

## 構造的砂質土と疑似粘性土の単調ならびに繰返し載荷時の力学挙動

Mechanical behavior of structural sandy soil and quasi-clayey soil under monotonic and cyclic loading.

藤田薫<sup>1</sup>, 小高猛司<sup>2</sup>, 久保裕一<sup>3</sup>, 李 圭太<sup>4</sup>, 神野俊也<sup>5</sup>

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・大阪支店

5 元名城大学学生

### 概 要

土の骨格構造はせん断抵抗などの力学挙動に影響を及ぼすため、その把握は重要である。著者らは、細粒分を含有する砂質土において、供試体作製時の初期含水比を変えることによって、異なる骨格構造を形成させることができ、同じ間隙比であっても、せん断強さが大きく異なる供試体を作製できることを明らかにしてきた。本論文では、同じ手法で骨格構造が異なる砂質土（ここでは構造的砂質土と呼ぶ）の供試体を作製し、力学挙動に及ぼすせん断モードの影響を検討するため、三軸圧縮試験と単純せん断試験を実施し、それらを比較した結果を示す。

また近年、細粒分含有率が高く工学的分類上は粘性土とされる堤防土において、降雨や洪水による大規模な法すべり等の事例が報告されているが、本論文では、細粒分含有率 50%の疑似粘性土供試体を作製し、構造的砂質土供試体と同様に、供試体作製時の初期含水比を変えることによって骨格構造を変えることを試み、細粒分が卓越した地盤材料の力学挙動における骨格構造とせん断モードの影響についても検討した結果を示す。

キーワード：構造，砂質土，疑似粘性土，三軸試験，単純せん断試験

### 1. はじめに

骨格構造の概念を持たない一般的な土質力学では、土のせん断強さは間隙比によって決まると考えるのが通常である。しかし、土が含有する様々な土粒子同士で構成する骨格構造は、せん断抵抗などの力学挙動に影響を及ぼすために、その把握は非常に重要であると考えられる。著者らは、細粒分を含有する砂質土において、供試体作製時の初期含水比を変えることによって、異なる骨格構造を形成することを明らかにした<sup>1)2)</sup>。本論文では、同じ手法で骨格構造が異なる砂質土（ここでは構造的砂質土と呼ぶ）の供試体を作製し、力学挙動に及ぼす骨格構造とせん断モードの影響を検討するため、三軸圧縮試験と単純せん断試験を実施し、それらを比較した結果を示す。

また近年、細粒分含有率が高く、工学的分類上は粘性土とされ、一見せん断強度が大きい堤防土において、降雨や洪水による大規模な法すべり等の被災事例が報告されている<sup>2)</sup>。本論文では、細粒分含有率 50%（一部 80%）の疑似粘性土供試体を作製し、構造的砂質土供試体と同様に、

供試体作製時の初期含水比を変えることによって骨格構造を変化させることを試み、細粒分が卓越した地盤材料の力学挙動における骨格構造とせん断モードの影響についても検討する。

さらに、構造的砂質土と疑似粘性土（50%と 80%）の両試験試料における繰返し載荷による三軸試験も実施した。両試験試料の液状化判定を実施するとともに単調載荷試験から得られた結果を踏まえて検討する。

### 2. 試験条件

図 1 の粒形加積曲線における下図の混合試料が、本論文での構造的砂質土である。上図の粒径加積曲線にて示す三河珪砂 4 号と 6 号、シルト分を含む野間精配砂を重量比 3:1:3 で混合したものである。今回用いた構造的砂質土は、実堤防砂である千歳川北島堤防砂に類似するよう混合したものである。一方、図 2 の粒形加積曲線に示す混合試料が疑似粘性土である。三河珪砂 6 号とシルト分が卓越した DL クレイを重量比 1:1 で混合し、細粒分含有率 50%の供試体を作製した。さらに、同様の試料を重量比 1:4 で混合し、細粒分含有率 80%の供試体も作製した。

