

斜面崩壊に対する雨量指標の地盤工学的考察

広島大学工学部 正 会 員 森脇 武夫
 広島大学工学部 フェロー 佐々木 康
 広島大学工学部 正 会 員 加納 誠二
 広島大学大学院 学生会員 白石 芳樹

1. はじめに

降雨による斜面崩壊や土石流などの土砂災害に対しては、斜面崩壊の予知・予測とそれに基づく避難によって被害の軽減を図ることが大切である。そのため、様々なタイプの雨量指標^{1), 2)}が提案されているが、その多くは経験的に定められたものが多く、必ずしも地盤工学的な根拠に基づいたものではない、そこで本論文では斜面崩壊の予知・予測のために提案されている雨量指標の地盤工学的な意味について検討する。

2. 降雨時の斜面安定

図 - 1 に示す定常浸透流のある無限長斜面において、崩壊が起こる限界水位高さ H_w は、次式で与えられる³⁾。

$$H_w = \frac{\frac{c_d}{\cos^2 b} + g_i \cdot H \cdot (\tan f_d - \tan b)}{(g_i - g') \cdot \tan f_d + (g_{sat} - g') \cdot \tan b} \quad (1)$$

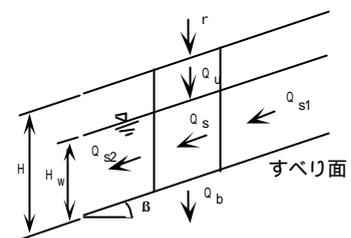


図 - 1 浸透流のある無限長斜面モデル

ここに、 g_i は土が不飽和状態（浸透流水面以上）での湿潤単位体積重量、 g_{sat} は土が飽和状態（浸透流水面以下）での湿潤単位体積重量、 g は土の水中単位体積重量、 c_d と f_d は土の粘着力と内部摩擦角、 H は風化層厚、 b は斜面勾配である。平成 11 年 6 月 29 日豪雨による広島県土砂災害における崩壊箇所の現地調査結果⁴⁾を参考に、崩壊を検討する代表的な斜面として $H=1.0m$ 、 $b=35^\circ$ 、 $c_d=2.5kN/m^2$ 、 $f_d=35^\circ$ 、 $g_{sat}=20kN/m^3$ 、 $g_i=18kN/m^3$ 、 $g=10kN/m^3$ の斜面を考えると、崩壊が起こる限界水位高さは式 (1) にこれらの値を代入して $H_w=53cm$ と求められる。

3. 降雨による地下水位の上昇

次に、図 - 1 に示すモデルを用いて降雨に伴う地下水面の上昇過程を予測する。このモデルでは地表面から風化層への雨水の鉛直流入と風化層内の基盤層に平行な浸透流のほかに、風化層から基盤層への鉛直流入を考えている。すなわち、降雨は風化層内へ鉛直に流入し（流量 Q_u ）、風化層内にある地下水面に達したら基盤層と平行に流下する（流量 Q_s ）が、一部は風化層から基盤層へと鉛直に流入する（流量 Q_b ）と考える。また、無限長斜面の条件 $Q_s = Q_{s1} = Q_{s2}$ を考慮すると、地下水面の上昇速度は次式によって与えられる。

$$\frac{dH_w}{dt} = \frac{Q_u - Q_b}{n_e} \quad (2)$$

ここに、 n_e は風化層の有効間隙比で、風化層の間隙率 n と初期の飽和度 S_r によって $n_e = (1 - S_r) \cdot n$ として与えられる。斜面への流入量 Q_u は降雨強度 r と不飽和透水係数 k_u のいずれか小さい方の値になる⁵⁾。風化層であるまさ土の不飽和透水係数 k_u は、含水率によって大きく変化するために容易に決定できないので、ここでは⁵⁾の例にならって飽和透水係数 k_s で近似できるものとする。また、まさ土の飽和透水係数 k_s もまさ土の風化度などによって異なるが、 $k_s = 10^{-3} \sim 10^{-2} cm/s$ 程度の値が報告されることが多い。この値は、 $k_s = 36 \sim 360 mm/h$ で、降雨強度に比べてやや大きい範囲にあるため、 $Q_u = r$ とできる。さらに、降雨開始時の地下水面は風化層の下端（すべり面）にあるとし、降雨浸透流量 $Q_u \cdot t$ は瀬尾・船崎²⁾の定義した有効雨量 $RE = r \cdot t$ で与えられることを考慮すると、地下水位高さは次式によって表すことができる。

斜面崩壊，降雨，まさ土，雨量指標，降雨浸透

$$H_w = \frac{RE}{n_e} \left(1 - \frac{Q_b}{r} \right) \quad (3)$$

この式は、降雨によって上昇する地下水位高さ H_w が降雨強度 r と有効雨量 RE の両方に依存していることを意味している。また、式(3)における Q_b は風化層から基盤層への鉛直流入量を表しており、鉛直浸透の場合は動水勾配が $i=1$ になるため基盤層の透水係数 k_b を用いて、 $Q_b = k_b$ として与えられる。今、基盤層の透水係数を $k_b = 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、風化層の有効間隙率を $n_e = 0.20$ とした場合に、地下水位高さが $H_w = 10, 30, 50, 70, 90 \text{ cm}$ となる降雨強度 r と有効雨量 RE の関係を描いたものが図-2である。この図から、先に示した風化層厚 $H=1.0 \text{ m}$ 、斜面勾配 $b=35^\circ$ 、風化土の粘着力、 $c_d = 2.5 \text{ kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $f=35^\circ$ の斜面において崩壊が起こる限界水位高さ $H_w = 53 \text{ cm}$ に対する降雨強度 r と有効雨量 RE の関係は、瀬尾・船崎²⁾が示したA曲線とB曲線に囲まれた崖崩れを含む小規模な災害が多発する領域と良く対応していることがわかる。

