

サイト増幅特性を用いた 地震動H/Vスペクトルの計算法に関する考察 —福井地域の地震観測記録を対象として—

安井 譲¹・西川 隼人²・小嶋 啓介³・前田 寿朗⁴
瀬瀬 一起⁵・宮島 昌克⁶

¹正会員 早稲田大学理工研招聘研究員 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail:y.yasui@kurenai.waseda.jp

²正会員 舞鶴工業高等専門学校主任技術職員 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)
E-mail:nisikawa@g.maizuru-ct.ac.jp

³正会員 福井大学教授 工学部建築建設工学科 (〒910-8507 福井県福井市文京3-9-1)
E-mail:k_kojima@u-fukui.ac.jp

⁴非会員 早稲田大学教授 創造理工学部建築学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail:tmaeda@waseda.jp

⁵非会員 東京大学教授 地震研究所災害科学系研究部門 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)
E-mail:koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp

⁶正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学類 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail:miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

著者らは、地震動H/Vスペクトルは水平と上下の一次元波動伝達関数の比に基盤面の水平と上下の入射波スペクトルの比を乗じて計算できるとの計算法を提案している。近年、地震による地盤の揺れを拡散波動場と仮定することにより、地震動H/Vスペクトルは伝達関数の比に基盤の速度比により定まる係数を乗じて求められるとする同様な計算式が誘導された。これを契機に、著者らの計算法の伝達関数に代ってサイト増幅特性を用いる方法を改めて提案するとともに、その方法の妥当性を拡散波動場理論によるものと関連付けながら考察することとした。その際、対象は福井地域の地震観測記録とした。その結果、サイト増幅特性の比に乗じる係数として基盤の速度比により定まるものを用いれば、計算による地震動H/Vスペクトルは観測値とよく一致することが分かった。さらに、地震動H/Vスペクトルを同定・逆算して得られた地盤構造を用いて計算した一次元波動伝達関数とサイト増幅特性との対応を考察した。

Key Words : *H/V spectrum, earthquake motion, transfer function, diffuse-wave field, spectral inversion, site amplification, source spectrum*

1. はじめに

H/V スペクトル法は地表面の1点の常時微動波形の水平と上下成分のスペクトル比から得られる卓越周期やピーク高さを利用して地盤の地下構造を推定しようとするもので、その簡便性と機動性から地盤探査の補助手段の一つとして多用されている。このH/Vスペクトルは古くから取り上げられていたが^{例えば1)2)}、中村ら³⁾が表層地盤の震動特性と関連付けたことが広く工学的に注目される契機となった。

常時微動のH/Vスペクトルの成因は、現在では表面波の水平鉛直振幅比と考える説が優勢で、その逆解析による地盤の速度構造の同定も試みられている⁴⁾。なお、近年、Sanchez-Sesmaら⁵⁾は拡散波動場の仮定のもとに微動H/Vスペクトルの計算法を提案しているが、その適用性の検討⁶⁾は始められたばかりの状況にある。

一方、地震動のH/Vスペクトルについてもその性状や成因を明らかにしようとする多くの研究⁷⁻¹³⁾があるが、なかでも小林ら¹²⁾¹³⁾は地震波の初期微動部分のH/VスペクトルはP波の斜め入射で、主要動のH/Vスペクトル

はSV波の斜め入射でそれぞれ説明できるとして、地盤構造の逆解析手法を提案している。この方法は波動理論的に正統なものであるが、地震記録の1波ごとに斜め入射波解析を行う必要があるなど簡便さにやや欠ける面があった。これに対して著者ら^{14,15)}は、地震動HVスペクトルは水平と上下の一次元波動伝達関数の比に基盤面の水平と上下の入射波スペクトルの比を乗じて計算できるとの簡便な方法を提案するとともに、提案手法を使って地盤構造を逆算するなどしてその有用性について論じている。近年、川瀬ら^{16,17)}は、ランダムに分布した十分な数の震源群によって生じる地盤震動を拡散波動場としてとらえると、地震動HVスペクトルは水平と上下の一次元波動伝達関数の比に基盤の速度比からなる係数を乗じて求められるとの同様な計算式を誘導した。川瀬ら¹⁷⁾はさらに人工地震波を用いてパラメトリックな数値検討を行って、多数の地震記録を用いれば入射角の影響やSV-P変換波の影響はキャンセルアウトされることなどを示しているが、これらは著者らの提案式の前条件を補強するものともなっている。

この度、拡散波動場理論による同様な計算式が提案されたのを契機に、著者らの提案手法における水平と上下の伝達関数に代ってスペクトルインバージョン解析¹⁸⁾で得られるサイト増幅特性(地盤増幅特性)^{例えば19)}を用いる方法を改めて提案するとともに、その手法の妥当性を考察することとした。考察は拡散波動場理論によるものと関連付けて行うこととし、検討の対象は福井地域の地震観測記録^{20,21,22)}とした。ここに、サイト増幅特性を用いたのは、伝達関数を用いる場合は対象とする全観測地点のP波とS波の速度構造と減衰特性が必要であるのに対し、サイト増幅特性を用いる場合は基準点のものがわかればよく、より効率的な検討が可能になると考えたためである。なお、サイト増幅特性には地盤の2, 3次元効果が含まれること、特に上下動のサイト増幅特性にはP波だけでなくSV変換P波も含まれることなどから、サイト増幅特性と一次元の伝達関数とは必ずしも等価ではないことに留意しておく必要がある。

2. 地震動H/Vスペクトルの計算法

(1) 著者らの原提案式

著者ら^{14,15)}は、半無限の地震基盤とその上の水平成層地盤からなる地盤の下方から水平(S波)あるいは上下(P波)の地震波が鉛直に入射した場合に対して水平動と上下動の一次元の重複反射理論を適用して、次のような計算式を提案している。

$$HVR^R_j(f) = S_{HV} \frac{H_j(f)}{V_j(f)} \quad (1)$$

$$S_{HV} = \frac{a_{Hij}(f)}{a_{Vij}(f)} = const. \quad (2)$$

ここに、 $HVR^R_j(f)$: 重複反射理論に基づくj地点の地震動HVスペクトル、 $H_j(f)$: 基盤に地震波が入射したときのj地点の水平(S波)伝達関数、 $V_j(f)$: 同・上下(P波)伝達関数、 S_{HV} : 地震基盤露頭における上下入射波スペクトルに対する水平入射波スペクトルの比、 $a_{Hij}(f)$: i地震時のj地点の地震基盤露頭における水平入射波スペクトル(後出の(8a)式参照)、 $a_{Vij}(f)$: 同・上下入射波スペクトル(後出の(8b)式参照)、 f : 振動数。

(2)式において S_{HV} を地震iや地点jによらず一定としているが、同式および後出する(4)式が成立するかどうかを検討・確認することは本論の重要な目的の一つである。

なお、中村ら³⁾は地表面のHVスペクトルは表層地盤の水平伝達関数 $H_j(f)$ に等しいとの関係式を提案しているが、これは上下動の増幅がないこと、即ち $V_j(f)=1$ であること、および基盤における水平と上下の入射波スペクトルが等しいこと、即ち $S_{HV}=1$ であること等の仮定のもとに導かれたものである。

(2) 拡散波動場理論による計算式

川瀬ら^{16,17)}はランダムに分布した十分な数の震源群によって生じる地盤震動に拡散波動場理論を適用して下に示す計算式を導いた。

$$HVR^D_j(f) = \sqrt{\frac{2V_{p0}}{V_{s0}}} \frac{H_j(f)}{V_j(f)} \quad (3)$$

ここに、 $HVR^D_j(f)$: 拡散波動場理論に基づくj地点の地震動HVスペクトル、 V_{p0} : 基盤のP波速度、 V_{s0} : 基盤のS波速度。

