

降雨浸透を考慮した数値解析手法による切土斜面観測データの再現解析

斜面安定解析 飽和不飽和浸透流解析 剛塑性有限要素法
切土 斜面崩壊感知センサ

早稲田大学大学院 正会員(若手) ○大木 拓哉
早稲田大学 国際会員 赤木 寛一
早稲田大学招聘研究員 国際会員 小西 真治
前田建設工業(株) 国際会員 石黒 健

1. 研究背景

近年、集中豪雨の増加に伴い各地で斜面崩壊災害が急増しており、令和3年7月豪雨に伴う熱海土石流災害では死者26名、物的被害98棟と甚大な被害をもたらされた。本研究では斜面災害の低減を最終目的として降雨浸透を考慮した一連の数値解析手法により豪雨時の斜面安定性を簡易に予測する手法の提案を試みる。本論文では、その第一段階として、ある切土斜面に設置した斜面崩壊感知センサの実測データを対象として、数値解析による再現を試みた結果を報告する。既往の斜面崩壊事例¹⁾では、切土斜面かつ表層1m以内の浅層での崩壊が、土質的には降雨が浸透しやすい砂質系材料(まさやシラスなど)の報告例が多い。今回解析対象とした切土斜面は、これらの条件を満足し、過去の大型台風時にその近傍で斜面崩壊が発生した履歴を持つ。その後研究目的で斜面崩壊感知センサ¹⁾が設置され、2019年10月の台風19号到来時の実測挙動が観測された。

2. 斜面崩壊感知センサ及び数値解析手法の概要

図1に斜面崩壊感知センサの概要を示す。MEMS傾斜センサにより地盤の変形(傾斜角)を、併設した土壌水分計により降雨浸透に伴う体積含水率の推移をリアルタイムに計測しインターネット配信する¹⁾。

図2に、斜面安定性を評価するための数値解析の流れを示す。まず、飽和不飽和浸透流解析により斜面内部への雨水の浸透状況を計算し、斜面内各部の体積含水率(飽和度)や単位体積重量の変化、各節点の圧力水頭や浸透水圧を求める。別途与えた飽和度～粘着力関係より、降雨浸透に伴う粘着力の低下が求まるため、土塊重量の増加、土の強度低下、浸透圧力といった斜面不安定化の各要因が逐次計算される。これらを次の剛塑性解析に受け渡す。剛塑性有限要素法では、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。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²⁾。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。

斜面崩壊感知センサの実測データと本数値解析手法による解析結果を比較照合することで、解析手法の精度や実務への適用性を吟味する。

3. 解析モデルおよび解析条件

図3に、今回解析対象とした切土斜面の外観を示す。奥にブルーシートが見えるが、過去の豪雨時に部分的な崩壊が生じた跡である。本地点は車や人が頻繁に立ち入る場所ではなくそのまま放置可能であったため、研究的な目的で図中の3か所に図1のセンサを設置した。切土斜面の勾配は概ね1:1であり、斜面センサを設置した時の試掘結果から、表層約1mの範囲に平均粒径0.3mm程度の均一な砂層が、その下には半固結した粘土層が確認された。図4に解析に用いたモデルを示す。水理境界

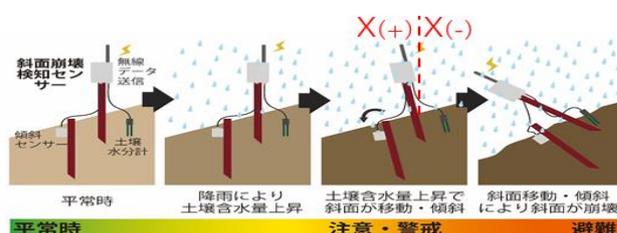


図1 斜面崩壊感知センサの概要¹⁾



図2 数値解析手法の全体フロー



図3 切土斜面及び計器設置状況

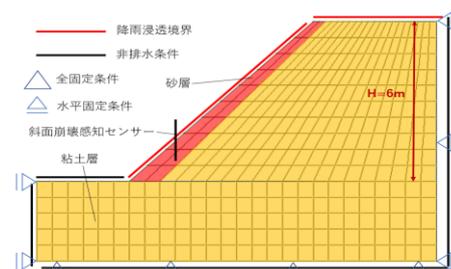


図4 解析モデルおよび境界条件

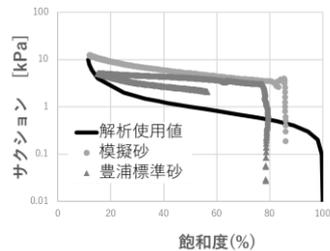


図5(a) 解析に用いた水分保持特性

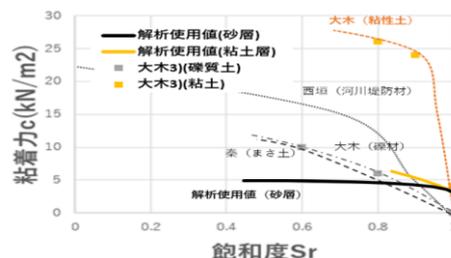


図5(b) 解析に用いた飽和度粘着力関係

Reproduction Analysis of Cut Slope Observation Results Using Numerical Methods Considering Rainfall Permeation

Takuya Oki {Waseda University}
Hirokazu Akagi {Waseda University} Shinji Konishi
Takeshi Ishiguro {Maeda Corporation}

