

高速移動加振源による軌道－地盤系の動的応答性状

岡山大学 環境理工学部 正会員 竹宮宏和
岡山大学大学院工学研究科 学生会員 里中修平

1. まえがき

本研究では、高速列車走行を想定して、半無限地盤、成層地盤上の軌道構造をはりでモデル化して、高速移動載荷・加振状態でのはり－地盤系としての動的相互作用解析を介して、はりと地表面の応答を移動速度、地盤条件のパラメータの下で調べた。解析手法には、フーリエ変換法による波数－振動数領域解を求め、その空間－時間領域への逆変換には離散波数法と高速フーリエ・アルゴリズムをとっている。

2. 定式化

(1) 動的サブストラクチャ法

レール－枕木－軌道系をバルヌーイ・オイラー梁でモデル化する。いま、軌道上を移動速度 c 、加振振動数 ω_0 、強度 P_0 で移動する輪重によるはりの支配方程式は

$$EI\partial_x^4 u_b + m\partial_t^2 u_b + P_b(x, t) = P_0\delta(x - ct)e^{i\omega_0 t} \quad (1)$$

ただし $\partial_x = \partial/\partial x$, $\partial_t = \partial/\partial t$ 意味し、 EI は曲げ剛性、 m は単位長さ当たりの質量、 $P_b(x, t)$ は地盤との相互作用における地盤反力を表す。式(1)を x 軸座標と時間に関してフーリエ変換を適用すると

$$(EI\xi_x^4 - \omega^2 m)\tilde{u}_b(\xi_x, \omega) + \tilde{P}_b(\xi_x, \omega) = (2\pi P/c)\delta(\xi_x - (\omega - \omega_0)/c) \quad (3)$$

ここに $\sim$ は空間に、 $-$ は時間に関しての変換領域量を表し、それぞれ波数 ξ_x 、振動数 ω の関数となる。

つぎに、地盤に対して、速度 c 、加振振動数 ω_0 の移動加振力 $P_s(x - ct, y, z = 0, t)$ を地表面に与えて、その3次元弾性体としての応答を評価する。そのとき地盤解析からの波数－振動数領域解は、定位置点加振解であるグリーン関数 $G_{zz}(\xi_x, \xi_y, z, \omega)$ を利用して

$$\tilde{u}_s(\xi_x, \xi_y, z, \omega) = \tilde{G}_{zz}(\xi_x, \xi_y, z, \omega)\tilde{P}_s(\xi_x, \xi_y, z = 0, \omega) \quad (4)$$

ただし、 $P_s(\xi_x, \xi_y, z = 0, \omega)$ は $P_s(x, y, z = 0, t)$ のフーリエ変換による波数－振動数領域量である。

ところで、式(4)をはりの支配式(3)に適合した波数－振動数領域の変位とするため、移動加振力を移動軸に沿っての分布 $P_s(x - ct, z = 0, t)$ とその直交断面での幅 $2B$ の分布 $\Psi(y)$ の積で表現する。ただし、 y 方向積分値を1とする。その結果、はりの波数－振動数領域の応答は、

$$\tilde{u}_b(\xi_x, \omega) = \frac{1}{EI\xi_x^4 - \omega^2 m + \tilde{K}(\xi_x, \omega)} (2\pi P_0/c)\delta(\xi_x - (\omega - \omega_0)/c) \quad (5) \quad \text{ここで} \quad \tilde{K}(\xi_x, \omega) = \frac{2B}{\tilde{G}_s(\xi_x, y = 0, z = 0, \omega)} \quad (6)$$

を相互作用ばね係数として導入している。式(5)に2重逆フーリエ変換を施し空間・時間領域応答を求めると

$$u_b(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P_0}{c} \frac{\exp(-i(\omega - \omega_0)/c)x \cdot \exp(i\omega t)}{EI((\omega - \omega_0)/c)^4 - \omega^2 m + \tilde{K}((\omega - \omega_0)/c, \omega)} d\omega \quad (7)$$

