地震による斜面崩壊危険度評価判別式「六甲式」の改良と実時間運用

Improvement and real time calculation of Rokko formula,
a discriminant function for risk assessment of slope failures by earthquake

神谷 泉*・乙井 康成*・中埜 貴元*・小荒井 衛*
Izumi KAMIYA, Kosei OTOI, Takayuki NAKANO
and Mamoru KOARAI

Abstract : Rokko formula is a discriminant function for risk assessment of slope failures by earthquake. There are three problems to apply the formula for real time anticipation: too narrow target range of PGA (peak ground acceleration), lack of PGA data, and too long calculation time. We developed modified Rokko formula, estimation method of PGA from JMA (Japan Meteorological Agency) seismic intensity scale, and calculation method using precomputed histogram of real-time-independent part. We applied the methods to past earthquakes using shake maps (estimated seismic intensity distribution data) by JMA, and compared the results with slope failure positions by air photo interpretation. The results were appropriate in the interpretation area except narrow steep-slope-strips, but the system sometimes anticipated higher risk at the outside of the interpretation area. The difference was mainly caused by lack of seismometer near the epicenter.

1. はじめに

大地震の発生直後には、被害の概要がわからない場合が多い。このような場合、災害対策の初動段階では、実際の被害情報ではなくても、ある程度の根拠を持った被害の予想（例えば、定性的な根拠はあるが、十分検証されていない方法による予想）であれば、有用な情報となる。そこで、筆者らは、斜面崩壊、地すべり、液状化の3種の地盤災害について、推計震度分布図（永井，2001；松岡・翠川，1993）と、DEM，地形分類，地すべり分布図等の既存情報を組み合わせ、政府レベルの災害対策初動に間に合うよう発災後30分をめどに、自動的に予想した結果を関係部局に送信することを目指している（神谷ほか，2012）。

このうち、斜面崩壊の可能性の計算方法は、斜面安定解析等の工学的な方法と、地震動と崩壊の実例に基づく統計的な方法がある。本研究では、工学的な方法に必要なパラメーターを広域的に得ることは困難であ

るため、統計的な方法を用いることにした。統計的な方法としては、中央防災会議（2001）、損害保険料率算出機構（2012）、内田ほか（2004）、中村ほか（1997）があげられる。中央防災会議（2001）は、現地調査で作成された急傾斜地崩壊危険箇所カルテ（以下、「斜面カルテ」と呼ぶ）を用い、斜面単位で斜面崩壊の可能性を評価したが、本研究では斜面カルテのない部分も評価する必要がある。損害保険料率算出機構（2012）は、中央防災会議（2001）の手法を、斜面カルテのない場所にも適用したが、現地調査を行っていないため、中央防災会議（2001）のパラメーターの半数以上を無視することとなった。この方法は、都道府県等を単位とした集計結果においては、無視したパラメーターの効果が平均化されるため、妥当である可能性が高いが、1 km 等のセル単位での妥当性は疑問であると判断した。これに対して、加速度、傾斜、曲率を用いる内田ほか（2004；以下、「六甲式」と呼ぶ）と、加速度、傾斜、水系密度を用いる中村ほか（1997）は、本研究で実際に使用できるデータから推定可能な方法である。ここで、六甲式は、式を導いた平成7年（1995年）兵庫県南部地震のほかに7つの地震で検証されているが（富田ほか，2010）、中村ほか（1997）は、提案後検証

*国土地理院

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 51, NO. 6, 2012

がなされていない。これらのことから、六甲式が最も適切であると判断した。六甲式は、兵庫県南部地震の六甲山地における斜面崩壊の実例をもとに、国土技術政策総合研究所が開発した「地震による斜面崩壊危険度判別式」である。

六甲式を上記の予想に用いるためには、対象とする地表最大加速度（PGA：peak ground acceleration；本稿では水平成分のみを考慮する）の範囲が狭いこと、震度ではなく PGA を使用していること、迅速な計算には適さないことが問題となる。本稿では、これらの問題に対する解決策を提示し、過去の地震に対して適用した結果を紹介する。

