

空気～水～土骨格連成有限変形解析を用いた
透水模型実験のシミュレーションと浸透破壊メカニズムの考察
(Numerical simulation of a seepage model test and consideration of seepage failure
mechanism using soil-water-air coupled finite deformation analysis)

吉川高広¹，野田利弘²，小高猛司³，崔瑛⁴

1 名古屋大学大学院・工学研究科社会基盤工学専攻・yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

2 名古屋大学・減災連携研究センター

3 名城大学・理工学部社会基盤デザイン工学科

概 要

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おり、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。本論文では、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を用いて、まずは高透水性層が行き止まりを有する透水模型実験のシミュレーションを実施した。その結果、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を実施して、地盤の透水性および外水位が浸透破壊時の変形量の差に加えて、変形モードに影響を与えることを示す。

キーワード：浸透破壊，透水模型実験，三相連成有限変形解析

1. はじめに

洪水の継続時間が短い日本においては、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いなかった。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⁾。さらに、平成 25 年 7 月に発生した子吉川堤防の法すべりと梯川堤防の法崩れ^{2),3)}も、高透水性の基礎地盤に起因する被災と考えられている。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た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。

本研究では、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⁴⁾を用いて、透水模型実験⁵⁾の数値シミュレーションを行った。本解析コードは、広範な土の力学挙動を統一的な枠組みで記述できる弾塑性構成式 SYS Cam-clay model⁶⁾を搭載し、静的・動的の外力形態を問わず、変形から破壊までを一貫した枠組で扱う水～土骨格連成有限変形解析コード⁷⁾を、不飽和土もシームレスに扱うことができるように拡張したものである。本論文では、具体的にまず、高透水性層が行き止まりを有する透水模型実験の概要について述べた後、解析コードの妥当性の検証（Validation）として、本実験の数値シミュレーションを実施し、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。さらに、本解析コードを用いたケーススタディを実施して、地盤の透水性および外水位が浸透破壊時の変形量の差に加えて、変形モードに影響を与えることを示す。

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は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。実験結果の詳細は、次章において解析結果と比較して示す。

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。計算開始時のメッシュサイズは、地盤部分で 10mm 四方になるように設定した。堤体部分は、2 分で 10mm 盛土をする速さで土要素を 1 段ずつ追加して作製した⁸⁾。築堤後には圧密計算を 2 時間行った。表 1 は土骨格の構成式 SYS Cam-clay model に関する材料定数と初期値を示す。表 2 は不飽和浸透特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値を示す。表 1 は Noda et al. (2008)、表 2 は杉井ら⁹⁾の三河硅砂 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。表 3 は三河硅砂 3, 6, 8 号の飽和透水係数(杉井ら, 2002)を示す。8 号砂は 4 章のケーススタディで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。図 2 は三河硅砂 6 号の水分特性曲線および透水係数と飽和度の関係を示す。水分特性は van Genuchten モデル¹⁰⁾、透水係数と透気係数は Mualem モデル¹¹⁾を用いた。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 3 は透水模型実験の結果を示す。図 4 は計算結果の飽和度分布を示す。なお、図 4 の 50 秒経過時の図中に示す黒破線は高透水性層の位置を表し、以後の計算結果のコンター図においても高透水性層の位置を黒破線で示す。まず、図 3 と図 4 の比較より、計算結果は実験結果の浸潤過程をよく再現できていることがわかる。実験では浸透開

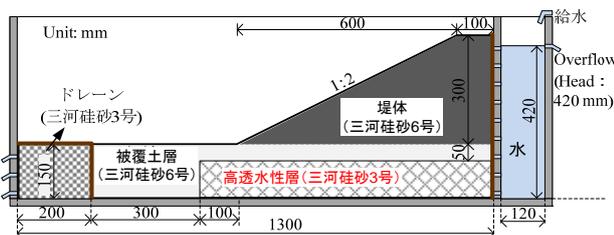


図 1 透水模型実験の概要

表 1 土骨格の構成式に関する材料定数と初期値

弾塑性パラメータ		
NCL の切片	N	1.98
限界状態定数	M	1.0
圧縮指数	λ	0.05
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.012
ポアソン比	ν	0.3
発展則パラメータ		
正規圧密土化指数	m	0.06
構造劣化指数	a	2.2
構造劣化指数	b	1.0
構造劣化指数	c	1.0
構造劣化指数	c_s	1.0
回転硬化指数	b_r	3.5
回転硬化限界面	m_b	0.7
初期値		
初期構造の程度	$1/R_0^*$	4.0
初期間隙比	e_0	1.0
初期応力比	η_0	0.545
初期異方性の程度	ζ_0	0.545

