

斜面カルテと空間情報データベースを用いた 斜面の地震時信頼性評価手法

梶 丹人¹・佐々木 真哉²・酒井 久和³・梶谷 義雄⁴

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非会員 千葉市役所 都市局都市部都市計画課

(〒260-0026 千葉県千葉市中央区千葉港 2-1 千葉中央コミュニティセンター3 階)

E-mail: masaya4480@city.chiba.jp

³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

⁴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。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。また、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。

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。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、斜面崩壊確率評価式の検討を行う。また、文献調査により斜面崩壊に関する地質学的知識を修得し、斜面崩壊発生の因子を把握し、仮説に基づいた斜面崩壊モデルを提案する。

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、平成 19 年新潟県中越沖地震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 535 箇所、中越沖地震の災害状況図範囲内の 196 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。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 日前の雨量 (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。

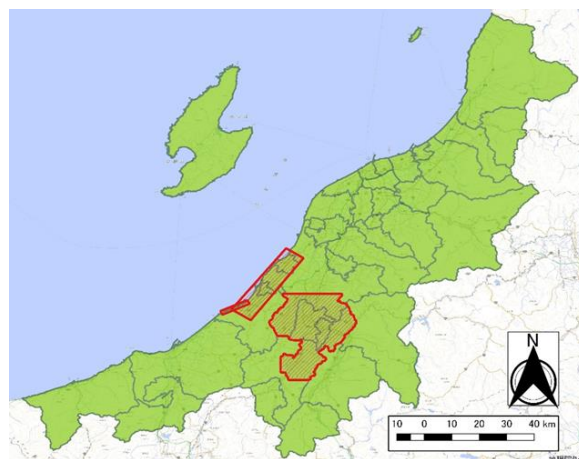


図-1 新潟県全図における研究対象地域の位置

表-1 観測変数と斜面崩壊率 (1/2)

観測変数		該当斜面数	斜面崩壊率 ($\times 10^{-2}$)	崩壊斜面数
地震動強度指標データ	PGA	(以上~未満) (cm/s^2)		
		0~200	0	0
		200~400	18	0.11
		400~600	190	0.07
		600~800	290	0.23
		800~1000	120	0.25
		1000~1200	56	0.16
		1200~1400	30	0.10
		1400~	22	0
	PGV	(以上~未満) (cm/s)		
		0~20	0	0
		20~40	214	0.09
		40~60	300	0.22
		60~80	116	0.20
		80~100	60	0.17
		100~120	21	0.10
		120~140	8	0.13
		140~	7	0
斜面カルテ	斜面の高さ	(以上~未満) (m)		
		0~20	345	0.08
		20~40	247	0.21
		40~60	80	0.20
		60~80	36	0.39
		80~100	8	0.63
		100~	10	0.90
	斜面の勾配	(以上~未満) ($^\circ$)		
		30~35	177	0.15
		35~40	165	0.12
		40~45	111	0.19
		45~50	123	0.17
		50~55	47	0.32
		55~60	22	0.18
		60~65	46	0.13
		65~70	11	0.27
		70~75	14	0.21
		75~	10	0.40
	横断形状	オーバーハング	35	0.23
		平坦	277	0.16
		斜面に凹凸	414	0.17
	遷急線	有り	669	0.16
		無し	57	0.28

表-1 観測変数と斜面崩壊率 (2/2)

