

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：82115

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14841

研究課題名（和文）堤防下の浸透流の新しい考え方に基づいた基盤内のパイピング進行解析モデルの開発

研究課題名（英文）Development of analysis model for backward erosion piping in foundation under levee based on new concept of seepage flow

研究代表者

田端 幸輔（Kosuke, Tabata）

国土技術政策総合研究所・河川研究部・主任研究官

研究者番号：90756678

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：堤防下基盤層のパイピング進行を表現できる数値解析モデルの構築を行った。モデルについては、固液二相流、混相流の2パターンでの構築を試みた。二相流モデルについては安定した解析を実施することが困難であったが、混相流モデルについては、空隙拡大に伴う透水係数の変化等、現象再現上重要と考えられる要素を取り込むことで、互層構造や粒度分布の違いによる噴砂領域の拡大過程を概ね表現できることを確認した。ただし、完全な空隙領域を有するパイピングの形成については再現できなかった。これは、粒子の過剰な抜け出しに伴う骨格の破壊機構や、層流～乱流へと遷移する際の抵抗則を十分モデル化できていないことが要因であると推察される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

洪水外力の巨大化が著しい昨今において、最も重要な治水施設である堤防の破壊危険性を科学的に推定し、堤防強化対策に生かすことのできる技術の確立が強く求められる。基盤漏水に伴う堤防パイピング破壊は、見えないところで徐々に進行する破壊現象であり、危険箇所の推定が困難である。本研究では、パイピング発達機構の理解、堤防破壊の危険性を高める要因推定、有効な対策の検討とその効果検証等に繋げるための1つのアプローチが提示されており社会的意義があると考えられる。また、単純な混相流モデルに、現象再現上重要と考えられる要素を取り込むことでパイピング進行を概ね表現できており、学術的知見も得られている。

研究成果の概要（英文）：A numerical analysis model was constructed that can represent the progression of piping in the basement layer beneath the embankment. Two models were attempted: solid-liquid two-phase flow and multiphase flow. It was difficult to perform stable analysis with the two-phase flow model, but it was confirmed that the multiphase flow model can generally represent the expansion process of the sand boiling area due to differences in interlayer structure and particle size distribution by incorporating elements that are considered important for reproducing the phenomenon, such as changes in permeability coefficient due to increased porosity. However, it was not possible to reproduce the formation of piping with a completely void area. This is presumably due to the inability to fully model the mechanism of skeleton destruction caused by excessive escape of particles, and the resistance law when transitioning from laminar to turbulent flow.

研究分野：河川工学

キーワード：堤防 基盤浸透 パイピング破壊 浸透流 粒度分布 空隙率

1. 研究開始当初の背景

洪水外力の巨大化が著しい昨今において、最も重要な治水施設である堤防の破壊危険性を科学的に推定し、堤防強化対策に生かすことのできる技術の確立が強く求められる。

基盤漏水に伴う堤防パイピング破壊は、見えないところで徐々に進行する破壊現象であり、危険箇所の推定が困難であることは言うまでもないが、どの程度パイピングが発達すると致命的となるのか、パイピング規模に最も影響を及ぼす要因は何なのかといった基本的なことも十分明らかにされていない。パイピングは土の変形・破壊問題の一つとして主に地盤工学分野が中心となって研究されてきたが、水と土砂が混ざり合ったダイナミックな運動として水工学の視点から力学的に捉え、新しい考え方を打ち出していくことも重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、浸透流と砂粒子の運動に伴うパイピング発達機構、堤防破壊の危険性を高める要因分析、有効なパイピング対策等の検討に活用することを目指し、流れと土砂の運動を考慮したパイピング進行解析モデルを開発することを目的としている。

3. 研究の方法

堤防下基盤層のパイピング進行を表現できる数値解析モデルの構築を行った。モデルについては、固液二相流、混相流の2パターンでの構築を試みた。

(1) 固液二相流モデル

まず、液相（浸透流）と固相（砂粒子群）それぞれの運動を力学的に表現できる二流体モデルの構築を試みた。相互作用力は、平衡状態に Darcy 則に帰着するように設定した。固相の応力項には μ -I レオロジー [1] の考え方を導入した。ただし、後述するように安定した解析を実施することが困難であったため、当初想定と変更し、混相流モデルについても検討した。

