

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

EXTENDED SEISMIC RISK ANALYSIS BY HAZARD-CONSISTENT MAGNITUDE AND DISTANCE

亀田 弘行*・石川 裕**

By Hiroyuki KAMEDA and Yutaka ISHIKAWA

While the conventional seismic hazard analysis incorporates estimation of a single ground motion intensity parameter, it is often required in engineering application to estimate not only intensity parameter, but also other ground motion parameters, such as, predominant period, ground motion duration, etc.... For the purpose of such an extension, the use of "hazard-consistent magnitude" and "hazard-consistent distance" is proposed. They are defined as conditional mean values given that the ground motion intensity exceeds the level specified by the annual probability of exceedance. Other ground motion parameters are determined as such corresponding to the hazard-consistent magnitude and the hazard-consistent distance. In this manner, one can determine all parameters to characterize a site ground motion on the basis of a single risk parameter.

Keywords: seismic hazard analysis, determination of multiple ground motion parameters, hazard-consistent magnitude, hazard-consistent distance

1. 緒 論

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推定するには、地震の発生から地震動の推定に至るプロセスにおいて種々の不確実性が含まれる。工学の分野ではそれらの不確実性の処理に確率・統計的手法を用いた地震危険度解析の手法が広く用いられている。地震危険度解析に関する研究は、河角の研究¹⁾以来、金井・鈴木²⁾、後藤・亀田³⁾らによって地震データの扱いなどに改良が加えられ、さらに多くの研究者による成果を加え、それらの結果はわが国の地震危険度図の基本となっている。また、地震発生そのものを確率論的にモデル化する方法をCornell⁴⁾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^{5)~8)}、それらの研究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実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できる利点がある。

ところで、上述の地震危険度解析は、基本的には単一の地震動強度パラメータを取り扱う手法であるため、地震動強度のみでなく継続時間や周波数特性なども同時に扱うような問題に地震危険度解析の考え方を取り入れたような研究は少ない。たとえば、最近わが国でも関心が高まっている原子力発電所の確率論的地震リスク評価⁹⁾においても、地震危険度解析の考え方は最大加速度のハザード曲線を評価するステップに用いられるにとどまっている。一方、耐震設計法の高度化に伴い、地震動の強度のみでは地震荷重に関する情報として不十分で、継続時間、卓越周期、スペクトルの形状などが同時に必要とされるようになってきているが、従来の地震危険度解析の方法では、このような複数の地震動パラメータを同時に扱うことは不可能であった。

地震危険度解析において複数の地震動パラメータを厳密に取り入れるには、すべてのパラメータの同時確率分布を評価する必要がある。しかしながら、この方法は解析的にきわめて複雑なうえに、それに見合うデータを得ることも困難であるため、工学的に現実的な方法とはいえない。そこで、本研究では、種々の地震動パラメー

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 都市施設耐震システム研究センター (〒611 宇治市五ヶ庄)

** 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)

ターのうち、構造物の地震時挙動を最も強く支配すると考えられる強度パラメーターを年超過確率に応じてまず算定した後、「ハザード適合マグニチュード」・「ハザード適合震央距離」を新たに定義し、これを用いて他の地震動パラメーターを評価する手法を提案する。これにより、解析的な煩雑さを避けつつ、地震危険度解析の手法を複数の地震動パラメーターの同時評価法に拡張することができる。

なお、本研究で示す手法は、著者両名が別々に発案したものの^{10),11)}で、研究対象はそれぞれ異なるが、手法としての基本的な考え方が同じであること、また、汎用的な手法であり、ここで述べる以外にも適用対象が広いと考えられることから、1編の論文として、ここにまとめるものである。

2. ハザード適合マグニチュード・震央距離の定義

(1) 基本概念

ここでは複数の地震動パラメーターを同時に扱うが、その中で、最大加速度などの強度パラメーターが工学的に最も重要であることは当然である。そこで、まず強度パラメーターの算定については従来の地震危険度解析の手法を踏襲する。すなわち、図-1(a)のように確率モデル化された地震群に対して図-1(b)のハザード曲線を求め、年超過確率 p を与えて対応する地震動強度 $y(p)$ を求める。

