

PQ モニタリング台車を用いた車輪とレールの 潤滑状態の監視方法について

○松田 卓也 (東京地下鉄) 荻野 智久 (東京地下鉄)
 中里 祐一 (東京地下鉄) 福島 智樹 (東京地下鉄)
 友松 白英 (東京地下鉄) 谷本 益久 (東京地下鉄)

Tokyo Metro Co., Ltd., 3-19-6 Higashi-ueno, Taito-ku, Tokyo 110-8614, Japan

In Tokyo Metro running on the subway, there are many sharp curves. In order to prevent from wheel flange and rail side wear, there are lubricator on ground side. But the coefficient of friction between wheel and rail may decrease unexpectedly due to the influence of the surrounding environment. Excessive decrease in coefficient of friction causes slipping and sliding. In this study we introduce to method of detecting signs of gliding due to excessive lubrication by using PQ monitoring bogie. Finally, we introduce the actual monitoring system of the lubrication conditions by using the PQ monitoring bogie in Tokyo Metro.

キーワード：車輪/レール接触，乗り上がり脱線，摩擦係数，モニタリング，フランジ摩耗，レール側摩耗，
 (Wheel/rail contact, Flange climb derailment, Friction coefficient, Monitoring, flange wear, rail side wear)

1. 背景

都市内を走行する地下鉄では，一般道路の下を走行する等の地形的な拘束があり，急曲線が非常に多く存在する．急曲線において，曲線旋回性の向上や車輪とレールの摩耗防止を目的に塗油器を用いて，内軌と外軌のレールを潤滑し，車輪とレール間の摩擦係数を下げる．この潤滑が不足していると摩擦係数の増大により，車輪フランジ摩耗、レール側摩耗及び波状摩耗等が発生する．一方，周辺環境の影響により，一時的に摩擦係数が大きく低下することがある．著しい摩擦係数の低下は空転や滑走が発生させ、運行安定性の低下に繋がる．以上のように，車輪とレール間の摩擦係数は適正に管理する必要がある．

これまでの先行研究によって，PQ モニタリング台車を用いた営業線での測定結果より，車輪とレール間の潤滑が不足し，車輪フランジ摩耗やレール側摩耗が多く発生している曲線の推定方法は紹介している(1)．本研究では同様に PQ モニタリング台車のデータより，車輪とレール間の摩擦係数の低下による滑走の予兆を把握する方法について紹介する．最後に実際に東京メトロで活用中の PQ モニタリング台車を用いて営業線の車輪とレール間の潤滑状態を監視する方法についても紹介する．



写真1 レール側摩耗

2. PQ モニタリング台車について

営業線で車輪とレール間の力を測定するために，PQ モニタリング台車を用いた(2)．この台車は，営業線で横圧(Q)と輪重(P)の測定が可能であり，脱線係数(Q/P)を常時モニタリングすることができる．横圧は渦電流式変位計を用いて，車輪板部の変形量より横圧を推定している．輪重は磁歪式変位計を用いることで，軸ばねのたわみ量を測定することで輪重を推定している．

また，軸箱に加速度センサを取り付けることで，波状摩耗による振動，分岐器通過時の振動等を測定することが可能である．



写真2 PQ モニタリング台車全体像



写真3 輪重・横圧測定センサの概要

3. 滑走原因曲線の推定方法

3.1 滑走の原因

滑走は車輪とレール間の摩擦係数が周辺環境の影響を受け、一時的に低下した際に発生する可能性が増加する。さらに車輪とレール間の摩擦係数が低下した状態でブレーキを動作することで、車輪の滑走が発生する。車輪とレール間が乾燥状態・湿潤状態にあるクリープ特性線図を図1に示す。車輪とレールが粘着している場合は微小滑り領域、空転・過走状態は巨視滑り領域と呼ばれている。この二つの領域の境となる粘着力を粘着限界と呼び、ノッチやブレーキにより、車輪とレール間に進行方向への力(接線力)が働き、その接線力が粘着限界を超えた場合、空転・滑走が発生する。図1からわかるように、車輪とレール間が湿潤状態において、粘着限界の値は乾燥状態に比べて低くなる。これは湿潤状態のほうが、空転・滑走が発生し易いことを示している。

