

道路沿線の斜面を対象とした降雨の浸透を考慮した剛塑性有限要素法を用いた斜面安定解析

早稲田大学 学生会員 ○中村 裕貴
 早稲田大学 学生会員 西山 柁克
 東京地下鉄株式会社 正会員 小西 真治
 早稲田大学 フェロー会員 赤木 寛一

1. はじめに

近年、気象の極端化による短時間での集中豪雨により、各地で土砂崩れによる被害が報告されている。それらの被害を最小限とするためには備えが必要となり、関連する研究が急がれている。降雨による斜面崩壊の主な要因としては大きく3つあり、降雨の浸透に伴う単位体積重量の増加、サクシジョンの低下による見かけの粘着力の減少、降雨の浸透等による浸透水圧の作用が挙げられる。そこで、著者らは飽和不飽和浸透流解析と剛塑性有限要素法を組み合わせた手法を用いて、これら3つの要因全てを考慮した斜面安定解析を実施し、避難警報システムに適用出来るような合理的なシミュレーション方法を検討している。本研究では上述の手法を活用し、ある道路沿線の斜面を対象としてその適用性を検討した。

2. 剛塑性有限要素法

図1に解析の流れを示す。剛塑性有限要素法とは、塑性状態のみに着目した解析手法であり、地盤が塑性流動しているものと仮定し、その際の応力の釣合条件、ひずみ速度の適合条件を上界定理等で解き、破壊時の応力分布や荷重係数 μ を求めるものである。著者らの手法では、降伏基準にはMohr-Coulomb則、塑性流れにはDrucker-Prager則を適用している¹⁾。荷重係数 μ は斜面の安定解析における安全率に相当し、荷重係数 μ が1のときが通常重力場を表している。よって、1以上で地盤は安定、1未満で地盤は不安定(崩壊)と判定することが可能である。



図1 解析の流れ

3. 対象斜面及び現地調査の結果

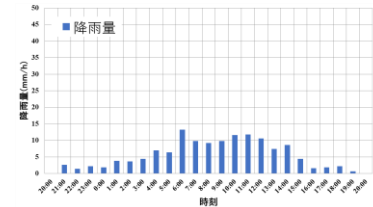
対象斜面はある道路沿線の切土斜面である。対象斜面は勾配が非常に厳しく、傾斜角は約45度となっている。また、現地調査の結果表層付近は砂層で構成されており、加えて境界面は不明瞭であるが、内部に泥岩層が存在することが報告されている。なお、当該斜面は斜面下部において法面から深さ約50cmの位置に土壌水分計及び傾斜計が設置されており、リアルタイムで傾斜角速度及び体積含水率の変化をモニタリングできるようになっている。また、以下の図2に本解析で対象とするモニタリング期間内の

降雨①及びモニタリング開始以前に崩壊が発生した際の降雨②、③の降雨イベントを示す。

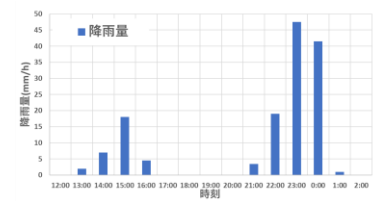
4. 飽和不飽和浸透流解析

(a) 解析条件

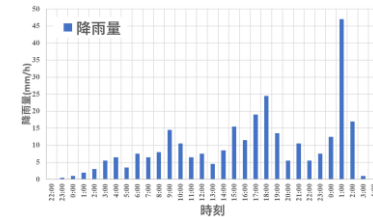
現地調査の結果をもとに作成した対象斜面の解析モデルを図3に示す。今回解析対象とする斜面は前述の通り砂層で構成されていること、泥岩層の位置が不明瞭であることから、砂層のみの1層モデルと



①2019年10月11日～12日の降雨量



②2018年9月4日～5日の降雨量

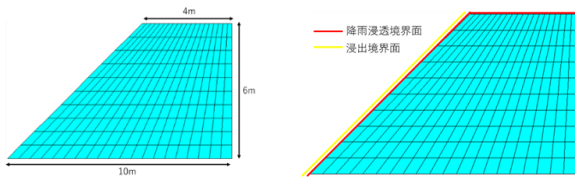


③2017年10月21日～23日の降雨量
 図2 対象降雨イベント

している。また、地盤条件を設定する上で、保水性試験及び透水試験が行われていないことから、粒度試験の結果より、水分特性曲線及び飽和透水係数をクレーガーの式を用いて推定した。また、比透水係数と体積含水率の関係をvan-Genuchten式から導かれる不飽和透水係数モデルとMualemモデルから得られる式を用いて求め、解析に用いた。以上より、現地調査をもとに得た解析に用いる地盤条件を表1に示す。また、解析モデルの範囲は現地調査の結果より、上面が4m、底面が10mであり、深さは6mとした。なお、飽和時の粘着力に関しては、本来砂層の粘着力は0kN/m²とすることが一般的であるが、前述のモニタリングの結果、体積含水率の値が非常に高い値を計測しているにも関わらず崩壊が発生しない場合があること及び、粒度試験の結果細粒分が10%程含まれていることから、実測値は得られていないものの、飽和時の粘着力が存在すると考えられる。よって砂層の飽和時の粘着力を3kN/m²と仮定²⁾した。なお、解析モデルの総節点数は231点、総要素数は200個である。また、境界条件として、解析モデル表面部に降雨の浸透境界面を、法面に浸出境界面をそれぞれ解析条件として設定した。それら解析条件を図3に合わせて示す。

表 1 地盤条件

	砂層
乾燥重量 γ_d (kN/m ³)	14.6
飽和透水係数 k(m/sec)	1.0×10^{-5}
内部摩擦角 ψ (°)	30.7
飽和時の粘着力 c' (kN/m ²)	3
比貯留係数 S_s (1/m)	1.0×10^{-7}



