

急傾斜地における斜面要因を考慮したげ崩れ発生限界雨量線の設定手法に関する研究

倉本 和正¹・鉄賀 博己²・菊池 英明³・守川 倫⁴・門間 敬一⁵・古川 浩平⁶

¹正会員 工修 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²山口県土木建築部砂防課傾斜地保全係長 (〒753-8501 山口県山口市滝町 1-1)

³正会員 工博 八千代エンジニアリング(株)東京事業部水工部 (〒153-0061 東京都目黒区中目黒 1-10-23)

⁴学生会員 山口大学大学院 工学研究科社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁵正会員 建設省土木研究所砂防部砂防技術総括研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市大宇旭 1 番地)

⁶正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

急傾斜地におけるがけ崩れの発生予測手法の一つとして提案されている発生限界雨量線は、従来降雨要因を用いて設定されているが、崩壊危険度の異なる斜面が混在する場合、空振り率の高いものになることが予想される。本研究においては、豪雨時に発生するがけ崩れを定義し、それらに対して重判別分析を用いたがけ崩れ発生・非発生予測システムの構築を行った。また、構築したシステムを用いて降雨要因と斜面要因を考慮したげ崩れ発生限界雨量線を設定し、その有効性について検討を行った。さらに、散発的に発生するがけ崩れに対する適用性についても考察を加えた。

Key Words: slope failure, critical line, heavy rainfall, multiple discriminate analysis

1. はじめに

急傾斜地においてがけ崩れ発生の危険性が高い急傾斜地崩壊危険箇所(以下、危険箇所)は全国に約 8 万 7 千箇所¹⁾も指定されており、しかも、危険地域への住居や開発などが進行する近年においては、その数は増加する傾向にある。そのような背景から、建設省では急傾斜地崩壊対策事業等により危険箇所に対するハード対策を整備する動きが年々強まっているが、平成 8 年度末においてその整備率はわずかに約 24%¹⁾にとどまっており、現状ではそれらすべてに対してハード対策を施すのは極めて困難である。そのような中、近年ではハード対策とともに警戒・避難体制を整備するソフト対策に注目が集まっており²⁾、危険地予測、危険降雨予測、警戒避難対策等は重要な課題とされている。

気象庁³⁾においてはレーダー・アメダス解析雨量を利用した広域における平均的な斜面崩壊発生の可能性(ポテンシャル)を表す「土壌雨量指数」を開発し、大雨注意報・警報の基準値として用いることが検討されている。しかしながら、この土壌雨量指数は広域における天気予報的な意味合いであり、予測よりも予報の範囲内であると考えられる。

また、建設省²⁾においては、「集中的に発生するがけ

崩れ」に対して半減期 72 時間及び半減期 1.5 時間の実効雨量を用いて評価したがけ崩れ発生限界雨量線(以後、CL)の設定を行い、予測精度の高い結果を得ている。しかしながら、降雨要因のみで設定した場合、CLを越えるような降雨に対しては対象とする地域がすべて危険と判断され、がけ崩れが発生しない箇所では空振りとなるため、周辺住民の予測に対する信頼性の欠如が懸念される。しかも、CLを設定する際に対象とする「集中的に発生するがけ崩れ」に対しては、「散発的に発生するがけ崩れ」との境界が明確に示されておらず、設定する上で障害となることが予想されることに加え、その設定手法の適用可能な範囲は非常に限定されている。

以上のことから、がけ崩れのCLを設定するにあたっては対象とするデータを明確にし、降雨要因のみでなく、各斜面の地形特性を考慮して個別に設定することが望ましいと考えられるが、それらの課題に対する研究はほとんど行われていないのが現状である。

2. がけ崩れデータベースの構築と対象データの選別

本研究においては、昭和 50～平成 10 年までに山口

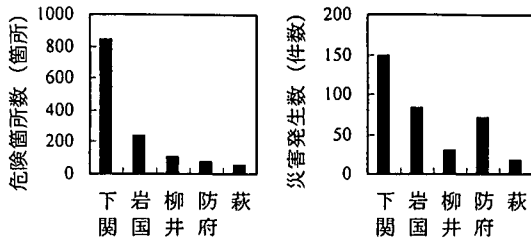


図-1 地域毎の危険箇所数及び発生状況

県内で発生したかけ崩れの災害報告書 999 件、平成 8 年度急傾斜地崩壊危険箇所点検データ（以下、危険箇所データ）3,436 箇所⁴⁾及びその期間の雨量データを収集、整理し、それらを効率的に検索、抽出するためにかけ崩れデータベースを構築した。以後の解析においては、このデータベースに基づいて斜面要因、降雨要因を抽出し、解析用にデータを変換する。

解析に用いる斜面要因については、災害報告書に記載されている平面図、横断面図等から読み取ることができる幾つかの要因（斜面縦横断形状、斜面高、斜面傾斜角等）を用いることも可能であるが、記録者毎のばらつきや項目の欠落等も幾つか含まれていることに加え、調査項目も少ないことからそのみで解析を行うことは精度上問題がある。

これに対し、危険箇所データは熟練した技術者が危険箇所点検要領⁵⁾に示される統一された基準に従って調査を実施し、しかも災害報告書に比べ調査項目が多いため斜面要因として用いるには十分であるが、発生の有無が不明である。したがって、危険箇所において災害の発生が確認できれば、危険箇所を発生、非発生斜面に区分でき、それらに対して危険箇所データを斜面要因として用いることができる。

そこで、本研究においては、1/10,000 の地形図（山口県土砂災害警戒避難体制図）において危険箇所と危険箇所が対応していることを確認した上で、危険箇所を発生及び非発生斜面に区分し、それぞれの斜面に対しては各斜面の危険箇所データを斜面要因として用いた。また、発生報告時刻等については災害報告書データをそのまま用いることとする。

降雨要因については、従来の研究⁶⁾から雨量観測所を中心とする半径 5km 円内を降雨一定とみなし、発生報告時刻を含む一連の降雨を発生降雨として抽出する。ここで、一連の降雨とは、前後に 24 時間以上の無降雨があるひとまとまりの降雨として定義⁷⁾する。ただし、発生降雨は危険箇所においてかけ崩れの発生が確認されたものとするため、危険箇所に指定されていない箇所でも発生が確認されたものであっても、発生降雨としては取り扱わない。

非発生降雨は、原則として時間雨量 20mm/hr または

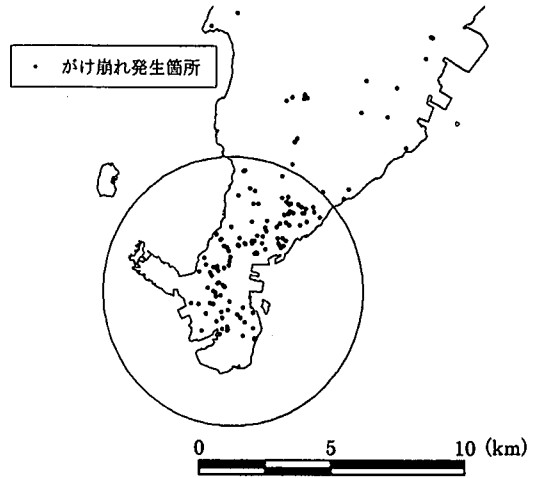


図-2 対象地域及び対象エリア

累積雨量 80mm 以上⁸⁾で崩壊が確認されていない一連の降雨とし、それらすべてを抽出する。ただし、降雨要因と斜面要因を組合せて解析を行う場合、同一の降雨において特定の危険箇所においては発生であるが、その他の危険箇所においては非発生となる場合があるため、その場合、発生降雨であっても非発生斜面に対しては非発生降雨として取り扱うものとする。

3. 対象地域の設定

山口県は全国的に見てもかけ崩れが多発する地域に属しており、毎年のように各地で被害が発生している。中でも、本州最西端に位置する下関市においては図-1 に示す通り、県内の他の地域に比べ危険箇所が圧倒的に多く存在し、かけ崩れの発生数も最多である。しかも、そのほとんどは古くから海上交通の要所として栄え、現在も市の中心となっている下関市南部に分布し、この地域は常に土砂災害の危険にさらされている。

