

常時微動を用いた臨海部表層地盤の S 波速度構造の推定に関する研究

長 尾 毅*・紺 野 克 昭**

港湾・海岸構造物が建設される臨海部地盤は軟弱であり、地震時には被害が集中しやすい。地震危険度を左右する要因の一つに地盤のせん断波 (S 波) 速度があり、S 波速度の深度分布を正確に知ることが重要である。実務においては S 波速度は N 値より推定することが多いが、N 値と S 波速度の関係にはばらつきが大きい。本研究では観測の容易な常時微動に着目し、位相速度から深さ 60 m までの地盤の S 波速度の深度分布を 5 m または 10 m 刻みで推定する方法を提案する。全国 15 の臨海部地盤における常時微動観測結果から、提案する方法を用いて S 波速度分布を推定し、速度検層結果との比較を行った。

1. はじめに

港湾・海岸構造物が建設される臨海部地盤は一般に軟弱であることから、地震時には被害が集中しやすい。地震危険度を左右する要因の一つに地盤のせん断波 (S 波) 速度があり、S 波速度の深度分布を正確に知ることが重要である。しかしながら、実務においては速度検層が実施されている地点は少ない。このため S 波速度は N 値より推定することが多いが、N 値と S 波速度の関係にはばらつきが大きい。

本研究では常時微動に着目する。常時微動とは地震動の作用がない状態での地盤の微小な振動であり、常時微動鉛直成分のアレー観測をアレー半径を変えて複数回実施することにより微動の位相速度が得られる。地盤は一般に多層系であり、このため位相速度は分散性を示し、その値は短周期側では最表層地盤の S 波速度に近い値を示し、長周期側では深部の S 波速度の影響を強く受ける。このため、位相速度を解析することにより、地盤の S 波速度の深度分布を推定することが可能となる。

ただし、位相速度より S 波速度構造を推定するためには S 波速度構造の初期推定値を設定した上で逆解析を実施する必要がある。逆解析による S 波速度の推定は非線形最適化問題となるので、複数の局所解を有することとなり、精度の良い初期推定値の設定法の開発が重要な課題となる。しかしながら、これまでに Ballard (1964) の方法のほかは初期推定値の設定方法に関する研究事例は皆無である。本研究では、表層 60 m までの深さの S 波速度構造について、平均 S 波速度を用いた新たな初期値推定手法を提案することを目的とする。

提案する手法の適用性の検証のため、全国の 15 地点における常時微動観測結果をもとに空間自己相関法 (Aki, 1957) を適用して位相速度を算出し、位相速度より直接 S 波速度構造を 5 m および 10 m 刻みで推定し、速度検層結果との比較を行った。さらに、推定 S 波速度構造に

よる伝達関数を PS 検層結果をもとにした伝達関数と比較し、固有周期の推定精度について検討した。

2. S 波速度構造推定手法

(1) 検討対象

本研究で対象とする地点は全国で速度検層が実施されている臨海部 15 地点である。微動アレー観測の方法としては、表層地盤構造を把握する観点からアレー半径は 3 または 5, 10, 18 m の 3 種類とし、円中心および円周上に 3 点のセンサーを配置した計 4 点のアレーを採用している。サンプリング周波数は 200 Hz である。観測時間はアレー半径ごとに 10 分程度である。

観測結果より位相速度を空間自己相関法 (Aki, 1957) を用いて行う。これは、アレー半径 r における複数のセンサーの記録からコヒーレンスの実数部分 (空間自己相関係数) を抽出し、式 (1) の関係からベッセル関数の逆演算を用いて周波数毎の位相速度を求める方法である。なお、位相速度 C は波数 k と $C = \omega/k$ の関係にある。

$$\text{Re}[\overline{\text{coh}}(r, \omega)] = J_0(kr) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ω : 角周波数、 k : 波数、 J_0 : 第 1 種 0 次ベッセル関数である。

図一1に位相速度の算出例を示す。3 つのアレー半径により細実線で示すように位相速度が 3 種類算出される。アレー半径と観測可能な波長の関係に留意し、各位相速度から最終的に 1 地点について図の太実線に示すように 1 つの観測位相速度を設定している。

