

豪雨時の段階的表層崩壊プロセス

○京都大学大学院 工学研究科
京都大学 防災研究所

林雄二郎
堤大三・藤田正治・多田泰之・井上和也

1. はじめに

斜面崩壊を考える場合、斜面が一度で崩壊したのか、複数回に分けて崩壊したのかは、崩壊時刻や災害規模を予測する上で重要な観点である。しかし一般的に崩壊のプロセスは崩壊跡地を観察することでしか推測できないため、これまででなされてきた数多くの研究の中でもこの問題はほとんど検討されていない。そこで本研究では豪雨時における斜面崩壊のプロセスを数値シミュレーションを用いて再現することで、斜面の段階的崩壊について検討した。

2. 方法

土層内の水移動を計算する浸透流解析では、基礎式である3次元 Richards 式を有限要素法で解くことで、水の流れと圧力水頭を求めた。

崩壊判定においては、動的計画法（以下 DP 法）と簡易 Janbu 法を組み合わせ、安全率最小となる臨界すべり面の探索を2次元で行った。DP 法は最初の stage から最終 stage に至る複数の経路のうち、利得値が最大または最小となる経路を効率的に求める数学的手法であり、ここでは想定斜面内に設けた探索点を結んで形成されるすべり面のうち安全率最小となるものを求める。これと Janbu 法とを組み合わせることで、円弧、非円弧問わず様々なすべり面に対応できる¹⁾。

計算の流れとしては図1に示す様に、①斜面の形状、降雨、土に関する各データを入力する ②浸透流解析を行い、土層中の圧力水頭を計算する。③計算過程②で得た圧力水頭の値を利用して臨界すべり面を求め、斜面崩壊判定を行う。④ここで安全率が 1.0 を切らなかった場合は②に戻り、計算を繰り返す。1.0 を切った場合は崩壊が起こったとみなし、⑤に進む。⑤崩壊土を取り除いて斜面形状を更新し、再び②に戻り計算を継続する。設定終了時刻に達した時点で計算を終了する。

3. 計算条件

想定斜面は、2004年に実際に段階的崩壊が目撃された三重県宮川村小滝の斜面形状をモデルとし、降雨条件もその際の実測値を用いた²⁾。斜面の水平長さは $x=200\text{m}$ 、高さ $z=145.3\text{m}$ で勾配 36° である。土層厚は 2m で、それより下層は基岩とした。モデル上では、この基岩は不透水であり、かつ崩壊の発生しない高い強度を与えた。奥行き $y=2\text{m}$ としたが、土層は完全に均質であるとしているため、間隙水圧、臨界すべり面とその安全率に奥行き方向の変化は無く、実質的には2次元で計算を行っているのと変わらない。降雨データを図2に示す。9月29日の10時~11時に最大降雨

強度 119mm/h のピークがあり、総雨量は 753mm である。土層は1層、湿潤単位体積重量は含水率に関わらず均一で $\gamma = 1.92 \text{ tf/m}^3$ であるとし、空隙率 $n = 44.2\%$ 、飽和透水係数 $K_s = 0.01 \text{ cm/s}$ とした。土の粘着力、内部摩擦角については $0.0 < c < 1.5 [\text{tf/m}^2]$ 、 $5.0 < \phi < 62.5 [\text{degree}]$ の範囲で様々な組み合わせを考え計算を行った。初期条件として、十分湿潤した土層に総雨量 380mm の降雨を約10時間に渡って与えた後、一週間放置し、自然排水させた圧力水頭分布の状態を想定した。

