

博士論文

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)

2023年3月

石丸太一

山口大学大学院創成科学研究科

論文要旨

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、地表面の変状を伴うことなく、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くことが分かり、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。

Abstract

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.

目次	
第1章 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 ため池の特徴.....	2
1.3 内部侵食の分類と定義.....	3
1.4 潜在的な小規模内部侵食 —サフュージョン—.....	6
1.5 本研究の位置づけと目的.....	9
1.6 本論文の内容と構成.....	10
1.7 参考文献.....	11
第2章 既往の研究.....	13
2.1 サフュージョンの種類.....	13
2.2 サフュージョンの発生メカニズムに関して.....	14
2.3 サフュージョンが及ぼす影響について.....	20
2.4 参考文献.....	24
第3章 サフュージョンを受けた土の力学特性の変化.....	29
3.1 概説.....	29
3.2 使用した土の物理特性.....	29
3.3 実験装置.....	34
3.4 実験方法.....	36
3.5 結果の整理.....	37
3.5.1 侵食率および有効侵食率の定義.....	37
3.5.2 透水後間隙比の定義.....	37
3.6 実験条件.....	38

3.7	実験結果.....	40
3.7.1	土粒子の排出状況.....	40
3.7.2	排水せん断挙動.....	42
3.7.3	せん断前間隙比と各種強度の関係.....	44
3.7.4	ダイレイタンシー特性.....	48
3.7.5	侵食率と各強度変化率の関係.....	50
3.8	結論.....	52
3.9	参考文献.....	53
第4章	サフュージョン挙動把握に資する濁度の利用.....	55
4.1	概説.....	55
4.2	土木分野における濁度の利用.....	55
4.3	濁度計測の概要.....	56
4.4	濁度測定の方法.....	58
4.5	サフュージョン実験への濁度の適用.....	59
4.5.1	基準試料の濁度測定.....	59
4.5.2	同一濃度濁度比の定義.....	63
4.6	第3章における三軸試験排水の分析.....	65
4.7	まとめ.....	66
4.8	参考文献.....	67
第5章	排水の濃度—濁度関係に着目したサフュージョン進行メカニズム.....	69
5.1	概説.....	69
5.2	パート1：飽和度と細粒分含有率がサフュージョン挙動に与える影響.....	69
5.2.1	実験装置.....	69

5.2.2	実験試料.....	71
5.2.3	実験手順.....	72
5.2.4	測定項目と測定方法.....	74
5.2.5	実験結果.....	75
5.2.6	移動土粒子の粒径に着目したサフュージョンの進行メカニズム.....	93
5.2.7	まとめ.....	95
5.3	パート2：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.....	97
5.3.1	実験装置.....	97
5.3.2	実験試料.....	99
5.3.3	実験手順.....	101
5.3.4	実験結果.....	102
5.3.5	まとめ.....	106
5.4	パート3：動水勾配の変動がサフュージョン挙動に与える影響.....	107
5.4.1	実験手順.....	107
5.4.2	実験結果.....	108
5.5	まとめ.....	113
5.6	参考文献.....	114
第6章	総括.....	115
	謝辞	

第1章 序論

1.1 研究背景

近年の豪雨や大地震の発生に伴い、農業用ため池（以下、ため池）に関する被害が数多く報告されている。平成30年7月豪雨では、西日本を中心に甚大な水害が発生し、従来の防災重点ため池に指定されていない小規模なため池を含む32箇所が決壊する被害が発生した。表1.1に近年の豪雨災害とそれを受けての行政の取り組みを示す。平成30年7月豪雨による甚大な被災を受けて防災重点ため池の見直しと再選定が実施され、防災重点ため池の数は従来の11,399箇所を大幅に上回る63,722箇所となった²⁾。また、ため池の管理体制の強化を目的に、令和元年7月に「農業用ため池の管理及び保全に関する法律」が施行され、都道府県によるため池に関する情報のデータベース化や、所有者および管理者が不明瞭なため池の明文化等が進められている³⁾。ため池防災は、今後、防災重点ため池を中心とした早急な対応・対策の実施と日常点検の維持と向上が求められていくと想定される。

表 1.1 近年の豪雨災害と主な行政の取り組み（山本，2019 に加筆）¹⁾

年月	概要
H23.3	東日本大震災
H25-27	全国のため池一斉点検
H27.5	土地改良事業設計指針「ため池整備」の改定
H29.7	九州北部豪雨
H30.7	平成30年7月豪雨
H30.7	平成30年7月豪雨を踏まえたため池対策検討チームが設置
H30.7	全国ため池緊急点検の実施
H30.11	「防災重点ため池」の新たな選定基準を策定
H30.12	「防災・減災，国土強靱化のための3か年緊急対策について」を閣議決定
R 元.7	「農業用ため池の管理及び保全に関する法律」が施行
R2.12	「防災・減災，国土強靱化のための5か年加速化対策」を閣議決定

1.2 ため池の特徴

現存する最古のため池は狭山池（大阪府大阪狭山市）と言われ、築造時期は600年前後とされている。図1.1に示すように、築造後の狭山池は洪水や地震等による決壊のため、何度も改修を繰り返していることが歴史書や現場調査から分かっている⁴⁾。改修で用いられた盛土はそれぞれ性質が異なっているため、断面で見ると地層のようになっている⁵⁾。

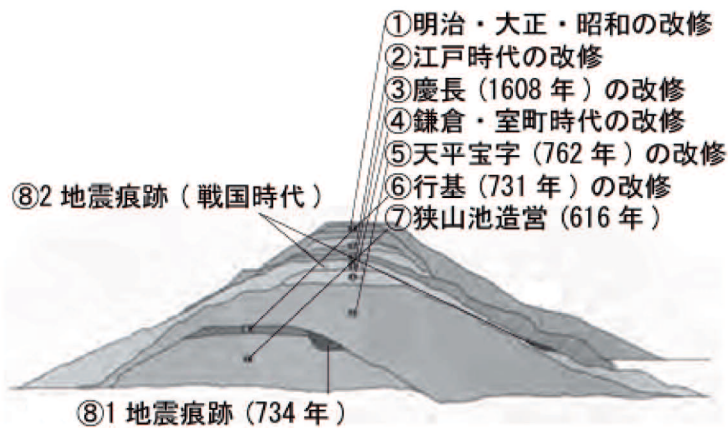


図1.1 狭山池の断面図（吉井ら，2017より引用）⁶⁾

ため池の約7割は近世以前に築造されている。ため池の設計に関する記述は1949年の「土堰堤」が最初であるとされ、ため池の大部分は地域ごとの経験的な技術によって築造されている⁷⁾。用土はできるだけ近くにあり、強固でない取りやすい土が選定され、足踏みや簡易な道具を用いた人力の締固めが行われていたと想像され⁸⁾、当然現在の施工基準を満たしているものは少ない。さらに、一般的には、灌漑期の放水と翌年の耕作に向けた貯水のため、営農活動に合わせた人為的な操作によって年間周期で水位が大きく変動するという特徴を有する（図1.2）。

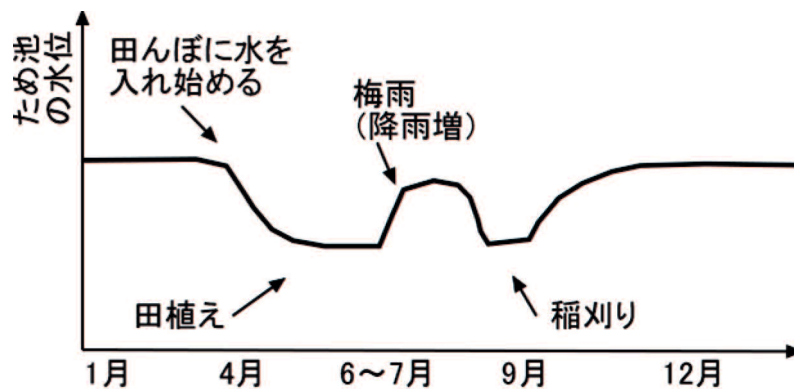


図1.2 営農活動に伴うため池水位の変動例（農林水産省，2015を参考に作成）⁹⁾

このように、ため池は以下のような歴史的特徴を有しており、維持管理に細心の注意を払う必要がある。

- 土質が多種多様である
- 築造時の締固め状況が不明瞭である
- 改修による層状の断面構造が見られる
- 年周期の大きな水位変動を受けている

1.3 内部侵食の分類と定義

ため池堤体や河川堤防のように貯水を目的とした土構造物では、堤体表面から濁った水が漏出する時がある¹⁰⁾。これは、堤体内部を流れる水の浸透作用を受けて、土粒子が堤外へ抜け出している状態である。農林水産省が公表している「ため池管理マニュアル¹¹⁾」においても、漏水の濁りは重要なチェック項目になっており、発見した管理者は直ちに地方自治体へ報告するように促している。堤体内にパイプ状の孔隙（パイピング）が発生し、それが堤体法面まで達すると、堤体全体の崩壊の一因になる（写真 1.1～写真 1.3）。



写真 1.1 パイピングが発見されたため池の全景
(山口県下関市船引ため池)



写真 1.2 底樋の脇に形成したパイピング孔
(山口県下関市船引ため池)



写真 1.3 堤体表のり面に開いた入口とみられるパイピング孔
(山口県下関市船引ため池)

パイピングのように、盛土構造物の内部を流れる水の浸透を受けた結果、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を内部侵食 (**Internal erosion**) といい、河川堤防やため池堤体などの貯水を目的とした盛土構造物の被災要因のひとつである。内部侵食は、その規模や発生形態、発生箇所によって細かく分類されており、そのメカニズムに応じた専門用語が定義されている。文献間で用語の定義が異なることがあるため¹²⁾、本研究では、ICOLD (2017)¹³⁾の分類を用いることとした。内部侵食は、以下の4パターンのメカニズムによって開始し、発達していく (図 1.3)。

- **Concentrated leaks**

締固め不足による不等沈下や、乾燥収縮などによって既に地盤に形成された空洞領域を流れる浸透流がその表面を侵食する現象である。侵食によって、クラック幅が拡大し、パイピングに繋がる可能性がある。

- **Backward erosion**

浸透水の浸出箇所から土粒子の流亡が開始し、浸透流の流れとは反対の向きに侵食が拡大していく現象をいう。**Backward erosion** はさらに2つに分類され、侵食がパイプ状に進展する場合を **Backward erosion piping**、侵食が鉛直上向きに波及し、陥没が発生する場合を **Global backward erosion** といい、日本語では、「後退侵食」と訳されることがある¹⁵⁾。

- **Contact erosion**

異なる土質の層境界で発生する内部侵食で、より細粒な材料が侵食を受けられる現象である。

- **Suffusion**

地盤内部を流れる浸透流によって、粗粒な土粒子が形成する間隙空間を細粒な土粒子が移動・流出する現象である。日本語では、「細粒分流出」と訳されることが多い。

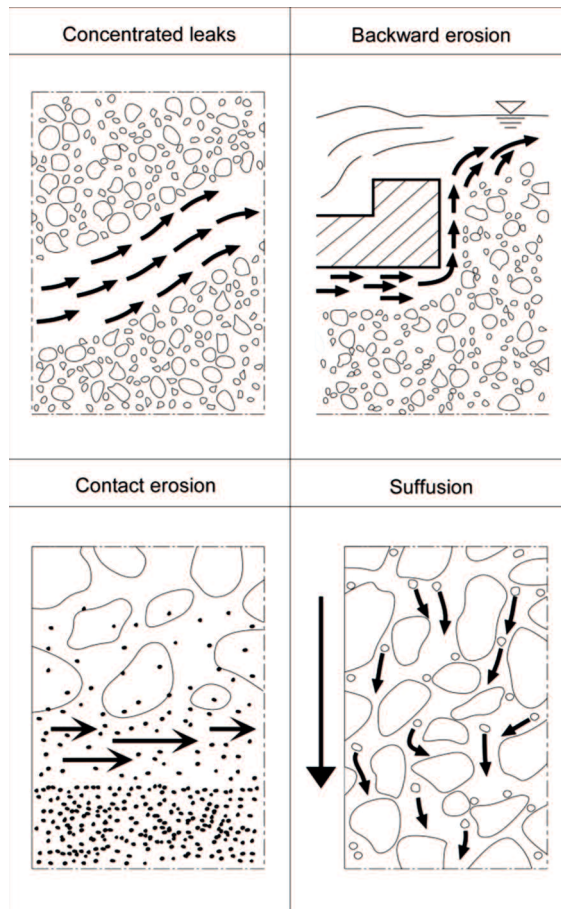


図 1.3 内部侵食メカニズムの分類 (Fell and Fry, 2007 をもとに作成) ¹⁴⁾

1.4 潜在的な小規模内部侵食 —サフュージョン—

本研究では、内部侵食の分類における Suffusion に着目した。上記分類における Suffusion は、地盤内部を流れる浸透流によって、粗粒な土粒子が形成する間隙空間を細粒な土粒子が移動・流出する現象である。Suffusion は日本語で「細粒分流出」と訳されることが多いが、ここでの「細粒分」は 0.075mm 以下の土粒子（地盤工学会による区分）の意味ではなく、あくまで、土全体の粒径範囲の中でも細粒な土粒子を表現していることに留意されたい。本研究では、Suffusion を「細粒分流出」と訳さず、カタカナ表記でサフュージョンと表現することとした。

図 1.4 に内部侵食の規模を軸に整理したサフュージョンの位置付けを示す。着目する現象の規模を粒子レベル、要素レベル、構造物レベルと大別するとサフュージョンは粒子レベルの最も小規模な内部侵食である。

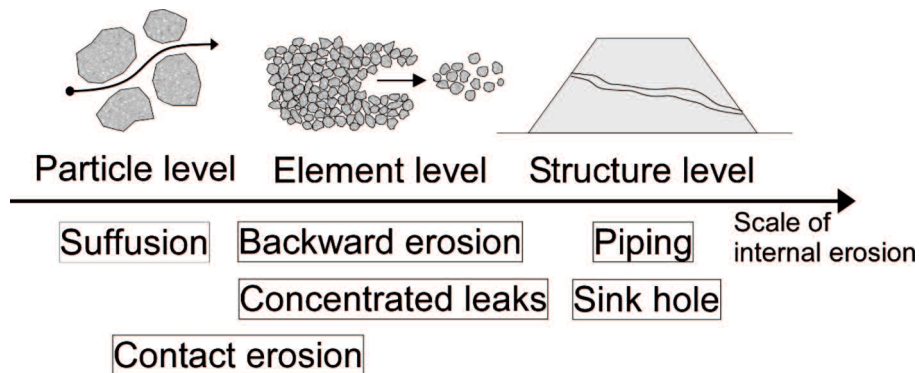


図 1.4 内部侵食の規模と分類

Foster and Fell¹⁵⁾は、内部侵食がいずれかのメカニズムで開始した後、図 1.5 に示すような、Initiation (開始) → Continuation (継続) → Progression (発展) → Breach/Failure (損傷/破壊) の過程で進行し、内部侵食はある程度進行してはじめて変状が地表面に顕在化することを述べている。サフュージョンは主にこれらの初期段階に関わっており、例として、次のような影響を与えるとされる¹³⁾。

- 浸透力の増加によって後退侵食やパイピングを誘発する。
- 間隙の変形によって、盛土の天端が沈下する。
- 間隙水圧の増加や地盤耐力の低下によって、すべり破壊を誘発する。

したがって、上記2つのように、サフュージョンが起点となり、より規模が大きい内部侵食（パイピングや陥没）に発達するような、内部侵食で始まり、内部侵食として地表面に表れるプロセスだけでなく、サフュージョンが潜在的に進行し、地盤耐力を低下させ、最終的には他の破壊モード（すべり、液状化など）で地表面に顕在化するプロセスを考える必要がある。

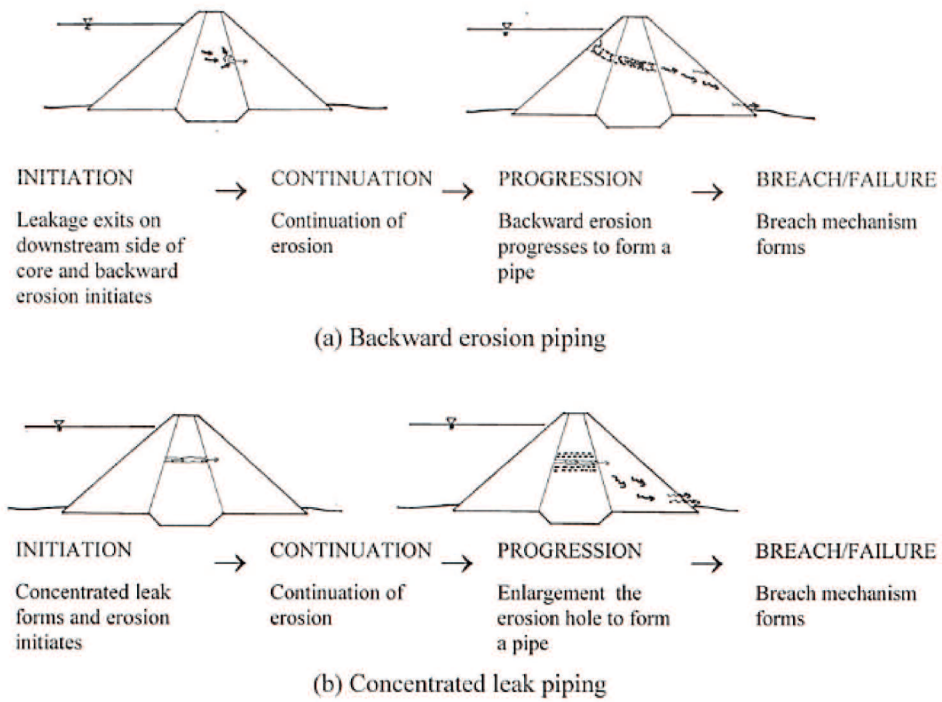


図 1.5 内部侵食の進行プロセス (Foster and Fell, 1999 より引用) ¹⁶⁾

1.5 本研究の位置づけと目的

サフュージョンの発生については、古くから確認されているものの、そのメカニズムや地盤材料に与える影響は十分に解明されていない。本研究は、サフュージョンが開始後、潜在的に進行し、何らかの影響が土構造物内部に蓄積されていくという、ひとつのシナリオを想定し、メカニズムやその影響の解明を目指すものである。具体的な検討項目を以下に示す。

1. 近年、サフュージョンが土の変形および強度特性に与える影響を調べるために、三軸試験機内部で土粒子の流亡を伴う浸透流を与えた供試体に対するせん断試験が実施されている。その多くは、人工的に調整されたギャップのある土に対する検討がほとんどであり、自然土で実施された研究はほとんどない。本研究では、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。
2. Foster and Fell¹⁶⁾が示す内部侵食の進行プロセス、開始→継続→発展→破壊/損傷のうち内部侵食の“開始”および“損傷/破壊”領域に関する研究が多く、“継続・発展”領域に関する研究は比較的少ないといえる。そのうち、サフュージョンにより移動する土粒子の粒径が時間的にどのように変化しているのかを調べた研究はない。そこで、微小な変化を捉えるために濁度を用いて、サフュージョンによる流出土粒子の粒径を調べ、進行メカニズムを考察した。

1.6 本論文の内容と構成

本論文は序論を含めて全6章から構成されている。各章の要点を以下に記す。

第1章 序論

本研究の背景と目的を述べ、論文の内容と構成を示した。

第2章 既往の研究

サフュージョンのメカニズムおよび地盤に与える影響に関する既往の研究を整理した。

第3章 サフュージョンを受けた土の力学特性

内部でサフュージョンを再現できる特殊な三軸試験機を用いて、土粒子が流出した供試体に対する排水せん断試験を実施した。なお、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た。

第4章 サフュージョン挙動把握に資する濁度の利用

サフュージョンによって流出する土粒子の粒径変化を捉えるために、濁度を利用した。その方法と適用について予備的検討を行った。

第5章 排水の濃度—濁度関係に着目したサフュージョン進行メカニズム

カラム装置を用いた一次元通水実験に濁度測定を取り入れて、流出する土粒子の量や粒径の時間的变化を調べるとともに、供試体の飽和度や細粒分含有率、上載圧等の影響を検討した。

第6章 結論

各章で得られた知見をまとめ、結論とした。

1.7 参考文献

- 1) 山本恵太：「農業用ため池の管理及び保全に関する法律」の概要—農業用ため池の適正な管理を目指して—，農村計画学会誌，Vol.38，No.3，pp.320-323，2019.
- 2) 農林水産省：「ため池」https://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/（閲覧日：2022年10月15日）.
- 3) 農林水産省農村振興局：農業用ため池の管理及び保全に関するガイドライン，2019年6月策定（2020年10月一部改正）.
- 4) 西田一彦，市川秀之，辻本勝彦：狭山池の歴史と堆積土の性状—物証土木史の一試み—，土木史研究，第15号，pp.469-474，1995.
- 5) 金盛弥，古澤裕，木村昌弘，西園恵次：狭山池ダム・古代の堤体が語る土木技術史について，土木史研究，第15号，pp.485-490，1995.
- 6) 吉井克信，西川寿勝，浜地長生：狭山池の改修とその技術変遷，建設機械施工，Vol.69，No.8，pp.54-59，2017.
- 7) 毛利栄征：ため池の地震・豪雨による被災事例に学ぶ地域減災の実現について，石川県地質調査業協会『技術講演会』講演資料，2019.
- 8) 房前和朋，竹林征三：労働唄・どんつき節による土木技術史の研究，土木史研究，第16号，pp.627-636，1996.
- 9) 農業農村工学会：土地改良事業設計指針「ため池整備」，2015.
- 10) 近田昌樹，川本欣也：ため池のパイピングと漏水調査事例，農業農村工学会誌，Vol.86，No.2，pp.125-128，2018.
- 11) 農林水産省農村振興局整備部防災課：ため池管理マニュアル，p.5，2015.
- 12) Říha, J., Alhasan, Z., Petrula, L., Popielski, P., Dąbska, A., Fry, J.J., Solski, S.V., Perevoshchikova, N.A., Landstorfer, F.: Harmonisation of Terminology and Definitions on Soil Deformation Due to Seepage, Internal Erosion in Earthdams, Internal Erosion in Earth dams, Dikes and Levees, Vol.17, pp.347–366, 2019.
- 13) ICOLD: Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations, Bulletin 164, 2017.
- 14) Fell, R., Fry, J. J.: Internal erosion of Dams and their Fions, Taylor & Francis, p.245, 2007.

- 15) 公益社団法人地盤工学会平成 30 年度会長特別委員会：平成 30 年 7 月豪雨を踏まえた豪雨地盤災害に対する地盤工学の課題—地盤工学からの提言—，2019.
- 16) Foster, M., Fell, R.: A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods. University of New South Wales, Kensington, 1999.

第2章 既往の研究

2.1 サフュージョンの種類

Slangen¹⁾は土骨格からの土粒子が流出することによる質量損失 Δm や体積変化 ΔV , 透水係数の変化 Δk によって, サフュージョンはさらに“Suffusion (サフュージョン)”と“Suffosion (サフォージョン)”に細分化することを提案している。(図 2. 1)。この分類は, 侵食後の地盤の応答を考察するために, 極めて重要であることを Slangen¹⁾は主張している。

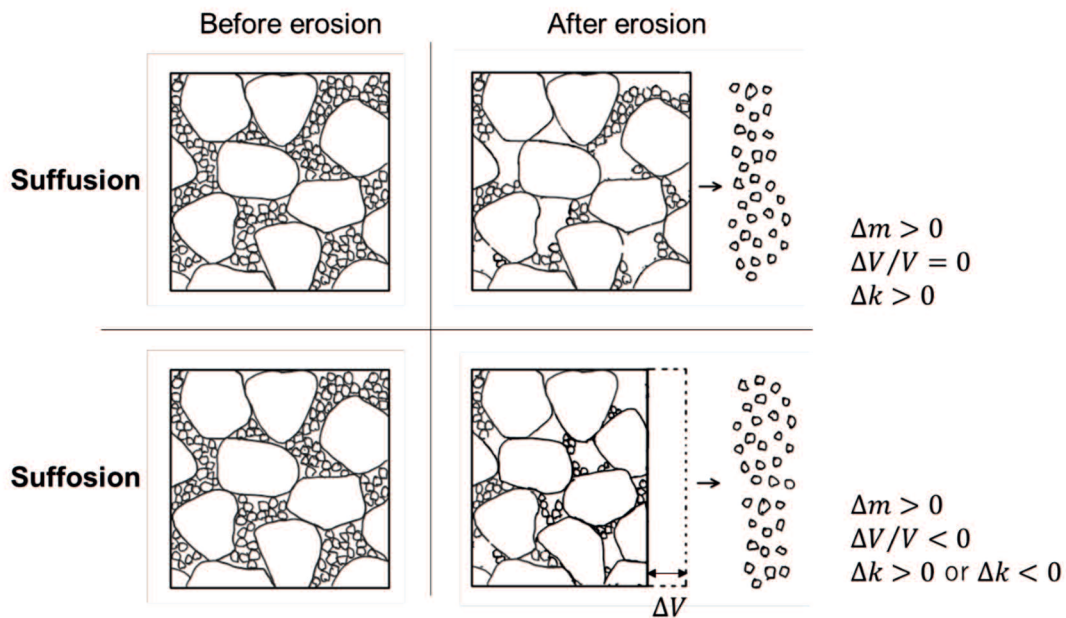


図 2. 1 Suffusion と Suffosion の違い (Slangen, 2018 をもとに作成) ¹⁾

2.2 サフュージョンの発生メカニズムに関して

表 2.1 にサフュージョンに関する既往の研究の検討項目を Foster and Fell²⁾の進行プロセスを軸に整理した。

まず，“開始”領域に関する研究においては，サフュージョンを含む内部侵食の発生を支配する要因として，図 2.2 に示すような，土質，地盤，浸透の各条件等が着目され，サフュージョンが発生する，または，発生しやすい条件が検討されている。素因としての土質条件や地盤・施工条件，誘因としての水理学的条件が相互に関連しあう。また，対象とする現象も様々であり，堤体における水みちの拡大だけでなく，埋設管渠破損部からの土粒子流出や地盤のゆるみ部分からの空洞拡大など現象に応じた境界条件も異なる。現在までに，これら個々の要因がどのように内部侵食に影響を与えているのか，様々な知見が蓄積されてきている。

表 2.1 Foster and Fell²⁾の内部侵食の進行メカニズムを軸に整理したサフュージョンに関する
既往の研究の検討項目³⁾⁻⁴⁸⁾と本研究の検討項目 (太字で示す)

開始		継続・発展	損傷/破壊
サフュージョンの発生条件や発生しやすさの解明			
土質条件	粒度分布 ³⁾⁻⁵⁾	メカニズムや継続性・継続時間の解明 目詰まりとその解消 ¹⁸⁾⁻¹⁹⁾ 移動土粒子粒径の経時変化	最終的な構造物への影響の解明 前兆現象 ^{a)} パイピング ²⁵⁾ 地盤陥没 ²⁶⁾
	塑性指数 ⁶⁾ 粒子形状 ⁷⁾		
地盤条件	拘束圧・土被り圧 ⁸⁾⁻⁹⁾	進行メカニズム ニズム	透水性 変化 透水係数 ²⁷⁾⁻³⁰⁾
	密度・間隙比 ¹⁰⁾ 含水比・飽和度 ⁶⁾		
浸透条件	動水勾配 ¹¹⁾⁻¹³⁾	浸透時間 ^{18), 20)} 動水勾配の繰返し変動 ²¹⁾⁻²³⁾ 間欠的な浸透 ²⁴⁾	せん断特性 ³¹⁾⁻³⁹⁾ 剛性 ³⁶⁾ 体積変化 ^{8), 36)} 密度分布 ⁴⁰⁾⁻⁴¹⁾ F_c分布・粒度分布 ^{15), 18), 28), 42), b)}
	流速 ¹⁴⁾ 浸透方向 ¹⁵⁾		
その他	供試体サイズ ¹⁶⁾	浸透条件	強度・変形 特性の変化 地盤の不均一化
	メッシュ径 (流出境界条件) ¹⁷⁾		

a) 前兆現象としてサフュージョンが発生しているとされている事例。b) 細粒分以下の検討はなし。

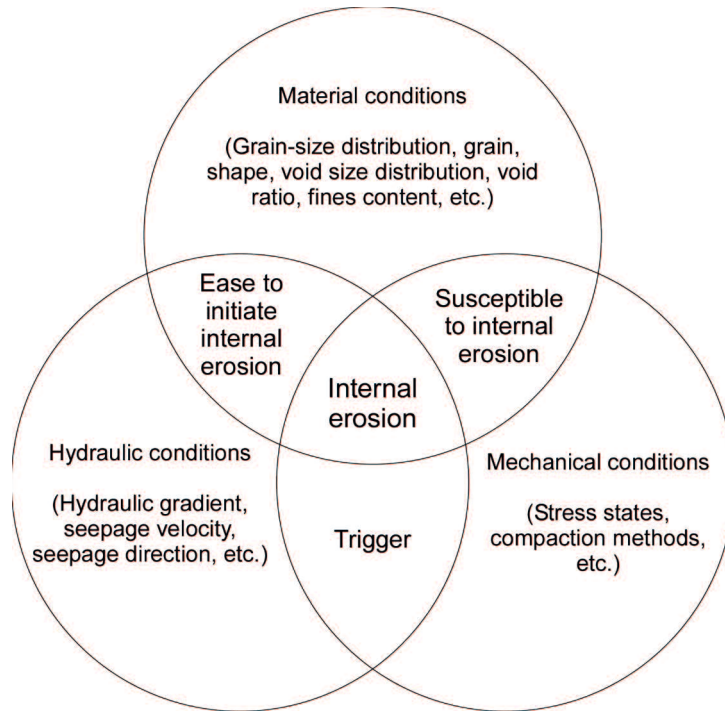


図 2.2 内部侵食に影響を与える要因 (Bonelli, 2012 をもとに作成) ⁴³⁾

フィルダムのフィルター内部の安定性を検討した Kenney ら ³⁾ (1985) の研究は、内部侵食問題の起点となった代表的な既往の研究である。粒状材料が形成する間隙のくびれ径に着目し、フィルター内部の洗い出しの有無を判定する H-F Shape Curve を提案した(図 2.3)。

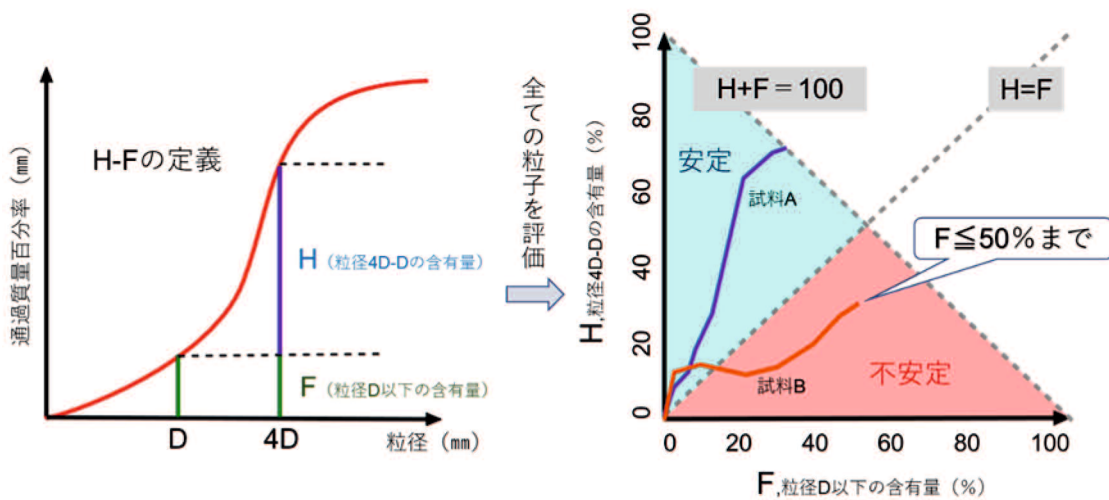


図 2.3 Kenney らの H-F Shape Curve の考え方 (杉井ら, 2016 をもとに作成) ¹⁰⁾

粒径加積曲線のある粒径 D から 4 倍の粒径 $4D$ までの土粒子が形成する間隙くびれ径の最大が D となることを明らかにした上で、土粒子の流出実験が実施されており、ある粒径 D までの通過質量百分率を F (%), D から $4D$ までの質量百分率を H (%) としたとき、「 $H/F \geq 1.0$ 」は内部安定、「 $H/F < 1.0$ 」は内部不安定としたものである。また、検討する範囲は均等係数 U_c が 3 以上で粒径幅が広い場合は $F < 20\%$ の範囲、均等係数 U_c が 3 以下で粒径幅が狭い場合は $F < 30\%$ の範囲となっている。図 2.3 の例では、試料 A は内部安定、試料 B は内部不安定と判定される。この判定指標の閾値に関しては様々な議論、修正がなされてきたが、Ronnqvist⁴⁾ (2014) がその経緯をまとめている (図 2.4)。

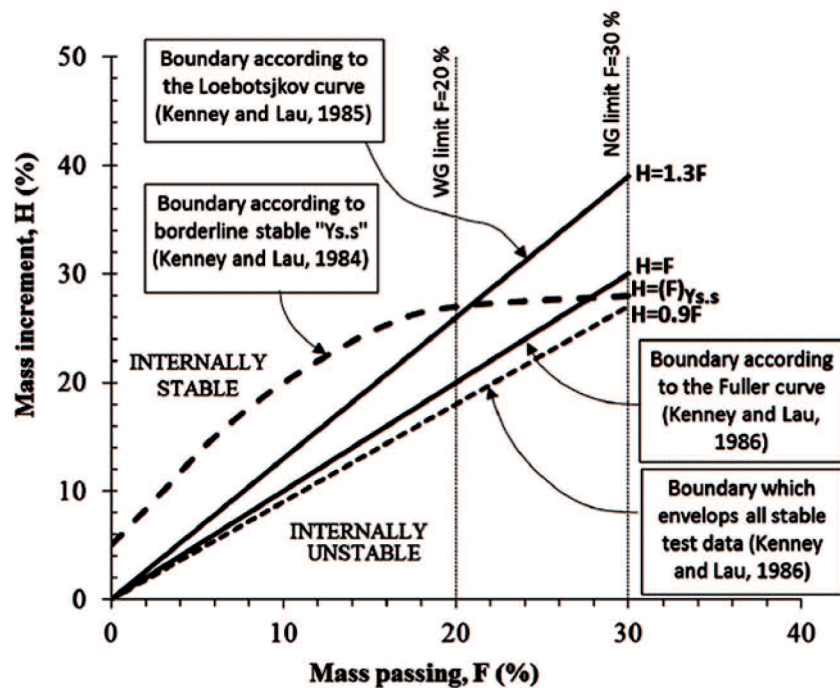


図 2.4 Kenney らの安定指標の閾値の変遷 (Ronnqvist ら, 2014 より引用) ⁴⁾

内部安定指標は Kenney ら以外にもいくつか提案されており、Chang and Zhang⁵⁾はそれらのデータを再整理・再考察している。杉井ら¹⁰⁾は Kenney らの安定指標に間隙径情報を導入した新しい指標を提案している。前田ら⁴⁴⁾は、粒度分布形状に起因する間隙径、間隙の連続性、粒子および間隙空間の平均配位数等が内部侵食に与える影響を、土粒子の流出が可能な一次元透水実験と三次元個別要素法解析を用いて調べている。実験で流出量の多かった粒度分布形状ほど、大きい間隙径を持ち、その繋がり距離が長い間隙構造を有してい

ることを明らかにした。また、粒子骨格構造の安定度や粒子の拘束度を表す平均配位数が大きいほど内部侵食を受けにくいことを明らかにした。これらの研究は、幾何学的観点から土粒子の移動について、主に移動可能な間隙空間の有無によって議論されたものである。

一方で、土粒子の動き出しに関しては、地盤工学における Terzaghi の限界動水勾配や Justin⁴⁵⁾の限界流速、水理学における限界掃流力や限界摩擦速度の考え方を基礎とし発展してきた。杉井ら⁴⁶⁾は、限界動水勾配は土塊の重量と浸透力のつり合いから求めるものであり、土粒子が少しずつ流出する進行性の破壊メカニズムを説明するのは難しいとして、浸透破壊は限界流速で評価することが有用であると述べている (図 2.5)。

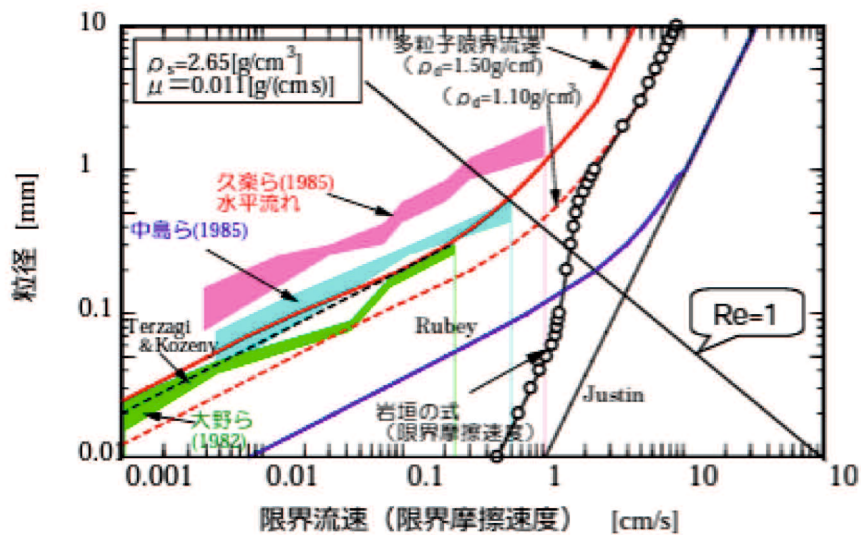


図 2.5 限界流速 (杉井ら, 2018 より引用)¹⁴⁾

その他にも、土の塑性指数や施工時の含水状態⁶⁾、拘束圧^{9), 12)}、流出境界条件 (メッシュ径, 孔径)¹⁷⁾等に着目した研究がなされ、内部侵食が発生する、または、発生しやすい条件の検討が多くなされている。

