

排水の濁りに着目した動水勾配変動下における 細粒分流出挙動の時間変化

石丸太一*・鈴木素之*・高野翔太*・小森朝陽*

*山口大学大学院創成科学研究科

1 はじめに

近年多発する豪雨や大地震により盛土構造物に関する被害が多数報告されている。なかでも、貯水を目的としたため池堤体や河川堤防の内部では、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。内部侵食の一種で、細粒分流出 (Suffusion) といわれる地盤中の細粒分の移動は土の透水性や密度を変化させることから、盛土構造物において細粒分流出の挙動やメカニズムの解明が待たれている。既往の研究により細粒分流出は土粒子の移動と目詰まりを繰り返しながら徐々に進行することが指摘されている¹⁾。本研究では、水位変動下の河川堤防やため池堤体のように動水勾配が時間的に変化する場合を想定した細粒分流出実験を実施し、動水勾配の変化によって、土粒子の侵食量や流出する土粒子径がどのように変化するかを調べた。

2 使用した土試料

図1に使用した土試料の粒径加積曲線を示す。粒径が異なる複数の珪砂を混合した混合珪砂 (Q) および珪砂4号 (Q4) に対して所定の割合でカオリンを混合した土試料を使用した。QK5は混合珪砂にカオリンを5%加えた土試料で、実際にため池堤体土として使用されている宇部まさ土の粒径加積曲線に似るように配合した。GG10は珪砂4号にカオリンを10%加えた土試料である。GG10のようなギャップのある土 (Gap-graded soil) は一般的に内部侵食が発生しやすいとされている。

3 実験装置と実験方法

図2に本実験で使用したカラム通水実験装置を示す。供試体寸法は直径100mm、高さ200mmの円筒型である。最適含水比に調整した土試料を、所定の密度になるように5層に分けて1層ずつ突き固めて、供試体を作製した。通水開始前に供試体内部を二酸化炭素で置換し、脱気水を24時間浸透させることで、飽和度を92%以上にした。供試体下部には425 μ mのメッシュと5mmの孔が109個空いたア

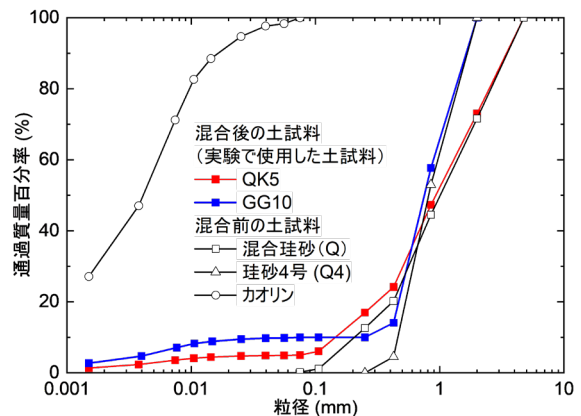


図1 使用した土試料の粒径加積曲線

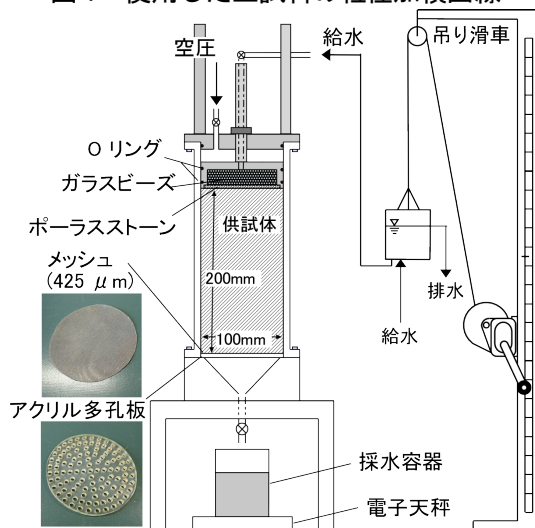


図2 カラム通水実験装置

表 1 実験条件

	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
土試料	QK5	QK5	QK5	GG10	GG10
初期間隙比 e_0	0.85	0.85	0.85	0.66	0.66
限界動水勾配 i_c	0.89	0.89	0.89	0.99	0.99
初期動水勾配 i_0	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0
動水勾配の変動パターン	1.0 \leftrightarrow 1.5	1.0 \leftrightarrow 0.5	0.5 \leftrightarrow 1.0	1.0 \leftrightarrow 1.5	1.0 \leftrightarrow 1.5
変動回数 (回)	6	7	6	6	30

