



## 微動 H/V の 1 次ピークの振動数と振幅に基づいた地盤増幅度評価式の検討

西川隼人<sup>1)</sup>, 野口竜也<sup>2)</sup>, 宮島昌克<sup>3)</sup>, 香川敬生<sup>4)</sup>

- 1) 正会員 福井工業大学工学部建築土木工学科, 准教授 博士 (工学)  
e-mail : nishikawa@fukui-ut.ac.jp
- 2) 正会員 鳥取大学大学院工学研究科, 助教 博士 (工学)  
e-mail : noguchit@cv.tottori-u.ac.jp
- 3) 正会員 金沢大学理工研究域, 教授 工博  
e-mail : miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp
- 4) 正会員 鳥取大学大学院工学研究科, 教授 博士 (理学)  
e-mail : kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

### 要 約

本研究では微動H/Vにより簡便かつ精度良く最大地動速度の地盤増幅度を評価することを目的として, 基盤への入射スペクトルの特性を考慮した経験的な地盤増幅度評価式を求めた. まず, 著者らの提案した理論地盤増幅度評価式をもとにサイト増幅特性の1次ピーク振動数と振幅をパラメータとする経験式を導き, 地盤増幅度を精度良く評価できることを示した. 続いて, 地震観測記録から評価した地盤増幅度を対象にサイト増幅特性のパラメータを用いた地盤増幅度評価式を求めた結果, 地盤増幅度の観測値と評価値の間に高い相関が得られた. 最後にサイト増幅特性の代わりに微動H/Vを用いた経験的な地盤増幅度評価式を求めたところ, 既往研究で用いられているタイプの経験式に比べて, 高い精度で地盤増幅度を評価できることを明らかにした.

キーワード: 地盤増幅度, 最大地動速度, 微動H/V, ピーク振動数, ピーク振幅

### 1. 序論

地震動を構成する重要な要素の一つであるサイト特性(後述するサイト増幅特性と地盤増幅度を含む地震動の増幅特性)は空間的に狭い範囲でも変動することから, 正確な地震動予測において精度の高いサイト特性評価が必要不可欠である. 地震動予測において対象となることが多い最大地動速度の地盤増幅度(最大振幅の基盤から地表までの増幅特性)に対して複数の経験的な評価式が提案されており, 評価式のパラメータとして平均 S 波速度, サイト増幅特性(振動数領域の基盤から地表までの増幅特性), 常時微動の水平・鉛直スペクトル比(微動 H/V)のピーク振動数などが用いられている<sup>1)-8)</sup>. この中で地盤の微動 H/V はコントラストが明瞭な地盤ではピーク振動数が S 波伝達関数(地盤情報から重複反射理論などにより計算される理論増幅特性), サイト増幅特性のピーク振動数と対応することが指摘されており<sup>9)-13)</sup>, 地震観測点や地盤情報未知点のサイト特性を知ることが可能である. また, 測定や解析が容易なことから, 広範囲, 高密度な地盤増幅度評価において有用と思われるが, 既往の微動 H/V のピーク振動数を用いた地盤増幅度評価式<sup>14), 15)</sup>では, 地盤増幅度の評価精度は必ずしも高くない.

著者らの一部が求めた理論地盤増幅度評価式による検討では, 基盤への入射スペクトルの特性により, サイト増幅特性のあるピーク振動数を境に最大地動速度の地盤増幅度が増加から低減に転じる<sup>16)</sup>が, 既往研究の地盤増幅度評価式<sup>14), 15)</sup>は地盤増幅度の常用対数値が微動 H/V のピーク周期の常用対数値に対して, 単調増加する形で表されており, 評価精度低下の一要因になっていると考えられる. 著者らが明らかにした, 地盤増幅度への基盤入射波のフーリエ振幅スペクトルの影響を微動 H/V のピーク振動数を用いた経験式に考慮することにより, 地盤増幅度の評価精度が向上する可能性がある.

また、経験的な地盤増幅度評価式においてあまり利用されていない微動 H/V のピーク振幅もサイト特性との関連が考えられることから、地盤増幅度の評価精度向上を目的として、ピーク振幅を地盤増幅度評価式に利用した。

本研究では微動H/Vの1次ピーク振動数とピーク振幅のみから簡便かつ従来<sup>14) 15)</sup>よりも高精度に最大地動速度の地盤増幅度を評価することを目的として、著者らの提案した理論地盤増幅度評価式<sup>16)</sup>の特徴を取り入れた経験的な地盤増幅度評価式を検討した。なお、経験式の元となる理論式はサイト増幅特性のピーク振動数、ピーク振幅をパラメータとしていることから、まず、サイト増幅特性を対象とした場合の地盤増幅度評価式を求めた。続いて、サイト増幅特性の代替として、微動H/Vを用いることにより、微動H/Vのピーク振動数とピーク振幅をパラメータとする地盤増幅度評価式を求めた。経験式の評価は著者らの研究<sup>15)</sup>で地震観測記録から地盤増幅度を評価した中国地方と兵庫県地震観測点を対象に行った。

## 2. 地盤増幅度評価式の導出

### 2.1 理論地盤増幅度評価式の簡略化

著者の一部は、パーセバルの定理と極値理論に基づき、ある地点の地表面と S 波速度 = 2~3 km/s 程度の解放地震基盤における地震波の最大加速度や最大速度などの最大振幅の比である地盤増幅度が以下の式で表わされることを導くとともに、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<sup>16) 17)</sup>。

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

ここに  $F$  は地盤増幅度、 $A_s$  は地表波の最大振幅、 $A_b$  は解放地震基盤の地震波（以降、基盤波と呼ぶ）の最大振幅である。また、 $G(f)$  は対象地点のサイト増幅特性、 $F_b(f)$  は基盤波のフーリエ振幅スペクトル、 $f$  は振動数 (Hz) である。

$F_b(f)$  は Boore の研究<sup>18)</sup>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、 $R$  は震源距離であり、 $1/R$  は幾何減衰に対応する。ラディエーションパターン係数は地表と解放地震基盤で同一であり、全方位の平均値を考えた。 $M_0$  は地震モーメント、指数項は内部減衰と散乱減衰に対応し、 $Q_s$  は S 波の  $Q$  値 (Quality factor)、 $V_s$  は地震発生層の S 波伝播速度、 $S(f)$  は震源スペクトルである。

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  $C$ 、 $M_0$ 、 $R$  は同じ値であるので、両スペクトルの比をとることにより、これらはキャンセルされる。また、式(2)の指数項の  $Q_s$  は一般的に  $Q_0 \times f^\gamma$  ( $Q_0$  は定数) と表わされる<sup>(例えば 19)</sup>が、既往研究<sup>(例えば 20, 21)</sup>で  $Q_s$  が  $Q_0 \times f$  で表されているケースがあることから、ここでは  $\gamma = 1$  と仮定することにより、式(2)の指数項を振動数によらない定数と考える。以上の条件、仮定のもと、最大地動速度を対象とした場合について、式(1)を整理すると以下のようなになる。

$$F_V = \frac{A_s}{A_b} \cong \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G(f)^2 S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df}} \quad (3)$$

$F_V$  は最大地動速度の地盤増幅度である。式(3)の  $S(f)$  は速度の震源スペクトルであり、次の  $\omega^2$  則に従う式に高域遮断フィルターを考慮したものとした。

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

右辺第1項が $\omega^{-2}$ 則モデル、第2項が高域遮断フィルターに対応する。 $f_c$ はコーナー振動数、 $f_{max}$ は高域遮断振動数である。

サイト増幅特性 $G(f)$ は著者らの研究<sup>17)</sup>で用いた単一のピークを有する関数を合成したものをを用いた。なお、後ほど地震観測記録から求めたサイト増幅特性と区別するために今後、疑似サイト増幅特性 $G_p(f)$ と呼ぶ。合成した疑似サイト増幅特性は次式で表される。

$$G_p(f) = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^{N_g} G_i^2(f)} \quad (5)$$

$i$ は疑似サイト増幅特性のモード次数、 $N_g$ は $G_i(f)$ の数である。また、 $G_i(f)$ は次式で表される。

$$G_i(f) = \sqrt{\frac{4\alpha_i h_i^2 f_i^2 f^2}{(f_i^2 - f^2)^2 + 4h_i^2 f_i^2 f^2}} \quad (6)$$

ここに $\alpha_i$ は振幅を調整する係数、 $f_i$ は疑似サイト増幅特性のピーク振動数、 $h_i$ はピーク振幅の形状を規定する係数である。

式(3)に式(5)を代入すると以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} F_V &= \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{1 + \sum_{i=1}^{N_g} G_i^2(f)\} S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df}} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{1 + G_1^2(f) + \dots + G_{N_g}^2(f)\} S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df}} \\ &= \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{S(f)^2 + G_1^2(f)S(f)^2 + \dots + G_{N_g}^2(f)S(f)^2\} df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df}} \quad (7) \end{aligned}$$

ここに $G_i(f)$ に対する地盤増幅度 $F_i$ を次のように定義する。

$$F_i = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} G_i^2(f) S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df}} \quad (8)$$

