

常時微動の回転成分を用いた地盤構造推定の可能性について

京都大学地球環境学堂 正会員 ○清野 純史
(株)奥村組 非会員 増田 貴之

1. はじめに

地盤の卓越振動数や層構造を推定する手法の一つとして、単点微動観測や微動アレー観測がしばしば行われている。交通振動を始めとする様々な振動源を有する常時微動のスペクトルの水平・上下成分の比 (H/V) によってその地盤の卓越振動数を推定したり、常時微動に含まれる表面波の分散性をアレー観測を基に解析することで S 波速度構造を推定する方法は、汎用的な地盤探査手法として定着しつつある。微動アレー探査は、レイリー波を仮定した上で、その上下成分のみを用いて SPAC 法等により分散曲線を求め、逆解析により P 波速度、 S 波速度、層厚、密度などの地下構造のパラメータを求めるのが一般的である。

一方、もう 1 つの表面波であるラブ波は理論的には S 波波動方程式と境界条件から算出されるため、その分散性が識別されれば、 P 波による体積変化の影響を受けない形で、直接 S 波速度構造を推定できる。しかし、ラブ波は微動の水平成分にレイリー波とともに混在しており、従来の手法ではそれらを分離することは容易ではないため、ラブ波を利用した探査結果は非常に少ないのが現状である。

そこで本研究では、ラブ波の境界条件を与える前の S 波の波動方程式と、回転成分からなるねじれ波 (Rotational Wave) の支配方程式が同じことに着目し、回転成分による新たな微動探査手法の可能性を探ることを目的としている。 K -net 観測点での回転成分の微動観測による位相速度の分散曲線と、 K -net の検層データから得られる理論分散曲線との比較を行い、回転成分による新たな微動アレー探査の妥当性を検討する。

2. 位相速度の分散曲線に対する地盤パラメータの感度の検討

ここでは、レイリー波とラブ波の各表面波の基本的性質を把握するために、位相速度の分散曲線に対する地盤パラメータの感度を比較する。そのため、地盤の層厚、密度、 S 波速度、 P 波速度 (レイリー波のみ) を変化させて与え、ラブ波とレイリー波の各周波数に対する位相速度を計算し、多数の分散曲線を作成する。ここでは、表-1 に示す地盤のパラメータをそれぞれ変動係数が 0.1 であるような正規乱数として 1000 組発生させた。ラブ波とレイリー波に対して得られた分散曲線群をそれぞれ図-1 (a), (b) に、また変動係数を表-2 に示す。変動係数に大きな違いは見られないが、レイリー波の変動係数が概して幾分か小さい値となっている。

表-1 地盤モデルの一例

層番号	層厚 (m)	S 波速度 (m/s)	P 波速度 (m/s)	密度 (t/m ³)
1	11	210	860	1.7
2	9	340	1500	1.9
3	22	560	2100	2.1
4	∞	790	2600	2.2

表-2 変動係数の比較

振動数 (Hz)	ラブ波	レイリー波
0.25	0.101	0.098
5.00	0.105	0.122
10.0	0.102	0.101
15.0	0.101	0.099

3. ねじれ波を用いた位相速度の検出の試み

常時微動の水平成分にはレイリー波とラブ波が混在しているため、ラブ波のみを分離することは容易ではない。ラブ波を用いた地盤構造推定を行う手法もいくつか提案されている^{1), 2), 3)}が、通常、微動アレー探査は、微動の鉛直成分をレイリー波の鉛直成分とみなし、観測波の上下動成分のみを用いて、地盤構造推定を行っている。ここではまず、ねじれ波に関する定式化より、ラブ波と同様の考え方が成り立つこと、そして回転成分を抽出することで、ラブ波と同様の位相速度の分散曲線が得られる可能性があることを示す。

キーワード 常時微動, ねじれ波 (Rotational wave), 回転成分, 位相速度, 分散曲線, 地盤構造

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 京都大学工学研究科 都市社会工学専攻 TEL 075-383-3249

