

地震動H/Vスペクトルを同定して 地盤構造を逆算する方法に関する基礎的考察 —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・前田 寿朗³・小嶋 啓介⁴
瀬瀬 一起⁵・宮島 昌克⁶

¹正会員 早稲田大学理工学研招聘研究員 (〒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

⁴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

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

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スペクトルは水平と上下の一次元の波動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計算式が誘導された。この計算式を用いれば、地震動H/Vスペクトルの観測値を一次元の成層地盤の伝達関数で同定することにより、S波とP波の速度構造と減衰特性を同時に逆算することが可能である。ところが、地震動H/Vスペクトルの同定の試みは始まったばかりで事例が少なく、同定結果の妥当性の吟味など基礎的な検討も十分に行われているとは言えない状況である。そこで、著者らがその地盤構造を検証したことがある福井地域のKiK-netの観測地点を対象として地震動H/Vスペクトルの同定計算を行ってその方法の適用性について考察することとした。考察は、地中に対する地表のスペクトル比の計算値と観測値との比較、および地震基盤に対する地表面のスペクトル比の計算値とサイト増幅特性との照応等によりおこなった。その結果、地震動H/Vスペクトルのみの同定で概して妥当な地盤構造を逆算できることが確認された。一方、散乱減衰を感知できない場合もあったことから地中に対する地表のスペクトル比を参照することも必要であるとも言える。また、サイト増幅特性との照応は一次元伝達関数近似の妥当性の検討に有効であること、さらには地表面近くのP波構造を検証することの重要性などが確認された。

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

1. はじめに

地震動のH/Vスペクトルについては中村ら¹⁾の研究をはじめとする多くの研究²⁻⁵⁾がある。なかでも小林ら⁵⁾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⁶⁾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地震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してその有用性について論じている。近年、川瀬ら⁷⁾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 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地震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理論的に誘導した。著者ら⁸⁾は、川瀬らの提案を契機に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⁹⁾で得られるサイト増幅特性（地盤増幅特性）^{例えば¹⁰⁾}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した。その結果、地震動 H/V スペクトルは提案手法による結果とよく一致しその妥当性が示されたが、これは間接的に川瀬らの計算式の妥当性を示すものでもあった。

川瀬らの計算式を用いれば、地震動H/Vスペクトルの観測値を一次元の成層地盤の伝達関数で同定することにより、S波とP波の速度構造と減衰特性を同時に逆算することが可能である。ところが、地震動H/Vスペクトルの同定の試みは始まったばかり¹¹⁾¹²⁾で事例が少なく、同定結果の妥当性の吟味など基礎的な検討も十分に行われているとは言えない状況である。そこで、著者らがその地盤構造を検証したことがある福井地域のKiK-netの観測地点を対象として地震動H/Vスペクトルの同定計算を行ってその方法の適用性について考察することとした。

考察は以下のような手順で行った。まず、地震動H/Vスペクトルのみを対象にして地盤構造を逆算する。続いて、地震動H/Vスペクトルと、水平と上下の地中に対する地表のスペクトル比の、計3つのスペクトル比を連結同定して地盤構造を逆算する。これら2つの同定・逆算結果を互いに比較して地震動H/Vスペクトルのみを同定・逆算する方法の適用性について検討する。また、逆算地盤構造をもとに計算した地震基盤に対する地表面の伝達関数と、著者らが先に求めているサイト増幅特性とを比較することにより一次元伝達関数近似の妥当性を考察する。

2. 地震動H/Vスペクトルの計算式

(1) 拡散波動場理論による計算式

川瀬ら⁷⁾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。

$$HVR^D_j(f) = \sqrt{\frac{2V_{p0}}{V_{s0}}} \frac{T_{Hj}(f)}{T_{Vj}(f)} \quad (1)$$

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H/Vスペクトル、 V_{p0} ：地震基盤のP波速度、 V_{s0} ：地震基盤のS波速度、 $T_{Hj}(f)$ ：地震基盤に水平地震波が入射したときのj地点の一次元水平（S波）伝達関数、 $T_{Vj}(f)$ ：同・上下（P波）伝達関数、 f ：振動数。

(2) 著者らの提案式

著者らは、原案提案式⁶⁾の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¹³⁾で置き換えた次式を提案した⁸⁾。

$$HVR^G_j(f) = S_{HV} \frac{G_{Hj}(f)}{G_{Vj}(f)} \quad (2)$$

ここに、 $HVR^G_j(f)$ ：サイト増幅特性を用いた場合のj地点の地震動H/Vスペクトル、 S_{HV} ：地震基盤面における上下動の振幅スペクトルに対する水平動の振幅スペクトルの比、 $G_{Hj}(f)$ ：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。

(2)式の S_{HV} は本来振動数の関数で、地震(i)や地点(j)によって異なる値を取るべきものであるが、近似的に次式が成立することが確認されている⁸⁾。

$$S_{HV} \cong \frac{\alpha_i}{\beta_i} \cong \sqrt{\frac{2V_{p0}}{V_{s0}}} \quad (3)$$

ここに、 $\alpha_i(f)$ ：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。

3. サイト増幅特性

同定・逆算結果は既存のサイト増幅特性⁸⁾と比較・照応される。ここで、念のためにそのスペクトルインバージョン解析方法の概要を述べておきたい。スペクトルインバージョン解析は、下式に基づいて水平動と上下動を独立¹⁴⁾¹⁵⁾に行い、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ている。

$$A_{Hij}(f) = \alpha_i(f) \cdot S_i(f) \cdot P_{Hij}(f) \cdot G_{Hj}(f) \quad (4a)$$

$$A_{Vij}(f) = \beta_i(f) \cdot S_i(f) \cdot P_{Vij}(f) \cdot G_{Vj}(f) \quad (4b)$$

ここに、 $A_{Hij}(f)$ ：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、 $S_i(f)$ ：i地震の震源スペクトル、 $P_{Hij}(f)$ ：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。

ここで、観測点は、K-NET：11地点、KiK-net：7地点およびFU-net¹⁶⁾（福井大学観測網）：9地点、の計27地

点である。また、対象とした地震は 21 個で、基準点は KiK-net の FKIH03 (和泉) としている。その他の解析条件については文献 8) を参照されたい。

4. 同定の方法

地盤構造の逆算は、地震動HVスペクトルのみを同定する場合（以後、単独同定）と、地中に対する地表面の水平動と上下動のスペクトル比を合わせて3つのスペクトル比を同時に連結させて同定する場合（以後、連結同定）について行う。

(1) 評価関数

同定の計算方法には遺伝的アルゴリズム (GA) ¹⁷⁾ を用いた。3つのスペクトル比を同時に連結させて同定する場合の評価関数を以下に示す。ここで、評価式は観測点にかかわらず同じ式になるので観測点に関する添え字 j を省いてある。これに伴い、以後の説明において、 $T_{Hj}(f)$, $T_{Vj}(f)$, $G_{Hj}(f)$ および $G_{Vj}(f)$ についても j を省いて $T_H(f)$, $T_V(f)$, $G_H(f)$ および $G_V(f)$ のように表すものとする。

$$E = c_1 E_1 + c_2 E_2 + c_3 E_3 \quad (5)$$

$$E_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [HV^{(O)}(f_i) - HV^{(C)}(f_i)]^2 \quad (6a)$$

$$E_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [B_H^{(O)}(f_i) - B_H^{(C)}(f_i)]^2 \quad (6b)$$

$$E_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [B_V^{(O)}(f_i) - B_V^{(C)}(f_i)]^2 \quad (6c)$$