式(8)を式(7)に代入すると、以下のようになる。

$$F_V = \sqrt{1 + F_1^2 + \dots + F_{N_g}^2} \quad (9)$$

既往研究<sup>17)</sup>では式(8)の無限積分を留数定理により求めており、解析的に地盤増幅度を評価できるが、評価式が非常に長く計算が煩雑になる。

理論的な地盤増幅度評価式を簡略化するために、地震の規模が大きくなると速度震源スペクトルの高振動数成分が相対的に小さくなり、最大地動速度の地盤増幅度に対する高域遮断フィルターの影響が小さくなる特性<sup>16)</sup>を利用し、式(4)の高域遮断フィルターを除いた式(10)を震源スペクトルとした。なお、鶴来他は明確ではないが地震の規模が大きいほど $f_{max}$ が小さくなる傾向が見られることを指摘しており<sup>22)</sup>、地震規模が大きい場合、 $f_{max}$ の低下により高振動数成分が小さくなる可能性も考えられる。本論文で対象とする地震規模( $M_{JMA} = 5.0 \sim 7.3$ )では速度震源スペクトルの高振動数の相対振幅が小さい

ことから、速度震源スペクトルとして式(10)を用いても問題ないと仮定した。この仮定の妥当性は3章の高域遮断フィルターの有無の地盤増幅度への影響の評価において調べた。

$$S(f) = \frac{2\pi f_c^2 f}{f_c^2 + f^2} \quad (10)$$

式(10)で表される速度震源スペクトルの自乗値の無限積分値は次のようになる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(f)^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f)^2 f_c^4}{(f_c^2 + f^2)^2} df = 2\pi^3 f_c^3 \quad (11)$$

また、地表スペクトルの自乗値の無限積分値は次式で与えられる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} G_i^2(f) S(f)^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2\pi f)^2 f_c^4}{(f_c^2 + f^2)^2} \frac{4\alpha_i h_i^2 f_i^2 f^2}{(f_i^2 - f^2)^2 + 4h_i^2 f_i^2 f^2} df = \frac{8\pi^3 \alpha_i f_c^4 h_i f_i^2 (f_i + f_c h_i)}{(f_i^2 + 2f_i f_c h_i + f_c^2)^2} \quad (12)$$

式(11), (12)から、コーナー振動数  $f_c$ ,  $G_i(f)$  に対する最大地動速度の地盤増幅度は次式で与えられる。

$$F_i = \sqrt{\frac{4\alpha_i f_c h_i f_i^2 (f_i + f_c h_i)}{(f_i^2 + 2f_i f_c h_i + f_c^2)^2}} \quad (13)$$

式(4)の震源スペクトルに高域遮断フィルターを考慮した地盤増幅度評価式(文献17)の式(3), (5)~(8), (13), (14), (16)~(20)) は計算が非常に煩雑なものであるが、高域遮断フィルターを考慮しない場合の式(13)はシンプルな式となっている。なお、今後、高域遮断フィルターを考慮した地盤増幅度評価式を精算式、考慮しない式(13)を簡易式と呼ぶ。

## 2.2 精算式と簡易式による地盤増幅度の対応

地盤増幅度の精算式と簡易式の対応を調べるために、コーナー振動数や  $f_{max}$ , 式(5)の疑似サイト増幅特性を設定して両式から計算した地盤増幅度を比較した。疑似サイト増幅特性は1次ピークのみ有するものとして、 $\alpha_i = 100$ ,  $h_i = 0.1$  とし、 $f_i$  は 0.1~20 Hz を対象に対数軸で等分して 501 個求めて、それぞれの  $f_i$  に対する地盤増幅度を計算した。また、地震の規模による地盤増幅度の変化を調べるために、 $M_w$  を 5.0~6.5 まで 0.5 刻みで変化させ、対応する  $f_c$  を用いて地盤増幅度を計算した。ただし、同じ  $M_w$  でも地震のタイプによって  $M_w$  と  $f_c$  の関係が異なる<sup>23)~25)</sup> ことから、後述する地震観測記録による地盤増幅度評価において対象としたプレート内地震、地殻内地震に対する  $f_c$  を求め、地盤増幅度の計算に用いた。 $f_c$  の計算には以下に示す地震モーメント  $M_0$  (N・m) とモーメントマグニチュード  $M_w$  の関係式<sup>26)</sup>、および短周期レベル  $A$  (N・m/s<sup>2</sup>)<sup>27)</sup> と地震モーメント  $M_0$ , コーナー振動数  $f_c$  との関係式を用いた。

$$\log M_0 = 1.5M_w + 9.1 \quad (14)$$

$$A = 4\pi^2 f_c^2 M_0 \quad (15)$$

$$A = 2.29 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (16)$$

$$A = 4.87 \times 10^9 \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (17)$$

式(16)がプレート内地震、式(17)が地殻内地震の短周期レベルの関係式<sup>25)</sup>に対応する。精算式の計算に必要な  $f_{max}$  は 6 Hz, 10 Hz の 2 ケースを考えた。

図 1, 2 に地震タイプ,  $M_w$  ごとの 1 次ピーク振動数  $f_i$  と最大地動速度の地盤増幅度  $F_v$  の関係を示す。図の円はコーナー振動数の値を示している。まず、 $f_i$  と  $F_v$  の関係の特徴を見ると  $M_w$  が大きくなるほど  $F_v$  のピーク値が低振動数側にシフトしている。これは図 3 のように速度震源スペクトルのピークが  $M_w$  の増大に伴い、低振動数側に移動するためである。次に地震タイプによる  $F_v$  の違いを見ると、図 3 の震源スペクトルから分かるように、同じ  $M_w$  でもプレート内地震の方がコーナー振動数が高いため、

地殻内地震と比較して  $F_V$  のピークが高振動数側に見られる。

続いて、精算式と式(13)の簡易式による  $F_V$  の違いを見ると、いずれのケースも  $f_1 = 2$  Hz よりも低振動数では両者の差が小さいことが分かる。  $f_{max}$  の値によって差があるが、2 Hz よりも低振動数では高域遮断フィルターの振幅がフラットに近づくため、高域遮断フィルターの影響が小さくなり、式(13)と精算式の差が小さくなったと考えられる。また、  $M_w$  が大きくなるにつれて、全体的に精算式と式(13)の簡易式による地盤増幅度の違いが小さくなっており、式(13)の簡易式が精算式による値と概ね対応している。これは図3の震源スペクトルから明らかなように、  $M_w$  が大きくなるほど高域遮断フィルターの影響の大きい高振動数の振幅が相対的に小さくなるためである。また、  $f_{max}$  が大きいほど、高域遮断フィルターがフラットな状態に近づくため、  $f_{max} = 10$  Hz の場合の方が高域遮断フィルターを考慮していない式(13)と近い値になっている。

### 3. 経験式による地盤増幅度の評価

#### 3.1 1次ピークのみと複数のピークを有する疑似サイト増幅特性に対する地盤増幅度

経験式は簡便に地盤増幅度を評価することを目的としているため、パラメータが少ないことが望ましい。そのため、本研究ではサイト増幅特性の1次ピークの情報のみを経験式のパラメータとして考えているが、現実のサイト増幅特性には複数のピークが存在する。そこで経験式の構築に先立ち、20次までピークを有する疑似サイト増幅特性に対する地盤増幅度  $F_V$  とピークが1次だけの疑似サイト増幅特性の地盤増幅度  $F_{V1}$  を比較した。地盤増幅度  $F_V$  と  $F_{V1}$  は精算式で求めた値である。

$G_p(f)$  のピーク振動数  $f_i$  と増幅率  $\alpha_i$  を変化させて、複数の地盤増幅度  $F_V$  と  $F_{V1}$  を計算した。疑似サイト増幅特性のパラメータの  $\alpha_i$  は以下の式により求めた。

$$\alpha_i = r_i \exp\left(-\frac{\pi f_i}{4Q_0 f_1}\right) \quad (18)$$

$i$  はモード次数であり 20 次までとした。  $r_i$  は対数軸上で  $20/i \sim 400/i$  の範囲で変動する一様乱数、  $Q_0$  は減衰の程度を表すパラメータであり、30 とした。

また、疑似サイト増幅特性の2次以上のピーク振動数は次式により計算した。

$$f_i = \exp\{(i-1)^{-0.5-0.03(i-1)}\} f_{i-1} \quad (19)$$

2次ピーク振動数は  $f_2 = \exp(1) f_1 \approx 2.72 f_1$  であり、2層地盤の理論伝達関数の1次と2次ピーク振動数の関係 ( $f_2 = 3f_1$ ) に近くなるようにした。また、モード次数が高くなるほど、指数項の値が1に近づくように係数を調整し、次数が1つ低いピーク振動数との間隔が小さくなるようにした。  $f_1$  は 0.1 ~ 20 Hz を対象に対数軸で等分して 501 個求めるとともに、  $\alpha_i$  を 10 ケース変えて地盤増幅度を計算することにより、合計で 5010 個の地盤増幅度を求めた。図4に評価に用いた疑似サイト増幅特性  $G_p(f)$  の例 (1次ピーク振動数  $f_1 = 0.4$  Hz, 4.0 Hz) を示す。

