

## レール損傷管理技術に関する 研究開発の現状



瀧川 光伸\*



青木 宣頼\*

レール損傷を適切に管理することは、輸送の信頼性を確保する上で大変重要である。本稿では、現在、レール頭部に発生する損傷に関して、テクニカルセンターで取り組んでいる事例について紹介する。具体的には、きしみ割れの現状調査と発生メカニズムの実験的検討及びシェリングの下に発生することがある横裂傷の進展予測について紹介する。これまでの研究により、きしみ割れの発生箇所は熱処理レールが敷設されている緩曲線部に集中することや、アタック角がその発生に寄与することがわかった。また、横裂の進展予測については、レールの残留応力分布を明らかにすることにより、ある条件下での横裂進展シミュレーションが可能となることを確認した。

●キーワード：レール損傷管理、きしみ割れ、転動試験装置、シェリング、横裂

### 1. はじめに

レールは車輪との接触による疲労や材料欠陥により損傷が発生する。このレールの損傷を適切に管理できない場合、輸送障害や脱線などの安全問題につながる。テクニカルセンターではこれまでに新しいレール探傷車の開発などのレール損傷管理に対する技術開発を行ってきたが、ここでは最近取り組んでいるレール頭部に発生するきしみ割れと横裂（シェリング）に関する研究の現状について紹介する。

### 2. きしみ割れに関する調査・研究

#### 2.1 きしみ割れの現状

近年、在来線において、曲線半径が比較的大きい曲線区間の外軌レールに、図1に示すようなはく離を伴ったきしみ割れが多く見られるようになった。これまで、はく離に至るような傷は、車両から塗油を行っている区間を除きほとんど観察されず、大きな問題にはなっていなかった。しかし、近年、塗油を行っていない区間でもはく離に至る傷が観察され、その傷が原因によるレール交換が増加しているため、この現象に対する要因を分析し対策を検討することになった。

#### 2.2 きしみ割れの現状

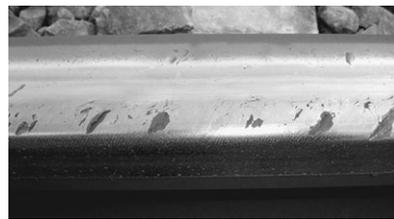


図1 はく離を伴ったきしみ割れ

はく離を伴ったきしみ割れのレール内部における損傷状態を確認するために、はく離が激しいレールの頭部中央をレール長手方向に切断した。その状況を図2に示す。これにより、はく離が激しくなったきしみ割れの内部は、内部に進展したき裂がレール長手方向につながった状態になっており、つながり方によっては矢印で示すようなレール底部に向かって進展する可能性のあるき裂の存在を確認することができた。このような方向に進むき裂は、レール破断に至る可能性も考慮する必要がある。



図2 きしみ割れの切断面（レール長手方向）

#### 2.3 きしみ割れ発生箇所の調査

きしみ割れの発生している箇所の特徴を捉えるために、レール探傷車の探傷データ分析、軌道検測車（East-i）の

横圧分析及び現場測定（輪重・横圧等）を実施した。

最初に、探傷データの分析結果を図3に示す。分析は、きしみ割れの発生が多い首都圏の5線区を対象にした。対象となった曲線数は上下線を合わせて約1100箇所になる。グラフの縦軸は調査した5線区の曲線延長に対してきしみ割れが発生している延長の割合を表している。図3より、曲線半径700～800mと400mの区間にきしみ割れが比較的多く発生していることがわかった。その原因として、曲線半径800m以下の外軌レールには、熱処理した硬いレールが使用されていることが関係していると考えられた。

