

# 空気～水～土骨格連成有限変形解析に基づく 河川堤防基礎地盤の透水性がパイピング破壊に及ぼす影響評価

有効応力解析法 パイピング 河川堤防

名古屋大学 学生会員 ○加藤健太 吉川高広  
 名古屋大学 国際会員 野田利弘  
 名城大学 国際会員 小高猛司  
**GEOASIA** 研究会 国際会員 高稲敏浩  
 建設技術研究所 国際会員 李圭太

## 1. はじめに

2012年7月の九州北部豪雨では高水位状態が長時間継続したことにより、矢部川堤防がパイピング破壊を起こし決壊した。本報では、実在する粘性土と砂質土の互層地盤上の河川堤防のパイピング破壊に対する照査を目的として空気～水～土骨格連成有限変形解析を実施した。使用した解析コードは、砂から粘土さらにはその中間土までを同じ理論的枠組みで記述可能な土の弾塑性構成式 **SYS Cam-clay model**<sup>1)</sup> を搭載した動的／静的空気～水～土骨格連成有限変形解析コード<sup>2)</sup> である。ただし本報では簡単のため、地下水位は基礎地盤の地表面と一致しているもの（基礎地盤は常に飽和状態）とし、堤体は飽和・不飽和の両状態を扱う。

## 2. 解析条件

別報<sup>3)</sup>と同様に庄内川右岸 6.0km 地点の堤防を対象とする。その地質横断図を **図 1** に示す。地表面には水色で示した粘性土層、その下には黄色で示した砂質土層があり、粘性土と砂質土の互層地盤となっている。本報では地表面付近の砂質土層 (As1 層) の透水性に注目し、①現場透水試験結果から得られた透水係数 ( $3.28 \times 10^{-3} \text{ (cm/sec)}$ ) を用いた場合、②礫質土の混入を想定して①の透水係数を 100 倍大きくした場合、および③②においてウェルドレーン工法<sup>4)</sup> のような堤内基盤排水工法を想定して、被覆土層の透水性を改善した場合、の 3 ケースについて解析を実施した。解析に用いる **SYS Cam-clay model** の土質パラメータは現地採取した試料の力学試験結果から決定し、As1 層以外の基礎地盤の透水係数は現場透水試験結果<sup>5)</sup> の値を用いた。堤体の水分特性曲線には、Carsel and Parrish<sup>6)</sup> の van Genuchten 式<sup>7)</sup> の silt の値を用い、透水係数と透気係数の式には Mualem モデル<sup>8)</sup> を用いた。河川堤防は、有限要素メッシュを追加・削除することで<sup>9)</sup> 原地盤から築造し、築造に伴う過剰間隙水圧が消散するまで放置した後、河川水位を計画高水位 (T.P.5.22m) 程度まで上昇させ、高水位状態を維持し続けた。河川水位上昇時には、川表側の河川水位よりも下に位置する土要素に河川水位に対応した全水頭境界を設定し、その他の川表側の土要素および川裏側の土要素に浸出面境界を設定した。解析ケース③の改良範囲は川裏法尻付近の被覆土層の幅 1m 分とし、透水係数のみ  $6.28 \times 10^{-5} \text{ (cm/sec)}$  から  $1.0 \times 10^{-2} \text{ (cm/sec)}$  に変更した。

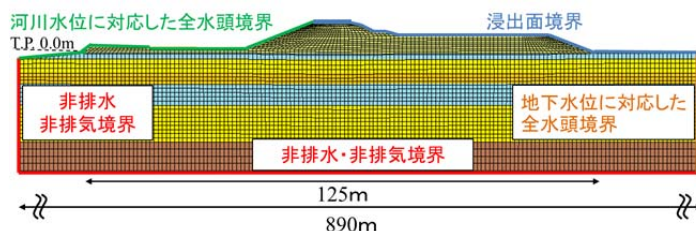


図 1 庄内川右岸 6.0km 地点の地質横断図

表 1 解析ケースの透水係数の一覧

	As1 層 (cm/sec)	
①	$3.28 \times 10^{-3}$	基本ケース
②	$3.28 \times 10^{-1}$	As1 層の透水係数を 100 倍
③	$3.28 \times 10^{-1}$	②の被覆土層の一部を改良

