

高速列車走行に伴う軌道および周辺地盤の振動性状 - 枕木効果に注目して

岡山大学環境理工学部 正会員 竹宮宏和
岡山大学大学院自然科学研究科 児嶋基成

1.はじめに

筆者らは、高速列車走行に伴う軌道―地盤系の振動を環境振動の観点から研究しているが、前回の報告では、レール―枕木―バラスト系を Euler 梁でモデル化して、層状地盤との動的相互作用解析を行った。本報告では軌道部を詳細にモデル化し、離散枕木による振動影響に注目して、2.5 次元有限要素法に導入した。

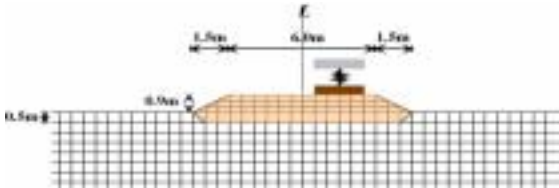
2.定式化

レール―枕木―地盤系モデルのイラストを図－1 に示す。枕木を剛体（質量＝ m_r ）、レールを弾性曲げ梁（剛性＝ EI , 単位長さ当たり質量＝ m_s ）として、レールパッド（バネ係数 k_p ）を介してそれらが連結されると同時に、バラストを経て路盤、地盤に支持される。

定式化においては、まず軌道方向についての変位をフーリエ変換から波数領域展開し、レール（R）-枕木（S）系の鉛直方向の動的つりあい式を表すと、

$$\begin{bmatrix} EI\xi_x^4 - M_r\omega^2 + K_p & -(K_p/N)I^T \\ -(K_p/N)I & (K_p - M_s\omega^2)/NI \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u}_r \\ \tilde{u}_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{2\pi}{c} \chi(\xi_x) \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \delta\left(\xi_x - \frac{\omega}{c} - m\frac{2\pi}{d}\right) \\ -\tilde{P}_s(\xi_x)/NI \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに枕木と地盤の連続性を N の節点でとっているの
で、単位ベクトル I を導入した。



図－1 軌道周辺のみを表示

原地盤には、2.5 次元有限要素法を適用する。枕木と地盤の動的相互作用系は振動数・波数領域において次式のマトリックス表示で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \tilde{K}^R & \tilde{K}^P \\ \tilde{K}^P & \tilde{K}_I^S + \tilde{K}_H^G \\ & \tilde{K}_{IF}^G \\ & \tilde{K}_{FF}^G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{U}^R \\ \tilde{U}_I^S \\ \tilde{U}_F^G \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{P}^R \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし、上添え字 S はソリッド要素、 R はレールの
はり要素、 G は地盤のソリッド要素を示す。下添字の I
は相互作用節点、 F はその他の自由節点を指す。

キーワード：高速列車走行、軌道―地盤系、環境振動、枕木振動効果、2.5 次元有限要素法
連絡先 〒700－8530 岡山市津島中3－1－1

つぎに輪荷重のモデル化を、間隔 d の配置の枕木を
ととして衝撃的な作用力として次式で近似する。

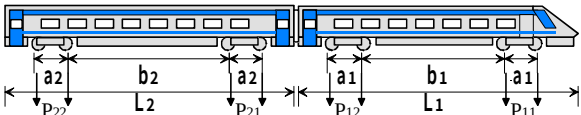
$$P_{N_i}(x,t) = \sum_{n=0}^{N_i-1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_n(x-ct+L_n) \cdot d \cdot \delta(x-md) \quad (3)$$

ここに $P_n(x-ct+L_n)$ は列車輪重である。変換領域では

$$\tilde{P}_{N_i}(\xi_x, \omega) = \frac{2\pi}{c} \chi(\xi_x) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(\xi_x - \frac{\omega}{c} - m\frac{2\pi}{d}\right) \quad (4)$$

$$\chi(\xi_x) = \sum_{n=0}^{N_i-1} \left[\left\{ P_{n1} \left(1 + e^{-ia_1\xi_x} \right) + P_{n2} \left(e^{-i(a_1+b_1)\xi_x} + e^{-i(2a_1+b_1)\xi_x} \right) \right\} \cdot \exp(-i\xi_x L_n) \right] \quad (5)$$

