

並進回転6成分振動観測に基づく表面波特性の推定に関する検討

福井大学 建築建設工学講座 正会員 ○小嶋 啓介
福井大学 建築建設工学専攻 非会員 松本 和樹

1. まえがき

近年、常時微動観測に基づいて地盤の震動特性や、地下構造を推定しようとする試みが研究され、一部は実用化されつつある。その多くは単点3成分観測によるH/Vスペクトルや、アレイ観測に空間自己相関法などを適用して求められるRayleigh波位相速度などを利用しているが、Love波速度や両表面波の振幅比の特定などに課題が残されている。一方、従来の観測対象とされてきた並進3成分に加えて、回転成分を観測することにより、地盤の振動特性の情報量が飛躍的に増加することが指摘され、並進成分の空間補間から回転成分を抽出し、その可能性を指摘する研究も散見している。本論文では、到来方向、周波数ごとの伝播速度と振幅を設定した人工6成分振動データを生成し、その分析から、はじめに設定した諸特性を推定する方法を提案・検討し、実際の6成分観測への応用に備えようとするものである。

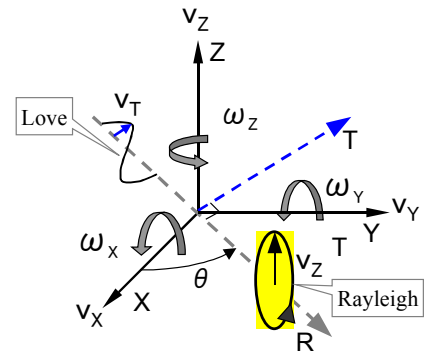


図-1 表面波と並進・回転成分

2. 定式化

図-1に観測対象の6成分を示す。3次元直交座標をとり、並進速度を v_x, v_y, v_z 、各軸周りの回転速度を $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ と表記する。本研究では、6成分観測で記録されるのは、X軸から時計回りの角度 θ で、遠方から平面波として伝播するRayleigh波とLove波からなると仮定する。伝播方向を R 、接線方向を T とすると、角速度 ω の表面波速度の各方向の成分波は次式で記述できる。

$$\begin{aligned} v_T^L(r, t) &= A^L \sin(\omega \cdot t - \kappa_L r + \phi_L) \\ v_R^R(r, t) &= A_H^R \sin(\omega \cdot t - \kappa_R r + \phi_R + \pi/2) \\ v_Z^R(r, t) &= A_V^R \sin(\omega \cdot t - \kappa_R r + \phi_R) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 r : 観測点からの R 軸に沿った距離、 t : 時間、 κ : 波数、 ϕ : 位相、 A : 振動数に依存する振幅、上添え字 R, L : Rayleigh波とLove波、下添え字 T, R, Z : 半径、接線および上下方向を示している。観測点 ($r=0$) で観測される各方向の成分波は、時間を省略すれば次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} v_X \\ v_Y \\ v_Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_R^R \\ v_T^L \\ v_Z^R \end{pmatrix} \quad (2)$$

一方、平面波の仮定より、Love波とRayleigh波による、各軸周りの回転速度は次式で記述できる。

$$\begin{aligned} \omega_X^L(r, t) &= 0 \\ \omega_Y^L(r, t) &= 0 \\ \omega_Z^L(r, t) &= \frac{1}{2} A_L \kappa_L \sin(\omega t - \kappa_L \cdot r + \phi_L) \end{aligned} \quad (3)$$

表-1 Rayleigh波・Love波速度

Frequency(Hz)	0-2	2-10	10-20
Rayleigh (m/s)	600	Linear	100
Love. (m/s)	500	Linear	100

表-2 Rayleigh波・Love波振幅

Frequency (Hz)	0	5	20
Rayleigh-H (m/s)	0.5	-	0.5
Rayleigh-V (m/s)	0.6	0.1	1.6
Love (m/s)	0.2	-	0.8

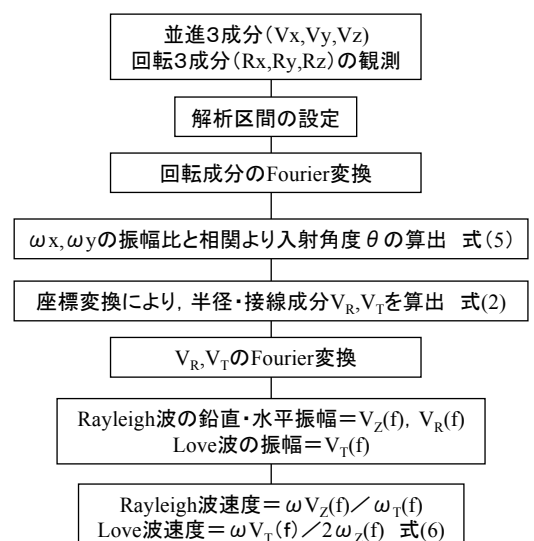


図-1 6成分データの解析手順

キーワード 並進・回転6成分, Rayleigh波, Love波, 到来方向, 位相速度

連絡先 〒910-8507 福井市文京 3-9-1 福井大学工学研究科 TEL 0776-27-8592

$$\begin{aligned}\omega_X^R(r, t) &= A_H^R \kappa_R \sin \theta \cos(\omega \cdot t - \kappa_R r + \varphi_R) \\ \omega_Y^R(r, t) &= -A_H^R \kappa_R \cos \theta \cos(\omega \cdot t - \kappa_R r + \varphi_R) \\ \omega_Z^R(r, t) &= 0\end{aligned}\quad (4)$$

