

断層面および移動震源効果を考慮した地震危険度評価法

野 畑 有 秀 若 松 邦 夫 藤 森 健 史
奥 田 暁 安 井 讓

Evaluation of a Hazard Assessment that Considers the Fault Plane and Seismic Directivity

Arihide Nobata Kunio Wakamatsu Takeshi Fujimori
Satoshi Okuda Yuzuru Yasui

Abstract

We report here a hazard assessment procedure with which to estimate the Uniform-Hazard-Spectra by a method of synthesizing large earthquake spectra using spectra represented by an ω -squared model of a small earthquake. This method can take into account the fault extension, seismic directivity and randomness of location of a fault in a seismic region. The procedure used divides the seismic region into small elements, and synthesizes the number of small elements which correspond to the scaling law the area of a large earthquake and the area of a small element. Results show that the intensity of spectra in frequencies higher than the corner-frequency depends on the randomness of the rupture point in the fault plane.

概 要

確率論的地震危険度評価における地震動強度の推定には、その取り扱いの簡便さから、点震源を基とした距離減衰式を用いるのが一般的である。一方、巨大地震または近距離地震等の地震動強度を推定するための手法として、広がりのある断層を想定し、その運動を考慮した中小地震合成法があり、確定的な地震動予測が行われている。そこで本報告では、確率論的危険度評価に断層の効果を取り入れるため中小地震合成法を利用する危険度解析法を提案し、移動震源効果についての検討を行った。その結果、コーナー振動数より高い領域で、地震動強度の変動が60%程度あり、平均値評価で危険度解析を行った場合に比べて、危険側になり得ることを示した。また、兵庫県南部地震を例として、本手法の妥当性を検証すると同時に予測の問題点を示した。さらに、清瀬市を例にフィリピン海プレート上面で起こる地震を対象に検討を行い、関東地震がその地震動強度を代表していることを示した。

1. はじめに

建造物の耐震設計において考慮すべき地震動強さのレベルの評価には、地震発生の時空間分布を確率変数に置き換え確率的に評価する危険度解析と、ある想定地震を考慮して、サイトへの地震強度を推定し評価する方法とに分けられる。後者では、想定する地震が巨大または、近距離であるため断層モデルを考慮する場合が通常である。工学的に断層モデルを用いる場合のひとつに、中小地震観測波をグリーン関数とした地震の相似則に基づく中小地震合成法による評価法がある。その合成結果は観測記録との対応がよい^{1)~4)}とされている。一方、危険度解析での地震動強度の推定には、その取り扱いの簡便さから、点震源を基とした距離減衰式を用いるのが一般的

であり、断層運動による地震動特性を考慮してないのが普通である。しかしながら、1995年兵庫県南部地震により、都市直下の活断層による地震危険度評価が重要な耐震設計の課題となり、近距離活断層による地震動特性を危険度評価に取り込む必要性が生じている。そこで、本報告では、中小地震合成法を利用し、近距離地震に適応した危険度評価法を提案する。一般に、地震動特性を評価する上でのばらつきの要因として表-1に示されるものが考えられる。本検討では、震源の不確定性の項目の内、将来どこから破壊が開始するのか予測できないことにより生じるばらつきを中心に検討する。破壊開始点とサイトの位置関係により、どのように地震動が変化するかを模式図を図-1に示す。破壊進行方向では、波形の継続時間が短くなり、最大値は大きくなる。スペクトル

について言えば、コーナー振動数が高くなり、結果として高振動数領域での強度が増加する特性がある。これらの特性を考慮したばらつきと、図-2に示されるように、震源域内においてマグニチュードに応じた面積を考慮した断層・サイト間の距離のばらつきを同時に取り込んだ危険度評価を行う。

2. 危険度評価方法

2.1 スペクトル予測

断層面積の拡がりやを考慮して合成する方法として、壇他³⁾、藤堂他⁴⁾を参考に、(1)式によりスペクトル上での合成を行う。

$$U_m(\omega) = \sum_{i=1}^{n_m} \sum_{j=1}^{n_m} U_{em}(\omega) e^{-i\omega t_{ij}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 U_m は合成される大地震、 U_{em} は滑り量を補正した要素地震であり、 ω は角振動数である。 t_{ij} は、破壊開始点から各要素の時間遅れと観測点と要素の時間遅れの和を表す。また n_m は、地震のスケール則に基づき、要素地震と合成される地震の地震モーメント比の 1/3 乗と等しい。

