

地表流と地下浸透を考慮した斜面安定解析における飽和透水係数の影響

九州大学大学院 学生会員 ○村上 朱明 正会員 笠間 清伸
華北電力大学 正会員 Zhu Yulong
北海道大学 正会員 石川 達也

1. はじめに

近年、気候変動に伴うゲリラ豪雨の増加により山間部での斜面崩壊が増加している。現在、リアルタイムに計測した雨量情報と降水短時間予報をもとに、60 分間積算雨量と土壌雨量指数の 2 つの指標を用いて、土砂災害警戒情報を発令し、住民の避難判断・誘導に活用している。土砂災害警戒情報は、1km のグリッドごとに、60 分間積算雨量と土壌雨量指数の空間において、土砂災害警戒の判断基準（CL）を規定している。この CL の大きさは、過去の土砂災害の発生とその時の雨量情報のみから規定されているため、対象となる斜面の地形や土質などの情報が十分に考慮されたものではない。

そこで本文では、豪雨時に発生する斜面の地表流と浸透流を考慮し、CL が設定されている 1km のグリッドを対象に広域斜面安定解析を行い、地形および地盤の飽和透水係数が斜面の安全率に与える影響を分析した。

2. 解析概要

本研究では豪雨時に発生する斜面の地表流と浸透流を連成解析できる有限要素法ソフトウェア COMSOL を用いて行った。降雨時の地表流の挙動を計算するために浅水方程式¹⁾、浸透流の挙動を計算するために Richards 方程式²⁾を用いて計算を行った。降雨浸透の境界条件には Green-Ampt モデルを採用した。降雨の降り始めでは浸透能 f_p が十分大きいため、降雨強度 R をそのまま Richards 方程式の境界条件とした。ただし、降雨強度 R が浸透能 f_p を超えた場合、降雨の一部が地表面に流出するとした。図-1 に地表流と浸透流の計算の流れを示す。斜面の安定性の判定には Lu ら³⁾が提案した局所安全率(LFS)を採用した。

解析対象は福岡県太宰府市 1km×1km のグリッドで囲まれた 2 つの地域を選定した。ここは 2003 年 7 月の梅雨前線による豪雨災害時に土石流等の災害が多発した地域であり、その時のデータは現在の CL 設定にも用いられている。大城山から大原山に連なる四王寺山の山系の山腹に位置し、地質は花崗岩から成る。

図-2 に $R=100\text{mm/h}$, $k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$, $c=200\text{kPa}$ における降雨開始から 8 時間後の安全率分布を示す。分析対象は図-2 の矢印で示す地表流が初めに発生する箇所付近の斜面部を選定した。表-1 に示す条件でパラメトリックスタディを実施し、地盤の力学特性が安全率の経時変化に与える影響を分析した。なお、本文ではグリッド内に一定の地盤定数を入力している。