観測変数			該当斜面数	斜面崩壊率 ($\times 10^{-2}$)	崩壊斜面数	観測変数			該当斜面数	斜面崩壊率 ($\times 10^{-2}$)	崩壊斜面数
斜面カルテ	表土の厚さ	(以上~未満) (cm)				斜面カルテ	地盤の状況	崩積土	4	0	0
		0~10	1	0	0			火山砕屑石	1	1	1
		10~20	9	0.11	1			強風化岩	83	0.25	21
		20~30	28	0.11	3			段丘堆積物	164	0.12	19
		30~40	33	0.03	1			軟岩	471	0.17	80
		40~50	251	0.18	46			硬岩	3	0.67	2
		50~60	28	0.25	7		地質時代	第三紀	202	0.34	69
		60~70	82	0.18	15			前期更新世	299	0.13	39
		70~80	150	0.13	20			中期更新世	8	0	0
		80~90	10	0	0			後期更新世	131	0.05	7
		90~100	124	0.20	25			完新世	86	0.09	8
		100~	10	0.50	5		岩石区分	堆積岩類1	414	0.15	64
	表土の状況	亀裂・転石・浮石	12	0.17	2			堆積岩類2	142	0.30	42
		風化・亀裂が発達	23	0.30	7			(段丘堆積物)	136	0.05	7
		礫混り土・砂質土	599	0.15	92			扇状地/崖錘堆積物	18	0.11	2
		粘質土	91	0.23	21			非アルカリ火山岩類	12	0.58	7
		風化・亀裂が未発達	1	0	0			(その他)	4	0.25	1
植生図	植生の種類	二次草原	6	0.67	4	斜面カルテ	断層破砕帯	有り	15	0.20	3
		落葉広葉二次林	257	0.15	39			無し	711	0.17	120
		落葉広葉低木群落	36	0.50	18		災害履歴	(0回)	684	0.17	119
		植林地	291	0.08	24			1回	38	0.11	4
		耕作地	66	0.27	18			2回	4	0	0
		竹林等	2	0	0		対策工事	有り	158	0.14	22
		その他	68	0.29	20			無し	568	0.18	101
	伐採根	有り	114	0.10	11		近隣斜面の崩壊	有り	433	0.16	71
		無し	612	0.18	112			無し	293	0.18	52
	湧水の状況	常時湧水有	298	0.19	56		実効雨量	(以上~未満) (mm)			
		降雨時湧水有	57	0.18	10			0~40	195	0.10	19
		斜面が常時湿潤	68	0.19	13			40~80	251	0.13	33
		斜面は乾燥	303	0.15	44			80~	280	0.25	71
土壌図	グライ層	有り	362	0.15	55	土壌の種類	土壌の種類	有り	433	0.16	71
		無し	364	0.19	68			無し	293	0.18	52
	土壌の種類	黒ボク土	65	0.08	5			(以上~未満) (mm)			
		低地土	214	0.10	22			0~40	195	0.10	19
		赤黄色土	64	0.06	4			40~80	251	0.13	33
		停滞水成土	146	0.21	31			80~	280	0.25	71
		褐色森林土	108	0.32	35						
		未熟土	83	0.12	10						
		その他(市街地等)	46	0.35	16						

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

3. 研究方法

(1) 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・非崩壊の二値データを使い、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。発生確率を Y 、定数を α 、説明変数を x 、偏回帰係数を β とすると、次の式 (3a) で表される。また、ロジスティックモデルは右図のようになる。

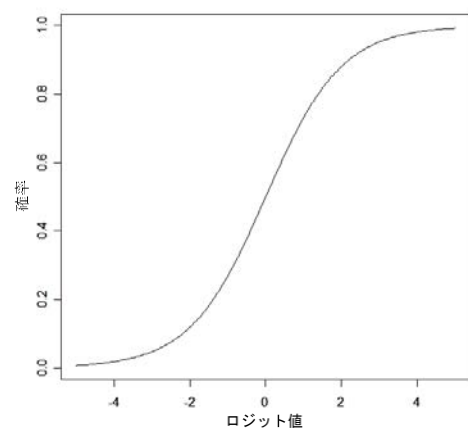


図-2 ロジスティックモデル

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。

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

ここに、

r: 相関係数

(2) 斜面崩壊モデルの検討

a) 検討手順

図-3 のように変数間の分析を行い、地震時の斜面崩壊に関してモデル化を行う。

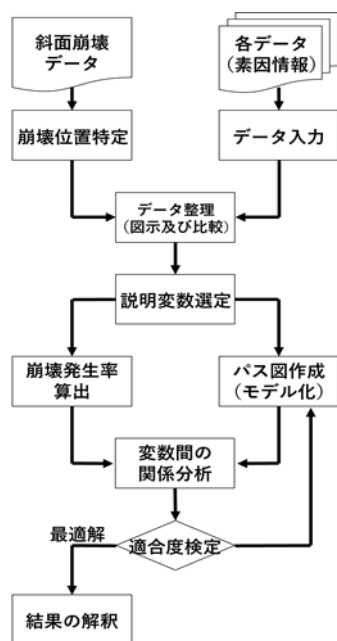


図-3 モデル検討の手順

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）や観測変数（説明変数）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

とができる。また、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。

c) パス図

パス図は、潜在変数や観測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。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表している。また、パス図を描画するための決まりは以下の4つである。外生変数とは、単方向の矢印を受け取らない変数のことである。

