

# 論文 熱処理レールの横裂進展試験 によるき裂進展速度の評価

細田 充<sup>1</sup>・水谷 淳<sup>1</sup>・西本 晋平<sup>1</sup>・兼松 義一<sup>2</sup>・片岡 宏夫<sup>1</sup>・山本 隆一<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)  
E-mail: hosoda.mitsuru.75@rtri.or.jp, mizutani.jun.49@rtri.or.jp, nishimoto.shimpei.33@rtri.or.jp  
kataoka.hiroo.77@rtri.or.jp, yamamoto.ryuichi.22@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)  
E-mail: kanematsu.yoshikazu.23@rtri.or.jp

レール損傷で発生が多い形態の一つに、転がり接触による熱処理レールのゲージコーナキ裂を起点とした横裂があり、熱処理レールの横裂進展速度の把握が求められている。本研究では人工傷を設置した各種実レールに対し、ヘッドダウンの横裂進展試験を実施し、横裂進展速度を把握するとともに、進展速度に影響を与える因子の評価を行った。鋼種の違いで進展傾向や横裂進展速度に顕著な差異はみられなかった。レール頭部の残留応力を低減させた焼鈍を施した普通レールの横裂進展速度は非焼鈍処理品と比べて遅い傾向を示し、残留応力の影響が示唆された。熱処理レールに対し、ゲージコーナキ裂を想定して人工傷をレール頭頂面中心から10mm偏心させた供試体の試験結果は比較的浅い位置で破断に至る結果となった。

**Key Words :** rail, squat, transverse crack, crack growth rate, stress intensity factor

## 1. はじめに

レールは軌道を構成する重要な部材であり、列車の走行安全性を確保するには、レール損傷を防止するための保守管理が非常に重要である。現在、日本の鉄道におけるレール損傷の中で、レール頭部の転がり接触疲労損傷が多数を占める。その発生過程や進展過程についてはこれまでに多くの調査や研究が行われている。図-1 にレール頭頂面シェリングの概要を示す。レール頭部の転がり接触疲労損傷であるレール頭頂面シェリングは水平裂が成長する過程で、き裂がレール底部方向へ分岐し(以下、「頭部横裂」という)、レール折損に至る可能性がある。一方で、図-2 に示すように、近年は熱処理レールの頭部において、ゲージコーナキ裂<sup>1)</sup>を起点とした横裂によるレール折損が発生している。そのため、鉄道事業者は目視検査やレール超音波探傷等による定期的な検査を実施し、その検査結果から必要に応じて補強継目板の設置やレール交換等を実施している。しかしながら、以上の措置には多大なるコストを要しているのが実情であり、それらの検査周期や措置の適正化のため、頭部横裂の進展特性の解明が求められている。

頭部横裂の進展速度に関しては、過去にレールから切り出した試験片を用いた要素試験と簡易な理論による推

定が行われたが<sup>2)</sup>、実レールの横裂進展については実験的な検証が行われていなかった。そのため、著者らは人工傷を加工した普通レールに対し、実際の軌道の応力状態を考慮した横裂進展試験を実施し、横裂進展速度の把握を行ってきた<sup>3)</sup>。さらに、同種試験<sup>4)</sup>や営業線の超音波探傷結果の分析による検討も行われている<sup>5)</sup>。また、熱処理レールのき裂進展速度に関する研究も進められている<sup>6)</sup>が、実レールの横裂進展試験等の詳細な検討は行われていない。

本研究では、このような状況をふまえ、要素試験片を用いたき裂の進展試験で鋼種による進展速度の違いを把握したのち、実レールを用いた頭部下の横裂進展試験を実施し、熱処理レールにおける横裂進展速度を把握するとともに進展速度に影響を与える因子の評価を行った。

シェリング(落ち込んで黒班になる)

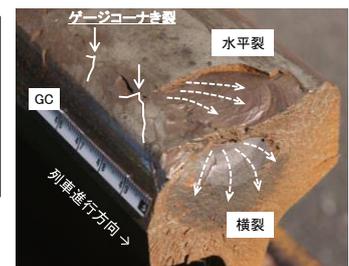
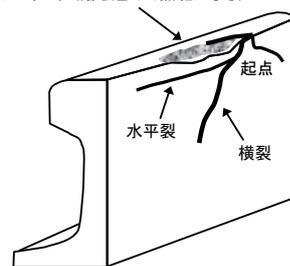


図-1 頭頂面シェリングの概要

図-2 ゲージコーナキ裂の例

## 2. き裂進展特性試験

レール頭部のき裂進展特性を把握する上で必要となる材料定数を得るため、新品の熱処理レール(一般的に曲線で用いられている HH340 レール)の頭部から、図-3 に示す ASTM E647<sup>10)</sup> に規定される CT (Compact tension) 試験片を採取し、疲労き裂進展試験を実施した。また、比較材として新品の普通レールについても同様の試験を実施した。なお、レール製造時に生じる残留応力がき裂進展試験結果に影響を及ぼす可能性が考えられるため、その影響を除去する目的で焼鈍処理を施している。また、レール頭部に対するき裂の進展方向の差異を確認するため、試験片の採取方向をレール長手方向および垂直方向とした。試験では 100kN 電気油圧式疲労試験機 (MTS 製) を使用し、荷重一定制御の荷重形式とし、負荷速度 10Hz、応力比  $R$  (最小応力/最大応力) : 0.01, 0.1, 0.5 の 3 段階とした。また、き裂進展速度は  $10^{-8}$  m/cycle 以上とした。表-1 に各試験結果から得られるパリス則の定数と指数を、図-4 にき裂進展試験結果の一例を示す。 $da/dN$  と  $\Delta K$  の関係グラフの直線部は、疲労き裂の進展速度を表すパリス則として知られている。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

