

S8-1-3 低速域・低すべり率域におけるレール/車輪間の過渡的粘着特性

[機] 〇白 官錫, [機] 桃園 聡, [機] 京極 啓史 (東京工業大学)

[機] 中原 綱光 (東京工業大学), 陳 樺 ((財) 鉄道総合技術研究所)

Transient Traction Characteristics Between Rail and Wheel under Low Velocity and Low Slip Ratio

Koan-Sok BAEK, Member (Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 O-okayama Meguro-ku, Tokyo 152-8552)

Satoshi MOMOZONO, Keiji KYOGOKU, Tsunamitsu NAKAHARA, Member (Tokyo Institute of Technology)

Hua CHEN (Railway Technical Research Institute)

This paper describes an experimental investigation on transient traction coefficient using a twin disc rolling-sliding frictional machine, which simulates the actual contact condition of rail and wheel under the low slip ratio and low velocity. As a result, with increasing sliding distance, traction coefficient increased linearly at first and reached to a peak, and then decreased a little and became steady. Thereafter surface roughness and hardness decreased up to reaching the peak of traction coefficient. During traction coefficient decreased after the peak, surface roughness and hardness increased rapidly by wear on the rolling-sliding contact surface. Moreover, the primary factors, which traction coefficient increased immediately after a test start, were associated with surface roughness, hardness, and such boundary films as oxide film, reaction film.

キーワード: トラクション係数, 過渡的, レール/車輪, トライボロジー, 表面粗さ, 硬さ

Keyword: Traction coefficient, Transient, Rail/wheel, Tribology, Surface roughness, Hardness

1. はじめに

列車が急曲線を低速走行する際には乗り上がり脱線を生じる危険性が存在する。2000年3月8日に営団(現、東京メトロ)日比谷線で発生した列車脱線事故の後に行われた事故調査において、列車の通過頻度や気温・湿度の雰囲気などによって摩擦(トラクション)係数が大きく変化することが発見された⁽¹⁾⁽²⁾。急曲線通過の時間は短く、すべり率も1%以下の場合が多いので、レールと車輪間の実質のすべり距離は短く、その粘着現象は過渡的だと考えられる。従来のトラクション係数の研究はトラクション係数とすべり率の関係で示された定常特性であり、ある固定されたすべり率でのトラクション係数の時間的变化及びすべり距離に関する研究は見られない。したがって、本論文では低速域・低すべり率域の走行におけるレールと車輪間の過渡的トラクション係数に及ぼす影響因子について調べる第一歩として、実際のレールと車輪の接触条件を模擬した2円筒転がりすべり摩擦力試験機を用いて実験を行った。

2. 実験装置及び方法

2.1 実験装置

転がりすべり摩擦力試験機の諸元を表1に示している。本試験機は駆動側と制動側それぞれに独立に回転させることができる2.5kWのサーボモーターが装備されており、両者の回

転速度の差によりすべり率を設定することができる。制動側モーター部はX-Y方向に移動可能なリニアガイドで浮動支持され、ロードセルを用いて摩擦力のX-Y方向成分をそれぞれ測定できるようになっている。また、本試験機には環境雰囲気作成装置が附属しており、密閉したチャンバ内の試験片周辺の気温及び湿度を制御できるようになっている。試験片に加える荷重(接触面圧)はコイルばねによって駆動側の軸を制動側の軸に押さえつけることにより与えた。試験片は実際のレール(JIS 60N)の頭頂面から切り出したパーライト組織を持つ炭素鋼で、その寸法は直径30mm、厚さ8mmである。実際のレールと車輪間の接触現象と近くするために、制動側試験片には円筒面に、駆動側試験片には曲率半径40mmのクラウニングが施されている。このために接触状態は線接触ではなく楕円接触になっており、試験片どうしの片当たりを防ぐとともに小さ

Table 1 Performance of experimental apparatus

Rotational speed	0~4000rpm
Contact load (Herzian contact pressure)	0~0.2kN (0~1260MPa)
Slip ratio	0~5%
Attack angle	-3°~+3°

