

統計的手法による自然斜面崩壊の研究

STATISTIC RESEARCHES ON FACTORS AFFECTED
MOUNTAINSLOPE SLIDES

沖 村 孝*・杉 本 博**

By Takashi OKIMURA and Hiroshi SUGIMOTO

1. ま え が き

降雨に起因する自然斜面の崩壊は、地形、地質、土質、植生条件や降雨条件など多くの要因が関係し複雑な崩壊機構・崩壊形態を示す。崩壊原因の究明に関する従来の研究は、個々の崩壊地ごとにその崩壊原因を調査研究する手法と、いくつかの崩壊地の調査結果を集めて、これらのなかより1個の要因を選択し、たとえば、傾斜度と崩壊、植生と崩壊のように個々の要因と崩壊との関係を論じたものがある。これらの調査研究結果を利用した崩壊の予知・予測のためには後者の手法が有利であるが、しかしこの手法では研究対象が個々の要因に限られているため、要因相互の関係およびいくつかの要因が同時に作用した場合の崩壊の予知・予測は不可能である。本研究は、数量化理論を用いた統計処理により、崩壊に寄与すると考えられている要因の多変量解析を行い、要因の相互関係および要因の崩壊に対する影響の大きさを量的に表現することにより、崩壊の原因となる要因を示し、将来の崩壊の予知・予測へ一課程を示そうとするものである。

統計的手法を用いたこの種の研究は、最近10年間、盛んに行われている。これらの研究のうち村野¹⁾、持永ほか²⁾らの研究は、崩壊に寄与すると思われる要因の相互関係および各要因の崩壊への影響度を知るための研究であり、丸安ほか³⁾、青山ほか⁴⁾、中野ほか⁵⁾、難波⁶⁾、竹下⁷⁾、久保村ほか⁸⁾、小橋ほか⁹⁾、南部ほか¹⁰⁾らは、直接崩壊の予知・予測を目的とした研究を行っている。

本来、崩壊現象は斜面上に存在する土粒子の集合体であり、力学的な安定を失って下方へ落下・流下する現象であり、この現象の解明には物理学的な考え方が基本とな

ることは明らかである。しかし、崩壊の機構、形態が複雑なため、またそれに寄与すると考えられる要因があまりにも多いため、現実には力学的な解析が不可能な状況にある。このために上述したような統計的手法を用いた崩壊の研究が行われているが、これらの研究で使われている要因は空中写真、小縮尺地形図あるいは簡単な現地調査より得られる、いわゆる外観要因がほとんどであり、また、要因の区別の基準(識別規準)が明確であるからとの理由より、むやみに新しい要因を設定する傾向もあり、統計的手法以外の研究から得られている従来の知見が要因として採択または要因選択の際考慮されていない傾向もみうけられる。このため統計処理の結果として、いわゆる適中率は高くなっても、再現性があるかどうか疑わしくなっている¹⁾。また、従来の研究のなかには要因の識別規準がばく然としているため、統計処理の結果から危険度を判定するためには現場を相当熟知している必要があると認められる場合もあり、これらについてはすでに二、三の指摘もなされている¹¹⁾。

本研究は、統計的手法ではあまり研究の対象とされていなかった自然斜面の表土層崩壊を研究対象とし、要因調査にあたっては明確な識別規準を設定するとともに、できる限り現地調査を主体として行った。また、外観要因も大縮尺地形図を使用することにより、識別精度の向上を期した。さらに、従来の研究データにありがちな調査の個人差をなくするため、直接研究者らがすべての要因調査を実施した。本研究ではこのような過程を経て得られた結果と従来の知見との関係を考察し、従来より崩壊の原因として考えられていた要因の相対的な影響の大きさの把握を試みた。

2. 調査地区

調査地は六甲山系の表斜面とした。六甲山系は昭和13年7月、昭和36年6月および昭和42年7月と3

* 正会員 工修 神戸大学講師 工学部土地造成工学研究施設

** 正会員 工修 兵庫県土木部



(建設省国土地理院 1/50 000 地形図「神戸」の一部)

図-1 調査地位置図

回にわたり豪雨による崩壊が発生している。この山系は花崗岩で形成されており、地質的には六甲花崗岩（黒雲母花崗岩）と布引花崗岩（黒雲母・角閃石花崗閃緑岩）に大別される。崩壊はこれら花崗岩が風化したマサ土層内で発生する表土層崩壊が主体となっている。調査地区としては布引花崗岩が分布する地域に5か所選定した(図-1)。これらの調査地区では、昭和42年災害の直後、科学技術庁国立防災科学技術センターにより撮影された縮尺1/2500の空中写真を使用して、建設省国土地理院が縮尺1/500の大縮尺地形図を図化している。本研究ではこれらの図を基図として採用した。なお「青谷地区」については、文部省科学研究費研究課題「山くずれと地質・地形構造との関連に関する研究」(研究代表者・田中茂)により作成された縮尺1/500の地形図を使用した。

3. 解析単位

一つの崩壊はある広がりをもった現象であり、このため要因調査の範囲もあるまとまった面積をもつ必要がある。しかもこのまとまった面積内には崩壊が発生するに必要な要因をすべて含んでいなければならない。自然斜面は非常に複雑であり、相隣り合った崩壊でもそれに寄与したと思われる要因がまったく異なっている場合がしばしばある。このためあるまとまった面積としては個々の崩壊面積が基準となるべきである。すなわち、この面積内には1個の崩壊が存在あるいは発生するに必要にし

