

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 ～

The effect of the incident angle on the site amplification factors for deep basin structures by use of two-dimensional finite element analyses
- For Osaka and Kushiro sedimentary basin -

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)

The site amplification factor for deep basin structure by the spectral inversion analyses often shows different characteristic from that by the one-dimensional amplification effects. The major reasons of the difference attribute to the effects by two or three dimensional characteristic of ground structure and incident angle of earthquake ground motion. We evaluated the site amplification factors against earthquakes with different incident angles for Osaka and Kushiro sedimentary basin both by spectral inversion and two-dimensional finite element analyses considering the incident angles. As the result of the analyses, it was shown that the two amplification factors are in good agreement.

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, 入射方向

1. はじめに

地震動は、震源特性、伝播経路特性に加えて、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ため、構造物の設計において考慮すべき地震動の評価においては、これら諸特性を最大振幅の形ではなく周波数特性を考慮して評価すべきことが土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)¹⁾に述べられている。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おり^{2)～4)}、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⁵⁾により評価している。

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、強震計の設置間隔が数キロ～数十キロメートル離れており、強震計の設置されていない地点のサイト増幅特性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⁶⁾の研究や原田ら⁷⁾の研究が例としてあげられ、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、深い複雑な地盤構造により、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、関東平野のような深い堆積構造を有するサイトでは、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⁾。またその増幅倍率も、盆地構造に対する斜め入射の角度に依存し、斜め入射の程度が大きくなるほど増幅率が增加するため、1 次元の増幅倍率から説明される倍率よりも大きいと指摘されている⁹⁾。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ており、例えば長ら¹⁰⁾による深部構造(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する議論などがある。

著者らは、前報¹¹⁾において、大阪平野を対象に、2次元有限要素解析において入射方向 θ を $10^\circ \sim 170^\circ$ の間で変化させた伝達関数と、スペクトルインバージョン結果の比較を行っている。前報¹¹⁾では、スペクトルインバージョンによる増幅特性が、スペクトルインバージョンに用いる地震の入射方向によって、2次元有限要素解析の最大値に近い傾向または平均値に近い傾向を示すことを定性的に明らかにした(本研究における「入射方向」の定義は、3.2節および図-8に後述する)。このため本研究では、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定量的な検討を行った。検討対象としては、前報¹¹⁾で対象とした深い盆地構造である大阪平野に加えて、大阪平野と比較すると規模の小さな盆地構造と考えられる釧路平野を取りあげ、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った。スペクトルインバージョン結果と2次元有限要素解析結果の比較に際しては、スペクトルインバージョンに用いた個々の地震に着目し、個々のサイト増幅特性とその地震の入射方向に対応する2次元有限要素解析結果の比較を行った。

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⁵⁾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、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 $O(f)$ の入射方向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

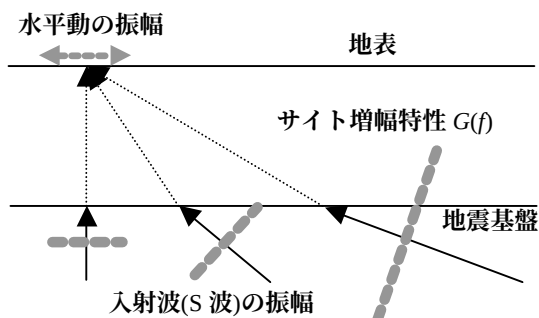


図-1 スペクトルインバージョンにおける入射方向の影響

基盤における入射波の振幅は入射方向によって異なっていたり、入射方向によって地震波が伝わる経路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

大阪平野のスペクトルインバージョンは前報¹¹⁾で述べたように、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地点を対象とし、表-1に示す条件を満足する72地震、3354記録(6708の水平成分)を用いて行っている^{12),13)}。なお、基準観測点は、表層付近のS波速度が十分に大きい地点(地表から10mまでの平均S波速度が400m/s以上)、かつ、複数(5地震程度)の観測記録が得られている地点の中から、予備的解析結果に基づいて、周波数ごとにサイト増幅特性の最も小さい地点を選定した^{12),13)}。

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うち、本稿で入射方向の及ぼす影響を議論する大阪事-G(港湾地域強震観測網)、K-NET岸和田(OSK008)のサイト増幅特性を図-2に示す。卓越周波数は明瞭ではなく、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示している。

次に釧路平野について述べる。釧路平野のスペクトルインバージョンは、東北・北海道地方の474地点に中部地方の139地点と関東地方の82地点を加えた計695地点を解析対象地点として行っている^{12),13)}。用いた地震記録は、表-1に示す条件を満足する318の地震による11496の記録(22992の水平成分)であり、解析に用いた地震の震央と観測点の位置を図-3に示す。なお、基準観測点は大阪平野の場合と同じ考え方に基づいて選定した。

表-1 スペクトルインバージョンの条件

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		
	対象とする 地震観測エリア 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	$\Delta \leq 150 \text{ km}$	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	$D \leq 60 \text{ km}$	Q値を一定とみなす
	最大振幅	$A_{\max} \leq 100 \text{ Gal}$	非線形性の影響を避ける
	周波数帯域	$M \geq 4.5$	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

