

## マルチスケールからみた盛土構造物の経年変化に関する研究

Multi-scale studies on deterioration of embankment structures

近畿大学理工学部社会環境工学科 講師 中島晃司

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 1. 研究背景・目的

近年、豪雨などの災害により盛土構造物が崩壊する事例が後を絶たない。国土強靱化計画が進められている我が国において、被害に対する合理的な対策が求められる一方、補修や補強対策が必要と判定されている盛土が全国各地で数多く残っている。盛土法面の局所的な崩壊は、特に弱部となっている箇所できりやすくと考えられ、中長期的な経年変化に対する評価手法や維持管理手法が求められている。

河川堤防やため池盛土については、地盤材料内の細粒分の移動（内部侵食）により堤体の力学特性（例えば、透水性や強度）が変化することで、最終的に変形や崩壊といったダイナミクスに何らかの影響を及ぼす可能性があるとして、その再現実験や再現解析が進められている。しかし、細粒分の移動を可視的に評価することは困難であるため、種々の材料条件や水理条件のもとで実施したケーススタディから内部侵食の発生原因を特定するにとどまっている。本研究では「内部侵食の可視化」に着目し、屈折率の等しい固体材料と液体材料により作製した模擬地盤を用いて、浸透により移動する細粒分をトラッキングする手法を取り、地盤の時空間的な内部変状を微視的スケールから評価する。そして、地盤内の土砂が移動・堆積および流出を繰り返すことで透水性分布が変化していく状態を、土/水/空気連成有限要素解析の中で再現し、内部侵食による盛土構造物の浸潤挙動を明らかにする。

#### 2. インデックスマッチング法を用いた細粒分挙動に関する実験

土内部の可視化手法として、本研究では比較的安価なインデックスマッチング法を利用した検討を行った。インデックスマッチング法とは固体と流体（液体）の屈折率を一致させる技術である。追跡したい物質の屈折率を異なるものにすれば、その物質のみを可視化できる。実験試料には、固体としてホウケイ酸ガラス（屈折率：1.47~1.48）、流体として質量パーセント濃度 60%に調整したヨウ化ナトリウム水溶液（屈折率：1.48）を使用した。市販のホウケイ酸ガラス板を粉砕機で細かく砕き、2~4mmふるいに残留したもの（以降、粉砕ガラスと呼ぶ）を使用することで土粒子を模擬した。ホウケイ酸ガラスとヨウ化ナトリウム水溶液の屈折率がほぼ同じであるため、写真-1のような透明試料が作製できる。追跡する細粒分を選定するため、本研究では、色砂と発光粒子を用いて検討を行った。色砂は、7号珪砂を黒スプレーで着色したものを使用し、粉砕ガラスの質量に対して1%の含有率となるように混ぜた。発光粒子は、7号珪砂の平均粒径（ $D_{50}=0.25\text{mm}$ ）程度に調整した粉砕ガラスにローダミンを着色して作製した。ローダミンはグリーンレーザーの波長（532nm）に反応し、発光する性質をも

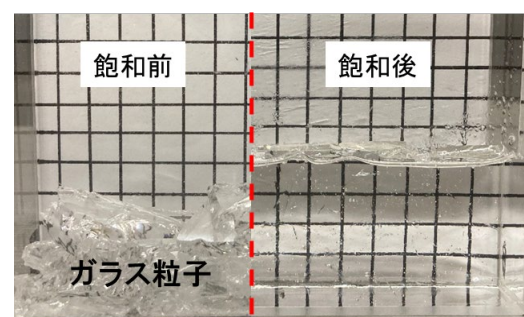


写真-1 実験で使用した透明材料

つ。写真-2は、YAGレーザーを照射した際の試料内部の様子であり、流体の動きに応じた細粒分の動きを追跡できる可能性が期待できる。

図-1に、実験装置の概要を示す。実験試料をアクリル容器に入れ、木槌で振動を与えながら供試体を作製、ヨウ化ナトリウム水溶液を流しながら飽和を図った。飽和させたのち、給水タンクを上昇させることで動水勾配を変化させた。はじめに、動水勾配を0.5→0.7→1.0→1.5→2.0の順に、10分間隔で段階的に増加させる予備実験を行った。実験中、供試体側面をカメラでインターバル撮影し(1枚/秒)、取得した写真に対してPIV解析を行い、細粒分挙動を評価した。

