

地震動エネルギーの距離減衰等の特性

平井俊之¹・澤田純男²

¹株式会社ニュージェック

(〒531-0074 大阪市北区本庄東二丁目3番20号)

E-mail:hiraits@newjec.co.jp

²京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

E-mail:sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

地震動の強さを評価するための指標として地震動エネルギーに着目し、国内の地震観測記録を用いモーメントマグニチュードと等価震源距離を説明変数として地震動エネルギーの距離減衰式を求めた。距離減衰式のばらつきや、本震と余震との関係から、地震動エネルギーの方が最大加速度値や最大速度値よりも地震の規模や距離に応じて安定的に地震動の強さを評価できることが分かった。また、ウェーブレット変換により地震動エネルギーの周波数特性について検討した。地震動エネルギーの特性は、オメガスクエアモデルと整合しており、地震動の強さを評価する指標として合理的であることがわかった。

Key Words : Seismic Wave Energy, Attenuation Equation, Index of Strong Ground Motion, Wavelet Transform

1. はじめに

構造物の設計が仕様設計から性能設計へと移りつつある中で、外力としての地震動についても、将来発生が予測されるレベル²地震動等を過不足なく合理的に評価するための研究がなされている。地震観測記録の蓄積及び震源断層の評価手法や地震動予測手法等の発展によって、断層位置や断層モデルが明らかな過去の大地震については、地震波形の再現が可能になっている¹⁾。耐震設計においても、経験的グリーン関数法や統計的グリーン関数法等の手法を用い、断層モデルを考慮して地震外力を波形として予測することが行われつつある。しかし想定する地震は断層位置や断層モデルにおいて不確定要素があるために、予測結果にはばらつきが生じると考えられる。したがって、予測波形の妥当性を評価するために、経験的に得られる指標と比較することが行われる。このときよく用いられるのが最大加速度値や最大速度値等であり、多くの距離減衰式が提案されている^{2) 3) 4)}。これらの指標は確かに地震動の強さの一面を表しているが、入力地震動を波形として予測する場合には、最大値だけでは不十分であると考えられる。さらに、港湾構造物などの土構造物を対象とした場合には、地震動の強さの指標として、最大加速度値や最大速度値よりも、土の変形との関係が

強いと考えられるエネルギー的な指標の方がより実被害との整合性が高いとの指摘もある⁵⁾。また、古くから地震動の強さを評価する指標としてエネルギー入力を用いられている⁶⁾。

本研究では、予測された地震動を評価する指標の一つとして、地震動エネルギーについて着目する。既往の観測記録を用いて地震動エネルギーの距離減衰式を求め、最大加速度値や最大速度値等の既往の指標と比較し、適用性を検討した。

2. 地震動エネルギーの距離減衰特性

(1) 地震動エネルギー

地震動のエネルギーに関する研究はこれまでもいくつかみられる^{7) 8) 9)}。地盤の単位体積あたりの地震動エネルギーは次式で定義される。

$$E = \frac{1}{2} \rho V_s \int_0^t v(t)^2 dt \quad (1)$$

ここで、 $v(t) (= \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2})$ は通過する地震動の速度時刻歴波形であり、 ρ および V_s は、それぞれその地盤の密度およびS波速度である。

表-1 強震観測記録のリスト

発震日時					Mw	記録数		地震名
						等価震源距離100km以下	すべて	
1997	3	26	17	31	6.1	39	59	鹿児島県北西部地震
1997	5	13	14	38	6.0	40	56	
1997	6	25	18	50	5.8	26	78	
1998	5	3	11	9	5.5	17	18	
1998	9	3	16	58	5.9	16	21	
2000	10	6	13	30	6.6	50	167	鳥取県西部地震
2003	7	26	0	13	5.5	29	52	
2003	7	26	7	13	6.1	29	88	宮城県北部地震
2004	10	23	17	56	6.6	38	147	新潟県中越地震
2004	10	23	18	34	6.3	35	132	
2004	12	14	14	56	5.7	17	22	
2005	3	20	10	53	6.6	35	114	福岡県西方沖地震
2006	4	21	2	50	5.6	27	30	
2007	3	25	9	42	6.7	18	91	能登半島地震
2007	7	16	10	13	6.6	33	142	新潟県中越沖地震
2007	7	16	15	37	5.6	32	61	
2008	6	14	8	43	6.9	41	127	岩手・宮城内陸地震

