

レール頭部横裂の進展予測手法の構築

細田 充* 片岡 宏夫*

小谷 隼* 弟子丸 将*

Experimental Study on the Prediction Method of Transverse Crack Growth Rate in Rail Head

Mitsuru HOSODA Hiroo KATAOKA

Jun KOTANI Tadashi DESHIMARU

The maintenance work on rail defects, especially squat, is very important to ensure railway safety. Transverse cracks branch from horizontal cracks of rail head and grow in a direction toward railbase. Clarification of the mechanism of crack growth is very helpful to make a maintenance plan. In this paper, the authors proposed a test method for crack growth with full-scale test rail. Also, comparing the results obtained by some crack growth models with the test results obtained by the proposed test method, the prediction method of transverse crack growth rate under various actual track conditions was developed.

キーワード：レール，シェリング，線形破壊力学，き裂進展速度，頭部横裂

1. はじめに

レールは軌道を構成し、列車の走行安全を確保するための重要な部材であり、レール損傷を防止するための保守管理は重要である。

発生頻度の高いレール損傷の形態として、図1に示すような頭頂面シェリング（以下、「シェリング」という。）がある。シェリングによる水平裂から傷がレール底部方向に分岐して（以下、「頭部横裂」という。）、最終的にレールが破断する可能性があるため、鉄道事業者は超音波探傷等の検査を実施し必要に応じてレール交換を行っている。それらの検査周期や処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。

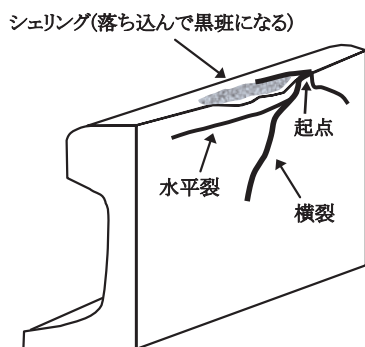


図1 頭頂面シェリングの概要

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

定が行われているが¹⁾、実レールの横裂の進展については実験的に検証されていなかった。そのため、著者らは人工傷を加工した実レールの横裂進展試験を実施するとともに、き裂進展解析ツールの開発を行ってきた^{2) 3)}。一方、最近では、同種の試験⁴⁾や、任意の方向のき裂進展に対して、配置した節点のまま解析可能なメッシュフリー法による解析的な検討も行われている⁵⁾。また、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⁶⁾。

以上のことを踏まえて本研究では、進展速度の推定精度を向上させるために、人工傷および実際に横裂が発生した現場発生レールを用いて、軸力を与えた状態で繰返し鉛直荷重を載荷することによる横裂進展試験、破断面形状を考慮した有限要素解析およびそれらの結果を用いたき裂進展解析ツールの深度化を行った。その結果、試験により横裂の進展速度を把握し、軌道構造条件、車両条件等の条件を考慮してき裂進展速度を推定できるき裂進展解析ツールを開発した。

2. 横裂進展速度推定の考え方

頭部横裂の進展を予測するために、線形破壊力学による推定手法を用いることとする⁷⁾。その主な流れは以下のとおりである。

- ① き裂形状、発生応力から応力拡大係数を計算する。
- ② 応力拡大係数から有効応力拡大係数範囲を求め疲労き裂進展則に代入しき裂進展速度を求める。

ここで、応力拡大係数とはき裂先端付近に分布する応

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

特集：軌道技術

力の大きさの程度を示す係数であり、有効応力拡大係数範囲はき裂が開口している間の応力拡大係数の範囲であるが、ここではそれを引張の応力変動の範囲に対応しているものとみなした。既往の研究において、レール鋼の要素試験により、有効応力拡大係数範囲と疲労き裂進展速度の関係が示されている¹⁾。その疲労き裂進展速度は次式で表される。

$$da/dN = 10^{-11} (\Delta K_{I,eff})^3 \quad (1)$$

ここで、 a ：き裂の大きさ (mm)、 N ：応力変動の繰返し数、 $\Delta K_{I,eff}$ ：有効応力拡大係数範囲 (MPa・m^{1/2})。本研究では上記の考え方にに基づき、き裂進展速度の検討を行った。

