

固有振動に着目したレール軸力測定手法の精度向上

浦川 文寛* 阿部 和久** 高橋 寛***

Improvement of the Accuracy of the Method for Measuring the Axial Force of a Rail Based on the Natural Frequency

Fumihiko URAKAWA Kazuhisa ABE Hiroshi TAKAHASHI

In order to evaluate the axial force of a continuous welded rail quantitatively in a simple manner, a method of measuring the axial force based on the change of the natural frequency has been developed. However, the accuracy of this method is insufficient because of some variations of track conditions. In this study, we extracted factors which influence the measurement accuracy and proposed the error correction method using track finite-element analysis for the purpose of improving accuracy of this measuring method. Furthermore, we measured the natural frequency and axial force of the rail of a real track in order to validate the proposed method.

キーワード：ロングレール，軸力測定法，固有振動数，レール加振試験，有限要素解析，現地試験

1. はじめに

ロングレールに発生する軸力は、夏季にはレールの張出し、冬季にはレールの破断を引き起こす可能性があるため、その値を正確に測定し、適切に管理する必要がある。しかしながら、ロングレールの軸力測定は難しく、概ね 200m 毎に設置された基準杭とレール上の目印から水糸と定規を用いて測定したふく進量と設定温度により、間接的に軸力を管理しているのが現状である。

ロングレールの軸力を精度よく測定するため、過去に様々な方法が検討されている。これらの手法の概要と課題について以下に述べる。

(1) レールのひずみを直接測る方法

レール腹部にひずみゲージ等のひずみセンサを設置し、レールの温度応力を測定する^{1) 2)}。この方法では、レールの軸力の変化量は精度良く測定できるものの、その絶対値は測定できない。

(2) 磁気弾性効果による方法

応力による磁気ひずみを利用するもので、バルクハウゼンノイズ法³⁾や MAPS-SFT⁴⁾等がある。これらの手法は残留応力（レール製造時等に付加される）の影響を強く受けるため、軸力の絶対値を測定できない、あるいは無負荷状態での測定値を得るための較正試験が必要となる。

(3) X線による測定⁵⁾

X線を用いてレール鋼の結晶のひずみから応力状態を測定する手法であるが、測定する応力にはレールの温度応力に加えて残留応力が含まれるため、(2)の手法と同様の問題が生じる。

(4) こう上法

レールを吊り上げた際の反力から軸力を測定する手法で、軸力の絶対値を測定することが可能である。しかしながら、本手法で測定できるのは引張の軸力に限定される。さらに、欧州で開発された VERSE⁶⁾を例に挙げると、測定時に 30m に渡ってレール締結装置を緩解するといった大掛かりな作業が必要である。

(5) 超音波を用いた方法

音弾性効果を利用し、弾性波速度の変化から軸力を測定する手法が検討されてきた^{7) 8)}。しかしながら、この手法は軸力に対する感度が低く、また測定値の温度依存性が高いという問題がある。ガイド波⁹⁾やレイリー波の極性¹⁰⁾を用いることで、感度を向上させる試みがなされているものの、十分な測定精度は得られていない。

Nucera^ら¹¹⁾は、超音波がレールを伝搬する際に発生する高調波成分が、軸力によって変化する特性を利用し、非線形パラメータ β （基本波の振幅の 2 乗と第 2 次高調波の振幅の比に比例する定数）の測定波形から、レールの設定温度（軸力がゼロとなる温度）を求める手法を提案し、試験線にて $\pm 3^\circ\text{C}$ の精度を確認している。ただしこの手法では、レール温度が設定温度と等しくなる時刻の前後数時間の連続した測定が必要であるため、気象条件や時間の制約が大きく、1 箇所当りの測定時間も長い。

(6) レールの振動モードによる方法

レールの軸力によって振動モード（振幅、固有振動数）が変化する性質を利用する方法で、解析や室内試験、実験線での検討が行われている^{12) 13) 14)}。この手法は軸力の絶対値が測定可能で、大掛かりな作業や測定機器を必要とせず、かつ比較的短時間で測定できることから現場での適用が期待される。ところが、振動モードは軸力だけでなく、軌道の様々な条件、特にレールと締結装置の状

