

各種手法による軟質表層地盤の V_s 構造 推定に関する考察

栗田 哲史¹・中村 直樹²・中川 貴洋³・杉本 剛康⁴

¹正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)
E-mail: kurita@tepsco.co.jp

²正会員 東電設計株式会社 (〒135-0062 東京都江東区東雲1-7-12 KDX豊洲グランスクエア9F)
E-mail: naoki.nakamura@tepsco.co.jp

³東京電力パワーグリッド株式会社 (〒108-0023 東京都港区芝浦4-19-1)

⁴正会員 東京電力ホールディングス株式会社 (〒100-8560 東京都千代田内幸町1-1-3)

表層地盤の地震応答解析を行うにあたり適切な地盤構造モデルの作成が必要であり、そのためデータ取得に様々な現地調査が行われるのが一般的である。地盤の V_s 構造を推定する方法として、最も代表的なものは PS 検層である。この他、鉛直アレイ地震観測記録、単点常時微動計測、水平アレイ常時微動計測等から逆解析手法で V_s 構造を推定することも良く行われる。地震応答解析の精度は地盤構造モデルの良否に依存するところが大きいため、これら調査結果の特徴をよく理解し、各手法によって得られる推定地盤構造モデルが相互にどのような関係にあるのかを把握しておく必要がある。本研究では鉛直アレイ地震観測を行っている軟質表層地盤のサイトを対象として、各種手法による V_s 構造推定の比較を行い、各推定法間に関する関係について考察した。

Key Words : *Vs, inversion, PS logging, vertical array seismic observation, microtremor measurement*

1. はじめに

表層地盤の地震応答解析を行うためには地盤構造モデルを作成する必要がある。その基となるデータを取得する目的で様々な現地調査が行われている。特に、地盤の増幅特性を把握するためには S 波速度 (V_s) 構造を知ることが重要となる。代表的な V_s 構造推定手法としては、ボーリング孔を用いた地盤調査法の PS 検層、微動探査 (水平アレイ微動計測から位相速度分散曲線を評価する方法、単点微動計測の H/V スペクトルを用いる方法、等)、地震観測記録を用いる方法の1つである鉛直アレイ地震観測記録の地表と地中間のフーリエスペクトル比を用いる方法などがある¹⁾。

この中で最も一般的な方法は PS 検層と思われる。PS 検層はボーリング孔が掘削できる環境であれば、殆ど制限なく実施することができる。鉛直アレイ地震観測地点では地中観測用の地震計を設置するボーリング孔を利用して PS 検層を行うことが多いため、得られたデータを

用いた地震応答解析と観測記録との比較によって調査結果の妥当性を評価することができる。PS 検層結果をそのまま用いて良好な結果が得られる場合とそうでない場合があることが分かっており^{例えば2)}、地震観測記録に適合するように V_s 構造を逆解析するのが前述の鉛直アレイ地震観測記録を用いる方法である。

一方、微動探査は PS 検層や鉛直アレイ地震観測記録を用いる方法と比較して、機動性や経済性における利点があるものの、交通振動などによるノイズの影響や起振源のパワー不足などにより適用限界があると考えられている。

V_s 構造推定手法の原理から考えて、各手法より得られる情報の特性としては次のように想定される。PS 検層はボーリング孔近傍の局所的な情報が得られるものと思われる。また、水平アレイ常時微動計測はアレイ規模に依存するものの、ある程度広域の空間情報が反映されると考えられる。更に、鉛直アレイ地震観測と単点常時微動計測は、両者の中間程度の空間的広がりの方が得

られるものと予想される。

以上の通り、地盤の Vs 構造を推定する手法には一長一短があり、実務では調査の目的や予算、立地環境などに応じて適切な調査手法を選択することになる。そのためには、各手法によって推定された結果がどのような関係にあるかを把握しておく必要がある。

そこで本研究では、鉛直アレイ地震観測システムが設置されている地点を対象に、微動探査を実施して Vs 構造の推定について検討した。通常、鉛直アレイ地震観測システムを設置する場合には、地中埋設用地震計設置のためのボーリング孔を利用して PS 検層が行われるため、PS 検層結果との比較も可能となる。また、微動探査では、表層地盤と工学的基盤とのコントラストが明瞭な場合に良好な結果が得られることから、軟質な表層地盤に鉛直アレイ地震観測システムが設置されている地点を選定した。

なお、本研究では弱震動時の地盤特性に着目し、地盤物性の非線形性の影響については対象外とする。

2. 検討方法と評価対象地点

(1) 検討方法

本研究で行った各種 Vs 構造推定の検討方法は以下のステップの通りである。

- i) 評価対象地点の PS 検層結果を準備する。
- ii) 鉛直アレイ地震観測システムで観測された最大加速度 100m/s^2 以下の弱震動記録に基づいて逆解析した Vs 構造モデルを準備する。以降、これを最適地盤モデルと称することとする。
- iii) 評価対象地点において、単点の常時微動計測を行い H/V スペクトルを求める。PS 検層と最適地盤モデルから理論的に算定される H/V スペクトルの理論値と計測結果との比較を行う。なお、H/V スペクトルの理論値としては Arai and Tokimatsu³⁾に従った。常時微動計測器には、白山工業社製の JU410 を使用した。
- iv) 評価対象地点に十分なスペースがある場合には、水平アレイ常時微動計測を行い、SPAC 法⁴⁵⁾により Rayleigh 波の位相分散曲線を求める。なお、水平アレイ常時微動計測は半径 10m および 20m の正三角形アレイとした。微動計は円の中心に 1 箇所、円周上に 3 箇所設置した。PS 検層と最適地盤モデルから算定される位相速度分散曲線の理論値と計測結果との比較を行う。
- v) 以上の結果から、各種 Vs 構造推定手法から得られる結果について考察する。

(2) 評価対象地点

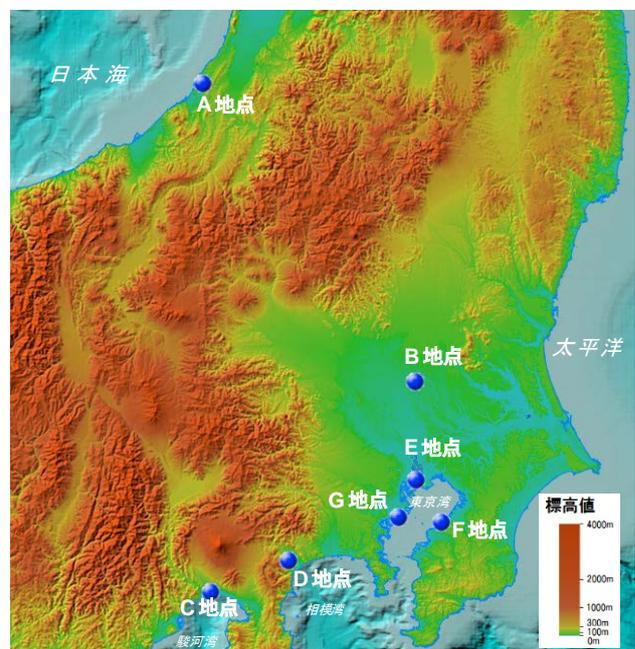
本研究ではタイプの異なる手法の比較を行うことから、できるだけ複雑な要因を排除し、シンプルな条件下で各手法を評価すべきと考える。そのために、地点選定の前提条件として水平成層が想定される地盤であることとした。

図-1 に評価対象地点の分布を示す。首都圏を中心とした中日本の主として平野部の堆積地盤に位置する 7 地点を選定した。全ての評価地点は表層が軟質な地盤に鉛直アレイ地震観測システムが設置されているサイトである。各評価対象地点では、地表と地中の工学的基盤層に地震計が設置されている。また、場所によっては工学的基盤と地表との間に幾つかの地震計が設置されている場合がある。

