

鉄道一般
車両
軌道
構造物
防災
電力
信号通信情報
材料
環境
人間科学
浮上式鉄道

弾性構造型合成制輪子で車輪のダメージを軽減する

鉄道車両は雨天時のようなレールが濡れた状態でブレーキを掛けると、十分なブレーキ力を得にくくなる場合があります。この原因として、レールと車輪の間あるいは制輪子と車輪の間の摩擦係数が水分によって低下することが挙げられます。介在する水分を除去する方法として、従来から硬質ブロックが制輪子に挿入されていますが、晴天時にはこの硬質ブロックが発熱して車輪へダメージを与える場合があります。そこで、硬質ブロックを用いることなく雨天時のブレーキ性能を確保し、さらに車輪へのダメージを軽減する合成制輪子を新たに開発したので紹介します。

鉄道車両の踏面ブレーキ

鉄道車両の踏面ブレーキは、図1のように基礎ブレーキ装置(☞参照)によって制輪子が車輪踏面に押し付けられることで摩擦力が発生し、ブレーキ力を得ています。搭載する制輪子は車両条件や走行する線区に応じて選定され、鑄鉄制輪子、合成制輪子、焼結合金制輪子などが用いられています。このうち、合成制輪子は多くの通勤電車などで使用されていますが、水分介在による摩擦係数低下の対策として金属系ブロックなどが制輪子に挿入されており、これが車輪へダメージを与える場合があります¹⁾。

モデルは水分除去のために金属系ブロックを挿入した既存の合成制輪子と、接触面圧が均等化するように考案した弾性材型および弾性構造型の3種類です(図2)。図中の単位GPaの数値は圧縮弾性率(☞参照)を表し、数値が高いほど硬いことを意味しています。

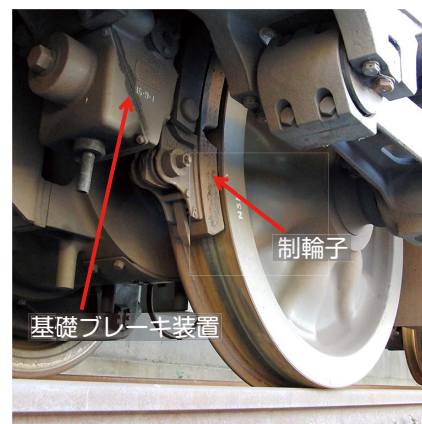


図1 鉄道車両の踏面ブレーキ

制輪子の応力解析

制輪子と車輪の接触状態を把握するために応力解析を実施しました。解析

☞ 基礎ブレーキ装置

摩擦材である制輪子あるいはライニングをそれぞれ車輪踏面、ブレーキディスクに押し付ける装置を基礎ブレーキ装置と呼びます。一般的に、踏面ブレーキ方式にはユニットブレーキ装置やSJシリンダ装置が、ディスクブレーキ方式にはハサミ装置がそれぞれ用いられます。

☞ 圧縮弾性率

物質を圧縮して厚さを薄くするために必要な単位面積当たりの力を圧縮弾性率と呼びます。一般的には、ヤング率と言います。この値が大きいほど硬い物質であることを意味します。



嵯峨 信一
Shinichi Saga
車両制御技術研究部
ブレーキ制御研究室
副主任研究員
【専門分野】 制輪子、研磨子、車輪/レールの粘着問題



狩野 泰
Yasushi Karino
車両制御技術研究部
ブレーキ制御研究室
主任研究員
【専門分野】 機械ブレーキ装置、ディスク/ライニングの摩擦問題



芳賀 昭弘
Akihiro Haga
前 車両構造技術研究部
車両運動研究室
主任研究員
(現 鉄道国際規格センター計画課長)
【専門分野】 車両運動、乗り心地、路面形状の適正管理



