

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820197

研究課題名(和文)越流時の堤体飽和度及び粘性土が侵食限界に及ぼす影響を考慮した越流侵食モデルの開発

研究課題名(英文)Development of embankment erosion model considering effect of cohesive soil on critical non-dimensional shear stress

研究代表者

八木澤 順治(YAGISAWA, Junji)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70549998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：洪水時の堤防越流による破堤現象を解明するために水理模型実験を実施した。実験では、粘性土の特性として細砂含有率と洪水時に変化する堤防中の含水比を変化させた実験を系統的に実施した。その結果、粘性土の移動限界の変化には、細砂含有率よりも含水比の変化が大きく影響することがわかった。その結果を受けて、含水比の鉛直分布を変化させた実験を追加で実施した。その結果、流水によるせん断力を受ける表層の含水比が同様でも、鉛直勾配が急なケースの方が無次元限界掃流力が小さくなることがわかった。これらの結果は堤防の構成材料の違いとそれに伴う浸透の仕方によって、堤防の侵食過程が大きく変化することを示唆している。

研究成果の概要(英文)：For preventing the embankment breaching, to elucidate erosion mechanism of the embankment is quite important. In previous research, erosion characteristics of cohesive soil has been investigated by changing water content. However, water content of embankment in vertical direction should be changed at the flood event. Therefore, the objective of this study is to elucidate the effect of vertical distribution of water content of cohesive soil on non-dimensional critical shear stress by conducting flume experiment.

In the experiment, well-mixed fine sand and O.A. Clay were used as cohesive soils. Initial water content of cohesive soil was set around 30%. Four water content sensors set at 1cm (L1), 2cm (L2), 4cm (L3) and 8cm (L4) from the initial surface respectively. As a result of experiment, water content was increased only L1 layer. Non-dimensional critical shear stress of cohesive soils decreased with increasing the water content gradient between L1 and L2 layer.

研究分野：水工水理学

キーワード：粘性土 移動限界 含水比 細砂含有率

### 1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では破堤を伴う洪水氾濫被害が多発している。我が国における堤防の破堤原因としては越流によるものが約7-8割を占めており、越流時における堤体の侵食機構を把握することは対策を考える上で非常に重要である。そのため、越流水及び堤体侵食現象を高精度に追跡できる計算モデルの構築が求められている。河川工学分野では越流時における堤防侵食プロセスの解明に関して、多くの実験的検討が実施されているのに対して、数値解析に関する研究事例はそれほど多くない。その原因として、堤防の越流破壊現象が極めて急勾配の移動床水理であることに加え、浸透、侵食、局所的なすべり破壊などが複雑に絡んだ現象であるためモデル化を困難にしていることが挙げられる。特に、越流による堤防材料の侵食量の評価は破堤現象に大きく影響するため、従来の侵食量評価手法において以下の2点を改良すべきと考えている。(1)堤防の越流侵食は通常、裏法面における不飽和土の侵食であるため、河道内の飽和した河床面の侵食プロセスとは異なる挙動を示す。不飽和土はサクシヨンの影響により飽和した河床面と比較してせん断強度が大きく、また、そのせん断強度は飽和度とともに変化することから堤体材料の移動限界に大きく影響する。そのため、不飽和土では浸透と侵食を一体として捉え、サクシヨンによるせん断強度の増加が堤体材料の移動限界に与える影響を考慮する必要がある。(2)一方、もうひとつの大きな課題として、粘着性を有する土の侵食限界の評価が挙げられる。1960年代より国内外において粘性土の侵食限界の評価が盛んに検討されているものの、粘着力の力学的解釈が未だ不透明であるため普遍的な侵食限界が明らかとなっていない。そのため、従来の越流侵食モデルでは、非粘着性材料で得られた移動限界式が適用されており、粘性土で構成された堤防モデルあるいは実物の堤防の侵食形状を精度良く再現することが難しいことが指摘されている。このことから、堤体材料としての粘性土の地盤力学的特性(含水比、締固度、粘土含有率)と粘性土の移動限界とを関連付ける必要がある。

上記の背景を踏まえ、本研究では越流浸食に関連した各現象(越流流れ、浸透流、土砂移動、すべり破壊)を相互作用系として捉え、連動して解析できる堤防侵食モデルの開発が必要であるという着想に至った。新しい堤防侵食モデルの開発にあたり、主に上述した問題点、(1)不飽和堤体表層におけるせん断強度の飽和度による変化が堤防材料の移動限界に及ぼす影響、(2)粘着性材料の侵食限界を、実験的に明らかにする。得られた実験結果をもとに浸透による飽和度の変化および粘着性材料の侵食限界の影響を組み込んだ堤防の越流侵食モデルの構築を図る。

