

浸透条件下でのせん断変形に伴う砂質土の細粒分流出現象

Outflow of fine fraction of sandy soil during shear deformation under seepage condition

湯貫 敬¹, 小高猛司², 久保裕一³, 李 圭太⁴

- 1 名城大学・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・コンサルティング事業統括本部

概 要

河川堤防やため池などの浸透条件下の砂質土は、浸透流により土骨格の細粒分の流出が発生し、漏水が濁っている場合は非常に危険なサインであると言われている。すなわち、土骨格からの細粒分の流出は、河川構造物の破壊の前兆と考えられる。しかし、土骨格からの細粒分の流出と堤体の変状との関係性は十分に明らかになっていない。本研究では、浸透条件下のせん断過程を土粒子レベルで観察ができる一面せん断試験を実施し、砂質土の力学特性の変化と細粒分の移動、流出との因果関係について検証した。具体的には、細粒分の流出が促進されやすい混合砂を用いて一面せん断試験を行い、せん断変形に伴い移動する細粒分の観察をした。その結果、せん断変形に伴う骨格構造の変化によって、細粒分の移動は促進されることが確認できた。すなわち、細粒分の流失は土構造物のせん断変形が引き起こす現象の一つであることが明らかとなった。

キーワード：一面せん断試験，河川堤防，浸透，砂質土，細粒分

1. はじめに

河川堤防やため池などの浸透条件下の砂質土では、浸透流などにより、土骨格から細粒分が流失することによって粒度分布が変化し、さらに密度にも変化が生じる可能性があり、力学特性が変化し、最悪の場合には構造物が変状する危険性もある(図1)。長時間洪水が継続する場合、河川堤防においては基礎地盤のパイピングや堤体法尻での内部侵食を伴う浸透破壊の危険性が高まる。例えば、パイピングにおいては、堤体と基礎地盤の境界面で水みちが形成され、澄んだ水が流れ出る間の堤体の崩壊リスクは低いが、流出水が濁っていると内部侵食が進行しており、堤体が大変状に繋がる危険性が高いことは模型実験からも明らかである。一方、明確な水みちの存在がない段階においても、細粒分の流出が議論されることも多く、その場合には、土粒子と流路、ならびに流速などの流出条件が議論となる。古いため池などの土構造物は、人力で築堤されたものも多く、締め固め不足や、経年劣化等の原因から河川堤防と同様、洪水時に水の浸透による細粒分の流出で内部侵食が起こり、破堤に至ることが考えられる。ただし、堤体からの細粒分流失が浸透流の作用のみで発生している現象かどうかは慎重な議論が必要である。

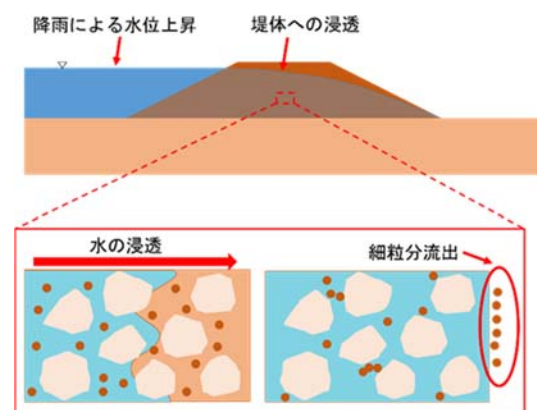


図1 堤体の細粒分流出の模式図

我々の研究グループでは、細粒分が土塊から流出する現象は単なる浸透流のみで引き起こされるのではなく、その土塊のせん断変形に起因し、かつ促進される現象との仮説に基づき研究を開始した。本論文では、堤体土を模擬した細粒分を含む砂質土の一面せん断試験を浸透条件下で実施することにより、せん断過程における細粒分の移動を観察することにより、砂質土の力学特性と細粒分の移動、流出との因果関係について検証を行った。