て最小の広がりをもつものでなければならない。本研究ではこの概念をもつ広がり単位を解析単位と称することにし、具体的には「山ひだ」を考へることとした。この山ひだについてはすでに竹下⁷⁾が北九州市の山地における研究で解析単位として取り上げている。一方、塚本¹²⁾は山くずれ現象を水系網の成長現象であると考え、1次谷まで成長していない山ひだを「0次谷」と称してこの0次谷内の山くずれを羽越災害と天草災害より考察し、0次谷の中にだいたい1個の山くずれ発生可能地点のあることを指摘している。このことはここで設定した山ひだがその呼称の相違はあるが、本質的には一致しており解析単位として妥当であることを示している。

本研究では2.に述べた地形図を使用し、図-2に示すように地形図の等高線を使用して、凹状地形で等高線の延長交差角の最小のものが140度以内を山ひだと定義した。山ひだの上下境界は、前者は分水界、後者は他の谷と交わる点とした。この手法により設定した山ひだは、空中写真の実体視によるそれと大差ないことを確認した。このようにして得られた各調査地区内のすべての山ひだ数を表-1に示す。この表で崩壊群とは調査地区内で昭和42年豪雨により崩壊が発生した山ひだ

非崩壊群とは崩壊が発生しなかった山ひだを示す。調査地区全体で崩壊群45個、非崩壊群33個、データ総数は78個となり、崩壊発生率は57.7%と非常に高い値となっている。

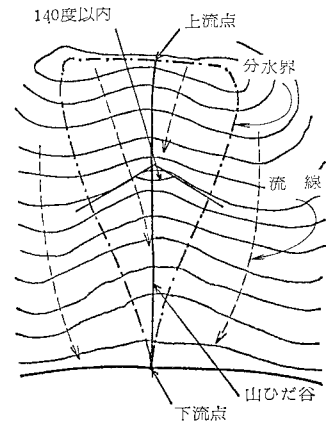


図-2 山ひだの意義

表-1 調査を実施した山ひだ一覧表

調査地区名	崩壊群	非崩壊群	計
篠原	10	4	14
高尾	7	7	14
青谷	8	12	20
春日野	15	3	18
氷室	5	7	12
計	45	33	78

4. 要因の選定および調査結果

自然斜面における山腹崩壊に影響を及ぼす要因は、通常これを素因と誘因とに分けて考えられているが、一般には時間的に不変であると考えられている素因でも、長期的には変化するものもある。本研究では昭和 42 年災害を調査対象としており、一方、要因は災害発生直前の値を求める必要がある。この時間経過の補正手段として経年的変化の早い植生は空中写真等の現地調査以外の方法で求め、他の素因については調査時点まで時間的変化はないものとみなした。素因のうち地質要因である岩の種類については、2. で述べたように各調査地区とも布引花崗岩内にあるため岩の種類は考えないこととした。

一方、誘因としての降雨要因は昭和 42 年の豪雨の等雨量線図をみると、今回選定した 5 か所の調査地区はいずれも総降雨量が 300~320 mm の範囲に位置しており¹³⁾、このため、誘因として受けた豪雨の総降雨量は各調査地区はもちろん各解析単位も等しいとみなし、解析要因としては除外した。

以下、本研究で調査を行った要因の調査方法、識別規準について述べる。

○地表面形状——山ひだの縦断線上の midpoint に立ち、この付近の地表面形状を表わした要因で、「凹凸」、「なだらか」、「クリープ」の 3 つのカテゴリーに分類した。「凹凸」とは地表面が凹凸になっている状態を、「なだらか」とは地表に凹凸が少ない状態を、「クリープ」とは立木が一樣な方向に傾き、幹が曲っている状態をそれぞれ示した。

○風化度——土壌分類による A~B 層を除いた地点の風化度を示し、これは山ひだの midpoint 付近でハンマーを用いて判断した。本研究では「強風化」と「中風化」のカテゴリーに分類した。「強風化」とは手で容易に鉱物粒までこわすことができる程度の風化状況を示し、「中風化」とはハンマーでたたくと微細な割れを生ずるものを示した。

○平均貫入量——山ひだの上流点、中点、下流点の 3 点で、試作の簡易貫入試験器¹⁸⁾を用いて貫入試験を実施し、15 cm 貫入に要するおもりの落下回数が 50 回以上となる深さを貫入量とし、3 点の平均値 (cm) で示した。これは山ひだの平均表土層厚を表わすものとした。

○最小貫入量——山ひだの表土層厚を表わす別の表現法として設定した。これは山ひだの 3 測点で実施した貫入試験の結果、最も小さい測定値を最小貫入量 (cm) とした。

