

有限差分法を用いた京都盆地における サイト増幅特性の評価法に関する研究

長尾 毅¹・香川耀平²・山田雅行³・伊藤佳洋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: 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

京都盆地を対象に深層地盤構造による地震動の増幅特性を有限差分法を用いて評価した。有限差分法のみを用いた解析結果は、堆積層が薄い一部の強震観測点を除き経験的増幅特性を十分に評価できなかったため、近傍地点の経験的増幅特性と有限差分法による解析結果を組み合わせることで精度の良い増幅特性の評価を試みた。さらに、広範囲の周波数帯における増幅特性を評価するため、対象領域の異なる2種類の3次元有限差分法の結果を組み合わせる検討を行った。

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い。そして、地点ごと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。

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⁸⁾¹⁰⁾。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

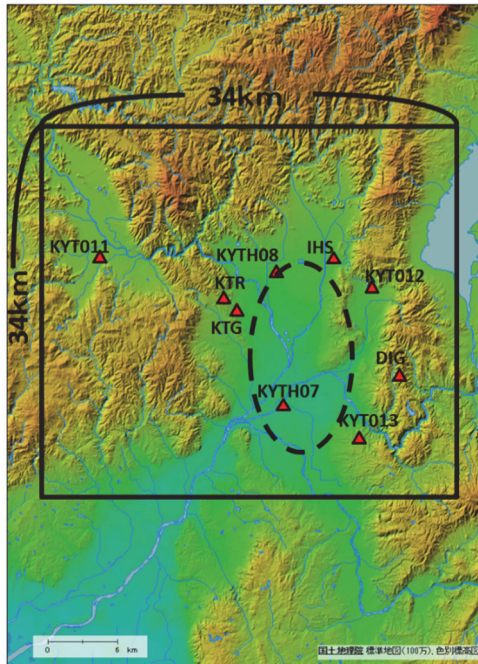


図-1 検討対象範囲

表-1 サイト増幅特性評価に用いた地震

地震番号	発震日時		緯度	経度	深さ	M
①	2007/4/15	12:19	34.79	136.41	16	5.4
②	2009/2/18	6:47	35.66	136.31	9	5.2
③	2011/2/27	2:19	36.16	137.46	4	5.0
④	2011/7/5	19:18	33.99	135.23	7	5.5
⑤	2011/7/24	23:32	33.92	136.14	42	4.8
⑥	2011/8/10	8:13	34.05	135.52	61	4.7
⑦	2011/11/18	3:58	35.93	136.34	7	4.8
⑧	2011/12/14	13:01	35.35	137.24	49	5.1
⑨	2012/1/9	0:37	34.00	135.50	56	4.7

る。本研究では、京都盆地を対象に、3次元有限差分法によりサイト増幅特性の評価を試みた。

2. 京都盆地におけるサイト増幅特性

(1) 京都盆地及び検討対象地点の概要

京都盆地は東西約 10km、南北約 18km の、東西両縁を急崖で限られた断層運動による陥没盆地である¹¹⁾。本研究で検討対象とする強震観測点は、防災科学技術研究所(K-NET, KiK-net)¹²⁾の強震観測点が 5 地点(KYTH07, KYTH08, KYT011, KYT012, KYT013)、関西地震観測研究協議会¹³⁾の強震観測点が 4 地点(IHS, DIG, KTR, KTG)の計 9 地点である。図-1 に電子国土による色別標高図¹⁴⁾と検討対象強震観測地点の位置を示す。なお KYT011 は京都盆地からは外れているが、近傍の観測点として対象に含めている。

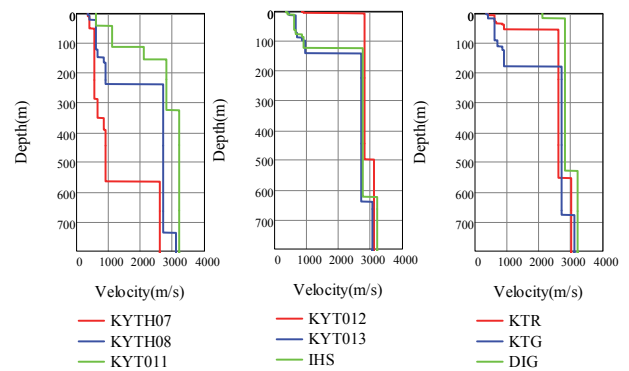


図-2 S波速度構造

(2) 検討対象地点のサイト増幅特性

各強震観測点におけるサイト増幅特性は、一部を除きスペクトルインバージョンによって求められている¹⁵⁾。ただし、強震観測点のうち KYTH07・KYTH08・KTR においてはサイト増幅特性は求められていないので、サイト増幅特性が既知である観測点と KYTH07・KYTH08・KTR の各地点で得られた同時記録のスペクトル比よりサイト増幅特性の評価を行った¹⁶⁾。サイト増幅特性の評価に用いた地震は表-1 に示すとおりである。KYTH07 及び KYTH08 は①～④, ⑧, ⑨の地震を, KTR は③～⑨の地震を使用した。

3. 低周波領域を対象とした差分法によるサイト増幅特性の評価

(1) 検討手法

本研究では 3 次元有限差分法による数値解析を行って強震観測地点のサイト増幅特性の評価を行った。用いたツールは地震動シミュレータ(GMS: Ground Motion Simulator)¹⁷⁾である。地盤モデルは、図-1 に示すように東西南北方向 34km・深さ方向 8km で切り出し、地盤構造データには、地震ハザードステーション(J-SHIS)¹⁸⁾で公開されているデータを用いた。図中の楕円状の破線は京都盆地の概ねの位置であり、強震観測点の中では KYTH07 が最も地震基盤が深い。図-2 に検討対象地点の S 波速度構造を示す。用いる地盤モデルの正確さが解析精度に強く影響を及ぼすことが想定される。京都盆地においては大規模な物理探査が行われており¹⁹⁾²⁰⁾、J-SHIS による公開データはこれら探査結果が反映されていると考えられる。

