

砂質土に形成される骨格構造の評価と液状化予測への適用
Evaluation of soil structure formed in sandy soil
and its application to liquefaction prediction

山下隼史¹, 小高猛司², 久保裕一³, 李 圭太⁴, 夏目将嗣²

- 1 名城大学大学院・理工学研究科社会基盤デザイン工学専攻
- 2 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp
- 3 中部土質試験協同組合・技術部
- 4 日本工営株式会社・コンサルティング事業統括本部

概 要

近年、南海トラフ地震をはじめとする巨大地震に備えて、河川堤防や海岸堤防といったインフラの液状化対策が急務となっている。液状化の検討を行う必要のある砂地盤は、それぞれ特有の骨格構造を有しており、地盤の液状化対策を適切に行うためには、この骨格構造を考慮して液状化に対する強度を評価する必要がある。本研究では、今まで曖昧な概念とされてきた砂質土の骨格構造を定量的に評価した上で、その骨格構造が液状化強度に及ぼす影響の評価を試みた。具体的には、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、 \overline{CU} 試験と弾塑性構成モデル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に評価したとともに、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明らかにした。さらに、土-水連成弾塑性有限要素解析を用いて振動台試験の妥当性も示した。

キーワード：液状化，砂質土，骨格構造，三軸試験，振動台試験，弾塑性構成式

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¹⁾²⁾。そのため、砂地盤の液状化強度を正確に把握するためには高品質なサンプリングを行い、室内試験により詳細に評価することが望ましい。しかし、高品質なサンプリングを何本も行うのはコストによる制約の観点から現実的ではない。

図1に同一地点におけるサンプリング方法の違いによる液状化強度の違いを示す¹⁾。凍結サンプリングとチューブサンプリングによる液状化強度の違いは、サンプリング時の乱れの度合いが影響したと考えられる。そこで筆者らは、このようなサンプリング時に発生する「乱れ」の原因が「骨

格構造の劣化」であるとする、曖昧な概念として語られてきた砂質土の「乱れ」が定量的に評価できる可能性があると考えている。すなわち、低品質な試料の乱れの度合いを定量的に評価出来れば原地盤の液状化強度を推定できる可能性がある。以上を最終ゴールと見据えつつ、本研究においては、まずは以下の3点を目的とする。

- 1) 砂質土に形成される骨格構造の可視化
- 2) 砂質土の骨格構造の力学的かつ定量的な評価
- 3) 骨格構造の違いが液状化特性に及ぼす影響の評価

サンプリング時に発生する乱れを骨格構造の劣化として模擬するため、後述する骨格構造を人為的に変化させる手法を用いて、同一間隙比でありながら異なる骨格構造を有する供試体を作製する。砂質土に形成された骨格構造の違いは、顕微鏡による供試体表面の観察と、X線CTによる内部観察によって確認する。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、 \overline{CU} 三軸圧縮試験と骨格構造を記述出来るSYSカムクレイモデル³⁾によるシミュレーションを行う。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、繰返し載荷三軸試験による液状化強度試験および模型地盤の振動台試験を実施する。さらに、 \overline{CU} 試験のシミュレーションによって得られたSYSカムクレイモデルのパラメータの妥当性を検証するため土-水連成弾塑性解析GEOASIA⁴⁾を用いた振動台試験のシミュレーションを行う。

