

震源スペクトル、マグニチュードの地盤増幅度への影響と増幅度評価式の観測値への適用性

西川隼人¹

要旨:本論文ではパーセバルの定理と極値理論に基づいて導いた地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式を用い、地盤増幅度に対する震源スペクトルのパラメータやモーメントマグニチュードの影響を調べた。また、提案した評価式と観測記録による増幅度を比較し、評価式の適用性を検証した。提案した増幅度評価式によって、 f_c や f_{max} の最大地動加速度、最大地動速度の増幅度への影響を調べたところ、 f_{max} による影響は最大地動加速度、 f_c による影響は最大地動速度の方が大きいことが明らかになった。また、モーメントマグニチュード M_w と地盤増幅度の関係を調べた結果、 M_w が大きくなるほど、最大地動速度の増幅度が最大となる f_g が低振動数にシフトした。最後に提案式による増幅度と観測値を比較したところ、最大地動加速度はやや対応が悪いものの、最大地動速度はよく対応した。

キーワード:地盤増幅度、コーナー振動数、高域遮断振動数、震源スペクトル

1. はじめに

これまでの研究で、最大地動加速度、最大地動速度などの地震動指標の地盤増幅度が地震の規模によって変化することが指摘されており^{例えは1)}、紺野ら²⁾や翠川ら³⁾は地震観測記録から地震の規模に応じて表層の平均S波速度と地盤増幅度の関係式を求めている。これらの研究では、地震の規模による地震動の周期成分の違いが地盤増幅度に影響を及ぼしていることが指摘されているが、いずれも定性的な議論にとどまっている。一方、著者⁴⁾は地震規模と密接に関連している震源スペクトルのコーナー振動数 f_c と地盤増幅度の関係を調べるために、パーセバルの定理と極値理論に基づき f_c や震源スペクトルの高域遮断振動数 f_{max} などをパラメータとする増幅度評価式を求めた。評価式によって f_c や f_{max} の地盤増幅度への影響を調べたところ、最大地動速度の方が f_c による影響が大きく、 f_{max} による影響は最大地動加速度の方が大きいことを明らかにしている。提案した増幅度評価式は f_c や f_{max} 、サイト增幅特性のピーク振動数やピーク増幅度を規定するパラメータによって、陽な形で表した式であることから、これらのパラメータを与えることにより解析的に増幅度を求めることが可能である。

ただし、この研究でサイト增幅特性として用いたKanai⁵⁾のスペクトルはピーク振動数よりも高振動数での増幅度の低下が著しく、観測記録で得られるサイト增幅特性と対応が良くない。また、提案式と

地震観測記録による増幅度との対応を調べておらず、提案式が地震動予測において適用可能かどうか確認する必要がある。

そこで本論文ではサイト增幅特性として、Kanai⁵⁾のスペクトルよりも観測値と対応がよいスペクトルを用いて、増幅度評価式を求めるとともに、評価式による増幅度と地震観測記録から求めた増幅度の対応を調べ、本論文で提案する増幅度評価式の適用性を検証する。解析では既往研究に基づき最大地動加速度、最大地動速度の増幅度表評価式を求め、震源スペクトルの形状を支配する f_c と f_{max} の影響を調べる。続いて、地震モーメント、モーメントマグニチュード、 f_c の関係式を利用して、モーメントマグニチュードによる地盤増幅度の変化を見る。この際、 f_{max} の地盤増幅度への影響も調べるが、 f_{max} の地震依存性については議論が別れている^{6), 7), 8)}ので、 f_{max} がモーメントマグニチュードに依存する場合、依存しない場合の両方のケースを考える。最後に防災科学技術研究所 KiK-net の地震観測記録を用いて増幅度を算出し、本研究で求めた評価式による地盤増幅度との対応を調べる。

2. 地震動スペクトルと地盤増幅度の関係

著者は、パーセバルの定理と極値理論からある地点の地表面と解放基盤の地震波の最大振幅の比、いわゆる地盤増幅度が次式で表わされることを導びくとともに、模擬地震波や観測地震波においても関係式が概ね成り立つことを示している^{4), 9)}。

1 舞鶴工業高等専門学校 教育研究支援センター
技術職員

$$F = \frac{A_s}{A_b} \doteq \sqrt{\frac{\int_{\infty}^{\infty} G(f)^2 F_b(f)^2 df}{\int_{\infty}^{\infty} F_b(f)^2 df}} \quad (1)$$

ここで F は地盤増幅度、 A_s は地表波の最大振幅、 A_b は解放基盤の地震波の最大振幅である。また、 $G(f)$ はその地点のサイト增幅特性、 $F_b(f)$ は解放基盤波のフーリエスペクトルである。ここで $F_b(f)$ はBooreの研究¹⁰⁾に従い、次式で表わされるものとする。

$$F_b(f) = CM_0 \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\pi f R}{Q_s V_s}\right) S(f) \quad (2)$$

$F_b(f)$ はS波のみから成り立つものとし、式(2)の C はラディエーションパターンなどをパラメータとする係数、 $1/R$ は幾何減衰に対応する。 R は震源距離である。 M_0 は地震モーメント(dyne・cm)、指指数項は内部減衰に対応し、 Q_s はS波の減衰の程度を表すパラメータ、 V_s は地震発生層のS波伝播速度である。 $S(f)$ は震源スペクトルである。 $S(f)$ は次の ω^2 則に従う式で表されるものとする。

$$S_A(f) = \frac{(2\pi)^2 f_c^2 f^2}{f_c^2 + f^2} \frac{f_{max}}{\sqrt{f_{max}^2 + f^2}} \quad (3)$$

$$S_V(f) = \frac{2\pi f_c^2 f}{f_c^2 + f^2} \frac{f_{max}}{\sqrt{f_{max}^2 + f^2}} \quad (4)$$

$S_A(f)$ は加速度、 $S_V(f)$ は速度の震源フーリエスペクトルである。Fig.1に震源スペクトルの一例を示す。サイト增幅特性 $G(f)$ は著者の研究⁴⁾ではKanai⁵⁾の提案したスペクトルを用いたが、このスペクトルはピーク振動数よりも高振動数側では振幅が急激に低下しており、実際のサイト增幅特性と対応がよくない。そこで今回は次の澤田ら¹¹⁾の提案した式をサイト增幅特性として用いることにした。

$$G(f) = \beta \sqrt{\frac{f_g^4 + 2\alpha f_g^2 f^2 + \alpha^2 f^4}{(f_g^2 - f^2)^2 + 4h_g^2 f_g^2 f^2}} \quad (5)$$

