

レール横裂 管理手法の向上



青木 宣頼**



瀧川 光伸*



小関 昌信*

現在のレール損傷管理は主に超音波によるレール探傷により行っている。そのレール探傷周期や判定基準、レール交換までの管理方法や期限は、過去の破断事例や経験に基づくものであり、余裕をもった安全率を有していると考えられる。そこで、現在のレール損傷（シェリング）管理に関して問題点を抽出し、効率的なレール保守管理が行えるように探傷の判定基準、レール交換などの処置期限の見直しを検討した。シェリングの詳細な探傷を行った結果、シェリングを構成している水平裂の長さや横裂の深さには相関が見られないことから、水平裂長さの判定基準の見直しを提案した。また、軸力負荷条件でレール損傷の疲労試験を行い、軸力の有無により傷の進展速度に違いがあることを明らかにした。そこで、実際の探傷データから損傷進展シミュレーションの精度を検証し、その妥当性を得ることができたため、そのシミュレーションを用いて損傷レールの処置期限について見直しを行った。

●キーワード：レール、シェリング、超音波探傷、破壊力学

1. はじめに

現在のレール損傷管理は主に超音波によるレール探傷により行っている。そのレール探傷周期や判定基準、レール交換までの管理方法や期限は、過去の破断事例や経験に基づくものであり、余裕をもった安全率を有していると考えられる。そこで、現在のレール損傷（シェリング、図1を参照）管理に関して問題点を抽出し、効率的なレール損傷管理を目指して、シェリングの詳細な探傷による分析、損傷レールの疲労試験結果や損傷進展の数値シミュレーションを用いて、探傷の判定基準、レール交換などの処置期限について見直しを行った。

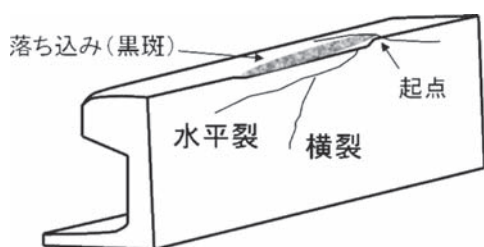


図1 シェリングの状態

2. 現在の探傷基準の課題

現在のレール損傷管理は、レール探傷車により一定の周期で探傷を行い、その後、発見された傷の大きさに応じて人力で詳細な再探傷を行っている。その際のシェリングに関する管理基準を表1に示す。シェリングの管理は水平裂長さと横裂深さの2つの基準を用いて行っている。これらは国鉄時代の新幹線の基準をJR民営化後に在来線に導入し、その後若干の修正を経て、現在の値になっている。また損傷

が見つかった場合の処置方法とその期限については、線区の重要度とこれまでの経験から定められている。以下にその課題を示す。

課題①：水平裂長さや横裂深さの管理基準の根拠

国鉄時代に新幹線のシェリングを調査したところ水平裂長さや横裂深さにはある程度の相関があり、また探傷できる精度から現在の基準値が定められている。しかし在来線については明らかでない。

課題②：処置方法の期限に対する根拠

現在の処置方法の期限に対する明確な根拠がない。また損傷の進展には、レール長手方向の軸力（レールの温度変化により発生する応力）が影響することが知られている。つまり、シェリングの発見する季節により傷の進展速度が異なる可能性があるため、損傷の発見された時期により処置期限が変わることも考えられる。

表1 シェリングの管理基準

判定基準	通常調査傷	緊急調査傷①	緊急調査傷②
シェリング	水平裂 20 mm以上 または横裂 10 mm以上	水平裂 30 mm以上 または横裂 15 mm以上	水平裂 100 mm以上 または横裂 30 mm以上
再探傷期限	緊急調査傷：3 日以内（発生位置の特定のみ） 通常調査傷：30 日以内（発生位置と傷の大きさ・深さを特定）		
処置方法	東京 100km 圏 山形・秋田新幹線	継目板取付：3 日以内 レール交換：計画交換	継目板取付：3 日以内 レール交換：10 日以内
	上記以外	継目板取付：計画取付 レール交換：計画交換	継目板取付：3 日以内 レール交換：30 日以内