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 新潟大学 工学部建設学科

*** 新潟大学大学院 自然科学研究科

特集：軌道技術

態によって変化するため、十分な精度が得られていない。

本論文では、レールの固有振動数に着目した軸力測定法の精度向上と実用化を目的とし、レールの固有振動数への影響が大きいと思われるいくつかの軌道条件のばらつきを軌道の有限要素モデルで再現し、これらのばらつきが軸力推定精度へ与える影響を解析的に求めるとともに、これらの誤差の補正方法を検討した。また、実軌道にてレールの軸力と固有振動数を測定し、本軸力測定法の有効性を検証した。

2. 軸力の測定方法

レールの振動モードのうち、締結位置を節、締結間中心を腹とする水平方向の pinned-pinned モード (図1) がまくらぎ、道床の物性値の影響が小さく、かつ軸力に対する固有振動数の感度も高い¹⁴⁾ため、軸力の推定にはこのモードの固有振動数を用いる。軸力の測定方法は図1に示す通りで、現場にてレール頭部のインパルス加振を行い、その加速度応答の周波数分析より固有振動数を測定し、解析で得られる固有振動数と軸力の関係より軸力を推定する。固有振動数の測定に必要な機器は、インパルスハンマー、加速度センサ、FFTアナライザであり、機材の携帯性に優れ、かつ測定時間は1箇所当り1分程度と短いことが特徴である。

固有振動数は高精度に測定できることが確認されており¹⁴⁾、本軸力測定法の精度は解析で得られる固有振動数-軸力の関係に左右される。3章と4章では、これを精度良く求めるための解析方法について述べる。

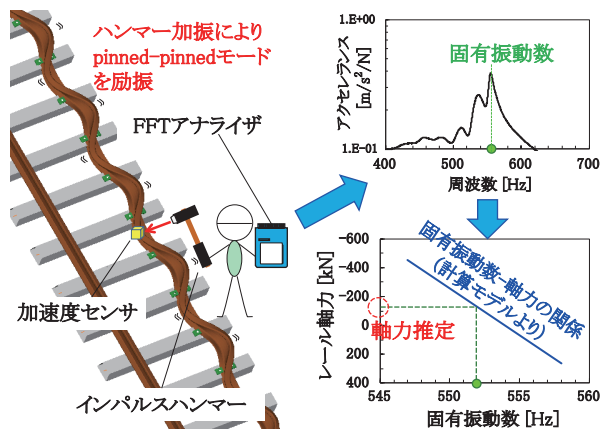


図1 固有振動数によるレール軸力の推定方法

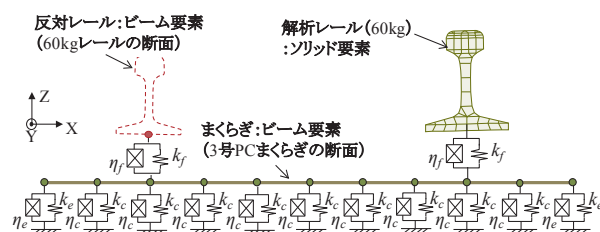


図2 解析モデル (1 締結分)

3. 軌道の有限要素モデル

3.1 モデル概要

軌道の有限要素モデルの1締結分の構造を図2に示す。本モデルでは、振動解析の対象とする片側のレール (以降「解析レール」) のみを詳細なソリッド要素でモデル化し、反対側のレール (以降「反対レール」) とまくらぎはそれぞれ60kgレール、3号PCまくらぎ相当の断面形状を持つビーム要素でモデル化した。締結部はレールとまくらぎを結合するばね要素でモデル化した。バラスト層はまくらぎ下に配置したばね要素で表現した。解析パラメータは表1の通りで、 k_f は温度によって変化するが、ここではレールとまくらぎの平均の温度が25℃での値を示している。モデル境界部で生じる反射波の影響が十分小さくなるよう、200締結 (延長120m) 分の軌道をモデル化した。レール軸力は、解析レールのソリッド要素の線膨張率を $1.14 \times 10^{-5}/\text{℃}$ とし、これに一樣な温度を付加することで導入する。

