

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 11 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04347

研究課題名（和文）河川堤防の維持管理技術向上のための浸透に対する弱部抽出と巡視点検方法の実用化提案

研究課題名（英文）Proposal for Practical Application of Extraction of Weak Points against Seepage and Inspection Method for Improving Maintenance Technology of River Levees.

研究代表者

竹下 祐二（Takeshita, Yuji）

岡山大学・環境生命科学研究所・教授

研究者番号：90188178

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：河川堤防内の浸透挙動のモニタリング方法と計測データを忠実に再現できる堤防モデルの構築方法の開発を目的として、河川水や降雨による実河川堤防内の浸透挙動の長期モニタリングを実施した。大量の計測データは、深層学習を用いてニューラルネットワークに学習させ、出水時における堤防内の浸透挙動を予測するAIシステムを構築した。

また、堤防内の降雨浸透挙動の評価指標として実効雨量を用い、累加雨量や堤防のり面での位置に応じた実効雨量を算出することで、堤防表層領域内の土中水分動態の評価を試みた。さらに、堤体表層の現場飽和透水係数を測定する簡易型原位置変水位透水試験装置を試作し、その有用性と妥当性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、我が国で頻発している堤防の破堤による甚大な災害の防止と軽減は、国民から強く求められている重要な研究課題である。そのため、堤防内での丁寧な動態観測と計測データ分析が不可欠であり、工学的に十分な精度を有し、実行可能性の高いモニタリングを実施してデータを蓄積することによって、河川堤防調査技術の向上に貢献することが望まれる。

本研究成果は、堤防内の浸透挙動の動態計測に基づく堤防の弱部区間の推定とその浸透特性値の原位置測定を行うことで、浸透現象に対する堤防の安全性評価を行う「系統的かつ客観的な堤防調査・監視方法」に寄与するものであり、河川堤防の維持管理技術開発に対しての波及効果が期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a method for monitoring seepage behavior in river levees and a method for constructing levee models that can faithfully reproduce the measured data, long-term monitoring of seepage behavior in actual river levees due to river water and rainfall was conducted. A large amount of measurement data was used to train a neural network using deep learning, and an AI system was constructed to predict the seepage behavior in the levee during runoff.

In addition, the effective rainfall was used as an index to evaluate the rainfall infiltration behavior in the levee, and the evaluation of soil moisture behavior in the levee surface area was attempted by calculating the effective rainfall according to the cumulative rainfall and the position of the levee slope. In addition, a simplified in-situ permeability test apparatus for measuring the field saturated hydraulic conductivity of the levee surface layer was developed, and its usefulness and validity were verified.

研究分野：地盤工学

キーワード：河川堤防 浸透 現地計測 実効雨量 土中水分量 原位置透水試験 深層学習 ニューラルネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国で頻発している集中豪雨による河川の氾濫や堤防の破堤による甚大な災害の防止と軽減は、国民から強く求められている重要な研究課題である。河川堤防は防災上非常に重要な土構造物であるが、浸透に対する強化対策が必要とされている区間は国の直轄管理区間の約40%で4000kmに及び、堤防補強の戦略とそのための革新的な維持管理技術の開発が急務である。

河川堤防は長く線状な土構造物であるため、その点検・維持管理技術に関しては多くの課題が残されている。たとえば、堤防本体はその築堤履歴（嵩上げや拡幅等の繰返し）に依存して、一般に不均質な状態にある。そのため、浸透現象に対して弱部となり得る透水性の高い砂層などの局所的な存在を知るためには、十分な密度のボーリング調査などを行う詳細点検が必要とされるが、すべての河川区間で詳細点検を行うことは困難である。また、堤体構成材料の土質情報の取得を目的としたボーリング調査のみでは、長大な河川堤防の挙動を十分に予測することは困難であると思われる。このように、河川堤防の維持管理技術の黎明期においては、堤防内での丁寧な動態観測と計測データ分析が不可欠であり、工学的に十分な精度を有し、実行可能性の高いモニタリングを実施してデータを蓄積することによって、河川堤防調査技術の向上に貢献することが望まれる。

