

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 23 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 東京理科大学

氏 名 : 石丸太一

研究課題名 : 流出土粒子径に着目した浸透の揺らぎを受ける盛土構造物における細粒
分流出の継続・発達メカニズムの解明

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

流出土粒子径に着目した浸透の揺らぎを受ける

盛土構造物における細粒分流出の継続・発達メカニズムの解明

Mechanism of Continuation and Development of Suffusion in Embankment Structures

Subjected to Seepage Fluctuation Focusing on Particle Size of Eroded Soil

東京理科大学 助教 石丸太一

（研究計画ないし研究手法の概略）

近年、豪雨や地震による河川堤防やため池の被災が相次いでおり、土構造物の安全性評価と対策強化が喫緊の課題になっている。河川堤防やため池など水際の土構造物では、水の浸透による細粒分流出（内部侵食の一種）の発生が懸念され、それは地盤耐力を低下させる経年劣化の一因とされている。

本研究の目的は、浸透流の変動の影響を受ける盛土構造物における細粒分流出の継続と発達のメカニズムを解明することである。細粒分流出は、降雨や貯水位変動などの影響による浸透の揺らぎに曝されながら経年的に継続し、程度が大きな状態に発達していくと考えられる。しかし、侵食が継続・発達しやすい浸透条件や、その過程における流出土粒子の量や粒径、透水係数の変化など不明瞭なことが多い。

本研究課題では、横向き浸透によるパイピング可視化実験を実施した。動水勾配を段階的に上昇させる場合と繰り返し変動過程を加えたパターンで侵食の様子がどのように変化するかを調べた。侵食実験において、長時間土粒子の侵食量や侵食する土粒子の粒径を連続的に計測することは容易ではない。そこで、光学センサーを用いた濁度計を作製し、土粒子の侵食量、侵食土粒子の粒径を把握することを試みた。本報告では、1. 光学センサーを用いた多チャンネル濁度計の製作、2. パイピング可視化実験の結果、3. パイピング可視化実験への多チャンネル濁度計の適用と課題の3点について得られた知見を提供する。

（実験調査によって得られた新しい知見）

1. 光学センサーを用いた多チャンネル濁度計の開発

1.1. 概要

細粒分流出の進行や発達過程を調べるために、侵食量だけでなく、侵食する土粒子の粒径を把握することが有用であることが分かっている（Ishimaru et al., 2025）。しかしながら、侵食による排水中に含まれる土粒子の粒径を連続的に計測することは容易ではない。そこで、濁度計の光源の波長によって、感応しやすい粒径範囲が異なることを利用して、複数の濁度計の応答の違いから粒径の変化を捉えることを試みた。

1.2. 多チャンネル濁度計の仕様

本研究で製作した多チャンネル濁度計は、光の出力系と受光系を180°対向配置した透過系を基本とし、観測を複数波長チャンネルへ拡張したものである。透過系は、懸濁粒子によって透過光が減少することを直接利用する点で、測定原理としては「透過（減衰）方式」に属する。受光素子としてCdSセル（光導電セル、LDR）を用いた。CdSセルは入射光に応じ

て抵抗値が変化し、明るい状態では低い抵抗値、暗い状態では高い抵抗値になる素子である。つまり本装置で透過光による明るさに当てはめた場合、濁りの増加によって透過光の減衰が大きくなった場合、CdS セルの抵抗値 R_{Cds} は増加する方向に変化する。

CdS セルの抵抗変化を計測可能な電圧信号に変換するため、固定抵抗 R_{div} と CdS セルを直列に接続した分圧回路を用いた。電源電圧を V_{DD} とし、分圧点の電圧を V_{div} とすると、回路構成に応じて分圧点電圧は次式で表される。

$$V_{\text{div}} = V_{\text{cc}} \frac{R_{\text{Cds}}}{R_{\text{fix}} + R_{\text{Cds}}} \quad (1)$$

