

斜面カルテと崩壊履歴の共分散構造分析を用いた斜面の地震時信頼性評価手法

梶 丹人¹・酒井 久和²・梶谷 義雄³

¹学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: tanto.masaki.7h@stu.hosei.ac.jp

²正会員 法政大学教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: hisakai@hosei.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 香川大学教授 創造工学部 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

E-mail: kajitani@eng.kagawa-u.ac.jp

山地の多い日本では、豪雨や地震が誘因となって毎年のように斜面災害が発生している。斜面災害により周辺の家屋などへの直接被害だけでなく、インフラの断絶、孤立地域の出現といった二次災害が生じる。斜面災害による被害を抑えるため、危険な斜面への事前対策が必要になる。本研究では、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震が発生した新潟県を対象地として、県が管理する斜面カルテに加え、地震動強度指標データ、降水量、地質図、土壌図、植生図といった空間情報データベースの収集を行い、地質学、統計学の両観点から斜面崩壊被害の特徴を掴んだ。説明変数同士の相関を利用して共分散構造分析を行い、仮定に基づく斜面崩壊に関するモデルを作成した。また、斜面カルテと収集した各データの項目を説明変数とし、崩壊確率評価式の検討を行った。

Key Words: earthquake, the slope failure probability evaluation formula, covariance structure model

1. はじめに

我が国では、山地と丘陵地の面積が国土面積の7割を占めており、地震時や降雨時における斜面災害が頻発している。斜面災害により、周辺の家屋、耕地、道路、鉄道、河川などへの直接的な被害、また、インフラの断絶による孤立地域の出現、河道閉塞による湛水、決壊、氾濫といった二次災害が生じる。近年だけでも、平成16年新潟県中越地震、平成19年新潟県中越沖地震、平成20年岩手・宮城内陸地震、平成23年東北地方太平洋沖地震、平成28年熊本地震、平成30年北海道胆振東部地震といった大規模な地震で数多くの斜面災害が発生している。特に、平成30年9月6日に発生した北海道胆振東部地震では、土砂災害の被害件数が約220件となり、36名もの死者が出た¹⁾。北海道厚真町に被害が集中し、住家被害も多く見られた。このような被害を減らすためには、災害が発生する前に斜面への対策を行う必要がある。しかし、国内の膨大な数の斜面に対して優先的に対策を行うべき斜面の選定は困難である。

そこで本研究では、過去に発生した斜面災害について統計的分析を行い、斜面崩壊発生因子を把握し、仮説に基づいた斜面崩壊モデルを提案する。また、そのモデルを用いた斜面崩壊確率評価式の検討を行う。

2. 対象地域とデータ

(1) 対象地域

本研究の対象地域は比較的大きな地震が発生した地域、それに伴い数多くの斜面災害が発生した地域を考慮し、平成16年新潟県中越地震²⁾、平成19年新潟県中越沖地震³⁾による被害が大きかった新潟県とした。本研究では、斜面の崩壊情報として国土地理院によって作成された災害状況図の範囲内(図-1)で検討を行う。

(2) 使用するデータ

a) 斜面カルテ

本研究では各都道府県が管理している急傾斜地斜面カ

ルテを斜面カルテとして利用する。斜面カルテに関しては、新潟県から提供受けており、新潟県中越地震の災害状況図範囲内の 531 箇所、中越沖地震の災害状況図範囲内の 195 箇所を対象とする。

b) 地震動強度指標データ

本研究ではPGV（地表面最大速度），PGA（地表面最大加速度）を地震動強度指標データとして利用する。このデータは、中越地震については国立研究開発法人防災科学技術研究所のPULIDO氏が算出したもの、中越沖地震については東京工業大学の松岡教授が算出したものであり、それぞれメッシュデータとして提供頂いた。

c) 降水量データ

本研究で用いる降水量データとして、気象庁の過去の気象データを利用する。それぞれの斜面における降水量は観測できないので、対象地域を分割し、斜面から最も近い観測所のデータをそれぞれ用いることとした。

また、本研究では降り始めからの雨量を示す連続雨量ではなく、実効雨量を用いる。実効雨量は過去の降雨状況を考慮に入れたもので、新しい降雨ほど影響が強く、過去の雨量は減少係数をかけて影響を減じさせたものである⁴⁾。降った雨が時間の経過とともに浸透、流出することで変化する土中の水分に相当する量であり、土砂災害との関連性がよい指標である。実効雨量 $R_G(\text{mm})$ は、 n 日目の雨量 (mm) と1日単位の減少係数 $(0 < a < 1)$ を用いると次式で表される。

$$R_G = R_0 + a^1 * R_1 + a^2 * R_2 + \dots + a^n * R_n \quad (2a)$$

d) その他のデータ

本研究で用いる地質図として、国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センターの地質図データを利用する。土壌図として、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センターの20万分の1の土壌図データを利用する。中越地震の範囲には12種類、中越沖地震の範囲には6種類の土壌が存在した。また、植生図として、環境省自然環境局生物多様性センターの植生図データを利用する。