このようにして $y(p)$ が定まると、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ことになるから、対象とする地震群の母集団が変化する。すなわち、図-1(c)のように、 $Y \geq y(p)$ なる条件下での地震群を対象とすることになる。同図からわかるように、この場合のマグニチュード M 、震央距離 Δ の条件付確率分布は p の値によりさまざまに変化する。

本研究の提案は、この M 、 Δ の条件付確率分布を用いて、強度以外の地震動パラメーターを決定しようとするものである。もっとも、 M 、 Δ の確率分布を扱うことは重要であるものの、複雑な確率分布を直接扱わずに、その代表値を扱う方が簡便であり、工学的に十分有用な場合が多い。そこで、本研究では、 $Y \geq y(p)$ なる条件下での M 、 Δ の条件付期待値を求め、これを「ハザード適合マグニチュード」「ハザード適合震央距離」と定義する。そして、このハザード適合マグニチュード・震央距離から強度パラメーター以外のパラメーターを推定する。この方法によれば、対象とする地震動パラメーターがいくつであっても、すべて強度パラメーター Y の年超過確率 p という単一のリスク指標の関数として求められることになり、その解釈、実際の取り扱いのうえでも便利である。

(2) 年超過確率に対応する強度パラメーターの算定 (ハザード曲線)

複数の地震動パラメーターのうち、強度パラメーターの値は前述のごとく従来の地震危険度解析の方法により求める。その手法はすでに確立されたものであるから、詳細は他の文献^{4),5)}に譲り、ここでは必要な項目に限定して述べる。地震危険度解析も細部ではいくつかの手法に分かれるが、ここでは、Cornell 流⁴⁾の考え方で議論を進める。

解析ではまず、注目地点周辺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、これを地震発生域とよぶ）に分割したうえで、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発生域内で一樣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ーのアテニュエーション式を組み合わせることにより、注目地点での強度レベルごとの年超過確率を求める。なお、アテニュエーション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、強度パラメーター Y が1年間にある値 y を超える確率（年超過確率） p は次式のようなになる。

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

ここに、 w_k は地震発生域 k の地震で注目地点に $y(p)$ 以

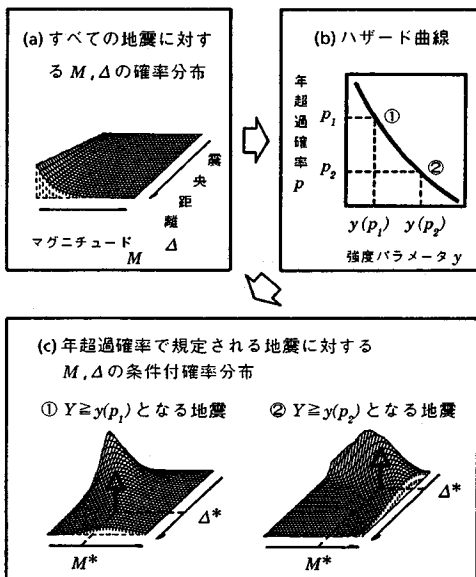


図-1 強度パラメーターの年超過確率により規定される地震群 (概念図)

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。

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

ただし、 ν_k は地震発生域 k における単位面積当たりの地震の年平均発生数、 s_k は地震発生域 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 Δ の確率関数である。なお、ここでは計算のアルゴリズムの関係上、本来は連続量であるマグニチュードと震央距離を離散化して扱っている。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 のアテニュエーション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。以上のようにして求められる p と $y(p)$ の関係を図示して図-1(b) のようなハザード曲線を得る。

(3) ハザード適合マグニチュード・震央距離の算定
本研究で新たに定義するハザード適合マグニチュード・震央距離算定の定式化について示す。地震発生に関する前提条件はすべて2.(2)のハザード曲線算定の場合と同様である。

