

降雨継続中の切土のり面における崩壊・未崩壊の時間ごとの予測手法について

西 邦正*・古川浩平**・小川 健***・
中川浩二****

切土のり面が降雨継続中に崩壊を引き起こすか否かの判別は防災管理上非常に重要であるが、個々のり面の状況に応じた判別は現在に至るまでほとんどなされていない。本研究では、り面評価要因、時間要因および降雨要因を用いて、雨の降り始めから1時間ごとに崩壊・未崩壊の判別ができるシステムの構築方法とその応用例を示す。これより、降雨中にり面の崩壊予測が可能であることを示すと共に残された課題を述べる。

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

1. はじめに

降雨継続中の切土のり面の防災管理は、主として降雨量の観測結果に基づいて実施されている。この場合、降雨量としては各地方気象台が発表する注意報や警報および道路の各管理者による観測結果が採用されており、管理基準値は一時間最大降水量や累積降水量が一般的に用いられている¹⁾。しかし、豪雨時に崩壊した切土のり面を対象とした筆者らの研究²⁾によれば、切土のり面の崩壊はり面に関する要因と降雨に関する要因の組み合わせによって引き起こされるものと考えられた。また降雨要因についても、単に降雨量の大きさだけでなく、雨の降り方も影響因子であることが分かった。しかし、この研究では崩壊発生時のり面に関する資料に基づいて作成したカテゴリーデータを取り扱っているために、現在降っている雨によりのり面が崩壊するか否かを降雨中に判別することができていない。降雨期間中のり面の防災管理を行うためには、降雨開始時から時間の経過に伴って変化する降雨量に対し、時間の経過に伴って危険降雨（り面崩壊を引き起こす降雨）かどうかを判別できるシステムを構築する必要があると考える。

本研究では、重判別分析により、崩壊を引き起こした降雨と崩壊を引き起こさなかった降雨とを対象とし、降雨開始から1時間ごとに崩壊・未崩壊の判別を試みる。これより、危険降雨の判別を行うための判別システムの構築方法と降雨継続中に崩壊予測を行う上での課題について述べる。ここで、本研究の対象は供用中降雨時に崩壊が発生した切土のり面であり、分析にはり面に関す

る要因（地質、地形、土工要因）、時間に関する要因（供用後の経過年数）および降雨に関する要因（降雨量、降雨継続時間）をアイテムとして採用している。

2. 崩壊を引き起こした降雨の判別上の問題点と判別要因について

(1) 災害予測における既往の研究の問題点

降雨時における斜面等の災害予測は、土石流の分野で多くの研究（たとえば参考文献3), 4), 5))が行われており、降雨に関する要因の適用性が示されてきた。ここで、り面崩壊が過去最大降雨量で発生する事例では、降雨量の大きさのみに着目した分類が危険降雨とそうでない降雨を判別する上で有効であろう。また、崩壊予測ではなく崩壊要因の分析を研究目的としているのであれば、降雨終了後に抽出できる降雨要因を用いて分析を行うことは有用であろう。

しかし、既往の調査・研究で用いられてきた雨量指標の中には、雨が降り終わらなければデータが得られないものや無降雨期間が長い場合にデータが抽出できないものがある。また、降雨終了時にならなければ整理できない要因もある。このような要因は、時間ごとに崩壊するか否かを判別する上では利用できない要因であり、本研究の課題に対して有用な要因とならない。そして、降雨に関する要因のみでは、地形、地質および降雨の各要因が関連付けられた合理的な予測システムは構築できないと考えられる。

(2) 判別要因に関する筆者らの研究結果²⁾

供用中に崩壊した切土のり面に関する諸データは、供用中の多くのり面の中から防災対策を必要とするり面を抽出したり防災対策工法の選定を行うために有益であり、報告書や資料として整理・保管されている。したがって、崩壊したり面周辺の地形条件やり面保護工については崩壊後でも情報の収集が可能である。しか

* 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

表-1 安定性評価のためのアイテム、
カテゴリー区分基準²⁾

アイテム	カテゴリー	区分規準	備考		
地質 要因	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	
地形 要因	F 地下水・湧水 降雨水の集中度	.	.	のり面評価表に示したのり面評価要因 ²⁾	
		.	.		
土工 要因	J のり面保護工	46	Very Low	評価ランク1	
		47	Low	評価ランク2	
時間 要因	I 供用後の期間	48	Medium	評価ランク3	
		49	High	評価ランク4	
		50	Very High	評価ランク5	
		51	短い	5年未満	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
		52	中くらい	5年～10年	5年未満
降雨 要因	J 一時間 最大降水量	53	多い	10年以上	降雨発生期間中での最大値
		54	少ない	20mm/未満	
		55	中くらい	20mm/h～30mm/h	
		56	多い	30mm/h以上	
		57	少ない	100mm未満	5h以上の無降雨時間がない場合の降水量
要因	K 累積降水量	58	中くらい	100mm～200mm	の累計値
		59	多い	200mm以上	累積降水量の採用時間
		60	短い	20h未満	
		61	中くらい	20h～40h	
		62	多い	40h以上	
要因	L 降雨パターン	63	前半	前半に多く降る	対象とする降雨により設定
		64	中盤	中盤に多く降る	
		65	後半	後半に多く降る	

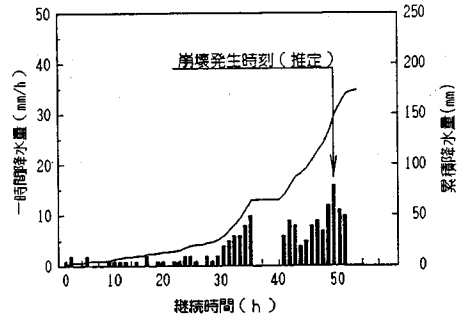


図-1 降雨量の経時変化²⁾

3. 時間経過に伴う危険降雨の重判別分析

判別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、供用中降雨時にのり面に変状（崩壊）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。これらは工学的には岩種別に検討することが妥当である²⁾と考え、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整理を行った。

