

気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び 応答スペクトル推定式の提案

安中 正¹・山崎文雄²・片平冬樹³

¹ 正会員 理修 東電設計株式会社 技術開発本部 (〒110 東京都台東区東上野3-3-3)

² 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)

³ 正会員 東京電力株式会社 電力技術研究所 (〒230 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

1988年1月から1996年3月までの気象庁87型強震計記録を用いて、地震の断層面の大きさを考慮した最大地動及び応答スペクトルの経験的推定式を提案した。マグニチュードの大きな12個の地震については、断層モデルから最短距離と等価震源距離を決定し、回帰に用いた。推定式は、マグニチュード5.0以上の地震に対して、距離（最短距離あるいは等価震源距離）が500km以下の範囲の地点で得られた記録を用い、2段階回帰の方法により決定した。推定式は気象庁77地点の平均的な式であるが、第1近似的には支持基盤での地震動を予測する式として用いることが可能である。

Key Words : Attenuation equation, two-stage regression method, JMA-87 type accelerogram, response spectrum, peak ground motion

1. まえがき

阪神・淡路大震災を契機として、動的に規定されたレベル2地震動に対する耐震性能照査という課題が提起されている¹⁾。レベル2地震動を動的に設定する方法として、応答スペクトルを規定し、それに適合した模擬地震動を作成する方法がある。その方法をより実用的なものとするためには応答スペクトル推定式をより信頼できるものにする必要がある。

断層近傍まで適用可能な最大地動と応答スペクトルの推定式として安中らによる式^{2) 3)}が提案されているが、データが関東地方とその周辺に限られている。全国的な適用を考慮すると、全国的なデータに基づいて式を設定するのが望ましい。将来的にはK-netのデータがその基礎になっていくと考えられるが、現状では気象庁87型強震計記録の活用が最も現実的である。

これまでも気象庁87型強震計記録を用いた推定式の検討は行われてきた^{4) 5)}が、断層近傍での適用という面では十分な考慮がされていなかった。

現状で断層面の大きさを考慮する方法として実用的なのは、最短距離を用いる方法と等価震源距離を用いる方法と考えられる。本検討では、気象庁87型強震計記録を用い、断層面の大きさをこの2つの方法により考慮した推定式を提案した。

2. 回帰データ

1988年8月1日から1993年12月31日までの期間の気象庁87型強震計の記録（387地震76地点2166記録）⁴⁾は、マグニチュードが4以上で震源深さが200km以下の地震に対して水平2成分の最大加速度がともに 1 cm/s^2 以上の基準で整理されている。今回、1994年1月1日から1996年3月31日までの期間の記録を同基準で追加した。整理した記録は全部で1036地震77地点4060記録となった。

最大速度と最大変位は、加速度時刻歴を積分して求めた。積分の際には0.1Hz以下の低周波数成分を除去した。

地震に関するデータは気象庁発表に基づき整備した。回帰分析で断層面の大きさを考慮するために、マグニチュード6.5以上の大きな地震の内、既往の文献で断層モデルが設定されている地震を中心に、12個の地震の断層モデルを設定した。

断層モデルを設定した12個の地震の記録については、断層モデルから最短距離と等価震源距離を求めた。等価震源距離 X_{eq} は、断層を小領域に分けた時の領域数を N 、領域 i のすべり量を d_i 、領域 i と観測点間の距離を X_i として、各領域からのエネルギーの幾何減衰のすべり量の2乗による重み付き平均

$$X_{eq}^{-2} = \sum d_i^2 X_i^{-2} / \sum d_i^2 \quad (1)$$

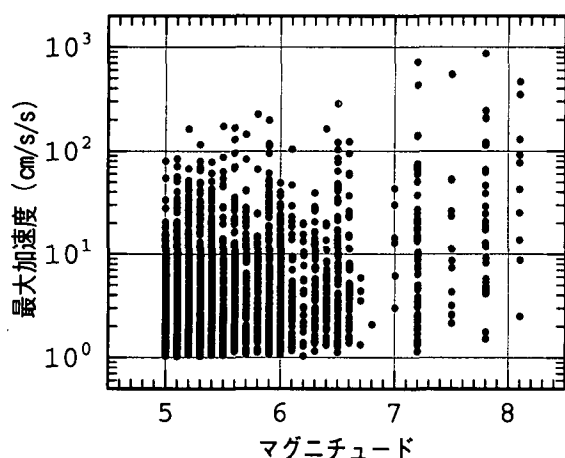


図-1 最短距離の場合の検討に用いたデータ分布

として求められる⁶⁾。 d_i は一定とした。12個の地震以外については、点震源として、震源距離が最短距離と等価震源距離に等しいとした。

回帰に用いるデータの範囲（マグニチュードや距離の範囲）の影響に関する検討⁷⁾に基づき、最終的にマグニチュード5.0以上の地震に対して、距離（最短距離あるいは等価震源距離）が500km以下の範囲の地点で得られた記録を用いた。最短距離の場合の検討に用いたデータは388地震77地点2085記録、等価震源距離の場合は387地震77地点2075記録である。最短距離の場合の検討に用いたデータの分布を図-1に示す。

