

三軸圧縮ならびに単純せん断による構造的砂質土のせん断挙動の違い

砂質土 構造 せん断

名城大学

国際会員 小高猛司

名城大学

特別会員 ○藤田 薫・御手洗翔太・田中貴之

建設技術研究所

国際会員 李 圭太

中部土質試験協同組合

国際会員 久保裕一

1. はじめに

細粒分を含有する砂質土は、供試体作製時の含水比が異なることによって形成する骨格構造が異なる。我々の研究グループでは、その性質を利用して骨格構造の異なる供試体を作製して三軸試験を実施することにより、同じ間隙比であっても完全飽和後のせん断強度が大きく異なることを示した¹⁾²⁾。本報では、構造的砂質土のせん断挙動に及ぼすせん断モードの影響を検討するために、先に述べた供試体作製時の含水比を変える手法で作製した3種類の骨格構造が異なる砂質土供試体を用いて実施した単純せん断試験の結果を示す。

骨格構造が卓越した土が示す典型的なせん断挙動として、ひずみ軟化現象が筆頭に挙げられる。その軟化の程度がその土の有する骨格構造の尺度として考えられることもある。本報では、三軸試験で顕著に発現されるひずみ軟化現象について、せん断モードを変えることによる見え方の違いも示す。

2. 試験条件

試験試料は、三河珪砂4号と6号、及びシルト分に富んでいる野間精配砂を3:1:3の重量比で配合したものである。図1に今回の試験に使用した混合試料の粒度分布を示す。この配合割合は、実堤防砂(千歳川北島堤防)の粒度に合わせて決めた。表1に今回の試験で使用した各試験の供試体の諸元を示す。今回の試験では三軸圧縮試験²⁾、単純せん断試験ともに供試体作製時の含水比を0%、5%、10%とし、3種の骨格構造が異なる供試体を用いて非排水せん断試験を実施した。三軸圧縮試験で用いた供試体は、直径50mm、高さ100mmの円柱である。初期含水比5%と10%のケースでは、乾燥状態の試料を所定の配合で十分に混合した後に蒸留水を加水し、均一になるように十分に混合した後に、試験装置外の鋼製モールドで5層に分けて締め固めをして作製した。試験装置外のモールドを使用する理由は、初期含水比5%と10%のケースでは、所定の間隙比に締め固めるためには比較的大きなエネルギーが必要であることと、締め固め後の供試体は自立するためである。一方、初期含水比0%のケースでは、乾燥状態の試料を試験装置に設置した二つ割りモールドを用いて、同じく5層に分けて軽く突き固めて供試体を作製した。単純せん断試験で用いた供試体は、直径60.4mm、高さ30mmの円柱である。この寸法の外部モールドが無かったために、いずれの供試体も、供試体作製用の二つ割りモールドを用いて、試験機内で3層に分けて締め固めて作製した。いずれの供試体も、ほぼ同一の間隙比となるように留意して作製したが、試験装置に設置したモールドであったために十分な締め固めエネルギーを作用させることができず、単純せん断試験の供試体においては、初期含水比に応じて間隙比が大きく異なった。本報の結果は、その違いも含めて考察するが、別途同一間隙比による試験も進めている。供試体作製後には、二重負圧法によって完全飽和を行い、背圧を200kPa作用させて、初期有効拘束圧100kPaで非排水せん断を実施して比較を行った。

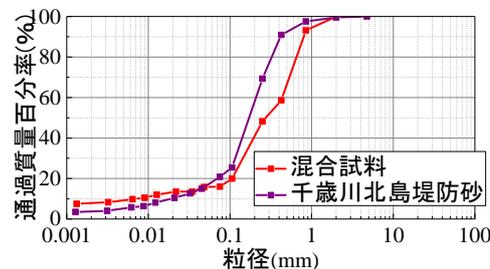


図1 試験試料の粒度分布

表1 三軸試験、単純せん断試験に使用した各供試体の諸元

試験条件	初期含水比 [%]	拘束圧 [kPa]	圧密後間隙比
三軸圧縮	0	100	0.614
	5		0.645
	10		0.645
単純せん断	0	100	0.637
	5		0.750
	10		0.833