①観測変数は四角で囲む。

②潜在変数は楕円で囲む。

③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。

④共変関係にある2つの外生変数には双方向の矢印を結ぶ。

d) モデルの検討

以下の条件のように、誘因を除く潜在変数の個数を変えながらモデルを仮定する。

Case1

説明変数 21 個、潜在変数 5 個

Case2

説明変数 21 個、潜在変数 6 個

Case3

説明変数 21 個、潜在変数 7 個

Case4

説明変数 21 個、

潜在変数 6 個（崩壊に直接かかわる変数有り）

e) 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。

①CFI (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。

②TLI (Tucker-Lewis Index)

1に近いほど適合が良い。1を超える値も存在する。

③RMSEA (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。

4. 研究結果

(1) 崩壊確率評価式の検討

a) 新潟県中越地震における崩壊確率評価式

変数減数法を利用したロジスティック回帰分析を行った結果、式 (4a) が導出された。

Y =

$$\frac{1}{1 + \exp\{-(-4.323 + 0.6702\log V + 0.02964H + 0.2813G_1 - 0.6358G_2 - 0.7656D)\}}$$

(4a)

ここに、

Y : 崩壊確率

V : PGV (地表面最大速度) (cm/s)

H : 高さ (m)

G₁ : 植生の有無(有りの時 0, 無しの時 1)

G₂ : 樹木の有無(有りの時 1, 無しの時 0)
(草地である時, G₁ と G₂ は 0)

D : 段丘堆積物

(段丘堆積物の時 1, 段丘堆積物でない時 0)

b) 崩壊確率評価式の妥当性の検討

図4 は式 (4a) 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、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。

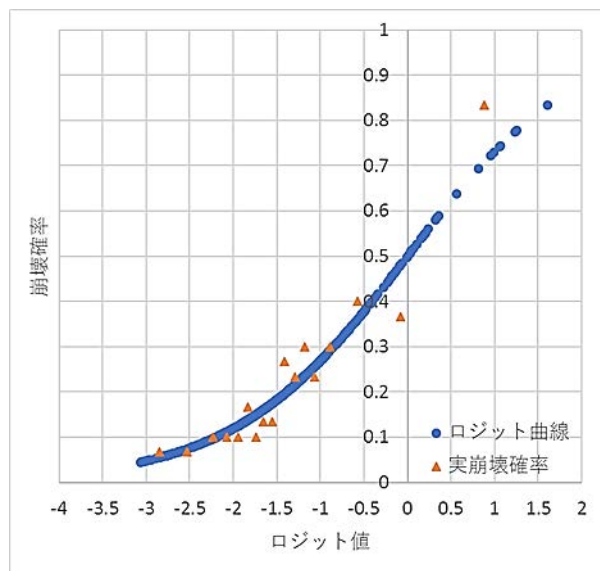


図4 ロジット回帰曲線と実崩壊確率 (中越)

式 (4.3) から崩壊確率分布図を作成し、実際の崩壊箇所と重ね合わせたものが図 5.2 である。多少のずれは見受けられるが、崩壊確率の高い場所と実際の崩壊箇所が重なっていることが分かる。そのため、式 (4.3) を

利用した崩壊確率評価は実被害と整合しているといえる。

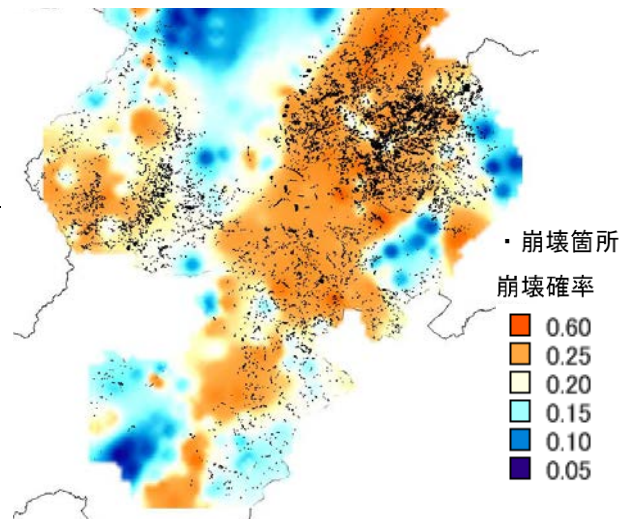


図-5 崩壊確率 (回帰式(4a)) と実崩壊箇所 (中越)

c) 崩壊確率評価式の他地震への適用

中越地震の被害に基づく回帰式 (4a) を中越沖地震に適用し、他の地震に対する有効性を検討する。図 5.3 は中越地震の回帰式 (4a) を中越沖地震に適用したもので、実際の崩壊確率 (ロジット値を大小順に並べ、20 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表したもの) が予測した崩壊確率より低くなっていることが分かる。

