

# 熱処理レールのき裂進展速度の推定

細田 充\* 水谷 淳\* 山本 隆一\* 片岡 宏夫\*\*

## Estimation for the Transverse Crack Propagation of a Heat Treated Rail

Mitsuru HOSODA Jun MIZUTANI Ryu-ichi YAMAMOTO Hiroo KATAOKA

Rail breakage due to transverse crack originating from the gauge corner cracks has been occurring in the heat treated rails. Operators conduct periodic maintenance by rail replacement, visual inspection and rail ultrasonic flaw detection. These measures require a great deal of cost, and it is required to research on crack propagation. In this research, we carried out rail bending tests with an artificially-processing crack in the rail head to investigate the transverse crack growth rate and tendency using various rails. In addition, we developed a methods for estimation transverse crack growth by FEM and verified the method by comparing the estimated values with rail bending test results.

キーワード：レール，レール頭部横裂，応力拡大係数，き裂進展速度，有限要素法

### 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) 2)</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>3)</sup>，実レールの横裂進展挙動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>4)</sup>。さらに，同種の試験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て，各種実レールを用いた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した。また，試験を模擬した横裂進展解析を行い，解析精度について検証したのち，各種軌道条件を考慮可能な横裂進展解析モデルを構築した。

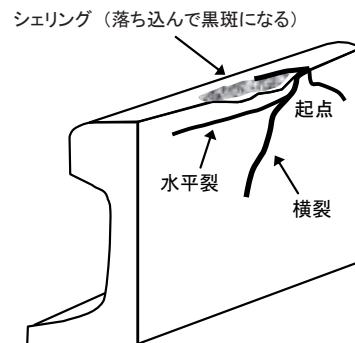


図1 頭頂面シェリングの概要

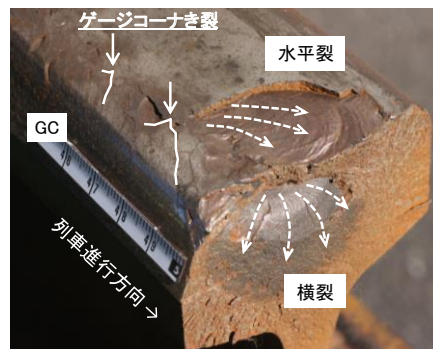


図2 熱処理レールにおけるゲージコーナキ裂の例

\* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

\*\* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

特集：軌道技術

2. 実レールの横裂進展試験

本試験では、各種レールの頭部横裂の進展速度を把握するために、頭頂面に人工傷を加工した実レールに対し、レール曲げ疲労試験機を用いて、横裂進展試験を実施した。横裂進展試験は2つの方法で行った。

(1) レール頭部を下にした状態（以下、ヘッドダウンという）の横裂進展試験

レール頭部を下にした状態で、レール底部に繰返し鉛直荷重を作用させ、レール頭部に引張応力を発生させることで横裂を進展させる試験である。単純な応力状態であり、レール使用履歴の有無、熱処理の有無、残留応力および傷の位置等の異なる条件が横裂進展速度に与える影響を評価するため実施した。

(2) レール軸力を付加しかつレール頭部を上にした状態（以下、ヘッドアップという）の横裂進展試験

レールに軸力を付加し、かつレール頭部を上にした状態で繰返し鉛直荷重を頭部に作用させ、横裂を進展させる試験である。実際の営業線に設置されているレールの応力状態を想定して実施した。

2.1 ヘッドダウンの横裂進展試験

各種実レールの頭頂面に人工傷（半径5mmの半円状断面のスリット）を放電加工により加工し、レール頭部を下にした状態の横裂進展試験を実施した。各供試体は表1に示すとおり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、それぞれの横裂進展速度を把握した。横裂進展試験はレール曲げ疲労試験機を用いて、図3に示すように、支点間隔1000mm、载荷間隔150mmの片振り4点曲げで実施した。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140N/mm<sup>2</sup>（164～11kN）を負荷した後、100N/mm<sup>2</sup>（121～11kN）に応力振幅を下げ、繰返し载荷（以下、「本载荷」という）した。き裂進展量は図4に示すように人工傷の両端に貼ったクラックゲージを用いて測定した。測定範囲はクラックゲージの寸法上25.2mm以内である。

