

車輪/レール間摩擦調整による台車曲線旋回性能評価実験

交通システム研究領域
帝都高速度交通営団
住友金属テクノロジー

※佐藤安弘
留岡正男
谷本益久

大野寛之 松本 陽

1. はじめに

地下鉄など都市内の曲線の多い路線にとって、曲線通過時の横圧、きしり音、車輪/レール摩耗等の低減は依然重要な課題である。このため、車輪/レール境界を改善し、潤滑によりクリープ力を減少させることのできる摩擦調整材 (Friction Modifier, FM と略記) が近年開発されている。

FM についてはこれまで、基本特性の調査¹⁾、噴射装置の試作や営業線での試験²⁾が行われてきた。

営業線を用いた現車試験では、既設路線の特定された曲線についてのみの評価であり、車輪/レール間の摩擦制御と車両運動の関係を一般的に論じることはできなかった。

そこで今回、所内の台車試験設備を使用して、車輪/レール間摩擦調整の有無と台車曲線旋回性能との関係を、特に曲線半径との依存性に着目して評価した³⁾⁴⁾⁵⁾ので報告する。

2. 実験概要

2. 1. 試験設備及び台車

実験は当研究所に設置されている都市内鉄軌道用台車試験設備を用いて行った。これは、実物大台車をレールを模擬する4輪の軌条輪の上に搭載して軌条輪を回転させることにより、台車の走行状態を作り出すものであり、いわゆる半車体モデルの台車回転試験機といわれるものである。本試験機は、曲線通過時の内外軌レールの行路差を左右軌条輪の回転数差によって、また、レール曲率に相当する軌条輪角を付与することにより曲線状態を模擬することができる。軌条輪の断面は、タイプレート角 1/40 の50N レール頭頂面形状に加工されている。

本実験に用いた台車は、モノリンク式軸箱支持装置を採用したボルスタレス台車である。その車輪踏面形状については、銀座線・丸の内線で使われてい

る円弧踏面車輪を採用している。

2. 2. FMとその塗布方法

車輪/レール間の摩擦特性を調整する材料として、水を溶媒とした液状の摩擦調整材 "KELTRACK™ HPF"を用いた。この FM は、ドライ状態よりも摩擦係数を低く保ちながら、すべり量が増大するに従って摩擦係数が大きくなるポジティブなクリープ特性を持っており、その間の摩擦係数を 0.17 ~ 0.35 に確保することができる。

摩擦調整の方法としては、既に実用化している車上塗布方法²⁾を模擬することとした。はじめに試験機を直線状態低速で回転させ、FM を軌条輪が1回転する間にノズルにより噴射し、その後軌条輪を停止し乾燥させてから実験を行った。図1に軌条輪及びFM噴射装置を示す。

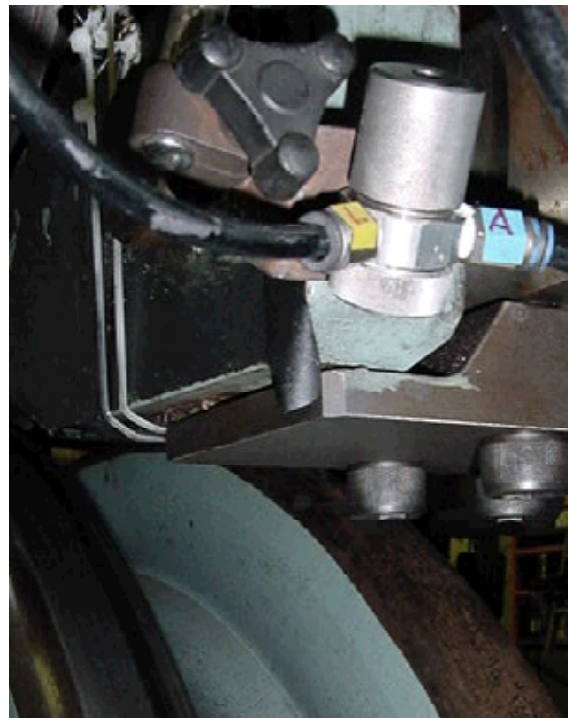


図1 摩擦調整材噴射装置

2. 3. 実験方法と評価項目

今回の実験では、車輪／レール間の摩擦調整の有無を一つのパラメータにとり、台車姿勢とそれにより発生する車輪／レール間の力の状態を観察することにより、台車の曲線旋回性能の差異を評価した。

