

# 確率論的想定地震の概念と応用

亀田弘行<sup>1</sup>・石川 裕<sup>2</sup>・奥村俊彦<sup>3</sup>・中島正人<sup>4</sup>

<sup>1</sup>フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611 宇治市五ヶ庄)

<sup>2</sup>正会員 工修 清水建設株式会社 総合企画室 課長 (〒105-07 東京都港区芝浦1-2-3 シーバンス S館)

<sup>3</sup>正会員 工修 清水建設株式会社 和泉研究室 (〒100 東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル)

<sup>4</sup>正会員 工修 財団法人電力中央研究所 (〒270-11 我孫子市我孫子1646) (元京都大学大学院生)

本研究は、地域の地震防災対策や重要構造物の耐震設計などで用いられる想定地震の設定法として「確率論的想定地震」を提案し、その活用法を示したものである。確率論的想定地震は、これまで別個の概念として扱われてきた想定地震と確率論的地震危険度解析を結合することにより構成されるもので、工学的意義が明らかで系統的な想定地震の設定方法を提示しようとする。本論文では、確率論的想定地震の概念構成や定式化とともに、全国主要都市における評価例やハザードマップの作成例を示して、その有用性を論じた。特に神戸における検討では活断層データを考慮した評価結果を兵庫県南部地震と対照させることにより、低頻度巨大外力としての内陸直下地震を確率論的想定地震により評価する考え方について示した。

**Key Words :** *probabilistic scenario earthquake, active fault data, Great Hanshin earthquake, low frequency-high impact earthquake motion, seismic hazard map*

## 1. 緒 論

### (1) 想定地震の設定に関する問題点

想定地震は地域の地震防災計画、広域的なライフライン施設の地震対策、特定の重要構造物の耐震設計などにおける外力条件設定の方法として広く用いられている概念で、対象とすべき将来の地震について、その規模と位置に関するパラメータをあらかじめ特定の値に想定するものである。広域的な防災対策では、地震によって「同時に」発生する地震動の地域分布を知る必要があるため、外力条件として想定地震を設定することが有効である。また、重要構造物の耐震設計では、強度、周期特性、継続時間などの地震動特性を詳細に検討したうえで、設計用入力地震動を時刻歴波形や応答スペクトルなどにより定める。この場合、規模や震央距離などの諸元が明らかな想定地震を設定することにより、物理的イメージを明確にしながら地震動の定量評価を行えるという利点がある。

想定地震は対象とする地域と周辺の地震活動や地体構造などを基礎資料として設定されるが、その具体的方法についてはケースごとに個別の判断が行われることが多く、その意味で多分に任意性を含むものであった。もちろんそこでは、専門家による入念

な吟味に基づき、十分な地震学的根拠を持った判断が行われていると考えられるが、一方、設定された想定地震が持つ工学的意味については、かなりのあいまいさが残されていた。

想定地震の工学的な位置づけを明確にするとは、例えば次のような問いに答えることである。i)設定された想定地震による地震動強度はどのような地震危険度レベル(例えば年発生確率)に対応するか、ii)複数の想定地震が設定される場合にそれらによる地震動強度の発生頻度は相対的にどのような関係にあるか、iii)想定地震の諸元(規模や距離)の違いに起因して地震動特性(強度、周期特性、継続時間)が変化するが、こうした複数の想定地震に対して予想される被害シナリオの違いとそれらの発生頻度との関係はどのようなものであるか。これらはいずれも、現実の防災対策や耐震設計を合理的に行う場合に必要な定量的情報である。これらの命題は、地震の発生や地震動の性質が、将来を予測する問題の中では大きな不確定性を含んでいることから提起されるものであり、こうした不確定性を定量的かつ合理的に評価した上で想定地震を設定する方法が必要であることを意味している。もちろん従来より、特定の再現期間に適合した設計用入力地震動を作成した例<sup>1)</sup>や設計用入力地震動と再現期間との関係を明確にしよ

うとする試み<sup>2)</sup>も行なわれてきたが、その内容は特定のケースごとの限定的な議論であり、現実には地域防災計画や重要構造物の耐震設計のための想定地震の大部分において、上述したような工学的な位置づけは明確にされていない。

### (2) 不確定性評価の方法としての確率論的地震危険度解析とその問題点

一方、地震外力の設定における不確定性を組織的に評価するための解析手段としては、確率論的地震危険度解析が広く用いられてきた<sup>3)~5)</sup>。この方法は、地震発生と地震動推定に関わる個々の不確定性を確率モデルで表現することにより、全体の不確定性を組織的に定量評価し、不確定性のもとの意思決定という地震荷重評価の問題に対処しようとするものである。予測される地震動の特性と、その発生確率を表す「リスク指標」（年超過確率や再現期間など）との関係を明確にできることが、確率論的地震危険度解析の最大の特徴である。確率論的地震危険度解析の結果は、ハザード曲線や一様リスクスペクトルなど、発生確率に対応する地震動強度で表現されるが、そこでは個々の地震の物理的イメージ（マグニチュードや震央距離など）は隠されている。そこには発生確率と地震動強度との関係に議論を集約することにより、工学的な解釈を明快にさせる意図が見られる。

### (3) 確率論的想定地震の提案

上記(2)の末尾の議論にもかかわらず、確率論的地震危険度解析の結果を用いる場合でも、対象としている地震の物理的イメージを大まかにでも把握しておくことは、工学的実践の場では重要である。そのため、筆者らは先に「ハザード適合マグニチュード」、「ハザード適合震央距離」の概念により、発生確率に応じた地震動を起し得る地震群の平均像を用いることを提案した<sup>6)</sup>。本研究はこの考え方を拡張して、想定地震の設定法に関する前述のような課題に応えようとするものである。

これにより、図-1に示したように、従来別個の流れであった想定地震と確率論的地震危険度解析を結びつけることにより（同図の太い矢印）、両者を統一的な枠組みの下で議論することが可能となる。確率モデルを用いて想定地震の設定に関わる不確定性の評価を行うことから、この方法により設定される想定地震を本研究では「確率論的想定地震」(Probabilistic Scenario Earthquake：以下では略して“PSE”と記す)と呼ぶこととする。

PSEの考え方は、i) サイトに影響を与える可能性

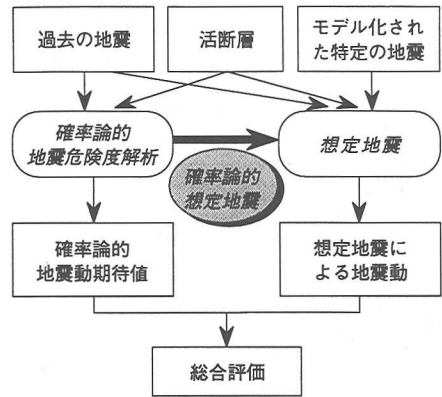


図-1 地震外力の設定フロー

がある複数の地震活動域\*に対し、それぞれハザード適合マグニチュード、ハザード適合距離\*\*およびハザード適合方位を算出して、それらをもってそれぞれの地震活動域に固有の想定地震を定義すること、ii) 異なる地震活動域の貢献度を定義することにより、設定された想定地震の相対的な出現可能性を定量的に表現し、重要な想定地震を選定するための指標として用いようとしたこと、iii) 活断層（または活断層系）や海溝型のプレート境界地震など、場所と規模がある程度明確な地震活動域に対しては、貢献度を算出することにより、ランダムな地震（地震域）による貢献度と同一の規範で比較できるようにしたこと、の3点に要約される。