次いで、“継続・発展”領域に関する研究においては、サフュージョンの進行および粒子の間隙中の移動メカニズムや継続性・継続時間が調べられている。なかでも、Luo et al.¹⁸⁾は地盤内に浸透力が長期に作用した場合、土粒子の移動→目詰まり→目詰まりの押し出し→土粒子の再移動が反復的に繰り返し進行することを指摘している。そのことから、サフュージョンは一度に発生するわけではなく、徐々に進行していく現象であるとして、浸透条

件が時間的に変化する状況を再現した実験が実施され、サフュージョンの進行に与える影響が調べられている。

最後に、“損傷/破壊”領域に関する研究においては、サフュージョンが最終的に盛土構造物に与える影響が検討され、サフュージョンやそれに伴う目詰まりが土の透水性や力学特性、変形特性を変化させることが分かっている³¹⁾⁻³⁹⁾。また、サフュージョンはパイピングや地盤陥没といった大規模な内部侵食の前兆現象として観測されるケースがあることや¹⁷⁾、³⁵⁾、細粒分の目詰まりによって盛土の排水性能が低下した場合、すべりに対する抵抗性が失われていくといった解析結果³⁰⁾が報告されている。

以上、サフュージョンに関する既往の研究を概観すると、目的や検討項目は多岐にわたるが、サフュージョンの“開始”および“損傷/破壊”領域に関する研究が多く、“継続・発展”領域に関する研究は比較的少ないといえる。

そのなかで、本研究で取り上げる検討項目のうち、移動土粒子粒径の経時変化の解明は、“継続・発展”領域の進行メカニズムに関連するものであり、既往の研究ではほとんど明らかにされていない。これについて、本研究では濃度と濁度関係に基づく新たな指標を導入して、その解明を行った。

2.3 サフュージョンが及ぼす影響について

Chang and Zhang³¹⁾, Chang ら³²⁾, Ke and Takahashi³³⁾, Ke ら³⁴⁾, Ouyang and Takahashi³⁵⁾, Sato and Kuwano³⁶⁾, Prasomsri and Takahashi³⁷⁾などは三軸試験機内でサフュージョンを再現し、その後の供試体に対してせん断試験を行うことで、サフュージョンの影響を受けた土の強度・変形特性を調べている。

Chang and Zhang³¹⁾, Chang ら³²⁾は、ギャップのある粒度分布形状の土 (Gap-graded soils) を使用し、異方応力下のサフュージョン挙動を調べた上で、サフュージョンが排水せん断挙動に与える影響を調べている。サフュージョンの影響を受けていない供試体は、せん断時に膨張傾向を示すのに対して、サフュージョンにより密度が低下した供試体は、収縮挙動を示し、ピーク強度も低下した。

Ke and Takahashi³³⁾は三軸試験機内でサフュージョンを伴う通水を行う際に、背圧を維持することで試験中に高い飽和度を保つことができる実験システムを開発した。

Ke ら³⁴⁾は粒径の異なる2種類の珪砂を混合した土試料を使用し、圧密終了後に下向き浸透流を与え、サフュージョンを発生させた後、排水せん断試験を実施した。透水によって、細粒分が抜け出すことで間隙比を増加させながらも、供試体自体が収縮する挙動を観察した。図 2.6 に得られたせん断挙動を示す。細粒分が流出した場合の軸差応力は細粒分が流出していない場合よりも微小ひずみ領域 (1%程度以下) で大きくなり、中ひずみ領域 (1%~15%) において小さくなるという結果がいずれのケースでもみられた。

Ouyang ら³⁵⁾は Ke らと同様の土試料を使用し、サフュージョンが非排水せん断挙動に与える影響を調べている。その結果、ピーク強度、残留強度ともに増加し、特に初期の細砂分の含有量が少ないほどその差が大きい結果となった。マイクروسコープでの微視的観察により、透水した場合、細砂が粗い粒子間に詰まっている様子が観察されており、接触点の増加が強度に影響を与えたと述べている。

Sato and Kuwano³⁶⁾は実際に建設材料としても使用される江戸崎砂を使用し、三軸試験機内でサフュージョンの再現と排水せん断試験を実施し、サフュージョンによりピーク強度が低下する結果を得た。また、サフュージョン前後で微小ひずみ繰り返しを実施し、供試体のヤング率が低下することを明らかにしている。

Prasomsri ら³⁷⁾は Suffusion と Suffosion の違い、すなわち、内部侵食とともに土骨格が変形するか否かによって、強度に与える影響が異なることを明らかにしている (図 2.7)。

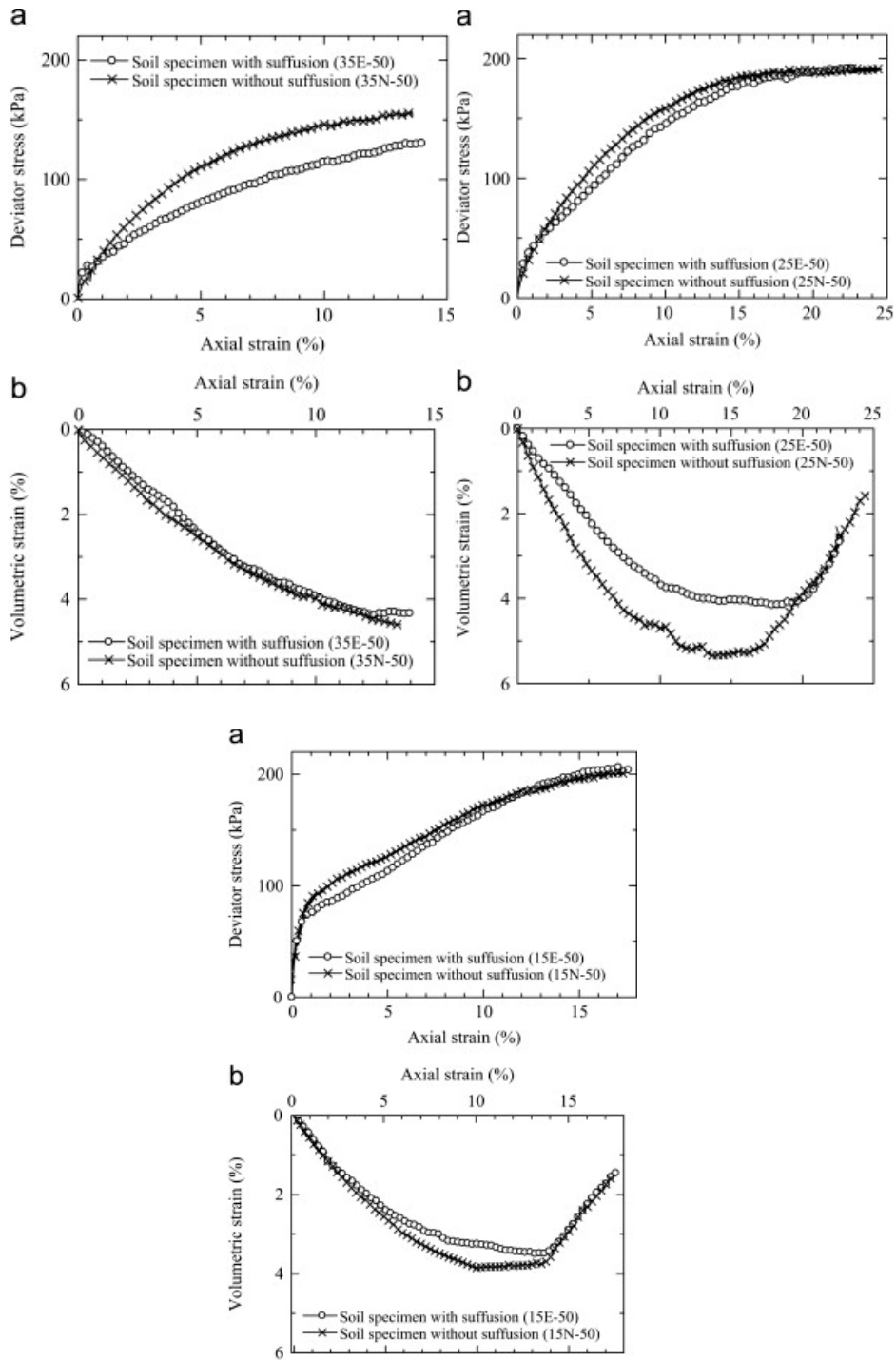


図 2.6 初期細砂含有率の異なる土試料 (35%, 25%, 15%) を用いた侵食あり・なしの力学挙動の比較, a: 応力-ひずみ関係, b: 体積ひずみ-軸ひずみ関係

(Ke and Takahashi, 2014 より引用) ³⁴⁾

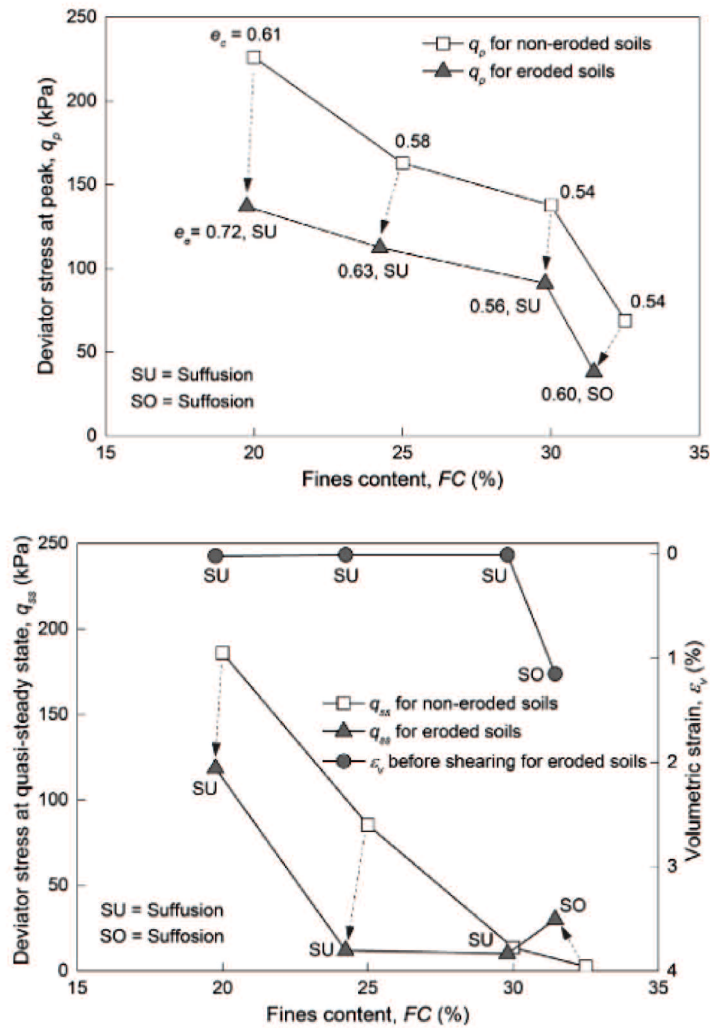


図 2.7 Suffusion および Suffosion によるピーク強度，残留強度の変化
(Prasomsri and Takahashi, 2020 より引用)³⁷⁾

これらの研究より，細粒分が流亡することによって，間隙が増大し，密度が低下することが強度の低下に結びついていることが指摘されているが，それだけでなく，粒度変化や土粒子骨格の再構成が土要素そのものを変化させていることも一因と考えられている。

図 2.8 に，上記文献で検討された土試料の粒径加積曲線を示す。様々な研究成果が蓄積されてきてはいるものの，粒径の異なる 2 種の土試料を混合したギャップのある粒度分布形状の試料 (Gap-graded soils) を使用した実験が多く，また，現場の土試料を使用した実験は少ない。

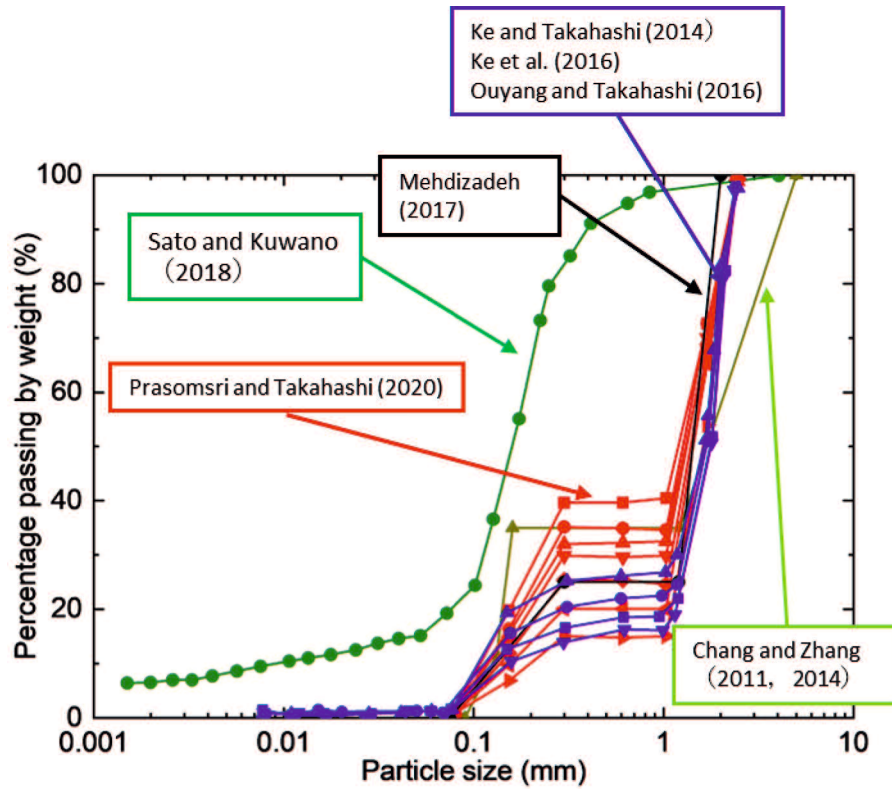


図 2.8 サフュージョンが強度特性に与える影響について調べた既往の研究^{31) -37)}における土試料 (文献よりデジタイザを用いてトレース)

2.4 参考文献

- 1) Slangen, P.: On the influence of effective stress and micro-structure on suffusion and suffusion, Master thesis of The University of British Columbia, 2018.
- 2) Foster, M., and Fell, R.: A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods. University of New South Wales, Kensington, 1999.
- 3) Kenney, T. C., and Lau, D: Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, No.2, pp. 215–225, 1985.
- 4) Ronnqvist, H., and Viklander, P.: On the Kenney-Lau approach to internal stability evaluation of soils, Geomaterials, Vol.4, pp.129-140, 2014.
- 5) Chang, D. S., and Zhang, L. M.: Extended internal stability criteria for soils under seepage, Soils and Foundations, Vol.53, No.4, pp.569-583, 2013.
- 6) 河井正, 高木聖人, 金鍾官, 風間基樹: 細粒分を含む締め固めた砂質土の土粒子流出特性に関する実験的研究, 地盤工学ジャーナル, Vol.13, No.4, pp.309-318, 2018.
- 7) Marot, D., Bendahmane, F., Nguyen, H.H.: Influence of angularity of coarse fraction grains on internal erosion process, La Houille Blanche, Vol.96, No.6, pp.47-53, 2012.
- 8) Chen, C., Zhang, L.M., Pei, L., Wu, Z, Y.: Soil deformations induced by particle removal under complex stress states, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.146, No.9, 2020.
- 9) Bendahmane, F., Marot, D., Alexis, A.: Experimental parametric study of suffusion and backward erosion, Geo-environmental Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol.134, No.1, pp.57-67, 2008.
- 10) 杉井俊夫, 余川弘至, 小竹亮太, 安達良: 内部侵食を対象とした Kenney らの粒度安泰指標への間隙率の導入, 第 28 回中部地盤工学会シンポジウム, pp.97-100, 2016.
- 11) Skempton, A.W., Brogan, J.M.: Experiments on piping in sandy gravels. Géotechnique, Vol.44, No.3, pp.449-460, 1994.
- 12) Moffat, R., Fannin, R, J.: A hydromechanical relation governing internal stability of cohesionless soil, Canadian Geotechnical Journal, Vol.48, No.3, pp.413-424, 2011.

- 13) Zhong, C., Le, V.T., Bendahmane, F., Marot, D., Yin, Z, Y.: Investigation of spatial scale effects on suffusion susceptibility, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.144, No.9, 2018.
 - 14) 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*, Vol.24, pp.619-624, 2018.
 - 15) Marot, D., Tran, D.M., Bendahmane, F., Le, V.T.: Multidirectional flow apparatus for assessing soil internal erosion susceptibility, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.43, No.6, pp.1481-1498, 2020.
 - 16) Sibille, L., Marot, D., Sail, Y.: A description of internal erosion by suffusion and induced settlements on cohesionless granular matter, *Acta Geotechnica*, Vol.10, No.6, pp.735-748, 2015.
 - 17) 佐藤真理, 桑野玲子: 一次元浸透試験による内部侵食発生要因の検討, *生産研究*, Vol.66, No.4, pp.331-335, 2014.
 - 18) Luo, Y., Qiao, L., Liu, X., Zhan, M., Sheng, J.: Hydro-mechanical experiments on suffusion under long-term large hydraulic heads, *Natural Hazards*, Vol.65, pp.1361-1377, 2013.
 - 19) 前田健一, 近藤明彦: 粒度分布形状に起因する内部浸食メカニズムに着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす間隙構造の影響, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, Vol.70, No.2, pp.507-517, 2014.
 - 20) Le, V.T., Marot, D., Rochim, A., Bendahmane, F., Nguyen, H.H.: Suffusion susceptibility investigation by energy-based method and statistical analysis, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.55, pp.57-68, 2018.
 - 21) 富澤彰仁, 佐々木亨, 石原雅規, 佐々木哲也: 土粒子の移動に着目した繰返し浸透実験, *令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会概要集*, III-85, 2019.
 - 22) 佐藤真理, 桑野玲子: 流出水の濁度による土砂流出の定量評価, *生産研究*, Vol.64, No.4, pp.187-191, 2012.
 - 23) 佐藤真理, 桑野玲子: 地盤の内部侵食と排水の濁度の関係, *生産研究*, Vol.65, No.4, pp.199-202, 2013.
 - 24) 長崎智洋, 梶山慎太郎, 中田幸男: 繰返し透水履歴に対する締固め土の内部侵食の評価, *公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集地盤と建設*, Vol.38, No.1, pp.59-67, 2020.
-

- 25) 近田昌樹, 川本欣也: ため池のパイピングと漏水調査事例, 農業農村工学会誌, Vol.86, No.2, pp.125-128, 2018.
 - 26) 佐藤真理, 桑野玲子: 地中埋設物が水みちと土砂流出時の空洞形成に及ぼす影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.1, pp.113-125, 2015.
 - 27) Lafleur, J., Mlynarek, J., Rollin, A, L.: Filtration of broadly graded cohesionless soils., Journal of Geotechnical Engineering, Vol.115, pp.1747-1768, 1989.
 - 28) Marot, D., Rochim, A., Nguyen, H, H., Bendahmane, F., Sibille, L.: Assessing the susceptibility of gap-graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology, Natural Hazards, Vol.83, pp.365-388. 2016.
 - 29) Rochim, A., Marot, D., Sibille, L., Thao Le, V.: Effects of hydraulic loading history on suffusion susceptibility of cohesionless soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.143, No.7, 04017025, 2017.
 - 30) 山本剛, 中井卓巳, 丸木義文, 小高猛司, 岸田潔, 大西有三: 長期劣化の概念を導入した道路法面の健全性評価手法の提案, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.21-33, 2009.
 - 31) Chang, D.S., and Zhang, L.: A Stress-controlled Erosion Apparatus for Studying Internal Erosion in Soils, Geotechnical Testing Journal, Vol.34, No.6, pp.1-11, 2011.
 - 32) Chang, D.S., Zhang, L., Cheuk, J.: Mechanical consequences of internal soil erosion, HKIE Transactions, Vol.21, No.4, pp.198-208, 2014.
 - 33) Ke, L., and Takahashi, A.: Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion, Geotechnical Testing Journal, Vol.37, No.2, pp.347-364, 2014.
 - 34) Ke, L., and Takahashi, A.: Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil, Soils and Foundations, Vol.54, No.4, pp.713-730, 2014.
 - 35) Ouyang, M., and Takahashi, A.: Influence of initial fine content on fabric of soils subjected to internal erosion, Canadian Geotechnical Journal, Vol.53, No.2, pp.299-313, 2016.
 - 36) Sato, M., and Kuwano, R.: Laboratory testing for evaluation of the influence of a small degree of internal erosion on deformation and stiffness, Soils and Foundations, Vol.58, No.3, pp.547-562, 2018.
-

- 37) Prasomsri, J., and Takahashi, A.: The role of fines on internal instability and its impact on undrained mechanical response of gap-graded soils, *Soils and Foundations*, Vol.60, No.6, pp.1468-1488, 2020.
- 38) Mehdizadeh, A., Disfani, M. M., Evans, R., Arulrajah, A., Ong, D. E. L.: Mechanical consequences of suffusion on undrained behavior of a gap-graded cohesionless soil - An Experimental Approach, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.40, No.6, pp.1026-1042, 2017.
- 39) Ishimaru, T., Suzuki, M., Wakamatsu, T.: Mutual relationship between suffusion and shear behavior in triaxial compression apparatus, *Proc. of 10th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment*, pp.153-158, 2020.
- 40) 堀越一輝, 高橋章浩: 浸透流による盛土内の細粒土の移動に与える再堆積の影響, *地盤工学ジャーナル*, Vol.10, No.4, pp.473-488, 2015.
- 41) Doan Nguyen, C., Benahmed, N., Andò, E., Sibille, L., Philippe, P.: Soil microstructural changes induced by suffusion: x-ray computed tomography characterization. *E3S Web Conf.* Vol.92, 2019.
- 42) Israr, J., Indraratna, B.: Internal stability of granular filters under static and cyclic loading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.143, No.6, 2017.
- 43) Bonelii, S.: *Erosion of Geomaterials*, Wiley, 2012.
- 44) 前田健一, 近藤明彦: 粒度分布形状に起因する内部浸食メカニズムに着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす間隙構造の影響, *土木学会論文集 A2 (応用科学)*, Vol.70, No.2, pp.507-517, 2014.
- 45) Justin, J. D.: *The Design of Earth Dams*, ASCE, Vol.87, pp.49-54, 1923.
- 46) 杉井俊夫, 梅基哲矢, 山田公夫, 名倉晋: 浸透破壊を対象とした進行性メカニズムの評価に関する研究, *地盤工学シンポジウム論文集*, 25 巻, pp.61-67, 2013.

第3章 サフュージョンを受けた土の力学特性の変化

3.1 概説

ため池堤体土として利用される宇部まさ土に対して、土粒子を流出させることができる特殊な三軸試験機を用いた排水せん断試験を実施し、サフュージョンが力学特性に与える影響を調べた。土粒子の流出を考慮した間隙比を用いて結果を整理した上で、力学特性への影響を検討した。

3.2 使用した土の物理特性

本研究に用いた土試料は、山口県宇部市で採取したまさ土である。西日本では、堤体土にまさ土を使用したため池が存在する^{1),2)}。表 3.1 および図 3.1 に、本研究で使用した土試料の物理特性、粒径加積曲線をそれぞれ示す。本研究では、細粒分含有率が 5.2%である通常の宇部まさ土 (M5) に加え、細粒分含有率が 10%になるように宇部まさ土を粒度調整した土試料 (M10) および宇部まさ土の細粒分をカオリンに置き換えた土試料 (MK5) を作製し、細粒分含有率や細粒分の塑性の違いによる結果への影響を併せて調べた。

M10 は、宇部まさ土から目開き 75 μm のふるいを用いて抽出した細粒分を通常の宇部まさ土に加えて、最終的な細粒分含有率が 10%になるように調整した。MK5 は、通常の宇部まさ土を目開き 75 μm のふるいの上で水洗いした後、自然乾燥させた 75 μm 径以上のまさ土にカオリンを 5.2%分混ぜ合わせて作製した。土質分類法では、3 種類とも細粒分まじり砂質礫に中小分類される。図 3.2 に示すように、中間粒径が取り除かれた粒度分布形状 (Gap-graded soil といわれる) や下に凸の粒度分布形状 (Upwardly concave や Soil with flat tail in finer といわれる) は一般的にサフュージョンが発生しやすいとされる³⁾。表 3.2 に既往の研究より提案された内部安定指標^{4), 5), 6)}を用いて、本実験試料の内部侵食の発生しやすさを評価した結果を示す。粒径幅が広い粒度分布の土に適用できる 3 つの指標のうち、Kenney の内部安定指標で本実験試料が内部不安定と判定された。Kenney の内部安定指標については、第 2 章 2.2 で詳しく説明している。図 3.3 に今回使用した 2 種類の土試料の H-F 曲線⁴⁾を示す。図 3.1 の粒径加積曲線にプロットされている点を検討対象とし、それぞれの粒径を D として H, F を求め、図 3.3 にデータをプロットした。M5, M10, MK10

第3章 サフュージョンを受けた土の力学特性の変化

いずれも均等係数 U_c が3以上なので、検討範囲は $F < 20\%$ となる。2種類の土試料において、それぞれ D_5 ($\approx 75\mu\text{m}$), D_{12} ($\approx 106\mu\text{m}$) 以下の範囲 (図中の破線囲み) で内部不安定と判断されたため、細粒分が移動できる間隙空間を有する粒度分布であるといえる。また、流速の影響を受けやすい細粒分の流出に着眼していることもあり⁷⁾、今回使用する土試料は内部侵食が発生しやすい粒度分布であると判断した。

表 3.1 使用した土の物理特性

Experimental Soils		
Soil name	Decomposed granite soil (Ube Masado)	
Soil code	M5	M10 (Adjustment of F_c)
Fines content F_c (%)	5.2	10.0
Specific gravity G_s	2.625	2.610
Plasticity index I_p	NP	NP
Uniformity coefficient U_c	19.4	32.9
Maximum dry density $\rho_{d\text{max}}$ (g/cm^3)	1.929	1.950
Material Soils		
Soil name	Decomposed granite soil ($< 75 \mu\text{m}$)	Kaolin
Fines content F_c (%)	100	100
Specific gravity G_s	2.646	2.675
Liquid limit w_L (%)	44.3	59.9
Plastic limit w_P (%)	26.9	35.6
Plasticity index I_p	17.4	24.3

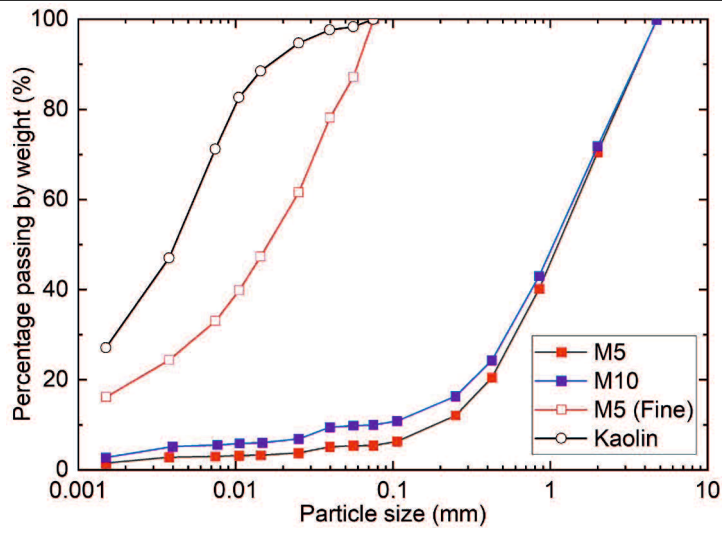


図 3.1 使用した土試料の粒径加積曲線

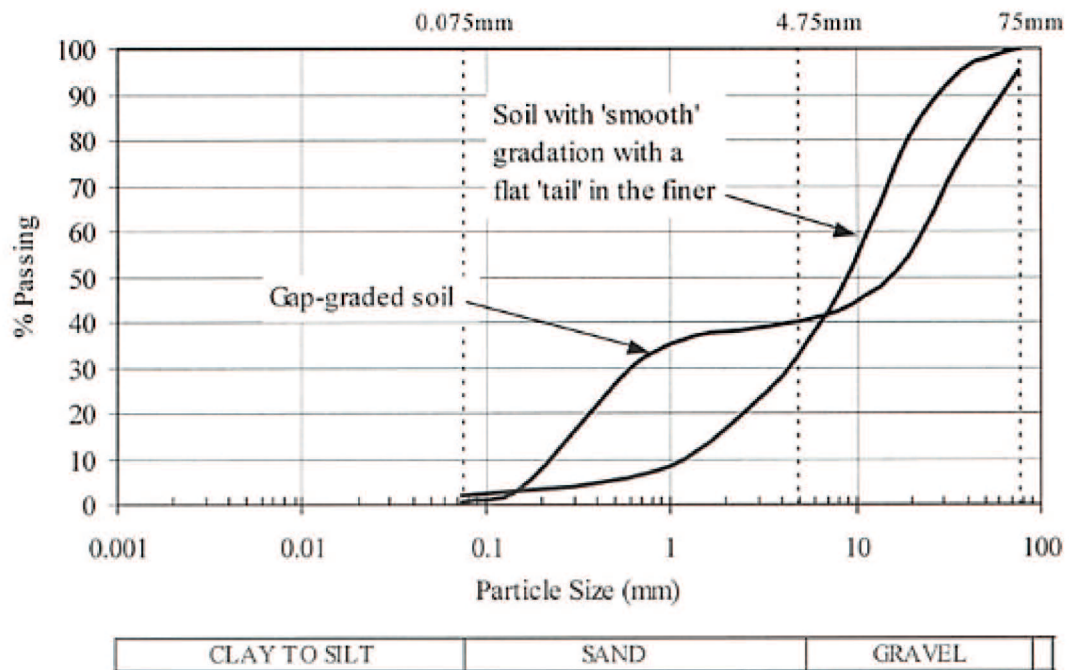


図 3.2 内部不安定になり易い粒度分布の例 (Foster and Fell, 1999 より引用) ³⁾

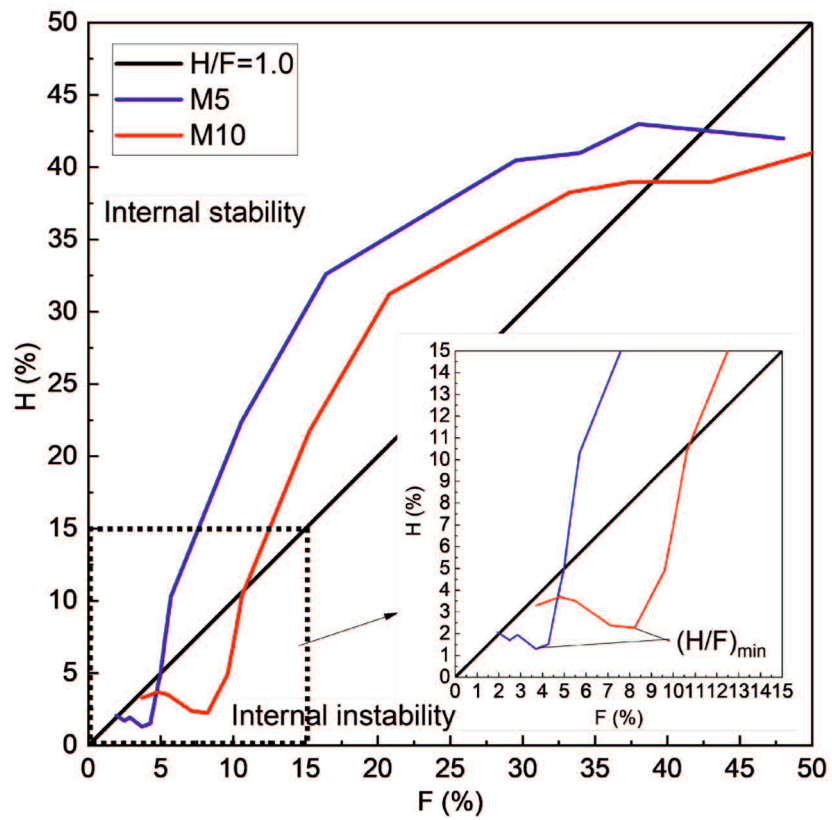


図 3.3 使用した土試料の H-F 曲線

表 3.2 使用した土の内部安定性評価の結果

Criteria of internal stability		Assessment of internal stability of soils used in this study			
Researchers	Criteria*1	Information	Soils		
Kezdi (Skempton and Brogan 1994) ⁴⁾	$D'_{15}/d'_{85} \leq 4$	D'_{15} : particle size equivalent to 15% passing percentage in coarse component d'_{85} : particle size equivalent to 85% passing percentage in fine component	M5	$D'_{15}/d'_{85} = 3.73$	S
			M10	$D'_{15}/d'_{85} = 2.35$	S
Kenney and Lau (1985) ⁵⁾	$(H/F)_{min} > 1.0$	F : mass of soil particles with smaller than any particle diameter D H : mass of soil particles ranging in particle size from D to $4D$	M5	$(H/F)_{min} = 0.38$	U
			M10	$(H/F)_{min} = 0.26$	U
Wan and Fell (2008) ⁶⁾	$15/\log(D_{20}/D_5) > 22$ or $30/\log(D_{90}/D_{60}) < 80$	D_5, D_{20}, D_{60} , and D_{90} : particle size equivalent to 5%, 20%, 60%, and 90% passing percentage in particle size distribution, respectively.	M5	$15/\log(D_{20}/D_5) = 12.1$ $30/\log(D_{90}/D_{60}) = 73.4$	S
			M10	$15/\log(D_{20}/D_5) = 24.5$ $30/\log(D_{90}/D_{60}) = 75.4$	S

Note: *1 A soil is evaluated as internally stable when the conditional formula is met.

*2 S is internally stable. U is internally unstable.

