

地震危険度解析システムの開発

石川 裕
(技術研究所)

§ 1. はじめに

構造物の耐震安全性を照査する場合、将来生起するであろう地震荷重を的確に設定することは基本的かつ重要な問題である。最近では、地震が断層運動によって発生するという認識が定着しつつあり、地震予知に関する研究も精力的に進められているが、将来発生するであろう地震の時刻・位置・規模（いつ、どこで、どの程度の大きさの地震が発生するか）を正確に予測することは現段階では不可能である。そこで、工学の分野では、確率・統計的手法を援用することにより地震のもつ不確定性を処理し、将来のある期間における地震動強度の発生確率を推定しようとする試みが行なわれており、それらは一般に地震危険度解析と呼ばれている。

従来、地震危険度解析は設計用地震荷重（設計震度）を設定するためのバックデータとして実施されてきたが、昨今、以下に示す理由により地震危険度解析が見直され、そのニーズが増加するよう勢にある。

(1)地盤や構造物の耐震安全性の検討に際して動的解析が頻繁に行なわれるようになってきたが、その場合の入力地震動の設定において、解析地点周辺の地震環境が反映できる地震危険度解析がきわめて有用であること。

(2)既存構造物の耐震診断が行なわれる機会が増加している。耐震診断では比較的短期間での地震荷重を評価する必要があるが、その場合、期間に応じた形で地震荷重が評価できる地震危険度解析が有用であること。

(3)地震発生に関するデータが最近見直された¹⁾²⁾のに伴い、新しい地震発生データに基づき地震危険度解析を実施する必要性が生じたこと。

(4)原子力発電所をはじめとする重要構造物では、耐震安全性の評価に確率論的な考え方³⁾が導入されるようになってきたが、その場合の地震荷重の評価に地震危険度解析を行なう必要があること。

本報告は、以上のような背景から最近開発した地震危険度解析システム「HAZARD」の概要について紹介す

るものである。まず、地震危険度解析の方法について述べた後、HAZARDの概要ならびにそれを用いて解析した例について示す。

§ 2. 地震危険度解析の方法

2.1 地震危険度解析に関する既往の研究

地震危険度解析に関する研究は、河角の研究⁴⁾以来、多くの研究者により研究が重ねられ⁵⁻⁸⁾、それらの成果は我が国の地震危険度図の基本となっている。また、地震発生に関する諸条件を確率論的にモデル化する方法をCornell⁹⁾が提案して以来、この方法によっても数多くの地震危険度解析が実施されており¹⁰⁾⁻¹³⁾、それらの成果は各種構造物の設計用地震荷重の評価や確率論的な安全性評価などに貢献している。特に、Cornell流の方法は、将来発生するであろう地震の時刻・規模・位置のそれぞれに含まれる不確定性を考慮する意味できわめて有用であり、地震の発生をポアソン過程でモデル化すれば地震動強度ごとの年超過確率を示すハザード曲線で結果を簡潔に評価することができる。

一方、従来の地震危険度解析手法は基本的に単一の地震動強度パラメータを取り扱うものであったのに対し、亀田・石川¹⁴⁾はこれを複数の地震動パラメータの同時評価法へ拡張する方法について提案し、そのための指標としてハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離を定義している。この考え方を利用すれば、年超過確率や再現期間といった単一のリスクの指標の下に複数の地震動パラメータを評価することができ、例えば砂地盤の液状化予測のための地震荷重評価¹⁴⁾や、リスク適合地震動¹⁴⁾¹⁵⁾といったような地震危険度に応じた形での模擬地震動の発生などが可能となる。

ここで紹介する地震危険度解析システム HAZARDは、基本的に上述のCornell流の方法に基づいている。また、従来より行なわれていた強度パラメータの地震危

険度解析に加えて、亀田・石川により提案された方法に基づきハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離、ならびに強度以外の地震動パラメータの評価が可能となっている。

