

10. 営業車両による常時観測へのアプローチ

—新しい脱線係数の測定法—

交通システム研究領域 ※ 佐藤 安弘 大野 寛之 足立 雅和 名誉研究員 松本 陽
東京地下鉄 留岡 正男 住友金属テクノロジー 谷本 益久 住友金属 佐藤 興志

1. はじめに

鉄道車両の走行安全性の確認のため、従来から輪重・横圧測定により脱線係数が求められてきた。特に急曲線における乗り上がり脱線については、平成12年に発生した地下鉄日比谷線中目黒事故の原因調査を通じて、脱線係数が車輪・レール間の摩擦係数に大きく依存すること、摩擦係数は状況により大きく変化することなどが指摘された¹⁾。

しかしながら、脱線係数を求めるためには、測定用の特別の輪軸を要するため、これまで新線開業や新形式車両導入時等、特定の場合にしか測定されてこなかったのが実情であった。

こうした状況を受け、筆者らは車輪・レール間の摩擦係数や脱線係数を頻繁に観測することの重要性を痛感し、東京地下鉄、住友金属工業、住友金属テクノロジーと共同で、営業車両による常時観測を可能とする新たな測定法の研究を進めてきた^{2,3)}。

このほど、提案する測定法を組み込んだ量産仕様台車が試作され、営業車両による常時観測への見通しを得たので、その概要を報告する。

2. 急曲線における横圧発生メカニズムと脱線係数

急曲線通過中の台車は、典型的には図1に示すように、台車の進行方向前軸では、車輪は曲線の外側を向いており(アタック角が大)、外軌側に大きく変位してレールとフランジで接触している。一方、後軸ではアタック角・左右変位とも小さいため、車輪踏面勾配による内外軌間での車輪回転半径差がとれないので大きな縦クリープ力が発生して、台車を曲線の外側に向けようとする反操舵方向のモーメントが働く。さらに、前軸ではアタック角により曲線の外側に向く横クリープ力が働く。これらの力に抵抗して脱線を防いでいるのが前軸外軌側のフランジと

レール間に働く力であり、曲線では前軸外軌側横圧が大きくなる要因となっている⁴⁾。

このように急曲線部での大きな横圧は、車輪・レール間に発生するクリープ力の反力として発生するので、この間の摩擦係数に大きく依存する。すなわち、摩擦係数が半減すれば、横圧も半減する可能性がある。一方、車輪・レール間の摩擦係数は、日照や車輪通過の影響等により一日のうちでもかなり変動している。地下鉄日比谷線での調査⁵⁾によれば、内軌側の摩擦係数は始発時の0.2に対し、運行頻度の増える朝9時頃には0.7程度まで大きく増加したことがわかった。

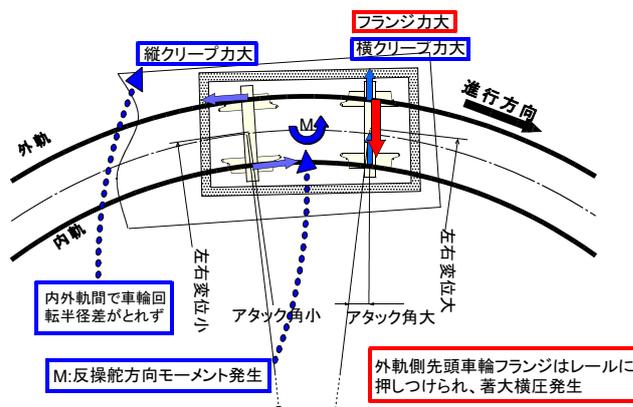


図1 急曲線通過中の台車の姿勢と作用力

3. 従来の測定方法と問題点

脱線係数は、図2に示すとおり、車輪・レール間に働く力のうち、垂直方向の力である「輪重」Pと横方向力である「横圧」Qの比である Q/P により求められる。

脱線係数の観測には、車両(車輪)側から測定する方法と地上(レール)側から測定する方法があるが、地上測定は、車両側に特別な装置を必要としないので、そこを通過する全車両を計測できる利点を持つが、特定の曲線などでのデータしか取得できない。一方、車両側測定では、図3に示すように、車輪にひずみゲージを