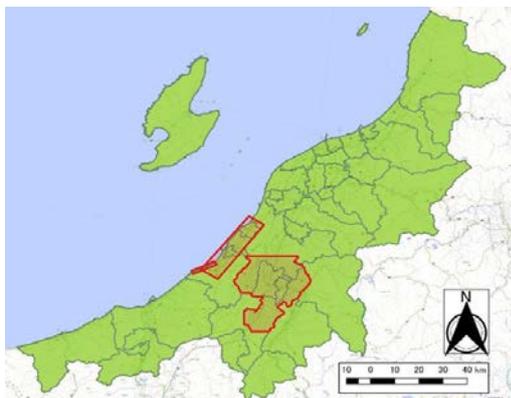


図-1 新潟県全図における研究対象地域の位置

表-1 観測データと崩壊発生率 (1/2)

観測データ (カテゴリー)		該当斜面数	崩壊発生率 ($\times 10^{-2}$)	崩壊斜面数		
地震動強度指標データ	PGA (cm/s^2)	0~200	0	0.000	0	
		200~400	18	0.111	2	
		400~600	190	0.068	13	
		600~800	290	0.228	66	
		800~1000	120	0.250	30	
		1000~1200	56	0.161	9	
		1200~1400	30	0.100	3	
	1400~	22	0.000	0		
	PGV (cm/s)	0~20	0	0.000	0	
		20~40	214	0.093	20	
		40~60	300	0.223	67	
		60~80	116	0.198	23	
		80~100	60	0.167	10	
		100~120	21	0.095	2	
120~140		8	0.125	1		
140~	7	0.000	0			
斜面カルテ	斜面の高さ (m)	0~20	345	0.078	27	
		20~40	247	0.211	52	
		40~60	80	0.200	16	
		60~80	36	0.389	14	
		80~100	8	0.625	5	
		100~	10	0.900	9	
	斜面の勾配 ($^\circ$)	30~35	177	0.153	27	
		35~40	165	0.115	19	
		40~45	111	0.189	21	
		45~50	123	0.171	21	
		50~55	47	0.319	15	
		55~60	22	0.182	4	
		60~65	46	0.130	6	
		65~70	11	0.273	3	
	横断形状	70~75	14	0.214	3	
		75~	10	0.400	4	
		オーバーハング	35	0.229	8	
	横断形状	平坦	277	0.159	44	
		斜面に凹凸	414	0.171	71	
		遷急線	有り	669	0.160	107
	表土の厚さ (m)	無し	57	0.281	16	
		表土の厚さ (m)	0~10	1	0.000	0
			10~20	9	0.111	1
			20~30	28	0.107	3
			30~40	33	0.030	1
			40~50	251	0.183	46
			50~60	28	0.250	7
			60~70	82	0.183	15
			70~80	150	0.133	20
			80~90	10	0.000	0
			90~100	124	0.202	25
		100~	10	0.500	5	
		表土の状況	亀裂・転石・浮石	12	0.167	2
風化・亀裂が発達	23		0.304	7		
礫混り土・砂質土	599		0.154	92		
粘質土	91		0.231	21		
風化・亀裂が未発達	1		0.000	0		
伐採根	有り	114	0.096	11		
	無し	612	0.183	112		
湧水の状況	常時湧水有	298	0.188	56		
	降雨時湧水有	57	0.175	10		
	斜面が常時湿潤	68	0.191	13		
	斜面は乾燥	303	0.145	44		

表-2 観測データと崩壊発生率 (2/2)

観測データ (カテゴリー)		該当斜面数	崩壊発生率 ($\times 10^{-2}$)	崩壊斜面数	
斜面 カ ル テ	地盤の状況	崩積土	4	0.000	0
		火山碎屑石	1	1.000	1
		強風化岩	83	0.253	21
		段丘堆積物	164	0.116	19
		軟岩	471	0.170	80
	断層破砕帯	有り	15	0.200	3
		無し	711	0.169	120
	災害履歴	(0回)	684	0.174	119
		1回	38	0.105	4
		2回	4	0.000	0
	対策工事	有り	158	0.139	22
		無し	568	0.178	101
	近隣斜面の崩壊	有り	433	0.164	71
		無し	293	0.177	52
植 生 図	植生の種類	二次草原	6	0.667	4
		落葉広葉二次林	257	0.152	39
		落葉広葉低木群落	36	0.500	18
		植林地	291	0.082	24
		耕作地	66	0.273	18
		竹林等	2	0.000	0
		その他	68	0.294	20
土 壌 図	グライ層	有り	362	0.152	55
		無し	364	0.187	68
	土壌の種類	黒ボク土	65	0.077	5
		低地土	214	0.103	22
		赤黄色土	64	0.063	4
		停滞水成土	146	0.212	31
		褐色森林土	108	0.324	35
		未熟土	83	0.120	10
		その他(市街地等)	46	0.348	16
		地 質 図	地質時代	第三紀	202
前期更新世	299			0.130	39
中期更新世	8			0.000	0
後期更新世	131			0.053	7
完新世	86			0.093	8
岩石区分	堆積岩類1		414	0.155	64
	堆積岩類2		142	0.296	42
	(段丘堆積物)		136	0.051	7
	扇状地/崖錘堆積物		18	0.111	2
	非アルカリ火山岩類		12	0.583	7
(その他)	4	0.250	1		
降 水 量	実効雨量 (mm)	0~40	195	0.097	19
		40~80	251	0.131	33
		80~	280	0.254	71