GMS においては計算効率を高める観点から地盤モデルの上部と下部で格子点間隔を変化させる不連続格子を用いており²¹⁾、本研究における解析のグリッド間隔は地表から深さ 1km まで 40m、それ以降は 120m である。解

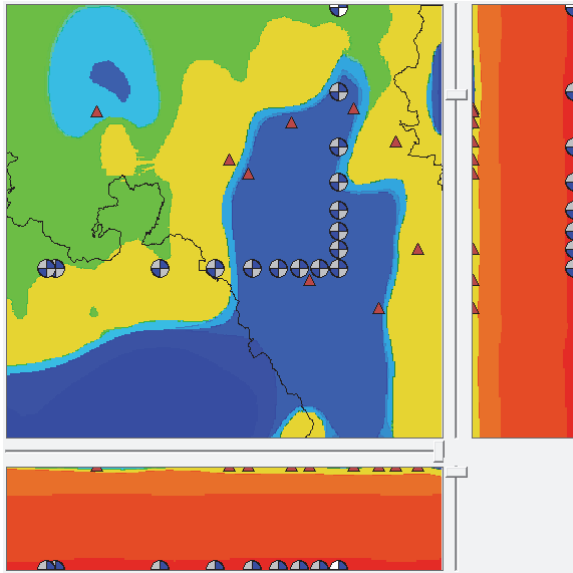


図-3 震源位置

表-2 Q 値

V_s (m/s)	Q
$V_s < 600$	60
$600 \leq V_s < 1000$	100
$1000 \leq V_s < 2000$	150
$2000 \leq V_s < 3000$	200
$V_s \geq 3000$	300

析における震源時間関数には Ricker wavelet を用いた。サンプリング周波数は 1000/3Hz とした。 Q 値の設定は表-2 に示すとおりとした。フーリエ振幅スペクトルは P 波の到達時刻と考えられる時間から 24.576 秒間の地震波を評価した。各地点のサイト増幅特性は別途同規模の岩盤均一の地盤モデルを作成し、不均質地盤モデルのフーリエスペクトルを岩盤均一地盤モデルのフーリエスペクトルで除したものにより定義した。震源は図-3 に示すように、各観測点への入射角度が様々になるように設定し、得られた増幅特性の平均値を解析による増幅特性とした。

本解析では、有効周波数上限値は 1.75Hz 程度となり、耐震性能照査の観点から重要な周波数帯をカバー出来ているとは言いがたい。有効周波数上限値は解析モデルにおける最小 S 波速度と格子間隔との間に式(1)の関係があり、格子間隔が狭くなれば有効周波数上限値は増加する。

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

ここに、 $f_{\max}$: 有効周波数上限値 (Hz) , $V_{s\min}$: 解析最小 S 波速度 (m/s) , d : 格子間隔 (m) である。

ただし、サイト増幅特性の評価にあたり京都盆地全体の波動の伝播状況を考慮するためには解析領域を広く取らざるを得ず、計算負荷の観点から設定されるグリッド間隔には限界があるため、低周波領域の増幅特性を本モデル（以下、大領域モデル）により評価することとし、高周波側の増幅特性は別途検討を行うこととする。

(2) 解析結果

強震記録によるサイト増幅特性(observed)と解析による増幅特性(analysis)を図-4に比較する。1Dは図-2に示した S 波速度構造をもとにした1次元の周波数伝達関数である。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 $1/70$ 、 500m/s 以上の場合は 0.005 とした。このほか、図-4中の2種類の modified については後述する。構造物の耐震性を議論する上で重要な 0.2-5.0Hz 程度の周波数帯に着目すると、サイト増幅特性としては、今回新たに求めた KYTH07, KYTH08 の 2 地点の増幅倍率が非常に大きく、特に KYTH07 では 0.2-3.0Hz 程度の周波数帯域で 10 倍以上の増幅倍率を示し、ピークでは 60 倍程度の値となっている。KYTH08 もピークの倍率は 50 程度である。何れも強震観測点の中では堆積層の厚さが非常に厚いことがこの倍率の原因と考えられる。次に、KYT011, KYT013, IHS, KTG, KTR がピークの倍率が 5~10 程度であり、堆積層の薄い KYT012, DIG は 3 倍程度以下である。

1次元周波数伝達関数 (1D) の振幅はサイト増幅特性よりも低く、1次元構造での議論ではサイト増幅特性を評価できない。3次元有限差分法によるサイト増幅特性 (analysis) については、堆積層の最も薄い KYT012, DIG については概ね良好にサイト増幅特性を評価できていると考えられる。ただし、同様に堆積層の非常に薄い KYT011 については解析は観測値を過小評価している。1次のピーク周波数も観測の 1Hz に対して解析は 2Hz 程度であり大きな違いがある。1次元周波数伝達関数の 1 次ピークは解析と一致している。KYT011 は京都盆地から外れており、前述した大規模な物理探査エリアからは外れている。KYT011 における増幅特性の過小評価は地盤モデルの精度に問題がある可能性が考えられる。

上記 3 地点に次いで堆積層の薄い KTR では解析は若干過小評価気味であるが、それら地点より堆積層が厚い KYT013 では良好な推定結果となっている。KYT013 よりも更に堆積層の厚い KTG, KYTH08, HIS, KYTH07 では解析は増幅倍率を過小評価している。

以上のように、地盤モデルの精度に問題がある可能性がある KYT011 を除くと、堆積層が薄い地点 ($V_s = 2700\text{m/s}$ の堆積深さが地下-100m 程度以浅の地点) では解析により概ねサイト増幅特性を精度良く評価できたのに