PSEの概念とその適用例についてはすでにいくつかの機会に発表してきた<sup>7)~11)</sup>が、本論文ではそれらの経過の中で形成されてきた概念を統一的に整理して、包括的な方法論として提案しようとするものである。また、兵庫県南部地震の発生により、低頻度巨大外力としての内陸活断層による直下地震の理解という観点から、PSEの考え方は新たな意義を持つことになったと考えている。この点についても報告を行った<sup>12)</sup>が、本論文ではその後の解析結果も含めて、改めて全体の枠組みの中で位置づけを行う。

\* 本論文では地震の発生源を、ランダムに発生する地震活動の場（領域）を表わす「地震域」、海洋性のプレート境界で発生する巨大地震を表わす「プレート境界地震」、内陸の活断層の活動に起因する地震を表わす「活断層」、の3種類でモデル化し、それぞれ「」の用語を定義している。そして、これらの3種類の地震の発生源を総称して「地震活動域」と呼んでいる。

\*\* 距離の表現は必ずしも震央距離である必要はない。本論文で説明する適用例では、地震域では震央距離、プレート境界地震や活断層に対しては断面との最短距離に基づいて、それぞれハザード適合距離を算出している。

本研究とは独立の同時期に、米国では1991年頃から、主として原子力施設の設計用地震（controlling earthquakes）を確率的に決定する方法の開発を目的として、ハザード適合マグニチュード・ハザード適合距離と同様の定義（ $\bar{M}$ 、 $\bar{D}$ と表現）を用いることが議論されてきた<sup>13)</sup>。この段階で、米国の関係者の一人であるStanford大学・Cornell教授と筆者の一人との間でこの問題に関する議論が行なわれ<sup>14)</sup>、それぞれから問題点の提起が行なわれた。その中で、筆者らの方法では、異なる地震活動域からの貢献度を個別評価してそれぞれに想定地震を設定する点に独自性があることなどが確認された。その後、米国でもこの課題について検討が重ねられ、一つの帰結として、“deaggregation”の概念が提出された<sup>15),16)</sup>。これは、ハザード曲線に対する種々のパラメータ領域や地震活動域の影響度を再分解して示すことにより、確率的地震危険度解析の結果に関する物理的理解を深めるという意味で、本研究の内容と軌を一にするものと考えられる。このように、本研究は独自の的方法論により達成されたものであるが、同様の（同一ではない）概念も独立に研究され、提案されている。本論文ではこのような経緯を踏まえた上で、筆者らがこれまでに行ってきた研究のまとめとして、独自の議論を展開するものである。

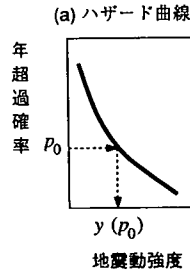
## 2. 確率的想定地震の定式化

### (1) 想定地震設定の工学的条件

地震の発生や地震動の推定に関わる不確定性の合理的な定量評価を含む想定地震の設定法を開発するのが本研究の主題である。前章における所論から、想定地震の工学的設定法に要請される条件が以下のように整理される。

- ①対象地点（サイト）と周辺地域の地震活動に関する地球物理的知見を的確に反映していること。特に、地震危険度解析モデルの作成の段階で、地震源のモデル化、発生する地震の時空間分布特性、上限マグニチュードなどについて、十分な吟味が行われていること。
- ②設定される想定地震と、サイトにおける地震動強度のリスク指標（例えば年超過確率 $p_0$ ）との関係が明らかにされていること。
- ③複数の想定地震を設定する場合に、それらの相対的な発生頻度が定量的に評価されていること。
- ④注目する周期帯域を的確に反映する想定地震であること。すなわち、適切な地震動予測式（距離減衰式）を用いて、注目する周期帯域の地震動特性

### 【全地震活動域】



### 【特定の地震活動域】

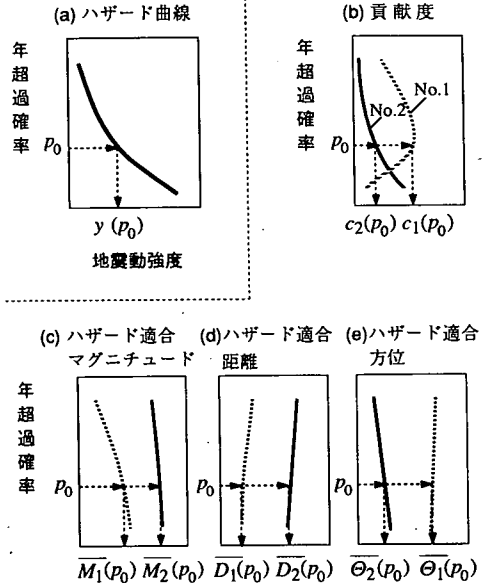


図-2 確率的想定地震の設定方法（模式図）

が、想定地震の「くせ」（個性）として表現されていること。

これらの条件のうち、①は理学的・工学的にいかなる立場をとるにせよ当然心掛けねばならない条件であるが、②～④はこれまで主として確率的地震危険度解析として、工学的な視点から方法論が整備されてきたものである。

### (2) 確率的想定地震の設定手順

一般に、あるサイトにおける地震危険度には複数の地震活動域で発生する地震が関与するため、想定地震とそのサイトにおけるリスク指標を結びつけるには、こうした複数の地震活動域の影響程度をすべて踏まえた上での議論が不可欠である。このような条件を定量化するために、本研究では、地震危険度解析により対象とするサイトでの地震動強度とリスク指標の関係を明確にした上で、地震動強度があるリスクレベルを上回るという条件下での地震群（マグニチュード・距離・方位の条件付確率分布）を地震活動域ごとに定義し、その地震群の代表値として想定地震の各諸元を設定する。

以下に確率的想定地震の定式化の手順を説明するが、ここではポアソン型モデルに基づく標準的な地震危険度解析モデルを前提とする。

図-2に確率的想定地震の設定方法の模式図を示すが、その設定手順は次のようになる。

### ①サイトにおけるハザード曲線の算定

確率論的地震危険度解析によりサイトのハザード曲線を算定し、あるリスクレベル $p_0$ に対する地震動強度 $y(p_0)$ を得る(図-2(a))。ここで、あるサイトにおいて、地震動強度 $Y$ が1年間にある値 $y$ を超える確率(年超過確率) $p_0$ は次式で表現される。

$$p_0 = 1 - \exp \left\{ - \sum_k w_k(p_0) \right\} \quad (1)$$

ただし、 $w_k(p_0)$ は地震活動域 $k$ の地震でサイトに $y(p_0)$ 以上の地震動をもたらす地震の年発生頻度であり、地震活動域 $k$ における地震の発生頻度 $v_k$ に加えて、地震規模 $M$ ならびにサイトとの距離 $D$ の確率分布、地震動強度 $Y$ の距離減衰式とそのばらつき $U_Y$ により定式化される。