このような背景から、下関においては「わがまちの斜面構想」⁹⁾をかかげ、斜面の安全確保や斜面環境の保全・創造等に対して積極的な取り組みを行っている。しかしながら、現状では毎年訪れる梅雨や台風の時期になると各地で災害が多発しており、警戒・避難等のソフト対策は重要な課題といえる。

そこで、本研究においては、図-2 に示す下関市南部を対象地域に設定し、解析を行うこととした。図中の円は下関気象台を中心とする半径 5km の観測エリアを示し、この円内においては降雨一定とみなす。また、図中の●については過去 24 年間の発生箇所を示しており、観測エリア内で多くの災害が発生していることがわかる。

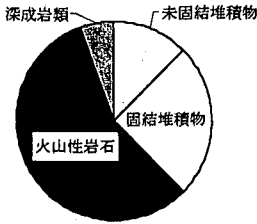


図-3 下関市における地質分布

がけ崩れ等の土砂災害に関しては地質的な特徴を捉えていくことが必要である¹⁰⁾とされており、地質が土砂災害に及ぼす影響が少なくないと考えられる。したがって、それらの影響を排除することが重要であると考えられるが、下関市においては図-3に示す通り、様々な地質が混在している。そこで、それらの要因の影響を取り除くため、その中で最も多い火山性岩石(安山岩)を下関市の代表的な地質として選定し、解析に用いることとした。

4. 対象データの検討

(1) 発生時刻の推定

がけ崩れの発生時刻については曖昧なものも多く、また、報告された時刻についても信頼性について欠ける面がある¹¹⁾。特に、周囲が暗く発生の発見が困難な夜間から深夜にかけては、翌日の朝になって発見され、報告されているものも少なくないと考えられる。

対象とする下関市において、がけ崩れ災害報告書に記載されている発生報告時刻を見ても、図-4に示す通り午前中(特に6:00~9:00)に報告されたものが多く、このことからしても災害報告書の発生報告時刻についてはその信憑性に疑問が残る。したがって、本研究では発生報告時刻の多い午前中(6:00~9:00)のデータについて発生時刻の推定を行った。

発生時刻の推定は、推定の対象となるデータの発生時刻を、前日の夜間(20:00以降)から発生報告時刻まで最大の時間雨量となる時刻に移動し、その時刻を発生推定時刻とした。ここで、発生時刻を移動させる時間帯を前日の20:00以降にしたのは、周囲が暗くなり発生の確認が困難と考えられるためである。また、がけ崩れは降雨ピーク付近で発生するものが多い¹¹⁾とされており、時間雨量が発生の引金となる可能性が高いと考えられる。したがって、推定の対象となるデータについては発生時刻を移動させる時間帯の中での最大の時間雨量時に発生したものとする。

発生推定時刻と発生頻度の関係を図-5に示す。図-5より、午前中に集中して報告されたものは全体的にば

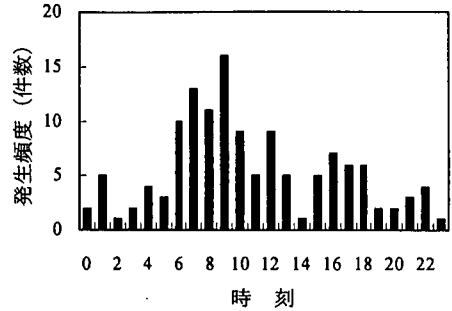


図-4 発生報告時刻と発生頻度の関係

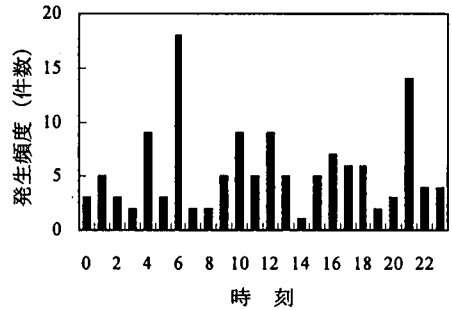


図-5 発生推定時刻と発生頻度の関係

らつく傾向が見られたが、6:00と21:00にピークが現れる結果となった。この原因について災害報告書及び降雨データを見ると、下関市においては、過去に6:00と21:00に激しい豪雨を経験しており、そこでがけ崩れが多発していることが挙げられる。このようなことを勘案すると、がけ崩れの発生頻度は時間的に見てほぼ均等な分布となっており、本研究で行った発生時刻の推定はほぼ妥当であると考えられる。したがって、今後の解析にはこの発生推定時刻を用いることとする。

(2) 豪雨時に発生するがけ崩れの抽出

がけ崩れの発生は突発的で、しかも様々な要因が複雑に絡み合って発生する現象であるため、すべての発生を予測することは非常に困難である。そこで、建設省によるCLの設定手法²⁾では、がけ崩れを「集中的に発生するがけ崩れ」と「散発的に発生するがけ崩れ」とに分類し、「集中的に発生するがけ崩れ」を対象に検討を行っており、本研究においてもそれに準じて、対象とするデータを選定して解析を行うこととした。

しかしながら、「集中的に発生するがけ崩れ」と「散発的に発生するがけ崩れ」についてはそれらの境界が定量的に示されていないため、両者の分類には不明瞭な点が多く、設定したCLの適用範囲もあまり明確でない。したがって、本研究においてはそれらの分類を定量的に示し、解析結果の適用範囲を予め明確にした上で解析を進めることとした。

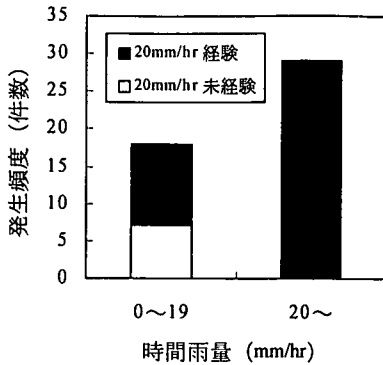


図-6 時間雨量と発生頻度の関係

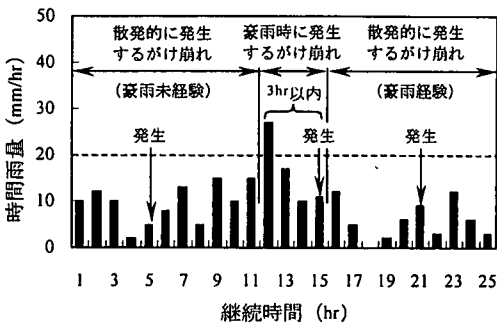


図-7 豪雨時に発生するがけ崩れの概念図

そこで、本研究においては下関市南部における発生降雨の時間雨量と発生頻度の関係について検討し、ある一定値以上の時間雨量を経験した後に発生したデータを対象とする。ここで、検討に用いるデータの時間雨量には発生推定時刻における時間雨量ではなく、発生に影響を及ぼす時間雨量が重要であると考えられるため、過去の研究²⁾を参考に発生から3時間以前に経験した最大の時間雨量を採用することとした。

図-6に時間雨量と発生頻度の関係を示す。ここでは時間雨量の閾値を設定し、閾値以上及び未満の発生数を比較検討するが、ここで閾値をあまり大きく設定し過ぎると解析結果の精度は向上する反面、その適用範囲は狭くなり、逆に小さくし過ぎると適用範囲は広がるが、精度は低下すると考えられる。したがって、時間雨量の閾値は一応の目安として過去の研究³⁾を参考に20mm/hrと設定して検討を行うこととした。また、図中の20mm/hr未満のデータについては、発生までに20mm/hr以上を経験したものと未経験なものをそれぞれ■と□で示した。

図-6より、発生推定時刻もしくはその直前に20mm/hr以上の激しい時間雨量を経験したものについては全発生数の60%以上を占めており、多くが20mm/hr以上の時間雨量を契機として発生していると

