

サクシオン効果を記述する SYS Cam-clay modelを用いた堤体の浸透破壊の 空気～水～土連成有限変形シミュレーション

A soil-water-air coupled finite deformation simulation on seepage failure of levee using the SYS Cam-clay model which can describe suction effect

吉川高広¹⁾, 野田利弘²⁾, 小高猛司³⁾, 崔瑛⁴⁾

Takahiro Yoshikawa, Toshihiro Noda, Takeshi Kodaka and Ying Cui

1) 博(工) 名古屋大学 大学院工学研究科 助教 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町, E-mail:

yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp)

2) 博(工) 名古屋大学 減災連携研究センター 教授 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)

3) 博(工) 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科 教授 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

4) 博(工) 横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院 准教授 (〒240-8501 横浜市保土ケ谷区常盤台79-1)

A seepage model test of a river levee on the ground having a highly permeable soil layer was simulated using a soil-water-air coupled finite deformation analysis code incorporating the SYS Cam-clay model which can describe suction effect. The simulated result showed that the levee body became normal consolidation state due to decrease in suction effect associated with increase in saturation degree and thereby slip failure of the levee body could occur. In addition, the soil element on the slip surface showed softening behavior with plastic volume expansion.

Key Words : Soil-water-air coupled analysis, Suction, Seepage failure

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。

著者らはこれまでに、土骨格の弾塑性構成式にSYS Cam-clayモデル^[1]を搭載した空気～水～土連成有限変形解析コード^[2]を用いて、透水模型実験^[3]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した^[4]。本稿では、京川ら^[5]、Zhang and Ikariya^[6]に倣ってサクシオン効果を考慮できるSYS Cam-clayモデル^[7]を新たに用いて、透水模型実験^[3]のシミュレーションを実施し、サクシオン効果の有無が浸透破壊挙動に与える影響について述べる。

2. 透水模型実験^[3]の概要と解析条件

図-1は参照した透水模型実験^[3]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5:2:5で混合した砂を用いている。実験手順は、基礎地盤と堤体を構築した後に、(i)模型右端の水位を基準面から100mmの高さで1.5時間放

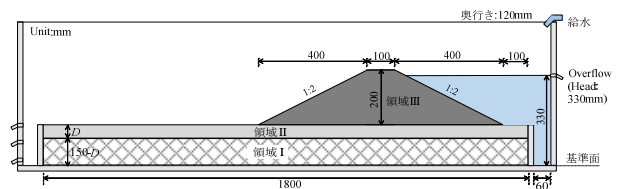


図-1 透水模型実験^[3]の概要

置後、(ii)水位を高さ330mmまで上昇させる。著者ら^[4]はこれまでに、目立った変形が生じなかった (a)地盤上部層厚が50mm (図-1中の $D=50\text{mm}$) の場合と、最終的には滑りが堤体天端部分まで到達した (b)地盤上部層厚が30mm (図-1中の $D=30\text{mm}$) の場合をシミュレートし、(a)の場合は変形がほぼ生じない様子を、(b)の場合は基礎地盤の層境からボーリングする様子の再現に成功した。本稿では、大きな変形が生じた (b)のシミュレーションを、サクシオン効果を考慮できるSYS Cam-clayモデル^[7]を用いて行い、サクシオン効果有無の違いが堤防の変形挙動に与える影響を示す。なお、実験結果^[3]は、次章において解析結果と比較して示す。

図-2は解析断面を示す。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一定（位置水頭の基準が解析断面下端のとき、前述(i)の過程では全水頭100mm、(ii)の過程では全水