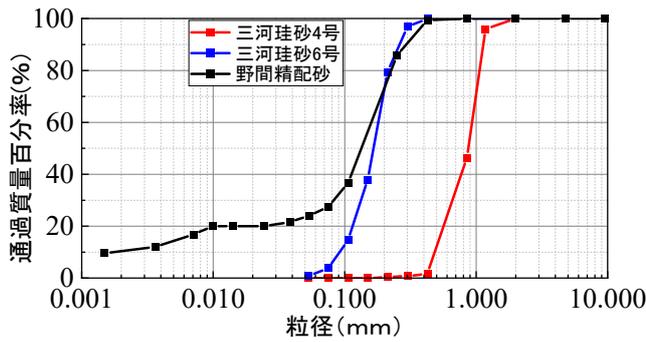


図1 構造的砂質土 粒径加積曲線

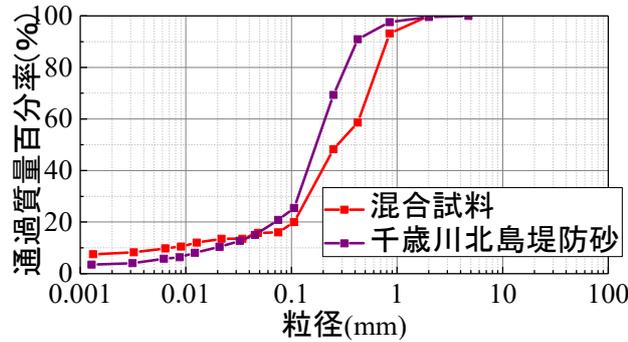


図2 疑似粘性土 粒径加積曲線

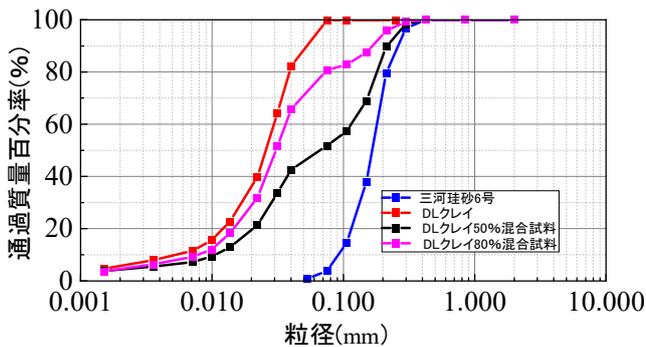


表1 単調載荷試験の諸元

試験試料	試験方法	初期含水比	相対密度	
構造的砂質土	三軸圧縮試験	0%	68%	
		5%	62%	
		10%	62%	
	単純せん断試験	0%	64%	
		5%	64%	
		10%	64%	
疑似粘性土	三軸圧縮試験	0%	71%	
		5%	70%	
		10%	73%	
	三軸細粒分80%	10%	87%	
		単純せん断試験	0%	69%
			5%	63%
10%	63%			

表2 繰返し載荷試験の諸元

試験試料	応力比	含水比	相対密度
構造的砂質土	0.13	10%	74%
	0.15		66%
	0.22		66%
疑似粘性土(50%)	0.125	10%	66%
	0.15		66%
	0.175		68%
疑似粘性土(80%)	0.175	10%	87%
	0.225		89%
	0.3		89%

いずれの混合試料においても、骨格構造を変化させるために供試体作製時の初期含水比を0%、5%、10%の3種類とした(細粒分含有率80%の疑似粘性土供試体は、初期含水比10%のみ)。表1に示すように、三軸圧縮試験と単純せん断試験とで計13パターンでの単調載荷試験を実施した。また、表2にて構造的砂質土の初期含水比10%の供試体と疑似粘性土の初期含水比10%における細粒分含有率50%、80%の供試体の繰返し載荷試験の諸元を示す。

三軸圧縮試験に用いた供試体は直径50mm、高さ100mmの円柱供試体であり、外部の鋼製モールドにて5層に分けて突き固めた。初期含水比0%は自立できないので、三軸セル内に二つ割りモールドを設置し、5層に分けて突き固めた。単純せん断試験に用いた供試体は、直径60mm、高さ30mmの円柱供試体であり、三軸圧縮試験で用いた供試体と同様の手法で3層に分けて突き固めて作製した。表1には、それぞれの供試体の相対密度も記載している。ややばらつきがあるが、ほぼ同じ相対密度の供試体となっていることがわかる。