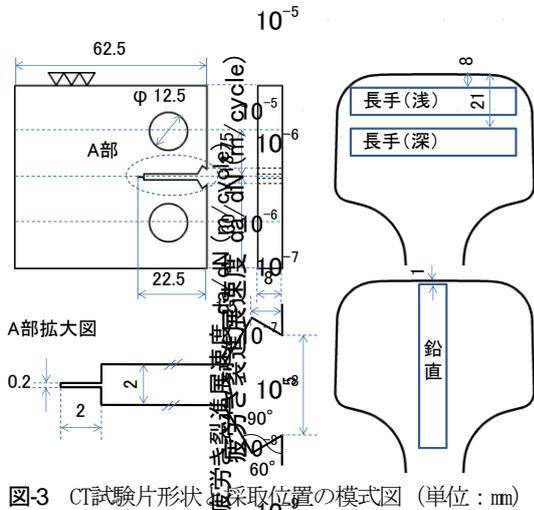


図-3 CT試験片形状と採取位置の模式図 (単位: mm)

ここで、 $a$ : き裂の大きさ、 $N$ : 応力変動の繰返し数、 $\Delta K$ : 有効応力拡大係数範囲、 $C, m$ : 材料定数

これら一連の試験結果より、パリス則の成立する範囲においては、レール鋼種、焼鈍の有無および試験片採取方向の違いはき裂進展特性にほとんど影響しないことが示された。一方、応力比が大きいほどき裂進展速度が速くなる傾向が見られた。

## 3. 実レールの横裂進展試験

ここでは、種々のレールの頭部横裂の進展速度の差異を把握するために、レール曲げ疲労試験機を用いて実レール頭部の横裂進展試験を実施した。

### (1) 試験概要

頭部横裂の進展速度を把握するために、各種実レールに対して横裂進展試験を実施した。本試験で用いた供試体を表-2に示す。本試験では使用履歴の有無や残留応力を低減させる目的で焼鈍した普通レール、ゲージコーナキ裂を想定して人工傷を10mm偏心させた熱処理レール等を用い、それぞれの供試体のレール頭頂部には図-5に示すような人工傷(半径5mmの半円状スリット)を加工した。ここでは、人工傷先端に不均一な変形や塑性変形が生じないようにするため、放電加工により作製した。

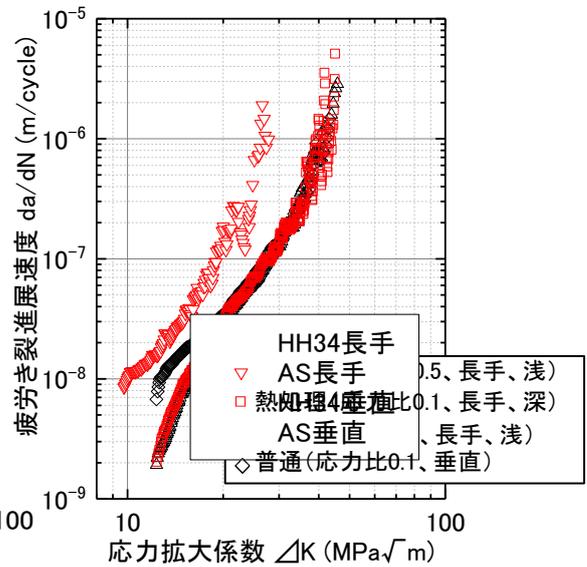


表-1 各試験条件におけるパリス則の定数と指数

No.	試験片			応力比	試験で得られたき裂進展に直線近似に最小二乗法を用いた ΔK 範囲		相関係数 (R <sup>2</sup> )	試験結果 (da/dN と ΔK の関係)						
	鋼種	焼鈍	採取方向		m	C		使用履歴	焼鈍	人工傷設置位置	頭部応力振幅	鉛直荷重範囲		
1	熱処理	無し	長手(浅)	0.1	3.71	4.21×10 <sup>-13</sup>	0.997	表-2 横裂進展試験条件 100 (N/mm <sup>2</sup> ) 121~11 (kN)	中心	中心	121~11 (kN)			
2	熱処理	無し	長手(深)	0.1	3.8	3.49×10 <sup>-13</sup>	0.991							
3	熱処理	無し	鉛直	0.1	3.81	3.54×10 <sup>-13</sup>	0.994							
4	熱処理	無し	鉛直	0.5	4.29	3.02×10 <sup>-13</sup>	0.951					無	—	中心
5	熱処理	無し	長手(浅)	0.5	2.94	9.46×10 <sup>-12</sup>	0.995					無	○	中心
6	普通	有り	鉛直	0.1	3.65	7.23×10 <sup>-13</sup>	0.998					有	—	中心
7	普通	有り	長手(浅)	0.1	3.66	7.78×10 <sup>-13</sup>	0.999					有	○	中心
8	普通	有り	鉛直	0.01	3.64	5.53×10 <sup>-13</sup>	0.999					無	—	中心
9	普通	有り	長手(浅)	0.5	3.26	4.06×10 <sup>-12</sup>	0.992					無	—	偏心