実際にはこれは高速フーリエ変換 (FFT) アルゴリズムをとおして計算される。式(7)より算出される相互作用力 $\tilde{P}_s(\xi_x, z = 0, \omega)$ による軌道周辺の地盤応答 $\tilde{u}_s(\xi_x, \xi_y, z, \omega)$ は、式(4)と(6)から

$$\tilde{u}_s(\xi_x, \xi_y, z, \omega) = \tilde{G}_{zz}(\xi_x, \xi_y, z, \omega)\tilde{P}_s(\xi_x, z = 0, \omega) \quad (8) \quad \tilde{P}_s(\xi_x, z = 0, \omega) = (2\pi P_0/c) \cdot \tilde{K}(\xi_x, \omega) [EI\xi_x^4 - m\omega^2 + \tilde{K}(\xi_x, \omega)]\delta(\xi_x - (\omega - \omega_0)/c) \quad (9)$$

(2) ウィンクラーばね床上のはり

地盤ばねを一定値と仮定すると、式(9)の時間－空間領域表現は

$$P_s(s) = (P_0/2L_c)\exp(-\delta|s/L_c|)[(1/\delta)\cos(\eta s/L_c) + (1/\eta)\sin(\eta|s/L_c|)]e^{i\omega_0 t} \quad (10) \quad \text{ただし} \quad s = x - ct, \quad \delta = \sqrt{1 - \alpha^2},$$

$\alpha = c/c_{cr}$, $c_{cr} = \sqrt{4EI/K}$, $L_c = \sqrt{4EI/m^2}$. さらに振動数帯域では $\omega/\Omega \ll 1$ ($\Omega = \sqrt{K/m}$) の範囲では、

$$P_s(s) = P_0(1/\sqrt{2}L_c)\exp(-|x/L_c|)\sin(|x/L_c| + \pi/4)e^{i\omega_0 t} \quad (11)$$

この荷重状態は擬似静的載荷となる。

4. 解析結果の考察

解析対象とした地盤は、密度 $\rho = 1.8[t/m^3]$ 、せん断波速度 $V_s = 200[m/s]$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 内部減衰比 $\zeta = 0.05$ の一様半無限体と層厚 $D = 10m$ の剛基盤上の一様成層である。軌道はりは、曲げ剛性 $EI = 1.3 \times 10^5$

キーワード：移動加振源、軌道－地盤系、軌道振動、沿線地盤振動、フーリエ変換法、擬似静的載荷

連絡先：岡山市津島中2-1-1、Tel. & Fax. 086-251-8146

[kNm²] 単位長さ当たり質量 $m = 7.5$ [t/m]，幅 $B = 6$ [m] 内部減衰率 $\beta = 0.03$ とした．加振源の移動速度 C による応答への影響を見るため，地盤のせん断波速度で規率化してマッハ数 $M_\beta = c/V_s$ を導入した．

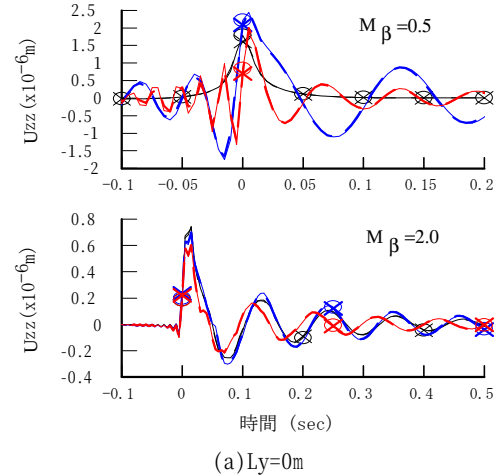
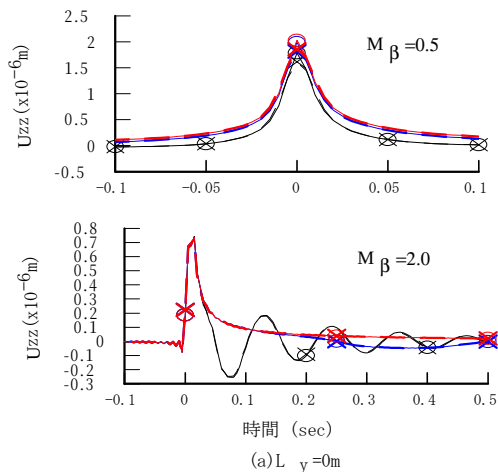
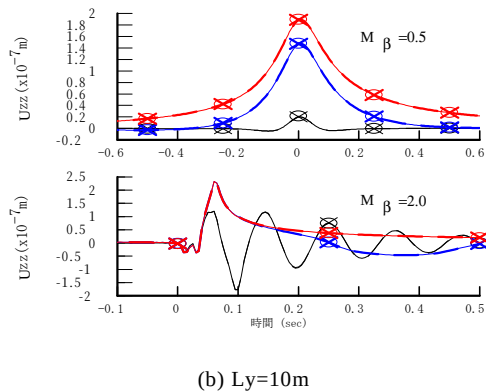
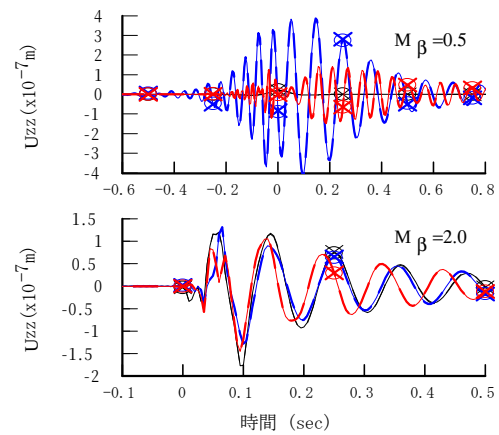


