

地震による不安定化斜面の分布状況と特徴分析

ハザマ技術研究所 黒台昌弘, 笠博義*

東京理科大学 大林成行, 小島尚人, 村上竜也**

斜面崩壊の危険箇所を予測することは、地震に対する防災計画を立案する上で重要である。また、地震の発生によって不安定化した斜面の分布を把握することも、地震発生後の2次災害を防止する上で大きな意味を持っている。本研究は、筆者らが開発した斜面安定性評価システムを用いて、阪神・淡路大震災で多数の斜面崩壊が発生した六甲山麓を対象とした斜面安定性評価を行ったものである。その結果、震災で崩壊した斜面の特徴を明確にすると同時に崩壊の危険性を持つ斜面の分布を評価することができた。この評価結果は、現地調査によって妥当であることが確認された。

1. はじめに

1995年1月に発生した阪神・淡路大震災では、建造物の倒壊やそれに伴う火災によって5000名を越える多数の死者が出るなど、極めて大きな人的、社会的な被害が発生した。また、同時に市街地が海岸と六甲山地に挟まれた狭小な地域に発達した神戸市の地形的な特徴から、山麓部を中心に多数の斜面災害も発生している。こうした地震による斜面崩壊が大きな被害を及ぼした例では、1984年の長野県西部地震による御岳の大崩壊や1978年の宮城県沖地震での郊外の造成地での斜面災害が記憶に新しい。

このように、地震によって斜面が崩壊し、大きな被害を発生させることは、過去のたくさんの事例が示すとおりであり、最近の丘陵や山間部への都市域の拡大に伴って、むしろその危険性は増大している。

以上のような背景から、地震に対する防災計画を立案する上で、我が国の大半の都市においては、斜面災害を視野に入れた計画を立てる必要があることは明らかである。すなわち、事前に崩壊危険性のある領域を特定し、必要な対策工を順次行うことや、地域に対する適切な情報提供などの措置を講じるなどが必要である。

本研究は、筆者らによって開発され、これまでに多数の適用実績を有する斜面安定性評価技術¹⁾を地震による斜面災害の防災計画に適用したものである。
キーワード：斜面安定性評価、斜面防災、衛星データ

*ハザマ技術研究所, 0298-58-8822

**東京理科大学, 0471-24-1501

具体的には、今回の震災で実際に多数の斜面災害が発生した神戸市六甲山麓を検討地域として、斜面安定性評価システムによる崩壊斜面の特徴の分析および地震によって不安定化した斜面の分布状況について予測を行ったものである。

2. 研究の目的

本研究で使用している斜面安定性評価システムは、衛星データと数値地理情報を統計的に分析することによって、対象領域内の不安定化斜面の平面的な分布状況を把握するものである¹⁾。このシステムはこれまでに降雨による地すべりや崩壊、または建設工事等による人為的な作用による斜面の不安定化を評価する目的で、10例以上の適用実績を有するものである^{2, 3)}。さらに、地震に対する評価については、1987年の千葉県東方沖地震によって発生した小規模な斜面崩壊について検討を行い、このシステムが効果的に不安定化した斜面の分布状況について予測を行うことができることを確認している¹⁾。

こうした研究経緯を踏まえた上で、本研究で設定した目的は次に示すようにまとめられる。

- ①都市部において発生した地震による斜面災害について、その特徴を整理すると同時に、解析に用いるべき素因（アイテム）について検討する。
- ②上記の検討によって選定された素因情報を用いて、実際に斜面の安定性評価を行い、崩壊した斜面の特徴分析を行う。
- ③得られた予測図を現地の状況と照合し、その適合

性を評価すると同時に、地震防災計画への本システムの効果的な適用方法について検討する。

3. 斜面安定性評価システムの概要

斜面の安定性評価に際して、不安定化斜面（または崩壊危険斜面）の平面的な分布状況は、従来は地形・地質技術者が空中写真等を用いて地形判読を行うことによってなされていた。しかし、この技術においては、正確な判断ができるまでにはかなりの経験が必要であることや、同レベルの技術者間でも、必ずしも判断結果が一致するとは限らないという問題点が指摘されている。こうした背景から、より客観的でしかも容易に利用できる斜面の安定性評価技術が求められており、本システムもこうしたニーズをもとに研究開発されたものである。