3. 回帰方法

回帰により最終的に求める式の形は、最短距離 R_{ij} を用いる場合は安中ら²⁾と同じ

$$\log A_{ij} = c_m M_i + c_h H_i - c_d \log(R_{ij} + c_1 \exp(c_2 M_i)) + c_0 + \sum \delta_{kj} b_k + \epsilon \quad (2)$$

とし、等価震源距離 X_{ij} を用いる場合は大野ら⁸⁾と同じ距離減衰の形にマグニチュードの補正項として震源深さの項を追加した

$$\log A_{ij} = c_m M_i + c_h H_i - \log X_{ij} - c_d X_{ij} + c_0 + \sum \delta_{kj} b_k + \epsilon \quad (3)$$

とした。ここで、 A_{ij} は*i*番目の地震の*j*番目の観測点における地震動強度（水平2成分の平均）、 M_i は地震のマグニチュード、 H_i は地震の震源深さ（断層モデルを用いた場合は断層中心の深さ）、 δ_{kj} はKroneckerのデルタ、 b_k は*k*番目の観測点の地点補正值であり、 b_k の平均がゼロとなるように c_0 を求めている。 ϵ は各記録に対するランダム変数（誤差）であり、地震毎に与えられる共通な変動 ϵ_e とそれを除いて各記録に対して独立に与えられるランダム変数 ϵ_o の和として、 $\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_o$ の形で表される。 ϵ_e は地震間（inter-event）の変動、 ϵ_o は地震内（intra-event）の変動を示す。多くの地震に対する ϵ_e の平均はゼロ、

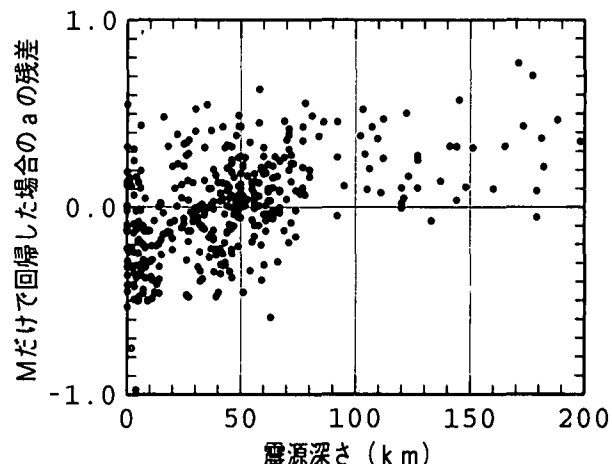


図-2 Mだけで回帰したaの残差と震源深さHの関係

分散は σ_e^2 、 ϵ_o の平均はゼロ、分散は σ_o^2 である。

回帰方法として2段階回帰を用いた。2段階回帰では、上記の中の地震に関する項を未知数として

$$a_i = c_m M_i + c_h H_i + c_0 + \epsilon_e \quad (4)$$

とし、1段階目の回帰で a_i を決定する。通常の最小2乗法では解が得られないため、1段階目の回帰では特異値分解法を用いている。そして、2段階目の回帰では、 a_i を目的変数として M_i と H_i で回帰する。ただし、厳密には回帰に用いる a_i は第一段階の回帰により求めた $\hat{a}_i$ であるため、

$$\hat{a}_i = c_m M_i + c_h H_i + c_0 + (\hat{a}_i - a_i) + \epsilon_e \quad (5)$$

の形にする必要がある。この形にした場合には、非対角項を含む分散共分散行列が重みとして用いられ、 ϵ_e は繰り返し計算により決定される⁹⁾。

等価震源距離式の場合に、2段階回帰の1段階目の回帰で決定した a をMだけで回帰した場合の残差と震源深さHの関係を図-2に示す。震源深さが100km程度以下ではHとaの残差の間に明瞭な正の相関があるが、震源深さが100km程度以上になると残差はほぼ一定になる。このため、 $c_h H_i$ の項のHに上限100kmを設定し、Hが100kmを超える場合は $c_h H_i$ の項のHを100kmとした。

