

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 11 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560499

研究課題名（和文） 振動モード法に基づくロングレール軸力測定法の理論的検討

研究課題名（英文） Theoretical study on a measuring method of rail axial stress using vibration modes

研究代表者

阿部 和久 (ABE KAZUHISA)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：40175899

研究成果の概要（和文）：ロングレールの軸力測定法として、振動モードを利用した手法について理論的検討を行った。まず、軸力を受けるまくらぎ離散支持レールの理論分散曲線を求め、まくらぎ位置を節とする水平・鉛直たわみの定在波モードが軸力測定に適するとの結論を得た。続いて、曲線部および分岐器介在ロングレールの場合について検討し、これらの軌道においても軸力と共振周波数との関係から軸力測定が理論的に可能であるとの結論を得た。

研究成果の概要（英文）：A measuring method of rail axial stress is studied based on numerical models. For this purpose, dispersion curves are obtained for a periodically supported continuous welded rail. It is found that the pinned-pinned resonance is a suitable mode. Moreover, applicability of the method to curved rails and tracks with a railroad switch is investigated. Through numerical experiments availability of the method for these cases is proved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：ロングレール，軸力測定，共振周波数，定在波モード

1. 研究開始当初の背景

(1) 鉄道レールのロングレール化は、列車通過時に発生する衝撃・振動・騒音を低減し、ひいては軌道破壊の抑制や乗り心地の改善にも役立っている。しかし、まくらぎ締結による抵抗力によりレール伸縮が拘束されるため、温度上昇により軌道座屈が、また温度低下によりレール破断が発生する恐れがある。これらのことから、軌道の保守管理上、レール応力の把握は極めて重要であると認

識されている。そのため、我国や欧米において、様々なレール応力測定法が長年に亘り模索されて来た。しかし、これまでに提案された測定法ではレール敷設時の初期状態を把握しておく必要があり、既設レールの任意箇所を随時測定することができず、いずれも汎用性や実用性に欠ける。

(2) なお、レールを加振し、その際のレール振動応答より軸力を同定する方法が 1980 年

頃欧米において考案され、その理論構築と測定法の検討がなされたが、結局実用化には至らなかった。この方法が成功しなかった理由としては、「理論計算において、レールを弾性床の上のりとしてモデル化しているが、実際のレールはまくらぎにより離散支持されており、現象を適切に表現できていない」ことが挙げられる。しかし、圧縮・引張に関わらず任意箇所の軸力を比較的容易に測定可能な方法であり、実現すれば非常に有効な手法となり得る。

2. 研究の目的

既往の研究における上述の問題点を踏まえ、本研究ではレールをまくらぎにより離散支持された周期構造として捉え、波動モード特性を利用することにより、振動測定法に分類される新たな軸力測定法の理論構築を目指す。

具体的には、以下の項目について明らかにすることを目的とする。

(1) 直線および曲線ロングレールの軸力測定法に関する理論的検討

①レールにおける伝播モード分散特性の、軸力や緩衝具(ゴムパッド)、道床などの剛性に対する鋭敏性を調べる。

②以上の結果に基づき、軸力の抽出に有効なバンド端モードを特定する。

③レール調和加振とインパルスハンマーによる打撃加振に対応する応答解析により、上記バンド端モードの検出過程をシミュレートし、本測定方法の有効性を検証する。

(2) 分岐器介在ロングレールの軸力測定法に関する理論的検討

①分岐部分を含む無限長レールの数値モデルを構成し、加振応答解析を行う。それに基づき、分岐部の卓越周波数の、軸力や各種物性値に対する鋭敏性を調べる。

②以上の結果に基づき、軸力の抽出に有効な卓越モードを特定する。

③分岐部を対象とした(1)に準ずる測定法を構築し、その有効性について理論的検証を行う。

3. 研究の方法

(1)直線ロングレールの軸力測定法について検討する。具体的には、軸力を受けるレールを無限周期軌道としてモデル化し、その波動分散特性を求める。その結果よりレール軸力とモード周波数との関係を求める。さらに、レール加振のシミュレーションを通し、この関係を用いて卓越周波数からレール軸力を求める本方法の有効性について検証する。

(2)曲線ロングレールの軸力測定法について検討する。そのために、一定曲率を有する

レールの分散解析を新たに行い、レール軸力とモード周波数との関係を求める。さらに、加振応答解析より、卓越周波数からレール軸力を求める本方法の有効性を検証する。

(3)分岐器介在ロングレールの軸力測定法について検討する。そのために、まず分岐部のように非周期構造を一部に含む軌道の加振応答解析法を構築する。次に、当該解法を用い、分岐器の加振応答解析を実施し、レール軸力と卓越周波数との対応関係を調べる。その結果に基づき、レール軸力の測定に適した卓越モードを特定し、測定法の有効性を検討する。