研究を行う上で筆者らが入手できたデータ数は、変成岩地山ののり面：23個、堆積岩地山ののり面：23個、火成岩地山ののり面：15個である。このうち、降雨量（累積降水量と一時間最大降水量）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データについては、その降雨量とのり面崩壊との関係が明らかでなく崩壊の原因は他にあると考えられるので、前報²⁾と同様、データから削除した。したがって、これらのデータについては今後の課題と考えて、本研究では取り扱わないこととした。そのため、本分析に用いたのり面数は、変成岩地山ののり面：12個、堆積岩地山ののり面：11個、火成岩地山ののり面：7個である。

(1) 分析に採用した要因

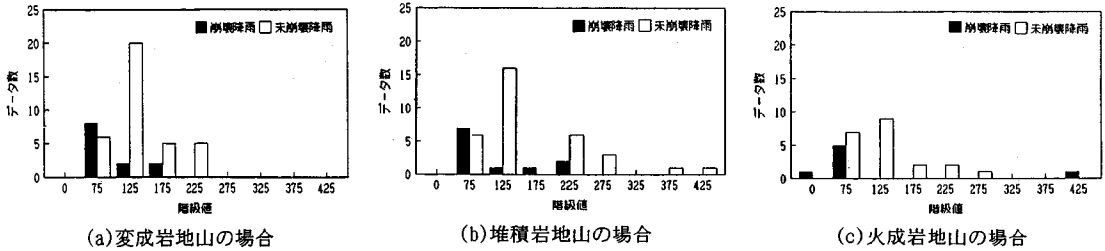
筆者らの研究結果²⁾に基づき、分析を行うためのアイテムとしてののり面評価要因（地質要因、地形要因および土工要因）、時間要因（供用後の経過年数）および降雨要因（一時間最大降水量、累積降水量および降雨継続時間）を採用した。ここで、分析に有用なデータを用いることは、統計解析上の有意性や計算処理上の効率化だけでなく、工学的にも現場技術者にとってデータ量の簡素化として重要であろうと考えられる。そこで、データの独立性に関する検定結果より、のり面評価要因のうち地質要因は「節理等の状態(C)」、地形要因は「降雨水の集中度(G)」、土工要因は変成岩地山の場合「のり高さ(H)」、堆積岩地山の場合「のり面保護工(J)」、火成岩地山の場合「のり面保護工(J)」で代表させている。

し、のり面の安定性に大きく影響を及ぼすと考えられる地山条件（地質要因）については、膨大なのり面を調査することのコスト面と技術的判断の困難さから「切ってみないと分からないからとにかく常識的な線で切ってみてその結果崩壊したらそこだけ手直しする⁶⁾」と考えて、設計段階の調査が必要最低限度に抑えられたのり面もある。これらのことから、崩壊発生後にすべての情報がそろった資料の整理を試みても収集できない場合が多い。

このような情報量の制限が分析結果の信頼性にどのような影響を及ぼすのかを明らかにするため、筆者らは数量化理論を適用して「崩壊を引き起こした降雨」と「崩壊を引き起こさなかった降雨」の判別をするシステムの構築を試みた。その結果、降雨中におけるのり面の崩壊は単に降雨量だけではなく、地質、地形、土工および供用開始後の経過年数が影響因子であることが分かった。

そして、判別の信頼性に及ぼす各要因の影響の度合いは、のり面が建設された地山の岩種によって異なっていた。さらに、要因数（情報量）はできるだけ多くそろえたほうがよく、要因数がそろえられない場合であっても、従来から用いられてきた降雨量に関するアイテムだけでなく降雨パターンに関する要因、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ことが分かった。

これらのことから、時間の経過によって変化する降雨量データにのり面に関する要因も加えて、その都度のり面崩壊を引き起こす降雨か否かが判別できるシステムの構築が防災管理を行う上で必要と考える。



図一 2 崩壊降雨と未崩壊降雨の度数分布図

この方法については参考文献2)を参照されたい。これらアイテムのカテゴリー区分基準については表一1に示している。なお、時間ごとに判別を行うので降雨要因のうち「降雨継続時間(L)」はアイテムとして採用していない。

降雨量については地域気象観測日報⁷⁾に記録されている1時間ごとの降雨データを用いており、のり面が「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。ただし、収集できた資料では崩壊発時刻が明らかでない場合が多いので、前報²⁾と同様、図一1の時間～降雨量関係図に示すように最大の1時間最大降水量を示す時間を崩壊発時刻として設定した。そして、崩壊のり面に最も近い観測所(両者の距離は最大で10 km程度である)の観測データをのり面崩壊を引き起こした降雨データとして採用した。のり面が「崩壊しなかった」場合の降雨に関するデータは、同様の観測所の観測データの中から累積降水量を基本に以下の3種類を用いている。

- 降雨1：のり面崩壊以前の一番目に大きかった降雨量
 - 降雨2：のり面崩壊以前の二番目に大きかった降雨量
 - 降雨3：のり面崩壊以前の三番目に大きかった降雨量
- なお、四番目以降は崩壊時の降雨量よりも小さなデータが多くなることから、ここでは3種類とした。したがって、未崩壊降雨が崩壊降雨の3倍であることに意味はない。

以上より、本研究で使用した降雨データについて、崩壊を引き起こした降雨と未崩壊であった降雨の累積降水量の度数分布図を図一2(a)～(c)に示す。ここで、縦軸は降雨データの度数であり、横軸は累積降水量の階級値を示している。たとえば、階級値125 mmの上にある棒グラフは100 mm < X_n ≤ 150 mm (X_nは階級範囲のn番目の数値)の階級範囲にある数値の度数を意味しており、■の記号はのり面崩壊を引き起こした崩壊降雨、□の記号はのり面崩壊を引き起こさなかった未崩壊降雨を表している。データ数は前述の通りであり、後者は前者の3倍の数となっている。これらから見られるように、ここで検討しているデータにおいては崩壊降雨量は未崩壊降雨量に比べて少な目に位置している。

(2) 分析手法

本研究で用いた分析手法は重判別分析⁸⁾であり、判別関数式は次式で示される。

$$f_j = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i X_i \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、f_j：降雨開始j時間目の判別得点
- A₀：定数項
- A_i：各アイテムの係数値
- X_i：各アイテムの値
- n：アイテム数 (n=1, ..., 7)

