

愛媛大学工学部 正会員 安山信雄
大豊建設(株) 正会員 ○溝端光雄

1. はじめに

近年、鉄道沿線の騒音振動が公害問題として大きく取り上げられ、これの解決は鉄道界の重要な課題の一つとなっている。特に振動問題に関しては従来より数多くの研究がなされているが、軌道の振動軽減対策を考える上での軌道振動の評価式は、地下鉄道についてのみ求められているにすぎない。したがって本報告は新幹線のスラブ軌道、バラスト軌道を取り上げ、これらの衝撃過渡応答、周波数応答を理論計算し軌道の振動特性を把握することにより振動軽減対策の資料を提供せんとするものである。また理論計算の妥当性を検討するために最近、注目されているまくらぎパッドを取り上げ、その効果についてビブロジョール試験を行ったので、その結果についても言及したい。

2. 理論計算による軌道の振動特性

実軌道の振動解析は連続梁の曲げ振動として解析することになるが、これまでの研究で図1に示す質点系のモデルに近似させても大差ないことが明らかにされているので、本報告においてもこのモデルを用いて解析する。

この質点系の運動方程式は

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Y}_0 \\ \ddot{Y}_1 \\ \ddot{Y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & -r_1 \\ 0 & -r_1 & r_1+k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}_0 \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -K & 0 \\ -K & K+k_1 & -k_1 \\ 0 & -k_1 & k_1+k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

となり、これをマトリックス表示すると

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = P \quad (2)$$

となる。なお計算に用いた軌道パラメータの諸値は表1、表2に示すとおりである。従って計算の組み合わせ総数はスラブ軌道、バラスト軌道の各々につき540通りとなる。また減衰については臨界減衰の1/2とした。

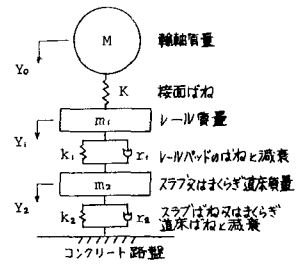


図1 軌道の振動モデル

最初に、車輪フラット、レール継目などにおいて生じる衝撃に対応する輪軸落下の過渡応答に関しては、 $P=0$ 、初期条件 $Y_0=0, \dot{Y}_0=\sqrt{2gh}(H$:落高) $, Y_1=Y_2=0, \dot{Y}_1=\dot{Y}_2=0$ として線型加速度法により(2)式を解析し、各組み合わせの波長のピーク値を読み取り、これらをデータとして次の評価式(3)を仮定し、その指数を求める。この結果が表3、表4である。次に軸距と走行速度から決まる定常的軌道振動に対応する周波数 $f_i=d_i M^a r^b D_1^{c_1} D_2^{c_2} D_3^{d_1} D_4^{d_2}$ ($i=0,1,2$) に対する応答に関しては、(1)式において $P_0=p e^{i\omega t}$ ($p=10^{-3}m$)として複素振幅 $\tilde{Y}_i=\beta_i M^{f_i} r^{g_i} D_1^{h_i} M_s^{k_i} D_2^{l_i}$ ($i=0,1,2$) による解法で処理をし、その結果の1例が図2である。

表1 スラブ軌道のパラメータ

輪軸重量 (Kg)	接面ばね 係数 (ton/cm)	レール重量 (Kg/m)	レールパッドの ばね係数 (ton/cm)	スラブ 重量 (Kg)	スラブの ばね係数 (ton/cm)
500	1000	53.3	90	468	900
1000		60.8	60	526	300
1500		70.0	30	1000	200
			15		100
					50

表2 バラスト軌道のパラメータ

輪軸重量 (Kg)	接面ばね 係数 (ton/cm)	レール重量 (Kg/m)	レールパッドの ばね係数 (ton/cm)	まくらぎ 重量 (Kg)	まくらぎ ばね係数 (ton/cm)
500	1000	53.3	90	434	300
1000		60.8	60	380	200
1500		70.0	30	700	100
			15		50
					30

