

レール損傷管理技術に関する研究開発の現状

小 関 昌 信・片 岡 慶 太

鉄道のレールは列車荷重を支持するとともに、自然環境の中で雨や温度変化等の厳しい条件にさらされている。このような条件下でレールにき裂など損傷が発生すると、冬季の温度下降に伴い引張応力が増大し、損傷が進行し破断に至る恐れがある。このようなレール損傷事故を予防するために、現場においては適切にレールの検査や修繕を行っているが、一方でレールの信頼性を向上させるために、より確実な検査・管理方法やレールの品質改善などの研究開発が求められている。本稿では、研究開発の現況を紹介する。
キーワード：レール損傷，レール交換，レール探傷，レール削正，シェリング，きしみ割れ，摩耗

1. はじめに

鉄道のレールは走行する鉄道車両のガイドウェイとして案内する機能を有しているが、道路と異なり、面的な広がり狭く、極めて局所的な接触点（1円硬貨程度の面積）で車両の荷重を支持する線上の走行路の特徴をもっており、冗長性に乏しく、非常に高い信頼性が求められる使命を背負った軌道部材と言える。

レールは過酷な列車荷重の繰り返しにより、損傷、摩耗、疲労の後天的な症状が進行し、使用に耐えられない状態に達して、交換によりその使命を終える。定期的な検査により、破断に至る前に予防保全されているが、ごくまれに使用期間中に破断が発生する（図—1）。レールが破断して開口すると、レール中の信号電流が遮断され、信号機が停止現示となり、列車の運転中止の手続きがとられ、輸送の安定性が損なわれる。

過去の試験によるとレールの破断開口量が70 mm程度までは列車脱線の危険性はなく、管理基準上はより厳しい運転規制のルールを定め、安全性を確保しているものの、輸送安定性を損なう恐れがある。

また、レールは適切な管理を前提とした厳しい環境で使用される軌道部材であり、年間100億円以上のメンテナンスコストを要している。これは鉄道地上施設のメンテナンスコストの1割強を占めるとともに二酸化炭素に関わるライフサイクルアセスメント（LCA）上でも大きな地球環境負荷をかけ、軌道保守部門の8割をレールが占めているという推定もある。そこで、軌道部門において、輸送安定性のさらなる向上とメンテナンスコスト削減を目指して、レールの保全品質の

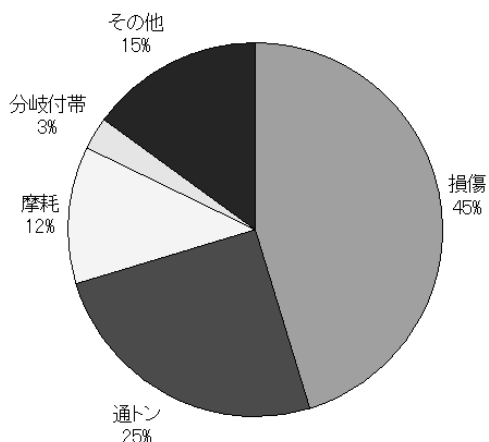
向上、耐用期間の延伸を目的とした様々な研究開発を継続しているところであり、本稿ではその概要を紹介する。



図—1 レール破断例

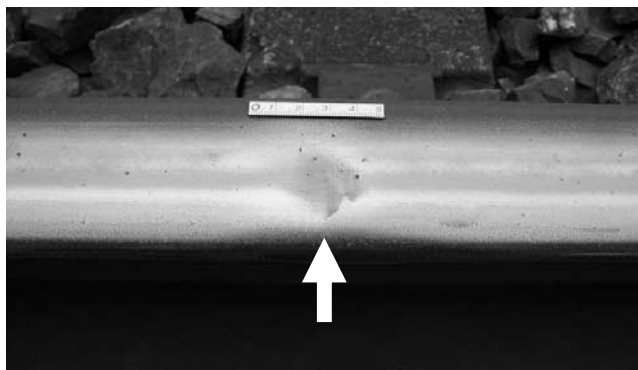
2. レール交換要因の実態

レールの耐用期間を決定させる要因は複数あり、主なものとして、レール継ぎ目部（溶接部を含む）の繰り返し引張応力による「疲労」、車輪とのこすれ合いによる「摩耗」、後天的に発生する「損傷（ひび割れ）」、鉄が水や酸素や酸などの作用により酸化し錆が進展する「腐食」やレール中を流れている電流が大地に漏れることにより鉄が電子を失ってやせていく「電食」を理由にレール交換が行われる。図—2に、レール交換数量の要因別比較を示す。