本モデルにて pinned-pinned モードの固有振動数を算出したところ、軸力ゼロにおける固有振動数は504.0Hz、軸力に対する固有振動数の感度は90.6kN/Hzであった。

表1 解析パラメーター覧

(a) ソリッド・ビーム要素

部位	要素	縦弾性率 [GPa]	ポアソン比	質量密度 [kg/m ³]	線膨張率 [1/℃]
解析レール	ソリッド	206	0.29	7820	1.14E-05
反対レール	ビーム	206	0.29	7820	-
まくらぎ	ビーム	45	0.167	2350	-

(b) ばね要素

部位	要素	記号	方向	値			
締結部のばね	ばね	k_f	TX	205.9 MN/m			
			TY	129.9 MN/m			
			TZ	786.4 MN/m			
			RX	1.90 MNm/rad			
			RY	1.44 MNm/rad			
			RZ	1.30 MNm/rad			
	減衰 (損失係数)	η_f	TX	0.11			
			TY	0.10			
			TZ	0.19			
			RX	0.11			
			RY	0.09			
			RZ	0.04			
まくらぎ (端部) / バラスト間ばね	ばね	k_e	TX	6.19 MN/m			
			TY	6.96 MN/m			
			TZ	4.05 MN/m			
			RX	0.076 MNm/rad			
	減衰 (損失係数)	η_e	TX	4			
			TY	4			
			TZ	4			
			RX	4			
			まくらぎ (中央部) / バラスト間ばね	ばね	k_c	TX	4.09 MN/m
						TY	6.36 MN/m
TZ	3.45 MN/m						
減衰 (損失係数)	η_c	RX		0.076 MNm/rad			
		TX		4			
		TY		4			
			TZ	4			
			RX	4			

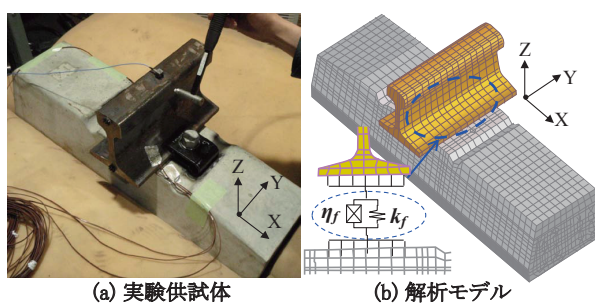


図3 締結部のばね係数測定のための実験モデル解析

3.2 締結部のばね係数の測定

固有振動数測定時の微小振動下における締結部のばね係数を得るため、図3(a)のように、カットしたレールとまくらぎを締結した供試体をインパルス加振した際の加速度応答を測定した。さらに、実験と同様のサイズのレールとまくらぎを6自由度のばね要素1個で接続した有限要素モデル(図3(b))を用いたモデル解析により、加振応答の実測値を再現する6自由度のばね要素のパラメータを同定し、締結部のばね係数 k_f および損失係数 η_f の測定値とした。

4. 軌道条件のばらつきによる軸力測定精度への影響評価とその補正方法

軌道条件のばらつきによって生じる固有振動数のずれにより、固有振動数-軸力の関係が変化するため、軸力測定に誤差が生じる。本章では、軸力測定精度への影響が大きいと予想される軌道の条件として3つ挙げ、これらの固有振動数への影響を図2に示した解析モデルにより定量的に評価する。また、その補正方法について検討する。

4.1 軸力測定精度への影響評価

軸力測定の実用化のための、固有振動数のずれの許容値を±1Hzと仮定し、これを評価基準とする。ここで、1Hzは前章の周波数感度より、レールの軸力で90.6kN、温度で5℃に相当する。

(1) 締結間隔のばらつき

レールの締結間隔平均 $\mu=600\text{mm}$ 、標準偏差 $\sigma=10\text{mm}$ 、20mm、30mm、50mmの正規乱数で、 σ 毎に7通り(乱数パターン01~07)のばらつきを与えた場合の固有振動数を算出した。図4に、締結間隔一定のときの固有振動数(504.0Hz)との差を比較したものを示す。固有振動数のずれは $\sigma=10\text{mm}$ では0.4Hz以下と小さいが(図4(a))、 $\sigma=20\text{mm}$ 以上では1Hz以上となった(図4(b)~(d))。一般にバラスト軌道では $\sigma=20\text{mm}$ 以上の締結間隔のばらつきが生じ得るため、軸力測定時にはこの影響は無視できない。