最短距離を用いた式の c_1 と c_2 の項は、震源近傍で地震動強度が頭打ちになる現象を表現するために導入されており、係数は最短距離が0kmで最大加速度がMに依存しなくなるという制約条件（ $c_m = c_2 \cdot c_d \log e$ ）と、1979年インベリアルバレー地震及び経験的グリーン関数法による断層近傍の最大加速度データ（折れ曲がりの傾向）との適合という2つの条件²⁾を満足するように繰り返し計算で設定した。

4. 回帰結果

最短距離を用いた場合の最大地動の回帰係数を表-1に、等価震源距離を用いた場合の回帰係数を表-2に、加速度応答スペクトルの回帰係数と周期の関係

表-1 最短距離式の回帰係数 ($c_1=0.334, c_2=0.653$)

特性値	C d	C m	C h	C o
最大加速度(cm/s ²)	2.136	0.606	0.00459	1.730
最大速度(cm/s)	1.918	0.725	0.00318	-0.519
最大変位(cm)	1.635	0.935	0.00091	-2.992

表-2 等価震源距離式の回帰係数

特性値	C d	C m	C h	C o
最大加速度(m/s ²)	0.00207	0.573	0.00429	-0.243
最大速度(cm/s)	0.00163	0.697	0.00293	-2.116
最大変位(cm)	0.00108	0.912	0.00075	-4.110

