

細粒分の流出に着目したまさ土の一次元透水実験

鈴木 素之 (創成科学研究科建設環境系専攻) 石丸 太一 (創成科学研究科建設環境系専攻)
 神木 雄一 (創成科学研究科建設環境系専攻) 若松 知季 (工学部社会建設工学科)
 神山 惇 (宮崎大学工学教育研究部社会環境システム工学科)

ONE DIMENSIONAL PERMEABILITY EXPERIMENT ON MASADO FOCUSING ON SUFFUSION OF FINE GRAIN

Motoyuki SUZUKI (Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation)
 Taichi ISHIMARU (Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation)
 Yuichi KAMIKI (Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Sciences and Technology for Innovation)
 Tomoki WAKAMATSU (Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering)
 Atsushi KOYAMA (Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Miyazaki)

Abstract: The internal erosion is one of the important causes affecting safety of an old embankment for reservoir. There is a possibility that fine soil particles are transported and eventually flowed out of embankment due to the internal erosion caused by seepage flow. However, the mechanism of internal erosion and its effect on instability of embankment remain unexplained. In this study, a model ground with different fine content and relative density was produced inside a cylindrical column, and a one-dimensional seepage flow was simulated in order to clarify the specific condition when the suffusion can occur. Furthermore, this study tried to consider the transportation of soil particles in the column in the relation between the outflow time, the amount and the size of the passing soil particles. As a result, the difference in degree of erosion was confirmed by the fine content and the relative density.

Key Words: Internal Erosion, Seepage, Suffusion

1. はじめに

日本全国には約 20 万箇所のため池が存在し、近年では堤体の劣化が問題となっている¹⁾。漏水や断面変形、クラック、陥没、パイピングなど堤体の改修が必要と判断されるような目に見える劣化もあるが、そのような変状が顕在化していない劣化も考えられる。その一つが内部侵食である。ため池堤体の内部では水の浸透を長期間受けた結果、細粒分が土中を移動し、さらには堤体外に流出している。すなわち、長期間の浸透流を受けたため池堤体は地盤材料の一次的な性質（主に粒度に起因するもの）を変えてしまっている可能性がある。土質力学では、地盤や土構造物の変形や破壊の過程において地盤材料そのものの性質の変化は考慮しておらず、内部侵食の発生メカニズムや堤体の安定評価に与える影響について不明瞭なことが多い。

本研究では、土の細粒分が流出しやすい条件を検討するために、細粒分含有率と相対密度の異なる条

件で作製した模型地盤に対して、一次元の透水実験を行った。また、流出する土粒子の流出量と粒径の時間変化を測定し、それをもとに模型地盤内部の土粒子の動きを考察した。

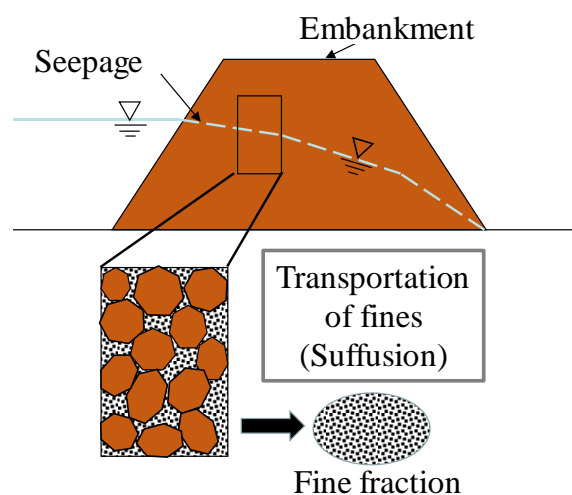


Fig-1 Image of internal erosion in embankment

2. 使用した土試料と調整方法

内部侵食現象を想定した室内実験について多くの研究がなされているが、それぞれ使用している土試料は異なり、特徴を有している。前田健一ら²⁾は、様々な粒度分布形状を有する球形ガラスビーズの粒状試料を用いて、内部侵食を受けやすい粒度分布形状について検討している。ガラスビーズを用いることで粒子形状の影響を除き、粒度による幾何学的な考察が可能である。小高猛司ら³⁾は粒径の異なる2種類の珪砂および現場試料の一部を使用した混合土を使用し、細粒分の流出を表現することを試み、力学挙動に与える影響を考察している。堀越一輝ら⁴⁾は珪砂3号と珪砂8号の混合土を使用した小型の盛土模型に浸透流を与え、細粒土の移動や流出について考察している。この混合土は珪砂3号が土骨格を

