

統計手法による地震時斜面崩壊確率 に関する研究

中村孝明¹・岡田和明²・本間直樹³

¹正会員 工博 株式会社篠塚研究所 主任研究員 (〒160 東京都新宿区新宿 6-26-4 JMビル)

²正会員 東京電力株式会社 工務部主任 (〒100 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

³非会員 大成建設株式会社 土木設計第一部課長 (〒163-06 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

統計的評価手法の一つである最尤法を使い、地震動の大きさに応じた斜面崩壊確率を推定できる Fragility Curve (F.C.) を求めた。地形図から読み取れる簡便且つ機械的な方法を使い、斜面の崩壊危険度を3段階に分類し、危険度ごと個別にF.C. を評価した。統計情報については、伊豆に発生した2つの地震(伊豆大島近海地震; 1978, 伊豆半島沖地震; 1974)による崩壊記録を使った。そして、評価手法の適用性や危険度分類の際の要因の寄与度について検討を行った。

KeyWords : *earthquake slope failure, failure probability, fragility curves, large region risks, best likelihood method*

1. はじめに

国土の7割を山地が占める我が国では、地震や豪雨を原因とする斜面崩壊が頻繁に発生し、人命や財産を奪う我が国特有の自然災害として、その危険性が古くから憂慮されている。特に、鉄道や道路、送電や通信など、ライフライン施設は山間域を有機的に広がっており、施設によっては、一カ所の斜面崩壊でその機能が失われ、社会生活に甚大な影響を及ぼすことがある。このため、斜面崩壊に対する対策工や崩壊の予知に関する研究が精力的に行われている。予知^{1)~3)}については、潜在的な危険度要因を地形や地質等から判読し、要因の寄与度を重みとして、危険度の優劣を点数やクラスで表示するのが主流である。地方自治体^{4), 5)}では、予知情報に住居の有無を勘案し、斜面崩壊による被害を量的に評価している。また、マグニチュードと崩壊が発生した限界の震央距離との関係を明らかにした研究⁶⁾もある。一方、崩壊の可能性を確率^{7), 8)}で記述する試みも行われている。確率で示すことは、危険性を定量化したことに同意であり、被害想定や地震リスクマネジメント⁹⁾、対策の費用対効果の検討など、防災を目的とした様々な対策策定の判断情報として、その利用価値は極めて高い。

斜面崩壊は様々な不確定要因が混在して発生する

と考えられる。個々の要因の関与を数学モデルで記述し、要因の不確定性やばらつきを量的に示すことができれば、信頼性理論に基づき崩壊確率の推定は可能となる。しかし現状では、要因の関与もばらつき量についても未解明な部分が多く、数学モデルで記述するのは困難である。従って、崩壊事例から統計的に評価することが有効な手段となる。

本研究は、a) 地震動の大きさに応じた斜面崩壊確率の評価方法、b) 崩壊確率の統計的評価方法の整備、c) 崩壊確率を使った広域施設の地震危険度の定量的評価、d) 防災対策における確率情報の効果的な利用方法、等の提案を目的とする。本論では、a), b) に相当する斜面崩壊の発生確率の評価方法、ならびに統計手法について示し、伊豆に発生した2つの地震(伊豆大島近海地震; 1978, 伊豆半島沖地震; 1974)の崩壊記録を使い、評価手法の適用性の検討と共に、崩壊確率の推定を試みる。

2. 斜面崩壊確率の評価方法

斜面崩壊は地震動の大きさ、即ち作用加速度に依存するものと考えられる。また、斜面は固有の耐力を持ち、その耐力はばらつきを持つ確率変数 R で代表できると仮定する。 R を抵抗加速度と呼ぶ。作用加速度は、対象地点で観測される水平最大

加速度とし、適当な距離減衰式から推定する。距離減衰式は誤差を含むため、推定された作用加速度は確率変数として扱い、これをAと置く。斜面崩壊は抵抗加速度Rを作用加速度Aが越えた場合に発生すると考えることができ、信頼性理論^{10), 11)}より、崩壊確率 P_f は次式のように求められる。

$$P_f = P(R < A) = P(X < 1.0) \quad (1)$$

ここに、 $X = R/A$ である。距離減衰式の誤差は、通常対数正規分布で表される。抵抗加速度についても、ここでは対数正規分布で近似できるものと仮定する。R, Aが共に独立である場合、Xも対数正規分布で表すことができる。

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda_m}{\zeta}\right)^2\right] \quad (2)$$

ここに、 λ 、 ζ は確率分布の中央値、対数標準偏差を表し、次式で表される。

$$\lambda_m = \ln r_m - \ln a_m \quad (3)$$

$$\zeta = \sqrt{\ln\left\{\left(1 + \delta_r^2\right)\left(1 + \delta_a^2\right)\right\}} \quad (4)$$

ここに、 a_m 、 r_m は作用加速度、抵抗加速度の中央値、 δ_a 、 δ_r はそれぞれの変動係数を表す。ここで、確率変数を $z = xa_m$ と置き換え、 $0 \sim a_m$ までの積分を行うと斜面の崩壊確率は次の様に求められる。

$$F_z(a_m) = \int_0^{a_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \ln r_m}{\zeta}\right)^2\right] dz \quad (5)$$

上式は、作用加速度の中央値 a_m が与えられた際の条件付きの崩壊確率を表す。横軸に作用加速度、縦軸に崩壊確率をとると、斜面の崩壊度曲線(Fragility Curve; F.C.)が表現できる。図-1にR, Aの確率密度とFragility Curveの様子を概念的に示す。以下、F.C.と略記する。

