

# 深層地盤構造と常時微動の活用による サイト増幅特性の評価に関する研究

長尾 毅<sup>1</sup>・山田 雅行<sup>2</sup>・野津 厚<sup>3</sup>

<sup>1</sup>国土交通省国土技術政策総合研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nagao-t92y2@ysk.nilim.go.jp

<sup>2</sup>株式会社ニュージェック 技術開発グループ(〒531-0074 大阪市北区本庄東2-3-20)

E-mail: yamadams@newjec.co.jp

<sup>3</sup>独立行政法人港湾空港技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: nozu@pari.go.jp

深層地盤構造、常時微動H/Vスペクトル、近傍地点のサイト増幅特性をもとに対象地点のサイト増幅特性を評価する方法について検討を行った。多次元効果等による1次元鉛直入射を上回る増幅特性を常時微動解析等により評価し、これをもとに1次元鉛直入射の周波数伝達関数を補正するものである。13地点を対象に提案法、既往の研究による方法と強震記録より求められたサイト増幅特性の比較を行い、提案法の適用性を議論した。

**Key Words :** *site amplification factor, microtremor, transfer function, deep subsurface profile*

## 1. はじめに

構造物の設計入力地震動の設定においては、震源特性、伝播経路特性、深部地下構造による地震動の増幅特性を考慮する必要があると指摘されている<sup>1)</sup>。これら諸特性のうち、深層地盤による増幅特性については、単に地震基盤相当から地盤の1次元構造としての増幅を考慮するのでは不十分であり、設計入力地震動を合理的に評価する観点からは2~3次元構造としての、鉛直入射のみならず斜め入射を含んだ増幅特性を評価する必要がある。これらの点に関する研究事例も幾つかあるが<sup>2)3)</sup>、現状では3次元的地盤構造が地震基盤まで得られていて解析的な検討が可能な地点は限られていることから、深層地盤による増幅特性(以下、サイト増幅特性と記述)の評価のためには強震観測記録を用いたスペクトルインバージョン<sup>4)</sup>によることが現実的と考えられる。この手法による研究事例も幾つかあり<sup>5)6)7)</sup>、構造物の設計地震動の評価において実務でも用いられ始めている<sup>8)</sup>。ただし、強震観測地点は全国に密に展開されているとはいえ、少し離れた地点で深層地盤の影響により地震動の増幅特性が大きく変わることがあることも広く知られており、強震観測記録のみで設計入力地震動を広範囲かつ正確に評価するには限界がある。このため、サイト増幅特性の評価におけ

る補助材料として、常時微動の活用が考えられる。常時微動観測記録より得られる指標として常時微動H/Vスペクトルの情報を地震動の増幅特性と関連付けて議論する研究が中村の研究<sup>9)</sup>を端緒として数多く行われている<sup>10)11)</sup>。既往の研究には常時微動H/Vスペクトルを主に実体波の観点から議論するもの<sup>9)</sup>と主に表面波の観点から議論するもの<sup>12)</sup>が混在している状況であるが、常時微動H/Vスペクトルが地盤のS波速度構造に関係する何らかの情報を持っているという認識においては広く一致しているといえる。また、常時微動H/Vスペクトルと地震動増幅特性のピーク周波数の調和性についてはかなりの研究事例が蓄積されているほか、両者の倍率の相関に関する研究事例も多い。このような背景に鑑み、著者ら<sup>13)</sup>は、地震基盤から上の地盤の多次元効果等を含んだサイト増幅特性を対象に、特に両者の明瞭なピークの周波数および振幅に着目して、常時微動H/Vスペクトルとの相関について検討し、強震観測が行われていない地点のサイト増幅特性を近傍のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをもとに推定する方法について提案を行った。この方法は後述するように常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅と地震動の増幅倍率に相関があるという前提に基づいたものである。このことは、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数においても表面波が卓越していると考え

と説明できないが、H/Vスペクトルのピーク周波数における振幅については表面波以外のノイズ成分の影響を無視できないと考えられ、地震基盤内に存在する実体波が水平成層地盤によって増幅され、地表で観測されたものがノイズの主成分であると筆者らは考えている<sup>14)</sup>。さて、既往の研究<sup>13)</sup>により強震観測が行われていない地点のサイト増幅特性を常時微動H/Vスペクトルと近傍地点のサイト増幅特性により評価する方法に一定の有用性が示されたが、例えば近傍地点と対象地点の常時微動H/Vスペクトルがピークが明瞭なものと不明瞭なもの組み合わせの場合など、精度に問題が残されているケースもあった。そこで本研究では別のアプローチを試みる。深層地盤構造が明らかな地点を対象に、従来のサイト増幅特性補正方法で用いた情報に加えて、1次元の地震動の増幅特性を用いるものである。前述のように、1次元の増幅特性だけでは実際の増幅特性を評価することはできないため、1次元と実際の地盤の増幅特性のギャップを克服することに眼目を置いた。なお、以下では水平成層地盤に鉛直入射した場合の周波数伝達関数を簡単のため伝達関数と称する。

