

表面波探査

Surface Wave Exploration

時 松 孝 次 (ときまつ こうじ)

東京工業大学助教授 工学部建築学科

表面波にはレイリー波とラブ波があるが、いずれも物体の表面に沿って伝播する波である。レイリー波の伝播は水面に石を投げ込んだ時に起こる波紋のそれである。したがって、鉛直振動が優勢である。一方、ラブ波の伝播は、蛇が地面を這い進む姿に似ている。つまり、鉛直振動はなく、進行方向と直交する方向の水平振動が卓越する。

いずれの波の振幅も物体表面で大きく、その波長とほぼ同じ深度で無視できるほど小さくなる。このため、波長が短い波は浅い部分の性質を、波長が長い波はより深い部分までの性質を反映する。

一般に地盤は深くなるほど堅くなるから、波長 λ の長い波ほど、位相(伝播)速度 c が速くなる。 c 、 λ と周波数 f の関係は $c=f\cdot\lambda$ であるから、深い地盤の性質を反映する波長の長い波ほどその周波数が低い。このように波長または周波数に依存して位相速度が異なる性質を分散性と呼ぶ。実体波にはない表面波特有のものである。位相速度と波長または周波数の関係のある地盤に対して図-1のように示したものを分散曲線という。

地盤が水平成層構造と考えられ、そのS波速度構造が既知であれば、弾性波動論から分散曲線が決まる。レイリー波とラブ波では分散曲線の形状が異なるが、いずれも地盤固有のものである。したがって、地表での観測から表面波の位相速度と波長の関係(分散性)が決まれば、S波速度構造を弾性波動論の逆問題として推定することが可能である。また、精度は期待できないが、半経験的に、位相速度が測定波長の1/3~1/2の深度のS波速度に対応すると考えてS波速度構造の概略を推定することもできる。このような背景から、表面波の分散特性を積極的に利用して、S波速度構造を決定しようとするのが表面波探査である。実体波(S波、P波)を対象とし

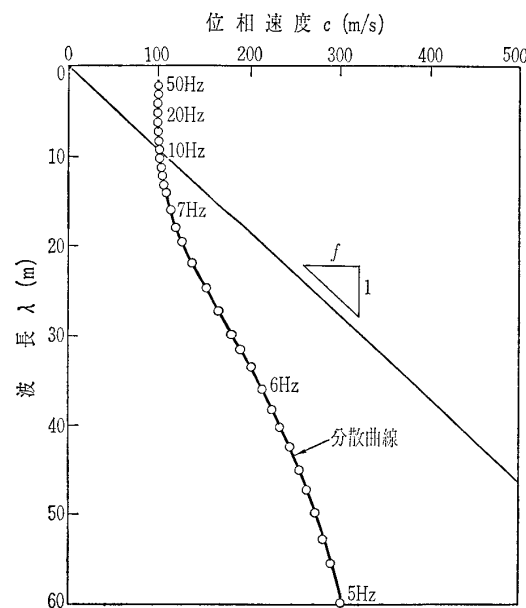


図-1 分散曲線の例

た反射、屈折法と同様、地表探査に分類されるが、対象とする波や理論的背景は以上のように異なる。

表面波探査の大部分はレイリー波の卓越する波を強制的に発生させ、その分散性を決定しようとするものである。その中には、地盤上の1点で起振機を一定周波数 f で鉛直振動させる方法がある。起振機からは、S波、P波、レイリー波などの波が発生するが、地表面を伝わる実体波は距離の2乗に、表面波は距離の1/2乗に比例してその振幅が減衰するため、起振源から離れた場所ではレイリー波が優勢となる。そこで、起振源から十分離れた放射線上に少なくとも2個の鉛直センサーを距離 D だけ離して配置し、地盤の鉛直振動を観測する(図-2)。2点で観測された波の位相差 ϕ を求めれば、2点間を伝わる波の伝播時間 Δt は $2\pi f/\phi$ となる。したがって、

