

## カラム通水実験における単層および二層地盤の細粒分排出挙動

Suffusion Behavior of Single and Two Soil Layers in Column Infiltration Experiments

高野 翔太<sup>1)</sup>, 鈴木 素之<sup>2)</sup>, 石丸 太一<sup>3)</sup>, 小森 朝陽<sup>4)</sup>

- 1) Shota TAKANO, 博士前期課程, 山口大学大学院創成科学研究科, TakanoS@yucivil.onmicrosoft.com  
 2) Motoyuki SUZUKI, 教授, 山口大学大学院創成科学研究科, msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp  
 3) Taichi ISHIMARU, 博士後期課程, 山口大学大学院創成科学研究科, IshimaruT@yucivil.onmicrosoft.com  
 4) Asahi KOMORI, 博士前期課程, 山口大学大学院創成科学研究科, i029fd@yucivil.onmicrosoft.com

実際の地盤は複数の層に分かれており、浸透流が生じた際には異なる複数の層に含まれる数種類の細粒分が移動すると考えられるが、粒径や物理特性が異なる細粒分が同時に排出されるプロセスには不明な点が多い。本研究では、数種類の細粒分が浸透によって排出された際の排出挙動を調べることを目的として、単層もしくは二層の地盤を再現し、鉛直下向きの一次元通水実験を実施した。その結果、単層地盤と二層地盤で細粒分の排出挙動は異なり、二層地盤における土層の配置の入れ替えは土粒子の排出量や排水の濁度の値に影響することが明らかになった。

キーワード：細粒分流出，浸透，カラム通水実験，骨格間隙比，濁度

(IGC : D-03, D-04)

## 1. はじめに

近年、日本各地で豪雨による土砂災害が発生していることへの対応が喫緊の課題となっている。降水量が多くなる時期の発災では、その被害が拡大・長期化することが懸念される。一方、地盤内では浸透流が発生すると、それに伴って土中の微細な土粒子が間隙中を移動・流出する可能性がある。この現象は内部侵食と言われ、その既往の研究によれば、内部侵食による細粒分の流出は地盤の変形や強度特性に影響を与えるとされており、地盤の空洞形成や陥没につながる可能性がある<sup>1)3)</sup>。

内部侵食による細粒分の移動形態<sup>4)</sup>は、Concentrated leak erosion, Backward erosion, Contact erosion, Suffusionのいずれかに該当される。石丸ら<sup>5)</sup>は、Suffusion（以降、細粒分流出と称す）に着目し、浸透によって排出される土の粒度組成の時間変化を明らかにすること、また、土粒子の流出量と排出土の粒度組成にどのような関係があるのかを明らかにすることを目的として、単一の土試料を用いた通水実験を行い、細粒分流出の時間変化を排水の濁度から評価した。しかし、実際の地盤は透水性や粒度組成の異なる複数の層から構成されており、図-1に示すように、地盤内で鉛直下向きに浸透流が生じた際にはそれぞれの層に含まれる種類の異なる細粒分が移動し、土層の境界部では異なる細粒分同士が混合すると考えられるが、粒径や塑性が異なる細粒分が同時に移動・排出されるプロセスについては十分に明らかにされていない。そこで、本研究では粒度組成および塑性が異なる2種類の細粒分が浸透によって排出された際の、細粒分の排出

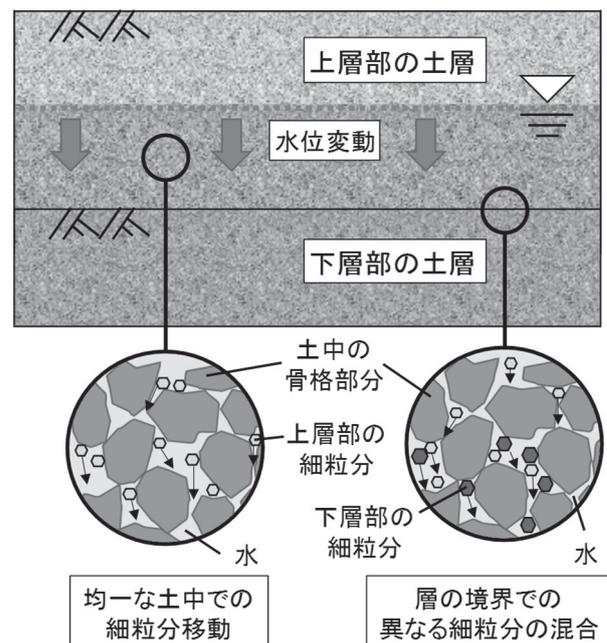


図-1 地盤内の内部侵食の概念図

挙動を分析することを目的として二層の地盤をカラム通水容器内に再現し、細粒分流出を伴う定水位一次元通水実験を実施した。一連の実験では排水の回収に要する時間を計測しながら、排水の濃度と濁度を同時に測定し、細粒分流出が進行中の両者の関係を経時的に追跡した。また、比較として単層の地盤を再現したケースでの通水実験も行い、単層地盤と二層地盤での細粒分流出の挙動の違いについて検討した。