○傾斜度——山ひだ谷の縦断面図を縮尺 1/500 の地形図の等高線を用いて作成し (図-3)、上流点と下流点を

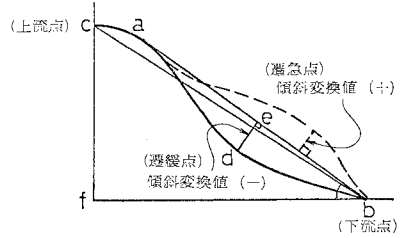


図-3 傾斜要因設定のための模式図

結んだ直線と水平面との角度 ($\angle cbf$) で表わした。これは山ひだ谷の平均傾斜角 (度) を示している。

○傾斜変換値——図-3 で、地表面沿いに上流点から下流点に向って最初に現れる遷急点 a と下流点 b とを結び、この直線と地表面までの垂直距離の最大値 (de) を傾斜変換値とした。点 d が直線 ab より上にあれば (遷急点) 「+」、下にあれば (遷緩点) 「-」とした。もし絶対値が同じ値であれば上流点に近い点を採用した。この要因は傾斜変換点の存在の有無およびその大きさを表現しようとしたものである。単位は、縦断面図より直接読みとったため mm で表示した。

○植生——昭和 42 年災害直後に撮影された空中写真 (縮尺 1/10 000) から立木の葉の繁茂している部分を縮尺 1/500 の地形図に移写し、山ひだ面積に対する比率 (繁茂率) で表わした。ただし、崩壊群における山ひだ面積はあらかじめ崩壊面積を除外した。

○リニアメント——昭和 35 年 9~10 月撮影 (縮尺 1/24 000) および昭和 36 年 7 月撮影 (縮尺 1/10 000) の空中写真から、フォトリアメントを判読し、これをまず昭和 42 年撮影の空中写真に移写し、さらにこれを縮尺 1/500 の地形図に転写した。山ひだ内にフォトリアメントが存在する場合は「あり」、そうでない場合を「なし」とした。判読の個人差を少なくするため、研究者らが交互に判読するとともに、移写に際しては、現地換算で 10 m 程度の誤差をみこした。

○リニアメント占有率——誤差をみこまないリニアメントの山ひだ横 (縦) 断長に対する山ひだ投影斜面長 (図-3 の直線 fb に相当) の割合で表示した。これは山ひだに対するリニアメントの大きさを表わそうとするものである。

○流域平均幅——流域平均幅 (m) は、縦断方向の単位斜面長当りに流入する平均的な集水量を表わすものとして考えた要因で、山ひだ面積を山ひだ投影斜面長で除した値とした。

○形状係数——流域平均幅を山ひだ投影斜面長で除した値で、山ひだ全体の形状を示す要因とした。

○崩壊歴——昭和 34 年撮影および昭和 36 年崩壊の空中写真を用いて、調査対象とした山ひだ内に崩壊地があれば「あり」、そうでなければ「なし」とした。

以上述べた要因および各要因のカテゴリーを表-2にまとめて示す。上述した識別基準，調査方法により得られた結果を図-4に示す。この図は調査結果を各要因ごとに，崩壊群，非崩壊群に分けて頻度分布で示したものであり，上方の数字は各階級（表-2に示したカテゴリーより細分化している要因もある）に該当する山ひだ数を示す。この図から，崩壊群と非崩壊群の分布が異なっている要因としては，最小貫入量，傾斜度，崩壊歴，風化度，平均貫入量などがあげられるが，他の要因は両群ともほとんど同じ分布を示していることがわかる。

表-2 要因名，カテゴリー一覧表

要因名	カテゴリー（水準）	
現地調査	地表面形状	凹凸，クリーブ，なだらか
	風化度	強風化，中風化
	平均貫入量	<50 cm, 50 cm ≤ ~ <90 cm, 90 cm ≤ ~ <130 cm, 130 cm ≤
	最小貫入量	<60 cm, 60 cm ≤ ~ <120 cm, 120 cm ≤
室内計測	傾斜度	<35°, 35° ≤ ~ <40°, 40° ≤
	傾斜変換値	<-10 mm, -10 mm ≤ ~ <-5 mm, -5 mm ≤ ~ <0 mm, 0 mm ≤
	植生	<35%, 35% ≤ ~ <65%, 65% ≤
	リニアメント	あり，なし
	リニアメント占有率	0, 0 < ~ <0.5, 0.5 ≤
	流域平均幅	<3 m, 3 m ≤ ~ <6 m, 6 m ≤ ~ <9 m, 9 m ≤
	形状係数	<0.15, 0.15 ≤ ~ <0.30, 0.30 ≤
崩壊歴	あり，なし	

5. 解析

(1) 要因の数量化

表-2に示した要因のなかには，量的な表現が困難な属性要因がいくつか含まれている。このような要因を含んだ多変量解析には数量化理論がよく用いられている。この数量化理論は，林がガットマンの予測の理論から出発し，定性的な要因の各カテゴリーに適当な数値を与えて，定量的変数と同様に多変量解析ができるように工夫した理論である¹⁴⁾。この理論はI類からIV類までのモデルが存在するが，本研究では定性的な外的規準（崩壊群，非崩壊群）に個体（山ひだ）を判別するII類のモデルを採用した。