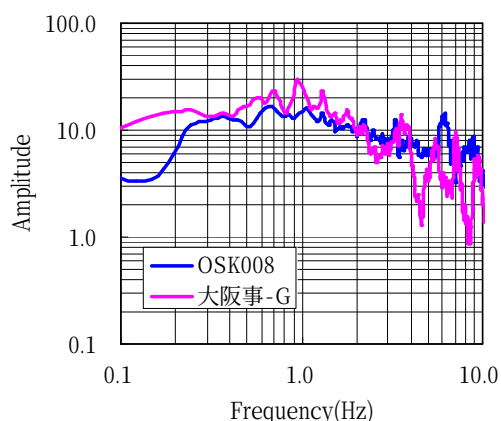


図-2 港湾におけるサイト増幅特性(大阪平野)

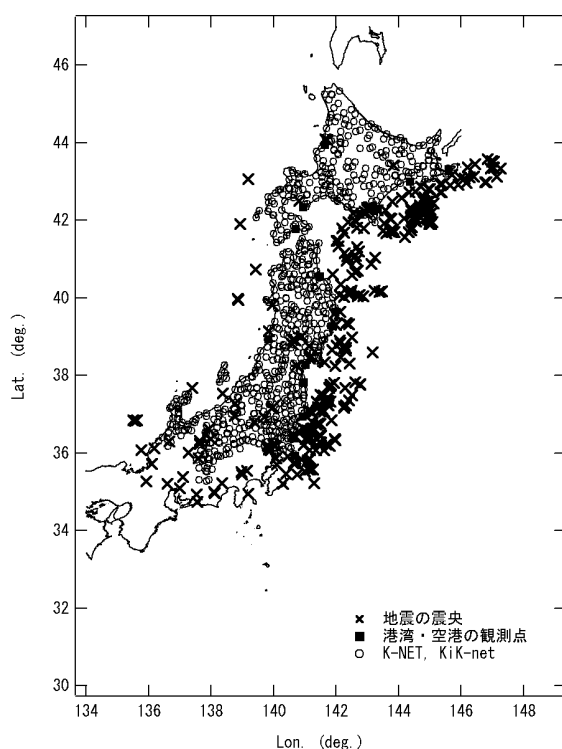


図-3 解析に用いた地震の震央と観測点の位置(北海道・東北)

本稿で入射方向の及ぼす影響を議論する釧路-G(港湾強震観測網), K-NET 釧路(HKD077)のサイト特性を常時微動 H/V スペクトルとともに図-4に示す。このうち釧路-Gのサイト増幅特性は0.8-1, 2-3, 4Hzにピークが見られる特性となっている。これは、深澤ら¹⁴⁾による港湾強震観測網の卓越周波数が、釧路-Gで1Hzおよび4Hzであることと概ね一致している。また、サイト増幅特性と常時微動H/Vスペクトルの1次のピーク周波数は概ね一致している。これは、大阪平野における結果¹¹⁾とは異なる傾向である。

3. 2次元有限要素解析によるサイト増幅特性の検討

大阪平野のような大規模な盆地構造を有する場所では、

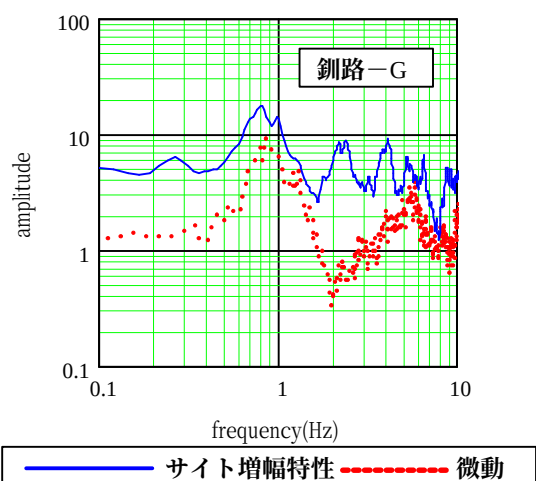
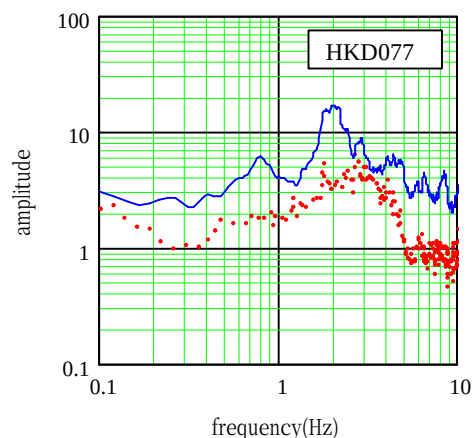


図-4 港湾におけるサイト増幅特性(釧路付近)

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一致度は低く、増幅倍率、形状ともに異なることが知られている¹¹⁾。

3.1 2次元有限要素解析方法

図-5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-5に併記)。なお、検討断面は盆地の中央に近いので、断面に直交する方向の盆地端部の影響など、3次元的影响は比較的少ないと考えられる。

図-5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¹⁵⁾から、2次元断面を切り出すことによって作成した。図-6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-6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)。ここでは、堆積層は 100m×100m の四角形アイソパラメトリック要素でモデル化を行っており、表層部 4 要素の最も低い平均 S 波速度は 400m/s となることから、計算精度は 1Hz 以下と考えた。

図-7に釧路における微動および地震観測点(●微動観測点, ●微動+地震観測点)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断面を 2 次元有限要素解析の検討断面(—EW 断面)として設定した(図-7に併記)。なお、検討断面に直交する方向には地盤構造の変化が少ないため、3 次元的な影響は比較的少ないと考えられる。また、図に示したように微動観測は強震観測地点以外の地点においても行っており、いずれの地点においてもピークが明瞭であることを確認している。

