

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

ハンマー打撃で レール軸力を求める

ロングレールでは気温や日照の影響で、大きなレール軸力が発生することがあり、軌道管理上の課題となっています。そこで、レールの固有振動数をもとにレールに作用する絶対軸力を推定する基礎理論を構築し、数値解析により軸力測定に有効な固有振動モードを抽出しました。本理論の正しさを検証するために、実軌道のロングレール区間でのレールの加振実験を実施しました。本文では、ハンマー打撃でレール軸力を求める手法を紹介します。



相川 明

Akira Aikawa

鉄道力学研究部
軌道力学研究室
主任研究員

【専門分野】 バラスト、まくらぎ、粒状体解析、大規模数値解析、現場測定、センサー技術

定尺レールとロングレール

レールの標準の長さは25mです。これを「定尺レール」と呼んでいます。通常の線路は、この定尺レールを継目板でつないで、連続した構造にしたものです。電車に乗っていると「ガタン、ゴトン」と大きな音がしますが、これは車輪がレールの継目を通過するときに発生する衝撃音です。この衝撃荷重が原因となり、継目付近には軌道沈下が発生し、また軌道構造自体にも損傷や劣化現象が発生します。つまり継目は線路構造の最大の弱点であり、その維持管理も大変です。

一方、この定尺レールの端部を溶接して、1本の長いレール構造にしたものをロングレールと呼んでいます。ロングレールの場合は、基本的に継目がありませんので、継目で発生する劣化現象を防止できます。また、継目を通過する際の衝撃音や振動も発生しません。振動・騒音の低減や乗り心地の改善にも効果があります。

ロングレールにはこのような利点があり、最近では、新幹線ばかりでなく、在来線においても導入が進められています。電車に乗ったときに

「ガタンゴトン」という衝撃音が聞こえない線路は、たいていロングレールになっています。

温度変化によるレールの伸縮

このように書くとロングレール化により、すべての問題が解決できるように思えます。確かに、定尺レールでは不可避だった衝撃に関する問題をかなりの面で解決できます。しかしその一方で、ロングレールならではの厄介な問題を抱え込むこととなります。それはレールの内部に発生する熱応力に関する問題です。

レールは鉄で出来ています。しかもほとんどのレールは屋外に敷設されており、季節の気温変動や日照の影響を受けます。つまり、レールは、夏場の炎天下では、強い日差しのエネルギーを受けて、素手では触れないほど熱くなります。一方、冬場には、外気温と同じく、凍り付くほど冷たくなります。

このような温度変化があると、鉄で出来たレールはその長手方向に、その温度変化に応じた伸びや縮みを起こします。この伸縮量については、1mの長さの鉄ですと、1℃の温度上昇で伸

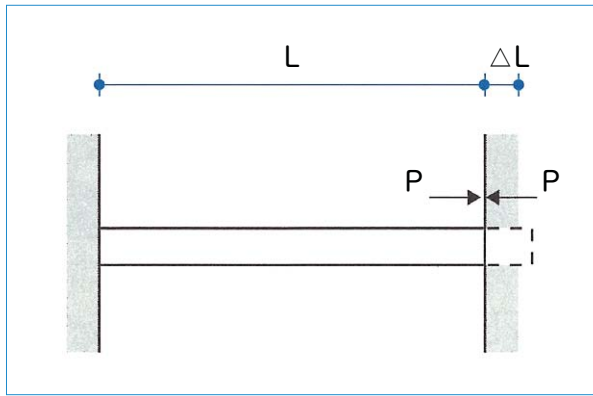


図1 温度上昇による熱応力の発生

びる量は非常に小さく、わずか $10\mu\text{m}$ ほどしかありません。ところが、夏場と冬場のレールの温度差は数 10°C あり、レールの長さは定尺レールの場合でも25mもあります。したがって、その端部での伸縮量はミリメートル単位となり、目視でも分かるほどの大きくなります。

温度変化による軸力発生のおくみ

定尺レールの場合、レール端部の継目に隙間があります。レールが多少伸び縮みを起こしても問題はありません。ところが、ロングレールでは、等間隔に設置されたまくらぎに、レールがしっかり締結されています。そのため、その両端部を除くと、ロングレールの伸縮は完全に押さえ込まれています。

図1は長さ L の鉄製のレールが、その両端を壁に挟まれた状況を表しています。ここで温度上昇があると、本来ならば鉄のレールには伸び ΔL が発生します。ところが、ロングレールは、締結装置やまくらぎによりしっかり固定されていますので、伸縮できません。つまり、鉄の棒の中では、長さ $L+\Delta L$ の鉄の棒を、 L の長さしかない場所に、無理矢理押し縮めた状態になっています。そのため、ロングレールの内部には、温度変化によりレール長手方向に熱応力(以下「軸力」という)が発生します。

