

斜面および土構造物の地震危険度の統計的解析

STUDY ON SEISMIC RISK ANALYSIS OF SLOPES AND EARTH STRUCTURES

松尾 稔*・板橋一雄**

By Minoru MATSUO and Kazuo ITABASHI

The purpose of the present paper is to propose a methodology of the seismic risk analysis of slopes and earth structures based on the seismic coefficient. First, attenuation study of peak acceleration for various earthquakes in Japan is made and this shows noticeable scatterness depending upon the region of the earthquake. Second, the records of about twenty thousands earthquakes which occurred in Japan are investigated to determine the area of "earthquake nest" and Gutenberg-Richter's equation is given for each "earthquake nest." These results are incorporated with the seismic risk analysis assuming the circular seismic source and poisson process as a seismic source model. The actual cases are analysed by the proposed method and they show the validity of the method to distinguish the failure case and non-failure case.

1. ま え が き

著者らは斜面や土構造物に関する実用性のある耐震設計法や耐震診断法の開発を最終目標として研究を進めている。そのためには、①耐震計算法、②地震時の土の挙動、③地震外力の評価法、④耐震設計・診断規準の設定法が必要となる。特に、地震外力の評価には、どれくらいの頻度でどの程度のマグニチュードの地震が発生するかという地震活動度、および建設地点にどれくらいの頻度でどの程度の地震動が到来するかという地震危険度の両問題の解決が必要である¹⁾。上記の目標を達成するために、著者らは斜面や土構造物の地震被災事例の収集・整理、震度法・円弧すべり面法による破壊事例・非破壊事例の解析、地震動記録の収集・解析を行ってきた^{2), 3)}。その結果、①被災形態がすべり破壊であると判断される事例が全体の被災事例のうち70%程度あること、②震度法・円弧すべり面法により、地震時の斜面や土構造物の破壊・非破壊の大略の判断が可能であること、③震度法の基本的思想に従い、加速度の代表値として最大加速度で

はなく、破壊に寄与した平均的加速度を用いるべきだとの考えに立ち加速度時系列記録の移動平均を行った結果、最大加速度と移動平均加速度の最大値との間にはきわめて高い相関があり、結果的に最大加速度を地震動の1つの代表値として利用してよいことを明らかにした。また、④震度法・円弧すべり面法により被災事例を逆解析して求めた震度(逆算震度)と各地震の距離減衰式から推定される最大加速度との関係は、かなりのばらつきはあるものの、平均的にみると直線関係にあることがわかった。

本論文では上記結果を基礎において、斜面や土構造物の地震危険度解析について述べる。その基本的な方法論はすでにCornell⁴⁾が示したものであるが、これに日本およびその周辺の地震発生状況、最大加速度の距離減衰式の地域性ならびに震度と最大加速度の関係を加味して、わが国における斜面や土構造物の耐震設計・診断に適用できるよう努めている。必要上まず初めに、Cornellが示した方法論と新しく加味した点を略述しておきたい。

Cornellが示した地震危険度解析に必要な項目は、①地震動パラメーター(最大加速度など)の距離減衰式、②地震源モデル、③地震源で生ずる地震マグニチュード、④地震の時間的発生過程、である。Cornellは地震動バ

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地盤工学教室
(〒464 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工修 名城大学助手 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市中区塩釜1-501)

ラメーターとして、修正メルカリ強度と最大地震動パラメーター(最大加速度など)の両者を考えている。そして、後者については金井⁵⁾や Esteva and Rosenblueth⁶⁾の提案による周知の関係式を用いている。最大加速度が地震動の1つの代表値となり得ることを上に述べたが、著者らは日本国内の最大加速度の実測値を用い、距離減衰式の重回帰分析を行った。その場合、地殻構造の地域性を考慮するために、地震発生地点の地域別距離減衰式を提案している。その詳細については2.で述べる。また最大加速度と震度の関係も考慮し、斜面や土構造物の地震危険度を評価するパラメーターとして震度を用いることにした。

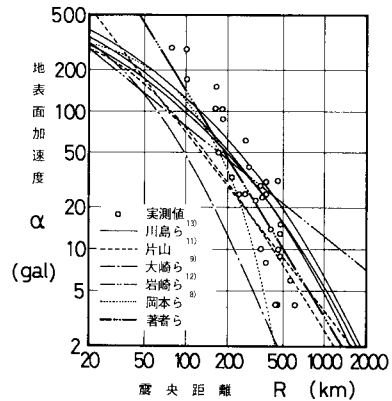
地震源モデルとして Cornell は、距離に関する確率密度関数が比較的簡単な形となるよう、線震源と環状震源(その一部を考えれば扇状震源)を考え、その地震源内では一様に地震が発生すると仮定している。地震源については3.で詳述するが、日本の地震発生状況では線震源や環状震源は考えにくい。そこで、本論文では円形震源分布域(以下では簡便のためにこれを円形震源モデルと記す)を仮定して距離に関する確率密度関数を求めた。また、Cornell は地震源で生ずる地震マグニチュードに関しては Gutenberg-Richter の関係、地震発生過程に関してはポアソン過程を仮定している。著者らも日本付近の地震源で生ずる地震マグニチュードの整理を行い、Gutenberg-Richter の関係を求めるとともに、地震マグニチュードの確率密度関数も求めた。上述した点を考慮し、4.では斜面や土構造物の震度による地震危険度解析の方法を簡単に示し、同時に宮城県沖地震のときに破壊した吉田川堤防の事例解析結果を示す。

