

多角形地震域モデルによる地震危険度解析

SEISMIC HAZARD ANALYSIS USING A POLYGONAL SOURCE-AREA MODEL

石川 裕*

By Yutaka ISHIKAWA

A method of seismic hazard estimation using the polygonal source-area models is developed. In the Cornell's type seismic hazard analysis, the seismic region surrounding the analytical point is divided into small source-areas. In each source-area, parameters characterizing its seismic activities are assumed to be uniform and earthquakes are assumed to occur independently and randomly. Although the circular, fan-shaped, or rectangular models are commonly used as the shape of source-area models in Japan, they are too restrictive to represent the complicated shape of faults and plate boundaries. Hence, polygonal models are expected to be practical to represent them. In this paper, the formulation of the probability of epicentral distance by the use of a polygonal model is mainly described.

Keywords: seismic hazard analysis, polygonal source-area model, probability of distance

1. はじめに

Cornell 流の方法による地震危険度解析^{1),2)}では、将来発生する地震の時刻、規模と合わせて発生位置についても確率モデルを設定する必要がある。過去に発生した地震の震央分布図などより明らかなように、わが国周辺ではきわめて広い範囲で地震が発生する。したがって、わが国を対象とする地震危険度解析では解析地点周辺の地域を地震活動度や地震発生様式が一樣とみなせる領域(以下、地震域²⁾とよぶ)に分割して、その領域内では一樣ランダムに地震が発生すると仮定する場合が多い。このとき、解析に用いる地震域モデルの形状としては、解析地点までの距離(震央距離もしくは震源距離:以下では単に距離と記す)の確率計算を容易にするため、円形・扇形³⁾⁻⁵⁾もしくは長方形⁶⁾⁻⁸⁾が多く用いられる。しかし、このような形状の地震域モデルを用いる場合、次のような問題点が含まれる。

① 解析地点を中心とする円形・扇形モデルを用いる場合には、モデルの形状が解析地点の位置に依存する。したがって、同一地域でも解析地点が変われば、マグニチュードの度数分布を表わす Gutenberg-Richter 式の b

値や地震発生率などの地震発生に関与するパラメーターの値が変化することになる。特に、地震危険度図を作成する場合のように複数の地点で同時に解析を行う場合には検討が必要となる。

② 松尾・板橋⁴⁾が用いているように、解析地点に依存しない円形モデルを用いれば、上述のような問題点は解消される。しかし、解析地点周辺の地域を円形のみでカバーしようとするとい工夫が必要となる。

③ ①, ②の問題を解決するには長方形のモデルはきわめて便利である。しかし、相模トラフや駿河トラフにみられるように、わが国周辺におけるプレート境界や活断層区的位置・形状は必ずしも規則的ではない。したがって、長方形のみでこのように不規則な形状の領域をモデル化しようとするときめ細かいモデル化が必要となる。

本研究では上述のような問題点を解決するため、多角形の地震域モデルによる地震危険度解析手法について検討を行った。多角形のモデルを用いれば本来複雑な形状である地震域を比較的容易にモデル化することが可能である。多角形の地震域モデルを用いた解析プログラムとしては McGuire⁹⁾によるものがあるが、そこでは距離の確率関数を算定する際に、地震域を解析地点を中心とする微小な扇形に分割するというアルゴリズムを用いて

* 正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所
(〒135 江東区越中島 3-4-17)

いるため、やや煩雑な計算が必要となる。本研究では多角形の地震域を三角形に分割することにより距離の確率関数を容易に算定する考え方について新たに提案した。以下、その考え方について述べ、最後に適用例を示す。

2. 距離の確率関数の算定

(1) 距離の確率関数の算定方法

Cornell 流の方法により地震危険度解析を行う場合には、各地震域ごとに解析地点との距離の確率関数を算定する必要がある。そこで、以下では多角形の地震域モデルを用いた場合の距離の確率関数の算定方法について述べる。なお、本研究では地震は各地震域内で一様ランダムに発生すると仮定し、また、本来は連続量である距離を計算のアルゴリズム上、離散化して取り扱う。

