

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

荒木義則¹・古川浩平²・松永悟³・小笠原貴人⁴・石川芳治⁵・水山高久⁶

¹正会員 工修 中電技術コンサルtant (株) 水工部 (〒734 広島市南区出汐2-3-30)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

³正会員 財団法人広島県建設技術センター技術部 (〒730 広島市中区中町8-18)

⁴学生会員 山口大学大学院 工学部社会建設工学科 (〒755 宇部市常盤台2557)

⁵正会員 農博 京都府立大学助教授 農学部林学科 (〒606 京都市左京区下鴨半木町1-5)

⁶正会員 農博 京都大学教授 農学研究科 (〒606-01 京都市左京区北白川)

土石流危険渓流における豪雨による土砂崩壊を対象として、素因である地形要因と誘因となる降雨要因を組み合わせることにより、土砂崩壊の「発生」「非発生」を判別するシステムを構築した。判別システムでは、土砂崩壊の発生に影響を与える要因について検討するとともにその発生を予測する上での課題について検討した。また、本手法を土砂崩壊の発生限界線の設定に用いることにより、渓流毎の個別防災管理を提案し、土砂災害のソフト対策への適用可能性について検討した。

KeyWords : debrisflow, heavyrain, multiple discriminant analysis, critical line

1. はじめに

近年、梅雨時期や台風の季節になると毎年全国各地で土砂災害が発生しており、尊い人命が失われ、貴重な資産や財産が破壊されている。集中豪雨による土砂災害の発生は、極めて突発的であるため発生の予測が難しく、適切な対応を誤れば、被害がより大きくなる可能性がある。しかも、国土の狭い我が国では、地形・地質的に土砂災害の危険性の高い地域が多い。このため、土砂災害の防止と対策は緊急を要する重要な課題であると言える。

特に、土石流危険渓流に指定されている渓流には、土石流の発生や流出の防止、山腹斜面の崩壊防止等の目的で砂防ダムや山腹工等の土石流対策施設の整備が行われている。これらのハード対策を必要とする土石流危険渓流は、建設省の行った平成2年～4年度の調査結果¹⁾によると日本全国には、土石流危険渓流が約7万9千もあり、しかも土石流危険渓流に指定される渓流が増加傾向にあることが示されている。これは、人々の生活域が山麓地や丘陵地に対しても拡大してきているからであり、特に地方の都市周辺においてその傾向が強いことが指摘¹⁾されている。このため危険性の高い土石流危険渓流は、早急にハード対策を実施する必要がある。しかしながら

ら、土石流対策施設の建設適地が少ないなどのハード対策が十分に行えない場合や非常に数の多い渓流整備にかかる時間的・予算的な対応の遅れ等を考慮すると、ソフト面からの対策でもって、ハード面の不足を補う必要がある。

現在、ソフト対策の一つとして全国的に警戒避難基準雨量の設定²⁾が試みられている。警戒避難基準雨量の設定では、過去の土石流の発生降雨と非発生降雨から、時間雨量；実効雨量、有効雨量強度等の降雨要因を用いて土石流の発生が予想される危険降雨を判断するための基準線を設定することが行われている。また、この降雨要因を用いた基準線と土石流危険渓流の危険度分類³⁾を組み合わせたソフト対策等も行われている。しかしながら、降雨要因のみの基準では、非常に安全側の基準となり、空振り率が大きくなることがある。このため避難勧告の発令や解除等の実用面において課題が残されており、警戒の発令や避難指示に対する的確性向上の研究⁴⁾も行われている。

また、土石流発生危険度に関する既往の研究⁵⁾では、地形・地質要因を水準区分し、これら地形要因に降雨要因を水準区分したものを加えて土石流の「発生」「非発生」を判別する検討が行われている。しかしながら、降雨の影響を十分には反映できてお

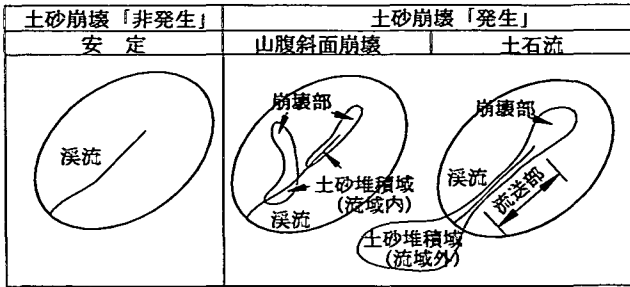


図-1 土砂崩壊状況の模式図

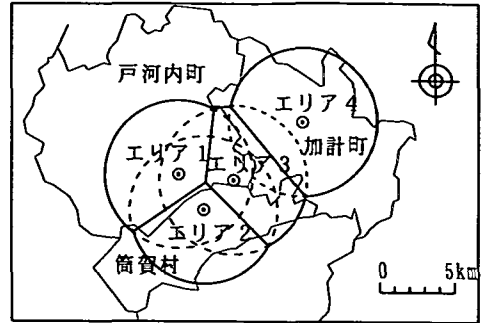


図-2 エリア区分図

らず、また水準区分の決め方に汎用性がもたせにくいなどの問題点が指摘されている。

そこで本研究は、過去に幾度も土砂災害に見舞われている広島県北西部地域(山県郡加計町及びその周辺)を対象として、重判別分析により地形要因と降雨要因を加味した土砂崩壊の「発生」「非発生」の判別システムを構築した。ここで、地形要因や降雨要因は、水準区分を行わず計測値や評価値をダイレクトに用いた。また、地質要因は、表土層の土質特性(砂質土、粘性土等)により土石流の発生や流出形態等に影響⁹⁾を与えると考えられるため、本研究では広島県北西部に広く分布している風化花崗岩からなる溪流に限定して取り扱った。

また、この判別システムを用いて、溪流毎に土砂崩壊の「発生」「非発生」を判別する発生限界線を設定することにより溪流の個別防災管理を提案し、土砂災害のソフト対策への適用可能性について検討した。

2. 土砂崩壊の発生形態と観測エリア区分

近年、広島県北西部では、昭和47年7月、昭和63年7月、平成5年7月の3回に渡って土砂災害に見舞われている。特に、昭和63年7月の土砂災害⁷⁾は、主に土石流により甚大な被害をもたらしており、当地域は全国的に見ても土石流の発生しやすい傾向にあると考えられる。

溪流の土砂崩壊現象は、図-1の土砂崩壊状況の模式図に示すように、まったく変化のない安定した溪流、山腹の斜面崩壊は発生したが土石流にならなかった溪流、また土石流の発生した溪流があり、溪流の形態変化としては、安定・山腹斜面崩壊・土石流の3つのタイプに分類することができる。しかしながら、土石流または山腹斜面崩壊の発生した溪流は、その中間的な土砂移動形態を示す溪流が存在し

ていることを考慮すると土石流と山腹斜面崩壊を明確に分離することは困難である。また、これらの土砂移動現象は、保全対象物との位置関係により、甚大な被害を引き起こすことがある。このため、本研究では、土石流または山腹斜面崩壊の発生した溪流を土砂崩壊の発生した溪流として扱うものとする。

土砂崩壊の発生は、いわゆる素因としての地形・地質要因に、ある限界以上の誘因が加わることによって引き起こされる。ここで誘因には、豪雨、融雪、火山活動、地震等⁹⁾が考えられるが、本研究において対象とした土砂崩壊は、全て豪雨が原因となっている。

本研究の対象地域には4つの雨量観測所があり、観測所を中心にエリア分割を行ったものを図-2に示す。エリア半径は、極力短い距離であることが望ましいが、実際には雨量観測所が離れている場合も多い。また降雨の影響範囲は、その地域を形成する地形要因等によりある程度左右されるため、現在では大旨半径5kmが目安⁹⁾と考えられている。したがって、本研究においても半径5kmのエリア分割とし、このエリア内において降雨は一定であると考えた。また、雨量観測所間の距離が5km以内でエリアの重複する溪流は最も近い雨量観測所に含まれるものとして取り扱った。

3. 分析データの抽出

(1) データ収集上の現状と課題

土石流危険溪流における溪流調査³⁾は、地形・地質要因から土石流発生の危険性が高い溪流を抽出する調査であり、土石流の発生に関係する要因として溪床勾配、溪床堆積物の状態、地質、流域面積、主流長、溪流幅等の地形要因や過去の土石流の発生経歴等が全国統一の規準により調査され、土石流発生の危険性が評価されている。

表-1 観測エリア毎の渓流数

観測 エリア	一次谷	二次谷 以上	分割後の 渓流数	合計
1	10	2	4	14
2	2	0	0	2
3	10	10	31	41
4	22	17	50	72
合計	44	29	85	129