### ②各地震活動域における貢献度 $c_k(p_0)$ の算定

あるリスクレベル $p_0$ に対する地震活動域 $k$ の貢献度 $c_k(p_0)$ とは、サイトにある強度レベル $y(p_0)$ 以上の地震動が生じた場合に、その地震が地震活動域 $k$ で発生したものである条件付確率であり、式(1)で示した $w_k(p_0)$ を用いて次式で定義される(図-2(b))。

$$c_k(p_0) = w_k(p_0) / \sum_k w_k(p_0) \quad (2)$$

### ③貢献度による重要地震活動域の抽出 (=確率論的想定地震)

モデル化された地震活動域の中で、対象とするリスクレベル $p_0$ に対する貢献度 $c_k(p_0)$ が大きい地震活動域 $k$ を抽出する。サイトに $y(p_0)$ 以上の地震動が生じるとすれば、それがどこの地震活動域で発生する地震である可能性が高いかを表わす相対的な指標が貢献度 $c_k(p_0)$ であるため、 $c_k(p_0)$ が大きい地震活動域により注目する必要がある。従って、想定地震の諸元は貢献度 $c_k(p_0)$ が大きいいくつかの地震活動域に対して設定するものとする。このようにして設定された想定地震(確率論的想定地震:PSE)はサイトにおけるリスク指標 $p_0$ に依存する。図-2の模式図の例ではNo.1とNo.2の2つの地震活動域が抽出されている。

### ④地震活動域ごとの確率論的想定地震の諸元の設定

抽出された地震活動域 $k$ においてPSEの諸元(マグニチュード、距離、方位)を設定する。その際、一つの客観的な指標として地震活動域 $k$ におけるハザード適合マグニチュード $\bar{M}_k(p_0)$ 、ハザード適合距離 $\bar{D}_k(p_0)$ 、ハザード適合方位 $\bar{\Theta}_k(p_0)$ をPSEのマグニチュード・距離・方位として用いること

ができる。ここで、ハザード適合マグニチュード・距離とはサイトにおける地震動強度 $Y$ が $y(p_0)$ 以上となる条件下での地震活動域 $k$ の地震のマグニチュードおよび距離の条件付期待値であり、定式化を含めた詳細は文献(6)で示されている。図-2の例ではマグニチュード( $\bar{M}_1(p_0)$ )は小さいものの距離( $\bar{D}_1(p_0)$ )が近い地震No.1と距離( $\bar{D}_2(p_0)$ )は遠いもののマグニチュード( $\bar{M}_2(p_0)$ )が大きい地震No.2の2タイプの地震が設定されることになる。また、No.1、No.2の地震の方位はそれぞれ、 $\bar{\Theta}_1(p_0)$ 、 $\bar{\Theta}_2(p_0)$ となる。

### (3) 確率論的想定地震の特徴

以上に述べたPSEの特徴ならびに利用に際しての主な留意点を列挙すると次のようになる。

#### ①抽出の目安となる貢献度 $c_k(p_0)$

PSEは対象サイト周辺で想定される複数の地震に対して、貢献度という客観的かつ定量的な指標によりその重要性が判断できるところに最大の特徴がある。その際、PSEを設定する上で貢献度が何%以上のものを対象とすることが一つの問題となる。また、異なる貢献度のPSEを同列に扱ってよいのかどうかという議論も当然あるであろう。これについては必ずしも統一的な規定を示す必要はないと思われるが、一般的に貢献度が5%程度以上のPSEについては何らかの配慮しておくべきと思われる。特に大きな貢献度をもつPSEについては特別の注意が必要であるのは当然である。

#### ②リスクレベル $p_0$ によるPSEの変化

対象とするリスクレベル $p_0$ の値によって、抽出される地震活動域が異なる場合があり得るとともに、同じ地震活動域のPSEであってもその諸元は $p_0$ に依存して変化する。 $p_0$ を年超過確率とした場合、一般に $p_0$ を小さくするほどそれに対する地震動強度 $y(p_0)$ は大きくなり、それに伴いPSEとしては相対的に近距離でマグニチュードが大きな地震が強調されることになる。このことはまた、 $p_0$ を小さくすることにしたいが、対象とする地震群が特定の地震活動域に集中する傾向をもたらすことを意味する。これより、次章で示すように、個々には地震発生頻度が低い活断層でも、 $p_0$ が小さい領域でその影響が顕著になる場合があり得る。

#### ③対象とする周期帯域に対応したPSE

リスクレベル $p_0$ が固定されても、地震危険度解析を行う場合の地震動強度パラメータ $Y$ ならびにその距離減衰式が異なれば設定されるPSEの諸元は変化する。地震動強度パラメータとして短周期の指標を選定すれば、距離による減衰が大きいた

め、設定されるPSEとしては相対的に近距離の地震が卓越する。逆に比較的長周期の指標を選定すれば、距離による減衰が小さく遠方の地震でも影響度が強くなるため、PSEとしては相対的に広範囲の地震が選択される可能性がある。対象とする地震動の周期帯域によって想定すべき地震のタイプが異なることは当然であり、定性的には理解されていることではあるが、ここで提案したPSEの概念を用いればこうした点に関して定量的な評価が可能となる。

#### ④PSEにより再評価される地震動強度 $y'_k(p_0)$

PSEが設定された次のステップでは、PSEによる対象サイトでの地震動が改めて再評価される。この地震動の再評価の方法は、距離減衰式による簡便な方法から断層モデルを用いる詳細な方法まで多岐にわたるが、ハザード曲線の算定と同じ距離減衰式を用いたとしても、再評価される地震動強度 $y'_k(p_0)$ はハザード曲線における $p_0$ に対する地震動強度 $y(p_0)$ とは一般的に一致しない。これには次の2つの理由がある。一つはハザード適合マグニチュード・距離・方位を算定する場合に地震動強度が $y(p_0)$ を上回るような地震群を取り扱っていることに起因しており、このため $y'_k(p_0)$ は $y(p_0)$ より大きくなる傾向にある。一方、ハザード曲線を求める地震危険度解析では距離減衰式のばらつきを見込むことが基本であるため、地震動の再評価で中央値をとるような場合には $y'_k(p_0)$ は $y(p_0)$ より小さくなる傾向にある。したがって、 $y'_k(p_0)$ が $y(p_0)$ より大きくなるか小さくなるかについては、対象とする地震活動域の特性や $p_0$ の値によって様々である。 $y(p_0)$ をPSE設定のための目安と考えれば、PSEが設定された後はPSEにより再評価される $y'_k(p_0)$ 、もしくは地震学的知見と地盤震動の知見を駆使したより詳細な方法によって評価された地震動が用いられることになるが、当然その際にも当該リスクレベル $p_0$ とそれに対応する地震動強さ $y(p_0)$ との関係は認識しておく必要がある。

⑤ハザード適合方位が定まらない場合の位置の設定  
ハザード適合距離 $\bar{D}_k(p_0)$ とハザード適合方位 $\bar{\Theta}_k(p_0)$ からPSEの位置を決める場合、サイトをその内部に含む地震活動域では、 $\bar{\Theta}_k(p_0)$ が一義的に定まらないかその値が不安定になる場合がある。特にこうした場合、PSEの位置をどう設定するかが問題となるが、一つの解決方法として、震央方位をその地震活動域の重心方向に定めることが考えられる。この場合、距離は算定されたハザード適合距離 $\bar{D}_k(p_0)$ をそのまま用いればよい。

### 3. 活断層を考慮した神戸における確率論的想定地震

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、震源断層近傍において、これまでわが国で観測されなかった強い強震動記録群が得られ、この地域に展開する阪神都市圏に膨大な被害をもたらした。このような性格の地震動はこれまでの構造物の耐震基準や地域防災計画では明確に位置づけられてはおらず、こうした外力をいかに評価していくかが重要な課題となっている。そのため、活断層による直下地震の発生とそれによる地震動の評価を行う工学的な方法論を構築していく必要がある。