(2) 地震動エネルギーの距離減衰式

a) 観測データ

地震観測データはK-NETおよびKiK-netのデータを用いた¹⁰⁾。設計に用いる入力地震動は、工学的基盤面上の2E波として定義されることが多いことから、入力地震動のエネルギー密度を、工学的基盤上の自由表面上のエネルギーとして評価する。工学的基盤上での地震動を評価する場合、地震計が工学的基盤上に設置されているか、工学的基盤までの詳細な地盤情報が明らかとなっている必要がある。解析に用いた地震を表-1に示す。1997年以降に観測された地震で、Mjが5.5以上で震源深さが30km以浅、観測点数10以上のものを選定した。ただし、大規模な余震が複数あった場合には、本震と最大余震を選定した。K-NETの記録については、地表における地震動の最大加速度値が10gal以上のデータに対して、等価線形解析手法(SHAKE)を用いて工学的基盤まで引き戻す計算をおこなった。工学的基盤のS波速度は300m/s以上とし、調査ボーリングが工学的基盤まで達していない観測点のデータは除外した。せん断ひずみに関わる非線形特性は、砂と粘土でそれぞれの特性を設定し、砂の非線形特性は土被り圧依存性を考慮した¹¹⁾。最大せん断ひずみが0.3%を超え、等価線形解析の精度に問題が生じていると考えられるデータも除外した。KiK-netについては、地表でS波速度300m/s以上の地盤上に地震計が設置されている地点のデータを用いた。

b) 回帰分析

これまで、エネルギーの距離減衰特性に着目した研究¹²⁾は少ないが、最大加速度値や最大速度値に関しては多くの研究がある。

本研究では、距離減衰式の基本形として次式を用いることとした。

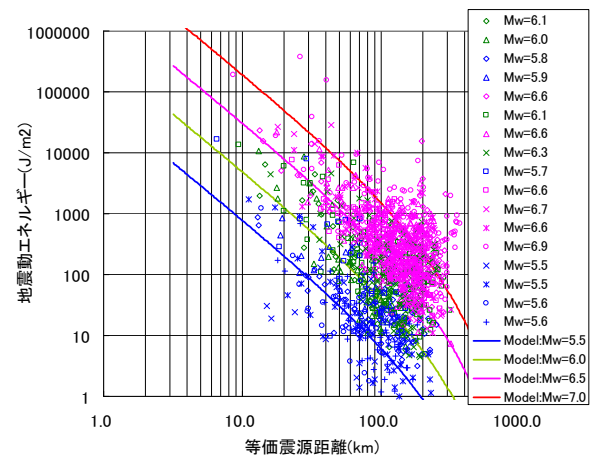


図-1 地震動エネルギーの距離減衰特性

$$\log_{10}(E) = aM_w + b \log(X_{eq}) + cX_{eq} + d \quad (2)$$

ここに、Eは、工学的基盤面上の地震動エネルギー、 M_w はモーメントマグニチュード、 X_{eq} は等価震源距離¹³⁾である。a, b, c, dは係数である。

既往の研究により、用いるデータのマグニチュードと距離に相関関係がある場合に一括で重回帰分析を行うと不都合が生じることが知られているため、距離に関わる回帰とマグニチュードに関わる回帰を分離する2段階回帰分析を行った¹⁴⁾。