3. 研究方法

(1) 斜面崩壊モデルの検討

a) 検討手順

本研究は、図-2 に示した手順でモデルの検討を行う。前述の各データを整理し、表-1、表-2のようにカテゴリーごとの崩壊発生率を算出する。崩壊発生率から、崩壊に関係のあるカテゴリーが判明するが、崩壊確率評価式を導出するために、(1) 共分散構造分析+ロジスティック回帰分析、(2) ロジスティック回帰分析のみの2

通りの分析を行う。最後に、それぞれの分析結果(的中率)を比較することで、分析方法に関する考察を行う。

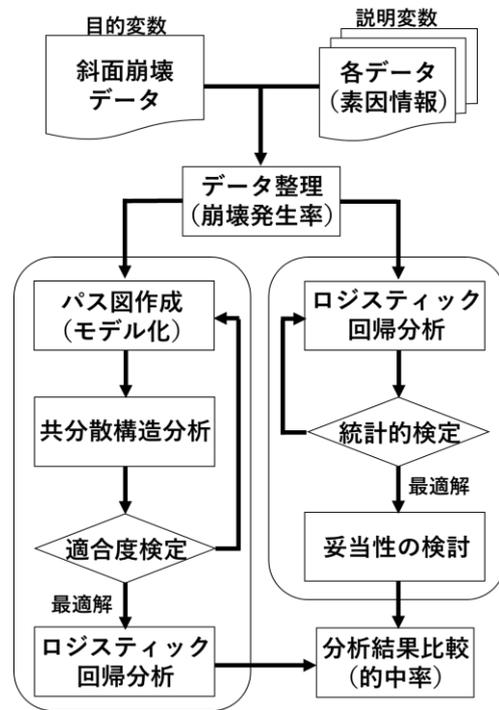


図-2 モデル検討の手順

b) 共分散構造分析

本研究では、斜面崩壊のモデルを作成するために共分散構造分析を用いる。共分散構造分析は、構造方程式モデリングとも呼ばれ、観測データをもとに数値として直接観測できない潜在変数(構成概念)や説明変数(観測変数)の関連性を検討するための統計手法である。この手法は、自分の研究仮説を反映したモデルを構築することができ、複雑な変数間の関係をパス図で表現することも可能である⁹⁾。

また、共分散構造分析では、目的変数が二値変数となることは好ましくないとされているため、推定された潜在変数を用いてロジスティック回帰分析を行う。なお、説明変数に関しては、各カテゴリーの崩壊発生率を平均=0、分散=1に正規化した値を用いる⁹⁾。

c) パス図

パス図は、潜在変数や説明変数間の関係性を円や四角、矢印を利用して表現した図のことであり、数式を使わずに関係性を表すことができる。説明変数は四角、潜在変数は楕円で囲み、影響を与える変数から与えられる変数に向けて単方向の矢印を結ぶ。矢印に書かれる数値はパス係数と呼ばれるもので、変数から変数への影響の大きさを示す⁷⁾。

d) モデルの適合度

共分散構造分析ではモデルを作成した後に評価を行う。評価にはモデルとデータの当てはまり度を表す適合度指

標を用いる。代表的な適合度指標として次の4つが挙げられる。これらの値を考慮したモデルを決定する。

- ①GFI (Goodness of Fit Index : 適合度指標)
- ②AGFI (Adjusted Goodness of Fit Index : 修正適合度指標)
0から1までの値をとり、0.9を超えるのが望ましい。一般的にAGFI<GFIで、この差が小さいほうが良い。
- ③CFI (Comparative Fit Index : 比較適合度指標)
0から1までの値をとり、1に近いほど適合が良い。
- ④RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation)
頻繁に利用される指標であり、0.05以下は当てはまりがよく、0.1以上は当てはまりが悪いと判断できる。