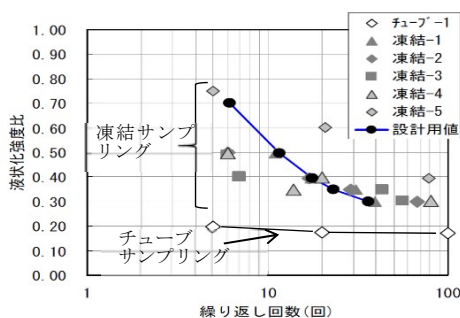
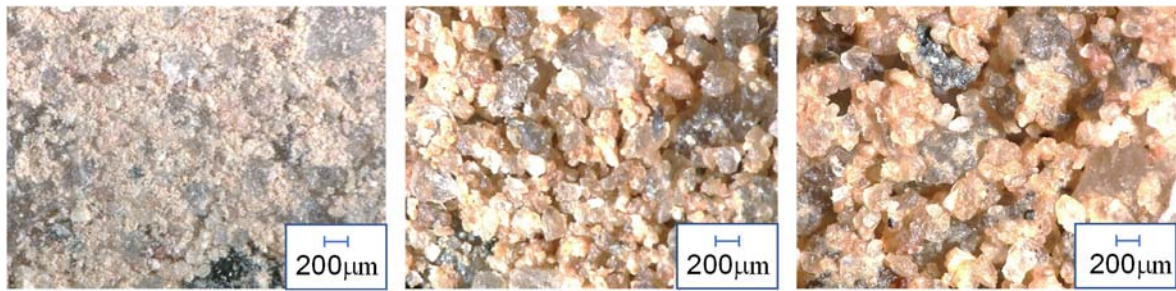


図1 サンプリング法の違いによる液状化強度の違い¹⁾

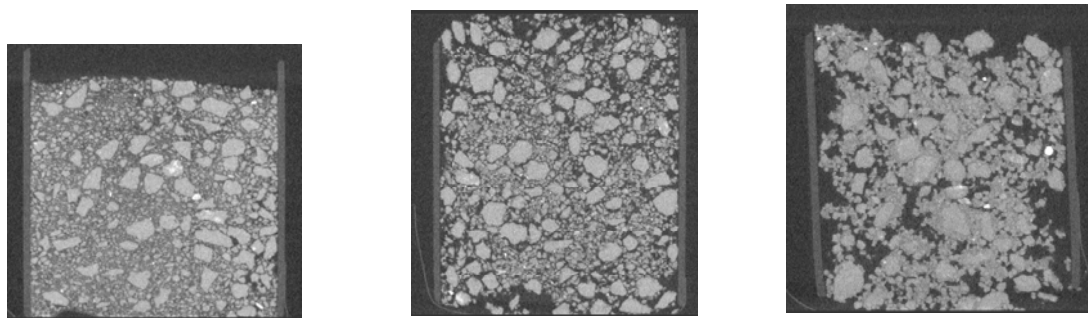


(a) 初期含水比0%

(b) 初期含水比5%

(c) 初期含水比10%

写真1 マイクロスコープによる供試体表面の観察



(a) 初期含水比0%

(b) 初期含水比5%

(c) 初期含水比10%

写真2 マイクロ X 線 CT による供試体の観察

2. 骨格構造の観察

図2は試験に用いた試料の粒径加積曲線である。試験試料は、三軸試験、模型試験ともに三河珪砂4号と6号、および野間精配砂を重量比3:1:3で配合した混合砂であり、細粒分を15%程度含む砂質土試料である。本研究では、同一間隙比でありながら人為的に異なる骨格構造を砂質土に形成する手法を用いて供試体を作製する。具体的には、供試体を締め固める際の含水比（以下：初期含水比）を変化させることによって、サクシオンに応じて細粒分の団粒化の度合いを変化させ、それら団粒化した細粒分が粗粒分の周囲に付着することで異なる骨格構造が形成される。本研究では供試体作製時の初期含水比を0%、5%、10%と変化させた。初期含水比5%、10%は、乾燥試料を所定の含水比になるように蒸留水を加水し、均一になるまで十分に攪拌した。その後、湿潤試料をモールド内で所定の間隙比($e=0.60$, $D_r=71.6\%$)となるように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%は三軸試験装置内にゴムスリーブを被せたモールドを設置し、乾燥試料を5層に分けて空中落下させることにより、供試体を作製した。

