

# 模型堤防の浸透破壊メカニズム解明のための空気～水～土骨格連成有限変形シミュレーション

名古屋大学 正会員 ○吉川高広 フェロー会員 野田利弘 非会員 内藤誠也  
名城大学 正会員 小高猛司 横浜国立大学 正会員 崔瑛

## 1. はじめに

平成 24 年 7 月の九州北部豪雨による矢部川堤防の被災は、局所的なパイピングをきっかけとして決壊した“越流なき破堤”として大きな衝撃を与え、複雑な地盤条件・水理条件においても合理的に河川堤防の安全性照査が可能な最新の地盤力学に基づく解析手法の構築が求められている。

本稿では、粘土から砂、さらにはその中間土までの力学挙動を統一的な枠組みで記述可能な弾塑性構成式 SYS Cam-clay モデル<sup>1)</sup>を搭載した空気～水～土骨格連成有限変形解析コード<sup>2)</sup>を用いて、透水模型実験<sup>3)</sup>のシミュレーションを行い、浸透破壊する場合としない場合の違いを表現できることを示す（解析コードの Validation）。また、本解析コードを用いたケーススタディも実施して、基礎地盤と堤体の土質や境界／外力条件の違いが、浸透破壊発生の有無に与える影響を示す。

## 2. 透水模型実験<sup>3)</sup>の概要と解析条件

図 1 は参照した透水模型実験<sup>3)</sup>の概要を示す。模型の右側から透水させる実験で、領域 I に基礎地盤の高透水性層として三河硅砂 3 号を、領域 II に上部砂質基礎地盤層（以後、地盤上部層）として三河硅砂 8 号を、領域 III に堤体として三河硅砂 6 号、7 号、8 号を 5:2:

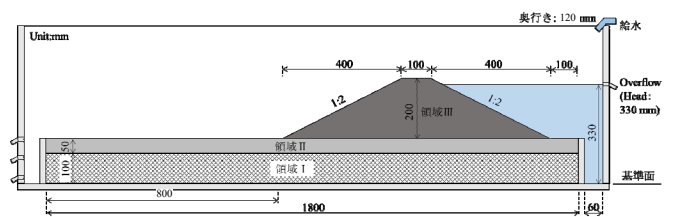


図 1 透水模型実験<sup>3)</sup>の概要（地盤上部層厚が 50mm の場合の例）

5 で混合した砂を用いている。本稿では、目立った変形が生じなかった (i) 地盤上部層厚が 50mm（このとき高透水性層厚は 100mm）の場合と、最終的には滑りが堤体天端部分まで到達した (ii) 地盤上部層厚が 30mm（このとき高透水性層厚は 120mm）の場合をシミュレートした事例について述べる。なお、実験結果<sup>3)</sup>は、次章において解析結果と比較して示す。

解析における変位の境界条件は、下端で鉛直・水平方向固定条件、左右端で水平方向固定条件とした。水と空気の境界条件は、水を浸透させる川表側を全水頭 330mm（位置水頭の基準は解析断面下端）・排気条件、水槽と接する下端を非排水・非排気条件、排水部である左端および川裏側を浸出面・排気条件とした。土骨格の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model<sup>1)</sup>に関する材料定数は、Noda et al.<sup>4)</sup>の三河硅砂 6 号の値を用いた。水分特性曲線（van Genuchten 式<sup>5)</sup>）に関する材料定数および飽和透水係数の値は、杉井ら<sup>6)</sup>の研究を参考に決定した。ここでは簡単のために、土質の違いは飽和透水係数の違いとして表現した（飽和透水係数の値は、3 号砂： $4.06 \times 10^{-3}$  m/s、8 号砂： $1.0 \times 10^{-5}$  m/s、6・7・8 号混合砂： $8.25 \times 10^{-5}$  m/s）。初期状態は、実験条件に合わせて決定し、初期の比体積、構造、応力比、異方性、飽和度、間隙空気圧（0kPa）および間隙水圧（水分特性曲線から計算）を地盤内で一定と仮定し、土被り圧に応じて過圧密比を分布させた。

## 3. 透水模型実験のシミュレーション結果（解析コードの Validation）

図 2 は、地盤上部層厚 50mm の場合に関して、実験結果<sup>3)</sup>の写真と解析結果のせん断ひずみ分布図を示す。浸透開始から 100 分経過後も、実験において目立った変形は見られず、解析においてもせん断ひずみがほとんど生じていない。図 3 は、地盤上部層厚 30mm の場合に関して、実験結果<sup>3)</sup>の写真と解析結果のせん断ひずみ分布図を示す。実験では、浸透開始後 50 秒経過時に川裏側の高透水性層と地盤上部層の層境で大きく膨張し、24 分 30 秒経過時には滑りが堤体天端部分まで到達している。解析では、実験のように滑りが天端まで到達する様子までを表現できていないが、高透水性層と地盤上部層の層境から始まる大変形の様子を捉えている。図 4 は、地盤上部層厚 50mm の場合と 30mm の場合の平均骨格応力分布を比較した図である。地盤上部層厚 30mm