表 2 不飽和浸透特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値

水分特性曲線		
最大飽和度 %	s_{max}^w	100.0
最小飽和度 %	s_{min}^w	0.0
van Genuchten パラメータ kPa^{-1}	α	0.28
van Genuchten パラメータ ($m' = 1 - 1/n'$)	n'	12.898
乾燥透気係数 m/s	k_d^a	8.87×10^{-3}
初期飽和度 %	s_0^w	10.6
その他の物性値		
土粒子密度 g/cm^3	ρ_s	2.65
水の体積弾性係数 kPa	K_w	2.19×10^6
空気の気体定数 $m^2/s^2/K$	\bar{R}	287.04
絶対温度 K	Θ	293.15

表 3 三河硅砂 3, 6, 8 号の飽和透水係数の値

		3 号砂	6 号砂	8 号砂
飽和透水係数 m/s	k_s^w	4.06×10^{-3}	1.61×10^{-4}	2.21×10^{-5}

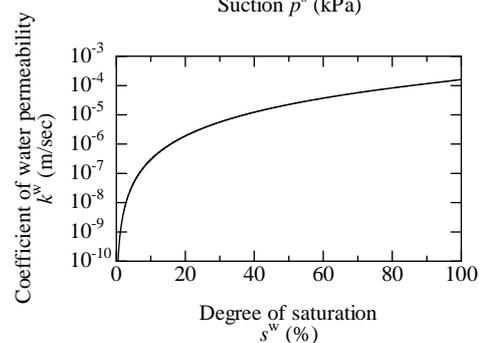
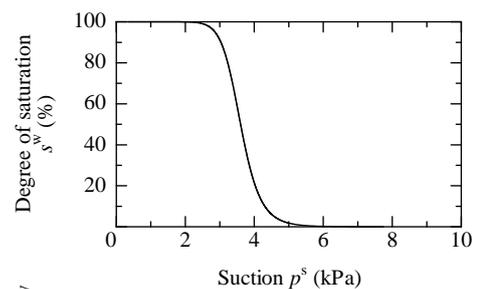


図 2 三河硅砂 6 号の不飽和浸透特性



50秒経過時



1分40秒経過時



2分20秒経過時

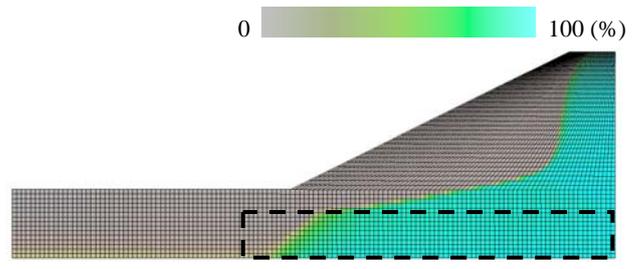


4分50秒経過時

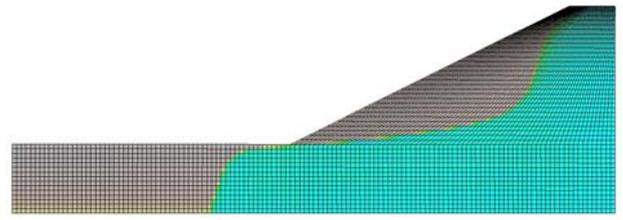
図 3 透水模型実験の結果

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。このボイリングをきっかけとして、最終的には 4 分 50 秒経過時のように堤体高さが半分程度になるまで崩壊していく。図 5 と図 6 はそれぞれ計算結果のせん断ひずみ分布と平均骨格応力分布¹²⁾を示す。図 4 の飽和度分布より、1 分 40 秒経過時は浸潤面が高透水性層と被覆土層の層境を越えた時間であり、このとき平均骨格応力が層境においてその周りより若干は小さいものの、せん断ひずみはほとんど生じていない。2 分 20 秒経過時に、実験ではボイリング（噴砂・噴水）が発生し、計算においても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する様子を表現できている。4 分 50 秒経過時には、さらに変形が進展しているが、実験のように堤体が崩壊する様子の再現までは現状難しい。

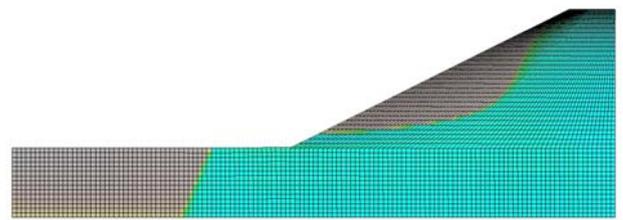
図 7 は法尻付近でせん断ひずみが最も大きい土要素の



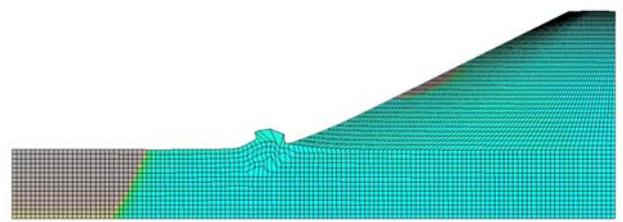
50秒経過時



1分40秒経過時



2分20秒経過時



4分50秒経過時

図 4 飽和度分布の計算結果

力学挙動を示す。図中の白抜き点は浸透開始前、黒塗り点はせん断ひずみが 3%を越えたときの点を示す。黒塗り点あたりから、吸水軟化により急激に骨格応力経路が原点に近づく。このため以後本論文では、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、浸透過程、および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外水位が与える影響）