いま n 個の調査場所（解析単位）で R 個の要因についてそれぞれ調査を実施したとする。これらの要因のうち j 番目の要因は k_j 個のカテゴリーをもっているものとする。ここで， i 番目の調査場所が j 番目の要因に関して k 番目のカテゴリーで反応するときのみ 1，他の $(k_j - 1)$ 個のカテゴリーに反応したときには 0 の値をとる $\delta_i(jk)$ なる量を導入する。すなわち，

$$\delta_i(jk) = \begin{cases} 1 & (\text{カテゴリー } k \text{ に反応したとき}) \\ 0 & (k \text{ 以外のカテゴリーに反応したとき}) \end{cases}$$

.....(1)

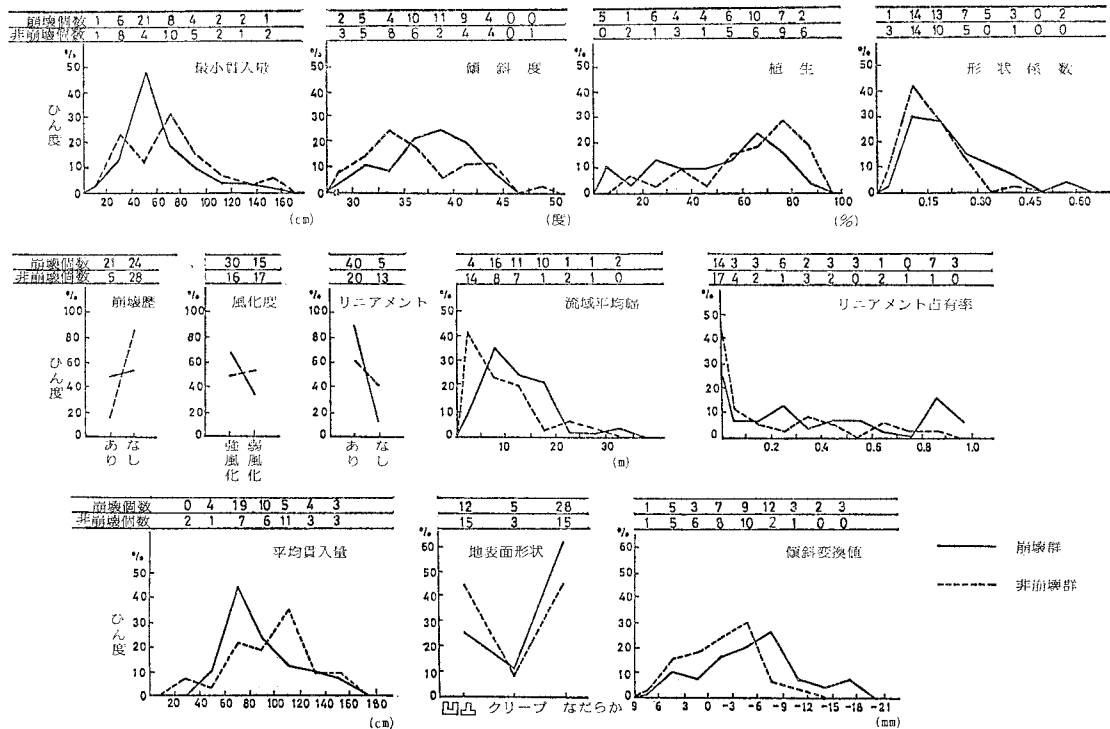


図-4 要因別頻度分布

となる。次に、

$$\alpha_i = \sum_j^R \sum_k^{k_j} \delta_i(jk) \cdot x_{jk} \dots\dots\dots (2)$$

なる合成変数を考える。ただし、 x_{jk} は j 番目の要因の k 番目のカテゴリーに与えるべき数である。 n 個の調査場所を昭和 42 年豪雨による崩壊群、非崩壊群の 2 個の群に最も効果よく判別しようとする場合には、各群の相関比 η の自乗値が最大になればよい。本理論は、そのような条件を満たすように x_{jk} の値を決定する方法である。式 (2) の表示法は、ダミー変数法におけるものと同様であるが、ダミー変数法はダミー変数が 1 か 0 の値しかとらず、係数が最小自乗法などによって計算されるが、この数量化理論では逆に変数 x_{jk} のとる値が η^2 を最大にするように決定され、係数 $\delta_i(jk)$ は 1 か 0 の値しかとらないようになっている。したがってこの理論の特徴は定性的な要因を数量化するとともに、ダミー変数法の場合と同様に定量的な要因もあるカテゴリー分けを行うことにより、定性的要因と同じように扱うことができる手法である。

本理論の詳細な説明はすでにいくつかの文献により紹介されている¹⁴⁾ため、ここでは省略する。以後、式 (2) における α_i を斜面判定値、 x_{jk} を判別係数とよぶことにする。なお、各要因内のカテゴリー (表-2 参照) を以後、水準と称する。

(2) 要因の規定力の大きさ

数量化が行われた後、本研究の目的である各要因の崩壊に対する影響の大きさ (以後、規定力と称する) を決定しなければならない。この指標としては一般に次の式が使用されている。

$$R(j) = \max(x_j) - \min(x_j) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$\max(x_j)$: j 番目の要因の各水準に与えられた判別係数の最大値

$\min(x_j)$: j 番目の要因の各水準に与えられた判別係数の最小値

通常 $R(j)$ をレンジと称し、これを規定力の大きさの指標としている。一般には各要因間に相関性があるため、偏相関係数に相当するもの (数量化後は偏相関係数) が規定力の大きさを表わす指標と考えられるが、経験的事実によりレンジは偏相関係数とほとんど比例することがわかっているため¹⁴⁾、規定力の大きさはレンジで表現することとする。