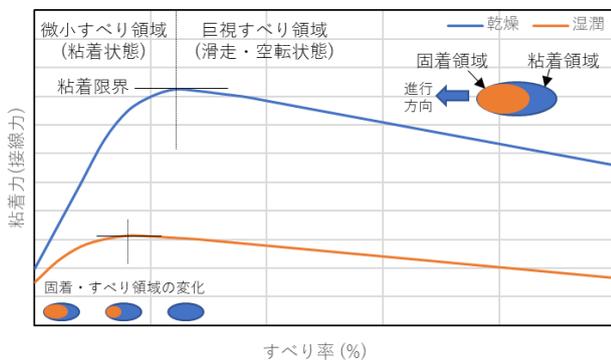


図1 粘着力とすべり率の関係について

3.2 内軌の潤滑状態の把握方法

車輪とレールの間の摩擦係数が低下した際に滑走は発生するが、首都圏の地下鉄道においては、曲線内軌側に積極的に塗油を実施している。さらに予期できない周辺環境の影響によって、必要以上に摩擦係数が低下する場合、滑走の危険性が高まる。つまり、内軌側の摩擦係数を把握することで、滑走の予兆を把握できる。

内軌の摩擦係数の把握には内軌 Q/P を用いることが可能である。内軌 Q/P を用いて、内軌車輪/レール間の摩擦係数を評価方法の概念図を図2に示す。急曲線走行時、内軌車輪において、摩擦係数によって横方向に生じる力 F は以下のように示される。

$$F = \mu \times N \quad (1)$$

ここで μ は摩擦係数、N は荷重を示す。図2に示すように、内軌側は車輪踏面のみが接触していることから、 $F \approx Q$ (内軌側横圧) と見なすことができる。ここで式(1)を変形すると

$$\mu = F / N \quad (2)$$

となる。荷重 N は、 $N = \text{輪重 } P$ となることから(2)に代入すると、摩擦係数 $\mu = F / N = Q / P$ となる。以上のことから、内軌 Q/P は摩擦係数と等価と見なすことができる。

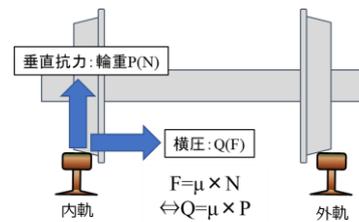


図2 急曲線走行時、内軌車輪にかかる力

図3に PQ モニタリング台車によって測定された急曲線走行時の内軌 Q/P の値を示す。この急曲線は定常曲線の曲線半径が 200m であり、入口・出口緩和曲線を有した曲線であり、入口緩和曲線の内軌側に塗油器が設置されている。車両が直線部から入口緩和曲線に差し掛かり、徐々に横圧の増加が始まるが、塗油器通過直後に急激に内軌 Q/P が下がっていることがわかる。これは塗油器の塗油の影響で車輪内軌の横圧が減少された結果である。

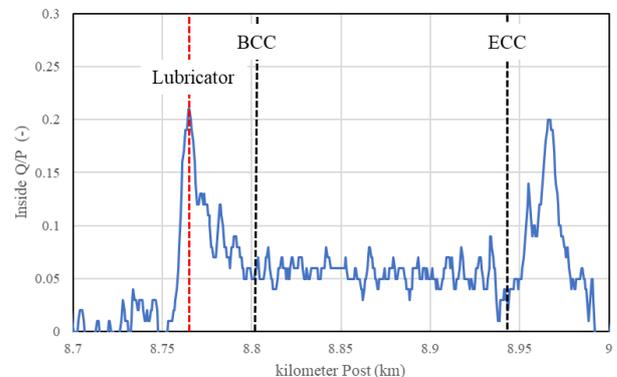


図3 急曲線走行時の内軌 Q/P の変化

3.3 各曲線の内軌潤滑状態の長期観測

図3にあるように、内軌 Q/P の値は緩和曲線、定常曲線と異なる。また、潤滑状態は時々刻々と変化しているため、走行毎に変化する。日々の潤滑状態の変化を捉え、長期的に潤滑状態を評価するために、以下の手順で長期の潤滑状態を監視することとした。

- ① 定常曲線中の内軌 Q/P の平均値をその走行時の代表値とする。
- ② PQ モニタリング台車が走行した全ての走行時において、代表値を算出する。
- ③ 10 日ごとに代表値をさらに平均値(ここでは Average κ とする)を算出し、10 日ごとの平均値の変動を算出する。
- ④ 全ての急曲線において、①から③の作業を実施する。

任意の曲線における、潤滑状態の長期観測の結果を図4に示す。Term16 より Average κ の値が急激に低下、つまり内軌車輪とレール間の摩擦係数が急激に低下していることがわかる。