2. 六甲式の改良

地表面の傾斜を s (度)、地表面の 2 方向の曲率の平均を c (m^{-1} ；以下、単に曲率という)、PGA を a (gal) とすると、六甲式 F は、以下のとおりであり、正の場合は崩壊、負の場合は非崩壊と判別する。

$$F = 0.075s - 8.92c + 0.006a - 0.3228 \quad (\text{六甲式})$$

六甲式は、斜面崩壊の悉皆的な調査がなされた範囲のデータを使用して作成され、検証されてきたが、そのような調査は、ある程度斜面崩壊が集中して発生した区域を対象としている。六甲式を作成した際のトゥールースデータの PGA は、216gal (計測震度 5.0 に相当) ～ 368gal (計測震度 5.4 に相当) であった。ここで、計測震度の相当値は、第 3 章の推定式において、モーメントマグニチュード (M_w) を 6.9 (兵庫県南部地震の値) として換算した値である (以下同様)。このようなグランドトゥールースの制約と、傾斜、曲率、PGA の 1 次式であるという制約のため、例えば曲率が 0 の場合 (地表面の凹凸がない場合)、傾斜が 43 度以上では PGA が 0 gal であっても崩壊と予想する。また、PGA が 583 gal (計測震度 5.8 に相当) 以上では、傾斜が 0 度であっても崩壊すると予想する。本システムでは、このような場合でも、妥当な結果を得る必要がある。

六甲式に使用する 3 つの入力値のうち、曲率の寄与は少ないため (内田ほか, 2004)、まず、曲率が 0 の場合を考える。「PGA が 0 gal の場合には崩壊しない」と「傾斜が 0 度の場合には崩壊しない」を要求すると、傾斜のべき乗と PGA のべき乗の積で崩壊を予想することが自然である。しかし、六甲式は正負の値を取り、

正の場合に崩壊すると予想する式である。このため、上記の積の対数を取り、 $G_0 = p \log_{10} s + q \log_{10} a + r$ の形式の判別式を考え、 G_0 の値が六甲式と類似するよう、係数 p , q , r を決定する。

ここで、傾斜の値が 0 ～ 10 度の範囲は、ほとんど崩壊しないため (符号が同じであれば) 六甲式と同じ結果を得る必要がないこと、傾斜 43 度以上は六甲式が不適切であるため六甲式と同じ結果を得る必要がないことを考慮し、傾斜については 15, 20, 25, 30, 35, 40 度の各値で六甲式の再現を目指すものとする。また、PGA については、六甲式を作成した際の元データの最小値、最大値及びその間を 4 分割する値 (最大値、最小を含め、216, 254, 292, 330, 368gal) の各値で六甲式の再現を目指すものとする。これらの組み合わせの $6 \times 5 = 30$ 個のサンプルの誤差の 2 乗和を最小とすると、 $G_0 = 4.38 \log_{10} s + 3.93 \log_{10} a - 15.27$ となった。

次に、曲率の効果を追加する。傾斜と曲率の関係が $0.075s - 8.92c = \text{const.}$ の場合、六甲式の値は不変である。この条件が満たされる場合に式の値が不変となるように G_0 を拡張し、曲率を含む判別式 G (修正六甲式) を作成した。ただし、いずれかの対数の引数が 0 以下の場合は、 G は負の無限大と解釈する。

$$G = 4.38 \log_{10}(s - 119c) + 3.93 \log_{10} a - 15.27 \quad (\text{修正六甲式})$$

図 1 に、六甲式と修正六甲式における崩壊と非崩壊の分岐点 (曲率が 0 の場合) を示す。当然のことながら、修正六甲式では、震度が 0 あるいは傾斜が 0 度の場合は、非崩壊と予想していることがわかる。

3. 地表最大加速度 (PGA) の推定

六甲式、修正六甲式の計算には PGA が必要であるが、地震時に得られる情報は、PGA ではなく計測震度 (あるいは計測震度の分級結果である震度) である。本研究では、藤本・翠川 (2010) の PGA から計測震度を推定する式を逆に解き、計測震度から PGA を求めることにした。計測震度を I 、モーメントマグニチュードを M_w 、PGA を a (gal) とすると、計測震度と、PGA の推定式は以下のとおりである。なお、 la の計算においては、桁落ちを避けるため、分母ではなく分子を有理化している。