詳細は文献1)に譲ることとするが、本システムは、斜面崩壊や地すべりなどの崩壊現象を発生させる要因のうち、斜面自体が持つ内的な要因（素因）に注目し、トレーニングデータ（教師データ）として与えられる基準をもとに、不安定化斜面の特徴を数量化し、それをもとに平面的な分布状況について評価を行うものである。

なお、予測結果に対する評価は、斜面の安定性という問題の特性から、直接的に判断することは困難であり、教師データの分類性を指標化した統計的な指標（的中率）から間接的に評価することとなる。この的中率とは、対象領域内の未崩壊箇所に対して、予測結果において安全側に分類される箇所の割合から求められるものである。

4. 地震による斜面安定性評価のための素因情報の選定に関する検討

(1) 素因情報の収集・作成

斜面の崩壊現象に関わる素因、誘因には地形、地質条件から建設工事等の人為的なものまで、極めて多数のものが考えられる。このような素因の中で、本研究では、地震によって発生する斜面崩壊現象を検討する上で、必要と考えられる素因情報を取捨選択していく必要がある。すなわち、地形的な側面では傾斜や斜面方位に加えてリニアメントなどの地震との関連性の強い地形の有無などが影響することが考えられる。また、一方では都市部での災害である

ことから、衛星データの取扱いにおいても都市部の人工斜面と自然斜面を考慮するなどの必要があるものと考えられる。

本研究では、上述のようなことを念頭に置き、これまでの適用事例（文献2,3）など）とも合わせて検討した結果、表-1に示すような素因情報を用いることとした。なお、ここで、リニアメントからの距離と植生指標については、次に示すような手順でデータを作成した。

①リニアメントからの距離：地震時の斜面崩壊は、震源となる断層からの距離にも大きく影響を受けると同時に、地質的な脆弱部となっていることが多いリニアメント周辺では崩壊が発生しやすい。

神戸地区では、六甲山系から連続するいくつかのリニアメントが厚い堆積物の下に存在することが知られており、こうした地質条件は斜面の不安定化にも影響しているものと考えられることから、既存のリニアメント分布図をもとに図-1に示すようなリニアメントからの距離分布図を作成した。

②植生指標：これまでのいくつかの適用事例⁴⁾では、衛星データから算出される植生指標は、斜面の安定性評価において地盤状況を反映する有効な指標であることが確認されている。本研究でもこの指標を用いることとしたが、本地域は大都市部であることから、市街地の取り扱いが問題となる。そこで、本研究では市街地の領域を予め衛星データから抽出し、この部分をマスキングした上で植生指標の算出を行った。こうすることによって、植生が生育する領域

表-1 本研究で作成した素因情報

素因情報	主 題 図
標 高 斜面方位 傾 斜 谷 密 度 (起 状 量)	地形図 (1/10,000 国土地理院) ・芦屋 (平成4年10月1日発行) ・摩耶山 (同 上)
地 質	地質図 (1/50,000 地質調査所) ・神戸 (昭和58年3月16日発行) ・大阪西北部 (昭和57年3月19日発行)
現存植生	現存植生図 (1/50,000 環境庁) ・神戸 (昭和57年発行) ・大阪西北部 (同 上)
リニアメント からの 距 離	既存技術資料より作成
植生指標 (土地被覆)	LANDSAT/TM (1993年3月23日観測)

表-2 アイテムの独立性の検討結果

		標高	地質	傾斜	現存	起伏	斜面	植生	土地	谷密	リニア
標高	○	—									
地質	○	0.681	—								
傾斜区分	○	0.529	0.364	—							
現存植生	○	0.487	0.481	0.562	—						
起伏量	×	0.548	0.383	0.892	0.586	—					
斜面方位	○	0.191	0.372	0.292	0.309	0.293	—				
植生指標	○	0.622	0.417	0.581	0.581	0.605	0.273	—			
土地被覆	×	0.584	0.472	0.615	0.630	0.639	0.269	0.839	—		
谷密度	○	0.150	0.071	0.174	0.111	0.154	0.092	0.142	0.105	—	
リニアメント	○	0.304	0.532	0.149	0.197	0.171	0.264	0.243	0.192	0.054	—

