

# 豪雨時における切土のり面の崩壊誘因評価と崩壊・未崩壊の判別について

西 邦正\*・古川浩平\*\*・小川 健\*\*\*・  
中川浩二\*\*\*\*

本研究では供用中豪雨により崩壊した切土のり面を対象とし、筆者らがすでに提案したのり面評価要因に時間要因と降雨要因を加え、崩壊・未崩壊の判別システムについて構築方法を提案している。分析に用いたデータは、3岩種（変成岩、堆積岩、火成岩）の地山に建設されたのり面より収集した。これより豪雨時ののり面崩壊に及ぼす影響因子を明らかにするとともに、崩壊予測を行う上での課題について検討している。

**Key Words** : cut-off slope failure, heavy rain, indigenous factors, multivariate analysis

## 1. はじめに

筆者らは、切土のり面の安定性評価について専門技術者の定性的主観を定量的かつ客観的に評価し得るファジ理論を応用し、得られたファジ係数およびファジシステムの出力結果より、切土のり面の崩壊要因の評価および崩壊規模の予測を行う手法を提案している<sup>1)</sup>。しかし、この手法では「どのような要因」によって「どのような規模」の崩壊が起こるのかを予測することができても、「どのような降雨が崩壊発生の引き金となるのか」については明らかではない。

ところが、現実に切土のり面の崩壊の多くは降雨時に生じており、場合によっては交通障害を引き起こすなどの災害が発生している。また、供用中豪雨時に崩壊が発生した切土のり面について過去の降雨データ<sup>2)</sup>を収集して検討したところ、崩壊発生時よりもさらに多い降水量を供用開始後から経験しているにも関わらず、その時まで崩壊を免れてきたのり面が多数存在することが分かった。そのために、降雨データのみで切土のり面の崩壊を引き起こした降雨（以下、危険降雨と言う）を分析・評価することには限界があると考えられる。したがって、個々ののり面状況に応じた防災管理を行うためには、のり面の安定性が評価できる要因と降雨に関する要因を同時に取り扱う必要があり、のり面崩壊を引き起こした豪雨の特性を把握した上で、のり面崩壊に影響を及ぼす因子を明らかにすることが重要であると考えられる。

以上のことより本研究は、のり面評価要因（地形要因、

地質要因、土工要因）、時間要因（供用開始後の経過期間）および降雨要因（累積降水量、一時間最大降水量、降雨継続時間、降雨パターン）をアイテムとして採用し、危険降雨の崩壊誘因評価および判別を行うものである。

## 2. のり面崩壊要因と降雨特性

ここでは、先に示した変成岩地山<sup>1)</sup>に加えて堆積岩と火成岩の各地山に対して構築したファジシステム<sup>3)</sup>から、崩壊要因および崩壊可能性の評価結果について概説する。それに続いて、崩壊を引き起こした降雨の特性と降水量から崩壊予測を行う上での問題点について述べる。

崩壊要因および崩壊可能性の評価を行うために使用した資料は、高速道路の調査、設計、施工および管理に携わる専門技術者が、供用中豪雨時にのり面に変状が生じた際の現地調査結果に基づいて記述した定性的・主観的表現によるのり面調査資料である。これより、ファジシステムを構築するために抽出したのり面数は変成岩地山：23個、堆積岩地山：23個、火成岩地山：15個である。

入力をのり面評価表<sup>1)</sup>を用いて作成した評価ランク、出力を予測崩壊形態の崩壊ランクとしたファジシステムの同定結果を式（1）、式（2）、式（3）に示す<sup>3)</sup>。

### ① 変成岩（黒色片岩）地山

$$Y = (0.14, 0.00)X_A + (0.11, 0.00)X_E \\ + (0.10, 0.00)X_F + (0.15, 0.00)X_G \\ + (0.30, 0.20)X_H + (0.10, 0.08)X_I \dots \dots \dots (1)$$

### ② 堆積岩（砂岩・頁岩）地山

$$Y = (0.00, 0.07)X_C + (0.53, 0.00)X_E \\ + (0.17, 0.00)X_G + (0.21, 0.18)X_I \\ + (0.00, 0.03)X_J \dots \dots \dots (2)$$

### ③ 火成岩（花崗岩）地山

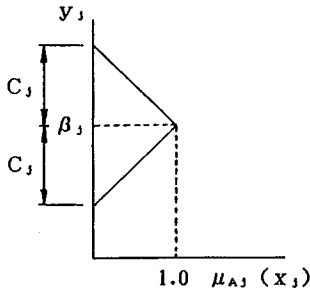
\* 正会員 工修 復建調査設計（株）技術研究所 主任研究員

（〒732 広島市東区光町 2-10-11）

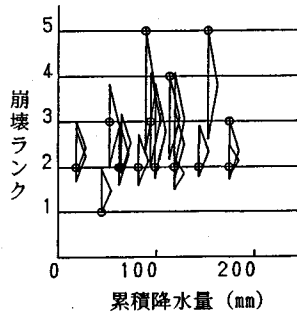
\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科

\*\*\* 正会員 日本道路公団広島管理局小郡管理事務所 所長  
（現日本道路公団名古屋管理局調査役）

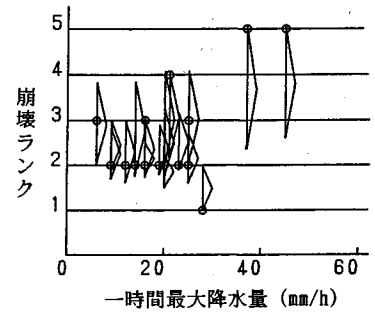
\*\*\*\* 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科



図一 三角形ファジィ数



図二 崩壊ランク～累積降水量関係図 (供用中, 変成岩地山の場合)



図三 崩壊ランク～一時間最大降水量関係図 (供用中, 変成岩地山の場合)

$$Y = (0.00, 0.16)X_A + (0.07, 0.00)X_E + (0.09, 0.00)X_F + (0.00, 0.09)X_G + (0.11, 0.00)X_I + (0.78, 0.00)X_J \dots (3)$$