4. 研究成果

(1)離散支持されたレールにおける周波数と波数および軸力との関係(分散曲面)

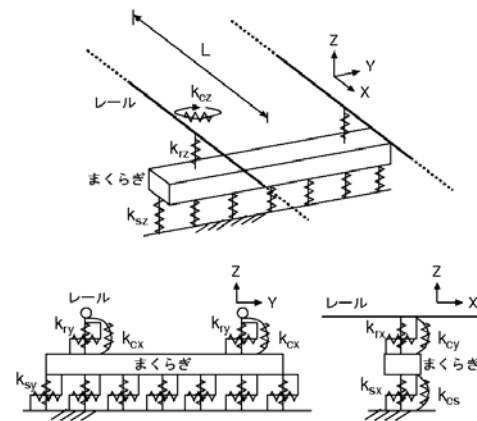


図1 3次元軌道モデル

図1のように、まくらぎで離散支持された無限長レールを3次元軌道モデルとして設定する。レールは50kgNレール、まくらぎはPCまくらぎを想定し、各種物性値を設定した。なお、まくらぎ間隔は $L=0.6\text{m}$ とする。

周波数 f とFloquet波数 κ および軸力 N との関係は3次元空間中の曲面として与えられる。そこで、軸力を0から2MN毎に6MNまで変化させたときの、周波数と無次元化したFloquet波数との関係性を求めた。その結果を図2に示す。なお、実際のレールではこれ程大きな軸力が作用することはないが、軸力の影響を確認する目的で6MNまで図示した。

図中水平線で与えられている分散曲線はFloquet波数や軸力の影響を受けていないが、これらは主にまくらぎが振動するモードに対応している。図で、 $\kappa L=\pi$ における分散曲線の傾きが0となるモードの内、軸力の影響が認められるもの(A, B, C, D, E)は、定在波モードに対応しており、レールを加振した際に卓越して現れるため、測定しやすいモードを与える。そのため、軸力測定にはこれら

の振動モードを利用するのがよいと考えられる。

A, C, Dはともに波長 $2L$ の下, まくらぎ位置を節として振動するモードである. なお, Dは pinned-pinned resonance に相当しているが, わずかにまくらぎの回転振動を伴っている. B, Eの波長は $2L$ であり, 他のモードと同一波長を与えるが, まくらぎ位置を腹として振動するモードとなっている.

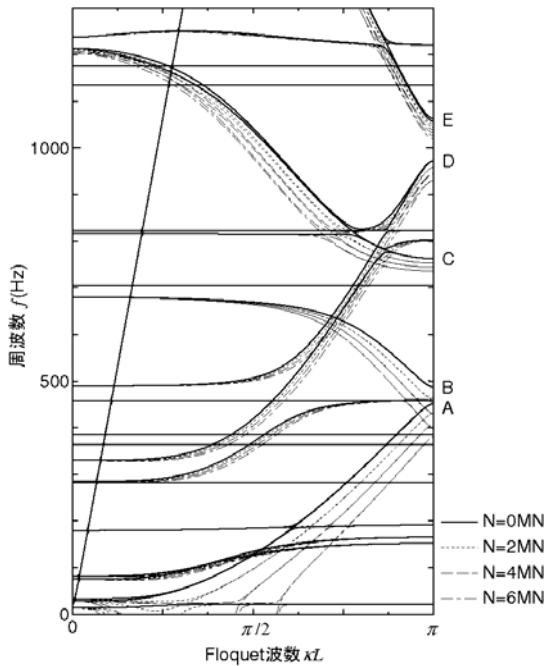


図2 まくらぎ支持レールの分散曲線

(2) 測定に適するモードの検討

$\kappa L = \pi$ における周波数と軸力との関係を図3に示す. なお, 図には1次元軌道モデルに対する結果も示した. 軸力0MNの近傍で軸力に対する周波数の感度を調べると, A~Eの振動モードはそれぞれ1MN当り10Hz, 13Hz, 5Hz, 7Hz, 6Hzほどとなっており, A, Bのモードが比較的高い鋭敏性を有していることがわかる.

実際の軌道において, 締結装置やまくらぎ下パッドの剛性はある程度バラツキを有するものと考えられる. そこで, 締結装置等に関するバネ定数の違いが結果に及ぼす影響について調べた.

