

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
 Estimation of S-Wave Velocity Profiles Based on Inversion of
 Dispersion Curves and H/V Spectra of Microtremors

新井 洋¹⁾
 Hiroshi ARAI¹⁾

1) 東京工業大学工学部建築学科助手 博士(工学)

Research Associate, Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

要約

微動の分散特性と H/V スペクトルの逆解析から地盤の S 波速度構造を推定する手法を提案し、その妥当性を検討した。その結果、鉛直成分(レイリー波)の分散特性に加え水平動直交方向成分(ラブ波)の分散特性または H/V スペクトルを同時に逆解析することで、レイリー波分散曲線のみの逆解析に比べ、地盤の S 波速度構造を深部まで精度よく推定できることを示した。さらに、得られた構造を用いて地盤の地震時応答特性を推定し、実地震動特性と比較することで、提案手法が地盤の地震時応答特性評価に有効であることを示した。

SUMMARY

A joint-inverse analysis using dispersion curves and horizontal-to-vertical spectral ratio (H/V) of microtremors is presented for estimating S-wave velocity profiles. The inversion of the observed dispersion and H/V data successfully result in S-wave velocity profiles, which are consistent with PS log. With these profiles, the spectral ratios of vertically incident S-waves between surface and down-hole stations are computed, and compared with those of observed strong motion records. The computed and observed spectral ratios show a fairly good agreement. This indicates that the proposed inversion method could be promising for estimating S-wave velocity profiles and local site conditions.

1. はじめに

地表での地震動特性を評価する上で、地盤の S 波速度構造に関する情報が不可欠である。地盤の S 波速度構造を簡便かつ迅速に推定する手法として、微動鉛直成分のアレイ観測からレイリー波の分散特性を求め、これを逆解析する方法^{例えば1)-3)}が挙げられる。この方法では、探査深度は最大観測波長に依存することから、深部構造を精度良く推定するためには半径の大きなアレイを用いて観測を行う必要がある。しかし、実際には、観測現場の制約などから半径の大きなアレイを展開できない場合もある。この場合、長周期領域での観測データが不足するため、レイリー波分散曲線の逆解析だけでは深部までの構造を精度良く推定することができない。そこで本研究では、微動の鉛直(V)成

分の分散特性に加え水平動直交方向(T)成分の分散特性⁴⁾または H/V スペクトル⁵⁾を同時に逆解析することで、地盤の S 波速度構造を深部まで精度良く推定する可能性を検討する。この逆解析では、遺伝的手法と非線形最小 2 乗法を併用した逆解析手法を提案する。さらに、得られた構造を用いて地盤の地震時応答特性を推定し、その精度について検討する。

2. 遺伝的手法と非線形最小 2 乗法を併用した逆解析

2.1 最適化手法

地盤を等方弾性で N 層から成る水平多層構造(Fig. 1、最下層は半無限体)とし、逆解析において最小とすべき評価関数 F は次式とする。

$$F = \sum_i [C_{Rm}(f_i) - C_{RS}(f_i)]^2 W_{Ri} + \sum_j [C_{Lm}(f_j) - C_{LS}(f_j)]^2 W_{Lj} + \sum_k [(H/V)_m(f_k) - (H/V)_S(f_k)]^2 W_{HVs} \quad (1)$$

ここに、 f は周波数、 $C_R, C_L, (H/V)$ はV成分(レイリー波)、T成分(ラブ波)の位相速度およびH/Vスペクトルを表し、添字 m は観測値、 S は基本モードから高次モードまでを考慮した理論値^{3), 6)}を表す。ここで、表面波のH/Vスペクトル⁶⁾ $(H/V)_S$ の算定では、地盤構造以外に水平動中のレイリー波ラブ波振幅比R/Lの値が必要となる。筆者らは、既往の研究⁶⁾において、アレイ観測された微動の水平動伝播方向(R)・直交方向(T)成分のF-kスペクトル解析⁴⁾から求めた位相速度と到来方向を用いて両成分のビーム波を作成し、両者のスペクトル振幅比の値を周期0.1-5秒の範囲で0.4-1程度と求めている。そこで、本研究ではR/Lの値として0.7を仮定する。また、 W は重みで、各成分の残差2乗和平均の逆数を適合型Biweight法⁷⁾により重み調節した値を用いる。まず、地盤構造の探索範囲を決め、遺伝的手法(GA)による最適化⁸⁾を行う。安定した解を得るために、乱数の初期値を変えて複数回の試行を行い、各試行での最適解の平均をとる。次に、これを初期値として非線形最小2乗法の一つである修正Marquardt法^{7), 9)}により最適化を行い、補正量が十分小さくなつた時点の解を最終的な推定地盤構造とする。このように、遺伝的手法と非線形最小2乗法を併用することで、両者の利点を生かして、ロバスト性が高く、かつ局所収束能力の高い最適化を最短時間で行うことが期待できる。