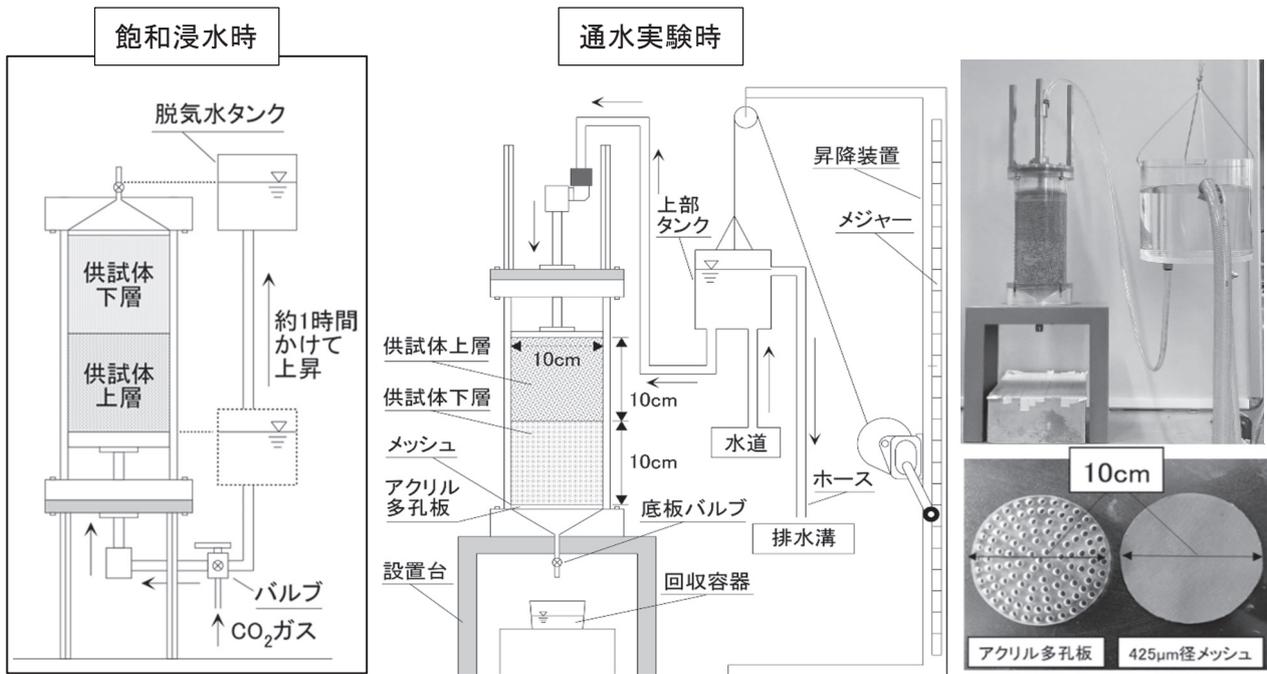


図-2 円筒型カラム通水装置<sup>5)</sup>の概略図

## 2. 試験方法

### 2.1 カラム通水装置

図-2 にカラム通水装置<sup>5)</sup>の概略図を示す。本研究では、アクリル製の円筒型カラム通水容器を用いて、内部に単層もしくは二層の地盤を再現し、細粒分流出を伴う通水実験を実施した。二層の地盤を作製する場合は2種類の土を上層と下層に分けて敷き詰め、単層の地盤を作製する場合は、1種類のみ土試料を、層の厚みを倍にして詰めた。カラム通水容器内の寸法は内径 10 cm、高さ 20 cm であり、そこに土試料を詰める際は、所定の密度になるように複数層に分けてランマーで突き固めた。供試体下部には直径 5 mm の穿孔が 108 個あるアクリル多孔板とメッシュを設置し、排出される土粒子の粒径を制限した。本研究では、目開きが 425 μm 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。カラム通水容器内の供試体に注水する際は越流によって定水位を保つことで、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構造となっている。

### 2.2 供試体の作製

#### 2.2.1 土試料の配合

本研究では、粒度の異なる複数の珪砂を配合した粗粒珪砂（以降、ホスト珪砂とする）と、細粒分としてカオリンまたは DL クレーを細粒分含有率 5 % となるように配合した土試料を使用した。表-1 にカオリンと DL クレーの物理特性を示している。表-1 からカオリンは低塑性、DL クレーは非塑性であることがわかる。カオリンおよび DL クレーを細粒分として使用したのは、二つの細粒分の

表-1 カオリンと DL クレーの物理特性

	カオリン	DL クレー
土粒子の密度 $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.74	2.68
液性限界 $w_L$ (%)	73.1	NP
塑性限界 $w_p$ (%)	36.7	NP
塑性指数 $I_p$	36.4	—

表-2 珪砂の配合割合

珪砂	粒径 (mm)	配合割合 (%)
1号	4.8~1.7	9
3号	3.3~0.8	41
4号	2.4~0.3	16
5号	1.7~0.2	22
6号	0.6~0.07	2
7号	0.2~	10
合計	—	100

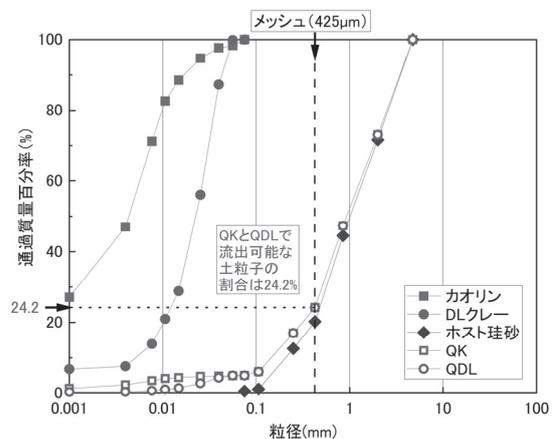


図-3 粒径加積曲線

塑性および粒径が異なることから、通水実験の時の排出挙動に違いが出てくると考えたためである。ホスト珪砂は珪砂 1 号, 3 号, 4 号, 5 号, 6 号, 7 号の 6 種類の粒度の異なる珪砂を表-2 の割合になるように配合し、宇部まさ土の粒度組成に類似させた。また、ホスト珪砂とカオリンを配合した土試料を“QK” (Quartz sand and Kaolin), ホスト珪砂と DL クレーを配合した土試料を“QDL” (Quartz sand and DLClay) と命名する。QK と QDL の土粒子密度は、どちらも  $\rho_s = 2.65 \text{ Mg/m}^3$  である。図-3 に本研究で使用した土試料の粒径加積曲線を示している。本研究ではカラム通水容器内の最下部に  $425 \mu\text{m}$  メッシュが敷いてあることから、流出可能な土粒子の乾燥質量の割合は全体の 24.2 % となっている。

QK または QDL を配合する際の含水比については締め試験の結果から得られた最適含水比を採用し、QK については 11.5 % 相当の精製水を加え、QDL については 10.6 % 相当の精製水を加えた。

