

高密度強震観測エリアにおける サイト増幅特性の解析的評価法に関する研究

出口拓磨¹・長尾 毅²・山田雅行³・伊藤佳洋⁴

¹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: 147t134t@stu.kobe-u.ac.jp

²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

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: yamadams@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: itoys@newjec.co.jp

高密度に強震観測ネットワークが構築されているエリアを対象に、任意の地点においてサイト増幅特性を評価する方法を検討した。深層地盤構造をモデル化した3次元有限差分法を用いた複数の地点の振動特性の比と経験的サイト増幅特性を用いて低周波側の増幅特性を評価し、高周波側についてはエリア内をゾーン区分したうえで経験的増幅特性の平均倍率によって増幅特性を評価するものである。御前崎半島周辺地域を対象に適用性を検討し、強震動シミュレーションを行って実用的に十分な精度でサイト増幅特性を評価できていることを示した。

Key Words : site amplification factor, finite difference method, 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、土木構造物の設計入力地震動の評価においてはこれらの諸特性を考慮する必要がある¹⁾。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い。そして、任意の地点のサイト増幅特性の正確な評価の困難性が、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、これまでに強震観測記録を用いたスペクトルインバージョン³⁾を行うことにより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⁴⁾を行うとともに、強震記録の得られていない地点のサイト増幅特性の評価法として常時微動観測記録を用いた手法⁵⁾の検討などを行ってきた。前者はサイト増幅特性の経験的評

価方法として現時点では最も精度の高い方法と考えられるが、解析に適用可能な強震観測記録が得られている必要がある。後者は基本的にサイト増幅特性の1次のピーク周波数と倍率の経験的補正を主眼とした方法であるため、広範囲な周波数帯におけるサイト増幅特性の正確な評価という観点では問題を有している。

サイト増幅特性は、深い複雑な地盤構造により、1次元の水平成層構造では説明できない特徴を持つ場合が見られる。著者らは、深層地盤構造をモデル化した2次元有限要素解析を用いてサイト増幅特性の評価を行ってきた⁶⁾⁷⁾。その結果として、解析によるサイト増幅特性は強震記録による増幅倍率を概ね説明できる場合もあるものの、解析値が観測値を若干下回る場合も見られた。この原因の一つとして3次元的地盤構造の影響が考えられ、3次元解析による増幅特性の評価も行っているが⁸⁾⁹⁾、サイト増幅特性の評価精度については残された課題も多い。

本研究では、比較的高密度で強震観測が行われている地域において任意の地点のサイト増幅特性を解析的に評価する方法について検討を行った。

2. 検討対象エリアとサイト増幅特性

本研究は、高密度に強震観測ネットワークが構築されている静岡県西部、御前崎半島周辺を対象とした。図-1に電子国土による空中写真¹¹⁾をもとに対象エリアの位置を示す。今回検討する対象エリアの強震観測点は、防災科学技術研究所（K-NET, KiK-net）¹²⁾の強震観測点が5地点(SZO016, SZO017, SZO018, SZO019, SZOH26), 自治体の強震観測点が9地点(SZO4021, SZO4241, SZO4231, SZO4221, SZO4211, SZO4441, SZO4471, SZO4421, SZO4811)の計14地点である。強震観測ネットワークの発達している我が国においても、高密度に強震観測が実施されているエリアであるといえる。図-2に検討対象強震観測点の位置を示す。

強震観測点のうち、K-NET, KiK-netのサイト増幅特性はスペクトルインバージョン³⁴⁾によって算定されており、公開されている¹³⁾。またその後、自治体の強震観測点のサイト増幅特性についても、同様にスペクトルインバージョンによって算定されている。



図-1 空中写真と対象エリア（電子国土¹¹⁾をもとに加筆）

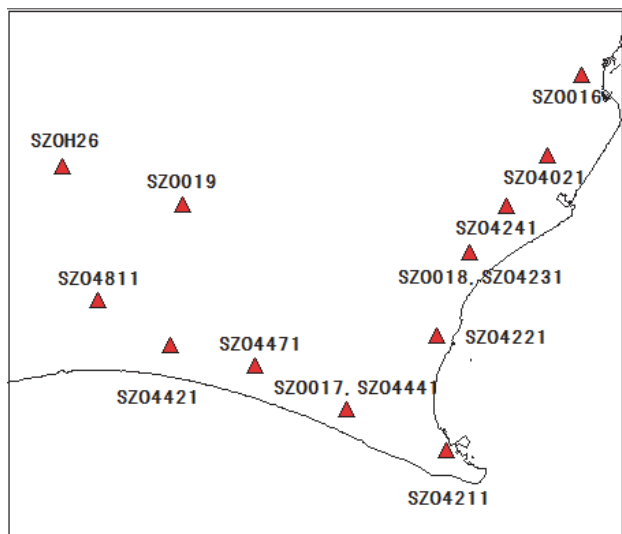


図-2 強震観測点位置

3. サイト増幅特性の解析評価手法

(1) 有限差分法によるサイト増幅特性の評価

強震観測の実施されていない任意の地点においてサイト増幅特性を評価する方法として、本研究では3次元有限差分法による数値解析によってサイト増幅特性の解析評価を試みた。解析には防災科学技術研究所によりパッケージ化されたGMS¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾を用いた。また解析に用いる地下構造モデル、震源モデルは、次のように設定した。

地盤モデルとして、 Q 値を含む物性値は、地震ハザードステーション(J-SHIS)¹⁷⁾による深部地盤情報を基礎モデルとして用いた。検討においては図-1の対象エリアを東西45km、南北45km、深さ45kmまで切り出して、表-1に示す格子間隔でモデル化した。

なお有限差分法による計算を行う際には、計算の安定条件を満たすために、格子間隔は式(1)を満たす必要がある。

$$f_{\max} = \frac{V_{s\min}}{5d} \quad (1)$$

ここに、 $f_{\max}$ は最大有効周波数(Hz)、 $V_{s\min}$ は最小S波速度(m/s)、 d は格子間隔(m)である。

エリア内の最小S波速度600m/sと最小格子間隔50mを用いると式(1)により最大有効周波数は2.4Hzである。

震源モデルは、スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性の算定に用いた地震の入射方向等による影響を考慮して設定した。中部地方におけるサイト増幅特性の算定に用いた地震のうち、多く用いられている入射方向の代表的な震源を4つ選定し、到来方向、震源メカニズムが同一の単震源モデルで解析を試みた。図-3は本研究に用いた解析モデルである。

