

34 浸透と負の間隙水圧を考慮した斜面の安定解析

農林水産省森林総合研究所 三森利昭

1. はじめに

斜面の安定問題に関し、有効応力概念に基づいた極限釣り合い法と呼ばれるいくつかの斜面安定解析法が提案されてきた。これによれば、斜面地形、土の密度、土質強度と間隙水圧の斜面内の分布等のパラメーターを与えることによって、不安定土塊の安全性の指標（安全率）が得られることになる。豪雨を原因とする崩壊を対象とした場合、これらのパラメーターのうちの斜面内間隙水圧分布を観測することが困難なため、極限釣り合い法による解析に際し、間隙水圧値を仮定して計算する場合が多い。しかし近年の浸透流解析法の進展によって、豪雨下の斜面内間隙水圧分布の経時変化が得られるようになったことから、極限釣り合い法との組合せによって安全率の経時変化が得られ、崩壊メカニズムに関する詳細な解析が可能となりつつある。今回、降雨下での斜面の安定性の変化について、負の間隙水圧を考慮した解析法により数値実験を行ない、若干の考察を行なったので、その結果を報告する。

2. 解析方法

解析の対象とした斜面を図-1に示す。斜面は水平長20m、比高8m、土層厚さ2m、最大傾斜角30°の均質斜面である。浸透流は飽和ダルシー則を不飽和領域に拡張したRichards(3)の浸透支配方程式に基づき、有限要素法により解析を行なった(5)。安定解析については、不安定土塊を探索できるアルゴリズムの解析法として円弧法を採用し、簡易Bishop法(1)を用いることにした。安定解析にあたり、有効応力原理を負の間隙水圧（サクション）にも拡張したBishop & Bjerrum(2)の方法によって、

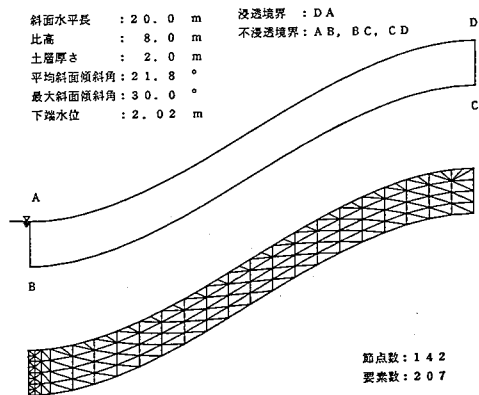


図-1. 実験に用いた斜面

不飽和条件下での強度について考慮することにした。不飽和状態における有効応力の式は(1)式で表わされる。ここで、 σ' : 有効応力、 σ : 全応力、 u_a : 間隙空気圧、 u_w : 間隙水圧、 x : 飽和状態で1乾燥状態で0となるパラメーターである。 u_a が大気圧と等しい($u_a=0$)とすると、(1)式は(2)式のように簡略化される。

$$\sigma' = \sigma - u_a + x(u_a - u_w) \quad \text{--- (1)} \quad \sigma' = \sigma - x u_w \quad \text{--- (2)}$$

既報例を参考にして(3)式に示すように x と u の値を決定した。ここで、 $S_r(\theta/\theta_s)$ は飽和度である。なお、 $S_r=0.8$ は今回使用したモデルでは、サクション値で-25cmH₂O($pF=1.4$)に相当する。

$$\begin{aligned} S_r \geq 0.8 \text{ のとき } & x = 1.0 \\ S_r < 0.8 \text{ のとき } & x = 1.25 \cdot S_r \end{aligned} \quad u = x u_w \quad \text{--- (3)}$$

浸透流解析において必要となる、飽和・不飽和透水係数 K 、比水分容量 C 、体積含水率 θ のそれぞれのパラメーターは、Van Genuchten(6)の提唱した(4)~(7)式を用いた。

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right]^m \quad (m=1-1/n) \quad \text{--- (4)}$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{--- (5)}$$

$$C(\psi) = \frac{-\alpha m (\theta_s - \theta_r)}{1-m} \Theta^{1/n} (1 - \Theta^{1/n})^m \quad \text{--- (6)} \quad K = K_s \cdot K_r, \quad K_r = \Theta^{1/n} [1 - (1 - \Theta^{1/n})^m]^2 \quad \text{--- (7)}$$

ここで、 ψ : マトリックポテンシャル (サクション)、 Θ : 有効飽和度、 θ : 体積含水率、 θ_r : 飽和体積含水率、 θ_s : 残留体積含水率、 α 、 n : パラメータ、 K_r : 比透水係数、 K_s : 飽和透水係数、 K : 不飽和透水係数を表わす。(4)~(7)式のパラメータと乾燥密度 W_d 、土質強度定数 c' ・ ϕ' を表-1に示す。浸透流解析を行なう際の初期条件は、土層が降雨強度20mm/hにおける定常状態(かなり湿潤な状態)から排水していく途中の過程を浸透流解析によってもとめ、土層が比較的乾燥状態である流出量0.086 mm/hの時の要素節点マトリックポテンシャルの値とした。一般に流出量は比較的得やすい情報であり、現実の山地斜面の解析にも用いることが可能と考えられる。降雨強度は、10mm/h (Run-1)、20mm/h (Run-2)、30mm/h (Run-3)、40mm/h (Run-4)の4種類の矩形降雨を与えたが、総降雨量はすべて480mmに統一した。解析期間は降雨期間・無降雨期間を合わせて、72時間とした。