図一2 レール交換の要因別比較

第一の交換理由の「損傷」については、かつてはレールが先天的に欠陥を持っていたことが原因となることがあったが、最近ではレール製造の品質管理技術が向上したため、後天的な原因により発生、進展する場合が大多数を占める。日本ではこのうち、車輪からの転がり接触疲労損傷である「シェリング」が顕著である(図一3)。



図一3 レールシェリング

第二の交換理由の「通トン」は列車の累積通過トン数が疲労基準に達することによるレール交換である。累積通過トン数については、レール種別、レール継ぎ目種別で交換基準が定められている。国鉄末期に定められた基準によると、50 N レールでは、普通継ぎ目で通トン4億トン、溶接継ぎ目で6億トン、60 kg レールでは、各々6、8億トンとなっており、例えば、山手線では20年程度に相当する。この通トン基準は、継ぎ目部に発生する衝撃荷重による底部における引張応力の繰り返し回数によるもので、レール鋼における金属疲労に関するS-N線図によって決定される。

第三の交換理由の「摩耗」は、ゲージコーナーと呼ばれるレールの肩部の摩耗量と頭頂面の摩耗量による基準があり、前者は左右レール間隔を意味する軌間拡大

による脱線を予防するため、後者はレール断面積の減少に伴うレール剛性の低下による応力拡大や変位拡大を予防するために規定されている。摩耗は特に曲線区間で卓越し、曲線半径の小さい急曲線区間では摩耗がレール耐用年数を決定する最大の要因となっている。

3. 最近の研究開発事例紹介

レールに関わる背景や交換要因の実態について述べてきたが、輸送安定性のさらなる向上とメンテナンスコスト削減をめざして行われてきた研究開発事例をいくつか紹介する。

輸送安定性の向上については、レール損傷が進行してレールが破断し、列車が運転中止となってしまうことを予防するため、確実に損傷を発見し、傷の種類や大きさに応じて適切に管理することが肝要である。それに加えて、図一2にも示したように、レール交換要因の最も多くを占めているのが「損傷」であり、レール損傷の発生件数を抑える努力も必要である。また、レールの疲労寿命を延伸する取り組みや、レール摩耗を抑制させる取り組みも行っている。

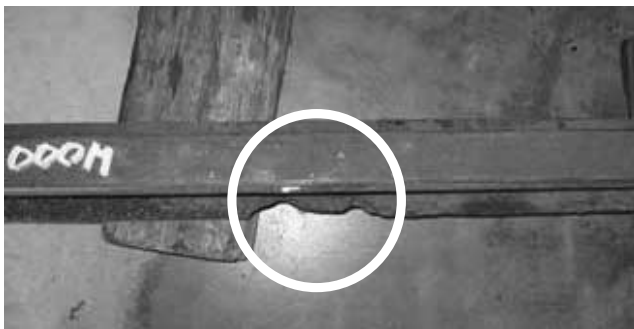
(1) レール損傷を見つける

レール損傷の探傷はレール探傷車(図一4)により超音波をレールに入射して検出している。最近ではレール探傷車の探傷能力が向上し、検出安定性の向上、探傷領域の拡大、検出対象傷の拡大が図られてきた。しかし、現在においてもレール断面全てを探傷できるわけではない。レール探傷における超音波はレール頭頂面から入射されるが、レールの断面形状上、レール底端部には超音波が達しないことから、レール底端部は探傷不能箇所となる。しかし、このような探傷不能箇所であるレール底端部に損傷が発生し、破断に至るといった事例が発生している。



図一4 レール探傷車

レール底端部に発生する損傷は主に、電食や腐食である(図—5)。レール底端部はレールをマクラギに固定するレール締結装置と接触しているが(砕石と接触する場合もある)、トンネル内の漏水や、踏切内に溜まった水が原因となって、このような接触箇所を經由し電流が地表に漏れることにより、レールの鉄原子がイオン化し、やせていくという現象が起こる。レールの全断面が露出している箇所では、目視により、電食・腐食の有無を確認することができるが、踏切内のように敷板等で覆われている箇所では、目視による確認が困難である。