まず、ある地震発生域 k を特定したとき、 k で発生する地震で、注目地点に $y(p)$ 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 $E_k(M | Y \geq y(p))$ 、 $E_k(\Delta | Y \geq y(p))$ は次式で表わされる。

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

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

上式中、 $P_k(m_i, \delta_j | Y \geq y(p))$ は地震発生域 k の地震で注目地点に $y(p)$ 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。

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

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、地震発生域 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、これに注目地点に $y(p)$ 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

合わせることにより、全地震発生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が次式により算定できる。

$$M^* = E(M | Y \geq y(p)) = \frac{\sum_k E_k(M | Y \geq y(p)) \cdot w_k}{\sum_k w_k} \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta^* = E(\Delta | Y \geq y(p)) = \frac{\sum_k E_k(\Delta | Y \geq y(p)) \cdot w_k}{\sum_k w_k} \dots\dots (7)$$

ただし、 w_k は式(2)に示したとおりである。

以上をまとめると、本研究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（以下ではそれぞれ M^* 、 Δ^* と記す）は次のようになる。

$$M^* = E(M | Y \geq y(p)) = \frac{\sum_k \nu_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j m_i \cdot P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)}{\sum_k \nu_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)} \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta^* = E(\Delta | Y \geq y(p)) = \frac{\sum_k \nu_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j \delta_j \cdot P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)}{\sum_k \nu_k \cdot s_k \cdot \sum_i \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j)} \dots\dots\dots (9)$$

また、 $Y \geq y(p)$ なる条件下でのマグニチュード、震央距離の分散 $\text{Var}(M | Y \geq y(p))$ 、 $\text{Var}(\Delta | Y \geq y(p))$ 、共分散 $\text{Cov}(M, \Delta | Y \geq y(p))$ についても次に示す関係式¹²⁾を用いることにより算定できる。

$$\text{Var}(M | Y \geq y(p)) = E(M^2 | Y \geq y(p)) - (M^*)^2 \dots\dots (10)$$

$$\text{Var}(\Delta | Y \geq y(p)) = E(\Delta^2 | Y \geq y(p)) - (\Delta^*)^2 \dots\dots (11)$$

$$\text{Cov}(M, \Delta | Y \geq y(p)) = E(M \cdot \Delta | Y \geq y(p)) - M^* \cdot \Delta^* \dots\dots\dots (12)$$

なお、上式において、 $E(M^2 | Y \geq y(p))$ 、 $E(\Delta^2 | Y \geq y(p))$ 、 $E(M \cdot \Delta | Y \geq y(p))$ は式(3)~(9)において M^* 、 Δ^* を算定したのと同様の手順で求めることができる。

3. 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

以上論じてきた諸概念を用いれば、従来の地震危険度解析を拡張して、確率論的な妥当性を失うことなく複数の地震動パラメーターを同時に決定する方法を体系化することができる。その手法は次の2ステップからなる。

- ① ハザード曲線を用いて、年超過確率 p に対応する地震動強度 $y(p)$ を算定する。
- ② $Y \geq y(p)$ なる条件下での条件付期待値として他の地震動パラメーター(継続時間や周波数特性など)を算定する。
すなわち、従来行われてきたステップ①に、ステップ

②を加えることにより，地震危険度解析を拡張できる。ステップ②の具体的な方法には以下のような2通りが考えられる。

(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，強度パラメーター Y 以外の地震動パラメーター X が，地震のマグニチュード M ，および震央距離 Δ から $X=g(M, \Delta)$ の形で推定されるとすれば， $Y \geq y(p)$ なる条件下での X の期待値 X^* は，前章2. で示した， M^* ， Δ^* を算定すると同様の考え方で次式のように算定することができる。

$$\begin{aligned}
 X^* &= E(X | Y \geq y(p)) \\
 &= \left[\sum_k \nu_k \cdot s_k \cdot \sum_j g(m_i, \delta_j) \cdot P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j) \right] / \left[\sum_k \nu_k \cdot s_k \cdot \sum_j P(Y \geq y(p) | m_i, \delta_j) \cdot P_k(m_i) \cdot P_k(\delta_j) \right] \dots \dots \dots (13)
 \end{aligned}$$