2.2 強度パラメータの地震危険度解析

まず、最大加速度、最大速度など強度パラメータの地震危険度解析手法について述べる。

図-1に解析のフローを示す。解析では、まず解析地点周辺地域を地震活動度や地震発生様式が一樣と見なせる領域（以下、これを地震域と呼ぶ）に分割した上で、地震発生の時系列はポアソン過程に、規模別地震発生頻度は Gutenberg-Richter 式に従うものとし、地震発生位置は各地震域内で一様ランダムであると仮定することにより地震発生をモデル化する。そして、この確率モデルと強度パラメータの距離減衰式を組み合わせることにより、解析地点での強度レベルごとの年超過確率を求める。なお、距離減衰式に含まれるばらつきは対数正規分布により考慮する。このとき、強度パラメータ Y が 1 年間にある値 y を超える確率（年超過確率） P は次式のようになる。

$$p = 1 - \exp\left(-\sum_k w_k\right) \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 w_k は地震域 k の地震で解析地点に $y(p)$ 以上の地震動をもたらす地震の年発生率であり、次式のようになる。

$$w_k = v_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j) \quad \dots\dots(2)$$

ただし、 v_k 、 s_k はそれぞれ、地震数 k における単位面積

当たりの地震の年平均発生数、および地震域 k の面積である。 $P_k(m_i)$ 、 $P_k(\delta_j)$ はそれぞれ、 k で発生する地震のマグニチュード M 、震央距離 d の確率関数である。また、 $P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j)$ はマグニチュードが m_i 、震央距離が δ_j の地震により Y が $y(p)$ を超える確率であり、 Y の距離減衰式にそのばらつきを考慮することにより算定することができる。

2.3 ハザード適合マグニチュード・震央距離の算定

ハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離¹⁾の概念を図-2に示す。同図(a)は、すべての地震を対象とした場合のマグニチュード・震央距離の確率分布であり、これに基づき 2.2 で示した方法により図-2(b)のようなハザード曲線を得る。ハザード曲線が得られると、実際に生起する地震動 Y が $y(p)$ を超えるという条件下で以後の議論が行われるから、対象となる地震のマグニチュード・震央距離の母集団（条件付確率分布）が図-2(c)のように p によって変化することになる。そして、強度以外の地震動パラメータはこのマグニチュード・震央距離の条件付確率分布を用いて決定される。ハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離とは、それぞれこのようなマグニチュードおよび震央距離の条件付期待値として定義される。

ハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離の算定法を示す。まず、ある地震域 k を特定したとき、 k で発生する地震で、解析地点に $y(p)$ 以上の地震動が生じたという条件下での、マグニチュードおよび震央距離の条件付期待値 $E_k(M | Y \geq y(p))$ 、 $E_k(d | Y \geq y(p))$ は次式で表わされる。

