

レール横方向の周波数応答特性に関する実験的研究

九州旅客鉄道㈱ ○正会員 原田 稔
九州大学工学部 正会員 角 知憲
九州大学工学部 学生員 箱田 厚
九州大学工学部 学生員 池田健一

1. はじめに

レールの小返りは、曲線を列車が通過する時の横圧によって主に外軌レールに起こる現象である。しかし、急曲線区間においては台車がリジッドな構造であるため、内軌上の車輪に横すべりが発生し、内軌レールにも小返り振動が発生する可能性がある。本研究は、急曲線内のPCマクラギ区間において、列車走行時の内軌レール振動加速度を測定し、同区間でインパルス加振実験を行いレール小返り振動の周波数応答を実験的に求め、その結果よりレール小返り振動のモデルを作成したものである。以下に、この結果について報告する。

2. レールの振動加速度

急曲線内の列車走行時に伴う内軌レールの振動加速度測定は、JR長崎本線、多良～肥前大浦間 71k100 付近（起点：鳥栖）の波状摩耗の発生が見られる箇所で行った。実験場所の概要を表-1に示す。

表-1 測定場所概要

項目	種別	測定場所データ
軌道構造	レール	50N
	マクラギ	PC 特殊型 (225.8 × 300 × 2000mm)
	締結装置	特殊区間用
	道床	砕石（厚 200mm）
線形	曲率	R=250m
	カント	C=85mm

各測定点は、加速度計をレール底部の背面に取り付けたものを上下(Z)方向、レール頭部、腹部の側面に取り付けたものを左右(Y)方向とした。測定データを1/3OCT. バンド分析した結果を図-1に示す。

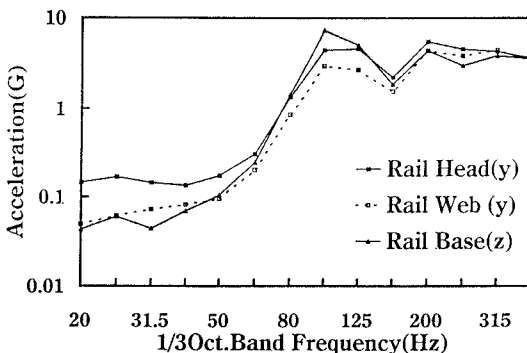


図-1 列車走行時振動加速度

各測定点の卓越周波数は、Z,Y 方向ともに 1/3OCT. バンド帯域で 100Hz に見られた。これは、測定区間に発生している波長 15cm ～ 16cm の波状摩耗の周波数帯域と同じであることから、波状摩耗による影響が少なからずあるといえる。しかし Y 方向の加速度は、Z 方向と同程度であるため Z 方向振動のクロストークとは考えにくい。むしろ主にレール自体が横方向に回転するモード、いわゆるレールの小返り運動が生じていると考えられる。

3. インパルス加振実験

測定場所の小返り方向に対してインパルス加振を行い、周波数応答関数からレール小返り振動モードの固有値を求める実験を行った。実験装置及び測定点を図-2に示す。実験は、レール側面に加速度計 G1 ～ G3 を取り付け、インパルスハンマーにてレール頭部側面を加振した。また、軌道に載荷するため加速度計取り付け位置から約 2m 離れた場所に保守用車を停車させた。測定

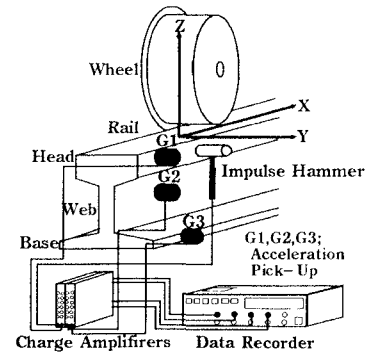


図-2 実験装置及び測定点

データは、データレコーダに記録した後 FFT アナライザにより周波数応答解析を行った。その結果を図-3に示す。

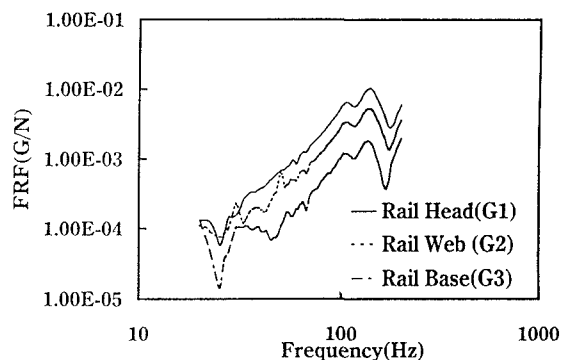
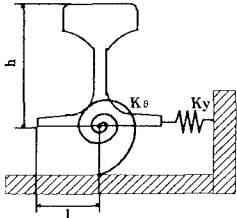


図-3 周波数応答分析結果

この結果より卓越周波数は、110Hz, 138Hz 付近に見られ、レール頭部、腹部、底部の各モードともに同じ位置でピークを示した。この2つのモードのうちどちらか1つはレール自体がもつ固有の振動モードで、もう1つは荷重によりレール長手方向に対して拘束されたことによるモードと考えられる。このことから実験区間のレールは、110Hz, 138Hz の周波数で小返り振動を起こすモードを持っていることがわかった。

