神戸市街地直下における基盤岩深度分布の推定

—やや長周期微動の水平/上下スペクトル比に基づく評価—

ESTIMATION OF BASE ROCK DEPTH DISTRIBUTION UNDER
KOBE URBAN AREAA study based on horizontal-to-vertical spectral ratios
of long-period microtremors石田 寛*, 野澤 貴*, 古屋伸二*, 高井 剛*
加藤研一**, 丹羽正徳****Hiroshi ISHIDA, Takashi NOZAWA, Shinji FURUYA, Tsuyoshi TAKAI,
Kenichi KATO and Masanori NIWA*

Long-period microtremors were observed at 63 points in Kobe urban area after the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. The purpose of the observation was to clarify the depth distribution of the base rock under the area. Using the observed records, horizontal-to-vertical spectral ratios were evaluated from cross-spectra of horizontal and vertical components and power spectra of vertical components. On the other hand, horizontal-to-vertical spectral ratios for the fundamental mode of Rayleigh wave were calculated from subsurface structure models with a different depth of the base rock. Comparing the two groups of spectral ratios, it was inferred that the base rock depth increases very sharply to about 1km on the south of the Rokko Mts. but the inclination becomes very gentle under Kobe urban area.

Keywords : *microtremor, Rayleigh wave, cross-spectrum, spectral ratio, base rock*
微動、レイリー波、クロススペクトル、スペクトル比、基盤岩

1. はじめに

神戸およびその周辺地域では平成7年兵庫県南部地震により史上最大級の地震災害が発生した。その中でも、六甲山地と大阪湾岸の中間に位置する幅1 kmから2 km程度の帯状地域に被害が集中した。源栄・永野^{1)~3)}はこの現象を地盤の不整形性による一種の焦点効果の結果と捉え、不整形地盤モデルを用いたシミュレーション解析により定量的な説明を試みた。この場合、地盤の不整形性とは、厚い堆積層が六甲山塊によって堰止められたような構造(段差構造)となっていることを指す。その他にも同様の解析^{4), 5)}が実施され、帯状地域に被害が集中したことと地盤の段差構造には密接な関係があることが明らかになりつつある。

これらの解析に用いられたモデルは、既往の深層ボーリング結果⁶⁾や最近実施された余震観測⁷⁾および反射法探査⁸⁾などによるデータに基づいて作成されたものである。しかし、神戸から西宮にかけての六甲山地南縁地域

(以後簡単に神戸地域と呼ぶ)においては大深度構造に関する定量的な情報は今なお断片的にしか得られていないのが現状である。

上記の解析的研究により、地震動の短周期成分を評価しようとするとき、場合によっては表層地盤特性だけでなく大深度構造の影響も考慮する必要性が示された。しかし、大深度構造に関する議論は、今までは主に高層建物や長大構造物の耐震設計と関係づけて行なわれるのが普通であった。これらの構造物の固有周期やわが国の大都市地域の地盤条件を考慮すると、問題となる地盤の深さは数百mから数kmの範囲となる。このような大深度構造を求める方法として、従来は人工地震探査やボーリング調査に頼るほかはなかったが、いずれもコストが嵩むことなどのため実施が容易ではなかった。そこで、このような問題点を解消するものとして、周期が1秒から10秒程度までのいわゆる「やや長周期」領域における微動に着目した手法が研究されてきた。特に、水平アレ

* 鹿島技術研究所 工修
** 鹿島小堀研究室 工博
*** 鹿島技術研究所 工博

Kajima Technical Research Institute, M. Eng.
Kajima Kobori Research Complex, Dr. Eng.
Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.