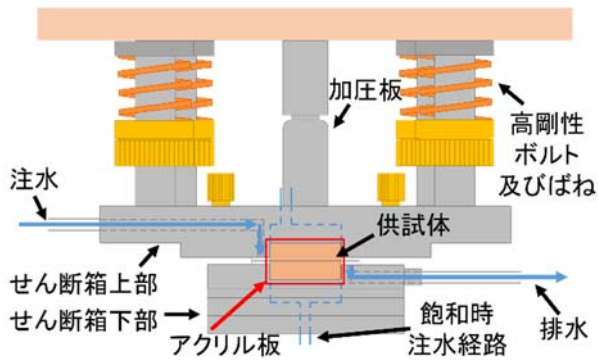


図2 一面せん断試験機の模式図



図4 せん断箱を設置した状態

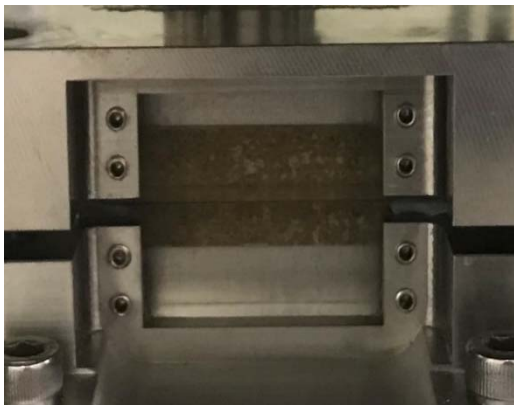


図3 せん断箱前面のアクリル板

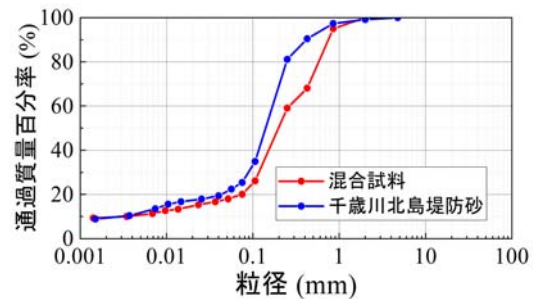


図5 粒度分布

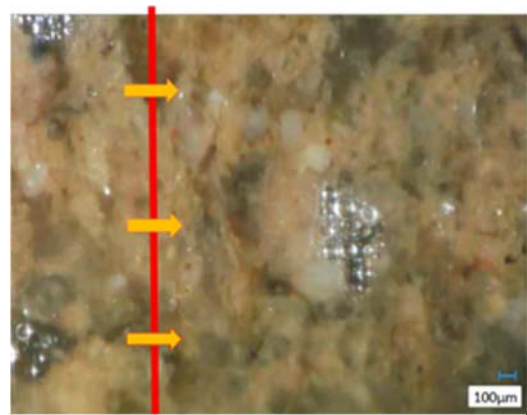


図6 細粒分の観察

2. 試験概要

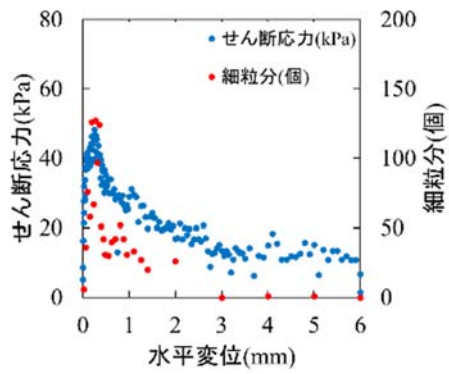
2.1 試験装置

本研究で使用した一面せん断試験装置の概要について説明する。図2に一面せん断試験機の模式図を示す。せん断箱は上部・下部の2層構造になっており、下部せん断箱の供試体底面と上部せん断箱内で供試体上部に接する加圧板にはそれぞれポーラメタルが設置してあり、供試体下部から上部への通水によって供試体を飽和化することができる。また、図2に示すように、せん断箱上部にある注水路に所定の圧力を負荷した水を流し、せん断箱下部の排水路からその水を排水することにより、供試体の左から右へ一方かつ一定動水勾配の浸透流を発生させられる。また、試験中に一方の浸透条件を作るためには、せん断箱からの外部への漏水を防止することが必要なため、せん断箱上部と下部の境界面にグリスを塗り、せん断箱上部を固定する高剛性ボルトに設置したばねによって、力を調整しながらせん断箱上部、下部を密着させている。

