異なる骨格構造を有する砂質土の液状化特性の評価

砂質土　骨格構造　液状化

名城大学大学院　正 会 員　○山下隼史
セントラルコンサルタント（元名城大院）　正 会 員　藤田　薫
名城大学　国際会員　小高猛司
中部土質試験協同組合　国際会員　久保裕一
日本工営　国際会員　李　圭太

1. はじめに

地盤材料はそれぞれ固有の骨格構造を有するが，特に砂質材料の場合には，その骨格構造の違いが地盤の液状化特性の評価に影響を及ぼすと考えられる。砂質土はサンプリング時に乱れやすいため，その際に骨格構造が大きく劣化することが想定される。本報では，同一間隙比でありながら異なる骨格構造を形成するように作製した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 [1] によるシミュレーションによって骨格構造の違いを定量的に評価するとともに，繰返し三軸試験および模型地盤の振動台試験を実施し，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。さらに，土―水連成弾塑性解析 GEOASIA を用いた評価も行う。

2. 試験の概要

三軸試験，振動台試験ともに，三河珪砂 4 号と 6 号，および野間精配砂を質量比 3：1：3 で配合した細粒分 15%程度の混合砂（図 1 参照）を用いた。供試体作製時の含水比（以下：初期含水比）を 0，5，10%と変えることにより，異なる骨格構造を有する供試体が作製可能である。すなわち，含水状態によって細粒分の団粒化の度合いが異なり，それら団粒化した細粒分が粗粒分に付着することで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 および 10%は外部モールドで所定の間隙比（e=0.60，Dr=71.6%）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%では自立しないため，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 層に分けて締め固めた。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。$\overline{CU}$三軸試験は有効拘束圧 50，100，150kPa，載荷速度 0.1%/min，繰返し三軸試験は有効拘束圧 100kPa，周波数 0.1Hz で実施した。

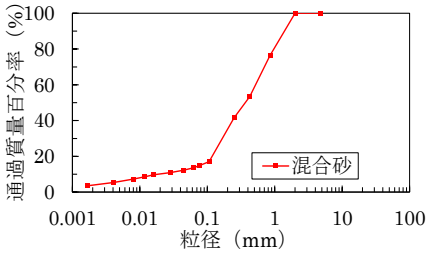


図 1　試験試料の粒径分布

図 2 に振動台模型の概要を示す。5 層に分けて各層 20mm で締固めを行い，間隙比 0.60 となるように図の寸法の模型地盤を作製した。地盤底部の有孔アクリル板を通して，地盤内の間隙空気を CO_2 に置換した後に，やはり地盤底部から水を浸透させて飽和化を行った。入力加速度は，振幅 3m/s²，振動数 3Hz の正弦波（開始 1/3 秒間はスイープ波）とした。加振中は，振動台の加速度と微小間隙水圧計によって深さ 40, 80mm の位置で地盤内の過剰間隙水圧を測定した。

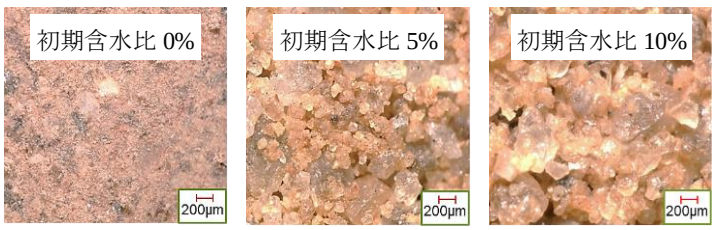


写真 1　供試体のマイクロスコープ画像

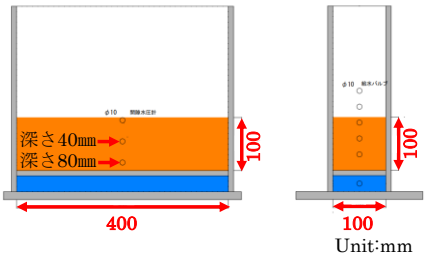
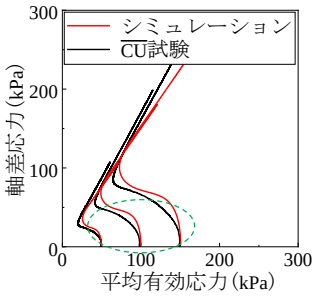