上式中の記号の意味は以下のようである。即ち、 c_1 , c_2 , c_3 : 重み係数, $HV^{(O)}(f)$: 観測HVスペクトル, $HV^{(C)}(f)$: HVスペクトルの計算値, $B_H^{(O)}(f)$: 地中に対する地表面の水平動の観測スペクトル比, $B_H^{(C)}(f)$: 同・水平動の計算スペクトル比, $B_V^{(O)}(f)$: 地中に対する地表面の上下動の観測スペクトル比, $B_V^{(C)}(f)$: 同・上下動の計算スペクトル比, N : 振動数の数, f_i : i 番目の振動数。

ここに、単独同定のときは $(c_1, c_2, c_3) = (1, 0, 0)$ とし、3つのスペクトル比を同時に連結させる連結同定の場合は $(c_1, c_2, c_3) = (1, 1, 1)$ とするものとする。

なお、GA探索を行う際の計算条件は以下のように設定した。即ち、個体数を50、ビット数を8、世代数を200とし、交叉確率を0.7、突然変異確率を0.01とし、グレイコード、動的突然変異およびエリート選択を考慮した。また、試行回数は10回でその平均値を逆算値とし、振

表-1 深部地盤構造の諸元

層厚 (m)	EL (m)	ρ (ton/m ³)	V_s (m/s)	n_{is} (m/s)	V_p (m/s)	n_{ip} (m/s)
34	-10	2.21	1,450	24.2	3,700	120
86	-44	2.29	1,760	24.2	4,300	120
500	-130	2.39	2,200	24.2	4,600	120
770	-630	2.52	2,800	7.0	5,130	12.8
2600	-1,400	2.58	3,100	5.2	5,310	8.9
-	-4,000	2.75	3,600	6.0	6,270	10.5

動数範囲は0.5~20Hzとした。

(2) 深部地盤の取り扱い

HVスペクトルの計算は、PS検層モデルの最下面の下方に大場ら¹⁸⁾のモデル（深さ4 kmを地震基盤面と想定）を付加した一次元成層地盤モデルについて行う。深部地盤構造として大場らのモデルを用いたのは、このモデルが概ね福井県全域に適用可能¹⁹⁾とされている理由による。表-1に大場らのモデル（深部地盤構造）の諸元を示した。同表から、地震基盤の速度は、 V_{s0} が3,600m/s, V_{p0} が6,270m/sである。従って、 S_{HV} は次のような値となる。

$$S_{HV} \equiv \sqrt{2V_{p0}/V_{s0}} = 1.87 \quad (7)$$

因みに、この値は、主要動におけるP波入力の一必要性を指摘した久家ら²⁰⁾の推定値1~3の範囲内にある。

(3) 探索変数

探索する変数は地中観測点がある層以浅の地盤（浅部地盤）のS波速度 V_s とP波速度 V_p 、これらに対応する散乱減衰係数 $n_{ex}(x=s, p)$ と内部減衰係数 $n_{ix}(x=s, p)$ および地中観測点層から地震基盤までの地盤（深部地盤）の各層の層厚とした。なお、後述するように深部地盤の一部についてはその内部減衰係数も探索した。

ここで、減衰特性は(8)式に示すように散乱減衰と内部減衰の和で表される²¹⁾ものとした。また、地盤密度 ρ と V_s は(9)式に示すような関係²²⁾があるとされているが、地震基盤の密度は文献18)に従い2.75ton/m³としている。

$$h_x = h_{ex} + h_{ix}, (x=s, p) \quad (8a)$$

$$h_{ex} = \frac{n_{ex}}{V_x} \frac{1}{f}, (x=s, p) \quad (8b)$$

$$h_{ix} = \frac{n_{ix}}{V_x}, (x=s, p) \quad (8c)$$

$$\rho = 1.4 + 0.67\sqrt{V_s}, (V_s : \text{km/s}) \quad (9)$$

表-3 対象とした地震の諸元

No.	発生地域	地震発生日時				緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ (km)	M _{JMA}
1	福井県嶺南	2009年	11月	22日	23:52:29.0	35.492	135.908	12	3.7
2	若狭湾	2010年	1月	9日	11:12:25.3	35.737	135.982	11	3.6
3	奈良県	2010年	7月	21日	6:19:18.5	34.205	135.693	58	5.1
4	福井県嶺南	2010年	9月	5日	22:06:19.7	35.653	136.158	12	3.6
5	岐阜県飛騨地方	2011年	2月	27日	5:38:2.6	36.155	137.453	4	5.5
6	静岡県東部	2011年	3月	15日	22:31:46.3	35.308	138.713	14	6.4
7	滋賀県北部	2011年	4月	18日	17:16:29.3	35.390	136.288	38	3.6
8	滋賀県北部	2011年	5月	21日	15:25:38.2	35.373	135.888	15	3.4
9	駿河湾	2011年	8月	1日	23:58:11.0	34.707	138.548	23	6.2
10	福井県嶺北	2011年	11月	17日	19:09:47.3	35.933	136.337	8	3.7
11	福井県嶺北	2011年	11月	18日	3:57:56.2	35.933	136.337	7	4.8
12	福井県嶺北	2011年	11月	22日	2:38:51.9	35.930	136.340	8	3.6
13	岐阜県美濃東部	2011年	12月	14日	13:01:8.2	35.355	137.243	49	5.1
14	滋賀県北部	2011年	12月	19日	8:58:51.2	35.352	135.783	8	3.6
15	京都府南部	2012年	2月	21日	10:22:35.0	35.270	135.820	13	3.4
16	愛知県西部	2012年	5月	5日	18:56:52.8	35.188	137.173	45	4.3
17	京都府南部	2012年	10月	13日	11:21:2.7	35.263	135.658	13	3.8
18	京都府南部	2012年	11月	17日	17:12:59.9	35.265	135.488	7	3.9
19	石川県加賀地方	2013年	4月	4日	1:58:13.4	36.733	136.785	10	4.3
20	淡路島付近	2013年	4月	13日	5:33:17.7	34.418	134.828	10	6.0

表-2 内部減衰係数の探索範囲

(a) n_{is}

土質	経験値	探索範囲
表層土	10.5	0~16
砂礫	13.6	0~20
岩	24.2	0~36

(b) n_{ip}

地盤のP波速度 (m/s)	経験値	探索範囲
< 1700	60	0~90
> 1700	120	0~180

ここに、上式中の記号の意味は次のようである。即ち、 h_x ：減衰定数、 h_{ex} ：散乱減衰定数、 h_{ix} ：内部減衰定数、 V_x ：速度、であって、 $x=s$ はS波の、 $x=p$ はP波の定数あるいは速度であることを、それぞれ示す。

(4) 探索範囲

浅部地盤については以下のような要領で探索した。即ち、層厚はPS検層モデルの値で固定して速度を探索した。ただし、PS検層モデルの最下層（地中観測点がある層）の厚さはその1.5倍を限度に探索するものとした。速度の探索範囲はPS検層モデルの0.75~1.25倍としたが、逆転層をできるだけ避けるために探索層の速度の上限が次の層（下層）の目標値を超える場合は上限を強制的に次の層の目標値とした。また、減衰の探索は、まず内部減衰のみを考慮して行い、その結果が思わしくない場合

に散乱減衰を導入するものとした。内部減衰係数の探索範囲の上限は著者らが提案している経験値²³⁾²⁴⁾の1.5倍とした。また、散乱減衰係数は浅部地盤について考慮するものとし、S波減衰の場合で0.4Vsを、P波減衰で0.6Vpをそれぞれ上限とした。なお、減衰の探索範囲の下限は内部減衰、散乱減衰とも零としている。念のため、表-2に内部減衰係数の探索範囲をまとめて示した。

深部地盤については以下の要領で探索した。即ち、速度を固定して層厚を探索するものとし、その範囲は大場らのモデルの0.5~1.5倍とした。減衰は、Vsが2,800m/s、3,100m/sおよび3,600m/sの3層については固定し、その他の層については浅部地盤と同様に最適値を探索するものとした。ここに、上記の3層の減衰定数 h_{ix} はJ-SHIS²⁵⁾の深部物性値情報を参考にしてS波、P波ともそれぞれ、0.0025、0.00167および0.00167で固定した。このとき、これらの減衰定数に対応する内部減衰係数 n_{ix} の値は表-1に示したとおりである。