(2) 平均 S 波速度推定手法

本研究ではまず平均 S 波速度を推定し、平均 S 波速度推定値を用いて S 波速度構造を推定する。ここで、深さ x (m) までの平均 S 波速度 V_{sx} は走時で重み付けした値であり、式 (2) により得られる。

$$V_{sx} = \frac{\sum_i H_i}{\sum_i \frac{H_i}{V_{Si}}} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{ただし、} \sum_i H_i = x \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 H_i : i 番目の土層の層厚 (m)、 V_{Si} : i 番目の

* 正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 港湾施設研究室
** 正会員 工博 芝浦工業大学助教授 土木工学科

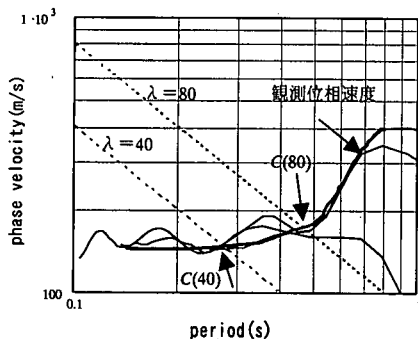


図-1 位相速度例 (川崎港)

土層のS波速度 (m/s) である。

位相速度から、まず長尾ら (2002) の方法により深さ 60 m までの平均S波速度を5m刻みで推定する。これは、深さ x までの地盤の平均S波速度 V_{sx} と最も相関の高い波長 λ における位相速度 $C(\lambda)$ (表-1 参照) の値を読み取るものである。図-1 に示したように、例えば $C(40)$, $C(80)$ は観測位相速度とそれぞれ $\lambda=40, 80$ m の等波長線の交点として読み取り、これをそれぞれ V_{s30} , V_{s60} とするものである。また、図-2 にレイリー波の波長と位相速度の関係を2地点について示した。図中の実線が常時微動観測結果に空間自己相関法を適用して得られる観測位相速度であり、鎖線がPS検層結果のS波速度構造をもとにして Haskell (1953) の方法によって算出した理論位相速度である。また、●印はPS検層結果より得られる平均S波速度であり、表-1 に示した深さに対応する波長の位置にプロットしてある。従って、●印と実線が一致しているほど平均S波速度の推定精度が高いといえる。

(3) S波速度構造推定手法

次に、平均S波速度を用いてS波速度構造の推定を行う。いま、深さ x_a から Δx だけ深度方向にある深さを x_b とする。 Δx 間のS波速度は $V_{s\Delta x}$ とし、 Δx 間ではS波速度は一定値と仮定する。 V_{sx_b} は式(4)により得られる。

$$V_{sx_b} = \frac{x_b}{\frac{x_b}{V_{sx_b}}} = \frac{x_a + \Delta x}{\frac{x_a}{V_{sx_a}} + \frac{\Delta x}{V_{s\Delta x}}} \quad (4)$$

これより、 $V_{s\Delta x}$ は式(5)により得られる。

$$V_{s\Delta x} = \frac{V_{sx_b} \Delta x}{\left(1 - \frac{V_{sx_b}}{V_{sx_a}}\right) x_a + \Delta x} \approx \frac{C(\lambda_b) \Delta x}{\left(1 - \frac{C(\lambda_b)}{C(\lambda_a)}\right) x_a + \Delta x} \quad (5)$$

推定する層厚の刻み幅 Δx については、本研究においては5mと10mの2種類を想定する。あらかじめボーリングにより層構成が既知の場合も考えられるが、層構成が未知の場合にも適用が可能なように一定の刻み幅と

表-1 平均S波速度と位相速度の関係

V_{sx}	$C(\lambda)$
V_{s10}	$C(15)$
V_{s15}	$C(20)$
V_{s20}	$C(30)$
V_{s25}	$C(35)$
V_{s30}	$C(40)$
V_{s35}	$C(50)$
V_{s40}	$C(35)$
V_{s45}	$C(60)$
V_{s50}	$C(70)$
V_{s55}	$C(75)$
V_{s60}	$C(80)$

