

## 流出土粒子径に着目した上載圧載荷がサフュージョンの進行に与える影響

山口大学大学院博士後期課程 学生会員 ○石丸 太一  
 山口大学大学院創成科学研究科 正会員 鈴木 素之  
 山口大学大学院博士前期課程 学生会員 高野 翔太

## 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、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移動・流出する現象—サフュージョン (Suffusion) 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。これより、サフュージョンが継続すれば、盛土構造物の安定性が経年的に失われていく。しかし、サフュージョン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、上載圧の大きさが異なる条件下において、細粒分の流出を伴う2種類の下向き通水実験を実施した。排水の流量や濁度、排出土の質量を経時的に測定し、サフュージョンの進行性・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。なお、排出する僅少な土粒子に対して粒径の連続的な分析を行うために、排水の濁度測定から排出土の粒度を推定する手法を用いた。

## 2. 使用した土試料

図1, 表1にそれぞれ今回の実験で使用した土試料の粒径加積曲線, 物理特性を示す。本研究では、混合珪砂(宇部珪砂1号, 3号, 三河珪砂4~7号の混合砂)とカオリンを95:5で混合し、細粒分含有率が5.0%の珪砂-カオリン混合砂(QK)を再構成した。なお、三河珪砂7号には細粒分が含まれていたため、あらかじめ75 $\mu\text{m}$ ふるい上で水洗いし、炉乾燥させたものを使用した。本粒度は、ため池の堤体土として使用される宇部まさ土に近くなるように調整した。下に凸の粒度分布(upwardly concave distribution)は内部侵食に対して不安定になりやすく<sup>2)</sup>、本粒度はKenney et al.<sup>3)</sup>の提唱する内部安定指標によって内部不安定と判定された。

## 3. 実験装置と実験方法

## 3.1 実験装置

図2に実験装置の模式図を示す。供試体は、寸法が直径10cm, 高さ20cmの円筒形である。供試体上部には、ガラスビーズによる透水性の高い層を設け、水の流れが均一に拡散するようにした。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425 $\mu\text{m}$ 径のメッシュを設置し、メッシュ径以下の土粒子が水とともに流出可能である。

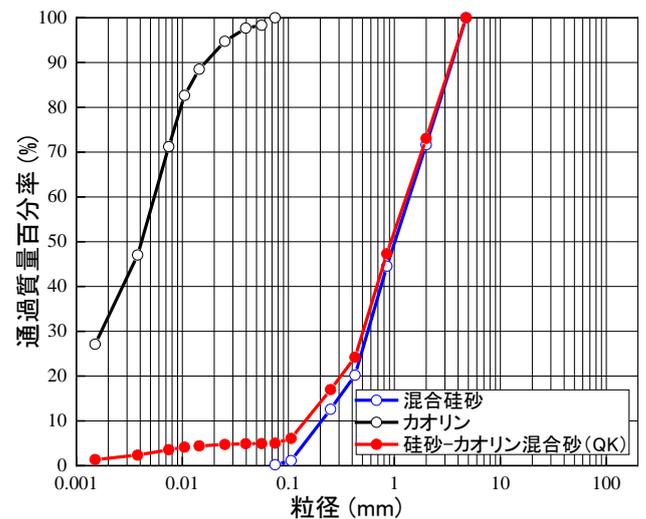


図1 本研究で使用した土試料の粒径加積曲線

表1 本研究で使用した土試料の物理特性

試料名	混合珪砂	カオリン
土粒子の密度 $\rho_s$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.650	2.675
細粒分含有率 $F_c$ (%)	0	100
最大間隙比 $e_{max}$	0.901	—
最小間隙比 $e_{min}$	0.512	—

キーワード 内部侵食, 浸透流, 盛土構造物

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

### 3. 2 実験方法・手順

含水比を 10% に調整した土試料を目標間隙比になるように突き固めて供試体を作製した。試験前に上下逆にした供試体の下部(供試体上面)から  $\text{CO}_2$  を供試体を送り込んだ後、脱気水を少しずつ浸水させることで飽和度が 95% 以上となった。この過程では、供試体の上下を逆にし、ポーラスストーン側の面から上向きに通水することで、メッシュ側の面から土粒子が漏出しないように留意した。供試体を元の向きに戻した後、載荷板上部の空間に空圧を与えることで、所定の上載圧を付与することができる。本実験では、上載圧を 100kPa かけて一次元圧密をした後、上載圧を完全に除荷したケース(QK-0kPa)と上載圧を 100kPa のまま維持したケース(QK-100kPa)の2つの条件で通水実験を実施した。なお、圧密後の供試体の間隙比 $e$ は、QK-0kPa が 0.526, QK100kPa が 0.522 となり、ともに近い値となった。