これらの結果から次の事が明らかとなる。表3、表4から①ゴムパッドを挿入することにより D_1, D_2 を下げて弾性支持を計ることは、それより下方への振動の伝播を防止するとともにゴムパッド直上のもについては、その振幅、加速度を増加させることになる。②コンクリート路盤すなわち高架床上传わる衝撃振動の軽減には伝達力をおさえる必要がある訳だが、このためには D_1, D_2 を下げるるとともに M を軽減することが効果的であろう。図2の周波数応答の解析結果より① D_1 が減少すると Y_0, Y_1 は増加し Y_2 は減少、 $\dot{Y}_0, \dot{Y}_1$ は D_2 が100%~200%の範囲内において

D_1 が小さい程減少する。そして D_2 が30%~50%となると D_1 が大きい程減少する。② D_2 が減少すると Y_0, Y_1, Y_2 は増加, $\ddot{Y}_0, \ddot{Y}_1$ は D_1 が60%~90%の場合に減少傾向を示し D_1 が15%~30%と軟くなると増減は示さない。そして $\ddot{Y}_2$ は増加する。このとき D_2 が30%~50%, D_1 が60%~90%の場合には, その傾向は少ない。③ M_s, M_b の増加により $Y_0, Y_1, Y_2, \ddot{Y}_0, \ddot{Y}_1, \ddot{Y}_2, T.f.$ は減少傾向を示す。

3. まくらぎパッドの効果について

ビブロジョール試験機を用いてまくらぎパッド, レールパッドの硬軟が軌道各部の振動加速度, まくらぎ沈下に対してどのような効果を持つのかを実験的に把握しようとするものである。ビブロジョールの回転数は1000rpm~3000rpmまで200rpm毎に変化させ, 各回転数につき30万回加圧した。まくらぎ沈下は各回転数につき1万, 3万, 6万, 10万, 15万, 20万, 30万加圧した時に測定し, 振動加速度は振動が定常状態となったと考えられる30万回加圧した時測定した。なおパッドの有無, 硬軟による組み合わせ数は6通りとし, まくらぎパッドは, まくらぎ下面に全面貼付して実験を行った。

表らにまくらぎ累積沈下量(各組の300rpm終時沈下量)を示す。まくらぎパッド有りの場合がなしの場合に比較して沈下量で90%程度の減少を生じている。そしてまくらぎパッドの硬軟による差違は, より軟かいパッドの場合, 沈下量が減少している。またレールパッドの硬軟による差違は顕著でない。

表6に模型軌道各部の振動加速度ピーク値を示す。最初に軌道の下方への減衰について*印の値から, まくらぎパッドなしの場合まくらぎ, 道床は一体として振動し, そして路盤へ至ると振動が低減している。まくらぎパッド有りの場合は, レールパッドの硬軟に関係なく, まくらぎと道床の間で振動がパッドにより大きく軽減され道床, 路盤は一体的に振動していると考えられる。次に各組の比率を**印の値に示す。まくらぎパッド有りの場合, なしの場合に比較してまくらぎ加速度は増加し道床, 路盤の加速度は減少している。しかしレールパッド, まくらぎパッドの硬軟による差は有意な程ではないと考えられる。以上の結果について理論解析結果と対応させると, 定性的傾向は一致していると考えられる。

4. おすび

本報告で得られた理論解析結果は, 軌道の振動軽減対策上有用なものと考えられる。今後の課題としては, 軌道の厳密な理論解析, まくらぎパッドの適切な貼付面積などが挙げられる。

表3 スラフ軌道

$Y_0 = \alpha_0 M^{0.744} / Mr^{0.028} D_1^{0.227} Ms^{0.075} D_2^{0.053}$	$\alpha_0 = 0.102$
$Y_1 = \alpha_1 M^{0.727} / Mr^{0.020} D_1^{0.265} Ms^{0.064} D_2^{0.074}$	$\alpha_1 = 0.123$
$Y_2 = \alpha_2 M^{0.540} / Mr^{0.028} D_1^{0.403} Ms^{0.064} D_2^{0.728}$	$\alpha_2 = 0.211$
$\ddot{Y}_0 = \beta_0 M^{0.101} D_1^{0.019} Ms^{0.009} / M^{0.958} D_2^{0.006}$	$\beta_0 = 22181.0$
$\ddot{Y}_1 = \beta_1 M^{0.038} D_2^{0.026} / Mr^{0.400} D_1^{0.064} Ms^{0.031}$	$\beta_1 = 1754.6$
$\ddot{Y}_2 = \beta_2 M^{0.112} / Mr^{0.083} D_1^{0.379} / Ms^{0.731} D_2^{0.182}$	$\beta_2 = 1.956$
$T.f. = Y M^{0.410} / Mr^{0.008} D_1^{0.216} D_2^{0.213} / Ms^{0.063}$	$Y = 0.509$

