

選択流路を考慮した浸透流計算と斜面安定解析

京都大学防災研究所
京都大学大学院工学研究科

○堤大三・藤田正治・多田泰之・Roy C. Sidle
林雄二郎

1. はじめに

熊本県水俣市において2003年7月20日0時から5時までの5時間に降った265 mmの豪雨が、集川上流部の斜面崩壊を引き起こし、集川を流下した土石流は宝川内地区に甚大な被害をもたらした。この斜面崩壊は、表土層だけでなくその下層の風化安山岩層に達する比較的大規模なものであり、最大崩壊深さ15~20 mから考えると、深層崩壊に分類される。一般的に深層崩壊は、多量の先行降雨の後、降雨ピークから遅れて発生するケースが多く、逆に先行降雨は少ないが短期間に高強度の降雨がもたらされた斜面では、降雨ピークと同時に表層崩壊が発生することが多いと考えられている。当該崩壊の場合、降り始めまでの10日間の先行降雨が70 mmと少なく、その後の短時間に90 mm/hr程度の強い降雨が観測され、その降雨ピークに遅れることなく深層崩壊が発生している。これは、先に述べた通常の降雨パターンと崩壊分類の関係とは異なる。この原因として、風化安山岩層に発達した節理が選択流路として働き、表層からの浸透水がすばやく深層にまで到達したことで急激な間隙水圧の上昇をもたらし、降雨ピークと同時に深層にまで達する斜面崩壊を引き起こしたのではないかとということが指摘されている^{1,2)}。本研究では、風化基岩中に選択流路の発達した大規模な斜面を想定し、降雨浸透過程と斜面安定性に関する数値実験を行なうことで、降雨による斜面崩壊発生機構についての検討を行った。

2. 計算手法

(1) 選択流を考慮した浸透流計算³⁾

土層内の浸透流は、Richards式を有限要素法により計算し求めた。得られた圧力水頭 ψ の分布から、パイプ壁面の土層が不飽和($\psi < 0$)の場合、その部位の選択流は無いものとみなす。逆に、飽和($\psi \geq 0$)の場合、圧力水頭値 ψ によって開水路流及び管路流に選択流を分類し以下の式にて選択流量および土層から選択流路への浸透流量を計算した。

a) 開水路流 ($\psi = 0$)

$$S_p'(u) = \frac{dQ_p(u)}{du} + \frac{dA_p(u)}{dt} \quad (1)$$

$$Q_p(u) = \frac{1}{n_m} R(u)^{2/3} (\sin \alpha(u))^{1/2} A_p(u) \quad (2)$$

b) 管路流 ($\psi > 0$)

$$S_p'(u) = \frac{dQ_p(u)}{du} \quad (3)$$

$$Q_p(u) = \frac{1}{n_m} R^{2/3} \left(\frac{d\phi(u)}{du} \right)^{1/2} A \quad n=0.025 \quad (4)$$

ここで、 u [m]はパイプの流下方向を表す軸（下流方向に正）、 $S_p'(u)$ [m³/sec/m]は単位長さあたりの土層から選択流路への浸透流量、 $Q_p(u)$ [m³/sec]は選択流量、 $A_p(u)$ [m²]は選択流路内流水断面積、 A [m²]は選択流路断面積、 n_m [m^{-1/3}s]は粗度係数、 R [m]は径深、 $\alpha(u)$ [°]は選択流路の傾斜角、 $\phi(u)$ [m]は選択流路内の水理水頭である。式(1)、(2)は、それぞれ開水路流と管路流における連続式、式(3)、(4)は、マニング式である。

浸透計算による圧力水頭分布と、式(1)、(2)もしくは式(3)、(4)を連立させて、収束計算により土層及び選択流路内の圧力水頭分布と選択流量を計算した。

(2) 斜面安定性

安定解析 (Janbu法) と、滑り面探査 (動的計画法) を組み合わせた手法を用いて、 $x-z$ 断面における任意の

滑り面形状に対応可能な崩壊判定を行った。また、 $x-z$ 断面における ψ の2次元分布をもとに土層内の局所的な安全率 (= 抵抗力/滑動力) F_s の2次元分布を計算し、上記の崩壊判定手法と併用した。

