

KiK-net Dataを用いた2005年福岡県西方沖地震 本震および余震の高域遮断フィルター

鶴来雅人¹・香川敬生²・入倉孝次郎³

¹財団法人 地域 地盤 環境 研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail:turugi@geor.or.jp

²財団法人 地域 地盤 環境 研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail:kagawa@geor.or.jp

³愛知工業大学客員教授 (〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4)

E-mail:irikura@geor.or.jp

強震動予測を精度良く行うには、高周波数領域の地震動特性を明らかにすることが必要である。そこで、本研究では2005年福岡県西方沖地震の本震および余震を対象として、それらの記録の高周波数領域におけるスペクトル低減特性を検討した。その結果、本震の f_{max} は既往研究による1995年兵庫県南部地震本震の値とほぼ同じ6.5Hzとなった。しかし、高域遮断フィルターの傾きは1995年兵庫県南部地震本震に比べやや小さいことが明らかとなった。余震の f_{max} は9~20Hzとばらつきが大きく、その地震規模依存性は明確ではないが、本震の値よりは明らかに大きいと言える。

Key Words : High frequency range, Spectral decay characteristics, The 2005 Fukuoka-ken Seihō oki Earthquake, f_{max} , High cut filter

1. はじめに

地震動のスペクトルが ω^{-2} 則¹⁾に従うと仮定した場合、加速度スペクトルの形状はコーナー周波数以上の高周波数領域で平坦となる。しかし、実際にはある周波数より高周波数領域では低減傾向を示す。Hanksはこの低減傾向に遷移する周波数を f_{max} (高域遮断周波数)と名づけ、その成因に関する問題提起をした²⁾。この f_{max} の生成要因については、地表近傍での影響によるものとする考え^(例えば 3)と震源の影響によるものとする考え^(例えば 4)の2通りがあり、現在でもその決着はついていない。図-1に大地震および小地震の加速度フーリエスペクトルの概念図を示す。ここで、小地震のスペクトルの ω^{-2} 則に従うスペクトルからの偏差をもたらし高域遮断フィルターを $P_d(f)$ 、大地震のそれを $P_L(f)$ 、大地震と小地震の高周波数帯域におけるスペクトル低減特性の違いを補正するためのフィルターを補正フィルター $P_c(f)$ としている。

経験的グリーン関数法⁵⁾や統計的グリーン関数法⁷⁾、ハイブリッド法⁹⁾などにより強震動予測を精度良く行う際には、この高周波数領域におけるスペクトル低減特性の解明が重要である。強震動予測のフローとそれにお

ける高域遮断フィルターの位置付けを図-2に示す。経験的グリーン関数法のように地震動予測の過程で小地震記録を用いる場合には補正フィルター $P_c(f)$ による補正が、小地震記録を用いない場合には $P_L(f)$ による補正が必要と考えられる。

地震観測記録から f_{max} の値やその地震規模依存性および高域遮断フィルターの形状を検討する試みは複数行われている。例えば、佐藤⁹⁾は2000年鳥取県西部地震の本震および余震のKiK-net観測点での記録を用いた解析を行い、 f_{max} は2~20数Hzに存在しその地震規模依存性は見られないとしている。また、川瀬・松尾¹⁰⁾は1996年8月~2002年6月に発生した地震(全228地震、 M_j : 4.5~7.3)について解析を行ない、 f_{max} の値には明瞭な地震規模依存性は見られないとしている。著者らは、1995年兵庫県南部地震など最近国内で発生した大地震の硬質地盤や岩盤における観測記録を用いて、高周波数領域における低減特性を検討し、 f_{max} はサイトによらずほぼ一定であることを示した上で、高域遮断フィルターを提案している^{11)~13)}。香川・ほか¹¹⁾やKagawa *et al.* ¹³⁾は前述した大地震の高域遮断フィルター $P_L(f)$ の提案、鶴来・ほか¹²⁾は小地震と大地震の高域遮断フィルター $[P_d(f), P_L(f)]$ およびそれらの