注) M: 輪軸重量 Mr: レール重量 Ms: スラフ重量
D₁: レールパッドのばね D₂: スラフのばね

表4 バラスト軌道

$Y_0 = \alpha_0 M^{0.783} / Mr^{0.024} D_1^{0.024} Mb^{0.120} D_2^{0.034}$	$\alpha_0 = 0.091$
$Y_1 = \alpha_1 M^{0.761} / Mr^{0.024} D_1^{0.263} Mb^{0.115} D_2^{0.059}$	$\alpha_1 = 0.116$
$Y_2 = \alpha_2 M^{0.655} / Mr^{0.006} Mb^{0.132} D_2^{0.602}$	$\alpha_2 = 0.119$
$\ddot{Y}_0 = \beta_0 M^{0.106} D_1^{0.031} Mb^{0.012} / M^{0.950} D_2^{0.018}$	$\beta_0 = 21982.5$
$\ddot{Y}_1 = \beta_1 M^{0.039} D_2^{0.048} / Mr^{0.396} Mb^{0.089} D_2^{0.029}$	$\beta_1 = 1640.9$
$\ddot{Y}_2 = \beta_2 M^{0.162} / Mr^{0.101} D_1^{0.379} / Mb^{0.754} D_2^{0.120}$	$\beta_2 = 317.3$
$T.f. = Y M^{0.531} D_1^{0.200} D_2^{0.244} / Mr^{0.020} Mb^{0.078}$	$Y = 0.249$

注) M: 輪軸重量 Mr: レール重量 Mb: バラスト重量
D₁: レールパッドのばね D₂: バラストのばね

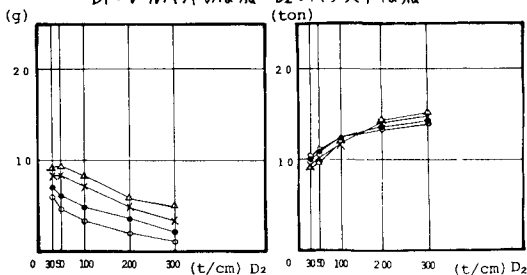


図2 バラスト軌道の周波数応答の例

表5 まくらぎ累積沈下量(mm)

まくらぎパッド		なし		A(4.32t/cm)		B(2.66t/cm)		
レールパッド		なし		なし		なし		6mm
6mm		13mm		6mm		13mm		13mm
沈下量	101.8	138.0	115	12.0	7.8	7.5		(46.5t/cm)
比率	*1.0	*1.34	*0.11	*0.12	*0.08	*0.07		

注) *なし-6mmを1とした場合の各組の比率

表6 模型軌道各部の振動加速度ピーク値(g)

まくらぎパッド		なし		A(4.32t/cm)		B(2.66t/cm)		
レールパッド		なし		なし		なし		
6mm		13mm		6mm		13mm		
まくらぎ	1.0	5.91	1.0	4.84	1.0	8.10	1.0	8.87
レール	**1.0	**0.83	**1.49	**1.37	**1.55	**1.50		
道床	1.06	6.29	1.25	6.03	0.20	1.74	0.22	1.80
路盤	**1.0	**0.96	**0.28	**0.29	**0.28	**0.26		
軌道	0.60	3.55	0.53	2.58	0.20	1.77	0.20	1.60
比率	**1.0	**0.73	**0.50	**0.45	**0.48	**0.52		

注) *軌道の下方への減衰比率

注) **なし-6mmを1とした場合の各組の比率

参考文献 1) 佐藤 祐: 軌道構造の振動伝達に関する影響, 土木学会論文集, 1975.8, pp.63~70.
2) 加藤 八洲・豊川 実男: まくらぎパッドの性能, 鉄道局誌, 24巻, 2号, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100.