

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

A study on the effect of incident angle of seismic motion on the site amplification characteristic for deep basin structure

長尾 毅*, 山田雅行**, 野津 厚***

Takashi Nagao, Masayuki Yamada and Atsushi Nozu

*工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

**工修 株式会社ニュージェック (〒531-0074 大阪市北区本庄東 2-3-20)

***工博 独立行政法人港湾空港技術研究所(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

It is important to estimate the site amplification effects especially due to the deep subsurface structure in evaluating the seismic design ground motion. The site amplification factor for deep basin structure by the spectral inversion analyses shows characteristic that cannot be necessarily explained by the one-dimensional amplification effects: no peak frequency and high amplification factor for the frequency less than 1.0 Hz. We aim at discussing the site amplification characteristic for deep basin structure by the two-dimensional finite element analyses. We paid close attention to the effect of incident angle on the site amplification factor.

Key Words: Site amplification factor, Strong motion, Basin structure, Incident angle

キーワード: サイト増幅特性, 強震動, 盆地構造, 入射角

1. はじめに

工学的基盤(せん断波速度 300m/s 以上)¹⁾における地震動は, 震源特性, 伝播経路特性, 地震基盤～工学的基盤までの深層地盤による地震動増幅特性に依存する。また, 構造物の地震応答は入力地震動の振幅の大小だけではなく周期成分にも依存するため, 設計入力地震動はこれら諸特性を適切に反映したものであることが望ましい²⁾。筆者はこれまでに, 港湾構造物の耐震性能照査に用いる入力地震動の合理化の観点から, これら諸特性を考慮した地震ハザード解析などの検討を行ってきた³⁾。ここで, 筆者の過去の一連の研究^{3)～5)}においては, 深層地盤による地震動増幅特性(以下, サイト増幅特性)については, 強震記録をもとにしたスペクトルインバージョン⁶⁾により求めている。これは, 近年, 強震観測ネットワークが長足の発展を遂げ, 日本全国を濃淡の差はあれカバーしていることを考慮したものである。

スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性の評価に関する問題点は, 多くの場合, 強震計の設置間隔が数キロ～数十キロメートル離れていることにあり, 強震計設置地点と地盤条件が同一と見なせる地点はともかく, 地盤条件が同一と見なせない地点の評価が困難な点にある。

強震計の設置されていない地点の地震動や地震動の増幅特性を, 対象地点より離れた地点において得られている強震記録などを用いて評価する試みも見られる。それらは主に常時微動 H/V スペクトル比を用いるものが多く, 例えば神山ら⁷⁾は常時微動 H/V スペクトル比に一定の係数を乗ずることによって増幅特性を推定しており, また, 原田ら⁸⁾は, 常時微動 H/V スペクトル比と地震動のスペクトル比に着目した検討を行っている。これら既往の研究による方法は, 地盤構造が水平成層条件に近く, 地震動の増幅特性のうちピーク周波数を 1 次元の問題として議論する場合には有効である可能性がある。しかし, サイト増幅特性は, 深い地盤構造, さらにその 2, 3 次元効果により, 1 次元の水平成層構造で説明できない特徴を持つ場合がある。

例えば, 関東平野のように深い堆積構造を有する場合には, そのサイト増幅特性は 1Hz 以下の周波数帯域で明瞭なピークを有さないことがある⁸⁾。加えて, その増幅倍率も, 1 次元の増幅倍率から説明される倍率よりも大きいということが増井・翠川⁹⁾によって指摘されている。増井・翠川⁹⁾は, この点を, 後続表面波の生成, 励起が盆地構造に対する斜め入射角度に依存し, 斜め入射の程度が大きくなるほど増幅率が增加するものと説明している。同様に深い盆地構造の大阪平野でも, そのサイト増

幅特性が1次元の増幅倍率と一致しないことが指摘されることがある。例えば長ら¹⁰⁾は、これを深部構造(地震基盤までの平均的モデル)による増幅率と浅部構造(検層による詳細なデータ)による増幅率の和として、説明を試みている。

構造物の耐震性能照査の観点からは、地震動の増幅特性の吟味が重要である。これまでスペクトルインバージョンによるサイト増幅特性の評価の有効性について明らかにしてきたが、強震計の設置されていない地点の地震動の増幅特性を、常時微動 H/V スペクトル比を用いて合理的に推定する手法についても検討を進めなければならない。このため本研究では、まず深い盆地構造における地震動の増幅特性に焦点を当てた検討を行った。検討対象として大阪平野を取りあげ、2次元地盤モデルを用いて有限要素解析を実施して増幅特性の検討を行い、スペクトルインバージョンにより得られたサイト増幅特性との比較を行うとともに、1次元解析との相互比較を行った。2次元解析においては、入射角の影響に注意を払い、サイト増幅特性の補完として期待される常時微動観測により得られるレーリー波の特性との比較も併せて行った。

2. スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性

2.1 スペクトルインバージョン

スペクトルインバージョン⁶⁾は、サイトで得られた地震観測記録 $O(f)$ から震源の特性 $S(f)$ 、伝播経路特性 $P(f)$ 、地震観測点のサイト増幅特性 $G(f)$ を分離する手法で、式(1)を対数表示した式(2)を用い、最小二乗法を用いて解くことにより、解(震源の特性およびサイト増幅特性)を得る手法である。ここに、 f は周波数を示す。

$$O(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \quad (1)$$

$$\log(O(f)) = \log(S(f)) + \log(P(f)) + \log(G(f)) \quad (2)$$

スペクトルインバージョンは、図-1に示すように、地震観測記録 $O(f)$ の入射角によって影響を受ける場合がある。例えば、地表での水平振幅が同じ場合でも地震基

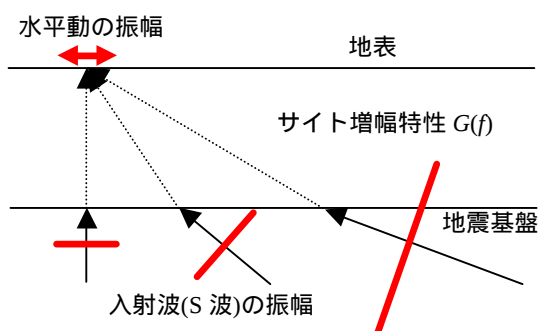


図-1 スペクトルインバージョンにおける入射角の影響

盤における入射波の振幅は入射角によって異なっていたり、入射角によって地震波が伝わる経路(地層)が異なっていることが考えられる。

2.2 スペクトルインバージョンの結果

大阪平野を中心として、近畿地方の194地点に中国・四国地方の75地点と中部地方の153地点を加えた計422地点を解析対象地点としてスペクトルインバージョンを行った^{11),12)}。スペクトルインバージョンに用いた地震記録は、表-1に示す条件を満足する72地震、3354記録(6708の水平成分)である。解析に用いた地震の震央と観測点の位置を図-2に示す。