2. 研究の目的

本研究課題の申請時における当初の研究目的は、河川堤防の維持管理技術の向上であり、土中水分量の動態計測に基づく堤防の弱部区間の推定とその浸透特性値の原位置測定を行って、浸透現象に対する堤体の安全性評価を行い、堤体すべりなどの重点監視箇所と判断された場合には、堤防変状の予兆を把握するための効率的な監視を行う「系統的かつ客観的な堤防調査・監視方法」の提案である。学術的な特徴としては、①堤防内部の土中水分動態の特徴認識による弱部区間の推定、②地盤調査の原点といえるシンプルな操作性とコンパクトな装置による原位置透水試験方法の開発、そして③重点監視箇所に挿入設置されたセンサーデータの「可視化」により巡視点検の効率化に寄与する点にあり、河川堤防の維持管理技術開発に対しての波及効果が期待される。実際の河川堤防において実証実験を行い、従来の対症療法型から予防保全型への転換を可能とする維持管理技術として実用化に結び付けることを目的としている。

3. 研究の方法

本研究課題の研究方法について、それらの具体的内容は、以下の3項目に集約される。

(1) 一級河川堤防の裏のり面における降雨量と土中水分動態の長期連続計測の実施
堤防裏のり面に簡易型転倒降雨量計と複数本の多深度計測型土中水分計を設置して、降雨量と土中水分動態の長期連続計測を実施した。これらの降雨量と土中水分動態の計測事実に基づき、堤防のり面内の降雨浸透挙動の特徴や降雨に対する土中水分量の応答性を考察した。

(2) 簡易型変水位透水試験方法の提案

河川水や降雨によって発生する河川堤防内での浸透挙動を精度良く把握するためには、堤防のり面表層の現場飽和透水係数を原位置で測定することが重要である。そこで、現場飽和透水係数の原位置定水位透水試験方法として提案されているプレッシャーインフィルトローメータ法をベースにして、簡易型変水位透水試験法を提案し、試験装置の施策を行った。

(3) 深層学習を用いたニューラルネットワークによる堤防内の浸透挙動のモデル化
堤防内で計測された大量データ（河川水位、堤体や基礎地盤層内水位、土中水分量、雨量など）を深層学習を用いたニューラルネットワークに学習させ、出水時における堤防内の浸透挙動予測のためのAIシステムを開発する。

4. 研究成果

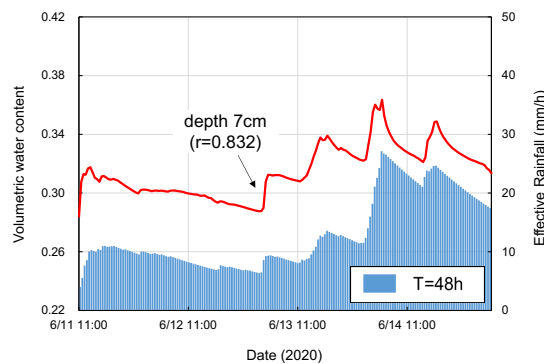
(1) 河川堤防における降雨浸透挙動を定量的に評価する降雨指標の提案

河川堤防における降雨浸透挙動を定量的に評価する降雨指標として、降雨イベントや堤防のり面の位置に応じた実効雨量を算出することで、堤防表層領域内の土中水分動態の評価を試みた。実効雨量とは、過去の降雨の影響を時間経過とともに減少させて計算した雨量であり、次式のように表される¹⁾。実効雨量は、降雨の影響の時間経過を考慮した土中水分量の変動に相当する雨量として捉えることができ、半減期を適切に設定した実効雨量を用いれば、河川堤防のり面における降雨浸透による土中水分動態を表現できると考えられる。

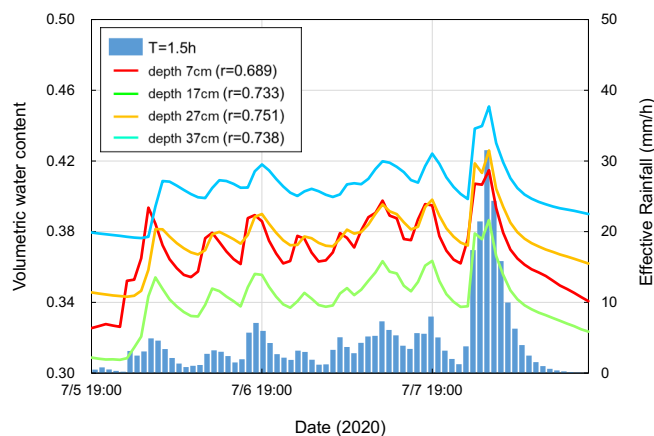
$$R_t = r_t + \sum_{n=1}^x a_n r_{t-n} = r_t + a_1 r_{t-1} + \dots + a_x r_{t-x} \quad (4.1)$$