兵庫県南部地震以降、活断層があればこれに注目して、確定的な地震の発生源として考えようとする意見がある反面、いつ動くか分からない活断層に対処することは困難とする意見も存在する。両者を相容れない対立概念のまま放置することは望ましいことではなく、それらのギャップを埋める論理が必要である。筆者らは、PSEの概念はこうした課題を整理し、整合性ある議論の土俵にのせる道具となりうると考える。PSEによれば、種々の年超過確率に対するPSEとそれぞれの貢献度を比較することにより、ランダムな地震環境から、特定の地震活動域の影響が卓越する地震環境までを連続的に議論することができるからである。

こうした点を検討するため、本章では兵庫県南部地震以前という前提に立って、活断層を考慮した神戸におけるPSEの算定を行なった<sup>12)</sup>。その結果を兵庫県南部地震と対照させることにより、今後の低頻度巨大外力の評価におけるPSEの適用性について考察する。

#### (1) 地震危険度評価における活断層の取扱い

文献12)で指摘したように、活断層を考慮した地震危険度解析では次のような項目が結果に大きな影響を及ぼす。i) 活断層のモデル化(グループ化とセグメント化)、ii) 活断層の諸元および諸関係式に含まれる不確定性の評価、iii) 活断層データと地震発生データ(歴史地震データ)の解釈と組み合わせ。

これらの問題については今後さらなる検討が必要と考えるが、本研究では以下のような取り扱いをしている。

地震危険度解析における活断層モデルとして松田による「起震断層」<sup>17)</sup>を用いる。ただし、「起震断層」を用いたとしても兵庫県南部地震で実際に活動した活断層を事前に正確に予測することは困難で

表一 神戸の地震危険度解析における諸条件

	地震発生データに基づく方法		活断層データに基づく方法
地震活動域	地震域 (ランダムに発生する地震)	プレート境界地震 (南海地震)	活断層 (起震断層)
地震発生時系列	定常ポアソン過程	定常ポアソン過程	定常ポアソン過程
地震発生頻度	下記に示す過去の地震発生データに基づく ・宇佐美1600~1884 ( $M \geq 7.5$ ) ・宇津1885~1925 ( $M \geq 6.0$ ) ・気象庁1926~1990 ( $M \geq 5.0$ )	過去の地震発生データに基づく ・南海地震: 1/117年	平均変位速度 $S$ と地震時断層変位量 $D$ との比 ( $D$ は $M$ に応じて松田式 <sup>19)</sup> により定める)
マグニチュードの確率	b値モデル (Gutenberg-Richter式に基づく指数分布)	一様分布 ・南海地震: 8.0~8.4	固有規模 (断層長さに応じて松田式 <sup>19)</sup> により $M$ を定める)
距離の確率	各地震域内で一様ランダムに地震が発生すると仮定して距離の確率を評価 深さは1926年以降の $M \geq 5$ の地震の深さの平均値	固有距離 仮定した断層面への最短距離 ・南海地震: 132km	固有距離 断層線への最短距離 (深さを0kmとした場合の断層面への最短距離)
最大加速度の距離減衰式	福島・田中式 <sup>20)</sup> ばらつきは対数標準偏差0.5の対数正規分布でモデル化 $\log_{10} A_{max} = 0.51M - \log_{10}(R+0.006 \cdot 10^{0.51M}) - 0.0034R + 0.59 >$		

あったとする地震学的見解<sup>18)</sup>があることから、兵庫県南部地震以降各地で行なわれている種々の活断層調査結果を取り入れた地震危険度評価モデルの構築が今後の課題である。

活断層のパラメータに関する諸関係式については、後述するような代表的な関係式を用いる。

活断層データと地震発生データを対象期間が異なる独立なデータと見なし、両データに基づく結果を地震動強度の発生頻度の段階で足し合わせた解析を行なう。もちろん歴史地震として活動したことが明白な活断層についてはデータの重複を避ける処理が必要となるが、以下に述べる神戸の例ではこれに該当する活断層は見当たらない。

## (2) 解析方法と条件

表一に地震危険度解析における諸条件を示す。地震発生データに基づく地震危険度解析では、ランダムに発生する地震を多角形地震域モデル<sup>21)</sup>でモデル化するとともにプレート境界地震である南海地震を別個にモデル化している。図一3に解析で用いた地震域モデルを示す。一方、活断層データに基づく地震危険度解析では、1回の地震により個々の活断層モデルの全長が破壊し、固有規模の地震が発生すると仮定している。各活断層の平均変位速度はその活動度に応じて、A級：5mm/年、B級：0.5mm/年、C級：0.05mm/年と仮定している。ただし、神戸に最も大きな影響を及ぼすと予想される六甲断層帯に関しては文献<sup>22)</sup>に基づき平均変位速度を0.8mm/年

と仮定した。また、個々の活断層の活動による地震発生時系列は本来、前回の活動からの時間依存性を考慮してモデル化すべきであるが、兵庫県南部地震以前に前回の活動歴が明らかになっていた活断層はきわめて少なかったため、本研究では活断層の活動による地震もすべて経時的にポアソン過程に従うと仮定している。図一4に地震危険度解析で用いた神戸周辺の主な活断層(起震断層)モデルを、また表一2にその諸元を示す。

## (3) 神戸におけるハザード曲線

図一5に神戸におけるハザード曲線を示す。同図によれば、最大加速度が200Gal以下の範囲では地震発生データに基づく結果の方がやや大きめの年超過確率を与えるが、それ以上の加速度レベルでは活断層データに基づく年超過確率の方が大きくなる。これはもし活動すれば大きな加速度をもたらす反面、地震の年当たり発生頻度は $10^2 \sim 10^3$ 以下ときわめて低い活断層の特性が反映された結果である。図一5において太い実線が地震発生データと活断層データを足し合わせた解析結果である。両データを足し合わせた解析結果を用いても、神戸における最大加速度の100年再現期待値はおおよそ190Galである。また、1,000年再現期待値はおおよそ460Galである。この結果による限り、兵庫県南部地震の際に神戸で記録された600~800Galという最大加速度は年超過確率で見ると $10^3$ 以下、すなわち再現期間では1,000年以上(1,000年オーダー)ということになる。

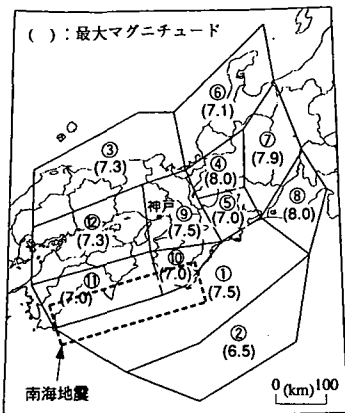


図-3 解析に用いた地震域モデル

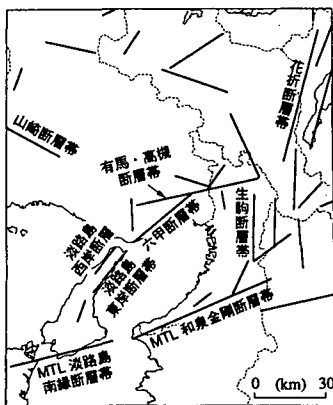


図-4 解析に用いた活断層モデル  
 (「起震断層」<sup>7)</sup>に基づき作成)

