

細粒分流出に伴う砂質堤体土の劣化に関する考察 Degradation of a sandy embankment soil due to outflow of fine particles

小高猛司¹, 崔 瑛², 李 圭太³, 御手洗翔太⁴, 高木竜二⁵

1 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科・kodaka@meijo-u.ac.jp

2 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科

3 株式会社建設技術研究所・大阪本社・水工部

4 名城大学・理工学部・社会基盤デザイン工学科

5 名城大学大学院・理工学研究科・建設システム工学専攻

概 要

河川堤防の砂質堤体の法尻や基礎地盤においては、洪水時に即座に変状を引き起こすほどではないが比較的大きな動水勾配が作用した場合、堤体土内の細粒分が徐々に流失することによって堤体材料の強度劣化が引き起こされ、変状に至る事象も考えられる。本研究では、砂質堤体土からの細粒分流出に着目し、その流失が堤防土の力学特性に及ぼす影響について三軸試験を通して考察した。具体的には、河川堤防砂を模擬した混合砂を用いて、細粒分含有率と供試体密度を各種調整した供試体を用いて三軸試験を実施し、浸透による細粒分流出による堤体土の劣化について検討を行った。その結果、細粒分の流失に伴う間隙比の増大によって、堤体土の強度変形特性が大きく変わることが示された。

キーワード：河川堤防，パイピング，内部浸食，三軸試験，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浸食を伴う浸透破壊の危険性が高まる。いずれの現象も河川水が堤内地に浸出してくる現象であるが、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、浸出する水が濁ってきた場合には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ている。

河川堤防の砂質堤体の法尻や基礎地盤においては、洪水時に即座に変状を引き起こすほどではないとしても、比較的大きな動水勾配が作用した場合、堤体土内の細粒分が徐々に流失することによって堤体材料の強度劣化が引き起こされ、堤体全体に変状が発生する事態も考えられる。

本研究では、浸透過程で発生する砂質堤体土からの細粒分流出に着目し、その流失が堤防土全体の力学特性に及ぼす影響について三軸試験を通して考察した結果を示す。具体的には、河川堤防砂を模擬した混合砂を用いて、細粒分含有率と供試体密度を各種調整した供試体を用いて三軸試験を実施し、浸透による細粒分流出による堤体土の強度変形特性の変化について検討を行った。

なお、堤体や基礎地盤から、細粒分を含む土砂の流失が発生している時点で、堤体内部での変状（構造変化）や、

透水係数の差が大きく異なる土層境界などで顕著な水みち形成（チャンネルリング）が生じている可能性も多分にあり、細粒分流失は堤体劣化の一要因であることをあらかじめ断っておく。

2. 試験方法

本論文の試験試料には、三河珪砂4号と6号、およびシルト分が卓越した野間精配砂を使用し、これらを3:1:3の割合で配合した。この割合で配合したものを基本ケースとする。図1に「流失なし」として基本ケースの粒度分布を示す。この粒度分布は、実際の堤防土（千歳川北島堤防）の粒度曲線とほぼ一致するように決定した。

一方、細粒分流出を模擬する供試体を作製する場合は、0.075mmのふるいを用いて、野間精配砂から所定の減少率の細粒分を取り除いてから混合した。そのため、細粒分を減少させたケースにおいては、野間精配砂の混合割合はその減少分だけ低下している。

本試験では、基本ケース（流失なし）での供試体間隙比を0.6、0.65、0.7の3種とした。間隙比0.6の場合には細粒分減少率を10%と20%、間隙比0.65の場合には細粒分減少率を5%と10%とした供試体を作製した。間隙比0.7の場合には、細粒分を減少させない基本ケースのみとした。細粒分を減少させることによって供試体の間隙比は増大し、ゆる詰めになる。そのため、それぞれの細粒分減少率

は、供試体作製時に三軸試験装置に設置可能な自立する供試体の作製の可否によって判断し、設定した。図1には、すべての細粒分減少率の粒度分布も示している。細粒分を減少させた割合に応じて、順に細粒分の割合が低下していくことがわかる。

供試体作製においては、乾燥状態の試料を所定の配合で十分に混合した後に、含水比10%で蒸留水を加水し、均一になるように十分に攪拌混合した。その混合試料をモールド内で所定の目標間隙比を満足する密度となるように