中橋 順一
Jyunichi Nakahashi
車両構造技術研究部
車両運動研究室
主任研究員
【専門分野】 車両運動、車輪/レール接触問題

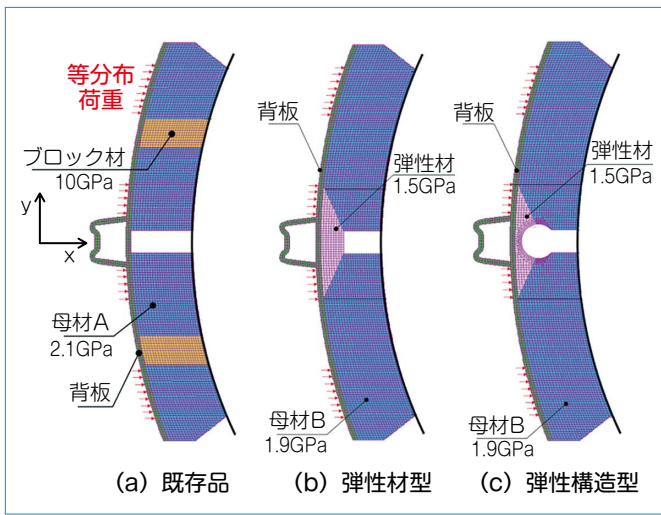


図2 応力解析モデル

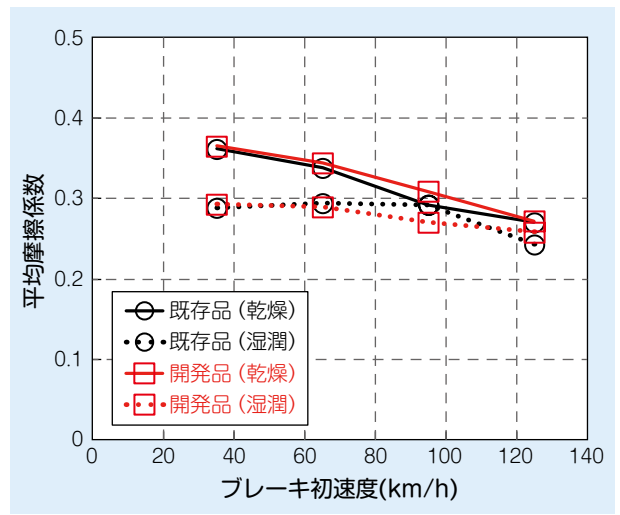


図4 摩擦係数の測定結果(常用ブレーキ)

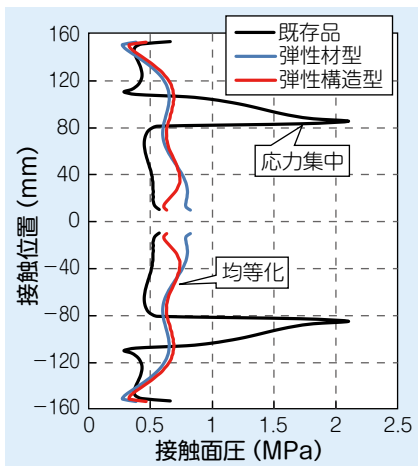


図3 接触面圧の解析結果

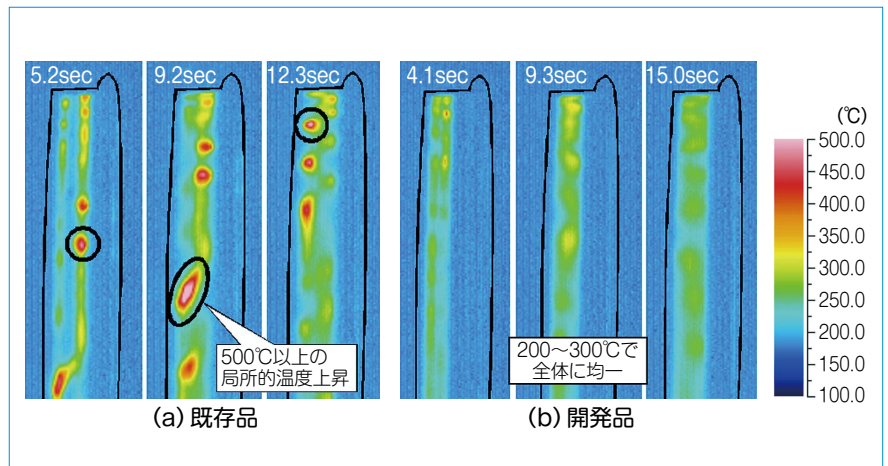


図5 各時刻における踏面温度の比較(非常ブレーキ)

車輪との接触面圧の解析結果を図3に示します。既存品におけるブロック材の圧縮弾性率は母材より約5倍高いため、ブロック部に応力集中が発生しています。一方、考案した制輪子は圧縮弾性率の均一化と中央部に配置した弾性材により応力集中が緩和されています。さらに、弾性材型よりも弾性構造型は中央部における接触面圧の均等化が図られているため、弾性構造型をベースに制輪子の開発を行いました。

台上試験

摩擦係数

開発した弾性構造型合成制輪子を用いて台上試験を実施しました。常用ブレーキにおける平均摩擦係数の測定結果を図4に示します。この結果から、開発品は水分除去の金属系ブロックを

