

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13825

研究課題名（和文）河川堤防の連続性を考慮した浸透破壊メカニズムの実験的解明

研究課題名（英文）Experimental investigation of seepage failure mechanisms in the continuity of river levees

研究代表者

堀越 一輝（Horikoshi, Kazuki）

東京工業大学・環境・社会理工学院・助教

研究者番号：90771965

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、河川堤防におけるパイピングの発生条件や進展メカニズムの解明とこれによる破壊の兆候を早期に捉える推定法を提案することである。そのため、本研究では、線状システムである河川堤防をモデル化した幅広い模型を用いた模型浸透実験を重力の数十倍の遠心加速度場で実施した。これにより、基礎地盤における旧河道の堆積分布や堤防縦断方向の堤防敷幅が、パイピングの発生・進行に影響を及ぼすことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、現在、見直しが予定されている治水計画の見直しに対して、堤防の信頼性に関する情報を提示し、さらに、将来の無人航空機による測量技術の発展や陸域観測衛星の分解能の向上とあいまって進歩・創造されることが期待される河川堤防の点検技術の向上に大きく寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to understand the initiation factors and development mechanism of piping in river levees, and to propose a method to estimate the early signs of failure caused by the piping. For this objective, physical model seepage tests using a wide model of a river levee were conducted in a centrifugal acceleration field. As a result, it was confirmed that the depositional distribution of the old river channel in the foundation ground and the width of the levee body in the longitudinal direction of the levee affect the initiation and progression of piping.

研究分野：地盤工学

キーワード：パイピング 河川堤防 治水

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

河川水位は急激に上昇し、河川水の氾濫を防ぐ役割を担う堤防の内部とその下にある基礎地盤には激しい浸透力が作用する。このような強い浸透力は、堤防やその基礎地盤内部で侵食現象を引き起こす。この現象は内部侵食と呼ばれ、堤防などの治水構造物の健全性を阻害し壊滅的な被害の一因となる。この内部侵食が知覚できるほど発達した現象が、良く知られたパイピング現象である。

浸透による堤防基礎地盤のパイピング現象は、河川の流出特性や国土的要因によって、従来、欧米諸国、とりわけ、オランダにおいて盛んに研究されてきた。日本においては、2012年のパイピングによる矢部川堤防の破堤や気候変動による洪水期間の長期化の懸念から、近年、小規模および中規模の模型実験が実施されている[1]。侵食現象に限らず地盤工学の領域で取り扱うほぼすべての現象は、研究対象である土の応力状態に依存することが知られている。しかし、これまでの実施されたパイピングに関する多くの実験的研究は、小規模な模型寸法で実施されたもので、土の応力依存性を考慮されたものではない。遠心模型実験は、遠心力によって小型模型内に作用する見かけの重力を大きくし、実大スケールと同じ地盤の応力や水圧レベルを再現し、その状態で模型実験を可能とする実験手法である。パイピングに関する遠心模型実験は、van Beekら[2]、Leavellら[3]、そして申請者ら[4]が実施した3例があるが、これらはいずれも、「点」的な視点で実施されたものである。

[1]例えば、林愛実，森三史郎，小高猛司，崔瑛，李圭太：高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊に関する模型実験，第71回土木学会年次学術講演会，III-118，pp.235-236，仙台，2016。

[2] van Beek, V.M., Bezuijen, A. & Zwanenburg, C.: Piping: Centrifuge experiments on scaling effects and levee stability, Proc. 7th Int'l Conf. Physical Modelling in Geotechnics, pp.183-189, Zurich, 2010.

[3] Leavell et al.: Geotechnical Centrifuge Experiments to Evaluate Piping in Foundation Soils, Technical Report by US Army Corps of Engineer Research and Development Center:ERDC/GSL TR-14-14, 2014.

[4] Koito, N., Horikoshi, K. & Takahashi, A.: Physical modelling of backward erosion piping in foundation beneath levee, Proc. 8th Int'l Conf. Scour and Erosion, pp.445-451, Oxford, UK, 2016.