本装置では、 $R_{\text{fix}} = 10\text{k}\Omega$ に設定した。なお、この分圧点電圧 V_{div} は CdS セルの抵抗値 R_{Cds} の変化、つまり濁度の変化に対して比較的小さい変動量となるため、本研究ではオペアンプを非反転増幅回路として 2 段直列に構成し、出力電圧の変動を読み取りやすいようにした。本装置では、多チャンネル濁度計の各チャンネルから得られるアナログ電圧を Espressif Systems 製の ESP32 を用いてアナログデジタル変換によりデジタル化し、時刻情報を付与した上で microSD カードへ CSV 形式で記録した。

1.3. キャリブレーション試験

濃度や粒径が既知の土粒子を用いた懸濁液に対して、多チャンネル濁度計を適用した場合、どのような出力値が得られるかを調べた。図 1 に示すように、マグネティックスターラーとペリスタポンプを用いて、多チャンネル濁度計を経由する循環系を作製し、細粒分の種類や濃度が変化した時のセンサーの応答を調べた。本実験では、東北珪砂 7 号、宇部珪石粉および笠岡粘土を使用した。平均粒径はそれぞれ 0.17 mm、0.012 mm、0.003 mm である。

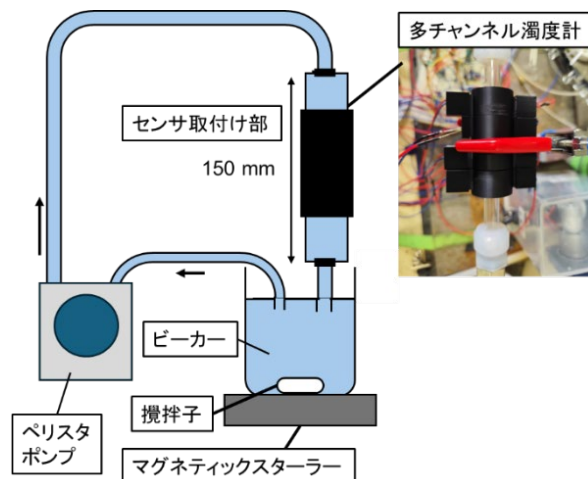


図 1 多チャンネル濁度計のキャリブレーション試験

図 2 に多チャンネル濁度センサーで測定した濃度と差分出力値 $\Delta S(c)$ の関係を光源別に示す。ここで、差分出力値 $\Delta S(c)$ とは、土粒子濃度がゼロの場合における出力値 $S(c=0)$ と任意の段階における出力値の差であり、濃度がゼロの時にゼロ、濃度が増加するほど値が大きくなっていくパラメータである。同じ濃度でも、土試料の粒径が小さいほど、近似線の傾きが大きくなった。これは、懸濁物質の比表面積が大きいほど光が拡散しやすくなることによる。

図 3 に多チャンネル濁度センサーで測定した濃度と差分出力値 $\Delta S(c)$ の関係を土試料ごと

に示す。同一試料における光の波長ごとの差分出力値をみると、いずれの場合でも青>緑>赤の順で差分出力値が大きくなっていることがわかる。これは、光源の波長が短いほど散乱・反射の影響を受けやすいことによる。

