

空気～水～土骨格連成有限変形シミュレーションによる 模型堤防の浸透破壊メカニズムの考察

空気～水～土骨格連成有限変形解析 浸透破壊 河川堤防

名古屋大学 ○吉川高広 野田利弘 内藤誠也
名城大学 小高猛司 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、高透水性層を有する地盤の局所的なパイピングをきっかけに決壊し、“越流なき破堤”として大きな衝撃を与えた。本被災を受けて、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できる最新の地盤力学に基づく新たな解析手法の構築が求められている。

本研究は、矢部川堤防決壊をはじめとした高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊メカニズムの解明を目指している。本稿では、空気～水～土骨格連成有限変形解析コードを用いた透水模型実験のシミュレーション結果として、浸潤過程およびボイリング発生箇所・時間をよく再現できることを示す。また、本解析コードを用いたケーススタディとして、地盤の透水性および水位がボイリング発生の有無に加えて、浸透破壊の変形モードに影響を与えることも示す。

2. 透水模型実験の概要と解析条件

図 1 は透水模型実験の概要を示す。模型の右端から透水させる実験で、地盤に透水性が高い三河硅砂 3 号の層を設けている。矢部川堤防の被災箇所でも報告された高透水性層の行き止まり²⁾を表現するために、三河硅砂 3 号の層を途中で打ち切っている。地盤の被覆土層および堤体部分には三河硅砂 6 号を用いている。実験結果は、次章において解析結果と比較して示す。

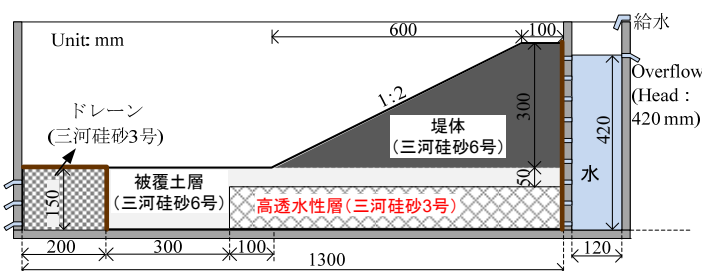


図 1 透水模型実験の概要

解析における水と空気の境界条件は、水を浸透させる右端で全水頭 420mm・非排気条件、水槽と接する下端を非排水・非排気条件、排水部である左端を浸出面・非排気条件、地表面を浸出面・排気条件とした。土骨格の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model³⁾に関する材料定数は、Noda et al.⁴⁾の三河硅砂 6 号の値を用いた。水分特性曲線 (van Genuchten 式⁵⁾)に関する材料定数および飽和透水係数の値は、杉井ら⁶⁾の三河硅砂 6 号の値から決定した。ここで、3 号砂と 6 号砂の違いは、飽和透水係数のみを変えて表現した (飽和透水係数の値は、3 号砂: $4.06 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, 6 号砂: $1.61 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ⁶⁾)。4 章のケーススタディでは、被覆土層として 6 号砂よりも透水性が低い 8 号砂 (飽和透水係数の値: $2.21 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ⁶⁾) を想定した。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

図 2 は透水模型実験の結果と計算結果の飽和度分布の比較である。計算結果は実験結果の浸潤過程をよく再現できている。実験では浸透開始から 2 分 20 秒経過時点で、図の赤丸で示した箇所でボイリング (噴砂・噴水) が発生した。こ

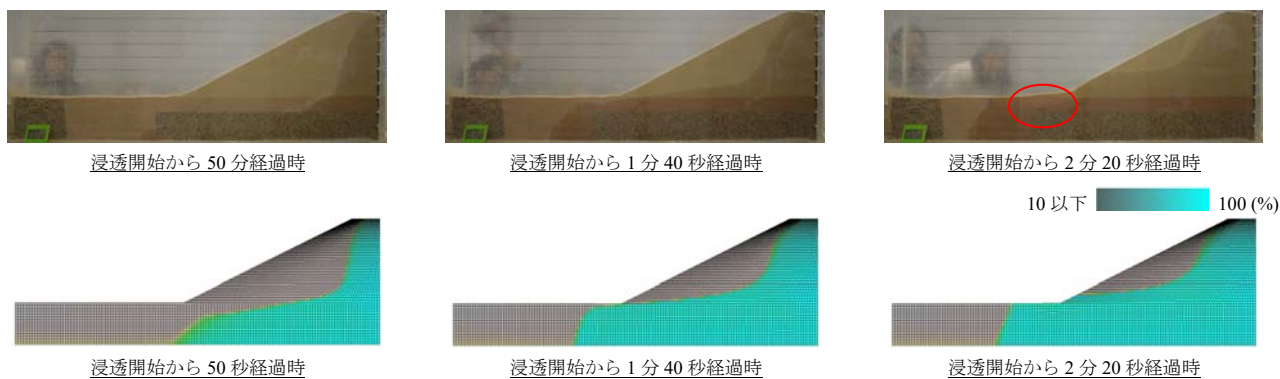


図 2 透水模型実験の結果 (上) と計算結果の飽和度分布 (下) の比較 (3 章)

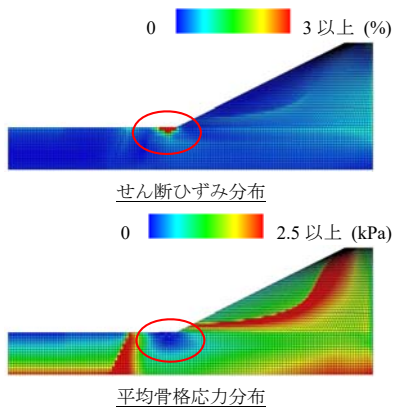


図3 透水模型実験の再現解析 (3章)
(浸透開始から2分20秒経過時)