2. 最大加速度の距離減衰式

建設予定地点で地震時の最大加速度を推定するためには、一般に距離と地震マグニチュードにより決まるとする距離減衰式に頼らざるを得ない。ここでは従来の提案式について簡単に触れ、その後に地域区分を考えた距離減衰式を提示する。

(1) 従来の研究について

河角⁷⁾は、震度階、地震マグニチュード、震央距離(あるいは震源距離)間の関係を示し、河角マップを作成した。岡本ら⁸⁾は岩盤内の、また大崎ら⁹⁾は硬質地盤上の加速度記録を用いて、距離減衰式を作成している。勝又¹⁰⁾は震央付近の上限最大加速度および震源域の端からの距離を、また片山¹¹⁾は最大加速度の水平2成分を考慮して式を提案している。岩崎ら¹²⁾は地盤種別を考慮し、さらに川島ら¹³⁾は時刻歴を取り入れて重回帰分析を実施している。いずれも、研究、実用の両面において卓越した成果であることはいうまでもないが、本論文では後述する

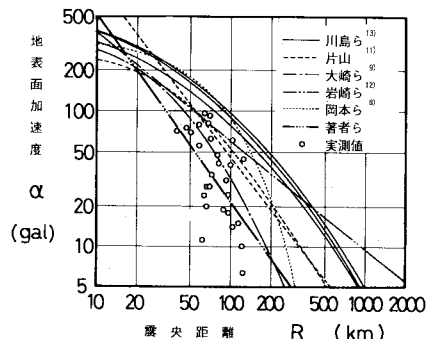


図—1 地表面加速度と距離減衰式(宮城県沖地震の場合)

ように、斜面や土構造物の解析精度を少しでも上げるため、地域別の距離減衰式を必要としたのである。

1978年に2つの大きな地震が発生している。宮城県沖地震($M=7.4$)と伊豆大島近海地震($M=7.0$)である。これらの地震時には多くの地点で地表面加速度が測定されているので、観測値をまず上述した距離減衰式と比較してみた。図—1は宮城県沖地震に関するものである。図中の丸印は地表面で測定された最大加速度であり^{14),15)}、震央距離に対して図示してある。種々の線は前述の各提案式に地震マグニチュード7.4を代入して得られた関係である。岡本らの関係は岩盤内の、また大崎らの関係は硬質地盤上の記録に基づいた関係であると思われるが、測定値の方がかなり上側にある。また、片山、岩崎ら、川島らの関係と比較すると、震央距離の短いところで大きな観測値が、震央距離の長いところで少し小さめの観測値が得られている。しかし、これらの関係は日本全体の加速度記録を説明するために作成されたものであって、ローカルな影響をも精度高く説明しようと意図されたものでないことを考えれば、この程度の外れはむしろ当然であり、批判するには当たらない。

図—2は伊豆大島近海地震に関する同様の図である。



図—2 地表面加速度と距離減衰式(伊豆大島近海地震の場合)

やはり丸印が地表面で測定された最大加速度であり¹⁶⁾、震央距離に対して図示してある。また、各提案式に地震マグニチュード7.0を代入した関係も示した。この図から観測された地表面加速度は各提案式よりもかなり小さく地域性がより顕著に現われている。なお、両地震の実測値を比較すると、図-2の伊豆大島近海地震の場合には地震マグニチュードの割には小さな地表面加速度しか測定されていないうえ、震央距離に対する減衰がかなり大きく、両者の地震マグニチュードの相違以上に差があるように思われる。

以上の結果からも、最大加速度の距離減衰式を距離と地震マグニチュードのみの関数とするには限界が感じられる。最大加速度に影響する要因として、①距離（震央距離、震源距離など）、②地震マグニチュード、③地震の発生メカニズム、④地震波の伝播経路（地表面付近の地盤、地殻構造など）、⑤観測地点周辺の地形、などを考慮して精度を高める努力が数多くなされている¹⁷⁾⁻¹⁹⁾とはいえ、はなはだしい困難さのゆえに、普遍性のある推測法はいまだ見出されるに至っていない。本論文の斜面や土構造物の耐震設計・診断を考えるに当たっても、上記の種々の項目を取り入れる試みをしたが、適切な表現法がないことや資料不足のため、結局断念せざるを得なかった。ただし、地震源の地域区分を考慮した点だけは新しい点であり、これに基づき各地域ごとの距離減衰式を提案することとした。