表-1. 解析に用いたパラメータ

θ_s	θ_r	K_s	α	n	W_d	c'	ϕ'
m^3/m^3	m^3/m^3	m/sec	m^{-1}		kg/m^3	kgf/m^2	deg
0.70	0.35	5.0×10^{-5}	-6.0	1.8	800.0	0.0	40.0

3. 結果と考察

3. 1 安全率の経時変化 4種類の降雨について、解析期間中に最小安全率を与える円弧を求めたところ、すべての降雨強度について同一の円弧となったため、すべてこのすべり円弧(中心(3,13)、半径11.3m)における安全率であらわす。図-2に安全率の経時変化とハイレトグラフを示す。降雨

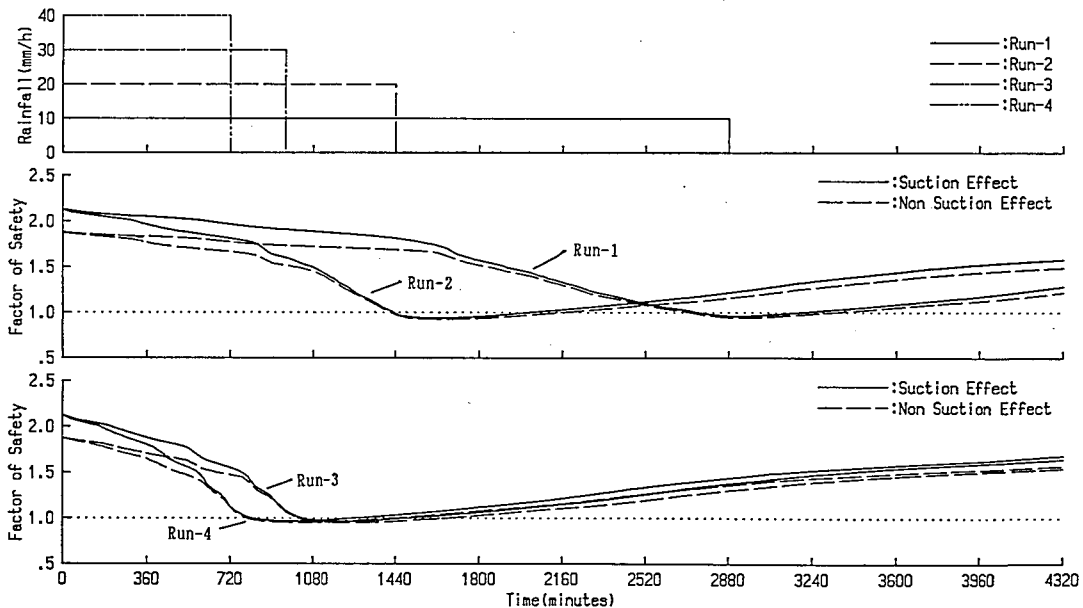
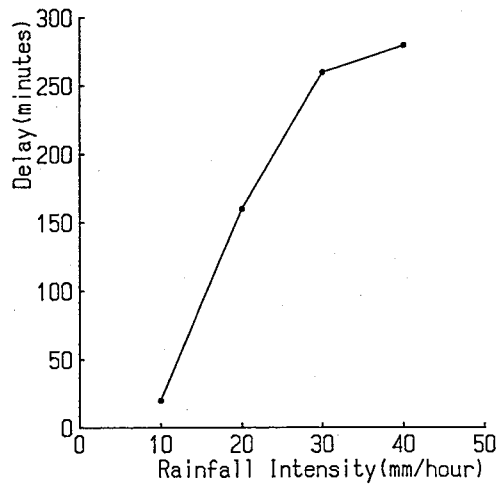


図-2. 降雨と安全率の経時変化

期間中は、降雨強度が大きいほど安全率は急激に低下し、降雨停止後において最小となるが、それ以降は、斜面の安定性は回復していくが、その割合は緩やかである。最小安全率の値は降雨強度にかかわらずほぼ同じであり、降雨強度の違いは最小安全率にあまり反映せず、総降雨量が等しい場合ほぼ同じ最小安全率を示す結果となった。負の間隙水圧を考慮した場合、乾燥時において安全率は安定側の値を示すが、降雨終期付近においては考慮しなかった場合とほとんど変わらない結果となった。これは、降雨開始期はすべり土塊内の飽和域が小さいため負の間隙水圧の効果により安全率が増加するのに対し、降雨終期付近では、飽和