表-2 神戸周辺の主な活断層モデルの諸元

活断層名	活動度	$T_R$ (年)	$L$ (km)	$M$	$R$ (km)	$A_{max}$ (Gal)
六甲断層帯	B*	3,100	31	7.3	0.6	633
有馬・高槻断層帯	B	8,200	52	7.7	10	498
淡路島東岸断層帯	B	3,500	22	7.1	16	342
淡路島西岸断層帯	B	2,200	14	6.7	19	256
MTL和泉・金剛断層帯	A	840	53	7.7	42	255
MTL淡路島南縁断層帯	A	700	44	7.6	52	198

\* 六甲断層帯の平均変位速度は0.8 (mm/年)としている。  
 $T_R$ : 平均活動間隔,  $L$ : 断層長さ,  $M$ : マグニチュード,  
 $R$ : 断層との最短距離,  $A_{max}$ : 福島・田中式により推定される最大加速度。

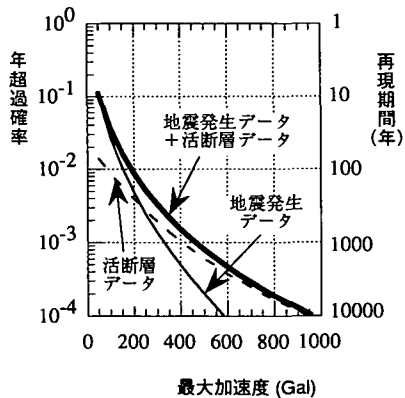


図-5 神戸におけるハザード曲線

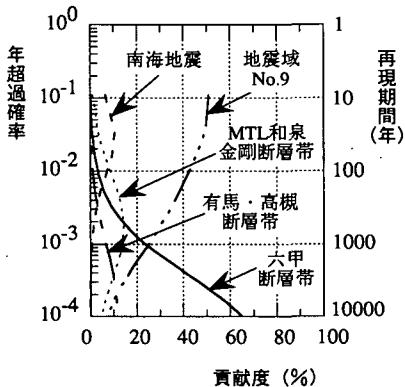


図-6 神戸における主な地震活動域の貢献度

表-3 神戸における確率的想定地震

地震活動域	年超過確率 $P_0 = 10^{-2}$			年超過確率 $P_0 = 10^{-3}$			年超過確率 $P_0 = 10^{-4}$		
	再現期待値 189 (Gal)			再現期待値 464 (Gal)			再現期待値 959 (Gal)		
	貢献度 (%)	$\bar{M}$	$\bar{\Delta/R}$ (km)	貢献度 (%)	$\bar{M}$	$\bar{\Delta/R}$ (km)	貢献度 (%)	$\bar{M}$	$\bar{\Delta/R}$ (km)
地震域No.9 (近距離地震)	43	6.5	29	25	6.9	25	7	7.1	22
南海地震	7	8.2	130	<5	-	-	<5	-	-
六甲断層帯	<5	-	-	24	7.3	0.6	65	7.3	0.6
MTL和泉・ 金剛断層帯	9	7.7	42	14	7.7	42	5	7.7	42
淡路島東岸 断層帯	<5	-	-	8	7.1	16	6	7.1	16
有馬・高槻 断層帯	<5	-	-	7	7.7	10	11	7.7	10
MTL淡路島 南縁断層帯	8	7.6	52	6	7.6	52	<5	-	-
淡路島西岸 断層帯	<5	-	-	5	6.7	19	<5	-	-

#### (4) 神戸における確率論的想定地震

神戸におけるPSEについて、図-6に主な地震活動域(地震域、南海地震、活断層)の貢献度を示す。また、表-3には年超過確率が $10^2$ 、 $10^3$ 、 $10^4$ の場合のPSEの結果を示す。なお、この表では貢献度が5%以上の地震活動域を抽出している。

これらの図表より再現期間が100年オーダー(年超過確率 $=10^2\sim 10^3$ )の場合には近距離でランダムに発生する地震群を表わす地震域No.9の貢献度が最も大きく、特に年超過確率が $10^2$ 付近では六甲断層帯の貢献度は5%以下である。これに対し、再現期間が1,000年オーダー(年超過確率 $=10^3\sim 10^4$ )になると活断層の貢献度が相対的に大きくなるとともに、とりわけ六甲断層帯の貢献度が顕著に増加してくる様子がうかがえる。特に年超過確率が $10^4$ に近づくと、六甲断層帯のみの貢献度が突出し、特定のシナリオに収斂していくことになる。

以上の結果より、PSEの観点から兵庫県南部地震を考察してみると、i)過去の地震発生データ(歴史地震データ)のみに基づくPSEでは兵庫県南部地震の事前想定は難しかったこと、ii)活断層データを考慮したPSEによれば六甲断層帯を貢献度がある程度大きい想定地震として抽出できたが、その場合でも再現期間を1,000年程度以上とする必要があったこと、が指摘できる。

このことは、活断層データを考慮したPSEを議論する場合には少なくとも1,000年オーダーの再現期間を見据えておくことが必要であると同時に、再現期間を大きくとることにより、PSEの考え方を低頻度巨大外力の評価に拡張することが可能であることを示すものである。さらに、これらの種々の性格をもつ複数の地震活動域の影響の強さ(貢献度)が、年超過確率などのリスク指標によって連続的に変化することを表現できるところにPSEの特徴があることを指摘したい。

#### 4. 活断層を考慮した主要都市の確率論的想定地震

上述した神戸における地震危険度評価の結果、活断層データを評価に組み入れるとともに1,000年オーダーの再現期間を考慮することによって、PSEを低頻度巨大外力の評価に利用することの可能性が示された。今後、他の地点における評価例を積み上げていくことにより、その有用性を検証していく必要がある。そこでここでは、例えば2段階耐震設計におけるレベル2地震動評価のベースとなる想定地

震として、活断層を考慮した再現期間1,000年に適合するPSEを他の8都市について評価した例について示す<sup>23),24)</sup>。併せて各都市の地震危険度の地域差についても考察を加える。

##### (1) 評価の方法と条件

本研究では、札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、広島、高松、福岡、の主要8都市を対象として、再現期間1,000年に適合するPSEを評価した。評価方法は先の神戸での評価に用いたものと同じである。地震発生データに基づく方法では、地震活動域として多角形地震域モデルの他に、関東地震、東海地震、南海地震をプレート境界地震としてモデル化している。また、活断層データに基づく方法では、大阪における上町断層帯など、「起震断層」<sup>17)</sup>に記載されている以外にも警戒すべき活断層が指摘されている場合には、それについてもモデル化している。なお、再現期間1,000年は先の神戸での評価において六甲断層帯の貢献度が大きく現れはじめる再現期間に対応していることに加えて、文献2)や25)で高層建築物の耐震設計におけるレベル2に相当すると論じられているリスクレベルに対応している。しかしながら、レベル2に相当する地震動強さの再現期間として1,000年が妥当かどうかについては、今後さらなる検討が必要であることは当然である。

##### (2) 評価結果

表-4は上記8都市において再現期間1,000年に適合するPSEを評価した結果である。表には先の神戸における結果も併記している。ここでPSEは「貢献度が最大となるPSE」と「貢献度が5%以上となるもののうち、福島・田中式(の中央値)により再評価される最大加速度が最大となるPSE」の両者を選定している。表には図-1のフローに基づき、各都市における「確率論的地震危険度解析に基づく最大加速度の1,000年再現期待値」とともに最大加速度の「過去の地震による最大値」と「活断層による最大値」についても併記している。また、表-4に基づき、最大加速度の「過去の地震による最大値」、「活断層による最大値」、および「1,000年再現期待値」の地点ごとの値を比較して図-7に示している。

