

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289153

研究課題名(和文) 細粒分の流出による土の微視的な構造変化とマクロな材料劣化メカニズムの解明

研究課題名(英文) Microstructural changes due to loss of fine particles and mechanism of induced macroscopic degradation of soils

研究代表者

肥後 陽介 (HIGO, Yosuke)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10444449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,600,000円

研究成果の概要(和文)：一連の透水試験と三軸圧縮試験を行い、X線CTを用いて内部侵食が起こる過程を可視化した。実験は、表層部と深部を模擬して2種類の拘束圧によって実施し、拘束圧が内部侵食に与える影響を検討した。さらに、セグメンテーションやモルフォロジー解析といったCT画像の画像解析を実施し、内部侵食の結果として供試体内に現れる間隙水のみを相を明確に可視化した。実験結果より、拘束圧が高いほど内部侵食に対する抵抗が大きくなることを明らかにした。また、モルフォロジー解析によって、内部侵食は不均一に発生し、結果として水みちが形成されることを明らかにした。さらに、内部侵食によって供試体の強度特性が劣化することが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, a series of permeability tests and triaxial compression tests were conducted using x-ray tomography in order to visualize the process of occurrence of internal erosion, in which the effect of confining pressure on internal erosion is investigated. Under two different confining pressures, considering soils located near surface and rather deep in ground, the specimens were tested. In addition, CT image analyses including segmentation and morphology analysis were carried out to clearly visualize the distribution of the pore water phase as a result of internal erosion. From the experimental results, it has been found that a rise in confining pressure strengthens the resistance of soils to internal erosion. Morphology analysis clarified the development of water pathway in the specimens due to non-homogeneous internal erosion. Furthermore, Macroscopic strength and stiffness of the soils degrade due to the internal erosion.

研究分野：地盤工学

キーワード：内部侵食 X線CT

1. 研究開始当初の背景

土の内部侵食は、ダムや堤防の浸透破壊や斜面崩壊の原因として広く知られてきた。土中の水の浸透によって細粒分が流される事によって間隙が大きくなり、結果的に強度及び剛性の低下として材料が劣化すると考えられている。また、近年増加の一途をたどる台風や豪雨による洪水時には、河川水位の上昇によって、内部侵食に起因したパイピングが多数発生している。パイピングは堤防決壊の主たる原因のひとつであり、パイピングによる堤防の劣化度合いを把握し、対策を実施することが課題となっている。

内部侵食は粗い土粒子の間に存在し、土骨格の応力伝達に大きく寄与しない細粒分において発生しやすい。このことから、細粒分と粗粒分の比など粒度分布を指標とした内部侵食に対する安定性が提案されている。また、動水勾配や流速との関係から、内部侵食のイニシエーションやパイピング破壊の条件が研究されている。一方、内部侵食による材料の劣化は、コーン貫入試験による強度変化の測定や三軸圧縮試験による限界状態線の移動によって解釈されている。

これらの研究では、粒径分布あるいは間隙比といった巨視的物理量によって内部侵食による材料劣化のメカニズムが議論されており、以下の点において十分とは言えない。

- 細粒分が流れ出し、侵食が進行していく微視的挙動を確かめた事例が無いため、内部侵食による骨格構造変化が明らかでない。
- 内部侵食による骨格構造変化が不明であるため、結果として現れる力学特性劣化の原因究明が十分になされていない。
- 既往の研究では明らかに粒度の異なる2種類の砂を混ぜた実験が多く、実際の土の内部侵食メカニズムは基本的に明らかでない。

2. 研究の目的

本研究では、透水時の細粒分の流出現象を微視的な観点から明らかにし、内部侵食による内部構造変化とマクロな土の材料劣化との関係を明らかにすることに着想し、以下の点について研究を行う。

A. マイクロ X 線 CT による細粒分流出挙動

の可視化と微視構造変化の定量的評価

供試体の浸透による細粒分流出過程をマイクロ X 線 CT を用いて可視化する。まずは、人工的に粗粒土と細粒土を配合した土を用いて、供試体内部での内部侵食の進展を観察する。