(3) 水準総数の決定

解析結果の信頼度を高めるためには、データの精度を高めるとともに、データ数が多ければ多いほどよいことは統計処理の原則であろう。同様に要因数、水準数も多いほど解析結果を評価するには便利であるが、これらの条件を満たすためには膨大な量のデータを必要とする。このためデータ総数の少ない場合には総水準数を規制しなければならない。この問題について難波¹⁵⁾は、経験的に水準総数をデータ総数の 1/5~1/3、小橋¹⁶⁾はデータが現地調査で得られた場合には、データ総数の 1/2 程度水準総数でよいと述べている。これらの経験的事実を踏まえて、今回は水準総数をデータ総数の 1/3 (78/3=26) 以下とした。この水準総数内にできるだけ多くの要因を解析に入れるため、1 要因の水準数は 4 以下とした。

(4) 要因間の相関

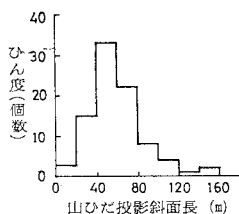
表-2 に示した 12 要因から崩壊の原因となる要因および規定力の大きさを求めるため、また限られた総水準数以内で解析するためには、同質とみなされる要因はあ

表-3 12 要因間の単純相関係数

地形 表面 形状	風化度	平均 費入量	最費 小入量	傾斜度	傾斜 変換値	植生	リニア メント	リニアメン ト占有率	流域 平均幅	形状係数	崩壊歴	要因名
1.000	-0.040	-0.068	-0.060	0.071	0.193	0.029	-0.043	0.087	0.254	0.170	-0.020	地表面形状
	1.000	-0.412	-0.265	0.299	-0.097	0.040	-0.038	0.029	-0.152	-0.076	-0.018	風化度
		1.000	0.688	-0.495	-0.097	0.018	0.079	-0.022	0.086	0.013	0.055	平均費入量
			1.000	-0.329	-0.053	-0.003	-0.050	-0.183	-0.082	-0.131	0.056	最小費入量
				1.000	-0.174	0.108	-0.314	-0.019	-0.184	-0.073	0.115	傾斜度
					1.000	0.072	0.338	0.416	0.232	0.037	0.194	傾斜変換値
						1.000	-0.101	0.029	-0.048	-0.086	0.272	植生
							1.000	0.576	0.434	0.223	-0.323	リニアメント
								1.000	0.401	0.236	-0.163	リニアメント 占有率
									1.000	0.680	0.163	流域平均幅
										1.000	-0.066	形状係数
											1.000	崩壊歴

らはじめこれを棄却する必要がある。本研究ではこの12要因でまず数量化を行い属性要因を変数要因に変換した後、各要因間の単純相関係数を求め、相関性の高い要因の一方を棄却することとした。この結果得られた単純相関係数を表一3に示す。相関係数を使用して要因を棄却するための明確な規準はこの解析法では不明であるが本研究では相関係数0.5以上の値を示した要因間においては互いに相関関係があるものと考え、これらを同質要因とみなして一方を棄却することとした。この条件を満たす要因は表一3より「平均貫入量」と「最小貫入量」、「流域平均幅」と「形状係数」、「リニアメント」と「リニアメント占有率」の3組が該当する。「平均貫入量」と「最小貫入量」で相関係数が大きくなった理由としては、山ひだ内3測点での貫入量のばらつきが小さかったためと考えられる。谷での水の作用は浸食、運搬、堆積が考えられ、それぞれの作用は上流部、中流部、下流部で卓越していると考えられているため3測点で表土層厚を求めたが、この結果より、貫入量が小さなばらつきであったということは、山ひだのような場所では、一様な営力（主として浸食力）が作用しているとみなされる。このためここでは表土層厚の局所条件を示している「最小貫入量」を用いることとし、「平均貫入量」は棄却する。「流域平均幅」と「形状係数」も大きな相関を示した。

4. にそれぞれの要因の定義を示したが、これより山ひだ投影斜面長がほぼ同じ値を示すなら、両者は高い相関を示すことが容易に推察される。図一5は、この山ひだ投影斜面長の分布を示したものであるが、40~60mに約42%も現れており、かなりまとまった分布を示していることがわかる。したがって、このために相関係数が高くなったものと考えられる。本研究では「形状係数」を採択し、「流域平均幅」を棄却する。「リニアメント」と「リニアメント占有率」も大きな相関を示しているが、リニアメントの大きさを示す「リニアメント占有率」という要因のなかには、「リニアメント」のあり、なしの結果も入っているため高い相関を示したものと考えられる。ここでは「リニアメント占有率」を棄却し、「リニアメント」を採用



