

学位論文要旨

(Summary of the Doctoral Dissertation)

学位論文題目 (Dissertation Title)	潜在的な小規模内部侵食の進行メカニズムと土の力学特性に与える影響の解明 (Investigation of Progression Mechanism of Potential Small-Scale Internal Erosion and Its Effect on Soil Mechanical Properties)
氏名(Name)	石丸 太一

近年多発する豪雨や大地震によりため池堤体に関する被害が多数報告されている。貯水を目的としたため池堤体や河川堤防の土構造物内部では、水の浸透を長期間受けた結果、土粒子が間隙流体に取り込まれ、間隙を移動、さらには堤体外に流出する現象である内部侵食が発生する。内部侵食はその規模や発生形態によって分類されているが、そのうち、粗粒な土粒子が形成する間隙空間を細粒な土粒子のみが流出する現象は **Suffusion** (サフュージョン) と呼ばれ、潜在的に透水性の増加や地盤耐力の低下を引き起こしていることが分かっている。このようなサフュージョンが進行し続ければ、土構造物の安定性が経年的に失われる。しかし、それが土構造物に与える影響は元より、その発生や進行のメカニズム、発生要因についても十分に解明されていない。そこで、本研究ではサフュージョンがため池堤体土の強度特性に与える影響および流出土粒子粒径に着目したサフュージョンの進行メカニズムの解明を目的とした。

第1章では、研究背景、内部侵食の分類について整理した後、研究の位置付けと目的を述べた。

第2章では、サフュージョンに焦点を当て、既往の研究で明らかにされたメカニズムや、地盤材料に与える影響について整理した。

第3章では、まず、ため池堤体土として用いられ、かつ、内部安定性の評価によってサフュージョンの発生リスクがあると判定された土試料を用いて、サフュージョンが強度特性に与える影響を調べた。セル室内で土粒子の流亡を伴う通水が可能となるように改良した三軸試験機を用いて、サフュージョンの有無による強度特性の変化を調べた。その結果、土粒子の流亡に伴う間隙比変化に対応しないピーク強度、残留強度の変化が認められ、せん断直前の間隙比が同じでも、サフュージョンの有無によって、その後の力学特性が異なることが分かった。ただし、侵食量は全体の0.7%以下と小さいため、土粒子は供試体内部を移動したものの、最終的に流出せずに滞留した細粒な土粒子の影響が強度変化に現れたものと考えられる。

第4章では、小規模な内部侵食のメカニズムにアプローチするために、地盤内部を通過し、漏出した濁水の濃度と濁度の関係に着目して、流出土粒子径の時間変化を調べる手法を考案し、予備検討を実施した。また、第3章で土粒子の流亡を伴う通水により得られた排水に対し、上記手法を適用した。その結果、侵食しにくい状況であると、流出する可能性がある土粒子の中から、粒径の小さい土粒子だけが間隙をくぐり抜け、径の大きな土粒子は排出せずに供試体内に滞留していることが推察された。

第5章では、サフュージョンを伴う一次元下向き通水実験を実施し、流量、土粒子の排出量および排

水の濁度の三者の関係を詳細に調べた。その上で，第4章の手法を利用してサフュージョンの進行とともに変動する排出土の粒度組成を調べた。その結果，いずれの条件においても，流出境界面に設置したワイヤーメッシュの目開き径を通過できる流出可能成分の中からさらに粒径が小さな土粒子が選抜され，排出していることが分かった。また，サフュージョンの進行とともに，排出土の粒度組成が時間変化しており，その傾向が通水開始前の供試体の飽和度によって大きく異なることが分かった。実験終了後の供試体の粒度組成を調べたところ，高さ方向の流出可能成分の分布だけでなく，流出可能成分自体の粒度組成も不均一になっていることが分かり，粒径の小さい土粒子ほど間隙での移動距離が長いことが推測された。

さらに，定水位条件下において上載圧がサフュージョン挙動に与える影響を調べた結果，動水勾配が大きい場合において，上載圧が大きいほどサフュージョンが発生しにくくなることが分かった。排出土粒子の粒度組成を調べたが，上載圧による違いはみられなかった。

加えて，動水勾配変動下におけるサフュージョンの進行について調べた。その結果，1回目の通水以降，土粒子の排出量は大幅に低下するが，動水勾配が上昇すると，土粒子の排出量が増加し，その状況は動水勾配を30回変動させてもなお継続した。流出土粒子の粒度組成を調べた結果，供試体に初めて動水勾配を与えた段階で，粒径が小さく流れやすい土粒子は既に抜けており，動水勾配の変動で流出する土粒子は，比較的径の大きな土粒子であることが分かった。

以上，サフュージョンによって流出する土粒子の粒径は，その発生を取り巻く条件や，進行時間によって変化することが分かった。サフュージョンの研究において，排出土の粒度組成は時間とともに変化する要素であり，サフュージョンの進行度を評価する項目になることが明らかになった。