図5~図8に  $f_{max} = 6$  Hz の場合のプレート内地震、地殻内地震に対する  $F_V$  と  $F_{V1}$  の対応を示す。データは経験式で対象とする1次ピーク振動数の範囲内の 0.4 Hz 以上と範囲外の 0.4 Hz 未満に分けて示した。図中の相関係数  $R$  は精算値と予測値の常用対数値を1次式で回帰した場合の値であり、以降の  $R$  も同じ計算方法で求めた。図5~図8を見ると、図5の(a)~(c)、図7の(b)で  $F_{V1}$  が7前後で頭打ちしていることが分かる。図1, 2に示すように  $M_w$  ごとに、  $F_{V1}$  が最大となる1次ピーク振動数が存在し、この振動数と  $f_1$  が近く、なおかつ、1次ピーク振幅  $\alpha_1$  の値が上限値に近い場合に  $F_{V1}$  が7前後になっている。図5の(a)~(c)、図7の(b)では  $F_{V1}$  が7前後になる  $f_1$  と  $\alpha_1$  の組み合わせのデータが複数あるため、  $F_{V1}$  が7前後で頭打ちしている。

次に1次ピーク振動数ごとに相関係数の傾向を見ると、1次ピーク振動数が 0.4 Hz 以上の場合、全体的に見て両者の相関が高く、  $M_w$  が大きいほど相関係数が高くなっている。1次ピーク振動数が 0.4 Hz 未満の場合は  $F_V$  と  $F_{V1}$  にあまり相関が見られないが、0.4 Hz 以上の場合と同様に  $M_w$  が大きくなるにつれて相関係数が高くなる傾向が見られた。  $M_w$  により相関係数が変化する要因として、  $M_w$  が大きくなるほど、震源スペクトルの低振動数成分が支配的になるため、疑似サイト増幅特性の1次ピークの寄与が大きくなることが考えられる。地震タイプによる相関係数の違いを見ると、全体的に見て、地殻内地震の方が相関係数が高い。これは地殻内地震の方が震源スペクトルのコーナー振動数が低いため

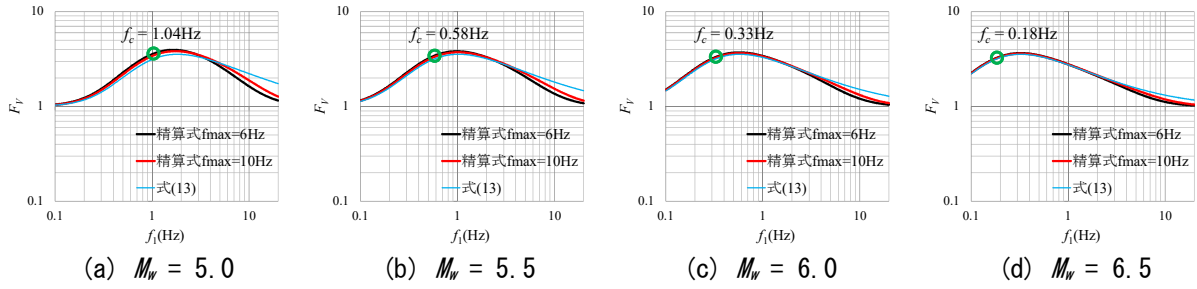


図1 1次ピーク振動数  $f_1$  と精算式、式(13)の簡易式による地盤増幅度の対応 (プレート内地震)

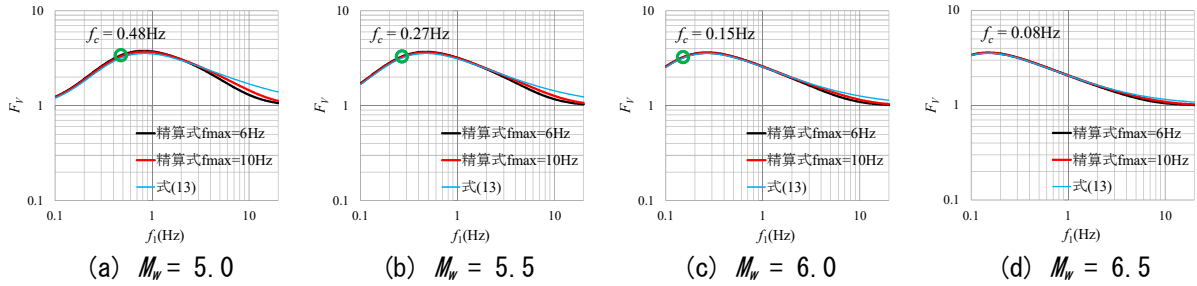


図2 1次ピーク振動数  $f_1$  と精算式、式(13)の簡易式による地盤増幅度の対応 (地殻内地震)

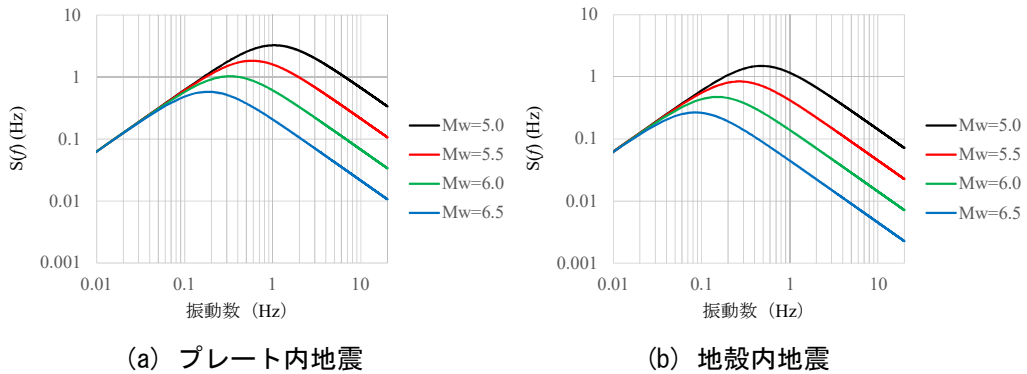


図3 速度震源スペクトル

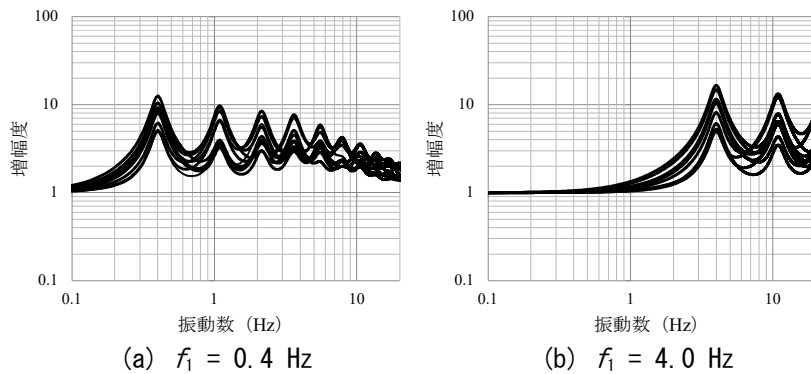


図4 疑似サイト増幅特性

である。なお、相関係数の値は少し異なるが、 $f_{max} = 10 \text{ Hz}$  の場合も同じ傾向を示した。

以上の結果から、複数のピークを有するサイト増幅特性に対しても1次ピーク振動数の情報のみから地盤増幅度を評価することが可能であると判断し経験式を構築した。

### 3.2 経験的な地盤増幅度評価式モデルの導出

3.1 の検討に基づき、サイト増幅特性が 1 次ピークのみから成り立つ場合に対して、式(13)をもとに経験式モデルを考えるとともに、地震タイプ、 $f_c$ 、 $f_m$ が異なる 16 ケースの精算式より求めた地盤増幅度を対象に経験式の妥当性を検証した。まず、式(13)左辺の  $F_i$  を  $F_v$  として、両辺の常用対数値をとると以下ようになる。

$$\log F_v = \log(4\alpha_1 f_c h_1)^{0.5} + \log(f_1^2)^{0.5} + \log(f_1 + f_c h_1)^{0.5} - \log(f_1^2 + 2f_c h_1 f_1 + f_c^2) \quad (20)$$

式(20)右辺に含まれる変数のうち、地盤増幅度への影響が小さいものを定数として取り扱うために、まず、右辺の第 1、第 3、第 4 項に含まれる  $h_1$  の影響を考察した。 $h_1$  は  $G_i(f)$  のピーク形状を規定する係数であり、値が小さいほどピークが鋭くなる。重複反射理論による伝達関数はピークが鋭いほど、ピー

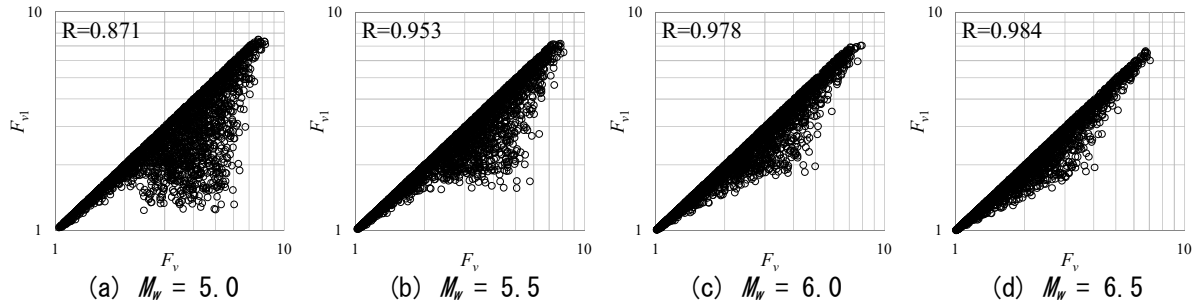


図 5  $F_v$  と  $F_{v1}$  の対応 ( $f_{max} = 6$  Hz, 0.4 Hz 以上, プレート内地震)

