

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

長尾 毅¹・加納嵩士²・伊藤佳洋³・山田雅行⁴

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: 142t114t@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

⁴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: yamadams@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を検討した。近畿地方を対象に適用法を示し、平成25年の淡路島付近の地震を対象に各種の増幅特性を用いて震度の再現解析を実施し、安全側に震度を評価できることを示した。

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

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ため、土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)¹⁾においては構造物の設計入力地震動の評価において、これらの諸特性を考慮する必要性が説かれている。設計基準類においても、地点ごとにこれら諸特性を考慮して設計地震動を求めることも行われつつある²⁾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、深層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が、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。

著者らは、これまでにスペクトルインバージョン³⁾を

用いた深層地盤による地震動増幅特性(以下、サイト増幅特性)の評価を行ってきた⁴⁾。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⁵⁾、著者らも、常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数・振幅をもとにして強震計の設置されていない地点のサイト増幅特性を経験的に補正する方法の提案を行っている⁷⁾。しかしながら、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。そこで本研究では、近畿地方を対象に、深層地盤情報をもとに、1次元構造を仮定した増幅特性を補正することでサイト増幅特性を簡易評価する方法について検討した。なお本研究では、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. サイト増幅特性と1次元増幅特性

(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⁴⁾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近畿地方については、防災科学技術研究所のK-NET[®]・KiK-net[®]、関西地震観測研究協議会¹⁰⁾および港湾地域強震観測網¹¹⁾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-net¹²⁾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) 1次元増幅特性

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)¹³⁾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、本研究では以下の方針で両者を結合した。

①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。

②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。

③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、「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、500m/s以上の場合は0.005とした。

(3) サイト増幅特性と1次元増幅特性の比較

近畿地方の強震観測地点KYT013、OSK003を例に、上述の方法で得られた表層から地震基盤までの地盤構造を図-1に示す。KYT013と比較してOSK003は地震基盤が深く、堆積層厚に違いが見られる。次に、この地盤構造を用いた1次元の増幅特性とスペクトルインバージョンによって得られたサイト増幅特性の比較を図-2に示す。site ampはサイト増幅特性、1Dは1次元増幅特性である。

