

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

名古屋大学 正会員 ○吉川 高広

フェロー会員 野田 利弘

学生会員 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、吸水による自重の増加などが挙げられているが、崩壊メカニズムの完全な解明までには至っていない。一般に降雨時の斜面・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が、崩壊メカニズム解明には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必要がある。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がある。

以上の認識のもと、降雨による斜面や盛土の崩壊メカニズム解明を見据えて、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⁾を用いて、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を行った。

2. 参照実験³⁾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た Chueasamat ら³⁾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 クレイ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て、上方から散水する実験である。DL クレイ基盤の締固め度は 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 I 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。本稿は降雨強度の異なる 3 ケースの解析を行った。

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。

解析コードに搭載した不飽和の効果を考慮した弾塑性構成式 SYS Cam-clay モデル²⁾の材料定数と初期値について、DL クレイの材料定数は著者らの既往研究の値²⁾を、初期値は実験と同じ値を与えた。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 クレイ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。また不飽和浸透特性に関しては、各材料の保水性試験結果³⁾を再現するように、van Genuchten⁴⁾–Mualem⁵⁾モデルの材料定数を設定し、初期値は実験と同じ値を与えた。

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。降雨により地表面から浸透していく過程を解析は再現できている。図-4 は降雨強度 100mm/h の場合のすべり破壊の様子を示す。斜面全体にわたってすべり線が生じる様子を解析は再現できている。次に、降雨強度が異なる 25mm/h と 50mm/h の場合に対して、図-5 と図-6 はそれぞれすべり破壊挙動と間隙水圧分布の違いを示す。図-3 と図-4 に示す降雨強度 100mm/h の場合と併せて、解析は降雨強度が大きいほどすべり領域が大きくなる傾向を表現できており、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。

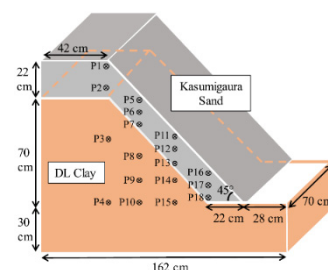


図-1 実験模型の概要

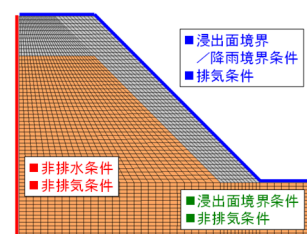


図-2 解析断面

図-7 は降雨強度 100mm/h の場合において、すべり線上に位置する法尻の土要素の力学挙動を示す。降雨浸透による間隙水圧と飽和度の上昇により塑性変形が生じて、SYS Cam-clay モデルが表現する過圧密 R と構造 R^* が解消し、最終的には 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挙動を呈して、大変形に至ることがわかる。