2.2 逆解析パラメータの感度

レイリー波分散曲線の逆解析では、地盤の物理定数のうち、S波速度と層厚がパラメータとされ、密度とP波速度は固定するかS波速度と連動されることが多い。これは、レイリー波位相速度のP波速度と密度に対する感度がS波速度と層厚に対する感度に比べて低く¹⁾、感度の低いパラメータを混ぜて逆解析を行うと、それに対して過大な補正ベクトルが割り当てられ、逆解析が適切に行われないためである。したがって、表面波H/Vスペクトルの逆解析

| | |
|---|----------------------------------|
| 1 | $H_1, \rho_1, V_{P1}, V_{S1}$ |
| 2 | $H_2, \rho_2, V_{P2}, V_{S2}$ |
| 3 | $H_3, \rho_3, V_{P3}, V_{S3}$ |
| ⋮ | ⋮ |
| N | $\infty, \rho_N, V_{PN}, V_{SN}$ |

Fig. 1. Soil layer model.

に先立ち、パラメータの感度を評価しておく必要がある。

ある地盤構造において、第 j 層の層厚 H_j に対する表面波H/Vスペクトル $(H/V)_S$ の感度は、次式の無次元化偏微分係数の絶対値 D で表せる。

$$D = |(H/V)_S \cdot (\partial(H/V)_S / \partial H)| \quad (2)$$

(at $H = H_j$)

他のパラメータに対する感度も同様に表せる。ここで、 D の値が大きいことは、 $(H/V)_S$ の当該パラメータに対する感度が高いことを意味する。例として、Fig. 2(a)に示す4層の地盤構造において、各層の層厚・密度・P波速度・S波速度に対する $(H/V)_S$ の感度を求め、その周期特性を同図(b)-(e)に示す。図から、密度・P波速度に対する感度(c), (d)に比べ、層厚・S波速度に対する感度(b), (e)の方が高い場合の多いことがわかる。他の数種類の地盤構造についても感度解析を行い、同様の傾向があることを確認した。このことは、 $(H/V)_S$ の逆解析におけるパラメータは、レイリー波分散曲線の場合と同様、層厚とS波速度が適當であることを示している。

3. 微動の分散特性とH/Vスペクトルの逆解析に基づくS波速度構造推定

逆解析は、V成分(レイリー波)の分散特性のみ(ケースA)、V成分およびT成分(ラブ波)の分散特性(ケースB)、V成

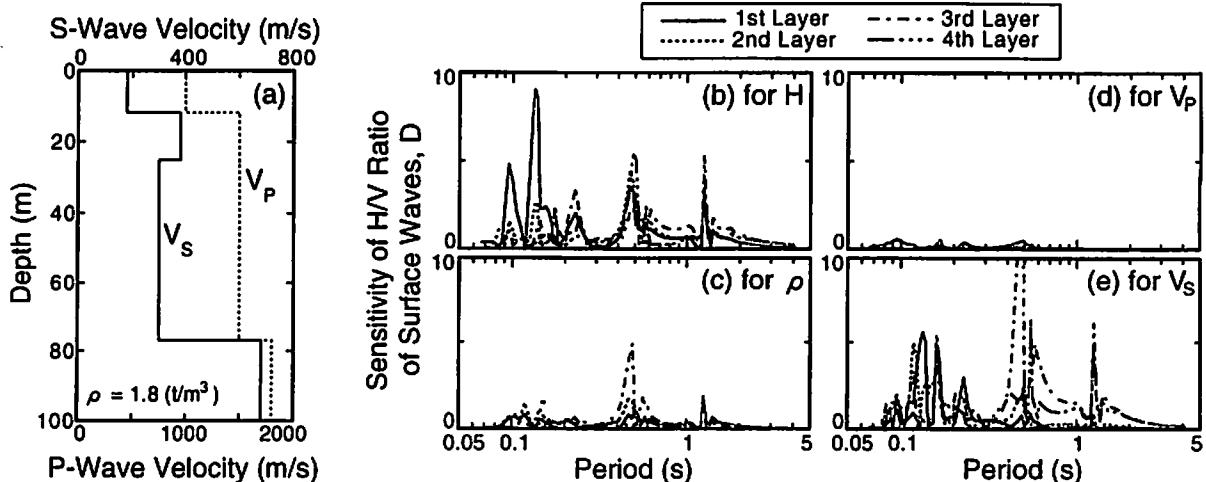


Fig. 2. An example of sensitivities of H/V ratio of surface waves.