大阪平野上に位置する港湾、大阪港(大阪事-G, 大阪南-G)、尼崎西宮芦屋港(尼崎-G, 西宮-G)、神戸港(神戸-G, 六甲-G)において、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を図-4に示す。いずれも特定の卓越周期が明瞭に見えず(表層地盤の影響と考えられる神戸-Gの3Hz付近のピークを除く)、かつ1Hzよりも長周期側における倍率が10倍を超える大きな値を有するようなサイト増幅特性となっていることがわかる。

2.3 スペクトルインバージョンの結果の検証¹²⁾

スペクトルインバージョンの結果は基準観測点の選定によって大きく影響を受ける。仮に岩盤でない観測点が基準観測点として選定されていれば、震源スペクトルは過大評価となる。そこで、スペクトルインバージョンによって得られた震源スペクトルから各々の地震の地震モーメントを算出し、これをF-net(防災科学技術研究所, www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html)のCMT解と比較することにより、基準観測点選定の妥当性について検討を行った(図-3)。

震源スペクトルから求めた地震モーメントはF-netの地震モーメントと概ね整合していることから、少なくとも地震モーメントの算定にかかわるような低周波側においては適切な基準観測点が選定されているものと考えられる。したがって、震源スペクトル、サイト増幅特性についても妥当性は高いものと考えられる。

2.4 スペクトルインバージョンの結果の比較

鶴来ら¹³⁾は、観測スペクトルを既知の震源特性と伝播経路特性で除する方法により、関西地域における強震観測地点のサイト増幅特性の再評価を行っている。ここでは、関西地震観測研究協議会(以下、関震協という)の観測点のうち岩盤上あるいは風化岩上の観測点であるDIG:醍醐(京都)、HSD:桜井初瀬(奈良)、KID:猪名川木津(兵庫)、KBU:神戸大学(兵庫)、CHY:千早(大阪)におけるサイト増幅特性の比較を行った。KBU、KIDでは、本研究と鶴来ら¹³⁾のサイト増幅特性はピーク、倍率ともよく一致しているが、DIG、HSD、CHYでは、ピークの位置などは良く一致しているものの、本研究で算定されたサイト

表 - 1 スペクトルインヴァージョンの条件

対象とする 地震観測ネット	強震観測網(K-NET), 1996.5 ~ 2002.3 基盤強震観測網(KiK-net)(地表), 1997.10 ~ 2002.3 港湾地域強震観測, 1963.3 ~ 2002.3 関西地震観測研究協議会, 1994.4 ~ 2002.3 →対象地震数: 72 地震		
	近畿地方: 福井, 滋賀, 三重, 京都, 奈良, 兵庫, 大阪, 和歌山 近畿地方を取り囲む地域: 富山, 石川, 岐阜, 愛知, 鳥取, 岡山, 香川, 徳島		
地震 記録 選定 条件	マグニチュード	$M < 6.0$	点震源とみなす
	震央距離	Δ 150km	LG 波, モホ面反射波の影響 (距離減衰が $1/X$ にならない)を避ける
	震源深さ	D 60km	Q 値を一定とみなす
	最大振幅	A_{max} 100Gal	非線形性の影響を避ける
	周波数帯域	M 4.5	0.2Hz 以上の周波数帯域で S/N 比が確保できる
	同時観測	3 地点以上	複数の観測点で同時観測さ れている