表-4および図-7に示される最大加速度のうち、1,000年再現期待値には距離減衰式のばらつきが含まれており、他の項目にはばらつきが含まれていないという違いはあるが、これらの図表より次のことが指摘できる。

①図-1に示したフローにより得られる種々の地震



表-4 主要都市における確率論的想定地震

都市名	再現期間1,000年に適合する確率論的想定地震										1,000年 再現 期待値 (Gal)	過去の地 震による 最大値 (Gal)	活断層 による 最大値 (Gal)
	貢献度が最大となる確率論的想定地震					貢献度が5%以上で再評価値が最大となる 確率論的想定地震							
	震央地域/活断層名	貢献度 (%)	M	Δ/R (km)	再評価 値(Cal)	震央地域/活断層名	貢献度 (%)	M	Δ/R (km)	再評価 値(Cal)			
札幌	内陸近距離の地震	70	6.0	19	156	馬追丘陵西縁断層帯	12	7.0	33	201	236	179	201
仙台	内陸近距離の地震	51	6.5	19	273	長町・利府線断層帯	26	7.2	1.2	616	432	334	616
東京	関東地震	82	8.0	21	355	関東地震	82	8.0	21	355	560	400	327
名古屋	天白河川断層	34	6.7	13	323	岐阜・一宮線	9	6.9	6	481	675	534	481
大阪	MTL和泉金剛断層帯	22	7.8	28	357	上町断層帯	12	7.3	3.9	559	527	406	559
神戸	内陸近距離の地震	25	6.9	25	225	六甲断層帯	24	7.3	0.6	633	464	311	633
広島	内陸近距離の地震	40	6.6	31	193	五日市断層帯	20	7.0	9.5	420	360	306	420
高松	南海地震	24	8.2	94	149	MTL四国断層帯	23	8.5	28	423	392	393	423
福岡	近距離の地震	73	6.5	26	188	西山断層帯	15	7.1	19	325	297	172	325

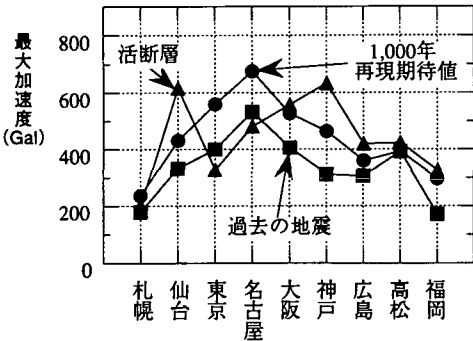


図-7 主要都市における各種最大加速度の比較

動強度（「過去の地震による最大値」，「活断層による最大値」，「1,000年再現期待値」）の大小関係は地点によってさまざまである。過去の地震の再来を考えるのみでは不十分である可能性があることは神戸に限った問題ではない。したがって、特にレベル2地震動を評価するにあたっては、画一的な手法に拠るのではなく、対象地点ごとに過去の地震や活断層の特徴を明らかにした上で、図-1に示した種々の流れによる検討を行うことが不可欠である。

②表-4より、東京を除く8都市においては「再評価値が最大となるPSE」として活断層の活動に基づく地震が抽出されている。このPSEによる最大加速度の「再評価値」（同表の右より4列目）は「活断層による最大値」（同表の再右列）と一致していることから、これらの都市においては、再

現期間が1,000年で貢献度が5%以上という選定基準によって、当該地点に最も影響が大きい活断層を想定地震として抽出し得ることがわかる。

③前章で述べた神戸の結果（表-3）では、再現期間が1,000年で貢献度が5%以上となるようなPSEが7つの地震活動域において抽出された。また、表-4における東京以外の都市では「貢献度が最大となるPSE」と「再評価値が最大となるPSE」で異なる地震が抽出されていることから、こうした都市でもレベル2地震動をもたらすような地震が複数考え得ることがわかる。一方、同表における東京の結果では、「貢献度が最大となるPSE」と「再評価値が最大となるPSE」のいずれにおいても関東地震が82%という大きな貢献度をもって抽出されており、こうした都市ではレベル2地震動をもたらすような地震がある程度限定されることを表している。このことは、地点ごとにレベル2地震動をもたらすような地震の特徴を明確にしていける必要があること、およびPSEの概念を用いることによってこうした地点ごとの想定地震の特徴を系統的な選定基準で定量的に評価することが可能となることを示している。

④各地点において評価される最大加速度の値は、例えば1,000年再現期待値で236~675 (Gal)と大きな幅がある。とりわけ、活断層を考慮した場合の地震危険度の地域差は過去の地震のみに基づく場合に比べてより強調されることになると考えられる。したがって、特にレベル2地震動の評価においては、こうした地域差の取り扱いに関して設計的な観点も踏まえた議論を行っていく必要がある。

## 5. 確率論的想定地震によるハザードマップ

次に、PSEの概念を広域的な地震危険度評価のためのハザードマップに応用した例について示す。ハザードマップとは自然災害の外力条件を表す指標を用いて、その指標値が場所によりどのように変化していくかを表わす図である。広域的な地震危険度の差異を表現するための方法として、最大加速度や最大速度の確率論的期待値を示したハザードマップが従来より用いられてきた（例えば河角マップ<sup>26)</sup>が、本研究で提案したPSEの考え方も地震活動域の貢献度を指標とするマップの形で表現することにより、ハザードマップの一つとして利用することができる。ここではPSEの貢献度を用いた2種類のハザードマップを定義するとともに、近畿地方におけるケーススタディを通じて、影響の大きい地震活動域が評価パラメータによって地域的にどのように変化していくかについて考察した<sup>1)</sup>。

### (1) PSEによるハザードマップの分類

ここで提案する「PSEによるハザードマップ」は具体的には、i) 地震活動域ごとの貢献度の地理的分布を示したハザードマップ（地震活動域貢献度マップ）、ii) 各地点において貢献度が最大となる地震活動域を示したハザードマップ（最大貢献度マップ）、の2種類である。このうち、i)の「地震活動域貢献度マップ」は当該地震活動域がどの地域にまで影響するかを表わすマップであり、ii)の「最大貢献度マップ」は対象地点に対してどの地震活動域で発生する地震が相対的に最も影響が強いかを表わすマップである。ii)については貢献度が最大のもののみならず、貢献度の順位別にマップを描くことも可能である。PSEの貢献度は対象とするリスクレベルや地震動の周期帯域ごとに変化するものであり、こうしたパラメータを規定した場合のハザードマップを描くことによって、PSEの地域的な変化を直接捉えることが可能となる。

### (2) ハザードマップの作成例

ここでは近畿地方を対象として、PSEによるハザードマップを作成した例について示す。解析対象範囲は、東経134.5°～137.0°、北緯33.4°～35.8°の地域である。ただし、この計算ではハザードマップ作成の第一段階として、表現の際に大縮尺の地図を必要とする活断層は考慮していない。したがって、リスクレベルも活断層の影響がそれほど現れない再現期間100年を対象としている。当然のことながら、活

断層を考慮したハザードマップを作成することも可能である。ここではランダムな地震発生場である地震域と、それとは別個に、プレート境界地震として南海地震および東海地震を断層面の拡がりや考慮してモデル化している<sup>1)</sup>。また、地震動の周期帯域の違いに伴うハザードマップの変化を見るために、地震動強度指標は加速度応答スペクトルとし、その距離減衰式は安中・野沢式<sup>27)</sup>を用いている。ここで比較の対象とした周期は0.1sと4.0sである。