具体的には、まず第1段階目の回帰式として、次式を用いた重回帰分析を行い、距離減衰に関する回帰係数bと、各地震ごとに求まる回帰係数 α_i を求める。

$$\log(E) = \sum \delta_{ij} \alpha_i - b \log(X_{eq}) + cX_{eq} \quad (3)$$

添え字iは地震の番号に対応しており、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。次に、各地震ごとに求めた α_i とモーメントマグニチュードを用いて、第2段階の回帰計算を行う。

$$\alpha = aM_w + c \quad (4)$$

表-1に示す等価震源距離が100km以下の522個のデータを用いて回帰分析を行った結果、 $a=1.593$ 、 $b=-1.856$ 、 $c=0.00274$ 、 $d=3.99$ が得られた。回帰式と観測値をプロットした結果を図-1に示す。図-2に主な地震の観測値と回帰式を比較して示す。

(3) 他の指標の距離減衰特性との比較

a) 距離減衰特性のばらつき

最大加速度値と最大速度値について(2)式と同様の距離減衰特性を求め、対数標準偏差で地震動エネルギーとばらつきを比較した。地震動エネルギーは速度波形の2乗和に比例しているため、次元を合わせるために地震動エネルギーについては平方根のばらつきを算定した。地

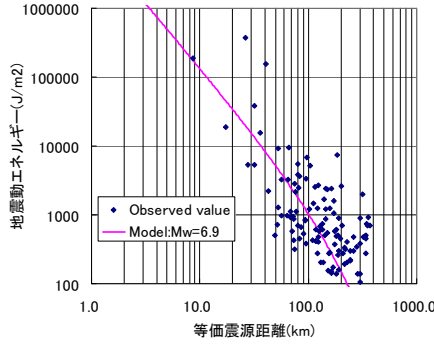


図-2 距離減衰式と観測記録の比較(岩手・宮城内陸地震)

震動エネルギーの平方根の対数標準偏差は0.23であり、最大加速度値の0.28より小さく、最大速度値の0.24とほぼ同等であった。

b) 本震と余震の大きさの違い

地震動エネルギーと最大加速度値、最大速度値について、ほぼ同じ位置で起きた本震(新潟県中越地震17:56 : Mw=6.6)と余震(18:34 : Mw=6.3)とを比較した(図-3)。本震と余震とで等価震源距離はほとんど差がないため、地震の規模の違いにより本震の方が地震動は大きくなるはずである。地震動エネルギーについては97%が本震の方が大きかったが、余震の方が大きいケースが最大加速度値では30%程度、最大速度値では20%程度あり、地震動エネルギーの方が地震の規模の違いとよく整合している。

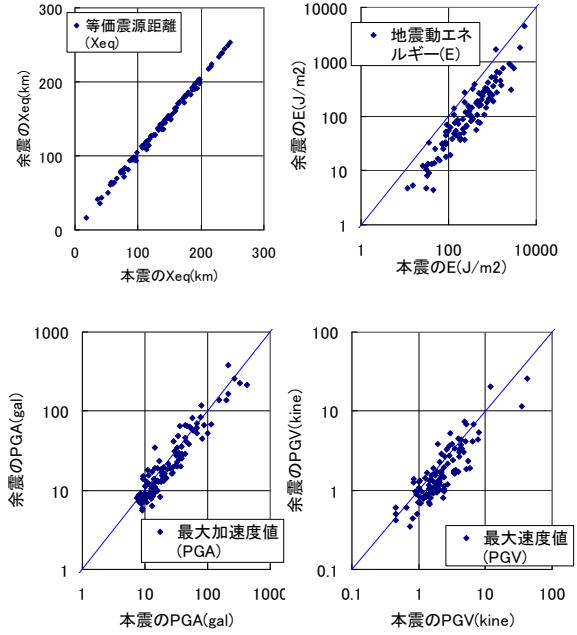


図-3 本震と余震の比較(新潟県中越地震)

3. ウェーブレット変換による地震動エネルギーの分析

(1) ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は時間周波数解析の手法の一つであり、以下の式により、変換と逆変換を行う。

$$T_{m,n} = \sum_m \sum_n v(t) \psi_{m,n}(t) \quad (5)$$

$$v(t) = \sum_m \sum_n T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (6)$$