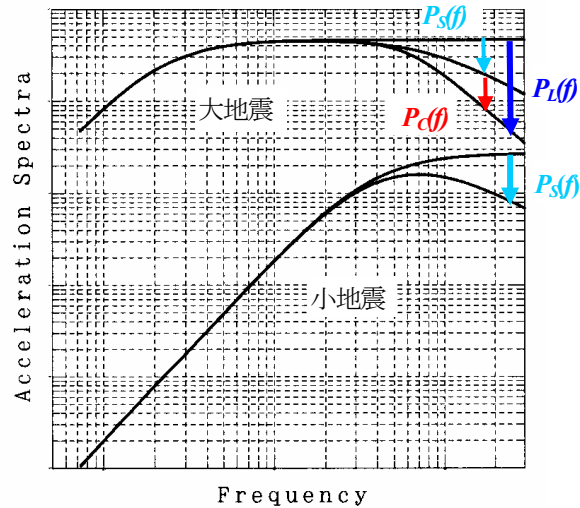


図-1 大地震と小地震の加速度フーリエスペクトルの概念図

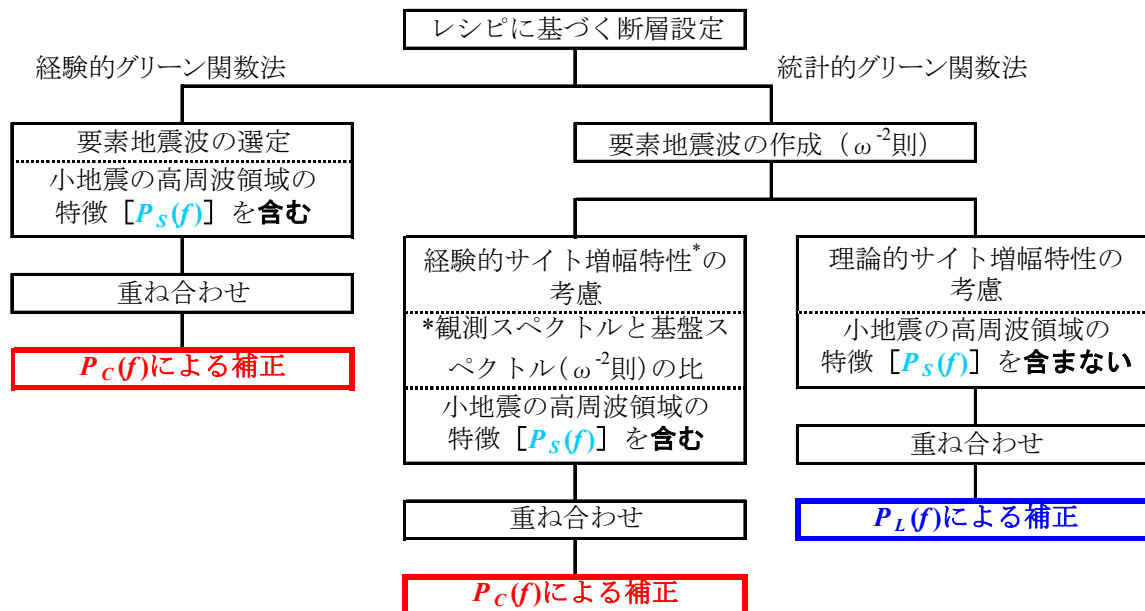


図-2 強震動予測のフローと高域遮断フィルターの位置づけ

違いを補正するフィルター $P_c(f)$ の提案を行っている。

本検討では、2005年福岡県西方沖地震の本震および余震を対象に、高周波数領域におけるスペクトル低減特性 $[P_s(f)$ および $P_L(f)]$ について検討する。

2. 検討手法

まず、岩盤観測点（防災科学技術研究所 基盤強震観測網 KiK-net の地中観測点）における観測記録から震源スペクトルを求める。この時、2005年福岡県西方沖地震の震源域から概ね100km以内、かつ地中地震計設置深度

