

一次元通水実験において通水方法が細粒分流出の継続性に与える影響

山口大学大学院 学生会員 ○石丸 太一
 山口大学大学院 正会員 鈴木 素之
 山口大学大学院 学生会員 若松 知季

1. はじめに 近年の豪雨や地震によって、日本各地で多くの盛土構造物が被災している。河川堤防やため池堤体などの貯水の影響を受ける盛土構造物では、図1に示すように、粗粒な土粒子が形成する骨格を維持したまま、細粒な土粒子が水の浸透で流出する現象—Suffusion（細粒分流出）が問題視されている。また、この現象が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¹⁾。これより、細粒分流出が継続すれば、盛土構造物の安定性が経年的に失われていく。しかし、細粒分流出の発生や進行のメカニズムは未だ不明なことが多い。本研究では、細粒分流出の進行性・継続性を検討するために、細粒分の流出を伴う2種類の下向き通水実験を実施し、排水の流量や濁度、排出土の質量を経時的に測定した。排出される土粒子が少なく、連続的な分析が難しいというこれまでの課題を解決する方法として、排水の濁度測定から排出土の粒径分析を試み、細粒分流出の進行性・継続性を土粒子の排出量だけでなく、粒径の観点からも考察した。

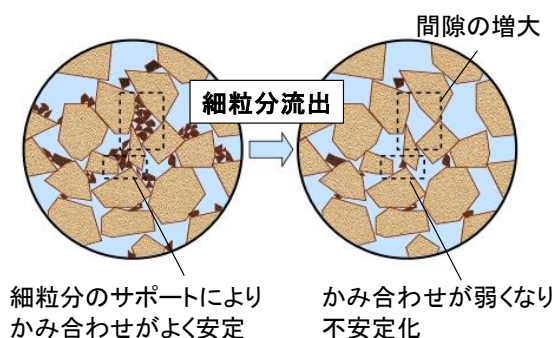


図1 細粒分流出のイメージ図

2. 濁度測定による懸濁液中浮遊物質の粒度推定手法 細粒分流出を再現する実験は様々実施されているが、排出してくる土粒子が僅少かつ微小であることが連続的な回収や分析の妨げとなっている。本研究では、濁度計の持つ「懸濁物質の粒径が小さいほど濁度の数値が高くなる性質」²⁾を利用して排出土粒子の粒度の推定を試みた。ふるい目が75 μ m, 106 μ m, 250 μ m, 420 μ mのふるいをそれぞれ通過した宇部まさ土をキャリブレーション用試料C75, C106, C250, C420と称して、土の種類、濃度SS、濁度測定用のセルに移す前の懸濁液の容積が異なる計80種類の懸濁液を作製し、濁度測定を実施した。図2に濁度測定の結果を示す。横軸が懸濁液の濃度、縦軸が濁度を示している。懸濁土粒子の種類が同じとき、浮遊砂濃度と濁度は直線関係を示し、懸濁土粒子に粒径が大きい土粒子が多く含まれるほど、その近似線の傾きは小さくなった。なお、懸濁液の容積の違いによる濁度測定への影響はほとんどなかった。ここで、各近似線を基準線と呼ぶこととする。図2中に模式的に示すように、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、同一濃度の時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X」と呼ぶこととし、細粒分流出実験時の排出土のパラメータに使用する。この同一濃度濁度比が大きいほど基準となるキャリブレーション用試料よりも小さい粒径の配分が多いことを意味する。

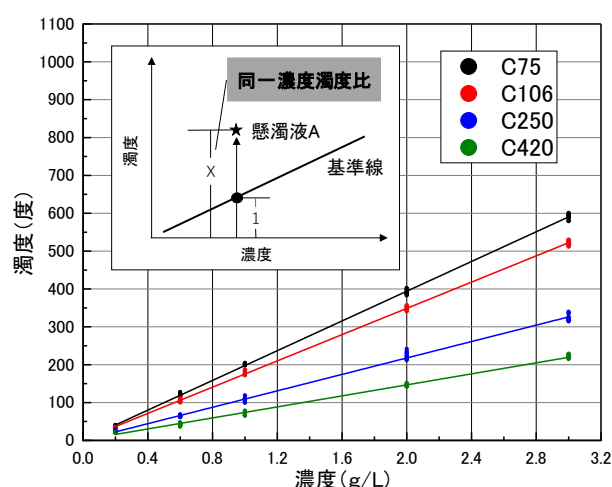


図2 同一濃度濁度比の定義

3. 円筒型コラムを用いた一次元通水実験**3. 1 使用した土試料**

本研究では宇部まさ土を粒度調整した土試料を使用した。ふるい分けにより分級した粒径が420 μ m～2mm(粗砂)

