

◆特集：自然災害に対応する危機管理技術◆

地震時の斜面崩壊危険度評価手法の検討

内田太郎* 片岡正次郎** 岩男忠明*** 松尾 修**** 寺田秀樹*****

1. はじめに

平成16年の新潟県中越地震のように、地震により多くの斜面崩壊が発生し、人的・物的被害が生じることがある。中央防災会議において切迫性の高い東海地震発生時の斜面崩壊による被害予測が行われている。地震による土砂災害を軽減するために、地震時を対象とした精度の良い斜面崩壊危険度評価手法が必要とされている。これまで提案されてきた地震時の斜面崩壊予測手法は以下の2つに大別される。

- (1) 有限要素法などを用いて3次元動的振動解析を基本とする方法¹⁾
- (2) 既往地震時の崩壊実績から、地形等の要素と崩壊地分布の関係に基づく経験的手法²⁾

(1)の手法は、物理的な解析手法に準拠しているため、被災事例がない地域や異なる特徴を有する地震動波形による崩壊危険度評価に用いることができる可能性が高いが、地下情報が十分に得られないことや、広範囲に計算を実施する場合、モデル作成の手間や計算時間が膨大になることなど、実務面では依然として課題がある。そこで近年、(1)と(2)の中間的な簡易な物理モデルに準拠する手法が提案されてきた³⁾。

一方、(2)の手法は、GISの技術の進歩などにより、実用可能性は高いと考えられる。しかし、既存の崩壊分布実績を基に作成された手法が、他地域、または異なる特徴を有する地震動波形に有効であるかという手法の汎用性を検討する必要性があるがこれまで行われてきていない。また、(1)及び(1)と(2)の中間的な手法においても、現時点では山地斜面に適用する場合、地下情報等が十分に得られないため、地震時の崩壊実績に基づくパラメータの同定が必要となるのが現状である。このことは、これらの手法に関しても、手法の汎

用性について検討する必要があることを示している。

そこで、本研究では、地形など一般的に入手可能なデータを用い、過去の地震による斜面崩壊の実績データがない場合においても、山腹斜面の地震時の崩壊危険度を評価できる実務的な手法を開発することを目的とした。

2. 六甲山地における判定手法の提案

2.1 データ準備

崩壊地データは、六甲砂防事務所により調査され、データベース化されたものを使用した。地形データは六甲砂防事務所の砂防GIS上のデジタルマッピングデータ(2m間隔の等高線)から作成した10mメッシュごとの標高値を用いた。

既往の研究から、地形要素のうち斜面勾配、標高、方位、斜面の凹凸が地震時の崩壊に影響を及ぼすことが明らかにされてきた⁴⁾。そこで、DEMから、斜面勾配、方位、標高及び斜面の凹凸を表す指標(地上開度、地下開度、平均曲率、最大傾斜方向の曲率、尾根谷度及びラプリアン)について算出した。

また、崩壊発生に影響を及ぼす地震動の特性値は十分に明らかにされているとはいいがたいが、ここでは、算出が容易な最大速度、最大加速度について検討した。最大速度、最大加速度は、断層近傍の比較的強い地震動についての再現性が高い震源断層からの最短距離をパラメータとした距離減衰式に破壊伝播の効果を加味した手法⁵⁾を用いて推定した。なお、地形量、地震動の大きさに関する算出の詳細は文献⁶⁾を参照されたい。

2.2 危険度判定式の導出

2.1で算出した各因子と崩壊発生率の単相関を検討した結果、斜面勾配、斜面の凹凸、地震動の最大加速度が崩壊発生率との相関が高いことが分かった。さらに、斜面の凹凸を表す指標は用いる指標の違いが判別結果に及ぼす影響は小さいが、

平均曲率（影響範囲20m）がわずかではあるが有効であることが分かった。

そこで、勾配、平均曲率（影響範囲20m）、破壊伝播効果を考慮した最大加速度を説明変数とし、崩壊の発生・非発生を目的変数とした判別分析を行い、判別関数式（以下、六甲式）を導いた。

$$F = 0.075I - 8.9c + 0.0056a - 3.2 \quad (1)$$

ここで、 F は判別得点である。判別分析においては、 F が正のとき、崩壊発生、負のとき、崩壊非発生と予測されたことになる。また、 I は勾配（°）、 c は平均曲率、 a は最大加速度（ cm/s^2 ）である。