3.3 実験装置

図 3.4 に本実験で用いた内部侵食用三軸圧縮試験機全体の配管図を示す。本実験装置は、既存の三軸圧縮試験機を、内部侵食が再現できるように改良したものである。

図 3.5 に本実験で用いた内部侵食用三軸圧縮試験機のうち、内部侵食を発生させる機構の部分を抜粋した模式図を示す。供試体寸法は、直径 5cm, 高さ 10cm の円柱状である。供試体上部に上部タンク、供試体下部に下部タンクを接続し、水頭差によって供試体に下向きの浸透流を与えることができる。ペDESTALに漏斗状のくぼみを設けるとともに、供試体の下部端面には目開き 250 μm または目開き 425 μm の網目状のワイヤーメッシュ、6 mm 径の孔を 21 個開けたアクリル板の順にペDESTALに設置した。下向きの浸透流を受け、侵食された土粒子はワイヤーメッシュ、アクリル多孔板を通過後、水とともに下部タンクに集まる仕組みとなっている。この有孔板と漏斗型のペDESTALで侵食土を集める方法は、Marot et al.⁸⁾や Ke and Takahashi.⁹⁾の実験装置を参考にした。また、本装置は供試体内部に背圧を作用させたまま、水頭差による通水が可能であり、通水中も高い飽和度を維持することができる。この背圧を作用させた状態で通水を行う方法は、Ke and Takahashi.⁹⁾の実験装置を参考にした。侵食過程を行わない場合は、通常の三軸試験と同様に、供試体端面にポーラスストーンとろ紙を設置した。供試体高さ ΔL に対する下部タンクの排水面から上部タンク水面の水位差 ΔH を調整することで、任意の平均動水勾配 i を供試体に与えた。ここで、水の浸透に伴って、上部タンクの水位が低下するため、平均動水勾配は浸透開始直後が最大で、その後徐々に低下することに留意されたい。下部タンクの最大容量は 785 mL である。

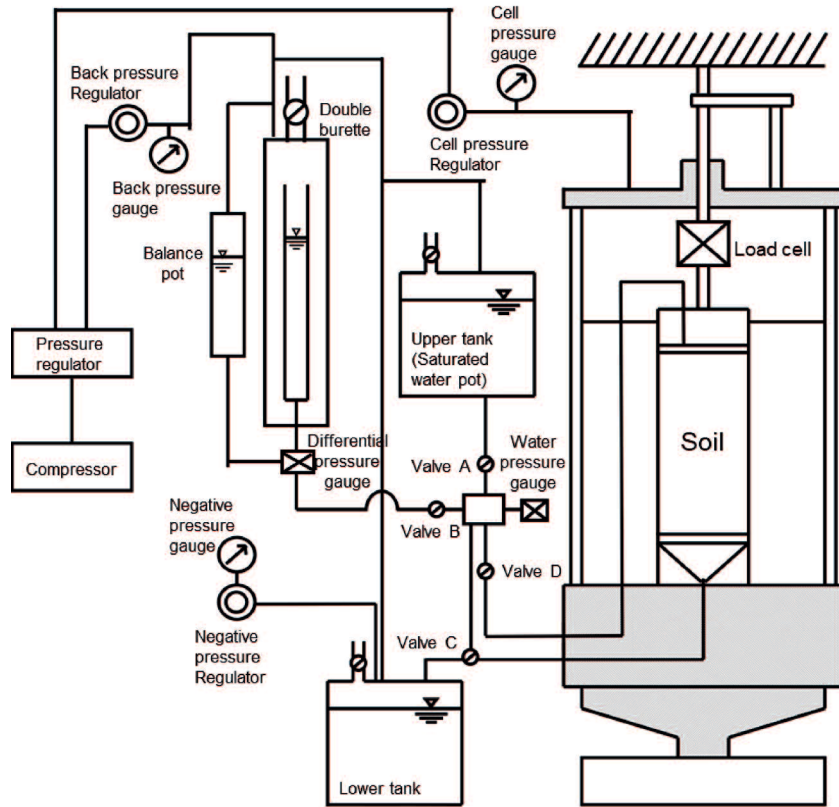


図 3.4 内部侵食用三軸試験機全体の配管図

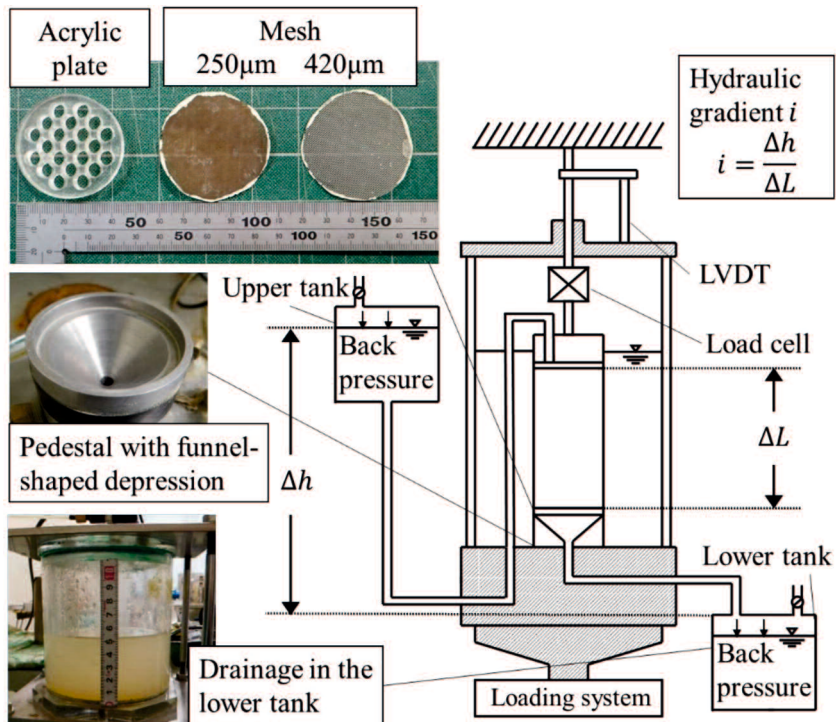


図 3.5 内部侵食を発生させる機構

3.4 実験方法

土試料は最適含水比になるよう加水，混合した後，目標の間隙比となるように予め計測した質量分の土が所定の高さになるようにモールド内で突き固めて成形した。この作業は5層に分割して行った。

三軸セル室に供試体を設置した後，供試体の下部から上向きに通水量が一定になるまで脱気水を通水した。背圧 100kPa を作用させて，間隙圧係数 B 値が 0.95 以上であることを確認した後，有効拘束圧 $\sigma'_c = 30\text{kPa}$ で等方圧密した。その後，侵食を発生させる場合は，初期平均動水勾配が 5 になるように上部タンクの初期水位を調整し，下部タンクの最大容量 (785ml) が一杯になるまで鉛直下向き通水を行った後，直ちにひずみ速度 0.2%/min で軸ひずみが 15%に至るまで排水せん断を行った。本実験では，動水勾配が小さいと土粒子が流亡せず，逆に大きすぎると配管で土粒子が詰まることから，予備実験により，土粒子の流出を確認することができた平均動水勾配 5 の条件で通水を実施した。試験終了後，排水量，排土量，排水の濁度をそれぞれ測定した。透水を行わない場合は圧密終了後直ちに排水せん断した。また，一部のケースでは，軸ひずみ 15%に至るまでせん断した後，その時点の三軸応力状態を維持したまま，破壊後の供試体に対して，初期平均動水勾配 5 で下部タンクの容量が一杯になるまで透水を実施し，侵食状況を調べた。

したがって，本実験は，図 3.6 に示す 3 パターンの手順で実施され，それぞれ，NE (No Erosion)，EBS (Erosion before shearing)，EAS (Erosion after shearing) と実験コードを命名した。

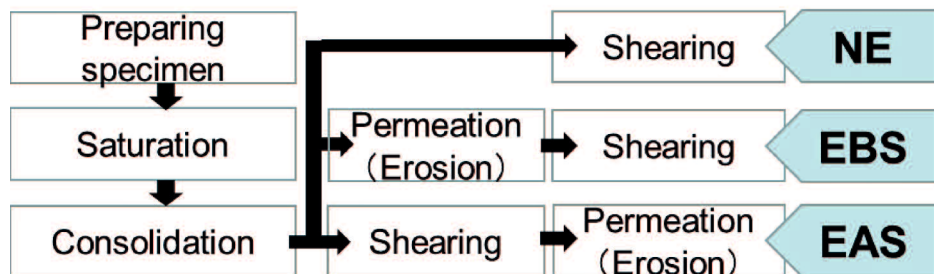


図 3.6 本実験の手順と実験コード

3.5 結果の整理

3.5.1 侵食率および有効侵食率の定義

サフュージョンの程度を定量的に表現するために、佐藤ら¹⁰⁾が定義した式(3.1)で表される侵食率 R_e をパラメータとして使用した。

$$R_e = \frac{m_{sd}}{m_{s0}} \times 100 \quad (3.1)$$

ここで、 m_{sd} は排出土粒子の乾燥質量、 m_{s0} は供試体初期乾燥質量である。

また、本実験では、細粒分含有率が異なる土試料を用いていることや、供試体底面のメッシュによって流出可能な土粒子の粒径を制限していることから、メッシュの目開き径以下の流出可能分に対する侵食土量を有効侵食率として定義した。有効侵食率は式(3.2)で示す。

$$R'_e = \frac{m_{sd}}{m'_{s0}} \times 100 \quad (3.2)$$

ここで、 m'_{s0} は作製時の供試体に含まれているメッシュの目開き径以下の土粒子の乾燥質量である。

3.5.2 透水後間隙比の定義

土粒子の流亡による土粒子の密度 ρ_s は一定とし、乾燥密度 ρ_d の変化を考慮して透水後の供試体の間隙比を算出した。間隙比が変化する要因として、透水を行うことで生じる土粒子の流出や供試体の体積変化が挙げられる。しかし、本実験ケースでは透水中の軸変位量が最大でも0.063 mmと非常に微小であったため、間隙比への影響は小さいと考え、無視することとした。したがって、透水後の供試体乾燥密度 ρ_{das} は、土粒子の侵食量を考慮して式(3.3)で算出した。

$$\rho_{das} = \frac{m_{s0} - m_{sd}}{V_{ac}} \quad (3.3)$$

ここで、 m_{s0} は供試体初期乾燥質量、 m_{sd} は試験終了後に下部タンクから回収した排出土粒子の乾燥質量、 V_{ac} は圧密後の供試体体積である。

したがって、透水後の間隙比 e_{as} は式(3.4)で算出する。

$$e_{as} = \frac{\rho_s}{\rho_{das}} - 1 \quad (3.4)$$

ここで、 ρ_s は土粒子の密度である。

3.6 実験条件

表 3.3 に本実験の実験ケースと結果をまとめる。本実験では、湿潤突き固め法で作製した供試体が自立する範囲の様々な密度で供試体を作製した。前述したように、透水中の軸変位量 Δh_{vp} は最大でも 0.063 mm であり、侵食による体積変化はほとんど生じていない。したがって、本実験の侵食形態は“Suffosion”というよりむしろ“Suffusion”であるといえる。

第3章 サフュージョンを受けた土の力学特性の変化

表 3.3 実験ケースと結果

Test-ID	ρ_d (g/cm ³)	e_0	e_{ac}	e_{bsh}	e_{ash}	Δh_{vp} (mm)	R_e (%)	R_e' (%)
NE-M5-1	1.766	0.487	0.469	0.469	-	-	-	-
NE-M5-2	1.790	0.467	0.453	0.453	-	-	-	-
NE-M5-3	1.671	0.571	0.550	0.550	-	-	-	-
NE-M5-4	1.634	0.607	0.587	0.587	-	-	-	-
NE-M5-5	1.660	0.581	0.564	0.564	-	-	-	-
EBS-M5-m250-1	1.764	0.488	0.476	0.482	-	0.014	0.39	3.25
EBS-M5-m250-2	1.718	0.528	0.506	0.512	-	0.063	0.37	3.09
EBS-M5-m250-3	1.645	0.596	0.575	0.577	-	0.042	0.11	0.94
EBS-M5-m425-1	1.766	0.478	0.465	0.468	-	0.010	0.20	0.95
EBS-M5-m425-2	1.774	0.480	0.461	0.466	-	0.063	0.33	1.61
EBS-M5-m425-3	1.677	0.565	0.549	0.560	-	0.000	0.68	3.31
NE-M10-1	1.797	0.452	0.438	0.438	-	-	-	-
NE-M10-2	1.762	0.482	0.464	0.464	-	-	-	-
NE-M10-3	1.575	0.666	0.644	0.644	-	-	-	-
NE-M10-4	1.642	0.590	0.567	0.567	-	-	-	-
NE-M10-5	1.696	0.539	0.528	0.528	-	-	-	-
EBS-M10-m250-1	1.756	0.486	0.461	0.465	-	0.012	0.23	1.33
EBS-M10-m250-2	1.754	0.488	0.470	0.473	-	0.000	0.24	1.39
EBS-M10-m250-3	1.608	0.623	0.598	0.603	-	0.000	0.37	2.16
EBS-M10-m425-1	1.763	0.480	0.471	0.475	-	0.016	0.24	1.03
EBS-M10-m425-2	1.562	0.671	0.645	0.650	-	0.000	0.29	1.21
EBS-M10-m425-3	1.651	0.581	0.544	0.547	-	0.006	0.20	0.81
EAS-M5-m250-1	1.791	0.466	0.450	0.450	0.512	0.006	0.33	2.73
EAS-M5-m250-2	1.699	0.545	0.526	0.526	0.565	0.002	0.31	2.58
EAS-M5-m425-1	1.653	0.588	0.564	0.564	0.446	0.016	0.07	0.34
EAS-M5-m425-2	1.694	0.549	0.519	0.519	0.511	0.006	0.24	1.19
NE-MK5-1	1.716	0.530	0.505	0.505	-	-	-	-
NE-MK5-2	1.751	0.499	0.492	0.492	-	-	-	-
NE-MK5-3	1.633	0.608	0.616	0.616	-	-	-	-
NE-MK5-4	1.782	0.473	0.461	0.461	-	-	-	-
NE-MK5-5	1.640	0.601	0.595	0.595	-	-	-	-
NE-MK5-6	1.615	0.615	0.606	0.606	-	-	-	-
NE-MK5-7	1.682	0.560	0.545	0.545	-	-	-	-
EBS-MK5-m425-1	1.614	0.626	0.592	0.594	-	0.070	0.15	0.71
EBS-MK5-m425-2	1.752	0.498	0.490	0.492	-	0.063	0.15	0.75
EBS-MK5-m425-3	1.705	0.539	0.531	0.536	-	0.032	0.33	1.63
EBS-MK5-m425-4	1.633	0.608	0.579	0.589	-	0.063	0.60	2.94

Note: Test-ID: {Experimental code – Soil name - (Sieve size of mesh) - Number}

ρ_d : Initial dry density of specimen, e_0 : Initial void ratio, e_{ac} : Void ratio after consolidation, e_{bsh} :
Void ratio before shearing, e_{ash} : Void ratio after shearing, Δh_{vp} : Vertical displacement during
permeation process, R_e : Erosion rate, R_e' : Effective erosion rate.

3.7 実験結果

3.7.1 土粒子の排出状況

図 3.7, 図 3.8 に, それぞれ M5 および MK5 の侵食ありのケース (EBS, EAS) の透水前間隙比と侵食率および有効侵食率の関係を示す。侵食率は総じて 0.7%以下と低く, 細粒分含有率, メッシュ径, 圧密後 (透水前) 間隙比と各侵食率には相関がみられなかった。また, EBS と EAS の違いも特にみられなかった。

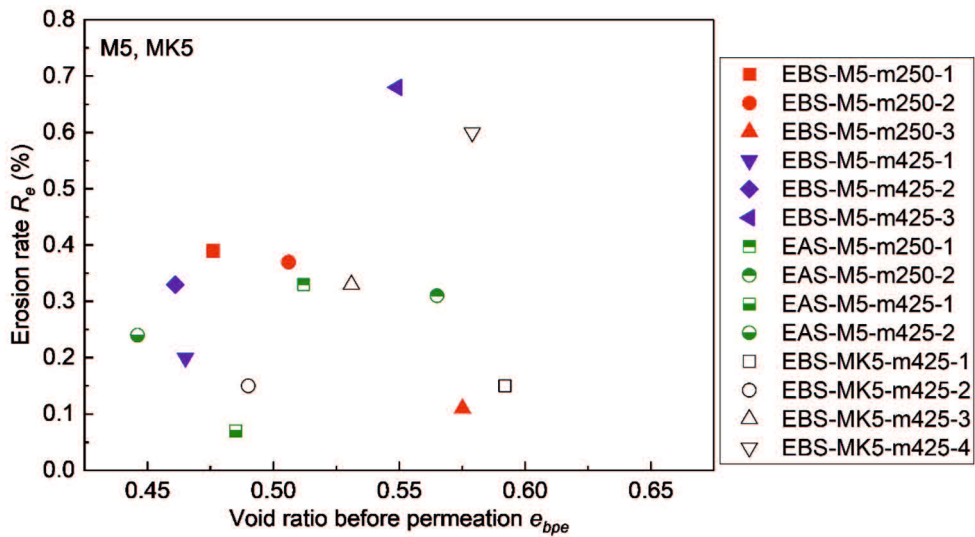


図 3.7 透水前間隙比と侵食率の関係 (M5, MK5)

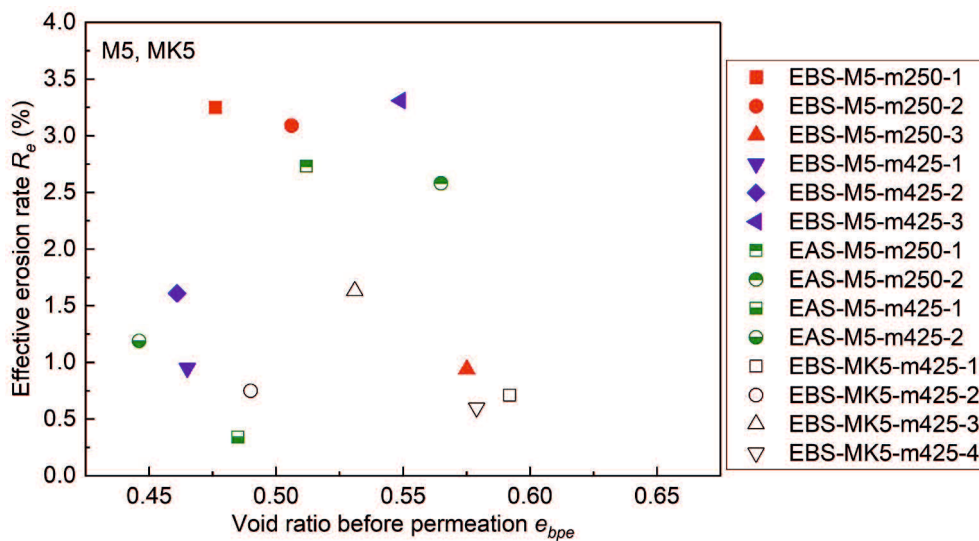


図 3.8 透水前間隙比と有効侵食率の関係 (M5, MK5)

図 3.9, 図 3.10 それぞれ, M10 の侵食ありのケース (EBS, EAS) の透水前間隙比と侵食率および有効侵食率の関係を示す。侵食率は総じて 0.4%以下と低かった。圧密後 (透水前) 間隙比が大きいほど, 侵食率, 有効侵食率ともに大きくなる若干の傾向がみられた。M5, MK5 と同様に, 細粒分含有率, メッシュ径, 圧密後 (透水前) 間隙比と各侵食率には相関がみられなかった。

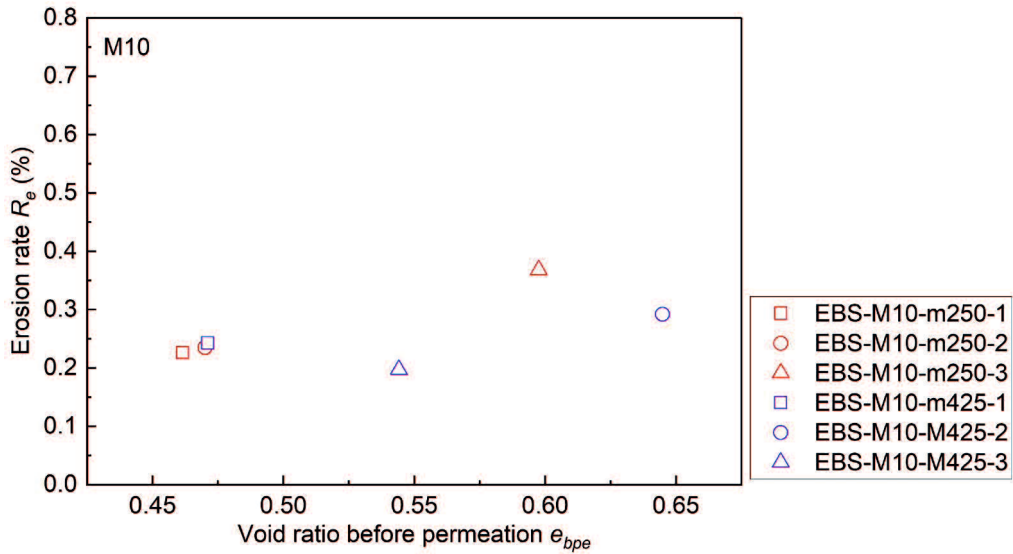


図 3.9 透水前間隙比と侵食率の関係 (M10)

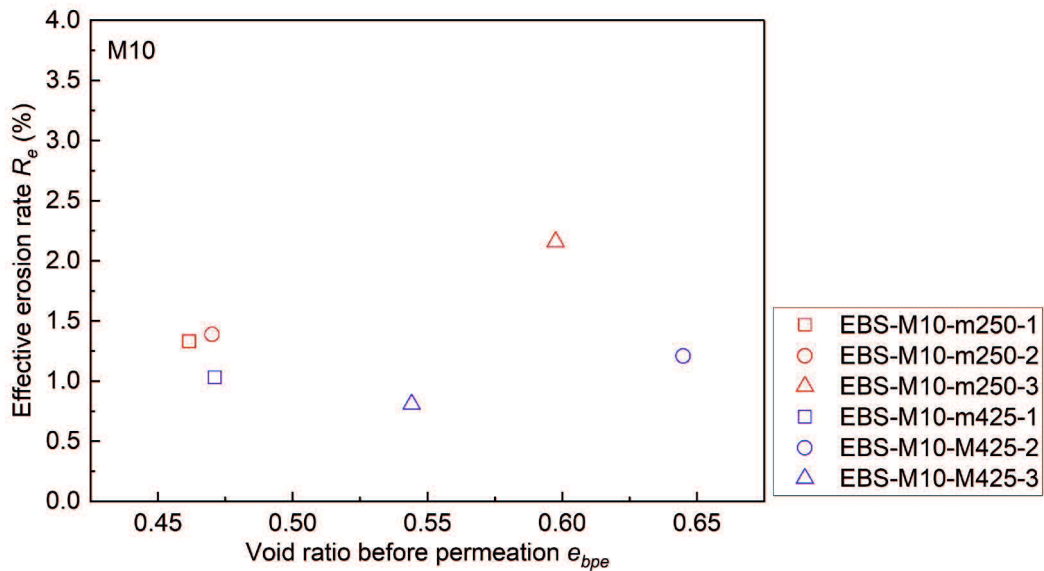


図 3.10 透水前間隙比と有効侵食率の関係 (M10)

3.7.2 排水せん断挙動

図 3.11～図 3.13 に軸差応力と軸ひずみの関係および軸ひずみと体積ひずみの関係を
 示す。本実験では、供試体の間隙比を変化させる要因として、圧密による体積変化と土粒
 子の流出による供試体の乾燥密度の変化があるため、せん断前の間隙比を揃えることは
 非常に難しく、応力・ひずみ関係において透水の有無によるせん断挙動の違いを単純に対
 比することはできなかった。そこで、せん断前の間隙比と強度の関係そのものに着目して、
 サフュージョンを引き起こす透水の有無が強度へ及ぼす影響を検討することとした。

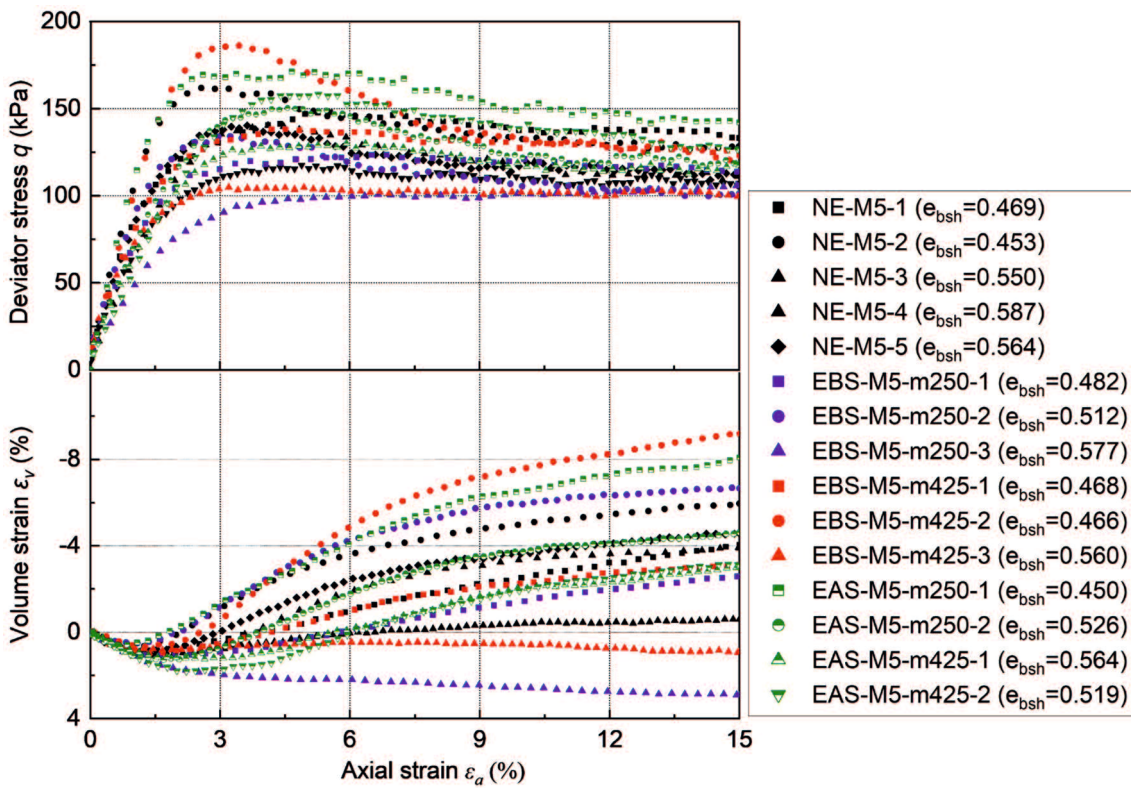


図 3.11 応力ひずみ関係および軸ひずみ—体積ひずみ関係 (M5)

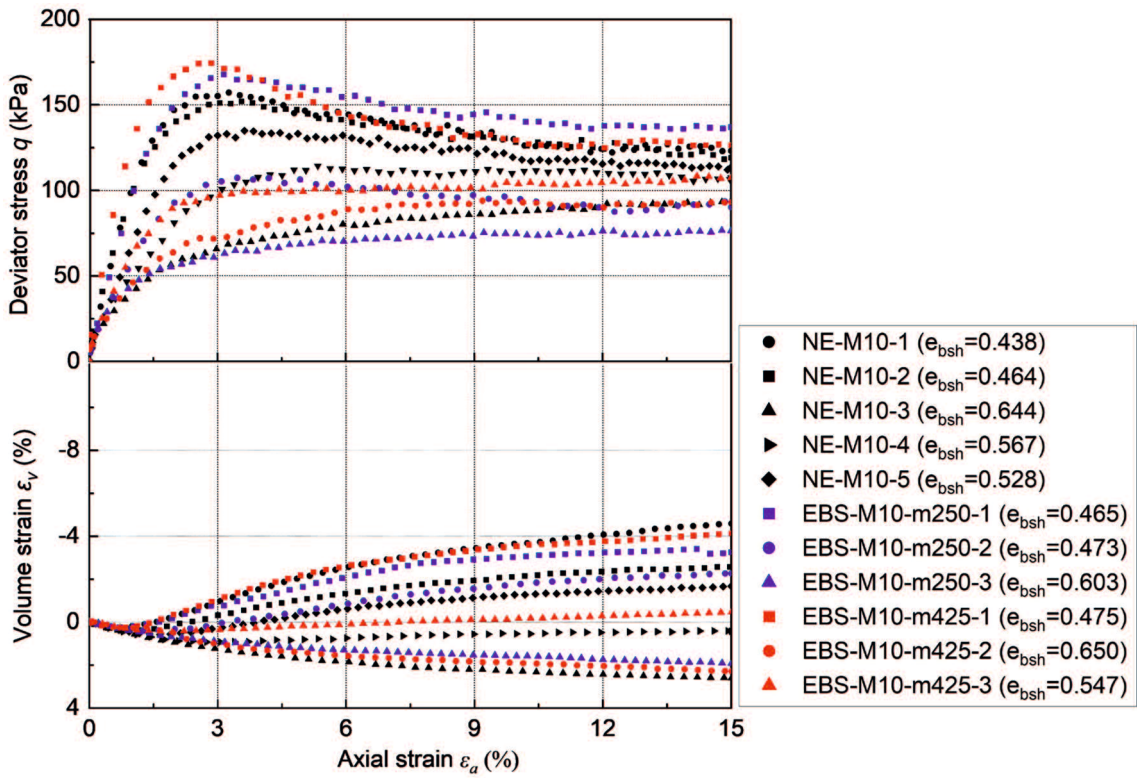


図 3.12 応力ひずみ関係および軸ひずみ—体積ひずみ関係 (M10)

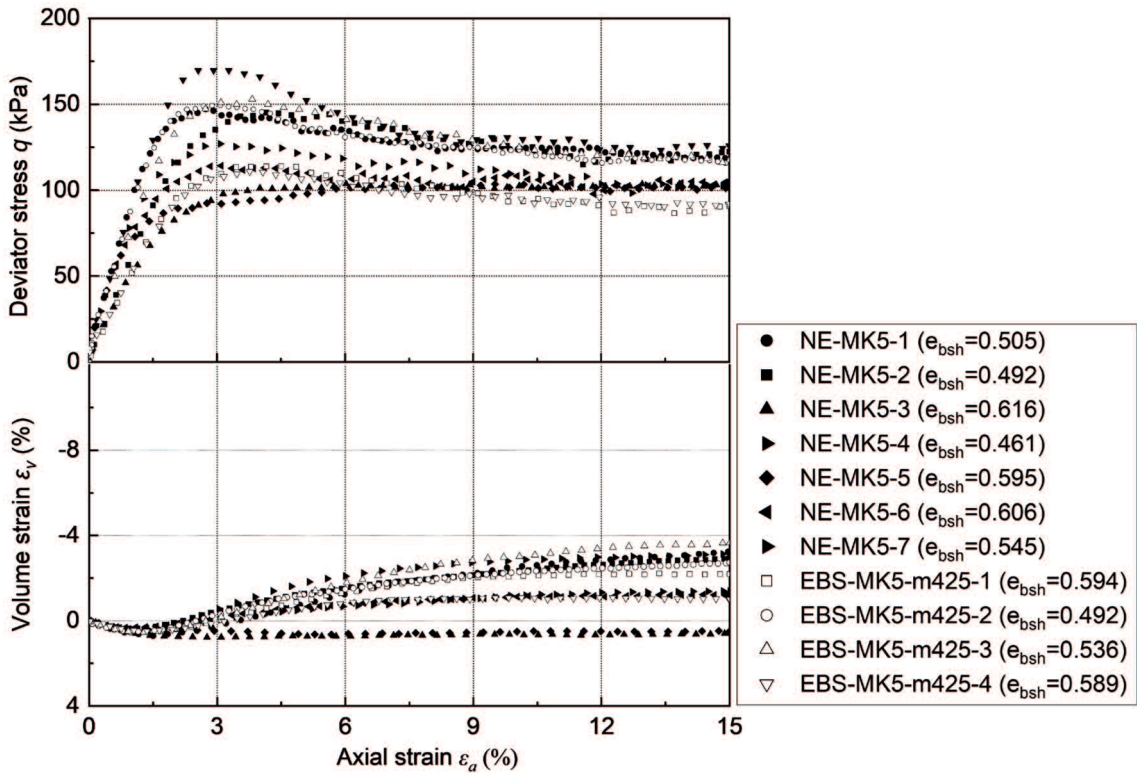


図 3.13 応力ひずみ関係および軸ひずみ—体積ひずみ関係 (MK5)

3.7.3 せん断前間隙比と各種強度の関係

図 3.14, 図 3.15 に侵食なしのケース (NE) のせん断前間隙比とピーク強度および残留強度の関係をそれぞれ示す。ここで、 q_{res} は軸ひずみ 15%時の軸差応力とした。図中に示す実線は NE の実測値に対する近似線である。この近似線においてはせん断前の間隙比が小さくなる (密になる) につれて、 q_{max} と q_{res} の値が大きくなるといった当然の結果となる。M5 と M10 を比較すると、間隙比が同じであれば、M5 の方がピーク強度が高い。間隙比が同じでも、M10 の方が最大乾燥密度 ρ_{dmax} が大きく、相対密度としては小さいことが強度が低い要因であると考えられる。

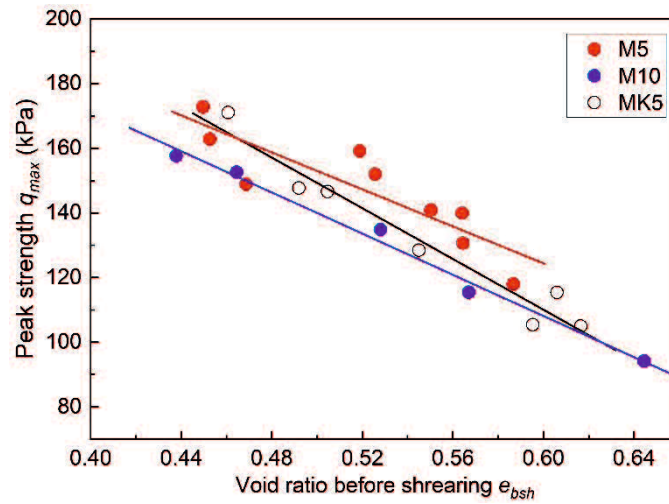


図 3.14 せん断前間隙比とピーク強度の関係 (NE)

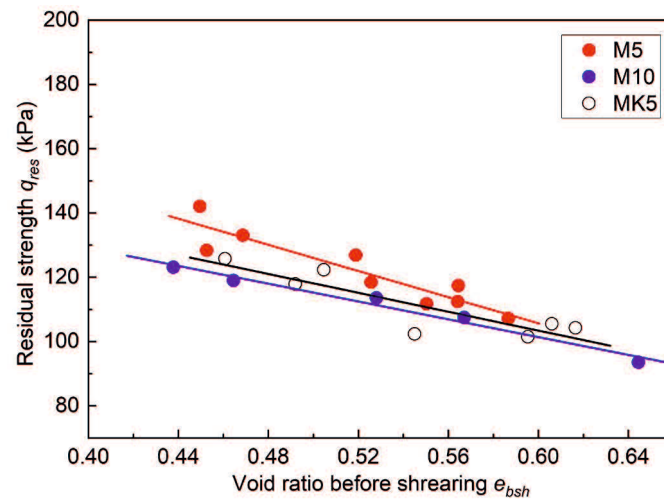


図 3.15 せん断前間隙比と残留強度の関係 (NE)

図 3.16～図 3.21 にせん断前（NE, EAS の場合は圧密後, EBS の場合は透水後）の間隙比 e_{bsh} とピーク強度 q_{max} および残留強度 q_{res} の関係を土試料ごとにそれぞれ示す。これ以降, NE の実測値に対する近似線を強度基準線と呼ぶことにするが, 透水ありの場合, 強度基準線から外れた位置にデータがプロットされており, せん断直前の間隙比が同じでも透水によってピーク強度や残留強度が異なることが分かった。このことは Ke and Takahashi¹¹⁾や Sato et al.¹²⁾が指摘したことを裏付けており, 間隙比の変化以外にも強度を変化させる要因があると考えられる。

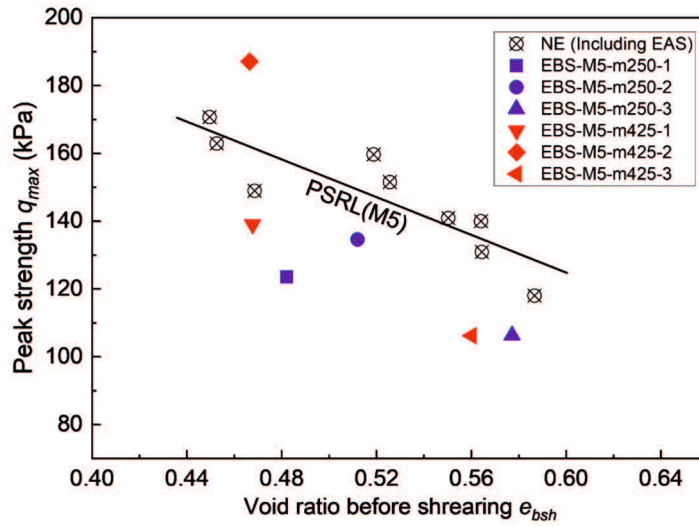


図 3.16 せん断前間隙比とピーク強度の関係 (M5)

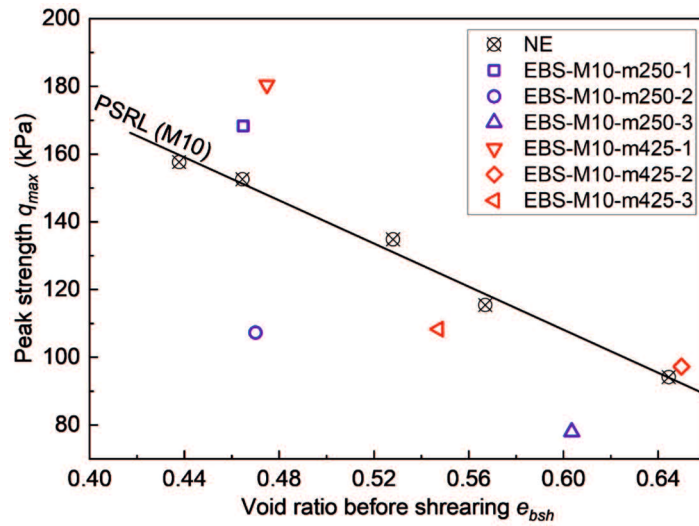


図 3.17 せん断前間隙比とピーク強度の関係 (M10)

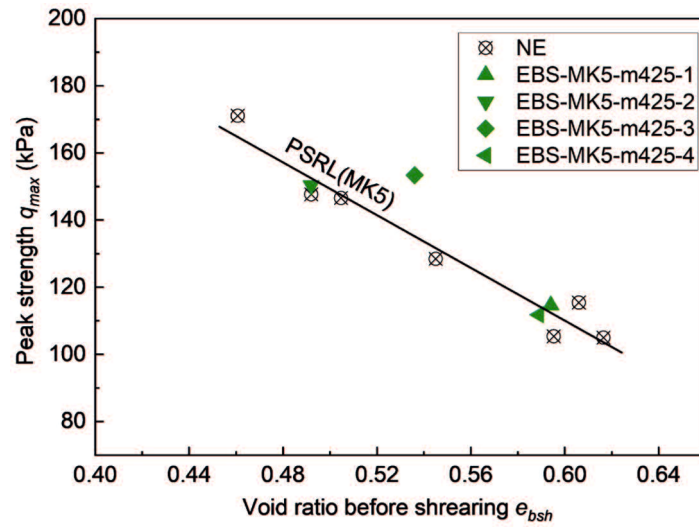


図 3.18 せん断前間隙比とピーク強度の関係 (MK5)

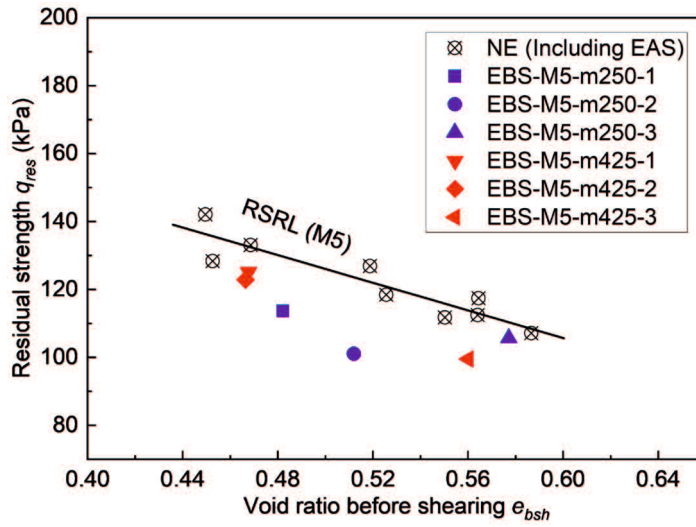


図 3.19 せん断前間隙比と残留強度の関係 (M5)

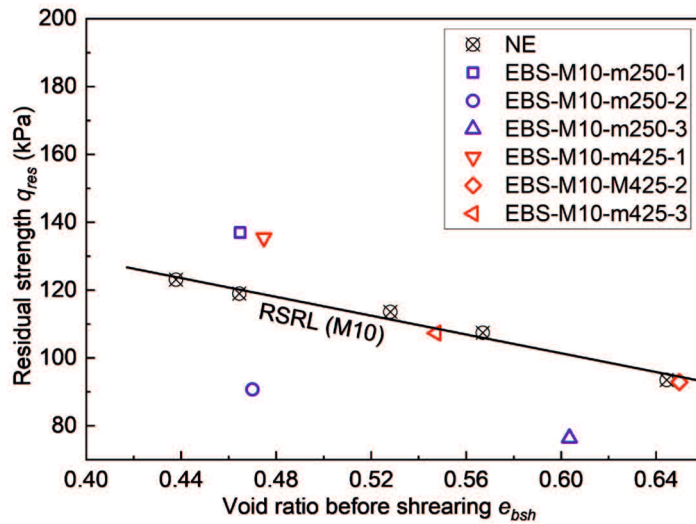


図 3.20 せん断前間隙比と残留強度の関係 (M10)