供試体作製後には、三軸圧縮試験機、単純せん断試験機内にて二重負圧法によって供試体の完全飽和を行い、初期有効拘束圧100kPaで等方圧密後、非排水せん断試験を実施した。初期含水比とは、あくまで供試体作製時の含水比のことであり、せん断試験は完全飽和で実施していることに注意されたい。

### 3. 試験結果

#### 3.1 各試験試料の観察

写真1と2に構造的砂質土供試体と疑似粘性土供試体の表面を顕微鏡にて、倍率200倍で撮影した画像を示す。両試験試料の初期含水比0%の供試体では、共通して土粒子が隙間なく詰まって見えるが、骨格構造を形成している様子は見られない。一方、両試験試料においても、初期含水比0%と5%では、明確な骨格構造の違いを確認することができる。

写真1における構造的砂質土の初期含水比5%では、団粒化した細粒分が観察され、大きな土粒子間の隙間に入り込んでいる様子がわかる。構造的砂質土の初期含水比10%では、団粒化した細粒分が大きな土粒子の周りに付着し、より大きな塊を形成していた。この大きな塊が組み合わせり、骨格構造を形成している様子が観察された。

写真2における疑似粘性土の細粒分(DLクレイ)はガラス質の粒状体であることが確認できる。疑似粘性土の初期含水比5%では、団粒化した細粒分が大きな土粒子を覆うように付着し、骨格構造を形成している様子が確認できる。さらに、団粒化した細粒分は、アーチ状かつハチの巣のような構造を形成している様子が観察された。初期含水比10%では、初期含水比5%と同様に細粒分の団粒化が見られるが、水分が多いためにその団粒化が十分に形成されず、初期含水比5%のような明確かつ特徴的な骨格構造までには至っていない。



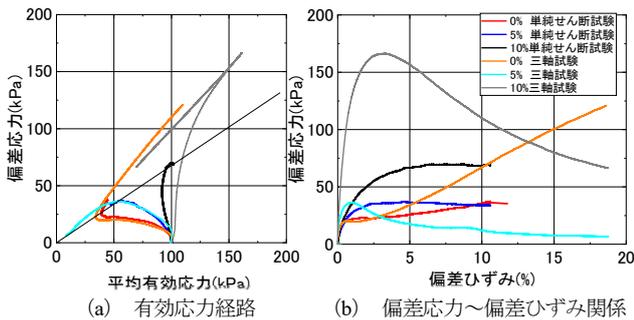
(a) 0% (b) 5% (c) 10%

写真 1 構造性砂質土



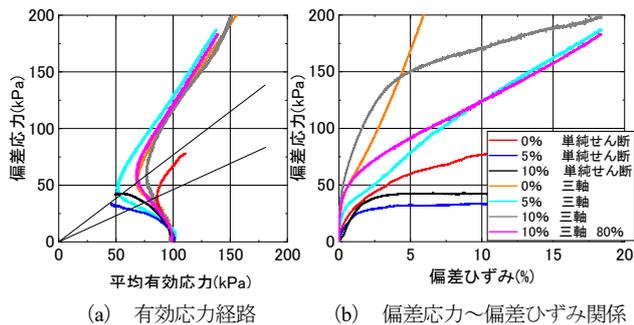
(a) 0% (b) 5% (c) 10%

写真 2 疑似粘性土



(a) 有効応力経路 (b) 偏差応力～偏差ひずみ関係

図 3 構造性砂質土 試験結果



(a) 有効応力経路 (b) 偏差応力～偏差ひずみ関係

図 4 疑似粘性土 試験結果

### 3.2 単調載荷試験

三軸圧縮試験と単純せん断試験の 2 種類の試験結果の比較を行うため、試験結果は、応力もひずみもどちらも不変量を用いて整理する。具体的には、せん断応力を評価するのにあたっては、偏差応力テンソルの第二不変量 $\sqrt{2}I_2$  (単に「偏差応力」と呼ぶ)を用いる。また、せん断ひず

