

車輪板部のせん断ひずみを活用した PQ 輪軸の転走試験

本堂 貴敏*

Roller-rig Test of Instrumented Wheelset Utilizing Shear Strains on Wheel Web

Takatoshi HONDO

Instrumented wheelsets are widely utilized in railway industries for the purpose of the measurement of wheel-rail interaction forces. In the conventional instrumented wheelset, the measurement accuracy of lateral forces is reduced due to the bending moment induced by wheel loads. The authors have proposed a new configuration of the instrumented wheelset to reduce the influence of the wheel load on the measurement of the lateral force. This proposed configuration utilizes the shear strains of wheel webs as a measure of lateral forces. This paper describes the accuracy verification of the proposed configuration under wheel rotating conditions. Single-wheelset roller-rig tests are carried out and the test results show that the proposed method can reduce the influence of wheel loads even under rotating conditions.

キーワード：PQ 測定, 走行安全性, 車輪・レール間相互作用, 軌条輪試験, 交差感度

1. はじめに

鉄道における輪重・横圧測定は、車両の走行安全性評価や曲線通過性能評価において重要な役割を果たしている。輪重 (P) とは、車輪がレールから受ける上下方向の力であり、横圧 (Q) とは、同じく左右方向の力である。横圧を輪重で除した値 Q/P は脱線係数と呼ばれ、走行安全性評価の指標として用いられる。車両が実軌道を走行している際の輪重・横圧を連続的に測定する方法のひとつとして、車輪に複数のひずみゲージを貼付してロードセル化した「PQ 輪軸」が国内外で広く使用されている (図 1)¹⁾。その構成方法にはいくつかのバリエーションがあるものの、車輪板部に複数設けられた孔側面に生じる垂直ひずみを用いて輪重を測定すること、および、車輪板部側面の曲げひずみを用いて横圧を測定することは、国内の PQ 輪軸に共通する特徴である²⁾³⁾。

曲げひずみを用いた横圧測定法 (以下、従来法) には、車輪・レール間接触位置が左右方向にシフトした場合に、輪重による曲げモーメントの影響を受け、測定精度が低下し得るという課題がある (図 2)。具体的には、曲線通過中にフランジ近くで接触する曲線外軌側車輪の横圧は、輪重の影響でみかけ上大きく測定され、実態よりも厳しい評価となる場合があった。著者らは、輪重測定用孔内部のせん断ひずみを横圧尺度として活用することで、輪重の影響を低減する横圧測定法 (以下、提案法) を提案し、FEM 解析と静荷重試験を通じて、輪重の影響の低減効果を検証した⁴⁾。本研究では、単一輪軸の転走試験を通じて、車輪回転状態での提案法の妥当性を検証した。