そして、f_jの全体の変動S_Tとグループ間の変動S_Bの比、すなわちS_B/S_Tが最大になるように定数項A₀および各アイテムの係数値A_iが決定され、式(1)の判別関数式より降雨開始j時間目の判別得点が求められる。ここで、目的変数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。)

降雨要因については1群のデータとして「崩壊した」時の降雨、2群のデータとして「崩壊しなかった」時の降雨(降雨1、降雨2、降雨3)を用いている。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。以上より、雨の降り始めから1時間ごとの降雨量に対してそれぞれデータを作成し、「崩壊を引き起こした降雨」と「崩壊を引き起こさなかった降雨」の判別を1時間ごとに試みた。

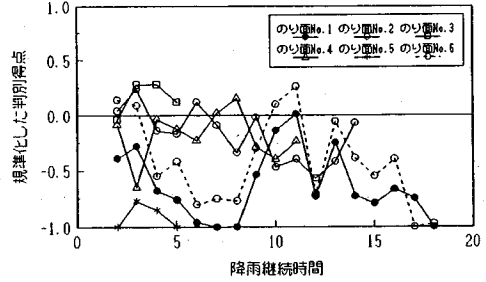
(3) 1時間ごとの降雨を対象とした分析結果

3岩種の地山に建設されたのり面のうち、一例として降雨開始10時間後の堆積岩地山ののり面の入力データを表一2に示す。本研究で収集した資料では大半ののり面が降雨開始から20時間までに崩壊しているため、分析は降雨開始から20時間までのデータを対象として行った。ここで、降雨継続中にのり面が崩壊した場合、崩壊以降の未崩壊降雨(2群)のデータは削除している。したがって順次データ数は減少している。なお、のり面番号は資料整理を行った順に設定しており、その順位に意味はない。

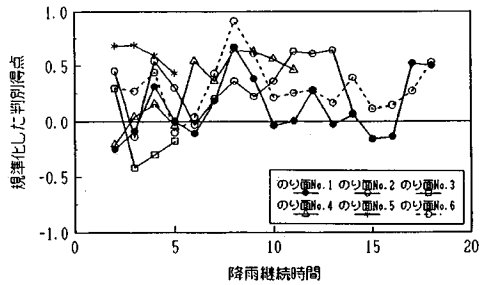
表一 2 降雨開始 10 時間後の入力データ例
(堆積岩地山の場合)

表 外的 基準	山 No	のり面 要素			降雨要素			
		地質	地形	土質	経過年数 (年)	累積降水量 (mm)	一時最大降 水量(mm/h)	降雨 パターン
崩 壊	1	3	1	3	2			
	2	5	2	3	10	57	12	2
	3	4	1	3	11	45	20	3
	4	4	2	2	6	50	31	1
	5	3	1	2	11	45	20	3
	6	3	2	2	11	45	20	3
	7	4	1	4	10	31	9	1
	8	3	1	4	11	49	20	3
	9	3	1	1	12	6	3	3
	10	4	1	2	12	6	3	3
	11	3	3	3	12	6	3	3
降 雨	1	3	1	3	0			
	2	5	2	3	10	45	7	3
	3	4	1	3	10	45	7	3
	4	4	2	2	5	39	20	1
	5	3	1	2	10	45	7	3
	6	3	2	2	10	45	7	3
	7	4	1	4	4	73	32	2
	8	3	1	4	8	18	6	3
	9	3	1	1	8	45	14	1
	10	4	1	2	12	50	9	1
	11	3	3	3	12	50	9	1
未 崩 壊	1	3	1	3	0			
	2	5	2	3	8	45	14	1
	3	4	1	3	10	57	12	2
	4	4	2	2	6	15	2	3
	5	3	1	2	10	57	12	2
	6	3	2	2	10	57	12	2
	7	4	1	4	6	71	36	2
	8	3	1	4	4	73	32	2
	9	3	1	1	10	19	5	1
	10	4	1	2	12	40	24	1
	11	3	3	3	12	40	24	1
降 雨	1	3	1	3	1			
	2	5	2	3	8	4	1	1
	3	4	1	3	11	7	2	3
	4	4	2	2	5	52	16	3
	5	3	1	2	11	7	2	3
	6	3	2	2	11	7	2	3
	7	4	1	4	5	102	34	2
	8	3	1	4	10	31	9	1
	9	3	1	1	0	27	14	1
	10	4	1	2	11	42	19	2
	11	3	3	3	11	42	19	2

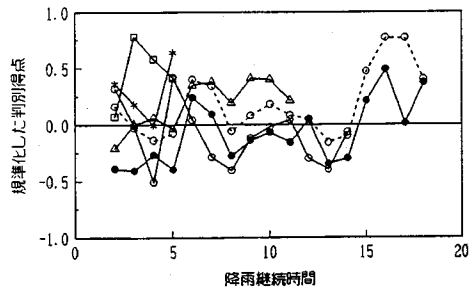
備考
表中の空白は降雨開始後10時間経過するまでにのり面が崩壊したことを意味する。



図一 3 崩壊のり面の判別得点の経時変化例
(変成岩地山ののり面)



図一 4 (a) 未崩壊のり面の判別得点の経時変化例
(変成岩地山ののり面で降雨 1 の例)



図一 4 (b) 未崩壊のり面の判別得点の経時変化例
(変成岩地山ののり面で降雨 3 の例)

a) 崩壊・未崩壊降雨に対する判別得点の時間経過
ここでは、1時間ごとに構築した判別システムより出力された判別得点の時間経過を岩種別に示す。図一 3 は変成岩地山の 6 つの崩壊のり面を例に取り、崩壊を引き起こした降雨の判別得点の経時変化を示したものである(分析に用いたデータをすべて図化すると繁雑となるので、ここでは資料整理順に設定したのり面番号の順に図化している)。ここで、縦軸は各時間ごとの最大値で規準化した判別得点、横軸は降雨開始からの継続時間である。出力された判別得点の判別境界値は 0 であり、崩壊時の降雨(のり面崩壊を引き起こした降雨)は負の値、未崩壊時の降雨(のり面崩壊を引き起こさなかった降雨)は正の値で与えられている。そして、判別得点の絶対値が大きいほど危険降雨か否かが明らかに判別できることを意味している。なお、降雨開始から 1 時間目は降雨量が微少で有意差のないデータが多く、また降雨パターン要因など作成できないデータもあったので分析を行っていない。したがって、図面上においても図化されていない。判別得点の出力結果は、図中でのり面ごとの時間変化傾向が理解し易いように時間ごとの判別得点を折れ線で表示している。