Table-1 Physical properties of soils used in this study

Soil name		fs-5	fs-10
ρ_s (g/cm ³)		2.625	2.625
e_{max}		1.018	0.987
e_{min}		0.664	0.574
Particle size (%)	420 μ m~2mm	95	90
	106 μ m~420 μ m	0	0
	Smaller than 106 μ m	5	10

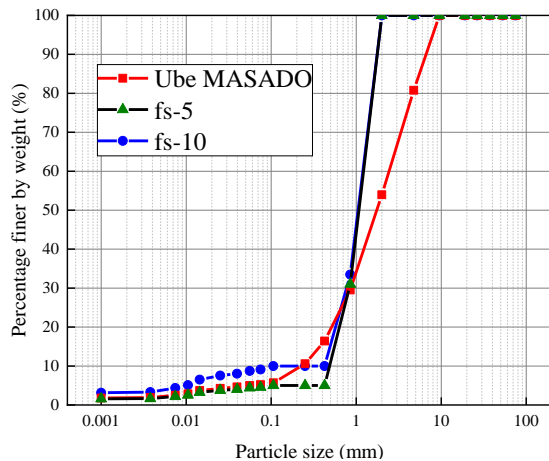


Fig-2 Particle size distribution of soils used in this study

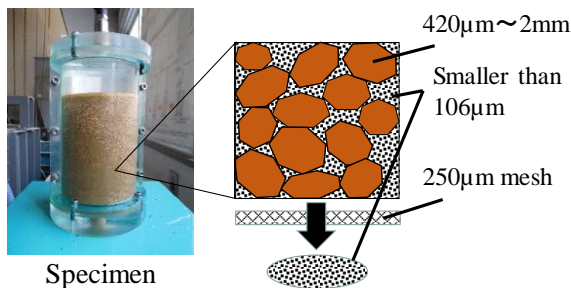


Fig-3 Image of framework of soil particle subjected to suffusion of fines

形成する粒子で、珪砂8号は細粒土を模して作成されている。

Table-1 に本研究で用いた土試料の物理特性、**Fig-2** に粒径加積曲線を示す。実験には、山口県宇部市で採取したまさ土（“宇部まさ土”）を使用した。宇部まさ土をふるい分けにより、2mm以上、420 μ m~2mm、106 μ m~420 μ m、106 μ m以下に分粒し、**Table-1** の割合になるように混ぜ合わせて再構成し、fs-5 (Fine sand:5%), fs-10 (Fine sand:10%)と命名した。本研究では、説明を簡単にするために106 μ m以下の土粒子を“細砂”と呼び、土粒子全体に対する細砂の割合を“細砂含有率”と呼ぶ。粒度分布は450 μ m~2mmの土粒子が粒子間応力を伝達する骨格を形成し、細砂がその間隙に存在している状態をイメージした(**Fig-3**)。Kenney et al.⁵⁾によると、粒径加積曲線のある粒径Dの移動に対して、そのDから4倍の粒径4Dまでの土粒子がフィルターとして働き、土粒子の移動に大きく関わっているとされている。fs-5, fs-10の場合、細砂の最大粒径106 μ m径の土粒子のフィルターとして働く106 μ mから約4倍粒径の420 μ mの土粒子がないので、内部侵食が起こりやすい条件と言える。また、堀越一輝ら⁴⁾によると、ある区間の粒径が取り除かれた粒度分布を持つ土は内部侵食が起こりやすく、“ギャップのある土”と表現している。