観察にとどまらず、さらに、CT 画像の画像解析によって、間隙比の変化を定量化し、内部侵食の分布を明らかにする。また、土の強度や剛性には粗粒土の骨格構造変化が顕著に影響すると考えられるため、粗粒土粒子の動きやすさの指標と考えられる粗粒土と空隙との接触面積の変化を定量化する。すな

わち、粗粒土の骨格を支えていた細粒土の減少を定量化することと等価である。以上より、密度変化と粗粒土の空隙接触面積の変化を材料の不安定化の指標とすると共に、それらの分布を明らかにする。

B. 三軸圧縮試験によるマクロな力学特性変化と微視構造変化の関係の解明

次に、細粒分が流出した土の巨視的な材料劣化を研究するため、浸透試験後の供試体で三軸圧縮試験を行う。浸透試験を行わない試験結果との比較から、供試体全体の平均としての強度、剛性、ひずみ軟化に与える細粒分流出の影響を明らかにする。さらに、透水試験で定量化した不安定化指標とマクロな力学特性の変化の関係を明らかにする。また、予めせん断力（軸差応力）を与えた供試体で透水実験を行う。この実験では、実際の堤防や MH 生産井で考えられるせん断力が働いた状態での細粒分流出による土の変形を明らかにする。

C. 堤防材料における細粒分流出挙動とそれによるマクロな力学特性変化の評価

さらに、堤防材料を用いた透水試験を実施し、実際の土で起こる細粒分の流出現象を明らかにする。また、どのような土で細粒分の流出が発生しやすいかを粒度調整した試料で検討する。

3. 研究の方法

A. マイクロ X 線 CT による細粒分流出挙動の可視化と微視構造変化の定量的評価

粗粒分と細粒分を配合した試料を用いた透水実験を行い、試料内部の侵食挙動をマイクロ X 線 CT で可視化する。この透水実験および後述する三軸試験は連続して行うため、X 線の減衰を減らすためアクリル製でかつ支柱の無い特別なセルを作成する。透水過程は浸透破壊に至る直前の状態までの間で数段階程度に分割し、各撮影段階では一度実験を停止し、X 線 CT で内部の状態を可視化する。これは、浸透破壊時は土の変形が高速に進むが、X 線 CT は 1 度のスキャンに数十分を要し、スキャン中に変形が生じて精度のよい画像取得が困難なためである。ただし、各撮影段階での内部の状態を比較することによって、断続的ではあるが、透水による細粒分の流出によって進行的に引き起こされる内部侵食挙動を可視化することができる。

CT 画像の画像解析によって、3 号珪砂相、8 号珪砂+間隙水の相、間隙水相、空気相に四値化する（セグメンテーション）。これにより、内部侵食による各相の密度変化を定量化し、その分布を評価する。実験結果から得ることのできる、流出した細粒分量、透水量の結果と CT 画像解析から得られる内部構造変化の比較から、以下の項目を議論し、内部侵食の進行的挙動を明らかにする。

- ・ 初期構造が内部侵食に与える影響(どの箇所侵食が発生しやすいか)
- ・ 内部侵食の進行過程(どのように侵食が進

展するか)

- ・ 内部侵食箇所分布(一様に侵食されるか、選択的に侵食されるか)

B. 三軸圧縮試験によるマクロな力学特性変化と微視構造変化の関係の解明

内部侵食後の供試体を用いて三軸圧縮試験を行い、内部侵食によるマクロな変形・強度特性の変化を評価する。実験条件は排水条件と非排水条件を設定する。三軸圧縮試験はひずみ制御で実施し、軸ひずみ数%程度おきに X 線 CT スキャンを実施し、三軸圧縮による内部構造変化を観察する。

透水試験を行わず内部侵食の無い供試体の三軸試験結果との比較を通して、内部侵食によるマクロな力学特性(変形特性、強度特性)の変化を評価する。なお、上下端面の摩擦は極力低減し、境界条件に起因するひずみの局所化による影響を弱め、内部侵食による材料劣化をより適切に評価できるようにする。

上記で得られた微視内部構造変化とマクロ力学挙動の変化との比較から微視的な構造変化とマクロな材料劣化の関係を明らかにする。三軸試験における供試体内部のひずみ分布を Digital Image Correlation (DIC) によって定量化する。そして、侵食分布と三軸試験におけるひずみの分布を比較し、侵食箇所とひずみの発生箇所の関連を明らかにする。

