

砂質土の浸透条件下における一面せん断試験 Direct shear test of a sandy soil under seepage condition

御手洗翔太¹，小高猛司²，李 圭太³，久保裕一⁴

- 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 株式会社建設技術研究所・大阪本社
- 4 中部土質試験協同組合

概 要

出水時に堤体法尻や基礎地盤からの漏水が濁る現象は、堤防にとって極めて重要な危険信号である。すなわち、堤内地側への浸透水が濁っている場合には、土骨格から細粒分が流出していることに伴い、堤体変状の危険性が高まっていると考えられている。しかし、細粒分の流失が堤防劣化・変状を引き起こすのか、堤防変状発生の一側面として細粒分が流失しているのか、あるいは相互に影響しながら劣化・破壊が進行していくのか、不明確な点が多い。本研究では、細粒分流出は、発生し始めたせん断変形に起因する、あるいは促進される現象と考える。そこで、砂質土からの細粒分流出に着目し、浸透流場でのせん断過程を土粒子レベルで観察できる一面せん断試験装置を新たに開発し、浸透条件下におけるせん断変形と細粒分の移動、流出との因果関係について検証した。具体的には、細粒分の移動、流出が発生すると考えられる粒度調整した混合砂を用いて一面せん断試験を実施し、浸透及びせん断変形に伴う砂粒子の観察を実施した。その結果、せん断変形に伴う構造変化によって、浸透とともに細粒分が移動することが示された。

キーワード：河川堤防，内部侵食，一面せん断試験，細粒分

1. はじめに

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。例えばパイピング現象においては、澄んだ水が滲出してくる間の危険性は低いが、堤内側に浸出してくる河川水が濁っている場合には土粒子が流出し、堤体変状の危険性が高いと経験的に考えられている。すなわち、基礎地盤や堤体土の土砂が浸透水に混じる場合には、堤体の安定性が失われつつある兆候と一般に考えられることが多い。

堤体と基礎地盤、あるいは基礎地盤が複層であればそれら基礎地盤間の透水性に大きなギャップがある場合には境界面で水みちが形成され、その水みちを流れる高流速の非ダルシー流れによって比較的大きな動水勾配が作用した場合、土粒子が流れ出る場合がある。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場合も多く、その場合には、流路となる土の間隙の大きさや土粒子自身の粒径、そして流速などの流出条件が議論となり先行研究もなされている¹⁾。しかし、細粒分の流出は、発生し始めたせん断変形に起因する、あるいは促進される現象とも考えられる。

本研究では、浸透条件下におけるせん断変形に伴う細

粒分の移動、流出との因果関係について検証した結果を示す。具体的には、細粒分の移動、流出が促進されやすいよう粒度調整した混合砂を用い、新たに開発した浸透流場でのせん断過程を土粒子レベルで観察できる一面せん断試験装置を使用し、せん断変形に伴う細粒分の移動、流出について検討する。

2. 試験条件

本研究では細粒分の移動、流出の様子を観察することを目的としており、粗粒分と細粒分の含有量にギャップがあり、粗い粒子間を細粒分が比較的移動しやすい条件で試験を行う必要があると考える。言い換えると、水の浸透とともにフィルターの役割を果たす粒子の間を、より小さな粒子が流れ、内部侵食が発生しやすいと考えられる試料で検討を行う。そこで、Kenneyら²⁾の粒状フィルターの内部安定性の指標を用いることにした。これは、図1に示すような試料が内部侵食を起こさないためには任意の粒径Dに対して4Dの粒子含有量がそれ以上含まれていることが必要であるという指標で、 $H/F \geq 1$ で安定、 $H/F < 1$ で不安定とする。指標に基づき内部侵食が起りやすいと考えられる試料で試験を実施する。

本論文の試験試料には、三河珪砂4号とシルト分が卓越した野間精配砂を使用し、これらを1:2の割合で配合した。これは、粗粒分と細粒分の含有量のギャップを均等係数で判断し、その値が大きくなり、細粒分がある程度含まれるように配合した。配合した試料は均等係数 $U_c = 75\%$ 、細粒分含有量 $F_c = 20\%$ であった。配合した試料を混合試料とし、図2にその粒度分布を示す。この試料について Kenney の指標に基づいて連続的に検討を行うと、 $0.03 \sim 0.035 \text{ mm}$ 以下の粒子は不安定で移動するという判定になり、内部浸食を起こす可能性があると考えられる。しかし、粒径のみによる判定のため、せん断変形が加わった際の構造変化や水みちが形成された場合と同じく不安定とされる粒子の移動が確認できるかどうか検討を行う。