2. 研究の目的

本研究の長期的な目標は、今後迫り来る洪水リスクに対応できる河川堤防の信頼性評価法の確立によって、日本のみならず諸外国における社会資本の整備および維持管理技術の向上に寄与することである。これを達成すべく、本申請研究の目的は、河川堤防におけるパイピングの発生条件や進展メカニズムの解明とこれによる破壊の兆候を早期に捉える推定法を提案することである。そのため、本申請研究では、線状システムである河川堤防をモデル化した幅広い模型用いた模型浸透実験を重力の数十倍の遠心加速度場で実施し、これらの実験結果と数値解析の結果を比較、分析することで、本申請研究の目的を達成する。

3. 研究の方法

本研究は、主に遠心模型実験手法(図1)を用いた実験的アプローチによって研究課題を実施するものである。上述のように遠心模型実験手法は、遠心力によって小型模型内に作用する見かけの重力を大きくし、実大スケールと同じ地盤の応力や水圧レベルを再現し、その状態で模型実験を可能とする実験手法である。この実験手法を用いて遠心加速度50G場において堤防模型に対して浸透実験を実施し、パイピング現象を小型模型内で再現させた。本研究では、従来ある堤防の特定断面をモデル化した2次元的なモデルではなく、線状構造物である堤防のその基礎地盤の空間的な堆積構造の変化や堤防形状を再現するため、比較的奥行き幅のある土層を使用することにより準3次元的な地盤モデルを作製、これを使用し、浸透実験をおこなった。これにより、基礎地盤で旧河道の形状に起因する空間的に複雑な地盤構成を有する地盤上に河川堤防が存在する場合、もしくは堤防幅が局部的に狭まる箇所での、パイピングの進展特性やそれに伴う盛土の変状について検討をおこなった。なお、実験中、堤防の幾何学形状の変化を今回開発した3次元計測システムによって



図1 遠心模型実験装置

図1 遠心模型実験装置

計測し、パイピングの進展度合いと堤防の変状の関係の様子を確認した。実験パラメータを、基礎地盤下部に存在する旧河道(高透水性の層)の分布形状、堤防自体の縦断方向の敷幅とした、それぞれ3パターンずつの実験を行った。

4. 研究成果

(1) 遠心場における3次元形状計測システムの開発

本研究を実施するにあたり、50G場での遠心加速度場において、深度センサーを用い実験中の堤防法面形状の計測をおこなった。その結果の一例を図2に示す。この図において、赤い部分が初期状態より、沈下を示した部分、青い部分がパイピングによって生じた噴砂が堆積した部分を示している。この深度センサーによる3次元的な法面計測と、レーザー変位計を使った点的な計測方法、土層前面の透明アクリルから確認できる堤防の様態からPIV(粒子画像流速測定法)によって変位を分析する手法の取りまとめた結果は、成果【2】の国際学会論文にて報告をおこなった。

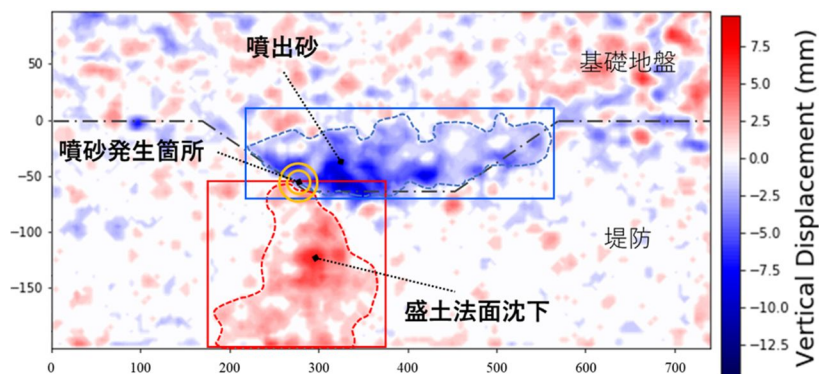


図2 堤防と基礎地盤表面における鉛直変位の変化量分布(赤:沈下,青:隆起部)

(2) パイピングの発生・進行に及ぼす基礎地盤の3次元的堆積状況の影響

3パターンの基礎の堆積状況を想定した模型実験によって得られた結論は次の通りである。旧河道の曲流部を想定し、この旧河道の終点が堤内地側の法尻部と一致し、いわゆる、行き止まり構造となっている基礎地盤の地盤構造を有している場合、パイピングの初期段階で発生する噴砂が生じる平均動水勾配(河川水位)が最も小さく、パイピングの危険性が高い(図3)。基礎地盤中の旧河道の空間的な分布の違いにより、その直上にある堤防の沈下の進行モードは異なる様子が確認され、パイピング進行に伴う河川堤防の表面変位を捕捉できることが確認された(図4)。