なお，式中の記号はすべて2. においてすで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(13)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ー X の条件付期待値を算定することができる。ところが，パラメーター 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. 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ー X の条件付期待値 X^* を推定することができる。1次近似および2次近似の定式化¹²⁾を以下に示す。

● 1次近似

$$X^* \approx g(M^*, \Delta^*) \dots \dots \dots (14)$$

● 2次近似

$$\begin{aligned}
 X^* &\approx g(M^*, \Delta^*) \\
 &+ \frac{1}{2} \left[\left| \frac{\partial^2 g}{\partial M^2} \right|_{M^*, \Delta^*} \cdot \text{Var}(M | Y \geq y(p)) \right. \\
 &+ \left| \frac{\partial^2 g}{\partial \Delta^2} \right|_{M^*, \Delta^*} \cdot \text{Var}(\Delta | Y \geq y(p)) \\
 &+ 2 \cdot \left. \left| \frac{\partial^2 g}{\partial M \partial \Delta} \right|_{M^*, \Delta^*} \cdot \text{Cov}(M, \Delta | Y \geq y(p)) \right] \dots \dots \dots (15)
 \end{aligned}$$

すなわち，注目する各地点において，地震危険度解析を行う場合，ハザード曲線を算定すると合わせて，ハザード適合マグニチュード，ハザード適合震央距離を求めておけば，ここで示した考え方により，与えられた年超過確率 p に応じて，簡便な形で強度パラメーター以外の地震動パラメーターの条件付期待値を評価することが可能になる。

4. 適用例

以上に示した拡張された地震危険度解析（以下，本論文では拡張地震危険度解析とよぶ）の適用例を示す。解析の対象としたのは，東京，大阪，仙台，福岡の4地点である。

(1) ハザード適合マグニチュード・震央距離の算定結果

図-2に上記4地点におけるハザード曲線，および強度パラメーターの年超過確率に対するハザード適合マグニチュード・震央距離の算定例を示す。地震発生域のモデル，歴史地震資料などの諸条件は文献11)に示したものをを用いている。地震動強度の指標としては地表における最大加速度とし，そのアテニュエーション式は道路橋示方書¹³⁾の4種地盤の式を用いている。また，そのばらつきは対数標準偏差0.5と仮定している。

図-2において，ハザード曲線によれば，どの地点においても，年超過確率を小さく見込むにつれて，期待される最大加速度は大きくなり，その大きさは東京，仙台，大阪，福岡の順となることがわかる。また，ハザード適

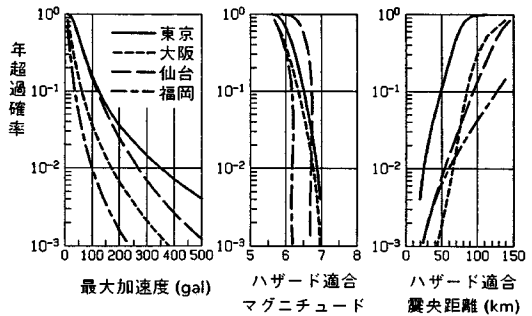


図-2 各地点におけるハザード曲線およびハザード適合マグニチュード・震央距離

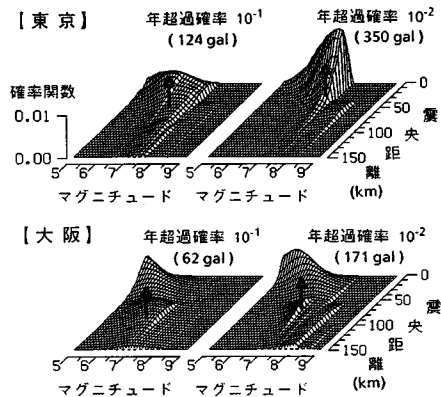


図-3 東京・大阪におけるマグニチュード・震央距離の条件付確率分布

合マグニチュード・震央距離に関しては、定性的には最大加速度の年超過確率が小さくなるに伴い、ハザード適合マグニチュードは大きく、また、ハザード適合震央距離は小さくなっていく傾向がわかる。しかしながら、定量的には、地点によって周辺の地震環境を反映した特徴的な差異がみられる。