ここで、Yは予測崩壊形態を与える崩壊ランクでありランク1（全体として安定である）からランク5（大規模崩壊）までを1，…，5のランクに設定している。X<sub>A</sub>，…，X<sub>J</sub>は切土のり面評価要因の評価ランクであり，これらはVery Low（「非常に良好な状態」）であり崩壊可能性は非常に低いからVery High（「非常に不良な状態」）であり崩壊可能性は非常に高い）までを1，…，5のランクに設定している。この係数（β<sub>j</sub>，C<sub>j</sub>）は中心と幅からなるファジィ係数（図一参照）であり，中心β<sub>j</sub>は崩壊規模を決定付ける要因，幅C<sub>j</sub>はあいまいさの程度を表している。A，…，Jはそれぞれ下記のり面評価要因の項目を表している。

(I) 地質・地形要因

A：地山地質，B：土質分類，C：節理等の状態，  
D：節理等の傾斜，E：被覆層・風化層の厚さ，F：地下水・湧水の状態，G：降雨水の集中度

(II) 土工要因

H：のり高さ，I：のり勾配，J：のり面保護工

のり面評価表および外的基準を崩壊形態としたファジィシステムの同定方法などの詳細については文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

各岩種別に構築したファジィシステム(式(1)，(2)，(3))には，地下水・湧水の状況(F)と降雨水の集中度(G)のうち一方または両方が，ファジィ係数の中心値または幅に現れている。このことは，これら水に関する要因が崩壊規模を決定付けるとともに，大規模な崩壊が生じる可能性を高める要因であることを意味している。この結果については，従来から一般的にいわれているような「雨が多く降ればのり面崩壊が発生する」，「地下水や湧水が多ければ危険である」という経験的判断に合致するものである。

一方，「時間当たり雨量が20 mmを超えると小崩壊が多発し，次に時間40 mmを超えると総雨量が伸びるほ

ど中規模の崩壊が発生する。さらに総雨量が300 mmを超えると時間雨量が小さくなくても大崩壊が発生している」という調査結果が報告されている<sup>1)</sup>。そこで，本研究で用いた3岩種の地山に建設されたのり面について，実際の崩壊ランクと累積降水量および一時間最大降水量との関係を整理した。ここで，降雨データは対象区域に最も近い観測所での観測結果（地域気象観測毎時降水量日報）を用いた。累積降水量はひと雨（雨の降り始めから崩壊発生時まで）の降水量の累計値であり，無降雨期間が5時間以内のひと雨期間中の総雨量とした。また，一時間最大降水量は累積降水量の中で最大の一時間降水量とした。なお，本研究で収集した3岩種のデータには特殊な崩壊データ，たとえば降雨後の晴天時に崩壊が発生したことが報告されているようなデータは含まれていない。そして，3岩種間でこれらの関係に有意差が見受けられないので，ここでは変成岩地山における崩壊を例に取り崩壊可能性と降水量との関連性について考察を行う。

図二，図三はファジィシステムによる予測出力（崩壊ランクであり，三角形ファジィ数で示す）とそののり面崩壊を引き起こしたとされる降雨の累積降水量および一時間最大降水量の関係を示したものである。図中の○印は実際に発生した崩壊ランクを示している。調査結果<sup>1)</sup>に従えば，降水量が多いほど大規模な崩壊が発生するので，両関係図上において実際の崩壊形態（○印）は左下側から右上側へ分布することが期待される。これらの図によるといくらかその関係は認められるようである。

一方，ファジィシステムによる崩壊形態の予測出力については，降水量の多少に関らず1，…，5のランクで示されるファジィ係数の中心値も同程度のばらつきで発生している。いま降水量が多いほど大規模な崩壊が発生するのであれば，「あいまいさ」は少ないので右上であるほど三角形は小さくなることが期待される。ところが，ファジィシステムに基づく評価結果（予測崩壊形態）は調査結果に示されるような一般的認識と対応し

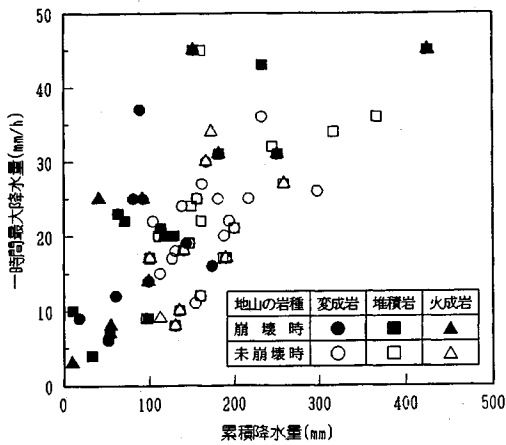


図-4 (a) 累積降雨水量～一時間最大降水量関係図

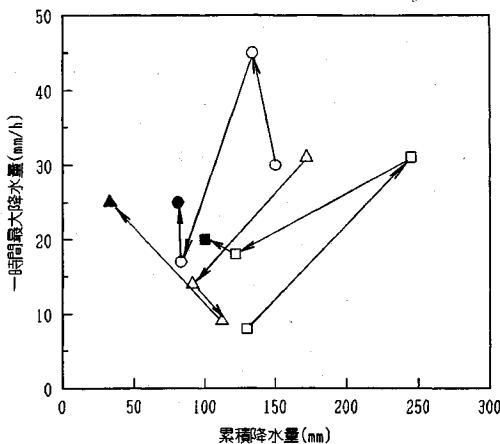


図-4 (b) 降雨履歴例とのり面の崩壊・未崩壊

ているとは言えず、降水量との明確な関係は認められないようである。したがって、崩壊の可能性が予測されたのり面が降雨時にどの程度の危険度を有しているのかについて、筆者らが提案したファジィシステム<sup>1)</sup>のみで評価することは困難であると考えられる。

図-4 (a) は累積降水量と一時間最大降水量の関係を各のり面について示したものである。図中黒印は崩壊時、白印は未崩壊時の降雨を意味し、記号の違いはのり面が建設された地山の岩種の違いを表している。なお、未崩壊時の降水量は、のり面崩壊以前において第一番目から第三番目に多かった累積降水量を基本に抽出し図化している。同図によれば、崩壊時と未崩壊時の降雨を明確に分類することは困難なようである。図-4 (b) は図-4 (a) 中の3岩種について、それぞれ崩壊時までに経験した降雨の履歴例を矢印で図化している。この図に示すように、これらのデータの中には崩壊発生以前において崩壊時よりも多い降水量を経験しているのり面が多数混在している。そして、降水量が崩壊に関係していることは事実であるが、降水量のみからのり面の崩壊を予測す

ることは困難であると考えられる。なお、降水量(累積降水量および一時間最大降水量)が非常に少ないにもかかわらず崩壊したとされるのり面のデータについては、降水量とのり面崩壊との関係が明らかでない。そのため、図-4 (a) に示すデータのうち累積降水量 50 mm 程度または一時間最大降水量 10 mm/h 程度で崩壊したのり面データは削除している。