2.3 適用結果

六甲式を六甲山地に適用した結果、実際に崩壊が発生したメッシュのうち90.5%のメッシュで崩壊すると予測された（表-1）。一方、実際に崩壊が発生しなかったメッシュも含め全体では、48.7%の正答率であった。実際に崩壊が発生していない斜面のほぼ半数で、崩壊が発生すると予測してしまった（表-1）。また、判別得点-0.5～0.5の斜面の崩壊発生率は0.05%であるのに対して、判別得点3以上の斜面では約2%以上であった（図-1）。つまり、判別得点0と比べて、判別得点3以上の斜面は40倍以上地震時の崩壊の可能性が高い。すなわち、六甲式で求めた判別得点は、

相対的な斜面崩壊発生の危険度を表すといえる。以上の結果に基づき、地震による斜面崩壊発生の危険度を5段階（判別得点-3.0～-1.5（崩壊発生率約0.001%以下）、-1.5～-0.5（約0.03%以下）、-0.5～0.5（約0.1%以下）、0.5～1.0（約0.2%以下）、1.0～10（約0.2%以上））に分類し、図示したものを図-2に示した。

表-1 六甲山地における判別分析結果

| | | 予測 | | 合計 | |
|-------|---------|-----------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| | | 非崩壊 | 崩壊 | | |
| 実際の崩壊 | 個数 | 非崩壊 崩壊 合計 | 849373 223 849596 | 897756 2127 899883 | 1747129 2350 1749479 |
| | 的中率 (%) | 非崩壊 | 48.6 | 51.4 | 100 |
| | | 崩壊 | 9.5 | 90.5 | 100 |