3. 水平裂と横裂の関係調査

シェリングが発生して交換した267本のレールについて、水平裂長さ（mm）と横裂深さ（mm）の関係を詳細に調査した。その結果を図2に示す。なお、188本のレールについては水平裂のみで横裂を確認することはできなかった。図には過去の損傷事例を基に、レール頭部からの斜角70度の探触子による検知限度も示している。斜角70度探触子は横裂を発見するために使用する探触子であるが、図3に示すように水平裂が長いと横裂を正確に発見できない場合がある。この限度線よりも上の領域では、水平裂に遮断されずに横裂を探索することが可能な範囲となる。

図2より、水平裂長さ（mm）と横裂深さ（mm）には明確な相関は見られず、また発生する損傷のほとんどが頭部からの斜角70度の探傷では水平裂に覆われ、横裂の深さを検知することが出来ないことを確認した。

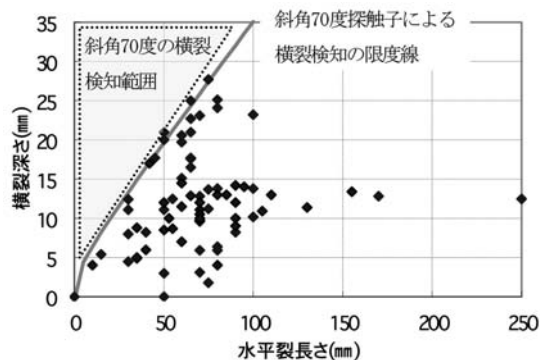


図2 水平裂と横裂深さの調査結果

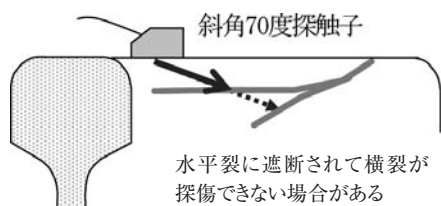


図3 斜角70度探触子による横裂の探傷

また、図4はレール探傷車で発見したシェリング147件について、横裂深さと水平裂長さのどちらで検知したかを整理したものである。処置対象となるランク2以上で検知したものは横裂深さでわずか1件であり、このことからシェリングの発見はほとんど水平裂長さ（ランク2～4）で検知されていることがわかる。

水平裂長さ（mm）と横裂深さ（mm）に相関は無く、またシェリングで破断に至った事例は横裂の進展によるものがほとんどである。以上より、現地での正確な横裂深さを把握することができれば、シェリングの損傷管理がより効率的に実施できる。横裂を測定する方法としては、レール頭部の左右側面に探触子

を配置して一方の探触子から超音波を入射させ、反対側の探触子で受信する透過法が実用化されている（図5）。また、レール頭部のあご下から超音波を入射させて探傷する方法も検討されている（図6）。