3章の解析条件の一部を変更して、まずは次に示す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、

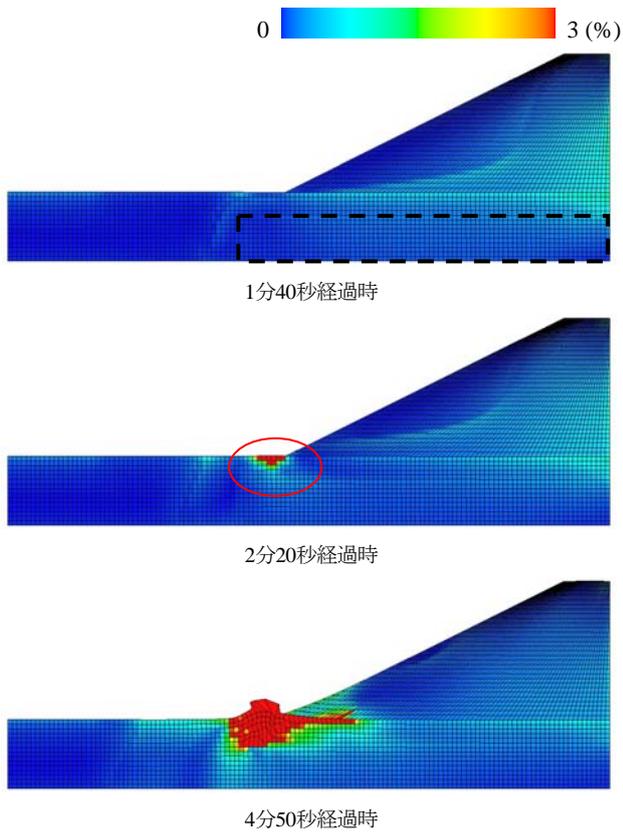


図 5 セン断ひずみ分布の計算結果

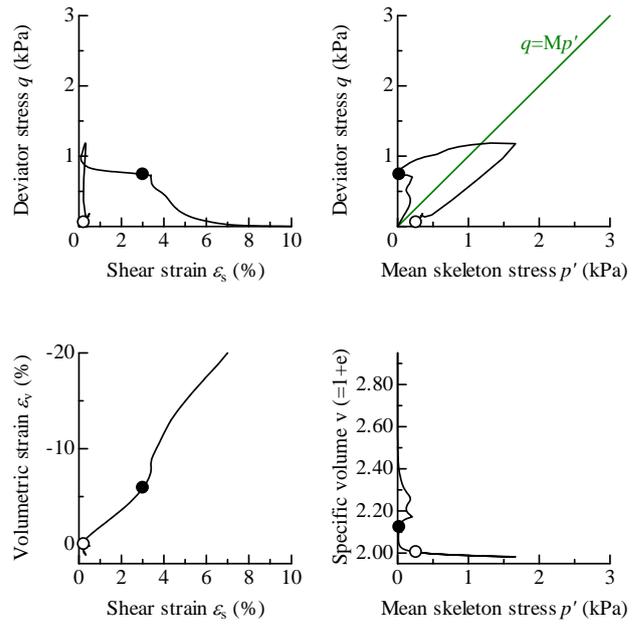


図 7 法尻付近のせん断ひずみが最も大きい土要素の力学挙動

