

確率論的地震危険度の評価手順と感度解析

蛭沢勝三*・高荷道雄**・田中歳明***
阿部清治****

日本原子力研究所では、原子力発電所の地震リスク評価を行うための一環として確率論的地震危険度評価を行ってきた。これまで、地震危険度計算コードSHEATを開発するとともに、多くの発電所サイトに適用し得る確率論的地震危険度の評価手順を提案した。この手順を敦賀市・水戸市・掛川市の3地区に適用した場合の感度解析を行ったところ、地震危険度に不確実さをもたらす重要な因子とその影響の大きさ及び3地区の地震危険度の特徴が分かった。

Keywords: nuclear power plant, probabilistic safety assessment, seismic hazard, attenuation model

1. 緒 論

原子力発電所の安全性を総合的・定量的に評価する方法として、確率論的安全評価(PSA: Probabilistic Safety Assessment)手法がある。この手法は、原則として、原子力発電所で発生し得るすべての事故を対象とし、それらの発生頻度と影響を解析することにより、施設の安全性を評価するものである。対象とする事故には、ランダムな機器故障等原子力発電所の施設やシステムに内在する原因で引き起こされる事故(内的事象という)と、地震・津波等原子力発電所の施設やシステムの外部にある原因で引き起こされる事故(外的事象という)とがある。我が国において外的事象を評価する場合は、地震によるリスクを評価することが重要である。このため、日本原子力研究所(以下原研という)では、1985年に原子力発電所の地震リスクを評価するための手法開発¹⁾に着手した。地震リスク評価は、一般に、特定サイトにおける地震危険度評価、各レベルの地震動に対する建屋・機器の応答評価、建屋・機器の損傷確率評価・地震によるシステム機能喪失発生確率評価/炉心溶融事故発生頻度評価の4つの項目からなる^{1),2)}。

原研は、これまでに、地震リスク評価用計算コードの開発の一環として確率論的地震危険度評価用計算コードSHEAT¹⁾を開発するとともに、多くの発電所サイトに適用し得る評価手順の確立を図ってきた。そして、地震危険度に不確実さをもたらす因子とその影響の大きさを明らかにするため、いろいろな地区にこの評価手順を適応した場合の広範な感度解析を行ってきた。

本報告では、原研の確率論的地震危険度評価手順を説

明するとともに、感度解析の計算結果と地震危険度をより精度良く評価するための評価手順の課題等について述べる。

2. 原研の確率論的地震危険度評価手順

(1) 確率論的地震危険度評価手順の概要

まず、一般的な確率論的地震危険度評価手順の概要を述べる。この評価は、評価の対象とする特定の地区周辺での地震の発生をモデル化することと、距離減衰を考慮してこのような地震によってもたらされるその地区の地震動を計算する2つのステップからなる³⁾。

地震発生モデル化では、歴史地震データや活断層データを用い地震の発生位置・規模(M: マグニチュード)・発生頻度の各項目を設定する。これらの設定方法は、歴史地震データと活断層データを用いる場合とでは異なる。

歴史地震データを用いる場合について述べると、地震の発生位置の設定では、評価の対象とする領域(以下対象領域という)内に地震活動の似た領域(以下地震域という)を定め、これらの地震域を網目分割しそれぞれ網目の中心に震源を定める。地震の規模は、地震域内の地震を用いて求めたGutenberg-Richter式⁴⁾(以下G-R式という)で表わされる地震規模別発生頻度分布における各マグニチュードの値とする。地震の発生頻度は、地震発生にポアソン過程を仮定した上で、発生頻度が地震域内で一様であるとして求めた値とする。

活断層データを用いる場合は、活断層から発生する地震の活動様式をb値モデル⁵⁾(個々の活断層から発生する地震の規模別発生頻度分布がG-R式で表わされるといふモデル)で表わすか、最大モーメントモデル⁶⁾(個々の活断層から固有の規模を有する地震がある繰返し間隔で発生するというモデル)で表わすかによって取扱いが異なる。b値モデルの場合は、地震の発生位置について

* 正会員 工修 日本原子力研究所リスク評価解析研究室
(〒319-11 茨城県東海村白方白根2-4)

** 工修 トランスニュークリア(株)技術室

*** NKK 原子力研究室

**** 日本原子力研究所リスク評価解析研究室

は活断層線をいくつか分割しそれぞれの分割線上の中心に震源を定める。地震の規模は、断層長さと地震規模の関係を表わす経験式から求めた値とする。地震の発生頻度は、地震発生にポアソン過程を仮定した上で、活断層の変位・平均変位速度・ b 値を用いて求めた値とする。最大モーメントモデルの場合は、 b 値モデルで設定した b 値を0とする以外は b 値モデルの場合と同様にして地震の発生位置・規模・発生頻度を定める。

地震動の計算では、既存の地震動距離減衰式（以下距離減衰式という）で求めた値のまわりにはばらつきを仮定し、このばらつきをある確率分布型とその標準偏差で表わす。それぞれの地震に対して計算された地震動レベルごとの発生頻度をすべての地震について足し合わせ、その結果を年当り超過発生頻度で表現したものを地震危険度とする。

著者等も基本的に以上のような方法に従って確率論的地震危険度評価を行う。しかしながら、地震発生及び地震動発生両方のモデル化においていろいろの課題が指摘されているので、著者等はこれらの課題を解決し得る評価手順を提案した。

以下、地震発生のモデル化における a) 歴史地震データと活断層データの用い方、b) 地震の発生頻度の算定方法、に関する課題及び地震動発生モデル化における課題に分け、それぞれの課題に対する解決方法を提案するとともに、この提案に基づき両モデルそれぞれの各項目を評価する手順について述べる。

(2) 地震発生のモデル化に関する手順

a) 歴史地震データと活断層データの用い方

地震発生をモデル化する時には、通例として、歴史地震のデータか活断層のデータいずれか一方のデータを用いる。しかしながら、歴史地震データの場合は内陸部（日本海海域部を含む）・太平洋海域部のいずれの地域でも記録されているが、収録期間が最大で飛鳥・奈良時代まで遡っての約1300年程度であるので、地震の繰返し発生時間間隔（以下繰返し間隔という）が1000年以上にもなる地震の発生頻度について十分に評価することが難しい^{6),7)}。一方、活断層データの場合は地震活動について数十万年オーダーの情報を有しているものの、海域部では活断層が十分発見されていないので、そこでの地震の発生をモデル化するのは困難である^{6),7)}。

