

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

香川敬生¹・鶴来雅人²・佐藤信光³

¹(財)地域地盤環境研究所 主席研究員 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail:kagawa@geor.or.jp

²(財)地域地盤環境研究所 グループ・リーダー (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

E-mail: turugi@geor.or.jp

³独立行政法人水資源機構 技術研究研修センター 特命審議役 (〒338-0812 さいたま市桜区神田936)

E-mail:nobuteru_sato@water.go.jp

強震観測記録に見られる高周波数低減特性について、ダムにおける硬質サイトの記録を中心として検討をおこなった。強震動の高周波数成分は加速度波形に大きく影響し、これを合理的に与えることは耐震設計および地震被害予測の観点から重要である。一方、その特性については、高周波地震動観測の困難さもあり、震源・伝播経路・サイト特性といった特定の要因が十分に解明されていない。本研究では、個々の強震観測記録の高周波数低減特性を高周波限界周波数 f_{max} とべき乗数で定義したButterworth型のフィルタで近似し、その平均的特性および標準偏差を導くことで、実用的な強震動予測に用いる際の指標を提案するものである。

Key Words : Strong Groind Motion, High Frequency Attenuation, f_{max} , Hard Sites

1. はじめに

広帯域の地震動を計算する場合、観測記録に見られる高周波遮断特性のモデル化が重要となる。経験的グリーン関数法に基づく既往地震の地震動評価例^{1), 2)}では、適正な加速度波形を得るために高周波遮断特性が導入されている。しかしながら、その特性が震源特性・伝播経路特性・サイト特性のいずれに起因するかの結論は得られておらず、また高周波数まで精度のある観測記録がほとんど得られていないこともあってその特性を合理的に設定することは困難である。そこで本研究では、大地震時に震源近傍域で得られた硬質サイトにおける観測記録を用いて、標準的な高周波数遮断特性について検討をおこなった。なお、ここでは、高周波数遮断特性を震源特性・伝播経路特性・サイト特性・計器特性のいずれかに特定せず、総合的な減衰特性と仮定した上で、 f_{max} とべき乗数で定義される Butterworth 型のフィルタの形状を用いて解析をおこなう。

2. 用いる観測記録

地表面付近の増幅特性（特に非線形性）による影

響を極力避けるため、硬質岩盤サイトと想定されるダムサイト基礎における記録³⁾および(独)防災科学技術研究所 K-NET⁴⁾、KiK-net⁵⁾観測記録のうち、表層が軟弱地盤ではなくS波速度が700m/sを越える層が深さ5m程度以浅に現れる硬質サイト（表-1）の記録を用いる。実際、軟弱層の厚いKiK-netサイトでは、地表と地中の観測記録から導かれる高周波遮断特性が大きく異なり、地盤増幅特性の影響が懸念される。

表-1 用いたK-NET, KiK-netサイトの諸元

| 記号 | サイト名 | 表層Vs(m/s) | 最深部Vs(m/s) | Vs>700となる深度(m) |
|--------|------|-----------|------------|----------------|
| MYZ004 | 南郷 | 330 | 700 | 2 |
| MYZ005 | 日向 | 300 | 1,070 | 2 |
| SMNH10 | 美保関 | 500 | 2,100 | 4 |
| OKYHO7 | 神郷 | 510 | 1,570 | 6 |

本検討で利用したものは以下の17観測記録であり、これらの水平2成分のフーリエ振幅スペクトルをベクトル合成して解析に用いる。図-1に各地震の震源断層とダムサイトの位置関係を示す。