中小地震合成法の長所の一つに実際の観測記録を用いることにより震源から観測点までのグリーン関数を経験的に求めることができる点にある。しかしながら、予測の立場で考えると、観測地震波が得られている地点は限られている。そこで本報告では要素地震のフーリエスペクトルを、中規模地震の観測記録を比較的良く説明できる^{1),3),4)}とされている ω^{-2} モデルで代用する。すなわち、(2)式で示される ω^{-2} モデルの変位フーリエスペクトル $D(f)$ を(1)式の $U_{em}(\omega)$ に、 $\omega = 2\pi f$ の関係を考慮して、代入することにより合成を行う。

$$D(f) = \frac{R_{av} M_0}{4\pi V_s^2 (1 + (f/f_c)^2)} S \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{V_s Q}\right) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 M_0 は地震モーメント、 X は観測点までの距離、 V_s は S 波速度、 f は振動数、 f_c は後述するコーナー振動数である。また、 R_{av} は平均的ラディエーションパターンであり 0.61 を、 S は自由地表面の増幅率であり 2 を、 ρ は密度であり 3 tf/m^3 、 \exp の項は内部減衰項を表し $Q=300$ を本解析では各々用いている。

円形のクラックモデルを考慮した BRUNE⁷⁾ のモデルによるとコーナー振動数 f_c は $2.34 V_s / 2\pi r$ であり、また M_0 は $(16/7) \sigma r^3$ である。ただし σ は応力降下量、 r は断層等価半径である。この関係より、コーナー振動数は次式で表される。

$$f_c = \frac{V_s}{(8.47 M_0 / \sigma)^{1/3}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

本検討では、応力降下量は、地震の平均的な値¹⁰⁾として $\sigma = 50 \text{ bar}$ を用いている。大地震と要素地震の滑り量の補正を(2)、(3)式の M_0 を n_m 倍することにより要素地震

表-1 地震動予測におけるばらつきの要因

不確実性	不確定性
<ul style="list-style-type: none"> ・サイトコンディション 地盤構造 不整形性 不均質媒体等 ・伝搬経路 ・断層位置と深さ ・その他 	<ul style="list-style-type: none"> ・破壊の性状 破壊開始点 破壊面積 破壊の不均質性 滑り方向 滑り量 ・その他

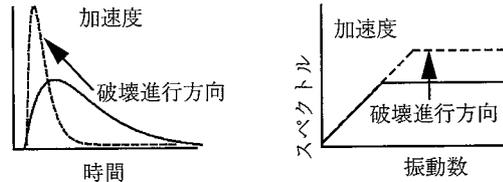


図-1 破壊伝搬方向が及ぼす地震動強度への影響

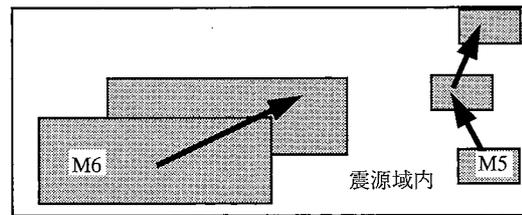


図-2 破壊面積を考慮した地震危険度評価の概念

のフーリエスペクトルをもとめる。また、解析するマグニチュードにより、 n_m が整数でなくなるため、要素地震の地震モーメントを微調整することにより n_m が常に整数になるよう計算を行う。また、人為的に要素サイズを決めた事による特有の卓越振動数を避けるため破壊伝搬速度を確率変数 $V_{r_{ij}} = (1 + a_{ij}) V_r$ と置き、合成した 5 サンプルの平均値を採用する。ここに a_{ij} は平均値 0、標準偏差 0.2 のランダム変数であり、 V_r は平均破壊伝搬速度である。

2.2 最大加速度予測

最大加速度を予測する方法として翠川⁵⁾の方法を用いる。すなわち、次式に示すように要素波包絡形の 2 乗和が、本震の振幅 $A(t)$ の 2 乗と等しいとするものである。要素波包絡形は既往の最大加速度距離減衰式 $a_{max}(m_e, X_{ij})$ と、包絡形を表す関数 $f(t)$ の積によって求まる。