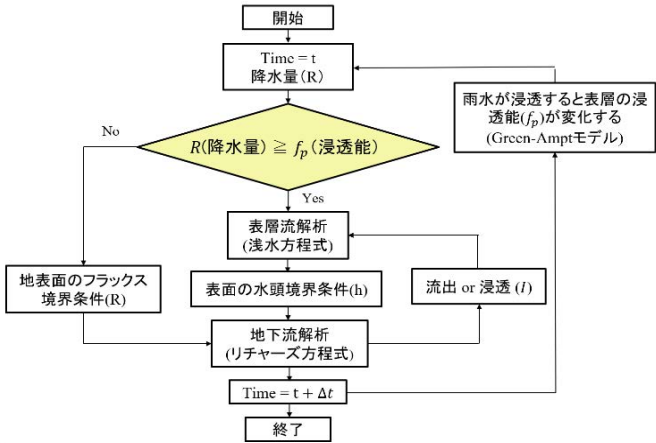


図-1 地下浸透流と地表流の連成解析フロー

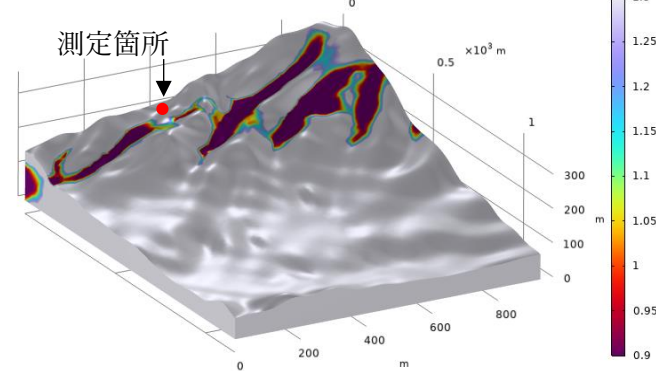


図-2 解析例

表-1 解析条件

粘着力 $c(\text{kPa})$	200
飽和透水係数 $k_s(\text{m/s})$	1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-4} , 1.0×10^{-5}
内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	30
初期地下水位 GWL(m)	-10
雨量 $R(\text{mm/h})$	20, 40, 60, 80, 100

キーワード 斜面 防災 地表流 COMSOL

連絡先 819-0395 福岡市西区本岡 九州大学伊都キャンパス

3. 解析結果

図-3, 4 に $k_s=1.0\times10^{-4}\text{m/s}$ と $k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$ における雨量ごとの安全率と時間の関係を示す。図-3 より $k_s=1.0\times10^{-4}\text{m/s}$ では雨量による安全率の下がり方に変化はなく、雨量が大きくなるにつれて崩壊までの時間が早くなった。一方、図-4 より $k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$ では雨量 $R=40\text{mm/h}$ から安全率の下がり方が大きく変化し、ある時刻から急激に安全率が低下することが分かる。図-5, 6 に $R=60\text{mm/h}$ 時の $k_s=1.0\times10^{-4}\text{m/s}$ と $k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$ における、降雨開始から 1 時間後の水深の分布を示す。 $k_s=1.0\times10^{-4}\text{m/s}$ では領域全体で地表流は発生しておらず、 $k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$ では領域全体で地表流が発生しており、谷部では特に地表流による水深が大きくなった。このことから $k_s=1.0\times10^{-4}\text{m/s}$ の降雨開始から 1 時間後ではまだ降雨すべてが地盤内に浸透しており、 $k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$ では地盤内に浸透できなくなった雨が地表流として地表に流出していることが分かる。これは $k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}=36\text{mm/h} < 40\text{mm/h}$ であり、降雨が地盤の透水係数を上回ったことが原因として考えられる。

4. まとめ

$k_s=1.0\times10^{-4}\text{m/s}$ では安全率の下がり方はどの雨量でも一定の速度で低下し続け、雨量が大きくなるほど安全率は小さくなり、崩壊までの時間も早くなった。 $k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$ では $R=40\text{mm/h}$ から急激に安全率が低下し始めた。また図 3, 4 より、飽和透水係数によって安全率の下がり方が異なった。このことから安全率の低下には飽和透水係数が非常に大きな影響を与えており、その原因として地表流の発生が挙げられる。雨量よりも飽和透水係数が高いと地盤内に浸透できない雨が地表に流出し、その結果地表の有効応力が急激に低下するため、急激な安全率の低下をもたらすと考えられる。

参考文献

- 1) Murillo, J., García-Navarro, P., Burguete, J., Brufau, P., 2007. The influence of source terms on stability, accuracy and conservation in two-dimensional shallow flow simulation using triangular finite volumes. Int. J. Numer. Methods Fluids 54, 543–590
- 2) Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics. 1 (5), 318–333.
- 3) Lu, N., Şener-Kaya, B., Wayllace, A., Godt, J.W., 2012. Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety. Water Resour. Res. 48, W09524