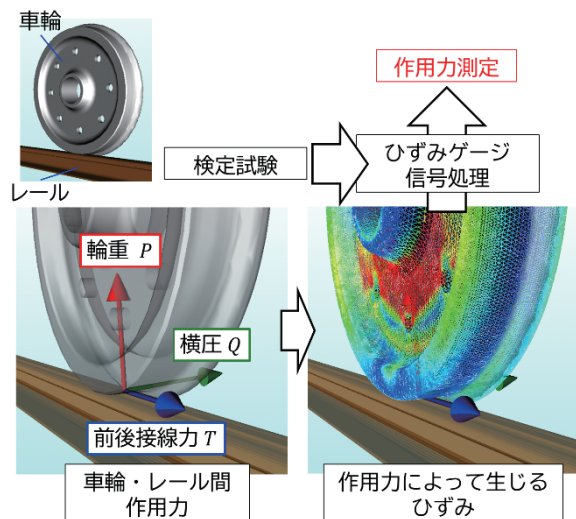


図 1 PQ 輪軸を用いた輪重・横圧測定の原理

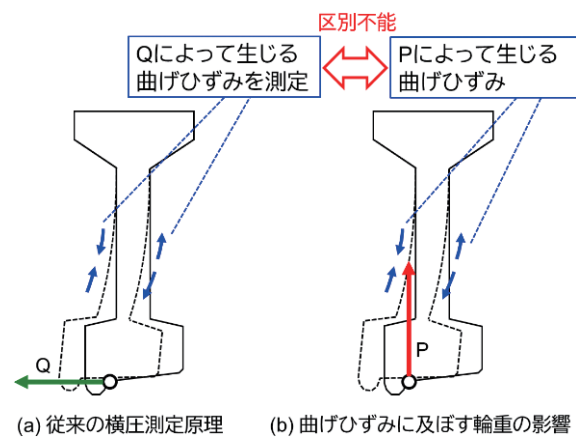


図 2 現行の横圧測定法の課題

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

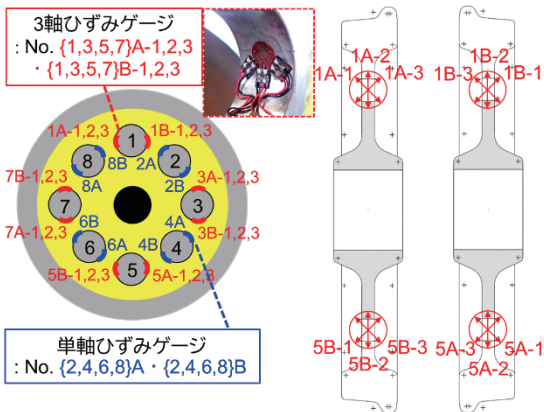


図3 提案法のブリッジ回路構成

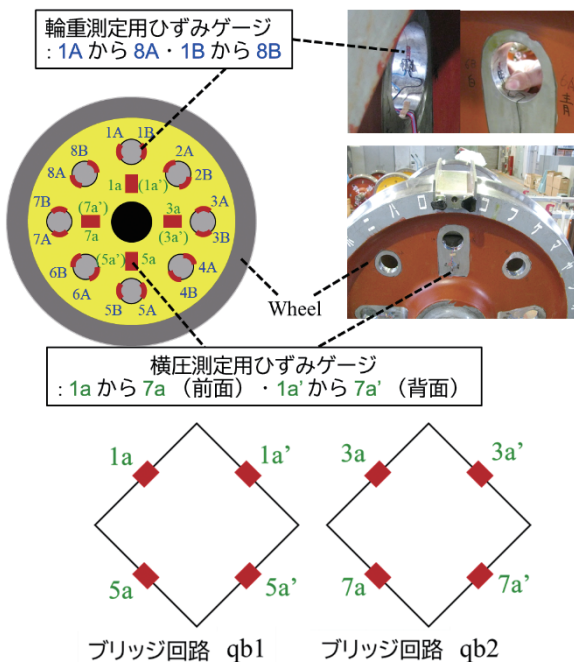
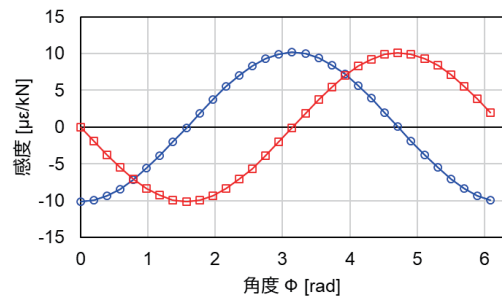


図4 従来法のブリッジ回路構成

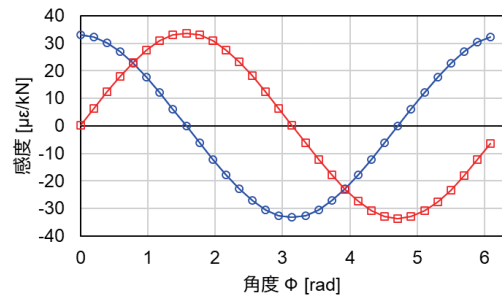
2. 車輪板部のせん断ひずみを活用したPQ輪軸

2.1 ひずみブリッジ回路構成

提案する横圧測定法のブリッジ回路構成を図3に示す。提案する手法では、PQ輪軸用の車輪に通常設けられている輪重測定用の孔の内部の輪重測定点に3軸ひずみゲージを貼付し、垂直ひずみとせん断ひずみを同時に測定する。このうち垂直ひずみについては、従来のPQ輪軸と同様に、輪重尺度として活用する。従来の車