### 2. 研究の目的

越流による破堤を伴う洪水氾濫は人命にも関わる大きな被害を伴う、堤防の破堤危険度を把握するため、越流水および堤体侵食過程を高精度で評価できる計算モデルの構築が期待されている。そこで、本研究では従来十分考慮されてこなかった、(1)堤体材料の飽和度がせん断強度に与える影響、(2)粘性土で構成される堤体材料の侵食特性に支配的な要因(含水比、締固度などの地盤力学的パラメータ)、を水理実験より導出する。さらに、上記2項目で得られた知見を、従来の地形変化予測モデルに組み込んだ新しい堤防侵食モデルを開発することで、越流に対して脆弱性の高い堤防を事前に把握することを可能にするとともに、越流侵食対策手法に資することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1)堤防材料を想定した粘性土の限界掃流力評価

粘性土の移動限界については、1960年代より様々な力学的・化学的パラメータを導入して研究されているものの、一般的な知見が得られていないのが現状である。しかし一方では、粘土が砂と結合することである程度の大きさをもつ土塊として離脱すること、その粒径が含水比・締固度と関連していることが報告されている。さらに、離脱した土塊の大きさとその時の水理量から算出されるシルズ数とを比較すると、砂のみで得られる限界値よりはるかに大きくなり、また、含水比に応じて限界値の大小関係が区分できる可能性があるとして報告されている。ただし、実験ケースが少なく限定的という問題点があったため、それらを改良すべく粘性土の移動限界を明らかにするために水理実験を実施する。具体的には、長さ2.8m、幅20cmの開水路の上流先端から90cmから140cmの区間に粘性土を設置して実験を行った。流量は $4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ で固定し、1時間通水した。実験により水面計、流速を計測するとともに、ポイントゲージにより侵食された粘性土の侵食深を測定し、流出した体積を算出した。また、実験中における正味の掃流砂量を把握するため、水路下端にネット(網目:0.108mm)を設置することにより、掃流砂のみを採取し、流出した体積を測定することで無次元限界掃流力の算出に用いた。粘性土の移動限界を評価する指標としての無次元限界掃流力を用いた。無次元限界掃流力は芦田・道上の式より流砂量式を用いて算出した。実際の堤体材料の土質情報を参考に粘性土の粒径と実験ケースを決定し、実験ケースとしては細砂含有率と含水比を変化させた11ケースで実験を行った。また、実験に使用した粘性土としては、50%粒径が0.281mmの珪砂7号と0.083mmのDLクレーを実験条件に応じた混合比で作成した。

(2)粘性土を用いた異なる飽和度条件下における堤体侵食量の評価

長さ 2.8m, 幅 20cm の開水路の上流先端から 90cm から 140cm の区間に粘性土(50%粒径が 0.281mm の珪砂 7 号と 0.083mm の OH カオリンを実験条件に応じた混合比で作成)を設置して実験を行った(図-1)．流量は  $4.5 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$  で固定し, 1 時間通水した．実験により水面形, 流速を計測するとともに, ポイントゲージにより侵食された粘性土の侵食深を測定し, 流出した体積を算出した．実験中における正味の掃流砂量を把握するため, 水路下端にネット(網目:0.108mm)を設置することにより, 掃流砂のみを採取し, 流出した体積を測定することで無次元限界掃流力の算出に用いた．また, 実験時間中の含水比の時間変化は含水比計(HS10: Decagon 社)を用いた．図-1 に示すように, 上記の粘性土設置区間の中央に, 表層から 1cm, 2cm, 4cm, 8cm の深さに計 4 つ取り付けて 1 秒間隔で計測した．なお, 今回は細砂含有率 20%と初期含水比約 30%とした試料を用いた．

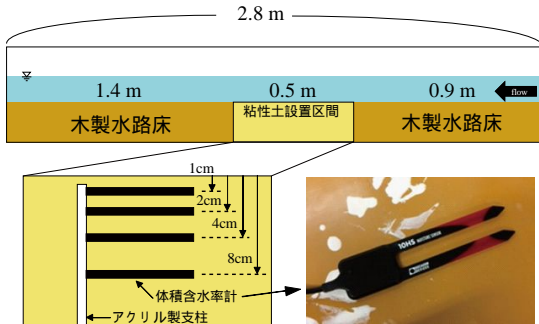


図-1 実験水路および体積含水率計の設置状況

(3)上記を反映した解析モデルの開発

(1),(2)で得られた粘性土の移動限界に関する知見を合わせて, 開発した堤防越流侵食モデルの土砂移動パートに組み込み, モデルを粘性土にも適用可能なよう発展させる．改良されたモデルは, (1),(2)で実施される実験で得られたデータをもとに検証を実施する．検証後は, 堤防の材料(粘土含有率, 粒度分布), 堤防表層の状態(飽和度, 締固度), 越流条件(越流規模・継続時間), に着目した解析を実施する．で想定する種々の越流条件下における堤防侵食量を比較検討し, 堤防の破堤リスク軽減効果の定量評価を行なう．