土石流危険渓流の調査対象となる渓流は、保全対象が人家5戸以上または官公署、学校、病院、駅、旅館、発電所等の重要施設が流域内にある場合で、保全対象物の位置によっては、流域が一次谷や二次谷以上となることがある。このため、二次谷以上の流域の渓流調査は、本流を中心とした調査となり、支流から土石流が発生した場合は、その事前調査がほとんど行われていないのが現状である。そこで、対象地域における土石流危険渓流の観測エリア毎の渓流数と谷次数を表-1に示す。表-1より、土石流危険渓流は、一次谷の渓流だけでなく二次谷以上の渓流も多く含まれていることがわかる。

山腹斜面崩壊を伴う土石流は、一次谷において発生することが多い⁷⁾ことから、地形要因の抽出は一次谷を対象とし、二次谷以上の渓流は全て一次谷に流域を再分割した。さらに流域内に砂防ダムや道路、田圃、畑等の人為的な開発が行われている渓流は対象外とし、自然渓流のみを取り扱った。

地形データには、土石流危険渓流調査結果と1/5,000の森林基本図を用いる。土石流危険渓流調査は、災害発生前に調査されたものを用いる必要があるが、対象地域には、昭和57年3月に土石流危険渓流調査¹⁰⁾が行われているため、昭和63年7月、平成5年7月の災害前の貴重なデータとなっている。しかしながら昭和47年の災害以前には、土石流危険渓流調査は行われていないため、調査内容の中で、現地調査を必要とする溪床堆積厚さや溪流幅に関するデータの収集が出来なかった。溪床堆積厚さ以外の要因は、溪流の形状に関する調査であるため、昭和57年3月の調査結果をそのまま用いることとした。また、1/5,000の森林基本図からは、土石流危険渓流調査以外の地形データの抽出を行う。

土石崩壊を経験した渓流は、不安定土砂の移動が行われるため、移動土砂の程度に応じて、その後の土石崩壊の発生規模に影響を与えられ考えられるが、本研究では、土石崩壊の「発生」「非発生」の判別を目的としているため、一旦土石崩壊の発生した渓流も発生前と同様に取り扱った。

土石崩壊の発生状況データは、昭和47年7月災害に関しては、昭和57年3月の土石流危険渓流調査結果の中に、過去の災害経歴としてどの渓流から土石流が発生したかが示されている。また、昭和63年7月や平成5年7月の土石災害では、航空写真や被害後の現地調査等により比較的詳細なデータが残されている。

一方、降雨データは、気象庁の各地方气象台や建設省、県、市町村等の各事務所において観測・記録されている。また、現在では財団法人河川情報セン

ターを利用することにより、NTTの電話回線を通して、レーダ雨量やテレメータ雨量がリアルタイムで受信¹¹⁾できるようになっている。本研究では、土石崩壊の発生地域にある雨量観測所として県や市町村で観測された降雨データを利用する。降雨データは、昭和47年～平成5年までの21年間における土石崩壊の発生降雨および比較的降雨量の多い非発生降雨について収集した。ここで、非発生降雨は、積算雨量80mm以上かつ時間雨量20mm/h以上のものを採用した。

土石崩壊の発生時刻は、前兆現象や地元住民による発生状況の目撃証言等から総合的に推定されることが多い。このため、土石崩壊の発生降雨は特定できても発生時刻までは不明であったり、また、あいまいなものが多く、その確認が困難な場合もある。ここでは、目撃証言等から推定された土石流の発生時刻と降雨の時間雨量のピークがほぼ一致しているため、時間雨量のピーク値を土石崩壊の発生時刻として取り扱った。

これらのデータ収集上の制約は、土石崩壊の発生予測を困難なものにしている。しかしながら、限られたデータの量と質に応じて合理的な土石崩壊に対する防災管理システムを構築する必要があると考える。

(2) 地形要因の設定

土石崩壊の素因となる地形要因は、図-3に示す項目を考えた。これらの項目は、土石流危険渓流調査の項目に、地形図から読み取れる要因として土石流や山腹斜面崩壊に関係があると考えられる項目を加えたもので、表-2に地形要因の一覧表としてまとめた。この表で○印がついている要因は、土石流危険渓流調査の項目であり、現地調査を必要とする要因は、溪流幅(要因GF)、溪床堆積厚さ(要因GG)、溪床堆積厚評価(要因GP)であり、それ以外の要因は、全て地形図から読み取ることができる。また、これらの地形要因は、現地調査や地形図から直接計測される渓流および流域内斜面の状態を表す要因と、これらの計測値を基に溪流の状態を評価する評価要因から成っている。

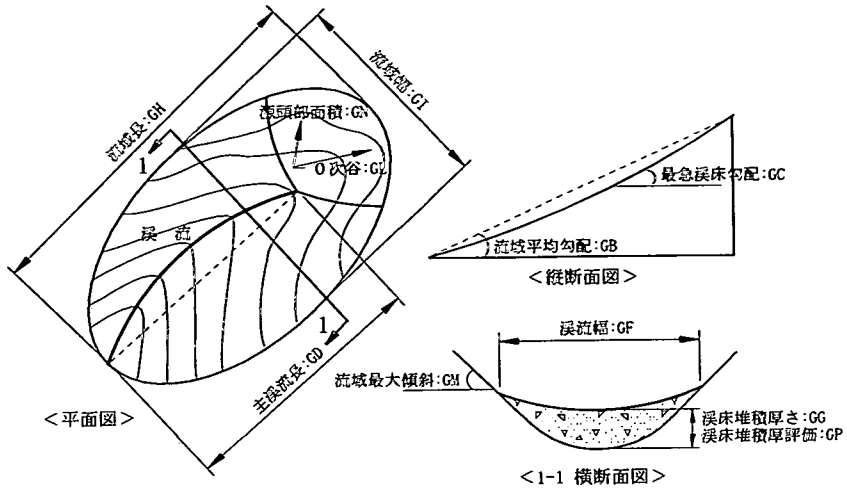


図-3 地形要因模式図

表-2 地形要因一覧表

要 因		採 用 理 由
地 形 要 因	GA 水系模様	流水の流下形態 (最短溪流長/主溪流長)
	GB 流域平均勾配(°)	「すべり台」としての土石の流下しやすさ
	GC 最急溪床勾配(°)	○ 溪床の移動しやすさ
	GD 主流流長(km)	○ 流水の流下距離
	GE 流域面積(km ²)	○ 集水の大小
	GF 溪流幅(m)	○ 流水の流下しやすさ
	GG 渓床堆積厚さ(m)	○ 土石流の発生・発達規模
	GH 流域長(km)	流域形状
	GI 流域幅(km)	同上
	GJ 流域形状比	流域形状の比(流域幅/流域長)
	GK 谷深比	谷の発達程度(主流流長/流域長)
	GL 0次谷の数	土石流発生場の大小
	GM 流域最大傾斜(°)	山腹斜面崩壊の発生・非発生
	GN 源頭部面積(km ²)	土石流発生源の集水の大小
GO 流域 渓床危険度評価	○ 建設省方式による評価(a1=4, a2=3, b=2, c=1)	
GP 評価 渓床堆積厚評価	○ 同上(多い=3, 中=2, 少ない=1)	
GQ 評価 降雨集中度評価	流域の形状と谷の発達状況から降雨の集中度を評価	

○印：土石流危険渓流調査項目

ここで、渓床堆積厚さの調査は、土石流危険渓流調査要領(案)³⁾によると、渓床勾配10°以上での各断面の最深堆積土砂厚の平均値を調査し、それが困難な場合には、渓床勾配10°以上での平均堆積土砂厚の多い、中、少ないについて調査することが示されている。本研究で取り扱った溪流の調査結果によると渓床堆積厚さは、多い、中、少ないの評価が行われており、渓床堆積厚さ(要因GG)は、入手することが出来なかったため、要因から削除した。

流域評価要因において、渓床危険度評価³⁾(要因GO)とは、建設省方式による評価項目であり、渓床勾配と渓床勾配15°以上の流域面積の関係から、a1, a2, b, cの危険度分類がなされており、ここでは、ランク4, 3, 2, 1として扱った。

渓床堆積厚評価³⁾(要因GP)は、技術者の定性的な判断であるが土石流が発生するための発生源となる

不安定土砂の状態を評価した重要な要因であると考えられるため、ここでは、多い、中、少ないの状態をランク3, 2, 1として評価した。

降雨集中度評価¹²⁾(要因GQ)とは、流域の形状と谷の発達状況から降雨の集中度を評価したものであり、ランクが1~5まで評価されており、ランクの高いものほど谷が深く地形が複雑で集水地形をしている。

これらの地形要因に対して相関係数による要因分析を行う。要因分析では、多重共線性の問題¹³⁾を避けるため、ここでは、相関係数0.7以上の高い相関を有する要因があれば、どちらかを代表的な要因として扱い、一方の要因を削除する。表-3に地形要因による相関係数一覧表を示す。表-3より、表中の記号は、表-2の地形要因一覧表の記号と一致しており、相関係数が0.7以上の高い相関を有する要因の