この課題に対し著者等は、太平洋海域部で発生するプレート間地震と内陸部で発生するプレート内地震とは繰返し間隔が大きく異なることに注目し、地震をプレート間地震とプレート内地震に分け、これらの地震の発生位置・規模・発生頻度について歴史地震データと活断層データとを使い分けてモデル化することとした。

以下、このモデル化の方法について述べる。

① プレート間地震のモデル化

プレート間地震の発生位置・規模・発生頻度については、歴史地震データを用いてモデル化する。プレート間地震が発生する地域のうちの歴史地震データ収録期間の最も短い北海道でも、その期間が約250年程度であるので、このデータで最大繰返し間隔約100年程度のプレート間地震の発生頻度をモデル化できると考えた。

地震の発生位置の設定では、まず、ユーラシアプレート下に沈み込む太平洋プレート及びフィリピン海プレート表面上に200km四方の対象領域を定める。次いで、この領域内にプレート表面構造の構造境界を示すアサイスミック・フロント⁸⁾がある場合には、それによって分けられた領域をそれぞれ地震域とし、それが無い場合には対象領域全域をひとつの地震域とする。そして、前述の(1)で述べた歴史地震データを用いる場合と同様の方法で各地震域に震源を定める。地震の規模は、地震域内の歴史地震データに基づいて作成した地震規模別発生頻度分布における各マグニチュードの値とする。各地震域内の地震活動が、一般に用いられるG-R式に従うと仮定するより、この式を算定するもととなった地震規模別発生頻度分布そのものに従うとした方が現実的であると考えたからである。地震の発生頻度 ν は、地震の発生がポアソン過程に従うと仮定し、次のように求める（以下後述の式(2)~(8)で表わす内容と対比させるために、時間依存性を考慮しない方法という）。

$$\nu = N_{he} / (T_{hs} \cdot N_{hc}) \dots \dots \dots (1)$$

N_{he} : 地震域内で発生した歴史地震の数

T_{hs} : 歴史地震データの抽出期間

N_{hc} : 地震域内の震源の数

プレート間地震のうち東海地域沖合の南海トラフ付近で発生するM8程度以上の巨大地震のデータの場合は、地震危険度への寄与が大きいこと、及びこの地震の発生に関し大規模地震対策研究会等⁹⁾の詳しい情報が得られることから、地震規模の求め方は上述と同様とするが、特例として、発生位置・頻度の求め方を変える。地震の発生位置は、フィリピン海プレート表面上に設定した将来巨大地震の発生が予想される領域（以下この巨大地震を想定巨大地震、その領域を地震空白域という）で空間的に一様とする。発生頻度は、後述の式(3)~(8)で表わす時間依存性を考慮した方法で求めた値とする。

② プレート内地震のモデル化

プレート内地震の発生位置・規模・発生頻度については、活断層データと歴史地震データの両方を用いてモデル化する。プレート内地震は、繰返し間隔が長いので長期の地震活動情報を有する活断層データでモデル化することが望ましいが、海域部では活断層データが少ないのでそこでの地震の発生を十分にモデル化し得ない。また、活断層データでは、モデル化し得る地震規模の下限値がM6.5程度¹⁰⁾であるので、この規模以上の地震につい

てはモデル化し得るものの、それ以外の地震についてはモデル化し得ない。そこで、内陸部での M 6.5 程度以上の地震の発生については活断層データと歴史地震データを用いてモデル化する。但し、両者の重複を避けるため、活断層と歴史地震とを対応し得る地震断層については歴史地震データを用いず、活断層データを用いるものとする。海域部での地震と内陸部での M 6.5 程度以下の地震の発生については、歴史地震データを用いてモデル化する。

以下、活断層データと歴史地震データとに分け、地震発生に関する各項目の評価手順を述べる。

(i) 活断層データの取扱い方法

地震の発生位置の設定において、深さは飯田式¹¹⁾で求めた余震体積半径の2分の1とし、平面的位置は前述の(1)で述べた活断層データを用いる場合と同様の方法で求める。地震の規模は、断層長さ L とマグニチュード M の関係を表わす松田式¹⁰⁾で求める。地震の発生頻度 ν を求める場合には、最大モーメントモデルに従うと仮定する。さらに、活断層から発生する地震の平均繰返し間隔 T_{ai} 内における歴史期間 T_{hi} (歴史地震データが記録されている期間)中には、この活断層から地震が発生していないので、この期間分だけ地震発生の可能性が高くなると考え、次のように求める(以下時間依存性を考慮した方法という)。

$$\nu = P_{ac} / ((T_{ai} - T_{hi}) \cdot N_{hc}) \dots \dots \dots (2)$$

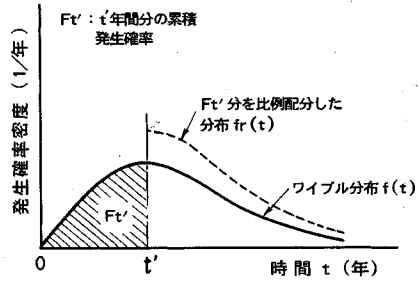
- P_{ac} : 確実度を確率値で表したもの
- T_{ai} : 地震の平均繰返し発生時間間隔
- T_{hi} : 歴史期間
- N_{hc} : 活断層上の震源の数

活断層の存在の確からしさを表す確実度¹²⁾は、著者等が確実度の定義に基づいて確実度 I 及び II に対しそれぞれ 1.0 及び 0.7 と仮定した各確率値 P_{ac} とする。地震の平均繰返し間隔 T_{ai} は、後述の式 (6) で算定した値とする。但し、地震断層のうちサイトに大きな地震動をもたらすと考えられる地震断層から発生する地震の発生頻度については、その求め方を変える。その発生頻度は、後述の式 (3)~(8) で表わす時間依存性を考慮した方法で求めた値とする。

(ii) 歴史地震データの取扱い方法

地震の発生位置の設定において、深さは上述の (i) の活断層データの場合と同様の方法で求め、平面的位置は前述の (1) で述べた歴史地震データを用いる場合と同様の方法で求める。地震域は、活断層研究会の活断層区¹²⁾に基づいて著者等がユーラシアプレート内に設定した領域とする。地震の規模・発生頻度の求め方は、プレート間地震の場合と同様とする。