抵抗加速度は、斜面の潜在的な耐力に相当するが、これまで加速度で代表するような斜面耐力についての研究はなく、崩壊確率として捉えた研究例^{7), 8)}も少ない。これにより、抵抗加速度に関する事前の情報はなく、確率分布のパラメータを未知とした推定問題を考えなくてはならない。抵抗加速度のパラメータが分れば、F.C.は容易に描くことができ、

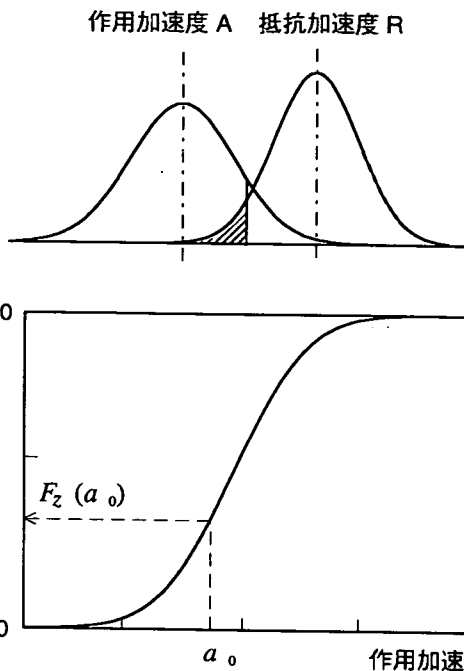


図-1 作用と耐力の確率密度関数とF.C.

加速度に依存した崩壊確率を求めることができる。

本論では、抵抗加速度の確率分布パラメータ(r_m , δ_r)を統計的に推定し、斜面崩壊のF.C.を求める。ここで、作用加速度については安中ら¹²⁾の距離減衰式を使う。また、山間域は表土はあるものの、硬質の岩が露呈していると考えられることから、表層の地盤増幅効果は考慮しないこととする。

3. 統計的アプローチ

観測データから確率情報(平均値、標準偏差など)を推定する方法は、統計的推定手法と称され一般化されている。そこでは正規分布や極値分布など、既往の分布モデルへの当てはめが行われ、確率分布のパラメータ推定が統計的推定手法の実態となっている。統計に使われる観測データ(サンプル)は、母集団からの無作為抽出でなければならず、サンプルが母集団を代表しているか、偏った情報ではないか、など事前の検討が重要となる。

(1) 最尤法

確率分布のパラメータ推定方法の一つに最尤法がある。一般的に使われている最尤法は、可測軸上に分布しているサンプルを対象としている。しかし、斜面の崩壊事例から得られる情報は、崩壊したか否かの2値情報であり、可測軸を持たない。このよう

な情報を対象とした最尤法¹³⁾は、観測結果が1つの状態をとる場合を0、もう一方の状態をとる場合を1とするダミー変数で表し、1となる確率を統計的に求める問題に帰着できる。以下、斜面崩壊問題に準じてパラメータ推定の方法を説明する。

地震後、無作為に選ばれた斜面が n 箇所あり、それぞれ崩壊した、しない、の2価の結果が観測されているとする。また、作用加速度の中央値、変動係数についても適当な距離減衰式を使うことで得られているものとする。これら観測結果が実現する確からしさが最大となる抵抗加速度の中央値 r_m ならびに変動係数 δ_r を算定すればよい。尤度関数は以下のように表現できる。

$$L(a_{mi}; r_m, \delta_r) = \prod_{i=1}^n F_Z(a_{mi}; r_m, \delta_r)^{q_i} \cdot (1 - F_Z(a_{mi}; r_m, \delta_r))^{1-q_i} \quad (6)$$

式中 q_i は、崩壊していた場合1、崩壊していない場合0、を与える2価関数である。通常は、尤度関数を r_m ならびに δ_r で微分し0と置き、これらを未知数とする連立方程式を解けばよい。しかし、式(6)には陽に解くことのできない積分が含まれているため、尤度 $L(\)$ が最大となる r_m 、 δ_r を数値解析的に求めなくてはならない。また、式(6)は積で表現されているため、尤度が過小となることが予想され、数値解析上のけた落ちが懸念される。そこで対数を取り、和の形に変形する。

$$\ln L(a_{mi}; r_m, \delta_r) = \sum_{i=1}^n \left\{ q_i \ln F_Z(a_{mi}; r_m, \delta_r) + (1 - q_i) \ln [1 - F_Z(a_{mi}; r_m, \delta_r)] \right\} \quad (7)$$

求めるパラメータは2つあるため、最初に δ_r を仮定し、尤度が最大となる r_m を求める。次に求められた r_m を既知として尤度が最大となる δ_r を求める。この作業を r_m 、 δ_r が収束するまで繰り返す。計算フローを図-2に示す。

一方、情報の如何によっては、中央値と変動係数、双方を推定することが困難な場合がある。これは、情報がある加速度に集中していたり、低い加速度と高い加速度に分散集中しているような、情報が稠密な場合で、解は発散してしまう。本来であれば、情報は低い加速度から高い加速度まで広く散らばっているのが理想的であるが、解析にとって都合の良い情報は稀である。情報が偏っている場合の対処方法