通水実験は、上面側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実験を連続して実施した。定水位通水実験では、上部タンクの水位を越流によって一定に保つことで一定の動水勾配 1.125 で供試体に鉛直下向きの浸透流を与えた。通水量は全体で 2000ml とし、約 100ml ずつ 20 回分をビーカーで採水し、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その都度測定した。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。その後、水の供給を止めてから 30 分間隔で供試体上面に 500ml の水を 9 回供給した。給排水繰返し通水実験終了後、供試体を高さ方向に 6 分割し、中央部分と側壁近くから試料を採集した。採集した試料は、75 $\mu\text{m}$  のふるいの上で水洗いし、ふるい残留分を炉乾燥した後、質量を測定し、細粒分含有率 $F_c$ を算出した。

## 4. 実験結果と考察

### 4. 1 土粒子の排出状況

図 3 に定水位通水実験における流量の経時変化および定水位通水過程、給排水繰返し通水過程の両過程におけるビーカー毎の累加土粒子排出量を示す。QK-0kPa, QK-100kPa の流量はおおむね同程度であった。また、どちらのケースにおいても、通水初期段階で僅かな流量の増加がみられた。土粒子の流出に伴って、透水性が増加したと考えられる。定水位通水過程における累加土粒子排出量を見ると、上載圧の有無に関わらず、ビーカーNo.10(通水量 1000ml)程度で土粒子の排出がほとんどなくなった。しかし、給排水繰返し通水過程に移行すると、土粒子が再び排出し始めた。定水位通水過程では、QK-100kPa の方が、QK-0kPa よりも総排出量が僅かに多かったが、給排水繰返し通水過程では、ビーカーNo.22 以降の土粒子排出量に大きく差が出始め、QK-

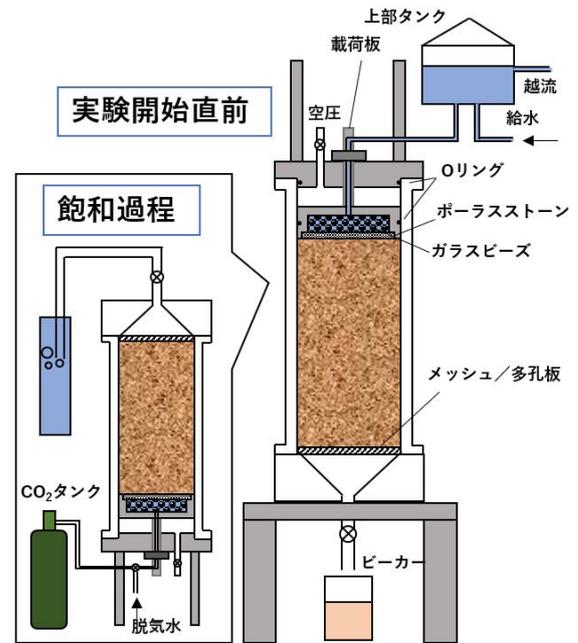


図 2 円筒カラム通水装置の模式図

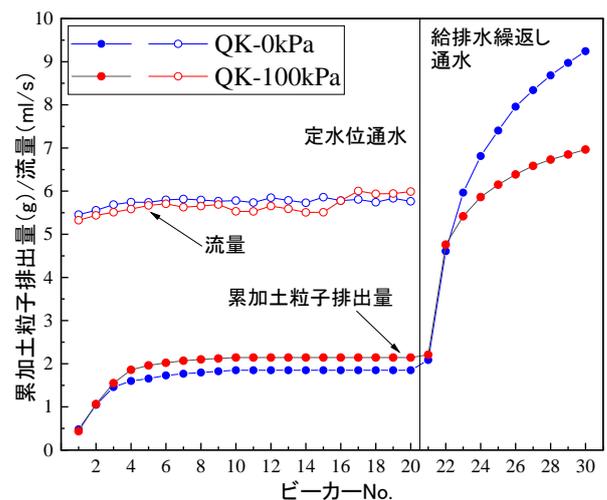


図 3 定水位通水過程における流量の経時変化と全過程におけるビーカー毎の累加土粒子排出量

0kPa の排出量の方が多くなった。

#### 4. 2 濁度測定による排出土粒子径の分析

サフュージョン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<sup>4)</sup>を利用して排出土粒子の粒度の経時変化を調べた。