(2) 混相流モデル

混相流モデルでは、現象を支配すると考えられる以下の点を考慮するものとし、噴砂発生～パイピング進行を表現できる数値解析モデルの開発を目指した。

基盤透水層内の浸透流のモデル化

多孔質体内の粒子が浸透流によって輸送される機構のモデル化

については、流れの非平衡性、粒度分布、空隙率の違いが透水性に及ぼす影響を考慮できるように、多孔質体の液相領域で体積平均した三次元の連続式、運動方程式を用いた。空隙率に依じた透水係数変化については室田、佐藤の方法 [2] を基に算定した。

については、多孔質体の骨格を構成する粒子の存在割合と空隙中を移動する粒子の存在割合の時空間変化を解くものとした。これにより、土砂の抜け出しに伴う空隙率の増大を表現できるようにした。この際、移動粒子の粒径よりも大きい空隙径の存在割合から透過率を定義し、空隙よりも相対的に大きな粒子の輸送を制限するフィルタリング効果を考慮した。

また、粒子の動き出しについては、浸透流速が Richardson & Zaki [3] による干渉沈降流速を越えた場合に生じるものとした。本来この式は、鉛直方向の粒子の移動限界について表現したものであるが、杉井ら [4] によると、Richardson & Zaki の干渉沈降流速により水平方向の移動限界についても概ね説明可能であることを模型実験により確認しており、本検討においてもこの知見を活用した。

4. 研究成果

(1) 固液二相流モデル

固相のみを対象として斜面崩落を試算した結果、安息角に概ね一致する斜面が形成されることまでは確認した。しかし、液相と固相を混在させて堤体基盤透水層の計算を試みたところ、圧力上昇時の固相の静止から動き出しまでのプロセスすら安定的に計算することが困難であった。固相の直応力を空隙率の関数として単純化したこと等も理由と考えられるが、摩擦係数等のパラメータの吟味やアルゴリズム自体にも課題があり、実用的なモデルにするには更なる調査検討が必要と考えられ、今後の課題である。

(2) 混相流モデル

構築した混相流モデルを、小高らの室内模型実験 [5] と (図-1)、建設省土研の大型模型実験 [6] に適用した。その結果、圧力上昇に伴い土砂輸送が生じ始めると、粒度分布と空隙の場所的な変化によって流れと圧力分布が急激に変化し伝搬していく様子が確認できた (図-2)。

また、互層構造や粒度分布の違いによる噴砂領域の拡大過程を概ね表現できることを確認した (図-3,4)。ただし、完全な空隙領域を有するパイピングの形成については再現できなかった。これは、粒子の過剰な抜け出しに伴う骨格の破壊機構や、層流～乱流へと遷移する際の抵抗則を十分モデル化できていないことが要因であると推察される。

混相流モデルにより、パイピング発達を解析できる可能性を確認できたが、実務への応用等に向けては課題が多く残される。例えば、空隙率と粒度分布に加えて、粒子同士の接触点数を推定する手法を提示することができれば、空隙率の上昇に伴う有効応力の低下プロセスを表現できる可能性があると考えられる。また、X線CTスキャン等により、空隙構造を可視化・数値化し、フィルタリング効果のモデル化の妥当性を明らかにしていく必要がある。この他、空隙発達に伴いレイノルズ数が上昇することから、粒子分散系の抵抗則(層流~乱流)をモデル化し、詳細な実験結果等からパラメータを設定していくことも必要であると考えられる。