な荷重で大きな面圧を生じさせることができる。

2.2 実験方法

実験条件については、一般的に新品レールの場合 1000MPa、摩耗されたレールの場合 500～700MPa 程度のヘルツ最大接触面圧であると言われている。そこで、本実験ではヘルツ最大接触面圧 800MPa (接触荷重 53N) を基準にした。速度については低速状態を再現し、かつ Dry 状態での接触の時に発生する試験機の共振現象を避けるために 1.26m/s (800rpm) を基準にした。またレール周辺の気温及び湿度についてはそれぞれ 30℃、60%RH を基準にした。すべり率についてはレールと車輪間のすべり状況及び試験機の性能を考慮してすべり率を 0.7% に基準にして実験を行った。実験方法は実験を行う前に本試験機の気温や湿度と転がり案内面の起動摩擦を安定させるために試験片を装着しない状態で 30～40 分ぐらい運転させてから実験を行った。試験片については、実験を行う前に超音波洗浄機を用いて試験片の表面を洗浄した後で、転がり接触による硬さの変化を把握するためにピッカース微小硬度計により硬さ測定を行った。さらに、NanoFocus 社の光学式 3D 表面形状測定システムを用いて接触面の表面粗さを計測し、接触表面を 3D で観察した。そして実験終了後も同様に、試験片の硬さと表面粗さを計り、実験前後を比較した。摩擦力は X-Y 転がり案内面に設置したロードセルで検出されて、A/D コンバーターを通して PC に入力される。

3. 実験結果及び考察

3.1 すべり距離によるトラクション係数の変化

図 1 は接触面圧 800MPa、転がり速度 1.26m/s (800rpm)、すべり率 0.7%、チャンバ内の気温 30℃、相対湿度 60%RH である場合、すべり距離によるトラクション係数の変化と振動の様子を示している。そして各部分についての表面粗さと硬さの変化を図 2 に、すべり距離が増加している時の接触面の表面状態の変化を図 3 に示している。ここで図 1 の図中に示し

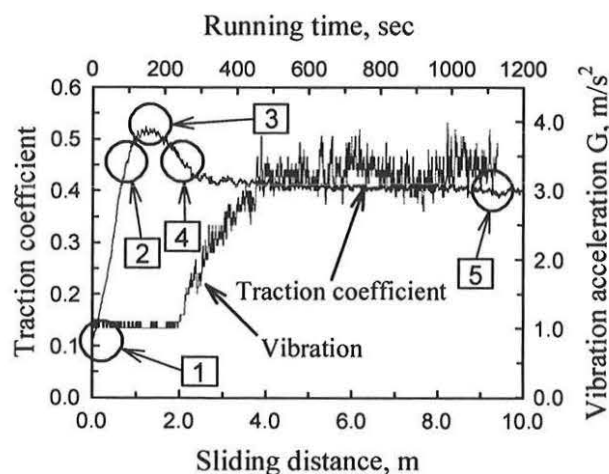


Fig. 1 Relationships of traction coefficient and vibration acceleration for sliding distance

た番号と図 2、3 に示した番号が対応している。(1) は試験開始前、(2) は試験開始後、トラクション係数が頂点となる前の区間、(3) は頂点の区間、(4) は頂点を過ぎて減少する区間、そして (5) はトラクション係数が一定になる区間に分けた。各部分の接触面の表面状態の観察、表面粗さ、硬さなどを把握することにより、すべり距離による粘着特性を把握することができる。図 1 で見ると、トラクション係数が直線的に急激に増加して頂点に到達した後減少する時から振動が急激に増加することが分かる。これはトラクション係数が頂点を過ぎて減少する時から摩耗が始まることを意味している。そして、図 2 と図 3 を見ると、接触面の表面が (1) → (2) → (3) と進行するとともに表面粗さと硬さが少し減少し、表面は弾性変形をしている。しかし (3) → (4) → (5) と進行して行くと表面は凝着摩耗が進行し、表面粗さは増加し、また加工硬化により硬さが急激に大きくなるのが分かる。ここで、結果を考察するために、金属における乾燥摩擦 (固体摩擦) に対する Bowden-Tabor の摩擦モデル理論⁽³⁾を用いる。トラクション係数は junction growth により接触界面と内部のせん断強度比 k によって、次式で表される。

$$\mu = k / \sqrt{\alpha(1 - k^2)} \quad (1)$$

ここに、 α は Von Mises 降伏条件の定数である。

式(1)で $k < 0.2$ の場合は junction growth が無視できて、次式で表される。

$$\mu = \tau_c / H_{eff} \quad (2)$$

ここに、 τ_c は平均せん断強度、 H_{eff} は平均有効硬さである。

式 (2) で示されるトラクション係数は、粗さ突起接触域における二つの材料強度物性値であり、有効せん断強度と有効硬さで表される⁽⁴⁾。(1) → (2) の進行では、すべり距離の増加とともに試験片表面の酸化膜などの表面膜が破壊され、それによって、界面のせん断強度が増加するため、式 (1) のせん断強度比 k が増加し、有効硬さ H_{eff} と同じ傾向を示す硬さ H_v が

