

破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予知に関する研究

STUDY ON PREDICTION OF SLIDE OF NATURAL SLOPES BY
PROBABILITY OF FAILURE

松 尾 稔*・上 野 誠**

By Minoru MATSUO and Makoto UENO

1. はじめに

豪雨に伴う斜面崩壊による災害は、単なる財貨の損失だけでなく、人命が失われることが多い点に特徴がある。特に、わが国のように斜面崩壊を誘起しやすい気象特性と狭隘な地形を有する国土に、膨大な人口が拡散しているという状況は、斜面災害が多発する素地をなすものといえよう。

斜面災害の予防方法として、次の 2 つが考えられる。1 つは事前に斜面崩壊の危険度を低減させる方法であり、もう 1 つは危険時に崩壊を予知し損害を最小限にくい止める方法である。第 1 の方法により、たとえ事前に対策工を設けて安定度を高めたとしても、信頼度の面からみれば崩壊の可能性はなお常に存在する。加えて、全国的に膨大な数と延長を有するすべての斜面に多額の投資をして対策工を実施することは、現実には不可能である。それゆえ、第 2 の方法、すなわち事前に対策工が行われた既処理斜面および未処理斜面を問わず、崩壊の時刻、位置、規模などを適確に予知し、崩壊発生の際の被害を最小限に止めることができることが重要となる。

変位量などの連続観測が可能な、ある特定の狭い範囲の斜面崩壊予知に関しては、たとえば斎藤によるすぐれた提案¹⁾があるが、広範囲に及ぶ数多くの斜面の崩壊予知に関しては、現在のところ不可能に近いといわざるを得ない。これは、斜面自体の有する複雑な形状、環境および性質だけでなく、崩壊の誘因である豪雨の斜面に及ぼす影響が明確になっていないからである。したがって、予知精度を高めるためには、まず豪雨時の斜面土中水分状態が予測され、それに応じて刻々と変化する斜面の危険度を定量的に表示することが肝心となる。本論文では、破壊確率という定量的なファクターの豪雨による遷移

特性に着目し、崩壊予知のための一方法を提案する。このために、まず豪雨と土中水分の応答関係を把握する必要がある。そこで、土中の空気と水の流れを考慮した降雨浸透解析法により、豪雨時の土中水分の挙動を解析する。任意の時刻での土中水分状態が与えられれば、それに応じた土の力学的性質より、斜面の破壊確率が計算できる。

従来、構造物の挙動は主として変形や圧力の計測によって調べられてきたが、豪雨時に斜面の挙動を計測するのは非常に困難かつ危険である。これに対し、破壊確率を用いた崩壊予知方法では、降雨量以外に降雨中の情報を必要としないから、上述の困難さ、危険さを回避するのにきわめて有効であり、新しいアイデアによる方法として期待される。破壊確率の変化は、おそらく斜面の変位となんらかの対応関係をもち、斜面の変位が増大し破壊に近づくような状況では、破壊確率も上昇しているにちがいない。この観点が、破壊確率の遷移特性より予知方法を見出そうとした基盤である。現時点では、斜面の変位量と破壊確率の対応関係を定量的に把握するまでに

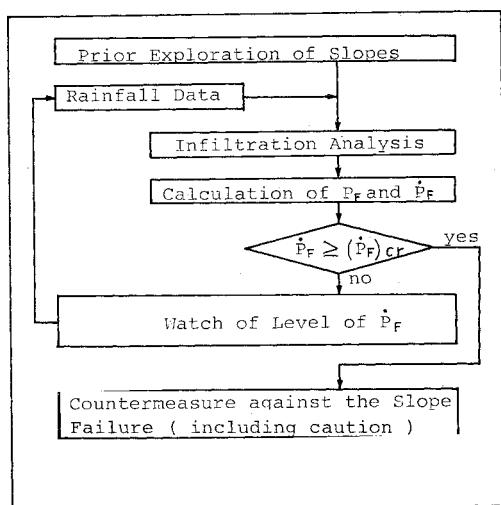


図-1 斜面崩壊予知システムのフローチャート

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土圧研究施設

** 学生会員 工修 名古屋大学大学院博士課程 工学部土木学科

至っていないが、このことは以下に示す崩壊の予知方法そのものにはなんら影響を与えるものではない。斜面崩壊予知の手順は 図-1 のフローチャートに示されており、本論文の構成もこれに従うものとする。

2. 降雨浸透解析法

一般に、降雨浸透は非定常かつ不飽和な状態を呈し、同時に間隙空気の閉塞、離脱を伴う複雑なものである。本論文では、空気と水を考慮した2相流浸透理論を基に、境界条件を工夫することにより、降雨と土中水分の応答解析を行う。ところで、田中によれば²⁾ 斜面への降雨の浸透は最初に鉛直下方へ進み、浸潤前線が透水性の低い基岩に達した後に流線転向が生じ、斜面傾斜方向への中間流が発生する。本論文では、鉛直浸透についてのみ議論する。それは、斜面の微小幅の区間で中間流が平衡状態（流入量＝流出量）を保っていると仮定しているからである。この仮定は、斜面上端部を除き不当なものではない。したがって、地下水の形成は、浸透水が基層上に溜ることによるものとして取扱う。

(1) 基礎方程式

混相流に関する基礎方程式は石油化学の分野で提案され、これを空気と水の2相流浸透問題に適用したのが、Morel-Seytoux^{3), 4)} らである。後の(2)以下でこの基礎方程式が式の展開上参考になるので、本節においてその要約を簡単に再録すると以下のようになる。不飽和状態の水の流れに Darcy 式が適用できることはすでに知られている⁵⁾が、空気の流れにも Darcy 式が適用できることを仮定して、水、空気の両方の流れについて運動方程式をたてると次のようになる（添字 w は水を、 a は空気を表わす）。

$$V_w = - \frac{kk_{rw}}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial z} - \rho_w g \right) \dots \dots \dots (1)$$

$$V_a = - \frac{kk_{ra}}{\mu_a} \left(\frac{\partial p_a}{\partial z} - \rho_a g \right) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに, j を流体種別を示すとすると, V_j : 流速, k_{rj} : relative permeability, k : intrinsic permeability, μ_j : 粘性係数, p_j : 圧力, ρ_j : 密度である. z は鉛直下方を正とする方向座標である. ここで, k は土に固有の値であり, 飽和状態での透水係数 k_{sat} , 水の粘性係数 μ_w , 密度 ρ_w , および重力加速度 g により次式で求められる.