表-1 対象データ数一覧

	降雨		斜面		降雨+降雨	
	豪雨時	散発的	豪雨時	散発的	豪雨時	散発的
発生	29	19	29	19	29	19
非発生	103		12		2881	

考えられる。また、20mm/hr未満で発生したデータの中で発生以前に20mm/hr以上を経験したものは61%を占め、それらを合計すると全発生データのうち、発生までに20mm/hr以上を経験したがけ崩れは全体の85%を越えることになる。

これらのことから、がけ崩れについては20mm/hrを境界として発生数が増加し、発生の危険度が増していると考えられるため、本研究においては、以上のことを踏まえて、図-7に示すような「豪雨時に発生するがけ崩れ」を定義し、それらを対象に検討を行うこととした。ここで、「豪雨時に発生するがけ崩れ」とは、発生から3時間以前に20mm/hr以上の時間雨量を経験して発生したがけ崩れを指し、それ以外は「散発的に発生するがけ崩れ」と定義する。

ただし、同一降雨で複数のがけ崩れが発生した場合、その発生推定時刻によって「豪雨時に発生するがけ崩れ」と「散発的に発生するがけ崩れ」が同一降雨内に存在する。また、「散発的に発生するがけ崩れ」であっても、発生以前における豪雨(20mm/hr以上の時間雨量)経験の有無によって、性質が異なるものと考えられることから、それらを「豪雨経験」と「豪雨未経験」とに分類する。

(3) 対象データの抽出

対象斜面は、データベース化した危険箇所内の、対象地域内に属する自然斜面とし、その中から発生斜面、非発生斜面をそれぞれ設定する。

表-1は対象とするデータ数一覧を示す。ここで、表中の降雨について、発生は「豪雨時に発生するがけ崩れ」に対応する一連降雨数(29降雨)と「散発的に発生するがけ崩れ」に対応する一連降雨数(19降雨)を、非発生は対象期間内に一件の崩壊も確認されていない一連降雨数(103降雨)をそれぞれ示している。ただし、同一時刻において複数件発生している場合、発生降雨数はその発生件数分として取り扱った。

表中の斜面について、発生は対象斜面の内、地質区分が火山性岩石(安山岩)の48斜面とした。その内訳は、「豪雨時に発生するがけ崩れ」に対応する斜面が29斜面、「散発的に発生する斜面」に対応する斜面が19斜面である。また、「散発的に発生するがけ崩れ」に対応する斜面の内、豪雨(20mm/hr以上の時間雨量)

表-2 降雨指標一覧表

降雨要因			説明
短期	時間雨量	RH	一連降雨における1時間雨量(mm/hr)
長期	累積雨量	RS	一連降雨において降り始めからの累積雨量(mm)
短期	実効雨量(T=1.5)	RT15	$R_t = \sum \alpha \cdot r_{t-1} + r_t$ ここに、 R_t : 時刻 t における実効雨量(mm) α : 減少係数 = $(0.5)^{t/T}$, T : 半減期(hr) r_t : 時刻 t における時間雨量(mm/hr)
長期	実効雨量(T=24)	RT24	
長期	実効雨量(T=48)	RT48	
長期	実効雨量(T=72)	RT72	

表-3 解析結果表

		case-a	case-b	case-c	case-d	case-e	case-f	case-g	case-h
短期	時間雨量(mm/hr)	0.680	0.355	0.431	0.482				
	実効雨量(T=1.5)(mm)					0.861	0.566	0.615	0.666
長期	累積雨量(mm)	0.734				0.508			
	実効雨量(T=24)(mm)		0.935				0.824		
	実効雨量(T=48)(mm)			0.902				0.788	
	実効雨量(T=72)(mm)				0.876				0.746
相 関 比		0.569	0.731	0.721	0.694	0.543	0.594	0.618	0.611
正判別率	発生 (%)	29/29	29/29	29/29	29/29	28/29	28/29	29/29	29/29
		100.0	100.0	100.0	100.0	96.5	96.5	100.0	100.0
	非発生 (%)	82/103	83/103	83/103	84/103	86/103	77/103	77/103	80/103
		79.6	80.5	80.5	81.5	83.4	74.7	74.7	77.6
全体 (%)	111/132	112/132	112/132	113/132	114/132	105/132	106/132	109/132	
	84.0	84.8	84.8	85.6	86.3	79.5	80.3	82.5	

経験後に発生した斜面、豪雨未経験で発生した斜面はそれぞれ12斜面と7斜面である。ただし、発生斜面数については同一斜面で複数発生したデータを含んだものである。

非発生斜面は、各観測所エリア内において、これまでに一度も崩壊が発生しておらず、かつ危険箇所指定されている未対策の自然斜面であり、地質区分が火山性岩石(安山岩)の12斜面とした。

ただし、発生斜面として取り扱う斜面であっても、ある降雨を経験して崩壊を起こすまでは非発生斜面であったと考えられるため、これらの斜面と発生以前に経験したすべての一連降雨を組合せた場合は非発生データとみなすことができる。したがって、表-1に示す斜面と降雨を組合せた場合の非発生のデータ数(2881)は、非発生斜面にすべての一連降雨(発生降雨、非発生降雨)を組合せた場合のデータ数に、上述した発生以前の斜面に発生以前の一連降雨を組合せた場合のデータ数を合計して算出した。

5. がけ崩れ発生予測システムの構築

(1) システム構築手法及び解析方法

がけ崩れの発生予測モデルを構築するために、本研

究においては、斜面がどのような条件で発生または非発生となるかを斜面要因、降雨要因より総合的に判断する。解析には幾つかの量的な説明変数から発生、非発生の質的な外的基準を判別する手法として重判別分析を用いる。式(1)に重判別分析の判別式を示す。

$$Z = \sum_{i=1}^n B_i X_i + \sum_{j=1}^m C_j X_j \quad (1)$$

ここで、Z : 合成変量

B_i, C_j : 斜面要因、降雨要因の重み

X_i, X_j : 斜面要因の値 ($i=1 \dots n$),
降雨要因の値 ($j=1 \dots m$)

重判別分析は測定値をなんらかの集団に分類するとき、その集団間の差をなるべく大きくするような重みを求める方法であり、本研究においては発生、非発生の2つの集団に対して斜面要因(要因数 n)、降雨要因(要因数 m)を説明変数として用い、合成変量の全分散と各集団間の分散の比で表される相関比を最大化するような各要因(斜面要因、降雨要因)の重み B_i, C_j を求める。ここで、相関比は0~1の間の値をとり、1に近い方がより良い判別ができる。

また、 B_i, C_j についてはデータから直接合成変量を算出する際の判別式の係数であり、合成変量の全平均

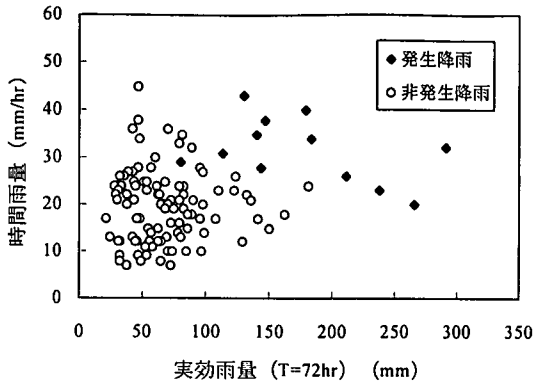


図-8 case-dにおける降雨散布図

表-4 全データに対するシステム評価

		case-d
短期	時間雨量(mm/hr)	0.482
長期	実効雨量(T=72)(mm)	0.876
相 関 比		0.694
正判別率	発生 (%)	29/29
		100.0
	非発生 (%)	1982/2881
		68.7
全体 (%)	2011/2910	
	69.1	

