

氏名（本籍） ^{たき} ^{かわ} ^{みつ} ^{のぶ}
瀧 川 光 伸（東京都）
学位の種類 博士（工学）
学位記番号 乙第 844 号
学位授与の日付 平成 26 年 3 月 20 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目 曲線外軌レールの表面損傷に関する研究

論文審査委員 （主査）教授 野口 昭治
教授 萩原 慎二 教授 溝口 博
教授 向後 保雄 教授 佐々木信也

論文内容の要旨

1. 曲線外軌レールに発生する損傷の種類

(1) きしみ割れ，ピッチング，ゲージコーナシェリングについて

近年，曲線外軌レールのゲージコーナ部に損傷が発生して，レールの保守管理に苦慮している実情がある．そこに発生している主な損傷は，きしみ割れ，ピッチング，ゲージコーナシェリングに分類されている．

(2) きしみ割れ等の発生傾向（軌道条件，レール表面発生範囲等）

きしみ割れとして管理している損傷がどのような曲線（曲線半径別，曲線内のおもな発生範囲，軌道検測車で測定している横圧の発生傾向）で発生しているかについて調査した．その結果，曲線半径 800m 以下の曲線で主に発生しており，その箇所には熱処理を行ったレールが敷設されていた．あわせて，レール表面におけるき裂の発生範囲についても調査し，レール頭頂面中心よりゲージコーナ側であることを確認した．

(3) 最近の外国鉄道での事例紹介

海外では特にヨーロッパにおいてレール表面損傷の割合が多く，イギリスでは 2000 年にハットフィールドで発生した脱線事故の原因がきしみ割れ (Head checks) と言われており，きしみ割れの発生原因や対策に関する研究が盛んに行われるようになった．

2. 軌道と車両の変遷

(1) JR になってからのレール表面損傷の変化（シェリング(直線)→きしみ割れ(曲線))

レール交換の主な原因として、以前はシェリング（転がり接触疲労傷）が多くの割合を占めていたが、首都圏では周期的なレール削正の取り組みにより、その割合が減少してきている。しかしながら、以前とレール交換の全体数量が変わっておらず、その原因がきしみ割れであることが統計データから確認できた。

(2) JRになってからの車両構造の変化（車重、台車、車輪形状の変更）

JRになってから車両重量の軽量化、車輪形状の変更やスピードアップが行われた。きしみ割れが問題になってきた時期と首都圏の車両の変遷を整理すると、軽量車両の導入時期と一致する結果が得られた。

(3) 外軌レール潤滑手法の変化

JRになってからの車両更新にあわせて、外軌レールの潤滑手法が車上式塗油（鉱油系）を中心に行われるようになった。以前は曲線レール摩耗抑制のため地上式塗油（グリース系）が中心におこなわれてきたが、車上式に変更になってから新たな損傷（ピッチング）も問題になっている。しかしながら、きしみ割れの発生原因とは異なっていた。

3. レールの損傷管理ときしみ割れの関係

(1) 超音波によるレール探傷ときしみ割れの関係

現在のレール検査は、主にレール探傷車という工事用車両を使用して、超音波をレール頭部から入射して行っている。その超音波探傷ではレール表面付近が不感帯となるため、きしみ割れ探傷としての十分な性能が得られない。

(2) きしみ割れのレール内部き裂状況

現在のきしみ割れ管理方法（検査基準、超音波探傷）だけでは、ゲージコーナ付近の損傷を起点とするレール折損の予兆を見逃す恐れがあった。以前は、目視検査により表面き裂の長さを管理していれば問題ないということになっていた。しかしながら、きしみ割れのレール内部き裂状況を調べると、その内部き裂は連続的につながっており、場合によってはレール底部方向に向かうき裂も見られ、レール折損に至る可能性を否定できなかった。

(3) レール表面撮影装置とフェイズドアレイ探傷法の適用検討

きしみ割れに対する超音波探傷の補助手段として2種類の手法を検討した。1点目の手法は、きしみ割れき裂の発生状況と大きさが確認できる探傷車搭載型の撮影手法について開発をした。2点目の手法として、フェイズドアレイ探傷法を利用したきしみ割れの横裂深さを測定できる探傷器を開発した。レールのあご下部から超音波を入射する二探触子法を採用しており、連続的に探傷できることが特徴となっている。2013年度中に各支社に配備され横裂深さの探傷管理に活用される予定である。