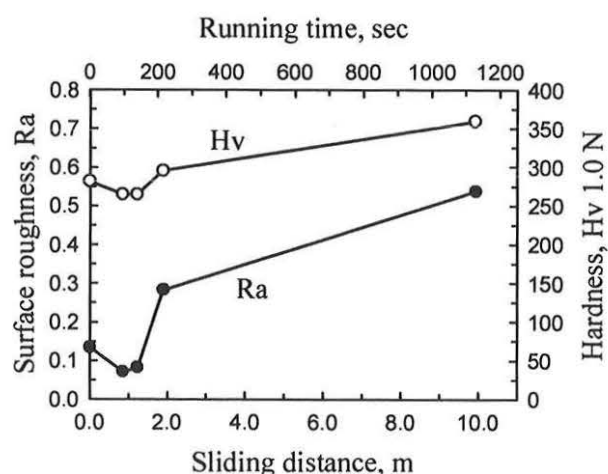


Fig. 2 Variation of surface roughness and hardness in each position

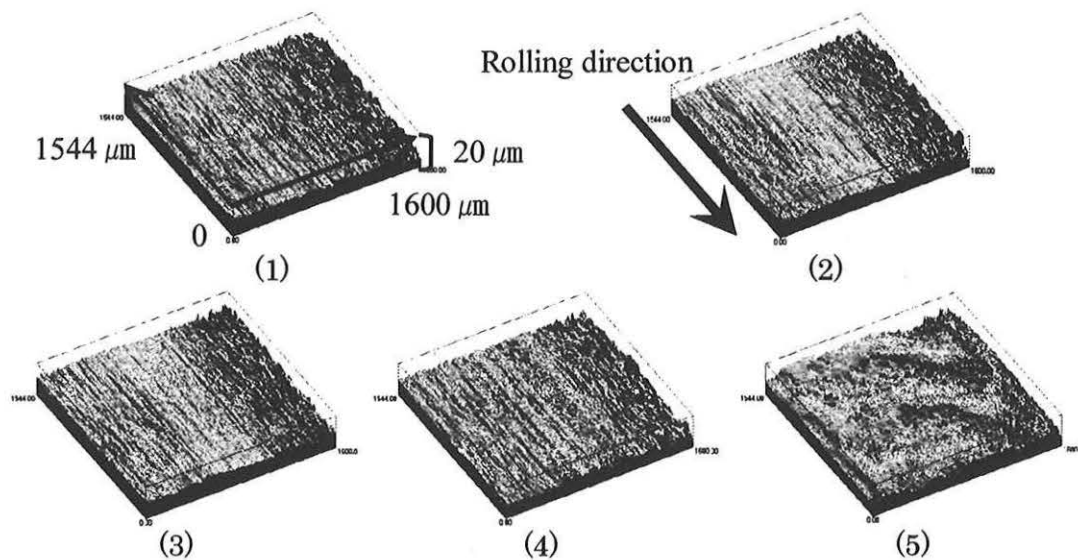


Fig. 3 Variations of contact surface for sliding distance

若干減少しても、トラクション係数が増加したと考えられる。そして、(2) → (3) では硬さの変化はあまりないが、破壊された酸化膜の一部が表面層に埋め込まれる⁽⁶⁾ことによってせん断強度比 k の増加が押さえられることによってトラクション係数の増加が止まる。(3) → (4) では表面層の塑性変形に伴う加工硬化により硬さが増加するため、トラクション係数は減少したと考えられる。(4) → (5) では表面膜の破壊と酸化などによる修復が定常になり、加工硬化も徐々に飽和して一定になるためにトラクション係数がほぼ一定になると考えられる。