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (7)$$

$\psi(t)$ は正規直交ウェーブレットである。 $v(t)$ は入力 velocity 時刻歴波形、 $T_{m,n}$ はウェーブレット係数である。 m はウェーブレットのスケールを表す係数で、レベル m という呼び方をする。 n はウェーブレットの位置を表す係数である。逆変換は、多重解像度解析によって以下のように表される。

$$d_m(t) = \sum_n T_{m,n} \psi_{m,n}(t) \quad (8)$$

$$v(t) = \sum_m d_m(t) \quad (9)$$

ここに、 $d_m(t)$ は $v(t)$ のうちレベル m の成分である。各レベルの地震動エネルギーは、ウェーブレットの正規直交性に基づいて以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2} \rho V_s \int_0^t v^2 dt = \frac{1}{2} \rho V_s \left(\int_0^t \sum_m d_m^2 dt + \int_0^t \sum_{m \neq n} d_m d_n dt \right) \\ &= \frac{1}{2} \rho V_s \sum_m \int_0^t d_m^2 dt = \frac{1}{2} \rho V_s \sum_m E_m \end{aligned} \quad (10)$$

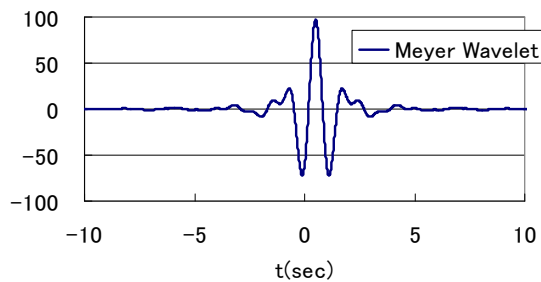
ここに、 E_m はレベル m の地震動エネルギーである。

本研究では、正規直交ウェーブレットとして図-4に示すMeyerのウェーブレットを用いた¹⁵⁾。Meyerのウェーブレットは周波数領域で局在化しており、フーリエ変換と対応させた分析が可能であると考えられる¹⁶⁾。図-5にウェーブレット変換の例を示す。各レベルの周波数帯は表-2に示すとおりである。

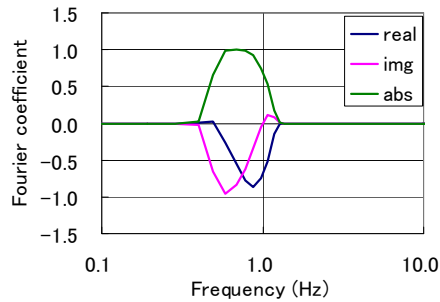
(2) 地震動エネルギーの周波数特性

地震動エネルギーの周波数特性を、以下の指標に着目して検討した。

- ・各レベルの地震動エネルギー(E_m)の距離減衰特性
- ・地震動エネルギーに対する各レベルの寄与率(E_m/E)



(a) 波形



(b) フーリエ係数

図-4 Meyerウェーブレット

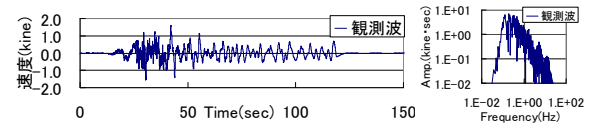
表-2 各レベルの周波数帯域

レベル	周波数帯域(Hz)
0	- 0.008
1	0.004 - 0.016
2	0.008 - 0.033
3	0.016 - 0.065
4	0.033 - 0.130
5	0.065 - 0.260
6	0.130 - 0.521
7	0.260 - 1.042
8	0.521 - 2.083
9	1.042 - 4.167
10	2.083 - 8.333
11	4.167 - 16.667
12	8.333 - 33.333
13	16.667 -