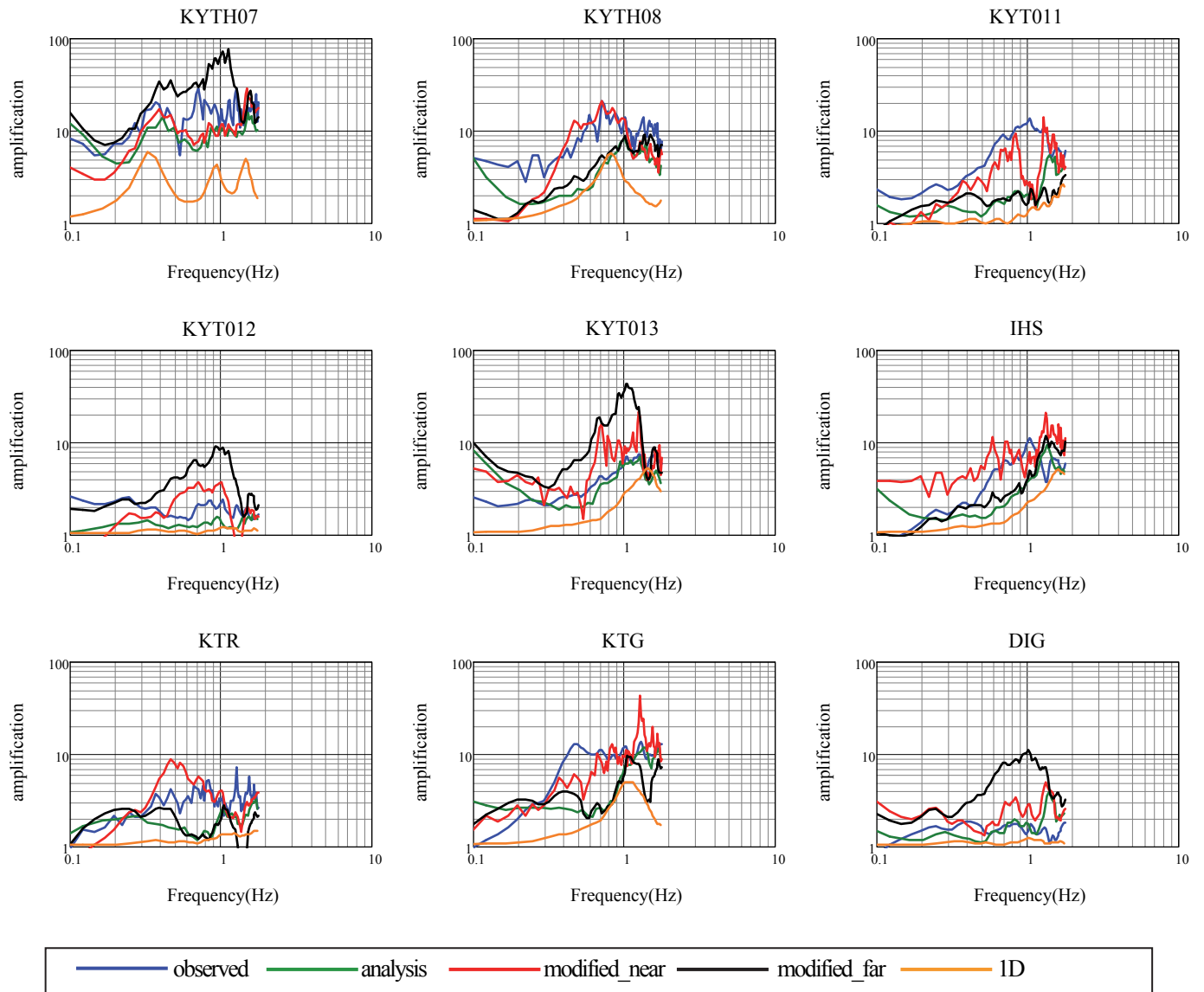


図-4 増幅特性の比較

対して、堆積層がそれよりも厚い地点では解析による増幅特性は観測値よりも小さく、過小評価となった。

過小評価の原因として、解析における Q 値の設定の問題、地盤モデルにおける表層のモデル化精度等が考えられるが、別途行った検討によりそれらの影響は小さいことが分かっている²⁾。このため、過小評価の原因としては、KYT011におけるようなJ-SHISの地盤構造の精度の問題が考えられる。

(3) 解析精度向上方法の検討

以上の結果を踏まえて、サイト増幅特性の評価精度向上の方法について検討する。対象地点の地盤モデルに誤差が含まれている場合、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地点の増幅特性は同程度の誤差が含まれることが考えら

れ、解析による2地点の増幅特性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による増幅特性を用いて、式(2)により推定を行うこととする。

$$Gt(f) = Gr(f) \cdot \frac{At(f)}{Ar(f)} \quad (2)$$

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、 $At(f)$ ：対象地点の解析による増幅特性、 $Ar(f)$ ：参照地点の解析による増幅特性、 f ：周波数である。

表-4 補正に用いた観測点

	near	far
KYTH07	KYT013	KYT011
KYTH08	KTG	KYT013
KYT011	KTR	DIG
KYT012	IHS	KYT011
KYT013	KYTH07	KYT011
IHS	KYTH08	KYT013
KTR	KTG	DIG
KTG	KTR	DIG
DIG	KYT012	KYT011

各強震観測点について、参照地点を最も近い強震観測点にした場合(modified_near)と、最も遠い強震観測点にした場合(modified_far)で比較して図-4に示す。補正に用いた観測点の一覧は表-4に示すとおりである。近傍地点を参照地点として選んだ場合、KTG、DIG等のように大きな変化は見られないケースもあるものの、KYTH08、KYT011等のように、概ね単独で評価した場合よりも精度が向上しているといえる。逆に、遠地を参照地点として選んだ場合は概して精度が悪く、補正を行う前よりも精度が悪化するケースが多いことが分かる。これは、距離が離れた地点どうしでは地盤モデルの誤差の傾向が異なるためと考えられる。なお、式(2)と類似の方法で補正を行う既往の研究として、例えば高橋ら²³⁾の研究があげられるが、高橋らの研究では解析値の比を純粋に伝達関数として用いているのに対して、本研究では誤差を打ち消しあう効果を期待している点で意味合いが少し異なるといえる。