この地域的な特徴をより明確にするため、東京、大阪の2地点について、年超過確率が 10^{-1} 、 10^{-2} に対応する場合の M 、 Δ の条件付確率分布を図-3に示す。この条件付確率分布はハザード適合マグニチュード・震央距離を算定する場合の基本となるものである。図-3において、矢印の根元がそれぞれハザード適合マグニチュード・震央距離を表わしている。図-3に表われているように、東京では、比較的近距离の地震の発生頻度が相対的に高く、このため、図-2にみられるように、他の地点に比べてハザード適合震央距離の値は小さい。一方、大阪では、広い範囲の地震の影響を受けること、また、年超過確率が 10^{-2} 程度となるような場合には、南海道沖や根尾谷断層付近などのやや遠方で発生するマグニチュードが8クラスの地震の影響が相対的に大きくなっていくために、ハザード適合震央距離の値は東京に比して大きな値をとることがわかる。

ここでは東京、大阪の2地点の特徴のみを示したが、太平洋側での地震の発生頻度が高い仙台、地震活動がそれほど活発でない福岡についてもそれぞれの地点に関する特徴をみることができ、図-2に示したハザード適合マグニチュード・震央距離はそのような特徴を反映したもとなっている。

(2) 液状化予測への適用

次に、拡張地震危険度解析の考え方を地盤の液状化予測に適用した例について示す。地盤の液状化に関与する地震動特性として、最大加速度のみならず、地震動の繰り返し回数も重要なパラメーターであることは周知のとおりであり、最近多く用いられている時松・吉見¹⁴⁾による液状化簡易判定法では、この影響を地震のマグニチュードで代表させる形で考慮している。したがって、地震危険度解析により地震荷重を設定する場合には、ある期間に期待される最大加速度と合わせて、地震のマグニチュードを設定する必要がある。この場合、設定するマグニチュードの値は注目地点周辺の地震環境に当然左右されるものであるところから、本研究で定義したハザード適合マグニチュードをそのまま用いることにより、そのような地震環境の特徴や考慮する期間に応じた形で、マグニチュードの期待値を設定することが可能となる。また、今後、地震動の繰り返し回数との間のばらつきが大きいマグニチュードではなく、繰り返し回数を表わすもっと直接的なパラメーターを判定法に取り入れ

て精度向上を図る場合でも、そのパラメーターが M 、 Δ と対応づけられていれば、本研究で示した拡張地震危険度解析の手法を用いることにより、単一のリスク指標に基づいた形で地震動パラメーターを評価することができる。

ここでは、東京、大阪、仙台、福岡の4地点において4.(1)で示した最大加速度とそれに対応したハザード適合マグニチュードを用いて、時松・吉見¹⁴⁾による液状化簡易判定法を用いて地盤の液状化予測を行った例について示す。図-4に解析の対象としたモデル地盤の N 値および地下水位を示す。砂層は全層ともに、単位体積重量 1.9 tf/m^3 、細粒分含有率5%以下と仮定している。ここでは、この条件の砂地盤が東京、大阪、仙台、福岡の4地点に存在すると仮定した場合の、期間100年の液状化に対する安全率 F_L の分布を算定した。なお、期間100年はハザード曲線では年超過確率 10^{-2} に相当する。

表-1に図-2により求めた、上記4地点での再現期間100年の最大加速度とそれに対応するハザード適合マグニチュードを示す、表-1によれば、最大加速度は東京、仙台、大阪、福岡の順に大きくなっているのに対し、ハザード適合マグニチュードは上述したような地域的な特徴を反映して、東京、大阪、仙台、福岡の順に大きくなる結果となっている。