図 2　振動台模型の概要

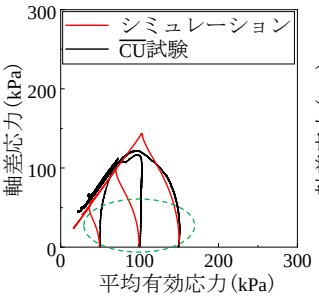
3. 試験結果

図 3 に$\overline{CU}$三軸試験による有効応力経路を黒線で示す。液状化抵抗と関連が深いと思われる緑の破線で囲ったせん断初期に着目すると，初期含水比 0%は有効応力が減少する塑性圧縮挙動を示す。一方，初期含水比 5%と 10%は，せん断初期においては，有効応力経路が鉛直に立ち上がる弾性挙動が卓越し軸差応力 100kPa までの経路はほぼ一致する。図 3 には表 1 に示すパラメータを用いた SYS カムクレイモデル [1]によるシミュレーション結果を赤線で示している。初期含水比 0%の有効応力経路に合致するようにすべての弾塑性パラメータを決定した後に，骨格構造に関するパラメータである構造の程度の初期値 $1/R_0^*$ならびに構造劣化指数 a のみを変化させることで，初期含水比 5%と 10%の有効応力経路の再現を試みている。図 4 にせん断中の構造の程度 $1/R^*$の変化を示す。初期含水比が高いほど構造の程度の初期値 $1/R_0^*$が大きく，せん断に伴う劣化が遅いというように骨格構造の違いを定量的にモデル化することで，三軸試験で観察される有効応力経路をはじめとする力学挙動の大きな変化は一定程度説明可能であることが示された。図 5 に繰返し三軸試験の結果を示す。初期含水比 5%と 10%は，初期含水比 0%と比較して液状化強度が明確に高い。この理由としては，図 3 の

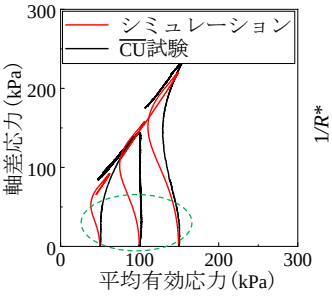
Evaluation of liquefaction characteristics of sandy soils with different soil structures:
J.Yamashita, K.Fujita, T.Kodaka (Meijo Univ)Y.Kubo (Geolabo-Chubu), K.Lee (Nippon Koei)



初期含水比 0%



初期含水比 5%



初期含水比 10%

図 3　$\overline{\mathrm{CU}}$三軸試験の有効応力経路

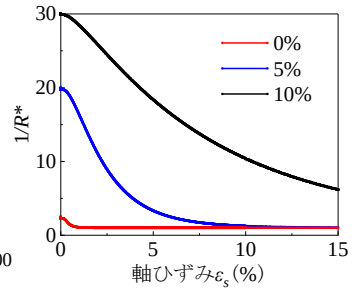


図 4　せん断に伴う構造の劣化の程度の推移

$\overline{\mathrm{CU}}$試験で見られた，せん断初期の卓越した弾性挙動が大きく影響していると考えてよい。繰返し応力振幅比が低い範囲では，初期含水比 5%と 10%の液状化強度に有意な差が認められない。これは$\overline{\mathrm{CU}}$試験の有効応力経路でも軸差応力が小さい範囲ではほぼ同じであることと合致しており，繰返し応力振幅比が高くなると差が生じる傾向が見られるのも，$\overline{\mathrm{CU}}$試験において軸差応力の増大につれて差が生じることと合致する。

図 6 に振動台模型試験における，加振開始後 15s の地盤の写真を示す。模型地盤に同じ長さの 2 本のガラス棒を深さ 40mm(左)と 80mm(右)まで挿入して地盤内の液状化の様子を観察している。初期含水比 0%の地盤では，地表面の様子とガラス棒の転倒から明確な液状化が観察できたが，初期含水比 10%の地盤では，深くまで挿入した右のガラス棒に変化がないなど明確な液状化が確認できなかった。図 7 は振動台試験における深さ 80mm での過剰間隙水圧比の経時変化である。初期含水比 0%の地盤の過剰間隙水圧比が，初期含水比 5%，10%の地盤と比べて突出して高い。なお，初期含水比 0%でも過剰間隙水圧比が 1 に到達しないのは計測誤差と考えている。これらの振動台試験の結果は，図 6 の繰返し三軸試験結果において，初期含水比 0%のみ液状化強度が低いことと合致している。