みを評価するのにあたっては、偏差ひずみテンソルの第二不変量 $\epsilon_s$  (単に「偏差ひずみ」と呼ぶ)を用いる。

図 3 に構造性砂質土の有効応力経路 (偏差応力～平均有効応力関係) と偏差応力～偏差ひずみ関係を示す。有効応力経路では、両試験結果の変相点を原点から直線で結んだ変相線がほぼ一致した。そのため、変相線は 1 本の直線のみで示している。さらに、初期含水比 0% と 5% の供試体においては、せん断モードが大きく異なるにも拘らず驚くほど変相点までのせん断挙動が一致する。一方、初期含水比 10% の供試体では、せん断初期で鉛直に立ち上がる弾性挙動は両試験で一致しているが、最大せん断応力は三軸圧縮試験結果の方が遥かに大きい値が示された。さらに、初期含水比 10% における三軸圧縮試験結果でのみ、脆性破壊を示唆する急激なひずみ軟化挙動が見られた。高位な骨格構造を有する鋭敏粘土の顕著なひずみ軟化は、三軸圧縮試験でのみ観察される現象であるという指摘<sup>3)</sup>とこの初期含水比 10% の試験結果は整合している。また、いずれの初期含水比の供試体においても、両試験の変相後の有効応力経路は大きく異なる。すなわち、構造性砂質土における三軸圧縮試験の場合は高位な骨格構造を有する初期含水比 5% と 10% の供試体においては、ひずみ軟化が顕著に現れている。また、低位な骨格構造を有する初期含水比 0% の供試体においては、ひずみ硬化が顕著に現れている。

図 4 に疑似粘性土の有効応力経路 (偏差応力～平均有効応力関係) と偏差応力～偏差ひずみ関係を示す。今回用いた疑似粘性土供試体は、細粒分の全量が写真 2 に示すガラス質の細粒シルトである。それを反映して細粒分含有率が 50% であるものの、全般的に砂質土に近い力学特性を呈し

ている。有効応力経路では、単純せん断試験の初期含水比 0%以外の変相線は、ほぼ一致した。三軸圧縮試験では、初期含水比 5%の塑性圧縮の度合いがやや大きい、変相後はいずれも正のダイラテンシーの拘束に伴うひずみ硬化を示す。本論文では示していないが、初期含水比 0%の供試体では、偏差応力が約 800kPa まで上昇することが確認されており、低位な骨格構造を有する密詰め砂の典型的な挙動が現れていた。一方、単純せん断試験では、変相時とその後の正のダイラテンシーの拘束によるひずみ硬化は初期含水比 0%でのみ見られた。しかも、変相線は三軸試験のそれと大きく異なっている。初期含水比 5%と 10%の供試体では、ひずみ硬化もひずみ軟化も見られず、最終的な応力比はほぼ同じになり、それらは三軸圧縮試験の変相応力比とほぼ同じであった。初期含水比 10%の細粒分含有率 80%における疑似粘性土供試体の試験結果は同じ初期含水比の細粒分含有率 50%における疑似粘性土供試体の試験結果にほぼ類似した結果が得られた。

### 3.3 繰返し载荷試験

図 5 に、初期含水比 10%で作製した構造的砂質土供試体と初期含水比 10%で作製した細粒分含有率 50%と 80%の疑似粘性土供試体の繰返し载荷三軸試験から得られた液状化曲線を示す。また、図 6 は繰返し回数 15 回で液状化に至る試験ケースの繰返し回数と最大軸ひずみとの関係を示している。単調载荷試験結果にて、今回用いた疑似粘性土は砂質土に近い力学特性を呈していると述べたが、図 5 と 6 で示す繰返し载荷試験結果においても、細粒分含有率 50%の疑似粘性土供試体は、構造的砂質土供試体とほとんど変わらない結果であった。したがって、繰返し载荷試験においても疑似粘性土の細粒分含有率 50%の供試体

