

舞鶴工業高等学校 正員 田中祐一朗

1. はしがき 筆者は先に植生の影響をも考慮した斜面崩壊の発生と、それによる生産土砂量の予測についての理論解析を行なった。¹⁾しかし考察の単純化のために、斜面の土質に関係なく降雨は全て地中に浸透すると云う大きな仮定を用いた結果、崩壊発生条件は土質によってあまり変化しないと言う結論となる。このような仮定を満足する場合はいくつか、実際の適用性において問題のあることから、今回は表面流の発生する場合も含めて理論の修正をほか、た結果について報告するものである。

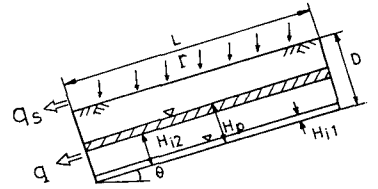
2. 斜面崩壊の発生条件 図-1に示すような、長さ L 、角度 θ の最も単純な斜面について考えることにする。地下水面も基面と平行であるとする、この斜面の崩壊発生条件はCoulombの式より、

$$\tau \geq C + \bar{\sigma} \tan \phi \quad (1) \quad \tau = \{(D-H)\gamma_t + H\gamma\} \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = \{(D-H)\gamma_t + H\gamma\} \cos \theta \quad (3) \quad \text{より次のように与えられる。}$$

$$C \cdot \sec \theta \leq \{(D-H)\gamma_t + H\gamma\} \tan \theta - \{(D-H)\gamma_t + H\gamma\} \tan \phi \quad (4) \quad \text{図-1. 考慮した斜面のモデル}$$

ここに、 τ =土の剪断力、 C =土の粘着力、 $\bar{\sigma}$ =基面に垂直に作用する力、 ϕ =土の内部摩擦角、 γ =乾燥土の単位重量、 γ_t =飽和土の単位重量、 γ' =土の水中単位重量、 D =風化土層厚、 H =地面より地下水面までの距離である。降雨の地中への浸透能力を近似的に $f \div k$ (k は土の透水係数)と考えられる。降雨を(1)無降雨期 t_{10} 、(2)先行降雨期 t_{11} 、(3)現降雨期 t_p に分け、また t_p を $t_p < L$ の場合と $t_p > L$ の場合とに分けてかつそれぞれ水の期間をまとめて取り扱うことにする。さらに地下水流はDarcyの法則に従うものと仮定すると、以上の事柄は次のように表現される。(ただし、 q =単位中よりの地下水流量、 q_s =単位中よりの地表面流量とする。)



$$\int_{t_{10}}^{t_{11}} q_{10} dt = 0 \quad (5) \quad \int_{t_{10}}^{t_{11}} q_{11} dt = n_e H_{11} \quad (6)$$

$$q_{10} = 0 \quad (7) \quad q_{12} = k \cdot n_e \cdot H_{12} \cdot \tan \theta \quad (8) \quad q_p = k \cdot n_e \cdot H_p \cdot \tan \theta \quad (9)$$

$$H = D - H_p \quad (10) \quad q_s = (r_p - k)L \quad (\text{ただし } r_p < k \text{ のとき } q_s = 0) \quad (11)$$

ただし n_e は土の有効空隙率である。また斜面上の降雨と地下水、地表面流との間の質量保存則より、

$$\int_{t_{11}}^{t_{12}} q_{12} dt - \frac{1}{L} q_{12} (t_{12} - t_{11}) = n_e (H_{12} - H_{11}) \quad (12)$$

$$\int_{t_{11}}^{t_p} q_p dt - \frac{1}{L} (q_p + q_s) (t_p - t_{12}) = n_e (H_p - H_{12}) \quad (13)$$