4. レール小返り振動モデル



レールの小返り振動モデルを図-4に示す。モデルは、レール底部に横方向のばね K_y とレール底部にねじり方向のばね K_θ があると仮定し、共に複素型のばね定数として与え、損失係数を0.1とする。ここで、 h はレールの高さ、 l は軌道パッド幅の半分の長さを表している。まず横方向については、レール長手方向の境界を無限と考えた弾性支承梁とし、

$$EIy \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + K_y U = 0 \quad \cdots (1)$$

$$U = U_0 e^{i\lambda x} e^{i\omega t} \quad \cdots (2)$$

$$EIy \lambda^4 - \omega^2 \rho A + K_y = 0 \quad \cdots (3)$$

と与える。ここで、 E はレールのヤング係数、 I_y はレール断面2次モーメント（横）、 U はレールの横変位、 ρ はレールの材料密度、 A はレール断面積、 ω は角振動数である。 $\text{Re}(\lambda_i) \leq 0$ の境界条件より λ の実部が負または0の場合を採用して式(4),(5)により横方向変位 U_0 を求める。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 U_1 + \lambda_2 U_2 &= 0 \\ \lambda_1^3 U_1 + \lambda_2^3 U_2 &= \frac{W}{2EIy} \end{aligned} \right\} \quad \cdots (4)$$

$$U_0 = U_1 + U_2 \quad \cdots (5)$$

次にねじり方向についても横方向と同様に境界条件を与えた運動方程式

$$GI\theta \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \rho I\theta \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + K_\theta \theta = 0 \quad \cdots (6)$$

$$\theta = \theta_0 e^{i\lambda x} e^{i\omega t} \quad \cdots (7)$$

$$GI\theta \lambda^2 - \omega^2 \rho I\theta + K_\theta = 0 \quad \cdots (8)$$

$$I\theta = I_x + Ah^2 \quad \cdots (9)$$

$$K_\theta = \frac{1}{3} F K_\alpha \quad \cdots (10)$$

$$\theta_0 = \frac{hW}{GI\theta y} \quad \cdots (11)$$

$$U_0 = h\theta_0 \quad \cdots (12)$$

とする。ここで、 K_x は縦方向のばね定数、 G はレールの横弾性係数、 I_x はレール断面2次モーメント（縦）、 I_p はレール断面極2次モーメント、 $I\theta$ はレールベース回りの回転慣性、 θ_0 はねじり角、 α は

縦方向に対する補正係数である。式(8)を γ について解き式(11),(12)よりねじり変位 U_0 を求める。得られた2つの変位を合成して小返り変位とする。

5. 数値計算

式(1)～(12)に測定区間のデータを入力し α を推定する。計算に用いた入力データを表-2に示す。また、計算の適合度をレール頭部について行なった。その結果を図-5に示す。

表-2 入力データ

記号	単位	物性値
I_x	cm^4	1960.0
I_y	cm^4	322.0
I_p	cm^4	201.0
A	cm^2	64.05
h	cm	15.3
l	cm	6.5
ρ	$\text{N/sec}^2 / \text{cm}^3$	7.85×10^{-3}
E	N/cm^2	2.06×10^7
G	N/cm^2	7.8×10^6
K_x	N/cm	1.08×10^6
K_y	N/cm	1.43×10^5
α		0.72

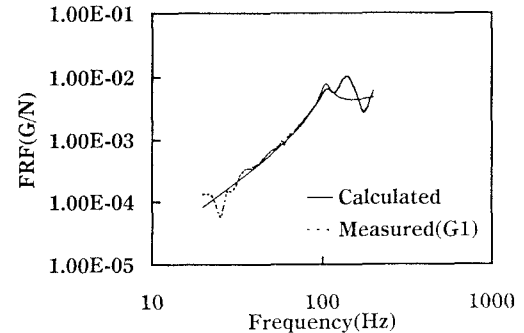


図-5 測定値及び計算値

この図より計算値は、荷重によるレール長手方向の拘束に対する条件を考慮していないため卓越する振動モードは、1つしか現れていないが、計算値と測定値は、ほぼ同じ傾向であることがわかる。

6. まとめ

本研究は、急曲線内軌レールに発生する小返り振動の周波数応答を実験的に求め、その特性を明らかにすることを目的としたものである。本研究によって明らかになったことは、次のようなことである。

- (1) 列車通過時の振動加速度測定結果から内軌レールの小返り振動は、上下方向のクロストークによるものではなく、レール自体に小返り運動を起こすモードが存在するために生じた可能性が高いと考えられる。
- (2) 小返り振動の卓越周波数は、レールにインパルス加振した時に得られる110Hz, 138Hzの卓越周波数と対応している。またこれは、波状摩耗のピッチや輪軸のねじり振動固有値¹⁾とほぼ対応する。

【参考文献】

- 1) 角・佐々木・松本・大嶋：急曲線区間におけるレール波状摩耗と車輪・軌道の動的相互作用，土木学会論文集，No.440/IV-16, pp173～176, 1992.1