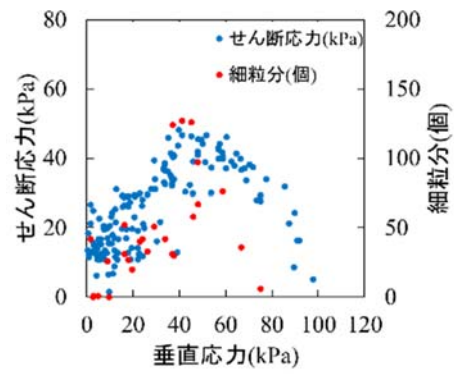
本研究では、細粒分の移動を観察するため、図3に示すように、せん断箱前面に透明のアクリル板を設けている。このアクリル板を介してマイクロスコープを用いて動画撮影をすることによって、せん断面近傍の土がせん断中にどのような振る舞いをするのか観察することが可能となる。図4はせん断箱の全景であり、せん断箱の左につないだチューブから注水して浸透流を発生させる。

2.2 試験方法

試験試料は、三河珪砂4号と6号、及びシルト分が卓越した野間精配砂を重量比3:1:3に配合したものである。図5に試験で使用した混合試料の粒径加積曲線を示す。この配合割合は、実堤防砂(千歳川北島堤防砂)の粒度に合わせて設定した。供試体作製においては、初期含水比10%となるよう蒸留水を加えて均一になるように十分に混合した。その混合試料を間隙比0.8となるように3層に分けて、締め固め、一辺50mm、高さ20mmの直方体の供試体とした。そして、供試体を飽和させた後、垂直応力を100kPa(ケース1)、150kPa(ケース2)、200kPa(ケース3)、400kPa(ケース4)の4つのケースに分け、圧密をした。圧密終了後、まず初期水頭差が20cmの注水槽からレギュレータを用いて、1kPa/minの割合で4kPaまで上昇させ、3分間放置し、3分経過後にせん断を開始し、せん断速度0.5mm/minで変位6mmになるまでせん断を行った。