(5) 修正モデルについて

上記の範囲で探索した結果が思わしくない場合にはPS検層部分の速度の探索範囲を変えて再探索した。この探索範囲を変えたモデルを修正モデルと呼び、元のモデルは原型モデルと呼んで区別することとした。

5. 地震と観測点およびスペクトル比の解析条件

(1) 地震と観測点

表-3に対象とした地震の諸元を、図-1に対象とした

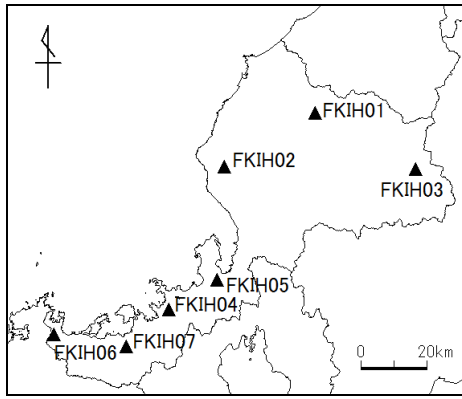


図-1 KiK-net観測点

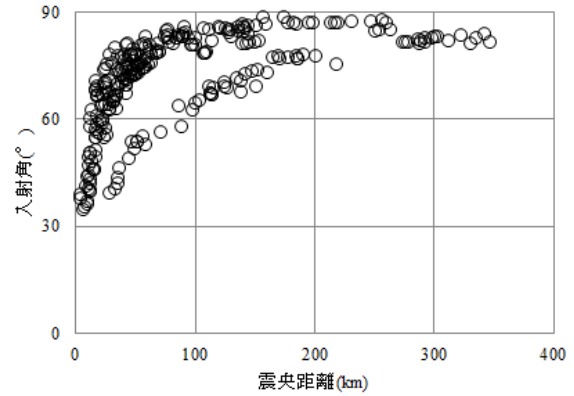


図-2 見掛けの入射角と震央距離

KiK-net観測点をそれぞれ示した．表-3には紙面の都合上、直近の20個の地震の諸元を示しているが、対象とした地震は中国地方から東海地方までの地域で発生した116個の地震であり、気象庁マグニチュードは3.1～7.4、震源深さは4～58 kmである．また、震源距離の範囲は8～351km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8割以上を占めている．

(2) 解析条件

地表面の観測記録を用いて計算するH/Vスペクトル $HV^{(O)}(f)$ は次の要領で計算した．水平動，上下動とも，S波到達から10秒間を切り出し，零データを付加した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，これを上下動のスペクトルで除したものを観測地震の数で平均してH/Vスペクトルとした．ここで，H/Vスペクトルを平均することにより斜め入射の効果がスタッキングアウトされる⁷⁸⁾可能性が示されていることを記しておくたい．

地中に対する地表の水平動のスペクトル比 $B_H^{(O)}(f)$ は次の要領で計算した．S波到達から10秒間のトランスバース成分を切り出し，零データを付加した81.92秒を計算の対象とし，上記と同様な条件で計算した地中のスペクトルに対する地表のスペクトル比を観測地震の数で平均して $B_H^{(O)}(f)$ とした．なお，地中観測記録の水平成分はHi-net²⁹⁾で公開されている設置方位情報に基づく方位補正を行った上で解析に用いている．

地中に対する地表の上下動のスペクトル比 $B_V^{(O)}(f)$ はPS時間が10秒以上の記録を抽出し，P波到達から10秒間の上下動成分を対象として， $B_H^{(O)}(f)$ と同様な計算をして求めた．

6. 同定結果とその考察

図-3～図-12にスペクトル比の同定結果を，表-4には同定結果に基づく地盤モデルの諸元を，それぞれ示した．ここに，図-3～図-12の各図は， $HV^C(f)$ と $HV^O(f)$ を比較したもの（簡単のため $HV^C(f)$ ， $HV^O(f)$ ともH/Vと表示，計算値[同定値]と観測値とを区別するときはその都度明示する）， $B_H^C(f)$ および $B_V^C(f)$ の同定結果をそれぞれに対応する観測値 $B_H^O(f)$ および $B_V^O(f)$ と比較したもの（同，それぞれH/HBおよびV/VB），同定で得られた地盤構造を用いて計算した $T_H(f)$ および $T_V(f)$ とこれらに対応する $G_H(f)$ および $G_V(f)$ とを比較したもの（同，それぞれH/H0およびV/V0，ただし， $G_H(f)$ あるいは $G_V(f)$ を，同定地盤モデルのH/H0あるいはV/V0と区別して指す場合は「サイト増幅特性」と記述する），の合計5つのグラフをセットにして示してある．ここに，計算結果にはバンド幅0.4HzのParzenウィンドウを施してある．これらの図の凡例で「単独」とあるのは単独同定した結果であることを示し，「連結」とあるのは連結同定した結果であることを示す．なお，H/Vの図には参考のため(2)式で計算した地震動 HV^R を「サイト増幅特性」として示してある．以下に，観測点ごとに同定結果とその考察を述べる．

(1) FKI01（永平寺）

図-3に原型モデルの同定結果を示したが，単独同定でH/Vの観測値と同定値が乖離しており，結果としてその他のスペクトル比の近似度もよくない．また，連結同定を行ってもその近似度は改良されていない．そこで，修正モデルによる同定を行った．修正モデルは以下のような考えのもとに作成した．

当観測点のPS検層モデルは，第1層（層厚4m）と第2層（層厚2m）のVsがそれぞれ150m/sと1,000m/sとなっているが，既往の検討²⁷⁾を参考にしてこれら2つの層をま

とめて V_s が130m/sで層厚が7m（1m付加）の単層とした。また、その層の V_p は、次に示す2,000m/s未満における経験式²⁸⁾により定めた。なお、他の修正対応モデルとして、表層の厚さを固定して表層3層の V_s を大幅に低減するモデルも扱われてれている²⁹⁾ことを付記しておく。

$$V_S = 0.194 V_P + 0.078, (V_S, V_P : km/s) \quad (10)$$

図-4に修正モデルの同定結果を示した。単独同定でも、 H/V だけでなく H/HB や V/VB 、および $H/H0$ と $V/V0$ についてもよい近似結果が得られている。さらに、連結同定を

行くと H/HB や V/VB の近似度が向上している。

以上の結果から、 H/V の同定度がよくない場合は速度構造を見直すことが必要であること（ H/V の同定度は速度構造の信頼性の指標になり得ること）、 H/V を単独同定した地盤モデルで H/HB や V/VB ひいては $H/H0$ および $V/V0$ を良好に近似できること（単独同定でS波とP波の速度と対応する減衰係数を推定できること）、連結同定を行うと H/HB や V/VB の近似度を向上させることができること、等が確認された。