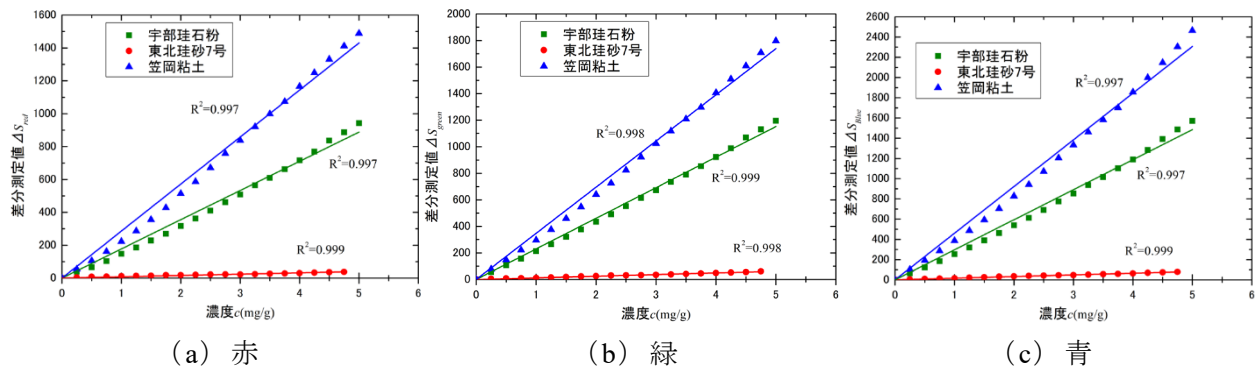


図2 懸濁液濃度と差分出力値の関係（光源別）

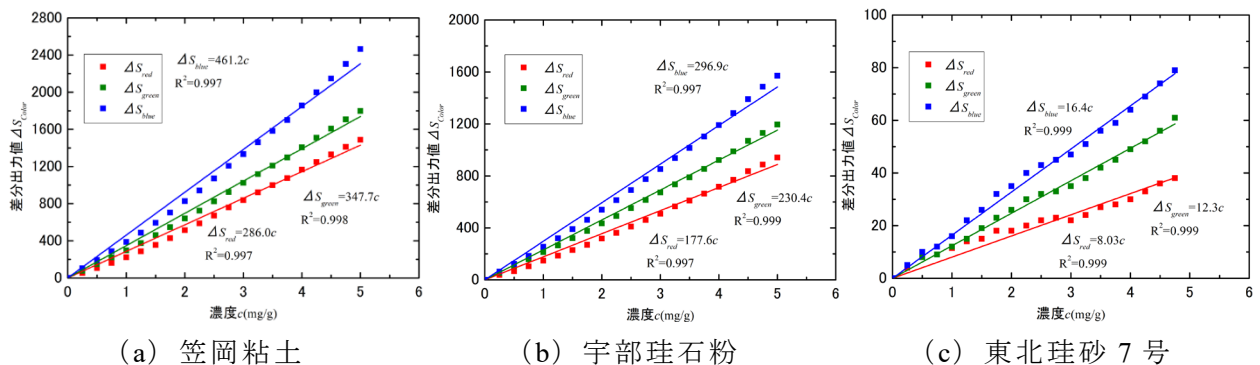


図3 懸濁液濃度と差分出力値の関係（土試料別）

いずれの測定結果であっても、同一試料、同一波長の場合、濃度 c と差分出力値 $\Delta S(c)$ には 1 次の近似関係が見られる。そこで、差分出力値 $\Delta S(c)$ を濃度 c と感度係数 k_{color} の一次式として (2) 式で表す。

$$\Delta S_{color}(c) = k_{color} * c \quad (2)$$

ここで、各試料で $\Delta S_{color1}(c)/\Delta S_{color2}(c)$ のように差分出力値の比を取ることで、感度比 k_{blue}/k_{red} 、 k_{green}/k_{red} 、 k_{blue}/k_{green} を得ることができる。なお感度比 k_{color1}/k_{color2} はいずれも 1 以上になるように比を設定した。

この感度比 k_{color1}/k_{color2} は理論的には濃度 c には依存しない、粒径分布などの粒径に関する値に対する各試料固有の値であると考えることができる。図4に粒径分布の代表的な値として平均粒径 D_{50} と感度比 k_{color1}/k_{color2} の関係を示す。 D_{50} が大きいほど k_{blue}/k_{red} と k_{green}/k_{red} は大きくなった。一方で k_{blue}/k_{green} は D_{50} に依存せず、おおむね同様の値になった。これは、青と緑の光源の波長が近いからであると考えられる。また、 k_{blue}/k_{red} と k_{green}/k_{red} は細粒分と砂の境界である 0.075mm 近傍で増加することが予想される。したがって、 k_{blue}/k_{red} と k_{green}/k_{red} を利用することで、細粒分流出によって流出する土粒子の粒径変化を捉えられること、少なくとも細粒分と砂分の判定ができることが示唆された。ただし、現段階の装置では装置外部からの光の影響を完全には排除できておらず、外光補正や光源強度・受光感度の厳密な校正も十分ではないため、センサーの更なる改良が必要である。