(a) 提案法の横圧感度特性



(b) 従来法の横圧感度特性

図5 提案法と従来法の横圧に対する感度特性

輪曲げによる尺度に代えて、輪重測定点において測定したせん断ひずみを横圧尺度として活用することが、提案手法のコンセプトである。

2.2 静的な感度特性の解析関数近似

本検証では、輪軸回転状態での検証に先立ち、キャリブレーションのための静荷重試験を以下の荷重位置条件について実施した。

- 横圧荷重：車輪背面から、車輪円周方向32点に左右方向の力を荷重した。
- 輪重荷重：車輪踏面に、車輪円周方向32点×左右方向3点（計96点）に上下方向の力を荷重した。

以上の静荷重試験の結果は、単位荷重あたりのブリッジ出力（すなわちブリッジ出力感度）として、荷重位置ごとに整理した。なお、本検証では、比較のため従来法によるブリッジ回路qb1、qb2も同一車輪上に構成した（図4参照）。なお、輪重測定用のブリッジ回路は新連続法²⁾で構成した。

静荷重試験によって得られた提案法と従来法の横圧に対する感度を図5に示す。提案法は従来法に比べて横圧に対する感度が1/3程度に低下する一方、図示するような周期的な感度特性を持つという点については、従来法と提案法と同様である。横圧が作用した場合に横圧測定用ブリッジ回路qs1、qs2に生じる出力感度は、車輪円周方向の荷重位置を角度で表現した変数を ϕ として、

表1 同定されたフーリエ係数一覧

n	S_n^H	C_n^H	S_n^F	C_n^F	R_n^F	B_n^F
Bridge circuit qb1						
1	-0.01496	32.68030	0.00113	0.10622	0.00990	-0.11826
2	-0.01000	-0.00928	-0.00004	-0.00053	-0.02189	-0.00840
3	0.00276	0.41712	-0.00013	-0.00185	0.00098	0.01630
4	-0.00304	0.01179	0.00014	-0.00032	-0.00400	-0.00426
5	-0.00943	0.03066	0.00009	-0.00115	0.00159	0.00004
6	-0.00553	-0.02120	0.00014	-0.00053	0.00084	-0.00525
7	-0.01349	0.01289	-0.00006	-0.00054	0.00028	-0.00266
8	-0.00422	-0.00228	0.00003	-0.00031	0.00045	-0.00255
9	-0.00825	-0.00851	0.00006	-0.00037	0.00015	-0.00403
10	0.01660	-0.00487	0.00003	-0.00031	0.00008	-0.00634
11	0.00229	-0.00335	0.00000	-0.00037	0.00118	-0.00482
Bridge circuit qs1						
1	-0.06838	-10.10660	-0.00012	-0.02830	-0.00297	0.00854
2	0.01647	-0.00801	-0.00005	0.00008	0.00020	0.01332
3	-0.00193	-0.05614	0.00003	0.00283	-0.00095	-0.02052
4	0.00052	-0.00386	-0.00004	0.00006	0.00084	0.00704
5	0.00236	-0.00908	-0.00004	0.00167	-0.00094	-0.01098
6	0.00153	0.00654	-0.00005	0.00013	0.00086	0.00341
7	0.00332	-0.00903	0.00001	0.00104	-0.00009	-0.00592
8	0.00149	-0.00013	-0.00001	0.00007	0.00056	0.00137
9	0.00220	-0.00156	-0.00003	0.00060	0.00000	-0.00251
10	-0.00506	0.00095	-0.00001	0.00007	0.00048	0.00197
11	-0.00146	-0.00242	0.00000	0.00034	-0.00022	-0.00046