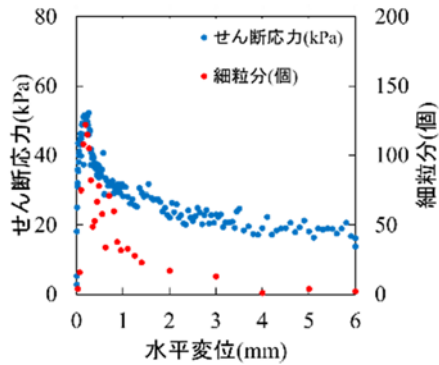


(a)せん断応力・細粒分関係
～水平変位関係

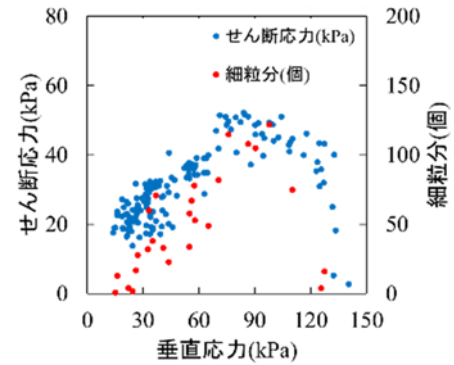


(b)せん断応力・細粒分関係
～垂直応力関係

図7 初期垂直応力 100kPa の結果

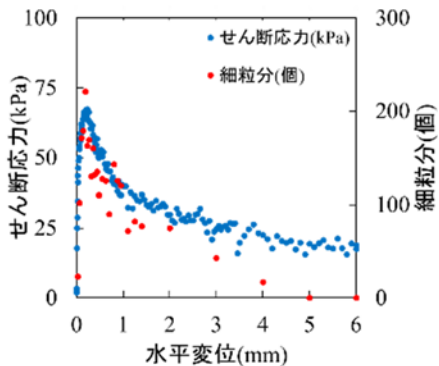


(a)せん断応力・細粒分関係
～水平変位関係

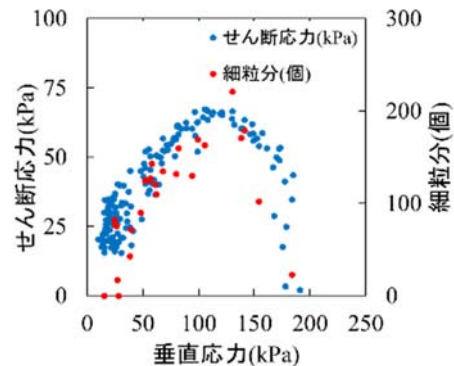


(b)せん断応力・細粒分関係
～垂直応力関係

図8 初期垂直応力 150kPa の結果

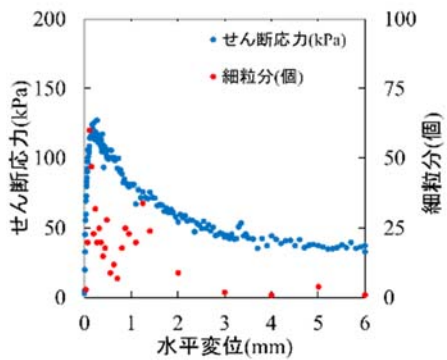


(a)せん断応力・細粒分関係
～水平変位関係

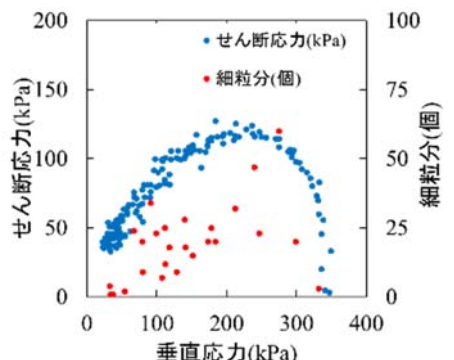


(b)せん断応力・細粒分関係
～垂直応力関係

図9 初期垂直応力 200kPa の結果



(a)せん断応力・細粒分関係
～水平変位関係



(b)せん断応力・細粒分関係
～垂直応力関係

図10 初期垂直応力 400kPa の結果

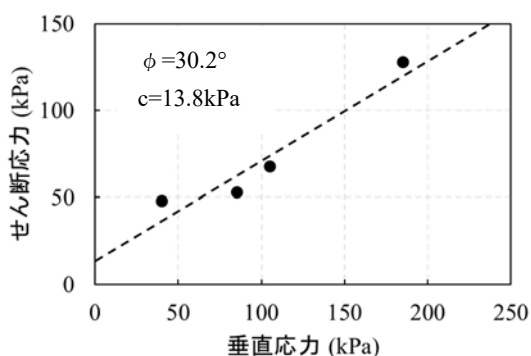


図 11 ピーク値のプロットと破壊規準線

表 1 基準線を通じた細粒分の個数とせん断前の間隙比

100kPa	150kPa	200kPa	400kPa
1185 個	1288 個	2791 個	500 個
0.66	0.60	0.67	0.62

供試体の前面の亚克力板部分にマイクロスコープを設置し、ライトを照射しながら、亚克力板から見える細粒分の移動を浸透開始からせん断終了まで撮影した。図 6 は、細粒分の移動をマイクロスコープで撮影した画像である。細粒分の流出量を定量的に計測する方法は、図 6 の赤線のように基準線を定め、その線を 5 秒間に通過する細粒分の個数を目視でカウントして計測した。

3. 試験結果

図 7~10 の青色のプロットは、ケース 1~4 の試験結果における(a)せん断応力~水平変位関係、(b)せん断応力~垂直応力関係である。これらの図から、せん断初期には垂直応力が鉛直に立ち上がる弾性的な挙動を示し、せん断応力がピーク値に到達した後は塑性圧縮を伴う急激な軟化を呈し、典型的なゆる詰め砂の挙動を示した。

