

微動記録を用いた地盤各層の S 波速度の同定と妥当性の検討

砂田尚彦¹・澤田 勉²・三神 厚³・辻原 治⁴

¹ 学生会員 徳島大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

² 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

³ 正会員 博(工) 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

⁴ 正会員 博(工) 和歌山工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒644-0023 御坊市名田町野島 77)

地表 1 点の微動記録を用いて地盤各層の S 波速度を同定する手法を提案する。とくに、微動記録の中からレイリー波が卓越する区間を抽出し、その水平／鉛直スペクトル振幅比(H/V スペクトル振幅比)をターゲットとして、地盤各層の S 波速度を同定した。数値解析では、同定した S 波速度と P S 検層によるそれを比較し、提案した手法の妥当性を検討した。

Key Words : Identification, S-wave velocity, Microtremors, H/V spectral ratio

1. はじめに

構造物の耐震安全性評価では、当該地点における局所的な地盤条件、とくに S 波速度を適切に把握することが重要である。地盤条件の推定には種々の方法が用いられるが、そのうち常時微動による方法は手軽に測定できるという利点があるため、多方面で盛んに利用されている。最近では、微動を用いて地盤の S 波速度構造を推定する研究もなされている¹⁾³⁾。この方法は、微動のアレー観測から得られるレイリー波の分散特性¹⁾²⁾、あるいはレイリー波の分散特性と H/V スペクトル比を併用して³⁾、地盤の S 波速度構造を推定するものである。しかし、この方法では微動のアレー観測が必要であり、解析自体もやや繁雑である。

本研究の目的は、地表 1 点の微動記録のみから地盤の S 波速度を同定しうる可能性を検討することである。具体的には、微動にレイリー波が多く含まれること⁵⁾⁶⁾を利用して、その H/V スペクトル振幅比⁴⁾とレイリー波の水平／鉛直振幅比⁷⁾との対応より地盤各層の S 波速度を同定する。とくに、微動記録の中でレイリー波が卓越する区間を抽出する方法を用い⁸⁾、その区間の H/V スペクトル振幅比から S 波速度の同定を行う手法を提案し、数値解析より手法の妥当性を検討した。

2. 微動観測と観測点の地盤構造

徳島市内の 2 地点のそれぞれについて、地表の 1 点のみで微動観測を行った。以下では、これらの地点を A 地点、B 地点と呼ぶ。観測は夜間に行ったが、これら 2 地点とも道路に近接(A 地点は国道から約 100m、B 地点は約 50m)していたため、主な振動源は走行車両によると考えられる。これら 2 地点では、標準貫入試験や P S 検層が実施され、詳細な地盤構造がわかっている。表-1 および表-2 に、A 地点および B 地点の地盤構造(層厚、密度、P 波速度および S 波速度)を示す。

表-1 A 地点の地盤構造

Layer No.	Thickness (m)	Density (t/m ³)	P-Velocity (m/sec)	S-Velocity (m/sec)
1	0.9	1.75	690	260
2	5.2	1.80	1060	110
3	2.8	1.85	1490	150
4	2.9	1.90	1490	150
5	3.1	1.95	1570	220
6	1.6	1.85	1640	290
7	17.4	2.00	1640	360
8	2.8	1.90	1640	410
9	-	2.00	1640	450

表-2 B地点の地盤構造

Layer No.	Thickness (m)	Density (t/m ³)	P-Velocity (m/sec)	S-Velocity (m/sec)
1	7.3	2.00	1370	120
2	8.8	1.90	1370	270
3	10.0	1.75	1650	170
4	11.0	1.90	2090	280
5	13.0	1.85	1500	320
6	14.9	1.93	1870	420
7	10.0	1.80	2590	320
8	10.1	1.80	2590	540
9	-	2.00	2600	600

観測に用いた計器は、パソコンを組み込んだ携帯用振動計およびサーボ型速度計であり、それらの総合特性は0.5Hz以上の振動数領域でほぼ平坦である。各地点での観測は1点のみで行い、計測時間は180秒、サンプリング周波数は100Hzとした。