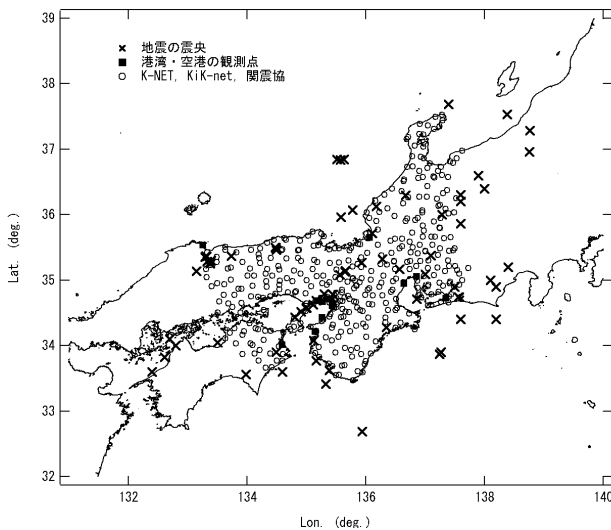


図 - 2 解析に用いた地震の震央と観測点の位置

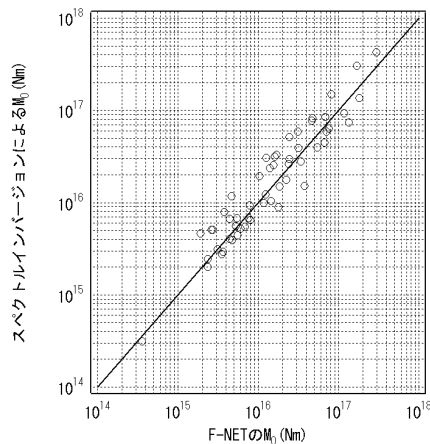


図 - 3 震源スペクトルから求めた地震モーメントと F-net の地震モーメントの比較

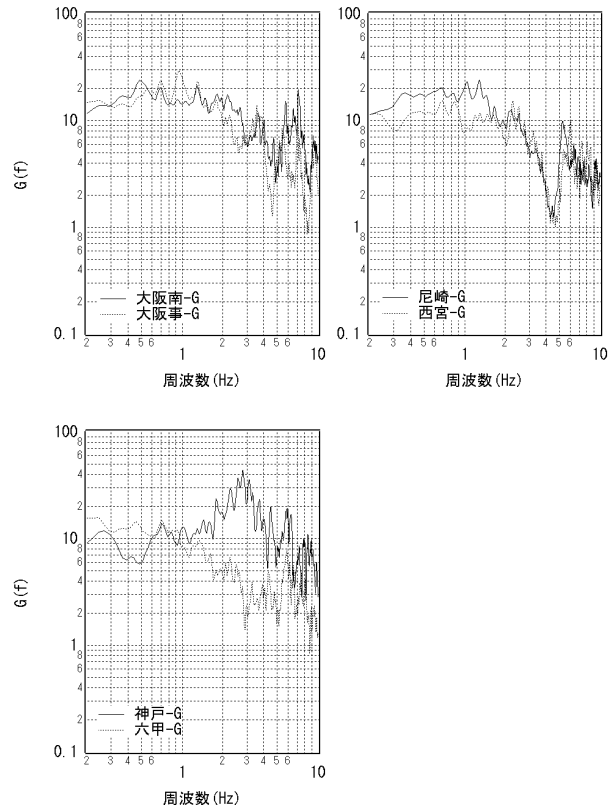


図 - 4 港湾におけるサイト増幅特性

増幅特性は鶴来¹³⁾のサイト増幅特性に比べて大きな値となっている。

これは, 本研究が周波数ごとにサイト増幅特性の最も小さい地点を基準観測点として選定しているのに対して, 鶴来¹³⁾は DIG という特定の観測点でのサイト増幅特性を 1 と仮定することにより対象地震の震源スペクトルを評価していることに起因していると考えられる。また, 低周波数側における違いは, 解析に使用しているデータ長の違いも理由であると考えられる。すなわち, 鶴来¹³⁾は 40 秒間のデータを用いているのに対し, 本研究では後続位相を十分に考慮できるように 160 秒間のデータを用いている点である。

また, 鶴来¹³⁾が評価した地震モーメントは F-net のものより 1.2 倍 ~ 2.0 倍程度大きいことが報告されていることを勘案すると, 両者の対応は概ね良いものと考えられる。

3.2 次元有限要素解析によるサイト増幅特性の検討

3.1 1 次元解析の問題点

2 章で述べたスペクトルインヴァージョン結果(INV)と 1 次元重複反射法を用いて計算した伝達関数(1D SHAKE)の比較を OSKH02 地点を例に行った(図 - 6)。OSKH02 では地表から深度約 1600m の地震基盤まで PS 検層が実施されており, KiK-net より公開されている。

図 - 6に示す伝達関数は、このデータに基づく地盤モデルより計算したものである(堆積層の減衰は1%とした)。図 - 6をみると、両者の一致度は低く、増幅倍率、形状ともに異なっている。ここでは、この要因を説明すべく、2次元有限要素解析を用いて検討を行った。

3.2 2次元有限要素解析方法

図 - 7に大阪平野における地震観測点(●:港湾地域強震観測, ●:K-NET, ●:KiK-net, ●:関震協)を示す。スペクトルインバージョン結果との比較を効率よく行うために、これらをできるだけ多く通るような東西、南北断面を2次元有限要素解析の検討断面(●:EW断面, ●:NS断面)として設定した(図 - 7に併記)。

図 - 7の検討断面に対する地盤モデルは、(独)産業技術総合研究所により提案された阪神地域における3次元地下構造モデル¹⁴⁾から、2次元断面を切り出すことによって作成した。図 - 8に地盤モデルを示す。地盤モデルは、水平方向73.6km、上下方向24.0kmで、側面にエネルギー伝達境界、底面には粘性境界を配している。このうち、図 - 8には、堆積層を含む部分(水平方向52.8km、上下方向3.2km)のみを示している。大阪平野の標準的な地盤構造を勘案して、S波速度(V_s)、350m/s以下、350~450m/s、450~600m/s、600~800m/s、800~1000m/s、1000m/s以上の6層の堆積層とS波速度(V_s)、3100m/sの基盤層に区分した。各層の物性(V_s , V_p , 密度)は上述の層区分ごとに、(独)産業技術総合研究所による3次元地下構造モデルの値を平均化した値とした(表 - 2)。

なお、2次元有限要素解析には地盤と構造物の動的相互作用解析を扱う解析コードとして幅広く利用されているSuperFLUSH/2D¹⁵⁾を用いた。またSuperFLUSH/2Dは地盤の半無限性を考慮できる境界処理機能を有している。

3.3 2次元有限要素解析結果

2次元有限要素解析において、入射角 θ を $10^\circ \sim 170^\circ$ (図 - 9参照、 90° が鉛直下方に相当)の間で変化させて、地震観測点相当位置の伝達関数を求めた。入射角は、平面波と仮定した入力動がモデル底面に沿って見かけ上伝播する速度(進行波速度)を制御することによって変化した。伝達関数はモデル底面への入力動、水平成分に対する地震観測点における水平成分の値である。図 - 10、図 - 11にそれぞれEW、NS断面の結果を示す。図の凡例の10~170の数字は入射角 θ であり、周波数ごとの最大値(MAX)と平均値(AVE)も併記した。なお、解析周波数範囲はモデルの制約上、0.1~1.0Hzとした(したがって、以下の2次元有限要素解析との比較に関しては0.1~1.0Hzの周波数帯域に限定した議論である)。