## 2. 伝達関数、常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性との関係

### (1) 検討対象地点

本研究では、全国の強震観測サイトのうちS波速度1000m/s以上の地層までのS波速度構造が利用可能であり、かつ、著者らが常時微動観測を実施した地点を対象とした。比較的近傍にある強震観測サイト2-3地点をペアとして、東北地方(FKSH14, FKSH16)、中部地方(AICH04, AICH06, AICH12)、中国地方(山陽)(HRS013, HRS13, 広島-G)、中国地方(山陰)(TTRH03, SMNH03, SMNH16)、四国地方(EHM008, 松山-G)を対象とした。このうち、広島-G及び松山-Gは港湾地域強震観測網<sup>15)</sup>の観測サイトである。各地点のS波速度構造は図-1に示すとおりである。S波速度構造は基本的に公開されているものをを用いたが、S波速度2000m/s程度までのデータが得られていない地点については、常時微動アレー観測をもとに推定したS波速度構造を用いている。アレー観測によるS波速度推定については、文献14)に示したとおりである。

### (2) 各特性の算定方法

伝達関数の算定における減衰定数は、「東海地震に関する専門調査会(中央防災会議)」等を参考に  $V_s < 500\text{m/s}$  の場合は  $1/70$ 、 $500\text{m/s}$  以上の場合は  $0.005$  とした。次に、常時微動観測は周期5秒までフラットな特性を有するサーボ型速度計を用いており、常時微動H/Vスペクトルの算出においては長周期の波動成分の影響も考慮できるように、各観測地点について擾乱の少ない163.84秒間のデータを3区間抽出し、その平均値としている。水平成分は直交する2成分の二乗平均の平方根とした。スペクトルの