表1 横裂進展試験条件

種別	使用履歴	焼鈍	人工傷位置	頭部応力振幅	鉛直荷重範囲
普通	無	—	中心	100 (N/mm <sup>2</sup> )	121～11 (kN)
	無	○	中心		
	有	—	中心		
	有	○	中心		
熱処理	無	—	中心		
	無	—	偏心		

試験結果を図5、試験後の破面の例を図6に示す。なお、ここでは図5の横軸は予き裂発生後の载荷回数、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。横裂深さは人工傷から概ね楕円形状にき裂が進展することを想定して、クラックゲージにより検知されるレール表面上のき裂長さ破断後の疲労破面模様（ビーチマーク）の形状により算出した。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5(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5(b)に示すように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<sup>3)</sup>。レール頭部中央位置には引張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。

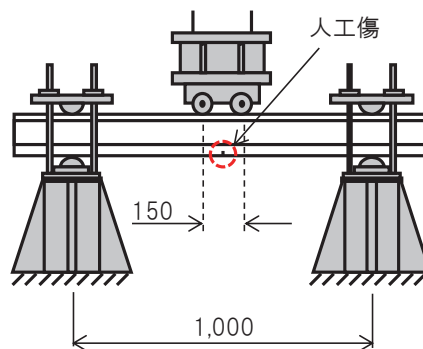
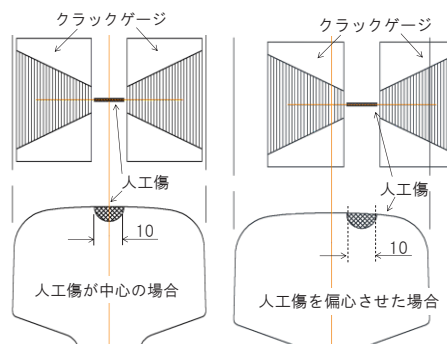


図3 ヘッドダウンの横裂進展試験概要（単位 mm）



(a) 人工傷中心 (b) 人工傷10mm偏心  
図4 人工傷およびクラックゲージの設置

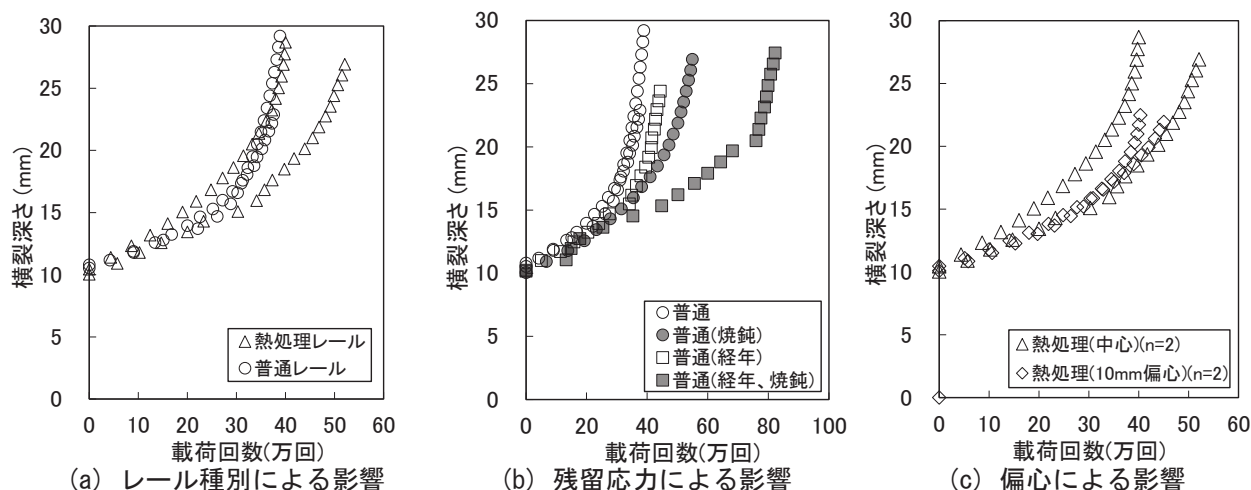
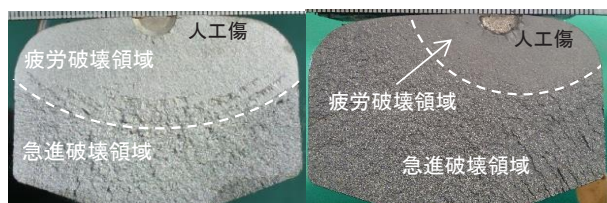