C. 堤防材料における細粒分流出挙動とそれによるマクロな力学特性変化の評価

堤防材料を用いた透水実験と三軸試験を実施し、実際の土での細粒分流出挙動を観察するとともにマクロな力学特性変化を評価する。手法は A, B と同様である。堤防砂は実際の堤防から取得した砂を締め固めて試料を作成する。

4. 研究成果

4. 1 透水試験時の細粒分流出挙動の可視化と強度特性変化

(1) 透水三軸試験の実験手順

本実験は Ke and Takahashi¹⁾の透水三軸試験と同様の手法で実施した。珪砂 3 号と 8 号を体積比 7 : 3 で混ぜ合わせた試料を用いた。図 1 に粒径加積曲線を示す。供試体は、 $\phi 35 \times h 70$ (mm)、相対密度 30 % となるよう湿潤突き固め法で作成した。供試体上面にろ紙を被せ、さらにその上にポーラスストーンを設置した。供試体下部には、珪砂 8 号のみ通過できる穴径 1mm の有孔盤を設置した。供試体上部とビューレットをつなぎ、水頭差をつけ、レーザー変位計を用いて水頭差を計測した。浸透流が層流であると仮定し、Darcy 則より動水勾配を算出した。透水三軸試験に関して動水勾配を 1, 2, 4, 8, とそれぞれ 10 分透水させ段階的に変化させ、12 で 30 分透水し

た後透水を一時中断し CT 撮影、さらに 30 分、60 分透水させ同様に撮影を行った。

透水後、排水三軸試験を行った。軸ひずみ 2%, 4%, 6%, 8%, 12%, 16%, 20% でそれぞれ CT 撮影を行った。透水無の供試体を同条件で排水三軸試験し、比較対象とした。CT 撮影に用いた装置は KYOTO-GEO μ XCT (TOSCANER-32250 μ HDK) であり、CT 画像の画素サイズは、 $37 \times 37 \times 41 \mu\text{m}$ である。

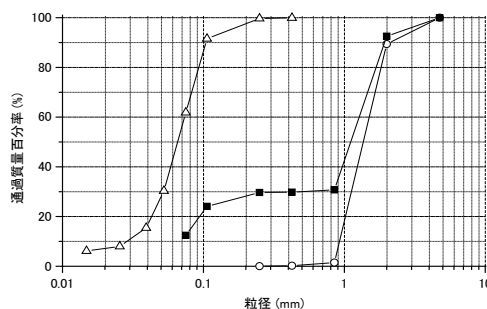


図 1 粒径加積曲線

(2) CT 画像取得方法

取得した CT 画像より、珪砂 3 号、水、珪砂 8 号+水、の 3 相割合を定量化するセグメンテーションを行った。珪砂 8 号は粒径が細かく個々の粒子の分離が困難であるため、8 号と水が混ざった相を一つの相として解析した。さらに Morphology 解析により、水相のみを抽出し、Erosion 処理することで細かい間隙水を除き、大きな間隙水に着目する解析を行った。

(3) 実験結果

動水勾配 12 で計 120 分透水させた。時間-透水係数関係を図 2 に示す。時間の経過と共に透水係数が徐々に増加し、透水開始から約 105 分後、一気に 0.0035 (cm/sec) あたりまで透水係数が上昇している。この瞬間に大量の出砂を確認しており、浸透破壊したと考えられる。

(3) 三軸試験結果

図 3 に試験の結果得られた応力ひずみ関係を示す。随所にみられる応力低下は、X 線 CT 撮影中に荷重を一時停止することで生じた応力緩和現象が原因である。両ケース共、終始軸差応力が増加しており、ピーク応力 560 (kPa) に向けて収束していくことが分かる。ここで透水有供試体の方が応力が低く、次第に透水無と同等の応力まで上昇することが分かる。これは、ある程度のひずみまでは、透水によって生じた間隙によって強度低下するが、その後間隙が少なくなると骨格材である 3 号珪砂に強度に依存するようになり、同等の強度に至ったためと考察する。