写真1は、マイクロスコープにより撮影された供試体表面の画像である。初期含水比5%と10%は、モールド脱型後の供試体の表面であり、初期含水比0%はアクリル円筒に実際の三軸試験と同様の空中落下法で作製したものをアクリル越しに撮影した画像である。これらの供試体はすべて同一間隙比で作製した供試体であるから、マクロな視点で見れば、「土粒子」と「間隙」の割合は三種類とも等しい。しかし、マイクロスコープの観察においては、細粒分の団粒化により初期含水比が高くなるにつれて、供試体の

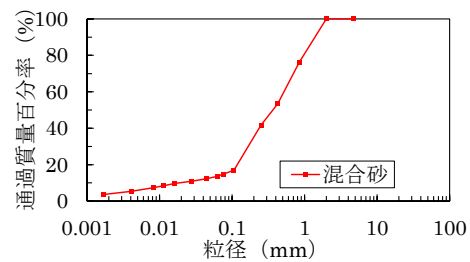


図2 混合砂の粒径加積曲線

「間隙」がより大きくなるように観察される。このようなミクロな土粒子配列の違いこそが砂質土における骨格構造の違いであると考えられる。

写真1で見られた骨格構造が供試体内部にまで形成されているかを確認するため京都大学が所有するマイクロフォーカス X 線 CT 装置による観察も行った（写真2）。初期含水比5%と10%においては、モールドから脱型後の供試体の中心部を内径11mmのプラスチック製ストローで押し抜いて観察用供試体を作製した。初期含水比0%では、ストローに直接所定の密度となるように空中落下して供試体を作製した。観察の結果、マイクロスコープによる表面観察以上に、初期含水比が高いほど、団粒化した細粒分が粗粒分の周囲に凝集する様子が明確に観察でき、画像内で黒く映る「間隙」がより大きくなる。マクロの間隙比は同一であることから、間隙以外の部分ではより強固な骨格構造が形成されていると考えている。

3. 試験の概要

3.1 三軸試験の概要

初期含水比を変えた3種類の供試体を2章で述べた方

法で作製し、二重負圧法を用いて完全飽和を行って試験を実施した。なお、飽和後も写真1に見られた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, せん断時の荷重速度は 0.1%/min である。繰返し荷重三軸試験（液状化強度試験）は、有効拘束圧 100kPa, 周波数 0.1Hz で実施した。

なお、 \overline{CU} 試験に対しては表 1 のパラメータを用いて SYS カムクレイモデル³⁾によるシミュレーションを行った。

3.2 振動台試験の概要

図 3 に振動台模型の概要を示す。模型地盤は 1 層あたり 20mm とし、5 層に分けて締固めを行い、間隙比 $e=0.60$ となるように図の寸法の地盤を作製した。振動台試験においても三軸試験と同様に、初期含水比 0%, 5%, 10% と変化させた 3 ケース実施した。模型地盤底部の有孔アクリル板を通して、模型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脱気水を浸透させて飽和化を行った。入力加速度は、振幅 $3m/s^2$, 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、加速度計による振動台の加速度と微小間隙水圧計による深さ 40, 80mm の位置で地盤内の過剰間隙水圧を測定した。

表 1 シミュレーションに用いたパラメータ

		初期含水比	0%	5%	10%
パラメータ 弾塑性	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 発展測	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	

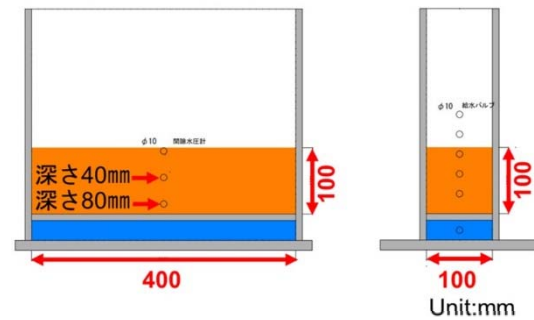


図3 振動台模型寸法

4. 三軸試験結果

4.1 \overline{CU} 試験結果

図 4 に \overline{CU} 三軸試験による有効応力経路を黒線で示す。 \overline{CU} 試験の有効応力経路から、初期含水比が異なることで、全く異なる力学挙動を示すことがわかる。さらに、液状化抵抗と関連が深いと思われる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%, 10% は、せん断初期において、有効応力経路が鉛直に立ち上がる弾性挙動が卓越している。さらに、初期含水比 5% と 10% の有効応力経路は軸差応力 100kPa 付近までの経路はほぼ一致するが、軸差応力が 100kPa を超えた付近から経路が大きく異なるようになる。図 4 には表 1 に示したパラメータを用いた SYS カムクレイモデル³⁾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 5 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、図 4 に観察されるような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。