3.2 すべり率によるトラクション係数の変化

図 4 は接触面圧 800MPa、転がり速度 1.26 m/s (800rpm)、チャンバ内の気温 30°C、相対湿度 60%RH の条件下で、すべり率が変化した場合の転がり時間に対するトラクション係数の変化を示している。すべり率が 0.0% の場合は、トラクション係数がほとんどゼロに近い値で一定である。そしてすべり率が増加するとトラクション係数の曲線の形が図 4 のようになっていくことを確認することができる。またすべり率が大きい 4.0%、5.0% の場合は、トラクション係数が頂点に至って少し減少した後、また増加することが分かる。これは後に述べる図 3(5) のようにうねり状の摩耗痕(波状摩耗と思われる)が激しく生じ、それによりトラクション係数が増大し、また振動と騒音も大きくなったものと考えられる。図 5 は最大トラクション係数 ($\mu_{\max}$) 及び一定値に達したトラクション係数 (μ_s) とすべり率及びすべり速度の関係を示している。すべり率が 0.7% ぐらいで最大トラクション係数は約 0.53 の最大値となり、さらにすべり率が増加すると、トラクション係数は徐々に低下する。そして一定値でのトラクション係数も最大トラクション係数と同じ傾向が見られる。ただし 4.0%、5.0% の場合、走行時間が増加しながら摩耗痕が激しくなってトラクション係数

が増加するので、すべり距離 5m の時の値を一定値とした。

3.3 転がり速度の変化によるトラクション係数の変化

図 6 は接触面圧 800MPa、すべり率 0.7%、チャンバ内の気温 30°C、相対湿度 60%RH の条件下で、転がり速度を 0.31m/s (200rpm) から 5.03m/s (3200rpm) まで変化させた時のトラクション係数のすべり距離による変化を示している。駆動側及び制動側モーターが回転して一定速度になった時のトラクション係数は 0.1~0.2 であり、そこから直線的に増大して頂点に到達した後、急激に減少している。そして 0.31m/s を除いたすべての転がり速度で、トラクション係数はすべり距離が約 2m で一定になることが分かる。また、転がり速度が増加するほど最大トラクション係数が低くなっていることも分か

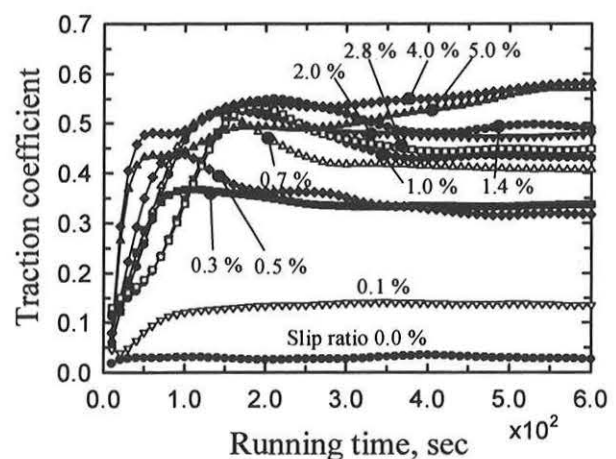


Fig. 4 Effect of slip ratios on relationship of between traction coefficient and running time

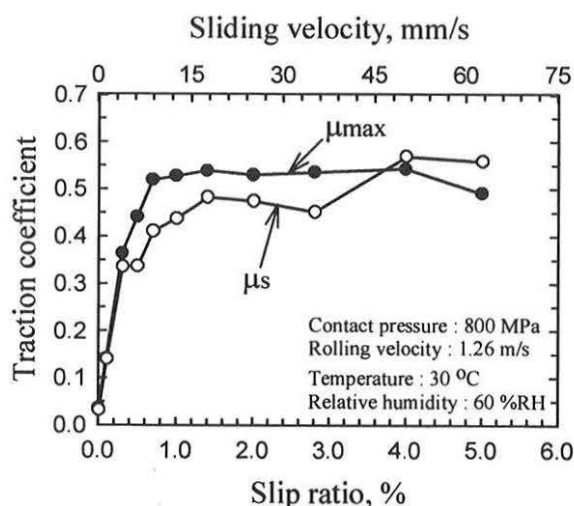


Fig. 5 Relationships of maximum and saturated traction coefficients for slip ratio and sliding velocity

