クリギング法等を用いた中部・西部日本の サイト増幅特性の簡易評価法に関する研究

長尾 毅¹・福田 健²・伊藤 佳洋³

¹正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

²学生会員 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: 160t129t@stu.kobe-u.ac.jp

³正会員 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: itoys@newjec.co.jp

深層地盤構造による増幅特性は一般に一次元構造を仮定した増幅特性と比較して大きな振幅を示す。このため、解析的にサイト増幅特性を精度良く評価することは困難を伴うことが多く、強震記録の解析により評価される。一方で、耐震設計や地震防災の観点からはサイト増幅特性を任意の地点で簡易に評価することが求められる。本研究では、一次元の深層地盤構造を仮定した周波数伝達関数を補正することでサイト増幅特性を安全側に評価する方法について、中部・北陸・中国・四国地方を対象に、クリギング法等の適用を検討した。さらに、周波数伝達関数の精度が悪い場合の改善方法として、常時微動H/Vスペクトルを用いて精度向上を図る方法についても検討した。

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

1. はじめに

地震動は、震源特性、伝播経路特性、浅部・深部地盤による地震動増幅特性に依存する¹⁾。このため、地震動は震源依存かつ地点依存であることを踏まえて設定する必要がある²⁾。設計基準類においても、地点ごとにこれらの点を考慮して設計地震動を求めることも行われつつある³⁾が、数多くの基準類では依然として地盤分類等に応じた数例の代表的なスペクトル等を用いて設計を行うことを標準としている。上記の3特性のうち、浅部・深部地盤による地震動増幅特性(以下、サイト増幅特性)は地点ごとに大きく異なる場合が多く、かつ複雑な深層地盤構造により、1次元の水平成層構造による増幅倍率よりも大きな増幅倍率を示す場合が多い。

このために、任意の地点のサイト増幅特性を正確に評価することは困難を伴う。このことが、多くの設計基準類でサイト増幅特性を的確に反映した設計地震動の採用に至っていない理由の一つであると考えられる。

サイト増幅特性の評価のために、これまでにスペクトルインバージョン⁴⁾を用いた評価が行われてきた⁵⁾。スペクトルインバージョンは、大深度のボーリングや大規模な地下探査などを実施することなく、地表での地震観測

記録をもとにサイト増幅特性の評価を可能にする優れた手法である。しかし、全国的な地震観測網は整備されている現状ではあるものの、強震計の設置間隔は数キロ～数十キロメートル程度離れているため、対象地点の直近で強震計が設置されていない場合にはサイト増幅特性の評価が困難となる。対象地点より離れた地点のサイト増幅特性をもとに、常時微動H/Vスペクトル比を用いて対象地点のサイト増幅特性を評価する試みも見られるが^{6) 7) 8)}、常時微動H/Vスペクトルを用いるだけでは補正精度に問題がある場合があることも考えられるとともに、常時微動H/Vスペクトルのピークが明瞭でない場合には補正が困難であるなどの問題も残されている。

近年、深層地盤情報と表層地盤情報は各方面でデータベース化の努力がなされ、容易に入手できる環境が整いつつある。そこで、深層地盤情報をもとに、より簡易な方法として、地震基盤に至る地盤構造をもとにした1次元の水平成層を仮定した周波数伝達関数(以下、周波数伝達関数)を補正することでサイト増幅特性を評価する方法も近畿地方を対象に提案されている⁹⁾。この方法は周波数伝達関数の1次ピーク周波数をもとにして回帰分析を用いて補正方法を決定するものである(以下、ピーク周波数法と記述)。さらに、この簡易法については、

空間的確率現象に対する統計的手法のうち代表的な方法であるクリギング法^{10, 11)}を用いて対象地点の近傍のサイト増幅特性から対象地点のサイト増幅特性の補正方法を決定する方法について、近畿地方と九州地方の港湾を対象に検討が行われた¹²⁾。その結果として、ピーク周波数法よりもクリギング法の方がサイト増幅特性を精度良く推定できる地点が多いことが示されている。本研究では、検討が行われていない中部・北陸・中国・四国地方を対象に、クリギング法の適用性について検討を行うとともに、精度検証のため、ピーク周波数法についても検討を行った。さらに、周波数伝達関数の精度が悪い場合の改善方法として、常時微動 H/V スペクトルを用いて周波数伝達関数を補正することによる精度向上についても検討を行った。