3. レイリー波抽出のための指標

本研究では、微動記録の中でレイリー波が卓越する区間を抽出し、そのH/Vスペクトル振幅比を用いて地盤のS波速度を同定する。以下では、レイリー波の卓越区間の抽出に用いる指標⁸⁾について簡単に述べる。この方法は、レイリー波の水平動と鉛直動の間に90°の位相差があり、水平/鉛直スペクトル比が虚数になること⁷⁾を利用するものである。いま、水平面内の直交座標系(x, y)において、x軸がEW方向に、y軸がNS方向に一致する場合を考えると、x軸から角度 θ をなす任意方向の水平動 $x'(t)$ は次式より求められる。

$$x'(t) = x(t) \cos \theta + y(t) \sin \theta \quad (1)$$

ここで、 $x(t)$, $y(t)$ は微動のEW成分、NS成分である。このとき、水平成分 $x'(t)$ と鉛直成分 $z(t)$ のスペクトル比(H/Vスペクトル比)は次式で定義される。

$$R_{xz}(f) = F_x(f) / F_z(f) \quad (2)$$

ここで、 $R_{xz}(f)$ はH/Vスペクトル比、 $F_x(f)$ および $F_z(f)$ は、それぞれ水平成分 $x'(t)$ および鉛直成分 $z(t)$ の複素フーリエスペクトルである⁹⁾。

上式は次のように変形される。

$$R_{xz}(f) = S_{xz}(f) / S_z(f) \quad (3)$$

ここで、 $S_{xz}(f)$ は $x'(t)$ と $z(t)$ の相互パワースペクトル、 $S_z(f)$ は $z(t)$ のパワースペクトルであり、それぞれ次のように与えられる。

$$S_{xz}(f) = E\{F_x(f)F_z^*(f)\} / T \quad (4)$$

$$S_z(f) = E\{F_z(f)F_z^*(f)\} / T \quad (5)$$

ここで、 $*$ は共役複素数を、また $E\{\cdot\}$ は平滑化操作を

表し、 T は継続時間である。式(5)のパワースペクトル $S_z(f)$ は実数であるので、式(3)のH/Vスペクトル比の位相は、 $S_{xz}(f)$ すなわち水平動と鉛直動の相互パワースペクトルの位相と一致する。相互パワースペクトル $S_{xz}(f)$ は、その実数部(co-spectrum) $C_{xz}(f)$ と虚数部(quad-spectrum) $Q_{xz}(f)$ を用いて次のように表すことができる¹⁰⁾。

$$S_{xz}(f) = C_{xz}(f) + iQ_{xz}(f) \quad (6)$$

上式を極座標表示すると、次のようになる。

$$S_{xz}(f) = |S_{xz}(f)| \exp\{i\phi_{xz}(f)\} \quad (7)$$

$$|S_{xz}(f)| = [C_{xz}^2(f) + Q_{xz}^2(f)]^{1/2} \quad (8)$$

$$\phi_{xz}(f) = \tan^{-1}\{Q_{xz}(f)/C_{xz}(f)\} \quad (9)$$

ここで、 $|S_{xz}(f)|$ および $\phi_{xz}(f)$ は、それぞれ相互パワースペクトルの絶対値(振幅)と位相角である。 $\phi_{xz}(f)$ は、式(3)のH/Vスペクトル比の位相角であるが、これはまた水平動 $x'(t)$ と鉛直動 $z(t)$ の間の位相差になる(式(4)参照)。前述のように、レイリー波の水平動と鉛直動の間には90°の位相差があり、H/Vスペクトル比が虚数になることが知られている。このことより、微動の水平2成分を座標変換して作成したある方向の水平動 $x'(t)$ と鉛直動 $z(t)$ の相互パワースペクトル $S_{xz}(f)$ において、その虚数部が卓越する方向はレイリー波の進行方向となり、その方向の微動にはレイリー波が多く含まれると考えられる。そこで、相互パワースペクトル全体に占める虚数部の割合を表す指標として次の $IQ(\theta)$ を定義した。

$$IQ(\theta) = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |Q_{xz}(f)| df / \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |S_{xz}(f)| df \quad (10)$$

ここで、 θ は水平2成分の座標変換に用いる方位角、 $f_{\min}$ および $f_{\max}$ は対象とする振動数領域の下限および上限振動数である。

4. 同定解析

解析では、前述の180秒の微動記録に10秒ごとの開始点を設け、それぞれの開始点から2048個のデータを抽出し、16区間のサンプル波を作成した。これらのサンプル波をそれぞれ独立な記録とし、前述の $IQ(\theta)$ を計算し、それが最大になるときの値を求めた。 i 番目の記録の計算では、方位角 θ を0°~360°の間で1°ずつ変化させて $IQ(\theta)$ を求め、それらのうちで $IQ(\theta)$ が最大になる方向を探索し、そのときの最大値を $IQ_{\max}(i)$ とした。そして、各地点での微動記録から $IQ_{\max}(i)$ の大きい3つのサンプル波を選択し、同定解析に用いた。