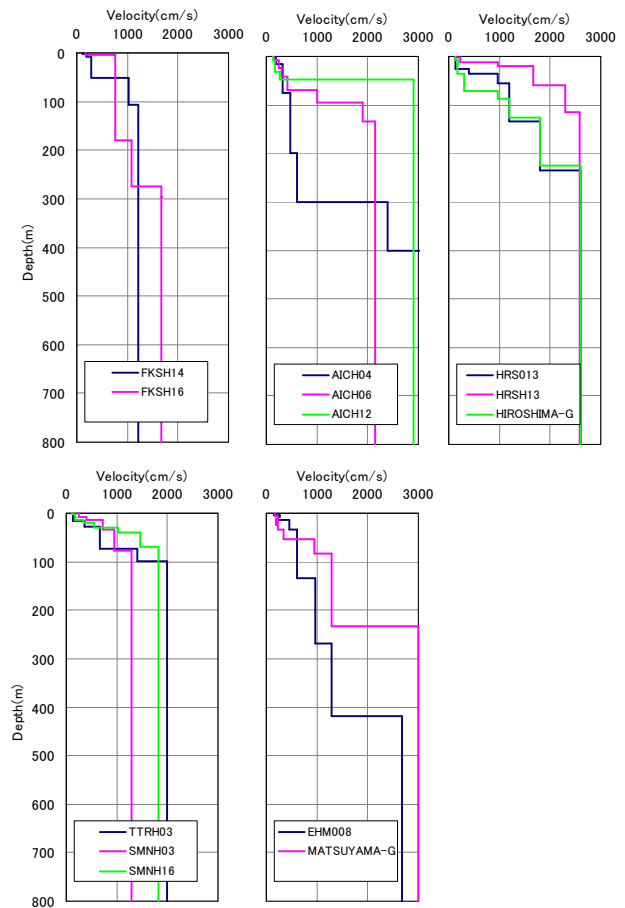


図-1 S波速度構造

平滑化については、長周期においてもピークを明瞭に判別できるようにする観点から水平成分、鉛直成分ともに0.05HzのParzenウィンドウを用いている。

また、サイト増幅特性の算出方法については文献8),16)等に示しているが、本論での議論のために手法を簡単に紹介する。九州、中国・四国、近畿、中部、関東、東北・北海道の6つのブロックにおける防災科学技術研究所のK-NET<sup>17)</sup>、KiK-net<sup>18)</sup>および港湾地域強震観測<sup>15)</sup>の観測記録を対象とした。対象地点数はブロックに応じて301~695、対象地震数はブロックに応じて48~318、対象記録数はブロックに応じて1949~11496である。基準観測点はブロック毎および周波数毎に最もサイト増幅特性の小さい地点としている(ただし軟弱地盤上の観測点を除く)。解析は2段階に分けて行っている。第一段階ではS波を含む40秒間のデータから計算したフーリエスペクトルを対象とし、震源特性の分離を行った。このとき基準観測点でのサイト増幅特性を1とした。第二段階では、震源特性を第一段階で得られたものに固定し、後続位相を含む160秒間のデータから計算したフーリエスペクトルを対象に解析を行い、サイト増幅特性の評価を行った。このように解析を二段階に分けて行ったのは、基準観測点となるような堅固な観測点であっても、40秒のデータから計算したフーリエスペクトルと160秒のデータから計算したフーリエスペクトルには若干の差があり、この差が震源特性の評価に与える影響を避けるためである。分

