

地震時における斜面崩壊発生場の 地形・地質的検討

たねひらかずなり ふじわらやすまさ すえとみいわ お はしおのぶひろ
種平一成¹・藤原康正¹・末富岩雄¹・橋尾宣弘¹

¹ (株) エイト日本技術開発 (〒532-0034 大阪府大阪市淀川区野中北一丁目12-39)

本業務は、想定地震における大規模斜面崩壊を含む斜面崩壊の発生状況を地形条件、地盤条件、地震動特性から事前に推定することができる手法の開発を目的とする。近年、国内で発生した大規模地震のうち3事例を用い、GIS上で作成したメッシュデータをもとに崩壊発生と崩壊規模に関する影響分析を行った。主な内容は、素因・誘因の階級別崩壊発生率の単相関分析およびラフ集合理論を用いた崩壊に寄与する要因の組み合わせの抽出であり、これらを実施した結果、大規模崩壊の危険性を評価する上で有効な指標となり得るいくつかの要因が得られた。

Key Words : 地震, 斜面崩壊, 崩壊規模, 大規模崩壊, 危険度評価

1. はじめに

近年の大規模地震では、表層崩壊に加え深層崩壊などの大規模な斜面崩壊が発生しており、被害拡大の原因のひとつとなっている。このため、地震時の斜面崩壊の予測においては、小規模から大規模な崩壊まで包括的に危険性を評価できる手法の構築が必要と考えられる。崩壊規模によって、崩壊発生場の地形・地質的特徴が異なる可能性があるが、その要因についてはこれまでにいくつか報告されている(例えば、八木ら, 2007; 濱崎ら, 2015)。しかし、崩壊規模を定量的に区分し、地形条件・地盤条件・地震特性との関係性を分析した事例は少ない。そこで本検討では、崩壊面積により大規模崩壊とその他の崩壊を区分し、崩壊発生に影響する素因・誘因の傾向の違いについて検討を行ったため、その概要を報告する。

2. 検討条件

(1) 対象地震と範囲

対象とする地震は、国内の直下型地震のうち斜面崩壊事例が多く、かつ大規模な崩壊を含んでいる2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2016年熊本地震の3地震とした。各地震の分析対象範囲は、崩壊が多発した地域を含み、地震前の10mメッシュデータが存在する範囲とした(図-1)。

(2) 崩壊地の設定と崩壊規模の区分

崩壊地は、地震前後の空中写真判読により、GIS

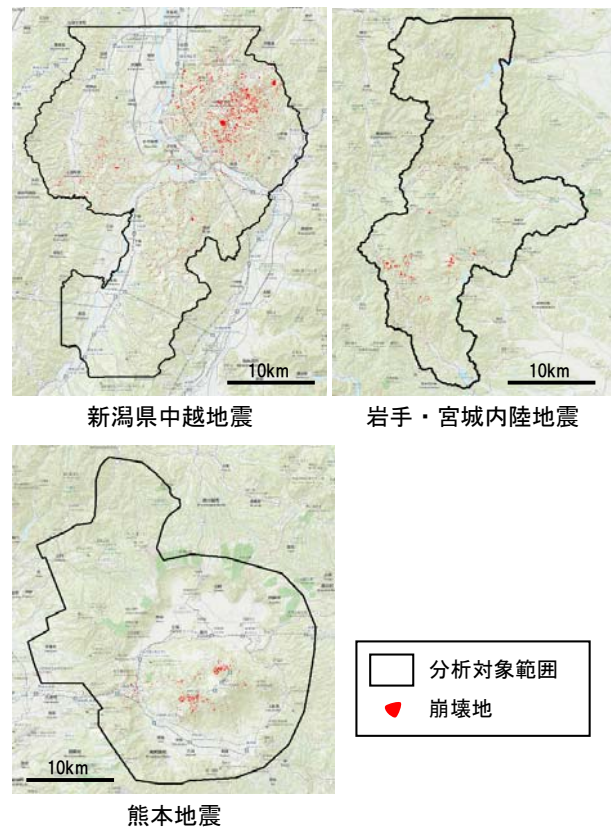


図-1 各地震の分析対象範囲

上でポリゴンデータ(以下、崩壊地ポリゴンと呼ぶ)を作成し、深層崩壊の規模の目安(土木研究所, 2009)を参考に、ポリゴンの面積が1ha以上の崩壊を「大規模崩壊」、1ha未満を「その他崩壊」とした。