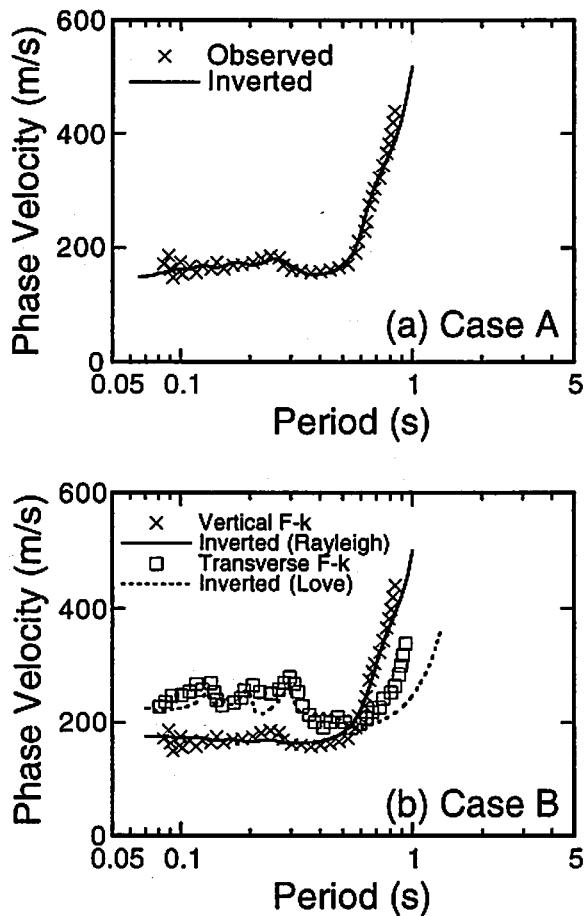
分の分散特性 + H/V スペクトル(ケース C)の 3 ケースについて検討する。この際、評価関数((1)式)は各ケースにおいて無関係な項を無視して組み換える。検討には、東京都夢の島(以下、サイト A)で 3 成分アレイ観測された微動波形データ¹¹⁾を用いた。微動計は固有周期 1 秒の速度計、アレイ形状は円形 6 点、アレイ半径は 7.5, 15, 20, 30, 48 m であった。鉛直(V)成分および水平動直交方向(T)成分の F-k スペクトル解析¹²⁾を行って、有効波長をアレイ半径の 2~6 倍の範囲として、その分散特性を求めた。観測および解析手法の詳細は参考文献¹¹⁾を参照されたい。また、微動の H/V スペクトル(H/V)_m は次式により求めた。

$$(H/V)_m = (S_{NS}^2 + S_{EW}^2)^{1/2} / S_{UD} \quad (3)$$

ここに、 S_{NS} , S_{EW} , S_{UD} は NS, EW, UD 方向成分のフーリエスペクトル振幅である。

TABLE 1. DEEP UNDERGROUND STRUCTURE AT SITE A.

| Thickness(km) | ρ (t/m ³) | V_p (km/s) | V_s (km/s) |
|---------------|----------------------------|--------------|--------------|
| 1.5 | 1.9 | 1.8 | 0.7 |
| 0.8 | 2.2 | 2.8 | 1.5 |
| ∞ | 2.5 | 5.6 | 3.0 |