ここで、既往の研究で水平動のサイト増幅特性と一次元の理論伝達関数 $H/H0$ との対応を検討した例¹³⁾はあるが、

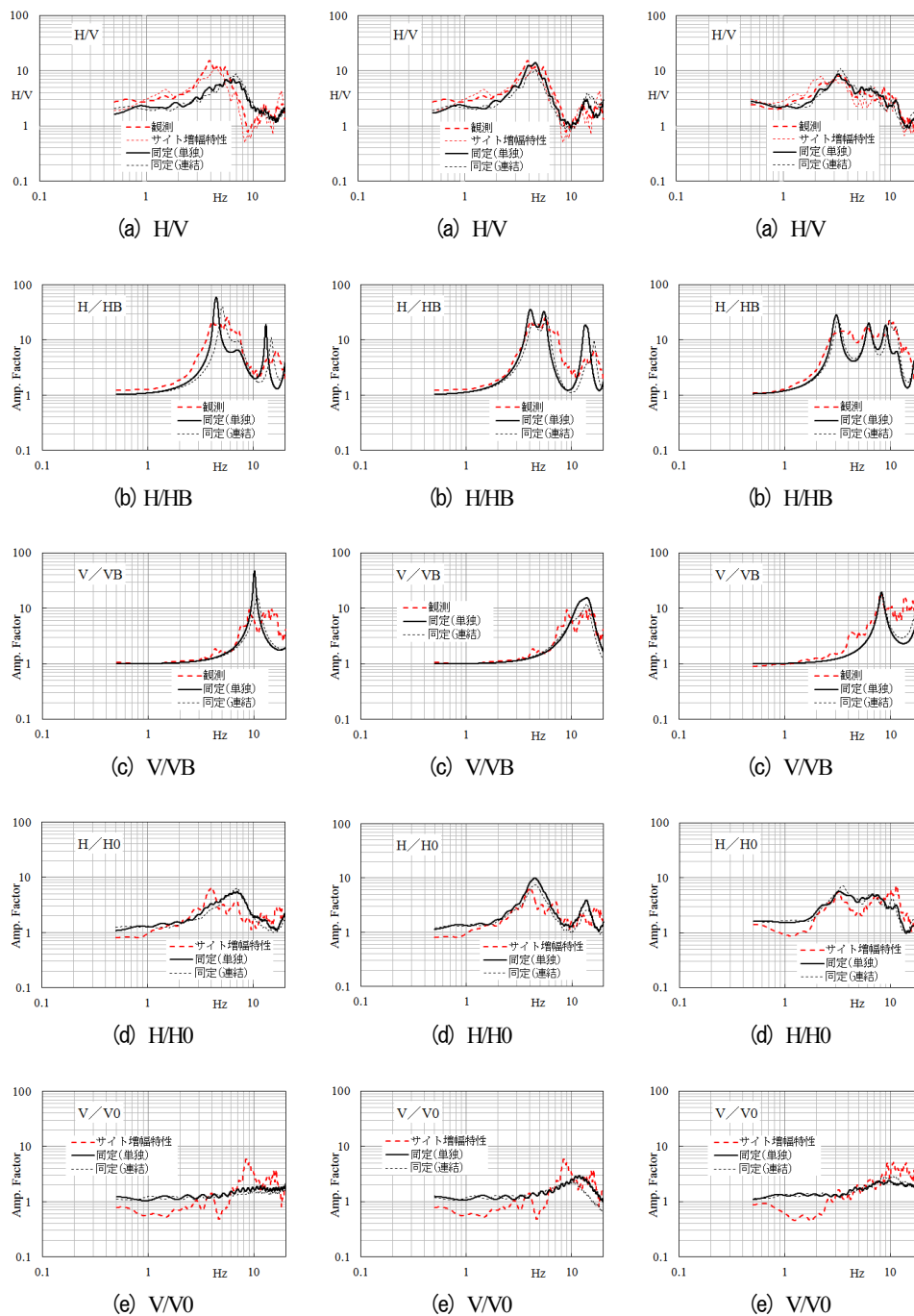


図-3 FKI01（永平寺）
原型モデル

図-4 FKI01（永平寺）
修正モデル

図-5 FKI02（織田）
原型モデル

上下動について検討した例は見当たらないことを付記しておきたい。

なお、表-4の(a)と(b)に、それぞれ原型モデルと修正モデルの連結同定結果に基づく地盤モデルの諸元を示してある。

(2) FKIHO2 (織田)

図-5に原型モデルの同定結果を示した。単独同定でも、H/VだけでなくH/HBやV/VBひいてはH/H0および

V/V0をほぼ近似できており、H/HBは連結同定により近似度がやや向上している。なお、表-4の(c)には連結同定結果に基づく地盤モデルの諸元を示してある。

(3) FKIHO3 (和泉)

図-6に原型モデルの同定結果を示した。H/Vは良好に近似できているにも拘わらずH/HBの同定値の振幅が過大である。そこで、散乱減衰を考慮したモデルで同定計算を行った。図-7に散乱減衰を考慮した場合の同定結果

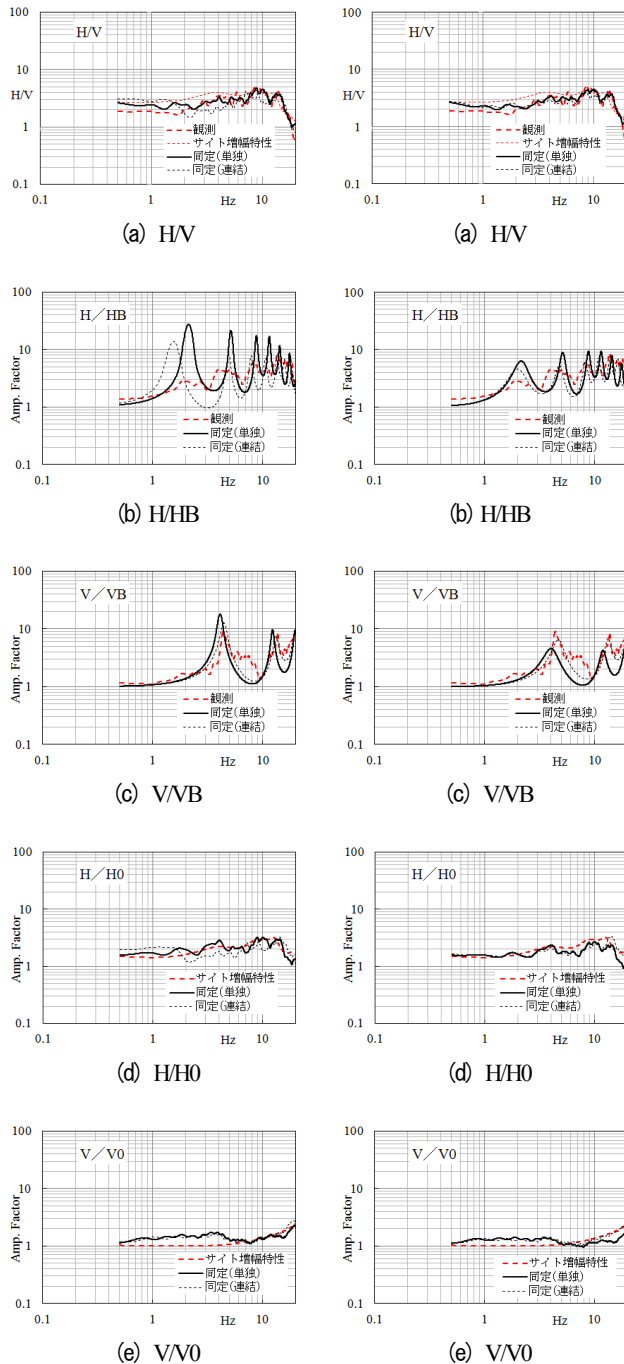


図-6 FKIHO3 (和泉)
原型モデル

図-7 FKIHO3 (和泉)
原型モデル (散乱減衰考慮)