分類正誤率 48.7%

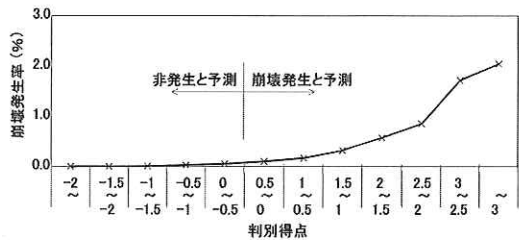


図-1 六甲山地の判別得点崩壊発生率関係

危険度評価図（勾配+平均曲率20m+地震動考慮）

— 危険度評価凡例 —

- 崩壊が起りにくい
- ▨ 崩壊がやや起りにくい
- ▩ 崩壊がやや起りやすい
- 崩壊が起りやすい

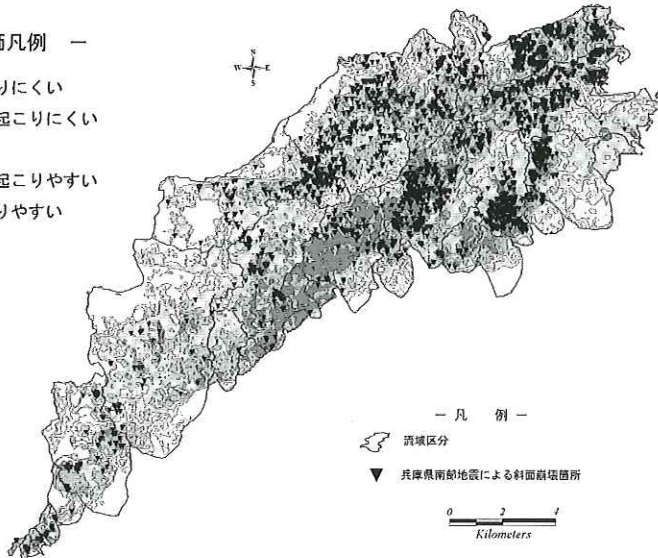


図-2 六甲山地の地震による斜面崩壊危険度評価図

3. 作成した手法の汎用性の検討

3.1 検討手法

検討には、1997年以降で崩壊分布が面的に把握されている①1997年3月の鹿児島県北西部の地震、②2000年7月神津島の地震の2事例の崩壊分布実績を用いた。

対象範囲は、①では震源付近の30km²、②では神津島全域とした。検討に用いた崩壊分布図は土木研究所によって作成されたものを用いた。それぞれ対象範囲に、157、1526箇所の崩壊が発生していた。勾配、平均曲率算出に用いるDEMは、①は北海道地図社の10mメッシュDEMを、②はレーザー計測による1mメッシュDEM（(株)朝日航洋作成）を10mメッシュに調整し使用した。最大加速度は、六甲山地において用いた手法と同様な手法で算出した。最大加速度算出に用いる震央の座標、断層の座標、マグニチュードは①は地震予知連絡会、②は地震予知情報センターが示した値とした。

両地震事例に対し六甲式を適用し、判別正誤率、判別得点-崩壊発生率関係を検討した。また、各事例について、崩壊実績データに基づき、説明変数は勾配、平均曲率（影響範囲20m）、最大加速度、目的変数は崩壊発生の有無とした判別分析を実施し、各説明変数の係数を決定した（それぞれ、「鹿児島式」、「神津島式」と呼ぶ）。その上で、鹿児島式、神津島式を用いた際の判別正誤率、判別得点-崩壊発生率関係を検討した。

3.2 分類正誤率

六甲式を鹿児島県北西部の地震に適用した場合、分類正誤率が60.8%、また鹿児島式を適用した場合では50.7%となった。この結果からすると、六甲式の適用が良いと見えるが、実際に崩壊している箇所において正しく予測できた確率に着目すると、六甲式では46.8%、鹿児島式では68.8%であ

表-2 鹿児島県西部地震における判別分析結果

| 六甲式 | | 予測 | | 合計 |
|---------|-----|------|--------|-------------|
| | | 非崩壊 | 崩壊 | |
| 実際の崩壊 | 個数 | 非崩壊 | 102952 | 169184 |
| | | 崩壊 | 75 | 141 |
| | | 合計 | 103027 | 169325 |
| 的中率 (%) | 非崩壊 | 60.9 | 39.1 | 100 |
| | 崩壊 | 53.2 | 46.8 | 100 |
| | | | | 分類正誤率 60.8% |

| 鹿児島式 | | 予測 | | 合計 |
|---------|-----|------|-------|-------------|
| | | 非崩壊 | 崩壊 | |
| 実際の崩壊 | 個数 | 非崩壊 | 85728 | 169184 |
| | | 崩壊 | 44 | 141 |
| | | 合計 | 85772 | 169325 |
| 的中率 (%) | 非崩壊 | 50.7 | 49.3 | 100 |
| | 崩壊 | 31.2 | 68.8 | 100 |
| | | | | 分類正誤率 50.7% |

表-3 神津島地震における判別分析結果

| 六甲式 | | 予測 | | 合計 |
|---------|-----|------|-------|-------------|
| | | 非崩壊 | 崩壊 | |
| 実際の崩壊 | 個数 | 非崩壊 | 81050 | 188923 |
| | | 崩壊 | 142 | 1497 |
| | | 合計 | 81192 | 190420 |
| 的中率 (%) | 非崩壊 | 42.9 | 57.1 | 100 |
| | 崩壊 | 9.5 | 90.5 | 100 |
| | | | | 分類正誤率 43.3% |

| 神津島式 | | 予測 | | 合計 |
|---------|-----|------|-------|-------------|
| | | 非崩壊 | 崩壊 | |
| 実際の崩壊 | 個数 | 非崩壊 | 94452 | 188923 |
| | | 崩壊 | 138 | 1497 |
| | | 合計 | 94590 | 190420 |
| 的中率 (%) | 非崩壊 | 50.0 | 50.0 | 100 |
| | 崩壊 | 9.2 | 90.8 | 100 |
| | | | | 分類正誤率 50.3% |