表-1 計算概要

格子点数	領域Ⅰ	900×900×61
	領域Ⅱ	300×300×281
全格子点数	74,700,000	
格子間隔	領域Ⅰ (深さ 0-3km)	50m
	領域Ⅱ (深さ 3-45km)	150m
時間間隔 (秒)	0.0025	
タイムステップ数	20000	

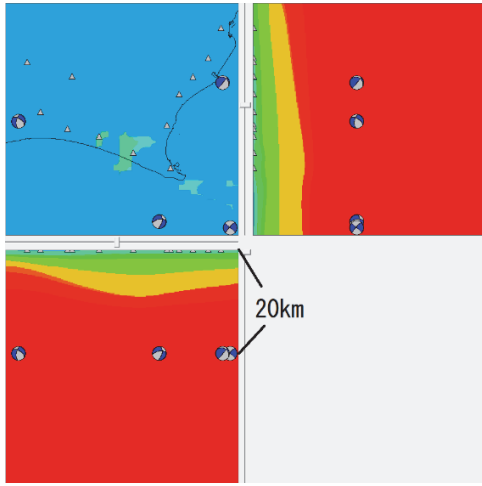


図-3 解析モデル

(2) 解析によるサイト増幅特性の算定

各地点におけるサイト増幅特性は、別途岩盤均質地盤をモデル化した解析を実施し、不均質地盤のフーリエ振幅スペクトルを岩盤均質地盤のフーリエ振幅スペクトルで除することで求める⁹⁾¹⁰⁾ことが考えられる。

本研究では3次元の深層地盤構造をモデル化した解析を行うが、地盤モデルに誤差が含まれている可能性は否定できない。このため、単純に上記の方法で増幅特性の評価を行なうと解析誤差の問題が大きいことが考えられる¹⁰⁾。いま、対象地点と近傍の強震観測点の2地点で誤差の程度が同程度と仮定すると、解析による2地点の解析結果には同程度の誤差が含まれることが考えられ、2地点の解析結果の比を取ることでその誤差がキャンセルされることが期待される。このため、近傍地点の観測によるサイト増幅特性と、近傍地点及び対象地点の解析結果を用いて、式(2)により算定することとする。ここでフーリエ振幅スペクトルはS波を含む40秒間のデータから計算し、スペクトルは0.2HzのParzenウィンドウによる平滑化を行った。

$$Gt(f) = Gr(f) \cdot \frac{Ot(f)}{Or(f)} \cdot \frac{Pr(f)}{Pt(f)} \quad (2)$$

ここに、 $Gt(f)$ ：対象地点のサイト増幅特性推定値、 $Gr(f)$ ：参照地点のサイト増幅特性、 $Ot(f)$ ：対象地点の解析によるフーリエ振幅スペクトル、 $Or(f)$ ：参照地点の解析によるフーリエ振幅スペクトル、 $Pt(f)$ ：対象地点の伝播経路特性、 $Pr(f)$ ：参照地点の伝播経路特性、 f ：周波数である。

本研究では、上述のように、対象エリア内に強震観測地点が多く含まれることが特徴である。この特徴を生かし、式(2)によるサイト増幅特性の評価を対象エリア内の全地点に対して行い、計 13 地点の参照地点を考慮し

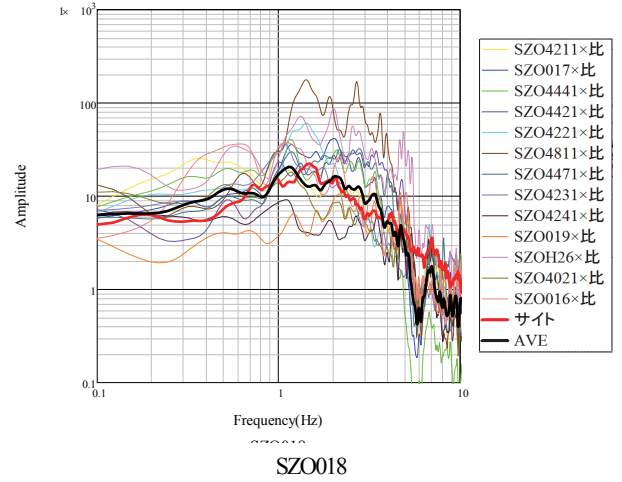


図-4 サイト増幅特性算定結果

て式(2)を適用し、得られた結果の対数平均を解析によるサイト増幅特性と評価した。また、伝播経路特性は、震源から球面上に広がる実体波の幾何減衰 ($1/r$) と非弾性減衰を考慮し、式(3)により評価した。

$$P(f) = \frac{1}{r} \exp(-\pi f r / QVs) \quad (3)$$

ここに、 r ：震源距離(km)、 Q ： Q 値であり、東日本海溝型地震¹⁸⁾の Q 値 ($Q=114 \times f^{0.92}$) に設定した。また Vs ：伝播経路における平均的なS波速度(km/s)である。

ここで図-4 に、SZO018 を対象にしたサイト増幅特性の算定結果を示す。図には各観測点との解析結果の比によるサイト増幅特性とその平均 (AVE)、サイト増幅特性 (サイト) を示す。SZOH26, SZO4221, SZO4811 の 3 つの参照地点に対する増幅特性が、特に 1~2Hz の領域で非常に大きな増幅倍率となるなど、増幅倍率のばらつきが大きい。これは例示しない地点についても同様であった。よって、これら 3 地点の地盤構造モデルには、特に誤差が大きいことが想定される。このため以降、上記 3 地点については、検討対象から除外した。なお、これら 3 地点の地盤構造の精度確認などについては今後の課題とする。

4. 高周波数帯域におけるサイト増幅特性の評価

(1) 評価方法の概要

上述したように、有限差分法によるサイト増幅特性の解析評価手法は有効周波数が 2.4Hz であり、このままでは工学的に重要な周波数帯域をカバーしているとはいえない。このため次に、2.4~10Hz の高周波数帯域における