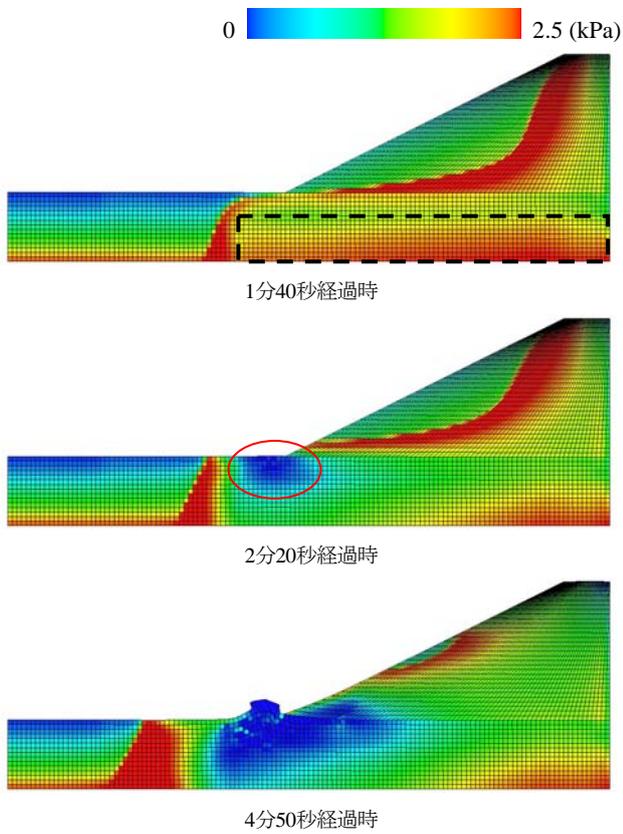


図 6 平均骨格応力分布の計算結果

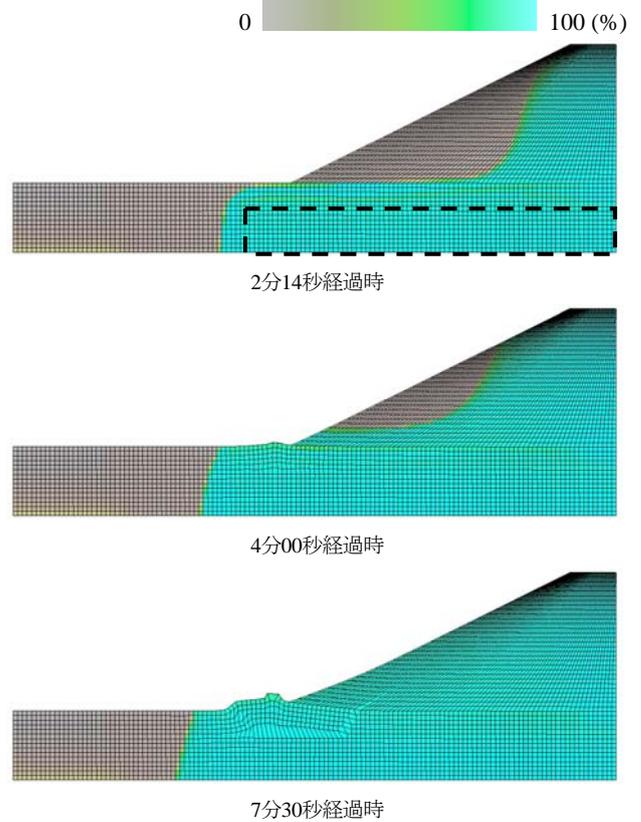


図 8 飽和度分布の計算結果
(被覆土層が8号砂の場合)

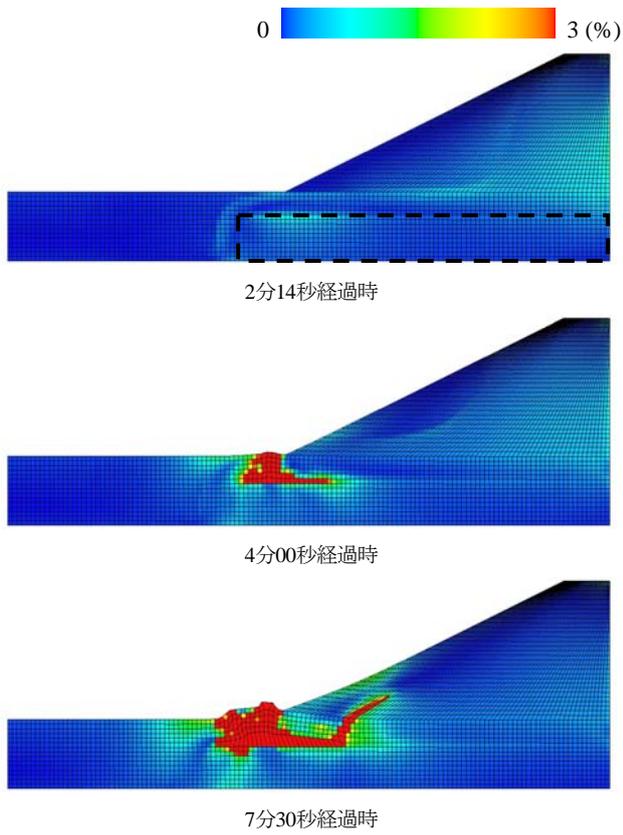


図 9 せん断ひずみ分布の計算結果
(被覆土層が8号砂の場合)