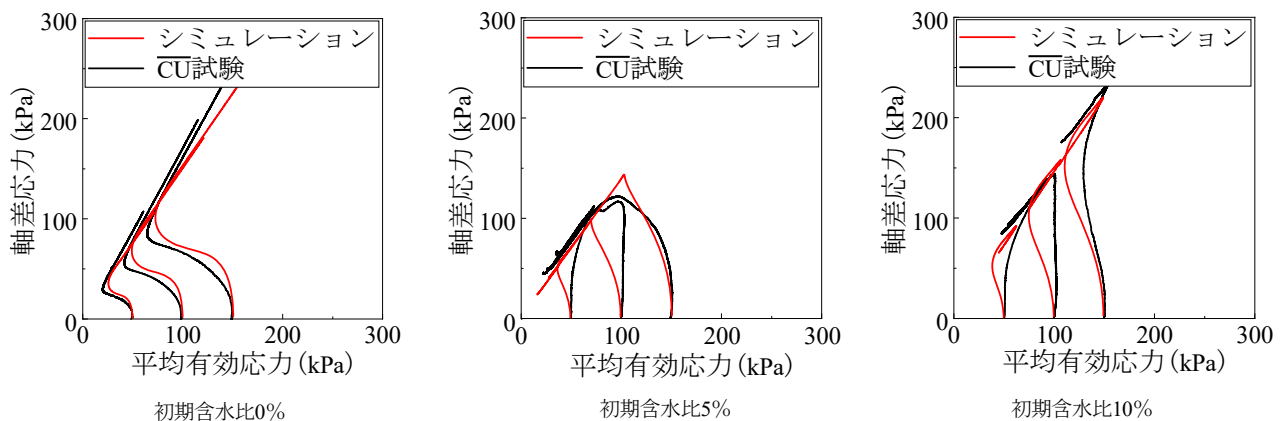


図4 \overline{CU} 試験結果及びシミュレーションの有効応力経路

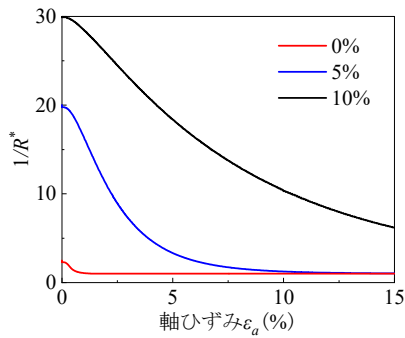


図5 せん断に伴う構造の劣化の程度の推移

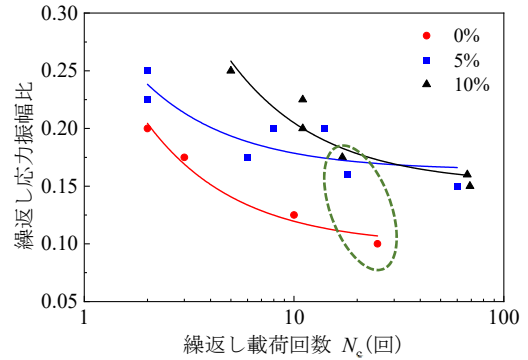


図6 液状化強度曲線 ($\Delta u/\sigma'_0=95\%$ で判定)