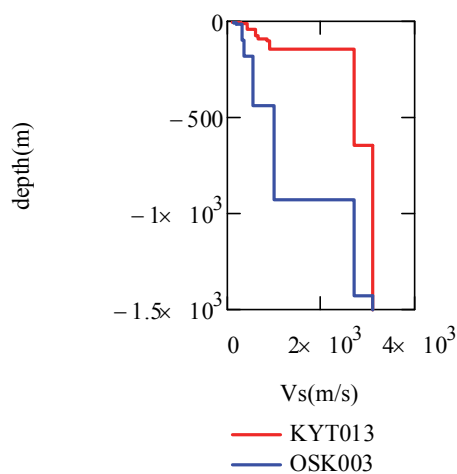


図-1 S波速度構造

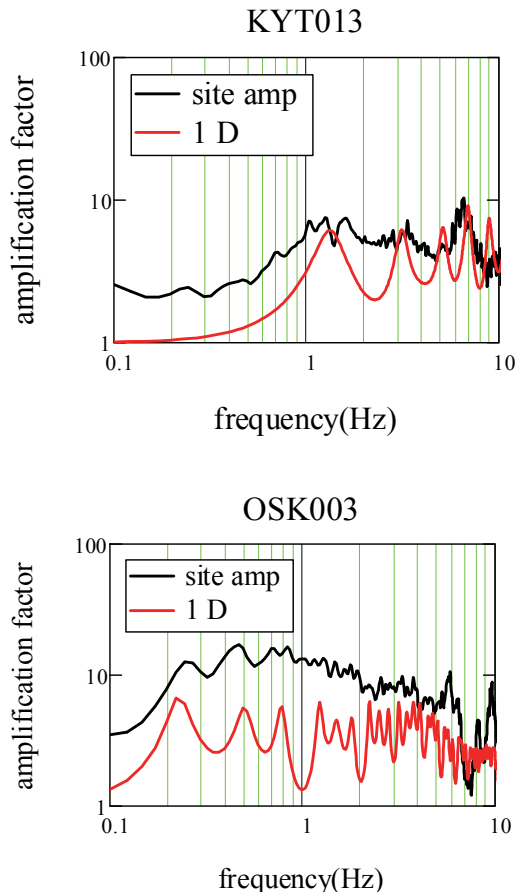


図-2 サイト増幅特性と1次元増幅特性の比較

サイト増幅特性と1次元増幅特性の比較から、両者の不整合な点として、①低周波領域の振幅、②最大振幅、③包絡形状の3点の違いを挙げることができる。

以上のうち、まず低周波領域の振幅については、1次元増幅特性は低周波領域で倍率1に漸近するが、サイト増幅特性は1以上の値を示す。既往の研究¹⁴⁾においてもこの点について議論しており、仮想的な地震震盤に対する実際の岩盤地点の平均的な増幅特性を示しているとして、近畿・中部等のブロック別の増幅率を検討しているが、文献14)では堆積層の薄い地点のみを対象としていることに注意が必要である。次に最大振幅については、図-2の例ではKYT013では両者に大きな違いは無いものの、OSK003については1次元増幅特性では最大振幅を過小評価してしまうことが分かる。また包絡形状については、1次元増幅特性はピークとディップの激しい形状となるものの、サイト増幅特性は1次元増幅特性よりも滑らかな包絡形状となっている。これらは、実際の地盤が水平成層ではないこと、また地震動が鉛直入射するのではなく斜め入射することなどが原因と考えられ¹⁵⁾、1次元増幅特性では実際の増幅特性を過小評価してしまうといえる。

3. サイト増幅特性の簡易評価法の検討

(1) 基本的考え方

本研究では、任意の地点のサイト増幅特性を簡便に評価する方法を構築することを目的として、1次元増幅特性に対して地点ごとの特性を踏まえた補正を施すことによってサイト増幅特性を簡易評価する方法を検討する。上述したサイト増幅特性と1次元増幅特性の不整合に対して、低周波領域の振幅及び最大振幅について地点ごとの深層地盤構造に関する情報を用いて補正し、包絡形状については、1次ピーク周波数に応じたバンド幅のウィンドウにより平滑化を行うことで対処する。本研究で対象とする地点数は165である。

(2) 低周波領域の振幅の補正

低周波領域の振幅については、基本的に堆積環境に依存すると考えられ、堆積層が厚い地点では振幅が大きく、堆積層が薄い地点では振幅が小さいことが考えられる。まず、既往の研究¹⁶⁾¹⁷⁾を参考に、 $V_s=1000\text{m/s}$, 1200m/s , 1400m/s , 1600m/s , 1800m/s , 2000m/s の各層上面までの深さを各地点で算出し、この深さとサイト増幅特性の低周波領域の振幅の相関を検討する。低周波領域としては、サイト増幅特性が 0.2Hz までの領域で精度を確保している¹⁸⁾ことを考慮し、 $0.2\text{--}0.3\text{Hz}$ の平均増幅倍率とした。さらに、表層地盤条件についても検討対象とした。表層地盤条件としては防災等の分野で広く用いられている表層 30m の平均 S 波速度 ($AVS30$) を用いた。 $AVS30$ の値は増幅特性のうち高周波領域の増幅に寄与する傾向が強いと考えられるが、 $AVS30$ の値の大小は間接的に深層地盤構造における堆積層の大小に関係がある可能性があるという考えのもと、検討対象とした。なお $AVS30$ は走時で重み付けした値とした。

低周波領域の平均サイト増幅特性（以降、低周波倍率： A_{lf} ）に対する $AVS30$ 及び $V_s>1000\text{m/s}$ の層出現深さのうち、代表例として最も低周波倍率と相関の高かった $V_s=1200\text{m/s}$ の層出現深さ ($d1200$) の関係を図-3 に示す。●印が各データである。 $AVS30$ に対しては負の相関、 $d1200$ に対しては正の相関関係があることが分かる。

次に相関関係を回帰式で表現することを考えるが、 $AVS30$, $d1200$ ともに値の分布は一樣ではなく偏りがある。このため全てのデータを対象に回帰分析を行うと、データの集中した領域に回帰結果が影響を受け、結果として幅広い領域について低周波倍率を精度良く推定する回帰式とはならなかったため、図-3 に示したように、対数軸上で等間隔となる区間を設定し、区間毎に平均値を算出し（図中の■）、区間平均に対する回帰を行った。

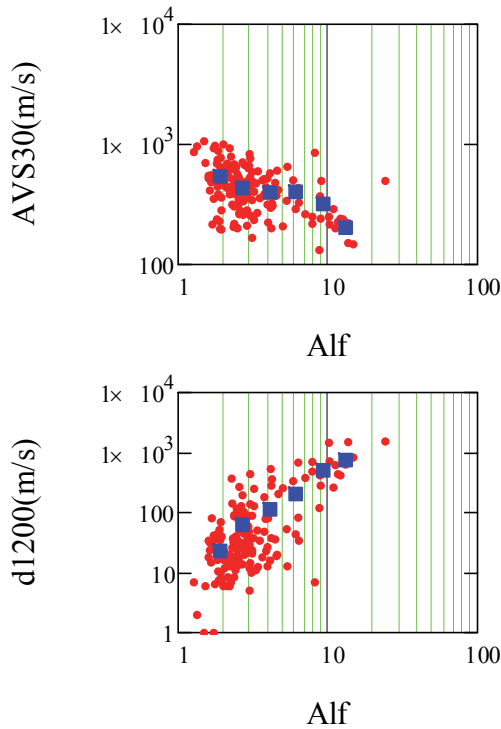


図-3 低周波倍率と AVS30 及び $d1200$ の関係
(■は区間平均値)