図 11 には、4 ケースの一面せん断試験結果から、せん断応力のピーク値と対応する垂直応力の値をプロットし、破壊規準線を描いたものである。せん断抵抗角 ϕ は 30.2° であり、ゆる詰め砂として相応しい値と考えられる。しかし、粘着力 c は 13.8kPa とやや過大な値を示した。この原因は、試験中の水漏れを防ぐために、せん断箱上部と下部をグリスで圧着したことによると考えている。

一方、図 7~10 の赤色のプロットは、図 6 に示したように、マイクロスコープの観察領域内に設定した基準線を横切って通過した細粒分の個数を 5 秒間隔でカウントし、計測時刻によって一面せん断試験のそれぞれの計測値とひも付けした図である。図から、全ての拘束圧において、青色と赤色のプロットの傾向が驚くほど類似していることが分かる。すなわち、細粒分が流れる個数は、せん断直後からせん断応力とともに増加し、せん断応力がピーク値を迎えた時に、流れる個数も最大値となる。また、せん断応力が急激に低下して軟化する際には、流れる個数も激減している。この試験結果より、砂質土の中に含まれる細粒分

は、通常は様々な大きさの土粒子の中で固定化されているものの、せん断変形が進行し、細粒分を捕捉している粗粒分の構造が変化する際に、細粒分が一気に移動を始めると考えられる。

表 1 は、各ケースの基準線を通じた細粒分の累積個数である。せん断前の間隙比も示すがそれぞれ幅があるものの試験結果に影響を及ぼしたとは考えていない。流れた細粒分の個数を 4 ケースで比較すると、ケース 3 が最大であり、ケース 4 が最小となった。せん断前の間隙比が類似していても、垂直応力が大きくなると、密詰め傾向になり、細粒分の移動できる間隙が狭くなり、細粒分の流出を阻害していると考えられる。また、ケース 1 と 2 の累積個数が少ないのは、せん断前に所定の水頭を付加した状態で 3 分間静置してからせん断を開始しているが、その静置時間中にも一定量の細粒分が流失し、その流失量は圧密荷重が小さい程多いためと考えている。

4. まとめ

本研究では、細粒分の移動、流出を観察しやすく、かつ力学特性の把握に適している混合砂を用い、浸透条件下の一面せん断試験を実施した。せん断中に流れる細粒分の個数は、せん断直後から水平応力とともに増加し、水平応力がピーク値を迎える時に、最大となる。この試験結果より、砂質土の中に含まれる細粒分は、せん断変形が進行し、細粒分を捕捉している粗粒分の構造が変化する際に、細粒分が一気に移動を始めることが明らかになった。本試験では、せん断時に流れる細粒分の累積個数は、初期垂直応力 300kPa までは高くなるほど増加するが、 400kPa になると逆に減少する。初期垂直応力が高いほど、粗粒分による細粒分の補足作用が大きくなるが、初期垂直応力が低い場合には、せん断前の浸透条件下で細粒分がすでに移動しているために、せん断を始めてから移動する細粒分は少なくなることが考えられる。垂直応力 400kPa になると、せん断時にも粗粒分が補足する作用が大きくなると考えられる。

本研究により、砂質土からの細粒分の流出は、せん断変形の発生により現れる現象であることが示された。

最後に、本研究の試験を実施するにあたり、元名城大学の御手洗翔太氏と井上司氏にお世話になった。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小高猛司, 李 圭太, 崔 瑛, 森 智彦, 森 三史郎, 林 愛美: 浸透に伴う基礎地盤の弱화에起因する堤防法すべり崩壊に関する考察, 第 5 回河川堤防技術シンポジウム, 2017.
- 2) 御手洗翔太, 小高猛司, 李 圭太, 久保裕一: 砂質土の浸透条件下における一面せん断試験, 第 30 回中部地盤工学シンポジウム, 2018.
- 3) 久保裕一, 小高猛司, 李 圭太, 井上 司: 浸透場一面せん断試験による砂質土のせん断挙動と細粒分移動の関連性の考察, 第 75 回土木学会年次学術講演会, 2020.