キーワード 内部侵食, 浸透流, 盛土構造物, 濁度

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科 鈴木素之
 TEL 0836-85-9303

と 106 μm 以下（細砂）の宇部まさ土を所定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．土粒子全体に対する細砂の割合を“細砂含有率”と呼ぶ．本試料の内部侵食の安定性を Chang and Zhang³⁾ が提案する指標を用いて評価した．Chang and Zhang 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 soils）で， $F_c \leq 10\%$ を満たす時，gap ratio (G_r) というパラメータを用いた指標での評価が適していると述べている．gap-graded soils の粒径加積曲線において，取り除かれている区間の最小粒径を d_{min} ，最大粒径を d_{max} とし，式 (1) で G_r を算出する．

$$G_r = \frac{d_{max}}{d_{min}} \quad (1)$$

$F_c \leq 10\%$ の条件を満たすとき，「 $G_r < 3$ 」は内部安定，「 $G_r > 3$ 」は内部不安定と判断される．今回使用した土試料はすべて $F_c \leq 10\%$ を満たし， $G_r 3.39\%$ ($d_{min} 3106\mu\text{m}$ ， $d_{max} 3420\mu\text{m}$) 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であるといえる．

3. 2 実験装置と実験方法 図 3 に試験装置の模式図を示す．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 420 μm 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．本実験では，供試体上面の水位を一定に保った定水位通水実験と一定間隔で供試体上面に一定量給水する給排水繰返し通水を実施した．定水位通水では，円筒カラムに注水し，越流によって定水位を保つことで一定の動水勾配 19125 で供試体に鉛直下向きの浸透流を与えた．透水開始時の供試体の飽和度は 70% 程度であった．通水量は全体で 1400ml とし，約 100ml ずつ 14 回分をビーカーで採水した後，ビーカー毎の採水時間，排水量，排出土粒子の質量および排水の濁度を測定した．給排水繰返し通水実験は，定水位通水実験の実験ケース fs-5_098(2), (3), (4), (5) の実験終了後，同じ供試体で継続して実施した．定水位通水実験終了後，ただ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．パターン 1 とパターン 3 では，水の供給を止めてから，それぞれ 5 分後，24 時間後に底板のバルブを閉じ，各部の粒度，含水比等の計測のために供試体を解体した．パターン 2 とパターン 4 では，水の供給を止めてからそれぞれ 5 分後，24 時間後に供試体上面から 500ml の水を供給した．その後，それぞれ 5 分間ごと，24 時間ごとに水の供給を 9 回繰返した．最後の給水からそれぞれ 5 分後，24 時間後に，供試体を解体した．

3. 3 実験結果と考察

3. 3. 1 定水位通水実験 図 4 に定水位通水実験における平均流量と土粒子の総排出量の関係を示す．ここで，実験ケース名は【使用した土試料名_間隙比】を表している．実験条件が同じであっても平均流量に違いが生じたが，これは透水開始時の飽和度が影響していると考えられる．fs-5，fs-10 とともに平均流量が多いほど総排出量が多い傾向が見られた．また，細砂含有率が小さい fs-5 の方が，細砂含有率が大きい fs-10 よりも土粒子の総排出量が多かった．図 5 にビーカー毎の同一濃度濁度比を示す．基準線は C106 を選択した．供試