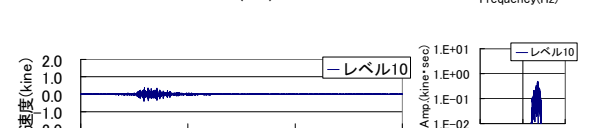
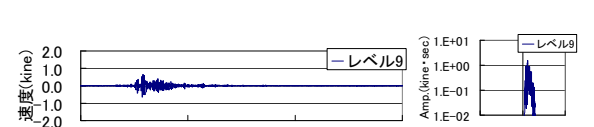
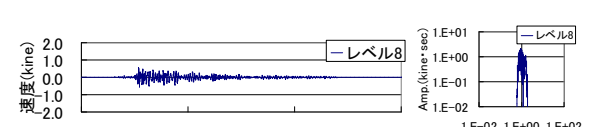
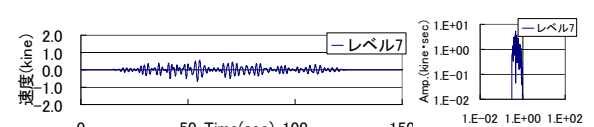
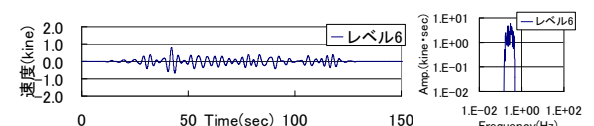
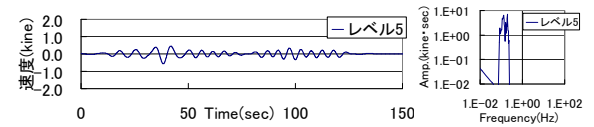
図-6に、例として、観測記録のレベル5およびレベル10の成分の地震動エネルギーのプロットとその距離減衰特性を示す。距離減衰式は2.と同じ手法を用いて決定した。また、図-7に各距離減衰式の係数を各レベルに対して求めた結果を示す。係数cは100km以下の等価震源距離では係数a, bに比べて影響が小さいため、係数a, bに対して検討した。

図-8に、例として、観測記録のレベル5およびレベル10の成分の地震動エネルギーに対する寄与とモーメントマグニチュードおよび等価震源距離との関係を示す。図-9に各レベルの寄与率を示す。

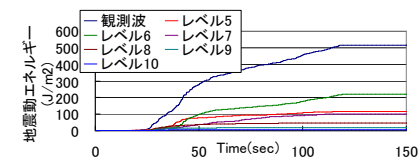
地震動エネルギーの特性を、オメガスクエアモデルと比較して検討した。オメガスクエアモデルは、震源における変位フーリエ振幅が低周波数側で一定値であり、コーナー周波数より高い周波数fでは f^2 に比例して減少する。



(a) 観測波



(b) 各レベルへの分解結果



(c) 地震動エネルギーの時刻歴

図-5 ウェーブレット変換の例

また、規模の大きい地震と規模の小さい地震の変位フーリエ振幅は低い周波数で大きく、高い周波数では小さい。地震動エネルギーは速度波形のパワースペクトルに比例するため、図-10に示すように速度でみたモデルと比較する。

