

(62) 表面波の性質を利用した地盤探査法の埋立地における適用例

佐藤工業(株) 正会員 ○末富 岩雄 松原 智樹
東京電力(株) 正会員 福島 啓介 矢野 康明

1. はじめに 近年、面的な地下構造の情報を得ることを目的として、表面波の性質を利用することにより、ボーリングを行うことなく簡易に地盤構造を推定する手法が注目されている。これは表面波探査法と常時微動のアレー観測を行う方法（以後、微動アレー探査法と呼ぶ）に大別される。表面波探査法は、地表面上で鉛直加振を行うと、ある程度離れた地表面上ではレイリー波が卓越することを利用して、人工的に振動を与え各周波数における2点間の到達時間差から位相速度の分散曲線を算出するものである。振動の与え方により、起振器を用いる定常加振と重錘落下や打撃による衝撃加振に大別される。微動アレー探査法は、常時微動の鉛直成分にはレイリー波が卓越することを利用して、微動のアレー観測を行いF-Kスペクトル法や空間自己相関法により位相速度の分散曲線を算出するものである。各手法の運用上の特徴を表-1に示す。数十mまでの深度を対象とする場合、起振器を用いた表面波探査法が最も有効であるが、運搬・経費等に難がある。本研究では、各手法の適用範囲を明らかにし複数の手法を組み合わせることにより、これらの簡易な地盤探査法の適用範囲を拡張することを目的として、表-1に示す各手法により地盤探査を実施した。

表-1 表面波を利用する探査法の運用上の特徴

項 目	運 搬 性	所要時間	対象深度	経 費	用 地
衝撃加振による 表面波探査法	○	○	×	○	○
定常加振による 表面波探査法	×	△	△	×	△
微動アレー探査法	○	△	○	○	×

○は制約が少ないことを、×は制約が多いことを意味する。

2. 調査地点の概要 東京湾岸埋立地において地盤探査を実施した。当地点では、サスペンション型のPS検層等による詳細な地盤調査が行われており、その結果に基づき表-2に示すように地盤をモデル化した。このモデルのレイリー波の理論分散曲線を図-1に示す。

表-2 調査地点の地盤構造

層番号	層 厚 (m)	単位体積重量 (γ/m^3)	V_s (m/s)	V_p (m/s)
1	5.0	1.85	100	320
2	5.0	1.50	100	1640
3	4.0	1.80	170	1640
4	3.0	1.70	420	1760
5	5.0	1.60	220	1760
6	9.5	1.80	420	1760
7	1.5	1.80	520	1760
8	6.0	1.72	320	1760
9	7.0	1.85	420	1760

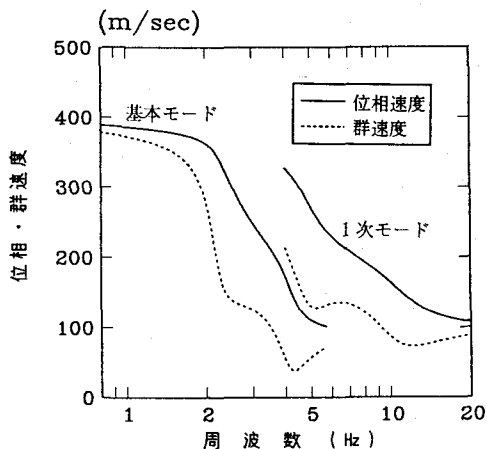


図-1 調査地点におけるレイリー波の理論分散曲線

3. 表面波探査法 1) 探査方法 図-2に示すように2点で鉛直成分を測定する。2点の記録のクロススペクトル $\phi_{12}(f)$ を用いて、位相差 $\theta_{12}(f)$ は次式で与えられる。

$$\theta_{12}(f) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Re}(\phi_{12}(f))}{\text{Im}(\phi_{12}(f))} \right\} \quad (1)$$

