

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	粒子法を用いた盛土の変形及びリスク評価に関する解析的研究 (A Numerical Study on the Deformation and Risk Assessment of Embankments by the Particle Method)
氏名(Name)	下川 大介

堤防は長い歴史の中で構築された長大で不均質な土構造物であり、堤防の維持管理は、目視による状態把握に頼らざるを得ない状況である。しかし、点検等によって発見される変状と出水時の被災については明確な関係性が認められていないため、堤防決壊に至る変状と至らない変状を見極める必要がある。また、現在、我が国の設計では、パイピングの発生や法面すべりの安定性を別々に評価しており、パイピング発生から堤防決壊に至るかどうかについては評価することはできない。さらに、近年の気候変動により集中豪雨が増加したことで、降雨のみによる被災が増加している。そこで、本研究では、盛土の変形を再現可能な粒子法(SPH法)を用いて既往の模型実験や過去の被災事例の再現解析を実施し、河川堤防の進行破壊に関する評価方法について検討した。また、SPH法を用いて不均質な盛土を対象として、降雨条件や土質条件のバラツキを考慮したすべりに関するリスク評価を実施した。

研究の結果、ひずみによる軟化現象と土粒子流出を組み入れた解析により、実験や実際の被災現場における変状の進行を相当程度再現することができた。また、SPH法を用いることで、根茎密度や根茎の深さによる影響を比較的良好に再現できることが示唆された。さらに、不均質性を考慮したSPH法を用いることで、斜面の不安定性に関連する危険レベルの定量的な評価が可能であることを示した。

以下に、論文の各章の概要を示す。

○ 第1章：序論

本章では、現状の河川堤防の維持管理に関する背景や課題についてまとめた。また、本研究の構成について示した。

○ 第2章：解析方法

本章では、現在の堤防の維持管理に関する課題について示した。統計的解析(ロジスティック回帰分析)により、変状の発生から被災の予測を行うことが困難であることが示唆された。また、平均動水勾配の大きな区間や、平均法面勾配の急な区間等は被災発生の可能性が高いことが示唆された。

○ 第3章：解析方法

本章では、本研究で用いた解析手法およびSPH法の原理について示した。また、粒子法に関する既往研究についてまとめた。

○ 第4章：実験の再現解析

本章では、集中豪雨による法面すべりに植生の与える影響に関する模型実験についてSPHを用いた再現解析を試みた。再現解析では、模型実験サイズの解析ではすべりが発生しなかったが、実物大の解析では模型実験結果と同様の傾向が確認された。SPH法を用いることで、根茎密度や根茎の深さによる影響を比較的良好に再現できることが示唆された。ただし、模型実験サイズの再現については困難であり、今後、各パラメータのスケール効果による影響を検証し、補正を行う必要があることが示唆された。

○ 第 5 章：現場の再現解析

本章では、実際に被災が発生した筑後川、子吉川、梯川の再現解析を行った。筑後川の解析では、集中豪雨によって法面すべりが発生した事例の再現解析を実施した。子吉川の再現解析では、基礎地盤の強度低下に伴い、すべりと噴砂が同時に発生する進行過程が発生し、開削調査で観察された地盤構造の特徴を再現できた。また、砂質土層が被覆土層を破って崩壊土の下に入る現象は、基礎地盤中の間隙水圧が被圧された状態において発生することが確認された。梯川の解析では、噴砂によって基礎地盤に緩みが生じ強度低下が生じたことで、盛土層が落ち込み、法面すべりまで進行する過程を再現することができた。

○ 第 6 章：リスク評価

本章は、SPH 法を河川堤防のように不均質性が存在する構造物で、降雨条件や土質条件のバラツキを考慮したすべりに関するリスク評価を実施したものである。降雨条件や土質条件、表層のゆるみ域にばらつきを与え、危険度を評価した。地盤特性や降雨条件の不確実性の確率論的アプローチを用いて、土砂流出が構造物等と与える影響について危険度評価を可能となることが示唆された。また、このアプローチは、斜面の不安定性に関連する危険レベルの合理的な定量評価を可能にし、それによって、現行の基準の不確実性と、許容可能なリスクレベルを考慮した様々な対策工の範囲設定や優先順位付けを可能となることを示した。