地震の発生頻度算定に最大モーメントモデルとポアソン過程を併用したのは、両者に次のような関係が認めら



図一1 ワイブル分布上に経過時間分の累積発生確率を比例配分する概念図

れたので、プレート内地震の発生を矛盾なく評価できると考えたからである。個々の地震は最大モーメントモデルに従ってある繰返し間隔をもって発生しているものの、ある対象期間・対象領域で発生した個々の地震をグループでみた場合には、これらの地震の発生は見掛け上ランダムとみなし得るので、ポアソン過程を仮定し得る。

b) 地震の発生頻度の算定方法

地震の発生頻度を算定する場合は、ポアソン過程を仮定することが多い。この方法では、偶発的な地震の発生が仮定されるので、時間の経過に伴って発生頻度を変えて算定することはできない^{13),14)}。

この課題に対し著者等は、ある断層内の岩盤に蓄積されたひずみエネルギーが地震の発生により一旦解放された後再び時間とともに増加するにつれ、発生頻度も高くなるような時間依存性を考慮した方法で発生頻度を求めることとした。この方法を適用し得る地震は、繰返し間隔と最終歴史地震の発生時期が分かっているもの(例えば想定巨大地震や地震断層から発生する地震)に限られる。

以下、これら地震の発生頻度の算定方法(以下時間依存性を考慮した方法という)について述べる。図一1に示すように、地震の繰返し間隔 t がワイブル分布 $f(t)$ に従ってばらつくことと仮定し、最終歴史地震の発生年を0年とした上で、対象とする年の発生頻度を求める。最終歴史地震発生以後 t' 年経過しても地震が発生しない場合は、 t' 年間の累積発生確率 $F_{t'}$ を t' 年以降の分布に比例配分して求めた分布 $f_r(t)$ から発生頻度を求める。

$$F_{t'} = \int_0^{t'} f(t) dt$$

$$= \int_0^{t'} m \cdot (t^{m-1}/t_0) \cdot \exp(-t^m/t_0) dt \dots \dots \dots (3)$$

$$f_r(t) = (1/(1-F_{t'})) \cdot m \cdot (t^{m-1}/t_0) \cdot \exp(-t^m/t_0) \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 m はワイブル分布を規定する形のパラメータであり、 t_0 は尺度のパラメータである。

以下、この m と t_0 の求め方について述べる。

① 歴史地震データを用いる場合

m, t_0 については、歴史地震データから求められた繰

返し間隔 t_i を統計処理して求める。 i は繰返し間隔数を表す。

② 地震断層データを用いる場合

m については後述の3章(2)c)で述べる2.9と仮定し、 t_0 についてはこの m 2.9と平均繰返し間隔 T から求める。次式で Γ はガンマ関数を表す。

$$t_0 = T^m / (\Gamma(1+1/m))^m \dots\dots\dots (5)$$

平均繰返し間隔 T は、断層変位 D (mm) と平均変位速度 S (mm/年) から求めるものとする。 D は、断層長さ L (km) から経験式を用いて計算するものとする。

$$T = D/S \dots\dots\dots (6)$$

$$D = 10^{0.6M-1.0} \quad \text{松田式} \dots\dots\dots (7)$$

$$M = (\log L + 2.9) / 0.6 \quad \text{松田式} \dots\dots\dots (8)$$

(3) 地震動発生モデル化に関する手順

距離減衰式は、一般に、異なる地域で観測された地震動の最大値のデータを用い、これらに良く合致するような関数とその標準偏差を求める方法で作成される。この式では、地震動の比較的低いレベルでのデータまでも対象としている反面、近距離で発生した大きな地震による強地震動領域でのデータが少ないので、その領域での不確かさが大きい。そこで、地震 PSA で対象とする強地震動をこの式で精度良く算定することは難しい¹⁵⁾。

この課題に対し著者等は、既存の距離減衰式ではこの課題を解決し得ないと考えるが、当面地震動の大きさを土木研究所が提案する1種地盤を対象とした距離減衰式¹⁵⁾ (以下土研式という) で求めることとした。次式で、 a は最大加速度 (Gal) を、 Δ は震央距離 (km) を表す。

$$a = 1073 \cdot 10^{0.221M} \cdot (\Delta + 30)^{-1.251} \dots\dots\dots (9)$$

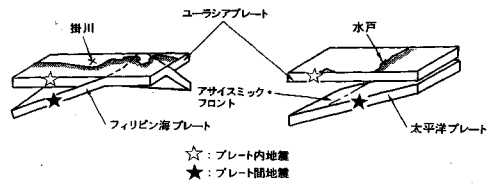
土研式を選択したのは、式の作成のために全国での多くの観測地震動データを用いているので、日本での平均的な地震動距離減衰が表されていること、対象とした地盤条件が著者等が対象とする地盤条件 ($V_s \geq 700$ m/s 程度) に近いこと及び地震動のばらつきが表示されていることによる。地震動のばらつきを表す分布形とその標準偏差は、土研式に従い、対数正規分布・対数標準偏差 0.5 とする。

3. 地震危険度の感度解析

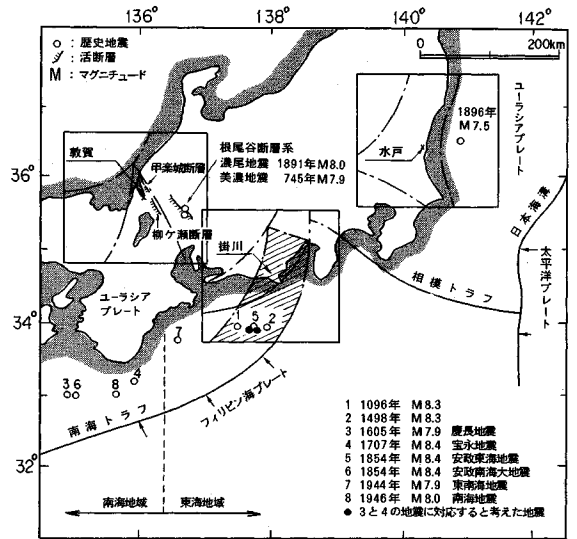
(1) 解析の概要

a) 解析方法

本感度解析では、まず、複数の対象地区を選定し、2章で述べた原研の確率論的地震危険度評価手順に基づき各地区ごとに標準となるケース(以下標準ケースという)を定め、それらの地震危険度を計算した。次いで、地震危険度に影響を及ぼすと考えられる因子については、地区ごとに標準ケースの値を1個ずつ変えて計算を行い、これら因子の地震危険度に及ぼす影響の度合いをみた。



(a) 掛川・水戸周辺の地殻・マントル構造を表す模式図



(注1) 実線は各地区の対象領域(200 Km四方)を表す。
(注2) 1点線は活断層区に基づきユーラシアプレート上に設定した地震域の境界を表す。
(注3) 斜線部はフィリピン海プレート表面上に設定した地震空白域を表す。