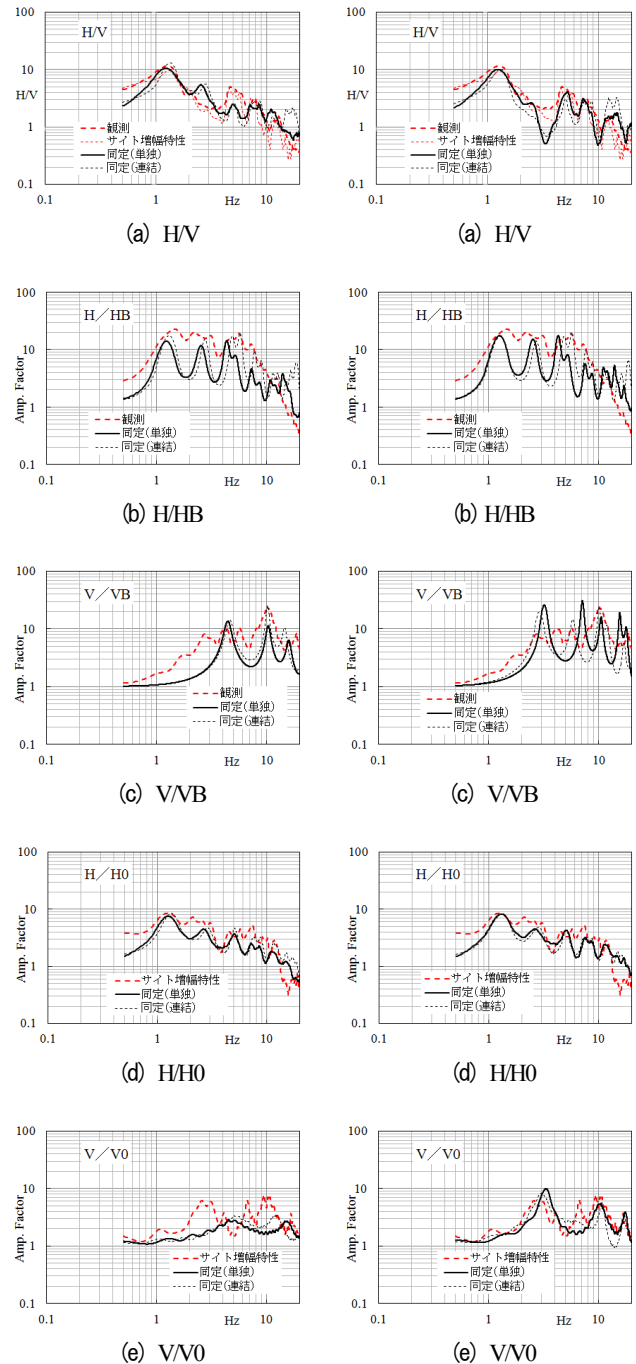


図-8 FKIHO4 (三方)
原型モデル

図-9 FKIHO4 (三方)
修正モデル

を示したが、 H/HB の近似度は大幅に改良されている。

図-6と図-7の考察から内部減衰だけを仮定した場合は、 H/V が良好に近似できてても他のスペクトル比が近似できていない（散乱減衰の必要性を看過する）場合があることを示しており注意を要する。なお、本観測点はスペクトルインバージョン解析⁸⁾の基準点でその解析においては散乱減衰を考慮したモデルを用いている。

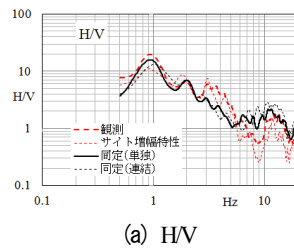
なお、表-4の(d)と(e)には、それぞれ散乱減衰を考慮しない場合と、考慮した場合の連結同定結果に基づく地

盤モデルの諸元を示してある。

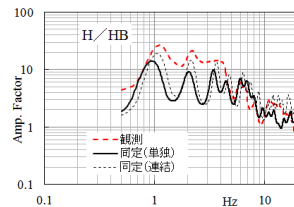
(4) FKI04（三方）

図-8に原型モデルの同定結果を示した。 H/V についてはほぼ妥当な近似結果が得られているものの、 $V/V0$ のサイト増幅特性と同定値との対応がよくない。連結同定でも改善されていないが、これは V/VB の観測値が明瞭なピークを有していないことが関係していると思われる。

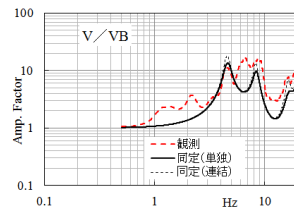
$V/V0$ の近似度を改善するために、浅部地盤や深部地



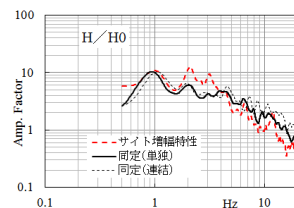
(a) H/V



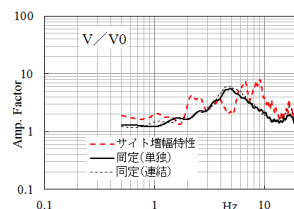
(b) H/HB



(c) V/VB

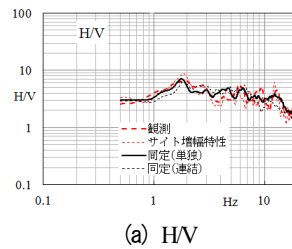


(d) $H/H0$

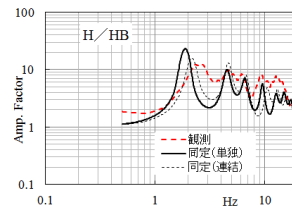


(e) $V/V0$

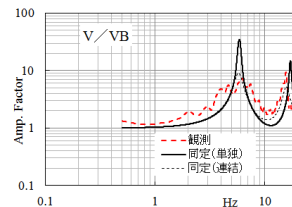
図-10 FKI05（敦賀）
原型モデル



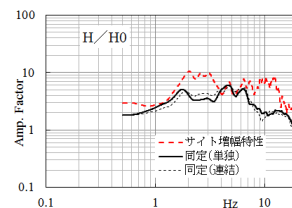
(a) H/V



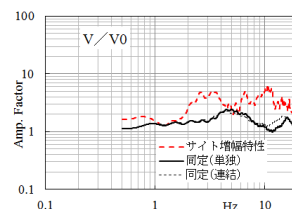
(b) H/HB



(c) V/VB

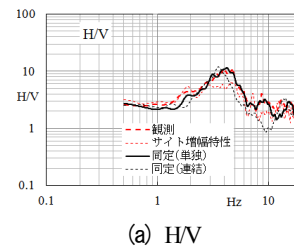


(d) $H/H0$

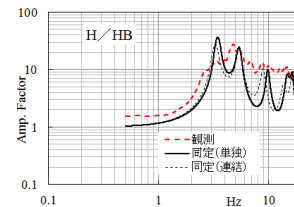


(e) $V/V0$

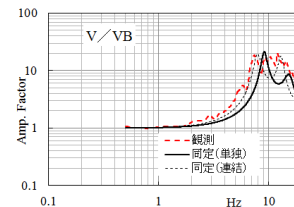
図-11 FKI06（高浜）
原型モデル



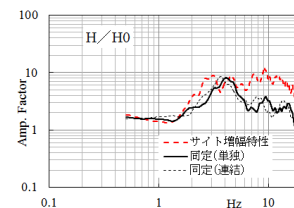
(a) H/V



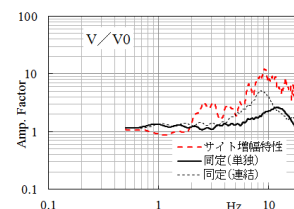
(b) H/HB



(c) V/VB



(d) $H/H0$



(e) $V/V0$

図-12 FKI07（小浜）
原型モデル

表-4 同定された地盤モデルの諸元 (連結同定結果)