これらのことから、同定したファジィシステムによれば「水」に関連する項目は降雨時における切土のり面の崩壊形態を予測する上で重要な崩壊要因であると評価できる。しかし現時点では、崩壊の可能性が予測された切土のり面で「どのような豪雨」が崩壊発生の引き金となるかについて降水量のみから明らかにするのは困難と思われる。さらに、警戒・避難態勢を取るための警戒規準線や避難規準線の設定<sup>5)</sup>には専門技術者の経験的判断を必要とするため、客観的な判断規準を与えるための手法とはなっていない。そこで、「崩壊を引き起こした降雨」と「未崩壊であった降雨」について分析を行い、要因として地形・地質やのり面保護工など降水量以外の要因についても考慮に入れた上で崩壊を引き起こした降雨、すなわち危険降雨の分析を行う必要があると考える。

### 3. 判別要因の抽出と分析データ

#### (1) データ収集上の現状と課題

のり面の崩壊に関するデータは、防災対策を必要とするのり面の抽出や防災対策工法の選定を行うため、報告書や資料として整理されている。一方、降雨データについては各道路管理者の現地事務所や気象庁の各地方気象台で観測・記録されている。しかし、本研究を進めるに当たり、崩壊したのり面の地山条件と降雨データが揃ったデータの収集を試みたが、本研究で用いたデータ以外の良質なデータの取得が困難であった。また、入手できた資料のうち、崩壊発生日時の記録から「どの降雨で崩壊したのか」は把握できるが、崩壊発生時刻については不明なデータも多くその確認も困難であった。

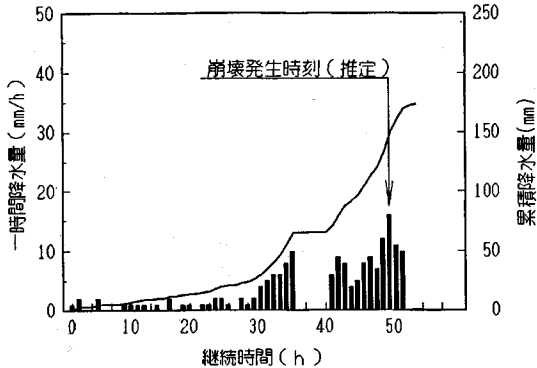
これらのデータに関する制約は現在における管理・観測体制の限界として挙げられる。しかし、このような現状であっても収集可能なデータの質に応じた合理的な防災管理システムを構築することは必要であり、本研究はその1つの例になると考えられる。そして、本研究の考え方に沿ったデータや資料の収集・整理に努めれば、同様の手法を用いて信頼性の高い豪雨時におけるのり面の崩壊予測を行うことが可能になるとと思われる。

#### (2) 降雨データの取得と整理

表-1 は変成岩地山に建設された切土のり面に崩壊をもたらした 12 個の降雨データの一部を示したものである。このうち一例として供用開始後約 10 年経過したのり面(のり面番号 1)の崩壊を引き起こした降雨データ

表一 降雨データの例 (変成岩地山の場合)

降雨番号	累積降水量 (mm/h)	一時間最大降水量 (mm)	降雨継続時間 (h)
1	170	16	52
2	93	21	14
3	82	25	11
4	134	45	5
5	81	25	5
...	...	...	...



図一五 降水量経時変化と推定崩壊発生時刻(降雨番号1の場合)

(降雨番号1)を図一五に示す。ここでは縦軸に一時間降水量(棒グラフで示す)および累積降水量(折れ線で示す)、横軸に降雨の継続時間を示している。このり面は変成岩(黒色片岩)地山に建設された中くらいの規模(のり面段数5段、のり高さ32m)のり面である。地山は表層部から深さ10mに渡って風化が進行しており、地質構造は流れ盤であったことから、コンクリート吹付け工にせり出し、浮き上がりおよび横亀裂、コンクリートブロック積擁壁に斜め亀裂が発生した。設計時のボーリング調査では地下水位は確認されていない。この年は梅雨期をささむ6ヶ月間で総雨量が1800mmにも達し、周辺各地で多くのり面崩壊を引き起こした。この降雨以前では約3週間で4mmの連続雨量しか生じていなかった。同様の崩壊が、他の岩種に建設されたのり面についても発生した。

崩壊発生時刻については前述の通り明らかでないことから、時刻については推定することとした。すなわち、過去において多数のり面崩壊を引き起こした降雨のいくつかの代表例を取り上げて累積降水量と崩壊発生時刻について検討したところ、降雨の開始から適当な時間の勾配の比較的緩やかな曲線部分に続く急勾配の累加曲線が崩壊の発生時刻までに相当時間続いていること<sup>6)</sup>、さらに、この累加曲線区間の変曲点(ひと雨期間中のピーク後に降雨強度が急に小さくなる点)で崩壊が発生する事例があること<sup>7)</sup>から、図に示すようにこのあたりで最大の一時間最大降水量を示す時間を崩壊発生時刻として設定した。これより、ひと雨の累積降水量および降雨継

表二 安定性評価のためのアイテム, カテゴリー-区分基準

地質	アイテム	カテゴリー	区分基準		備考
			カテゴリー	区分基準	
A	地山地質	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
B	土質分類	1	Very Low	評価ランク1	のり面評価表に示したのり面評価要因(参考文献1)参照
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
C	節理等の状態	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
D	節理等の傾斜	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
E	被覆層・風化層	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
F	地下水・湧水	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
G	降雨水の集中度	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
H	のり高さ	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
I	のり勾配	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
J	のり面保護工	1	Very Low	評価ランク1	
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
K	供用後の期間	1	Very Low	評価ランク1	供用開始時から降雨発生時または崩壊発生時までの期間
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
L	一時間最大降水量	1	Very Low	評価ランク1	降雨発生期間中での最大値
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
M	累積降水量	1	Very Low	評価ランク1	5h以上の無降雨時間が無い場合の降水量の累計値
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
N	降雨継続時間	1	Very Low	評価ランク1	累積降水量の採用時間
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	
O	降雨パターン	1	Very Low	評価ランク1	対象とする降雨により設定
		2	Low	評価ランク2	
		3	Medium	評価ランク3	
		4	High	評価ランク4	
		5	Very High	評価ランク5	

