

# 空気～水～土連成有限変形解析コードによる降雨模型実験における不飽和斜面の変形・破壊シミュレーション

Simulation of deformation and failure of unsaturated slope in a rainfall model test using a soil-water-air coupled finite deformation analysis code

吉川高広<sup>1)</sup>, 野田利弘<sup>2)</sup>, 西沢建吾<sup>3)</sup>

Takahiro Yoshikawa, Toshihiro Noda and Kengo Nishizawa

- 1) 博(工) 名古屋大学 大学院工学研究科 助教 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町, E-mail: yoshikawa.takahiro.d3@f.mail.nagoya-u.ac.jp)
- 2) 博(工) 名古屋大学 大学院工学研究科 教授 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
- 3) 修(工) 元 名古屋大学 大学院工学研究科 学生 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Numerous slope and embankment collapses have occurred due to heavy rainfall. Causes of the collapses are considered as reduction of strength due to saturation of unsaturated soil and rise in pore pressure, and increase of self-weight due to water absorption. However, the detailed collapse mechanism has not been elucidated. To elucidate the mechanism, this study conducted deformation and failure simulations of unsaturated slopes in rainfall model tests using a soil-water-air coupled elastoplastic finite deformation analysis code considering inertia force. As a result, we succeeded in reproducing the deformation-to-failure behavior of the model slope due to rainfall infiltration. The soil element on the slip surface exhibited "softening behavior with plastic volume expansion" above the critical state line in  $p'-q$  skeleton stress space. In addition, we reproduced deformation and failure patterns according to rainfall intensity.

**Key Words** : Soil-Water-Air Coupled Elastoplastic Finite Deformation Analysis, Unsaturated Soil, Inertia Force, Rainfall

## 1. はじめに

近年では、平成30年7月豪雨や令和元年東日本台風をはじめ、降雨による斜面や盛土の崩壊が多発している。その崩壊要因には、不飽和土の飽和化や間隙圧上昇による強度低下、吸水による自重増加等が挙げられているが、詳細な崩壊メカニズムの解明までには至っていない。従前、降雨時の斜面・盛土の崩壊予測には、浸透解析と安定解析を組み合わせた手法が用いられる。しかし、斜面・盛土の崩壊メカニズム解明には、浸透解析で得られる応力状態を用いて安全率が1を超えるか否かで破壊の有無を与える安定解析は全く不十分で、降雨浸透に伴う土の変形から破壊に至る一連の過程を扱う力学体系が必要である。また、破壊現象は加速度運動を伴うため、たとえ外力が降雨であっても、慣性力を考慮する必要性は言うまでもない。さらに、変形から破壊に至る大変形挙動を数値シミュレートするには、土の変形とともに現れる幾何的非線形性を考慮する有限変形論に基づく解析手法が不可欠である。

以上の認識のもと、著者らはこれまでに、慣性力対応の空気～水～土連成弾塑性有限変形解析コード<sup>[1], [2], [3]</sup>を用いて、不飽和土三軸供試体の吸水破壊メカニズムの解明を行ってきた<sup>[4]</sup>。本研究では次なるステップとして、同解析コードを用いて、降雨模型実験<sup>[5]</sup>における不飽和斜面の変形・破壊シミュレーションを行った。本報では、この結果、当該模型実験と同様、降雨浸透に伴って不飽和斜面が

変形から破壊に至り、すべりが、その面上に位置する土要素が限界状態線 $q=Mp'$ の上側で示す「塑性体積膨張を伴う軟化挙動」を呈することによって生ずることを示す。

## 2. 参照実験<sup>[5]</sup>の概要と解析条件

土材料の不飽和浸透特性が明示されているChueasamat et al.<sup>[5]</sup>の降雨模型実験を参照した。図-1は実験模型の概要を示す。1G重力場において、DL clayから成る基盤の上に、霞ヶ浦砂から成る不飽和斜面を構築し、上方から散水する実験である。DL clay基盤の締固め度は100% (飽和度は約61%) で、霞ヶ浦砂層の相対密度は0, 25, 50%の3条件 (飽和度は約29～34%)、降雨強度は25, 50, 100mm/hの3条件で、計9ケースの実験が行われている。図-1中のP1～18に示す点で水圧が計測されている。本稿では降雨強度の異なる3ケースの解析結果について述べる。なお、実験結果は、次節において解析結果と併せて示す。