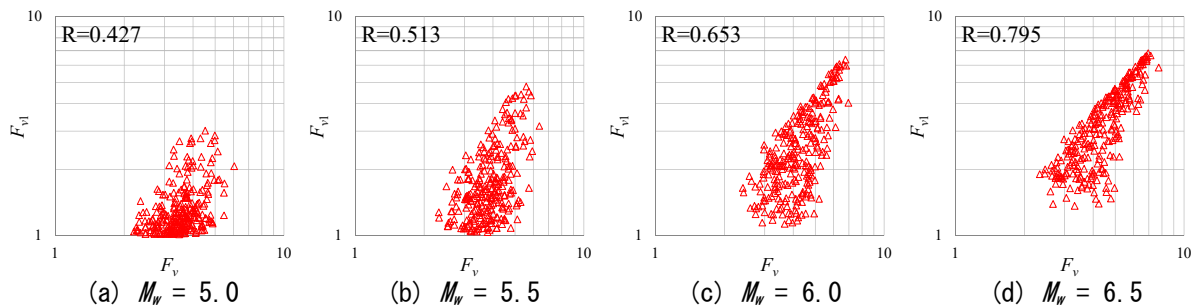


図 6  $F_v$  と  $F_{v1}$  の対応 ( $f_{max} = 6$  Hz, 0.4 Hz 未満, プレート内地震)

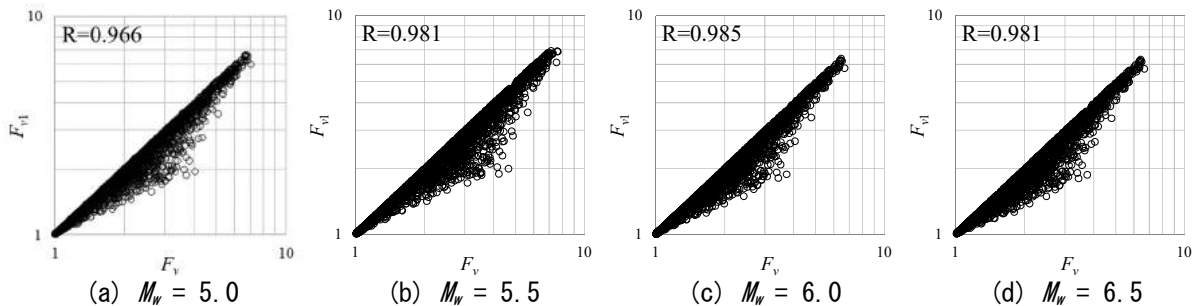


図 7  $F_v$  と  $F_{v1}$  の対応 ( $f_{max} = 6$  Hz, 0.4 Hz 以上, 地殻内地震)

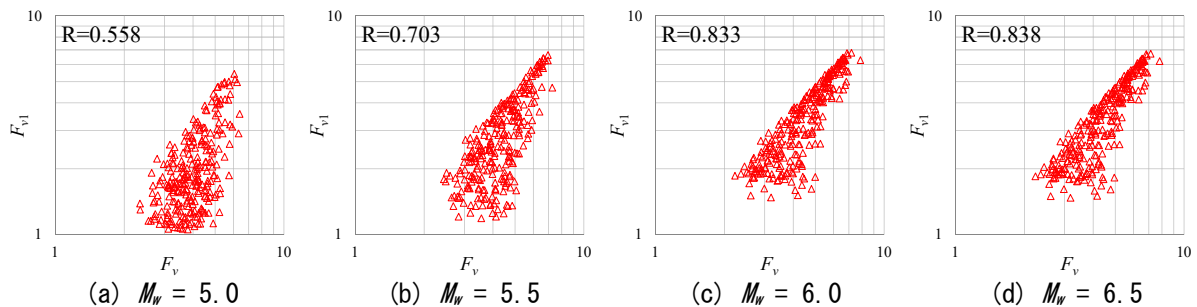


図 8  $F_v$  と  $F_{v1}$  の対応 ( $f_{max} = 6$  Hz, 0.4 Hz 未満, 地殻内地震)

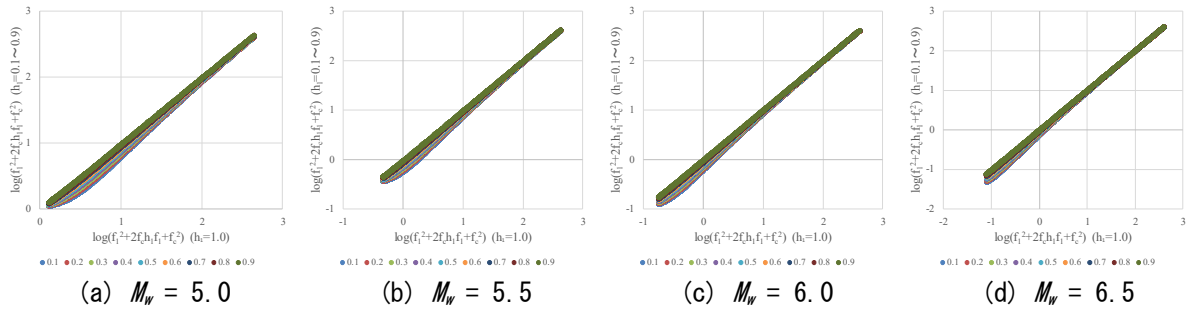


図9  $M_w = 5.0 \sim 6.5$  のプレート内地震に対する式(20)右辺第4項( $h_1 = 1.0$ )と第4項( $h_1 = 0.1 \sim 0.9$ )の対応

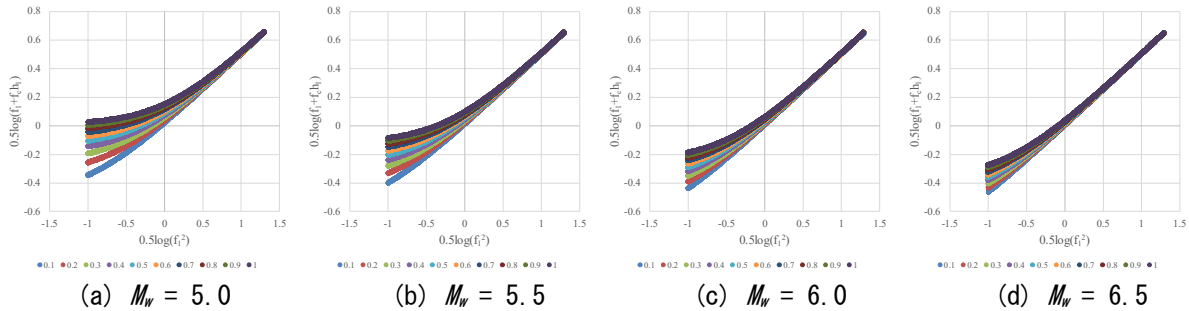


図10  $M_w = 5.0 \sim 6.5$  のプレート内地震に対する式(21)右辺第3項と第4項の対応

表1 式(21)右辺第4項を第3項で線形回帰した場合の相関係数

	$h_1=0.1$	$h_1=0.2$	$h_1=0.3$	$h_1=0.4$	$h_1=0.5$	$h_1=0.6$	$h_1=0.7$	$h_1=0.8$	$h_1=0.9$	$h_1=1.0$
$M_w=5.0$	0.998	0.995	0.991	0.988	0.984	0.981	0.978	0.976	0.973	0.971
$M_w=5.5$	0.999	0.998	0.996	0.994	0.992	0.990	0.988	0.986	0.984	0.982
$M_w=6.0$	1.000	0.999	0.998	0.997	0.996	0.995	0.994	0.993	0.992	0.990
$M_w=6.5$	1.000	1.000	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997	0.997	0.996	0.995

クの増幅度も大きくなる。また、既往研究<sup>28)</sup>では本論文の $h_1$ に対応する減衰定数を伝達関数の増幅率を規定するインピーダンス比の関数で表している。ここでは既往研究<sup>28)</sup>を参考に右辺第1項の $h_1$ が1次ピークの増幅率を規定する $a_1$ で表されるものとし、 $h_1$ が $a_1^n$ に比例すると仮定した。 $n$ は定数である。

$h_1$ が含まれる右辺第3項は後述する回帰分析と関連があるため、先に右辺第4項に対して、 $h_1$ の影響を調べた。図9に $M_w = 5.0 \sim 6.5$ のプレート内地震に対する、 $h_1 = 1.0$ の第4項と $h_1 = 0.1 \sim 0.9$ の第4項の対応を示す。同図を見ると、 $h_1 = 1.0$ の第4項と $h_1 = 0.1 \sim 0.9$ の第4項が概ね一対一の関係になっていることが分かる。地殻内地震の場合も同様の傾向になったことから、第4項に対する $h_1$ の影響が小さいと仮定し、定数とする。以上を考慮して、式(20)を次のように表す。

$$\log F_V = a + \log(\alpha_1)^{0.5+n} + \log(f_1^2)^{0.5} + \log(f_1 + f_c h_1)^{0.5} - \log(f_1^2 + 2b f_c f_1 + f_c^2) \quad (21)$$