図-1 微動観測地点の分布

イ観測により微動を構成する表面波の分散曲線を求め、それに基づく逆解析により地盤構造を同定する研究が盛んに行われて来た⁹⁾。

そこで、このような目的のために筆者らが開発してきたやや長周期微動のアレイ観測による手法¹⁰⁾を用いて、神戸地域の大深度構造を求めることを初めは検討した。しかし、現地における復旧作業等の状況から、震災後半も経過していない時点における多地点での同時観測は時期尚早と判断し、個々の地点で独立に観測した記録を用いる手法を適用することとした。この手法は微動の水平成分と上下成分のスペクトル比を地盤構造と関係づけようとするものであり、従来から長周期および短周期微動について研究が行われている^{11)~15)}。アレイ観測とスペクトル比による手法の適用性を比較すると、前者が狭い地域の平均的な地盤構造を多層構造として求めることが可能であるのに対し、後者は観測が比較的容易であるため、多地点で観測することにより広い地域における概略の地盤構造の評価に適していると言える。しかし、スペクトル比による手法については、アレイ観測による手法がレイリー波を対象にしていることが明確であるのとは対照的に、対象とする波動の種類が曖昧であることが問題とされて来た。そこで、本論文ではやや長周期微動の水平/上下スペクトル比をレイリー波を対象として求め、これに基づいた大深度地盤構造の推定手法を提案する。次に、この手法を神戸地域に適用して基盤岩上面の深度分布を推定し、大深度における段差構造の存在を確かめ、その形状を評価する。

2. 観測概要

観測は1995年5月23日から26日の昼間に55地点で実施した。また、「神戸住吉での南北縦断リニアアレイによる地震・常時微動合同観測」¹⁶⁾の一環として、1995年3月3日から4日にかけて観測した8地点の記録も検討データに含めた。したがって、観測地点は計63地点と

なる。観測地点の分布を図-1に示す。観測地点はAからGまでの7本の測線に沿って配置され、それぞれの測線は六甲山地の南端部から臨海部までは六甲山地の走向に直交するように設定されている。そのうち、測線CとEは二つの人工島にもそれぞれ3観測地点を持っている。各測線は、長さが約2kmから7km、地点数は6から12にわたり、同じ測線における観測地点間の平均距離は約500mである。

5月の観測は各測線ごとに定点観測および移動観測を組み合わせて実施した。観測成分はいずれも3成分である。移動観測は今回の観測の主体をなすものであり、各観測地点を巡りながら順に観測を実施した。これに対して、定点観測は各測線について1箇所設けられた定点観測地点において、移動観測が実施されている時間帯においては30分おきに観測を行なった。ただし、測線Eは合同観測で観測した地点が多く、定点観測地点は設けていない。

地震計は振動技研(株)製のPELSを用い、固有周期は10秒に設定した。一回の観測継続時間は8分間である。データは、10Hzのハイカットフィルタを通して増幅した後、14ビットのAD変換機能を持つレコーダにより100Hzサンプリングで収録した。移動観測ではいずれかの定点観測時間に合わせて観測を行なうこととし、短周期のノイズを考慮して、10Hzだけでなく1Hzのハイカットフィルタを用いた観測も併せて実施した。

観測結果の一例として、測線Cの定点観測地点C03において、1995年5月24日の9時から18時までの毎正時に観測されたNSおよびUD成分のパワースペクトルを図-2に示す。これらのパワースペクトルは、各観測記録から40秒間ずつ重複させながら取り出した80秒間の記録を個々の標本関数と見なし、アンサンブル平均により推定したものである。その際、波形からノイズが著しく大きいと判断される区間は検討から除いた。したがって、標本の大きさは8から40の範囲にばらついている。アンサンブル平均のみで評価するには、この程度の標本の大きさでは必ずしも十分ではないため、さらに有効バンド幅0.05Hzのパルツェンウィンドウにより平滑化を行なって、パワースペクトルを推定した。図-2より、NSおよびUD成分のパワースペクトルのレベルおよび形状は、9時から15時まではほとんど変化していないが、その後卓越成分は振動数が0.8Hzから0.6Hzに移動し、レベルは15時から17時までの2時間に10倍程度に増大していることがわかる。

3. 水平/上下スペクトル比の評価手法

本研究では、微動の観測記録から求めた水平/上下スペクトル比を、地盤モデルから求めたレイリー波基本モードの水平/上下スペクトル比と比較することにより地盤構造を推定する。