図-2にPIV解析結果を示す。図は、合成ベクトルコンターを示しており、赤色の箇所は粒子が大きく動いていることを意味する。例として、動水勾配0.5と1.0の結果について示す。色砂を使用した場合は、動水勾配の大きさと粒子移動量の関係についてはさほど見受けられなかった。

次に、発光粒子を使用して同様の水理条件で実験を行った結果をみると、色砂と比べて、動水勾配を上げた際に、内部侵食の発生領域が広がっている様子がみてとれる。色砂を用いるよりも、内部侵食挙動を精度良く評価できる可能性がうかがえる。

予備実験より、発光粒子をトレーサー粒子として採用し、図-3に示す異なる透水履歴を与える実験を行った。透水時間を120分間で統一し、4つのケースを実施した。Case1では、動水勾配2.0を120分間保った。Case2とCase3は15分毎、Case4は10分毎に動水勾配を0.5ずつ上げた。Case2では、動水勾配を1.5まで上げた後、残りの75分間は動水勾配2.0で保った。Case3は動水勾配1.5まで上げた後に、再度、動水勾配0.5から段階的に上げていき、計2サイクルの繰返し透水履歴を与えた。Case4では、Case3にもう1サイクル加えた計3サイクルの透水履歴を与えた。なお、Case3とCase4では、動水勾配1.5から次のサイクルに移る際に1度排水をしている。