$a$ 、 $b$ は定数である。式(21)をもとに回帰分析によって $F_V$ を評価する経験式を求めるが、第4項に含まれる $f_c h_1$ の値によっては、第3項と第4項の相関が高くなり、多重共線性を生じる恐れがあるため、2つの項の対応を調べた。図10に $M_w = 5.0 \sim 6.5$ のプレート内地震に対する右辺第3項と $h_1$ を変化させた第4項の対応、表1に右辺第4項を第3項で線形回帰した場合の相関係数を示す。図10を見ると、 $M_w$ が大きくなるほど縦軸の第4項の違いが小さくなっている。表1の相関係数を見ると、全て0.97を超える高い値となっていることから、第3項と第4項を含んだ式で回帰分析を行うと多重共線性を生じる恐れがあるため、第4項を除外した。なお、地殻内地震を対象とした場合も第3項と第4項の相関係数が高くなった。

続いて、コーナー振動数 $f_c$ について検討すると、経験式の構築の対象とする地震観測記録から評価した地盤増幅度は様々な規模の地震から評価した平均的な値であり、特定の規模の地震を対象としないため、 $f_c$ は地震規模に依存しない定数と考えた。ただし、精算式による地盤増幅度を対象に経験式を求



める際はケースごとに定数を求めた。以上を踏まえ、式(21)を次の回帰式で表した。

$$\log F_V = c_1 + c_2 \log(\alpha_1) + c_3 \log(f_1) + c_4 \log(f_1^2 + af_1 + b) \quad (22)$$

$c_1 \sim c_4$ は回帰係数である。式(22)の $F_V$ を3.1の条件で精算式により求めた地盤増幅度として、回帰分析によって式(22)の係数を評価した。ただし、式(22)の $a, b$ は回帰分析では求められないため、両者の値を変動させて、式(22)の回帰係数を求め、誤差二乗和が最小になるようにして $a, b$ を決定した。

図11～14に精算式と式(22)の回帰式によって評価した地盤増幅度の対応を示す。図11～14の横軸の精算値は精算式による地盤増幅度、縦軸の予測値は式(22)による値である。予測値を見ると6～7で頭打ちになっているデータが多い。これは予測値の計算に用いた式(22)が式(13)をもとにしたためであり、図15の1次ピーク振動数 $f_1$ と式(22)による予測値の対応から分かるように、ある1次ピーク振動数 $f_1$ 付近で予測値の上限値が存在する。式(22)から得られた図15と式(13)から得られた図1, 2を比較すると、図15の方が勾配の変化が緩やかであり、ピーク付近もなだらかになっている。このピークとその付近の予測値により、図11～14で見られる頭打ちが生じている。

続いて、精算値と予測値の相関係数 $R$ を見ると、全て0.9以上という高い値であり、 $M_w$ によらず精算値と予測値の対応が良い。 $M_w$ が小さい場合、精算値が大きいデータでは予測値を過小評価しているデータがあり、予測値では1次ピークのみ考慮していることが要因と考えられる。しかし、1次ピークの影響が大きくなる $M_w = 6.5$ では精算値と予測値が概ね1対1で対応している。地震動予測では $M_w = 6.5$ 以上の地震を想定することが多いことから、式(22)に基づく地盤増幅度評価は実用上、問題がないと考える。なお、次章で地震観測記録から評価した地盤増幅度を対象に式(22)を求めたところ、特異な数地点を除き、精度良く地盤増幅度を評価できている。

次に地震タイプによる相関係数の違いを見ると、同じ $M_w$ で比較した場合、地殻内地震の方が相関係数が高いが、 $M_w = 6.5$ になると地震タイプによる違いは小さくなっている。以上の検討結果から、サイト増幅特性の1次ピーク振動数とピーク振幅をパラメータとした経験式でも、複雑なサイト増幅特性に対する地盤増幅度を精度良く評価できることが明らかになった。

#### 4. 地震観測記録から求めたサイト増幅特性による地盤増幅度の評価

本章では地震観測記録から求めたサイト増幅特性が得られている地点の地盤増幅度評価を目的として、式(22)による評価式を求めた。サイト増幅特性と地盤増幅度は著者ら<sup>15)</sup>が中国地方や兵庫県地震観測点を対象に評価した際のデータセットに2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震（気象庁マグニチュード $M_{JMA} = 6.6$ ,  $M_w = 6.2^{29)}$ と最大余震（ $M_{JMA} = 5.0$ ,  $M_w = 4.7^{29)}$ ）の地震観測記録を追加して再評価したものである。サイト増幅特性と地盤増幅度はKiK-net美東（YMGH12）の地震基盤相当の層を基準とした相対値であり、それぞれ、スペクトルインバージョン<sup>30)</sup>と回帰分析によって求めた。

解析対象とした地震は表2に示す18個（地殻内地震12, プレート内地震6）であり、 $M_{JMA}$ が5.0～7.3（ $M_w = 4.9 \sim 6.8^{29)}$ 、震源深さが7～86 km、解析に用いた地震観測記録は1893個である。地震観測記録は地盤の非線形化の影響を避けるために、水平動の最大地動加速度が1～200 cm/s<sup>2</sup>のデータを用いた。解析対象とした地震観測点は中国地方と兵庫県内のK-NET111地点、KiK-net83地点(地表)、鳥取県内の気象庁観測点5地点、鳥取県内の自治体観測点34地点の計233地点である。図16に解析対象とした地震の震央と地震観測点の分布図を示す。基準点を除いた232地点のサイト増幅特性の1次ピーク振動数とピーク振幅を、それぞれ式(22)の $f_1, \alpha_1$ 、地盤増幅度を $F_V$ として用い、式(22)の回帰係数と $a, b$ を求めた。

図17に地震観測記録から評価した地盤増幅度(観測値)と式(22)によって求めた予測値の対応、表3に式(22)の係数や相関係数、標準偏差を示す。図17を見ると全体的に観測値と予測値のばらつきが小さいが、JMA境港は観測値が10.2、予測値が3.9という大きな違いがある。図18のJMA境港のサイト増幅特性を見るとは1次ピーク振動数の0.7 Hzよりも高振動数の1～5.5 Hzでも増幅度が10を超える大きな値となっており<sup>15)</sup>、1次ピークよりも高振動数の増幅度も $F_V$ の観測値に影響を及ぼしている可能性がある。従って、JMA境港の予測値の過少評価は、図11～14で予測値が過小評価になったことと同じく、1次ピークのパラメータのみ考慮したこと起因すると考えられる。しかし、JMA境港以外のデータのほとんどは、予測値が観測値の1:0.5～1:2の範囲に入っており、観測値と予測値の相関係数 $R = 0.890$ という高い値となった。以上から、サイト増幅特性の1次ピーク振動数とピーク振幅のみをパラメータとした地盤増幅度評価式によって、地震観測記録による地盤増幅度を精度良く評価できることが明らかになった。

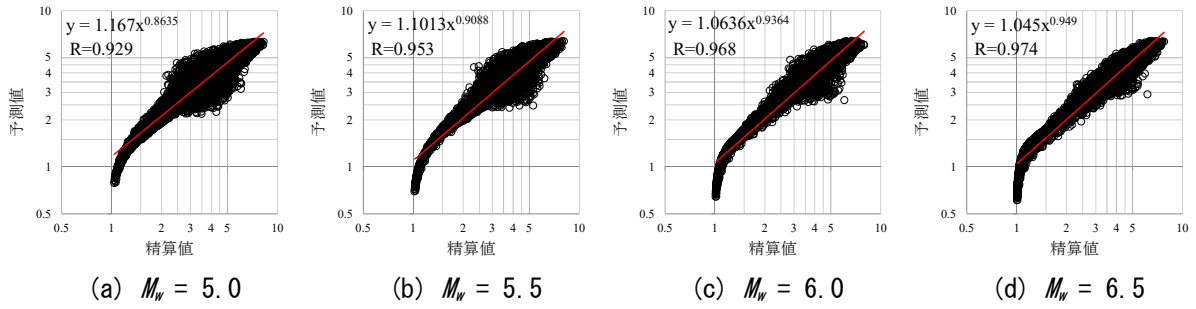


図 11 精算式と式(22)によって計算した地盤増幅度の対応 ( $f_{max} = 6$  Hz, プレート内地震)