すなわち、

$$A^2(t) = \sum_{i=1}^{n_m} \sum_{j=1}^{n_m} [a_{max}(m_e, X_{ij}) \cdot f(t - t_{ij})]^2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$f(t) = t/t_p \exp(1 - t/t_p) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$t_p = 0.0015 \cdot 10^{0.5m_e} + 0.12 \cdot X_{ij}^{0.75} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 m_e は要素地震のマグニチュード、 X_{ij} , t_{ij} は各要素 ij からの距離および到着時間遅れを各々表しており、要素地震の経験的距離減衰式は、本報告では福島⁹⁾による次式を用いる。

$$\begin{aligned} \log(a_{\max}(m_e, X_{ij})) &= 0.51m_e \\ &\quad - \log(X_{ij} + 0.006 \times 10^{0.51m_e}) \\ &\quad - 0.0033X_{ij} + 0.59 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(7)$$

このようにして得られた $A(t)$ より合成された地震の最大加速度 A_{\max} を求めることにより、危険度評価を行う。

2.3 危険度解析手法

震源域内では、図-2 に示すようにマグニチュードに応じた面積を有するものとして計算を行う。(1), (4)式で合成された地震強度 a , すなわち $U_m(\omega)$ および A_{\max} は、破壊がどの位置からも一様な確率で開始し、断層が矩形でかつ震源域も矩形であり、その震源域の大きさが要素地震の断層長さ L と幅 W の各々 N_L , N_W 倍の場合、次式の確率を有することとなる。

$$p(a) = \frac{1}{(N_L - n_m + 1)(N_W - n_m + 1)n_m^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

上式は、マグニチュードが要素サイズとほぼ等しいときは、サイトと震源までの距離の確率密度を表し、その時の震源スペクトルは確定評価となる。また、震源域全体が断層となる地震の場合は、破壊開始点の違いによる移動震源効果のばらつきを評価することとなる。確率密度 $p(a)$ を全震源域に渡って計算することにより、確率分布関数 $P(a \geq A | n_m)$ をもとめ、地震の発生確率 $f_m(m)$ を考慮してある強度 A を越える超過確率 $H(a \geq A)$ を次式で求める。

$$H(a \geq A) = v \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} P[a \geq A | n_m] f_m(m) dm \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここに、 m はマグニチュード、 m_{\min} は最小マグニチュード、 m_{\max} は最大マグニチュード、 v は m_{\min} 以上の地震の年平均発生率をそれぞれ表わす。 $f_m(m)$ は発生マグニチュードの確率密度で、 b 値モデル、すなわち、マグニチュードに応じて発生率が対数上直線で下る経験則に従うとすると次式で表わされる。ここに、 β は GR 式の b 値より $\ln 10$ である。

$$f_m(m) = \frac{\beta \exp(-\beta(m - m_{\min}))}{1 - \exp(-\beta(m_{\max} - m_{\min}))} \quad \dots\dots\dots(10)$$

