

車輪・レール間の境界条件による横圧への影響に関する調査研究

正 [土] ○石崎 雅史 (大阪市交通局) 鍋島 寛之 (大阪市交通局)

菅原 剛治 (大阪市交通局) 山岡 悟 (大阪市交通局)

正 [機] 陸 康思 (住友金属テクノロジー株式会社) 高橋 克之 (住友金属テクノロジー株式会社)

Investigation study on the influence of wheel/rail interface condition on the lateral force

Masashi ISHIZAKI, Osaka Municipal Transportation Bureau (OMTB) 1-12-62, Kujominami, Nishi-ku, Osaka City

Hiroyuki NABESHIMA, Goji SUGAHARA & Satoshi YAMAOKA, OMTB

Yasushi OKA & Katsuyuki TAKAHASHI, Sumitomo Metal Technology, Inc.

Imazatosuji Line (Line No.8) of Osaka Municipal Subway is a LIM system which contains many sharp curves. In order to reduce mainly corrugation which occurs on low rail in sharp curve section, friction modifier is applied to top of low rail. From the day to day experience we find, friction modifier can not only reduce the formation of corrugation but also improve curving performance of vehicle. Unfortunately, just limited research data related to this experience is published. To elucidate the phenomena scientifically, wheel load, lateral force, angle of attack, displacement of wheelset and rail were measured under multiple friction conditions between wheel and rail contact. From the measured result we grasped the influence of interface friction condition on lateral force. This research also helps us to find the optimal level of friction modifier application.

Keywords: sharp curve, corrugation, friction modifier, interface condition, lateral force

1. はじめに

大阪市地下鉄今里筋線 (第8号線) は、リニアモータ駆動方式を採用し、平成18年12月24日に開業した路線である。この路線は、比較的狭隘な道路下に敷設しており、急曲線区間の占める割合が大きいことが特徴である。

この路線では、一般に、波状摩耗抑制や横圧低減に効果があるとされる摩擦調整材 (Friction modifier) を急曲線区間に導入している。当初は、レール保守上必要な材料として採用したが、その後、輪軸の曲線旋回性の向上にも寄与している可能性が経験的に分かってきた。しかし、力学的な裏付けデータがあまり公表されておらず、事業者として実地試験を実施し、効果確認を行うべきであるとの結論に至った。

本研究では、実線路で設定した複数の境界条件 (摩擦条件) のもとで、輪重・横圧・アタック角・輪軸変位・レール小返り変位を測定した。この結果、境界条件による差異が明らかとなり、摩擦調整材の最適な塗布レベルを確認することができた。

本論では、実地試験の方法について紹介するとともに、境界条件による横圧への影響について報告する。

2. 急曲線区間におけるレール保守管理

急曲線区間の保守管理においては、内軌レールの波状摩耗と、外軌レールの側摩耗をいかに軽減するかが重要である。今里筋線の軌道構造を図1に示す。

従来、内軌レールに対しては、外軌レールおよび摩耗防止レールとともに、レール用グリスを塗油してきた。しかしながら、内軌側車輪の空転や滑走の原因になるとの指摘が多く寄せられ、現在は塗油を休止している。塗油を休止することで、振動・騒音の直接的原因となる波



Fig.1 Track Structure of Imazatosuji Line

状摩耗が卓越してきた。そこで、グリスに代わる材料として、一般的に波状摩耗抑制や横圧低減に効果があるとされる摩擦調整材を採用している。なお、摩擦調整材に期待している効能については、後ほど簡単に触れたい。

外軌レールの側摩耗に対しては、主として、「摩耗防止レール」 (Straining Rail) の敷設で対処している。摩耗防止レールは、本市独特の軌道構造であり、内軌側車輪フランジ背面を拘束し、外軌側車輪フランジと外軌レールとの接触状況を緩和することを目的としている。

これまでの筆者らの調査研究¹⁾によると、摩耗防止レールによって、フランジ背面横圧が外軌横圧の一部を分担するような荷重配分が生じることが分かっている。しかし、この状況は、曲線を通過する輪軸内におけるフランジ背面間距離やフランジ摩耗状況に左右されることから、摩耗防止レール単独では、安定的な外軌横圧低減効果の持続が困難である。このため、摩擦調整材塗布によって、これを補完することが望ましいと考えている。

3. 摩擦調整材の一般的効能と効果確認の範囲

図2に、曲線通過時の台車系に作用する力を模式的に

示す。曲線通過時の輪径差によって、第2軸の外軌側車輪には、縦クリープ力 (Longitudinal creep force) が作用し、内軌側車輪のクリープ力と偶力をなす。そして、この偶力によるモーメント (Moment by creep force) を打ち消すように、フランジ力 (Flange force) が作用する。