同様の手法で全ての曲線で摩擦係数の確認を行った結果、滑走が発生した曲線において、滑走発生時の約1カ月以上前

から、Average κ の値が 0.05 付近まで低下した状態になることが多く見受けられた。また、駅侵入区間によるブレーキの使用頻度が極めて高い場所かつ下り勾配で滑走が多く発生していた。以上のように全ての曲線において、長期的に摩擦係数を監視し、駅前のブレーキ動作区間かつ下り勾配においては著しく摩擦係数が低下しないように、注意が必要である。

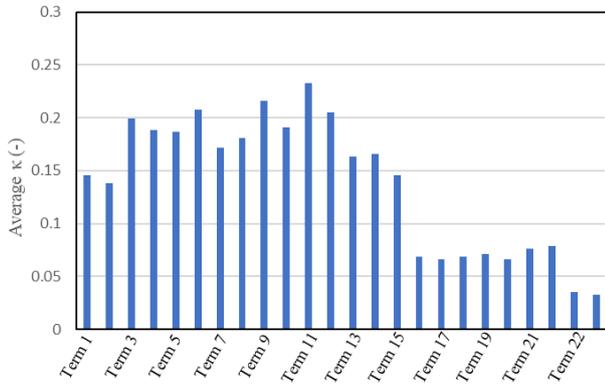


図 4 滑走が発生した曲線の潤滑状態の変化

4. PQ モニタリング台車を用いた車輪とレール間の潤滑状態の監視体制について

上記の摩擦係数の低下した曲線の推定方法と先行研究の各曲線で発生するフランジ摩耗量の推定方法(1)を用いて、PQ モニタリング台車による営業線での潤滑状態の監視を実施している。図 5 に概要を示す。定期的に取得されている PQ モニタリング台車のデータに対して、解析ソフトを構築し、自動計算を実施している。計算によって、各曲線の長期間の内軌車輪の摩擦係数の変動と推定フランジ摩耗量を算出している。これらの算出された値に対して、閾値を設け、その値を超えた際は自動で関係各所にメールを展開する機能を付与した。この機能により、長期的な各曲線の潤滑状態を可視化することが可能であり、潤滑状態の大きな変化があった場合、すぐに把握することが可能である。

また、PQ モニタリング台車には軸箱の振動を測定する機能を有しており、波状摩耗や分岐器での振動の進展を監視することで日々の状態の変化の確認を行うこともできる。こちらの機能についても併せて試験運用を開始しており、今後は閾値の設定を行っていききたい。

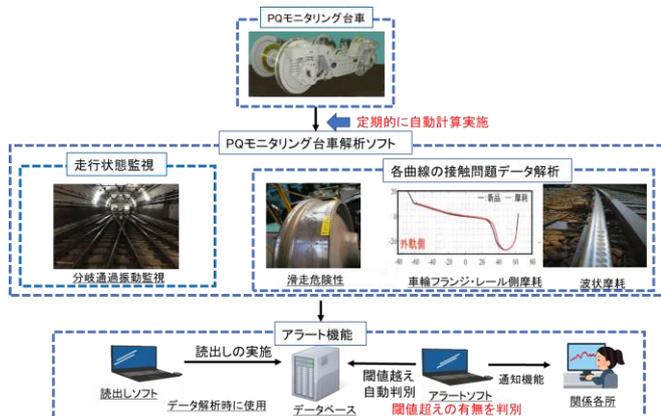


図 5 PQ モニタリング台車による潤滑状態監視システム

5. 今後の展望

今後は本システムを用いて、車輪とレール間の潤滑状態の監視を進めていく。また、路線によって、台車構造・車輪踏面の違いや運転方式の違い(ATO運転、手動運転)があるため、各路線に合わせて、車輪フランジ摩耗量や滑走の予兆となる閾値の設定が必要となる。これらは各路線の営業線の実態と合わせた閾値の設定が必要となるため、運用を重ねて、閾値を設定していきたいと考えている。

また、選択した時期や曲線に対して、PQモニタリング台車の結果を出力する機能も構築しており、今後は本システムを活用し、車輪とレールの接触問題の解決に努めて、適切な潤滑状態の実現し、滑走や車輪フランジ摩耗を低減させたい。

文 献

- (1) PQ モニタリング台車を用いた各曲線で発生するフランジ摩耗量の推定方法について、松田、荻野、渡邊、新井、米原、谷本、松本、道辻、一柳、佐藤、大野、緒方、松見 J-Rail 2019 講演論文集, 2019
- (2) PQ 輪軸を用いない車輪/レール接触力の測定方法、大野、松本、佐藤、清水、留岡、松本(耕)、谷本、佐藤(與)、日本機械学会論文集(C 編), Vol.77, No.774, 2011