表-3 地形要因相関係数一覧表

	渓流要因										斜面要因			流域評価要因			
	GA	GB	GC	GD	GE	GF	GH	GI	GJ	GK	GL	GM	GN	GO	GP	GQ	
溪流	GA	1.00															
	GB	-0.25	1.00														
	GC	-0.04	0.52	1.00													
	GD	0.26	-0.35	0.10	1.00												
	GE	0.13	-0.33	-0.08	0.67	1.00											
	GF	-0.08	-0.11	-0.17	-0.09	-0.12	1.00										
	GH	0.13	-0.37	-0.01	0.80	0.77	-0.07	1.00									
	GI	0.07	-0.31	-0.17	0.35	0.72	-0.11	0.36	1.00								
	GJ	-0.06	-0.02	-0.14	-0.24	-0.01	-0.12	-0.40	0.55	1.00							
	GK	0.28	-0.18	0.15	0.62	0.17	-0.04	0.09	0.21	0.23	1.00						
斜面	GL	0.14	-0.47	-0.17	0.49	0.75	-0.07	0.53	0.61	0.06	0.14	1.00					
	GM	0.11	0.13	0.32	0.27	0.10	-0.03	0.14	0.07	0.03	0.21	0.05	1.00				
	GN	-0.01	-0.17	-0.21	0.08	0.54	-0.05	0.37	0.51	0.11	-0.25	0.30	-0.12	1.00			
流域	GO	0.14	0.19	0.41	0.26	0.28	-0.12	0.30	0.21	-0.03	0.04	0.18	0.16	0.04	1.00		
	GP	-0.07	-0.01	-0.06	0.10	0.20	0.06	0.23	0.21	-0.03	-0.10	0.10	-0.19	0.15	0.18	1.00	
評価	GQ	0.21	-0.32	-0.06	0.33	0.45	-0.07	0.17	0.58	0.30	0.31	0.63	-0.03	0.17	0.09	0.03	1.00

表-4 降雨要因一覧

要 因	指標	説 明
RA 時間雨量(mm/h)	短期	一連の降雨における1時間雨量
RB 積算雨量(mm)	長期	一連の降雨における累積雨量
RC 有効雨量(mm)	長期	一連の降雨において時間雨量4mm/h以上の降り始め(変曲点A)～4mm/h未満が3時間以上経過(変曲点B)までの累積雨量
RD1 実効雨量(mm)(半減期1hr)	短期	前期降雨の影響を考慮した累積雨量で半減期T時間における
RD2 実効雨量(mm)(半減期24hr)	長期	t時間前の減少係数 $\alpha = 0.5^{t/T}$ (T:半減期)と時間雨量 $r(t)$ の積和
RD3 前期実効雨量(mm)(半減期3hr)	前期	一連の降雨において時間雨量4mm/h以上の降り始め(変曲点A)
RD4 前期実効雨量(mm)(半減期6hr)	前期	以前の实効雨量
RD5 前期実効雨量(mm)(半減期12hr)	前期	
RE 降雨継続時間(hr)	時間	一連の降雨において雨の降り始めから降り終わりまでの時間
RF 有効時間(hr)	時間	有効雨量に対する時間で変曲点A～Bまでの時間
RG 有効雨量強度(mm/h)	短期	有効雨量を有効時間で除した値
RH 降雨強度勾配比	変動	降雨継続時間と積算雨量における変曲点AとBの勾配比
RI1 基準化した有効降雨重心	変動	有効降雨時間内の降雨の重心時間/有効時間
RI2 有効降雨重心	変動	有効降雨時間内の降雨の重心時間

中で、流域長(要因GH)、流域幅(要因GI)、流域形状比(要因GJ)においてその特性が反映できることを考慮して要因から削除する。また、0次谷の数(要因GL)は、流域面積(要因GE)でその特性が反映できると考えて要因から削除する。

したがって、データを入手出来なかった渓床堆積厚さ(要因GG)と相関行列から相関の高くなった流域長(要因GH)、流域幅(要因GI)、0次谷の数(要因GL)の4要因を除く全13要因を用いて検討を行うものとする。

(3) 降雨要因の設定

土石流の発生した降雨の一例を図-4に示す。図-4は、縦軸に時間雨量(mm/h)と積算雨量(mm)を、横軸に降雨継続時間(hr)を用いて、それぞれ折れ線グラフおよび棒グラフで表している。この降雨では、時間雨量61mm/h、積算雨量268mmにおいて、山腹斜面崩壊を伴う砂礫型の土石流が発生し、その下流部において激甚な土砂災害を引き起こした。

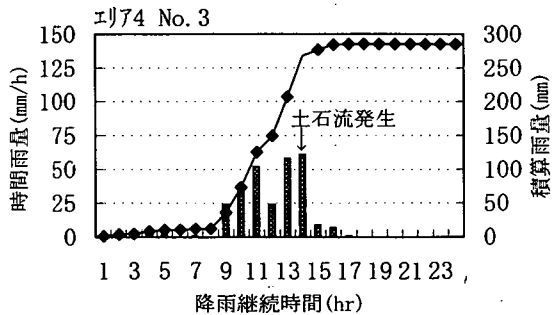


図-4 土石流発生降雨の一例

このような土砂災害を発生させる降雨に対して、表-4の降雨要因一覧に示すような14要因を考えた。これらの要因は、それぞれ降雨の短期、長期、時間、変動、前期の特徴を表す指標から成っている。

表-5に降雨要因の相関係数一覧表を示す。表-5より、相関係数が0.7以上の高い相関を示す要因は、降雨の短期、長期、時間、変動、前期指標においてそれぞれ相関の高い要因が含まれており、土砂崩壊

表-5 降雨要因相関係数一覧表

	RA	RB	RC	RD1	RD2	RD3	RD4	RD5	RE	RF	RG	RI1	RI2
RA	1.00												
RB	-0.18	1.00											
RC	0.15	0.28	1.00										
RD1	0.79	-0.05	0.42	1.00									
RD2	-0.01	0.90	0.62	0.25	1.00								
RD3	-0.20	0.78	-0.19	-0.14	0.55	1.00							
RD4	-0.22	0.84	-0.24	-0.21	0.57	0.97	1.00						
RD5	-0.24	0.84	-0.27	-0.25	0.56	0.93	0.99	1.00					
RE	-0.28	0.89	-0.05	-0.31	0.63	0.86	0.92	0.92	1.00				
RF	-0.21	0.28	0.58	-0.29	0.30	-0.10	-0.08	-0.07	0.29	1.00			
RG	0.61	-0.37	-0.04	0.72	-0.16	-0.19	-0.27	-0.31	-0.55	-0.71	1.00		
RI1	0.39	-0.03	-0.63	0.20	-0.22	0.24	0.30	0.32	0.14	-0.56	0.24	1.00	
RI2	-0.16	0.33	0.57	-0.23	0.34	-0.05	-0.02	0.00	0.34	0.98	-0.73	-0.42	1.00

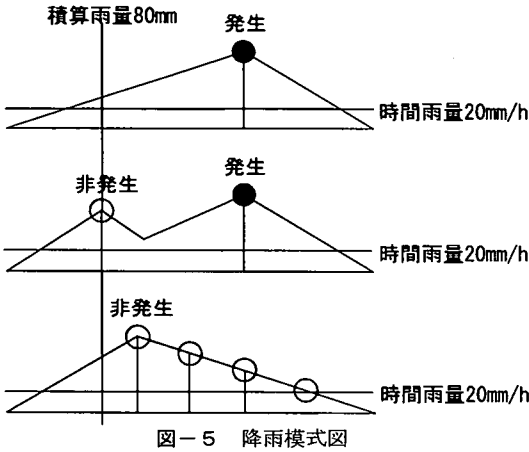


図-5 降雨模式図

の判別システムを構築する上で、要因相互の相関係数を考慮した降雨要因の組み合わせを検討する必要がある。

また、降雨要因の抽出において、一連続降雨は、前後に24時間以上の無降雨期間があるひとまよりの降雨として定義²⁾する。一連続降雨から降雨要因を抽出する方法は、図-5の降雨模式図に示すように、発生降雨については、土砂崩壊の発生時間において要因を抽出する。また非発生降雨については、時間雨量のピーク以降の変化点において積算雨量80mm以上で時間雨量20mm/h以上となる要因を抽出する。抽出した降雨要因に対して、地形要因と同様に相関行列を計算し、相関係数による要因分析を行う。