(3) 2つの計算式の比較

著者らの原提案の(1)式は下方から基盤に地震波が入射した場合を前提にして導かれているのに対して、拡散波動場理論に基づく(3)式は、一次元の成層地盤の地表面を水平あるいは上下に加振した時の加振点直下の変位応答の解析解(グリーン関数)の虚数部を用いて誘導されたものである。即ち、これらの虚数部が、基盤に地震波が入射した場合の地表面の伝達関数の自乗で表されることを発見・利用したもので、個々の地震の震源特性や基盤入射波等とは無関係に導かれたものである。

また、(1)式と(3)式とを比較すると(3)式は当該地点の

地盤の速度, 層厚および密度などの地盤構造が分かれば計算できるのに対して, (1)式では地盤構造のほかに入射波スペクトルの比が必要なところに違いがある. さらに, (1)式と(3)式との比較から次の関係式が示唆される.

$$S_{HV} = \sqrt{\frac{2V_{p0}}{V_{s0}}} \quad (4)$$

(4) サイト増幅特性を用いる場合

基盤に対する伝達関数をスペクトルインバージョン解析から得られるサイト増幅特性に置き換える²³⁾と(1)式は次のように表される.

$$HVR^G_j(f) = S_{HV} \frac{G_{Hj}(f)}{G_{Vj}(f)} \quad (5)$$

ここに, $HVR^G_j(f)$: サイト増幅特性を用いた場合の地震動HVスペクトル, $G_{Hj}(f)$: j地点の水平方向のサイト増幅特性, $G_{Vj}(f)$: j地点の上下方向のサイト増幅特性.

(5)式に(4)式を代入すると次式を得る.

$$HVR^G_j(f) = \sqrt{\frac{2V_{p0}}{V_{s0}}} \frac{G_{Hj}(f)}{G_{Vj}(f)} \quad (6)$$

ここに, 著者らの提案式とは(5)式あるいは(6)式を指すものとする. また, 観測値との比較には(6)式を用い, (4)式の成立性は別途検討することとした. なお, (6)式は拡散波動場理論に基づく(3)式中の伝達関数をサイト増幅特性で置き換えたものと等価である.

(5) 地震動波形の計算部位

HVスペクトルの計算はS波部分(主要動)について行うこととした. なお, 川瀬ら¹⁷⁾はK-NETのMYG014の地震観測記録について, 地震動波形全体, P波部分, S波部分およびコーダ波部分のHVスペクトルを計算したところ, P波部分以外はほとんど同じHVスペクトルが得られたとして, (3)式はP波部分以外であればどの部分にも適用できるとしている.

(6) 基盤と基準点

基盤は既往の文献²⁴⁾を参考にして, $V_{s0} = 3.6\text{km/s}$ の層とした. この層のP波速度 V_{p0} は 6.24km/s であるから, $S_{HV} = \sqrt{2V_{p0}/V_{s0}} = 1.86$ となる. また, 後述するスペクトルインバージョンの基準点は地表面の地震観測記録をもとに基盤から上にある地盤の影響を剥ぎ取って基盤露頭波を求めるのに適した地点である必要がある. 本研究では, 岩質地盤の出現が浅く地中に対する地表の伝達関数の同定が比較的良好に行われているKiK-net観測地点の和泉(FKIH03)を基準点とした(図-1参照).

3. スペクトルインバージョン解析

主要動の水平動と上下動のスペクトルインバージョン解析において, 震源スペクトルや伝播経路特性は水平と上下について同じであるとの前提のもとに, 基準点の水平動に対するサイト増幅特性を拘束条件として, 水平・上下を一体的にインバージョン解析しようとする研究²⁵⁾がある. この場合, 上下動のサイト増幅特性は地震基盤面の水平動に対する相対的な増幅率となり²⁶⁾, 上下動のサイト増幅特性を直接的に求めることができない. 本論では地震基盤面の上下動に対するサイト増幅特性を直接的に得ることを目的として水平動と上下動を独立にインバージョン解析^{27),28),29)}することとした.

(1) 解析方法

地表面の水平動と上下動の振幅スペクトルは以下のように表されるものとする.

$$A_{Hij}(f) = a_{Hij}(f) \cdot G_{Hj}(f) \quad (7a)$$

$$A_{Vij}(f) = a_{Vij}(f) \cdot G_{Vj}(f) \quad (7b)$$

ここに,

$$a_{Hij}(f) = S_{Hi}(f) \cdot P_{Hij}(f) \quad (8a)$$

$$a_{Vij}(f) = S_{Vi}(f) \cdot P_{Vij}(f) \quad (8b)$$

$$S_{Hi}(f) = \alpha_i(f) \cdot S_i(f) \quad (9a)$$

$$S_{Vi}(f) = \beta_i(f) \cdot S_i(f) \quad (9b)$$

$$G_{Hj}(f) = G_{H0}(f) \cdot \bar{G}_{Hj}(f) \quad (10a)$$

$$G_{Vj}(f) = G_{V0}(f) \cdot \bar{G}_{Vj}(f) \quad (10b)$$

(7)~(10)式中の記号は次のような意味を表す. まず, (7)式については, $A_{Hij}(f)$: i地震時のj地点の地表面の水平振幅スペクトル, $A_{Vij}(f)$: 同・上下振幅スペクトル, $G_{Hj}(f)$: j地点の水平動のサイト増幅特性, $G_{Vj}(f)$: j地点の上下動のサイト増幅特性, である. (8)式については, $S_{Hi}(f)$: i地震の水平震源スペクトル, $S_{Vi}(f)$: i地震の上下震源スペクトル, $P_{Hij}(f)$: i地震時のj地点の水平動の伝播経路特性, $P_{Vij}(f)$: 同・上下動の伝播経路特性, である. また, (9)式については, $S_i(f)$: i地震の震源スペクトル, $\alpha_i(f)$: i地震の震源スペクトルが水平動に寄与する係数, $\beta_i(f)$: 同・上下動に寄与する係数, である. さらに, (10)式については, $G_{H0}(f)$: 基盤に対する基準点地表面の水平動のサイト増幅特性, $G_{V0}(f)$: 同・上下動のサイト増幅特性, $\bar{G}_{Hj}(f)$: 基準点に対するj地点の水平動のサイト増幅特性, $\bar{G}_{Vj}(f)$: 同・上下動のサイト増幅特性, である.

