

# 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

長尾 毅<sup>1</sup>・香川耀平<sup>2</sup>・山田雅行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

深層地盤構造をモデル化した3次元有限差分法を用いて京都盆地の強震観測地点における地震動の増幅特性を評価し、強震観測記録より求められたサイト増幅特性との比較を行った。一部の強震観測点では、サイト増幅特性の評価が行われていなかったため新たにサイト増幅特性の評価を行った。堆積層が薄い地点においては解析による増幅特性は観測による増幅特性と比較的良好一致を示したが、堆積層の厚い地点においては解析結果は増幅倍率を低く評価する傾向にあった。このため、近傍地点の観測によるサイト増幅特性と差分法による解析結果を組み合わせることでサイト増幅特性を再評価した結果、サイト増幅特性の推定精度が向上することが分かった。

**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)<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>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<sup>4)</sup>。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<sup>5)</sup>、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<sup>7)</sup>。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<sup>8)10)</sup>。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

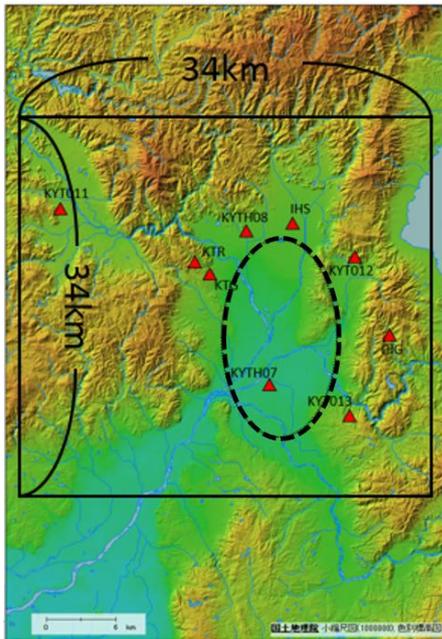


図-1 検討対象範囲

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<sup>11)</sup>。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)<sup>12)</sup>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<sup>13)</sup>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<sup>14)</sup>と検討対象強震観測地点の位置を示す。

### (2) 検討対象地点のサイト増幅特性

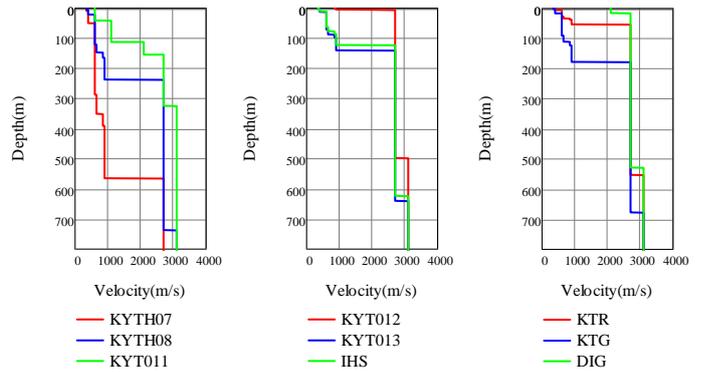


図-2 S波速度構造

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<sup>15)</sup>。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<sup>16)</sup>。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. 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)<sup>17)</sup>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)<sup>18)</sup>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<sup>19)20)</sup>、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<sup>21)</sup>、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。解析における震源モデルにはRicker waveletを用いた。サン

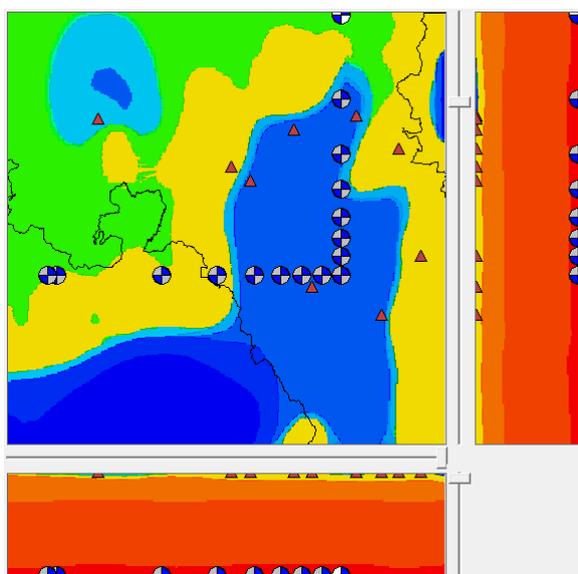


図-3 震源位置

表-2  $Q$  値

$V_s$	$Q$
$V_s < 600$	60
$600 \leq V_s < 1000$	100
$1000 \leq V_s < 2000$	150
$2000 \leq V_s < 3000$	200
$V_s \geq 3000$	300