評価手法について検討する。

一般に、高周波側の増幅特性は表層地盤の影響を強く受けるものと考えられる¹⁹⁾。また表層地盤の構成と密接な関係があることが知られている微地形分類²⁰⁾は表層30mの平均S波速度(AVS30)と相関があることが既に示されている²¹⁾。

そこで本研究では、高周波数帯域におけるサイト増幅特性を簡易評価するため、表層地盤による影響に着目して、地震ハザードステーション(J-SHIS)¹⁷⁾等によって公開されている地形・地盤分類250mメッシュマップ²²⁾の微地形区分を用い、さらに微地形区分ごとのAVS30の値(図-6)を参照して、強震観測点をグループ分けした。

このようにして同じグループであると判断された地点では、高周波側の増幅特性に大きな差が無いことが期待でき、かつ本研究対象エリアでは高密度にサイト増幅特性が得られているため、同一の微地形区分内のサイト増幅特性の高周波成分を平均化することで、精度良く各地点のサイト増幅特性の高周波成分を評価できることが期待できる。

(2) 対象エリアの微地形区分

対象エリアの微地形区分を図-5に示す。今回、対象エリア内に同一区分の観測点が存在しない地点(SZO019：丘陵)、あるいは1ペアしかない観測点(SZOH26, SZO4211：砂礫質台地)も存在した。そこで対象エリア外であるが、検討対象エリア周辺に位置する防災科学技術研究所(K-NET, KiK-net)¹²⁾の強震観測点7地点(SZO020, SZO023, SZO024, SZO026, SZOH24, SZOH31, SZOH36)、自治体の強震観測点が3地点(SZO2022, SZO2121, SZO4821)を加え、計24地点でグループ分けを行った。実際の微地形区分の分類においては、図-5以外の情報としてK-NET、およびKiK-netの強震観測点に関しては、AVS30を評価して更に詳細に検討を行っている。なおK-NETについては深さ20mまでのS波速度データしか公開されていないため、既往の研究²⁰⁾²¹⁾を踏襲し、最下層のS波速度が深さ30mまで続くものとしてAVS30を評価した。その結果、SZO016, SZO017, SZO018, SZO019, SZO4231, SZO4441については、図-5に示した微地形区分から図-6の関係を基にして、AVS30から推定できる微地形区分に変更している。

最終的に4つのグループに大別した結果を表-2に示す。また各グループにおけるサイト増幅特性を図-7に示す。同一グループ内において高周波側のサイト増幅特性が概ね類似することが分かる。またグループ①の山地・丘陵では、2~3倍と低い増幅倍率、グループ②、③と順に増幅倍率が大きくなり、グループ④の三角州など

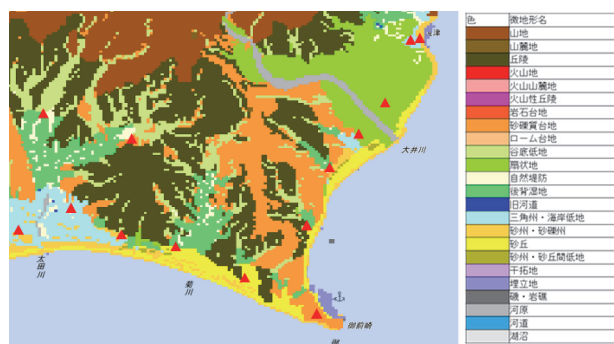


図-5 微地形区分(若松ら²²⁾をもとに加筆)

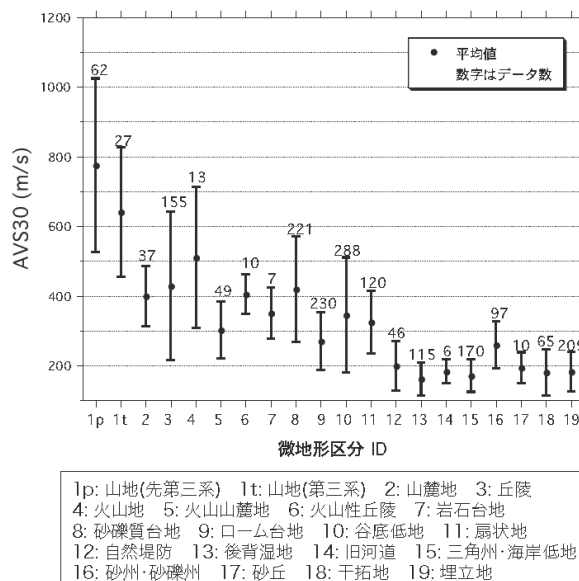
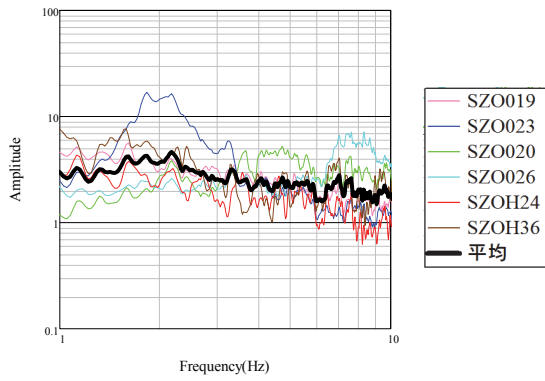


図-6 微地形ごとの地盤の平均S波速度の平均値と標準偏差²¹⁾

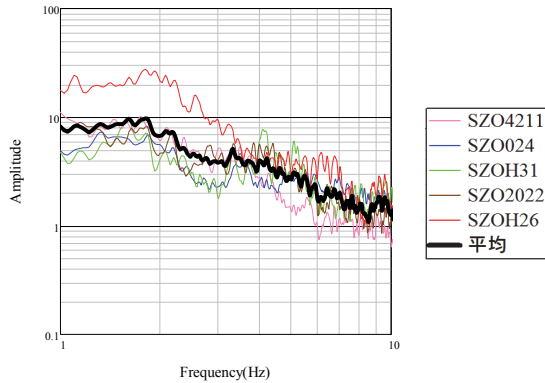
表-2 グループ分け

	微地形区分	強震観測点
グループ①	丘陵	SZO019, SZO023
	山地	SZO020, SZO026, SZOH24, SZOH36
グループ②	砂礫質台地	SZO4211, SZO024, SZOH31, SZO2022
	谷底低地	SZOH26
グループ③	扇状地	SZO018, SZO4021, SZO4231, SZO4241
	砂州	SZO016, SZO017, SZO2121, SZO4421, SZO4441
グループ④	後背湿地	SZO4221
	三角州・海岸低地	SZO4811, SZO4821
	砂丘	SZO4471

