

III-421 降雨下での斜面の信頼性解析と破壊予知に関する研究

鳥取大学工学部 正会員 高岡 宣善 鳥取大学大学院 ○学生員 杉村 重憲
 鳥取大学工学部 正会員 白木 渡 (株)村本建設 正会員 上辺 健夫
 鳥取大学工学部 正会員 松保 重之

1. まえがき 我国は、到る所に急斜面をもち、降水量が多いため集中豪雨による斜面崩壊が起こりやすい。そのため、従来からその現象の解明と対策に関して多くの研究がなされてきた¹⁾。本研究では、斜面崩壊に至るかどうかの判定と降雨による崩壊発生時間の予知を多くの不確実性を含む土性値に対して、信頼性理論を導入することにより評価する。また、斜面の破壊確率の評価法として、相関を有し非正規分布する多くの確率変数を有する問題にも適用でき、しかも精度良い解を得ることができる繰返し高速モンテカルロ法²⁾を用いることを提案する。

2. 斜面の安定解析法 斜面の安定解析手法には、摩擦円法と分割法がよく用いられるが、ここでは円弧すべり面による分割法を取り上げる。図-1(a)において、すべり円弧の中心に関してのモーメントを考えた場合、斜面の安定度を示す安全率 F は式(1)で定義される。ここに、 M_r :すべりに抵抗するモーメント、 M_s :すべりを起こそうとするモーメント、 W :単位幅当たりの分割片の重量(t/m)、 S :単位幅当たりの分割片底面における抵抗力(t/m)、 α :分割片とすべり面の傾斜角(度)である。この分割法も、分割片に働く外力の評価の仕方により、フェレニウス法とビショップ法の2つの解析法がある。分割片に働く外力を図-1(b)のように考え、式(2)により安全率を求める方法が、フェレニウス法と呼ばれる解析法である。ここに、 W' :地下水位以下で浮力を考えた有効重量(t/m)、 l :分割片がすべり面を切る弧の長さ(m)、 c :土の粘着力(t/m)である。また、図-1(c)に示すように分割片の側面に働く力 X_n 、 E_n を考え、式(3)により安全率を求める解析法がビショップ法である。ここに、 u :分割片底面における単位面積当たりの間隙水圧(t/m^2)である。

3. 斜面の安定解析への信頼性理論の適用 斜面崩壊についての破壊基準関数は、すべりモーメントと抵抗モーメントの差の形で式(4)のように定義する。従って、破壊確率 P_f は式(5)で表わされる。斜面が2層以上に別れている時には、破壊確率 P_f は式(6)のようになる。ここに、 Z_i :上から i 番目の層の破壊基準関数($i=1, 2, \dots, n$)である。一般に、この破壊確率を評価する際には各崩壊モード間の相関を考慮して評価する必要がある。

4. 降雨下での斜面崩壊予知法¹⁾ 崩壊の時間的な予知問題を考える場合、時々刻々と変わる土中水分状態(飽和度)を把握し、飽和度の変化による強度の力学的特性を推定し、斜面の破壊確率の変化を推定して、斜面の崩壊を予知する必要がある。設計飽和度 $S_{r,d}$ は式(7)により推定される。ここに、 $S_{r,i}$:初期飽和度(%), R_e :実効雨量(cm), n :間隙率(%), D :表層厚(m)である。粘着力 c は飽和度に大きな影響を与え、 c がピーク値をとる飽和度を S_r^* とし、そのときの c を c_{max} とすると、間隙比 e と S_r^* との関係は式(8)により表わされる。そして S_r^* より湿潤側での c の現象特性は、 c/c_{max} を c^* で表わし、 $S_r - S_r^*$ を ΔS_r と表わすと、 c^* は正規分布で近似でき、 c^* の平均値と標準偏差 $S_{c,c}$ は式(9)で表わされる。また、せん断抵抗角 ϕ は、本研究では比較的浅い斜面の破壊問題を取り扱っているため、斜面土のせん断強度の変化によって与える影響は c に比べて $F = \frac{1}{\Sigma W \sin \alpha} \cdot \frac{\Sigma [c b + (W - u b) \tan \phi]}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi \sin \alpha}{F}}$ はるかに小さく、 S_r とは無関係な一定の正規分布として与える。

このように、降雨による斜面土の飽和度への変化とこれに伴う土の強度の遷移特性が $Z = M_r - M_s$ (4)

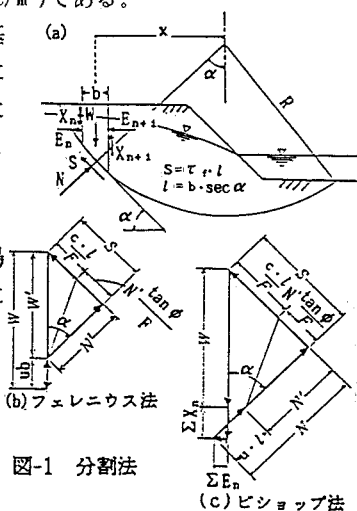


図-1 分割法

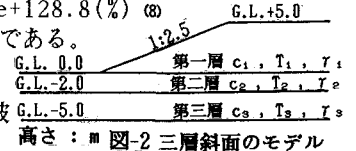
$$F = \frac{M_r}{M_s} = \frac{\Sigma S}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (1)$$

$$F = \frac{\Sigma [c l + W' \cos \alpha \tan \phi]}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{\Sigma W \sin \alpha} \cdot \frac{\Sigma [c b + (W - u b) \tan \phi]}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi \sin \alpha}{F}} \quad (3)$$