図-2 観測地点 C03 における NS および UD 成分の 1 時間おきのパワースペクトル

図-3 観測地点 C03 における 1 時間おきの水平 (NS) / 上下スペクトル比

3.1 観測記録に基づく評価

まず、「やや長周期領域における微動の上下成分はレイリー波が支配的である」と仮定する。このとき、レイリー波の水平成分は、微動の全水平成分のうち上下成分と相関する成分を抽出することにより評価できる。そこで、レイリー波の水平/上下スペクトル比を次式により推定した。

$$R(f) = \left| \frac{S_{zx}(f)}{S_{zz}(f)} \right| \quad (1)$$

ここに、 $S_{zx}(f)$ は上下および水平成分のクロススペクトル密度、 $S_{zz}(f)$ は上下成分のパワースペクトル密度である。各スペクトルは図-2で示したパワースペクトルの場合と同様な手法により求めた。図-2と同じ観測地点 C03でのスペクトル比 (NS/UD) を図-3に示す。これより、1 Hz より高振動数側では振幅の暴れが激しく、スペクトル比の検討は困難であるが、それより低振動数側ではいずれの時間帯のスペクトル比もほぼ一致することがわかる。図-2には16時以降にパワースペクトルが大きく変化したことが示されていたが、水平/上下スペクトル比はそのような変化に対して安定であることがわかる。したがって、今回の観測結果のスペクトル比に関しては、0.1 Hz から 1 Hz の振動数範囲を対象とし、観測時間帯には影響されないものと考えて検討する。

また、スペクトル比を評価するときに用いる水平成分は、レイリー波の進行方向が不明であることから、水平 2 成分の観測記録を用いて 30 度刻みの方向で合成した 6 種類の水平成分を用いた。一例として、観測地点 C04 におけるスペクトル比を図-4に示す。観測された水平 2 成分の振幅レベルには大きな差がないことから、各方向でのスペクトル比の違いは主にその方向での水平成分と上下成分のコヒーレンスで決定され则认为られる。

図-4 観測地点 C04 における 6 方向での水平/上下スペクトル比

したがって、スペクトル比が最大となる方向をレイリー波の進行方向と見なし、この方向のみを考慮することで十分とも考えられる。しかし、図-4より、最大のスペクトル比を与える方向の感度は鈍く、また振動数によって変化するため、水平成分を評価すべき方向を一意的に決定することは困難である。むしろ、レイリー波の水平成分と上下成分のコヒーレンスが大きいと期待できる振動数範囲では6種類のスペクトル比の包絡線がレイリー波の特性を表しているものと考えの方が妥当と考えられる。したがって、観測値のスペクトル比は6種類のスペクトル比全体で表わすこととする。

3.2 地盤モデルに基づく評価

微動の水平／上下スペクトル比に基づく手法は、各地点について独立に地盤構造を求めようとするものであり、基準となる地盤モデルが必要である。そこで、神戸地区を代表する地盤モデルとして、岩田ら⁷⁾が1995年兵庫県南部地震の余震観測記録に基づいて提案した東灘区の地盤モデルを採用する。図-1にはこのモデルが作成された地点の位置も示した。しかし、このモデルの堆積層部分は5層からなり、レイリー波の基本モードに基づく評価にとっては層数が必要以上に多すぎると考えられる。そこで、まずこのモデルの最表層部分における低速度層を無視して堆積層の部分を2層構造に単純化し、基盤の深度を検討するための基準モデルとした。基準モデルを岩田らのモデルと比較して表-1に示す。なお、地盤減衰は考慮していない。レイリー波基本モードの分散曲線および水平／上下スペクトル比に関して、岩田らの地盤モデルおよび基準モデルを比較して図-5に示す。基準モデルは、この振動数領域におけるレイリー波の基本モードに関してはほぼ元のモデルと等価であると見なすことができる。