毛管圧力 p_c は空気圧と水圧の差として表わされ、飽和度 S_r の関数となる。すなわち、 p_c は次式で表わされる。

次に、空気と水の流速の和を V とおき、 V_w と V の

比を F_w とおくと、 V, F_w は次式で表わされる。

いま、式(1), (2), (4)を式(5)に代入して整理すると、次式が得られる。

$$\frac{V}{k(k_{rw}/\mu_w + k_{ra}/\mu_a)} = -\frac{\partial p_a}{\partial z} + f_w \frac{\partial p_c}{\partial z} + f_w \rho_w g + (1-f_w) \rho_a g \quad \dots \dots \dots (7)$$

式(7)が2相流の運動方程式である。式(7)において、
 $p_a \ll p_w$ なので右辺第4項を無視し、流れの任意区間
 $[z_1 z_2]$ で積分すれば次式のようになる。

$$V = \frac{p_a(z_1) - p_a(z_2) + \rho_w g \int_{z_1}^{z_2} f_w dz + \int_{z_1}^{z_2} f_w d\rho_c}{\int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{k(k_{rw}/\mu_w + k_{ra}/\mu_a)}} \dots \quad (8)$$

また、式(1), (2)より F_w は次のように表わされる.

$$F_w = f_w \left\{ 1 + \frac{k k_{ra}}{\mu_a V} \left(\frac{\partial p_c}{\partial z} + 4 \rho g \right) \right\} \dots \dots \dots (9)$$

なお、 $f_w, \Delta\rho$ は次式で表わされる。

式(8), (9)より、任意の区間 $[z_1, z_2]$ における V_w, V_a が以下の式から求められるわけである。

$$\left. \begin{array}{l} V_w = VF_w \\ V_a = V - VF_w \end{array} \right\} \dots \dots \dots \quad (11)$$

次に、流れの連続式は、土の間隙率 n 、時間 t 、飽和度 S_t を用いて次式で表わされる。

$$n \frac{\partial S_r}{\partial t} = - \frac{\partial V_w}{\partial z} \dots \dots \dots \quad (12)$$

したがって、最終的には式(8),(12)を与えられた境界条件のもとで解いて、深さ z 、時刻 t における $S_r(z, t)$ を求めるわけであるが、解析的に厳密解を得るのが困難なため、次節に示すような数値解析を行うこととする。

(2) 数值解析

いま、図-2に示すような鉛直浸透モデルを考え、浸

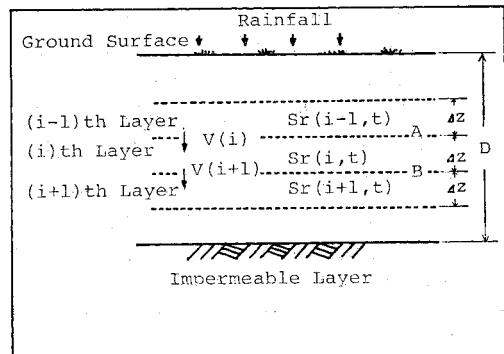


図-2 降雨浸透解析のモデル

透層を薄い層(厚さ Δz)に分割する。図-2で、 i 層の飽和度の変化は、 $i-1$ 層と i 層の境界A、および i 層と $i+1$ 層の境界Bを通過する流速の差に依存するはずである。境界Aを通る $V(i)$ は $i-1$ 層と i 層の圧力や重力の状態によって決定され、境界Bを通る $V(i+1)$ は i 層と $i+1$ 層の状態によって決定される。したがって、式(8)で求められる V を次式によって計算するわけである。

$$\begin{aligned} V(i) = & \frac{p_a(i-1) - p_a(i) + \Delta z \rho_w g \{f_w(i) + f_w(i-1)\}/2}{\Delta z \{u(i)\}} \\ & + \{p_c(i) - p_c(i-1)\} \{f_w(i) + f_w(i-1)\}/2 \\ & + u(i-1)/2 \end{aligned} \quad \dots \quad (13)$$

ここに、

$$f_w(i) = 1/\{1 + k_{ra}(i) \mu_w / (k_{rw}(i) \mu_a)\} \quad \dots \quad (14)$$

$$u(i) = \frac{1}{k \{k_{rw}(i) / \mu_w + k_{ra}(i) / \mu_a\}} \quad \dots \quad (15)$$

である。また、 F_w は次式によって計算する。

$$\begin{aligned} F_w(i) = & \frac{f_w(i) + f_w(i-1)}{2} \\ & \cdot \left[1 + k \frac{\{k_{ra}(i) + k_{ra}(i-1)\}}{2 \mu_a V(i)} \right. \\ & \left. \cdot \left\{ \frac{p_c(i) - p_c(i-1)}{\Delta z} + \Delta \rho g \right\} \right] \end{aligned} \quad \dots \quad (16)$$

$V(i)$ 、 $F_w(i)$ から、 $V_w(i)$ 、 $V_a(i)$ を求めればよい。

$$\begin{aligned} V_w(i) = & F_w(i) V(i) \\ V_a(i) = & V(i) - F_w(i) V(i) \end{aligned} \quad \dots \quad (17)$$

時間 t における i 層の飽和度 $S_r(i, t)$ は、 Δt 時間前の $S_r(i, t-\Delta t)$ より、次式によって計算される。

$$S_r(i, t) = S_r(i, t-\Delta t) + \frac{\{V_w(i+1) - V_w(i)\} \Delta t}{n \cdot \Delta z} \quad \dots \quad (18)$$

空気は水に比べて粘性係数、密度ともに小さいから流速が大きくなる。そのため、地表面から空気の離脱が容易である場合、たとえば、湛水のない層厚小の斜面表層などの場合には、土中での空気の閉塞は生じにくいと考えられる。問題となるのは、地表面に湛水が生じて空気の離脱が困難な場合である。不飽和状態での土中の空気の流れが速いことを考え、土中の空気圧は場所的に差がなく、一定になるものと仮定する。いま、地表面を通過する空気の流速(土中と地上の空気圧の差に依存する)を $V_{as}(t)$ とすると、土中に流入する空気量は時間 $[t-\Delta t, t]$ では次式のようになる。

$$W_a(\Delta t) = V_{as}(t) \Delta t \quad \dots \quad (19)$$

また、時刻 $(t-\Delta t)$ における土中の空気量は、

$$W_a(t-\Delta t) = nD \{1 - S_r^*(t-\Delta t)\} \quad \dots \quad (20)$$

ここに、 D は浸透層厚、 $S_r^*(t-\Delta t)$ は時刻 $(t-\Delta t)$ での浸透層の平均飽和度を表わす。時刻 t での空気量は、

$$W_a(t) = nD \{1 - S_r^*(t)\} \quad \dots \quad (21)$$

となる。したがって、式(19)～(21)より浸透層の平均空気圧 $p_a^*(t)$ (時刻 t における)は、ボイルシャルルの法則を用いて次式によって計算される。

$$\begin{aligned} p_a^*(t) = & p_a^*(t-\Delta t) \cdot W_a(t-\Delta t) \\ & / \{W_a(t) + W_a(\Delta t)\} \end{aligned} \quad \dots \quad (22)$$