(2) 地域区分を考慮した最大加速度の距離減衰式

建設省土木研究所と運輸省港湾技術研究所は、強震計による地盤加速度の測定結果を公表している^{20),21)}。これらの資料を用いて、1963年から1982年の20年間に、少なくとも5地点以上で地表面加速度が測定された82個の地震を選び出し、図-3にその震央位置を示した。地震の諸元、すなわち発生年月日、震源位置（緯度、経度、深度）、地震マグニチュードは気象庁の地震月報によった²²⁾。この82個の地震によって、総計886個の地表面加速度が得られている。図-3には、日本海溝、相模トラフ、南海トラフならびに茂木²³⁾がGutenberg-Richter式のb値が地殻構造と関係していることを示すために用いた地域区分線も破線で併記した。これらの区分線と、82個の地震の震央位置分布を勘案して、点線で示すような地域①～⑥の6地域に分割した。このような地域分けにより地震波の伝播経路の相違を適切に表現しようとするれば、本来ならば、加速度測定地点の地域分けも考えるべきであるが、資料数に制限があったので、この点は考慮せずに地表面加速度の重回帰分析を行った。重回帰分析では、距離として震央距離と震源距離の両者を用い、次式(1)の係数 b_1 , b_2 , b_3 を求めた。

$$A = b_1 \cdot 10^{b_2 M} \cdot (R + b_3)^{-b_3} \dots \dots \dots (1)$$

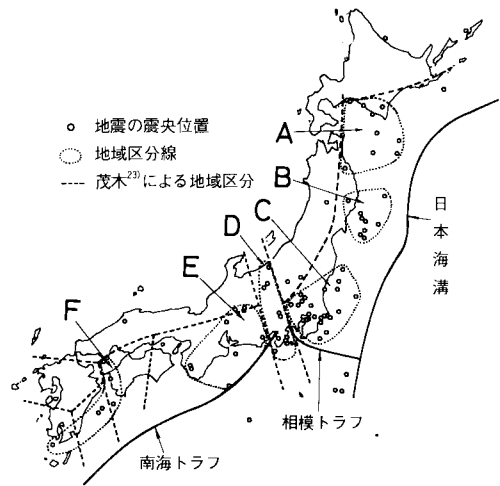


図-3 距離減衰式の回帰分析に用いた地震の震央位置とその地域区分

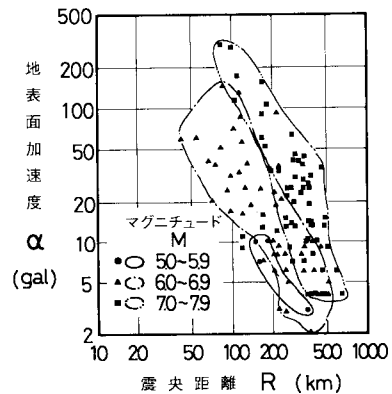


図-4 地表面加速度と震央距離の関係

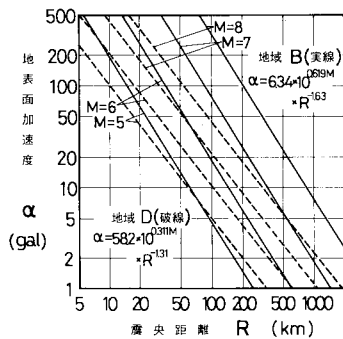
ここに、Aは最大加速度 (gal), Mは地震マグニチュード, Rは距離(km)である。b₄については岩崎らと同様0, 10, 20, 30 (km) の場合を計算したが、震源距離、震央距離の場合とも重相関係数に大差はなかったため、ここでは紙幅の都合によりRは震央距離、b₄=0(km) の場合のみを示す。なお、この場合にはR=0でA=∞となるので、この式の適用範囲はデータの存在するR≒20~1000 kmとする。

図-4は、地域⑥で生じた地震で観測された地表面加速度を地震マグニチュードのランク別に示したものである。ランクは5.0~5.9, 6.0~6.9, 7.0~7.9とし、各ランクごとに値がばらばらしている範囲を示してあるが、これから地表面加速度に対する震央距離や地震マグニチュードの影響がよくわかる。

図-5に、回帰式のみではあるが、特徴のある地域①と地域②の2例を示した。図の複雑さを避けるため、観

測点のプロットは省略してある。地域⑧の場合には係数 b_3 が大、すなわち震央距離に対する地表面加速度の減衰が大きい。また、地域⑩の場合には係数 b_2 が小、すなわち地表面加速度に対する地震マグニチュードの影響が小さい特徴がある。

表一は各地域ごと、ならびに収集した全加速度記録 886 個を用いた場合の重回帰分析結果の一覧表であり、地震数、加速度記録数、回帰係数 b_1 , b_2 , b_3 , 重相関係数が示してある。この表から、図一五に示したように、地域⑧の係数 b_3 が他の地域よりも大きく、地域⑩の係