式(1)のような周期関数 $h(\phi)$ を用いて表現できる。

$$h(\phi) = \sum_{n=1}^D (S_n^H \sin n\phi + C_n^H \cos n\phi) \quad (1)$$

ただし、 S_n^H および C_n^H はフーリエ係数であり、静荷重試験結果から最小二乗法を用いて決定する。また、 D はフーリエ級数の最大次数であり、経験的に $D=11$ とした。フーリエ級数による感度の表現は、従来法に対しても適用できる。

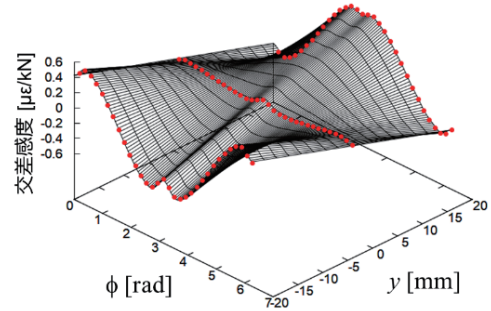
横圧感度とは異なり、輪重や前後接線力を載荷した場合に横圧測定用ブリッジ回路に生じる出力感度（交差感度）は、車輪円周方向の載荷位置 ϕ だけではなく、左右方向の載荷位置 y にも依存して変化する。このような特性を表現するために、式(2)に示す、フーリエ級数と1次関数を組み合わせた関数 $f(\phi, y)$ を導入する。

$$f(\phi, y) = y \sum_{n=1}^D (S_n^F \sin n\phi + C_n^F \cos n\phi) + \sum_{n=1}^D (R_n^F \sin n\phi + B_n^F \cos n\phi) \quad (2)$$

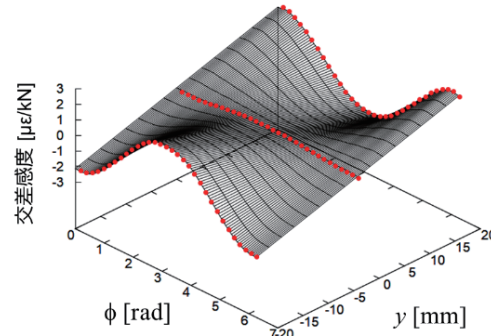
式(1)および式(2)を使用すると、横圧 Q および輪重 P が、位置 (ϕ, y) に作用した際のひずみ出力 ϵ を、近似的に式(3)のように計算することができる。

$$\epsilon \approx Qh(\phi) + Pf(\phi, y) \quad (3)$$

■ フィットting ● 試験結果



(a) 提案法の輪重交差感度特性



(b) 従来法の輪重交差感度特性

図6 提案法と従来法の輪重交差感度特性

関数 $f(\phi, y)$ の各パラメータも、最小二乗法を用いて決定することができ、本論文の供試輪軸のブリッジ回路 qb1 および qs1 のフーリエ係数については、表1に示すように同定された。参考として、これらのフーリエ係数を用いて式(2)を2変数関数として図示すると、図6に示すような形状となる。ブリッジ回路 qs1 の輪重に対する交差感度特性(図6(a))は、ブリッジ回路 qb1 の交差感度特性(図6(b))とは異なり、ピーク位置が凹んだような特徴的な関数形状となることが分かる。

なお、本論文の主旨からは逸れるが、車輪踏面に前後方向の力を載荷した場合にも、横圧測定用の各ブリッジ回路に、接触位置に応じ出力が生じることが近年の研究より明らかとなっている⁵⁾。曲線通過中に縦クリープ力が作用した場合に、この影響も横圧測定に誤差をもたらし得る。一方、前後方向の力に関する交差感度の大きさは輪重に関する交差感度の大きさより若干小さく、また実際に作用する前後接線力の大きさは輪重に比べて小さいので、輪重作用に起因する誤差よりは影響が小さい。さらに、前後接線力交差感度と輪重交差感度、および横圧感度の位相は90度異なり、横圧感度が最大となる位置では、前後接線力交差感度の影響はゼロとなる⁵⁾。したがって、ひずみ波形のピーク値のみを読み取る間欠法³⁾においては、前後接線力の影響を無視できる。そこで本論文では、提案手法の間欠法への応用をまず念頭

