分散曲線とH/Vスペクトルによる2層地盤モデルの表層S波速度と表層厚の導出手法

EVALUATION OF THICKNESS AND SURFACE LAYER S-WAVE VELOCITY OF THE TWO LAYERED SUBSURFACE MODEL BY DISPERSION CURVE AND H/V SPECTRUM

古家萌子 ——— * 1 前田寿朗 ——— * 2

Moeko KOIE ——— * 1 Toshiro MAEDA ——— * 2

キーワード：
微動アレー観測, 地盤構造, 分散曲線, H/V スペクトル

Keywords:
Microtremor array observation, Sub-surface structure, Dispersion curve, H/V spectrum

Subsurface structure model is constructed by simulating dispersion curves usually by GA with reference data such as PS logging. When the reference data is not available or micro-tremor array radius is inadequate for the wavelength of interest, method to infer a simpler subsurface model such as a two-layered model is desirable. We propose the method to deduce surface layer thickness and shear wave velocity of the model by resorting to quarter wavelength theory and the concept of wavelength-thickness ratio. The method itself and the wavelength-thickness ratio is tested by PS logging data at K-NET and KiK-net observation sites.

1. はじめに

微動アレー観測による成層地盤モデルの推定において, 地盤調査結果を参考として, 分散曲線にGA等の逆解析を用いることが広く行われている。参考となる地盤調査結果のない場合は, 微動測定結果のみから少数のパラメータを評価するのが現実的であり, 極小円形アレー観測による深部に達しない波長の範囲で評価される分散曲線に対しては, 工学的基盤上の表層を表現する2層構造を簡便に推定する手法が有効と考えられる。

紺野・片岡¹⁾は, 波長35mあるいは40mのレイリー波位相速度より, 深さ30mまでの平均S波速度AVS30を推定し, 大橋ほか²⁾は表層厚に5m~10mを加えた波長におけるレイリー波位相速度が, 表層5m~30mの範囲の平均S波速度にほぼ一致することを示した。西守ほか³⁾は, これらの関係を用いて観測分散曲線から平均S波速度を推定し, 速度検層による平均S波速度に対応した結果を得た。長ほか⁴⁾は, 分散曲線から簡便な変換式によりS波速度構造のイメージを得る簡易プロファイリング法(SP法)と, 層境界面を推定するためのH/Vスペクトルの深度分布を併用して, 2層および3層のS波速度構造を推定する方法を提案している。

本研究では, 上述の知見を参考に, 横軸を波長とした位相速度分散曲線とH/Vスペクトルを利用して, 2層地盤モデル表層の平均S波速度および層厚を推定する方法を提案する。具体的には, 波長の表層厚に対する比を波長層厚比と定義し, 位相速度とS波速度の関係を仮定して, 1/4波長則を組み合わせることにより表層S波速度と層厚を導出する。^{5), 6)}

本報告では, 種々の地盤構造に対する適用性を評価するために, 比較的硬質で深部の情報が示されているKiK-net観測点, ならびに市街地相当の地盤構造が主であるK-NET観測点の地盤データを使用

して, レイリー波基本モードの分散曲線に対する検討を行った。また, 既報とは異なり反復計算を行わない方法と, H/Vスペクトル卓越振動数を用いた波長層厚比の推定式を示した。

2. 波長層厚比評価方法

図1にここで用いるH/Vスペクトルと分散曲線の関係を示す。平均S波速度を与える表面波の波長 λ を層厚 H の a 倍とし, a を(1)式により波長層厚比と定義する。表層のS波卓越振動数をH/Vスペクトルの卓越振動数 f_{HV} で近似し, レイリー波位相速度 V_r が表層のS波速度 V_s の b 倍と仮定する。レイリー波位相速度は対応する波長 λ と振動数 f_{tr} の積であり, (1)式を用いて1/4波長則は(2)式で表される。

$$\lambda = aH \quad (1)$$

$$f_{HV} = \frac{V_s}{4H} = \frac{V_r}{4H \cdot b} = \frac{\lambda \cdot f_{tr}}{4H \cdot b} = \frac{a}{4b} f_{tr} \quad (2)$$

図1 H/Vスペクトルと横軸波長の分散曲線の関係

¹⁾ 早稲田大学大学院建築学専攻修士課程 元大学院生 / 現 ㈱小堀鐸二研究所 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

²⁾ 早稲田大学理工学術院 教授・博士 (工学)

¹⁾ Former Graduate Student, Dept. of Architecture, Waseda Univ. / Kobori Research Complex Inc.