を得る。(12)に(6)、(8)を代入して H_{12} について解くと、

$$H_{12} = \left(\int_{t_{10}}^{t_{11}} q_{11} dt + \int_{t_{11}}^{t_{12}} q_{12} dt \right) / n_e \left\{ 1 + \frac{k}{L} \tan \theta (t_{12} - t_{11}) \right\} \quad (14)$$

$$\text{となる。}(13) \text{に}(11) \text{を代入すると、} \int_{t_{12}}^{t_p} k dt - \frac{1}{L} q_p (t_p - t_{12}) = n_e (H_p - H_{12}) \quad (15)$$

(15)に(9)、(14)を代入して整理すると、

$$\int_{t_{12}}^{t_p} k dt + R_1 + \frac{k}{L} \tan \theta \int_{t_{12}}^{t_p} k dt = n_e H_p \left\{ 1 + \frac{k}{L} \tan \theta (t_p - t_{12}) \right\} \left\{ 1 + \frac{k}{L} \tan \theta (t_{12} - t_{11}) \right\} \quad (16)$$

$$\text{を得る。ここで、} R_1 = \int_{t_{10}}^{t_{11}} q_{10} dt + \int_{t_{11}}^{t_{12}} q_{11} dt + \int_{t_{12}}^{t_{12}} q_{12} dt \quad (17)$$

$$\text{である。さらに } t_{12} = t_{12} - t_{11}, \quad t = t_p - t_{12}, \quad R_p = \int_{t_{12}}^{t_p} q_p dt \quad (18)$$

$$\text{と置く。現降雨に対する初期条件として考慮すべき先行降雨期間 } t_{11} \text{ は地下水が全て流出する時間と(2)次のように与えられる。} \quad t_{11} = 4.6 / n_e L / k \cdot \tan \theta \quad (19)$$

(18)、(19)を(16)に代入(H_p について解くと、

$$H_p = \frac{\int_{t_{12}}^{t_p} k dt + R_1 / (1 + 4.6 / n_e L \cdot t \cdot \tan \theta)}{n_e (1 + \frac{k}{L} \cdot t \cdot \tan \theta)} \quad (20)$$

(14)に(10)を代入すると、崩壊発生条件式は次のように書き直される。

$$C \cdot \sec^2 \theta - D \delta (\tan \theta - \tan \phi) \leq \{(\delta_t - \delta) \tan \theta + (\delta - \delta') \tan \phi\} / H_p \quad (21)$$

(21) に (11), (20) を代入すると,

$$R_p - \int_{t_0}^{t_p} \frac{\delta_s}{L} dt + \frac{R_i}{1 + 9.61 n_e} \geq \left\{ \frac{C \sec^2 \theta - D \delta (\tan \theta - \tan \phi)}{(\delta_t - \delta) \tan \theta + (\delta - \delta') \tan \phi} \right\} n_e \left(1 + \frac{k}{L} \cdot \tan \theta \right) \quad (22)$$

を得る。上式の左辺は地中に浸透した総水量を意味しており、これが崩壊発生のための一つの条件式である。(しかし筆者は先に過去に発生した崩壊発生のデータから実証的に $r_p \cdot R_p \geq \text{const}$ が崩壊発生の降雨条件として有効であることを見出している。⁵⁾ R_p は累加雨量であって、 t に関して常に増加関数であり、かつ R_p の微係数は r_p であり、また δ_s は (11) より t の関数であることを考慮すると、(22) を t で微分することにより、

$$r_p - \frac{\delta_s}{L} \geq \left\{ \frac{C \sec^2 \theta - D \delta (\tan \theta - \tan \phi)}{(\delta_t - \delta) \tan \theta + (\delta - \delta') \tan \phi} \right\} n_e \frac{k}{L} \tan \theta \quad (23)$$

となる。特別な場合を除き一般には $1 \gg \frac{k}{L} \cdot \tan \theta$ として良いと思われるので、(22), (23) の両辺を掛け合せて、

$$r_p \left(R_p + \frac{R_i}{1 + 9.61 n_e} - \int_{t_0}^{t_p} \frac{\delta_s}{L} dt \right) \geq A \left(\frac{k}{L} \tan \theta + \frac{\delta_s}{L} \right) \quad (24)$$

$$\text{となる。ここで } A = n_e \left\{ \frac{C \sec^2 \theta - D \delta (\tan \theta - \tan \phi)}{(\delta_t - \delta) \tan \theta + (\delta - \delta') \tan \phi} \right\} \quad (25)$$