表-1 影響を分析した項目

大項目	小項目	中越	岩手・宮城	熊本
地形条件	傾斜	○	○	○
	平均曲率	○	○	○
	起伏量	○	○	○
	方位	○	○	○
	集水面積	○	○	○
地盤条件	地質	○	○	○
	比抵抗値		○	○
	火山灰層厚			○
地震動特性	断層最短距離	○	○	○
	等価震源距離	○	○	○
	最大加速度	○	○	○
	計測震度	○	○	○
		○	○	○

※○は地震毎の分析対象項目

(3) 影響を分析した項目

地震時の斜面崩壊に関する既往文献を収集・整理し、既往の知見として得られている影響要因について、表-1のように整理した。これらの要因の影響の大きさを分析することとしたが、データの存在状況により地震毎に分析項目は異なっている。

(4) 分析手順と方法

まず、地震前の数値標高モデル (DEM) および各種資料等から地形条件、地盤条件、地震動特性をGIS上で10mメッシュデータとして整理する。つぎに、10mメッシュの重心が崩壊地ポリゴン内に属するメッシュを崩壊メッシュとして設定する。そして、分析項目毎に階級別もしくは属性別に分類し、崩壊発生率や崩壊面積との関係について整理する。崩壊発生率は、階級別・属性別の全メッシュ数に対する階級別・属性別崩壊メッシュ数の割合とし、「大規模崩壊」、「その他崩壊」、大規模崩壊とその他崩壊を統合した「全崩壊」をそれぞれ正規化 (最大値を1, 最小値を0に変換) し、グラフに表示した。また、分析方法はヒストグラムにより単相関分析を行うとともに、複数要因を組合せた場合の影響についてラフ集合理論を用いて分析した。

3. 結果と考察

(1) ヒストグラムによる分析

各要因の崩壊発生率をヒストグラムに整理し、相関性の分析を行った結果、いくつかの要因について「大規模崩壊」と「その他崩壊」で傾向の違いがみられた。本稿ではそのうち傾斜、地質、比抵抗値、断層最短距離、最大加速度について以下に示す。

a) 傾斜

傾斜の階級毎の崩壊発生率について、図-2は中越地震の例であるが、「その他崩壊」では傾斜が急になるほど崩壊発生率が上昇し、「大規模崩壊」では60°前後より急傾斜側で発生率が低下する傾向があり、このような傾向は、3地震に共通してみられた。また、全崩壊に占める「大規模崩壊」の割合は、15°未満の緩斜面で最も高くなるとともに (図-2)、崩壊面積の階級毎の平均傾斜角は、「大規模崩壊」において小さくなる傾向が3地震に共通してみられた (図-3)。特に中越地震は、崩壊面積2500m²以上では崩壊面積の増加に伴い平均傾斜角が常に減少

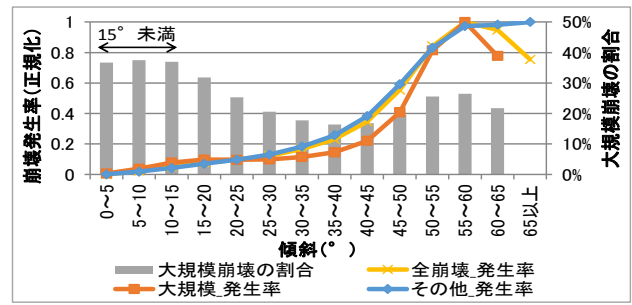


図-2 傾斜と崩壊発生率の関係 (中越地震)