図-1 に距離の確率関数を算定する考え方について示す。その手順は次のとおりである。

① 多角形の地震域を l 個の三角形 (以下、三角形要素とよぶ) に分割する。このとき、各三角形要素の面積を $s_k (k=1 \sim l)$ とする。

② 三角形要素 k において、各辺を n 等分してそれぞれ結ぶと、面積が等しい n^2 個の小三角形に分割される。

③ 分割された小三角形 j の重心と解析地点との距離 δ_j は容易に算定されるので、このとき、距離 δ_j の確率関数 $P(\delta_j)$ は次式で求められる。そして、分割数 n を大きくとることにより、精度よく $P(\delta_j)$ を求めることができる。

$$P(\delta_j) = \frac{1}{n^2} \times \frac{s_k}{\sum_{k=1}^l s_k} \dots\dots\dots (1)$$

(2) 算定例

距離の確率関数の算定例を示す。図-2 に計算に用いた地震域のモデルを示す。モデルAは解析地点を中心とする単一の扇形のモデル、モデルBは解析地点を中心とする扇形を2つ組み合わせたモデルである。これらのモデルに対しては、距離の累積確率 (分布関数) は理論的に次式で与えられる。

① モデルA

$$P(R \leq r) = \frac{r^2}{R_1^2} \dots\dots\dots (2)$$

② モデルB

$$P(R \leq r) = \begin{cases} \frac{r^2(\theta_1 + \theta_2)}{R_1^2\theta_1 + R_2^2\theta_2} & (0 < r \leq R_2) \\ \frac{r^2\theta_1 + R_2^2\theta_2}{R_1^2\theta_1 + R_2^2\theta_2} & (R_2 < r \leq R_1) \end{cases} \dots\dots\dots (3)$$

以下の計算では、モデルAに対し、 $R_1=100$ km、モデルBに対し、 $R_1=100$ km、 $R_2=50$ km、 $\theta_1=90^\circ$ 、 $\theta_2=$

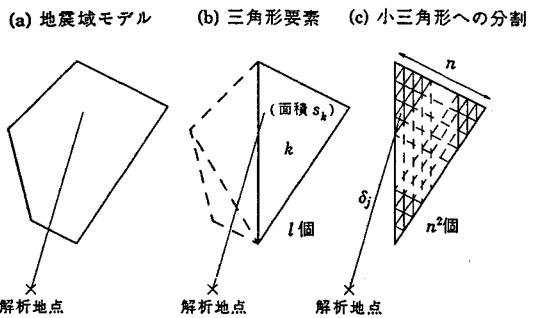


図-1 距離の確率の算定方法

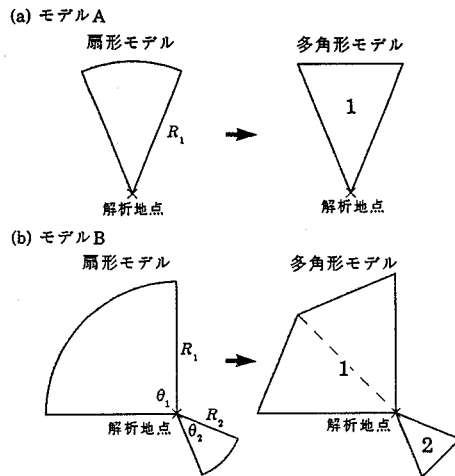


図-2 地震域モデル

45°としている。

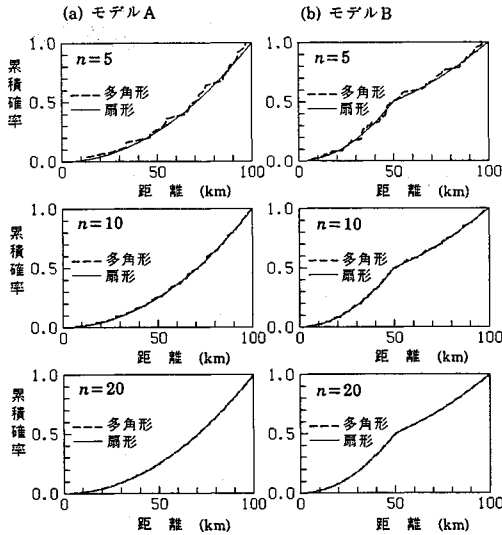
一方、これに対する多角形のモデルは図-2中に示すものであり、それぞれ扇形モデルと面積が等しくなるようにしている。また、モデルBのNo.1の地震域は破線で示されるような2個の三角形要素に分割している。