に置き、輪重作用の影響のみについて詳細に検証する。以下、間欠法によって抽出した横圧、輪重をそれぞれ「間欠横圧」、「間欠輪重」と呼ぶ。

3. 一輪軸の転走試験による検証

3.1 試験および評価方法

鉄道総合技術研究所が所有する、単輪軸転走試験装置（通称「クリープ力試験装置」、図7）を用いた転走試験を実施した。転走対象のPQ輪軸に対して、アタック角および輪重アンバランスを変化させた様々な条件で1分間以上転走させ、ひずみ信号を収録した。転走速度は、走行速度約30km/h相当とした。ひずみ測定に加えて、転走中の車輪・軌条輪間接触位置を、車輪踏面に塗料を塗布することで測定した。具体的には、車輪踏面に塗料を塗布した状態で転走試験を行い、試験終了後に、塗料が剥離した領域の両端位置を専用の定規で測定し、両端位置の平均値を左右方向の接触位置として整理した。

収録したひずみ信号から、以下の手順でピーク値を抽出し、間欠横圧に変換して評価した。

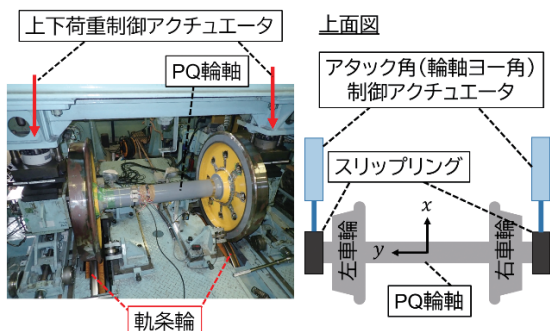


図7 クリープ力試験装置の概要

- 軌条輪速度が一定の時間帯40秒間分のデータに対して、高周波成分を除去するため、カットオフ周波数100Hzのローパスフィルタをひずみ信号にかける。
- 円周方向の接触位置 ϕ を、簡易的に式(4)により評価する。

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\epsilon_{qb2}}{\epsilon_{qb1}} \right) \quad (4)$$

ただし、 ϵ_{qb1} および ϵ_{qb2} は、それぞれ従来法による横圧測定ブリッジ回路 qb1 および qb2 のひずみ出力である。

- $-0.02 < \phi < 0.02 \text{ rad}$ の範囲について、 ϵ_{qb1} および ϵ_{qb2} の平均値、 $\bar{\epsilon}_{qb1}$ および $\bar{\epsilon}_{qb2}$ を計算する。
- 静荷重試験で得られた $\phi=0 \text{ rad}$ における横圧感度（従来法 $a_{b1} = 33.1 \mu\epsilon/\text{kN}$ 、提案法 $a_{s1} = -10.2 \mu\epsilon/\text{kN}$ ）を用いて、それぞれの手法の間欠横圧、 $Q_b^{\text{int}} = \bar{\epsilon}_{qb1}/a_{b1}$ および $Q_s^{\text{int}} = \bar{\epsilon}_{qs1}/a_{s1}$ を計算する。なお、後の考察のために、間欠輪重も同様の方法で計算する。

3.2 従来法と提案法の間欠横圧の比較

本節では、後述する全21試番のうちの代表的なデータとして、接触位置5mm刻みでバリエーションを持ち、かつ輪重の大きさがおおよそ揃っている4試番（図8）の間欠横圧の相関について評価した。図8にはローパスフィルタ処理後のひずみ波形（1秒間分の拡大図）と、塗料による接触位置測定結果を示している。なお、接触位置の座標系は、踏面中心（車輪背面から65mmの位置、図9）を $y=0 \text{ mm}$ として、フランジ側が正值となるよう定義した。