○ 第 7 章：結論

本章では、本研究で得られた結果について要約し、SPH 法を盛土の維持管理に活用するために解決すべき課題や今後の展望等を示した。

学 位 論 文 要 旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	粒子法を用いた盛土の変形及びリスク評価に関する解析的研究 (A Numerical Study on the Deformation and Risk Assessment of Embankments by the Particle Method)
氏 名(Name)	SHIMOKAWA Daisuke

Levees are long and heterogeneous soil structures that have been constructed over a long period of time, and their maintenance and management must rely on visual inspection of their condition. However, since there is no clear relationship between deformations discovered by inspection and damage at the time of flooding, it is necessary to identify deformations that may or may not lead to levee failure. In addition, the current design in Japan evaluates the stability of piping and slope slides separately, and it is not possible to evaluate whether the occurrence of piping leads to a levee failure or not. Furthermore, recent climate change has led to an increase in torrential rainfall, which has resulted in an increase in damage caused solely by rainfall. Therefore, in this study, we conducted model experiments and reproduction analyses of past damage cases by using the particle method (SPH method), and examined the evaluation method for progressive failure of river levees. The SPH method was also used to evaluate the risk of slippage considering the variation of rainfall and soil conditions.

As a result of the study, the analysis incorporating strain-induced softening and soil particle discharge was able to reproduce progressive failure of the embankment to a considerable extent. It was also suggested that the SPH method could relatively well reproduce the effects of rhizome density and rhizome depth. Furthermore, it was shown that the SPH method, which accounts for heterogeneity, can be used to quantitatively assess the level of hazard associated with slope instability.

The following is a summary of the chapters of the dissertation.

○ Chapter 1: Introduction

This chapter summarizes the background and issues related to the current maintenance and management of river levees. It also presents the structure of this study.

○ Chapter 2: Analysis Methodology

This chapter presented issues related to the current maintenance of levees. Statistical analysis (logistic regression analysis) suggested that it is difficult to predict damage from the occurrence of deformations. The analysis also suggested that sections with large mean hydraulic gradients and sections with steep mean slope gradients have a high likelihood of being damaged.

Chapter 3: Analysis Methodology

This chapter describes the analysis method used in this study and the principle of the SPH method. Previous studies on the particle method are also summarized.

Chapter 4: Reproduction of the Experiment

In this chapter, we attempted to reproduce and analyze the model experiment on the effect of vegetation on slope slip caused by torrential rainfall using SPH. In the reproduction analysis, no slip occurred in the model experiment size analysis, but the full-scale analysis confirmed the same trend as the model experiment results, suggesting that the SPH method can reproduce the effects of rhizome density and rhizome depth relatively well. However, it was suggested that the effects of scale effects on each parameter should be verified and corrected in the future.

Chapter 5: Site Replication Analysis

In this chapter, reproduced analyses of the Chikugogawa River, the Koyoshigawa River, and the Kakehashigawa River conducted. In the analysis of the Chikugogawa River, a reproduced case of slope slip caused by torrential rainfall was analyzed. In the analysis of the Koyoshigawa River, a progressive process of simultaneous occurrence of slip and sand eruption was observed as the strength of the foundation ground decreased, and the characteristics of the ground structure observed in the open-cut survey were reproduced. In addition, it was confirmed that the phenomenon of the sandy soil layer breaking through the covering soil layer and entering under the collapsed soil occurred when the pore water pressure in the foundation ground was under pressure. In the analysis of the Kakehashigawa River, it was possible to reproduce the process in which the embankment layer fell and progressed to the slope slip due to the loosening and strength loss of the foundation soil caused by the sand eruption.

Chapter 6: Risk Assessment

In this chapter, the SPH method was applied to a heterogeneous structure such as a river embankment to evaluate the risk of slip in consideration of variations in rainfall and soil conditions. The risk was evaluated by giving variations in rainfall conditions, soil conditions, and the area of loosening of the surface layer. It is suggested that a probabilistic approach to the uncertainty of ground properties and rainfall conditions can be used to evaluate the risk of sediment runoff impact on structures and other objects. It was also shown that this approach enables a reasonable quantitative assessment of the hazard level associated with slope instability, thereby allowing scoping and prioritization of various countermeasure works considering the uncertainty of the current criteria and the acceptable risk level.

