

講演概要 地下鉄の急曲線部におけるレール及び車輪の摩耗防止について

佐藤安弘¹・陸 康思²・大橋基樹³・矢吹大智³・渡辺将伍³
三浦 崇³・久慈真樹³・萩原 武⁴・磯部栄介⁴・砥出朋史^{4,5}

¹ 正会員 交通安全環境研究所 交通システム研究部 (〒182-0012 調布市深大寺東町 7-42-27)
E-mail: ya-sato@ntsel.go.jp

² 交通安全環境研究所 交通システム研究部 (〒182-0012 調布市深大寺東町 7-42-27)

³ 仙台市交通局 鉄道技術部 (〒984-0032 仙台市若林区荒井字矢取東 46-1)

⁴ 日本地下鉄協会 リニアメトロ推進本部 (〒101-0047 千代田区内神田 2-10-12)

⁵ 日本製鉄 関西製鉄所 (〒554-0024 大阪市此花区島屋 5-1-109)

地下鉄の低コスト化を実現するため、電車の床面高さ寸法を小さくできるリニアモータ駆動方式地下鉄(リニアメトロ)が1990年に大阪で開業して以来、東京、神戸、福岡、横浜、仙台の各都市の計7路線で導入されている。リニアメトロの特性を生かして建設された路線では、普通鉄道としては異例の半径160m以下の急曲線が多数存在する場合が多い。こうした急曲線部等において、走行安全性の確保を前提として、レール及び車輪の摩耗防止に関する保守面での最適化の追求が続けられている。今回、リンク式操舵台車がリニアメトロとしては初めて導入され、その後のレール及び車輪の摩耗状況を踏まえて導入された地上塗油による摩耗防止対策と相まって、摩耗防止に一定の効果が得られたので、その評価方法などについて報告する。

Key Words : subway, linear metro, link-type steering bogie, wear, rail lubricator

1. はじめに

地下鉄は主として道路の下に建設するため土地の有効活用が図られ、都市景観に影響を与えないなど、大都市の高速大量輸送機関として優れている。その一方で、建設には多額の資金を必要とすることから、低コスト化を実現するため、リニアメトロが開発された。リニアメトロの特性として、回転型モータ駆動の普通鉄道に比べ、リニアモータとリアクションプレートとの間の駆動力により急勾配に強く、地形や埋設支障物への対応に柔軟性があること、回転型モータによる駆動機構がないため、車軸を操舵しやすく車輪径を小さくできることから、急曲線に適応し、民地支障を少なくできること、車両の床面を低くでき、トンネル掘削断面を縮小できるので、建設費の低減に有効であることがあげられる¹⁾。こうした特性を生かして、大阪、東京、神戸、福岡、横浜、仙台の各都市の計7路線(総延長約115km)で導入されている。リニアメトロの特性を生かして建設された路線では、普通鉄道としては異例の半径160m以下の急

曲線が多数存在する場合が多い。こうした急曲線部等において、レール削正、レール交換、摩擦調整材の塗布などの保守が実施されている²⁾。また、内軌側車輪のフランジ背面を拘束することにより、外軌の側摩耗を軽減することを目的として、「摩耗防止レール」を敷設している例もある³⁾。このように、走行安全性の確保を前提として、レール及び車輪の摩耗防止に関する保守面での最適化の追求が続けられている。

今回、急曲線部の横圧の低減効果が期待されるボギー角連動方式の半強制操舵台車であるリンク式操舵台車⁴⁾がリニアメトロとしては初めて導入され、その後のレール及び車輪の摩耗状況を踏まえて導入された地上塗油による摩耗防止対策と相まって、摩耗防止に一定の効果が得られたので、その評価方法などについて報告する。

2. 当初の仕様と摩耗の状況

(1) 路線及び車両の概要

リニアメトロは、大阪に初めて導入されて以来、

直線走行と急曲線通過を両立する、軸箱前後支持剛性を柔剛性とした自己操舵台車が採用されている⁴⁾。また、急曲線部においては摩耗軽減のためレール頭部に熱処理を施した硬頭レールが採用されている。その一方で、硬頭レールは波状摩耗等が発生した場合のレール削正が普通レールに比べ困難であり、また、接触圧の高いレールゲージコーナー部に残留応力が蓄積されるため、比較的少ない通過トン数できしみ割れが発生することがあり、このきしみ割れに油脂系液体が浸透すると、車輪通過時にきしみ割れが促進されることが知られている⁵⁾。従って、車輪フランジ部の摩耗防止のため車輪フランジへの塗油や外軌ゲージコーナーへの塗油を実施する場合等にきしみ割れへの影響が考えられる。