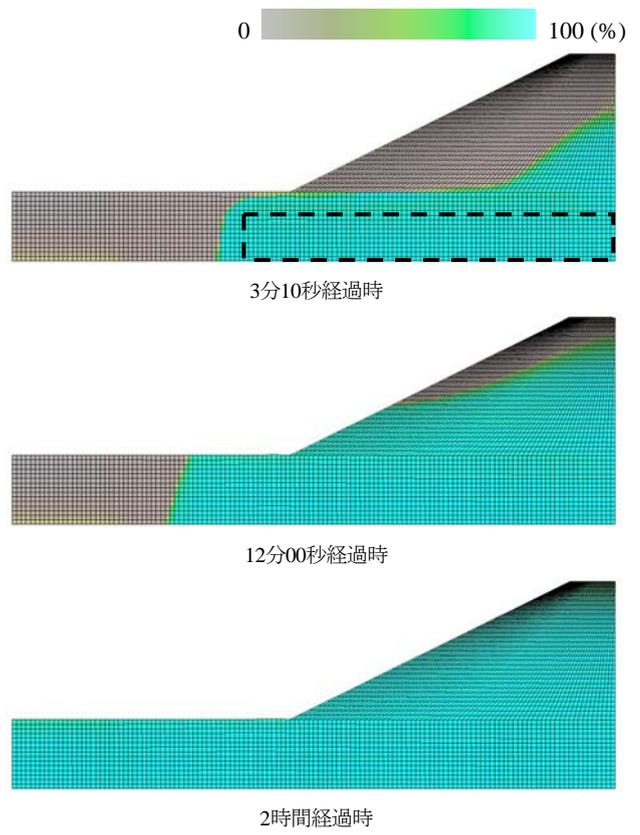


図 11 飽和度分布の計算結果
(被覆土層が8号砂かつ水位が210mmで低い場合)

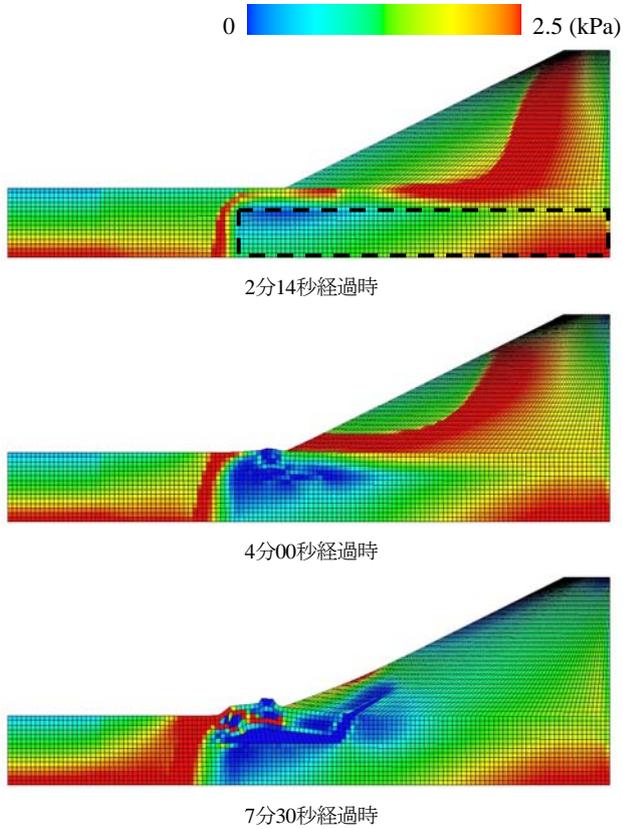


図 10 平均骨格応力分布の計算結果
(被覆土層が8号砂の場合)

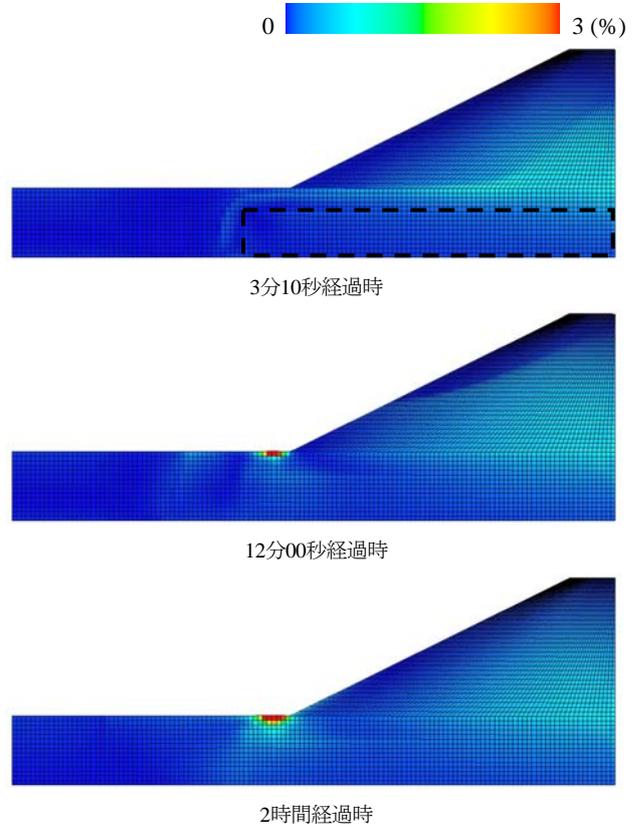


図 12 せん断ひずみ分布の計算結果
(被覆土層が8号砂かつ水位が210mmで低い場合)