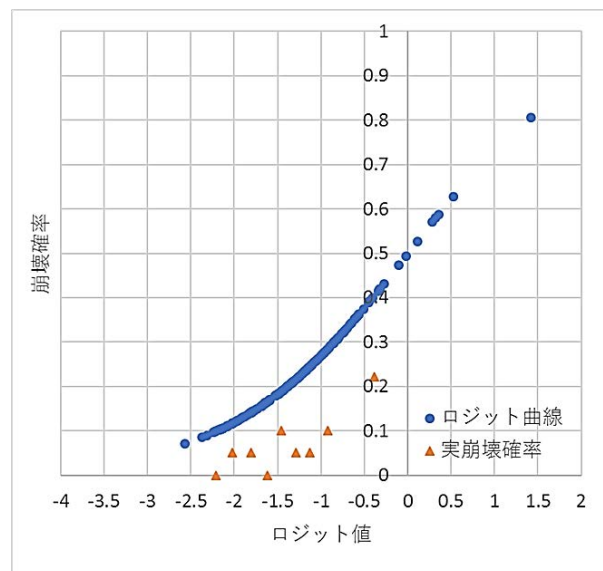


図-6 ロジット回帰曲線と実崩壊確率 (中越沖)

また、図 5.4 は中越地震の回帰式 (4a) を中越沖地震に適用し作成した崩壊確率分布図と中越沖地震の崩壊箇所を重ね合わせた図である。崩壊確率分布図においても崩壊確率を過大に評価してしまっていることが分かる。

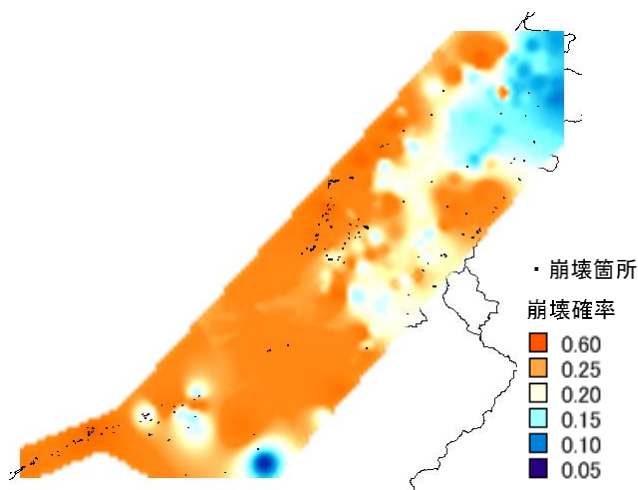


図-7 崩壊確率（回帰式(4a)）と実崩壊箇所（中越沖）

d) 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2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と、崩壊的中率と非崩壊的中率の平均が最大になる時のボーダー、2つのボーダーを決定し、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成する。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(4b)、(4c)、(4d)により計算される。

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

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

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

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、式(4a)を利用した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-2)、崩壊的中率と非崩壊的中率の平均が最大になる時の的中率(表-3)を示す。

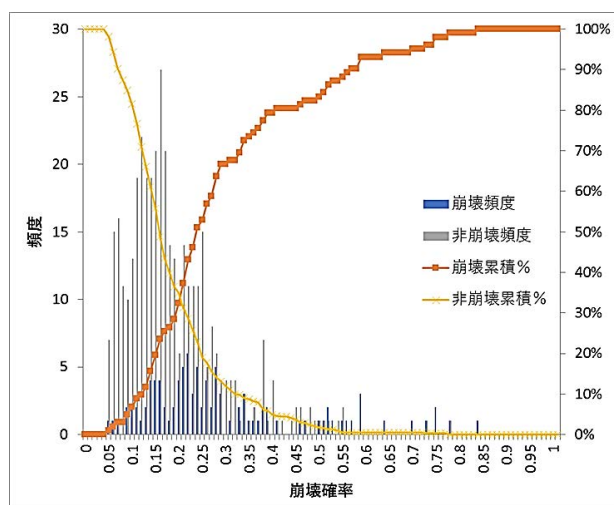


図-8 崩壊・非崩壊ヒストグラム

表-2 ミニマックス判別による的中率（ボーダー20.4%）

		予測		合計		
		非崩壊	崩壊			
実 際	非崩壊	256	133	389	崩壊 的中率	0.657
	崩壊	35	67	102	非崩壊 的中率	0.658
合計		291	200	491	分類 正誤率	0.658