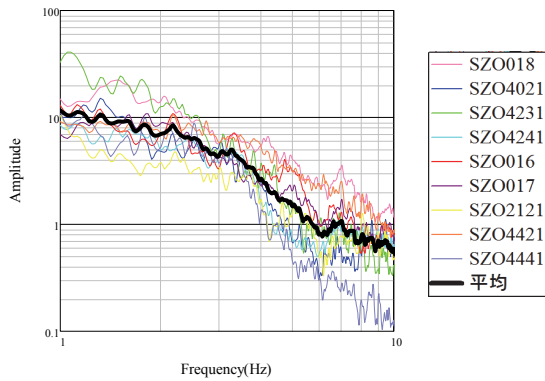
は4Hz以下の範囲では10倍以上の大きな倍率を示した。これらはAVS30と関係のある微地形区分から想定される高周波側の増幅倍率と調和的なものであった。



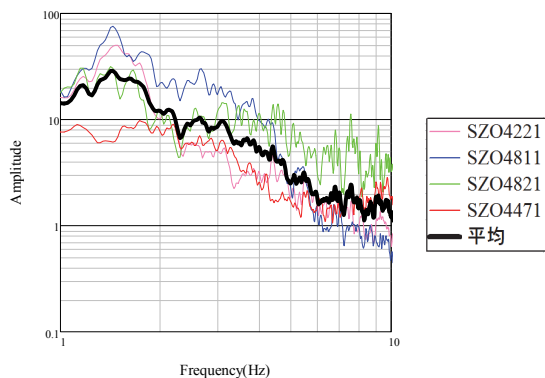
グループ①



グループ②



グループ③



グループ④

図-7 各区分におけるサイト増幅特性(1~10Hz)

なお、本研究では高周波側のサイト増幅特性の評価法として、各グループにおける対象地点以外のサイト増幅特性の平均を用いた。

(3) サイト増幅特性の合成

以上のようにして低周波側については有限差分法を用い、高周波側は微地形区分などを用いてサイト増幅特性を評価し、両者を合成することで、0.1~10Hzにおけるサイト増幅特性の解析的評価を試みた。

これら2つのサイト増幅特性を合成する際、不連続の影響が生じる。そこで不連続な影響を減少させるためのテーパーを有する窓関数を用いて、2.4Hzにおける有限差分法によるサイト増幅特性の重みを0にする必要がある。本研究では図-8に示す窓関数 $X(f)$ を用いて、1.4~2.4Hzの帯域において2つのサイト増幅特性を合成した。図-8は一般的なコサイン関数のフィルターで式(4)で表すことができる。

$$X(f) = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\{\pi(f-2.4)\} & 1.4 < f < 2.4 \\ 1 & f \leq 1.4 \\ 0 & f \geq 2.4 \end{cases} \quad (4)$$

いま、有限差分法によるサイト増幅特性を $AMP_d(f)$ 、微地形分類で分けたグループにおけるサイト増幅特性の平均を $AMP_s(f)$ とすると、式(5)の方法でサイト増幅特性を合成した。つまり、1.4Hzまでを $AMP_d(f)$ で評価し、1.4~2.4Hzの帯域はフィルターを用いて両者を重み付けし、2.4Hz以降を $AMP_s(f)$ で評価することにより、サイト増幅特性が未知の地点のサイト増幅特性 $AMP(f)$ を評価した。

$$AMP(f) = AMP_d(f) \cdot X(f) + AMP_s(f) \cdot \{1 - X(f)\} \quad (5)$$

図-9に上述の合成方法を用いたサイト増幅特性の評価例(SZO4021)を示す。合成後のサイト増幅特性(黒線とサイト増幅特性(緑線)と比較すると、低周波側においてやや過小評価であるが、高周波側では良い一致を示しているといえる。またサイト増幅特性の合成による不連続の影響もある程度の範囲に留めることができた。

同様に、提案したサイト増幅特性の解析的評価法を用いて、対象エリア内の強震観測点10地点のサイト増幅特性の評価を行った結果を図-10に示す。

まず差分法による結果の2.4Hz以下の帯域に関して、サイト増幅特性のピークが不明瞭であるSZO4211, SZO4241, SZO4441, SZO4471では増幅特性を精度よく評価することができた。またエリア内北部に位置する

SZO016, SZO4021では過小評価であったのに対し、これらの観測点より南側に位置する SZO019, SZO017, SZO4421 では過大評価となった。なお 1.5Hz 付近に明瞭なピークを示す SZO018, SZO4231 は表層地盤の影響も大きいと考えられるため、本研究の深部地盤情報を利用した解析モデルでは評価できなかった。