図-5にはKYTH08とKYT011を対象に、補正に用いた近傍地点と遠地点を結ぶように切り取った断面におけるS波速度深度分布を示す。KYTH08に対して近傍地点のKTGと遠地点のKYT013と比較するとKYT013は盆地最深部を隔てた地点に存在することが分かる。同じことがKYT011を対象にした場合にも確認でき、近傍の地点のKTRと遠地点のDIGと比較すると、DIGは盆地最深部を隔てた地点に存在している。本方法による補正の精度に影響する項目として、単純な距離のみならず、盆地構造における位置も関係している可能性があり、今後更に検討を行う必要があると考えられる。

4. 高周波領域を含めたサイト増幅特性の評価法の検討

(1) 高周波領域の検討手法

大領域モデルでは2Hz程度までの増幅特性を評価でき、

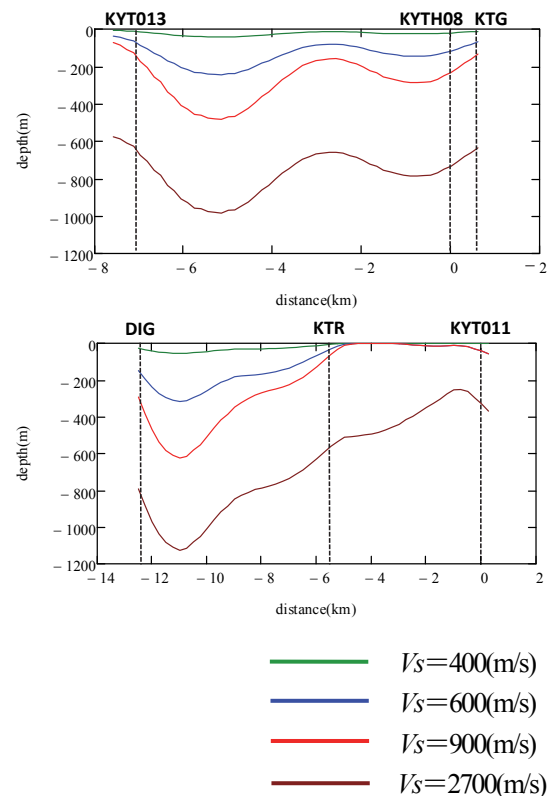


図-5 S波速度深度分布

例えば港湾構造物では2Hz程度までの周波数帯が重要であるという指摘はある²⁴⁾ものの、それだけでは一般的な土木構造物の耐震性能照査において重要な周波数帯域をカバーできているとは言えない。本研究では、一般的な土木構造物の振動特性や設計地震動の周波数特性等を考慮し、5Hz程度までの増幅特性の評価を検討する。

上述のように解析領域を広く取ると京都盆地全体の波動伝播の影響を考慮できるものの、解析有効周波数上限値は低くなる。ただし、大領域モデルの検討で2Hz程度までの増幅特性の評価を行えているため、更に評価を行うのは2Hz以上の周波数帯であり、これは広い領域の深部地盤構造による増幅ではなく、狭い領域の地盤構造による増幅であることが考えられる。ただし図-4に示したように、1次元地盤構造では増幅特性の評価を行うことはできない。このため、高周波領域の増幅特性評価として、狭い領域を対象に増幅特性の評価を行い（以下、小領域モデル）、大領域モデルの結果と組み合わせることで耐震性能評価上重要な周波数帯における増幅特性の評価を試みる。

高周波数領域を対象とした解析では、対象地域である京都盆地を図-6の赤点線のように10km四方の小領域エリア①～④で切り出し、各々について深さ方向3kmまでの地盤構造をモデル化した。