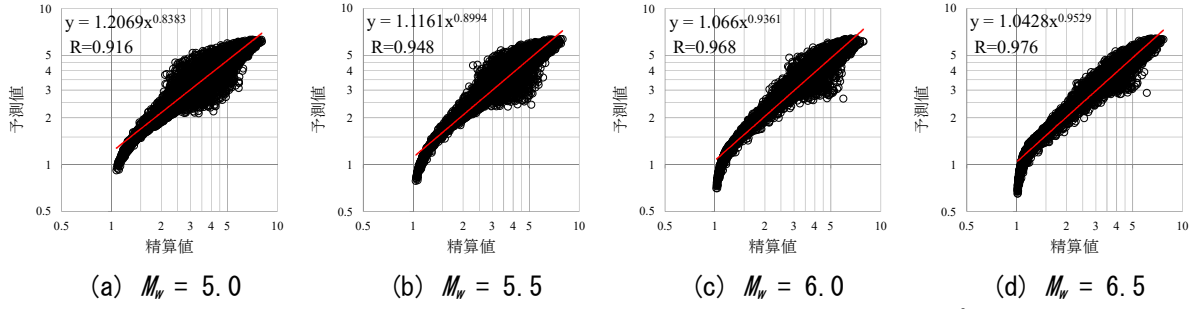


図 12 精算式と式(22)によって計算した地盤増幅度の対応 ( $f_{max} = 10$  Hz, プレート内地震)

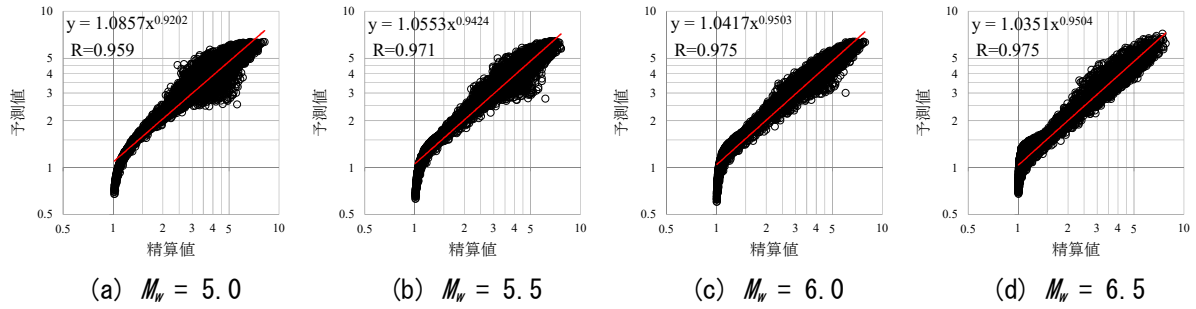


図 13 精算式と式(22)によって計算した地盤増幅度の対応 ( $f_{max} = 6$  Hz, 地殻内地震)

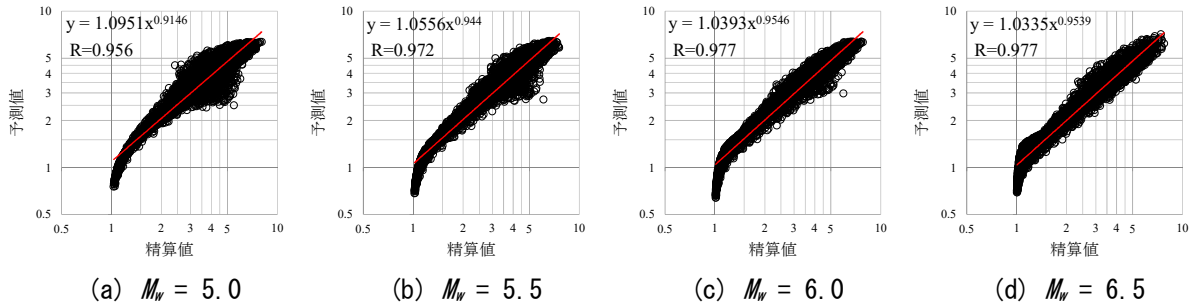


図 14 精算式と式(22)によって計算した地盤増幅度の対応 ( $f_{max} = 10$  Hz, 地殻内地震)

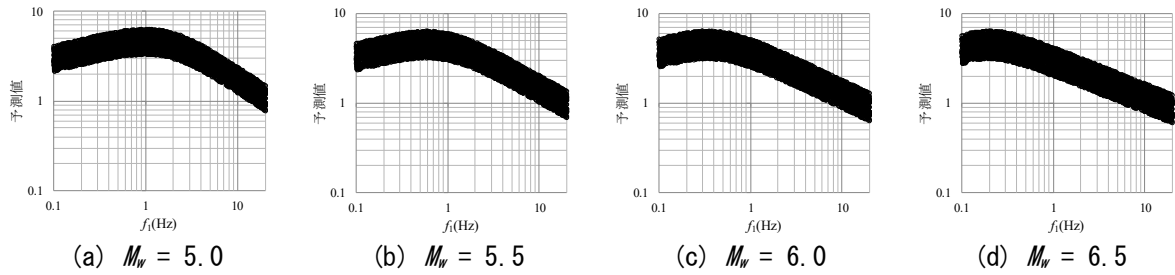


図 15  $f_1$ と式(22)によって計算した地盤増幅度の対応 ( $f_{max} = 6$  Hz, プレート内地震)



図 16 地震の震央と地震観測点の分布図  
 (●: 気象庁, ○: 自治体, △: K-NET,  
 ▲: KiK-net, ×: 震央)

表 2 解析対象地震の諸元

番号	発生日時	震央地名	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	$M_{JM1}$	$M_w$	地震タイプ
1	1997/6/25 18:50:12.7	山口県中部	34.4400	131.6650	8	6.6	5.8	地殻内
2	1997/9/4 05:15:43.2	鳥取県西部	35.2617	133.3767	9	5.5	5.2	プレート内
3	1998/05/23 04:49:35.2	伊予灘	33.7033	131.8417	86	5.4	5.5	プレート内
4	2000/10/06 13:30:17.9	鳥取県西部	35.2733	133.3483	9	7.3	6.6	地殻内
5	2000/10/08 13:17:55.2	鳥取県東部	35.1383	133.1500	7	5.6	5.1	地殻内
6	2000/10/08 20:51:17.1	鳥取県東部	35.3683	133.3100	8	5.2	5.0	地殻内
7	2001/01/12 08:00:04.2	兵庫県北部	35.4650	134.4900	11	5.6	5.2	地殻内
8	2001/03/24 15:27:54.5	安芸灘	34.1317	132.6933	46	6.7	6.8	プレート内
9	2001/03/26 05:40:53.4	安芸灘	34.1167	132.7083	46	5.2	5.1	プレート内
10	2002/09/16 10:10:49.8	鳥取県中部	35.3700	133.7383	10	5.5	5.1	地殻内
11	2006/09/26 07:03:48.3	伊予灘	33.5050	131.8833	70	5.3	5.3	プレート内
12	2007/04/26 09:02:56.9	愛媛県東予	33.8883	133.5833	39	5.3	5.0	プレート内
13	2011/06/04 01:57:31.0	鳥取県東部	35.0950	132.6700	11	5.2	4.9	地殻内
14	2011/11/21 19:16:29.5	広島県北部	34.8717	132.8933	12	5.4	5.2	地殻内
15	2013/04/13 05:33:17.7	淡路島付近	34.4183	134.8283	15	6.3	5.8	地殻内
16	2014/03/14 02:06:50.8	伊予灘	33.6917	131.8900	78	6.2	6.3	プレート内
17	2016/10/21 14:07:22.5	鳥取県中部	35.3800	133.8550	11	6.6	6.2	地殻内
18	2016/10/21 14:53:17.5	鳥取県中部	35.3600	133.8667	9	5.0	4.7	地殻内

### 5. 微動 H/V による地盤増幅度評価

4章の検討からサイト増幅特性の1次ピーク振動数とピーク振幅のみで精度良く地震観測記録による地盤増幅度を評価できることが明らかになったが、サイト増幅特性を評価できる地点は地震観測点やS波速度構造が明らかな地点に限られる。そこでサイト増幅特性が不明な地点の地盤増幅度を評価するために、サイト増幅特性の代替として、常時微動測定から容易に計算できる微動H/Vを利用する。微動H/Vのピーク振動数は基準観測点に対するS波スペクトル比やS波伝達関数のピーク振動数と対応が良いことが指摘されており(例えば9)-13), 拡散波動場理論に関する研究では微動H/Vと地震動H/Vの1次ピーク振動数がよく対応することが報告されている<sup>31)</sup>。また、研究によって、ばらつきの程度は異なるが、微動H/Vと伝達関数またはS波スペクトル比のピーク振幅に相関が見られるという報告<sup>9)-11)</sup>がある。本研究で対象とする微動データでも、微動H/Vとサイト増幅特性のピーク振動数やピーク振幅に相関が見られるか調べた上で微動H/Vのパラメータの地盤増幅度評価への利用を検討した。

本研究で対象とした微動観測データの内訳は野口、香川<sup>32)</sup>が測定した鳥取県内47地点のデータと文献<sup>32)</sup>とは別に岡山県、広島県の3地点で測定したデータ、先名他<sup>33)</sup>による23地点のデータであり、詳細は表4のとおりである。微動H/Vは常時微動波形から20秒間または40秒間を10区間前後取り出し、スペクトルは紺野、大町<sup>9)</sup>の対数型ウィンドウ(係数30)により平滑化して算出した。

