

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・破壊メカニズムの解明

不飽和土 弾塑性 降雨

名古屋大学 国際会員 ○吉川 高広 野田 利弘
非会員 西沢 建吾

1. はじめに

近年、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、本研究では慣性力対応の空気～水～土連成弾塑性有限変形解析コード^{1), 2), 3)}を用いて、降雨模型実験⁴⁾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。

2. 参照実験⁴⁾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 Chuecasamat et al.⁴⁾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。

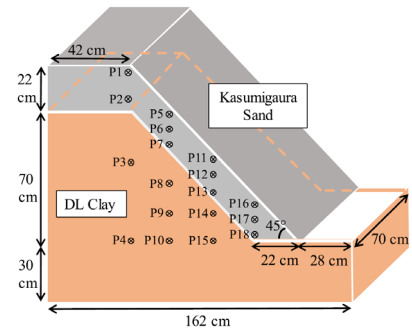


図1 実験模型の概要

図2は解析断面を示す。2次元平面ひずみ条件で解析を行った。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。

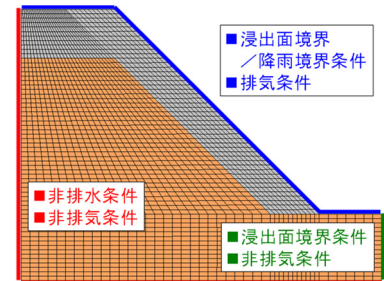


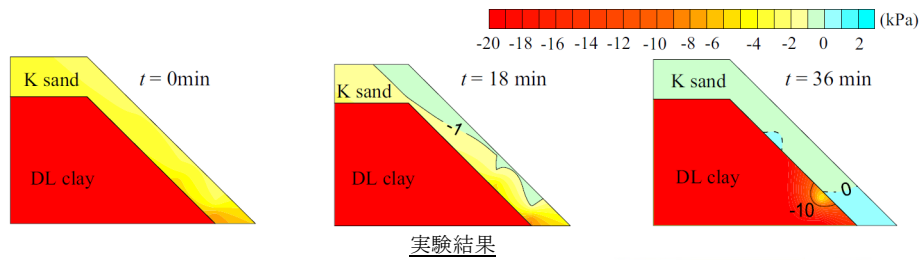
図2 解析断面

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²⁾である。DL clay の材料定数は著者らの既往研究の値²⁾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。不飽和浸透特性モデルには van Genuchten⁵⁾—Mualem⁶⁾モデルを用いた。各材料の吸水過程の保水性試験結果⁴⁾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。

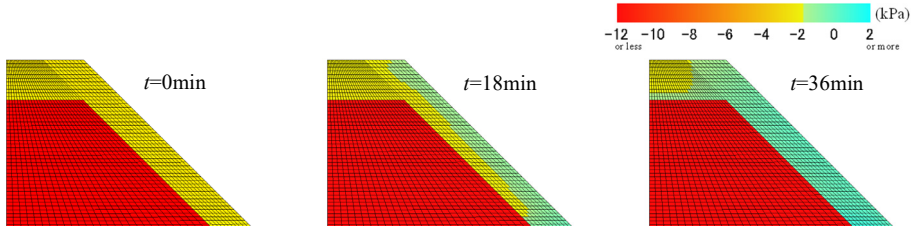
3. 解析結果

図3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4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5は図4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5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。

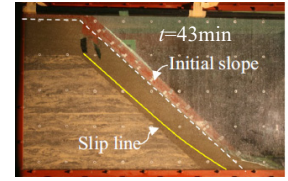


実験結果

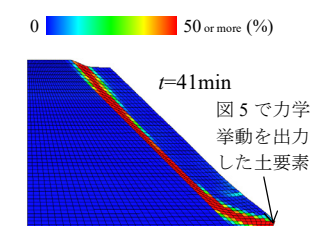


解析結果

図3 降雨強度 100mm/h の場合の間隙水圧分布



実験結果 (破壊時の写真)



解析結果 (せん断ひずみ)

図4 降雨強度 100mm/h の場合のすべり破壊の様子

図6と図7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。コンター図の凡例は、図3および図4と同じである。図3と図4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。

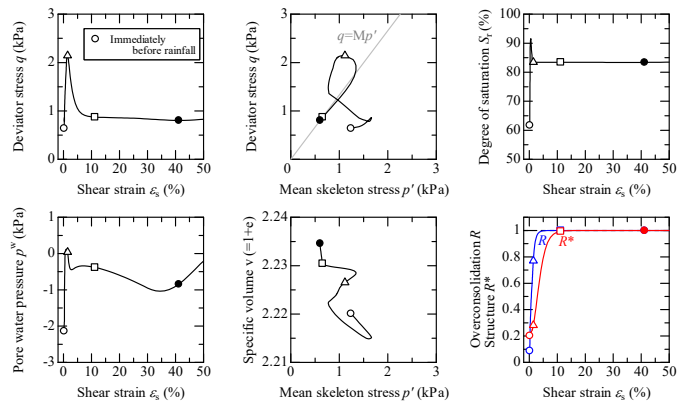


図5 すべり線 (法尻) の土要素の力学挙動

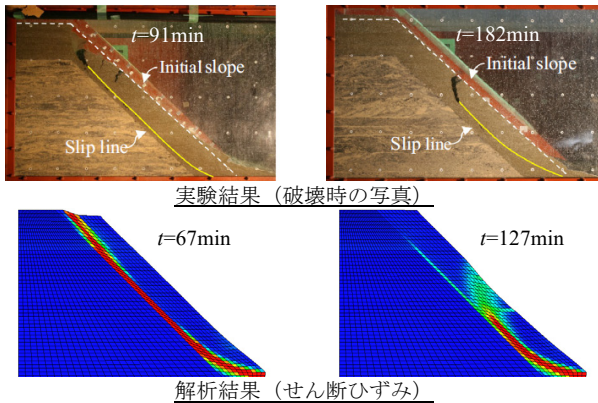


図6 降雨強度に応じたすべり破壊挙動の違い

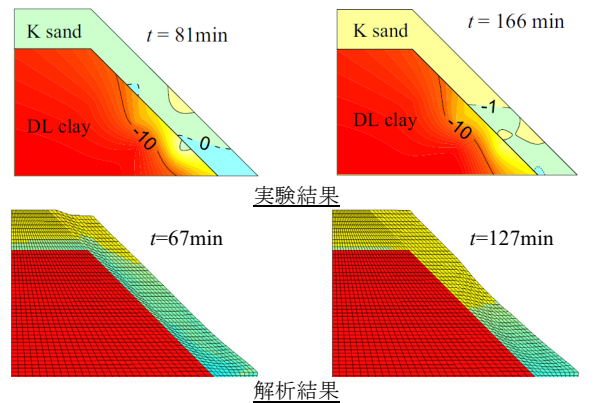


図7 降雨強度に応じた間隙水圧分布の違い

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^{1),2),3)}により、降雨模型実験⁴⁾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。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 および 17H01289 の助成を受けた。

参考文献 1) Noda and Yoshikawa: Soil-water-air coupled..., S&F, 55(1), 45-62, 2015. 2) Yoshikawa and Noda: Triaxial test..., S&F, 60(5), 1151-1170, 2020. 3) Yoshikawa and Noda: Development and validation..., ICSMGE 2022. 4) Chueasamat et al.: Experimental tests..., S&F, 58(2), 290-305, 2018. 5) van Genuchten: A closed-form equation..., Soil Sci Soc Am J, 44(5), 892-898, 1980. 6) Mualem: A new model..., Water Resour. Res., 12(3), 513-522, 1976.