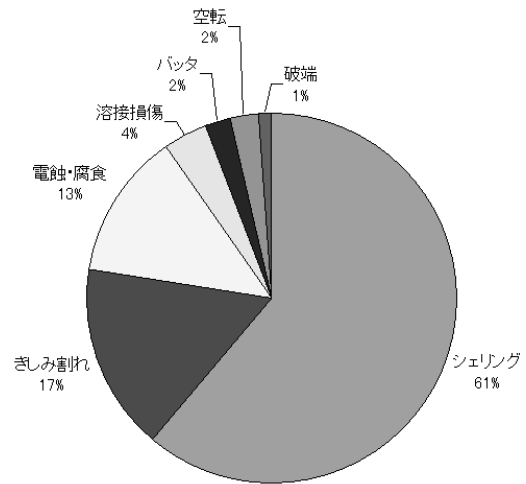
図—5 レール底端部の電食

探傷不能箇所であるレール底端部についても探傷できる手法の開発が期待されており、「ガイド波」と呼ばれる低周波超音波を用いた探傷方法の開発を進めている。このガイド波は平板や配管のような断面形状が単純な長大構造物の高速非破壊評価を行う手段として近年注目を集めており、パイプライン等の1次探傷にも用いられている。この方法は、ガイド波をレール底端部から入射し、レール長手方向に伝播させ、断面形状の変化点において反射してくる波の有無により、損傷の有無を判断するものである。レールのように複雑な断面形状を持つ棒状材料にも適用できることが確認されているが、敷設されているレールの場合、レール底端部がレール締結装置により強固に固定されており、締結装置による減衰やノイズをいかに排除していくかが今後の課題である。

(2) レール損傷の進みを予測する

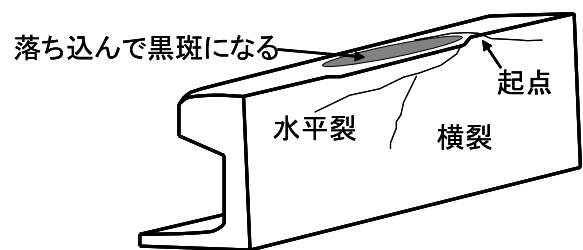
レール損傷の管理方法については、き裂が発生してから破断に至るまでの進展メカニズムは解明されておらず、従来からの経験則に基づく管理方法が基本となっている。しかし、安全性の向上のほかに損傷レール交換費用の削減、検査周期や判定基準等の見直しによる検査業務の適正化の観点からも、損傷の進展メカニズムの解明が必要となる。図—2にレール交換要因

を示したが、最も大きな割合を占める損傷について、さらにその内訳を示したものが図—6である。「損傷」によるレール交換の多く(6割程度)がシェリングによるものとなっている。



図—6 交換要因における「損傷」の内訳

そのため、シェリングの進展予測について確実にを行うことができれば、安全性の向上やレール管理の効率化に最も貢献できる。シェリング損傷では、図—3に示した黒斑の下に水平裂が存在している。この水平裂が時間の経過につれて、レールの内部へ向かうき裂に枝分かれすることがある。このき裂を「横裂」という(図—7)。横裂が進展すると、レールの強度が低下し、破断に至る恐れがある。



図—7 シェリングの模式図

横裂の進展については実験室レベルではある程度予測が可能となってきた。しかし、実際の現場では様々な要因があることから、現場から交換された損傷レールのき裂進展試験を実施することにより、き裂進展解析の推定精度をさらに向上させることが必要である。

(3) レール損傷の発生を予防する

レール交換要因の多くを占めるシェリングについては、その発生件数を抑える努力も必要である。従来から、シェリング発生機構の解明に関する多くの研究が

行われている。新幹線で使用されているレールについては、材料学的な見地からレール頭頂面下の金属組織を分析した結果、車輪の接触影響層が極めて浅いことから、接触影響を受けている層、つまりシェリングの核が生成される層を砥石により削る（以後、「削正」と記す）ことによって除去する措置が提言されていた。一方、在来線で使用されているレールの場合、接触影響層が深いため、削正をしても予防は難しいとされていた。

しかし、最近の研究により、レール頭頂面における車輪の接触影響層は、敷設状態が異なる場合においても、0.1 mm 程度の表層にあり、レール削正によりシェリングを予防できる可能性が示されている。また、在来線のシェリングは通トンにして5000万トン程度から微増していること、また実験的研究により5000万トン程度の周期で削正を実施することにより、シェリング抑制効果が期待できると推定されている。