図一 3 より降雨開始からしばらくは誤判別があるが、時間の経過と共に判別が安定化する(崩壊降雨を「崩壊する」と正しく判別できるようになる)ことが分かる。

同じのり面について、図一 4 (a) は未崩壊時の降雨 1 (のり面崩壊を引き起こさなかった降雨のうち、のり面崩壊以前の一番目に大きかった降雨量)、図一 4 (b) は未崩壊時の降雨 3 (のり面崩壊を引き起こさなかった降雨のうち、のり面崩壊以前の三番目に大きかった降雨量)をそれぞれ図化したものである。未崩壊降雨については、同じ岩種の地山であってものり面の違いによって「崩壊しない」と正しく判別できた場合とそうでない場合があることが分かる。未崩壊時の降雨 1 と降雨 3 の判別得点の時間変化傾向は降雨量の違いによって異なるが、崩壊降雨の場合のような特徴は見受けられず、降雨 1 と降雨 3 を合わせて考えると、判別得点は時間にかかわらずばらついているようである。

図一 5、図一 6 (a)、図一 6 (b) は堆積岩地山の崩壊

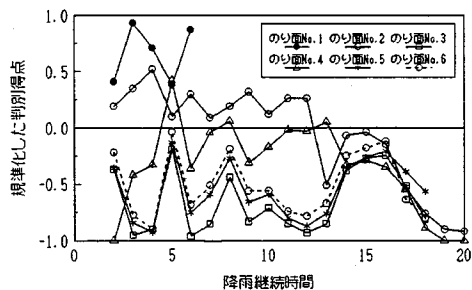


図-5 崩壊のり面の判別得点の経時変化例 (堆積岩地山ののり面)

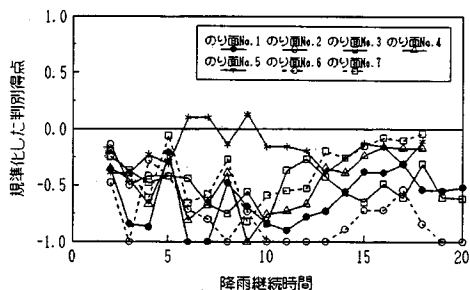


図-7 崩壊のり面の判別得点の経時変化例 (火成岩地山ののり面の例)

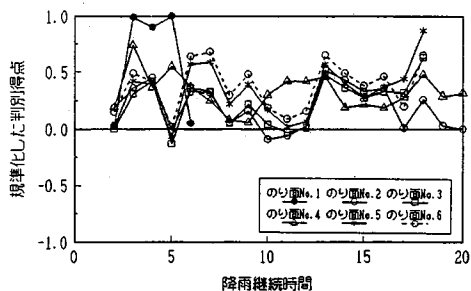


図-6(a) 未崩壊のり面の判別得点の経時変化例 (堆積岩地山ののり面で降雨1の例)

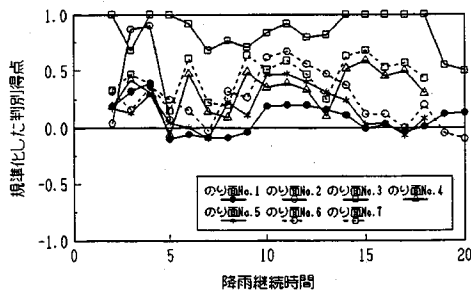


図-8(a) 未崩壊のり面の判別得点の経時変化例 (火成岩地山ののり面で降雨1の例)

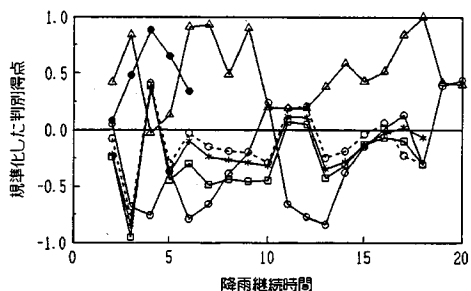


図-6(b) 未崩壊のり面の判別得点の経時変化例 (堆積岩地山ののり面で降雨3の例)

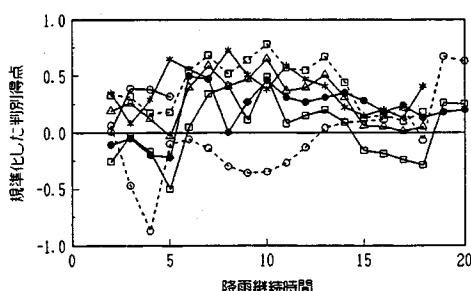
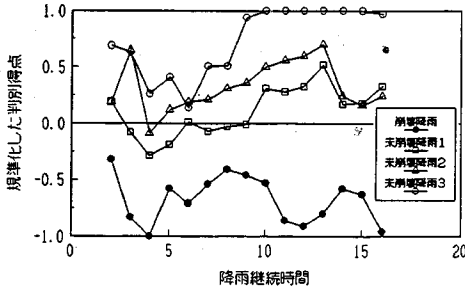


図-8(b) 未崩壊のり面の判別得点の経時変化例 (火成岩地山ののり面で降雨3の例)