図-7における係数aはモーメントマグニチュードに関する係数、係数bは等価震源距離に関する係数である。

係数aは、低いレベルで大きく、高いレベルで小さくなっている。これは、図-6で、レベル5においてはモーメントマグニチュードごとにプロットした各距離減衰式

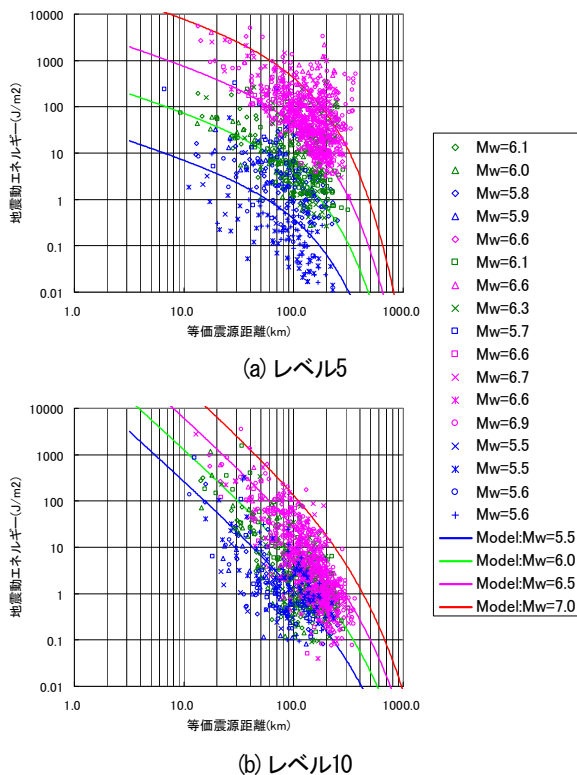


図-6 レベル5とレベル10の地震動エネルギーの距離減衰特性

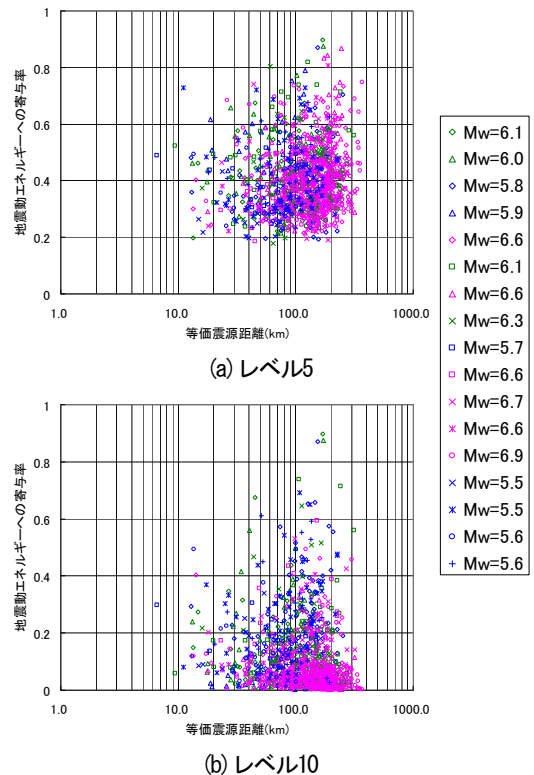


図-8 レベル5とレベル10の地震動エネルギー寄与率

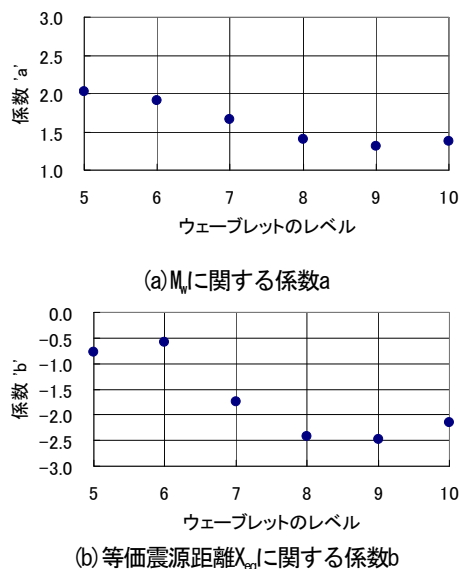


図-7 距離減衰式の係数とウェーブレットレベルとの関係

が離れているがレベル10では近いことに対応しており、オメガスクエアモデルにおける大きい規模の地震と小さい規模の地震との違いに対応していると考えられる。 M_w の定義から、 M_w の差が2に対して地震モーメント M_0 の比は $10^3=1000$ 倍であり、オメガスクエアモデルに従うと長周期側の振幅は1000倍、短周期側は10倍となる。パワーでみると、 M_w の差が1に対して長周期側は1000倍、短周期側は10倍である。したがって、理論的には、 a は低いレベルで3.0になり低いレベルで1.0になると考えら

