

レール軸力の空間変動が軌道振動特性に及ぼす影響

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 阿久津 友宏
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久
 (財) 鉄道総合技術研究所 正会員 相川 明
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛

1. はじめに

鉄道軌道のレールはまくらぎに拘束されるため、温度変化に伴い大きな温度応力が発生する。その結果、高温時には座屈の原因となる圧縮軸力が作用し、低温時には破断の原因となる引張軸力が作用する。したがって、レールの軸力を把握し管理することは軌道保守上非常に重要である。

これまで本研究では、軌道の共振周波数が軸力に依存することを利用した軸力測定法(振動軸力測定法)の可能性について検討してきた^{1)~4)}。ただし、いずれもレールの軸力分布が区間一定であることを条件としており、軸力が空間的に変動した場合の影響を考慮していない。そこで本研究では、軸力の空間的変動が軸力と共振周波数との関係にどのような影響を及ぼすのかについて検討する。

2. 解析概要

レール温度は、1日さらには1年間に亘る日射条件および気温の変化の影響を受けて変動する。

レールは温度変化に伴い伸縮しようとするが、締結装置やまくらぎによってある程度拘束されるため、レールには温度軸力が発生することとなる。ただし、レール端部は拘束力が比較的低く、大きな変位が発生し、軸力が解放される。そのため、レール軸力は区間内で一定値をとらず、空間的な変動を生じる。

本研究では、これらの過程を考慮したうえでレール軸力を求め、その軸力を導入の下、加振応答解析を行う。

3. レールの温度解析

(1) 熱収支方程式⁵⁾

図1の、レール微小区間 dx における、微小時間 dt 当たりの熱エネルギーの増分 dE は次式で与えられる。

$$dE = -dE_H + dE_S - dE_T - dE_R \quad (1)$$

ここで、 dE_H はレール内を移動して微小区間 dx より出

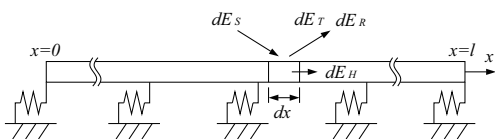


図1 ロングレールの1次元モデル

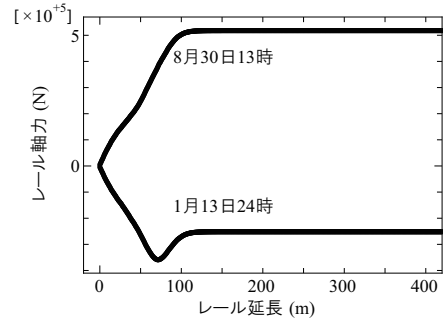


図2 軸力分布

ていく熱エネルギー、 dE_S は太陽輻射エネルギー、 dE_T は周囲の空気に伝達される熱エネルギー、 dE_R は周囲に放出される熱エネルギーである。

太陽輻射エネルギーには、年間の日射条件の変化、レール日射面の評価を考慮することで再現している。そして、周囲の空気との伝達熱には、年間の気温変化を反映させている。年間の気温変化は新潟市の2010年6月1日1時から2011年5月31日24時までの気温データ⁶⁾を採用した。

式(1)を変形・離散化し、Newton-Raphson法により解いてレール温度を求める。

4. レール軸力の解析

(1) レール軸力の評価

温度変化に伴って生じる温度応力およびふく進により生じる軸方向ひずみから、レール軸力 N (圧縮を正) を次式で評価する。

$$N = EA(\alpha T - \varepsilon) \quad (2)$$

ただし、 E はレールのヤング率、 A はレールの断面積、 α はレールの線膨張係数、 T はレール敷設時からの相対温度、 ε はレールの直ひずみ(伸びを正)である。

(2) 軸力分布の解析結果

初期設定(6月1日1時)からのレール相対温度が最も低い1月13日24時、および、最も高い8月30日13時の軸力分布を図2に示す。以降の解析ではこれらの軸力を導入して行う。

5. 加振応答解析

(1) 解析対象

本解析では、レール延長360m、まくらぎ間隔は0.6mと

Key Words: ロングレール, 軸力, 振動

連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 7021

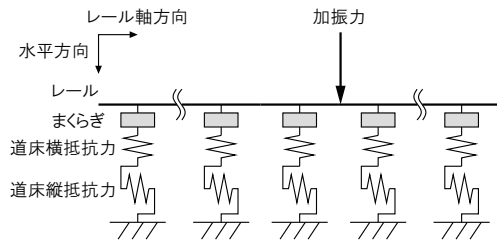


図3 軌道モデル (水平加振)

表1 50kgN レールの各種設定条件

質量密度 (kg/m^3)	$\rho = 7880$
断面積 (m^2)	$A = 64.05 \times 10^{-4}$
ヤング率 (GPa)	$E = 206$
ポアソン比	$\nu = 0.33$
断面二次モーメント (m^4)	$I_x = 1960 \times 10^{-8}$
せん断係数	$K_x = 0.394$