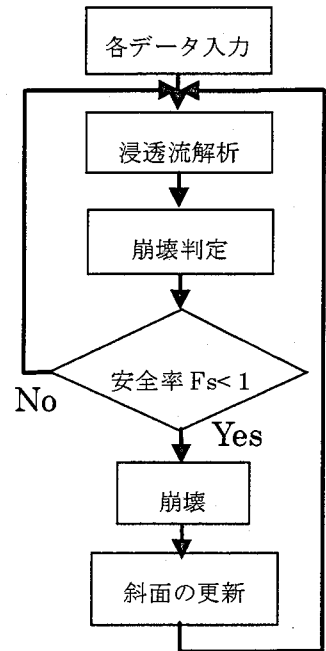


図1 数値シミュレーション全体のフロー

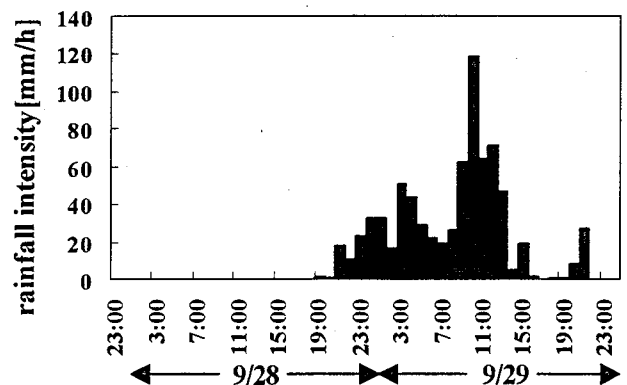


図2 降雨強度の変化

4. 結果・考察

様々な土層の強度の元で計算を行うと、大きく分けて次の3つの結果が得られた。(1) 1度の崩壊で斜面の下端から8割以上が崩れ落ちる(この場合は崩壊が起こった時点で計算を終了した)。(2) 1回目の崩壊後も斜面の2割以上が残り、さらに崩壊が起こる。(3) 最後まで崩壊しない。

(1)を「単回崩壊」、(2)を「多段階崩壊」と呼んだ。単回崩壊の代表例として① $c' = 1.0 \text{ tf/m}^2$, $\phi' = 30^\circ$ のケースを、多段階崩壊の代表例として② $c' = 1.0 \text{ tf/m}^2$, $\phi' = 27.5^\circ$ のケースを取り上げ、初期状態とそれぞれの場合の崩壊直前、直後の土層内の圧力水頭分布と斜面形状を図3、図4に示す。どちらの場合も降雨に伴って圧力水頭が上昇して行き、安全率が低下

して崩壊に至った。①のケースでは9月29日10時34分に大規模な崩壊が見られ、斜面のほとんどが崩れ落ちた。②のケースでは29日10時09分に1回目の崩壊があり、その19分後の10時28分に2回目の崩壊が起こった。

次に、与えた粘着力、内部摩擦角の値とそのときの崩壊形態との関係を図7に示す。ここに、Not existing slopeは初期条件においてすでに崩壊してしまうケース、Multi-collapseは多段階崩壊が、Single-collapseは単回崩壊がおこるケース、Stable slopeは崩壊が起こらないケースである。内部摩擦角が 45° 以上の土は一般的にあまり見られないためその領域には網をかけた。粘着力が高く、内部摩擦角が比較的低い領域ではSingle-collapseが多く見られるが、内部摩擦角が大きくなっていくとほとんど多段階崩壊で占められている。これは、土層のせん断抵抗力 τ [tf/m^2]と垂直有効応力 σ' [tf/m^2]との $\tau - \sigma'$ 関係($\tau = c + \sigma' \tan \phi$)から説明できると考えられる。

5. まとめ

本研究では数値シミュレーションにより斜面の段階的崩壊について検討し、そのプロセスを再現することができた。崩壊形態としては一度で崩壊してしまう場合よりも段階的に崩壊する場合のほうが圧倒的に多く見られた。数値シミュレーションでは平行斜面を仮定し、土層も均質としているが、実際の斜面では基盤構造は平行ではなく、地中の水流も複雑な挙動をするため、より段階的な崩壊が起こりやすいと考えられる。

参考文献

- 1) 久保田哲也ら：臨界すべり面解析と信頼性解析を応用した地すべり・崩壊危険度の判定法, 地すべり, 第27巻, 第4号, Journal of Japan Landslide Society, 27-4 (1991)
- 2) 林拙郎ら：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, pp.48-55, 2004

