

数量化法による転落型落石の危険度評価

THE ANALYSIS OF BOULDER-FALL BY THE METHOD OF QUANTIFICATION AND ITS APPLICATION TO THE PREDICTION

村上幸利*・箭内寛治**

By Yukitoshi MURAKAMI and Kanji YANAI

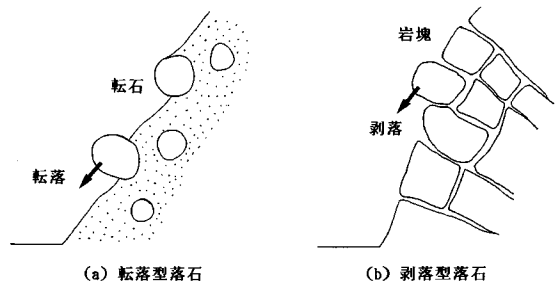
This paper is concerned with the factor analysis of a boulder-fall by the theory of quantification and the presentation of a method for evaluating the possibility of the boulder-fall on a slope. Based on the considerations about the topographical, geological and mechanical conditions related to the phenomenon of boulder-fall, detailed field investigations have been carried out on many actual slopes in Yamanashi and Nagano prefectures. The statistical analysis of the data obtained from the field investigations is conducted to grasp quantitatively the degree of the influence which each of the factors gives to the phenomenon. Moreover, on the basis of the theory of quantification, the method by which the possibility of an outbreak of boulder-fall can be estimated is presented, and its applicability is examined through comparing with observations.

Keywords : field measurements, method of quantification, slope stability, rock-fall

1. ま え が き

近年、国土開発や観光開発が進められるなかで、地形・地質条件の悪い山岳域にまで交通網が拡充されつつあり、これに伴って落石事故の多発化が心配されている。図一1に示すように、落石には、成因ならびに形態の違いから転落型落石（転石型落石ともいう）と剥落型落石（浮石型落石ともいう）に分類されるものがあるが、その落石による事故を未然に防止するためには、落石の発生が懸念される交通路沿いの斜面に落石予防工または落石防護工を施し、安全対策を図っていくことが必要とされる。代表的な対策工として、落石防止棚、落石防止網、落石防止擁壁などの設置があるが^{1),2)}、限られた予算をこのような災害防止のための設備費として、危険性の高い落石斜面から優先的に割り当てていくには、落石の危険度を定量的に評価できる手法の開発が不可欠である。落石危険度の評価法を大別すると、統計確率論に基礎を置く方法と力学的な解析に基づくものがあるが³⁾、前者の範疇に入る採点法はすでに幾人かの研究者等によって提案されている^{4)~6)}。この方法は、過去に発生した落

石事例の調査・収集に基づいて落石に関する主要因子を把握し、それに経験則を加味しながら採点基準を設定して、その得点から斜面における落石の危険度を評価しようとするものである。この評価法は簡便であって実用的な方法であると考えられるが、採点の対象とされる因子の選定や採点基準において、理論的根拠の希薄さが窺われるきらいがある。もちろん、採点法の趣旨からして、外観的にできるだけ簡易に判別できる影響因子のみに絞りこんで、それを採点の対象にすべきであろう。また、落石現象には、理論的または数量的に把握しきれない因子が関与するので、経験等をより所とした採点基準の設定が要請される面があることを認識する必要がある。しかし、採点基準の適正化を目指し、危険度評価の精度



図一1 落石の分類

* 正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木工学科
(〒400 甲府市武田4-3-11)

** 正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木工学科 (同上)

を高めていくには、理論的または定量的に吟味できる部分については、できる限りの検討を加えて、必要ならば修正を施していくことも重要である。また、採点法以外の、統計数理に立脚した評価法を追究することは、落石の危険度評価に関する手段の幅を広めるためにも肝要であると思われる。このような観点から、本論文では、すでに斜面崩壊や土石流の発生予測などに利用されている数量化理論を用いて^{7),8)}、まず転落型落石現象に関与する因子の追求と抽出およびその影響度の評価を試み、また、その分析結果を参考にして、数量化理論に基づいた転落型落石の危険度評価法を提示し、その適用性について吟味する。さらに、因子の影響度評価の結果と採点法における採点基準との対比から、因子の影響特性について若干の考察を加えることにする。

2. 数量化分析Ⅱ類

多変量解析法のうちで、質的な形で与えられる外的基準を質的な要因に基づき予測または判別する方法が数量化分析Ⅱ類である。本研究では、その数量化理論を用いて、転落型落石現象に関与する要因の分析および危険度評価の検討を行うことを目的とするので、まず理論の要点を説明しておく⁹⁾。

K 個のカテゴリーからなる外的基準と、それとの関係を調べたい各要因アイテムのカテゴリーへの反応パターンが表—1 のようなデータ形式で与えられるとする。なお、ここで使用される用語を具体的に落石問題に対応させて説明するならば、落石発生の有無が外的基準であり、転石が存在するまたは存在していた斜面の高さや傾斜角などが要因アイテムであり、また、それぞれのアイテムでの区分にあたる、たとえば斜面高さ 10 m 未満、10 m 以上 20 m 未満、20 m 以上といったものがカテゴリーに相当する。第 i 群の第 α 番目のサンプルが、各アイテムのどのカテゴリーに反応するかを表わすために、次のようなダミー変数を導入する。