3. 各手法による推定の比較

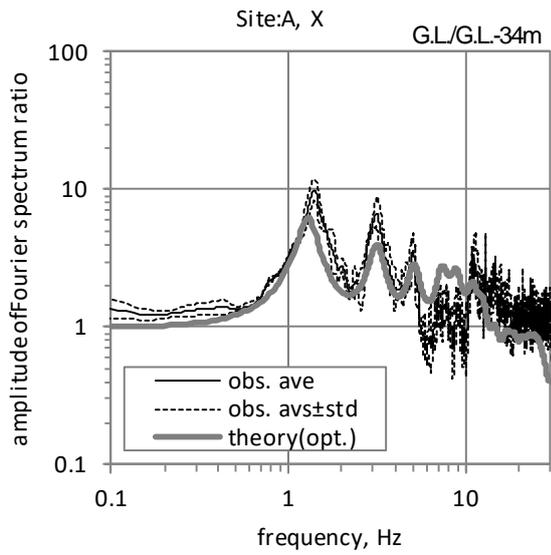
(1) 鉛直アレイ地震観測記録による推定結果

図-2 に鉛直アレイ観測記録の平均スペクトル比（地表/地中）と最適地盤モデル（図中表記：opt.）による理論伝達関数の比較を示す。ここで観測値は、各成分のフーリエスペクトルを 0.2Hz の Parzen window で平滑化した後に比を計算している。理論値は、鉛直入射 SH 波の 1 次元波動伝播理論によって算定したものである。

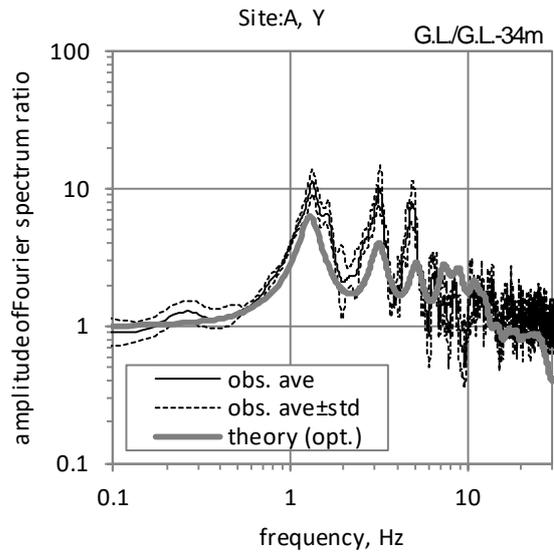


(背景地図：国土地理院地理院地図（電子国土 Web）)

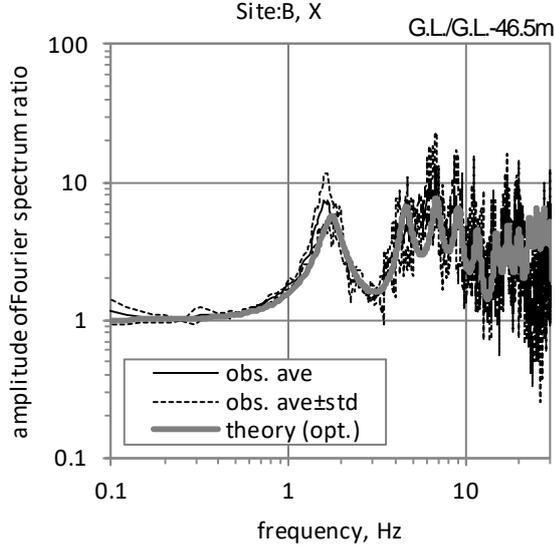
図-1 評価対象地点位置図



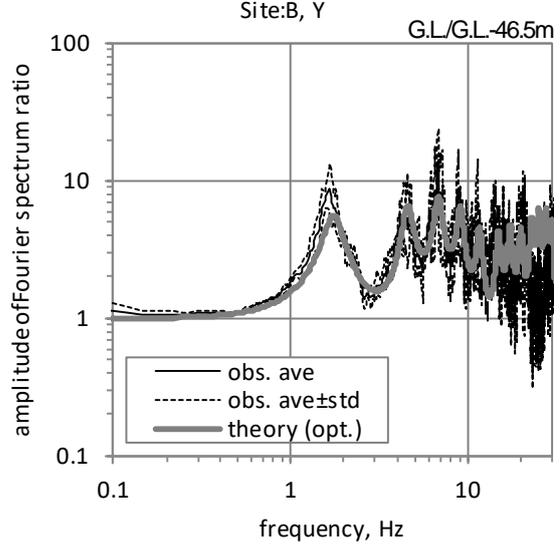
(1) A地点, X成分



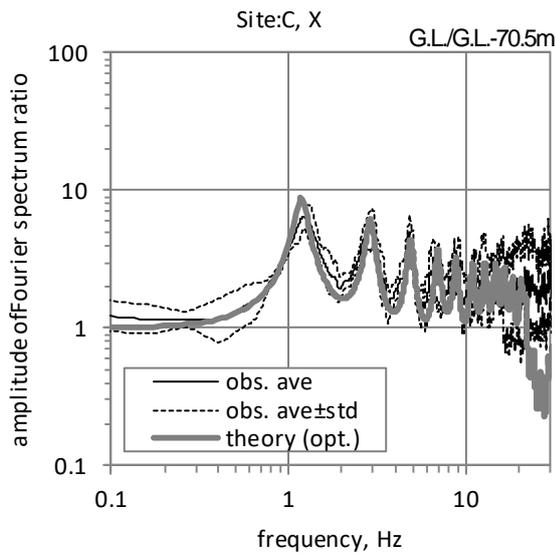
(2) A地点, Y成分



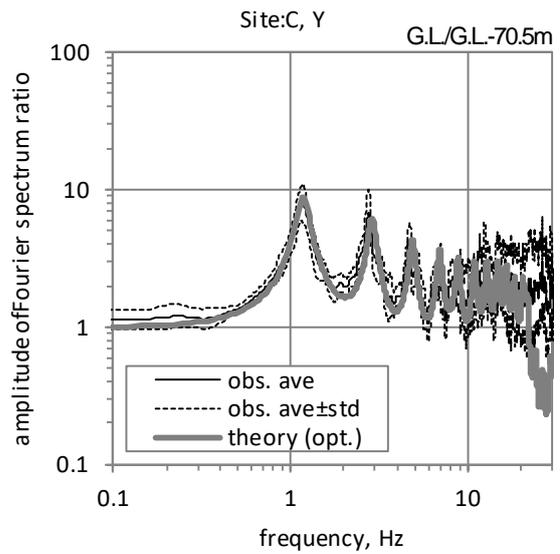
(3) B地点, X成分



(4) B地点, Y成分

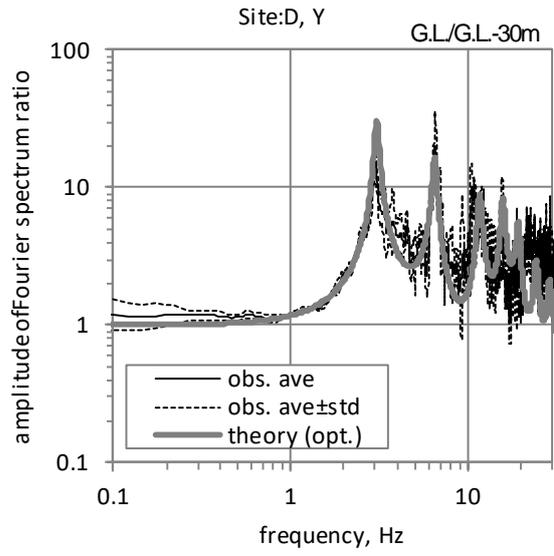
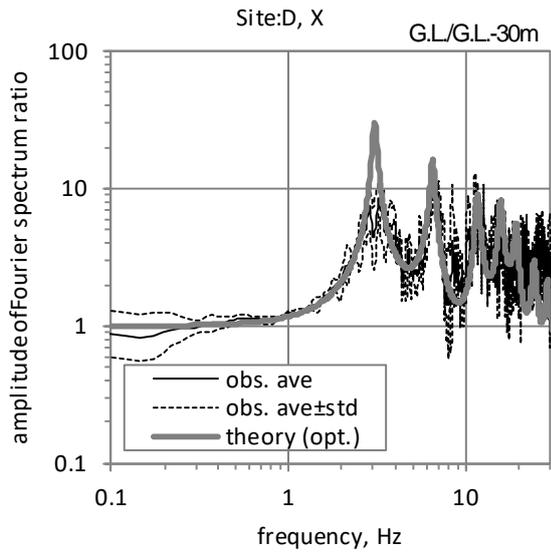