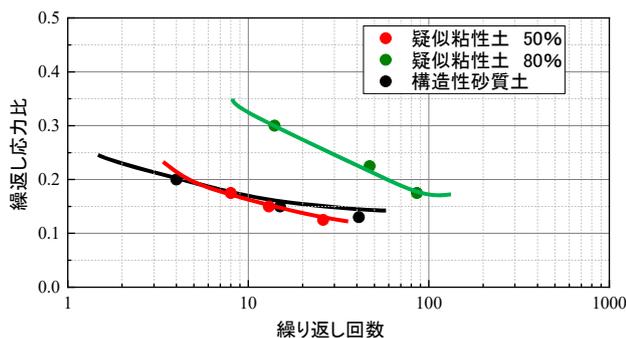


図 5 液状化強度曲線

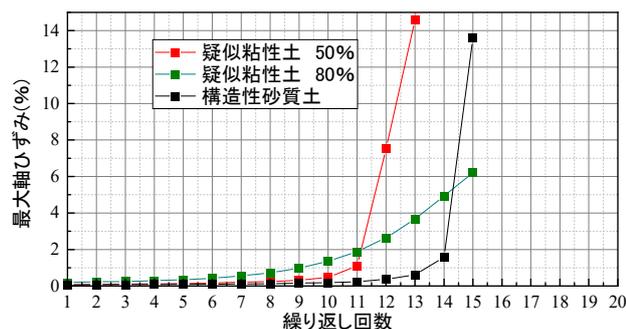


図 6 繰返し回数～最大軸ひずみ

は砂質土に近い力学特性を有しているといえる。細粒分含有率 80%であってようやく液状化抵抗が増加している。ただし、紙面の都合によって本論文では示していないが、細粒分含有率 80%であっても、有効応力は 0 に到達し、密詰め砂質土に近い挙動であった。

## 4. まとめ

マイクロスコープを用いることで、目視による土の骨格構造の確認ができ、供試体作製時の初期含水比を変えることによって骨格構造が変化することを明確に示すことができた。具体的には、初期含水比が大きくなるにつれて、細粒分が団粒化し、大きな土粒子に付着することで骨格構造を形成している様子が確認された。不飽和状態で形成されたその骨格構造の違いが、完全飽和した後も、さらには等方圧密した後も残存し続けているために、それぞれの供試体における試験結果が大きく異なると考えられる。

単調载荷試験における構造的砂質土では、三軸圧縮試験と単純せん断試験の両試験において、初期含水比が 0%、5%、10%と大きくなるにつれ、せん断初期の偏差応力が増加し、高位な骨格構造を形成していることが示唆された。また、変相前までは、せん断モードが異なってもそれぞれの有効応力経路が一致することが分かった。疑似粘性土においては、細粒分がシルト分主体であったために砂質土に類似した性質を示した。しかしながら、変相線はほぼ一致するものの、初期含水比の違いは力学挙動の違いとして大きく現れなかった。

繰返し载荷試験において、単調载荷試験と同様に疑似粘性土では細粒分含有率が 50%であっても砂質土に類似する力学挙動を呈する地盤材料であることが示された。写真 2 で示した疑似粘性土供試体の表面の画像にて、DL クレイの多くの細粒分がガラス質の粒状シルトであったことが原因であると考えられる。

### 参考文献

- 1) 御手洗翔太, 小高猛司, 板橋一雄, 崔 瑛, 李 圭太, 久保裕一: 砂質土の供試体作製における初期含水比の違いが力学挙動に及ぼす影響, 第 72 回土木学会年次学術講演会, 2017.
- 2) 御手洗翔太, 小高猛司, 李 圭太, 久保裕一: 砂質土の構造が単調ならびに繰返し载荷挙動に及ぼす影響, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019.
- 3) 中山雄人, 小高猛司, 李 圭太, 久保裕一, 石原雅規: 細粒分が卓越した疑似粘性土堤防の強度評価の注意点, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019.
- 4) 三好直輔, 小高猛司, 板橋一雄, 福沢宏樹, 吉田賢史: 不攪乱・再構成・繰返し粘土供試体のせん断挙動の違い, 第 46 回地盤工学研究発表会, 2011.