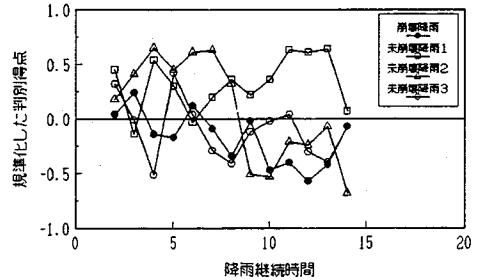
のり面について同様の関係を図化したものである。これらの図を見て分かるように、崩壊時降雨と未崩壊時降雨の判別得点の時間変化傾向は変成岩地山ののり面の場合と類似している。一方、図-7、図-8(a)、図-8(b)は火成岩地山の崩壊のり面について図化した例である。なお、火成岩地山では解析のり面数が7であったので、ここでは全のり面について図化している。この岩種ののり面の判別得点は、多少判別境界値付近に分布するのり面もあるが、変成岩地山と堆積岩地山ののり面の場合と比較して「崩壊する」あるいは「崩壊しない」と正しく判別しやすいことが分かる。これらのことが岩種特性を意味するかどうかについては明らかにできないが、少なくとも地山の特性⁹⁾に応じて個々に判別システムを構築する必要があることは明らかであろう。

b) 崩壊・未崩壊降雨の判別傾向

図-9、図-10は判別得点の時間変化傾向の典型的特徴を見るために、判別得点と降雨継続時間の関係を一例として図化したものである。ここで、図-9は崩壊降雨の判別得点が小さいために崩壊降雨を「崩壊する」とよく判別できた堆積岩地山ののり面No.9の例であり、図-10は崩壊降雨と未崩壊降雨の判別得点の差がないために判別できなかった変成岩地山ののり面No.2の例である。図中●印は崩壊降雨、□印は未崩壊時の降雨1、△印は未崩壊時の降雨2、○印は未崩壊時の降雨3をそれぞれ表している。このように、同様の手法で行った分析結果でありながら個々ののり面によって判別状況は様々である。これは、崩壊・未崩壊の判別に及ぼす影響の程度がのり面評価要因と降雨継続中の降雨要因とで



図—9 危険降雨が良好に判別できた例



図—10 危険降雨が良好に判別できない例

表—3 崩壊・未崩壊の正判別率の一覧

継続時間	変成岩地山の場合			堆積岩地山の場合			火成岩地山の場合		
	崩壊時	未崩壊時	全体	崩壊時	未崩壊時	全体	崩壊時	未崩壊時	全体
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	58.3	50.0	52.1	72.7	69.7	70.5	100.0	71.4	78.6
3	58.3	58.3	58.3	72.7	66.7	68.2	100.0	66.7	75.0
4	83.3	75.0	77.1	81.8	69.7	72.7	100.0	76.2	82.1
5	75.0	52.7	58.3	72.7	57.6	61.4	100.0	57.1	67.9
6	83.3	80.5	81.3	81.8	63.6	68.2	85.7	71.4	75.0
7	83.3	80.5	81.3	81.8	60.6	65.9	85.7	66.7	71.4
8	75.0	77.8	77.1	72.7	63.6	65.9	100.0	71.4	78.6
9	91.7	72.2	77.1	81.8	66.7	70.5	85.7	71.4	75.0
10	75.0	69.4	70.8	72.7	69.7	70.5	100.0	81.0	85.7
11	75.0	75.0	75.0	72.7	69.7	70.5	100.0	71.4	85.7
12	91.7	80.6	83.3	72.7	78.8	77.3	100.0	76.2	82.1
13	91.7	66.7	72.9	72.7	63.6	65.9	100.0	85.7	89.3
14	83.3	72.2	75.0	81.8	60.6	65.9	100.0	85.7	89.3
15	83.3	69.4	72.9	81.8	57.6	63.6	100.0	76.2	82.1
16	83.3	72.2	75.0	81.8	66.7	70.5	100.0	81.0	85.7
17	83.3	80.6	81.3	90.9	60.6	68.2	100.0	71.4	78.6
18	83.3	80.6	81.3	81.8	57.6	63.6	100.0	76.2	82.1
19	83.3	80.6	81.3	90.9	60.6	68.2	100.0	81.0	85.7
20	83.3	80.6	81.3	90.9	57.6	65.9	100.0	85.7	89.3
平均値	80.2	72.4	74.4	79.4	64.3	68.1	97.7	74.9	81.0

異なるためと考えられる。

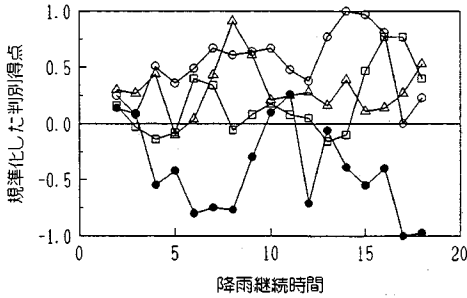
表—3は各岩種ののり面について時間ごとの正判別率を一覧表に整理したものである。ここで、「崩壊時」の正判別率とは実際に崩壊を引き起こした降雨を「崩壊した」と判別した率、「未崩壊時」の正判別率とは崩壊を引き起こさなかった降雨を「崩壊しなかった」と判別した率である。そして、「全体」とはこれらを総合して崩壊あるいは未崩壊に至る降雨をそれぞれ正しく判別した率である。ただし、のり面が降雨開始から20時間までに崩壊した場合、崩壊した時点で判別が正しければそれ以降も「正」、誤っていればそれ以降も「誤」として正判別率を求めている。そして、前述の理由により降雨開始1時間目は分析を行っていない。

表—3の分析結果より、崩壊を引き起こした降雨を「崩壊する」と正しく判別できる率(正判別率)の平均値は、変成岩地山の場合は80.2%、堆積岩地山の場合は79.4%、火成岩地山の場合は97.7%で非常に高いことが分かる。一方、未崩壊降雨の正判別率は、いずれの