図4にカオリンおよびQKの425 $\mu\text{m}$ 径ふるい通過分を使用して作製した濃度が異なる懸濁液の濁度測定結果を示す。懸濁土粒子の種類が同じとき、懸濁液の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。ここで、各近似線を基準線と呼ぶこととする。図4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 $R_t$ 」と定義した。この同一濃度濁度比が大きいほど基準となる試料よりも小さい粒径の配分が多いことを意味する。

図5に定水位通水過程、給排水繰返し通水過程の両過程におけるビーカー毎の $R_t$ の変化を示す。QKの425 $\mu\text{m}$ 径ふるい通過分を使用した懸濁液の濃度と濁度の関係を基準線として選択した。QKの425 $\mu\text{m}$ 径ふるい通過分は本実験でカラムから流出可能な土粒子であり、仮に供試体からそれら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。しかし、ビーカーNo.1からNo.5までは $R_t$ が3.5~6.0と1よりも高い値となり、流出可能な土粒子の中から粒径が小さな土粒子が優先的に流出したことが分かる。また、両ケースともビーカーNo.6以降、 $R_t$ が小さくなった。それは粒径の大きな土粒子が時間差で排出してくるからであると考えられる。なお、ビーカーNo.11以降は土粒子の排出量が計測できなかったため、 $R_t$ を算出することができなかった。

給排水繰返し通水過程における $R_t$ は上載圧による違いが顕著に現れた。QK-100kPaでは、給排水を繰り返すにつれて $R_t$ が大きくなり、排出土粒子径が小さくなっていくことが分かる。上載圧により粒子間に作用する応力が、流出可能な土粒子の中でも比較的大きな粒径の土粒子に作用し、それらを拘束するために、粒径が小さい土粒子が排出されたと考えられる。一方で、QK-0kPaでは、給排水を繰り返すにつれて $R_t$ が小さくなり、比較的大きな粒径の土粒子を多く含んでいることが分かる。粒子間に作用する応力が小さいために、水の流れによるせん断力によって、土粒子が骨格から剥離しやすい状態であったため、比較的大きな粒径の土粒子も流出したと考えられる。

#### 4. 3 実験終了後の供試体の状況

図6にそれぞれ供試体中央および側壁付近における $F_c$ の供試体高さ方向分布を示す。QK-0kPaでは、側壁近くの $F_c$ が中央部分よりも減少した。一方、QK-100kPaでは、供試体中央部分と側壁近くで $F_c$ に大きな差はなかった。カラム実験において剛壁との境界は土粒子が移動しやすいことが分かっている<sup>5)</sup>が、上載圧の载荷に伴う側圧の増加によって、側壁付近の土粒子の移動を抑制したと考えられる。図6の(c)は中央部分と側壁