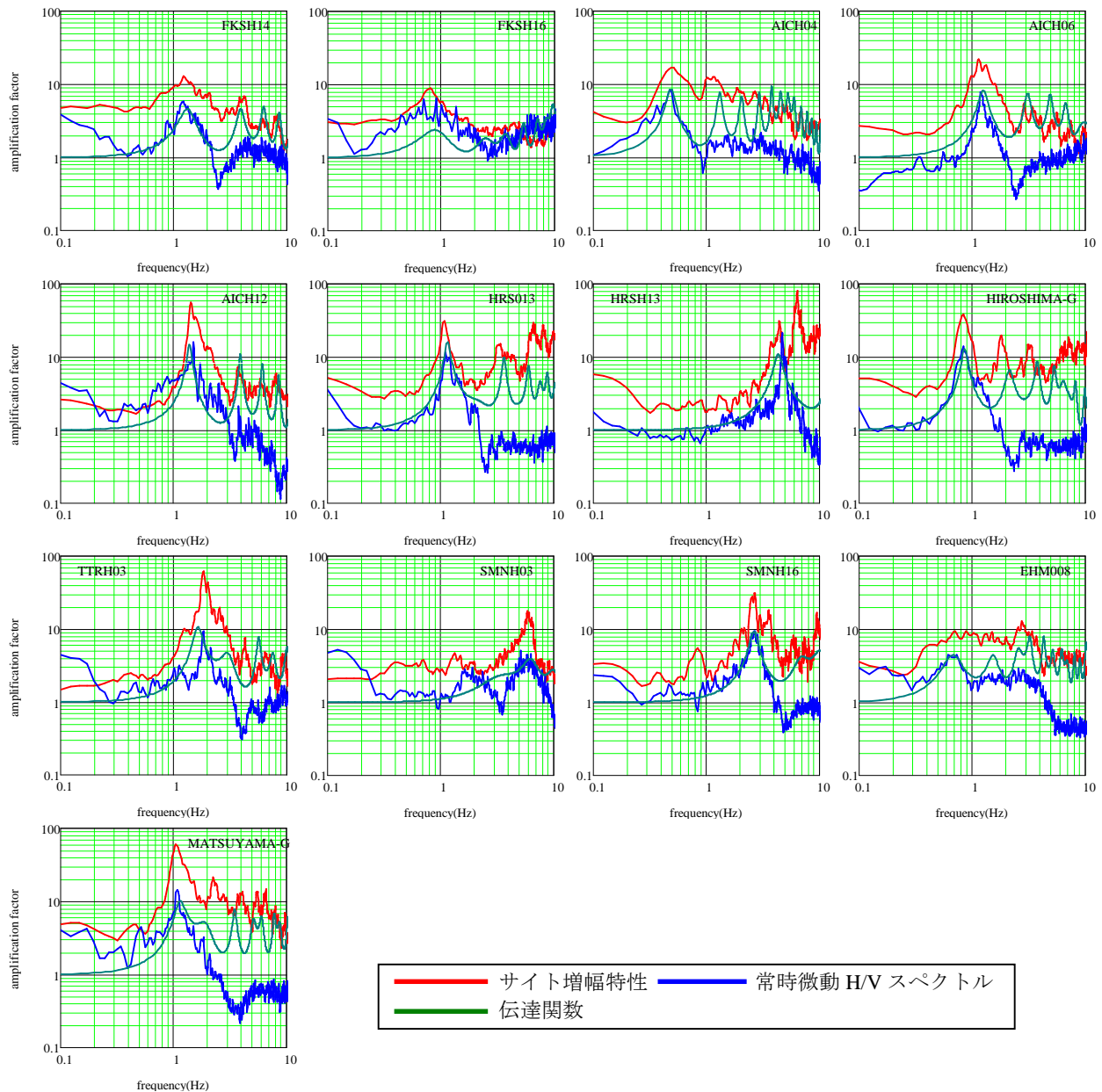


図-2 1次元伝達関数，常時微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係

離された震源特性の低周波側のフラットレベルから地震モーメントを評価し、F-net<sup>19)</sup>のCMT解と比較すると、両者は概ね対応するので、ここで得られたサイト増幅特性はほぼ地震基盤に対応するものと考えられる。なお、サイト増幅特性はスペクトルインバージョンにおけるデータ数が少ないものを除外してデータ数3以上の地点のみを対象としている。

### (3) 伝達関数，常時微動H/Vスペクトルとサイト増幅特性の関係

各サイトにおける1次元重複反射理論による周波数伝達関数，常時微動 H/V スペクトルとサイト増幅特性の関係は図-2に示すとおりである。

3者の1次のピーク周波数は概ね良く一致しており、常時微動H/Vスペクトルを用いて深層地盤による増幅特性を議論することの妥当性が示されているといえる。振幅については、サイト増幅特性は長周期レ

ベルにおいても1には収束せず、数倍の増幅倍率となっているほか、全体的に伝達関数よりも大きな増幅倍率を示している。伝達関数の1次のピークの増幅倍率は、常時微動H/Vスペクトルの1次のピークの振幅に近い値を示すことも特徴で、既往の研究<sup>14)</sup>と同じ傾向である。

