

氏 名	おお やま ただ お 大 山 忠 夫
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 61 年 12 月 10 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 38 年 3 月 東北大学工学部機械工学科卒業
学位論文題目	高速鉄道車両の車輪とレール間の粘着力におよぼす 接触条件の影響と粘着力向上に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 阿部 博之 東北大学教授 大宮司久明 東北大学教授 北條 英典 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学助教授 加藤 康司

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

現在方式の鉄道は、鋼製レール上を鋼製車輪が転動するシステムであり、これにより駆動力および制動力の伝達と車輪の案内の役割を果たしている。車輪とレール間で微小なすべりを伴いながら伝達される力を、鉄道では粘着力と称しており、これは車両の加速あるいは減速度を定める重要なファクタである。近年、鉄道車両の高速化とともに粘着力に対してより高度な要求が生じてきており、とくにブレーキの場合には安全性の点から減速度を高くとることが望まれるが、粘着力がその限界を定めてしまうため、粘着力向上方策を究明することが重要な課題となっている。従来から粘着の問題に関して数多くの研究がなされてきたが、高速域における粘着力の挙動を、とくに接触条件に注目してすべり率と接線力の関係から基礎的に検討した研究は殆どない。さらに、主としてブレーキ時における粘着力向上方策に関しても実用的成果は極めて少ない。このような背景から、本研究は、高速域において車輪とレール間の粘着力におよぼす接触条件の影響を明らかにするとともに、それをもとに粘着力向上方策を究明することを目的に行ったものである。

第2章 車輪とレール間の粘着力利用システムと接線力を伝達するころがり

接触理論

本章では、車輪とレール間の粘着現象をトライボロジーシステムとして考察することによって、その要因関係をより体系的にとらえることができた。その結果、粘着力の低下の要因を究明し、実用面における向上策に反映させるためには、表面条件等をコントロールした実験装置によるシミュレーションが必要であることを示し、その方法の提案を行った。

接線力を伝達するころがり接触理論については、従来からいくつかの理論が提案されてきたが、ここでは、その代表的な Carter, Poritzky, 穂坂, Heinrich, Bufler の理論をとりあげ、二次元弾性接触理論を用いて一部修正を含む詳細な検討を行った結果、最終結果をすべり率と接線力の関係で表せば、これらの理論解は全て Carter の理論解に本質的に一致することを明らかにした。また、その物理的説明を付け加え、さらに、実際面へ適用する場合の問題点を指摘した。

第3章 乾燥状態における粘着力の挙動

粘着現象を検討する場合の基本となるのは乾燥状態であるが、これまでその条件での高速域における系統的な研究は見られない。

本章では、乾燥状態におけるすべり率と接線力の関係ならびに粘着係数に対する諸要因の影響について、模型転動試験装置を用いた実験によって検討した。これまで、すべり率と接線力の関係について理論と実験の差が大きいと言われてきたが、本研究では 300 km/h までの速度領域において、速度、接触圧、試験輪の表面硬さ、表面あらさ、円筒接触における軸方向の接触長さ等を変え、また、動的接触荷重条件も付加して、系統的な実験を行い、前章で示した理論値と比較した。その結果、すべり率と接線力の関係に対して各種要因の中で接触圧のみが影響することを明らかにした。また、それらの関係を表す実験式を提案し、その係数が接触圧と関連づけられること、さらに、高接触圧条件では理論と実験がかなり良く合うことを示した。一方、従来から、粘着係数は速度が高くなる程低下するというのが通説であったが、乾燥状態では 300 km/h までの速度領域において、粘着係数の低下は殆ど認められないことを、初めて実験的に明らかにした。

第4章 水潤滑状態における粘着力の挙動

一般に、降雨・降雪時にレール面が水で濡れた状態では粘着力が低下すると言われているが、その機構は必ずしも明らかでなく、このような水潤滑状態において、高速域で系統的に行った実験結果はこれまで見られない。

本章では、模型転動試験装置ならびに大型転動試験装置によって 250 km/h までの速度領域で実験を行い、水潤滑状態における粘着力の挙動について考察した。その結果、水潤滑状態では、乾燥状態と異なりすべり率と接線力の関係ならびに粘着係数に対して、速度と表面あらさの影響が極めて大きいことを明らかにした。粘着係数は、速度が高くなるに従って急激に低下し、また、表面あらさが小さい程低い値を示すことが明らかとなり、このことから、接触面に形成される水膜の厚さと表面における突起高さならびに突起密度との関係から、粘着係数の挙動を明らかにする見通しが