上記の研究結果に基づき、2005年度から首都圏の通トン数の多い線区を対象に、シェリング抑制のためのレール削正を開始している。この削正については従来、主にレールの波状摩耗や溶接部の凹凸を削正し滑らかにするために投入していたレール削正車により実施している。レール削正車は、モータの駆動軸に直結した砥石を回転させてレールに当てることによりレールの表面を削ることができる（図—8）。



図—8 レール削正車によるレール削正の様子

レール表面の削正は、一度削正車が通過しただけで削正できるのではなく、砥石の角度を変え、複数回通過することにより正しい形状に仕上げる削正が可能となる。1回の削正車の通過のことを1パスというが、限られた列車間合いの中で、いかに長い延長を効率的に削正できるかはこのパス数に左右される。必要な削正量を確保した上で、いかにパス数を少なくして削正できるかが経済的な課題となる。このパス数については削正車に装備されている砥石の数にもよるが、試験削正を重ね、現在運用している基本的な16頭式（砥

石が16個あるという意味）の削正車の場合、4パスで必要な削正量が得られることがわかっている。図—9はレール削正前後の頭頂面の外観である。削正前に施したマーキングが4パス削正後に消えていることが確認できる。これによりレール頭頂面に砥石がまんべんなく当たっていることがわかる。現在は、削正面の仕上げを目的とした追加パスを組み合わせる削正を実施している。

シェリング抑制を目的としたレール削正についてはすぐに効果が発揮されるものではないが、今後もシェリングの抑制が達成されたか追跡調査していく必要がある。



図—9 レール削正前後の頭頂面

(4) レールの材質を変える

シェリング抑制方法として、レール削正を挙げたが、「レールの材質を変える」という観点からの研究も行われている。シェリングの発生を防止してレールの長寿命化を図るために、摩耗を適度に促進させて損傷起点となる接触影響層を自己除去するレールとして「ペイナイトレール」が開発されている。これは従来、レールの基本的な考え方とされていた「レールの高強度化」とは異なる考え方により開発されている。



図—10 摩耗交換したレール

また、図—2に示したように、レール交換の第三の要因は摩耗（図—10）であり、耐摩耗性レールとして頭部全断面熱処理レール（HHレール）を使用しているが、近年はHEレール（過共析レール）という耐摩耗性、対表面損傷性を向上させた熱処理レールが開発商品化されている。

（5）新しい損傷に挑む

前述したように、レールの管理方法を変える、あるいは材質を変えるなど、シェリングに対する研究は数多く行われてきた。図—6に示した損傷の内訳のうち、シェリングに次いで多いものとして、「きしみ割れ」がある。近年、緩曲線や直線と円曲線をつなげる緩和曲線区間の外側レールのゲージコーナー部（車輪が走行するレール頭部の角部）で、図—11に示すようなきしみ割れからはく離に至る傷が稠密線区を中心に多く観察されるようになってきている。

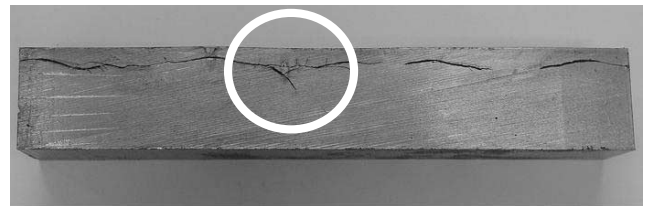


図—11 はく離を伴ったレールきしみ割れ

きしみ割れは以前からレール管理の対象であったが、はく離に至るような傷は、車両からレールに塗油している区間を除いてはほとんど観察されることはなく、きしみ割れのき裂長さの管理だけを行っていれば十分であった。しかし、最近では曲線半径が比較的大きく摩耗進みの少ない曲線で、はく離を伴ったきしみ割れが観察されるようになり、きめ細かな管理が求められている。

きしみ割れについては、これまで破断に至る事例が少ないため、シェリングほどは研究されていなかったが、過去の研究報告を参考にしながら、きしみ割れの発生とはく離傷に至る現象を分析し、きしみ割れの対策についても研究を行っている。

はく離が激しくなったきしみ割れの内部は、きしみ割れの下にできた水平裂がレール長手方向につながっている状態であり、その水平裂のつながり方によっては、レール底部へ向かって進むようなき裂が発生する