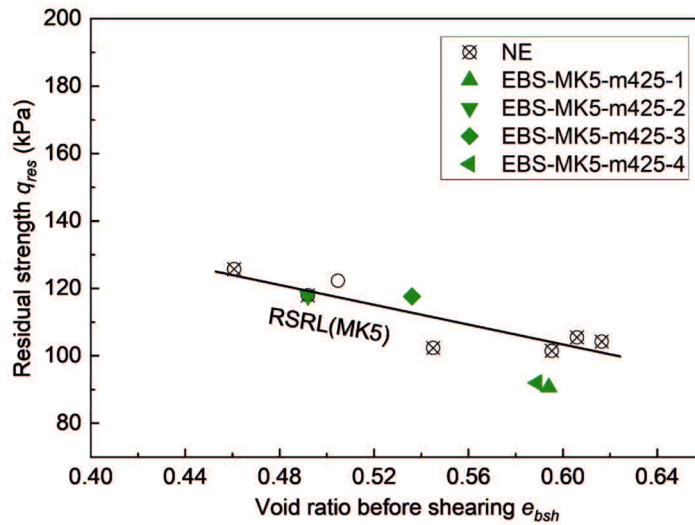


図 3.21 せん断前間隙比と残留強度の関係 (MK5)

3.7.4 ダイレイタンシー特性

図 3.22, 図 3.23 にせん断前間隙比と破壊時のダイレイタンシー係数の関係を示す。ここで、破壊時のダイレイタンシー係数とは、ピーク強度発現時の微小軸ひずみ $d\varepsilon_a$ に対する微小体積ひずみ $d\varepsilon_v$ の比であり、軸ひずみ—体積ひずみ関係における接線の傾きである。なお、正の値が正のダイレイタンシーを表すように正負を逆にしている。

せん断前間隙比が大きい場合（密度が低い場合）は、サフュージョンによって収縮傾向に変化していることが分かる。一方、せん断前間隙比が小さい場合（密度が高い場合）は、少しばらつきがあるが、NE よりも EBS の方が、破壊時のダイレイタンシー係数が大きく、サフュージョンによって、より顕著な膨張傾向に変化していることが分かる。せん断前間隙比の違いによって、サフュージョン後のダイレイタンシー挙動の変化傾向が異なる。したがって、サフュージョン後のダイレイタンシー挙動の変化が、サフュージョンによるピーク強度の増加と低下を決定付けているものと考えられる。

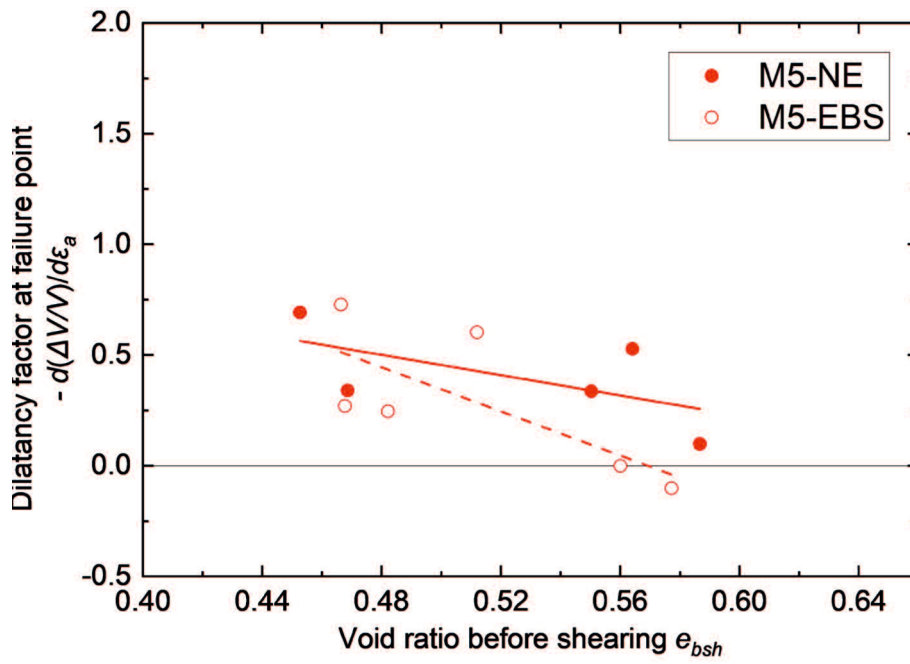


図 3.22 せん断前間隙比と破壊時のダイレイタンス係数 (M5)

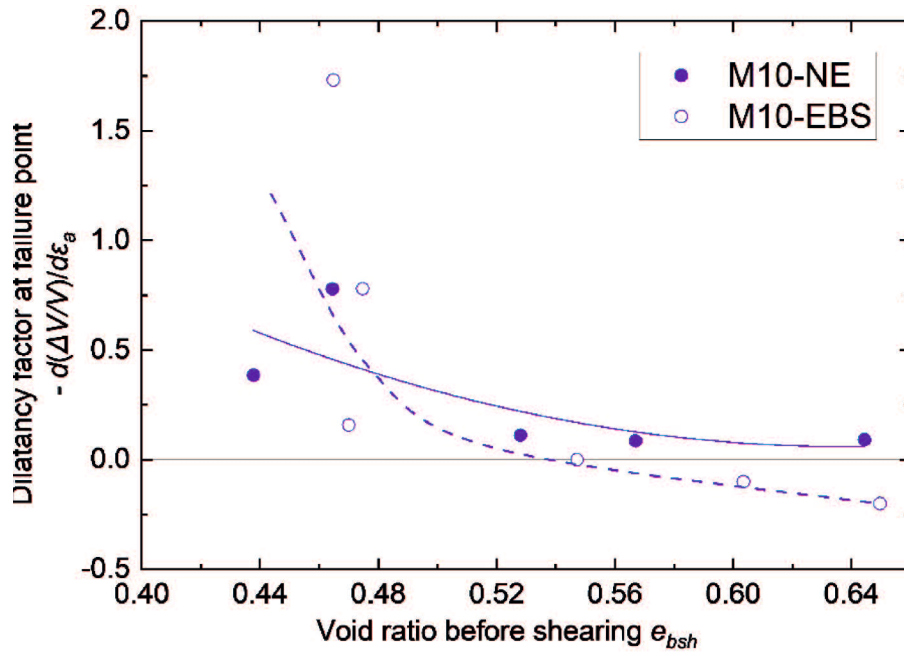


図 3.23 せん断前間隙比と破壊時のダイレイタンス係数 (M10)

3.7.5 侵食率と各強度変化率の関係

図 3.24 に示すように、透水有のデータにおいてせん断前間隙比が同じ場合の各強度基準線上の値と実測値との比率を強度変化率として表現した。図 3.25, 図 3.26 に各強度変化率と侵食率の関係を示す。多くのケースで各強度変化率は負の値となり、土粒子の流亡による密度変化以上に強度が低下した。一方、比較的密詰めの供試体の一部のデータでは、各強度変化率が正の値となり、透水によって密度変化以上に強度が増加した結果もみられた。EBS-M5-m250-2, EBS-M5-m425-2 では、ピーク強度の強度変化率が正の値であるが、残留強度の強度変化率は負の値となり顕著なひずみ軟化がみられた。また、ピーク強度、残留強度のどちらの強度変化率も侵食率とは相関がみられなかった。透水により流出した土粒子は全体の 0.7%以下と少なく、力学特性の違いは流出した土粒子だけでなく、供試体内部で移動したものの、流出に至らなかった土粒子が再形成した骨格構造の変化が関連していると考えられる。

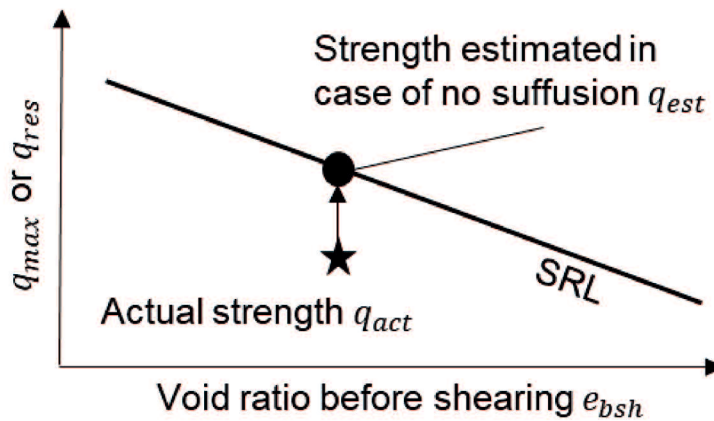


図 3.24 各強度変化率の定義

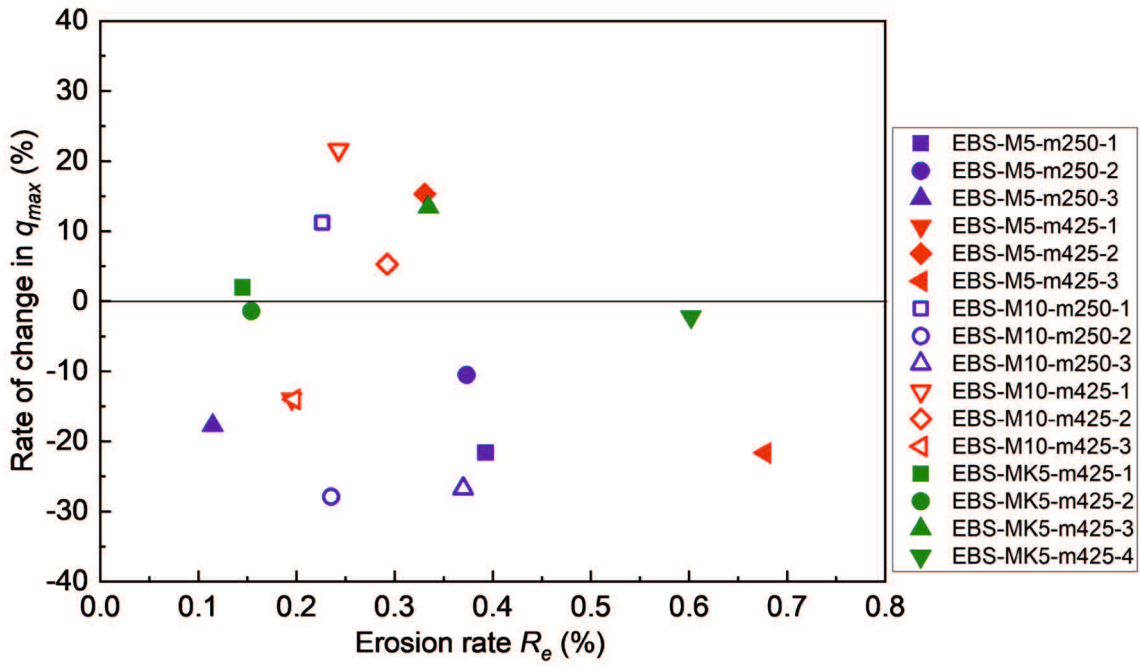


図 3.25 侵食率とピーク強度変化率の関係

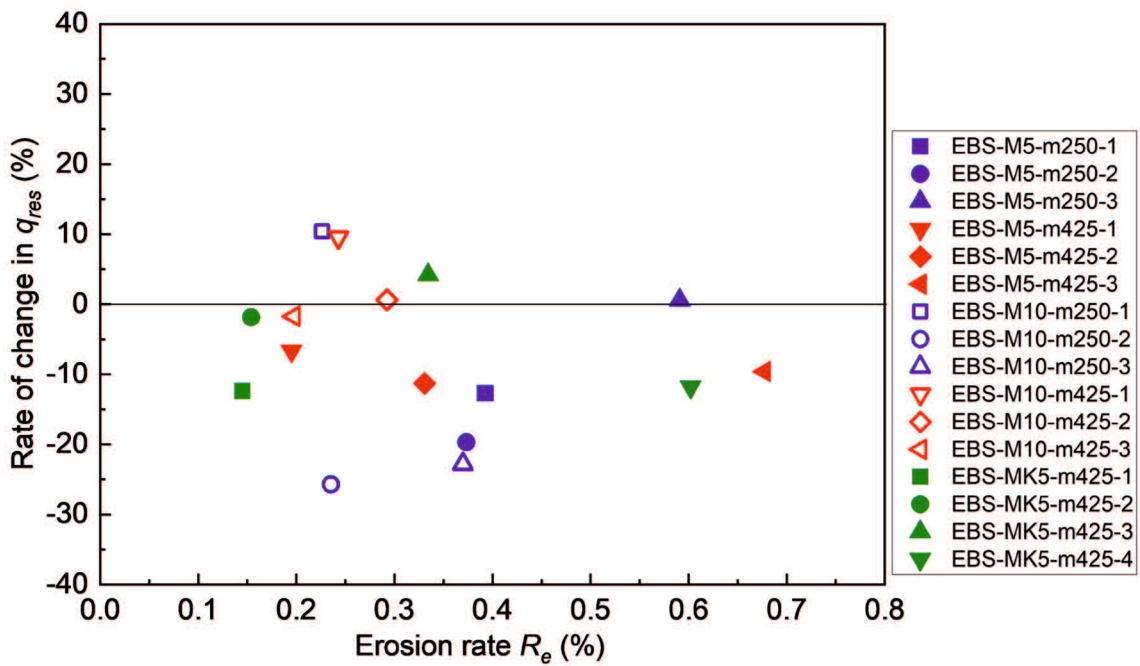


図 3.26 侵食率と残留強度変化率の関係

3.8 結論

本章では、内部でサフュージョンを再現できる特殊な三軸試験機を用いて、土粒子が流出した供試体に対する排水せん断試験を実施した。なお、ため池堤体土として用いられることがあり、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た。以下に得られた結果を要約する。

- 1) 本実験条件では、侵食を伴う通水過程において、供試体の軸変位はほとんど変化しなかったことから、内部侵食形態は **Suffusion** であった。
- 2) せん断前とせん断後にそれぞれ透水を行った場合では、侵食率はほとんど変わらなかった。
- 3) せん断前間隙比とピーク強度の関係、せん断前間隙比と残留強度の関係から、細粒分含有率が 5%、10%の両ケースにおいて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、内部侵食をもたらす通水によってその後の力学特性が異なることが分かった。
- 4) 多くのケースで、ピーク強度および残留強度はせん断前間隙比から推定される透水なしの場合の各強度よりも小さくなったが、比較的密詰めの供試体の一部のデータでは、逆に大きくなる結果もみられた。
- 5) せん断前間隙比が大きい場合（密度が低い場合）は、サフュージョンによってダイレイタンスー特性が収縮傾向に変化し、せん断前間隙比が小さい場合（密度が高い場合）は、より顕著な膨張傾向に変化した。サフュージョン後のダイレイタンスー挙動の変化が、サフュージョンによるピーク強度の増加と低下を決定付けているものと考えられる。
- 6) まさ土由来の細粒分を有した **M5**、**M10** よりも、カオリンを混合した **MK5** の方が透水の有無による強度変化率が小さかった。
- 7) ピーク強度、残留強度の各強度変化率と侵食率の相関はみられなかった。侵食率が 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。

3.9 参考文献

- 1) 山本哲朗, 宮崎晃一, 勝部安昭, 寺山崇, 三浦壱章, 中野利春: 2001年芸予地震により被災した東広島市内のため池調査, 土と基礎, 50巻, 11号, pp.45-47, 2002.
 - 2) 藤本哲生, 栗林健太郎, 棚谷南海彦, 黒田修一: 2019年台風第19号等による豪雨で決壊したため池堤体の特徴と決壊要因の推定, 土木学会論文集 b1(水工学), Vol.76, No.1, pp.370-384, 2020.
 - 3) Foster, M., and Fell, R.: A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping using event tree methods. University of New South Wales, Kensington, 1999.
 - 4) Skempton, A.W., Brogan, J.M.: Experiments on piping in sandy gravels. Géotechnique, Vol.44, No.3, pp.449-460, 1994.
 - 5) Kenney, T. C., and Lau, D: Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, pp. 215-225, 1985.
 - 6) Wan, C.F., and Fell, R.: Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol.134, pp.401-407, 2008.
 - 7) Justin, J. D.: The Design of Earth Dams, ASCE, Vol.87, pp.49-54, 1923.
 - 8) Marot, D., Rochim, A., Nguyen, H. H., Bendahmane, F., Sibille, L.: Assessing the susceptibility of gap-graded soils to internal erosion: proposition of a new experimental methodology, Natural Hazards Vol.83, pp.365-388. 2016.
 - 9) Ke, L., and Takahashi, A.: Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion, Geotechnical Testing Journal, Vol.37, No.2, pp.347-364, 2014.
 - 10) 佐藤真理, 桑野玲子: 一次元浸透試験による内部侵食発生要因の検討, 生産研究, Vol.66, No.4, pp.331-335, 2014.
 - 11) Ke, L., and Takahashi, A.: Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil, Soils and Foundations, Vol.54, No.4, pp.713-730, 2014.
-

- 12) Sato, M., Kuwano, R.: Laboratory testing for evaluation of the influence of a small degree of internal erosion on deformation and stiffness, *Soils and Foundations*, Vol.58, No.3, pp.547-562, 2018.

第4章 サフュージョン挙動把握に資する濁度の利用

4.1 概説

土粒子の粒度分布を求める場合は、内部侵食に関する研究においても、一般にふるい分析および沈降分析が実施されている。75 μm 以下の細粒分に対しては沈降分析が採用されるが、実験試料として乾燥質量65g程度の量が必要となる¹⁾。後述するカラム通水実験では、直径10cm、高さ20cmの円筒型の供試体から排出する土粒子を細かい時間間隔で分けて回収しており、一度に最大でも6g程度の細粒分しか得られないため、沈降分析は適用できない。そこで、濁度の測定値が懸濁物の粒径の影響を受けるという性質を利用して、濁度から粒度分析ができないかを検討した。既往の研究でも濁度測定を取り入れたサフュージョン実験があり²⁾⁻⁵⁾、それらの濁度の利用目的は、排出土粒子の回収やはかり計測を行うことなく、濁度から土粒子の流出量を推定することである。しかしながら、同一実験中に排出土の粒度が時間変化することや実験条件によって排出土の粒度が変化する可能性は考慮されていない。本章では、濁度計測の概要を述べた後、通水実験に適用するための予備実験について述べる。さらに、本手法を用いて、第3章で侵食を伴う三軸試験によって得られた排水から排出した僅少な土粒子の粒径を分析した結果を述べる。

4.2 土木分野における濁度の利用

濁度は、河川工学の分野において、広く利用されている。濁度指標を用いた河川やダム⁶⁾の景観や生態系に関する評価⁶⁾、河川流域における水系一貫土砂管理（河川の源流から出口に至る水系全体において移動する土砂の量と質を把握し、貯水池の容積や地形を適切に管理すること）等を目的として、濁度測定を取り入れたモニタリングが実施されている⁶⁾。

地盤工学の分野では、フィルダムの日常点検に濁度が用いられる。浸透流量測定用の三角堰や浸透圧測定用のブルドン管を流れる水の濁度を日常的に計測し、経験的に定められた基準値を超えていないかを調べ、アラートとして利用される。地頭園ら⁷⁾は、湧水の濁度を測定することで、深層崩壊の予測に利用する試みを行っている。

内部侵食の模型実験においても濁度測定を取り入れた研究が既にいくつか存在する。Bendahmane ら⁴⁾、佐藤ら²⁾³⁾、Haghighi ら⁵⁾は、侵食によって排出される懸濁液の濁度を測することで侵食された土粒子量を推定している。しかし、これらの研究は、排出された土粒子の粒度が時間的に変化しない条件、もしくは、粒度が変わらないという仮定の下、侵食された土粒子量を推定したものである。

4.3 濁度計測の概要

濁度とは、水中に分散している粒子によって生じる水の濁りを目視または機器を使用して定量的に表現したものである。この濁度を光量的に測定する装置を濁度計という。JIS K0101（工業用水試験法）では、カオリンを基準とするカオリン濃度とホルマジン標準液を基準とするホルマジン濃度、水道法水質基準では、粒径の異なる5種のポリスチレン系粒子を混合した試験用粒子（JIS Z 8901）を基準とするポリスチレン・ラテックス（=PSL）濁度が用いられており、それぞれの物質の1mg/Lを含む溶液の濁度を1度としている。

濁度計の測定方式も様々であり、透過散乱光方式、表面散乱光方式、積分級方式、透過光方式、散乱光方式、粒子数計測（レーザー）方式等に分類され、それぞれ懸濁液の濃度範囲、測定環境、求める精度等に合わせて選択される⁸⁾。本研究では、主に、微量な土粒子に対する検討を行うため、極めて低い濁度領域でも測定を行うことのできる透過散乱光方式の濁度計（笠原理化工業株式会社製濁度計 TR-55）を使用した（写真 2.1）。

透過散乱光方式の原理を図 2.1 に示す。光源の平行光線は懸濁物質によって減衰し、透過光受光部に到達し、透過光を測定する。一方、光源に対して 90° 方向に配置された散乱光受光部では懸濁物質により発生した散乱光量を測定する。透過光と散乱光を同時に測定し、その比を濁度に換算する測定方式である。この測定方式は、単位体積中の懸濁物質の粒子比表面積が大きいほど散乱強度が大きくなるという特徴があり、同じ濃度の懸濁液でも、懸濁物質の粒径が小さいほど濁度は高く測定される。

表 4.1 使用した濁度計の仕様（メーカー公表値）

濁度計 TR-55 （笠原理化工業株式会社製）	
測定単位	“度”（5種混合ポリスチレン濁度標準） （オプション ホルマジン濁度“FTU”）
光源	LED
測定範囲	0.00～1100 度 3レンジ自動切換え
分解能	0.01 度/0.00～10.99 度 0.1 度/11.0～109.9 度 1 度/110～1100 度
測定精度	±2%以内（100 度以下/FS） ±3%以内（1000 度以下/FS）

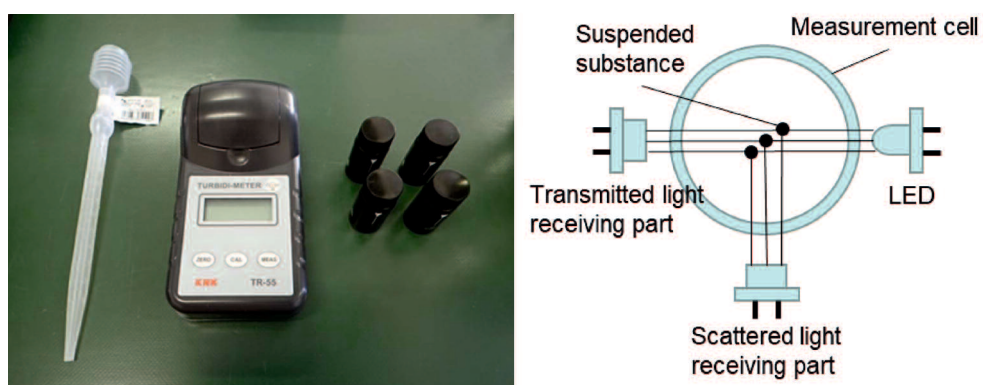


図 4.1 使用した濁度計と測定原理

4.4 濁度測定の方法

濁度測定には、濁度計、測定セルおよびピペットを用いた。攪拌した懸濁液からピペットで約 10 mL の検水を採取し、測定セルに入れる。測定セルを軽く振り、壁面の気泡を取り除いた後、測定器にセットした。検水の安定のため約 10 秒間の静置後、スイッチを押し、約 5 秒後に測定された濁度が表示される。測定した検水は懸濁液に戻さずに、別の測定セルを用いて、同様の測定を 4 度行った。また、毎回の実験開始時と終了時に精製水と水道水の濁度を同様の方法で測定した。

4.5 サフュージョン実験への濁度の適用

4.5.1 基準試料の濁度測定

粒度特性が既知の土試料（以下、基準試料と呼ぶ）をもとに作製した懸濁液を用いて、懸濁土の粒度が濃度と濁度の関係に与える影響を調べた。ただし、濁度は懸濁物質の粒度特性の他に粒子形状や色調の影響を受けるため⁶⁾、基準試料には後述する通水実験で使用するまさ土とそれよりも粒径の小さいカオリンを選定した。まさ土は山口県宇部市で採取したもので（以後、宇部まさ土と呼ぶ）、土粒子の密度は 2.625g/cm^3 である。宇部まさ土はそれぞれ $75\mu\text{m}$ 、 $106\mu\text{m}$ 、 $250\mu\text{m}$ および $425\mu\text{m}$ のふるいを通過させ、C75、C106、C250 および C425 と命名した。図 4.2 に、宇部まさ土と 5 種類の基準試料の粒径加積曲線を示している。

これらの 5 種類の基準試料を用いて懸濁液の濃度 C と測定セルに移す前の容積が異なる懸濁液を作製し、濁度測定を行った。なお、 C は土粒子と精製水の組成割合とし、式 (4.1) で定義する。

$$C = \frac{m_{ds}}{V_{dw}} \quad (4.1)$$

ここで、 m_{ds} は懸濁土の質量 (mg)、 V_{ds} は水の容積 (L) である。懸濁液の C は 100, 200, 600, 1000, 2000 および 3000 mg/L の 6 通りに変えた。ただし、カオリンを用いた場合、3000 mg/L の懸濁液は濁度計の測定限界値を超えたため、2600 mg/L とした。また、通水実験では様々な容積の懸濁液を扱うことになるため、検水採取時の容積の違いによる検水採取位置や容器の形状等の影響がないかを調べるために、測定セルに移す前の懸濁液の容積を 0.05, 0.25, 0.50 および 2.5 L の 4 通りに変えた (図 4.3)。溶媒には精製水を使用した。以上、計 120 種類の懸濁液に対して濁度測定を各 4 回実施した。

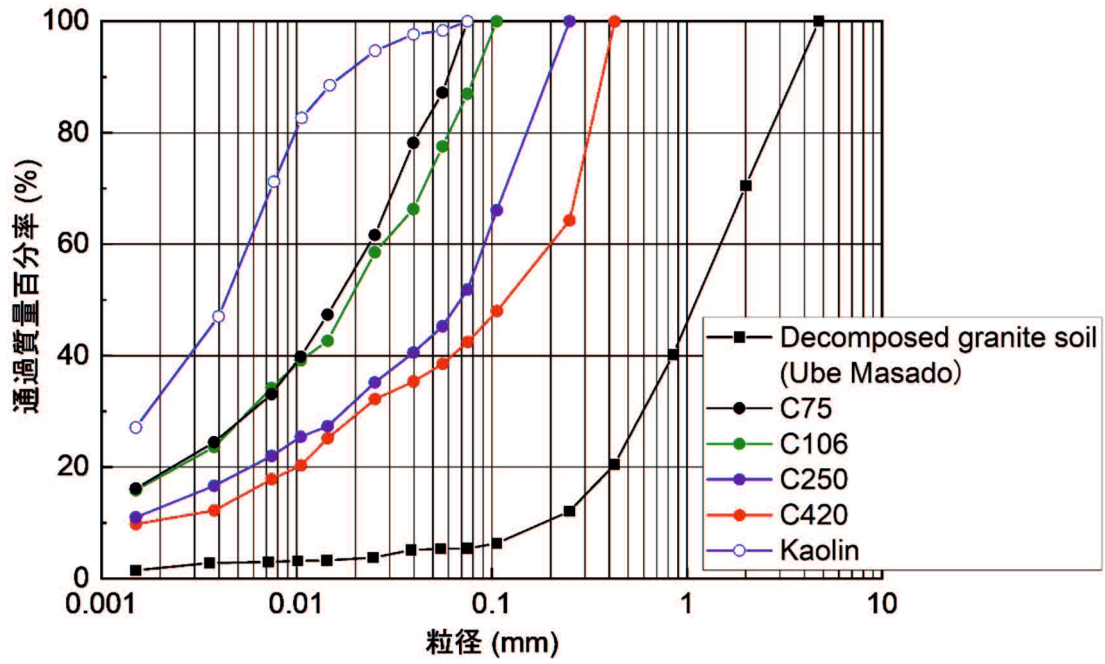


図 4.2 基準試料の粒径加積曲線

表 4.2 基準試料の粒度情報

	Maximum particle size D_{max} (μm)	D_{50} (μm)
C75	75	16
C106	106	18
C250	250	69
C425	420	110
Kaolin	75	4.2

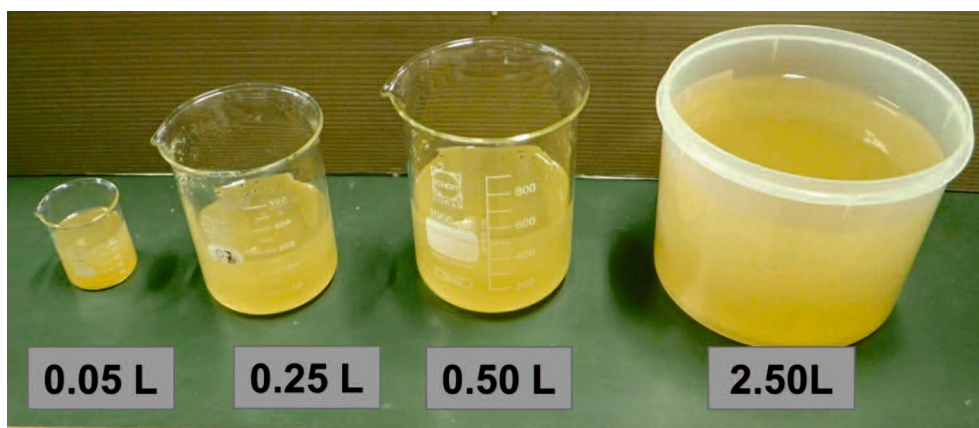


図 4.3 異なる容積の懸濁液

図 4.4 (a) に基準試料を用いた懸濁液の濃度と濁度の関係を示す。図には懸濁液 120 種類×測定 4 回分の 480 個のデータが示されており、土の種類は色分けしているが、容積の違いは特に区別していない。なお、毎回の実験前後に測定した精製水および水道水の濁度はそれぞれ 0.02 度以下、0.2 度以下であり、溶媒の濁度はほとんどないことを確認している。図中の各直線は、溶媒の濁度がゼロであることを考慮して、切片がゼロの条件において最小二乗法で求めた基準試料ごとの近似直線である。懸濁土の種類が同じとき、決定係数が高いことから、濃度と濁度の関係の実測値に対する近似直線の適合度は良好である。しかし、図 4.4 (b) の低濃度領域をみると、C425, C250 の場合、濃度が 200mg/L, 100mg/L の範囲、C106, C75 の場合、濃度が 100mg/L の範囲において測定結果は近似直線上に乗らず、線形性を保っていないことを確認した。

懸濁土に粒径が大きい土粒子が多く含まれるほど、その近似直線の傾きは小さくなった。これは、前述した透過散乱光測定方式の濁度計の特徴を反映している。また、濃度と懸濁土が同じであれば、懸濁液の容積に関わらず、濁度の値はほぼ同じであった。したがって、検水採取時の懸濁液の容積や容器形状による検水採取位置の違いによる濁度測定への影響は少ないと考えられる。

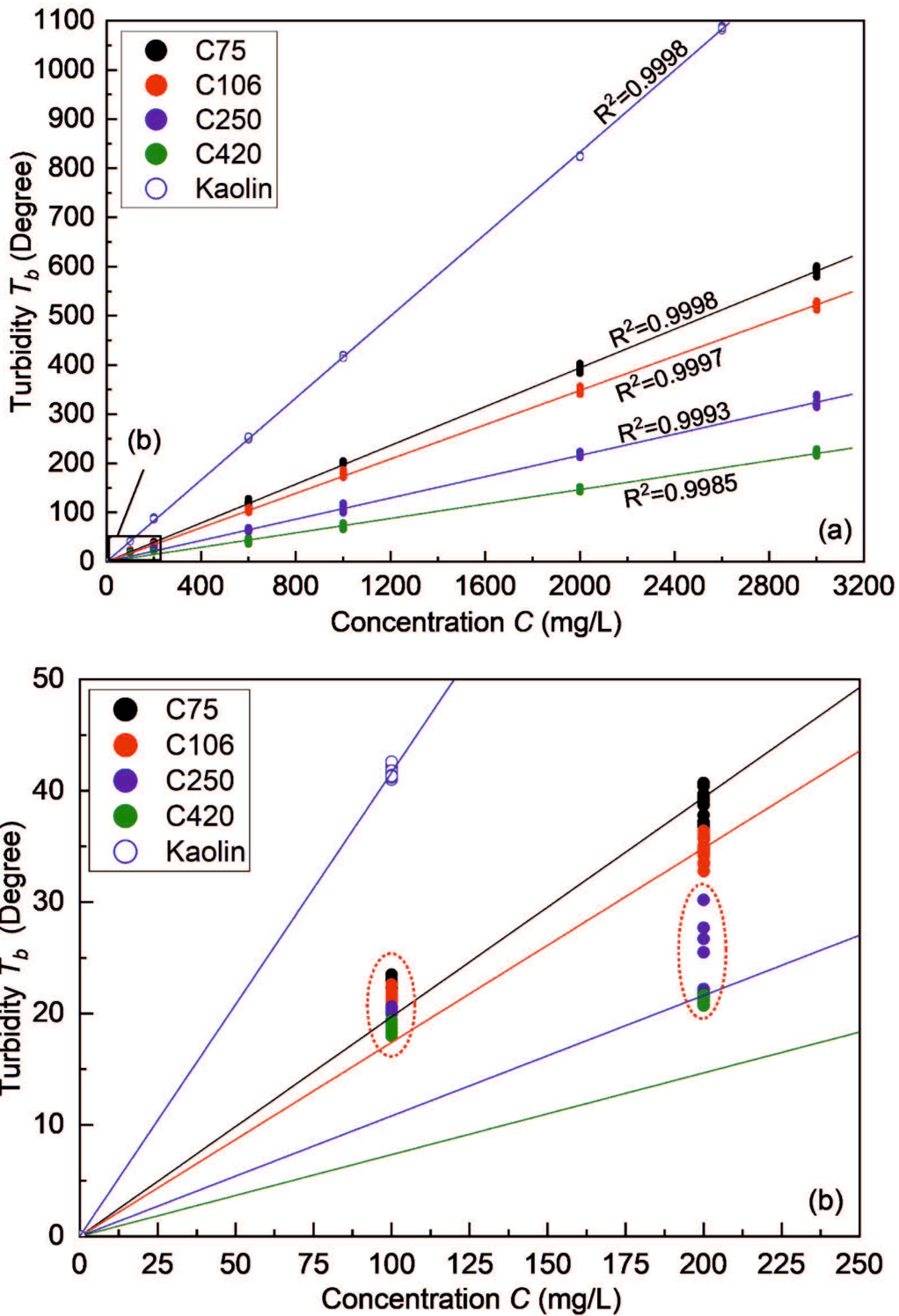


図 4.4 (a) 基準試料を用いた懸濁液の濃度と濁度の関係および
(b) 低濃度領域 (0~250mg/L) の拡大図

4.5.2 同一濃度濁度比の定義

図 4.5 において、ある懸濁液中の土の粒度組成と基準試料の粒度組成を比較するために、濃度と濁度の関係で導入した同一濃度濁度比 R_t を説明する。図 4.4 の各近似直線を基準線とし、ある懸濁液 A の濃度と濁度の関係がプロットされているとき、同一濃度のときの基準線上の濁度に対する懸濁液 A の濁度の比を“同一濃度濁度比 R_t ”と定義する。本研究では、通水実験時に排出される排水の濁度測定結果から R_t を求め、粒度組成の推定を行った。 R_t の通水実験への具体的な適用方法と結果の解釈については次章以降でその都度説明する。また、実験過程において、濁度計の測定限界値（1100 度）を超える濃度の高い懸濁液を扱う場合があった。そうした場合、濁度が測定可能な範囲まで懸濁液を希釈し、濁度測定を行った。図 4.6 に示すように、希釈前の測定データが原点と希釈後の測定データを結ぶ直線上にプロットされると仮定すると、 R_t は希釈前後で変化しないことから、その仮定のもと、希釈しない場合も希釈した場合も R_t は同様に扱うこととした。また、希釈した場合、希釈後の結果から希釈前の濁度 T_{bcal} を次式より推定した。

$$T_{bcal} = \frac{T_{bact}}{C_a} \times C_b \quad (4.2)$$

ここで、 C_a は希釈前の懸濁液の濃度、 T_{bact} と C_b はそれぞれ希釈後の濁度と濃度である。

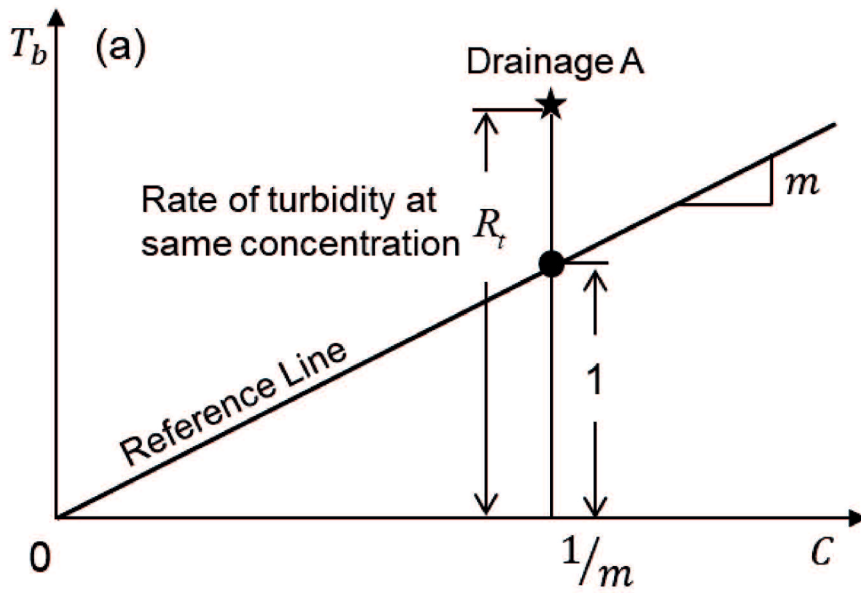


図 4.5 同一濃度濁度比 R_t の定義

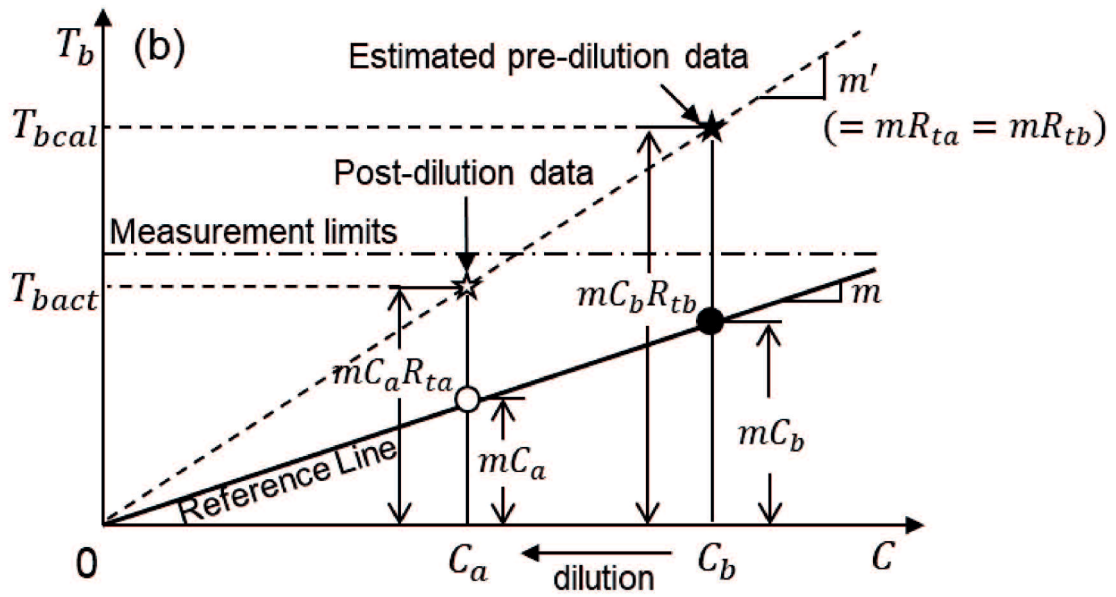


図 4.6 排水濃度が濁度計の測定範囲を超えた時の R_t と換算濁度 T_{bcal}

4.6 第3章における三軸試験排水の分析

図4.7に、第3章の三軸試験で得られた排水の濃度と濁度の関係を基準試料の近似線とともに示す。流出境界面に設置したワイヤーメッシュの目開き径は425 μm もしくは250 μm であるが、排水の濁度測定結果はすべてC425, C250の基準線よりも上部にプロットされた。さらに、多くのケースでC75の基準線よりも上部に結果がプロットされていることが分かる。供試体にもともと含まれるメッシュ径以下の土粒子の中から75 μm 以下の土粒子が多く排出してきたと推測される。