備考: 表中の○印は後述する分析で採用したアイテムである。ただし、データの検定結果に基づき、地質要因はC要因、地形要因はG要因を採用している。土工要因は、変成岩地山ではJ要因、堆積岩地山と火成岩地山ではJ要因を採用している。

続時間を求めた。以下このような方法でデータ整理を行っている。

(3) 判別要因の選定

まず初めに、のり面崩壊を引き起こす降雨であるかどうかを数量化理論で判別するためのアイテムは表一2に示す15アイテムとし、それぞれの資料に基づいて3~5のカテゴリーおよび区分基準を考えた。以下その内容について説明する。

のり面崩壊の安定性を評価するアイテム(地山およびのり面が本質的に有する崩壊可能性の素因)には、筆者らが作成したのり面評価表<sup>1)</sup>に示す、地山地質(A)、土質分類(B)、節理等の状態(C)、節理等の傾斜(D)、被覆層・風化層の厚さ(E)、地下水・湧水の状態(F)降雨水の集中度(G)、のり高さ(H)、のり勾配(I)、のり面保護工(J)の10項目を選定した。各評価要因はVery Low(「非常に良好な状態」であり崩壊可能性は非常に低い)からVery High(「非常に不良な状態」であり崩壊可能性は非常に高い)までを1, ..., 5の評価ランクで設定している。

「供用開始後の経過期間(K)」のアイテムは、地山やのり面保護工の風化・劣化がのり面の安定性に大きな影響を及ぼすこと、これは供用開始後からの経過期間と密接な関係にある<sup>3)</sup>ことから採用した。このカテゴリー区分は、今回収集したデータの崩壊時期を考慮して3区分に設定した。

降雨要因については参考文献<sup>6), 8), 9)</sup>および維持・管理に携わる専門技術者を対象に聞き取り調査を行い「一時

表一三 入力データの概要 (アイテムB~Iは省略)

アイテム 外的 規 準	No.	のり面評価要因					時間要因			降雨要因											
		A		J			K			L		M		N		O					
		1	2	3	4	5	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
崩壊した (1群)	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
	2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	4	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	5	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	6	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
崩壊しなかった (2群)	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
	2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	3	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
	4	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
	5	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0
	6	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1

間最大降水量 (L)、「累積降水量 (M)」および「降雨継続時間 (N)」の3アイテムを採用した。また、実際の降雨状況は地盤の水理特性と関連してのり面崩壊に大きな影響を及ぼすと考えられるので「降雨パターン (O)」を選定した。これらのカテゴリー区分は、降雨データを参考にして3区分に設定した。

なお、前期雨量 (崩壊発生時の前日から1週間、2週間または30日前までの総雨量) など降水量に関する他の要因についてはのり面崩壊との関連付けがなれていない<sup>6),8)</sup>こと、アイテムに採用しても有意な数値として揃ったデータが収集できないこと、などの理由により考慮から外した。

#### 4. データの検定とアイテムの簡素化

##### (1) データの検定

表一三は収集した資料に基づいて作成した15アイテム・65カテゴリーで構成されるデータの一例を示したものである。ここで、1群の「崩壊した」場合の降雨に関するデータは、のり面崩壊発生日時に対応する降雨データより作成している。2群の「崩壊しなかった」場合の降雨に関するデータは、のり面崩壊発生日時以前の降雨データより作成している。なお、アイテムのうちのり面評価要因については、1群と2群に同じデータを用いている。また未崩壊時の降雨データは、累積降水量を基本として以下の3種類を用いている。

降雨1：のり面崩壊以前の第一番目に多かった降水量

降雨2：のり面崩壊以前の第二番目に多かった降水量

降雨3：のり面崩壊以前の第三番目に多かった降水量

これらは、変成岩 (黒色片岩) 地山、堆積岩 (砂岩・頁岩) 地山および火成岩 (花崗岩) 地山ののり面についてそれぞれ作成している。崩壊時の降水量が非常に少ないデータについては前述の理由により削除していることから、ファジィシステムを構築する際に作成したのり面データに対し、本分析に用いるのり面数は、変成岩地山：12個、堆積岩地山：11個、火成岩地山：7個である。

式 (1), (2), (3) にみられるように、のり面評価表に採用した10項目の要因のうち、岩種やのり面の特性によっていくつかの要因は従属関係にあるので、崩壊要因としてファジィシステムの係数に採用されていない<sup>1),3)</sup>。これは数学的にはデータの独立性の問題として捕らえることができ、統計量として有意性を持たない要因は統計解析を行う際に配慮が必要である。

データ分析を行う上では以下のことが考えられる。

- ① データ数が少ない場合、多元の連立方程式を解くことができない (固有値問題を解くことができない)
- ② 標本分布 (ある統計量の確率分布) から抽出したデータ群が母集団に対して相関関係がない場合、統計解析の適用上に問題がある

③ データに片寄りがあり自己相関性が高い場合、原データのままで分析手法が適用できない

分析に有用なデータを用いることは計算処理上の効率化だけでなく、工学的にも現場技術者にとってデータ量の簡素化として重要であろうと考えられる。そして何よりも、数少ないデータで分析を可能にするためには、アイテムの数を解析可能なまでに減ずる必要がある。

そこで、本研究で用いようとするデータ形態は「カテゴリーデータ」であり前述の通り母集団分布の種類が不明であることから、ノンパラメトリックの検定を行う。そして、独立と非独立の程度を定量的に評価し、分析上有意なアイテムの抽出を行う。すなわち、まずクロス集計表を作成しカテゴリー相互の度数を求める (手順1)。そして $\chi^2$ 検定により独立性の検定を行い、データの相関性を調べる (手順2)。次に、式 (4) に示すクラマーのコンティンジェンシー係数 ( $C_r$ ) で各アイテム間の関連を求める (手順3)。なお、これらの詳細については参考文献 (たとえば、10), 11)) を参照されたい。

$$C_r = \frac{\Phi^2}{t-1} \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $\Phi^2$ : 平均自乗コンティンジェンシー  
 $t$ : 属性のカテゴリー数

コンティンジェンシー係数 ( $C_r$ ) は属性間が完全独立 (無関連) である時 0, 独立でない時 1 となり, 属性間の関連の程度を示す係数である。この結果に基づいて, のり面評価要因の 10 項目の中から地質要因, 地形要因, 土工要因について各 1 項目, 計 3 項目で代表できるアイテムの選定を行う。