ここで f_g は $G(f)$ のピーク振動数(Hz)、 h_g はピーク振動数の振幅を規定する係数、 α は高振動数側の増幅度を調整する係数、 β は全体の振幅を調整するための係数である。Fig.2に $\beta=1$ 、 $f_g=2$ 、 $h_g=0.1$ の場合の $G(f)$ と既往研究で用いたKanai⁵⁾の提案したスペクトルを示す。同図から分かるようにスペクトルは単一のピークから成っており、今回の検討ではサイト增幅特性が基本モードのみによるものと仮定する。Fig.2を見てわかるようにKanai⁵⁾のスペクトルは f_g よりも高振動数側の増幅度が急激に低下しているが、今回用いた澤田ら¹¹⁾のサイト增幅特性は高振動数側の増幅度を調整でき、より実際のサイト增幅特性に近いも

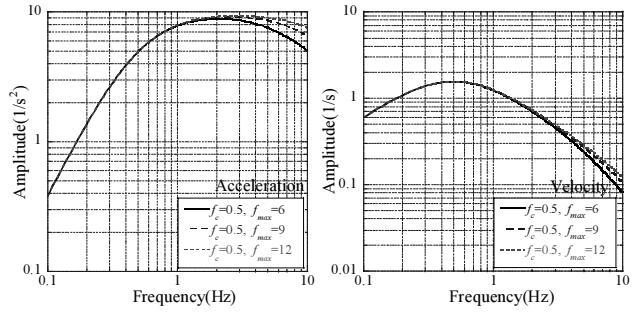


Fig.1 Source spectrum

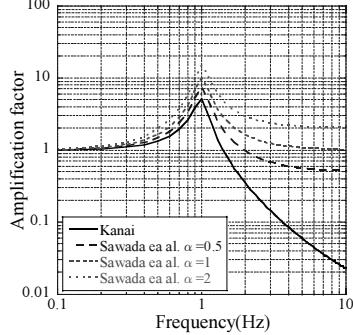


Fig.2 Site amplification effect

のとなっていることが分かる。

同一地点における地表波のスペクトル $F_b(f)G(f)$ と基盤波のスペクトル $F_b(f)$ の C 、 M_0 、 R は同じ値であり、両方の波の最大振幅の比をとることにより、キャンセルされる。また、式(2)の指指数項の Q_s は一般に $Q_0 f^\alpha$ (Q_0 は定数)と表わされるが、ここでは $\alpha=1$ と仮定することにより、この指指数項を定数と考える。これにより、式(1)は以下のように表すことができる。

$$F = \frac{A_s}{A_b} \sqrt{\frac{\int_{\infty}^{\infty} G(f)^2 S(f)^2 df}{\int_{\infty}^{\infty} S(f)^2 df}} \quad (6)$$

3. 地盤増幅度評価式の提案と f_c 、 f_{max} 、 M_0 と地盤増幅度の関係

3. 1 地震動スペクトルのパラメータによる地盤増幅度の表現

2章では地盤増幅度が震源スペクトルとサイト增幅特性によって表現できることを導いた。ここでは震源スペクトルのパラメータである f_c 、 f_{max} の増幅度への直接的な影響を調べるために式(6)に基づき、 f_c 、 f_{max} やサイト增幅特性のパラメータ f_g 、 h_g による増幅度の定式化を試みる。

まず、式(6)右辺分母の無限積分値を留数定理によって加速度、速度について求める。加速度の場合の無限積分値は次のようになる。

$$\int_{\infty}^{\infty} S(f)^2 df = \int_{\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f_c)^4 f^4}{(f_c^2 + f^2)^2} \frac{f_{max}^2}{f_{max}^2 + f^2} df$$

$$= \frac{(2\pi)^5 f_c^4 f_{max}^2 (f_c + 2f_{max})}{4(f_c + f_{max})^2} \quad (7)$$

また、速度の場合は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \int_{\infty}^{\infty} S(f)^2 df &= \int_{\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f_c^2)^2 f^2}{(f_c^2 + f^2)^2} \frac{f_{max}^2}{f_{max}^2 + f^2} df \\ &= \frac{(2\pi)^3 f_c^3 f_{max}^2}{4(f_c + f_{max})^2} \end{aligned} \quad (8)$$

続いて、式(9)で表される式(6)右辺分子の無限積分値を留数定理により求める。

$$\begin{aligned} &\int_{\infty}^{\infty} G(f)^2 S(f)^2 df \\ &= \int_{\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f_c^n)^n f_c^4 f_{max}^2 (f_g^4 + 2\alpha f_g^2 f^2 + \alpha^2 f^4) \beta^2}{(f_c^2 + f^2)^2 (f_{max}^2 + f^2) \{(f_g^2 - f^2)^2 + 4h_g^2 f_g^2 f^2\}} df \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)の n は加速度の場合は 4、速度では 2 である。式(9)の無限積分の計算が煩雑になるので、留数定理による無限積分の公式¹²⁾を用いて値を求めた。

$$\int_{\infty}^{\infty} G(f)^2 S(f)^2 df = \frac{(2\pi)^{n+1} f_c^4 f_{max}^2 \beta^2 M}{2\Delta} \quad (10)$$

ここで

$$\begin{aligned} \Delta &= \sum_{i=1}^7 f_i & a_1 &= 2f_c + 2h_g f_g + f_{max} \\ a_2 &= 2h_g f_g f_c^2 + 2f_c f_g^2 + f_{max} f_c^2 + 4h_g f_g f_c f_{max} + f_{max} f_g^2 \\ a_3 &= f_c^2 + 4h_g f_g f_c + f_g^2 + 2f_c f_{max} + 2h_g f_g f_{max} \\ a_4 &= -(f_c^2 f_g^2 + 2h_g f_{max} f_g f_c^2 + 2f_{max} f_c f_g^2) \\ a_5 &= f_{max} f_g^2 f_c^2 \\ f_1 &= -f_{max}^2 f_c^4 f_g^4 & f_2 &= -2a_1 a_4 f_{max} f_c^2 f_g^2 \\ f_3 &= a_2 a_3 f_{max} f_c^2 f_g^2 & f_4 &= a_2^2 a_4 & f_5 &= -a_1^2 a_4^2 \\ f_6 &= -a_1 a_3^2 f_{max} f_c^2 f_g^2 & f_7 &= -a_1 a_2 a_3 a_4 \end{aligned}$$