横軸を従来法の間欠横圧、縦軸を提案法の間欠横圧と

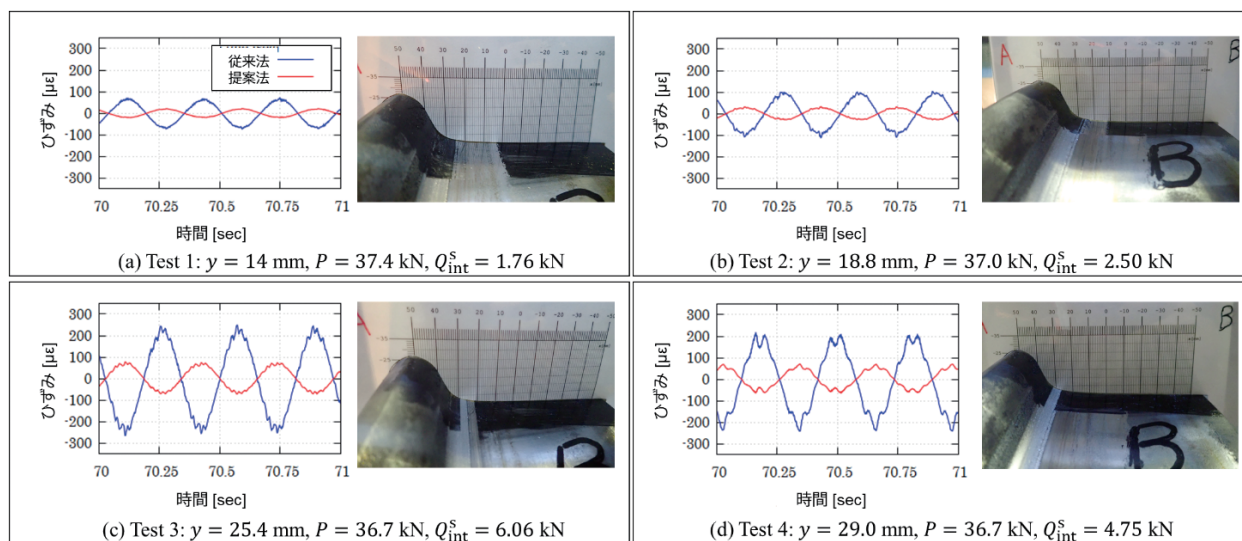


図8 従来法と提案法の相関評価の対象とする4試番

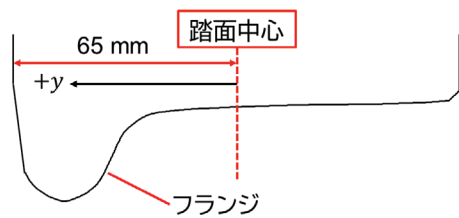


図9 接触位置の正負の定義

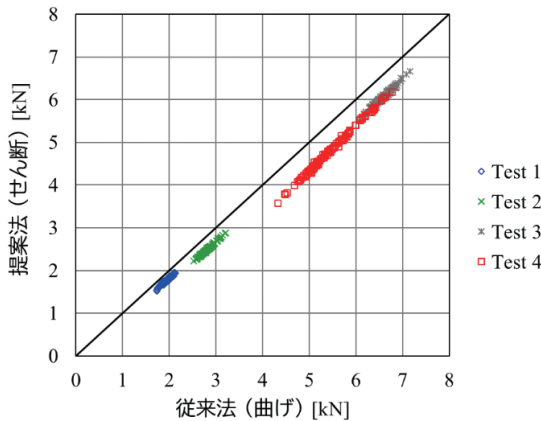


図10 従来法と提案法の間欠横圧の比較

して両者を比較したグラフを図10に示す。転走試験中に輪軸の状態が変化したと考えられ、それぞれの試番において横圧が広い範囲に分布していることが確認される。従来法と提案法の間欠横圧には強い相関が認められ、試番ごとの相関係数は、Test 1 : 0.97, Test 2 : 0.99, Test 3 : 0.99, Test 4 : 1.00であった。一方、横圧に対する感度は、図5に示すように従来法の1/3程度に低下し、S/N比が悪化することが懸念される。しかし、少なくとも軌条輪試験においては、図8に示すひずみ波形からも見てとれるように、ノイズの影響は通常使用されるローパスフィルタで対処できるレベルであった。したがって、提案法は従来法の代替手法として十分実用的であると言える。提案法の間欠横圧は従来法の間欠横圧よりも全般的に小さい傾向にあり、これが先行研究⁴⁾で議論した、輪重の影響の低減効果によるものかどうかについて、3.3節で考察する。