次に、神戸地域の地盤構造は、基準モデルとは堆積層の層厚のみが異なり、その他の地盤定数や基盤岩の構造は不変であると仮定した。さらに、堆積層である上部2

(1) 分散曲線

(2) 水平／上下スペクトル比

図-5 岩田ら⁷⁾のモデルと基準モデルのレイリー波基本モードの比較

層の層厚は、基準モデルにおける比5:4がすべての地点で保持されると仮定した。この仮定は、層厚変化の最も単純なケースとして想定したものであり、このケースでは基盤岩上面の深さとレイリー波の水平／上下スペクトル比が一対一対応となる。そこで、基盤岩上面の深さを変えたときの基本モードのスペクトル比の変化を求めた。結果を図-6に示す。横軸を振動数の対数軸としたとき、基本モードのスペクトル比は形状をほぼ維持したまま、基盤岩上面の深度とともに低振動数側に平行移動していくように見える。基盤深度が1kmから2kmの間では、200m深くなるごとにおおよそ0.04 Hz程度低振動数側にずれることがわかる。

表-1 岩田ら⁷⁾のモデルと基準モデルの比較

	層 厚 (km)		P 波速度 (km/s)		S 波速度 (km/s)		単位体積重量 (t/m^3)	
	岩田ら	基準	岩田ら	基準	岩田ら	基準	岩田ら	基準
堆積層	0.007	0.5	1.5	2.2	0.1	0.5	1.4	2.0
	0.013		1.8		0.2		1.6	
	0.055		2.1		0.3		1.8	
	0.425		2.2		0.5		2.0	
	0.4		2.8		1.50		2.2	
基盤岩	0.1		4.25		2.85		2.3	
	4		5.7		3.20		2.5	
	13		6.0		3.46		2.8	
	∞		6.7		3.87		3.0	

4. 基盤深度の評価

4.1 理論値の当てはめと評価結果

観測地点 C04 に対して理論値を当てはめた結果を図-

図一六 基盤岩上面深度 (D) を変化させたときのレイリー波基本モードの水平/上下スペクトル比

図一七 観測地点C04に対する理論水平/上下スペクトル比の当てはめ (Dは基盤岩上面深度)

図一八 基盤岩上面深度 $D = 0.8 \text{ km}$ のときの基本および1次モードの A_R / k_R

7に示す。基盤深度を 0.8 km とした場合の理論値には 0.24 Hz 付近に顕著なピークが見られるが、観測値にはそれと対応するピークは見られない。しかし、そのピークの高振動数側の肩から谷にかけては良く整合していることがわかる。この現象を考察するため、基本および1次モードのミディアムレスポンス A_R を波数 k_R で除した振幅スペクトル¹⁷⁾ を図-8に示す。これより、ピークの高振動数側の肩の部分 ($0.3 \sim 0.5 \text{ Hz}$) では、基本モードの水平および上下成分の値が低振動数側より10倍以上になっていることがわかる。さらに、それぞれの1次モードに対して約10倍大きいことから、水平/上下スペクトル比は基本モードだけでほぼ決定されと考えられる。谷の部分 ($0.5 \sim 0.6 \text{ Hz}$) でも、水平成分の振幅が極小値をとるが、上下成分は十分な振幅レベルを保っているため、谷の評価も比較的安定していることが期待できる。したがって、基本モードの水平/上下スペクトル比に関しては、この振動数範囲が最も安定して評価できる範囲であると考えられる。また、基本モードのピーク振動数では水平および上下成分の振幅自体はともに極小値をとることがわかる。したがって、本手法の前提となる仮定、すなわち「やや長周期領域における微動の上下成分はレイリー波が支配的である」とする仮定は、このピーク振動数付近では成立が困難な状況となる。なぜなら、レイリー波の上下成分がその他の種類の波動に埋没することが推測されるからである。そのため、ピーク振動数付近では上下成分の振幅が過大評価されると同時に水平成分とのコヒーレンスも低下し、その帰結として水平/上下スペクトル比がピークにならないことも理解できる。したがって、スペクトル比の理論値を観測値に当てはめる場合には、ピークの部分ではなく、ピークの高振動数側の肩および谷にかけての部分に着目して当てはめることが妥当であると考えられる。以上のような判断基準により、測線A、C、FおよびGのそれぞれ3観測地点において、レイリー波基本モードの理論スペクトル比を観測記録のスペクトル比に当てはめた。結果を図-9に示す。なお、観測地点の番号は山側から順に付けたものである。