なお本研究では、サイト増幅特性の精度が確認されている 0.2Hz 以上¹³⁾、工学的に重要な周波数帯として 10Hz 以下の増幅特性を対象として議論する。

2. サイト増幅特性の簡易評価法

(1) サイト増幅特性

サイト増幅特性の算出方法については文献⁵⁾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。本研究で対象とする地方については、防災科学技術研究所の K-NET¹⁴⁾・KiK-net¹⁵⁾および港湾地域強震観測網¹⁶⁾の観測記録を対象とした。基準観測点を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(ただし軟弱地盤上の観測点を除く)、基準観測点に対する各観測点の増幅特性を評価している。

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-net¹⁷⁾のCMT解と比較すると、両者は概ね対応するため、得られたサイト増幅特性はほぼ地震基盤から地表に至る増幅特性に対応するものと考えられる。

(2) サイト増幅特性と1次元増幅特性の比較

本研究で扱う増幅特性は深層地盤を含んだ増幅特性であるため、深部地盤構造が必要となる。深層地盤構造については、地震ハザードステーション(J-SHIS)¹⁸⁾により公開されているデータを用いた。表層地盤データについては、K-NET等において公開されているデータを用いた。表層地盤の情報と深層地盤の情報を統合して1次元の深層地盤データを作成した。表層地盤の地盤情報はPS検層等の実施により一定の精度が保たれていると考えられるが、深層地盤の情報は大規模な物理探査結果等をもとに設定されていると考えられ、全ての強震観測点で十分な精度の情報が設定されているとは必ずしもいえないと考えられる。統合にあたり、表層地盤の最深部の情報と対応する深度の深層地盤情報を照合し、既往の研究による以下の方針⁹⁾で両者を結合した。

(i) 深層地盤データがただ1層のみ登録されている場合は、表層地盤の最下層がさらに層厚30m続いているものと仮定した。

(ii) 表層地盤最下層のS波速度 (V_{ss}) と深層地盤の対応する深さのS波速度 (V_{sd}) の関係が $V_{sd} > 3V_{ss}$ の場合は、表層地盤の最下層がさらに層厚30m続いているものと仮定した。

(iii) 上記に該当しない場合は、表層地盤最下層と該当する深さの深層地盤土層の層厚を同じとした。

以上の方針は表層地盤の情報と深層地盤の情報が食い違うことが多いことを踏まえて、表層地盤の情報を優先的に取り扱った際の一つの考え方であり、十分な根拠に基づいたものではない。この方法の妥当性などは今後慎重に精査する必要があると考えられる。このようにして設定された地盤構造をもとに1次元の増幅特性を評価するが、減衰定数については、参考文献¹⁹⁾等を参考に $V_s < 500\text{m/s}$ の場合は1/70、500m/s以上の場合は0.005とした。

図-1 に EHM011 を対象に、サイト増幅特性と周波数伝達関数を比較する。両者の不整合な点として、(i) 低周波領域 (0.2-0.3Hz) の振幅、(ii) 最大振幅、(iii) 包絡形状の

図-1 サイト増幅特性と周波数伝達関数の比較

3 点の違いを挙げることができる⁹⁾。なお、(i)の周波数帯域は、サイト増幅特性が 0.2Hz 以上の領域で精度を確保している¹³⁾ことを考慮して設定している。

(3) 簡易評価法による補正方法

上記の 3 点の問題を踏まえ、簡易評価法においては、以下の手順により増幅特性を評価する⁹⁾。

(i)周波数伝達関数のピーク周波数をバンド幅（ただし上限は 4Hz）とする Parzen ウインドウで 1 次元増幅特性を平滑化する。

(ii)平滑化した増幅特性に以下の係数を乗じる。

・0.25Hz 以下の領域では、0.25Hz で後述する低周波倍率 (A_{lf}) の推定値になるように係数 C_1 を乗じる。

・XHz 以上では、平滑化した周波数伝達関数のピーク値が推定ピーク値になるような係数 C_2 を乗じる。

・0.25-XHz の区間は C_1 と C_2 を補間した係数を乗じる。
X は 1.25 と周波数伝達関数のピーク周波数のうち小さい方の値とする。

簡易評価法においては、低周波領域の倍率とピーク倍率を次の 2 種類の方法で推定することで任意の地点の増幅特性を評価する。簡易評価法のうちピーク周波数法は、これら指標を周波数伝達関数のピーク周波数との統計分析により推定するものであり、クリギング法はこれら指標をクリギング法を用いて推定する。