図-5にこのような条件を用いて算定した上記4地点での F_L の分布を示す。この図によれば、 F_L 値は東京、仙台、大阪、福岡の順に小さくなっており、結果的に期待される最大加速度の大きさの順序と対応している。また、ここでは、期間を100年とした場合の例を示したが、考慮する期間が変われば、それに応じて期待される地震荷重も変化し、その結果液状化に対する危険度も変化する

表-1 各地点における再現期間100年の最大加速度およびハザード適合マグニチュード

地点名	東京	大阪	仙台	福岡
最大加速度(gal)	350	171	268	100
ハザード適合マグニチュード	6.88	6.78	6.72	6.18

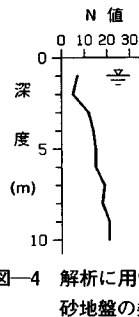


図-4 解析に用いた砂地盤の条件

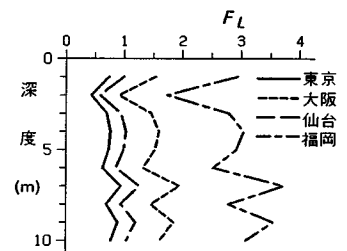


図-5 各地点における期間100年に対応する F_L の分布

る。そして、ここで示した、拡張地震危険度解析によれば、このような地震環境の違いや考慮する期間を反映した形で地震荷重を設定することが可能となる。

また、ここでは液状化予測に用いるマグニチュードとしてハザード適合マグニチュード M^* を直接用いたが、対象とする構造物の重要度などによっては、その代わりに $M^* + \alpha \sqrt{\text{Var}(M|Y \geq y(p))}$ (ただし $\alpha > 0$) を用いるような形で、より安全側の評価を行うことが必要な場合もある¹¹⁾。ただしその場合、係数 α の決定が新たな問題として入ってくることになる。これは、複数の地震動パラメータの同時確率分布を扱うことなくこれらのパラメータを確率論的に決定しようとする本研究の手法の基本に由来する問題であり、その意味では手法を簡略化した代償として起こってくる問題ともいえるが、地震動強度を第一義的に重要なパラメータとし、その年超過確率の関数として他の地震動パラメータを推定しようとする本研究の手法の基本に抵触するものではない。ただ、手法の適用にあたり、上述のような問題が生じることを踏まえたうえで、 M^* 、 Δ^* の扱いについて工学的判断を行う場合があることを念頭に置くべきと考えている。

(3) リスク適合地震動の発生

本研究の手法の典型的な適用例として「リスク適合地震動」の発生法を示す。これは非定常地震動時刻歴のシミュレーション手法における種々の地震動パラメータの決定に、本研究の拡張地震危険度解析の概念を用いるものである。

ここで扱う地震動発生モデルでは、まず基盤地震動について、地震動強度パラメータとして rms 強度の時間軸上での最大値 (最大 rms 強度) γ を用いる。他に最大 rms 強度となるまでの時間 (継続時間パラメータ) t_m 、卓越振動数 f_p 、スペクトルの帯域幅に関するパラメータ (スペクトル形状パラメータ) β_g を用いる。さらに、これらのパラメータの値が求まると、これを用いて表層地盤による非線形増幅の効果を与える変換係数 $\beta_g^*(f)$ を算定し、地表面地震動を発生することができる。

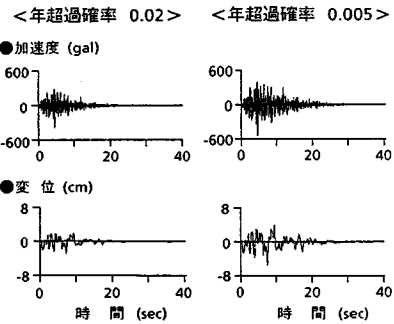
これらのパラメータのうち、 γ 、 t_m 、 f_p 、 β_g の決定に拡張地震危険度解析の手法を適用する。はじめに、3. のステップ①により、 γ のハザード曲線を求め、それより年超過確率 p に対応する γ の値 $\gamma_0(p)$ を求める。 t_m 、 f_p 、 β_g については、ステップ②により、それぞれの条件付期待値 $t_m^*(p)$ 、 $f_p^*(p)$ 、 $\beta_g^*(p)$ を算定する。以上述べた地震動モデルやリスク適合地震動の考え方の詳細については文献(10)、(15)、(16)を参照されたい。以下、本研究の拡張地震危険度解析の適用例という観点から、リスク適合地震動の算定結果を紹介する。