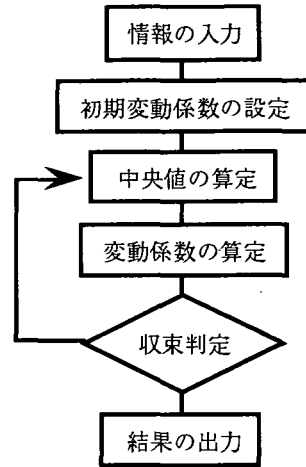


図-2 最尤推定のフロー

としては、一つの未知量を既知として与え、もう一つのパラメータを推定することにする。

(2) 数値計算例

適用性の検討として仮定の数値を使い、最尤法による抵抗加速度のパラメータ推定を試みる。情報として、作用加速度の中央値が200Galで5箇所中1箇所、400Galで7箇所中3箇所、500Galで5箇所中4箇所、が崩壊していた場合を想定する。これを式(6)に適用すると尤度は次のようになる。

$$L(\) = F_Z(200)^1 (1 - F_Z(200))^4 \cdot F_Z(400)^3 (1 - F_Z(400))^4 \cdot F_Z(500)^4 (1 - F_Z(500))^1 \quad (8)$$

ここで、作用加速度の変動係数 $\delta_a = 0.4$ 、抵抗加速度の初期の変動係数 $\delta_r = 0.4$ とする。計算の結果、抵抗加速度の中央値 $r_m = 372\text{Gal}$ 、変動係数 $\delta_r = 0.54$ となった。F.C.を図-3に示す。横軸は作用加速度の中央値に当たる。同図に記述統計で示される各作用加速度での崩壊頻度を比較して示す。F.C.との一致は良く、崩壊情報がF.C.に効果的に反映されていることが分かる。

ここで示した最尤法は、異なる作用加速度を受けた崩壊情報を統一的に扱いF.C.を直接推定していること、崩壊したか否かの2価情報を対象としていること、作用加速度のばらつきを評価に含めていること、などが特徴として挙げられる。斜面崩壊に限らず、様々な構造物のF.C.を震害事例などから推定する場合、上記の方法は簡便且つ有効である。

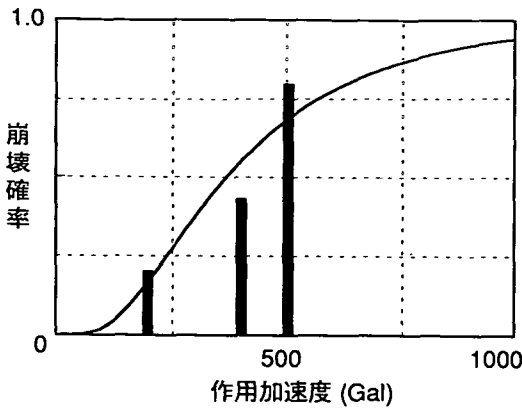


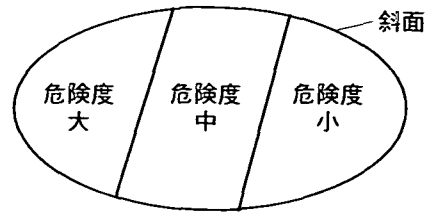
図-3 F.C.と崩壊頻度の比較

4. 統計評価の基本方針と方法

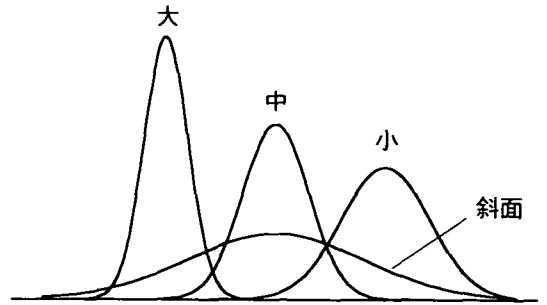
(1) 統計的母集団と危険度

斜面崩壊は必然性に基づいており、ランダムにどこにでも起こるというわけではない。即ち、地形や地質等によって崩壊の危険性の度合いは異なる。これを危険度と定義する。危険度の判別要因は、傾斜角、斜面形状、地質、地形、植生、断層の有無などが挙げられ、素因子と呼ばれている。素因子による危険度分類が可能な場合、危険度ごとに抵抗加速度は異なることとなり、パラメータ評価は個別に行う必要がある。統計的に概説すると、斜面という大きな母集団は、危険度ごとに異なった母集団として細分化され、それぞれ混在し合うことはない。図-4(a)にその様子を示す。同図(b)は、斜面という大きな集団と分類された各危険度の抵抗加速度を、確率分布として概念的に表現したものである。危険度によって分けられた各分布は、危険度の段階ごとに差を持って分け、大きな母集団に比べそのばらつきは減少する。危険度分類が妥当である場合、この傾向は顕著となる。同図(c)は、危険度ごとのF.C.を概念的に描いたものである。図中破線は、作用加速度を設定した場合の条件付の崩壊確率を表している。確率は危険度によってそれぞれ明瞭な差が現われる。次に、危険度の分類数、即ち段階分けをどの程度にすべきかという問題について考える。より詳細な評価を目指すには、危険度の分類数を多くする方がよい。しかし、一般的な推奨値があるわけではなく、分類の妥当性や情報の有無や精度、更に利用方法や利便性と言った観点からも捉える必要がある。本研究では3段階程度が適当であると判断し、3段階の危険度分類を目指すこととする。

