

技術報告

原子力機器の構造信頼性評価のための地震動評価コードの開発

杉野 英治^{1,*†}, 小森 義久², 鬼沢 邦雄¹, 鈴木 雅秀¹

Development of Seismic Load Evaluation Code for Evaluating Structural Reliability of Nuclear Components

Hideharu SUGINO^{1,*†}, Yoshihisa KOMORI², Kunio ONIZAWA¹ and Masahide SUZUKI¹

¹Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

²CRC Solutions Co., Ltd, 2-7-5, Minamisuna, Koto-ku, Tokyo 136-8581, Japan

(Received November 16, 2005 and accepted in revised form March 22, 2006)

To establish the reliability evaluation method for nuclear components, we developed a probabilistic seismic hazard evaluation code SHEAT-FM (Seismic Hazard Evaluation for Assessing the Threat to a facility site-Fault Model) using a seismic motion prediction method based on fault model. The seismic motion prediction method is usually used for defined fault. In this code, we propose to apply this method for undefined fault in the seismic hazard evaluation. This report describes the outline of SHEAT-FM code and sample problem for a model site, and result of the comparison of seismic hazard curves using fault model and attenuation relationship.

KEYWORDS: nuclear components, seismic hazard, fault model, undefined fault, attenuation relationship

I. 緒言

現行の発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針(以下、耐震指針)では、記録が残されている歴史地震や地形・地質から読み取れる活断層のデータをもとに、発電所サイトごとに設計用基準地震動を作成し機器・構造物に作用する外力としているが、設計用基準地震動を上回る地震動の発生を完全に否定することは困難である。実際、2000年10月6日、鳥取県西部地震では、活断層がないとされてきた地域で大地震が発生している。さらに、2005年8月16日、宮城県沖地震では、近接する原子力発電所での揺れが一部の周波数帯で設計用限界地震動 S2 を超えていたことが原子力安全委員会の第26回耐震指針検討分科会において東北電力より報告されている¹⁾。原子力施設のように極めて高い信頼性が要求される構造物では、決定論的に設定した設計用基準地震動を上回る地震動の可能性を考慮して、確率論的手法により原子力機器の地震時の信頼性評価手法を整備することが必要であると考えられる。

対象サイトにおいて、ある大きさを超える地震動の発生頻度を確率論的に定量評価できる手法として、地震ハザード評価手法が知られている。従来の地震ハザード評価手法では、対象サイトにおける地震動強さの推定には、過去の地震記録をもとに経験的に求めた距離減衰式を用いるのが

一般的である。日本原子力研究所(現、日本原子力研究開発機構)においてもこれまでに、原子力発電所の地震リスク評価研究の一環として、距離減衰式を用いた地震ハザード評価コード SHEAT (Seismic Hazard Evaluation for Assessing the Threat to a facility site)^{2,3)}を開発している。蛇沢ら⁴⁾は、SHEAT コードを複数のサイトに適用して感度解析を行い、距離減衰式の種類とばらつきの設定が結果に大きく影響することを示し、地震ハザード評価の精度を向上させるためには、対象サイトごとにその周辺の地震環境(震源特性や伝播経路特性など)を考慮したより精度の高い地震動評価手法を用いることの必要性を指摘している。

最近では、断層の破壊過程や地盤内の伝播特性を考慮した、いわゆる断層モデルによる地震動評価手法が確立されており、強震動レシピー⁵⁾としてまとめられている。地震ハザード評価に関する研究でも、従来の距離減衰式と併用して、ある程度震源が特定される地震を対象にこの手法が用いられている⁶⁾。著者らは、震源を特定することができない地震についても、従来の距離減衰式に替えて、サイト周辺の地震環境を反映した断層モデルによる地震動評価手法を適用することを考え、新たに地震ハザード評価コード SHEAT-FM (Fault Model)⁷⁾を開発した。

本報では、SHEAT-FM コードの概要とモデルサイトへの適用例を示すとともに、距離減衰式による評価と比較して、本コードの適用性を検証する。

II. 評価方法

1. SHEAT-FM コードの概要

SHEAT-FM コードによる地震ハザード評価の手順を

¹ 日本原子力研究開発機構 安全研究センター

² ㈱CRC ソリューションズ

* Corresponding author, E-mail: sugino-hideharu@jnes.go.jp

[†] 現在、(独)原子力安全基盤機構 (Japan Nuclear Energy Safety Organization)