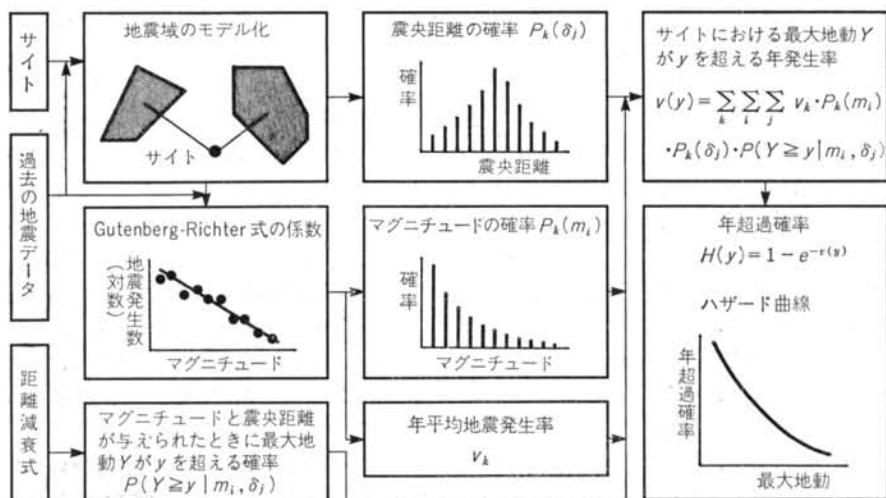


図-1 地震危険度解析のフロー

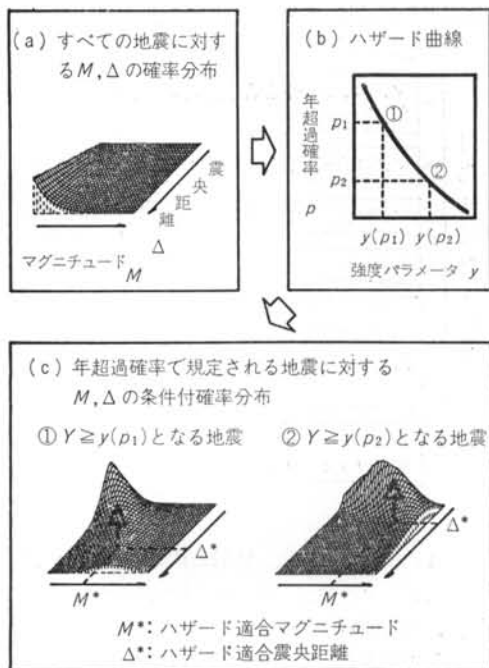


図-2 ハザード適合マグニチュード・震央距離の概念

$$E_k(M|Y \geq y(p)) = \sum_i \sum_j m_i \cdot P_k(m_i, \delta_j | Y \geq y(p)) \quad \dots(3)$$

$$E_k(\Delta|Y \geq y(p)) = \sum_i \sum_j \delta_j \cdot P_k(m_i, \delta_j | Y \geq y(p)) \quad \dots(4)$$

上式中、 $P_k(m_i, \delta_j | Y \geq y(p))$ は地震域 k の地震で解析地点に $y(p)$ 以上の地震動が生じた場合に、その地震のマグニチュード、震央距離がそれぞれ m_i, δ_j である条件付確率であり、次式で求められる。

$$P_k(m_i, \delta_j | Y \geq y(p)) = \frac{P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)}{P(Y \geq y(p))} \\ = \frac{P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)}{\sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)} \quad \dots(5)$$

なお、式中の各記号の定義は 2.2 で示したものと同様である。

これにより、地震域 k の地震を対象とした場合のマグニチュード、震央距離の条件付期待値が求まる。したがって、これに解析地点に $y(p)$ 以上の地震動をもたらす地震の年発生率 w_k に応じた重み付けをして足し合わせることににより、全地震域を考慮した形でマグニチュードおよび震央距離の条件付期待値、すなわちハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離（以下では、それぞれ M^*, Δ^* と記す）が次式により算定できる。

$$M^* = E(M|Y \geq y(p)) \\ = \frac{\sum_k w_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j m_i \cdot P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)}{\sum_k w_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)} \quad \dots(6)$$

$$\Delta^* = E(\Delta|Y \geq y(p))$$

$$= \frac{\sum_k w_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j \delta_j \cdot P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)}{\sum_k w_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)} \quad \dots(7)$$

2.4 強度以外の地震動パラメータの算定

(1) 条件付期待値を直接算定する方法

地震動の継続時間や周波数特性など、強度パラメータ Y 以外の地震動パラメータ X が、地震のマグニチュード M 、および震央距離 Δ から $X = g(M, \Delta)$ の形で推定されたとすれば、 $Y \geq y(p)$ なる条件下での X の期待値 X^* は、先に示したハザード適合マグニチュード M^* 、ハザード適合震央距離 Δ^* を算定するのと同様の考え方で、次式のように算定することができる。

$$X^* = E(X|Y \geq y(p)) \\ = \frac{\sum_k w_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j g(m_i, \delta_j) \cdot P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)}{\sum_k w_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)} \quad (8)$$