$$a_n = 0.5^{n/T} \quad (4.2)$$

ここで、 R_t は時間 t における実効雨量、 r_t は時間 t の時間雨量、 α_n は減少係数、 T は半減期 ($T=1.5, 6, 24, 72$ 時間など)である。堤防固有の最適半減期を用いた実効雨量を算出することで、時々刻々と変化する雨量計測値や降雨予報値に対して、各堤防のり面位置における土中水分動態の推定が可能になると期待される。また、最適半減期の長さによって、堤防のり面における危険箇所や警戒すべき降雨イベントを推定できるため、実効雨量は、堤防内の降雨浸透挙動の評価指標として堤防の維持管理実務において活用できると期待される。算出された最適半減期における実効雨量と土中水分動態の関係を図-4.1 に示す。



(a) 堤防裏のり面下部 (2020/6/11~6/15 : 累加雨量 51.6mm)



(b) 堤防裏のり肩 (2020/7/5~7/8 : 累加雨量 116.0mm)

図-4.1 土中水分動態と実効雨量

(2) 簡易型変水位透水試験方法による現場飽和透水係数の迅速な原位置測定

簡易型変水位透水試験装置を試作し、透水試験方法の有用性と妥当性は、堤防裏のり面において多地点で実施した原位置透水試験および採取試料による室内土質試験によって検証した。簡易型変水位透水試験は、プレッシャーインフィルトローメータ法(GPI法)²⁾による定水位透水試験と同等の精度で現場飽和透水係数を簡便に測定することができると思われる。また、簡易型変水位透水試験では、浸潤用円筒内に小型自記水位計を設置することにより自動計測が容易に可能になるため、原位置透水試験における省人化が期待できる。また、試験装置がシンプルかつコンパクトであり、可搬性を有しているため、多地点で同時に透水試験を実施でき、河川堤防のり面表層での透水係数の平面分布を評価するなどの地盤調査に有用であると思われる。考案した簡易型原位置変水位透水試験と GPI 法の試験装置の概要を図-4.2 に示す。

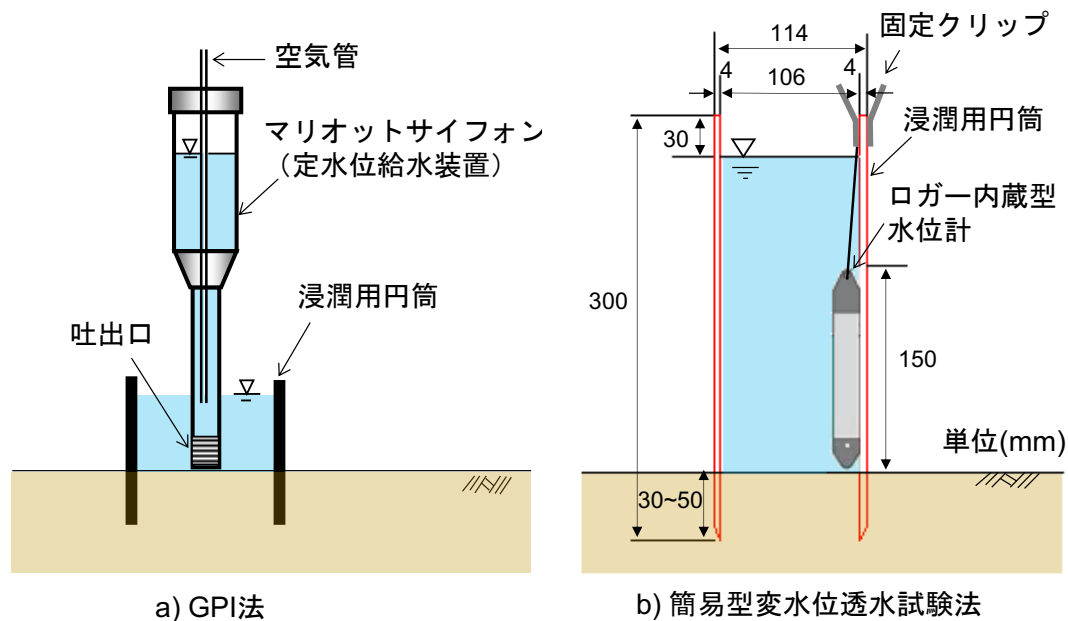
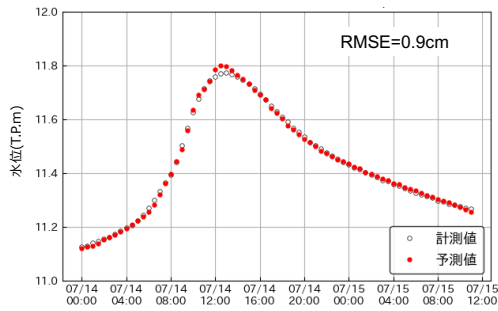