図4.8に、図4.7より算出した、同一濃度濁度比 R_t と侵食率 R_e の関係を示す。このとき、同一濃度濁度比の基準は250 μm 径のメッシュを使用した場合C250, 425 μm 径のメッシュを使用した場合はC425の基準線を使用している。侵食率が他よりも大きかったEBS-M5-m425-3を除いて、侵食率が大きいほど、同一濃度濁度比が小さくなる傾向が得られた。侵食しにくい状況であると、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と考えられる。ただし、3.7.1より、侵食率 R_t と透水前間隙比 e_{bpe} の間に有意な相関関係は得られなかったため、ここでいう「侵食しにくい状況」は、間隙レベルよりも小さい粒子一粒一粒のミクロスケールの影響であると考えられる。

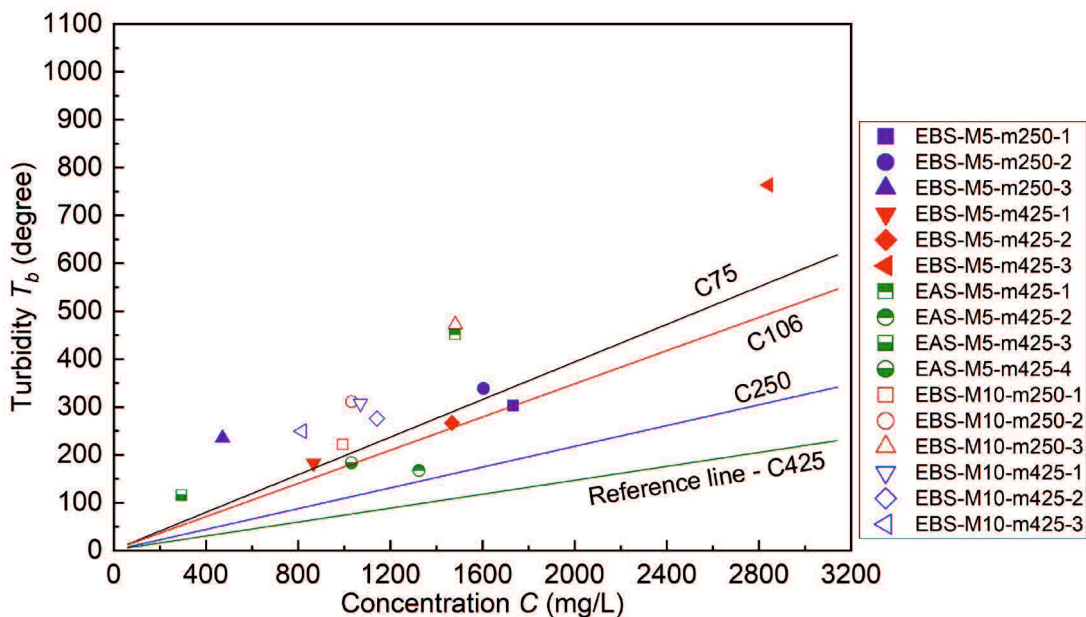


図4.7 第3章の三軸試験で得られた排水の濃度と濁度の関係

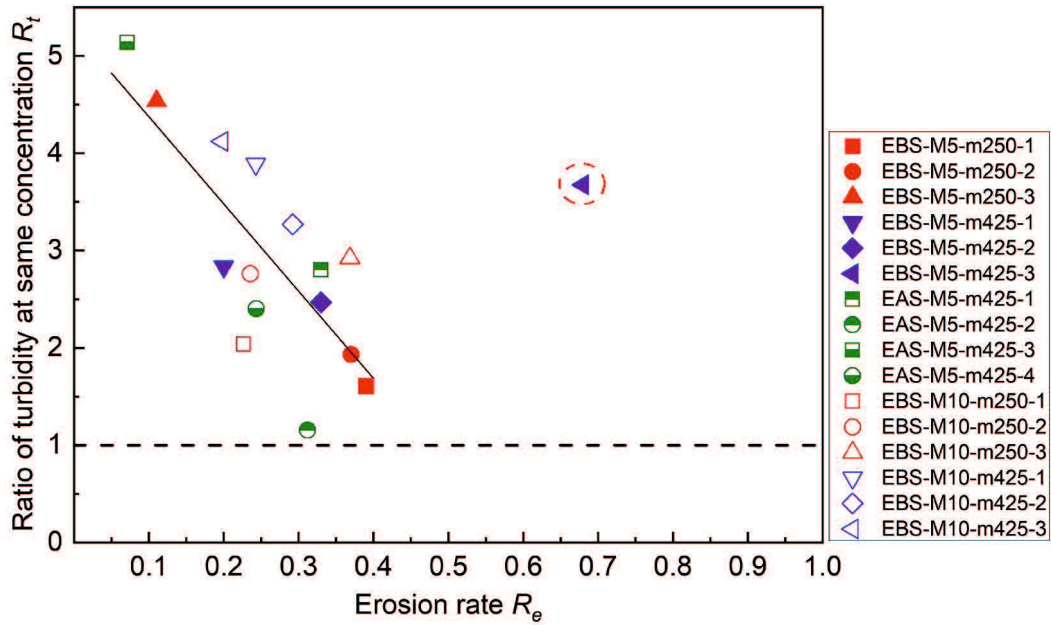


図 4.8 第3章の三軸試験で得られた排水の同一濃度濁度比 R_t と侵食率 R_e の関係

4.7 まとめ

本章では、粒径が小さいほど出力値が大きくなるという濁度の性質を利用して、内部侵食実験における排出土の粒度組成の変化を捉える方法を考案し、予備検討を実施した。さらに、本手法を用いて、第3章で侵食を伴う三軸試験によって得られた排水から排出した僅少な土粒子の粒径を分析した結果、侵食率が大きいほど、同一濃度濁度比が小さくなる傾向が得られ、侵食しにくい状況であると、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。

4.8 参考文献

- 1) 益社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（第一回改訂版），丸善出版，2020.
- 2) 佐藤真理，桑野玲子：流出水の濁度による土砂流出の定量評価，生産研究，64巻，4号，pp.187-191，2012.
- 3) 佐藤真理，桑野玲子：地盤の内部侵食と排水の濁度の関係，生産研究，65巻，4号，pp.199-202，2013.
- 4) Bendahmane, F., Marot, D., Alexis, A.: Experimental parametric study of suffusion and backward erosion, *Geo-environmental Engineering*, Vol.134, No.1, pp.57-67, 2008.
- 5) Haghghi, I., Chevaliar, C., Duc, M., Guedon, S.: Improvement of hole erosion test and results on reference soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.139, No.2, pp.330-339, 2013.
- 6) 横山勝英：濁度計の粒径依存特性と現地使用方法に関する考察，土木学会論文集，No.698，II-58，pp.93-98，2002.
- 7) 地頭菌隆，石塚忠範，能和幸範，柳町年輝：深層崩壊警戒対応の湧水センサーの開発，砂防学会誌，Vol.66，No.5，pp.49-52，2014.
- 8) 平野順子：濁度計の測定方式と濁度標準液，日本環境技術協会広報誌「かんぎきょう」，Vol.127，pp.18-19，2013.

第5章 排水の濃度—濁度関係に着目したサフュージョン進行メカニズム

5.1 概説

本章では、第4章で述べた排水の濃度—濁度関係に着目しながら、一次元カラム通水装置を用いて土粒子の流出挙動を調べた一連の実験について、以下に示す内容で述べる。表2.1、図2.2に示すように、内部侵食に影響を与える要因は多岐にわたる。本研究では、土質、地盤および水理条件それぞれから抽出した項目が、サフュージョン挙動に与える影響を検討した。

パート1：飽和度と細粒分含有率がサフュージョン挙動に与える影響

パート2：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

パート3：動水勾配の変動がサフュージョン挙動に与える影響

それぞれ、使用した装置や実験試料、実験方法等が異なるため、それらについてはその都度述べることとする。

5.2 パート1：飽和度と細粒分含有率がサフュージョン挙動に与える影響

5.2.1 実験装置

図5.1に本実験で使用した上部貯水型カラム通水装置の模式図を示す。供試体は、直径10cm、高さ20cmの円筒形である。従来から、円筒形の土供試体に対して、任意の浸透力を与え、流出した土粒子の量から、サフュージョンの程度を評価する研究が数多く行われている。なかでも、Bendahmane et al.¹⁾や Ke and Takahashi²⁾は、供試体底部に有孔板（ワイヤーメッシュ）と漏斗状のくぼみを設けることで鉛直下向きの浸透流によって侵食した土を集める工夫がなされており、本実験装置はそれらの装置を参考に製作した。供試体下部には直径5mmの孔が108個開いたアクリル多孔板と425 μm 径のメッシュを設置し（図5.2）、水とともに流出可能成分のみが通過できる。円筒カラム上部の貯水部に注水し、越流によって定水位を保ちながら、供試体に鉛直下向き一定の浸透流を与えることが可能

である。実験終了後には、カラムを2分割にすることで、供試体に与える機械的乱れを少なくして、各部の土粒子を採取できるようにした。

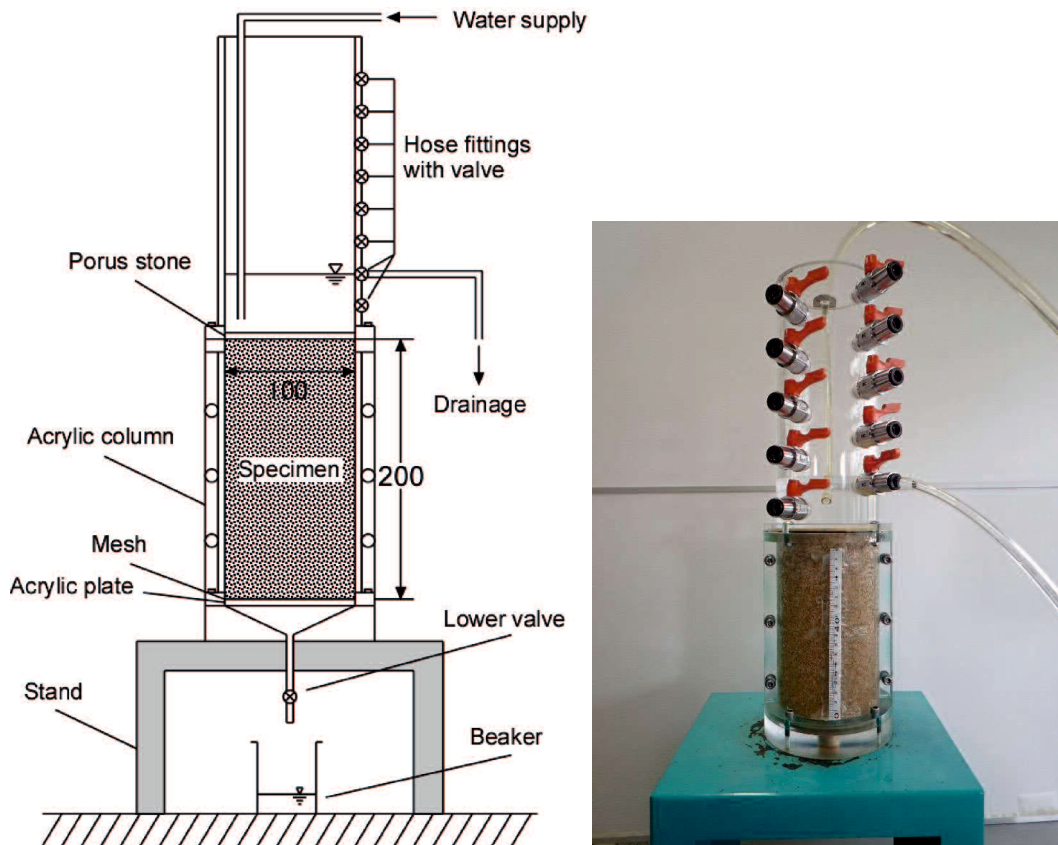


図 5.1 上部貯水型カラム通水装置

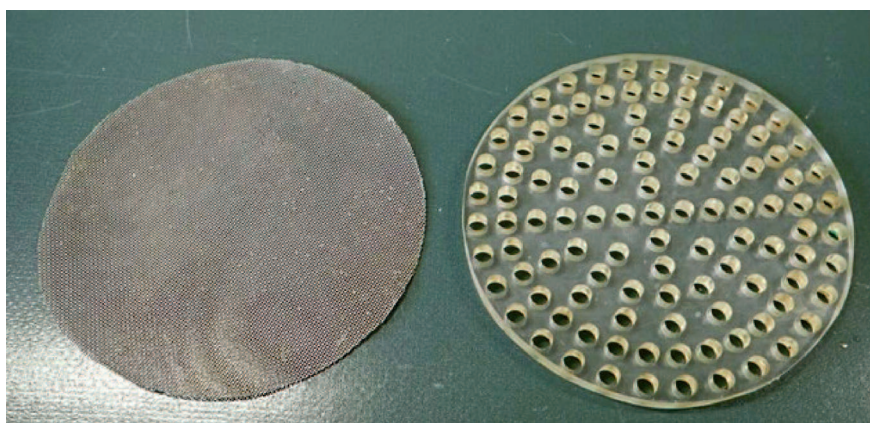


図 5.2 使用したワイヤーメッシュとアクリル多孔板

5.2.2 実験試料

パート1におけるサフュージョンを伴う通水実験には、第3章の濁度測定で用いた土試料と同じ宇部まさ土の粒度調整分を使用した。実験が行いやすい Gap-graded soil になるように粒度を調整し、排水の濃度—濁度関係の基本的挙動を整理した。

宇部まさ土は、ふるい分けにより、2mm 以上、425 μ m~2mm、106 μ m~425 μ m、106 μ m 以下に分級し、所定の割合で混ぜ合わせて再構成した。図5.3に調整した粒度加積曲線を示す。本研究では、流出境界面にワイヤーメッシュを設置し、流出する土粒子の粒径に制限をかけている。そこで、ワイヤーメッシュの目開き径より大きな粒径の土粒子を“骨格成分”，ワイヤーメッシュの目開き径より小さな粒径の土粒子を“流出可能成分”，土粒子全体の質量に対する流出可能成分の質量の割合を“流出可能成分含有率”と呼ぶこととする。したがって、本実験条件では、粒径が425 μ m以上の土粒子が“骨格成分”，106 μ m以下の土粒子が“流出可能成分”となる。また、本実験条件における流出可能成分は、第3章で基準試料として用いたC106と同じ土試料である。本試料はそれぞれRM5、RM10（RMはReconstituted Masadoの頭文字）と命名し、末尾の数字は流出可能成分含有率(%)を表している。

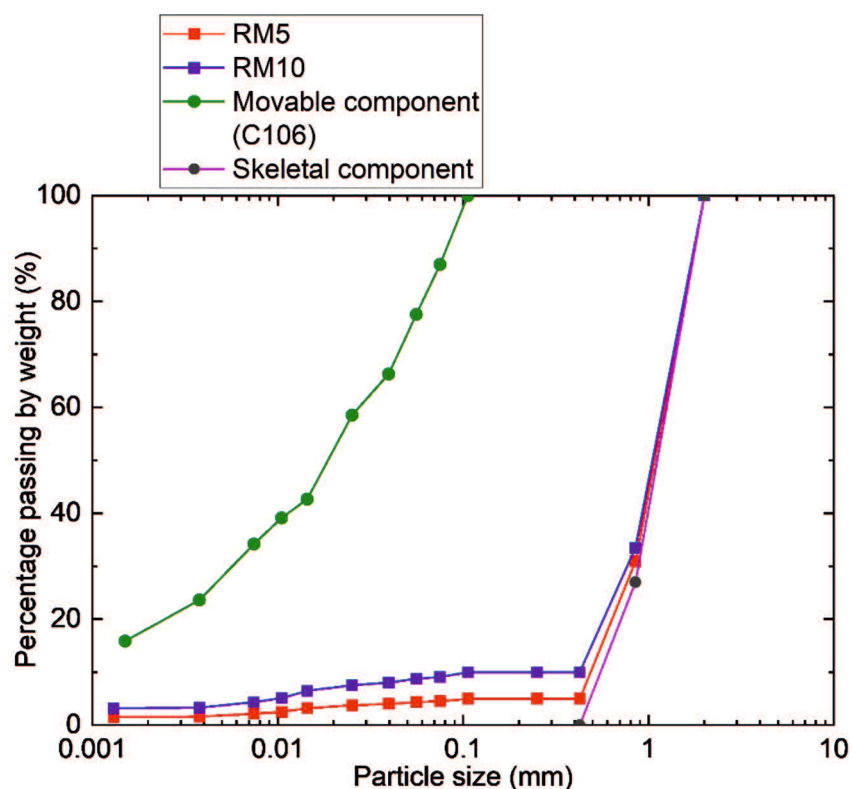


図5.3 使用した土の粒度加積曲線

Chang and Zhang³⁾は内部侵食に関する複数の安定指標の再整理を行い、本試料のようなある区間の粒径が取り除かれた粒度分布を持つ土 (gap-graded soil) で、細粒分含有率 $F_c \leq 10\%$ を満たすとき、gap ratio (G_r) という指標での評価が適していると述べており、 G_r は gap-graded soils の粒径加積曲線において、該当する粒径の土粒子が存在しない区間の最小粒径を d_{\min} 、最大粒径を d_{\max} とし、式 (5.1) で算出される。

$$G_r = \frac{d_{\max}}{d_{\min}} \quad (5.1)$$

$G_r < 3$ は内部安定、 $G_r \geq 3$ は内部不安定と判断される。本試料の内部侵食の安定性を Chang and Zhang³⁾の指標を用いて評価した。その結果、今回使用した土試料はいずれも $F_c \leq 10\%$ を満たし、 $G_r = 4.01$ ($d_{\min} = 106 \mu\text{m}$, $d_{\max} = 425 \mu\text{m}$) であることから、内部不安定と判断され、内部侵食が起こりやすい粒度分布を有している。

5.2.3 実験手順

含水比を調整した湿潤状態の土試料を 5 層ごとに突き固めて供試体を作製した。各層に対して目標の密度になるようにあらかじめ算出した質量分の土試料が所定の高さになるようにランマーを用いて突き固めた。実験前に上下逆にした供試体の下部 (通水実験時の供試体上面) に脱気水タンクを接続し、少しずつ上昇させることで供試体を浸水させた。このように、ポーラスストーン側の面から上向きに通水することで、メッシュ側の面から土粒子が漏出しないように注意した。脱気水タンクの水面の高さが供試体上面の高さと同じになるまで、約 1 時間かけて脱気水タンクを上昇させた。この段階の供試体の飽和度を初期飽和度 S_{r0} とした。初期飽和度は次のように算出する浸水前後に供試体に流入した水の質量 $m_{w(in)}$ を計測し、通水後の含水比 w_1 を式 (5.2) で算出する。

$$w_1 = w_0 + \frac{m_{w(in)}}{m_s} \times 100 \quad (5.2)$$

ここで、 m_s は土粒子の乾燥質量、 w_0 は通水前の供試体の含水比である。したがって、通水後の飽和度 S_r は式 (5.3) で算出する。

$$S_r = \frac{w_1 \cdot G_s}{e} \quad (5.3)$$

ここで、 G_s は土粒子の比重、 e は間隙比である。上記の方法では S_{r0} はたかだか約 70~80%であった。そこで、飽和度を上げるために、脱気水による浸水前に CO_2 ガスを供試体

下部から供給すると、 S_{r0} は92%以上となった。なお、 CO_2 ガスの供給の有無によって以降の実験結果が大きく異なったことから、便宜上、前者を「不飽和条件」、後者を「飽和条件」としてグループ分けをし、結果を整理する。

飽和過程終了後、供試体を元の向きに戻した後、貯水円筒を上部に取り付け、円筒カラムに注水し、越流によって水位を一定に保った。下部の排水バルブを開けると通水が開始される。排水を約100mLずつ回収容器で採水し、排水の濁度と濃度の関係を経時的に追跡するには、できるだけ少量ずつ連続的に採水することが望ましいため、回収容器を板の上に一列に並べ、板ごと動かすことで、速やかに容器の交換ができるようにした。

図5.4に示すように、一部の実験では、定水位通水後、さらなる侵食が発生するように給排水過程を繰り返す通水を実施した。定水位通水実験終了後、直ちに供試体上部への水の供給を止め、供試体の底面から排水し、水位を低下させた（これを水位低下過程と呼ぶ）。その後、供試体上面に設置した漏斗に500mLの水を30分間隔で9回供給し、その都度排水を回収した。このとき、供試体上面側の水位が定水位通水時の水位を越えないように、漏斗の先端に取り付けたバルブの開口具合で落水速度を調整し、500mLの水が約40秒で落水するようにした。供試体に接続した漏斗から大気圧状態で繰り返し水を浸透させる方法は、地中空洞が間欠的な浸透によって拡大していく様子を観察した佐藤ら⁴⁾の実験を参考にした。

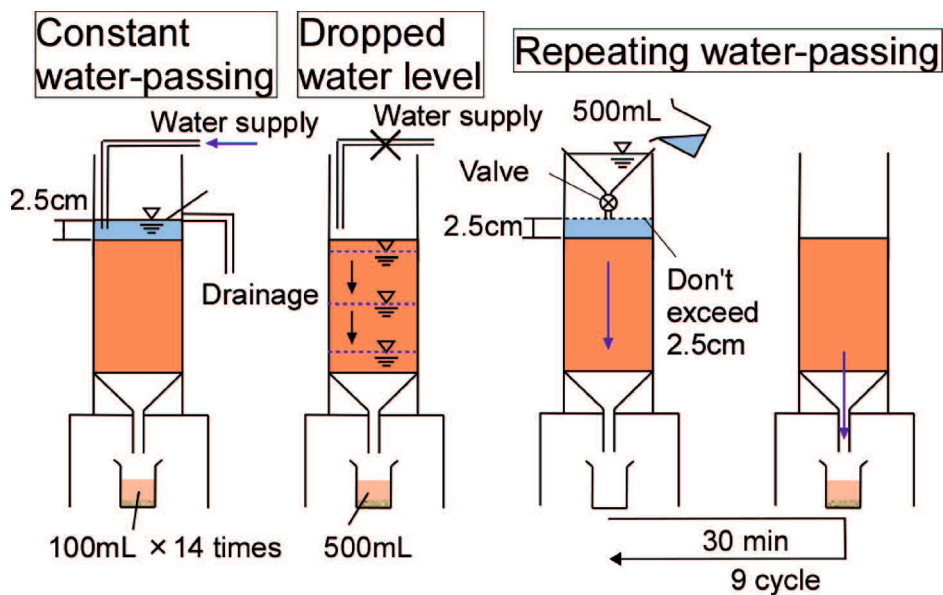


図 5.4 本実験の通水方法

5.2.4 測定項目と測定方法

実験中に回収容器ごとの採水時間をストップウォッチで計測した。実験終了後に回収容器ごとの排水量，排出土の質量および排水の濁度を測定した。排水の濁度は第3章と同様の方法で測定した。排出土の質量は，環境省の定める浮遊物質量（SS）の測定方法⁵⁾に準じて測定した。ろ過器はアスピレータを使用した吸引ろ過器，ろ過材は孔径 $1\mu\text{m}$ のガラス繊維ろ紙を使用し，高分解能電子天秤（最小表示 0.0001g ）を用いて計測した。

一部の実験では，実験終了後に，供試体を高さ方向に6分割した。図5.5に示すように，層ごとに $106\mu\text{m}$ のふるいの上で水洗いし，ふるい残留分を炉乾燥した後，質量を測定し，流出可能成分含有率 F を算出した。さらに，ふるい通過分の土粒子は水とともにすべて回収し，懸濁液にした後に，その濁度を測定することで，供試体に残留した流出可能成分に対する R_t を算出した。既往の研究のいくつかでは，サフュージョン実験終了後の供試体を分割し，各部から採取した土の粒度試験（ふるい分析，沈降分析）を実施している⁶⁾⁹⁾。しかしながら，土骨格を形成する大部分の粒度はほとんど変化しないため，土全体の粒径加積曲線を描いても，サフュージョンによる F の変化しか読み取ることができない。本実験では， F の計測に加え，流出可能成分それ自体の粒度変化を捉えるため， R_t を利用した。この方法は，残留した流出可能成分が少ない場合や供試体を細かく分割した場合でも，その粒度組成の変化を調べることができるといった利点がある。

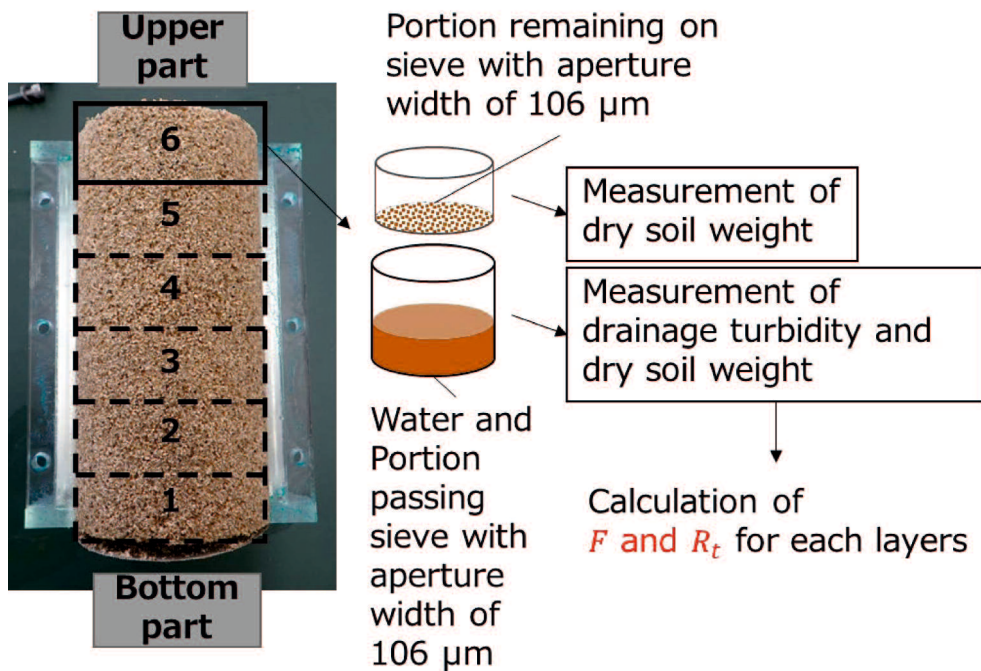


図 5.5 実験後供試体の分割後の実験工程

5.2.5 実験結果

a) 実験ケース

表 5.1 に今回実施した実験ケースを示す。ここで、実験ケース名は【使用した土試料名_飽和・不飽和条件_ID】を表している。表には、実験条件、実験結果およびそれぞれの供試体に対して実施した実験項目を示している。ここで、最終沈下量は、カラム通水装置解体時に供試体の沈下量を測定した値である。

表 5.1 実験ケース

Experiment code	Initial void ratio e_0	Initial Saturation degree S_{r0} (%)	Final settlement (mm)	Constant water-passing process	Repeating water-passing process	Breaking apart of specimen
RM5_unsat_1	0.85	71.5	2.05	○		
RM5_unsat_2		72.4	2.35	○		
RM5_unsat_3		74.4	2.45	○		○
RM5_unsat_4		78.6	4.50	○	○	○
RM5_sat_1		92.6	3.15	○		
RM5_sat_2		96.7	3.15	○		
RM5_sat_3		93.1	3.35	○		○
RM5_sat_4		97.2	4.10	○	○	○
RM5_sat_4		97.5	3.90	○		
RM10_unsat_1		71.5	2.25	○		
RM10_unsat_2		72.5	3.45	○	○	
RM10_sat_1		98.8	2.60	○		
RM10_sat_2		94.8	3.25	○	○	

Note : unsat (Unsaturated)=不飽和条件, sat (Saturated)=飽和条件。

b) 土粒子の排出状況

図 5.6 に実験で得られた排水の写真の一例を示す。このように、通水量が増えるほど濁りが小さくなることを確認できる。図 5.7, 図 5.8 にそれぞれ、土粒子の排出量および排水の濁度の変化を示す。各図横軸は通水量および括弧内に回収容器 No.を示している。土粒子の排出量と排水の濁度は、通水量 100mL ごとに回収した排水から得られた結果である。(a) の不飽和条件における土粒子排出量は、通水量 100mL または 200mL 時点でピークとなり、その後徐々に減少し、通水量が 600mL を超えるとほぼゼロになった。一方、(b) の飽和条件では、通水量 300mL または 400mL 時点で土粒子の排出量がピークを迎えた。その後、RM5 では通水量 800mL 程度、RM10 では通水量 700mL 程度を超えると土粒子の排出がほぼゼロになった。飽和条件の方が、不飽和条件よりも、土粒子の排出量のピークが遅れ、排出が停止するまでより多くの通水量を要した。また、飽和・不飽和条件ともに、排水の濁度の変化は、土粒子の排出量の変化に付随しておおむね同様の挙動となった。なお、この濁度には、排水を希釈した場合に式 (4.2) で推定した排水の希釈前の濁度 T_{beal} も含まれており、これ以降の結果もまた同様である。

図 5.9 に平均流量と土粒子の総排出量の関係を示す。図中の実線は、試料別に最小二乗法で求めた近似線である。飽和度によらず、RM5 の方が RM10 よりも土粒子の流出量が多かった。また、同じ土試料の結果を比較すると、初期飽和度が高く、平均流量が多いほど、土粒子の総排出量が多かった。さらに、RM5 の方が RM10 よりも平均流量の増加量に対する排出土の増加量が多い。したがって、RM10 よりも RM5 において、土粒子の総排出量は初期飽和度に起因する平均流量の違いに鋭敏であり、すなわち、供試体の飽和度の影響を受けやすいといえる。

第5章 排水の濃度—濁度関係に着目したサフュージョン進行メカニズム

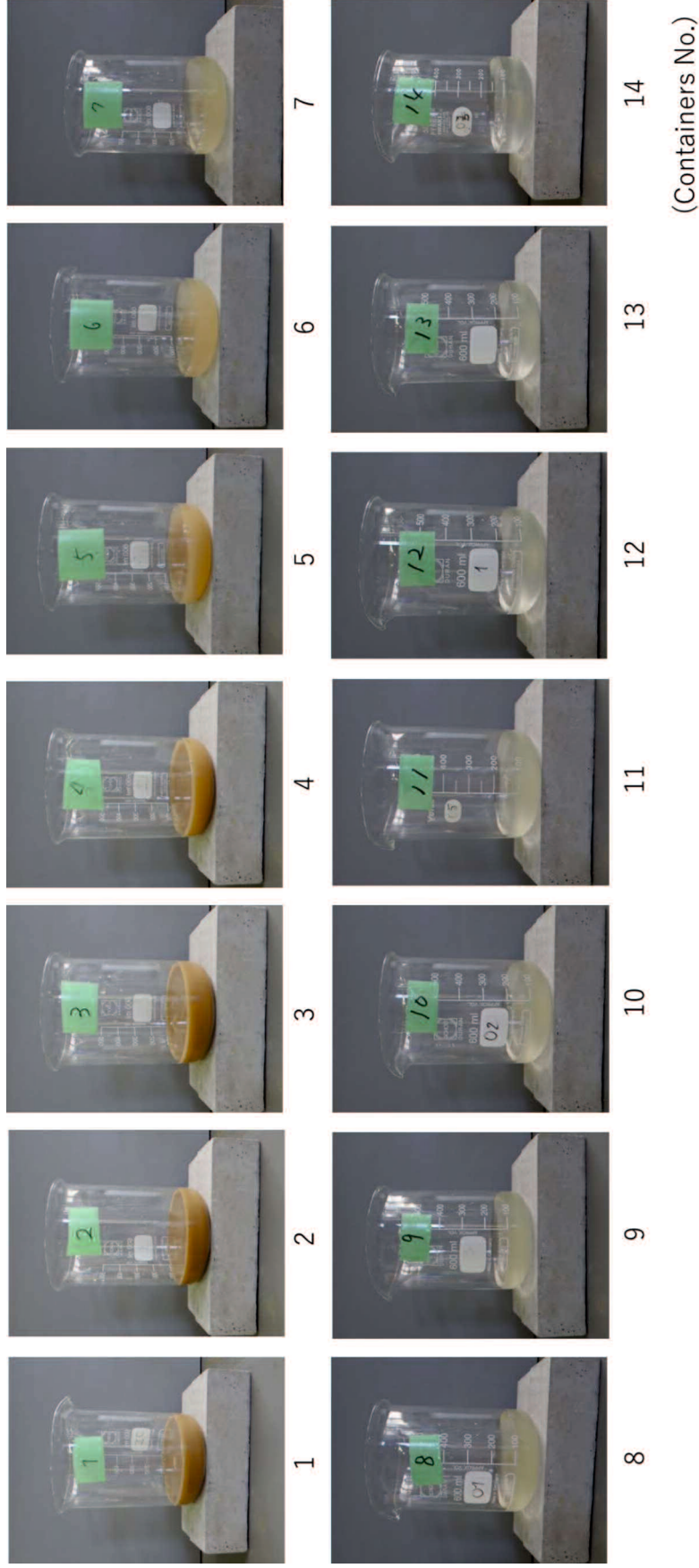


図 5.6 排水の濁りが小さくなっていく様子

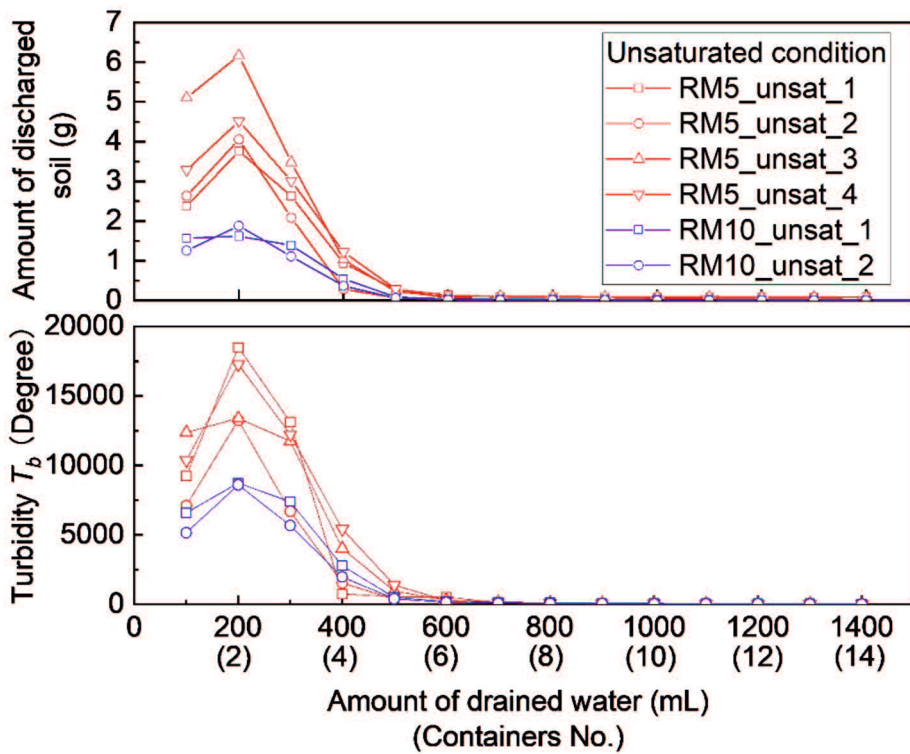


図 5.7 土粒子の排出量および排水濁度の変化（不飽和条件）

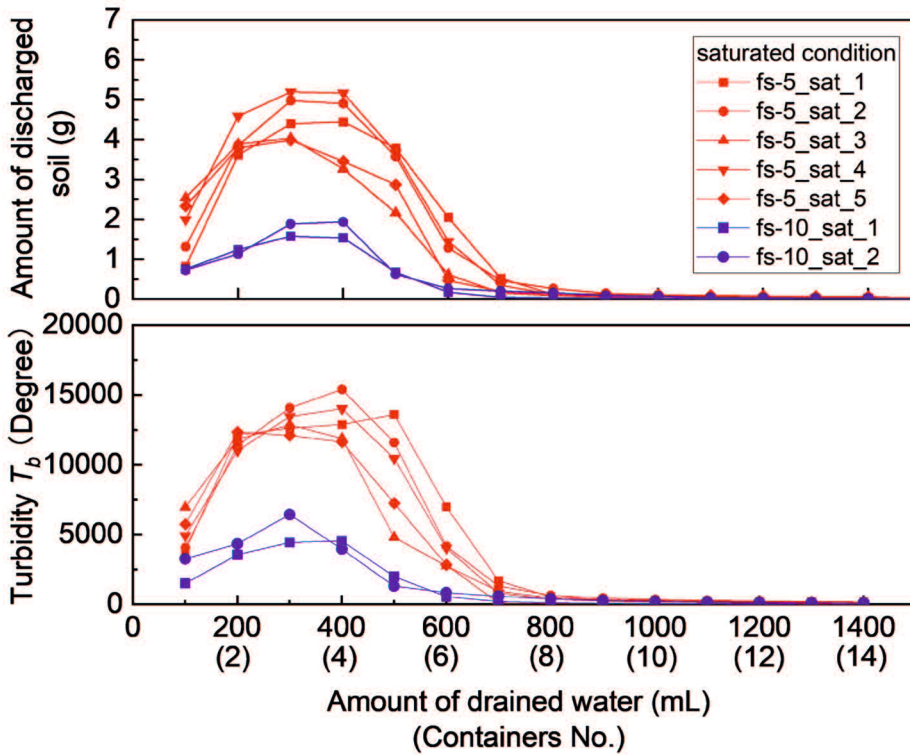


図 5.8 土粒子の排出量および排水濁度の変化（飽和条件）

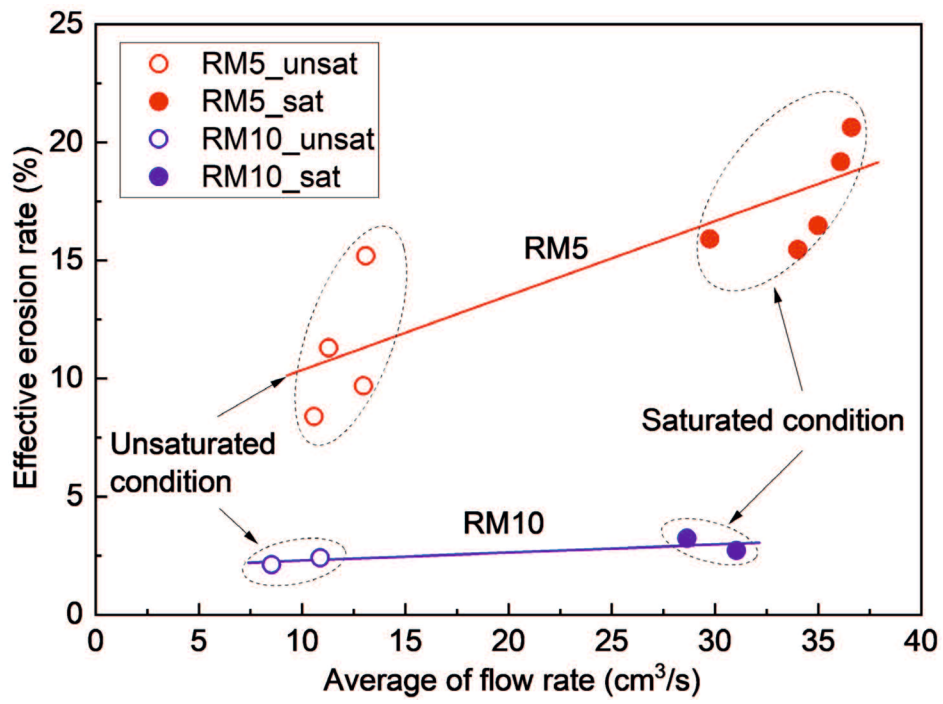


図 5.9 平均流量と有効侵食率の関係

c) 排水の濃度—濁度関係の経時変化

図 5.10 に実験ケース RM5_unsat_4 と RM5_sat_4 の定水位通水過程における排水の濃度と濁度の関係を示し、本実験で得られた典型的な挙動を説明する。排水の濃度と濁度はともに、透水開始から増加し、ピークを迎えた後、あるところで減少に転じ、原点に向かって収束していく挙動となった。また、濃度が増加する過程の濁度よりも、濃度が減少する過程の濁度が高くなり、その挙動は同じ経路を辿らなかった。

