

大成建設 正会員 下野正人 大成建設 正会員 大矢敏雄
 篠塚研究所 正会員 中村孝明 京都大学 正会員 大津宏康

1. はじめに

地震による斜面崩壊は、地震動はもとより、地質や地形などに含まれる様々な要因が混在して発生すると考えられる。現状では、これらの要因については、関与の程度もばらつき量についても未解明な部分が多く、個々の要因の関与を数学モデルで記述するのは困難である。従って、崩壊事例から崩壊確率を統計的に評価することが一つの有効な手段となる。

中村ら¹⁾は、最尤法を用い、過去の崩壊記録から地震動の大きさに応じた斜面崩壊確率 (Fragility Curve; F.C.) を推定する方法を示している。しかし、比高 (対象地域の最高点と最低点の高度差) は連続量であるにもかかわらず段階的に扱っていること、他の要因について検討が十分なされていないこと、などが指摘できる。そこで、本研究では、斜面崩壊に関与する要因のうち、地震動や比高のような連続量として扱えるものについて、直接その影響を崩壊確率に反映させる方法を示し、地質や地形などの他の要因についてもその取り扱いについて検討を行った。さらに、適用性の検討として、中村らと同様に伊豆に発生した2つの地震による崩壊記録を用いて伊豆地域の斜面崩壊確率の推定を行った。

2. 斜面崩壊確率の評価方法

事象の生起に関する要因が多数で、かつ、複雑な場合、半ば経験的な観点から回帰解析的な方法によって事象の発生可能性を評価することが一案としてある。多重ロジスティックモデル、あるいはプロビットモデルと呼ばれる多変量解析の一手法がこれに対応する。この場合、関与すると考えられる要因を線形和の形で取り込み、最小2乗法や最尤法などにより、要因の未定係数を求める問題を考えればよい。本研究では、プロビットモデルに基づき、過去の崩壊記録から斜面の崩壊確率を最尤法により推定する方法を検討した。以下に具体的に示す。

地震時の崩壊確率 $F(x_1, x_2)$ が標準正規確率分布関数を用いて以下のように表わされると仮定する。

$$F(x_1, x_2) = \Phi(Z^*) \quad (1)$$

$F(x_1, x_2)$ は、作用加速度 x_1 、比高 x_2 が与えられた際の条件付の崩壊確率を示す。

ここで、 Z^* は作用加速度および比高の2つの確率変数を線形和の形で持つ関数を考え、以下のように仮定する。

$$Z^* = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \quad (2)$$

X_1 : 基盤最大加速度、 X_2 : 比高、 β_0 、 β_1 、 β_2 : 未定係数である。なお、連続量として取り扱えない他の要因については、要因毎の F.C. を算定することで対処する。詳細は3.に示す。

崩壊確率は(2)式を(1)式に代入することにより以下のように表される。

$$F(x_1, x_2) = \Phi(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2) \quad (3)$$

これから、尤度関数は次式で表わすことができる。

$$L(\beta_0, \beta_1, \beta_2) = \prod_{i=1}^n \Phi(\beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i})^{q_i} (1 - \Phi(\beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i}))^{1-q_i} \quad (4)$$

ここで、 n はデータサンプル数を示す。 q_i は崩壊している場合は1、そうでない場合は0を与える2値関数である。(4)式より、未定係数 β_0 、 β_1 、 β_2 は、尤度 L を最大にする値として求められる。

未定係数 β_0 、 β_1 、 β_2 と加速度による F.C. のパラメータ (μ_1 、 σ_1 : 平均値、標準偏差) は次のように関係付けられる。

$$\beta_1 = 1/\sigma_1, \beta_0 + \beta_2 x_2 = -\mu_1/\sigma_1 \quad (5)$$

以上により、加速度をパラメータとした斜面崩壊の F.C. は、比高 x_2 が与えられた場合の条件付として表現することができる。

また、確率変数を $\ln(X_1)$ 、 $\ln(X_2)$ と置き、log 軸上に分布する変数に置き換えることで、崩壊確率を対数正規分布で表わすことができる。

$$Z^* = \beta_0 + \beta_1 \ln(X_1) + \beta_2 \ln(X_2) \quad (6)$$

この場合、未定係数である β_0 、 β_1 、 β_2 と F.C. パラメータ (λ_1 、 ζ_1 : 中央値、対数標準偏差) は次のように関係付けられる。

$$\beta_1 = 1/\zeta_1, \beta_0 + \beta_2 \ln(x_2) = -\lambda_1/\zeta_1 \quad (7)$$