土層内の局部的な空気圧の差は無視してかまわないので、式(13)の $p_a(i) = p_a(i-1) = p_a^*(t)$ とおけばよい。

(3) 解析に用いられる諸条件

a) 土質条件

空気と水の k_{ra} 、 k_{rw} と S_r の関係、および p_c と S_r の関係については、Morel-Seytouxらが一般化して示しているものを用いることにする⁶⁾(図-3,4)。intrinsic permeability k は、土の透水係数、水の粘性係数、密度がわかれば式(3)より求めればよい。

b) 境界条件

幾何学的には、深さ D の位置に不透水層が存在し、等方、等質な土質よりなる1次元モデルを考える。従来の一般的な浸透解析は、主として地表面より上に湛水が存

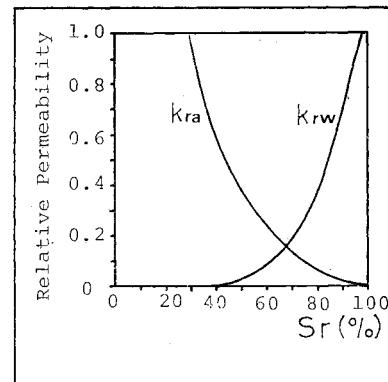


図-3 k_{ra} 、 k_{rw} ～ S_r 関係 (Morel-Seytouxによる)

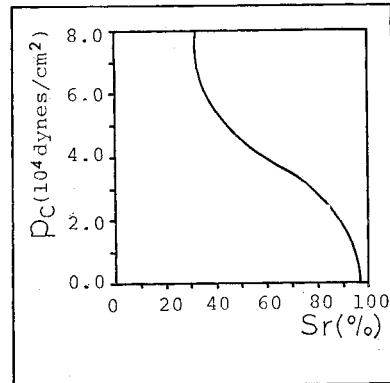


図-4 p_c ～ S_r 関係 (Morel-Seytouxによる)

在するケースを対象としていた。しかし、降雨浸透では地表面に湛水が生じない場合も多く、水頭の形で境界条件を与えるのが不適当な場合がある。なぜなら、降雨強度が小さく湛水が生じていない場合には、降雨強度が地盤の浸透能以下となり、降雨はすべて土中に浸透する。したがって、水頭ポテンシャルが浸透現象を支配するのではなく、降雨量が現象を支配することになる。そこで、湛水の生じる瞬間に地表面から土中に浸透する水の流速は V_{cr} とし、降雨強度を R 、 Δt 時間前の湛水深を H とすると、 $R + (H/\Delta t) < V_{cr}$ のときが湛水の生じない浸透（弱雨浸透）となる。逆に、 $R + (H/\Delta t) \geq V_{cr}$ のときは湛水が存在しているから、湛水深に相当する水頭を境界条件として与え、地表面から土中に入る水の流速を計算するわけである。この場合を強雨浸透と称する²⁾。このようにして、弱雨浸透と強雨浸透で異なるタイプの境界条件を与えることにより、ランダムに生起する降雨と土中の飽和度分布との応答解析を行う。

c) 初期条件

初期条件として、時刻 $t=0$ における土中の飽和度分布 $S_r(i, t)$ と空気圧 $p_a^*(t)$ を与える。無降雨時に土中の空気圧は大気圧 p_{atm} に等しいと考えてよいから、 $p_a^*(t) = p_{atm}$ とする。

(4) 解析結果と実験結果の検討

降雨浸透解析法の妥当性を検証するため、図-5 に示すような鉛直浸透実験装置を用いて降雨浸透実験を行った。土中水分の測定には、電気抵抗式水分計を使用した。実験は 2 ケースについて行われ、両ケースとも初期飽和度、降雨条件を異なるものにしている。ケース I は

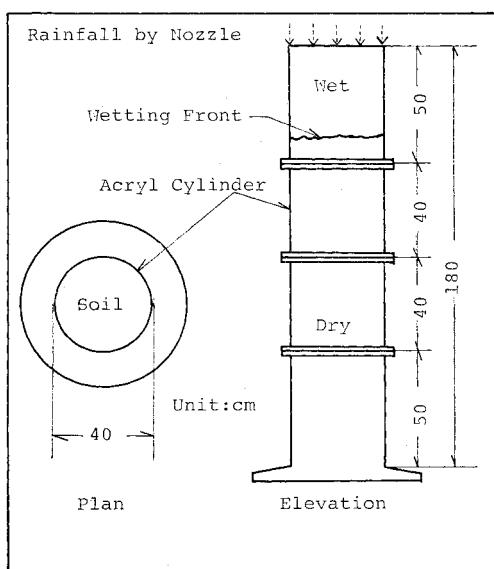


図-5 降雨浸透実験装置の概要

図-6 (a) に、ケース II は 図-7 (a) に示される降雨条件で実験が行われ、その結果が 図-6 (b), 図-7 (b) に各時刻における飽和度の分布として示されている。な

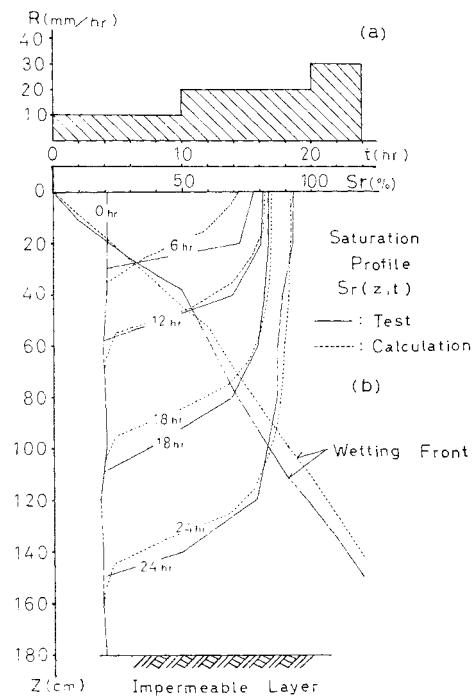


図-6 土中水分状態と降雨のレスポンス
(ケース I)