観測地点A01およびC01は六甲山地の南端部であり、岩盤上と見なされる地点である。観測記録から求めた6通りのスペクトル比の包絡線は顕著なピークや谷が見られない。基盤が露頭している(基盤深度 0 km)として求めた理論スペクトル比は 0.7 前後の値でほぼ一定であり、観測値と良い一致を示している。

堆積層上の観測地点(A01およびC01以外)では、観測値は低振動数側から高振動数側に落ち込む崖と谷から構成される特徴的な形状パターンが見られる。この形状パターンは、観測地点が六甲山地から海岸に近づくにつれて低振動数側に移動していくことがわかる。それぞれの観測値に重ねて示した理論値は上述したような観点で当てはめたものである。したがって、理論値のピークの

高振動数側の肩および谷で比較的良く適合している。ピーク振動数付近での当てはめが困難なことは既に述べた。ピークより低振動数側については、対象振動数範囲の低振動数側の限界に近く詳しい考察は難しいが、観測値は若干の変動はあるものの理論値と概ね適合している

ように見える。また、測線Fは図-1からわかるように基準モデル地点の東を通る測線であり、ここでは比較的近い3観測地点の結果を示している。これらの地点では、当てはめられた理論値の基盤深度は1.0~1.2kmであり、基準モデルの0.9kmよりやや深くなっている。しかし、

図-9 観測記録の水平/上下スペクトル比(実線)および基盤岩上面深度を適合させた地盤モデルのレイリー波基本モード水平/上下スペクトル比(点線、Dは基盤岩上面深度)

図-10 各測線に沿った基盤岩上面の深度

これらの観測地点は基準モデル地点から東方に約1km離れているため、厳密な比較は困難である。

以上から、基準とする地盤モデルおよび層厚変化パターンを仮定すれば、理論値を観測値に当てはめることは可能であり、したがって微動の水平/上下スペクトル比に基づく基盤岩深度の推定も可能であると考えられる。そこで、同様の検討をすべての観測地点に対して行ない、基盤深度の分布を推定した。結果を既往の調査結果とともに図-10に示す。縦軸には標高を、横軸には最北端の岩盤上の観測地点から各観測地点までの距離をとった。また、既往の調査結果は調査地点と最も近い測線の図に示した。

測線AからDまでは、六甲山地から南下すると基盤面は急傾斜で深さを増すが、深度が1kmを超えるとその傾斜はやや緩やかになることがわかる。測線Eでは、北側の3つの観測地点ではほとんど堆積層の影響が見られない。この部分は太月断層と芦屋断層に挟まれた地域に当たり、堆積層が発達していないことを示す。芦屋断層の南側測線Fでは、測線AからDまでの傾向と同様であり、山地を離れると基盤岩の深度はすぐに1kmを超え、その後はほぼ平坦になっている。しかし、測線Gでは他の測線とは対照的に基盤面の傾斜は比較的緩やかであり、大阪湾岸に至るまで傾斜角はほぼ一定である。

以上より、兵庫県南部地震の際に地震動の焦点効果を引き起こしたとされている大深度に至る地盤の段差構造は、大被害を受けた神戸市の須磨区から西宮市にかけての地域において連続して存在することが推定される。図-10に基づいて神戸地域における基盤岩上面の深度分布を作成した結果を図-11に示す。

4.2 既往の地盤調査結果との比較

大深度地盤構造に関する既往の調査は、本論文で対象としている地域の西側部分ではほとんど見当たらない。測線Cの観測地点C04の付近(神戸市中央区二宮)では、ボーリングにより深さ724mで花崗岩に達したとの報告