## 3. 解析結果

図 2 と図 3 は、解析ケース①および②における川裏法尻付近のせん断ひずみと平均骨格応力 (平均有効応力) の分布を示す。図 2 より、解析ケース①では高水位状態が 50 年継続してもせん断ひずみはほとんど生じておらず、パイピング破壊が発生することはなかった。一方、解析ケース②では高水位状態が 8 時間継続した時点で As1 層の上部でせん断ひずみが生じており、その後さらに時間が経過すると要素が膨張してパイピング破壊が発生した。図 3 の平均骨格応力を見ると、パイピング破壊が発生した解析ケース②では①に比べて大きく低下しており、ほぼ 0kPa となっている部分が見られる。図 4 は解析ケース②の含水比変化の分布を示し、青色ほど値が大きいことを意味する。せん断ひずみ大きい部分で含水比が増大して、吸水していることがわかる。河川水位が上昇すると、As1 層に川から給水されて間隙水圧が上昇し、上部の被覆土層との間に動水勾配が生じる。解析ケース①では川からの給水量と被覆土層への排水量のバランスが取れていたため、パイピング破壊が発生することはなかった。しかし解析ケース②では、As1 層の透水係数が非常に大きいため、川から大

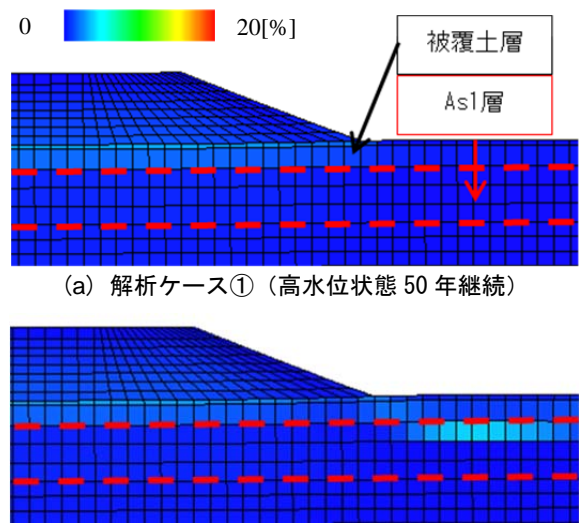


図 2 川裏法尻付近のせん断ひずみ分布

量に給水され、被覆土層への排水量とのバランスが崩れたため、被覆土層と As1 層の境に水が溜まり、パイピング破壊が発生した。すなわち、透水層の透水性が礫質土程度大きく、透水層と被覆土層の透水性に大きな差があると、パイピング破壊の危険性が高まることがわかった。

図 5 は解析ケース②に堤内基盤排水工法を施した解析ケース③のせん断ひずみ、平均骨格応力および含水比変化の分布を示す。解析ケース②でせん断ひずみが生じた高水位状態が 8 時間継続しても、大きなせん断ひずみが生じることはなかった。平均骨格応力の低下も抑えられており、含水比変化を見ても、As1 層の上部での含水比の増大の程度が小さくなっている。基礎地盤の変状を完全に抑制することはできないが、高水位状態が 2 日程度継続してもパイピング破壊が発生することはない。このように、堤内基盤排水工法のパイピング破壊防止効果が確かめられた。

#### 4. おわりに

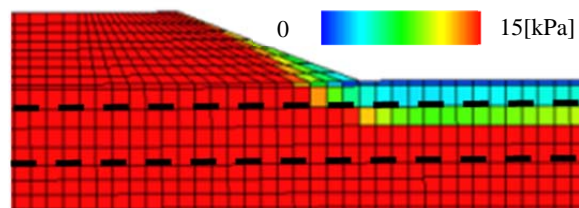
庄内川右岸 6.0km 地点の堤防では計画高水位状態が長時間継続しても浸透破壊が生じることがなかった。しかし、透水層である表層砂質土層に礫質土が混入しているなど、透水係数が大きい場合には高水位状態が継続すると 8 時間程度で変状が現れ始め、パイピング破壊が発生した。このような基礎地盤を有する河川堤防には、堤内基盤排水工法が有効であることが確認された。