(5) C地点, X成分



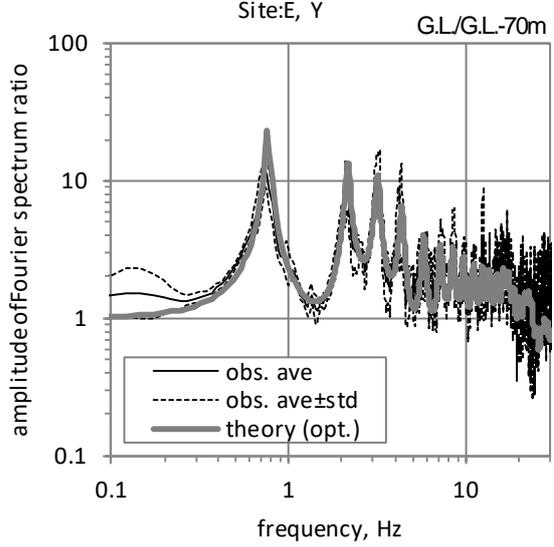
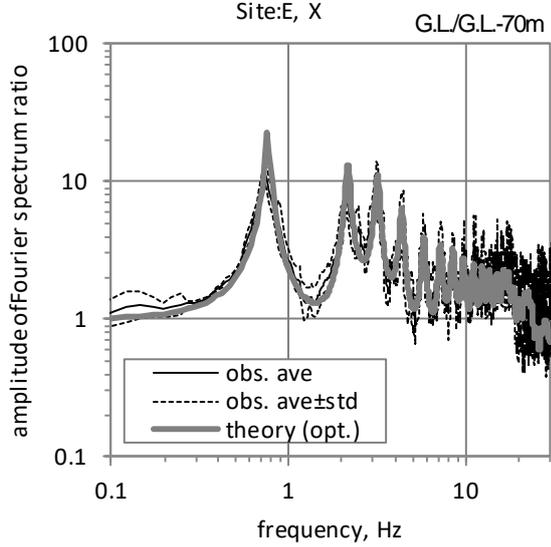
(6) C地点, Y成分

図-2 鉛直アレイ観測記録の平均スペクトル比と最適地盤モデルによる理論伝達関数の比較(1)



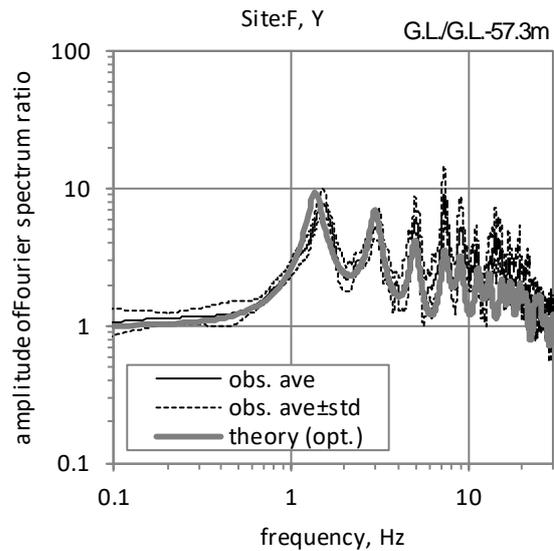
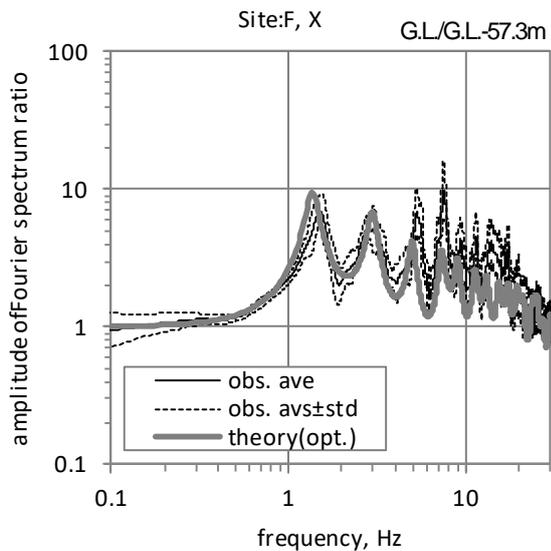
(7)D地点,X成分

(8)D地点,Y成分



(9)E地点,X成分

(10)E地点,Y成分



(11)F地点,X成分

(12)F地点,Y成分

図-2 鉛直アレイ観測記録の平均スペクトル比と最適地盤モデルによる理論伝達関数の比較(2)

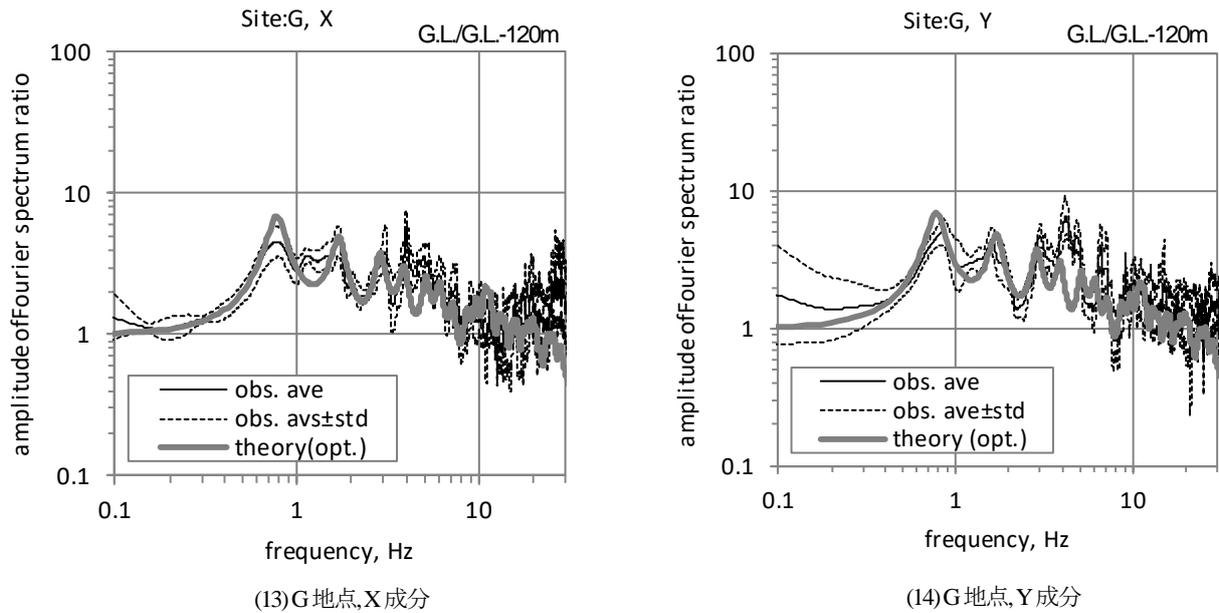


図-2 鉛直アレイ観測記録の平均スペクトル比と最適地盤モデルによる理論伝達関数の比較(3)

各地点の最適地盤モデルは既往の検討⁶⁾により求められたものであり、速度構造と周波数依存型の減衰を観測記録のフーリエスペクトル比に適合するように最適化手法で求めている。最適化手法で最適な地盤モデルを求める際、PS 検層により得られている速度分布を最適化手法の初期値もしくは解の探索範囲設定に用いている。

図-2 の A 地点については、PS 検層の結果で観測記録の卓越振動数をよく説明できるため、最適地盤モデルと PS 検層結果は一致している。また、E 地点については PS 検層を実施していないため、別途得られていた標準貫入試験の N 値分布から V_s への換算値⁸⁾によって初期値の代用とした。

図-2 の A, F, G 地点について、観測値と最適地盤モデルによる理論値との振幅レベルにやや乖離している箇所が見受けられる。これらは、前述の通り地中地震計が他にも存在することから複数のフーリエスペクトル比の組合せが存在し、それら全てについて全層一様の減衰モデルで最適化を行っているため、部分的に一致度が低下しているものである。なお、振幅レベルについては地盤モデルの減衰が主として影響しているため、本論の検討内容には影響を及ぼさないと考えている。

全ての地点で観測記録のフーリエスペクトル比に卓越周波数の異方性は認められない。また、1 次元波動伝播理論で高次モードまで観測記録が説明できている。以上より、全対象地点はほぼ水平成層地盤の仮定が成り立つと考えられる。