一般に、摩擦調整材は、一定の均衡クリープ率のもとで横クリープ力 (Lateral creep force) を低減できる効能を有する。しかし、塗布量によって、その低減効果にどの程度の差異が生じるかは不明であった。

本論では、内軌横圧、外軌横圧およびフランジ背面横圧それぞれについて検証を行うものとする。

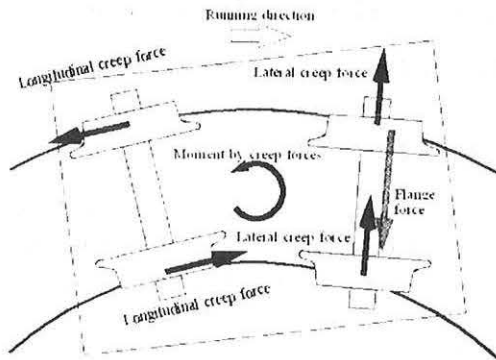


Fig.2 Forces in the bogie

4. 実地試験

4.1 計測方法

本研究における輪重・横圧および車輪／レール相対変位の測定には、レールおよびまくらぎ上に設置するセンサーを用いた。軌道狂いや車両走行特性による影響を考慮し、測点は約5m離れた2地点とした。各測点におけるセンサーの配置を図3に示す。

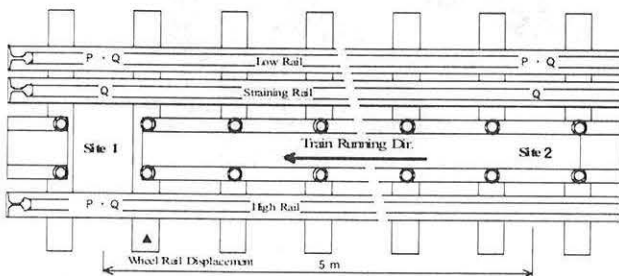


Fig.3 Measurement Layout

4.1.1 輪重・横圧の測定法

車輪が急曲線区間を通過するとき、内軌側車輪は踏面で内軌レールと接触するほか、フランジ背面で摩耗防止レールと接触する。このため、図4に示すように、PQ輪軸による測定を行うと、内軌横圧 (Lateral force of low rail) とフランジ背面横圧 (Back of flange lateral force) を分離することが困難である。

そこで、PQ輪軸に代わり、内軌レール、外軌レールおよび摩耗防止レールに横圧測定用センサー、内軌および外軌レールに輪重測定用センサーを設置する測定法を用いた¹⁾ (図5参照)。この方法は、車輪がセンサー間 (Sensing area) を通過する間に、輪重と横圧を常時測定する一種の連続レールPQ法²⁾である。なお、横圧の符号は、図4に示す矢印方向を正とする。

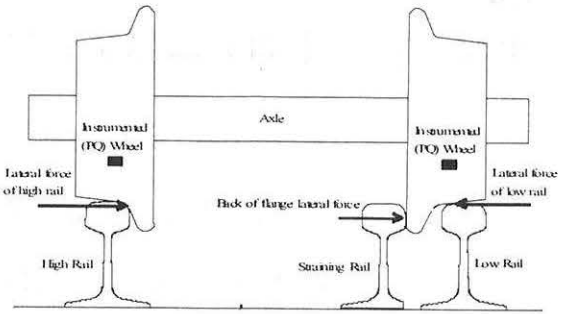


Fig.4 Instrumented PQ Measuring Wheel

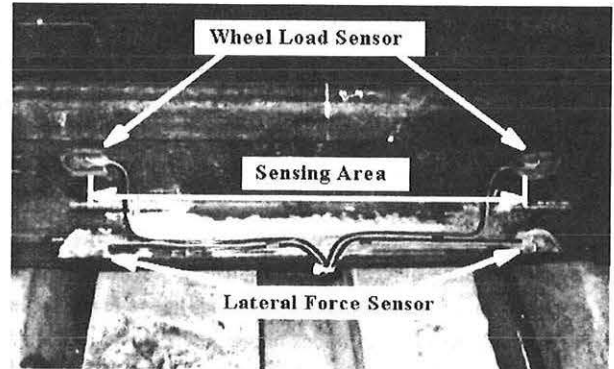


Fig.5 Rail PQ Measuring Sensor Layout

4.1.2 車輪／レール相対変位の測定法

車輪・レールの変位要素として、アタック角、輪軸横変位および外軌レール小返り変位を測定した。測定には、図6に示すように、まくらぎ端部に固定した非接触レーザー変位計 (Displacement sensor) を用いた³⁾。変位量の符号は、輪軸が曲線と逆の方向にヨーイングして外軌側へ寄り、外軌側レールが軌間外側へローリングする場合を正とする。



