

基岩内浸透水が斜面の安定性に与える影響について

京都大学大学院農学研究科(現国土交通省東北地方整備局新庄河川事務所) ○大山誠
 京都大学大学院農学研究科 小杉賢一朗 水山高久

1. はじめに

従来提唱されてきた降雨浸透計算を組み込んだ斜面安定解析における問題点として、場の不均質性が降雨浸透に伴う間隙水圧の変化に与える影響を無視することが多い、という点が挙げられる。一般に地質学的に同一と判断される地層内においても、降雨浸透に関わる物理特性は空間的に大きく変動することが明らかになっている¹⁾。さらに、従来の森林水文学においては、基岩の透水性は無視されることが多かったが、実際の基岩は透水性を有し²⁾、斜面安定計算においてもそれを無視することはできないと考えられる。本研究においては、降雨浸透計算と斜面安定計算を組み合わせた計算手法を提示し、基岩の水分特性に不均質性を持たせた場合斜面の安定性がどのように変化するかを検討する。

2. 計算方法

計算対象となる斜面と降雨波形を設定して降雨浸透計算を行い、得られた間隙水圧のデータを用いて斜面安定計算を行った(図1)。

まず、2004年9月29日に台風21号に伴って発生した三重県宮川村小滝地区の斜面崩壊を参考に、計算対象となる二次元斜面と降雨量を設定した(図2)³⁾。斜面スケールは実際に崩壊が起こった斜面の1/5、降雨量は実際の降雨量の1/2に設定した。表土層は50cm~100cmであったという報告から、土層深度は75cmとし、土層深0~45cmは団粒状土壌、45~75cmはカベ状土壌とした。また土層の下に150cmの基岩を想定した。

降雨浸透計算においては有限要素法を用いたプログラムを利用した⁴⁾。斜面を6000要素に分割し、それぞれの要素に飽和体積含水率 θ_s 、残留体積含水率 θ_r 、メジアン孔隙径に対応する圧力水頭 ϕ_m 、孔隙径分布の幅を表すパラメータ s 、飽和透水係数 K_s のパラメータを与えた(表1)。降雨浸透計算開始時における斜面内の圧力水頭は一律 $-100\text{cmH}_2\text{O}$ とした。

斜面安定計算においては Bishop 法を用いた(図3)。安全率は以下の式で表される(式1)。

$$F_s = \frac{\sum \frac{cb + (W - \gamma b) \tan \phi}{(1 + \tan \phi \tan \alpha / F_s) \cos \alpha}}{\sum W \sin \alpha} \quad \text{式 1}$$

ここで、 F_s :安全率、 c :粘着力、 ϕ :内部摩擦角、 W :スライスの重量、 b :スライスの幅、 ϕ :間隙水圧、 α :傾斜角である。土質強度に関しては風化花崗岩を想定し、土粒子の密度 $=2.65\text{gf/cm}^3$ 、 $c=20\text{gf/cm}$ 、 $\phi=35^\circ$ とした。

表1 降雨浸透計算に用いた土壌のデータ

	団粒状土壌 (深度 0~45cm)	カベ状土壌 (深度 45~75cm)	基岩 (深度 75~225cm)
θ_s	0.621	0.668	0.6445
θ_r	0.399	0.459	0.429
ϕ_m	-33.4cm	-121.5cm	random
s	1.42	1.38	1.40
K_s	$1.70 \times 10^{-2} \text{cm/s}$	$1.15 \times 10^{-3} \text{cm/s}$	random