なお、式中の記号はすべて既に定義したものである。

(2) ハザード適合マグニチュード・震央距離による近似評価法

式(8)を用いれば、与えられた年超過確率 p に応じて強度以外のパラメータ X の条件付期待値を算定することができる。ところが、パラメータ X はマグニチュードおよび震央距離の関数として表わされているため、2.3 で定義したハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離を用いれば近似的にパラメータ X の条件付期待値 X^* を次式により 1 次近似として推定することができる。

$$X^* \approx g(M^*, \Delta^*) \quad \dots(9)$$

さらに精度を上げるには、2 次近似として X^* を推定することができる。2 次近似による X^* の推定式については、文献 14) を参照されたい。

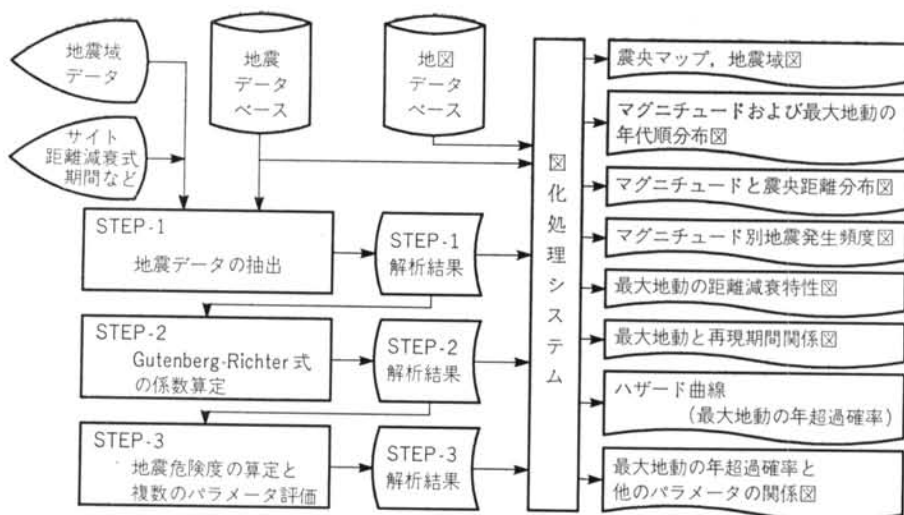
§ 3. 地震危険度解析システムの概要

3.1 地震危険度解析システム HAZARD の特徴

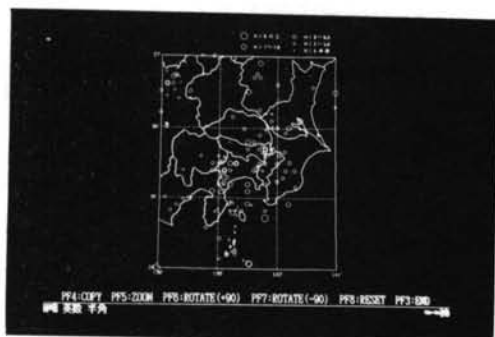
以上に述べた方法により、地震危険度解析を行なうシステム HAZARD を開発した。HAZARD のシステム構成を図-3 に示す。HAZARD が有している主な特徴は、以下のとおりである。

(1) 日本各地で過去に発生した地震データ¹⁾²⁾¹⁶⁾をデータベースとして備えているため、全国どの地点でも迅速に地震危険度解析が行なえる。

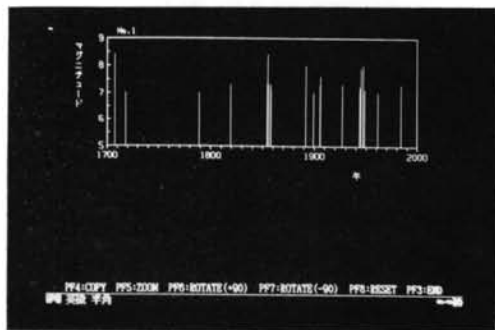
(2) 地震域モデルの形状として多角形を採用しているため、複雑で不規則な形状のプレート境界や活断層区を容



図一3 HAZARD のシステム構成



写真一1 震央マップ



写真一2 マグニチュード年代順分布図

易にモデル化できる。なお、多角形モデルを用いた場合の距離の確率関数の算定方法¹⁷⁾については後で詳しく述べる。

(3) 上述したように、従来より行なわれていた強度パラメータの地震危険度解析に加えて、ハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離、ならびに強度以外の地震動パラメータの評価が可能となっている。