におけるせん断波速度が2,000m/sec以上の地点の記録を用い、この条件に当てはまる複数地点の記録から震源スペクトルを推定し、その平均を求めた。スペクトルの算出には主要動部20秒間を用い、水平2方向のベクトル和とした。ここで、主要動部の抽出にあたってマルチテーパー^{14), 15)}を用いることにより、スペクトル算出の精度向上を図った。また、地中観測記録については地表面からの反射波の影響が懸念されるが、この影響は小さいことを確認している。さらに計器特性の補正を行った。 Q 値は九州北部および西部地域の地殻内地震を用いたスペクトルインバージョン解析によって得られた特性[式(1)]¹⁰⁾を用いた。

表-1 解析に用いた地震の諸元および推定した各種パラメータ

No.	発震時刻	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	M_J	M_0 (dyne·cm)	f_c (Hz)	M_w	f_{max} (Hz)	s	M_0 比	サイト数
1	2005.03.20 10:53	33.738	130.175	9	7.0	1.15×10^{26}	0.16	6.6	6.5	0.90	1.47	9
2	2005.03.20 14:32	33.797	130.087	12	4.5	3.98×10^{22}	0.78	4.3	14.6	0.80	1.34	3
3	2005.03.20 15:41	33.708	130.222	10	3.6	3.79×10^{21}	1.58	3.7	10.4	1.02	1.55	2
4	2005.03.20 16:08	33.762	130.143	12	4.1	9.83×10^{21}	1.48	3.9	9.2	0.33	2.08	4
5	2005.03.20 20:38	33.745	130.170	11	4.5	4.22×10^{22}	1.13	4.4	13.4	1.47	1.94	9
6	2005.03.21 06:17	33.728	130.193	12	3.9	1.03×10^{22}	2.02	3.9	19.0	2.35	1.42	7
7	2005.03.21 15:37	33.783	130.097	11	4.2	1.30×10^{22}	1.62	4.0	19.3	2.11	1.73	6
8	2005.03.21 23:59	33.785	130.100	12	4.8	9.42×10^{22}	0.97	4.6	16.5	1.78	1.68	8
9	2005.03.24 23:38	33.740	130.170	11	4.3	8.07×10^{21}	1.95	3.9	15.8	1.51	1.50	6
10	2005.03.25 03:43	33.722	130.215	11	4.0	1.00×10^{22}	1.54	3.9	17.2	1.83	1.46	4
11	2005.03.25 21:03	33.785	130.117	12	4.1	1.76×10^{22}	1.79	4.1	14.4	1.42	1.54	8
12	2005.04.20 06:11	33.677	130.287	14	5.8	1.43×10^{24}	0.67	5.4	8.8	0.98	1.09	9
13	2005.04.20 06:22	33.678	130.288	13	4.7	7.03×10^{22}	1.00	4.5	19.7	1.73	1.32	8
14	2005.04.20 09:09	33.678	130.283	13	5.1	2.12×10^{23}	1.01	4.8	11.0	1.40	1.41	9

M_0 : 地震モーメント, f_c : コーナー周波数, M_w : モーメントマグニチュード

M_0 比 : 地震モーメントのF-netの値に対する推定値の比率

$$Q(f)=112.0 \times f^{0.70} \quad (1)$$

続いて, 地震モーメント M_0 およびコーナー周波数 f_c を評価する. Andrews¹⁶⁾の方法により, 震源変位スペクトルの低周波数領域におけるフラットレベル Ω_0 およびコーナー周波数 f_c を求め, 式(2)により地震モーメントを得る. こうして得られた地震モーメントは防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net により推定された値と比較することによって, その妥当性を確認する.

$$M_0 = \frac{4\pi\rho\beta^3}{R_{\phi\theta}} \times \Omega_0 \quad (2)$$

ここで, ρ , β は媒質の密度およびせん断波速度であり, $R_{\phi\theta}$ はラディエーションパターンの係数である.