図一五 距離減衰式の回帰式

表一 距離減衰式の重回帰分析結果

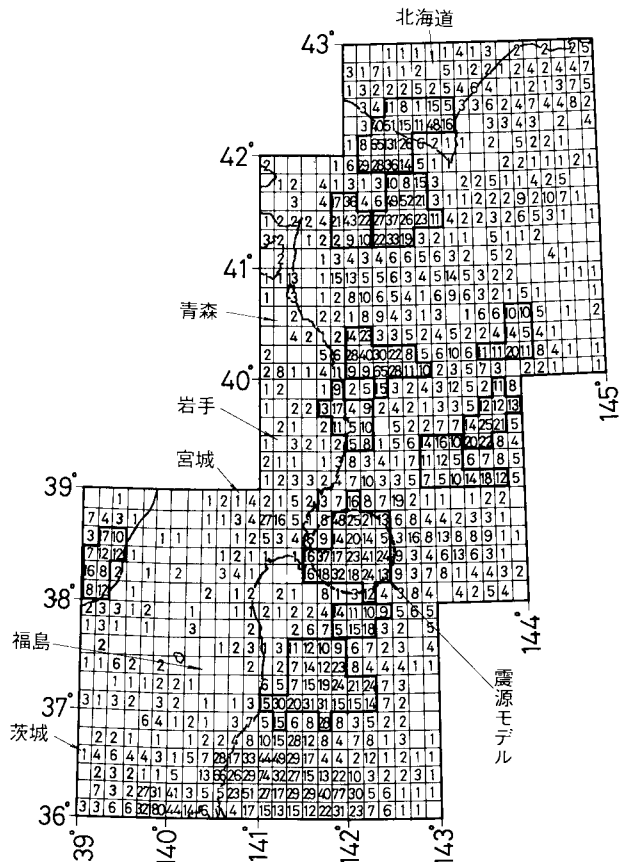
地域	地震数	加速度記録数	回帰係数			重相関係数
			b_1	b_2	b_3	
A	9	106	12.53	0.4830	1.356	0.725
B	9	121	6.341	0.6188	1.631	0.779
C	26	283	3.702	0.5442	1.335	0.703
D	11	116	58.22	0.3107	1.311	0.728
E	9	78	288.8	0.2047	1.202	0.743
F	6	57	25.38	0.4153	1.278	0.701
全体	82	886	5.081	0.4630	1.144	0.670

表二 従来の距離減衰式

提案者等	地震数	加速度記録数	回帰係数			重相関係数
			b_1	b_2	b_3	
岩崎ら (地盤種別を考慮)	—	301	18.4	0.302	0.800	0.62
第1種	—	29	28.5	0.207	0.598	0.48
第2種	—	74	13.2	0.330	0.806	0.59
第3種	—	127	32.1	0.254	0.757	0.61
第4種	—	68	6.47	0.423	0.977	0.72
片山	46	330	9.59	0.466	1.290	0.71
篠ら (地盤種別を考慮)	—	723	—	—	—	—
第1種	—	—	6.85	0.373	0.866	0.59
第2種	—	—	6.75	0.351	0.793	0.60
第3種	—	—	14.8	0.318	0.829	0.62
第4種	—	—	4.45	0.420	0.922	0.67

数 b_2 が他の地域よりも小さいことがわかる。ただし、地域⑩では係数 b_2 が小さく、地震マグニチュードの影響がより小さいといえる。残りの地域④, ⑤, ⑥の係数 b_2 は地域⑧と⑩の中間の値となり、係数 b_3 は地域⑩とほぼ同じ値となる。このことは、地域④, ⑤, ⑥の場合、地震マグニチュードの影響は図一五の両者の中間的關係を示し、震央距離に対する地表面加速度の減衰性は地域⑩の場合に近いことを示している。

表二に、岩崎ら¹²⁾、片山¹³⁾、篠ら¹⁷⁾による同形式の回帰式に基づく値を示した。各式の提案に用いられたデータの質や量が異なるので単純な比較は行えないが、表一の全データを一組とした場合の回帰式の係数 b_1 , b_2 , b_3 値は、片山の場合の値に近いことがわかる。なお、全加速度記録を用いた場合の重相関係数は 0.67 で、他者によるものに比べそれほど高くないが、表一の地域分けを考慮したときの各地域の重相関係数は、すべてこれらより大きくなっている。これは、土構造物の計画や解析等に地域別の距離減衰式を用いることの優位性を示している。ただし、地域⑧の結果を記入した図一と地域⑩の結果を記入した図二をみればわかるように、回



図一六 10°メッシュ内で生じた地震数 (1961年~1982年)

帰線の回りのばらつきはそれでもなおかなり大きい。この事実を認識しながらも、これ以上精度を上げる方法がないので、後の地震危険度解析にはこうして求めた地域別の距離減衰式を適用する。

3. 地震の巣と地震マグニチュード

2. で求めた距離減衰式を建設予定地点の最大加速度の推定に用いるにしても、地震が発生する場所とその地震マグニチュードを与える必要がある。

(1) 地震の巣

地震学では、地震活動の盛んな場所を“地震の巣”とよんでいる²⁴⁾。前述の距離減衰式や震度と最大加速度の関係では、距離として震央距離を用いているので、平面的な“地震の巣”を決める必要がある。“地震の巣”や地震マグニチュードの整理に関連して、震源位置や地震マグニチュードの決定精度、地震検知能力が地域や深度により異なる、などの問題²⁵⁾があるが、これらの事実を設計や解析に生かすには、まだ地震学的知識が不十分といわざるを得ない。そこでここでは、地震に関する構造的議論には一切立ち入らず、工学的利用を目的とする観点に絞って平面的な“地震の巣”を検討することとする。