なお、簡易評価法で推定対象とする低周波領域の倍率は後述する A_{lf} であり、ピーク倍率は後述する R_a に 1 次元増幅特性の最大倍率を乗じたものであるが、上記①で述べたように簡易推定法では平滑化した周波数伝達関数を用いるため、平滑化した周波数伝達関数における低周波倍率及びピーク倍率はどれも平滑化前の値とは異なる。このため A_{lf} 及び R_a は C_1 及び C_2 とは異なる値となることに注意が必要である。

3. クリギング法による簡易評価

(1) クリギング法

クリギング法^{10),11)}は、地球統計学と呼ばれる手法の代表的な方法であり、対象地点 s_0 における推定値をその周辺の地点 s_i におけるデータの重みつき平均として評価する。

$$z^*(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad (1)$$

ここに、 $z^*(s_0)$: $z(s_0)$ の不偏推定量、 λ_i : 重みであり、式(2)に従う。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2)$$

$z^*(s_0)$ は、その分散値が観測値の他のどの線形結合より

も小さくなるように得られると仮定する。これより、

$$E[z(s_0) - z^*(s_0)] = 0 \quad (3)$$

$$Var[z(s_0) - z^*(s_0)] = \min \quad (4)$$

ここに、 E 及び Var はそれぞれ期待値および分散である。分散を最小化するためにラグランジュ未定乗数法を用いることで重み λ_i が求められる。

(2) クリギング法による簡易評価

クリギング法においては、空間分布特性をセミバリオグラムを用いて評価する。セミバリオグラムの評価にあたり、統計解析の精度を高める観点から検討対象地方の K-NET, KiK-net, 港湾地域強震観測網のサイト増幅特性評価が行われている全地点¹³⁾を対象に統計解析を行った。今回はセミバリオグラム球形モデルを用いている。

クリギング法で対象地点の低周波倍率、最大振幅比を評価するにあたり、強震観測地点は平面上で一定の間隔で設置されているわけではない。このためまず、平面上で 10km グリッド上で低周波倍率、最大振幅比を推定し、対象地点近傍のグリッドにおける推定値をもとにして対象地点の値を推定するという手順を取る。その際、検討対象地点ごとに、対象地点のデータを除外したデータセットを作成してグリッドの推定値等を求めている。なお、クリギング法については、近傍に他の強震観測点が存在しない離島では適用が困難である¹²⁾が、本研究で対象とした中国・四国および中部地方においてはそのような地点は存在しなかった。

図-2、図-3 にクリギング法による推定値と経験的サイト増幅特性による値（真値と呼ぶ）の比較を中部・北陸地方を対象として示した。

4. ピーク周波数法による簡易評価

図-4に中部・北陸地方、図-5に中国・四国地方における低周波倍率 A_{lf} と 1 次元増幅特性のピークの周波数 f_p の関係を示す。 f_p は 0.1-10Hz の領域で増幅倍率が最も高い周波数としている。■のマークは区間平均であり、対数軸上で等間隔となる区間で平均としている。ここでは鉛直軸を対象に区間平均を算出し、区間平均を対象に回帰式（図中の実線）を求めた。これらの結果より求められた回帰式は中部・北陸地方について式(5)、中国・ a_{lf} 四国地方について式(6)のとおりである。

$$A_{lf} = 10^{0.49} f_p^{-0.11} \quad (5)$$

$$A_{lf} = 10^{0.44} f_p^{-0.21} \quad (6)$$

図-2 中部・北陸地方における低周波倍率推定結果

(a)ピーク倍率比推定値

(b)ピーク倍率比真値

図-3 中部・北陸地方におけるピーク倍率比推定結果

図-4 低周波倍率とピークの周波数の関係
(中部・北陸地方, ■は区間平均値)

図-5 低周波倍率とピークの周波数の関係
(中国・四国地方, ■は区間平均値)

図-6 最大振幅比とピークの周波数の関係
(中部・北陸地方, ■は区間平均値)

図-7 最大振幅比とピークの周波数の関係
(中国・四国地方, ■は区間平均値)

ピークの倍率については、対象とする0.2-10Hzの領域における1次元増幅特性の最大倍率に対するサイト増幅特性の最大倍率比を最大振幅比 R_a と定義し、1次元増幅特性のピークの周波数 f_p の関係より検討する。図-6に中部・北陸地方、図-7に中国・四国地方について両者の関