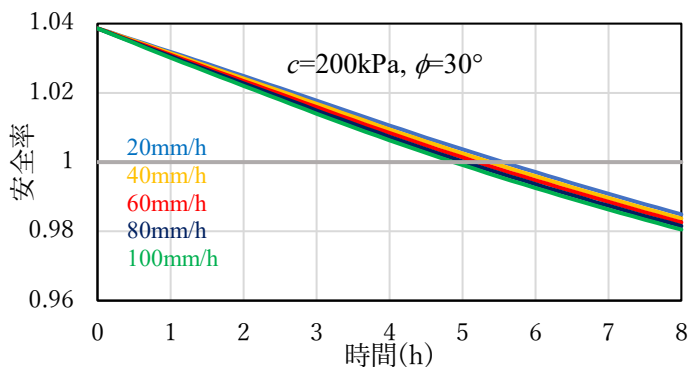


図-3 安全率と時間の関係($k_s=1.0\times10^{-4}\text{m/s}$)

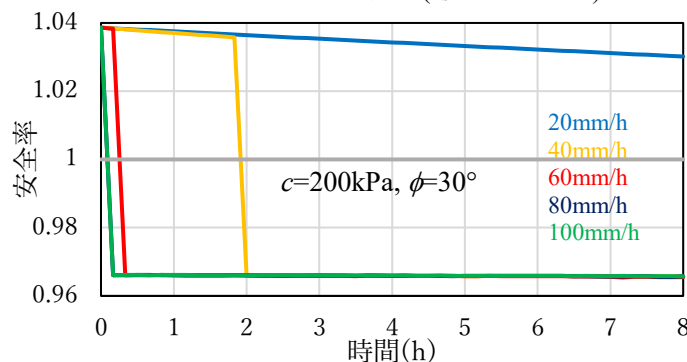


図-4 安全率と時間の関係($k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$)

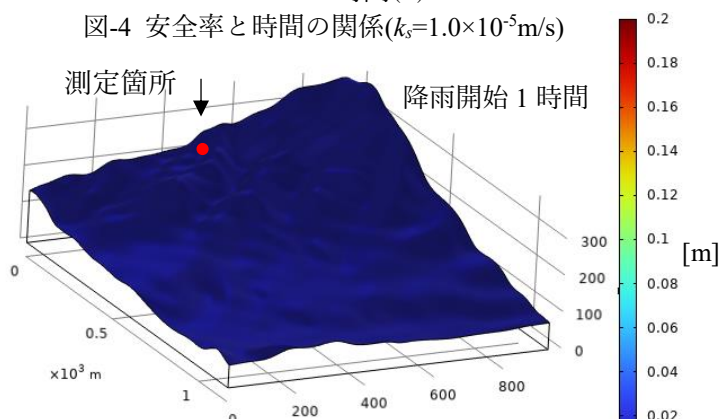


図-5 降雨開始 1 時間後における水深

($k_s=1.0\times10^{-4}\text{m/s}$)

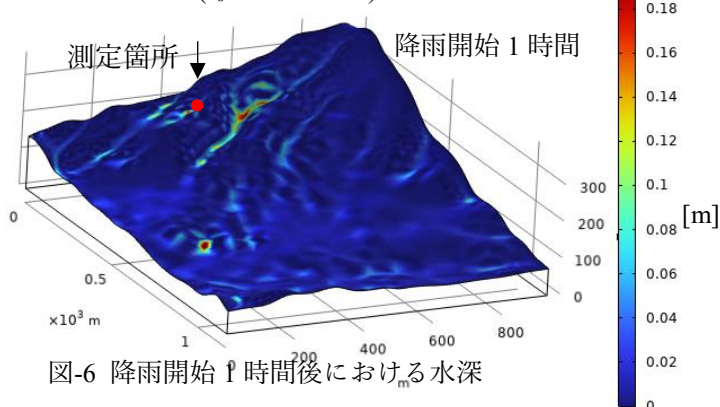


図-6 降雨開始 1 時間後における水深

($k_s=1.0\times10^{-5}\text{m/s}$)