4. 土砂崩壊判別モデルの構築

土砂崩壊判別モデルの構築では、説明変数に地形要因や降雨要因の量的データから、目的変数に土砂崩壊の「発生」「非発生」の質的な判別を行うこと

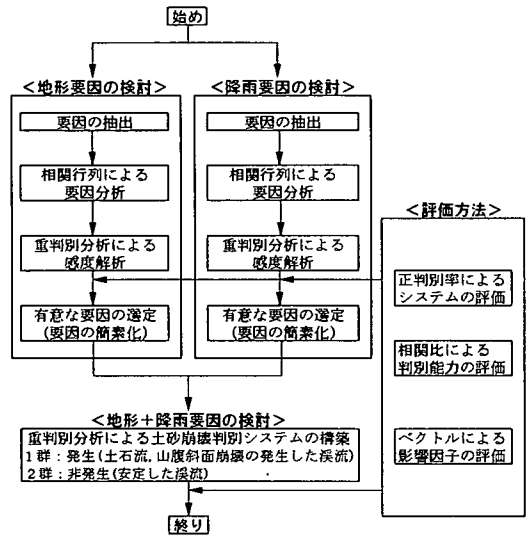


図-6 土砂崩壊判別システムの流れ図

から重判別分析¹⁴⁾を用いる。本研究に用いた重判別分析の関数式は、式(1)で示される。

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

ここで、Z：判別得点

A_0 ：定数項

B_i, C_j ：地形要因、降雨要因の係数値

X_i, X_j ：地形要因の値 ($i = 1 \dots n$),

降雨要因の値 ($j = 1 \dots m$)

重判別分析では、判別得点の全体の変動 S_i とグループ間の変動 S_B の比 S_B/S_i が最大になるように定数項および各要因の係数が決定される。また、判別得点が正値であれば1群(発生グループ)、負値であれば2群(非発生グループ)と判別される。

土砂崩壊判別モデルを構築するための分析手順を

表-6 要因のクラス分類

クラス	要因	内容
1	地形	土石流危険渓流調査結果 (計測要因+評価要因)
2		土石流危険渓流調査結果+地形図から読み取れる要因 (計測要因)
3		土石流危険渓流調査結果+地形図から読み取れる要因 (計測要因+評価要因)
4	降雨	2要因のみ (短期雨量指標+長期雨量指標)
5	地形+降雨	3要因以上 (短期雨量指標+長期雨量指標+その他指標)
6		地形・降雨の検討において得られた最良の要因の組み合わせ

図-6の土砂崩壊判別システムの流れ図に示す。判別システムでは、まず、地形要因の検討と降雨要因の検討を別々に行う。地形要因の検討では、土砂崩壊の発生した溪流と非発生の溪流を地形要因のみで判別することであり、溪流が本来持っている崩壊危険度について検討する。また、降雨要因の検討では、土砂崩壊を引き起こす降雨かどうかの判別を行い、土砂崩壊の発生に影響を与える降雨要因について検討する。各検討とも、前述した相関行列による要因分析を行う。次に、以下に示す入手情報量のクラス分類に従った感度解析を行い、土砂崩壊の発生に影響を与える有意な要因を選定し、要因の簡素化を行う。さらに、地形要因と降雨要因を組み合わせた検討では、溪流毎に土砂崩壊の「発生」「非発生」の判別を行う。

また、構築した土砂崩壊判別システムは、正判別率によるシステム評価、相関比による判別能力の評価、ベクトルによる影響因子の評価により、総合的な評価を行う。ここで、正判別率とは、実際に土砂崩壊の「発生」「非発生」をそれぞれ正しく判別した率と全体を総合して正しく判別した率とで表わす。また、相関比とは、相関係数にあたるもので、0~1の値をとり、当然1に近い方がよりよい判別ができる。さらに、ベクトルとは、データを標準化したときの判別式の係数であり、正負の記号および絶対的な数値の大きさから判別への影響度が判断できる。

5. 入手情報量のクラス分類

豪雨による土砂崩壊は、豪雨の襲来時期によるが、数年~数10年に1回程度発生する地域や今まで土砂崩壊を一度も経験したことのない地域がある。このように土砂崩壊の発生回数は地域によって異なるため、入手できるデータ量も地域によって異なってくる。また、溪流データの調査方法や調査項目は、データの質や量にも関係する。したがって、著者らの設定した地形要因や降雨要因、さらに既往の土砂災害に関する被害状況等の資料が必ずしも全て揃っ

ているとは限らない。また状況によっては設定した要因の一部しか入手できないことや被害状況の把握が困難なことも想定される。

そこで入手情報量に応じた土砂崩壊判別モデルを構築し、入手情報量が判別モデルに与える影響について検討する。入手情報量には、情報収集の行い易さの観点から表-6に示す6通りのクラス分類を行った。

ここで、クラス1~3は、地形要因のクラス分類であり、クラス1は、土石流危険溪流の調査結果を用いた場合で比較的収集し易いデータである。クラス2は、土石流危険溪流の調査結果と著者らが設定した地形図から読み取れるその他の要因のうち、地形図から計測した要因のみを用いた場合である。クラス3は、クラス2の計測要因に評価要因を加えた全ての地形要因を用いた場合である。クラス4は、土石流の警戒避難基準雨量の設定¹⁵⁾や斜面災害の危険度評価¹⁶⁾等に用いられている2つの降雨要因を組み合わせた場合である。クラス5は、クラス4の降雨要因に著者らの設定した降雨要因を加えた場合である。クラス6は、地形要因および降雨要因の各検討において得られた要因から地形要因と降雨要因を組み合わせた検討を行う。

6. 地形要因による検討結果

地形要因による検討では、土砂崩壊の発生した溪流と非発生の溪流の違いを、溪流が本来持っている崩壊危険度の違いとして、土砂崩壊を引き起こしやすしい危険な溪流の判別を行う。地形要因による土砂崩壊の判別では、降雨要因の影響を強く受けることから、同じ雨が降ったと推定できる地域で判別を行う必要がある。ここでは、図-2に示したエリア区分において、最も被害の大きかったエリア4のみを対象とし、降雨の影響を極力少なくする。地形要因による検討は、まず、入手情報量のクラス分類1~3に適用し、各地形要因のベクトル値の符号から、工学的な意味付けが困難となる要因については、その

表-7 地形要因の分析結果

クラス分類		1			2			3			
		初期	中間	最終	初期	中間	最終	初期	中間	最終	
ベクトル値	溪流	GA 水系模様				0.039	0.114	0.113	0.056	0.116	0.115
		GB 流域平均勾配(°)				-0.281			-0.353		
		GC 最急渓床勾配(°)	0.668	0.910	0.922	-0.109			-0.162		
		GD 主溪流長(km)	-0.520			0.565	0.569	0.570	0.456	0.561	0.560
		GE 流域面積(km ²)	0.416	0.088	0.042	-0.169			-0.068		
		GF 溪流幅(m)	0.160	0.378	0.385	-0.081			0.005	0.082	0.086
		GG 渓床堆積厚さ(m)									
		GH 流域長(km)									
		GI 流域幅(km)									
		GJ 流域形状比				0.633	0.814	0.814	0.658	0.815	0.816
		GK 谷深比				-0.281			-0.168		
		GL 〇 次谷の数									
		GM 流域最大傾斜(°)				0.042	-0.018		0.072	-0.003	
		GN 源頭部面積(km ²)				-0.267			-0.297		
評価	GO 渓床危険度評価	-0.288						0.164	-0.008		
	GP 渓床堆積厚評価	0.029	-0.146					-0.028			
	GQ 降雨集中度評価							-0.228			
相 関 比		0.087	0.046	0.045	0.183	0.120	0.120	0.198	0.121	0.121	
正判別率	発生	16/23	14/23	14/23	15/23	13/23	13/23	17/23	14/23	14/23	
	%	69.6	60.9	60.9	65.2	56.5	56.5	73.9	60.9	60.9	
	非発生	30/49	29/49	28/49	30/49	32/49	33/49	33/49	32/49	32/49	
	%	61.2	59.2	57.1	61.2	65.3	67.3	67.3	65.3	65.3	
全 体		46/72	43/72	42/72	45/72	45/72	46/72	50/72	46/72	46/72	
%		63.9	59.7	58.3	62.5	62.5	63.9	69.4	63.9	63.9	

要因を削除し、感度解析により段階的に要因を絞り込むものとする。

検討結果の一覧を表-7に示す。表-7より、クラス1は、地形要因のうち既往の土石流危険度調査結果のみを用いており、最も情報が入手し易いクラスである。初期段階におけるモデルの精度は、相関比0.087、正判別率は、発生69.6%、非発生61.2%、全体63.9%となった。また、ベクトル値では、主溪流長(要因GD)と渓床危険度評価(要因GO)が負値を示しており、工学的な意味付けが困難となった。これは、重判別分析が数学的な最適化により与えられたデータに対する予測値との誤差を最小にしているためである。したがって、工学的な意味づけが困難な要因は、判別分析から削除し、ベクトル値が全て正值になるまで判別を繰り返す。最終段階において最急渓床勾配(要因GC)、流域面積(要因GE)、溪流幅(要因GF)の3つの要因のベクトル値が全て正值を示した。モデルの精度は、相関比0.045、正判別率は、発生60.9%、非発生57.1%、全体58.3%となり、初期段階よりも精度が低下した。