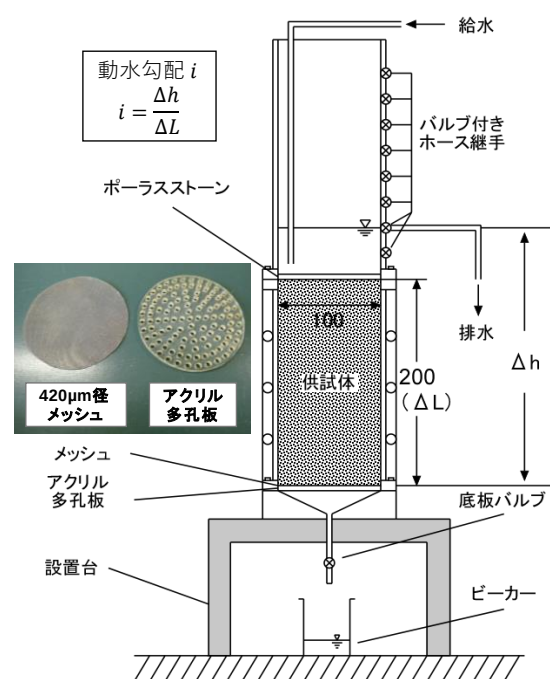


図 3 円筒型コラム通水装置

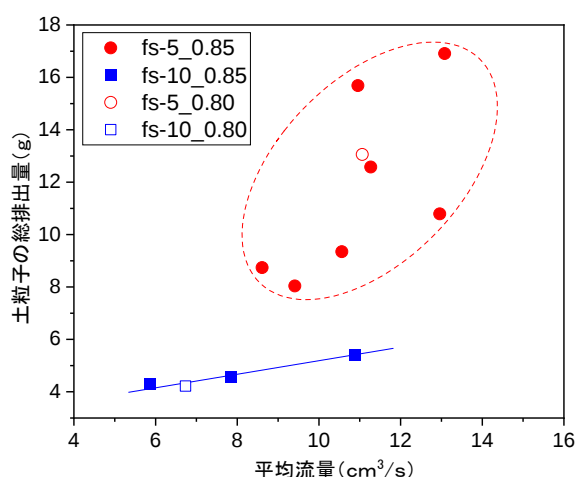


図 4 平均流量と土粒子の総排出量の関係
(定水位通水)

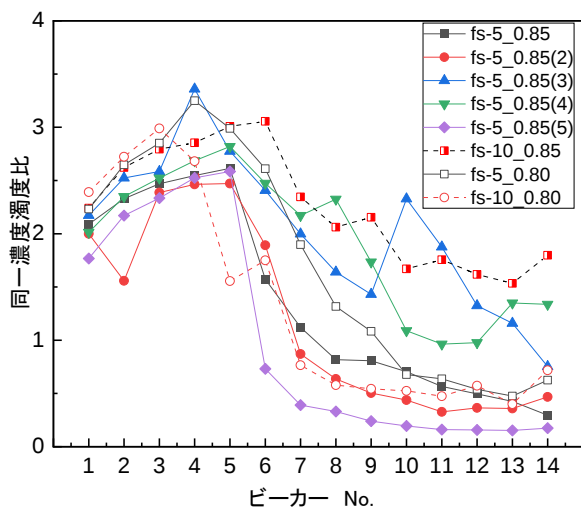


図5 ビーカー毎の同一濃度濁度比

体にもともと含まれる細砂の粒度は C106 と同じであるため、仮に供試体の細砂がそのままの粒度で排出されたならば、同一濃度濁度比は 1 となる。ビーカーNo91の同一濃度濁度比はすべてのケースで 197~295 程度であり、C106 よりも小さな土粒子（粘土分）の配分が大きいことが分かる。ここで、後述の説明の簡単のために、細砂の中でも比較的小さな土粒子を粘土分、大きな土粒子をシルト分と表現するが、粒径区分の呼び名とは異なる。すべてのケースでビーカー No94-6（通水量が 400ml~600ml 程度）まで同一濃度濁度比が増加した後、同一濃度濁度比が小さくなっていく傾向が見られる。通水開始直後から通水量 400ml~600ml 程度まで、粘土分が優先的に排出してくるため、同一濃度濁度比は高いが、その後、粘土分の排出が少なくなるため、同一濃度濁度比が低くなると考えられる。Sato and Kuwano¹⁾ は、円筒供試体に対する下向き通水時の供試体内部における土粒子の移動について、流出境界付近では粘土分+シルト分が流出するが、供試体上部では、粘土分のみが移動していると述べている。同一濃度濁度比が、透水開始直後ではなく、しばらくしてからピークを迎えるのは、供試体上部の粘土分が流出面までの輸送距離分の時間差を生じて流出してくるからであると考えられる。

3. 3. 2 給排水繰返し通水実験 図6に給排水繰返し通水実験におけるビーカー毎の土粒子の排出量を示す。定水位通水過程で土粒子の排出はほぼ止まったが、水位低下過程でわずかに土粒子が排出し、給排水繰返し通水過程では土粒子が再び排出し始めた。図7にビーカー毎の同一濃度濁度比を示す。パターン 2, 4 では 1 回目の給排水繰返し通水で同一濃度濁度比が 295 程度に跳ね上がった。その後の給排水繰返し通水でも、同一濃度濁度比は 2 以上を維持した。本実験は