表-1 対象とした地震の諸元

No.	発地域	地震発生日時	緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ(km)	M _{JMA}
1	福井県沖	1999年 11月 7日 3:34 :01.6	36.0583	135.7933	15	5
2	福井県嶺北	2000年 3月 24日 23:00 :21.5	35.9067	136.7533	9	4.2
3	福井県嶺南	2000年 6月 5日 9:54 :41.2	35.7200	136.1100	9	4.9
4	福井県嶺南	2001年 4月 16日 19:05 :18.0	35.4800	135.9167	14	4.2
5	福井県嶺北	2002年 8月 18日 9:01 :01.8	36.1283	136.1767	11	4.7
6	滋賀県北部	2002年 11月 19日 18:36 :15.9	35.4533	136.3050	14	3.9
7	福井県嶺南	2003年 3月 13日 21:04 :56.0	35.5183	135.9733	14	4.2
8	石川県加賀地方	2003年 6月 5日 23:14 :21.5	36.2733	136.3100	12	4.1
9	岐阜県美濃中西部	2003年 12月 23日 14:34 :40.6	35.6183	136.3000	9	4.4
10	福井県嶺北	2004年 10月 5日 8:33 :51.4	35.9333	136.3767	12	4.8
11	岐阜県美濃中西部	2005年 6月 20日 14:04 :28.0	35.7567	136.8550	9	4.6
12	岐阜県美濃中西部	2005年 6月 20日 21:38 :24.8	35.7583	136.8567	9	4.3
13	岐阜県美濃中西部	2006年 2月 16日 23:10 :45.4	35.6883	136.4217	14	4.4
14	岐阜県美濃中西部	2006年 2月 18日 16:21 :10.6	35.6883	136.4183	13	4.1
15	岐阜県美濃中西部	2007年 1月 22日 2:16 :07.8	35.7333	136.3367	13	4.5
16	岐阜県美濃中西部	2007年 4月 28日 9:27 :24.6	35.7283	136.6250	10	4.6
17	若狭湾	2007年 8月 31日 23:36 :57.2	35.9150	135.6967	16	4.4
18	福井県嶺北	2007年 12月 21日 14:22 :54.5	35.9383	136.3483	7	4.5
19	福井県嶺北	2007年 12月 21日 16:01 :08.6	35.9383	136.3483	7	4.2
20	福井県嶺南	2008年 8月 8日 4:35 :16.2	35.4200	135.8550	15	4.2
21	岐阜県美濃中西部	2009年 2月 18日 6:47 :07.0	35.6617	136.3133	9	5.2

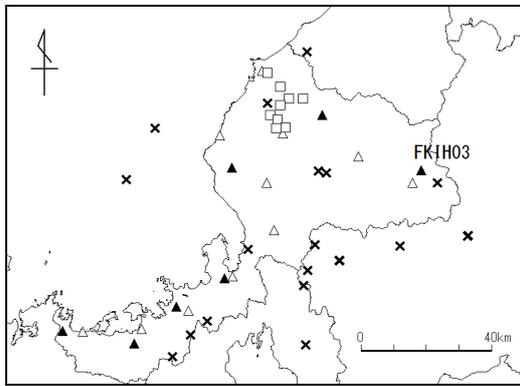


図-1 対象地震の震央と観測点の分布

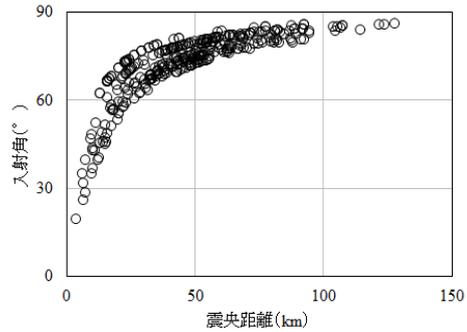


図-2 見掛けの入射角と震央距離

(7)式と(8)式に基づいてスペクトルインバージョンを行い、震源スペクトル、伝播経路特性およびサイト増幅特性を求める。ここで、(8)式中の震源スペクトルは(9)式に示すように、本来の震源スペクトルとは異なり、見掛けの震源スペクトルとも呼ばれるべきものである。なお、本論では(9)式の右辺のように分解しないで、左辺の見掛けの震源スペクトルを未知数として取り扱うものとした。

(2) 地震と観測点および地震波の解析条件

表-1にスペクトルインバージョン解析の対象とした地震の諸元を、図-1に対象地震の震央位置(図中x)と対象観測点(図中, △: K-NET, ▲: KiK-net, □: 福井大学観測網²²⁾[以後FU-netと称する])を、それぞれ示した。対象とした地震は福井県とその周辺で発生した21個の地震であり、いずれも震源深さが16 km未満の浅い地震である。対象観測点数は、K-netが11地点、KiK-netが7地点、FU-netが9地点の合計27地点である。また、解析に用い

た地表面地震観測記録は水平2成分上下1成分を1個として全部で341個であり、それらの震源距離の範囲は11km~128kmである。図-2に解析対象記録の震央距離と見掛けの入射角の関係を示したが、入射角が60度以上のものが全体の9割近くを占めている。

(7)式の $A_{xij}(f)(x=H,V)$ は、次の要領で計算した。S波到達から5秒間を切り出し、零データを付加して81.92秒を計算の対象とした。切り出した波形の両端には5%のコサインテーパーを施した。振動数領域は0.5Hz~20Hzを対象とし、バンド幅0.4HzのParzenウィンドウを用いてスペクトルを平滑化した。なお、水平動成分は2方向のスペクトルの自乗和平方根値としている。

(3) 基準点とその地盤構造

基準点としてKiK-net 観測地点の和泉(FKIH03)を選び(図-1参照)そのサイト増幅特性を以下に示す式^{30,31)}により計算した。

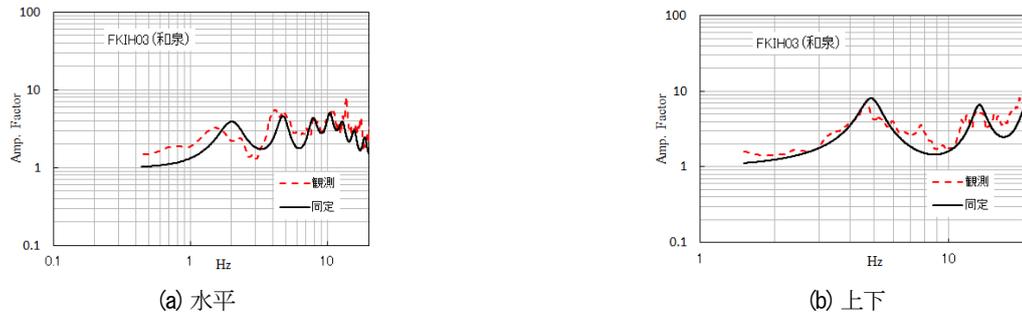


図-3 基準点の地震時伝達関数 (地表/地中[GL-200m])

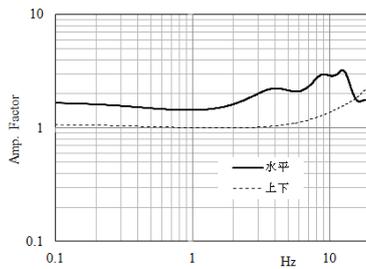


図-4 基準点のサイト増幅特性 ($G_H(f), G_{V0}(f)$)

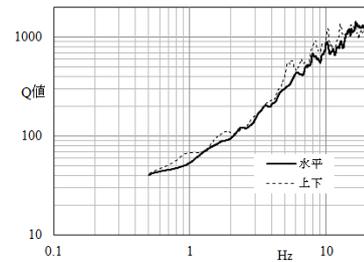


図-5 伝播経路特性 ($Q_H(f), Q_V(f)$)

$$G_{H0}(f) = \sqrt{\frac{\rho_0 V_{s0}}{\rho_r V_{sr}}} \bar{H}_0(f) \quad (11a)$$

$$G_{V0}(f) = \sqrt{\frac{\rho_0 V_{s0}}{\rho_r V_{pr}}} \bar{V}_0(f) \quad (11b)$$

ここに、 $\bar{H}_0(f)$: 和泉地点の地中観測点位置の露頭地盤に対する地表面の水平 (S波) 伝達関数、 $\bar{V}_0(f)$: 同・上下 (P波) 伝達関数、 ρ_r : 和泉地点の地中観測点付近の地盤の密度、 V_{sr} : 同・S波速度、 V_{pr} : 同・P波速度、 ρ_0 : 基盤の密度。