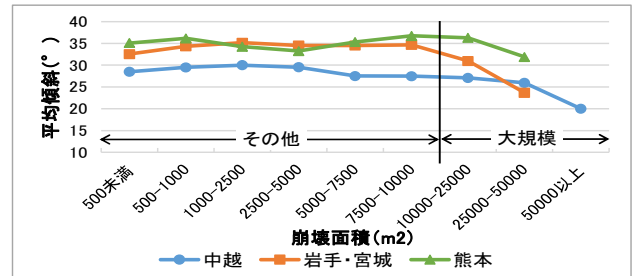


図-3 崩壊面積の階級毎の平均傾斜角 (3地震)

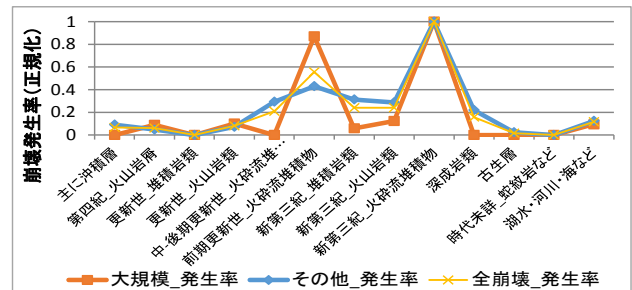


図-4 地質と崩壊発生率の関係 (岩手・宮城内陸地震)

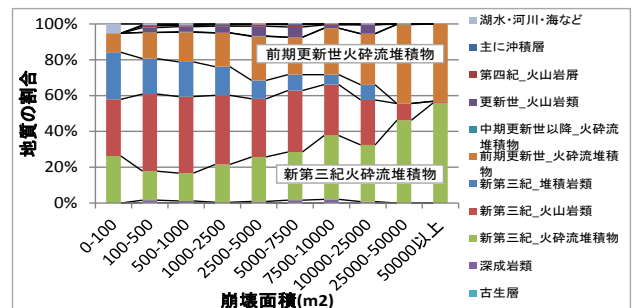


図-5 地質と崩壊面積の関係 (岩手・宮城内陸地震)

しており、他の地震よりも関係性が明瞭といえる。「大規模崩壊」で傾斜が緩くなる原因としては、「大規模崩壊」の発生域に小規模な緩斜面が含まれ、メッシュサイズが小さいためにこれらを拾い、分析結果に影響している可能性が考えられる。また、中越地震のように地すべり地形が発達し、傾斜が緩くなった斜面では、大規模崩壊が生じやすいことを示している可能性も考えられる。

b) 地質

特定の地質で崩壊発生率が高くなる結果が3地震に共通してみられた。図-4に示す岩手・宮城内陸地震の例では、「大規模崩壊」、「その他崩壊」ともに新第三紀の火砕流堆積物で崩壊発生率が最も高く、「大規模崩壊」については前期更新世の火砕流堆積物が高い発生率を示している。また、崩壊面積が大

きくなるほど特定の地質の割合が増加する傾向が3地震に共通してみられた（図-5に岩手・宮城内陸地震の例を示す）。大規模化に伴い優勢となる地質は、中越では新第三紀の堆積岩類、岩手・宮城では火砕流堆積物、熊本ではカルデラ形成後の火砕岩や先阿蘇火山岩類などである。このように、地質は崩壊規模に関係しており、地質条件によって「大規模崩壊」に対する危険性は異なると考えられる。

c) 比抵抗値

空中電磁探査による比抵抗値について、深度方向における変化率が大きいと「その他崩壊」の発生率が顕著に高くなり、変化率が小さいと「大規模崩壊」の発生率や全崩壊に占める割合が増大する傾向がみられた（図-6に熊本地震の例を示す）。これより、地盤の物性の均質さが崩壊規模に関わり、岩質や風化、亀裂等の状態が均質なほうが一体となって崩壊し易く、大規模化する可能性が考えられる。また、物性の均質さで振動特性が異なり、それが崩壊規模に影響している可能性も考えられる。なお、熊本地震の事例では深度0～30mの一次微分値（地表面と深度30mの比抵抗値の差（絶対値）を深度の差30mで除した値）に関係性がみられたが、地形・地質条件によって深度が異なる可能性があるため、他の事例についても検証が必要と考えられる。