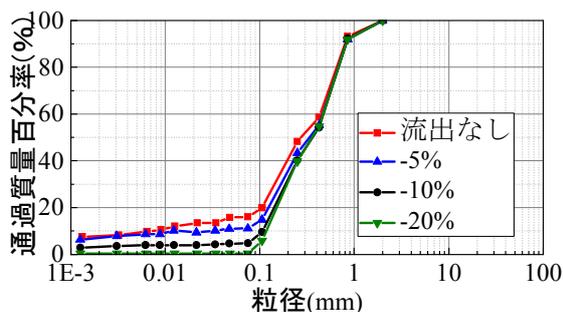


図1 珪砂4号, 6号, 野間精配砂を3:1:3で配合した各混合割合の粒度分布

表1 珪砂4号, 6号, 野間精配砂を3:1:3で配合した各試験条件と各供試体の間隙比

目標間隙比	試験条件	実際の間隙比	圧密後の間隙比
0.7	基本ケース 50kPa	0.658	0.659
	基本ケース 100kPa 1	0.667	0.656
	基本ケース 100kPa 2	0.652	0.645
	基本ケース 150kPa	0.655	0.638
0.65	基本ケース 50kPa	0.608	0.616
	基本ケース 100kPa	0.620	0.614
	基本ケース 150kPa	0.625	0.622
	-5% 50kPa	0.666	0.672
	-5% 100kPa	0.664	0.655
	-5% 150kPa	0.655	0.639
	-10% 50kPa	0.696	0.700
	-10% 100kPa	0.720	0.705
-10% 150kPa	0.715	0.701	
0.6	基本ケース 50kPa	0.572	0.575
	基本ケース 100kPa	0.565	0.555
	基本ケース 150kPa	0.564	0.557
	-10% 50kPa	0.658	0.665
	-10% 100kPa	0.668	0.660
	-10% 150kPa	0.661	0.646
	-20% 50kPa	0.767	0.770
	-20% 100kPa 1	0.779	0.756
	-20% 100kPa 2	0.757	0.748
	-20% 150kPa 1	0.777	0.791
	-20% 150kPa 2	0.739	0.728

5層に分けて締固め、高さ100mm、直径50mmの供試体とした。拘束圧は各供試体で50kPa, 100kPa, 150kPaとした。二重負圧法による飽和化後、背圧200kPaで圧密を1時間実施し、その後、荷重速度0.1%/minで軸ひずみが15%に達するまで非排水せん断条件でせん断を行った(CUB試験)。表1に三軸試験の供試体として設定した、試験試料の配合割合と間隙比を示す。実際の間隙比について着目すると、細粒分を減少させない基本ケースでは、想定した3種の目標間隙比(e=0.7, 0.65, 0.6)のいずれにおいても、値が小さくなっていることが分かる。これは、供試体作製時に試料を締固めによってモールド内に詰めたため、値が小さくなり想定していたよりも密になったと考えられる。また、表内の色つき部分の間隙比は、細粒分の減少により結果的に類似している条件となったため比較の対象とする。次に圧密後の間隙比について着目すると拘束圧50kPaの結果ではすべての条件で、間隙比の値が圧密前より大きくなっていることがわかる。これは、所定の拘束圧よりも供試体作製時の締固めによる圧力の履歴のほうが大きかったためと考える。一方、100kPa, 150kPaの結果では多くの条件で間隙比の値が圧密前よりも小さくなっていることが分かる。これは、供試体作製時の締固めによる圧力の履歴よりも、これらの拘束圧の方が大きかったため、供試体が密になったと考えられる。