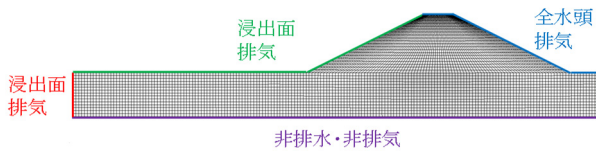


図-2 解析断面

頭330mm)・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。

表-1は土骨格の弾塑性構成式SYS Cam-clay model^{[1],[7]}に関する材料定数と初期値を示す。Noda et al.^[8]の三河硅砂6号の値を参考に決定した。表-2は土の水分特性 (van Genuchten式^[9], Mualem式^[10]) 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。図-3は水分特性曲線を示す。表-3は飽和透水係数と乾燥透気係数の値を示す。杉井ら^[11]の研究を参考に値を決定した。ここでは簡単のために、土質の違いは飽和透水係数および乾燥透気係数の違いとして表現した。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・堤体内で一定と仮定し、土被り圧に応じて過圧密比を分布させた^{[12],[13]}。なお、堤体部分は土要素を1段階ずつ追加・載荷^[14]して作製した。

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		
CSLの切片 (最大飽和度時)	Γ	1.82
CSLの切片 (最小飽和度時)	Γ_r	1.86
限界状態定数	M	1.0
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	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
	a	2.2
構造劣化指数	b	1.0
	c	1.0
	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		
構造の程度	$1/R^*_0$	2.0
過圧密比	$1/R_0$	分布
間隙比 (3号砂)	e_0	0.9
間隙比 (8号砂, 混合砂)	e_0	1.0
応力比	η_0	0.545
異方性の程度	ζ_0	0.545

3. 解析結果

まず、前述(i)の過程について、図-4は、サクシオン効果無しの場合の水位100mm上昇前後の飽和度分布を示す。

表-2 土の水分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
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

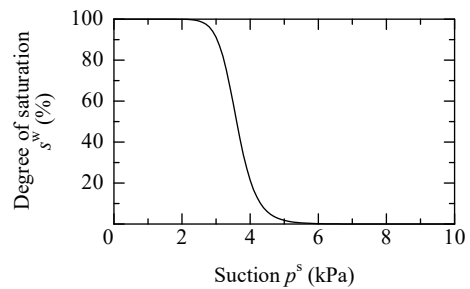


図-3 水分特性曲線

表-3 飽和透水係数と乾燥透気係数の値

		3号砂	8号砂	混合砂
飽和透水係数 m/s	k_s^w	4.60×10^{-3}	2.21×10^{-5}	8.25×10^{-5}
乾燥透気係数 m/s	k_d^a	7.60×10^{-1}	3.65×10^{-2}	1.36×10^{-1}

模型堤防は初期飽和度10.6%で作製し、その後水位を100mmまで上昇させ、十分に (1.5時間) 放置すれば、図-3に示す水分特性曲線を反映して、天端位置においてもほぼ飽和状態になる。なお、本研究では間隙比依存性の水分特性曲線を用いていないため、サクシオン効果の有無にかかわらず両者はほぼ同じ結果になる。図-5は水位100mm上昇後1.5時間経過時の比体積変化分布 (水位100mm上昇直前からの変化量, 圧縮が正) を比較した図で