### 2.2.2 骨格相対密度 $D_{rg}$ の導入

混合土の組成は図-4 のように間隙(Void), 細粒分(Fines)および粗粒分(Sand)の三つに分けて考えることができる。本研究においては、カオリンと DL クレーが細粒分に該当し、ホスト珪砂が粗粒分に該当する。一般的な間隙比  $e$  は、固体部の体積  $V_s (=V_{ss} + V_{sf})$  と間隙部の体積  $V_v$  の比により次式(1)で求められる。

$$e = \frac{V_v}{V_{ss} + V_{sf}} \quad (1)$$

しかし、本研究では細粒分流出の挙動を分析することが目的であり、細粒分を流出可能な部分の一部であるとみなす考えから、大嶺ら<sup>6)</sup>の研究を参考にし、細粒分を間隙とみなす骨格間隙比  $e_g$  を採用した。 $e_g$  は次式(2)で定義される。

$$e_g = \frac{V_v + V_{sf}}{V_{ss}} \quad (2)$$

ホスト珪砂の最大間隙比を最大骨格間隙比  $e_{gmax}$ , 最小間隙比を最小骨格間隙比  $e_{gmin}$  と定義する。 $e_{gmax}$ ,  $e_{gmin}$  および  $e_g$  の 3 つで定義される相対密度を骨格相対密度  $D_{rg}$  とし次式(3)のように定義する。

$$D_{rg} = \frac{e_{gmax} - e_g}{e_{gmax} - e_{gmin}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

本研究において、 $D_{rg} = 60 \%$  を比較的密な条件として、 $D_{rg} = 30 \%$  を比較的緩い条件として供試体を作製した。

### 2.3 飽和の手順

カラム通水容器内に供試体を詰めたら脚付きの蓋を取り付けて容器を密閉する。供試体の上層部側が下になる

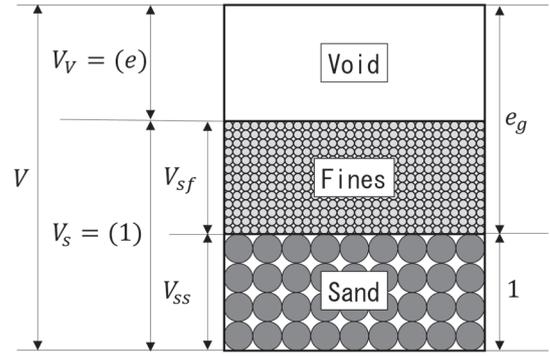


図-4 骨格間隙比<sup>6)</sup>の概念図

ように容器を静置させ、図-2 の左側に示すように、供試体の上層部側から上向きに  $\text{CO}_2$  ガスを注入し、供試体に  $\text{CO}_2$  ガスを約 1 時間かけて充満させた。その後、脱気水タンクのチューブを通じて上向きに脱気水を注水した。その際に、脱気水タンクの水面の高さが底板バルブ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。そのままの状態ですべて約 1 日静置させ、供試体内を脱気水で飽和させた。

### 2.4 通水手順

通水実験時には、図-2 の中央に示すように、飽和が完了した供試体を設置台の上で元の向きに戻した。供試体へ注水するときの動水勾配の設定については、限界動水勾配  $i_c$  を、式(4)を用いて計算した結果、全ての通水ケースで  $i_c$  の値は 0.99 から 1.07 の範囲に収まることが分かった。そのため、本研究では全ての通水ケースで動水勾配の値を 1.00 に定めた。 $G_s$  は土粒子の比重、 $e$  は飽和完了後の供試体の間隙比である。

$$i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e} \quad (4)$$

通水を行う前にカラム通水装置の上部タンクの水面の高さを、供試体上層部の上端と合わせて水位を固定し、動水勾配を一定にした。上部タンクへの水の供給は常に行われており、余分な水は越流によって排水される仕組みから、水位を一定に保った状態で供試体に鉛直下向きの浸透流を与えた。さらに、コンプレッサーを用いて供試体に対し 100 kPa の先行荷重をかけ、10 分ほど圧密させた。その後、先行荷重は除荷した。

通水開始と同時にカラム通水容器最下部の底板バルブを開き、下の放出口から出てくる排水を底板バルブ直下に設置している回収容器で回収した。1 つの回収容器における採水時間は通水中に測定し、排水量、排出土の質量および排水の濁度は通水終了後に測定した。排水の濁度と濃度の関係を経時的に追跡するには、短時間に分けて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。排水の採水量は全体で 2,000 mL とし、

表-3 通水ケースの詳細

ケース名	細粒分の種類		層の厚み (cm)	骨格相対密度 $D_{rg}(\%)$	作成時の間隙比 $e_0$	通水実験直前の間隙比 $e_1$	
単層	Case1	カオリン		20	30	0.695	
	Case2	DL クレー		20	30	0.695	
	Case3	カオリン		20	60	0.585	
	Case4	DL クレー		20	60	0.585	
二層	Case5	上層部: DL クレー	下層部: カオリン	10	30	0.695	0.669
	Case6	上層部: カオリン	下層部: DL クレー	10	30	0.695	0.660
	Case7	上層部: DL クレー	下層部: カオリン	10	60	0.585	0.571
	Case8	上層部: カオリン	下層部: DL クレー	10	60	0.585	0.576

表-4 排水の採取状況 (Case5 [上層が QDL, 下層部が QK,  $D_{rg} = 30\%$ ])

回収容器 No.	精製水	①	⑤	⑩	⑮	⑳
排水の写真						
採水時間 (s)		13.20	12.35	11.98	11.45	11.53
排土量 (g)		0.693	0.344	0.053	0.015	0.008
濃度 (g/L)		7.33	3.69	0.55	0.16	0.09
濁度 (度)		3675	1865	333	104.9	73.0

約 100 mL ずつ 20 回分を回収容器で採水した。

### 2.5 通水ケース

表-3 に本研究で行った通水ケースの詳細を示す。単層地盤を通過した場合と二層の地盤を通過した場合での細粒分流出の挙動の違いを比較するため、2 種類の細粒分および 2 つの骨格相対密度の条件を採用して、一層で 4 ケース、二層で 4 ケースの合計 8 ケースの通水実験を実施した。一層のみの通水実験の場合では、層の厚みは 20 cm であり、二層の通水実験の場合では、上層の厚みが 10 cm、下層の厚みも 10 cm となっている。また、飽和させる前の初期の供試体の間隙比  $e_0$ 、および飽和の過程や上載圧により、間隙比が変化した後の通水直前の間隙比  $e_1$  を示している。 $e_0$  は式(5)から、 $e_1$  は式(6)からそれぞれ求めた。

$$e_0 = \frac{\rho_s}{\rho_{d0}} - 1 \quad (5)$$

$$e_1 = \frac{\rho_s}{\rho_{d1}} - 1 \quad (6)$$

$\rho_s$  は土粒子の密度 ( $\rho_s = 2.65 \text{ Mg/m}^3$ )、 $\rho_{d0}$  は飽和させる前の供試体における初期の土粒子の乾燥密度、 $\rho_{d1}$  は圧密が完了した通水実験直前の供試体における土粒子の乾燥密度である。 $e_0$  に比べ、 $e_1$  の方が小さいのは、先行荷重によって圧密した際に、供試体の体積が収縮しているからである。