(11)式は基準点の地中観測点位置近傍の地盤が基盤に達していない場合に、観測点位置地盤に対する基盤とのインピーダンス比で $\bar{H}_0(f)$ や $\bar{V}_0(f)$ を補正するものである。なお、(11b)式で V_{s0} を用いているが、これは基盤での地震波は上下動もS波である²⁹⁾とした理由による。

(11)式の $\bar{H}_0(f)$ や $\bar{V}_0(f)$ を計算するためには基準点の速度構造と減衰特性が必要である。著者ら²⁰⁾²¹⁾は福井県のKiK-net観測地点の地中観測点に対する地表面の水平と上下の地震時伝達関数を、自由度を増す目的³²⁾で細分割した地盤モデルを用いて、遺伝的アルゴリズム (GA)³³⁾で逆解析して速度構造と減衰特性を求めている。図-3に和泉地点の地中観測点 (GL-200m) に対する地表面の地震時伝達関数の同定結果を、表-2に得られた速度構造と減衰特性を、それぞれ示した。なお、これらの逆解析において、水平伝達関数は地震動のS波部分を、上下伝達関数はP波部分を、それぞれ対象としている。

表-2 基準点の速度構造と減衰特性

層No.	厚さ (m)	深さ (m)	ρ (t/m ³)	V_s (m/s)	$n_{e,s}$ (m/s)	$n_{i,s}$ (m/s)	V_p (m/s)	$n_{e,p}$ (m/s)	$n_{i,p}$ (m/s)
1	6	6	1.77	313	101	14.2	657	180	44.8
2	6	12	1.93	619	234	12.3	1494	273	87.2
3	26	38	2.03	897	223	30.4	2959	645	105
4	42	80	2.11	1140	187	16.7	3482	862	144
5	120	200	2.23	1548	569	29.4	3800	942	121

ここに、上下動においてS波部分ではなくP波部分を用いているのはSV-P変換波がP波伝達関数に与える影響を避けようとしたためである。

また、減衰特性は(12)式に示すように散乱減衰と内部減衰の和で表される³⁴⁾ものとし、地盤密度 ρ はS波速度と(13)式に示すような関係³⁵⁾があるとしている。

$$h_x = h_{ex} + h_{ix}, (x = s, p) \quad (12a)$$

$$h_{ex} = \frac{n_{ex}}{V_x} \frac{1}{f}, (x = s, p) \quad (12b)$$

$$h_{ix} = \frac{n_{ix}}{V_x}, (x = s, p) \quad (12c)$$

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s} \quad (13)$$

ここに、 h_x : 減衰定数、 h_{ex} : 散乱減衰定数、 h_{ix} : 内部減衰定数、 n_{ex} : 散乱減衰係数、 n_{ix} : 内部減衰係数、 V_x : 速度、であって、 $x = s$ はS波の、 $x = p$ はP波の定数あるいは係数であることを、それぞれ示す。

図-4に(11)式を用いて計算した和泉地点の水平と上下のサイト増幅特性を示した。なお、同式や(6)式中の基

盤の諸定数については既往の文献²⁴⁾を参考にして、また、和泉の地中観測地点付近の地盤定数は表-2をもとに、それぞれ以下のように設定している。

$$\rho_0 = 2.75 \text{ g/cm}^3, V_{s0} = 3.60 \text{ km/s}, V_{p0} = 6.24 \text{ km/s}$$

$$\rho_r = 2.23 \text{ g/cm}^3, V_{sr} = 1.55 \text{ km/s}, V_{pr} = 3.80 \text{ km/s}$$

(4) 伝播経路特性

伝播経路特性のスペクトルインバージョン結果について述べる。(8)式に含まれる伝播経路特性 $P_{Hij}(f)$, $P_{Vij}(f)$ が以下のようにあらわされるものとする。

$$P_{xij}(f) = \frac{1}{R_{ij}} \exp\left(-\frac{\pi f R_{ij}}{Q_x(f) V_a}\right), (x = H, V) \quad (14)$$

ここに、 R_{ij} : i 番目の地震における j 番目の観測地点の距離、 $Q_x(f)$: 地震波の水平動 ($x = H$) あるいは上下動 ($x = V$) の伝播経路での Q 値、 V_a : 地震波の伝播経路での平均的な速度 (基盤でのS波速度)。

図-5に、 $Q_x(f)$ について、水平動のインバージョンから求めたものと上下動から求めたものを比較して示した。両者はほぼ等しい値を示すことがわかる。このとき、 $V_a = V_{s0} = 3.60 \text{ km/s}$ としている。

4. H/V スペクトルの観測値と計算値の比較

スペクトルインバージョン解析の結果から求められたサイト増幅特性を(6)式に代入して得られる地震動H/Vスペクトルと、同じ観測地点の地表面の水平と上下の観測記録から直接的に得られるH/Vスペクトル (観測H/Vスペクトルと称する) とを比較する。この観測H/Vスペクトルは、スペクトルインバージョン解析の場合と同様

な計算条件で計算した地表面の加速度波形のフーリエ振幅スペクトルの水平2成分の自乗平方根を上下成分のもので除して求めたものを各観測地点ごとに地震波の数で算術平均したものである。

図-6に、KiK-netの7つの観測点について観測H/Vスペクトルと、サイト増幅特性を用いて(6)式により計算したH/Vスペクトルとを比較して示した。同様に、図-7にはK-NETの11個の観測点について、図-8にはFU-netの9個の観測点について、それぞれ示した。いずれの地点についても観測値は計算値とよく一致しており、対象としたすべての地点で良好な結果を得た意義は大きい。また、見掛けの入射角が60度以上の観測記録がほとんどであったことを考えると、入射角の影響やSV-P変換波の影響はスタッキングアウトされている¹⁷⁾ものと推察される。以上の考察から、基盤面のスペクトル比 S_{HV} を川瀬らにより導かれた係数 $\sqrt{2V_{p0}/V_{s0}}$ と等しいとすると、著者らの提案式による計算値と観測値はよく一致することが確認された。これは、間接的にはあるが(3)式に示した拡散波動場理論に基づく計算式の妥当性を支持する結果であるとも言える。

ここで、上記のスタッキング効果について述べておきたい。本論の結果によると地震の数が20個程度、観測記録の数が340個程度で十分な効果があることになるが、その原因として、H/Vスペクトルそのものが雑信号を除去する機能を有している可能性や、大きな入射角の記録同士が互いに相殺した可能性も考えられる。また、 $V_s = 3.0 \text{ km/s}$ 程度の硬質地盤の深さが比較的浅い地域であること²⁴⁾も関連している可能性がある (「6.考察」参照)。今後、入射角の影響について吟味するとともに、福井地域以外についても検討していく必要がある。