図 5.11 に本実験で得られたすべての定水位通水過程における排水の濃度と濁度の関係を示す。また、図 5.12, 図 5.13 には、不飽和条件と飽和条件の結果を分けて示す。RM5_unsat_3 の結果において、濃度に対する濁度が明らかに低いデータがあるが、計測ミス等の人為的なエラーである可能性が高い。飽和度の違いによって、排水の濃度と濁度の関係が異なる挙動を示した。流出可能成分含有率が異なる RM5, RM10 ともに、飽和度の違いは、経路の勾配に現れ、不飽和条件の方が、飽和条件よりも経路の勾配が大きくなった。これは、飽和条件よりも不飽和条件において、粒径が小さな土粒子が多く排出してきたことを意味する。また、流出可能成分含有率の違いは、濃度と濁度のピークに現れ、流出可能成分含有率が 5%である RM5 の方が、流出可能成分含有率 10%である RM10 よりもピークが高くなった。このピークの違いは土粒子の排出量の違いを反映したものである。

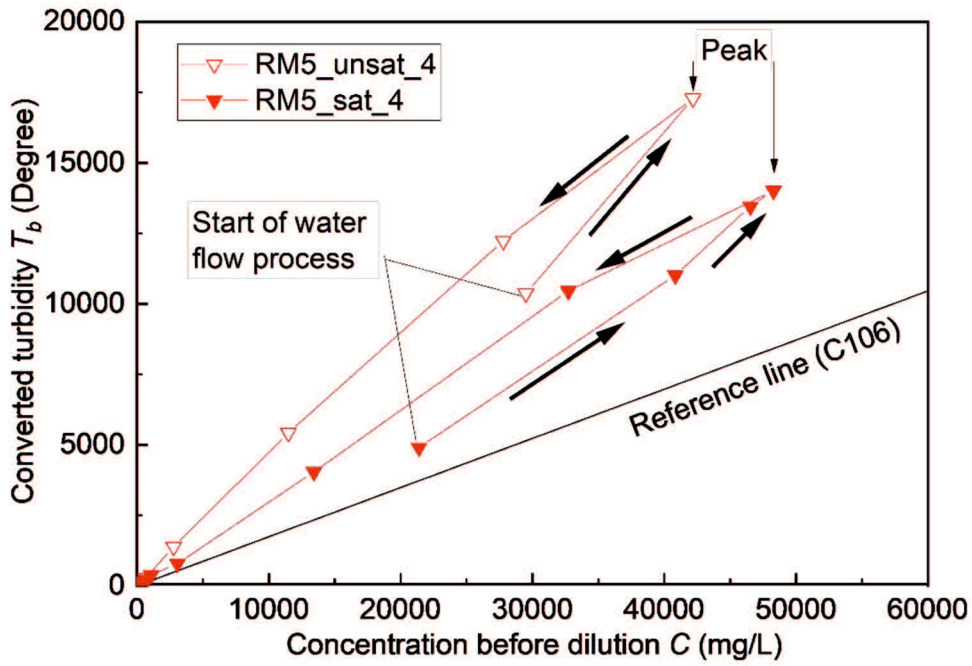


図 5.10 排水の濃度と濁度の関係における典型的挙動

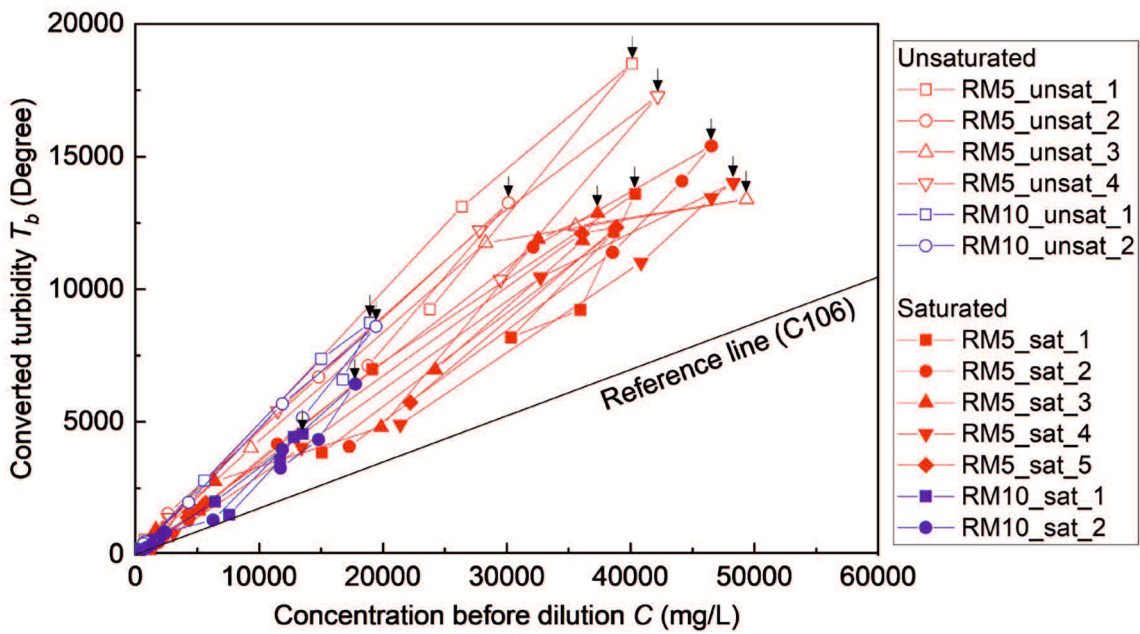


図 5.11 排水の濃度と濁度の関係（全ケース）

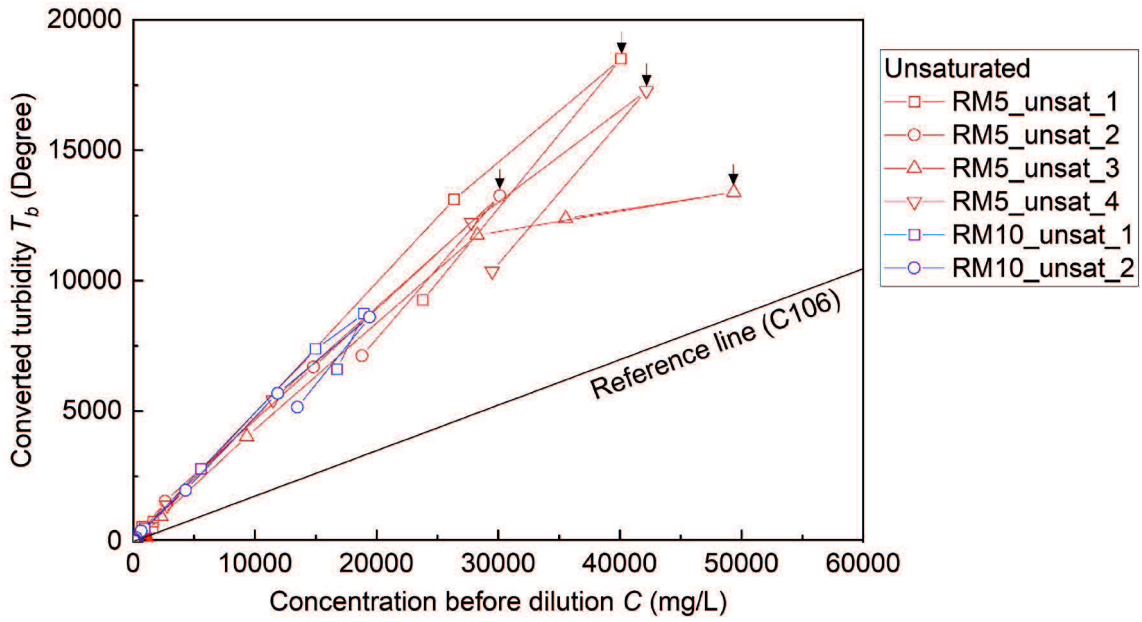


図 5.12 排水の濃度と濁度の関係（不飽和条件）

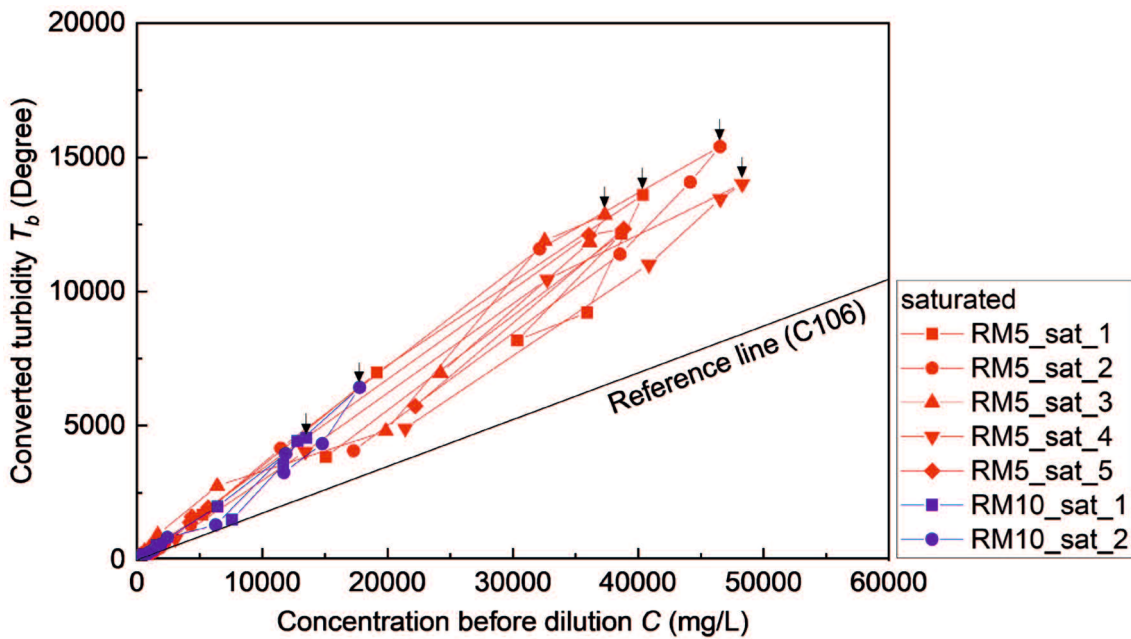


図 5.13 排水の濃度と濁度の関係（飽和条件）

d) 同一濃度濁度比 R_t の変化

RM5_sat_5の実験ケースにおいて、レーザ回折散乱式粒度分布測定装置を用いて、排出土の粒子径分布を調べ、 R_t との関係を調べた。使用した装置はHORIBA製LA-920である。図5.14にRM5_sat_5における排出土の粒子径分布、図5.15にRM5_sat_5における定水位通水過程の R_t の変化およびレーザ回折散乱式粒度分布測定装置で求めた粒度分布における50%粒径 D_{50} 、90%粒径 D_{90} の変化を示す。 R_t の算出に使用した基準線は実験試料の流出可能成分と同一の土であるC106の基準線を選択した。ただし、図4.4より、C106の基準線において、排水の濃度が200mg/L以下の低濃度領域では、基準線上に実測値が乗っていないので、濃度が200mg/Lを下回る排水の R_t は表示していない。回収容器No.1からNo.4にかけて、粒子径分布の山のピークが左にシフトしながら大きくなっており、粒径が小さな土粒子の配分が増えていることが分かる。回収容器No.5からNo.6にかけて、粒子径分布の山のピークが右にシフトしながら小さくなり、その後、回収容器No.7~9においては、100 μ m~200 μ m付近に新たなピークが発生した。すなわち、粒径が小さな土粒子の配分が少なくなり、相対的に粒径が大きな土粒子が増えたと考えられる。排水の R_t との関連を見ると、No.1からNo.4にかけて粒径が小さな土粒子の配分が増える時、 R_t は増加し、No.5からNo.9にかけて、粒径が小さな土粒子の配分が少なくなる時、 R_t は減少している。同様に、レーザ回折散乱式粒度分布測定装置で求めた粒度分布における D_{50} 、 D_{90} も R_t の変動と連動しており、 R_t は排出土の粒度の変化を適切に捉えていると判断できる。

ここで、図5.16に R_t と排出土の粒度の関係を模式的に示す。上述のように供試体の流出可能成分はC106と同じであるため、仮に供試体の流出可能成分と同じ粒度組成で排出されたならば、 $R_t=1$ となる。ここで、説明の簡略化のために、流出可能成分の中でも比較的小さな土粒子を「粘土相当分」、大きな土粒子を「シルト相当分」と表現すると、 R_t は粘土相当分とシルト相当分の比率を反映する。 $R_t < 1$ のときは、シルト相当分が流出可能成分の初期の比率よりも多い（粘土相当分が流出可能成分の初期の比率よりも少ない）状態であり、逆に、 $R_t > 1$ のときは、シルト相当分が流出可能成分の初期の比率よりも少ない（粘土相当分が流出可能成分の初期の比率よりも多い）状態であると推測できる。なお、本手法は、排水を連続的に採水できる実験装置を使用することを前提とし、流出可能成分の濃度と濁度の関係が直線になる試料土に対して適用できる。なお、光学式濁度計の感知可能な粒径の上限に留意しつつ、細砂以上の土粒子が懸濁液中に存在する場合は濃度と濁度が直線関係になるかどうか事前に確認しておく必要がある。

図 5.17 にすべての実験ケースにおける定水位通水過程の R_t の変化を示す。通水量 100mL 時点の R_t は、不飽和条件で 2.0~2.5 程度、飽和条件で 1.1~1.8 程度であった。どちらの場合も $R_t > 1$ であるため、粘土相当分が流出可能成分の初期の比率よりも多く排出されたとと言える。また、飽和条件の方が、不飽和条件よりもその程度は低かった。この理由として、飽和条件の方が、流量が多く、間隙内を流れる水の流速が速かった分、シルト相当分の流出が多く、 R_t が相対的に小さくなったためと考えられる。

定水位通水過程で排出する土粒子の大半が排出する通水初期段階（通水開始から通水量 400mL~600mL まで）をみると、飽和・不飽和条件ともに R_t が増加する傾向にあった。土粒子が移動を開始した後、シルト相当分から順に土粒子骨格に捕捉されると考えられ、徐々にシルト相当分の排出が少なくなることから、排出土中の粘土相当分の比率が相対的に多くなり、 R_t が上昇したと推測される。また、通水量 100mL 時点だけでなく、この通水初期段階全体においても、飽和条件の方が不飽和条件よりも R_t が小さく、シルト相当分が多く排出されていると考えられる。それ以降、飽和条件では、そのまま R_t が増加する傾向にあったが、不飽和条件では、 R_t が徐々に減少し、シルト相当分が多い粒度組成になった。

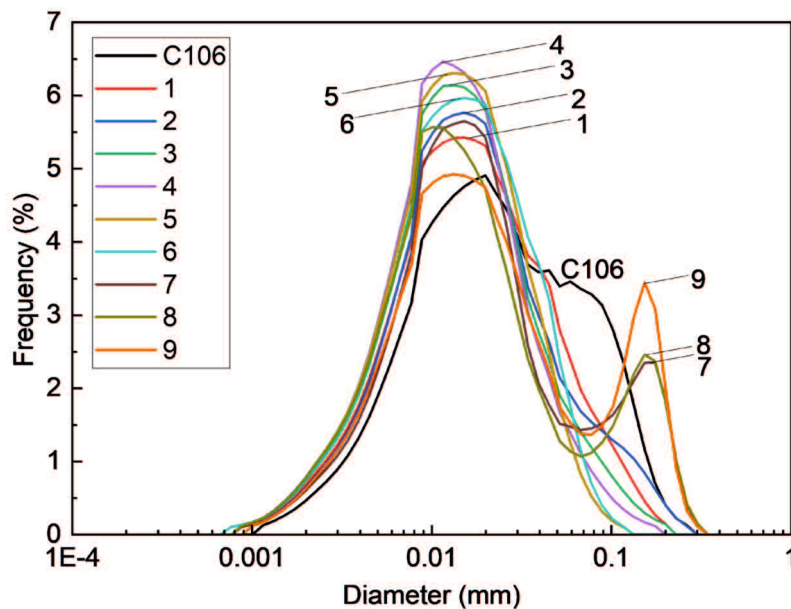


図 5.14 レーザ回折散乱式粒度分布測定装置による回収容器ごとの粒子径分布 (RM5_sat_5)

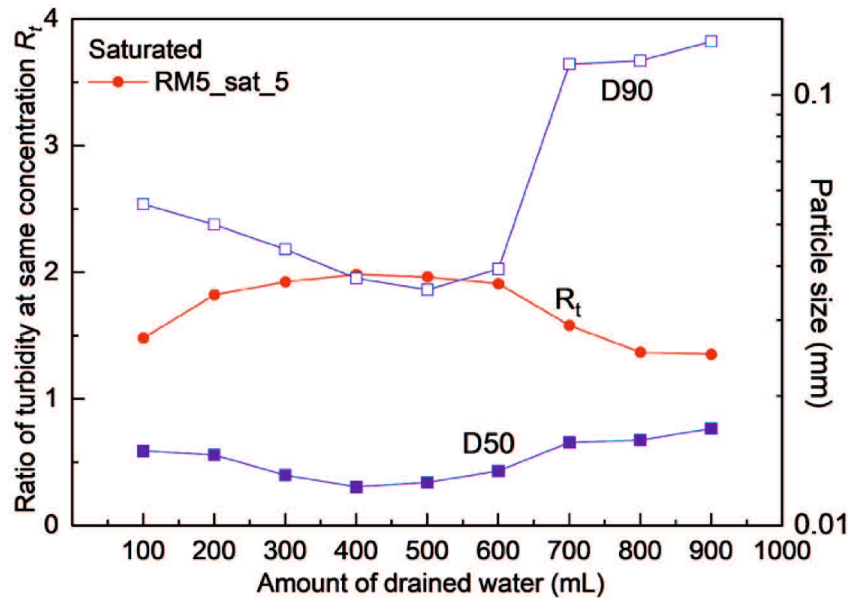


図 5.15 同一濃度濁度比およびレーザー回折散乱式粒度分布測定装置で求めた D_{50} , D_{90} の変化 (RM5_sat_5)

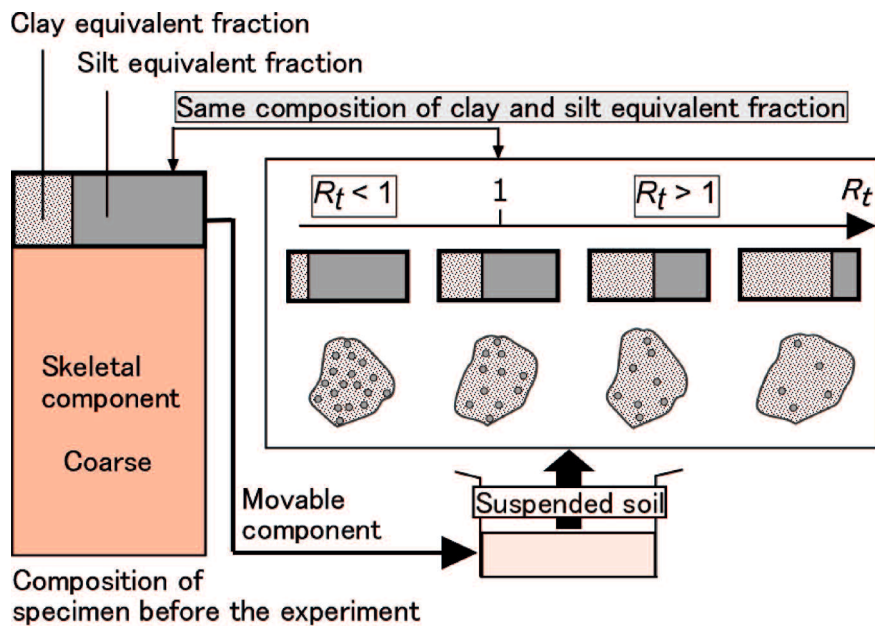


図 5.16 同一濃度濁度比の考え方

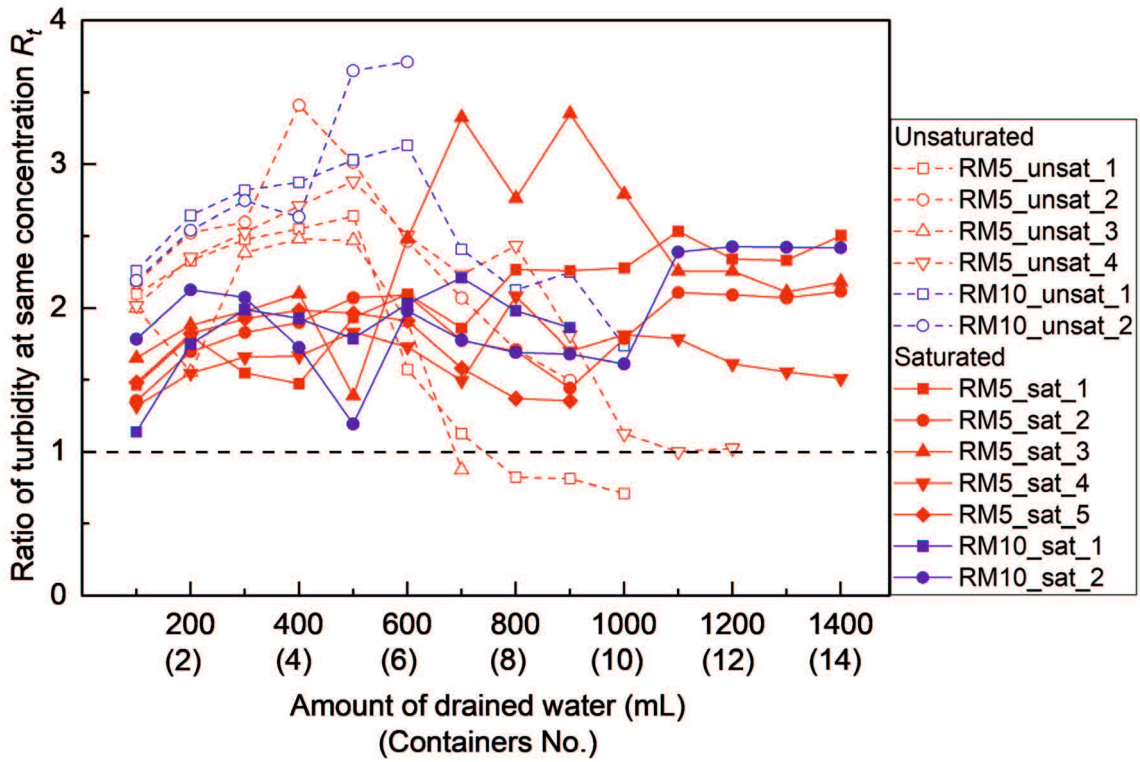


図 5.17 同一濃度濁度比の変化

e) 給排水繰返し通水

図 5.18 に給排水繰返し通水を実施した実験ケースにおける土粒子の累加排出量を示す。給排水繰返し通水時の供試体はいずれも、定水位通水後に水位を低下させるため、飽和度が低下し、不飽和状態であると考えられる。すべてのケースにおいて、土粒子の排出は定水位通水過程でほぼ止まったが、水位低下過程で土粒子がわずかに排出し、給排水繰返し通水過程で土粒子の排出が再開した。その後、土粒子の排出は徐々に緩やかになった。長崎ら¹³⁾の上向きの浸透条件下におけるサフュージョン実験においても同様に、間欠的な流れによって土粒子の排出が再開し、土粒子の排出量が徐々に減少することが分かっている。給排水するたびに、Luo ら⁷⁾が主張する目詰まりの押し出しが発生し、土粒子の移動→目詰まり→目詰まりの押し出し→土粒子の再移動が繰り返されたと考えられる。

図 5.19 に給排水繰返し通水過程の土粒子の排出量増分を示す。ここでの土粒子の排出量増分は、水位低下過程までの累加土粒子排出量とそれ以後の各時点での累加土粒子排出量との差を示している。RM5, RM10 とともに、飽和条件の方が不飽和条件よりも土粒子の排出量が多かった。定水位通水過程で飽和条件の方が既に土粒子を多く排出しているにもかかわらず、給排水繰返し通水でも土粒子排出量が多かった。給排水の時間間隔はともに同じであることから、定水位通水時に飽和していた供試体の方が、不飽和であった供試体よりも給水時の供試体の飽和度が高く、それが土粒子の流出を促進させた可能性がある。また、定水位通水過程と同様に、RM5の方がRM10よりも給排水繰返し過程の土粒子の流出量が多かった。

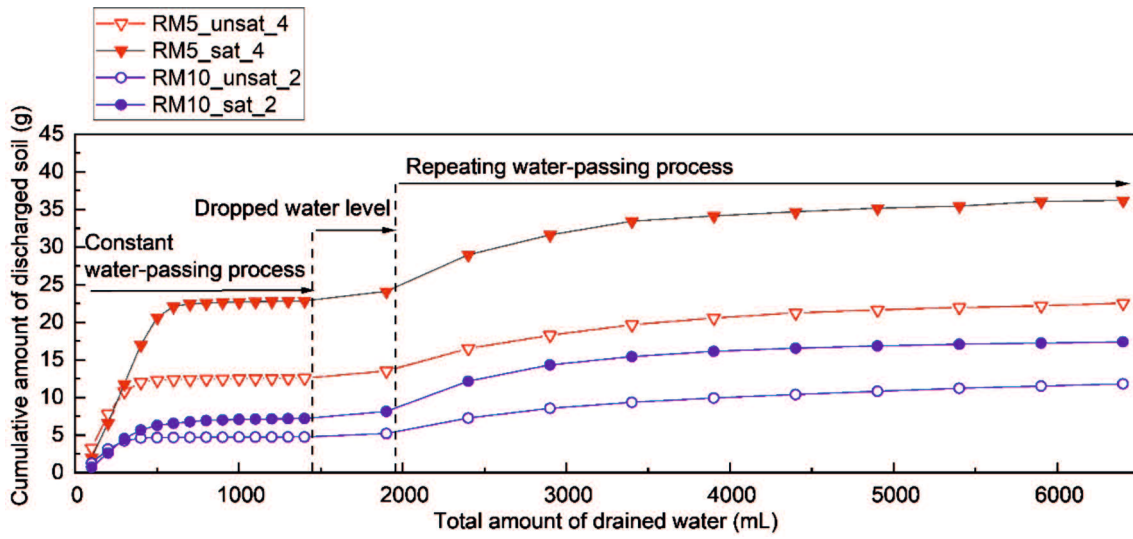


図 5.18 土粒子の累加排出量の変化
(定水位通水過程～給排水繰返し過程)

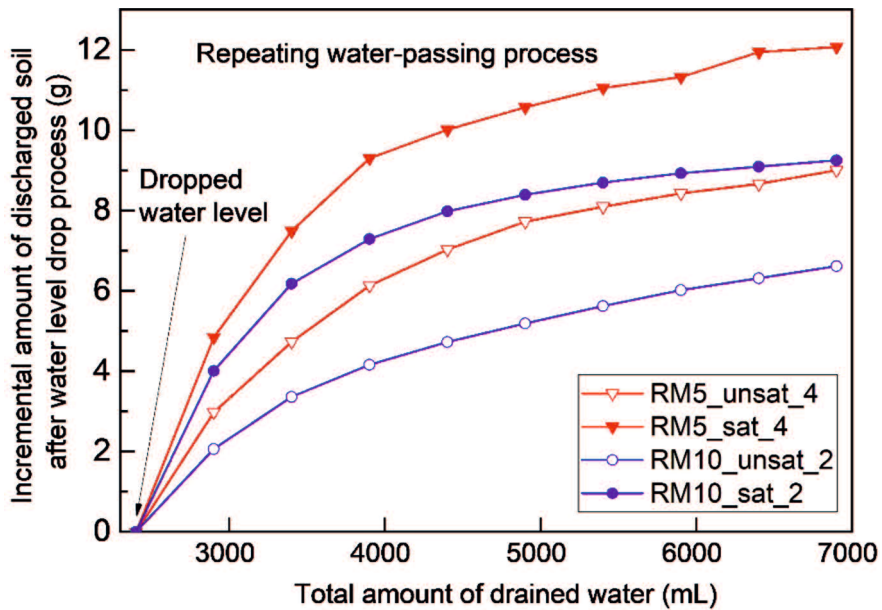


図 5.19 水位低下過程以降の排出土粒子量増分

図 5.20 に給排水繰返し通水過程における排水の濃度と濁度の関係を示す。1 回目の給排水における濃度と濁度の関係がピークとなり，給排水の回数を増やす度に，原点に向かって近づいていく挙動となった。定水位通水時と同様に，飽和度および流出可能成分含有率の違いによって，排水の濃度と濁度の関係は異なる挙動を示した。RM5, RM10 とともに，定水位通水時に不飽和条件だった場合は，飽和条件であった場合よりも経路の勾配が高くなった。

図 5.21 に水位低下過程および給排水繰返し通水実験における R_t の変化を示す。水位低下過程で R_t が1 付近になり，給排水繰返し通水が始まると R_t は上昇した。その後の給排水繰返し通水でも， $R_t > 1$ を維持した。このことから，給排水繰返し通水でも流出可能成分の中から粘土相当分が優先的に排出されていると言える。また，RM5, RM10 とともに，定水位通水時に飽和条件だった場合の方が，不飽和条件であった場合よりも全体的に R_t が大きいの。土粒子の排出量が多い飽和条件の方が，不飽和条件よりも，シルト相当分が多く排出していることが分かった。

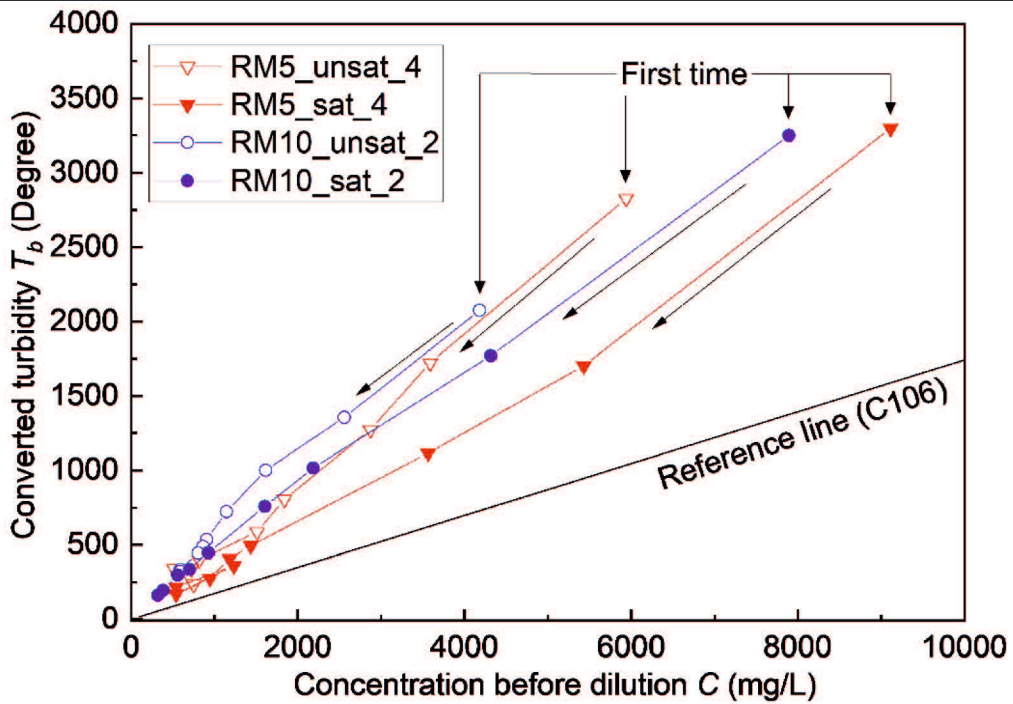


図 5.20 排水の濃度と濁度の関係 (給排水繰返し通水過程)

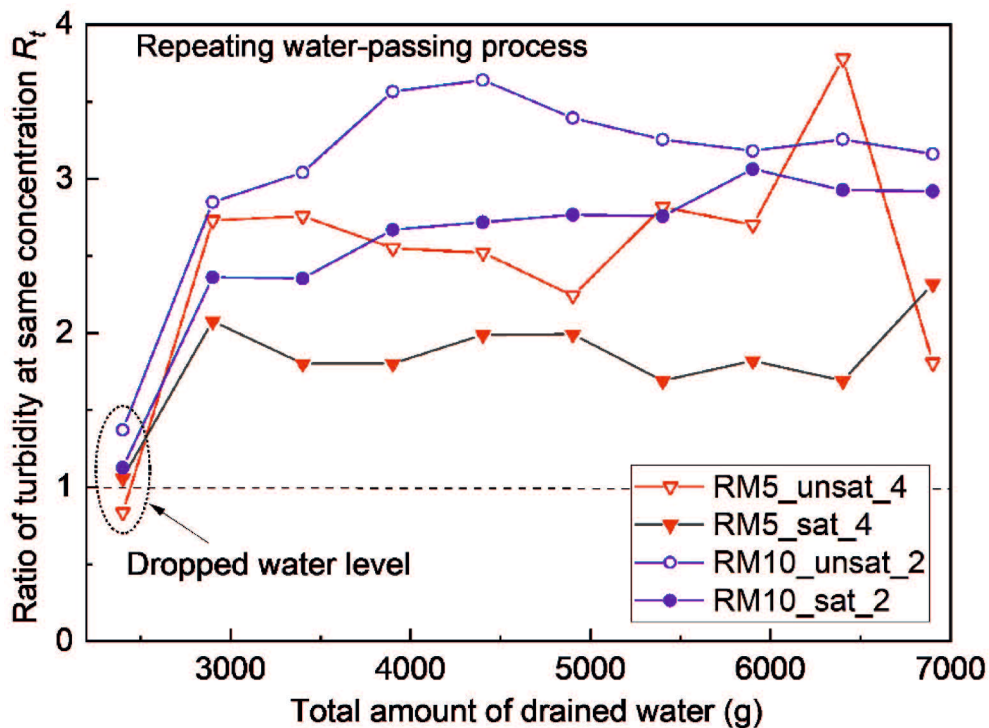


図 5.21 同一濃度濁度比の変化 (給排水繰返し過程)

f) 通水実験後の供試体の状態

図 5.22, 図 5.23 に RM5 を用いた各通水実験後に調べた供試体高さ方向の F_c および供試体に残留した流出可能成分に対する R_t の分布を示す。定水位通水後の供試体では、飽和・不飽和条件ともに、土粒子の排出によって全層にわたって F が初期値の 5%から減少した。特に、飽和条件では、上層から下層にかけて F が高くなる分布となった。定水位通水後の供試体における R_t は、不飽和条件では、全層でわずかに 1 を下まわり、供試体に残留した流出可能成分の粘土相当分の比率が初期状態から減少している。飽和条件では、上層から下層にかけて R_t が徐々に大きくなる分布となった。上層では $R_t < 1$ 、最下層では $R_t > 1$ となることから、上層から下層にかけて粘土相当分が卓越して移動したと推測される。