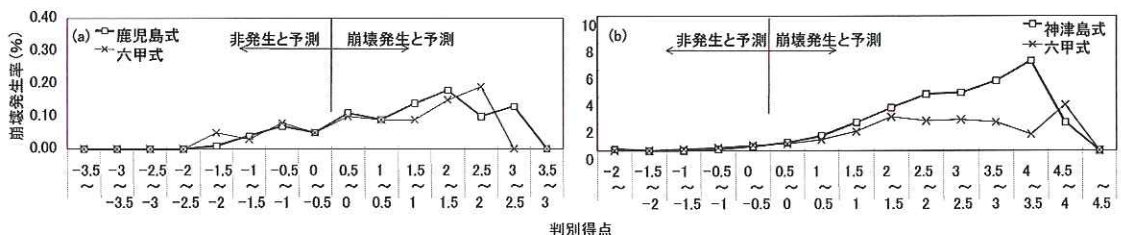


図-3 (a) 鹿児島県北西部、(b) 神津島における判別得点-崩壊発生率関係

り、実際に崩壊している斜面の抽出漏れが少ない方がよいとする立場からは、鹿児島式の方が有利な結果を得た。

六甲式を神津島に適用した場合、分類正誤率が43.3%、神津島式を適用した場合でも、50.3%となった。また、どちらの式も、崩壊箇所の90%以上を崩壊地と予測した。

3.3 判別得点—崩壊発生率関係

六甲式を用いて算出した判別得点と同じであっても、鹿児島県北西部、神津島の両地震による崩壊発生率は、兵庫県南部地震とは異なった(図-1及び3)。しかし、判別得点の増加に伴い崩壊発生率が増大する関係は共通して得られた。

また、鹿児島北西部の地震に対して鹿児島式を適用した場合も、六甲式とほぼ同じ関係が得られた。一方、神津島の地震においては、六甲式に比べて、神津島式を用いた場合は、判別得点の増加による崩壊発生率増加の程度が大きく、多くの崩壊が発生した既往事例がある場合、既往事例を用いることによって評価手法の精度が向上することを示している。

4. まとめ

兵庫県南部地震を対象に、斜面の地震時崩壊危険度を評価する実務的な手法として、勾配、平均曲率、最大加速度を説明変数とした線形判別式を作成した。鹿児島県北西部の地震、神津島の地震を対象とした検討結果から、作成した線形判別式を用いて算出された判別得点は、地震、地質に依らず、相対的な地震による斜面崩壊発生の危険度を評価できることが示された。なお、本研究で検討した崩壊事例は、比較的小規模なものが多く、

地すべり等大規模な土砂移動現象に本手法が有効であるかどうかは今後検討が必要である。

参考文献

- 1) Ashford, SA., Sitar, N., Lysmer, J., Deng, N.: Topographic effects on the seismic response of steep slopes, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.87, pp.701-710, 1997
- 2) 松岡昌志・翠川三郎: 国土数値情報を利用した地震時斜面崩壊危険度予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 474巻, pp.59-66, 1995
- 3) Jibson, RW., Harp, EL., Michael, JA: A method for producing digital probabilistic seismic landslide, Engineering Geology, Vol.58, pp.271-289, 2000
- 4) 西田顕郎・小橋澄治・水山高久: 数値地形モデルに基づく地震時山腹崩壊斜面の地形解析, 砂防学会誌, 49巻6号, pp.9-16, 1997
- 5) 福島美光: 距離減衰式の再構築と地盤増幅のモデル化, 地球, 37巻, pp.80-89, 2002
- 6) 内田太郎・片岡正次郎・岩男忠明・松尾 修・寺田秀樹・中野泰雄・杉浦信男・小山内信智: 地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, 204号, 91p., 2004

内田太郎*



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室
研究官
Taro UCHIDA

片岡正次郎**



国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震防災研究室主任研究官
Shojiro KATAOKA

岩男忠明***



国土交通省四国地方整備局四国山地砂防事務所調査課長(前国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室研究官)
Tadaaki IWAO

松尾 修****



独立法人土木研究所 耐震研究グループ長(前 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター地震災害研究官)
Osamu MATSUO

寺田秀樹*****



国土交通省河川局砂防部保全課保全調整官(前 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター砂防研究室室長)
Hideki TERADA