レイリー波分散曲線の逆解析における最大探査深度は、観測最大波長の 1/3 程度と考えると、この場合 90 m 程度となる。そこで、A-C 各ケースについて、深度 100 m 以浅の地盤を 4 層にモデル化し、提案手法により逆解析を行って S 波速度構造を推定した。この際、深度 100 m 以深の構造は既往の地震探査結果(TABLE 1)¹⁰⁾で固定した。また、P 波速度と密度は検層結果を参考に仮定した。A-C 各ケースにおける観測値と理論値の対応を Fig. 3a-c に、推定 S 波速度構造を Fig. 4a-c に検層結果と比較して示す。Fig. 3において、ケース A-C いずれの場合も理論値(実線および破線)は観測値とほぼ適合しており、逆解析自体は適切に行われたことが示唆される。しかし、ケース A の推定構造(Fig. 4a 実線)に対応する表面波の H/V スペクトル (Fig. 3c 鎖線)は微動の H/V スペクトル (Fig. 3c ○印)との対応が良くない部分が見受けられ、推定構造が適切でない可能性も推察される。以下、A-C 各ケースの推定結果について考察する。なお、検層結果を用いて感度解析(2.2 節)を行ったところ、深度 50 m 付近の高速度層の層厚・S 波速度に対する感度が他の層に比べて低かったため、逆解析ではこの層の存在を無視している。

(a) レイリー波分散曲線のみの逆解析

推定 S 波速度構造 (Fig. 4a 実線) は、深度 40 m 程度以浅では検層結果(破線)と概ね対応している。しかし、それ以

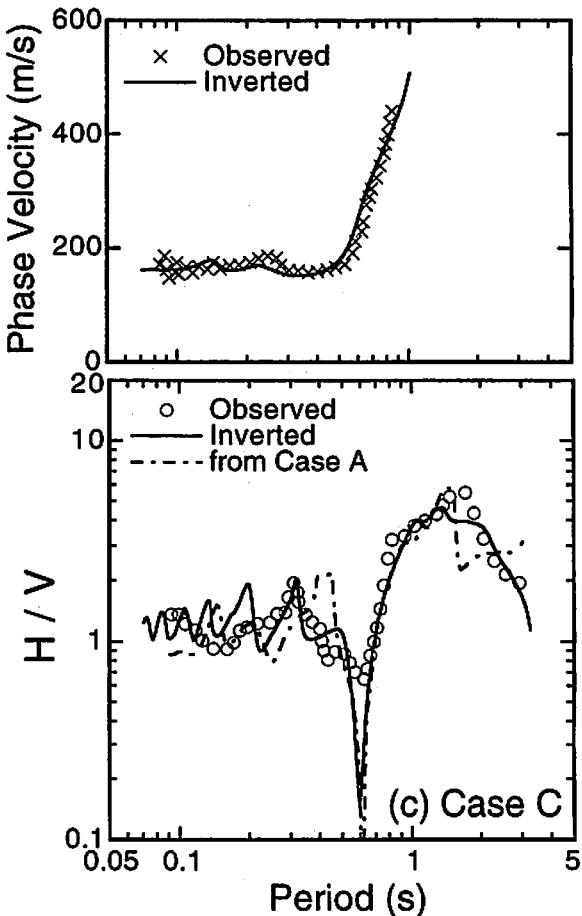


Fig. 3. Observed and inverted dispersion curves and H/V spectra at site A.