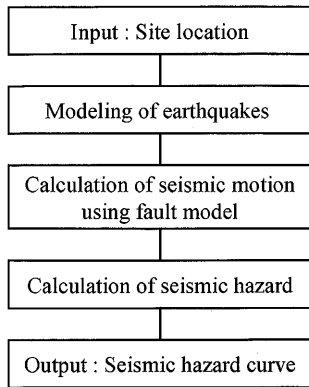


Fig. 1 The procedure of seismic hazard evaluation

Fig. 1 に示す。まず、対象サイト周辺で過去に発生した地震を歴史地震データや活断層データなどから抽出し、地震規模や発生頻度などをモデル化する。次に、サイト周辺に多数の震源を仮定し、それぞれの震源からサイトにもたらされる地震動を予測する。地震動の予測には、後述の断層モデルによる地震動評価手法を用いる。そして予測された値を平均値とする確率分布を仮定し、すべての地震について集計した結果、ある強さを超える地震動の発生頻度(超過発生頻度)を表した地震ハザード曲線が得られる。

断層モデルによる地震動評価手法としては、経験的グリーン関数法⁸⁾や統計的グリーン関数法⁹⁾などが知られている。いずれも小地震波形を断層の破壊過程に従って重ね合わせることにより大地震による強震動を合成するものであるが、本手法では震源を特定することができない地震を対象としているため、適当な小地震観測記録が得られていない場合にも有効な統計的グリーン関数法を採用する。

地震ハザード評価において断層モデルによる地震動評価手法を採用することで、地震動の時刻歴波形が予測され、地盤、建屋、機器などの地震応答解析に利用できるほか、最大加速度や最大速度、最大応答スペクトルなど、種々の地震動強さ指標を抽出することができるので、対象構造物の破損度合いを説明するのに適した地震動強さ指標により地震ハザード曲線を算出するなどの応用が期待できる。

2. 断層モデルによる地震動評価手法の概要

断層モデルによる地震動評価手法としては、香川ら¹⁰⁾の手法を引用することとし、 ω^{-2} 則に従う震源特性を持ったP波およびS波に観測点までの伝播経路特性を加味して人工小地震波とし、小断層ごとに作成した人工小地震波を入倉ら¹¹⁾の合成法に従って重ね合わせてゆく方法を用いる。具体的な手順を以下に示す。

震源スペクトル $S_A(f)$ は、Boore¹²⁾ のスペクトル形状を満たす基盤地震動として、距離 1 km において作成する。コーナー周波数 f_c は、応力降下量 $\Delta\sigma$ と連動して設定し、Faccioli¹³⁾ の表現に倣って高周波限界 f_{\max} を導入する。

$$S_A(f) = R_{\theta\phi} \frac{\pi M_0}{\rho V^3} \cdot \frac{f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \frac{1}{f_{\max}} \quad (1)$$

$$f_c = 4.9 \times 10^6 V_s \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0}\right)^{1/3} \quad (2)$$

$$f_{\max} = 7.31 \times 10^3 M_0^{-0.12} \quad (3)$$

ここで、 M_0 は地震モーメント、 ρ は媒質(地震発生層)の密度、 V は媒質の地震波速度(P波およびS波)を表す。また $R_{\theta\phi}$ はラディエーション係数で、Kamae and Irikura¹⁴⁾ に倣い周波数依存型の放射特性を用いる。人工小地震波は、この振幅特性と Boore¹²⁾ によるホワイトノイズに包絡形を施した位相特性を用いて生成する。その際、断層すべりの非一様性(アスペリティ)を考慮して振幅を調整する。

人工小地震波は、一様であると仮定した地震発生層内を伝播してサイト下の地震基盤に至る。地震基盤における加速度フーリエスペクトル $R_A(f)$ は、震源スペクトル $S_A(f)$ に伝播経路特性を加味して、次式で表される。

$$R_A(f) = S_A(f) \frac{1}{x} \exp\left(\frac{-\pi f \cdot x}{Q(f) \cdot V}\right) \quad (4)$$

ここで、 x は震源距離、 $Q(f)$ は周波数ごとに定義された内部減衰を表す係数(Q値)で、周波数に依存した形で次式のようにモデル化する。Q値の係数 α と β は、対象サイトで観測された地震記録を用いたインバージョン解析などによって評価する。

$$Q(f) = \alpha \times f^\beta \quad (5)$$

小断層ごとに計算した人工小地震波をグリーン関数とし、入倉ら¹¹⁾の合成法に従って重ね合せを行い、対象サイト下の地震基盤における地震動を予測することができる。予測される地震動は、NS, EW, UD の3成分として求められる。

3. 断層パラメータの設定方法

断層モデルによる地震動評価手法では、断層の面積や方向など震源に関するパラメータ(以下、断層パラメータ)を多数設定する必要がある。しかし、これまでに活動記録がなく震源を特定することができない地震を対象とした場合、断層パラメータを設定することは非常に困難である。そこで、SHEAT-FM コードでは、断層パラメータのうち、経験式が求められているパラメータを除き、Fig. 2 に示した走向角や傾斜角、滑り角については不確かさを考慮して確率変数として扱えるようにしている。