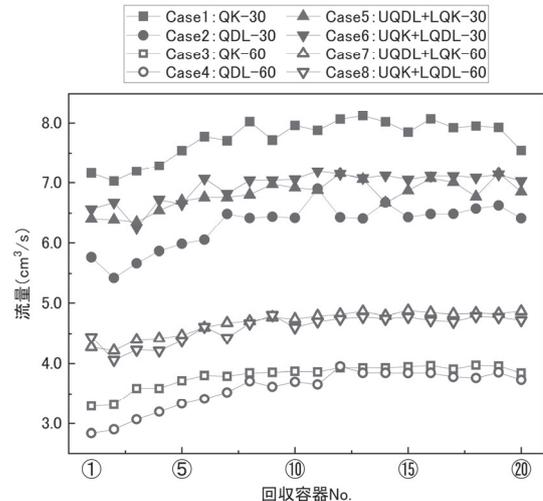


図-5 排水の流量の時間変化

表-5 図中の記号の詳細

供試体イメージ図	QK	QDL	QDL QK	QK QDL
$D_{rg} = 30\%$ (緩詰)	Case1 (■)	Case2 (●)	Case5 (▲)	Case6 (▼)
$D_{rg} = 60\%$ (密詰)	Case3 (□)	Case4 (○)	Case7 (△)	Case8 (▽)

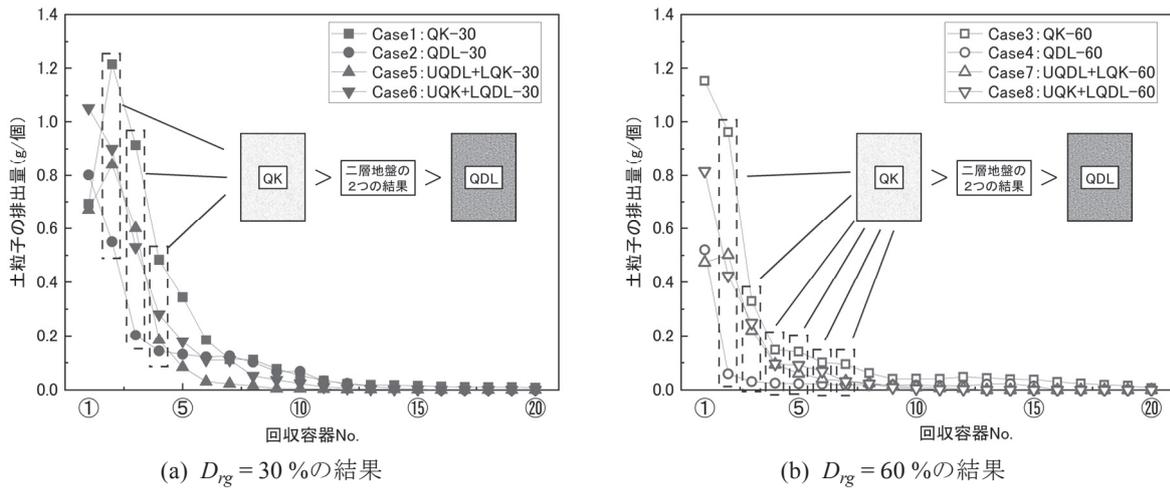


図-6 土粒子の排出量の時間変化

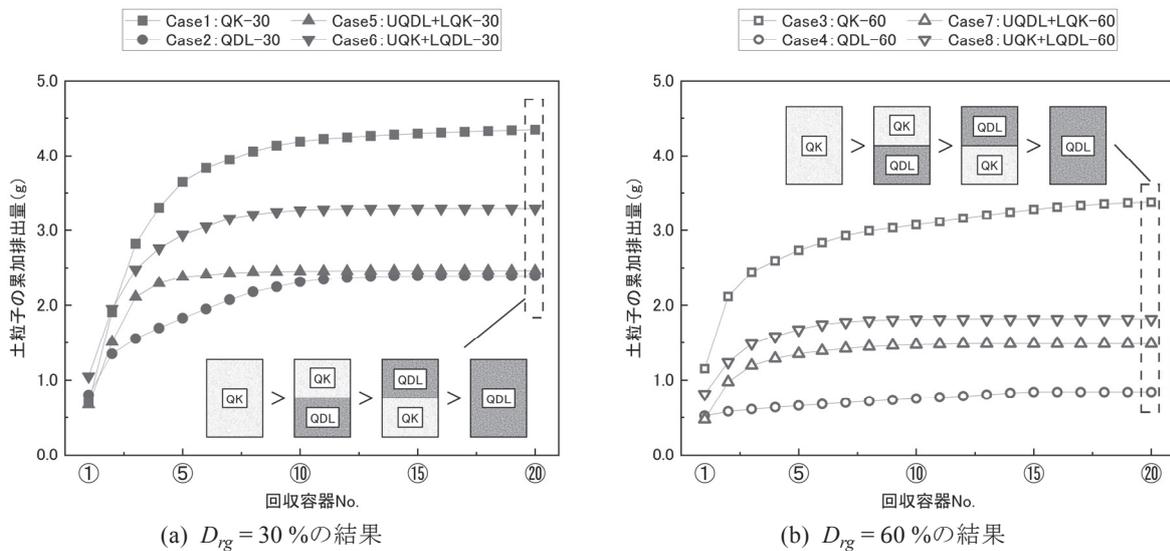


図-7 土粒子の累加排出量の時間変化

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 排水の目視観察

表-4 に Case5 (上層部が QDL, 下層部が QK,  $D_{rg} = 30\%$ ) の通水実験で得られた排水の採取状況の例を示している。20 個の排水の試料の中でも採取番号①番, ⑤番, ⑩番, ⑮番, ⑳番を示している。これらと併せて, 細粒分が含まれていない純粋な精製水の写真も示し, 排水の濁り具合を比較している。なお, 通水に用いているのは一般的な水道水であるが, 濁度 - 濃度関係の検定には精製水を用いた。①番に関しては容器の反対側が全く見えないほどに濁っており, 濁質物である土粒子を多く含んでいるのがわかる。それ以降の⑤番から⑳番にかけては排水の濁りは見受けられるが, 水中に含まれている濁質物の量が減っていることが肉眼でもわかる。