3.3 輪重交差感度低減効果の評価

本評価では、 $\phi = 0\text{rad}$ 近傍のひずみ平均値を用いて間欠横圧を計算した。これは、式(3)において $\phi = 0$ と置き、ひずみ量として式(5)を評価したことに相当する。

$$\begin{aligned} \epsilon &\approx Qh(0) + Pf(0, y) \\ &= Q \sum_{n=1}^D C_n^H + P \left(y \sum_{n=1}^D C_n^F + \sum_{n=1}^D B_n^F \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\sum_{n=1}^D C_n^H$ は、 $\phi = 0\text{rad}$ における横圧感度なので、ひずみ量 ϵ から間欠横圧 Q^{int} を計算するプロセスは、次式のように表現できる。

$$\begin{aligned} Q^{\text{int}} &= Q + P(ay + \beta), \\ \alpha &= \frac{\sum_{n=1}^D C_n^F}{\sum_{n=1}^D C_n^H}, \beta = \frac{\sum_{n=1}^D B_n^F}{\sum_{n=1}^D C_n^H} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 Q, P は真の横圧、輪重を表しているのに対し、 Q^{int} には輪重の影響による誤差が重畳していることに注意する。間欠横圧 Q^{int} は、従来法と提案法の両方から計算でき、それぞれ、

$$\begin{aligned} Q_b^{\text{int}} &= Q + P(a_b y + \beta_b), \\ Q_s^{\text{int}} &= Q + P(a_s y + \beta_s) \end{aligned} \quad (7)$$

と表せる。ここで、 $a_b, \beta_b, a_s, \beta_s$ は、静荷重試験結果から定まる定数であり、従来法と提案法それぞれについて計算される。従来法と提案法の間欠横圧の差を取り、さらに両辺を輪重 P で割ると式(8)を得る。

$$\frac{Q_b^{\text{int}} - Q_s^{\text{int}}}{P} = (a_b - a_s)y + (\beta_b - \beta_s) \quad (8)$$

すなわち、図10に示す、提案法の従来法に対する横圧低下が、静荷重試験で見られたような輪重の影響の低減効果によるものと仮定すると、間欠横圧の差を間欠輪重で割った値が、左右方向接触位置 y の一次関数になるはずである。

軌条輪試験結果について、式(8)に示す関係が成立しているかどうかを検証するために、前節で評価対象とした試番 Test 1, 2, 3, 4を含む、全21試番分の結果(いずれも踏面中心からフランジまでの領域で車輪踏面が軌条輪と接触する条件)について、試番ごとに式(8)の左辺の平均値を計算し、塗料で測定した接触位置との相関を調査した。評価対象とした全21試番の接触位置、間欠輪重、間欠横圧測定結果を図11に示す。同図より、本試験において、接触位置については約5mmから35mmまでの範囲、間欠輪重については約15kNから40kNまでの範囲、間欠横圧については約0kNから15kNの範囲で分布していたことが分かる。図11に示すデータと、ブリッジ回路qb1から計算した間欠横圧平均値を用いて、式(8)の左辺と接触位置の関係プロットしたものを図12に示す。同図には、表1に示す静荷重試験結果から計算した $a_b, \beta_b, a_s, \beta_s$ を用いて、正規化した間欠横圧の差 $(Q_b^{\text{int}} - Q_s^{\text{int}})/P$ と接触位置 y の関係を予測した一次関数も示している。試験結果は静荷重試験結果から予測される一次関数の近辺に強い相関