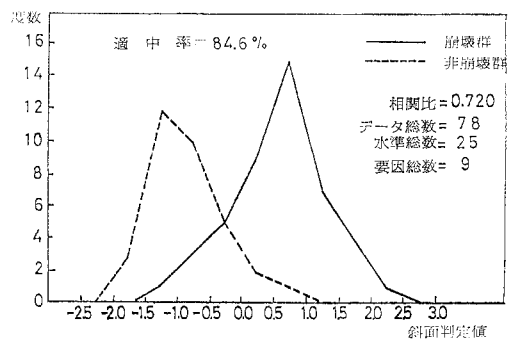
図一5 山ひだ投影斜面長の分布

した。

以上より、本研究では、12要因中3要因を棄却し、残りの9要因を崩壊に影響を及ぼす要因と設定する。この9要因の総水準数は表一2より25水準となり、この値は前節で述べた許容最大水準数26以下を満足しているため、この9要因を解析用データとした。

(5) 解析結果

以上のデータを用いて各要因の規定力の大きさを求めるため数量化Ⅱ類法で解析を行った。この結果得られた各水準の判別係数を用いて式(2)より斜面判定値を求めた。これを昭和42年の崩壊、非崩壊群別に頻度分布で



図一6 数量化Ⅱ類による判別結果

表一4 判別結果一覧表

要因名	水準	山ひだ個数			判別係数	レンジ
		崩壊群	非崩壊群	計		
地表面形状	凹	12	15	27	-0.239	0.754
	ク	5	3	8	0.515	
	な	28	15	43	0.054	
風化度	強	30	16	46	0.307	0.748
	中	15	17	32	-0.441	
最小貫入量	60 cm 未満	28	13	41	0.145	0.712
	60 cm 以上 120 cm 未満	14	17	31	-0.072	
	120 cm 以上	3	3	6	-0.567	
傾斜度	35° 未満	11	16	27	-0.642	1.207
	35° 以上 40° 未満	21	8	29	0.169	
	40° 以上	13	9	22	0.565	
傾斜変換値	-10 mm 未満	5	1	6	0.198	1.189
	-10 mm 以上 -5 mm 未満	15	2	17	0.690	
	-5 mm 以上 0 mm 未満	16	18	34	-0.072	
	0 mm 以上	9	12	21	-0.499	
植生	35% 未満	16	6	22	0.448	0.920
	35% 以上 65% 未満	20	12	32	0.047	
	65% 以上	9	15	24	-0.472	
リニアメント	あり	40	20	60	0.144	0.625
	なし	5	13	18	-0.481	
形状係数	0.15 未満	15	17	32	-0.165	0.636
	0.45 以上 0.30 未満	20	15	35	-0.024	
	0.30 以上	10	1	11	0.471	
崩壊歴	あり	21	5	26	0.319	0.479
	なし	24	28	52	-0.160	

示したものが図-6である。崩壊群、非崩壊群のピークが明瞭に2つに分かれており、良好な判別が行えたことを示している。この図における相関比は0.720であり、規準値 α_0 (図-6における崩壊群の面積と非崩壊群のそれが等しくなる点) は0.0に変換している。したがって、この図における適中率が84.6%であるということは、昭和42年の豪雨を受けた場合、9要因を用いた斜面判定値が0.0を越えれば崩壊するというを84.6%の確率で断言できることを意味している。

表-4は解析結果を各要因別に示したものである。この表には実測データもあわせて示した。表中のレンジより、崩壊に対する各要因の規定力の大きさは傾斜度、傾斜変換値、植生、地表面形状、風化度、最小貫入量、形状係数、リニアメントおよび崩壊歴の順となることが明らかとなった。図-7はこの各要因の規定力の大きさを図示したものである。この図より、傾斜度および傾斜変換値の2要因が他の要因に比して特に大きな規定力を持っていることがわかる。この結果は、従来より言及¹⁹⁾さ

れている「傾斜」の重要性の割合を初めて表わしたものである。

図-8は要因内の各水準の判別係数(危険度)を示したものである。傾斜度と最小貫入量の判別係数は直線的な分布を示していることがわかる。表土層崩壊に対しては、これらの要因は極値をもつ分布を示すものと考えられるが、これは調査対象地の傾斜度のばらつきが少なかったため、このような結果になったものと思われる。

6. 考察——要因の評価および問題点——

前章において、本研究の初期の目的である崩壊に対する要因の影響の大きさの順序を量的に明らかにしたが、ここではいくつかの要因を取り上げ解析結果より新たに判明したこと、および問題点について述べる。

解析結果より傾斜度が最大の規定力をもつ要因となることが明らかになったが、傾斜度は従来より自然斜面の崩壊では重要な要因として認識されている要因であり、今回の結果はその重要性の程度を表わし得たものである。しかし、この傾斜度は図-3で示される山ひだの平均傾斜度であり、崩壊傾斜度とか最大傾斜度を表わしたのではない。現実の山ひだの縦断面形は図-3のようになっており、この形の特徴を表わすため本研究では、傾斜変換値なる要因を新たに設定した。この識別基準については4.で述べたとおりであるが、この要因は傾斜変換量を近似的に表わそうとしたものであり、この種の研究では従来採択されていなかった要因である。結果は傾斜度につぐ規定力の大きな要因であることが判明した。従来より崩壊、特にその発生位置を支配すると考えられてきた傾斜変換¹⁷⁾は、発生位置のみならず崩壊発生の有無にも大きな影響をもつことがこの結果より明らかになった。図-8より遷急点より遷緩点の方がより危険側となることが判明したが、これはすでに小出²³⁾が別の調査結果より指摘した結論と同じ結果が得られた。図-8はまた、遷緩点においてもあまり傾斜変換値が大きくなると逆に安全となることを示している。遷緩点において傾斜変換値が大きいということは上流側の傾斜度が大きいことを意味し、六甲のようにマサ土で形成される表土層ではこのような場合、急傾斜のためあるいは表流水による表土層の浸食作用が卓越し、崩壊すべき表土層が存在し得なくなっているためと考えられる。