係を示す。最大振幅比が極端な場合の影響を排除する観点から、最大振幅比の5%比超過値及び95%超過値のデータは排除して区間平均(■のマーク)を算出し、回帰式(図中の実線)を求めた。中部・北陸地方については、ピーク周波数が1Hz未満の領域ではデータ数が少なく、区間平均値の精度に問題がある可能性を考慮し、1Hz以上の領域の区間平均値を対象に回帰を行った。

回帰式としては、中部・北陸地方について式(7)、中国・四国地方について式(8)が得られた。

$$R_a = 10^{0.26} f_p^{-0.21} \quad (7)$$

$$R_a = 10^{0.41} f_p^{-0.15} \quad (8)$$

なお、図より明らかなように低周波倍率及び最大振幅比の何れもばらつきが大きく、ピーク周波数法による結果には誤差が大きく含まれ、適用性には限界があると考えられる。

5. 両手法による増幅特性の推定精度の比較

クリギング法、ピーク周波数法による増幅特性の評価結果について、中国・四国地方で30地点、中部・北陸地方で24地点を例として図-8～図-10に示す。

堆積層の非常に薄い地点(例えば、図-9のTTR003、図-10のGIF026等)では周波数伝達関数により概ねサイト増幅特性を説明できるのに対して、それ以外のほとんどの地点では周波数伝達関数をサイト増幅特性として用いると過小評価となる。

一方簡易評価法では、例えば図-8のEHM011、TKSH02、図-9のOKYH04、SMN002、TTR003、図-10のTYM001等の地点においては増幅特性をかなり過大評価しているほか、図-10のNGN015においては周波数伝達関数よりも増幅特性を大きく評価しているものの、経験的サイト増幅特性と比較すると過小評価である。NGN015の誤差については後に考察する。しかしながら、図-8のKGWH02、図-9のHRSH07、OKY012、AICH14、図-10のISKH04のように、周波数伝達関数と比較すると簡易評価法を用いることでサイト増幅特性の評価精度が大きく向上する地点があるといえる。なお図-10のISKH04については、3Hz以上の帯域で過大評価となるが、土木構造物の耐震性評価において特に重要な周波数帯については精度が確保できているものと考えられる。

この他の簡易評価法に誤差が大きいケースの特徴として、周波数伝達関数のピーク周波数とサイト増幅特性のピーク周波数にずれがある場合が指摘できる。例えば図-8のKOC015、KOMATSUJIMA-G、HRS019等の地点がこれに該当し、これは深層地盤構造の誤差によるところ

—— サイト増幅特性 ——— ピーク周期数法 ——— クリギング法 ——— 1次元周期波数伝達関数

図-8 サイト増幅特性推定結果

図-9 サイト増幅特性推定結果

図-10 サイト増幅特性推定結果

図-11 NGN015 周辺地点 (Google マップに加筆)

図-12 残差二乗比の累積分布
(クリギング法, 中部・北陸地方)

図-13 残差二乗比の累積分布
(ピーク周波数法, 中部・北陸地方)

が大きいのと考えられる。これら地点の精度向上方策については次章で検討する。

次にクリギング法とピーク周波数法の結果について比較検討する。全体的な傾向としては、2つの手法による増幅特性は大きな差が認められない地点が多い。ただし

幾つかの地点については推定結果に有意な差が認められる。2つの手法の違いは、低周波倍率とピーク倍率の違いだけであるが、傾向としてどちらかの手法が必ず大きな倍率となるというわけではない。2つの手法の差が大きくなる地点として、例えば図-10のHRSH06、図-11のSMN002、TTR003、AIC001、図-12のNGN015、ISK001等が挙げられるが、前述のように何れの手法もサイト増幅特性を過小評価している NGN015 以外の地点ではピーク周波数法よりもクリギング法の方がサイト増幅特性を精度良く推定できているといえる。特に図-11のAIC001では、クリギング法ではサイト増幅特性を精度良く推定できているのに対して、ピーク周波数法ではかなり過大評価となることが分かる。