軸力変動は100トンにも達する

鉄の熱膨張係数をもとにするると、レールの温度が 1°C 変動すると、50kgNレールの場合で約1.63トン、60kgNレールの場合で約1.97トンもの軸力変動が発生します。たとえば、夏場の炎天下のレール温度と、真冬の温度との間には $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 近くの温度変動がありますので、レールには数十トン ~ 100 トン近くの軸力の変動が発生することになります。100トンと言えば、自家用車100台分の重さに相当します。

軸力が発生するだけならば、それほど問題は無いのですが、例えば、夏場の猛暑による大きな圧縮軸力の発生は軌道座屈(レールの張り出し)の原因となります。一方、冬期の寒冷地での引張軸力の発生は、場合によってはレール破断などのトラブルを誘発しかねません。つまり、それらの予防のために、ロングレールでは軸力の継続的な管理が必要になるわけです。

従来の軸力測定法

レールに発生する軸力によるトラブルを防止するには、ロングレール軌道においては、定められた温度範囲内の敷設と、軸力の長期にわたる適切な管理が不可欠です。しかし、現状では、実用に耐えうる有効な測定法がありません。通常は一定区間毎に設置された杭を基準にして、レール上の目印をも

とに、レールの伸縮量を測定し、ふく進による付加軸力を管理するという方法によっています。

しかし、この方法では、誤差や主観が介入する余地が多分にあり、局所的な軸力のばらつきも、得られた値の結果の信頼性も分かりません。そのため、現場でレールに作用する絶対軸力を簡便に把握できる非破壊測定法の開発が望まれています。

レール軸力と固有振動数の関係

ギターやバイオリンなどの弦楽器では、弦を引っ張れば音が高くなり、弦を緩めれば音が低くなります。これと同じく、レールについても、軸力の増減により、レールの固有振動数が変化します。レールも引っ張られると固有振動数が高くなり、圧縮されると固有振動数が低くなります。つまり、レールに作用する軸力とその固有振動数との関係を理論的に明らかにできれば、レールの固有振動数をもとに、レール軸力の大きさを推定することができることになります。

ただし、レールの場合、柔らかくて細長い弦の振動とは異なり、素材自体の剛性があり、断面積も大きく、複雑な断面形状をしています。また、相応の質量もあります。そのため、軸方向の伸縮のみではなく、曲げ、ねじり、せん断変形、中心軸の偏心などの影響も受けます。しかもレールはまくらぎで離散的に締結されており、それらの効果についても考慮しなければなりません。

レールの固有振動数をもとに作用する軸力の大きさを求めるには、レールの断面形状とその剛性、および、複雑な固定条件を考えたいうでの理論的な評価が必要になってきます。つまり、先ほどの弦の説明とは異なり、音の高さだけではなく、音色を分析する必要があるわけです。

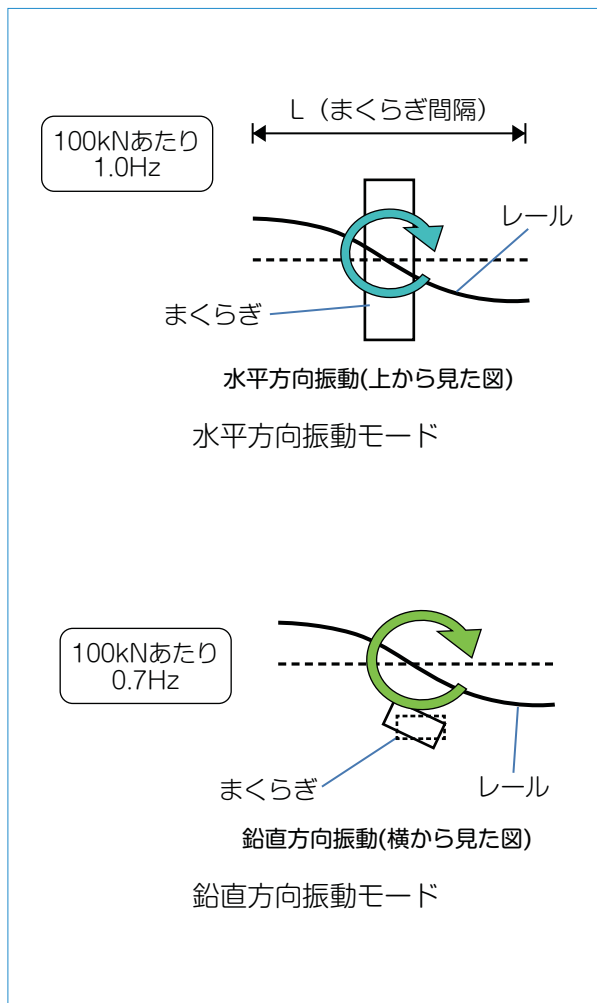


図2 軸力測定に最適な固有振動モード

レールの場合、音色に相当するのは、固有振動数とそのときのレールの変形のモードです。その抽出には、コンピュータを用いた数値解析が必要になってきます。

軸力測定に有効な固有振動モード

50kgNレールおよび3号PCまくらぎ(締結間隔60cm)からなる無限長のバラスト軌道に関する数値解析を行ない、軸力を受けながら振動するバラスト軌道に関する波動分散解析によって、軸力測定に有効な固有振動モードを抽出しました。