図5 横裂進展試験結果（载荷回数と横裂深さの関係）



(a) 人工傷中心 (b) 人工傷10mm偏心

図6 試験後の破面の例

(d) 図5(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6より、偏心させた場合には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。

## 2.2 ヘッドアップの横裂進展試験

実際の営業線に設置されているレールの横裂進展状況を再現するため、経年の熱処理レールの頭頂面に人工傷を加工したレールを用い、温度変化によりレール長手方向に発生する応力を想定してレール軸力を付加しながら繰り返し鉛直荷重を载荷する横裂進展試験を実施した。熱処理レールに発生するゲージコーナき裂からの横裂は、レール断面方向から傾いて進行するが、シェリングに比べてその傾きは深い（垂直に近い）。そのため、本試験ではヘッドダウンの横裂進展試験と同様の人工傷を垂直に加工し、人工傷の位置もゲージコーナ側に10mm偏心させた。ヘッドアップの横裂進展試験前にヘッドダウンの状態では荷重を行い、予き裂を5mmの位置まで発生させたのち、図7に示すように、ヘッドアップの状態では設置し、レール軸力および支点間隔1000mm、载荷間隔150mmの片振り4点曲げで繰り返し鉛直荷重を载荷した。

試験条件を表2に示す。引張軸力は、754kN（温度変化量50℃相当）、566kN（38℃相当）、357kN（25℃相当）の3通り、頭部曲げ応力振幅は100N/mm<sup>2</sup>、60 N/mm<sup>2</sup>

の2通りとした。試験 No. ②の供試体については、引張軸力357kNかつ頭部曲げ応力振幅100N/mm<sup>2</sup>で200万回载荷したが、き裂が進展しなかった。そのため、引張軸力を566kNに変更した後、再度、鉛直荷重を繰返し载荷した。

ヘッドアップの横裂進展試験後の破面の例を図8に示す。ビーチマークの形態が供試体ごとに異なっているため、ヘッドダウンの横裂進展試験のようにき裂の進展を楕円と仮定せず、ビーチマークの形状を参考に横裂深さとクラックゲージの測定結果の関係を推定し、横裂深さに換算することとした。また、クラックゲージの測定結果はゲージコーナ側の値を用いている。試験結果を図9に示す。ここでは载荷回数とクラックゲージから測定されたき裂長さおよび横裂深さの関係を示す。シェリングからの横裂を対象とした過去の試験結果と同様に<sup>4)</sup>、経年の熱処理レールを供試体とした本試験結果はばらつきが大きいものになると想定されるが、得られた結果をまとめると以下の通りである。

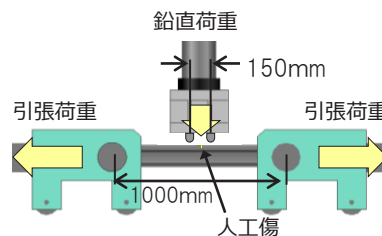


図7 ヘッドアップの横裂進展試験

表2 ヘッドアップの横裂進展試験の条件

試験 No.	種別	使用履歴	人工傷	頭部曲げ 応力振幅 (N/mm <sup>2</sup> )	引張軸力 (kN)
①	熱処理	経年	偏心	60	754
②				100	377 → 577 (200万 回载荷後)
③				100	754