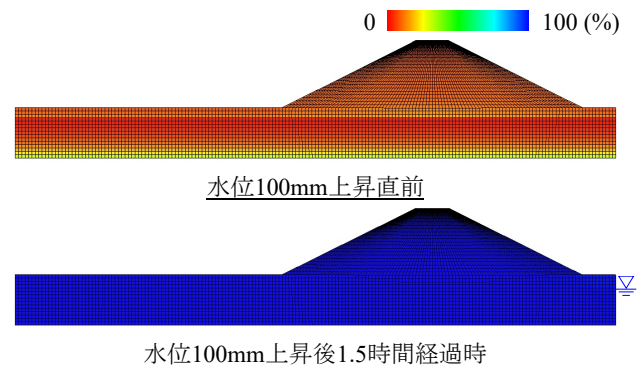


図-4 水位100mm上昇前後の飽和度分布

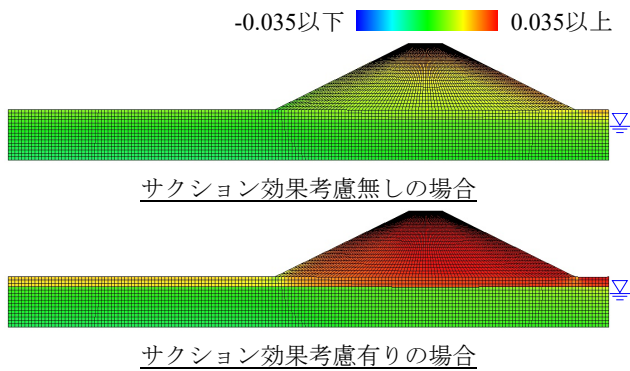


図-5 比体積変化分布の比較
(水位100mm上昇後1.5時間経過時)

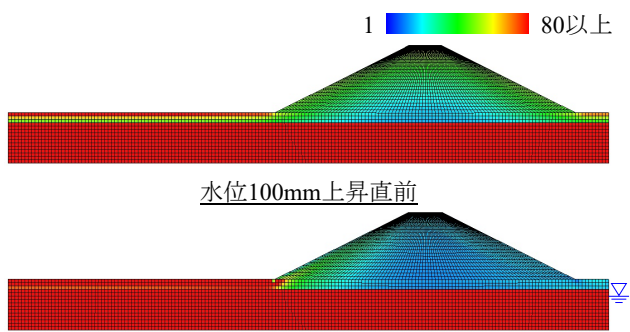


図-6 水位100mm上昇前後の過圧密比分布
(サクシヨン効果考慮無しの場合)

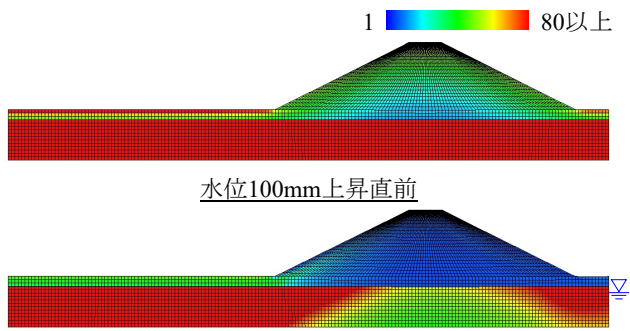


図-7 水位100mm上昇前後の過圧密比分布
(サクシヨン効果考慮有りの場合)

ある。サクシヨン効果有りの方が、吸水コラプスが生じるため、体積圧縮量が大きい。図-6と図-7はそれぞれ、サクシヨン効果考慮無しと有りの場合の、水位100mm上昇前後の過圧密比分布図を示す。初期過圧密比は、サクシヨン効果考慮が無い場合と有る場合において等しくなるように解析条件を設定したため、水位を100mm上昇する直前（堤体構築後）の過圧密比もほぼ等しい。水位を100mm上昇後は、サクシヨン効果有りの方が、吸水コラプス（塑性体積圧縮）に伴い正規圧密化している。

次に、前述(ii)の過程について、図-8は実験結果、図-9と図-10はそれぞれ、サクシヨン効果考慮無しと有りの場合のせん断ひずみ分布の解析結果を示す。実験では、浸透開始から50秒経過時に基礎地盤の層境から変形が生じ、それをきっかけに堤体が進行的に崩壊していく。解析においても、基礎地盤の層境から変形し始め、これをきっかけに堤体が法尻から徐々に崩壊していく様子を捉えられている。実験結果のようにその後の大崩壊を表現できていないが、サクシヨン効果有りの方が、堤体内部への変形が進行している。これは図-6と図-7で示したように、浸透による吸水コラプス（塑性体積圧縮）が正規圧密化を促進し、堤体の強度・剛性が小さくなったためである。図-11は、図-10中に矢印で示したすべり面上に位置する土要素の力学挙動を示す。図中の白抜き点は水位330mm上昇直前の点を示す。水位上昇により間隙水圧が上昇し、吸水軟化（塑性体積膨張を伴う軟化）で骨格応力経路が原点に近づいている。