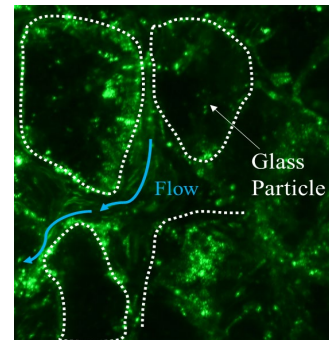


写真-2 レーザー照射時の試料内部

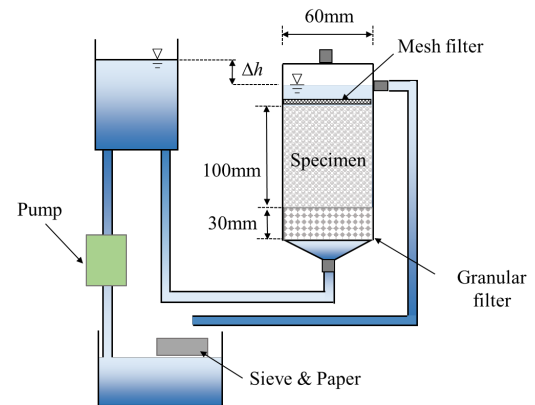


図-1 実験装置の概要

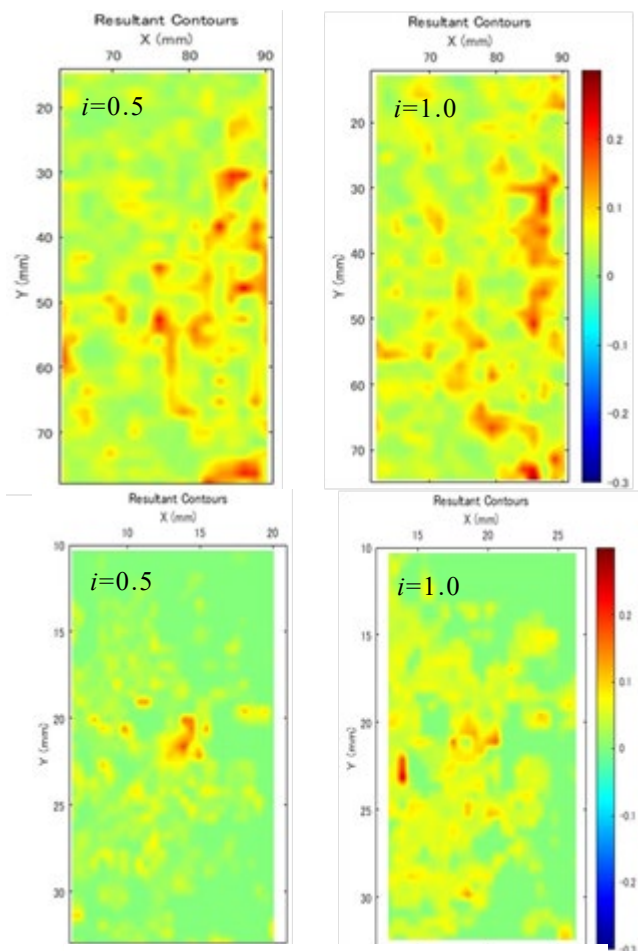


図-2 PIV解析の結果

(上：色砂，下：発光粒子)

### 3. 土質の不均一化にともなう浸透挙動シミュレーション

本研究では盛土構造物の1つである河川堤防を取り上げる。浸透解析には、土/水/空気連成有限解析コード DACSAR-MP を使用した。

図-4(a)は河川水の浸透を再現するために作製した解析モデルである。まず全要素に同じ透水係数を与えて ( $k_x=1.8\text{m/day}$ ,  $k_y=0.9\text{m/day}$ ) 均一な盛土とし、基礎地盤左端から裏法側地表面にかけて浸透境界を与えた。次に、図に示すように1分間に20mmずつ、盛土高9割まで増水させ、6時間水頭境界を与えることで、河川水の浸透を再現した。

図-4(b)は降雨による浸透を再現するために作製した解析モデルである。均一な盛土作製までは前述のとおりである。その後、基礎地盤両端に浸透境界を与え、図に示すように地表面に6.5mm/hの降雨を1時間与えた。透水係数は、水平、鉛直方向ともに前述のとおりである。そして、均一盛土における解析結果から、浸潤面以下の法尻を構成している一部要素の透水係数を変更し、不均一盛土を再現した(図-5)。その再現として、透水係数を下げる場合と上げる場合の2つのケースを検討した。これは、細粒分が目詰まりする場合と流出する場合を想定している。透水係数を上げるケースは100倍 ( $k_x:1.8\text{m/day}\rightarrow180\text{m/day}$ ,  $k_y:0.9\text{m/day}\rightarrow90\text{m/day}$ )、下げるケースは1/100倍 ( $k_x:1.8\text{m/day}\rightarrow0.018\text{m/day}$ ,  $k_y:0.9\text{m/day}\rightarrow0.009\text{m/day}$ )へ変更し、均一盛土と同様に解析を行った。

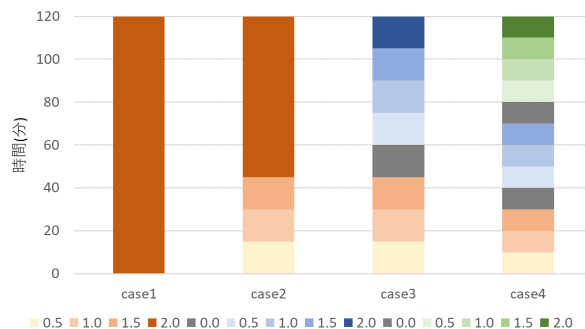


図-3 浸透条件 (凡例は動水勾配を示す)