気象庁では、日本およびその周辺で生じた地震をまとめ、地震月報²²⁾として報告している。それには、地震の発生日月日、位置（緯度、経度、深度）、マグニチュードが記載されている。気象庁の地震観測体制が非常によく整備されたのは1961年頃からといわれているので、ここでは1961年から1982年の22年間のデータを用いた。この間には、マグニチュード3.0以上の地震が約20000回発生したことが記録されている。これらの地震の震央位置を緯度、経度10'メッシュごとに集計し、その地震数を示した一例が図-6である。なお、数字が記入されていないメッシュは地震が生じていないことを意味する。この図は、北海道南部から関東北部にかけての例であるが、地震が集中的に生じている所やそうでない所が明白である。たとえば、襟裳岬の西から南西部、岩手県の沖合、宮城県牡鹿半島の沖合、福島県の沖合などに震央位置の集中が認められる。この図には地震発生深度の情報が入っていないので、同一メッシュ内の地震が必ずしも同一震源のものかどうかはわからない。しかし、前述の最大加速度の距離減衰式や、最大加速度と逆算震度の関係³⁾を求めるときには震央距離を用いているので、ここでは震央位置が集中している所を便宜上“地震の巣”とよぶ。それでもなお、必ずしも明確な境界線が引けるわけではないが、一応図の太線枠で示すような平面的な“地震の巣”を考えることにした。

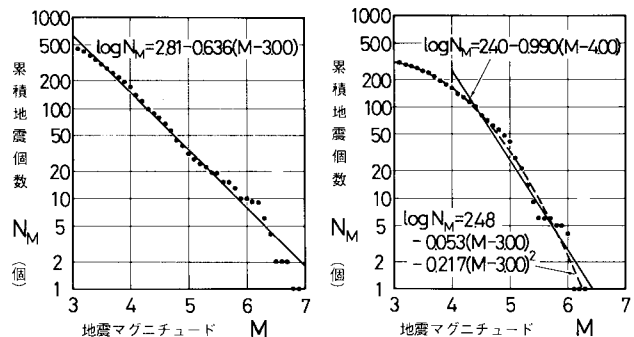
(2) 地震の巣で生ずる地震マグニチュード

地震マグニチュードの発生度数に関しては、それが地震マグニチュードとともに指数的に減少するという、著名な Gutenberg-Richter の式がある。この関係から、あるマグニチュード以上の地震発生度数 N_M とマグニチュードの関係もやはり指数関係となり、次式で表わされる。

$$\log N_M = a - b(m - m_0) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 m_0 は工学上問題としなければならない最小の地震マグニチュードである。この式の係数 b は、従来 0.7~1.0 の値を示すといわれており²⁴⁾、“地震の巣”の性質を示す重要なパラメーターである。その他にも、地震マグニチュードの度数分布そのものについての研究もある。たとえば、Gutenberg-Richter 式の折れ曲がり点の地震マグニチュードがその地殻構造と関係することを示した茂木の研究²³⁾や b 値が指数分布の最尤推定によって求められることを指摘した安芸の研究²⁶⁾などがそれぞれあり、他に、式(2)と異なる式も提案されている²⁴⁾。

まず、図-6の平面的な“地震の巣”に関して、式(2)の関係をプロットしてみた。図-7はその代表的な例であり、図中の黒丸印はその地震マグニチュード以上の地震個数である。同図(a)は宮城県牡鹿半島沖合の“地震の巣”の場合であり、同図(b)は岩手県沖合の場合である。図中の実線と破線は回帰分析の結果であるが、(a)の場合には小さな地震マグニチュードから Gutenberg-Richter の式に非常によくのっている。ただし、 b 値は従来いわれている値より少し小さく 0.636 となっている。一方、(b)の場合には Gutenberg-Richter の式から外れる領域がある。最小マグニチュード m_0 を種々変化させたところ、 $m_0=4.0$ のときに相関係数が最も高く、その場合の b 値は 0.990 となった。この図には、地震マグニチュードの二次の項までを考慮した回帰式も記入したが、これは非常によくデータを説明することがわかる。他の“地震の巣”に関して、直線が合



(a) 宮城県牡鹿半島沖合の場合 (b) 岩手県沖合の場合

図-7 累積地震発生個数と地震マグニチュードの関係

う場合と二次曲線が合う場合の両者があった。以上のことから、平面的な“地震の巣”で生ずる地震マグニチュードの発生度数に関しては、最小地震マグニチュードをどの程度にとるかの問題はあるものの、第一近似としては Gutenberg-Richter 式で十分表現できること、少し上に凸の関係になる場合には二次の項までを考慮すればよいことがわかる。

4. 地震危険度解析

(1) 方法論

最大加速度の距離減衰式は基本的には式(1)の形式でよい。ただし、本章では微積分の便利さゆえに式(1)の対数の底を e にするので、以下の各式における係数 b_2 は式(1)では $b_2 \ln 10$ に相当する。なお、当然のことながら b_1 、 b_3 は同じである。さて、斜面や土構造物の地震危険度解析を震度 K を用いて行うためには最大加速度と震度の関係を導入しなければならない。前論文では³⁾、実際事例の逆解析を通じて震度 K と最大加速度 A の関係を2つの形式で表わした。すなわち、

$$K = c_1 \cdot A^{c_2} \dots\dots\dots (3 \cdot a)$$

$$K = c'_1 + c'_2 A \dots\dots\dots (3 \cdot b)$$

震度法・円弧すべり面法で耐震設計を行う場合、用いる最大加速度は通常 100~400 gal である。この範囲においては上記両式に大差がないので、前論文では簡単な式(3-b)を用いて議論を進めた。しかしながら、本論文で示す地震危険度解析においては確率統計的手法を用いる。したがって、後に説明するように、最大加速度の累積分布関数が必要となる。そのため、理論の構築上、最大加速度が 0 gal 以上の全範囲にわたって(最大加速度~震度)関係が定義されていなければならない。この場合、式(3-b)では $A=0$ gal でも $K=c_1$ となり、物理的に不都合が生ずる。 A の小さな範囲の事例解析結果はないが、工学的見地からみて、この範囲の影響はきわめて小さいので、数学的な整合性を図るため後の地震危険度解析においては式(3-a)を仮定する。ただし、繰り返すが、このことは前論文と矛盾することではなく、問題となる最小の最大加速度が 100 gal 程度以上であれば、式(3)のどちらを用いてもほぼ同様の地震危険度解析結果が得られることがわかっているのである。