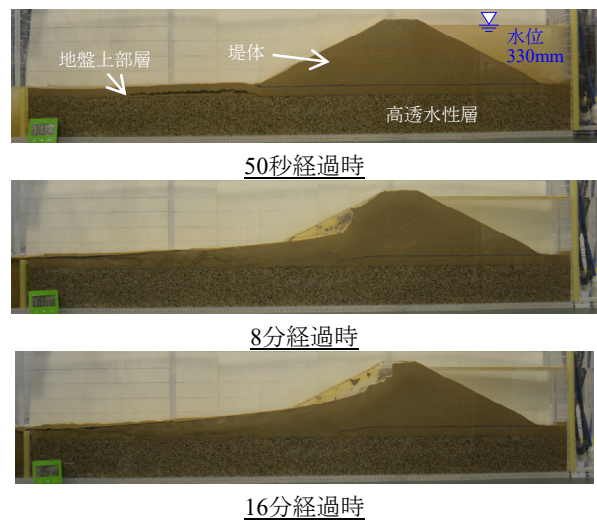


図-8 水位330mm上昇時の実験結果

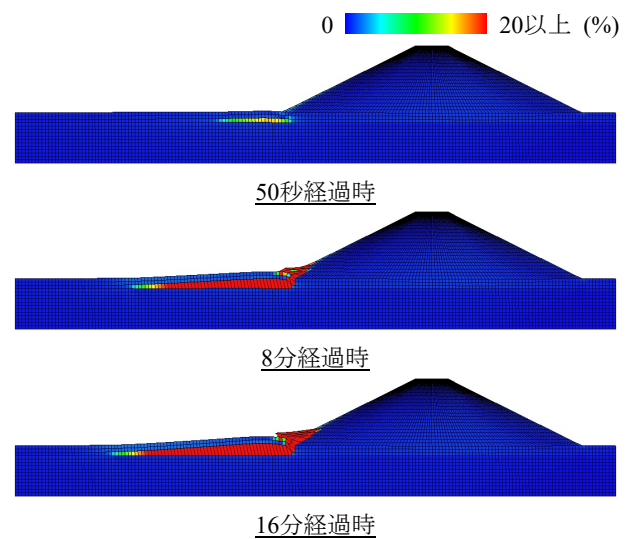


図-9 水位330mm上昇時のせん断ひずみの解析結果
(サクシヨン効果考慮無しの場合)

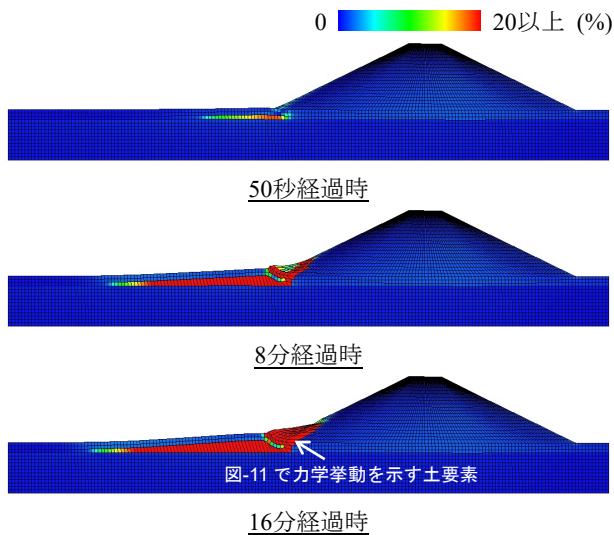


図-10 水位330mm上昇時のせん断ひずみの解析結果 (サクシオン効果考慮有りの場合)