2次元平面ひずみ条件で解析を行った。図-2は解析断面を示す。実験と同じ寸法で、実験手順と同様に、基盤と斜面の土要素を1段ずつ追加<sup>[6]</sup>して降雨直前の模型を作製した。左端と下端は非排水・非排気条件、右端は浸出面境界・非排気条件、地表面は浸出面境界 (斜面構築時) / 降雨境界 (散水時) ・排気条件を設定した。また、下端は水平・鉛直方向変位固定、左右端は水平方向変位固定とした。

解析コードに搭載した土骨格の構成モデルは不飽和の効果を考慮した弾塑性構成式SYS Cam-clayモデル<sup>[2]</sup>であ

る。表-1はその材料定数と初期値を示す。DL clayの材料定数は著者らの既往研究の値<sup>[2]</sup>を、初期値については実験と同じ間隙比を与えた。霞ヶ浦砂については、力学試験結果が明示されていないため、ここではDL clayと同じ材料定数を用い、初期値としては緩い条件（締固め度約80%）を設定した。なお、応力式には骨格応力の式<sup>[7]</sup>を用いた。

不飽和浸透特性モデルにはvan Genuchten<sup>[8]</sup>—Mualem<sup>[9]</sup>モデルを用いた。表-2はその材料定数と初期値およびその他の物性値を示す。図-3は保水性試験結果<sup>[5]</sup>と解析に用いた水分特性曲線を示す。各材料の吸水過程の保水性試験結果<sup>[5]</sup>を再現するように材料定数を設定し、初期値については実験と同じ飽和度を与えた。

DL clay層および霞ヶ浦砂層の構築時は、初期の間隙比、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)を各層内で一定と仮定し、土被り圧に応じて過圧密比を分布させた<sup>[10],[11]</sup>。

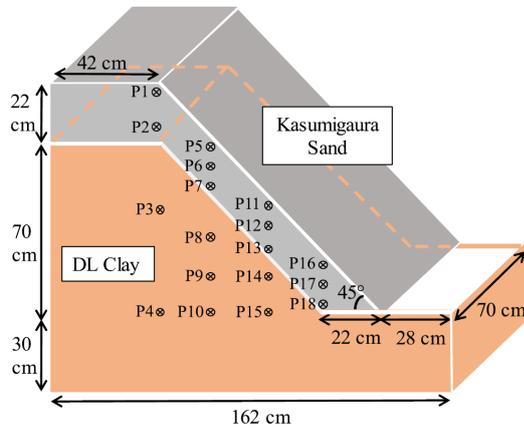


図-1 実験模型の概要<sup>[5]</sup>

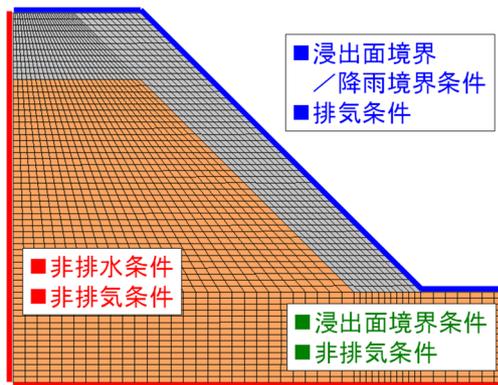


図-2 解析断面

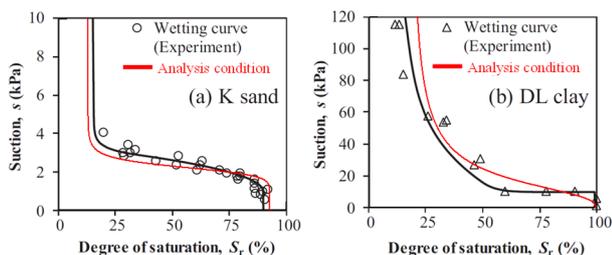


図-3 保水性試験結果<sup>[5]</sup>と解析に用いた水分特性曲線

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		霞ヶ浦砂	DL clay
$S_e^l = 1$ における限界状態線の $p' = 98.1 \text{ kPa}$ , $q = 0 \text{ kPa}$ のときの比体積	$\Gamma$		1.965
$S_e^l = 0$ における限界状態線の $p' = 98.1 \text{ kPa}$ , $q = 0 \text{ kPa}$ のときの比体積	$\Gamma_r$		2.09
限界状態定数	M		1.33
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$		0.05
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$		0.01
ポアソン比	$\nu$		0.3
発展則パラメータ		霞ヶ浦砂	DL clay
正規圧密土化指数	$m$		1.3
構造劣化指数 ( $b = c = 1.0$ )	$a$		1.0
構造劣化指数	$c_s$		0.8
回転硬化指数	$b_r$		0.0
回転硬化限界定数	$m_b$		0.0
初期値		霞ヶ浦砂	DL clay
間隙比	$e_0$	1.23	0.745
構造の程度	$1/R_0^*$	5.0	1.0
応力比	$\eta_0$	0.545	0.545
異方性の程度	$\zeta_0$	0.0	0.0