d) 断層最短距離

「大規模崩壊」は「その他崩壊」と比較して遠距離での崩壊発生率が低い傾向が3地震に共通してみられ（図-7に中越地震の例を示す）、全崩壊に占める「大規模崩壊」の割合は、断層から近距離（概ね10km以内）で増加する傾向がみられた。震源断層からの距離と崩壊規模の関係については、「震源断層の両側20km以内に崩壊地の多くが分布し、面積1ha以上の大規模崩壊は震源断層の両側10km以内に分布する」（砂防学会、2016）や「震源断層から遠ざかるにつれ地すべりが小規模化する傾向を示し、最も遠い地すべりは震源断層から22km離れている」（丸山ら、2010）等の報告があり、本分析結果はこれらの報告とも整合性のある結果といえる。

e) 最大加速度

最大加速度は、観測値をクリギング法により補間し、250mメッシュの解像度で整理したものを分析に用いた。図-8より、最大加速度の階級が同一の「大規模崩壊」と「その他崩壊」の崩壊発生率を比較すると、3地震とも500galまでは「その他崩壊」のほうが高いものの、500gal以上になると「大規模崩壊」の崩壊発生率が急激に上昇し、「その他崩壊」と同等ないし逆転する傾向がみられる。また、「その他崩壊」の発生率が上昇する最大加速度は地震によって差があるものの、「大規模崩壊」では3地震とも共通しており、「大規模崩壊」の発生には地形・地質条件に関わらず、一定以上の大きな地震動が影響している可能性が考えられる。

f) 断層最短距離と最大加速度の関係

最大加速度は、逆断層の上盤と下盤の関係や山地・低地等の地形条件に影響されるため、必ずしも

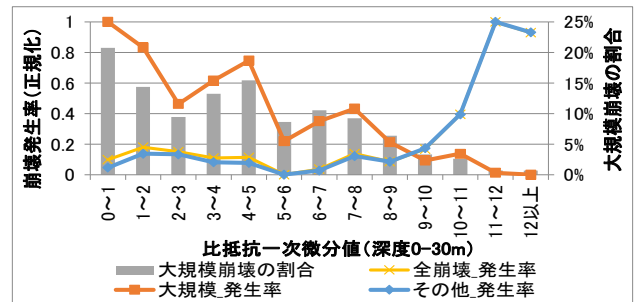


図-6 比抵抗微分値と崩壊発生率の関係(熊本地震)

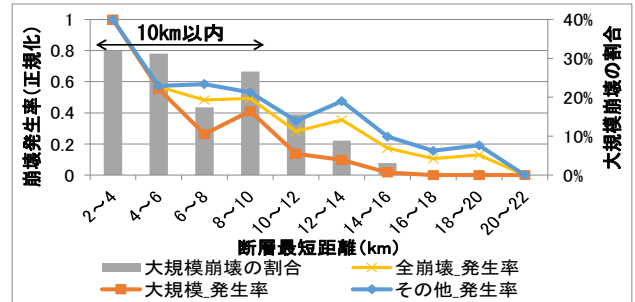


図-7 断層最短距離と崩壊発生率の関係(中越地震)

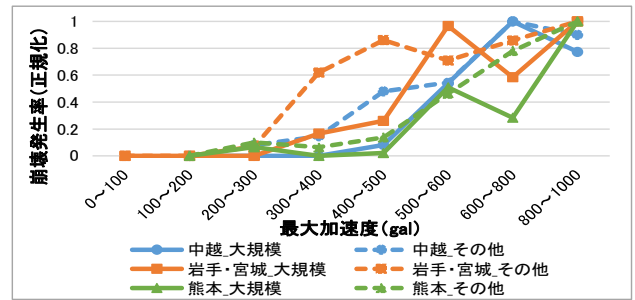


図-8 最大加速度と崩壊発生率の関係(3地震)