キーワード: 地震、斜面崩壊、統計手法、最尤法

連絡先 東京都新宿区西新宿1-25-1 TEL:03-5381-5289 FAX:03-3345-1914

3. 伊豆地域の崩壊危険度の推定

本手法の適用性を検討するため、伊豆に発生した 2 つの地震（伊豆半島沖地震：1974、伊豆大島近海地震：1978）による崩壊記録を用い、伊豆地域の斜面崩壊確率を推定した。

1) 危険度要因と分類

斜面は地形や地質等の要因によって崩壊の危険性の度合い（危険度）が異なるため、これら連続量としての取り扱いが困難な要因については、対象地域を危険度によって分類し、それぞれの地域での崩壊記録に基づいて危険度毎の F.C.を推定することで対処する。具体的に本研究では、伊豆半島の中南部地域を500×500mのメッシュに分割し、メッシュ毎に危険度の分類評価を行った。ここで、危険度要因としては、地質、地形、植生、断層の有無など様々なもの考えられるが、今回は、このうちの地質、水系の2つに着目した。地質は地山の強度を表し、水系は地形、風化の程度に関連する指標と考えた。

伊豆地域における地質および水系の分類は、地質については伊豆地域の特徴を踏まえて、軽石、洪積層、軟岩、硬岩の4分類とし、水系は海岸を含む地域、河川を含む地域、その他の地域の3分類とした。これらの分類に従って崩壊情報を整理した結果を表-1に示す。対象とした伊豆中南部では特に岩盤斜面が多いことが分かる。

表-1 メッシュ分類結果

			水系分類			
			1 その他	2 河川	3 海岸	合計
地	1	崩壊数	10	3	3	16
	軽石	全体数	34	22	7	63
質	2	崩壊数	5	3	4	12
	洪積	全体数	43	18	8	69
分	3	崩壊数	163	120	17	300
	軟岩	全体数	1184	674	122	1980
類	4	崩壊数	89	25	14	128
	硬岩	全体数	743	209	38	990
合計		崩壊数	267	151	38	456
		全体数	2004	923	175	3102

2) フラジリティカーブの算定

統計的評価の信頼度はデータ量に依存するため、本検討では、比較的データの多い「軟岩-その他」に分類された地域における F.C.の推定を行った。推定結果を図-1に示す。

なお、F.C.算定の際の関数 Z^* は、①斜面崩壊確率は、加速度、比高に比例して大きくなると予想できること、②加速度0では崩壊確率が0になると考えられること、③比高0では崩壊確率が0に近いと思われることから、（6）式に示した加速度および比高に対数を取ったものを用いた。

図-2および図-3に、推定F.C.と崩壊事例との比較を示した（●は崩壊事例からプロットした崩壊率）。図より本手法により推定されたF.C.が崩壊事例と比較的よく整合していることが分かる。

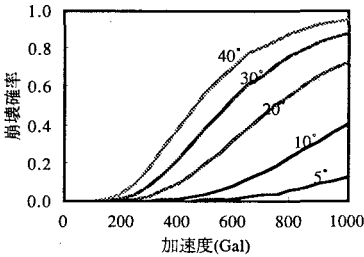


図-1 フラジリティカーブ推定結果

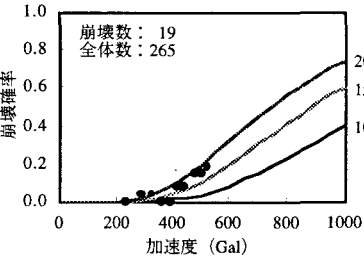


図-2 崩壊事例との比較（比高角10～20°）

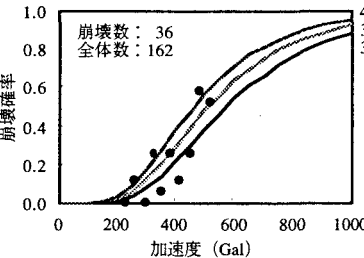


図-3 崩壊事例との比較（比高角30～40°）

参考文献 1) 中村孝明、岡田和明、本間直樹：統計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，NO.570/I-1，pp.73-82，1997.7