\*  $S_e^l$ : 有効飽和度

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

不飽和浸透特性		霞ヶ浦砂	DL clay
van Genuchten パラメータ $\text{kPa}^{-1}$	$\alpha$	0.45	0.07
van Genuchten パラメータ ( $m' = 1 - 1/n'$ )	$n'$	10.0	2.5
吸着水含水比 %	$w_r$	5.0	5.0
封入空気遷移パラメータ	$\alpha^*$	0.5	0.01
連続空気遷移パラメータ	$\mu^*$	0.5	0.01
飽和透水係数 m/s	$k_s^w$	$1.25 \times 10^{-4}$	$6.68 \times 10^{-7}$
乾燥透気係数 m/s	$k_d^a$	$6.89 \times 10^{-3}$	$3.68 \times 10^{-5}$
初期値		霞ヶ浦砂	DL clay
飽和度 %	$S_{r0}$	30.0	61.0
自由水飽和度 %	$S_{r0}^w$	99.9	99.9
その他の物性値		霞ヶ浦砂	DL clay
土粒子密度 $\text{g/cm}^3$	$\rho^{ss}$	2.653	2.692
水の体積弾性係数 kPa	$K_w$	$2.19 \times 10^6$	
空気の気体定数 $\text{m}^2/\text{s}^2/\text{K}$	$\bar{R}$	287.04	
絶対温度 K	$\Theta$	293.15 (20 °C)	

### 3. 解析結果

#### (1) 降雨強度100mm/hの場合

図-4は降雨強度100mm/hの場合の間隙水圧分布の実験結果と解析結果を示す。斜面部分のみを拡大して示す。両者の比較より、解析は地表面からの降雨の浸透過程を再現できていることがわかる。図-5は降雨強度100mm/hの場合のすべり破壊の様子を示す。解析は法尻から法肩まで斜面全体に渡ってすべる挙動を再現できている。

図-6は図-5中に示したすべり線上に位置する法尻の土要素の力学挙動を示す。図-6中に示す○は降雨直前の状態であり、○→△→□→●の順に時間が経過していく。まず○から△にかけて、降雨浸透による飽和度上昇と間隙水圧上昇により塑性変形とともに、SYS Cam-clayモデルが表現する過圧密解消( $R$ の増加)と構造劣化( $R^*$ の増加)が生じている。次に△から□にかけては、さらに過圧密解消と構造劣化が生じて、構造劣化による塑性体積圧縮を伴う軟化挙動が見られる。最終的には□から●にかけて、Cam-clayモデルの特徴である限界状態線 $q=Mp'$ 上側で示す塑性体積膨張を伴う軟化が生じ、大変形に至っている。

図-7はすべり破壊時のせん断ひずみ分布と加速度分布の解析結果を示す。実験<sup>[5]</sup>においてすべり線が形成されるのに要した時間は不明だが、解析では1秒以内の極めて短い時間で明確なすべり線が形成された。まず(i)の降雨開