最後に, 高周波数領域におけるスペクトル低減特性を規定するフィルターを Boore¹⁷⁾による形状 [式(3)] とし, 先に得られた地震モーメント M_0 およびコーナー周波数 f_c を既知として与えた上で, 式(3)の係数である高域遮断周波数 f_{max} およびべき乗数 s を焼きなまし法¹⁸⁾により求める.

$$P(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^{2s}}} \quad (3)$$

検討対象地震の諸元を表-1 に, それらの震央および対象地点の位置を図-3 に示す. ここで No.1 の地震が本

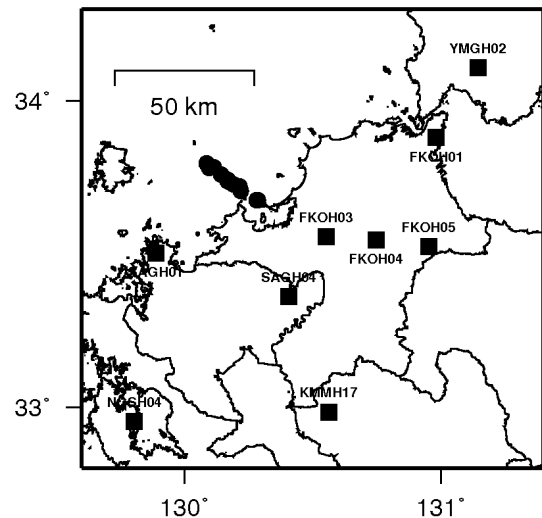


図-3 検討に用いた震央(●)および
検討対象地点(■)の位置

震, No.2~No.14 の地震が余震である.

3. 検討結果

(1) 得られた各種パラメータ

複数サイトにおける観測記録から求めた平均の震源ス

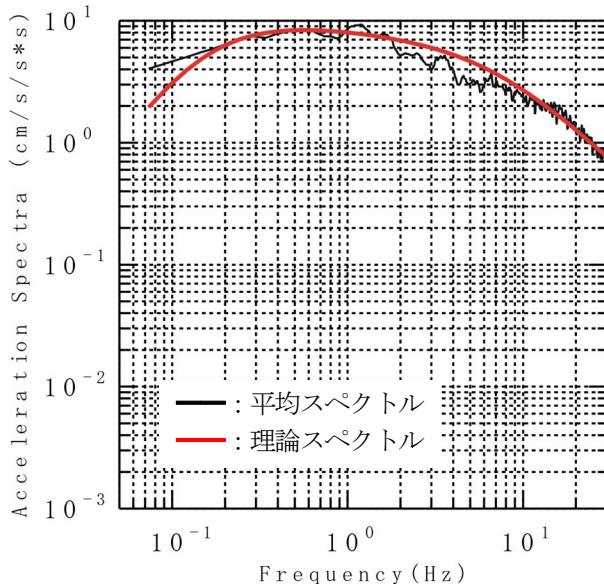


図-4 本震の平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトル

ペクトルより得られた地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_c 、高域遮断周波数 $f_{\max}$ およびべき乗数 s の値を表-1に示す。同表には推定した地震モーメントから得られるモーメントマグニチュード M_w 、地震モーメントの F-net の値に対する推定値の比率 (M_0 比) および検討に用いたサイト数を併記する。これより、推定された地震モーメントは F-net の値に対して1.09倍～2.08倍程度であり、推定された値の妥当性が概ね確認できた。

なお、ここでは震央距離が概ね100km以内の観測点の記録を用いたが、50km以内の観測点の記録を用いた場合も表-1に示す結果とほぼ同じ結果となった。

(2) 本震記録の高域遮断フィルター

2005年福岡県西方沖地震 本震の平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトル $A(f)$ を図-4に示す。理論スペクトル $A(f)$ とは、 ω^2 則に基づく震源特性と伝播経路特性および高域遮断フィルター $P(f)$ を考慮したスペクトルである [式(4)参照]。

$$A(f) = CM_0 S(f) \frac{1}{X} \exp \frac{-\pi f X}{Q(f) \beta} P(f) \quad (4)$$

ここで、 $S(f)$ は ω^2 則に基づく震源特性で式(5)で表せる。また、 X は解析に用いたサイトまでの震源距離の平均値 (cm)、 β はせん断波速度 (cm/s) であり、 C はラディエーションパターンなどその他の係数である。