貼付し、車輪板部の垂直ひずみで輪重を、曲げひずみで横圧を測定する。車両側では、走行区間全般に渡る輪重・横圧が連続的に測定できる反面、車上に計測器を搭載し、測定したい輪軸の数だけ特別な加工を施した輪軸を準備し、回転する輪軸から電気信号を取り出すためにスリップリング等を使用する必要があるため、特定の列車のしかも数ある輪軸のうち、代表する1～2軸程度の輪重・横圧のみを測定するのが通例である。特に従来の車両側測定は、摺動部のあるスリップリングや軸端に穴開け加工した輪軸など、測定システム自身の耐久性に劣るため、営業車による常時観測には適用できなかった。

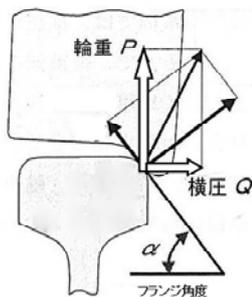


図2 車輪・レール間の力と脱線限界

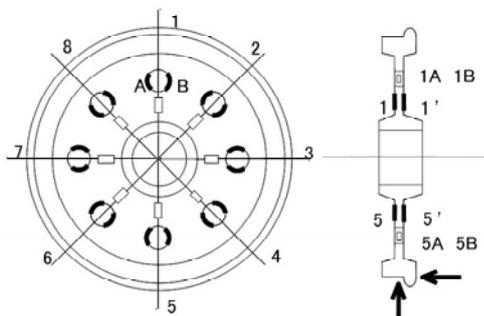


図3 従来の輪重・横圧測定用歪みゲージの貼付状況

しかしながら、先に述べたように、レール・車輪間の摩擦状態は時々刻々変化しているから、脱線係数も大きく変化しているものと思われ、外軌側脱線係数や内軌側摩擦係数を営業車などにより常時モニタできるようになれば、安全上の効果は非常に大きい。

4. 提案する新しい測定方法

4. 1. 輪重

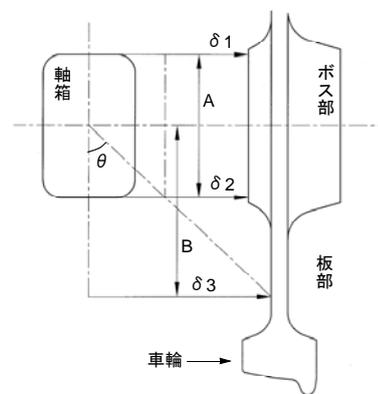
輪重の測定に関しては、軸ばねたわみ量、台車枠応力による方法を試みた。いずれも静的には良好な直線性があり問題ないが、軸ばねを介した部位での測定量なので、周波数の高い輪重抜けなどの変動には対応できない

可能性があるものの、実車走行試験を行った都市鉄道程度の走行速度では、脱線係数を求めるための母数として用いる限り、実用的に大きな問題はないように思える。

4. 2. 横圧

横圧の測定に関しては、横圧による車輪のたわみ(曲げ変形量)を、台車側の軸箱に取り付けた渦電流式の非接触変位計により、直接検出するものである(以下、ここでは従来の測定法をひずみ測定法、提案する測定法をたわみ測定法と呼ぶ)。測定原理は単純であるが、検出される変位量は最低 0.005mm 程度の精度を必要とし、センサ取付などに起因する誤差やノイズについては十分注意する必要がある。今回は、限界支障などの実用性も考慮して、図4に示すように、車輪板部の曲げ変形量を板部の最外周部で測定する($\delta 3$)。

しかしながら、軸箱と輪軸にはガタがあり、軸箱～車輪間にも相対変位が発生する可能性があるため、これを補正する必要がある。変位補正は大きく分けて2つあり、1つは車軸を支持するベアリングのスラスト隙間などにより、輪軸が軸箱に対してスラスト方向に移動することである。もう1つは台車枠にかかる横方向力などにより、軸箱が輪軸に対して傾くことである。



$\delta 3$: リム部変位、 $\delta 2$: ポス下部変位、 $\delta 1$: ポス上部変位、A: ポス部上下センサ間の距離、B: 車軸中心と車輪板部センサとの距離

図4 新しい横圧測定法の原理

(1) 車軸スラスト移動量の補正($\delta 3'$)