(2) 崩壊確率評価式の検討

a) ロジスティック回帰分析

回帰式から発生確率を求められることが特徴で、本研究では目的変数に崩壊・非崩壊の二値変数を使い、斜面の崩壊確率評価式を算出する。説明変数には量的変数と質的変数を混在させて使うことができるので、勾配などの量的データと植生の有無などの質的データを同時に使うことができる。崩壊確率を $p(x)$ 、定数を α 、説明変数を x_n 、偏回帰係数を β_n とすると、次の式 (3a) で表される⁸⁾。

$$p(x) = \frac{1}{1 + \exp\{-\alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n\}} \quad (3a)$$

b) 変数減少法

この方法は、全ての説明変数を利用し分析をし、変数を減らす方法である。また、変数の選択において、P値を用いた統計的検定を実施し、モデルの当てはまり度を表すAICの変化も考慮する。

c) 多重共線性

多重共線性とは変数同士に高い相関関係が存在することで発生する問題のことである。多重共線性の有無については、式 (3b) で示される VIF (分散拡大要因) という指標 (r は相関係数) が用いられ、その値が10を超えた場合多重共線性が存在するとみなす。5以下が望ましいともされている。この問題を解決するために、相関の強い組み合わせのいずれかのカテゴリを排除する。

$$VIF = \frac{1}{1 - r^2} \quad (3b)$$

4. 研究結果

(1) 斜面崩壊モデルの検討

a) モデルの決定

潜在変数に対する説明変数の組み合わせや潜在変数の

個数を変更したが、モデルを大幅に変更していないため、適合度指標の値が大きく変化することはなかった。その中でも最も良い値を示したモデル (説明変数 21 個、潜在変数 5 個) の適合度を表4に示す。どの数字をとっても今回検討したモデルは当てはまりが良いとはいえない。また、5つの潜在変数を地震動要因、地形要因、表土要因、地質要因、過去要因と仮定する。

表-3 本モデルの適合度指標

GFI	AGFI	CFI	RMSEA
0.883	0.844	0.603	0.077

b) 分析結果

共分散構造分析によって算出されたパス係数を記したパス図を図-3、図-4に示した。パス係数は変数から変数への影響の大きさを表しており、図-3より、地形要因、表土要因、地質要因、地震動要因、来歴要因の順に崩壊への影響度が大きいことがわかる。

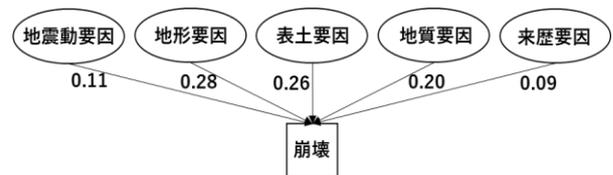


図-3 崩壊への影響

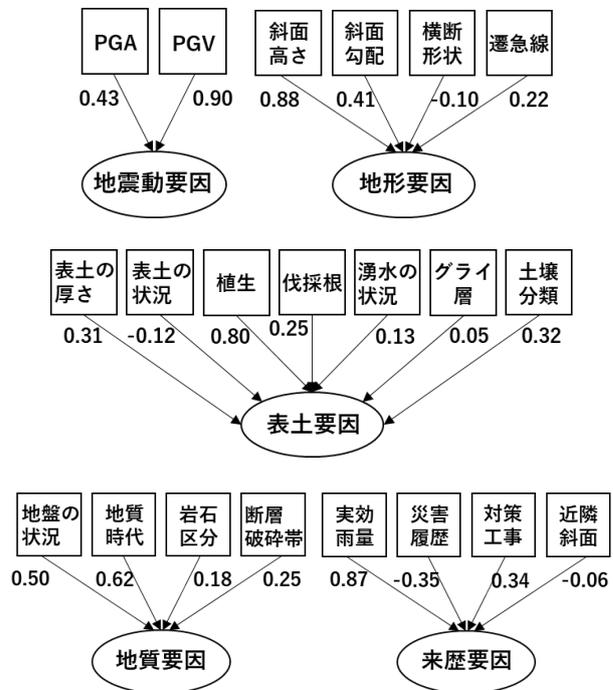


図-4 各潜在変数への影響

斜面高さ、斜面勾配、横断形状、遷急線を集約した地形要因と、表土の状況や植生、湧水の状況等を集約した

表土要因、地盤の状況、地質時代、岩石区分、断層破碎帯を集約した地質要因が他の要因に比べて、斜面崩壊に影響を与えていることがわかる。小島らも共分散構造分析を行った結果、標高、斜面方位、傾斜、谷密度からなる地形要因と崩壊発生間の因果関係が強いことを示しており、類似の結果となった。地形、地質については、今回観測されたデータ以外にも崩壊しやすい条件が知られており、0次谷や後氷期開析前線の下部斜面等が挙げられる⁹⁾。地形図や空中写真、現地調査によって得られる情報も存在するので、今あるデータに加えて活用することで、信頼性のあるモデルになると推測できる。