また、これに併せて曲線通過時のエネルギー消費量に関して摩擦調整の有無による差異を評価した。

このための測定項目は、輪軸、台車枠、荷重枠の左右変位、アタック角、輪重、横圧、接線力（車軸のねじりより算出）とし、台車姿勢と車輪／レール間に作用する力を評価することとした。加えて試験機で曲線走行状態を再現するために必要とされる消費電力量を測定し評価対象とした。

曲線半径は ∞ ～180m までを設定し、超過遠心力の発生しない均衡カント状態で試験を実施した。また、スラックは10mm で一定とした。速度20km/hにて直線～曲線～直線の走行パターンで試験を行った。

3. 実験結果

3. 1. 前軸外軌横圧及び脱線係数

台車の曲線旋回性能を評価する指標として、台車前軸外軌の横圧及び脱線係数に着目する（図2、図3参照）。摩擦調整有(FM)、無(DRY)に関わらず、曲線半径500m 近傍で横圧の符号が反転しており、半径約500m 以下でフランジ接触が起こると考えられる。

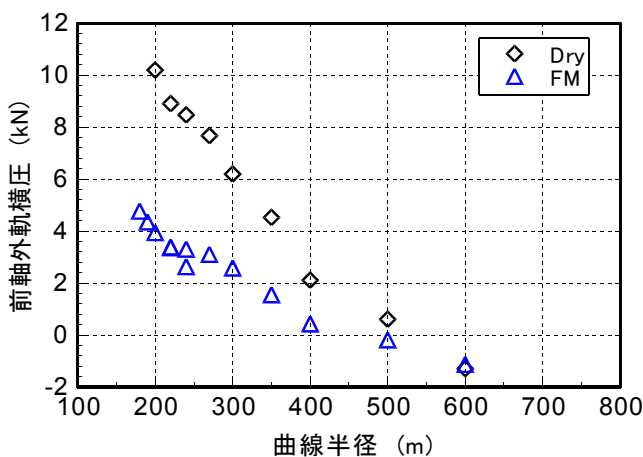


図2 前軸外軌横圧

摩擦調整材の効果により、フランジ接触を起こしてから後、曲線半径が小さくなればなるほど横圧及び脱線係数が大きく低下していることがわかる（今回の最小曲線半径では DRY に比較して FM の場合

は横圧及び脱線係数が1/2以下となった）。

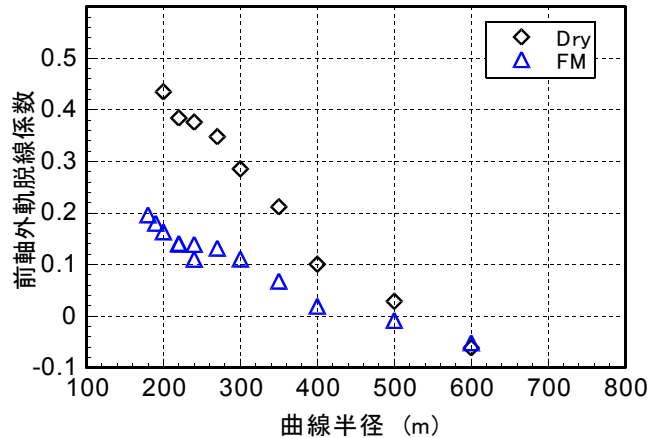


図3 前軸脱線係数

3. 2. 後軸接線力

曲線通過中の前軸外軌横圧に密接に関係する後軸の接線力について図4に示す。後軸接線力は輪軸左右変位量に大きく依存する。つまり半径約350m 以上では、輪軸は純粋転がり位置より外側で走行するため、操舵を助長する方向の接線力が発生しているが、これは次第に小さくなり、半径350m 付近ではほぼ純粋転がり位置で輪軸は走行することとなり接線力が発生しなくなる。さらに半径が小さくなるにつれて、輪軸は純粋転がり位置より内側で走行するため、台車操舵を妨げる方向に後軸の接線力が発生する。