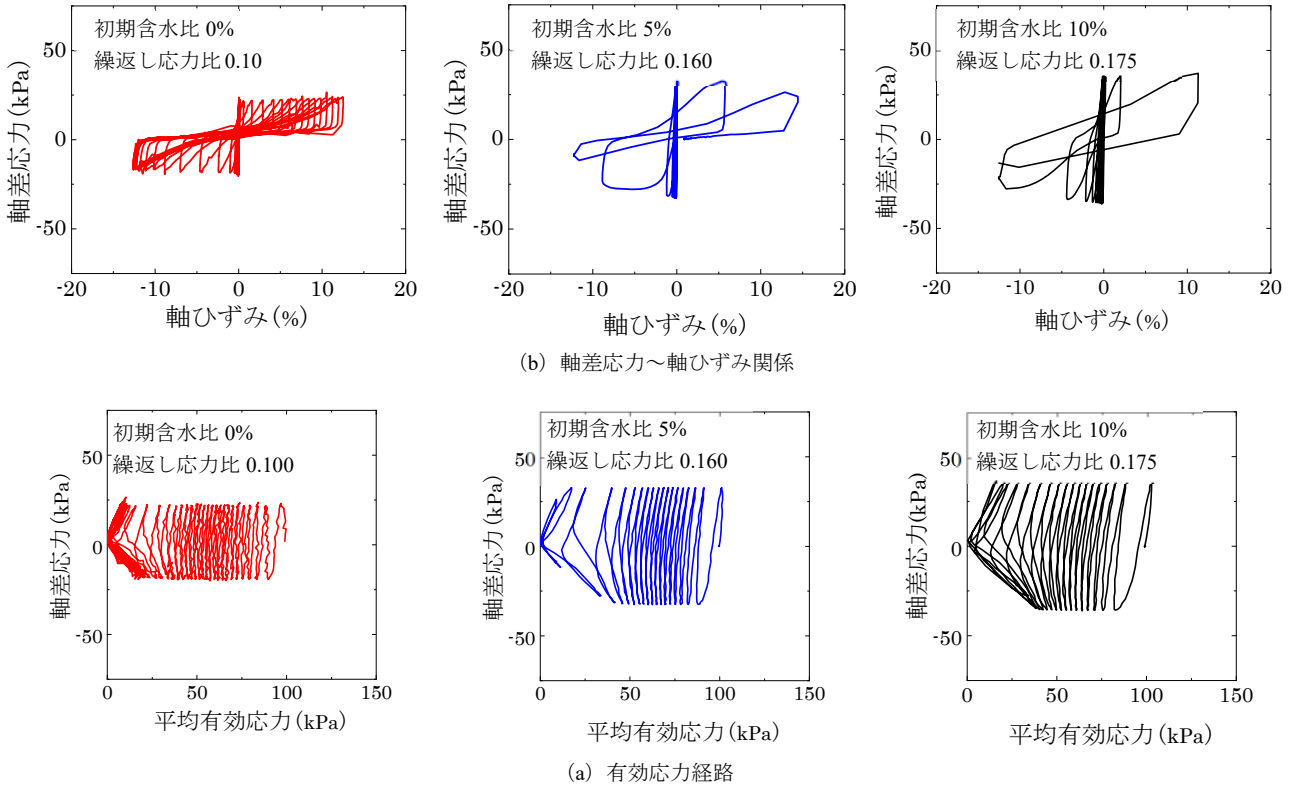


図7 繰返し载荷試験結果 (液状化判定回数が20回に近いもの)

4.2 液状化試験結果

図6に繰返し载荷三軸試験より得られた液状化強度曲線を示す。液状化強度曲線は有効応力が95%消失した際の繰返し载荷回数でプロットした。曲線は、東ら⁹⁾が提案した以下の式(1)を用いてフィッティングを行った。

$$R_L = \frac{a}{N_c} + b \quad (1)$$

ここで、 R_L は繰返し応力振幅比、 N_c は液状化判定時の繰返し载荷回数、係数 a 、 b はフィッティングパラメータである。図6からは初期含水比0%で $R_{L20}=0.105$ 、初期含水比5%は $R_{L20}=0.170$ 、初期含水比10%は $R_{L20}=0.183$ の液状化強度が得られた。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 \overline{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。しかし、繰返し応力比が小さい範囲では、初期含水比5%と10%の液