表-3 ミニマックス判別による的中率（ボーダー19.0%）

		予測		合計		
		非崩壊	崩壊			
実 際	非崩壊	248	141	389	崩壊 的中率	0.716
	崩壊	29	73	102	非崩壊 的中率	0.638
合計		277	214	491	分類 正誤率	0.654

ミニマックス判別によるボーダーと崩壊的中率と非崩壊的中率の平均が最大になる時の的中率を比べてみると約1%の違いが出た。崩壊的中率と非崩壊的中率の平均が最大になる時のボーダー、19.0%を採用すると、安全側の予測になり、より多くの崩壊斜面を当てることができる。

この的中率を既往の研究と比較する。兵庫県南部地震

での六甲山の斜面崩壊から、判別分析を用いて斜面崩壊予測式を作成した内田ら¹⁰⁾の崩壊の中率は90.5%，非崩壊の中率は48.6%，分類正誤率は48.7%であった。単純な比較はできないが、90.5%という高い崩壊の中率を誇っている。過去5つの地震（1974年伊豆半島沖地震，1978年伊豆大島近海地震，1978年宮城県沖地震，1984年長野県西部地震，1987年千葉県東方沖地震）の斜面崩壊データから、数量化理論2類を用いて斜面崩壊予測式を作成した松岡ら¹²⁾の崩壊の中率は81.0%，非崩壊の中率は69.5%，分類正誤率は75.3%であった。この研究と比べると本研究の斜面崩壊確率評価式の精度があまりよくないことが分かる。

これは中越地震において地すべりが多発していたことが原因だと考えられる。2つの既往の研究では地すべりを対象としておらず、斜面崩壊に特化した式を作成していた。それに対し本研究では地すべりと斜面崩壊、両方を対象に分析を行っていた。斜面崩壊と地すべりでは崩壊機構が異なるため、個別に検討を行わなければならない可能性が高い。

(2) 斜面崩壊モデルの検討の検討

a) モデルの決定

Case1からCase4までの各モデルの適合度指標を表4に示す。モデルを大幅に変更していないため、適合度指標の値がCaseによって大きく変化することはなかった。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。

Case1, Case2, Case3においては、潜在変数を5個、6個、7個と増やしたが、適合度指標の数値はそれぞれ悪化した。また、Case4においては、Case1のモデルをもとに斜面に直接影響を与える観測データのない何かがあると仮定し、潜在変数として加えたが、Case2, Case3と同様に適合度指標は悪化した。

このことから、適合度指標は決して良くないが、本研究のモデルとしてCase1を適用する。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4 各モデルの適合度指標

	CFI	TLI	RMSEA
Case1	0.581	0.474	0.096
Case2	0.580	0.470	0.097
Case3	0.580	0.464	0.101
Case4	0.579	0.467	0.096

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-9、図-10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-9より、地形要因、地質要因、表土要因、過去要因、地震動要因の順に崩壊への影響度が大きい。