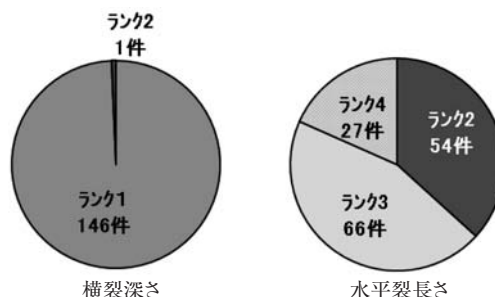


図4 探傷車でのシェリング検知結果（ランク2以上が処置対象）



図5 レール頭側部からの透過法による探傷

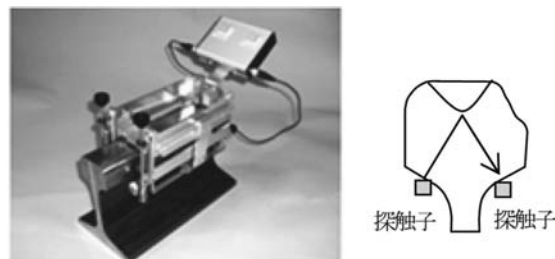


図6 レールあご下からの反射法による探傷

4. 横裂進展の確認

4.1 軸力負荷条件における疲労試験

シェリングの発生している60kgレールについて、軸力条件と鉛直荷重の条件を変えて疲労試験を行った（図7）。損傷の進展は100万回ごとに試験機を止めて、レール頭部からの斜角70度による探傷と透過法（頭側部からの二探触子法）による探傷をしながら横裂の進展を確認した。疲労試験の条件と結果を表2に示す。疲労試験は3点曲げで支点間長

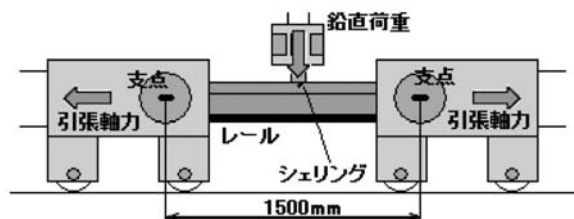


図7 軸力負荷条件による疲労試験

を1.5mに設定して実施しており、軸力750kNは温度応力で約40℃に相当している。それぞれ300万回の繰り返し载荷を実施したが、いずれもレール破断までは至らなかった。

そのため試験レールを強制的に破断し、横裂の破断面(図8)を観察して10万回ごとの傷の進展速度を求めた。各試験条件における損傷進展速度を図9に示す。図より軸力を負荷した場合の方が、損傷の進展速度が早いことを確認した。

表2 疲労試験結果

試験番号	荷重条件 (kN)		開始時き裂深さ (mm)	終了時き裂深さ (mm)
	鉛直	軸力		
No. 1	75	0	10	11
No. 2	100	0	10	11
No. 3	75	750	6	9
No. 4	100	750	7	11

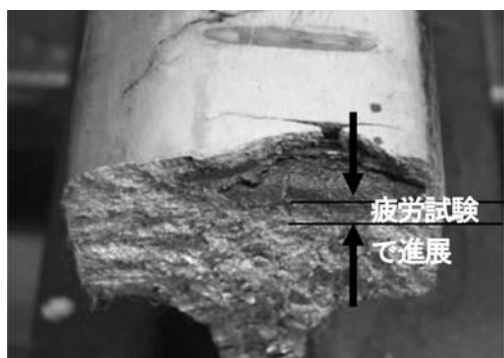


図8 疲労試験後の破断面

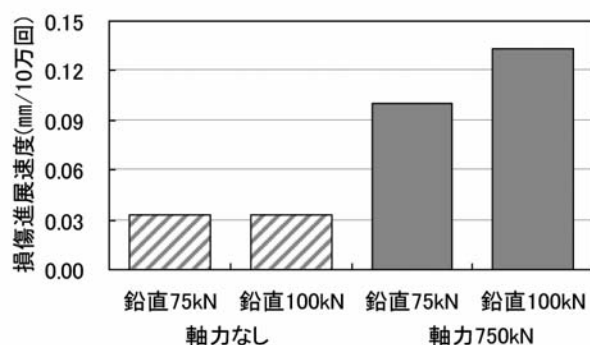


図9 疲労試験での損傷進展速度

4.2 レール探傷車による発見傷の追跡調査

過去のレール探傷車の探傷結果から、シェリングが繰り返し発見されている箇所のデータを抽出した。検知されたシェリング200ヶ所のうち、横裂深さを複数回記録した損傷が6ヶ所あった。これらの損傷の進みを確認し、列車の通過トン数(通過トン)と横裂深さで整理したものを図10に示す。横裂の深さにより損傷の進みに明瞭な差は見られなかった。最も進みが速いもので0.35mm/100万トンであった。