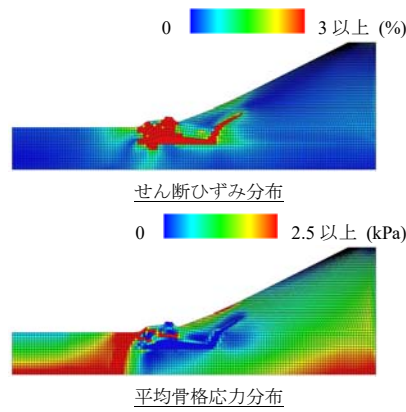


図4 被覆土層の透水性が低い場合
(4章①)

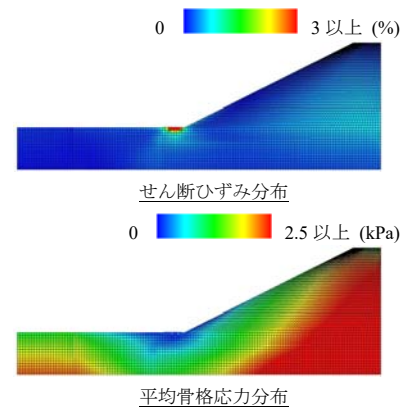


図5 被覆土層の透水性が低い、かつ、
水位が210mm(低い)場合(4章②)

のボイリングをきっかけとして最終的には堤体高さが半分程度になるまで崩壊するが、解析ではボイリング発生段階までを追うことができる。図3は、浸透開始から2分20秒経過時のせん断ひずみ分布と平均骨格応力分布を示す。計算では2分20秒経過時に、赤丸で示した法尻付近の地表面でせん断ひずみが大きく、平均骨格応力がゼロ近くまで低下している。なお、図は省略するが、せん断ひずみが最も大きい土要素の力学挙動を確認したところ、せん断ひずみが3%付近で急激に吸水軟化により骨格応力経路が原点に向かい、平均骨格応力がゼロに近づいた。このため、以後本稿ではせん断ひずみが3%以上生じ、平均骨格応力がゼロに近づくことをボイリングと呼ぶ。以上のように、本解析コードは、浸透によるボイリング現象を、間隙水圧の上昇に伴う骨格応力の低下として良く表現できることがわかった。

4. ケーススタディ (地盤の透水性および水位がボイリング発生に与える影響)

3章の解析条件の一部を変更して、2つのケーススタディを行った。① 図1において被覆土層に透水性が低い三河硅砂8号の飽和透水係数を与えた場合、および、② ①の条件で右端水位を420mmから210mmに低くした場合である。

① 被覆土層の透水性が低い場合に関して、図4はせん断ひずみ分布および平均骨格応力分布を示す。3章の場合と異なり、地盤の層境での平均骨格応力もゼロに近づき、最終的には層境でもボイリングして大きなせん断変形が生じ、せん断面は堤体に向かって進展した。② ①の条件下で、水位のみ210mmで低い場合に関して、図5はせん断ひずみ分布および平均骨格応力分布を示す。水位を低くすると、今度は層境ではなく地表におけるせん断変形が最終的には卓越した。以上より、地盤を構成する土材料の透水性および外水位の差が、浸透破壊発生の有無に加えて、浸透破壊モードにも影響を与えることがわかった。

5. おわりに

図5は水～土骨格二相系の静的／動的有限変形コード⁷⁾を用いた解析結果の一例である。簡単のため二相系解析コードを用いているが、解析条件によっては、河川堤防が浸透時に進行的に破壊していく様子を表現できつつあり、せん断面の土要素は吸水軟化している。今後は、解析条件をパラメトリックに変更し、三相系解析を用いて、引き続き河川堤防の進行性破壊のメカニズム解明に取り組んでいきたい。

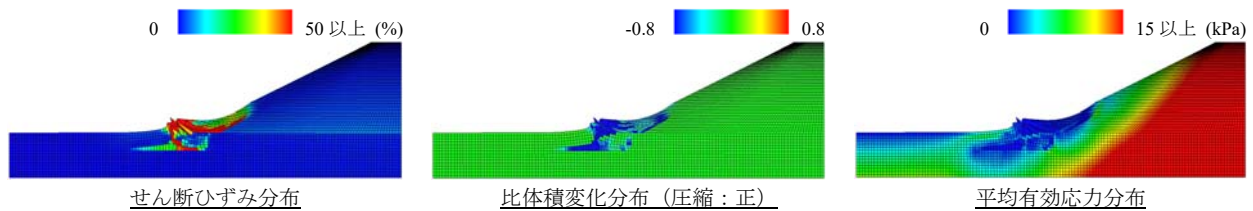


図5 二相系の静的／動的有限変形コードを用いた解析結果の一例

謝辞：JSPS 科研費 25249064 および H27 年度国土交通省河川砂防技術研究開発の助成を受けた。感謝の意を表す。

参考文献：1) Noda and Yoshikawa: Soil-water-air coupled ..., S&F, 55(1), 45-62, 2015. 2) 矢部川堤防調査委員会：報告書、九州地方整備局筑後川河川事務所, 2013. 3) Asaoka et al.: An elasto-plastic description..., S&F, 42(5), 47-57, 2002. 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) 杉井俊夫・山田公夫・奥村恭：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. 7) Noda et al.: Soil-water coupled ..., S&F, 48(6), 771-790, 2008.