(4) 画像解析結果

セグメンテーション画像より供試体を縦方向に 10 分割し、それぞれの相割合を算出し比較した(図 4)。この結果より、珪砂 3 号は全体的に透水によって分布が変化せず、透水

によってほぼ移動しなかったことが分かる。水相と珪砂 8 号+水相とは、対照的な挙動を示しており、細粒分が抜けることで間隙が増加していることが分かる。また、供試体下部に近づくほどその傾向は顕著であることが読み取れる。このことから、透水により下方から順に侵食され流出することが分かった。Morphology 解析により、間隙の大きい間隙水の分布を表現した(図 5)。この結果より、透水前は全体的に間隙が分布していたのに対し、透水が進むにつれて下方で間隙が発達することが分かる。120 min では供試体縦断方向に水みちを形成することが分かる。これらのことから、浸透破壊するには段階的に侵食が起こると考えられる。まず、境界面から細かい土が少しずつ流出することで内部に微小空洞を多数形成させ、それらが徐々に拡大し粗な状態となる。これにより密な部分の局所的な動水勾配が徐々に増加し、限界動水勾配に至った瞬間一気に破壊に至ると考えられる。

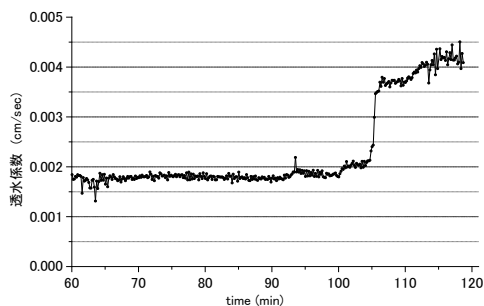


図 2 i=12 の透水係数時刻歴 (60~120min)