図—12 レール底部へ向かって進むき裂

可能性があることが確認された（図—12）。

また、レールのゲージコーナー部に発生するきしみ割れの下に水平裂が発生すると、レール頭部の反対側（フィールドコーナー側）に進展し、き裂が貫通してしまう場合があることも確認された。このような場合、レール頭部全体がはく離してしまう可能性も考えられる。すなわち、きしみのクラックだけであればレール破断に至る確率は非常に小さいが、はく離が生じてそのはく離から水平裂が進展した場合は、レール頭部表層全体の脱落やシェリングと同じように横裂によるレール破断に至る恐れがある。

最近のきしみ割れからはく離傷は、速度向上、車両構造の変化、車輪踏面形状の変更等が影響していると考えられる。そこで、レールと車輪間の疲労や摩耗に関する現象を評価するために製作された転動試験装置を使用して、きしみ割れ現象を解明するために各種実験を行っている。具体的には、車輪とレールの形状に着目したきしみ割れ発生要因分析を検討すると共に、レールの材質を変更した試験を行うことにより、きしみ割れ対策に有効なレール材質を見出していく予定である。

また、きしみ割れ自体はレール表面に発生し、レール探傷車による超音波探傷では検出しにくいことから、きしみ割れを早期発見するために、渦流探傷等の方法について検討すると共に、レール削正車を活用したきしみ割れ予防のための削正パターンを考案するつもりである。

（6）レールの疲れを抑制する

図—2にレール交換の要因を示したが、2番目に多いのが「通トン」である。これは、レールの溶接部の底部に発生する引張応力による疲労限度から交換基準が定められている。レールの溶接部は、溶接時の熱影響による軟化層や溶接金属の硬度差があるために、車輪が繰り返し通過すると、レール頭頂面に凹凸が発生し、進展する。また、レールの頭頂面に凹凸があると、より大きな応力が発生する。しかし、これまでの研究により、レール溶接部の凹凸量を適切に維持管理することにより、疲労寿命の延伸が可能であるということ

がわかっている。

具体的には、前述の16頭式レール削正車を使用した場合、敷設後の平均的な削正周期が5000万トンとなるように、4パス削正することにより、現行の通トン交換基準の2倍以上に延伸が可能であるとの結果が得られている。しかし、当面は2億トンだけ交換周期を延伸し、現場で検証しつつ本格的な周期を見直していく予定である。また、すでにある程度の通トン履歴のある既設レールの場合、特に大きな凹凸がある場合を除き、削正開始時の累積通トンが50 Nレールは5億トン以下、60 kgレールは7億トン以下であれば、2億トンの延伸が可能であることがわかっている。疲労寿命の延伸を目的としたレール削正を実施することにより、レールの信頼性の向上だけでなく、通トンレール交換の削減、つまりコストダウンも可能となる。

4. 今後の研究開発について

鉄道用レールをとりまく過酷な条件、それらを克服するためにどのような努力がなされているかについて

説明してきた。鉄道用レールの材質については、「傷が入りにくい」、「傷が進みにくい」、「錆びない」、「温度膨張しにくい」というのが理想である。しかし、価格、供給量の他、レールに求められる性能を満足できるかという面で、ハードルは非常に高いが、いずれもレールを保守管理する技術者の夢であり、今後も継続的に挑戦を続ける必要がある。

JCMA

[筆者紹介]

小関 昌信 (こせき まさのぶ)
東日本旅客鉄道株
JR 東日本研究開発センター
テクニカルセンター 課長



片岡 慶太 (かたおか けいた)
東日本旅客鉄道株
JR 東日本研究開発センター
テクニカルセンター



建設の施工企画 2005年バックナンバー

平成17年1月号(第659号)～平成17年12月号(第670号)

1月号(第659号)

建設未来特集

6月号(第664号)

建設施工の環境対策特集

10月号(第668号)

海外の建設施工特集

2月号(第660号)

建設ロボットとIT技術特集

7月号(第665号)

建設施工の環境対策—大気環境特集

11月号(第669号)

トンネル・シールド特集

3月号(第661号)

建設機械施工の安全対策特集

8月号(第666号)

解体・再生工法特集

12月号(第670号)

特殊条件下での建設施工機械特集

4月号(第662号)

建設機械施工の安全対策特集

9月号(第667号)

専門工事業・リースレンタル特集

■体裁 A4判

■定価 各1部840円
(本体800円)

5月号(第663号)

災害復旧・防災対策特集

■送料 100円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>