$$S(f) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (5)$$

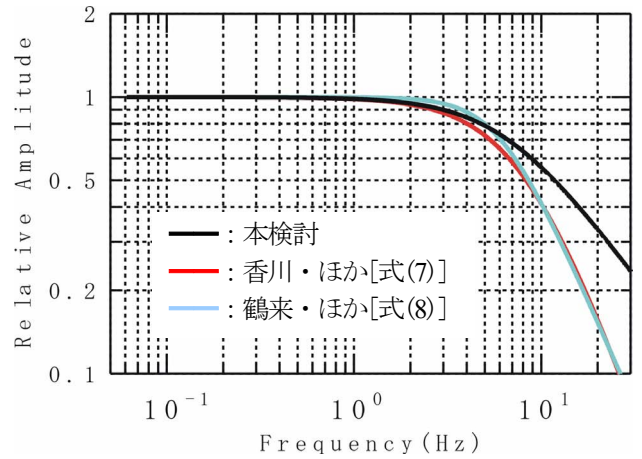


図-5 大地震の高域遮断フィルター

これより、平均スペクトルと理論スペクトルは良く適合していることが判り、得られたパラメータの妥当性が確認できる。

本震の高域遮断周波数 $f_{\max}$ は6.5Hz、べき乗数 s は0.9、すなわち高域遮断フィルターは式(6)のように推定された。この高域遮断フィルターを図-5に示す。比較のため、同図には香川・ほか¹¹⁾によるフィルター [式(7)]、鶴来・ほか¹²⁾によるフィルター [式(8)] を同図に併記する。ここで、香川・ほか¹¹⁾は1995年兵庫県南部地震、1997年鹿児島県北西部地震および2000年鳥取県西部地震を対象として、それらの平均的特性を求めたものであり、鶴来・ほか¹²⁾は1995年兵庫県南部地震を対象としたものである。これより、本研究で得られた高域遮断フィルターの低減し始める周波数は香川・ほか¹¹⁾や鶴来・ほか¹²⁾によるフィルターとほぼ同じであるが、その低減の傾きはやや小さいことがわかる。この傾きの違いが大地震の高域遮断フィルターのばらつきの範囲内かどうかは、今後検討が必要である。

$$P_L(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{6.5}\right)^{2 \times 0.90}}} \quad (6)$$

$$P_L(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{8.3}\right)^{1.92}} \quad (7)$$

$$P_L(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{6.0}\right)^{2 \times 1.55}}} \quad (8)$$

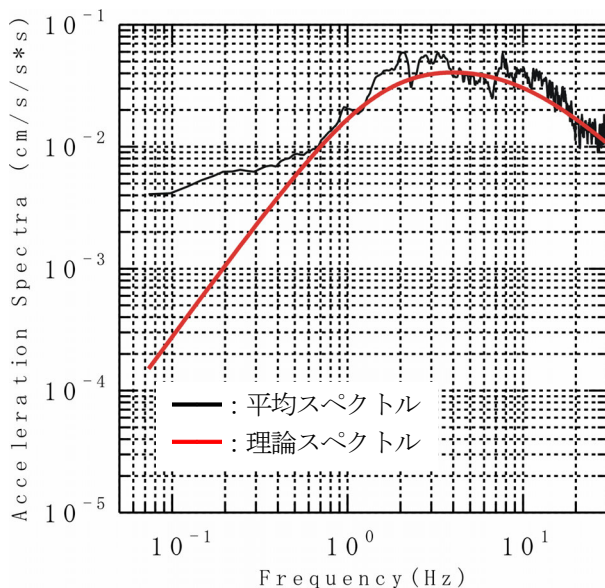


図-6 余震の平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトル (No.6 : 2005年3月20日15時41分の地震)