(2) 検定結果に基づくアイテムの抽出

$\chi^2$ 検定により有意水準 5% および 1% で検定を行った。その結果, いずれの岩種についてもり面評価要因として選定したほとんどのアイテムは有意水準 1% で独立性の仮説が棄却された。このことから, のり面評価表の 10 項目の要因は互いに従属関係にあるので, この中から各要因で 1 アイテムを選定することは必ずしも手法そのものを否定するものではないと考えた。なお, 検定結果の具体的な数値については説明を省略する。

そこで, のり面評価要因を代表できる 3 項目の要因を抽出するために各アイテム間の関連を求めた。ここでは, 計算で得られたクラマーのコンティンジェンシー係数 ( $C_r$ ) から属性相関として下記の関連係数を定義する。

- ① 外的関連係数:  $C_e$
- ② 内的関連係数:  $C_i$

外的関連 ( $C_e$ ) は他の要因との関連性を表す係数であり, 係数が小さいほど属性間の関連性が低く独立性が高いので他の要因では代表できないことを意味する。内的関連 ( $C_i$ ) は同一要因内の関連性を表す係数であり, 係数が大きいほど属性間の関連性の程度が高く従属性が高いので他の要因を代表できることを意味する。そして, これらの係数から総合的に有意性のある最適な要因を評価するために最適係数 ( $C_{opt}$ ) を次式で定義する。

$$C_{opt} = C_i / C_e \dots\dots\dots (5)$$

すなわち, この最適係数が大きいほど代表に適していると評価しアイテムの抽出を行う。

図-6 は地質要因の 5 アイテムについて岩種ごとに最適係数を図化したものである。縦軸は最適係数であり, 横軸はアイテムを示している。ここで, コンティンジェンシー係数より求めた最適係数 ( $C_{opt}$ ) は, 相対的評価ができるように岩種ごとの要因の最大値でそれぞれ規準化している。したがって, 最適値では 1.0 であり完全独立の場合は 0 になる。なお, 火成岩地山ののり面データでは安定性が高いのり面 (崩壊ランク 1) と崩壊時の降水量が著しく少ないのり面データを削除したところ, 地山地質 (A) と土質分類 (B) の 2 要因は全データがそれぞれ同じカテゴリーになったので, 分析に用いたデータからこれらのアイテムは削除している。残りの 3 アイテムについて 3 岩種の最適係数を平均すると, 節理等の状態 (C) 要因では 0.852, 節理等の傾斜 (D) 要因では 0.583, 被覆層・風化層の厚さ (E) 要因では 0.615 となったので, 地質要因としては節理等の状態

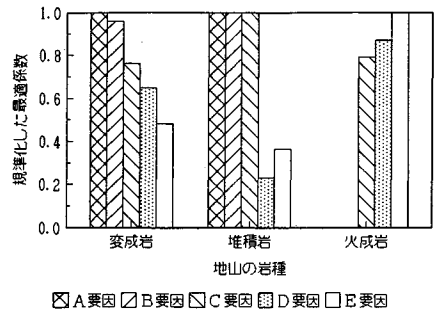


図-6 地質要因の最適係数

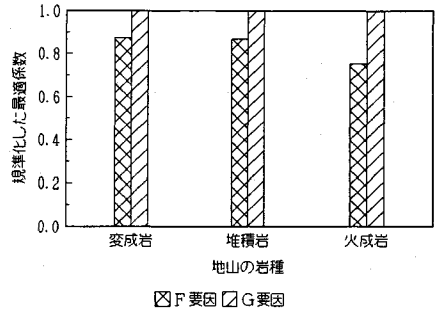


図-7 地形要因の最適係数

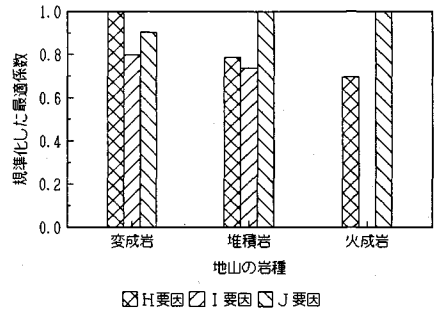


図-8 土工要因の最適係数

(C) 要因に代表させることとする,

図-7 は地形要因の 3 アイテムについて最適係数を図化したものである。同様に, 地下水・湧水の状態 (F) 要因では 0.832, 降雨水の集中度 (G) 要因では 1.000 となったので, 地形要因としては降雨水の集中度 (G) 要因をアイテムに代表させることとする。

図-8 は土工要因の 2 アイテムについて最適係数を図化したものである。火成岩地山ののり面については全データが同じカテゴリーになったのでのり勾配 (I) 要因を削除しているが, その他については最適係数の大きさが岩種によってそれぞれ異なっている。特に, 土工要因は地質要因や地形要因に比べて 3 項目の内容に類似性がないことから, ここでは最適係数の大きさに準じて変成岩地山ではのり高さ (H) 要因, 堆積岩地山および火成岩地山ではのり面保護工 (J) 要因に代表させることとする。

のり面評価要因のうち地質要因を代表する節理等の状

態(C)は、風化の進行の影響を受けるとともにその分布によって崩壊の形態が支配される要因である。降雨時にはこの割れ目から浸透した降雨水がのり面崩壊を引き起こすと考えられる。地形要因を代表する降雨水の集中度(G)は地下水の供給に大きな影響を及ぼす要因である。そして、土工要因の2要因(H, J)については、それぞれ降雨水の集水面積や表面からの降雨水の浸透防止に加えて表面侵食や風化の防止など、のり面の安定性に大きな影響を及ぼす要因である。ここで、のり勾配(I)は崩壊に対して特に重要な要因と考えられるが、経験的には地盤を構成する地層の種類や状態および切土高さによって定められており、安定勾配の確保が可能か否かによってのり面保護工法が選定されている。このことから、土工要因の他の2要因にのり勾配(I)要因が従属していると考えれば、アイテムとして採用しない理由が工学的に理解できる。これらの要因の抽出結果は降雨時に崩壊した切土のり面の崩壊要因の評価結果<sup>9)</sup>とも対応しており、工学的に妥当であると考えられる。以上より、8アイテム・30カテゴリーに簡素化したデータ(表-2参照)を基本として数量化Ⅱ類による分析を行う。