S波速度の同定では次の評価基準を用いた。

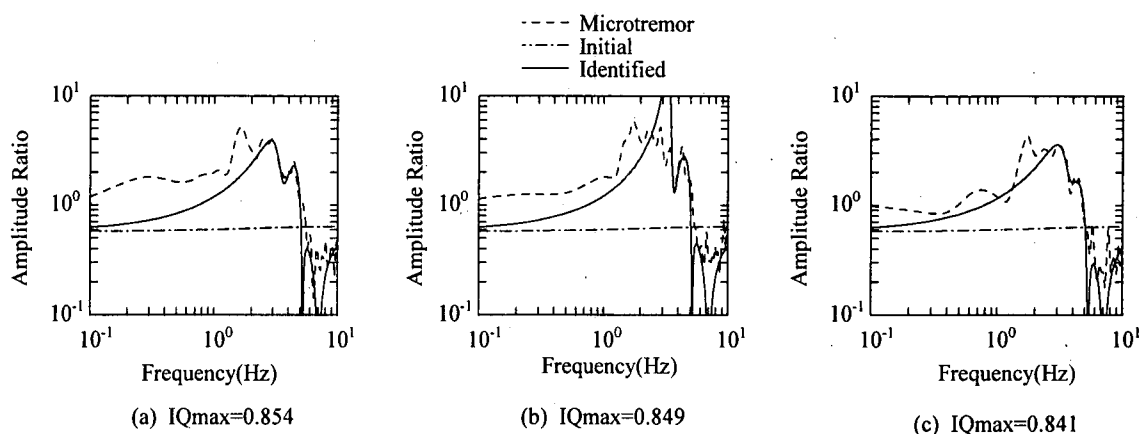


図-1 微動のH/Vスペクトル振幅比と同定値に対する水平/鉛直振幅比の比較 (A地点)

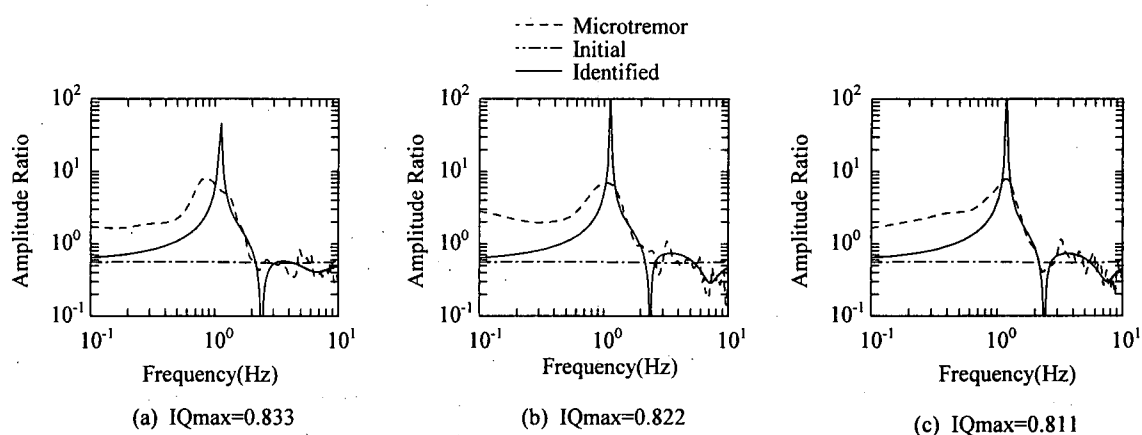


図-2 微動のH/Vスペクトル振幅比と同定値に対する水平/鉛直振幅比の比較 (B地点)

$$Se = \sum_j \left\{ \left| \tilde{R}_{xz}(f_j; \alpha) \right| - \left| R_{xz}(f_j) \right| \right\}^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

ここで、 $\left| \tilde{R}_{xz}(f_j; \alpha) \right|$ = レイリー波の水平/鉛直振幅比、 $\left| R_{xz}(f_j) \right|$ = 微動のH/Vスペクトル振幅比、 $f_j = j$ 番目の振動数、 α = 同定すべきパラメータ(地盤各層のS波速度)である。式(11)は、地盤構造から計算されるレイリー波の水平/鉛直振幅比と微動のH/Vスペクトル振幅比の残差平方和を最小とする基準である。地盤各層の層厚および密度は標準貫入試験等から得られるので既知とした。また、P波速度の影響は小さいので³⁾、これも既知とした。式(11)の振動数の上下限值としては、A地点で2Hz~15Hz、B地点で1Hz~15Hzを用いた。なお、レイリー波の水平/鉛直振幅比の計算ではHaskellの理論⁷⁾を用い、地盤の減衰を考慮しなかったため、水平/鉛直振幅比がある周波数近傍で過大になる。これに対し、微動のH/Vスペクトル振幅比は地盤中に存在する減衰作用のため有限となり、それほど大きくならない。このような理論値と実測値の差を解消するため、式(11)で対象とする周波数領域のうち、微動のH/Vスペクトル振幅比がその最大値の0.6倍を超える周波数域は対象外とした。