プリング周波数は  $1000/3\text{Hz}$  とした。解析上の有効周波数上限値は  $1.75\text{Hz}$  程度である。 $Q$  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。

## (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。図中の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  $0.2\text{-}5.0\text{Hz}$  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  $0.2\text{-}3.0\text{Hz}$  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

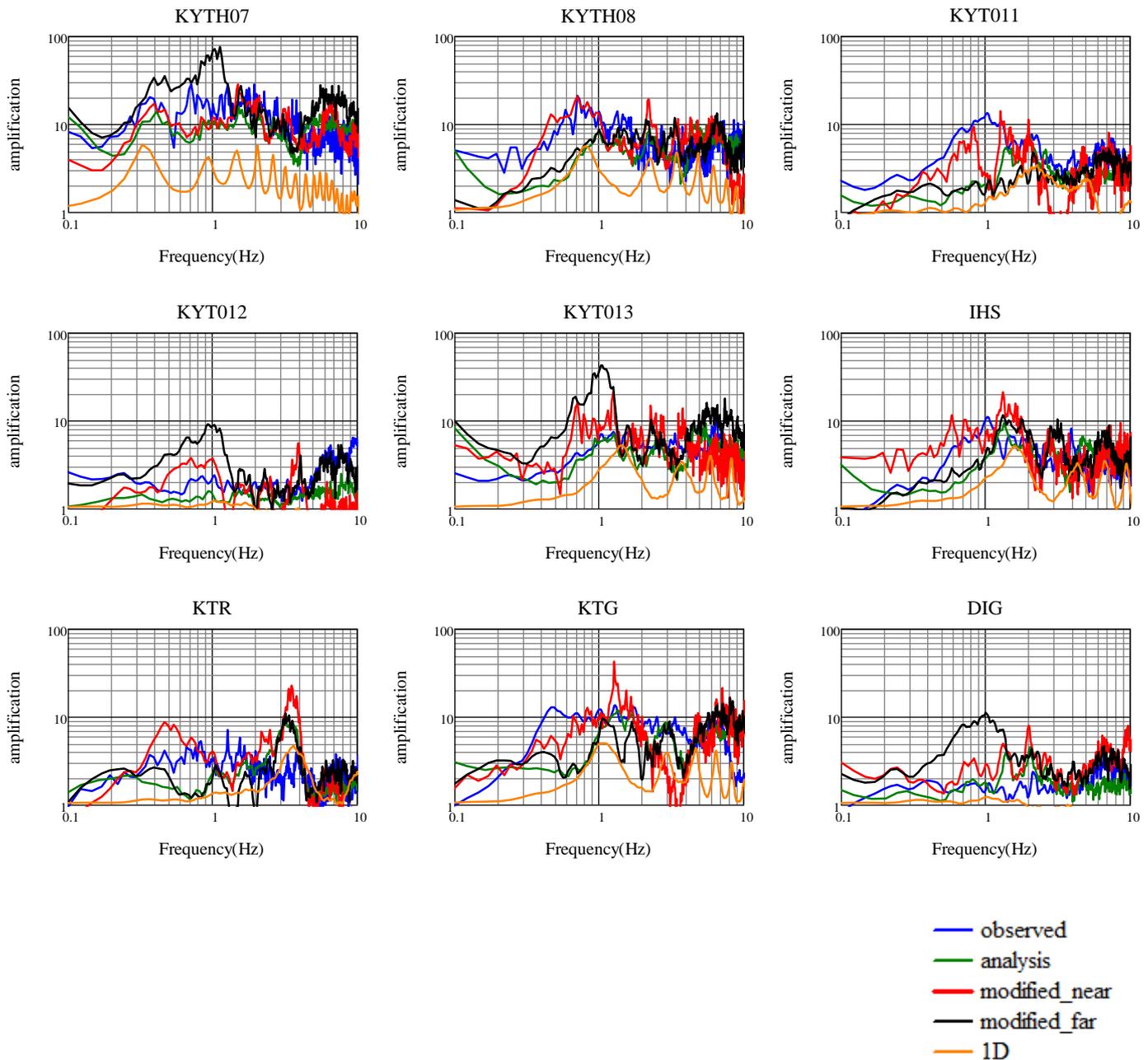
測点の中では堆積層の厚さが非常に厚いことがこの倍率の原因と考えられる。次に、KYT011, KYT013, IHS, KTG, KTR がピークの倍率が5~10程度であり、堆積層の薄い KYT012, DIG は3倍程度以下である。