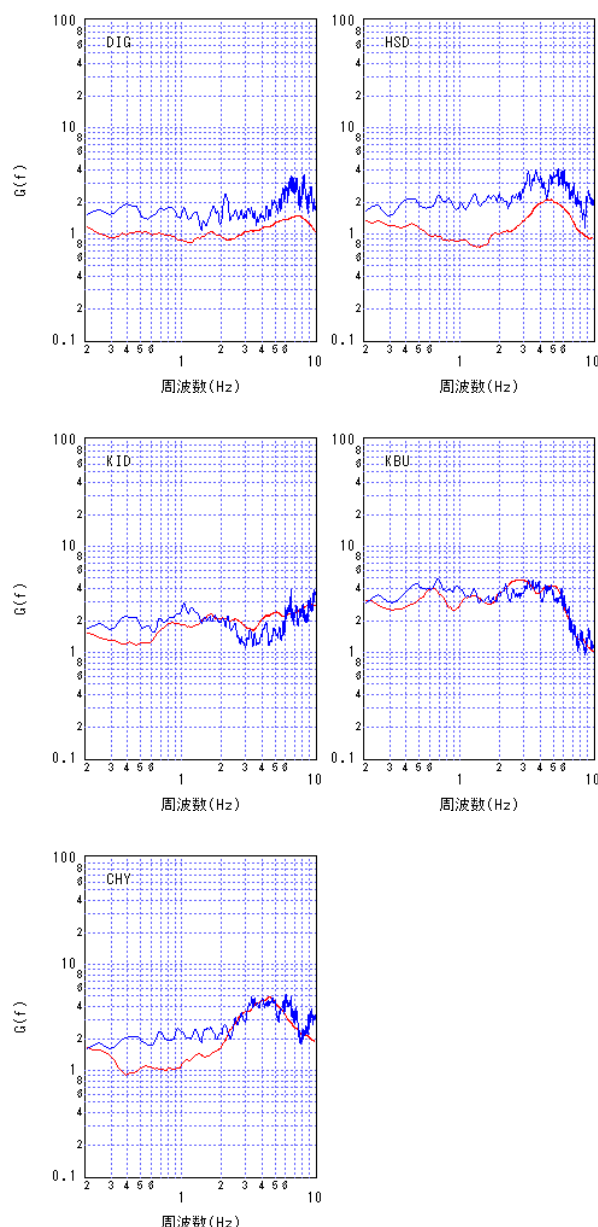


図 - 5 関震協観測点のうち岩盤上あるいは風化岩上の観測点における本研究(青線)と鶴来¹³⁾(赤線)のサイト増幅特性

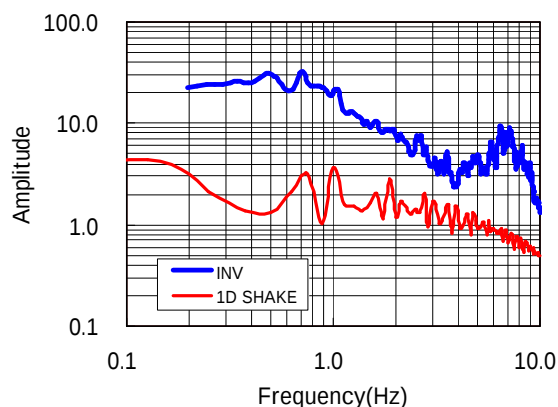


図 - 6 スペクトルインバージョン結果と1次元重複反射法を用いて計算した伝達関数の比較

それぞれの地点において、各入射角の伝達関数に着目すると、その倍率は大きくばらついており、形状も細かな山谷がいくつも見られることがわかる。一方、平均値や最大値は、山谷が比較的滑らかな形状となっていることがわかる。伝達関数が入射角の影響を受けるという点に関しては、関東地方における地震観測記録を対象とした増井・翠川⁹⁾による研究結果とも調和的である。

3.4 2次元有限要素解析とスペクトルインバージョン結果の比較

前節で求めた伝達関数のうち入射角 $\theta = 90^\circ$ の値(EW90, NS90), 周波数ごとの最大値(MAX), 平均値(AVE)とスペクトルインバージョン結果, 1次元重複反射法を用いて計算した伝達関数(1D)の比較を行った(図 - 12, 図 - 13)。なお, ここでは1次元重複反射法の地盤モデルは2次元有限要素解析の地盤モデルにおいて該当する位置の値を用いることとした。

図 - 12, 図 - 13をみると, 2次元有限要素解析の入射角 $\theta = 90^\circ$ の値(EW90, NS90)は, 盆地構造の影響は少なく, 1次元重複反射法を用いて計算した伝達関数(1D)とよく一致していることがわかる。逆に, 両者が一致していることにより, 2次元有限要素解析および1次元重複反射法の計算が妥当な解析結果を与えていることが確認できるものと考えられる。

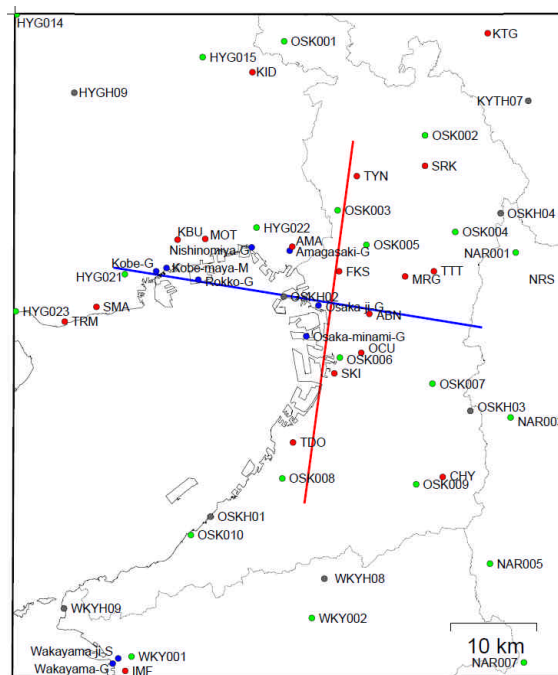
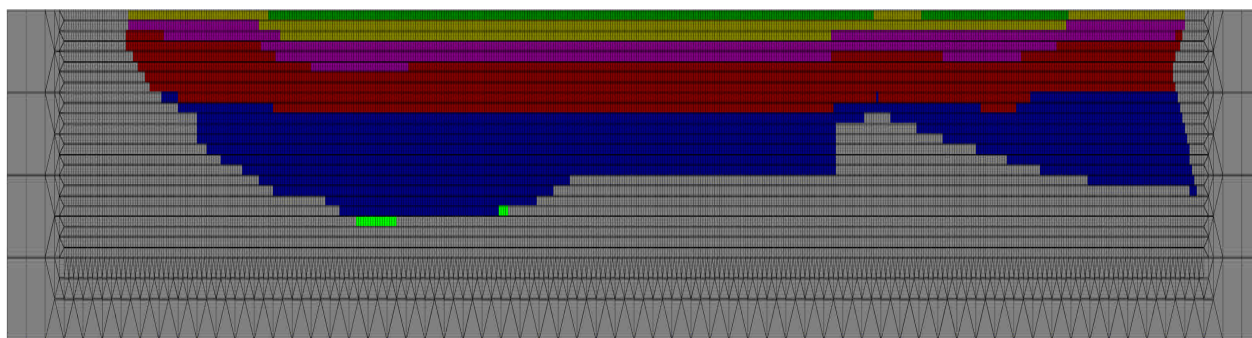