以降、試験ケースを分類するための便宜上であるが、当初の目標間隙比を用いて試験結果を示す。

3. 試験結果

3.1 各間隙比での基本ケースの比較

図2, 3 および 4 にそれぞれ、目標間隙比 e=0.7, 0.65 および 0.6 の基本ケースでの試験結果を示す。

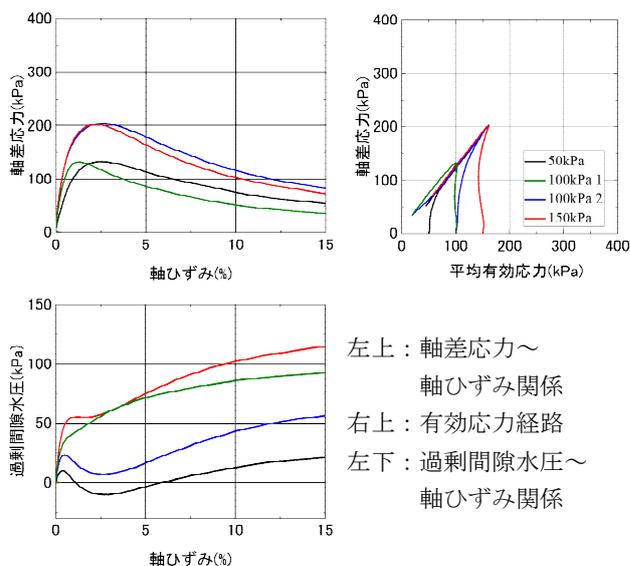


図2 e=0.7基本ケースの試験結果

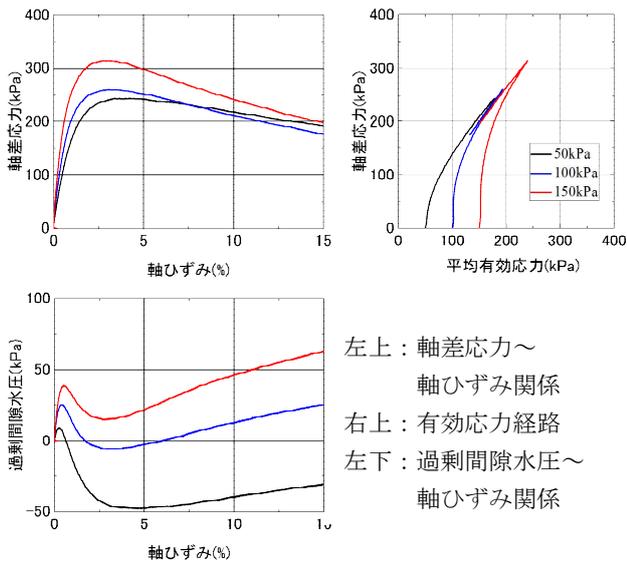


図3 e=0.65基本ケースの試験結果

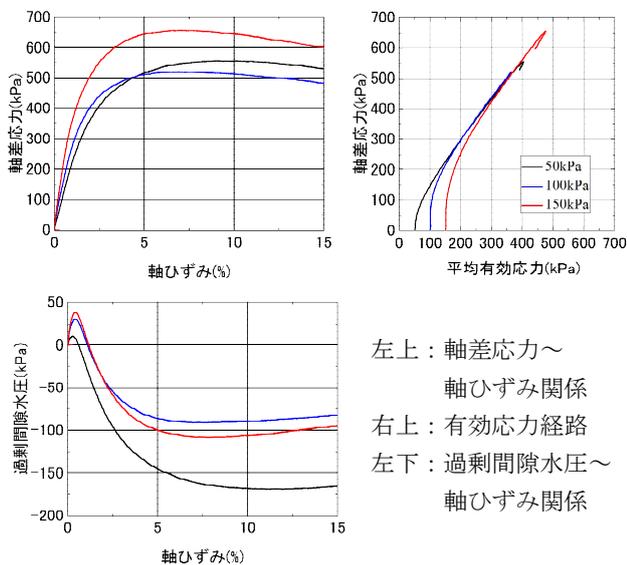


図4 e=0.6基本ケースの試験結果

図2~4の軸差応力~軸ひずみ関係に着目すると、間隙比が小さい密詰め供試体になるにつれ、最大軸差応力の値が大きくなっている。また、過剰間隙水圧~軸ひずみ関係に着目すると、密詰め供試体になるにつれ、負の過剰間隙水圧の発生が顕著になっている。図2の有効応力経路では、拘束圧100kPa₁の結果において、最大軸差応力までほぼ一定の平均有効応力を示す弾性的な挙動を示した後、一転して塑性圧縮を伴う軟化挙動を示した。また、他の3つの結果では最大軸差応力まで緩やかな硬化が見られ、その後軟化した。図3の有効応力経路では、いずれの拘束圧においても正のダイレイタンスの拘束に伴う硬化によって、最大軸差応力が大きく発生するものの、その後急激なひずみ軟化を呈した。図4の有効応力経路では、さらに正のダイレイタンスの拘束による塑性膨張を伴う硬化は顕著になる。