表2 各種ばね定数 (単位は MN/m)

道床縦抵抗バネ定数	$k_u = 550$
道床横抵抗バネ定数	$k_v = 6$

する。加振方法は水平加振、軌道モデルは図3とし、レールは Timoshenko ばりでモデル化する。レールは 50kgN レール、まくらぎは PC まくらぎを想定し、レール 1 本当たりのまくらぎ質量を 100kg とする。レールの各種物性値は表1のように設定した。

道床縦抵抗力および道床横抵抗力をそれぞれ、次式のように複素剛性 k'_u, k'_v として与え、減衰効果を導入する。

$$k'_u = k_u(1 + 0.05i\omega), \quad k'_v = k_v(1 + 0.05i\omega) \quad (3)$$

各種ばね定数は表2のように設定した。

(2) 解析条件

測定は加振点と同じ箇所で行う。加振点はまくらぎ間中央とし、レール端から最初のまくらぎ区間 (0.6m 地点) を基点とし 3m 間隔で 60 箇所順次設定した。

(3) 測定精度

軸力分布が一定の下で加振応答解析を行った場合の結果と比較し、測定精度を検討する。ここでは、加振点における軸力をレール全体に一樣に分布させる。

軸力一定の下での 49kN あたりの感度は、軸力-1075kN ~ -28kN の範囲において 0.7Hz 程度、29kN ~ 1554kN の範囲においても 0.7Hz 程度であった。ここでは、軸力変動下における共振周波数と軸力一定下における共振周波数の差が 49kN あたりの感度に収まることを測定精度を満たす条件とする。

図4に1月13日24時、図5に8月30日13時における共振周波数の差を比較した結果を示す。参考のため、実

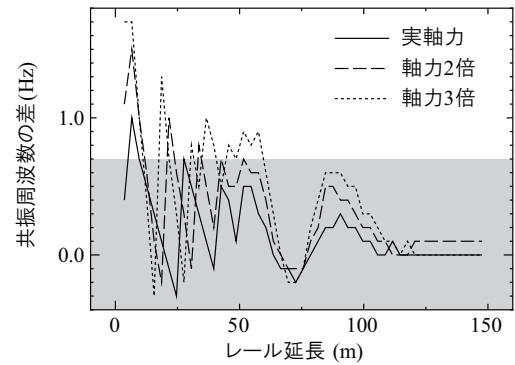


図4 共振周波数の差 (冬・水平加振)

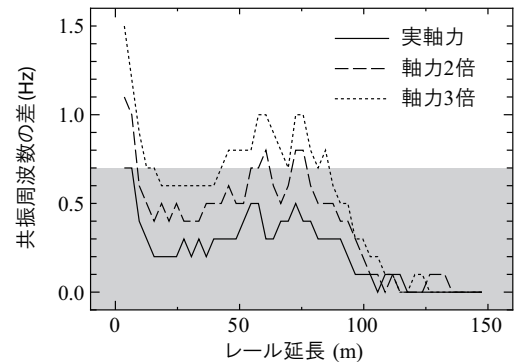


図5 共振周波数の差 (夏・水平加振)

際の温度条件から得られた軸力に加え、その軸力を2倍、3倍にして解析した結果も合わせて示す。夏・冬何れの場合も軸力の変動が大きくなるレール端に近いほど、また、軸力の空間勾配を大きくするほど、共振周波数の差が大きくなっていることがわかる。ただし、レール端軸力はそれほど大きくなりませんので、本来測定を要しない。したがって、通常の軌道区間において発生する温度軸力下であれば、測定に支障は生じないものと考えられる。

6. おわりに

ロングレールの軸力測定に際して、軸力の空間的な変動がどの程度影響を及ぼすのか調べた。軸力の空間的な変動は共振周波数を変動させ得るものの、特に軸力の空間勾配の大きくなるレール端近傍を除けば、測定精度は十分確保し得るものと考えられる。

参考文献

- 1) 清水紗希, 阿部和久, 相川明, 紅露一寛: 軸力を受けるレールの波動伝播解析, 計算数理工学論文集, 9, 67-72, 2009.
- 2) 清水紗希, 阿部和久, 相川明, 紅露一寛: 3次元はり要素を用いた軸力を受ける軌道系の波動伝播解析, 鉄道力学論文集, 14, 75-82, 2010.
- 3) 石川大地, 阿部和久, 紅露一寛: 軸力を受ける曲線レールの振動応答解析, 計算数理工学論文集, 10, 57-62, 2010.
- 4) 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.
- 5) 河合潤: 物理工学・化学工学を学ぶための熱・物質移動の基礎, 丸善, 2005.
- 6) 気象庁 HP <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>