なお、地震発生を定常ポアソン過程に従うとすると、年超過確率 $F(a)$ は $1 - \exp[-H(a \geq A)]$ で示される。

3. 鉛直断層面での計算例

3.1 基本モデルでの検討

移動震源効果を考慮したモデルについての検討をマグニチュード7程度の大きさ(佐藤¹⁰⁾による平均値)を有する図-3 に示すような鉛直断層を用いて行う。観測サイ

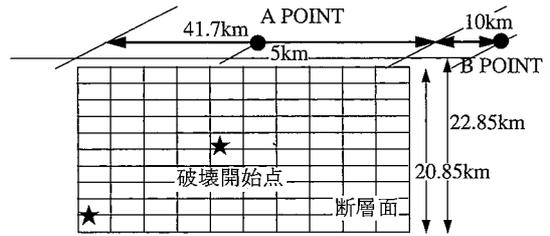


図-3 解析検討用モデル

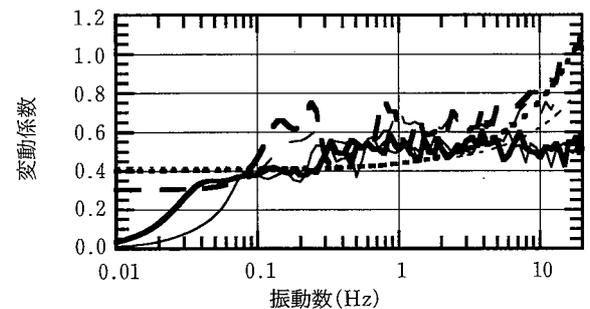
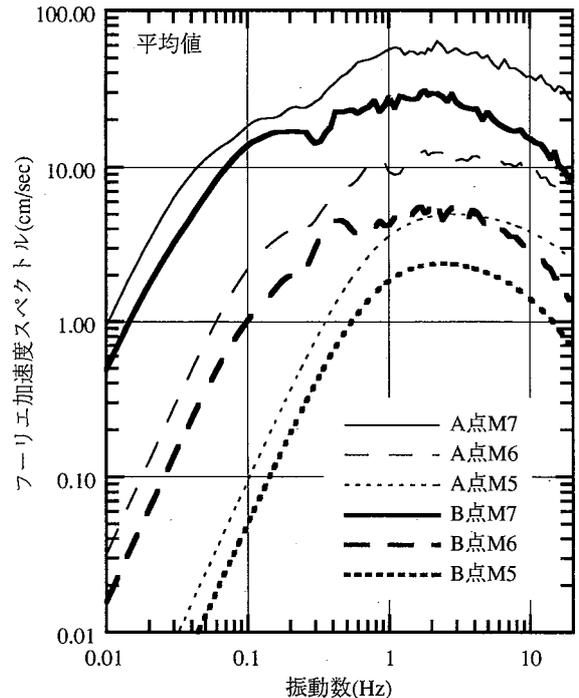


図-4 破壊開始点の不確定性を考慮した場合の平均フーリエ加速度スペクトルとその変動係数

ト A, B においてのマグニチュードごとの平均加速度フーリエスペクトルとその変動係数を図-4 に示す。なお、要素地震は、断層長さを1/10したマグニチュード5の地震とした。また本検討では S 波速度 V_s を 3.5 km/sec、破壊伝搬速度 V_r を 2.5 km/sec とした。

図-4から、次の様なことが考察される。マグニチュード7では断層面全体が破壊する事となるため、スペクト

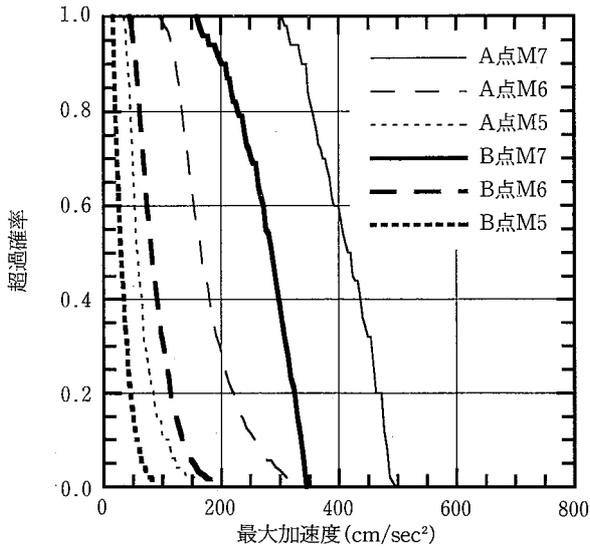


図-5 破壊開始点の不確定性を考慮した場合の最大加速度の超過確率

ル強度の変動は、破壊開始点の不確定性による移動震源の効果により生じる。したがって、コーナー振動数まではスペクトルの変動係数はほとんど0であるが、コーナー振動数より高い振動数範囲では、ほぼ一定で0.6程度となっている。また観測点の位置により、変動し始めるコーナー振動数が変わっていることがわかる。一方、マグニチュード5では、 $n_m = 1$ となり、スペクトル強度の変動は、各断層面からの観測点への距離のばらつきにより生じる。距離のばらつきによる変動は、高振動数領域(数Hz以上)で変動が大きくなっており、最大加速度におけるばらつきが大きくなることを示している。マグニチュード6では、距離によるばらつきと、移動震源効果によるばらつきが合成された変動を示す。

次に、最大加速度での結果を図-5に示す。移動震源の効果でばらつくマグニチュード7では300 cm/sec²から500 cm/sec²と約1.3倍の変動幅であるが、距離でばらつくマグニチュード5では、40 cm/sec²から160 cm/sec²と約4倍の変動幅が存在することがわかる。この傾向は前述したスペクトルでの傾向と対応している。