地震マグニチュードの発生度数に関しては、3. で述べたように第一近似としては Gutenberg-Richter 式でよい。したがって、地震マグニチュードの累積分布関数 $F_M(m)$ 、確率密度関数 $f_M(m)$ は次式となる。

$$F_M(m) = \begin{cases} 0 & , m < m_0 \\ 1 - \exp[-\beta(m - m_0)] & , m_0 \leq m \end{cases}$$

$$f_M(m) = \begin{cases} 0 & , m < m_0 \\ \beta \exp[-\beta(m - m_0)] & , m_0 \leq m \end{cases}$$

$$\dots\dots\dots (4)$$

ここに、 β は前述した式(1)と同様の理由により、 $b \ln 10$ に相当する。

地震源モデルとしては、図-6 に示した平面的な“地震の巣”を考慮し円形と仮定した。円形震源モデルの利点は、Cornell の扇状震源モデルとは異なり、建設予定地点が震源からいかなる方向にあっても、その地震危険度解析に必要な震源パラメーターが不変なことである。ここにいう震源パラメーターとは、震源モデルの半径 l 、地震マグニチュードの最小値 m_0 、Gutenberg-Richter 式の b 値、地震平均発生率 ν である。さて、図-8 に示すように円形震源モデルの端までの距離を d としたとき、距離 R の累積分布関数 $F_R(r)$ 、確率密度関数 $f_R(r)$ は次式となる。

$$F_R(r) = \frac{1}{\pi} \left[x_2(1-x_2^2)^{\frac{1}{2}} + \sin^{-1} x_2 + \frac{\pi}{2} \right] - \frac{1}{\pi} \left(\frac{r}{l} \right)^2 \left[x_3(1-x_3^2)^{\frac{1}{2}} + \sin^{-1} x_3 - \frac{\pi}{2} \right]$$

$$f_R(r) = \frac{2}{\pi} (1-x_2^2)^{\frac{1}{2}} \frac{dx_2}{dr} - \frac{2}{\pi} \left(\frac{r}{l} \right)^2 (1-x_3^2)^{\frac{1}{2}} \frac{dx_3}{dr} + \frac{r}{l^2} - \frac{2r}{\pi l^2} x_3(1-x_3^2)^{\frac{1}{2}} - \frac{2r}{\pi l^2} \sin^{-1} x_3, \quad d \leq r \leq d+2l \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= \frac{r^2 - d^2 - 2dl - 2l^2}{2l(d+l)}, \quad x_3 = \frac{r^2 + d(d+2l)}{2r(d+l)} \\ \frac{dx_2}{dr} &= \frac{r}{l(d+l)}, \quad \frac{dx_3}{dr} = \frac{r^2 - d(d+2l)}{2r^2(d+l)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

地震の発生過程を平均発生率 ν のポアソン過程とすれば、以上の仮定より、建設予定地点の震度の確率分布が求められる。

距離 $R=r$ で地震が生じたとき、震度 K がある値 k を越える確率は、地震マグニチュードと距離が独立ならば次式で与えられる。

$$P[K \geq k | R=r] = k^{-\frac{b}{c_2 b_2}} \cdot (c_1 b_1^{c_2})^{c_2 b_2} \cdot e^{\beta m_0} \cdot r^{-\frac{b_2}{c_2 b_2}}$$

$$k_0 \leq k \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$k_0 = c_1 \cdot b_1^{c_2} \cdot e^{c_2 b_2 m_0} \cdot r^{-c_2 b_2}$$

震度 K の累積分布関数を $F_K(k)$ とすれば、

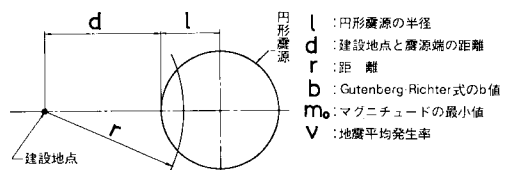


図-8 円形震源モデル

$$\begin{aligned}
 1 - F_k(k) &= \int_D P[K \geq k | R = r] f_R(r) dD \\
 &= k^{-c_2/b_2} \cdot (c_1 \cdot b_1^{c_2}) / c_2 b_2 \cdot e^{\beta m_0} \int_D r^{-\frac{c_2}{b_2}} \cdot f_R(r) dD \\
 &= C \cdot G \cdot k^{-\frac{\beta}{c_2 b_2}} \dots \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

ここに、

$$C = (c_1 b_1^{c_2}) / c_2 b_2 \cdot e^{\beta m_0}, \quad G = \int_D r^{-\frac{c_2}{b_2}} \cdot f_R(r) dD$$