図-7の検討断面に対する地盤モデルは、(独)北海道開発土木研究所(現 土木研究所 寒地土木研究所)により提案された釧路地域における 3 次元地下構造モデル¹⁶⁾を参考に作成した。図-9に地盤モデルを示す。地盤モデルは、水平方向 36.8km, 上下方向 12.0km 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-9には、堆積層を含む部分(水平方向 26.4km, 上下方向 1.6km)のみを示している。さらに同地下構造モデル¹⁶⁾を参考に、S 波速度(V_s), 500m/s, 1000m/s, 1900m/s の 3 層の堆積層と S 波速度(V_s), 2300m/s の基盤層に区

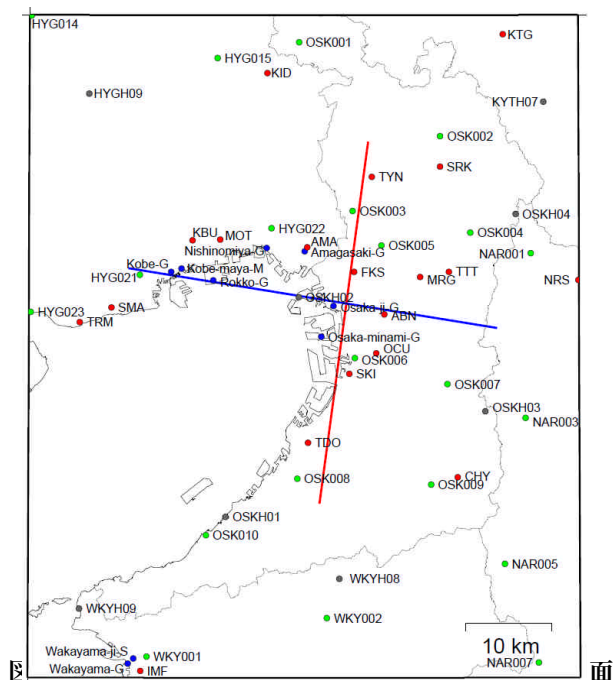
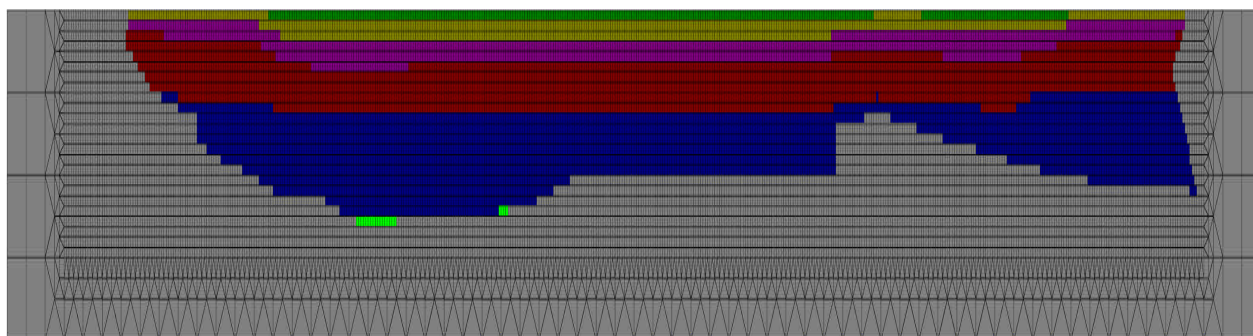
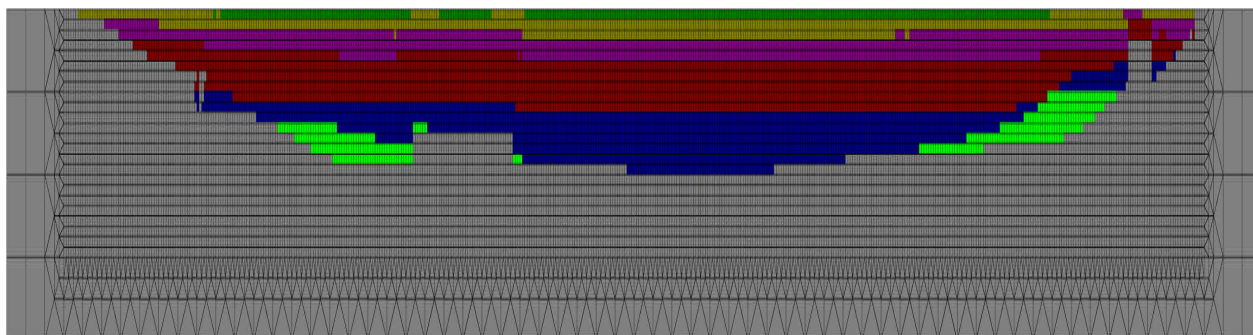


表-2 2次元有限要素解析物性一覧(大阪平野)

	ρ (g/cm ³)	V_p (m/s)	V_s (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-6 2次元有限要素解析地盤モデル(大阪平野)

分した(表-3)。ここでは、堆積層は 50m×50m の四角形アイソパラメトリック要素でモデル化を行っており、表層部 4 要素の最も低い S 波速度は、500m/s であり、計算精度は 2Hz 程度と判断した。

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/2D (例えば 17)) 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。

3.2 2 次元有限要素解析結果

2 次元有限要素解析において、入射方向 θ を $10^\circ \sim 170^\circ$ (図-8参照、 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。入射方向は、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させた。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。