(2) レール頭部摩耗

直線2箇所、曲線2箇所(R320, R400)の内外軌、

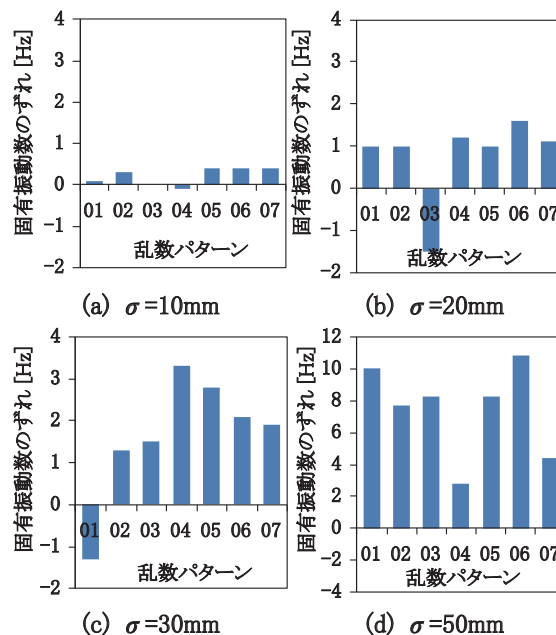


図4 締結間隔に正規乱数($\mu=600\text{mm}$, σ)のばらつきを与えた場合の固有振動数のずれ

計6断面において測定したレール頭部摩耗形状(図5)に合わせ、解析レールのソリッド要素の形状を変えてモデルを組み込み、摩耗による固有振動数の変化を算出した。新品レールでの固有振動数(504.0Hz)を基準とした固有振動数のずれを図6に示す。図より、固有振動数は、頭頂面が摩耗する直線および曲線内軌では増加、側面が摩耗する曲線外軌では減少する傾向が得られた。また、直線で摩耗量が2mm程度と比較的小さい箇所であっても1Hz以上の固有振動数のずれが生じた。

(3) 締結部のばね係数の個体差と温度依存性

3.2節の方法により、軌道パッドの発生品5枚(No.1~No.5)と新品(No.6~No.8)を設置した場合の締結部のばね係数をそれぞれ測定した。締結金具は5N形の新品で、No.1~No.8の軌道パッドに対して同一のものをを用い、標準トルクの120Nmで緊締した。温度毎のばね係数を測定するため、レールをヒートガンで約70℃まで熱し、レール底部とまくらぎ上面の温度差が10℃以下となった直後から、レール温度が常温まで下がるまで約5℃毎に加振試験を実施した。広い温度領域での値を得るため、No.1~No.7は冬季(2月)、No.8は夏季(9月)に試験を実施した。締結部のばね係数 k_f とレール底部温度とまくらぎ上面温度の平均値 t との関係について、固有振動数への影響が大きいRZ方向の測定結果を図7に示す。図より、レールとまくらぎの平均温度が下がるほど、締結部のばね係数が増加することがわかる。軌道パッドのばね係数の個体差の影響を評価するため、 k_f を t の2次関数で近似して25℃でのNo.1~No.8の軌道パッドのばね係数を求め、pinned-pinnedモードの固有振動数を軌道パッド毎に算出した。基本モデル(表1のばね