(4) 図一3に示したように、HAZARDにおける解析では、①地震データの抽出、②Gutenberg-Richter式の係数の算定、③強度パラメータの年超過確率の算定ならびに強度以外の地震動パラメータの評価、④結果の図化の各ステップに分けることができ、それぞれ必要な部分だけの解析を行なうことができる。

(5) 地震危険度解析結果として、図一3に示したような8種類の図を描くことができ、それぞれ端末画面上ならびに静電プロッタにより出力できる。写真一1、写真一2には画面に出力した結果のイメージを示す(実際はカラーで表示される)。

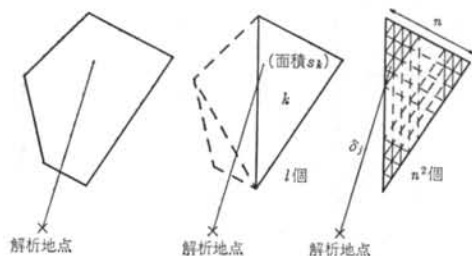
HAZARDではその他にも、円形の地震域モデルによる解析、地震データからの余震の除去、30種類以上の距離減衰式による解析などを行なうことができる。また、対話型処理の採用や画面入力によるデータのインプットなど、ユーザーの利便性を考えた諸々の機能を有している。

3.2 多角形地震域モデルによる距離の確率の算定

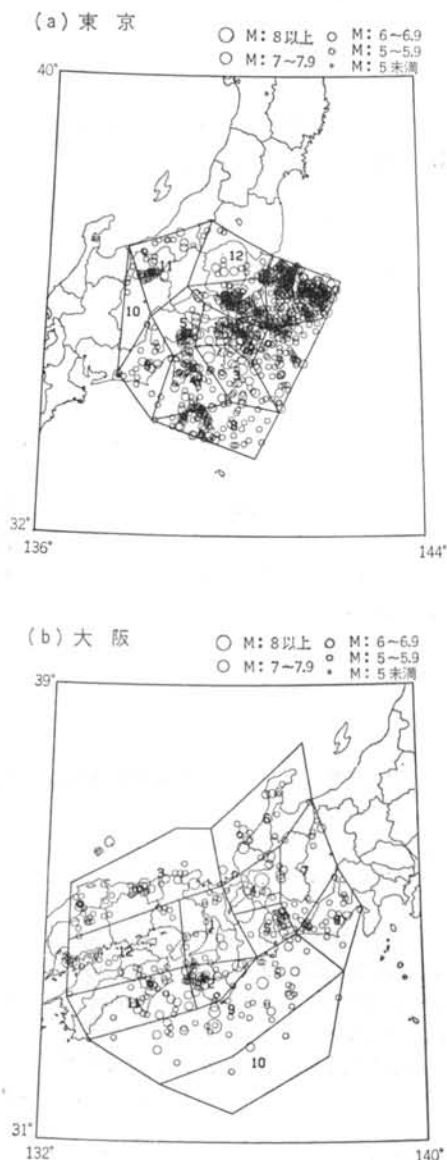
2.2で述べたように、Cornell流の地震危険度解析では解析地点周辺地域において地震域のモデルを設定する必要がある。従来の地震危険度解析では、円形・扇形や長方形の地震域モデルが用いられることが多かった。これはひとえに、解析地点までの距離の確率の算定が容易であるからに他ならない。しかし、このようなモデルでは、複雑かつ不規則な形状であるプレート境界や活断層区をモデル化しづらいといった問題点を抱えていた。

今回開発したHAZARDではこのような問題点を解消するため、地震域モデルとして多角形のモデルを用い

(a)地震域モデル (b)三角形要素 (c)小三角形への分割



図一4 距離の確率関数の算定法



図一5 地震域モデルと地震データの震央分布

ることを基本としている。多角形のモデルを用いると、プレート境界などのモデル化は容易である反面、解析地点までの距離の確率計算がやや煩雑となる。そこで、ここでは多角形の地震域モデルを用いた場合の距離の確率（確率関数）の算定方法¹⁷⁾について述べる。図一4に距離の確率関数を算定する考え方について示すが、その手順は次のとおりである。