続いて、図4より、各潜在変数への影響を考察する。はじめに、地形要因への影響だが、斜面高さのパス係数が0.88と他に比べて高く、斜面崩壊に強くかかわる因子であることがわかる。斜面が高いほど斜面の範囲が大きくなり、部分的でも崩壊と判断されやすいと推測できる。

次に、表土要因と地質要因だが、それぞれ植生と地質時代が崩壊に強く関わっていることがわかる。第三紀層の斜面が崩壊しやすいことは知られており⁹⁾、表2の崩壊発生率も高い値となっている。

また、地震動要因と来歴要因は他の要因に比べて、斜面崩壊への影響が小さい。地震動要因はPGAとPGVの地震動強度指標データからなる潜在変数であり、第2章のカテゴリー別の崩壊発生率で地震動の値が大きくても崩壊発生率は高くないという結果を得ている。このことから斜面崩壊への影響度が小さくなったと考えられる。なお、PGAとPGVの相関係数が高くなると予想されたが、0.5程度にとどまったため、片方の変数の排除は行わなかった。来歴要因は、実効雨量、災害履歴、対策工事、近隣斜面崩壊を集約した潜在変数である。表2でも実効雨量が多いほど斜面崩壊が発生する傾向がみられたが、来歴要因においてはそれ以外の説明変数が原因となり、崩壊への影響度が小さくなったと推測できる。

モデルについては、適合度指標がよい値を示さなかった。原因としては、統計学よりも地質学を優先したモデルを作成したこと、大きいモデルであることが挙げられる。

(2) 崩壊確率評価式の検討

a) 潜在変数を利用した崩壊確率評価式 (Case 1)

共分散構造分析と適合度検定によって採用した本モデルの潜在変数を利用して、崩壊確率評価式を導出する。斜面ごとの各潜在変数の値は、説明変数(崩壊発生率を平均0、分散1に正規化した値)とパス係数をかけ合わせた値とする。これは、共分散構造分析(構造方程式モデリング)で用いられる計算である。算出された潜在変数を用いて、ロジスティック回帰分析を行った結果、表4のような係数とP値となった。一般的に好ましいとき

れている有意水準0.05を全変数で下回っており、有意であることが確認できる。

係数の値を大きい方から並べると、地形要因、表土要因、地質要因、地震動要因、来歴要因の順となり、図9で示した共分散構造分析によるパス係数の値の大小と一致する。

また、図5は表4の偏回帰係数を用いたロジスティック回帰から算出されるロジット曲線と実際の崩壊確率(ロジット値を大小順に並べ、30個ずつロジット値の平均を取り、その範囲内での崩壊斜面と全斜面の比)を示すものであるが、実崩壊確率がロジット曲線から外れている箇所が見られる。崩壊確率が0に集中していることも確認できる。

表4 Case 1モデルの偏回帰係数とP値

変数	係数	標準誤差	P値
(定数)	-2.142	0.144	<0.001
地震動要因	0.369	0.123	<0.01
地形要因	0.789	0.132	<0.001
表土要因	0.700	0.115	<0.001
地質要因	0.502	0.122	<0.001
来歴要因	0.291	0.109	<0.01

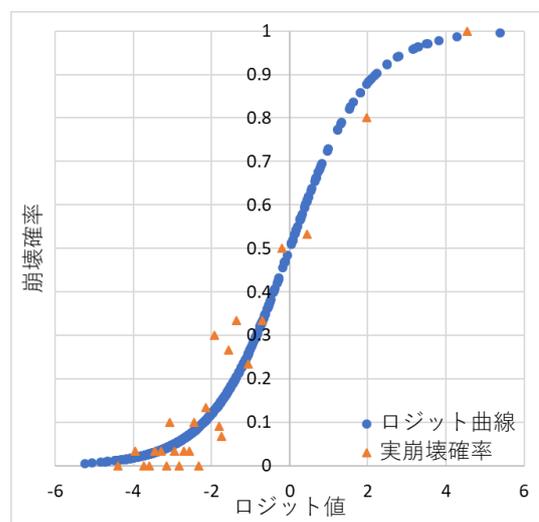


図5 ロジット回帰曲線と実崩壊確率(Case 1)

b) 観測データを利用した崩壊確率評価式 (Case 2)

Case 1の評価式と比較するために、観測データから直接ロジスティック回帰分析と統計的検定を繰り返して¹⁰⁾、変数を削った評価式をCase 2とする。表7に示した各変数のP値を見ると、有意水準0.05をすべて下回っており、有意であることが確認できる。