表-5 斜面要因一覧表

要因区分	危険度ランク									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
地形要因	傾斜度	数値データ								
	斜面高さ	数値データ								
	斜面方位	北向き	北東向き	北西向き	東向き	西向き	南西向き	南東向き	南向き	
	斜面形状	凹型尾根	直線尾根	凸型直線	凸型尾根	直線直線	凹型直線	直線谷	凹型谷	凸型谷
	オーバーハング	無	有							
	選念線	不明瞭	明瞭	非常に明瞭						
地質土質要因	地表の状況	岩	粘質	砂礫	風岩	亀裂				
	表土の厚さ	数値データ								
	地盤の状況	硬岩	軟岩	段丘堆積物	強風化岩	火山砕屑物	崩積土			
	不連続面との関係	Gタイプ	Fタイプ	Eタイプ	Dタイプ	Cタイプ	Bタイプ	Aタイプ		
環境要因	風化状況	風化無し	一部風化	風化変質	粘土化	土壌化				
	植生の種類	針広混交	広葉樹	針葉樹	竹林	草地	裸地			
	樹木の樹齢	50年以上	40~50年	30~40年	20~30年	10~20年	10年未満			
	伐採根の状況	無	有							
	調査斜面(崩壊履歴)	無	新	古						
	隣接斜面(崩壊履歴)	無	新	古						
地盤要因	湧水	乾燥	湿潤	降雨時	常時					
	活断層との距離	25m以上	20~24m	15~19m	10~14m	5~9m	0~4m			

を 0, 全分散を 1 となるように基準化すれば, その係数 (基準化したときの判別式の係数をベクトルと呼ぶ) の大小によってそれに対応する要因がどの程度合成変量に影響を与えるかを評価することができる。

また, 式(1)において, 各データセットの合成変量から合成変量の全平均を差し引けば, 判別境界値を 0 とすることができるため, 各データセットの判別を行う際, 得られる判別得点 (各データセット合成変量-合成変量の全平均) が正值であれば発生, 負値であれば非発生とすることができる。

そこで, 本研究では式(2)に示すような判別式¹²⁾を用いることとした。

$$T = -A_0 + \sum_{i=1}^n B_i X_i + \sum_{j=1}^m C_j X_j \quad (2)$$

ここで, T : 判別得点

A_0 : 合成変量の全平均

重判別分析においては, 発生, 非発生及び全体の正判別率, 相関比により判別能力の評価を行い, また, ベクトルにより各要因が発生に及ぼす影響度を評価する。ここで, 正判別率とは, 実際に発生もしくは非発生であったデータを正しく判別しているかを示したものであり, 発生, 非発生それぞれの総数に対する正判別数の比で表す。

本研究においては, まず従来のCL²⁾に準じ, 降雨要因による検討を行った。そこで, 最適な降雨要因の組合せを検討した後, 斜面要因と降雨要因を組合せた解析を行った。

(2) 降雨要因による検討

a) 降雨要因の設定

ここでは, 最適な降雨要因の組合せを検討するために降雨要因のみを用いて重判別分析を行う。解析に用いる降雨要因は過去の研究^{2), 8)}を参考に表-2 に示す短期降雨指標 2 要因, 長期降雨指標 4 要因を選択した。

解析に用いる発生降雨要因については、発生から3時間以前に経験した時間雨量の内、最も大きいものとする。また、非発生降雨要因は一連の降雨の時間雨量ピーク時点でのものとする。

解析では、短期降雨指標と長期降雨指標を組合せて行い、検討するケースは8ケースとする。

b) 解析結果

設定した降雨要因の組合せを用いて重判別分析を行い、最良の降雨指標の組合せを検討した。結果を表-3に示す。表中の降雨指標の欄に記入されている数字は重判別分析によって得られたベクトルであり、それにより各要因がシステムに与える影響度を表している。

表より、正判別率に着目すると、全体の正判別率が最も高いのは case-e の 86.3% であるが、発生における正判別率を見ると 96.5% となっており、発生降雨を見逃していることがわかる。

発生予測システムの構築にあたっては、その性格上、非発生の誤判別、すなわち空振りを多少許容したとしても、発生の誤判別である見逃しを避けることが重要であると考えられる。したがって、全体の正判別率が高い場合であっても発生データを完全に捕捉していない場合はよいシステムが構築されたとは言いがたい。

そこで、分析結果については、発生の正判別率が 100% を満足するケースに着目することとした。

発生の正判別率が 100% で、かつ非発生の判別率が最も高いのは case-d の 81.5% であり、非常に高い判別精度を示している。これは、図-8 に示す case-d の降雨散布図からも高い分離性を伺うことができる。

しかしながら、降雨要因のみで構築したシステムを用いて発生、非発生の判別を行った場合、ある降雨において発生と判別されれば対象エリア内に存在するすべての斜面は発生すると予測されることになる。実際には発生と判別され、それが正判別であったとしても発生する斜面は一部であり、ほとんどは非発生であるため、すべての斜面で発生するとした場合に非常に空振り率が高くなってしまふ。事実、case-d に対して、表-1 に示す降雨要因と斜面要因を組合せた発生 29 個、非発生 2881 個のデータをそれぞれ適用し、その正判別率を算出すると、表-4 に示す通り非発生的中率が 68.7% とかなり低く、空振り率の高い結果となっている。

これらの問題点を解消するためには、観測エリア内で同一降雨を経験した場合、斜面要因を用いてある斜面では発生、別の斜面では非発生となるように、斜面毎に異なる発生の可能性（ポテンシャル）を検討し、個々の斜面に対して予測を行うようなシステムを構築することが重要である。

そこで、本研究においては、降雨要因と斜面要因を

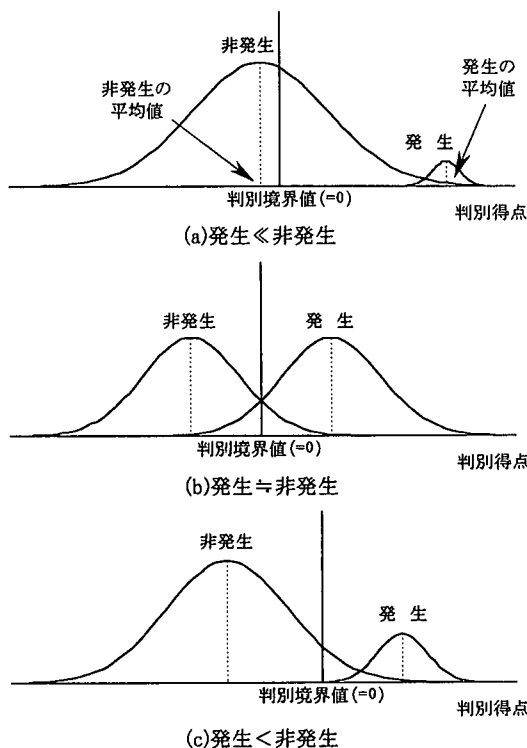


図-9 重判別分析の概念図

考慮して同様の解析を行い、斜面の個別管理を目的とした発生予測システムの構築を試みた。なお、その場合の降雨要因には降雨要因による解析で最良のケースとなった case-d の組合せを用いることとした。

(3) 斜面要因を考慮した検討

a) 斜面要因の設定

分析に用いる斜面要因には、ファジィ理論を用いた斜面危険度評価法¹³⁾で採用されている要因を参考に、危険箇所点検（平成8年）で調査された地形要因、地質土質要因、環境要因、地震要因の中から表-5に示す18要因を選択した。また、表中に示す各要因のカテゴリー区分は、斜面危険度評価法¹³⁾を参考として、発生に及ぼす影響が大きいと考えられるものが高い危険度ランクになるよう順次並べ替えを行った。

なお、危険箇所点検で得られた項目の内、上位地形の方向、遷急線の位置、斜面上端の土地利用状況、活断層の走行、対象斜面と活断層の方向については発生に及ぼす影響度が不明瞭で、危険度ランクを設定する際のデータの並び替えに対する根拠付けが困難なため要因から除外した。危険箇所の延長については、宅地等の配置に依存するところが大きく、発生に与える影響は少ないと考え、要因から除外した。また、対策工、対策工の状況については、対策工が整備されていない