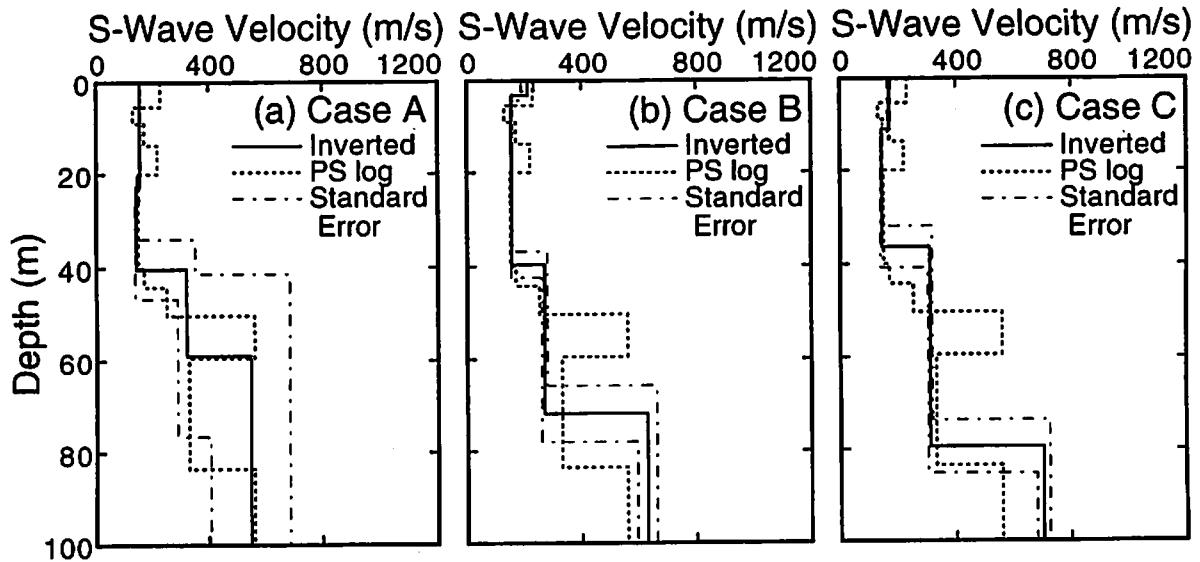


Fig. 4. Comparison of V_s profiles from microtremor measurements with those from down-hole method at site A.

深では、S波速度 600m/s 程度の層の出現深度は検層結果では 85 m 程度であるのに対し、推定構造では 60 m 程度となっており、両者の対応は悪い。また、推定標準誤差^{1), 7)}(鎖線)は地表付近では小さいが深部ほど大きくなり、推定構造の信頼性が深部ほど低いことを示唆している。これは、観測分散曲線(Fig. 3a)が得られている周期帯はサイト A の地盤の 1 次固有周期(1.4 秒)の半分程度以下であり、この周期帯のレイリー波は波長が相対的に短く、深部の構造を反映しにくいためと考えられる。

(b) レイリー波ラブ波分散曲線の同時逆解析

推定 S 波速度構造 (Fig. 4b) は、レイリー波分散曲線のみの場合 (Fig. 4a) に比べ、S 波速度 600m/s 程度の層の出現深度の検層結果との対応が改善されている。また、推定標準誤差は、レイリー波分散曲線のみの場合 (Fig. 4a) に比べ、深度 40 m 程度以深で小さく抑えられており、推定構造の信頼性が比較的高いことを示唆している。

比較的深部において S 波速度構造が精度良く推定された理由を検討するため、S 波速度および層厚に対する感度解析(2.2 節)を行った。Fig. 5 上三段に推定構造における C_{RS} , C_{LS} の第 2~4 層の S 波速度に対する感度を横軸周期で示す。いずれの層でも、 C_{LS} の感度(実線)は C_{RS} のそれ(破線)よりも大きい場合が多く、周期 0.1~0.3 秒で卓越している。層厚に対する感度についても同様の傾向が確認された。ここで、推定構造に対応するラブ波各モードの相対振幅スペクトル A_L/k_L (Fig. 5 下段、 A はミディアムレスポンス、 k は波数) は、周期 0.3 秒以下では高次モードの振幅が卓越している。表面波は同一周期では高次モードほど波長が長く、より深部の構造を反映しやすい。このため、このサイトでは短周期領域においても深い層での C_{LS} の感度が高いと考えられる。したがって、短周期領域でラブ波の理論値と観測値が適合することで、より正確に深部の S 波速度が推定され、推定標準誤差が小さく抑えられたと考えられる。

