

振動軸力測定のためのレール締結部回転剛性の同定

新潟大学大学院自然科学研究科

新潟大学工学部建設学科

(公財) 鉄道総合技術研究所鉄道力学研究部

新潟大学大学院自然科学研究科

学生員 高橋 寛

正会員 阿部 和久

正会員 浦川 文寛

正会員 紅露 一寛

1. はじめに

これまでに本研究室では、軸力を受けるレールの波動伝播モード解析に基づいたレール軸力測定手法の実現可能性について検討を行ってきた¹⁾。

様々な検討を通し、まくらぎ位置を節とする振動モード(pinned-pinned モード (図 1)) が軸力に対する感度も良好で、軸力測定には最適であるとの結論を得た。しかし、鉄道総研において実施された実軌道の測定²⁾では、共振周波数-軸力間に概ね線形関係が成り立つものの、その感度が理論と符合しないことが確認された。

本軸力測定法の実用化には、まずは周波数-軸力関係を適切に捉えることが不可欠であり、そのためには上述の理論モデルと実軌道との挙動の差異を突き止める必要がある。昨年度の検討を通して、実測に近い感度を与え得るものとして、軌道パッド剛性の温度依存性³⁾の影響が有力であるとの結論を得た。しかし、実際の軌道において、レール締結部の回転剛性にはパッドの他に締結装置も関与し得る。したがって、パッドの回転剛性を知り得たとしても、それ以外の要因が回転剛性に影響する可能性がある。さらに、温度依存性が重要となる場合、パッド毎の温度依存性を適切に把握することが要求される。これらの影響を個々に評価して軌道モデルに反映させることは現実的では無い。そこで本年度は、数値モデルにおいて、軸力と合わせて、レール締結部の回転剛性を未知量として扱い、軸力・回転剛性を同定する逆問題について検討する。

2. 軌道のモデル化

Pinned-pinned モードを対象とするため、当該モード解析を、図 2 のように離散支持された無限長レールに基づき実施する。レールは Timoshenko ばり要素で離散化し、まくらぎは質点で与える。なお、実軌道においては pinned-pinned 共振でレールが振動する際に、締結部分を介してレールに集中モーメントが作用し得る。その影響を再現するために、まくらぎ位置に回転ばね k を設定している。

3. 軸力の算出

回転剛性 k と軸力 $N=0$ の時の共振周波数 f_0 との関係は一意に定まる (図 3)。よって、回転剛性が分かれば、 f_0 が

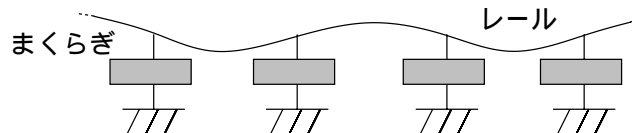


図 1 pinned-pinned モード

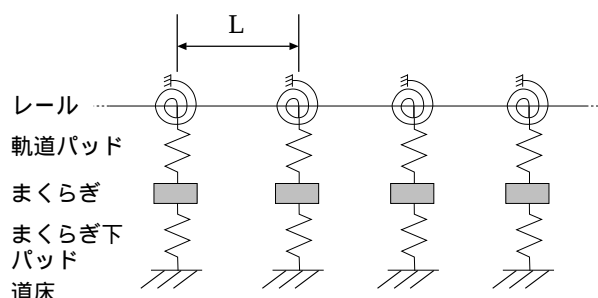


図 2 数値モデル (モード解析)

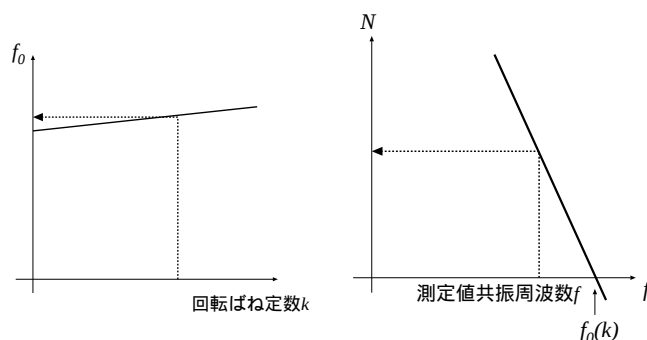
図 3 $f_0 - k$ 関係

図 4 軸力の算出

一意に決まり、共振周波数-軸力関係から共振周波数を用いて軸力を算出することが可能となる (図 4)。以上より、本軸力測定法は回転剛性の同定問題に帰着する。

4. 感度解析

回転剛性同定のために感度解析を実施する。目的関数を次式の様与える。

$$J = (m - \bar{m})^2 \quad (1)$$

ここで、 m はモード解析から得られる回転剛性 k に感度を持つと思われる物理量、 $\bar{m}$ は m に対応する測定データである。

式 (1) の最小値を求めることにより、 k の推定値を得る。

表 1 各種物性値(軌道片側分)

まくらぎ質量 (kg)	80
まくらぎ間隔 (m)	0.57
軌道パッドばね定数 (MN/m)	1182
軌道パッド減衰定数 (kN・s/m)	100
まくらぎ下パッドばね定数 (MN/m)	30
まくらぎ下パッド減衰定数 (kN・s/m)	50