解析によるサイト増幅特性については、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  $1\text{Hz}$  に対して解析は  $2\text{Hz}$  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  $-100\text{m}$  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、前者については、別途、堆積層の  $Q$  値を地震基盤の  $Q$  値に一致させた解析を行ったが、増幅倍率にはほとんど差は見られなかった。また、表層地盤については、J-SHIS による地盤データは最小の S 波速度が  $350\text{m/s}$  であり、工学的基盤相当よりも軟弱な地盤はデータ化されていない。このため、関西地盤情報データベース<sup>2)</sup>のデータをもとに工学的基盤以浅の地盤モデルを各強震観測地点において作成し、図-4 に示した解析による増幅倍率に工学的基盤以浅の地盤による1次元の周波数伝達関数による倍率を乗じて結果を比較したが、両者に違いが見られるのは概ね  $2\text{Hz}$  程度以上の周波数帯であり、かつ倍率の変化も僅かなものであり、推定精度の改善には寄与しない結果となった。工学的基盤以浅の地盤による増幅も本来3次元的な増幅特性を考慮すべきであるが、モデル化の困難性と解析上の問題(最小の S 波速度が小さくなると差分法における格子点間隔を短くする必要があり、計算負荷が高まる)があり、簡単に解決できる問題ではない。以上の問題点以外にも、KYT011 において見られたような、J-SHIS の地盤モデルの精度に起因する問題が考えら



れる。

対象地点の解析による増幅特性を用いて、式(1)により推定を行うこととする。

#### 4. サイト増幅特性の評価精度向上法の検討

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によって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

$$Gt(f) = Gr(f) \cdot \frac{At(f)}{Ar(f)} \quad (1)$$

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

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

表-3 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

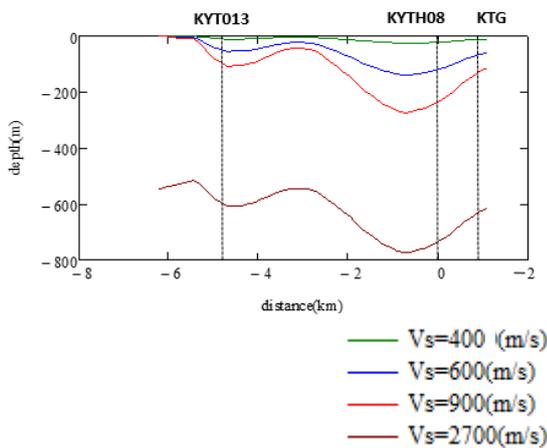


図-5 S波速度深度分布

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ては地盤モデルの誤差の傾向が異なるためと考えられる。

図-5にはKYTH08を対象に、補正に用いた近傍地点(KTG)と遠地点(KYT013)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。3地点は1直線上には位置していないため、KYTH08以外の2地点のS波速度構造自体は正確なものではない。特にKTGについては図示したものよりも堆積層が薄いのが、KYTH08に対して近傍地点のKTGと遠地点のKYT013を比較するとKYT013は盆地最深部を隔てた地点に存在することが分かる。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。

## 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 ( $V_s=2700\text{m/s}$ 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。

**謝辞:** 本研究の取りまとめにあたり、港湾空港技術研究所・野津厚氏から貴重な意見を頂きました。ここに深く謝意を表します。また、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。

## 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) 一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, 1-268, 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/>. (2014年8月閲覧).
- 13) 関西地震観測研究協議会: CEORKA, <http://www.ceorka.org/>. (2014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. (2014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/>(2014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/>. (2014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) 関西地盤情報データベース: 関西圏 DB, <http://www.kg-net2005.jp/>(2014年8月閲覧).

## ANALYTICAL EVALUATION METHOD OF SITE AMPLIFICATION FACTOR AT KYOTO BASIN

Takashi NAGAO, Yohei KAGAWA 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.

In this study, site amplification factors at several strong observation points in Kyoto basin were evaluated by three dimensional seismic response 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. In addition, new evaluation method of site amplification factor was proposed using both analytical site amplification factor and observed site amplification factor. Applicability of the proposed method was discussed.