Fig.6 Wheel/Rail Displacement Sensor

4.2 試験結果

4.2.1 試験条件

外軌レールには通常どおりグリス塗油したまま、内軌レールの頭頂面について、①今まで経験的に最適と考えてきた現状の塗布レベル (Normal)、②現状より塗布量を半減させた状態 (Reduced)、③塗布しない状態 (Dry) の3境界条件を設定した。

試験対象車両は、営業車両 (4両編成) を用いた。乗車状況による影響を最小限に抑えるため、各条件における測定は、同一時間帯で実施した。また、その幅は、列車個体差による影響を最小限に抑えるため、同線を運行中の全編成にかかるデータが得られるようなものとした。

4.2.2 試験結果

境界条件による横圧への影響について、傾向を評価するために、測定時間帯における全列車の平均値を各条件で求めた。各条件で求めた内軌横圧、外軌横圧およびフランジ背面横圧を図7～図11に示す。

また、アタック角、輪軸横変位及びレール小返り変位を図12～図14に示す。

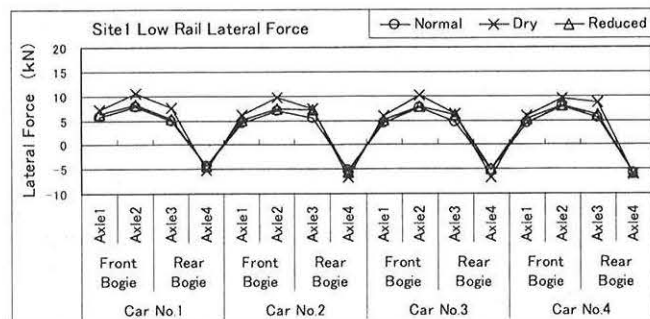


Fig.7 Low Rail Lateral Force of Site1

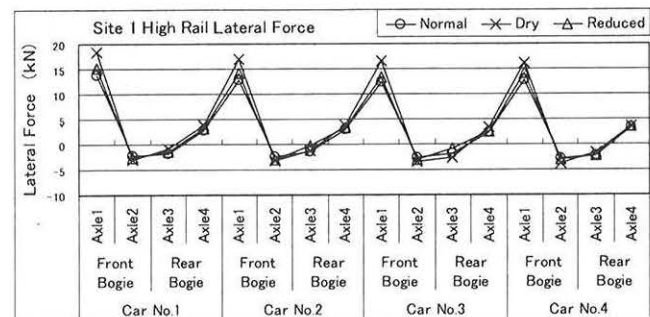


Fig.8 High Rail Lateral Force of Site1

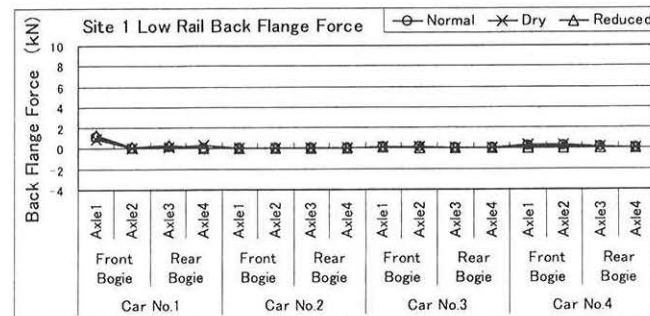


Fig.9 Low Rail Back Flange Force of Site1

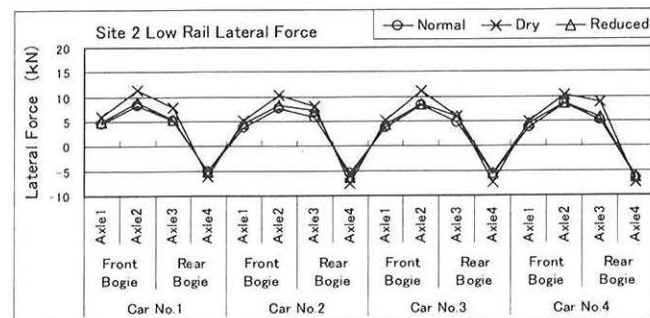


Fig.10 Low Rail Lateral Force of Site2

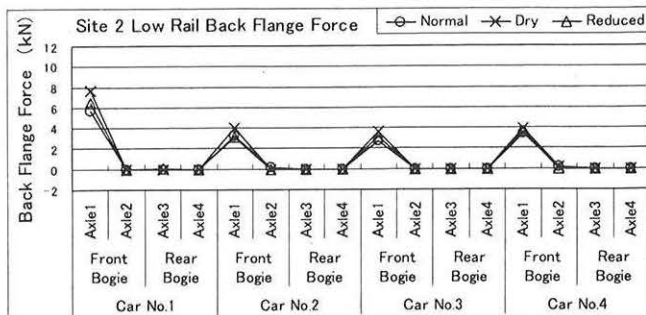


Fig.11 Low Rail Back Flange Force of Site2