大阪平野における結果は前報¹¹⁾に示しているが後の議論との比較のために図-10、図-11にそれぞれ大阪平野 EW、NS 断面の結果を再掲する。また、釧路平野 EW 断面の結果を図-12に示す。ここでは、面内波動(P-SV 成分)の伝達関数を示している。図の凡例の 10~170 の数字は入射方向 θ であり、MAX は周波数ごとの最大値、AVE は平均値を示す。なお、解析周波数範囲はモデルの制約上、大阪平野は 0.1~1.0Hz、釧路平野は 0.1~2.0Hz とした(したがって、以下のスペクトルインバージョンとの比較に関してはそれぞれ 0.1~1.0Hz、0.1~2.0Hz の周波数帯域に限定した議論である)。

それぞれの地点において、各入射方向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、大阪平野について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。釧路平野の結果については、0.8Hz 付近にピークがあり、平均化した後もこのピークが残っている。図-4に示したサイト増幅特性

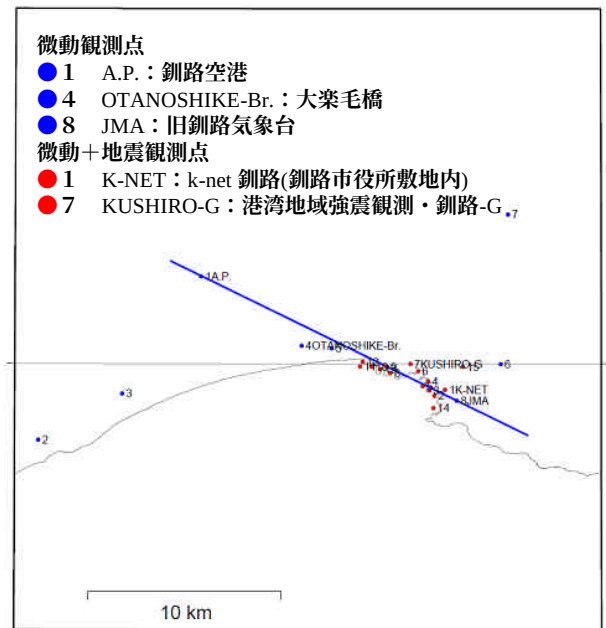


図-7 地震観測点および 2 次元有限要素解析の検討断面(釧路平野)

表-3 2 次元有限要素解析物性一覧(釧路平野)

	ρ (g/cm ³)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	減衰
1	1.5	1800	500	0.01
2	1.9	2500	1000	0.01
3	2.15	4000	1900	0.01
基盤 1	2.7	4500	2300	0.005
基盤 2	2.7	4500	2300	0.000005

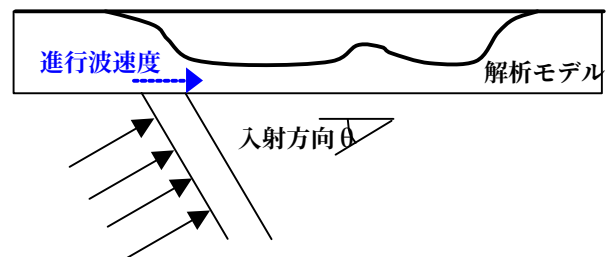
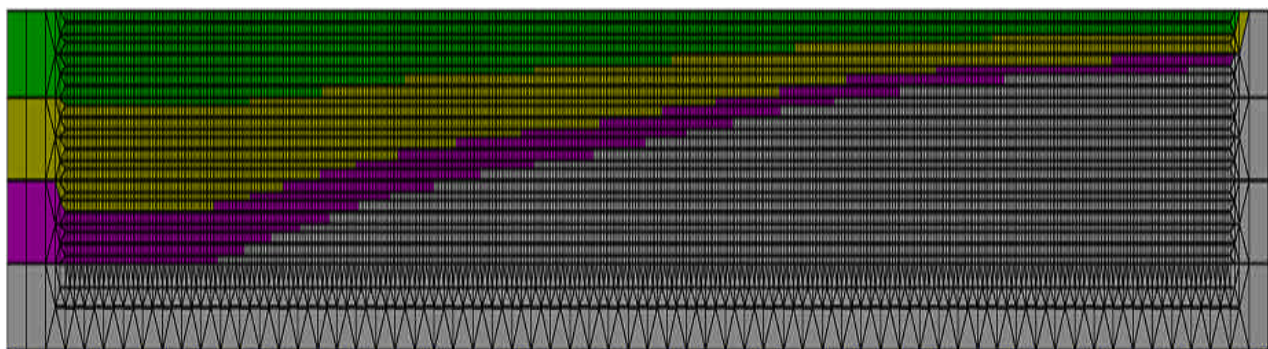


図-8 2 次元有限要素解析における入力動



EW 断面(左: W, 右: E)
■物性 1, ■物性 2, ■物性 3, ■物性 4, ■物性 5, ■物性 6, ■基盤

図-9 2 次元有限要素解析地盤モデル(釧路平野)