状化強度に大きな差が見られなくなる。これは、 \overline{CU} 試験の有効応力経路でも軸差応力が小さい範囲では初期含水比5%と10%がほぼ同じ経路であることと合致している。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{CU} 試験において軸差応力の増大につれて有効応力経路に差が生じることと合致する。

図7は図6の液状化強度曲線において、液状化判定時の繰返し载荷回数が20回に近い3ケースの軸差応力～軸ひずみ関係(上段)と有効応力経路(下段)である。初期含水比0%のケースは繰返し応力比0.100で繰返し载荷回数25回、初期含水比5%のケースは繰返し応力比0.160で繰返し载荷回数18回、初期含水比10%のケースは繰返し応力比0.175で繰返し回数17回と液状化判定している。初期含水比10%と5%では、過剰間隙水圧が上昇して平均有効応力が95%程度消失する直前に急激な軸ひずみの増加が見られ、液状化した。一方、初期含水比0%では、平均

有効応力が原点に近づいてからも、剛性の劣化と回復を繰り返すサイクリックモビリティ現象が確認され、軸ひずみも徐々に増加する傾向が見られた。サイクリックモビリティ現象が初期含水比 5%と 10%にあまり見られない理由は、 \overline{CU} 試験結果を示した図 4 において、初期含水比 5%と 10%が明確なピーク値を迎えた後に、急激なひずみ軟化傾向を示す脆性的な破壊挙動を示した事に関連があると考えられる。すなわち、初期含水比 5%と 10%のケースはサイクリックモビリティが発生する間もなく脆性破壊し、一気に軸ひずみが増加したと考えている。

図 8 は、図 7 の 3 ケースにおける両ひずみ振幅～繰返し
 繰返し荷回数比関係である。繰返し荷回数比 N/N_c は有効応力が 95%減少した回数 N_c を 1 としたときの割合である。このグラフからも初期含水比 5%と 10%は急激な軸ひずみの増加によって液状化しているのに対し、初期含水比 0%は段階的に軸ひずみが増加していることが読み取れる。

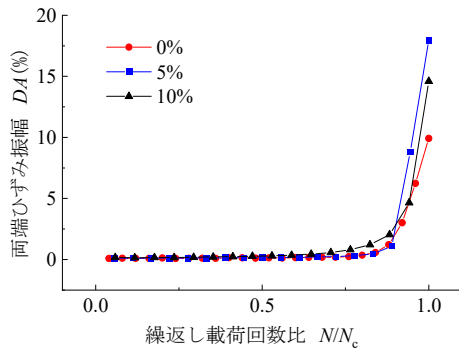
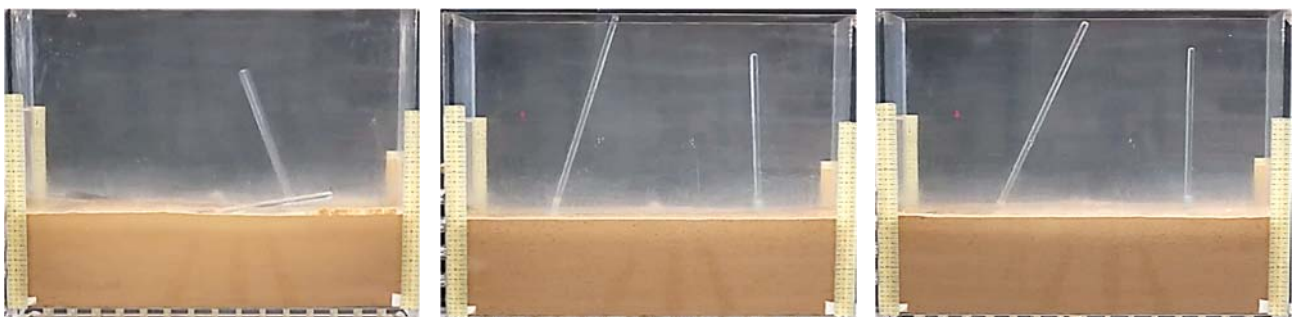


