

Ⅲ-A 228

降雨による斜面表層崩壊の理論モデルとその利用

鳥取大学(学)池田勇司(正)榎 明潔
不動建設(正)中村正邦

1. まえがき

降雨や融雪による斜面表層崩壊は不飽和非定常浸透問題と有限斜面安定問題の混合問題であり、厳密な解析は困難である。この問題に対する解析法には、タンクモデル¹⁾などのブラックボックス型モデル、土質力学理論を用いて有限要素法など数値計算により解を求める原理型モデルが考えられている。ブラックボックス型モデルでは、降雨のみの影響を考えるため、斜面の幾何条件、力学特性、浸透特性などのパラメータの影響や破壊メカニズムが不明である。原理型モデルでは、パラメータの影響はわかるが、数値計算が必要であるため、解いてみなければ解がわからないという欠点がある。本論文の理論モデルは、下に示す各過程で力学的に明確な仮定をもち、数値計算を行う必要がないという長所をもつ原理型モデルである。²⁾ このモデルを用いて、破壊の条件を明らかにすることができる。降雨や融雪による斜面表層崩壊の機構は、室内実験における観察や現場での間隙水圧の長期観測の結果から、以下の過程よりなると考えられている。³⁾ ①斜面表面から水が浸入し、斜面表面に平行な Wetting Front(以下WFと略す)が形成され、斜面深部方向へ下降して基岩に到達する。②基岩面に平行な方向への浸透流が発生する(下流ほど層厚の厚い地下水面が現れる)。③基岩部での間隙水圧の上昇により、表層土と基岩部の境界面をすべり面とする斜面崩壊が発生する。

2. 降雨時の斜面崩壊の機構に関する仮説と理論的検討

＜降雨の鉛直浸透＞ 基岩から地表までの高さ H に相当する図-1の土柱内の、重力による鉛直浸透を考える。浸透域の上下面の全水頭差は $h_1 - h_2$ で距離も $h_1 - h_2$ であるから、動水勾配は1となる。したがって、鉛直方向の透水係数を k_v とすると、浸入する流速は k_v となり、降雨強度 R がどんなに強くても実際に地盤に浸入する流量は k_v で残りは地表流となる。地盤への浸入量 r は $r = \text{Min}(R, k_v)$ (1) で表わされる。WFが基岩に到達し表層土内に間隙水圧が発生して崩壊が生じるまでに要する時間として、土柱が飽和するまでの時間 T で近似することができる。間隙率と初期の飽和度により決まる有効間隙率を n_e とすると、土柱の間隙の合計が $H n_e$ であるから $T = H n_e / r$ (2) を得る。

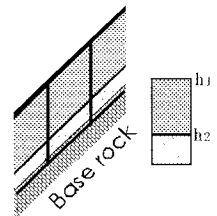


図-1 土柱内の鉛直浸透

＜基岩に沿う浸透流＞ 斜面表面から単位面積・単位時間当たり r の雨水の供給がある場合の表層土内の定常浸透流を考える。地下水流に対しては井戸の理論と同様に Dupit の仮定(基岩面と平行な流速成分が卓越するので基岩面に垂直な流速成分は無視できる)を採用する。図-2のA面とB面に挟まれた微小区間(基岩表面沿いに ds の幅)に出入りする水の質量保存則から、水深 $H_w = s \cdot r / (k_b \sin \beta) + H_w$ (3) を得る。 H_w は対象としている領域の最上流部での地下水の水深である。

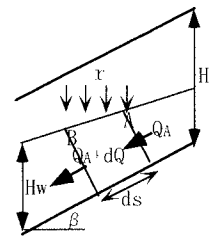


図-2 雨水浸透のある場合の定常浸透流

＜斜面の安定＞ 斜面の安定解析法として、スライス間力についての仮定が異なる各種スライス法が提案されているが、「すべり土塊の厚さ H と長さ L の比 H/L の低下とともに、解析法による安全率の差がなくなり、長大斜面としての安全率に近づく」ことが明らかである。 $H/L \leq 0.2$ であれば長大斜面としてよい。降雨による表層崩壊では、 $H/L \leq 0.1$ であるから、

キーワード：安定解析、斜面、降雨

〒680-0945 鳥取市湖山町南 4-101 鳥取大学工学部土木工学科 Tel 0857-31-5289, Fax 0857-28-7899

長大斜面の安定解析法を用いてよい。そこで、深さ H_w なる定常浸透流がある場合の基岩面上での間隙水圧は浸透理論から $u = \gamma_w H_w \cos^2 \beta$ となることを用いて長大斜面の安定解析法により斜面がちょうど破壊する時の浸透流の水深 H_{wL} を求めると次式を得る。

$$H_{wL} = \frac{\gamma H}{\gamma_w} \left\{ 1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi_d} \left(1 - \frac{c_d}{\gamma H \sin \beta \cos \beta} \right) \right\} \quad (4)$$

<降雨強度・継続時間と斜面の破壊の関係> 議論を簡単にするため、降雨波形(降雨強度-時間関係)を降雨強度 R で継続時間 T という矩形に限定し、 $c_d=0$ なる砂質系の表層土を考える。斜面を破壊させる降雨の条件は、次の2条件を同時に満たすことである。