SHEAT-FM コードにおける断層パラメータの設定手順を以下に示す。基本的には、入倉の強震動レシビ⁵⁾を参考としている。

- (1) 対象地震の気象庁マグニチュード M_J を参照する。
- (2) M_J から以下の関係式を用いて地震モーメント M_0 (dyne·cm) を算出する。地殻内地震については武村¹⁵⁾による(6)式を、プレート境界地震については

佐藤¹⁶⁾による(7)式をそれぞれ適用する。

地殻内 : $\log M_0 = 1.17M_j + 17.72$ (6)

プレート境界 : $\log M_0 = 1.5M_j + 16.2$ (7)

- (3) Somerville ら¹⁷⁾の関係式を用いて地震モーメント M_0 (dyne·cm) から断層面積 S (km²), アスペリティ総面積 S_a (km²), 小断層における断層すべり継続時間 (立上がり時間) τ (s) をそれぞれ算出する。

$$S = \begin{cases} 2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3} & (M_0 < 10^{26}) \\ 4.24 \times 10^{-11} \times M_0^{1/2} & (M_0 \geq 10^{26}) \end{cases} \quad (8)$$

$S_a = 0.215 \times S$ (9)

$\tau = 2.03 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3}$ (10)

- (4) 断層面は矩形を仮定し, 断層の長さ L (km) と幅 W (km) から断層面積 S は(11)式で表される。 L と W の間に(12)式の関係式を仮定して, これら2つの式から L, W を算出する。

$S = L \cdot W$ (11)

$W/L = 0.5$ (12)

ただし, 地殻内地震の場合, W の上限を 20 km とする。

- (5) 断層を小断層に分割する。分割後の小断層がマグニチュード 5.0 から 5.5 程度の大きさになるように, L と W の分割数を決定する。

- (6) Fig. 2 に示した走行角 θ , 傾斜角 δ , 滑り角 λ は, Fig. 3 に示すロジックツリーを用いて確率変数とし

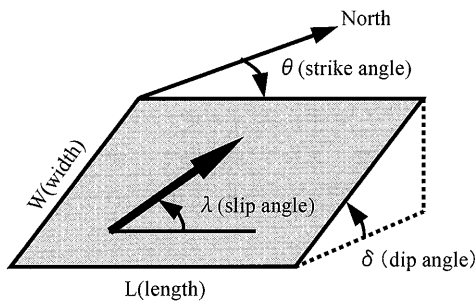
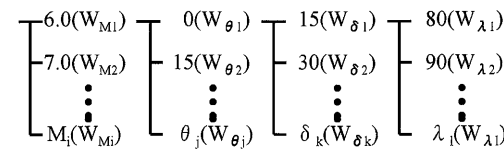


Fig. 2 Explanation of geometric fault parameters

Magnitude M	Strike angle θ (degree)	Dip angle δ (degree)	Slip angle λ (degree)
----------------	-----------------------------------	--------------------------------	----------------------------------



$F_{ijkl} = F_{ann} \times W_{ijkl}$

F_{ijkl} : Frequency of seismic occurrence

F_{ann} : Annual frequency of seismic occurrence in the area

W_{ijkl} : Weight coefficient of seismic occurrence

$W_{ijkl} = W_{M_i} \times W_{\theta_j} \times W_{\delta_k} \times W_{\lambda_l}$

Fig. 3 Logic tree concept for geometric fault parameters

て扱う。

なお, アスペリティの位置および個数については, 地震規模が大きくなるにつれてアスペリティの数が大きくなることが知られているが, 現段階ではこれらを特定することが困難であるため, 1つのアスペリティが断層中央に位置するものと仮定している。また破壊開始点についても同様である。

III. モデルサイトへの適用例

茨城県大洗町の(独)日本原子力研究開発機構の大洗研究開発センター敷地(以下, 大洗サイト)を対象に, SHEAT-FM コードの適用例を以下に述べる。

1. モデルサイトの概要

大洗サイトが位置する東北沿岸部では, 日本列島に対して太平洋プレートが西進し, ユーラシアプレートの下に沈み込む構造になっている¹⁸⁾。サイト周辺では, 太平洋プレートとユーラシアプレートの境界付近で, 宮城沖地震をはじめ海溝型の大地震がしばしば発生している。また, 大洗サイトから北西に位置する湯元・塩原断層群近傍では, ユーラシアプレート内部の比較的浅いところでの地震が確認されている。