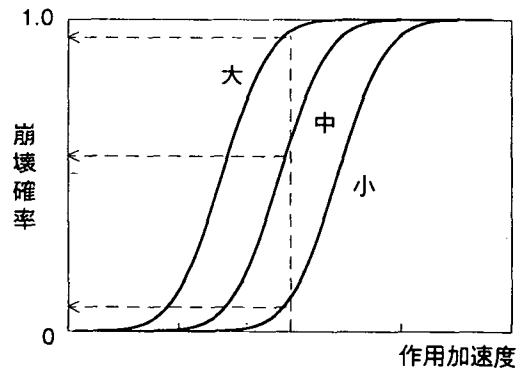
一方、危険度分類の定義や方法は様々であるが、



(a) 斜面集団の危険度による細分化



(b) 危険度の違いによる抵抗加速度の分布



(c) 危険度の違いによるFragility Curve

図-4 統計的母集団と危険度の分類

人的判断を必要とするような分類方法は好ましくない。この理由は、人による判断には個人差があり、これがばらつきとなって現われ、母集団の持つ本来のばらつきが明らかとならないからである。判断の個人差を排除するためには、だれが分類しても同じ結果となるような機械的な分類方法が必要となる。

(2) 統計評価とメッシュ分割

統計的評価では、崩壊した斜面情報に加え、大きな加速度を受けたにも関わらず崩壊しなかった斜面の情報が重要となる。しかし、斜面は連なって存在しているため、健全であった斜面箇所をどのように

特定するかという悩ましい問題がある。これは崩壊した斜面についても言える。そこで、対象領域を広域的に設定し、ある大きさのメッシュに洩れがないように分割する。そして、メッシュごとに崩壊した箇所が1箇所以上あったか、なかったかを判読する。これにより、崩壊しなかった斜面を含めた整合性のとれた統計評価が可能となる。

メッシュの大きさについては、特殊な崩壊を除き、大規模な崩壊が一つのメッシュに十分納まる程度を目安に、また、危険度分類での労力を勘案し、500mメッシュとした。丸めた数字にしたのは、広域的な地震危険度評価^{4), 5)}では、500mメッシュを採用している例が多く、一般的に受け入れやすいと考えたからである。

(3) 危険度要因と分類方法

危険度を評価する場合、地形、地質図あるいは現地調査などから、様々な情報を必要とする。しかし、広域的な危険度評価を目指す場合、現地調査は労力的に困難であり、既存の地形、地質図より判断するのが順当である。地形図は特に入手が容易であり、本論では、国土地理院から出されている1/2万5千の地形図を使い、各メッシュの危険度分類を行う。

地震時に不安定になり易い斜面は次のような特徴があると推察される。a) 岩質が脆く侵食されやすい、b) 起伏量大きい(斜面傾斜角が大きい)、c) 断層(リニアメント)や破碎帯などが存在する、d) 過去に崩壊している、等である。c)、d)は地形図から読み取る場合人的判断を必要とするため、ここでは省くこととする。a)の場合、地層や岩質の硬さ・脆さは、透水性の反映と見ることができ、水系の発達頻度、いわゆる「水系密度」で表現できる。地山が軟質で脆く、侵食が進行しつつあるところほど沢(水系)が密に発達しているものと考えられる。b)では、起伏している地形表面の不安定さをその斜面の傾斜角度で表現するものである。方法として、メッシュ内における相対的高度差(最高点と最低点との高度差:比高)、即ち起伏の度合いを量的に示すものである。起伏が大きいほどその区域の地形はそそり立ち、高度差による重力ポテンシャルが大きく働く。斜面傾斜角度が30°以上になると斜面地山は不安定になるという報告がある。

以上より、斜面崩壊に影響を及ぼす要因として、「水系密度」、「斜面傾斜角度」の2つに注目する。崩壊要因としての妥当性を検討する目的から、それぞれの要因を5段階の危険度レベルに分類する。分類方法を図-5に示す。そして、それぞれの寄与度を重みとして各危険度に乗じ、基準化した後、最終的

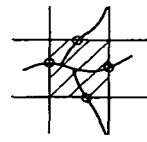
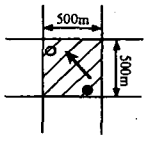
危険度レベル	水系密度	斜面傾斜角度
1	 メッシュとの交点数 0 ~ 9	 (メッシュ内最高標高- 最低標高)/2点間距離 0° ~ 9°
2	10 ~ 14	10 ~ 19°
3	15 ~ 19	20 ~ 29°
4	20 ~ 24	30 ~ 39°
5	25 以上	40° 以上

図-5 危険度レベルの分類方法

な3段階の危険度分類を行う。

(4) Fragility Curve の評価手順

F.C.の評価に必要な作業手順をまとめると、a)対象領域を500mのメッシュに細分化し、メッシュごとに危険度の分類評価を行う、b)メッシュの中央点で観測される水平最大加速度を推定する、c)メッシュ内で1箇所以上崩壊していたか否かの情報を危険度ごとに分類整理し、d)危険度ごとに最尤法に適用する、となる。崩壊していたか否かは、崩壊規模の大小に関わらずカウントする。

5. 崩壊確率の推定

崩壊確率推定に際し、伊豆に発生した2つの地震(伊豆半島沖地震、伊豆大島近海地震)による崩壊記録¹⁴⁾を使う。その理由は、2つの地震による崩壊記録が精度よく整っており、統計情報としての条件を満足していると判断したからである。しかし、本震と余震による崩壊の分別はできず、全て本震による崩壊と見なした。

(1) 伊豆に発生した2つの地震

伊豆半島沖地震¹⁵⁾は、1974年5月9日に発生した。震央は石廊崎の南西5kmで、震源の深さは10km、マグニチュードは6.9であった。この地震の断層は、北西-南東方向に走向し北東に傾斜する面