²⁾ Dept. of Architecture, Waseda Univ., Dr. Eng.

平均 S 波速度を与える振動数 f_{tr} は f_{HV} から(3)式で評価される。

$$\frac{f_{tr}}{f_{HV}} = \frac{4b}{a}$$

a および b を適切に設定できれば、 f_{HV} から表面波の振動数 f_{tr} を求め、分散曲線から V_s を読み取り、 b を用いて V_s を、 f_{HV} を用いて H を評価することができる。

3. 波長層厚比の検討

3.1 理論分散曲線を用いた検討方法

PS 検層結果に基づいて理論的に計算した地盤モデルのレイリー波基本モードの分散曲線および H/V スペクトルを対象とし、地盤モデルから評価される表層厚 H_m および表層 S 波速度 V_{sm} と提案手法による結果との比較により、適切となる波長層厚比について検討した。具体的には、H/V スペクトルの卓越振動と地盤モデルの各層下部境界面から地表の S 波卓越振動数を比較して、最も近い下部境界面深度を地盤モデルの表層厚 H_m とし、その部分を通過する S 波の伝播時間に相当する S 波速度を表層 S 波速度 V_{sm} と設定した。

検討には、山間部中心に深部まで地盤構造の公開されている KiK-net 観測点 637 点、ならびに市街地中心に展開されている K-NET 観測点 1007 点を用いた。既往研究結果⁶⁾および予備検討結果に従って、波長層厚比の検討範囲を 3 以下とした。レイリー波位相速度と S 波速度の比を表す値であるパラメータ b は、半無限体を仮定したときポアソン比 0.25 に対応する 0.92 を使用し、分散曲線の対象振動数範囲を 1~30Hz とした。

波長層厚比の有効性を示す指標を(4)式で定義した。すなわち、提案手法による表層厚 H と地盤モデルの表層厚 H_m の差の H_m に対する比を層厚誤差 E_H 、 V_s と V_{sm} の差の V_{sm} に対する比を速度誤差 E_V 、それらの絶対値の平均を総合誤差 E とした。それぞれの誤差絶対値の 20%を判定基準に用いた。

$$E_H = (H_m - H)/H_m$$

$$E_V = (V_{sm} - V_s)/V_{sm}$$

$$E = (|E_H| + |E_V|)/2$$

3.2 K-NET 観測点を用いた検討

波長層厚比を 0.1~3 の範囲で設定し、各観測点で最良の総合誤差を示した波長層厚比を観測点波長層厚比とする。総合誤差判定基準内の観測点波長層厚比分布を図 2 に示す。図 2 より、K-NET では観測点波長層厚比 1.5 となる観測点数が最大であった。

表 1 に、各誤差の絶対値平均および判定基準内の観測点数の割合である適合率を示す。全観測点の総合誤差の平均は 0.3 程度であり、全体の 6 割程度が判定基準内であり、層厚誤差に対して速度誤差が小さい傾向が認められる。卓越振動数 f_{HV} が 10Hz 以下の観測点のみを対象とすると、79%が総合誤差判定基準内となり、さらにピーク値 p_{HV} に 1 以上の条件をつけると 96%が基準内となる。これらの制約条件は、速度コントラストのある工学的基盤が存在しない観測点を除外する試みに相当する。

つぎに、波長層厚比を一定として全点に提案手法を適用したときの、判定基準内の件数（1 観測点について複数を許容）の分布を図 3 に示す。総合誤差 E を棒グラフで、層厚誤差 E_H および速度誤差 E_V それぞれを折れ線グラフで示す。図 3 より、K-NET 観測点では波長層厚比

1.2~1.3 に対して S 波速度が精度良く得られ、1.5 に対して表層厚が精度良く得られる傾向にあり、1.5 における総合誤差判定基準内の件数は 355 件(35.25%)である。

表 1 K-NET 観測点における誤差判定結果

	E_H		E_V		E	
	絶対値	適合率	絶対値	適合率	平均	適合率
	平均	(%)	平均	(%)		(%)
全点	0.386	48.4	0.251	71.7	0.318	60.4
$f_{HV} \leq 10$	0.278	60.7	0.066	96.5	0.172	79.0
$p_{HV} > 1$	0.293	57.0	0.246	71.8	0.269	70.0
$f_{HV} \leq 10$ & $p_{HV} > 1$	0.138	74.8	0.042	99.6	0.090	96.0

図 2 誤差判定基準内の観測点波長層厚比分布 (K-NET)

図 3 波長層厚比に対する判定基準内件数の分布 (K-NET)