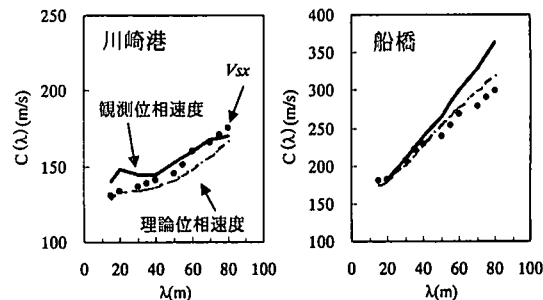


図-2 波長と位相速度の関係

するものである。

この方法で推定を行った結果、推定されるS波速度は、実測値と比較してばらつきが大きいことが分かった。検討の結果、この原因は、注目している波長近傍において位相速度が急激に増加する場合に、式(5)の近似関係がうまく成立しないためであることが分かった。そこで、式(5)右辺の第2式の分母を mx と定義し、 mx と RVs の相関を整理した。ここで、 RVs は、 $V_{s\Delta x}$ 推定値と実測値の比である。結果を図-3 に示す。

位相速度の変化の激しい波長近傍においては mx が小さな値を示すが、この値がある一定値(5m刻みの場合は3m、10m刻みの場合は6m)以下の場合に、実測値よりも大きな値を推定してしまう傾向にあり、 mx がゼロに近付くにつれて RVs は指数関数的に増加することが分かる。そこで、 mx と RVs の関係の近似式を導入し、式(6)~式(7)に示すように、 mx の値に応じて $V_{s\Delta x}$ の推定値を補正する。

$$V_{s\Delta x} = \frac{C(\lambda_b) \Delta x}{a \left\{ \left(1 - \frac{C(\lambda_b)}{C(\lambda_a)}\right) x_a + \Delta x \right\}} = \frac{C(\lambda_b) \Delta x}{a \cdot mx} \quad (6)$$

ここに、

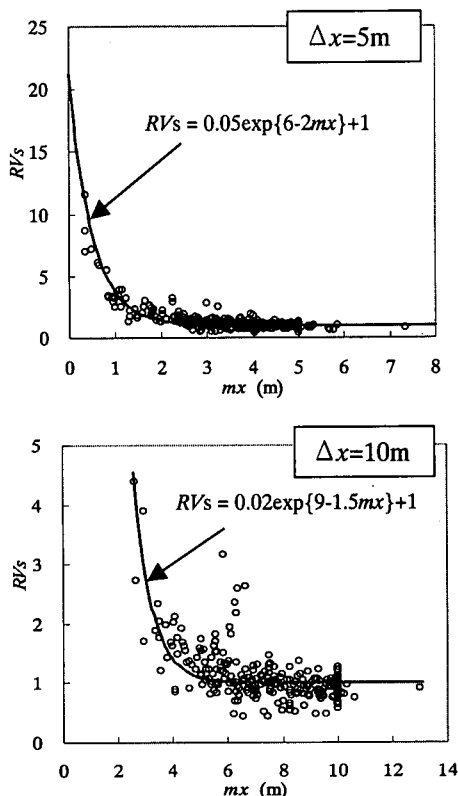


図-3 mx と RVs の相関

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 0.05 \exp\{6-2mx\} + 1 \quad (\Delta x = 5 \text{ m}) \\ \alpha &= 0.02 \exp\{9-1.5mx\} + 1 \quad (\Delta x = 10 \text{ m}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

3. S波速度構造推定精度の検討

以上述べた方法によるS波速度構造の推定精度について検討する。比較のために、既往の提案方法としてBallard法(1964)による推定もあわせて行う。この方法は、深さ x におけるS波速度 $Vs(x)$ を式(8)により求めるものである。

$$\left. \begin{aligned} Vs(x) &= 1.1C(T) \\ x &= (1/3 \sim 1/2)C(T) \cdot T \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

