

京都大学大学院 工学研究科 学生会員 ○鶴澤 祐人, 正会員 小山 倫史, 学生会員 中村 秀樹
(株)建設技術研究所 大阪本社 正会員 李 圭太
国土交通省近畿地方整備局福知山河川国道事務所 非会員 山田 雅義, 福山 直紀

1. はじめに

近年, 集中豪雨や局所的大雨 (ゲリラ豪雨) による斜面崩壊が, 国道沿いなどで数多く発生している. 現在, 降雨時の通行規制は降雨開始からの累積降雨量 (本研究の対象斜面では累積 200mm) の情報をもとに発令されている. しかし, この基準は個々の斜面の地盤物性, 地質構造, 降雨の特性などを考慮しておらず, 降雨中の斜面の状態を正確に把握できているとは限らない. そこで本研究では, 対象斜面の地盤物性・地形を考慮した豪雨時の通行規制基準を提案することを目的とし, 一定の降雨強度を用いて有限要素法 (FEM) による 2 次元飽和・不飽和浸透流解析および円弧すべり解析を行い, 降雨強度と斜面崩壊までの累積降雨量の関係を明らかにし, 降雨時の通行規制基準線を作成した. そして基準線を用いて過去 10 年間に発生した降雨に対する危険度評価を行った.

2. 飽和・不飽和浸透流解析¹⁾

飽和・不飽和浸透流解析の支配方程式は, 質量保存則による連続式とダルシー則から導出される式を, 不飽和領域まで拡張した式である.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_r(\theta) \left(K_{ij}^s \frac{\partial \psi}{\partial x_j} + K_{i3}^s \right) \right) - q = (\alpha S_s + \beta c(\psi)) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

$i, j=1,2,3 \text{ (1:x, 2:y, 3:z)}$

ここに, K^s : 飽和透水係数, K_r : 比透水係数, ψ : 圧力水頭, q : 体積内の単位体積当たりのシンク/ソース流量 (排水時, $q>0$), S_s : 比貯留係数, α : 飽和領域=1 不飽和領域=0, $c(\psi)$: 比水分容量, β : 飽和領域=0 不飽和領域=1 である.

3. 斜面モデル

本研究で対象とした斜面は, 京都府福知山市夜久野町日置地区の国道 9 号線沿いの斜面で幅 20m, 高さ 40m, 深度 10m の部分をモデル化した. 雨水浸透減少を詳細に把握するため地表面付近の要素を細かく分割した. 境界条件は, 地表面は降雨境界, 道路面および擁壁は不透水境界, モデル上下流側面に水頭固定境界を設定し, モデルの底部は不透水境界とした. また, 地層区分は既往の報告書²⁾をもとに設定した (図 1). 表層の物性値については既往の地質調査結果をもとに設定した. 岩盤層の物性値については代表 N 値から推定した (表 1 参照). 不飽和特性については詳細な調査が行わ

斜面の安定解析に関しては円弧すべりを想定したフェレニウス法を用い, 図 3 に示す滑り面を想定した.

4. 斜面の危険度評価

4.1 通行規制基準の作成

一定の降雨強度を用いて, 斜面の雨水浸透流解析および円弧滑り解析を行い, 降雨強度と安全率が 1 を下回るまでの累積雨量の関係を調べた. 降雨強度は 6~120mm/h の 20 通りを検討した. 解析結果を図 4 に示す (以下通行規制基準線と呼ぶ). 本図より, 降雨強度が大きくなるにつれ累積雨量は小さくなる. これは, 降雨強度が大きいほど短期間に多量の雨水が供給され, 浸透速度が大きいためであると考えられる. また, 降雨強度が非常に大きくなると, 累積雨量は一定となり,

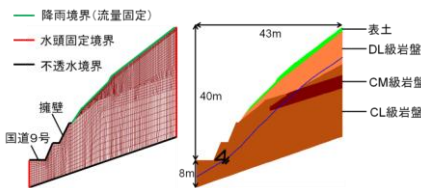


図 1. 境界条件図および地層区分

表 1. 解析に用いた各層の物性値

	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$c(\text{kN/m}^2)$	$\phi(^{\circ})$	$K(\text{cm/sec})$
表土	18	2	33.72	9.62×10^{-3}
DL 級岩盤	20	100	30	1.0×10^{-5}
CM 級岩盤	25	1000	40	5.0×10^{-6}
CL 級岩盤	22	500	40	1.0×10^{-6}

