3205 PQ モニタリング台車による 営業線データの報告とその活用方法について

[機] 鹿田 敬司, [機] 清水 忠, ○ [機] 齋藤 拓也 (東京地下鉄)

[機] 佐藤 興志, [機] 根来 尚志, 大木 康孝 (住友金属)

[機] 谷本 益久 (住友金属テクノロジー)

Report of the commercial train running date
measured by new on-board measuring method of derailment coefficients

Keiji SHIKATA, Makoto SHIMIZU, Takuya SAITO (Tokyo Metro Co., LTD. Higashi Ueno, Taito-ku, Tokyo)
Yoshi SATO, Shoji NEGORO, Yasutaka OHKI (Sumitomo Metal Industries, LTD. Shimaya, Konohana-ku, Osaka)
Masuhisa TANIMOTO (Sumitomo Metal Technology, INC. Shimaya, Konohana-ku, Osaka)

By using a new monitoring system for derailment coefficients, the authors have succeeded in measuring derailment coefficients everyday on every curve of a commercial line. From these data, we could evaluate the variations of derailment coefficients statistically which change according to the track conditions and train boarding conditions. In this paper we introduce the commercial running data analysis, and propose a new management method for maintaining good railway track conditions.

Keywords: Railway, Derailment coefficient, Wheel/rail contact, Contact force, Measurement

1. はじめに

車両の走行安全性は、新線開業や路線延伸、新形式車両導入時等の節目に終車後の脱線係数測定によって評価することが一般的である。しかしながら、更なる安全性の向上のためには、脱線係数測定の実施頻度を増やし、現状の車両および軌道状態での走行安全性評価を行うことや、理想的には営業時間中に常時脱線係数測定を行い、状態の変化や異常値の早期発見等リアルタイムで走行安全性を確認・管理できるシステムを構築することが必要であると考える。

このような考えにありながら、車輪に貼り付けた歪ゲージにより車輪の歪量を計測し、輪重・横圧を推定するPQ輪軸を用いた従来の測定方法では、その耐久性から営業線での常時測定は難しい状況にあった。具体的には、歪ゲージの測定用配線を車軸の中央に貫通させる必要があり、長期的には車軸の強度が問題となることや、車輪のひずみ信号を回転系である輪軸から静止系である車上の測定器に伝達するために使用する、スリッピングの接点部分の摩耗が問題であった。

そこで東京メトロでは、交通安全環境研究所、住友金属、住友金属テクノロジーと共同で、脱線係数の常時監視を目的に、台車枠等の静止系から簡易的に脱線係数を測定する方法を検討した。そして、輪重は軸バネのたわみ量を磁歪式変位計により測定し、横圧は渦電流式の非接触変位計により車輪板部の変位を測定することで、強度・耐久性の問

題を解決し、脱線係数を測定する新手法を確立した。

開発した測定方法の妥当性を検証するために実施した、交通安全環境研究所の台上試験機による曲線通過実験および本線路での走行試験の結果から、本測定手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、実際の営業車両で利用できる量産仕様台車(PQモニタリング台車)を製作し、平成21年1月より丸ノ内線車両第3車両(T車)へ2台車装着し、営業使用を開始している。

Fig.1 Derailment Coefficient Monitoring Bogie

2. 営業線における脱線係数データ

PQ モニタリング台車最大の強みは営業時間中に繰り返し測定ができることである。脱線係数の値は毎回同じ値が計測されるわけではなく、様々な外部要因から影響を受け、値が大きく変化する。横圧 Q は車輪/レール間の潤滑状態の変化によって大きく増減し、輪重 P は乗車率（空車条件・満車条件）・走行速度（超過遠心力の作用）などにより変化する。従来の PQ 輪軸を用いた数回の夜間試運転では、これらの全ての状況における脱線係数を測定することは事実上不可能であるが、PQ モニタリング台車を営業線に供することにより、これを可能とした。

2.1 変化する脱線係数

Fig.2 にある曲線（R:160m, カント：125mm, スラック 13mm）における数日間の走行データ（脱線係数、横圧、輪重、内軌 Q/P）を示す。

まず脱線係数であるが、直線走行中はほぼ 0 であるが、緩和入口曲線を進むにつれて値が上昇し、円曲線中ではほぼ一定となり、緩和出口曲線で最大値を取り、その後直線に向けて値が下降し、再び 0 となる。特筆すべきは円曲線中の値および最大脱線係数発生地点の値の測定毎の変化である。同一曲線であっても測定毎に値が異なっていることが確認できる。最大脱線係数発生地点（8.953km）では脱線係数が最も低い時で 0.86 であり、最も高い時で 1.20 となっている。脱線係数が 0.86 であれば、脱線係数目安値（1.02）以下の値であるため、走行安全性の判定としては「可」となるが、1.20 であれば目安値を超過するため、走行安全性の判定は「不可」となる。このことから、夜間試運転のように 1 回限りの測定