表-6 検討ケース一覧表

検討ケース		説明	システム構築データ			
			発生	非発生	合計	残データ
case-1	全斜面+全降雨	未崩壊データに全ての斜面要因と全ての降雨要因（崩壊、未崩壊降雨）を組合せたケース	29	2881	2910	0
case-2	全斜面+降雨選別	未崩壊データに全ての斜面要因と未崩壊の降雨要因を組合せたケース	29	2339	2368	542
case-3	崩壊斜面+降雨選別	未崩壊データに崩壊を経験した斜面要因と未崩壊の降雨要因を組合せたケース	29	1127	1156	1754
case-4	未崩壊斜面+降雨選別	未崩壊データに崩壊を経験していない斜面要因と未崩壊の降雨要因を組合せたケース	29	1212	1241	1669

表-7 採用した斜面要因一覧表

検討ケース	case-1	case-2	case-3	case-4
傾斜度	○	○	○	○
斜面高さ	○	○	○	○
斜面方位	○	○	○	○
斜面形状	○	○	○	○
オーバーハング	○	○	-	-
遷急線	○	○	○	○
地表の状況	○	○	○	○
表土の厚さ	○	○	○	○
地盤の状況	○	○	○	-
不連続面との関係	○	○	○	○
風化状況	○	○	○	○
植生の種類	○	○	○	○
樹木の樹齡	○	○	-	○
伐採根の状況	○	○	○	○
調査斜面(崩壊履歴)	○	○	○	-
隣接斜面(崩壊履歴)	-	-	○	○
湧水	○	○	○	○
活断層との距離	○	○	○	○
時間雨量	○	○	○	○
実効雨量(半減期72hr)	○	○	○	○

表-8 解析結果表

検討ケース		case-1	case-2	case-3	case-4	
相 関 比		0.052	0.143	0.238	0.358	
正判別率	選別データ	発生(%)	29/29	29/29	29/29	29/29
			100.0	100.0	100.0	100.0
		非発生(%)	1781/2881	1372/2339	682/1127	712/1212
			61.8	58.7	60.5	58.7
		全体(%)	1810/2910	1401/2368	711/1156	741/1241
	62.2	59.2	61.5	59.7		
	全データ	発生(%)	同上	同上	同上	同上
			同上	1418/2881	1469/2881	1083/2881
		非発生(%)	同上	49.2	50.9	37.6
			同上	1447/2910	1498/2910	1112/2910
49.7		51.4	38.2			

自然斜面を対象としているため除外した。なお、岩盤の状況と断層・破碎帯の有無については対象とする斜面で変化がなく、判別に無関係なため除外した。

b) 解析結果

本研究で行う重判別分析においては発生・非発生の2群判別を行うが、降雨要因と斜面要因を組合せて解析を行う場合、非発生のデータ数は上述した通り2881と膨大になり、発生データ(29)と非発生データのデータ数には極端な偏りが生じる。

このような場合、図-9(a)に示すように重判別分析の判別境界値(=0)と圧倒的にデータ数の多い非発生データの合成変量の平均値はほぼ等しくなる可能性が高い。つまり、このような偏りを持った2つの集団で重判別分析を行うと、発生データについては高い正判別率となるが、逆に非発生データについては非常に正判別率の低い結果となることが予想される。したがって、何らかの方法で非発生のデータ数を減少させ、できる限り両集団のデータ数の格差を少なくすることが望ましいと考えられる。

しかしながら、図-9(b)に示すように両集団のデータ

数をほぼ同等とした場合、全体的な正判別率は向上すると考えられるが、発生データをすべての中ずることは困難となる可能性が高いと考えられる。

本研究のように発生データの正判別率を100%にすることに重点を置く場合は、両集合間のデータをほぼ同数にして全体の正判別率を向上させるのではなく、図-9(c)に示すように、発生データが100%を満足する場合に非発生データの正判別率を最高にし得るようなデータ数の格差を探索することが重要である。

これらの問題を解消するためには、表-6に示すように、まずシステム構築について全データを用いる場合の他に、降雨要因及び斜面要因を選別した3ケースを設定し、解析を行うこととした。選別する際に削除したデータについても、構築されたシステムの判別率の計算には取り入れて、最終的に全データでシステムの有効性を検討した。

また、解析を行うにあたり、設定した要因については相関係数による要因分析を行い、相関係数0.7以上の要因については、多重共線性の問題¹⁰⁾を避けるためいずれかを代表的な要因として取り扱い、その他を削

除することが必要である。そこで、各斜面要因における相関係数を求めた結果、各ケースにおいて幾つかの異なる要因がそれぞれ 0.7 以上の高い相関を示した。したがって、相関の高い要因についてはある要因で代表させ、その他を削除することとした。しかしながら、相関の高い要因をどれで代表させるかについては明確な根拠がないため、解析ではその要因について考えられるすべての組合せを行い、最も高い正判別率が得られる組合せを採用した。各ケースで採用した要因の組合せについては表-7 に示す通りである。表中の「○」は採用した要因を、「-」は削除した要因をそれぞれ示す。

解析では、設定した斜面要因のベクトルが評価に対して矛盾があるものについては削除し、最終的に矛盾がなくなるまで段階的に要因を絞り込む。ここで、評価に対する矛盾とは、各要因のベクトルが負値を示すことであり、データの危険度ランクが上がれば非発生に寄与することを意味している。

表-8 に解析結果を示す。表-8 より、設定した 4 ケースにおいては case-1 が発生、非発生、全体の正判別率でそれぞれ 100%、61.8%、62.2%と最も精度が高くなっている。しかしながら、前述した降雨要因による解析結果より正判別率が低く、斜面要因を考慮して解析を行った効果が見られなかった。その原因としては、上述した通り、両グループ間のデータ数の格差が大きすぎると考えられるため、さらにその格差を少なくするように非発生データの選別を行うことが必要であると判断した。

そこで、本研究においては非発生データの選別について、構築したシステムから明らかに予測が可能な非発生データを徐々に削除し、発生の正判別率が 100% を満足する場合に非発生の正判別率を最高とし得るデータ数の格差を試行錯誤で探索することを試みた。ここで、明らかに予測が可能な非発生データとは、非発生データにおいて非発生と判別する、すなわち非発生の正解データの中から重判別分析により得られた判別得点が小さいデータをいう。

判別得点は、式(2)から明らかのように、その値が小さいほど発生が起りにくいということを示しており、判別得点の低いデータを削除することは、非発生の判別が容易なデータを除去することを意味する。つまり、これらの操作を行うことは、データ数の格差を減少させるだけでなく、非発生の判別が困難なデータのみを解析の対象として残すことになる。したがって、それらのデータを上手く判別できるシステムを構築することができれば削除したデータは容易に判別することができると考えられ、最終的にはシステムの精度向上につながるものと期待される。