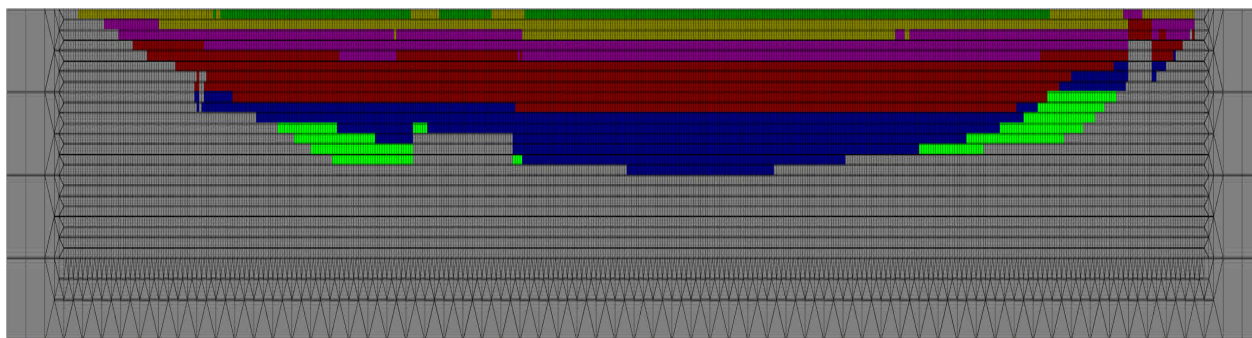
図 - 7 地震観測点および2次元有限要素解析の検討断面

表 - 2 2次元有限要素解析物性一覧

	ρ (g/cm ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	減衰
1	1.65	1550	320	0.01
2	1.81	1660	410	0.01
3	1.93	1810	530	0.01
4	1.98	2020	720	0.01
5	2.06	2290	920	0.01
6	2.24	2770	1150	0.01
基盤	2.60	5500	3100	0.005



EW 断面(左: W, 右: E)



NS 断面(左: S, 右: N)

■ 物性 1, ■ 物性 2, ■ 物性 3, ■ 物性 4, ■ 物性 5, ■ 物性 6, ■ 基盤

図 - 8 2次元有限要素解析地盤モデル

1000m
0m 1000m

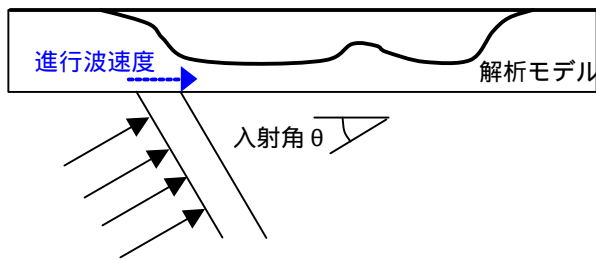


図-9 2次元有限要素解析における入力動

一方、スペクトルインバージョン結果はちょうど最大値(MAX)と平均値(AVE)の間とよく対応しているように見受けられる。最大値(MAX)は図-10、図-11より θ が 90° から離れた浅い角度の場合の伝達関数が支配的であることがわかる。一方、平均値(AVE)はすべての入射角の地震動の平均的な伝達関数と考えられる。神戸-G、六甲-G、大阪事-G、大阪南-G、OSK006においては比較的平均値(AVE)に近く、一方、OSKH02、OSK008は最大値(MAX)に対応している。スペクトルインバージョンにおいて、大阪事-G、OSKH02地点のサイト増幅特性の算定に用いた地震の震央図および地震諸元を図-14、表-3に示す。平均値(AVE)に近いグループの大阪事-Gの地震は、震央距離が比較的近く、震源とサイトを結ぶ仰角も 20° 程度の値となっているのに対して、最大値(MAX)に対応しているOSKH02ではほとんどの地震が震央距離100kmを超え、震源深さが10km程度であるため、仰角は 10° 以下となっていることがわかる。なお、地震基盤以下の構造を含めた波線追跡を行い、その基盤入射角で議論する方法も考えられるが、ここでは大阪事-GおよびOSKH02における定性的な傾向を簡便に比較するため、仰角を用いた。

3.5 2次元有限要素解析と常時微動 H/V スペクトル比の比較

図-12、図-13には、各地震観測点近傍において測定した常時微動 H/V スペクトル比(微動)を併記した。常時微動観測は、周期5秒までフラットな特性を有するサーボ型速度計を用いており、常時微動 H/V スペクトル比の算出においては長周期の表面波の影響を考慮できるように、各観測地点について163.84秒間のデータを3区間抽出し、その平均値としている。スペクトルの平滑化については、0.05HzのParzenウィンドウを用いている。

常時微動 H/V スペクトル比は、1Hz以下の領域に注目すると、0.2~0.3Hzに比較的弱いピークを有している点で、2次元有限要素解析の入射角 $\theta = 90^\circ$ の値(EW90, NS90)と1次元重複反射法を用いて計算した伝達関数(1D)と基本モードに関して比較的近い形状を示しているが、スペクトルインバージョン結果や2次元有限要素解析の平均値(AVE)とは全くと言っていいほど対応していないことがわかる。このことから、本研究で対象とした大阪平野のような深い盆地構造においては、2次元の

な影響が大きいため、常時微動 H/V スペクトル比をそのままの形でサイト増幅特性の補完として用いることは困難であると考えられる。

4. まとめ

構造物の耐震性能照査の観点から地震動の増幅特性に着目し、深い盆地構造の大阪平野を対象として、スペクトルインバージョンにより得られたサイト増幅特性2次元有限要素解析による伝達関数および1次元重複反射法による伝達関数の比較を行った。2次元有限要素解析においては、入射角 θ を $10^\circ \sim 170^\circ$ の間で変化させて伝達関数を求めた。この結果、大阪平野における地震動増幅特性に関して以下のことが明らかとなった。

2次元有限要素解析の入射角 $\theta = 90^\circ$ の値(EW90, NS90)は、盆地構造の影響は少なく、1次元重複反射法を用いて計算した伝達関数(1D)がよく一致していることがわかった。

スペクトルインバージョン結果はちょうど最大値(MAX)と平均値(AVE)の間とよく対応しており、地震動の増幅特性が地震動の入射角によって、影響を受けていることがわかった。

常時微動 H/V スペクトル比は、1Hz以下の領域に注目すると、0.2~0.3Hzに比較的弱いピークを有している点で、2次元有限要素解析の入射角 $\theta = 90^\circ$ の値(EW90, NS90)と1次元重複反射法を用いて計算した伝達関数(1D)と基本モードに関して比較的近い形状を示しているが、スペクトルインバージョン結果や2次元有限要素解析の平均値(AVE)とは全くと言っていいほど対応していないことがわかった。

以上から、大阪平野(盆地)のような深い盆地構造におけるサイト増幅特性は、地震動の入射角によって影響を受けていることがわかる。このことは、大阪平野のような堆積盆地内での地震動の増幅特性を1次元の重複反射理論に基づいて評価することは困難であることを示している。一方で、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が、地震動の入射角の影響を合理的に反映していることを示唆している。これは、用いる地震によって入射角の影響は受けているものの、2次元有限要素解析結果の最大値(MAX)と平均値(AVE)の間の値をとっていることからわかる。また、1次元重複反射法による伝達関数より常に大きい(設計上安全側)値となっていることも特筆すべき点であると考えられる。