リル多孔版を設置し、それ以上の径の土粒子が流出しないようにした。載荷板上部に空圧を与えることで上載圧を付与できる機構を有している。本実験では、載荷板と供試体上面を密着させるために一律 10kPa の上載圧を与えた。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 1 に本実験の実験条件を示す。Case1~Case4 までは、動水勾配の上昇下降を 6 回もしくは 7 回繰り返した。Case5 では、動水勾配の上昇下降を 30 回繰り返した。動水勾配を変動させる直前に、採水容器を交換しながら、排水をすべて回収した。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、全ケースにおいて、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。

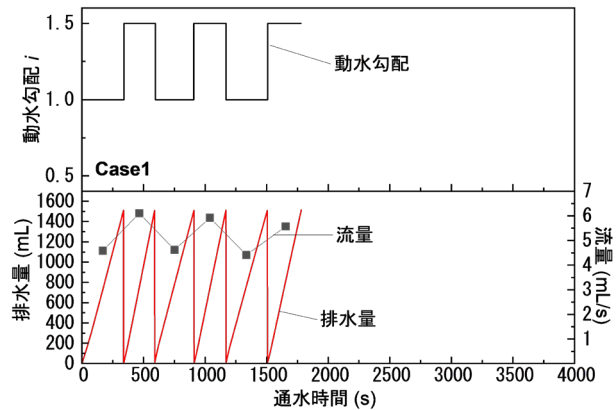


図 3 動水勾配, 排水量, 流量の関係 (Case1)

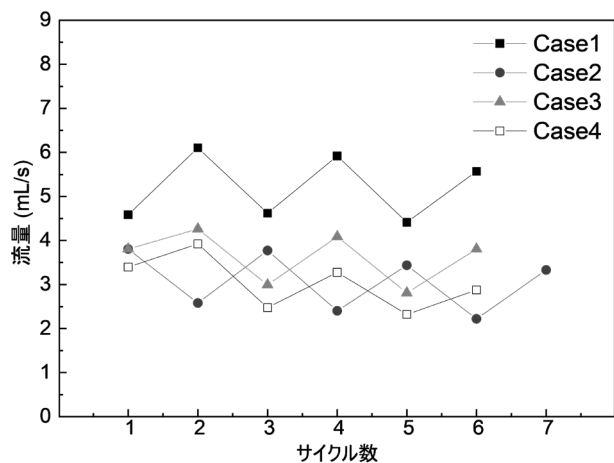


図 4 サイクルごとの流量の変化 (Case1~Case4)

4 実験結果

図 3 に Case1 の動水勾配と排水量および流量の時間変化の一例を示す。排水量は、サイクル毎の累積値を示しており、採水容器を交換する度に排水量はゼロからの累積値となっていることに留意されたい。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、流量も変動していることが分かる。図 4 に Case1~Case4 におけるサイクルごとの流量の変化を示す。動水勾配を繰返し変動させるにつれて、同じ動水勾配でも流量が小さくなる傾向がすべてのケースでみられた。細粒分の移動によって目詰まりが発生し、透水性が低くなったと考えられる。図 5 に Case5 の動水勾配と排水量および流量の時間変化を示す。Case1~Case4 と同様に、動水勾配を繰返し変動させるにつれて、同じ動水勾配でも流量が小さくなる傾向が