3.3 KiK-net 観測点を用いた検討

KiK-net に関する、同様な総合誤差判定基準内の観測点波長層厚比分布を図 4 に示す。図 4 より、KiK-net では観測点波長層厚比 1.4 となる観測点数が最大であった。

表 1 と同様な誤差の平均値および適合率を表 2 に示す。総合誤差の平均は 0.25 程度であり、全体の 6 割強が判定基準内と判断され、K-NET よりもやや良好な結果となっている。また、K-NET 同様に、層厚誤差に対して速度誤差が小さい傾向が認められる。H/V スペクトルの卓越振動数 f_{HV} が 10Hz 以下の観測点のみを対象とすると、その 82%が総合誤差判定基準内となるのに対し、ピーク値 p_{HV} が 1 以上の条件を加えても適合率はほぼ変わらず、KiK-net 観測点ではピーク値に関する条件付加が影響しないことが示されている。

図 5 に、KiK-net 観測点 637 点のすべてを対象に、図 3 と同様に波長層厚比を一定として提案手法を適用したときの判定基準内の件数の分布を示す。図 5 より、K-NET 同様に波長層厚比 1.2 に対して S 波速度が精度良く得られ、1.5 に対して表層厚が精度良く得られる傾向

にある。波長層厚比 1.3 について、総合誤差判定基準内は 200 件 (31.4%) である。

表 2 KiK-net 観測点におけるにおける誤差判定結果

	E_H		E_V		E	
	絶対値 平均	適合率 (%)	絶対値 平均	適合率 (%)	平均	適合率 (%)
全点	0.334	49.5	0.180	76.9	0.257	66.7
$f_{HV} \leq 10$	0.234	60.0	0.069	92.4	0.151	82.3
$p_{HV} > 1$	0.324	50.9	0.177	76.9	0.251	68.1
$f_{HV} \leq 10$ & $p_{HV} > 1$	0.225	61.7	0.066	92.7	0.145	83.9

図 4 誤差判定基準内の観測点波長層厚比分布 (KiK-net)

図 5 波長層厚比に対する判定基準内件数の分布 (KiK-net)

4. 波長層厚比と H/V スペクトル卓越振動数の関係

波長層厚比を一定として総合誤差判定内となった場合について、H/V スペクトル卓越振動数 f_{HV} の分布を検討した。図 6 に、 f_{HV} に対して総合誤差判定基準内の件数が最多であった波長層厚比 a を、K-NET および KiK-net について示す。 f_{HV} に対して複数の a が対象となる場合は平均を用いた。これらの図より、 a と f_{HV} の間には正の相関関係が想定される。また、 f_{HV} を 10Hz 以下としたときの回帰直線、ならびに判定基準内件数で重みをつけた回帰直線も併せて示した。KiK-net、K-NET のどちらにおいても近似直線の一次係数は 0.06～0.09、切片は 0.6～1.1 程度となった。

そこで、一次係数を 0.01 刻みで 0.03～0.12、切片を 0.1 刻みで 0.4～1.3 と設定して卓越振動数に対する波長層厚比を定め、それらの組合せごとに総合誤差判定の適合率および総合誤差の平均を求めた。K-NET および KiK-net の結果を図 7 および図 8 に、適合率の平均を図 9 に示す。図 7 および図 9 の色の薄い部分が高い適合率に、図 8 の色の濃い部分が小さな総合誤差平均に対応する。それぞれの図の

パターンは、K-NET および KiK-net で類似しており、同様な係数の適用性が推定される。判定基準内適合率は、K-NET で $a = 0.09f_{HV} + 0.6$ 、KiK-net で $a = 0.06f_{HV} + 1.1$ で最大となった。図 9 の適合率の K-NET と KiK-net の平均について最良の結果は $a = 0.07f_{HV} + 0.9$ で得られた。

図 6 H/V スペクトル卓越振動数と波長層厚比分布

図 7 波長層厚比の関係式回帰係数と適合率

図 8 波長層厚比の関係式回帰係数と総合誤差平均

図 9 波長層厚比の関係式回帰係数と平均適合率

この関係式を用いて波長層厚比を設定し、K-NET および KiK-net について評価した総合誤差 E の平均値および適合率を表3に示す。表3より、 $p_{HV} > 1$ かつ $f_{HV} \leq 10$ の条件を付加すると、K-NET で70%, KiK-net で44%程度の観測点で総合誤差判定基準内となる。表1および表2では各観測点について最良の評価を与える波長層厚比による結果であり、卓越振動数の関数で波長層厚比を与えた表3の結果の適合率はそれらを下回るが類似した傾向を示している。

