

道路沿線の切土斜面における降雨時の体積含水率および崩壊時期の再現解析

早稲田大学 学生会員 ○中村 裕貴 早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
早稲田大学 非会員 大木 拓哉 (株)東京メトロ 国際会員 小西 真治
(株)前田建設 国際会員 石黒 健

1. 研究背景

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。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、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。

飽和不飽和浸透流解析においては、出力された圧力水頭の値から体積含水率の推移を算出し実測データと比較検討を行う。また剛塑性有限要素法では、前述の圧力水頭の値から算出された3つの斜面の崩壊要因①単位体積重量の増加、②サクションの低下による見かけの粘着力の減少、③地下水流の発生による浸透水圧の作用)を考慮することで崩壊時期の推定を行っている。解析の手順と算出される値は図1に示すとおりである。

本論文では上述の手法を活用し、とある道路沿線の切土斜面の崩壊事例を対象としてその適用性を検討した。



図1 解析手法のフロー

2. 対象斜面の概要および崩壊発生時の様子

ある道路沿線の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、リアルタイムで体積含水率及び傾斜角速度の変化をモニタリングできるようになっている。

表層崩壊は、2019/10/11~12にかけて被害を及ぼした台風19号による降雨を原因として発生しており、その時の降雨及び軸傾斜度を図2に示す。

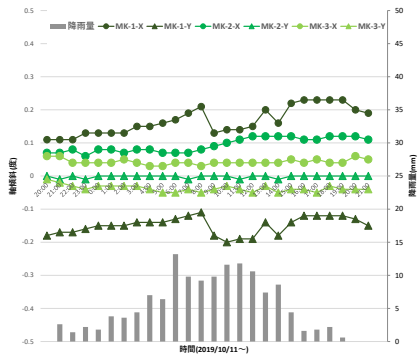


図2 崩壊時の降雨及び軸傾斜度

3. 飽和不飽和浸透流解析による体積含水率の確認

①解析条件

図3に示すモデルを作成し、対象斜面を再現した。台形部分は下面10m、高さ6m、上面4m、下付き部分は横13m、縦3mである。台形の法面および上面を降雨浸透面として、図3中の赤い部分を砂層、黄色の部分粘土層として図4に示すような水分特性曲線を設定した。砂層は地盤工学会¹⁾、粘土層は竹内氏²⁾の不飽和特性を参考に作成している。また、現場試験の結果をもとに用いたその他のパラメータは表1,2の通りである。

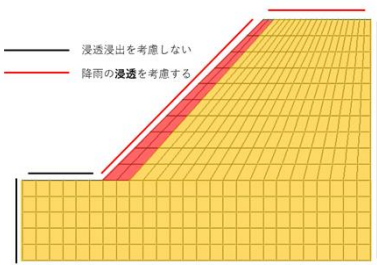


図3 モデル形状および境界条件
表1 砂層の物性値

項目	記号	単位	値
乾燥単位体積重量	γ_d	kN/m ³	14.3
飽和透水係数	k	cm/s	1.0×10^{-2}
内部摩擦角	ϕ'	deg	30.7
比貯留係数	Ss	1/m	1.0×10^{-4}
初期体積含水率	θ_0		0.19
初期飽和度	Sr ₀		0.44
粘着力(飽和時)	c'	kN/m ²	3

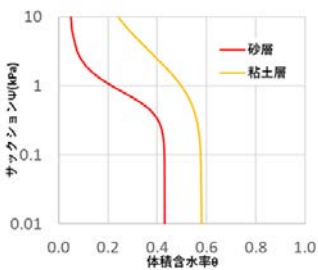


図4 水分特性曲線
表2 粘土層の物性値

項目	記号	単位	値
乾燥単位体積重量	γ_d	kN/m ³	14.3
飽和透水係数	k	cm/s	1.0×10^{-6}
内部摩擦角	ϕ'	deg	30.7
比貯留係数	Ss	1/m	1.0×10^{-4}
初期体積含水率	θ_0		0.48
初期飽和度	Sr ₀		0.84
粘着力(飽和時)	c'	kN/m ²	3

②解析結果

土壌水分計の測定位置に合わせて図 5 のように体積含水率の出力要素を決定した.図 6 に示す曲線のうち、緑色の 3 本の曲線が土壌水分計による体積含水率の実測値であり、黄色の曲線が解析による体積含水率の算出値である.また、同グラフ内に降雨の推移も併記する.解析結果は実測データに近い値を示すことが確認できた.