4. 実験によるきしみ割れ発生の要因分析

(1) レール・車輪転動試験装置と摩耗による模擬状況の確認

きしみ割れの発生要因や対策法を検討するために、二円筒式のレールと車輪を模擬した実験装置（転動試験装置）を利用することを検討した。その前段階として、転動試験装置と実際のレール・車輪間に生じる現象についての検証を摩耗実験により行った。レール試験輪の摩耗量と実現象のレール摩耗量を分析して、本実験装置の有用性を確認した。

(2) きしみ割れ発生箇所（営業線）における軌道動的測定

きしみ割れの再現実験を行うために、営業線における曲線（曲線半径 800m）で軌道動的測定（輪重、横圧、アタック角など）を実施した。その結果、転動試験に与える条件として輪重 50kN（ラジアル荷重）、横圧 10kN（スラスト荷重）、アタック角 0.1° （ねじれ角）に決定した。

(3) きしみ割れの再現実験と発生要因分析（アタック角や横圧の影響）

レール・車輪間を模擬した有限要素モデルを利用して、営業線の測定結果から転動試験装置に与える条件（ラジアル荷重、スラスト荷重）を求めた。その後、その条件を転動試験装置に与えてきしみ割れの再現実験を行い、きしみ割れの発生状況を再現することに成功した。転動試験装置の回転数と実際のレール・車輪間が接触した回数（累積通過トン数）を指標に、きしみ割れき裂とはく離の発生する時期についても考察をした。きしみ割れのき裂の発生は回転数 100 万回未満（累積通過トン数 1000 万トン未満）、はく離の発生までには回転数約 800 万回（累積通過トン数約 8000 万トン）の時間経過が必要であった。また、この実験から、きしみ割れが発生するにはアタック角が必要であることも確認した。

5. きしみ割れ対策手法の検討

(1) レール材質変更による対策の検討

(1-1) 転動試験装置によるレール材質変更試験

転動試験装置により、曲線に一般的に使用されてきたレール（熱処理レール）と異なるレール材質（普通レール鋼（直線に使用）、ベイナイト鋼、過共析鋼、新材質 2 種類）について、回転数 1,000 万回（累積通過トン数 1 億トン）超えまでの実験を行い、きしみ割れのき裂とはく離の発生について相対的な評価を実施した。高強度の過共析鋼、シェリング対策用に開発されたベイナイト鋼および新材質 2 種類のレール材質が、これまで使用してきた熱処理レールと比較してきしみ割れのき裂とはく離に対して有効であることを確認した。あわせてゲージコーナ部の摩耗量についても分析を行い、普通レール鋼より材質硬度の小さいベイナイト鋼は、摩耗量が大きすぎることも確認をした。はく離状況と摩耗量から、営業線におけるきしみ割れ対策用レールとして過共析、新材質 2 種類の計 3 種類のレールを採用し、営業線にて試験敷設をすることにした。

(1-2)営業線における試験敷設と結果

過共析，新材質2種類および熱処理レールを2箇所営業線に試験敷設して経過を観察している。1箇所目の試験において，過共析レールについては，き裂進展が遅いことが確認されたが，シェリングに至る経過時間は熱処理レールとあまり変わらないという結果が得られた。2箇所目の試験箇所は，累積通過トン数で5000万トンを経過したところであるが，4種類のレール表面状態に大きな違いは観察されていない。

(2) レール削正による予防策の検討

(2-1)これまでのレール削正（日比谷線脱線事故による削正位置の制限）

2000年に発生した日比谷線脱線事故は，その要因の一つとしてレール削正作業を行った後のレール断面形状が挙げられている。そのため，社内にレール頭頂面上の削正範囲が限定され，きしみ割れの発生しているゲージコーナ部の削正ができなかった。その後，国土交通省の最終報告書から，レール頭頂面より5mm下までの削正が可能となったが，きしみ割れ対策としては不十分な削正範囲であった。

(2-2)レール削正範囲の拡大

きしみ割れの発生範囲や脱線に対する安全を担保しながら，順次削正できる範囲を8mm下まで拡大した。その結果，きしみ割れの発生している範囲（き裂発生範囲の99%）が削正でカバーできるようになった。

(2-3)レール削正周期と削正量の最適化

転動試験装置の結果や営業線での調査から，きしみ割れのき裂は累積通過トン数1,000万トン以下（回転数100万回相当以下）で発生することが今回の研究を通して確認されており，そのき裂の進展を抑制するための削正量や削正周期を求めた。現在，通トン5,000万トン（回転数500万回相当）毎のレール削正を実施しているが，現行の削正量ではきしみ割れき裂に対して十分でないことが判明したため，レール材質やレール形状の変更と組み合わせてレール削正量を定めるのが妥当であるとの結論を得た。