2. 地震発生のモデル化

地震の発生位置や規模, 発生頻度などの地震発生のモデル化は, 歴史地震データおよび気象庁地震月報(気象庁カタログ)を用いて設定する。歴史地震データとしては, 古文書に基づき作成された宇佐美カタログ¹⁹⁾と宇津カタログ²⁰⁾があり, 気象庁カタログ²¹⁾と合せて, それぞれの地震カタログから Table 1 のように抽出する。Fig. 4 にプレート構造などを考慮して設定した評価対象領域とサイト周辺の地震発生状況を示す。大洗サイトを中心に約 300 km 四方の範囲を対象とする。図中には, 各カタログから抽出した歴史地震の分布を合せて示した。

大洗サイト周辺の活断層区分や過去の地震発生状況などを参考に, 評価対象領域を地震発生様式の似ている領域(以下, 地震域)に分割し, 地震域ごとに地震発生のモデル化を行う。Fig. 5 に設定した地震域を示す。深さ 15 km を境にして, 浅い方では, ユーラシアプレート内で発生する地震をモデル化するものとして5つの地震域を, 深い方では, ユーラシアプレートと太平洋プレートの境界で発生する地震をモデル化するものとして4つの地震域をそ

Table 1 The extraction range of Historical earthquake data

A.D.	1603	1884	1926	1980	2002
Over M6.0	Usami Catalogue		Utsu Catalogue	JMA Catalogue	
M5.5-6.0	JMA Catalogue				

JMA: Japan Meteorological Agency

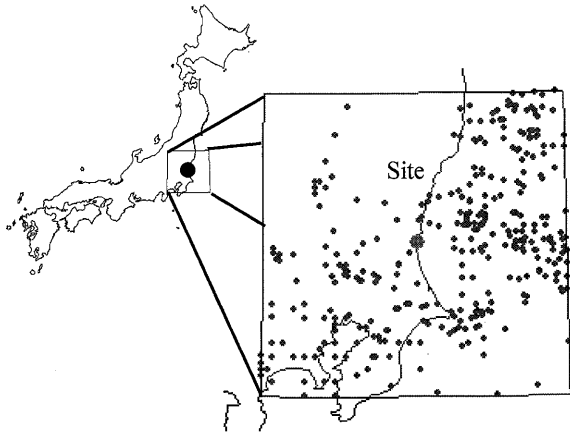


Fig. 4 The seismic occurrence situation and object domain around the Oarai site (1603-1980, 5.5<M)