特集：軌道技術

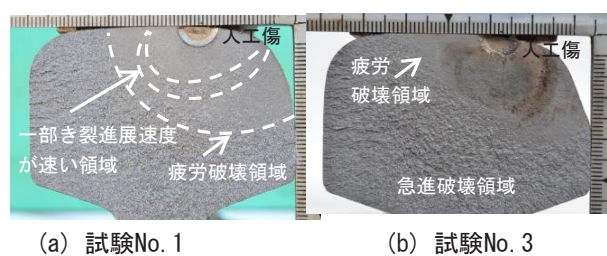


図8 ヘッドアップの横裂進展試験の破面の例

- (a) 引張軸力が754kNの試験において、頭部曲げ応力振幅が大きいほど、横裂進展速度も速くなる結果となった(試験No. ①, ③の結果の比較)。
- (b) 引張軸力が754kN, 566kN, 377kNの試験結果の比較において、前述のように引張軸力377kNの条件ではき裂が進展しなかったことを考慮すると、引張軸力が大きいと横裂の進展速度が大きくなると推定されるが、ばらつきが大きい。実際、566kNと754kNの結果を比較すると、566kNの試験結果の方がクラックゲージでき裂長さ25mmに至るまでの鉛直荷重の載荷回数が少ない結果となった。ただし、き裂長さ13mm以降の進展速度は載荷回数と長さの関係の傾きからほぼ同等となっている。(試験No. ②, ③の結果の比較)。

2.3 残留応力測定および考察

レールの頭部内部の残留応力は横裂進展に大きく影響することが知られており、過去にもひずみゲージをレール頭部内部に設置し切り出し法で測定されてきた<sup>6)</sup>。しかし、切り出すサイズに依存するため、細かいピッチで測定することは困難であった。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10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て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。本手法を用いて1mmピッチで残留応力測定を行った。測定結果を図11、結果のまとめを表3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で66N/mm<sup>2</sup>、新品および経年の熱処理レールでそれぞれ72N/mm<sup>2</sup>、154N/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。一方、経年の熱処理レールは、累積通過トン数の影響で頭頂面近傍では圧縮となり、直下の深さ10～30mmでは最大で190N/mm<sup>2</sup>程度の大きな引張の残留応力が発生していた。

ここで、横裂進展速度を決定する有効応力拡大係数範囲ΔKおよび応力比Rについて着目する。き裂進展速度

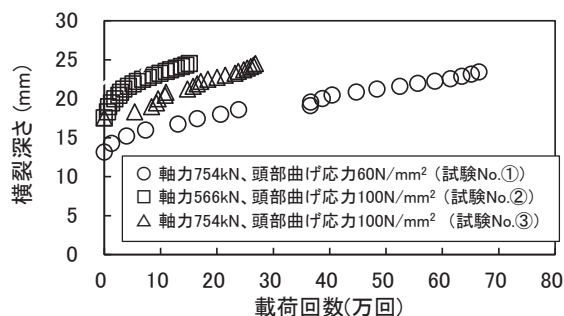


図9 載荷回数と横裂深さの関係(ヘッドアップ)