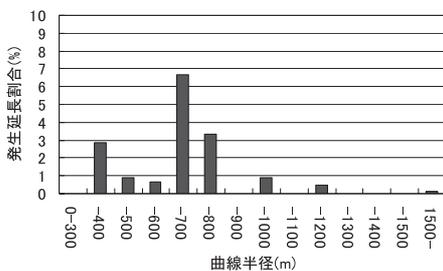


図3 曲線半径別のきしみ割れ発生延長割合

次に、きしみ割れの発生している箇所における横圧の大きさを、East-iの検測データから分析した。その結果を図4に示す。図より、熱処理レールの区間においては、10kN程度の横圧が多く発生していることが確認された。

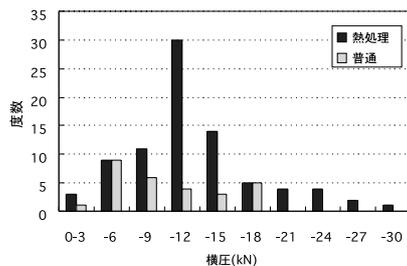


図4 East-iの横圧分析結果

最後に、現場測定の一例として外軌横圧の測定結果を図5に示す。測定箇所の軌道条件は曲線半径800mの区間であり、通過する車両はボルスタ付き台車の旧型車（普通、特急）とボルスタレス台車の新型車（普通、特急）である。車輪踏面形状は全て修正円弧踏面の車両である。図5より、ボルスタレス台車の新型車の方が、旧型車より横圧の大きい傾向が見られた。その値は、普通列車（約80km/h）において平均で4kN、最大で8kNであり、特急列車において平均で7kN、最大で10kNであった。East-iの検測及び地上測定により得られたこれらの値は、次の章

で説明する転動試験装置での実験条件を決める際の参考とした。

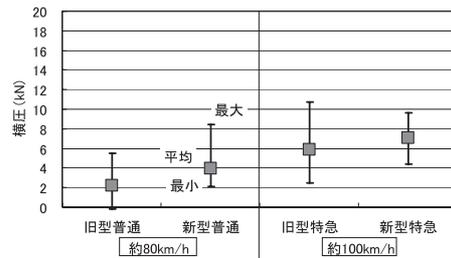


図5 外軌横圧の測定結果

## 2.4 対策の検討に向けた室内実験

探傷データの分析結果と地上測定結果から得られた情報をもとに、図6に示す車輪・レール転動試験装置を用いて、対策を検討するための室内実験を実施した。車輪試験片は実際の車輪の大きさの1/2、レール試験片は実際のレール幅の1/2サイズで製作されている。



図6 車輪・レール転動試験装置

この転動試験装置を用いて、きしみ割れを発生させる実験を、予備試験を含めて2回行った。最終的にはどちらの実験においても、はく離の伴ったきしみ割れを再現することができた。

1回目の予備試験では現状把握から得られた条件をもとに、アタック角（レールと車輪のなす角）を変化させながら行った。アタック角が0.0°の場合、800万回転まで回したが、実際のレールと同じようなきしみ割れは発生しなかった。しかしながらその後、アタック角を0.1°に変更すると、最終的にきしみ割れとはく離傷を発生させることができた。最初に発生したはく離傷を図7に、その時の実験条件を表1に示す。



図7 はく離傷を生じたレール試験片

表1 きしみ割れが発生した実験条件

レール試験片	材質	輪重	横圧	アタック角	車輪
JIS60	熱処理	50kN	10kN	0.1°	修正円弧

予備試験により得られた実験条件（表1）を使用して、2回目の本実験（JIS50N試験片使用）を行った。この本実験では、きしみ割れの発生及びはく離傷の発生に加え、最終的にはレール試験片頭部から部材の脱落が発生した。その時の状態を図8に示す。この時の傷の長さは17mmであり、試験片の大きさから実際の傷長さに換算すると34mmとなる。この長さは、きしみ割れの保守管理において「補強継目板を取り付けて計画的な交換を行う」ことになっており、傷の長さ管理としては妥当であることが確認された。