解析領域を小さくすることで解析格子間隔を10mとし、解析有効周波数を7Hzまで拡張させた。今回の解析にお

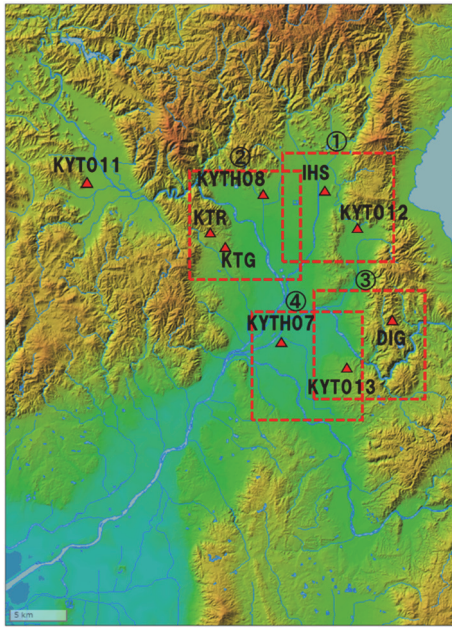


図-6 京都盆地 小領域解析検討エリア

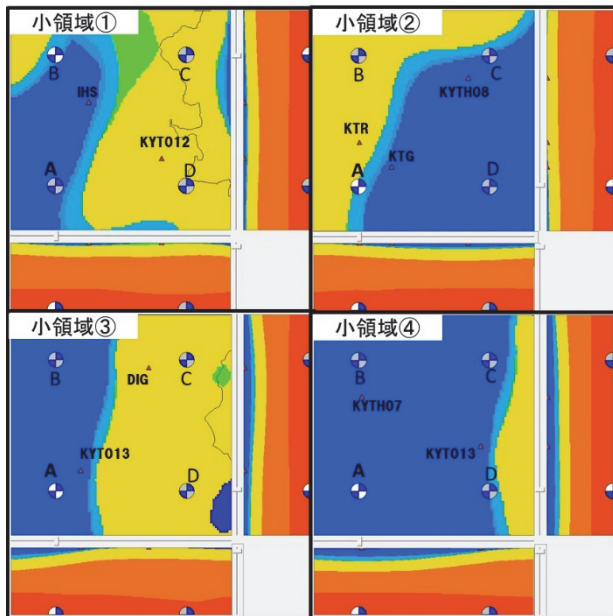


図-7 京都盆地 小領域解析 震源位置

ける計算上の格子点間隔は地表から深さ1kmまで10m, それ以降は30mである。解析ツール、地盤構造データ、震源時間関数、 Q 値は大領域モデルの解析と同様である。震源は図-7のように各解析領域の四隅（A～D地点）に解析領域の両端から2kmずつ離して設定し、1つずつ増幅特性を評価して平均化を行った。震源モデルには図-7に示している横ずれ断層（Strike: 0° , Dip: 90° , Rake: 0° ）に加えて、逆断層（Strike: 135° , Dip: 45° , Rake: 90° ）を設定し、それぞれ解析を行った。サンプリング周波数は10000/8Hzとした。差分法を用いた計算では、格子点間隔を小さくすると安定条件を満たすために時間ステップ間隔も小さくする必要がある。こ

のため、大領域モデルに比べてサンプリング周波数を大きく設定している。フーリエ振幅スペクトルは、P波の到達時間から26.2144秒間の地震波を評価した。解析による各地点のサイト増幅特性の評価は大領域モデルの解析と同様であり、各震源位置・震源モデルにより得られた増幅特性の平均値を解析による増幅特性とした。なお、KYT011については小領域でモデル化する際、他の対象観測点を含めることが出来ず、また、亀岡盆地に位置しており京都盆地から外れているため、高周波領域におけるサイト増幅特性の評価の対象から除外することとした。このように近傍に強震観測地点が存在しない地点における高周波領域の増幅特性の評価方法については今後の課題である。

(2) 解析結果

強震記録によるサイト増幅特性（observed）と小領域モデルにおける解析によるサイト増幅特性（analysis average）を図-8に比較する。図中のmodifiedについては後述する。KYTH07では、7Hz程度まで概ね良好に実測による増幅倍率を評価できているが、1Hz前後の周波数帯ではやや過小評価となっている。KYTH08, KTR, KYT013では、2～7Hzで概ね良好に評価できているが、2Hz以下の周波数帯では過小評価となっている。KYT012, KTGでは全体として過小評価しており、KYT012では特に4～7Hzの高周波数帯で過小評価となる。KTR, DIGでは概ね良好に評価できていると考えられるものの、KTRでは2Hz以下、DIGでは5～7Hzの周波数帯でやや過小評価となっている。

以上のように、KYTH07, KYTH08, KTR, KYT013のように概ね良好に実測による増幅倍率を評価できている地点もあるが、周波数帯によって過小評価または過大評価している部分が見られる。また、KYT012, KTGでは全体で過小評価しているなど、解析結果のみを用いた場合は小領域モデルにおいても解析精度の問題が残ることが確認できた。

このほかの小領域モデルの解析結果の特徴として、ピークとディップの明瞭な増幅特性が評価される点をあげることができる。図-9に、小領域①のA地点に逆断層を設置し解析を行った際のIHSにおける不均質地盤モデルと岩盤均質モデルによるフーリエ振幅スペクトルを示す。不均質モデルにおけるフーリエスペクトルでは、4～7Hzの領域で振幅が滑らかに減少している。それに対して、岩盤均質モデルでは振幅が2Hz, 4Hzなどの特定の周波数において振幅の急激な落ち込みが認められる。一般に差分法を用いた解析において、格子間隔の小さいモデルを用いると通常間隔のモデルと比較してより多くのタイムステップが必要となり、時間進展とともに誤差が

蓄積さる問題が指摘されている²⁾。岩盤均質モデルにおいて特定の周波数で振幅の急激な落ち込みは考えにくく、増幅特性に見られるピークは解析誤差であると考えられる。

次に、大領域モデルの有効周波数上限値の1.75Hzまでの範囲で、大領域モデルと小領域モデルによる解析結果を比較する。上述のように大領域モデルの目的は京都盆地全体の波動の伝播状況を考慮することであり、小領域モデルでは比較的狭い領域の波動伝播の影響しか考慮できないことが想定された。しかしながら、図-4と図-8の比較より、1.75Hzまでの範囲における増幅特性の評価結果に顕著な違いは見られない地点が多い結果となった。ただし、KYT013、KTGの2地点においては違いが認められ、KTGでは全帯域で小領域モデルは大領域モデルよりも増幅倍率を低く評価する結果となっている。例えば1.3Hz程度で大領域モデルでは10倍程度、小領域モデルでは4倍程度の増幅倍率を示している。このほかKYT013では0.7Hz程度以上の領域で差が認められ、1.1Hz程度では大領域モデルで7倍、小領域モデルで3倍程度の増幅倍

率を示しており、大領域モデルによる解析結果の方が実測に近い増幅倍率を示している。さらに、IHSにおいてはピーク周波数に違いがみられ、大領域モデルでは1.4Hz程度、小領域モデルでは2Hz程度にピークが認められ、大領域モデルの方が実測によるサイト増幅特性のピーク周波数とよく一致しているといえる。

(3) 解析精度向上の検討

小領域モデルについても、大領域モデルと同様に、近傍地点のサイト増幅特性を用いた補正を検討する。上記のように、各々の地点であらかじめ岩盤均一モデルの結果を用いてサイト増幅特性を評価すると誤差が大きいと考えられるため、岩盤均一モデルの結果は用いず、不均質地盤モデルの各地点の結果のみを用いた補正方法を検討する。