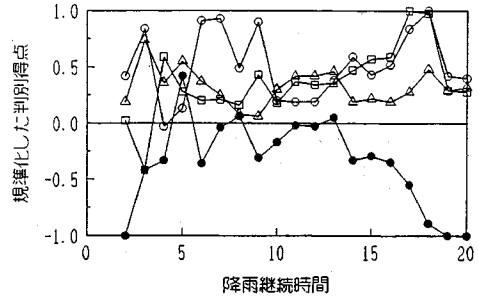
岩種についても崩壊時の降雨の判別率より低く、それぞれ72.4%、64.3%、74.9%である。そして、全体の崩壊・未崩壊の正判別率はそれぞれ74.4%、68.1%、81.0%であり、その高低は未崩壊降雨の判別率に左右されていることが分かる。これらのことは、個々ののり面状況と降雨とのかかわりによるものと思われるが、いずれの場合も良好な判別能力を有した判別システムが構築できていると考えられる。そして、本研究で用いた統計的手法によりのり面崩壊を引き起こす降雨とそうでない降雨を判別すれば、崩壊降雨を「崩壊しない」と誤判別する割合は小さく、防災管理上安全側の立場のシステムが構築できると考えられる。

c) 様々な降雨量での崩壊・未崩壊降雨の判別傾向

ここでは各岩種の地山に建設されたのり面の中から、崩壊降雨を「崩壊した」と正しく判別できたのり面を選び、崩壊を引き起こした降雨と様々な降雨量の未崩壊降雨との判別傾向について考察する。未崩壊降雨データは、図—2(a)~(c)に示した降雨データの度数分布図



崩壊時(170mm) 未崩壊時(53mm)
未崩壊時(121mm) 未崩壊時(176mm)
図-11 崩壊降雨と未崩壊降雨の判別得点
(変成岩地山:のり面 No.6 の場合)



崩壊時(172mm) 未崩壊時(78mm)
未崩壊時(142mm) 未崩壊時(251mm)
図-12 崩壊降雨と未崩壊降雨の判別得点
(堆積岩地山:のり面 No.4 の場合)

を参考に、崩壊時の降雨量に対して多い場合、同程度の
場合および少ない場合のデータを用いて判別得点を求め
ている。

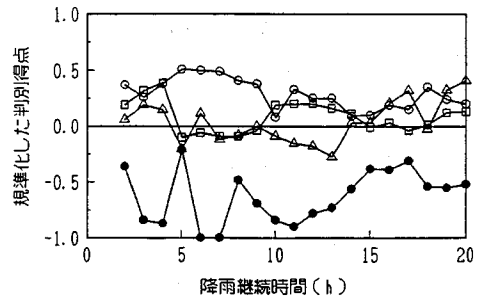
図-11~図-13に分析結果を示す。図中、凡例の括
弧内の数値は累積降水量を意味している。これらの図か
ら、未崩壊時の判別得点の大きさは、降雨量の大きさ
によらず岩種ごとでそれぞれ異なることが分かる。そし
て、岩種別に構築した判別システムは、様々な量の降雨
に対し、崩壊を引き起こす降雨であるか否かを良好に判
別できることが分かる。誤判別が生じた未崩壊降雨につ
いては、時間の経過に伴って判別境界値付近(判別得点
0の付近)を推移することから、「およそ未崩壊であろ
う」との判断はできると思われる。

4. 降雨要因のみから判別した場合の正判別率 の比較

先に、のり面崩壊の予測には降雨要因のみならず地
質、地形、土工、経過年数といった要因をも含めた分析
が重要であることを述べた。しかし、現実にはこれらの
データが収集・整理できないことも多い。そこで、こ
こでは各要因がそろった場合と降雨データのみが入手
できた場合とについて重判別分析を行い、降雨以外の要因
が重要であることを示す。このことは、信頼性の高い防災
管理を行う上で、入手した情報量(要因数)の違いによ
る崩壊・未崩壊の判別システムの特性を把握する上でも
重要であると考えられる。検討ケースは以下の2ケース
である。

- ケース1:各要因がそろった場合(要因数は7)
(「地質要因」+「地形要因」+「土工要因」+
「経過年数」+「累積降水量」+「一時間最大降水
量」+「降雨パターン」)
- ケース2:降雨要因だけを用いた場合(要因数は2)
(「累積降水量」+「一時間最大降水量」)

なお、独立性が高い有用なデータで分析を行うために前

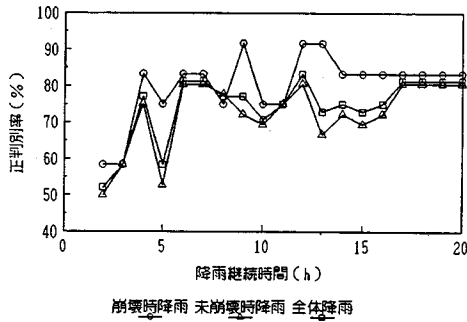


崩壊時(54mm) 未崩壊時(85mm)
未崩壊時(134mm) 未崩壊時(245mm)
図-13 崩壊降雨と未崩壊降雨の判別得点
(火成岩地山:のり面 No.1 の場合)

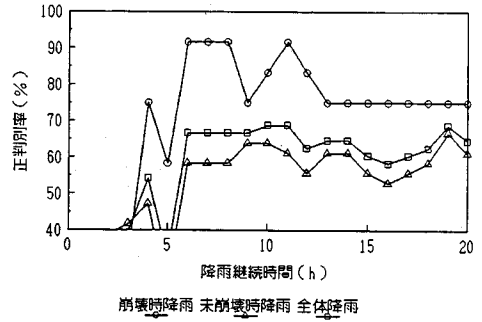
章の分析結果と同様、地質要因は「節理等の状態(C)」、
地形要因は「降雨水の集中度(G)」、土工要因は変成岩
地山では「のり高さ(H)」、堆積岩地山では「のり面保
護工(J)」、火成岩地山では「のり面保護工(J)」で代
表させている。

変成岩地山、堆積岩地山および火成岩地山の各のり面
について、ケース1とケース2の分析結果を図-14と
図-15((a)は変成岩地山の場合、(b)は堆積岩地山
の場合、(c)は火成岩地山の場合)にそれぞれ示す。こ
こで、縦軸は正判別率、横軸は降雨継続時間である。図
中、○印で示した崩壊時降雨の正判別率とは実際に崩壊
を引き起こした降雨を「崩壊した」と正しく判別した
率、△印で示した未崩壊降雨の正判別率とは崩壊を引き
起こさなかった降雨を「崩壊しなかった」と正しく判別
した率、□印で示した全体降雨とはこれらを総合して崩
壊あるいは未崩壊の降雨を正しく判別した率である。