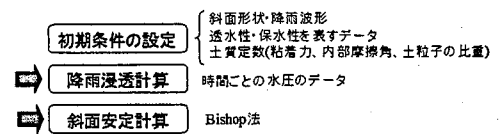


図1 計算の流れ

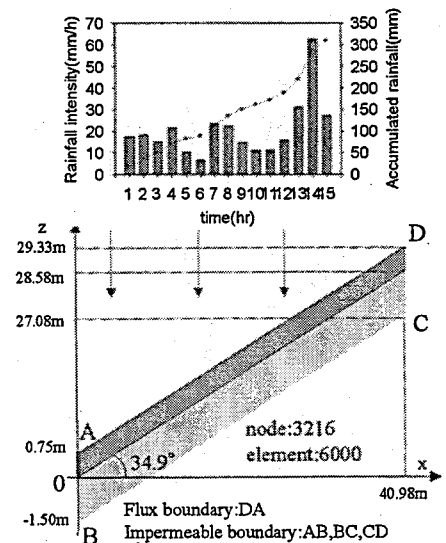


図2 計算対象の降雨波形と斜面

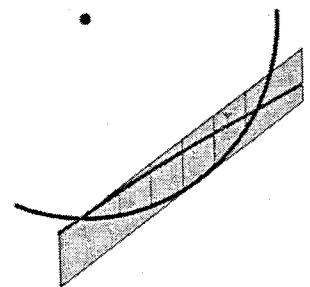


図3 Bishop法の概念図

3. 基岩の透水係数の与え方

土壌の透水係数の計測は比較的容易であるが、基岩の透水係数を計測することは非常に困難である。実際に基岩を山地斜面で採取して透水試験を行い、飽和透水係数を算出した例²⁾は極めて少ない。本研究では、団粒状土壌を構成する1200要素、カベ状土壌を構成する800要素の飽和透水係数はそれぞれ一律に設定したが、基岩を構成する4000要素の飽和透水係数は正規分布に従ったランダムな値に設定した。

一般に土壌の透水性と保水性は関連しており、そのパラメータの間に次式の対応関係が提案されている⁵⁾。

$$\log K_s = -2 \log(-\psi_m) + \log(B \exp(s^2)) \quad \text{式 2}$$

ここで、 $B=10^{0.4}$ であり、 s は定数(表 1)と仮定した。 $\log(-\phi_m)$ が標準偏差 σ の正規分布に従うとすると、 $\log K_s$ は標準偏差 2σ の正規分布に従うことになる。基岩の飽和透水係数の幾何平均値を $10^{-3.35}$ cm/s と仮定した上で、式 2 の関係を用いて、 K_s と ϕ_m をランダムに発生させた。また、大きな K_s を持つ基岩要素を恣意的に配置することにより、基岩内の割れ目を想定した計算も行った。6 パターンの計算の概略を表 2 にまとめた。

表 2 基岩の飽和透水係数の設定

	σ	基岩の飽和透水係数分布の特徴
①	0	4000 要素が一律の透水係数($\log K_s = -3.35$)
②	0.25	4000 要素をランダム配置
③	0.5	4000 要素をランダム配置
④	0.5	土層最深部から基岩にかけて割れ目があり、出口が斜面外
⑤	0.5	基底部に割れ目があり、出口が斜面外
⑥	0.5	斜面上流の基岩内に割れ目があり、出口が斜面内

②～⑥については、それぞれ 5 通りずつ設定し安全率の計算を行った。

4. 結果と考察

①～③の比較から、基岩の飽和透水係数の分散が大きくなるほど、 F_s が 1.0 となる時間が遅くなり、斜面の安全性が高まるという結果となった(図 4)。同一条件の斜面においては、飽和透水係数の小さい方が少ない降水量で崩壊が発生するという指摘があり⁶⁾、 σ が大きくなるほど飽和透水係数の算術平均が大きくなることの影響していると考えられる。

次に、基岩に割れ目がある場合について考察する。④～⑥のいずれの場合も、③と比較し F_s が 1.0 となる時間が早くなり、斜面の安全性は低下した(図 5)。従来の研究では④・⑤のような割れ目やパイプなどの出口が斜面外にある場合排水性が良くなり斜面は安定性を増し、逆に⑥のような出口が斜面内にある場合には地下水位を上昇させ斜面は不安定になるということが指摘されている。本研究では、⑥は従来の研究結果と一致したが、④・⑤では従来と異なる結果となった。本研究の場合、下流側に割れ目を設定し透水性が良い要素を集中させると、反対に上流側は透水性が悪い要素が集中することになる。そのため上流側の間隙水圧が高まり、不安定な部分が形成されたことが原因であると考えられる。つまり、割れ目の排水性よりも透水性の偏在性の方が影響が大きいといえる。