条件は法面、上面のみ降雨の浸透を考慮し、その他の境界面は非排水とした。変位境界条件は図中に併記した。

図 5 に解析に用いた水分特性曲線及び飽和度～粘着力関係を示す。図中には現場砂層の粒度を模した室内模擬砂の実測保水曲線や大木³⁾他による砂、礫の飽和度～粘着力関係を併記した。解析では当初これらの値を参照して物性値を定めたが、斜面センサ実測挙動へのフィッティングの過程で得られた最終物性が図中の実線(解析使用値)となり、これらとは若干異なる結果となった。

4.解析結果と実測データの比較検討

斜面センサ設置後、2019年10月に台風19号到来時の実測データが取得された。図6、図7は、その際の実測降雨量(斜面崩壊感知センサに併設した簡易雨量計データを採用)を降雨入力条件として解析を行った結果と、この実測データを比較したものである。図6に示した3つの土壌水分計実測データにはばらつきが見られるものの、体積含水率の立ち上がりや上昇速度、その後の低下傾向など、不飽和浸透流解析結果は実測挙動を概ね再現できている。また図7は剛塑性解析により荷重係数を求めた結果であるが、累積降雨量が取れんする後半付近で荷重係数が1を切り、その後、降雨停止(と斜面内の排水)に伴って若干の回復を示す結果となった。図3は台風19号通過後の斜面の状況を示したものであるが、全体崩壊は免れたものの、斜面上方にテンションクラックが連続して観察されており、図7の荷重係数の推移と符合する。図8(a)(b)は、荷重係数が1を切った時の斜面内の粘着力、単位体積重量のコンターを示しており、降雨浸透による斜面内の飽和度上昇に伴い表層砂層の粘着力が低下し、単位体積重量が増加していること(斜面安定性が低下していること)を表している。図8(c)はMEMS傾斜センサの実測傾斜角速度を示しているが、確かに荷重係数が低下するに伴い、実測の傾斜角速度(斜面の局所的なすべり速度に相当)も増加傾向を示しており、剛塑性解析結果と整合する結果となっている。

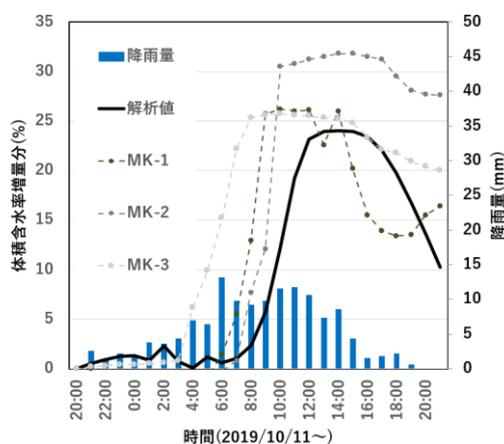


図6 土壌水分計の実測値と解析値の比較

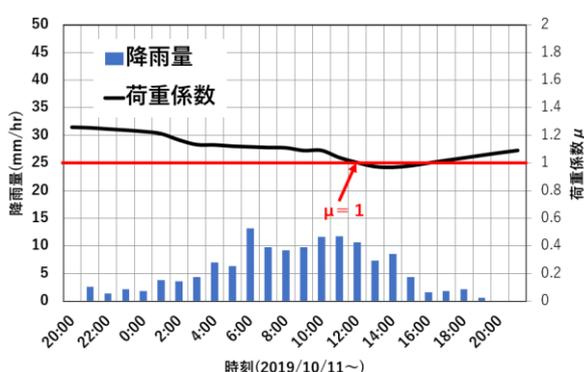


図7 荷重係数の計算結果

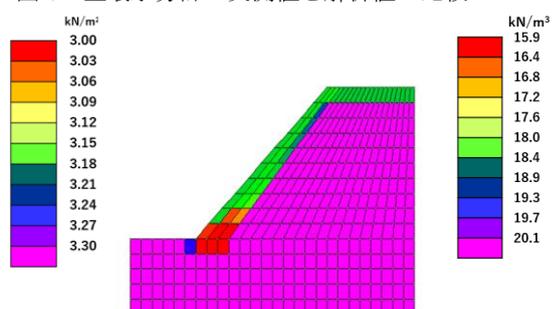


図8(a) 崩壊時の粘着力分布(解析)

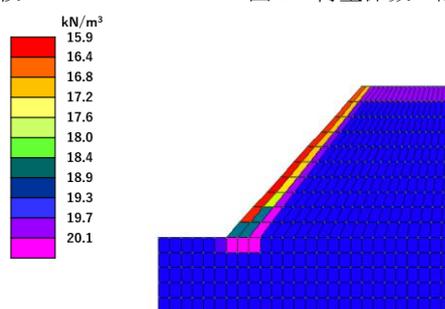


図8(b) 崩壊時の単位体積重量分布(解析)

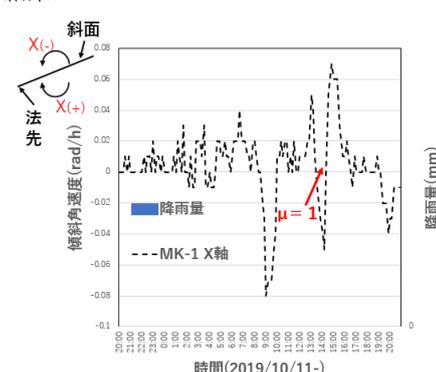


図8(c) 傾斜角速度の実測データ

6.参考文献

- 1) モニタリングシステム技術研究組合：ガイドライン第7編のり面・斜面の安定性評価のモニタリング，
<http://raims.or.jp/guideline/>
- 2) 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
- 3) 大木基裕：飽和度を変化させた盛土材料の強度特性，土木学会第65回年次学術講演会，III-096，2010