図19に対象とした73地点のサイト増幅特性の1次ピーク振動数 $f_1$ と微動H/Vの1次ピーク振動数 $f_m$ の対応を示す。図19のサイト増幅特性の1次ピーク振幅 $\alpha_1$ と $f_m/f_1$ の対応から分かるように $\alpha_1$ が15よりも小さいと、 $f_m/f_1$ のばらつきが大きくなっていることから、図20では $\alpha_1$ が15未満、15以上ごとに $f_1$ と $f_m$ の対応を示した。相関係数Rは全データに対する値である。 $\alpha_1$ が15以上の場合は $f_1$ と $f_m$ が概ね1対1で対応しているが、15未満では両者にばらつきが見られる。 $\alpha_1$ が小さい地点では1次ピーク振動数に対応する層のコントラストが小さいため、微動H/Vの1次ピークに明瞭なピークが見られず、より高い振動数のピークを1次ピークとした可能性が考えられる。次に図21のサイト増幅特性の1次ピーク振幅 $\alpha_1$ と微動H/Vの1次ピーク振幅 $\alpha_m$ の対応を見ると、ややばらつきが見られるものの、 $\alpha_1$ と $\alpha_m$ に相関が見られることが分かる。

以上のように $f_m$ と $\alpha_m$ はそれぞれ対応する $f_1$ と $\alpha_1$ と相関が見られることから、式(22)の $f_1$ を $f_m$ 、 $\alpha_1$ を $\alpha_m$ に置き換えた次の地盤増幅度評価式を求めた。

$$\log F_V = c_1 + c_2 \log(\alpha_m) + c_3 \log(f_m) + c_4 \log(f_m^2 + d f_m + e) \quad (23)$$

$c_1 \sim c_4$ は回帰係数であり、サイト増幅特性の場合と同様に $d$ 、 $e$ を変化させて、地盤増幅度の観測値と式(23)による予測値の誤差二乗和が最小になるようにして回帰係数や $d$ 、 $e$ を決定した。また、ピーク振動数の常用対数値のみをパラメータとする既往研究<sup>14), 15)</sup>と同タイプの以下の地盤増幅度評価式を求め、式(23)の結果と比較した。

$$\log F_V = c_1 + c_2 \log(f_m) \quad (24)$$

図 22 に地盤増幅度の観測値と式(23)による予測値の対応, 図 23 に観測値と式(24)による予測値の対応を示す. また, 表 5 に式(23), (24)の係数や相関係数, 標準偏差および, 統計モデルの良さを評価する指標の 1 つである AIC(赤池情報量基準)<sup>34)</sup>を示す. 図 22, 図 23 から式(23)による予測値が式(24)に比べて観測値との対応が良く, 表 5 の相関係数や標準偏差, AIC から式(23)が式(24)よりも予測式として優れていることが分かる. なお, 図 22 の一部の観測値の大きなデータで予測値が小さくなっているものがあり,  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  の関係が影響を及ぼしていると考えられる. 図 21 の回帰式から明らかのように,  $\alpha_1$  が小さい場合,  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  に大きな差はないが,  $\alpha_1$  が 10 のとき,  $\alpha_m$  は 3,  $\alpha_1$  が 40 のときは  $\alpha_m$  が 6 というように,  $\alpha_1$  が大きいほど  $\alpha_m$  との差が大きくなる. 従って,  $\alpha_1$  が大きい場合に  $\alpha_m$  を代替として用いると  $\alpha_1$  を過小評価してしまい, その結果,  $F_v$  の観測値も過小評価してしまう. 図 11~図 14 の  $M_w$  の小さいデータや図 18 の JMA 境港の予測値の過小評価はサイト増幅特性の 1 次ピークの情報しか考慮しなかったことが要因だが, 図 22 については  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  の関係が主な要因と考えられる. 今後,  $\alpha_1$  の大きい場合の予測値の評価方法を再検討する予定である.

続いて, 表 3 のサイト増幅特性を対象とした場合との係数の違いを式(22), (23)のパラメータから考察する. 式(22)の  $f_1$  と  $\alpha_1$  はそれぞれ, 式(23)の  $f_m$  と  $\alpha_m$  に対応している. 図 19 に示す回帰式より,  $f_1$  と  $f_m$  の常用対数値は図 19 に示す本研究の対象範囲では概ね 1 対 1 で対応するが, 上述のように図 21 の回帰式から計算される  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  の常用対数値の差異は  $\alpha_1$  が大きいほど大きくなる. 以上から式(22), (23)の係数の違いに  $\alpha_1$  と  $\alpha_m$  の関係が影響を及ぼしていると考えられるが, これ以外にも式(22)と(23)で対象とするデータ数が異なっていることなども係数の違いに影響を及ぼしている可能性がある.

## 6. まとめ

本論文では微動 H/V を用い, 簡易に従来よりも高い精度で最大地動速度の地盤増幅度を評価することを目的として, 著者らの提案した理論地盤増幅度評価式に基づく経験的な地盤増幅度評価式を求めた. まず, 著者らの提案した理論地盤増幅度評価式(精算式)を簡略化することにより, 経験式の基本となる地盤増幅度評価式(簡易式)を求めるとともに, 簡易式をもとに経験式を導出した. 続いて, 2 つの地震タイプ, 4 つの  $M_w$ , 2 つの  $f_m$  による 16 ケースの震源パラメータや疑似サイト増幅特性を対象に精算式によって地盤増幅度を計算し, 各ケースに対し地盤増幅度を予測対象とした経験的な地盤増幅度評価式を求めた. その結果, 疑似サイト増幅特性の 1 次ピーク振動数とピーク振幅のみの経験式によって, 高精度で地盤増幅度を評価できることを明らかにした. 次に中国地方などの地震観測点の観測記録から評価した地盤増幅度やサイト増幅特性を対象に, 経験的な地盤増幅度評価式を求め, 精度良く地盤増幅度を評価できることを示した. 最後に微動 H/V の 1 次ピーク振動数とピーク振幅をパラメータとする経験的な地盤増幅度予測式を求めた結果, 従来の微動 H/V のピーク振動数の対数値のみをパラメータとする経験式に比べて高精度で地盤増幅度を評価できることを明らかにした.

今後は今回, 対象とした中国地方などの地域以外の地震観測点においても同様の検討を進め, 提案した地盤増幅度評価式の適用性を検証する予定である. また, 提案した地盤増幅度評価式を個別の地震に適用するとともに, 強震動予測で対象となる  $M_{JMA} = 7$  前後の複数の地震から評価した地盤増幅度を対象とした検討も行う予定である.

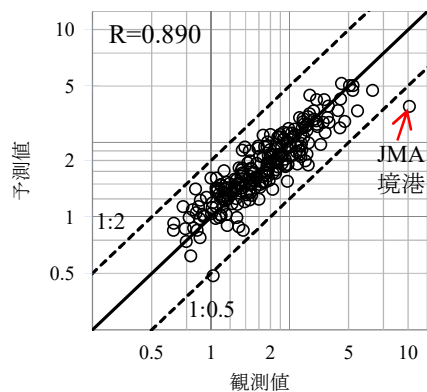


図 17  $F_v$  の観測値と式(22)の予測値の対応

表 3 式(22)の係数, 相関係数, 標準偏差

$c_1$	0.257
$c_2$	0.494
$c_3$	4.704
$c_4$	-2.723
$a$	0.328
$b$	0
相関係数	0.890
標準偏差	0.095

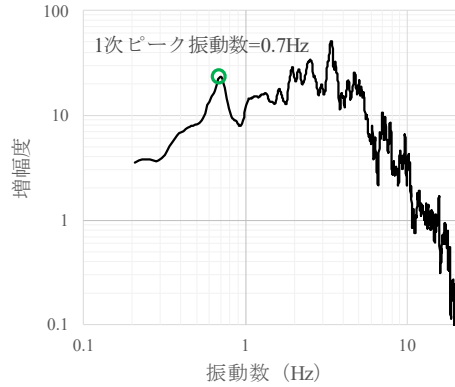


図 18 JMA 境港のサイト増幅特性<sup>15)</sup>

表 4 微動データの内訳

県	観測網	野口, 香川 <sup>32)</sup>	先名他 <sup>33)</sup>
鳥取県	気象庁	4	0
	自治体	34	0
	K-NET	9	0
	KiK-net	0	6
島根県	K-NET	0	17
岡山県	KiK-net	1	0
広島県	K-NET	1	0
	KiK-net	1	0