図 8 は SYS カムクレイモデルを搭載した弾塑性変形解析 GEOASIA によって，表 1 のパラメータを用いて実施した振動台試験の予備解析結果である。入力波形を最初から最大振幅の規則波とするなど，詳細なすりあわせができていないが，骨格構造が一番脆弱な初期含水比 0%の地盤のみ液状化に到達するなど，試験で得られた現象を大局的に説明している。今後，境界条件や入力波形など詳細な検討を進めるとともに，模型試験においても地盤の飽和化，間隙水圧の計測精度の向上などの課題解決に取り組む予定である。

4.　まとめ

本報では，砂質土の骨格構造の違いが液状化特性に及ぼす影響を要素試験と模型実験，ならびにそのシミュレーションを用いて示した。今回使用した試験試料は比較的細粒分を多く含む砂質土であるが，より均一粒径に近い細粒分の少ない砂質土についても今後検討を進める。砂質地盤の液状化抵抗の評価に影響を及ぼす，サンプリング時の乱れや年代効果と言った抽象的な概念を，弾塑性力学によって記述することが可能な骨格構造を用いて，定量的に評価する手法の構築を進めたい。

表 1　パラメータ詳細

		初期含水比(%)	0	5	10
パラメータ	弾塑性	圧縮指数λ		0.044	
		膨潤指数κ		0.012	
		限界状態定数M		1.350	
		NCLの切片N (q=p'=98.1kPaのときの比体積)		1.550	
		ポアソン比υ		0.300	
	発展則	構造劣化指数a(b=c=1.0)	8.00	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$\zeta=\sqrt{2/3\beta_0\cdot\beta_0}$		0.01	
		初期平均有効応力p_0'		20.0	

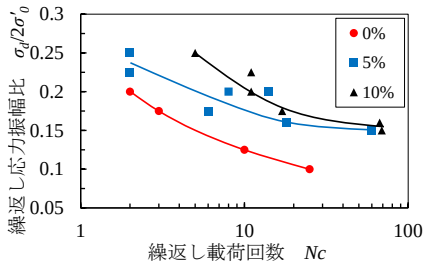
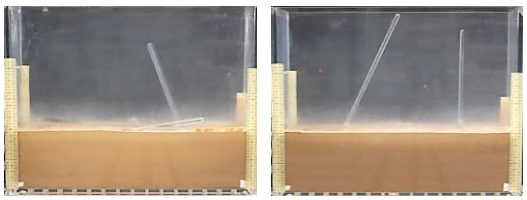


図 5　液状化強度曲線（$\Delta u/\sigma_0' = 95\%$）



(a) 初期含水比 0%　　(b) 初期含水比 10%

図 6　振動台試験結果（加振 15s 後の様子）

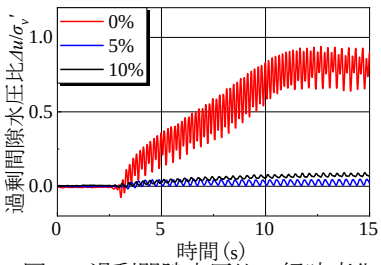


図 7　過剰間隙水圧比の経時変化（振動台試験）

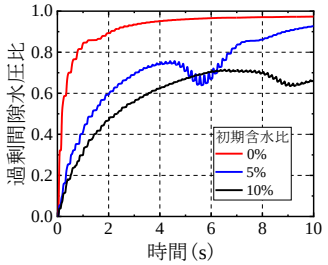


図 8 過剰間隙水圧比の経時変化(GEOASIA)

SYS カムクレイモデルよる要素挙動の解析にあたっては名古屋大学准教授中井健太郎先生，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お世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献　1) A. Asaoka et al：An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, 42(5), 2002.