同定の際に用いるS波速度の初期値は全層一律とし、200m/s~600m/sの範囲で変化させて式(11)の問題を解き、それらの解のうち残差平方和が最小となる解を最終的に採用した。S波速度の同定では、深さ60m以浅の地盤を対象とし、A地点およびB地点の地盤をそれぞれ4層および5層地盤でモデル化した。以下、解析結果について述べる。図-1および図-2は、A地点およびB地点の微動のH/Vスペクトル振幅比と、同定値に対するレイリー波の水平/鉛直振幅比を比較したものである。図より、両者の対応は低周波数域を除くと比較的よいことがわかる。図-3は、S波速度の深さ方向の分布を示したもので、破線はPS検層を、一点鎖線は初期値を、また実線は同定値を表す。図より、深層部を除くと、同定値はPS検層値と比較的よく一致することがわかる。

5. おわりに

地表1点の微動記録のみから地盤のS波速度を同定する手法を提案し、その妥当性を検討した。とくに、微動記録の中からレイリー波が卓越する区間を抽出し、それ

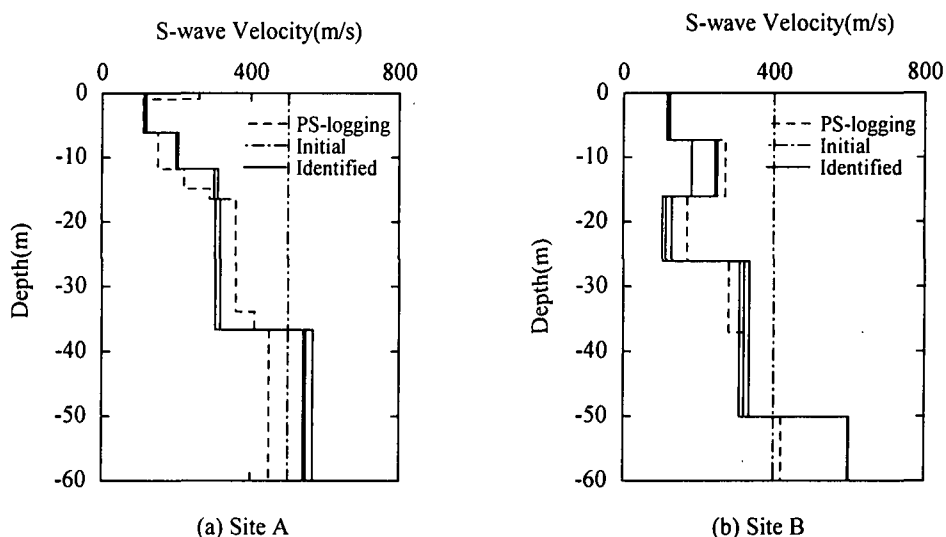


図-3 S波速度の同定結果とPS検層の比較

を用いて地盤各層のS波速度を同定した。数値解析より、本手法による同定値は深層部を除くとPS検層値とほぼ対応することを示した。

参考文献

- 1) Horike, M.: Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized area, J. Phys. Earth, 33, pp.59-96, 1985.
- 2) Tokimatsu, K., Shinozawa, K. and Kuwayama, S.: Use of short-period microtremors for Vs profiling, J. of Geotech. Eng. Vol.118, No.10, ASCE, pp.1544-1558, 1992.
- 3) 新井洋：微動の分散特性とH/Vスペクトルの逆解析によるS波速度構造の推定, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.613-618, 1998.
- 4) 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講演集, pp.265-270, 1986.
- 5) 時松孝次, 宮寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, 第439号, pp.81-87, 1992.
- 6) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧：短周期微動の水平動と鉛直動のスペクトル比を用いる地盤周期推定法の改良と適用, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.251-260, 1994.
- 7) Haskell, N.A.: The dispersion of surface waves on multilayered media, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 8) 澤田勉, 不可三広和, 三神厚, 辻原治, 砂田尚彦：微動記録に含まれるレイリー波のH/Vスペクトル比の位相特性について, JCOSSAR 2000 論文集, pp.261-268, 2000.
- 9) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp.93-109, 1994.
- 10) 星谷勝：確率論手法による振動解析, 鹿島出版会, pp.22-28, 1974.