以上より、基本ケースにおいては、目標間隙比が小さくなるほど顕著な密詰め傾向が明確に示された。

3.2 e=0.65,0.6 それぞれの細粒分を減少させたケースの結果

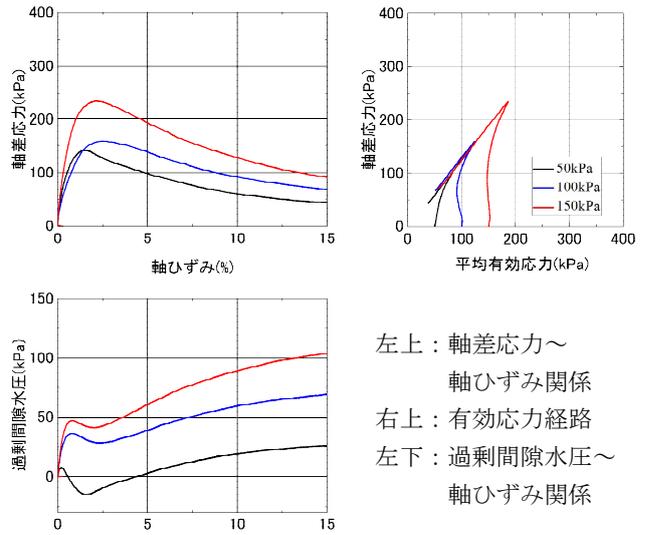


図5 e=0.65 -5%の試験結果

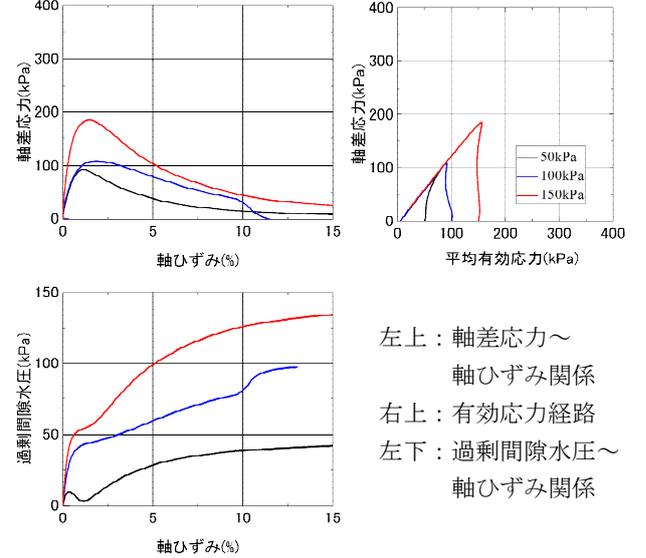


図6 e=0.65 -10%の試験結果

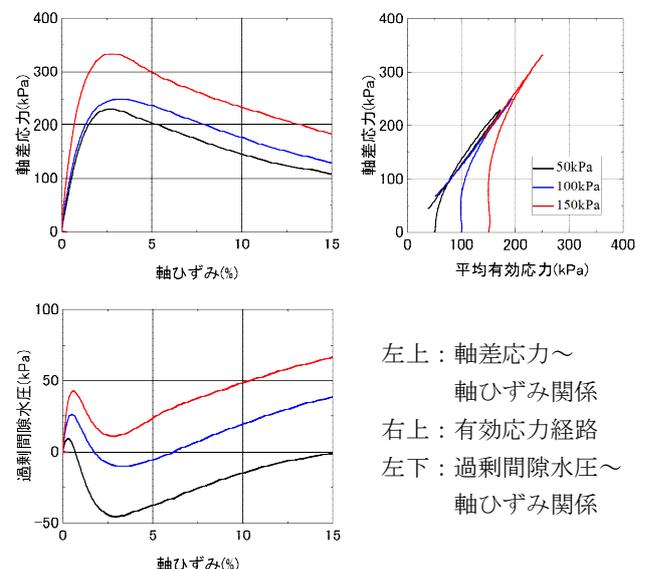


図7 e=0.6 -10%の試験結果

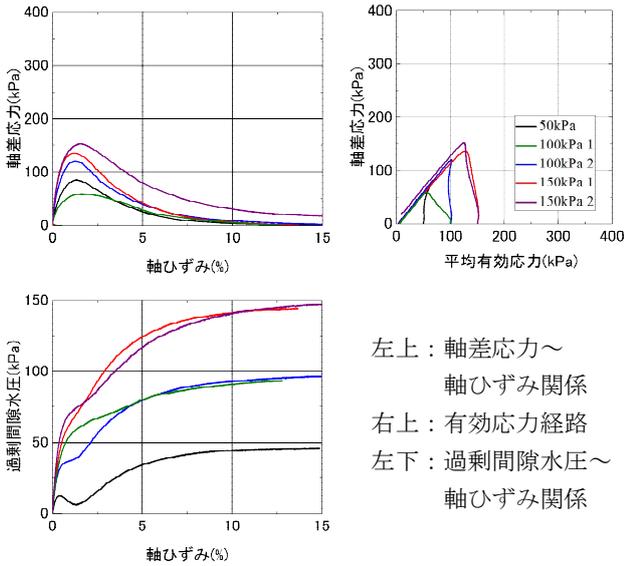


図8 $e=0.6$ -20%の試験結果

図5-8の軸差応力～軸ひずみ関係に着目すると、間隙比0.65, 0.6ともに細粒分の割合を減少させたケースほど軸差応力の値が低くなっていることがわかる。また、過剰間隙水圧～軸ひずみ関係に着目すると、細粒分の割合を減少させたケースほど、間隙水圧の上昇が著しいことがわかる。図5の有効応力経路では、最大軸差応力まで緩やかな硬化が見られ、その後軟化している。図6では、図2の拘束圧100kPa_1の結果のように、弾性的な挙動を示した後、一転して塑性圧縮を伴う軟化挙動を示している。図7では、一旦硬化した後に急激なひずみ軟化を呈している。一方、図8では、間隙水圧の上昇が大きく、有効応力経路においてもほぼ全体的に原点に向かっていて静的液状化に近い状態となっている。