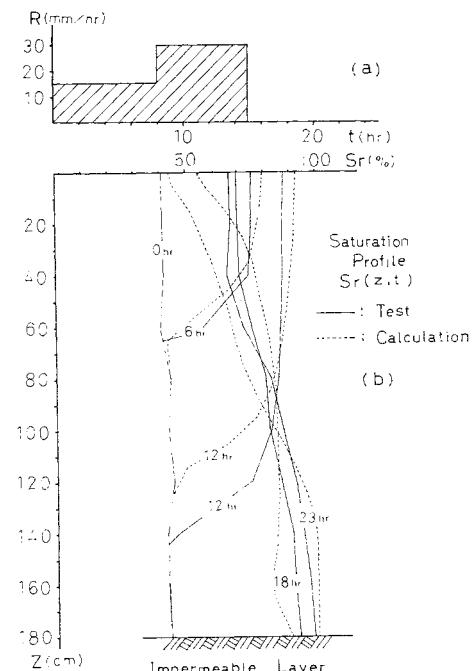


図-7 土中水分状態と降雨のレスポンス
(ケース II)

お、実験に用いた土質は砂質ローム土（一般的な山土で、砂分63%，シルト分21%，粘土分16%）で、間隙率 $n=0.489$ 、透水係数 $k_{sat}=8.2\times10^{-4}(\text{cm/sec})$ と両ケースとも同一である。

次に、ケースI、IIの実験条件とまったく同じ条件で降雨浸透解析を行った。 k_{ra} 、 $k_{rw}\sim S_r$ 関係、および $p_c\sim S_r$ 関係はMorel-Seytouxらの提示した関係⁶⁾（図-3,4）を採用した。解析結果は、図-6(b)、図-7(b)の破線で示されている。この解析結果と実験結果を、以下に比較検討してみよう。

ケースIでは、初期飽和度（図-6(b)中、 $t=0\text{ hr}$ で示される）を20%程度と低くしたため、浸透の進行は遅い。また、未浸透部と既浸透部での飽和度の差が大きい。解析結果は実験結果と、定性的にだけでなく定量的にもよく一致し、浸潤前線の進行状況もほとんど同じである。

ケースIIでは、初期飽和度を40%程度と、ケースIよりやや高くした。このケースにおいても、計算値がかなりの精度を有することが確認できる。このケースでは、降雨停止後に土中水分が再分配される（浸透層上部から下部へ水が移動する）過程に対しても検討されているのが特徴である。図-7(b)より、浸透過程だけでなく土中水分の再分配過程に対しても、解析結果は若干の誤差を認めるならばよい精度を示しており、この降雨浸透解析法が土中水分の再分配過程にも適用できることがわかる。なお、計算ではタイムステップ $\Delta t=4\text{ 分}$ 、浸透層の分割区間の幅 $\Delta z=10\text{ cm}$ としており、これはケースI、IIともに共通である。なお、分割区間の幅 Δz のとり方によって、解析結果に若干の差がみられる。すなわち、 Δz を小さくすると解が不安定になり、 Δz を大きくすると精度的に問題が生じる。そこで、本論文では Δz について数通りの値で計算を行って、解の精度および安定性がもっとも良好な値を採用している。

以上に示したように、ある程度単純化された降雨型ではあるが、これに対して行われた実験と解析結果は定性的、定量的によく一致している。このことは、本章で導いた降雨浸透解析法が妥当であり、これによってランダムに発生する降雨と土中飽和度分布のレスポンスを求め、さらにそれを工学的に応用していくことが十分可能であることを示している。なお、実際の斜面に対し降雨浸透解析を行う場合、植生の影響も考慮すべきであるが、植生の存在による雨水の遮断および滞留などに関して定量的な把握がなされていない現状を考え、解析では安全側の見地から植生に関しては考慮せず、すべて裸地斜面として取扱うこととする。植生の影響については、今後の課題としたい。

3. 破壊確率による斜面崩壊予知

1. 述べたように、本研究は斜面崩壊の予知を、破壊確率の遷移過程に基づいた方法によって行うこと目的としている。そこで、過去の崩壊例を参考にして、崩壊に至るまでの破壊確率 P_F の遷移過程を調べ、 P_F の遷移特性を見出すことにより、崩壊時刻を推定する方法を提示しようと試みた。同様に、危険と思われながらも崩壊にまで至らなかった未崩壊例についても P_F の遷移過程を調べ、崩壊と未崩壊を識別しうるパラメーターを抽出し、崩壊予知に応用しようと試みている。

なお、本論文では崩壊斜面の過半数を占める表層すべり崩壊についてのみ議論し、他の崩壊形態（たとえば崩落型崩壊）は取扱わない。すなわち、破壊モードとしては、降雨浸透に伴う土中飽和度の上昇による土の強度低下、自重の増大、および地下水形成後の中間流発生に伴った浸透水圧によって生じる間隙水圧などを原因とする、斜面表層全般のすべり崩壊のみを対象とする。いわば、平均的見地から取扱えるすべり破壊を対象とするわけで、水みち、クラック、断層などの地質的弱層、パイピング、表面侵食など、いわゆる特異点や特殊条件に支配される破壊は対象としない。これは、このような特異点、特殊条件に支配される破壊のメカニズムがまだ明確にされておらず、その危険度を定量的に評価する解析法が十分でないことに加え、表層すべり崩壊が斜面崩壊全体に占める割合が非常に大きい（表土滑落型が全体の51%，マサ、シラスの滑落を加えると67%）からである⁷⁾。また、植生の影響も考慮されていないが、これは植生の斜面安定に及ぼす影響が明確でなく、その定量的評価が困難なためである。

(1) 破壊確率 P_F の算定

a) P_F 算定の条件

崩壊地、未崩壊地の調査により豪雨の時間雨量～時間図（ハイエトグラフ、崩壊例では崩壊時刻も記入されている）、表層および崩壊部分の厚さ、全斜面長あるいは崩壊斜面長、斜面傾斜角、表層土質の種類などが一般に明らかにされている。しかし、降雨浸透解析で必要な、透水係数 k_{sat} 、間隙率 n （あるいは間隙比 e ）、降雨前($t=0$)の初期飽和度 $S_r(t)$ 、比重 G_s 、および強度係数 c 、 ϕ などについては、調査されていない場合があるため、これに対しては土質の種類に基づいて表-1の*印で示されるような常識的な値を仮定した。なお、表-1において粘性土の透水係数の仮定値が大きいように思われるかも知れないが、斜面表層は風化土が多く、実際に砂をかんでいる場合が一般的であることを考えて、大

表一 崩壊、未崩壊斜面の諸性質 (* は仮定値)