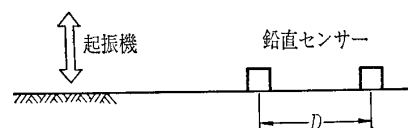


図-2 表面波探査の現場計測例

技術手帳

2点間を伝わる波の位相速度 c が $D/\Delta t$ となる。以上から、 c と f が既知となるから、波長 λ が決まり、図-1 に示す分散曲線の1点が決まる。起振機の周波数を変えて上記の操作を繰返せば、分散曲線が得られる。

ハンマーを地面に打ちつけても、重りを地面に落としても、起振機を用いて不規則な鉛直振動を起こしても、起振源より離れた位置ではレイリー波が卓越する。この場合、発生する波は単一周波数の正弦波ではなくなるが、2点で観測される波の優勢な周波数成分に対する位相差 ϕ をスペクトル解析から求めれば、単一正弦波の場合と同様の手順で、位相速度と波長の関係が求められる。なお、起振源とセンサー間の距離は、実体波の影響をさけて測定波長 λ の1/4ないし1倍程度以上離す必要がある。

上記の方法で発生できる周波数は小さなハンマーを用いた場合は10 Hz程度以上、大きな重りを落下させたり、持運びできる程度の起振機を用いた場合は5 Hz程度以上である。地盤条件により異なるが、これらは、それぞれ数m以浅、10~20m以浅程度の地盤を探索していることに相当する。それよりも深い地盤も同様の方法で探索可能であるが、周波数の低い波を発生させる必要があるため、起振源の重量が重くなり非効率的である。

深い地盤を探索したい場合、微動の鉛直成分に卓越するレイリー波に着目し、分散曲線を得ることも可能である。この場合、起振機などの振源が必要ないという利点がある一方、波の到来方向が分からないので、ある程度の数の鉛直センサーを地表面に二次元的に配置して微動を同時観測する必要がある。周期1秒以下の短周期微動を用いた場合は100m程度、周期1秒~5秒程度の長周期微動を用いた場合は数km程度までの地盤構造の推定が可能である。ただし、深い構造を推定したい場合には、センサー間距離を大きくとる必要があり、計測がおおがかりとなる。

同時観測された微動データに周波数一波数 (F—

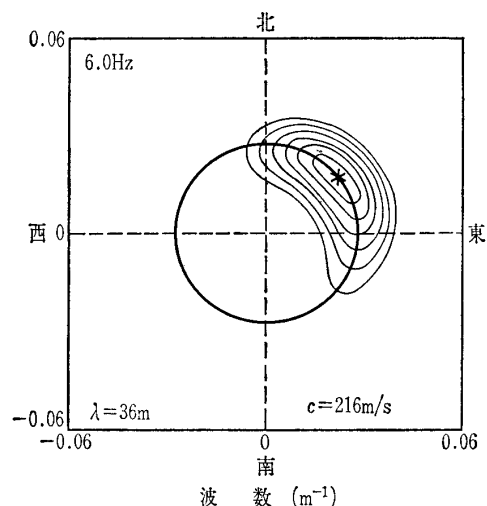


図-3 F—K スペクトルの例¹⁾

K) スペクトル解析を施すと、対象とする周波数 f に対してF—Kスペクトルが図-3のように求められる。図の波数軸は東西南北に対応するため、ピークの方が微動の到来方向を示し、原点からピークまでの距離が波長 λ の逆数(波数)となる。 f と λ が既知となるから、位相速度が決まり、分散曲線の1点が決まる。微動は種々の周波数成分を含んでいるため、このようなスペクトル解析から対象とする周波数帯域の分散曲線が一度に求められる。

表面波探索の地盤工学への適用は比較的最近のことである。そのため、計測、計測結果の解釈、逆解析などにおいて、まだ解決しなければならない問題点も多い。しかし、地表にセンサーを置くだけで、表層より地下深部までの地盤構造が把握できる可能性を持つ点に魅力は多く、今後、さらに改良発展が期待される探索法と考えられる。なお、分散曲線の逆解析については説明を省略したが、文献2)などが参考になる。

参考文献

- 1) Tokimatsu, K., Shinzawa, K. and Kuwayama, S.: Use of short-period microtremors for V_s profiling, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 118, No.10, 1992.
- 2) 時松孝次・田村修次: 高次モードと回転軌跡を考慮したレイリー波分散曲線の逆解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第432号, 1992.

(原稿受理 1992.7.6)