図-4.2 GPI法と簡易型変水位透水試験の試験装置

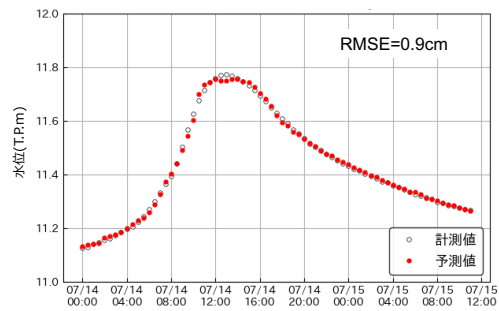
(3) ニューラルネットワークによる堤防内水位の学習と予測

深層学習を用いたニューラルネットワーク (Deep Neural Network; DNN) を用いて出水時に実河川堤防で計測された河川水位と堤防基礎地盤の水位挙動を学習させ、基礎地盤の水位挙動の予測を試みた³⁾。現時刻からの予測時間が長くなる場合には、再帰型ニューラルネットワーク (Recurrent Neural Network; RNN)⁴⁾の適用により、予測精度の向上が確認された。図-4.3～図-4.5に堤防基礎地盤における実測水位とニューラルネットワークによる予測水位との比較を示す。これらの水位の予測精度を比較するために実測水位と予測水位との平均平方二乗誤差 RMSE を図中に併記した。

今後、上流の河川水位変動や降雨状況など、対象堤防における縦断方向の情報をも付加した近似度の高い堤防浸透モデルの構築が可能になり、従来の断面 2 次元浸透流解析による数値解析モデルでは困難であった浸透挙動の再現や予測が可能になることが期待される。水位の予測精度をさらに向上させるためには、ニューラルネットワークの学習に用いる計測データの質と量とが重要であり、堤防内浸透挙動の計測点配置、計測間隔、計測すべき物理量の選定などの計測システムについての検討を行う必要がある。