また微地形区分を利用した 2.4~10Hz に関しては、概ね良い精度で簡易評価を行うことができた。

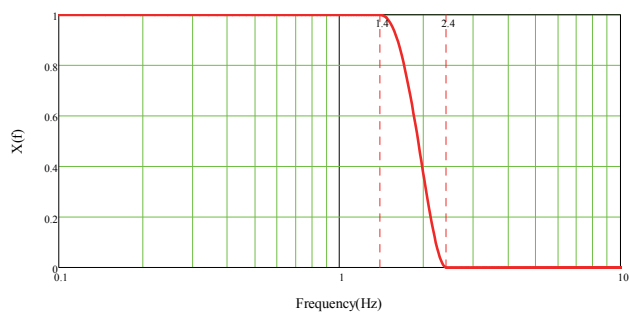


図-8 使用した窓関数 $X(f)$

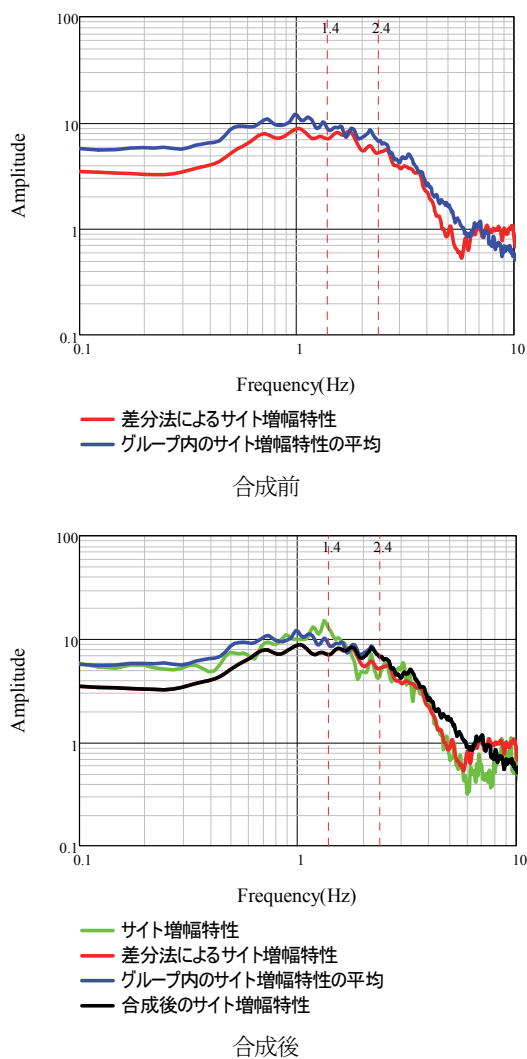


図-9 SZO4021 のサイト増幅特性を求めた例

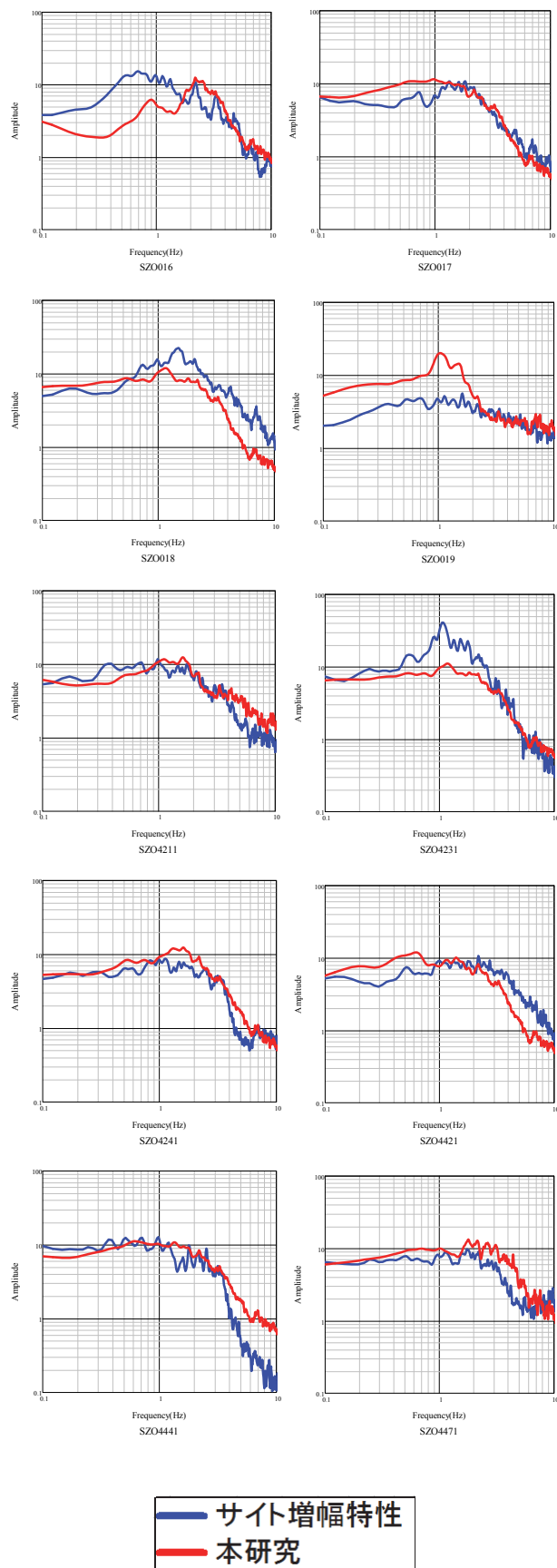


図-10 サイト増幅特性評価結果

5. サイト増幅特性の検証

(1) 強震動シミュレーション

本研究で行ったサイト増幅特性の解析的評価手法の適用性を検討するために、強震動シミュレーション²⁴⁾を実施した。サイト増幅特性としてスペクトルインバージョンによるものと本研究によるものを用いて強震動シミュレーションを行い、両者を比較することで、本研究の解析的評価手法が、実用的に十分な精度でサイト増幅特性を評価できているのか確認した。

強震動シミュレーションには、この検証の客観性を保つために、既往の研究により震源モデルが提案されている地震を選択した。そこで、森川他²⁴⁾により、経験的グリーン関数法を用いて震源モデルが構築されている2001年4月3日23:57に発生した静岡県中部の地震（北緯34.99°，東経138.109°，深さ33.2km，M5.3）を対象として強震動シミュレーションを実施した。

(2) 震源モデルの妥当性の確認

まず本研究で適用する震源モデルの妥当性をSZO016，SZO017，SZO018，SZO019を対象に、既に得られているサイト増幅特性を用いて検討する。この地震は1個のアスぺリティからなる震源モデルが提案されている。表-3に震源モデルのパラメタ²⁴⁾を示す。なお伝播経路の Q 値は東日本海溝型地震¹⁸⁾の Q 値（ $Q=114 \times f^{0.92}$ ）を用いた。

位相の補正に用いる中小地震記録としては、対象サイトへの入射角が近く、点震源とみなせる2001年4月4日0:04の地震（北緯34.992°，東経138.102°，深さ32.8km，M4.1）の記録を低周波側までS/N比が良いことを確認して用いた。

強震動シミュレーションの結果として、図-11に加速度フーリエスペクトル（水平2成分のベクトル和）を示す。また図-12に速度波形を示す。なお速度波形に関しては、波形の山谷の比較を容易にするため、ここでは特に0.2~2.0Hzの帯域に着目して比較を行った。