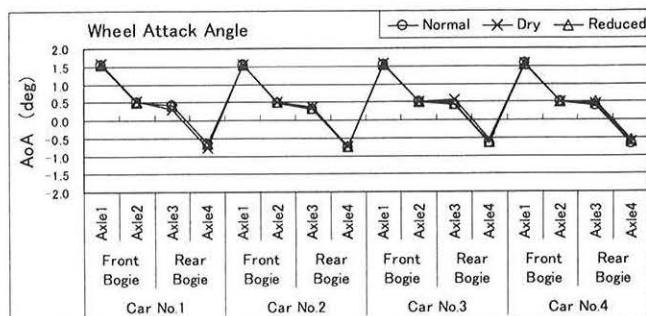


Fig.12 Wheel Attack Angle

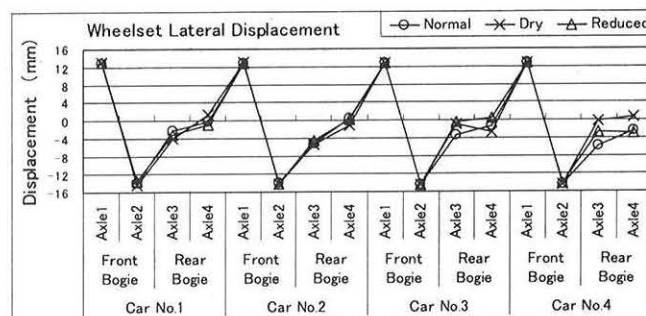


Fig.13 Wheelset Lateral Displacement

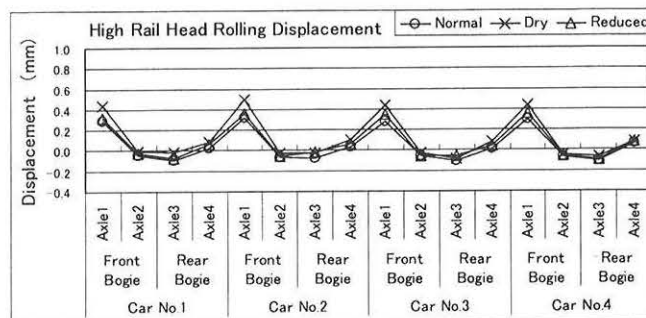


Fig.14 Rail Head Rolling Displacement

5. 横圧への影響に関する考察

5.1 内軌横圧

地点1および地点2における内軌横圧を図7および図10に示す。編成内の各車両において、第2軸の横圧が比較的高くなっている。図13によると、第2軸が内軌側フランジ接触位置まで横変位している。このことから、フランジ力がこの横圧の一部に寄与していると考えられる。また、第1軸と第3軸の内軌側フランジが内軌レールと離

れていることから、この2軸の横圧は、車輪・レール間のクリープ力による横圧である。

第1軸に着目すると、各車両とも、無塗布状態(Dry)、塗布量半減状態(Reduced)、現状塗布状態(Normal)の順で横圧が減少している。地点1と地点2における傾向および値はほぼ同じである。

図12のアタック角の測定結果によると、各境界条件とともに第1軸のアタック角は約1.5度で、列車走行時の車輪横クリープ率に換算すると25%以上である。これまでの研究によると、この程度のクリープ率であれば、無塗布状態において、波状摩耗が内軌レールに形成される。

現地レールに波状摩耗が観測されていないことから、摩擦調整材を塗布することによって、波状摩耗の発生が抑制されたと考えている。

5.2 外軌横圧

地点1における外軌横圧を図8に示す。編成内の各車両において、第1軸の横圧が突出している。特に、先頭車両における第1軸の横圧が高くなっている。図13によると、第1軸が外軌側フランジ接触位置まで横変位している。このことから、外軌側車輪フランジおよび外軌レール肩部の摩耗は、主にこの軸位において生じていると推定できる。