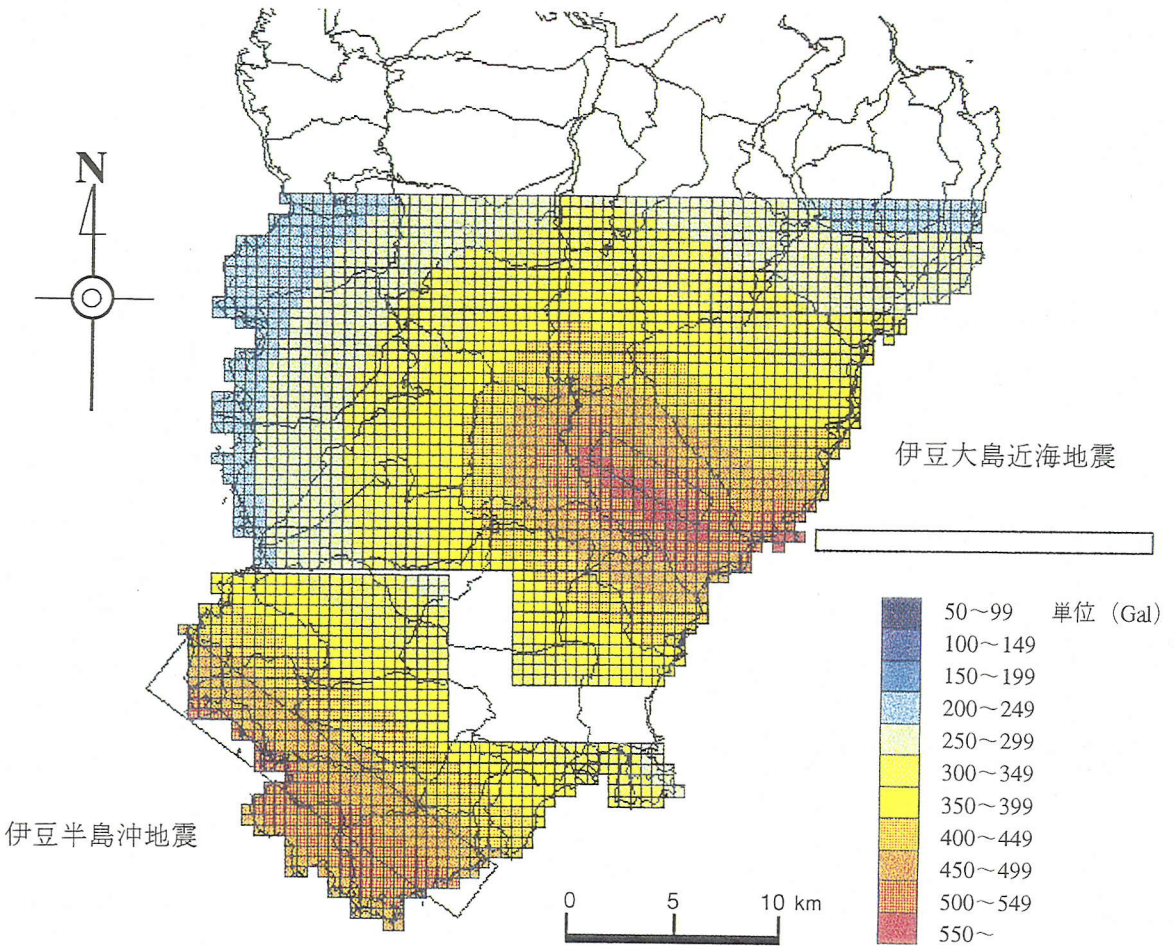


図-6 地震断層位置とメッシュ分割, 推定最大化速度分布

の右横ずれ断層であったと推測される。一方、1978年1月14日に発生した伊豆大島近海地震¹⁵⁾は、震央が伊豆大島の西約10kmで、震源の深さは0km、マグニチュードは7.0であった。この地震の主断層は、伊豆半島の稲取へ東西方向にのびる、ほぼ垂直に北に傾斜した断層面の右横ずれ断層であったが、更に稲取から伊豆半島内を北西に向かう副次的な断層があった。

図-6に、2つの地震の断層位置とそれぞれの地震を対象とした500mメッシュの分割の様子を示す。図には、各メッシュの中央点で推定される水平最大加速度の大きさの色別分類も併記している。図中上部のメッシュ群が伊豆大島近海地震、下部が伊豆半島沖地震を対象としたものである。対象範囲については、200Gal程度が崩壊の下限値であるとの報告¹⁾を参考にした。それぞれメッシュ数は伊豆大島近海地震2327個、伊豆半島沖地震783個である。同様

のメッシュを伊豆地方の地形図(1/2万5千)に重ね、メッシュごとに、図-5に示す危険度分類方法に従って、各メッシュの危険度を分類整理する。また、崩壊記録の明記されている地図¹⁴⁾にメッシュを重ね、1箇所以上崩壊したか否かを拾う。

ここで、推定加速度について、国井ら¹⁶⁾による断層線からの距離と加速度の関係との比較を行った結果、本推定は多少大きめに評価するものの、土建の式¹⁷⁾などの震央距離を対象とした距離減衰式に比べ、妥当な推定であると考えた。

(2) 危険度分類の整理方法

伊豆半島沖地震について、斜面傾斜角の危険度レベル3に相当する情報を抜粋したものを表-1に例示する。この表からは、例えば加速度レンジ350Gal~400Galに入るメッシュの数(サンプル数)が99個で、その内1箇所が崩壊していた、と読むことが