①多角形の地震域を l 個の三角形に分割する。このとき、各三角形の面積を s_k をする。

②分割された三角形 k において、各辺を n 等分してそれぞれを結び、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 は容易に算定できるので、このときの距離 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。

$$P(\delta_j) = \frac{1}{n^2} \times \frac{s_k}{\sum_{k=1}^l s_k} \quad \dots\dots(10)$$

§ 4. 適用例

HAZARD により解析を行なった例について示す。解析対象は東京、大阪の2地点である。表一1に解析条件を、また図一5に解析に用いた地震域のモデルならびに地震データの震央分布を示す。

表一2には、STEP 2 で算定された各地震域における

地震発生データ

- 宇津¹⁾ 1885～1925 ($M \geq 6$)
- 気象庁¹⁶⁾ 1926～1983 ($M \geq 5$)
- (余震、深さ 100km 以上の地震は除去)

最小マグニチュード

- 5.0

最大マグニチュード

- 各地震域ごとに過去の最大値

地震動の距離減衰式

- 道路橋示方書¹⁸⁾の4種地盤の式：

$$A = 12.8 \times 10^{0.4M} \times (d + 10)^{-1.112}$$

A ：最大加速度 (Gal)

M ：マグニチュード

d ：震央距離 (km)

距離減衰式のばらつき

- 対数標準偏差 0.5 の対数正規分布

表一1 解析条件一覧

(a) 東京

No	年当たり地震発生数* ($M \geq 5$)	b 値	最大マグニチュード
1	4.22×10^{-5}	0.472	7.4
2	1.80×10^{-4}	1.121	6.5
3	4.15×10^{-5}	0.622	8.2
4	7.02×10^{-5}	0.863	7.3
5	3.68×10^{-5}	0.577	7.3
6	2.08×10^{-4}	1.099	7.2
7	8.20×10^{-5}	0.946	7.1
8	7.01×10^{-5}	0.986	6.8
9	2.52×10^{-5}	0.769	6.4
10	1.15×10^{-5}	0.937	6.5
11	3.84×10^{-5}	1.348	7.4
12	2.35×10^{-5}	0.826	7.3
13	2.93×10^{-4}	0.824	7.5

(b) 大阪

No	年当たり地震発生数* ($M \geq 5$)	b 値	最大マグニチュード
1	1.81×10^{-5}	0.984	7.6
2	5.47×10^{-5}	0.783	7.0
3	1.61×10^{-5}	0.864	7.4
4	1.82×10^{-5}	0.547	8.1
5	3.50×10^{-5}	1.037	7.1
6	9.16×10^{-6}	0.884	7.1
7	1.40×10^{-5}	0.972	7.4
8	2.49×10^{-5}	0.914	6.7
9	1.31×10^{-5}	0.721	8.6
10	1.59×10^{-6}	0.881	6.5
11	2.30×10^{-5}	0.922	6.8
12	1.27×10^{-5}	1.184	7.3

*地震発生数は単位面積 (km^{-2}) 当たり

表-2 各地震域における地震パラメータ

Gutenberg-Richter 式の係数および最大マグニチュードを示す。このうち、b 値はその地震域におけるマグニチュードの確率分布を規定するパラメータであり、値が小さいほど相対的にマグニチュードの大きな地震の発生割合が大きいことを意味する。

図-6 に最終結果であるハザード曲線ならびにハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離を示す。この図より、同一の年超過確率に対しては東京の方が大阪より大きな最大加速度が期待されること、またハザード適合マグニチュードはほぼ同じものの、ハザード適合