- 1995年兵庫県南部地震：一庫ダム、箕面川ダム
- 1997年3月鹿児島県北西部地震：鶴田ダム、

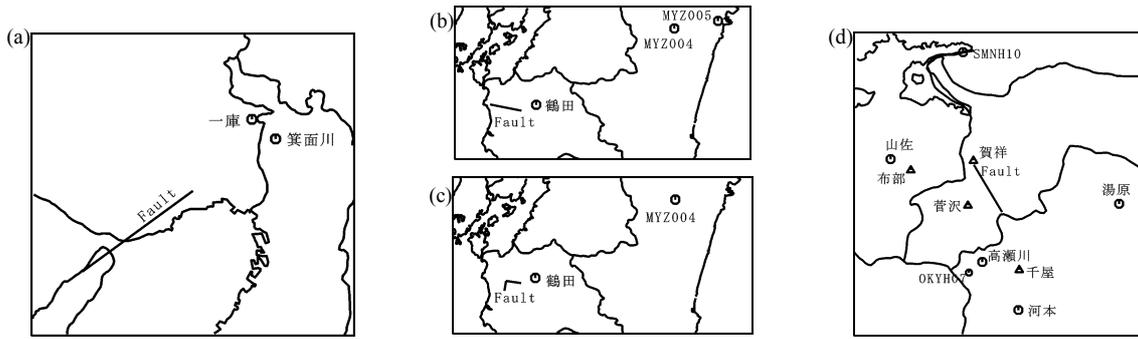


図-1 各地震の震源断層に対するダムサイトの位置 (a) 1995 年兵庫県南部地震, (b) 1997 年 3 月鹿児島県北西部地震, (c) 1997 年 3 月鹿児島県北西部地震, (d) 2000 年鳥取県西部地震

MYZ004, MYZ005

- 1997 年 5 月鹿児島県北西部地震：鶴田ダム, MYZH004
- 2000 年鳥取県西部地震：賀祥ダム, 菅沢ダム, 千屋ダム, 河本ダム, 山佐ダム, 高瀬川ダム, 布部ダム, 湯原ダム, SMNH10, OKYH07

記録の計器特性については詳細が示されていないが、いずれもデジタル記録であり極端な特性の差は無いものと考えられる。ここでは、それぞれの記録でスペクトルの高周波部における急な落ち込み（フィルターなど）を避けた範囲を解析対象とする。

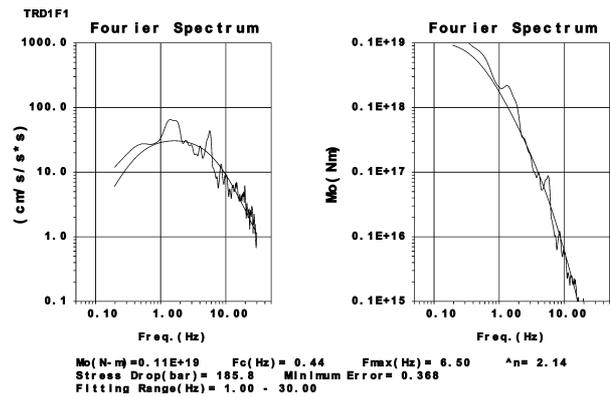


図-2(1) 1997 年 3 月鹿児島県北西部地震による鶴田ダムの記録による解析例

3. 各観測記録の高周波数低減特性

解析にあたって、高周波数減衰特性 $F(f)$ を、以下の定義式を用いてモデル化する。ここに、 f_{max} は限界周波数、 n はべき乗係数である。

$$F(f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{max}}\right)^n} \quad (1)$$

次に、スペクトル形状が ω^{-2} 則に近いサイトについて、既往の震源解析から得られている地震モーメントを想定し、低周波数を含む広い帯域でコーナー周波数 (f_c)、 f_{max} 、および n を未知数として推定する。その際に、焼き鈍し法 (Simulating Annealing: SA)⁶⁾ を用いた。得られたコーナー周波数および高周波数レベルは、既往の震源解析で得られているものと大きく矛盾しないことが確認できた。次に、何らかのサイト増幅を含むと考えられる他の点について、地震モーメントおよびコーナー周波数を上の解析結果から既知として与え、主に 10Hz より高周波数域を対象に f_{max} 、および n を未知数として推定した。その結果の一例として、1997 年 3 月鹿児島県北西部地震による鶴田ダム観測記録および 2000 年鳥取県西部地震による賀祥ダム観測記録の解析例を図-2 に示す。図の左は変位スペク