(b) 敦賀・水戸・掛川周辺での主な歴史地震・活断層の分布図

図-2 敦賀・水戸・掛川周辺の地殻・マントル構造と主な歴史地震・活断層の分布図

b) 対象地区

地震危険度に影響を及ぼす因子は、対象地区の置かれている条件(地質・地殻・マントル構造の違い、歴史地震データ^{16)~18)}・活断層データ¹²⁾の多寡、地震空白域の有無等)によって異なると考えられるので、対象地区は、これらの条件が異なる敦賀市・水戸市・掛川市の3地区とする。図-2(a),(b)に各地区周辺の地殻・マントル構造及び主な歴史地震と活断層の分布を示す。

c) 感度解析で対象とした因子とその設定範囲

感度解析で対象とした因子は、これまでに実施された地震危険度感度解析の研究¹⁹⁾で対象とした因子を参考とし、地震発生モデルと地震動発生モデルに係わるもののうち、地震危険度に大きく影響を及ぼすと考えられるものとした。その因子と設定範囲を表-1に示す。表中の◎は標準ケースでの値を示す。

d) 評価対象地震の分類とそれらの識別記号

評価の対象とする地震を、(i)プレート間で発生したかプレート内で発生したか、(ii)評価のもとになるデータが歴史地震データか活断層データか によって分

表-1 感度解析で対象とした因子とその設定範囲

対象因子		設定範囲	
地震発生データ	抽出期間の設定	敦賀・掛川 ⑤M 7.0～ - 679～1980年 M 6.0～6.9-1603～1980年 M 5.5～5.9-1926～1980年	水戸 ⑤M 6.0～ - 1603～1980年 M 5.5～5.9-1926～1980年
	地震域の設定	⑤活断層区及びアサシミック・フロントに基づき設定する場合 ・対象領域(200 km 四方)全域を1地震域とする場合	
	震源位置の設定	⑤地震域内で様とする場合 ・歴史地震データそのままの値とする場合	
モデル	想定巨大地震の発生頻度を算定する方法の設定	⑤時間依存性を考慮する方法 ・時間依存性を考慮しない方法(H 1, H 2)	
	地震規模・断層変位を算定する経験式の選択	⑤松田式 ・ 飯田式 ・ 米倉式	
	平均変位速度の設定	⑤活動度 A, B (5.0, 0.5 mm/年) ・ 活動度 A, B (10.0, 1.0 mm/年) ・ 活動度 A, B (1.0, 0.1 mm/年)	
地震動発生モデル	確実度の設定	⑤確実度 I, II (1.0, 0.7) ・ 確実度 I, II (0.9, 0.8) 確実度 I, II (0.8, 0.6) 但し、確実度を確率値で表わしている	
	活断層から発生する地震の発生頻度を算定する方法の設定	⑤時間依存性を考慮する方法 ・時間依存性を考慮しない方法	
	距離減衰式の選択	⑤土木研究所式(1種地盤) ・ 金井式 ・ 建設省新耐震設計法の式(1種地盤)	
地震動発生モデル	地震動のばらつきを表わす分布形の選択	⑤対数正規分布 ・ 上限打ち切りの対数正規分布 ・ β 分布	
	対数標準偏差(σ)の設定	⑤ σ 0.5 ・ σ 0.7 ・ σ 0.3	

(注1) ⑤は、標準ケースでの設定内容を示す。Mは、マグニチュードを表す。
 (注2) 「抽出期間の設定」の因子において標準ケース以外の範囲は、いろいろ変えて設定する。
 (注3) 「想定巨大地震の発生頻度を算定する方法の設定」の因子は、掛川だけに適用される。

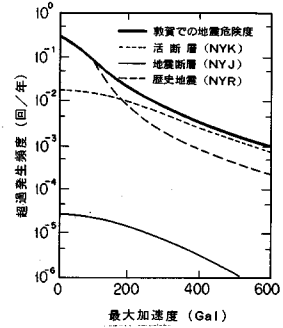


図-3 標準ケースにおける敦賀での地震危険度とその内訳

けて扱う。具体的には、次の6種類のグループに基づく地震を考える。対象地区の地震危険度は、各グループ(相当しないものを除く)のデータに基づいて計算されたものの合計となる。

- ① 太平洋プレートとユーラシアプレートの境界付近で発生した歴史地震のデータ(以下歴史地震(KTR)という)。
- ② フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界付近で発生した歴史地震のデータ(以下歴史地震(KFR)という)。
- ③ フィリピン海プレートとユーラシアプレートの境界付近のうち、特に、東海地域沖合の地震空白域で発生したM8程度の巨大地震のデータ(以下想定巨大地震(KFS)という)。
- ④ ユーラシアプレート内に存在する地震断層を除いた活断層のデータ(以下活断層(NYK)という)。
- ⑤ ユーラシアプレート内に存在する地震断層のデータ(以下地震断層(NYJ)という)。
- ⑥ ユーラシアプレート内で発生した歴史地震のデータ(以下歴史地震(NYR)という)。

(2) 対象地区の解析で特に留意した事項

a) 敦賀の場合

敦賀周辺には、地震断層である根尾谷断層系があり、これから敦賀に大きな地震動をもたらしたと考えられる美濃地震(745年, M 7.9)と濃尾地震(1891年, M 8.0)が発生している。この地震断層から発生する地震の発生頻度を地震断層データを用いて推定するか、歴史地震データを用いて推定するかにより、地震危険度がどの程度変わり得るかについてみた。

b) 水戸の場合

水戸周辺では、歴史地震データの収録期間が約400年

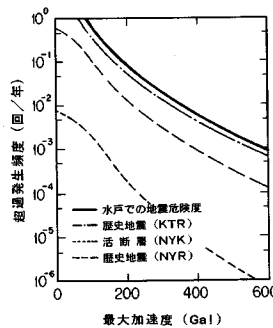


図-4 標準ケースにおける水戸での地震危険度とその内訳

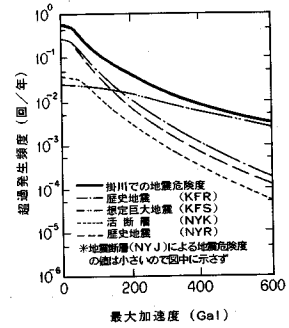


図-5 標準ケースにおける掛川での地震危険度とその内訳

(1603～1980年)であり、敦賀・掛川での約1300年(679～1980年)と比較して短い。また、その周辺は関東ローム層で覆われているので、発見されている活断層が少ない。このような歴史地震データと活断層データを用い、地震危険度を十分評価し得るのかについてみた。

c) 掛川の場合

図-2(b)に示すように東海地域東部の地震空白域では、安政東海地震(1854年, M 8.4)以降大きな地震は発生していない。この空白域での想定巨大地震の発生頻度をどのように評価するかにより、地震危険度がどの程度変わり得るかについてみた。この地震の発生頻度を(4)式の時間依存性を考慮した方法で求める場合は、次の力武²⁾の仮定を用いている。