このように、伝達関数とサイト増幅特性は包絡形状に類似点は認められるものの、設計地震動評価や地震危険度評価の際に重要な増幅倍率に関しては違いが大きい。

## 3. 長周期レベルの増幅倍率の評価

全国を北海道・東北，関東，東海・甲信・北陸，近畿，中国・四国，九州の6地区に区分し，地区ごとに微動のタイプや基盤のS波速度に着目して堆積

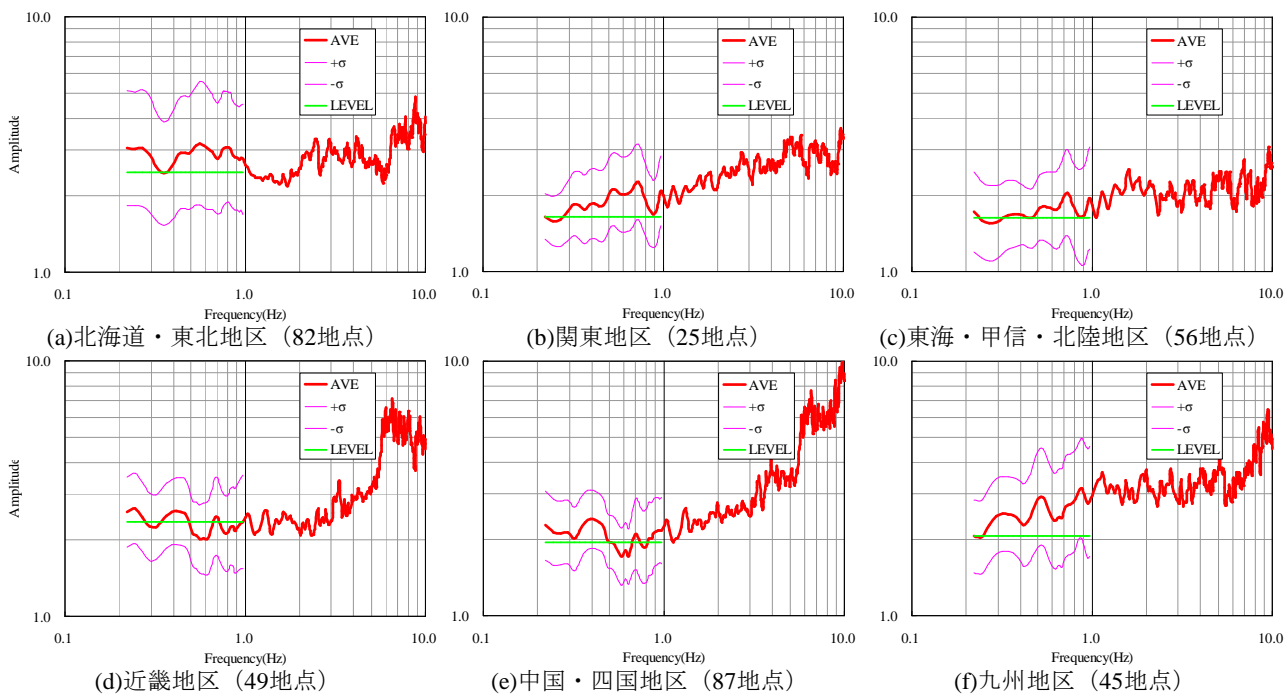


図-3 平均的サイト増幅特性

表-1 1Hz以下のサイト増幅特性平均値

地区	平均値 バラツキ最小 $f$	対数標準偏差 (0.2~1Hz)
北海道・東北	2.46	0.220
関東	1.64	0.136
東海・甲信・北陸	1.63	0.154
近畿	2.35	0.144
中国・四国	1.95	0.124
九州	2.05	0.181

層が薄いと判断された地点のサイト増幅特性の平均化を行い、堆積層が薄い地点の平均的サイト増幅特性の算定を行った。なお、ここで対象とする薄い堆積層とは、第四紀の堆積層、風化岩層、盛土層などを総じて呼ぶものである。また、ここでの地区の区分は便宜的なものであり、地体構造や深部地盤構造との対比については今後の課題とする。なお、同様の検討は既往の研究<sup>20)</sup>でも行っているが、本研究においては更に検討対象地点数を増やして精度を高めた。平均的サイト増幅特性の算定結果を図-3に示す。各地区のデータ数は図のキャプションの括弧内に示したとおりである。図中AVEは各地区の対数平均、 $\pm\sigma$ は対数平均 $\pm$ 対数標準偏差の値を示す。また、LEVELは1Hz以下のサイト増幅特性の対数標準偏差が最小となる周波数 $f$ における平均値である。

図-3のそれぞれの地区の0.2Hz~1.0Hzの範囲に着目すると、概ねフラットで2倍程度の値を示している。これは仮想的な地震基盤に対して、実際の岩盤地点の平均的な増幅特性を示していると考えられる。また、標準偏差を見ると、0.2~1.0Hzの間で対数標準偏差0.2程度の値を示している。表-1には1Hz以下のサイト増幅特性の対数標準偏差が最小となる周波

数 $f$ における平均値および対数標準偏差の平均値を地区毎に示す。

北海道・東北地区の平均的サイト増幅特性は2.46となり、他の地区の平均的サイト増幅特性と比べて大きい値となっている。これは対数標準偏差の値が他の地区と比べて大きい値となっていることが要因である可能性が考えられる。近畿、中国・四国地区および九州地区の平均的サイト増幅特性は関東、東海・甲信・北陸地区の平均的サイト増幅特性と比べて大きい値となっている。これは、中国地方や九州北部が他の地域に比べて、実体波より幾何減衰が小さいLg波の発達しやすい環境である可能性が考えられる。

#### 4. 深層地盤構造と常時微動の活用によるサイト増幅特性の評価方法

##### (1) 評価方法

本研究では、深層地盤構造と常時微動の活用によるサイト増幅特性の評価法として、伝達関数を補正する方法を検討する。具体的には、多次元効果等による1次元鉛直入射を上回る増幅特性について、1次のピーク周波数における増幅倍率について既往の研究<sup>13)</sup>による方法と整合する結果が得られるものとし、併せて3. で述べた仮想的な地震基盤に対する実際の岩盤地点の平均的な増幅特性が長周期レベルの増幅倍率に反映されるものと考え、両者を併せて考慮するものである。

本研究によるサイト増幅特性の評価式は式(1)のとおりである。

$$a(f) = \left\{ (a_{1D}(f) - 1) \frac{p_e}{p_{1D}b} + 1 \right\} b \quad (1)$$

ここに、 $a(f)$ : サイト増幅特性推定値、 $a_{1D}(f)$ : 1次元地盤構造による増幅倍率、 $p_e$ : 1次ピーク増幅倍率推定値 (文献13)14)による)、 $p_{1D}$ : 1次元地盤構造による1次ピーク増幅倍率、 $b$ : ベース増幅倍率 (長周期成分)、 $f$ : 周波数である。

