

空気～水～土骨格連成有限変形解析による透水模型実験の再現と浸透破壊メカニズムの考察

空気～水～土骨格連成解析 浸透破壊 河川堤防

名古屋大学 国際会員 ○野田利弘 吉川高広
名城大学 国際会員 小高猛司 崔瑛

1. はじめに

洪水の継続時間が短い我が国においては、河川堤防の決壊の主因は越水であり、浸透のみによる決壊は久しく起こって来なかった。しかし、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ため、「越流なき破堤」として大きな衝撃を与えた。当該被災箇所では、粘性土堤体の下に堤外地と直接連通している高透水性層が行き止まりの状態が存在していたことが報告されている¹⁾。これまで、河川堤防は過去の被災経験に基づいて、断面形状に重きを置いた整備が行われてきた。また、堤体の浸透すべり破壊の検討にあたっては、浸透解析と円弧すべり解析という別々の解析手法を組み合わせる方法が標準となっている。しかしながら、上記のような透水性基礎地盤に起因する堤防被災をきっかけに、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、空気～水～土骨格連成有限変形解析コード²⁾を用いて、まず透水模型実験の再現解析を行った。具体的には、高透水性層が行き止まりを有する透水模型実験をシミュレートして、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(解析コードのValidation)。さらに、本解析コードを用いたケーススタディも実施して、高透水性層の行き止まりの有無、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砂3号の層を設けている。矢部川堤防の被災箇所報告された高透水性層の行き止まりを表現するために、三河砂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。

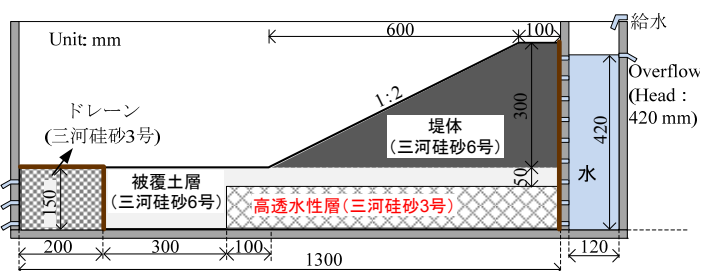


図1 透水模型実験の概要

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⁾の三河砂6号の値から決定した。ここでは簡単のため、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: 4.06×10^{-3} m/s, 6号砂: 1.61×10^{-4} m/s⁶⁾)。4章のケーススタディでは、8号砂(飽和透水係数の値: 2.21×10^{-5} m/s⁶⁾)を想定した土を被覆土層として用い、6号砂よりも透水性が低い。3号砂と6号砂の飽和透水係数は約20倍異なり、3号砂と8号砂は約200倍異なる。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(噴砂・噴水)がボイリング(噴砂・噴水)が発生した。こ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37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37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。

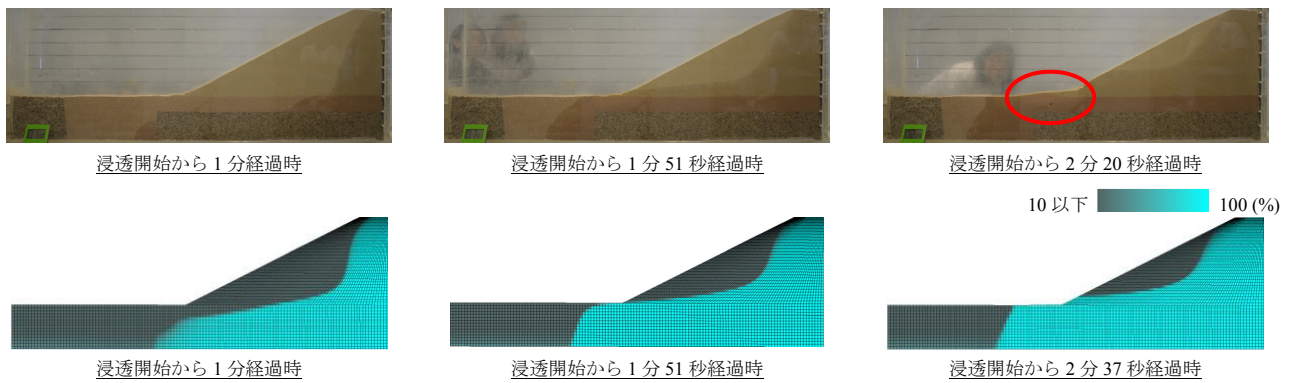


図2 透水模型実験の結果（上）と計算結果の飽和度分布（下）の比較（3章）

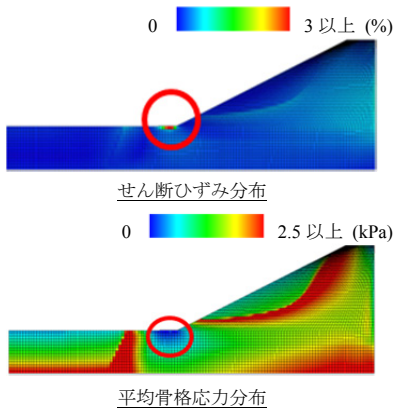


図3 透水模型実験の再現解析（3章）
（浸透開始から2分37秒経過時）

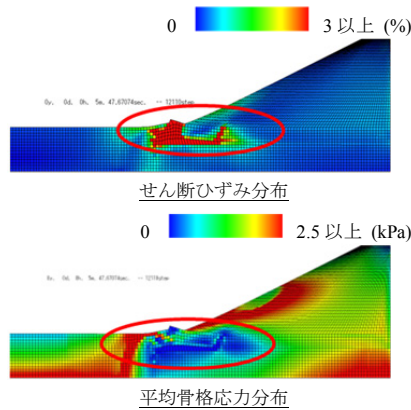


図4 被覆土層の透水性が低い場合
（4章②）

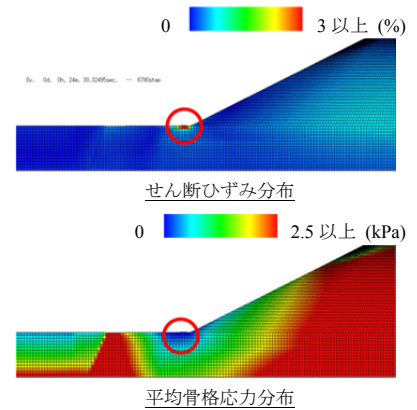


図5 被覆土層の透水性が低い、かつ、
水位が180mm（低い）場合（4章③）

4. ケーススタディ（高透水性層の行き止まりの有無、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、次に示す3つのケーススタディを行った。① 図1において三河硅砂3号から成る高透水性層の行き止まりが無く、左端まで連続している場合、② 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③ ②の条件で右端水位を420mmから180mmに低くした場合、の3ケースである。

①に関しては、図を省略するが、行き止まりが無い場合はボイリング発生までの時間が長くなる。さらに、水位を210mmまで下げると、行き止まりが有る場合はボイリングが発生したが、無い場合はボイリングしなかった。② 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。③ ②の条件下で、水位のみ180mm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、高透水性層の行き止まりの有無、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

本解析手法は、砂か粘土か、変形か破壊か、降雨か地震か、という土材料・照査対象・外力形態等の違いを問わず、同一の理論的枠組みで地盤・土構造物の挙動を評価できる。今後は、実大スケールの照査に加えて、越水などの水理学的観点からの照査も視野に入れ、広範な土材料や外力に対する河川堤防の変形・破壊問題に取り組んでいきたい。

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) 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. 2) Noda and Yoshikawa: Soil-water-air coupled ..., S&F, 55(1), 45-62, 2015. 3) Asaoka et al.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, 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.