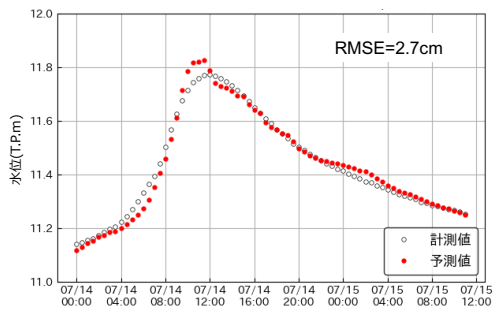


(a) DNN

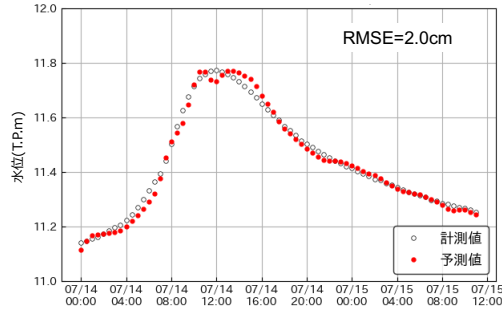


(b) RNN

図-4.3 基礎地盤の実測水位と予測水位の比較（現時刻から1時間後）

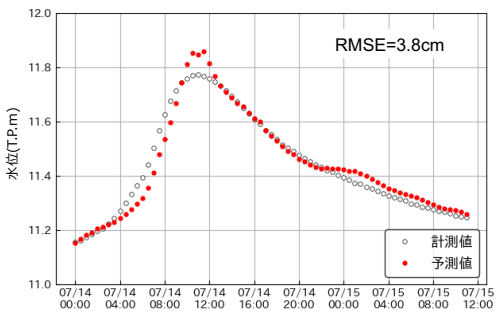


(a) DNN

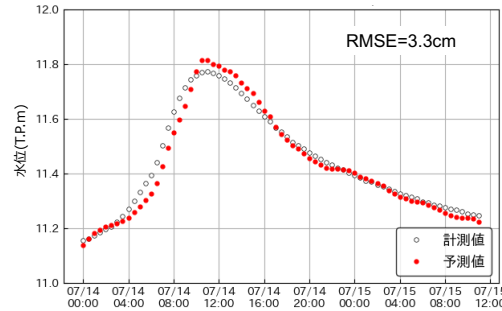


(b) RNN

図-4.4 基礎地盤の実測水位と予測水位の比較（現時刻から2時間後）



(a) DNN



(b) RNN

図-4.5 基礎地盤の実測水位と予測水位の比較（現時刻から3時間後）

<引用文献>

- 1) 矢野勝太郎：前期雨量の改良による土石流の警戒・避難基準設定手法の研究，砂防学会誌，Vol.43, No.4, pp.3-13, 1990.
- 2) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E.: Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, Soil Science Society of America journal, 54, pp.1233-1241,1990.
- 3) 竹下祐二・鳥越友輔：深層学習を用いた出水時における河川堤防内水位の予測方法，土木学会論文集C, Vol.76, No.4, pp.340-349, 2020.
- 4) 斎藤康毅：ゼロから作るDeep Learning—Pythonで学ぶディープラーニングの理論と実装，オライリージャパン，pp.51-66, 2016.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 TAKESHITA Yuji, KATAYAMA Nobutake, TORIGOE Yusuke, SATO Ami	4. 巻 75
2. 論文標題 A CASE STUDY OF MONITORING OF SEEPAGE FLOW BEHAVIOR IN THE RIVER LEVEE DURING FLOOD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 155 ~ 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.1_155	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 -

1. 著者名 TAKESHITA Yuji, TORIGOE Yusuke	4. 巻 76
2. 論文標題 QUASI-REAL-TIME PREDICTION OF SEEPAGE FLOW BEHAVIOR IN RIVER LEVEE DURING FLOOD BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK USING DEEP LEARNING	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering)	6. 最初と最後の頁 340 ~ 349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejge.76.4_340	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9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 竹下祐二・鳥越友輔・山本純也・入江大輝
2. 発表標題 深層学習を用いた出水時における河川堤防内水位の変動予測
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 竹下祐二・鳥越友輔・片山頌嵩・佐藤亜海
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた河川堤防内の浸透挙動の予測方法
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下祐二・片山頌嵩・鳥越友輔・佐藤亜海
2. 発表標題 河川堤防の浸透挙動計測に基づいた浸透流解析モデルの作成に関する考察
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下祐二・山本純也・鳥越友輔・入江大輝
2. 発表標題 土中水分動態計測による河川堤防内の降雨浸透挙動に関する考察
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 竹下祐二, 鳥越友輔, 片山頌嵩, 佐藤亜海
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた河川堤防内の浸透挙動の予測方法
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下祐二, 片山頌嵩, 鳥越友輔, 佐藤亜海
2. 発表標題 河川堤防の浸透挙動計測に基づいた浸透流解析モデルの作成に関する考察
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji TAKESHITA
2. 発表標題 Field techniques for measuring soil hydraulic properties in unsaturated soils
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific Conference On Unsaturated Soils (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹下祐二・山本純也・鳥越友輔
2. 発表標題 再帰型ニューラルネットワークを用いた河川堤防内水位の変動予測に関する考察
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 竹下祐二・川田勇希・山本純也
2. 発表標題 深層学習を用いた降雨時における河川堤防内の土中水分動態の予測方法
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
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
研究分担者	岩田 徹 (Iwata Toru) (10304338)	岡山大学・環境生命科学研究科・准教授 (15301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究 分 担 者	金 秉洙 (Kim Byeong-Su) (90648601)	岡山大学・環境生命科学研究科・准教授 (15301)	

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