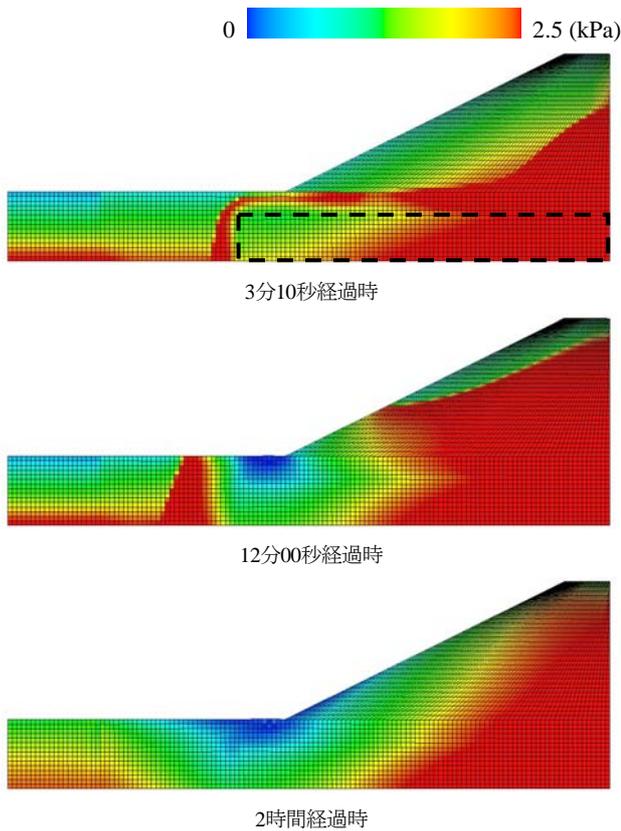


図 13 平均骨格応力分布の計算結果
(被覆土層が8号砂かつ水位が210mmで低い場合)

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 8 から図 10 はそれぞれ飽和度分布、せん断ひずみ分布および平均骨格応力分布を示す。2 分 14 秒経過時は浸潤面が高透水性層を越えたときであり、このとき地盤の層境における平均骨格応力は、3章の場合よりも低くゼロに近い。その後、4分経過時には、法尻付近の地表だけでなく層境でも大きなせん断変形が生じ、最終的にはせん断面が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 11 から図 13 はそれぞれ飽和度分布、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、層境において大きなせん断ひずみは生じず、法尻付近の地表においてせん断変形が卓越した。また、浸透開始から 2 時間経過時まで安定して計算でき、このとき定常状態となった。

図 14 は各ケースで浸潤面が層境を越えたときの過剰間隙水圧の等値線の比較を示す。ここで、過剰間隙水圧は、ある基準位置（本解析では解析断面下端）に自由水面を仮定した場合に計算される静水圧値から、過剰に発生した間隙水圧と定義する。水位 420mm で(a) 被覆土層が 6 号砂と (b) 8 号砂の場合を比較すると、8 号砂の場合は層境において、等値線が密に存在し、上向き動水勾配が大きい。(c) 被

覆土層が 8 号砂でも水位が 210mm の場合は、法尻近くの等値線の間隔は(a)に近い。また、各ケースの平均骨格応力分布を比較すると、図 6 に示す被覆土層が 6 号砂の場合と図 13 に示す被覆土層が 8 号砂で水位が 210mm の場合はその分布が類似し、図 10 に示す被覆土層が 8 号砂で水位が 420mm の場合のように、浸潤面が高透水性層を越えるときに層境で平均骨格応力がゼロ近くまでは低下していない。このことから、水位によって破壊モードに差が生じたことがわかる。

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、浸透破壊時の変形量の差に加えて、浸透破壊モードにも影響を与えることがわかった。

