

連続的にレール頭頂面凹凸および浮きまくらぎが発生している箇所のレール応力解析モデル

鉄道総合技術研究所 正会員 ○相澤 宏行
 鉄道総合技術研究所 正会員 細田 充
 鉄道総合技術研究所 正会員 山本 隆一

1. はじめに

レール頭頂面凹凸（以下、レール凹凸とする）と浮きまくらぎが発生している箇所は、レール損傷が発生する可能性が高いことが知られている¹⁾。そのため、このような箇所を列車が走行した場合にレール底部に発生する応力を把握する必要がある。

そこで本稿では、レール凹凸と浮きまくらぎが連続的に発生している箇所のレール底面に発生する応力を動的に解析する手法を検討した。

2. 軌道動的応答モデル

過去に鉄道総研で開発した、軌道の動力学を計算するモデルの一つに軌道動的応答モデルがある²⁾。これは、図1のようにレールの下側に軌道（軌道パッド、まくらぎ、まくらぎ下ばね）を、上側に車両（ばね下質量、軸ばね、台車枠）をばねと質点で表現し、車輪はレールに Hertz の非線形接触ばねで結合しているモデルである。レールは Euler 梁とし、その変形を様々な波長の固有関数の重ね合わせとして表現している。後に、梁を Timoshenko 梁としたモデルも開発されている³⁾が、これらのモデルを現場に連続的に存在するレール凹凸および浮きまくらぎを対象として使用した例はまだない。そこで、本稿ではレールを Euler 梁としたモデル（以下、Euler）、Euler 梁に回転慣性を付加したモデル（以下、Euler+rot）、Timoshenko 梁としたモデル（以下、Timoshenko）の3種類を対象とし、現地測定試験の再現解析を行い、その結果を比較した。

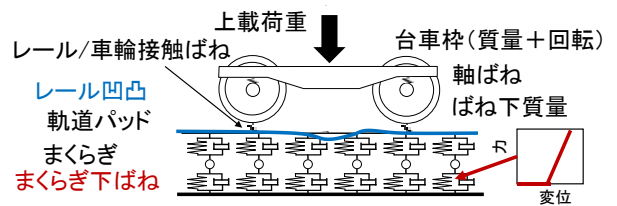


図1 軌道動的応答モデルの模式図

なお、Timoshenko 梁の方程式は式(1)の通りである。

$$\frac{1}{I^2} \left(-\frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{p}{\rho A} \right) + \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{1}{\lambda_s^2} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} - \frac{\rho}{E} \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} - \frac{1}{\rho A} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{EA} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (1)$$

ここに、 w はレール変位、 p は外力である。このうち第1項が Euler（純粋な曲げを考慮した梁）、第1、2項が Euler+rot（曲げに加えて梁要素の回転慣性を含んでいる）、全項を合わせると Timoshenko（曲げと回転慣性に加えて梁要素のせん断変形を考慮している）となる。

3. 現地測定試験と計算条件の概要

現地測定試験をある営業線のトンネル内で行った。当該箇所にはトンネル天井からの漏水がレールに滴下されている状況であった。この漏水箇所直下のレール底部で発生する応力を測定した。現地で観測されたレール凹凸および浮きまくらぎ量は図2の通りである。最もレール凹凸および浮き量が大きい箇所が漏水箇所に対応する。この箇所における列車通過時のレール応力の再現解析を行うために、3種類の軌道動的応答モデルに図2のレール凹凸および浮きまくらぎを入力し、表1および2のパラメータを与えて計算した。浮きまくらぎはまくらぎ

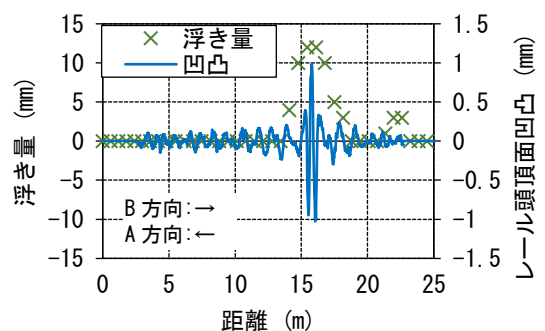


図2 レール凹凸と浮きまくらぎの状況

表1 車両の計算条件

ばね下質量 (kg)	635.0
軸ばね (kN/m)	1030
軸ばね減衰 (kNs/m)	19.6
台車枠質量 (kg)	770.0
台車枠ピッチング	
慣性半径 (m)	1.10

キーワード レール頭頂面凹凸、浮きまくらぎ、漏水、レール応力、軌道動的応答モデル
 連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7272

下ばねをまくらぎ下面とバラストの接触の有無により傾きを変えて表現した。梁の600Hz以下の挙動を表現できるように、固有関数の重ね合わせ次数は Euler および Euler+rot は30, Timoshenko は32 とした。