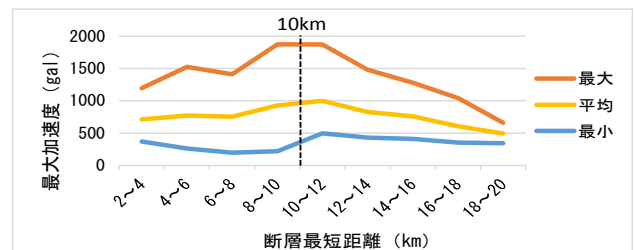


図-9 断層最短距離と最大加速度の関係(中越地震)

断層から近距離で大きくなるとは限らない。図-9に中越地震の断層最短距離と最大加速度の関係を示す。断層最短距離が10km以上では距離が遠いほど最大加速度が小さくなるが、断層最短距離が10km未満では、逆に距離が近いほど最大加速度の最大値や平均値は小さくなる傾向が見られる。このことは、断層最短距離(10km以内)と最大加速度が独立した影響要因であることを示している可能性が考えられる。

(2) ラフ集合分析

ラフ集合は、1982年にZ. Pawlakによって開発された手法であり、膨大なデータベースの中から有用な法則を見つけるデータマイニング手法の一つである。本稿では、収集・整理した地形・地盤条件、地震特性をもとに、ラフ集合分析の主な機能である「データベースの縮約」を用いて発生・非発生を分離する

要因の組み合わせを分析した。表-2に整合度（整合データ数/全データ数）が「大規模崩壊」で70%以上、「その他崩壊」で50%以上となる要因の組み合わせを示す。地形条件は主に「その他崩壊」の要因の組合せに挙がっており、「大規模崩壊」では中越地震のみで抽出されている。比抵抗値は「大規模崩壊」について分析対象とした2つの地震の両方で挙がっており、比抵抗値に表れる地盤特性（風化や変質の状態、含水状態、亀裂の状態など）は小規模な崩壊よりも大規模な崩壊でより影響が大きい可能性が考えられる。また、地震動特性については、「大規模崩壊」、「その他崩壊」ともに複数の地震で抽出され、断層最短距離が特に頻度が高い（岩手・宮城についても3要因以上ではすべて断層最短距離が選定されている）。これらの結果はヒストグラムによる分析結果とも整合性があり、妥当な結果と考えられる。

4. まとめと課題

「大規模崩壊」の発生に関わる要因のうち、本稿で取り上げたいいくつかの要因について以下にまとめた。その他の要因については、表-3に概要を示した。

(1) 地形条件

従来から地震時崩壊との関係性が指摘されている傾斜について、大規模化によって平均傾斜が緩くなる傾向がみられた。この傾向は中越地震で最も顕著であり、地すべり地形を反映したものと考えられる。このような地域では、危険箇所の推定において「大規模崩壊」と「その他崩壊」で傾斜の閾値を変更することが効果的となる可能性がある。また、3地震に共通して傾斜60°をピークに急傾斜側で「大規模崩壊」の発生率が低下する結果が得られた。これについては、複数のメッシュサイズで比較・検討を行い、より詳細に分析を行う予定である。

(2) 地盤条件

比抵抗値は、深度方向の変化率が小さい場合に「大規模崩壊」の発生率が增大する傾向がみられ、岩質や風化、亀裂等の状態が均質なほうが一体となって崩壊し易く、大規模化につながる可能性が示された。空中電磁探査による比抵抗値は、効率的に広域のデータが取得できるため、「大規模崩壊」の予測において有効な指標となる可能性がある。今後は複数の事例で検証を行う必要がある。また、地質は崩壊面積が大きくなるほど特定の地質の割合が増加する傾向が3地震に共通してみられた。「大規模崩壊」の発生場を予測する上で地質条件を考慮（例えば地質別の危険度評価式の設定等）することは有効である可能性が考えられる。

(3) 地震動特性

断層最短距離が近いほど「大規模崩壊」の割合が増加し、断層から概ね10km以内で発生率が高まる傾向がみられた。また、最大加速度については、3地震に共通して500gal以上で「大規模崩壊」の崩壊発生