これらの結果を踏まえて、今後は、常時微動 H/V スペクトル比とスペクトルインバージョン結果との関係について検討し、常時微動 H/V スペクトル比からスペクトルインバージョン結果を予測する手法について検討を行っていく予定である。

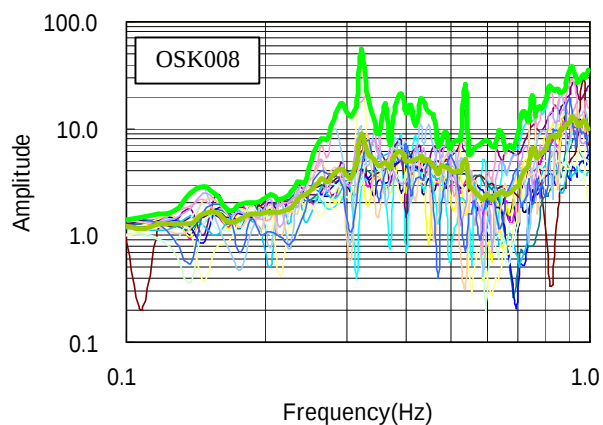
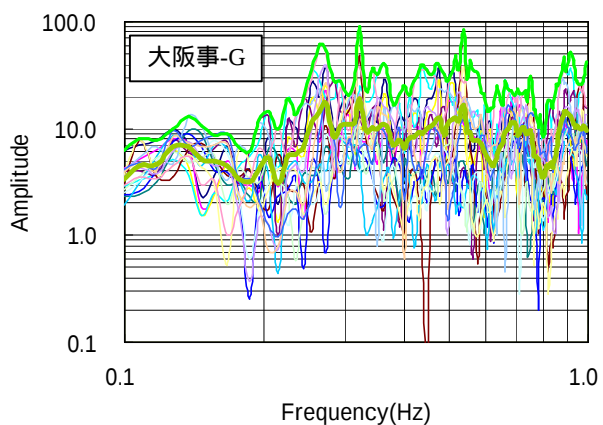
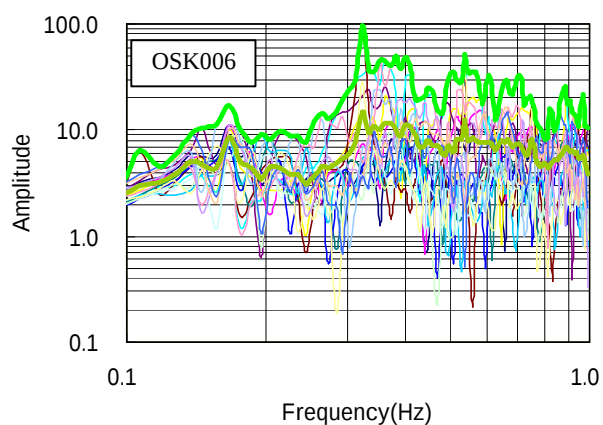
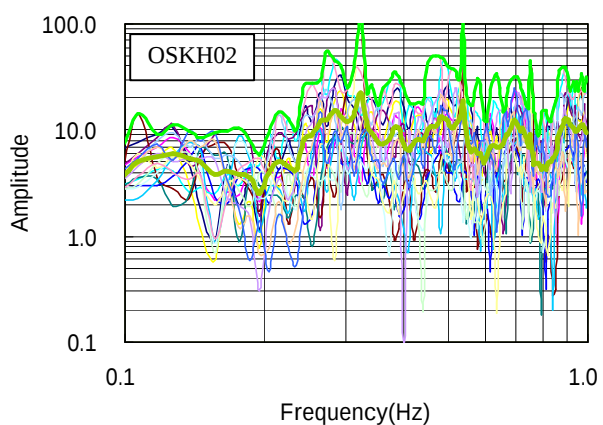
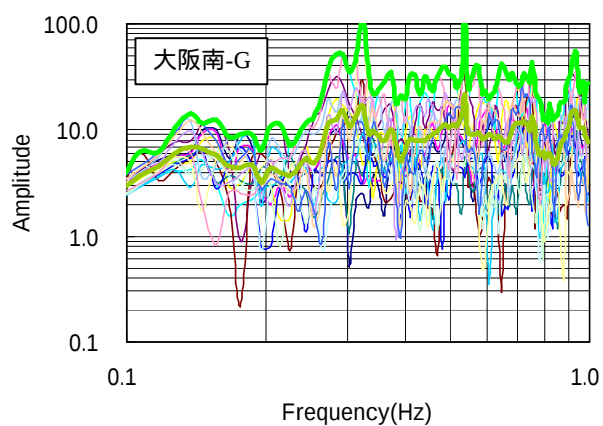
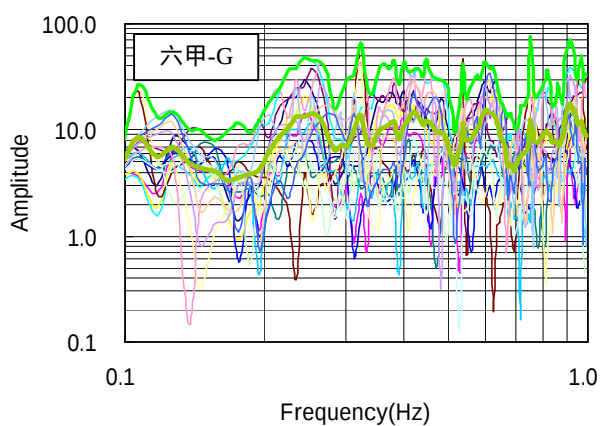
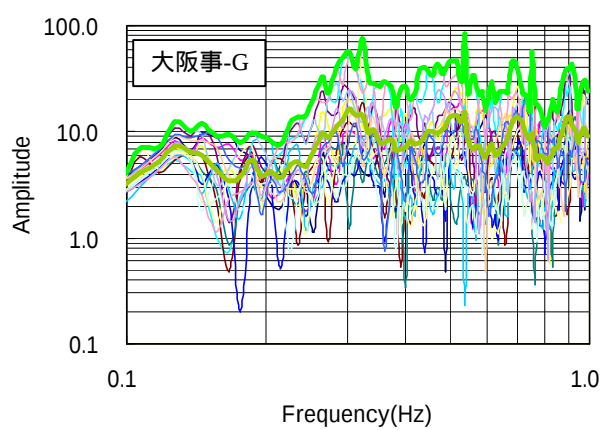