クラス2は、著者らの設定した地形要因のうち計測要因のみを用いており、初期段階では、ベクトルが負値を示す要因があるため、同様に段階的な感度解析を行い、最終段階では、水系模様(要因GA)、主溪流長(要因GD)、流域形状比(要因GJ)の3要因となり、モデルの精度は、相関比0.120、正判別率は、発生56.5%、非発生67.3%、全体63.9%となり、ク

ラス1の最終段階の結果と比べてモデルの精度はやや改善された。

クラス3は、クラス2の計測要因に流域評価要因を加えた場合で著者らの設定した全ての地形要因を用いている。同様な感度解析により、最終段階では、水系模様(要因GA)、主溪流長(要因GD)、溪流幅(要因GF)、流域形状比(要因GJ)の4要因となり、モデルの精度は、相関比0.121、正判別率は、発生60.9%、非発生65.3%、全体63.9%となり、クラス2とほぼ同じ精度となった。

入手情報量のクラス分類1~3において、最終段階で残った地形要因は、水系模様(要因GA)、最急渓床勾配(要因GC)、主溪流長(要因GD)、流域面積(要因GE)、溪流幅(要因GF)、流域形状比(要因GJ)の6要因であり、全て溪流の計測要因であった。また、各クラスとも相関比は低く、正判別率は6割程度となった。

これは、土砂崩壊の発生が降雨要因の影響を強く受けており、観測エリア4では、昭和47年7月と昭和63年7月に土石流が発生しており、土砂崩壊の発生降雨が異なっているため、降雨特性の影響を全て取り除くことが出来なかったと考えられる。また、ある限られた発生降雨のみに着目しても、その降雨特性に対する溪流の危険度が評価されることになる。このため、溪流の土砂崩壊の「発生」「非発生」の判別は、地形要因と降雨要因を組み合わせた検討を行う必要があると考えられる。

表-8 短期指標と長期指標を組み合わせた2つの降雨要因の検討結果

検討ケース		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ベクトル値	短期 RA 時間雨量(mm/h)	0.685	0.183	0.480						
	RD1 実効雨量(mm) (半減期1hr)				0.632	-0.148	0.238			
	RG 有効雨量強度(mm/h)							0.132	0.131	0.125
	長期 RB 積算雨量(mm)	0.729			0.775				-0.991	
	RC 有効雨量(mm)		0.983			0.989				-0.991
RD2 実効雨量(mm) (半減期24hr)			0.877			0.971				-0.992
相 関 比		0.112	0.395	0.189	0.086	0.391	0.152	0.051	0.390	0.147
正判別率	発 生	5/5	5/5	5/5	4/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
	%	100.0	100.0	100.0	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	非発生	13/21	14/21	11/21	11/21	13/21	13/21	15/21	13/21	13/21
	%	61.9	66.7	52.4	52.4	61.9	61.9	71.4	61.9	61.9
全 体		18/26	19/26	16/26	15/26	18/26	18/26	20/26	18/26	18/26
%		69.2	73.1	61.5	57.7	69.2	69.2	76.9	69.2	69.2

表-9 3つの降雨要因の検討結果

検討ケース		1	2	3	4	5	6	7
ベクトル値	短期 RA 時間雨量(mm/h)	-0.254	0.370	0.433	0.317	0.183	0.193	0.198
	長期 RC 有効雨量(mm)	0.292	0.751	0.775	0.840	0.983	0.978	0.974
	時間 RE 降雨継続時間(hr)	-0.922						
	RF 有効時間(hr)		0.547					
	変動 R11 有効降雨重心 (基準化)			-0.460				
R12 有効降雨重心				0.440				
前 期	RD3 前期実効雨量(mm) (半減期3hr)					0.005		
	RD4 前期実効雨量(mm) (半減期6hr)						0.077	
	RD5 前期実効雨量(mm) (半減期12hr)							0.105
相 関 比		0.524	0.447	0.418	0.431	0.395	0.398	0.399
正判別率	発 生	4/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5	5/5
	%	80.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	非発生	18/21	15/21	12/21	13/21	14/21	13/21	13/21
	%	85.7	71.4	57.1	61.9	66.7	61.9	61.9
全 体		22/26	20/26	17/26	18/26	19/26	18/26	18/26
%		84.6	76.9	65.4	69.2	73.1	69.2	69.2

7. 降雨要因による検討結果

(1) 2つの降雨要因による検討結果

降雨要因による検討では、土砂崩壊を発生させる危険降雨であるかどうかの判別を行うことである。クラス4は、2つの降雨要因を用いた検討であり、土石流の警戒避難基準雨量の設定¹⁵⁾や斜面災害の危険度評価¹⁶⁾等に用いられている要因を参考とし、短期指標と長期指標を用いて、相関行列の要因分析結果を基に、相関の高い要因を除いて、要因相互の組み合わせを考えた感度解析を行う。表-8に2つの降雨要因を用いた感度解析の結果を示す。表-8より、各ケースとも土砂崩壊の発生降雨に対する正判別率はどれも100%と高い正判別率となった。それに対して非発生降雨における正判別率は、検討ケース毎に異なっており、ケース2、7の正判別率が高くなった。ケース2の時間雨量(要因RA)と有効雨量(要因RC)の組み合わせでは、相関比0.395、正判別率は、発生100%、非発生66.7%、全体73.1%となり、相関比は最も高く、また正判別率も非常に高くなった。また、ベクトルは、両要因とも正值となり、

特に、有効雨量のベクトル値が0.983となり時間雨量のベクトル値0.183と比べて大きく、判別システムに与える影響が強いことを示している。

また、ケース7の有効雨量強度(要因RG)と積算雨量(要因RB)の組み合わせでは、全体の正判別率が76.9%と最も高くなったが、相関比が0.051と低くなっている。また、積算雨量(要因RB)のベクトル値が-0.991と負値を示しており、工学的意味付けが困難な結果となった。

したがって、2つの降雨要因の検討では、ケース2の時間雨量(要因RA)と有効雨量(要因RC)の組み合わせが、土砂崩壊の発生降雨を最も精度良く判別している。

(2) 3つ以上の降雨要因による検討結果

3つ以上の降雨要因の検討では、前述した短期指標としての時間雨量(要因RA)と長期指標としての有効雨量(要因RC)の2つの降雨要因に時間指標、変動指標、前期指標の要因をそれぞれ組み合わせ、危険降雨の判別を行う。表-9に3つの降雨要因の検討結果を示す。

表-9より、ケース1では、2つの降雨要因に時間指標としての降雨継続時間(要因RE)を加えた検討で

表-10 4つの降雨要因の検討結果

検討ケース		1	2	3	4	5
ベクトル値	短期 RA 時間雨量(mm/h)	0.566	0.29	0.373	0.378	0.378
	長期 RC 有効雨量(mm)	0.488	0.053	0.749	0.751	0.755
	時間 RF 有効時間(hr)	0.525	0.598	0.546	0.535	0.526
	変動 RI1 有効降雨重心(基準化)	-0.406				
	RI2 有効降雨重心		0.745			
前期	RD3 前期実効雨量(mm)(半減期3hr)			0.029		
	RD4 前期実効雨量(mm)(半減期6hr)				0.086	
	RD5 前期実効雨量(mm)(半減期12hr)					0.102
相 関 比		0.464	0.154	0.447	0.449	0.450
正判別率	発生	5/5	4/5	5/5	5/5	5/5
	%	100.0	80.0	100.0	100.0	100.0
	非発生	13/21	15/21	14/21	14/21	14/21
	%	61.9	71.4	66.7	66.7	66.7
全 体		18/26	19/21	19/26	19/26	19/26
%		69.2	73.1	73.1	73.1	73.1

表-11 データ数の取り扱い

検討ケース	内 容	システム構築用データ			残りのデータ
		発生	非発生	合計	
1 全溪流 +全降雨	全溪流に全ての降雨要因を用いてシステムを構築する。	36	736	772	—
2 全溪流 +降雨選別	全溪流に土砂崩壊の発生降雨要因の最小値以上となる降雨要因を用いてシステムを構築する。	36	418	454	318
3 溪流選別 +全降雨	対象期間中に土砂崩壊を経験した溪流に全ての降雨要因を用いてシステムを構築する。	36	158	194	578
4 溪流選別 +降雨選別	対象期間中に土砂崩壊を経験した溪流に降雨選別要因を用いて構築する。	36	74	110	662

あり、相関比0.524、正判別率は、発生80%、非発生85.7%、全体84.6%となり、相関比は最も高くなっているが、発生の正判別率が2つの降雨要因の検討結果と比べて低下している。また、時間雨量(要因RA)と降雨継続時間(要因RE)のベクトル値が負値となり、工学的意味付けが困難な結果となった。