#### 3.2 排水の流量の時間変化

図-5 に流量の時間変化を示している。図中の凡例については, 単層の場合は【土の種類 (QK または QDL) -  $D_{rg}$  (30% または 60%)】を表しており, 二層の場合は

【Upper: 上層部の土の種類 (QK または QDL) + Lower: 下層部の土の種類 (QK または QDL) -  $D_{rg}$  (30% または 60%)】を表している。表-5 に図中の記号の詳細を示している。全体的に,  $D_{rg} = 30\%$  と  $60\%$  で排水の流量に明確に差が出ていることがわかる。まず,  $D_{rg} = 30\%$  のケースでは, 流量が最も大きいのは Case1 の QK 単層のケースであり, 最も小さいのは Case2 の QDL 単層のケースであった。そして, 二層の結果である Case5 と Case6 の流量については Case1 と Case2 の間に入った。一方,  $D_{rg} = 60\%$  のケースにおいては単層の通水結果である Case3 と Case4 に大きな差は生じず, 二層の結果である Case7 と Case8 の両方が Case3 と Case4 を上回った。透水理論を考慮した場合,  $D_{rg} = 60\%$  においても  $30\%$  の通水ケースと同様, 2 ケースの単層の流量の間に二層の流量の値が来ることが考えられる。しかし, 境界面付近のミクロスケールでの間隙構造の変化に影響され, 透水性に変化が現れたと考えられる。この点については今後の課題とする。二層のみの流量の結果に着目して, 同じ骨格相対密度の条件で土層の配置が違うケースを比較すると, 流量に大きな差が生じなかった。つまり, 二層地盤の場合では

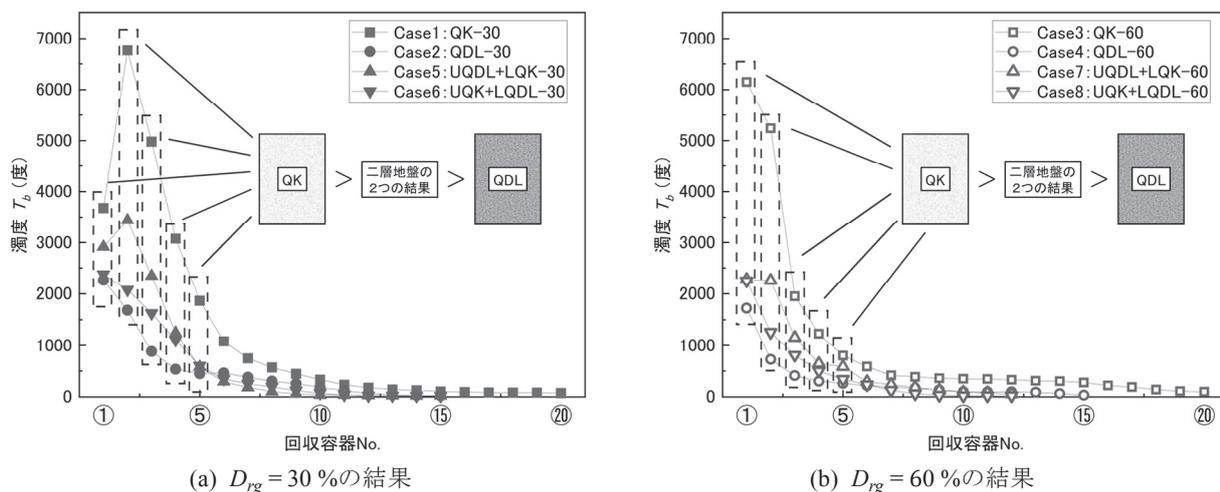


図-8 排水の濁度の時間変化

通過する土層の順番が変わっても、流量に大きな差は生じないということが分かった。

### 3.3 土粒子の排出量の時間変化

図-6 に回収容器ごとに含まれている土粒子の排出量の時間変化を、図-7 に土粒子の累加排出量の時間変化を、それぞれ同じ骨格相対密度の条件ごとに分けて示している。図-6 に着目すると、ほとんどのケースにおいて、採取番号①～⑤番の間で排出量が大きくなり、それ以降の土粒子の排出量は通水に伴って急激に減少し、採取番号⑩以降はほとんどなくなった。これにより、供試体内の流出可能な土粒子については、通水開始直後に大半が排出され、その後は排出量が減少することが分かった。また、 $D_{rg} = 30\%$  のケースでは②～④番の間で、 $D_{rg} = 60\%$  のケースでは②～⑦番の間で排出量の大小関係を比較すると、QK 単層>二層>QDL 単層という結果になった。図-7 において、単層のみの結果に着目すると、QK の排出量の方が大きくなっていることから、QK の方が QDL に比べて排出されやすいことが分かった。二層の通水結果について着目すると、 $D_{rg} = 30\%$  のケースの方が、土粒子の排出量が大きくなっていることが分かる。そして、同じ骨格相対密度でも上層部が QK、下層部が QDL の通水結果の方が、土粒子の排出量が大きくなった。これについては、カオリンの方が、DL クレーに比べて粒径が総じて小さく、塑性指数が高いこと<sup>7)</sup>から、間隙内での流動性が高く、上層にあったとしても、下の土層を通過しやすかったのではないかと考えられる。そのため、最終的な排出量は、上層が QDL、下層が QK の通水ケースよりも大きくなったと考えられる。また、最終的な累加排出量の大小関係をみると、 $D_{rg} = 30\%$  と  $60\%$  の双方で、QK 単層>UQK+LQDL>UQDL+LQK>QDL 単層という結果になった。