4. 計算結果および考察

計算によって得られた波形の一例(A方向の試番1)を図3に示す。測定値はピークの値が160MPa程度となっているが、これに対して Euler および Euler+rot はやや小さい値を、Timoshenko を用いた場合はやや大きい値となっている。Euler と Euler+rot の計算結果はほぼ同一の結果となっている。

図4に、応力ピーク値について、測定値に対する各モデルの計算値の相対誤差を示す。各進行方向の試番ともに、相対誤差が最も少ない傾向にあるのは Timoshenko を用いた場合の計算結果である。その相対誤差はB方向の試番5を除いて±20%の範囲内に収まっている。一方で Euler および Euler+rot についても Timoshenko ほど精度は良くないものの、B方向の1,2,5を除けば相対誤差は±20%に収まっている。

本解析のレールの細長

比 $\lambda = l\sqrt{\frac{A}{I}}$ 、とせん断を考

慮した細長比 $\lambda_s = \lambda\sqrt{\frac{Gk_s}{E}}$

は、最大次数の固有関数の変形についてはそれぞれ15.2 および 5.17 であ

る。式(1)の第3項によれば、せん断を考慮した細長比は1/10のオーダーで影響を及ぼすことが分かる。このことから、凹凸に起因すると推測される高周波振動は梁のせん断挙動まで考慮した時に影響が表れ、応力計算の精度に影響を及ぼすと考えられる。一方で、せん断の影響を考慮しなくてもある程度の精度を持って応力が計算されることから、浮きおよびレール凹凸が重畳した箇所のレールの挙動は曲げが支配的であると推測される。

5. おわりに

現地測定された応力について3種類のモデルを用いて再現解析を行った。今後、精度の高い Timoshenko 梁を用いたモデルを使用し、パラメトリックスタディを通して浮きまくらぎおよびレール凹凸がレール応力に及ぼす影響について考察する。

参考文献

- 1) 細田充, 相澤宏行, 山本隆一: トンネル内漏水箇所におけるレール損傷の原因調査, 第28回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-RAIL2021), SS9-1-5, 2021
- 2) 三浦重: 軌道構造の動特性モデルの構築, 鉄道総研報告, Vol.9, No.12, pp. 7-12, 1995
- 3) 石田誠, 三浦重, 河野昭子: 軌道動的応答モデルとその解析結果, 鉄道総研報告, Vol.11, No.2, pp. 19-26, 1997

表2 軌道の計算条件

レール種別	50kgN
ヤング係数 E (kN/mm ²)	206
せん断剛性 G (kN/mm ²)	80.0
せん断係数 k_s	0.340
軌道パッドばね定数 (MN/m)	110
まくらぎ下ばね (MN/m)	40.0
軌道パッド減衰 (kNs/m)	98.0
まくらぎ下ばね減衰 (kNs/m)	98.0
まくらぎ質量 (kg)	80.0
バラスト質量 (kg)	52.5
梁の全長 l (m)	25.12

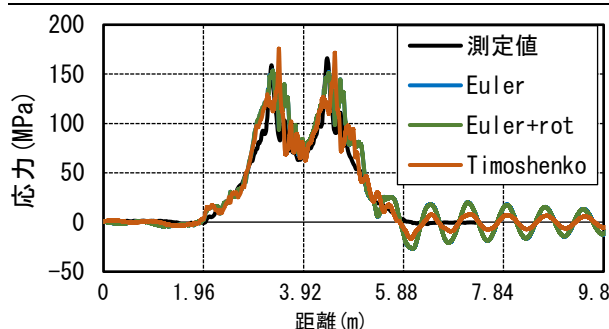


図3 応力の時刻歴波形

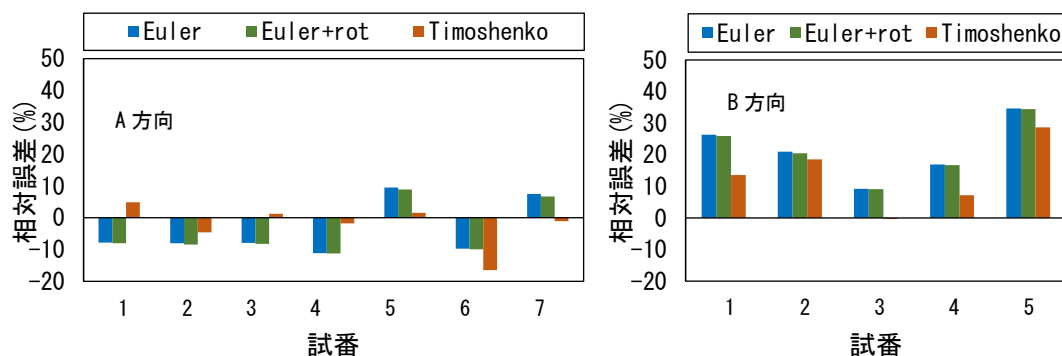


図4 モデル毎の実測値に対する相対誤差