(2) 常時微動計測の HV スペクトルによる検討

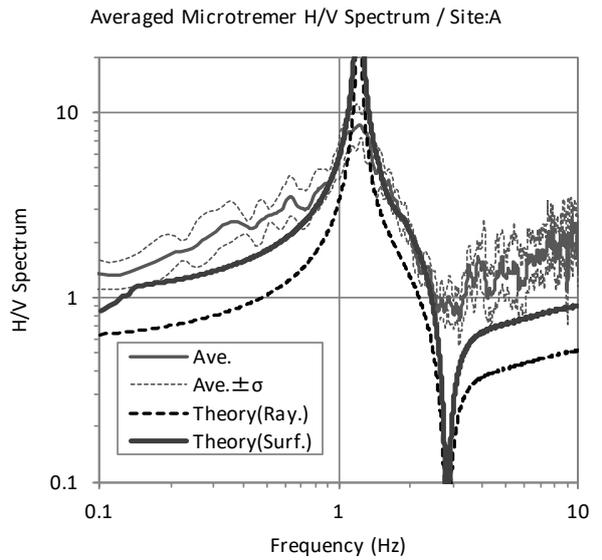
常時微動の単点計測は各地点共に時間刻み 0.01 秒 (100Hz) で継続時間 10 分以上のデータが得られるように計測を行った。計測器はプラスチック製コンテナの風よけで覆い、計測記録が風の影響を受けないように配慮した。各計測記録は交通振動などの雑振動部分を避け、重複を許して継続時間 1 分の区間を 10 区間抽出した。なお、各抽出区間の前後 1 秒を \cos 関数でテーパ処理している。フーリエスペクトルに 0.1Hz の Parzen window で平滑化処理を施した後に次式の通り H/V を算定して、アンサンブル平均を求めた。

$$\left(\frac{H}{V}\right)_M(f) = \sqrt{\frac{P_x(f) + P_y(f)}{P_z(f)}} \quad (1)$$

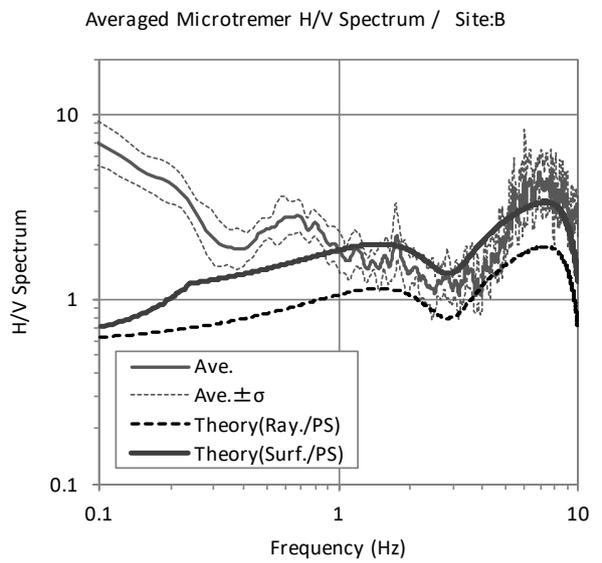
ここで、 $P_x(f)$ および $P_y(f)$ は常時微動計測記録の水平成分パワースペクトル、 $P_z(f)$ は同鉛直成分パワースペクトルを表す。

H/V の理論値については、Arai and Tokimatsu⁹⁾の理論に基づいて、Rayleigh 波だけを用いた場合と Love 波と Rayleigh 波の両方を考慮した表面波理論を用いた場合の 2 種類を考えた。両者とも基本モードのみを取り扱っている。Rayleigh 波の理論 H/V スペクトルは次式の通りである。

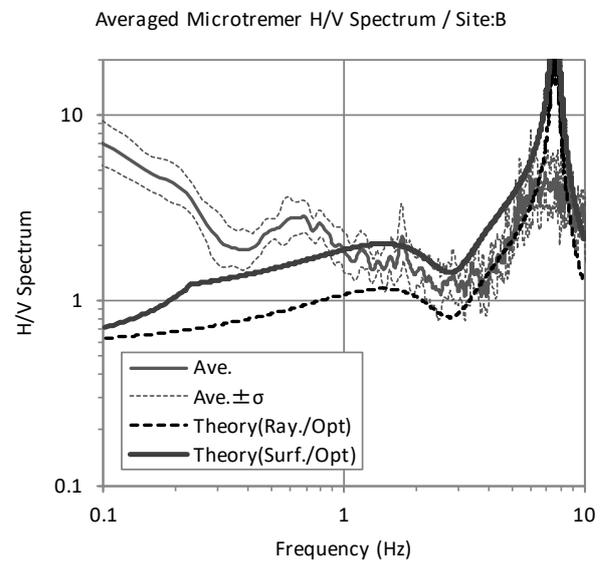
$$\left(\frac{H}{V}\right)_R(f) = \sqrt{\frac{P_{HR}(f)}{P_{VR}(f)}} \quad (2)$$