である。(24) が崩壊発生のための降雨条件式であり、 $r_p < k$ のときは $\delta_s = 0$ とすると、

$$r_p \left\{ R_p + \frac{R_i}{1 + 9.61 n_e} \right\} \geq A^2 \frac{k}{L} \tan \theta \quad (26)$$

となり、前回での降雨は全て地中に浸透すると仮定した場合の降雨条件式と一致する。

3. 崩壊発生確率と生産土砂量 (24) に (11) を代入し、 L について解くと次式を得る。

$$L \geq \frac{A^2 \cdot k \cdot \tan \theta}{r_p \left(R_p + \frac{R_i}{1 + 9.61 n_e} - \int_{t_0}^{t_p} \frac{\delta_s}{L} dt \right) - A (r_p - k)} \quad (27)$$

$$r_p < k \text{ の場合 } \delta_s = 0 \text{ とすると上式は } L \geq A^2 k \tan \theta / r_p \left(R_p + \frac{R_i}{1 + 9.61 n_e} \right) \quad (28)$$

となり、降雨は全て地中に浸透すると仮定した場合の崩壊発生斜面長の条件式に一致する。(27), (28) に見るように、降雨と斜面の境界条件によって決まる値以上の斜面長をもつ斜面が崩壊する。流域内の斜面長分布は対数正規分布をなすこと(事実⁶⁾)より、この斜面長分布の超過確率 $P(L)$ がある降雨条件における崩壊発生確率を与えることになる。そこでこの $P(L)$ を用いることにより、 S なる大きさの流域面積を持つ流域に T なる期間降雨があった場合、斜面崩壊と云う形式によって溪流へ供給される生産土砂量の体積 V_s は次のように求めることができる。

$$V_s = \int_T D \cdot P(L) \cdot S \cdot dt \quad (29)$$

4. 崩壊に及ぼす植物の影響 斜面上に生育する植物の樹根は、崩壊に大きな影響を与えることが筆者により提示されている。⁴⁾ その結果の要旨を再記すると、植物の影響を考えるとき、 $C' = C(1 + C_p)$ (30) のように土の粘着力は大きくなる。 C_p は植物体数と名指しされた係数であり、次のように与えられる。

$$C_p = \cos \theta \left[\frac{P}{\pi j^2 c} + \frac{j \delta}{3 c} (4 + 3 \tan \phi) + \sec \theta \{ 1 + \sec \phi (2 + \tan \phi) \} \right] / (1 + \tan \phi)^2 \quad (31)$$

ここに、 P = 樹木の重量、 j = 根の長さである。 j の値は植物の成長と共に変化するものであって、詳しくは植物学的に調査、研究しなければならないが、通常の樹木では枝の張り出しと同様と考えてオーダー毎に十分であり、したがって凡土層厚 D と近似的に等しいとして良いだろう。したがって通常の針葉樹、広葉樹では樹根は基面に達しているものと考えられ、これが崩壊に対して抵抗として大きな役割を演ずる理由である。

5. おまけ 以上により降雨の状況を観視することによって、斜面崩壊発生の危険度の予測と、それによる生産土砂量の予測が可能となった。(しかしその危険判定値は対象斜面の条件によって変化するもので、これを少なくとも (a) 植生の影響の有無、(b) 斜面の土質、とくに長の大小によって ($r_p \geq k$) 分けることにより、4 種に大別して考えれば実用上有意義であろうと思われる。本研究はその一部に文部省科学研究費(試験研究 58850115)の補助を受けたことを付記して謝意を表する。1) 田中、舞鶴高専紀要、第18号、2) 田中、第37回年講Ⅱ、3) 小川、新垣、吉村、第17回自然災害科学シンポジウム論文集、4) 田中、第38回年講Ⅱ、5) 田中、舞鶴高専紀要、第16号、