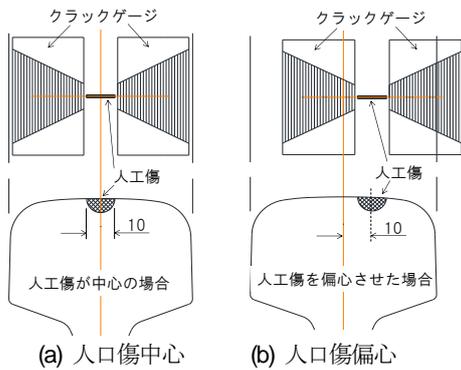


図-5 人工傷の設置およびクラックゲージの貼り付け状況

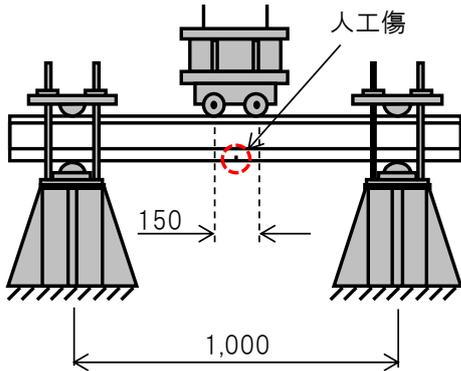


図-6 横裂進展試験概要

横裂進展試験は図-6に示すようなレール曲げ疲労試験機を用いて、レール頭部を下にした状態(以下、「ヘッドダウン」という)で支点間隔1000mm、荷重間隔150mmの片振り4点曲げで実施した。表-3に本試験の条件を示す。応力条件は、初期のき裂を速やかに発生させるため、人工傷から進展深さ5mm程度(頭頂面から10mm程度)の予き裂が発生するまで比較的高い頭部曲げ応力振幅 $140\text{N/mm}^2$ を負荷した後、 $100\text{N/mm}^2$ に応力振幅を下げ、繰返し荷重(以下、「本荷重」という)した。ただし、ヘッドダウンによる横裂進展試験のため、実軌道のように温度応力と列車荷重による圧縮の変動応力が作用する場合の横裂進展とは区別して考える必要がある。

横裂進展試験において、荷重回数と横裂深さの関係および横裂進展速度を把握する方法として2種類の方法を適用した。

1つは大小2通りの頭部応力全振幅を発生させる荷重条件で荷重し、その頭部応力全振幅の変動により疲労き裂進展速度が変わることを利用して、疲労破面に発生する境界部を測定する方法(以下、「ビーチマーク法」という)である。

もう一方は、図-5に示すようにクラックゲージをレール頭頂面に加工した人工傷の両側に貼り付けて、レール表面のき裂進展量を把握し、横裂深さに換算する方法である。ビーチマークは破断後の破面に現れるため、破面を測定することで横裂深さを把握することが可能であるが、過去にこの方法のみで測定した結果<sup>4)</sup>、供試体の状態や試験条件によってはビーチマークが発生しない場

表-3 横裂進展試験条件

項目	条件
荷重方法	片振り4点曲げ
荷重点間隔	150mm
レール設置状態	ヘッドダウン
荷重作用方向	鉛直方向
試験環境	常温、大気中
荷重周波数	3Hz

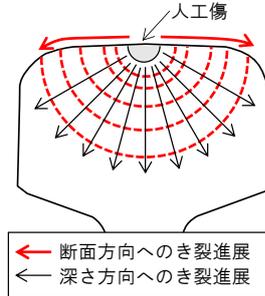


図-7 き裂進展概略(ヘッドダウン)

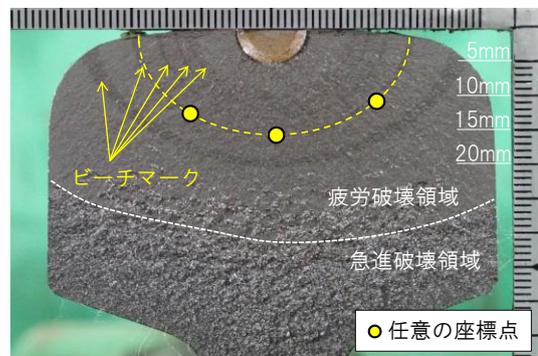


図-8 扁平率算出例

合もしくは明瞭でなく測定できない場合がある。一方クラックゲージを用いる方法はレール表面方向へのき裂進展量を的確に把握できるが、レール深さ方向へのき裂進展量ではないため、横裂進展速度を求めるためには、クラックゲージで検知された値を横裂深さへ換算する必要がある。以上を踏まえ、今回実施する横裂進展試験ではビーチマーク法とクラックゲージを用いる方法を組み合わせ、各荷重回数のき裂進展量を観測することとした。