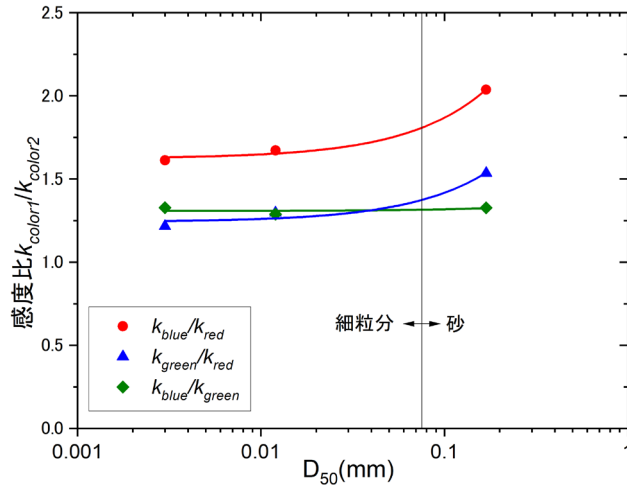


図 4 平均粒径と感度比の関係

2. パイピング可視化実験

2.1. 実験概要

Wang et al. (2024) の研究を参考にして、横向き浸透によるパイピング可視化実験装置を製作した。図 5 に実験装置の模式図および写真を示す。供試体の寸法は縦 200mm、横 100 mm、高さ 20 mm の直方体である。供試体上流側に接続されたタンクはオーバーフローによって水位を一定に保つことができ、電動昇降台によってタンク全体の高さを調整できる。電動昇降台は手動、もしくは、プログラム制御で昇降する。

本実験では、いわき珪砂 3 号に宇部珪砂粉を 10%、または、30% 混合した土試料を使用した。分級を防ぐため含水比を 5% にして混合し、所定の相対密度になるように 2 層に分けて突き固めた。供試体上面には 10kPa の上載圧を与えた。本研究では、1. 動水勾配を 0.05 ずつ段階的に上昇させるパターンと 2. 動水勾配を段階上昇させ、0.6 に達した段階で、振幅 0.1 の動水勾配の変動を 50 回加えたパターンの 2 通りの動水勾配履歴を与えた。実験中は、排水の流量、土粒子の侵食量を各動水勾配（動水勾配変動過程は 50 回変動させた後）ごとに計測し、ビデオカメラで供試体底面の様子を撮影した。

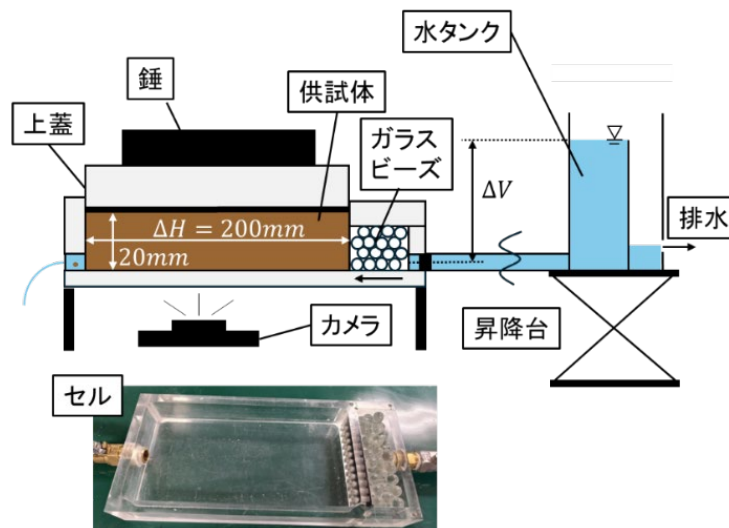


図 5 パイピング装置の模式図

2.2. 実験結果

図 6 に動水勾配と流量、侵食率の関係を示す。黒いグラフが流量（左軸）、赤いグラフが有効侵食率（右軸）を示している。有効侵食率は元の細粒分の質量に対する侵食した土粒子の質量の比である。