M は加速度では

$$\begin{aligned} M &= -\alpha^2 (a_4 a_5 + a_1 a_4^2 + a_3 a_5 + a_2 a_3 a_4) \\ &- 2\alpha f_g^2 (a_3 a_5 + a_2 a_4) - f_g^4 (a_5 + a_1 a_4) \end{aligned} \quad (11)$$

M は速度では次のようになる。

$$\begin{aligned} M &= -\alpha^2 (a_3 a_5 + a_2 a_4) - 2\alpha f_g^2 (a_5 + a_1 a_4) \\ &- f_g^4 (a_2 - a_1 a_3) \end{aligned} \quad (12)$$

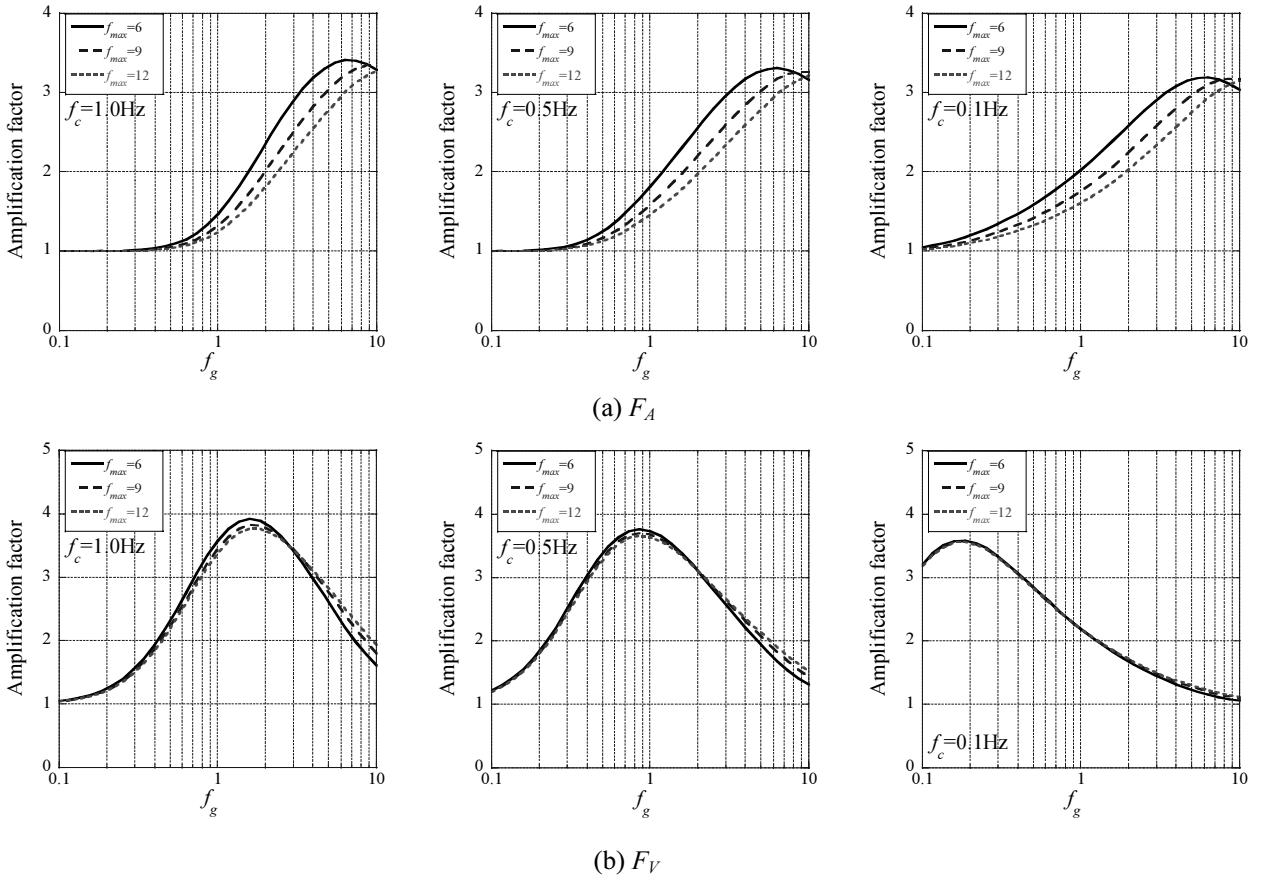
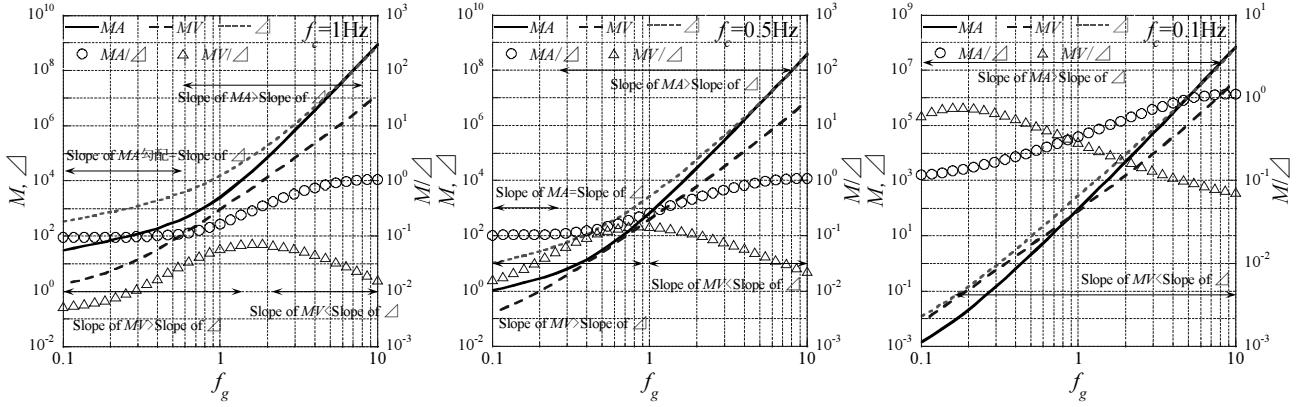
加速度、速度に対する M (以降、 M_A 、 M_V とする)を見ると、 M_A の第 2 項と M_V の第 1 項の括弧内の係数と