今回実施した横裂進展試験がヘッドダウンで鉛直方向のみの荷重を作用させることから、図-7に示すように、疲労破面は人工傷から概ね楕円形状に広がる。そこで、クラックゲージにより検知されるき裂長さに、楕円形状の扁平率を乗じて横裂深さとした。扁平率は、疲労破面内のビーチマーク、もしくは疲労き裂の進展速度が変わる境界の座標点から楕円形状を決定し算出した。算出例を図-8に示す。なお、扁平率は式(2)で示すように楕円の長軸と短軸から決定されるもので、その値が0の場合に円となる。

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (2)$$

ここで、 $f$ : 扁平率、 $a$ : 長軸、 $b$ : 短軸

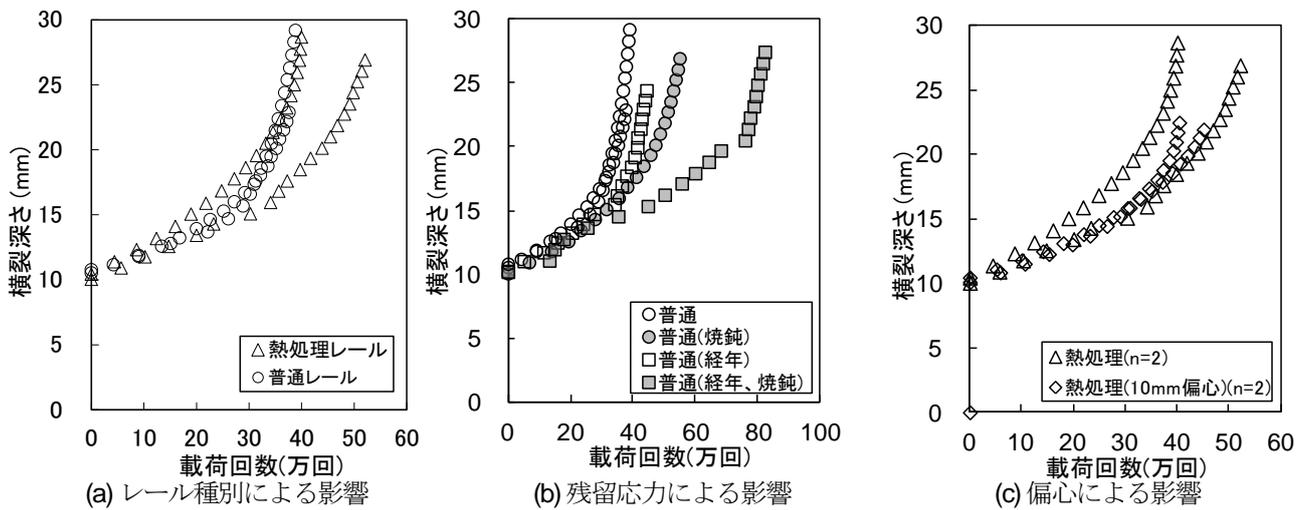


図-9 横裂進展試験結果（载荷回数と横裂深さの関係）

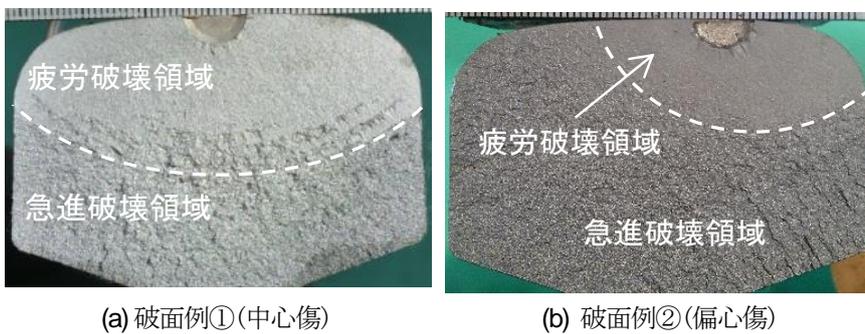


図-10 試験後の破面の例

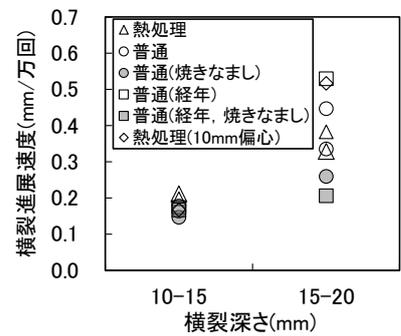


図-11 平均的な横裂進展速度

(2) 試験結果

横裂進展試験結果を図-9、試験後の破面の例を図-10に示す。なお、ここでは図-9の横軸は予き裂発生後の载荷回数を、縦軸は頭頂面からの横裂深さを示す。各供試体は全て破断に至った。試験結果は以下のとおりである。