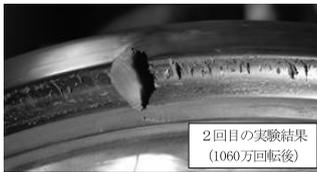


図8 きしみ傷（17mm）から部材の脱落

## 2.5 きしみ割れに関するまとめ

これらの実験から確認できたことを以下にまとめる。

- ・横圧だけではきしみ割れが発生せず、アタック角が必要であることが確認された。
- ・100万回転（通トン<sup>1</sup>1000万トン）未満できしみ割れが発生した。
- ・800万回転（通トン8000万トン）程度できしみ割れからはく離が生じた。
- ・1000万回転（通トン1億トン）を超えると連続的なはく離傷に進展した。

ただし、きしみ割れやはく離傷が発生するまでの期間は、この実験より長くなる可能性がある。その理由として、実験は各台車の2つの軸のうち、横圧の大きい軸だけの条件を与えて実施したため、実際の線路上より厳しい条件の実験となっているためである。この考察を証明するために、実験におけるレール試験片の摩耗量と輪重、横圧等の現場測定を行った箇所でのレール摩耗量の比較を行った。その結果を図9に示す。

図より、実際のレール摩耗量は試験片の摩耗量より3割

程度少なく、実験の方が厳しい条件であることがわかる。したがって、実験条件から実際のレールに起こる現象を考えた場合、傷が発生するまでの期間はある程度長くなる可能性があると思われる。

今後はこの実験条件を基本にして、レール材質を変更した実験及び横圧やアタック角を変更した実験を行い、きしみ割れの発生条件の検証やきしみ割れに有効なレール材質を提案する予定である。

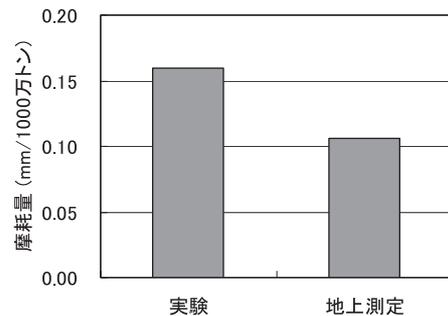


図9 試験片摩耗量とレール摩耗量の比較

## 3. レール横裂<sup>2</sup>管理手法の研究

### 3.1 研究概要

レール頭部に発生する横裂は、図10のようにレール破断に至る可能性があることから適切に管理することが重要である。そこでレール横裂の進展に寄与するレール内部の残留応力を明らかにするとともに、人工傷と実際の傷を用いて疲労試験を行い、傷の大きさによる横裂の進展状況を確認した。あわせて、これまでの知見と残留応力の測定結果を用いて横裂進展のシミュレーションを行い、疲労試験結果と比較してシミュレーションの妥当性を検討した。以下にその結果を報告する。



図10 横裂からの折損

### 3.2 レール頭部の残留応力<sup>3</sup>測定

レール頭部横裂が進展するには、引張応力が必要である。レールには車輪通過前後に発生するアップリフト、レール温度の変化による温度軸力、製造時、使用時に生

<sup>1</sup> 通トン：通過列車の荷重履歴      <sup>2</sup> 横裂：レール長さ方向に直角に折損する損傷  
<sup>3</sup> 残留応力：製造時、使用時に内部に発生した応力

じる残留応力により引張応力が発生する。柏谷等<sup>1)</sup>によると車輪通過前後にレール頭部に働く応力の振幅範囲を考えた場合、それぞれの応力の比率は、冬季においては概ねアップリフト15%、温度軸力30%、残留応力55%であり、レールの残留応力はレール横裂の進展に大きく影響する。実際のレール横裂の進展はレール使用中に発生する残留応力の影響を受けるため、新品レール、シェリングレール（横裂が発生しているレール）、使用履歴のあるレールについて測定を行い、残留応力の変化を調査した。