これから、位相速度 $c(f)$ は次式で与えられる。

$$c(f) = \frac{2\pi f \cdot D_2}{\theta_{12}(f)} \quad (2)$$

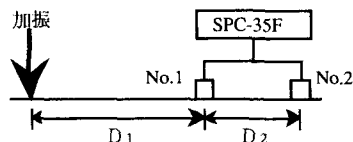


図-2 表面波探査法における配置

測定には携帯用振動計（SPC-35F）を用いた。加振源としては、起振器（起振力270kg；定常加振）と重錘落下（重量約20kg；衝撃加振）を用いた。サンプリング間隔は500Hzとし、定常加振の場合、 $D_1=10\text{m}$ 、 $D_2=5\text{m}$ 、衝撃加振の場合、 $D_1=5\text{m}$ 、 $D_2=2\text{m}$ とした。解析区間長は衝撃加振の場合1秒、定常加振の場合5秒とし、クロススペクトルを求める際にはハニング・ウィンドウを1回かけることにより平滑化を行った。

2) 測定結果 No.1地点における衝撃加振による応答と微動による応答のフーリエスペクトルの比較を図-3に示す。これより、5Hz以下では両者の差はなく微動を測定していることがわかる。得られた位相速度の平均値と標準偏差を図-4に示す。衝撃加振の場合、8~30Hz、定常加振の場合、4Hz以上で安定した値が得られている。これより低振動数側では、微動レベルが高くSN比が低いために安定した値が得られなかった。さらに低振動数まで表面波探査法により探査するためにはかなり大規模な加振源が必要となる。また、表面波探査法により地盤探査を行う場合でも、事前に微動の卓越振動数、振動レベル、到来方向等を把握しておくことにより、より信頼性が高い探査を行えると考えられる。

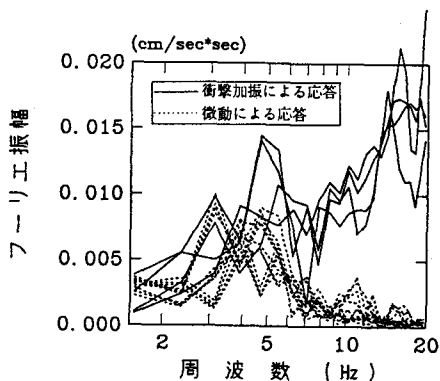
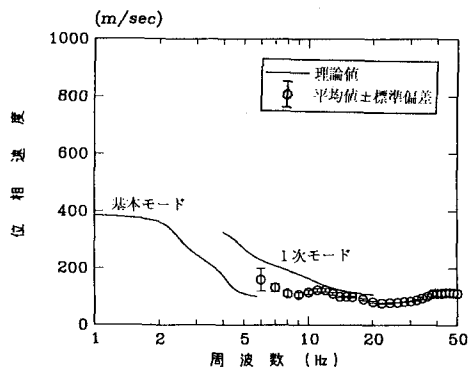
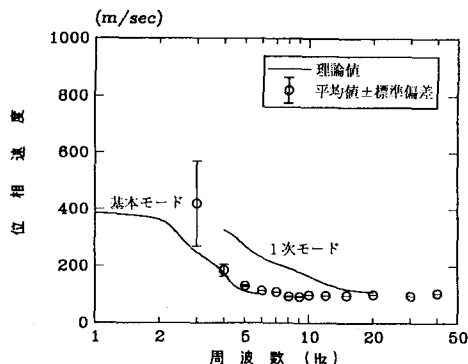


図-3 衝撃加振におけるSN比

4. 微動アレー探査法 1) 探査方法 図-5に示すように円周上の5点で鉛直成分を測定し、円の中心で3成分を測定した。半径9mと50mでサンプリング間隔を500Hzとして実施した。半径9mの場合10秒間、