(a) FKIHO1 (永平寺) 原型モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	4	4	1.63	113	-	14.5	493	-	49.8
2	2	6	2.04	919	-	12.9	2,710	-	69.8
3	14	20	2.23	1,559	-	30.0	4,159	-	178
4	44	64	2.28	1,711	-	35.0	4,159	-	178
5 *	36	100	2.41	2,279	-	35.4	4,159	-	178
6 *	9	109	2.41	2,279	-	35.4	4,159	-	178
7	760	869	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
8	2,903	3,772	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
9	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(b) FKIHO1 (永平寺) 修正モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	4	4	1.64	128	-	12.4	272	-	85.6
2	3	7	1.64	128	-	12.4	272	-	85.6
3	13	20	2.21	1,464	-	27.0	5,115	-	176
4	44	64	2.36	2,044	-	32.6	5,115	-	176
5 *	36	100	2.36	2,038	-	32.1	5,115	-	176
6 *	6	106	2.36	2,038	-	32.1	5,115	-	176
7	696	802	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
8	2,595	3,397	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
9	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(c) FKIHO2 (織田) 原型モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	2	2	1.65	142	-	8.5	404	-	33.1
2	2	4	1.65	142	-	8.5	833	-	47.4
3	12	16	1.77	298	-	18.3	1,258	-	26.3
4	30	46	1.97	731	-	18.3	1,927	-	119
5 *	54	100	2.39	2,170	-	21.3	3,926	-	117
6 *	10	110	2.39	2,170	-	21.3	3,926	-	117
7	528	638	2.39	2,200	-	21.2	4,600	-	69.8
8	801	1,439	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
9	2,452	3,891	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
10	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(d) FKIHO3 (和泉) 原型モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	6	6	1.81	381	-	5.9	650	-	20.9
2	6	12	2.02	848	-	9.1	1,160	-	45.3
3	26	38	2.13	1,190	-	22.4	3,540	-	159
4	42	80	2.21	1,480	-	25.5	3,540	-	159
5 *	120	200	2.14	1,220	-	34.5	3,560	-	175
6 *	32	232	2.14	1,220	-	34.5	3,560	-	175
7	97	329	2.29	1,760	-	14.7	4,300	-	98.1
8	469	798	2.39	2,200	-	13.9	4,600	-	77.9
9	741	1,539	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
10	2,350	3,889	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
11	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(e) FKIHO3 (和泉) 原型モデル (散乱減衰考慮)

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	6	6	1.80	350	59.4	3.5	644	181	10.6
2	6	12	2.01	838	111	8.9	1,137	376	34.0
3	26	38	2.06	959	132	12.5	3,580	1,395	95.8
4	42	80	2.11	1,119	273	11.3	3,580	1,395	95.8
5 *	120	200	2.24	1,578	475	12.7	3,597	1,207	109
6 *	8	208	2.24	1,578	475	12.7	3,597	1,207	109
7	81	289	2.29	1,760	-	19.2	4,300	-	94.5
8	492	781	2.39	2,200	-	14.5	4,600	-	120
9	759	1,540	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
10	2,597	4,137	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
11	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(f) FKIHO4 (三方) 原型モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	4	4	1.72	229	-	8.0	481	-	23.7
2	30	34	1.72	229	-	8.0	1,288	-	10.6
3	46	80	1.91	589	-	12.3	2,120	-	176
4	18	98	2.01	824	-	10.0	2,120	-	176
5 *	102	200	2.45	2,462	-	27.7	4,930	-	84.7
6 *	19	219	2.45	2,462	-	27.7	4,930	-	84.7
7	864	1,083	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
8	2,714	3,797	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
9	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(g) FKIHO4 (三方) 修正モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	4	4	1.72	228	-	8.6	472	-	4.7
2	30	34	1.72	228	-	8.6	472	-	4.7
3	46	80	1.90	558	-	10.8	1,675	-	157
4	18	98	2.00	814	-	10.7	1,675	-	157
5 *	102	200	2.46	2,496	-	20.2	4,398	-	35.7
6 *	24	224	2.46	2,496	-	20.2	4,398	-	35.7
7	673	897	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
8	2,789	3,686	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
9	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(h) FKIHO5 (敦賀) 原型モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	22	22	1.65	136	-	4.8	497	-	28.5
2	6	28	1.74	256	-	9.1	2,091	-	103
3	22	50	1.77	312	-	1.8	2,091	-	103
4	30	80	1.89	539	-	7.7	2,091	-	103
5 *	42	122	2.03	892	-	14.0	3,519	-	22.7
6 *	16	138	2.03	892	-	14.0	3,519	-	22.7
7	31	169	2.21	1,450	-	19.0	3,700	-	102
8	80	249	2.29	1,760	-	25.2	4,300	-	59.3
9	402	651	2.39	2,200	-	24.6	4,600	-	52.2
10	721	1,372	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
11	2,306	3,678	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
12	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(i) FKIHO6 (高浜) 原型モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	6	6	1.67	162	-	6.9	1,215	-	26.0
2	4	10	1.74	257	-	10.7	1,215	-	26.0
3	6	16	1.88	505	-	29.0	1,215	-	26.0
4	22	38	1.88	505	-	29.0	2,226	-	168
5	48	86	2.02	867	-	31.8	2,226	-	168
6 *	14	100	2.15	1,247	-	13.2	2,226	-	168
7 *	4	104	2.15	1,247	-	13.2	2,226	-	168
8	32	136	2.21	1,450	-	17.2	3,700	-	89.8
9	102	238	2.29	1,760	-	15.7	4,300	-	49.9
10	492	730	2.39	2,200	-	19.9	4,600	-	110
11	753	1,483	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
12	2,602	4,085	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
13	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

(j) FKIHO7 (小浜) 原型モデル

No.	層厚 (m)	深さ (m)	ρ (ton/m)	Vs (m/s)	nes (m/s)	nls (m/s)	Vp (m/s)	nep (m/s)	nlp (m/s)
1	10	10	1.69	182	-	11.3	424	-	48.2
2	14	24	1.88	503	-	12.2	1,197	-	43.5
3	14	38	2.07	994	-	24.7	2,685	-	104
4 *	66	104	2.29	1,771	-	24.2	4,279	-	47.7
5 *	21	125	2.29	1,771	-	24.2	4,279	-	47.7
6	495	620	2.39	2,200	-	11.5	4,600	-	132
7	696	1,316	2.52	2,800	-	7.0	5,130	-	12.8
8	2,425	3,741	2.58	3,100	-	5.2	5,310	-	8.9
9	-	-	2.75	3,600	-	6.0	6,270	-	10.5

* 地中地震観測点層, 地震計設置深さは上層下面

盤の構造を変えた多数のモデルについて検討を行ったが改善されなかった。そこで、修正モデルは以下のような考えのもとに作成した。

当観測点のPS検層モデルでは第1層（層厚4m）と第2層（層厚30m）の V_p がそれぞれ620m/sと1,700m/sとなっているが V_s はともに300m/sと小さめである。これに着目して、第1層、第2層の V_p の目標値を620m/sとしたものを修正モデルとした。図-9に修正モデルの同定結果を示したが、 V/V_0 の近似度が改良されている。

FKIH04の検討結果から次のような留意点があげられる。同定結果の信頼性を確認するためにはサイト増幅特性とも照応することが望ましい。また、地表面近くのP波の速度構造が地震基盤に対する地表面の上下の伝達関数に影響を与えることがあるので、P波速度構造の検証の実績を蓄積していく必要がある。

なお、表-4の(f)と(g)には、それぞれ原型モデルと修正モデルの連結同定結果に基づく地盤モデルの諸元を示してある。

(5) FKI05（敦賀）

図-10に原型モデルの同定結果を示したが、単独同定でも、 H/V だけでなく H/HB や V/VB については H/H_0 および V/V_0 をほぼ近似できており、連結同定により H/HB の近似度が改善されている。なお、表-4の(h)に連結同定結果に基づく地盤モデルの諸元を示してある。