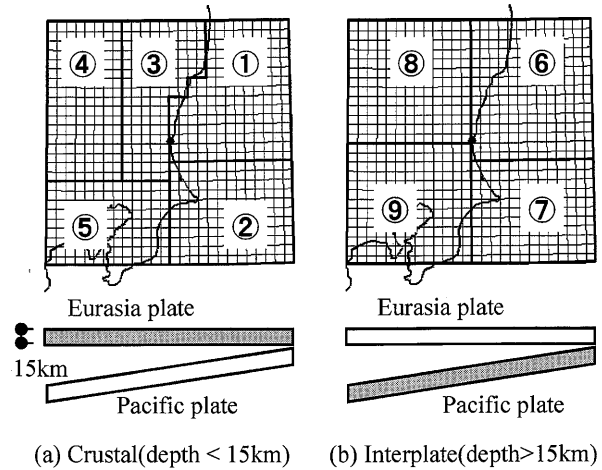


Fig. 5 Division of seismic regions

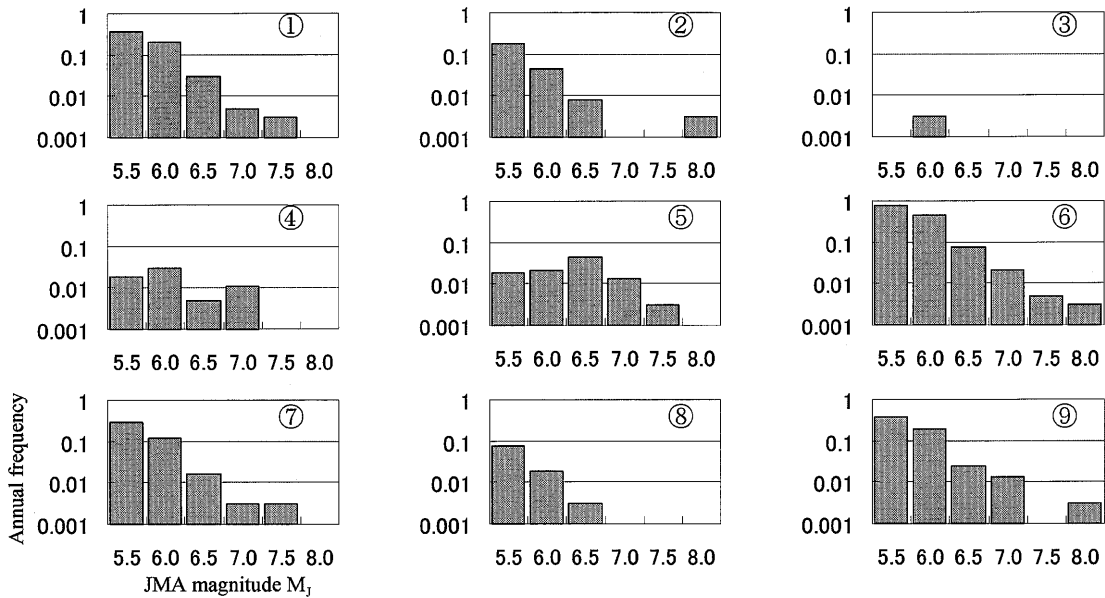


Fig. 6 Magnitude distribution in each seismic region

れぞれ設定する。また、各地震域をメッシュ分割し、全てのメッシュ中央に震源を設定する。地震の規模および発生頻度は、各地震域内の地震カタログに基づいて作成したマグニチュード分布に従うものとし、地震域内では一様であるとする。Fig. 6に各地震域のマグニチュード分布を示す。横軸は気象庁マグニチュード、縦軸は年平均発生頻度をそれぞれ表す。

3. 断層パラメータの設定

断層パラメータの設定は地震域ごとに行う。断層の大きさに関わるパラメータは、マグニチュードを基に、(6)式から(12)式を用いて算出する。走行角、傾斜角、滑り角については、各地震域内の代表的な断層を参考にロジックツリーを設定する。Fig. 7にロジックツリーを示す。地殻内地震の平均応力降下量は Somerville ら¹⁷⁾に倣い 23

Table 2 Fault model parameters

V_s	S(SH, SV) wave vel.	3.6(km/s)
V_p	P wave vel.	6.2(km/s)
V_R	Rupture vel.	2.8(km/s)
ρ	Density	2,700(kg/m ³)

bar とし、プレート境界地震の平均応力降下量は、蛭沢ら²²⁻²⁵⁾の大洗サイトにおける中小地震観測記録を用いたインバージョン解析の結果を参考にして 100 bar とする。また、大洗サイトにおける地震動の伝播経路特性(Q値)は、蛭沢ら²²⁻²⁵⁾を引用し次式を用いる

$$Q(f) = 100 \times f^{0.85} \tag{13}$$

断層モデルに必要なその他のパラメータは、Table 2に示すとおりである。

Region No. Type	Strike angle θ (degree)	Dip angle δ (degree)	Slip angle λ (degree)
① Crustal	-15(0.25)	15(0.25)	90(1.00)
	0(0.50)	30(0.50)	
	15(0.25)	45(0.25)	
② Crustal	0(1.00)	30(1.00)	90(1.00)
③ Crustal	-15(0.25)	75(0.25)	0(1.00)
	0(0.50)	90(0.50)	
	15(0.25)	105(0.25)	
④ Crustal	0(1.00)	90(1.00)	0(1.00)
⑤ Crustal	300(1.00)	30(1.00)	160(1.00)
⑥ Interplate	0(1.00)	30(1.00)	90(1.00)
⑦ Interplate	345(1.00)	70(1.00)	160(1.00)
⑧ Interplate	0(1.00)	90(1.00)	0(1.00)
⑨ Interplate	300(1.00)	30(1.00)	160(1.00)

Fig. 7 Example of logic tree for geometric fault parameters

4. 地震動評価と地震ハザード評価の結果

(1) 地震動評価

断層モデルによる地震動評価手法では、断層パラメータの設定が重要であり、地震動評価ならびに地震ハザード評価の結果に及ぼす影響が大きい。上述した断層パラメータの設定値が妥当であるかどうか検証するために、断層モデルを用いて評価した地震動の最大加速度に関する距離減衰特性に着目し、観測記録および既往の距離減衰式と比較する。

Fig. 8 に最大加速度の距離減衰特性について、断層モデルを用いて評価した地震動と観測記録を比較した結果を示す。断層モデルを用いて評価した結果は、観測記録の地震規模と地震種別に合せて、マグニチュード M_J が5.5および6.0のプレート境界地震の場合(地震域⑥~⑨)を示した。いずれも地表面から深さ 175 m の岩盤 ($V_s=1,020$ m/s) を解放基盤としたときの値である。Table 3 に観測記録として用いた地震の一覧を示す。図中の番号は表中の番号に対応する。Fig. 8(a) に水平成分 \bar{a} (NS, EW の平均) を、Fig. 8(b) に上下成分 a^V をそれぞれ示す。横軸は震源距離を表す。図中の黒点は断層モデルを用いて評価した値であり、○印は観測記録を示す。ただし、地中基盤で観測された波形には表層地盤の影響が含まれるため、この影響を取り除いた入射波成分 (2E) を求めてプロットしている。入