3. 試験結果

図2に三軸圧縮試験から得られた有効応力経路、軸差応力~軸ひずみ関係を示し、図3に単純せん断試験から得られた有効応力経路、せん断応力~せん断ひずみ関係を示す。三軸圧縮試験では、初期含水比0%の供試体は、せん断初期から顕著な塑性圧縮を示しており、変相状態に達すると正のダイレイタンスの拘束によって顕著に軸差応力が増加した。初期含水比5%では、明確なピークを示した後に、有効応力経路は原点に向かう静的液状化に近い破壊を示した。初期含水比10%では、せん断初期から高い剛性を示し、小さなひずみレベルで極めて大きな軸差応力に到達するが、ピーク後は、極めて顕著な脆性破壊をして、有効応力は一気に原点に向かって低下する。これらの違いは供試体の骨格構造が大

大きく異なるためであり、初期含水比が大きくなるほど、高位な骨格構造を有するために、せん断初期に弾性応答が顕著になるが、限界値を超えると一気に脆性破壊を起こす。初期含水比 0% の供試体は極めて低位な骨格構造であるために、せん断初期であってもほとんど弾性応答が見られない。変相後の軸差応力の顕著な増加は、骨格構造が低位であることを反映して、逆に粒子どうしのかみ合わせがよくなることによって発現していると考えられる。

図 3 の単純せん断試験においては、図 2 の三軸試験ほど顕著でないものの、初期含水比が 0% から 10% になるにつれてせん断強度が大きくなることは両試験で共通している。三軸試験ほど明確な差がないのは、初期含水比が高いほど間隙比が大きくなってしまったことも関係していると考えられる。

三軸試験と単純せん断試験の両者の試験結果を同じ尺度で比較するために、特に単純せん断試験の結果を、不変量を用いて整理する。すなわち、縦軸には偏差応力テンソルの第二不変量 $\sqrt{2J_2}$ (以下、偏差応力と呼ぶ) を用い、横軸には偏差ひずみテンソルの第二不変量 ϵ (以下、偏差ひずみと呼ぶ) を用いる。図 4 に両試験をあわせた偏差応力～偏差ひずみ関係と有効応力経路を示す。初期含水比 0% の供試体による試験結果に着目すると、変相点まで両試験の結果が、応力～ひずみ関係と有効効力経路のいずれもほぼ一致している。ただし、変相後には三軸試験のみ顕著に偏差応力が増加しており、三軸試験によるせん断モードの方が、正のダイレイタンシーの拘束度合いが大きいことを示唆している。初期含水比 5% の供試体に着目すると、単純せん断試験では三軸試験で観察される顕著なひずみ軟化が見られず、変相点から偏差応力がやや増加した。両試験の供試体の間隙比が異なるために単純な比較はできないが、単純せん断試験の供試体の間隙比を三軸試験の供試体なみに小さくしたとしても、三軸試験のようなひずみ軟化が発生するとは考えにくい。初期含水比 10% の供試体においては、さらに両試験の間隙比の差が広がるので比較は難しいが、単純せん断試験においてもややひずみ軟化の傾向は見られるようになるものの、脆性的な崩壊を呈するまでの傾向は見られない。なお、図 4 には、各試験における変相線（原点から変相点を結んだ直線）を記しているが、それぞれの初期含水比の供試体毎に、三軸圧縮、単純せん断とせん断モードが異なっても変相線はほぼ一致することが分かる。