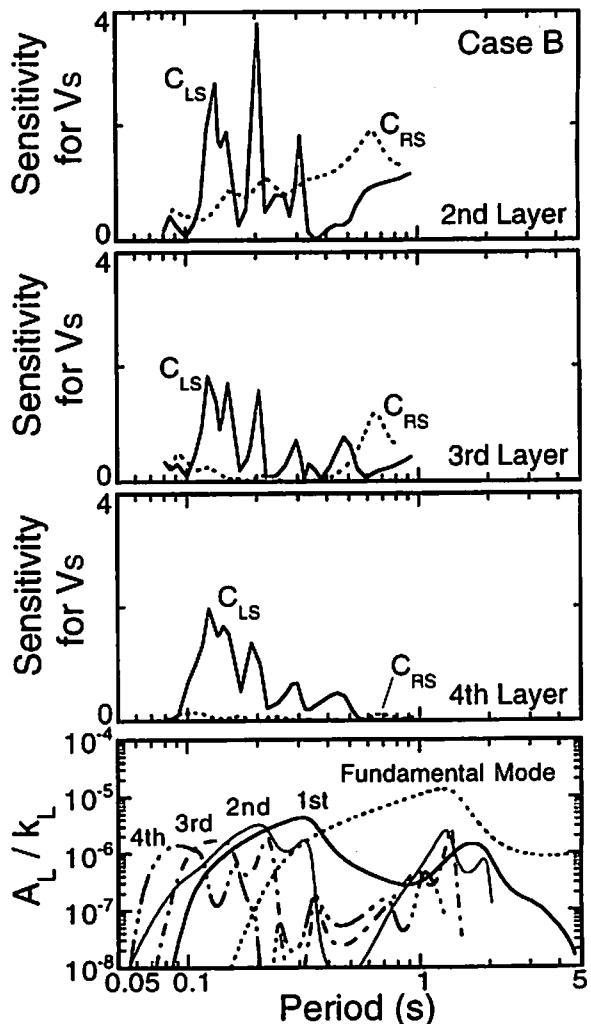


Fig. 5. Sensitivities of C_{RS} and C_{LS} for V_s and relative amplitude spectra of Love waves computed from the estimated profile (Case B) at site A.

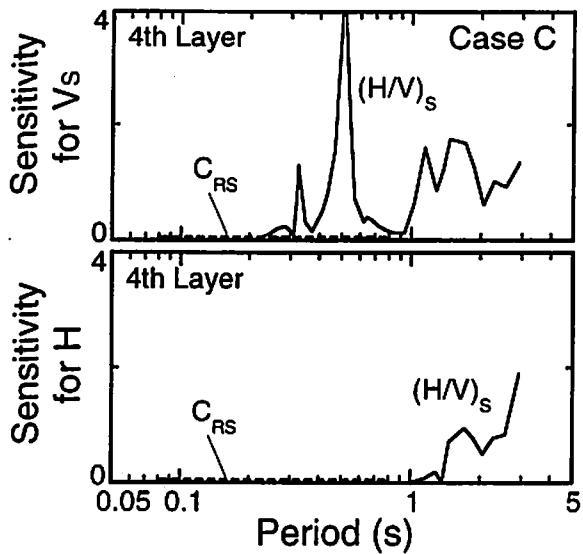


Fig. 6. Sensitivities of C_{RS} and $(H/V)_s$ for V_s and thickness computed from the estimated profile (Case C) at site A.

(c) 分散曲線と H/V スペクトルの同時逆解析

推定 S 波速度構造 (Fig. 4c) は検層結果とほぼ対応している。また、推定標準誤差はレイリー波ラブ波分散曲線の同時逆解析結果 (Fig. 4b) とほぼ同程度に抑えられており、推定構造の信頼性が高いことを示している。

レイリー波ラブ波分散曲線の同時逆解析の場合と同様、S 波速度および層厚に対する感度解析を行った。Fig. 6 に、推定構造における C_{RS} , $(H/V)_s$ の第 4 層の S 波速度および層厚に対する感度を示す。S 波速度・層厚いずれに対しても C_{RS} の感度(破線)はほとんどないが、 $(H/V)_s$ の感度(実線)は、鉛直成分の位相速度が得られていない周期領域(0.8 秒以上)で比較的高くなっている。このため、H/V スペクトルの理論値と観測値が鉛直成分の位相速度データのない長周期領域で適合することにより、深部での推定標準誤差が小さく抑えられ、検層結果に近い構造が推定されたと考えられる。以上の結果は、レイリー波分散曲線に加えさらに H/V スペクトルを同時に逆解析することで、レイリー波ラブ波両方の分散曲線を用いた場合と同等の精度で地盤の S 波速度構造を推定できることを示している。これは、微動観測から鉛直成分(レイリー波)の分散特性と H/V スペクトルは常に求められるが、水平動直交方向成分(ラブ波)の分散特性は求められない場合があること¹¹⁾を考えると、観測も容易で好都合である。

4. 推定 S 波速度構造を用いた地盤の地震時応答特性評価

推定された構造を用いて地盤の地震時応答特性を精度良く評価する可能性を検討する。Fig. 7 に、サイト A の S 波検層結果から 1 次元重複反射理論により求めた、鉛直入射 S 波に対する地表/G.L.-100 m の理論伝達関数((a)振幅比, (b)位相差)を実線で示す。図中の破線および鎖線は、ケ