解析より得られた軸力測定に適するレールの固有振動モードの例を図2に示します。この図は、各固有振動モードに関して、最大振幅発生時における変形の特徴を示しています。両モード

は、まくらぎ位置を節として振動するモードであり、レールがまくらぎと独立して振動するので、締結装置、まくらぎ下面のばね定数、および、まくらぎの振動の影響を受けず、軸力測定に適しています。

レール軸力の測定では少なくとも約100kN(約10トン)程度の測定精度が必要です。図中に、100kNの軸力変動に対する周波数変動の大きさを示します。固有振動数の測定精度は測定方法にもよりますが、最も簡単なインパルス加振の場合0.1~0.2Hzです。したがってレール軸力の測定に必要な分解能は十分に実現可能と考えられます。

インパルス加振実験

実軌道のロングレール区間で、気温、日照によるレール軸力変動を外力とし、

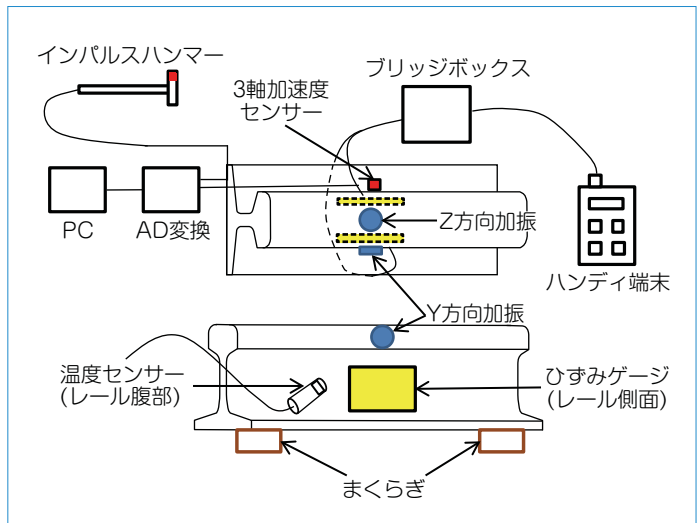


図3 ロングレール加振実験の概要

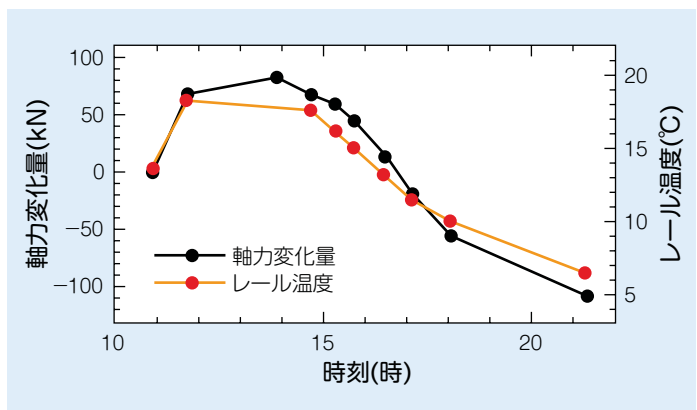


図4 軸力およびレール温度(実軌道)

レール軸力の変化とレールの固有振動数の変化との関係を調べました。実験の概要を図3に示します。加振箇所は、隣接するまくらぎの中間点です。加振点に水平方向と鉛直方向からインパルスハンマーで打撃を与え、加振箇所でのレールの応答波形を測定します。なお、個々の加振波形の特性の違いによる影響を排除するために、加速度データを加振力で除して基準化し、アクセラランス(加速度/加振力)に変換しました。