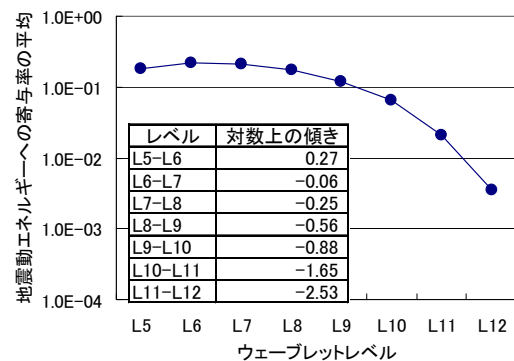


図-9 各レベルの地震動エネルギーへの寄与率

れる。観測記録では、低周波数側のレベル5で2.0程度と理論値と比べてやや小さめである。これは、低周波数側は表面波の影響が含まれるためと考えられる。表面波マグニチュード M_s の定義式より、 M_s の差が1に対して表面波の振幅は10倍であり、エネルギーでは100倍である。新潟県中越沖地震や鳥取県西部地震において、周期数秒程度の卓越周期をもつレーリー波やラブ波などの表面波が励起され伝播する様子が、K-NETやKiK-netの地震観測網でとらえられている^{17), 18)}。高周波数側のレベル10については、1.4程度であり理論値と大きな差はないと考えられる。

係数 b は低いレベルでは小さく、高いレベルでは大きい。これは、図-6で、レベル5では傾きが小さいが、レベル10では傾きが大きいことに対応している。この特性

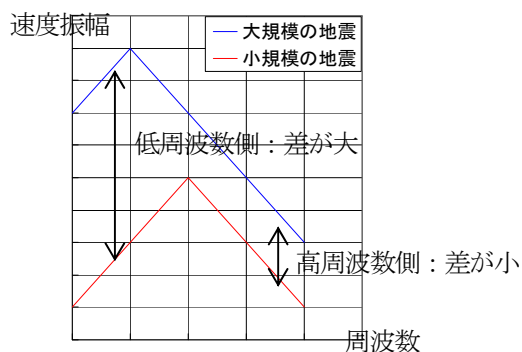


図-10 オメガスクエアモデル

は、高周波数側では距離に対する内部減衰が大きく、低周波数側では小さいという地震波の伝播経路特性と対応していると考えられる。

図-8については、いずれも等価震源距離との明確な関係はみられないが、レベル5の方が寄与が大きいことが分かる。また、図-9からはレベル6(0.13Hz～0.52Hz)やレベル7(0.26Hz～1.04Hz)の寄与が大きいことが分かる。

オメガスクエアモデルにしたがうと、エネルギーの周波数分布はコーナー周波数よりも低周波数側で周波数の2乗に比例して大きくなり、コーナー周波数でピークとなり、それよりも高周波数側では周波数の-2乗に比例して小さくなる。図-10から、レベル10より大きい高周波数側では傾きがほぼ-2であり、オメガスクエアモデルと整合している。低周波数側では傾きは小さく、ピークも滑らかであるが、これはさまざま規模の地震が含まれており、コーナー周波数が一定していないためと考えられる。

4. おわりに

地震動エネルギーの特性について検討した。モーメントマグニチュードと等価震源距離に対する地震動エネルギーの距離減衰式を提案し、最大加速度値や最大速度値の距離減衰特性とばらつきなどを比較した。また、ウェーブレット変換により地震動エネルギーの周波数特性について検討した。その結果、地震動エネルギーの特性として以下のことが分かった。

- 1) 距離減衰特性のばらつきは最大加速度値よりも小さく、最大速度値とはほぼ同程度である。
- 2) 地震動エネルギーは、最大加速度値等よりも地震の規模や距離に応じて安定的に地震動の強さを評価できる指標であると考えられる。
- 3) 地震動エネルギーの特性は、オメガスクエアモデルと整合していると考えられ、地震動の強さを評価する指標として合理的であると考えられる。