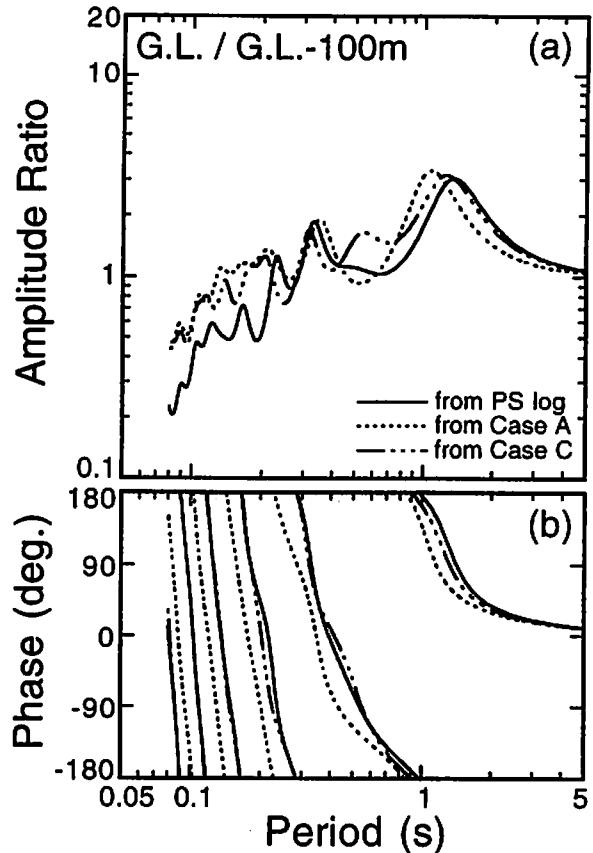


Fig. 7. Comparison of S-wave transfer functions estimated from microtremor measurements with that from down-hole method at site A.

ース A, C における推定 S 波速度構造 (Fig. 4a, c) から求めた S 波の理論伝達関数である。なお、地盤の減衰定数は、S 波速度 400m/s 未満では 5 %、それ以上では 2 % と仮定した。振幅の次元 (Fig. 7a) においては、ケース A, C 両伝達関数とも検層結果から求めた伝達関数と概ね対応しており、その適合度合いに大きな差異は見られない。しかし、位相の次元 (Fig. 7b) においては、ケース A の構造から求めた伝達関数(破線)に比べ、ケース C の伝達関数(鎖線)の方が検層結果から求めた伝達関数(実線)と良く対応している。

サイト A では、1987 年千葉県東方沖地震 (M 6.7) における鉛直アレイ強震記録が得られている¹¹⁾。この記録の水平成分の最大速度は 12cm/s 程度と比較的小さいことから、地震時の地盤の非線形挙動は小さかったものと推察される。そこで、Figs. 8, 9 に、地震計設置深度に対応する G.L.-1.07 m/G.L.-89.48 m および G.L.-18.33 m/G.L.-89.48 m の加速度記録 (EW 成分) のフーリエスペクトル比を、ケース A, C における推定 S 波速度構造から求めた S 波の理論スペクトル比(破線および鎖線)と比較して、Fig. 7 と同様、(a) 振幅比、(b) 位相差として示す。Figs. 8, 9 いずれにおいても、ケース A の構造から求めた理論スペクトル比(破線)に比べ、ケース C のスペクトル比(鎖線)の方が、振幅・位相とも実地震記録から求めたスペクトル比(○印)

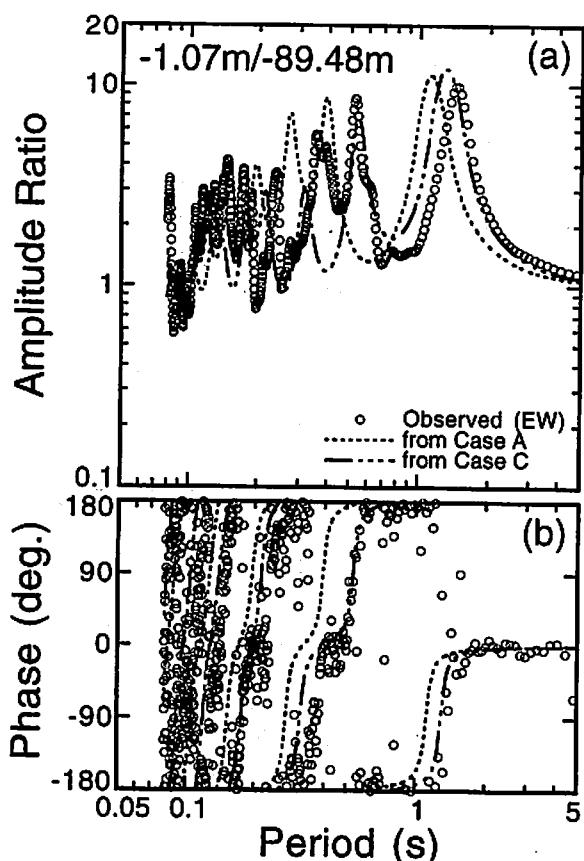


Fig. 8. Observed and estimated spectral ratios at site A.
(G.L. -1.07m / G.L. -89.48m)