### 3.4 排水の濁度の時間変化

図-8 に濁度の時間変化を同じ骨格相対密度の条件ごとに分けて示している。濁度測定の手法については石丸

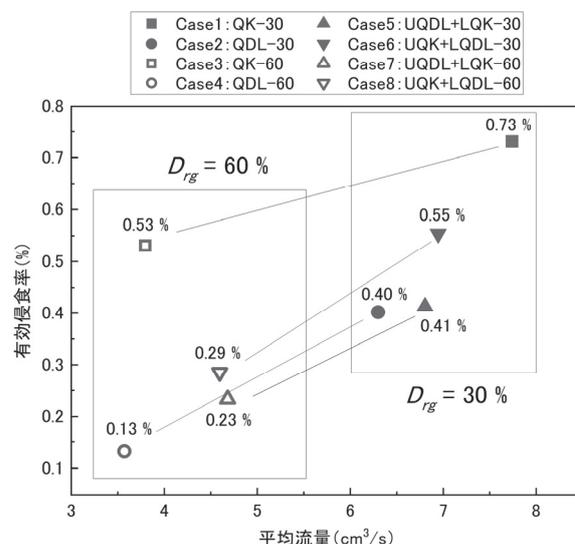


図-9 有効侵食率と平均流量の関係

ら<sup>5)</sup>の研究を参考にし、透過散乱光測定方式の濁度計(笠原理化学工業株式会社製濁度計 TR-55)を使用した。

図-8 に着目すると、①～⑤番にかけて、濁度は、QK 単層>二層>QDL 単層という大小関係になり、図-6 の土粒子の排出量と通水時間の関係と類似した傾向になった。

### 3.5 土粒子の有効侵食率と平均流量の関係

図-9 に“有効侵食率”(=排出土砂の乾燥質量/供試体内の流出可能な土粒子の乾燥質量)と排水の平均流量の関係を示す。細粒分であるカオリンと DL クレーについては  $425\ \mu\text{m}$  メッシュを全通可能としており、ホスト珪砂についても  $425\ \mu\text{m}$  以下の土粒子については流出可能とした。そのため今回の通水実験において、いずれの通水ケースでも流出可能な土粒子の割合は供試体全体の  $24.2\%$  となっている。流出可能な土粒子の乾燥質量については、 $D_{rg} = 30\%$  では  $594\ \text{g}$ 、 $D_{rg} = 60\%$  では  $636\ \text{g}$  となっている。本研究では各通水ケースでの平均流量と排出された土砂の割合についてまとめた。同じ土層の配置の条件でも、平均流量が下がると有効侵食率も下がる傾向

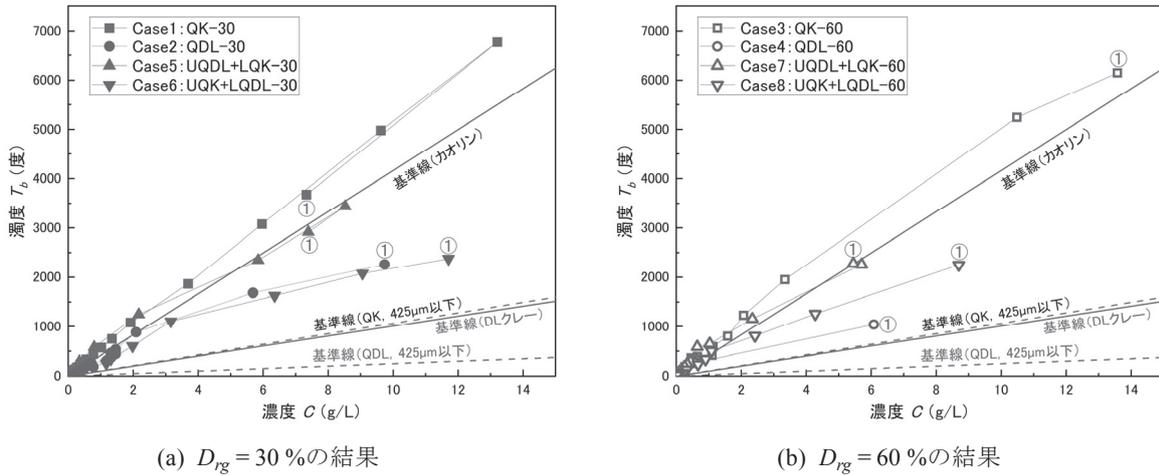


図-10 濁度と濃度の関係

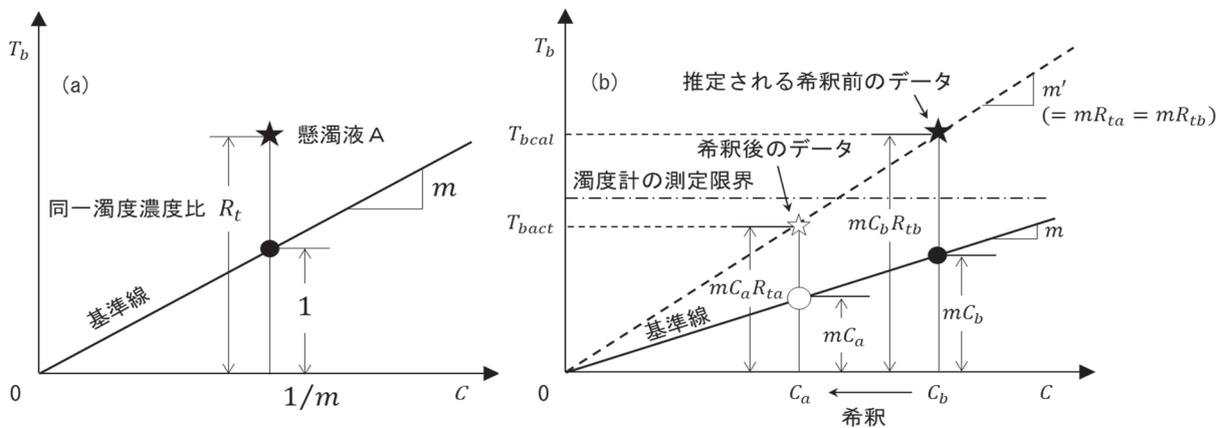


図-11 (a) 同一濁度濃度比の定義および (b) 排水濃度が濁度計の測定範囲を超えた時の $R_t$ と換算濁度  $T_{bcalt}$

にあることがみられた。また、QK と QDL では QK の方が有効侵食率は大きくなり、二層の通水結果における有効侵食率の値は QK と QDL の間に入ることが分かった。さらに、二層の結果でも、UQK+LQDL のケースの方が、有効侵食率が大きくなった。