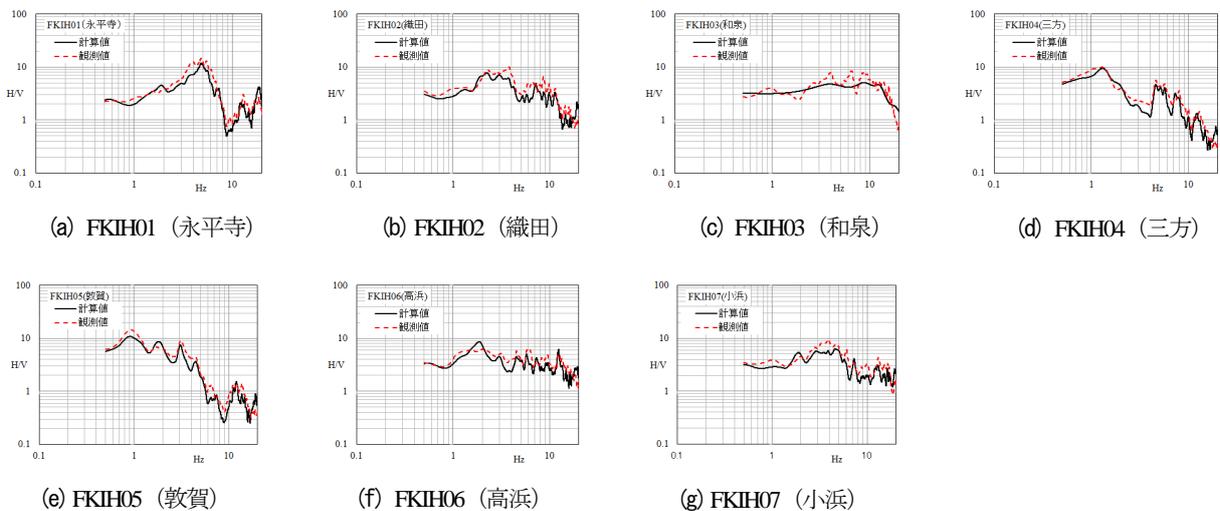


図-6 H/V スペクトルの(6)式による計算値と観測値との比較 (KiK-net)

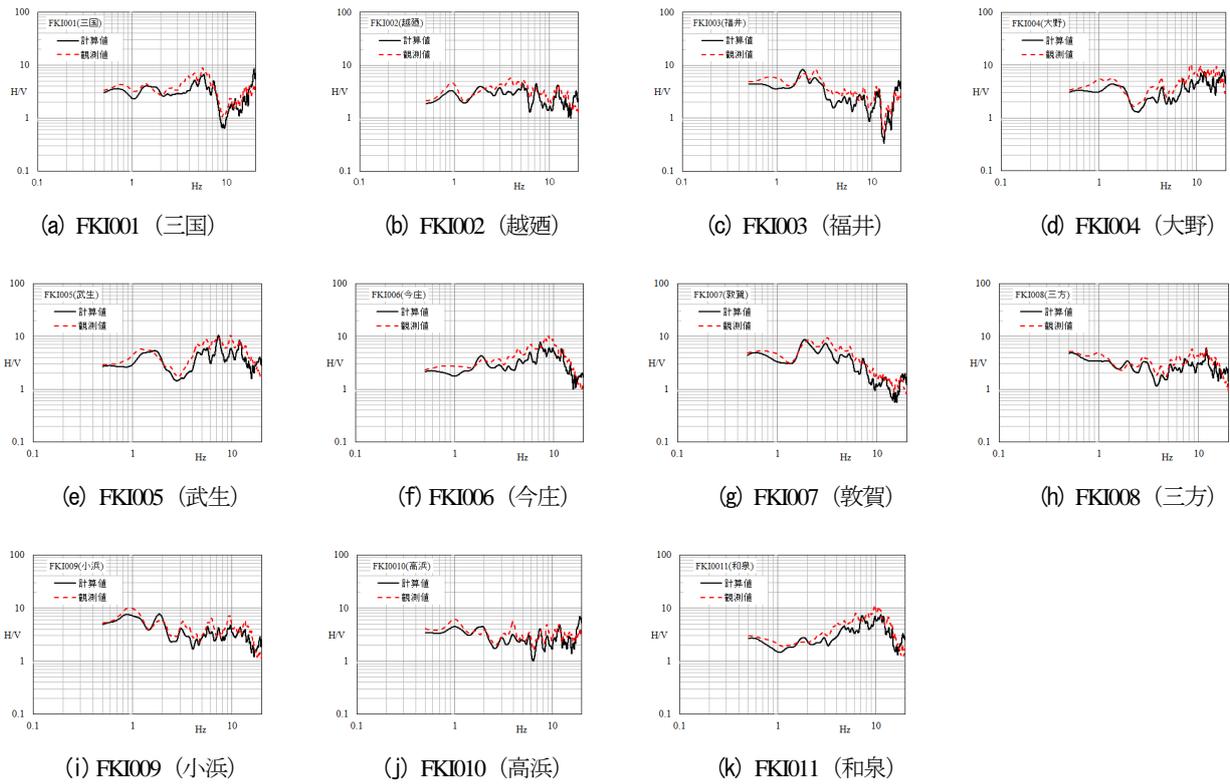


図-7 H/V スペクトルの(6)式による計算値と観測値との比較 (K-NET)

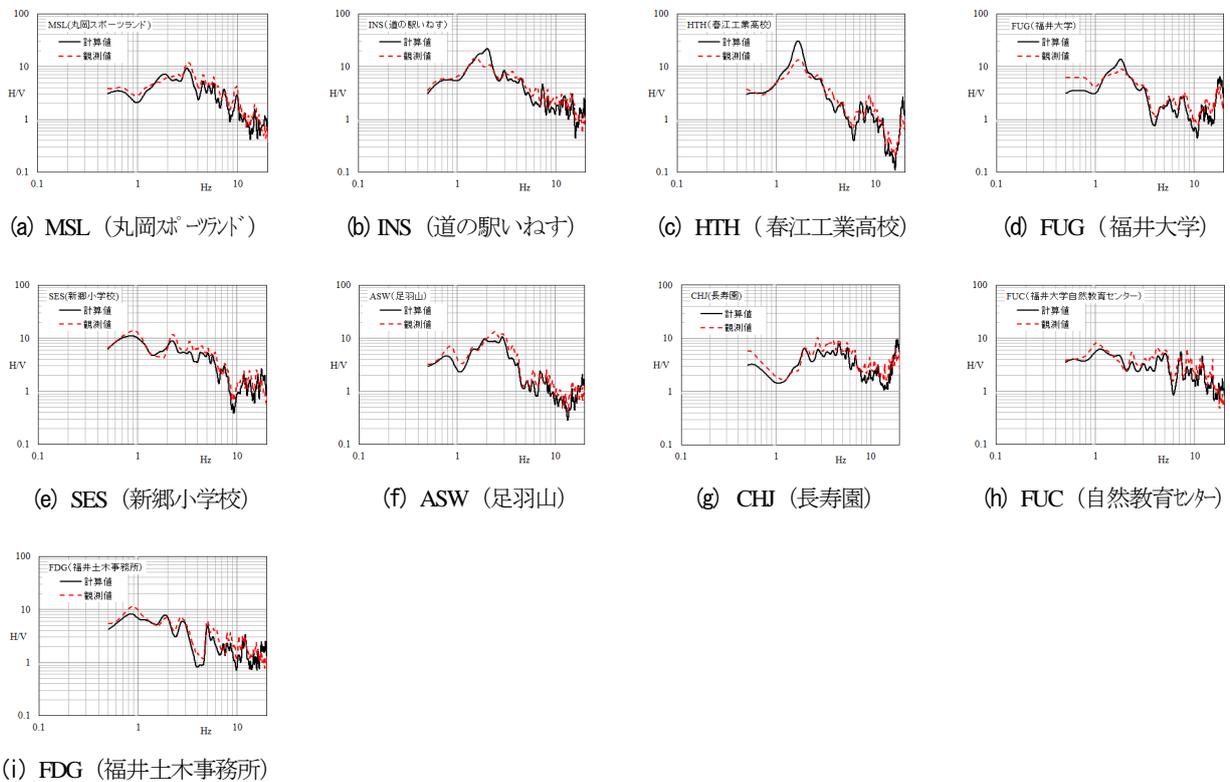


図-8 H/V スペクトルの(6)式による計算値と観測値との比較 (FU-net)

5. 基盤面のスペクトル比

(2)式に(8)式と(9)式を考慮し、スペクトルインバージョンの結果から $P_{Hij}(f) = P_{Vij}(f)$ とすると次式を得る.

$$S_{HV} = \frac{S_{Hi}(f)}{S_{Vi}(f)} = \frac{\alpha_i(f)}{\beta_i(f)} \quad (15)$$

(15)式は、基盤面における入射波スペクトルの水平と上下の比は見掛けの震源スペクトルの比に等しく、さらにこの比は震源スペクトルの水平動と上下動に寄与する係数の比に等しいことを示している.