一方、著者ら⁶⁾は次式を用いて時々刻々の累積雨量 R と降雨強度 r の両方を同時に評価できる雨量指数 R_f を提案し、この値の空間的な分布とその移動状況から斜面崩壊の危険地域を判定できることを示している。

$$R_f = \sqrt{(R_1 - R)^2 + a^2(r_1 - r)^2} \quad (4)$$

ここに、 $R_1 = 600 \text{ mm}$ 、 $r_1 = 100 \text{ mm/h}$ 、 $a = 5$ である。そこで、図-2で求めた降雨強度 r と有効雨量 RE の関係から、式(4)を用いて各地下水位高さ H_w に対応する曲線の雨量指数 R_f を求め、それぞれの地下水位高さ H_w に対してプロットしたものが図-3である。この図から、平成11年6月29日の豪雨によって被害が起こり始めた雨量指数 $R_f = 600 \text{ mm}$ (1週間の累積雨量を用いた場合の $R_f = 450 \text{ mm}$ に相当)⁶⁾は、基盤層の透水係数 $k_b = 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、風化層の有効間隙率 $n_e = 0.15 \sim 0.20$ の斜面において地下水位が $H_w = 40 \sim 60 \text{ cm}$ まで上昇することに対応しており、前述した斜面において崩壊が起こる限界水位高さ $H_w = 53 \text{ cm}$ と良く一致していることが分かる。

4. まとめ

降雨のある無限長斜面の浸透および安定解析から、雨量指数 R_f は地下水位がある高さまで上昇に必要な降雨パターンを表していることが明らかとなった。例えば、平成11年6月29日広島県土砂災害が起こり始めた雨量指数 $R_f = 450 \text{ mm}$ は、基盤層の透水係数 $k_b = 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、風化層の有効間隙率 $n_e = 0.15 \sim 0.20$ の斜面において地下水位が $H_w = 40 \sim 60 \text{ cm}$ まで上昇に必要な降雨パターンを表している。

参考文献

- 1) 網干寿夫・低引洋隆：真砂土自然斜面の崩壊について，第7回土質工学研究発表会講演概要集，pp.507-510,1972.
- 2) 瀬尾克美・船崎昌雄：土砂害（主に土石流的被害）と降雨量について，新砂防，Vol.26,No.2,pp.22-28,1973.
- 3) 佐々木康・森脇武夫・竹下祐二・加納誠二：平成11年6月末の広島県斜面災害における降雨特性とまさ土斜面の限界降雨量，地盤工学会・平成11年の広島県豪雨災害調査報告書，pp.141-152,2000.
- 4) 地盤工学会：平成11年の広島県豪雨災害調査報告書，pp.30-66,2000.
- 5) 榎明潔：降雨時の斜面表層崩壊，土と基礎，Vol.47,No.5,pp.17-20,1999.
- 6) 佐々木康・白石芳樹・加納誠二：平成11年の斜面災害をもたらした広島県の豪雨特性，第35回地盤工学研究発表会講演概要集，2000（投稿中）。

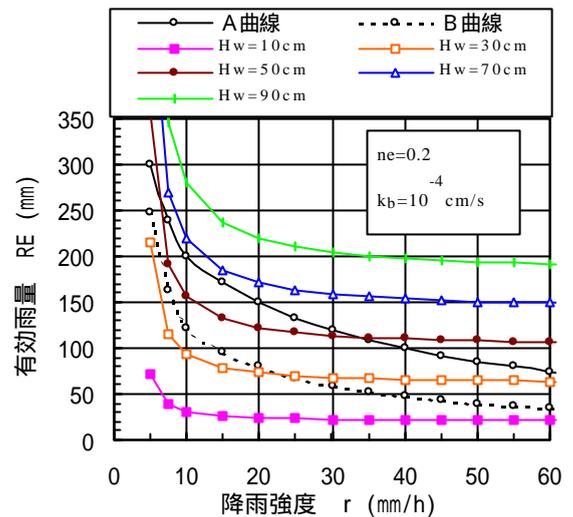


図-2 降雨強度と有効雨量の関係

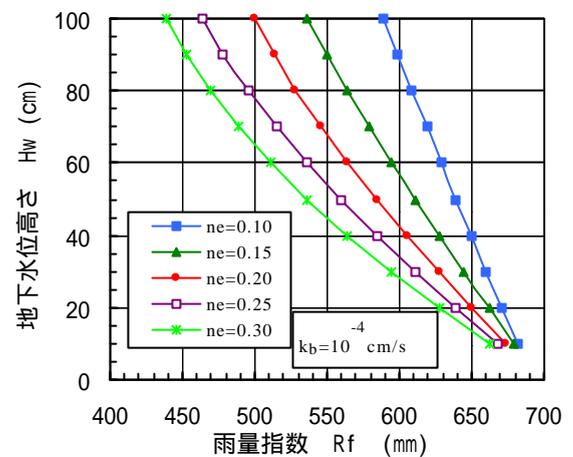


図-3 Rf と地下水位高さの関係