3. 計算条件

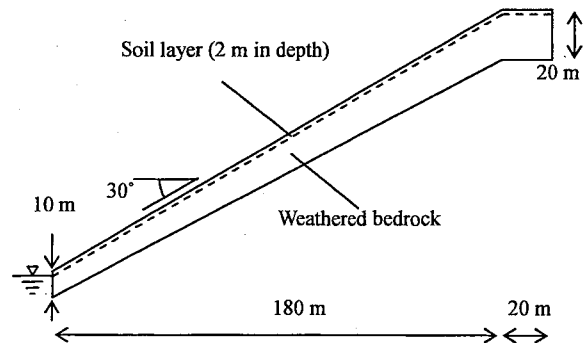


図-1 想定した斜面の側面図

図-1に示す斜面において、表土層深さ2.0 m、表土層以下は風化基岩層とし、幅2.0 mを計算対象領域とした。透水係数および比水分容量には対数正規分布モデルを用い、表土層、風化基岩層それぞれに異なるパラメータを与えた (例えば飽和透水係数は、表土層: $K_s = 0.005$ cm/s, 風化基岩層: $K_s = 0.0001$ cm/s)。また、土層強度も、それぞれ異なる値を仮定した (表土層: $c = 1.0$ tf/m², $\phi = 35^\circ$, 風化基岩層: $c = 3.0$ tf/m², $\phi = 60^\circ$)。

図-2に示すように、選択流路が無い単純な土層 (Case 1) 及び2種類の選択流路を設定した (Case 2, 3)。選択流路として、土層と風化基岩の境界部3箇所に直径 d ($=5.0$ cm)のパイプを設定、その下流端に接続する形で風化基岩内を鉛直下向きに伸びるクラックを設定した。さらにCase 2では、鉛直方向のクラック全てに接続する形で斜面下流方向に伸びるクラックを設定し、その下流端は斜面外に開放した。また、Case 3では、Case 2

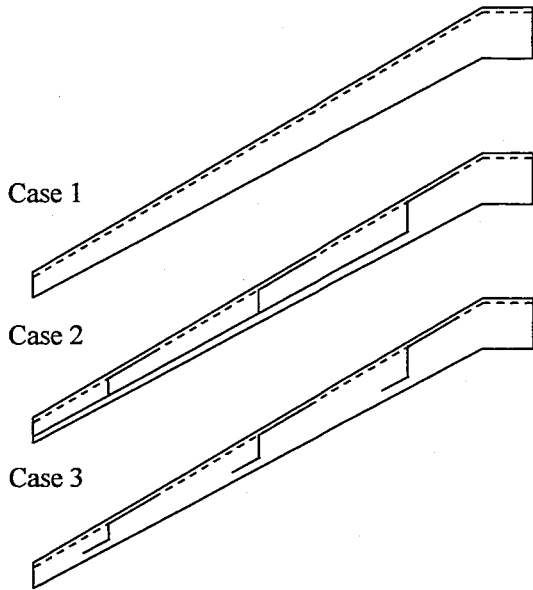


図-2 斜面における選択流路 (Case 1: 選択流路なし, Case 2: 土層外開放クラック, Case 3: 閉塞クラック)

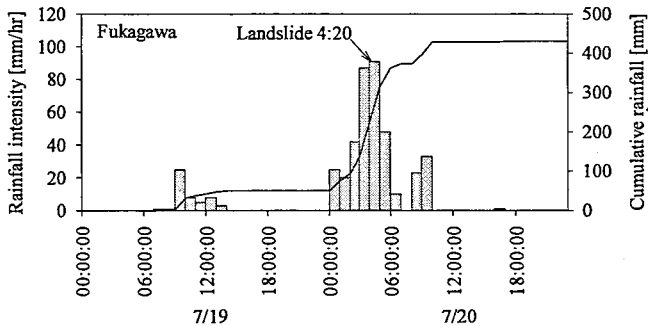


図-3 計算に用いた降雨パターン

における斜面下流方向に伸びるクラックが途中で切断された形状に設定した。全てのクラックは土壌層と風化基岩層の境界に設定したパイプと同一直径の円筒とし、斜面スライスを中心断面上に設置した。