番号	地名	土質	傾斜角(°)	表層厚(m)	初期 S_r (%)	間隙比	透水係数(10^{-3}cm/sec)	c_{\max} (t/m^3)	ϕ (°)
崩壊例	1 吳	ローム	45	2.0	66	0.9	1.6	5.0	23
	2 小原	マサ土	45	2.0	*60	*0.8	*5.0	*2.0	*30
	3 銀子	シルト質砂	35	1.2	42	1.0	2.4	*2.0	*25
	4 神戸	マサ土	40	3.5	*50	*0.8	5.0	*2.0	*25
	5 土岐	粘土	30	2.0	*50	*1.2	*1.0	*7.0	*10
	6 横浜	腐植土	45	1.4	*50	*1.0	*5.0	*5.0	*10
	7 横浜	ローム	50	1.4	*70	*1.2	*1.0	*10.0	*10
	8 小見川	砂質土	40	1.4	42	1.0	*5.0	*2.0	*30
	9 内海	粘性土	33	1.7	*60	*1.0	*10.0	*10	
	10 明智	砂質土	35	2.0	*50	*0.8	*5.0	*2.0	*30
	11 八日市場	砂質ローム	50	2.0	60	1.04	*1.0	*5.0	*20
	12 小原	砂質ローム	43	1.5	45	0.9	1.3	*5.0	*25
	13 横須賀	砂質土	30	2.5	*50	*0.8	*5.0	*2.0	*25
	14 明智	赤土	30	3.0	*50	*1.0	*1.0	*5.0	*10
未崩壊例	15 小原	砂質土	37	1.5	41	0.83	1.1	*2.0	*30
	16 吳	ローム	30	5.0	66	0.9	*1.0	5.5	23
	17 銀子	シルト質砂	35	1.2	42	0.9	*1.0	*2.0	*35
	18 神戸	マサ土	34	6.0	*50	*0.8	*5.0	*2.0	*25
	19 小見川	砂質土	34	1.8	41	1.0	*5.0	*2.0	*30
	20 小原	砂質ローム	32	1.5	45	0.9	1.3	*5.0	*25
	21 北勢	砂質ローム	23	3.8	64	0.96	0.82	7.0	10
	22 北勢	砂質ローム	32	3.2	64	0.96	0.82	7.0	10
	23 北勢	砂質ローム	35	4.5	64	0.96	0.82	7.0	10
	24 北勢	砂質ローム	32	4.2	64	0.96	0.82	7.0	10
	25 北勢	砂質ローム	20	7.0	64	0.96	0.82	7.0	10

きめに見積っている。浸透解析に必要な、 k_{ra} , k_{rw} ～ S_r 関係、および p_c ～ S_r 関係については、Morel-Seytoux らの研究⁶⁾を参考にして 図-3, 4 に示すような関係を用いた。また、解析のタイムステップ $\Delta t=6$ 分間としている。

土の強度係数 c , ϕ のうちで、特に水分変化の影響が顕著であり、かつ斜面安定に強く効いているみかけの粘着力 c は、飽和度との関係が重要となる。そこで、数種の一般的な山土（主としてシルト質砂）について、別途に飽和度を変化させて力学試験（一面せん断試験）を行った⁸⁾。その結果のうち、本論文の解析上必要なものを簡単に示すと以下のようになる。すなわち、ある飽和度 S_r^* で粘着力が最大値 c_{\max} となる。 S_r^* より高い飽和度 S_r ($S_r \geq S_r^*$)において、そのときの粘着力 c と c_{\max} の比を $c^* (= c/c_{\max})$ と表わし、飽和度の変化分 $\Delta S_r (= S_r - S_r^*)$ との関係調べると、 c^* と ΔS_r には線形相関が見出される。平均値を示す直線のまわりのばらつきを正規分布で近似すると、 c^* の平均値 μ_{c^*} 、標準偏差 σ_{c^*} 、および S_r , S_r^* が与えられた条件での c^* の条件付分布の確率密度関数、 $f(c^*|S_r, S_r^*)$ は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{c^*} &= 1.0 - 0.018 \Delta S_r \\ \sigma_{c^*} &= 0.182 \end{aligned} \right\} \dots \quad (23)$$

$$f(c^*|S_r, S_r^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{c^*}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{c^* - \mu_{c^*}}{\sigma_{c^*}}\right)^2\right\} \dots \quad (24)$$

間隙比 e と S_r^* にも直線相関が見出されたため、 S_r^* の推定は次式によって行えることが明らかにされている。

$$S_r^* = 128.8 - 100.0 e(\%) \dots (25)$$

以上より、各飽和度 S_r における c の値は、式(24)で表わされる c^* の分布に c_{\max} の値を乗じた分布型として与えられる。なお、解析に用いる c_{\max} の値のうちで、調査の行われていない表層土に関しては、著者らのせん断試験結果を参考にして仮定してある（表-1 の *印）。

一方、せん断抵抗角 ϕ は、水分変化による変動特性が明確でないため、 S_r とは無関係な一定の正規分布として与える。その際、 ϕ の標準偏差は従来の研究⁹⁾を参考にして、変動係数 V_ϕ (= 標準偏差/平均値) を 0.2 として与えてある。安定解析では、 $\tan \phi$ の形が抵抗モーメント式の中に含まれているが、 ϕ の普通のばらつきの範囲では近似的に $\tan \phi$ も正規分布することがわかっているので¹⁰⁾、 $\tan \phi$ のばらつきを

正規分布として評価する。 S_r の変化による ϕ の変化とは別に、斜面表層内に発生する中間流による浸透水圧（斜面勾配と地下水深より計算できる）に伴う間隙水圧の上昇を考慮し、 ϕ に対する浸透水の影響を評価している。

b) 安定解析法

与えられた調査結果および仮定された条件のもとで降雨浸透解析を行い、任意の時刻における土中の飽和度分布を得る。解析では、図-2 の鉛直浸透モデルを斜面の微小区間に適用した（図-8）。図-8 中の i 層（厚さ $4z$ ）の飽和度分布および地下水深より、その層内の土質諸係数、すなわち粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ 、単位体積重量 γ_t を与え、これを安定解析に用いる。安定解析は、地表面と基岩の間に在存する表層内に、円弧すべり