3.2 兵庫県南部地震を例として

鉛直断層面として1995年兵庫県南部地震を例として計算を行う。ターゲットとした地点は、地盤の影響が少ないと考えられている神戸大学である。図-6に示されるように、釜江⁹⁾らの検討によれば本地震は3のイベントにより起きたといわれている。このモデルを基に、前述した合成法で各パラメータを確定的に設定するシミュレーションを行い、合成法の妥当性を検証する。さらに今回の震源断層を含む淡路一六甲断層帯(約60 km、深さ20 km)の中で、マグニチュード7クラスの地震が発生すると仮定し、提案した手法で危険度評価を行い、シミュレーション結果と比較する。

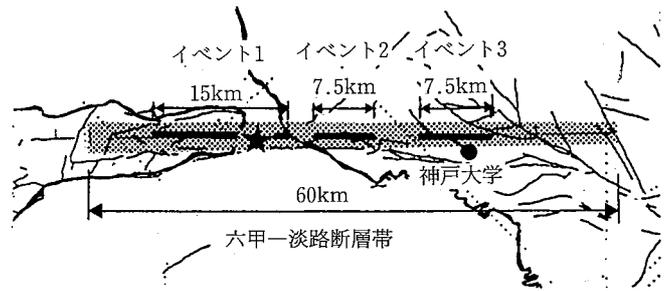


図-6 淡路一六甲断層帯と兵庫県南部地震の断層

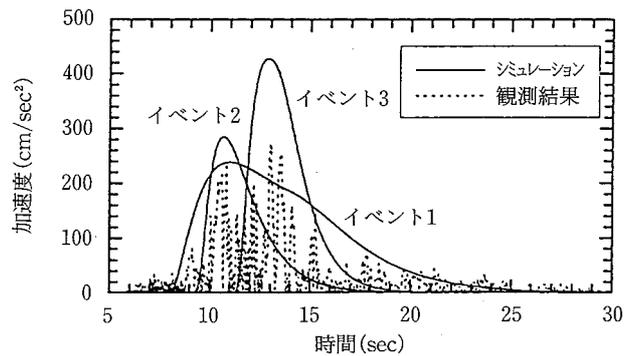


図-7 神戸大の最大加速度とその包絡形とシミュレーション結果

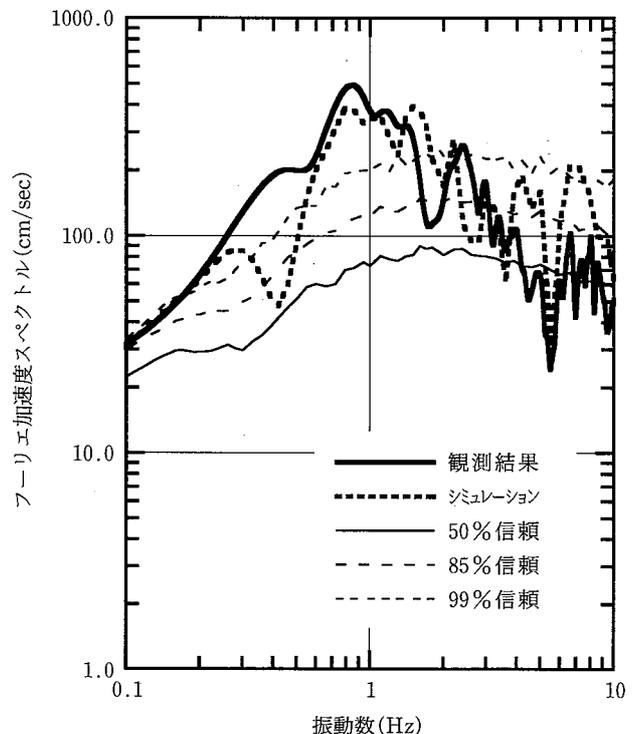


図-8 神戸大の加速度フーリエスペクトルのシミュレーションと危険度評価結果の比較

図-7に神戸大学での記録の加速度包絡形と、最大加速度予測法でシミュレーションした結果を示す。同図より、マルチプルショックによる各イベントの波同志がかさなり合う時間と分離される時間があることがわかる。このことは、震源過程の詳細を確定的に予測することの難しさを示唆している。図-8に観測記録とシミュレーション結果の加速度フーリエスペクトルを示す。なお、シミュレーションにおいては、内陸地震であることを考慮して応力降下量 $\sigma=100$ bar を用いているが、他のパラメータは前節と同じである。また表層地盤等の影響は考慮していない。同図には、危険度評価の結果も併せて示す。ここで、危険度評価における各パラメータは、佐藤¹⁰⁾による平均的な値を用いている。