列車の諸元については、図 2 を参照されたい。



図－2 X2000 荷重モデル

3.解析対象

表 1 は軌道部の物性値、表 2 は各車両の荷重パラメ
ータ、表 3 は解析地盤物性値、表 4 は盛土および置き
換え部の物性値を示した。

表 1 軌道部物性値

レール質量 (t/m)	レール剛性 (kN・m ²)	バネ定数 (kN/m)	枕木質量 (t/each)	枕木間隔 (m)
0.06	6.29*10 ³	5.4*10 ⁴	0.248	0.65

表 2 各車両の荷重パラメータ

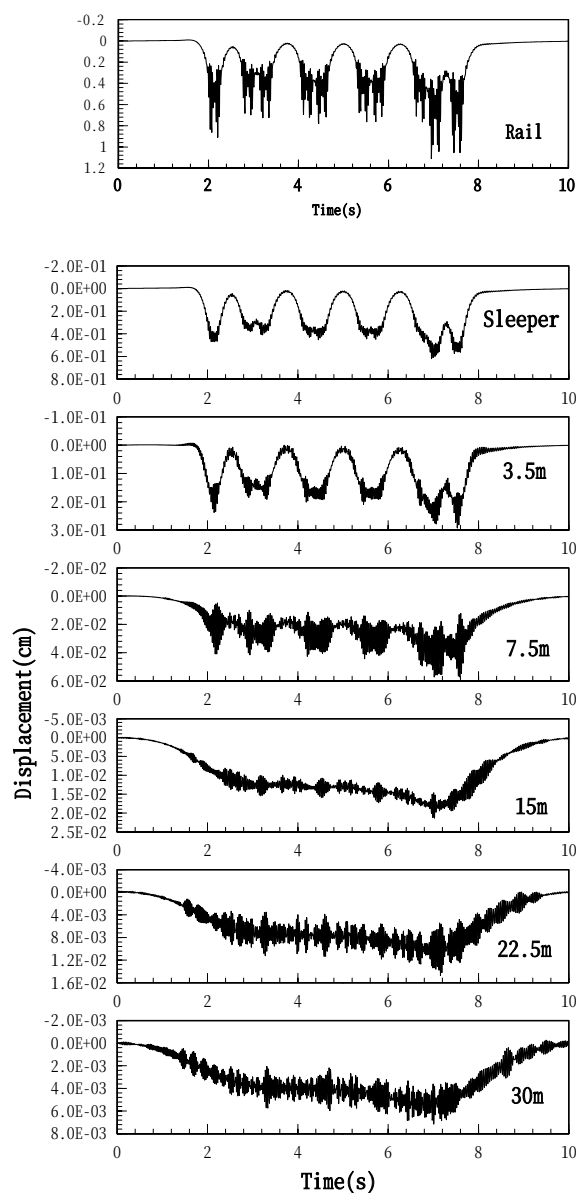
車両	車軸間隔			車軸荷重	
	a (m)	b (m)	L (m)	P ₁ (kN)	P ₂ (kN)
1	2.9	11.6	0.0	162	118
2	2.9	14.8	22.2	120	120
3	2.9	14.8	24.4	123	123
4	2.9	14.8	24.4	120	120
5	2.9	6.6	24.4	180	180

表 3 解析地盤物性値

物性	層厚 (m)	密度 (kg/m ³)	Vs (m/s)		Vp (m/s)		減衰定数 β	
			c=19.4	c=55.6	c=19.4	c=55.6	c=19.4	c=55.6
1	1.0	1500.0	72.0	65.0	500.0	500.0	0.040	0.063
2	3.0	1260.0	41.0	33.0	500.0	500.0	0.020	0.058
3	4.5	1475.0	65.0	60.0	1500.0	1500.0	0.050	0.098
4	6.0	1475.0	87.0	85.0	1500.0	1500.0	0.050	0.064
5	36.0	1475.0	100.0	100.0	1500.0	1500.0	0.050	0.060