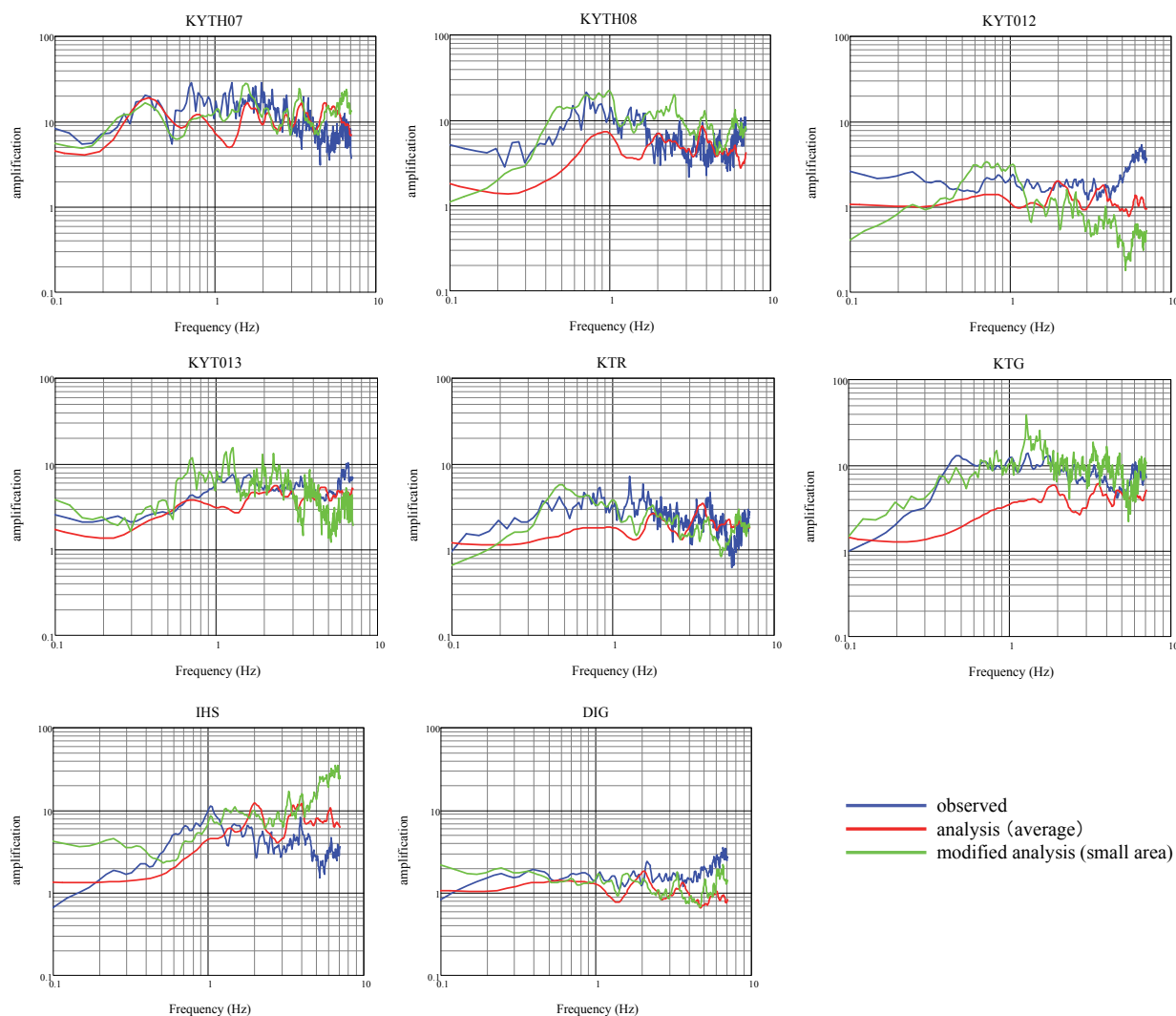


図-8 高周波領域の評価を含めた増幅特性の比較

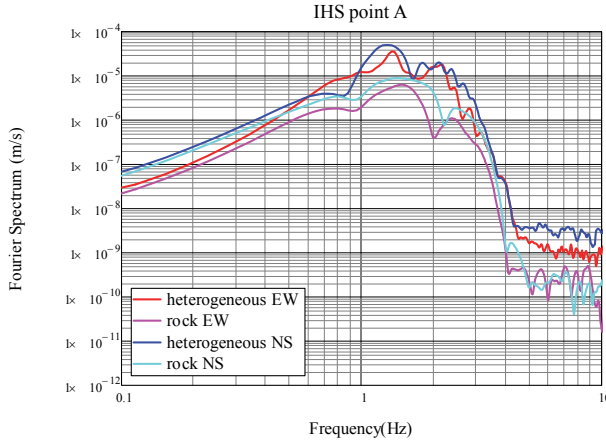


図-9 IHSにおけるフーリエ振幅スペクトル

解析による2地点の増幅特性の比ではなく、式 (3) のように不均質地盤モデルによるフーリエ振幅スペクトルの比を取り、伝播経路特性を考慮することでサイト増幅特性の評価を行う。

$$Gt(f) = Gr(f) \cdot \frac{Ot(f)}{Or(f)} \cdot \frac{Pr(f)}{Pt(f)} \quad (3)$$

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。

各対象地点の補正に用いた参照地点について、小領域内に観測点が2地点のみの場合は、同じ領域内の観測点をそれぞれ参照地点として補正を行った。観測点が3つある小領域③については最も近傍の地点を参照地点とすることとし、KYTH08はKTGを、KTGはKTRを、KTRはKTGを参照地点とし補正を行った。推定結果(modified analysis (small area)) を図-8に示す。

KYTH07では補正前後で増幅倍率にあまり変化は見られない。KYT012では0.6-1Hz程度の領域では実測の倍率に近い値を示すが、4~7Hzの周波数帯では逆に精度が悪くなっている。IHSでは、0.5~1Hzの周波数帯で増幅倍率が増加して推定精度が上昇している。しかし、4~7Hzの周波数帯では、精度が悪くなっている。KYTH08, KYT013, KTR, KTG, DIGでは補正により、特に0.2~2Hzの周波数帯の増幅倍率が上昇し、実測と同程度、もしくは近い増幅倍率を評価できている。また、2~7Hzの周波数帯では総じて実測と同程度の増幅倍率を評価できる結果となった。