3.3 同じ拘束圧ごとの基本ケースと細粒分減少の比較

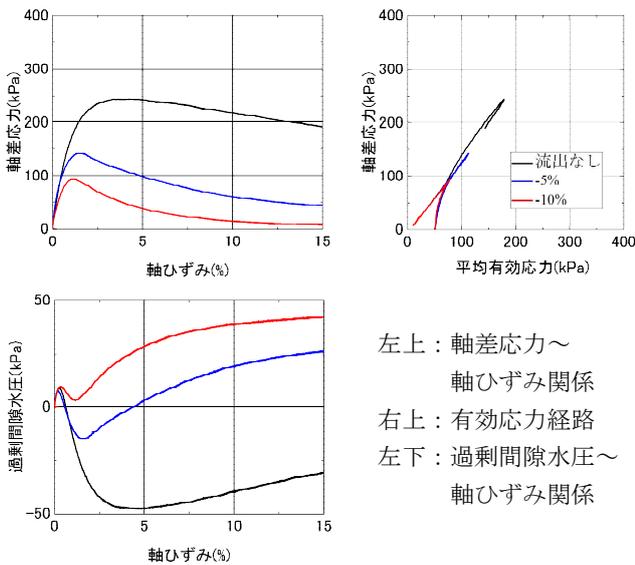


図9 $e=0.65$ 50kPaの試験結果の比較

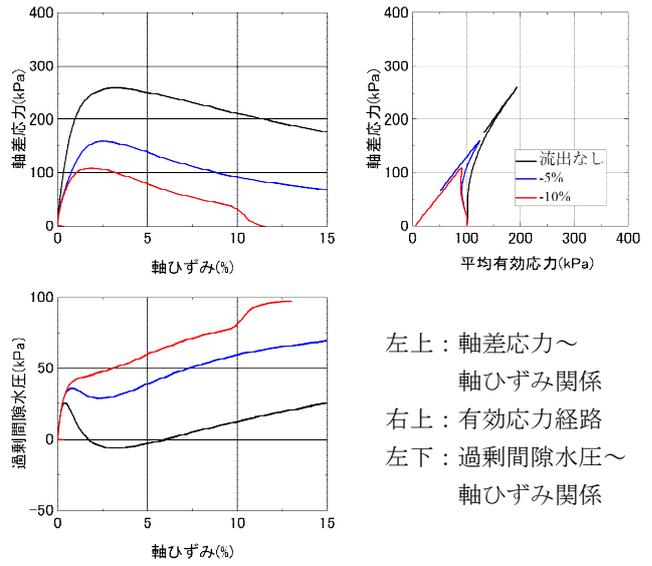


図10 $e=0.65$ 100kPaの試験結果の比較

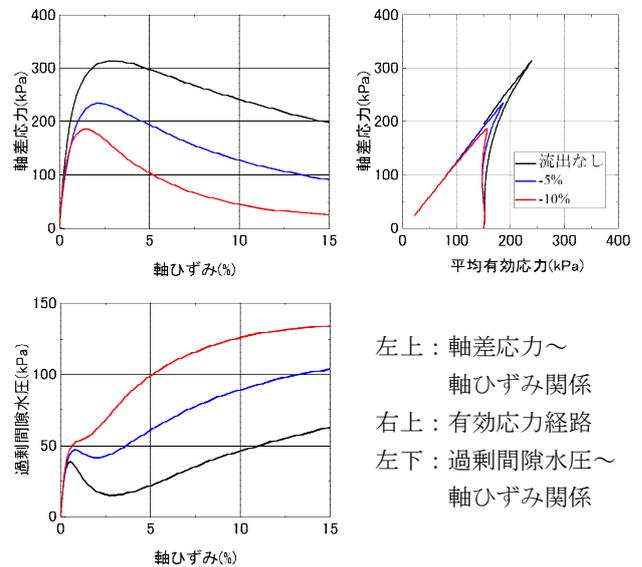


図11 $e=0.65$ 150kPaの試験結果の比較

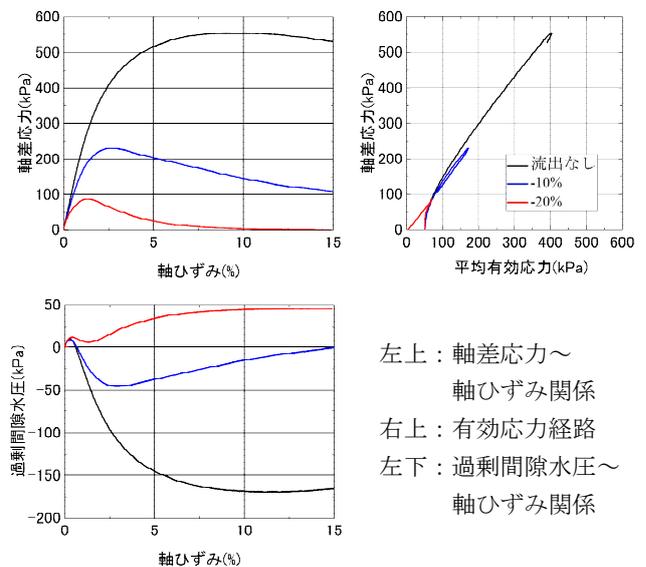


図12 $e=0.6$ 50kPaの試験結果の比較

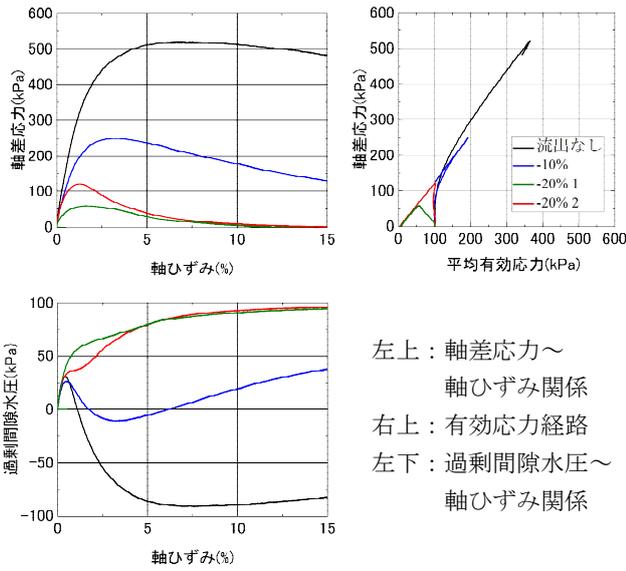


図13 $e=0.6$ 100kPa の試験結果の比較

左上：軸差応力～
軸ひずみ関係
右上：有効応力経路
左下：過剰間隙水圧～
軸ひずみ関係

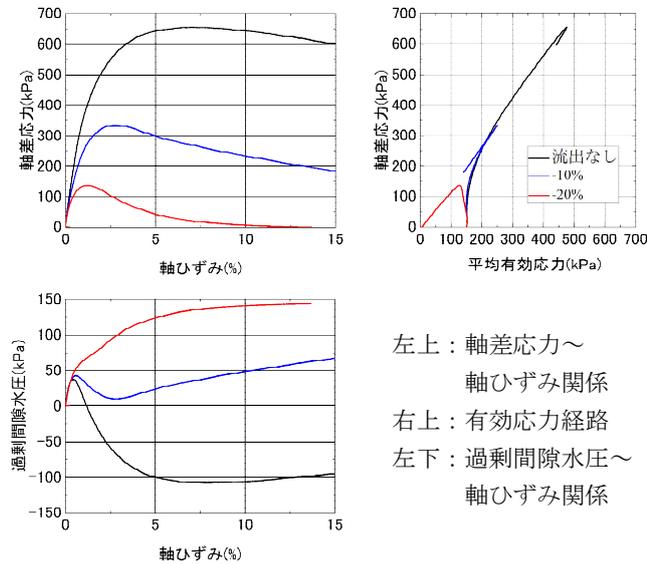


図14 $e=0.6$ 150kPa の試験結果の比較

左上：軸差応力～
軸ひずみ関係
右上：有効応力経路
左下：過剰間隙水圧～
軸ひずみ関係

これらの結果ではどの条件においても、細粒分の減少の割合が多いほど軸差応力の値が小さくなっており、有効応力に関しても、細粒分の減少に応じて低下している。また、それに伴い順に間隙水圧の上昇が比較的初期の状態から見られている。図 10 の有効応力経路では、どの結果においても最終的に軟化しているが、基本ケースである細粒分流出なし、-5%、-10%の順で徐々に原点に向かって行き減少の割合が一番多い-10%では静的液状化に至っている。図 13、14 では、共に基本ケースの結果として正のダイレイタンシーが発揮され、塑性膨張を伴う硬化を示している。-10%の結果では、緩やかに硬化した後に軟化している。また、図 13 の-20%_2の結果では初期に弾性的な挙動を示していて、その後-20%の他の2つの結果と同様、塑性圧縮を伴う軟化挙動を示している。これらの結果は、細粒分の流出におけるせん断強度の低下を認識できる挙動を表していて、ケースの差がよく出ている。