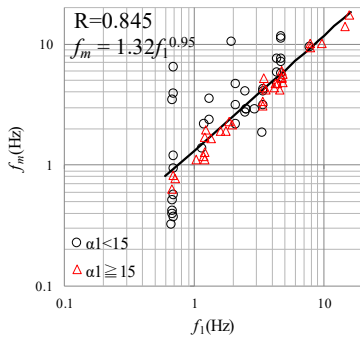


図 19  $f_1$ と $f_m$ の対応

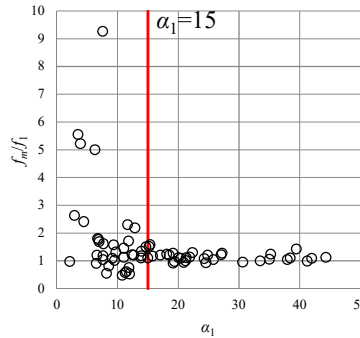


図 20  $\alpha_1$ と $f_m/f_1$ の対応

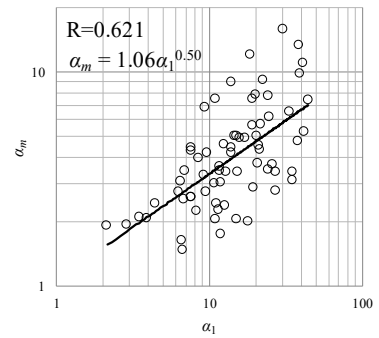


図 21  $\alpha_1$ と $\alpha_m$ の対応

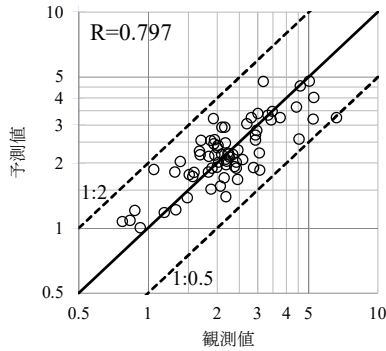


図 22  $F_v$ の観測値と式(23)の予測値の対応

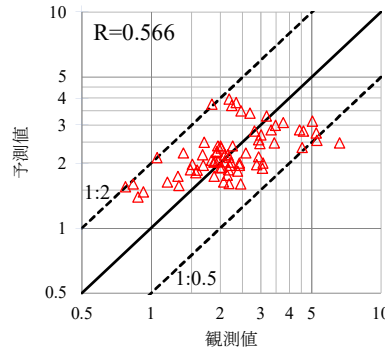


図 23  $F_v$ の観測値と式(24)の予測値の対応

表 5 式(23), (24)の係数, 相関係数, 標準偏差, AIC

	式(23)	式(24)
$c_1$	0.496	0.467
$c_2$	0.291	-0.261
$c_3$	1.089	/
$c_4$	-0.817	
$d$	0	
$e$	0.468	
相関係数	0.797	0.566
標準偏差	0.115	0.157
AIC	-96.172	-56.69

## 謝 辞

本研究では気象庁, 鳥取県, K-NET, KiK-netの地震観測記録, および, F-netの震源情報を利用させて頂きました. 国立研究開発法人 防災科学技術研究所の先名重樹博士にはK-NET下宇部尾の微動データをご提供頂きました. また, 3名の査読者の方々から大変有益なご指摘を頂きました. 本研究はJSPS 科研費JP18H01677 (研究代表者: 宮島昌克) の助成を受けたものです. 記して御礼申し上げます.

## 参考文献

- 1) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文報告集, No.442, pp.71-78, 1992.
- 2) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関

- 係, 日本地震工学会論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 11-22, 2006.
- 3) 山口 亮, 翠川三郎: 地盤の平均 S 波速度を用いた地盤増幅率の推定手法の改良, 日本地震工学会論文集, Vol.11, No.3, pp.85-101, 2011.
  - 4) 末富岩雄, 吉田 望, 清水善久, 中山 渉, 山崎文雄, 阿部 進, 鈴木 誠: 横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討 -卓越周期との関係-, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.157-160, 1999.
  - 5) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦 勝: サイト増幅スペクトルに基づく震度増加量の推定法, 土木学会論文集, No.738, I-64, pp.191-205, 2003.
  - 6) 神山 眞, 松川忠司, 片岡俊一: アレー強震観測システムを利用したローカルサイト増幅に関する研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1, pp.38-51, 2009.
  - 7) 酒本真先, 丸山喜久, 山崎文雄: 地盤増幅特性の広域的評価に向けた応答スペクトル距離減衰式の地点補正スペクトルの利用に関する基礎検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4, pp.405-416, 2013.
  - 8) 中村 豊: 常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988.
  - 9) 紺野克昭, 大町達夫: 常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平骨化とその適用例, 土木学会論文集, No.525, pp.247-259, 1995.
  - 10) 若松邦夫, 安井 譲: 短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.60, No.471, pp.61-70, 1995.
  - 11) 年縄 巧, 西田秀明, 翠川三郎, 阿部 進: 横浜市高密度強震計ネットワーク観測点における強震動と常時微動のスペクトル特性の比較, 土木学会論文集, No.640/I-50, pp.193-202, 2000.
  - 12) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.156A, pp.324-333, 2010.
  - 13) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: 常時微動 H/V スペクトルを構成する波動成分に関する一解釈, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.1, pp.48-62, 2012.
  - 14) 福岡俊彦, 神野達夫, 三浦賢治: 微動を用いた地盤増幅特性の簡易推定法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.269-270, 2007.
  - 15) 野口竜也, 西川隼人, 吉田昌平, 香川敬生: 鳥取県内の地震観測点における地盤構造の把握とサイト特性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.4, pp.646-658, 2016.
  - 16) 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, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.66, No.1, pp.20-29, 2010.
  - 17) 西川隼人, 宮島昌克: 合成したサイト増幅特性による地盤増幅度評価式の検討, 日本地震工学会論文集, Vol.15, No.7, pp.180-193, 2015.
  - 18) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 73, No. 6, pp. 1865-1894, 1983.
  - 19) Aki, K.: Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz, *Phys. Earth Planet. Inter.*, Vol. 21, No. 1, pp. 50-60, 1980.
  - 20) 山本みどり, 岩田知孝, 入倉孝次郎: 釧路地方気象台における強震動と弱震動に対するサイト特性の評価, 地震 第 2 輯, Vol.48, No.3, pp. 341-351, 1995.
  - 21) 佐藤智美: 統計的グリーン関数の最大加速度・最大速度の距離減衰特性, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.6, pp.1-16, 2007.
  - 22) 鶴来雅人, 田中礼司, 香川敬生, 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(その 3) - 国内で発生した地殻内地震の観測記録に基づく検討 -, 日本地震工学会論文集, Vol.17, No.5, pp.109-132, 2017.
  - 23) 川瀬 博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応, 日本地震工学会論文集, Vol.4, No.4, pp.126-145, 2004.
  - 24) 佐藤智美: 中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, No.48, 2003.
  - 25) 仲野健一, 川瀬 博, 松島信一: スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その 2 分離した特性に対する詳細分析, 日本地震工学会論文集, Vol.15, No.1, pp.38-59, 2015.
  - 26) Hanks, T. C. and Kanamori, H.: A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, No. B5, pp.

- 2348-2350, 1979.
- 27) 壇 一男, 佐藤俊明: 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, Vol.63, No.509, pp.49-60, 1998.
  - 28) 松田 敏, 河野允宏, 浅野幸一郎: 2次元不整形地盤における面外せん断波の増幅特性の簡易評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.70, No.593, pp.59-64, 2005.
  - 29) 国立研究開発法人 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/top.php?LANG=ja> (参照 2017-9-6).
  - 30) 岩田知孝, 入倉孝次郎: 観測された地震波から震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 第2輯, Vol.39, No.4, pp.579-593, 1986.
  - 31) 森 勇太, 川瀬 博, 松島信一, 長嶋史明: 微動と地震動の観測水平上下スペクトル比の相違とそれに着目した地盤構造同定手法の提案, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.9, pp.13-32, 2016.
  - 32) 野口竜也, 香川敬生: 微動探査による鳥取県内の強震観測地点における地盤震動特性の把握および地盤構造の推定, 第14回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3631-3638, 2014.
  - 33) 先名重樹, 大井昌弘, 藤原広行: 微動探査データの収集管理とデータベースシステムの構築 (K-NET, KiK-net 地点およびつくば市における微動探査結果を例として), 第116回物理探査学会学術講演会, P-5, 2007.
  - 34) Akaike, H.: A new look at the statistical model identification, *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-19, No. 6, pp. 716-723, 1974.

(受理: 2019年5月31日)  
(採用決定: 2019年10月25日)

## **A Study on an Empirical Formula for Amplification Factor Based on Fundamental Peak Frequency and Amplitude of Microtremor H/V**

NISHIKAWA Hayato <sup>1)</sup>, NOGUCHI Tatsuya <sup>2)</sup>, MIYAJIMA Masakatsu <sup>3)</sup> and KAGAWA Takao <sup>4)</sup>

1) Member, Associate Professor, Fukui University of Technology, Dr. Eng.

2) Member, Assistant Professor, Graduate School of Engineering, Tottori University, Dr. Eng.

3) Member, Professor, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Dr. Eng.

4) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Tottori University, Dr. Sci.

We propose an empirical formula expressed by using indices of microtremor H/V in order to easily evaluate an amplification factor for peak ground velocity in consideration of an effect of input motion spectra for bedrock. Firstly, an empirical formula model for an amplification factor consisting fundamental peak frequency and peak amplitude is derived based on a theoretical model proposed by authors. It is found that the empirical formula can accurately evaluate the amplification factors. Next, a formula for amplification factors evaluated from observation records is obtained by using parameters of site effect. The observed amplification factors show strong correlation to the ones evaluated by the formula. Finally, we develop an empirical formula by using a microtremor H/V instead of the site effect. Consequently, it is clarified that the empirical formula can evaluate the observed amplification factors more accurately than the formula model in the past studies.

*Keywords: Amplification factor, Peak ground velocity, Microtremor H/V, Peak frequency, Peak amplitude*