3. 横裂進展試験

3.1 試験方法

頭部横裂の進展速度を把握するため、使用履歴のあるレール頭部に人工傷(半径10mmの半円状のスリット)を加工したレール10本、およびシェリングから頭部横裂が発生した実レール3本を用い横裂進展試験を実施した。なお、人工傷を加工したレールは横裂進展試験前に頭部下向きの载荷試験を行い予き裂(疲労き裂)を発生させている。試験後破断面を確認したところ、人工傷レールの予き裂は13.5～20.5mm、現場発生傷レールの試験前の横裂深さは、深さ26.9mmの供試体No.12を除くと8.0および12.2mmであった(表1参照)。

横裂進展試験は、レール長さ方向と鉛直方向を同時に载荷できるレール曲げ疲労試験機を用いて、図2に示すようにレール頭部を上にした状態で実施した。シェリングからの横裂はレール断面方向から傾いて進行することが知られているが、その原因については明らかになっていない。かつ、载荷位置直下に人工傷を置いた場合、接触圧力が影響する可能性があると考えた。そのため、3点曲げに対する予備解析を行ったところ、载荷点から20mm程度離れた位置で図3に示すように30度傾いた面の法線方向の応力が大きくなることがわかった。そこで、傷が斜めに進展することを再現するために、図2に示すように人工傷が载荷点から20mm離れた位置にくるようにレールを設置した。载荷方法は、レール引張軸力を負荷した状態で、応力全振幅を大小2通り設定し、大と

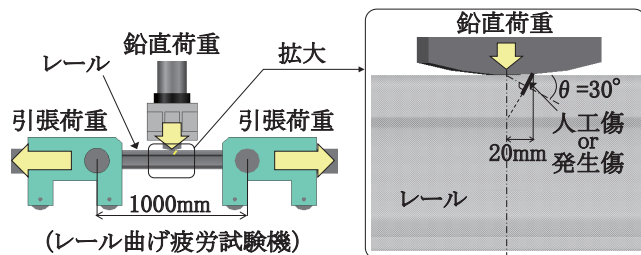


図2 横裂進展試験概要

小の载荷回数の比を1:2として所定の回数ごとに繰返した。このように応力全振幅を変化させることにより、疲労き裂の進展速度が変わり、振幅ごとの疲労破面の境界が観察できると予想した。50kgNレールの引張軸力は、温度変化量50℃相当(754kN)、25℃相当(377kN)の2通り、60kgレールは20℃相当(364kN)の合計3通りとした。総繰返し数は210万回とし、未破断の供試体は試験後に強制破断させ横裂破面を観察した。

残留応力 100N/mm²
 温度応力 50N/mm²(温度変化量20℃相等)
 観測点深さ：頭頂面から20mm下方

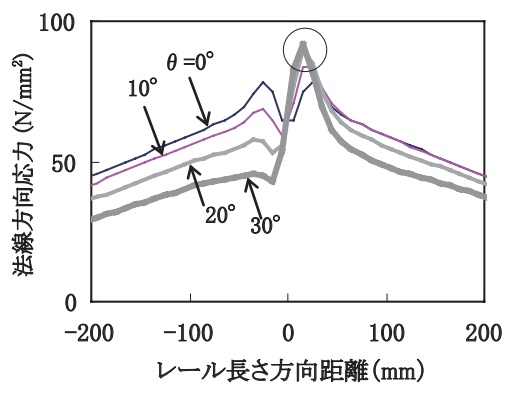
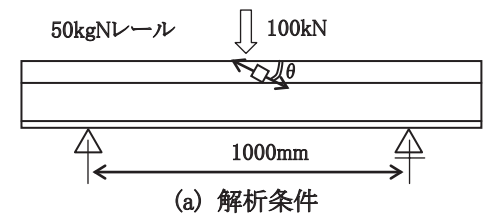


図3 レールの傾いた面に働く法線方向の応力の解析

3.2 試験結果

横裂進展試験の結果を表1に示す。試験結果の概要は以下のとおりである。なお、横裂深さは鉛直方向の値を表すものとする

- ① 鉛直荷重によりレール頭部が曲げ圧縮となる場合でも、引張軸力下で横裂が進展することを確認した。疲労き裂はレール断面に対し斜めに進展しており(図4)、深さ30mm程度で急進的な破断に至った(図5)。
- ② 50kgNレールで引張軸力754kNの条件では、9本中4本が破断した。
- ③ 50kgNレールで引張軸力377kN、60kgレールで364kNの条件では、4本中1本が破断した。ただし破断したNo.12は、試験前に大きな横裂のあったものであり、繰返し数71.6万回において、疲労き裂が深さ49mm程度まで進展し、その後急進的に破断に至った。