明らかにされ、時々刻々と変化する斜面の破壊確率を計算することができる。

5. 数値計算例および考察 図-2の斜面において、表-1のような正規分布する確率変数を想定し、ビショッ
プ法とフェレニウス法により破壊確率を計算した結果が $P_f = P[Z = M_r - M_s \leq 0]$ (5)
 $P_f = P[(Z_1 \leq 0) \cup (Z_2 \leq 0) \cup \dots \cup (Z_n \leq 0)]$ (6)
表-2である。ここに、 P_{f2}, P_{f3} はそれぞれ斜面の第二層お $S_{r1} = S_{r1} + \frac{1.0 R_o}{n D}$ (3) (7) $c^* = 1.0 - 0.018 \Delta S_r$ (9)
よび第三層の底面に接する円弧によって求めた斜面の破壊 $S_r^* = -100.0e + 128.8$ (%) (8)
確率であり、 P_{fA} は全ての層の相関を考慮に入れて求めた斜面の破壊確率である。
第一層での破壊確率 P_{f1} は、計算した結果他の層の数値と比べて非常に小
さいのでここでは除外した。表-2の結果ではフェレニウス法で計算した破
壊確率の方が大きいのであるが、これは図-2の斜面における中央安全率



がビショッブ法:1.417, フェレニウス法:1.242と
なっており、フェレニウス法の方が安全率を小さ
く評価する傾向があることによるものと思われる。
また、各層の破壊確率が独立であると仮定すると、
全体の破壊確率 $P_f (= P_{f1} + P_{f2} + P_{f3})$ はビショッブ法

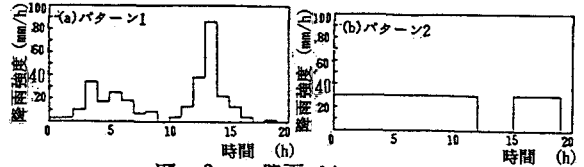


図-3 降雨パターン

では $P_f = 0.097$, フェレニウス法では P_f
=0.282となり各層の相関を考慮に入れ
た場合と異なった値をとる。このよう
に、繰り返し高速モンテカルロ法を用
いることにより、容易に各層の相関を
考慮した評価ができるのである。次に
降雨による斜面崩壊の予知問題を考え

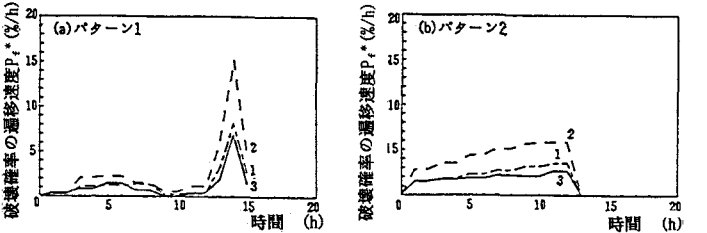


図-4 P_f^* の遷移特性

る。表-2の結果よりフェレニウス法はビショッブ法よりも破壊確

率を安全側に評価しているの、破壊確率の計算はフェレニウス表-1 適用例で用いる数値

法を用いておこなった。初期飽和度の場所的
な分布に関しては、斜面表層全体が同じ飽
和度を有しているものと仮定する。表-3に
示すような3通りの斜面で、図-3(a)および
図-3(b)に示すような2通りの降雨パターン

変数	q (t/m)	C_1	T_1	r_1	C_2	T_2	r_2	C_3	T_3	r_3
平均値	5.0	1.6	0.3	1.8	1.5	0.25	1.7	1.3	0.2	1.5
標準偏差	1.0	0.32	0.06	0.09	0.6	0.075	0.085	0.65	0.1	0.12

$T: \tan \phi$

について、破壊確率 P_f の時間的な 表-2 破壊確率の計算結果

変化を調べ、そして破壊確率の時
間的な上昇速度 P_f^* を求めグラフ
にしたのが図-4である。この図に
おいて P_f^* が一番大きなものを
(P_f^*)_{max}とすると、降雨強度最大

	ビショッブ法	フェレニウス法
P_{f2}	0.035	0.076
P_{f3}	0.062	0.206
P_{fA}	0.093	0.255

付近で(P_f^*)_{max}が現われていることがわかる。そして、統

表-3 斜面の諸性質

	C_{avg}	$T = \tan \phi$	r	斜面傾斜角(°)	表層厚(m)	初期 S_r (%)	間隙比 e
1	2.0	0.2	2.61	56.3	4.0	50.0	0.9
2	1.4	—	1.9	26.6	5.0	38.8	0.9
3	1.6 1.5 1.3	0.3 0.25 0.2	1.8 1.7 1.5	56.3 21.8	4.0 5.0	50.0 38.8	0.9

計をとった結果、(P_f^*)_{max}が約8%以上の値をとる場合に破壊する可能性が高いことがわかっている¹⁾。この
ことと図-4から、降雨パターン1のような降雨強度の時間的な上昇率が大きいもの程、斜面は崩壊しやすいと
思われる。この結果より、斜面の崩壊を予知するために繰り返し高速モンテカルロ法を適用して斜面の破壊確
率を計算し、(P_f^*)_{max}の遷移を瞬時に追うことのできるシステムの構築は、非常に有効であることがわかった。

参考文献: 1) 松尾 稔: 地盤工学-信頼性設計の理念と実際-, 技報堂出版, 1984.

2) 白木 渡.G.I.Schuëller: 条件付き破壊確率を用いた繰り返し高速モンテカルロ法と

その構造物の動的信頼度評価への応用, 構造工学論文集, Vol.35A, 1989.