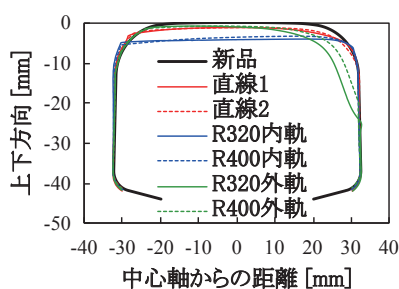


図5 レール頭部摩耗測定結果

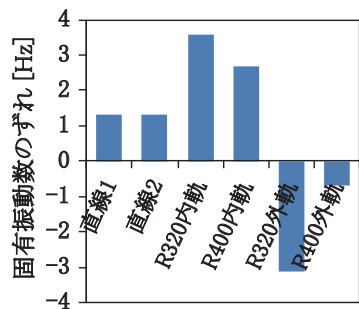


図6 レール頭部摩耗による固有振動数のずれ

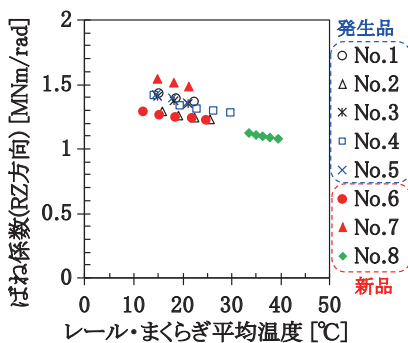


図7 締結部のばね係数(RZ方向)の温度特性

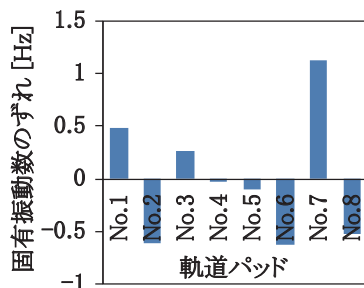
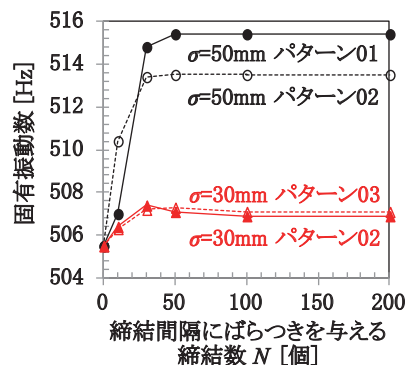
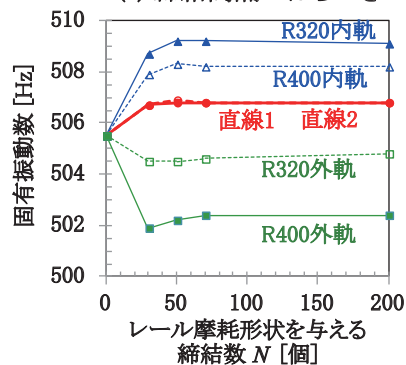


図8 軌道パッドの個体差による固有振動数のずれ



(a) 締結間隔のばらつき



(b) レール頭部摩耗形状

図9 中央N締結分のみ軌道条件のばらつきを与えた場合の固有振動数の変化

係数を用いた場合)の固有振動数との比較を図8に示すが、基本モデルからの固有振動数のずれはNo.7が最も大きく、その値は1Hzを超えた。

4.2 軌道条件のばらつきの影響範囲

測定箇所からどの範囲までの軌道条件が、固有振動数に影響するかを調べるため、モデル中央からN締結分のみ締結間隔にばらつき($\sigma=50\text{mm}$ の乱数パターン01, 02, $\sigma=30\text{mm}$ の乱数パターン02, 03)を与えて固有振動数を算出した。結果を図9(a)に示す。固有振動数は $N=30$ 以下ではNの増加とともに急激に変化するものの、 $N=50$ 以上の変化は0.2Hz以下と、概ね一定値に収束した。レール頭部摩耗に対しても同様の計算を行ったところ、締結間隔のばらつきと同様の傾向が得られ、 $N=50$ 以上で固有振動数の変化は0.3Hz以下となった(図9(b))。以上の結果より、締結間隔、レール頭部摩耗、およびその他軌道条件のばらつきによる固有振動数のずれは、概ね測定箇所を中心とした50締結分の状態で決まると推察される。