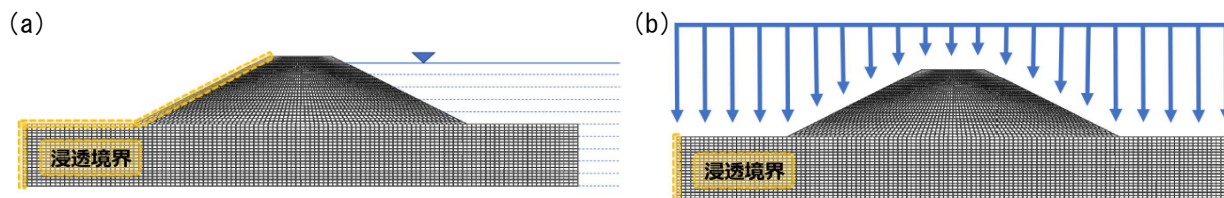


図-4 境界条件

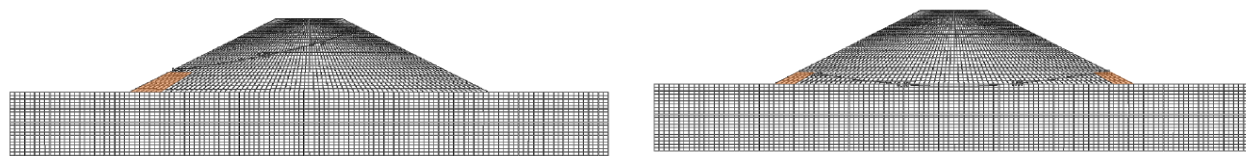


図-5 不均一性の再現 (橙色要素の透水係数を変更)

#### (実験調査によって得られた新しい知見)

##### 1. 細粒分挙動の評価

図-6 から図-9 に、合成ベクトルコンターの結果を示す。Case1 では、30~45 分で細粒分が最も大きく動き、それ以降はほとんど移動しない結果となった。

Case2 では、動水勾配 1.0 で細粒分が最も大きく動いた。その後、動水勾配を大きくしても、細粒分は若干動くものの、動水勾配 1.0 の結果より変化は小さいといえる。

Case3 では、1 サイクル目の動水勾配 1.0 で細粒分が大きく移動し、その後の動きは小さい。また、2 サイクル目の動水勾配 1.5 までは動きがほとんどないが、動水勾配を 2.0 に上げると細粒分は再び大きく動いた。

Case4 では、1 サイクル目の動水勾配 1.5 で細粒分が若干動いている。また、2 サイクル目の動水勾配 0.5 でも全体的な動きがみられる。それ以降、動水勾配を変化させても、細粒分の動きは小さい。排水後の 3 サイクル目では、動水勾配 0.5 で若干は動くものの、動水勾配 1.0 では動きが落ち着いている。しかし、3 サイクル目の動水勾配 1.5 で大きく動き、2.0 に上げてもおお細粒分の動きは続いた。

以上の結果をまとめると、次のように考えられる。一度細粒分が大きく動くと、動水勾配を上げてお細粒分の動きは小さい。しかし、排水をして動水勾配を上げると細粒分が再び大きく動き出す動水勾配の条件が存在する。さらに、繰返し回数が増えることで、再び動き出す動水勾配は小さくなるのが明らかとなった。細粒分が一度流出すると形成された隙間に流れが集中する。つまり選択的に流れやすい箇所を流体は流れるため、一度細粒分が大きく動いたあとは、そこには細粒分が存在しないので変化量が小さくなったと考えられる。一方で、排水をさせた（水位の変動があった）場合は、細粒分流出によってできた隙間を埋める形で土骨格が変形し、一度目の浸透で流出しなかった細粒分が移動する現象が起きていることが予想される。

## 2. 透水係数の不均一性が浸透挙動に及ぼす影響

図-10 および図-11 に、浸透解析結果を示す。河川水の浸透による解析では、透水係数を下げたケースにおいて、浸潤面が裏法尻部で上がり動水勾配が増大した。透水係数を上げたケースでは、浸潤面が裏法尻部で下がり、動水勾配が低下した。降雨浸透による解析では、透水係数を下げたケースにおいて、法尻部に水圧の高い領域が現れ、動水勾配が増大した。透水係数を上げたケースでは、水圧の高い領域が小さくなるとともに、浸潤面が下がり、法尻部で動水勾配が低下した。

以上の結果から、細粒分が法尻から流出する場合は、透水係数を上げた領域が簡易的なドレーンの働きをして浸潤面が低下するとともに、動水勾配が低減する一方で、細粒分が法尻付近で目詰まりする場合には、河川堤防の安全性が低下することが示唆された。