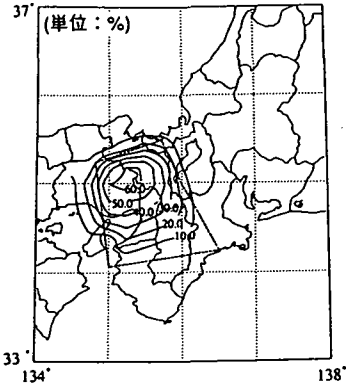
#### ①地震活動域貢献度マップ

図-8(a)に周期0.1sにおける地震域No.9（点線で囲まれた領域）の貢献度のマップを示す。地震域の中心地域では貢献度が60%を超える地点が存在する。また、等貢献度線全体は地震域の形状と比較すると北側に偏っており、貢献度が50%以上の地域（貢献度が絶対的に最大となる）は地震域内の一部に限られる。これは、No.9の地震域内の地点では、当該地震域の貢献度に加えて、最大マグニチュードが大きい南側の南海地震の貢献度が相応に大きくなるためである。図-8(b)に周期0.1sにおける南海地震の貢献度マップの例を示す。10%の等貢献度線は北側では京都府や滋賀県の南部にまで達しているが、東側は東海地震の影響と拮抗するため北側ほど広がらない。また、等貢献度線は断層面の形状に比較的似た形となっている。

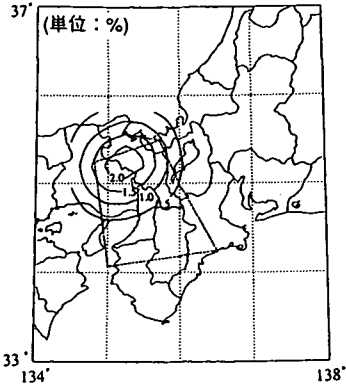
図-9(a)に周期4.0sにおける地震域No.9の貢献度マップの例を示す。周期0.1sの場合と比較すると、貢献度の値は各地域ともに大きく減少し、No.9の貢献度が最も大きくなる地域の位置はさらに北に移る。また、No.9の内部でも南部に位置する地点では、No.9の影響は殆ど見られない。これは周期4.0sでは南側の南海地震と南東側の東海地震の影響が、周期0.1sの場合と比べてさらに増大するためである。図-9(b)に周期4.0sにおける南海地震の貢献度マップの例を示す。解析対象範囲のほぼ全域で貢献度が20%以上となり、影響範囲が0.1sの場合より拡大していることがわかる。

このことは2.(3)③で述べたPSEと地震動の周期帯域の関係を具体的に示すものである。すなわち、各地震活動域の貢献度を示した「地震活動域貢献度マップ」は、地震動が短周期の場合には当該地点が含まれる地震域の貢献度が大きくなるのは当然として、一方で近接する地震活動域と相互に強く影響し合うため、等貢献度線の形状は地震活動域の形状に必ずしも相似形にはならない。また比較的長周期の地震動を対象とした場合には、東海地震や南海地震のように遠方でもマグニチュードが大きい地震活動域の影響が卓越してくる。

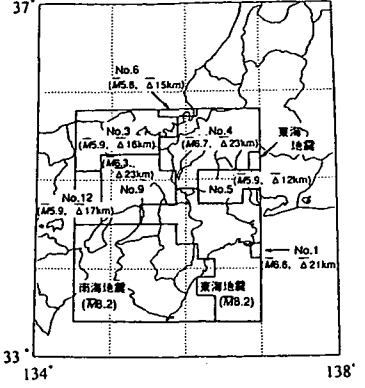
(a) 地震域No.9



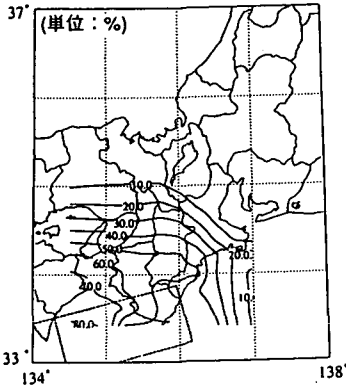
(a) 地震域No.9



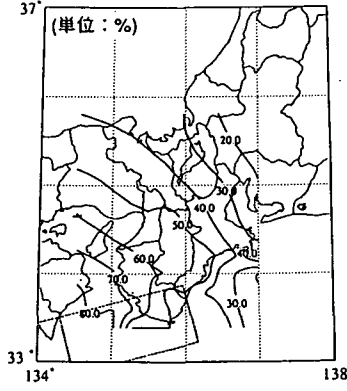
(a) 周期：0.1s



(b) 南海地震



(b) 南海地震



(b) 周期：4.0s

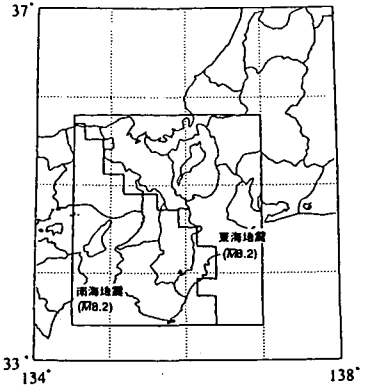


図-8 地震活動域貢献度マップ  
(周期：0.1s, 再現期間100年)

図-9 地震活動域貢献度マップ  
(周期：4.0s, 再現期間100年)

図-10 最大貢献度マップ  
(再現期間100年)

## ②最大貢献度マップ

図-10は各地点における貢献度が最大となる地震活動域を示す「最大貢献度マップ」の例である。図中の  $(M, \Delta)$  の値は当該地震活動域で算出されたPSEの平均的なマグニチュードと震央距離の値を示している。解析地点のピッチの関係で角張った図となっているが、図-10(a)の周期0.1sの場合には、近距離で発生する地震の影響が強いため、当該地点が含まれる地震活動域の貢献度が最大となり、解析地点の位置によって影響が最も強い地震活動域が細かく変化していく様子がわかる。これに対し図-10(b)の周期4.0sの場合には、マグニチュードが大きいほど長周期地震動が強く励起されることと長周期地震動ほど遠方まで伝播する現象を反映して、解析対象エリア全域で、最もマグニチュードが大きい東海地震と南海地震の貢献度が最大となる。

ここでは対象とするリスクレベルや地震動の周期に適合した想定地震の地域的な変化を明らかにすることを目的に、PSEの「貢献度」という指標を用いた2種類のハザードマップを提案した。従来より多く用いられてきた最大加速度や最大速度のハザードマップでは、個々の地震の物理的イメージとその貢献度は隠されていたが、今回提案した「PSEによるハザードマップ」は当該地域に影響を及ぼす可能性が高い地震を直接表示するものであり、想定地震により地域の地震危険度を定量評価していく上で有用である。

さらに地震活動域として活断層モデルを加えることにより、より低頻度のリスクレベルを対象としたハザードマップを作成することも可能であり、こうした点でもこのPSEによるハザードマップの方法論を発展させることができる。

## 6. 結 論

本研究では従来別個の考え方として用いられてきた想定地震と確率論的地震危険度解析を結合した「確率論的想定地震」の概念を提案するとともに、その定式化ならびに特徴について整理した。そして、神戸をはじめとする全国主要都市における確率論的想定地震の評価例や広域の地震危険度評価のための確率論的想定地震によるハザードマップの作成例を通じてその有用性について論じた。以下に得られた結論を要約する。