では、走行安全性の判定を下すには不十分であるということが推定される。なお、この曲線は脱線防止ガード敷設曲線であり、既に対策済みである。

次に何故このように脱線係数が変化するのかを確認するため、脱線係数の分子にあたる横圧 Q と分母にあたる輪重 P の測定毎の変化に注目する。まず横圧 Q であるが、脱線係数のバラつきと同様に横圧もバラついていることが確認できる。一方輪重 P の値の変化であるが、乗車率により輪重の変化はあるものの、横圧のバラつきと比較すると小さいことが認められる。よって脱線係数のバラつきの主な原因としては横圧変化であると言ったことができる。

2.2 軌道の潤滑状況が与える影響

では何故横圧が変化するのか？PQ モニタリング台車は外軌横圧、輪重を測定すると同時に内軌の横圧、輪重も測定しているため、内軌 Q/P も合わせて算出することができる。急曲線部において内軌側の車輪フランジはレールと接触しないことから、内軌 Q/P を車輪/レール間の摩擦係数と近似することができる。すなわち、内軌 Q/P の値を見ることで、PQ モニタリング台車が当該曲線を通じた際の車輪/レール間の潤滑状況を確認することができる。なお当該曲線入口には内外軌に塗油器 Fig.3 が設置されており、2 時間毎に 1 秒間グリスを吐出する設定となっている。

Fig.2 の内軌 Q/P データより、測定毎に大きく値がバラついていることが確認できる。円曲線中において、最も内軌 Q/P の値が低い時は約 0.3～0.4 程度となっているが、最も高い時は約 0.7 で一定となっている。この内軌 Q/P

Fig.2 Running Date of Commercial Train

の変化と脱線係数の変化の相関を確認するため、Fig.2の測定毎のデータより、最大脱線係数発生地点（8.953km）における外軌 Q/P と内軌 Q/P の相関を Fig.4 に示す。内軌 Q/P の値が増加するにつれて外軌 Q/P 値が増加しており、この二つの指標の間に相関があることが分かる。すなわち、脱線係数のバラつきは、軌道の潤滑状況によるものと言うことができる。

Fig.3 Lubricator of inside rail

Fig.4 Relation between Q/P of inside rail and that of outside rail

3. 営業線脱線係数データの利用方法について

3.1 バラつきを含めた走行安全性評価

これまでの PQ 輪軸を用いた夜間試運転での走行安全性の評価は、ある特定の条件下での僅かなデータから評

価するしかないのが実情であった。なるべく最悪条件で測定を行うため、試験車両を空車条件とし、走行速度を 10km/h 程度の低速走行とすることで輪重抜けしやすい状況を作り出すことはできるが、塗油による横圧低減の影響を排除するため、全ての軌道の潤滑状態をウェットからドライにすることは事実上不可能である。

よってこのような変動要因があることを認めた上、様々な条件下で繰り返し測定することにより、Fig.4 のように「バラつきを含めた走行安全性評価をする」ことがより現実的な評価になると考える。PQ 輪軸による測定は夜間試運転のみの測定のため測定回数を増やすことが困難であるが、PQ モニタリング台車であれば 1 日に最大 5~6 回の測定が可能となる（ただし運用による）。仮に PQ モニタリング台車を搭載した車両が 1 日に路線を 6 往復し、それを 1 か月繰り返したとすると、1 か月で 180 回の測定をすることが可能となり、最終的には統計処理を用いた走行安全性評価も可能となる。

3.2 軌道の潤滑管理指標

PQ モニタリング台車の第 1 の目的は脱線係数を測定し、走行安全性を評価することであるが、併せて内軌 Q/P（≒摩擦係数）も測定可能であるため、曲線毎の潤滑状況を把握することができる。

内軌レールの摩擦係数を適度に低く保つことができれば、外軌横圧の低減や、キシリ音の抑制、レール波状摩耗の成長を抑制することができる。内軌レールの潤滑状態に大きく影響を与えるものは、トンネル内に設置された塗油器であるが、その効果確認については、トンネル内の歩行点検や、走行中のキシリ音の有無などの定性的評価のみであった。レールに歪ゲージを貼り付け、レール側から内軌 Q/P を測定すれば定量的評価が可能であるが、東京メトロのように急曲線の多い路線の場合、各曲線に歪ゲージを貼り付けることは非常に困難である。