図-8に見られるごとく、シミュレーション結果は観測結果と比較的良く対応している。一方、危険度評価では85%信頼でほぼ全体的な強度は推定できるものの、1 Hz 付近の卓越振動数が説明できていない。この理由として、本地震では、平均的な断層面積より、小さな領域で強い破壊が起きていること、さらにはマルチプルショックによるイベントごとに時間差があり、観測点との位置関係で複雑な重なり合いをしていることなどが考えられる。今後、このような不確定性を定量的に評価し、確率変数として予測に取り込む必要があると考えられる。

4. 低角断層の計算例

中小地震合成法による評価の利点は、断層面が平面に限らなくても適用できることにある。この利点を生かして、関東平野に潜り込んでいるフィリピン海プレート上面で生じる地震についての危険度評価を例として行ってみる。図-9に石田⁹⁾が推定したフィリピン海プレート上面の深さを示す。この面上を $10\text{ km} \times 5\text{ km}$ (ほぼマグニチュード6程度)のメッシュにきり、その深さをメッシュごとに与えモデル化した。地震発生パラメータに関しては、最小マグニチュードを6.0, 最大マグニチュードを地帯構造区分より8.0, b 値を0.9, マグニチュード6.0以上の年平均発生率を0.25とした。他のパラメータは、全章で示したように地震の平均的な値である。

図-10に清瀬市を解析ポイントとした危険度評価解析結果を示す。同図には1923年関東地震の松浦モデルとほぼ同じ領域で、マグニチュード7.9を固定し破壊開始点だけをばらつかせた時の中央値のスペクトルも併せて示している。加速度フーリエスペクトルを減衰0%の速度応答スペクトルと見なすと、地殻の最上面である地震基盤での強度が推定できる。地表面での推定を行いたい場合は、堆積層による地盤の増幅特性を乗じればよい。松浦モデルとほぼ同じ領域で起きるとした場合の強度は、年超過確率0.001とほぼ等しく、(10)式より求めたマグニチュード7.9の起こる確率0.0012と同程度とである。これは、マグニチュード7.9程度の地震が清瀬市に影響を及ぼす強度は、フィリピン海プレートの潜り込みの深いところで起

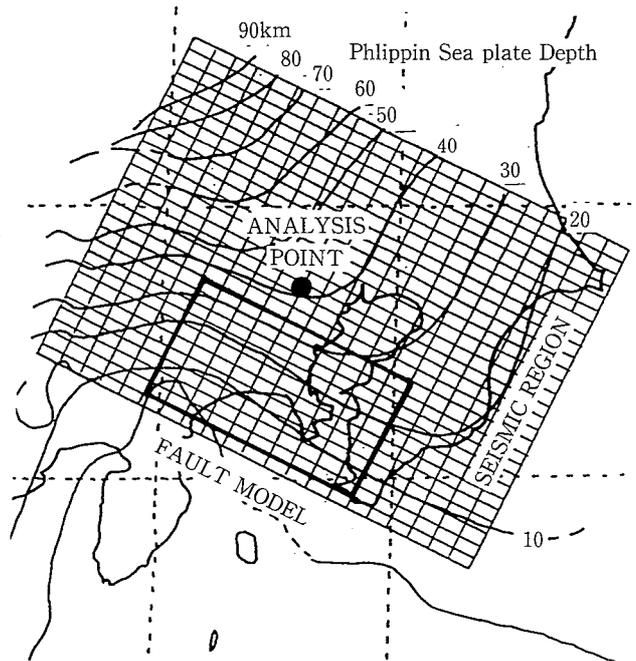


図-9 フィリピン海プレート上面のモデル化 (石田の図に加筆)