得られた。また、水潤滑状態においても、高接触圧で表面あらしの大きい場合には、すべり率と接線力に関する実験値が理論値と比較的良く合うが、あらしが小さい条件で速度が高くなるに従って理論と実験の差が大きくなることが明らかになった。

第5章 水潤滑状態下のころがり接触面に対する弾性流体潤滑理論の適用と表面突起の接触

前章において、水潤滑状態では粘着係数が速度の上昇とともに低下し、また、表面あらしの影響も大きいことが明らかとなった。この結果から、高速域における水潤滑状態下のころがり接触では、水膜の形成が接触機構に大きな影響をおよぼしていると考えられるが、これまでそのような面から行われた研究は見当たらない。

そこで本章では、車輪とレールのような鋼製接触体の水潤滑状態に対して弾性流体潤滑(EHL)理論を適用するために、Herrebrughによる等粘度条件の解法を拡張して圧力-粘度係数を考慮した場合の数値解析を行った。それにより、膜厚形状および圧力分布を明らかにするとともに、本例のように弾性係数が高い接触体に、粘度および圧力-粘度係数が小さい流体が介在する場合に適用できる膜厚算出式を提案した。

さらに、表面あらしの突起形状を球面あるいは楕円体とし、突起高さ分布を正規分布と仮定したモデルにより、水膜を介して突起で支持する荷重を求める式を導き、第4章の実験結果に適用して、粘着係数と突起で支持する荷重との間に比較的良好な相関関係のあることを明らかにした。

第6章 微量な油による表面汚染状態における粘着力の挙動

粘着力の挙動に対して影響をおよぼす接触面の介在物として、前章までの水潤滑のほか、レールおよび車輪表面に付着している油や錆といった汚染物がある。

本章では、表面汚染の一例として、微量な油(流動パラフィン)が付着した場合の粘着力の挙動を、250 km/hまでの高速域における実験によって検討した。その結果、極微量な油の付着でも粘着係数が0.1以下、すなわち乾燥状態の1/2~1/3に低下するが、速度ならびに接触圧の影響は認められないこと、また、すべり率に対する接線力の立ち上がり勾配が緩やかで、理論との差がかなり大きいことを示した。一方、油が付着した場合の静摩擦係数と動摩擦係数を高接触圧条件で測定し、乾燥状態ならびに水潤滑状態における測定値と比較した。その結果、微量な油で汚染された場合ならびに乾燥状態のように流体潤滑効果を見捨てる条件では、動摩擦係数が粘着係数に比較的近い値となることを実験的に明らかにした。

第7章 各種表面状態における粘着係数と摩擦係数ならびにすべり率と接線力の関係についての総合的考察

本章では、各種表面状態における粘着係数と摩擦係数ならびにすべり率と接線力の関係について、それらの特徴をまとめて示すとともに、総合的に考察を行った。まず、静摩擦係数と動摩擦係数の関係を考慮して理論解析を行った結果、流体潤滑効果を見捨てる条件では、動摩擦係数が粘着係

数にかなり近い値となることを理論的に明らかにした。一方、水潤滑状態のように流体潤滑効果を見逃すことは、こもり接触条件下での流体膜の形成を考慮する必要があるため、粘着係数に対する速度効果はこれによって説明できることが明らかとなった。

また、すべり率と接線力の関係については、接触面内の固着領域とすべり領域にそれぞれ静摩擦係数と動摩擦係数を導入しても、摩擦係数一定と仮定した場合に比べて殆ど差のないことを明らかにした。その結果、理論値と実験値の差は、主として接線方向の接触剛性の低下によるものと結論づけられ、乾燥状態における接触圧の影響、水潤滑状態における表面あらしと速度の影響、微量な油による表面汚染の影響などは、全て接触剛性に対する影響として統一的に説明できることが明らかとなった。

第 8 章 増粘着ブロックによる水潤滑時の粘着力向上と車輪踏面損傷防止

従来から粘着力を向上するために種々の試みがなされてきたが、昔から用いられてきた砂まき以外には実用的に効果のある方法は見出されていなかった。また、砂まきは低速域の駆動時には採用されるが、高速鉄道車両には適用することができない。前章までの研究結果から、粘着係数は水潤滑状態において速度が高くなるとともに低下すること、また、表面あらしの影響が大きいこと、さらに、水膜を介して表面の突起で支持する荷重が粘着係数と密接な関係をもつことが明らかとなった。