500m
0m 500m

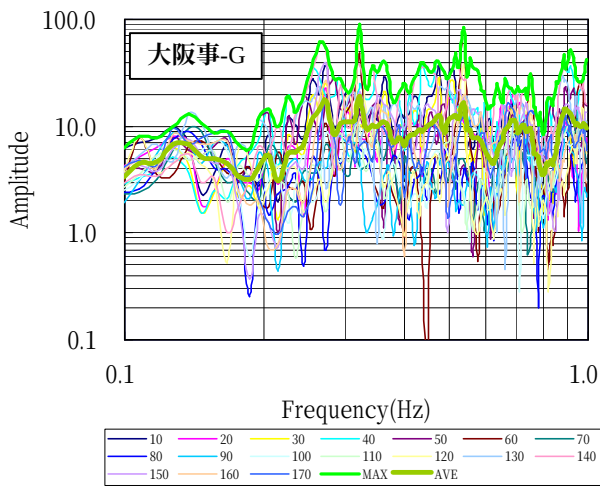


図-10 2次元有限要素解析結果(大阪平野, EW 断面)

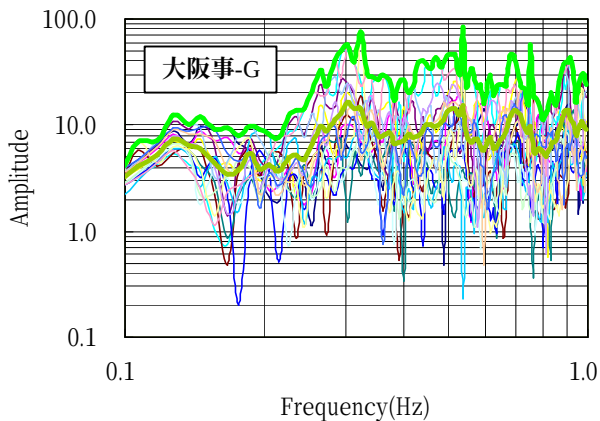


図-11 2次元有限要素解析結果(大阪平野, NS 断面)

においてもそのピークは認められるが、微動 H/V スペクトルには該当する周波数帯域において明瞭なピークはないことから、微動の結果からこの周波数帯域における増幅特性を議論することは困難であるといえる。なお、伝達関数が入射方向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。

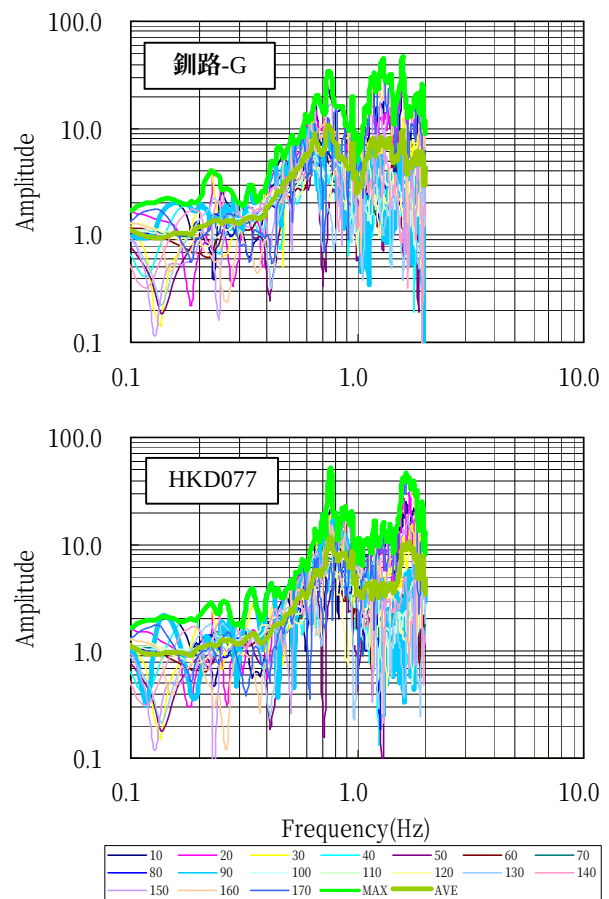


図-12 2次元有限要素解析結果(鉦路平野, EW 断面)

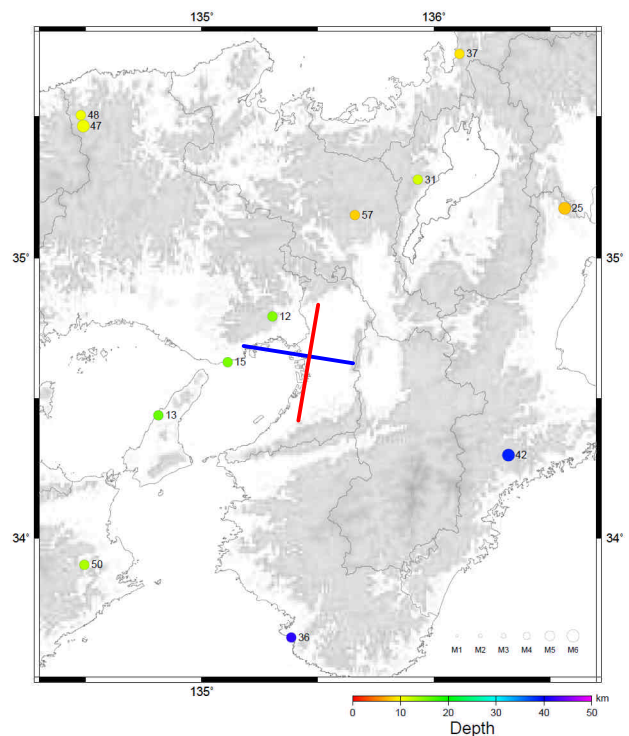


図-13 スペクトルインバージョンに用いた地震の震央図(大阪平野)