次に、結果から破断およびき裂の進展した未破断

の両方の供試体について、繰返し数1万回当りの横裂の進展速度を求めた。その結果を表1に示す。進展速度の算定にあたって、破断した供試体のピーチマークが明確に確認できるもの(図6)については、各応力振幅の進み量のうち最も大きなものをその応力振幅の繰返し数で除して算出し、未破断の供試体は、ピーチマークが不明確のため、横裂の総進み量を総繰返し数で除して平均的な進展速度を算出した。応力全振幅が140N/mm²で進展速度が最も速かったのは、供試体No.5の0.59mm/万回であった。

本試験において、進展速度にかなりのばらつきが生じていた。このばらつきの一つの要因として、レール内部

表1 横裂進展試験結果

供試体No	(上段)レール種別 (下段)傷種別	応力全振幅* (N/mm ²)	引張軸力 (kN)	横裂深さ (mm) (上段)試験前 (下段)試験後	横裂進展速度 (mm/万回)	総繰返し数 (万回)
1	50kgN	70	754	19.5	-	115.5
	人工傷	140		30.8	0.26	
3	50kgN	70	754	16.4	0.06	124.3
	人工傷	140		30.0	0.46	
5	50kgN	70	754	15.6	-	100.0
	人工傷	140		32.3	0.59	
7	50kgN	70	754	12.2	0.08	161.1
	現場発生	140		32.8	-	
12	50kgN	70	377	26.9	0.45	71.6
	現場発生	140		49.6	1.23	
2	50kgN	70	754	20.5	0.01	210 (未破断)
	人工傷	140		25.0		
4	50kgN	70	754	13.5	0	210 (未破断)
	人工傷	140		13.5		
6	50kgN	70	754	16.2	0.05	210 (未破断)
	人工傷	140		26.7		
8	50kgN	105	754	16.8	0.04	210 (未破断)
	人工傷	175		25.2		
9	50kgN	105	754	14.4	0.06	210 (未破断)
	人工傷	175		26.1		
10	50kgN	70	377	-	-	210 (未破断)
	人工傷	140		-		
11	50kgN	70	377	15.5	0	210 (未破断)
	人工傷	140		15.5		
13	60kgN	70	364	8.0	0	210 (未破断)
	現場発生	140		8.0		

