

I-B 180 走行荷重に対する地盤応答評価と制振法に関する基礎的研究

川崎重工（株） 矢木誠一郎
岡山大学 環境理工学部 竹宮 宏和

1 まえがき

列車の高速化と共に軌道周辺の環境振動がクローズアップされている。著者らは制振法として、波動遮断理論に基づいてWIB工法を提案しているが¹⁾、関連基礎的研究として、ここでは移動荷重によるサンドウッチ地盤の時間領域でのグリーン関数を薄層要素法と離散化波数法を適して開発した。解析例では、平坦軌道想定して、その直下に剛性の高い薄い層を導入したときの地層表面応答の低減効果を調べた。

2 定式化

薄層要素で分割された多層地盤の応答解析法を移動荷重問題に拡張すると、変位成分は

$$\begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} \frac{\xi_x^2}{\xi^2} \Phi_r \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_r^T + \frac{\xi_y^2}{\xi^2} \Phi_\theta \mathbf{R}^{SH} \Phi_\theta^T & \frac{\xi_x \xi_y}{\xi^2} \Phi_r \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_r^T - \frac{\xi_x \xi_y}{\xi^2} \Phi_\theta \mathbf{R}^{SH} \Phi_\theta^T & i \frac{\xi_x}{\xi^2} \Phi_r \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_z^T \\ \frac{\xi_x \xi_y}{\xi^2} \Phi_r \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_r^T - \frac{\xi_x \xi_y}{\xi^2} \Phi_\theta \mathbf{R}^{SH} \Phi_\theta^T & \frac{\xi_y^2}{\xi^2} \Phi_r \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_r^T + \frac{\xi_x^2}{\xi^2} \Phi_\theta \mathbf{R}^{SH} \Phi_\theta^T & i \frac{\xi_y}{\xi^2} \Phi_r \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_z^T \\ -i \frac{\xi_x}{\xi^2} \Phi_z \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_r^T & -i \frac{\xi_y}{\xi^2} \Phi_z \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_r^T & \Phi_z \mathbf{R}^{P-SV} \Phi_z^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \kappa(\xi) p_x \\ \kappa(\xi) p_y \\ \kappa(\xi) p_z \end{Bmatrix} d\xi_x d\xi_y$$

$$\text{ここで } \mathbf{R}^{P-SV} = \text{diag} \left[\frac{1}{s_j^2 P^{SV2} + \xi_y^2 c^2} \left(\cos \{ \text{Im}(s_j^{P-SV}) t \} - \cos \{ \xi_y c t \} + i \frac{\xi_y c}{\text{Im}(s_j^{P-SV})} \sin \{ \text{Im}(s_j^{P-SV}) t \} - i \sin \{ \xi_y c t \} \right) \right]$$

$$\mathbf{R}^{SH} = \text{diag} \left[\frac{1}{s_j^2 SH^2 + \xi_y^2 c^2} \left(\cos \{ \text{Im}(s_j^{SH}) t \} - \cos \{ \xi_y c t \} + i \frac{\xi_y c}{\text{Im}(s_j^{SH})} \sin \{ \text{Im}(s_j^{SH}) t \} - i \sin \{ \xi_y c t \} \right) \right]$$

$\kappa(\xi) = 4b_x b_y \xi_x \xi_y / \xi_x \xi_y$, s_j は表面波の固有値、 p_x, p_y, p_z は載荷重で c はその移動速度、 Φ_r, Φ_z は P波と SV 波の場合から得られ、表面波の固有ベクトルで、添字に指定される方向の載荷にしている。 Φ_θ は SH 波の場合から得られる表面波の固有ベクトルである。上添字 P は P 波を、S は S 波にしていることを示す。上式の波数積分は円筒座標に変換すれば $d\xi_x d\xi_y = \xi d\xi_\theta d\xi_r$ ($\xi_r = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}$ は半径方向の波数、 ξ_θ は周方向の波数) となり、積分区間は ξ について $0 \rightarrow \infty$ 、 ξ_θ について $0 \rightarrow 2\pi$ となる。 ξ_θ についての積分は被積分関数の原点 ($\xi = \xi_\theta = 0$) に対する対象、逆対象性より積分区間は $0 \rightarrow \pi/2$ とすることができる。このとき、半径方向の波数についての積分は離散化波数法、周方向の波数についての積分は長方形公式を用いる。