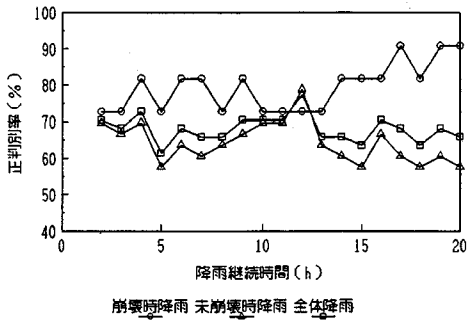
図-14のケース1(要因数7の場合)では、変成岩
地山の場合は崩壊時、未崩壊時および全体の降雨の正判
別率、堆積岩地山の場合は崩壊時の降雨の正判別率が降
雨継続時間の経過によっても増加する傾向にある。火



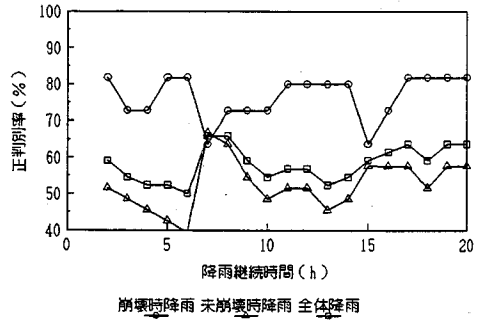
(a) 変成岩地山の場合



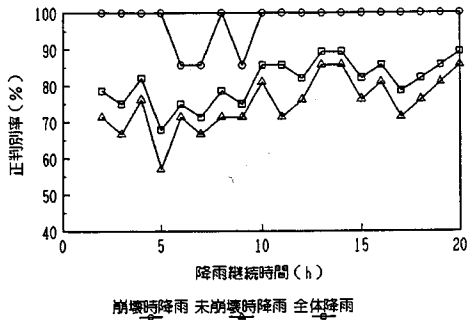
(a) 変成岩地山の場合



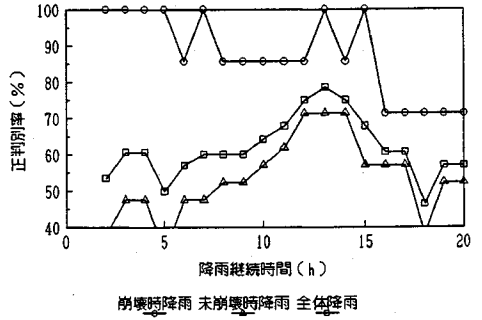
(b) 堆積岩地山の場合



(b) 堆積岩地山の場合



(c) 火成岩地山の場合



(c) 火成岩地山の場合

図-14 ケース1の正判別率経時変化図

図-15 ケース2の正判別率経時変化図

成岩地山の場合は、崩壊時の降雨の正判別率は一部の継続時間を除いて100%という高い数値であり、未崩壊時と全体の降雨の正判別率は降雨継続時間の経過とともに増加する傾向にある。これらのことが岩種特性を表しているのかについては明らかにできない。しかし、岩種別に判別システムを構築すれば、崩壊を引き起こした降雨を「崩壊した」と正しく判別できるようになることが分かる。さらに、岩種や要因数の違いによらず崩壊降雨の正判別率は未崩壊降雨の正判別率よりも大きな値であることが分かる。一方、図-15のケース2（要因数2の場合）の正判別率は、時間の経過に対してもばらつきが大きいためにケース1のような増加傾向は見受けられず、いずれの岩種についても低い数値となっている。

表-4 各ケースの相関比の比較

ケース	地山の岩種	平均値
ケース1 (要因数7の場合)	変成岩	0.358
	堆積岩	0.271
	火成岩	0.403
ケース2 (要因数2の場合)	変成岩	0.231
	堆積岩	0.063
	火成岩	0.161

表-4は各ケースについて岩種ごとの相関比を一覧表にまとめたものである。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、いくら以上あれば良いのかについて工学的な判断基準はないが、相関比が大きいほど得られた判別式の判別能力が高いと評価できる数値である。ここでは継続時間ごとに重判別分析を行っているので、各岩種について平均値を求めた。これより、ケース1のほうがケース2よりも高い判別能力を有していることは明らかである。

以上のことから、システムで出力された判別得点から崩壊するか否かを判別できる割合は、要因数が少なくなるほど小さいと言える。これらのことは本研究で収集できたデータに限って言えることかもしれないが、岩種によらず同じ傾向にあるということは、崩壊降雨の判別を精度よく行うためには、アイテムとして降雨に関する要因だけでなく、のり面評価要因など降雨以外の要因も考慮に入れる必要があることを示唆していると考えられる。さらに、この結果は前報²⁾と同様であることから、のり面評価要因など降雨以外の要因が崩壊降雨の判別を行う上で重要な影響因子であると考えられる。

5. 個々ののり面崩壊を引き起こした降雨の特性

表一5は個々ののり面崩壊を引き起こした降雨について、判別システムから出力された上述のケース1とケース2の判別得点の時間変化傾向より判断して、下記の4つのタイプに分類したものである。

タイプI：降雨開始から常に崩壊降雨として判別される降雨（降雨開始から一度も誤判別がなかった降雨）

タイプII：降雨開始から既ね崩壊降雨として判別される降雨（降雨期間中の誤判別はわずかであり、実際の崩壊時間に近づくほど正しく判別される降雨）

タイプIII：時間の経過に伴って崩壊降雨として判別される降雨（降雨開始後約10時間を過ぎたあたりから正しく判別される降雨）

タイプIV：常に「崩壊降雨である」と判断しにくい降雨（実際の崩壊時間に近づいても誤判別されている降雨）

すなわち、タイプIに分類される降雨については比較的崩壊降雨としての予測が容易であり、以下判別が困難になる順にタイプII～タイプIVに分類している。ここで判別境界値は0で、負の値が大きいほど「崩壊降雨」としての判別が容易であり、0に近づくほど判別しにくくなることを意味している。そして、誤判別は正の値で出力される。