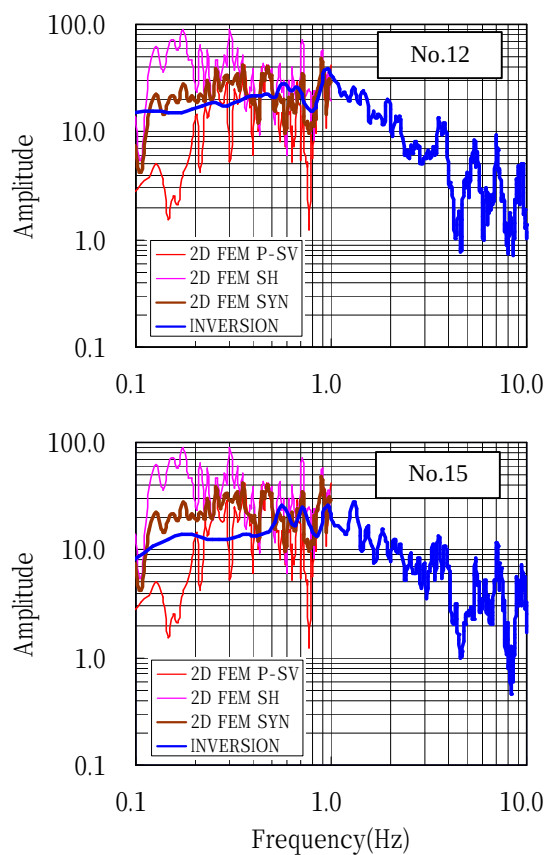


図-14 2次元有限要素解析結果(大阪平野, EW 断面)とスペクトルインバージョン結果の比較(大阪事-G)

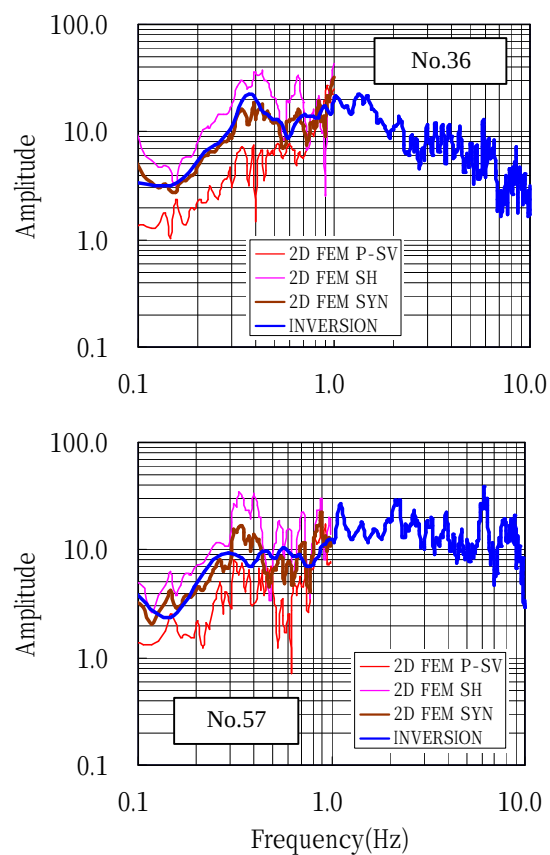


図-16 2次元有限要素解析結果(大阪平野, NS 断面)とスペクトルインバージョン結果の比較(OSK008)

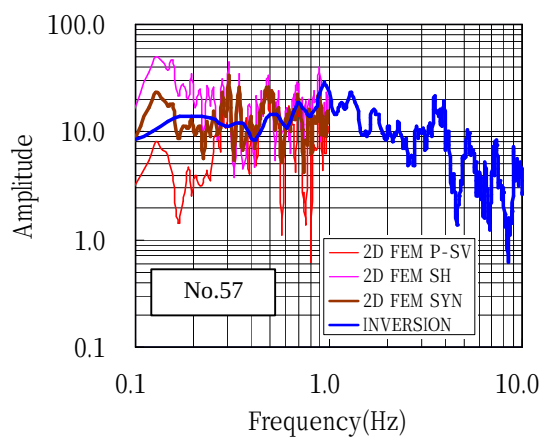


図-15 2次元有限要素解析結果(大阪平野, NS 断面)とスペクトルインバージョン結果の比較(大阪事-G)

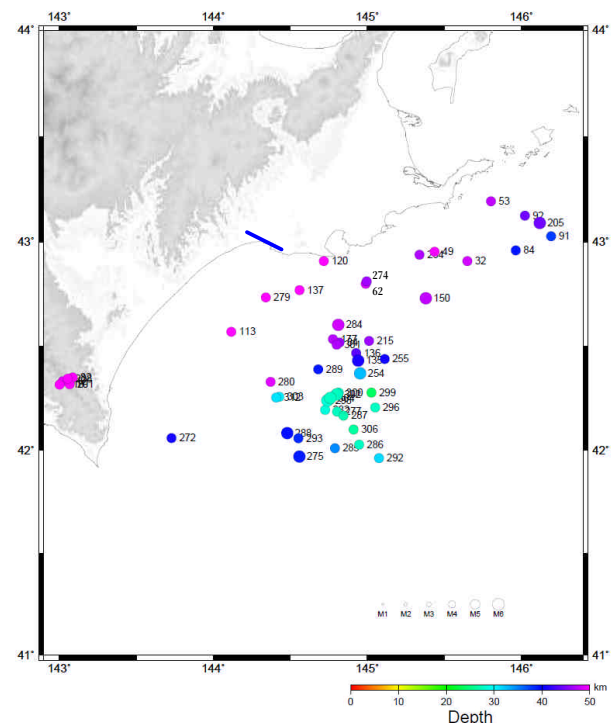
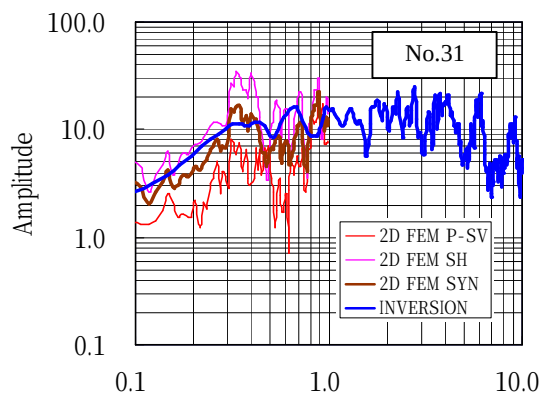