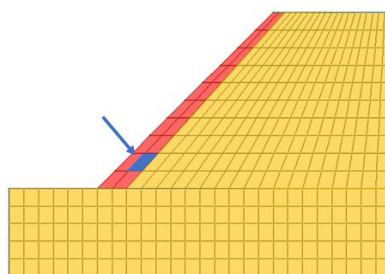


図 5 体積含水率の出力要素

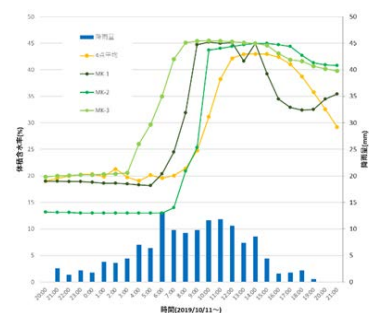


図 6 体積含水率の推移比較

4. 剛塑性有限要素法による崩壊時期の確認

剛塑性有限要素法とは、地盤が塑性流動していると仮定し、関連流れ則より導かれる応力のつり合い式を上界定理で解き、破壊時のひずみ速度分布や応力分布、荷重係数 μ を求める解析手法である. 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³⁾. 荷重係数は斜面の安定解析における安全率に相当するため、 $\mu \geq 1$ で地盤は安定、 $\mu < 1$ で地盤は崩壊と判定可能である.

①解析条件

図 7 に示すように、解析モデルの底面及び側面を全固定とする.また、図 8 に飽和度粘着力関係を記載し、以下にそれら解析に用いるパラメータの算出式を記載する.

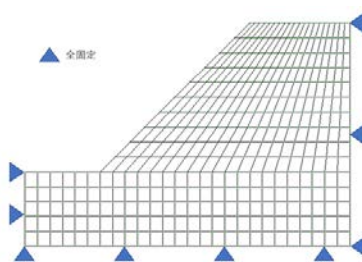


図 7 変位境界条件

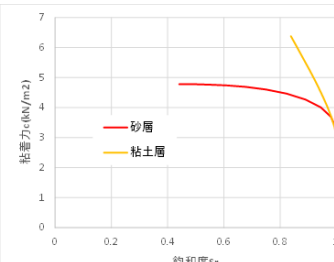


図 8 飽和度~粘着力関係

$$(\text{粘着力}) \quad c = c' + \chi \cdot (u_a - u_w) \cdot \tan \phi' \quad -(1)$$

c : 見かけの粘着力 χ : 間隙圧係数

u_a : 間隙空気圧 u_w : 間隙水圧 ϕ' : 飽和時の有効内部摩擦角

$$(\text{単位体積重量}) \quad \gamma = \gamma_d + \theta \cdot \gamma_w \quad -(2)$$

γ : 単位体積重量(kN/m³) γ_d : 乾燥単位体積重量 θ : 体積含水率 γ_w : 水の単位体積重量

②解析結果

剛塑性解析によって荷重係数の推移を算出した.図 9 に時間ごとの降雨量と荷重係数の推移を示す.降雨の浸透とともに荷重係数は低下し、2019/10/12 12 時時点で荷重係数 μ が 1 を下回っている.この結果から、2019 年度台風 19 号による崩壊を再現することができたと考える.

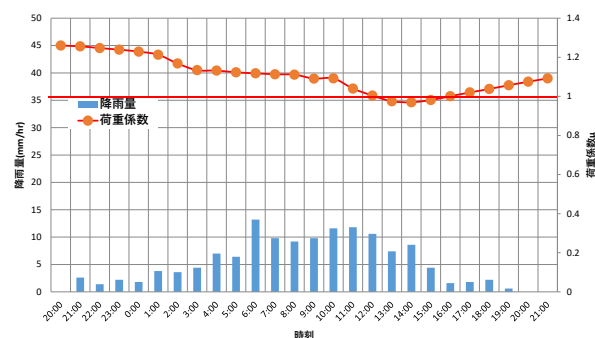


図 9 荷重係数の推移

5. まとめ

飽和不飽和浸透流解析において、体積含水率の推移を実測と同様に再現できることが確認された.加えて、剛塑性有限要素法によって、降雨時に荷重係数が 1 を下回ったため、実測と近いデータを得ることができた.本解析手法を用い、地盤条件が近い斜面での崩壊予測は可能であるため、今後は傾斜角や地盤条件の異なる斜面に関しても適用可能な解析手法の模索を行う必要があると考える.

参考文献

- 1) 地盤工学会:不飽和地盤の挙動と評価 地盤工学会, pp39
- 2) 竹内祐二 河野伊一郎:不飽和浸透特性の推定方法とその適用について 地盤と建設 Vol11, No.1 p98, 1993
- 3) 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

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 不飽和特性

連絡先: 〒168-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学赤木研究室 TEL: 03-5286-3405