また、0.2~1.75Hzの周波数帯において、大領域モデ

ルにおける最近地点を参照地点とした推定結果と小領域モデルにおける推定結果を比較する。KYTH07, KYTH08, KYT012, KYT013, KTRにおける補正結果では領域の違いによる推定結果に大きな差はない。IHSでは、0.4~0.8Hzで大領域モデルにおける推定結果の方が小領域モデルの推定結果に比べて増幅倍率がやや高くなり、特に0.5Hz以上の帯域での小領域モデルの過小評価と比較すると大領域モデルでは実測と同程度以上の増幅倍率が得られている。KTGでは、0.3~0.6Hzにおいて、大領域モデルでは過小評価であるが小領域モデルでは概ね精度良い推定結果である。DIGにおいては、0.2~0.6Hzの範囲では両モデルはほぼ同程度の増幅倍率を示しているが、0.6~1.7Hzでは、大領域モデルによる推定結果の方が増幅倍率が高く、やや過大評価の傾向にある。

(4) 高周波領域を含めたサイト増幅特性の評価手法

本章では、一般的な土木構造物の振動特性や設計地震動の周波数特性を考慮するために重要だと考えられる5Hzまで解析有効周波数を確保するために、解析領域を小さくし、解析格子間隔を小さくすることで解析有効周波数上限値を高く設定する手法を提案した。しかし、解析有効周波数上限値を高く設定するために解析領域を小さくすると、狭い領域の地盤構造による増幅特性しか考慮することが出来ないため、本来は京都盆地のような地盤構造全体の波動伝播を考慮することが出来ないものと考えられる。

本研究の範囲では大領域モデルと小領域モデルの結果に一部の地点を除いては大差は認められなかったものの、2つのモデルの結果を組み合わせることで最も合理的なサイト増幅特性推定値が得られることが期待できる。そこで本研究では、1.5Hz程度までは大領域モデルの推定結果(最近地点参照)を、1.5Hz以降から7Hzまでは小領域モデルによる増幅特性の推定結果を式(4)~式(6)に示す方法で組み合わせることで、高周波領域を含めたサイト増幅特性の評価を行う。

$$G_e(f) = w_l(f) \cdot G_{el}(f) + w_s(f) \cdot G_{es}(f) \quad (4)$$

$$w_l(f) = \begin{cases} 1 & f < 0.5 \\ 0.5 - 0.5 \cos(\pi(f - 1.5)) & 0.5 \leq f \leq 1.5 \\ 0 & 1.5 < f \end{cases} \quad (5)$$

$$w_s(f) = 1 - w_l(f) \quad (6)$$

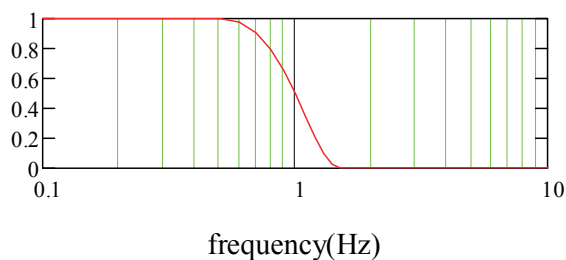


図-10 重み関数

ここに、 $G_e(f)$: サイト増幅特性推定値、 $G_l(f)$: 大領域モデルによる低周波帯のサイト増幅特性推定値、 $G_s(f)$: 小領域モデルによる高周波帯のサイト増幅特性推定値、 $w_l(f)$, $w_s(f)$: 重み関数、 f : 周波数である。

図-10に重み関数を示す。また、この方法によるサイト増幅特性推定結果を図-11に示す。図中の赤線が提案法による増幅特性である。図より、KYT012、IHSでは、特に3.5Hz～7Hzの高周波領域において、解析による増

幅特性が実測による増幅特性を過小評価または過大評価する結果となっている。しかし、その他の6地点では、7Hzまでの広い周波数帯域において、解析により実測による増幅倍率を概ね精度良く評価できており、工学的に重要な周波数帯の増幅特性評価における適用性はあるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、京都盆地を対称に、3次元有限差分法を用いてサイト増幅特性の解析的評価を試みた。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地盤モデルの精度に問題がある可能性があるKYT011を除くと、堆積層が薄い地点（本研究の範囲では $V_s=2700\text{m/s}$ 程度の土層の堆積深さが地下-100m程度以浅程度の地点）では解析により概ねサイト増幅特性を精度良く評価できたのに対して、堆積層がそれよりも厚い地点では解析による増幅特性は観測値