3. 実験装置概要

Fig-4 に試験装置の全体図および写真を示す。また、**Fig-5** に円筒カラム本体の概略図と写真を示す。カラムサイズは内径が10cmで、高さは20cmである。円筒カラムは供試体を外部から目視観察でき、試験終了後の供試体の取り出しが可能な二つ割にした。流入した水が均等に供試体に行き渡るように、供試体上部にポーラスストーンを設置した。供試体下部にはアクリル多孔板と交換可能なメッシュを設置し、排出される土粒子の粒径を調節できるようにした。本研究では、250 μ m径のメッシュを使用し、細砂のみが流出可能となっている。また、供試体底板に漏斗状のくぼみを設けることで、土粒子が排出されやすいようにした。上部タンクはオーバーフローによって定水位を保つことができ、一定の動水勾配で供試体に鉛直下向きの浸透流を与えることができる。この場合、上部タンクの水面から供試体底面までの高低差を水頭差とする。排水および排出土粒子の回収は測定項目に応じて、ピーカーと集水ケース(**Fig-6**)を使い分けた。集水ケースはケースの側面にろ紙をセットすることができ、土粒子の漏洩を防ぎつつ、長時間通水するようにした。

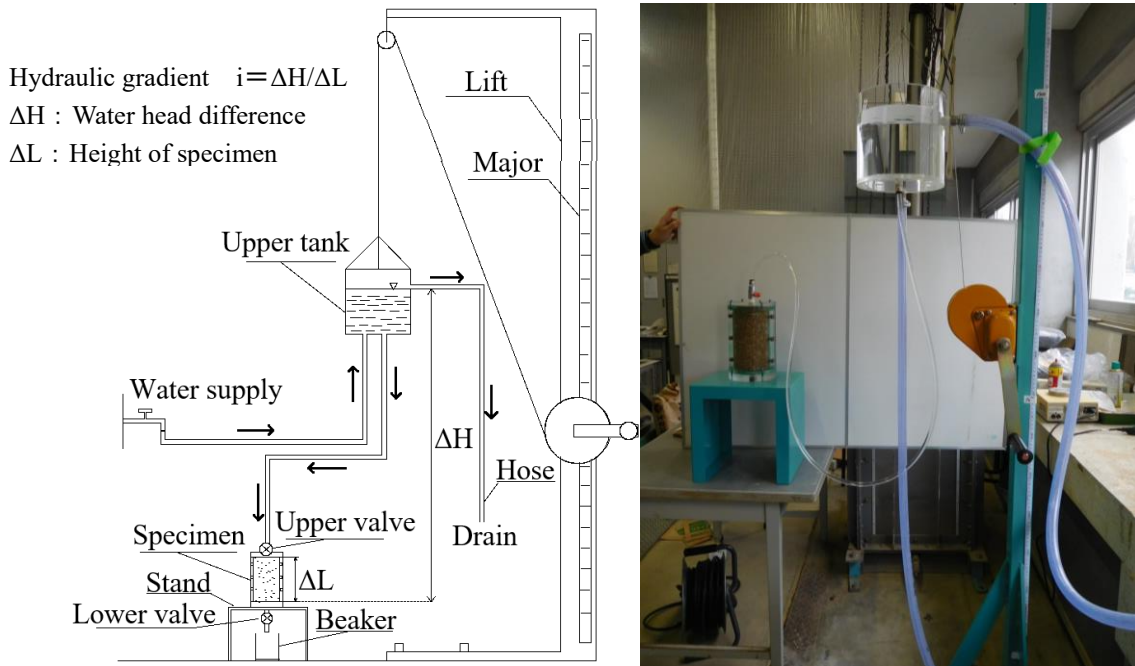


Fig-4 Schematic diagram of test apparatus

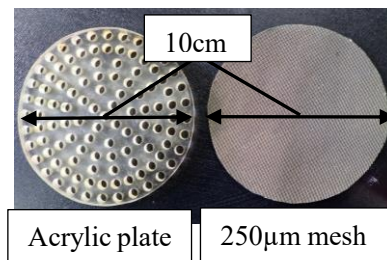
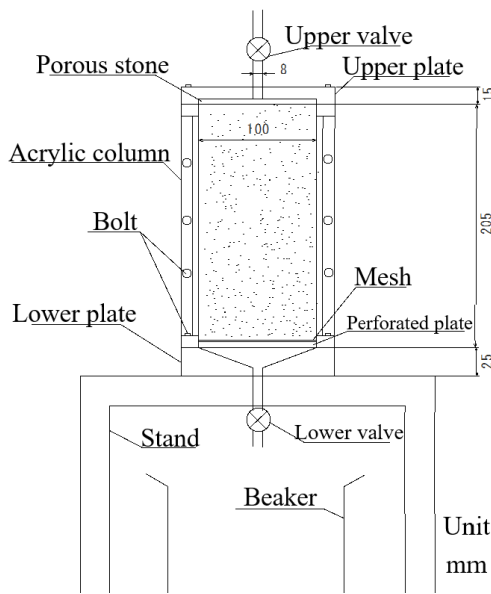