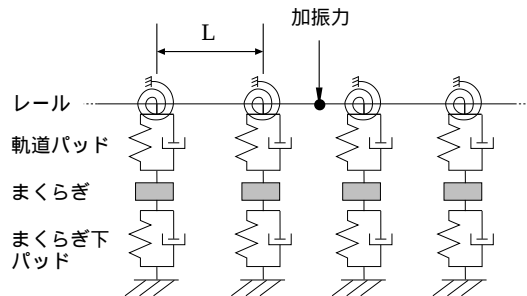


図 5 軌道モデル (非定常応答解析)

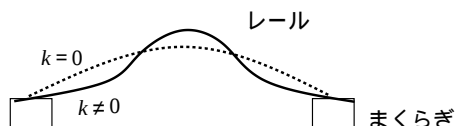


図 6 回転剛性のモード形状への影響

5. 解析結果

(1) 測定値の設定

加振応答をシミュレートした非定常応答解析(図5)結果の Fourier スペクトルより, pinned-pinned 共振成分を抽出し, それに基づき以下に示す 3 つの物理量を m として設定する場合について検討した. 加振方法はインパルスハンマによる加振を想定した. 解析では, 一定外力をスパン中央に $5 \times 10^{-4} \text{sec}$ に亘って作用させている. なお, 解析における時間増分は $5 \times 10^{-5} \text{sec}$ とした. 文献 2) の軌道条件に合わせ, レールは 50kgN レールとし, その他の解析条件を表 1 の様に設定した. なお, 共振周波数-軸力関係の感度を文献 2) と一致させるため, 軌道パッドのばね定数を通常より高めに設定している.

回転剛性 k が増加すると, 締結位置の回転角は減少し, モーメントは大きくなるものと考えられる. そこで, ある位置で計測するレール曲げモーメントと締結位置の回転角の比 $\bar{m}$ を, 測定値に設定する.

$$m_1 = \frac{\text{ある位置の曲げモーメント}}{\text{締結部回転角}} \quad (2)$$

回転剛性 k の存在により, モード形状はスパン内に変曲点を持つ(図6). そこで, モード形状の変化を評価し得る指標として, スパン中央の相対鉛直加速度と, ある位置にお

ける相対鉛直加速度との比を測定値とし次の様に設定した.

$$m_2 = \frac{\text{スパン中央鉛直加速度} - \text{締結部鉛直加速度}}{\text{ある位置の鉛直加速度} - \text{締結部鉛直加速度}} \quad (3)$$

レール中央部の曲げモーメント振幅は締結位置のそれと比較したとき 2 倍程度大きくなっており, 測定値の相対誤差を小さく抑えられる. そこで, スパン中央で計測する曲げモーメントとある位置における相対鉛直加速度との比を次のように m_3 に設定する.

$$m_3 = \frac{\text{スパン中央曲げモーメント}}{\text{ある位置の鉛直加速度} - \text{締結部鉛直加速度}} \quad (4)$$

測定誤差を考慮しない場合, m_1 で測定位置を締結部直近としたとき, および m_2 において, 分母の鉛直加速度の測定位置を締結位置から 0.1m 以上離れたときが, 検討対象の中では最も精度よく回転剛性を同定可能であることが分かった.

(2) 各測定値の誤差が軸力の誤差に及ぼす影響

各 m_i の測定誤差が軸力推定誤差に及ぼす影響を調べるために, m_i の変化量に対する N の変化量を次式により検討した.

$$\Delta N = \frac{\partial N}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial m_i} \cdot \alpha \cdot m_i \quad (5)$$

ここで, α は各測定値の相対変化量である.

解析の結果, $\alpha=1\%$ 当りの m_1, m_2, m_3 に対する N の変化量は, それぞれ $-430(\text{kN}), 25000(\text{kN}), -7200(\text{kN})$ となった.

以上より, 検討対象とした測定値の中では測定位置を締結部直近とした m_1 によるものが, N を最も精度よく推定可能であることが分かった.

6. おわりに

レール締結部の回転剛性を未知量として扱い, 軸力・回転剛性を同定する逆問題について検討した. その結果, 締結部直近における曲げモーメントと締結位置の回転角との比で m を設定した場合に, 検討対象としたケースの中で最も精度よく回転剛性 k と, 軸力 N とを同定可能であることを確認した.

なお, 今後は実測データに基づいた測定値の信頼性の検討や, 測定データに誤差を設定した場合にそれが軸力・回転剛性の推定精度に及ぼす影響などについてさらに検証する必要がある.

参考文献

- 1) Abe, K., Shimizu, S., Aikawa, A. and Koro, K. :Theoretical study on a measuring method of rail axial stress via vibration modes of periodic track, Proc. of WCRR, 2011.
- 2) 相川明, 阿部和久, 清水紗希, 坂井宏隆:固有振動数変化を利用したレール軸力測定法の基礎検討, RTRI REPORT Vol. 26, No. 8, 35-40, 2012.
- 3) 玉川新悟, 鈴木実, 弟子丸将:寒冷地向け低ばね定数軌道パッドの特性, 日本鉄道施設協会誌, 51(10), 43-46, 2013.