力武は、南海地域で発生した巨大地震(慶長地震(1605年), 宝永地震(1707年))とほとんど同時に、同じ規模の地震が東海地域東部でも発生したと考えている。そして、南海トラフ付近の南海-東海地域における巨大地

震の発生パターンには、どちらか一方の地域で巨大地震が発生すると、他の地域でも巨大地震が発生する傾向があるとしている。そこで、著者等はこの力武の仮定に基づき図-2(b)に示す南海地域で発生した慶長地震(1605年)・宝永地震(1707年)・安政南海大地震(1854年)・南海地震(1946年)のデータを用い、東海地域東部での想定巨大地震の発生頻度を求める。これらのデータを用いて(4)式の時間依存性を考慮した方法で用いるパラメータ等を計算すると、ワイブル分布の形のパラメータ m は 2.9、尺度のパラメータ t_0 は 2.2×10^8 、平均繰返し間隔は 117 年となる。

(3) 標準ケースの計算結果

a) 敦賀の場合

敦賀の標準ケースの地震危険度計算結果とその内訳を図-3に示す。図から、敦賀では、最大加速度 200 Gal を超える範囲で活断層(NYK)の影響が大きくなること分かる。特に柳ヶ瀬、甲楽城等の少数の活断層の影響が大きい。一方、地震断層(NYJ)による寄与は、極端に小さい。これは、式(4)の時間依存性を考慮した方法で地震発生頻度を算定すると、過去の地震として重要であった根尾谷断層系からの地震の発生頻度が極めて小さくなるからである。なお、敦賀周辺の深さ 100 km 以深で発生するプレート間地震による地震危険度への影響は小さいので、評価の対象とする地震をプレート内地震だけとした。

b) 水戸の場合

水戸の標準ケースの地震危険度計算結果とその内訳を図-4に示す。図から、水戸の地震危険度では、歴史地震(KTR)による寄与が大きいこと分かる。歴史地震(NYR)と活断層(NYK)のプレート内地震は、地震危険度にほとんど寄与していない。

c) 掛川の場合

掛川の標準ケースの地震危険度計算結果とその内訳を図-5に示す。図から、掛川の地震危険度では、特に、想定巨大地震(KFS)による寄与が大きいこと分かる。これは、この地震発生モデルにおいて地震規模を M8 程度としていること及び地震の発生頻度を式(4)の時間依存性を考慮した方法で求めるとこの発生頻度が大きくなることによる。歴史地震(NYR)、活断層(NYK)及び地震断層(NYJ)のプレート内地震は、地震危険度にほとんど寄与していない。

(4) 感度解析の計算結果

表-1に示す各ケースについて感度解析を行ったところ、敦賀・水戸・掛川の地震危険度のうち少なくとも1つに大きな影響を及ぼす7つの重要因子が明らかになったので、これらの計算結果について述べる。

a) 地震域の設定

このケースでは、図-2に示す活断層区及びアサイス

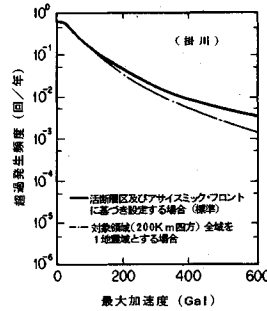


図-6 地震域を変えた場合の掛川での地震危険度

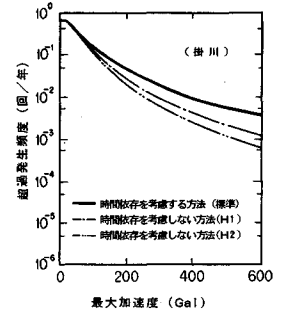


図-7 想定巨大地震の発生頻度を算定する方法を変えた場合の掛川での地震危険度

ミック・フロント等に基づき設定した標準ケースでの地震域を対象領域(200 km 四方)全域を1つの地震域とするものに変えて計算した。掛川では地震空白域の設定の違いにより、この因子による地震危険度への影響が大きかった。敦賀では活断層からの地震による地震危険度への寄与が大きいので、この因子による影響が小さかった。水戸ではこの地震危険度への寄与の大きい歴史地震(KTR)の震源分布が、太平洋プレート表面上に設定した各地震域において既に一樣に近いので、この因子による影響が小さかった。図-6に地震域を変えた場合の掛川での計算結果を示す。

b) 震源位置の設定

このケースでは、地震域内で一樣として設定した標準ケースでの震源を歴史地震データに記載されている震源位置に変えて計算した。この因子による地震危険度への影響は、掛川では大きかったが、敦賀・水戸では a) と同様の理由で小さかった。

c) 想定巨大地震の発生頻度を算定する方法の設定

このケースは、掛川だけに適用するものである。ここでは、標準ケースにおける式(4)の時間依存性を考慮した方法を次の2方法(H1, H2)に変えて計算した。H1は、想定巨大地震の平均繰返し間隔(117年)の逆数を発生頻度とする方法である。H2は、式(2)の時間依存性を考慮しない方法に基づき、巨大地震の発生個数(3個)/抽出期間(679~1980年)として求める方法である。図-7に発生頻度算定方法を変えた場合の地震危険度の違いを示す。

d) 地震規模・断層変位を算定する経験式の選択

このケースでは、標準ケースでの松田式を飯田式¹⁰⁾と米倉式¹⁰⁾に変えて計算した。この因子による地震危険度への影響は、活断層からの地震による地震危険度への寄与が大きい敦賀では大きかったが、水戸・掛川では小さかった。図-8に経験式を変えた場合の敦賀での計算結果を示す。