表-1 傾斜角危険度レベル3の崩壊情報
(伊豆半島沖地震)

サンプル数	崩壊箇所数	平均加速度 (Gal)	加速度レンジ (Gal)
0	0	0.0	200~250
9	0	290.5	250~300
76	0	328.0	300~350
99	1	374.9	350~400
82	5	424.9	400~450
64	10	476.6	450~500
42	8	509.0	500~550
0	0	0.0	550~600

できる。加速度のレンジ分けは、計算の簡略化を旨としたものである。加速度の下限と上限が、200Gal、600Galであるが、これは対象範囲で推定された加速度（距離減衰式から）の最大と最小から設定したものである。表中の平均加速度は、そのレンジの中にあるサンプルの加速度を平均化したものである。表の入力情報が要因ごと、危険度ごと、合計10組の統計情報として分類整理している。

(3) 加速度のレンジ分けと精度

加速度のレンジは、200Gal～600Galを50Galごとに8つに分けている。この分割を細かくすれば評価精度は向上するが、計算時間の増大が懸念される。そこで、表-1の情報を使い、分割数による評価精度について検討を行う。表の250Gal～550Galまでの6分割を基本とし、加速度レンジ（分割数）を変えて抵抗加速度の中央値推定を行い、推定値の真値への漸近状況を見る。その際、抵抗加速度および作用加速度の変動係数を便宜上0.4に固定した。

図-7に結果を示す。横軸は分割数で、縦軸は推定された抵抗加速度の中央値である。図より、分割を細かくすることで、真値に漸近していく様子が分る。また、分割数6（50Galきざみ）でも十分な精度であることが分る。

(4) 危険度要因の寄与度の検討

2つの要因（水系密度、傾斜角）が斜面崩壊の3段階の危険度分類に際し、妥当かどうかについて検

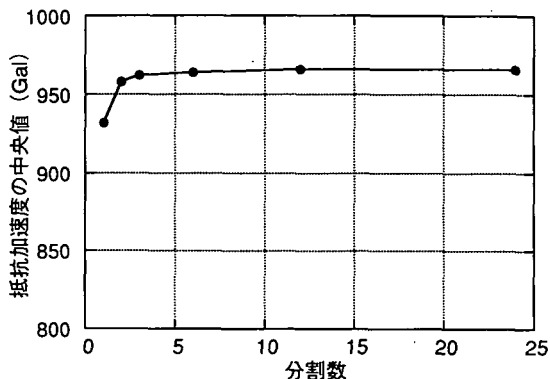


図-7 加速度のレンジ分けと抵抗加速度の中央値

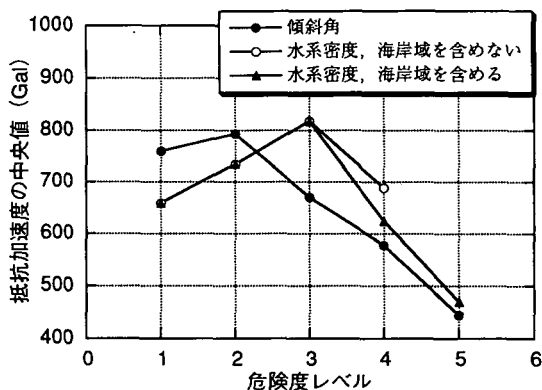


図-8 要因の危険度レベルと抵抗加速度の中央値

討を行う。図-8に、要因の危険度レベル（1～5）ごとに中央値推定を行った結果を示す。横軸は危険度レベル、縦軸は抵抗加速度の中央値である。危険度レベル1あるいは5では、要因によっては値が示されていない点がある。これは、その危険度レベルに類するデータがないか、あるいは崩壊した箇所がなかったためである。

図中●は斜面の傾斜角であり、危険度の高いレベル5へ向うに従い、中央値は下がる傾向が読み取れる。傾斜角が斜面崩壊の危険度評価において重要な要因であることが分る。水系密度については○と▲の2つで示している。この点について以下に解説する。評価対象とした伊豆半島は、海岸線が長く、また海岸域での斜面崩壊が特に目立つ。一方水系密度の調査では、その山域の侵食状況を知ることが目的で、メッシュ内での水系本数によって危険度の分類を行っている。しかし、海岸域については、風や波浪による侵食が甚だしいことが予想されるが、危険度分類の方法を定義していない。そこで、海岸域で

は危険度レベル5とし、海岸線より多少内陸に入ったメッシュについては、危険度レベル4とした。これは、多分に工学的判断が含まれることになり、人的な判断を含めないという前述の基本方針と相反する。そこで、海岸域を含めない場合についても示している。図中○に相当する。図より、海岸域を含めても含めない場合でもレベル3を頂点に山なりになっている。明瞭な依存関係を読み取ることは難しい。以上より、本論文では、危険度分類の要因として水系密度を除外し、斜面傾斜角のみを使うこととする。

ここで、水系密度を危険度要因から除外するものの、不適合と判断するのは時期早計である。様々な地震被害を取り込み多面的に検討することが重要である。

(5) Fragility Curve の評価

傾斜角の危険度分類を5段階から当初の目的である3段階に変える。その際、一般化を目指す上では丸めた数値が望ましいこと、また、急傾斜地崩壊危険箇所の指定⁵⁾や崩壊危険度評価³⁾では、傾斜角30°を分類の境にしていることを参考にし、危険度を小0~15°、中15°~30°、大30°以上の3段階に分類した。表-2に危険度ごとに分類整理された崩壊情報を示す。これら情報を最尤推定に適用し、抵抗加速度の中央値ならびに変動係数を推定する。推定結果は、危険度小が1000.0Gal, 0.63, 危険度中が699.0Gal, 0.41, 危険度大が531.0Gal, 0.31であった。ここで、サンプルの加速度の範囲は200Gal~600Galで、情報はこの範囲に集中している。このため、危険度小から見ると情報は稠密となり、中央値と変動係数を同時に収束させることができなかった。そこで、中央値を1000Galに固定し、変動係数を推定した。