図-17 スペクトルインバージョンに用いた地震の震央図(鉦路平野)

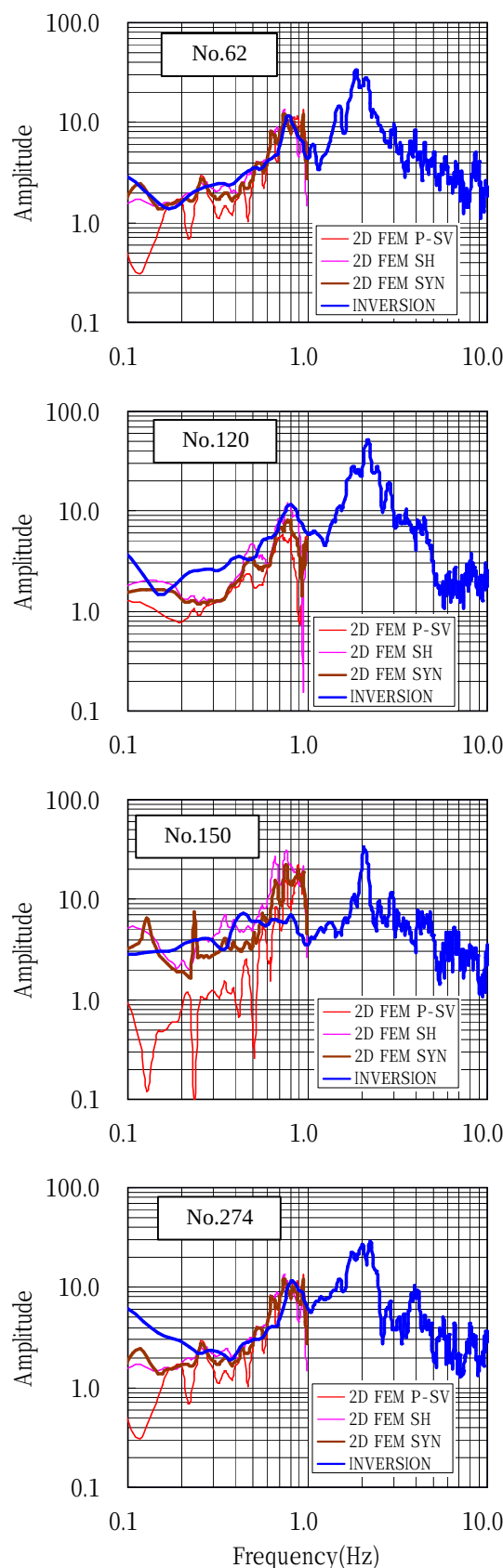


図-18 2次元有限要素解析結果(釧路平野, EW 断面)とスペクトルインバージョン結果の比較(HKD077)

表-4 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, 中:OSK008, 下:HKD077)

No.	年月日	緯度	経度	深さ	M	震央距離	入射方向
12	1995/1/25	34.788	135.307	15.0	5.0	25.2	43.2
15	1995/10/14	34.627	135.113	15.0	4.5	33.9	36.2
57	2001/8/25	35.152	135.660	8.2	5.4	60.3	151.5

No.	年月日	緯度	経度	深さ	M	震央距離	入射方向
31	1999/3/16	35.277	135.931	11.6	5.2	105.8	151.9
36	2000/4/15	33.645	135.386	41.8	4.9	98.2	47.0
57	2001/8/25	35.152	135.660	8.2	5.4	83.0	151.8

No.	年月日	緯度	経度	深さ	M	震央距離	入射方向
62	1998/4/9	42.801	144.990	48.3	5.0	72.1	137.6
120	2000/6/13	42.909	144.718	58.9	4.7	65.4	116.8
150	2001/4/14	42.731	145.381	47.6	5.6	98.4	150.2
274	2003/9/26	42.812	144.996	46.4	4.8	70.8	139.5

3.3 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

スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性は、個々の地震のフーリエスペクトル/震源スペクトル/伝播経路特性の平均値として与えられている。ここでは、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を行うにあたり、2次元有限要素解析において設定した断面の延長付近に震央が位置する地震の個々のフーリエスペクトル/震源スペクトル/伝播経路特性を、スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性として比較を行うこととした。一方、地震を選定することによって、その入射方向は特定可能である(ここでは、福山ら¹⁸⁾による深部構造モデルに対して、スネルの法則に基づくレイトレーシング法を用いて算定した)。2次元有限要素解析の結果は、特定された入射方向に対応する伝達関数を用いることとした。なお、スペクトルインバージョンは、水平2成分のベクトル和の平方根を用いているため、ここでは条件をそろえるために、図-10～図-12に示した面内波動(P-SV成分)の伝達関数に加えて、面外波動(SH成分)の伝達関数についても考慮して比較を行った。