### 5. 数量化理論による分析結果および考察

筆者らが収集した資料は供用中降雨時に崩壊が発生したのり面の地質要因、地形要因および土工要因に関するデータと、のり面の建設位置に対応した降雨データである。しかし、実際上はこれらに関連付けたデータの収集・整理が行われている場合ばかりでなく、状況によっては崩壊を引き起こしたとされる降雨データしか入手できない場合もある。そのため一般には累積降水量～時間最大降水量関係<sup>4)</sup>や降水量～時間関係<sup>5),7)</sup>から崩壊を引き起こした降雨特性のみに着目して分類し災害予測を行う手法が用いられているが、信頼性の高い防災管理を行うためには未崩壊時の降雨(過去において崩壊に至らなかった降雨であり崩壊時の降雨よりも多い降水量の場合もある)も加えた検討が必要であると考えられる。さらに、入手した情報量(要因数)の違いにより崩壊・未崩壊を判別するシステムの特性についても明らかにすることが重要であると考えられる。図-9は本研究で提案する判別システムの構築手順とその評価法を流れ図で示したものである。ここではまず、

クラス1: 地質, 地形, 土工, 時間, 降雨の各要因が揃った場合

のデータを用いて、数量化Ⅱ類により外的規準を1群(崩壊した降雨)と2群(崩壊しなかった降雨)に設定した分析を行う。さらに、

- クラス2: 地質要因が入手困難な場合
- クラス3: 地質要因と地形要因が入手困難な場合
- クラス4: 降雨要因のみが入手可能な場合

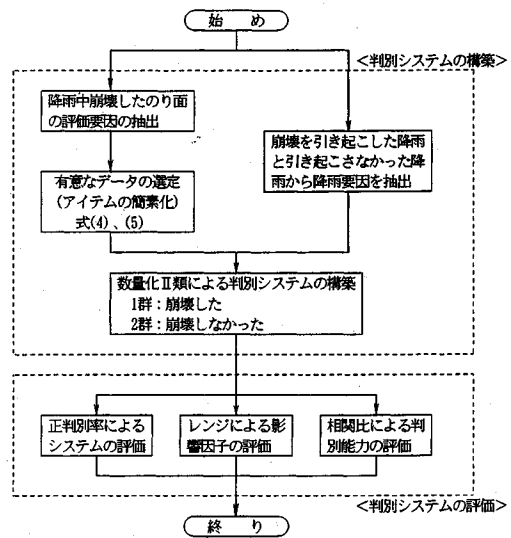


図-9 判別システムの流れ図

のデータについて分析を行う。クラス2~4はのり面施工後では入手しにくく筆者らが考えたデータの順にアイテムを削除してクラスを定めている。すなわち、地質要因は施工時に作成された資料以外の入手はかなり難しいが、土工要因ののり高さやのり面保護工および供用後の経過期間は供用期間中でも比較的容易に入手できるデータと考えた。これらの結果に基づいて、のり面の崩壊を引き起こす影響因子について、情報量(要因数)の違いに対する評価および危険降雨の判別特性について考察する。

#### (1) 数量化理論Ⅱ類による分析

降雨中崩壊したのり面について、降水量が「多い」か「少ない」か、降雨継続時間や供用開始後からの経過日数が「長い」か「短い」かといった質的要素に対して、ある降雨が崩壊発生を引き金となるかどうか、すなわち「崩壊した」か「崩壊しなかった」か、といった質的な形で与えられる外的規準を説明するために数量化分析Ⅱ類<sup>12)</sup>を適用する。ここで、外的規準は次のように設定している。

1群: 崩壊した

(崩壊降雨: 降雨が引き金となりのり面が崩壊した)

2群: 崩壊しなかった

(未崩壊降雨: 降雨は引き金とならずのり面は崩壊しなかった)

各クラスの分析結果を表-4に示す。これは岩種ごとに左側の欄に崩壊・未崩壊に対する正判別率、右側の欄にレンジを一覧表としてまとめたものである。ここで、崩壊・未崩壊降雨の正判別率とは、実際に崩壊を引き起こした降雨(崩壊降雨)を「崩壊した」と判別した率、崩壊を引き起こさなかった降雨(未崩壊降雨)を「崩壊

表—4 各クラスの崩壊・未崩壊判別結果とレンジの一覧

クラス	地山の 岩種	正判別率			レンジ							
		崩壊 降雨	未崩壊 降雨	全体の 評価	のり面評価要因			降雨要因				
					地質	地形	土工	時間要因 供用後の 経過期間	一時間最 大降水量	累積 降水量	降雨 継続時間	降雨 パターン
1	変成岩	100.0	72.2	79.2	0.943	1.000	0.399	0.430	0.254	0.256	0.142	0.236
	堆積岩	100.0	87.9	90.0	0.585	0.414	0.462	0.969	0.759	0.331	0.414	1.000
	火成岩	100.0	90.5	92.9	1.000	0.490	0.558	0.377	0.278	0.118	0.090	0.043
2	変成岩	91.7	72.2	77.1	—	0.688	0.675	0.208	1.000	0.909	0.693	0.853
	堆積岩	100.0	78.8	84.1	—	0.231	0.297	0.717	0.860	0.357	0.327	1.000
	火成岩	100.0	76.2	82.1	—	0.098	0.407	0.814	1.000	0.840	0.373	0.379
3	変成岩	91.7	72.2	77.1	—	—	0.494	0.225	0.994	0.551	0.994	1.000
	堆積岩	100.0	75.7	81.8	—	—	0.144	0.577	0.873	0.349	0.295	1.000
	火成岩	85.7	61.9	67.9	—	—	0.462	0.840	1.000	0.811	0.375	0.352
4	変成岩	91.7	75.0	79.2	—	—	—	—	0.853	0.533	0.957	1.000
	堆積岩	90.9	81.8	84.1	—	—	—	—	0.784	0.172	0.918	1.000
	火成岩	85.7	61.9	67.9	—	—	—	—	1.000	0.607	0.122	0.158

しなかった」と判別した率およびこれらを総合して崩壊あるいは未崩壊に至る降雨を正しく判別した率である。また、レンジとはあるアイテムのカテゴリスコアの最大値と最小値の間の距離であり、判別への貢献度を意味する値である。