M_A の第 3 項と M_V の第 2 項括弧内の係数が同じであるが、同じ係数に乗じられている項を見ると、 M_A の方が f_g の次数が高い。 M 全体では加速度は f_g の 7 次の関数であるのに対し、速度は 5 次の関数であり、加速度の方が f_g に対する変化が敏感である。また、 f_c 、 f_{max} についても加速度の方(f_c 6 次、 f_{max} 3 次)が速度(f_c 4 次、 f_{max} 2 次)に比べて次数が高い。

3. 2 f_c 、 f_{max} と地盤増幅度の対応

ここでは f_c 、 f_{max} と式(6)～(12)によって求めた最大地動加速度と最大地動速度の地盤増幅度の対応を調べる。増幅度を求める際に必要なパラメータ f_c 、 f_{max} 、 β 、 f_g 、 h_g 、 α のうち、 h_g は 0.1、 α と β は 1 に固定し、 f_c 、 f_{max} 、 f_g の変化に伴う増幅度の変化を見た。Fig.3 に f_c 、 f_{max} を変化させた場合の f_g と地盤増幅度の対応を示す。 F_A を見ると、 f_c が小さくなるほど f_g が低振動数の場合の増幅度が大きくなる傾向にあるが、高振動数で増幅度が最大となるという特徴は変わらない。 f_{max} の影響を見ると、値が小さくなるほど、増幅度が最大となる f_g が低振動数側にシフトしている。 F_V は f_c による変化が顕著であり、 f_c が小さくなるほど 増幅度の大きい振動数が低振動数側にシフトしている。また、 f_{max} による増幅度は F_A に比べて小さく、 F_A と F_V では f_c 、 f_{max} による影響が大きく異なっている。

このような f_g に対する F_A と F_V の違いの要因を式(7)～(12)から詳しく調べることにする。ただし、基盤スペクトルに対応する式(7)、(8)には f_g は含まれていないので、 f_g が含まれる地表スペクトルに対応する式(10)の Δ 、 M_A 、 M_V から F_A と F_V の違いの要因を見ることがある。Fig.4 に f_{max} を 9Hz に固定し、 f_c を変化させた場合の M_A 、 M_V 、 Δ 、 M_A/Δ 、 M_V/Δ の対応を示す。同図を見ると、 M_A と Δ は M_V に比べて f_c による変化が大きいことが分かる。 M_A と Δ の関係を見ると、 f_g に対する勾配は M_A が Δ よりも大きい、あるいは同じくらいであるので、 M_A/Δ は f_g についてフラットか右肩上がりの関係になっている。 f_c が小さくなるほど、 M_A が Δ より勾配の大きい領域が広がっており、ほとんどの f_g で M_A/Δ が右肩上がりの関係になっている。一方、 M_V は f_g に対する勾配が Δ よりも小さい区間があり、そのような区間では M_V/Δ は f_g に対して右肩下がりとなっている。 M_A とは逆に f_c が小さくなるほど、 M_V が Δ よりも勾配が小さい区間が広がっていき、対象とする f_g の大部分で M_V/Δ が右肩下がりとなる。以上の特性は M_A と Δ が M_V に比べて f_c と f_g の次数が高いことに起因する。また、 f_{max} の次数も M_A が M_V より大きく、そのため f_{max} による増幅度の変化は F_A が F_V よりも大きい。ただし、 f_{max} の次数は f_c に比べて小さく、また、値の変動も小さいことから、 f_{max} の増幅度への影響は f_c と比べると小さい。

Fig.3 Amplification factor for PGA and PGV obtained by eq.(6)~(12)Fig.4 Relationship between f_c and M_A , M_V , Δ

3.3 地盤増幅度の Mw 依存性

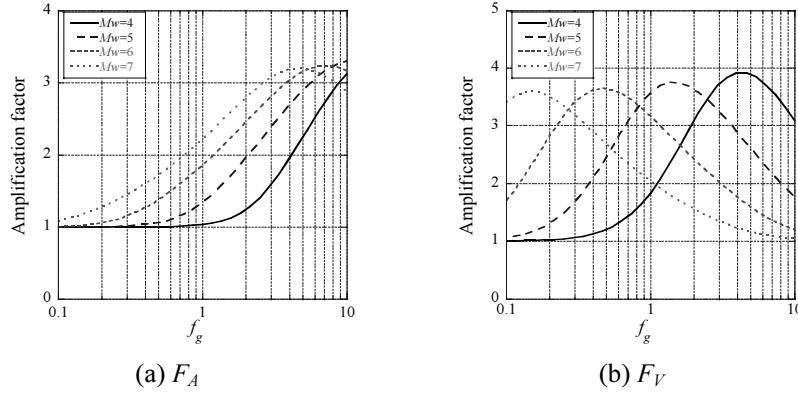
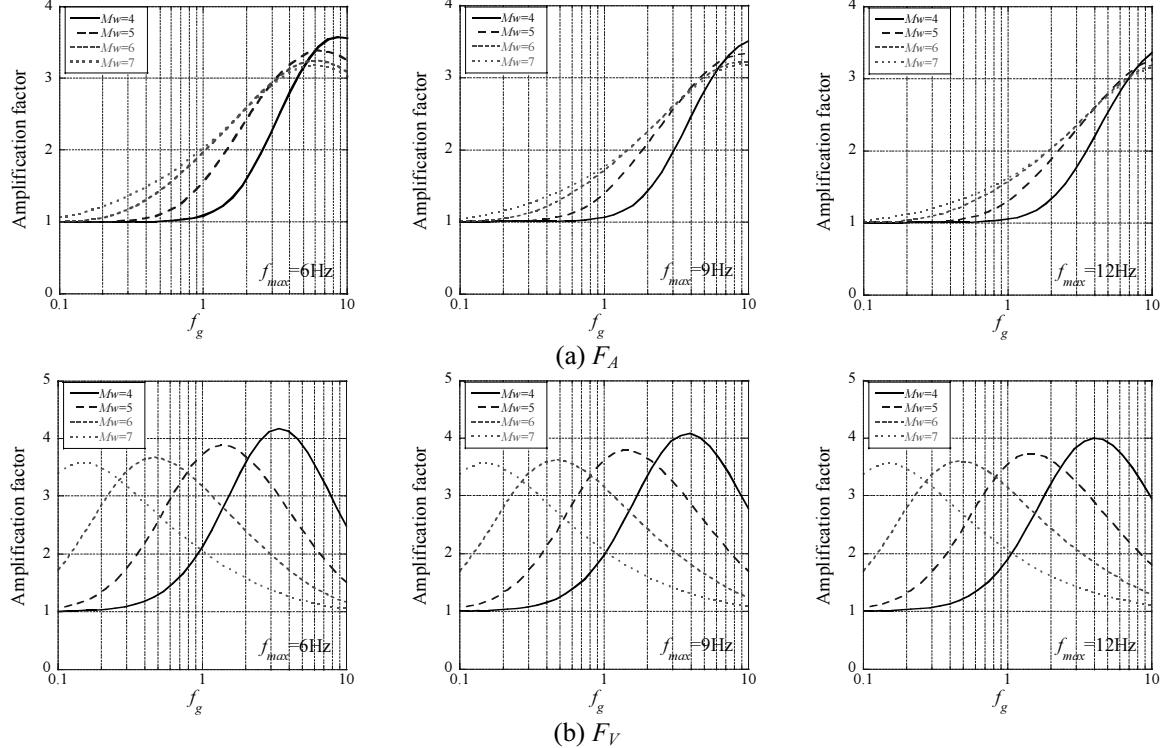
3.2で震源スペクトルのパラメータ f_c , f_{max} の地盤増幅度への影響を調べたが、地震規模と地盤増幅度の関係を調べる上ではマグニチュードと地盤増幅度の関係を調べる方が分かりやすい。そこで、ここではモーメントマグニチュード M_w による地震増幅度の変化を調べることにする。震源スペクトルのコーナー振動数 f_c は地震の規模に依存し、地震観測記録に基づく研究で f_c と M_0 に相関関係があることが報告されている（例えば^{13), 14)}。本研究では次の f_c と M_0 の関係式¹³⁾を用いて検討を進める。