・新品レール

新品レール（50N、60kg）の測定結果を図11に示す。50Nと60kgの傾向に大きな違いは見られなかったが、全体の傾向としては、レール断面内でレール中心部が引張応力（+）、その両側が圧縮応力（-）になっている。

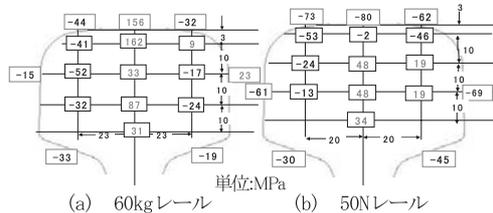


図11 新品レールの残留応力測定結果 (MPa)

・使用履歴のあるレール

使用履歴があり、傷が発生していないレールの測定結果を図12に示す。試験片はいずれも直線部で使用されていた普通レールである。レール表面と上層部では圧縮応力（-）が発生しており、その下部では引張応力（+）が発生していた。

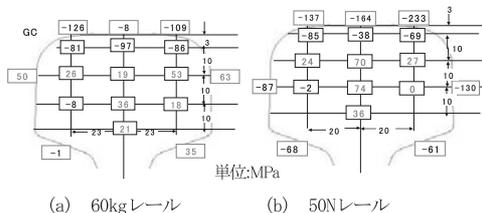


図12 使用履歴のあるレールの残留応力測定結果 (MPa)

・シェリングレール

シェリングが発生した50Nと60kgレールの測定結果を図13に示す。測定は横裂発生による応力の開放や、頭部の落ち込みによる衝撃荷重の影響を排除するため、シェリング傷の直前の部位で行った。シェリングレールは使用

履歴のあるレールと同様にレール表面と上層部で圧縮応力（-）が発生しており、その下部では引張応力（+）が発生していた。この引張応力が傷の進展に寄与すると考えられる。

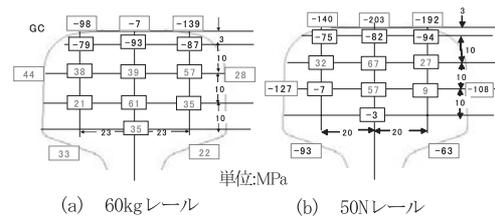


図13 シェリングレールの残留応力測定結果 (MPa)

以上の測定結果から、製造時にレール頭部中心部において引張応力（+）であったものが、レールと車輪が接触することによりレール表層部が圧縮応力（-）、その下部が引張応力（+）に変化することがわかった。また、シェリングレールと使用履歴のあるレールで残留応力の分布に明確な差異は見られなかった。

3.3 レール頭部横裂疲労試験

使用済みの60kgレールに横裂を模擬した半円形の人工傷のレールと実際の傷レールで疲労試験を行った。人工傷はレール頭部中央に半径30mm（2本）、25mm（2本）、20mm（2本）、15mm（3本）、10mm（2本）、5mm（2本）、実際の傷レールは傷深さ15mm（2本）、13mm（1本）、12mm（1本）、6mm（1本）の計18本について行った。試験は載荷能力200kNの油圧サーボ型疲労試験機を用いて、応力波形はサイン波、負荷荷重繰り返し周波数は7Hz、載荷荷重は最大147kN、最低10kNとした。この荷重は現場で列車通過時にレール頭頂部で測定された応力に、冬季のレール温度変化により発生する温度軸力を加味して設定したものである。試験はレール頭部を下側に向けた状態で、引張開口型（破壊モードI型）の傷の進展を想定して行った。

図14に疲労試験結果を示す。人工傷の深さ15mm以上の試験片（15mm①を除く）は載荷開始後比較的早期に破断した。15mm①と10mmについては1000万回に至る前に破断した。5mmの試験片は1500万回でも破断には至らなかった。その後強制的に破断して破面を確認したところ、疲労き裂の進展は見られなかった。また、同じ傷の深さでも試験片ごとに破断に至る繰返し回数にばらつきが見られた。