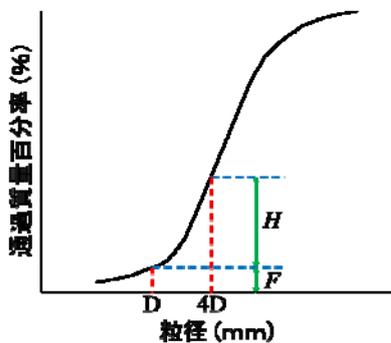


図1 Kenney の安定指標

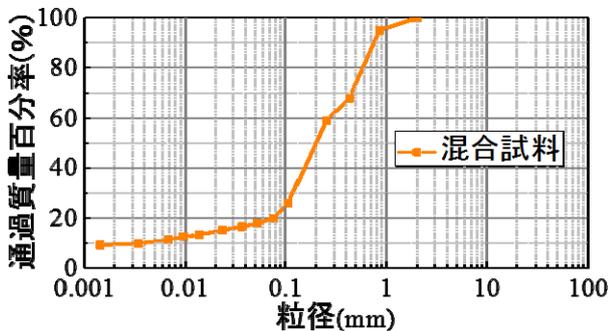


図2 試験試料の粒度分布

3. 試験装置概要

新たに開発した一面せん断試験装置のせん断箱を分解した状況を図3に示す。せん断箱下部は二層構造となっており、組付けた際、供試体底面にポーラスメタルを取り付けているため供試体飽和時に下方から注水することができる。せん断箱上下部にそれぞれ注水口および注水経路となる溝が作られており、せん断中は供試体内を左右に水を浸透させることができる。

せん断箱上下を組み、荷重計測用ロードセルの上に設置した様子を図4に示す。この図では、組み立てたせん断箱内に供試体を作製し、その上に蓋の役割をする加圧板を乗せたものになる。供試体上面に接する加圧板にもポーラスメタルが組み付けられており脱気および飽和時

の排水ができるようになっている。せん断箱上下のホースから脱気および飽和時の注水を行い、左右のホースを通してせん断時に水を浸透させる。各チューブのバルブの開閉により飽和時やせん断時の水の浸透方向を選択できるようにしている。

一面せん断試験装置の模式図を図5に示す。図に示すように上部せん断箱の注水経路から、下部せん断箱の排水経路まで、供試体の左から右へ浸透水を流すことが可能である。試験中に供試体への浸透水が外部に漏れないように、鏡面仕上げの上下せん断箱の接触面をシリコングリースでシールする。その上で、上部せん断箱を固定する高剛性ボルトに設置したばねで、力を調整しながら上下せん断箱を漏水しない程度に圧着する。また、試験中に供試体中の細粒分の移動を観察するため、せん断箱の前側面には透明なアクリル板を設けている。