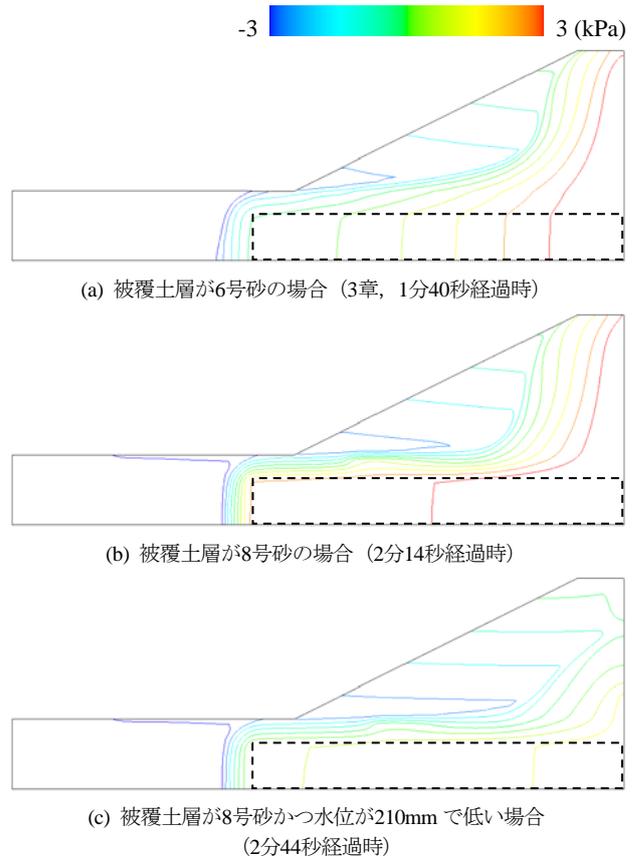


図 14 浸潤面が地盤の層境を越えたときの過剰間隙水圧の等値線の比較

最後に、被覆土層が 8 号砂で水位が 420mm のときに、対策工を施した場合の解析を実施した。具体的には、堤内基盤排水工法を想定して、図 15 の赤色で示す土要素にも三河硅砂 3 号の飽和透水係数を与え、高透水性層が部分的に地表まで連続している条件の解析を行った。図 16 から図 18 はそれぞれ飽和度分布、せん断ひずみ分布および平均骨格応力分布を示す。未対策の計算結果である図 8 から図 10 のコンター図と比較すると、浸潤面が高透水性層を越えた 2 分 14 秒経過時に、未対策の場合には層境において平均骨格応力がゼロ近くまで低下したが、対策工を施した場合はそのような様子は見られない。また、未対策の

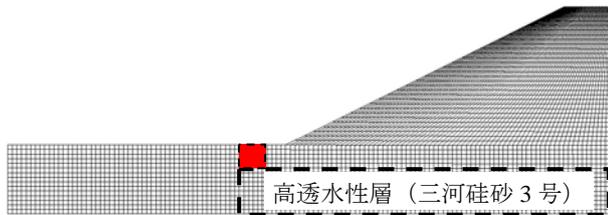


図 15 被覆土層が8号砂の場合に堤内基盤排水工法を想定した対策を行った場合の解析断面

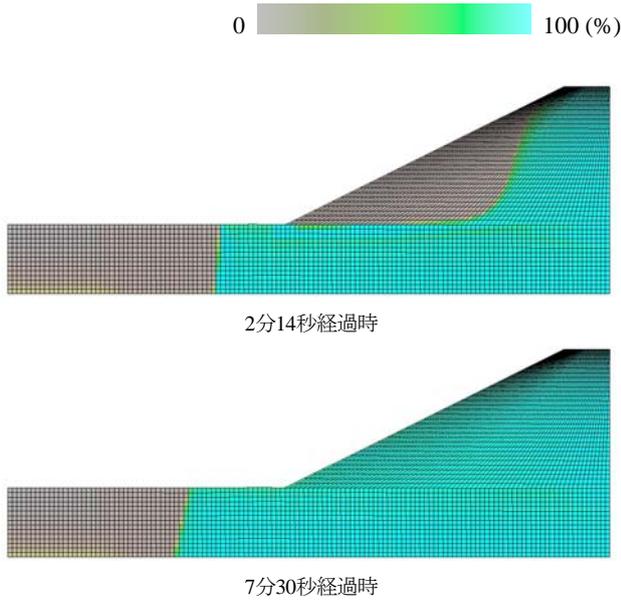


図 16 飽和度分布の計算結果
(堤内基盤排水工法を想定した対策を行った場合)

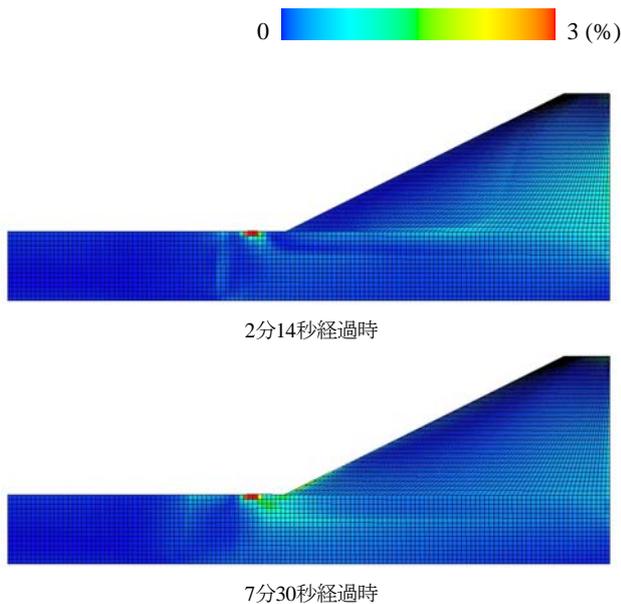


図 17 せん断ひずみ分布の計算結果
(堤内基盤排水工法を想定した対策を行った場合)