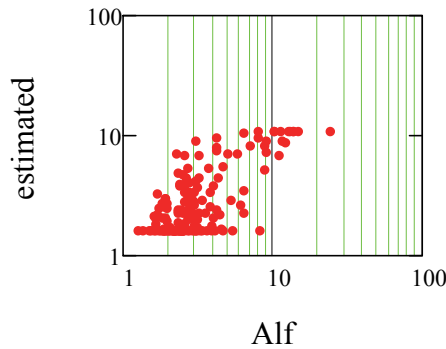


図-4 低周波倍率の推定精度

その際、低周波倍率が極端な場合の影響を排除する観点から、低周波倍率値の 5%非超過値 (=1.65) 及び 95%超過値 (=11.12) のデータは除外して区間平均を求めている。

低周波倍率に対する回帰として、AVS30 のみを用いた場合、 $d1200$ のみを用いた場合、AVS30 と $d1200$ の両方を用いた場合のそれぞれについて回帰式を求めた。これらのうち最も精度の良い回帰となったものは AVS30 と $d1200$ の両方を用いたものであり、得られた回帰式は式(1)のとおりである。なお回帰式には係数が含まれるが、その値は 0.997 であった。

$$Alf = AVS30^{-0.17} \cdot d1200^{0.52} \quad (1)$$

回帰式による低周波倍率の推定精度は図-4 に示すとおりである。鉛直軸 (estimated) が推定値である。なお推定においては、低周波倍率を極端に過大評価する地点が存在することが分かったため、推定値が上述した 95%超過値 (=11.12) を上回るかまたは 5%非超過値 (=1.65) を下回るかした場合は、それぞれ上下限值としている。図-4 より、推定結果はかなりばらつきが大きいことが分かる。誤差の生じる原因として、実際の堆積層厚等に対する低周波倍率のばらつき、深層地盤情報の精度等が考えられる。深層地盤情報については、近年大規模な物理探査等が行われ、その情報が反映されていると考えられるものの、全ての地点において十分な精度のデータが蓄積されているとは必ずしもいえない可能性がある。

深層地盤情報の精度が十分でない地点において推定を行う場合、常時微動観測によって地盤情報の精度を高めることが考えられる。ただしその場合、上述のように AVS30 と $d1200$ を求めるためには、大掛かりなアレイ観測を実施して地下構造の推定を行う必要があり、本研究で目的としている簡易評価という観点からは負荷の高いものとなる。そこで、常時微動の単点観測で評価しやすい深層地盤情報に関する指標として、1 次のピーク周波数に着目した。常時微動 H/V スペクトルにおける 1 次のピーク周波数は深層地盤の情報を反映したものであり¹⁹⁾、かつ常時微動 H/V スペクトルの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²⁰⁾ことから、仮に深層地盤情報の誤差が大きい場合であっても、ピーク周波数については精度良く評価可能と考えられる。

図-5 に低周波倍率と 1 次元増幅特性のピーク周波数 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値であり、AVS30 に対するものと同様に対数軸上で等間隔となる区間での平均としているが、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。

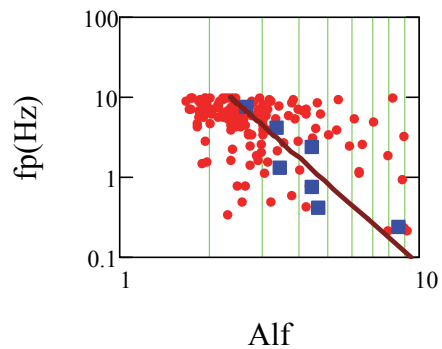


図-5 低周波倍率とピーク周波数の関係
(■は区間平均値)

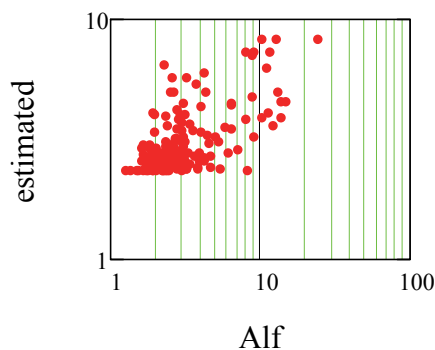


図-6 低周波倍率の推定精度

図-5 より，区間平均値の関係としては，低周波倍率とピーク周波数の関係は負の相関が認められる．堆積層の厚い地点では低周波倍率が高く，ピーク周波数が低くなり，堆積層が薄い地点ではその逆となることが想定され，両者の負の相関はその傾向と調和的であるといえる．得られた回帰式は式(2)の通りである．

$$Alf = 10^{0.67} \cdot f_p^{-0.30} \quad (2)$$

図-6 にピーク周波数を用いた低周波倍率の推定精度を示す．AVS30 及び d1200 を用いた場合と同様に，ばらつきは大きい，ピーク周波数を用いた場合は上下限の設定を行わなくても良いこと，かつ上述のように常時微動観測を実施すれば推定誤差を減少させることが比較的容易と考えられることから，本研究では式(2)により低周波倍率の推定を行うこととする．