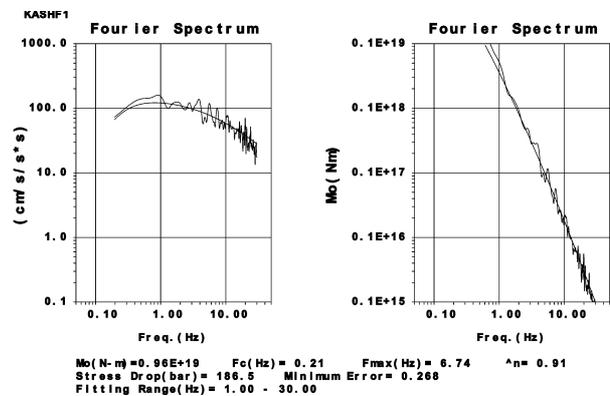


図-2(2) 2000 年鳥取県西部地震による賀祥ダムの記録による解析例

トル、右は加速度スペクトルへの適合例を示している。なお、ベクトル合成しない 2 成分のフーリエ・スペクトルで同様の解析をおこなったこのように推定したパラメターの一覧を表-2 に示す。図-3 には、2000 年鳥取県西部地震による千屋ダム観測記録の例を示すが、水平 2 成分の高周波数減衰特性がそれぞれ大きく異なっており、硬質サイトといえども地形効果やダムの影響などによるサイト特性の影響が含まれていることが懸念される。このため、各 2 成分とベクトル和の差がかけ離れているものを以下の解析からは除外した。用いた記録を表-2 に丸印で示している。また、一部値の求められていない記録

は ω^{-2} 則に従ったスペクトル形状でフィッティングできなかったものである。

4. 考察

表-2 に示した鳥取県西部地震の解析結果はふたつのタイプに分かれている。ひとつは、 f_{max} が10Hz に近く n が2程度のもの、もうひとつは f_{max} が5 Hz 程度より小さく n が1以下のもの(図-1(d)の三角印)である。後者が見られるサイトはより震源断層近傍に位置しているように思われるが、同じ程度の断層距離であってもそのような特徴の見られない記録もある。また、ふたつの鹿児島県北西部地震で共通して解析をおこなった2サイトでは、地震によらず観測点の毎の特性は安定している。

高周波遮断特性を震源規模に依存させたり地盤の非線形性を考察する検討もおこなわれているが、今回用いた情報から硬質サイトにおける高周波遮断特性が震源特性・伝播経路特性・サイト特性のいずれかに依存していることを早急に結論付けることは困難であり、今後の理学的検討仮題と考える。ここでは工学的に利用できる平均的な特性を導くことを目的とした。

表-2 から抽出した10記録の高周波遮断特性(ベクトル合成)について、周波数毎に平均値と対数標準偏差を求め、それらの点に適合するように、平均および標準偏差分のフィルター係数を求めた。その結果、

- 平均 : $f_{max} = 8.3\text{Hz}$, $n=1.92$
- 平均+1 σ : $f_{max} = 11.9\text{Hz}$, $n=1.88$
- 平均-1 σ : $f_{max} = 6.3\text{Hz}$, $n=2.02$

を得ることができた。図-4 にその結果を示す。図の左は10記録から解析した高周波遮断フィルターの形状を破線で、それから周波数毎に計算した平均と平均±標準偏差の点を繋いだ形状を実線で示している。図の右は平均と平均±標準偏差による形状(破線)を(1)式で近似したフィルターの形状(実線)を示している。なお、より硬質な全ダムサイトのみで解析おこなうと、以下の値となる。

- 平均 : $f_{max} = 5.4\text{Hz}$, $n=1.55$
- 平均+1 σ : $f_{max} = 9.0\text{Hz}$, $n=1.36$

5. おわりに

硬質サイトにおける強震観測記録の平均的な高周波数低減特性を表現するフィルター形状を提案した。対象とする問

題に応じて平均特性あるいは標準偏差を考慮したものを用いることにより、実用的な強震動予測の際の指標となることが期待される。また、確率論的な地震動評価においても応用可能と考えられる。ただし、あくまで10観測記録から導いた特性であり、今後の強震観測記録の充実に応じた追検討が望まれる。一般に強震計は電源を必要とするため、A/D変換時