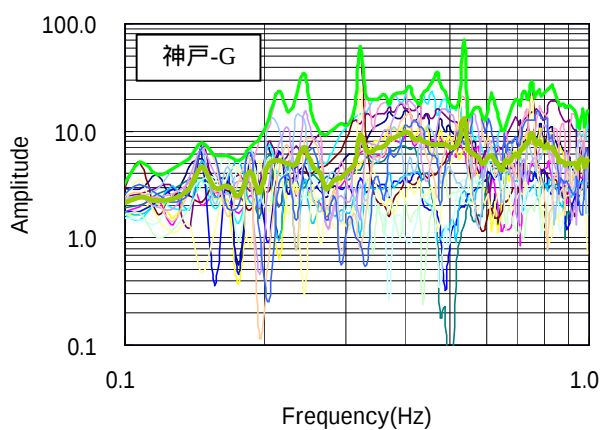
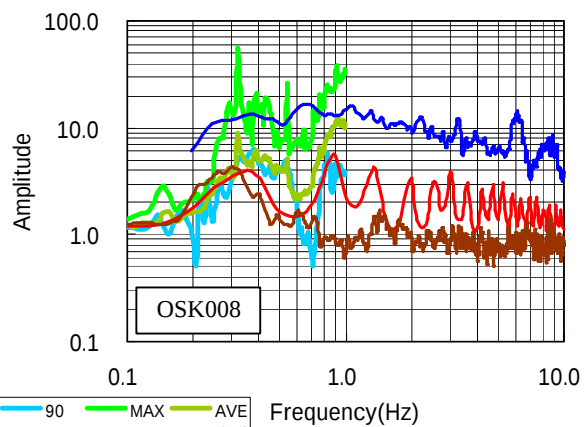
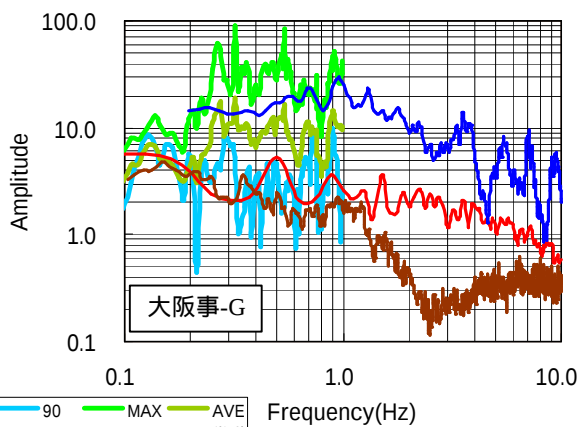
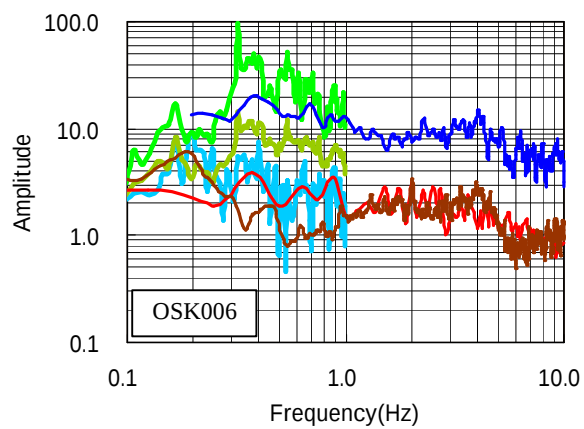
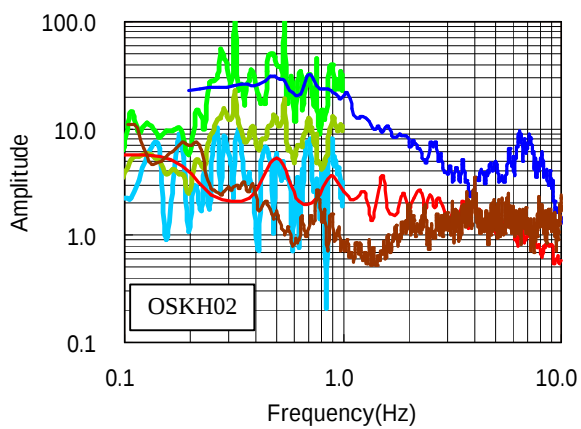
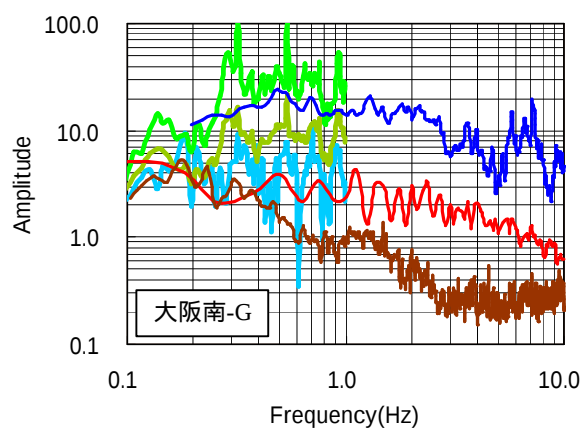
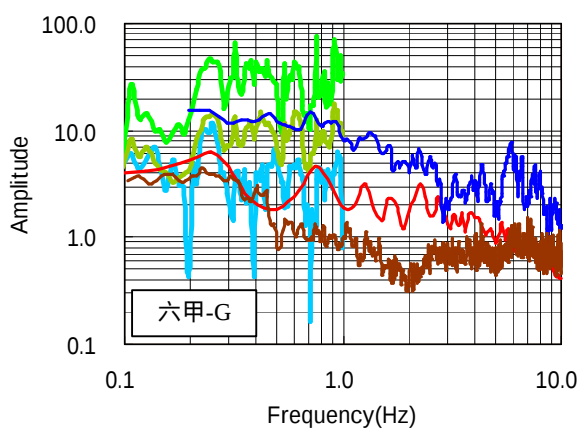
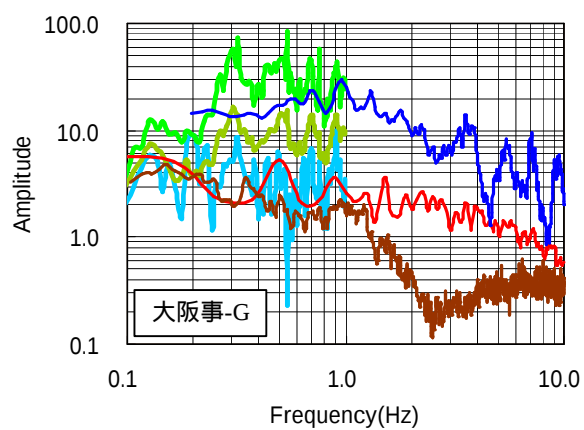
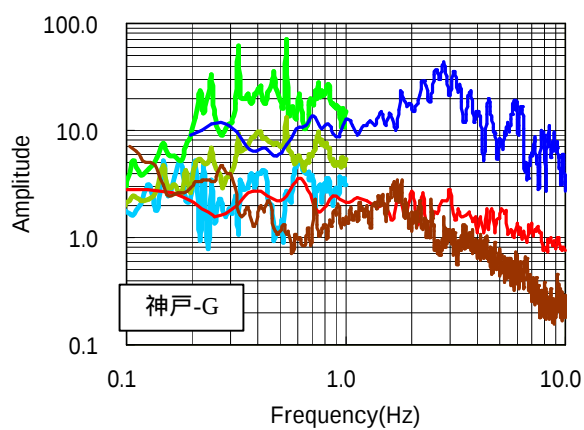