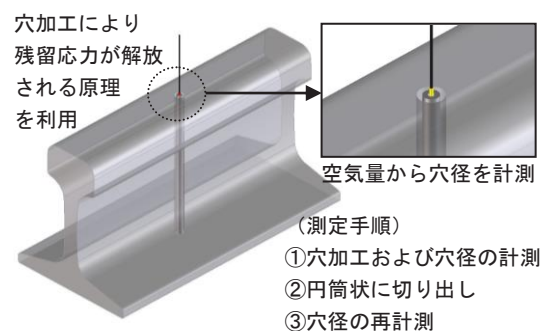


図10 MIRS法による残留応力測定

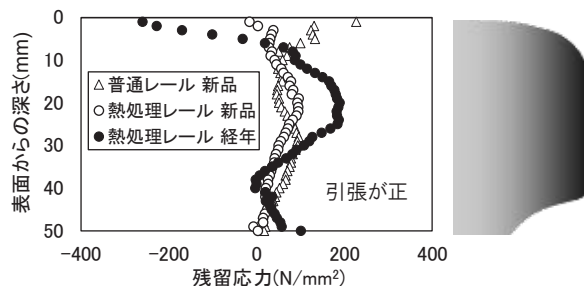


図11 残留応力測定結果

表3 レール頭部残留応力測定のとまとめ

レール種別	使用履歴有無	測定位置(mm)	残留応力(N/mm <sup>2</sup> )
普通	無	頭頂面	50～200
		頭部内部	45～100
熱処理	無	頭頂面	-50～0
		頭部内部	0～80
	有	頭頂面	-290～20
		頭部内部	100～190

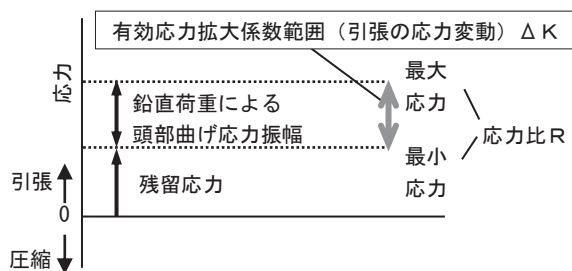


図12 ヘッドダウンの横裂進展試験でレール頭部に発生する応力

を表すウォーカー則を式 (1) に示す。

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \Delta K (1-R)^{n-1} \right]^m \quad R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1)$$

ここで、 $a$ : き裂の大きさ、 $N$ : 応力変動の繰返し数、 $C$ 、 $m$ : 材料定数、 $\sigma_{\min}$ : 最小応力、 $\sigma_{\max}$ : 最大応力

図 12 はヘッドダウンの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。ウォーカー則およびこれまでの試験結果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大きくなることは明らかである。例えば、ヘッドダウンの横裂進展試験では残留応力が発生している状態から、鉛直荷重が作用することで引張の曲げ応力振幅がレール頭部に発生し、有効応力拡大係数範囲に換算される。曲げ応力振幅が有効応力拡大係数範囲であり、本試験においては残留応力の大きさは有効応力拡大係数範囲  $\Delta K$  に影響していないと考えられる。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: 残留応力と鉛直荷重による曲げ引張応力振幅の和となる。

残留応力が大きくなることで、最小応力、最大応力および応力比も大きくなり、焼鈍および新品の普通レールの試験結果の比較で明らかに示されたように横裂進展速度に差があるのは、残留応力が異なることによる応力比の違いが大きく影響していると考えられる。ヘッドアップの試験は残留応力のみならず、軸力、および鉛直荷重による圧縮の曲げ応力変動が発生し、より複雑な応力状態となるが、これについても、有効応力拡大係数範囲  $\Delta K$  および応力比  $R$  に換算することで、横裂進展速度が定量的に示されると考えられる。また、本試験結果のばらつきが大きかったのは、累積通過トン数の影響による供試体(経年)同士の残留応力が異なるためと推定される。

### 3. 有限要素法による横裂進展解析

#### 3.1 解析手法の妥当性の検証

レール頭部横裂のき裂進展速度を把握するために、仮想き裂進展法と自動メッシング機能を有したき裂進展解析システム FINAS/CRACK<sup>7)</sup> および大規模非線形構造解析システム FINAS/STAR<sup>8)</sup> を用いた有限要素法による解析を実施した。

解析手法の妥当性の検証のため、ヘッドダウンで支持した新品の普通レールの横裂進展試験を模擬した解析を実施した。解析概要を図 13 に示す。本解析では支点間隔 1000mm、載荷間隔 150mm の片振り 4 点曲げ試験を模擬した。50kgN レールをモデル化し、載荷間隔の間をメッシュサイズ 5mm、それ以外を 10mm とした四面