(6) FKI06（高浜）

図-11に原型モデルの同定結果を示したが、 H/H_0 と V/V_0 の対応がよくない。この原因は、地震観測点近傍の地盤の不整形性の影響が無視できないため一次元成層地盤の仮定が成り立たないためではないかと推察された。そこで、不整形地盤に関する検討を行ったが、その内容については次章で述べることにする。なお、表-4の(i)に連結同定結果に基づく地盤モデルの諸元を示してある。

(7) FKI07（小浜）

図-12に原型モデルの同定結果を示した。単独同定でも、 H/V だけでなく他のスペクトル比についてもまずまずの結果が得られており、連結同定で V/VB と V/V_0 が改善されている。なお、表-4の(j)に連結同定結果に基づく地盤モデルの諸元を示してある。

7. 地盤の不整形性の影響について

FKIH06（高浜）観測点は福井県大飯郡高浜町高野にある青郷小学校高野分校の敷地の西北角に設置されている。図-13に、この観測点近傍の等高線図³⁰⁾をもとに作

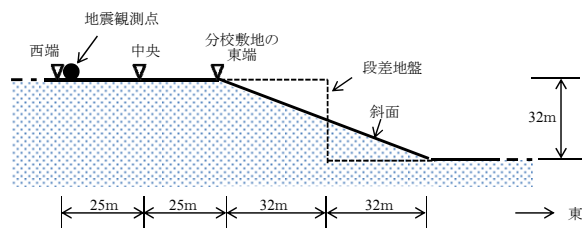


図-13 FKI06（高浜）観測地点の東西断面

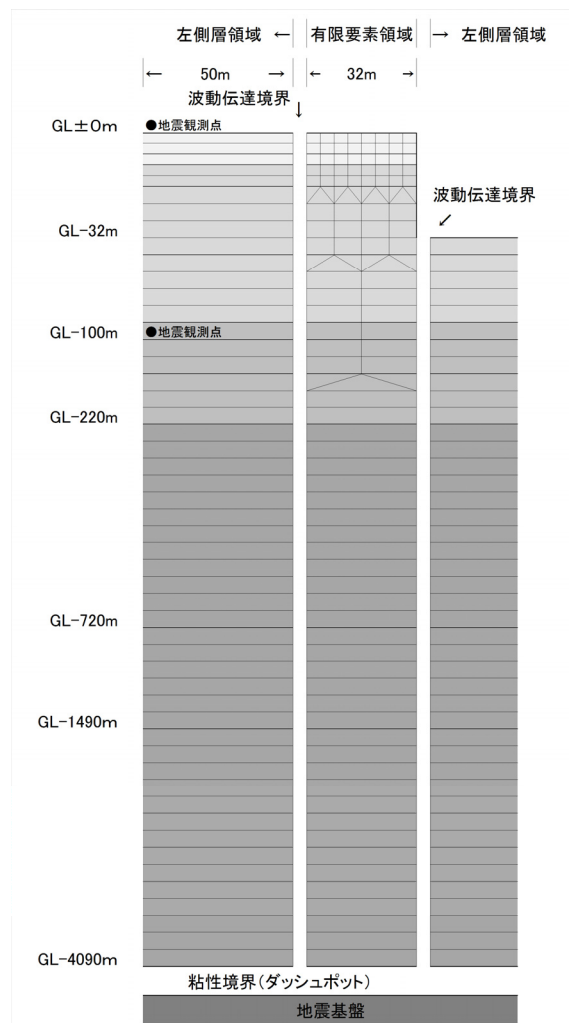


図-14 2次元 FEM モデル

表-5 2次元 FEM モデルの地盤定数

No.	層厚 (m)	深さ* (m)	ρ (ton/m ³)	V_s (m/s)	$\ln$ (%)	$\ln$ (m/s)	V_p (m/s)	$\ln$ (%)	$\ln$ (m/s)
1	6	6	1.70	200	5.25	10.5	1,600	3.75	60.0
2	4	10	1.78	320	3.28	10.5	1,600	3.75	60.0
3	6	16	1.92	600	4.03	24.2	1,600	3.75	60.0
4	22	38	1.92	600	4.03	24.2	2,050	5.85	120
5	48	86	1.96	700	3.46	24.2	2,050	5.85	120
6	14	100	2.09	1,050	2.30	24.2	2,050	5.85	120
7	34	134	2.21	1,450	1.67	24.2	3,700	3.24	120
8	86	220	2.29	1,760	1.38	24.2	4,300	2.79	120
9	500	720	2.39	2,200	1.10	24.2	4,600	2.61	120
10	770	1,490	2.52	2,800	0.25	7.0	5,130	0.25	12.8
11	2,600	4,090	2.58	3,100	0.17	5.2	5,310	0.17	8.9
12	-	-	2.75	3,600	0.17	6.0	6,270	0.17	10.5

* 左側層領域の地表面からの深さ

成した東西断面の模式図を示したが、敷地の東端から東に向かって約1/2の勾配で低くなっておりその高さは約32mとなっている。この地盤の基本的な震動特性を把握するために簡単のため図-13に示す段差地盤としてモデル化した。解析は、側面に波動伝達境界を、底面に粘性境界（ダッシュポット）を有する2次元有限要素法（2次元FEM）³¹⁾によった。解析モデルを図-14に示したが、有限要素領域の幅は32mで、地震基盤までの深さは4,090m、総要素数は158、総節点数は243である。密度、速度および内部減衰係数等の物性値を左側層領域の深さに対応させて表-5に示したが、これらの値はFKIH06の原型モデルの初期値である。また、層領域の層厚と有限要素のサイズは10Hzのときの波長の1/5以下になるように定めた。ここに、左側層領域の層数は91（底面の粘性

層を含む）で、右側は83であって、層厚の重み付き平均で計算した等価速度による基礎（地震基盤）固定の一次の固有振動数は左右両層とも水平で約0.4Hz、上下で約0.8Hzである。入力は、地震基盤にSV波（面内震動）あるいはP波が鉛直入射するものとし、図-14の地震観測点の応答を求めた。ここに、対象とする観測点は層領域にあるが、波動伝達境界（有限要素領域の左端境界）の応答と層領域の固有値解析情報等を用いてそれらの応答を計算することができる³²⁾。なお、比較のため左右の層数を同数の91とした場合（成層地盤）についても計算した。

ところで、不整形地盤の場合は、SV波入射のときに生じる上下動の影響やP波入射のときの水平動の影響を考慮する必要がある。これらの影響を考慮した地震基盤に対する伝達関数は次式に従って計算する。

$$H = \sqrt{u_s^2 + \left(u_p \times \frac{1}{S_{HV}}\right)^2} \quad (11a)$$

$$V = \sqrt{v_p^2 + (v_s \times S_{HV})^2} \quad (11b)$$

ここに、 H ：SV波入射に加えてP波入射の影響を考慮した地震基盤に対する水平伝達関数、 V ：P波入射に加えてSV波入射の影響を考慮した地震基盤に対する上下伝達関数、 u_s ：単位振幅のSV波が入射したときの水平応答、 v_p ：単位振幅のP波が入射したときの上下応答、 u_p ：単位振幅のP波が入射したときの水平応答、 v_s ：単位振幅のSV波が入射したときの上下応答、等であって、 S_{HV} は(7)式の値を用いる。

(11)式を図-14に示す地表面とGL-100mの地震観測点の応答に適用して得られた計算結果を図-15に示した。前章と同様に、 H/V 、 H/HB と V/VB （GL-100mに対する地表面の応答振幅比）および $H/H0$ と $V/V0$ （GL-4,090mの地震基盤露頭に対する地表面の応答振幅比）を示してある。なお、計算結果にはバンドパスフィルターを施していない。同図から段差地盤の計算値は観測値の特徴点のある程度再現しており、特に V/VB と $V/V0$ の対応関係がよい。これらの結果は当該地点の地震観測記録が地盤の不整形性の影響を受けている可能性を示唆している。