また、割れ目を斜面下部に設定した④・⑤では Bishop の円弧は斜面上部に形成され、反対に斜面上部に設定した⑥では円弧は斜面下部に形成された。円弧の位置は、割れ目により間隙水圧が高まった位置と一致した。

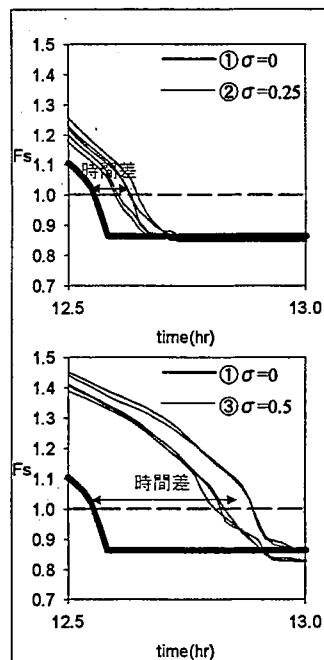


図 4 ①～③の安全率推移

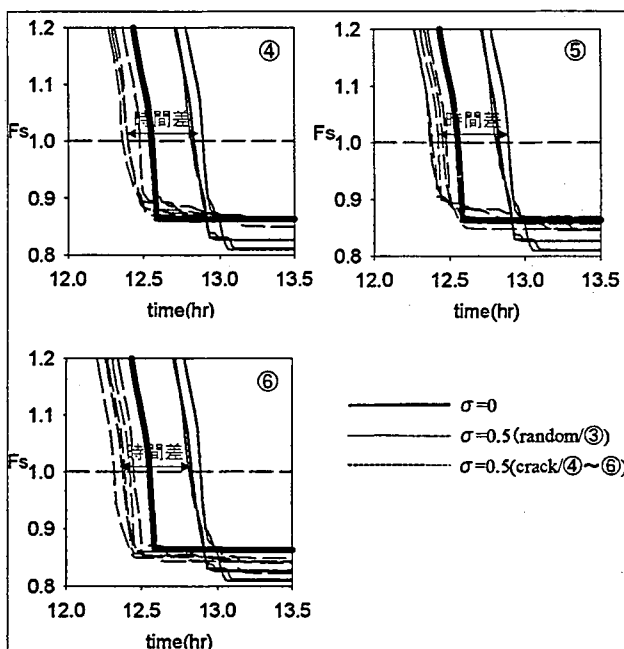


図 5 ④～⑥の安全率推移

参考文献

- 1) 齋藤雅彦・川谷健: 透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察、土木学会論文集、No.694、III-57、pp245-258、2001
- 2) 桂真也: 風化花崗岩の水文特性の計測—山地小流域における基岩を介した水文過程の解明に向けて—、京都大学修士論文、2005
- 3) 林拙郎・土屋智・近藤観慈・芝野博文・沼本晋也・小杉賢一朗・山越隆雄・池田暁彦: 2004年9月29日、台風21号に伴って発生した三重県宮川村の土砂災害(速報)、砂防学会誌、Vol.57、No.4、pp48-55、2004
- 4) Kosugi et al.: Numerical calculation of soil pipe flow

and its effect on water dynamics in a slope, Hydrol. Process. 18、 p777-789、2004

5) Kosugi, K.: New diagrams to evaluate soil pore radius distribution and saturated hydraulic conductivity of forest soil, Journal of Forest Research、2、 pp 95-101、1997

6) 三森利昭: 崩壊に関する諸因子の影響度評価に関する数値実験的研究、京都大学学位論文、1994