表—1 数量化Ⅱ類のデータ形式

外的基準	サンプル番号	アイテム1	アイテム2	...	アイテムR
		1 2 ... C ₁	1 2 ... C ₂		1 2 ... C _R
1	1	○			○
	2		○		○
	⋮				
	n ₁	○		○	○
2	1	○	○		○
	2		○		○
	⋮				
	n ₂	○	○		○
⋮	⋮				
K	1		○		○
	2		○	○	○
	⋮				
	n _K	○	○		○

$$\delta_{i\alpha}(jk) = \begin{cases} 1 \cdots \cdots \text{第 } i \text{ 群の } \alpha \text{ 番目のサンプルがアイテム } j \text{ のカテゴリー } k \text{ に反応するとき.} \\ 0 \cdots \cdots \text{反応しないとき.} \end{cases}$$

各要因アイテム・カテゴリーへの反応に基づいて、外的基準による分類を判別したいので、いま各アイテム・カテゴリーに対応するダミー変数の線形式

$$y_{i\alpha} = \sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{C_j} a_{jk} \delta_{i\alpha}(jk)$$

を考え、これをそのサンプルの数量すなわち評点とする。ただし、 a_{jk} はアイテム j のカテゴリー k に付与される数量とする。上式により、外的基準 K 個の分類を最も良く判別するには、 K 個の群の群間変動を全変動に対して相対的に最大にするように、言い換えれば相関比を最大にするように数量 a_{jk} を定めればよいことになる。全分散を σ_T^2 、群間分散を σ_B^2 でもって表わすと、当然ながら相関比は $\eta^2 = \sigma_B^2 / \sigma_T^2$ であるから、多少の操作を施すことによって、相関比 η^2 は、

$$\eta^2 = \frac{\sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{C_j} \sum_{u=1}^R \sum_{v=1}^{C_u} b(jk, uv) a_{jk} \cdot a_{uv}}{\sum_{j=1}^R \sum_{k=1}^{C_j} \sum_{u=1}^R \sum_{v=1}^{C_u} t(jk, uv) a_{jk} \cdot a_{uv}}$$

のような 2 次形式の比となる。ただし、

$$b(jk, uv) = \sum_{i=1}^K g_i(jk) \cdot g_i(uv) / n_i - n_{jk} \cdot n_{uv} / n$$

$$t(jk, uv) = f(jk, uv) - n_{jk} \cdot n_{uv} / n$$

$$g_i(jk) = \sum_{\alpha=1}^{n_i} \delta_{i\alpha}(jk)$$

$$n_{jk} = \sum_{i=1}^K \sum_{\alpha=1}^{n_i} \delta_{i\alpha}(jk)$$

$$f(jk, uv) = \sum_{i=1}^K \sum_{\alpha=1}^{n_i} \delta_{i\alpha}(jk) \cdot \delta_{i\alpha}(uv)$$

n_i : 外的基準 i に該当するサンプル数

n : 全サンプル数

ところが、各サンプルがおのおのの要因アイテムに対して、必ず 1 つだけのカテゴリーに反応するものと考えると、各アイテム内のカテゴリーに対応するダミー変数の間に

$$\sum_{k=1}^{C_j} \delta_{i\alpha}(jk) = 1 \quad (\text{任意の } i, j, \alpha \text{ に対して})$$

のような 1 次従属性が成り立ち、上式の η^2 を最大にする a_{jk} の値は、一意的には決定しない。このような不定性を除くためには、 $a_{j1} = 0$ のような標準化を行えばよい。 η^2 を最大にするような a_{jk} を求めるために、 η^2 を a_{uv} で偏微分して 0 とおくと、

$$\sum_{j=1}^R \sum_{k=2}^{C_j} \{ b(jk, uv) - \eta^2 t(jk, uv) \} a_{jk} = 0 \quad (u=1, \dots, R, v=2, \dots, C_u)$$

これを行列を用いて表現すると、

$$(B - \eta^2 T) A = 0$$

ただし、 $B=[b(jk, uv)]$, $T=[t(jk, uv)]$, $A=[a_{jk}]$ である。

B と T は、それぞれダミー変数 $\delta_{ia}(jk)$ のベクトルの群間および全体の偏差平方和積和行列である。これによって、最大固有値 η^2 に対する固有ベクトルとして、求めるべきカテゴリウエイト a_{jk} を得る。なお、この結果に基づき、 a_{jk} を $\sum_{k=1}^{Cl} n_{jk}a_{jk}=0$ となるように標準化して、すなわちアイテム j 内のカテゴリに付与する数量の平均値が零になるように書き改める場合が多い。また、外的基準の各カテゴリに与える数量としては、上記の a_{jk} の値を用いて各サンプルの評点を求め、カテゴリのおのおのについてのその平均値を利用すればよい。

外的基準に対する各アイテムの寄与の程度を評価する測度としては、数量化された外的基準と数量化された要因アイテムとの間の偏相関係数、あるいは各アイテム内のカテゴリに付与された数量 a_{jk} の範囲(レンジという)が用いられることになる。