ここに、 $C(T)$ は周期 T における位相速度である。

Ballard法においては、連続的にS波速度構造を推定することができるため、提案法との比較の観点から、以下の方法でS波速度構造を設定した。

①式(1)の係数は1/3とする。

②5m, 10mごとの推定とするため、深さの刻みを2.5mとし、対象とする範囲での平均を行う。例えば、深さ10~20m間のS波速度は、深さ10, 12.5, 15, 17.5, 20mにおけるS波速度の平均値とする。

本研究では常時微動観測の際の最小のアレー半径として3mまたは5mを採用しているが、波長15m程度の

位相速度が検出できず、このため、地表に近いごく浅い部分のS波速度が推定できない場合もある。このような場合は、提案法、Ballard法のいずれにおいても、推定可能な最浅部のS波速度が地表まで続いているものと仮定して補正を行い、必ず地表から順次S波速度構造を推定することとした。

検討地点のうち8地点について、各手法で推定されたS波速度構造の分布を図-4~図-5に示す。速度検層結果については、推定刻み厚さにあわせて平均S波速度として示している。

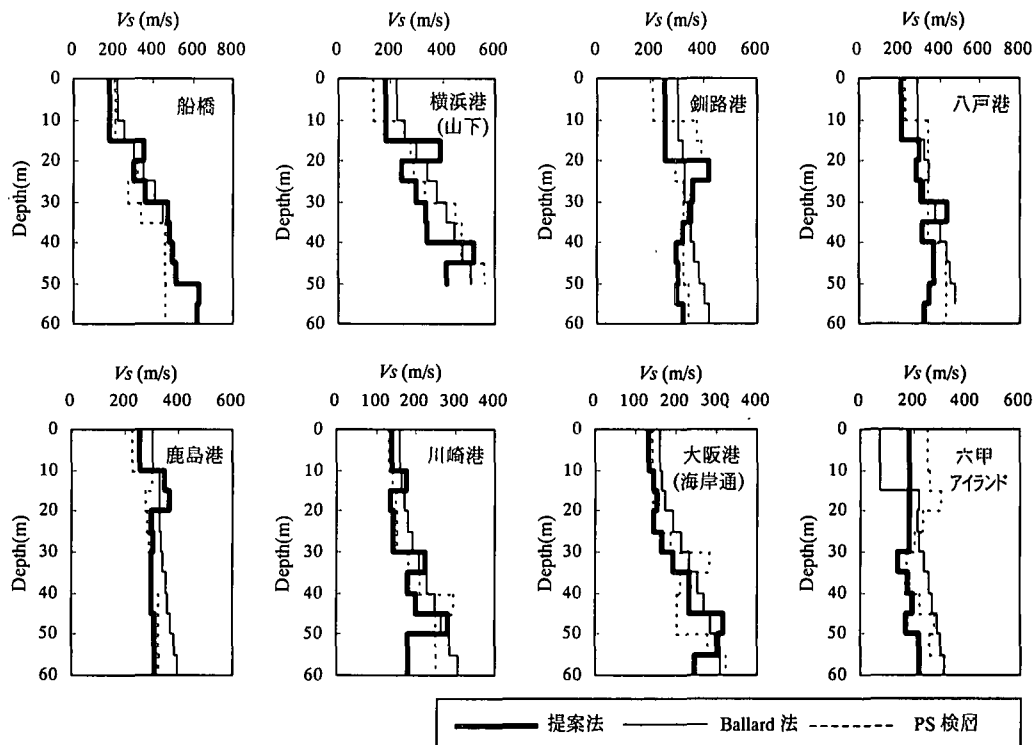
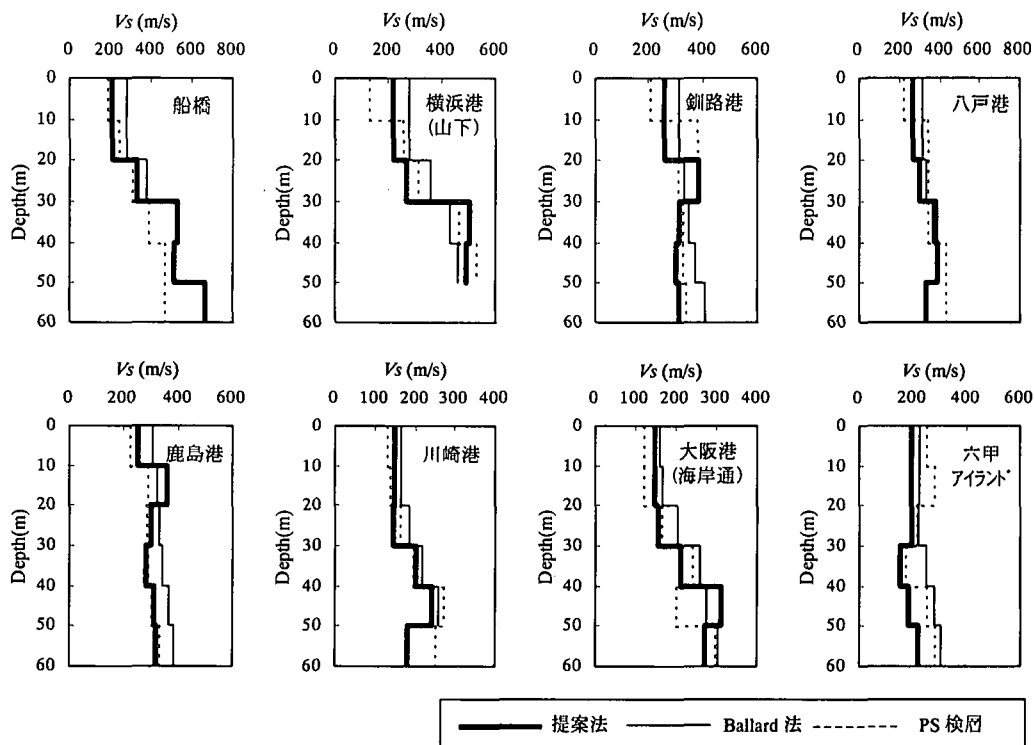
図より、Ballard法においては、基本的に推定S波速度は深度方向に単調に増加することがわかる。これに対して提案法ではそのような傾向はなく、深度方向に増減が大きい結果となる。この増減は特に5m刻みの場合に顕著であり、実際以上に増減があるように推定してしまう場合があることがわかる(例えば、横浜港(山下)、川崎港)。しかしながら、提案法ではS波速度の増減にはある程度追随する傾向がある(例えば、釧路港、六甲アイランド)。臨海部地盤ではS波速度が深度方向に単調に増加しない地盤構造が多く見られるが、そのような場合にはBallard法では対応が良くないといえる(例えば、釧路港、鹿島港、六甲アイランド)。