ベース増幅倍率 $b$ は地区毎に3. による値を用いる。1次ピーク増幅倍率推定値 $p_e$ の算定方法<sup>13)14)</sup>は、近傍地点のサイト増幅特性の1次ピーク振幅に、常時微動H/Vスペクトルの1次のピーク振幅の比 (= 対象地点/近傍地点) を乗じることで求める。

## (2) 評価結果

サイト増幅特性と本研究及び既往の研究<sup>13)14)</sup>によるサイト増幅特性推定値を図-4に比較して示す。図中のX to Yの表記は、近傍の地点Xの情報を用いて対象地点Yのサイト増幅特性を評価したことを示す。以下の議論のために既往の研究<sup>13)14)</sup>による算定手法を簡単に紹介する。

- ① サイト増幅特性が既知のA地点のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルを、A地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数( $f_A$ )が、サイト増幅特性が未知のB地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数( $f_B$ )に一致するように対数軸上で平行移動して補正する<sup>21)</sup>。いま、A地点の補正前のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルをそれぞれ $AMP_A(f)$ 、 $HV_A(f)$ とすると、補正後のサイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトル $AMP_A(f)'$ 、 $HV_A(f)'$ は次式で表すことができる。

$$\Delta f = f_B / f_A \quad (2)$$

$$AMP_A(f)' = AMP_A(f / \Delta f) \quad (3)$$

$$HV_A(f)' = HV_A(f / \Delta f) \quad (4)$$

- ② A、B両地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅の違いがA、B両地点のサイト増幅特性の着目するピーク振幅の違いを反映している可能性が高いことから、サイト増幅特性が未知のB地点のサイト増幅特性 $AMP_B(f)$ は、平行移動したA地点のサイト増幅特性 $AMP_A(f)'$ に、A、B両地点の常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅の比 ( $HV_B^{peak} / HV_A^{peak}$ ) を乗じることによって算定する。

$$AMP_B(f) = AMP_A(f)' \cdot (HV_B^{peak} / HV_A^{peak}) \quad (f > f_0) \quad (5)$$

- ③ このように処理を行うと、低周波レベルがA、B地点で大きく異なってしまうことから、低周波レベルに対しては、常時微動H/Vスペクトルのピーク振幅の比 ( $HV_B^{peak} / HV_A^{peak}$ ) ではなく、常時微動H/Vスペクトルの周波数ごとの振幅比

( $HV_B(f) / HV_A(f)'$ ) を乗じる。②と③の境界は、ピーク周波数より高周波数側で、②による値が③による値をはじめて上回る周波数 $f_0$ とする。

$$AMP_B(f) = AMP_A(f)' \cdot (HV_B(f) / HV_A(f)') \quad (f \leq f_0) \quad (6)$$

図-4を見ると、既往の研究による方法では、低周波領域で常時微動H/Vスペクトルの振幅比を利用するため、2地点の常時微動H/Vスペクトル振幅の違いが大きい場合は、実際よりも過大ないしは過小なサイト増幅特性評価となる場合がある (例: FKSH14⇔FKSH16, AICH06⇔AICH12, 松山-G⇔EHM008等)。さらに、既往の研究による方法ではサイト増幅特性の対数軸上での平行移動を行うが、その移動量が大きい場合は、もともとスペクトルインバージョンにおける精度が確保されていないものの工学的に重要でない周波数帯域であるため無視できた増幅倍率が、平行移動によって工学的に重要な周波数帯域に出現し、このため過大または過小な評価が看過できないと考えられるケースがある。この例としてHRSH13のサイト増幅特性をもとにした補正のケースが挙げられる。図-5に示すように、HRSH13のサイト増幅特性は9Hz程度から急激に増加していたが、工学的に重要でない周波数帯であったため設計地震動評価などでは大きな問題とならなかった。しかしながら、1次ピーク周波数を合わせるために対数軸上で平行移動した結果、2Hz程度から急激に大きな増幅倍率と見なされる結果となっており、設計地震動評価等では無視し得ない問題となると考えられる。

一方、提案法では、既往の研究に見られるような問題点は認められず、概ねサイト増幅特性を良い精度で評価できていると考えられる。ただし、AICH04⇔AICH06やAICH04⇔AICH12のように、高周波数領域で若干過大な評価結果となるケースも見受けられる。前述のように提案法では伝達関数の評価において周波数依存を考慮しておらず、今後更に改善に向けた検討が必要と考えられる。

