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

1. <u>はじめに</u>

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. <u>剛塑性有限要素法</u>

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-Couomb 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のときが通常の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 (崩壞)と判定することが可能である.



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

	早稲田大	学	学生会員	○中村	裕貴
	早稲田大	学	学生会員	西山	柾克
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	寬一



降雨①及びモニ

4. <u>飽和不飽和</u> <u>浸透流解析</u>



①2019年10月11日~12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。

キーワード 斜面安定解析 飽和不飽和浸透流解析 剛塑性有限要素法

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学創造理工学部赤木研究室 TEL03-5286-3405

表1 地盤条件	
	砂層
乾燥重量γ _d (kN/m³)	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/m²)	3
比貯留係数 $S_s(1/m)$	1.0×10 ⁻⁷



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.



5. <u>剛塑性有限要素法を用いた斜面安定解析</u>

(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



図5 変位境界条件

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. (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u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



図7 ひずみ速度分布

捉えていることが分かる.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. <u>まとめ</u>

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

- 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