一方 PQ モニタリング台車では車上から内軌 Q/P を、路線全体を連続して測定することができ、路線の全曲線に対して、曲線毎の潤滑評価をすることが可能である。その一例として Fig.5 に 3 連続曲線の内軌 Q/P の頻度分布を示す。この内軌 Q/P の値は、測定毎の曲線中における最大脱線係数発生時の内軌 Q/P の値をとったものである。Fig.5 より、曲線が塗油器から離れれば離れるほど内軌 Q/P の平均値が 0.593 から 0.698 へと上昇し、ヒストグラムの中央値も上昇していることが確認できる。

Fig.5 Frequency analysis of Q/P of inside rail in three continuous curves

このように曲線毎の潤滑状況を評価することで、潤滑状態が良くなければ、塗油器の吐出量や吐出タイミングを調整することで改善を図ることができる。またそれでも対処不可能な場合は、新たな塗油器の設置や車上からの潤滑管理（摩擦調整材）などの施策をとることが考えられる。

これにより、走行安全性の向上と、軌道保守の面の両方で大きなメリットを得られると考える(Fig.6)。

Fig.6 Flow chart of track condition management and Expected effect

3.3 軌道改良へのフィードバック

脱線係数を測定し、目安値を超過する値が測定された場合、暫定的には脱線防止ガードの設置により機械的に脱線を防ぐ方法や、塗油調整をすることで脱線係数を低く保つなどの方法があるが、根本的な解決ではない。PQ モニタリング台車の繰り返し測定データを確認すると、内軌 Q/P の影響により増減はあるものの、Fig.2 のように横圧が増加する地点はほぼ決まった場所であることが確認された。逆にいつも決まった場所で横圧が減少しているものも確認された。

よって今後の課題でもあるが、横圧が何故減少するのか、何故増加するのかを突き詰めて行くことで、車両の走行安全性を向上させる軌道改良が出来る可能性がある。また Fig2 のように最大脱線係数発生地点の発生要因が輪重抜けであるような場合については、カント減速曲線長を伸ばす等の処置をすることにより、輪重抜けを抑制し、走行安全性の改善を図るなどの改善策が考えられる。

3.4 軌道のフェール検知

上記のように、脱線係数の波形には曲線毎の傾向があるため、明らかにこの傾向と異なる波形を示した場合、軌道側になんらかのフェールが発生したと捉え、フェール検知に使用できる可能性がある。Fig.7 に Fig.2 の外軌 Q/P の各測定の波形を平均化し、地点毎の値のパラつき σ を記載したものを示す。

9 キロ地点のデータに着目してみると、この地点の平均値は 0.669、平均+3 σ の値は 0.734 である。通常の測定方法では仮にこの地点の脱線係数が 0.9 と測定されても目安値以下であるため安全であるとの評価にあるが、統計的に考えると 0.9 という値はその地点の平均+3 σ の値をさらに越える値であるため、何らかのフェールが発生したと推測することとなる。

4. まとめ

PQ モニタリング台車を導入することにより、バラつきを含めた走行安全性の評価、曲線の潤滑管理、曲線における横圧増加・減少地点の把握が可能となった。しかしながら、PQ モニタリング台車はあくまで測定するためのツールであり、それを評価して改良や改善を行うのはあくまで鉄道事業者、メーカなどの「ヒト」である。今後の課題は、今回紹介した評価方法以外にも様々な評価方法を検討し、最も効果的な評価方法を構築することと、その評価方法を基に、軌道改良等の走行安全性に関する取り組みを確実に実行していくことである。

これまで、走行安全性向上に関する取り組みは、車両は車両、軌道は軌道とセクションで分けられている面があったが、この PQ モニタリング台車は車輪/レール間の接触問題の解決に寄与するものであると考える。この問題の解決に向け、鋭意データの解析と走行安全性向上の取り組みを続けて行く。

参考文献

- 1) 清水, 中島, 齋藤: 東京メトロ営業線車両の脱線係数常時モニタリング, 鉄道車両と技術 No.167, P15-23(2010)
- 2) Makoto, SHIMIZU, et al. :A New Monitoring System For Derailment Coefficients without a Special Wheel-set (Monitoring results on a subway line), Bogie10, 2010

Fig.7 Statistical data of Q/P of outside rail