### 3.6 濁度と濃度の関係

図-10 に濁度と濃度の関係を示す。通水開始直後の高濁度・高濃度の排水ほどグラフの右上にプロットされる。中には、Case1 や Case5 のように回収容器①番よりも②番の方が濁度・濃度ともに値が大きくなるケースもあった。また、図中には基準線を設けた。基準線は大きく分けて 2 タイプであり、1 つ目が本研究で使用した細粒分であるカオリンと DL クレーをそれぞれ水に溶かして懸濁液を作製し、その懸濁液の濁度を測定して基準線を作製した。直線を引くために細粒分の懸濁液に関しては濃度の異なる複数の懸濁液を用意し、濁度の測定を行った。2 つ目が QK と QDL の 425  $\mu\text{m}$  以下の土粒子を抽出して、それを水に溶かして懸濁液を作製し、細粒分の基準線と同様に濁度を測定して基準線を設けた。425  $\mu\text{m}$  以下の土粒子の抽出方法は、QK と QDL の乾燥試料を 425  $\mu\text{m}$  ふるいでふるい分けして、通過した分を回収し、水に溶か

して懸濁液を作製した。なお、細粒分の基準線と同様に、こちらも濃度の異なる複数の懸濁液を用意し基準線を引いた。図-10 に着目すると、いずれのケースも QK と QDL の基準線を上回っていることが分かる。透過散乱光測定方式の濁度測定においては、単位体積中の懸濁物の粒子比表面積が大きいくほど、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、懸濁物の粒径が小さいほど濁度は高く測定されることが知られている<sup>8)</sup>。つまり、全ての通水ケースで排出された土粒子の粒径は基準線を上回っていることから、浸透の過程では流出可能な土粒子の中でも特に粒径の小さい土粒子が排出されると考えられる。なお、流出した土粒子の粒度組成については、粒度試験の沈降分析に必要な量を確保できなかったため、正確な粒度組成までは把握できなかった。

各通水ケースでの違いをみる。まず、単層のみの通水結果に着目すると、基準線と同様に、QK 単層の通水ケースの方が、QDL 単層の通水ケースに比べ同一濃度でより高い濁度の値が計測された。これについてはカオリンの粒径が DL クレーに比べて小さいことが影響していると考えられる。また、二層のみの通水結果に着目すると、Case5, 7 (上層部が QDL, 下層部が QK) の通水ケースの方が、それとは逆の Case6, 8 (上層部が QK, 下層部が

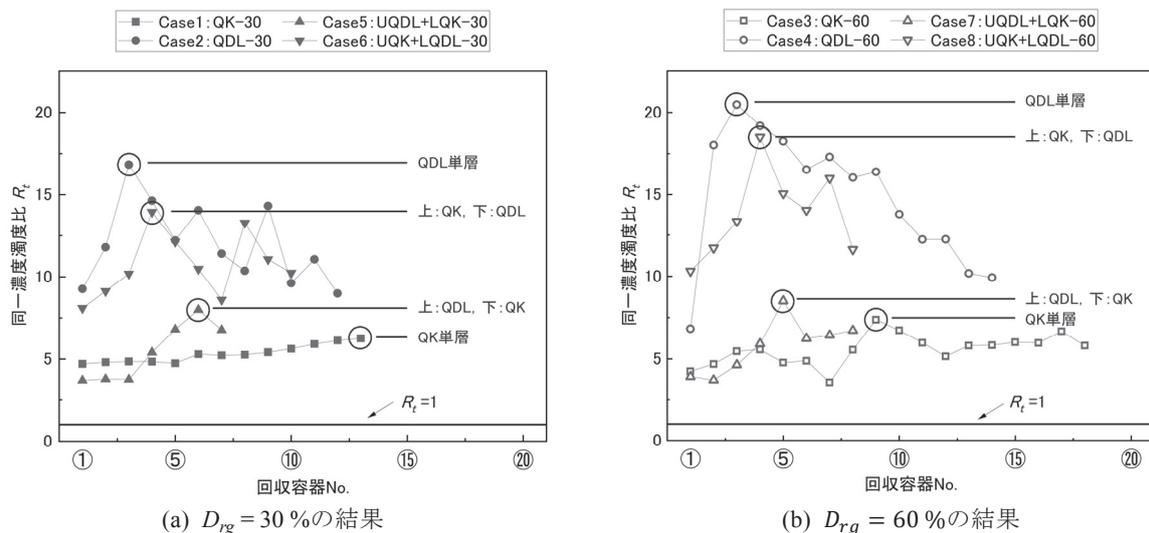


図-12 同一濃度濁度比の時間変化

QDL) の通水ケースよりも、同一濃度でより高い濁度の値が計測された。下層部が QK の通水ケースの方が濁度の値が大きくなったことから、排水の濁度はカラム通水容器の排出口に近い下層部の土の種類によって大きく変わることが分かった。比較的高い濁度の値が計測された QK 単層と、上層部が QDL、下層部が QK の通水ケースを比較すると、QK 単層の方が濁度の値が高くなった。それに対して、QDL 単層と、上層部が QK、下層部が QDL の通水ケースでは、濁度の値に大きな差は生じなかった。骨格間隙比の違いの影響について着目すると、骨格間隙比の違いが濁度と濃度の傾きに大きく影響しないことが分かった。しかし、同じ土層の配置でも  $D_{rg} = 30\%$  の方が濁度の値が高くなったことから、土中の間隙の大きさは濁度の値に影響することが分かった。このことについては、間隙が大きい通水ケースの方が流量も大きくなり、細粒分が抜けやすくなった結果、 $D_{rg} = 30\%$  の通水ケースの方が濁度の値が高くなったと考えられる。