今回検討対象とした仙台市の路線の概要を表-1に示す。当路線で採用されたリンク式操舵台車では、半径105mの曲線において、先頭軸のアタック角が10mrad未満となること、外軌側の横圧がリンク無しの場合に比べ約33%減少することなどが確認された⁶⁾。横圧低減による摩耗軽減効果が期待されたため、これまでのリニアメトロのような硬頭レールを採用せず、急曲線部を含め50N普通レールが採用された。その上で、曲線通過時のきしり音の抑制とレール波状摩耗の防止を図るため、半径135m以下の曲線に摩擦調整材塗布装置が導入された。

表-1 路線概要

営業キロ	13.9km
最小曲線半径	105m (6箇所)
最急勾配	57‰
駅数	13
軌間	1,435mm
電気方式	直流1,500V
集電方式	架空線方式
車両	リニアモーター駆動・4両編成
保安設備	ATC,ATO,可動式ホーム柵等

(2) レール／車輪の摩耗状況

この路線では、上記リンク式操舵台車及び摩擦調整材の導入効果により、レール波状摩耗は特に発生しておらず、急曲線部走行時のレール波状摩耗に伴う騒音も認められない。過去のリニアメトロの知見では、無潤滑条件の波状摩耗発生要因として、アタック角9.5mrad以上が挙げられている⁷⁾。一方で、室内模型実験では7.5mrad以上になると摩耗係数が急激に増加する傾向が確認されている⁸⁾。操舵台車導入により車輪フランジ摩耗量が軽減された報告⁹⁾があるものの、表-1に示すような急曲線を多数有する路線において、当初の車輪フランジ・レール間が無潤滑の条件下では、外軌ゲ

ージコーナーの摩耗と車輪フランジ部の直立摩耗が発生した。

この結果を受け、他のリニアメトロでも採用実績があり効果が確認されている地上塗油方式(地上側の装置によってレールのフランジ当たり面にグリスを塗布)を採用し、半径135m以下の曲線部(外軌側)に、地上塗油装置を設置することとした。

3. 評価方法の検討

地上塗油装置は、国際調達の結果、国内で実績の無い海外製品が採用された。そこで、以下の(1)～(4)の4段階で確認・評価を進めることとした。

(1) 構内車庫線での塗油の試行

車庫線の曲線部(半径80m)において、外軌ゲージコーナーに塗油装置で使用するグリスを手塗りする。車両を通過させ、塗油区間外へのグリスの付着状況やブレーキその他への影響の有無を確認する。

(2) 本線の代表曲線における塗油の試行と走行安全性への影響の確認

半径105mの曲線の中から摩耗量の最も大きい傾向が見られる1曲線を代表として選定し、代表曲線において、レールに測定用ひずみゲージを設置することで輪重・横圧及び脱線係数の測定(以下、地上側PQ測定という)を行う。併せて、当該箇所における台車の挙動を確認するため、非接触変位計を地上側に設置することで、輪軸の左右変位及びアタック角の測定を行う¹⁰⁾。測定箇所としては、摩耗量が最も大きい傾向にある地点でかつ車両の姿勢が安定する地点(出口緩和曲線に近い定常円曲線の終盤部)を選定した。測定箇所の状況を図-1に示す。



図-1 地上側PQ測定箇所

(3) 地上塗油装置の稼働による走行安全性への影響の確認

実車走行試験により、地上塗油装置を稼働した際の走行安全性を全線に渡り確認する。このため、車輪に測定用ひずみゲージを設置することで輪重・横圧及び脱線係数の測定(以下、車上側 PQ 測定という)を行う。潤滑条件としては、ドライ条件及び塗油条件における測定を行う。塗油条件としては、7 箇所曲線の部で地上塗油装置を稼働させ、塗油を行う。一方、(2)と同様に、地上側 PQ 測定、輪軸の左右変位及びアタック角の測定等を実施する。

(4) 地上塗油装置の稼働後の摩耗抑制効果の確認

地上塗油装置の稼働後数ヶ月間にわたり、(2)と同様の測定を行うとともに、レール摩耗量及び車輪摩耗量の追跡調査を行う。

4. 評価結果

(1) 構内車庫線での塗油の試行

車両がグリス塗布箇所を通過した後は、塗油区間外へも若干のグリスが伸展していることを確認した。また、車輪フランジにグリスが付着しているものの車輪踏面には付着していない状況を確認した。さらに、車庫線の走行中、特に制動に異常が無いことを確認した。