と良く対応している。特に、周期0.2~2秒の領域での対応が改善されている。ケースBの推定構造からS波の理論伝達関数・スペクトル比を求めたところ、振幅・位相ともケースCのそれとほぼ同一であり、観測地震動特性とも良く対応することが確認された。以上の結果は、微動の鉛直動アレイ観測に水平動観測を追加することで、地盤の地震時応答特性をより精度良く推定できることを示している。

5. 結論

微動の分散特性とH/Vスペクトルに基づいて地盤のS波速度構造および地震時応答特性を精度良く評価する可能性について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 表面波のH/Vスペクトルは、分散曲線と同様、地盤の物理定数のうちS波速度と層厚に対する感度が高い。
- (2) 鉛直成分(レイリー波)に加え水平動直交方向成分(ラブ波)の分散特性またはH/Vスペクトルを同時に逆解析することで、レイリー波分散曲線のみの逆解析の場合に比べ、地盤のS波速度構造および地震時応答特性をより精度良く推定できる。

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, 59-96, 1985.

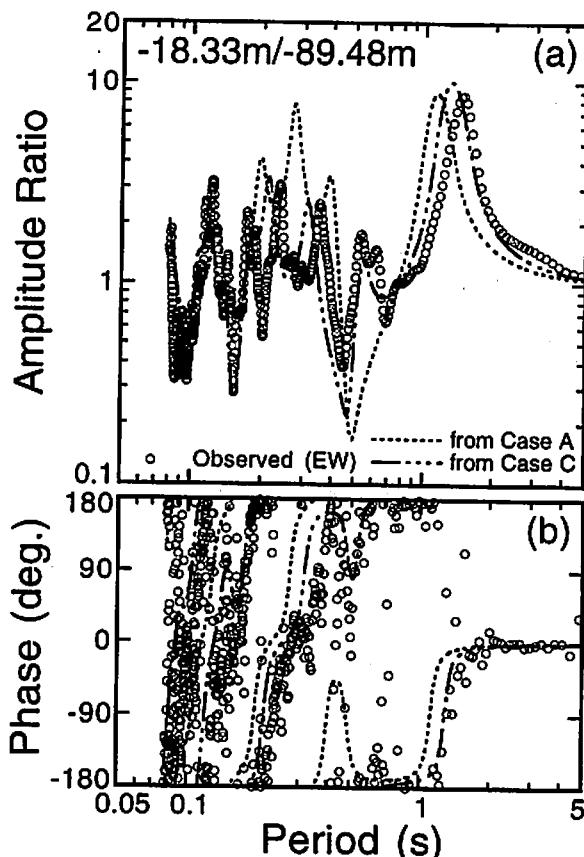


Fig. 9. Observed and estimated spectral ratios at site A.
(G.L. -18.33m / G.L. -89.48m)

- 2) 岡田廣、松島健: 長周期微動の観測による厚い地盤構造の推定について、第7回日本地震工学シンポジウム講演集, 211-216, 1986.
- 3) Tokimatsu, K., Shinzawa, K., and Kuwayama, S.: Use of short-period microtremors for V_s profiling, J. Geotech. Engrg., ASCE, 118(10), 1544-1558, 1992.
- 4) 時松孝次、新井洋、酒井潤也: 短周期微動に含まれる表面波の性質と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文集, 472, 47-55, 1995.
- 5) 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, 265-270, 1986.
- 6) 新井洋、時松孝次: レイリー波とラブ波の振幅比が微動 H/V スペクトルに与える影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II, 199-200, 1997.
- 7) 中川徹、小柳義夫: 最小2乗法による実験データ解析、東京大学出版会, 1982.
- 8) 山中浩明、石田寛: 逆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, 468, 9-17, 1995.
- 9) Marquardt, D. W.: An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters, J. Soc. Indust. Appl. Math., 11, 431-441, 1963.
- 10) 嶋悦三、柳沢馬住、工藤一嘉、瀬尾和大、山崎謙介: 東京の基盤構造(その2), 地震研究所彙報, 51, 45-61, 1976.
- 11) Ishihara, K. et al. : In-situ pore water pressures and ground motions during the 1987 Chiba-toho-oki earthquake, Soils and Foundations, 29(4), 75-90, 1989.