表—2 リスク適合地震動 (基盤地震動) のパラメータ値

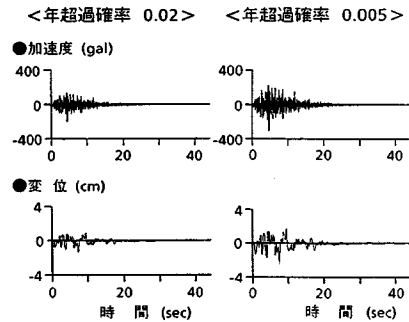
地点名	東京		大阪		
	0.02	0.005	0.02	0.005	
年超過確率 p	0.02	0.005	0.02	0.005	
最大 rms 強度 $\gamma_0(p)$ (gal)	123.0	192.1	46.6	86.6	
ハザード適合マグニチュード M^*	6.97	7.30	6.74	6.99	
ハザード適合震央距離 Δ^* (km)	24.3	23.6	55.3	42.3	
M 、 Δ の相関係数 ρ (条件 $\gamma \geq \gamma_0(p)$)	0.802	0.846	0.895	0.902	
$t_m^*(p)$ (sec)	1次近似	3.84	4.93	3.65	4.13
	2次近似	3.99	4.99	4.28	4.56
	条件付期待値	4.04	5.01	4.28	4.57
$f_p^*(p)$ (Hz)	1次近似	3.92	3.85	3.70	3.78
	2次近似	3.92	3.85	3.71	3.79
	条件付期待値	3.89	3.84	3.71	3.78
$\beta_g^*(p)$	1次近似	1.00	1.02	0.98	1.01
	2次近似	1.00	1.02	0.99	1.01
	条件付期待値	1.00	1.02	0.99	1.00

1次近似: 式(14), 2次近似: 式(15), 条件付期待値: 式(13)

【東京】



【大阪】



図—6 リスク適合地震動のシミュレーション波形

基盤におけるリスク適合地震動に関する諸量値を表—2に示す。ここでは、東京、大阪について、 $p=0.02$ および 0.005 の2つの場合に対する結果を示した。同表において、 $t_m^*(p)$ 、 $f_p^*(p)$ 、 $\beta_g^*(p)$ については式(13)の条件

付期待値による結果と、式(14)の1次近似および式(15)の2次近似による結果とを比較して示したが、大部分はいずれの方法でも同様の値を与えている。ただし、大阪に関する $t_m(p)$ のみ、1次近似による値が他の場合と比較して小さい値となっている。これは、 M 、 Δ の関数としての t_m の推定式の非線形性が強いことと、東京と比較して大阪における M 、 Δ の条件付確率分布のばらつきが大きい(図-3)ことによる。 t_m の値が小さく評価されることは工学的に危険側である。推定精度によって、式(13)~(15)のいずれかを注意深く選ぶ必要がある。

以上の結果に、表層地盤の非線形増幅の影響をとり入れて、地表地震動の特性に変換し、リスク適合地震動のサンプル波形を発生させた例を図-6に示す。同図で考慮した地盤条件としては、表層部分の軟弱さの指標を $S_n=0.2$ 、基盤までの深さを $d_p=50$ m としており、通常の沖・洪積地盤に相当するものである。これらの地盤パラメーターの意味については文献(16)を参照されたい。

図-6の結果は与えられた年超過確率(ここでは $p=0.02$ および 0.005)に対応する地震動を与える。変位波形で比較的短周期成分が目立つが、これは、ここで用いている地震動モデルが、表面波の影響を除去したものであることも一因で、基礎となる地震動モデルにおける検討課題と考えられる。全体としては、 p の値が小さい方が強度が大きく、継続時間が長くなる傾向がみられ、リスクに適合した地震動が備えるべき基本的性質がよく表現されている。