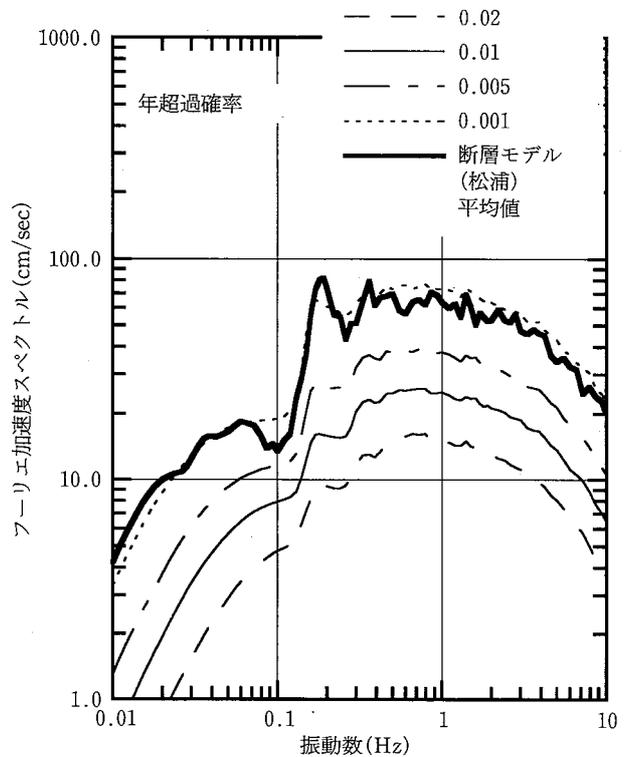


図-10 フィリピン海プレート上面で発生する地震の危険度評価例

こった場合でも関東地震の断層面を用いてもほぼ同程度であることを示しており、耐震安全性の検討用地震における海洋型地震の想定地震として関東地震を考慮することの妥当性を示している。しかしながら、年超過確率の値は、マグニチュードの発生確率にかなり影響を受けており、危険度評価を行う場合、その値を適切に見積もることも重要であると考えられる。

5. まとめ

中小地震合成法を利用した危険度解析法を用いて、移動震源効果による震源特性の不確定性を考慮した危険度評価を行った。本方法は、断層面積を考慮することにより、近距離での地震強度推定が可能であり、さらには、断層面が平面でなくても適用できることより、震源域の形状を任意にできる点に特徴がある。計算結果より、得られた知見は以下の通りである。

① 破壊開始点が特定できない場合、移動震源効果により鉛直断層面からのスペクトル強度の変動は10秒以上の長周期ではほとんどないが、それ以下の周期では約60%変動する。したがって、断層面積のみ考慮した危険度解析結果は危険側評価を与える可能性がある。

② 兵庫県南部地震を例として計算を行った結果、破壊の不均質性、断層面内の破壊面積の大きさにより、地震強度が特徴づけられていることがわかり、今後予測に用いる上で、上記の不確定性を適切に見積もることが重要であることがわかった。

③ 清瀬市をターゲットに、フィリピン海プレート上面で起こる地震を検討した結果、関東大地震の断層面を想定して地震が起こる評価とフィリピン海プレート上面で起こる地震の危険度評価はほぼ良い対応を示すことがわかった。

今後、これらの知見を踏まえて、より実用性の高い危険度評価法を検討していく予定である。なお、神戸大学

の記録は、関西地震観測研究協議会によるデータを使用させて頂きました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Irikura K.: Prediction of Strong Acceleration Motions Using Empirical Green's Function, Proc. of 7th JEES, (1986)
- 2) Takemura, T. and T. Ikeura: A Semi-empirical Method Using a Hybrid of Stochastic and Deterministic Fault Models: Simulation of Strong Ground Motions During Large Earthquake, J. Phys. Earth, 36, (1988)
- 3) Dan K., T. Watanabe and T. Tanaka: A Semi-empirical Method to Synthesize Earthquake Ground Motions Based on Approximate Far-field Shear-wave Displacement, 日本建築学会論文集, No. 396, (1989)
- 4) 藤堂, 千葉, 福沢: 確率パラメータを有する波形合成法による大地震時地震動の推定, 構造工学論文集, Vol.38B, (1992)
- 5) 翠川: 小地震の加速度包絡形の合成による大地震の最大加速度の推定, 日本建築学会論文集, No. 398, (1989)
- 6) Sato T., Kiyono J., Matuoka T.: Attenuation of Peak Ground Motion Taking into Account the Fault Extent, Proc. of 7th JEES, (1986)
- 7) BRUNE J.: Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Wave from Earthquakes, J. G. R., Vol. 75, No. 26, (1970)
- 8) Ishida M.: The Configuration of the Philippine Sea Plate into Kanto-Tokai District, Japan, Abst. 25th, IASPEI
- 9) 福島: 地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測, 東京工業大学博士論文, (1994)
- 10) 釜江, 入倉: 1995年兵庫県南部地震の断層破壊と強震動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1995)
- 11) 佐藤編: 日本の地震断層パラメーターハンドブック, 鹿島出版会, (1989)