図-13に大阪平野を対象としたスペクトルインバージョンに用いた地震の震央を示す。No.12, 15, 42がEW断面, No.31, 36, 37, 57がNS断面の延長付近に震央を持つことがわかる。大阪事-G(EW, NS断面), OSK008(NS断面)について、スペクトルインバージョンと2次元有限要素解析の結果の比較を行った。対象とした地震の諸元を表-4に、比較結果をそれぞれ図-14, 図-15, 図-16に示した。

まず全体的な傾向として、前報¹¹⁾におけるSV波入射の結果と比較して、SH波を併せて考慮し、SV波とSH波のベクトル和の平方根をとることによって、特に低周波数帯域の増幅倍率が増加し、かつ細かな山谷が均される結果となることわかる。そしてその結果は、スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性とよく一致する方向の変化であるといえる。

大阪事-G(EW断面)では明瞭なピークがないという傾

向はよく一致しており、No.15 の結果では 0.5Hz よりも低周波側で 2 次元有限要素解析による値が若干大きい傾向を示すが、No.12 の結果では非常に良い対応をしているといえる。大阪事-G(NS 断面)の No.57 の結果においても非常に良い対応をしているといえる。OSK008(NS 断面)については、0.3-0.4Hz にピークがあるケースがあり、特に No.36 の結果はピーク周波数および全体的な増幅倍率について非常に良く対応している。なお、平均化したサイト増幅特性は図-2 に示したように 0.3-0.4Hz のピークは明瞭ではない。従って、サイト増幅特性の利用目的として、該当するサイトにおける平均的な増幅倍率を求めたいのか、ある特定の断層破壊による増幅倍率を得たいのかによって、検討の仕方を変える必要がある可能性を示唆するものと考えられる。

次に、図-17 に釧路平野を対象としたスペクトルインバージョンに用いた地震の震央を示す。No.62, 120, 150, 274 が EW 断面の延長付近に震央を持つことがわかる。HKD077 について、スペクトルインバージョンと 2 次元有限要素解析(EW 断面)の結果の比較を行った。対象とした地震の諸元を表-4 に、比較結果を図-18 に示した。2 次元有限要素解析はどの地震を対象とした場合も 0.8-1.0Hz の範囲にピークがある。一方でサイト増幅特性は、No.150 の結果はあまり明瞭なピークが認められないなど、両者の差が比較的大きいケースがある。しかし、大阪平野の結果と同様に、SV 波と併せて SH 波を考慮し、両者のベクトル和の平方根をとることによって、特に低周波数帯域の増幅倍率が増加し、スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性とよく一致する結果が得られており、No.62 や No.274 の結果などは非常に良い対応を示しているといえる。

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、深い盆地構造を有する大阪平野と釧路平野を対象として、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と 2 次元有限要素解析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、入射方向 θ を $10^\circ \sim 170^\circ$ の間で変化させて伝達関数を求めた。

2 次元有限要素解析で仮定した断面の延長方向付近に震央持つ地震に限定し、個々の地震のサイト増幅特性(個々の地震のフーリエスペクトル/震源スペクトル)と、個々の地震の入射方向に対応した 2 次元有限要素解析の比較を行った結果、大阪平野および釧路平野におけるサイト増幅特性と伝達関数はよく一致することが明らかとなった。

これより、深い盆地構造を有する地点においても、スペクトルインバージョンにおける算定条件(基準観測点など)や算定結果についての妥当性が明らかになったとともに、強震記録の得られていない地点についても、

深部の不整形地盤構造を把握し、有限要素解析等を実施することによってサイト増幅特性を議論できる可能性があることが示されたと考えられる。一方、スペクトルインバージョンを実施する際には、サイト増幅特性の利用目的に応じて、使用する地震について表-1 に示す条件以外に入射方向に着目した選定も実施しなければならないことが示唆された。

なお、今回の検討によって有限要素解析結果とスペクトルインバージョン結果はよい対応を示す結果が得られたが、大阪事-G(EW 断面)における 0.5Hz よりも低周波側で 2 次元有限要素解析による値が若干大きい傾向を示すなど、スペクトルインバージョンが 2 次元有限要素解析と異なる傾向を示す部分も見られた。今後、さらに 3 次元的な影響なども考慮して、これらの挙動を解明していきたい。

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。また、独立行政法人北海道開発土木研究所(現 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所)による釧路平野の地盤モデルを参考にさせていただいた。2 次元有限要素解析に関しては、京都大学原子炉実験所 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) 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) 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，I-73，pp.141-158，2005。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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.
- 7) 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.
 - 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 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.
 - 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) 深澤清尊, 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.
 - 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) (独)北海道開発土木研究所: 設計入力地震動検討業務, 2006.
 - 17) <http://www.flush.co.jp/soft/software10.html>
 - 18) 福山英一, 石田瑞穂, Douglas S. Dreger, 川井啓廉: オンライン広帯域地震データを用いた完全自動メカニズムの決定, 地震 2, Vol.51, No.1, pp.149-156, 1998.

(2009 年 4 月 9 日 受付)