- (a) 全体の特徴として横裂深さの増加に伴って、横裂進展速度が速くなる傾向を示した。
- (b) 図-9(a)に、新品の普通レールと新品の熱処理レールのそれぞれ2本ずつのデータを示す。熱処理レールの1本の横裂進展速度が他3本に比べて遅い結果となっている。このばらつきは、各供試体のレール頭部の残留応力が異なることによるものと推察される。鋼種の影響は後述するその他の因子と比較すると小さい結果となった。
- (c) 図-9(b)より残留応力を低減させる目的で焼鈍した2種類のレールが非焼鈍処理品に比べて比較的遅い結果となった。レールの残留応力はレール内部でつり合っているが、局所的にみると、圧縮や引張り応力が存在しており、これが横裂の進展速度に影響すると考えられている。レール頭部中央位置には引張りの残留応力が発生することが知られており、本試験結果から残留応力が影響していることが示された。さらに本試験においては、使用履歴

による横裂進展速度の差異はみられなかった。

- (d) 図-9(c)より、人工傷の位置が中心の場合と偏心させた場合の比較から、横裂進展速度の傾向に明確な差異はみられないが、図-10より、今回実施した試験においては、偏心させた場合の限界横裂深さが中心の場合と比較して浅い位置で破断に至る結果となった。その理由として、偏心させた場合の方が応力拡大係数の発生傾向が大きくなると考えているが、これについては現在FEM解析で定量的に把握することを試みている。

次に、横裂深さの範囲ごとの平均的なき裂進展速度を図-11に示す。横裂進展速度の比較は横裂深さ10mm～20mmの間とし、深さ20mm以上においては図-10に示したように、脆性的なき裂進展が混在する領域であるため除外した。横裂深さが比較的浅い10～15mmにおける横裂進展速度0.1～0.2mm/万回程度で明確な差はみられないが、横裂深さ15～20mmにおいては、焼鈍を施した普通レールで遅くなり、図-9(b)の载荷回数と横裂深さの関係とも整合する。また、明らかに横裂深さ15～20mmの横裂進展速度の方が、横裂深さ10～15mmよりも高い結果となっている。

#### 4. レールの残留応力測定

残留応力が横裂進展速度に与える影響を確認するため、横裂進展試験を実施した各種レールに対し、(1)切り出し法および(2)MIRS法の2通りの方法でレール頭部内部の残留応力測定を行った。

##### (1) 切り出し法

焼鈍の残留応力低減効果を検証するため、焼鈍を施した供試体を対象に切り出し法でレールの頭部内部の残留応力を測定した<sup>11)12)</sup>。表-4に残留応力を測定した結果を以下に示す。ここでは、レールの頭部内部の残留応力について、焼鈍を行ったレール頭部内部の9点および頭頂面、頭側部の3点に対して測定を行った。焼鈍された供試体のレール頭部内部の残留応力は概ね消失はしているものの、頭頂面の表面は50 N/mm<sup>2</sup>程度の値となっている。

##### (2) MIRS法による残留応力測定<sup>13)</sup>

近年、様々な金属内部の残留応力測定方法が開発されているが、その一つにMIRS法がある。図-12に示すように、レール頭頂面中心に深さ方向へ穴を明け、マイクロエアプローブを用い空気量で孔の直径を精密に計測する。次に、孔の周囲を円筒状に切り出して残留応力を開放させ、最後に再度孔の直径を計測して、切り出し前後の孔の直径の差異から残留応力を測定する方法である。本測定結果を図-13に示す。全体として、深さ10～

30mmでは引張の残留応力が発生しており、その範囲の平均値は新品の普通レールおよび熱処理レールでそれぞれ66N/mm<sup>2</sup>、72N/mm<sup>2</sup>であった。また、頭頂面から深さ10mm程度の範囲では、深さによる残留応力の変化が大きくなっている。

##### (3) 残留応力測定結果のまとめおよび考察

切り出し法およびMIRS法による残留応力の測定結果を表-5にまとめた。

切り出し法による残留応力の測定は既往の研究でも行われており<sup>11)12)14)</sup>、本測定結果と同様な結果が得られている。

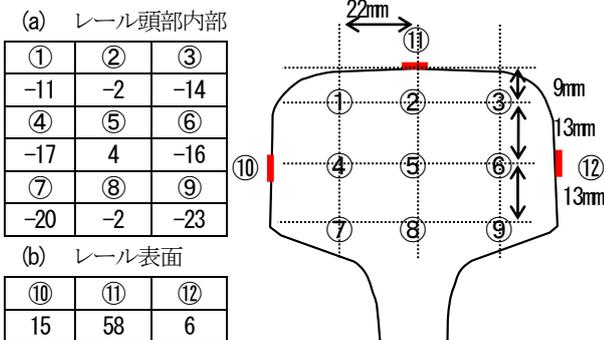
残留応力測定結果を用いて、横裂進展試験結果について考察する。

横裂進展試験では、焼鈍を施したレールの進展速度が遅い結果となった要因として、焼鈍したレールの残留応力は頭部内部で0 N/mm<sup>2</sup>程度であるのに対し、焼鈍されていない普通レールは同じ深さで比較して明らかに大きな引張の残留応力が発生している。このことから、より大きな残留応力が存在することで裂進展速度が増大したものと判断される。