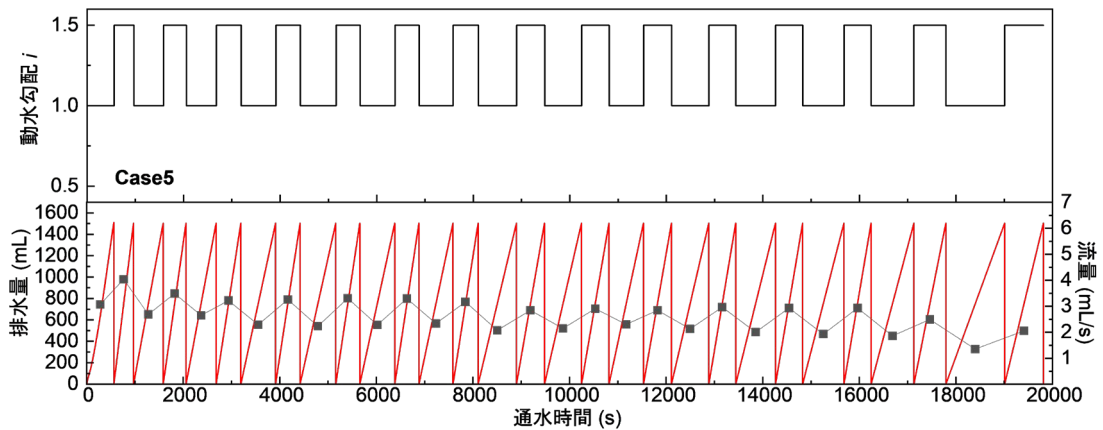


図5 動水勾配, 排水量, 流量の関係 (Case5)

みられた。図6にCase5における流量の変動が分かりやすいようにスケールを調整したグラフを示す。流量が低下した後、安定し、動水勾配の変動をしばらく与えると再び流量が低下するという傾向が繰り返し発生した。また、ひとたび流量が低下すると、数サイクルに渡って低下し続けていることが分かる。動水勾配の変動を受けた土内部では、細粒分の移動による間隙構造の変化が発生していると考えられる。透水性の変化をもたらす比較的大きな間隙構造の変化は、何らかのきっかけで発生した後、連鎖的に発生するものと考えられる。

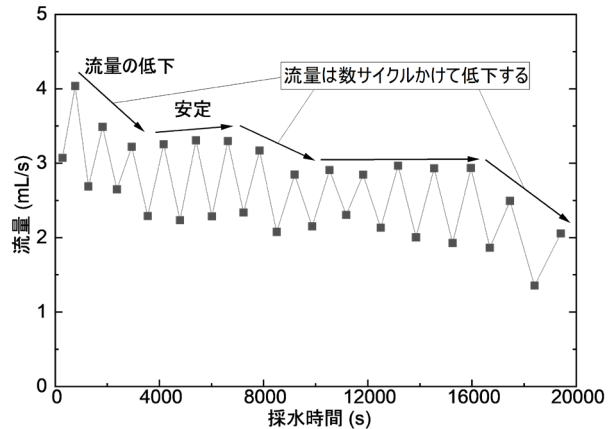


図6 流量の変化 (Case5)

図7に採水容器毎の土粒子排出量を示す。Case5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8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。図8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と比較すると、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、排水の濁度は動水勾配の変動による影響を確実に受けているといえる。

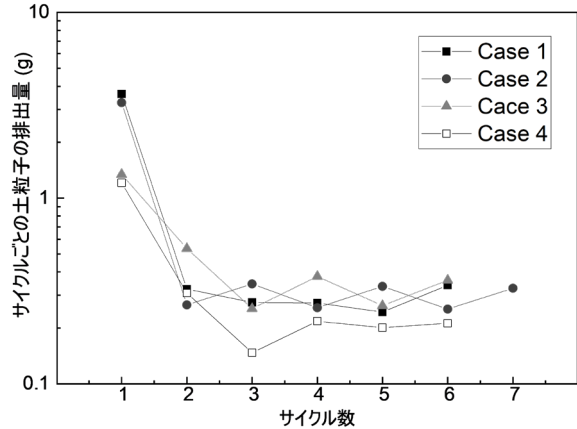


図7 サイクルごとの土粒子の排出量

図9に排水の濃度と濁度の関係を示す。図10は、図9の低濃度領域を拡大したグラフである。図には、カオリンおよびQK5の流出可能成分(425μm以下の土粒子)を用いて作製した懸濁液の濃度と濁度の関係を併せて示している。通