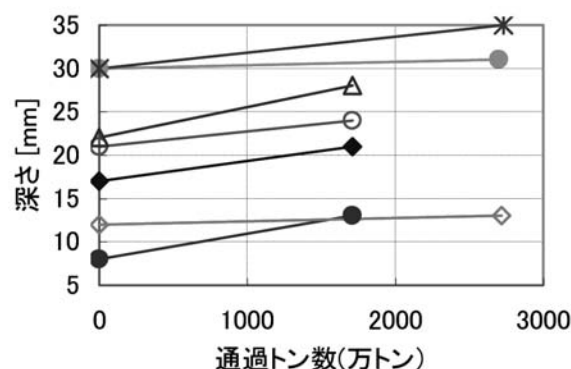


図10 レール探傷車の損傷の追跡結果

5. 損傷進展シミュレーションの検証

弟子丸¹⁾は、FEMにより損傷進展シミュレーションを行っている。計算の条件は車両種別、レール種別、レールや軌道の状態、レール内部の残留応力を考慮している。そこでレール探傷車による損傷進展を調査した線区の条件(4.2章)を入れて計算した結果を図11に示す。計算条件は特急列車、60kgレール、年間通過トン2000万トンとし、レール内部の残留応力は過去の測定結果に基づき設定している。

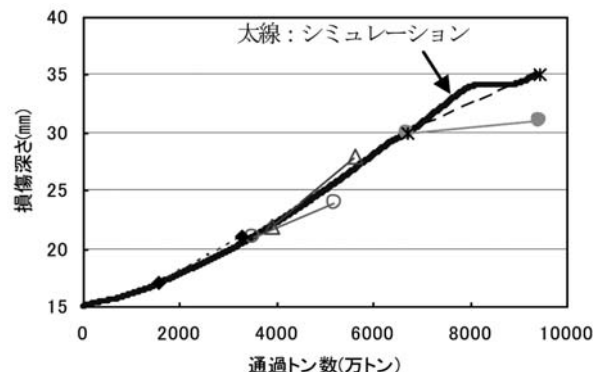


図11 シミュレーションと実測比較

図11にはシミュレーションの計算結果(太線)とレール探傷車の測定結果(図10)を合わせて表示している。シミュレーション結果は実測の結果と概ね一致しており、レール交換期限の見直しに用いても問題ないと判断した。一部にシミュレーションの方が早いものがあるが、原因として測定時期による軸力条件の違い、レール内部の残留応力や軌道条件の相違などが考えられた。

6. シェリングの管理基準見直し

6.1 水平裂長さ管理値の見直し

水平裂長さとは横裂深さに相関が見られなかったことから、横裂深さの基準に基づき、図2の斜角探傷の損傷検知範囲

を考慮してランク判定基準の見直しを提案した。図2より横裂深さ15mm（緊急調査傷①）の場合、レール頭部から斜角70度で確実に探傷できるのは水平裂で35mm、同様に横裂深さ30mm（緊急調査傷②）の場合は85mmとなるため、水平裂長さの管理基準は表3の見直し案のとおりとした。

表3 水平裂長さの管理基準の見直し案

判定基準	変更前	変更後
緊急調査傷①	30 mm	35 mm
緊急調査傷②	100 mm	85 mm

6.2 処置期限の見直し

横裂が急進的に進展し始める限界（急進破断限度）を過去の破断事例を分析して横裂深さ35mmとした。前記のシミュレーションで、急進破断限度（35mm）までの余寿命を求め、それに基づき再探傷とレール交換までの期限を再検討した。シミュレーションの条件は多数のケースがあるため、ここでは検討した結果の一例を紹介する。