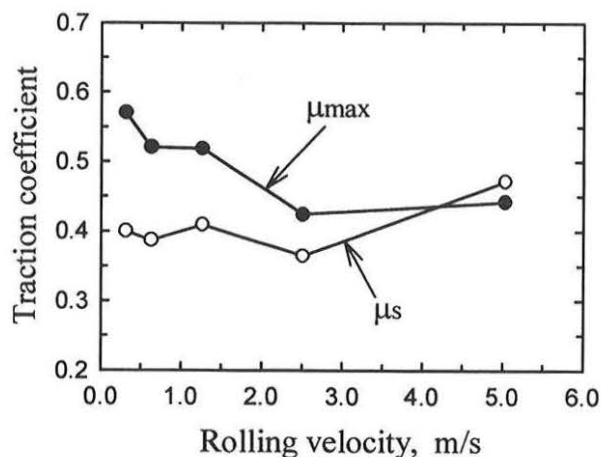


Fig. 7 Relationships of maximum and steady traction coefficients for rolling velocity

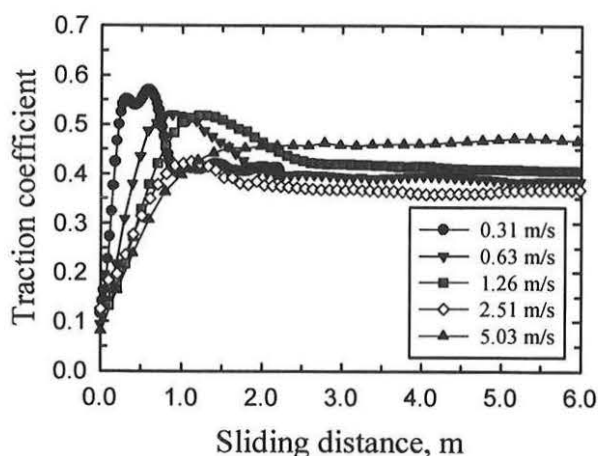


Fig. 6 Effect of rolling velocities on relationship of between traction coefficient and sliding distance

る。図7は、図6での転がり速度の変化において、トラクション係数が頂点に至った時の値、すなわち最大トラクション係数と一定値に達したトラクション係数を示している。最大トラクション係数は転がり速度が増加することによって減少し、一定値に達したトラクション係数も減少することが分かる。ただし5.03m/s (3200rpm) の場合、装置の振動によってトラクション係数のばらつきが大きくなっており、測定値の信頼性が低い。

4. おわりに

低速域で低すべり率域の走行において、鉄道のレールと車輪間の粘着特性を転がりすべり摩擦試験機により模擬実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

1. トラクション係数は、すべり率が0.3%より小さい場合は単調に増加し、その後一定値に達する。そして、すべり率が0.3%以上ではあるすべり距離で頂点を持つ。その後0.3~2.8%では一定値になり、2.8%より大きい場合は再び徐々に増加する。
2. 転がり速度が増加するにしたがってトラクション係数は減少し、その時の最大トラクション係数は0.42~0.57の範囲であった。
3. 試験開始後、トラクション係数が頂点に至るまで表面粗さ及び硬さは少し減少して、頂点でトラクション係数が減少する時から接触面の摩耗が速くなり、表面粗さや硬さが急激に増加する。

以上によりトラクション係数が直線的に急激に上昇する要因は、接触面の表面粗さと酸化膜、反応膜などの境界膜及び有効硬さの変化のためであると考えられるが、これらはナノスケールから数ミクロンまでの範囲の現象なので、今後そのレベルのより詳細な研究が必要である。

本研究に対し、ご支援頂いた(財)鉄道総合技術研究所軌道力学の石田誠室長に謝意を表す。

参考文献

- 1) 運輸省事故調査検討会：急曲線における低速走行時での乗り上がり脱線等の防止に関する検討会報告書、2004.3.
- 2) 石田誠，中原綱光：営団日比谷線脱線事故とトライボロジー，トライボロジスト，46，7 (2001) pp.548-555.
- 3) Bowden, F. P., and Tabor, D., The Friction and Lubrication of Solids, PART II, Oxford, (1964) pp.72-78.
- 4) 中原綱光：摩擦制御のための解析モデル・Bowden・Taborモデルの定量化，日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集，新潟(2003-11) pp.179-180.
- 5) Rice, S. L. et al., Wear materials 1981, ASME (1981) pp.47-52.