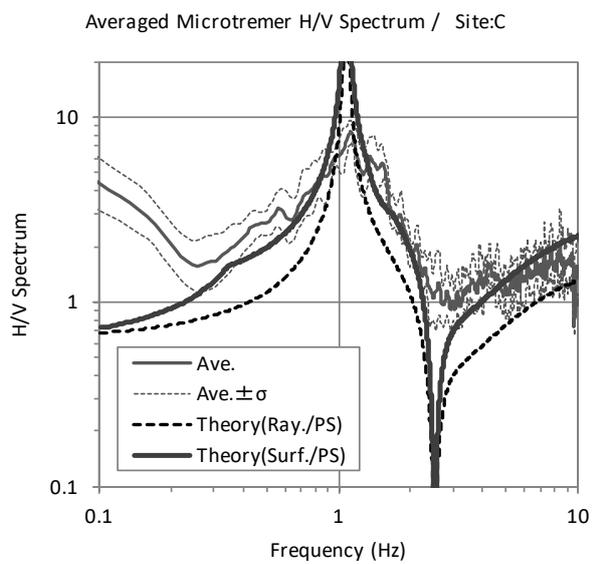
(1) A 地点の最適地盤モデル (PS 検層結果) との比較



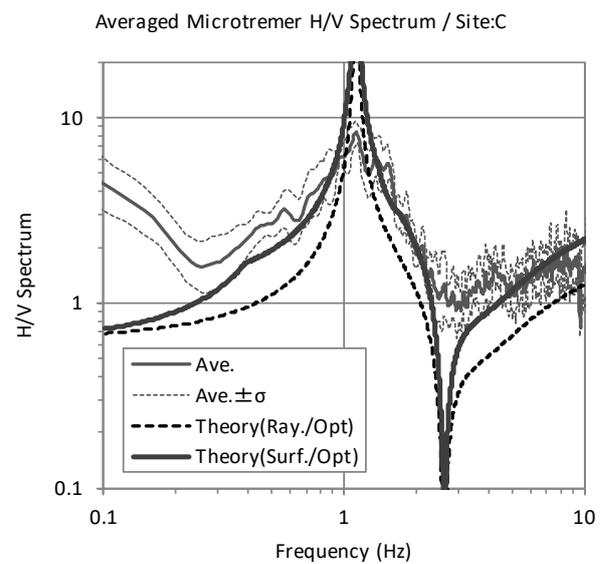
(2) B 地点の PS 検層結果との比較



(3) B 地点の最適地盤モデルとの比較

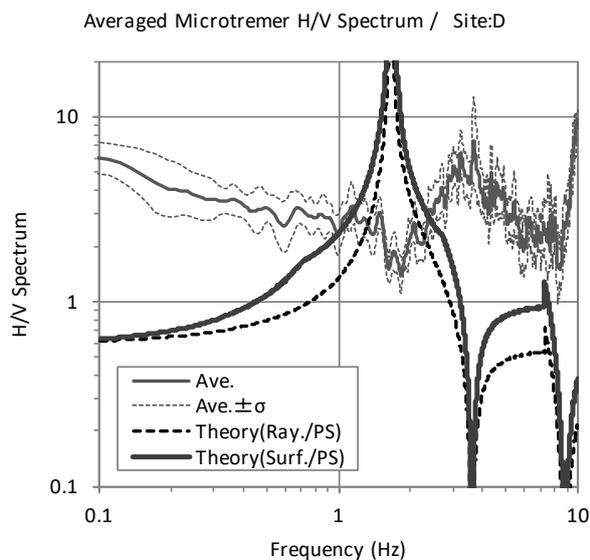


(4) C 地点の PS 検層結果との比較

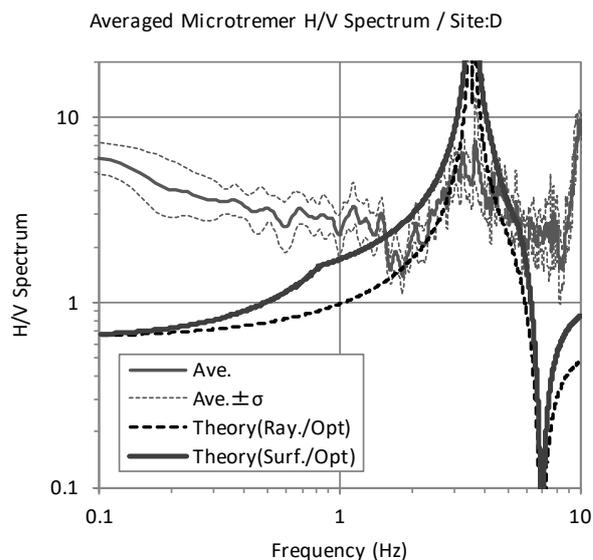


(5) C 地点の最適地盤モデルとの比較

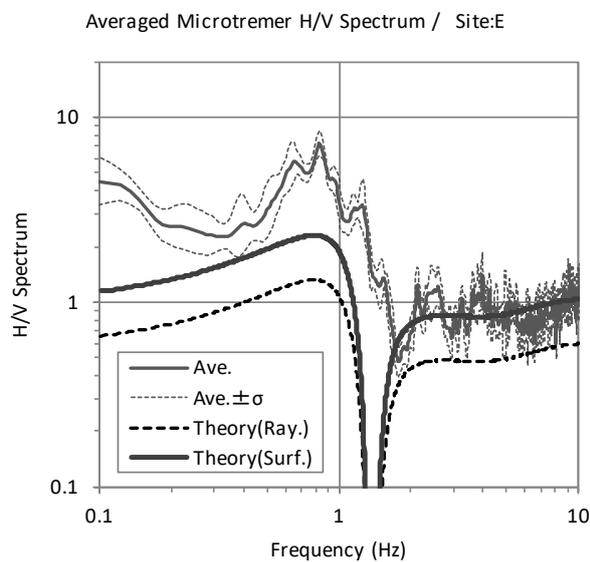
図-3 常時微動計測結果と理論値の H/V スペクトル比較 (1)



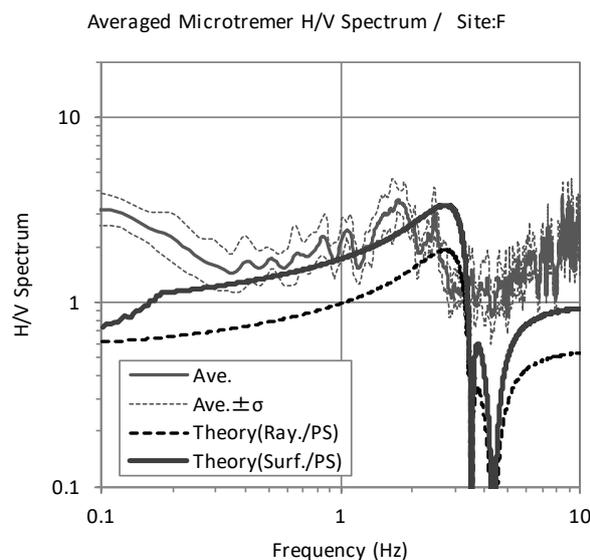
(6)D地点のPS検層結果との比較



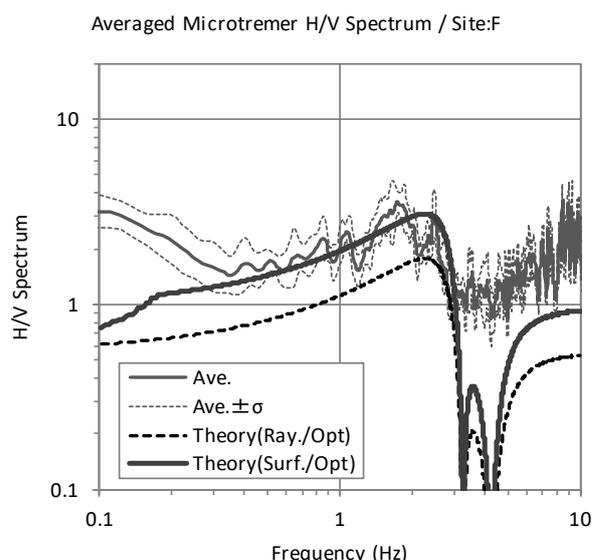
(7)D地点の最適地盤モデルとの比較



(8)E地点の最適地盤モデルとの比較

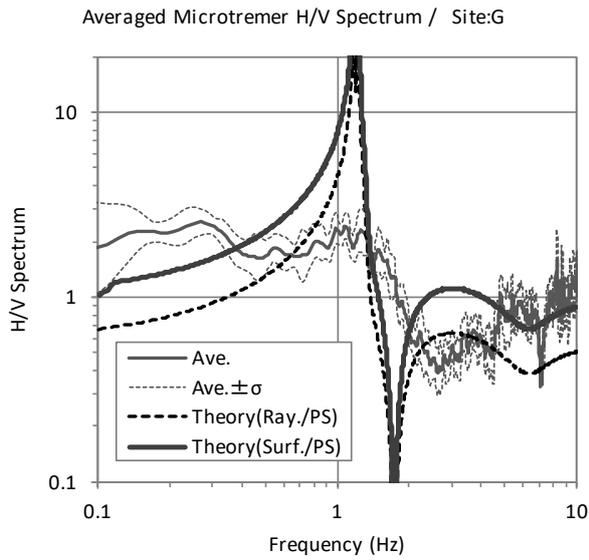


(9)F地点のPS検層結果との比較

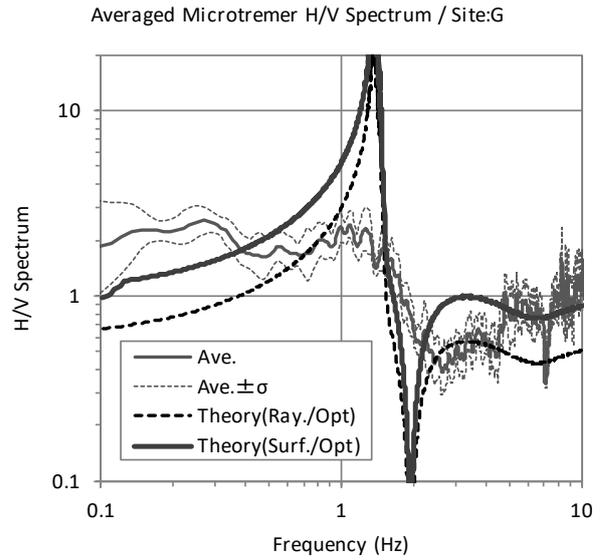


(10)F地点の最適地盤モデルとの比較

図-3 常時微動計測結果と理論値のH/Vスペクトル比較(2)

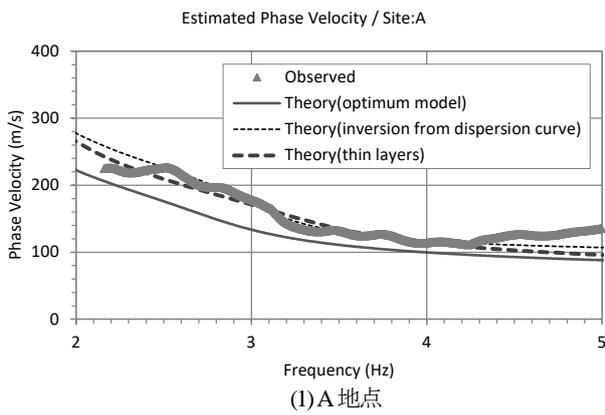


(11)G地点のPS検層結果との比較

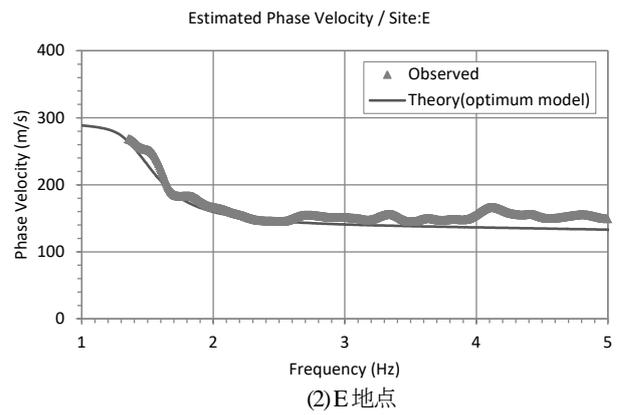


(12)G地点の最適地盤モデルとの比較

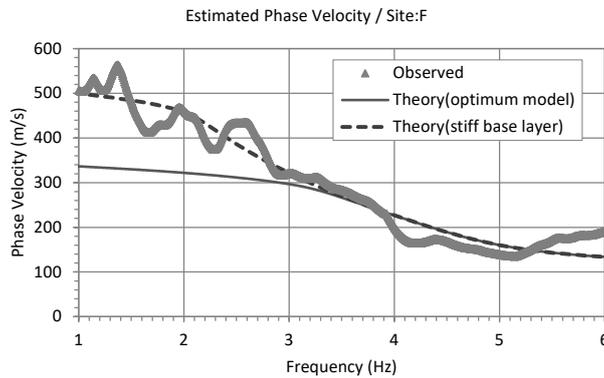
図-3 常時微動計測結果と理論値のH/Vスペクトル比較(3)