(a) 衝撃加振

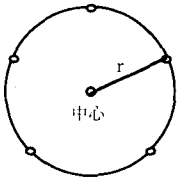


(b) 定常加振

図-4 表面波探査法による位相速度の分散曲線

半径50mの場合20秒間を1区間として解析した。F-Kスペクトル解析（最尤法¹⁹⁾）により位相速度を算出する。F-Kスペクトル $P(f,k)$ は次式で表される。

$$P(f,k)=\frac{1}{\sum_{l=1}^n\sum_{m=1}^n\phi_{lm}^{-1}\cdot\exp\{ik(x_l-x_m)\}}\tag{3}$$



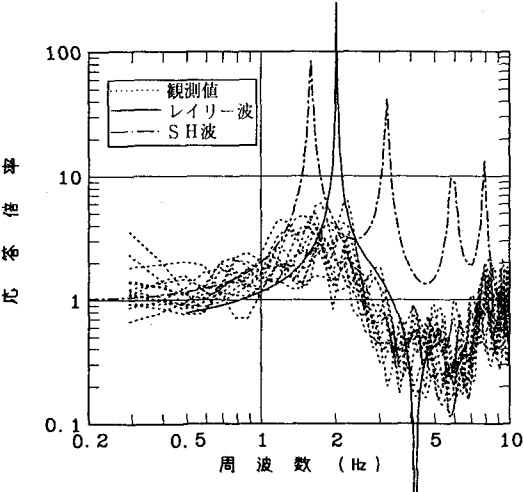
図－5 微動アレー探査法における地震計配置

ここで、 k は波数ベクトル、 n は観測点の数、 ϕ_{lm}^{-1} は2点間のクロススベクトルの逆マトリクス、 x は観測点の座標ベクトルである。このF-Kスペクトルがピークを有するときの波数ベクトルを k_{max} とすると、位相速度 $c(f)$ は次式により与えられる。

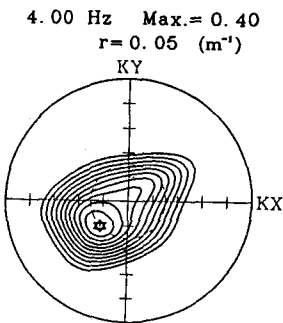
$$c(f)=\frac{2\pi f}{|k_{max}|}\tag{4}$$

2)測定結果 中心点における微動の水平／鉛直スペクトル比を図－6に示す。レイリー波の水平／鉛直スペクトル比の理論値と一次元重複反射理論によるSH波の伝達関数の理論値も合わせて示す。2 Hz付近でピークを有し、4 Hz付近で鉛直成分の方が大きくなるなど、レイリー波の理論値とよく対応しており微動にはレイリー波が卓越していると考えられる。F-Kスペクトルの例として、微動が卓越している4 Hzの場合を図－7に示す。F-Kスペクトル解析により得られた位相速度の平均値と標準偏差をP S 検層モデルによる理論値と合わせて図－8に示す。半径9mの微動アレーの場合、4～8Hz、半径50mの場合、2.25～5Hzで安定した値が得られている。上述の計測結果は周辺交通量が少ない休日の日中に行ったが、交通量が多い平日にも行い比較した。中村²⁾が述べているようにフーリエスペクトルには交通振動等による影響が見られたが、水平／鉛直スペクトル比には見られなかった。また、微動の到来方向は休日は北東方向から、平日は南方向からと異なったが、位相速度の分散曲線には大きな違いは見られなかった。

5. 逆解析による地盤構造推定 微動アレー探査法の場合、位相速度だけでなく伝播方向も定める必要があるので、今回のように起振器を用いた表面波探査法を実施できる場合には、これによる位相速度の分散曲線を用いることが望ましい。しかしながら、当地点では微動レベルが4 Hz付近で高いので、今回用いた起