図-14は横裂進展試験においてレール頭部に発生する各応力から求められる有効応力拡大係数範囲および応力比の概念図である。これまでの試験結果(図-4)により有効応力拡大係数範囲 $\Delta K$ および応力比 $R$ が大きいとき裂の進展速度が速くなることは明らかである。横裂進展試験では、図-14のように残留応力が存在している状態から、鉛直荷重が作用することで引張の曲げ応力振幅が十分に残留応

表-4 焼鈍の普通レールの残留応力測定結果

(単位: N/mm<sup>2</sup>, 上段が位置, 下段が値)



穴加工により残留応力が解放される原理を利用

空気量から穴径を計測

(測定手順)

①穴加工および穴径の計測

②円筒状に切り出し

③穴径の再計測

図-12 MIRS法による残留応力測定

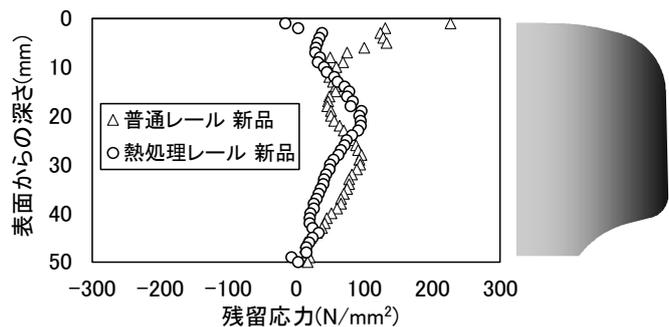


図-13 レール頭部に発生する各応力

表-5 レール頭部残留応力測定まとめ

レール種別	焼鈍	測定方法	測定位置 (mm)	残留応力 (N/mm <sup>2</sup> )
普通	焼鈍	切り出し法	頭頂面	50程度
			頭部内部	0程度
熱処理	-	MIRS法	頭頂面～深さ10	50～200
			深さ10～30	45～100
			頭頂面～深さ10	-50～0
			深さ10～30	0～80

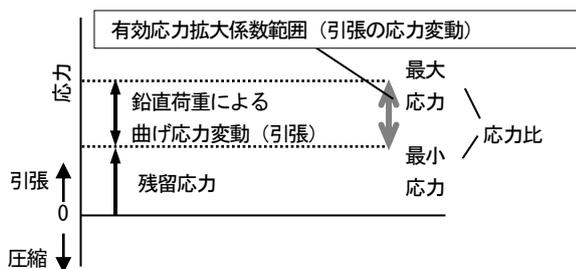


図-14 レール頭部の有効応力拡大係数範囲および  
応力比の概念図

が正の値であるため、曲げ応力振幅による応力拡大係数が有効応力拡大係数範囲  $\Delta K$  となる。今回の頭部横裂進展試験では全ての試験条件で同じ大きさの曲げ応力振幅を発生させており、有効応力拡大係数範囲  $\Delta K$  もそれぞれの試験で同じ値になっていると想定している。

次に、応力比  $R$  は最小応力/最大応力で定義されるが、ヘッドダウンの試験においては

最小応力：残留応力

最大応力：残留応力+鉛直荷重による曲げ引張応力振幅となる。引張の残留応力が大きくなることで、応力比も大きくなる。焼鈍および新品の普通レールの試験結果の比較で横裂進展速度に差があるのは、有効応力拡大係数範囲  $\Delta K$  が同じ値であると想定していることから、この応力比の違いが大きく影響していると考えられる。

## 5. 理論値との比較

### (1) 応力拡大係数

横裂試験結果によるレール頭部横裂の進展速度を定量的に検証するために、横裂進展試験結果と理論式を用いた推定値を比較する。推定値は線形破壊力学<sup>19)</sup>による推定手法を用いることとする。この推定手法はき裂形状や発生応力から応力拡大係数を算出し、疲労き裂進展則に代入することで求めるものである。既往の研究<sup>3)</sup>においては、き裂が同心円状に成長することとし、頭部横裂に対して以下の式(3)を用いて応力拡大係数を算出している。

$$K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

ここで、 $K_I$ ：応力拡大係数、 $\sigma$ ：き裂面応力、 $a$ ：円板状き裂の半径

この理論式は、無限体中の円板状き裂が様な引張応力の状態にある場合の式であるため、本稿では式(4)で表される矩形断面を有する物体について、半楕円形状き裂に曲げ応力が作用した場合の応力拡大係数<sup>19)</sup>を用いた。

$$K_I = M_k \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad k^2 = 1 - (a/c)^2 \quad (4)$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi$$