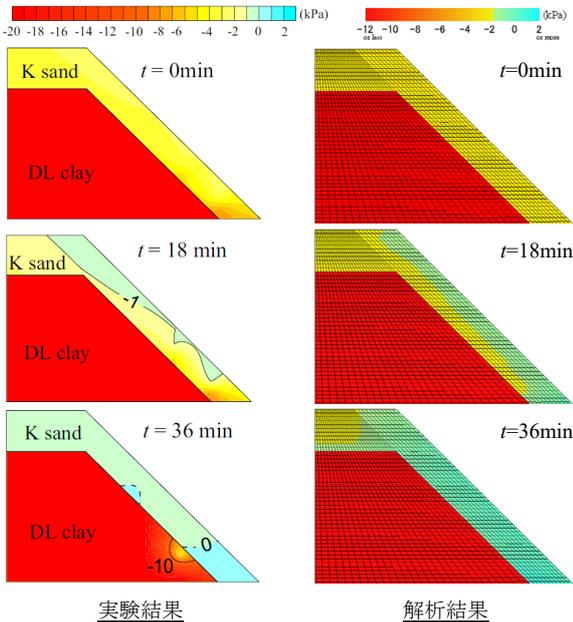


図-4 降雨強度 100mm/h の場合の間隙水圧分布

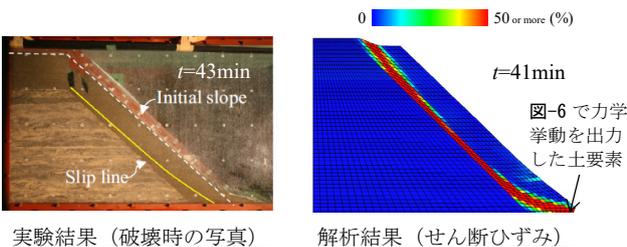


図-5 降雨強度 100mm/h の場合のすべり破壊の様子

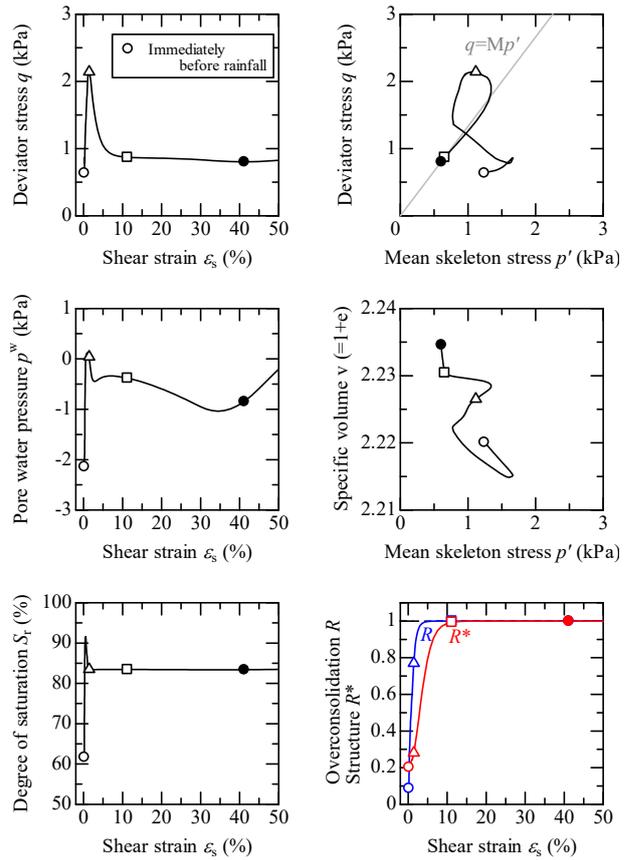


図-6 すべり線 (法尻) の土要素の力学挙動

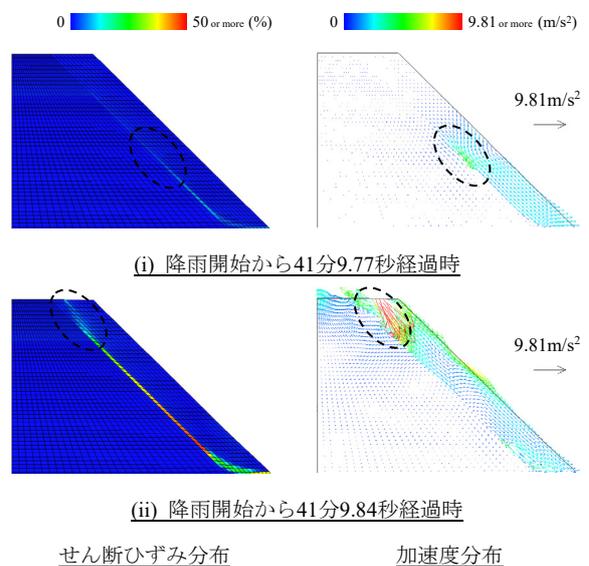
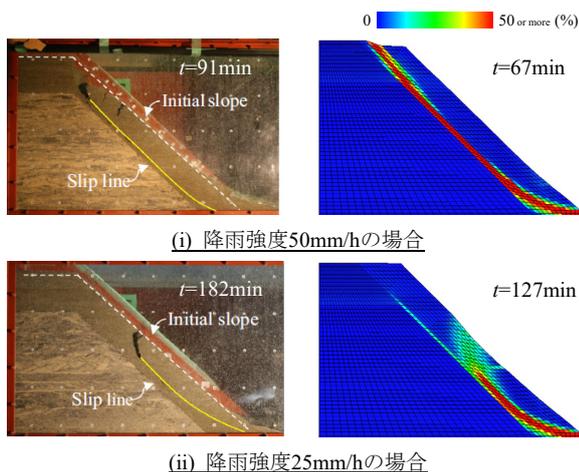