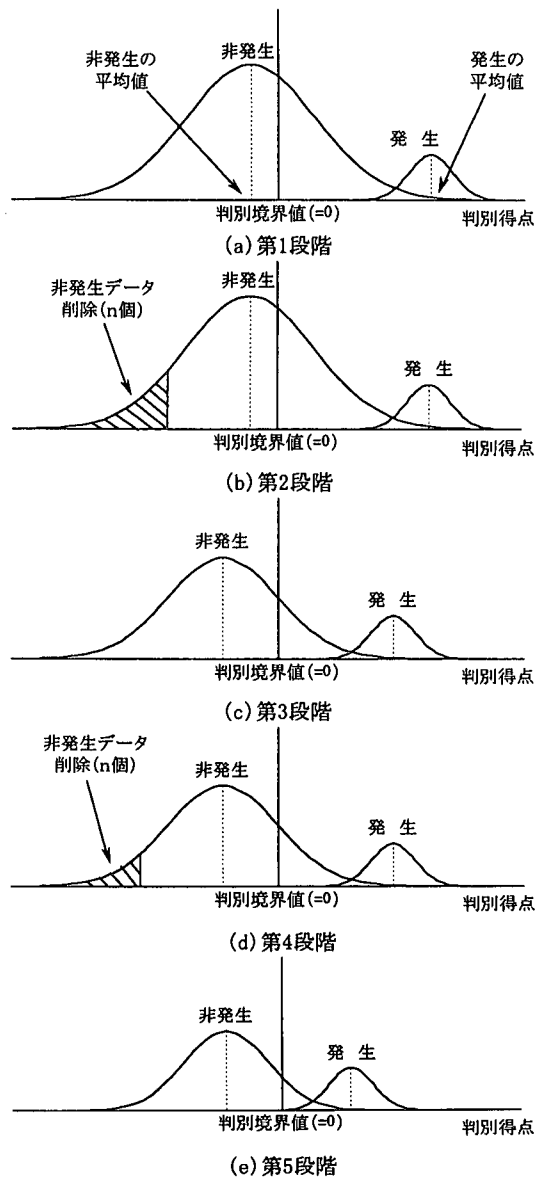


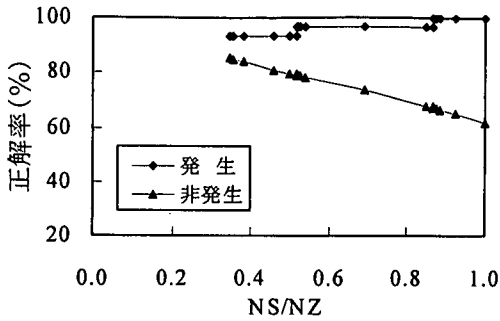
図-10 非発生データの選別方法 模式図

判別得点に基づく非発生データの選別方法は以下に示す通りである。また、図-10 にその方法の模式図を示す。

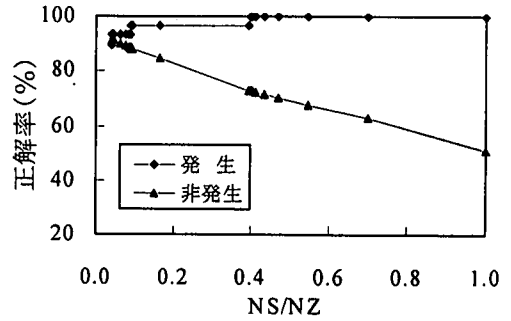
第 1 段階 設定したケース (case-1~case-4) に対して、各ケースにおける全データを用いて重判別分析を行い、判別得点を算出する (図-10 (a) 参照)。

第 2 段階 各非発生データから判別得点の小さいデータを順に n 個抽出し、第 1 段階で使用したデータから削除する (図-10 (b) 参照)。

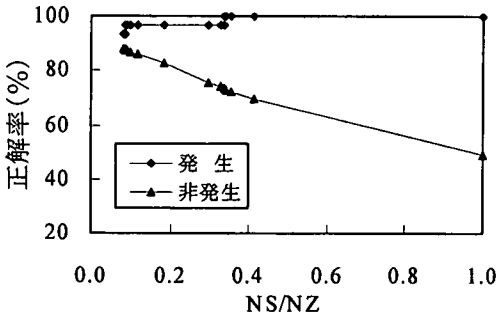
第 3 段階 前段階で選別されたデータを用いて、再度重判別分析を行い、使用データの判別得点を算出する (図-10 (c) 参照)。



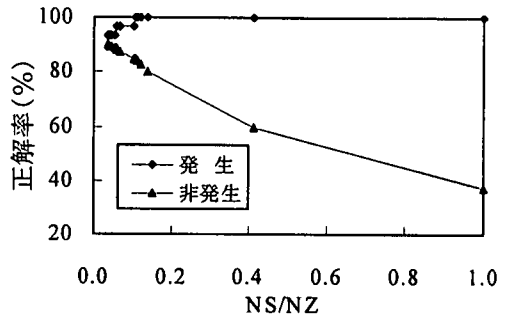
(a)case-1



(c)case-3



(b)case-2



(d)case-4

図-11 正判別率推移図

第4段階 第3段階で使用したデータの中から判別得点の小さい順にn個抽出し、再び非発生データの削除を行う(図-10(d)参照)。

第5段階 第3段階と第4段階を繰り返し行い、発生の正判別率がある値の場合に非発生の正判別率を最高とし得るデータ数の格差を試行錯誤で探索する(図-10(e)参照)。

この操作は発生の正判別率が変化する境界付近では密に、そうでないところでは比較的粗く行うため、削除するデータ数(n個)はその都度異なるが、密に行う付近では少なく、そうでないところでは多く設定した。

上記の方法でデータの選別を行った場合の正判別率の推移図を図-11に示す。図中の横軸は、各ケースによって設定された非発生のデータ数(NZ)に対する使用した非発生のデータ数(NS)の比、すなわち選別率(NS/NZ)を示す。図より、非発生データの選別回数(削除する回数)を増やすほど、非発生データの正判別率は増加する傾向にあることが確認されたが、発生データについては徐々に減少していく傾向にあることがわかる。

発生予測については、その性格上、非発生データの誤判別、すなわち空振りはある程度許容したとしても、発生データの正判別率は100%であることが重要である。そこで、各ケースにおいて、発生データの正判別

表-9 最良ケースにおける解析結果表

検出ケース	case-1	case-2	case-3	case-4		
傾斜度	0.254	0.167	0.207	0.090		
斜面高さ	x	x	x	x		
斜面方位	0.226	0.133	0.153	0.112		
斜面形状	x	x	x	x		
オーバーハング	x	x	-	-		
選急線	x	x	x	x		
地表の状況	x	x	x	x		
表土の厚さ	0.136	0.075	0.080	0.038		
地盤の状況	0.014	0.003	x	-		
不連続面との関係	x	x	0.021	x		
風化状況	x	x	x	x		
植生の種類	x	x	x	x		
樹木の樹齢	0.185	0.084	-	x		
伐採根の状況	0.068	0.036	x	0.185		
調査斜面(崩壊履歴)	x	x	0.034	-		
隣接斜面(崩壊履歴)	-	-	0.060	x		
湧水	x	x	x	x		
活断層との距離	0.166	0.125	0.188	0.071		
時間雨量	0.263	0.625	0.613	0.623		
実効雨量(半減期72hr)	0.854	0.731	0.714	0.742		
選別率	0.865	0.336	0.423	0.130		
相関比	0.058	0.359	0.480	0.706		
正判別率	選別データ	発生(%)	29/29	29/29	29/29	29/29
		非発生(%)	100.0	100.0	100.0	100.0
		全体(%)	1543/2493	441/786	272/448	108/128
			61.8	56.1	60.7	84.3
	全データ	発生(%)	29/29	29/29	29/29	29/29
		非発生(%)	1931/2881	2114/2881	2108/2881	2443/2881
		全体(%)	1960/2910	2143/2910	2137/2910	2472/2910
			67.3	73.3	73.1	84.7
	67.3	73.6	73.4	84.9		

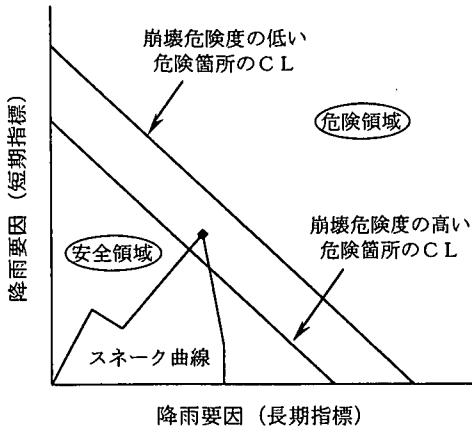


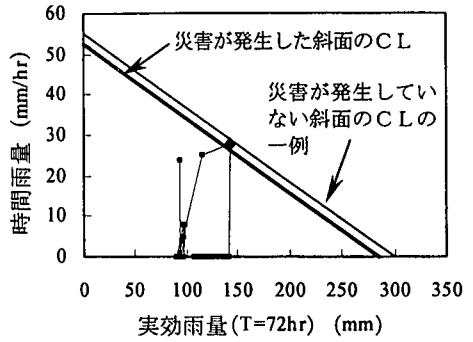
図-12 斜面要因を考慮したCL模式図

率が 100% を満足し、かつ非発生データの正判別率が最高となるものに着目する。

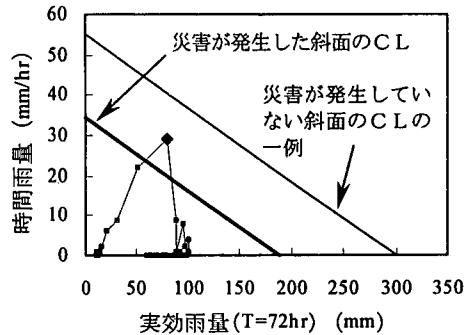
最良となる検討結果を表-9 に示す。表には、設定した要因について相関の高い要因を削除し、さらに、解析上矛盾を生じる要因を段階的に絞り込んだ最終的な結果を示す。ここで、表中の「-」は相関の高い要因であり、初期段階から削除したことを、また「×」は要因を絞り込む段階で削除したことをそれぞれ示している。また、表中の数値は最終的に残った斜面要因のベクトルであり、各要因が発生・非発生の判別にどの程度影響を及ぼしているかを示している。なお、各ケースにおいて最終的に残った要因は、本解析においてがけ崩れに対する重要要因として抽出されたことを意味している。