浸透計算には、図-3 に示す深川観測所にて記録された降雨パターンを用いた。

4. 結果と考察

各 Case において計算された斜面安全率の変化を図-4 に示す。Case 1, 3 では、降雨の開始と共に安全率が減少し始め、Case 1 では降雨ピークの初期段階で、Case 3 ではその最終段階で、それぞれ安全率が 1.0 を下回り崩壊発生と判定された。Case 2 では、安全率は常に 1.0 を上回り、崩壊は発生しないと判定された。安全率が 1.0 を下回った時間における、斜面内の局所的な安全率分布と滑り面形状を見ると (図-5)、Case 1 では、局所的な安全率の低い領域が表層に集中しており、滑り面も表層を横断する表層崩壊が発生したことを示している。崩壊発生後も便宜的に計算を継続したが、安全率が 1.0 を下回ったときは、常に滑り面は表層を横断していた。このことは、先行降雨の少ない短時間集中豪雨の場合、表層崩壊が発生しやすいという従来の傾向と一致している。一方、Case 3 の場合、選択流路が閉塞している風化基岩層での局所安全率の低下が著しく、滑り面もその部分を横断する深い形状を示しており、選択流路の

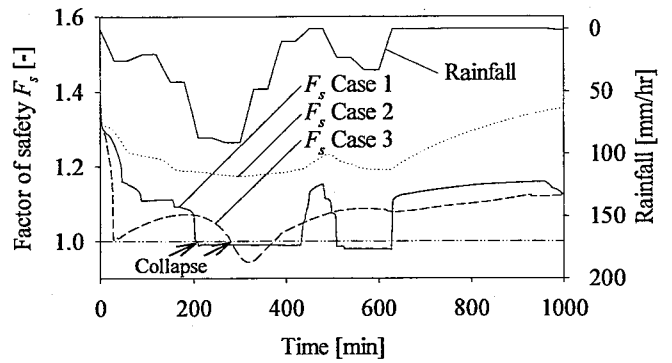


図-4 斜面の安全率変化

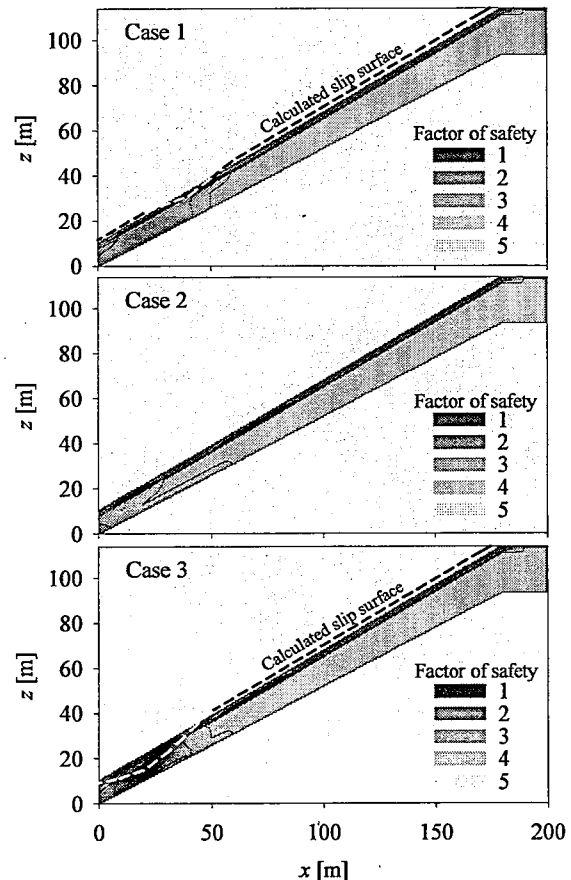


図-5 $F_s < 1.0$ (Case 1, 3) となった時の局所安全率分布と滑り面形状

存在が水俣市集川における斜面崩壊現象を説明しうるものが示された。

5. おわりに

選択流路を考慮した浸透流数値シミュレーションによって、風化基岩層にまで到達する深層崩壊の発生を説明できることが示された。

参考文献

- 1) Sidle R. C. and Chigira M. (2004): Landslides and debris flows strike Kyushu, Japan, EOS transactions AGU, Vol. 85 (15), pp. 145, 151
- 2) 谷口義信(2003): 2003年7月九州地域豪雨災害調査報告書(速報)一水保土砂災害一, 砂防学会誌, 56(3), p.31-35
- 3) 堤大三・Roy C. Sidle・藤田正治・水山高久(2004): パイプ流存在下での斜面の安定性に関する数値実験, 水工学論文集, 48, p.337-342