4.3 軌道条件を考慮した固有振動数 - 軸力関係の補正

(1) 締結間隔のばらつき

現場の測定箇所にて50締結分の締結間隔を測定し、これを基に固有振動数 - 軸力関係を算出する軌道モデルの50台の締結位置を定める。

(2) レール頭部の摩耗

現場の測定箇所にてレール頭部の断面形状を測定し、解析レール頭部のソリッド要素の形状を測定断面形状に合

わせて修正する。

(3) 締結部のばね係数の個体差と温度依存性

締結部のばね係数の温度依存性は、固有振動数 - 軸力関係の勾配の変化となって現れる。これについては現場にて固有振動数を測定する際に、同時に締結部近傍のレール底部とまくらぎ上面の温度を測定し、モデルの締結部のばね係数 k_f をレール底部とまくらぎの温度に応じた値(図7の回帰式)に設定することで修正する。

軌道パッドのばね係数の個体差については修正が難しく、今回測定した中では最大で100kN(固有振動数で1.1Hz)程度の誤差が生じ得ることが分かった。

5. 実軌道での軸力推定試験

5.1 試験概要

冬季(2013年11月)と夏季(2014年9月)に、実軌道にて軸力推定試験を実施した。当該箇所は在来線のロングレール不動区間であり、早朝から昼間にかけてのレール温度上昇に伴う軌道の固有振動数とレール軸力の変化を測定し、両者を比較した。試験の概要を図10に示す。固有振動数は、締結間中心にてインパルスハンマーでレール頭部側面をこ返り(X)方向に加振し、FC側頭部側面に設置した加速度計で加振方向と同方向のアクセラランスを測定し、波形のピークを読み取ることに

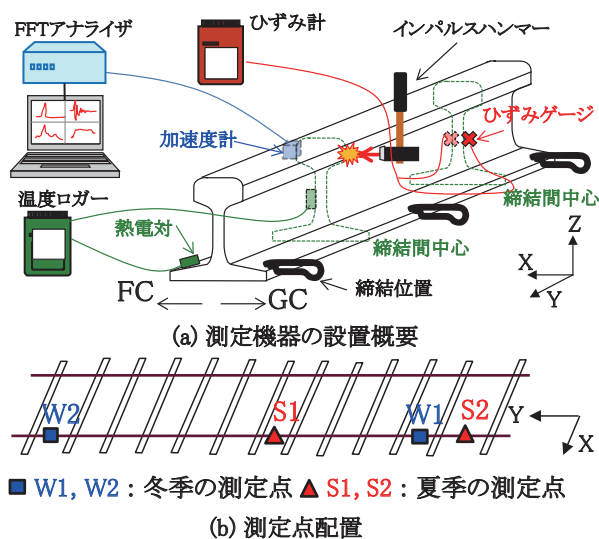


図 10 軸力推定試験の概要

より求めた。同時に、レール腹部に設置したひずみゲージによりレール軸ひずみの変化を、熱電対でレール腹部の温度を測定し、設定温度の 25℃でのひずみに対する軸ひずみの変化量を算出し、この軸ひずみ、レール断面積、縦弾性係数から軸力を算出した。さらに、締結部の温度特性に関する補正のため、締結箇所のレール底部の温度を熱電対で測定するとともに、測定箇所周辺の 50～100 締結分の締結間隔と当該箇所の代表的なレール頭部摩耗を測定した。測定点の配置は図 10 (b) の通りである。

5.2 試験結果

締結間隔は冬季では平均 565mm、標準偏差 28mm、夏季では平均 563mm、標準偏差 26mm であった。レール頭部摩耗を測定したところ、夏季では最大で 1.6mm、冬季では 2.2mm であった。レール温度は早朝から昼間にかけて上昇し、冬季では 5℃～24℃、夏季では 17℃～43℃の間で変化した。

レールの軸力と固有振動数の測定結果の関係を図 11 (a), (b) に示すが、実測により得られた固有振動数と軸力の関係には、高い線形性が得られた。固有振動数と軸力の関係について、同時期に行った 2 点の測定箇所の間で比較するとその勾配は等しいが、軸力ゼロでの固有振動数は、冬季の試験時に 1.5Hz 程度の差が生じた。また、冬季と夏季の試験結果を比較すると、固有振動数と軸力の関係の勾配が異なる結果となった(図 11 (a), (b))。