Fig-5 Schematic diagram of cylindrical column

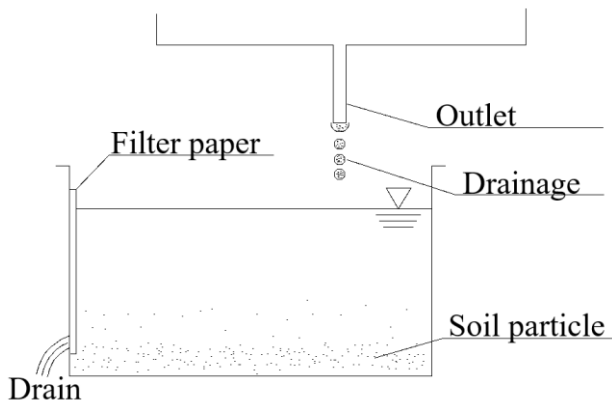


Fig-6 Schematic diagram of drainage and catching case

4. 粒度および相対密度が内部侵食に与える影響

4.1. 一次元透水試験方法

乾燥状態の土試料を相対密度が 80%, 85%になるように 4 層毎に突き固めて供試体を作製した. 試験前に供試体の底面から供試体が水に浸るまで少しずつ通水した. 同じ土試料を用いて行った予備実験によると, この時点での飽和度は相対密度が 80%, 90%のどちらの場合も約 90%であることを確認している.

円筒カラムと越流タンクを接続し, 管路およびタンクの気泡を空気弁から抜いた後, 動水勾配が 1.1 になるように越流タンクの高さを調整した. なお, 本実験ではすべての過程において脱気を行っていない水道水を使用した.

供試体下部のバルブを開くと透水が開始され, 透水開始から 100ml ずつ 5 回分ビーカーで採水し, 炉乾燥により排出土粒子の質量を測定した. その後は集水ケースを用いて 24 時間透水を続けた後, 最終的な土粒子の総排出量を測定した. 測定状況を Fig-7 に示す.

4.2. 試験結果

本研究では, 侵食の程度を表すパラメータとして細砂侵食率を定義し, 結果を整理した. 細砂侵食率は次式で表される.

$$\text{細砂侵食率 (\%)} = \frac{\text{排出した土粒子質量 (g)}}{\text{透水前の細砂質量 (g)}} \times 100$$

Table-2 に試験ケースおよび最終的な土粒子の総排出量と細砂侵食率を示す. 24 時間の透水では, 細砂含有率に関わらず, 相対密度 80%の方が 85%より

も細砂侵食率が高くなった. Fig-8, Fig-9 に排水 100ml ごとの排出土粒子の質量を示す. 横軸の No.は排出の順番を示し, それぞれの回収時間は Table-3 に示している. 本研究では, 排出した土粒子の分析に重きを置いたため, 分析が容易になるように排水 100ml ごとに統一して回収した. ここで, Table-3 から分かるように, 回収時間に差があるため単純な比較はできないことに注意しておきたい. 透水開始から供試体への通水量が増えるにしたがって土粒子の排出量は徐々に減少した. 約 500ml の透水を行うと土粒子の排出量は 10⁻² オーダーにまで減少した. 透水の初期段階において, 相対密度に関わらず, 細砂含有率が 10%のときよりも 5%の方が排出する土粒子が多い傾向がみられた. 24 時間後を見ても, 細砂含有率が 10%の時よりも 5%の時の方が細砂侵食率は高い. 本研究では, 細砂の最大粒径 106μm 径の土粒子のフィルターとして働く 106μm から約 4 倍粒径の 420μm の土粒子を除去した土試料を用いている. したがって, 細砂が多い方が細砂同士の接触が多く, 土粒子が移動しにくいことや目詰まりが発生しやすいことが推測される.

5. 濁度計を使用した粒径の予測

排出される土粒子の粒径の時間変化は供試体内での土粒子の動きを予測するのに有益なデータであると考えられる. しかし, 土粒子の排出量は少なく, 沈降分析をするには不十分である. 本研究では, 濁度測定による粒径の予測ができないか検討した.