観測とサイト増幅特性を用いたシミュレーション結果を比較すると全ての観測点において、加速度フーリエスペクトルはほぼ一致しており、特に低周波側（0.1~1Hz）のレベルでは良い一致を示している。また速度波形を比較すると、全体として、観測の振幅の大小は概ね再現されている。

以上のことから、本研究でサイト増幅特性の検証のために適用する震源モデル（森川他）は妥当なものであると考えられる。

表-3 震源モデルのパラメタ²⁴⁾

震源付近の密度(g/cm ³)	2.8
震源付近のS波速度(km/s)	3.82
走向(°)	341
傾斜(°)	36
破壊開始点	アスぺリティ中央
破壊伝播速度(km/s)	3.0
アスぺリティの長さ(km)	1.8
アスぺリティの幅(km)	1.8
アスぺリティの地震モーメント(dyne-cm)	8.2E+23
アスぺリティのライズタイム(s)	0.15
分割数	4×4×4

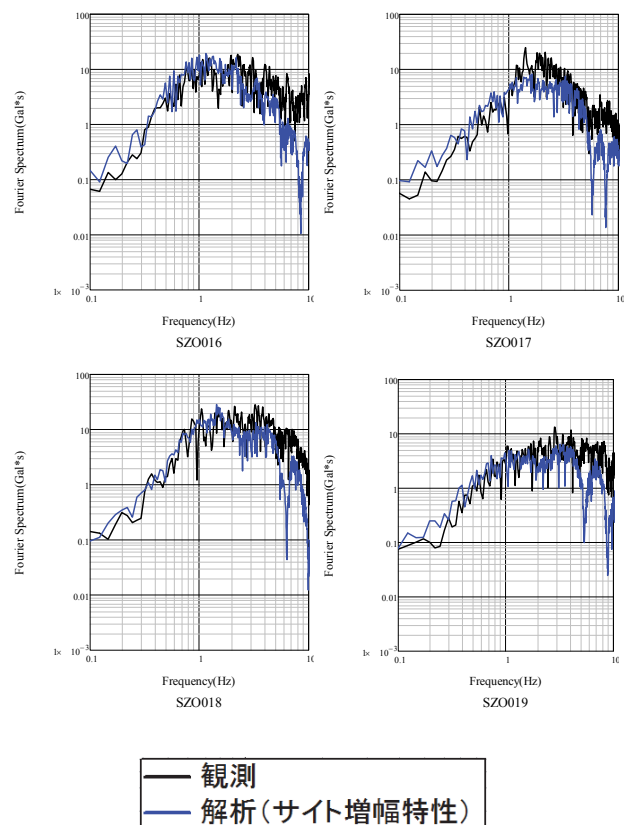


図-11 加速度フーリエスペクトルの比較

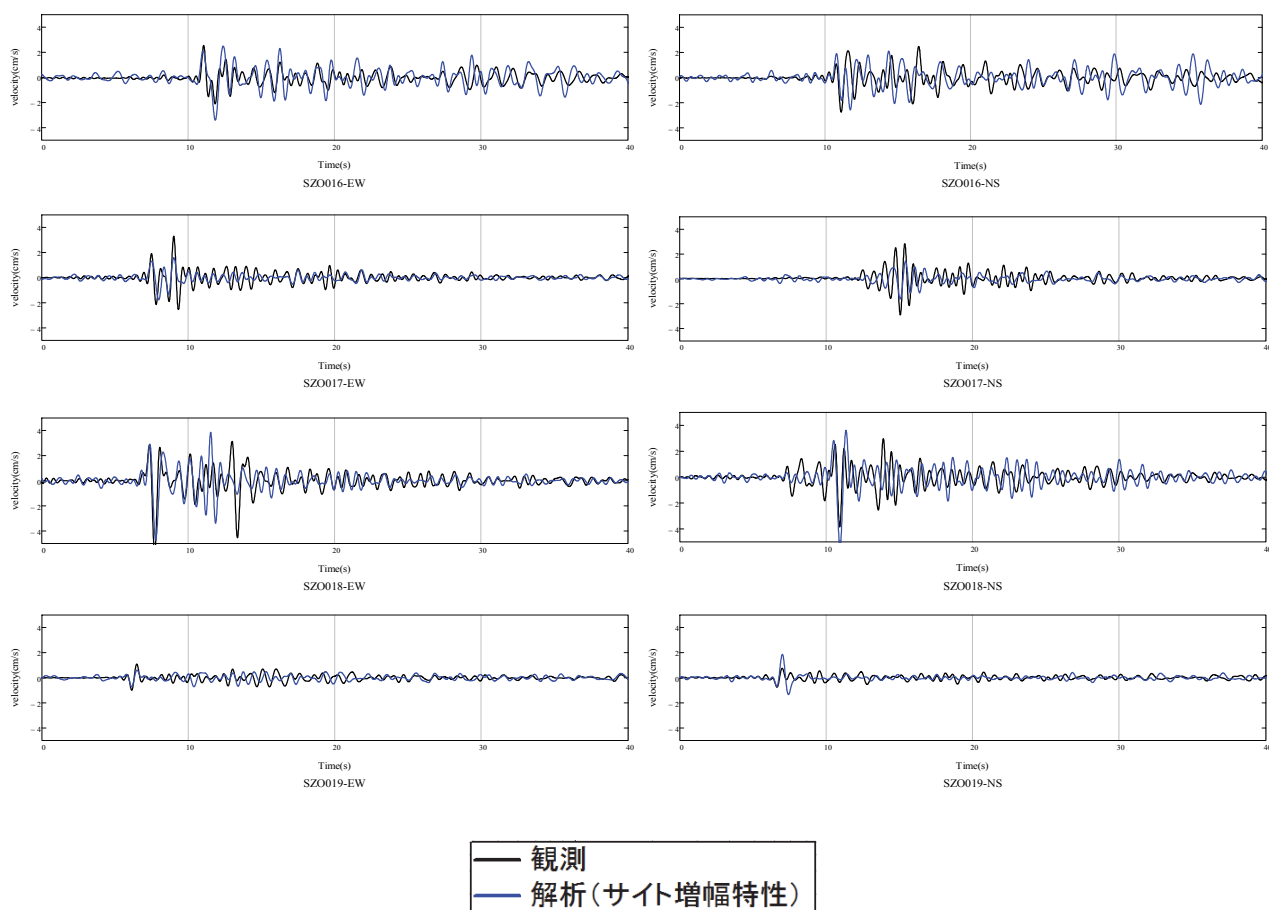


図-12 速度波形 (0.2~2Hz) の比較

(3) 強震動シミュレーションの比較

(2)で実施した強震動シミュレーションの震源モデルを用いて、サイト増幅特性の違いによるシミュレーション結果を比較することで、本研究で算定されたサイト増幅特性の適用性について議論する。実施対象地点は、9地点 (SZO016, SZO017, SZO018, SZO019, SZO4021, SZO4231, SZO4241, SZO4421, SZO4471) とし、それ以外の地点 (SZO4211, SZO4441) については位相に関する補正のための地震観測記録が得られなかったため除外した。また位相の補正のための中小地震記録として SZO4021, SZO4231, SZO4241, SZO4421, SZO4471 については、(2)で用いた地震記録を入手できなかったため、2007年8月31日 10:51の地震 (北緯 34.888°, 東経 137.752°, 深さ 32.8km, M4.1) の記録を用いた。

結果として図-13 に加速度フーリエスペクトル (水平2成分のベクトル和) を示す。さらに、図-14 に速度波形のEW成分 (0.2~2Hz) を示す。SZO019については本研究による結果が経験的サイト増幅特性による結果と比較して過大評価となっている。図-10 に示したように、この地点については2Hz以下の領域で本研究によるサイ

ト増幅特性は過大評価となっており、そのためこのような結果が得られていると考えられる。逆にSZO4231については本研究によるサイト増幅特性を用いた結果は過小評価となった。述のようにこの地点のサイト増幅特性の評価精度には表層地盤のモデル化の誤差の影響が考えられ、その結果として図-10 に示したように本研究によるサイト増幅特性は1Hz付近の増幅倍率を過小評価しており、このことが原因と考えられる。上のほかの地点の結果としてSZO016, SZO018の2地点についても本研究によるサイト増幅特性を用いた結果はやや過小評価の傾向にあるが、その程度はSZO4231と比較すると小さい。

これら以外のSZO017, SZO4021, SZO4241, SZO4421, SZO4471については、全体的にサイト増幅特性の違いによる影響は少なく、良い一致を示した。

以上のことから、本研究の評価手法によるサイト増幅特性は、表層地盤の影響が大きいと考えられる等、一部の地点を除いては実用的に十分な精度で評価できるものであることが分かった。