## 5. おわりに

本研究では、深層地盤構造、常時微動H/Vスペクトル、近傍地点のサイト増幅特性をもとに対象地点のサイト増幅特性を評価する方法について検討を行った。既往の研究による方法と比較すると、本研究による方法は概ねサイト増幅特性を良い精度で評価できることが分かった。ただし、高周波数領域で若干過大な評価結果となるケースも見受けられることから、今後更に改善に向けた議論が必要である。

謝辞: K-NETおよびKiK-netの強震観測記録及び土質データについては独立行政法人防災科学技術研究所のホームページ (<http://www.kik.bosai.go.jp>) より入手しました。また、港湾地域強震観測のデータはホ

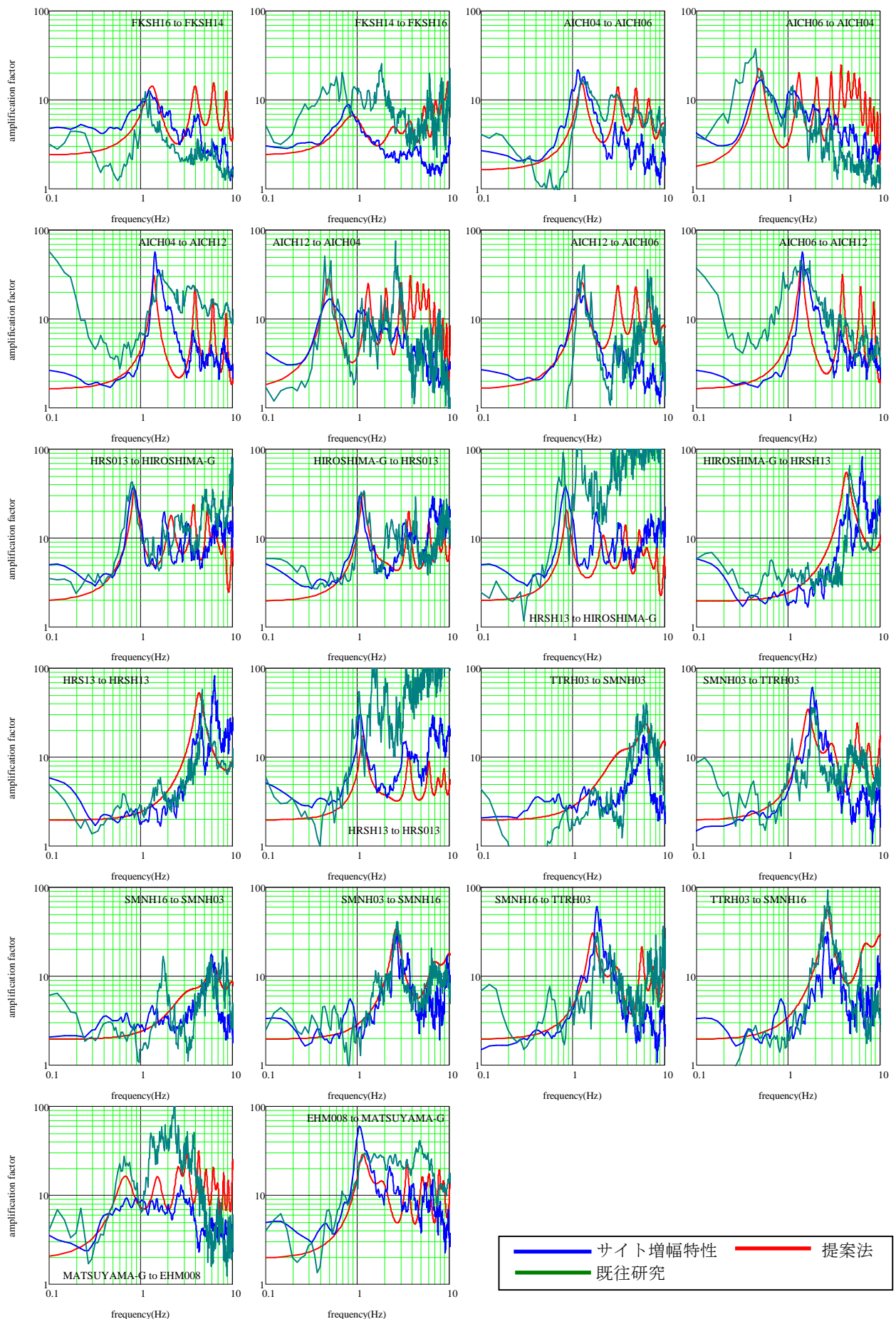


図-4 サイト増幅特性と本研究及び既往の研究<sup>13)14)</sup>によるサイト増幅特性推定値の比較

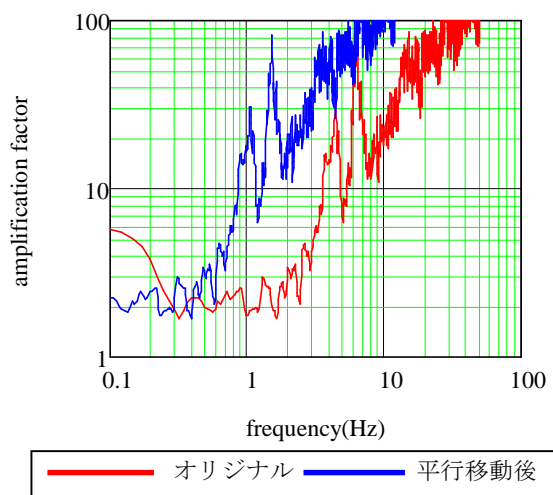


図-5 HRS13 サイト増幅特性

ホームページ(<http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>)より入手可能である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震設計ガイドライン（案）－耐震基準作成のための手引き－，2001.
- 2) 増井大輔，翠川三郎：工学的基盤での地震動にみられる深い地盤構造による増幅特性，土木学会論文集 A, Vol.62, No.2, pp.225-232, 2006.
- 3) 長尾 毅，山田雅行，野津 厚：深い盆地構造におけるサイト増幅特性に対する入射角の影響に関する研究，構造工学論文集 Vol.54A, pp.247-255, 2008.
- 4) 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 2, Vol.39, No.4, pp.579-593, 1986.
- 5) 佐藤智美，巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，No.556, pp.15-24, 2002.
- 6) 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，第 4 巻，第 4 号，pp.126-145, 2004.
- 7) 荘司雄一，神山 眞：Small-Titan の観測記録に基づく震源・伝播経路・ローカルサイト特性の推定，土木学会論文集，No.703, I -59, pp.237-253, 2002.
- 8) 長尾 毅，山田雅行，野津 厚：フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析，土木学会論文集，No.801, I -73, pp.141-158, 2005.

- 9) 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.
- 10) Bard, P-Y. : Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?, *The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds), Balkema, pp.1251-1279, 1999.
- 11) Kudo, K., Sawada, Y. and Horike, M. : Current studies in Japan on H/V and phase velocity dispersion of microtremors for site characterization, Proc. 13WCEE, Paper No.1144, 2004.
- 12) 時松孝次，宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係，日本建築学会構造系論文報告集 No.439, pp.81-87, 1992.