$$f_c = 10^{\{(23.38 - \log M_0)/3\}} \quad (13)$$

M_0 は地震モーメント (dyne · cm) である。ただし、地震規模を表す際にはマグニチュードを用いることが多いので、 M_w と M_0 の関係式¹⁵⁾を介して、次に示す f_c と M_w の関係式を用いた。

$$f_c = 10^{\{(7.28 - 1.5M_w)/3\}} \quad (14)$$

f_{max} は地震規模に依存するかどうか意見が分かれているので、依存する場合としない場合の両方のケースを考えて検討を行う。 f_{max} が地震規模に依存した場合、次に示す地震モーメントとの関係式を用いて検討を行う¹⁶⁾。

Fig.5 Relationship between f_g and amplification factor case f_c and f_{max} depend on M_w Fig.6 Relationship between f_g and amplification factor case f_c depends on M_w

$$f_{max} = 7.31 \times 10^3 \times M_0^{-0.12} \quad (15)$$

また、 M_w と M_0 の関係式¹⁵⁾により、 f_{max} と M_w は次式のように表すことができる。

$$f_{max} = 85.49 \times 10^{-0.18M_w} \quad (16)$$

先に求めた提案式によって求めた f_g と増幅度の対応を求める。 h_g は0.1、 α は1、 β は1である。Fig.5, 6に f_c と f_{max} が M_w に依存する場合、 f_c が M_w に依存する場合の f_g と増幅度の対応を示す。 f_c による変化を見ると、 F_A 、 F_V ともに M_w が大きくなるほど、低振動数側が相対的に大きくなっているが、 F_V の方が M_w による変化が大きい。 f_{max} が M_w に依存しない場合を見ると、 M_w に依存する場合と同じく、 M_w が大きくなるほど、低振動数側の増幅度が相対的に大き

くなっている。 f_{max} による増幅度の違いを見ると、 F_A は f_{max} が小さいほど、増幅度が最大となる f_g が低振動数側にシフトしている。一方、 F_V は $M_w=4$ の場合は f_{max} による増幅度の変化が少し見られるが、それよりも大きい M_w では増幅度にあまり違いは見られない。

4. 提案式と観測記録による地盤増幅度の比較

2, 3章では地震動スペクトルのパラメータと地盤増幅度の関係を導き、提案した増幅度評価式に基づき震源スペクトルのパラメータ f_c 、 f_{max} や M_w が地盤増幅度に及ぼす影響を調べた。本章では提案する評価式による増幅度と、KiK-netで得られた地震観測記録を用いて求めた増幅度を比較し、提案式の適用性を検証する。また、 M_w と提案式および観測記録による地盤増幅度の対応を見る。本論文で求めた増幅度評価式は地表と解放基盤面を対象としたものであるが、

ここでは地表と地中の基盤面に対してそのまま評価式を適用する。

観測記録による地盤増幅度は地表と地中の加速度時刻歴波形の水平2成分最大値の大きい方の値の比と定義した。今回、6つのKiK-net観測点を対象に地盤増幅度を評価する。これらの観測点の記録は以下の条件のもと選定した。

- ・ $M_w \geq 4.0$ の地震の記録
- ・地表と地中の水平成分いずれも最大加速度が1cm/s²以上の記録
- ・地盤の非線形化の影響を避けるために最大加速度が100cm/s²未満の記録

M_w はF-net¹⁷⁾による値を用いた。Table 1に対象としたKiK-net観測点の記録の諸元を示す。増幅度は先に求めた式を用い、 f_c と f_{max} が M_w に依存するものと仮定して式(14), (16)から計算し、増幅度の算出に用いた。各観測点のサイト增幅特性のパラメータ f_g , h_g , α , β は式(5)によるサイト增幅特性と観測記録から求めた地表記録と地中記録のフーリエスペクトル比(以降、観測スペクトル比)が最もフィットする場合の値とし、以下の関数が最小となるようにして求めた。

$$\text{Error} = \sum \{\log_{10} G_{obs}(f) - \log_{10} G(f; f_g, h_g, \alpha, \beta)\}^2 \quad (17)$$

$G_{obs}(f)$ は観測スペクトル比であり、S波到達から10秒間を切り出して求めた。波形を切り出す際は両端に5%のコサインテーパーを付けたウインドウを用い、フーリエスペクトルはバンド幅0.4HzのParzen Windowによって平滑化した。サイト增幅特性とのフィッティングには観測スペクトル比の算術平均値を用いた。 $G(f; f_g, h_g, \alpha, \beta)$ は式(5)によるサイト增幅特性である。また、式(17)は0.1~20Hzを対象とした。