(2) 判別特性について

クラス1における正判別率については、いずれの岩種についてものり面の崩壊を引き起こした降雨を「崩壊した」と判別した率は極めて高く、本研究で対象とした地域のデータでは100%であった。そして崩壊を引き起こさなかった降雨を「崩壊しなかった」と判別した率は70~90%であり、崩壊・未崩壊降雨の判別は平均的に80%以上であった。本研究で用いたデータは、崩壊した降雨の降水量より崩壊しなかった降雨の降水量の方が多いデータを数多く含んでいるにもかかわらず、本手法で構築したシステムでは「崩壊した」降雨は確実に危険と判別し、「崩壊しなかった」降雨についても非常に高い率で判別していると言える。このように各要因が揃った場合の判別システムは、危険降雨を安全側の立場で判別できるシステムであることが分かる。

クラス2については、クラス1と比べると「崩壊した」降雨の正判別率は変成岩地山の場合を除いて差がないが、「崩壊しなかった」降雨の正判別率はかなり下がっている。レンジの項を見れば分かるように地質要因のレンジが各岩種ともかなり大きいことから、この影響によるものと考えられる。クラス3~4についても、要因数(情報量)下がると正判別率は順次小さくなっているが、その影響はクラス2ほどではない。判別システムを構築する上で、入手できる情報が多ければ多い方が判別率は良いということは明らかである。

これらの分析結果を合わせて考えると次のことが結論付けられる。すなわち、「崩壊した」と判別される降雨の正判別率は岩種によって多少差があるものの、これら

を平均的に見れば地質、地形、土工、時間および降雨の各要因が揃った場合(クラス1)は約90%、地質要因がない場合(クラス2)は約80%、さらに地形要因や土工要因および時間要因がない場合(クラス3, 4)は75%程度の正判別率であった。このように、本システムの各要因の情報が揃ったクラスではある降雨がのり面崩壊を引き起こす降雨であるかどうかをほぼ判別できるシステムであろうと言える。すなわち、「崩壊した」降雨であるかどうかの判別を行う上で、データの入手はできる限り努力し多くの要因を揃えた方が判別精度を高めることができると言える。

(3) 判別システムの影響因子について

表—4のクラス1に示した変成岩地山ののり面の分析結果より地形要因(ここでは降雨水の集中度(G)の要因)のレンジが最も大きく、第2番目の影響因子としては、地質要因(ここでは節理等の状態(C)の要因)のレンジであった。降雨に関するアイテムのレンジは、他のアイテムに比べて小さかった。供用開始後の経過期間(K)は風化進行の度合いを表す要因であり、やや大きなレンジとなった。

これに対して、堆積岩地山の場合ではレンジの大きなアイテムは降雨パターン(K)、供用開始後の経過期間(O)、一時間最大降水量(L)の順であり、変成岩地山の場合と異なり降雨に関するアイテムが危険降雨の判別に大きな影響を及ぼしている。次に大きな値はのり面評価要因のうち地質要因(C)であった。

火成岩地山の場合では、地質要因と土工要因が最も大きなレンジの値となり、これらの要因が危険降雨の判別に大きな影響を及ぼす因子になっている。降雨に関するアイテムのレンジは、変成岩地山の場合と同様に小さかった。

以上のクラス1の場合のレンジの大きさから分かるように、各岩種の地山に建設されたのり面では、降雨時に



崩壊するかどうかについてはのり面評価要因（地形、地質および土工要因）が危険降雨の判別に大きく影響していることは明らかである。

なおこれらの地山の岩種特性として、変成岩地山の場合は降雨水はのり面よりもむしろ地山背後地から供給され節理が多く発達するほど開口部に粘土層や風化物質が多く挟在し降雨時に崩壊し易くなる<sup>3)</sup>こと、堆積岩地山の場合は地下水が地山背後地よりもむしろのり面表層部から供給されやすく風化はのり面の表層から深部に向かって進行し易い<sup>3)</sup>こと、花崗岩地山の内まさ化が比較的深部にまで及んでいるまさ土地域で斜面崩壊を引き起こす限界降雨量は、地山の地質特性（強度物性と浸透物性）や地形特性によって決まる<sup>13)</sup>こと、を考慮に入ればこれらの影響因子が工学的に妥当であることが理解できよう。

要因数を減らした場合、表-4に示したクラス2～クラス4のレンジより、危険降雨（崩壊・未崩壊降雨）の判別に影響を及ぼす第2番目までのアイテムの順位は次のようであった。

#### ①クラス2の場合

変成岩地山：一時間最大降水量，累積降水量

堆積岩地山：降雨パターン，一時間最大降水量

火成岩地山：一時間最大降水量，累積降水量

#### ②クラス3の場合

変成岩地山：降雨パターン，一時間最大降水量

堆積岩地山：降雨パターン，一時間最大降水量

火成岩地山：一時間最大降水量，経過期間

#### ③クラス4の場合

変成岩地山：降雨パターン，継続時間

堆積岩地山：降雨パターン，継続時間

火成岩地山：一時間最大降水量，累積降水量

クラス1の分析結果では、降雨時におけるのり面崩壊は単に降水量だけでなく地質、地形、土工および供用後の経過期間も影響因子となりその度合いは岩種によって異なっていた。しかし、クラス3、4の分析結果では降雨パターン（K）要因の影響が非常に大きいことが分かる。したがって、のり面の状況に関する要因が収集できない場合であっても、従来から用いられてきた降水量に関するアイテムだけでなく降雨パターン、すなわち「雨がどのような降り方をしているか」に着目することが精度の高い崩壊予測を行う上で重要であると言える。

#### （4）システムの判別能力について

図-10は各岩種についてクラスごとの相関比（固有値）の変化を図化したものである。ここで、相関比とはカテゴリー間において数量データの平均と変動に差があるかどうかを検定するための係数であり、0から1までの間の数値を取る。ただし、どの程度以上あれば良いのかについて判断規準はないが、相関比が大きいほど得ら

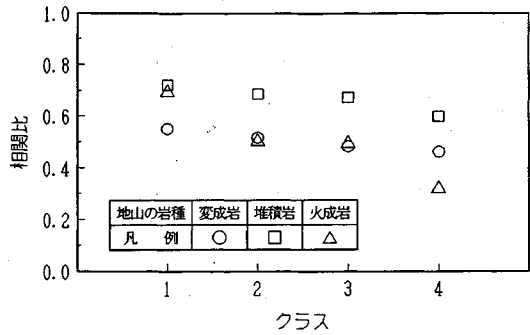


図-10 各岩種、クラスごとの相関比

れた判別式の判断能力が高いと評価できる数値である。ここで、縦軸は相関比、横軸はクラスである。これより、岩種によって多少の差はあるものの全体的には比較的大きな相関比が得られたことから、本研究で対象としたデータのようにその量と質に制限がある場合でも、収集したデータの独立の程度を定量的に評価した上で有意なデータの独立の程度を定量的に評価した上で有意なデータで分析を行えば、いずれのクラスについても固有値問題のある程度の信頼性の下で解くことができ、構築した判別システムは十分な判別能力を有していると言える。そして、クラス1～クラス4を比較すると要因数が多いほど相関比は大きくなる傾向にあることから、情報量(要因数)が多く揃うほど判別能力の高いシステムを構築できることが分かる。