給排水繰返し通水後の供試体では、飽和・不飽和条件ともに上層から下層にかけて F が高くなる直線的な分布になり、飽和条件の方が、不飽和条件よりも F が著しく減少した。また、飽和・不飽和条件ともに下層では F が初期値の 5%よりも高くなり、供試体の下層で目詰まりが発生していたとみられる。給排水繰返し通水後の供試体の R_t 分布をみると、全体的に R_t は 1 を下まわり、上層から下層にかけて大きくなる分布となった。給排水繰返し通水後は、定水位通水後よりも、粘土相当分の移動が卓越しており、 F の不均一化とともに、流出可能成分自体の粒度組成も供試体高さ方向に不均一になっていることが分かった。

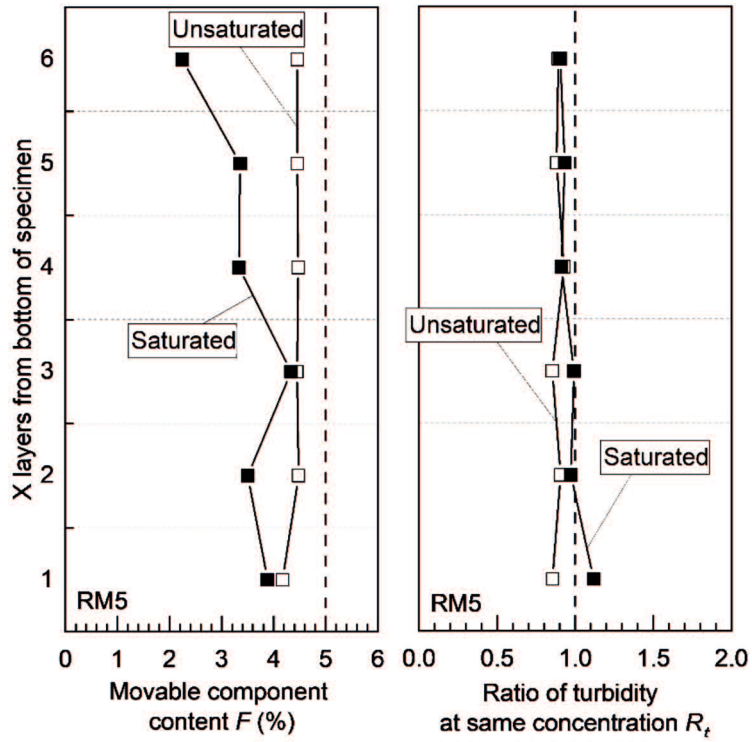


図 5.22 定水位通水後の流出可能成分含有率および R_t の供試体高さ方向分布 (RM5)

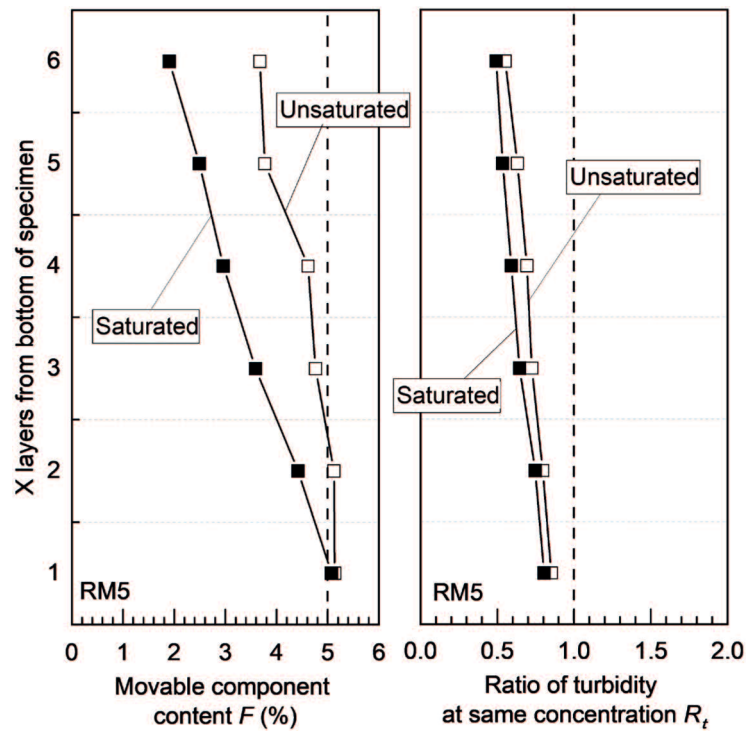


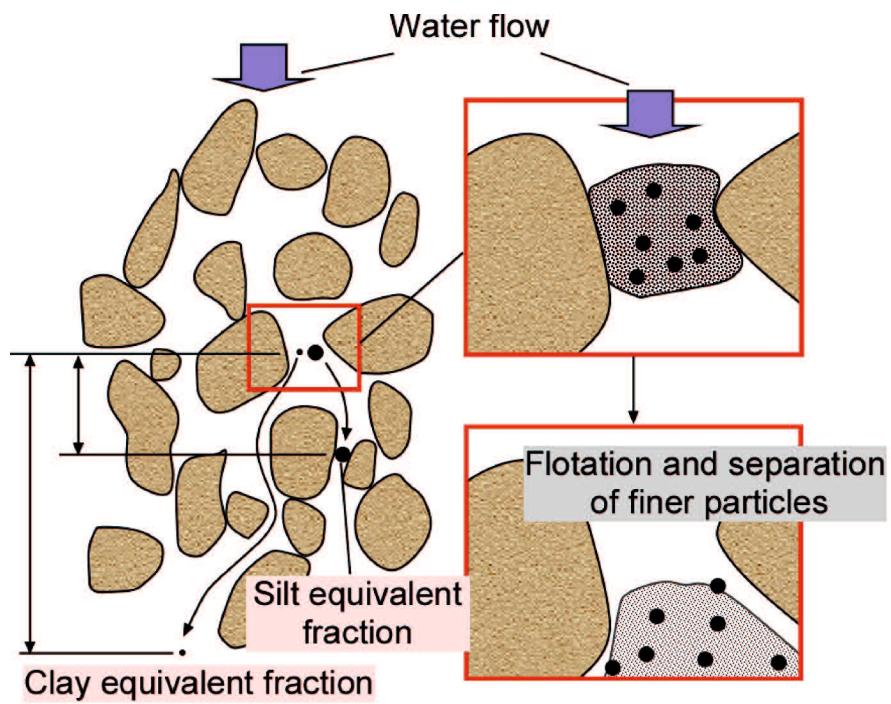
図 5.23 繰り返し給排水通水後の流出可能成分含有率および R_t の供試体高さ方向分布 (RM5)

5.2.6 移動土粒子の粒径に着目したサフュージョンの進行メカニズム

パート1から得られた、移動土粒子の粒径に関する結果を以下に整理する。

- a) 排出土の粒度が経時的に変化している。
- b) 累積通水量が多くなるほど、シルト相当分の排出量が少なくなり、粘土相当分だけが排出してくる。
- c) 間隙中の土粒子移動過程において、流出可能成分の中でも粘土相当分がより上層から下層に移動している。

これらの理由を、粒径ごとの捕捉されやすさによって生じる移動距離の差によるものと推察する。水に取り込まれた土粒子が間隙を通過するためには、比較的大きな土粒子が形成する間隙くびれ径⁸⁾よりも移動土粒子の粒径が小さい必要がある。間隙くびれ径よりも大きな土粒子は、間隙を通過できずにその場で捕捉される。近藤ら⁹⁾は三次元の個別要素法による数値解析を用いて、大粒子で構成された粒状体内に、浸透力によって小粒子を通過させた場合の移動の軌跡を観察している。その結果、大粒子の粒径が同じ場合、小粒子の粒径が小さいほど移動距離が長くなることを示している。図5.24に模式的に示すように、シルト相当分は間隙に捕捉されやすく、上層に残留しやすい、粘土相当分は間隙をくぐり抜けやすく、下層に移動しやすいために、粒径によって平均的な移動距離に差が生じることで、上記a)-c)のようなシルト相当分と粘土相当分のふるまいの差異がみられたと考えられる。特に、給排水繰返し通水のような間欠的な流れを受けた場合、土粒子は地盤の中で移動と滞留を繰返すため、粘土相当分とシルト相当分の移動距離の差の影響が蓄積され、流出可能成分自体の粒度組成の不均一化が顕著になったと考えられる。



Difference in migration distance caused by ease of trapping due to differences in particle size

図 5.24 サフュージョンの進行メカニズム

5.2.7 まとめ

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。排水の濃度と濁度の関係から、排出土の粒度組成を推定するパラメータとして同一濃度濁度比 R_t を導入し、それを利用して、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。

下記 1)-7)に飽和度と流出可能成分含有率が異なる土供試体に対する定水位通水実験から得られた結果、下記 8)-11)に定水位通水実験後の給排水繰返し通水実験から得られた結果を示す。

- 1) 土粒子の排出量および排水の濁度は通水開始直後に一度増加し、ピークを迎えた後、徐々に減少し、ほぼゼロになった。
- 2) 土供試体の飽和度が 92%以上の条件では、飽和度がそれ以下の条件のときよりも流量が多く、土粒子の排出量が多かった。また、飽和度によらず、流出可能成分含有率 5%の方が、10%よりも土粒子の排出量が多かった。
- 3) サフュージョンの進行に伴って、排水の濃度と濁度の関係が変動した。その関係は、濃度と濁度がともに上昇した後、あるところで減少に転じ、原点に向かって収束していくユニークな挙動となった。また、濃度が上昇する過程と減少する過程は同じ経路を辿らず、直線関係ではなかった。
- 4) 土の種類、濃度および測定セルに移す前の容積が異なる懸濁液の濃度と濁度の関係を調べた結果、その関係は、低濃度領域を除いて、原点を通る直線関係となり、粒径が小さな土粒子が多く含まれる懸濁液の結果ほど、その傾きが大きくなった。
- 5) 通水実験で排出する土の粒度組成が仮に流出可能成分と同じ粒度組成であったとき、その土が含まれる排水の R_t は 1 となるが、測定結果の多くは $R_t > 1$ となった。このことは、流出可能成分の中から粒径が小さな土粒子が多く排出してきていることを意味する。
- 6) 飽和条件では全過程を通して、不飽和条件では通水初期段階において、通水量が増えるにしたがって、 R_t が上昇する傾向にあった。サフュージョンが進行するにしたがって、排出土の粒度組成が時間変化していることが分かった。粒径が大きな土粒子の排出が徐々に少なくなり、相対的に小さい土粒子の比率が大きくなったと推測される。

- 7) 飽和条件の方が、不飽和条件よりも土粒子の排出量が多く、その分、粒径が大きい土粒子の排出が多いことが分かった。
- 8) 定水位通水過程で停止した土粒子の排出が給排水通水によって再開し、それを繰り返すごとに土粒子の排出が続いた。
- 9) 定水位通水過程で飽和していた条件の方が、不飽和であった条件よりも土粒子の排出量が多かった。また、定水位通水過程と同様に、流出可能成分含有率5%の方が、10%よりも土粒子の排出量が多かった。
- 10) 上記9)で土粒子の流出量が多かった条件ほど、排水の濃度と濁度の関係は緩い勾配で変化していた。したがって、土粒子の排出量が多いときは、粒径が大きい土粒子が多く排出していることが分かった。
- 11) 流出可能成分含有率5%の実験後供試体を分割し、残留した流出可能成分を分析したところ、給排水通水によって細粒分の移動が継続すると、供試体上部でのサフュージョンと供試体下部での目詰まりが顕著になり、それとともに、高さ方向の流出可能成分の分布だけでなく、流出可能成分の粒度組成も不均一になっていくことが分かった。

5.3 パート2：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

5.3.1 実験装置

図 5.25, 図 5.26 に本実験で使用した上載圧付与型カラム通水装置の模式図および写真を示す。供試体は直径 10cm, 高さ 20cm の円筒形である。供試体底面の構造は, 上部貯水型カラム通水装置と同じである。

載荷板上部に設けた空間に空圧を与えることで任意の上載圧を付与できる。円筒カラム上部にタンクを接続し, 載荷板内部の管路を通り, 供試体に動水勾配を与えることができる。供試体上面に均一に浸透力を与えるため, 載荷板内部には均一な粒径を持つガラスビーズで満たし, ポーラスメタルで蓋をする構造とした。上部タンクは, 越流によって定水位を保つことができる。また, 吊り滑車でタンクの高さを自由に制御でき, 任意のタイミングで, 動水勾配を変化させることができる。なお, 空圧によるカラム容器への負荷を考慮して, カラムを2分割にする構造にはしていない。

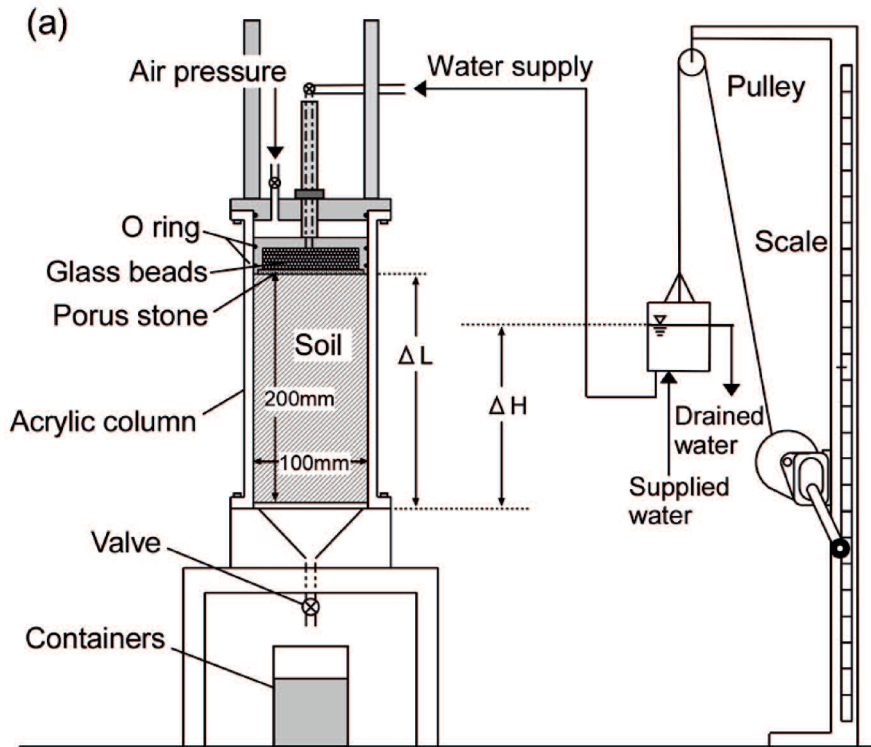


図 5.25 上載圧付与型カラム通水装置の模式図

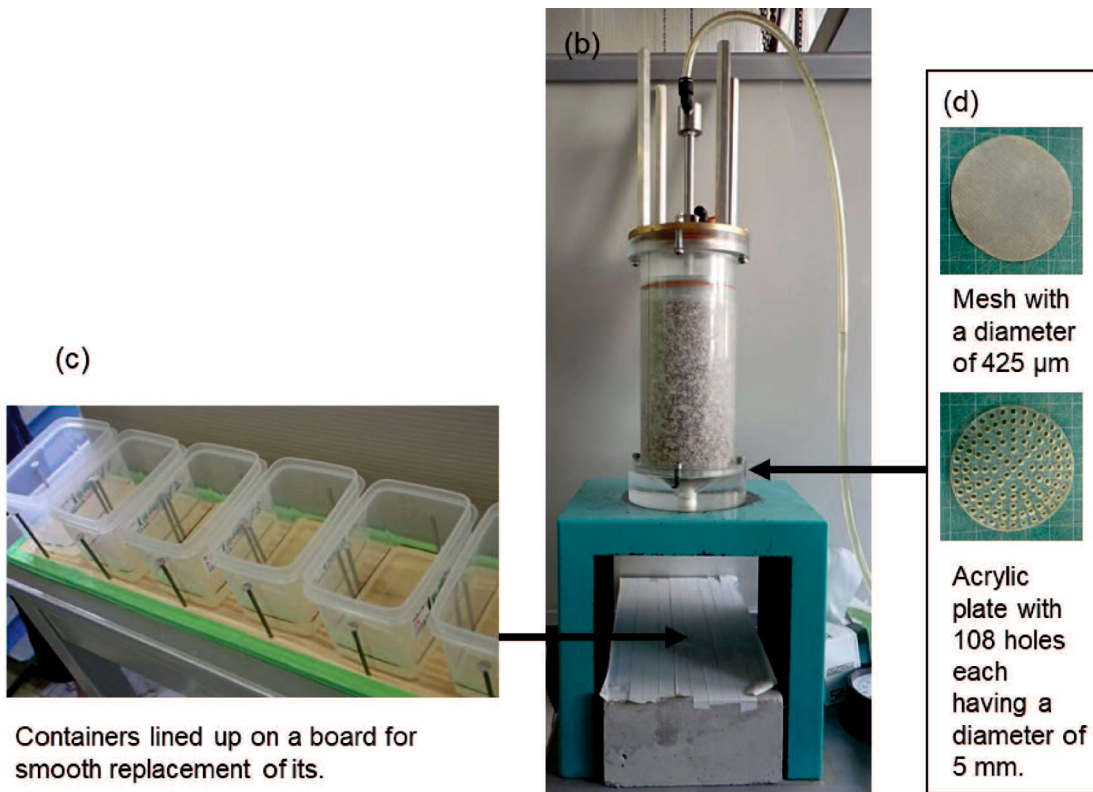


図 5.26 上載圧付与型カラム通水装置

5.3.2 実験試料

表 5.2, 図 5.27 にそれぞれ, 今回実験に使用した土および構成材料の物理特性および粒径加積曲線を示す。QK5 は, これまで実験で使用してきた宇部まさ土の粒径加積曲線に似るように, 複数の珪砂を混合したホスト珪砂にカオリンを 5%混合した土試料である。GG10 は珪砂 4 号にカオリンを 10%混合した土試料で, Gap-graded soil である。図 5.28 に QK5 の H-F 曲線⁸⁾を示す。QK5 は, $D_5 \cong 75\mu\text{m}$ 以下の土粒子が不安定と判定された。GG10 の内部安定性を Chang and Zhang³⁾の指標を用いて評価した結果, $F_c \leq 10\%$ を満たし, $G_r = 3.33 \geq 3$ ($d_{\min} = 75 \mu\text{m}$, $d_{\max} = 250 \mu\text{m}$) であることから, 内部不安定と判断され, 内部侵食が起りやすい粒度分布を有している。

表 5.2 本実験で使用した土の物理特性

Experimental Soils			
Soil code	QK5		GG10
Fines content F_c (%)	5.0		10.0
Specific gravity G_s	2.651		2.649
Uniformity coefficient U_c	6.4		12.0
$(H/F)_{\min}$	0.21		-
Gap ratio G_r	-		3.33

Material Soils			
Soil name	Host quartz sand	Quartz sand No.4	Kaolin
Fines content F_c (%)	0.0	0.0	100
Specific gravity G_s	2.646	2.646	2.675
Liquid limit w_L (%)	-	-	59.9
Plastic limit w_P (%)	-	-	35.6
Plasticity index I_P	-	-	24.3

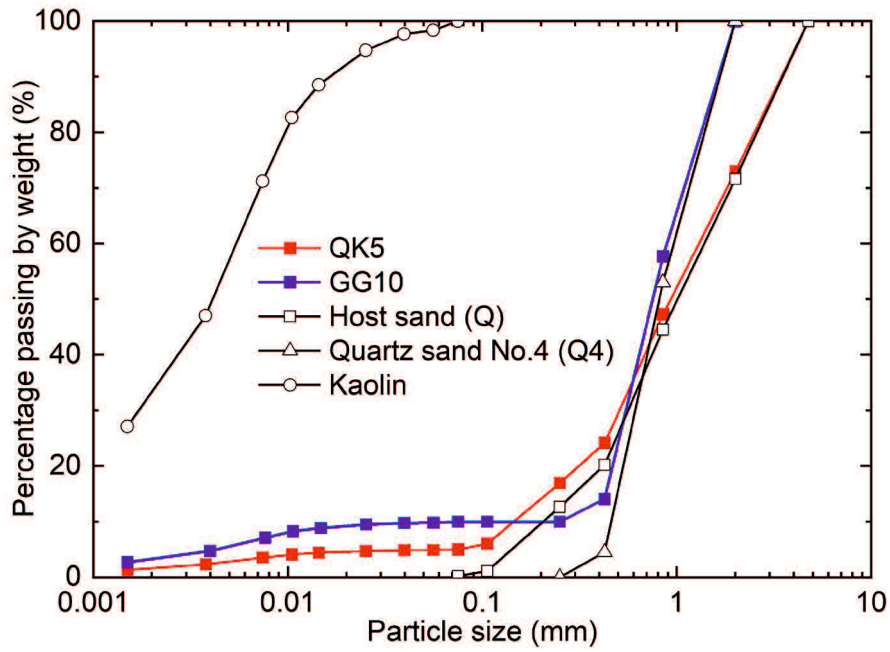


図 5.27 使用した土試料の粒径加積曲線

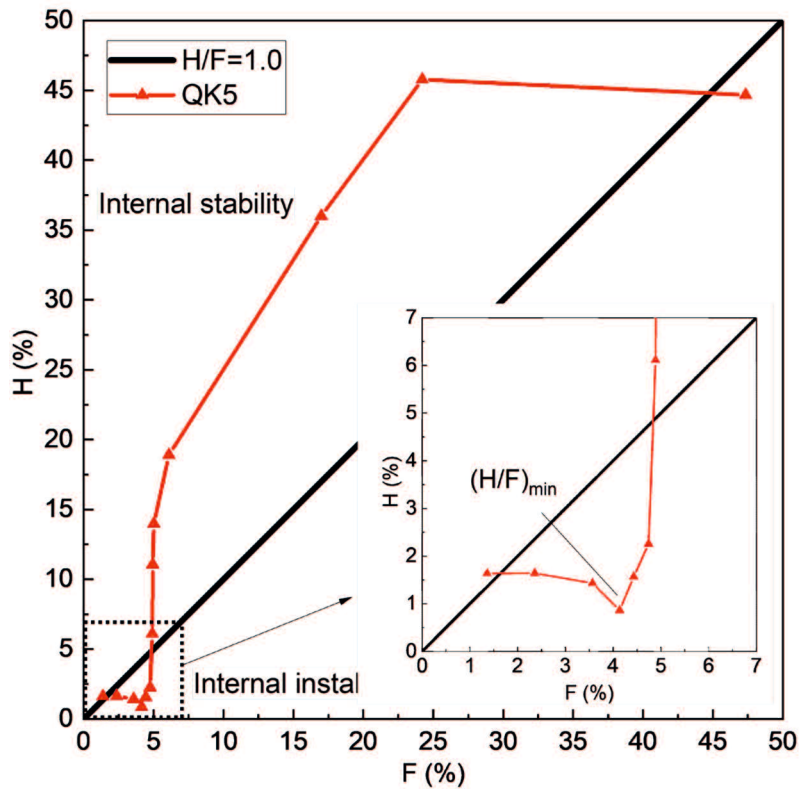


図 5.28 QK5 の H-F 曲線⁸⁾

5.3.3 実験手順

含水比を調整した湿潤状態の土試料を5層ごとに突き固めて供試体を作製した。各層に対して目標の間隙比になるようあらかじめ算出した質量分の土試料が所定の高さになるようにランマーを用いて突き固めた。表5.3に本実験で設定した初期間隙比を示す。供試体の下部から二酸化炭素を約1時間通過させ、供試体内部の空気を置換した後、脱気水タンクに接続し、少しずつ上昇させることで供試体を浸水させた。脱気水タンクの水面の高さが供試体上面の高さと同じになるまで、約1時間かけて脱気水タンクを上昇させた。供試体の初期飽和度 S_{r0} を式(5.2)、式(5.3)より確認し、92%以上の飽和度を確認した後、管路に空気が入らないように留意しながら上部タンクと供試体上部を接続した。供試体上面の水の出入りが自由な状態で、加圧板上部の空間に所定の圧力に達するまで、徐々に付与した。所定の圧力に達した後、30分程度静置した。上部タンクの水位を任意の高さに調整し、供試体下部のバルブを開くと通水が開始される。排水の回収方法や分析方法は、パート1と同じである。

表 5.3 供試体の初期間隙比

Soil name	QK5		GG10
Density condition	Loose	Dense	-
Initial void ratio e_0	0.65	0.58	0.66

5.3.4 実験結果

a) 上載圧と有効侵食率の関係

図 5.29 に上載圧と有効侵食率の関係を示す。QK5 では、供試体の密度に関係なく、動水勾配が 1.0 の実験条件において、上載圧が大きいくほど有効侵食率が小さくなる傾向がみられた。一方、動水勾配が 0.5 のケースでは、上載圧による有効侵食率の変化はみられず、各近似線はほぼ水平であった。また、Gap-graded soil である GG10 では、動水勾配 1.0 の条件においても、上載圧による有効侵食率の変化はみられなかった。表 5.4 に既往の研究における上載圧や拘束圧が内部侵食に与える影響を整理した。表には、載荷方法、土の種類、侵食の分類および侵食の影響を記載している。侵食の影響に関しては、上載圧や拘束圧が侵食を抑制する場合を“Positive”，促進する場合を“Negative”とした。また、侵食の規模が大きい順番に上から並んでいる。内部侵食の形態として小規模な Suffusion においては、上載圧、拘束圧が侵食を抑制するといえる。本実験の内部侵食形態は Suffosion であり、動水勾配 1.0 の結果が既往の結果と同様の傾向を示した。

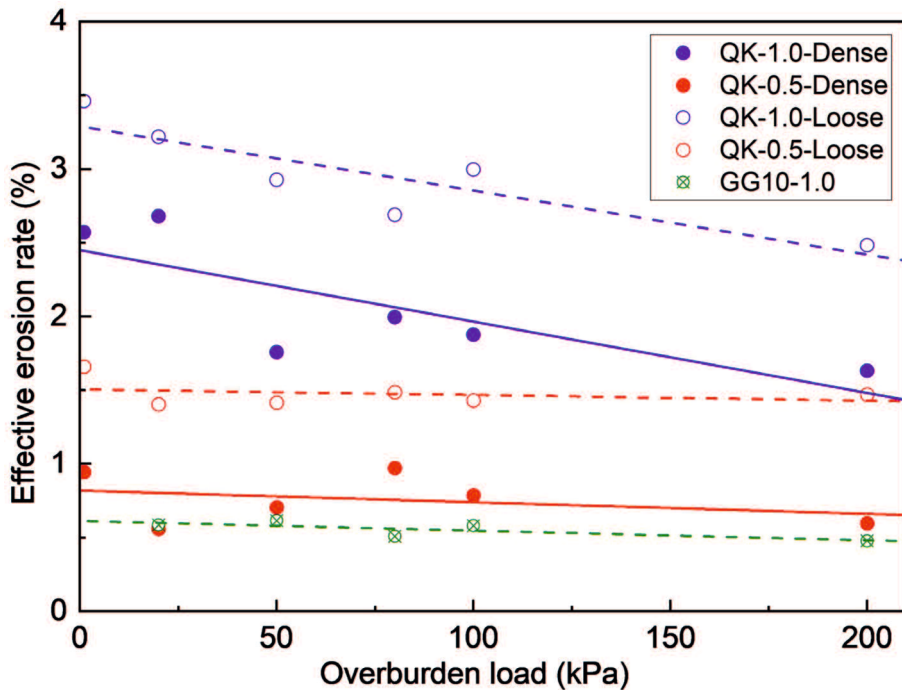


図 5.29 上載圧と有効侵食率の関係

表 5.4 拘束圧が内部侵食に与える影響についての既往の研究

Literatures	Loading way	Particle size distribution	Erosion scale	Effect of confining pressure
Tomlinson and Vaid, 2000 ¹⁰⁾	Top load cell, Overburden load	Two layers (Filter and core)	pipng	Negative
Bendahmane et al., 2008 ¹⁾	Triaxial cell, Isotropic	Upwardly concave	Suffusion	Positive
	Triaxial cell, Isotropic	Upwardly concave	Backward erosion	Negative
Moffat and Fannin, 2011 ¹¹⁾	Top load cell, Overburden load	Widely graded	Suffusion	Positive
Luo et al., 2013 ⁷⁾	Triaxial cell, Isotropic	Gap-graded	Suffusion	Positive
	Triaxial cell, Isotropic	Gap-graded	Suffusion	Positive
Chang and Zhang, 2013 ³⁾	Triaxial cell, Isotropic	Gap-graded	Suffusion	Positive
	Triaxial cell, Isotropic	Gap-graded	Suffusion	Positive
Ke et al., 2016 ²⁾	Triaxial cell, Isotropic	Gap-graded	Suffusion	Positive

b) 排水の濃度と濁度の関係

図 2.30～図 2.34 に排水の濃度と濁度の関係を示す。実線で示した基準線は、流出可能成分による基準線である。どの結果も流出可能成分の基準線を大きく上回る位置にデータがプロットされた。さらに、図中に示す破線はカオリンの基準線である。結果の多くはカオリンの基準線の上方にプロットされた。パート1の結果と同様に、流出可能成分の中からさらに粒径が小さい土粒子が流出してきていると推測される。しかしながら、上載圧の大きさによる濃度—濁度関係挙動の違いは確認できなかった。

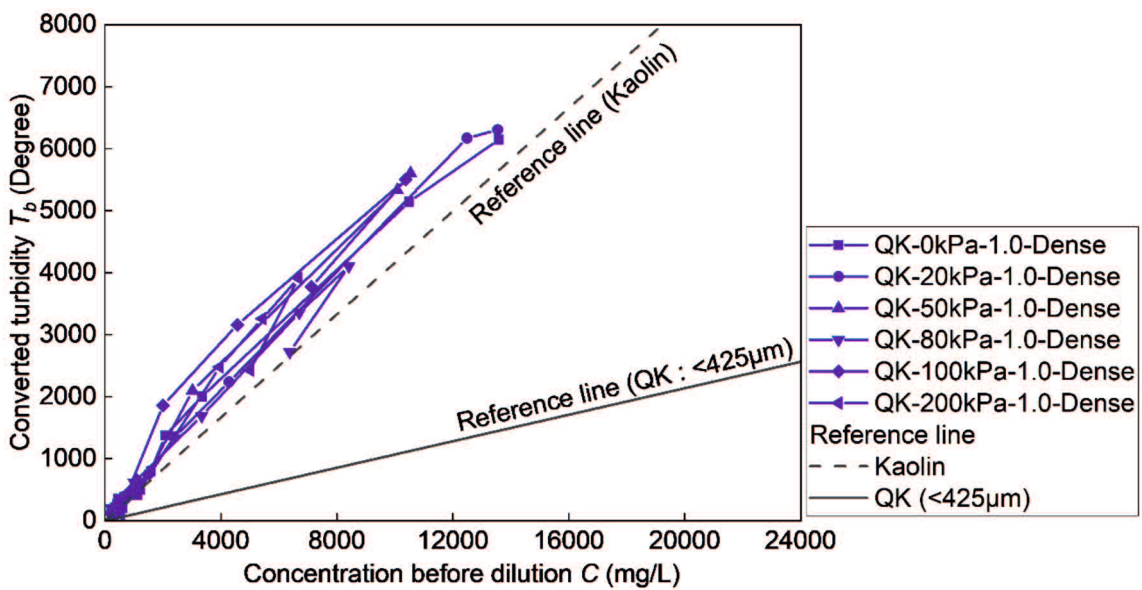


図 5.30 排水の濃度と濁度の関係 (QK5, 動水勾配 1.0, Dense)

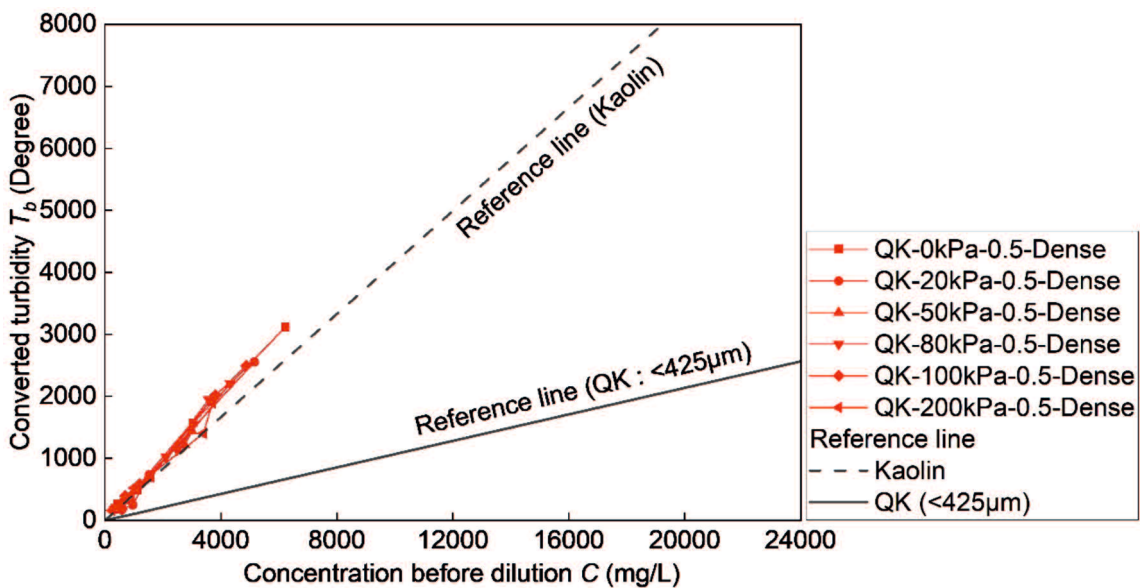


図 5.31 排水の濃度と濁度の関係 (QK5, 動水勾配 0.5, Dense)

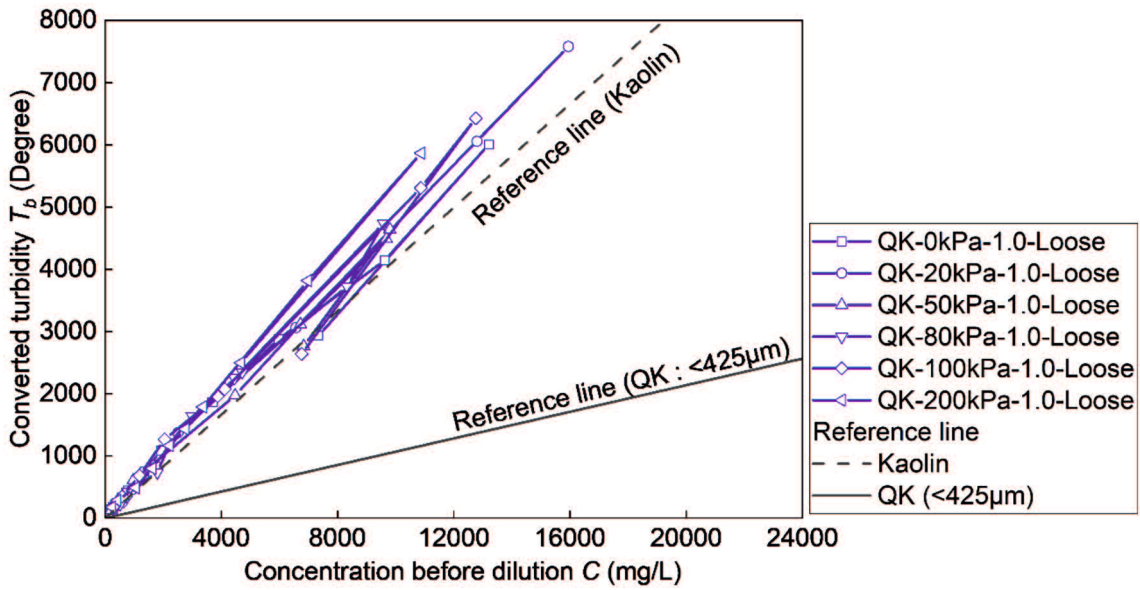


図 5.32 排水の濃度と濁度の関係 (QK5, 動水勾配 1.0, Loose)