8. まとめ

拡散波場理論に基づく地震動H/Vスペクトルの計算式を用いてS波、P波およびこれらの減衰係数を逆算して、その逆算手法の適用性の検討を行った。同定計算は地震動H/Vスペクトル（H/V）だけを同定する場合（単独同定）と水平と上下の地中に対するスペクトル比（それぞ

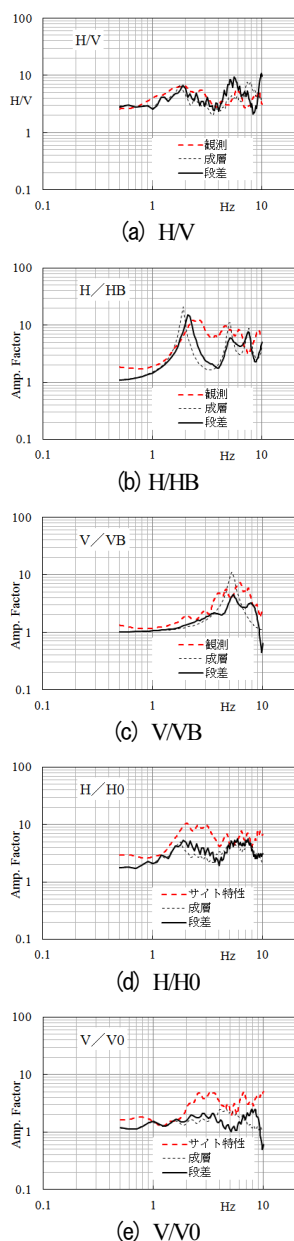


図-15 段差地盤の応答特性

れH/HBおよびV/VB)を合わせて3つのスペクトルを同時に連結して行う場合(連結同定)について行った。同定結果は上記の3つのスペクトル比のほかに地震基盤に対する地表面の水平と上下の一次元伝達関数(H/H0, V/V0)とサイト増幅特性とも比較した。検討の結果、得られた知見は以下のとおりである。

単独同定により連結同定とほぼ同等の同定結果が得られた。即ち、H/Vを単独同定することにより、H/HBとV/VBについても調和的な結果が得られた。さらに、単独同定地盤モデルに基づくH/H0とV/V0は、一部の観測点を除いて水平と上下のサイト増幅特性にほぼ対応した。これらは、拡散波場理論に基づく計算式の妥当性を示すもので、H/Vの単独同定により地震基盤から地表面に亘る地盤のS波とP波の速度と減衰係数を同時に推定できることを示している。

また、同定地盤モデルに基づくH/H0およびV/V0がサイト増幅特性とほぼ一致したことは、観測H/Vスペクトルとサイト増幅特性とも斜め入射の影響がスタッキングアウトされている可能性を示唆している。観測によるH/HBやV/VBは斜め入射の影響を含んでいると考えられるため、これらを同定するよりはH/Vを単独で同定する方が理にかなっていると言える。一方で、H/Vが十分な精度で近似できていても散乱減衰の必要性を看過する場合もあることから、同定結果の信頼性を確認するためにはH/HBやV/VBの観測値と同定値との照応も必要である。

同定地盤モデルのV/V0と上下動のサイト増幅特性との対応がよくない観測点で、両者の近似度を改善するためには表層地盤のP波の速度構造を修正する必要がある。今後、地表面近くのP波構造の確からしさの検証実績を蓄積することが必要である。また、同定地盤モデルのH/H0とV/V0ともサイト増幅特性との対応がよくない観測点について2次元FEMモデルを用いて検討した結果、表層地盤の不整形性が影響しているものと推察された。一次元成層地盤と仮定することの妥当性を検討するためにはサイト増幅特性との照応が有効であると言える。

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するとともに同研究所のJ-SHISの深部物性値情報およびHi-netの地震計設置方位を参考に致しました。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)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) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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 diffuse-field theory for plane waves, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.101, No.5, pp.2001-2014, 2011.
- 8) 安井謙, 西川隼人, 小嶋啓介, 前田寿朗, 額瀨一起, 宮島昌克: 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—, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol.69, No.4(地震工学論文集第32巻), pp. I_208-I_290, 2013.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 安井謙, 西川隼人, 前田寿朗, 井口道雄, 宮島昌克: 大加速度を記録した観測地点の地盤同定と非線形性状の考察, 東日本大震災2周年シンポジウム, 日本建築学会, pp.323-324, 2013.
- 12) 長嶋史明, 川瀬博, 松島信一, フランシスコJ.サンチェスマ, 早川崇, 佐藤智美, 大島光貴: 地震動H/Vスペクトル比を用いた地盤構造の推定と強震動予測, 日本地球惑星科学連合2013年大会, SSS33-03, 2013, <http://www2.jpgu.org/meeting/2013/session/PDF/S-SS33/SSS33-03.pdf> (2013年8月1日)。
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 18) 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.
 - 19) 田中清和, 野畑有秀, 大場政章: 地震波干渉法による敦賀半島周辺地域の深部地盤構造モデルの評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 B- II, pp.133-134, 2011.
 - 20) 久家英夫, 佐藤吉之, 小林喜久二, 徳永亮一: S 波主要動部上下成分の評価手法に関する検討, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, GO45-Fri-AM-4, pp.2313-2320, 2010.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) 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.
 - 25) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS, 深部物性値情報提供 API, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/api-dstruct-phys#response-success-json> (2013 年 8 月 5 日) .
 - 26) 防災科学技術研究所: Hi-net 高感度地震観測網, <http://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja> (2013 年 5 月 20 日)
 - 27) 安井謙, 野口竜也: K-NET 福井観測地点と KiK-net 永平寺観測地点の地盤速度構造の検討, 日本地震工学会大会-2004 梗概集, pp.328-329, 2005.
 - 28) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 功刀卓, 石井透, 早川譲, 森川信之, 小林京子, 大井昌弘, 先名重樹, 奥村直子: 琵琶湖西岸断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 281 号, p.36, 2005.
 - 29) 佐藤智美, 壇一男, 岡崎敦, 羽田浩二: 若狭湾周辺の地殻内地震の記録を用いたスペクトルインバージョン解析, 日本地震学会講演予稿集, 2007 年度秋季大会, p.286, 2007.
 - 30) 国土地理院: 電子国土 Web.NEXT, <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse4ie/index.html> (2013 年 8 月 5 日) .
 - 31) 石川理都子, 安井謙, 高野真一郎: 有限要素法による不整形地盤の斜め入射波解析, 日本建築学会・情報システム技術委員会, 第 12 回情報システム利用技術シンポジウム, pp.103-108, 1989.
 - 32) Waas,G. : Earth vibration effects and abatement for military facilities ; Report 3, Analysis method for footing vibrations through layered media, Technical report S-71-14, U.S.Army Engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavement Laboratory, 1972.

(2013.9.12受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON APPLICABILITY OF INVERSE CALCULATION METHOD OF SOIL STRUCTURE BASED ON EARTHQUAKE H/V SPECTRUM RATIO - ON EARTHQUAKE RECORDS IN FUKUI PREFECTURE -

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

By using the formula of the earthquake H/V spectrum ratio based on diffused wave field theory, it could be possible to presume simultaneously the S and P wave velocity structure and those damping coefficients. We examined the applicability of the method for observation record of KiK-net of the Fukui area. In examination, those calculated values and observed values were compared about the spectral ratio of surface ground to underground observation point, and the one to seismic bedrock. As a result, it was confirmed that an appropriate soil structure can be generally presumed by identification of only the earthquake H/V spectrum ratio. On the other hand, in order to presume scattering attenuation correctly, it turned out that it is desirable to make the identification connect with other spectral ratio. Moreover, the comparison with the site amplification factor was effective in the check of the validity of one-dimensional stratified soil layer approximation. Furthermore, it was shown that it is important to examine the P wave structure near the ground surface.