e) 平均変位速度の設定

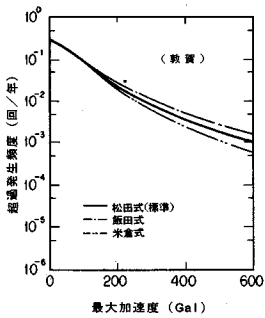


図-8 地震規模・断層変位を算定する経験式を変えた場合の敦賀での地震危険度

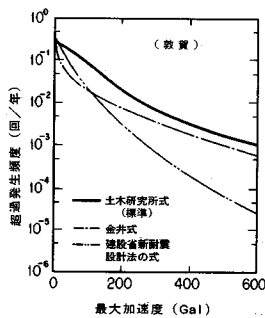


図-9 距離減衰式を変えた場合の敦賀での地震危険度

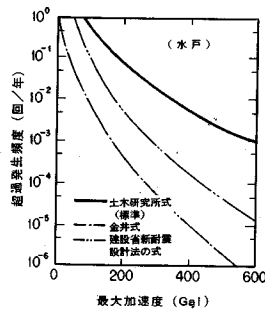


図-10 距離減衰式を変えた場合の水戸での地震危険度

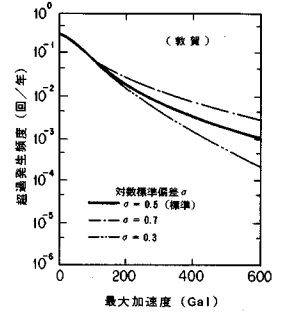


図-11 対数標準偏差を変えた場合の敦賀での地震危険度

このケースでは、活動度 A (1.0~10.0 mm/年) と活動度 B (0.1~1.0 mm/年) の変動範囲内で平均変位速度を変えて計算した。この因子が地震危険度と線形関係にあるので、その違いは、そのまま地震危険度の違いとなった。この因子は、d) の因子と同様敦賀の地震危険度に影響を及ぼした。

f) 距離減衰式の選択

このケースでは、標準ケースでの土研式を金井式²¹⁾と建設省新耐震設計法の1種地盤を対象とする式¹⁵⁾に変えて計算した。図-9, 10 に距離減衰式を変えた場合の敦賀と水戸での計算結果を示す。両図から、この因子が地震危険度に極めて大きく影響を及ぼすことが分かる。なお、掛川では、敦賀と同様の傾向であった。

g) 対数標準偏差の設定

このケースでは、標準ケースでの対数標準偏差 0.5 を 0.7 と 0.3 に変えて計算した。図-11 に対数標準偏差を変えた場合の敦賀での計算結果を示す。図から、この因子が地震危険度に極めて大きく影響を及ぼすことが分かる。水戸・掛川では、敦賀と同様の傾向であった。

4. 考 察

(1) 歴史地震データと活断層データの用い方

歴史地震データは、その信頼性が時代を遡るにつれ低くなるとともに、その収録期間が地域により偏っており、最大でも約 1300 年程度であるという特徴を有する。そこで、歴史地震データから評価の対象とする地震を抽出する場合は地震規模別に抽出期間を変えて設定するので、それをいろいろ変えた場合の地震危険度への影響をみた。今回の解析では、3 地区の地震危険度に対する影響は小さかった。しかしながら、敦賀・掛川両地区の標準ケースでの計算結果では、前者の歴史地震 (NYR) 及び後者の歴史地震 (NYR)・(KFR) とともに地震危険度への寄与が小さいので、抽出期間を変えてもそれに対する影響は分からない。そこで、抽出期間を変えた場合の地震危険度への影響の度合いをみるために、歴史地震

データだけを用い、抽出期間 τ を 1980 年を基点に 100 年、200 年... というように時代を遡って設定し、式 (10) に示す地震危険度への影響の度合いを表す比率 α を指標にしてそれを評価した。この場合、地震の発生位置・規模は、歴史地震データそのままの値とした。次式で、 $\nu(\tau)_{500 \text{ Gal}}$ は抽出期間 τ を変えた場合の最大加速度 500 Gal での超過発生頻度を、 $\nu(55)_{500 \text{ Gal}}$ は機械観測が開始された 1926~1980 年までを抽出期間とした場合の値を表す。

$$\text{比率 } \alpha = \nu(\tau)_{500 \text{ Gal}} / \nu(55)_{500 \text{ Gal}} \dots \dots \dots (10)$$

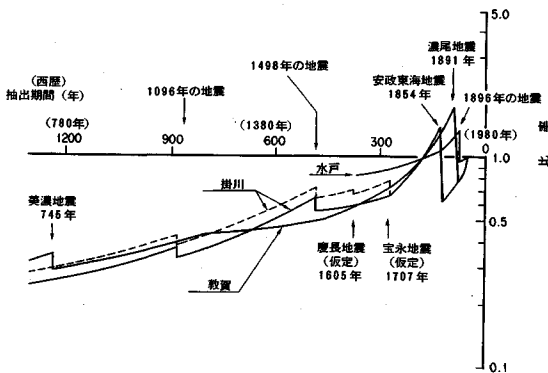
図-12 に敦賀・水戸・掛川の各地区における歴史地震データの抽出期間を変えた場合の最大加速度 500 Gal での超過発生頻度の比率を示す。

① 敦賀の場合

図-12 から、抽出期間約 100~1300 年の間では、根尾谷断層系から発生した濃尾・美濃地震を境にして比率 α が変化しており、これらの地震が地震危険度に大きく影響を及ぼしているといえる。そこで、将来発生が予想されるこれらと同規模の地震の発生頻度を精度良く評価する必要がある。それには、少なくとも平均繰返し間隔より十分長い歴史地震データが必要である。両地震の発生間隔約 1100 年をおおよその平均繰返し間隔とみなし、さらにこれにばらつきを考えるならば、約 1300 年程度の歴史地震データではその発生頻度を十分評価しがたい。そこで、繰返し間隔約 1000 年以上のプレート内地震の発生頻度を評価するには、地震活動に関して長期の情報に有する活断層データを用いる必要がある。しかしながら、発生頻度は繰返し間隔のどの時点でそれを評価するかによって大きく変わり得るので、発生頻度を時間依存性を考慮して評価する必要がある。そこで、根尾谷断層系のように繰返し間隔と最終地震発生年が分かっている地震断層については、時間依存性を考慮した方法でその発生頻度を評価する必要があると考える。