変数に着目すると、落葉広葉二次林(広葉樹)、植林地(針葉樹)、伐採根の有無が負の値を示しており、樹木の存在が斜面崩壊の抑制に大きく働いていることが推

測できる。また、前述の通り、第三紀層の斜面は崩壊しやすく、係数も大きな値となっている。

図-6 に示した実崩壊確率は、Case 1 と比較すると、ロジット回帰曲線に沿っているように見えるが、外れている箇所も目立つ。

表-5 Case2 モデルの偏回帰係数と P 値

変数	係数	標準誤差	P 値
(定数)	-3.297	0.506	<0.001
高さ	0.034	0.005	<0.001
落葉広葉二次林	-1.346	0.292	<0.001
植林地	-1.637	0.297	<0.001
伐採根の有無	-0.826	0.382	0.03
実効雨量	0.016	0.005	<0.01
第三紀層	1.313	0.240	<0.001

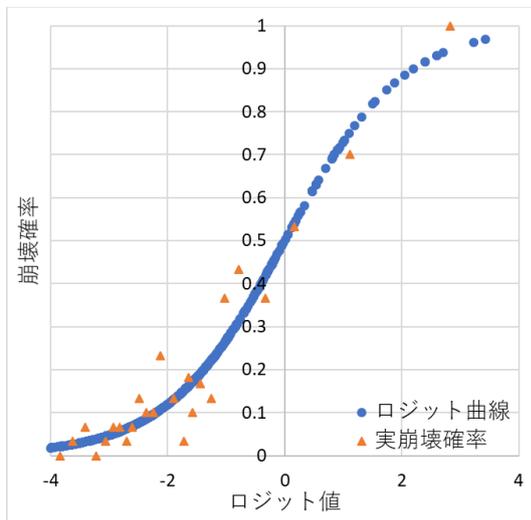


図-6 ロジット回帰曲線と実崩壊確率(Case 2)

と、最もロジット曲線に沿って実際の崩壊確率が分布していることが分かる。

表-6 Case3 モデルの偏回帰係数と P 値

変数	係数	標準誤差	P 値
(定数)	-5.140	1.384	<0.001
log(PGV)	0.642	0.349	0.07
高さ	0.033	0.005	<0.001
落葉広葉二次林	-1.400	0.299	<0.001
植林地	-1.745	0.309	<0.001
伐採根の有無	-0.786	0.387	0.04
実効雨量	0.013	0.006	0.02
第三紀層	0.937	0.271	<0.001
後期更新世	-1.152	0.476	0.02
完新世	-0.822	0.460	0.07

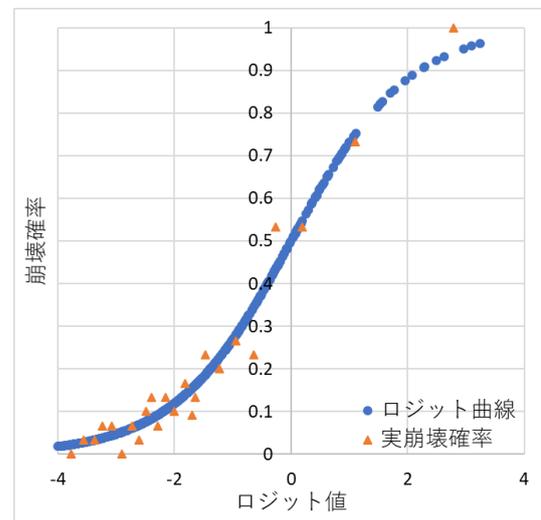


図-7 ロジット回帰曲線と実崩壊確率(Case 3)

c) 観測データを利用した崩壊確率評価式

(PGV 含む) (Case 3)

Case2 では、全説明変数の P 値が有意水準 0.05 を下回るように変数を減少させたことで、地震動に関する変数 (PGV, PGA) が省かれることとなった。Case3 では、P 値の値も検討しながら、PGV が変数として残ることを考慮した評価式を導出する。表-5 と表-6 に示した分析結果を比較すると、変数の数が 6 個から 9 個と大きく増加した。

変数に着目すると、植生 (落葉広葉二次林, 植林地, 伐採根の有無), 地質時代 (第三紀層, 後期更新世, 完新世) の各カテゴリーが多く残っており、斜面崩壊の因子として外すことのできない説明変数であることが確認できる。なお、PGV の値と崩壊発生率の関係を考慮した結果、本研究では PGV に対数をとっている。

図-7 に示した実崩壊確率は、Case 1, Case 2 と比較する

(3) 評価式による的中率比較

a) 的中率

崩壊確率評価式の精度を表す指標としての的中率がある。崩壊・非崩壊の二値で予測をする判別分析などでは、的中率を直ちに計算できるが、確率で予測をするロジスティック回帰分析では、崩壊・非崩壊を判断するボーダーを決定しなくてはならない。本研究では、ミニマックス判別により決定したボーダーを決定し、的中率、分類正誤率を算出する。