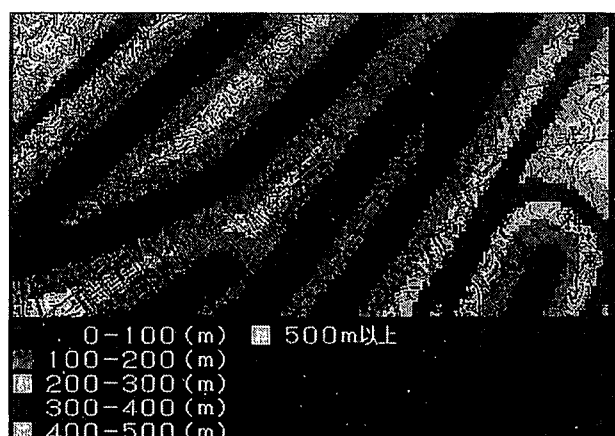


図-1 リニアメントからの距離分布図

内の具体的な植生の状況をよりきめ細かく検討することが可能である。

(2) 素因情報の比較検討

以上のような手法によって作成された素因情報を用いて斜面の安定性を評価することになるが、数量化理論においては、用いる素因（アイテム）の独立性が問題となり、各アイテム間の相互の関連性を評価する必要がある。そこで、本研究では数量化Ⅲ類を用いて各アイテム間の相関係数を求めることによってアイテムの独立性を評価した。その結果、表-2に網がけで示したように傾斜と起伏量および植生指標と土地被覆との間に高い相関関係が認められた。そこで、それぞれのうち、数量化Ⅱ類の偏相関係数の大きいアイテムを選定することとした。こうして、最終的に表-2に丸印で示した8つのアイテムを解析に用いることとした。

(3) 対象領域とトレーニングデータの選定

本研究の対象領域は阪神・淡路大震災によって多数の斜面崩壊が発生した神戸市内の六甲山麓（東西3km×南北1.5km）とした。また、トレーニングデータとしては、実際に地震によって斜面が崩壊した位置を、震災後に国土地理院が調査した資料より抽出し、この中でも比較的規模の大きいものを採用した。

5. 斜面安定性評価（不安定斜面の予測）

(1) トレーニングデータの分析

選定したトレーニングデータ自身の特徴分析を行うことによって、崩壊地のもつ各素因の特徴を知ることが可能である。すなわち、各アイテムごとに度数分布を検討することによって、崩壊地の持つ素因的な特徴を抽出することができる。この分析結果から、崩壊が発生した地点の特徴は表-3のようにまとめられる。この表から、今回の地震で崩壊が発生した地点は、比較的急傾斜で南東方向に面した、大阪層群上部の堆積物または黒雲母花崗岩によって構成される斜面であり、表面は植生に覆われている部分と位置付けられる。

また、リニアメントからの距離は200m以内であり、これは地震とリニアメントと崩壊の関連性について示唆しているものと捉えられる。

(2) 数量化Ⅱ類分析による検討

トレーニングデータの分析は、あくまでも各アイテムごとに独立した分析であるが、数量化Ⅱ類分析を行うことによって、各アイテム間の関連性を含めた解析を行うことができる。

表-4は数量化Ⅱ類分析結果をまとめたものである。表の中で、各アイテムごとに算出されるレンジ

表－３ トレーニングデータの特徴分析

アイ テ ム	崩壊との関連性の高いカテゴリ
標 高	250～400m
斜面方位	東～南
傾斜区分	15°～40°
谷 密 度	0～1
地 質	大阪層群上部、黒雲母花崗岩
現 存 植 生	モツツジ・アカマツ群落
リニアメント距離	0～200m
植 生 指 標	レベル1, レベル7～10

は、崩壊現象に対する各アイテムの関与の度合いを示すものである。また、各カテゴリー数量については、予測の基準として与えたトレーニングデータに付与された値が負であることから、この数値が負の値でかつ絶対値の大きいものほど崩壊との関連性が大きいことを示している。

以上の観点から、本研究での対象領域について検討すると、崩壊に対する寄与の大きいアイテムは地質および標高であり、これに次いで植生指標および斜面方位が崩壊との関連性の大きなアイテムとして位置付けられる。また、カテゴリー数量に着目すると、地質の大阪層群上部層および標高300～400mが崩壊地の特性を示すものとして位置付けられる。これ以外では、斜面方位の東北東、南南東および西南西、植生指標レベル4、傾斜30～35°と地質の非海成粘土・砂・礫などが目立つ。