次に、周波数伝達関数のピーク周波数には大きな誤差は含まれていないと考えられるものの、特にクリギング法ではサイト増幅特性を過小評価した NGN015 について、周辺地点を含めたサイト増幅特性を図-11に示す。図より分かるように、NGN015はサイト増幅特性の倍率が比較的低い地点に囲まれている。クリギング法においては、対象地点の周辺の地点の情報から対象地点の倍率を推定するため、このように増幅特性が周辺地点から急激に変化している地点においては推定精度が大きく低下するといえる。

次に、既往の研究⁹⁾と同様に、構造物の耐震性などの議論で特に重要と考えられる周波数帯における簡易評価法によるサイト増幅特性の推定精度を1次元増幅特性と比較する。周波数帯としては0.2-2Hzと0.2-5Hzの2つを設定する。この2区間について、1次元増幅特性と簡易評価法による増幅倍率とサイト増幅特性との残差二乗を算出した。1次元増幅特性の残差二乗に対する簡易評価法の残差二乗を残差二乗比(Rres)と定義し、残差二乗比の累積分布を中部・北陸地方を対象に図-12および図-13に示す。横軸1未満が簡易評価法の方が1次元増幅特性と比較して精度が良いことを示す。

0.2-2Hzの範囲ではクリギング法では80%程度の地点で、ピーク周波数法では70%程度の地点で周波数伝達関数よりもサイト増幅特性の推定精度が良い。図示しないが中国・四国地方も同様の傾向で、前者が80%、後者が70%の地点で簡易評価法が推定精度が良く、何れもクリギング法の方がピーク周波数法と比較して精度が良い地点が多い結果となった。これは近畿・九州地方の港湾を対象とした検討結果¹²⁾と同様の結果であった。なお近畿地方のピーク周波数法による推定⁹⁾では精度が良い地点は80%程度であったため、本研究の対象地点ではピーク周波数法による推定精度は近畿地方よりも若干劣る結果となった。

また、周波数帯として0.2-5Hzまでの範囲とした場合は、クリギング法およびピーク周波数法では精度の良い

図-14 常時微動H/Vスペクトルを用いた補正結果

地点の割合はそれぞれ 70%, 60%に減少する. 図示していない中国・四国地方も同じ傾向であった. 近畿地方のピーク周波数法による推定⁹⁾では精度が良い地点は 65%程度であったため, 本研究の対象地点ではこの帯域においてもピーク周波数法による推定精度は近畿地方よりも若干劣る結果となった.

6. 常時微動 H/V スペクトルを用いた評価精度向上の試み

前述のように, 周波数伝達関数の評価に用いる深層地盤構造に誤差が多く含まれている場合, いずれの手法によってもサイト増幅特性の推定精度が低くなる. しかしながら, 深層地盤構造を全ての地点で精度良く評価することは現時点では困難である.

一方, 適用の容易な常時微動観測により得られる常時微動 H/V スペクトルから評価されるピーク周波数は, サイト増幅特性のピーク周波数と良く一致することが指摘されている²⁰⁾. その際, 常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数に参照する増幅特性のピーク周波数を一致させることでサイト増幅特性の推定精度を高める方法が提案されている²⁰⁾ことから, 本研究では常時微動観測地

図-15 推定精度の変化

点において周波数伝達関数のピーク周波数が常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数に一致するように対数軸上で平行移動させたうえでこれまでの方法により簡易推定を行った. 検討は2つの手法のうち精度が高い地点の多いクリギング法とした. 対象地点は図-8の上2列に示した6地点である. 補正結果を図-14に示す. 図-8との比較により, ピーク周波数が一致することでサイト増幅

特性の推定精度が高まる地点が多いことが分かる。上述の残差二乗について、周波数伝達関数補正前と補正後の比較を図-15に示す。特に KOC015, KOMATSUJIMA-G, SZO010 の3地点はピーク周波数を補正することで推定精度が大きく向上している。その他の地点についても推定精度は向上しているが、HRS019のみは推定精度が変化しないかまたは若干精度が悪くなった。これは、ピーク周波数は精度良く推定できているものの、簡易評価法による増幅特性の包絡形状が経験的サイト増幅特性の包絡形状と比較してより裾の広いカーブを有しているためであり、スペクトルの平滑化に用いたバンド幅の影響であると考えられる。このバンド幅の適正化については今後更に検討を進める必要がある。今回は常時微動 H/V スペクトルを用いた検討は限られた地点を対象とした結果となっているため、今後は対象地点を増やして精度確認を行う必要があると考えられる。