$$(0 < a/c < 1.0, 0 \leq ct < 1.0, 0 \leq \phi \leq \pi)$$

ここで、 $K_I$ ：応力拡大係数、 $M_k$ ：矩形体中楕円状き裂の補正係数、 $a$ 、 $c$ ：楕円状き裂の短径と長径

また、レール鋼の疲労き裂進展則は、応力比を考慮できるように、過去に提案されている式(5)を用いた<sup>19)</sup>。

$$da/dN = C(\Delta K_{eq})^m \quad (5)$$

$$\Delta K_{eq} = \sqrt{\Delta K \cdot K_{max}}$$

ここで、 $\Delta K$ ：有効応力拡大係数範囲(MPa $\sqrt{m}$ )、

$K_{max}$ ：最大応力発生時の応力拡大係数、 $a$ ：き裂の大きさ(mm)、 $N$ ：応力変動の繰返し数(万回)、 $m$ 、 $C$ ：材料定数

式(5)の材料定数は、横裂進展試験の最小荷重載荷時におけるレール頭部の応力状態が概ね応力比 0.1 であることを考慮し、き裂進展特性試験で求めた普通レールの応力比 0.1 の条件の  $m=3.65$ 、 $C=7.23 \times 10^{-13}$  を用いた。本式で、 $K_{max}$  は、残留応力と曲げ応力を足し合わせた応力を式(4)に代入した応力拡大係数を用いた。この式では、残留応力の影響によって変化する応力比の違いを最大応力の変化、すなわち  $K_{max}$  で表すことで考慮している。また、本来残留応力はレール内部に平面的に分布し、その位置によって値は異なるが、今回の推定では、頭部内部で一定として、それぞれ残留応力が 0N/mm<sup>2</sup>、50N/mm<sup>2</sup>、75N/mm<sup>2</sup> および 100N/mm<sup>2</sup> の4パターンで実施した。なお、 $\Delta K$  は式(4)に今回の横裂進展試験の本載荷の応力振幅である 100N/mm<sup>2</sup> を代入して試算を行った。

### (2) 比較結果

5.1 節で示した推定手法を用いて試験結果と推定値の比較を行った。その結果を図-15に示す。

普通レールおよび熱処理レールともに残留応力 0~100N/mm<sup>2</sup> で算定した推定値内に試験結果が収まる結果となった。普通レールの試験結果について、焼鈍を施したレールは残留応力 0~50N/mm<sup>2</sup> の推定値内であった。残留応力の測定結果では、頭頂面内部では 0 N/mm<sup>2</sup> 程度、頭頂面 50N/mm<sup>2</sup> 程度であったことから推定値は試験の傾向をよく捉えているといえる。

その他のレールは 50~100N/mm<sup>2</sup> の推定値内であった。熱処理レールの試験結果については残留応力 50N/mm<sup>2</sup> と 75N/mm<sup>2</sup> を想定した推定値と概ね同様の傾向を示した。深さ 10~30mm では引張の残留応力が発生しており、その範囲の平均値は新品の普通レールおよび熱処理レールでそれぞれ 66N/mm<sup>2</sup>、72N/mm<sup>2</sup> であったことを考慮すると、この推定値も妥当であると考えられる。

横裂進展試験で示唆された横裂進展速度に及ぼす残留応力の影響について、理論式による推定値の検討からも、その妥当性が定量的に検証できたと考えられる。

## 6. まとめ

熱処理レールにおける横裂進展速度を把握するため、各種レールに対し頭部に人工傷を加工した実レールを用いた基礎的なヘッドダウンの横裂進展試験を実施し、それぞれのき裂進展傾向や横裂進展速度を明らかにした。その結果は以下のとおりである。

- (1) ヘッドダウンの横裂進展試験を実施した結果、普通レールと熱処理レールで進展傾向や横裂進展速度に顕著な差異

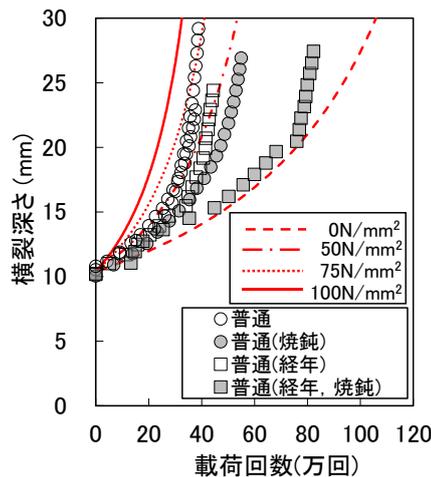
はみられなかった。また、レール頭部の残留応力を低減させる目的で焼鈍を施した普通レールの横裂進展速度が非焼鈍処理と比べて遅い傾向を示した。さらに、熱処理レールに対し、ゲージコーナき裂を想定して人工傷をレール頭頂面中心から10mm 偏心させた供試体を作製し、人工傷位置が異なる場合のき裂進展傾向や横裂進展速度を比較した結果、人工傷を偏心させた供試体は比較的浅い位置で破断に至る結果となった。

- (2) 試験結果と応力拡大係数を用いて算定した推定値を比較した結果、普通レールおよび熱処理レールの試験結果が残留応力  $0\text{N/mm}^2 \sim 100\text{N/mm}^2$  として算定した推定値内に収まる結果となった。