ここで、 S_{HV} が地震 i によらず一定と考えられるかどうかについて考察する. まず、(15)式に(4)式を考慮すると次式を得る.

$$\frac{S_{Hi}(f)}{S_{Vi}(f)} = \frac{\alpha_i(f)}{\beta_i(f)} = \sqrt{\frac{2V_{p0}}{V_{s0}}} \quad (16a)$$

(16a)式は見掛けの震源スペクトルの水平と上下の比および震源スペクトルの水平と上下の寄与係数の比は $\sqrt{2V_{p0}/V_{s0}}$ に等しいことを示している. ここで、(16a)式の見掛けの震源スペクトルとの関係に着目して $S_{Hi}(f)$ を次式のように表しておく.

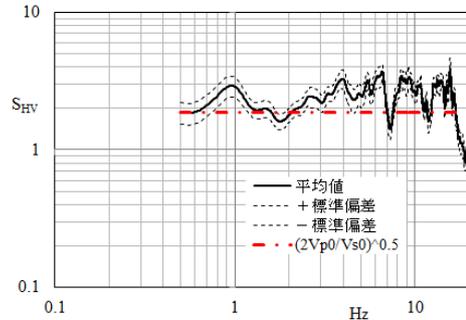


図-10 見掛けの震源スペクトル比の平均値

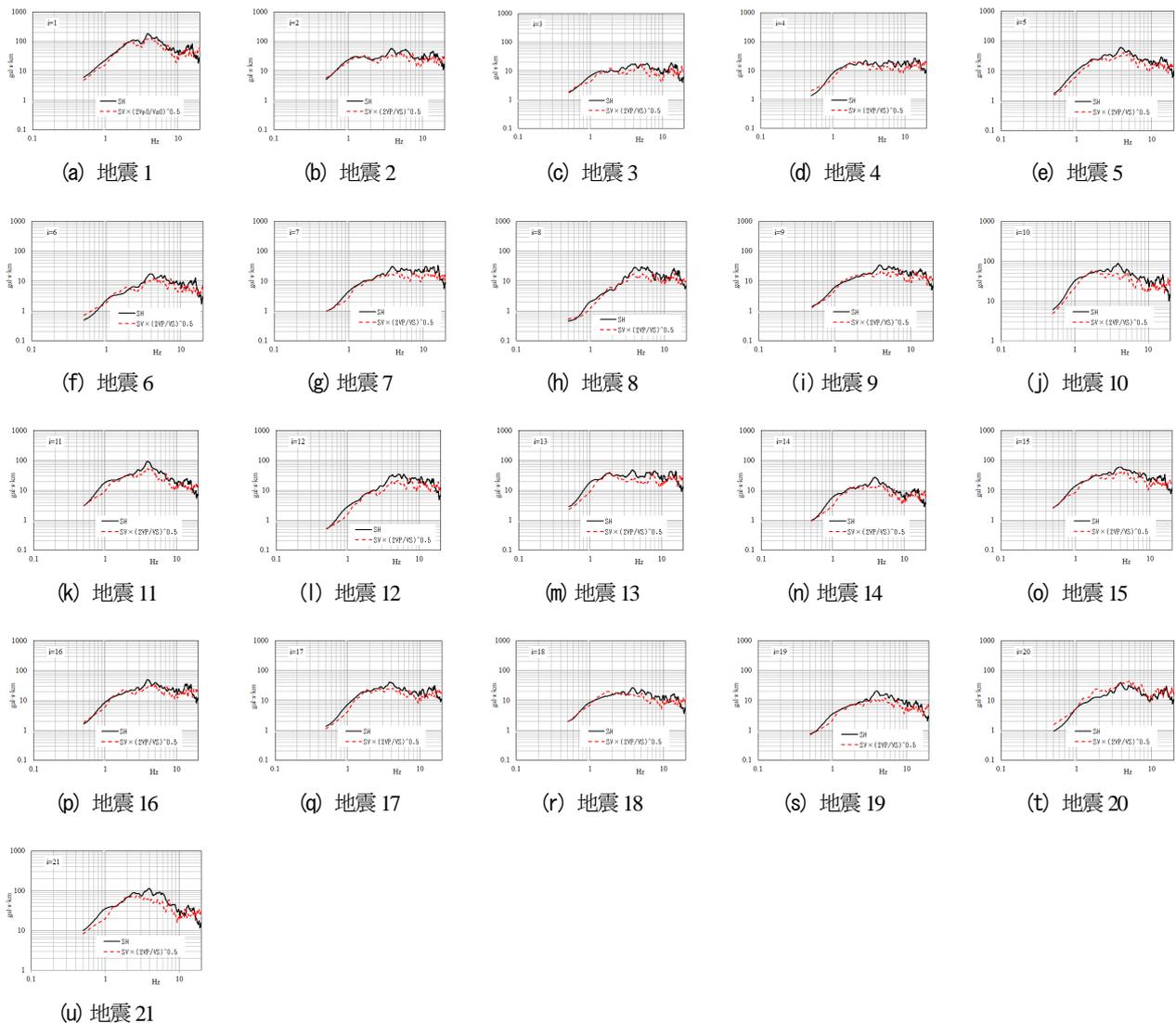


図-9 水平動および上下動から換算して求めた見掛けの震源スペクトル (縦軸の単位: $gal \cdot s \cdot km$)

$$S_{Hi}(f) = \sqrt{\frac{2V_{p0}}{V_{s0}}} \times S_{Vi}(f) \quad (16b)$$

図-9に(16b)式の左辺と右辺を各地震ごとに比較して示したが両者はよく一致している。因みに同図の縦軸の単位は $gal \cdot s \cdot km$ である。続いて、図-10に、(16a)式の最左辺の $S_{Hi}(f)/S_{Vi}(f)$ をすべての地震について平均したものを示したが、その値は $\sqrt{2V_{p0}/V_{s0}}$ にほぼ等しい。以上の考察から、(4)式がほぼ成立することが導かれた。

6. 考察

KiK-netの織田(FKIH02)観測地点を例として、水平・上下のサイト増幅特性と対応する一次元波動伝達関数との関係を考察する。これらの伝達関数を計算するためには表層から地震基盤に亘るS波とP波の速度構造とその減衰特性が必要である。そこで、観測地震動のH/Vスペクトルを著者らの原提案式(1)に(4)式を代入した計算式(これは川瀬らの(3)式に等しい)で同定・逆算^{14),15)}した速度構造と減衰特性を用いることとした。ここに、地盤はPS検層(深さ100m)で得られているモデルの最下層(厚さは54m以上と考えられる)に $V_{s0} = 3.6km/s$ の基盤(2の(6)参照)を付加するものとした。