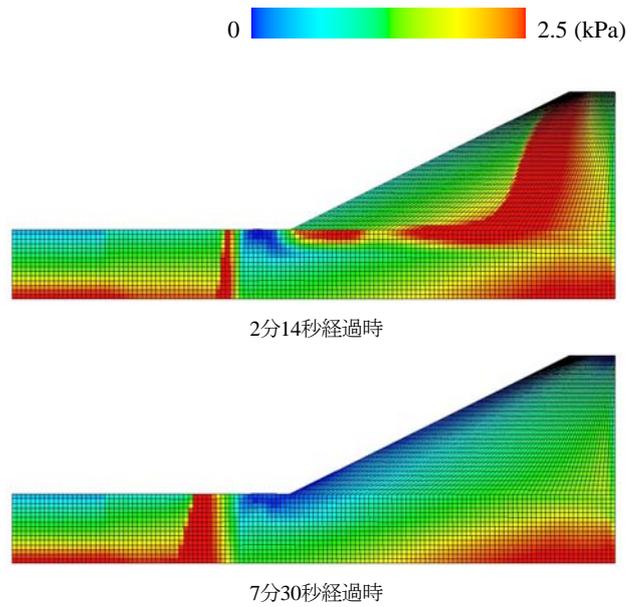


図 18 平均骨格応力分布の計算結果
(堤内基盤排水工法を想定した対策を行った場合)

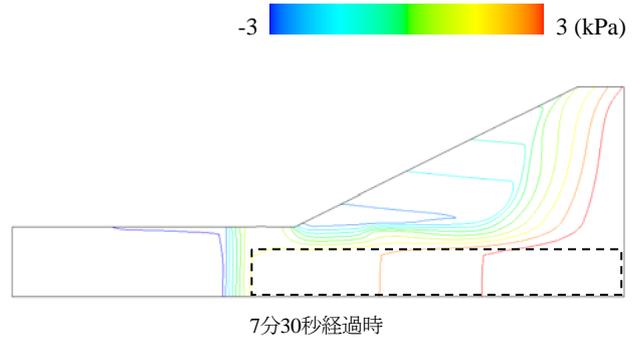


図 19 過剰間隙水圧の等値線の計算結果
(堤内基盤排水工法を想定した対策を行った場合)

場合は層境に沿ってせん断面が堤体まで進展した 7 分 30 秒経過時は、対策工を施した場合には、2 分 14 秒経過時と比べてもせん断ひずみの差がほとんど生じていない。これは高透水性層内の間隙水が地表面へと排出され、対策工無しの場合と比較して平均骨格応力の低下を抑えられるためである。図 19 は過剰間隙水圧の等値線を示す。図 14 に示したように、未対策の場合には層境において過剰間隙水圧の等値線が密に存在していたが、対策工を施した場合は、法尻付近の過剰間隙水圧の等値線が疎で、上向き動水勾配が小さい。

5. おわりに

高透水性層を有する透水模型実験のシミュレーションを通じて、空気～水～土骨格連成の弾塑性有限変形解析コードは、浸透破壊（ボイリング）を間隙水圧の上昇に伴う骨格応力の低下現象として、破壊箇所・破壊時間ともによ

く再現できることを示した。また、ケーススタディを通じて、高透水性層と被覆土層の透水性のコントラストおよび水位高さによって、浸透破壊時の変形量や破壊形態が異なることを示し、特に、高透水性層の飽和透水係数 (4.06×10^{-3} m/s) に比べて、被覆土層の値が約 200 分の 1 倍小さい場合 (2.21×10^{-5} m/s) は、高透水性層と被覆土層の層境でボイリングが生じ、せん断面は堤体に向かって大きく進展することを示した。また、堤内基盤排水工法を想定した対策工の有効性も確認した。

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、越水破堤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 と国土交通省 H27 年度河川砂防技術研究開発の助成を受けた。ここに、謝意を表します。

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) 災害報告特別セッション配布資料，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，土木学会，2014.
- 3) 大角一浩，飯田大輔，今森美穂：梯川古府地先漏水対策について，平成26年度北陸地方整備局事業研究発表会，2014.
- 4) Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 55(1), 45-62, 2015.
- 5) 小高猛司，李圭太，崔瑛，尤源，森三史郎，林愛実：透水性基礎地盤に起因する堤防の浸透破壊に関する考察，第3回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，土木学会，2015.
- 6) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57, 2002.
- 7) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 48(6), 771-790, 2008.
- 8) Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T. and Asaoka, A.: Predictive simulation of deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, *Soils and Foundations*, 50(2), 245-260, 2010.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522, 1976.
- 12) Jommi, C.: Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils* (eds. by Tarantino, A. and Mancuso, C.), Balkema, 139-153, 2000.