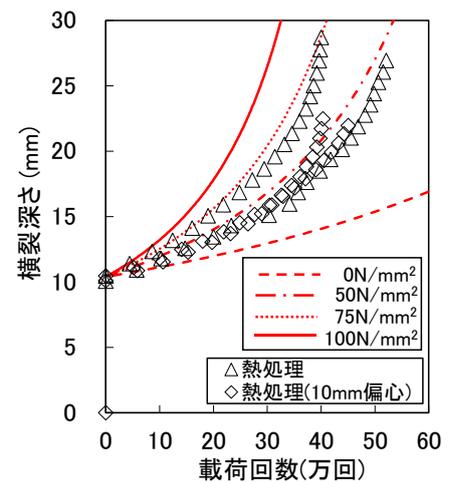
本横裂進展試験はヘッドダウンの状態、単純な引張の曲げ応力をレール頭部に発生させて検討したものであり、実際の営業線では、列車荷重による圧縮の曲げ応力およびレール温度の変動によるレール軸力の応力が発生している。今後は、より実現に近い試験条件で、横裂進展速度を把握していく予定である。

### 参考文献

- 1) 石田誠：鉄道技術 来し方行く末 レールシェリング対策, pp.30-33, RRR, 2013
- 2) 兼松義一：近年の曲線外軌の損傷事例と新型熱処理レール, pp.23-25, 新線路, 2016
- 3) 柏谷賢治, 石田誠：レール横裂成長速度予測モデル, pp.79-84, 第7回鉄道力学シンポジウム, 2003
- 4) 細田充, 弟子丸将, 片岡宏夫, 小谷隼：レール頭部横裂の進展予測手法の構築, pp.31-36, 第16回鉄道力学シンポジウム, 2012



(a) 普通レール



(b) 熱処理レール

図-15 残留応力を考慮した場合の試験結果と推定値の比較

- 5) Deshimaru.T, Kataoka.H, Hosoda.M : Eperimental Study on the Prediction Method of Transverse Crack Growth Rate, IHHA Conference 2011, 2011
- 6) 青木宣頼：レール横裂きずの進展に関する研究, pp.149-151, 日本鉄道施設協会誌, 2007
- 7) 堀克則他：横裂進みを考慮したシェリング傷管理方法, 第12回鉄道力学シンポジウム, 2008
- 8) 平野秀司, 矢作秀之：レールに発生する横裂の進展に関する一検討, VI-387, 土木学会第69回年次学術講演会, 2015
- 9) 辻江正裕, 赤間誠, 谷本啓：ゲージコーナき裂の進展予測に関する一考察, No.12-79, 第19回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2012
- 10) Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates : ASTM E647-13, 2013
- 11) 辻江正裕, 赤間誠, 松田博之, 名村明：レール横裂進展予測モデルの開発, 鉄道総研報告, 2010
- 12) 西田新一, 浦島親行, 榎本弘毅：レール鋼の疲労き裂伝ば過程における残留応力の影響, 材料, 第32巻, 第352号, 1983
- 13) 永井卓也：改良型深穴穿孔法による内部残留応力測定, 検査技術, 第21巻, 第6号, pp.64-67, 2016.
- 14) 越智保雄, A.J.McEvily：数種のレール鋼における疲労き裂伝ば特性および破壊靱性特性の評価, 日本機械学会論文集(A編), 53巻, 491号, 1987
- 15) 岡村弘之：線形破壊力学入門, pp.73-79, 1976
- 16) Horst G. Delorenzi : Energy release rate calculations by the finite element method, Engineering Fracture Mechanics, Volume 21, Issue 1, pp 129-143, 1985

(2018.4.6 受付)

## EVALUATION FOR TRANSVERSE CRACK PROPAGATION OF HEAT TREATED RAIL USING RAIL BENDING TEST

Mitsuru HOSODA, Jun MIZUTANI, Shinpei NISHIMOTO  
Yoshikazu KANEMATSU, Hiroo KATAOKA, Ryuichi YAMAMOTO

Rolling contact fatigue (RCF) is one of rail failures in the rail head occurring frequently by repeated train running. In recent years, rail breakage due to transverse crack originating from the gauge corner cracks has occurred in the heat treated rails. In this research, we carried out rail bending test with artificially-processing crack in rail head to investigate transverse crack growth rate and tendency using various rails.

Some specimens are prepared with artificial slit located eccentrically taking into account gauge corner cracks occurring. In addition, to investigate effect of residual stress on transverse crack growth rate, some specimens were subjected to annealing treatment in order to reduce the residual stress in the rail head.

It was shown that crack propagation of those rails subjected to annealing treatment to be slower than that of ordinary (non-treated) rails. In addition, there was no significant difference in the transverse crack propagation between ordinary rails and heat treated rails.

We prepared rail specimens with artificial slit located eccentric by 10 mm from the centre of rail head top surface assuming cracks occurring in the gauge corners. As a result of comparison, there was no significant difference in the transverse crack propagation between the ordinary rails and the specimen with crack positioned 10mm apart from the centre of rail head in lateral direction. The breakage of these specimens occurred at relatively shallow positions.