最尤推定の検証として、危険度中のF.C.と加速度でレンジ分けした8つの崩壊頻度を棒グラフで比較する。図-9に示す。図中F.C.と加速度レンジ550~600Galの崩壊頻度には隔たりが見られる。この理由は、本論で示した最尤法は、各加速度レンジのサンプル数が重みとして反映される特徴を持つことから、サンプル数の少ないレンジ情報(550~600Galは34)は、サンプル数の多いレンジ情報に比べ、情報としての信頼度が相対的に低いと判断されることによる。このような特徴を勘案すると、崩壊情報がF.C.に的確に反映されていることが分る。図-10に危険度ごと3つのF.C.をまとめて示す。作用加速度を想定した場合の条件付確率は、危険度ごとに明瞭な差を持って評価されることが分る。ちなみに、作用加速度200Galでの各崩壊確率は、危険度小から0.0098,

表-2 危険度ごとの崩壊情報

	サンプル数	崩壊箇所数	平均加速度 (Gal)	加速度レンジ (Gal)	崩壊頻度
危険度小	31	1	237.2	200~250	0.03
	109	5	227.3	250~300	0.05
	70	5	319.7	300~350	0.07
	36	2	374.7	350~400	0.06
	34	3	424.6	400~450	0.09
	56	5	478.2	450~500	0.09
	43	6	516.5	500~550	0.14
	2	1	556.9	550~600	0.50
危険度中	155	4	236.7	200~250	0.03
	389	20	275.6	250~300	0.05
	424	42	325.7	300~350	0.10
	445	61	375.3	350~400	0.14
	352	49	424.1	400~450	0.14
	266	52	474.9	450~500	0.20
	185	65	517.0	500~550	0.35
	34	18	558.2	550~600	0.53
危険度大	42	1	234.9	200~250	0.02
	73	6	274.8	250~300	0.08
	96	22	323.4	300~350	0.23
	80	15	374.6	350~400	0.19
	64	10	426.2	400~450	0.16
	69	35	478.9	450~500	0.51
	51	28	512.6	500~550	0.55
	4	2	558.0	550~600	0.50

0.011, 0.0231であった。危険度小と中では、およそ100箇所中1箇所程度、危険度大では100箇所中2箇所程度の斜面崩壊が発生すると推定できる。200Galは崩壊の下限値と言われているが、崩壊確率1%~2%という値は妥当と思われる。

求められたF.C.は、斜面耐力を対数正規分布で仮定したこと、使われたサンプルは伊豆半島固有の情報であること、危険度の分類要因は傾斜角のみであること、などから、現状では1次情報として扱うのが妥当であろう。様々な地震による崩壊情報を取り込み、更新を進めていくことが必要である。また、危険度要因について、さらに検討を重ねていくことが重要である。

ここで、F.C.はメッシュ分割や3段階の危険度の分類、距離減衰式による加速度の推定など、一連の手続きに従って評価されたものである。従って、

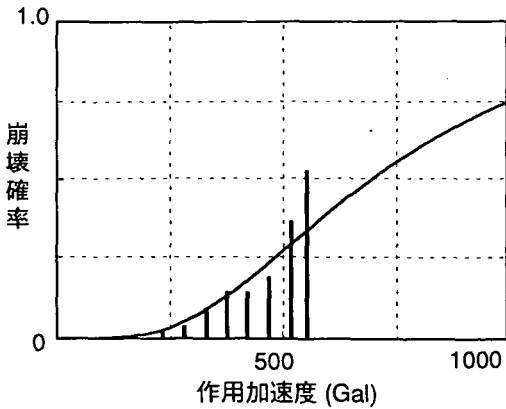


図-9 危険度中のF.C.と崩壊頻度の比較

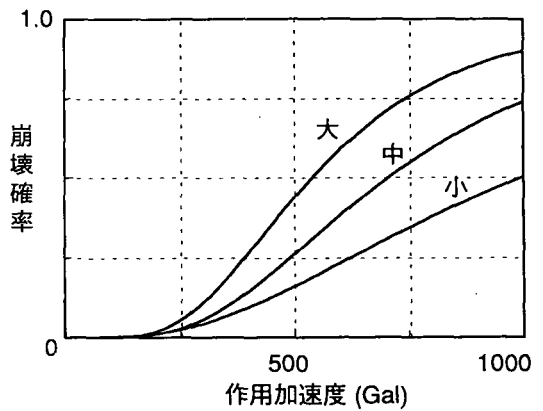


図-10 危険度ごとのF.C.