表 4 盛土および置き換え部の物性値

密度 (t/m ³)	ポアソン比	Vs	減衰定数
1.8	0.30	150.0	0.05



図－3.a 軌道および沿線地盤の変位応答，70 km/h

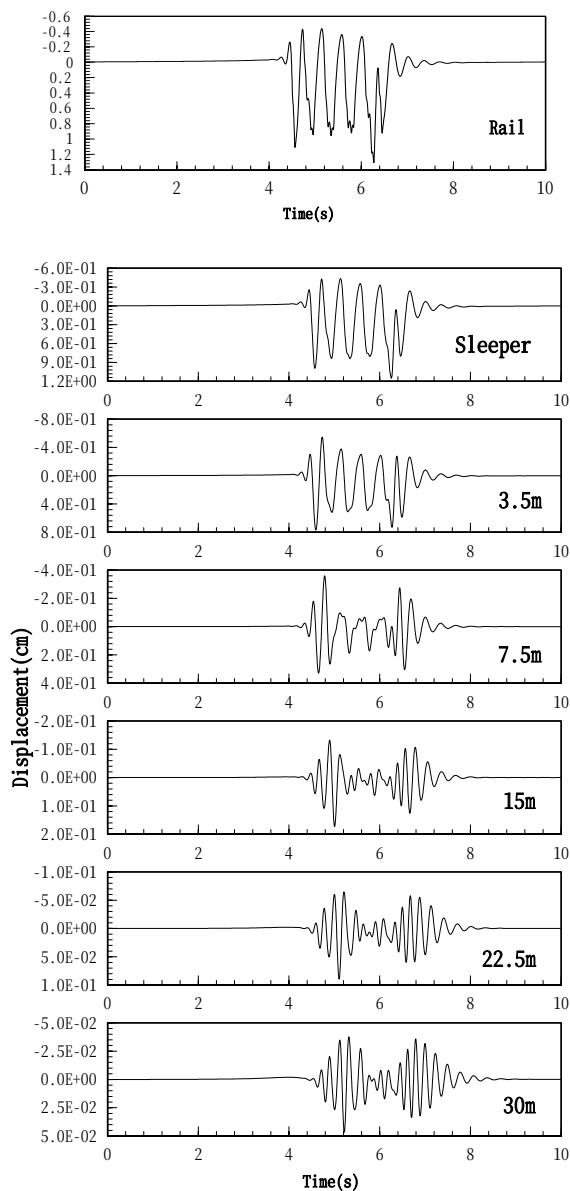


図3.b 軌道および沿線地盤の変位応答，(b) 200 km/h

4. 結果と考察

枕木の効果として，式 (3) において， $m=0, 1, 2$ をとった。 $m=0$ は滑らかな輪重の载荷を， $m=1, 2$ は隣り合う枕木の影響を意味している。これらに対応した応答を重ね合わせて図－3を得た。走行速度が 70 km/h と 200 km/h では，応答の様相は顕著に異なり，低速時走行のときは隣り合う枕木効果の変位量としては小さいが，高振動成分では移動する $m=0$ の擬似的な応答に重ね合われている。一方，高速時走行では， $m=0$ の応答のみが現われている。図－3に対応して，加速度応答（図を省略）では，低速時は $m=1$ の応答振動が支配的に現われるが，高速時の応答はやはり $m=0$ が支配的であることが分った。

5. むすび

著者らは，軟弱地盤上の列車による軌道及び沿線地盤振動の様相は大きく走行速度によって変化することをこれまでのシミュレーションにより示した。しかし，低速時走行の枕木からの衝撃による振動成分は，加速度で計測されるにもかかわらず，シミュレーションでは，今回初めて近似的であるが明確な形で取り扱った。

参考文献

- 1) 竹宮・合田：移動加振源による多層地盤上の盛土構造の振動評価への FEM-BEM の適用，土木学会論文集，605/I-45，143-152,1998.10.
- 2) 竹宮・前河・児嶋：高速列車下の軌道－地盤系の 2.5D－FEM による振動予測と制振法の検討，土木学会論文集，710/I-60，247-255, 2002.7.
- 3) H. Takemiya, Simulation of track-ground-vibration due to a high-speed train: the case of X-2000 at Ledsgard, Journal of Sound and Vibration, 261(3), 2003, 503-526.