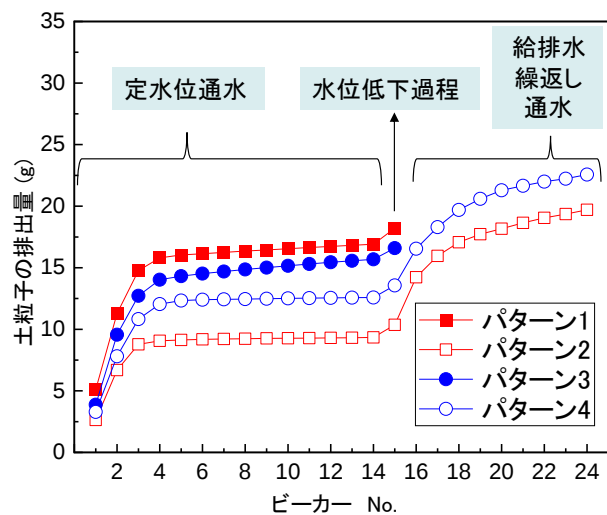


図6 ビーカーごとの土粒子の排出量

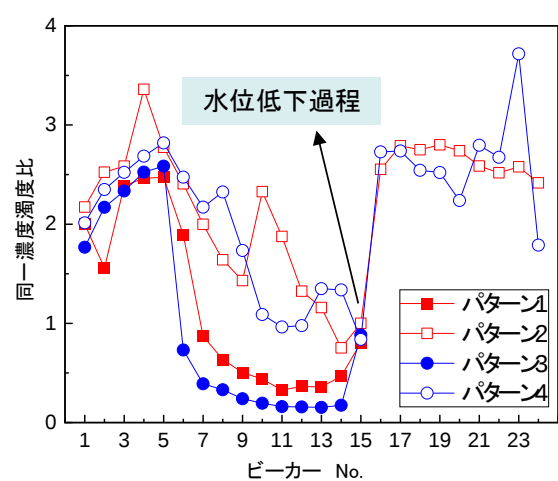


図7 ビーカー毎の同一濃度濁度比
(給排水繰返し通水)

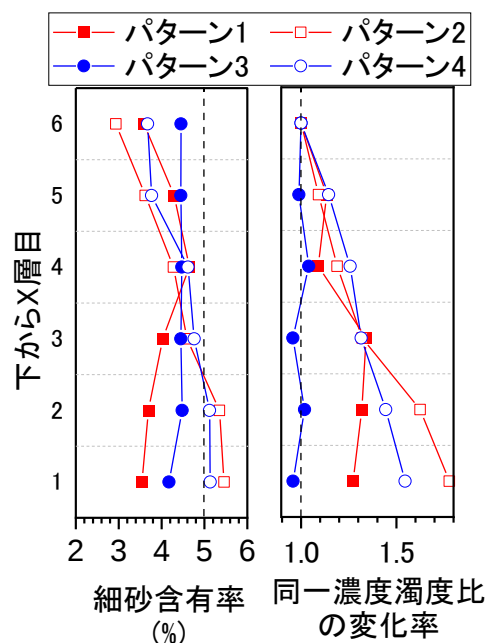


図8 給排水繰返し通水後の供試体の分割結果
(細砂含有率、最上層を1とした時の同一濃度濁度比の変化率)