図-3に距離の累積確率の算定結果を示す。各図において、実線が扇形モデルの式(2)、(3)により得られた理論値、破線が多角形モデルにより離散的に算定した値である。また、 n は式(1)に示した三角形要素の分割数である。

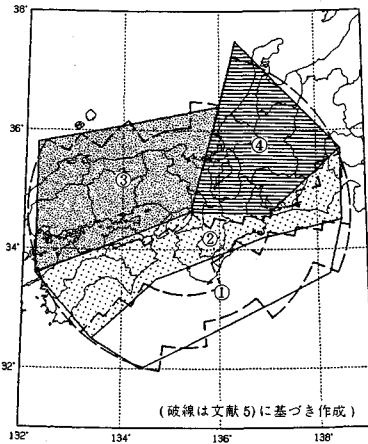
図-3より、ここで提案した多角形モデルによる方法で求めた距離の累積確率は、各三角形要素の分割数 n が5の場合には理論値に比べ相当の誤差がみられるのに対し、 n を10ないし20程度にとれば、十分な精度で距離の確率関数が算定できることがわかる。

3. 適用例

次に、多角形地震域モデルを用いた地震危険度解析例について示す。解析対象地点は大阪であり、ここではハ



図—3 距離の確率の算定結果

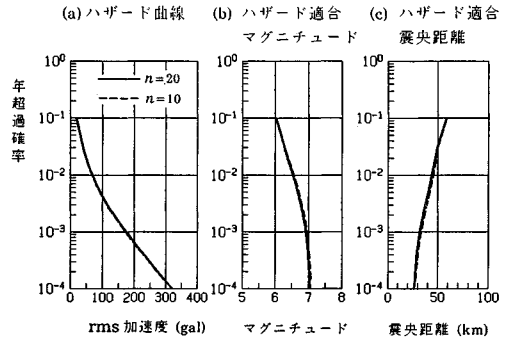


図—4 大阪における地震域モデル

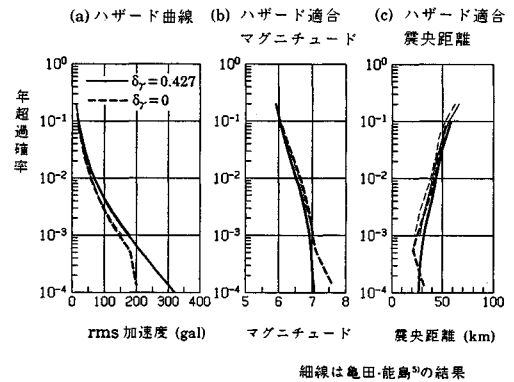
ザード曲線、ハザード適合マグニチュード、ハザード適合震央距離¹⁰⁾を算定した。なお、解析にあたっては多角形地震域モデルによる結果を扇形モデルの結果と比較するため、亀田・能島⁵⁾が用いた解析条件を基本的に踏襲した。図—4に解析に用いた地震域モデルを示す。図には亀田・能島⁵⁾が用いた扇形モデルの概略についても破線で示している。なお、ここでは4つの地震域を15の三角形要素に分割して解析を行った。表—1に各地震域におけるマグニチュード6以上の地震の単位面積当たりの年平均発生率、最大マグニチュード、b値を示す。また、対象とした地震動は基盤における最大rms加速度である。そのアテニュエーション式、式に含まれる不確定性および震央域の考え方については文献5)を参照されたい。

表—1 地震域ごとの地震パラメーター

No	マグニチュード6以上の地震の年平均発生率 (単位面積当たり)	最大マグニチュード	b 値
1	0.77×10^{-6}	8.6	0.42
2	1.09×10^{-6}	7.1	1.16
3	1.17×10^{-6}	7.5	1.15
4	2.34×10^{-6}	7.9	1.00