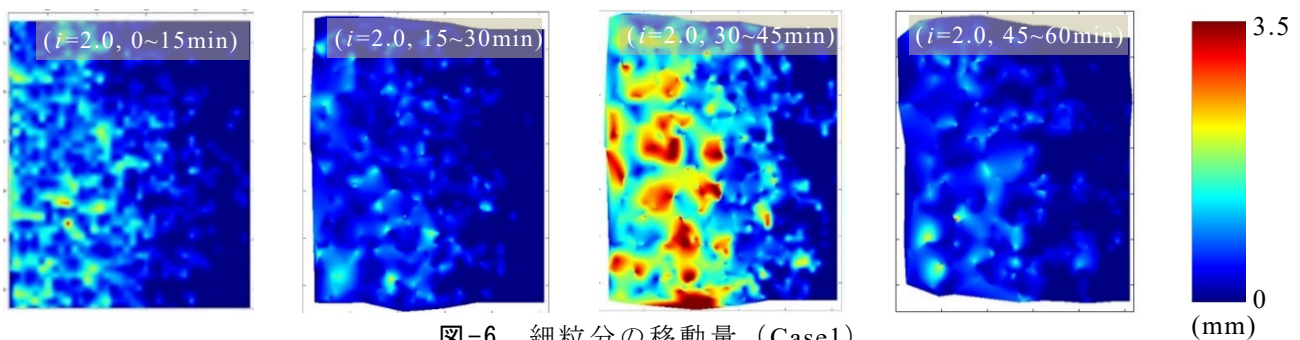


図-6 細粒分の移動量 (Case1)

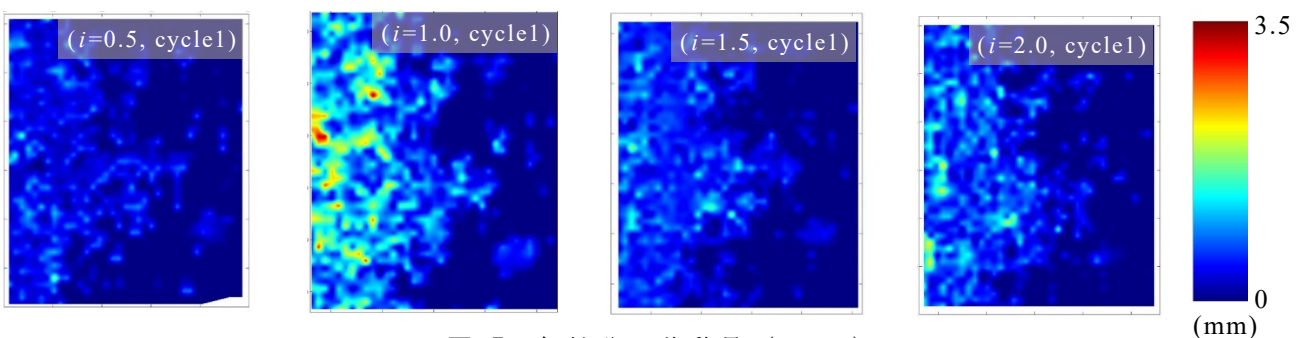


図-7 細粒分の移動量 (Case2)