車軸スラスト移動が起こると、ポス部、板部とも同じ移動量となるものと考えられるので、ポス部で測定した変位を板部変位から引き算する。その際、軸箱自体に傾きが生じることを考慮し、ポス部変位としてはポス上部とポス下部の平均値を適用する。

$$\delta 3' = \delta 3 - \frac{\delta 1 + \delta 2}{2}$$

(2) 軸箱傾き量の補正 (C)

軸箱傾きについては、ボス上部とボス下部の変位差を求めて補正する。

$$C = \frac{B}{A}(\delta_1 - \delta_2)$$

(1)(2)の補正を総合し、最終的に横圧 $Q(\delta)$ を得るための式は次のようになる。

$$Q(\delta) = \left\{ \delta_3 - \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} + \frac{B}{A} \times (\delta_1 - \delta_2) \right\} \times qk$$

qk : 横圧校正係数(輪軸に対して油圧ジャッキで横圧方向の荷重を負荷することにより求める)

5. 台上試験及び実車走行試験による検証³⁾

たわみ測定法を検証するため、従来の輪重・横圧測定用台車に図5に示すような変位計等を追加して、台車試験機による曲線通過試験及び実車走行試験を行った。従来のひずみ測定法から求めた横圧とたわみ測定法による車輪の横変形量(補正後)について、実車走行試験の曲線通過時に比較した結果を図6に示す。両者は非常に良好な比例関係が見られ、横圧 10kN に対して車輪板部の変形量は約 0.09mm である。



図5 横圧測定用センサの取付状況(台上試験)

また、輪重についても、軸ばねたわみと PQ 輪軸による輪重値との間の線形性を確認した。さらに、双方の測定法による横圧を実車走行試験により比較した結果、半径 120 ~ 350m 程度の両方向の曲線のほか、分岐部などの衝撃的な値も含め、十分な実用的精度を有しているものと判断した。

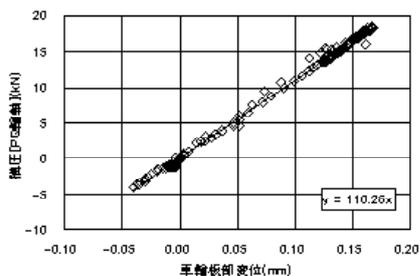


図6 車輪板部変位と横圧の関係

6. 量産仕様台車と実車走行試験⁵⁾

これまでの試験結果から、たわみ測定法の有用性並びに技術的な実現性が確認されたことから、実際の営業車両で使用するための量産仕様台車(PQ モニタリング台車)が製作され、営業車両としての走行性能および PQ モニタリング台車としての機能を確認するための走行試験を実施した。

6. 1. PQ モニタリング台車の概要

本台車の特徴として、横圧検知のために、C 種車輪(板部ストレート)およびディスクブレーキ(軸マウント式)を採用していることが挙げられる。車輪板部の横圧測定面は精密平面加工を施す、ディスクブレーキの採用により車輪部の熱変形を防ぐ、軸箱-車輪間のスラスト方向移動量(ガタ)を極力小さくするために円錐ころ軸受を採用する等の、測定精度向上を図った設計となっている。

輪重測定用の磁歪式変位計および横圧測定用の渦電流式変位計の設置位置を図7に示す。



図7 量産仕様台車と輪重・横圧測定用センサ

6. 2. 実車走行試験概要

実車走行試験は、丸ノ内線全線において行った。走行条件は、満車および空車条件を設定し、営業運転並みの速度の他に、特定曲線に関して 10km/h 以下での低速走行を行った。なお、この PQ モニタリング台車は、従来の輪重・横圧測定用 PQ 輪軸を備え、ひずみ測定法との比較ができるようにしている。

6. 3. 実車試験結果

実車走行試験における結果の一例(満車条件)を図8に示す。赤線がモニタリング台車による測定値、黒線がPQ輪軸による測定値である。ポギー角により曲線の状態が検知できる。同図より、モニタリング台車により測定される横圧値と、PQ輪軸による横圧値の測定波形はよく一致していることが確認できる。今後は更なる精度向上のために、輪重値については重心高さの影響を、横圧については車輪/レール接触位置による影響をそれぞれ考慮することを検討している。