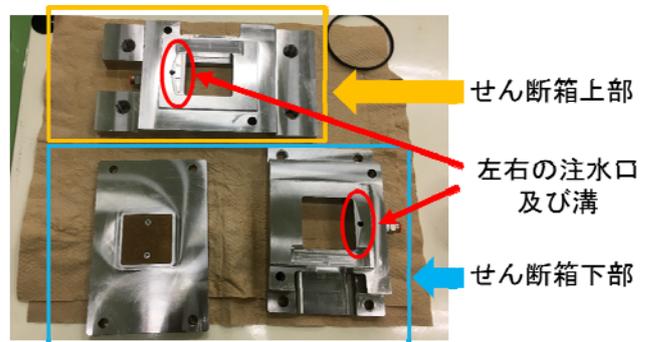


図3 せん断箱を分解した状況

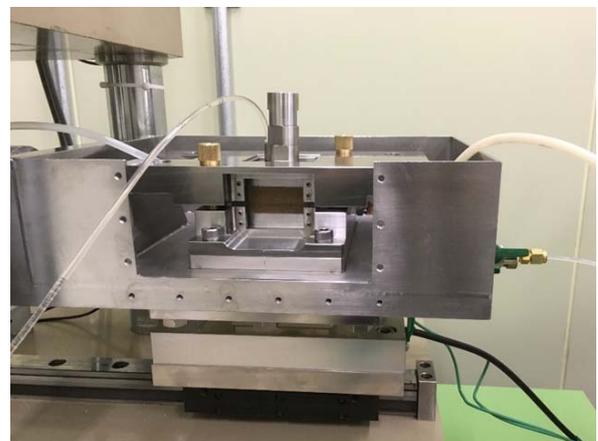


図4 せん断箱を設置した状況

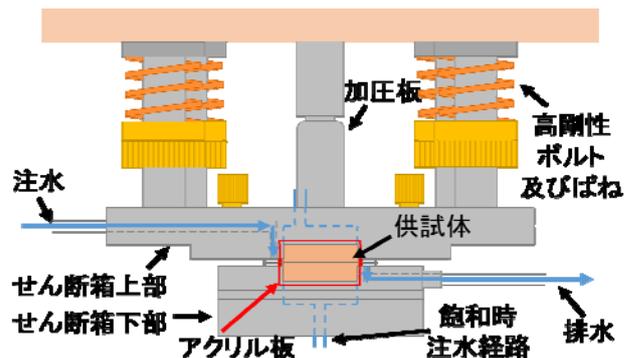


図5 一面せん断試験装置の模式図

4. 試験方法

供試体作製においては、乾燥試料を先述のように所定の割合で十分に混合した後に、含水比 10% となるように蒸留水を加水し、均一になるように十分に攪拌混合した。この混合試料を間隙比 1.0 となるように締め固めて、高さ 20mm、一辺 50mm の直方体の供試体を作製した。図 5 に示す供試体上面の注水経路を用いて -40kPa まで段階的に供試体の脱気を行う。このとき上下せん断箱の接触面をシリコングリースでシールしており、上部せん断箱を固定する高剛性ボルトに設置したばねで、漏水しない程度に圧着する程度であるため、あまりに大きな負圧を作用させると、十分なシールができず脱気後の注水時に漏水を起こす可能性がある。そのため、止水問題のない程度の負圧を作用させている。同じく図 5 に示す供試体上下面の注水経路を用いて飽和後、鉛直応力 20kPa となるまで圧密载荷を行った。圧密終了後、図 6 に示す試験手順で撮影およびせん断を行った。まず、初期水頭差 5cm の注水槽から 1kPa/min ずつ 2kPa まで水圧を上昇させ 5 分間保つ。その後浸透を継続させながら一面せん断を実施した。せん断速度 0.5mm/min で変位が 6mm に達するまでせん断を実施し、圧密終了後の水の浸透からせん断終了までの供試体内の細粒分の移動を、図 7 に示すようにアクリル板を介してマイクログラフで観察した。図中央のようにせん断中に供試体表面の粒子を観察するが鮮明に撮影ができるようライトを照射しながら撮影を行っている。

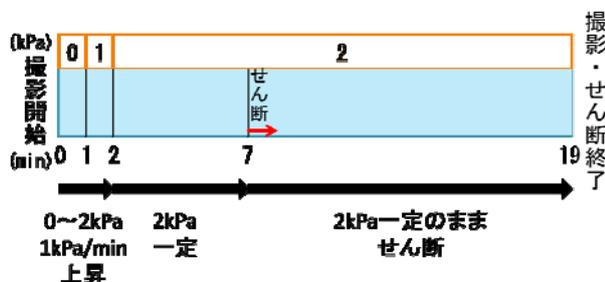


図 6 試験手順



図 7 試験中の様子

5. 試験結果

図 8 にアクリル板を介して撮影した試験中の試料の様子を示す。粒子の様子を正確に観察できるようにせん断面上部だけに焦点を合わせ拡大して撮影を行った。せん断面の真上を撮影しており、写真底面がせん断面とほぼ一致する。浸透開始からせん断開始までの 7 分間は細粒分の移動は確認できなかったが、アクリル板表面に付着している気泡が微量ではあるが消失していることが確認できた。一方、せん断開始後には、以下のように細粒分の移動が確認できた。