また、観測結果より推定可能な位相速度の波長は各地点毎に異なっているため、推定可能な深さにはばらつきがある。例えばBallard法では、深さ60mにおけるS波速度を推定するためには波長180mまでの位相速度が求められている必要がある。このため、速度検層が深さ60mまで実施されている12地点中、深さ60mまで推定できなかった箇所が船橋、八戸港、川崎港の3地点あった。これに対して提案法では、波長80mまでの位相速度が求められていれば深さ60mまでのS波速度構造の推定が可能であるため、60mまで推定できなかった地点はなかった。このことは、提案法の方が短いアレー半径の観測で深い位置まで推定可能であることを意味しており、提案法の利点といえる。

4. 伝達関数の検討

推定したS波速度構造を用いて、重複反射理論による伝達関数を算出し、これを速度検層結果による伝達関数と比較した。ここでは速度検層が最低50m以上の深さまで実施されている地点を対象とし、速度検層深度が50~60mの間ときは速度検層深さまで、速度検層が60m以深まで実施されているときは深さ60mの層を基盤とする伝達関数を想定する。ただし、前述のように速度検層が実施されている深さまで推定できなかった地点はここでは除外している。

図-6に $\Delta x=5$ mの場合の速度検層結果による伝達

図-4 S波速度構造 ($\Delta x = 5$ m)図-5 S波速度構造 ($\Delta x = 10$ m)