摩擦調整の有無で比較すると、この操舵を妨げる方向に作用する接線力に大きな差が現れている。この傾向は急曲線になるほど顕著に認められる。

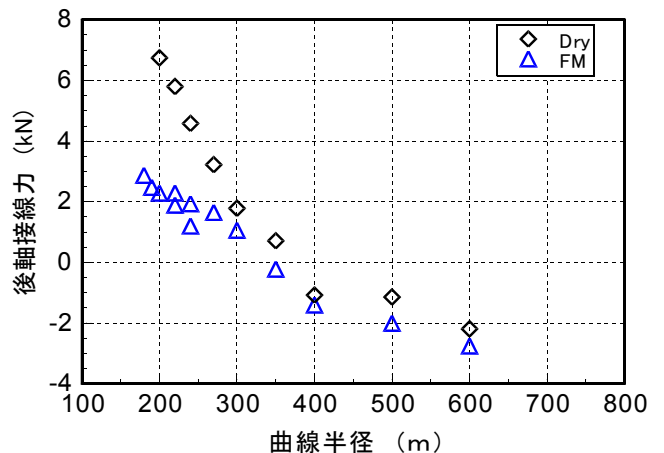


図4 後軸接線力

3. 3. 輪軸姿勢

後軸接線力に関する輪軸の左右移動量について図5に示す。同図に見られるように、後軸は曲線半

径が小さくなるにつれて外軌側から内軌側へ移動している。この横移動により、後軸は曲線通過時に必要な内外軌の輪径差を確保することができなくなり、車輪/軌条輪間に大きな縦すべりを発生させ、前述の接線力を急激に増大させる要因となっていることが確認された。しかしながら、摩擦調整の有無で各走行曲線毎の輪軸の左右移動量には差が現れていないことが明らかとなった。

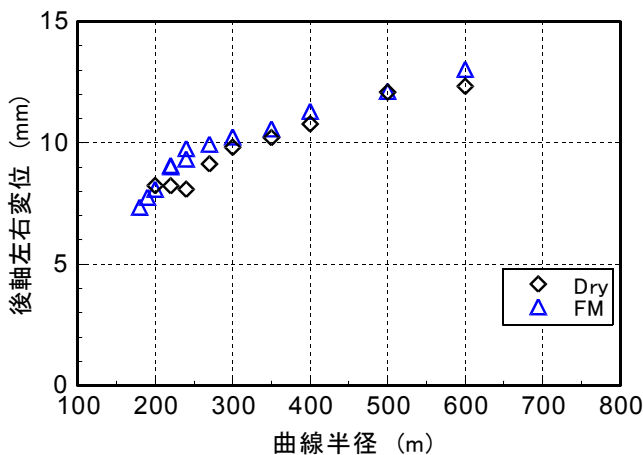


図5 後軸左右変位

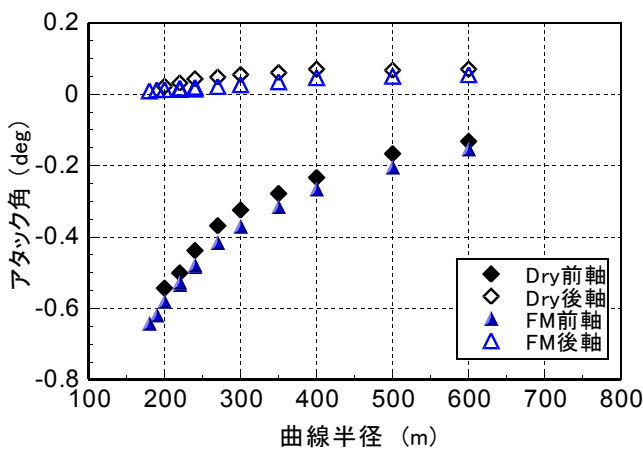


図6 アタック角

各輪軸のアタック角について図6に示す。前軸は曲線半径が小さくなるにつれて輪径差が獲得できなくなるためアタック角が反操舵方向(マイナス)に大きくなり、後軸ではいずれの曲線半径においてもアタック角はほぼ生じていない。前軸後軸ともFMの有無による顕著な差異は見られないものの、前軸については摩擦調整により若干アタック角が増加する傾向が見られる。これは車輪/レール間の摩擦係数の低下により輪軸の接線力が減少したことによると考えられる。しかしながら、アタック角の僅かな増加にもかかわらず、図2で示されたように、FMに