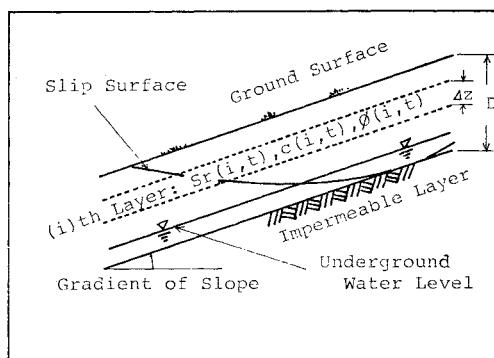


図-8 安定解析モデルの概要

面法を適用して行う。すべり面に沿う抵抗モーメント M_R 、滑動モーメント M_O より、斜面の安全係数 F_S は次式で与えられる。

斜面は $F_S \leq 1$ のときに破壊し、 $F_S > 1$ のときに安定であると定義する。安定解析は全応力解析で行うが、地下水面形成後に発生する中間流の影響は¹¹⁾、浸透水圧によって生ずる隙隙水圧分を、せん断面上に作用する垂直応力からさし引くことによって評価する。動水勾配 i' および水の単位体積重量 γ_w により、浸透水圧は $i'\gamma_w$ と表わされる。 i' は地下水面の勾配と一致するので、斜面傾斜角を θ とすると、

となる。また、地下水面上の土粒子の重量は水中重量で計算する。

浸透解析との対応より、図-8 のように斜面表層を幅 Δz の薄い層に分割する。時刻 t における i 番目の薄い層の飽和度 $S_r(i, t)$ に対応する強度係数 $c(i, t)$, $\phi(i, t)$ の分布、および単位体積重量 $\gamma_t(i, t)$ を用いて、破壊確率 $P_F(t)$ をシミュレーションによって求める。すなわち、 $c(i, t)$, $\phi(i, t)$ の母集団分布から、正規乱数により 1 組の $\{c(i, t), \phi(i, t)\}$ の値を斜面のそれぞれの薄い層ごとにわりつけて、安定解析を行う。この操作を N 回繰返すことによって N 個の安全係数 F_S が得られるわけである。これらの N 個の F_S の値は、 F_S の母集団分布よりランダムサンプルされたものと考えられるから、 F_S の実現値より F_S の母集団分布が推定できる。 N の値は大きいほど望ましいが、実際には N の値を 200 程度とすれば母集団分布の推定に関してほぼ十分と考えられるので、ここでは $N=200$ として計算を行っている。いま、 F_S を確率変量 X として、その j 番目の実現値を $x_j (j=1, \dots, N)$ とする。 $c(i, t)$, $\tan \phi(i, t)$ を正規分布で与え、 $\gamma_t(i, t)$ を一定値とおくと、式(26)は正規変量の線形結合となるので、 X も正規分布に従うものと考えてよい。その平均値 μ 、標準偏差 σ の最尤推定量 $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ は次式のようになる^[12]。

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mu} &= \sum_{j=1}^N x_j / N \\ \hat{\sigma} &= \sqrt{\sum_{j=1}^N x_j^2 / N - \left(\sum_{j=1}^N x_j / N \right)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

X の確率密度関数 $f(x)$ は、次式で与えられる：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\hat{\sigma}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)^2\right\} \quad \dots \quad (20)$$

したがって、時刻 t における斜面の破壊確率 $P_E(t)$ は、次式によって計算される。

ところで、強度係数 c, ϕ を正規分布と仮定しているので、理論上安全率の分布も $(-\infty, +\infty)$ の範囲で定義される正規分布となるが、物理的意味からすればマイナスの安全率は存在しない。しかし、実際の計算では $(-\infty, 0]$ の範囲の安全率が現われる確率は無視できるほど小さいため、確率・統計的取扱いの便宜上、式(30)の積分範囲を $(-\infty, 1]$ とおいたわけである。

なお、実際の計算では、降雨のハイエトグラフが時間雨量の単位で与えられているため、破壊時点の近傍では1時間ごとに、破壊時点より隔っている時には数時間ごとに $P_E(t)$ を計算し、遷移過程を求めていく。

(2) P_E の遷移特性と崩壊予知

表-1 に示される 14 個の崩壊例、および豪雨時に危険と想定されつつも崩壊の起らなかった 11 個の未崩壊例について、 $P_F(t)$ の時間的遷移を計算した。この 25 例はすべて、表層すべりを起したか、あるいは崩壊するならば表層すべりとなると考えられるものである。なお、豪雨開始時刻を $t=0$ として、 $P_F(t)$ の遷移過程を計算した。

まず、崩壊例に関して $P_F(t) \sim t$ 関係をみてみよう。
図-9(a) に代表的崩壊例のハイエトグラフを、**図-9(b)** に崩壊例の $P_F(t) \sim t$ 関係を示す。図中の番号は表-1 の地点番号に対応し、また、図中の黒点は実際の崩壊時刻を表わしている。いずれの例においても、崩壊時あるいはその付近で P_F が著しく上昇していることがわかる。崩壊時の P_F の値そのものは、土質と飽和度の初期値や他の解析条件の与え方によってかなり差があり信頼度は高くないが、 $P_F(t)$ の遷移傾向はどれも類似している。先に、 P_F と斜面の変位との関連を

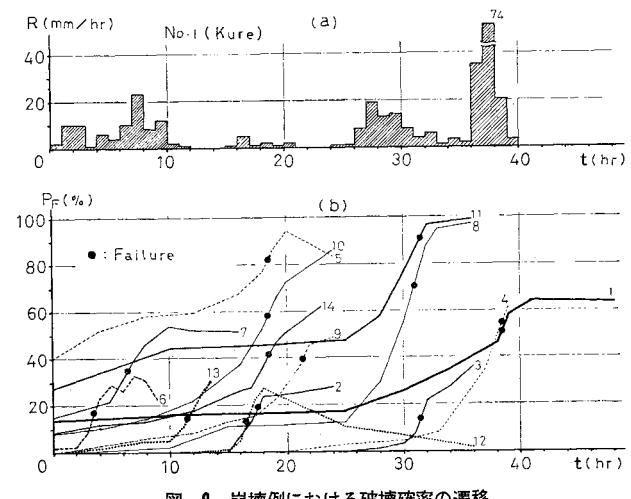
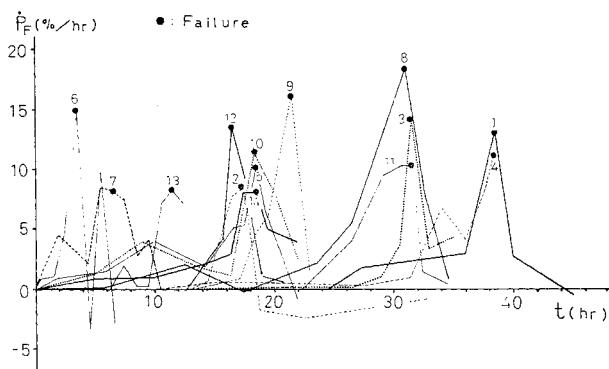
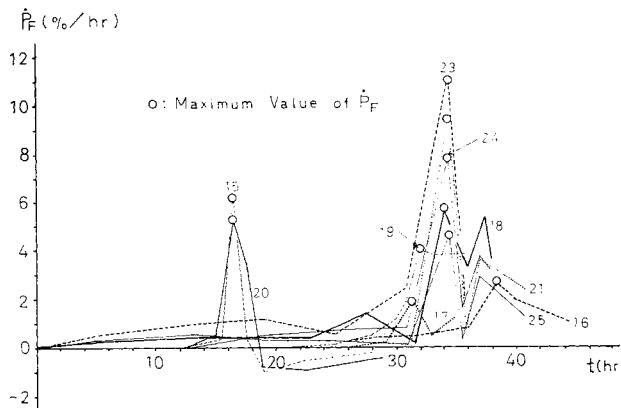