鉛直と水平たわみ振動の何れにおいても, まくらぎ位置を節とする振動モードが, 軸力に対する共振周波数の感度が高く, レールがまくらぎと独立して振動するため各種物性値のバラツキの影響も受けないことから, 軸力測定に適しているとの結論を得た. 特に, 水平方向振動モードAは, 締結装置やまくら

ぎ下部の剛性の影響が殆ど認められず, 軸力に対する共振周波数の感度も高いため, 軸力測定に最適であると考えられる.

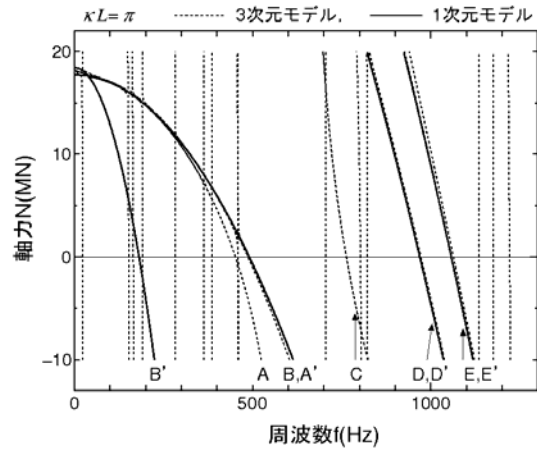


図3 $\kappa L = \pi$ における振動モードの周波数と軸力との関係

(3) レール加振による軸力測定の可能性の検討

軸力測定に適するのは, まくらぎ位置を節とする振動モードであるという結論を得た. そこで, この振動モードが, レール加振により実際に現れるのかについて検討した. まくらぎ支持点間中央をインパルスハンマーで加振した場合の解析結果を図4に示す.

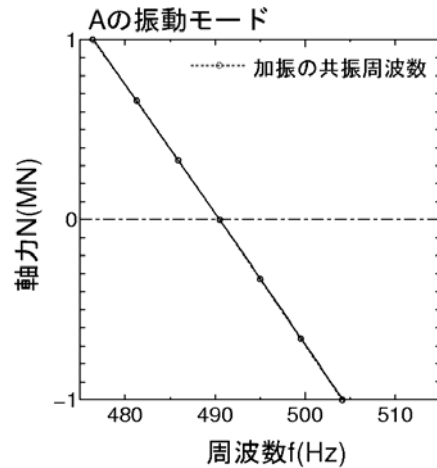


図4 共振周波数と軸力との関係

図はAの振動モードに対応する水平加振の結果である. 図より, 一点加振によっても定在波モードが励起され, 周波数と軸力との関係が抽出可能であることがわかった. また, 調和加振の場合についても検討した結果, 同様に適用可能であることを確認した.

(4) 曲線ロングレールへの適用可能性

曲線ロングレールの水平加振の場合, 水平たわみはレール軸方向変位を伴うこととな

る。そのため、厳密には直線ロングレールと異なる振動特性を有する。そこで、曲線ロングレールを、一定曲率を有しまくらぎにより周期的に離散支持された無限長曲線ばりとしてモデル化し、軸力作用下での分散解析を実施した。なお解析では、通常の曲線軌道における曲率半径の範囲内で条件を設定した。その結果、曲線軌道と直線軌道の分散曲線がほぼ一致することがわかった。このことより、曲線レールにおいても、理論的には直線レールが有する共振振動数・軸力関係をそのまま利用可能との結論を得た。

続いて、実際の軌道を想定し、一定距離の曲線区間の両端に緩和曲線と直線区間を設定した図5に示す軌道モデルを作成し、曲線区間におけるまくらぎ支持中央部の水平加振解析を実施した。