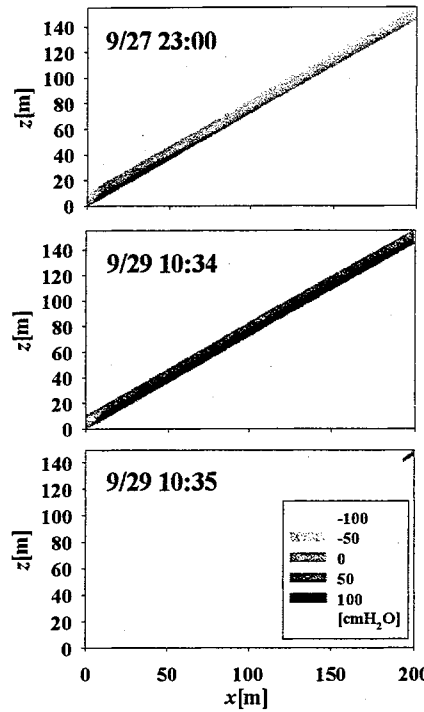


図3 圧力水頭の変化と崩壊の様子 ケース①

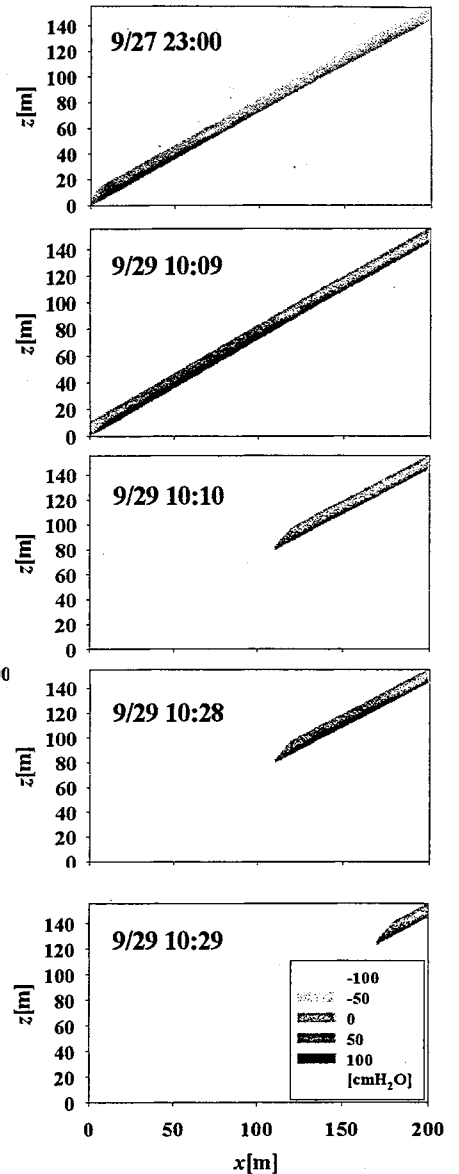


図4 圧力水頭の変化と崩壊の様子 ケース②

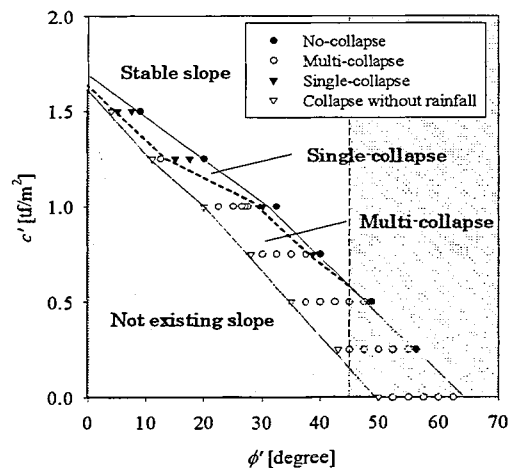


図7 土層強度と崩壊形態の関係