図-7 すべり破壊時のせん断ひずみ分布と加速度分布の解析結果

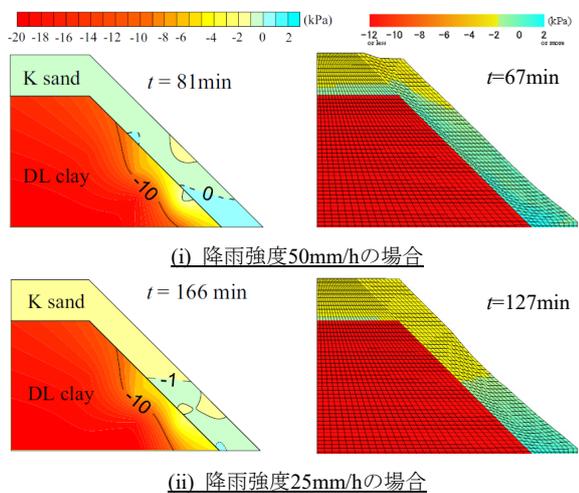
始から41分9.77秒経過時より、図中に破線の○で示す基盤と崩壊層の境界の新たにすべり始める位置で、斜面方向下向きに約 $5\text{ m/s}^2$ の加速度が生じている。次に(ii)の降雨開始から41分9.84秒経過時においても、図中に破線の○で示す新たにすべり始める位置で、斜面方向下向きに $1\text{G}$  ( $9.81\text{ m/s}^2$ )以上の加速度が生じている。一方で、基盤と崩壊層の境界下部では一旦すべりが止まり始め、斜面方向上向きに加速度が生じる様子が表現されている。

(2) 降雨強度50mm/hおよび25mm/hの場合

図-8と図-9は、降雨強度が50mm/hと25mm/hの場合のすべり破壊挙動と間隙水圧分布の違いをそれぞれ示す。図-4と図-5に示した降雨強度100mm/hの場合と併せると、降雨強度が25mm/hの場合には斜面中腹まですべり線が生じる一方、降雨強度が50mm/hと100mm/hの場合には斜面全体に渡ってすべり線が生じる様子を解析は再現できていることがわかる。この理由は降雨強度が大きいほど斜面上部まで間隙水圧が高い状態になるためである。



実験結果（破壊時の写真）      解析結果（せん断ひずみ）  
 図-8 降雨強度に応じたすべり破壊挙動の違い



実験結果      解析結果  
 図-9 降雨強度に応じた間隙水圧分布の違い

4. おわりに

慣性力対応の空気～水～土連成弾塑性有限変形解析コード<sup>[1],[2],[3]</sup>により、降雨模型実験<sup>[5]</sup>において不飽和斜面が変形から破壊に至る挙動の数値シミュレーションに成功した。このとき、すべり面上の土要素が限界状態線 $q=Mp'$ の上側で示す「塑性体積膨張を伴う軟化挙動」を呈することにより、斜面はすべり破壊に至ることを明らかにした。また、すべり破壊時に1G以上の大きな加速度が生じるこ

とを示した。さらに、25、50、100mm/hの3種類の降雨強度の違いに応じた変形・破壊挙動の違いも再現した。

今後は崩壊層の材料定数と初期値を再検討するとともに、令和3年7月に発生した熱海盛土の崩壊メカニズムの解明など、本解析コードを実問題に適用していきたい。

謝辞：JSPS科研費20K14821と17H01289の助成を受けた。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Yoshikawa, T. and Noda, T.: Triaxial test on water absorption compression of unsaturated soil and its soil-water-air-coupled elastoplastic finite deformation analysis, *Soils and Foundations*, 60(5), 1151-1170, 2020.
- [3] Yoshikawa, T. and Noda, T.: Development and validation of deformation analysis method for unsaturated soil based on new effective saturation degree considering trapped air, *Proceedings of 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022.
- [4] Noda, T. and Yoshikawa, T.: Two types of water absorption failure mechanism of unsaturated silt triaxial specimen, *Proceedings of 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022.
- [5] Chueasamat, A. et al.: Experimental tests of slope failure due to rainfalls using 1g physical slope models, *Soils and Foundations*, 58(2), 290-305, 2018.
- [6] Takaine, T. et al.: 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522, 1976.
- [10] Noda, T. et al.: Some bearing capacity characteristics of a structured naturally deposited clay soil, *Soils and Foundations*, 47(2), 285-301, 2007.
- [11] Nakano, M. et al.: Ground improvement of intermediate reclaimed land by compaction through cavity expansion of sand piles, *Soils and Foundations*, 48(5), 653-671, 2008.