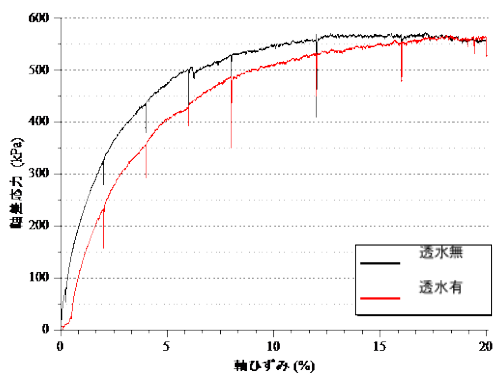


図 3 応力—ひずみ関係

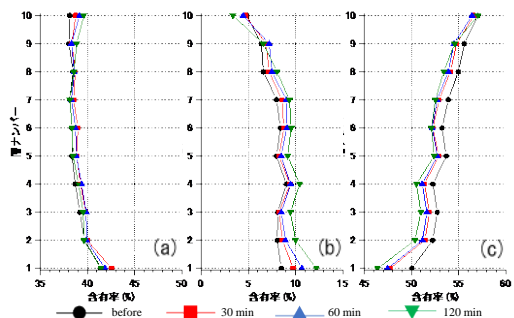


図 4 各相の含有率変化：(a)珪砂 3 号，(b)水相，(c)珪砂 8 号+水相

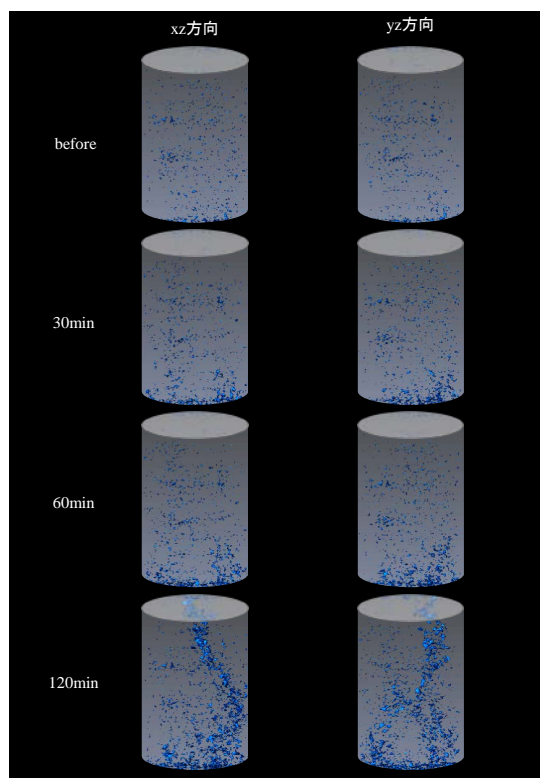


図 5 間隙水相分布の時刻変化

(5) まとめ

内部侵食過程を可視化するため、透水試験を行い、X 線 CT を用いて内部の観察を行った結果、透水によって初期は強度低下するがひずみの増加と共に骨格材の強度に依存するようになることが分かった。また、透水によって境界面で段階的に侵食されたのち、局所的動水勾配が限界動水勾配を超えた瞬間浸透破壊に至ると分かった。

4. 2 内部侵食に与える拘束圧の影響

(1) 実験方法

地表面付近を想定して拘束圧 10 kPa とした場合、堤防天端直下等、比較的拘束圧の高い状態を想定して拘束圧を 50 kPa とした場合の 2 ケースの実験を行った。

供試体は、4. 1 と同様に直径 35 mm、高さ 70 mm、相対密度 30 %となるよう珪砂 3 号と珪砂 8 号を体積比 7:3 で混ぜ合わせた。供試体作製時には、供試体内で珪砂 3 号と珪砂 8 号が均質になるように湿潤突き固め法を用いた。供試体下部には、珪砂 8 号のみ通過できる有孔板を設置した。水頭差によって下向きの透水力を与え、流れ出る水の量を測定し、Darcy 則より 10 秒毎の平均透水係数を算出した。

透水試験は、同供試体に対して動水勾配を 1, 2, 4, 8, 12 と順に上げて行った。各動水勾配における透水時間は 3 時間ずつである。また、CT 撮影は、透水開始前と動水勾配 1, 2, 4, 8, 12 の透水終了時の計 6 回行う。透水試験後、同供試体を用いて排水三軸試験を

行った。

(2) 画像解析手法

珪砂3号, 珪砂8号+水, 水, 空気の相の4相割合を定量化するために, CT画像を相ごとに色分けして相を分離するセグメンテーションを行った。そして, セグメンテーション画像より水相のみを抽出し, 間隙水の縮小・拡大処理を行う Morphology 解析を行った。この解析により, 小さな間隙水を除去して大きな間隙水のみに着目し, 供試体全体の水みちを可視化することができる。

(3) 実験結果

透水試験より得られた時間-透水係数の関係を図6に示す。拘束圧 10 kPa, 50 kPa の両ケースにおいて, 動水勾配が 1, 2 の時は透水性が極めて小さく細粒分の流出も見られなかった。そして動水勾配 4 のときに水が流れ出はじめた。そして, 図-2 より, 動水勾配 4, 8, 12 における丸印で示す透水係数の急激な上昇時に, 細粒分の流出を目視で確認した。これより, 粗粒分の間から細粒分が抜けていく suffusion が起こっている可能性があるといえる。また, 拘束圧 10 kPa の試験の方が拘束圧 50 kPa の試験より, 供試体の間隙比は 0.12 程度大きく, 透水係数の値も 5 倍程度大きいことがわかる。これより, 透水性は拘束圧に大きく依存するといえる。

また, 図7の排水三軸試験より, 透水によって, 細粒分が流出して間隙が増加することで, 透水を行っていない場合より強度が低下することがわかった。拘束圧 10 kPa, 50 kPa のいずれのケースにおいても, 軸ひずみが大きくなるにつれ, 細粒分の抜けた大きな間隙の影響で強度が低下したと考えられる。低拘束圧の場合, 細粒分の流出量が多く間隙が大きいため, 軸ひずみが小さい段階から粗粒分が間隙に落ち込みやすく suffusion を起こした供試体の強度の方が小さく, 軸ひずみが大きくなると, 粗粒分の移動によって間隙が埋まり, suffusion を起こしていない状態に近づくため供試体強度が最終的に一致したものと考えられる。一方, 高拘束圧の場合は, 相対的に軸差応力に対して土粒子間の local な滑りが少なく, 初期において軸差応力の差が小さいと考えられる。