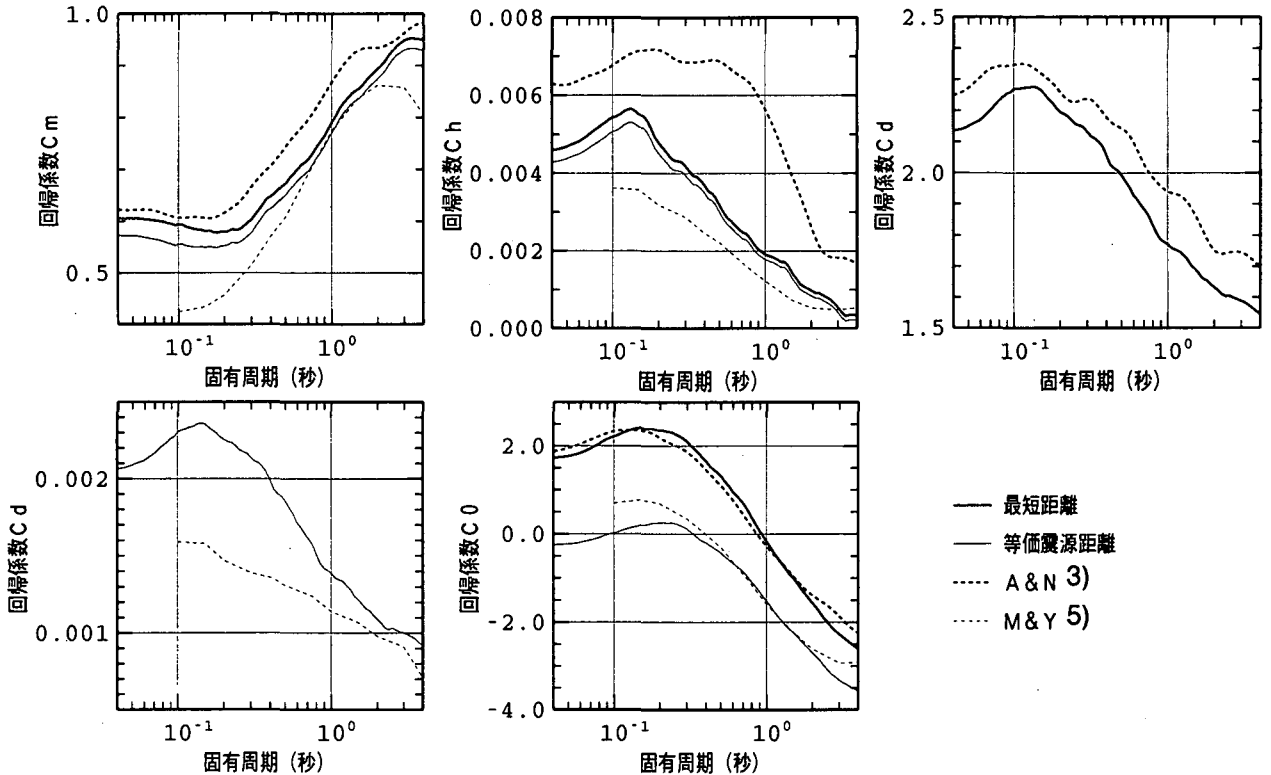


図-3 加速度応答スペクトル推定式の回帰係数と周期の関係

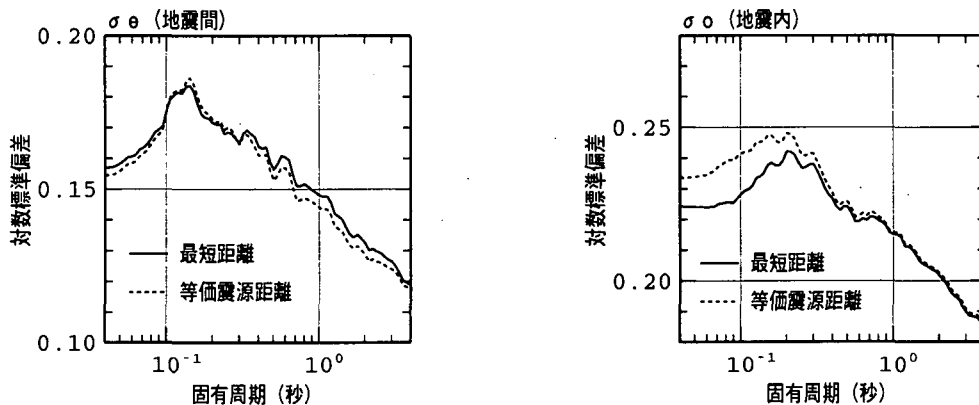


図-4 地震間のばらつきの標準偏差 (σ_e) 及び地震内のばらつきの標準偏差 (σ_o) と周期の関係

を図-3に、回帰により得られた σ_e 及び σ_o と周期の関係を図-4に示す。最短距離の場合の応答スペクトル推定式の c_1 と c_2 は表-1の最大地動の場合と同じ値を用いている。図-3では既往の2つの推定式^{3) 5)}の係数と比較している。関東地方のデータによるA&N³⁾とは係数 c_h の形状及び大きさにやや違いがある。同じ気象庁のデータを用いたM&Y⁵⁾との違いの原因は主に回帰に用いたデータ範囲の違いにある。図-4の標準偏差は周期0.1~0.2秒程度で最も大きくなっている。また、短周期側では等価震源距離を用いた場合の方が最短距離を用いた場合よりも σ_o が大きく、等

価震源距離を用いた場合の方がデータとの適合度がやや悪くなっている。

推定式の定数項の値は、気象庁77地点の地点補正係数の平均がゼロになるように求めたものであり、推定式は気象庁77地点の平均的な地震動を推定する式となっている。しかし、77地点はたまたま選ばれた地点であり、その平均にどのような意味があるか不明確である。

最短距離を用いた場合の応答スペクトル推定式に対する地点補正係数と周期の関係を図-5に示す。左側は平均からかなり偏りがある地点の例であり、右

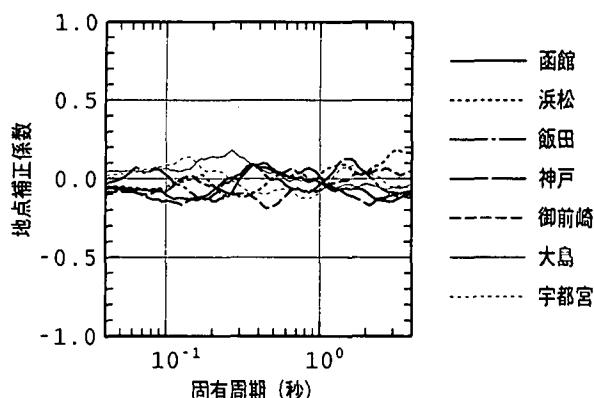
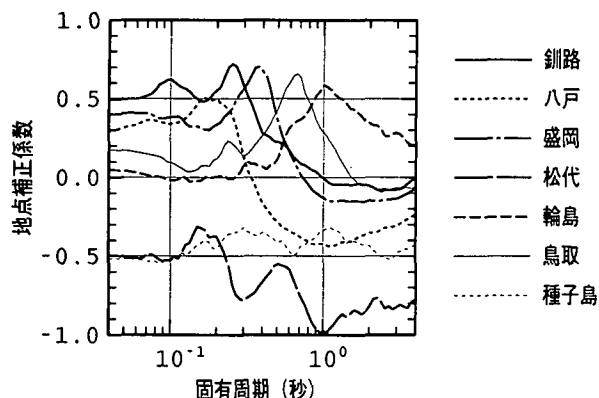