浸透開始 500 秒後 (せん断 80 秒後, せん断変位 0.7mm) では、約 0.1mm 程度の粒子 (図上部, 中央付近の色付きの点) も移動することが確認できた。しかし、移動し始めてすぐ別の粒子に接触し動きが止まったため、目詰まりを起こしたと考えられる。その後半分ほどの大きさの粒子 (図右, 中央付近の色付きの点) がその横を通過していくところも確認できた。

浸透開始 780 秒後 (せん断 360 秒後, せん断変位 3.0mm) では、気泡の消失と細粒分の移動が共に確認できた。気泡の消失は二つ確認でき、図に示した。まず、上の気泡が消失した瞬間、約 0.03mm 程度の複数の粒子が同じ経路を通過し目詰まりを起こして止まった。その直後、下の気泡が消失し、移動中だった粒子は直前に目詰まりを起こした経路を移動せず、気泡の消失によって形成された経路を移動した。

浸透開始 1020 秒後 (せん断 600 秒後, せん断変位 5.0mm) では、せん断中最も細粒分の移動が確認できた。図中央のような経路を 0.05mm 未満と思われる大きさの粒子が移動した。同時にその直下に存在する複数の経路にそれぞれ細粒分が移動していくところも確認できた。

浸透開始 1080 秒後 (せん断 660 秒後, せん断変位 5.5mm) では、一つ前の浸透開始 1020 秒後で活発に粒子の移動が確認できた場所を色付けしてある。この色付け部分では先ほどと異なり浸透による細粒分の移動が全く確認できなかった。せん断に伴う粒子の巻き込みにより細粒分が移動することができる経路が閉ざされた可能性がある。その代わりに、図の右下のように別の場所で細粒分の移動が確認できた。この粒子の移動が止まった直後に図の右上の粒子の動きも停止した。その後せん断終了時まで、大きく粒子が移動する様子は見られなかった。

6. おわりに

本研究では、細粒分の移動、流出が促進されやすいよう粒度調整した混合砂を用い、浸透流場でのせん断過程を土粒子レベルで観察できる一面せん断試験装置を使用し、せん断変形に伴う細粒分の移動を観察した。