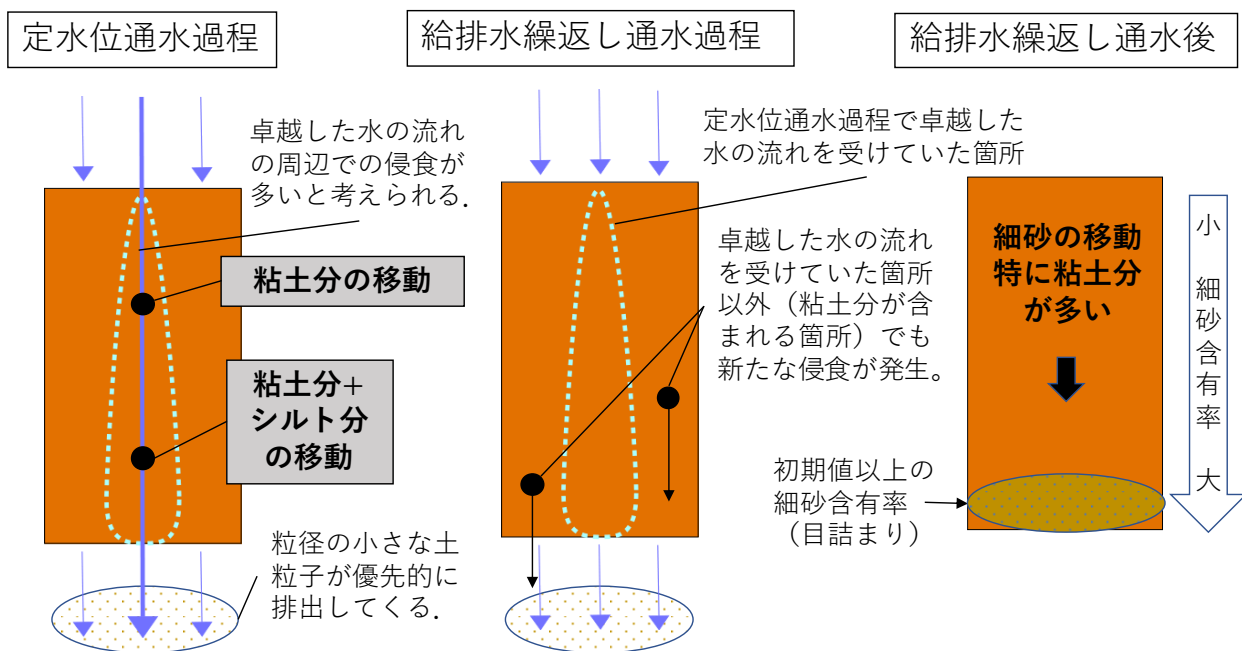


図9 本実験における細粒分流出のイメージ図

不飽和状態での通水条件であるため、定水位通水過程では初期飽和度が高い部分を優先して水が流れていたと考えられる。水位低下過程以降は、通水ごとにその経路が変化することで、卓越した流れを受けていない箇所が新たに侵食され、土粒子が移動し始めたと考えられる。さらに、給排水繰返し過程で同一濃度濁度比が増加したことから、粘土分が残っている新たな箇所の侵食が発生していると推測できる。図8に試験終了後に6層に分割した供試体の細砂含有率、最上層を1とした時の同一濃度濁度比の変化率を示す。同一濃度濁度比は層ごとに106 μm のふるいの上で水洗いし、ふるい通過分の土粒子は水とともにすべて回収し、懸濁液の濁度を測定することで算出した。給排水繰返し通水を行ったパターン2、4では最上層から最下層にかけて細砂含有率が大きくなる直線的な分布となった。また、どちらも最下層、下から2層目では初期の細砂含有率よりも大きくなった。上層から下層に向かって細砂が移動し、下部で滞留が起こっていることが分かる。さらに、給排水繰返し通水を行ったパターン2、4では最上層から最下層にかけて同一濃度濁度比が大きくなる直線的な分布になっていることから、粘土分が卓越して移動していると考えられる。

4. 結論 図9に本実験で得られた知見をまとめた細粒分流出のイメージ図を示す。通水実験によって、もともと供試体に存在する細砂の中から粘土分がより多く排出し、さらに粘土分の方から優先的に排出していることが分かった。定水位通水条件では、400ml～600ml程度の通水量で土粒子の排出がほぼ停止したが、給排水繰返し通水条件に移行すると土粒子の排出が再開した。そこで、新たに侵食された部分から流出する土粒子には、粘土分が多く含まれていることから、定水位通水過程で流出していない新たな箇所でも侵食が発生していると考えられる。給排水繰返し通水によって、供試体の上部の粘土分が下部に移動しており、供試体高さ方向に不均一化していた。また、供試体の下部の細砂含有率が初期よりも高いことから、メッシュ付近で滞留を引き起こしている可能性がある。以上のことから、鉛直下向きの通水条件において、一定の場所を常に水が流れている状態よりも、水が流れたり止まったりし、水の流れる場所が広がっていく状態で、細粒分流出が間欠的に発生することが分かった。

参考文献

- 1) Sato, M9, Kuwano, R9: Laboratory testing for evaluation of the influence of a small degree of internal erosion on deformation and stiffness, *Soil and foundations*, Vol958, pp9547-562, 20189
- 2) 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*，No9698，pp998-98，2002.
- 3) Chang, D9S9, Zhang, L9M9: Extended internal stability criteria for soils under seepage, *Soils and Foundations*, Vol953, No94, pp9569-583, 20139