3.4 類似している間隙比の同じ拘束圧での比較

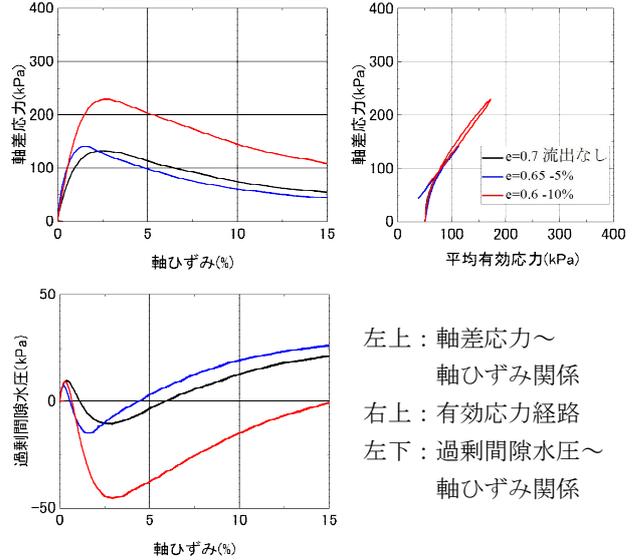


図15 類似間隙比 50kPa の試験結果の比較

左上：軸差応力～
軸ひずみ関係
右上：有効応力経路
左下：過剰間隙水圧～
軸ひずみ関係

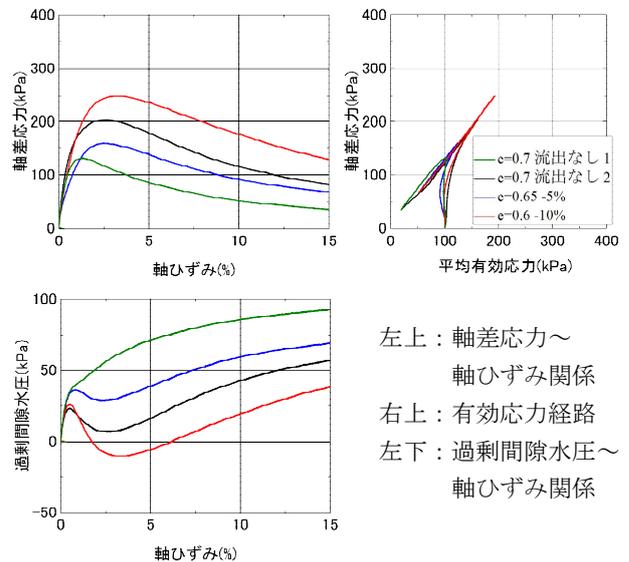


図16 類似間隙比 100kPa の試験結果の比較

左上：軸差応力～
軸ひずみ関係
右上：有効応力経路
左下：過剰間隙水圧～
軸ひずみ関係

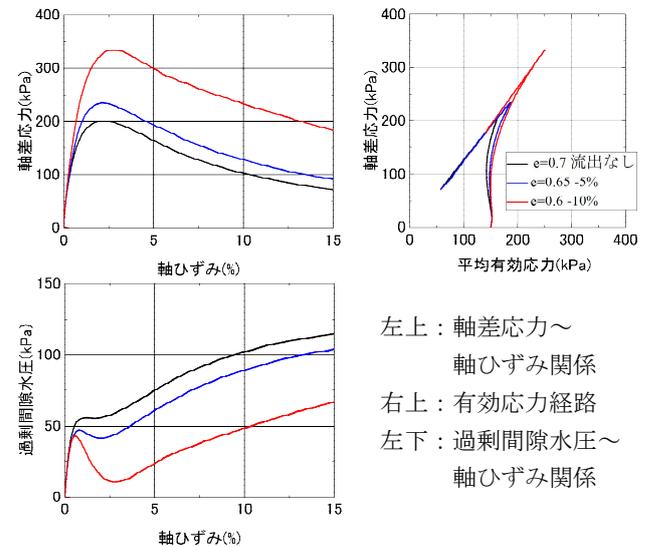


図17 類似間隙比 150kPa の試験結果の比較

左上：軸差応力～
軸ひずみ関係
右上：有効応力経路
左下：過剰間隙水圧～
軸ひずみ関係

表 1 では、今回使用した供試体の間隙比について示したが、この中から基本ケースである目標間隙比 0.7 と 0.65 の -5%、目標間隙比 0.6 の -10%において実際の間隙比及び圧密後の間隙比が類似していることから比較を行った。図 15～17 に試験結果を示す。