したがって、建設予定地点で震度 K がある値 k 以上となる確率は、

$$p_k = P[K \geq k] = C \cdot G \cdot k^{-\frac{\beta}{c_2 b_2}} \dots \dots \dots (9)$$

となる。そして、ポアソン過程の性質より、建設予定地点で上記事象が生ずる過程もポアソン過程となるので、 t 年間の最大震度 $K_{max}^{(t)}$ の累積分布関数は次式のようになる。

$$\begin{aligned}
 P[K_{max}^{(t)} \leq k] &= \exp[-\nu \cdot t \cdot C \cdot G \cdot k^{-\frac{\beta}{c_2 b_2}}], \\
 k_0 &\leq k \dots \dots \dots (10)
 \end{aligned}$$

(2) 吉田川堤防の地震危険度解析

上記方法論を用い、吉田川堤防の地震危険度解析を行ってみる。ここでは簡単のために、図-6 に示した宮城県牡鹿半島沖の震源のみを考える。図-6 に仮定した円形震源モデルを破線で示したが、震源モデルの中心位置は東経 142°05'、北緯 38°27' であり、震源モデルの半径は $l=43.5$ km である。この地震源で生ずる地震マグニチュードの頻度分布は図-7 (a) であるから、 $\beta = b \ln 10 = 0.636 \ln 10 = 1.464$ となる。そして工学的に問題とすべき最小の地震マグニチュード m_0 を 5.0 と仮定すると、平均発生率 $\nu = 1.55$ 回/年となる。ちなみに、吉田川解析地点における $m_0 = 5.0$ に対応する震度 k_0 は 0.024 である。また、最大加速度の距離減衰式としては、図-5 の地域③の式を用いるので、 $b_1 = 6.341$ 、 $b_2 = 0.6188 \ln 10 = 1.425$ 、 $b_3 = 1.631$ が得られる。そして、前論文³⁾の最大加速度と震度の関係から、 $c_1 = 0.00813$ 、 $c_2 = 0.531$ である。

解析地点から地震源モデルの端までの距離は $d = 71.5$ km であるから、式 (8) の $C = 0.911$ となる。G に関しては、 $f_R(r)$ が式 (5) のように複雑な関数の 2 重積分を必要とするので、数値積分を実施した結果、 $G = 0.000245$ となった。したがって、

$$\left. \begin{aligned}
 F_k(k) &= 1 - 0.000223 k^{-1.935} \\
 f_k(k) &= 0.000432 k^{-2.935}
 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (11)$$

この $F_k(k)$ と $f_k(k)$ を図示すると、図-9 のようになる。また、

$$P[K_{max}^{(t)} \geq k] = 1 - \exp[-0.000346 t \cdot k^{-1.935}] \dots \dots (12)$$

を、震度 k をパラメーターとして示すと図-10 のようである。震度 $k = 0.10, 0.20, 0.30$ 、さらに参考のために、 $0.13, 0.28$ の場合が示してあるが、時間の経過とともに

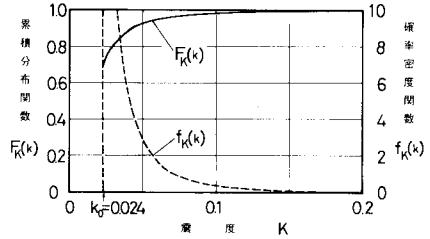


図-9 震度の累積分布関数と確率密度関数

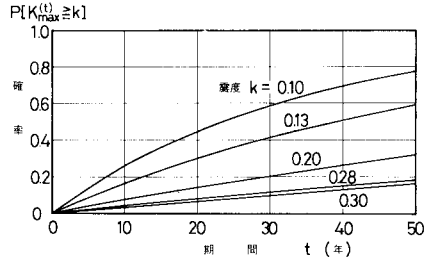


図-10 $P[K_{max}^{(t)} \geq k]$ と期間の関係

に確率 $P[K_{max}^{(t)} \geq k]$ の増加する定性的傾向がわかる。 $k = 0.13$ と 0.28 は吉田川堤防の一破壊事例の逆算震度ならびにその破壊事例に隣接する非破壊事例が耐え得る震度 (前論文³⁾の事例 E-3) である。

図-10 は試算例であるから、その縦軸である $P[K_{max}^{(t)} \geq k]$ の値が堤防の破壊確率そのものを与えているとは現在のところ考えていない。その理由として、①図-6 に示したように、多くの震源があるにもかかわらず、ここでは 1 つの震源しか考慮していないこと、②図-1 や図-2 にみられるような距離減衰式自身もつ変動を考慮していないこと、③前論文³⁾に示したように (最大加速度~震度) 関係は平均値線のまわりにはばらつくが、これを考慮していないこと、などが挙げられる。しかしながら、たとえば、 $k = 0.13$ と $k = 0.28$ の両曲線上で $t = 30$ 年に対する確率 $P[K_{max}^{(t)} \geq k]$ を比較してみると、前者は後者の約 3 倍となっており、これは両者の破壊しやすさの程度を大略比較したことにはなっていると考えてよい。換言すると、図-10 はいまだ破壊確率の絶対値を示す段階にまでは至っていないが、少なくとも斜面や土構造物の危険箇所の相対的比較や対策工実施の優先順位の決定などに有用な情報になり得ると考える。