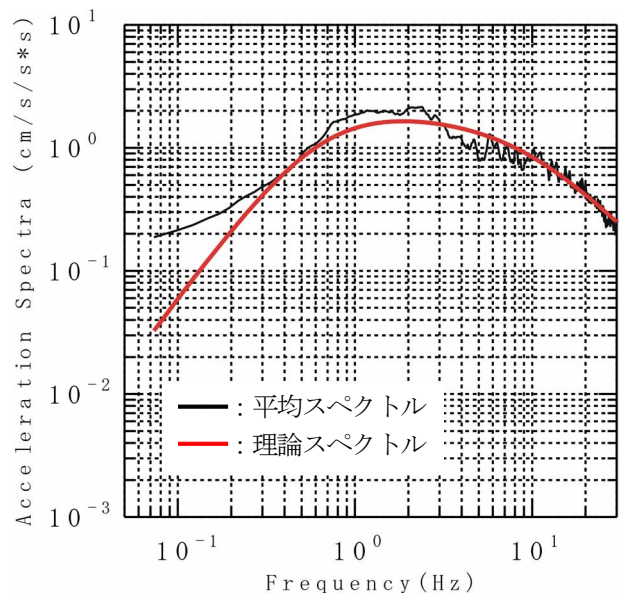


図-7 余震の平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトル (No.22 : 2005年4月20日6時11分の地震)

(3) 余震記録の高域遮断フィルター

2005年福岡県西方沖地震余震の一例として、

No. 6 : 2005年03月20日15時41分

No.22 : 2005年04月20日06時11分

の2地震について、その平均スペクトルとそれに適合する理論スペクトルを図-6および図-7に示す。なお、No.6 (2005年03月20日15時41分)の地震については0.7Hz程度以下、No.22 (2005年04月20日06時11分)の地震については0.4Hz程度以下の周波数帯域では十分なSN比がないと判断される。これらの図より、平均スペクトルと理論スペクトルは良く適合していることが判り、得られたパラメータの妥当性が確認できる。ここでは2地震のみを示したが、他の地震についても両スペクトルはこれらと同程度適合している。表-1より、2005年福岡県西方沖地震余震の $f_{\max}$ は9Hz~20Hz、べき乗数 s は0.3~2.4と推定され、いずれも大きくばらついている。その結果、高域遮断フィルターの形状も大きくばらついていることがわかる〔図-8参照〕。 $f_{\max}$ の値の地震規模依存性は明確ではないが、本震の値よりは明らかに大きいと言える。また、最大規模の余震すなわち本震に続いて2番目に規模の大きな地震 (No.12の地震)の $f_{\max}$ は8.8Hzとなり、本震の次に小さな値となった。 $f_{\max}$ の値の地震規模依存性を考える上で興味深い結果と言える。

4. おわりに

本研究では、2005年福岡県西方沖地震の高周波数領域

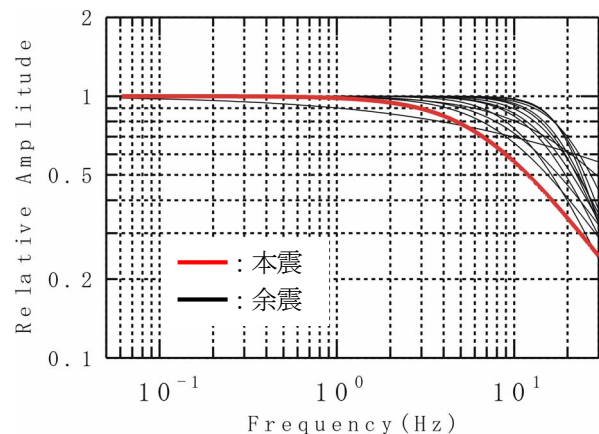


図-8 本震と余震の高域遮断フィルター

におけるスペクトル低減特性を検討した。その結果、本震記録の $f_{\max}$ は6.5Hzと推定された。この値は1995年兵庫県南部地震本震の値とほぼ同等である。しかし、高域遮断フィルターの高周波数領域における低減の傾きは1995年兵庫県南部地震本震に比べやや小さくなった。この傾きの違いが大地震の高域遮断フィルターのばらつきの範囲内かどうかは、今後検討が必要である。余震の $f_{\max}$ は概ね9Hz~20Hzと大きくばらついており、地震規模依存性は明確ではないが、本震の値よりは明らかに大きいと言える。また、高域遮断フィルターの高周波数領域における低減の傾きも大きくばらつくことが明らかとなった。