## 6. ま と め

本研究では供用中、豪雨時に崩壊した切土のり面を対象として、崩壊時と未崩壊時の降雨データに基づく危険降雨の判別システムについて構築手法を示した。これより、のり面崩壊を引き起こす影響因子について検討を行い、崩壊誘因である降雨の特性を明らかにした。結論を以下に列記する。

1) ファジィシステムの同定結果より、崩壊可能性を予測する上で「水」に関連する項目が重要な要因となっている。

2) しかし、ファジィシステムによる予測出力（予測崩壊ランク）と降水量とは明確な関連性があるとは言えない。

3) 崩壊発生以前に崩壊時よりも多い降水量を経験している場合には、従来の降水量のみに着目した方法では危険降雨の分類が困難である。

4) 崩壊を引き起こす危険降雨の判別を行う上で重要となる影響因子は、岩種特性に応じて特徴付けられる。

5) したがって信頼性の高い判別を行うためには、降雨要因だけでなくのり面評価要因（地質、地形、のり面保護工要因）などできる限り多くの要因を揃える必要が

ある。

6) 情報量に制限があっても適切なデータ処理を行えば、約0.5以上の相関比を有し約70%以上の正判別率で判別できるシステムを構築することができる。

7) この場合、信頼性の高い予測(危険降雨かどうかの判別)を行うためには「降雨パターン」、すなわち「雨がどのような降り方をしているか」に着目することが重要である。

8) 提案した手法で構築した判別システムは、のり面崩壊を引き起こした降雨を崩壊しなかった降雨よりも高い判別率で「崩壊した」と判別することができ、防災管理上有用なシステムとなり得る。

本研究の結果は、崩壊の可能性が予測された切土のり面について、崩壊を引き起こす降雨かどうかを概略的に判断する上で有用な工学的示唆を与えるものと考えられる。そして、構築した判別システムは降雨時において巡回による点検の頻度を増したり、必要に応じて動態観測や地質調査等の必要があるのり面かどうかを判別することができ、維持・管理上有効であると考えられる。ただし、以上述べたシステムにおいては、降雨期間中において危険か否かの予測に直接利用できることができない。この点については別途システムの構築を試みるつもりである。

なお降雨量には局地性があり、さらに筆者らが収集した資料では、①実際の崩壊発生時刻と記録上の崩壊発見時刻が異なる、②降水量の観測所とのり面の位置が離れている、③のり面が降雨以前既に不安定状態にあり降雨中に崩壊を発見した、④降雨時に地盤が緩み時間進行と共に遅れて崩壊が発生した、などの理由から必ずしも降水量とのり面崩壊の関係を説明できないデータもあった。したがって、信頼性の高いシステムを構築するためには、のり面崩壊と直接対応した降雨データの収集にも勤める必要があると考える。さらに、地盤条件や降雨条件には地域特性があるので、他の地域や情報量が異なる場合には今回と同じアプローチを行うことにより別のシステムを構築する必要がある。その結果、様々な条件下

にある切土のり面に対して適応範囲を広げることが可能になると思われる。

本研究のデータの収集に際し、日本道路公団広島建設局および広島管理局の方々から多くの支援を頂いた。また、降雨データは気象庁下関地方気象台 立石昭二氏のお世話になった。(株)大本組 鈴木昌次氏にはデータ解析について助言を頂いた。データ整理には山口大学学生 佐伯隆之君(現中電技術コンサルタント(株))の協力を得た。記して謝意を表わします。

#### 参考文献

- 1) 西 邦正・古川浩平・中川浩二：ファジィ理論を用いたのり面崩壊要因および崩壊可能性の評価について、土木学会論文集，No.445/Ⅲ-18，pp.109～118，1992.3.
- 2) 気象庁下関気象台：地域気象観測毎時降水量日報
- 3) 西 邦正・古川浩平・小川 健・中川浩二：ファジィ理論に基づく供用中切土のり面の崩壊要因評価と岩種特性、土木学会論文集，No.457/Ⅲ-21，pp.151～154，1992.12.
- 4) 奥園誠之：斜面防災100のポイント，鹿島出版会，p.154，1987.
- 5) 全国治水砂防協会編：土砂災害防止のための情報システム，pp.99～116，全国治水砂防協会，1985.
- 6) 土質工学会編：切土ノリ面，土質工学会，pp.197～208，1987.
- 7) 池谷 浩：降雨強度比による土砂害からの避難基準に関する一私案，新砂防，pp.7～11，1974.
- 8) 奥園誠之：切土斜面の設計から維持管理まで，鹿島出版会，1983.
- 9) 土質工学会編：土砂災害の予知と対策，土質工学会，pp.162～163，1985.
- 10) 安田三郎：社会統計学，丸善，pp.35～76，1969.
- 11) 毛利正光・西村 昂・本田義明：土木計画学，国民科学社，pp.47～52，1985.
- 12) 奥野忠一・芳賀敏郎・久米 均・吉沢 正：多変量解析法，日科技連，1975.3.
- 13) 八木則男・矢田部龍一・榎 明潔：降雨時の斜面崩壊に対する限界降雨量，土木学会論文集，第418号/Ⅲ-13，pp.65～73，1990.6.

(1993.3.31 受付)

## PROCEDURE FOR JUDGEMENT OF SLOPE STABILITY AND EVALUATION OF SLOPE-FAILURE FACTORS DURING HEAVY RAIN

Kunimasa NISHI, Kohei FURUKAWA, Tsuyoshi OGAWA and Koji NAKAGAWA

The subject of present research is concerned with in-service slopes that collapse due to heavy rain. The authors proposed a procedure to formulate slope collapse or noncollapse judgement system together with the new slope collapse factors, time and rain-fall, in addition to the previously proposed ones. The data used in the analysis are collected from several cut-off slopes constructed on three types of sites (metamorphic, sedimentary and igneous). From these data, the factors that bear an impact on the collapse of slope during heavy rain are clarified and some problematic points are brought under scrutiny in forecasting the slope collapse.