図-11 神戸地域における基盤岩上面の深度分布

があり⁶⁾、本研究の結果と良く整合している。

測線EとFにかけての数地点では岩田ら⁷⁾が余震観測により基盤岩の深さを求めている。その結果の一部を測線Eの図上に示すと、本研究の結果よりやや浅い結果になっている。また、測線DとEの中間で実施された反射法探査⁸⁾の結果を見ると、花崗岩が堆積層側に傾いた逆断層構造になっている。また、図-10では各地点での推定結果は実線で結んであるが、各地点間の基盤の傾斜等に関しては本論文の評価対象外であり、六甲山の南側で急に深くなっている傾向は反射法探査の結果と整合しているといえる。

香川ら¹⁸⁾および鳥海ら¹⁹⁾はともに大阪平野の基盤構造の把握を目的とした発破実験のデータに基づいて、六甲山地から大阪湾の方向に基盤面は急速に深さを増し、芦屋から尼崎の海岸付近では1.5km程度に達すると結論づけている。この結果は、測線FおよびGの結果と概ね一致している。また、香川ら²⁰⁾は各種の手法による推定基盤深度データをスプライン補間して、大阪湾周辺地域の基盤深度分布を求めている。これによれば、神戸地域の基盤面の深さは概ね本研究の結果と整合しているが、基盤面の傾斜に関しては異なっている。しかし、この研究では東灘区以外の神戸市街地のデータを欠いているため、神戸地域全体に関しては概略の傾向を示したものと解釈すべきであろう。

そのほか、本研究と同様にPELSを用いた微動の観測は、赤松ら²¹⁾が実施している。パワースペクトルの水平/上下スペクトル比のピーク周期に基づいて、神戸市灘区および中央区の南北測線で基盤深度を推定している。その結果は、臨海部から人工島にかけて1500m程度であり、本研究の結果と良い一致を示している。

地質構造の観点からは、本研究により推定された基盤面が測線CおよびEの南端部で深さを急激に増している点が注目される。これらの地点は甲陽断層と大阪湾断層を結ぶ線上にあり、両断層が連続しているとの説¹⁸⁾と整合していると見ることもできる。

5. 考察

5.1 スペクトル比計算手法の比較

微動の水平/上下スペクトル比の計算は、既往の研究^{11)~15)}では次式により行なっている。

$$R(f) = \sqrt{\frac{S_{xx}(f)}{S_{zz}(f)}}, \text{ or } R(f) = \frac{F_x(f)}{F_z(f)} \quad (2)$$

ここに、 $S_{xx}(f)$ および $S_{zz}(f)$ はそれぞれ水平および上下成分のパワースペクトル密度、 $F_x(f)$ および $F_z(f)$ はそれぞれ水平および上下成分のフーリエ振幅である。ここに示した2通りの式のうち、微動を定常確率過程として捉える場合には、パワースペクトルを用いた式の方が適当である。そこで、式(1)の結果と比較するため、パワースペクトルを用いた式(2)により測線Cの3観測地点のスペクトル比を計算し、図-12に示す。これを図-9と比較すると以下のことがわかる。

- 水平成分の合成方向による違いはクロススペクトルを用いた式(1)の場合より小さい。
- スペクトル比の観測値は理論値より振動数による値の変化が小さく、形状およびレベルともに式(1)の場合より理論値との整合性が悪化している。

これらの現象は、水平成分に含まれるレイリー波以外の波群の影響によるものと考えられる。したがって、微動に含まれるレイリー波を抽出して水平/上下スペクトル比を推定する場合には、クロススペクトルを用いた式(1)が適当であると考えられる。

5.2 堆積層厚の変化パターンによる影響

図-10に示した基盤深度は、基準モデルの上部2層の層厚の比を常に等しくしたまま両層の層厚を同時に変化させるケースを想定して評価したものである。しかし、基準モデルの第1層と第2層のインピーダンス比が大きく、第1層の層厚の影響を検討する必要がある。一方、神戸のボーリングデータによれば沖積層の層厚は海側で大きくなる²²⁾ことは明らかであり、また地質学的に推