(1)A地点



(2)E地点



(3)F地点

図-4 水平アレイ常時微動計測結果と理論値のRayleigh波位相速度分散曲線の比較

ここで、 $P_{HR}(f)$ は Rayleigh 波の水平成分パワースペクトル、 $P_{VR}(f)$ は Rayleigh 波の鉛直成分パワースペクトルを表す。また、Love 波と Rayleigh 波の両方を考慮した表面波の理論 H/V スペクトルは次式による。

$$\left(\frac{H}{V}\right)_s(f) = \sqrt{\frac{P_{HS}(f)}{P_{VS}(f)}} = \sqrt{\frac{P_{HR}(f) + P_{HL}(f)}{P_{VR}(f)}} \quad (3)$$

ここで、 $P_{HS}(f)$ 、 $P_{VS}(f)$ は表面波の水平および鉛直成分パワースペクトルを表す。また、 $P_{HR}(f)$ および $P_{HL}(f)$ は Rayleigh 波および Love 波の水平成分パワースペクトルを表す。

常時微動計測結果と理論値の H/V スペクトルの比較を図-3 に示す。図中の理論値では、PS 検層結果の速度構造を用いた場合（図中表記：PS）と鉛直アレイ地震観測記録から求めた最適地盤モデルを用いた場合（図中表記：Opt.）との 2 種類の結果を各地点ごとに示している。ただし、最適地盤モデルと PS 検層結果が一致している A 地点と PS 検層を実施していない E 地点は最適地盤モデルの結果のみを示している。

各地点の H/V スペクトルの比較より、次のようなことがわかる。A 地点では最適地盤モデル（PS 検層結果）による理論値と常時微動計測結果の H/V スペクトルはよく対応している。B 地点ではいずれの結果も理論値と計測結果がほぼ対応しているが、最も重要と思われる 6~8Hz 付近のピークの振幅レベルについて、最適地盤モデルを用いた理論値の方が計測結果を良く表しているように思われる。C 地点については、両理論値とも計測結果とよく対応しているが、1Hz 付近のピーク周波数に着目すると最適地盤モデルの方が計測記録と良く一致していることがわかる。D 地点については両者の差異が明瞭であり、最適地盤モデルを用いた場合は計測結果を良く再現できるが、PS 検層結果では計測記録を全く説明できないことが分かる。E 地点の最適地盤モデルによる理論値と計測結果では、0.8~0.9Hz 付近にピーク周波数が表れる点においては一致しているものの、振幅レベルは理論値が下回っており他地点程の対応の良さは認められない。F 地点では、PS 検層結果と最適地盤モデルとで理論値に大きな差異が認められない。何れも計測結果とは概ね対応しているが、2~3Hz のピーク周波数付近については最適地盤モデルを用いた場合の方が対応が良い。G 地点については、1Hz 強のピーク周波数について最適地盤モデルの方がよく対応している。

また、常時微動計測の H/V スペクトルから各地点の Vs 構造を逆解析することも行っている。逆解析手法には、個体数：500、総世代数：50 の GA (Genetic Algorithm) ⁷⁾を用いた。その結果、鉛直アレイ地震観測システムの観測記録に基づいて推定された最適地盤モデルと比較し

て概ね数%程度の変動範囲に収まる結果が得られており、ここまでに述べてきた傾向と矛盾しない。この逆解析結果の Vs 構造については次章の考察の中で示す。

以上対象地点を概観した結果より、全体的な傾向として、鉛直アレイ地震観測システムの観測記録に基づいて推定された最適地盤モデルに表面波理論を適用して得られる H/V スペクトルは常時微動計測記録の計測結果によるそれと良く対応する傾向にあることが確認された。また、PS 検層結果に基づく理論値は、計測結果と良く対応する地点もあるものの、全く対応しない地点も存在する。更に、全ての地点に共通する特徴として、H/V スペクトルの理論値に Love 波と Rayleigh 波の両方を考慮した表面波理論を用いた場合（図中表記：Surf.）の方が、Rayleigh 波のみを用いた場合（図中表記：Ray.）よりも振幅レベルに関する対応が良いと言える。これは、Arai and Tokimatsu⁹⁾による既往の検討結果と同様の傾向である。従って、今回対象とした軟質表層地盤の地点では、Rayleigh 波だけでなく Love 波が混在した常時微動が計測されたと考えられる。

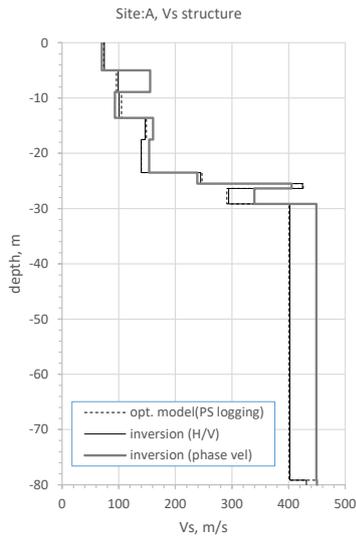
(3) 水平アレイ常時微動計測結果の検討

評価対象地点のうち敷地に十分なスペースがある A、E、F の 3 地点について半径 10m および 20m の正三角形アレイの常時微動計測を行った。水平アレイ計測では各地点で継続時間 20 分間超の計測を行い、交通振動などのノイズ部分を避けて継続時間 120 秒のデータを 10 区間準備した。各区間の取り出しには、単点計測の場合と同様のテーパー処理を施している。SPAC 法⁴⁾により空間自己相関係数をデータ区間ごとに求めて平均化処理を施した。なお、各データ区間ごとの空間自己相関係数を算定する際には 0.2Hz の平滑化処理を施している。

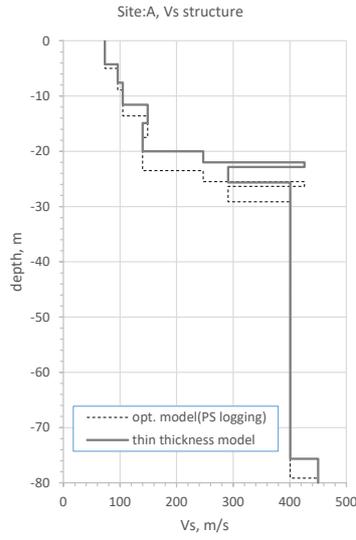
最終的に、空間自己相関係数の平均値から Rayleigh 波の位相速度分散曲線を求めた結果を図-4 に示す。図中の三角形シンボルが水平アレイ常時微動計測から求められた結果であり、実線は最適地盤モデルを用いて Rayleigh 波の理論により算定した位相速度分散曲線である。図より、E 地点については鉛直アレイ地震観測システムで観測された記録に適合するように作成した最適地盤モデルによる理論値と計測結果が非常に良く対応している。しかし、他の 2 地点については最適地盤モデルによる理論値と計測結果との間に乖離が見られる。この問題については次章で更なる検討を加え考察する。