第1軸に着目すると、各車両とも、無塗布状態(Dry)、塗布量半減状態(Reduced)、現状塗布状態(Normal)の順で横圧が減少している。この傾向は、5.1で述べた内軌横圧と同じである。

先頭車両の第1軸においては、無塗布状態と比べて、現状塗布状態での横圧は約4.6kN(率換算で約25%)低減している。一方、塗布量半減状態での横圧は、無塗布状態と比べて約3.1kN減少するが、現状塗布状態と比べてその減少率は小さい。

5.3 フランジ背面横圧

地点1および地点2におけるフランジ背面横圧を図9および図11に示す。地点1においては、先頭車両の第1軸のみが計測されたが、地点2においては傾向が大きく異なり、全車両の第1軸から横圧が検出された。

図4に示すように、輪軸の外軌側車輪フランジが外軌レールと接触する状態と、内軌側車輪フランジ背面が摩擦防止レールと接触する状態は、いくつかの要因に影響される。その一つが見かけ上の軌間拡大である。軌間拡大により、外軌側車輪フランジがレールと接触する前に、内軌側車輪フランジ背面が摩擦防止レールと接触し、背面横圧が発生する。地点1と地点2の背面横圧特性の差はこの要素による影響であると考えられる。

両地点とも、先頭車両の第1軸における背面横圧が高い。背面横圧が比較的高い地点2のデータをみると、無塗布状態、塗布量半減状態、現状塗布状態の順で背面横圧が低減している。

外軌側の横圧は、レール小返り変位によって影響を受ける。レール小返り変位は、見かけ上の軌間拡大につながる。図8および図14をみると、外軌横圧が高くなると、レール小返り変位が大きくなり、見かけ上の軌間が拡大する傾向がみられる。これにより、輪軸が外軌側へ変位可能な量が増え、結果として内軌側車輪フランジ背面が摩擦防止レールと接触し、背面横圧が発生する。無塗布状態で背面横圧が高くなる理由は、輪軸全体にかかる横クリープ力が高くなったことに起因している。背面横圧が輪軸にかかる横クリープ力の一部を分担したことで、

無塗布状態における高い横圧による外軌側への負担を軽減することになる。

5.4 事業者としての総合評価

5.1～5.3の結果から、内軌横圧、外軌横圧、フランジ背面横圧のいずれについても、摩擦調整材を塗布しない状態よりも、塗布した状態の方が顕著な横圧低減効果がみられる。また、今まで経験的に最適と考えてきた現状の塗布レベルよりも塗布量を低減させると、横圧低減効果が低下することも明らかとなった。

若干、輪軸の曲線旋回性の向上についても触れておきたい。摩擦調整材の塗布によって、例えば、先頭車両の第1軸と第2軸における横圧差が低減している。このことにより、摩擦調整材が曲線旋回性の向上にも寄与していると考えられる。

筆者らは、これらの結果を通じて、現状における摩擦調整材の塗布レベルに対して、科学的な裏付けができたことで、本研究は有益なものであったと考えている。

6. おわりに

本研究で行った実地試験では、このほかに、車輪近傍騒音およびレール振動加速度(上下方向・左右方向)もあわせて測定しているため、別途の機会にご報告できればと考えている。また、今回対象とした項目に、車輪近傍騒音およびレール振動加速度を加味した総合的な評価を行っていくこととしている。これについても、別途ご報告していきたいと考えている。

近年、摩擦調整材の導入に踏み切る事業者が増え、本研究と類似した効果確認事例⁴⁾もみられるようになってきた。本研究の結果が、急曲線部のレール保守管理に携わる技術者各位に少しでもお役にたてれば幸いである。

参考文献

- 1) 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回年次学術講演会講演概要集, IV-333, pp.663-664, 2009.
- 2) 佐藤安弘, 松本陽, 谷本益久, 康崎: 地上側測定による輪重及び横圧の連続的な測定方法の検討, J-Rail'95 講演論文集, pp97-100, 1995.
- 3) 佐藤安弘, 松本陽, 谷本益久, 陸康思, 宮内栄二, 古田勝: 地上側測定による車輪アタック角及び車輪/レール想定変位の測定方法, 機講論, No.96-1 Vol. IV, pp352-353, 1996.
- 4) 井上延亮, 東啓一: 曲線での車輪/レール間に生じる諸問題の改善, 鉄道車両と技術, No.148, pp11~14, 2008.