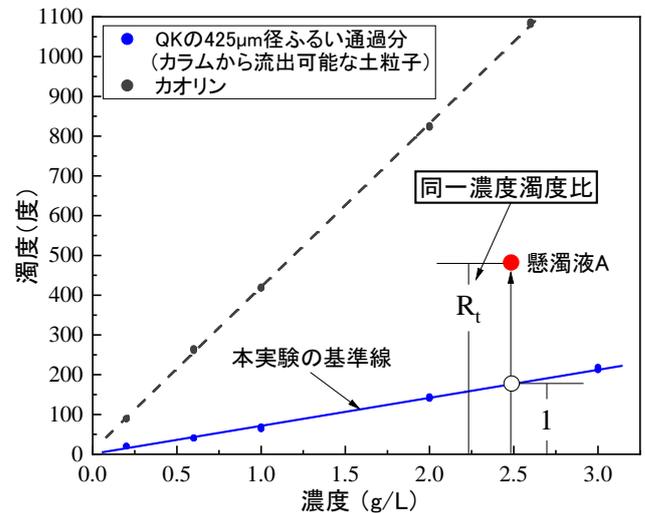


図4 懸濁液の濃度と濁度の関係

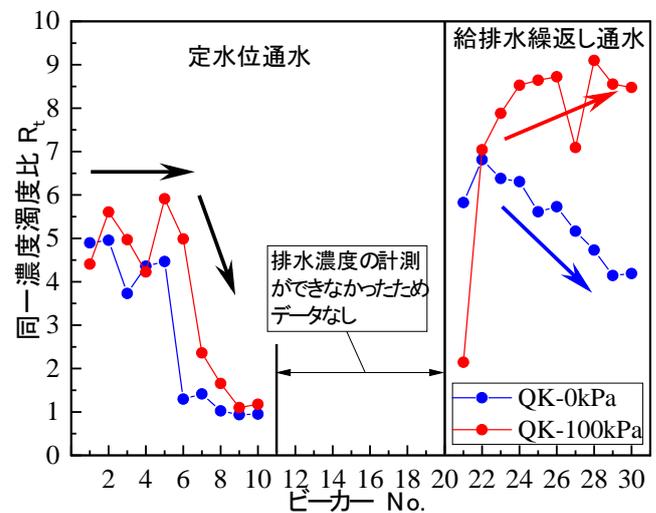


図5 ビーカー毎の同一濃度濁度比の変化

付近の平均 $F_c$ の分布を示している。どちらのケースも供試体の上部から下部にかけて、細粒分含有率が大きくなる分布となった。また、供試体の下部の方では、初期の細粒分含有率5.0%よりも大きくなった。上層から下層に向かって細粒分が移動していることが分かる。また、QK-0kPaの方がQK-100kPaよりも供試体下部への細粒分の移動が多い。このことから、上載圧がある場合、土粒子の移動が抑制されていることが分かった。

## 5. おわりに

本研究では、応力状態が異なる条件下において、細粒分の流出を伴う下向き通水実験を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 定水位通水過程で土粒子の排出が止まっても、給排水繰返し通水過程に移行すると土粒子が再び排出し始めた。
- 2) 定水位通水過程において、上載圧がない場合は上載圧がある場合よりもわずかに土粒子の排出量が少なかった。
- 3) 給排水繰返し通水過程において、上載圧がない場合は上載圧がある場合よりも土粒子が多く排出した。
- 4) 定水位通水過程初期や給排水繰返し通水過程時における排水の同一濃度濁度比 $R_t$ は1よりも高い値を示し、メッシュ径以下の流出可能土粒子の中から、粒径が小さな土粒子が優先的に排出していることが分かった。
- 5) 給排水繰返し通水過程における同一濃度濁度比 $R_t$ の経時変化は、上載圧がある場合は増加傾向であるのに対して、上載圧がない場合は減少傾向であった。上載圧による粒子間応力の伝達の違いによって、拘束される土粒子径の範囲が変わるからであると考えられる。また、これが3)の結果と関連していると考えられる。
- 6) 実験終了後の供試体各部における細粒分含有率を調査した結果、上載圧の有無に関わらず、細粒分含有率が供試体の上部から下部にかけて大きくなる分布となった。ただし、上載圧がある場合は、上載圧がない場合に比べて供試体内部の細粒分移動が抑制された。また、上載圧がない場合は、供試体中央部分に比べて、側壁付近での細粒分の移動が卓越していた。

**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) 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. 2) Lafleur, J., Mlynarek, J., Rollin, A. L.: Filtration of broadly graded cohesionless soils, *Journal of Geomechanical Engineering*, Vol.115, No.12, pp.1747-1768, 1989. 3) Kenney, T. C., Lau, D: Internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 215-225, 1985. 4) 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，pp.93-98，2002. 5) Doan Nguyen, C., Benahmed, N., Andò, E., Sibille, L., Philippe, P.: Soil microstructural changes induced by suffusion: x-ray computed tomography characterization, *E3S Web of Conferences*, Vol.92, 2019.

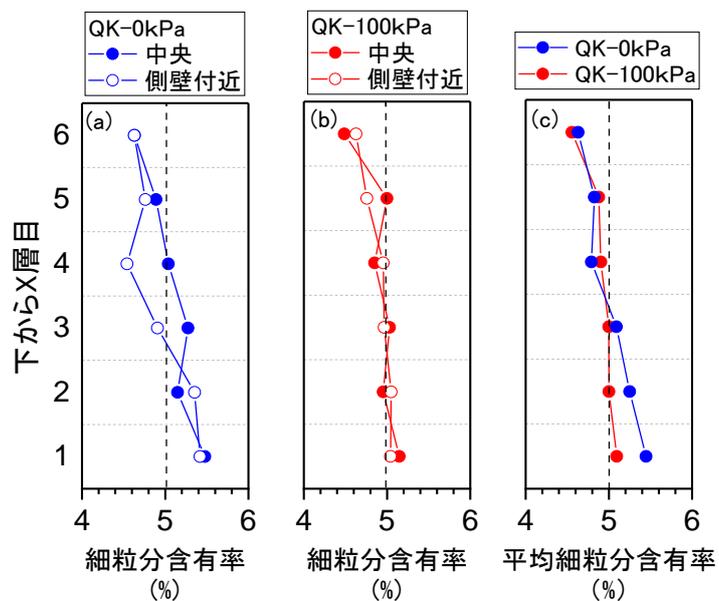


図6 通水実験終了後の供試体各部における細粒分含有率  
 ((a) QK-0kPaの中央部分と側壁付近, (b) QK-100kPaの中央部分と側壁付近, (c) 中央部分と側壁付近の平均細粒分含有率)