図 - 10 2次元有限要素解析結果(EW断面)

図 - 11 2次元有限要素解析結果(NS断面)



90 MAX AVE
1D INV 微動 Frequency(Hz)

図 - 12 2次元有限要素解析結果(EW断面)とスペクトルインヴァージョン結果の比較

90 MAX AVE
1D INV 微動 Frequency(Hz)

図 - 13 2次元有限要素解析結果(NS断面)とスペクトルインヴァージョン結果の比較

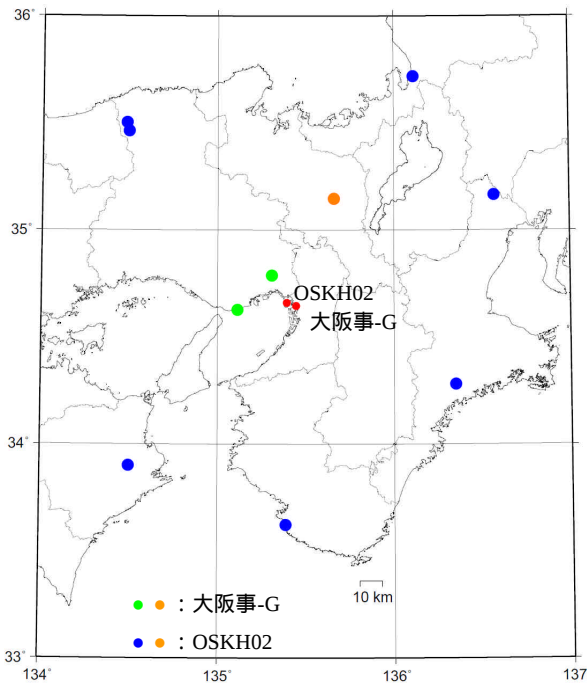


図 - 14 スペクトルインバージョンに用いた地震の震央図(OSKH02, 大阪事-G)

表 - 3 スペクトルインバージョンに用いた地震の地震諸元(上: 大阪事-G, 下: OSKH02)

年月日	緯度	経度	深さ	M	震央距離	仰角
1995/1/25	34.788	135.307	15.0	5.0	25.2	30.8
1995/10/14	34.627	135.113	15.0	4.5	33.9	23.9
2001/8/25	35.147	135.660	10.0	5.1	59.9	9.5
年月日	緯度	経度	深さ	M	震央距離	仰角
1998/4/22	35.165	136.570	10.0	5.4	121.6	4.7
2000/4/15	33.622	135.387	46.0	4.8	124.2	20.3
2000/6/5	35.718	136.112	10.0	4.7	135.0	4.2
2000/10/31	34.280	136.348	43.0	5.5	106.3	22.0
2001/1/12	35.463	134.492	10.0	5.4	121.7	4.7
2001/1/20	35.502	134.480	12.0	4.7	125.7	5.5
2001/2/8	33.900	134.500	20.0	4.7	119.4	9.5
2001/8/25	35.147	135.660	10.0	5.1	60.2	9.4

謝辞

スペクトルインバージョンの実施において、独立行政法人防災科学技術研究所 K-NET 及び KiK-net、関西地震観測研究協議会の地震観測記録を使わせていただいた。2次元有限要素解析に関しては、大阪工業大学 上林宏敏准教授にご指導をいただいた。ここに記して謝意を表すものである。

なお、港湾地域強震観測網の記録については国土技術政策総合研究所のホームページ <http://www.ysk.nilim.go.jp> より入手可能である。

参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 2) 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.

- 3) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: フーリエ振幅と群遅延時間に着目した確率論的地震ハザード解析, 土木学会論文集, No.801, -73, pp.141-158, 2005.
- 4) 野津 厚, 山田雅行, 長尾 毅: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した盆地生成表面波のシミュレーション - 九州地方のカルデラを例として -, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.891-905, 2006.
- 5) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚: 確率論的地震ハザード解析の適用 - 八戸港, 仙台塩釜港(塩釜港区)におけるレベル1地震動, 第12回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, 2006.
- 6) 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.
- 7) 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, -268, pp.535-536, 2006.
- 8) 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.
- 9) 長尾 毅, 山田雅行, 野津 厚, 諸星一信, 小林哲人, 安中 正: 微動 H/V を用いた東京港のサイト増幅特性のグルーピング, 地震工学論文集, pp.197-205, 2007.
- 10) 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.
- 11) 長 郁夫, 鶴来雅人, 岩田知孝, 香川敬生: 大阪盆地のサイト増幅特性 - 理論と実際の比較 -, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集(CD-ROM), S046-017, 2003.
- 12) 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.
- 13) 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, Vol.7, No.2(特集号), 2007.
- 14) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦勝: 関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.577-586, 2002.
- 15) 堀川晴央, 水野清秀, 石山達也, 佐竹健治, 関口春子, 加瀬祐子, 杉山雄一, 横田 裕, 末廣匡基, 横倉隆伸, 岩淵 洋, 北田奈緒子, Arben Pitarka: 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の3次元地盤構造モデル, 活断層・古地震研究報告, No. 3, 225-259, 2003.
- 16) <http://www.flush.co.jp/soft/software10.html> (2007.9.18 受付)