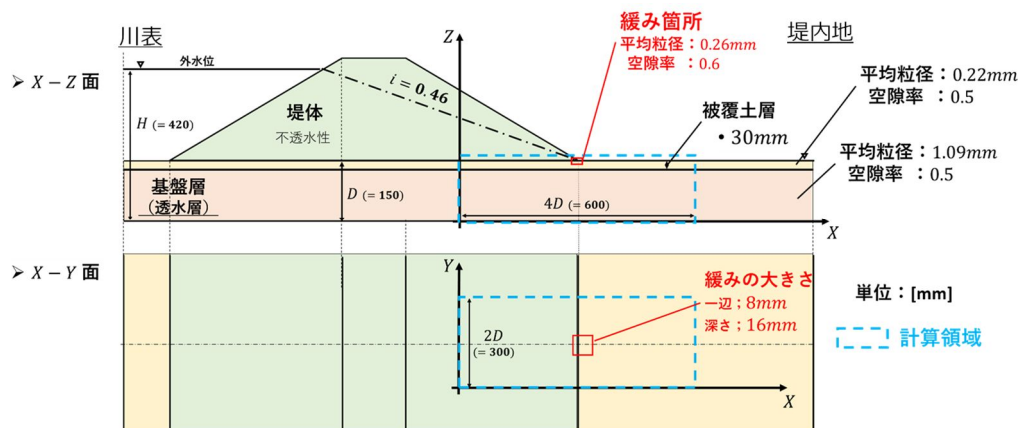
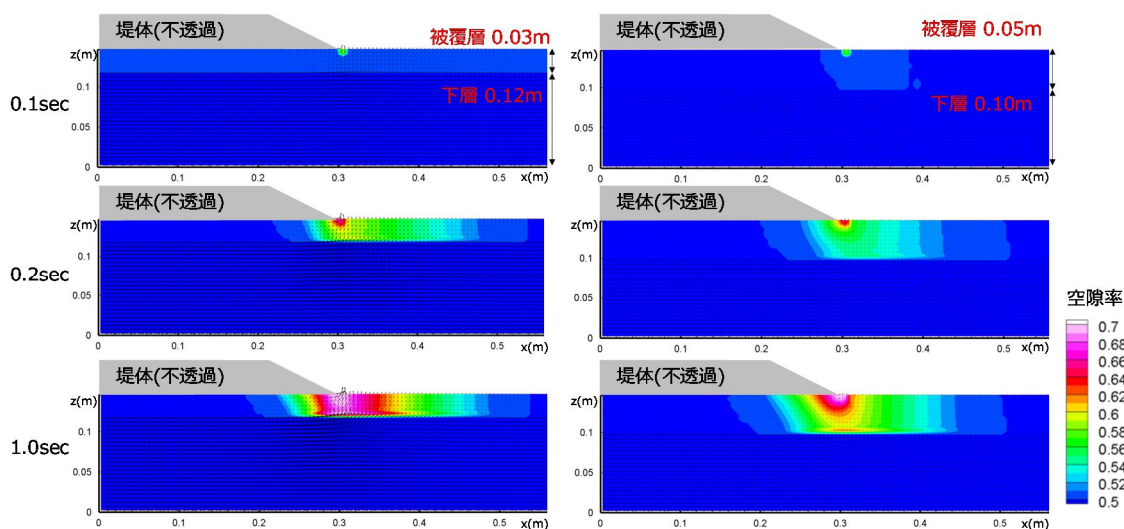


図-1 計算に用いた堤防、被覆土、基盤層の諸元



左 case1 (被覆層 0.02m, 下層 0.13m), 右 case2 (被覆層 0.05m, 下層 0.10m)