図8 両振幅軸ひずみ～繰返し荷回数比関係

5. 振動台試験結果

振動台試験における加振後 15s と加振終了時の画像を写真 3 に示す。上段が加振後 15s の写真であり、下段が加振終了時である。地盤には液状化の程度が観察しやすいように、左側には 40mm、右側には 80mm の深さまでガラス棒を差し込んである。この 40mm と 80mm の位置は間隙水圧計の計測位置の深さであるが、ガラス棒の振動が直接間隙水圧計に影響しないように位置は離してある。初期含水比 0%のケースは、加振後 15s の段階で地盤に 40mm の深さまで差し込んだガラス棒が完全に倒れ、右側の深さ 80mm のガラス棒も傾いている。加振終了時においてはガラス棒が 2 本とも地盤の中に埋まっている。初期含水比 5%と 10%においては、加振後 15s で地盤に 40mm の深さまで差し込んだガラス棒が同じように紙面右側に傾いているが、初期含水比 10%の方がやや大きく傾いている。加振終了時には、初期含水比 10%のケースにおいて深さ 40mm まで挿入したガラス棒が完全に地盤に埋まっており、少なくとも初期含水比 10%の地盤表面は液状化していたと推定される。

図 9 に振動台試験における過剰間隙水圧比の経時変化を示す。深さ 80mm における初期含水比 0%の過剰間隙水圧比は、初期含水比 5%と 10%の試験結果と比べて突出して高く出ている。さらに、初期含水比 0%のグラフは大きく振動しているがこれはサイクリックモビリティに起因するものと考えている。なお、グラフは載せていないが、深さ 40mm における過剰間隙水圧比も同様の結果を示

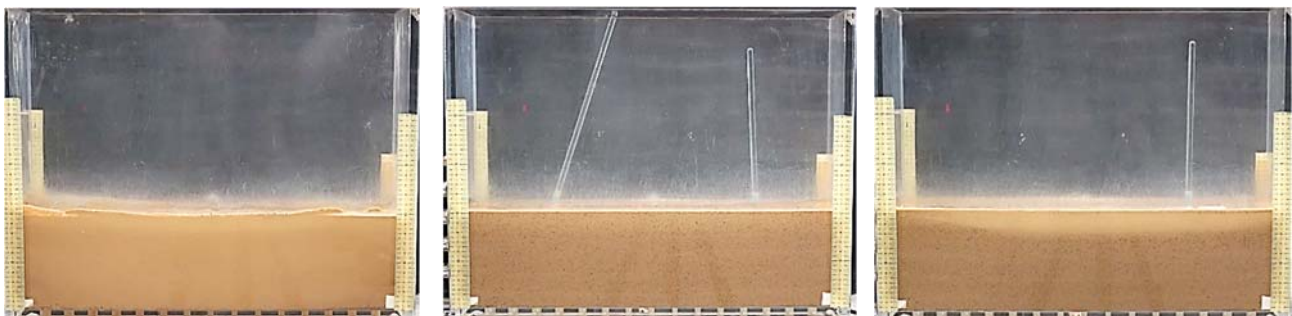


初期含水比 0%

初期含水比 5%

初期含水比 10%

(a) 加振後15sの様子



初期含水比 0%

初期含水比 5%

初期含水比 10%

(b) 加振終了時の様子

写真3 振動台試験結果

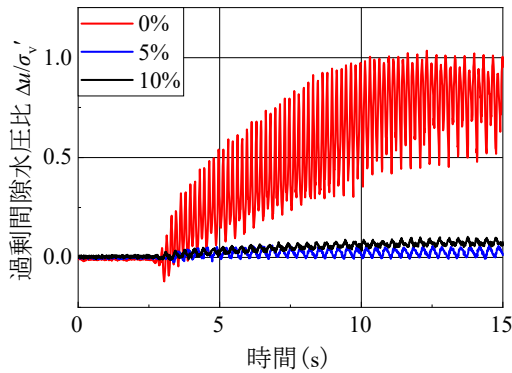


図9 振動台試験における過剰間隙水圧の経時変化
(深さ80mm)