② 水戸の場合

図-12 から、抽出期間約 100~400 年の間では、比率



図一12 歴史地震の抽出期間を変えた場合の最大加速度500 Galでの超過発生頻度の比率

α が0.8~1.3であり変動幅が小さいことが分かる。これは、地震危険度に大きく影響を及ぼすような巨大地震が発生しておらず、M7.7以下の数多くの地震がそれに少しずつ寄与しているからである。図一4に示すように、水戸では歴史地震(KTR)が地震危険度に大きく寄与しているから、関東ローム層下に未発見の活断層が多くあると考えたととしても、これらによる地震危険度への影響は小さいと考えられる。水戸での地震危険度は、歴史地震(KTR)で表される水戸周辺のプレート間地震により支配されているといえる。個々のプレート間地震の繰返し間隔は最大で約100年程度であるものの、対象領域200km四方で地震が多く発生しているので、この領域内での地震活動を定常なものとして評価し得る期間は、約100年程度よりさらに短い。また、歴史地震データの信頼性が時代を遡るにつれて低くなるので、約400年の歴史地震データに基づいて評価するより、中央気象台の地震観測が開始された最近約100年程度の歴史地震データに基づいて評価の方が発生頻度の精度が良いと考えられる。これらのことから、水戸での歴史地震データ収録期間約400年は敦賀・掛川の約1300年に比べ短いものの、そこでの地震発生については、最近約100年程度の歴史地震データによって十分精度良く評価できる。

③ 掛川の場合

図一12から、地震空白域で発生した1854年、1498年、1096年の3つの巨大地震を境にして比率 α が大きく変わることが分り、これらの地震が地震危険度に大きく影響を及ぼしているといえる。力武が1707年と1605年に発生したと推定している巨大地震を加えて比率 α を計算すると図中の破線のようになり、同じ傾向がみられるとともに、最近約400年では約100年程度の周期性がみられる。巨大地震のこの繰返し間隔約100年に対して歴史地震データ収録期間約1300年は十分長いので、ポアソン過程を仮定してこのデータを用い、その発生頻度を評価し得る。しかしながら、それは平均像を表わすもの

であるので、想定巨大地震のように繰返し間隔と最終地震発生年が分かっている場合には、精度の良い評価とはいいがたく、発生頻度を時間依存性を考慮して評価する必要がある。したがって、根尾谷断層系の場合と同様、時間依存性を考慮した方法でその発生頻度を評価する必要があると考える。

(2) 地震の発生頻度の算定方法

地震の発生頻度は、算定方法の違いによって大きく変わり得るので、この違いの程度をみるため、時間依存性を考慮した方法と考慮しない方法を根尾谷断層系から発生する地震と想定巨大地震に適用した場合につき発生頻度の計算結果を比較する。

根尾谷断層系では、1988年時点で見ると、1891年に平均繰返し間隔約1100年の濃尾地震が発生してから僅か97年しか経過していないので、ひずみエネルギーの蓄積量が少ない。この状態を地震発生頻度で表現すると、時間依存性を考慮した方法では 1.5×10^{-5} 回/年となり、地震発生の平均像を表す時間依存性を考慮しない方法では 1.5×10^{-3} 回/年となる。一方、東海地域沖合の地震空白域では、1854年に安政東海地震が発生してから134年経過しているが、平均繰返し間隔117年と予想される巨大地震が発生していないので、ひずみエネルギーの蓄積量はかなり多い。同様に、時間依存性を考慮した方法では 2.4×10^{-2} 回/年となり、時間依存性を考慮しない方法では 2.3×10^{-3} 回/年となる。

地震の繰返し間隔が対象とする施設の耐用期間より長い場合は、発生頻度を繰返し間隔のどの時点で評価するかにより、上述の計算結果のように、結果が大きく変わり得る。岩盤中のひずみエネルギーは時間の経過とともに増加するので、これにともない地震発生の可能性は時間とともに高まる。そこで、特に、地震危険度評価上重要な地震でその繰返し間隔と最終地震発生年が分かっている地震の発生頻度を評価する場合は、著者等は時間依存性を考慮した方法による必要があると考える。しかしながら、評価に用いる分布型の選択やそれらを規定する係数の精度に問題が残されているので、これらについては今後検討する必要があると考える。

(3) 距離減衰式の選択と対数標準偏差の設定

距離減衰式と対数標準偏差を変えた場合の地震危険度に及ぼす影響は、極めて大きい。そこで、最初に、距離減衰式について標準ケースで設定した土研式と原子力分野の設計で用いられている金井式とに着目し、両式の地震危険度に及ぼす影響の大きさの違いをみる。

敦賀では図一9に示すように土研式が金井式の約3倍程度の地震危険度の違いとなるのに対し、水戸では図一10に示すように約2~3桁の違いとなる。このような違いは、距離パラメータを震央距離とする土研式と震源距離とする金井式の距離減衰特性が反映されているため

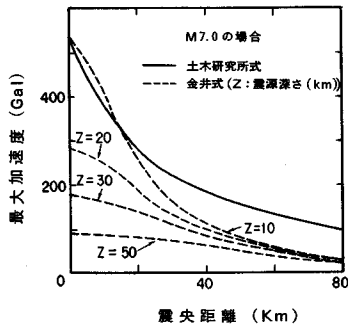


図-13 土研式と金井式における M7.0 の最大加速度と震央距離との関係

ある。この特性をみるため、図-13 に示す M7.0 の両式の最大加速度と震央距離との関係を例にして検討する。地震危険度に大きく影響を及ぼす震央距離 30 km 程度以内に注目すると、図から震源深さ 10 km 程度では両式による違いはあまり大きくないが、震源深さ 30 km 程度以上ではその違いが大きい。したがって、敦賀では地震危険度に大きく寄与する地震の震源深さが 15 km 程度、掛川では 20 km 程度であるので、両方の地区とも土研式と金井式による地震危険度の違いがそれ程大きくない。しかしながら、水戸では震源深さが 30~50 km 程度であるので、これらの式による地震危険度の違いが大きい。

土研式と金井式ともに、対象地区の近傍に想定した規模の大きな地震に適用した場合に不確かさが大きいという空間的な適用限界があるので、この限界を越え評価された上述の震央距離 30 km 程度以内の強地震動の不確かさはともに大きい。この傾向は、土研式・金井式に限らず石田が述べているように²²⁾他の既存距離減衰式にも当てはまる。すなわち、対象地区近傍での規模の大きな地震の発生をもモデル化する確率論的地震危険度を既存距離減衰式で精度良く評価することは難しいといえる。

次に、対数標準偏差についてみる。図-11 に示すように、対数標準偏差の違いは最大加速度が大きくなる程地震危険度に大きく影響を及ぼすので、これの低減を図る必要がある。既存の距離減衰式は、一般に 2 章 (3) で述べたように異なる地域でのデータに基づいて作成されているのでその式のばらつきを表わす対数標準偏差は大きい。この大きな部分は地域の違いによってもたらされているものによっていると考えられ、地震危険度を大きく評価している可能性がある。また、対数標準偏差で表わすことは、地震動の大きさに無限の大きさを与えることになるので、このような取り扱いが妥当なものとはいえない。そこで、対象地区ごとにその周辺の地震発生機構や地震動伝播特性を考慮したデータに基づき、距離減衰式のばらつきを評価することが重要である。