(2) 本線の代表曲線における塗油の試行と走行安全性への影響の確認

ドライ条件に比較して、グリス塗布後に試運転列車 1 軸目の外軌横圧及びアタック角は若干増加する傾向にあることを確認した。グリス塗布により、外軌ゲージコーナーと接触する車輪のフランジのど元との摩擦係数が低下し、接線方向の摩擦力が減少したため、輪軸を操舵させる方向に作用する操舵モーメントが減少したことによって、アタック角が増加したものと考えられる。

(3) 地上塗油装置の稼働による走行安全性への影響の確認

a) 脱線係数への影響

地上側 PQ について、営業列車の通過日時毎にプロットした測定結果を図-2に示す。これによれば、塗油装置の稼働開始後の4月初め頃から外軌横圧及び脱線係数が増加する傾向が確認された。その後、4月半ばにはグリスの供給量を少なくする方向で調整が実施され、5月後半になって外軌横圧及び脱線係数が減少したこと、代表曲線における塗油装置の5月下旬の設置位置調整・再稼働後に再び外軌横圧及び脱線係数が増加したことが確認された。但し、車両によってばらつきが大きく、横圧が低い車両も存在する。これは、車輪の

摩耗によるレール・車輪接触状況の違い及び潤滑状況の違いに起因するものと推定される。

車上側 PQ 測定及び地上側 PQ 測定の結果、塗油装置稼働開始後の脱線係数の最大値は目安値に対して小さいため、走行安全上の問題は無いものと考えられる。

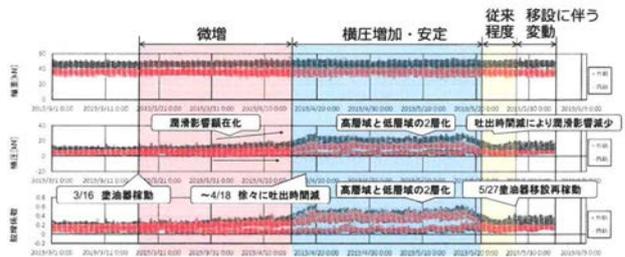


図-2 地上側 PQ 測定結果 (各列車の 1 両目 1 軸外軌)

b) ブレーキへの影響

ブレーキへの影響の有無については、本線試運転時のブレーキ試験結果によって確認を行い、塗油装置稼働開始後に特に制動減速度が低下する傾向は見られなかった。また、地上塗油装置の稼働直後に駅ホームでの過走はなかったことが確認されている。また、グリスの一部が車両に付着する状況が見られたが、ディスクブレーキのライニングにグリスの滞留は認められなかった。

これらの結果より、塗油によるブレーキへの影響については、これまでの塗油量では特に問題はないものと考えられる。

(4) 地上塗油装置の稼働後の摩耗抑制効果の確認

塗油装置を設置した 7 箇所曲線の部における外軌ゲージコーナー 45° 方向の摩耗量の推移を図-3に示す。各曲線部 1~2 箇所、合計 10 箇所で摩耗量の測定を行っており、プロットの形状はそれぞれの測定地点に対応している。一部の地点で摩耗量が 0 になった要因は、レールを交換したためである。交換後も交換前と同じ普通レールを使用しているが、レール交換後は摩耗量 0mm で推移している。その他のレール摩耗量は概ね漸増傾向にあるものの、塗油装置稼働後は、摩耗の進展はあまり見られない。