図1 六甲式と修正六甲式の崩壊と非崩壊の分岐点

$$I = -0.122 + 0.114M_w + 1.682\log_{10}a + 0.069(\log_{10}a)^2$$

$$Ia = \frac{I + 0.122 - 0.114M_w}{0.841 + \sqrt{0.715699 + 0.069I - 0.007866M_w}}$$

$$a = 10^{Ia} \quad (\text{PGAの推定式})$$

4. モーメントマグニチュード (M_w) の推定

PGA 推定式の計算に必要な M_w は、推計震度分布図に含まれる気象庁マグニチュード (M_J) から推定する。確率論的地震動予測地図の作成においては、陸域の浅い地震とそれ以外の地震に分けて、前者では武村 (1990) に基づく $M_w = 0.78M_J + 1.08$ を、後者では $M_w = M_J$ を用いている (藤原ほか, 2002)。ところで、筆者らは、甚大な被害をもたらす大地震に注目しているが、平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震のような巨大地震では、 M_J は、 M_w より小さくなる傾向にある。上の2つの推定式は、この傾向を表現してないため、新たに M_w の推定式を作成した。

推定式の作成のため、気象庁のウェブページに掲載されている地震の M_J と、USGS のウェブページ (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/>) の M_w を比較した。前者は、「日本付近で発生した主な被害地震」及び「過去地震・津波被害」に掲載されている M_J が6.5以上の地震とした。ただし、余震、 M_J の計算精度が低い可能性がある「離島及び北方領土周辺の地震」、及び M_J の確定値が発表されていない東北地方太平洋沖地震は除外した。また、マグニチュードの大きな地震のサンプルを確保するため、東北地方太平洋沖地震の余震のうち、 M_J が7.0以上の地震を追加した。こうして得られた31個の地震の M_J と M_w を用

い、次の回帰式を得た。

$$M_w = 1.30M_J - 2.37 \quad (M_w \text{ の推定式})$$

本研究では、上式を用いて M_J から M_w を推定し、 M_w と計測震度から PGA を推定し、修正六甲式等の計算に用いる。

5. 実時間計算の方法及び結果の表現方法

六甲式は、現在では基盤地図情報数値標高モデル (10 m メッシュ) (以下、このグリッドを「小グリッド」と呼ぶ) を使用して計算する。例えば、東海・東南海・南海の連動地震を想定すると、セル数が膨大になるため、当該地域の小グリッドの全てのセルの修正六甲式等の値を発災時に計算すると、目標時間内に処理が終了しない恐れがある。そこで、地震直後の計算においては、標準地域メッシュに基づくより大きなグリッド (セル数を基準に、250m, 500m, 1 km, 2 km, 4 km のグリッドから自動的に選択; 以下、「大グリッド」と呼ぶ) を用いて、修正六甲式等の値を近似的に計算することにした。

六甲式、修正六甲式は、PGA に関係する項と、関係しない項の和である。PGA に関係しない項を、それぞれ「部分六甲式」、「部分修正六甲式」と呼ぶ。あらかじめ、小グリッドの全てのセルにおける部分六甲式の値を計算し、大グリッドの全てのセルにおいて、「大グリッドのセルに含まれる小グリッドの部分六甲式の値」のヒストグラムを作成する。地震発生時には、大グリッドの部分六甲式のヒストグラムと各階級の代表値を用いて、六甲式等のヒストグラムを計算する。この計算は、大グリッド単位で実行するため、小グリッド単位の計算と比較し、大幅に計算量を削減することができる。なお、ヒストグラムの代表値は、部分六甲式の値であるが、対応する部分修正六甲式の値も、容易に計算することができる。

危険度は、小グリッドの各セルの修正六甲式等 (の階級ごとの代表値) を G_i とすると、 G_i が0以上の小グリッドの割合で評価する方法 (以下、「個数」と表記) と、 $\max(G_i, 0)$ の大グリッド内の平均値を用いて評価する方法 (以下、「平均」と表記) を試みた。経験的に、「個数」の場合には0.2, 0.4, 0.6, 0.8を境界とした等差的な分級、「平均」の場合には0.2, 0.4, 0.8, 1.6を境界とした等比的な分級を採用し、0～4の5段階に