5. あとがき

本論文で得られた結果を要約すると以下のようなうである。

- (1) 1978 年に生じた 2 つの大きな地震 (宮城県沖地震と伊豆大島近海地震) の際に観測された地表面加速度の距離減衰特性はかなり異なると同時に、従来提案さ

れている距離減衰式では十分表現し得ないことがわかった。

(2) そこで、1963年から1982年の20年間に生じた地震82個によって観測された886個の地表面加速度を用い、地震発生地点の地域区分を考慮した距離減衰式を提案した。

(3) 1961年から1982年の22年間に日本全体で生じた約20000個の地震の震央位置を図示し、震央位置が集中する平面的な“地震の巣”を提示した。

(4) それぞれの“地震の巣”について地震マグニチュードの整理を行った結果、一般にGutenberg-Richter式がよく合うことがわかった。そして、これから外れるケースでは地震マグニチュードの二次の項までを考慮すれば十分であることがわかった。

(5) 地震源モデルとして円形震源モデルを仮定し、震度に基づく地震危険度解析の方法論を示した。

(6) 宮城県牡鹿半島沖の震源のみを考え、その地震源で生ずる地震マグニチュードの b 値とその地域の地表面加速度の距離減衰式を用いて吉田川堤防の地震危険度解析を行った結果、宮城県沖地震時の破壊事例と非破壊事例の確率 $P[K_{\max}^0 \geq k]$ の相違が明らかとなった。

最後に、加速度の距離減衰等について有益な助言をいただいた東京大学 藤野陽三博士、ならびに地震資料、加速度記録の整理を精力的に遂行していただいた名城大学の牛田昌実、岸 悟、高田 聡、竹中郁尊の各氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 片山恒雄：地震活動度・危険度の確率論的な考え方，生産研究，27巻5号，pp.1~11，1975.
- 2) 松尾 稔・板橋一雄・佐々木康：実際事例の逆解析による土構造物の耐震性に関する研究，土木学会論文報告集，第343号，pp.25~33，1984.
- 3) 松尾 稔・板橋一雄：斜面および土構造物の耐震性評価に関する研究，土木学会論文報告集，第352号/Ⅲ-2，pp.139~147，1984.
- 4) Cornell, C.A. : Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5, pp.1607~1620, 1968.
- 5) Kanai, K. : An Empirical Formula for the Spectrum of Strong Earthquake Motions, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 39, pp. 85~95, 1961.
- 6) Esteva, L. and Rosenblueth, E. : Spectra of Earthquakes at Moderate and Large Distances, Soc. Mex. de Ing. Sismica, Mexico II, pp.1~18, 1964.
- 7) Kawasumi, H. : Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity Throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity in Historical Times, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 29, pp. 469~482, 1951.
- 8) 岡本舜三・田村重四郎・加藤勝行・小野公一郎：岩盤地帯における地震動，第11回地震工学研究発表会，pp. 53~56，1971.
- 9) 大崎順彦・渡辺 丹：地震動の最大値について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.525~526，1977.
- 10) 勝又 護：地震動の最大加速度の推定，験震時報，第37巻，pp.79~87，1972.
- 11) Katayama, T. : Statistical Analysis of Peak Accelerations of Recorded Earthquake Ground Motions, Seisan-Kenkyu, Vol. 26, No.1, pp.18~20, 1974.
- 12) 岩崎敏男・若林 進・常田賢一：加速度記録の統計解析，土木技術資料，Vol. 20, No. 4, pp. 28~32, 1978.
- 13) 川島一彦・相沢 興・高橋和之：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法，土木研究所資料第1993号，1983.
- 14) 土木研究所第一次調査団：1978年6月宮城県沖地震被害調査速報，土木技術資料，Vol. 20, No. 8, pp. 40~51, 1978.
- 15) 土田 肇・野田節男ほか：1978年宮城県沖地震港湾被害報告，港湾技研資料，No. 325, 1979.
- 16) 土木研究所調査団：1978年1月伊豆大島近海地震調査概要，建設省土木研究所資料第1346号，1978.
- 17) 篠 泉・大角恒雄・片山恒雄：強震データの統計解析における問題点，第37回土木学会年次学術講演会概要集，第I部会，pp. 659~660, 1982.
- 18) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太：地震動の最大地動予測における N 値を用いた地盤条件の評価法，土木学会論文報告集，第317号，pp. 69~78, 1982.
- 19) 太田外気晴・清田芳治：地震時の平均的加速度レベルに及ぼす地殻構造の影響，鹿島建設技術研究所年報，第28号，pp. 239~246, 1980.
- 20) 建設省土木研究所：土木構造物における加速度強震記録，土木研究所集報.
- 21) 運輸省港湾技術研究所：港湾地域強震観測年報，港湾技術研究所資料.
- 22) 気象庁：地震月報，気象庁.
- 23) Mogi, K. : Regional Variations in Magnitude-Frequency Relation of Earthquakes, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 45, pp. 313~325, 1967.
- 24) 宇津徳治：地震学，共立出版，1977.
- 25) 勝又 護：日本列島およびその周辺におけるサイスミシテとそれに関連する諸問題，験震時報，第35巻，第3,4号，pp. 1~68, 1970.
- 26) Aki, K. : Maximum Likelihood Estimate of b in the Formula $\log N = a - bM$ and its Confidence Limits, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 43, pp. 237~239, 1965.