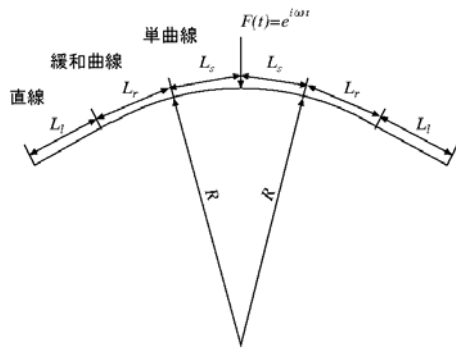


図5 曲線区間を含む軌道モデル

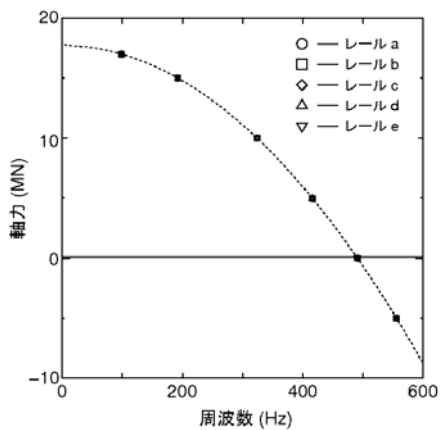


図6 曲線を含むレールの周波数・軸力関係

結果を図6に示す。図には、曲線区間の曲率半径(0~1000m)、曲線区間(60, 120m)、緩和区間(0, 30m)、直線区間(0, 30m)を異なる長さで与えたレール a~e における結果を示している。曲線区間の有無も含め、いずれのケースにおいても共振周波数と軸力との関係は

一致しており、本軸力測定法が適用可能であることがわかった。

(5) 分岐器介在ロングレールへの適用可能性

分岐器前後では、一方から1本、他方から2本のレールが接合されることで、レールに大きな軸力が作用する。そのため、軸力管理がとりわけ重要となる。そこで、分岐器前後のレールを対象に、本測定法の適用可能性について検討した。解析では分岐器介在レールを図7のようにモデル化した。なお、分岐番数は12番に設定した。

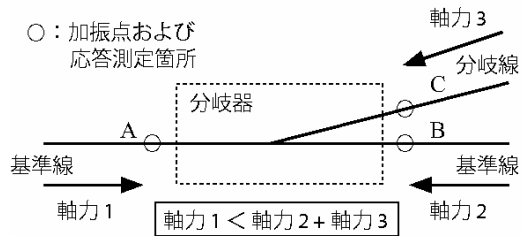


図7 分岐部前後の軌道モデル

分岐線側の基準線(図7中のA点)を加振した場合を例に、周波数と相対温度との関係を図8に示す。図には直線レールの場合も合わせて示している。なお、周波数・軸力関係を求めると、直線レールと同様の関係が得られたものの、直線レールのものとは一致しなかった。これは、分岐器前後の軸力が直線区間とは異なっているためと考えられる。ただし、図8のように、相対温度に換算して見ると分岐器の有無は結果に影響していないことがわかる。このことから、分岐器近傍の局所的な軸力は、動的応答特性に対してほとんど影響せず、直線部分の共振特性が支配的となっているものと考えられる。

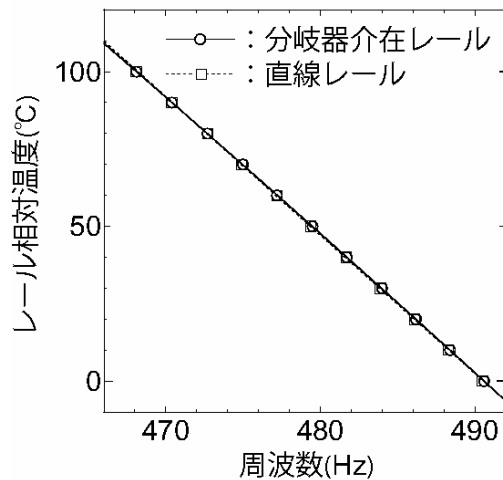


図8 周波数と相対温度との関係

なお、分岐器前後の軸力が一定となる直線部における軸力は共振周波数から求めることができるので、分岐部における軸力と直線部分のそれとの関係を予め求めておけば、分岐部の軸力を間接的に予測し得るものと考えられる。

(6) 今後の展望

本研究により、振動モード法に基づくレール軸力測定が理論的に可能であることがわかった。今後は実験や実軌道での試験を通し、理論の検証や実用化に向けた検討が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 阿久津友宏, 阿部和久, 石川大地, 紅露一寛, 温度応力を受ける分岐器介在ロングレールの動的応答解析, 計算数理工学論文集, 査読有, 11 巻, 2011, pp. 41-46
- 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, 査読有, 14号, 2010, pp.75-82
- 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, 査読有, 10巻, 2010, pp.57-62
- ④ 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特性, 計算数理工学会論文集, 査読有, 9巻, 2009, pp.67-72

[学会発表] (計 10 件)

- ① Abe, K., Theoretical study on a measuring method of rail axial stress via vibration modes of periodic track, WCR2011, 2011年5月25日, Lille Grand Palais (フランス)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阿部 和久 (ABE KAZUHISA)
新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 40175899