図-12 パワースペクトルに基づく水平/上下スペクトル比(実線)と地盤モデルに基づくレイリー波基本モード水平/上下スペクトル比(点線)

図-1 3 ケースBのレイリー波基本モードの水平／上下スペクトル比

図-1 4 ケースAおよびケースBにおける基盤岩上面深度の比較(測線C)

定される深い構造の断面図等^{6), 22)}にも堆積層の上部の方が下部よりも層厚の増加が速いことが示されている。そこで、ここでは沖積層を含む基準モデルの第1層の層厚のみが変化するケースを想定し、前のケースと比較する。前のケースをケースA、新たに想定したケースをケースBと呼ぶことにする。ケースBの基盤深度とレイリー波基本モードの水平／上下スペクトル比は図-1 3 のようになる。

ケースBでは、基盤深度が200m ずつ深くなる時のスペクトル比の変化の程度は図-6 に示したケースAより大きいことがわかる。また、このケースでは堆積層の第2層の層厚を400m に固定しているので、基盤深度は400m 以浅にはなり得ない。そこで、測線Cにおいて、スペクトル比の観測値に対して理論値を対応させることが可能な地点に対して、このケースにおける基盤深度を推定した。結果をケースAの場合と比較して図-1 4 に示す。ケースBはケースAに比べて基盤深度の変化が小さくなり、基盤深度の大きい地点ではやや浅めの評価になることがわかる。しかし、多くの測線で基盤深度は1km を超えたあたりではほぼ一定になる傾向があり、両ケースの結果は大きく異なることがわかる。

6. まとめ

神戸から芦屋、西宮にかけての7つの南北測線で微動のやや長周期成分を観測し、水平成分と上下成分のクロススペクトルを用いた手法によりレイリー波の水平／上下スペクトル比を推定した。次に、上部2層の堆積層と基盤岩からなる基準地盤モデルを構築し、基盤岩上面深度をパラメータとしてレイリー波基本モードの水平／上下スペクトル比を理論的に求めた。最後に、スペクトル比の理論値を観測値に当てはめることにより、基盤岩上面の深度分布を推定した。

今回の手法および結果について考察した結果を要約して以下に示す。

- i) 微動の水平成分と上下成分のクロススペクトルを上下成分のパワースペクトルで除して求めた水平／上下スペクトル比による手法は、パワースペクトル同士の比による手法より、レイリー波の水平／上下スペクトル比を推定するためには有効である。
- ii) 六甲山地から南下するにつれ、基盤面は急速に深さを増すが、1km を超えると傾斜は非常に緩やかになり、海岸付近では1km から15km 程度となる。
- iii) 兵庫県南部地震の際に地震動の焦点効果を引き起こしたとされている大深度に至る地盤の段差構造は、大被害を受けた神戸市の須磨区から西宮市にかけての地域において連続して存在すると推定される。
- iv) 堆積層の層厚変化のケースとして、層厚比を一定に保ちながら2層同時に変化するケースと最表層のみが変化するケースの2ケースを想定したが、ii) で述べた結果はこれらのケースに大きくは依存しない。
- v) 本研究は神戸地域全体の基盤深度分布を評価したものであるが、既往の地盤調査結果が存在する地区についてはそれらの結果と良く整合している。

今後は、段差構造によるレイリー波伝播特性への影響を検討するとともに、微動のアレイ観測による地盤構造モデルを構築し、これを基準とした基盤深度分布の評価も行なう予定である。

謝辞

本研究を行なうに際しては、東京工業大学瀬尾和大教授並びに山中浩明助教授には観測機器の一部を貸していただいた。また、鹿島建設小堀研究室武村雅之博士には本研究全般にわたり有益な助言をいただいた。記して感謝する。