3. 標本調査

データ収集のための標本調査を実施していくうえで、その調査項目や手法、あるいは測定精度が、数量化分析を通して転落型落石現象の理解や解明に有効なものになるよう配慮しなければならないことはいうまでもない。そのためには、転落型落石がいかなる地形・地質条件のところで発生する、どのような現象であるのかという基本的な認識がまず必要である。たとえば、落石問題を扱った一文献では、「転落型落石は、表層土や固結度の低い土層中に含まれている玉石、礫、岩塊などが、地表水の侵食、地下水の浸透、地中侵食によって、表面に浮き出し、周辺の土が軟弱化し、バランスを失って落ちる現象で、降雨水、融雪水によることが多い。」と説明されている⁴⁾。また、この型の落石は、火山泥流層、二次堆積ローム層、崖錐、段丘礫層あるいは風化花崗岩帯で代表されるような、巨礫や転石が土砂中に介在する地質の斜面部において多く発生するという事実がある¹⁰⁾。そこでまず、本研究においては、このような基本的認識を踏まえながら、調査の対象斜面を粘性土斜面および砂質土斜面それぞれの代表として考えられる「二次堆積性のローム斜面」ならびに花崗岩質岩石の風化斜面である「まさ斜面」に限定することとした。具体的には、無作為に抽

表—3 落石調査結果の整理表の例(ローム斜面)

	落石		斜面高			斜面傾斜角	
	有	無	5m未満	5~10m	10m以上	30°未満	30°~40°以上
落石	60	0	10	40	10	0	32
斜	68	0	12	44	12	0	36
5m未満			22	0	0	0	4
5~10m				84	0	0	28
10m以上					22	0	14
30°未満						0	0
30°~40°							60
40°以上							68

出した山梨県内および長野県南佐久地方における合計19か所の切土斜面または自然斜面であって、斜面内に露出している直径が20 cmから1 m程度の玉石状の転石98個および転石と斜面の状態変化を追跡する調査の中で落下を確認した転石78個それぞれを標本として採用した。調査項目は表—2に示すような12種のアイテムである。これらは、落石現象と直接的な関係をもつ斜面と転石それぞれの物理的要素、転石と斜面の物理的相互関係、さらに降雨、侵食作用あるいは凍結融解作用などに関連する斜面の微地形や地質特性を考慮しながら、しかも比較的簡易に判別または測定できる因子として選定したものである。このうち、標本転石の根入れ角については、その転石を掘り出し、斜面内に存在していた状態との比較でもって角度を測定した。なお、落下転石の場合は、その測定が比較的容易であることはいうまでもない。

ここで問題となるのは、落石が頻繁に発生する現象ではないということと、斜面から落下した転石については、落石前における斜面と転石との物理的関係を調査時点での状況などから推定しなければならないことである。したがって、特に落下転石に関する因子の諸量をとらえるためには、降雨後に重点を置き、しかも長期間にわたって継続的に調査を進める方法が有効であると考えられたので、約2年間にわたって、日雨量10 mm程度以上の降雨(甲府で年間約35日)があった後を中心にくつかの実斜面を見回るような方式の調査法を採用した。調査から得られた結果を整理し、まとめたものの一部を表—3に示しておく。

ところで、測定には「ものさし」が不可欠であり、さらにそれに付随して尺度点や目盛り間隔の設定が必要となる。このような「ものさし」あるいは目盛り間隔と数量化分析における要因アイテムのカテゴリ区分との間には、直接的に強い関連性がある、しかもその区分設定の仕方が解析結果に相当な影響を及ぼすことが知られている¹¹⁾。したがって、解析結果に生じる誤差を最小にするためにはカテゴリ区分の設定、すなわち測定時に

表—2 調査の対象とした要因アイテム

斜面に関する因子	斜面傾斜角、転石付近の傾斜角、斜面高さ、湧水状況、植生状況、斜面縦断形状、斜面肌・土の風化状態、土の強度
転石に関する因子	岩質、形状、根入れ角・根入れ深さ、大きさ

おける目盛り間隔の吟味等が重要な問題となる。しかし、現時点においては、一般的にこの問題に対する適正な答えを与えることはできないとされている。このため、本研究においても、要因アイテムあるいはカテゴリー区分の適正化に関して随時に検討を行っているものの、基本的には、上記の理由から生じる解析上の誤差や精度が多少なりとも含まれることを念頭に入れておかねばならない。

4. 数量化分析結果および考察

数量化Ⅱ類の理論を用いて、現地調査から得られたデータの統計分析を行った。その結果を表一4に示す。要因アイテム j 中のカテゴリー k に付与される数量 a_{jk} は、落石発生の有無を数量的に表わす評点に直接的な影響をもつ。したがって、たとえば要因アイテム j に着目するというならば、数量 a_{jk} (j は固定) の最大値と最小値の差によって定義されるレンジ (これを範囲ともいう) は、要因 j が落石発生に関与する程度を表わす測度として扱える。また、統計理論が教えるところから、落石に関する数量化された外的基準と各要因アイテムとの偏相関係数が、落石発生に及ぼす各因子の影響の程度を表わす測度となり、その値が1に近いほど影響の程度が大きいと評価される。ところで、この2種の測度を比較してみると、分析に採用される因子の数によって、各因子についてのレンジが大きく変動するのに対して、偏相関係数は0と1の間の正規化された値をとるので、因子の影響程度を客観的に評価する場合には、後者の測度の方が有効であるように考えられる。