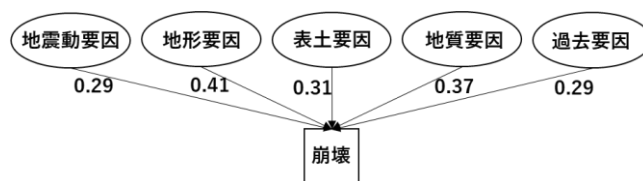


図-9 崩壊への影響

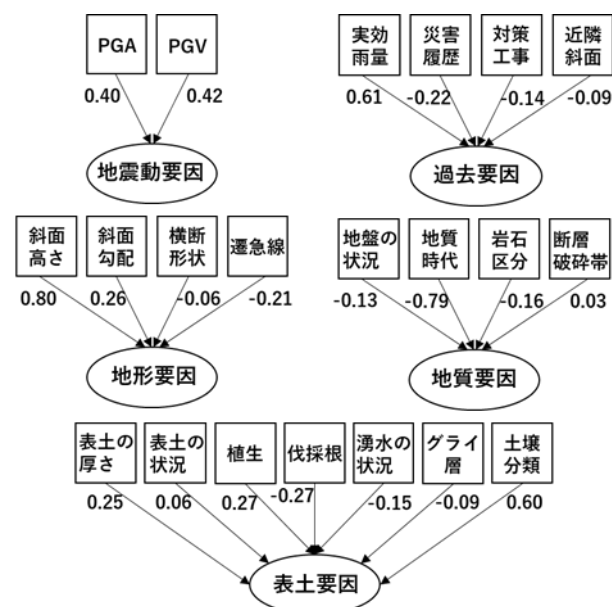


図-10 各潜在変数への影響

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、地盤の状況、地質時代、岩石区分、断層破砕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⁷⁾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と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。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。

次に、地形要因、地質要因への影響だが、地形要因への影響は図5.7に示しており、斜面高さのパス係数は0.80と他に比べて高い。佐々木の斜面崩壊確率評価式でも斜面高さが変数の一つとして抽出されており⁶⁾、斜面崩壊に強くかわる因子であることがわかる。また、地質要因への影響は図5.9に示しており、地質時代の影響を最も受けている。パス係数の値は、-0.79で負の値である。パス係数が負の値であることは、負の相関を持って

いることを意味する。地質時代が古くなるほど地質要因に影響を与えるということを表しており、第4章で示した古い第三紀層が最も崩壊発生率が高いということに整合する。

また、地震動要因と過去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4章では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。他の説明変数と結びつけるような潜在変数を仮定することも試す必要がある。過去要因は、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。第4章では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、過去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、目的変数が崩壊か非崩壊の二値変数であったことが考えられる。

5. まとめ

本研究では中越地震の斜面崩壊データを用いて、ロジスティック回帰分析を行い、斜面崩壊確率評価式を導出した。この評価式を中越沖地震に適用した場合、先行降雨量を考慮していなかったため、崩壊確率が過大評価であった。

次に、説明変数と斜面崩壊に関して、共分散構造分析を行いモデル化した。誘因である地震を起点として、複数の説明変数を集約した潜在変数が斜面崩壊に影響を与えているという仮定をもとに複数のモデルを作成したが、共分散構造分析に用いられる適合度指標は良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、目的変数が崩壊か非崩壊の二値変数であったことが考えられる。

最後に、最も適合度指標が良かったモデルについて考察を行った。このモデルは、すべての説明変数を地震動要因（PGA、PGV）、地形要因（斜面高さ、斜面勾配、横断形状、遷急線）、表土要因（表土の厚さ、表土の状況、植生、伐採根、湧水の状況、グライ層、土壌分類）、地質要因（地盤の状況、地質時代、岩石区分、断層破碎帯）、過去要因（実効雨量、災害履歴、対策工事、近隣斜面崩壊）の5つの潜在変数に分類し、これらの潜在変数が斜面崩壊に影響を与えると仮定したものである。斜面崩壊に影響を与えている潜在変数は、地形要因、地質要因、表土要因、過去要因、地震動要因の順になった。

地形及び地質は斜面崩壊しやすい条件として挙げられることも多く、それに準じた結果となった。また、地形要因に影響を最も与えている説明変数は斜面高さであり、斜面崩壊に強くかかわる因子であることがわかった。

モデルの適合度が必ずしも良いものではないことから、パス図の大幅な改良、新たな潜在変数、観測変数の導入を行う必要がある。また、今後は危険な斜面の把握のために斜面ごとの崩壊発生率の評価の実施する必要がある。

参考文献

- 1) 佐々木真哉：新潟県中越・中越沖地震の実被害に基づく斜面カルテを用いた斜面の地震時信頼性評価手法，法政大学卒業論文，2018.
- 2) 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.
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 小杉賢一朗：斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法，砂防学会誌，Vol67，No.5，pp.12-23，2015.
- 6) 千木良雅弘：災害地質学入門，近未来社，pp.27-30，1998.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.

(Received ?, 2009)

(Accepted ?, 2009)

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

Tanto MASAKI, Masaya SASAKI, 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. We used the slope chart and data from the spatial information database as explanatory variables and deduced the slope failure probability evaluation formula. In addition, 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.