(3) 最大振幅の補正

次に最大振幅の補正について検討する．堆積層の厚い地点では低周波倍率が高いのみならず，ピークの倍率についても 1 次元増幅倍率と比較して高くなることが考えられる．上述のように低周波倍率はピーク周波数を用いて推定することとしているため，最大振幅についてもピーク周波数を用いて推定することを試みる．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の比を最大振幅比 (Ra) と定義し，1 次元増幅特性のピーク周波数 f_p との相関を検討した．図-7 に両者の関係を示す．

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%非超過値 ($=0.51$) 及び 95%超過値 ($=4.16$) のデータは除外して区間平均 (■マーク) を算出し，回帰式 (図中の実線) を求めた．得られた回帰式は式(3)の通りである．

$$Ra = 10^{0.31} \cdot f_p^{-0.14} \quad (3)$$

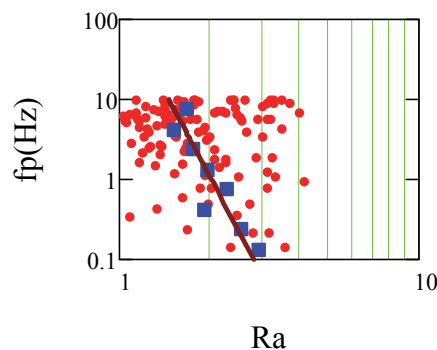


図-7 最大振幅比とピーク周波数の関係 (■は区間平均値)

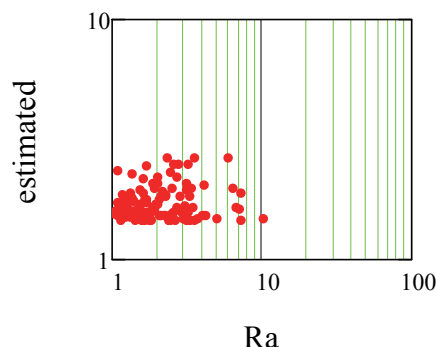


図-8 最大振幅比の推定精度

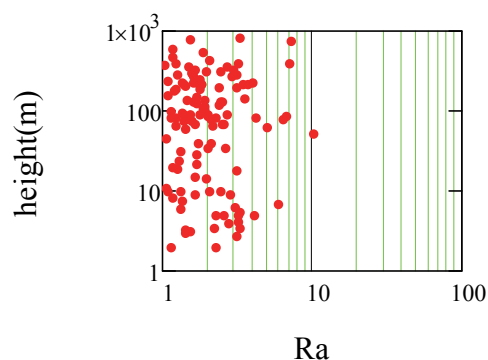


図-9 最大振幅比と標高の関係

図-8 には最大振幅比の推定精度を示す．ばらつきはかなり大きく，今後最大振幅比の推定方法については更に検討を行う必要があると考えられる．

なおこの他の指標として，標高の高い山間部では Ra が小さく，標高の低い平野部では Ra が大きいことが想定されるため Ra と標高の相関を検討したが，図-9 に示すように両者の間には相関は認められなかった．それ以外の指標についても同様であった．