Fig.7に観測記録による増幅度(観測値)の提案式による増幅度(計算値)の対応、Fig.8に対象とした6観測点の観測スペクトル比とサイト增幅特性、また、Table 2にフィッティングにより得られたサイト增幅特性のパラメータ、増幅度の観測値と計算値の常用対数値の相関係数を示す。Table 2のVsは地中地震計が設置されている層でのS波速度である。Table 2, Fig.7を見ると F_V はKiK-net石下(IBRH10)では相関が低いが、それ以外の観測点では相関係数が0.65~0.83である。KiK-net石下の相関係数が低い要因としては観測スペクトル比と式(5)によるサイト增幅特性のフィッティングが悪いことが考えられる。 F_A は相関係数が0.16~0.62であり、 F_V と比べて相関係数が低い。 F_A の観測値と計算値の対応が悪い要因として、 F_A への影響が大きい f_{max} が M_w に依存すると仮定

したこと、地震によって高域遮断フィルターの形状が異なることが指摘されている¹⁸⁾が、地震によらず式(3)を用いたことが考えられる。

続いて、Fig.9の M_w と地盤増幅度の観測値、計算値の対応を見ると、KiK-net石下を除き、 F_V の方が M_w に対する依存性が強く、 M_w の増大に伴う増幅度の低下が顕著である。また、ばらつきはあるものの提案式による増幅度は、 M_w に対する増幅度観測値の傾向を概ね表していることが分かる。

以上の地盤増幅度の観測値と計算値の比較から、 F_A は改善の余地があるが、 F_V については観測値と計算値の対応がよいことから、地震観測記録や地盤情報からサイト增幅特性が計算できる環境であれば、本論文で提案した F_V の評価式を地震動予測に活用できる可能性がある。ただし、今回、観測値と計算値の比較対象とした地震観測点は少ないことから、今後、より多くの観測点を対象に本論文で提案した増幅度評価式の適用性を検証する必要がある。また、 F_A の評価式については高域遮断フィルターの形状を今回用いた式以外のものを用いるなどして、観測値と計算値の対応の向上をはかる必要がある。

5. まとめ

本論文では著者が先に求めた地盤増幅度の評価式を改良するとともに、評価式による増幅度と観測記録による値を比較し、提案した増幅度評価式の適用性を調べた。サイト增幅特性を改良して求めた増幅度評価式によって、震源スペクトルのコーナー振動数 f_c や f_{max} による最大地動加速度、最大地動速度の地盤増幅度への影響を調べた。その結果、 f_{max} による影響は最大地動加速度、 f_c による影響は最大地動速度の地盤増幅度の方が大きいことが明らかになった。また、モーメントマグニチュードによる地盤増幅度への影響は、最大地動速度の方が大きいことが分かった。

最後に本研究で提案した増幅度評価式の地震動予測への適用性を調べるために、観測記録と提案式による地盤増幅度を比較した。その結果、 F_V は全体的に見て観測値と計算値がよく対応しているが、 F_A は観測値と計算値の対応がよくなかった。この要因の一つとして F_A に対して影響の大きい高域遮断フィルターを地震によらず同じものを用いたことが考えられる。今後は高域遮断フィルターの形状を今回用いた式以外のものを用いるなどして、観測値と計算値の対応の向上をはかる予定である。また、今回、観測値と計算値の比較対象とした地震観測点が少ないことから、今後、より多くの観測点を対象に本論文で提案した評価式の適用性を検証する予定である。

Table 1 Parameters for KiK-net sites

Code	Term	V_s (m/s)	M_w	Number
FKSH01	2000/7/21-2011/4/23	2600	4.4-7.8	37
IBRH10	2000/9/9-2011/4/2	2350	4.0-7.1	105
IWTH03	2000/7/30-2011/4/1	2800	4.0-7.9	70
IWTH04	2000/7/30-2011/3/28	2300	4.0-7.9	99
IWTH05	2000/7/21-2011/4/12	2600	4.0-7.9	118
IWTH22	2001/4/3-2011/4/11	2780	4.0-7.9	85