- 13) 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.56A, CD-ROM, 2010.
- 14) 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.
- 15) 野津 厚，菅野高弘：港湾地域強震観測年報 (2007)，港湾空港技術研究所資料 No.1184, 2008.
- 16) 野津 厚，長尾 毅，山田雅行：スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例，日本地震工学会論文集，第 7 巻，第 2 号，pp.215-234, 2007.
- 17) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 18) Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara, and Y. Okada: New strong-motion observation network: *KiK-net*, *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, 81, 329.
- 19) Fukuyama, E., M. Ishida, S. Hori, S. Sekiguchi and S. Watada: Broadband seismic observation conducted under the FREESIA Project, *Rep. Nat'l. Res. Inst. Earth Sci, Disas. Prev.* 57, 23-31, 1996.
- 20) 長尾 毅，山田雅行，野津 厚：堆積層が薄い地点におけるサイト増幅特性の簡易評価法の検討，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) [特]地震工学論文集，Vol.66, No.1, pp.1-11, 2010.
- 21) 長尾 毅，平松和也，平井俊之，野津 厚：高松港における被害地震の震度再現に関する研究，海洋開発論文集，第 22 巻，pp.505-510, 2006.

# A STUDY ON EVALUATION METHOD OF SITE AMPLIFICATION FACTOR BY USE OF MICROTREMOR AND DEEP SUBSURFACE PROFILE

Takashi NAGAO, Masayuki YAMADA and Atsushi NOZU

This study discusses an estimation method of the site amplification factor by use of microtremor and deep subsurface profile. The proposed method applies basic amplification factors obtained by statistical data analyses and first order peak amplification factors by use of microtremor H/V spectrum and the site amplification factor at a nearby site. Transfer function regarding deep subsurface profile is modified so as to show the estimated basic and first order peak amplification factors. Thirteen sites are picked up for the study and applicability of the method is discussed.