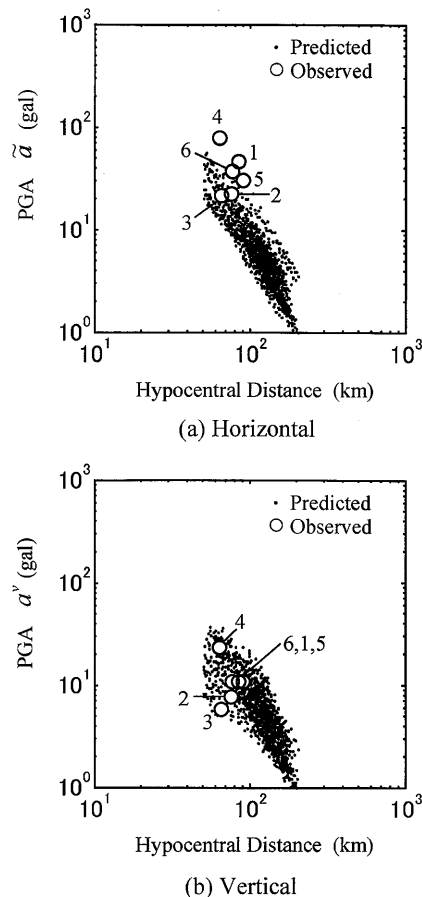


Fig. 8 Comparison of observation and prediction on peak ground acceleration

The points were predicted assuming $M_J=5.5$ and 6.0 in seismic region ⑥~⑨ for interplate.

Table 3 Earthquakes observed at the Oarai site

No.	Date	M_J	Depth (km)	Epical distance (km)
1	1989/02/19	5.6	55	63.7
2	1989/12/09	5.6	46	59.9
3	1990/08/05	5.8	39	52.7
4	1992/05/11	5.6	56	29.6
5	1992/06/01	5.7	44	79.1
6	2002/02/12	5.7	48	59.9

射波成分の算出には、地盤調査データに基づいた地盤モデルによる地盤応答解析を行う。解析には、重複反射理論および等価線形化手法に基づく地盤応答解析プログラム DYNEQ²⁶⁾を使用した。図から、断層モデルと観測記録を比較すると、上下成分ではほぼ一致しているが、水平成分では断層モデルが観測記録より若干小さめの値となっていることがわかる。

次に、断層モデルを用いて評価した値の全体的な傾向を把握するために既往の距離減衰式と比較する。比較の対象として、日本全国の強震データに加え、米国他で観測され

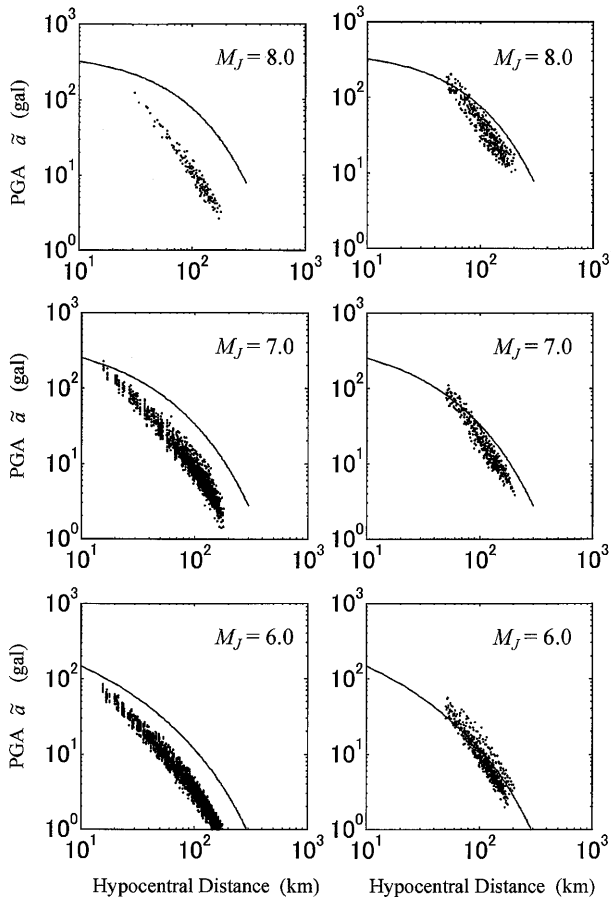


Fig. 9 Comparison of fault model and attenuation relationship on peak ground acceleration
 Solid line: Calculation by attenuation relationship, Dot: Calculation by fault model, Left column: Seismic region ①~⑤, Right column: Seismic region ⑥~⑨