表一4に示される分析結果をみると、2つの測度であるレンジと偏相関係数の相関性が、ローム斜面での「転石まわりの植生状況」、まさ斜面での「転石の岩質」と「斜面の縦断形状」の因子において、若干低いようであるが、全体的には両者の測度の相関性は高いものと判断される。いま、これらの測度に焦点を置いて表一4を眺めてみると、ローム斜面とまさ斜面とでは、落石に強く関与する要因が一部異なっている様子が認められる。すなわち、ローム斜面では、転石の根入れ角を始めとして、転石の形状、転石まわりの斜面勾配などが主要因子であって、全体的には転石と斜面土との間の物理性や力学的に関係する因子が支配的であるが、斜面の縦断形状や転石まわりの植生状況のように降雨水の作用に間接的に関係する因子も決して見逃せない重要な要因であることがわかる。一方、まさ斜面では、転石の根入れ角や岩質などといった転石と斜面との物理的関係についての因子とともに、斜面の縦断形状やその傾斜角、あるいは斜面の高さのように斜面全体に関する因子が強く影響する状況が窺われる。この影響因子に関する差異は、両斜面におけ

る転落型落石の発生機構の違いが一部反映されているためによるものとも推測されるが、詳細については今後の検討に待たねばならない¹²⁾。

転落型落石の発生機構を考慮した力学的解析においては、基本的には転石の根入れ角または根入れ深さ、転石の大きさと単位体積重量、斜面傾斜角、および斜面土と転石の間に働くせん断抵抗が、主要な素因として扱われている¹²⁾。これらの素因と要因分析から得られた主要因

表一4 数量化分析結果

ローム斜面					
アイテム	カテゴリー	度数	数量 a_{jk}	レンジ	偏相関係数
転石根入れ角	70°以上	58	-1.16	3.17	0.704
	50°~70°	42	0.27		
	50°未満	28	2.01		
斜面縦断形状	直線型	42	-0.97	2.44	0.411
	凹型	68	0.21		
	凸型	18	1.47		
転石周辺の植生状況	樹木	2	-1.82	2.13	0.220
	裸地	112	-0.01		
	草地	14	0.31		
転石の形状	角張っている	66	-0.83	1.71	0.471
	丸い	62	0.88		
転石周辺の斜面傾斜角	30°~40°	40	0.03	1.75	0.289
	40°~50°	54	-0.17		
	50°~60°	30	0.05		
	60°以上	4	1.58		
斜面高さ	5m未満	22	1.32	1.65	0.339
	5m~10m	84	-0.34		
	10m以上	22	-0.02		
湧水状態	乾燥	24	-1.01	1.25	0.235
	湿潤	104	0.23		
斜面傾斜角	30°~40°	60	0.61	1.15	0.266
	40°以上	68	-0.54		
転石の直径	30cm未満	82	-0.25	0.69	0.270
	30cm以上	46	0.44		
転石岩質	安山岩質	52	-0.29	0.64	0.149
	凝灰岩質	42	0.08		
	ホルンフェルス	34	0.35		
斜面土の強度	強い	62	0.06	0.33	0.089
	中位	32	0.12		
	弱い	34	-0.21		

まさ斜面					
アイテム	カテゴリー	度数	数量 a_{jk}	レンジ	偏相関係数
転石根入れ角	70°以上	26	-0.86	2.40	0.902
	50°~70°	10	0.37		
	50°未満	12	1.55		
転石の岩質	安山岩質	2	-1.96	2.65	0.672
	花崗・閃緑岩質	32	-0.18		
	ホルンフェルス	14	0.69		
斜面縦断形状	直線型	22	-0.99	2.32	0.483
	凹型	20	0.69		
	凸型	6	1.33		
斜面傾斜角	30°~40°	20	1.31	2.24	0.603
	40°以上	28	-0.93		
斜面高さ	5m未満	14	1.09	1.58	0.597
	5m~10m	32	-0.49		
	10m以上	2	0.17		
老化・風化状態	中位	44	-0.12	1.39	0.529
	著しい	4	1.27		
転石周辺の斜面傾斜角	30°未満	2	-0.77	1.31	0.554
	30°~45°	18	-0.76		
	45°以上	28	0.54		
転石周辺の植生状況	裸地	40	-0.17	1.03	0.441
	草地	8	0.85		
転石の直径	30cm未満	20	-0.07	0.29	0.128
	30~40cm	22	0.11		
	40cm以上	6	-0.17		
転石の形状	角張っている	22	0.10	0.18	0.137
	丸い	26	-0.08		