論文審査の結果の要旨

曲線外軌レールに発生する表面損傷であるきしみ割れに着目し，その予防策や保守管理の方法について研究を進めることは，鉄道輸送の安全・安定性を確保していく上で非常に重要である。本研究では，曲線外軌レールに発生するきしみ割れが多く発生するようになった歴史的・環境的背景を調査し，きしみ割れの発生条件，抑制対策の作成と検証までを実験を中心に行った。鉄道レールに関する調査や研究は，営業路線を使って日常営業の合間を縫って行われるために実験機会が少なく，大変貴重なデータが含まれている。本研究成果は，鉄道の安全やレール交換最適化によるコスト削減など，学術面以外においても貢献が大きい。

本論文は以下の6つの章からなっている。

第1章「緒言」では、本研究の背景および関連する従来の研究について述べ、本論文の目的と構成を示している。これまでのレール損傷を調査し、損傷件数や形態を分類した結果、近年きしみ割れの発生がレール損傷に占める割合が増加していることが明らかとなった。今後のレール保全において、きしみ割れの防止が重要であることを明確にしている。

第2章「レール・車輪間に影響する環境の変化」では、2000年以前にはきしみ割れが保守上の問題として挙がっていなかったことを鑑みて、レールや車両の変遷を調査し、その発生要因として考えられる環境変化について考察を行った。きしみ割れによるレール折損が2004年から見られるようになった。首都圏の路線で調査したところ、きしみ割れは曲線半径800m以下の緩曲線に多く存在しており、その区間には熱処理（HH340）レールが敷設されていることがわかった。さらに、トンネル内と屋外のレール損傷状況を比較することによって、きしみ割れがはく離に進展するためには、水の影響が大きいことを明らかにした。

第3章「レールの損傷管理ときしみ割れの関係」では、レールの保守管理方法について調査し、現在のきしみ割れの発生状況を考慮すると目視によるき裂長さの管理だけでは不十分であり、表面き裂の下に存在する水平裂や横裂に着目しなければならないことが明らかにした。そこで、特にレール折損に至りやすいきしみ割れのき裂から進展する横裂に対し、現状の探傷方法における課題を整理した上で、表面き裂の影響を受けずに探傷できる手法について、新たな方法を提案するとともにその有効性を検証した。レール表面画像撮影によるき裂長さやはく離状態について定量的に管理を行うための画像撮影法と画像処理方法の研究、レールのあご下部からのフェイズドアレイ探傷による横裂深さを検出できる探傷器の開発を行い、従来の方法と比較してきしみ割れの有無だけでなく、内部進展の様相まで明らかにすることができた。

第4章「実験によるきしみ割れの発生条件分析」では、きしみ割れの発生条件などについて考察をするために2円筒式のレール・車輪転動試験装置を用いて、実際の外軌レールで起こっているきしみ割れを再現できることを確認した。そして、きしみ割れ発生箇所における横圧は、軌道検測車の検測データから約10kNとわずかな値であり、応力的には摩耗が進みにくいという環境できしみ割れが発生するという疑問に対して、きしみ割れが発生するために必要な条件を実験的に探究し、きしみ割れが起こるためには、アタック角（車輪進行方向と曲線レール接線方向の角度ずれ）が大きく関与していることを明らかにした。

第5章「実験によるきしみ割れの発生要因分析」では、レール・車輪転動試験装置を用いて、きしみ割れを起こしにくい材料開発を行い、従来のレール材料よりも評価した材料（3種類）を用いた方がきしみ割れに対して長寿命を達成できることを明らかにした。これらの材料を用いて製作したレールを営業線に試験敷設しての実用実験も行っており、途中経過では現行使用されているレールと比較してき裂深さが浅く、レール交換までの時間を延長できそうであるという評価を得ている。さらに、材料以外の対策を併用してきしみ割れを防止する方法を検討している。きしみ割れは徐々に深く進行するので、交換基準に至る前に表層部を削り取ってしまうと、レール破損に至らない状態を保持することが可能で、レール交換周期を延ばすことができる。そこで、きしみ割れを起こしたレールの表層部を削り取るレール削正という観点からも検討を行い、適切なレール削正方法や削り量を提案している。レール頭頂面に当てる砥石角度を広げることによって、きしみ割れの発生範囲の99%の表面を削正できる方法を考案した。

最後に、第6章「結言」では、各章で得られた知見をまとめて、本研究を総括している。

研究内容を審査委員会で十分検討した結果、博士（工学）を授与するにふさわしい研究であることを審査委員会として認めることとなった。