図-9 崩壊例における破壊確率の遷移

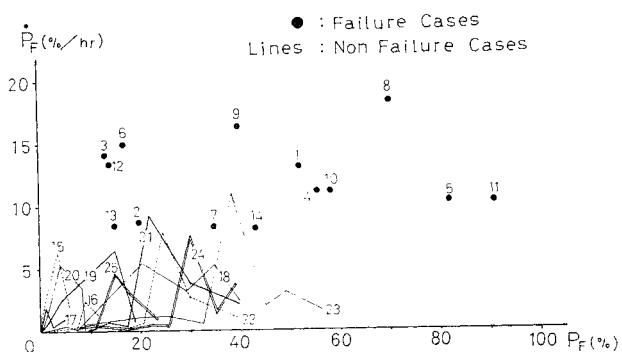
図-10 崩壊例における \dot{P}_F の遷移特性図-11 未崩壊例における \dot{P}_F の遷移特性

予想したが、 P_F の変化する速度が大きくなった時点では崩壊が生じていることは、斜面崩壊時に変位が増大することと強く対応しているものと考えられる。すなわち、 P_F の遷移速度 \dot{P}_F と、斜面の変位速度が表裏一体の関係にあることを示唆するものといえよう。したがって、力学的見地からも、計算上の精度からみても、崩壊予知に関しては P_F の絶対量より \dot{P}_F の方が指標として適切と考えられる。なぜなら、 P_F の値そのものは、 c , ϕ , k_{sat} , e 等の値に敏感であり、したがって、これらの推定精度に大きく左右される。これに対し、時々刻々と増減する破壊確率 P_F の時間的な変化の割合を示す \dot{P}_F では、これらのファクターの降雨による変化だけが顕著に反映されてくるため、 P_F の絶対量よりは \dot{P}_F の値を予知の指標とする方が適切と考えられたからである。そこで、次に $\dot{P}_F \sim t$ の関係について調べてみよう。

いま、 P_F を1時間当たりの P_F の変化量という単位で表わす。 \dot{P}_F と時刻 t の関係を崩壊、未崩壊例について、それぞれ 図-10, 11 に示す。図-10 中、黒点が崩壊時点を表わしているが、崩壊がいずれも、 \dot{P}_F が最大あるいはそれに近く

い値となった時に発生していることは注目に値する。崩壊時の \dot{P}_F を \dot{P}_{F^*} と表わすと、 \dot{P}_{F^*} の値はもっとも低い例でも 8(%/hr) 程度で、大部分が 8~20(%/hr) の範囲に含まれている。一方、未崩壊例についても同様に、 $\dot{P}_F \sim t$ 関係を調べてみると、図-11 より \dot{P}_F が最大となる時点においても、その最大値 $(\dot{P}_F)_{max}$ が崩壊例の場合の \dot{P}_{F^*} より小さくなっているものが大部分であることに注目すべきであろう。未崩壊例の中にも \dot{P}_F が崩壊例の \dot{P}_{F^*} より大きくなるものもあるが、これは斜面が崩壊に至らないまでも、かなり危険な状態になっていたことを示すものといえよう。もし、他の一般に非常に安定な斜面について同様の検討を加えるならば、 \dot{P}_F の値はほとんど零に近い値になると予想され、ここに検討を加えた未崩壊例が、かなり危険な状態のものであることは容易に理解される。

次に、崩壊時の P_F を P_{F^*} と表わして、 \dot{P}_{F^*} と P_{F^*} の関係および未崩壊例における $\dot{P}_F \sim P_F$ の遷移関係を調べてみると、図-12 に示すようになる。図-12 より、崩壊例において P_{F^*} は広い範囲に及んでおり、すでに示唆されたように、 P_{F^*} のみで崩壊との特徴的な関係を見出すのは困難である。このように P_{F^*} の値自体が広くばらつくのは、事前の詳細な土質調査が実際上不可能であるという問題の性格上、解析に用いる土質諸係数の精度が悪くならざるをえない点に主として起因している。これに対し、 P_F の値には上述の問題点の影響が小さく、崩壊、未崩壊を識別する上で非常に重要なとなる。図-12において、未崩壊例の $\dot{P}_F \sim P_F$ 関係をみると、これらが崩壊例より下位に位置し、かつ、崩壊、未崩壊を識別する2つの明確な領域が存在することがわかる。崩壊例の \dot{P}_{F^*} 、および未崩壊例の $(\dot{P}_F)_{max}$ をヒストグラムによって表わすと、

図-12 崩壊時の $P_{F^*} \sim \dot{P}_{F^*}$ 関係と未崩壊例の $P_F \sim \dot{P}_F$ 関係

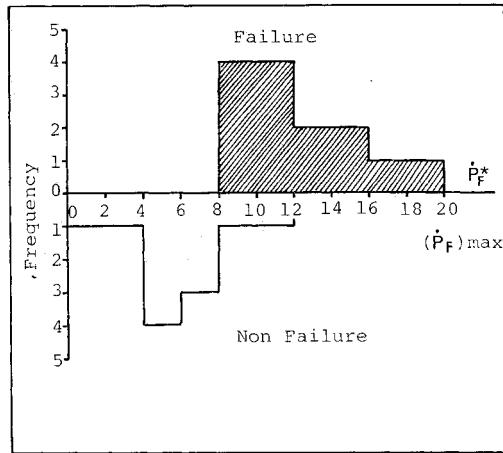
図-13 \dot{P}_F^* , $(\dot{P}_F)_{max}$ の分布