表-9 より、非発生データの正判別率に着目すると、case-1, case-2, case-3, case-4 の順にそれぞれ 67.0%, 73.4%, 73.1%, 84.8% となり case-4 の場合が最も精度が高いことがわかる。また、各ケースの選別率 (NS/NZ) を見ると、case-1, case-2, case-3, case-4 の順に 0.865, 0.336, 0.423, 0.130 となっており、case-4 において選別率が最も小さくなった。これらの結果については解析する地域の特徴が反映されるため一概には決定できないものの、対象地域においては選別率 0.13 で 84.9% の高い判別率が得られており、他の地域で適用する場合、一応の目安となると考えられる。

以上のことから、がけ崩れの発生予測モデルを構築するにあたっては、case-4 におけるデータ選別が有効であり、さらに構築されたシステムにおいて判別得点の低い非発生データを削除していき、システムを随時更新して行くことで、発生の正判別率が 100% を満足する場合に非発生の正判別率を最高とし得るシステムの構築が可能となった。



(a) 発生推定時刻に捕捉した例 (その1)



(b) 発生推定時刻に捕捉した例 (その2)

図-13 斜面要因を考慮したCLの一例

6. がけ崩れ発生限界雨量線への適用

(1) 斜面毎の発生限界雨量線の設定

がけ崩れのCLは、前節で構築した発生予測システムを用いて各斜面に対しての設定が可能である。設定については、式(2)における降雨要因を短期指標と長期指標の2要因とし、判別得点 $T=0$ として展開することで式(3)が得られる。

$$y = -\frac{C_2}{C_1}x - (-A_0 + \sum_{i=1}^n B_i X_i) / C_1 \quad (3)$$

ここで、 y : 短期降雨指標 (時間雨量)

x : 長期降雨指標 (実効雨量 (半減期 72hr))

C_1 : 短期降雨指標の重み

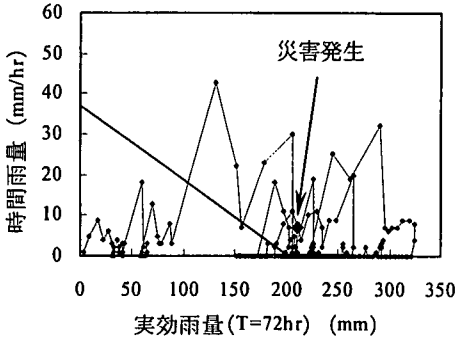
C_2 : 長期降雨指標の重み

式(3)において右辺第1項はCLの傾きを、また、第2項は各斜面における定数項をそれぞれ示している。また、式中の A_0 , B_i はそれぞれ合成変量の全平均と斜面要因の重みを示している。

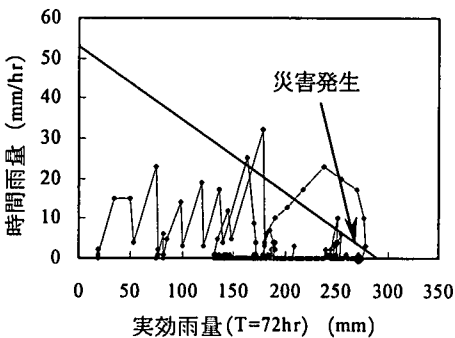
式(3)を用いて設定するCLの模式図を図-12 に示す。

表-10 非発生データにおける空振り率及び的中率

崩壊地形	空振り率	340/1393	24.4%
	的中率	1053/1393	75.6%
未崩壊地形	空振り率	215/1488	14.4%
	的中率	1273/1488	85.6%
合計	空振り率	555/2881	19.3%
	的中率	2326/2881	80.7%



(a) 発生推定時刻に発生を予測した例



(b) 発生推定時刻以前に発生を予測した例

図-14 豪雨経験後に発生したがけ崩れに対するCLの一例

CLを挟んで右側が危険な領域を、左側が安全な領域をそれぞれ示しており、1時間毎にプロットした降雨要因を結んだスネーク曲線がCLを越えた時点で発生と予測される。したがって、発生降雨が危険領域に入れば的中、安全領域内で推移すれば見逃しに、逆に非発生降雨が危険領域に入れば空振り、安全領域内で推移する場合は的中ということになる。

従来の研究²⁾で設定されているCLは降雨要因のみを用いて設定しているため対象とする地域に対して1本である。しかしながら、斜面毎に異なる斜面要因や地質要因により発生のポテンシャルは異なると考えられ、降雨要因のみによるCLでは安全側の設定になる

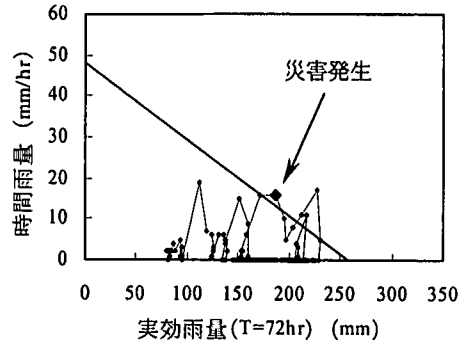


図-15 豪雨未経験で発生したがけ崩れに対するCLの一例

危険性が高い。本研究においては、各斜面によって異なる発生のポテンシャルを考慮し、CLに斜面要因を考慮することで各斜面に個別のCLを設定することを試みた。設定に際しては発生予測システムで最も高い判別精度を示したcase-4の結果を用いた。

図-13に本研究で設定したCLの一例を示す。図中のスネーク曲線は実際災害が発生したときのものを示し、太線は発生斜面のCLを、細線は非発生斜面のCL(一例)をそれぞれ示している。なお、図中の◆は発生推定時刻を示している。図より明らかなように、発生斜面についてはスネーク曲線がCLの右側、すなわち危険領域に入っているが、非発生斜面については危険領域に入ることなく推移しており、斜面要因を考慮することで同一降雨であっても発生・非発生を正しく判定することが可能となった。

発生予測システムに非発生として用いたデータは降雨の時間雨量最大時における降雨要因であるため、一連の降雨についてスネーク曲線を用いて評価する。結果を表-10に示す。表より、発生斜面における非発生データ(発生以前の非発生降雨)で75.6%、非発生斜面における非発生データで85.6%、すべての非発生データで80.7%的中率となった。5.(2)で検討した降雨要因のみによるシステムの的中率が69.1%ということからすると、10%以上も精度が向上し、本手法の有効性が確認された。また、この結果から発生斜面においては発生のポテンシャルが高いため、CLが非発生斜面に比べ下側になる傾向が強くなり、結果的に空振り率が高くなっていると考えられる。

(2) 散発的に発生するがけ崩れに対する評価

本研究においては、「豪雨時に発生するがけ崩れ」を対象に検討を行ってきたが、実際、がけ崩れは豪雨経験後の少雨で発生するものや豪雨を経験せずに発生するものなど多種多様である。そこで、それら散発的に発生するがけ崩れに対して構築したシステムの適用性