(4) 包絡形状の補正

最後に包絡形状の補正方法について検討する．上述のように，サイト増幅特性は 1 次元増幅特性と比較して包絡形状が滑らかであり，本研究では 1 次元増幅特性を平

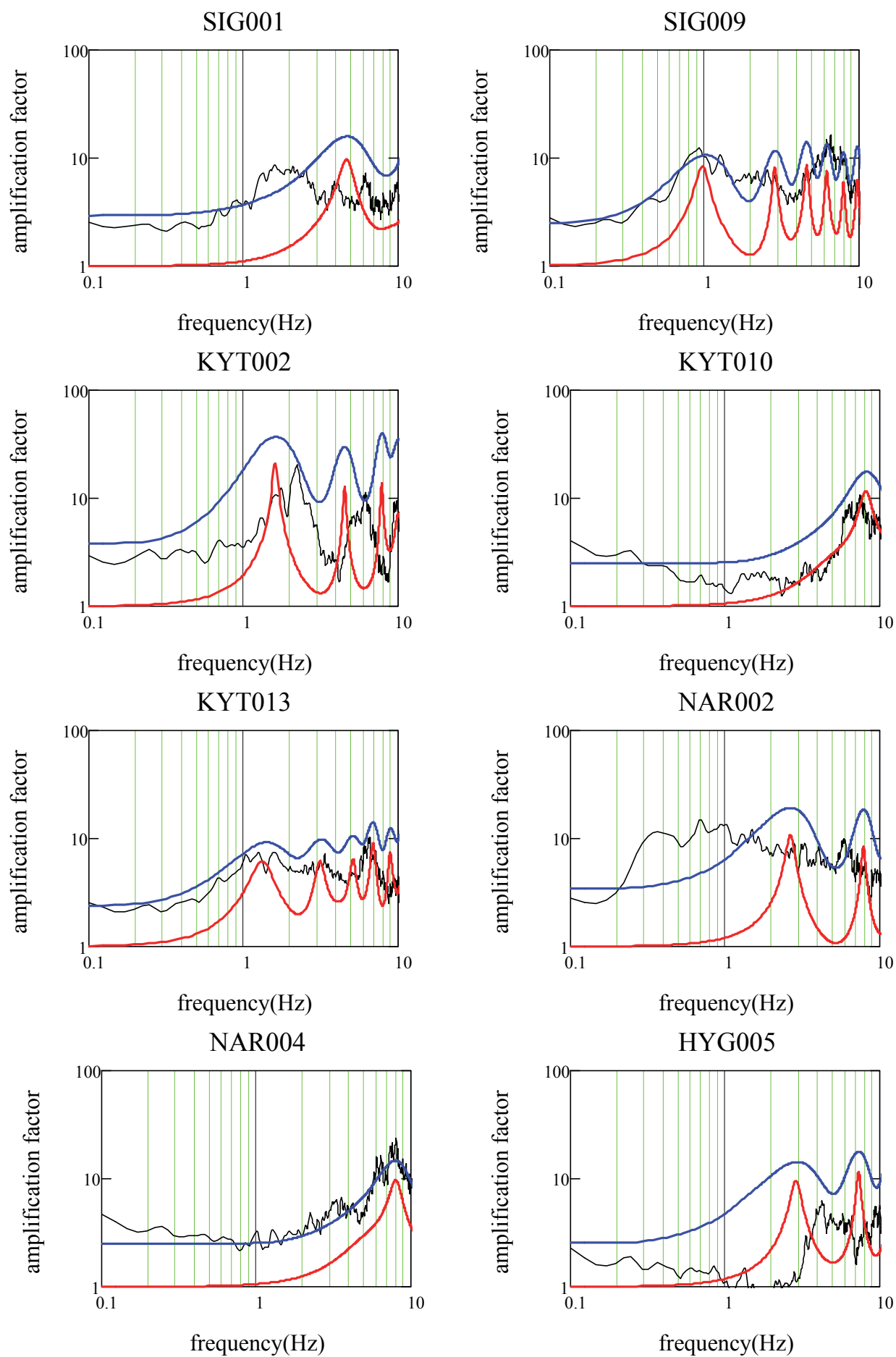


図-10 増幅特性の比較 — サイト増幅特性 — 1次元増幅特性 — 簡易推定

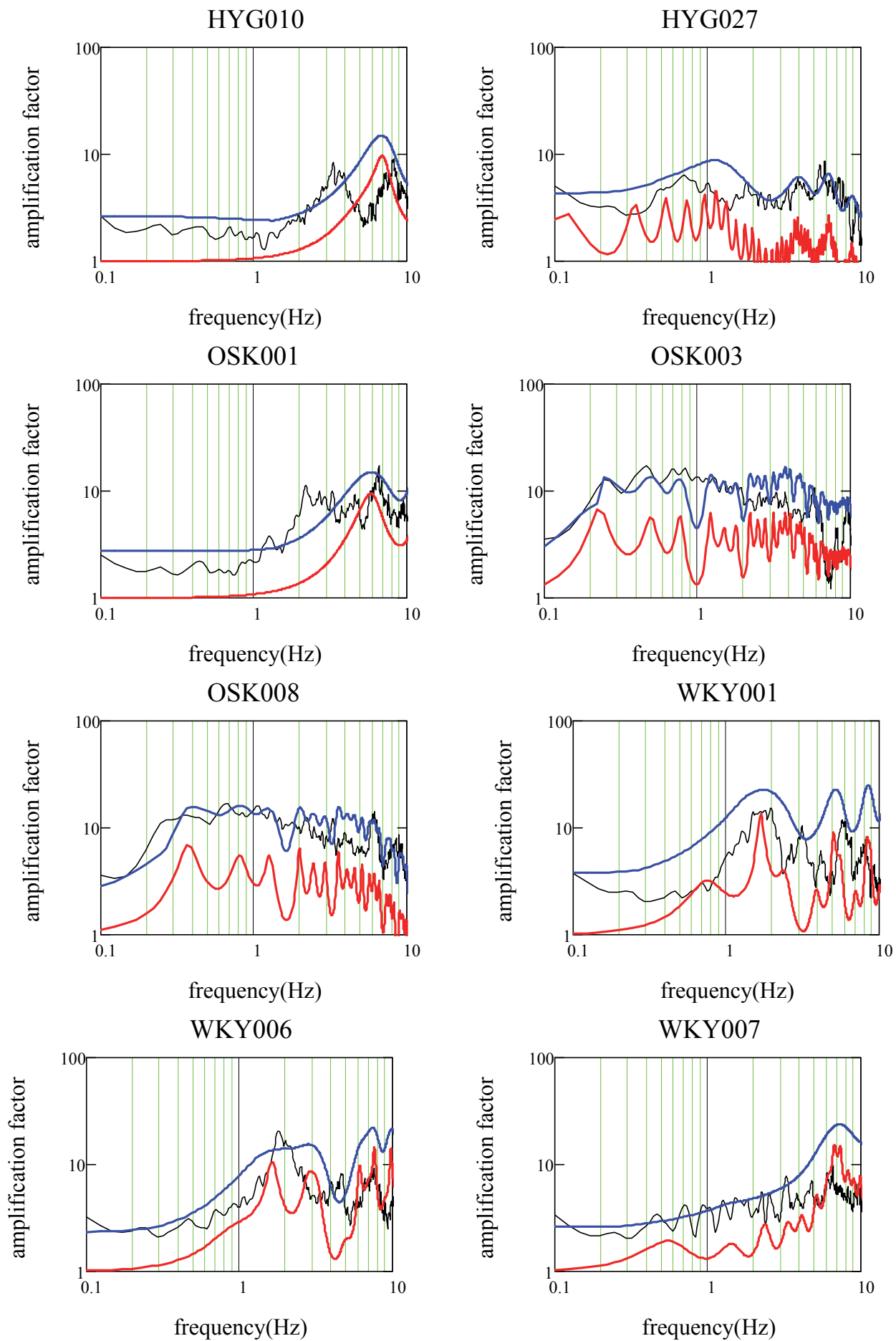


図-11 増幅特性の比較 (続き) ——— サイト増幅特性 ——— 1次元増幅特性 ——— 簡易推定

滑化することでこの点に対処する。平滑化に関しては、例えば最大倍率の評価に関する既往の研究事例²⁰⁾は存在するが、本研究は包絡形状の補正を目的として平滑化を行うものであり、一般的な Parzen ウィンドウを用いることとする。バンド幅については、ピーク周波数が低周波の場合にもピークが均されてしまわないこと、かつ包絡形状が滑らかになることを期待して、一定の値とはせず、1次元増幅特性のピーク周波数と一致するバンド幅を設定することとした。ただし、ピーク周波数が高周波の場合にも極端に滑らかな包絡とならないように、バンド幅の上限値は 4Hz に設定した。このバンド幅の設定については、最大振幅推定値や標高等、様々な指標との関係から最適な設定方法を更に検討する必要があると考えられる。

(5) 簡易評価法

以上の議論により 1次元増幅特性を補正してサイト増幅特性を推定する。具体的には以下の手順による。

①ピーク周波数をバンド幅（ただし上限は 4Hz）とする Parzen ウィンドウで 1次元増幅特性を平滑化する。

②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 で式(2)による低周波倍率推定値になるように係数 C_1 を乗じる。

- ・ X Hz 以上では、平滑化した 1次元増幅特性のピーク値が式(3)に基づく推定ピーク値になるような係数 C_2 を乗じる。

- ・ 0.25- X Hz の区間は C_1 と C_2 を補間した係数を乗じる。

X については、試行錯誤の結果として 1.25 とした。

図-10～図-11 にサイト増幅特性、1次元増幅特性、本研究による簡易評価の比較を例示する。KYT002, HYG005, WKY001 等のように、低周波領域で増幅特性を過大評価する傾向にある地点も存在するが、全体的な傾向としては、2. で述べたようなサイト増幅特性と 1次元増幅特性の不整合が解消される方向に変化していることがわかる。SIG009, KYT013, NAR004, HYG027, OSK003, OSK008 等は概ね精度良くサイト増幅特性を評価できていると考えられる。このほか、SIG001, NAR002 等はピークの周波数にずれが見られる。これは深層地盤情報の誤差に起因するものと考えられるが、簡易評価法による推定精度は 1次元増幅特性と比較すると良好であるということもできる。

(6) 推定精度

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した。周波数帯としては 0.2-2Hz と 0.2-5Hz の 2 つを設定した。