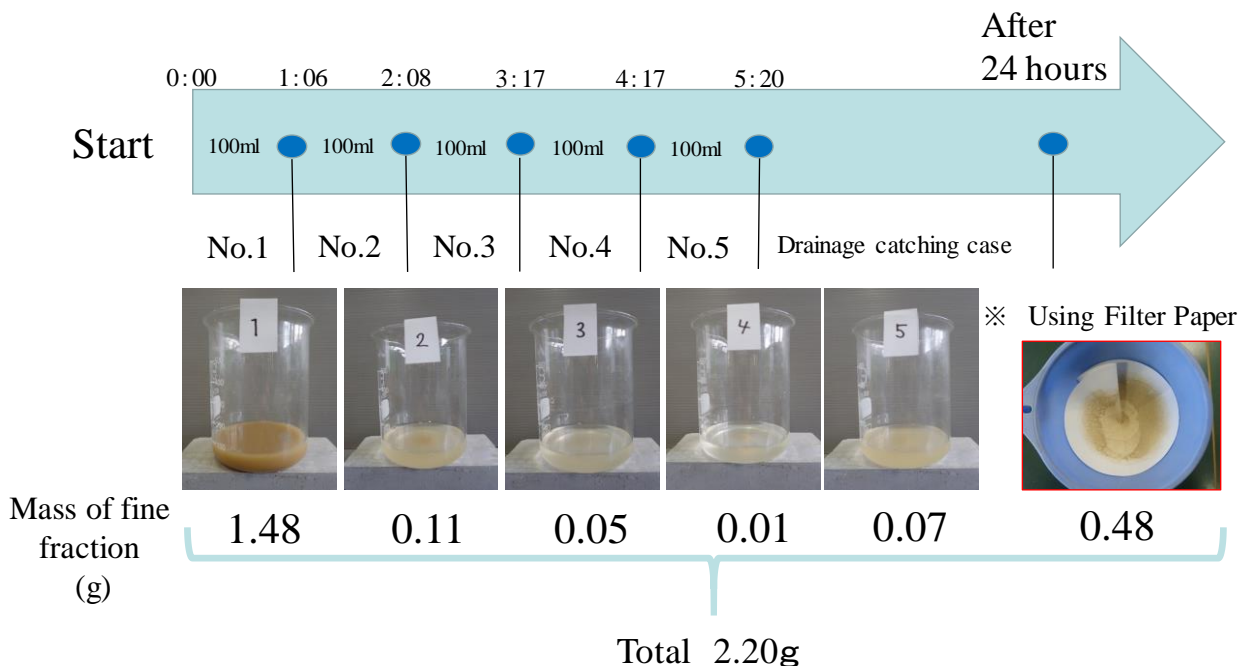


Fig-7 Measurement of typical case

Table-2 Test conditions and results

Case	1	2	3	4
Soil name	fs-5	fs-5	fs-10	fs-10
Relative density (%)	85	80	85	80
Specimen height (cm)	14	14	14	14
Hydraulic gradient	1.1	1.1	1.1	1.1
Critical hydraulic gradient	0.946	0.937	0.996	0.982
Total emissions of soil particles (g)	3.61	3.81	2.20	3.42
Erosion rate (%)	4.30	4.58	1.26	1.96