ケース2では、同様に時間指標としての有効時間(要因RF)を加えた検討であり、相関比0.447、正判別率は、発生100%、非発生71.4%、全体76.9%となった。相関比、正判別率とも2つの降雨要因の検討結果よりも精度が向上している。

その他のケース3~7までの検討結果は、2つの降雨要因の検討結果に比べて精度の改善が見られず、逆に精度低下を引き起こしている。

次に、表-10に4つの降雨要因の検討結果を示す。4つの降雨要因とは、前述の最良の結果を示した3つの降雨要因にその他の降雨要因として変動指標または前期指標を加えた検討であり、3つの降雨要因の結果と比べると全てのケースにおいて全体の正判別率が低下しており、これ以上、降雨要因を加えても精度の向上が見られないことが示された。

したがって、3つの降雨要因を用いた土砂崩壊の発生危険降雨の検討では、短期指標としての時間雨量(要因RA)と長期指標としての有効雨量(要因RC)、に時間指標としての有効時間(要因RF)を加えること

により、精度の高い判別を行うことができる。

8. 地形要因と降雨要因を組み合わせた検討結果

地形要因と降雨要因を組み合わせた検討では、個々の溪流において、それぞれの降雨に対して土砂崩壊の「発生」「非発生」を判別する。地形要因と降雨要因の組み合わせによるデータの特徴は、ある溪流に土砂崩壊の発生降雨と非発生降雨があれば、1群「発生グループ」と2群「非発生グループ」で同じ地形データを用いることになる。また、地形データと降雨データの組み合わせにより、分析データ数が多くなる。しかも、土砂崩壊の発生頻度は低いため、土砂崩壊の発生データ数に比べて非発生データ数が非常に多い。そのため、判別システムの構築においてデータ数の片寄りがシステムに影響を与えられられるため、表-11に示す検討ケースについて、溪流や降雨の特徴を考慮したデータ数の取り扱いの検討を行う。

ここで、ケース1は、全データを用いた場合で、発生36データ、非発生736データとなり、非発生データが発生データに比べて非常に多い。

ケース2は、全溪流を対象とし、選別した降雨

表-12 地形要因と2つの降雨要因を組み合わせた検討結果

検討ケース		1		2		3			4		
段階的要因の簡素化		初期	最終	初期	最終	初期	中間	最終	初期	最終	
ベクトル値	地形	GA 水系模様	0.023	0.073	0.039	0.088	-0.010			0.014	0.035
		GB 流域平均勾配(°)	-0.125		-0.148		-0.030			0.111	0.095
		GC 最急渓床勾配(°)	-0.112		-0.019		0.040	0.035	0.035	0.015	0.031
		GD 主溪流長(km)	0.347	0.215	0.298	0.237	-0.067			-0.140	
		GE 流域面積(km ²)	-0.181		-0.100		0.202	0.092	0.089	0.336	0.150
		GF 溪流幅(m)	-0.089		-0.022		-0.067			-0.032	
		GJ 流域形状比	0.323	0.330	0.255	0.239	-0.018			-0.085	
		GK 谷深比	-0.105		-0.061		0.024	-0.011		0.147	0.036
		GM 流域最大傾斜(°)	0.055	0.004	0.058	0.030	-0.089			-0.122	
	GN 源頭部面積(km ²)	-0.049		-0.064		-0.029			-0.056		
	降雨	短期 RA 時間雨量(mm/h)	0.290	0.323	0.424	0.446	0.304	0.312	0.312	0.414	0.439
		長期 RC 有効雨量(mm)	0.778	0.858	0.788	0.824	0.919	0.945	0.945	0.797	0.879
	相 関 比		0.128	0.122	0.192	0.184	0.423	0.421	0.421	0.632	0.617
同定データに対する正判別率	発生 %	36/36	36/36	34/36	35/36	36/36	36/36	36/36	34/36	35/36	
	非発生 %	100.0	100.0	94.4	97.2	100.0	100.0	100.0	94.4	97.2	
	全体 %	411/772	407/772	296/457	307/457	130/194	134/194	134/194	102/110	101/110	
		53.2	52.7	64.8	67.2	67.0	69.1	69.1	92.7	91.8	
全データに対する正判別率	発生 %	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	
	非発生 %	同上	同上	567/736	581/736	386/736	388/736	389/736	618/736	622/736	
	全体 %	同上	同上	77.0	78.9	52.4	52.7	52.9	84.0	84.5	
		同上	同上	601/772	616/772	422/772	424/772	425/772	652/772	657/772	
			77.8	79.8	54.7	54.9	55.1	84.5	85.1		

データを用いる場合である。ここで降雨選別とは、土砂崩壊の発生降雨と同程度の非発生降雨を用いることであり、発生降雨に比べて極力小さい非発生降雨を取り除き、システム構築における非発生降雨データを少なくする。降雨の選別方法は、土砂崩壊の発生降雨要因の最小値に着目し、非発生降雨の降雨要因の中で一つでも最小値以上の値を持てば降雨データとして用いる。

ケース3は、検討対象期間中に土砂崩壊を経験した溪流のみを対象とし、全ての降雨データを用いた場合である。ここで、土砂崩壊を経験した溪流は、山腹斜面崩壊や土石流の発生程度にもよるが、未経験溪流に比べて土砂崩壊を発生しやすい地形的な要因が多く含まれており、崩壊危険性の高い溪流であると考えられる。

ケース4は、ケース2の降雨選別とケース3の溪流選別の考え方を合わせた場合で、システム構築に用いるデータ数が最も少なくなる。

説明変数に用いる地形要因と降雨要因は、前述の各検討結果より、地形要因では、水系模様(要因GA)、最急渓床勾配(要因GC)、主溪流長(要因GD)、流域面積(要因GE)、溪流幅(要因GF)、流域形状比(要因GJ)の6要因が最終段階に残った要因である。しかしながら、地形要因のみの検討では判別精度が低く、土砂崩壊の「発生」「非発生」をうまく判別できなかったため、これらの地形要因を含む全ての計測要因を用いて再度要因の簡素化を行う。また、降雨要因は、2つの降雨要因として時間雨量(要因RA)と有効雨量(要因RC)を用いる場合と3つの降雨要因とし

てさらに有効時間(要因RF)を加える場合の2通りについて行う。

また、各検討ケースの比較は、同定に用いたデータに対する相関比や正判別率とともに構築した重判別システムを残りの非発生データに適用し、全てのデータに対する正判別率から総合的な評価を行う。

地形要因と2つの降雨要因を組み合わせた検討結果を表-12に示す。各検討ケースとも初期段階では、ベクトル値が負値となる要因が含まれており、段階的な要因の簡素化が必要となっている。最終段階の分析結果より、検討ケース4では、相関比0.617、正判別率は、発生97.2%、非発生89.2%、全体91.8%となり、検討ケースの中で最も高い精度となった。また、この重判別システムを残りの非発生データに適用した場合の全てのデータに対する全体の正判別率は、85.1%となり検討ケースの中で最も高い正判別率となった。

地形要因と3つの降雨要因を組み合わせた検討結果を表-13に示す。前述と同様の手順により、段階的な要因の簡素化を行った結果、最終段階において降雨要因の一部が削除されており、ケース2では、時間雨量(要因RA)と有効雨量(要因RC)が採用されているが、他のケースでは、有効雨量(要因RC)しか採用されなかった。システムの精度は、表-12の各検討ケースと比べて、相関比や正判別率がどれも低下しており、地形要因と3つの降雨要因の組み合わせでは、精度の向上が図れなかった。