流量を見ると $F_c=30\%$ のケースでは、動水勾配の変動の有無に関わらずほぼ直線的に増加した。どちらのケースでも動水勾配を 1.35 から 1.4 にあげている途中に、流量が急増し、パイピングが発生した。 $F_c=10\%$ のケースでは、動水勾配の変動なしの場合、動水勾配 1.0 付近まで直線的に増加し、最終的に動水勾配を 1.20 から 1.25 にあげている途中に流量が急増し、パイピングが発生した。パイピングが発生する動水勾配は、動水勾配の変動履歴の有無によらないことが分かった。また、動水勾配動水勾配の変動ありの場合、50 回の動水勾配の変動を与えた 0.6 以降、グラフの傾きが増加した。動水勾配の変動による細粒分の再配置によって透水性が増加したことが示唆される。

有効侵食率をみると、実験前半において、グラフ上はほぼ 0 付近を横ばいであった。しかしながら、どのケースも動水勾配 0.4 で排水が濁り始めており、わずかであるが細粒分流出が発生した。その後、動水勾配が 0.8 を超えたあたりから有効侵食率が増加した。動水勾配の変動過程における累積有効侵食率も示しているが、値はかなり小さかった。有効侵食率が増加し始める動水勾配や最終的な有効侵食率はかなりばらつきがあり、動水勾配の変動の有無や細粒分含有率による明確な傾向は確認できなかった。

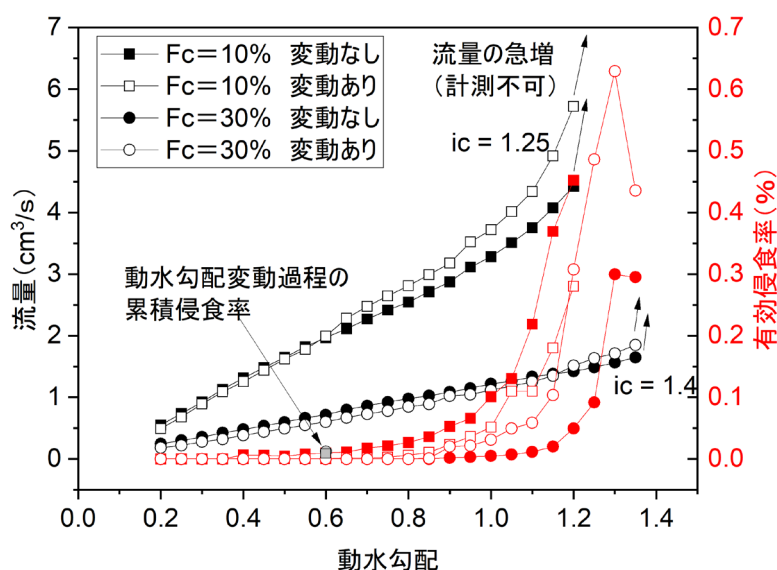


図 6 動水勾配と流量および有効侵食率の関係

3. パイピング可視化実験への光学センサーの適用と課題

計画段階では、多チャンネル濁度センサーとパイピング可視化実験を組み合わせ、パイピング過程における粒径の経時変化を調べる予定であったが、課題が見つかり、実験を行うことができなかった。多チャンネル濁度センサーはガラス管が飽和状態でなければ、正しく計測ができない。しかし、パイピング装置の構造上、供試体を飽和状態にすることが難しい、管路中の凹凸が多く気泡の除去ができないという問題があり、多チャンネル濁度センサーを適切に接続できなかった。今後、実験装置の改良が必要である。

(参考文献)

1) Ishimaru, T., Suzuki, M., Komori, A.: Suffusion behavior under fluctuated hydraulic gradient conditions focusing on amount and size of soil particles contained in drainage, Soils and Foundations 65(4), 2025. 2) Wang, T., Wang, C., Zhang, F., Peng, M., Bate, B.: Transformation mechanism of suffusion and backward erosion piping in gap-graded soil: an experimental study, Bull Eng Geol Environ 83(7), 2024.

(発 表 論 文)

なし