これらをもとに、高速域において、とくにブレーキ時に粘着力を向上するための増粘着ブロックを開発した。このブロックは、ブレーキと同時に車輪表面に作用し、主として細かな表面の突起を多数形成する機構によって水潤滑時の粘着力を向上するものであるが、その効果は、大型転動試験装置による実験ならびに実車による試験で確認された。この増粘着ブロックの適用によって、実用面において粘着力の向上により巨視すべりを防止し、その結果、車輪踏面損傷の軽減を可能にし、さらに、新幹線車両の高速走行時における転動騒音を低減する効果のあることが明らかとなった。

第 9 章 結 論

本研究で得られた主な成果を総括すると以下ようになる。

- (1) 各種表面状態における粘着係数の挙動を究明した結果、粘着係数に対する速度効果が明確に認められるのは水潤滑状態であること、また、その場合に表面あらしの影響が大きいことを明らかにした。
- (2) 水潤滑状態下のこもり接触面に対して弾性流体潤滑理論を適用して数値解析を行い、膜厚の算出式を提案した。さらに、表面の突起形状ならびに突起密度を考慮したモデルにより、水膜を介して突起で支持する荷重を求める式を導き、水潤滑状態で得た粘着係数と突起で支持する荷重との間にかなり良い相関性のあることを明らかにした。
- (3) すべり率と接線力の関係における理論値と実験値との差は、接触領域内の摩擦係数のとり方にあるのではなく、接線方向の接触剛性の低下によるものであると結論づけ、それによって種々の影響を統一的に説明できることが明らかとなった。

- (4) ブレーキ時に車輪表面に作用することによって、細かな表面の突起を多数形成して水潤滑状態における粘着力を向上する増粘着ブロックを開発し、室内実験と実車による試験でその効果を確認した。この増粘着ブロックの適用によって、巨視すべりによる車輪踏面損傷を大幅に軽減することが可能となり、また、新幹線電車の走行騒音の低減にも効果のあることが明らかとなった。

審査結果の要旨

新幹線に代表される鉄道車両の高速化には、高加速および高減速時における車輪とレール間の粘着力の向上が不可欠である。しかるに、高速域の粘着特性はほとんど解明されておらず、粘着力の効果的向上の実用技術も確立されていなかった。

本論文は、300 km/hまでの高速域における車輪とレール間の粘着挙動を接触理論と実験に基づいて明らかにするとともに、粘着力向上方策について検討したもので、全編9章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、従来の多くのころがり接触理論を比較検討し、すべての理論が本質的にはCarterの理論に一致することを見出している。本論文の基礎となる理論的検討であり、理論の体系化に資するところが大きい。

第3章では、基本となる乾燥状態を対象にし、すべり率と接線力係数(=接線力/垂直荷重)に及ぼす諸要因の影響を詳細に検討している。そこでは、粘着係数(最大接線力係数)が速度によって変化しないことを明らかにしている。これは従来の通説を覆した新知見である。

第4章では、高速域における水潤滑下の粘着係数を種々の接触条件下で系統的に調査している。乾燥状態と異なって、速度と表面あらさの影響が極めて大きいことを示している。これらは実用的にも重要な結果である。さらに、突起の弾性変形を考慮した接触理論を提案しているが、これは水潤滑下の粘着係数を理解するために有効な試みである。

第5章では、車輪とレール間の水潤滑状態に対して弾性流体潤滑理論を適用し、水膜厚さを求める式を初めて導いている。さらに水膜を介して荷重を支える突起の役割を明らかにしている。これらは水潤滑下のころがり接触の基本となる関係式である。

第6章では、車輪及びレールに付着した油が粘着力に及ぼす影響を実験的に調べ、極微量の油が粘着係数を大幅に低下させること、一方、速度や接触圧の影響は少ないことを示している。これらは実車両の粘着係数の評価に役立つ結果である。

第7章では、前章までに明らかにされた各種表面状態における実験的及び理論的結果の特徴をまとめて示すとともに、相互の関連を総合的に論じている。

第8章では、前章のまとめに基づき、増粘着ブロックを開発、改良し、実験と実車試験を行ってその有効性を確認している。高速車両の低騒音で安定な走行を可能にしている有用な方法である。

第9章は結論である。

以上要するに本論文は、高速、高加速、高減速時における車輪とレール間の粘着特性を初めて明らかにしたもので、その応用として、粘着力の向上方法を考案して巨視すべりの防止と車輪踏面損傷の軽減を可能にしており、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。