#### 4. 研究成果

(1) 粘性土の移動限界に関して

含水比が及ぼす移動限界への影響

図-2 に含水比による無次元限界掃流力の変化を示す．細砂含有率を 20%で固定し, 含水比を 30, 40, 60, 80, 90%と変化させたケースを示している．その結果, 無次元限界掃流力は 0.15-0.42 となり, 非粘着性材料のそれに

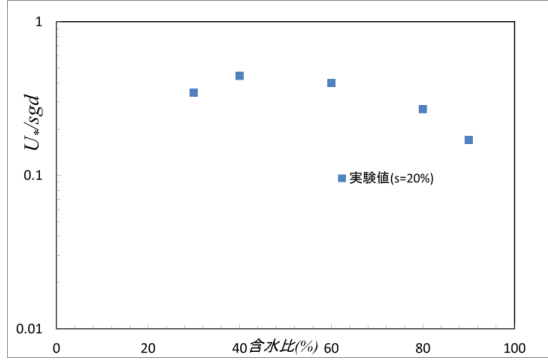


図-2 含水比による無次元限界掃流力の変化

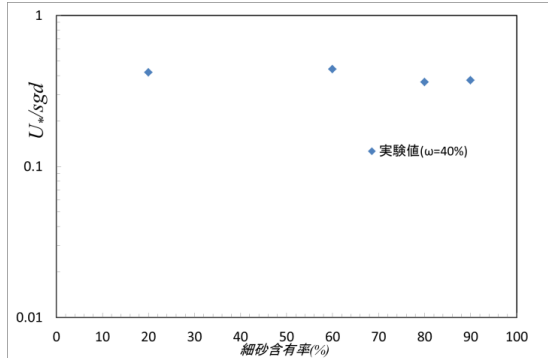


図-3 細砂含有率による無次元限界掃流力の変

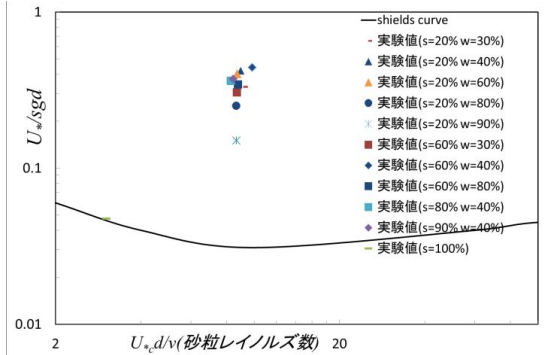


図-4 全ケースでの無次元限界掃流力の変化

比べると 3 倍から 8 倍大きくなった．その中で, 無次元限界掃流力が最も大きく, 最も移動しにくい状態である含水比 40%から含水比が高くなるにつれて無次元限界掃流力も小さくなり, 含水比 90%では 40%の約 1/3 程度まで低下した．既往研究でも, 吸着水量を超える水分は粒子間の距離を増加し, その結合を弱めると指摘されており, 同様の傾向が確認できた．ただし, 含水比が低くなればなるほど無次元限界掃流力が大きくなるわけではなく, 含水比 30%では含水比 40%より無次元限界掃流力は小さくなった．粘土粒子の粒子間に電気化学的な力によって粘着力が発現するためには, 粒子表面にある程度の水が吸着されることが必要であることも指摘されており, これと同様の傾向も確認できた．

細砂含有率が及ぼす移動限界への影響

細砂含有率による無次元限界掃流力の変化を図-3 に示す．含水比が 40%で細砂含有率が 20, 60, 80, 90%のものを比較した．細砂含有

率 20% , 60% の無次元限界掃流力がそれぞれ, 0.42, 0.44 で、細砂含有率 80%, 90% は若干低下し、それぞれ 0.36, 0.37 となった。80% 以上となると 80% 以下のケースより 0.06 程度小さくなるが含水比の変化と比べると無次元限界掃流力の変化量は小さかった。

#### 全実験ケースでの比較

全実験ケースでの無次元限界掃流力の比較を図-4 に示す。この図には、非粘着性材料で得られた shields curve も合わせて示している。全ケースを通じて含水比が高いケースで無次元限界掃流力が小さく、含水比が低いケースで無次元限界掃流力が大きくなる傾向がある。また少量でも水と粘土が混入すると、無次元限界掃流力は砂のみの値と比較して大きくなった。全ケースの中で最も無次元限界掃流力が大きいのは細砂含有率 60% , 含水比 40% のケースで最も小さいケースが細砂含有率 20% で含水比 90% のケースとなった。