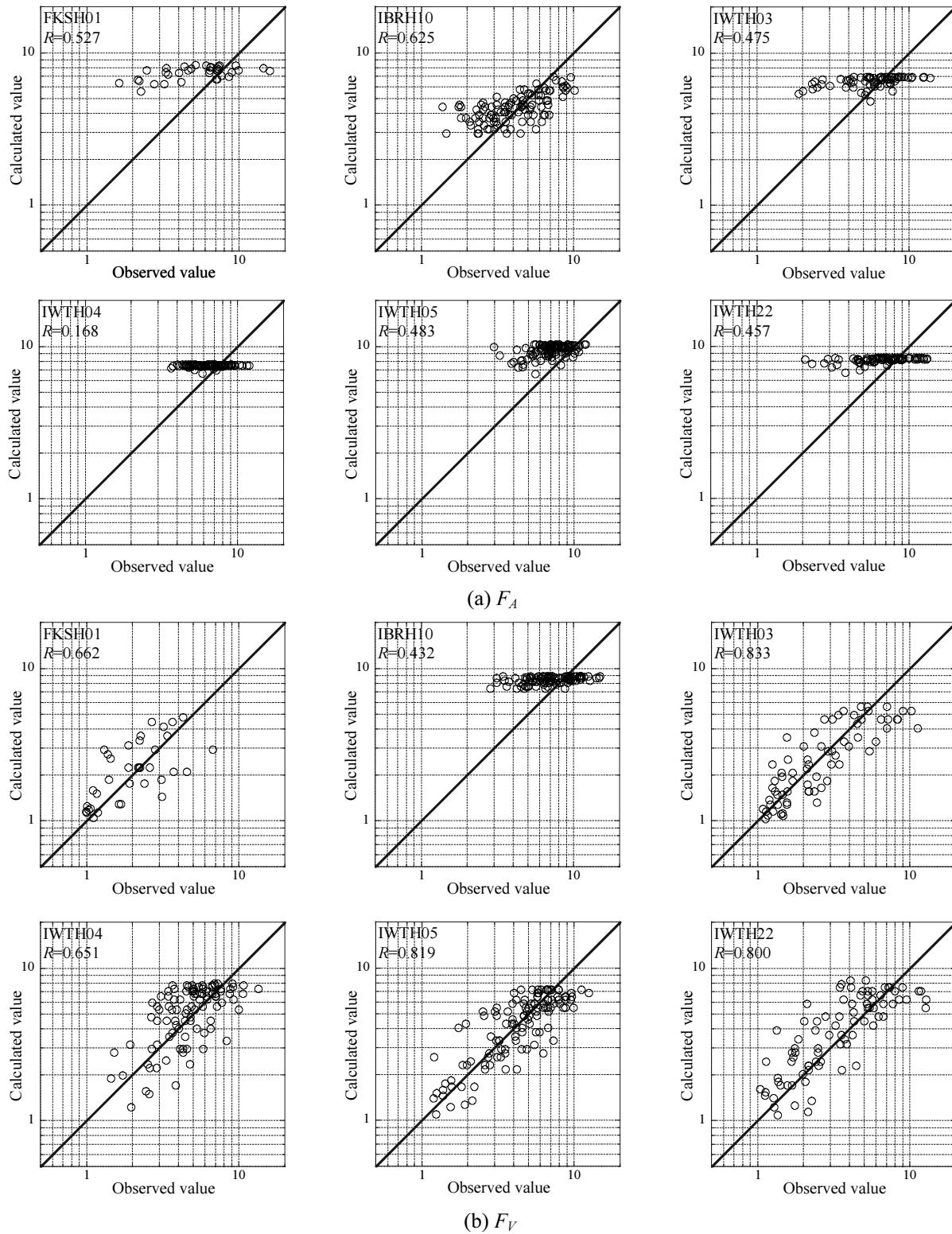


Fig.7 Comparison observed amplification factor with calculated value

Table 2 Parameters of eq.(5), correlation coefficient between observed amplification factor and calculated value

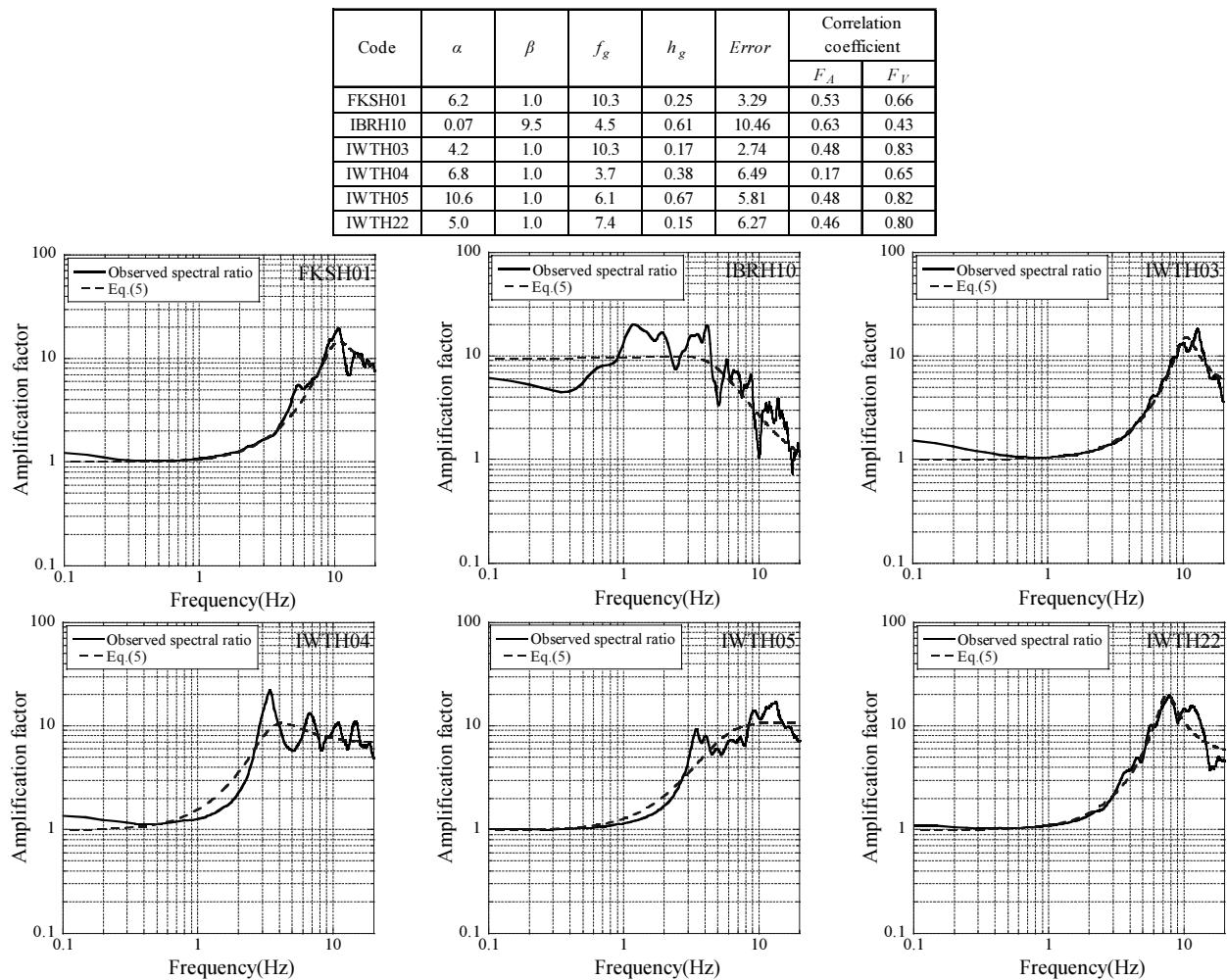
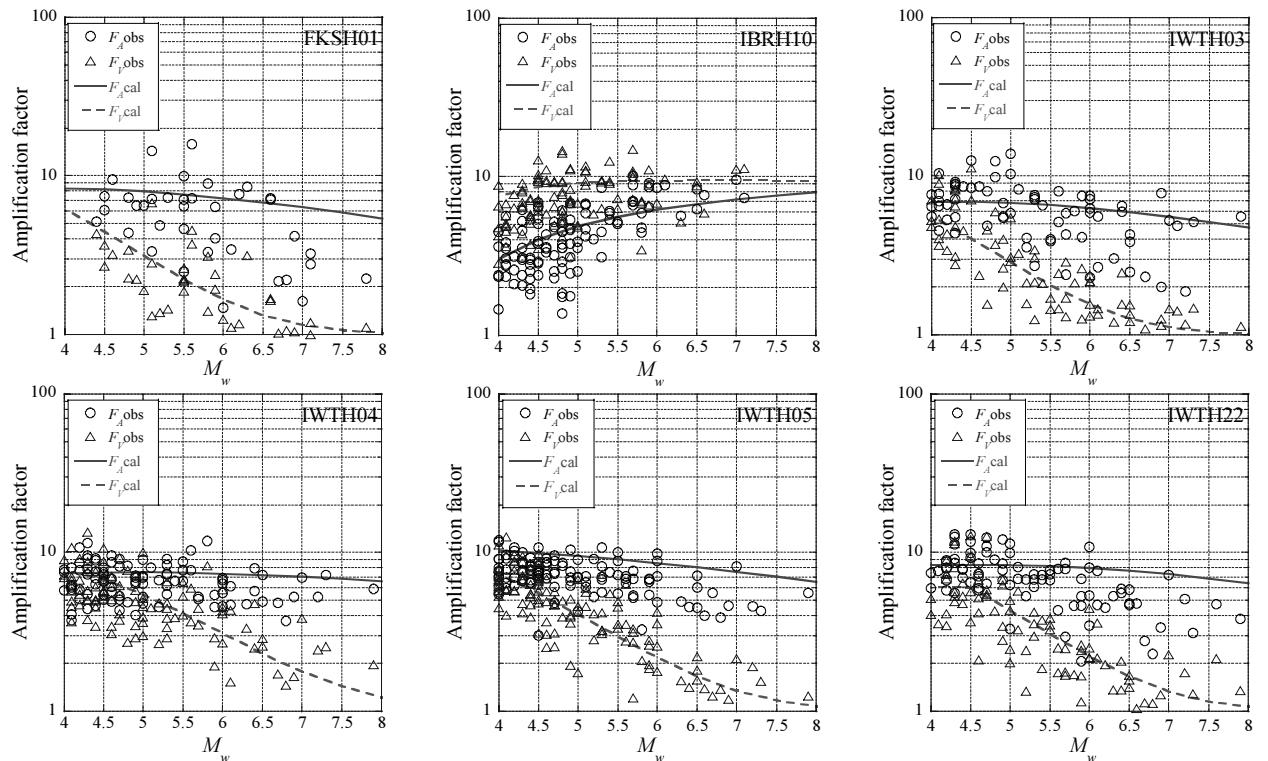