5. 結 論

本研究では、地震危険度解析の手法を複数の地震動パラメーター評価へ拡張することを目的に、強度パラメーターの年超過確率に対する、「ハザード適合マグニチュード」および「ハザード適合震央距離」を新たに定義し、これを用いて他の地震動パラメーターを評価する手法について提案した。以下に得られた結論を要約する。

(1) リスクを表わす指標である強度パラメーターの年超過確率に対し、地震動強度がその値を超えるという条件下でのマグニチュード、震央距離の条件付期待値をそれぞれ、「ハザード適合マグニチュード」、「ハザード適合震央距離」と定義した。

(2) 従来の地震危険度解析の手法を拡張し、地震動強度の年超過確率という単一のリスク指標の関数として、複数の地震動パラメーターを同時に算定する方法を提案した。その際、ハザード適合マグニチュード、ハザード適合震央距離が有効に利用できることを示した。

(3) 東京、大阪、仙台、福岡の4地点におけるハザード適合マグニチュード・震央距離を求め、ハザード適合

マグニチュード・震央距離が地点周辺の地震環境を的確に反映したパラメーターであることを示した。

(4) 実際の耐震問題への適用例として、地盤の液化化予測、およびリスク適合地震動のシミュレーションに上記手法を適用し、その妥当性を示すとともに、その適用に関する留意点を整理した。

なお、本研究をまとめるにあたり、数値計算の一部に協力いただいた、京都大学大学院生・能島暢呂氏に対し、ここに記して感謝の意を表する次第である。

また、本研究における数値計算の一部には京都大学大型計算機センター FACOM M-382/VP 200 システムを用いた。

参 考 文 献

- 1) Kawasumi, H. : Measures of Earthquake Danger and Expectancy of Maximum Intensity Throughout Japan as Inferred from the Seismic Activity, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 29, pp. 469~482, 1951.
- 2) Kanai, K. and Suzuki, T. : Expectancy of the Maximum Velocity Amplitude of Earthquake Motions at Bed Rock, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 46, pp. 663~666, 1968.
- 3) 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，pp.1~12, 1968.
- 4) Cornell, C. A. : Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, No. 5, pp. 1583~1606, 1968.
- 5) Der Kiureghian, A. and Ang, A. H. S. : A Fault Rupture Model for Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 67, No. 4, pp. 1173~1194, 1977.
- 6) Itoh, T., Ishii, K., Ishikawa, Y. and Okumura, T. : Development of Seismic Hazard Curves Based on Different Analytical Models, Proc. of the 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, Vol. III, pp. 729~733, 1985.
- 7) 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, pp. 407~415, 1985.
- 8) 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.
- 9) 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, pp. 2~40, 1986.
- 10) Kameda, H., Ueda, K. and Nojima, N. : Simulated Earthquake Motions Consistent with Seismic Hazard Analysis, Proc. of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 181~186, 1986.
- 11) 石川 裕：地震危険度解析における問題点と複数の地震動パラメーター評価への応用，地盤工学におけるリスク

- 評価手法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 83～90，1987.
- 12) Ang, A. H-S. and Tang, W. H. (伊藤学・亀田弘行訳) : 土木・建築のための確率・統計の基礎，丸善，1977.
 - 13) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，p. 108，1980.
 - 14) Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. : Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-Value and Fines Content, Soils and Foundations, Vol. 23, No. 4, pp. 56～74, 1983.
 - 15) 亀田弘行・能島暢呂：リスク適合地震動のシミュレーション手法，京都大学防災研究所年報，第 30 号 B-2, pp. 107～119, 1987.
 - 16) 杉戸真太・亀田弘行・後藤尚男・広瀬憲嗣：工学的基盤面と沖・洪積地盤面の地震動の変換係数—表層地盤の非線形性を考慮した最大地動，応答スペクトル，非定常スペクトルの推定モデル—，京都大学防災研究所年報，第 29 号 B-2, pp. 41～58, 1986.

(1987.10.23・受付)