3 解析例

図 1.a に示す成層地盤の地表面に移動する分布載荷を想定して、進行線上の地点で遷移応答を評価する。解析のための薄層分割は 50 層に、離散化波数の基本長は $L = 450 \text{ m}$ とし、最大離散化波数は π とした。図 2 は荷重の移動速度 C をパラメータにして、図の 1 観測点 1、2 の遷移応答を描いたものである。 $C < V_s$ の状態(サブ・ソニック)では、荷重の通過時点において最大応答が生じている。応答の様相は衝撃応答に酷似している。移動速度が一般化されたレーリ波に近づく(成層地盤ではレーリは分散性を示す)、応答は急激に大きくなる。さらに、移動速度が増すと、応答成分によって地盤振動が誘発され易くなっている。これについては著者の他の論文において詳述している²⁾。移動速度がサブ・ソニックの状態にある場合に限って、衝撃応答を低減させる目的で、人工的に地表面下に硬い層を設けた場合を想定して、図 1.b の解析をした。硬い層の深さはレーリ波の卓越する周期を推定し、レーリ波としての振幅が最大になる深さに設定した。ここでは、同層の剛性をパラメータにした結果を図 3 に示す。基本長 L は CASE 1, 2, 3 でそれぞれ m とした。一様な成層地盤のときの応答に比べてせん断波速度で (5 ~ 10) 倍程度の剛性が与えられると応答が約半分に低減していることが分かる。

4 むすび

本研究では、多成層地盤上の移動載荷に対する時間領域グリーン関数を薄層要素分割と離散化波数法を用いて導いた。これは初期条件を伴う載荷問題を扱うのに適している。本文では、その応用として移動荷重による成層地盤の応答評価と、それによる衝撃応答を低減させるため硬い層を設けた場合の応答低減効果を示した。

参考文献 1) 竹宮・藤原：地盤構造物系の制振法としての波動遮断ブロック(WIB)の導入、土木学会論文集、No.489/I-27, 1994.243-250. 2) 竹宮・合田：移動分布加振源による成層地盤の遷移応答特性、土木学会論文集投稿中

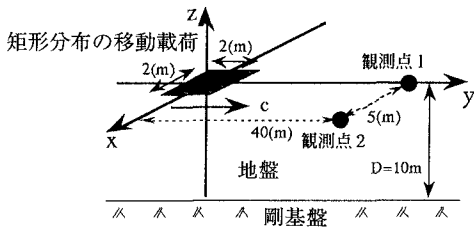


図 1.a 一様成層地盤上の移動分布荷重
 $V_p=200\text{m/s}$ $V_s=100\text{m/s}$ $\rho=1.8\text{t/m}^3$

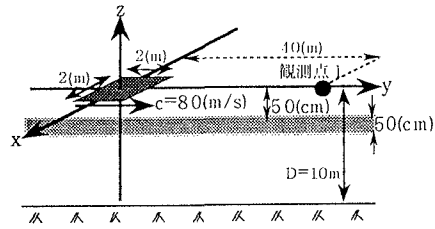


図 1.b 成層地盤内に人工的に硬い層を導入した場合

図 2 鉛直方向の移動載荷による
観測点 1 の遷移応答

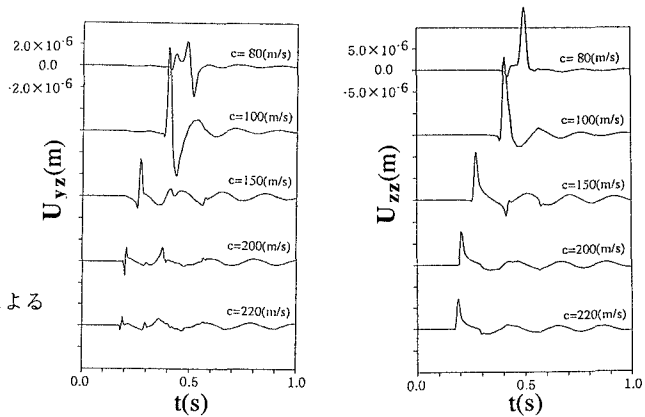


図 2 鉛直方向の移動載荷による
観測点 2 の遷移応答

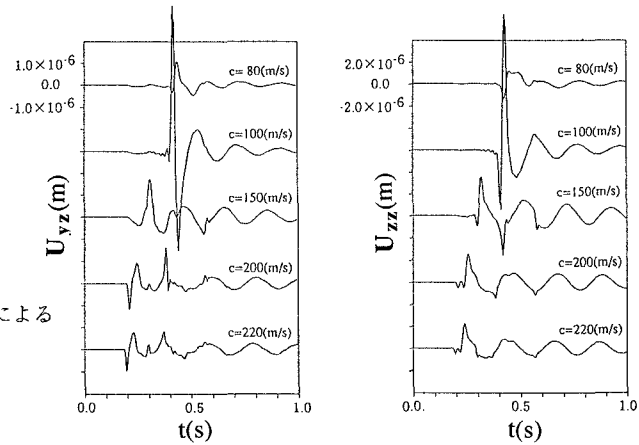


図 3 成層地盤内に人工的に
硬い層を導入した場合の応答低減