7. まとめ

本研究では、中部・北陸、中国・四国地方を対象に、1次元の深層地盤構造を仮定した周波数伝達関数を補正することでサイト増幅特性を安全側に評価する方法について、低周波倍率とピーク倍率をクリギング法などによって推定する手法の適用を検討した。本研究により得られた主要な結論は以下の通りである。

- (i) 1次元の深層地盤構造を仮定した周波数伝達関数をもとに、低周波領域の振幅、最大振幅を近隣の地点の値をもとにクリギング法で推定する手法を適用した。これらをピーク周波数との関係で補正する手法との精度比較を行った結果、検討対象とした中部・北陸、中国・四国地方の何れについても、クリギング法が精度良くサイト増幅特性を推定できる地点がピーク周波数よりも多かった。ただし、増幅倍率が近隣の強震観測点と比較して大きく変化する地点ではクリギング法では推定精度が悪く、更に検討が必要と考えられる。
- (ii) 深層地盤情報に誤差が含まれている地点について、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数より周波数伝達関数を補正したうえで簡易評価法を適用することで、多くの地点でサイト増幅特性の推定精度が向上する。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 26420458 の助成を受けたものである。

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

- のための手引き一，2001.
- 2) 土木学会：2016 年制定 土木構造物共通示方書 性能・作用編，2016.
- 3) 国土交通省港湾局監修，(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
- 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) 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.
- 6) 神山 眞，松川忠司：常時微動 H/V スペクトルによる地震動増幅スペクトルの一推定法，土木学会第 61 回年次学術講演会，I-268, pp. 535-536, 2006.
- 7) 原田隆典，王 宏沢，斉藤将司：常時微動 H/V スペクトル比による地震動推定法とその検証例，地震工学論文集，pp. 123-131, 2007.
- 8) 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.
- 9) 長尾 毅，加納嵩士，伊藤佳洋，山田雅行：深層地盤構造を用いた近畿地方のサイト増幅特性の簡易評価法に関する研究，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 72, No. 4, pp. 148-158, 2016.
- 10) 間瀬 茂，武田 順：空間データモデリング－空間統計学の応用，共立出版，2001.
- 11) 張 長平：地理情報システムを用いた空間データ分析，古今書院，2009.
- 12) 長尾 毅，福田 健，伊藤佳洋，山田雅行：近畿地方及び九州地方の港湾におけるサイト増幅特性の簡易評価，第 41 回海洋開発シンポジウム，2016.
- 13) 野津 厚，長尾 毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No. 1112，2005.
- 14) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), *Seism. Res. Lett.*, Vol. 69, pp. 309-332, 1998.
- 15) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, Y.: New strong-motion observation network: KiK-net, *Eos Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 81, p. 329, 2000.
- 16) 野津厚，長坂陽介：港湾地域強震観測年報（2013），港湾空港技術研究所資料，No. 1302, 2014.
- 17) Fukuyama, E., Ishida, M., Hori, S., Sekiguchi, S. and Wataada, S.: Broadband seismic observation conducted under the FREESIA Project, *Rep. Nat'l. Res. Inst. Earth Sci., Disas. Prev.*, Vol. 57, pp. 23-31, 1996.
- 18) (独)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2016 年 8 月 31 日閲覧)
- 19) 東南海，南海地震等に関する専門調査会（第 16 回），http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounan_kai_nankajishin/16/index.html (2016 年 8 月 31 日閲覧)
- 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.

(2016. 11. 2 受付，2017. 1. 9 修正，2017. 2. 18 受理)

A SIMPLE ESTIMATION METHOD OF SITE AMPLIFICATION FACTOR
AT CENTRAL AND WESTERN DISTRICT OF JAPAN
BY USE OF KRIGING METHOD

Takashi NAGAO, Ken FUKUTA and Yoshihiro ITO

It is difficult to evaluate site amplification factor analytically because site amplification factor is affected by several factors such as three dimensional deep subsurface profile. Site amplification factors have been evaluated by spectral inversion using strong motion record in the previous study. Therefore, site amplification factor has not been evaluated precisely at sites without strong motion observation.

This study aims at proposing a simple estimation method of site amplification factors by modifying the amplification factors assuming horizontally layered deep subsurface profile at the site of interest. Amplification factors at low frequencies and peak amplification factors were estimated both by the kriging method and regression equations in terms of peak frequencies of the amplification factors. Applicability of the proposed method was discussed.