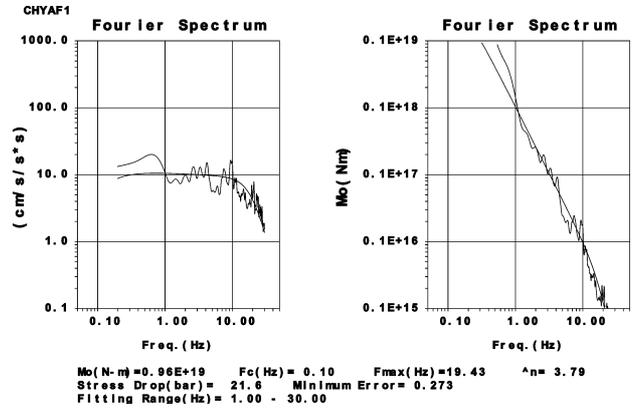


図-3(1) 2000年鳥取県西部地震による千屋ダムにおけるダム軸成分観測記録の解析例

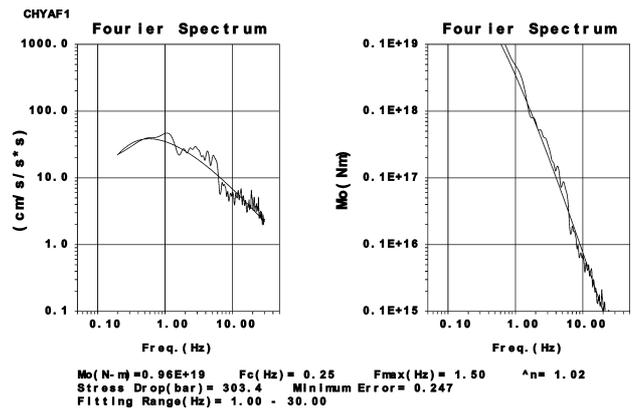


図-3(2) 2000年鳥取県西部地震による千屋ダムにおけるダム軸直交成分記録の解析例

表-2 推定したフィルター・パラメータの一覧

| 地震 | ダム名/ サイト記号 | 合成 | | 成分1 (NS/ダム軸) | | 成分2 (EW/ダム軸直交) | | 採用 | |
|-------------|---------------|----------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|------|---|
| | | f_{max} (Hz) | n | f_{max} (Hz) | n | f_{max} (Hz) | n | | |
| 兵庫県南部 | 一庫 | 4.82 | 2.46 | 9.58 | 3.88 | 3.15 | 2.35 | | |
| | 箕面川 | 4.40 | 2.21 | 2.99 | 2.21 | 9.71 | 3.89 | | |
| 鹿児島県 北西部 | 3月 | 鶴田 | 6.50 | 2.14 | 7.09 | 2.52 | 5.05 | 1.87 | ○ |
| | | MYZ004 | 11.97 | 2.32 | 14.92 | 3.60 | 10.81 | 2.40 | ○ |
| | MYZ005 | 11.53 | 1.84 | 10.01 | 1.80 | 12.54 | 1.98 | ○ | |
| | 5月 | 鶴田 | 4.15 | 1.64 | 4.61 | 1.99 | 3.75 | 1.45 | ○ |
| | | MYZ004 | 12.11 | 2.40 | 14.38 | 3.35 | 13.20 | 3.16 | ○ |
| 鳥取県西部 | 賀祥 | 6.74 | 0.91 | 7.94 | 1.28 | 5.32 | 0.78 | ○ | |
| | 菅沢 | 2.33 | 0.98 | 7.24 | 1.23 | 7.88 | 1.99 | | |
| | 千屋 | 2.87 | 0.86 | 19.43 | 3.73 | 1.31 | 1.01 | | |
| | 河本 | 7.27 | 1.31 | 10.19 | 1.58 | 9.08 | 1.75 | ○ | |
| | 山佐 | 9.51 | 2.19 | 6.15 | 1.87 | 9.12 | 2.10 | ○ | |
| | 高瀬川 | 7.56 | 1.98 | 6.26 | 1.65 | 8.47 | 2.24 | ○ | |
| | 布部 | 4.84 | 0.82 | | | 10.39 | 2.23 | | |
| | 湯原 | 10.72 | 1.75 | 7.91 | 1.88 | 2.60 | 0.85 | | |
| | SMNH10 | 10.20 | 3.24 | 10.29 | 3.29 | 9.26 | 2.92 | ○ | |
| | OKYH07 | | | | | | | | |