※ 応力全振幅小20万回、大10万回もしくは小40万回、大20万回を組み合わせ繰返し負荷した。

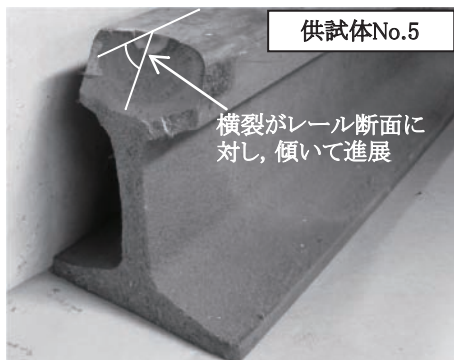


図4 試験による横裂の進展例

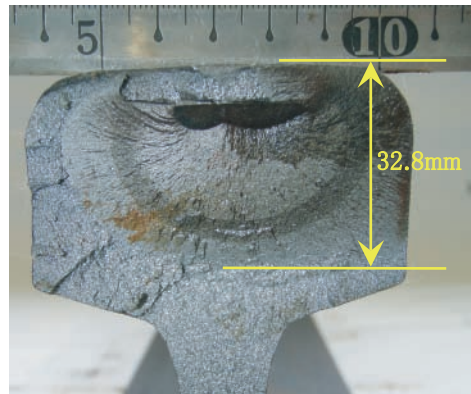


図5 供試体 No.7の破断面

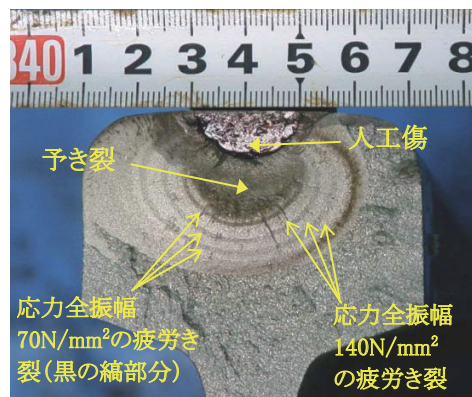


図6 供試体 No.1の破断面

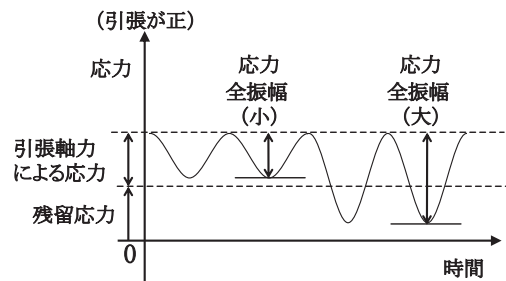


図7 残留応力が引張状態の応力振幅

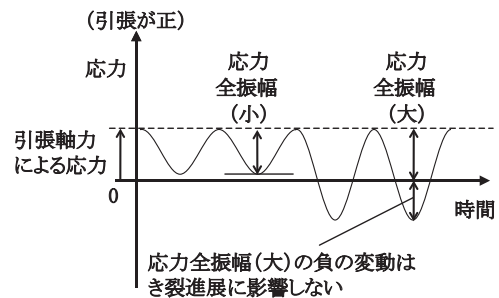


図8 残留応力がほとんど無い状態の応力振幅

の残留応力が考えられる。残留応力が、①引張状態、②ほとんど無い状態の2ケースが考えられ、前者については軸力+残留応力が大きく、曲げ圧縮による応力全振幅がほぼき裂進展に寄与すると推定される(図7)。後者については引張軸力を付加した場合においても、曲げ圧縮による応力全振幅の一部が圧縮の変動となり進展に寄与せず、前者と

特集：軌道技術

比較しき裂進展速度が遅くなったものと推定される(図8)。

また、式(1)によると、き裂進展速度は有効応力拡大係数範囲の3乗に比例する。この有効応力拡大係数範囲は応力変動に対応することから、き裂進展速度は応力変動の3乗に比例する。今回の試験結果は、横裂進展速度にばらつきが見られるものの、供試体No.12を除き、進展速度が最も速いもので、応力全振幅が2倍になると進展速度が7.4倍となっており、理論とほぼ合致している。

4. 試験結果による有限要素解析モデルの検証

3章の試験で使用した試験レールの有限要素モデルを作成して解析を行い、載荷時のき裂先端の応力拡大係数から計算されるき裂進展速度を求め試験結果と比較した。図9に解析モデルを、表2に解析の諸元を示す。3章の横裂進展試験を模擬し、支点間距離1000mmとして3点曲げの静的解析を行った。荷重は軸力754kN、鉛直荷重190kN(底部応力140N/mm²相当)とし、さらに残留応力を考慮する場合の2パターンとして、応力拡大係数を求めた。き裂の形状は試験レールを模擬し図9(b)のようにした。き裂先端の深さは約25mmとした。

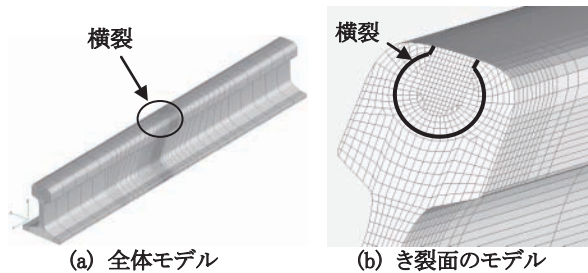


図9 解析モデル

表2 解析の諸元

項目	種類・諸元	
レール	50kgN レール	
荷重条件	軸力	754kN
	鉛直荷重	190kN
き裂先端深さ	25mm	
き裂角度	60度	
支点間距離	1000mm	

試験を模擬し、軸力と残留応力に対する応力拡大係数に、鉛直荷重載荷時の圧縮側の応力拡大係数の変動を加えたときに生じる引張の応力拡大係数の変動を有効応力拡大係数範囲(図10参照)とし、式(1)のき裂進展則からき裂進展速度を求めた。なお、残留応力は、レール長さ方向に等分布に50N/mm²を付加した。この解析における荷重の条件下では、これ以上の残留応力を付加させても、有効応力拡大係数範囲は大きくならずき裂進展速度には影響しない値となっている。

