

鉄道沿線の崩壊斜面を対象と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 ○西山 柁克
 早稲田大学 学生会員 岡崎 啓一朗
 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、サクションの低下による見かけの粘着力の減少、地下水の流入による浸透水圧の作用が挙げられる。そこで、著者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、都内の鉄道沿線において発生した斜面崩壊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、関連流れ則より導かれる応力のつり合い式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

対象斜面は都内の鉄道沿線の斜面である。対象斜面の崩壊幅は約40m、斜面長は約16mであり、傾斜角は34.7度である。また、現地調査の結果、対象斜面は関東ローム質

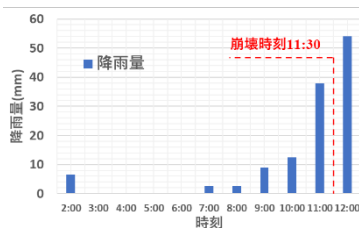


図2 時間降雨量の変化

土であった。斜面崩壊時刻は11:30であり、当日7:00より降り続いた降雨が原因で崩壊に至ったものと考えられる。図2に崩壊当日の降雨量のデータを示す。なお、降雨量のデータは対象斜面から直線距離約3kmにある崩壊発生現場から最も近いアメダスより得た。よって、解析対象期間は崩壊当日2:00から、崩壊発生30分後の12:00までの11時間とした。

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崩壊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関東ローム質土であるが、関東ロームは透水係数が非常に小さいことから、斜面が崩壊に至るためには、斜面内に周囲よりも透水係数の大きい透水層が存在したと考えられる。よって、現地調査で行われたマイクロ法による電気検層の結果をもとに、斜面内において抵抗値が大きくなっている部分に透水層として砂層が存在すると推定し、それを解析モデル内に組み込んだ。推定した砂層は地表からそれぞれ2.0m、3.0m、4.0m、5.6m、6.4m、7.6mに位置する計6層である。砂層は今回現場で行われたボーリング試験よりはっきりとは捉えられていないため、その層厚は薄いと考えることから、厚さ20cmと仮定し、2.0m、6.4m地点においては電気検層の結果の抵抗値が特に大きくなっていたことから、厚さ40cmと仮定した。これにより、解析モデルは粘土と砂の2層混合のモデルとなっている。

解析モデルの範囲は上面が5m、底面が18mであり、深さは電気検層の結果に基づき9mまでとした。また、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。なお、砂層に関しては推定であり、現地調査の結果がないため、一般値²⁾を参考とした。加えて、その透水係数の小ささから、斜面が崩壊に至るためには解析モデル表面からの降雨の浸透ではなく、地下水の浸透の影響が大きいと考えられる。よって、対象斜面に設置されていた水位計の結果から、モデル背面部からの地下水の流入を仮定した。また、比透水係数(飽和透水係数と不飽和透水係数の比)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。なお、解析モデルの総節点数は1196点、総要素数は1125個である。また、砂層以外にも、解析モデル表面部に降雨の浸透境界面を、法先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

	粘土層	砂層
乾燥重量 $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	8.29	14.72
間隙比 e	2.183	0.8
飽和透水係数 $k(\text{m/sec})$	5.84×10^{-7}	4.05×10^{-4}
内部摩擦角 $\psi(^{\circ})$	17.6	35
粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$	26.4	0

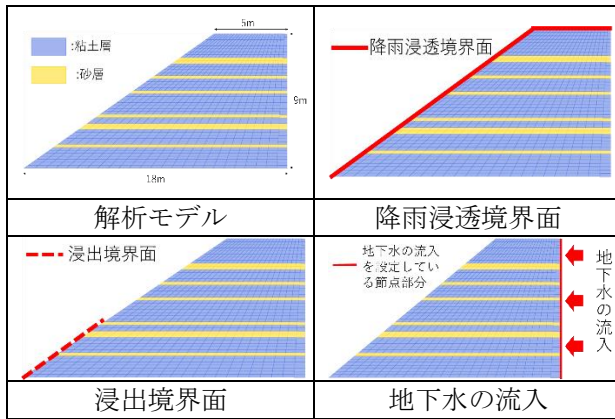


図 3 各解析条件

(b) 解析結果

前述の解析条件を基に、解析対象期間内で 30 分毎に飽和不飽和浸透流解析を行った。以下の図 4 に、2:00、10:00、11:30 の土の粘着力と単位体積重量の分布状況を示す。飽和不飽和浸透流解析の結果より、地下水が時間経過と共に砂層を中心として浸透し、解析モデルの背面部から法先方向へと、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。