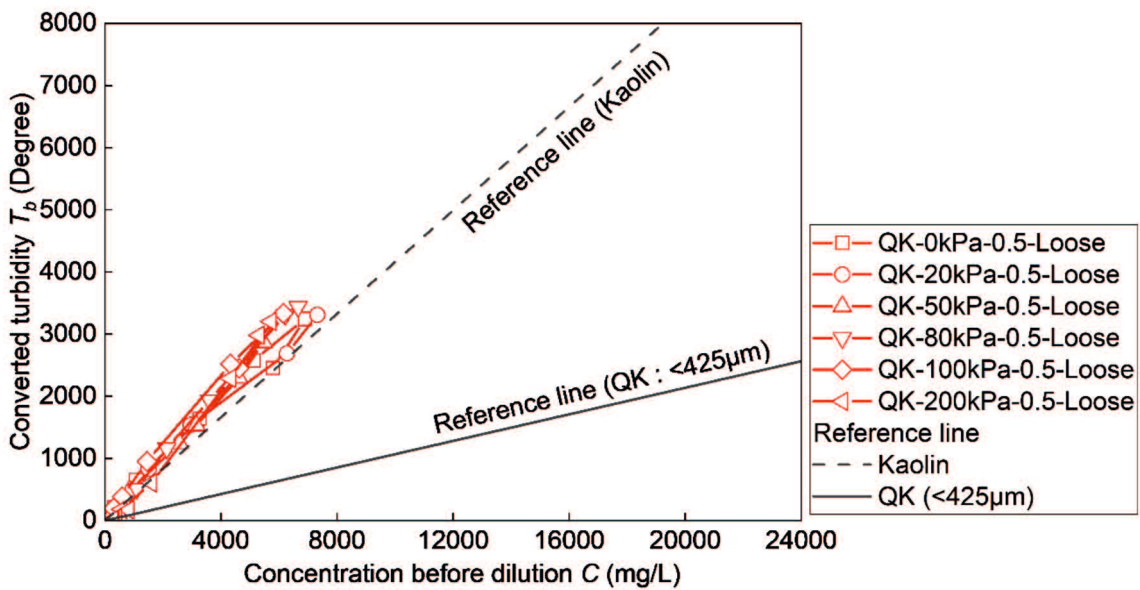


図 5.33 排水の濃度と濁度の関係 (QK5, 動水勾配 0.5, Loose)

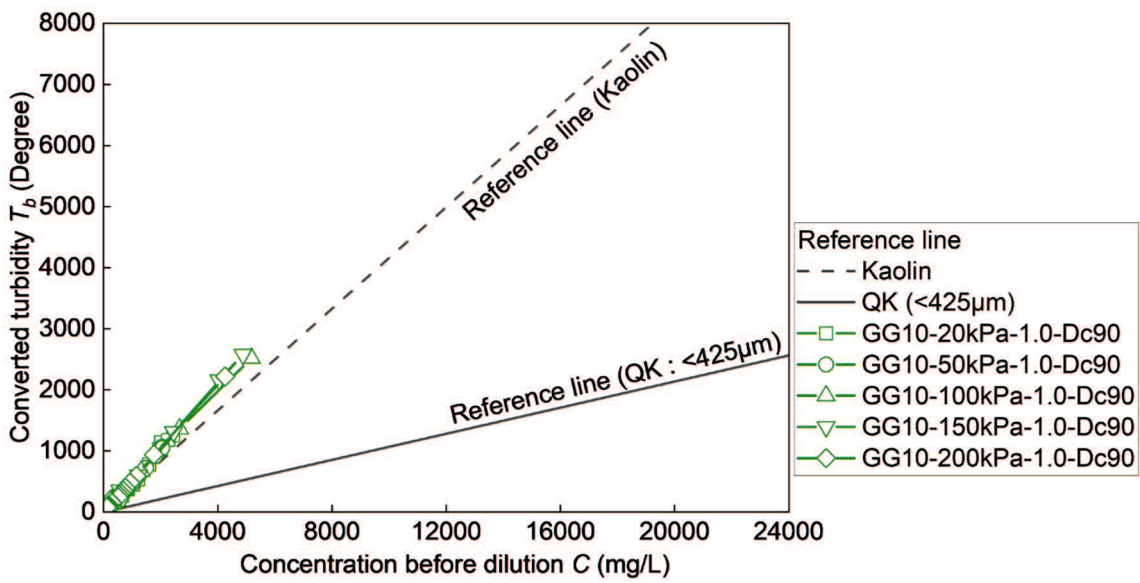


図 5.34 排水の濃度と濁度の関係 (GG10, 動水勾配 1.0)

5.3.5 まとめ

上載圧を付与できるカラム通水装置を用いて、一次元下向き通水を実施し、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。下記に得られた結果を示す。

- 1) 動水勾配 1.0 と 0.5 の 2 パターンの条件で、通水実験を実施した結果、動水勾配 1.0 の場合において、上載圧が大きいほど、密度の違いによらず、有効侵食率が低下することが分かった。この傾向は、既往の実験と同様の傾向である。
- 2) 有効侵食率の低下がみられた動水勾配 1.0 の場合における、上載圧による排水の濃度—濁度関係の違いはみられなかった、もしくは、検出できなかった。したがって、上載圧のみが流出土の粒径に与える影響は小さいと考えられる。

5.4 パート3：動水勾配の変動がサフュージョン挙動に与える影響

5.4.1 実験手順

実験装置は、5.3.1の上載圧付与型カラム通水装置を使用した。また、土試料は5.3.2のQK5とGG10を使用した。供試体の作製から飽和過程までは5.3.3の実験手順と同じである。載荷板と供試体上面を接地させるために上載圧10kPaを与えた。上部タンクの高さを変えることで動水勾配を調整し、供試体に下向きの浸透流を与えた。表5.5に本実験の実験条件を示す。動水勾配の上昇下降を6回もしくは7回繰り返した。動水勾配を変動させる直前に、採水容器を交換し、排水はすべて回収した。予備実験の結果、動水勾配一定の条件では1500ml程度通水すると、土粒子の排出がほぼ停止したため、1500ml通水するごとに動水勾配を変動させた。また、5ケースとも動水勾配の変動幅は0.5であり、上昇下降は約30秒かけて行った。測定項目は通水量、採水時間、採水容器毎の排出土粒子の質量と排水の濁度である。通水量と採水時間は電子天秤で自動計測し、排出土粒子の質量は蒸発皿を用いて計測した。

表 5.5 実験ケース

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
Soil name	QK5	QK5	QK5	GG10	GG10
Void ratio e_0	0.58	0.58	0.58	0.66	0.66
Initial hydraulic gradient i_0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0
Variation pattern of hydraulic gradient	1.0⇔1.5	1.0⇔0.5	0.5⇔1.0	1.0⇔1.5	1.0⇔1.5
Number of fluctuations	6	7	6	6	30

5.4.2 実験結果

a) 各サイクルにおける流量の変化

図 5.35～図 5.39 に実験ケースごとの動水勾配と排水量および流量の時間変化を示す。流量は動水勾配を上昇または下降させ終えてから、次に変動させ始める直前までの区間ごとに算出した。動水勾配の変動と連動して、流量も変動するが、動水勾配を繰り返し変動させるにつれて、同じ動水勾配でも僅かながら流量が小さくなった。大きな変化ではないが、土粒子の再配列によって透水性が低くなったと考えられる。

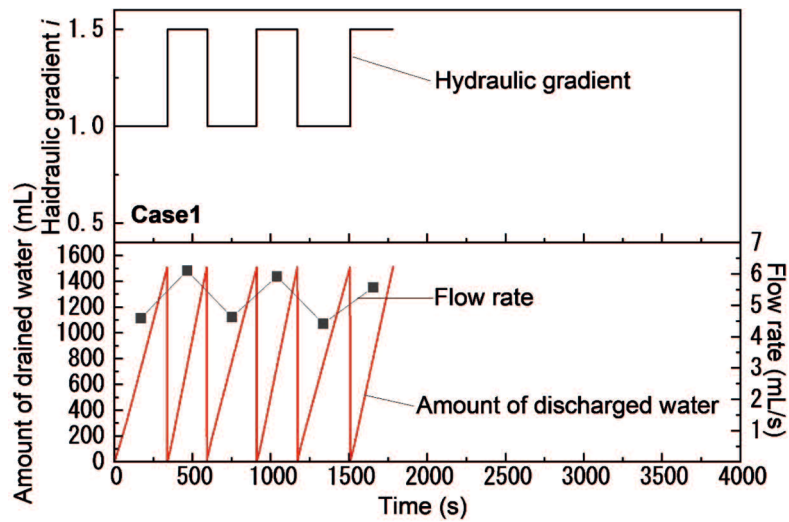


図 5.35 排水の排出状況 (Case1)

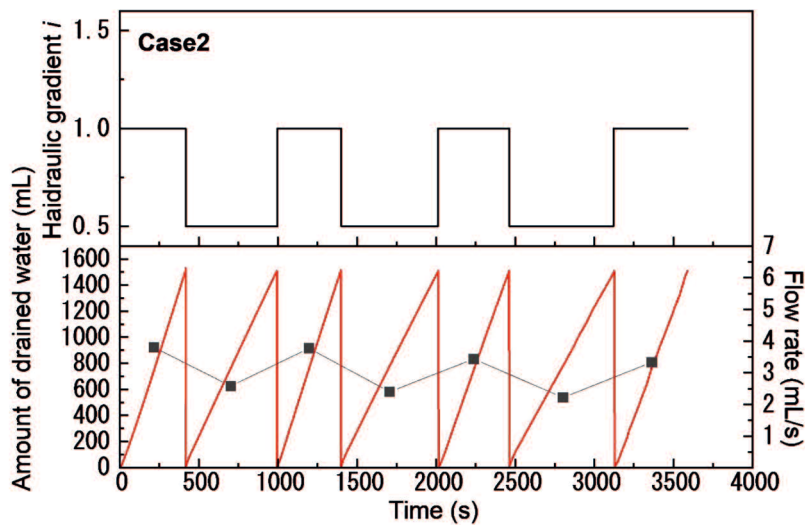


図 5.36 排水の排出状況 (Case2)

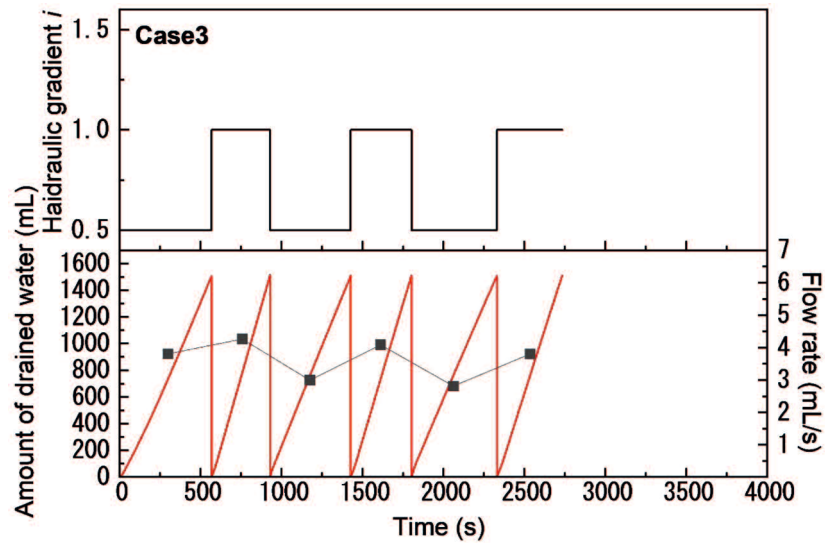


図 5.37 排水の排出状況 (Case3)

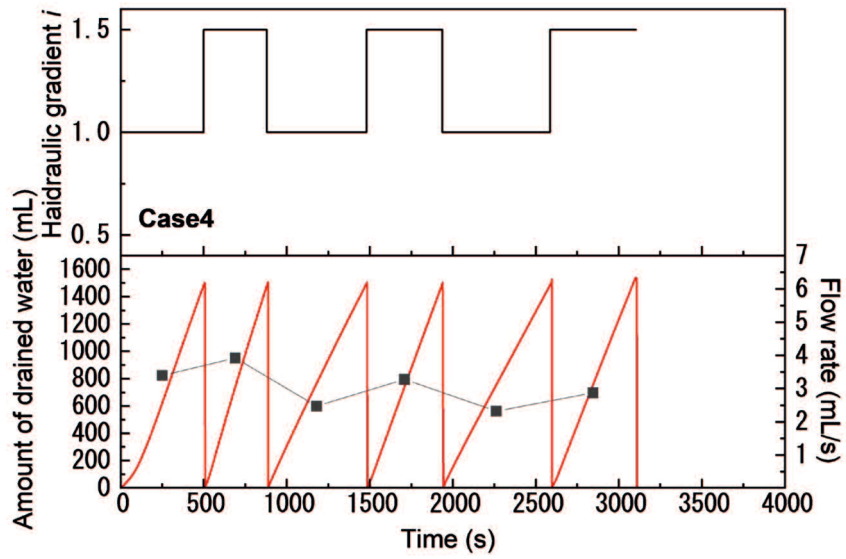


図 5.38 排水の排出状況 (Case4)

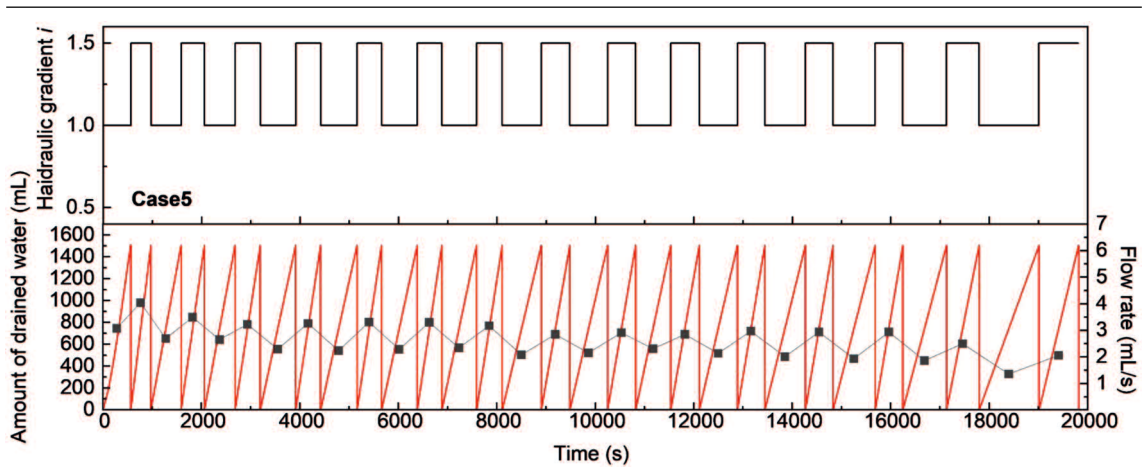


図 5.39 排水の排出状況 (Case5)

b) 各サイクルにおける土粒子排出量の変化

図 5.40 に採水容器毎の土粒子排出量を示す。Case 5 については、排出土粒子量の計測は行っていないため、参考として図 5.41 に各サイクルにおける排水の濁度を示す。動水勾配の変動を与えてからは、土粒子の排出量は 0.5g 以下と僅かであるが、動水勾配が上昇すると、土粒子の排出量が増加し、その状況が継続した。Case 5 の濁度についても同様の傾向を示した。通水開始直後の排出土粒子量を比較すると、動水勾配変動開始後の排出土粒子量はごく僅かであるが、動水勾配の変動による影響を確実に受けている。

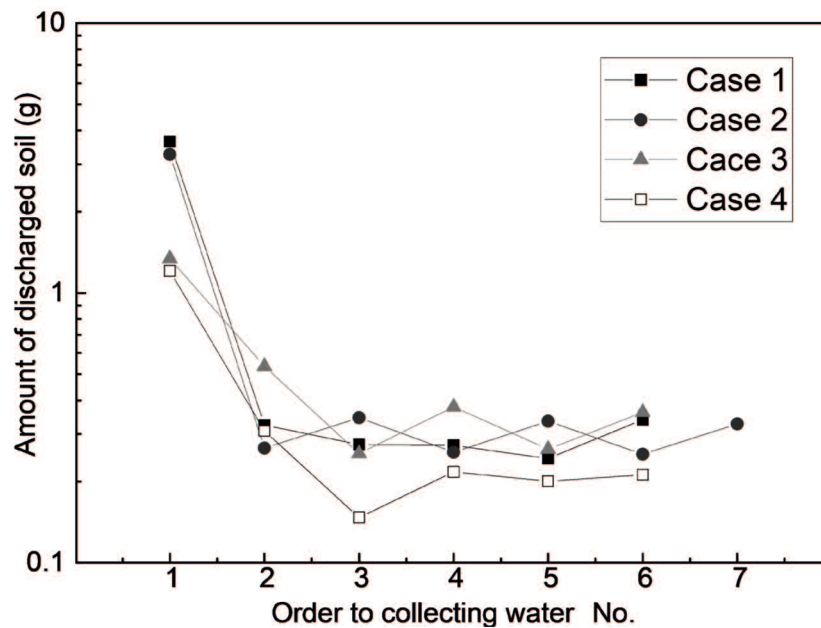


図 5.40 各サイクルにおける土粒子の排出量

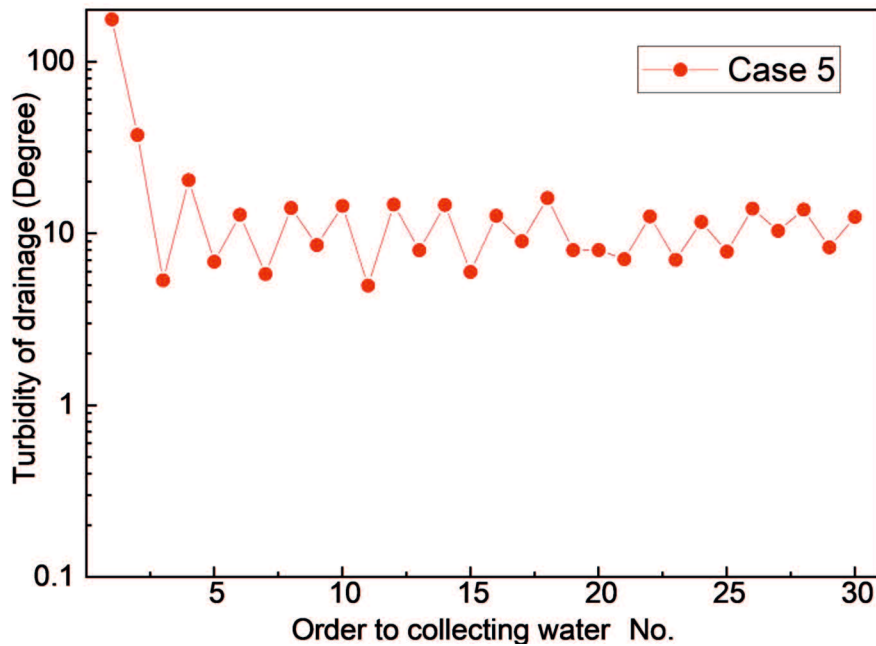


図 5.41 各サイクルにおける濁度の変化 (Case 5)

c) 各サイクルにおける排水の濃度と濁度関係

図 5.42 に排水の濃度と濁度の関係を示す。図には、カオリンおよび QK の流出可能成分 (425 μm 以下の土粒子) を用いて作製した懸濁液の濃度と濁度関係を併せて示している。動水勾配を与え始めた最初の方は、供試体の細粒成分であるカオリンの濃度—濁度関係よりも上方にデータがプロットされていることから、細粒成分の中でも径が小さな土粒子が卓越して流出したと推測できる。一方、動水勾配の変動を与え始めてからは、QK の流出可能成分の濃度—濁度関係に近づくようにデータがプロットされた。このことから、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と考えられる。

図 5.43 に Case1~Case3 における同一濃度濁度比の変化を示す。基準線は QK の流出可能成分 (425 μm 以下の土粒子) の基準線を用いた。1 サイクル目以降は、動水勾配が高い時のデータのみを示している。3 ケースとも徐々に同一濃度濁度比が減少しており、動水勾配の変動によりサフュージョンが進行するにつれて、径が小さな土粒子の配分が少なくなっていると想定される。また、初期動水勾配 0.5, 2 サイクル目で動水勾配 1.0 に上昇させた Case3 の結果をみると、2 サイクル目の同一濃度濁度が 3.8 と高い値を維持している。Case3 は限界動水勾配よりも小さい動水勾配を受けた後、限界動水勾配よりも大きな動水

勾配を受けており、2 サイクル目にまだ流出していない比較的小さい土粒子が排出してきたと推測される。

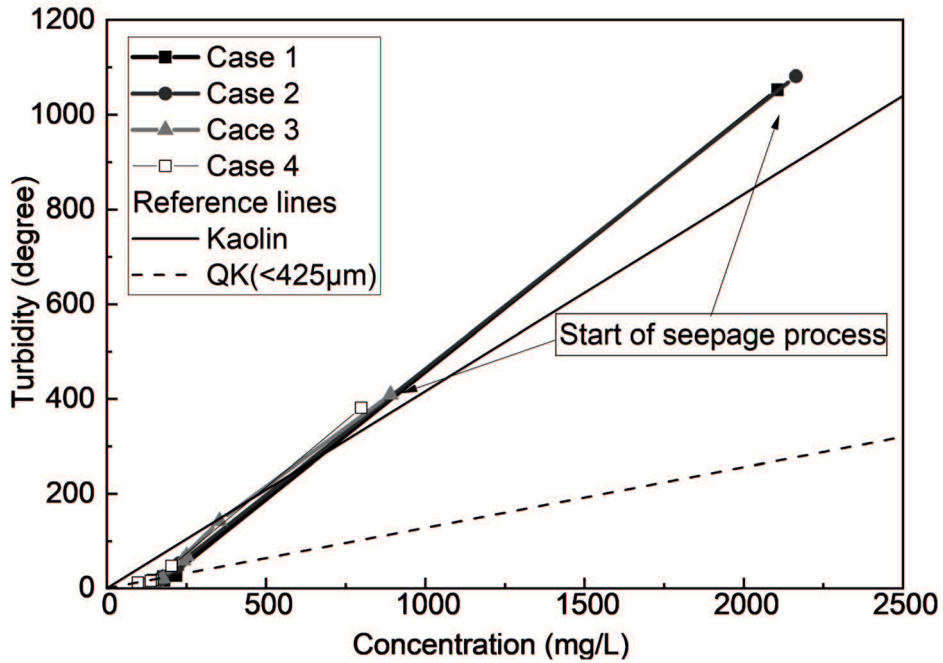


図 5.42 各サイクルにおける排水の濃度と濁度関係 (QK5)

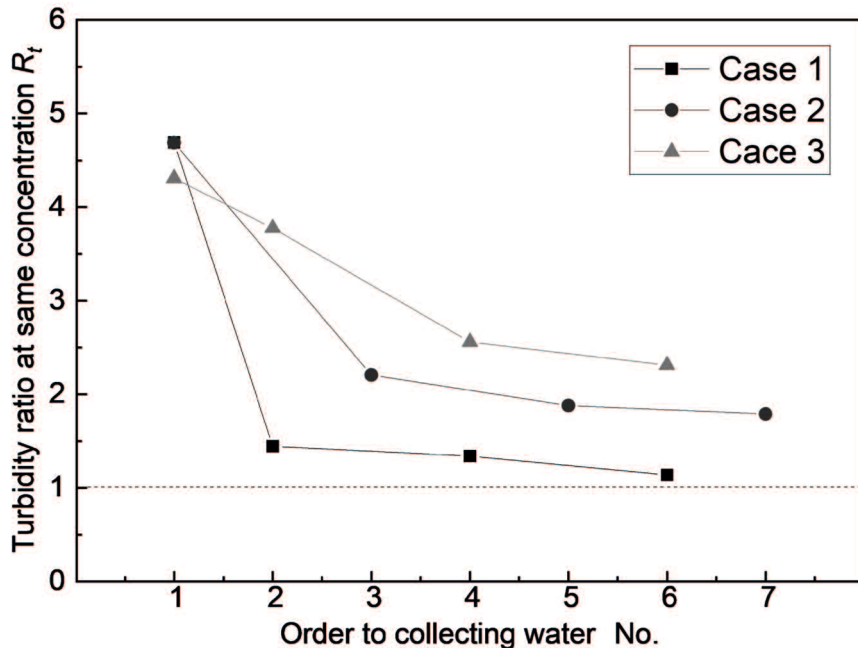


図 5.43 各サイクルにおける同一濃度濁度比の変動 (Case1~3)

5.5 まとめ

通水中に動水勾配を変動させる一次元通水実験を実施し，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。下記に得られた結果を示す。

- 1) 動水勾配を繰返し変動させるにつれて，同じ動水勾配でも僅かながら流量が小さくなった。土粒子の再配列によって透水性が低くなったと考えられる。
- 2) 一回目の通水以降，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た，その状況は動水勾配を30回変動させてもなお継続した。
- 3) 排水の濃度と濁度の関係から，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推測された。
- 4) 過去に受けた動水勾配よりも大きい動水勾配を受けた場合は，まだ流出していない比較的径が小さな土粒子が排出してくる可能性がある。

5.6 参考文献

- 1) Bendahmane, F., Marot, D., Alexis, A.: Experimental parametric study of suffusion and backward erosion, *Geo-environmental Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.134, No.1, pp.57-67, 2008.
- 2) Ke, L., and Takahashi, A.: Triaxial erosion test for evaluation of mechanical consequences of internal erosion, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.37, No.2, pp.347-364, 2014.
- 3) Chang, D. S., and Zhang, L. M.: Extended internal stability criteria for soils under seepage, *Soils and Foundations*, Vol.53, No.4, pp.569-583, 2013.
- 4) 佐藤真理, 祖父江陵, 堂領翔吾: 模型実験による複雑な内部侵食状況に関する検討, 島根大学生物資源科学部研究報告, 23号, pp.27-32, 2018.
- 5) 環境省: 付表9 浮遊物質量(SS)の測定方法, https://www.env.go.jp/kijun/wt_a09.html, (閲覧日: 2022年10月15日)
- 6) Marot, D., Tran, D.M., Bendahmane, F., Le, V.T.: Multidirectional flow apparatus for assessing soil internal erosion susceptibility, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.43, No.6, pp.1481-1498, 2020.
- 7) Luo, Y., Qiao, L., Liu, X., Zhan, M., Sheng, J.: Hydro-mechanical experiments on suffusion under long-term large hydraulic heads, *Natural Hazards*, Vol.65, pp.1361-1373, 2013.
- 8) Kenney, T. C., and Lau, D: Internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.22, pp. 215–225, 1985.
- 9) 近藤明彦, 山田高弘, 前田健一: 内部浸食および目詰りに及ぼす間隙構造の影響, 第24回中部地盤工学シンポジウム論文集, pp.71-78, 2012.
- 10) Tomlinson, S.S., Vaid, Y.P.: Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.1-13, 2000.
- 11) Moffat, R., Fannin, R.J.: A hydromechanical relation governing internal stability of cohesionless soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.48, pp.413–424, 2011.

第6章 総括

本研究では、サフュージョンが開始後、潜在的に進行し、何らかの影響が土構造物内部に蓄積されていくという、ひとつのシナリオを想定し、メカニズムやその影響について調べた。具体的には、まず、ため池堤体土として用いられることがあり、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。その結果、ごく僅かな侵食量でもため池堤体土の強度が低下することを確認した。次に、小規模な内部侵食のメカニズム解明にアプローチするために、排水の濃度と濁度の関係に着目し、流出土粒子径の時間変化を調べる手法を考案した。その手法を用いたカラム通水実験を実施し、サフュージョンの進行メカニズムを考察した。得られた結果は各章でまとめているが、本章ではそれらを総括した。

第3章では、内部でサフュージョンを再現できる特殊な三軸試験機を用いて、土粒子が流出した供試体に対する排水せん断試験を実施した。なお、ため池堤体土として用いられることがあり、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た。以下に得られた結果を要約する。

- 1) 本実験条件では、侵食を伴う通水過程において、供試体の軸変位はほとんど変化しなかったことから、内部侵食形態は **Suffusion** であった。
- 2) せん断前とせん断後にそれぞれ透水を行った場合では、侵食率はほとんど変わらなかった。
- 3) せん断前間隙比とピーク強度の関係、せん断前間隙比と残留強度の関係から、細粒分含有率が 5%、10%の両ケースにおいて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、内部侵食をもたらす通水によってその後の力学特性が異なることが分かった。
- 4) 多くのケースで、ピーク強度および残留強度はせん断前間隙比から推定される透水なしの場合の各強度よりも小さくなったが、比較的密詰めの供試体の一部のデータでは、逆に大きくなる結果もみられた。
- 5) せん断前間隙比が大きい場合（密度が低い場合）は、サフュージョンによってダイレイタンシー特性が収縮傾向に変化し、せん断前間隙比が小さい場合（密度が

高い場合)は、より顕著な膨張傾向に変化した。サフュージョン後のダイレイタ
ンシー挙動の変化が、サフュージョンによるピーク強度の増加と低下を決定付け
ているものと考えられる。

- 6) まさ土由来の細粒分を有した M5, M10 よりも、カオリンを混合した MK5 の方が
透水の有無による強度変化率が小さかった。
- 7) ピーク強度、残留強度の各強度変化率と侵食率の相関はみられなかった。侵食率
が 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、粒径が小さいほど出力値が大きくなるという濁度の性質を利用して、内部
侵食実験における排出土の粒度組成の変化を捉える方法を考案し、予備検討を実施した。
さらに、本手法を用いて、第3章の侵食を伴う三軸試験によって得られた排水から排出し
た僅少な土粒子の粒径を分析した結果、侵食率が大きいほど、同一濃度濁度比が小さくな
る傾向が得られ、侵食しにくい状況であると、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章パート1では、サフュージョンを伴う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。排水の濃度と濁度の関係から、排
出土の粒度組成を推定するパラメータとして同一濃度濁度比 R_t を導入し、それを利用して、
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。

下記 1)-7)に飽和度と流出可能成分含有率が異なる土供試体に対する定水位通水実験か
ら得られた結果、下記 8)-11)に定水位通水実験後の給排水繰返し通水実験から得られた結
果を示す。

- 1) 土粒子の排出量および排水の濁度は通水開始直後に一度増加し、ピークを迎えた後、
徐々に減少し、ほぼゼロになった。
- 2) 土供試体の飽和度が 92%以上の条件では、飽和度がそれ以下の条件のときよりも流量
が多く、土粒子の排出量が多かった。また、飽和度によらず、流出可能成分含有率 5%
の方が、10%よりも土粒子の排出量が多かった。

- 3) サフュージョンの進行に伴って、排水の濃度と濁度の関係が変動した。その関係は、濃度と濁度がともに上昇した後、あるところで減少に転じ、原点に向かって収束していくユニークな挙動となった。また、濃度が上昇する過程と減少する過程は同じ経路を辿らず、直線関係ではなかった。
- 4) 土の種類、濃度および測定セルに移す前の容積が異なる懸濁液の濃度と濁度の関係を調べた結果、その関係は、低濃度領域を除いて、原点を通る直線関係となり、粒径が小さな土粒子が多く含まれる懸濁液の結果ほど、その傾きが大きくなった。
- 5) 通水実験で排出する土の粒度組成が仮に流出可能成分と同じ粒度組成であったとき、その土が含まれる排水の R_t は1となるが、測定結果の多くは $R_t > 1$ となった。このことは、流出可能成分の中から粒径が小さな土粒子が多く排出してきていることを意味する。
- 6) 飽和条件では全過程を通して、不飽和条件では通水初期段階において、通水量が増えるにしたがって、 R_t が上昇する傾向にあった。サフュージョンが進行するにしたがって、排出土の粒度組成が時間変化していることが分かった。粒径が大きな土粒子の排出が徐々に少なくなり、相対的に小さい土粒子の比率が大きくなったと推測される。
- 7) 飽和条件の方が、不飽和条件よりも土粒子の排出量が多く、その分、粒径が大きい土粒子の排出が多いことが分かった。
- 8) 定水位通水過程で停止した土粒子の排出が給排水通水によって再開し、それを繰り返すごとに土粒子の排出が続いた。
- 9) 定水位通水過程で飽和していた条件の方が、不飽和であった条件よりも土粒子の排出量が多かった。また、定水位通水過程と同様に、流出可能成分含有率5%の方が、10%よりも土粒子の排出量が多かった。
- 10) 上記9)で土粒子の流出量が多かった条件ほど、排水の濃度と濁度の関係は緩い勾配で変化していた。したがって、土粒子の排出量が多いときは、粒径が大きい土粒子が多く排出していることが分かった。
- 11) 流出可能成分含有率5%の実験後供試体を分割し、残留した流出可能成分を分析したところ、給排水通水によって細粒分の移動が継続すると、供試体上部でのサフュージョンと供試体下部での目詰まりが顕著になり、それとともに、高さ方向の流出可能成分の分布だけでなく、流出可能成分の粒度組成も不均一になっていくことが分かった。

第5章パート2では、上載圧を付与できるカラム通水装置を用いて、一次元下向き通水を実施し、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。下記に得られた結果を示す。

- 1) 動水勾配 1.0 と 0.5 の 2 パターンの条件で、通水実験を実施した結果、動水勾配 1.0 の場合においてのみ、上載圧が大きいほど、密度の違いによらず有効侵食率が低下することが分かった。
- 2) 上載圧による排水の濃度—濁度関係の違いはみられなかった、もしくは、検出できなかった。したがって、上載圧のみが流出土の粒径に与える影響は小さいと考えられる。

第5章パート3では、通水中に動水勾配を変動させる一次元通水実験を実施し、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。下記に得られた結果を示す。

- 1) 動水勾配を繰り返し変動させるにつれて、同じ動水勾配でも僅かながら流量が小さくなった。土粒子の再配列によって透水性が低くなったと考えられる。
- 2) 一回目の通水以降、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た、その状況は動水勾配を 30 回変動させてもなお継続した。
- 3) 排水の濃度と濁度の関係から、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推測された。
- 4) 過去に受けた動水勾配よりも大きい動水勾配を受けた場合は、まだ流出していない比較的径が小さな土粒子が排出してくる可能性がある。

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。さらに、サフュージョンにより漏出する排水の濃度—濁度関係の変化は、流出する土粒子径の変化を反映していることが分かった。粒度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。

謝辞

本論文は、著者が山口大学工学部地盤安全工学研究室に所属した6年間の研究成果を取りまとめたものです。本研究を遂行、または論文の執筆をするにあたり、多くの方にご指導、ご助言をいただきました。また、本研究の一部は、JSPS 科研費特別研究員奨励費 (JP21J14582, 石丸太一)、公益財団法人鹿島学術振興財団研究助成金 (研究代表者: 鈴木素之)、一般財団法人大成学術財団研究助成 (研究代表者: 石丸太一) の助成を受けて実施しました。ここに記して関係各位に深く感謝の意を表す次第です。

山口大学工学部教授 鈴木素之先生には、細部に渡り厳しくも温かい懇切丁寧かつ終始適切なご指導、ご教授を賜りました。先生のご指導なくしては、本論文は元より、研究、実験において成果を出すことができませんでした。研究内容のみならず、外部資金獲得のための申請書の作成や、研究費の管理、教育に対する考え方など、将来、研究者として必要な能力や心得を教えてくださいました。先生の常々のご厚意とご指導を賜りましたことに、心から御礼申し上げます。先生のようにいつでも熱意をもって、研究・教育活動に励んでいきたいと思っております。今後ともどうぞ宜しくお願い申し上げます。

山口大学工学部教授 中田幸男先生、山口大学工学部教授 山本浩一先生、山口大学工学部准教授 吉本憲正先生、山口大学工学部准教授 森啓年先生には本論文の予備審査および本審査の審査員になって頂き、本研究に関する御指導、御助言を頂きました。自分の考え、主張を分かりやすく説明することの大切さを学びました。深く感謝申し上げます。

山口大学工学部特命教授 兵動正幸先生には将来のためのキャリアパス形成についての御支援をして頂きました。研究の進捗や就活の状況等いつも気に掛けてくださり、温かい言葉をかけて頂きました。

研究室のOBである(株)ケイズラブ 河内義文氏、長野工業高等専門学校教授 松下英次先生、大阪工業大学准教授 藤本哲生先生、秋田大学助教 田口岳志先生、宮崎大学助教 神山惇先生、(株)多機能フィルター 徳久晶氏には、著者の研究について多くのご助言をいただきました。研究についてだけでなく進路や生活面においてもたくさん相談に乗っていただきました。基礎地盤コンサルタンツ(株)山崎知佳氏、ヒロセ補強土(株)居石和昭氏には、特命助教として山口大学に出向されている間、研究室で多くの時間を共に過ごさせていただきました。同研究分野のパイオニアであられる東京大学教授 桑野玲

子先生、国立研究開発法人土木研究所 大坪正英先生には、東京大学の研究室を訪問させていただき、実験設備や実験方法、数値解析について、多くのことを学ばせていただきました。大坪先生には、オーストラリアの国際学会に初めて参加した際に、会場や懇親会の場で声をかけて頂き、気に掛けてくださいました。皆様に深く感謝申し上げます。

研究遂行にあたり、研究室の先輩・後輩・同輩には多くのご助力をいただきました。社会人ドクターのヒロセ補強土（株）志村直紀氏、JR 西日本コンサルタンツ（株）藤井公博氏、山口大学大学院創成科学研究科地盤安全工学研究室を修了された直属の2期先輩である内川浩紀氏、1期先輩である神木雄一氏、片岡知氏、宮前知弘氏、野村和樹氏には、実験の進め方、データ整理の方法、論文作成方法や発表の仕方等多くのことをご教授賜りました。1期後輩の若松知季氏、西山健太氏、松永崇史氏、丸小智範氏、2期後輩である河野成美氏、林克彦氏、鯨田宏樹氏、上鶴瀬一真氏、3期後輩である高野翔太氏、逢坂勇輝氏、川野拓未氏、三浦正彰氏、4期後輩である小森朝陽氏、大津新氏、杉山宙氏、小坂駿斗氏、藤井朗汰氏、呉屋港氏、5年後輩である又野公香氏、草野恭真氏、郷司航平氏、宮崎託翠氏、6年後輩である前田祐美氏、徳留彩香氏、ベトナムから留学していた Nguyen Thanh Duong 氏、東ティモールから留学していた Benjamin Hopffer Martins 氏、事務補佐員の宮本さやか氏、玉井藍氏、玉丸祐佳氏には研究生活において多くの支援をいただきました。学部4年生からお互いに切磋琢磨してきた同期の藤田義成君、時松那留君、志賀竜巳君とは研究室を通じて多くのことを共有し様々なことを助けてもらいました。個性豊かな先輩後輩、頼りになる同期をもつことができ、とても充実した研究生活を送ることができました。皆様のますますのご活躍を心よりお祈り申し上げます。

最後に、博士後期課程進学の支援と共に、著者を27年間いつも温かく支援し続けてくれた両親をはじめ、家族や友人に心から感謝し、本論文を終えることとします。