参考文献

- 1) 源栄正人、永野正行：神戸市の基盤不整形構造を考慮した地震動の増幅特性に関する解析的検討、土と基礎、Vol.43、No.7、pp15-20、1995
- 2) MOTOSAKA, M. and NAGANO, M. : Effects of deep irregular underground structure and shallow surface geology on the amplification characteristics of ground motions in Kobe City during 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake - Analytical study on interpretation of the heavily

- damaged belt zone -, J. of Phys. Earth (submitted)
- 3) 源栄正人、永野正行：深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の増幅特性解析－兵庫県南部地震における「震災の帯」の解釈－、日本建築学会構造系論文集、1996.10（掲載予定）
 - 4) 入倉孝次郎：阪神・淡路大震災の地震動と被害に関係、スマート構造研究委員会、第5回定例会、1995
 - 5) 川瀬博：堆積盆地が強震動に与えた影響－メキシコシティの場合と神戸市の場合－、第23回地盤震動シンポジウム、pp83-92、1995
 - 6) 岩見義男：「神戸のまちと地盤」、神戸新聞出版センター、1987
 - 7) 岩田知孝、畑山健、川瀬博、入倉孝次郎：神戸市東灘区におけるアレイ強震観測、平成7年度兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究、平成6年度文部省科学研究費研究成果報告書、pp147-154、1995
 - 8) 岩崎良規、本郷隆夫、横田裕、伊藤信一：関西地震観測研究協議会六甲台（神戸大学）観測点の地盤特性、日本地震学会講演予稿集、P77、1995
 - 9) 例えば、松島健、岡田広：長周期微動を用いた地下構造の推定－周波数－波数法による位相速度推定に必要な各種パラメータの検討－、北海道大学地球物理学研究報告、Vol.52、pp1-10、1989
 - 10) 例えば、山中浩明、武村雅之、石田寛、池浦友則、野澤貴、佐々木透、丹羽正徳：首都圏西部におけるやや長周期微動のアレイ観測とS波速度の関係、地震、第2輯、第47巻、pp163-172、1994
 - 11) 小林喜久二：やや長周期微動による深い地盤構造の推定に関する研究、東京工業大学博士論文、1981
 - 12) 中村豊、上野真：地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み、第7回日本地震工学シンポジウム、pp265-270、1986
 - 13) 時松孝次、仲條有二、田村修次：短周期微動の水平鉛直振幅比と地盤特性の関係、日本建築学会構造系論文集、Vol.457、pp11-18、1994
 - 14) Yamanaka, H., Takemura, M., Ishida, H. and Niwa, M. : Characteristics of Long-Period Microtremors and Their Applicability in Exploration of Deep Sedimentary Layers, Bull. Seism. Soc. Am. 84, pp1831-1841, 1994
 - 15) 若松邦夫、安井諒：短周期微動の水平上下スペクトル比による地盤増幅特性評価の可能性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.471、pp61-70、1995
 - 16) 松波孝治（代表）：神戸住吉での南北縦断リニアアレイによる地震・常時微動合同観測、平成7年度兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究、平成6年度文部省科学研究費研究成果報告書、pp155-195、1995
 - 17) 久田嘉章：堆積盆地の地震動特性に関する研究、早稲田大学博士論文
 - 18) 香川敬生、澤田純男、岩崎好規、江見晋：発破実験より推定される大阪堆積盆地構造、地震、第2輯、第43巻、pp527-537、1990
 - 19) 島海勲、竹内吉弘、大場新太郎、堀家正則、井上豊、馬場研介：大阪平野の地下構造－北港発破実験（1988年）による－、地震、第2輯、第43巻、pp373-378、1990
 - 20) 香川敬生、澤田純男、岩崎好規、南莊淳：大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化、第22回地震工学研究発表会、土木学会、pp199-202、1993
 - 21) 赤松純平、齊藤秀雄、慈道充、盛川仁：脈動観測による基盤岩形状と被害集中域、The Proceedings of Symposium on the Great Hanshin-Awaji Earthquake and Its Geo-Environments, pp239-243, 1995
 - 22) 土質工学会関西支部：「関西地盤」、1992

（1995年11月10日原稿受理、1996年2月8日採用決定）