表一5を見ると、要因数の違いによって崩壊降雨として判別できるタイプが変わるのり面とそうでないのり面があることが分かる。これは、個々ののり面を構成する

表一5 危険降雨に関する判別得点の変化状況の分類

地山の岩種	のり面 No.	ケース1	ケース2
		(要因数7の場合)	(要因数2の場合)
変成岩	1	I	II
	2	III	IV
	3	IV	IV
	4	II	II
	5	I	I
	6	II	II
	7	III	III
	8	II	II
	9	II	II
	10	I	II
	11	IV	IV
	12	I	II
堆積岩	1	I	IV
	2	III	IV
	3	I	I
	4	II	III
	5	I	I
	6	I	I
	7	IV	IV
	8	I	IV
	9	I	I
	10	I	I
	11	I	I
火成岩	1	I	I
	2	I	I
	3	I	I
	4	I	IV
	5	II	IV
	6	I	I
	7	I	IV

岩種、地質特性および地形特性によつてのり面崩壊を引き起こす降雨の状況が異なるためと考えられる。すなわち、タイプI～タイプIIIに分類される降雨（崩壊降雨であると判断できる降雨）のうち、要因数の違いによって判別タイプが変わらないのり面では、「累積降水量」および「一時間最大降水量」によつてのり面崩壊の発生の有無が決定づけられるのり面であり、危険降雨の判別はこれらの要因による影響が大きいと言える。ケース1とケース2で判別タイプが異なるのり面では「のり面評価要因」など降雨以外の要因が、危険降雨の判別を行う上で影響が大きいのり面であると言える。これらに対し、いずれのケースでもタイプIVに分類されたのり面は、「のり面評価要因」、「時間要因」および「降雨要因」だけでは危険降雨の判別が困難なのり面であると言える。判別得点の分類結果（表一5参照）より、各タイプに分類されたのり面数は次の通りである。

ケース1：各要因がそろった場合（要因数は7）

タイプI：17個、タイプII：6個

タイプIII：3個、タイプIV：4個

ケース2：降雨要因だけを用了場合（要因数は2）

タイプI：11個、タイプII：7個

タイプIII：2個、タイプIV：10個

これらより、要因が多く分かるとタイプIが増加し、要因が降雨に関する要因しか分らないとタイプIVが増加している。したがって、降雨要因だけでなくのり面に関する要因も含めて種々の要因を把握することが重要であると考えられる。

以上より、ある地域に限ったのり面崩壊資料を分析の対象としているにもかかわらず、個々ののり面にとって

崩壊の影響因子は多種多様であり、降雨量に影響されるのり面、降雨パターンに影響されるのり面、地質特性や地形特性に影響されるのり面などが混在していることが分かる。したがって、限られた要因のみで降雨継続中ののり面崩壊が発生するかどうかを判別することには限界があると考えられる。また、ある地山に建設されたのり面にとって危険降雨か否かについて信頼性の高い判別を行うためには、ケース1で採用したようにのり面評価要因と降雨要因などの各アイテムがそろった場合の資料を数多く収集・整理することが重要であると考えられる。

6. ま と め

本研究では供用中降雨時に崩壊した切土のり面を対象に、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アイテムとして採用し、「崩壊を引き起こした降雨」と「降雨を引き起こさなかった降雨」のデータを用いて分析を行った。そして、降雨継続中におけるのり面が崩壊するか否かの判別を行う上での課題を明らかにした。要点を以下に列記する。

(1) 雨の降り始めから1時間ごとに重判別分析を行うことにより、時間の経過に伴ってのり面崩壊を引き起こすか否かを判別するシステムの構築方法を示した。

(2) このシステムから出力された判別得点により、時間の経過に伴ってのり面崩壊を引き起こした降雨を「崩壊する」と正しく判別できるようになる。

(3) 本手法で構築した判別システムでは、のり面崩壊を引き起こした降雨を「崩壊した」と判別できる正判別率は約80%～98%である。

(4) この判別システムは、様々な降雨量の雨に対しても崩壊を引き起こす降雨であるか否かを判別することができる。

(5) 降雨要因のみから崩壊・未崩壊の判別を行った場合、のり面評価要因がすべてそろった場合に比べて正判別率とシステムの信頼性は低下する。

(6) システムより出力された判別得点の1時間ごとの変化傾向は、岩種の違いだけでなくのり面の特性によ

ってもそれぞれ異なる。

上で示したように、本研究の方法で構築したシステムを採用することにより、降雨中においてその降雨がのり面の崩壊を引き起こす降雨か否かの判断ができる可能性を示しており、統計的手法により崩壊予測を行うことの有用性を示していると考えられる。ただし、のり面崩壊の影響因子は多種多様であり、地盤条件や降雨条件には地域特性があるので、他の地域ののり面について検討する場合や岩種および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。そうすることにより、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。データ整理には山口大学大学院生 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) 奥園誠之：斜面防災100のポイント、鹿島出版会、p.154, 1987.
- 2) 西 邦正・古川浩平・小川 健・中川浩二：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、土木学会論文集, No. 480/VI-21, pp.127～136, 1993. 12.
- 3) 瀬尾克美・原 義文・五代 均：土石流の警戒・避難基準雨量の設定に関する研究、土木研究所資料第2215号、1985. 3.
- 4) 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, No. 94, pp.7～11, 1974. 12.
- 5) 瀬尾克美：土砂災害防止のための情報システム第6章、(出)全国治水砂防協会, pp.102～103, 1985. 6.
- 6) 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.
- 7) 気象庁下関気象台：地域気象観測毎時降水量日報
- 8) 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.
- 9) 奥園誠之：岩盤分類—斜面安定における岩盤分類、日本応用地質学会, pp.83～89, 1983. 8.

(1993.11.29 受付)

A SYSTEM FOR FORECASTING CUT-OFF SLOPE COLLAPSE DURING CONTINUOUS HEAVY RAIN

Kunimasa NISHI, Kohei FURUKAWA, Tsuyoshi OGAWA and Koji NAKAGAWA

The judgement of collapse or noncollapse of cut-off slope during continuous heavy rain is extremely important upon disaster management. But, until the present time the judgement was hardly made according to the individual slope condition. The present paper in this research deals with the procedure for formulation of a system that can foretell the collapse or noncollapse of slope for every hour during continuous heavy rain using various factors, such as slope evaluation factors, time and rain together with its application to a practical slope. The authors confirm the possibility of slope judgement by the system and discuss further ambiguous issues.