### 3.7 同一濃度濁度比の時間変化

図-11 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。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。 $R_t = 1$  を基準とし、排水の  $R_t$  の値が高いほど、排水中には細かい土粒子が多く存在していると考えられる。また、実験過程において、濁度計の測定限界値 (1,100 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、懸濁液を希釈した状態で濁度測定を行った。1 回の加水量は懸濁液の色味から判断し、今回の一連の実験では希釈後の水の容積は最大で 1.8 L 程度だった。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。

$$T_{bcal} = \frac{T_{bact}}{C_a} \times C_b \quad (7)$$

ここで、 $T_{bact}$  は希釈後の濁度、 $C_a$  は希釈後の濃度、 $C_b$  は希釈前の濃度である。図-12 に  $R_t$  の時間変化を示す。 $R_t$  の算出に使用した基準線は、ここに、QK 単層と下層部が QK の二層の  $R_t$  の算出には QK の基準線を、QDL 単層と下層部が QDL の二層の  $R_t$  の算出には QDL の基準線を採用した。図-12 をみると、全ての通水ケースで  $R_t > 1$  になっていることから、実際に排出された土粒子の粒度組成は、流出可能な  $425 \mu\text{m}$  以下の土粒子の中でもより小さい粒径の細粒分が排出されたと考えられる。また、 $D_{rg} = 30\%$  と  $60\%$  の双方で、QDL 単層と下層部が QDL の二層の  $R_t$  が比較的大きいことから、土試料の作製に使用した細粒分の粒径が比較的大きいほど、通水にて、より小さい粒径の土粒子が排出されると考えられる。さらに、骨格相対密度の違いについて着目すると、同じ土層の配置では  $D_{rg} = 60\%$  の方が  $R_t$  の最大値が高くなったことから、より密な供試体ほど、流出可能な土粒子の内、特に粒径の小さい土粒子のみが排出されやすくなると考えられる。

次に、各ケースにおける同一濃度濁度比の最大値に着目し、最大値の大小関係と最大値が現れるタイミングについて検討した。 $D_{rg} = 30\%$  と  $D_{rg} = 60\%$  の両方の条件で、 $R_t$  の最大値の大小関係は、QDL 単層  $>$  UQK + LQDL  $>$  UQDL + LQK  $>$  QK 単層となった。また、 $R_t$  の最大値が現れるタイミングについては、QDL 単層  $\rightarrow$  UQK +

LQDL→UQDL+LQK→QK 単層の順番になった。このことから、図-5の排水の流量の時間変化や、図-8の排水の濁度の時間変化などと同様に、 $R_t$ の大小関係や最大値が現われるタイミングについても、二層地盤の結果は単層地盤の間に来ることが分かった。

#### 4. 結論

本研究では、円筒型カラム通水容器内に、単層または二層の地盤を再現し、それぞれの試験条件に伴う細粒分の排出挙動について検討した。本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 排水の流量の時間変化は、骨格相対密度の違いによって大きく異なることが分かった。しかし、二層の通水ケースのみに着目すると、上下の土層を互いに入れ替えても流量に大きな差は生じなかった。
- (2) 土粒子の排出量は、通水開始直後に流出可能な土粒子の大半が流出することが分かった。途中の回収容器番号②番から④番もしくは⑦番にかけては、土粒子の排出量の大小関係は、QK 単層>二層>QDL 単層になり、最終的な累加排出量の大小関係については、QK 単層>UQK+LQDL>UQDL+LQK>QDL 単層という結果になった。
- (3) 濁度の時間変化は、土粒子の排出量の時間変化と類似する傾向があり、回収容器①番～⑤番にかけては、QK 単層>二層>QDL 単層という結果になった。
- (4) 有効侵食率は、最大でも 0.73 %であったことから、実際に流出する細粒分の量は流出可能な土粒子に対して非常に小さく、骨格相対密度の影響などを受けて排水の流量が下がると有効侵食率も低下することが分かった。有効侵食率の大小関係は土粒子の排出量と通水時間の関係と類似した。
- (5) 濁度と濃度の関係において、排水中の土粒子は流出可能な粒径の中でも特に粒径の小さいもので構成されている可能性あることが示された。また、QK 単層もしくは下層部が QK の二層の通水ケースが同一濃度でより高い濁度値が計測され、濁度の値は排出口に近い下層部の土の種類に影響を受けることが分かった。さらに、骨格相対密度の違いは濁度と濃度のそれぞれの最大値に影響することが示唆された。
- (6) 同一濃度濁度比の変化については、QDL 単層および下層部が QDL の二層のケースの方が、同一濃度濁度比が高くなる傾向にあることが分かった。さらに、骨格間隙比の違いによって同一濃度濁度比の最大値が変わることが示され、より密な供試体の条件では最大値が大きくなった。また、同じ骨格相対密度の条件下では、二層地盤の濁度の時間変化の仕方や同一濃度濁度比の大小関係については、土粒子の排出量と

同様に、二つの単層地盤の結果に挟まれるような関係にあることが分かった。

以上の結果から、本研究における単層地盤と二層地盤の細粒分の排出挙動として、二層地盤の通水ケースにおける土粒子の排出量や排水の濁度は、二層地盤を構成している 2 種類の土それぞれの単層の通水実験で得られた排出量や濁度値の間に来ることが分かった。また、二層地盤のみの結果に着目すると、上下の土層の入れ替えは排水の流量に影響しなくても、土粒子そのものが関連する排出量や濁度などのパラメータに影響を与えることが分かった。

本研究では、いずれの通水ケースでも細粒分含有率は 5 %と定めていた。その他にも動水勾配についても一定とした。カラム通水装置の上部タンクの高さを変動させ、動水勾配を変化させれば排出挙動が変わる可能性がある。今後は、供試体の細粒分含有率と動水勾配の影響について検討していく所存である。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) Ke, L., 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) Prasomsri, J., 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.
- 4) Zhang, L., Peng, M., Chang, D., Xu, Y., : *Dam Failure Mechanisms and Risk Assessment*, p.476, 2016.
- 5) 石丸太一, 鈴木素之, 高野翔太: 濁度を利用した細粒分流出実験における移動土粒子の粒度組成とその時間変化, *地盤工学ジャーナル*, Vol.17, No.1, pp.47-60, 2022.
- 6) 大嶺聖, 落合英俊: 土構造に着目した混合土の一次元圧縮特性, *土木学会論文集*, No.457, III-21, pp.127-136, 1992.
- 7) 横瀬広司, 吉良八郎: 粘性土と粗粒度の混合材料の工学的特性について, *香川大学農学部学術報告報告書*, 第 17 巻, 第 2 号, p.158, 1966.
- 8) 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.

(2022 年 6 月 13 日 受付)