以上の解析結果とトレーニングデータの分析結果を比較すると、地質や標高および斜面方位と傾斜など斜面崩壊への関与の度合いが大きいものについては、両者がほぼ一致していることがわかる。一方、植生指標やリニアメントからの距離等は、むしろ関連するカテゴリーが異なっていたり、崩壊現象への寄与の度合いが変化したりしている。これは、トレーニングデータ分析がそれ自身のみを分析しているのに対して、数量化Ⅱ類では、対象領域全域の中でトレーニングデータの持つ特徴を、各アイテム・カテゴリーの関連性を考慮して分析しているためである。すなわち、数量化Ⅱ類を用いて崩壊地と未崩壊地を総合的に分析することによって、崩壊地の特徴をより的確に抽出することが可能となる。

（３）斜面安定性評価図の作成

前述した数量化Ⅱ類の結果をもとに、対象領域を崩壊の可能性「有・無」の２つに分類し、表示したものが図－２である。この図では崩壊危険性「有」とされた地域を淡い黒色で表示してある。また、トレーニングデータとして選定した領域のうち、正しく危険側に分類されたものを濃い黒色（■）で、逆に崩壊危険性なしと分類された（誤分類された）ものを濃い黒色（▲）で示している。

この図から、この対象領域では山麓部を中心に崩壊の危険性がある地域がブロック的に分布していることがわかる。特に図の西側（左側）の地域や北東側（右上）の地域では広い範囲に渡って危険地域を示す範囲が分布している。なお、この評価結果の妥当性を示す中率は83.5%であり、比較的高い精度での評価が可能であったことを示している。

（４）現地調査結果との照合

図－２に示した斜面安定性評価図をもとに、震災発生後10ヶ月後に現地調査を行い、評価結果の検証を行った。その結果、図－２に示したように、崩壊危険性があると判断された多くの地点において、崩壊規模が拡大した斜面や対策工の施工が進められている斜面が見られるなど、本研究で行った評価結果が妥当であることが確認された。

6. まとめと今後の課題

以上述べてきたとおり、本研究では阪神・淡路大震災によって発生した斜面崩壊を対象として斜面の安定性評価を行い、いくつかの成果を得ることができた。以下にその成果を簡単にまとめる。

- ①本システムはこれまでの適用事例と同様に大規模な地震による斜面の安定性評価にも有効であることが確認された。
- ②これまでの斜面の安定性評価の適用事例を考慮した上で、地震による斜面の崩壊という特徴を反映したアイテムの選定法を提案することができた。
- ③トレーニングデータの分析と数量化Ⅱ類による双方の分析から、対象領域の崩壊斜面の特徴を的確に分析することができた。

また、今後の課題としては次のようなことがあげられる。

- ①本研究で対象としたような市街地での斜面の安定

表 - 4 数量化Ⅱ類分析結果

素因情報		頻度	カテゴリー 数量	偏相関係数 (レンジ)	素因情報		頻度	カテゴリー 数量	偏相関係数 (レンジ)
標高	(以上～未満:m)				傾	0～5°	231	0.186	
	100～150	52	0.982		斜	5～10°	660	0.392	
	150～200	552	0.446		区	10～15°	588	0.427	
	200～250	1150	0.585		分	15～20°	655	0.001	0.050
	250～300	898	-0.185	0.092		20～25°	739	-0.119	(1.088)
	300～350	772	-1.020	(2.003)		25～30°	795	-0.029	
	350～400	447	-0.863			30～35°	736	-0.661	
	400～450	376	0.236			35～40°	445	0.093	
	450～500	277	0.167			40～	151	0.019	
	500～	476	0.493			0 (個)	3447	-0.039	
斜面方位	北	12	0.677		谷密度	1	417	-0.383	0.027
	北北東	45	0.763			2	893	0.242	(0.721)
	北東	150	0.175			3	215	0.329	
	東北東	284	-0.559			4	28	0.338	
	東	470	-0.045		地質図	礫・砂・粘土	26	-0.369	
	東南東	633	-0.122			大阪層群上部亜層群	615	-1.502	
	南東	709	-0.042	0.056		非海成粘土・砂・礫	183	-0.693	0.091
	南南東	490	-0.523	(1.390)		ひん岩	8	0.090	(2.548)
	南	514	0.172			石英斑岩	35	0.830	
	南南西	488	0.192			黒雲母花崗岩	3035	0.172	
植生指標	南西	464	0.470		現存植生	黒雲母花崗岩	635	0.039	
	西南西	352	-0.464			角閃石黒雲母	463	1.046	
	西	207	0.588			粘板岩・頁岩・珸石			
	西北西	136	0.673			セツツジ・フナギ群集	3444	-0.286	
	北西	40	0.477			クス群落	248	0.742	0.062
	北北西	6	0.831			スギ・ヒノキ・ササ植物林	17	0.958	(1.244)
	レベル1	1223	-0.170			外国産広葉樹植林	92	0.173	
	レベル2	90	0.022			市街地	1199	0.641	
	レベル3	91	0.228		リニアメント	(以上～未満:m)			
	レベル4	161	-0.709	0.044		0～100	1875	0.016	0.010
植生指標	レベル5	225	-0.102	(1.409)		100～200	1498	-0.092	(0.219)
	レベル6	434	0.173			200～300	784	0.079	
	レベル7	573	0.036			300～400	441	0.035	
	レベル8	666	-0.302			400～500	211	0.127	
	レベル9	678	0.175			500～	191	0.020	
	レベル10	482	0.345		予測前	崩壊地(トレーニングデータ)	27		
	レベル11	244	0.701			未崩壊地	4973		
	レベル12	105	-0.285		予測後	崩壊地	816	-2.139	
	レベル13	28	0.086			未崩壊地	4184	0.012	
的中率 = 83.5%									