4. 議論

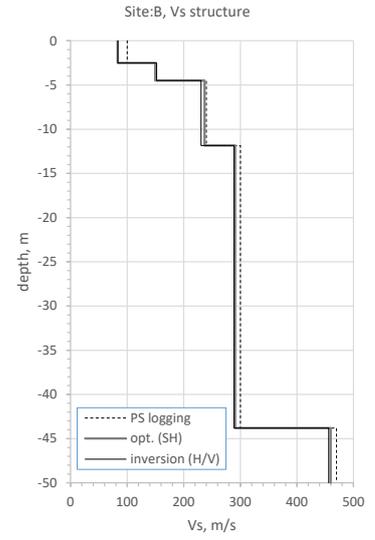
ここまでの検討結果を考察し、各種の Vs 推定について統一的な解釈を試みる。



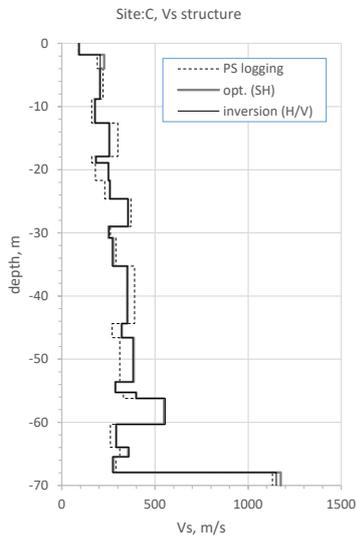
(1) A 地点, 位相速度分散曲線の逆解析



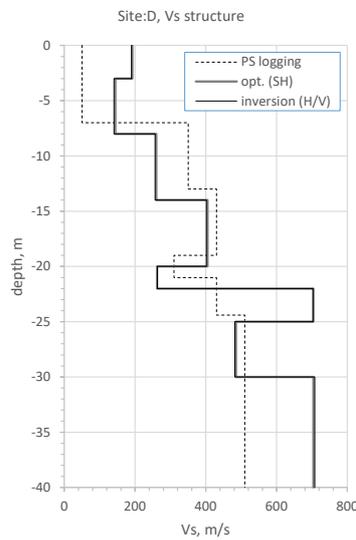
(2) A 地点, 表層の層厚低減



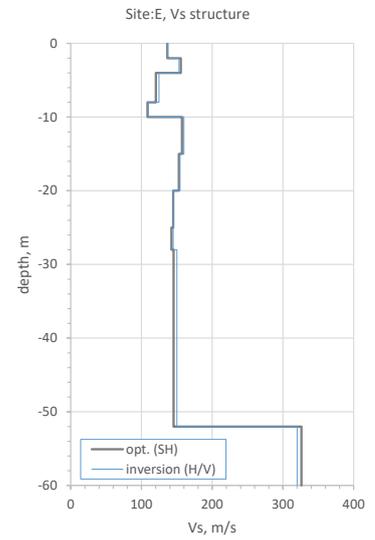
(3) B 地点



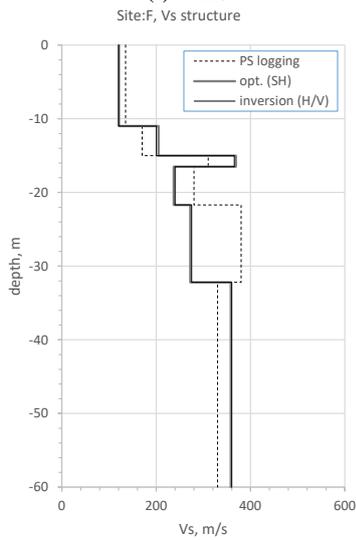
(4) C 地点



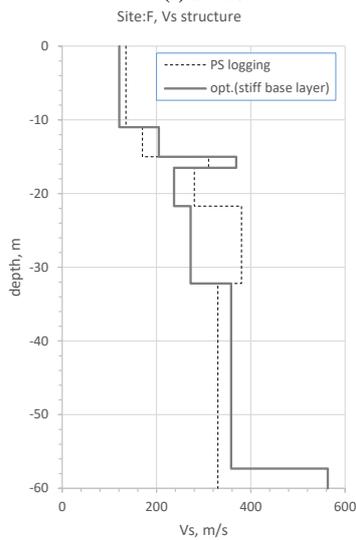
(5) D 地点



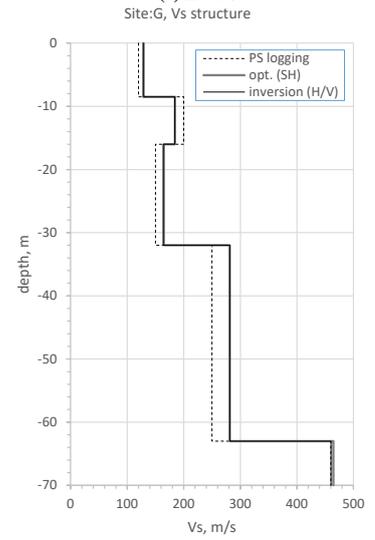
(6) E 地点



(7) F 地点, SH 波の最適地盤モデル



(8) F 地点, 工学的基盤速度増加



(9) G 地点

図-5 各地点の Vs 構造比較

(1) 各種 Vs 推定手法に関する考察

図-5 にこれまでの検討で得られた各評価地点の Vs 構造の比較を示す。Vs 構造の推定値にばらつきが見られる地点とそうでない地点があり、地点ごとに様相は異なる。

本研究で対象としているのは、地震時の表層地盤増幅特性を精度良く求めるための Vs 構造推定手法に関する検討である。従って、表層地盤の増幅率を直接使用している鉛直アレイ地震観測システムの観測データに適合するように求めた最適地盤モデルが最も基本になるものと考えることができる。これと比較して、PS 検層の結果は最適地盤モデルと良く対応する地点も有るものの、明らかに異なる地点も存在する。これは、PS 検層の起振源が地震と比較して明らかにパワーが小さいことおよび計測機器の発受信間距離が短いことからボーリング孔の極近傍の特性を反映していることが影響しているものと思われる。PS 検層結果と最適地盤モデルとの間に大きな乖離が認められる D 地点に着目すると、常時微動計測の H/V スペクトルは最適地盤モデルから算定した理論値と一致し、PS 検層結果から算定した理論値とは全く対応しない。一方、A~C 地点のように PS 検層結果と最適地盤モデルに殆ど差異が無い場合には、両推定値を用いた理論値と常時微動計測の H/V スペクトルは良く対応する。また、F および G 地点のように最適地盤モデルと PS 検層結果が若干異なる場合には、最適地盤モデルから算定される理論値の方が H/V スペクトルのピーク周波数を的確に捉えている。

図-5 における細実線は単点常時微動計測の H/V から Vs 構造を逆解析した結果である。前章で述べた通り、鉛直アレイ地震観測システムの観測記録に基づいて推定された最適地盤モデルに近い結果が得られたため、両者の線は非常に近接している。

以上より、本研究で対象としたような軟質表層地盤の場合、鉛直アレイ観測記録から求めた最適地盤モデルは、常時微動計測の H/V スペクトルを良く説明することができると言える。

(2) 位相速度分散曲線と Vs 構造に関する考察

前章で示したように鉛直アレイ地震観測記録から求めた最適地盤モデルを用いた理論値と常時微動計測記録の H/V スペクトルが良く対応する A 地点と F 地点について、水平アレイ常時微動計測から求めた Rayleigh 波の位相速度分散曲線が一致しない現象が見られた。そこで、両地点について個別に検討を行った。

はじめに、A 地点について位相速度分散曲線に適合する Vs 構造を逆解析によって求めた。逆解析手法には GA を用いた。GA の解析条件としては、個体数：500、