最小貫入量はレンジでみると9要因中第6位となった。この要因は従来の外観要因からは得られない要因で、統計処理による研究で初めて採用した要因である。これは、従来の研究にはなかった表土層の厚さという要因を表わそうとしたためであるが、規定力はあまり大きくはなかった。この原因については、(1)測点数が妥当

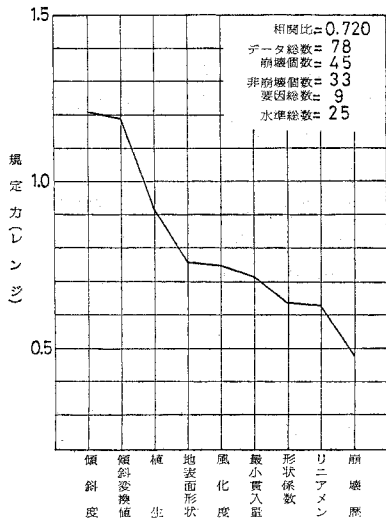


図-7 各要因の規定力の大きさ

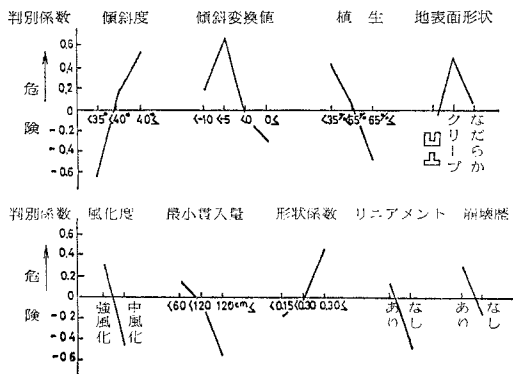


図-8 各水準の判別係数

であったか、(2) 表土層厚を示す要因としての表現法(最小貫入量)が妥当であったか、などが考えられる。自然斜面に発生する山くずれに関する表土層の厚さについては、厚さとともにこの変化も問題であることは従来より指摘されている¹⁹⁾にもかかわらず、本調査では山ひだ内で3点しか測定し得ず、このため厚さの変化が表現できなかったことが大きな問題点として考えられる。今後、この種の要因調査ではなんらかの調査手法により表土層の厚さを把握するとともにこの厚さの変化状態の表現方法についても再考する必要がある。図-8では最小貫入量が大きくなるにつれて安全側になっているが、表土層厚が厚ければ崩壊は発生しにくいことを筆者の一人は別の調査よりすでに指摘しており²⁰⁾、図-8はこの結果を表わしたものと考えられる。

植生に関しては、従来より自然斜面の崩壊には大きな影響をもつであろう²¹⁾といわれながらも量的な表現が困難であるためその評価も不明であった。しかし本研究の結果より傾斜関係の要因につく重要な要因となることが明らかになった。植生要因に関しては植生のもつ種々な特性を表現する方法として、林相、樹令、繁茂率などが考えられている²²⁾が、ここでは立木の繁茂状態を面積比で表わした。この結果、繁茂率が大きければ大きいほど安全になることが判明した。このことは植生の斜面被覆効果、根系による土壌緊縛効果が大きいことを示しているといえよう。

山ひだ内の過去の崩壊履歴として昭和42年災害以前の空中写真より過去の崩壊発生の有無を調べ崩壊歴という要因を設定した。解析結果は9要因中一番小さな規定力をもつ要因であることが判明した。従来、崩壊歴に関しては免役性の概念²³⁾があり、一度崩壊した場所は免役性のため崩壊しにくいと考えられているが、この概念はその中に時間と場所の問題を包含しており一概には論じられない。図-8の水準でみれば崩壊歴のない山ひだより、これがある山ひだの方が危険側となっている。このことは山ひだ単位で考える場合、六甲山系においては免役性がないともいえ、一度崩壊のあった山ひだでも二次崩壊の可能性があると考えられる。

7. 結 論

本研究は、六甲山系の自然斜面において豪雨に起因する崩壊の素因について統計的に研究したものである。研究方法は山ひだを解析単位と考え、各山ひだにおいて従来統計処理ではあまり考えられていない要因をも観察、測定し、昭和42年豪雨災害による崩壊を対象として、多変量解析を実施した。この結果得られた結論は以下のとおりである。

(1) 崩壊・非崩壊を判別するための要因の規定力の大きさ(影響の大きさ)は、大きいものから順に以下のとおりとなる。

傾斜度、傾斜変換値、植生、地表面形状、風化度、最小貫入量、形状係数、リニアメント、崩壊歴。

(2) 上記要因のうち特に傾斜度、傾斜変換値および植生は大きな規定力をもっている。このなかで、従来考えられておらず、今回初めて要因として採用した傾斜変換値は大きな影響力をもつことが明らかになった。