#### (2) 粘性土中の含水比の鉛直分布が移動限界に及ぼす影響

##### 各高さの含水比の時間変化

図-5 に実験中に計測した各高さの含水比の時間変化を示す。通水開始時にはどの高さに設置された体積含水率計も概ね 30% 程度の値を示している。通水開始から 65 分経過後には、表層から 1cm (以後 L1) の含水比が概ね 80% を超えた。この時、含水比計の一部が粘性土層から露出したため実験を終了した。一方、L1 よりも下方に設置した含水比は実験期間中大きく変化しなかった。実験終了までの間で、L1 の含水比が 40% まで上昇した期間を S1、60% まで上昇した期間を S2、80% まで上昇した期間を S3 とし、それぞれのステージで無次元限界掃流力を算出した結果を次節で議論する。

#### 含水比の鉛直分布が無次元限界掃流力に与える影響

図-6 に S1 から S3 の各ステージにおける含水比(時間平均値)の鉛直分布を示す。L1 のみ大きく変化しており、時間経過とともに、L1-L2 間の含水比の鉛直勾配は大きくなっていることがわかる。含水比の鉛直分布が粘性土の無次元限界掃流力に与える影響を確認するため、含水比が鉛直方向に変化していない既往実験結果と、今回の実験結果を比較した図を図-7 に示す。含水比が鉛直方向にほとんど変化していない S1 の無次元限界掃流力は、過去の実験結果と同等の無次元限界掃流力となっている。一方、含水比の鉛直勾配が大きい S2 や S3 の無次元限界掃流力は、含水比が鉛直方向に変化していない既往実験結果と比較して、大きく減少している。このことは、含水比の鉛直分布形状によって表層の移動限界が変化することを示唆している。

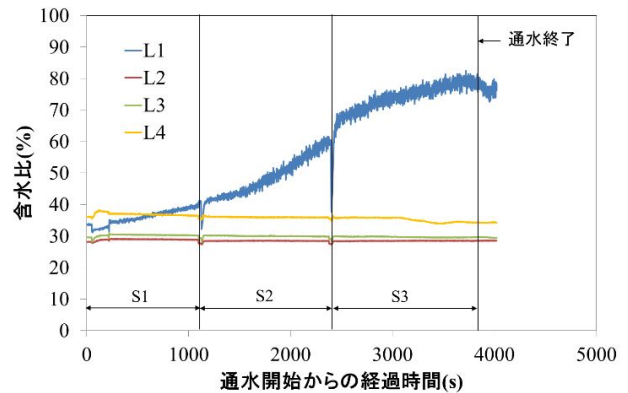


図-5 各層の含水比の時間変化

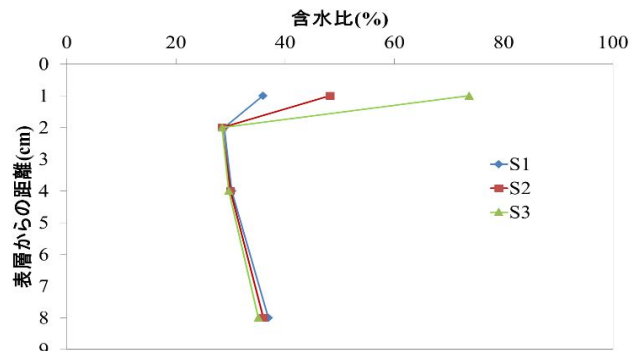


図-6 S1-S3 時の含水比の鉛直分布

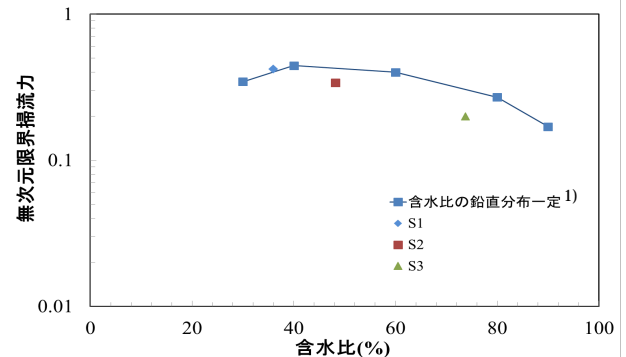


図-7 含水比の鉛直分布による無次元限界掃流力の相違

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

八木澤順治：含水比の鉛直分布が粘性土の移動限界に及ぼす影響，土木学会関東支部技術研究発表会，東京都市大学（東京都世田谷区），2016 年 3 月 14-3 月 15 日(3 月 15 日発表)

八木澤順治：含水比及び細砂含有率が粘性土の移動限界に与える影響，土木学会平成 27 年度年次学術講演会，岡山大学(岡山県岡山市)，2015 年 9 月 16 日-9 月 18 日(9 月 17 日発表)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者：八木澤 順治 (YAGISAWA, Junji)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70549998