したがって、相関比、正判別率、ベクトル値の検討において最も良い精度を示したのは、表-12の検

表-13 地形要因と3つの降雨要因を組み合わせた検討結果

検討ケース		1		2		3			4			
段階的要因の簡素化		初期	最終	初期	最終	初期	中間	最終	初期	中間	最終	
ベクトル値	地形	GA 水系模様	-0.092		0.015	0.082	-0.015			-0.011		
		GB 流域平均勾配(°)	-0.066		-0.092		-0.072			-0.057		
		GC 最急溪床勾配(°)	-0.103		-0.099		0.024	0.033	0.033	0.041	0.072	0.075
		GD 主溪流長(km)	0.216	0.225	0.278	0.231	0.095	-0.023		-0.023		
		GE 流域面積(km ²)	-0.142		-0.146		0.023	0.106	0.089	0.101	0.123	0.126
	GF 溪流幅(m)	-0.077		-0.060		-0.039			-0.048			
	GJ 流域形状比	0.216	0.334	0.256	0.269	0.026	-0.008		0.011	-0.015		
	GK 谷深比	-0.070		-0.088		-0.046			-0.023			
	斜面	GM 流域最大傾斜(°)	0.028	0.006	0.040	0.011	-0.036			-0.053		
		GN 源頭部面積(km ²)	-0.018		-0.041		-0.004			-0.014		
降雨												
雨	短期 RA 時間雨量(mm/h)	-0.066		0.047	0.384	-0.150			-0.074			
	長期 RC 有効雨量(mm)	0.774	0.915	0.785	0.848	0.799	0.994	0.995	0.822	0.990	0.989	
	時間 RF 有効時間(hr)	-0.506		-0.430		-0.572			-0.546			
相関比		0.175	0.110	0.191	0.157	0.671	0.385	0.385	0.700	0.462	0.462	
同定データに対する 正判別率	発生 %	35/36	36/36	35/36	36/36	33/36	36/36	36/36	33/36	36/36	36/36	
	非発生 %	97.2	100.0	97.2	100.0	91.7	100.0	100.0	91.6	100.0	100.0	
	全体 %	483/736	363/736	432/648	368/648	139/158	98/158	98/158	116/132	78/132	77/132	
		65.6	49.3	66.7	56.8	88.0	62.0	62.0	87.9	59.1	58.3	
全データに対する 正判別率	発生 %	518/772	399/772	467/684	404/684	172/194	134/194	134/194	149/168	114/168	113/168	
	非発生 %	67.1	51.7	68.3	59.1	88.7	69.1	69.1	88.7	67.9	67.3	
	全体 %	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	
		518/736	456/736	515/736	389/736	390/736	541/736	430/736	434/736			
	70.4	62.0	70.0	52.9	53.0	73.5	58.4	59.0				
	553/772	492/772	548/772	425/772	426/772	574/772	466/772	470/772				
	71.9	63.7	74.4	55.1	55.2	73.8	60.4	60.9				

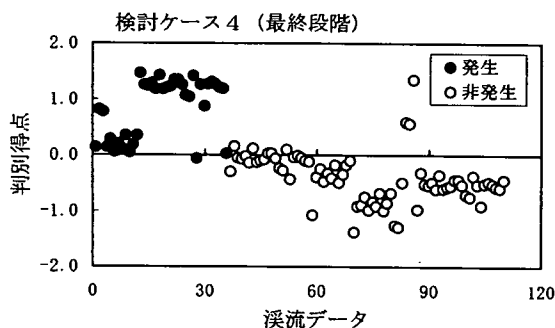


図-7 同定に用いた溪流データの判別得点

討ケース4の地形選別と降雨選別による検討であり、地形要因には、水系模様(要因GA)、流域平均勾配(要因GB)、最急溪床勾配(要因GC)、流域面積(要因GE)、谷深比(要因GK)の5要因、降雨要因は、時間雨量(要因RA)と有効雨量(要因RC)の2要因が重要な要因であることが示された。

この判別システムを用いて、同定データに対する溪流毎の判別得点を図-7に示す。図中の●印は発生溪流、○印は非発生溪流を示している。ここで、●印の発生溪流の判別得点が正值で、○印の非発生溪流のそれが負値であれば、それぞれ正しい判別をしたことになる。発生溪流は、判別境界値付近に位置するデータもあるが判別得点1.0~1.5の値が多い。また、非発生溪流も同様に判別境界値付近に位置するデータや土砂崩壊の発生に対して誤判断を示したデータもあるが、判別得点-0.5~-1.5に位置する

データが多い。これらの誤判別データや判別境界値付近のデータは、構築した土砂崩壊判別システムにおいて、実際の土砂崩壊現象を十分に評価することができなかった。しかしながら、複雑な地形形状や変化に富む表土層の状態を有する自然溪流において、これらの不確定要素を考慮すると、本研究において提案した土砂崩壊判別システムは、非常に精度の高い判別が行われたと言える。

9. 地形特性を考慮した土砂崩壊の発生限界線の設定

既往の警戒避難基準雨量は、建設省の「土砂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)²⁾」の手法によって決められている。しかしながら、前述したようにこの手法は、降雨要因のみを用いているためかなり安全側に設定されることが多く、警報の発令頻度が非常に多くなりがちであることが指摘⁴⁾されている。これは、土砂崩壊の発生を検討する上で、溪流の地形特性が無視されていることが、原因の一つと考えられる。そこで本研究では、地形要因と降雨要因を組み合わせた重判別分析により構築した土砂崩壊の「発生」「非発生」の判別システムを用いて、土砂崩壊の発生限界線(Critical Line, 以下、CLと略す)の設定に適用する。また、従来手法によるCLと比較することにより、溪流の個別防災管理への適用可能性について検討する。

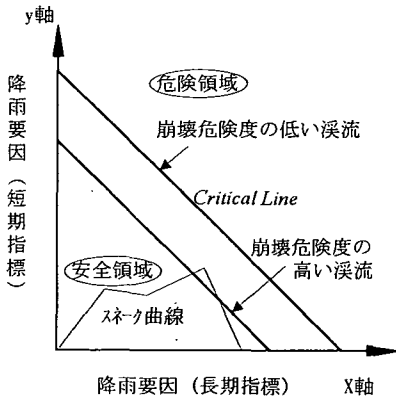


図-8 CLの設定模式図

本研究で提案するCLは、式(1)の重判別関数式において判別得点 $Z=0$ で与えられる。また、定数項や地形要因の変数項は、個々の溪流によってあらかじめ定まる値である。CLの設定に用いる判別システムは、前章の地形要因と降雨要因を組み合わせた検討において、最も良い精度を示した表-12の検討ケース4を用いる。

この判別システムを用いたCLの設定模式図を、図-8に示す。図-8より、X軸に降雨要因の長期指標として有効雨量(要因RC)、Y軸に短期指標として時間雨量(要因RA)を用いると、提案するCLは、地形要因と降雨要因からなる線形の重判別関数式を用いているため、従来のCLと同様に右下がりの直線²⁾となり、土砂崩壊発生の危険性がある領域と安全な領域を区分することができる。また、時事刻々と変化する降雨をスネーク曲線で表すと、このスネーク曲線がCLを越えると土砂崩壊発生の危険領域に入ることになる。

従来の降雨要因によるCLは、土砂崩壊の発生降雨を重視して、主観的ではあるが技術者の経験的な判断により設定されている。それに対して、本研究で提案しているCLの設定は、土砂崩壊判別システムを用いているため、より客観的に決定される。また、CLの切片は、個々の溪流の地形要因の影響を受けており、溪流毎に異なっている。このため、切片の大きい溪流ほど、崩壊危険度の低い溪流であり、逆に、切片の小さい溪流ほど崩壊危険度の大きい溪流となる。

ここで、従来手法により設定したCLを図-9に示す。CLの設定に用いた降雨要因は、本研究で提案している手法と比較するために有効雨量(mm)と時間雨量(mm/h)を用いることにする。また、CLは、発生降雨に対する判別を満足し、非発生降雨のスネーク曲線群から非発生領域が最も大きくなるように包

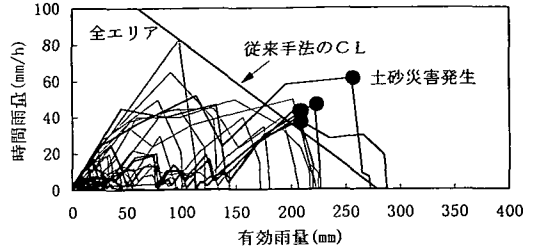
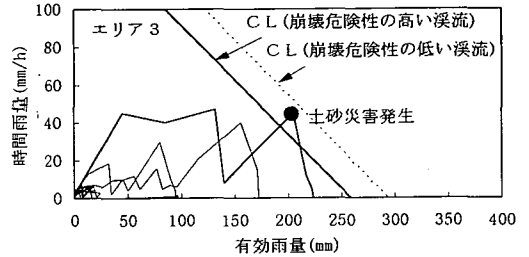
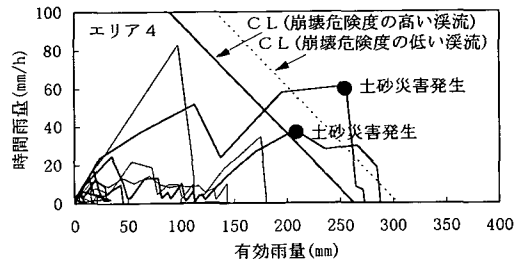


図-9 従来手法によるCLの設定



(a) 観測エリア3のCL例



(b) 観測エリア4のCL例

図-10 溪流毎のCLと土砂崩壊発生との関係例

絡線を設定⁴⁾した。また、スネーク曲線において太線が発生降雨、細線が非発生降雨を表している。さらに土砂崩壊の発生降雨については、推定された発生時刻に●印を示している。図-9において従来手法によるCLは、土砂崩壊の発生降雨を良く判別している。