しかしながら、本台車による脱線係数監視の主目的は、各曲線における脱線係数値の精密な計測ではなく、営業線における異常値の早期発見であることから、必ずしもPQ輪軸による測定値に正確に一致する必要はなく、安全上のモニタリングに使用するのであれば、今回の試験結果からほぼ実現性の見通しを得たと考える。

7. まとめ

営業車両による常時観測を可能とする測定法の研究を進め、輪重・横圧のたわみ測定法を提案した。

本測定法の実用性を検証するため、台上試験や実路線での実車走行試験を実施した結果、従来のひずみ測定法とよい相関が得られたので、本年春に、量

産仕様台車による走行試験を実施した。

その結果、提案したたわみ測定法は、測定法として用いるには、接触点変化による補正など、精度向上のためにいくつか残された課題が残っているが、直ちに従来のPQ輪軸を置き換えるのではなく、従来の測定を補完する目的で、安全上のモニタリングとして用いるのであれば、ほぼ実用の目途が付けられたと考えている。

急曲線の内軌側における車輪とレール頭頂面間の摩擦係数は、前述のように外軌側横圧の増大に直接影響するため、そのコントロールの重要性が近年指摘されているが、本測定法によって内軌側の横圧・輪重比を測定することにより、摩擦係数の変化を常時監視することも可能になる。

今後は、実車走行試験の結果をもとに改良を行い、営業使用による長期試験を行う予定である。

参考文献

- 1) 運輸省事故調査検討会、「帝都高速度交通営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書」、平成12年10月
- 2) 松本ほか; 平成17年度交通研発表会講演概要, pp125-130, 2005.
- 3) 松本; JREA, VOL.49, No.6, pp10-12, 2006
- 4) 松本ほか、交通研報告第24号,(1997),1
- 5) 岩本; JREA, VOL.50, (投稿中), 2007

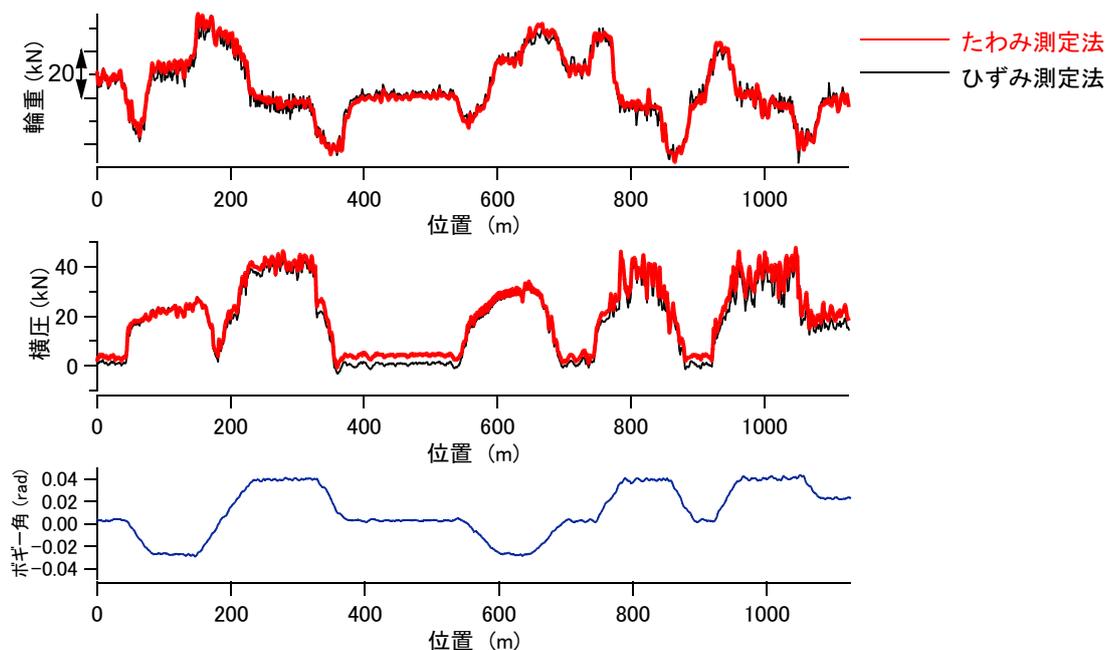


図8 実車走行試験における測定値の比較 (モニタリング台車とPQ輪軸)