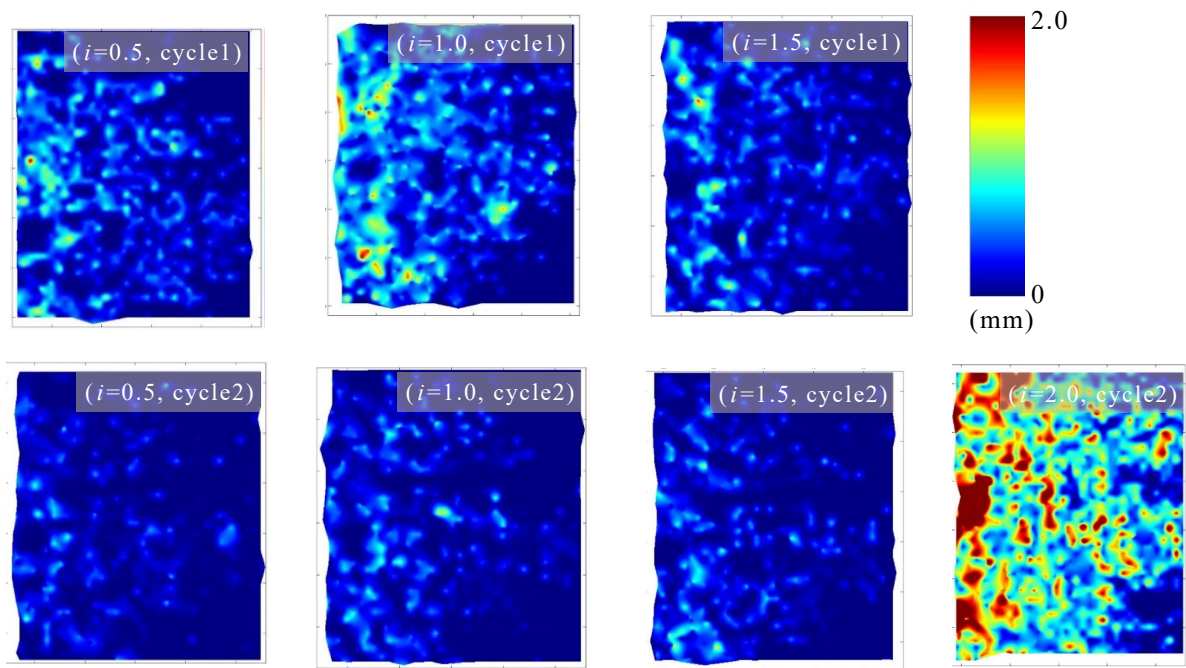


図-8 細粒分の移動量 (Case3)

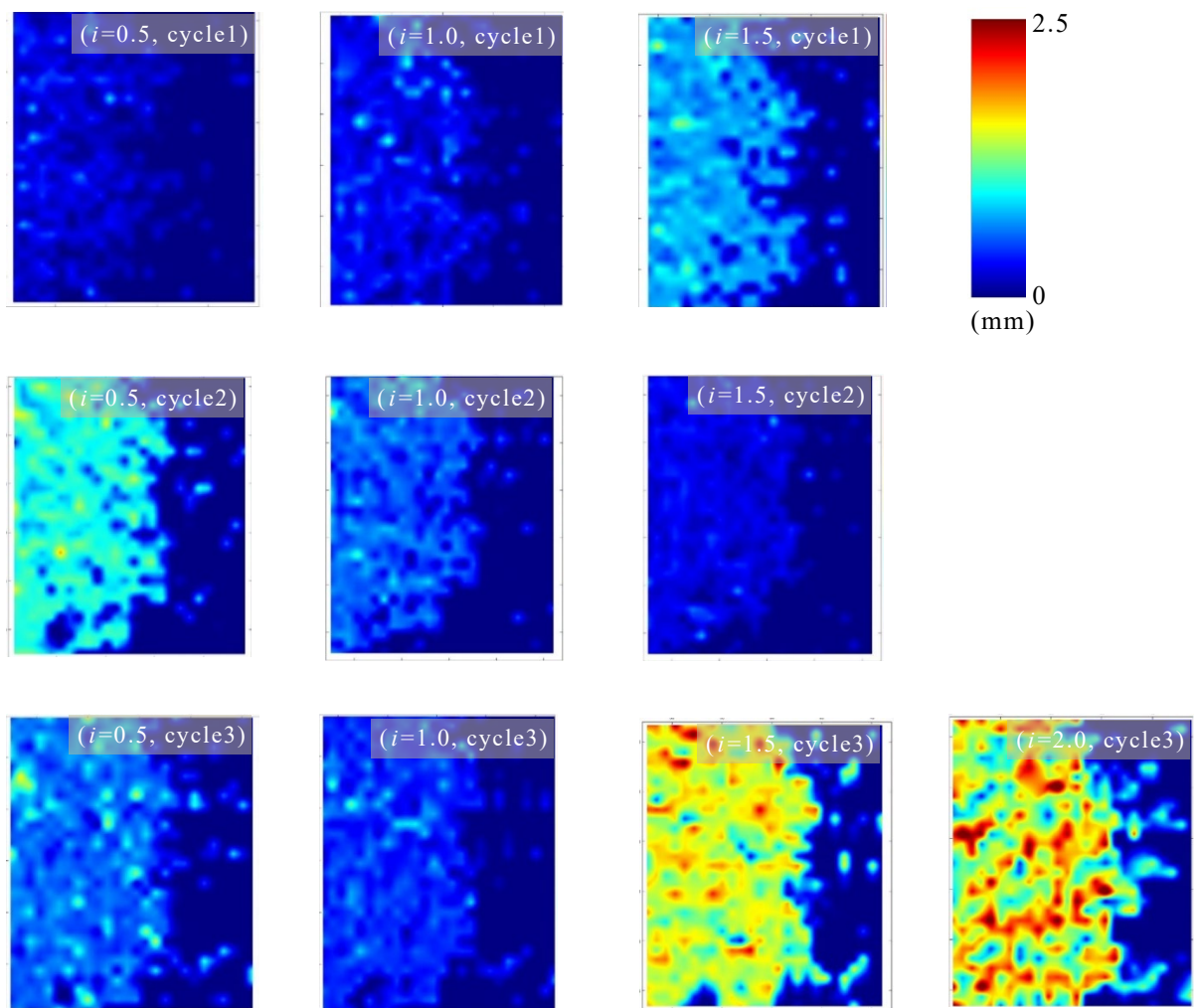
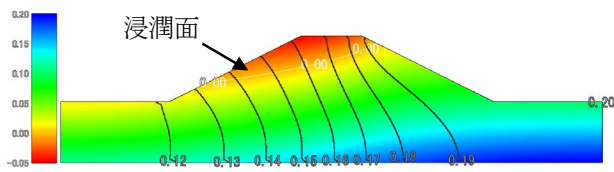
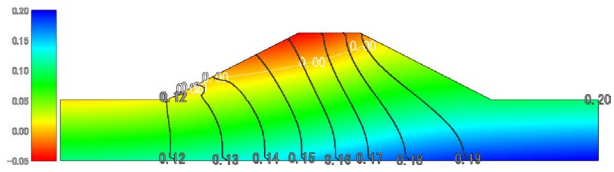