特定の斜面に着目した崩壊確率に直接適用できるわけではない。また、メッシュ内での崩壊規模や2箇所以上の崩壊については、明らかにできない。

6. おわりに

地震動に応じた斜面の崩壊確率を求めるため、震害記録から直接F.C.を評価する統計方法について示した。統計情報としては、伊豆に発生した2つの地震(伊豆大島近海地震、伊豆半島沖地震)の崩壊記録を使い、3つの危険度によるF.C.を求めた。

統計手法の特徴は、以下のようにまとめられる。

- 1) 異なる加速度を受けた崩壊情報を統一的に扱い、F.C.を直接推定している。
 - 2) 崩壊したか否かの2値情報を対象としている。
 - 3) 作用加速度のばらつきを評価に含めている。
- 斜面崩壊に限らず、様々な構造物のF.C.を震害事例などから推定する場合、この方法は簡便且つ効果的である。

斜面崩壊の危険度分類では、入手が容易な地形図を使い、人的判断を要しない簡便且つ機械的な方法であることを強調した。具体的には、対象とする領域を漏れがないようにメッシュ分割し、メッシュごとに危険度要因である傾斜角と水系密度を調べ、3段階の危険度分類を目指した。しかし、要因の寄与度の検討より、水系密度については要因としての妥当性を見出すことはできず、斜面傾斜角のみで3段階の危険度分類を行った。

F.C.の精度面での課題は、以下の3点に集約することができる。

- 1) 危険度分類における付加要因(地質、斜面形状等)の検討。
- 2) 地震による崩壊記録を取り込み、F.C.の更新を

進める。

3) 地震動の推定精度の改善

震害事例の収集整備は、防災対策の一貫として重要である。しかし多くの場合、統計情報としての整備が十分でないために、確率情報に反映できないのが現状である。これは、防災における確率情報の利用価値が十分認識されていないのが原因の一つと考えられる。また、確率という一見曖昧な数値に対する抵抗感があることも否定できない。今後は、F.C.の精度面での課題も含め、対策の適正化や費用対効果の検討など、リスクマネジメントという観点から、確率情報の効果的な利用方法について提案していきたい。

謝辞:本研究では、崩壊情報の収集において東京電機大学、安田進教授にご助言を頂いた。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 高橋博, 大八木規夫, 大滝俊夫, 安江朝光: 斜面災害の予知と防災, 白亜書房, pp.184 - 199, pp.259 - 268, 1986.
- 2) 寺田秀樹, 船山淳, 大浦二郎, 須原茂: 可能性線形回帰分析による地震時切土のり面. 斜面の崩壊危険度の検討, 地すべり, 第32号, 第3号, pp.1 - 9, 1995.
- 3) 安江朝光, 仲野公章: 地震に対する急傾斜地の危険度評価, 土木技術, 34巻8号, pp.68 - 74, 1979.
- 4) 静岡県地震対策研究協議会: 第2次地震被害想定結果報告書(人的・物的被害編), pp.60 - 68, 1993.
- 5) 東京都防災会議: 東京における地震被害の想定に関する調査報告(手法・提言編), pp.64 - 67, 1991.
- 6) 安田進, 杉谷俊明: 地震時斜面崩壊履歴の調査, 第23回土質工学研究発表会概要集, pp. 891 - 892, 1988.
- 7) 損害保険料率算定会: 斜面・急傾斜地の地震時の崩壊

- 被害に関する研究, 地震保険調査研究37, 1994.
- 8) 水野直也, 平松住雄, 鈴木誠, 奥村俊彦: 地震危険度を考慮した斜面安定性評価に関する一考察, 第26回土質工学研究発表会, pp. 1677 - 1678, 1991.
 - 9) 中村孝明, 水谷守: 地震リスクマネジメントにおけるイベントツリー解析, JCOSSAR'95, pp.75 - 80, 1995.
 - 10) Freudenthal, A.M., Garreit, J.M. and Shinozuka, M.: The Analysis of Structural Safety. J. of Struct. Div., ASCE, Vol. 92, No. ST1, pp.267 - 325, 1966.
 - 11) 星谷勝: 確率論手法による構造解析, 鹿島出版会, pp.113 - 122, 1973.
 - 12) Annaka, T. and Nozawa, Y.: A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district. Proc. 9th.WCEE, II, pp.107 - 112, 1988.
 - 13) 東京大学教養学部統計学教室: 自然科学の統計学, 東京大学出版, pp.231 - 250, 1994.
 - 14) 静岡県地震対策課: 静岡県東海地震対策土地条件図録集II, 静岡県地震対策地質条件図1(伊豆半島), 1993.
 - 15) 佐藤良輔: 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック, 鹿島出版会, pp.320 - 338, 1989.
 - 16) 国井隆弘, 望月利男, 松田磐余, 田村俊和: 1978年伊豆大島近海地震の地震断層と各種被害の分布, 第15回自然災害科学総合シンポジウム, pp. 301 - 304, 1978.
 - 17) 建設省土木研究所地震防災部・振動研究室: 最大地震動および地震応答スペクトルの推定法-(その3) 最大加速度, 速度, 変位, および加速度応答スペクトルの距離減衰式の開発-, 土木研究所資料 No.1864, 1982.

(1996. 5. 1 受付)

A STUDY ON SLOPE FAILURE PROBABILITY BY EARTHQUAKE BASED ON STATISTICAL METHOD

Takaaki NAKAMURA, Kazuaki OKADA and Naoki HONMA

Fragility curves for the slope failure probabilities conditional to the ground motion level were evaluated based on statistical method. For the evaluation of fragility curves, resisting capacity of slope in earthquake was assumed to a log-normal distribution with random variable as ground acceleration, and the parameters of the distribution were estimated using the maximum likelihood method. A risk of slope failure was categorized into three levels considering topographical factors as the inclination and condition of water erosion which were extracted from the topographical map. The observed data from Izu peninsula earthquake (1974) and Izu-Oshima-kinnkai earthquake (1978) were used as statistical sample data, and contribution of factors to risk of slope failure were studied.