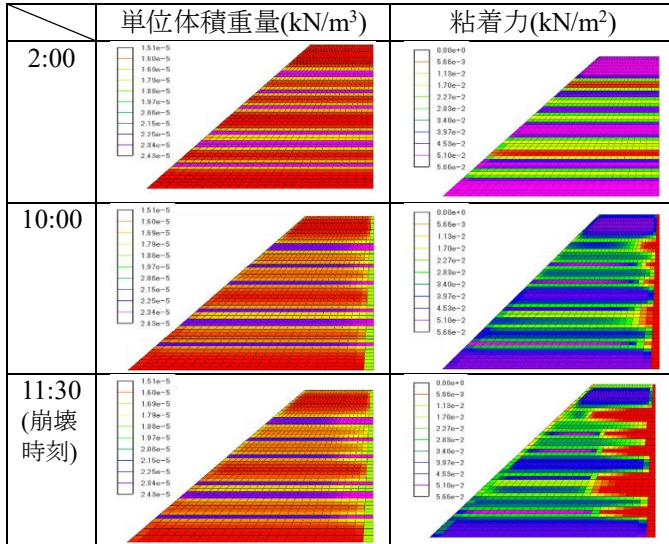


図 4 飽和不飽和浸透流解析の結果

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ている。そこに、飽和不飽和浸透流解析によって得られた節点ご

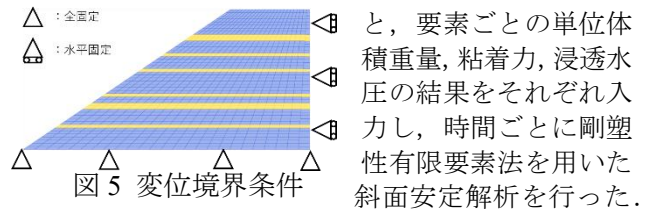


図 5 変位境界条件

(b) 解析結果

前述の図 2 に示した崩壊当日の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 の時間変化を図 6 に示す。

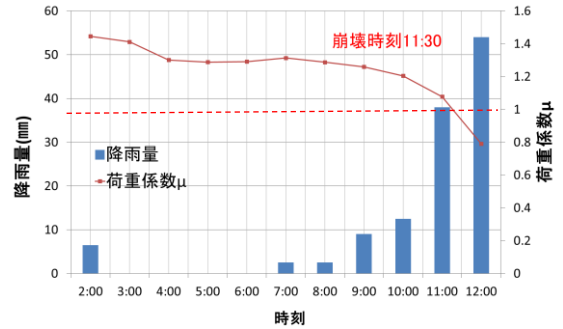


図 6 荷重係数の変化

図 6 より、2 時の降雨で荷重係数が低下した後、無降雨期間で、荷重係数がやや増加していることがわかる。また、7 時から降雨で再び荷重係数が低下をし始め、降雨強度の増加とともに荷重係数の低下も大きくなり、崩壊時刻において荷重係数 μ が 1 を下回っていることから、斜面の崩壊を捉えていることが分かる。また、図 7 に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。

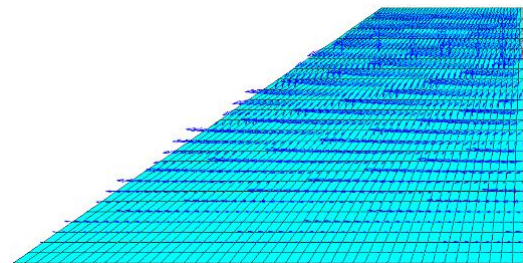


図 7 ひずみ速度のグラフ

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 及び崩壊形状から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解析を行い、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。なお今回対象とした斜面においては、現在適切な対策工がなされ、安全面に十分配慮がなされている。

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) 藤吉秀彰, 数値標高モデルの精度による地形勾配及び地下水深発生の特徴, www.jsece.or.jp/event/conf/abstract/2007/pdf/2007O045.pdf (2018/03/15 閲覧)