今後、大地震と小地震の高周波数領域におけるスペクトル低減特性の違いを補正するフィルター、すなわち図-1における $P_c(f)$ のモデル化が課題である。

謝辞：マルチテーパーによるスペクトルの算出にはエール大学 Park 教授・ほか が作成したプログラムを使用しました。また、防災科学技術研究所 基盤強震観測網 KiK-net の観測記録および広帯域地震観測網 F-net の震源パラメータを使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Aki,K. : Scaling relation of seismic spectrum, *Journal of Geophysical Research*, Vol.72, pp.1217-1231, 1967.
- 2) Hanks,T.C. : f_{max} , *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.72, pp.1867-1879, 1982.
- 3) Anderson,J.G. and Hough,S.E. : A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.74, pp.1969-1993, 1984.
- 4) Papageorgiou,A.S. and Aki,K. : A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion II. Application of the model, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.73, pp.953-978, 1983.
- 5) Hartzell,S.H. : Earthquake aftershocks as Green's functions, *Geophysical Research Letters*, Vol.5, pp.1-4, 1978.
- 6) Irikura,K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 7) 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, No.430, pp.1-9, 1991.
- 8) 入倉孝次郎, 釜江克宏 : 1948 年福井地震の地震動 —ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現—, 地震第 2 輯, Vol.52, pp.129-150, 1999.
- 9) 佐藤智美 : KiK-net 強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震とラディエーションパターンおよび f_{max} の評価, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.25-34, 2002.
- 10) 川瀬博, 松尾秀典 : K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.1, pp.33-52, 2004.
- 11) 香川敬生, 鶴来雅人, 佐藤信光 : 硬質サイトの強震観測記録に見られる高周波低減特性の検討, 第27回地震工学研究発表会, 315, 2003.
- 12) 鶴来雅人, 香川敬生, 岡崎敦, 羽田浩二, 入倉孝次郎 : 強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 —1995 年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討—, 日本地震工学会論文集, Vol.6, No.4, pp.94-112, 2006.
- 13) Kagawa,T., Tsurugi,M., and Irikura,K. : High Frequency Cut-off Characteristics of Strong ground Motion Records at Hard Sites, Subduction and Intra-Slab Earthquakes, American Geophysical Union 2006 Fall Meeting, S23E-0214, 2006.
- 14) Thomson,D.J. : Spectral estimation and harmonic analysis, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronic Engineers*, No.70, pp.1055-1096, 1982.
- 15) Lees,J.M. and Park,J. : Multiple-taper spectral analysis : A stand-alone C-subroutine, *Computers and Geosciences*, Vol.21, pp.199-236, 1995.
- 16) Andrews,D.J. : Objective determination of source parameters and similarity of earth-quakes of different size, *Geophysical monograph* 37, Maurice Ewing Vol.6, pp.259-267, 1986.
- 17) Boore,D.M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 18) Ingber,L. and Rosen B. : Genetic algorithms and very fast simulated reannealing: A comparison, *Mathematical and Computer Modeling*, Vol.16, 1992, pp.87-100.

(2007.06.29 受付)

HIGH-CUT FILTER DUE TO MAINSHOCK AND AFTERSHOCKS OF THE 2005 FUKUOKA-KEN SEIHO OKI EARTHQUAKE USING KiK-net DATA

Masato TSURUGI, Takao KAGAWA and Kojiro IRIKURA

Spectral decay characteristics in high frequency range due to mainshock and aftershocks of the 2005 Fukuoka-ken Seiho Oki Earthquake are examined. The Butterworth type high-cut filter with cut-off frequency f_{max} and its power coefficient is assumed in this study. The two parameters are estimated by fitting Fourier spectra of observed records at rock sites with the theoretical filter shape. In result, the cut-off frequency f_{max} of the mainshock is estimated as 6.5Hz. This value is almost same as that of the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake. The cut off frequencies f_{max} of aftershocks are estimated in the range about 9Hz and 20Hz.