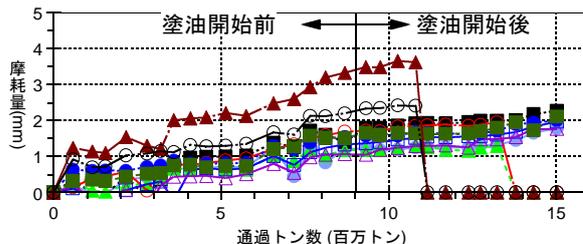


図-3 外軌の摩耗量の推移

このように、塗油装置稼働後については、測定

値のばらつきがあるものの、図-3をもとに平均的な摩耗速度を求めると図-4のとおりとなり、レールの摩耗軽減効果が認められた。

一方、車輪についても、塗油装置稼働後にフランジ摩耗軽減効果が認められた。

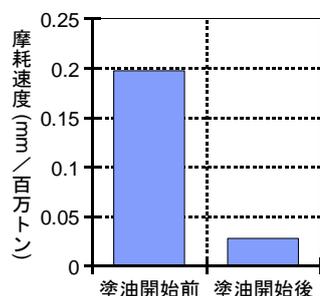


図-4 レール摩耗速度の比較

(5) 今後の課題

引き続き、地上塗油装置を設置した各曲線におけるグリスの供給状態や伸展状態を確認しつつ塗油装置の調整を行うこととしている。また、車両へのグリスの付着状況、特に車輪フランジのほかブレーキ周りへの付着状況を継続的に確認していくほか、塗油装置の定期的な稼働状況の点検を行う。今後は、塗布量の調整や定期点検周期などの最適化を進めていくこととしている。

5. まとめ

リニアメトロでは、その特性を生かして急曲線が多数存在する路線が多く、走行安全性の確保を前提として、レール及び車輪の摩耗防止に関する保守面での最適化の追求が続けられている。硬頭レールを使用せず、リンク式操舵台車と摩擦調整材の導入に加え、地上塗油装置の導入により一定の摩耗防止効果が得られた。

国内で実績の無い海外製地上塗油装置を導入す

るにあたり、走行安全性等の確認・評価を進めた結果、グリス塗布による走行安全上の問題は特に無いものと判断し、急曲線部の全体にわたり外軌ゲージコーナーにグリスが塗布されれば、レール/車輪の摩耗ともに、緩和されることを確認した。

引き続き、長期にわたりレール及び車輪の保守状況について注視していくこととしている。

参考文献

- 菅原 操：リニアメトロ これまでの歩みと今後への展望, SUBWAY, 第 196 号, pp.7-13, 2013.
- 東京都交通局ホームページ
https://www.kotsu.metro.tokyo.jp/subway/kanren/oedo_noisy.html, 閲覧日 2021.3.
- 石崎 雅史, 山岡 悟, 陸 康思, 高橋 克之：摩耗防止レール敷設区間における輪重・横圧の測定, 土木学会第 64 回年次学術講演会, IV-333, pp.663-664, 2009.
- 下川嘉之：曲線を円滑に通過するための操舵技術, 計測と制御, 第 56 巻, 第 2 号, pp.87-92, 2017.
- Eric Magel : Rolling Contact Fatigue: A Comprehensive Review, U.S. DOT, FRA, ORD, pp.45, 2011.
- 砥出朋史, 岩戸一典：仙台市東西線 2000 系車両用リニアメトロ地下鉄向けリンク式操舵台車の開発, 鉄道車両と技術, No.232, pp.2-6, 2016.
- 松本陽, 佐藤安弘, 谷本益久, 陸康思, 宮内栄二：曲線部に発生するレール波状摩耗の発生メカニズムに関する研究(第 2 報), 機論 C 編, pp.315-322, 1998.
- 西谷晃一, 吉岡亜陸, 足立野の花, 曄道佳明, 森裕貴, 佐藤安弘, 高橋克之, 陸康思：境界条件による車輪・レール摩耗への影響に関する実験的研究(第三報), 第 21 回鉄道技術連合シンポジウム, JSCM-2-3, 2014.
- 福島和樹：地下鉄向け狭軌用新操舵台車の開発, 鉄道車両と技術, No.249, pp.15-21, 2017.
- 佐藤安弘, 松本陽, 谷本益久, 陸康思：台車姿勢、輪重及び横圧の地上側からの把握方法, 土木学会第 51 回年次学術講演会, IV-404, pp.808-809, 1996.

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

PREVENTION OF RAIL AND WHEEL WEAR ON SHARPLY CURVED SUBWAY TRACK

Yasuhiro SATO, Yasushi OKA, Motoki OHASHI, Daichi YABUKI, Shogo WATANABE, Takashi MIURA, Masaki KUJI, Takeshi HAGIWARA, Eisuke ISOBE and Tomofumi TOIDE

Linear-motor-driven subway "Linear Metro", which can reduce the floor height of the train dimensions and construction costs, has been introduced into 7 lines. On the lines that made use of the characteristics of the Linear Metro, there are a lot of sharp curves which have a radius of less than 160m. This is different from normal railways. In such sharp-curve sections, optimization efforts in the maintenance for prevention of wear of rails and wheels are continued. A link-type steering bogie was introduced for the first time into a Linear Metro line. Based on the wear situation observed later, a ground-side lubrication device was introduced. The evaluation methods for the prevention of wear are reported.