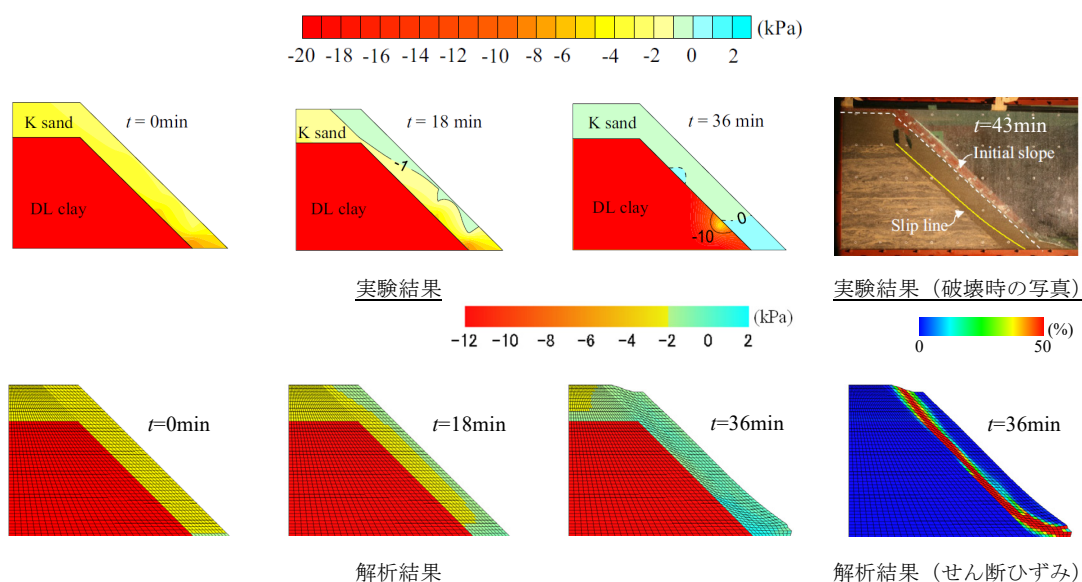
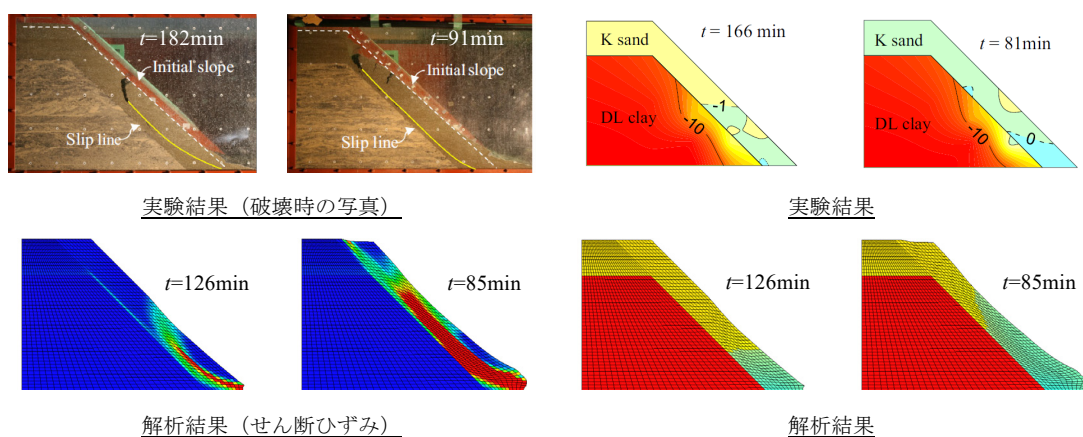


図-3 降雨強度 $I=100\text{mm/h}$ の場合の間隙水圧分布の経時変化

解析結果 (せん断ひずみ)

図-4 $I=100\text{mm/h}$ の場合のすべり破壊の様子



解析結果 (せん断ひずみ)

解析結果

4. おわりに

降雨模型実験³⁾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、すべり線の土要素は、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」を呈した。また、降雨強度の違いに応じた変形・破壊挙動の違いも再現できた。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崩壊メカニズムの解明など、実問題への適用を行っていきたい。

参考文献

- 1) Noda and Yoshikawa (2015): Soil-water-air coupled..., S&F, 55(1), 45-62.
- 2) Yoshikawa and Noda (2020): Triaxial test..., S&F, 60(5), 1151-1170.
- 3) Chueasamat, et al. (2018): Experimental tests of slope failure..., S&F, 58(2), 290-305.
- 4) van Genuchten (1980): A closed-form equation..., Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898.
- 5) Mualem (1976): A new model..., Water Resources Research, 12, 513-522.

図-7 すべり線 (法尻) の土要素の力学挙動

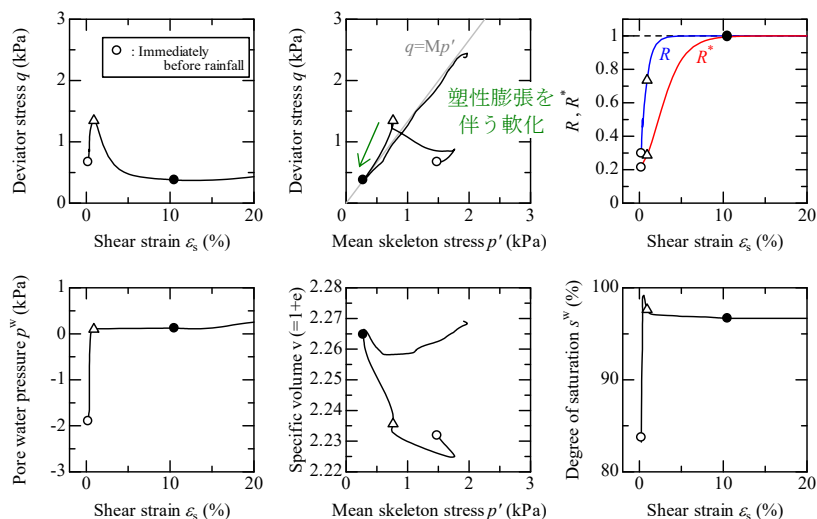


図-5 降雨強度に応じたすべり破壊挙動の違い

図-6 降雨強度に応じた間隙水圧分布の違い