よる横圧の顕著な低減効果が認められた。

以上より、摩擦調整の有無において、各走行曲線とも軌条輪と輪軸間の左右変位やアタック角、すなわち輪軸の姿勢には大きな変化が現れていないことが確認された。

3. 4. 消費電力量の変化

台車試験設備の主モータの消費電力量を図7に示す。消費電力量は摩擦調整により低減されており、グラフの傾きから、さらに急な半径200m以下ではさらにFMの効果が顕著に現れるであろうと推測できる。

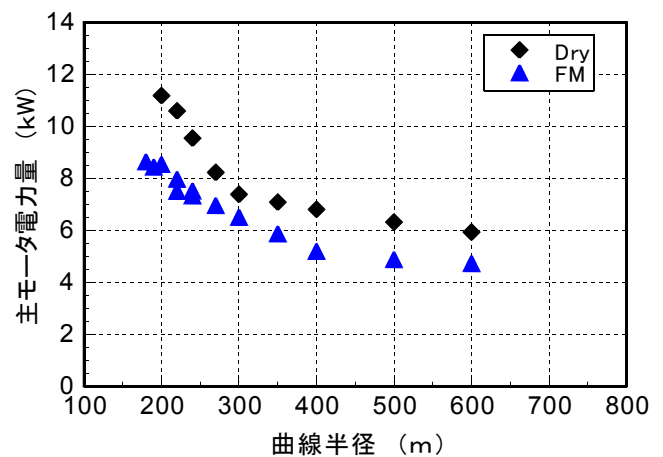


図7 消費電力量

3. 5. 繰り返し走行試験結果

FM噴射前後の影響を調べるため、直線→半径240m曲線→直線の試験を繰り返し、7回目と8回目の間でFMを噴射した結果、脱線係数及び電力量をプロットしたものを図8及び図9に示す。

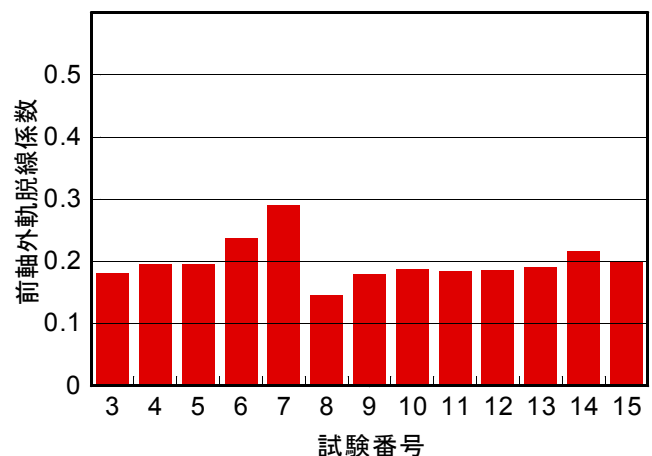


図8 繰り返し走行試験結果(脱線係数)

FMの供給のない試番3から7にかけて脱線係数が急激に増加しているのに対して、FMの噴射後の試番8の値は急激に減少して、最初の試番3の値程

度になっている。また、その後は試験を繰り返しても増加は緩やかであり、FM の効果の持続性が認められる。主モータ電力量についても、FM の噴射時点で減少することがわかる。

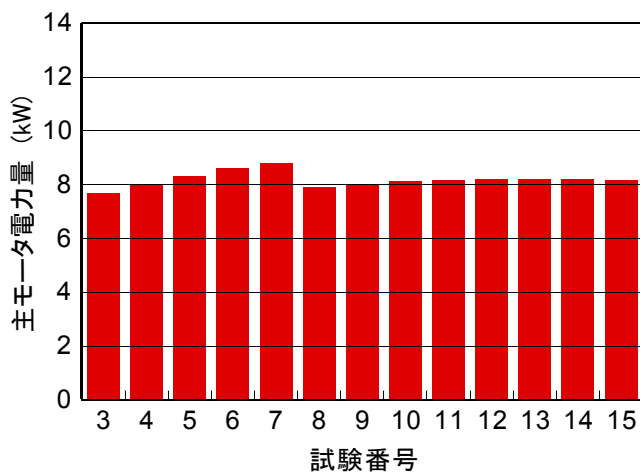


図9 繰り返し走行試験結果 (消費電力量)