図 4 移動荷重 ($f_0=0\text{Hz}$) による軌道—地盤系の遷移応答



軌道—地盤連成系モデル—○— $D=10m$ ○— $D=50m$ ○— 半無限
擬似静的分布荷重モデル—×— $D=10m$ ×— $D=50m$ ×— 半無限



軌道—地盤連成系モデル—○— 0Hz ○— 10Hz ○— 25Hz
擬似静的分布荷重モデル—×— 0Hz ×— 10Hz ×— 25Hz

図 4 移動荷重 ($f_0=0\text{Hz}$) による軌道—地盤系の遷移

図 5 移動加振源による成層地盤 ($D=10m$) の遷移応答
加振振動数による変化

図 4 は半無限一様地盤上の軌道を単位強度の荷重が移動したときの応答を示したものである．荷重の移動効果は， M_β が小さい範囲では，はりの静的たわみに比例して荷重の到達前後で対称の応答であるが， M_β が 1 を超えると，はり内の波動伝播より小さな振動が荷重の到達前に現れ，その後，荷重の通過時に大きな衝撃応答が現れ，荷重到達時間に関して非対称の応答となる．一様成層地盤では， M_β が 1 よりかなり小さいと，半無限地盤と同様な応答様相を呈するが， M_β が 1 を越えると荷重通過時に大きな衝撃応答を呈して，さらに成層厚が $D=10m$ と浅いと後続の振動現象が荷重の通過後に現れてくる．しかし $D=50m$ では半無限地盤の応答と同じく衝撃応答後は単調減少する．

つぎに載荷線上から直行方向に離れた地点 ($L_y=10m$) の応答は， $M_\beta=0.5$ では応答が急激に小さくなる．これは波動遮断の現象が層厚 $D=10m$ で生じていることに他ならない．しかし $M_\beta=2.0$ では，周期 1.1 秒の振動応答がむしろ現れている．これは Airy 相の波動伝播のためと説明される．移動加振源として，加振振動数 $f_0 = 25\text{Hz}$ で振動しながら移動する場合のはり（軌道）およびその近傍地盤の遷移応答を示したのが図 5 である．変位の時刻歴においてドップラー効果が現れて，応答振動数が加振源の通過前で加振振動数 f_0 より高く，そして通過後加振振動数 f_0 より低い方へシフトしているのが分る．

ウィンクラーモデルによる擬似静的荷重の地盤への載荷解は，動的相互作用解析解と殆ど一致した．

4. むすび

解析結果からは，半無限地盤と剛基盤上の成層地盤では，軌道振動および地盤応答が非常に異なることが指摘される．前者はレーリ波による共振現象があるが，後者ではエアリー相の固有モード波との共振現象が生じる移動速度が存在することが分かった．