表-11 散発データに対する評価

	豪雨経験	豪雨未経験
的中(1)	3/12	1/7
	25.0	14.3
的中(2)	8/12	0/7
	66.7	0.0
見逃し	1/12	6/7
	8.3	85.7

について検討を行った。

図-14 に豪雨経験後に発生したがけ崩れに対するCLの一例を示す。図-14(a)には発生推定時刻において発生を予測したものを、図-14(b)には発生推定時刻以前に発生を予測したものをそれぞれ示している。また、図-15には豪雨未経験で発生したがけ崩れに対するCLの一例を示す。

図-14(a)については発生推定時刻以前に40mm/hrを超える激しい豪雨を経験しており、その後のスネーク曲線はほとんどCLの右側、すなわち危険領域を推移していることがわかる。そのような経過をたどりながら、スネーク曲線は発生推定時刻では危険領域にあり、正確に発生を予測する結果となっている。図-14(b)については発生推定時刻で安全側へと移っているものの、その1時間前までは発生を予測している。

図-15においては、20mm/hrを超える豪雨を経験していないものの、一連の降雨の開始時から80mm程度の実効雨量があり、発生推定時刻においては危険領域で発生を予測した例である。このように散発的に発生するがけ崩れにおいては様々な形で発生を予測しているものがあるが、本研究では図-14(a)、図-15のような場合を的中(1)、図-14(b)のような場合を的中(2)として、それらの評価を行った。また、一度もCLを越えて危険領域に入らなかったデータは見逃しとした。結果を表-11に示す。

表より、豪雨経験後に発生したものについてはほとんどのデータが的中(1)、(2)のいずれかで事前に発生を予測しており、避難勧告の発令等に対しては有効であると考えられる。しかしながら、的中(2)が全体の67%を占めているため、避難勧告の解除時期をいつにするかによっては適用の可能性が低くなることも懸念されるため、今後これらの問題点も踏まえてシステムを改善していくことが重要である。また、豪雨未経験で発生するものについてはほとんどが見逃しであり、現状ではそれらを予測することは困難である。ただし、図-15に示す通り、ある程度の実効雨量がある場合については適用の可能性が示された。

以上の結果から、本研究で構築された発生予測シ

ステムについては豪雨経験後に発生するがけ崩れについても適用が可能であると考えられるが、豪雨未経験で発生するがけ崩れに対しては現状での適用は困難である。

7. おわりに

本研究においては、降雨要因を用いて設定されたがけ崩れ発生限界雨量線の問題点を解消するため、山口県下関市南部を対象として、重判別分析を用いたがけ崩れ発生予測システムの構築を行った。そして、構築したシステムを用いて降雨要因と斜面要因を考慮した及け崩れ発生限界雨量線について適用の可能性を検討した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

1) 様々な降雨指標の組合せを用いて発生・非発生の判別を行った結果、短期指標に時間雨量、長期指標に実効雨量(半減期72時間)を用いた場合が最適であった。また、その正判別率は、発生が100%、非発生が69.1%となり、空振り率の高い結果となった。

2) 降雨要因と斜面要因を考慮した判別においては、データ数の偏りがシステムに大きな影響を与えるため、非発生データに対して降雨選別、斜面選別を行い、さらにその中から明らかに予測可能な非発生データを削除していくことでより精度の高いシステムの構築が可能であった。最適となるケースの正判別率は、発生が100%、非発生が84.7%となり、降雨要因により構築したシステムに比べ非常に精度の高いシステムが構築された。

3) 構築したシステムをがけ崩れCLに適用可能であることを示した。このCLは崩壊危険度の異なる斜面に対してそれぞれ個別に設定できるため、降雨要因のみを用いたCLよりも精度が高くなることが明らかとなった。本研究で対象とした下関市南部において発生、非発生の的中率はそれぞれ100%、80.7%となった。

4) 散発的に発生するがけ崩れに対してCLの適用性を検討した結果、豪雨経験後に発生するものについては適用可能であると考えられるが、豪雨未経験で発生するがけ崩れに対しては現状での適用は困難である。

本研究においては、下関市南部における過去の災害に基づいて、降雨要因に斜面要因を考慮したCLの設定手法を提案した。しかしながら、斜面要因を考慮したCLについてもある程度以上の降雨の場合、すべての斜面において発生と判断されることは事実である。今後は他の異なる手法を用いた発生予測システムと組合せて予測の精度を向上させ、土砂防災に活用することが重要であると考えられる。

また、本論文は下関市南部の代表的な地質である火

山性岩石(安山岩)を対象に検討を行っているため、他の地域や異なる地質に対しては必ずしも有効であるとは言いがたい。したがって、今後は他の地域や異なる地質に対しても検討を行い、本手法の適用可能性を検討した上で、より汎用性の高いシステムを構築することが重要である。さらに、今後発生するがけ崩れのデータを蓄積し、随時システムの更新を行うことでより精度の高いシステムを構築することが重要である。

謝辞：本研究を行うにあたり、中電技術コンサルタント(株)荒木義則氏から本研究の内容について多くの助言を頂いた。また、データ整理、分析には山口大学学生長島正典君の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 建設省河川局砂防部：砂防便覧(平成9年版), 1998.
- 2) 社団法人全国治水砂防協会：砂防関係法令例規集(平成10年版), 1998.
- 3) (社)砂防学会：土砂災害警戒避難システムに関する研究, 1999.
- 4) 山口県土木建築部砂防課：第4次急傾斜地崩壊対策事業五箇年計画策定に向けて, パンフレット, 1997.
- 5) 建設省河川局砂防部傾斜地保全課：急傾斜地崩壊危険箇所点検要領, 1995.
- 6) 例えば, 建設省土木研究所砂防部砂防研究室：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, pp. 9-11, 1985.
- 7) 建設省河川局砂防部砂防課：土石流災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針(案), 1984.
- 8) 三井宏人：がけ崩れに関する降雨指標, 新砂防, Vol. 102, No. 1, pp. 1-12, 1977.
- 9) 江島深：下関市わがまちの斜面構想, 中国ブロック「斜面フォーラム」資料集 斜面の環境と安全を考える～21世紀の斜面整備に向けて～, pp. 8-13, 1997.
- 10) 横田知昭：崩壊調査資料の地質別集計に基づく一考察, 新砂防, Vol. 18, No. 1, pp. 15-31, 1965.
- 11) 倉本和正, 鉄賀博己, 菊池英明, 荒木義則, 古川浩平：山口県におけるがけ崩れの実態把握に関する基礎的研究, 第54回土木学会年次学術講演会講演概要集第6部, pp. 278-279, 1999.
- 12) 荒木義則, 古川浩平, 松永悟, 小笠原貴人, 石川芳治, 水山高久：土石流危険渓流における地形特性を考慮した土砂崩壊の発生限界線の設定に関する研究, 土木学会論文集, No. 574/VI-36, pp. 33-47, 1997.
- 13) 社団法人 全国治水砂防協会：新・斜面崩壊防止工事の設計と実例 参考編, pp. 18-23, 1996.
- 14) 田中豊, 垂水共之, 脇本和昌：パソコン統計解析ハンドブックII多変量解析編, pp. 16-17, 共立出版, 1989.

(1999. 11. 22 受付)

A STUDY ON A METHOD FOR DETERMINING CRITICAL LINE USING GIOMORPHOLOGICAL FACTORS OF SLOPE FAILURES DURING HEAVY RAINFALL

Kazumasa KURAMOTO, Hiromi TETSUGA, Hideaki KIKUCHI, Osamu MORIKAWA, Keiichi MONMA and Kohei FURUKAWA

In conventional research, precision forecasting of slope failures during heavy rainfall using critical rainfall line is not so accurate, because it used only rainfall factors for forecasting. In this research, the slope failure prediction system using both rainfall factors and geomorphological factors is constructed based on multiple discriminate analysis. Then we determined the critical rainfall line and try to improve the precision forecasting. The result shows that the precision had improved more than 80% in forecasting.