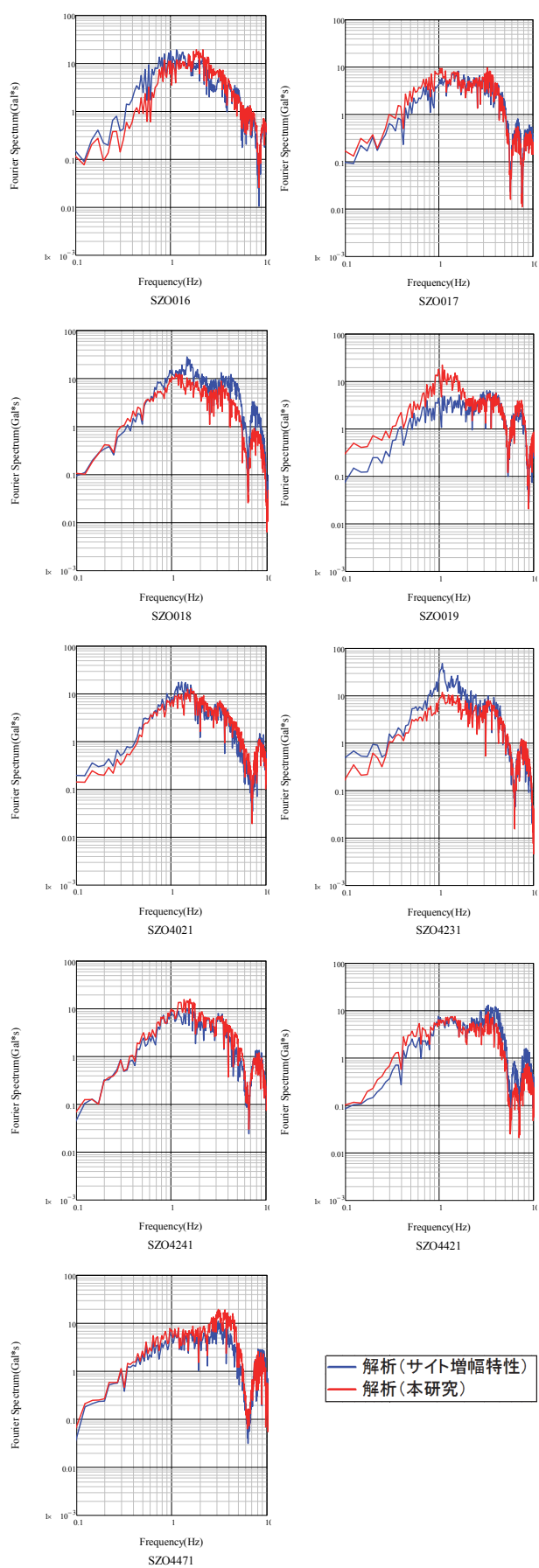


図-13 加速度フーリエスペクトルの比較

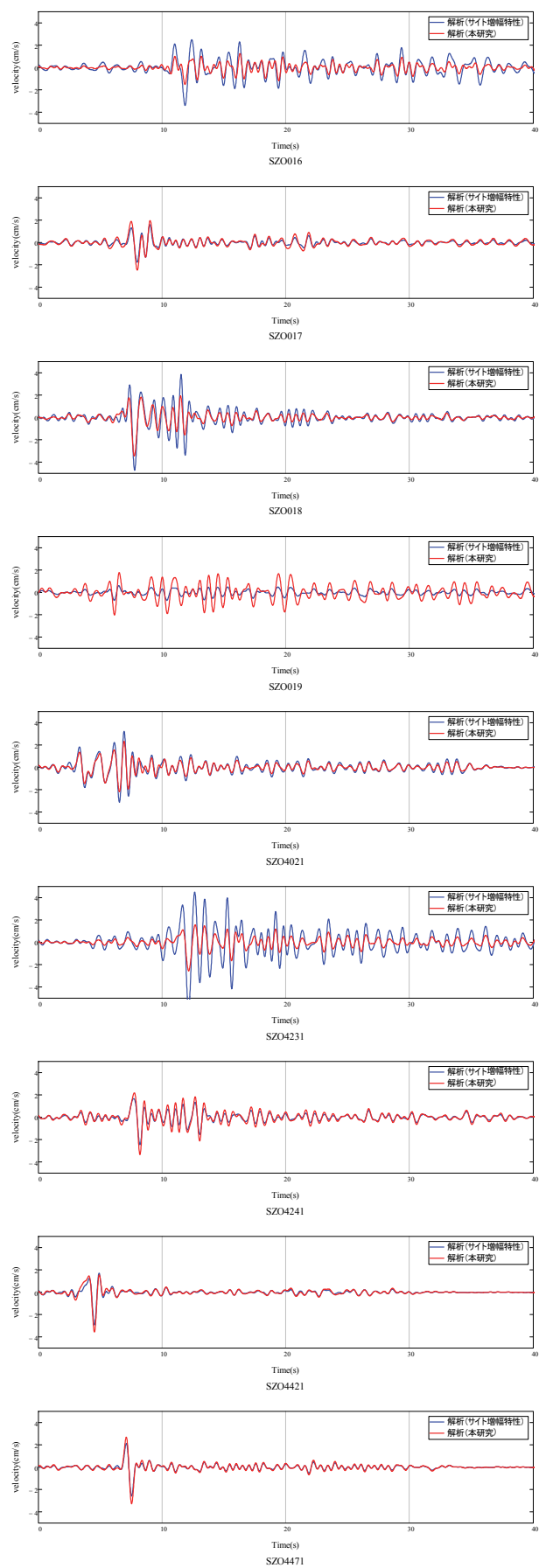


図-14 速度波形 (0.2~2.0Hz, EW成分) の比較

6. まとめ

本研究では、比較的高密度で強震観測が行われている御前崎半島周辺を対象に、サイト増幅特性を解析的に評価する方法について検討を行った。有限差分法による数値解析によって有効周波数の範囲内でサイト増幅特性を評価し、それ以降の高周波側については、微地形分類を用いたグルーピングによってサイト増幅特性を簡易評価した。また強震動シミュレーションを実施することによって、その有効性について議論した。

本研究の解析的手法によって、概ね良い精度でサイト増幅特性を評価できることが分かった。ただし、特に低周波側においてサイト増幅特性を過大評価、あるいは過小評価するケースが見受けられたことから、地盤構造の精度確認等、今後更に改善に向けた検討が必要である。また本研究による手法の妥当性を示すために、別のエリアにおいても同様の議論を進めることとした。

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。その他の地点の強震観測記録やサイト増幅特性は中部地方整備局より提供頂きました。ここに深く感謝します。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) 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.
- 6) 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.
- 7) 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の2D-FEMを用いた入射方向依存性に関する研究～大阪平野と釧路平野の検討～，応用力学論文集，Vol.12，pp.579-588，2009.
- 8) 山田雅行，長尾 毅，野津 厚：鬼首地域における地震動増幅の要因分析，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.70，No.4，p.I.33-I.43，2014.
- 9) 出口拓磨，長尾 毅：震源モデルの違いがサイト増幅特性に及ぼす影響の評価，土木学会年次学術講演会，2014.
- 10) 香川耀平，長尾 毅：震源モデルを変化させた京都府におけるサイト増幅特性の評価，土木学会年次学術講演会，2014.
- 11) 国土地理院：電子国土，<http://maps.gsi.go.jp/#8/34.743869/138.131104>，2015. (2015年8月閲覧)
- 12) (独)防災科学技術研究所：強震観測網(K-NET，KiK-net)，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>，(2015年8月閲覧).
- 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) 青井 真，早川俊彦，藤原広行：地震動シミュレータ：GMS，物理探査，第57巻，第6号，pp.651-666，2004.
- 15) Aoi, S. and H. Fujiwara：3-D finite difference method using discontinuous grids，Bulletin of the Seismological Society of America，Vol.89，pp.918-930，1999.