総世代数：50、解析周波数帯：2.5Hz~4.5Hz とした。逆解析の結果は図-4 (1)の細破線の通り、計測結果の位相速度分散曲線に適合する結果が得られる。しかし、得られた Vs 構造は図-5 (1)のように深層部まで最適地盤モデル (PS 検層結果) と大きく異なったものとなり、不自然である。そこで、最適地盤モデルの Vs 構造からの変化量をできるだけ抑制しつつ位相速度分散曲線を再現できる Vs 構造を探索したところ、図-5 (2)の実線のような結果が得られた。これは各層の Vs を最適地盤モデルと同じ値で固定し、地表付近の第 1 層~第 5 層の層厚を一律 0.85 倍にした場合の結果である。この Vs 構造を用いて位相速度分散曲線の理論値を計算した結果は図-4 (1)の太破線のように計測値と良く一致している。更に、全層の層厚を一律 0.85 倍にしても同様の結果が得られるが、第 6 層以深の層厚を変化させても位相速度分散曲線に殆ど影響を及ぼさないことから、深部の層厚の変化は着目周波数帯における位相速度分散曲線再現の必要条件となっていない。A 地点においては PS 検層結果と鉛直アレイ地震観測記録による最適地盤モデルが一致し、且つ単点常時微動計測結果の H/V スペクトルについては最適地盤モデルによる理論値と良く一致している。3 種類の異なる方法で整合性がとれているにも拘らず、水平アレイ常時微動計測の結果だけが整合していない。これは、各手法でカバーしている水平面の領域が異なっていることに原因があるものと考えられる。表層付近の層厚を若干薄くすることで計測結果を再現できるということは、この地点を少し広い範囲で見た時に表層付近が傾斜した構造である可能性を示しているものと考えられる。対象地点が柏崎平野の端部付近に位置することからも十分に有り得ることと思われる。水平アレイは他の 3 手法よりも広い範囲の地盤特性を反映しているものと考えられ、解析可能な波長帯域は概ねアレイ半径の 2 倍から数倍もしくは 10 数倍までの範囲と言われている^{9,10}。本研究で水平アレイ常時微動計測を行った半径の最大値は 20m であり、解析可能な最大波長は最大 200m 程度ということになる。従って、水平アレイ常時微動計測結果は 200m 四方程度の領域の地盤構造の影響を反映しているものと考えられる。

次に、F 地点についても位相速度分散曲線に適合する Vs 構造を逆解析によって求めた。逆解析手法および解析条件は A 地点の場合と同様である。解析周波数帯は 1.0Hz~5.5Hz とした。逆解析の結果は図-4 (3)の細破線の通り、計測結果の位相速度分散曲線に適合する結果が得られる。得られた Vs 構造は図-5 (8)の通りであり、図-5 (7)の最適地盤モデルと比較すると最深部の層の速度だけが大きくなっている。これは、鉛直アレイ地震観測システムでは、最深部の地震計以深の速度構造を求めるこ

とが困難であるため Vs 構造に反映されていなかった深部の高速度層の影響が、水平アレイ常時微動計測の結果には反映されていたと解釈できる。

最後に、E 地点については PS 検層結果が存在しないものの、鉛直アレイ地震観測記録、単点常時微動計測の H/V、水平アレイ常時微動計測結果の Rayleigh 波位相速度分散曲線が何れも概ね対応しており、各手法間に矛盾は生じていない。従って、E 地点は理想的な水平成層構造が広く分布しているものと推察される。

(3) 総括

以上の結果より、本研究で対象とした軟質表層地盤の Vs 構造推定において、PS 検層、鉛直アレイ地震観測、単点常時微動計測、水平アレイ常時微動計測の各手法の比較検討を行った結果、各手法の特性が確認された。これは、当初の想定を支持する結果が得られたことを示し、PS 検層が局所的、水平アレイ常時微動計測が広域的、鉛直アレイ地震観測と単点常時微動計測が前 2 者の中間程度の空間的な地盤情報を反映した結果が得られる傾向にあると考えられる。従って、地盤物性が均質に近く水平成層構造の地盤が広がる理想的な地点においては、各種推定結果が概ね一致するものと期待される。

5. まとめ

本研究では、軟質表層地盤を対象として Vs 構造の推定に関する検討を行った。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 鉛直アレイ地震観測システムの観測記録に基づいて推定された最適地盤モデルに表面波理論を適用した H/V スペクトル理論値は、単点の常時微動計測記録の H/V スペクトルと良く対応する傾向にあることが確認された。更に、全地点共通の特徴として、既往検討³⁾と同様に H/V スペクトルの理論値に Love 波と Rayleigh 波の両方を考慮した表面波理論を用いた場合の方が、Rayleigh 波のみを用いた場合よりも振幅レベルに関して計測値との対応が良く、今回対象とした軟質表層地盤地点では、Rayleigh 波と Love 波が混在した常時微動が計測されたと考えられる。
- 鉛直アレイ地震観測に基づく最適地盤モデルと PS 検層結果が異なる場合、各 Vs 構造モデルから算定される H/V スペクトルの理論値と常時微動計測結果とを比較すると、前者は良く対応するものの後者の適合度は劣ることが分かった。特に、前者のモデルはピーク周波数を的確に捉えられている傾向にある。
- 水平アレイ常時微動計測を行った 3 地点について、

計測により得られた Rayleigh 波位相速度分散曲線と鉛直アレイ地震観測に基づく最適地盤モデルから算定される位相速度分散曲線の理論値との比較を行った結果、両者が良く適合する地点と適合しない地点が存在した。適合しない地点について、位相速度分散曲線に適合する Vs 構造の逆解析を行い検討したところ表層付近の層厚や最深部の高速度層の存在などの影響であることがわかった。これらは、水平アレイ常時微動計測が他の推定手法と比較してより広い領域の地盤構造の影響を反映していることに起因するものと考えられる。

- 軟質表層地盤の Vs 構造推定において、PS 検層、鉛直アレイ地震観測、単点常時微動計測、水平アレイ常時微動計測の各手法の比較検討を行い、各手法の特性が推定結果に表れることを確認した。即ち、PS 検層が局所的、水平アレイ常時微動計測が広域的、鉛直アレイ地震観測と単点常時微動計測が前 2 者の中間程度の空間的な地盤情報を反映した結果が得られる傾向にあり、これは当初想定したことを支持するものであると考えられる。従って、水平成層構造が広がる理想的な地盤においては、各種推定結果が概ね一致するものと期待されることがデータを以て示された。

謝辞：常時微動計測には東電設計（株）の高橋秀明氏、松本陽介氏、青木宏明氏の協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 日本建築学会：地盤震動と強震動予測－基本を学ぶための重要項目－、6 章 地下構造の調査法とモデル化、丸善出版（株）、pp.91-101、2016。
- 栗田哲史：KiK-net 益城における 2016 年熊本地震の記録に基づく表層地盤の非線形増幅特性、土木学会論文集 A1（構造・地震工学）、Vol.73, No.4, pp.I_74-I_82、2017。
- Arai, H. and Tokimatsu, K.: S-wave velocity profiling by inversion of Microtremor H/V spectrum, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 94, No. 1, pp. 53–63, 2004.
- Aki, K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, *Bulletin of Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, Vol.35, pp.415-456, 1957.
- 岡田廣、松島健、森谷武男、笹谷努：広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法、物理探査、第 43 巻、第 6 号、pp.402-417、1990。
- Kurita, T., Kawahara, M., Annaka, T. and Takahashi, S.: Evaluation of local site effects in the Kanto district based on observation records, *Proceedings of Twelfth World Conference on Earthquake Engineering*, No.0224, 2000.
- 栗田哲史、佐藤博、足立倫海：表層地盤減衰の周波

- 数依存性に関する統計的性質, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4, pp.L_13-L_20, 2015.
- 8) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 4.5 耐震設計上の地盤種別, 丸善(株), p.26, 2002.
- 9) (社) 物理探査学会標準化検討委員会: 物理探査適用の手引き - 土木物理探査マニュアル 2008 -, pp.111-126, 2008.
- 10) 長郁夫, 先名重樹: 極小微動アレイによる浅部構造探査システム - 大量データの蓄積と利活用に向けて -, (国研) 産業技術総合研究所, Synthesiology, Vol.9, No.2, pp.86-96, 2016.

DISCUSSION ON V_s STRUCTURE ESTIMATIONS OF SOFT SUBSURFACE GROUNDS OBTAINED FROM DIFFERENT SURVEY METHODS

Tetsushi KURITA, Naoki NAKAMURA, Takahiro NAKAGAWA
and Takeyasu SUGIMOTO

It is necessary to prepare a ground structure model to implement seismic response analysis of the subsurface ground, and various field surveys are generally conducted to obtain the geological data. The most popular method to estimate the V_s structure of the ground is PS logging. Besides, it is also well performed to estimate the V_s structure by the inverse analysis from the vertical array seismic observation records, single point microtremor records, horizontal array microtremor records, etc. Since the accuracy of seismic response analysis largely depends on the performance of the ground structure model, the characteristics of these survey results should be well understood, and the relationship between the estimated ground structure models obtained by each method should be assessed. In this study, we compared V_s structure estimations by various methods for the sites of soft subsurface ground where vertical array seismic observation systems are installed, and discussed the relationship between each estimation.