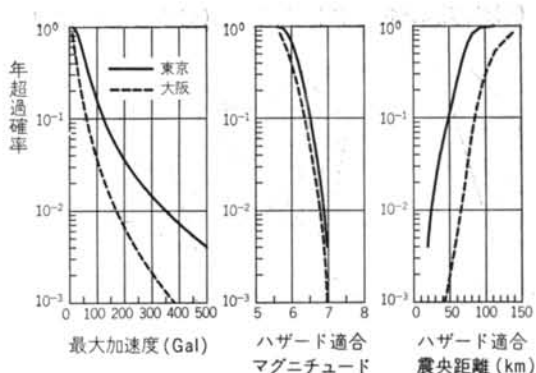


図-6 ハザード曲線・ハザード適合マグニチュード・ハザード適合震央距離

震央距離については東京の方が小さく、相対的に近距離の地震が卓越することなどが分かる。

§ 5. おわりに

本報告では地震危険度解析の方法を述べた後、最近開発した地震危険度解析システム HAZARD の概要について紹介した。冒頭で述べたように、最近地震危険度解析に対するニーズは高まるすう勢にある。ここで紹介したシステム HAZARD を用いれば、全国どの地点でも迅速に地震危険度解析を行なうことができるため、今後地盤や構造物の動的解析用入力地震動の設定や、建物の耐震診断における地震荷重評価などに威力を発揮するものと期待される。

<参考文献>

- 1) 宇津徳治：“日本付近のM 6.0以上の地震および被害地震の表：1885年～1980年” 東京大学地震研究所彙報 Vol.57 (1982) pp.401～463
- 2) 宇佐美龍夫：“工学的地震動策定のための日本被害地震一覧表” 地震学会予稿集 (1986年) p.156
- 3) 柴田碧・亀田弘行・黒田孝・岡村弘之・飛岡利明・宇賀丈雄・篠塚正宣：“原子力発電所の地震時危険度の確率論的評価” 日本原子力学会誌 Vol.28, No.1 (1986年) pp.2～40
- 4) H.Kawasumi: “Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity” Bulletin of Earthquake Research Institute, Vol.29 (1951) pp.469～482
- 5) K.Kanai & T.Suzuki: “Expectancy of the Maximum Velocity Amplitude of Earthquake Ground Motions at Bedrock” Bulletin of Earthquake Research Institute, Vol.46 (1968) pp.663～666
- 6) 後藤尚男・亀田弘行：“地震時における最大地動の確率論的研究” 土木学会論文集 第159号 (1968年) pp.1～12
- 7) 服部定育：“日本付近の地震危険度に関する考察—地震活動度、および地盤特性を考慮した地震危険度 map の提案—” 建築研究報告 No.81 (1977年)
- 8) 壇一男・神田順：“上下限値を有する極値分布を用いた地震危険度解析” 日本建築学会構造系論文報告集 第363号 (1986年) pp.50～56

- 9) C. A. Cornell: "Engineering Seismic Risk Analysis" Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5 (1968) pp. 1583~1606
- 10) A. Der Kiureghian & A. H-S. Ang: "A Fault Rupture Model for Seismic Risk Analysis" Bulletin of Seismological Society of America, Vol. 67, No. 4 (1977) pp. 1173~1194
- 11) T. Itoh, K. Ishii, Y. Ishikawa & T. Okumura: "Development of Seismic Hazard Curves Based on Different Analytical Models" Proc. of 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, Vol. III (1985) pp. 729~733
- 12) 亀田弘行・奥村俊彦: "活断層データと歴史地震データを組み合わせた地震危険度解析" 土木学会論文集 第362号/I-4 (1985年) pp. 407~415
- 13) 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 (1985年) pp. 161~163
- 14) 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 (1988年) pp. 395~402
- 15) H. Kameda & N. Nojima: "Simulation of Risk-Consistent Earthquake Motion" Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 16 (1988) pp. 1007~1019
- 16) 気象庁: "改訂日本付近の主要地震の表(1926年~1960年)" 地震月報別冊第6号(1982年)および"地震月報"(1961年~1985年)
- 17) 石川裕: "多角形地震域モデルによる地震危険度解析" 土木学会論文集 第416号/I-13 (1990年) pp. 377~380
- 18) 鈿日本道路協会編: "道路橋示方書・同解説 V耐震設計編" 日本道路協会(1980年) p. 108