(1) 通常調査傷の再探傷期限

年間2000万トンの線区（2000万トンに1回冬季を経験）において、横裂深さが15mmから35mmまで進展するのに必要な通トンについて計算した結果を図12に示す。図より急進破断限度までの通トンは、一番早くても約3000万トンであり、列車本数が多い線区で月間通トンが350万トン程度であることから現行の再探傷期限（30日）に対して十分に余裕のあることが分かった。そこで再探傷の期限を計画的な作業の可能な60日に延伸した。

ただし、熱処理レールについては場所によりゲージコーナークリACKが発生し、破断限度の浅い事例が確認されており進展速度も明確でないことから、東京100km圏などでは45日とした。

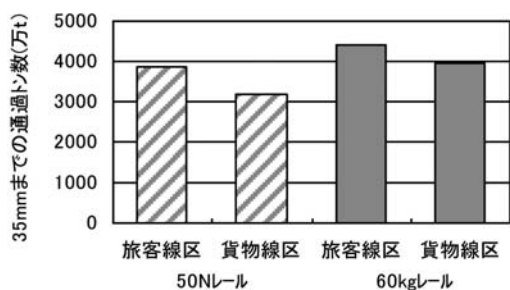


図12 横裂深さ15mmからの傷の進展（冬季発見）
（通トン2000万トン／年の線区）

(2) 通常調査傷の処置期限

通常調査傷の場合、横裂深さは15mm未満となる。一例として60kgレールで年間通トン4000万トンの線区（東京100km圏）であれば、図12より急進破断限度までの期限は約1年見込むことができる。そのため現行のレール交換期限（計画交換：通常は翌年度交換）を踏襲することにしたが、

翌年度の冬季前に横裂深さを正確に検知できる透過法で測定し、横裂の深さが15mm以下を再確認できれば、さらに1年間の交換期限延長を可能とした。

(3) 緊急調査傷①の処置期限

年間2000万トンの線区において横裂深さが25mmから35mmまで進展するのに必要な通トンについて計算した結果を図13に示す。一例として50Nレールで年間通トン2000万トンの線区（東京100km圏）で考える。緊急調査傷①の横裂深さは15～30mmであるが、図より夏季（4～10月）で横裂が25mm未満を透過法で確認することができれば、急進破断限度まで半年以上の余裕（1500万トン）を見込むことができる。そのため現行の30日以内のレール交換が、横裂25mm未満を条件として半年程度の期限をもってレール交換をすることが可能となる。

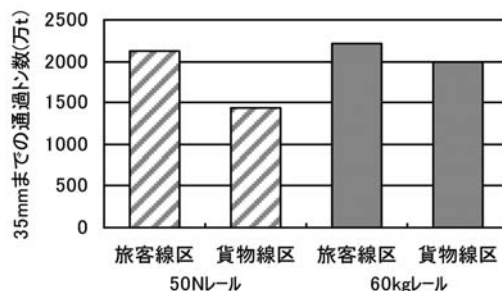


図13 横裂深さ25mmからの傷の進展（夏季発見）
（通トン2000万トン／年の線区）

7. まとめ

効率的なレール保守管理が可能となるようにシェリングの判定基準、レール交換までの期限などの見直しを検討した。シェリングの詳細な探傷を行った結果、水平裂長さと同様に横裂深さには相関が見られず、斜角探傷の検知限界に基づき水平裂基準の見直しを提案した。さらに、軸力負荷条件でレール損傷の疲労試験を行った結果、軸力の有無により損傷の進展速度に違いがあることを明らかにした。また、実際の探傷データから損傷進展シミュレーションの精度を検証し、その妥当性を得ることができた。そこでこのシミュレーションを用いて損傷レールの処置期限の見直しを提案した。

今後はレールのゲージコーナークリACK部に発生する損傷について、損傷の進展速度について知見を蓄積し、レール損傷管理全体の見直しにつなげていく予定である。

謝辞（財鉄道総合技術研究所より、シミュレーション結果を提供していただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 弟子丸将，片岡宏夫，柳沢有一郎；レール横裂進展速度に関する研究，新線路，pp.28～30，2007.3.