Fig.8 Site amplification effect obtained by eq.(5) and observed spectral ratio

Fig.9 Relationship between M_w and amplification factor

謝辞：本論文の作成に当たって、防災科学技術研究所 KiK-net の地震波形を使用させて頂きました。記してお礼申し上げます。

参考文献：

- 1) 片岡俊一, 山本博昭 : 地震動記録に基づく青森県内の強震観測点のサイト増幅度, 日本地震工学会論文集, Vol. 7, No. 2 (特集号), pp.110-129, 2007.
- 2) 紺野克昭, 鈴木貴博, 鎌田泰広, 長尾 豪 : 横浜市高密度強震ネットワーク観測点における微動を用いた地盤の平均S波速度の推定, 土木学会論文集A, Vol. 63, No. 4, pp.639-654, 2007.
- 3) 翠川三郎, 駒澤真人, 三浦弘之 : 横浜市高密度強震計ネットワークの記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度との関係, 日本地震工学会論文集, Vol. 8, No. 3, pp.19-30, 2007.
- 4) 西川隼人, 宮島昌克 : 地震動スペクトルのパラメータによる地盤増幅度の表現と地震規模依存性の評価, 土木学会地震工学論文集, Vol. 31, pp.20-29, 2010.
- 5) Kanai, K. : Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground, *Bull. Earthquake Res. Int., University of Tokyo*, Vol.35, pp.309-325, 1957.
- 6) 小林喜久二, 植竹富一, 真下 貢, 小林啓美 : 堆積地盤の速度構造を事前情報としたスペクトルインバージョンによる震源・伝播経路・地盤減衰特性評価法, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.289-294, 2002.
- 7) 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のラディエーションパターン及びfmaxの評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 556, pp.25-34, 2002.
- 8) 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.
- 9) 西川隼人, 池本敏和, 宮島昌克 : 関西地方の地震観測記録による自治体観測点を想定したサイト特性推定手法の検討, 土木学会地震工学論文集, Vol. 30, pp.118-127, 2009.
- 10) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, pp.1865-1894, 1983.
- 11) 澤田 勉, 平尾 潔, 辻原 治, 三神 厚 : 最大地動の距離減衰式に基づく工学的基盤地震動のシミュレーション手法, 土木学会論文集, No.682, pp.311-322, 2001.
- 12) Hubert, M. J., Nathaniel, B. N. and Ralph, S. P. : Theory of servomechanisms, Dover Publications Inc.; New edition, pp.369-370, 1947.
- 13) Takemura, M., T. Ikeura, and T. Uetake: Characteristics of source spectra of moderate earthquakes in a subduction zone along the pacific coast of the southern Tohoku district, Japan, *J. Phys. Earth*, Vol.41, pp.1-19, 1993.
- 14) 加藤研一 : K-NET強震記録に基づく1997年鹿児島県北部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.543, pp.61-68, 2001.
- 15) Hanks, T., and Kanamori, H. : A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No. B5, pp.2348-2350, 1979.
- 16) Faccioli, E. : A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, *Geophysical Monograph*, 37, Maurice Ewing, AGU, Vol.6, pp.297-309, 1986.
- 17) 独立行政法人 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網F-net, <http://www.fnet.bosai.go.jp/>
- 18) 鶴来雅人, 香川敬生, 入倉孝次郎 : 西日本で発生するスラブ内地震の観測記録に見られる高周波数領域におけるスペクトル低減特性に関する検討, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3826-3833, 2010.

(2012. 1. 10 受付)

INFLUENCE OF SOURCE SPECTRUM AND EARTHQUAKE MAGNITUDE FOR AMPLIFICATION FACTOR AND APPLICABILITY OF EVALUATION FORMULA TO OBSERVED VALUE

Hayato NISHIKAWA

ABSTRACT : The study examine influences of parameters of source spectrum and moment magnitude for amplification factor based on a relation between spectrum of earthquake motion and site amplification factor derived by Parseval's theorem and extreme value theory. The applicability of the proposed formula is examined in comparison of the amplification factor estimated by the formula with observed one. The influences of corner frequency f_c and cut off frequency f_{max} on amplification factors for PGA and PGV are investigate using the proposed formula. We clarified that influence of f_c for PGV is larger than that on PGA and f_{max} clearly affects PGA rather for PGV . A relation between M_w and amplification factor is also examined, the lager M_w become, the lower f_g of maximum amplification for PGV shifted. Finally, comparison of theoretical and observed amplification factors shows that their amplification factors for PGV have a good agreement rather than PGA .

Key Words : Amplification factor, Corner frequency, Cut off frequency, Source spectrum