4. まとめ

今回の実験から、単純せん断試験と三軸圧縮試験の両方において、初期含水比 0%、5%、10% と大きくなるにつれ、高位な骨格構造を有し、偏差応力も増加することが示された。また、単純せん断試験と三軸圧縮試験を比較すると、それぞれの供試体毎に両試験の変相線はほぼ一致し、構造が大きく変化する有効応力比はせん断モードによらず供試体の骨格構造に依存することが示された。ただし、骨格構造に起因して発揮される三軸試験で顕著に観察される高いピーク荷重とその後のひずみ軟化を伴う脆性的な破壊挙動は、単純せん断試験では観察できなかった。これは、顕著なひずみ軟化挙動は、三軸圧縮というせん断モードで顕著に発現する現象であることを示唆している。なお、不攪乱粘性土を用いた三軸試験と単純せん断試験による比較も別途行っている³⁾が、全く同じ深度で採取したほぼ均質な不攪乱沖積粘土供試体においても、ひずみ軟化挙動は三軸試験でしか観察できないことを確かめている³⁾。

参考文献：1) 御手洗ら：砂質土の供試体作製時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) 小高ら：砂質土の構造が単調ならびに繰り返し載荷挙動に及ぼす影響，第 54 回地盤工学研究発表会，2019.

(投稿中) 3) 小高ら：不攪乱・再構成・練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.

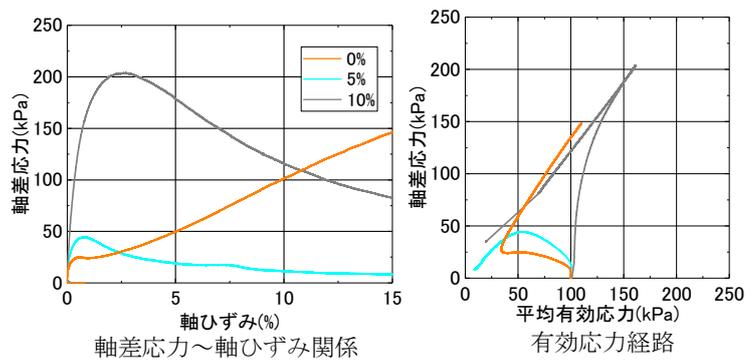


図 2 三軸圧縮試験結果

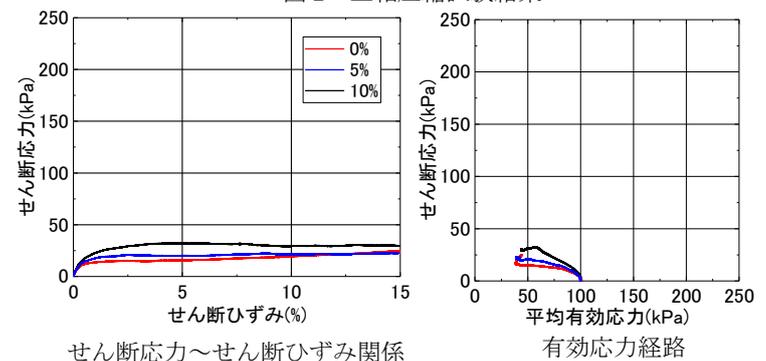


図 3 単純せん断試験結果

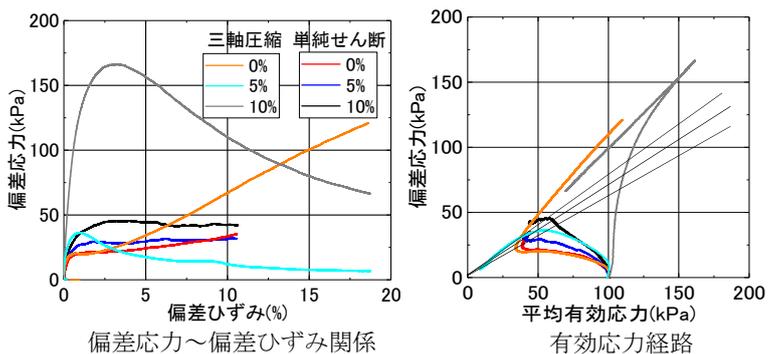


図 4 不変量を用いた両試験の比較