解析結果を表3に示す。有効応力拡大係数範囲は28.4MPa・m^{1/2}となり、き裂進展速度は2.29mm/万回となる。ここで求めた応力拡大係数に0.64の補正係数を乗じることにより、試験における最速の進展速度と同等の横裂進展速度が得られる。ただし、これらの差異については残留応力の影響等不確実な要因をさらに検討する必要がある。

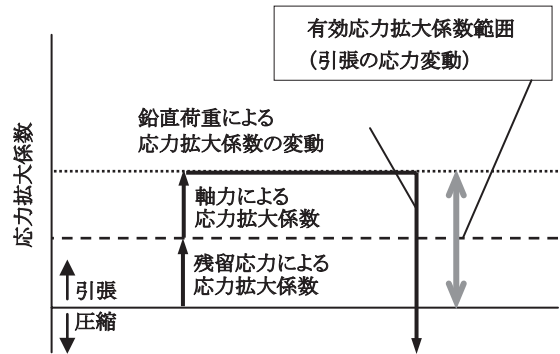


図10 解析の有効応力拡大係数範囲の概念図

表3 解析結果

応力拡大係数 (MPa・m ^{1/2})		き裂進展速度 (mm/万回)	
鉛直荷重190kN	軸力754kN	残留応力を考慮しない場合	残留応力50N/mm ² を考慮した場合
-28.4	20.9	0.91	2.29

5. き裂進展速度の推定

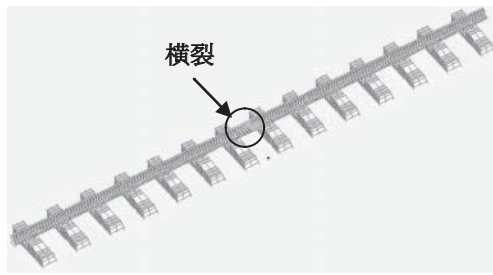
5.1 推定条件

き裂進展速度の推定にあたり、過去に開発したき裂進展解析ツール²⁾を改良し、4章で算定した有限要素モデルおよび上記の補正係数を用いて、横裂の進みを推定した。推定に用いた有限要素モデルを図11に示す。モデルは実軌道を模擬して、まくらぎ14本の軌きょう半分をモデル化し、横裂をレール長さ方向の中央位置に設定した。き裂の形状については実軌道に発生するき裂を想定し、水平裂から横裂に分岐しているものとし、横裂先端からレール長さ方向に20mm~30mmの位置に荷重を作用させる静的解析を行った。

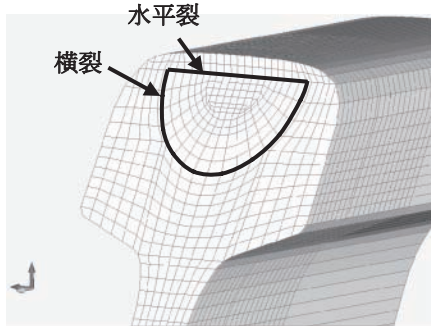
また、き裂進展解析ツールの中の応力拡大係数の計算は以下のように行った。あらかじめ、有限要素解析を行い、き裂深さに対して軸力および底部曲げ応力から応力拡大係数に換算する係数を求める。図12に横裂深さと応力拡大係数の関係を示す。次に、き裂進展解析ツールから出力される軸力および底部曲げ応力に、その換算係数と4章で得られた補正係数を乗じて、き裂進展速度を算定した。本ツールのフローチャートを図13に示す。

本ツールを用いて、き裂進展速度の試算を行った。表4に推定条件を示す。推定条件の考え方は以下のとおりである。

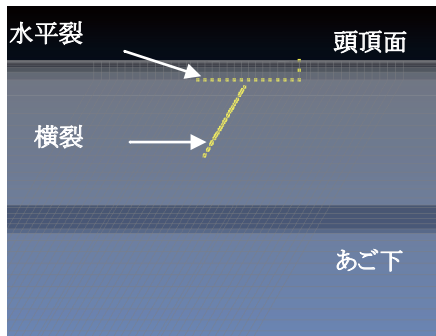
(1) 残留応力については、既往の研究によりレール頭部



(a) 解析モデル全体図



(b) 解析モデル断面図



(c) 解析モデル側面図(傷近傍)

図 11 実軌道を想定した解析モデル

中央付近に 100N/mm^2 までの引張りの残留応力があることが示されている⁴⁾。本推定では、き裂近傍に引張りの応力 75N/mm^2 が等分布に作用すると仮定した。

