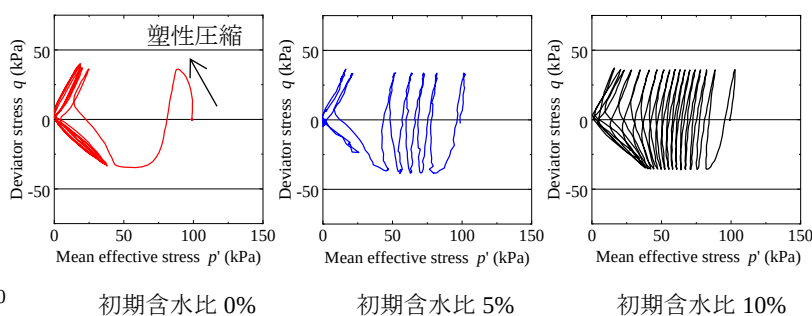


図3 繰返し載荷試験結果 (応力比 0.175 の有効応力経路)

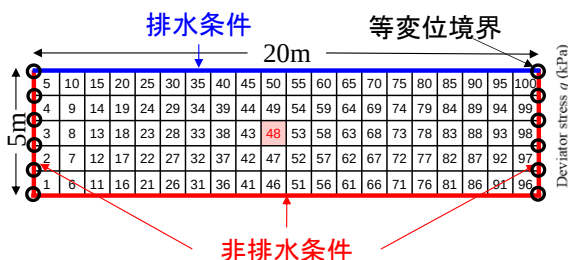


図4 有限要素メッシュ

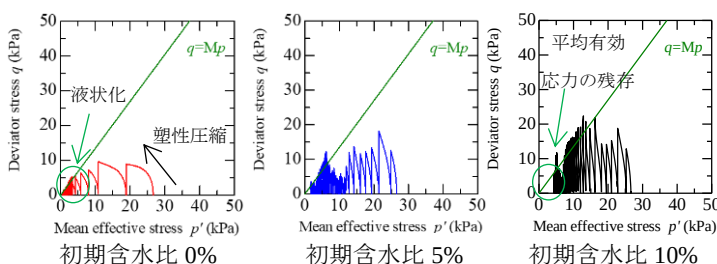


図5 解析結果 (要素48の有効応力経路)

ず有効応力の低下に抵抗していることが分かる。特に初期含水比10%のケースでは平均有効応力が残存している。

5. まとめ

三軸試験のシミュレーションにおいて、初期含水比が小さいほど初期の構造の程度が低位かつ劣化しやすいと評価された。このパラメータを用いて解析を行うと、深さ数メートル程度の地盤の解析において、液状化強度に骨格構造が影響を及ぼすことが示された。細粒分を適度に含む砂質土に形成される骨格構造には写真1に示したように細粒分の団粒化が深く関わっている。団粒化によって形成された骨格構造の違いは、特にせん断初期の剛性に影響を及ぼすことが明らかになった。せん断初期の剛性が上昇することによって、液状化のトリガーとなる過剰間隙水圧の上昇による有効応力の減少が抑制され、液状化強度が増加する。

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、振動台実験の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) Tatsuo et al.: Cyclic undrained triaxial and torsional shear strength of sands for different sample preparation methods, S&F, 26(3), 1986. 2) Ishihara: Liquefaction and flow failure during earthquakes. Géotechnique 43(3), 1993. 3) Yoshimi et al.: Undrained cyclic shear strength of a dense Niigata sand, S&F, 24(4), 1984. 4) Sze and Yang: Failure modes of sand in undrained cyclic loading: Impact of sample preparation, J. Geotech. Geoenviron. Engg. 40(1), 2014. 5) 小高ら：供試体作製法の違いが礫混じり砂の単調ならびに繰返しせん断挙動に及ぼす影響，第46回地盤工学研究発表会，2011. 6) 森ら：各種条件下における礫混じり砂の力学挙動の違いとそのシミュレーション，第23回中部地盤工学シンポジウム，2011. 7) 小高ら：河川堤防砂の構造の程度が力学特性の評価に及ぼす影響，河川技術論文集，18, 2012. 8) Kodaka et al.: Effects of sandy soil structure on various mechanical behaviors, Proc. 20ICSMGE, 2022. 9) 例えば，A.Asaka et al.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), 2002. 10) 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.