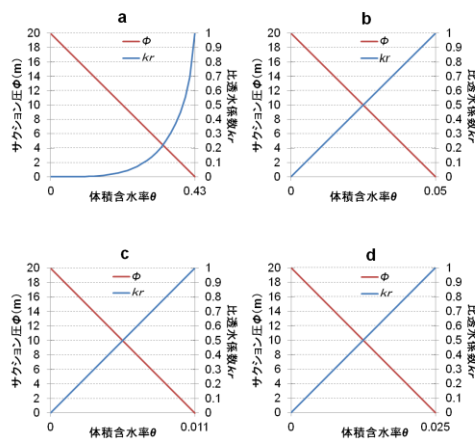


図 2. 不飽和特性 (a : 表層, b : DL 級岩盤, c : CM 級岩盤, d : CL 級岩盤)

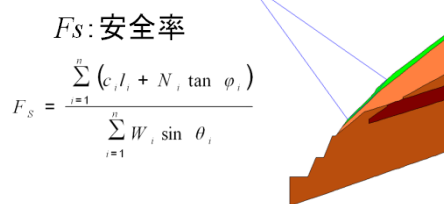


図 3. 想定すべり面

基準線が立ち上がる。これは斜面の浸透能よりも降雨強度が大きく、浸透能以上の雨水が供給されているためであると考えられる。

4.2 通行規制基準線による危険度評価

通行規制基準線を用いて、過去 10 年間に対象斜面付近で発生した降雨に対して危険度評価を実施した。スネークカーブは累積雨量の増加に伴い通行規制基準線に近付き、通行規制基準線をスネークカーブが交わる時点で危険と判断する。過去 10 年間に発生した降雨のうち、累積雨量が 50mm 以上の降雨を対象に危険度評価を行った結果、崩壊の危険性が高まったと考えられる降雨は、2004 年 10 月 20 日、2009 年 8 月 9 日、2011 年 9 月 20 日の 3 回あった。これらの降雨を図 4 で示す通行規制基準線とあわせてスネークカーブを描いたものを図 5 に示す。これらの結果から、現行の累積雨量 200mm よりも、提案した通行規制基準線による危険度評価の方が少ない累積雨量で崩壊の危険が高まっていると判断できる。また、3 種類の降雨は、安全率が 1 を下回るまでの累積雨量には違いがみられる。これは、各降雨の特性を反映しているためであり、現行の累積雨量のみの判断では、危険度予測を正確に行えない可能性があることを示唆する。

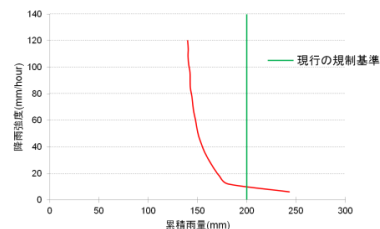


図 4. 解析結果 (通行規制基準線)

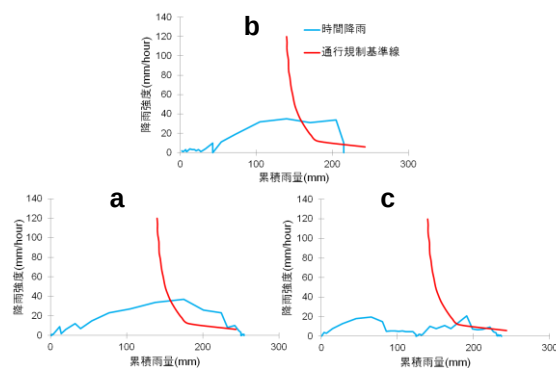


図 5. スネークカーブ (a : 2004 年, b : 2009 年, c : 2011 年)

5. まとめ

対象斜面における降雨時の通行規制基準を提案することを目的とし、一定の降雨強度を用いて雨水浸透流解析および円弧すべり解析を行い、その結果から通行規制基準線を作成した。この基準線を用いて、過去の降雨データをもとにスネークカーブを描き危険度評価を行った結果、現行の累積雨量 200mm による評価よりも厳しい結果となった。したがって、一律の累積雨量のみの判断では、危険度を必ずしも正確に把握できない可能性がある。また、崩壊の危険が高まっていると判断されるまでの累積雨量は、降雨によって違いがみられ、降雨の特性を考慮することが重要であると言える。今後、より短い時間間隔で降雨を把握することでゲリラ豪雨も対象とした精密な危険度評価を行える可能性がある。また、この危険度予測の方法は個別の斜面を対象とするため、通行規制基準を適用する斜面を抽出する手法の確立が必要である。また、通行規制基準線の作成にあたっては、解析モデルの高精度化が必要であり、現地の詳細な地質調査や、3 次元でのモデル化を行う必要がある。

参考文献

- 1) 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠 : 有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析, 土木学会論文集, 264 号, pp.87-96, 1977
- 2) 国土交通省近畿地方整備局 : 国道 9 号日置地区緊急法面他調査設計報告書, p.100, 2011