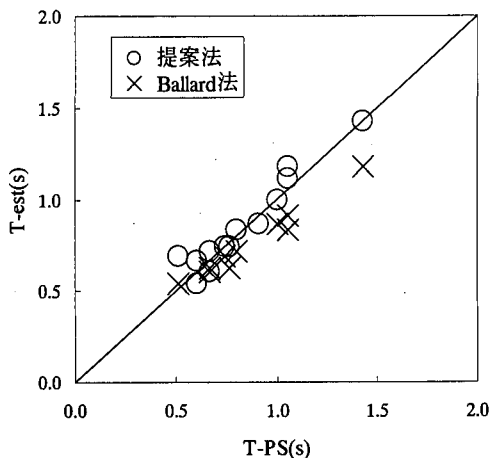


図-6 1次固有周期の比較

表-2 R_T の分布

(a) 提案法

	Δx (m)	R_T	μR_T	σR_T
1次固有周期	5	0.89~1.34	1.03	0.12
	10	0.89~1.26	1.01	0.10
2次固有周期	5	0.92~1.25	1.07	0.11
	10	0.89~1.19	1.04	0.11

(b) Ballard法

	Δx (m)	R_T	μR_T	σR_T
1次固有周期	5	0.71~1.04	0.92	0.09
	10	0.81~1.02	0.89	0.07
2次固有周期	5	0.61~1.11	0.91	0.12
	10	0.61~1.11	0.91	0.12

関数の1次固有周期 (T -PS) と観測位相速度をもとにした推定値による1次固有周期 (T -est) の比較を示す。提案法によって伝達関数は精度よく推定可能であることがわかる。また固有周期の推定値と速度検層結果を用いた理論値の比を R_T と定義すると、表-2 に示すように一次及び二次固有周期の R_T の平均値は1.01~1.07の範囲にあり、Ballard法の0.89~0.90よりも平均的には精度が高い。また、層厚の刻み幅としては、わずかながら10 m 刻みの方が有利な結果となった。これは、図-4 および図-5 に示したように、5 m 刻みの場合に実際以上のS

波速度の増減を推定してしまうことが原因と考えられる。

Ballard法は固有周期を実際よりも低めに推定する傾向にあることがわかった。これは、Ballard法においては深度方向にS波速度推定値が単調に増加するため、深い位置でのS波速度推定値が実測値を上回ることが多いことが原因と考えられる。

以上より、本研究による方法は、地盤の非線形性を考慮しない地震動の増幅特性の検討や固有周期による地盤種別分類には適用性は高いと考えられる。

5. ま と め

本研究では、位相速度より推定される平均S波速度を用いてS波速度構造を5 m または10 m 刻みで直接推定する手法を提案した。提案法では実際の地盤のS波速度の増減以上に増減があるように推定してしまう短所がある反面、増減に追従する可能性が高いことがわかった。また、観測に必要なアレー半径が短くてすみため観測が簡素化されることも提案法の有利な点である。

さらに、直接推定したS波速度構造を用いた伝達関数は速度検層結果による伝達関数と比較的よく一致した。

臨海部の埋立地盤では地盤情報が必ずしも豊富ではない場合が多く、そのような場合に常時微動観測は土質試験の代替として適用が考えられる。ただし、地盤の非線形性を考慮した地震応答の検討などでは逆解析の実施によりS波速度構造の最適化を行う必要があると考えられるため、今後は逆解析の実施によるS波速度の最適化手法について検討を進めたい。

謝辞：常時微動観測の実施において関係機関の協力を頂きましたことに感謝します。本研究は運輸施設整備事業団基礎研究制度の助成を受けて行ったものである。

参 考 文 献

- 長尾 毅・紺野克昭 (2002): 常時微動アレー観測に基づく表層地盤の平均S波速度推定精度に関する研究, 土木学会論文集, No. 696, I-58, pp. 225-235.
- Aki, K. (1957): Space and time spectra of stationary stochastic wave, with special reference to microtremors, Bulletin, Earthquake research Institute, Vol. 35, pp. 415-456.
- Ballard, R. F. and Jr. (1964): Determination of soil shear moduli at depth by in situ vibratory techniques, U. S. Army Waterways Experiment Station.
- N. A. Haskell (1953): The dispersion of surface waves on multilayered media, Bulletin, Seismological Society of America, 43, pp. 17-34.