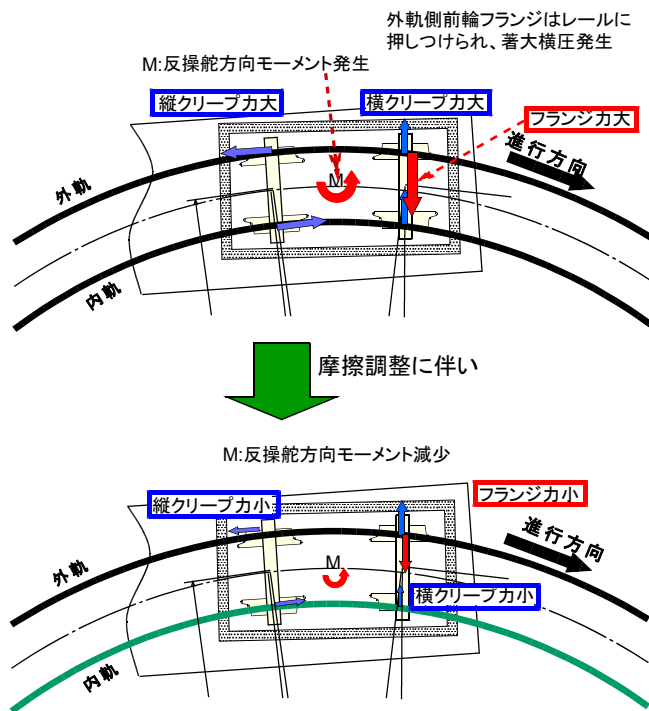


図10 摩擦調整による性能向上のメカニズム

4. 考察

先頭軸外軌に発生するフランジ力には、主として前軸のアタック角による横クリープ力と、後軸の輪径差不足による縦クリープ力が関係している。急曲線では後軸の左右変位が減少するため、台車が反操舵方向へ回転し、前軸のアタック角を一層増大させる。同時に、後軸の縦クリープ力は、台車を反操舵方向に旋回させる接線力のモーメントとして働き、

これに釣り合うように前軸外軌横圧 (フランジ力) を発生させている。摩擦調整の有無により輪軸の姿勢に大きな差が現れていないことから、車輪/レール間の摩擦係数が低下したことによりクリープ力が低減し、曲線旋回性能が向上したと考えられる。すなわち、後軸内軌側のクリープ力の低減によって後軸の接線力が減少し、台車を反操舵方向に旋回させるモーメントが減少したことと、前軸内軌側の横クリープ力が低減したことの両方から、前軸外軌側の横圧が減少したと考えられる。図10に本メカニズムのモデルを示す。

また、摩擦調整材の効果の持続性については、FM 噴射後、半径 240 m で 8 回走行した程度では、脱線係数、消費電力量等は噴射前の値に戻らず、低い値を保っていることから、持続性はあるものといえる。但し、実路線での持続性との関係については今後の課題である。

5. まとめ

今回、車輪/レール間摩擦調整の有無による台車曲線旋回性能の差異を各曲線半径において評価した結果、摩擦調整を実施することにより、後軸縦クリープ力低減、前軸横クリープ力の低減等による前軸外軌側の横圧低減の効果を得られ、曲線旋回性能が向上するとともに、曲線通過時のエネルギー消費量低減効果があることが明らかとなった。さらに、摩擦調整による曲線旋回性能向上効果は曲線半径が小さいほど顕著に認められた。

また、摩擦調整材の効果については、一定の持続性は確認されたが、実路線での持続性との関係については今後の課題である。今後の課題としてこのほか、実路線におけるエネルギー消費低減量の推定、各曲線毎の最適な摩擦調整材供給量の明確化等が挙げられる。

参考文献

- 1) 留岡ほか、JRail'99, (1999),233
- 2) 留岡ほか、JRail'01, (2001),535
- 3) 松本ほか、JRail'02, (2002),321
- 4) 大野ほか、機講論, No.02-50, (2002),439
- 5) A. Matsumoto, et al., Proc. of the 6th International Conference of Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2003), (2003),327