挿入しなくても既存品と同等の摩擦係数が得られることがわかりました。

車輪踏面温度

車輪踏面に発生する熱き裂などのダメージは、ブレーキ中の踏面温度と密接な関係があります。このため、乾燥条件におけるブレーキ中の車輪踏面温度について、高速サーモカメラを用いた測定を実施しました。各時刻の温度分布を図5に示します。既存品は500℃以上の温度上昇が局所的にみられますが、開発品は均一な温度分布となり、最高温度は300℃程度へ抑制される効果が確認されました。

走行試験

既存品および開発品を搭載したブレーキ性能試験を実施しました。2両編成の特急型気動車を供試編成(図6)と

し、先頭軸と第3軸にそれぞれ4ℓ/分の散水を行い(2軸散水)、最高速度120km/hから非常ブレーキを作用させました。

ブレーキ距離

測定したブレーキ距離について、勾配および初速度による補正を行ったブレーキ距離の平均値を図7に示します。乾燥条件に対する湿潤条件でのブレーキ距離の延伸率は、平均値で初速度30km/hおよび60km/hが約20%、90km/hが約17%、120km/hが約6%と小さく抑えられました。

また、開発品のブレーキ距離の最大値はいずれも初速度120km/hで乾燥条件が550.3m、湿潤条件が550.6mであり、2軸散水という過酷なレール湿潤条件下においても600m以下に停止できることを確認しました。