図-5 最短距離を用いた場合の応答スペクトル推定式に対する地点補正係数と周期の関係

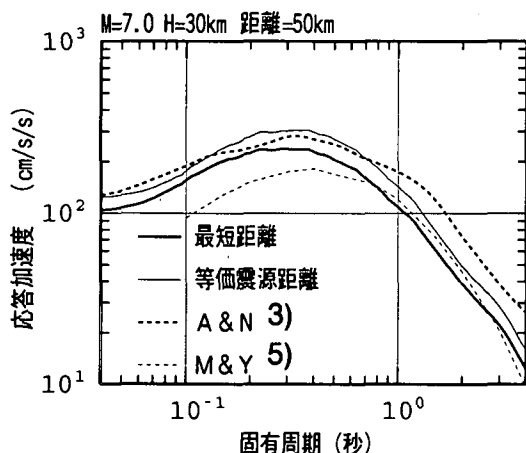


図-6 応答スペクトルの比較例

側は平均的な推定式に近い地点である。平均的な推定式に近い地点は、最大のずれが全周期帯で±0.2の範囲内に入る地点を選定した。

国土地理院の数値地図情報によると、平均的な推定式に近い7地点の内、大島を除く6地点が洪積世の地盤であり、その中の5地点が地形分類で台地に区分されている。関東地方のS波速度が300～600m/sの支持基盤に対する推定式^{2) 3)}を用いた場合の気象庁77地点の地点補正係数の平均は、最大加速度で0.00495 (1.01倍)であり、ゼロに近い。

気象庁77地点の平均的な推定式は、平均的な推定式に近い地点補正係数を持つ地点が洪積世の台地上の地点であること、関東地方の支持基盤の推定式とほぼ同じ最大加速度を与えることから、日本全体の支持基盤の平均的な地震動を評価する式として用いてよいと考えられる。

気象庁データに基づき本検討で設定した2つの推定式と既往の推定式^{3) 5)}による応答スペクトルの比較例を図-6に示す。M&Y⁵⁾は元々は2成分の最大に対する式なので、2成分の平均に補正している。

5. あとがき

気象庁87型強震計記録を用いて最大地動及び応答スペクトルの経験的推定式を検討し、従来よりも豊

富なデータに基づき地震の断層面の大きさを考慮した推定式を新たに提案した。推定式は日本全体の支持地盤 (S波速度が300～600m/s) における平均的な地震動の予測に用いることが可能と考えられる。

謝辞：本研究は、東京電力、関西電力、中部電力による共同研究「LNG地下式貯槽の合理的設計手法の研究」の一部として実施したものであることを付記し、関連電力会社及び電力中央研究所、土木学会「LNG地下タンクの設計合理化小委員会分科会1」(岩楯徹広主査) に対し謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 1996.
- 2) 安中正, 山谷敦, 桃林治彦, 野沢是幸：関東および周辺地域の地震観測記録を用いた基盤における最大加速度推定式の検討, 第19回地震工学研究発表会, 129～132, 1987.
- 3) Annaka, T. and Y. Nozawa : A probabilistic model for seismic hazard estimation in the Kanto district, Proc. 9th World Conf. Earthquake Eng., II, 107-112, 1988.
- 4) Molas, G.L. and F. Yamazaki : Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep events, Bull. Seis. Soc. Am., 85, 1343-1358, 1995.
- 5) Molas, G.L. and F. Yamazaki : Attenuation of response spectra in Japan using new JMA records, Bull. ERS, 29, 115-128, 1996.
- 6) 大野晋, 丹羽正徳, 武村雅之, 高橋克也：兵庫県南部地震の岩盤における地震動強さの推定, 第23回地震工学研究発表会, 201-204, 1995.
- 7) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹：距離減衰式に対する回帰方法及び回帰データの影響, 土木学会第52回年次学術講演会, 1997. (投稿中)
- 8) Ohno, S., T. Ohta, T. Ikeura, and M. Takemura : Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, Tectonophysics, 218, 69-81, 1993.
- 9) Joyner, W.B. and D.M. Boore : Methods for regression analysis of strong-motion data, Bull. Seis. Soc. Am., 83, 469-487, 1993.