ミニマックス判別とは、予測式による誤判別が最小になるようにボーダーを決定する方法である。図-8 のように横軸に崩壊確率、縦軸に頻度をとった崩壊・非崩壊のヒストグラムを作成し、左側から崩壊の累積頻度曲線、右側から非崩壊の累積頻度曲線を作図する。この時の、崩壊の累積頻度曲線と非崩壊の累積頻度曲線の交点の崩壊確率がボーダーとなる。また、交点での累積頻度を

100 から引いた値が的中率となる。

崩壊的中率，非崩壊的中率，分類正誤率はそれぞれ以下の式 (4a)，(4b)，(4c) により計算される。

$$H_1 = \frac{d}{c+d} \quad (4a)$$

$$H_2 = \frac{a}{a+b} \quad (4b)$$

$$F = \frac{a+d}{a+b+c+d} \quad (4c)$$

ここに、

H_1 : 崩壊的中率

H_2 : 非崩壊的中率

F : 分類正誤率

a : 非崩壊と予測して非崩壊だった斜面数

b : 崩壊と予測して非崩壊だった斜面数

c : 非崩壊と予測して崩壊した斜面数

d : 崩壊と予測して崩壊した斜面数

以下に、Case 1 におけるミニマックス判別によるヒストグラム (図-8)，ミニマックス判別による的中率 (表-7) を示す。

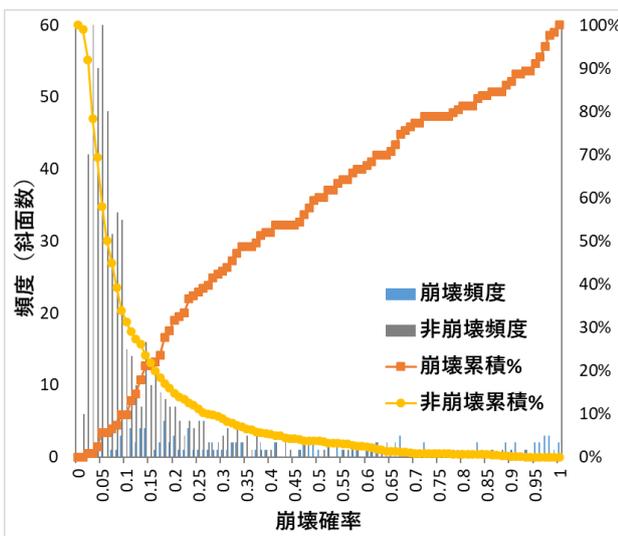


図-8 崩壊・非崩壊ヒストグラム

表-7 ミニマックス判別による的中率 (ボーダー15.4%)

		予測		合計	的中率	
		非崩壊	崩壊			
実際	非崩壊	476	127	603	崩壊的中率	0.789
	崩壊	26	97	123	非崩壊的中率	0.789
合計		502	224	726	分類正誤率	0.789

表-7 の的中率では、崩壊的中率，非崩壊的中率，分類正誤率のすべてで 78.9% という値になった。崩壊，非崩壊の評価に偏りのない結果となった。

b) 的中率比較

Case 1 と同様に、Case 2，Case 3 においてもミニマックス判別による的中率を算出した。表-8 に示した結果より、観測データから直接ロジスティック回帰分析を行った Case 2，Case 3 よりも、共分散構造分析による潜在変数でロジスティック回帰分析を行った Case 1 の方が、どの的中率も高い値を示すことがわかる。

表-8 ミニマックス判別による評価式ごとの的中率

	Case1	Case2	Case3
ボーダー	15.4%	15.7%	15.3%
崩壊的中率	0.789	0.732	0.748
非崩壊的中率	0.789	0.731	0.748
分類正誤率	0.789	0.731	0.748

この的中率を既往の研究と比較する。鹿児島県の豪雨災害に対して、多くの変数を用いて共分散構造分析を実行し、数量化理論との比較を行った小島ら¹¹⁾的中率は 78.9% であり、本研究の的中率は同程度の値となった。また、東北地方太平洋沖地震と熊本地震を対象に、ベイジアンモデルとファジーセットモデルを検討し、共分散構造分析を行った古川ら¹²⁾的中率はそれぞれ 73.98% と 74.0% であり、値だけに注目すると高いものとなった。

しかし、これらの研究と比較して、適合度が大幅に劣っていることから、モデル自体の見直しや、説明変数と潜在変数の組み合わせ、効いていない変数の排除が必要と考える。

5. まとめ

本研究では新潟県中越地震と中越沖地震の斜面崩壊データと斜面カルテ，地震動強度指標データ等を用いて、地震時の斜面崩壊に関する評価手法の検討を行った。説明変数内の各カテゴリーの崩壊発生率を算出することで、崩壊に影響を与えている因子の把握を行った。