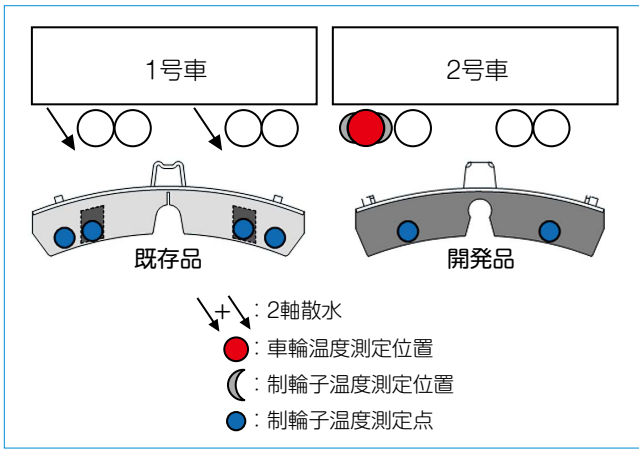


図6 走行試験編成

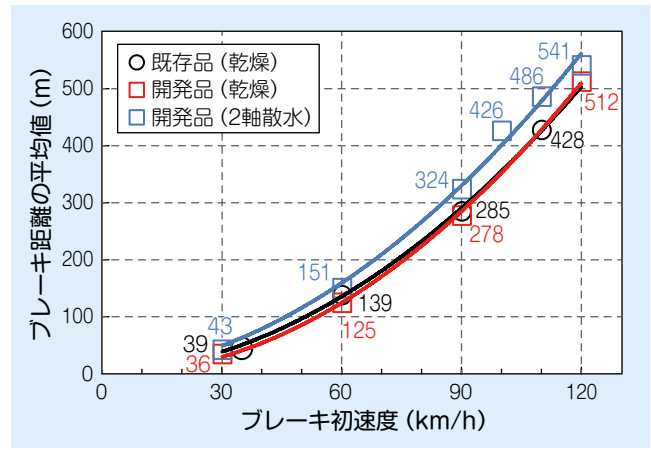


図7 ブレーキ距離の結果

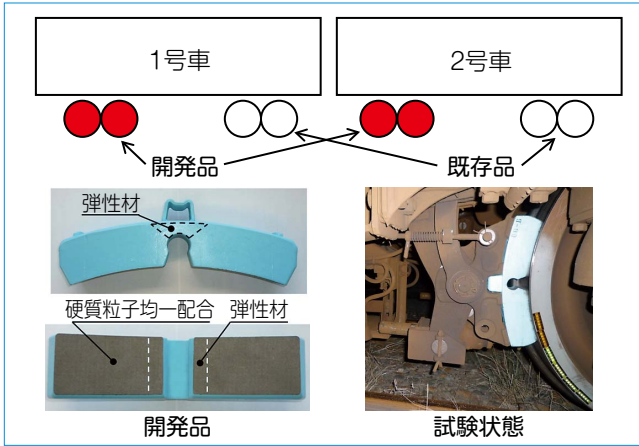


図8 長期耐久試験編成

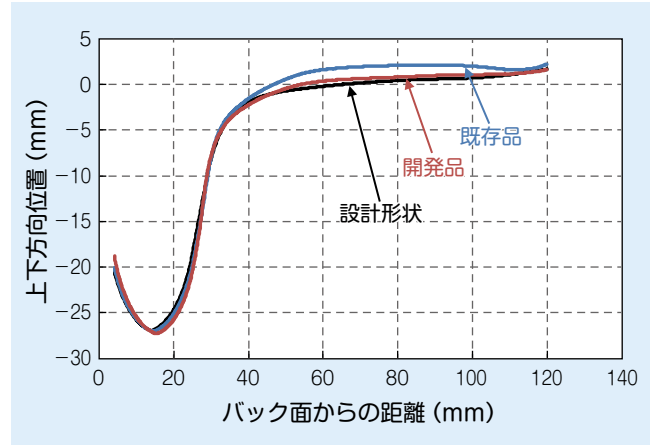


図9 推定摩耗形状の比較 (8万 km 走行後)

各種温度

制輪子の温度は摺動面の10mm直下に熱電対を挿入して測定しました。ただし、湿潤条件では散水の影響で試験回数を重ねる度に温度が低下したため、乾燥条件で評価しました。全試番を通した制輪子温度の最大値(乾燥条件)は、既存品が170℃(初速度60km/h)、開発品が111.2℃(初速度120km/h)であり、開発品の温度が低い結果となりました。また、いずれの試番も制輪子の目安温度である250℃以下で、試験後における開発品の摺動面は顕著な荒損もなく、良好な状態でした。

車輪の温度は反フランジ側のリム部にサーモラベル(☞参照)を貼り付けて測定しました。試験終了後の入庫時におけるサーモラベルの指示値の最大は、既存品が220℃、開発品が170℃であり、制輪子温度と同様に開発品の温度が低い結果となりました。また、

いずれの試番も車輪の目安温度である300℃を下回ることが確認されました。

長期耐久試験

開発品の制輪子を営業車1編成中の半分の台車に搭載し、車輪踏面形状などの各種調査結果から車輪踏面へのダメージ軽減効果について長期的な評価を行いました(図8)。

また、通常的車輪削正周期である約4万kmを走行した後の車輪踏面形状を基に、車輪摩耗形状推定ツール²⁾を用いて8万km走行後の摩耗形状についても推定し、評価を行いました。この推定ツールは、走行距離が異なる複数の摩耗形状データをデータベースに

蓄積し、車輪幅方向に0.1mm間隔毎に線形補間したものを線形回帰することにより任意の走行距離における車輪踏面形状を推定するものです。

推定した形状の比較を図9に示します。既存品の摩耗形状には制輪子の摺動幅にわたって凹摩耗の傾向がみられますが、開発品では車輪凹摩耗の発生が抑制されています。

摩耗形状による走行安定性の評価

解析条件

車輪踏面形状を設計する際には車輪踏面の曲率がレール上面の曲率より小さくなるように形状を決定し、かつへ

☞ サーモラベル

温度の変化に応じて表面の色が変化するようにした示温材です。一旦、色が変わると元に戻らない性質を有しています。シールのように測定したい対象物体に貼り付けることができます。幅広い温度変化を把握したい場合には、各温度範囲に対応したサーモラベルを必要数貼る必要があります。