表一五 力学解析と統計分析で扱われる因子の比較

力学解析での因子	程度	統計分析での因子	
		ローム斜面	まさ斜面
転石の根入れ角	強い因子	○ 転石の根入れ角 ○ 斜面の縦断形状 ○ 転石の形状	○ 転石の根入れ角 ○ 転石の岩質 ○ 斜面の縦断形状 ○ 斜面の傾斜角
		○ 転石周辺の傾斜角 ○ 転石の形状(球状または円柱状=一定)	○ 斜面高さ ○ 老化・風化状態 ○ 転石周辺の傾斜角 ○ 転石周辺の状況
転石の直径	弱い因子	○ 転石周辺の状況	○ 転石の直径 ○ 転石の形状
斜面土と転石との間のせん断抵抗		○ 斜面傾斜角 ○ 転石の直径 ○ 湧水状態 ○ 転石の岩質 ○ 斜面土の強度	

注) ○ 力学解析での因子と対応性が認められる因子

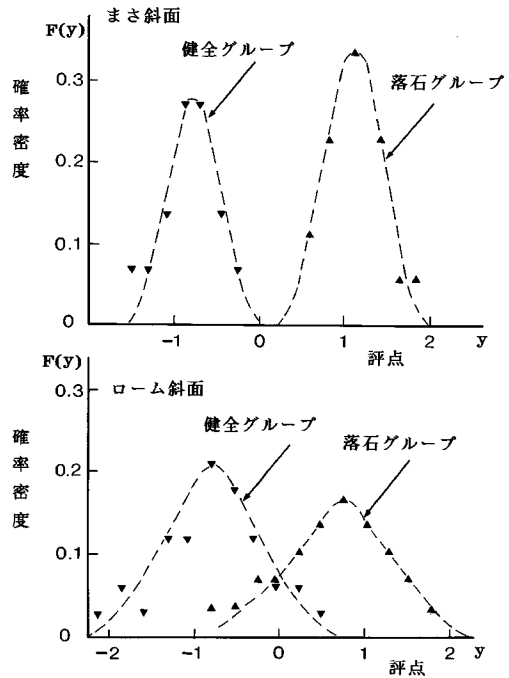
子とを比較・対照してみると、表一五に示すように、転石の根入れ角と転石付近の斜面傾斜角との2因子において特に強い対応関係が認められる。対応性が認められない主要因子としては、斜面の縦断形状、斜面高さ、転石まわりの植生状況が挙げられる。これらは降雨およびそれに伴う表流水の作用と関連性の深い因子であるが、落石に及ぼす影響の程度は大きく、力学的見地から行われる落石の危険度評価においても、なんらかの形で考慮されなければならない因子であると位置づけられる³⁾。

5. 落石危険度評価の試み

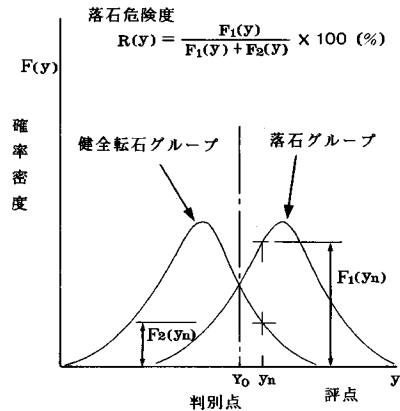
前述した統計分析結果に基づき、斜面内に存在する転石を対象とした、採点法とは異なる落石危険度評価法を提案し、その適用性について検討を加える。

(1) 落石発生危険度の評価法

数量化法とは、相関比 η^2 が最大になるように、各アイテム・カテゴリーに付与される数量 a_{jk} を決定することによって、そのときの外的基準に対する各要因の影響の大きさを評価しようとする方法である。ここで扱っている落石問題においては、このような数量 a_{jk} の決定は、斜面内に健全に存在する転石グループがもつ評点の確率分布と落石グループがもつ評点の確率分布の較差を最大にするような数量 a_{jk} を定めることにほかならない。表一四に示されるような各要因アイテム・カテゴリーに関する数量 a_{jk} を使用することによって、健全転石グループと落石グループそれぞれに所属する各転石について、調査結果に基づいた評点を算定することができる。調査したローム斜面とまさ斜面について、正規分布で近似した各グループの確率密度曲線を図一2に示す。この図は、落石判別図として防災工学上重要な意味をもつものである。しかし、統計分析の対象としたローム斜面のように両者のグループに関する分布曲線が重複する場合は、誤判別される可能性をもち、その取り扱いには十分な注意を要する。この問題を定量的に扱う一手法として、



図一2 数量化分析から得られた各グループの確率密度曲線



図一3 落石危険度の定義

以下のように定義される落石危険度を導入する考え方がある¹³⁾。すなわち、任意の転石の評点 y_n に対して、落石危険度 $R(y_n)$ は、 y_n における落石グループおよび健全転石グループの確率密度の和 $\{F_1(y_n) + F_2(y_n)\}$ に対する y_n における落石グループの確率密度 $F_1(y_n)$ の割合として定義される (図一3を参照のこと)。すなわち、

$$R(y_n) = [F_1(y_n) / \{F_1(y_n) + F_2(y_n)\}] \times 100(\%)$$

このように定義される落石の発生危険度 R を採用することによって、斜面に点在する転石が落石する可能性を定量的に評価することができる。さらにこれを拡張して、斜面を対象とした落石の危険度評価は、その斜面に

存在する転石の落石発生危険度の分布状態に関する統計的な扱いによってとらえることができる。

なお、今回調査した「まさ斜面」のように落石グループと健全転石グループの確率密度曲線が完全に分離する場合には、このような落石危険度の導入は不必要であることはいうまでもない。