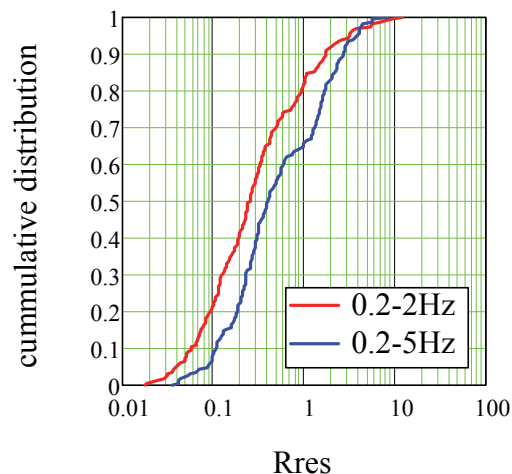


図-12 残差二乗比の比較

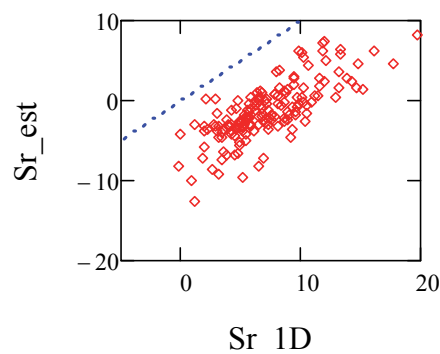


図-13 残差の比較 (0.2-2Hz)

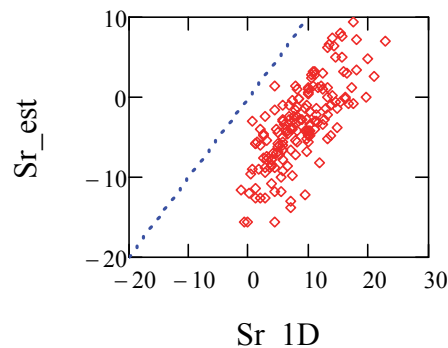


図-14 残差の比較 (0.2-5Hz)

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図-12 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 80% の地点で簡易評価法の方が精度が良い。ただし 0.2-5Hz までの範囲では精度の良い割合は 65% 程度に減少する。

これは上述のように簡易評価法では増幅特性を過大評価するケースがあるためであるが、見方を変えれば安全

側の評価ということも出来る。同じ周波数帯を対象に、サイト増幅特性の増幅率－1次元の増幅率の総和（ Sr_{1D} ）とサイト増幅特性の増幅率－簡易評価法の増幅率の総和（ Sr_{est} ）の比較を図-13～図-14に示す。図中の点線は1:1の補助線である。簡易評価法は1次元増幅特性と比較して、全て安全側の評価であることが分かる。

4. 震度の再現による評価精度の検証

本研究で検討した各種サイト増幅特性を平成25年の淡路島付近の地震(Mj6.3)の震度の再現解析に適用して簡易評価法の精度の検証を行う。

震度計算の震源モデルには特性化震源モデルよりパラメータの設定数が少ない疑似点震源モデル²⁹⁾を用いる。疑似点震源モデルは強震動評価のための震源モデルをより単純化したもので、アスペリティの分割数を1×1として、アスペリティが生成する震源スペクトルはオメガスクエアモデルに従うと仮定し、モデル化した震源モデルである。震源スペクトルに伝播経路特性と各種サイト増幅特性を乗じることにより対象地点でのフーリエ振幅が計算され、これと対象地点における中小地震記録のフーリエ位相を組み合わせ、フーリエ逆変換することにより、地震動の時刻歴波形を求め、この波形より計測震度を算出する。震源モデルの単純化により設定するパラメータは東経・北緯・深さ・地震モーメント・コーナー周波数の5個となる。解析では東経・北緯・深さは震源位置、地震モーメントは F_{net} 、コーナー周波数はサイト増幅特性で計算したフーリエスペクトルと震度の再現性から、それぞれを表-1のように設定した。

伝播経路の Q 値は野津²⁹⁾による兵庫県南部地震再現計算の値($Q=180\gamma^{0.7}$)を用いた。位相特性評価のための中小地震記録としては、伝播経路の位相特性を考慮するため淡路島内に震源を持つ2014年8月26日3:42に発生した地震(Mj4.2)の記録を用いた。

また、表層地盤の非線形挙動の影響を考慮するため野津²⁹⁾により提案された非線形パラメータを用いてグリーン関数を補正する簡便な方法を用いた。この方法では、非線形パラメータの設定を地動最大速度の繰り返し計算により求めることができるため、非線形挙動の影響を考慮した震度を予測することができる。