(4) 画像解析結果

図8に, 拘束圧 10 kPa の動水勾配 12 の透水終了時の CT画像とセグメンテーション画像の水平断面図を示す。また, 図9に Morphology 解析結果を示す。拘束圧 10 kPa の解析結果において, 動水勾配が大きくなるにつれ, 供試体の縦断方向に段階的に水みちが形成されていき, 形成された水みちは, 透水によって拡大していくことがわかった。水みちができた箇所は局所的であり, suffusion の起こる場所も供試体全体ではなく局所的であると言える。さらに, 拘束圧が小さいほど, 水みちは大きく, 形成されるタイミングも早いことがわかった。

(5) まとめ

これまでの研究では, suffusion は均質に起こると仮定されるなど, 内部侵食が進行していく微視的挙動を確認した事例はなかった。本研究より, suffusion は局所的に発生することが明らかになった。また, 透水によって suffusion が発生し, 細粒分が抜けていくことで水みちが形成され, 透水性が急激に上昇することが分かった。さらに, 拘束圧が小さいほど, 水みちは大きく, 形成されるタイミングも早いことが分かった。

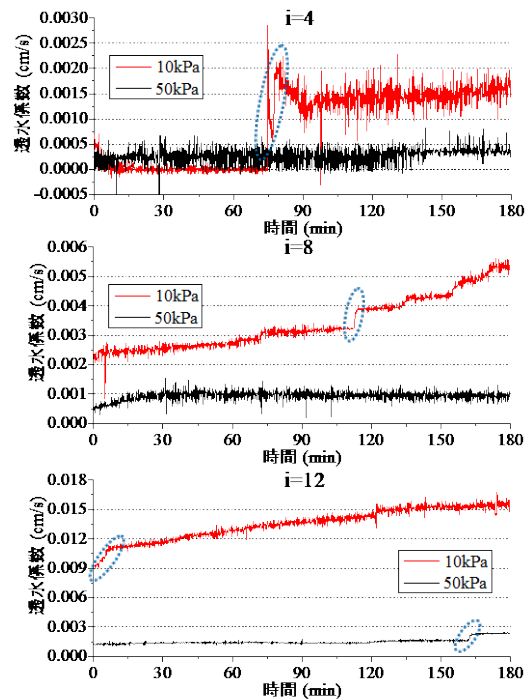


図6 透水係数時刻歴に与える拘束圧の影響

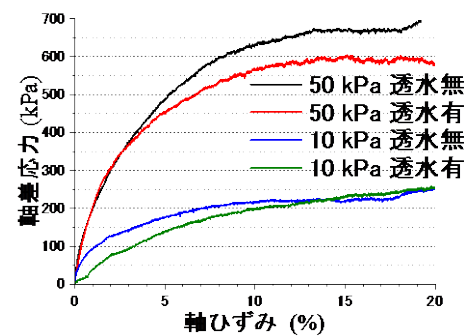


図7 三軸試験結果

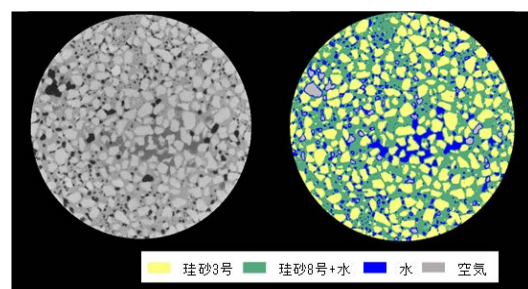


図8 CT画像とセグメンテーション画像 (拘束圧 10kPa)

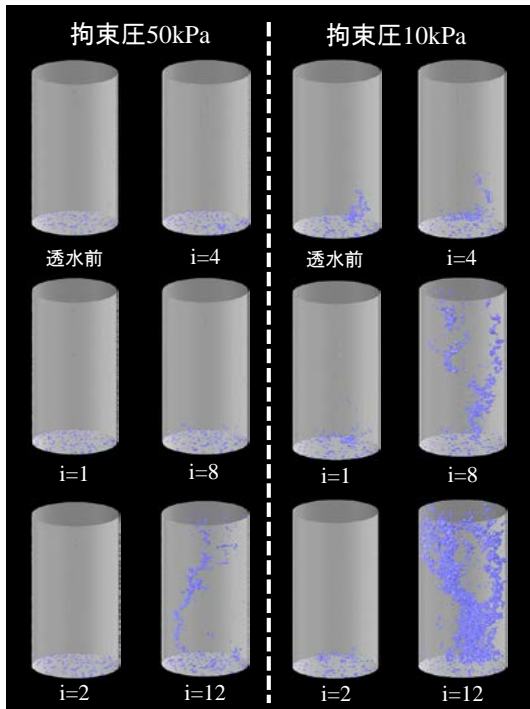


図9 Morphology 解析結果 (珪砂)