図4は、レール軸力とレール温度の経時変化を示したものです。実験当日のレール温度の変化は11.3°Cですが、その間にレール軸力には177kNの変動がありました。

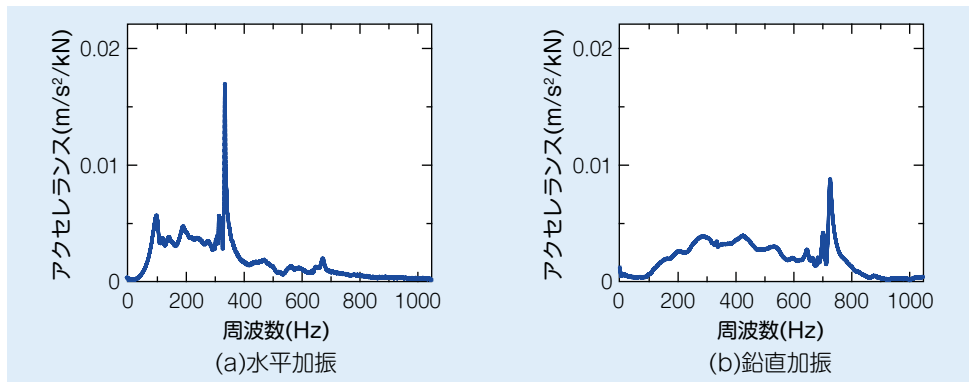


図5 加振実験測定例 (実軌道)

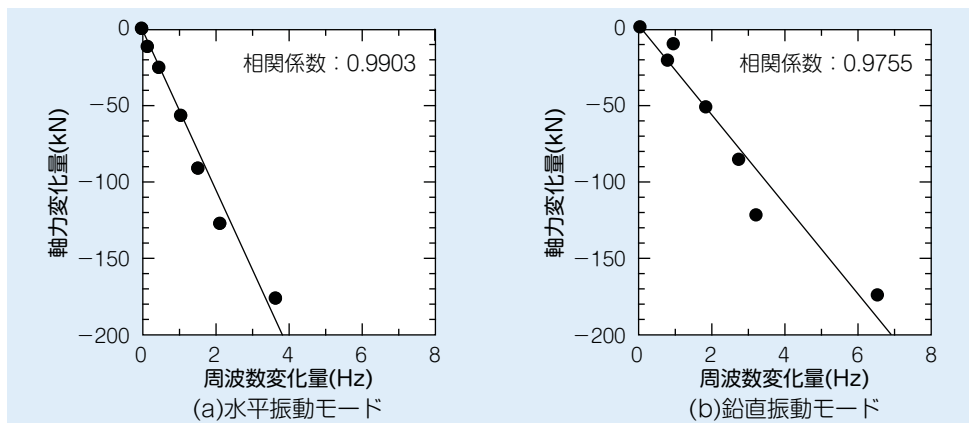


図6 軸力とレールの固有振動数 (実軌道)

軸力測定に適した固有振動周波数

加振実験の測定例を図5に示します。図より、水平加振では340Hz近傍に、鉛直加振では730Hz近傍にピークが見られます。これらは、まくらぎ位置を節、レール中間部を腹として、レールが水平方向および鉛直方向に振動する定在波の固有振動モードです。前掲の図2では、前者が水平方向振動モード、後者が鉛直方向振動モードに相当します。両図のピークの形状を比べると、水平方向振動モードの方が鋭く尖っており、固有振動数をより正確に特定できます。したがって水平方向振動モードの方が測定に有利であるとわかりました。

レール軸力と固有振動数の関係

図6は現場測定におけるレール軸力と固有振動数の関係を示したものです。ここでレール軸力の変化は、確認のためにレールに貼り付けたひずみゲージ(図3参照)により実測したもので

す。本実験では177kNのレール軸力変動で、水平方向で3.66Hz、鉛直方向で6.56Hzの固有振動数の変動がありました。固有振動数の変動幅は鉛直方向の方が水平方向より1.8倍ほど大きく、これはおよそ固有振動数の大きさに比例しています。また、図中の直線は測定値に近似式を当てはめたものです。図より、鉛直方向および水平方向のいずれの場合も、レール軸力変化量と固有振動数変化量には明瞭な線形性があり、どちらも高い相関性があることがわかりました。

また、水平方向振動モードの方が相関係数が大きく、測定値のばらつきも少ないことから、水平方向振動モードの方が測定に有利と判断できます。

まとめ

本報告では、軌道振動特性に基づくレール軸力の測定方法の可能性について、数値解析と現場実験により検討し

ました。数値解析の結果より、締結箇所を節とするレールの鉛直方向および水平方向の定在波の固有振動モードが、締結装置、まくらぎ下面のばね定数、および、まくらぎの固有振動モードの影響を受けず、レール軸力測定に有効であることがわかりました。また、実軌道での加振実験より、レール軸力の変化量とレールの固有振動数の変化量に明瞭な線形関係があることを確認し、温度変化に伴うレール軸力の変化量をハンマー打撃で評価できることを示しました。

今後は実軌道での実験および解析の高精度化により、実用化を目指します。

RRR

文献

- 1) 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方法の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol.26, No.8, pp.35-40, 2012