観測記録の計測震度とサイト増幅特性、1次元増幅特性、簡易評価法による増幅倍率で再現解析した計測震度

表-1 設定したパラメータ

東経	北緯	深さ(km)	$M_0(Nm)$	$f_c(Hz)$
134.829	34.419	14.8	1.1×10^{17}	1.0

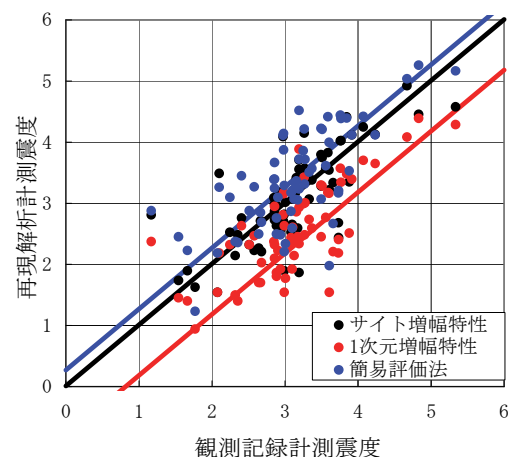


図-15 観測記録と予測結果の計測震度の相関

の相関図を図-15に示す。なお、観測記録、再現解析ともに水平2成分求めた震度で整理している。図中の実線は観測記録と震度予測結果を傾き1の直線で回帰した結果である。

傾き1の直線で回帰した実線より各サイト増幅特性の切片の値を求めると、サイト増幅特性では0.0、1次元増幅特性では-0.8、簡易評価法では0.3となる。簡易評価法は、サイト増幅と比較しても安全側の評価となり、1次元増幅特性と比較した場合にサイト増幅特性との差が小さい。1次元増幅特性より簡易評価法の方が高い精度で震度を再現できていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、近畿地方を対象に、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。

- ①近畿地方を対象に、1次元の深層地盤構造を仮定した周波数伝達関数をもとに、低周波領域の振幅、最大振幅、包絡形状をピーク周波数との関係で補正することでサイト増幅特性を評価する方法を提案した。提案法は1次元増幅特性と比較して、特に0.2-2Hzの範囲で精度良く増幅特性を評価できる。0.2-5Hzの範囲では1次元増幅特性と比較した精度は低下するが、1次元増幅特性よりも安全側の評価を行うことはできる。
- ②平成25年の淡路島付近の地震(Mj6.3)を対象に1次元増幅特性と本研究による増幅特性を用いて震度の再現計算を行い、提案法の方が高い精度で震度を再現できることを示した。

謝辞：K-NETおよびKiK-netの強震観測記録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。本研究は、平成26年度科学研究費（課題番号：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－，2001.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-net), Seim. Res. Lett., Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 9) 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.
- 10) 関西地震観測研究協議会：CEORKA，<http://www.ceorka.org/>. (2014年8月閲覧).
- 11) 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.
- 12) Fukuyama, E., M. Ishida, S. Hori, S. Sekiguchi and S. Watada: Broadband seismic observation conducted under the FREESIA Project, Rep. Natl. Res. Inst. Earth Sci. Disas. Prev. 57, 23-31, 1996.
- 13) (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/>. (2015年8月閲覧).
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) N. Morikawa, H. Fujiwara and S. Midorikawa：A new ground motion prediction equation applicable up to Mw9 based on data from the 2011 Tohoku-oki earthquake, Proceedings of 15th WCEE, Paper No.3988, 2012.
- 17) 森川信之，藤原広行：2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録に基づく地震動予測式と南海トラフ巨大地震への適用，第 14 回日本地震工学シンポジウム，pp.2711-2717，2014.
- 18) 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.
- 19) 佐藤智美，川瀬 博，松島信一：微動と S 波，P 波，coda から求められる地盤特性の違いとその理論的解釈，地震第 2 輯，第 51 巻，pp.291-318，1998.
- 20) 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.
- 21) 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滑化とその適用例，土木学会論文集 No.525，I -33，pp.247-259，1995.
- 22) 野津厚：強震動を対象とした海溝型巨大地震の震源モデルをより単純化する試みー疑似点震源モデルによる 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動シミュレーションー，地震 2，Vol.65，pp.45-67，2012.
- 23) 野津 厚，菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法ー内陸活断層地震および海溝型地震への適用性の検討ー，港湾空港技術研究所資料，No.1120，2006.
- 24) 野津厚：1703 年元禄地震の震度分布と整合的な SPGA モデルの作成事例，土木学会論文集 A1，Vol.70，No.4，pp. I -1089- I -1095，2014.

A SIMPLE ESTIMATION METHOD OF SITE AMPLIFICATION FACTOR BY USE OF DEEP SUBSURFACE PROFILES

Takashi NAGAO, Takashi KANO, Yoshihiro ITO and Masayuki YAMADA

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 use of deep subsurface profile. Amplification factors at low frequencies and peak amplification factors were estimated by the stochastic analysis. Estimated amplification spectra were obtained by modifying the amplification spectra assuming horizontally layered deep subsurface profile. Applicability of the proposed method was discussed.