4. 3 堤防材料を用いた実験

(1)実験方法

実験には、淀川堤防砂を 4.75 mm でふるいわけしたものを用いた。ふるい分け試験と沈降分析によって得られた淀川堤防砂の粒径加積曲線を図 10 に示す。なお、細粒分含有率 $F_c=25.14\%$ である。供試体は、相対密度 $D_r=30\%$ となるように土量を調整し、湿潤突き固め法によって作製した。また、供試体サイズは、直径 35 mm、高さ 70 mm とした。

(2) 実験結果

図 11 に Morphology 解析結果を示す。青色で示す水のみ相は動水勾配が 12 と極めて高い値になった時点でも、透水前の状態とほとんど変化していない。一方、赤の点線で囲んだ個所では、透水前に水相であった位置が土粒子相に変化していることから、他の箇所でも内部侵食が発生し、細粒分が目詰まりを起こした可能性が考えられる。しかし、内部侵食量は極めて限定的であった。

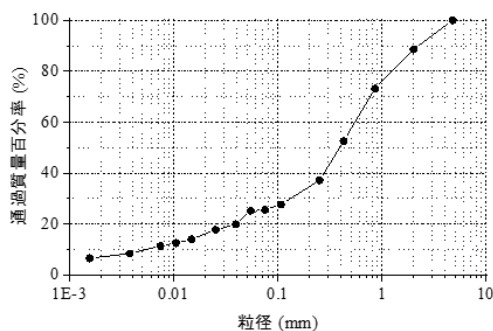


図 10 淀川堤防砂の粒径加積曲線

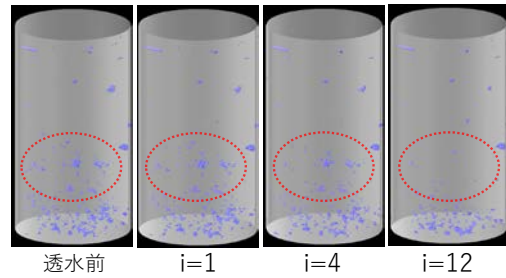


図 11 Morphology 解析結果 (淀川堤防砂)

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 4 件)

① 久泉友二, 岩永英, 肥後陽介, 一次元透水試験時の出砂を伴う浸透破壊と材料劣化に関する研究, 土木学会平成 28 年度全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016 年 9 月 7 日~9 日, 東北大学川内北キャンパス.

② 濱田祐輔, 岩永英, 肥後陽介, マイクロ X 線 CT を用いた三軸砂供試体の内部侵食に与える拘束圧の影響に関する研究, 土木学会関西支部平成 29 年度年次学術講演会, 2017 年 5 月 27 日, 大阪工業大学.

③ 濱田祐輔, 岩永英, 肥後陽介, マイクロ X 線 CT を用いた砂供試体の内部侵食に与える拘束圧の影響に関する研究, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017 年 7 月 12~14 日, 名古屋国際会議場.

④ Yosuke Higo, Yusuke Hamada, Suguru Iwanaga, Yuji Hisaizumi, Ryunosuke Kido, Imaging fine soil particles transportation through soil skeleton caused by seepage flow, 3rd International Conference on Tomography of Materials and Structures (ICTMS2017), 2017 年 6 月 26 日~30 日, ルンド.

6. 研究組織

(1)研究代表者

肥後 陽介 (HIGO, Yosuke)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 10444449

(2)研究分担者

木元 小百合 (KIMOTO, Sayuri)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号： 70362457

参考文献

1) Ke, L. and Takahashi, A. "Experimental investigations on suffusion characteristics and its mechanical consequences on saturated cohesionless soil", Soil and Foundations, 54 (4), pp.713-730, 2014