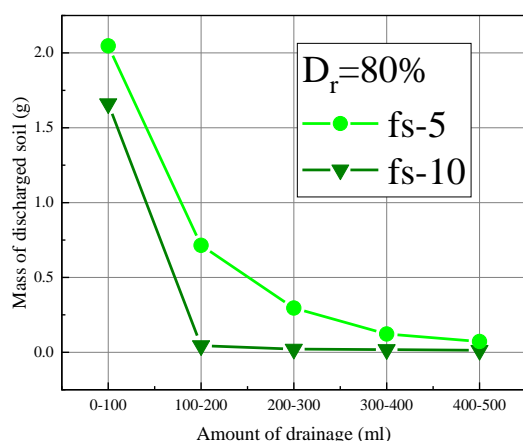
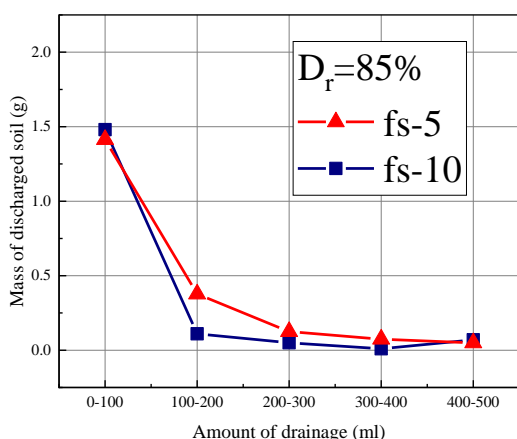
Fig-8 Mass of discharged soil particles per 100ml of drainage ($D_r=80\%$)Fig-9 Mass of discharged soil particles per 100ml of drainage ($D_r=85\%$)

Table-3 Drainage catching time

Beaker No.		1	2	3	4	5
Drainage catching time (s)	fs-5_ $D_r=80\%$	12	13	11	12	13
	fs-5_ $D_r=85\%$	13	14	9	12	16
	fs-10_ $D_r=80\%$	53	46	42	46	47
	fs-10_ $D_r=85\%$	66	62	69	60	63

5. 1. 使用した濁度計とキャリブレーション

本研究で使用した濁度計は笠原理化工業株式会社製濁度計 TR-55 型である。測定原理は透過・錯乱光測定方式で、水中の濁度物質に LED 光源の平行光線を当て、透過光量と錯乱光量を同時に測定することで定量的に濁りを表現している。透過・錯乱光測定方式の特徴は、同一の濁質および濃度であっても、粒径が小さいほど濁度の数値が高くなることである。筆者は、その性質を透水実験で時間毎に排出する土粒子径の大小比較に用いることができる可能性を考えた。

濁度測定のキャリブレーションを行うために、宇部まさ土のふるい分けにより粒径が $75\mu\text{m}$ 以下、 $106\mu\text{m}$ 以下、 $250\mu\text{m}$ 以下の土粒子を抽出し、それぞれ土粒子と精製水の質量比が一定になるように水を加えた容積の異なる懸濁液を 6 種類用意し (Table-4)、濁度測定を行った。本研究では、土粒子と精製水の質量比を濃度と定義する。濁度測定の結果を Fig-10 に示す。これより、懸濁液の容積に関わらず、土粒子の粒径と濃度が一定であれば濁度はほぼ同じ値を示すことが分かった。また、粒径の大きい土粒子が多く含まれるほど、濁度は小さくなることが分かった。

5. 2. 実際の排出土粒子を用いた濁度測定結果

4. の一次元透水実験でビーカーに回収した透水量 100ml 毎の排出土粒子に対し、キャリブレーション時と同様の濃度になるようにそれぞれ精製水を加え懸濁液を作製した。十分に攪拌した後、濁度を測定した結果を Fig-11 に示す。破線はキャリブレーション結果の平均値を示す。濁度は最低 20 度から最高 85 度程度とかなりばらつきがある。すべてのケースにおいて、透水開始直後は濁度が 45 度から 55 度程度であるが、その後、細砂含有率 5% と 10% で異なる傾向を示した。細砂含有率 5% の場合、濁度がいったん大きくなり、その後下がり始める。濁度計の性質から、透水開始から透水量が 200~300ml になるまで粒径が小さい粒子が優先的に排出され、その後、粒径が大きい粒子が混じり始めると推測される。細砂含有率 10% の場合、透水開始から、濁度は下がり、 $106\mu\text{m}$ 以下の土粒子を入れたキャリブレーション結果より小さくなる。移動可能の小さい粒子は 100ml 通水した段階で一気に排出され、その後、粒径の大きい粒子が少しずつ排出されたと推測できる。また、相対密度 85% では通水量 200~300ml と 300~400ml の間で急激に濁度が大きくなった。ここで、Fig-9 より通水量 300~400ml と 400~500ml の間で排出土粒子の質量が増えていることがみてとれた。原因は不明であるが、2 つの特異点は関連している可能性も考えられる。本結果より、粒径による排出の順序