した。この振動台試験の結果は、図6の液状化強度曲線において、初期含水比0%は明らかに液状化強度が低いことと合致する。今回は加振力が小さく、初期含水比5%と10%は明確な液状化には至らなかった。

図10はSYSカムクレイモデルを搭載した弾塑性変形解析GEOASIA⁴⁾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%の地盤のみ完全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必要がある。

6. まとめ

本研究は人工的に砂質土に形成させた骨格構造を弾塑性構成モデルによって定量的に評価するため、 \overline{CU} 三軸試験とその結果に対してSYSカムクレイモデルによるシミュレーションを行った。また、その骨格構造が液状化特性に及ぼす影響を評価するため、三軸試験機による液状化試験と振動台試験を行った。さらに、土-水連成弾塑性解析GEOASIAを用いて振動台試験のシミュレーションも実施した。以上の各試験とシミュレーションの結果より次のような知見が得られた。

- 1) 砂質土の骨格構造には細粒分の団粒化が大きく関わっており、本研究のケースでは団粒化が進むほど卓越した骨格構造を形成する傾向がある。
- 2) \overline{CU} 三軸試験の結果から、骨格構造が異なることによってせん断時の力学挙動が大きく変化することを確認した。さらに \overline{CU} 三軸試験のシミュレーションを行うことによって、SYSカムクレイモデルの構造に関するパラメータを用いることで、骨格構造の違いを定量的に説明可能であることを示した。
- 3) 液状化試験の結果から、骨格構造は動的な力学挙動にも影響を及ぼすことが確認された。さらに同一間隙比の供試体であっても、初期の構造の程度が高位

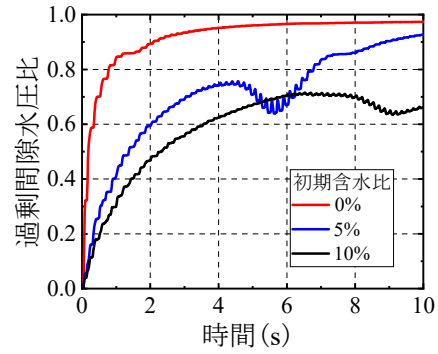


図10 過剰間隙水圧比の経時変化(GEOASIA)

であると液状化強度が増加する傾向があることを系統的な実験とシミュレーションにより示した。ただし、応力比が小さい範囲では初期含水比5%と10%の強度に大差がない結果となった。

一連の試験とシミュレーションの結果から、高位な骨格構造を形成しているほど液状化強度が高くなる傾向が見られた。これは、図1で見られるような原地盤からのサンプリング時に、構造が劣化することによって液状化強度が低下することに結びつけられることを示唆する。さらにその構造の劣化、すなわち乱れの評価は、SYSカムクレイモデルのパラメータを用いることで説明することが可能である。湿潤突固めによって形成される骨格構造と自然堆積で形成される骨格構造とは異なる点が多くあるが、骨格構造の液状化抵抗への寄与度を評価する第一歩となった。

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) 水口幸司, 阿部武, 吉川慎一, 西尾岳裕: 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 $\sim N$ 値 \sim 相対密度関係, 土と基礎, Vol. 42, No.4 pp. 63-67, 1994.
- 3) 例えば, Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol. 42, No.5, pp. 47-57, 2002.
- 4) 例えば, Noda, T., Asaoka, A., and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, Vol. 48, No.6, pp. 771-790, 2008.
- 5) 東拓生, 大塚久哲, 二宮嘉朗: 砂質土の相対密度を考慮した液状化強度曲線の定式化, 土木学会第49回年次学術講演概要集, pp. 528-529, 1994.