逆解析の手法はGAで、各層のS波速度 V_s 、P波速度 V_p 、S波内部減衰係数 n_{is} およびP波内部減衰係数 n_{ip} を探索した。 V_s と V_p の探索範囲はPS検層データの0.75倍~1.25倍とし、地盤の密度 ρ は(13)式によるものとした。 n_{is} の探索範囲は零から既往の研究²⁰⁾の経験値の1.5倍と

した。即ち、表層土(第1層と第2層): 0~16, 砂礫(第3層と第4層): 0~20, 岩(第5層と第6層): 0~36とした。また、 n_{ip} の探索の上限値は既往の研究²¹⁾の経験値(V_p が $1.7km/s$ 以下のとき60, 以上のとき120)の1.5倍とした。このとき上限値は、第1層と第2層で90, 第3~第6層で180となる。なお、S波とP波の散乱減衰係数 n_{es} と n_{ep} は零とした。基盤の直上層(PS検層データの最下層)の厚さは後述するように事前に探索したが、その他の層の厚さは事前・本解析ともPS検層の結果を用いた。

なお、GA探索の数値計算上の条件は以下のものである。即ち、試行回数: 10回, 世代数: 200, 個体数100, ビット数: 8, 交差確率: 0.7, 突然変異確率: 0.1で、動的突然変異およびエリート選択を考慮した。

基盤の直上層の厚さは既往の調査²⁴⁾を参考にして54m~5000mの広い範囲で事前に探索した。探索はGAでH/Vスペクトルを同定する方法によった。その結果、その厚さを163mにすれば、H/Vスペクトルの近似が良好であることが分かったので、本解析はこの値で固定して行うこととした。

図-11に地震動H/Vスペクトルの観測値と同定結果を示した。表-3に同定により逆算されたS波とP波の速度構造と減衰特性を示した。図-12にはこれらの速度構造をPS検層結果と比較して示してある。同図の(a)がS波速度で、(b)がP波速度である。P波速度の一部の層を除いてPS検層の値とほとんど同じ結果が得られている。また、紙面の都合で省いたが、減衰特性についても既往の研究結果^{20),21)}にほぼ対応する結果が得られている。

図-13に同定された速度構造と減衰特性を用いて計算した露頭基盤に対する地表面の伝達関数とサイト増幅特

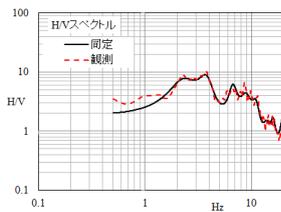


図-11 H/V スペクトルの同定

表-3 同定された地盤構造

層No.	厚さ (m)	深さ (m)	ρ (t/m^3)	V_s (m/s)	$n_{e,s}$ (m/s)	$n_{i,s}$ (m/s)	V_p (m/s)	$n_{e,p}$ (m/s)	$n_{i,p}$ (m/s)
1	2	2	1.66	150	-	13.2	426	-	42.0
2	2	4	1.66	150	-	13.2	867	-	49.4
3	12	16	1.79	335	-	19.8	1930	-	36.8
4	30	46	1.93	623	-	13.0	2610	-	97.6
5	163	209	2.32	1890	-	14.0	4740	-	67.5
6	-	-	2.75	3600	-	18.9	6240	-	125

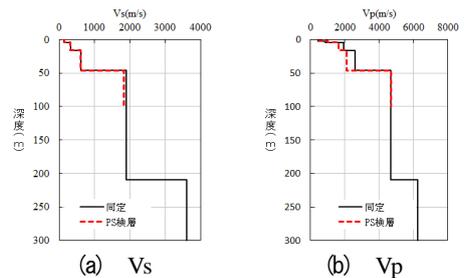


図-12 速度構造

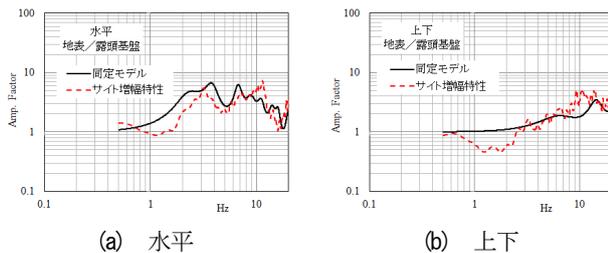


図-13 サイト増幅特性と伝達関数(地表/露頭基盤)

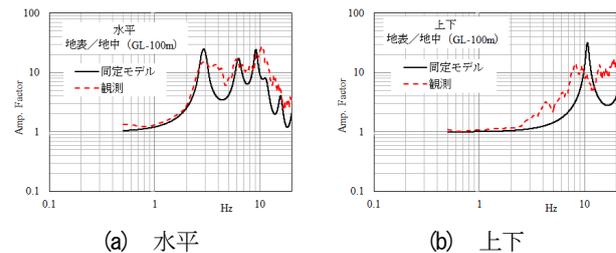


図-14 伝達関数(地表/地中[GL-100m])

性を比較して示した。ここに、(a)が水平伝達関数で、(b)が上下伝達関数である。一次元の伝達関数とサイト増幅特性が概ね一致しており、これは両者が等しい可能性を示しているとも言えるが、この点については今後の更なる検討が必要である。

念のため、図-14にGL-100mの地中観測点に対する地表面の伝達関数について、計算値と観測値を比較して示した。同図の(a)が水平伝達関数で、(b)が上下伝達関数である。ここに、(b)の観測値はP波部である。計算値と観測値は水平・上下ともおおむね一致している。

7. まとめ

著者らが提案したサイト増幅特性を用いた地震動H/Vスペクトルの計算法の妥当性を、拡散波動場理論に基づく計算式と関連付けながら、福井地域の地震観測記録を用いて考察した。

その結果、サイト増幅特性の比に乗じる係数として、拡散波動場理論に基づいて誘導された計算式に含まれる基盤の速度比により定まる係数を用いれば、計算による地震動H/Vスペクトルは観測値とよく一致することが示された。これは、間接的にはあるが拡散波動場理論に基づく計算式の妥当性を支持する結果であるとも言える。

また、水平と上下の基盤面スペクトルの比、水平と上下の見掛けの震源スペクトルの比および震源スペクトルの水平と上下の寄与係数の比は、基盤の速度比から定まる係数の値とほぼ等しいことが導かれた。

さらに、KiK-netのある観測地点を例として、サイト増幅特性と一次元波動伝達関数との対応を考察したところ、両者が等しい可能性が示されたが、これについては今後の更なる検討が必要である。

本論で対象とした観測記録の大半が見掛けの入射角が60度以上であったにも拘らずSV-P変換波の影響などがスタッキングアウトされたと思われる。今後、入射角の影響について吟味するとともに、福井地域以外の観測記録についても本方法の適用性を検討していく必要がある。

謝辞：防災科学技術研究所のK-NETとKiK-netの地震観測記録データを使用いたしました。また、本研究をまとめるにあたり井口道雄東京理科大学名誉教授（早稲田大学理工研）と川瀬博京都大学防災研究所教授に貴重な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 野越三雄, 五十嵐亨：微動の振幅特性(その2), 地震, 第2輯, 第24巻, pp.26-40, 1971.
- 2) 塩野計司, 太田裕, 工藤一嘉：やや長周期の微動観