以上のことから、既存の距離減衰式では比較的レベルの低い地震動領域の地震危険度の平均像を表わし得るが、対象地区近傍でいろいろな規模の地震をモデル化する地震 PSA にとって重要な強地震動領域の地震危険度を必ずしも精度良く評価し得ない。そこで、地震 PSA では、既存距離減衰式によらず、特定地区ごとにその周辺の地震発生機構や地震動伝播の地域特性を考慮し、強地震動を精度良く評価し得る距離減衰式を作成する必要がある。

5. 結 論

原研が提案した確率論的地震危険度評価手順を敦賀・水戸・掛川の 3 つの地区に適用した場合の地震危険度感度解析を行った。その結果、地震危険度をより精度良く評価するための評価手順の課題、地震危険度の不確かさをもたらす重要な因子とその影響の大きさ、及び敦賀・水戸・掛川各地区の地震危険度の特徴が分かったので、これらについて要約する。

(1) 確率論的地震危険度評価手順の主な内容と課題

① 地震発生のモデル化に当っては、地震をプレート間地震とプレート内地震に分け、これら地震の発生位置・規模・発生頻度を歴史地震データと活断層データを使い分けて評価する。地震の発生頻度を時間経過とともに変えて評価し得る時間依存性を考慮した方法で求める。

② 地震危険度の精度の向上を図るためには、地震動のモデル化において既存の距離減衰式を用いるのではなく、対象地区ごとの強地震動を精度良く評価し得る新たに作成した距離減衰式を用いる必要がある。

(2) 地震危険度評価で重要な因子と敦賀・水戸・掛川 3 地区の地震危険度の特徴

① 距離減衰式の選択及び地震動のばらつきを表わす対数標準偏差の設定は、敦賀・水戸・掛川のいずれの地区の地震危険度にも極めて大きな影響を及ぼす。

② 敦賀の地震危険度は、ユーラシアプレート内に存在する少数の活断層から発生する地震によって支配されている。水戸の地震危険度は、太平洋・ユーラシア両プレート境界付近で発生するプレート間地震によって支配されており、この地震の発生を最近約 100 年間の歴史地震データだけで十分精度良く評価し得る。掛川の地震危険度は、東海地域東部の地震空白域で発生が予想される巨大地震によって支配されている。

謝 辞 最後に、本研究において地震危険度全般についての考え方に関し日本原子力研究所 地震リスク研究専門部会を通し御教示頂いた京都大学 防災研究所 亀田弘行教授に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Abe, K. *et al.* : Development of seismic risk analysis methodologies at JAERI, NUCSAFE 88, Vol.2, pp.741~750, 1988.
- 2) Cummings, G.E. : Summary report on the seismic safety margins research program, NUREG/CR-4431, 1986.
- 3) 土木学会：動的解析と耐震設計第1巻地震動・動的物性, 技報堂出版(株), pp.31~47, 1989.
- 4) Gutenberg, B. and Richter, C.F. : Frequency of earthquakes in California, Bull. Seism. Soc. Amer., Vol.34, pp.185~188, 1944.
- 5) 島崎邦彦：活断層の活動様式と地震の規模別頻度分布, 損害保険料率算定会, 地震動予測の研究-昭和57年度報告-, pp.109~124, 1975年.
- 6) 島崎邦彦：地震危険度推定における歴史地震と活断層データの役割, 損傷保険料率算定会, 地震動予測の研究-昭和56年度報告-, pp.115~128, 1982年.
- 7) 亀田弘行・奥田俊彦：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) 吉井敏尅：東北日本の地殻・マントル構造, 科学, 47, No.3, pp.170~176, 1977.
- 9) 大規模地震対策研究会：地震防災対策強化地域の指定について(報告), 詳細大規模地震対策特別措置法, (株)ぎょうせい, pp.284~294, 1981年.
- 10) 阿部勝征ほか：地震と活断層, アイ・エス・ユ(株), pp.685・708, 1985年.
- 11) Iida, K. : Earthquake magnitude, earthquake fault, and source dimensions, Journal of Earth Science, Nagoya University, Vol.13, pp.115~132, 1965.
- 12) 活断層研究会：日本の活断層-分布図と資料, 東京大学出版会, pp.1~363, 1981.
- 13) 力武常次：日本各地の地震危険度, サイエンス社, pp.30~36, 1982年.
- 14) 島崎邦彦：地震危険度推定の新手法について, 損害保険料率算定会, 地震動予測の研究-昭和58年度報告-, pp.125~147, 1985年.
- 15) 川島一彦ほか：最大地震動及び地震応答スペクトルの距離減衰式, 土木研究所報告, 第166号, pp.86・103, 1985.
- 16) Usami, T. : Study of historical earthquakes in Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.54, pp.399~439, 1979.
- 17) 宇津徳治：日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表：1885~1980年, 震研彙報, Vol.57, pp.401~463, 1982.
- 18) 気象庁：日本付近の主要地震表(1926~1980年), 地震月報.
- 19) 加藤正治ほか：高層建物の地震リスク評価その9：地震動解析における感度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986年.
- 20) 力武常次：日本列島の科学, 東海大学出版会, pp.165~167, 1980.
- 21) 田中貞二：金井式に関する調査, ORI研究報告85-02, p.16, 1985.
- 22) 石田勝彦：震源域での基盤における最大地動速度の予測値に関する考察, 電力中央研究所報告書, 研究報告378014, 1978年.

(1990.4.9受付)

A METHODOLOGY OF PROBABILISTIC SEISMIC HAZARD EVALUATION AND SENSITIVITY STUDY

Katsumi EBISAWA, Michio TAKANI, Toshiaki TANAKA and Kiyoharu ABE

This paper presents a method for the evaluation of seismic hazard, defined as the relationship between the intensity of earthquakes at a given location and their annual probability of exceedance, which was developed for the probabilistic safety assessment of nuclear power plants.

The proposed method has the following characteristic features :

- 1) A combined usage of historical earthquake records and active fault data is made with a consideration of data availability and seismological conditions in Japan.
- 2) For evaluating the probability of occurrence of earthquakes in a given period, a time-dependent model is introduced to take into account the effect of strain energy accumulation in the active fault.

A sensitivity study with this method indicated that the evaluated seismic hazard is strongly dependent on the selection of attenuation model and the uncertainty parameter in the attenuation model.