○ Chapter 7: Conclusion

This chapter summarizes the results obtained in this study and presents issues to be resolved and future prospects for utilizing the SPH method in the maintenance and management of embankments.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	下川 大介
審 査 委 員	主 査：森 啓年
	副 査：中田 幸男
	副 査：鈴木 素之
	副 査：榊原 弘之
	副 査：吉本 憲正
論 文 題 目	粒子法を用いた河川堤防のすべり破壊及びリスク評価に関する解析的研究 (A Numerical Study on the Slip Failure and the Risk Assessment of River Levee by the Particle Method)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】	
<p>近年の豪雨災害により河川堤防が決壊など被災する事例が増加している。河川堤防は歴史的経緯から複雑な内部構造を持つ盛土構造物であり、その安全性評価手法の精度向上は喫緊の課題となっている。本研究は天文学や流体力学の分野において使用されている粒子法の一つである SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いて、豪雨や出水などの外力が作用した際の河川堤防などの盛土構造物の変形の再現及びリスク評価を試みたものである。従来の解析手法では困難であった盛土の変形量を解析により計算し、今後の設計や維持管理の高度化に資することを目的としている。</p> <p>第 1 章では、研究の背景と目的を述べ、本論文の構成を示した。</p> <p>第 2 章では、実際の河川堤防の維持管理において顕在化する変状をもとに、その維持管理に関する課題を示したうえで、本研究で着目し SPH 法により変形の再現を試みるべき変状の項目を明確にした。</p> <p>第 3 章では、SPH 法の概要について示すとともに、それを地盤工学の連続体力学に適用するための手法として、モール・クーロンモデルを用いて、速度ひずみから応力を計算し、運動方程式を用いて物質の加速度を求め、速度と位置を更新する方法についてまとめた。さらに主な既往研究について整理した。</p> <p>第 4 章では、降雨の集中による河川堤防の法面すべりに関する模型実験の結果を SPH 法によりその変形を再現し、降雨の集中により比較的深いすべりが発生することを示した。</p> <p>第 5 章では、SPH 法を実際の河川堤防の災害に適用し、すべりとパイピングを同時生起の場合もその変状を SPH 法によりよく再現出来ることを示した。</p> <p>第 6 章では、SPH 法で計算できる盛土の法面すべり量を用いて、不均質な地盤条件におけるリスク評価手法の提案を行った。</p>	

(様式 9 号)

第 7 章では、各章の結論を要約し、論文全体を統括した。さらに、SPH 法を盛土の維持管理に活用するための課題や展望等を示した。

本審査申請時の論文題目は、「粒子法を用いた盛土の変形及びリスク評価に関する解析的研究 (A Numerical Study on the Deformation and Risk Assessment of Embankments by the Particle Method)」であったが、本審査会での意見を受けて、「粒子法を用いた河川堤防のすべり破壊及びリスク評価に関する解析的研究 (A Numerical Study on the Slip Failure and the Risk Assessment of River Levee by the Particle Method)」に修正された。

公聴会是对面の開催とし、学内外から計 19 名の参加があった。公聴会における主な質問は 1) SPH 法のパラメータ設定方法に関すること、2) 解析における植生の条件と実際の堤防の植生に関すること、3) すべり量を河川堤防のリスク評価に活用する方法に関すること、4) SPH 法の今後の精度向上に関すること等であった。いずれの質問に対しても発表者から的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士 (工学) の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 3 編、参考論文 計 0 編)

- 1) 下川大介, 福原直樹, 森啓年, 服部敦: 変状と被災の統計的解析による堤防の点検及び巡視の合理化に関する一考察, 河川技術論文集, Vol.21, pp.337-342, 2015.6
- 2) Hirotooshi Mori, Xiaoyu Chen, Yat Fai Leung, Daisuke Shimokawa and Man Kong Lo: Landslide hazard assessment by smoothed particle hydrodynamics with spatially variable soil properties and statistical rainfall distribution, Canadian Geotechnical Journal, Vol.57, pp.1953-1969, 2020.3
- 3) 下川大介, 森啓年: 降雨による河川堤防の法面すべりに与える植生根茎の影響に関する数値解析, 地盤と建設, Vol.41, No.1, pp.51-59, 2023.12