(3) 図-8より要因水準の結果は以下のとおりとなった。

- a) 傾斜が急なほど危険度は高い。ただし、表土層崩壊発生の上限值(この値以上では崩落となる)は、本研究では不明である。
- b) 傾斜変換ではゆるい遷緩点付近が一番危険となる。
- c) 立木繁茂率が低いほど危険となる。
- d) 強風化ほど危険となる。
- e) 地表面がクリープ状態を示している山ひだは危険となる。
- f) 最小貫入量が小さいほど、すなわち薄い表土層ほど危険となる。ただし、表土層崩壊発生の下限値(この値以下では崩壊しない)は、本研究では不明である。
- g) 山ひだ状態が矩形に近づくほど危険となる。
- h) リニアメントが存在する山ひだは危険となる。
- i) 過去の崩壊歴のある山ひだは危険である。

8. 結 語

本研究は崩壊に関する従来統計処理の欠陥であったいわゆる再現性に関する問題を少しでも少なくすることを意図し、このため要因選定において従来考えられていなかった要因を設定したり、識別規準の難易にとらわれず現地調査を主体として資料の収集、測定を行った。結果は良好な判別が得られ、この結果より要因の規定力の大きさについても論じることができたと考えられるが、いくつかの問題点も新たに出てきた。これらの問題点の原因、対策については本文中で論じたが、今後これらの点に注意を払う必要がある。

本研究を進めるにあたり終始ご指導をいただいた神戸大学 田中 茂名誉教授に厚く感謝の意を表します。また数々のご助言をいただいた建設省国土地理院 羽田野誠一技官、現地調査をともにした神戸市土木局 高瀬和弘氏にあわせて感謝の意を表します。なお、本研究は文部省科学研究費補助金「山腹崩壊の統計的予測に関する

る研究」の成果の一部であり、計算は京都大学大型計算機センター FACOM 230-75 により行ったことを付記します。

参 考 文 献

- 1) 村野義郎：山地崩壊に関する 2, 3 の考察，土木研究所報告，第 130 号，1967.
- 2) 持永竜一郎ほか：シラスのり面崩壊に関する要因分析，土木学会論文報告集，第 197 号，1972.
- 3) 丸安隆和ほか：都市における自然災害，土木学会論文報告集，第 159 号，1968.
- 4) 青山博次郎ほか：都市における地形災害の統計的研究——横浜市の崖崩れの分析——，統計数理研究所，研究レポート 27，1972.
- 5) 中野尊正ほか：東京山手台地におけるがけ・擁壁崩壊危険度の実態調査，土と基礎，Vol. 20, No. 2, 1972.
- 6) 難波宣士：判別解析による崩壊危険斜面の判定法と問題点，治山，No. 6, 1973.
- 7) 竹下敬司：北九州市門司・小倉地区における山地崩壊の子知とその立地解析，福岡県林業試験場，治山調査報告 I，1971.
- 8) 久保村圭助，ほか：数量化法による切取りのり面の安全度解析，土木学会論文報告集，第 194 号，1971.
- 9) 小橋澄治ほか：空中写真判読による斜面災害危険度判定法（その 2），鉄道研究所速報，No. 71—186, 1971.
- 10) 南部光広ほか：統計的手法による道路用盛土のり面の安定解析，土木学会論文報告集，第 241 号，1975.
- 11) 小橋澄治：斜面の崩壊危険度分類の問題点，地すべり，Vol. 10, No. 2, 1974.
- 12) 塚本良則ほか：侵食谷の発達様式に関する研究——0 次谷と山崩れとの関係——，新砂防，Vol. 26, No. 2, 1973.
- 13) たとえば田中 茂：昭和 42 年 7 月豪雨による崩壊斜面の基礎調査，建設工学研究所報告，第 11 号，1968. 国立防災科学技術センター：昭和 42 年 7 月豪雨災害に関する研究，防災科学技術総合研究報告，第 24 号，1970.
- 14) 安田三郎：社会統計学，丸善，1969.
- 15) 小橋澄治：切取りのり面の安定度予測法の検討，鉄道技術研究資料，31-9, 1974.
- 16) 田中 茂ほか：山くずれと地質・地形構造との関連に関する研究，文部省科学研究費自然災害特別研究成果，No. 51-A-4, 1976.
- 17) Young, A. : Slopes, Oliver & Boyd, 1972.
- 18) 田中 茂ほか：淡路島における昭和 49 年 9 月豪雨による山くずれ災害の調査研究，建設工学研究所報告，第 17 号，1975.
- 19) 渡 正亮ほか：花崗岩風化地帯におけるがけくずれについて，防災科学技術総合研究報告，第 24 号，1970.
- 20) 田中 茂ほか：斜面表層の豪雨による崩壊の発生し難い条件について，第 5 回自然災害科学総合シンポジウム論文集，1968.
- 21) たとえば難波宣士：豪雨による山地崩壊と森林の関係，施工技術，Vol. 5, No. 11, 1972.
- 22) 佐倉詔夫：森林植生と崩壊の関係，林業技術協会，がけくずれ対策技術調査書，1967.
- 23) 小出 博：山崩れ，古今書院，1955.

(1978.10.23・受付)