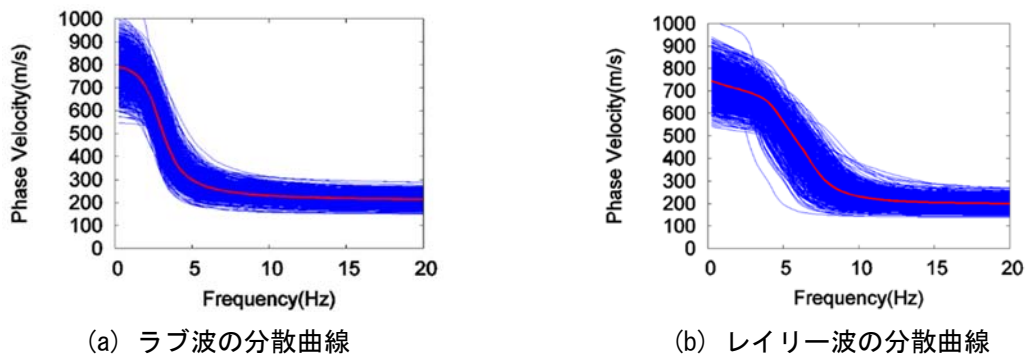


図-1 分散曲線の変動

弾性体としての変位とひずみに関する適合条件、フックの法則に従う応力ひずみ関係、そしてつりあい式から導出される波動方程式のベクトル表現に対して、その発散および回転操作を施すと次式(1-a), (1-b)を得る.

$$\rho \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Delta \quad (1-a)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \Theta \quad (1-b)$$

ここに Δ と Θ はそれぞれ変位ベクトルの発散と回転で、 $\Theta = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ である. 簡単のため x 方向に進む回転成分を考えると式(2)が, 自由表面での境界条件を考慮すると式(3)が与えられ, 本研究ではこの式(3)を, 式(4)のように隣り合う二点の観測上下動成分の差をとることで回転成分とみなすことにした.

$$\rho \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\omega_x (= \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}) = \frac{\partial w}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} \cong \frac{w_1 - w_2}{r} \quad (4)$$

ここに, ω_x は x 軸方向に進むねじれ波の回転成分, w は z 軸(上下)方向の変位, r は隣り合う観測点間の距離である. 図-2 に示す六角形アレー(写真-1)の隣り合う2点の上下成分(w_1 と w_2)の差を取り, 対面とのペアで2点同時観測⁴⁾とし, 3組の平均を取る. 今回はアレー半径を1m, 3m, 5mの3通りとして分散曲線を描いた. この結果を示したものが図-3である. 支配方程式はラブ波導出の際の場合と同じ式(2)で与えられるため, 境界条件を与えることによって得られる分散曲線はラブ波と同じものが得られることになる.

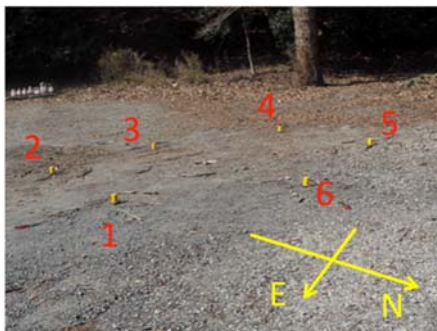


図-2 六角形アレー配置(青)

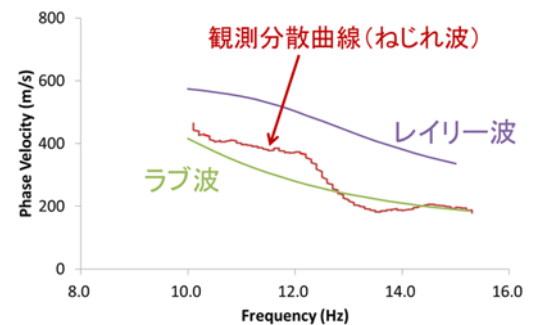


図-3 理論分散曲線と観測分散曲線

写真-1 K-net (KYT012) 近傍での観測

4. 結論

図-3 に示すように, ねじれ波の回転成分を用いた微動アレー観測による分散曲線と, ラブ波とレイリー波の理論分散曲線を微比較した結果, 概ねラブ波の分散曲線に近い値が得られた. ねじれ波の回転成分を用いることにより, ラブ波の分散曲線を推定できる可能性を示唆している.

参考文献

- 1) 岡田・松島: 物理探査学会第81回学術講演会講演論文集, pp. 15-18, 1989. 2) 松島・岡田: 物理探査学会第82回学術講演会公演論文集, pp. 5-8, 1990. 3) 山本: 物理探査, Vol. 53, pp. 283-298, 2000. 4) 盛川・大堀・飯山: 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第2号, pp. 89-106, 2010.