(2) 適用性に関する検討

統計分析の対象としなかった落石斜面に対して、上記の考え方に基づく危険度評価法の適用を試みた。そのうち、茅ヶ岳山麓を走る道路沿いの斜面を対象とした調査結果に基づき、調査期間内で実際に落石の確認をみた4個の転石についての、落石前に算定した落石危険度を表一6に示す。これを見ると、3個の転石の落石発生危険度は50%以上となっている反面、他の1個については、危険度が50%未満の値をもつ結果となった。この算定結果に対しては、いろいろな理由が考えられるが、危険度が大きく評価されるような転石は、すでに落石してしまっている可能性が高く、斜面に健全する転石の落石危険度は比較的小さいのが一般的であるという推測が成り立つこと、実際には降雨などの誘因が落石にかなりの影響を及ぼすにもかかわらず、この評価法では地形・地質的要素あるいは力学的要因といった「素因」を中心に扱っているために、降雨などの直接的誘因が十分に取込まれていない弱点が影響していることを挙げ得る。なお、算定された落石危険度が50%未満に算定された転石が実際には落石したという現実を考えると、ここで試みた落石危険度評価の予測精度については、まだまだ不十分さが残っているとみるべきであろう。

6. 採点法との比較

数量化分析結果と採点法での採点基準とを比較・検討することでもって、落石の危険度を評価するうえで必要な影響因子の選択ならびにその重み付けについて再吟味することができる。さらに、その結果を踏まえて、採点法と本文中で示した落石危険度評価法との相対的關係について検討することが可能になる。ここでは、この2つの問題について考える。

要因アイテムごとに算定された数量 a_{jk} のレンジは、各要因が落石に及ぼす影響の度合を表わす指標になることから、採点法での採点基準との間にはある一定の関連

性が存在するものと考えられる。すなわち、図一2に示すように、外的基準の評点が大きいほど落石の可能性は高まるわけであるから、 a_{jk} の値およびそのレンジを参考にして、因子の影響特性についての把握および採点法での採点基準に相当する各因子の重み付けが可能になる。しかし、前述したように、 a_{jk} のレンジは分析に用いられる要因アイテム数によって大きく変動するという問題を抱える。一方、偏相関係数は0と1の間の正規化された値をとるので、因子の影響程度を客観的に評価する場合にはレンジよりも有用性がある。したがって、両者の測度、特に偏相関係数をより所としながら、因子の影響程度と採点法での採点基準との対比を行ってみた。それを表一7に示す。いうまでもなく、数量化分析の結果には、誘因あるいは数値的評価が不可能であるような要因は除外されているので、採点基準との厳密な対応関係について議論することはできない。しかし、関係がみられる因子については、おおむね次のようなことが明らかにされる。すなわち、

a) 斜面傾斜角

採点法の基準では、斜面の傾斜角すなわち斜面勾配が大きいほど落石の危険性が高いとされている。数量化法によると、転石付近の斜面傾斜角に対しては同様な特性がみられる。しかしながら、斜面全体についての勾配では、傾斜角が40度以上よりも30度以上40度未満の斜面において落石が起こりやすく、むしろ異なった傾向が認められる。これが収集したデータの性質によるものなのか、普遍的にいえることなのか現段階においては何ともいえない。ただし、転落型落石の発生件数と斜面傾斜角の間に同様な傾向が存在することを示した文献が別途にみられることを付記しておく⁴⁾。なお、力学的観点からみた場合には、落石に影響する因子としての斜面傾斜角は、斜面全体についてのもより、転石周辺の斜面傾斜角に重点を置いて考えるべきであろう。この因子の影響度は中位程度である。

b) 斜面高さ

採点法の基準では、斜面高さは影響因子として全く考慮されないか、あるいは斜面高さが大きいほど落石の可能性が高まるとみられている。一方、数量化分析の結果では、5~10mの斜面高さで最も落石が発生しにくく、ついで10m以上、5m未満の順に落石の可能性が高くなっている。しかし、現段階でのデータ数やそのばらつきなどを考えると、両者間の関連性はまだ明確にはわからないというべきであろう。影響因子としては、中位にランクされる程度に重要である。

c) 湧水状態

採点法の基準では、湿潤なほど落石が起こりやすいとしている。数量化分析結果では、ローム斜面について、

表一6 落石の発生前後における転石の評点

	落石前の調査による評点		落石後の調査による評点	
	評点	危険度	評点	危険度
転石1	0.388	80%	2.307	100%
転石2	0.119	55%	1.610	100%
転石3	0.641	95%	2.276	100%
転石4	-0.359	25%	1.275	100%