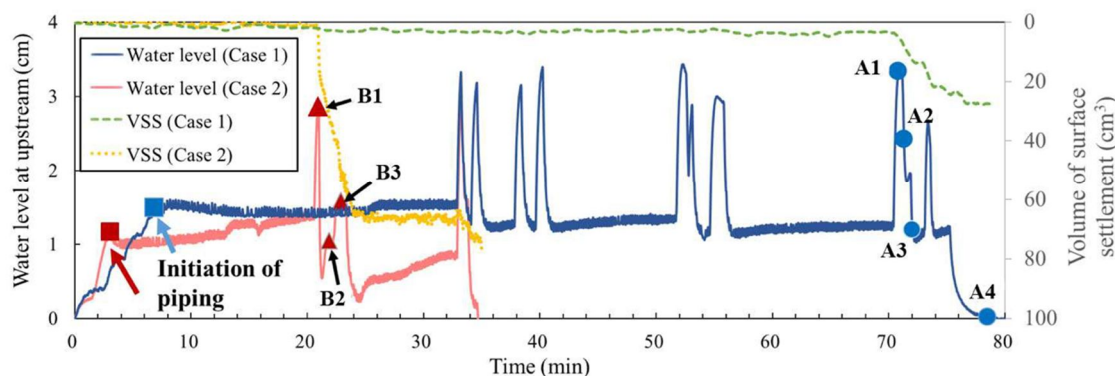


図3 実験中の上流側の水位履歴(洪水履歴に対応)と堤防法面の沈下体積(VSS)
Case 1:行き止まり構造なし, Case2 行き止まり構造あり

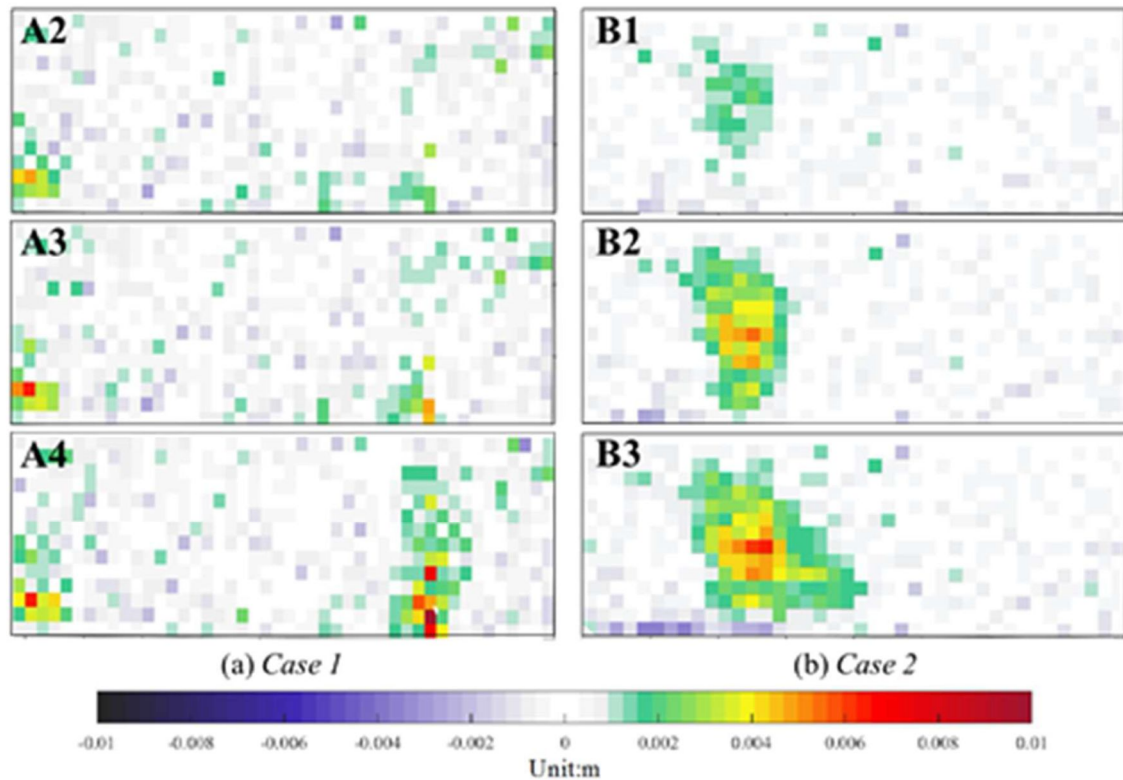


図4 パイピング進展による堤防法面の沈下: Case a:行き止まり構造なし, Case2 行き止まり構造あり (堤防法面のみ, 法尻方向は下部で, 正值が沈下, 沈下分布のタイミングは図3のA1~B3に対応)