図—5 解析結果 (三角形要素の分割数を変えた場合)



図—6 解析結果 (扇形モデルとの比較)

以下に解析結果を示す。図—5は三角形要素の分割数を変えた場合の最大rms加速度のハザード曲線、ハザード適合マグニチュード、ハザード適合震央距離である。実線が分割数20の場合、破線が分割数10の場合である。両者はほぼ重なり合っており、先に述べたように、分割数を10程度以上とれば安定した解析結果が得られることがこの図からも読み取れる。

図—6はアテニュエーション式に含まれるばらつきの大きさを変えた場合の解析結果である。実線が変動係数で0.427の場合、破線が変動係数0の場合である。図には亀田・能島⁵⁾の計算結果についても合わせて示している。最大rms加速度の年超過確率を小さくとるほど定性的にハザード適合マグニチュードは大きく、ハザード

適合震央距離は小さくなる様子、また、アテニュエーション式のばらつきを0とした場合には、震央域の影響により年超過確率が非常に小さい領域でハザード適合震央距離が逆に増大する様子など、文献5)、10)で述べられている特徴が現われている。

次に、地震域モデルの形状の違いによる影響について検討する。図-6では多角形モデルを用いた本研究による結果と扇形モデルを用いた亀田・能島⁵⁾による結果を比較している。同図によれば、ハザード適合震央距離に関してのみ、一部5~10 km程度の違いがみられるものの、それ以外のハザード曲線、ハザード適合マグニチュードについては両者の結果はほぼ重なっており、地震域モデルの違いによる差はほとんどみられない。このことより、多角形の地震域モデルでも十分な精度で地震危険度が算定できることがわかる。なお、このハザード適合震央距離の差は地震域モデルの細かな違い(図-4参照)に起因しているものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、地震危険度解析における地震域モデルとして多角形モデルを用いた場合の解析手法、特に距離の確率の算定方法について論じた。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 本来不規則な形状の地震域をモデル化するには円形・扇形や長方形のモデルより多角形モデルを用いた方がモデル化しやすい。

(2) 多角形の地震域モデルを用いた場合について、解析地点との距離の確率関数の算定方法について新たに提案した。

(3) 上述の方法を扇形モデルの地震危険度解析結果と比較することによりその妥当性を示した。

謝 辞：なお、本研究をまとめるにあたり、京都大学防災研究所教授 亀田弘行先生ならびに同大学院生能

島暢呂氏には解析データの提供をはじめ貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Cornell, C. A. : Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5, pp. 1583~1606, 1968.
- 2) 土木学会編：動的解析と耐震設計 第1巻 地震動・動的物性, 技報堂出版, 1989.
- 3) 建設省土木研究所地震防災部・振動研究室：既往地震活動に基づく地震動強度の期待値推定法, 土木研究所資料, 第1696号, 1981.
- 4) 松尾 稔・板橋一雄：斜面および土構造物の地震危険度の統計的解析, 土木学会論文集, 第364号/Ⅲ-4, pp. 161~168, 1985.
- 5) Kameda, H. and Nojima, N. : Simulation of Risk-Consistent Earthquake Motion, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, pp. 1007~1019, 1988.
- 6) 志賀敏男・柴田明徳・村上輝秀：東北地方における最大地震動強さの再現期間, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)2010, pp. 19~20, 1985.
- 7) Kanda, J., Iwasaki, R., Kitada, Y., Nakamizo, H. and Ogata, M. : Seismic Hazard Estimation Based on Earthquake Recurrence Rate in Comparison with Empirical Extreme Value Distribution, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 2-1-9, pp. II-83~II-88, 1988.
- 8) Annaka, T. and Nozawa, Y. : A Probabilistic Model for Seismic Hazard Estimation in the Kanto District, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, 2-1-13, pp. II-107~II-112, 1988.
- 9) McGuire, R. K. : Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis, United States Geological Survey, Open File Report 76-67, 1976.
- 10) 亀田弘行・石川 裕：ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析の拡張, 土木学会論文集, 第392号/I-9, pp. 395~402, 1988.

(1989. 10. 9・受付)