に交流電源によるノイズを避けるために 50Hz に至る前にフィルターによる低減がおこなわれていることが多い。今回の解析でそれよりも低周波数で地震動の低減現象が見られることがわかったが、このような検討のためには記録計のフィルターによる影響を懸念しなくても良い高精度の記録が望まれる。最後に、そのような観測体制作りの必要性に触れておきたい。

謝辞：解析に際して、日本大ダム会議（JCOLD）および（独）防災科学技術研究所が公開している強震観測記録を利用した。記して関係諸氏に感謝したい。

参考文献

1) 釜江克宏・入倉孝次郎：1995 年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション、

日本建築学会構造系論文集, 500, 29-36, 1997.

2) 池田隆明・釜江克宏・三輪滋・入倉孝次郎：経験的グリーン関数法による 2000 年鳥取県西部地震における震源のモデル化と強震動シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 21073, 145-146, 2001.

3) JCOLD : *Acceleration Records on Dams and Foundations*, No.2, Japan Commission on Large Dams, CD-ROM, 2002.

4) Kinoshita, S. : Kyoshin Net (K-NET), *Seismological Research Letters*, 69, 309-332, 1998.

5) 青井真・小原一成・堀貞喜・笠原敬司・岡田義光：基盤強震観測網 (KiK-net), *日本地震学会ニュースレター*, 12, No.3, 31-34, 2000.

6) Ingber, L. and B. Rosen : Genetic algorithms and very fast simulated reannealing : A comparison, *Mathematical and Computer Modeling*, 16, 87-100, 1992.

(2003. 6. 27 受付)

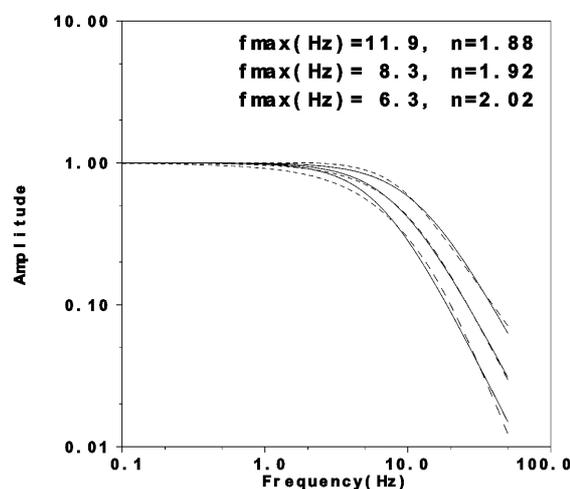
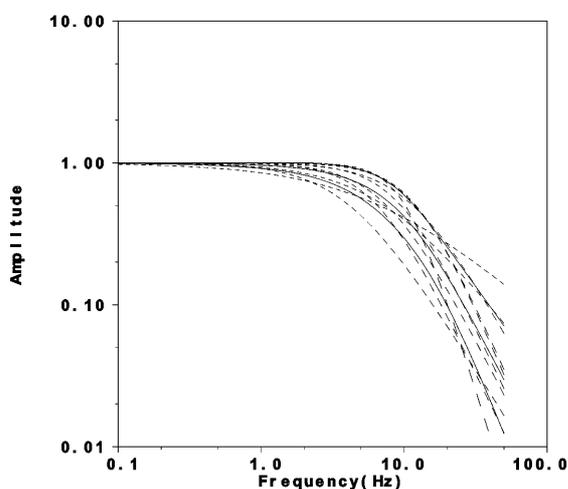


図-4 高周波数遮断特性の平均および平均+標準偏差のフィルター形状へのフィッティング例

A STUDY ON HIGH FREQUENCY CUT-OFF CHARACTERISTICS OF STRONG GROUND MOTION RECORDS OBSERVED AT HARD SITES

Takao KAGAWA, Masato TSURUGI, and Nobuteru SATO

We studied high frequency cut-off characteristics of strong ground motion. We use high quality observed records at hard sites, e.g. dam sites. Assuming a Butterworth type filter with limit frequency (f_{max}) and power factor, these two parameters were derived from Fourier spectrum of observed records. After analyzing the result from view points of site, path, or source effects, an averaged filter model is proposed with its standard deviation.