体二次要素で作成した。荷重はレール長手方向の中心において、レール底部裏から鉛直方向に繰り返し作用させた。荷重  $P$  の大きさは最大値 120kN、最小値 10kN とした。拘束条件は 1000mm のレール支持位置において上下変位を拘束し、長手方向はレール支持位置の底面中心部 1 点を拘束した。ヤング率  $E$  及びポアソン比  $\nu$  は、それぞれ、 $E = 2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 、 $\nu = 0.3$  を用いた。また、疲労き裂進展則は、ウォーカー則を用いた。別途行った材料試験より、レールの材料定数は  $(C, n, m)$   $C = 3.85 \times 10^{-12}$ 、 $n = 0.62$ 、 $m = 3.0$  とした。

初期き裂は図 13 に示すように、レール長手方向の中心、またはゲージコーナ側に 10mm 偏心させた位置において、レール頭頂面に垂直に 5mm 深さの半円とした。また、残留応力は、前述した MIRS 法による残留応力測定結果より、新品の普通レールの測定結果を与えた。解析手法の妥当性を検証するために、普通レールを対象とした解析結果と試験結果を比較する。図 14 に載荷回数と横裂深さの関係を示す。新品の普通レールの残留応力を付与した解析結果は新品の普通レールの試験結果と良好一致を示し、本解析手法はレールの横裂進展予測手法として、有効であることがわかった。

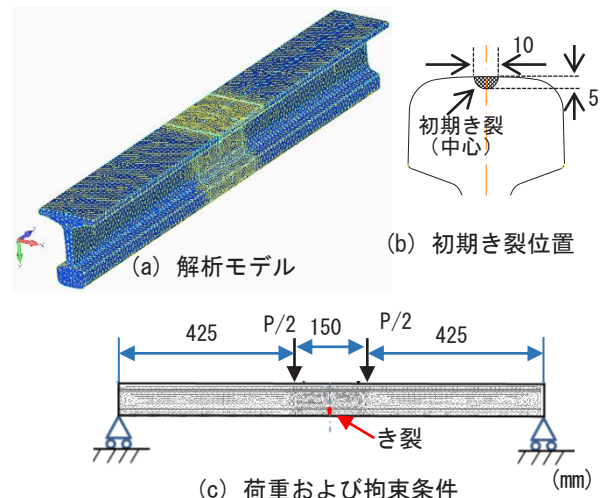


図 13 横裂進展解析 (ヘッドダウン) 概要

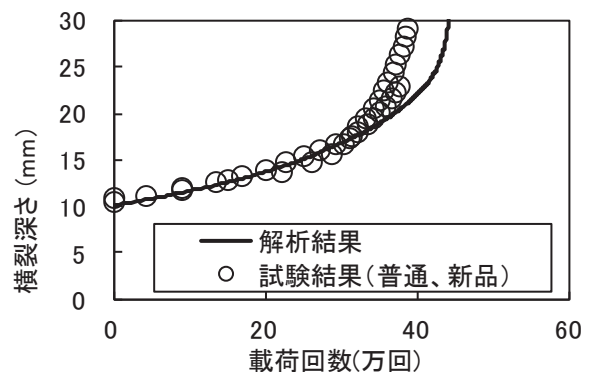


図 14 普通レールにおける解析および試験結果

特集：軌道技術

3.2 横裂進展予測手法の構築

以上の検討により、本解析手法がレールの頭部横裂の進展を予測可能であることが示唆されたので、この手法を用いて営業線に発生する横裂の進展予測手法を以下のように提案する。

営業線における横裂進展の推定にあたり、過去に開発したき裂進展解析ツール<sup>4)</sup>を改良し、横裂の進みを推定する。推定においては、列車荷重の特性や軌道条件、また、温度の変動による熱応力を考慮する必要がある。営業線における横裂進展解析のフローチャートを図15に示す。手順は以下の通りである。