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	潜在的な小規模内部侵食の進行メカニズムと土の力学特性に与える影響の解明 (Investigation of Progression Mechanism of Potential Small-Scale Internal Erosion and Its Effect on Soil Mechanical Properties)
氏 名 (Name)	ISHIMARU Taichi

In recent years, many reports have been made of damage to reservoir embankments due to frequent heavy rains and earthquakes. "Internal erosion" is the phenomenon in which soil particles move through the pore spaces of embankments and flow out of them because of long-term seepage in the soil structures of reservoirs and river embankments. Internal erosion is classified according to the scale and form of the erosion. "Suffusion" is the phenomenon in which only the fine-grained soil particles move through the pore spaces formed by the coarse-grained soil particles. Suffusion is known to cause an increase in hydraulic conductivity and a decrease in soil bearing capacity. However, the mechanisms and causes of the occurrence and progression of this phenomenon, as well as its effect on soil structures, have not been fully elucidated. Therefore, the purpose of this study was to clarify the effect of suffusion on the strength properties of reservoir embankments as well as the mechanism of the progression of suffusion, focusing on the particle size of the eroded soil particles.

In Chapter 1, the background of the study and the classification of internal erosion were provided.

In Chapter 2, the mechanism of suffusion and its effect on geomaterials, which have been clarified in previous studies, were described.

In Chapter 3, the effect of suffusion on the strength properties was firstly investigated by means of soil samples used for the reservoir embankments which were determined to be at risk of suffusion based on an internal stability evaluation. A triaxial compression testing system was established to simulate the suffusion inside each specimen. In the testing system's apparatus, only the fine particles were able to be discharged from the specimen through a sieve by supplying water. The results showed that changes in the peak and residual strength occurred independent of changes in the void ratio due to suffusion, and that the strength properties differed depending on the presence or absence of suffusion, even when the void ratio was the same as that before shearing. However, since the amount of erosion was small (less than 0.7% of the total), it is considered that the change in strength was influenced by the fine soil particles that moved through the specimen but remained in the specimen without finally flowing out of it.

In Chapter 4, in order to define the mechanism of small-scale internal erosion, a method was devised to examine the temporal changes in the size of the discharged soil particles, focusing on the relationship between the concentration and the turbidity of the drainage. The above method was also applied to the drainage obtained by seepage with suffusion in Chapter 3. As a result, the erosion rates were found to correlate with the particle size of the discharged particles.

In Chapter 5, a one-dimensional water-passing experiment with suffusion was conducted to investigate in detail the relationship among the flow rate, soil particle discharge, and turbidity of the drainage. The particle size composition of the discharged soil, which varied with the progress of suffusion, was examined using the method

described in Chapter 4. The results showed that, under all conditions, the soil particles with smaller diameters were selected from among those that were able to pass through the wire mesh at the outlet boundary and then discharged. It was also found that the particle size composition of the discharged soil changed with time as the suffusion progressed, and that this trend varied greatly depending on the saturation degree of each specimen before the start of permeation. After the completion of the experiment, the particle size composition of the soil samples showed that not only the distribution of the erodible component in the height direction, but also the particle size composition of the erodible component itself became heterogeneous, suggesting that soil particles with smaller particle sizes moved longer distances through the pores.

Furthermore, the effect of overburden pressure on the behavior of suffusion under constant hydraulic gradient conditions was explored, and it was revealed that higher overburden pressure resulted in less frequent suffusion when the hydraulic gradient was large. The particle size composition of the discharged soil was examined, and no difference was found among the various levels of overburden pressure.

In addition, the progression of suffusion was investigated under a fluctuating hydraulic gradient. The suffusion continued even after 30 cycles of hydraulic gradient variation. The particle size composition of the discharged soil particles showed that the small soil particles, that flow easily, had already been discharged when the specimen was first subjected to permeation force, and that the soil particles discharged by the change in hydraulic gradient were relatively large in diameter.

The particle size of the soil particles discharged by suffusion were seen to depend on the conditions surrounding the occurrence of suffusion and the time of the progression. In studies on suffusion, the particle size composition of the soil discharged by suffusion is a significant factor that changes over time and can be used to evaluate the degree of the progression of suffusion.