図15に破面の一例を示す。破面は人工傷を中心に扇状

に疲労域が広がり、深さ30～35mmを境にぜい性破面になっている。破断した試験片はいずれも深さ約30mmまで疲労域が広がっている。このことは実際の破断事例と合致している。

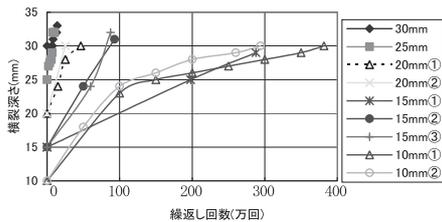


図14 疲労試験結果（繰返し回数と横裂深さ）

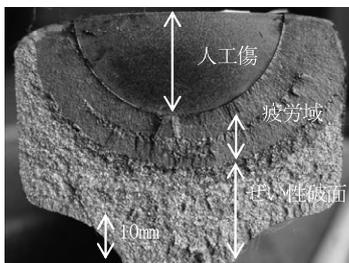


図15 破面（人工傷20mm）

### 3.4 シミュレーションと疲労試験結果の比較

図16に柏谷等<sup>1)</sup>の方法に基づくき裂進展の計算フローを、図17にフローを基にした横裂進展シミュレーション結果と人工傷の疲労試験結果を比較したグラフを示す。

計算条件には載荷荷重147KN（最大荷重+レール温度軸力を考慮）、試験体と同一レールの残留応力の測定結果を用いた。また、図17ではシミュレーションと実験結果を比較できるようにプロット位置を調節している。その結果20mm以上では精度良く、それ以下ではシミュレーションの方が早まる結果となったが、ある条件下ではシミュレーションで予測が可能であることがわかった。

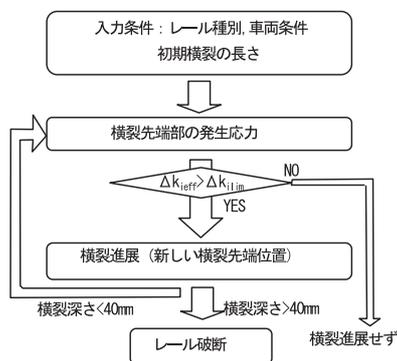


図16 き裂進展の計算フロー

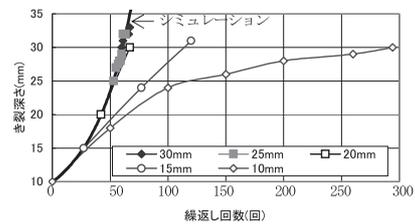


図17 試験結果とシミュレーションの比較

### 3.5 横裂管理に関するまとめ

以上の検討の結果、次のことが明らかになった。

- ・レールの残留応力は、レール種別に関係なく使用により車輪と接触する表層付近が圧縮応力になり、その下部には引張応力が発生する。また、傷の発生の有無による残留応力の分布に明瞭な差異は見られなかった。
- ・疲労試験により、レール横裂が15mmを越えると傷は早期に進展し、疲労域が30mmに達すると破断に至る。一方、横裂が10mm以下の場合はレール頭頂部の圧縮の残留応力等により傷の進展が緩慢である。
- ・シミュレーションでは深さ20mm以上の傷について精度良く予測ができ、それ以下の場合ではシミュレーションの方が早まる。

## 4. 今後の取り組み

本稿では、現在取組んでいるレール頭部に発生する損傷（きしみ割れと頭部横裂）に関する研究について紹介した。実験や理論解析により、新たな知見が得られたが、まだ解明しなければならない課題が残るため、レール管理に応用するには更なる時間が必要と考えている。

今後は、新たなレール探傷手法も含め、レール損傷管理が容易に、効率的に行えるような研究課題に取り組んでいく予定である。

### 参考文献

- 1) 柏谷賢治、石田誠；レール横裂成長速度予測モデル，第7回鉄道力学シンポジウム，pp79-84，2003.7