謝辞：防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの強震記録を使用させていただきました。

参考文献

- 1) Kamae, K., and Irikura, K : Source model of the Hyogo-ken Nanbu Earthquake and simulation of near-source ground motion, Bull. Seism. Soc. Am. 88, 400-412, 1998.
- 2) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A new attenuation relationship for peak ground accelerations derived from strong-motion accelerograms, Proceedings of Ninth Conference of Earthquake Engineering II, 343-348, 1988.
- 3) 司宏俊, 翠川三郎 : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.63-70, 1999.
- 4) 井合進, 倉田栄一, 向井健 : 地震最大加速度の距離減衰, 港湾技研資料724, 1992.
- 5) 野津厚, 井合進 : 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 平成12年度土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 2001.
- 6) 加藤勉, 秋山宏 : 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 第235号, pp.9-18, 1975.
- 7) 高木聖 : 地震動の最大エネルギーと震度との関係, 気象研究所研究報告, 第20巻, 第1号, pp.79-89, 1969.
- 8) 安芸敬一, P.G.リチャーズ : 地震学 定量的アプローチ, 上西幸司, 亀伸樹, 青地秀雄共訳, 古今書院, 2004.
- 9) 国生剛治, 本山隆一, 万谷昌吾, 本山寛 : 表層地盤における地震波のエネルギーフローと性能設計, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, pp.1-20, 2004.
- 10) 木下繁夫, 上原正義, 斗沢敏雄, 和田安司, 小久江洋輔 : K-NET95型地震計の記録特性, 地震2, 第49巻, pp.467-481, 1997.
- 11) 善功企, 山崎浩之, 梅原靖文 : 地震応答解析のための土の動的特性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.26, No.1, pp.41-113, 1987.
- 12) 大淵正博, 高田毅士 : 時刻歴波形構築のための地震動エネルギースペクトルに関する距離減衰式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第611号, pp.21-27, 2007.
- 13) Ohno, S., Ohta, S., Ikeura, T. and Takemura, M. : Revision of attenuation formula considering the effect of fault size to evaluate strong motion spectra in near field, Tectonophysics, 218, pp.69-81, 1993.
- 14) Joyner, W. B. and Boore, D. M. : Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from Imperial Valley, Bull. Seism. Soc. Am. 71, pp. 2011-2038, 1981.
- 15) Meyer Y. : Orthonormal Wavelets, in Wavelets Springer, pp. 21-37, 1989.
- 16) 佐々木文夫, 前田達哉, 山田道夫 : ウェーブレット変換を用いた時系列データの解析, 構造工学論文集, Vol. 38B, pp.

- 9-20, 1992.
- 17) 古村孝志, 武村俊介, 早川俊彦 : 2007年新潟県中越沖地震 (M6.8)による首都圏の長周期地震動, 地学雑誌, 116, pp. 576-587, 2007.
- 18) Furumura,T., Kennett, B. L. N. and Koketsu, K., : Visualization of 3D Wave Propagation from the 2000 Tottori-ken Seibu, Japan, Earthquake: Observation and Numerical Simulation, Bull. Seism. Soc. Am. 93, pp. 870-881, 2003.

CHARACTERISTICS OF SEISMIC WAVE ENERGY ON AN ATTENUATION RELATIONSHIP

Toshiyuki HIRAI and Sumio SAWADA

The characteristics of seismic wave energy are examined in this study. We proposed the attenuation equation of the seismic wave energy with respect to moment magnitude and equivalent hypocentral distance by using seismic records in Japan. By evaluating the dispersion of attenuation relationship and the difference of main shock and aftershock, the seismic energy is a better index than PGA and PGV to estimate the seismic intensity with respect to distance and magnitude stably. The frequency distribution of seismic wave energy is also evaluated by the wavelet transform analysis. The obtained seismic wave energy agrees with the omega-square source model. It is concluded that the seismic wave energy is a rational index to estimate the seismic intensity.