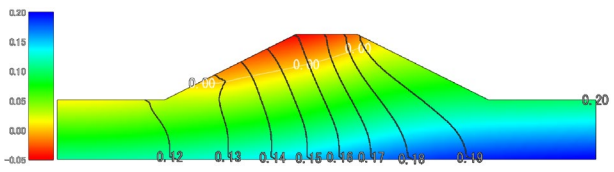
図-9 細粒分の移動量 (Case4)



(a) 均一



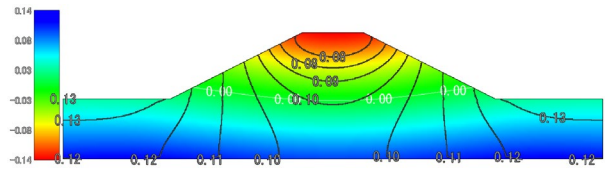
(b) 1/100 倍



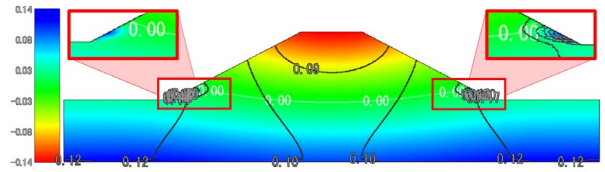
(c) 100 倍

(面コンター：水圧，線コンター：全水頭)

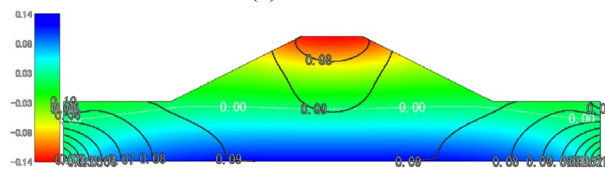
図-10 不均盛土の浸透挙動 (河川増水時)



(a) 均一



(b) 1/100 倍



(c) 100 倍

図-11 不均盛土の浸透挙動 (降雨時)

( 発 表 論 文 )

- 1) 中島晃司、河井克之、吉田英昭：異なる浸透履歴における内部侵食の進行に関する評価、第59回地盤工学研究発表会（投稿中）。
- 2) 吉田英昭、中島晃司、河井克之：異なる透水履歴が河川堤防の空間的不均一化に及ぼす影響、第59回地盤工学研究発表会（投稿中）。
- 3) 吉田英昭、中島晃司、河井克之：河川堤防の不均一化を考慮した浸透挙動評価、土木学会第79回年次学術講演会（投稿中）。