(2) 温度応力は、既往の研究と同様の条件で年間を通して平均温度が変化するものとし、一日の寒暖差を考慮して、各時期において温度が正規分布に従うものとした。

(3) 列車走行時に発生するレール曲げ応力については、横裂発生レールの凹凸形状を考慮し、 100mm の長さで 0.25mm および 0.50mm 程度の落ち込みを設定し、過去の知見から得たまくらぎの浮きを考慮した曲げ応力算定式を用いて底部曲げ応力を表5のようににした⁸⁾。また、レール底部曲げ応力のばらつきは正規分布に従うものとし、標準偏差を過去の知見から 50kgN レールに対し 8.9N/mm^2 、 60kg レールに対し 7.0N/mm^2 とした。

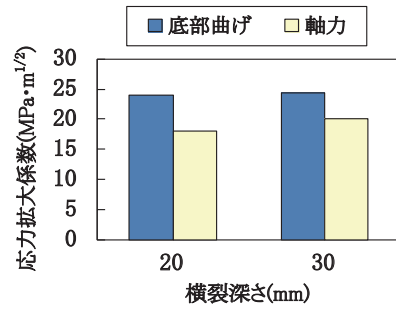


図 12 横裂深さと応力拡大係数

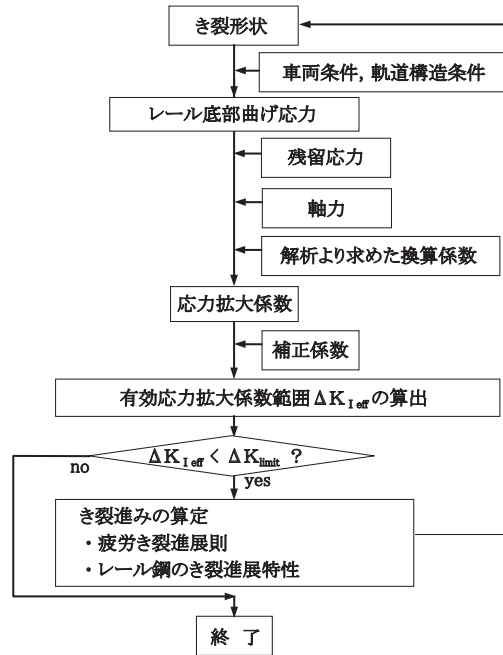


図 13 き裂進展解析ツールのフローチャート

表 4 推定条件

レール種別	50kgN
軌道条件	在来線, 有道床軌道 浮き有
車両種別	旅客車 (w=58.7kN, 130km/h) 機関車 (w=78.4kN, 100km/h)
年間通過トン数	500 万, 1000 万, 2000 万トン
設定温度	30°C
年間平均レール温度	26°C
年間レール温度変化量	± 14°C
日中温度標準偏差	6.3°C

表 5 レール底部曲げ応力の推定結果 (N/mm²)

50kgN レール				60kg レール			
車両種別	最大 最小	凹凸深さ		車両種別	最大 最小	凹凸深さ	
		0.25mm	0.50mm			0.25mm	0.50mm
旅客車	最大値	65.0	76.4	旅客車	最大値	52.9	62.9
	最小値	-5.1	-5.1		最小値	-4.2	-4.1
機関車	最大値	76.4	86.3	機関車	最大値	61.7	70.3
	最小値	-6.6	-6.6		最小値	-5.2	-5.2

特集：軌道技術

5.2 推定結果

き裂深さおよび温度応力と通過トン数との関係を図14に示す。

温度応力の波形の振幅が引張側に増加するにつれき裂が大きく進展し、圧縮側ではあまり変わらない。

図15に推定結果を示す。本推定条件下では、き裂が深さ15mmから35mmまで進展するまでの通過トン数は、年間通過トン2000万トンで凹凸量が0.25mmの場合は57~80百万トン、0.50mmの場合は52~71百万トンであった。凹凸量については0.50mmと比較して0.25mmの方が、き裂深さが35mmに至るまでの通過トン数が多くなった。なお、ここで機関車と比較して特急列車の方が、通過トン数が小さくなっていったのは、進展に要する走行繰り返し数は応力の小さい特急列車の方が多いが、静止輪重が小さいためにそれらをかけ合わせた通過トン数が小さくなったものである。これらの結果は想定している車両の走行条件、軌道状態によって変わり得るものである。