図-2 空隙率のコンター図と間隙水の流速ベクトル図

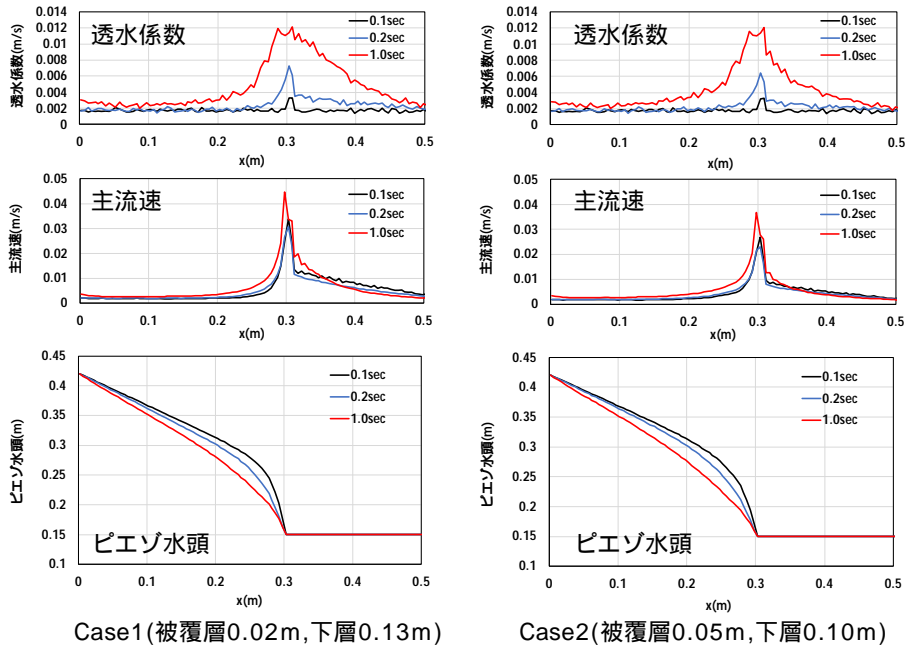


図-3 透水係数，主流速，ピエゾ水頭の縦断分布の変化

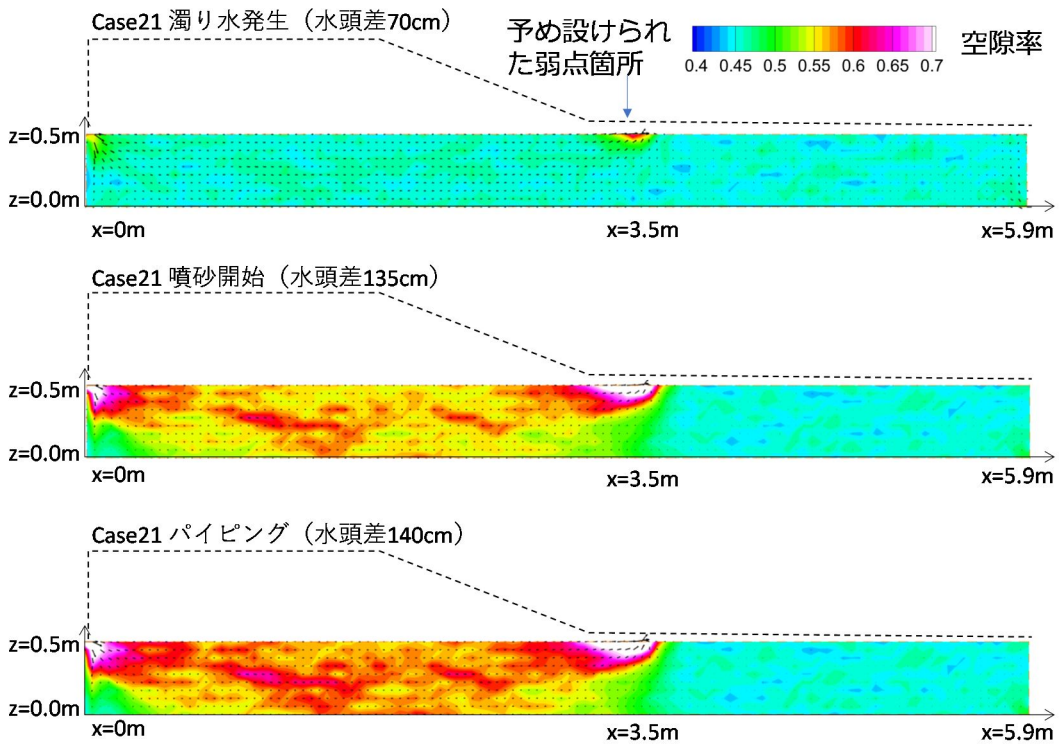


図-4 大型模型実験結果を用いた検討結果(水頭の増加に伴う流速ベクトル，空隙率の変化)

参考文献

[1]P.Jop, Y.Forterre and O.Pouliquen: A constitutive law for dense granular flows, Nature 441, 727, 2006. [2]室田明, 佐藤邦明: 空隙規模の分布による透水係数の評価について, 水理講演会講演集, pp.73-78, 1969. [3]J.F.Richardson and W.N.Zaki: Sedimentation and fluidisation: part I, Trans. Inst. Chem. Eng.,32, pp.35-53, 1954. [4] 杉井俊夫, 余川弘至, 寺西剣悟, 朱発瑜: 多粒子限界流速を用いた堤防の耐侵食性能の評価, 河川技術論文集, 第23巻, 2018. [5] 小高猛司, 李圭太, 崔瑛, 森智彦, 森三史郎, 林愛実: 浸透に伴う基礎地盤の弱体化に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論文集, pp.55-58, 2017. [6]三木博史, 山田哲也, 藤井厚企, 野口典孝, 佐藤正博: 堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する模型実験, 土木研究所資料, 第3399号, 1996.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 栗原克幸, 田端幸輔, 福岡捷二	4. 巻 76
2. 論文標題 粒子配置及び空隙構造の三次元性を考慮した堤防基盤浸透流のモデル化と堤防法先周辺の浸透流特性に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 I_313-I_318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 栗原克幸, 田端幸輔, 福岡捷二
2. 発表標題 非等方透水係数を考慮した堤防基盤における浸透流のモデル化と堤防法先地盤の緩みの影響評価
3. 学会等名 第8回河川堤防技術シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗原克幸, 福岡捷二, 田端幸輔
2. 発表標題 基盤境界の空隙条件が堤防基盤浸透流と堤防破壊危険性に及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会第48回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------