5.3 解析結果との比較

図 11 (a), (b) には、4.3 節の補正を行った場合と補正を行わなかった場合の解析結果も併せて示している。ここで、締結部のばね係数 k_f およびその温度特性の補正では、冬季の試験については No.6 の値を、夏季の試験については No.8 の値を用いた。補正を行わない場合

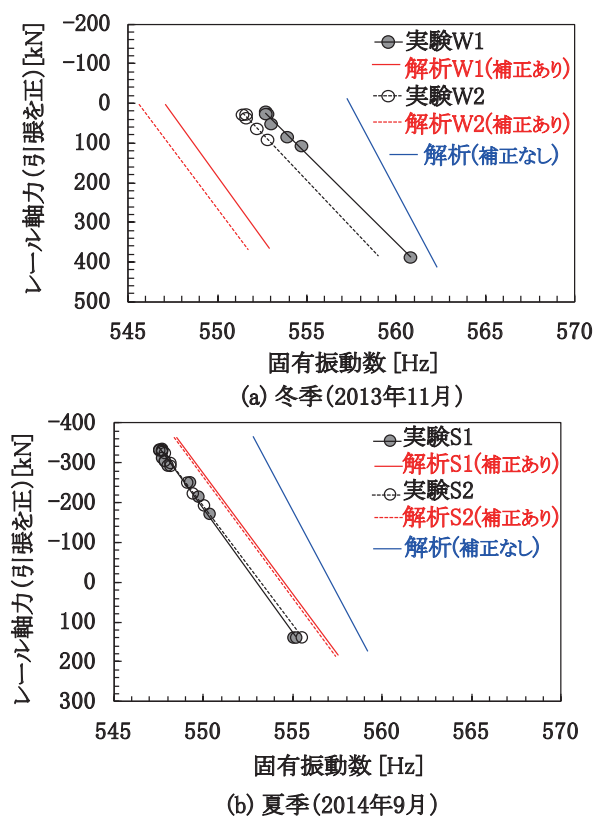


図 11 固有振動数 - レール軸力関係の実験と解析の比較 (軸力はレール温度 25℃でゼロと仮定)

では、単一の固有振動数と軸力の関係しか得られないが、補正を行うことで、実験で見られる様な 2 測点間の固有振動数の差 (冬季で 1.5Hz、夏季でゼロ) を再現することができた。これは、測定箇所毎の軸力推定値の差を補正可能であることを意味している。ただし、補正を行った場合の解析結果でも、軸力ゼロでの固有振動数には実験結果と比較して、冬季の試験では 7Hz、夏季の試験では 1Hz 程度の差が見られる。これについては、本試験で仮定した設定温度 (25℃) が、実際の設定温度と異なる可能性があるため、ここでは詳しく言及しない。

固有振動数と軸力の関係の勾配についても、補正を行うことで解析値が実験値に近づき、夏季の試験においては、実験と解析ではほぼ同じ値となった (図 11 (b))。しかし冬季の試験では、軸力に対する固有振動数の変化は、解析値 (補正あり) に比べて実験値の方が 1.2 倍程度大きい (図 11 (a))。これは、冬季の締結部のばね係数の温度特性のモデル化が適切ではないことが原因と考えられる。図 7 より、RZ 方向の締結部のばね係数の温度に対する変化量は、10℃～40℃の間でほぼ変わらないが、文献 [15] によれば、温度が低くなる程、軌道パッド材料の弾性率は増加し、かつ温度による弾性率の変化量も増加することが示されている。仮に、25℃以下での温度に対する締結部のばね係数の変化量を、25℃以上での変化量の 1.2 倍とすれば、冬季の試験での固有振動数と軸

特集：軌道技術

力の勾配は、実験と解析ではほぼ等しくなる。締結部のばね係数の温度特性については、締結部のばね係数、レール温度、まくらぎ温度の3者の相関性の検証や、冬季、夏季を含む広い温度領域（0℃～50℃程度）におけるばね係数の測定等、引き続き詳しく検討を進めたい。