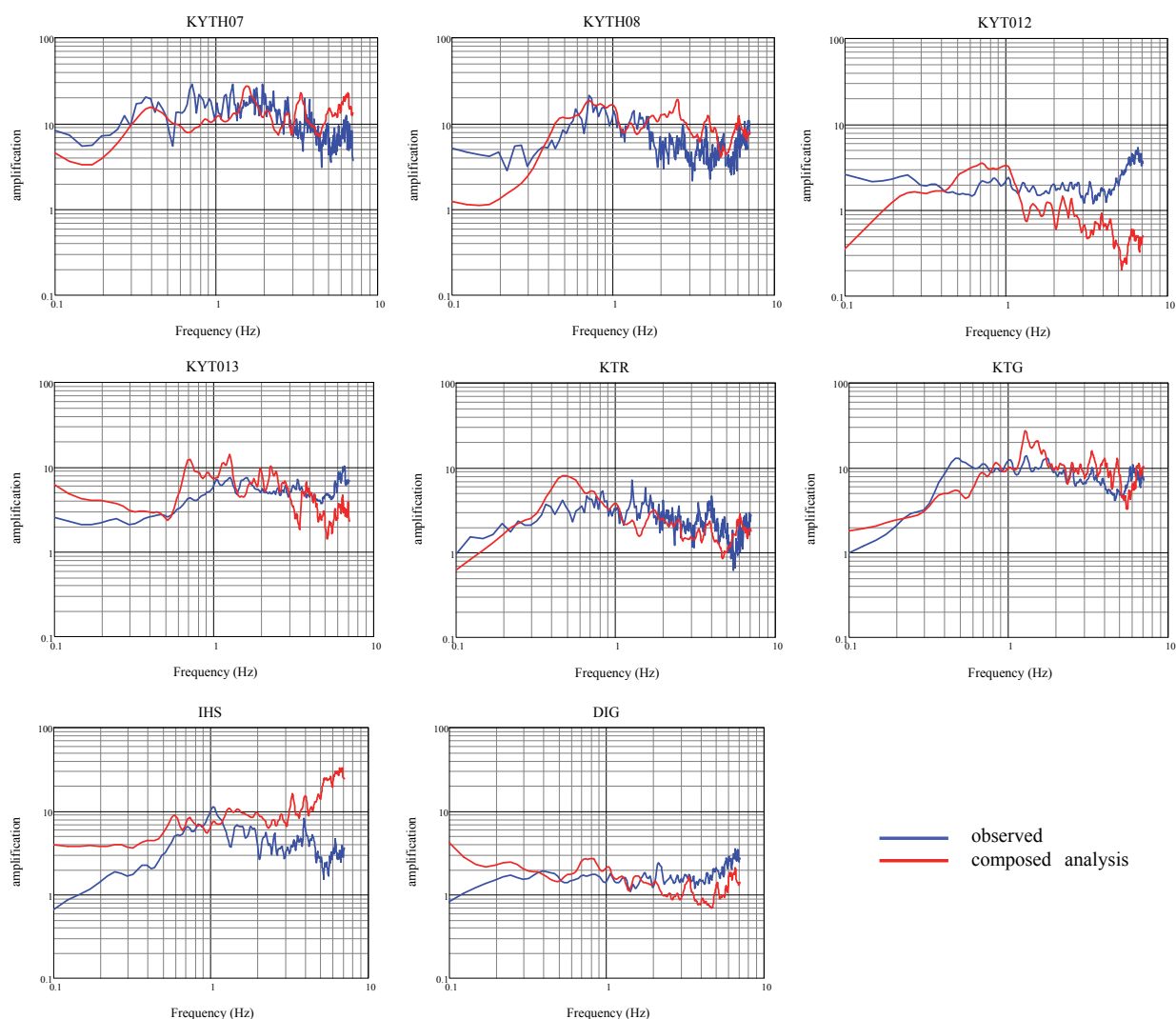


図-11 大領域モデルと小領域モデルの合成による増幅特性

よりも小さく、過小評価となった。この原因の一つとして、J-SHISによる地盤モデルの誤差が考えられる。

②近傍の観測点2地点で誤差の程度が同程度と仮定し、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による増幅特性を用いて、サイト増幅特性を評価した。その結果、参照地点を近傍の地点に設定すれば、サイト増幅特性の推定精度が向上するケースが多いことが分かった。

③盆地全体の波動伝播を考慮できる大領域モデルにおいて低周波帯の増幅特性を評価し、小領域モデルを用いて高周波帯の増幅特性を評価し、両者を組み合わせることで工学的に重要な帯域における増幅特性を評価する方法を提案した。

本研究の範囲では、大領域モデルと小領域モデルで低周波側の増幅倍率に顕著な差は認められなかった。このため、小領域モデルによる解析のみでも実用的には十分な精度で増幅特性が得られる可能性があり、モデルの適用性については今後更に検討を行う必要がある。また、京都盆地から離れたKYT011のように、比較的近傍に強震観測地点が存在しない地点における高周波領域の増幅特性評価方法についても更に検討を行う必要がある。

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) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 太田陽子，成瀬敏郎，田中眞吾，岡田篤正：日本の地形 6 近畿・中国・四国，東京大学出版会，pp.76-80，2004。
- 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) 関西地震観測研究協議会：CEORKA，<http://www.ceorka.org/>。(2015年8月閲覧)。
- 14) 国土地理院：電子国土 Web.NEXT，<http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse4/index.html>，2012。(2015年8月閲覧)。
- 15) 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。
- 16) 土木学会構造工学委員会：2010 年制定 土木構造物共通示方書Ⅱ(作用・荷重)，p59，2010。
- 17) (独)防災科学技術研究所：3 次元波動伝播シミュレーション(Ground Motion Simulator)，<http://www.gms.bosai.go.jp/>(2015年8月閲覧)。
- 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/>。(2015年8月閲覧)。
- 19) 関西地盤情報活用協議会：新関西地盤，京都盆地，2002。
- 20) 文部科学省：活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集，2003。
- 21) 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。
- 22) 長尾 毅，香川耀平，山田雅行：京都盆地を対象としたサイト増幅特性の解析的評価法に関する研究，第34回地震工学研究発表会，2014。
- 23) 高橋広人，福和伸夫，林 宏一，飛田 潤：地盤モデルに基づく2地点間の伝達関数と地震観測記録を用いた任意地点における地震動の推定，日本建築学会構造系論文集，第609号，pp.81-88，2006。
- 24) 野津 厚，井合 進，一井 康二，沼田 淳紀：ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分，レベル2地震動に対する土構造物の耐震設計シンポジウム，p.311-318，2000。

ANALYTICAL EVALUATION METHOD OF SITE AMPLIFICATION FACTOR AT KYOTO BASIN USING FINITE DIFFERENCE METHOD

Takashi NAGAO, Yohei KAGAWA, 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, site amplification factors at several strong observation points in Kyoto basin were evaluated by three dimensional finite difference analysis by modeling deep subsurface profile. Site amplification factors obtained by analysis were compared with those by spectral inversion and accuracy of the results by analysis was discussed. It was shown that the site amplification factor was evaluated more precisely by using both analytical site amplification factor and empirical site amplification factor. In addition, new evaluation method of the site amplification factor in the range up to 6Hz was proposed. Applicability of the proposed method was discussed.