キーワード 空気～水～土骨格連成解析, 浸透破壊, 河川堤防

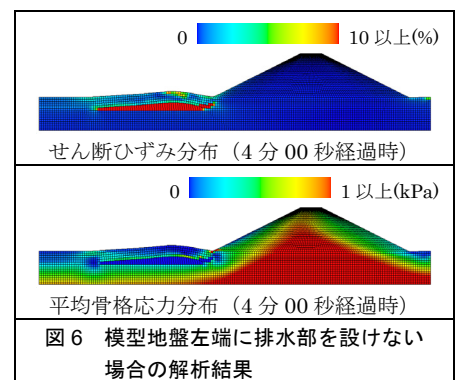
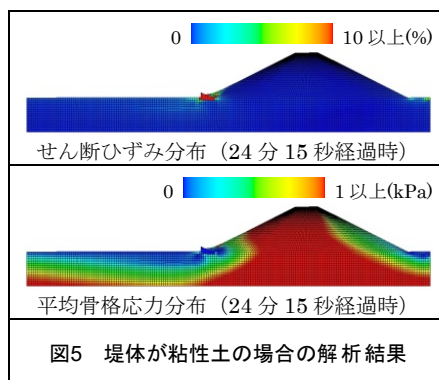
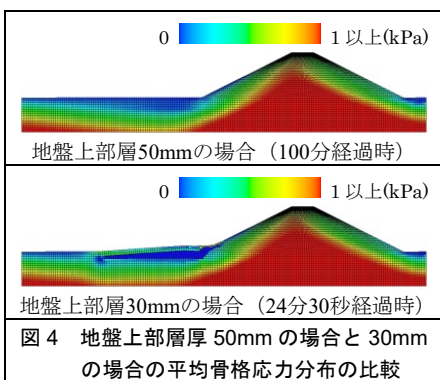
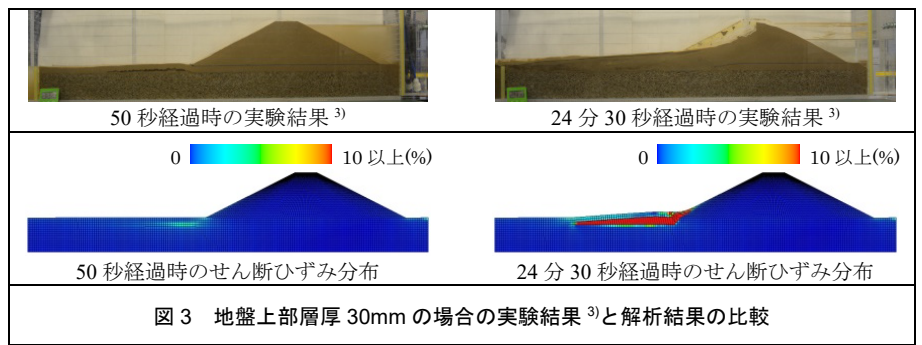
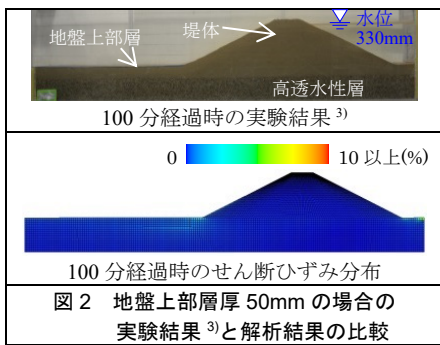
連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学部 9 号館 3 階 TEL: 052-789-3834

の場合は、大変形が生じた層境において平均骨格応力がゼロ近くまで低下している。紙幅の都合上図は省略するが、大きなひずみが生じるこの領域内の土要素は、吸水軟化（塑性体積膨張を伴う軟化）挙動を示している。

#### 4. ケーススタディ（基礎地盤と堤体の土質や境界／外力条件の違いが浸透破壊発生の有無に与える影響）

まず、土質を変更したケースについて述べる。層境から大変形が始まる地盤上部層厚 30mm の場合において、高透水性層を三河硅砂 3 号から 6 号に変更（飽和透水係数を  $4.06 \times 10^{-3}$  m/s から  $1.61 \times 10^{-4}$  m/s に変更）した場合、浸透開始から 100 分経過後も目立った変形は生じない（図は省略）。一方、目立った変形が生じなかった地盤上部層厚 50mm の場合において、堤体を三河硅砂 6・7・8 号混合砂から粘性土に変更（飽和透水係数を  $8.25 \times 10^{-5}$  m/s から  $6.68 \times 10^{-7}$  m/s に変更）して地盤上部層と堤体の透水性のコントラストを大きくした場合、図 5 のせん断ひずみ分布と平均骨格応力分布に示すように、地盤上部層と堤体の境から大変形が始まり、平均骨格応力も大きく低下する。

次に、境界／外力条件を変更したケースについて述べる。層境から大変形が始まる地盤上部層厚 30mm の場合において、外水位を 240mm として低くした場合、浸透開始から 100 分経過後も目立った変形は生じない（図は省略）。また、目立った変形が生じなかった地盤上部層厚 50mm の場合において、基礎地盤左端を非排水・非排気条件にして、模型水槽左端に排水部を設けないことを想定したケースでは、図 6 のせん断ひずみ分布と平均骨格応力分布に示すように、高透水性層と地盤上部層の層境から大変形が生じる。土質の違いや外水位の違いではなく、模型水槽の条件が浸透破壊発生の有無に影響を与えることが示唆される。



#### 5. おわりに

今後は、本解析コードを実大スケールの河川堤防の照査に適用して、より広範な土材料や外力に対する変形・破壊問題に取り組み、対策を検討する予定である。

謝辞：JSPS 科研費 25249064 および H28 年度国土交通省河川砂防技術研究開発の助成を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献：1) Asaoka et al.: An elasto-plastic description ..., S&F, 42(5), 47-57, 2002. 2) Noda and Yoshikawa: Soil-water-air coupled ..., S&F, 55(1), 45-62, 2015. 3) 小高ら: 基礎地盤の複層構造が河川堤防の浸透破壊に及ぼす影響, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017. 4) Noda et al.: Soil-water coupled ..., S&F, 48(6), 771-790, 2008. 5) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898, 1980. 6) 杉井ら: 高飽和時における砂の不飽和透水係数に関する考察, 平成 13 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, 267-268, 2002.