域はすべり土塊の大部分を占めているため、負の間隙水圧を考慮しないものと安全率はほとんど同じ値を示したものと思われる。降雨強度と降雨停止から最小安全率となる時刻までの時間（遅れ）の関係を示した図-3によると、降雨強度が大きいほど遅れの時間が長くなり、降雨強度40mm/hでは降雨停止約5時間後に最小安全率となる。これは、降雨後にも崩壊が発生することを示している。

図-3. 降雨停止から最小安全率までの時間

3. 2 有効貯留量と安全率 これまで連続降雨量や降雨強度、及びこれらの組合せや、タンクモデル水位や流域内の水分貯留量を用いて、崩壊の発生予測をする方法が報告されている。本解析法においては、浸透流解析から得られるマトリックスポテンシャル値から、斜面の水分貯留量を求めることができる特徴がある。水分貯留量を表わすには、

斜面の有効飽和度、あるいは水高値、平均含水率等の方法が考えられるが、ここでは谷(4)が提唱した有効貯留量概念を用いて山体水分量を表現することにし、斜面の水分量と斜面安定の関係について求めた。有効貯留量 V^* は、ある流出量における斜面の水分量を V とし、斜面内に流れが生じない状態、すなわち斜面内の全水理水頭が等しい時の斜面水分総量を V_{\square} 、斜面が飽和したときの水分総量を V_s とすると(8)式で表わされ、斜面の飽和時に1、流出量が0の時に0となる無次元数である。

$$V^* = \frac{V - V_{\square}}{V_s - V_{\square}} \quad \text{--- (8)}$$

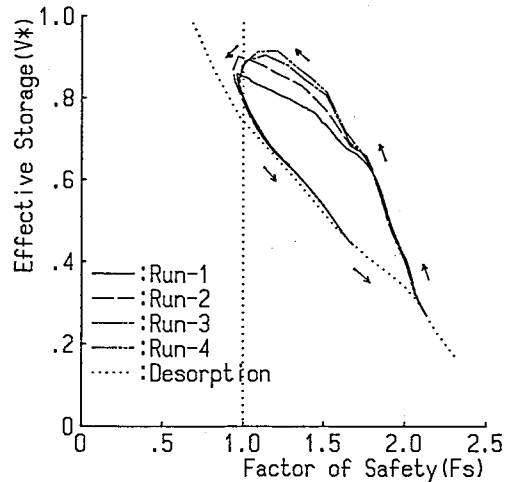


図-4. 安全率と有効貯留量

図-4に V^* と安全率の関係を示す。ここでの安全率は負の間隙水圧を考慮した値である。図-4によれば、増水過程と排水過程では有効貯留量が同じであっても安全率は異なり、一般に排水過程の

方が増水過程より安全率は小さく、降雨強度が大きいほどその違いは顕著である。例えば、強度40 mm/hの降雨において、有効貯留量が0.8の時、排水過程における安全率が1.53であるのに対し、排水過程で1.00と大きく異なる。これは、増水過程における水分が不飽和状態で水面上に多く存在し、飽和帯の発達が不十分であるため安全率が高いのに対し、排水過程における水分は降下浸透により地下水面にまで到達し、飽和帯が十分発達した後であるため安全率が低下すると推察される。また降雨強度が大きい程、降雨中に水面上の土層に不飽和状態で保持される水分も多く、降雨強度が大きいほど同じ有効貯留量に対して安全率が大きくなる結果を示したものの思われる。これらから、有効貯留量 V^* は斜面が排水過程にあるときはある程度安全率と対応するが、増水過程においては、安全率と対応しない結果となったが、総降雨量が同じ場合、最小安全率と有効貯留量がほぼ同じであることから、ある程度の指標となるものと思われる。

4. おわりに

本報告は2次元の均質な斜面を用いた数値実験であり、降雨も矩形降雨を与えているため、本手法の有効性を現実の崩壊斜面と降雨で確認する必要がある。本手法は、降雨等のごく限られたパラメータを入力値として崩壊発生を予測するこれまでの解析法に対し、複雑な斜面地形、根系を主とする植生が土質強度 (c' , ϕ') に与える影響、斜面における土質の不均質性、不飽和状態での土質強度の変化等々の複雑なパラメータを取り入れることが可能で、個別斜面における精度の高い予測を行うところに特徴がある。

謝辞

本研究にあたり、東京大学生産技術研究所虫明功臣教授、同龍岡文夫助教授には貴重な御指摘と御指導を賜った。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) Bishop, A.W.(1956):The use of the slip circle in the stability analysis of slopes (first technical session). Geotechnique.
- 2) Bishop, A.W. and Bjerrum,L(1960):The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems. Research conference on shear strength of cohesion soils, pp437-501.
- 3) Richards, L.A.(1931):Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, 1, pp.318-333.
- 4) 谷誠(1985):山地流域の流出特性を考慮した一次元鉛直不飽和浸透流の解析, 日林誌, vol.67, no.11, pp.449-460.
- 5) 坪山良夫・三森利昭(1989):有限要素法による林地斜面浸透流の数値実験, 水文水資源学会誌, vol.2, no.2, pp.49-56.
- 6) Van Genuchten, M.Th.(1980):A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. AM. J., vol.44, pp.892-898.