た震源近傍域のデータを含めて回帰した福島・田中²⁷⁾による最大加速度の距離減衰式を用いる。Fig. 9に M_j が6.0から8.0まで1.0刻みで予測した水平成分の最大加速度 \tilde{a} を示す。左列には地震域①~⑤に対する結果を、右列には地震域⑥~⑨に対する結果をそれぞれ示した。図中の黒点は断層モデルを用いて評価した値であり、実線は距離減衰式による値である。図から、地震域①~⑤では、断層モデルを用いて評価した値は距離減衰式の値に比べて小さいことがわかる。地震域によるこの違いは、主として平均応力降下量の設定値に起因するものと考えられる。すなわち、本例題では地震種別を考慮して地殻内地震を対象とした地震域①~⑤に対しては23 bar、プレート境界地震を対象とした地震域⑥~⑨に対しては100 barとしており、この違いが影響したものと考えられる。このように地震種別により性質の違いを考慮することは重要であり、地震ハザード評価の精度向上につながると考えられる。

(2) 地震ハザード評価

地震動評価式の不確かさを表す対数標準偏差 σ の値は、地震ハザード評価の結果に大きく影響することが知ら

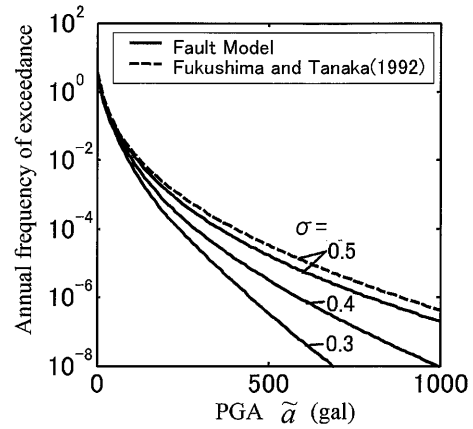


Fig. 10 Comparison of seismic hazard curves for peak ground acceleration using fault model and attenuation relationship
 σ : Logarithm standard deviation

れている。しかし、断層モデルによる地震動評価手法を用いる場合、対数標準偏差 σ は、個々の断層パラメータのばらつきや評価結果(例えば最大加速度)に及ぼす影響などを加味して決定されるものであるが、現在のところ、これを特定するには至っていない。本例題では、断層モデルによる地震動評価手法の不確かさ σ を仮定し、距離減衰式を用いた地震ハザード評価結果(一例として $\sigma=0.5$ とした場合)と比較する。

Fig. 10に、水平成分の最大加速度 \tilde{a} を指標とした地震ハザード曲線を示す。実線は断層モデルを用いた場合($\sigma=0.3, 0.4, 0.5$)であり、破線は福島・田中の距離減衰式²⁷⁾を用いた場合($\sigma=0.5$)である。この図から、 $\sigma=0.5$ の断層モデルによる地震ハザード曲線は、距離減衰式の結果よりも若干小さいことがわかる。これは、Fig. 9に示したように、一部の地震域(①~⑤)において断層モデルを用いて評価した最大加速度が距離減衰式に比べて小さいことが影響したものと考えられる。なお、ここに示した結果は、断層モデルによる地震動評価手法の不確かさを一般化するものではなく、今後検討すべき課題である。

IV. 結 言

著者らは、震源を特定することができない地震を対象に、従来の距離減衰式に替えて断層モデルによる地震動評価手法を適用した地震ハザード評価コード SHEAT-FMを開発した。本報では、SHEAT-FMコードの概要およびモデルサイトへの適用例を示すと共に、福島・田中による距離減衰式との比較を行い本コードの適用性を検証した。その結果、最大加速度の距離減衰特性に関して、プレート境界地震を対象とした地震域では断層モデルと距離減衰式による評価はほぼ一致していたものの、地殻内地震を対象とした地震域では断層モデルは距離減衰式より小さな値を与えた。このため、断層モデルにおける不確かさの対数標準偏差を距離減衰式のそれと同じ0.5とした場合に

は、断層モデルを用いて求めた地震ハザード曲線は距離減衰式の結果より若干下回ることがわかった。

断層モデルによる地震動評価手法を導入することにより、発電所サイト周辺の地震環境(震源特性や伝播経路特性など)を反映することができ、地震ハザード評価の精度向上を期待できる。しかし、本コードにはアスペリティの位置や個数、破壊開始点を単一のモデルで仮定するなどの課題が残されており、より現実的な地震動を評価するためにはこれらのモデルや不確かさを適切に考慮することが必要となる。また、本コードに使用した種々の評価式は一例であり、その他の評価式の適用も今後検討すべき課題である。