(様式 9 号)

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	石丸 太一
審 査 委 員	主 査：鈴木 素之 教授
	副 査：中田 幸男 教授
	副 査：山本 浩一 教授
	副 査：吉本 憲正 准教授
	副 査：森 啓年 准教授
論 文 題 目	潜在的な小規模内部侵食の進行メカニズムと土の力学特性に与える影響の解明 (Investigation of Progression Mechanism of Potential Small-Scale Internal Erosion and Its Effect on Soil Mechanical Properties)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】	
<p>貯水を目的とした土構造物（ため池堤体等）内部で発生する地盤侵食の一種のサフュージョンは、潜在的に透水性の増加や地盤強度の低下を引き起こす。本研究はサフュージョンの進行メカニズムおよびサフュージョンが土の強度特性に与える影響の解明を目的としたものであり、特に流出土粒子の粒径に着目して、その全容の把握を試みたものである。本学位論文では、研究の成果を全 6 章にまとめている。</p> <p>第 1 章では、研究の背景と目的、内部侵食に関する用語の定義を述べた。また、サフュージョンを、内部侵食を包摂する研究全体の中で位置づけ、本研究の対象を明確にした。</p> <p>第 2 章では、サフュージョンの発生メカニズムと地盤材料に与える影響に関する既往の研究結果を整理要約した。サフュージョンの継続・発展過程に関する研究は未だ不十分であること、移動土粒子径の経時変化を調べた研究は皆無であること等を示し、本研究の新規性を明確にした。</p> <p>第 3 章では、三軸セル室内でサフュージョンを再現可能な三軸試験装置を用いて、サフュージョンが土の力学特性に与える影響を調べた結果を述べた。ため池堤体土として使用されるが、内部安定性の評価によってサフュージョンの発生リスクがあると判定される土試料に対して、サフュージョンが土の強度やダイレイタンシー特性に影響を与えることを明らかにした。さらに、サフュージョンがもたらす密度変化だけがその要因ではないことを示した。室内試験の侵食量は全体の 0.7%以下と小さいため、土粒子は供試体内部を移動したが、最終的に排出されず供試体内に滞留し、その滞留した細粒土粒子が力学特性の変化に影響を及ぼしたと結論付けた。</p> <p>第 4 章では、サフュージョンのより詳細な理解のためには、非常に小さな変化を実験中に捉える必要があると考え、地盤内部を通過・漏出した排水の濃度と濁度の関係に着目した。</p>	

(様式 9 号)

また、同一濃度濁度比という新しいパラメータを導入して、流出土の粒子径の時間変化を調べる手法を考案した。

第 5 章では、サフュージョンを伴う一次元下向き通水実験を実施し、流量、土粒子の排出量および排水の濁度の三者の関係を調べた。同一濃度濁度比が流出土の粒子径の時間変化を適切に捉えていること、サフュージョンによって流出する土粒子の粒径はその発生を取り巻く条件や進行時間によって変化すること等を明らかにした。

第 6 章では、各章の結論を要約し、論文全体を総括した。サフュージョンの研究において取り上げた排出土の粒度組成は、時間の経過とともにユニークな経路で変化するものであることを突き止め、それと連動して変化する排水濁度はサフュージョンの進行度を評価する重要な項目になることを見出した。さらに、この成果は河川堤防やため池堤体、道路盛土などの安全性診断に利活用される可能性があることを示した。

公聴会是对面およびハイブリッドの併用開催とし、学内外から 52 名の参加があった。公聴会における主な質問の内容は、1) 濁度の測定や供試体の作製・飽和化等の実験方法に関すること、2) 専門用語に関すること、3) 研究の端緒となる事例と研究の進展に関すること、4) ため池堤体の被災メカニズムに関すること、5) 研究成果の漏水モニタリングへの活用など社会実装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の確かな回答がなされた。

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 6 編）

- 1) 石丸太一、鈴木素之、若松知季、神山惇：細粒分流出を伴う透水を受けたまさ土の力学特性，地盤工学会中国支部，地盤と建設，Vol.37，第 1 号，pp.107-114，2019.
- 2) 石丸太一、鈴木素之、高野翔太：濁度を利用した細粒分流出実験における移動土粒子の粒度組成とその時間変化，地盤工学ジャーナル，Vol.17，No.1，pp.47-60，2022.
- 3) Ishimaru, T., Suzuki, M., Wakamatsu, T.: Suffusion Process of Fine Particles in One Dimensional Permeability Experiment, Proceedings of the Technical Forum on Mitigation of Geo-disasters in Asia, pp.84-89, 2019.
- 4) Ishimaru, T., Suzuki, M., Wakamatsu, T.: Mutual Relationship between Suffusion and Shear Behavior in Triaxial Compression Apparatus, Proceedings of the Tenth International Conference – GEOMATE 2020 Geotechnique, Construction Materials and Environment, pp.153-158, 2020.
- 5) Wakamatsu, T., Suzuki, M., Ishimaru, T.: Outflow Characteristics of Fine Particles in Two Kinds of Water-Passing Experiments Using a Column, Proceedings of the Tenth International Conference – GEOMATE 2020 Geotechnique, Construction Materials and Environment, pp.321-326, 2020.
- 6) Suzuki, M., Ishimaru, T., Wakamatsu, T.: Suffusion and mechanical characteristics of soils affected by seepage before and after shearing in triaxial test apparatus, Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp.3595-3600, 2022.