本解析コード<sup>1)</sup>は、浸透だけでなく地震も扱えるため、浸透と地震の複合時の照査<sup>3)</sup>も可能である。今後、河川堤防をはじめとした様々な不飽和土構造物の浸透・地震時挙動を明らかにしていく予定である。

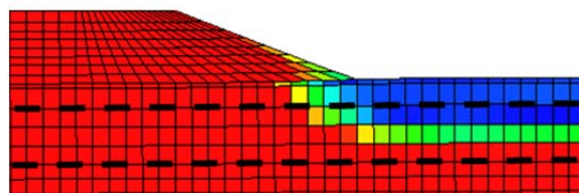
謝辞：JSPS 科研費 25249064 と国土交通省 H26 年度河川砂防技術研究開発の助成を受けた。ここに、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57.
- 2) Noda, T. and Yoshikawa, T. (2015): 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.
- 3) 野田利弘・吉川高広・加藤健太・小高猛司・高稲敏浩・李圭太 (2015)：空気～水～土骨格連成有限変形解析に基づく南海トラフ地震に対する大規模河川堤防の挙動に及ぼす河川水位の影響評価，第 50 回地盤工学研究発表会概要集（本誌掲載予定）。
- 4) 多田羅謙治・李圭太・江川祐輔・中土井佑輔 (2013)：河川堤防におけるウェルドレーン工法を用いた盤ぶくれ対策に関する検討，第 46 回（平成 25 年度）研究発表会論集，河川系 No.119-1，建設コンサルタンツ協会近畿支部。
- 5) 東邦地水株式会社 (1998)：平成 9 年度庄内川下流部堤防詳細点検報告書（資料編）。
- 6) Carsel, R.F. and Parrish, R.S. (1988): Developing joint probability distribution of soil water retention characteristics, *Water Resources Research*, 24(5), 755-769.
- 7) van Genuchten, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- 8) Mualem, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- 9) Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T. and Asaoka, A. (2010): 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.



(a) 解析ケース①（高水位状態 50 年継続）



(b) 解析ケース②（高水位状態 8 時間継続）

図 3 川裏法尻付近の平均骨格応力分布

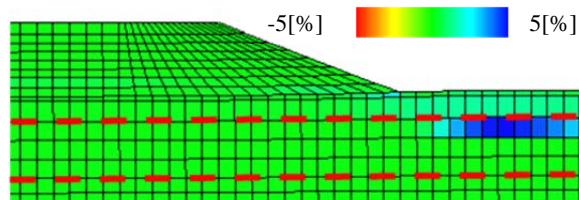
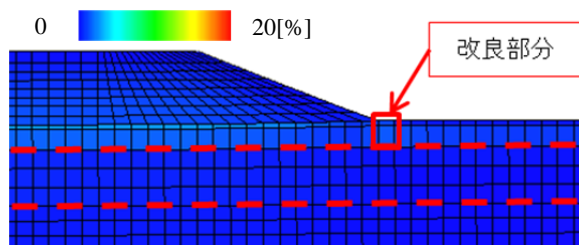
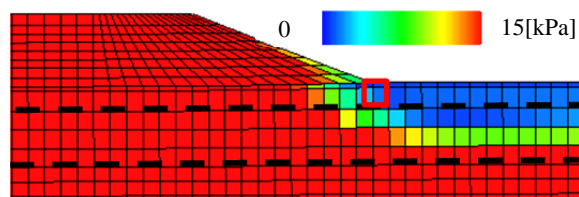


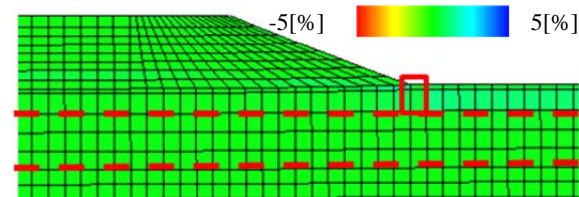
図 4 解析ケース②の含水比変化の分布  
（高水位状態 8 時間継続）



(a) せん断ひずみ分布



(b) 平均骨格応力分布



(c) 含水比の変化の分布

図 5 解析ケース③の諸量の分布  
（高水位状態 8 時間継続）