表3 波長層厚比 $a = 0.07f_{HV} + 0.9$ による誤差判定結果

	K-NET		KiK-net	
	E 平均	E 適合率(%)	E 平均	E 適合率(%)
全体	0.451	41.5	0.443	35.8
$f_{HV} \leq 10$ & $p_{HV} > 1$	0.174	69.9	0.353	43.9

5. 表層パラメータ導出例

$a = 0.07f_{HV} + 0.9$ に従って提案手法を適用し、小さな総合誤差が評価された観測点の表層パラメータ導出例を図10に示す。同図には、推定2層地盤モデルとPS検層モデルの、基本モード分散曲線およびH/Vスペクトルも示す。それらの計算において、基盤S波速度にPS検層結果を準用したが、その推定方法は今後の検討課題である。表4に、計算に使用した卓越振動数および波長層厚比、ならびに各種誤差評価値を示す。本手法により、層境界のS波速度コントラストの強い地盤構造に対して、比較的良好な分散曲線およびH/Vスペクトルの模擬が可能であることが示されている。したがって、 $p_{HV} > 1$ かつ $f_{HV} \leq 10$ で与えたピーク値と振動数範囲の制約が、NIG002のような地盤構造を適用対象から除外するために重要である。ただし、本論文で提示した制約条件と誤差判定基準には任意性があるため、測定結果と推定地盤モデルの分散曲線の比較を適宜行うことが望まれる。

表4 表層パラメータ導出結果例

		f_{HV} (Hz)	a	E_H 絶対値	E_V 絶対値	E
K-NET	NGS014	2.31	1.06	0.003	0.017	0.010
	NIG002	3.03	1.11	0.001	0.029	0.015
KiK-net	KKWH11	1.87	1.03	0.000	0.032	0.016
	SIGH04	3.03	1.11	0.031	0.003	0.017

6. まとめ

微動観測から得られる分散曲線とH/Vスペクトルを用いて、波長層厚比の概念と1/4波長則に準拠して2層地盤の表層厚および表層S波速度を推定する方法を提案した。K-NET および KiK-net 観測点のPS検層結果について分散曲線およびH/Vスペクトルを求めて本提案手法を適用し、PS検層結果から評価した2層地盤モデルとの比較により波長層厚比の設定方法を検討した。波長層厚比はH/Vスペクトル卓越振動数の一次関数で表され、それを用いて評価された表層厚および表層S波速度は、K-NET および KiK-net の半数程度の観測点において良好な結果を与えた。

また、表層パラメータの導出例により概ねコントラストの強い層境界および平均的な表層S波速度が捉えられ、H/Vスペクトル卓越振動数10Hz以下、同ピーク値1以上に適用範囲を制限するにより、速度コントラストの大きな境界面が対象深度にない観測点を除外する可能性が示された。ただし、これらの条件には任意性があるため、地盤モデルの最終評価には分散曲線の対応を確認する必要がある。

今回の検討はPS検層結果に基づく理論計算によるものであり、今後は微動測定により得られた分散曲線およびH/Vスペクトルを用いて提案手法の有効性を検討する必要がある。

図10 提案手法による表層厚と表層S波速度の導出例

参考文献

- 1) 紺野克昭, 片岡俊一: レイリー波の位相速度から地盤の平均S波速度を直接推定する方法の提案, 土木学会論文集 No. 647, pp. 415-423, 2000. 4
- 2) 大橋明如, 紺野克昭, 片岡俊一, 斎藤正樹: 地盤の平均S波速度とレイリー波の位相速度の関係, 土木学会第55回年次学術講演会 I-B347, pp. 694-695, 2000
- 3) 西守男雄, 長尾毅, 紺野克昭, 規矩大義, 宮田正史: 常時微動アレー観測による表層地盤のS波速度構造推定手法, 国総研資料第34号, 2002. 6
- 4) 長郁夫, 先名重樹, 藤原広行: 微動のH/Vスペクトルを用いたS波速度不連続の概査法の提案, 物理探査学会第129回学術講演論文集, 2013
- 5) 古家萌子, 前田寿朗: 分散曲線とH/Vスペクトルから表層パラメータを導出する試行解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), 2017. 9
- 6) 古家萌子, 前田寿朗: 分散曲線とH/Vスペクトルにより表層パラメータを導出する試行解析, 日本地震工学会大会講演梗概集, 2017

[2018年2月7日原稿受理 2018年5月7日採用決定]