注) 判別点 = 0.115

表一七 採点法における採点基準と数量化分析結果の比較

要因	採点法			数量化分析結果	
	日本道路公団 ^{*)}	池田・小橋 ^{*)}	箭内 ^{*)}	ローム斜面	まさ斜面
斜面傾斜角	30度未満 0	45度未満 0	30度未満 0	斜面全体について	
	30~40度 2	45度以上 5	30~45度 2	45度以上より30度~45度の傾斜角のほうが落石が発生しやすい。	
	40~45度 4		45度以上 4	転石付近について	
	45度以上 6			傾斜角が大ほど落石しやすい。	
				(中位の因子)	(強い因子)
斜面高さ	考慮されず	考慮されず	10m未満 2	高さが5m未満>10m以上>5m~10mの順に落石が起こりやすいようである。	
			10~20m 4	(中位の因子)	
			20m以上 6		
湧水状況	考慮されず	湧水なし 0 湧水あり 5	湧水なし 0 湧水あり 4	湿潤>乾燥の順に落石しやすい。	調査項目とせず
植生状況	繁茂 0	良 -1 0	繁茂 2	草まばら>裸地>	草まばら>裸地の順に落石しやすい。
	まばら 2	不良 0	まばら 4	>繁茂(木)の順に落石しやすい。	(弱い因子)
	裸地 4		裸地 6		(中位の因子)
集水状況・斜面の縦断形状	両者の因子について、状況により、0~4点	集水・小 0 集水・中 5 集水・大 10	直線状 0 ↓ 凸凹あり 4	凸型>凹型>直線型の順に落石が発生しやすい。	(強い因子)
地質・風化状態	状況によって、0~10点の配点	状況によって、-15点から20点まで配点極めて重要な因子としての扱い。	状況によって、0~10点の配点	風化状態は調査項目とせず。転石の岩質は、ホルンフェルス>凝灰岩質>安山岩の順に落石しやすい。	老化・風化が著しいほど、落石しやすい。(中位の因子) 転石の岩質については、ローム斜面とほぼ同じ特性。(強い因子)
斜面の強度	考慮されず	考慮されず	強い 2 ↓ 弱い 10	土の強度は小さいほうが落石しやすい。(弱い因子)	測定不可能
転石の形状	扁平状 0 ↓ 球状 4	考慮されず	考慮されず	角ばった石より丸い石のほうが落石しやすい。	(強い因子) (弱い因子)
転石の根入れ	状況によって、0~20点の配点	考慮されず	考慮されず	根入れ角が小さいほど落石しやすい。	(極めて強い因子)
転石の大きさ	一部、落石エネルギーの因子に間接的に取り入れられている。	考慮されず	考慮されず	大きいほど落石しやすい。(弱い因子)	半径15~20cm >15cm未満 >20cm以上の順に落石しやすい。(弱い因子)

同様な傾向が窺われる。因子としての影響度は小さい。

d) 植生状況

採点法の基準では、裸地斜面で落石が最も発生しやすく、植生が繁茂しているほど落石しにくいとしている。数量化分析の結果では、植生が繁茂する斜面で落石しにくいことは同じであるが、裸地より植生がまばらに茂っている斜面で落石の発生度合が大きくなっており、その傾向は若干異なっている。その理由については、現時点においては不明である。転石まわりの植生状況は、一般に落石に大に関係する因子として考える必要がある。

e) 斜面の縦断形状

採点法の基準では、直線形状が最も落石の発生が小さく、

形状が複雑であるか、あるいは集水しやすいものになるに従って、落石が起こりやすいとされている。数量化法の結果においても同様な傾向があり、直線型、凹型、凸型の順に落石が起こりやすくなっている。この因子は、落石に大に関係する重要な要因として位置付けられるものになっている。

f) 老化・風化状態

採点法の基準では、老化あるいは風化しているほど落石の危険性が高いとしている。数量化法の分析結果からは、まさ斜面で同様な傾向が認められるが、ローム斜面では、この因子自体が落石にはほとんど影響しないものになっている。

9) 土の強度

採点法の基準では、斜面土の強度が小さいほど落石の危険性が高い。しかし、数量化法による場合、ローム斜面では同様な傾向が認められるものの、ほとんど影響力のない因子になっている。また、まさ斜面では、土の強度の測定自体がきわめて難しい問題となっており、要因アイテムとして組み込めなかった。

一般的に、以上のような相関関係があると考えられる。しかし、ここで注意しなければならないことは、文献6)で示される採点法以外の採点法では全く考慮されていない「転石の根入れ角・根入れ深さ」が、数量化法による分析結果においては、ローム斜面およびまさ斜面の両者ともに、落石に最も大きい影響を及ぼす因子になっていることである。文献6)においては、この因子を転石の安定状態に強くかかわる重要な因子として位置づけているが、このことは力学的にみても当然のことであり、くしくも統計分析結果はこの事実を証明するものとなっている。また、ローム斜面については、やはり文献6)で提案されている採点法以外の採点法では一般に扱われていない転石の形状も重要な因子になっている。さらに、斜面の土質によっては転石の大きさや岩質も影響因子として扱われなければならない分析結果になった。一方、採点法では採点の対象にされている地域性、落石履歴、防護施設が、本研究では因子としてまだ取り入れられる段階に達していない状況にある。このように採点法と数量化分析結果の間で生じる差異については、採点法の基準が主として落石斜面全体をとらえた外観的な目視を中心とした調査結果に基づくものであるのに対して、数量化分析の方は個々の転石を中心にして、その物理性を重視して収集されたデータに基づいているからであるといえよう。なお、力学的見地から考えた場合にはその結果は明白であるが、転石の根入れ状態や転石付近の斜面傾斜角といった力学的な因子を全く無視した危険度判別で