表-2 ラフ集合分析で抽出された要因の組み合わせ

	大規模崩壊			その他崩壊		
	中越	岩手宮城	熊本	中越	岩手宮城	熊本
整合度	72%	91%	73%	53%	68%	65%
要因数	6	2	3	7	4	7
全要因数	10	16	21	10	16	21
地形条件	方位 起伏量 曲率			方位 起伏量 曲率	方位 勾配	方位 勾配 曲率
比抵抗値		(比抵抗 値140k) (比抵抗 微分値)	比抵抗値 30m		比抵抗微 分値	
地震動特性	断層最短 距離 等価震源 距離 計測震度		断層最短 距離 最大加速 度	断層最短 距離 等価震源 距離 計測震度	断層最短 距離	断層最短 距離

注1) 大規模崩壊は、整合度が70%以上で要因数が最小となる組み合わせ
注2) その他崩壊は、整合度が50%以上で要因数が最小となる組み合わせ
注3) 橙色ハッチは、複数地震で抽出された項目
注4) 括弧付きの項目は、該当事例が1事例のみ

表-3 各要因の分析結果一覧

要因 ※太字は本稿で例示	ヒストグラムによる分析			ラフ集合分析		
	中越	岩手宮城	熊本	中越	岩手宮城	熊本
地形条件	傾斜	◎	◎	◎	小	
	起伏量	○	○	○	大小	
	平均曲率	◎	◎	◎	大小	
	方位	●	×	×	大小	小
	集水面積	◎	○	◎	小	
地盤条件	地質	●	●	●		
	火山灰層厚	—	—	×	—	—
	比抵抗値	—	●	●	—	大小
地震動特性	断層最短距離	◎	○	○	大小	大小
	等価震源距離	○	○	○	大小	
	最大加速度	○	○	○		大
	計測震度	○	○	○	大小	
凡例	崩壊発生率との関係	◎：一定方向に明瞭な関係性あり ○：一定方向に概ね関係性あり ●：特定の階級・属性で発生率高い ×：関係性は不明瞭、有意性が低い			大：大規模崩壊の抽出要因 小：その他崩壊の抽出要因 大小：共通の抽出要因	
	崩壊面積との関係	■：全体的に崩壊面積との関係性あり □：部分的に崩壊面積との関係性あり			※整合度が大規模崩壊で70%以上、その他崩壊で50%以上の組合せに入る要因	

率が急激に上昇しており、「大規模崩壊」の発生には一定以上の大きな地震動が影響している可能性が考えられる。

以上のように「大規模崩壊」の危険性を評価する上で有効な指標となり得るいくつかの要因が得られた。その中には従来から指摘される項目に加え、空中電磁探査による比抵抗値など新たな要因も含まれる。また、本稿では詳述していない項目についても部分的に崩壊面積との関係性がみられる要因が複数存在するため（表-3の黄色ハッチ）、これらの組合せを含めてより詳細に検討していく予定である。

参考文献

- 1) 八木浩司, 山崎孝成, 渥美賢拓: 2004年新潟県中越地震にともなう地すべり・崩壊発生場の地形・地質的特徴のGIS解析と土質特性の検討, 日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 5, pp. 294-306, 2007.
- 2) 濱崎英作, 檜垣大助, 林一成: GISに基づく斜面変動予測評価のためのバッファ移動解析と過誤確率分析法, 日本地すべり学会誌, Vol. 52, No. 2, pp. 51-59, 2015.
- 3) 土木研究所 火山・土石流チーム: 「深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル(案)」に関するよくある質問と答え, p. 1, 2009.
- 4) 砂防学会: 平成28年熊本地震による土砂災害, 砂防学会誌, Vol. 69, No. 3, pp. 55-66, 2016.
- 5) 丸山清輝, 千田容嗣, ハスパートル, 藤澤和範, 石井靖雄: 2008年岩手・宮城内陸地震により発生した地すべりの特徴, 土木技術資料, 52-2, pp. 10-13, 2010.