(3) パイピングの発生・進行に及ぼす縦断方向の堤防敷幅の変化の影響

縦断方向の堤防敷幅の変化に着目した, 3パターンの縦断方向に長大な地盤模型を用いた遠心模型実験を行った. 結果の一例として, 実験中の随時計測した噴出砂量と盛土沈下量の関係を図5に示す. ここでは2ケースのみを示しているが, すべてのケースにおいて, この噴出砂量と盛土沈下量の関係がある変化点を境に2段階に分けられることが確認された. 図5にある段階Aでは, 噴出砂量に対して堤防法面沈下量が小さく, 堤防直下に空洞(パイプ)が形成され, その断面が拡大している段階である. 形成されたパイプは, 粘性土で構成された盛土のアーチ効果により, 形状が保たれるため, 盛土法面に大きな変形が生じない. 更にパイプ断面が拡大し, 変化点に到達すると, 噴出砂量の増加に伴い堤防法面の沈下量が顕著に増加することが確認された. この2段階の境界, すなわち, 限界パイプの寸法は, 盛土の材料強度だけでなく堤防形状に依存することを確認し, 堤防敷幅が変化する移行区間の長さが大きく, 且つ, 縦断方向の形状変化が相対的に緩やかになるほど, 限界パイプの寸法は小さくなり, 法面に顕著な沈下が生じやすくなることが確認された. このような状態の堤防では, 堤防下部に形成されたパイプを盛土法面の沈下量分布によって検出できる可能性が高いことを示した.

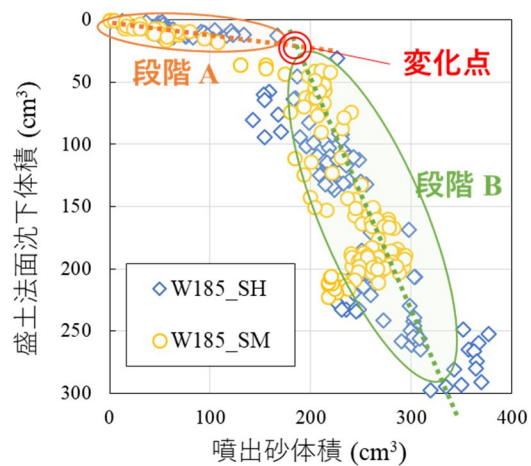


図5 堤防法面沈下量と噴出砂量の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 堀越一輝, 杉下佳辰
2. 発表標題 地盤工学からみた土の内部侵食に関する引用ネットワーク分析
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 伊藤優作, 高橋章浩, 堀越一輝
2. 発表標題 縦断方向に敷幅が変化する河川堤防のパイピングに伴う盛土法面変位
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤優作, 高橋章浩, 堀越一輝
2. 発表標題 浸透流解析による河川堤防の法尻付近局所動水勾配に与える敷幅の縦断方向変化の影響
3. 学会等名 第17回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀越一輝, 野田章太, 高橋章浩
2. 発表標題 洪水パターンの違いが堤防基礎地盤のパイピングに及ぼす影響の検討
3. 学会等名 第7回河川堤防技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田章太, 堀越一輝, 高橋章浩
2. 発表標題 旧河道に起因した土質構成が河川堤防の耐浸透性に及ぼす影響
3. 学会等名 第16回地盤工学会関東支部発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Horikoshi, Shota Noda, Ayumi Takizawa, Akihiro Takahashi
2. 発表標題 Centrifuge Modeling for Visualization of Backward Erosion Piping Progression
3. 学会等名 27th Meeting European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams & their Foundations (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusaku Ito, Shota Noda, Akihiro Takahashi, Kazuki Horikoshi.
2. 発表標題 Measurement techniques for capturing piping-induced deformation of levees in centrifuge model
3. 学会等名 10th International Conference on Scour and Erosion, (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤優作, 野田章太, 高橋章浩, 堀越一輝
2. 発表標題 深度センサーを用いた遠心場での堤防変形の計測
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田章太, 堀越一輝, 高橋章浩
2. 発表標題 旧河道に起因する空間的な地盤構成が堤防のパイピングに与える影響
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田 章太, 堀越 一輝, 高橋 章浩
2. 発表標題 パイピング進展挙動に着目した河川堤防の進行破壊に関する実験的研究
3. 学会等名 地盤工学会関東支部 発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 遠心模型実験によるパイピングの観察と3次元的進展の検討
2. 発表標題 堀越一輝, 野田章太, 瀧澤歩実, 高橋章浩
3. 学会等名 第6回 河川堤防技術シンポジウム
4. 発表年 2018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
---------	---------