- 測と地震工学への適用(6)微動に含まれる Rayleigh 波成分, 地震, 第2輯, 第32巻, pp.115-124, 1979.
- 3) 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, pp.265-270, 1986.
- 4) Arai, H. and Tokimatsu, K. : S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.94, No.1, pp.53-63, 2004.
- 5) Sanchez-Sesma, F. J., Rodriguez, M., Iturraran-Viveros, U., Luzon, F., Campillo, M., Margerin, L., Garcia-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. A. and Rodriguez-Castellanos, A. : A theory for microtremor H/V spectral ratio - application for a layered medium, *Geophys. J. Int.* 186, pp.221-225, 2011.
- 6) 安井謙, 吉田一博, 前田寿朗, 川瀬博：地盤の内部減衰が拡散波動場理論に基づく微動 H/V スペクトルに与える影響について, 日本地震工学会・大会-2012 梗概集, pp.298-299, 2012.
- 7) 若松邦夫, 安井謙：短周期微動の水平上下スペクトルによるサイト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, 第471号, pp.61-70, 1995.
- 8) 趙伯明, 堀家正則, 竹内吉弘, 川瀬博：微動と地震動から推定された地盤特性の比較, 地震, 第2輯, 第50巻, pp.67-68, 1997.
- 9) 佐藤智美, 川瀬博, 松島信一：微動と S 波, P 波, coda から求められる地盤特性の違いとその理論的解釈, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.291-318, 1998.
- 10) 先名重樹, 翠川三郎：地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定, 日本地震工学会論文集, 第9巻, 第4号, pp.16-31, 2009.
- 11) 野口科子, 笹谷努：2003年宮城県沖スラブ内地震における表層地盤の非線形応答とその強震動への影響, 地震, 第2輯, 第63巻, pp.165-187, 2011.
- 12) Kobayashi, K., Uetake, T., Mashimo, M. and Kobayashi, H. : Estimation of deep underground velocity structure by inversion of spectral ratio of horizontal to vertical component in P-wave part of earthquake motion, *I2WCEE*, paper No.2658, 2000.
- 13) 阿部康彦, 小林喜久二, 大島豊, 真下貢, 小林啓美：地震動の上下動・水平動スペクトル振幅比の特性とその応用に関する研究—その3 上下動・水平動スペクトル振幅比に基づく深部地下構造の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- I, pp.403-404, 1991.
- 14) 安井謙, 西川隼人：地震波の主要動の H/V スペクトルに着目した逆解析手法について, 日本地震工学会大会-2008 梗概集, pp.214-215, 2008.
- 15) 安井謙, 西川隼人：地震波の主要動の H/V スペクトルの逆解析による地盤構造推定の試み, 日本地震学会秋季大会予稿集, B12-05, 2008.
- 16) 川瀬博, Sanchez-Sesma, F. J., 松島信一：地震動の H/V スペクトル比の新解釈とその適用事例, 日本地震学会秋季大会予稿集, D22-01, 2010.
- 17) Kawase, H., Sanchez-Sesma, F. J. and Matsushima, S. : The optimal use of horizontal-to-vertical spectral ratios of earthquake motions for velocity inversions based on diffruse-field theory for plane waves, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.101, No.5, pp.2001-2014, 2011.
- 18) 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, 第2輯, 第39巻, pp.579-593, 1986.
- 19) 西川隼人, 池本敏和, 宮島昌克: 関西地方の地震観測記録による自治体観測点を想定したサイト特性推定手法の検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.30, pp.118-127, 2009.
 - 20) 安井謙, 西川隼人: 福井県の KiK-net 観測地点の速度構造と減衰特性の検討, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, GO45-Fri-AM-2, pp.2299-2305, 2010.
 - 21) 安井謙, 西川隼人: 福井県の KiK-net 観測地点の速度構造と減衰特性の検討—その4 P波速度と減衰について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B-II, pp.131-132, 2012.
 - 22) 小嶋啓介, 山中浩明: 観測地震動に基づく福井平野の地下構造の推定, 応用地質, 第44巻, 第2号, pp.94-103, 2003.
 - 23) 川瀬博, 松尾秀典: K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性とS波速度構造との対応, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, pp.126-145, 2004.
 - 24) 大場政章, 野畑有秀, 圓幸史朗, 鈴木晴彦: 敦賀半島における水平アレー地震観測, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, GO2-Thu-PM-1, pp.193-200, 2010.
 - 25) 川瀬博: 強震記録のスペクトルインバージョンから評価される地盤増幅率, 第32回地盤震動シンポジウム(2004), 日本建築学会, pp.51-60, 2005.
 - 26) Kawase, H., Sanchez-Sesma, F. J. and Matsushima, S.: Application of the H/V spectral ratios for earthquake and microtremor ground motions, 4th IASPEI/ IAEE International Symposium, pp.1-11, 2011.
 - 27) 加藤研一, 武村雅之, 池浦友則, 高橋克也, 植竹富一: 上下動強震記録から推定される基盤入射波スペクトルの性質, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B-I, pp.361-362, 1994.
 - 28) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的
 - サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.97-104, 1998.
 - 29) 圓幸史朗, 野畑有秀, 大堀道広, 木下雅充: スペクトル・インバージョンによるサイト地盤増幅特性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B-II, pp.181-182, 2003.
 - 30) 友澤裕介, 池浦友則: 距離減衰関数を距離レンジにより分割したスペクトルインバージョン解析手法, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, GO4-Thu-PM-10, pp.419-425, 2010.
 - 31) 赤澤隆士, 入倉孝次郎, 羽田浩二: KiK-net 地中強震記録を利用した経験的地盤増幅率の推定, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, GO1-Thu-PM-5, pp.147-154, 2010.
 - 32) 引田智樹, 池浦友則, 笠松健太郎: 波形逆解析による深部地下構造モデルの推定, 日本地震工学会大会-2008 梗概集, pp.192-193, 2008.
 - 33) 山中浩明, 石田寛: 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 第468号, pp.9-17, 1995.
 - 34) 小林喜久二, 久家秀夫, 植竹富一, 真下貢, 小林啓美: 伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰の推定—その3 Q値の基本式に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B-I, pp.253-254, 1999.
 - 35) 小林喜久二, 阿部康彦, 植竹富一, 真下貢, 小林啓美: 地震動初期微動部の上下動・水平動スペクトル振幅比の逆解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B-I, pp.307-308, 1995.

(2012. 11. 9受付, 2013. 3. 7修正, 2013. 3. 12受理)

STUDY ON THE CALCULATION METHOD OF EARTHQUAKE H/V SPECTRUM RATIO USING SITE AMPLIFICATION FACTOR - ON EARTHQUAKE RECORDS IN FUKUI PREFECTURE -

Yuzuru YASUI, Hayato NISHIKAWA, Keisuke KOJIMA, Toshiro MAEDA,
Kazuki KOKETSU and Masakatsu MIYAJIMA

Authors had proposed the calculation formula on earthquake H/V spectrum represented as the product of the ratio of transfer function by the ratio of input at seismic bedrock surface. Recently a similar formula on earthquake H/V spectrum has been proposed on the basis of assumption of diffuse-wave field. This research examines the validity of the authors' revised method in which the site amplification factors are used instead of the transfer functions, on seismic observation records of the Fukui area, by being related with the formula based on the diffuse-wave field theory. As a result, it turned out that earthquake H/V spectrum calculated by the author's revised method agrees well with the observed ones by using the coefficient consisting of the velocity ratio of the seismic bedrock. Moreover, it was shown that site amplification factors might be nearly equal to calculated transfer functions through the identification of an earthquake H/V spectrum at a KiK-net site.