は、表一8に示されるように、その結果に良い成績を残すことはできないといえる。ところで、地域性や落石履歴などの他因子を数量化分析に考慮できる状況は、今後のデータの集積によって、展開できることを付記しておく。

さて、ここで改めて注意しなければならないことは、数量化法によって得られる結果が、用いられたデータまたはその質によって大きく左右されることである。すなわち、データが収集された落石斜面と同質の斜面の落石に関しては、数量化分析の結果を用いることのでかなり有効な危険度判別が可能になろうが、異質の斜面については、全く意味をなさないという弱点をもつ。ここに、過去の落石事例を総合的にとらえて定められた従来の採点法における基準と数量化法による結果との比較を短絡的に行うことや即座の結論を誘導することはできない理由がある。しかし、この認識を踏まえながら、両者の方法でもって、実際のローム斜面の落石危険度判定をあえて試みた。試算結果は表一9に示すとおりである。なお、使用したデータは、数量化法による危険度判別の適用性を調べるのに用いたものと全く同じものである。採点法には箭内が提案するものを用い⁵⁾、防護施設についての採点はあえて除外してあるが、両者の方法による落石危険度評価の結果には、ほぼ共通した傾向が認められる。

7. 結 論

本研究では、落石斜面を対象とした現地調査を実施し、収集したデータの数量化分析から、転落型落石現象に関与する因子の抽出とその影響度の究明を試み、さらに数理統計的手法に基づく1つの落石危険度評価法を提案した。得られた結論を要約して以下に示す。

(1) 数量化分析によって、転落型落石に関与する因子の抽出ならびにその影響度合の定量的な把握ができた。特に、一部の採点法では扱われていない転石の根入れ状態に関する因子が落石の発生と深く関係するものであることが判明した。

(2) 数量化法に基づく転落型落石の危険度評価法の提案を行った。これは採点法とは異なった手法として位置づけられ、今後の発展が期待できる。

(3) 数量化分析から得られた因子群の影響特性と既発表の採点法における採点基準との関連性が明らかになった。

(4) 転落型落石の発生機構からとらえられる力学的な因子に加えて、斜面の縦断形状、斜面高さ、転石まわりの状況といった因子が落石に深く関与するものであることが、現場調査に基づくデータの統計分析結果から判明した。

(5) ローム斜面とまさ斜面とでは、落石に影響する

表一8 危険度評価に用いられる因子と分析結果での重相関係数および誤判別率の関係(ローム斜面)

危険度判別に用いた因子	重相関係数	誤判別率
11ヶの因子全部	0.734	17.2%
影響度上位10ヶの因子	0.728	17.2%
力学的因子のみを使用	0.594	17.2%
力学的因子のみを除外	0.180	43.8%

注) 力学的因子とは、転石の根入れ角、直径、岩質、転石付近の斜面傾斜角、斜面土の強度の5因子

表一9 採点法による得点との比較

	数量化法による危険度評価	採点法による得点
転石1	80%	28点
転石2	55%	28点
転石3	95%	25点
転石4	25%	15点

因子の種類やその影響程度が若干異なる。これは両斜面における転落型落石現象の発生機構の違いが一部反映されているためと推定される。

本研究では意識的に除外した降雨あるいは凍結融解作用といった因子が、落石の重要な誘因であると考えられるので、今後は、これらを十分に考慮した統計分析ならびに危険度判別法を展開していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 高速道路調査会：落石防護施設の設置に関する調査研究報告書，pp.71～107，1974.
- 2) 落石対策の研究委員会：落石対策の手引（改訂版），日本国有鉄道・施設局土木課，pp.48～148，1978.
- 3) 村上幸利・箭内寛治：転落型落石の危険度評価法について，土質工学会論文報告集，第28巻，第3号，pp.197～203，1988.
- 4) 池田和彦・小橋澄治：地形・地質からみた落石の傾向と発生予測，施工技術，第6巻，第8号，pp.17～21，1973.
- 5) 箭内寛治：落石の調査と対策，地質と調査，第33号，pp.38～46，1987.
- 6) 前掲1)，pp.59～70.
- 7) 久保村圭助・武井昌博：数量化法による切取り面の安全度解析，土木学会論文報告集，第194号，pp.141～150，1971.
- 8) たとえば，望月利男・松田馨余・花井徳實：昭和57年7月23日の長崎豪雨災害における土石流・斜面崩壊の発生に関する判別解析，第21回自然災害科学総合シンポジウム講演要旨集，pp.417～420，1984.
- 9) たとえば，田中 豊・脇本和昌：多変量統計解析法，現代数学社，pp.151～160，1983.
- 10) 小橋澄治：斜面安定，鹿島出版会，pp.16，1975.
- 11) 林知己夫：データ解析の考え方，東洋経済新報社，1977.
- 12) 村上幸利・箭内寛治：転落型落石の発生機構に関する基礎的研究，土質工学会論文報告集，第27巻，第1号，pp.109～116，1987.
- 13) 平田登基男・榎木 武，藤本繁雄：土石流発生危険度判定法の一提案と適用，土木学会第41回年次学術講演会講演概要集，pp.601～602，1986.

(1988.10.14・受付)