SHEAT-FM コードの開発を進めるに際し、^①日本原子力研究開発機構の平野雅司氏、柴田勝之氏、^②CRC ソリューションズの亀岡裕行氏より有益な助言を頂きました。また、^③原子力安全基盤機構の蛭沢勝三氏、堤 英明氏による日本原子力研究所在籍時の研究成果を利用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

— 参考文献 —

- 1) 東北電力, “2005年8月16日宮城県沖地震 女川原子力発電所における観測記録について,” 原子力安全委員会, 原子力安全基準・指針専門部会, 耐震指針検討分科会, 第26回会合参考資料第1号, (2005).
- 2) 蛭沢勝三, 田中歳明, 高荷道雄, 他, 地震ハザード評価コード SHEAT の使用手引き, JAERI-Data/Code 94-009, 日本原子力研究所, (1994).
- 3) 山田博幸, 堤 英明, 蛭沢勝三, 他, 地震ハザード評価コード SHEAT (PC 版) の使用手引, JAERI-Data/Code 2002-001, 日本原子力研究所, (2002).
- 4) 蛭沢勝三, 高荷道雄, 田中歳明, 他, “確率論的地震危険度の評価手順と感度解析,” 土木学会論文集, No. 437, 143-152 (1991).
- 5) 入倉孝次郎, “強震動予測レシピ—大地震による強震動の予測手法,” 京都大学防災研究所年報, 第47号 A, (2004).
- 6) 越智紗香, 神田 順, “不確定性を考慮した断層モデルを取り入れた地震危険度評価,” 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, 35-36 (2003).
- 7) 杉野英治, 鬼沢邦雄, 鈴木雅秀, 断層モデルによる地震動予測手法を用いた地震ハザード評価コード SHEAT-FM の使用手引き, JAERI-Data/Code 2005-008, 日本原子力研究所, (2005).
- 8) K. Irikura, “Semi-empirical estimation of strong ground motion during large earthquake,” *Bull. Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, **32**, 63-104 (1983).
- 9) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長, “地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測; 統計的波形合成法による予測,” 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, 1-9 (1991).
- 10) 香川敬生, 江尻讓嗣, “震源断層の破壊過程を考慮した震源近傍地震動の試算,” 「土構造物の耐震設計に用いるレベル2地震動を考える」シンポジウム, 地盤工学会関西支部, 1-6 (1998).
- 11) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子, “経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良,” 日本地震学会講演予稿集, 1997年度秋季大会, B25, (1997).
- 12) D. M. Boore, “Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiation spectra,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **73**[6], 1865-1894 (1983).
- 13) E. Faccioli, “A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties,” *Geophys. Monograph*, **37**, Maurice Ewing, AGU, Vol. 6, 297-309 (1986).
- 14) K. Kamae, K. Irikura, “Prediction of site specific strong ground motion using semi-empirical methods,” *Proc. 10th WCEE*, 801-806 (1992).
- 15) 武村雅之, “日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係,” 地震 **2**, **43**, 257-265 (1990).
- 16) 佐藤良輔, “日本の地震断層パラメータ・ハンドブック,” 鹿島出版会, 87 (1997).
- 17) P. G. Somerville, K. Irikura, R. Graves, *et al.*, “Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion,” *Seismol. Res. Lett.*, **70**, 59-80 (1999).
- 18) 宇津徳治, 地震の事典, 朝倉書店, (1988).
- 19) 宇佐美龍夫, 新編日本被害地震総覧[増補改訂版], 東京大学出版会, (1996).
- 20) 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,” 地震研究所彙報, **57**, 401-463 (1982).
- 21) 気象庁, 地震年報平成14年 (CD-ROM 版), 気象業務支援センター, (2002).
- 22) 蛭沢勝三, 中村 晋, 田居 優, 他, “断層モデルによる地震動予測式の作成法; 概要,” 土木学会第51回年次学術講演会概要集(第I部門), 420-421 (1996).
- 23) 香川敬生, 田居 優, 中村 晋, 他, “断層モデルによる地震動予測式の作成法; 断層パラメータの定量評価および地震動のばらつき,” 土木学会第51回年次学術講演会概要集(第I部門), 422-423 (1996).
- 24) 田居 優, 香川敬生, 中村 晋, 他, “断層モデルによる地震動予測式の作成法; インバージョン解析,” 土木学会第51回年次学術講演会概要集(第I部門), 424-425 (1996).
- 25) 中村 晋, 香川敬生, 田居 優, 他, “断層モデルによる地震動予測式の作成法; 表層地盤特性のはぎとり,” 土木学会第51回年次学術講演会概要集(第I部門), 426-427 (1996).
- 26) 吉田 望, 末富岩雄, “DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム,” 佐藤工業技術研究所報, No. 22, (1996).
- 27) 福島美光, 田中貞二, “新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂,” 日本地震学会講演予稿集, 1992年度秋季大会, 116 (1992).