次に、崩壊確率評価式を導出するために、地質学，統計学の両観点から 2 つの手法を検討した。一つ目は、仮設に基づいたモデルを活用できる共分散構造分析を実行した後、潜在変数を用いてロジスティック回帰分析を行う方法である。共分散構造分析は目的変数に二値変数を

とることが困難という問題点があるが、その過程でロジスティック回帰分析を利用することで、問題を取り除くことができた。また、観測データから導かれる変数を多く残すことが可能な上に、潜在変数のみの評価式となるので、よりまとまった評価手法となった。

二つ目は、観測データから直接ロジスティック回帰分析を行う方法で、統計的検定を繰り返しながら、使用する変数の検討を行った。多くの変数が排除され、落葉広葉二次林や植林地、伐採根といった樹木に関する植生と崩壊が起きやすいとされる第三紀層を含む地質時代、斜面高さ、実効雨量が崩壊発生に関わる因子であることが判明した。

これら2つの手法から導出された崩壊確率評価式を基にミニマックス判別を行い、的中率を算出したところ、共分散構造分析とロジスティック回帰分析を組み合わせた評価式が78.9%と最も高い的中率となった。

一方で、共分散構造分析でのモデルの適合度が好ましい値を示しておらず、モデル全体の見直しやモデルの縮小、説明変数と潜在変数の組み合わせの検討が求められる。また、現在は対象となる全データを用いて的中率のみを算出している状況であり、今後一部のデータを予測するランダムフォレストや他地震のデータ追加を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省：災害防災情報，
https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_180906.html
(2019.6.6 参照)
- 2) 新潟県：新潟県中越大震災の記録，
<http://www.pref.niigata.lg.jp/dobokukanri/1300136465340.html>
(2018.12.14 参照)
- 3) 新潟県：新潟県中越沖地震の記録，
<http://www.pref.niigata.lg.jp/dobokukanri/1255464221640.html>
(2018.12.15 参照)
- 4) 小杉賢一郎：斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法，
砂防学会誌，Vol.67，No.5，pp.12-23，2015.
- 5) 豊田秀樹：共分散構造分析 [R 編] - 構造方程式モデリング，東京図書，2014.
- 6) 小島尚人，関根亮，奥井明紀人，吉田智也：規範型教師データを取り入れた潜在危険斜面広域推定支援策の一提案，土木学会論文集，Vol.70，No.2，pp.60-69，2014.
- 7) 豊田秀樹，前田忠彦，柳井晴夫：原因をさぐる統計学，講談社，1992.
- 8) ハスバートル，丸山清輝，野呂智之，中村明：ロジスティック回帰分析を用いた既存地すべり地形の地震時の危険度評価，日本地すべり学会誌，Vol.49，No.1，pp.12-21，2012.
- 9) 千木良雅弘：災害地質学入門，近未来社，pp.27-30，1998.
- 10) 栗原伸一：入門統計学 - 検定から多変量解析・実験計画法まで - ，オーム社，2011.
- 11) 小島尚人，大林成行，青木太：共分散構造分析法を導入した斜面崩壊危険箇所評価アルゴリズムの構築，土木学会論文集，No.714，pp.79-93，2002.
- 12) 古川昭太，丸山喜久：共分散構造分析と機械学習に基づく地すべりと土砂崩壊地点の地形的特徴の評価，土木学会論文集，Vol.74，No.4，pp.369-380，2018.

(Received ?)

EARTHQUAKE RELIABILITY EVALUATION METHOD OF SLOPE USING SLOPE CHART AND SPATIAL INFORMATION DATABASE

Tanto MASAKI, Yoshio KAJITANI and Hisakazu SAKAI

In Japan, slope disasters occur on an almost annual basis because there are many mountainous areas in which torrential rains and earthquakes act as triggers. In addition to direct damage to buildings in the immediate vicinity, slope disasters also cause secondary disasters: cutting off areas due to the disruption of infrastructure. To mitigate the damage caused by slope disasters, it is important that measures addressing dangerous slopes be adopted before the disaster occurs. This study combines data from multiple sources, including the slope charts managed by the Niigata Prefecture where the 2004 Niigata ken Chuetsu Earthquake and the 2007 Niigata ken Chuetsu Offshore Earthquake occurred, the earthquake motion intensity index data, precipitation amount data, geological maps, soil maps, vegetation maps, and other spatial information data. From both geological and statistical perspectives, the characteristics of the damage caused by slope collapse are clearly understood. Covariance structure analysis was performed using the correlation between explanatory variables, and based on its assumption, a covariance structure model related to slope failures was created. In addition, we used the slope chart and data from the spatial information database as explanatory variables and deduced the slope failure probability evaluation formula.