- (1) 軌道条件（軌道線形、軌道構造条件）および車両条件を車両運動解析ソフト Simpack<sup>9)</sup>に入力し、車両の輪軸が通過した際のそれぞれ輪重横圧および車輪位置、接触面積を算定する。
- (2) き裂（形状、角度、位置等）、軸力および残留応力、き裂進展特性と(1)で得られた結果を横裂進展解析 FINAS/CRACKに入力し、車両の走行による横裂進展と有効応力拡大係数範囲および応力比の関係を求める。
- (3) 年間通過トン数（年間における列車の走行回数×列車重量）、温度変動条件等を設定し、(2)で得られた結果を用いて横裂進展を計算する。

今後は営業線から得られる探傷データ等を参考にして、横裂進展予測の高精度化を図る予定である。

4. まとめ

熱処理レールに発生する横裂の進展速度を把握するため、頭部に人工傷を加工した実レールを用いた横裂進展試験を実施し、き裂進展傾向や横裂進展速度を明らかにした。さらに、実レールの試験を模擬したFEM解析を実施し、その精度の検証をした後、予測手法を構築した。

- (1) 実レールのヘッドダウンの横裂進展試験を実施した結果、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。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10mm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) ヘッドアップの横裂進展試験を実施し、頭部曲げ応力振幅、軸力が大きくなるほど横裂進展速度が大きくなる結果となった。ただし、残留応力の影響によ

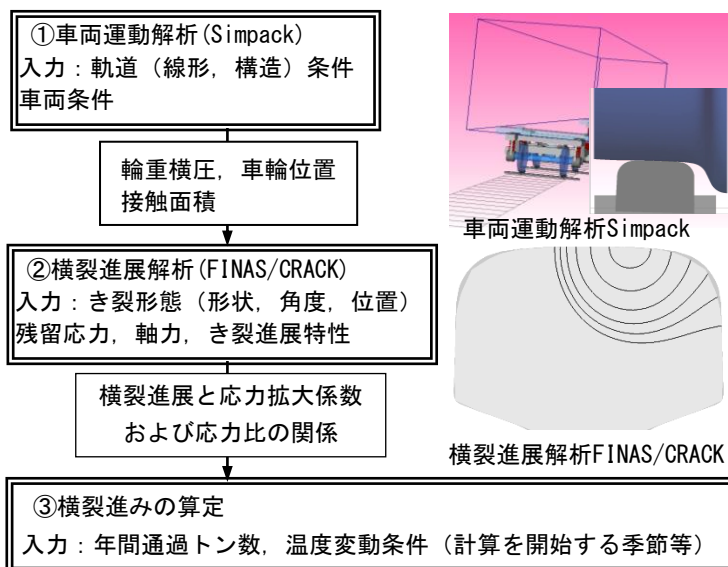


図15 横裂進展解析のフローチャート

- るばらつきもみられた。
- (3) レールの実形状を模擬したモデルを用いて、き裂進展の際の有効応力拡大係数範囲および応力比を考慮可能で自動メッシュ機能を備えた有限要素法による横裂進展試験のシミュレーションを実施した。試験結果と解析結果を比較した結果、横裂進展速度は概ね整合し本手法の有効性を示した。各種条件を考慮可能な横裂進展予測手法を提案した。

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，RRR，No.70，pp.30-33，2013
- 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，新線路，No.70，pp.23-25，2016
- 3) 柏谷賢治，石田誠：レール横裂成長速度予測モデル，鉄道力学シンポジウム，No.7，pp.79-84，2003
- 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，鉄道力学シンポジウム，No.16，pp.31-36，2012
- 5) 堀克則，福井義弘：横裂進みを考慮したシェリング傷管理方法，鉄道力学シンポジウム，No.12，2008
- 6) 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，1983.1
- 7) [http://www.engineering-eye.com/FINAS\\_CRACK/](http://www.engineering-eye.com/FINAS_CRACK/)（参照日：2018年10月1日）
- 8) [http://www.engineering-eye.com/FINAS\\_STAR/](http://www.engineering-eye.com/FINAS_STAR/)（参照日：2018年10月1日）
- 9) <https://www.3ds.com/ja/productservices/simulia/products/simpack/>（参照日：2018年10月1日）