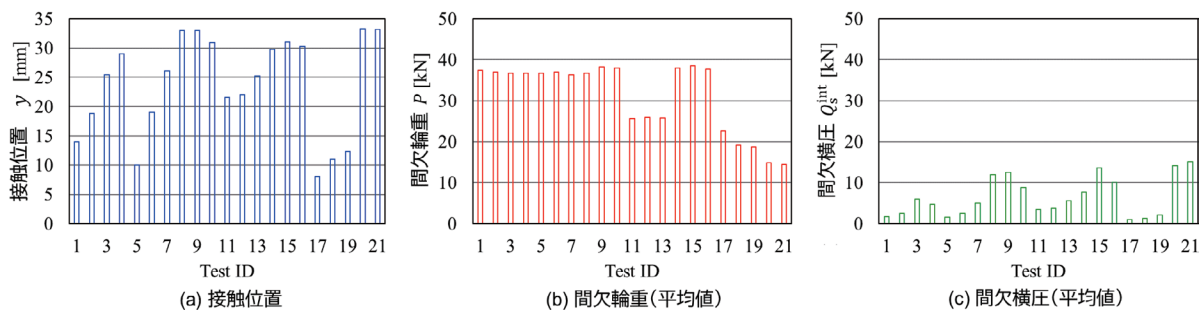


図 11 全 21 試番の接触位置・間欠輪重・間欠横圧測定結果

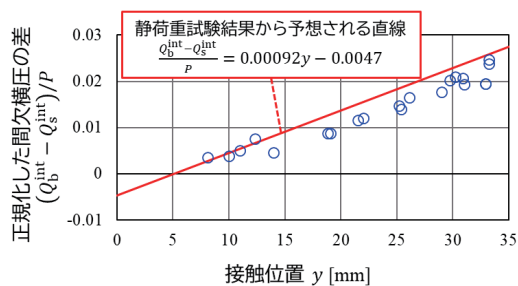


図 12 正規化した間欠横圧の差と接触位置の関係

(相関係数 0.97) を持って分布している。これは、「提案法の従来法に対する横圧低下が、輪重の影響の低減効果によるものである」という仮定を支持する結果であり、提案法は従来法よりも輪重に起因する曲げモーメントの影響を受けづらいことが、輪軸回転状態においても示された。

4. まとめ

本論文では、車輪板部のせん断ひずみを活用した横圧測定法について、輪軸回転状態での妥当性を検証した結果について報告した。単輪軸転走試験を通じて、従来の車輪曲げによる横圧測定法との比較検証を行い、以下のことを明らかにした。

- 従来法で測定される間欠横圧と提案法で測定される間欠横圧との間には強い相関があり、横圧に対する感度が 1/3 程度に低下するものの、ノイズの影響についてはフィルタ等で対処できるレベルである。
- 踏面中心からフランジまでの領域で車輪踏面が軌条輪と接触する条件では、提案法による横圧測定結果

が、従来法による横圧測定結果よりも小さくなる。

- 提案法において横圧が小さくなるのは、先行研究の静荷重試験で確認した、輪重に起因する曲げモーメントの低減効果によるものであると考えられる。

以上より、提案するせん断ひずみを活用した横圧測定法は、従来の車輪曲げによる横圧測定法の代替手法として十分実用的であり、かつ、精度低下要因のひとつである輪重の影響を低減できる測定手法であることを示した。

文 献

- 1) Bracciali, A., et al., "Review of Instrumented Wheelset Technology and Applications," Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, No.167, 2014.
- 2) 石田弘明, 松尾雅樹, 手塚和彦, 植木健司: 鉄道車両の新しい輪重, 横圧, 脱線係数連続測定法 (測定装置の開発), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.63, No.614, pp.3417-3423, 1997
- 3) 佐藤潔, 久保木辰夫, 神戸英樹: 間欠・連続併用に対応した輪重・横圧測定処理システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.29, No.2, pp.47-52, 2008
- 4) 本堂貴敏, 國行翔哉, 田中隆之, 鈴木貢: 輪重測定用孔内部のせん断ひずみを活用した PQ 輪軸による横圧測定法, 鉄道総研報告, Vol.35, No.9, pp.11-16, 2021
- 5) Hondo, T., et al., "Numerical and Experimental Investigations on Cross-sensitivity Characteristics of Instrumented Wheelset Associated with Longitudinal Force and Lateral Contact Position," Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, Vol.17, No.5, pp.051011-1 - 051011-9, 2021.