6. まとめ

本稿では、軌道条件のばらつきによるレール軸力推定精度への影響を、有限要素モデルにより評価した。また、軸力推定に使用する固有振動数とレール軸力の関係を、現場の締結間隔のばらつき、レール頭部摩耗、締結部の温度特性を考慮して補正する手法を提案し、現地試験によりその有効性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 実軌道で存在し得る締結間隔のばらつき、レール頭部の摩耗、締結部のばね係数のばらつきと温度特性による固有振動数のずれは、レールの軸力を推定する上で無視できない影響を与える。
- (2) 締結間隔のばらつき、レール頭部摩耗による固有振動数のずれについては、概ね測定箇所を中心とした50締結分の状態で決まる。現場にて50締結分の締結間隔、レール頭部摩耗を測定すれば、これらをパラメータとした補正が可能である。
- (3) 軌道パッドのばね係数の個体差により、今回の検討では最大で100kN程度の誤差が生じ得る。
- (4) 固有振動数とレールの軸力との間で高い線形性が得られることを実測においても確認できた。
- (5) 提案した手法により、実軌道で測定された測定箇所毎の軸力推定値の差を補正することができた。また、レール軸力推定に用いる固有振動数-軸力関係の勾配を、より精度良く見積もることができ確認した。
- (6) 夏季に実施した軸力測定試験では、実軌道の軸力を精度良く推定することができた。しかし、冬季の試験では実験と解析の差が大きく、この差の原因と思われる締結部のばね係数の温度特性については、さらなる検討が必要であることがわかった。

文 献

- 1) 小木曾清高, 矢作秀之, 高橋克之: レール軸力センサーを用いたロングレール管理の検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.18, pp.81-86, 2014
- 2) Yoon, H.-J., Song, K.-Y., Kim, J.-S. and Kim, D.-S., "Longitudinal strain monitoring of rail using a distributed fiber sensor based on Brillouin," *NDT&E International*, Vol.44, pp.637-644, 2011.
- 3) Zhang, R. (W.) and Wu, H., "Using magnetic Barkhausen

noise technology and finite element method to study the condition of continuous welded rails on the Darwin-Alice Springs Line," *Journal of Civil Engineering and Architecture*, Vol.5, No.7, pp. 596-605, 2011.

- 4) Hayes, A. P., "MAPS-SFT, A new tool in the infrastructure managers' toolbox," presented at the 4th International conference on railway condition monitoring, Derby, England, 18-20 June, 2008.
- 5) Sasaki, T., Takahashi, S., Kanematsu, Y., Satoh, Y., Iwafuchi, K., Ishida, M. and Morii, Y., "Measurement of residual stresses in rails by neutron diffraction," *Wear*, Vol.265 No.9-10, pp. 1402-1407, 2008.
- 6) Lemmon, C. and Gostling, R. J., "The non-destructive measurement of stress-free temperature in continuous welded rail," presented at the 4th World Congress on Railway Research (WCRR'99), Tokyo, Japan, 19-23 October, 1999.
- 7) Egle, D. M. and Bray, D. E., "Measurement of acoustoelastic and third - order elastic constants for rail steel," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.60, No.3, pp.741-744, 1976.
- 8) 戸田 裕己, 小玉 尊守, 村田 頼信: 音弾性によるロングレールの軸力測定 - 第2報 改良形装置による新敷設レールの軸力の経月変化測定 -, 非破壊検査, Vol.57, No.9, pp.441-447, 2008
- 9) Loveday, P. W., "Guided wave inspection and monitoring of railway track," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol.31, No.4, pp.303-309, 2012.
- 10) Hurlbaus, S., "Determination of longitudinal stress in rails," *Final Report for Safety IDEA Project 15*, 2011.
- 11) Nucera, C. and Lanza di Scalea, F., "Nondestructive measurement of neutral temperature in continuous welded rails by nonlinear ultrasonic guided waves," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.136, No.5, pp.2561-2573, 2014.
- 12) Beliveau, J.-G., "Resonant frequencies of lateral vibrations of rail in compression," *Canadian Society for Civil Engineering*, Vol.4, pp.389-398, 1997.
- 13) Read, D. and Shust, B., "Investigation of Prototype Rail Neutral Temperature Measurement System," *Railway Track and Structures*, Vol.103, No.6, pp.19-21, 2007.
- 14) 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
- 15) 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, 51巻10号, pp.43-46, 2013