- 16) 青井 真，藤原広行：不連続格子を用いた4次精度差分法による波形合成，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol.1，pp.879-884，1998.
- 17) (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).
- 18) 佐藤智美，巽 蒼樹：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，第556号，pp.15-24，2002.
- 19) 深津清尊，野津 厚，佐藤 陽子，菅野高弘：港湾地域強震観測地点における地震動の卓越周期，港湾空港技術研究所資料，No.1052，2003.
- 20) 若松加寿江，久保純子，松岡昌志，長谷川浩一，杉浦正美：日本の地形・地盤デジタルマップ CD-ROM 付，東京大学出版，2005.
- 21) 松岡昌志，若松加寿江，藤本一雄，翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定，土木学会論文集 No.794，I-72，239-251，2005.
- 22) 若松加寿江，松岡昌志：全国を網羅した地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築，第3回シンポジウム「統合地下構造データベースの構築」予稿集，pp.15-20，2009.
- 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―因果性および多重非線形効果に着目した改良―，港湾空港技術研究所資料 No.1173，2008.
- 24) 森川信之，笹谷 努，藤原広行：経験的グリーン関数法によるスラブ内地震の震源モデルの構築，日本地震工学シンポジウム(CD-ROM)，2002.

ANALYTICAL EVALUATION METHOD OF SITE AMPLIFICATION FACTOR AT DENSE STRONG MOTION OBSERVATION AREA

Takuma DEGUCHI, Takashi NAGAO, Masayuki YAMADA 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.

In this study, evaluation method of site amplification factors at dense strong motion observation area was discussed. Site amplification factors for the low frequency range were evaluated by using both three dimensional finite difference analysis results and empirical site amplification factors. On the other hand, site amplification factors for the high frequency range were evaluated by the mean amplification factors considering geomorphologic condition. Applicability of the proposed method was discussed.