図－6 微動の水平／鉛直スペクトル比



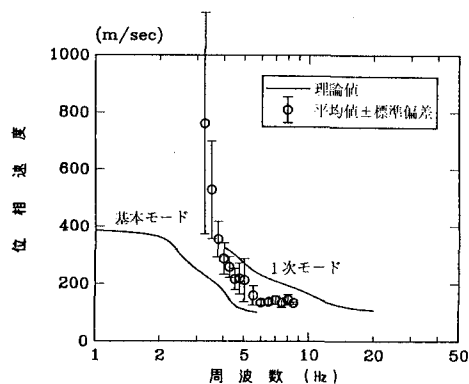
図－7 F－Kスペクトルの例

振器では4 Hz以下で十分な振動を与えることができなかった。そこで、2.25~3.75Hzを半径50mの微動アレーによる値、4~6Hzを定常加振による表面波探査法の値を用いて、逆解析³⁾を行った。P S検層による値を初期値とし、各層のS波速度のみを対象とした。得られた分散曲線を図-9に、S波速度構造を図-10に示す。基盤のS波速度を大きくすることにより2~3Hzにおける位相速度が大きくなり観測値に近づいている。このことは、3Hz以下の微動は深度50mより深い構造の影響を受けていることを示唆していると考えられる。

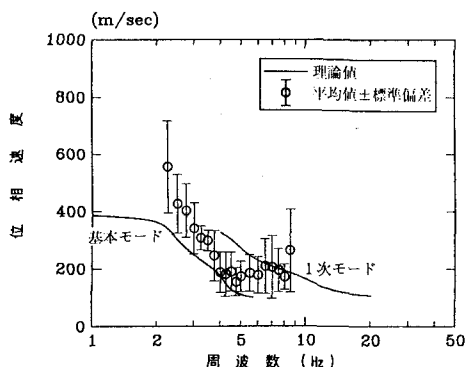
6. おわりに 表面波探査法と微動アレー探査法を併用することにより、表面波の性質を利用した地盤探査法の適用範囲を拡張できると考えられる。F-Kスペクトル解析および逆解析法には、大阪工業大学・堀家先生、(財)大阪土質試験所・香川氏によるプログラムを使用させていただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)堀家正則；微動の位相速度及び伝達関数の推定，地震，第33巻，pp.425~442，1980年
- 2)中村豊；常時微動観測に基づく表層地盤の地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol.2，No4，pp.18~27，1988年
- 3)Horike,M.;Inversion of Phase Velocity of Long-Period Microtremors to the S-Wave Velocity Structure down to the Basement in Urbanized Areas, J.Phys.Earth, Vol.33, pp.59-96, 1985



(a) 半径 9 m



(b) 半径 50 m

図-8 表面波探査法による位相速度の分散曲線

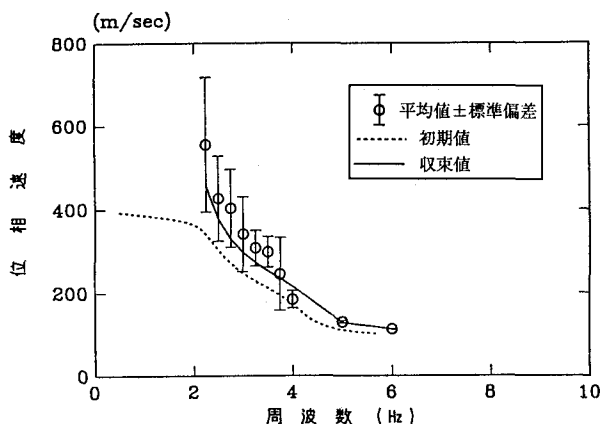


図-9 逆解析により得られた分散曲線

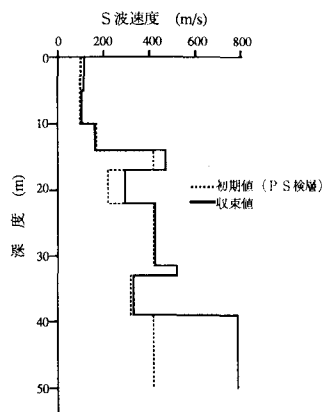


図-10 逆解析により得られたS波速度構造