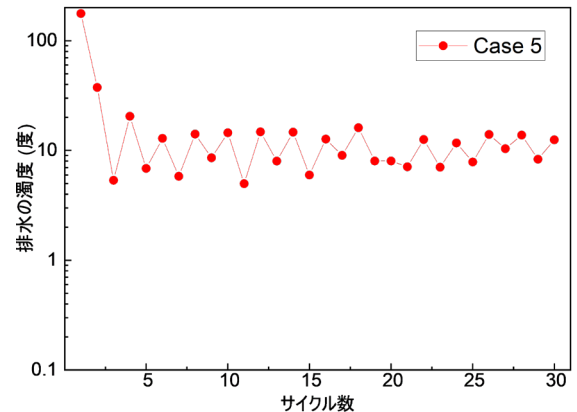


図8 サイクルごとの排水の濁度 (Case5)

水開始直後は、排水の濃度、濁度ともに高く、グラフの右上にデータがプロットされる。その後、濃度と濁度は小さくなり、左下の領域にデータがプロットされる。濁度は、濃度が同じでも懸濁物質の粒径が小さい方が高い値を示すことが分かっている²⁾。したがって、浸透力を与え始めた最初の方は、土試料中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、供試体に初めて浸透力を与えた段階で、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。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 サイクル目の濃度と濁度の関係もカオリンの基準線上にデータがプロットされた。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と推測される。

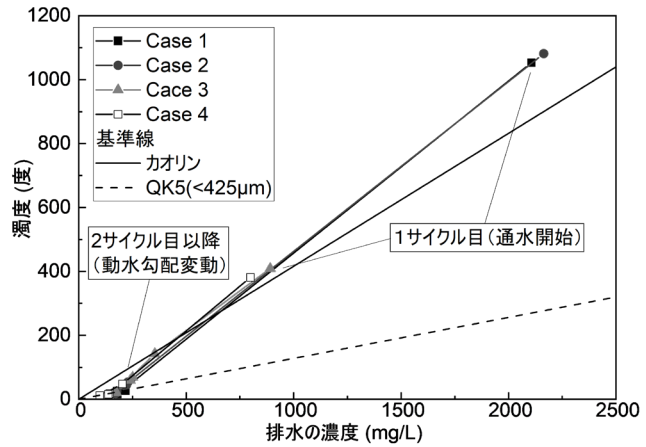


図9 排水の濃度と濁度の関係

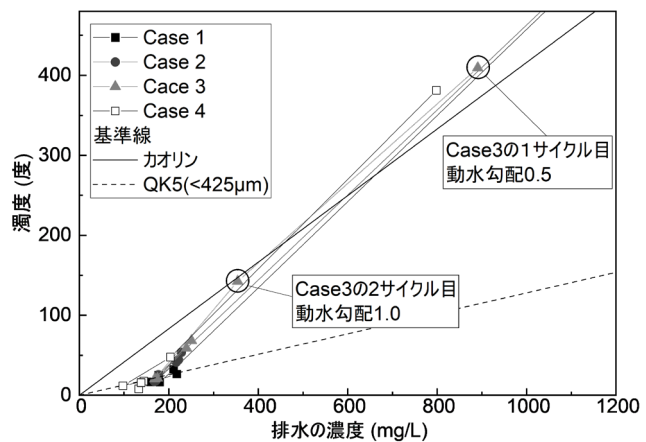


図10 排水の濃度と濁度の関係（濃度 1200mg/L 以下の領域の拡大）

5 おわりに

カラム通水実験を実施し、動水勾配が変動する条件下における細粒分流出の進行を調べた。以下に得られた結果を要約する。1) 動水勾配が繰返し変動することで、流量が徐々に低下した。また、流量は低下と安定を繰り返していることが分かった。2) 動水勾配が繰返し変動することで、土粒子の排出量の増減を繰り返しながら、細粒分流出が継続していることが分かった。3) 供試体に初めて浸透力を与えた段階で、粒径が小さく流れやすい土粒子は既に抜けており、動水勾配変動下で流出する土粒子は、流出可能成分の中でも比較的径が大きい土粒子であると推測された。

謝辞 本研究は、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）ならびに JSPS 科研費特別研究員奨励費（JP21J14582, 石丸太一）により実施したものである。ここに記して関係各位に深く感謝の意を表す次第である。

参考文献 1) 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. 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*, No.698, II-58, pp.93-98, 2002.