浸透条件下におけるせん断時の供試体の観察からせん断変形に伴う場合に細粒分が大きく移動することが確認できた。その反面、移動をしない粒子や移動をしても目

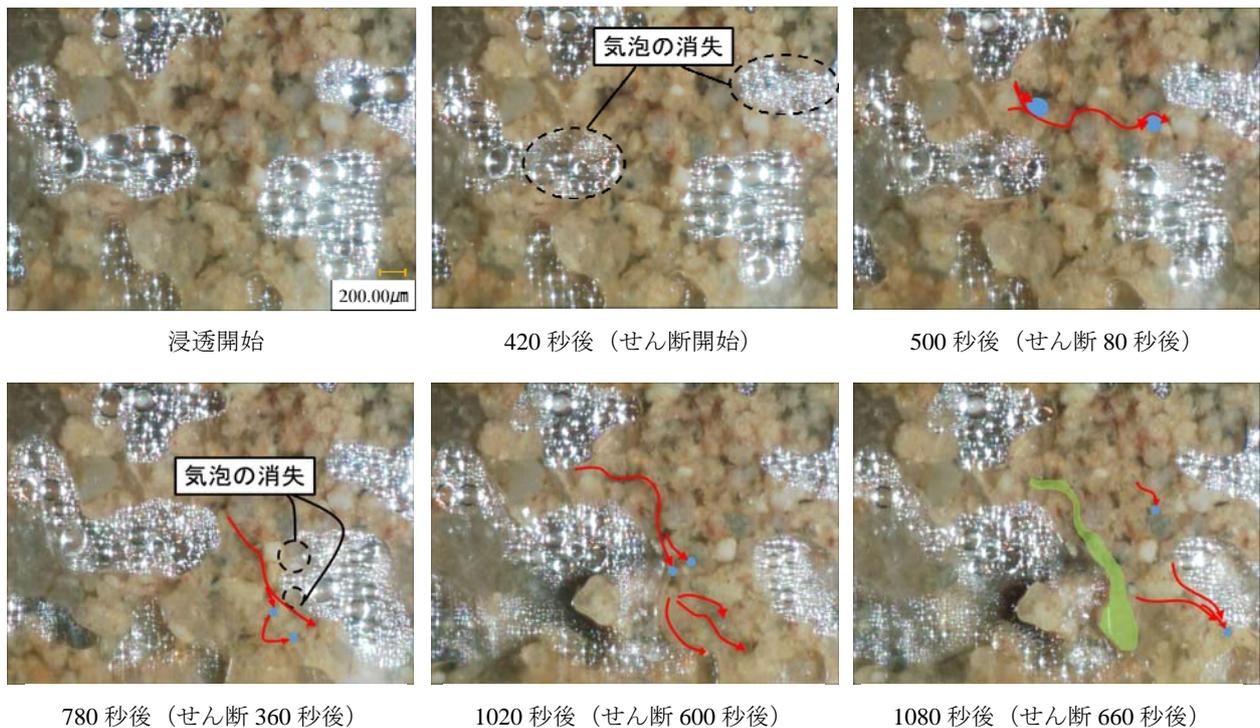


図 8 試験中の試料の様子

詰まりする粒子も存在する。移動する粒子の中で最大で約 0.1mm と Kenney の安定指標で内部浸食を起こす可能性があるかと判定された粒子よりも大きな粒子も移動することが確認できた。しかし、細かい粒子とは異なり、移動直後に他の粒子に接触して動きを止め、その後は大きな移動はしなかった。

粒子の動きの特徴として、一箇所に限らず複数の箇所でも移動する様子が見られたが、各流路に対して同じ道を連続的に粒子が流れていくことが確認できた。また、複数の粒子が流れ、その流路で目詰まりを起こすと後続の粒子の動きが途中で止まる様子が見られた。その場合、流れが止まった流路が枝分かれを起こし、別の水みちを形成するような現象も見られた。このことから浸透水と共に粒子が流れやすい方向を選択的に流れながら移動すると考えられる。せん断終了直前には、観察視野内においては粒子の動きが全体的に確認できなくなったことから、その範囲では粒子の目詰まりによって複数存在していた流路が閉ざされたと考えられる。

本実験では実現象と比べて大きな水頭差を作用させていることや、一面せん断試験ではせん断に伴い供試体の流路長が短くなり動水勾配が増大することにも注意し、せん断に伴う浸透量についても検討する必要がある。また、巨視的に平均的な動水勾配が小さい場合であっても、土粒子間を流れる微視的な間隙流は高速である場合も考えられ、微視的な流速の計測も含めて、より詳細な観察を行う必要がある。せん断に伴い細粒分の移動が促進されたことから、せん断変形による土骨格の変化により細粒分の流路が形成された可能性がある。さらには、せん断変形により刻々と供試体内の状況が変化していくため、

粒状フィルターの内部安定指標の判定とは異なる結果であったと考えられる。今後は浸透現象を力学特性と合わせて検証していく予定である。

なお、堤防土を模擬した砂質試料を用いて、各種の動水勾配における細粒分の移動状況を観察する試験も別途実施している。せん断試験時に供試体を流れる浸出水からフィルターで細粒分を補足する試みを実施しているが、せん断前の浸出水とせん断時の浸出水では、細粒分の流失量が明らかに異なることも確認している。シンポジウム当日には、その結果についても説明する予定である。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 16H04412 (基盤研究 B, 代表者: 小高猛司) の助成を受けて実施したものである。また、試験装置の開発には、クラフターサッポロの増井明典氏にご協力いただいている。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 杉井俊夫, 余川弘至, 小竹亮太, 安達良: 内部浸食を対象とした Kenney らの粒度安定指標への間隙率の導入, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム, 2016
- 2) Kenney T.C. and Lau D.: Internal stability of granular filters. *Canadian Geotech. J.*, 1985, 22, 215-225.
- 3) 小高猛司, 御手洗翔太, 李圭太, 久保裕一: 砂質土の浸透及びせん断過程における細粒分の移動・流出の観察, 第 53 回地盤工学研究発表会, 2018.