図より、総じて、基本ケースで最もゆる詰め供試体である間隙比 0.7 の結果より、もともとの供試体が密であるが細粒分を減少させたケースの方が、最大軸差応力が大きいことがわかる。図 15 の有効応力経路に着目すると、基本ケースの間隙比 0.7 と 0.65 の -5%は比較的近い挙動をしており、徐々に硬化していき最大軸差応力まで到達した後軟化している。一方、0.6 の -10%は、他の 2 ケースと比べて硬化の程度が大きい。図 16 の有効応力経路に着目すると、基本ケースの間隙比 0.7 の 2 つの同じ条件での試験結果に差が見られる。 $e=0.7_2$ がやや密詰めであるが、表 1 の実際の間隙比を見ても、図 16 の他のケースよりも若干間隙比が小さく密詰めである。そのため、そのケースを除外すれば、元の目標間隙比が大きいほど、ゆる詰め挙動を示している。その傾向は、図 17 の有効応力経路においても同様に現れている。以上の結果より、見かけの間隙比は類似している供試体でも、せん断時の挙動として違いはある。これは図 1 に示したようにそれぞれの目標間隙比の試験試料の粒度が異なることから予見できることである。相対密度での比較も今後試みる予定である。

4. おわりに

今回の試験では、0.075mm 以下の粒径の細粒分を所定の割合で一律にカットした供試体を用いて、細粒分の流失（低下）を表現することを試みた。また、ケースごとに 50, 100, 150kPa と 3 つの拘束圧において、非排水せん断条件でせん断を行った（CUB 試験）。

各間隙比の基本ケースでの比較では、間隙比の大きいゆる詰め供試体になるにつれ軸差応力が小さくなり、間隙水圧の上昇が見られる。また、有効応力に関しても軟化傾向にあるため、せん断抵抗の低下が示されている。目標間隙比 0.65, 0.6 それぞれの細粒分を減少させたケースの結果では、細粒分を減少させた割合が大きい供試体ほど、軸差応力が小さくなりせん断時の間隙水圧の上昇が著しく見られる。また、間隙比 0.6 の -20%の条件は今回の試験では、最も細粒分をカットした条件であるが、その有効応力経路に着目するとせん断抵抗はほとんど見られず、せん断後半にはほぼ静的液状化と見なせる共同を示した。同じ拘束圧ごとの基本ケースと細粒分減少の比較では、これまでのまとめと同様に、間隙比が大きく、細粒分減少の割合が多いほどせん断抵抗が小さいという傾向にある。図 13, 14 では、ケースの差がよく出ていると先に述べた。これらの結果は間隙比 0.65 の結果の比較と比べ塑性膨張を伴う硬化から、静的液状化へと至るほど細粒分カットによる挙動の違い

が著しいことがわかる。今後はより細かく段階的に細粒分をカットした結果を比較し、段階的な挙動の変化についても検討していくつもりである。また、今回の試験では、シルト分から最大 -20%の細粒分減少にもかかわらず、流出なしとした基本ケースの挙動と大きく異なる動きを示した。また、類似している間隙比の同じ拘束圧での比較では、間隙比が類似している条件でも若干異なる力学挙動を示すことも示された。間隙比が類似していても、一般に粒度が異なる試験試料では、力学挙動に差が生じることもあるが、河川堤防における細粒分流失で想定される範囲内において、どの程度の粒度の変化で力学挙動に差が生じるのかも含めて、相対密度を指標にしつつ検討を進める予定である。

浸透による細粒分の流失は、限界流速の考え方からも細かいほど流失しやすいことが想定される。今後は、粒径に応じた流失粒子の割合を変える検討も必要である。また、今回は 50, 100, 150kPa と堤体土としては大きな拘束圧で、比較を試みたがより小さな拘束圧での試験も必要かもしれない。

本論文の試験によって、細粒分の流失によって力学挙動が大きく変わることが示されたが、今後は弾塑性構成モデルによって、細粒分流失の効果についても数値解析を用いて詳細に検討してゆく予定である。

なお、「はじめに」でも書いたように、堤体や基礎地盤からの細粒分流失は、堤防劣化の一要因にすぎない。堤体や基礎地盤から、細粒分を含む土砂の流失が発生している時点で、堤体内部での変状（構造変化）や、透水係数の差が大きく異なる土層境界などで顕著な水みち形成（チャンネルリング）が生じている可能性も多分に考えられるし、実際に想定せねばならない。要するに、細粒分の流失が堤防劣化を引き起こすのか、堤防劣化現象の一側面として細粒分の流失が見られるのか、あるいは相互に影響しながら進行的に劣化・破壊が進行していくのか、まだまだ不明確な点が多い。本論文の実験は、あくまで細粒分流失を起点として、堤防劣化が進展するシナリオを描いて実施したものである。流失分以外の土粒子が、流失前の構造を保ち続けるという仮定であるが、浸透場においてその仮定が成り立つのか、成り立つとしたらどのような粒度構成の場合に成り立つのか、などについても、実際に浸透試験を実施して検証を進めねばならない。

謝 辞

本論文は、国土交通省国土技術政策総合研究所からの委託研究「パイピングに伴う堤防劣化を考慮した河川堤防評価技術の開発（研究代表者：小高猛司）」（平成 27～29 年度）の一環として実施した研究成果に基づくものである。記して謝意を表す。