分級した。

6. 過去の地震の推計震度分布図への適用結果

前章までに述べた手法を、推計震度分布図と、空中写真を用いた悉皆的な斜面崩壊の判読結果が存在する平成16年（2004年）新潟県中越地震、福岡県西方沖の地震（2005年3月20日）、平成19年（2007年）能登半島地震、平成19年（2007年）新潟県中越沖地震、平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震に適用した。なお、大グリッドは、福岡県西方沖の地震、岩手・宮城内陸地震では250m、他の地震では500mであった。

まず、能登半島地震において、六甲式と修正六甲式を、直接比較可能な「個数」を用いて比較した（図2（a-1）、（a-2）；凡例は同図(e)に示す）。その結果、六甲式は、震度が小さく傾斜が大きい北アルプス周辺で崩壊を過大に予想しているが、修正六甲式では改善されていることがわかる。

次に、同地震で、修正六甲式の「個数」と「平均」を比較した（図2（a-3）、（a-4））。「個数」は、修正六甲式が崩壊と判別する基準が安全側によりすぎている場合、ほとんどの小グリッドを危険と判断し、それ以上の情報が得られなくなる。図2（a-3）では、小グリッドの80%以上が崩壊すると判断した大グリッドが広い範囲を占め、このような事態が発生している可能性がある。一方、「平均」を用いると、このような恐れはないため、危険性を予想するという本研究の目的に適している。

以上の結果と考察から、修正六甲式の「平均」を用いることにした。なお、推計震度分布図には、計測震度3.5未満のデータは含まれないため、この部分は無条件に危険度を0とした。

修正六甲式の「平均」による各地震の予想結果を図2（b）～（f）に示す。これらの図には、悉皆的な写真判読で得られた崩壊箇所（国土地理院、2004、2005、2007、2008；佐藤ほか2007）と、概略の判読範囲を重ね合わせている。ここで、中越地震では、地すべりが多発しているが、写真判読では地すべりと斜面崩壊を区別していないため、地すべりがほとんど含まれていない「崩壊（小）」に分類されているデータのみを用いた。能登半島地震の判読範囲外の2点は、衛星画像の判読によるものである。中越沖地震では「斜面崩壊地」と「切

土地・盛土地の被害箇所」とを区別しているが、「斜面崩壊地」のみを掲載している。なお「切土地・盛土地の被害箇所」は、予想結果ではほとんど危険とされていない。

図2を見ると、判読範囲内においては、危険度が高い部分で崩壊が多発しており、予想結果はほぼ妥当であると判断する。すなわち、崩壊の分布は、中越地震においては、危険度が4と3の部分にはほぼ限られ、かつ4の方がより密である。能登半島地震においては、危険度が3と4の部分にはほぼ限られている。福岡県西方の地震、岩手宮城内陸地震では、判読範囲内には危険度4が存在しないが、崩壊は、危険度1～3の場所に偏って発生している。中越沖地震においては、先の「切土地・盛土地の被害箇所」を見逃しているほか、砂丘の縁辺部の崩壊、海岸線の崩壊を過少に予想している。これらは、いずれも狭い帯状の急傾斜地である。悉皆的な調査ではないが、東北地方太平洋沖地震においても、同様の事例が見られた。本研究では、大グリッド内のヒストグラムをとったため、このような狭い帯状の急傾斜地の崩壊を予想しにくいと考えられる。

一方、岩手・宮城内陸地震においては、斜面崩壊が多発している判読範囲より、その南側をより危険と予想しており、最も危険とした位置がずれている。推計震度は、判読範囲では概ね5強、その南側では最大6強であった。判読範囲とその周辺には推計震度分布図の計算に使用される震度計は配置されていないが、判読範囲内にあるKiK-netの観測点「一関西」の震度は6強と評価されている（青井・森川、2009）。

また、福岡県西方沖の地震では、斜面崩壊が多発した玄界島より、被害がほとんどなかった加唐島の方をより危険と予想している。推計震度は、玄界島では5弱、加唐島では5強であった。両島には、震度計は設置されていなかった。

以上の事実から、このずれの主要な原因は、震源近くの被害が最も大きかった場所の周辺に推計震度分布図の計算に利用可能な震度計が存在しなかったため、推計震度分布が震度を過小評価していることにある。この問題には、震源からの距離による震度の減衰式を併用する対策が考えられる。

斜面崩壊の予想の計算自体は、5秒程度で終了した。前処理、地すべりと地盤の液状化の予想、地図としての描画を含めた全体の処理時間は3分程度であった。従って、処理時間上の問題はない。