従来手法によるCLでは、検討エリア内で1本しか設定されないのに対して、本研究で提案している地形特性を考慮したCLは、溪流の地形要因により溪流毎に異なっている。ここでは、土砂崩壊が比較的集中したエリア3、4に対して代表的な溪流の地形特性を考慮したCLとスネーク曲線を描き、土砂崩壊の発生との関係について検討する。図-10(a)、(b)にエリア3、4の溪流毎のCLとスネーク曲線の関係を示す。

CLの傾きは、判別システムの時間雨量(要因RA)と有効雨量(要因RC)の係数比によって決まるため、溪流の地形要因には関係なく、全て一定値と

表-14 空振り率の比較

	従来手法のCL	提案手法のCL
空振り率 (%)	167/736 22.7	114/736 15.5

なる。また、CLの傾きは、次の1時間雨量の状態を考えた場合にスネーク曲線がCLの発生領域に出してしまうことから傾き-1より急にならないことが要求される¹⁷⁾。ここでは、-0.58となり-1よりも大きくなった。

図-10(a),(b)において、それぞれ実線で示したCLは、土砂崩壊の発生した溪流の中で最も地形的に崩壊危険度の高い溪流を示している。また、点線で示したCLは、非発生溪流の中で地形的に崩壊危険度の低い比較的 안전한溪流を示しており、実線と点線の違いは溪流の地形要因によるものである。図-10(a)では、崩壊危険性の高い溪流のCLは、発生降雨のスネーク曲線における発生時刻の降雨データに対して明らかに危険となっていることを示している。それに対して、崩壊危険性の低い溪流のCLでは、前述の発生降雨のスネーク曲線に対しても安全な領域となっている。同様に図-10(b)では、崩壊危険性の高い溪流のCLは、発生降雨のスネーク曲線に対して明らかに危険領域に入っていることを示している。また、崩壊危険性の低い溪流のCLでは、危険領域にある降雨に対して実際には崩壊を免れた溪流も存在しており、空振りとなる場合もある。

次に、従来手法と本手法のCLの比較では、非発生データを発生データと誤判別する場合に着目し、式(2)に示すような空振り率によって評価する。

$$M = \frac{n}{N} \times 100(\%) \quad (2)$$

ここで、M：空振り率(%)

n：発生領域にある非発生データ数

(CLを越える非発生スネーク曲線の各点のデータ数)

N：非発生データ総数

また、従来手法により設定したCLを個別溪流に適用し、本手法との空振り率と比較したものを表-14に示す。表-14より、従来手法のCLによる空振り率22.7%に比べて、本手法によるCLの空振り率は、15.5%と低くなった。この様に、本研究で提案したCLは、従来手法と比べて溪流の地形特性を考慮することが出来るため、実際の土砂崩壊の現象をより良く反映することができる。また、空振り率も低く

なり、溪流の個別防災管理への適用可能性が高いことが示された。

10. おわりに

本研究では、豪雨に伴い発生する土石流または山腹斜面崩壊のいわゆる土砂崩壊に対して、データ収集上の現状と課題について触れ、限られたデータの量と質に応じた合理的な「発生」「非発生」の判別システムを構築し、土砂崩壊を引き起こす地形要因や降雨要因の影響因子について検討した。また、この判別システムを土砂崩壊の発生限界線(CL)の設定に適用し、溪流の個別防災管理への適用可能性について検討した。以下に結論を列挙する。

1) 地形要因のみで崩壊危険性の高い溪流の判別を行う上で重要となる要因は、入事情報量によってシステムに与える影響因子が異なるものの、計測された要因の方が流域を評価した要因に比べて重要であると言える。

2) 降雨要因のみで土砂崩壊の発生降雨の判別を行う上で重要となる要因は、2つの降雨指標では、時間雨量(mm/h)、有効雨量(mm)となり、3つの降雨指標では、時間雨量(mm/h)、有効雨量(mm)、有効時間(hr)となった。システムの精度は、どちらも発生降雨に対して100%、非発生降雨に対して65%以上の正判別率となった。また、4つ以上の降雨指標を加えても精度の向上は見られず、逆に精度低下を引き起こした。

3) 地形要因と降雨要因を組み合わせた土砂崩壊の判別では、発生データに比べて非発生データが多くなる場合であっても、適切なデータ処理を行えば、同定に用いたデータに対して0.6以上の相関比を有し、「発生」や「非発生」の正判別率も90%程度の高い値が得られた。さらに、構築した判別システムを残されたデータに適用した場合も80%以上の正判別率となった。

4) 構築した判別システムを土砂崩壊の発生限界線(CL)の設定に適用した。本手法は、溪流毎の地形特性をCLの切片に反映できるため、土砂崩壊の「発生」「非発生」の判別を溪流毎に判断することが可能である。また、空振り率が従来手法に比べて低いため、溪流の個別防災管理において有用なシステムとなることが示された。

なお本研究の結果は、ある限られた地域に対して土砂崩壊の判別システムを構築しているため、地形

データや降雨データには、その地域の特徴が表れている。また、地質要因も風化花崗岩に限定して取り扱っているため、他の地域や他の地質に適用するには、本研究で提案した手法・手順にしたがって再度システムを構築する必要がある。また、本研究で提案した判別システムは、土砂崩壊の発生限界線の設定にも適用出来るため、土砂災害の防災管理において有効な示唆を与えてくれるものと考えられる。しかしながら、地形特性が考慮できる反面、複雑な地形特性を有する自然溪流において、土砂崩壊の発生原因が設定した地形要因と異なる場合には、誤判別を起こす可能性も否定できない。したがって、今後は、土砂崩壊の発生原因となる地形特性をより詳細に調査し、判別システムに反映することが大切になってくる。

本研究のデータの収集に際し、広島県土木建築部、広島県加計土木事務所の方々から多くの支援を頂いた。また、データ整理には、山口大学学生 小山保郎君の協力を得た。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 森山裕二, 星野和彦: 土石流危険溪流および地すべり危険箇所調査結果まとめ, 砂防と治水, Vol. 26, No. 2, 1993. 6.
- 2) 建設省河川局砂防部砂防課: 土石流災害に関する情報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針(案), 1984.
- 3) 建設省河川局砂防部砂防課: 土石流危険溪流および土石流危険区域調査要領(案), 1989. 10.
- 4) 藤井恒一郎, 久保田哲也, 奥村武信: 土石流発生情報の発令及び避難指示の的確性向上に関する研究, 新砂防, Vol. 47, No. 2(193), pp. 35-42, 1994. 7.
- 5) 足立勝治, 徳山久仁夫, 中筋章人, 中山政一, 二宮寿男, 大八木俊治: 土石流発生危険度の判定について, 新砂防, Vol. 106, pp. 7-16, 1977. 12.
- 6) 山下祐一, 石川芳治, 草野慎一: 土石流発生源の崩壊地の土質特性, 新砂防, Vol. 44, No. 5(178), pp. 19-25, 1992. 1.
- 7) 広島県土木建築部砂防課: 県北西部の災害メカニズム調査報告書, 1989. 3.
- 8) 武居有恒: 地すべり・崩壊・土石流, 鹿島出版会, pp. 40-44, 1993. 4.
- 9) 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. 3.
- 10) 広島県土木部砂防課: 土石流危険溪流及び危険区域調査報告書(様式-1), 1982. 3.
- 11) 谷 誠, 杉浦信男: 雨量観測システム, 新砂防, Vol. 42, No. 6(167), pp. 47-56, 1990. 3.
- 12) 荒木義則, 鈴木真次, 石川芳治, 水山高久, 古川浩平: 土石流危険溪流における崩壊規模の評価に関する研究, 土木学会論文集 No. 522/VI-28, pp. 133-142, 1995. 9.
- 13) 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. 7.
- 14) 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.
- 15) 石川芳治: 降雨量を用いた土石流の警戒・避難基準, 新砂防, Vol. 43, No. 2(169), pp. 40-47, 1990. 7.
- 16) 村石尚: 鉄道沿線の斜面災害の危険度評価, 新砂防, Vol. 49, No. 1(204), pp. 3-8, 1996. 5.
- 17) 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(Ⅲ), 土木研究所資料, pp. 47-48, 1988. 3.

(1996. 9. 4 受付)

A STUDY ON THE METHOD FOR DETERMINING CRITICAL RAINFALL IN A SEDIMENT COLLAPSE DUE TO NATURAL FACTORS

Yoshinori ARAKI, Kohei FURUKAWA, Satoru MATUNAGA,
Takahito OGASAWARA, Yoshiharu ISHIKAWA and Takahisa MIZUYAMA

We construct a judgment system on the collapsible and noncollapsible sediment in a disaster, due to rainfall and natural torrential factors. The system examines the influential factors on the collapse of sediment in a disaster and some problematic points are brought under scrutiny in forecasting it. We present a prevention control of disaster for each torrent by applying a method in the judgment system for determining the critical rainfall of sediment collapse.