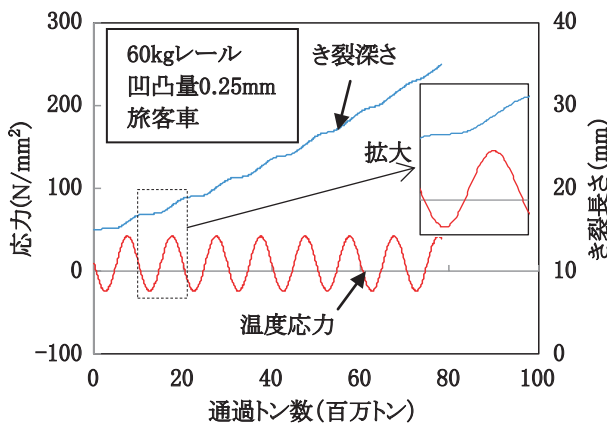


図14 発生応力とき裂深さの推定例

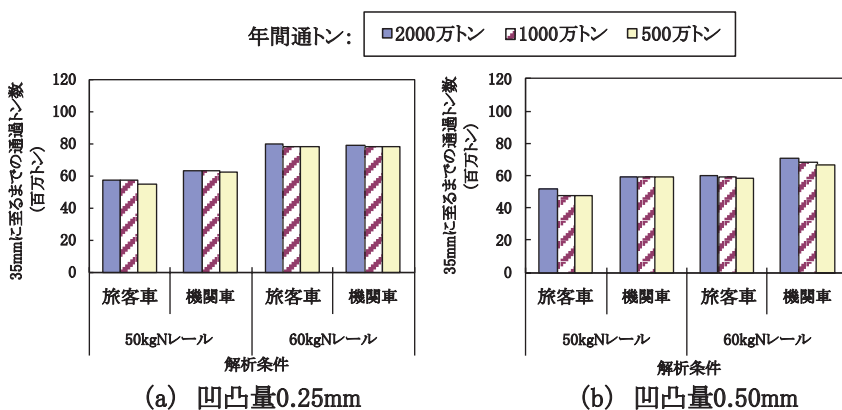


図15 推定結果 (残留応力 75N/mm²)

6. 結論

レールの頭部横裂の保守管理の適正化に資することを目的として、横裂進展試験で進展速度を把握し、破断面

形状を考慮した有限要素解析およびそれら結果を用いたき裂進展解析ツールの深度化を行った。これにより以下のような結論を得た。

- (1) 頭部に人工傷を加工したレールおよび現場で横裂が発生したレールに対して横裂進展試験を実施した。鉛直荷重のみでレールが曲げ圧縮の状態でも、引張軸力下では横裂が進展することを明らかにした。ただし、横裂進展速度にかなりのばらつきが生じた。試験結果において、破断面から読み取った最も速いき裂進展速度は、引張軸力754kN、レール底部曲げ応力振幅が140N/mm²の場合で0.59mm/万回であった。
- (2) 有限要素法で試験の横裂形状に対するき裂の応力拡大係数の解析を行い、解析により推定されるき裂進展速度と横裂進展試験結果の比較を行った。その結果、解析値は試験値と比較して大きく、解析結果の応力拡大係数に補正係数0.6を乗じれば試験結果と同等のき裂進展速度になる。
- (3) 有限要素解析を用いたき裂進展解析ツールの深度化を行い、き裂進みの試算を行った。き裂進展速度は想定される応力や軸力の状況により変化するが、凹凸量および浮き等の軌道構造条件、車両条件等の条件を考慮した推定結果を算出することが可能となった。

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, 2003年7月
- 2) 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, 2007年3月
- 3) Deshimaru.T, Kataoka.H, Hosoda.M: Eper-imental Study on the Prediction Method of Transverse Crack Growth Rate, IHHA Conference 2011, (2011).
- 4) 青木宣頼: レール横裂きずの進展に関する研究, 日本鉄道施設協会誌, 2007年2月
- 5) 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年12月
- 6) 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年7月
- 7) 白鳥正樹: 数値破壊力学, 実教出版, 1980年1月
- 8) 弟子丸将, 片岡宏夫, 阿部則次, 大野宗伸: 経年ロングレールの疲労寿命推定, 鉄道総研報告, 2006年4月