図2 過去の地震の斜面崩壊の予想結果と、空中写真の悉皆的判読による斜面崩壊の位置（黒印）と概略の判読範囲（黒枠）

7. 結 論

より広い範囲の地表最大加速度に対応するよう六甲式を修正し、推計震度分布図の推計震度をもとに斜面崩壊を予想するシステムを作成し、実時間で運用可能なことを確認した。このシステムを、既存地震に適用し、悉皆的な空中写真判読による崩壊箇所と比較したところ、人工斜面等の狭い帯状の急傾斜地を除き、予想結果は、判読範囲内ではほぼ妥当であった。一方、岩手・宮城内陸地震等においては、崩壊が多発している判読範囲より、その外側の方がより危険と予想した。この主要な原因は、震度計の配置密度の不足である。

謝 辞

国土技術政策総合研究所の富田陽子氏（現所属は北陸地方整備局神通川水系砂防事務所）からは、六甲式の利用方法に関する助言をいただいた。気象庁地震火山部からは、過去の地震の推計震度分布図のデータをいただいた。国土地理院の今給黎哲郎氏には M_w の推定に関する助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

（受付日2012.10.15，受理日2012.11.9）

参考文献

- 青井 真・森川信之，2009，2008年岩手・宮城内陸地震の KiK-net 一関西における 4 g の強震記録，日本地震工学会誌，9，pp.20-24.
- 内田太郎・片岡正次郎・岩男忠明・松尾 修・寺田秀樹・中野泰雄・杉浦信夫・小山内信智，2004，地震による斜面崩壊の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第204号.
- 神谷 泉・小荒井衛・乙井康成・中埜貴元，2012，地震発生直後における被害の予想，日本地球惑星科学連合2012年大会，HSC24-P07.
- 国土地理院，2004，平成16年新潟県中越地震 1:25,000 災害状況図，国土地理院技術資料 D・1-No. 451.
- 国土地理院，2005，「福岡県西方沖を震源とする地震」災害状況図。
<http://zgate.gsi.go.jp/fukuokajishin/> (accessed 25 Sep. 2012)
- 国土地理院，2007，平成19年（2007年）新潟県中越沖地震災害状況図。
<http://www1.gsi.go.jp/geowww/saigaikiroku/0707-chuetsuoki/map/index.html> (accessed 25 Sep. 2012)
- 国土地理院，2008，平成20年（2008年）岩手・宮城内陸地震 1:25,000詳細活断層図（活断層・地形分類及び地形の変状），国土地理院技術資料，D・1-No. 541.
- 佐藤 浩・宇根 寛・小沢慎三郎，2007，平成19年（2007年）能登半島地震による斜面崩壊の地形的特徴の GIS 解析，国土地理院時報，113，pp.55-63.
- 損害保険料率算出機構(2012)．全国を対象とした地震時の斜面崩壊危険度評価手法に関する研究，地震保険研究，24.
- 武村雅之，1990，日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震第2輯，43，pp.257-265.
- 中央防災会議(2001)．東海地震に関する専門調査会(第10回) 資料4．
<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/tokai/10/siryoku4.pdf> (accessed 7 Nov. 2012)
- 富田陽子・桂 真也・小山内信智・戸村健太郎・高山陶子・中島達也・岡野和行・原田美鈴（2010）．地震による斜面崩壊危険度評価判別式」の岩手・宮城内陸地震への適用について，平成22年度砂防学会研究発表会概要集，572-573.
- 永井 章，2001，面的震度分布情報の発表について，なるふる，28，pp.4-5.
- 中村孝明・岡田和明・本間直樹（1997）．統計的手法による地震時斜面崩壊確率に関する研究，土木学会論文集，570/I-40，72-78.
- 藤本一雄・翠川三郎，2010，マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係式，日本地震工学会論文集，10(2)，pp.1-11.
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・石井 透・早川 譲・功刀 卓・神野達夫・森川信之・小林京子・原 温子，2002，確率論的地震動予測値図作成手法の検討と試作例，防災科学技術研究所研究資料，第236号.
- 松岡昌志・翠川三郎，1993，国土数値情報を利用した広域震度分布予測，日本建築学会構造系論文報告集，447，51-56.