凡例	■(淡)	崩壊危険性「有」とされた地域
	■(濃)	トレーニングデータのうち、正しく危険側に分類された箇所
	▲	崩壊危険性なしと分類された(誤分類された)箇所
	○	トレーニングデータ以外で斜面对策工が実施されていた箇所
	●	斜面对策工が新たに実施されていたが、予測できなかった箇所

図 - 4 斜面安定性評価図

性評価では、より詳細な評価が求められることも考えられる。このため、今後は分解能1～5m程度の高分解能衛星データ等の利用も考慮する必要がある。

②都市部においては、単に危険斜面の分布を評価するのみならず、住宅密集地や重要構造物などとの関連性から、対策の優先度が問題となることが多い。こうした問題については、リスクマネジメントの考え方を導入することも検討する必要がある。

7. おわりに

地震予知が極めて困難である現状においては、それによって発生する斜面災害の予測は、一般的に、素因面からのアプローチを取らざるを得ないものと考えられる。また、ある特定地域を広く面的に評価する場合に利用できるデータは、地形や地質などの一般的に整備されているデータに加えて、現在その高分解能化が進んでいる衛星データなどが中心になるものと思われる。

こうしたことから、本研究で適用したシステムは、現時点において比較的容易に、地震防災計画に取り込むことができる技術の一つであると考えられる。特に、コンピュータ技術の急速な進歩に合わせて、

国土の数値情報の整備が進めば、本システムが防災計画の中で果たす役割は、より一般的になると考えられる。

本研究が斜面の防災に携われる人々の一助となれば幸いである。

【参考文献】

- 1)大林成行、小島尚人、笠博義：斜面崩壊予測を対象とした衛星マルチスペクトルデータの実利用化について、土木学会論文集第415号／VI-12、pp. 71～80、1990
- 2)笠博義、小島尚人、大林成行、黒台昌弘：異なった斜面崩壊のタイプに対する斜面崩壊予測システムの適用性の研究、土木学会論文集第444号／VI-16、pp. 11～20、1992
- 3)黒台昌弘、笠博義、藤田圭一、大林成行、小島尚人：地すべり調査・観測への斜面安定性評価システムの適用について、地盤工学でのリモートセンシングデータの活用シンポジウム発表論文集、pp. 173～178、1993
- 4)笠博義、黒台昌弘、大林成行、小島尚人：地すべり予測への衛星リモートセンシングデータの応用可能性について、日本リモートセンシング学会誌、vol. 12、No. 1、pp. 5～154、1992

A STUDY OF FORECASTING UNSTABLE SLOPES CAUSED BY EARTHQUAKE

M. Kurodai, H. Kasa, S. Obayashi, H. Kojima, T. Murakami

It is important to forecast slope failure zones for drawing up disaster prevention plan against earthquake. Owing to preventing second disaster, it is more important to clear the distribution of unstable slopes caused by earthquake. In this study, several unstable slopes at the foot of Mt. Rokko were forecasted using "Slope Stability Assessment System" which has developed by authors. And it is confirmed on site investigation that those slopes become more dangerous by that earthquake, that is, the situations on site correspond with our results of this study.