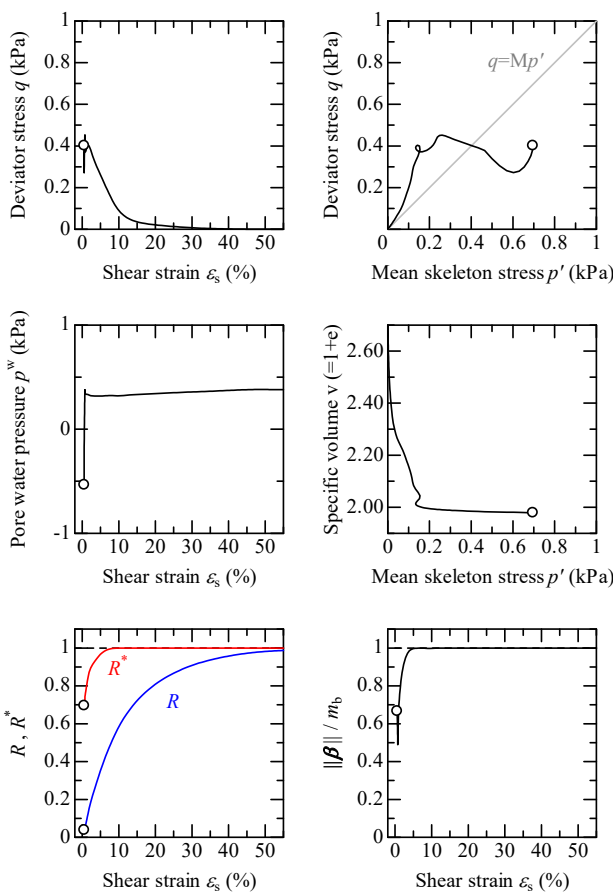


図-11 すべり面上に位置する土要素の力学挙動 (図-10中に矢印で示した土要素の力学挙動)

4. おわり

サクシオン効果を考慮できるSYS Cam-clayモデルを用いると、浸透時に生じる吸水コラプス(塑性体積圧縮)が正規圧密化を促進するため、堤体内部への変形が進行することを示した。実験結果のように、堤体が大崩壊する様

子の表現までは至っていないが、基礎地盤の層境からの変形をきっかけに、堤体が進行的に破壊する様子をよく捉えられた。

謝辞: JSPS科研費17H01289およびH29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る。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 小高猛司, 崔瑛, 林愛実, 森三史郎, 李圭太: 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, 961-962, 2017.
- [4] 吉川高広, 野田利弘, 内藤誠也, 小高猛司, 崔瑛: 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, 土木学会第72回年次学術講演会, 201-202, 2017.
- [5] 京川裕之, 菊本統, 中井照夫, Hossain Md. Shahin: サクシオン・飽和度・密度を統一的に考慮できる不飽和土の弾塑性モデル, 応用力学論文集, 12, 331-342, 2009.
- [6] Zhang, F. and Ikariya, T.: A new model for unsaturated soil using skeleton stress and degree of saturation as state variables, *Soils and Foundations*, 51(1), 67-81, 2011.
- [7] 吉川高広, 野田利弘: 不飽和土の排気・排水三軸圧縮シミュレーションを通じた水分特性モデルにおける間隙比依存性考慮の必要性, 第22回計算工学講演会, F-04-5 (CD-ROM), 2017.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522, 1976.
- [11] 杉井俊夫, 山田公夫, 奥村恭: 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.
- [12] Noda, T., Asaoka, A. and Yamada, S.: Some bearing

capacity characteristics of a structured naturally deposited clay soil, *Soils and Foundations*, 47(2), 285-301, 2007.

- [13] Nakano, M., Yamada, E. and Noda, T.: Ground improvement of intermediate reclaimed land by compaction through cavity expansion of sand piles, *Soils and Foundations*, 48(5), 653-671, 2008.

- [14] 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.