解析モデル 境界条件
図 3 解析モデル及び境界条件

(b) 解析結果

前述の解析条件を基に、解析対象期間内で1時間ごとに飽和不飽和浸透流解析を行った。以下の図4に降雨②の場合の粘着力と単位体積重量の分布状況の例を示す。飽和不飽和浸透流解析の結果より、降雨と共に雨水が浸透し、特に表層において単位体積重量が増加し、粘着力が低下していることがわかる。

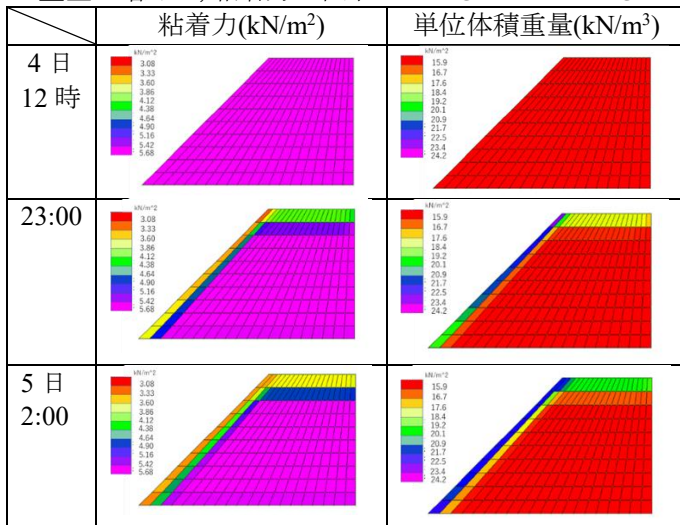


図 4 飽和不飽和浸透流解析の結果

5. 剛塑性有限要素法を用いた斜面安定解析

(a) 解析条件

剛塑性有限要素法では、飽和不飽和浸透流解析で用いた解析モデルと同様の解析モデルを用いて解析を行う。変位境界条件は図5に示すように解析モデル底面を全固定、背面を水平固定とした。そこに、飽和不飽和浸透流解析によって得られた要素ごとの単位体積重量、粘着力、浸透水圧の結果をそれぞれ入力し、時間ごとに剛塑性有限要素法を用いた斜面安定解析を行った。

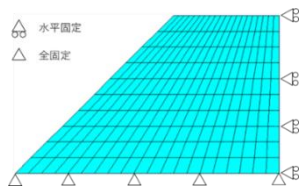
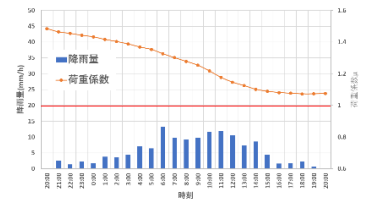


図 5 変位境界条件

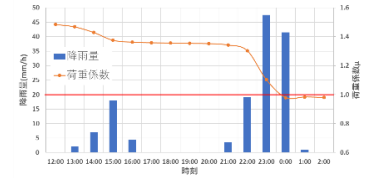
(b) 解析結果

前述の図2に示した時間降雨量のデータと剛塑性有限要素法を用いた解析によって得られた荷重係数 μ の経時変化を図6に示す。

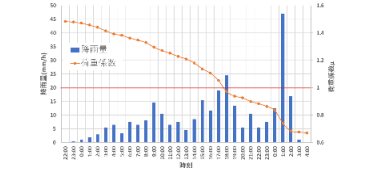
図6より、降雨の変化に伴う荷重係数の減少が見られる。実斜面で崩壊の発生しなかった降雨①では荷重係数が1を下回ることがなく、解析上も崩壊が発生しなかった。一方で、実際に崩壊の発生した降雨②及び降雨③では荷重係数が1を下回り崩壊に至った。また崩壊発生時刻に関しては、正確な発生時刻のデータはないが、崩壊推定時刻の範囲内で解析上も崩壊が発生しており、斜面の崩壊を捉えていることが分かる。



①2019年10月11日～12日の荷重係数の経時変化



②2018年9月4日～5日の荷重係数の経時変化



③2017年10月21日～23日の荷重係数の経時変化

図 6 荷重係数の経時変化

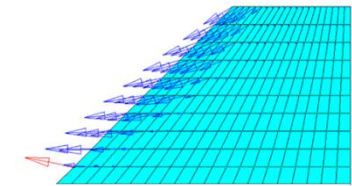


図 7 ひずみ速度分布

また、図7に降雨②の場合のひずみ速度を矢印で表現した場合の分布状況を示す。図7より、法先へかけて崩壊が発生したことがわかる。崩壊発生後の状況と比べると同様の傾向がみられるが、前述の通り泥岩層の存在が報告されていることから、実際には砂層と泥岩層の境界で崩壊が発生したと考えられる。

6. まとめ

飽和不飽和浸透流解析と剛塑性有限要素法を組み合わせた斜面安定解析によって、荷重係数 μ の算定結果より、降雨状況に対応した斜面の崩壊を捉えることが出来た。今後も他の崩壊事例を対象として、本解析手法の適用性を確認し、避難警報システムの発展に寄与していきたい。なお対象斜面においては、現在適切な対策工がなされ、安全面に十分な慮がなされている。

7. 参考文献

- 1) 小西真治, 仲山貴司, 田村武, 豊田浩史, 松長剛, 井浦智実: 地下水圧および飽和度による粘着力の変化を考慮した切羽安定評価法, 土木学会論文集 F, Vol.69, pp.1-9, 2013
- 2) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説土構造物, pp57-59, 2007