図-13 のようになる。横軸のランク幅は 2(%/hr) とし、縦軸は上側に \dot{P}_F^* の頻度を、下側に $(\dot{P}_F)_{max}$ の頻度をとってある。図-13 より、崩壊は \dot{P}_F^* の値が 8~20(%/hr) の範囲で発生していること、特に 8~12 (%/hr) の範囲に集中していることがわかる。一方、未崩壊例での $(\dot{P}_F)_{max}$ の分布に関しては、当初たとえば指數分布のような形になるものと予想したが、図-13 ではその傾向はみられず、 $(\dot{P}_F)_{max}$ が 4~8(%/hr) の範囲に多く分布している。これは、調査の対象にした未崩壊斜面が、崩壊に至らないまでもかなり危険な状態にあったためと考えられる。ちなみに、ここに示した未崩壊斜面の近くで、崩壊の発生した例が多い。実際にはそれより安定な斜面は、非常に多く存在すると考えるのが正当である。

以上の結果を、以下にまとめてみよう。(i) 崩壊時に P_F は急上昇するという特性があり、 P_F の値そのものは計算上大きくななくても、 P_F の時間的変化が著しい場合に崩壊が発生している。(ii) 崩壊には \dot{P}_F の遷移特性が強く影響しており、たとえ P_F の値が計算上大きくなっても、 \dot{P}_F の値が小さければ崩壊は生じにくい。(iii) \dot{P}_F^* の値は 8~20(%/hr) の範囲に及んでいるが、 $\dot{P}_F^* < 8(%/hr)$ の範囲で崩壊した例はない。一方、今回解析した未崩壊例では、 $(\dot{P}_F)_{max}$ の値は 0~12(%/hr) の範囲、特に 4~8(%/hr) の範囲に多く含まれている。このように、未崩壊例は明らかに崩壊例と異なる領域にある。(iv) 以上から、自然斜面崩壊の可能性を判別するパラメーターとしては、 \dot{P}_F を用いるのが最も有効と考えられる。25 個の崩壊、未崩壊例についていえば、両者を識別する \dot{P}_F の値 $(\dot{P}_F)_{cr}$ はほぼ 8 (%/hr) 程度と考えられる。

4. おわりに

本論文は、信頼度分析により斜面崩壊の予知のためのパラメーターの発見と、実際的に可能な予知方法を提起することを目的とした。本論文の結論を簡単に列記すると、以下のようになる。

(1) 降雨浸透の機構を、空気と水の両方の流れを考慮した 2 相流浸透理論、および降雨境界条件を工夫することによって解析する方法を示した。それと並行して、室内鉛直浸透実験を実施し、解析値と実験値の対応関係を検討した。その結果、両者は定性的、定量的に非常によい一致をみせ、ここに示した浸透解析法が有効であること、および浸透過程だけでなく土中水分の再分配過程に対してもシミュレートできることが判明した。

(2) 浸透解析において、土の浸透能と降雨量の関係より境界条件を区別して与え、実際の降雨のようにランダムに生起する現象をも解析できるようにした。

(3) 豪雨による斜面の破壊確率の変化を、崩壊が起った例について検討したところ、崩壊現象と強く関連していることがわかった。特に、破壊確率の遷移速度 \dot{P}_F が最大となる時点で崩壊する例が大部分であるという顕著な傾向が見出された。この \dot{P}_F が、斜面の変位速度となんらかの関連があることが、直観的に推察される。

(4) 未崩壊例における P_F の変化は全般的にゆるやかで、 $(\dot{P}_F)_{max}$ の値も崩壊例の \dot{P}_F^* より明らかに低い値を示している。これより、 \dot{P}_F が崩壊と未崩壊を識別し、斜面が崩壊に近づいているのか否かを判別するパラメーターとして、今後の斜面崩壊予知に応用できるものと期待される。崩壊、未崩壊の境界となる $(\dot{P}_F)_{cr}$ は、さらに多数の事例を調べることにより多少修正される余地はあるが、25 個の事例に対する検討によれば 8 (%/hr) 前後と考えられる。 P_F の絶対量と崩壊の関連は見出せなかったが、実際問題にこの予知方法を適用する場合には、 P_F についても基準値を定める必要が生じるかも知れない。なお、大型の電子計算機に、あらかじめ対象とする斜面に関する初期データと安定解析手順を組込んでおくならば、インプット情報として降雨量のみを得て \dot{P}_F を算定することは、きわめて短時間で可能であることを付記する。

本研究にあたって、適切なご助言を賜わった建設省土木研究所急傾斜地崩壊研究室長 安江朝光氏、名古屋大学助教授 高木不折博士、ならびに岐阜大学助教授 宇野尚雄博士に深甚なる謝意を表する次第である。なお、計算は、名古屋大学大型計算機センター FACOM 230-75 によって行ったことを付記する。

参考文献

- 1) 素藤道孝：斜面崩壊発生時期の予知，土と基礎，Vol. 17, No. 2, pp. 29~38, 1969.
- 2) 田中 茂：山地斜面の崩壊箇所の予想について，建設工学研究報告，No. 4, pp. 155~158, 1973.
- 3) Morel-Seytoux, H.J. : Two phase flows in porous media, Advances in Hydroscience, Vol. 9, pp. 120~176, 1973.
- 4) Brustkern, R.L. and Morel-Seytoux, H.J. : Analytical treatment of two-phase infiltration, Proc. ASCE, Vol. 96, No. HY 12, pp. 2535~2548, 1970.
- 5) Childs, E.C. : An Introduction to the Physical Basis of Soil Water Phenomenon, John Wiley & Sons Ltd, pp. 242~246, 1969.
- 6) Noblanc, A., and Morel-Seytoux, H.J. : Perturbation analysis of two-phase infiltration, Proc. ASCE, Vol. 98, No. HY 9, pp. 1527~1541, 1972.
- 7) 建設省土木研究所急傾斜地崩壊研究室：急傾斜地崩壊の実態と対策，土木研究所資料，第 801 号, pp. 5~7, 昭和 48 年。
- 8) 松尾 稔・上野 誠：斜面崩壊防止のための信頼性設計に関する研究，土木学会論文報告集，第 276 号, pp. 119 ~129, 1978.
- 9) Matsuo, M. : Reliability in Embankment Design, MIT, Dept. of Civil Engineering Report, R 76-73, pp. 1~203, 1976.
- 10) 松尾 稔・黒田勝彦：不飽和土の土質諸係数と破壊確率に関する一考察，土木学会論文報告集，第 208 号, pp. 65~75, 1972.
- 11) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，技報堂, pp. 213 ~216, 昭和 43 年。
- 12) たとえば，三上 操：統計的推測，筑摩書房, pp. 189~194, 昭和 44 年。

(1978.4.6・受付)