- ① 湿润前線が基岩に到達することが必要であるから、降雨継続時間について $T \geq L \ln_e / r$ を満たす必要がある。なお、降雨開始時の有効間隙比 n_e の値、すなわち、先行降雨の影響の評価が大問題である。
- ② 基岩沿いの浸透流の深さ H_w が対象斜面の下流端(上流端より L の距離にある)で限界の深さ H_{wL} を越える必要がある。式(3)で $s=L$ とし、式(4)を用いることにより

$$r \geq \frac{\gamma H}{\gamma_w L} k_b \sin \beta \left(1 - \frac{\tan \beta}{\tan \phi_d} \right) \quad (5)$$

横軸を相対降雨強度 R' ($R'=R/k_v$)、縦軸を降雨継続時間 T とすると、図-3のハッチの部分に降雨により斜面が崩壊する範囲となる。

3. 現地調査 この理論モデルに過去の災害時の降雨記録及び現場調査で得られた物性値を用いてみる。広島県山県郡加計町江河内地区で、昭和63年7月20日~21日に集中豪雨による土石流災害が起こった。この時の降雨データを図-4に示す。この地域で理論モデルに必要な物性値を収集するため平成9年5月に現場調査を行った。調査結果を表-1に示す。最も斜面が壊れにくい条件(ϕ_d, k_b 最大、 k_v 最小)で、鉛直浸透過程は飽和仮定とし、土柱が飽和するまでの時間で評価し、式(5)で示される地下水位条件は、WFが基岩に到達後、降り始めからの降雨の影響が出るものとして安定計算をした。結果を図-5に示す。今回の計算では、斜面が破壊するという結果を得た。

4. あとがき 従来、降雨による斜面表層崩壊問題は数値解析以外に解くことができなかった。これは、有限斜面問題と不飽和非常浸透問題の両方を解析する必要があると考えられたためであるが、無限斜面と飽和定常浸透などの仮定で簡単なモデル化が可能である。このモデルの挙動から、降雨波形と斜面特性により、選択的に斜面の表層崩壊の生じることが説明できる。そして、透水係数が大きく表層厚の小さい斜面ほど短期間の豪雨に弱く、逆の斜面ほど長期間の小雨に弱いこと、斜面が長いほど斜面が壊れやすいこと、鉛直透水係数が小さいほど、例えば斜面表面に植生などがあると斜面が壊れにくいことなどがわかる。このモデルは、斜面破壊のメカニズムを明示し、斜面破壊の有無の指針を与えることができる。

参考文献 1)道上正規・小島英司:タンクモデルによる崖崩れの発生予測、第33回土木学会中国四国支部年次学術講演会講演概要集、pp.145-146,1981. 2)榎他:降雨による斜面表層崩壊の理論モデル、第32回地盤工学研究発表会発表講演集、pp.1865-1866,1997. 3)八木・矢田部・榎明潔:降雨時の斜面崩壊予知に関する室内及び現地実験、地すべり、22-2、pp.1-7,1985.

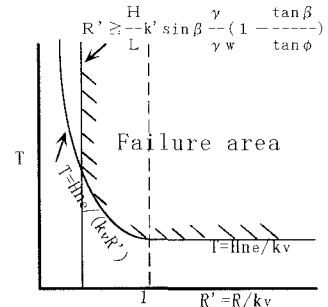


図-3 斜面表層崩壊の生じる降雨強度と継続時間の関係

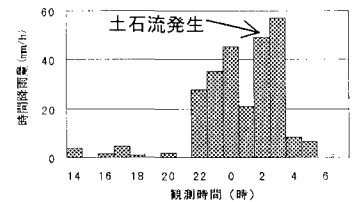


図-4 災害時の降雨データ
江河内・昭和63年7月20日

土質・地質	内部摩擦角 (ϕ)	粘着力 (c_u)	透水係数 (k_v)	鉛直透水係数 (k_v)	表層土透水係数 (k_b)
表層土	42.4	0.02	1.52 $\times 10^{-2}$	1.52 $\times 10^{-2}$	8.33 $\times 10^{-3}$
基岩	53.0	0.13	1.12 $\times 10^{-2}$	1.12 $\times 10^{-2}$	8.33 $\times 10^{-3}$
室内	31.0	0.05	5.30 $\times 10^{-2}$	5.30 $\times 10^{-2}$	5.30 $\times 10^{-2}$
野外	45.0	0.01	5.50 $\times 10^{-2}$	5.50 $\times 10^{-2}$	5.50 $\times 10^{-2}$
自然	24.1	0.11	3.23 $\times 10^{-2}$	3.23 $\times 10^{-2}$	3.23 $\times 10^{-2}$
調査	36.6	0.254	7.09 $\times 10^{-2}$	7.09 $\times 10^{-2}$	7.09 $\times 10^{-2}$

表-1 現地調査結果

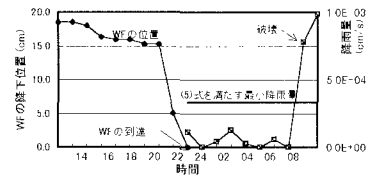


図-5 安定解析