上式から、鉛直軸周りの回転速度は Love 波、水平軸周りの回転速度は Rayleigh 波のみによって生成されることが明らかである。すなわち、回転速度の水平 2 成分観測値からは Rayleigh 波、鉛直成分からは Love 波の特性が抽出できることを示している。また Rayleigh 波の到来方向 θ は、次式により算出可能である。

$$\theta(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_X}{\omega_Y} \right) \quad (5)$$

この結果、式(2)の座標変換により、観測値である v_X , v_Y から v_R , v_T が算出できる。式(1)から求められる並進加速度をそれぞれ、 α_T^L , α_R^R , α_Z^R と書けば、Rayleigh 波と Love 波の速度は、次式で得られる。

$$-c_R(\omega) = \frac{\alpha_Z^R}{\omega_T^R}, \quad -2c_L(\omega) = \frac{\alpha_T^L}{\omega_Z^L} \quad (6)$$

以上の誘導は周波数ごとの成分波の時間領域でのものであるが、それらが合成された波のフーリエ変換による周波数領域においても、同様の議論が可能である。以上の計算手順の概要を図-1 に示す。

3. 数値シミュレーション結果

次のような条件で人工振動を生成した。

1) 時間間隔 0.01 秒, 1 区間 2048 個, 9 区間の平面波の連続記録. 2) 区間ごとに平面波が 0 度から 10 度ごとに到来, 3) 伝播方向に周波数依存のない場合と 5Hz ごとに 20 度ずつずれる場合. 4) Rayleigh 波と Love 波の速度と振幅は, 表-1,2 に示すとおり周波数区間ごとに一定または線形に変化. 図-2 の灰色線は, 並進速度 v_X , v_Y , Δ は v_Z のフーリエスペクトルである. また, \times と \square は式(2)による座標変換から求められた到来方向と接線方向成分のスペクトルである. 同図より, 表-2 で設定した Rayleigh 波の鉛直・水平振幅と, Love 波の周波数ごとの振幅特性が再現されていることが確認できる. 図-3(a)は, 解析区間(20.48 秒)ごとに到来方向が変化しないとした場合の, 式(5)による周波数ごとの到来方向の推定結果である. 図中の凡例の角度は解析区間ごとに事前に設定した角度を示しており, プロットは推定された伝播方向を示している. 同図(b)は, 上記2)の仮定に, 周波数帯域ごとに到来方向が変化することを加え, 5Hz ごとに 20° ずつ異なる方向から到来すると仮定して作成した人工振動に基づく結果である. なお同図では 9 つの区間のうち, 20° と 80° の結果のみを示している. 図-4 のプロットは解析区間ごとに式(6)を用いて推定された, Rayleigh 波と Love 波の速度を示している. 図の太い実線は, 表-1 に示した設定値であり, 細線は凡例で示す区間ごとに算出されて速度を示している. 1.5Hz 程度より低周波数側では精度が低下しているが, 高周波数域ではどの方向からの観測値を用いても精度良く推定されていることが確認できる.

4. あとがき

本研究では, 平面波として伝播する Rayleigh 波と Love 波からなる人工振動の単点 6 成分観測情報を作成し, その分析を通して, 表面波の伝播方向, Rayleigh 波と Love 波の周波数ごとの振幅, ならびに位相速度が正確に算出可能であることを示した. 今後は, 2021 年度に実施した加振器を用いた現場振動実験による, 並進計と回転計を併置した 6 成分同時観測データを用いた検討を行う予定である.

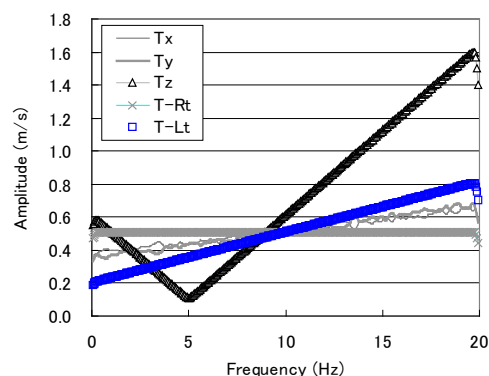
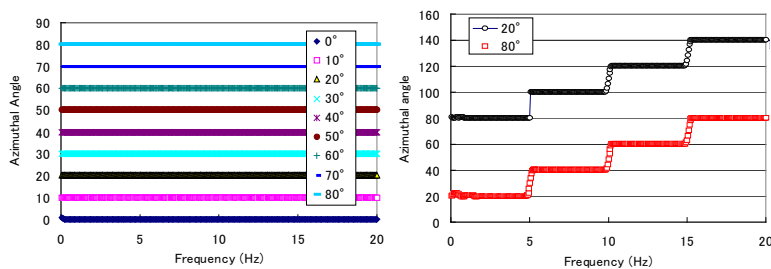


図-2 Rayleigh 波と Love 波の振幅



(a)到来方向の周波数依存なし (b)到来方向の帯域依存

図-3 回転速度から算出した到来方向

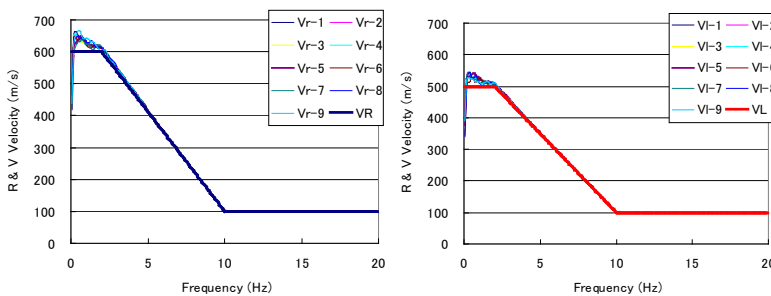


図-4 Rayleigh 波および Love 波位相速度