(1) 想定地震の設定法に関する工学的な問題点を明確にするとともに、確率論的地震危険度解析の拡張問題として確率論的想定地震の概念を提案した。

(2) 確率論的想定地震の設定手順ならびにその特徴について論じた。特に対象地点周辺で複数想定される地震の重要性を定量的に判断するための指標として「貢献度」を定義し、その利用法を示した。

(3) 活断層を考慮した神戸における確率論的想定地震を示し、それと兵庫県南部地震とを対照させることにより、確率論的想定地震の低頻度巨大外力の評価への適用性について検討した。その結果、六甲断層帯を確率論的想定地震として抽出するためには1,000年オーダーの再現期間を考慮する必要があることを指摘した。また、確率論的想定地震の概念を用いることにより、ランダムに発生する地震群から単一(少数)の地震シナリオに至る地震環境をリスク指標を介して連続的に議論できることを示した。

(4) 低頻度巨大外力としてのレベル2地震動を評価するための基礎資料として、全国主要8都市における活断層を考慮した再現期間1,000年に適合する確率論的想定地震を評価した。その結果、種々の地震動強度の大小関係やそこでの活断層の貢献度などは地点によってさまざまであり、対象地点ごとに種々の流れによる総合的な検討を行うことが不可欠であること、ならびに確率論的想定地震の概念を用いることによってこうした地点ごとの想定地震の特徴を系統的な選定基準で定量的に評価することが可能となることを指摘した。

(5) 確率論的想定地震における貢献度を指標とする2種類のハザードマップを提案し、近畿地方を対象とした作成例を通して、広域の地震危険度評価への確率論的想定地震の応用の可能性について考察した。

兵庫県南部地震以降、多くの自治体において地域防災計画の見直し作業が進められている。また、耐震設計に用いる入力地震動の改定作業も進みつつあ

る。こうした作業では地震外力の評価の最初のステップで想定地震の設定が多く行なわれるようになると思われるが、その際、本研究で論じたような「想定地震の工学的な位置づけ」を明確にするとともに、対象地域において考慮すべき種々の地震像を幅広い角度から検討しておくことが必要である。そして、こうした想定地震に関する情報を選定プロセスも含めて広く開示する姿勢が重要であると思われる。本研究で提案した確率論的想定地震の考え方は、客観的に想定地震を評価するためのツールとして有用であり、こうした概念がより合理的な地震荷重評価に向けての橋渡しとなることを期待するものである。

謝辞：本研究の一部は、文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(1)(07555635)の支援を受けた。また、本研究は社団法人システム総合研究所を事務局として、京都大学と清水建設株式会社との共同研究として実施されたものである。これらのご支援に深謝の意を表す。研究のとりまとめに際しては、土木学会耐震問題等基本問題検討会議ならびに土木学会耐震工学委員会地震荷重小委員会での議論を通じて有用な意見をいただいた。併せて謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 田村敬一：動的解析の入力地震動，東京湾横断道路の構造・施設設計に関する調査研究，土木研究所報告，第184号，pp.19-34，1991.
- 2) 渡部 丹，大熊武司，藤堂正喜：高層建築物設計用の地震・風荷重，第2回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム論文集，pp.655-658，1991.
- 3) Cornell, C. A. : Engineering Seismic Risk Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
- 4) 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.
- 5) 亀田弘行：地震危険度解析，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，pp.29-50，1989.
- 6) 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.
- 7) 石川 裕，亀田弘行：地震危険度解析に基づく想定地震の設定法，第8回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.79-84，1990.
- 8) Ishikawa, Y. and Kameda, H. : Probability-based Determination of Specific Scenario Earthquakes, *Proceedings of the 4th International Conference on Seismic Zonation (4ICSZ)*, Vol.II, pp.3-10, 1991.
- 9) Ishikawa, Y. and Kameda, H. : Scenario Earthquake vs Probabilistic Seismic Hazard Analysis, *Proceedings of the 6th International Conference on Structural Safety and*

- Reliability (ICOSSAR'93)*, Vol.3, pp.2139-2146, 1994.
- 10) 亀田弘行, 石川 裕, 中島正人: 想定地震の工学的設定法に関する研究, 京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告, 別冊第14号, 1994.
  - 11) 中島正人, 亀田弘行, 石川 裕, 奥村俊彦: 確率論的想定地震の応用に関する研究—ハザードマップの作成と活断層を考慮した低頻度巨大外力の評価—, 京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告, 別冊第21号, 1996.
  - 12) 石川 裕, 奥村俊彦, 亀田弘行: 活断層を考慮した神戸における地震危険度評価, 土木学会阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.61-68, 1996.
  - 13) US-NRC: Characterization of Seismic Sources and Determination of Safe Shutdown Earthquake Ground Motions, *Draft Regulatory Guide DG-1032*, 1995.
  - 14) Prof. Cornell, C. A. よりの私信, 1991.
  - 15) McGuire, R. K.: Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.85, No.5, pp.1275-1284, 1995.
  - 16) Boissonnade, A., Chokshi, N., Bernreuter, D. and Murphy, A.: Determination of Controlling Earthquakes from Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Nuclear Reactor Sites, *Transactions of the 13th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 13)*, Vol.4, pp.1771-776, 1995.
  - 17) 松田時彦: 最大地震規模による日本列島の地震分帯図, 地震研究所彙報, Vol.65, pp.289-319, 1990.
  - 18) 島崎邦彦: 活断層に基づく地震予測, 日本建築学会第23回地盤震動シンポジウム, pp.5-10, 1995.
  - 19) 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, 第2輯, 第28巻, pp.269-283, 1975.
  - 20) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, *Shimizu Technical Research Bulletin*, No.10, pp.1-11, 1991.
  - 21) 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Ⅱ-13 (ノート), pp.457-460, 1990.
  - 22) Matsuda, T.: Active Faults and Damaging Earthquakes in Japan — Macroseismic Zoning and Precaution Fault Zones, *Maurice Ewing Ser.*, Vol.4, Am. Geophys. Union, pp.271-289, 1981.
  - 23) 石川 裕, 奥村俊彦, 亀田弘行: レベル2地震動の評価のための活断層を考慮した確率論的想定地震, 土木学会第51回年次学術講演会, I-B250, pp.500-501, 1996.
  - 24) 石川 裕, 奥村俊彦: 活断層を考慮した主要都市の地震危険度評価, 清水建設研究報告, 第64号, pp.33-40, 1996.
  - 25) 渡部 丹: 設計用入力地震動の強さとそのレベル設定, 公共建築, 37-3, #145, pp.8-11, 1995.
  - 26) 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.
  - 27) Annaka, T. and Nozawa, Y.: A Probabilistic Model for Seismic Hazard Estimation in the Kanto District, *Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.II, pp.II-107-112, 1988.

(1996. 12. 20 受付)

## PROBABILISTIC SCENARIO EARTHQUAKES — DEFINITION AND ENGINEERING APPLICATIONS —

Hiroyuki KAMEDA, Yutaka ISHIKAWA, Toshihiko OKUMURA  
and Masato NAKAJIMA

An idea of probabilistic scenario earthquakes (PSE) is proposed and its engineering applications are described. PSE is developed by establishing a link between probabilistic seismic hazard analysis and scenario earthquakes, and makes it possible to objectively determine the scenario earthquakes corresponding to the specific risk level. The procedure of determining PSE and several case studies of PSE, which include the examples for major cities in Japan and the seismic hazard maps in terms of PSE, are shown in this study. In particular, the case study for Kobe demonstrates that the PSE can be applied to the evaluation of the "low frequency-high impact seismic event" such as Great Hanshin earthquake of 1995.