は細砂含有率や相対密度によって傾向が違ってくることを確認できた。今後は、測定時間の間隔や一度に回収する土粒子の量を今一度検討し、より長い時間観察ができるようにしていく。

Table-4 Mixing ratio of suspension

Beaker No.	Mass of soil particle(g)	Mass of water (g)
1	0.01	50
2	0.05	250
3	0.10	500
4	0.50	2500
5	1.00	5000
6	2.00	10000

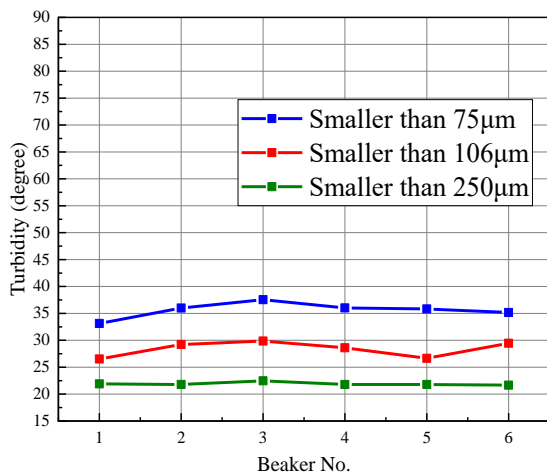


Fig-10 Relationship between particle size and turbidity

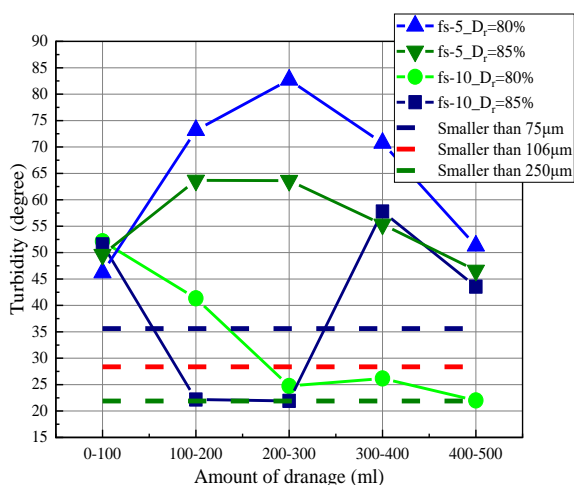


Fig-11 Relationship between amount of drainage and turbidity

6. 結論

本研究から得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 透水の初期段階において、相対密度に関わらず、細砂含有率が 10%の場合と 5%の場合では 5%の場合の方が細砂排出量が多かった。また、24 時間透水後の侵食率は、細砂含有率に関わらず、相対密度 80%の方が 85%よりも高くなった。本研究では、細砂含有率および相対密度により侵食の程度の違いが確認できたが、供試体内部の侵食メカニズムまで考察を展開するにはデータが少なく、透水係数や局所動水勾配といった透水条件の測定も行う必要がある。
- 2) 本研究では、濁度を用いて排出土粒子の粒径を予測することを試みた。①同一試料を用いた場合、水と土粒子の質量比が同じであれば（本研究では 5000 : 1）、懸濁液の量が 50ml から 10L の範囲において濁度はおよそ一定の値を示した。②土粒子と水の質量比が同じ懸濁液でも、小さい粒径の粒子が多いほど、濁度計は反応を示し、高い値を示す。以上、今回使用した濁度計の性質を利用することで、微少な土粒子の粒径の予測ができることが示唆された。ただし、この方法は粒度分布や正確な粒径の大きさまでは分からないため、あくまで相対的な評価でしか用いることができないと考える。

謝辞 本研究は山口大学山口学研究プロジェクトの研究助成を受けた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 農林水産省 WEB ページ「ため池」
http://www.maff.go.jp/j/nousin/bousai/bousai_saigai/b_tameike/ (2018/12/9 閲覧)
- 2) 前田健一, 近藤明彦: 粒度分布形状に起因する内部侵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.
- 3) 小高猛司, 雀瑛, 李圭太, 御手洗翔太, 高木竜二: 細粒分流出に伴う砂質堤体土の劣化に関する考察, 第 28 回中部地盤工学シンポジウム, 2016.
- 4) 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.
- 5) Kenny,T.C., Lau,D: Internal Stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 22, pp. 215-225, 1985.

(平成 31 年 1 月 25 日受理)