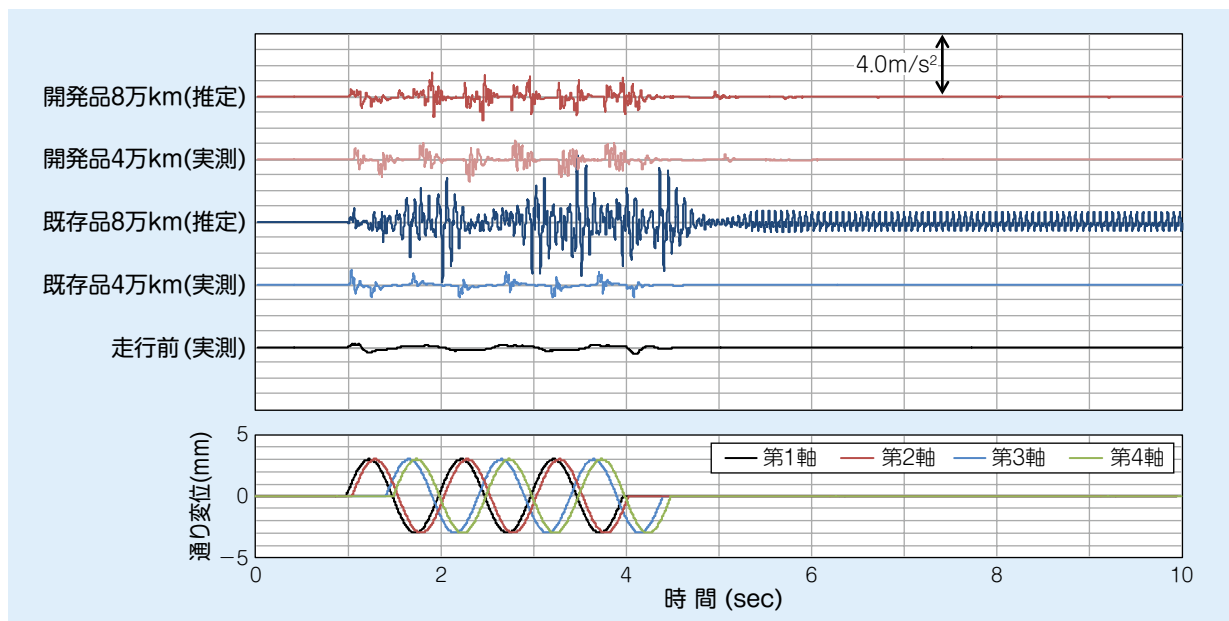


図10 振動加速度(進行前位台車枠)の解析結果

ヘルツ圧(☞参照)の増大と2点接触を回避するのが一般的です。しかしながら、累積走行距離や通過トン数(☞参照)の増加により、車輪やレールの摩耗が進むと、車輪/レール間の接触点が2点となる場合があります。特に凹摩耗が進み中立点近傍の2点接触が発生すると走行安定性に影響を与える可能性があります³⁾。

そこで、前述の実測および推定による踏面形状を用いて2点接触を考慮した車輪/レール間の接触点解析を行い、その結果を用いた車両運動シミュレーションにより走行安定性を評価しました。レール断面は60kgレールの設計形状、車両運動シミュレーションに用いた

車両モデルは振り車両の1両としました。

解析結果

走行安定性の評価は、直線区間を速度120km/hで等速走行中の車両に対して、第1~4軸の順に連続した通り変位(1Hz, ±3mm, 3波, ☞参照)を与え、その応答を台車枠の左右振動加速度(進行前位台車)と比較しました。図10に解析結果を示します。

既存品を搭載した台車における8万km走行後の推定踏面形状では、全振幅で約2m/s²の左右振動加速度が通り変位通過後も持続して発生します。これは凹摩耗に起因した自励振動と考えられます。

一方で、開発品を搭載した台車における8万km走行後の推定踏面形状で

は、通り変位通過直後に左右振動加速度が収束しています。

これらの結果から、開発品による車輪凹摩耗の抑制効果は、走行安定性に寄与するものと考えられます。

おわりに

開発した弾性構造型合成制輪子は、レール湿潤時のブレーキ性能確保に加えて、熱負荷の低減によって車輪のダメージを軽減する効果を有しています。これらの優れた特性により、安全性を確保するとともに、車輪踏面形状の維持による走行安定性(乗り心地)の向上や車輪削正周期の延伸によるメンテナンスコストの削減が図れるものと期待しています。RRR

☞ ヘルツ圧

2つの物体が荷重を受けた状態で接触した際には、接触部分がともに変形して接触面が生じます。このとき生じる接触面積が物体に対して十分に小さく、また変形が純粋な弾性変形である場合をヘルツ接触と呼びます。接触面の圧力分布は理論式で表され、ヘルツ圧と呼ばれます。

☞ 通過トン数

ある地点のレール上を通過した車両の総重量を通過トン数と呼びます。一般的に、通過トン数が多いほど軌道へのダメージが大きいことを意味します。こうした理由からレールの耐用年数は通過トン数で評価されています。

☞ 通り変位

長さ10mの糸をレールの側面に張った際の糸の中央部とレールとの水平距離、すなわち左右方向の変位を通り変位と呼びます。また、通り狂いとも呼ばれます。通り変位があると車軸の転向が発生し、横圧や車体左右振動の発生と増大を引き起こします。

文献

- 1) 半田和行, 森本文子, 深貝晋也, 柿嶋秀史: 車輪踏面熱き裂の発生メカニズムと対策法, 鉄道総研報告, vol.25, No.10, pp.23-28, 2011
- 2) 斉藤憲司, 佐藤栄作, 下村隆行, 芳賀昭弘, 大戸伸一: 新形通勤電車の車輪摩耗傾向および車両運動特性, 鉄道総研報告, vol.21, No.7, pp.45-50, 2007
- 3) 中橋順一, 下村隆行: 車輪/レール接触位置の3次元探索手法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp.21-26, 2011