

実験的研究によるレール傷の進展速度の推定

軌道技術研究部 軌道構造研究室
研究員 細田 充

1. はじめに

レール傷はレール破断につながる可能性があり、発生メカニズムの解明および進展速度の把握は重要な課題である。本研究は、頭部横裂および継目穴き裂のあるレールを対象にき裂進展試験および試験を模擬した有限要素解析を行い、頭部横裂および継目穴のき裂の進展特性について検討したものである。

2. き裂進展速度推定の考え方

頭部横裂および継目穴のき裂の進展を予測するために、き裂進展でよく用いられている線形破壊力学による推定手法を用いることとする。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進みを求める。

ここで、応力拡大係数はき裂先端付近に分布する応力の強さの程度を示す係数であり、また引張の応力変動に対応する応力拡大係数の範囲を有効応力拡大係数範囲という。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)。本研究も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. 頭部横裂の検討

3.1 横裂進展試験

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の頭頂部に人工傷（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。横裂進展試験は、レール長さ方向と鉛直方向に同時に載荷できるレール曲げ疲労試験機を用いて、図 1 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、予備解析により 3 点曲げに対して載荷点から 20mm 程度離れ

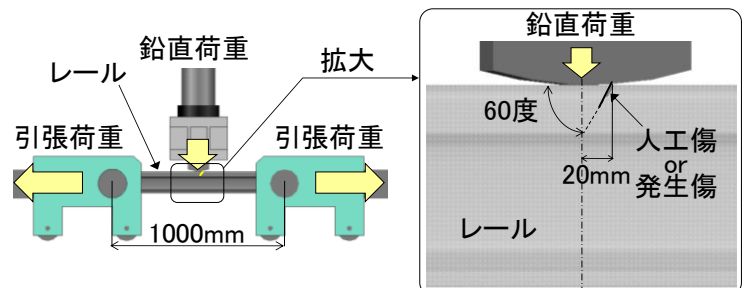


図 1 横裂進展試験概要

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、予備解析により 3 点曲げに対して載荷点から 20mm 程度離れ

た位置で 30 度傾いた面の法線方向の応力が大きくなる結果が得られたことから、人工傷が載荷点から 20mm 離れの位置にくるようにレールを設置した。

載荷方法は、レール軸力を負荷した状態で、応力全振幅を大小 2 通り設定し、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、振幅ごとの疲労破面の境界が観察できると予想した。総繰返し数は 210 万回とし、傷が斜めに進展する状況を再現した。なお、未破断の供試体は強制破断させ横裂を観察した。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。

- ①引張軸力 754kN の条件では、9 本中 4 本が破断した。
- ②50kgN 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。

次に、破断および未破断の両方の供試体について、疲労き裂の進展状況を観察した。その結果、破断した供試体は応力振幅毎の進展状況の違いが明確であったが（図 2）、未破断の供試体は進展状況の違いが不明確であり、破面の状態にばらつきがみられた。また、本試験における最も速い横裂進展速度は、応力振幅が 140 N/mm²、引張軸力 754kN の条件下で 0.59mm/万回であった。

3.2 横裂進展試験の有限要素解析

試験レールの有限要素モデル（図 3）を作成して静的解析を行い、横裂進展試験結果と比較した。解析は軸力 754kN および残留応力を考慮してレール長さ方向に等分布に 50N/mm² を付加した場合と、鉛直荷重 190kN（横裂進展試験の底部応力 140N/mm² 相当を与えた場合）の 2 パターンについて行い、応力拡大係数を求めた。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 4 参照）とし、式(1)のき裂進展則からき裂進展速度を求めた。その結果、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 0.60 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

表 1 横裂進展試験結果

引張軸力 (kN)	底部応力全振幅 (N/mm ²)	総繰返し数 (万回)	横裂進展速度 (mm/万回)	傷種別
754	70,140	115.5	0.26	人工傷
		124.3	0.46	人工傷
		100.0	0.59	人工傷
		161.1	0.08	発生傷
		未破断	0.01	人工傷
		未破断	0	人工傷
		未破断	0.05	人工傷
		未破断	0.04	人工傷
377	105,170	未破断	0.06	人工傷
		未破断	0	人工傷
364	105,170	71.6 *	1.23*	発生傷
		未破断	-	人工傷
		未破断	0	人工傷
		未破断	0	発生傷

* 試験前の横裂深さ 27mm
 * レール種別は 50kgN レール(軸力 364kN のみ 60kg レール)

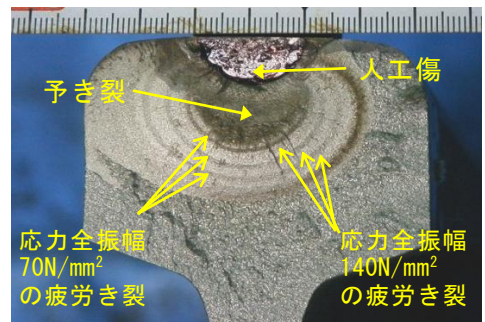
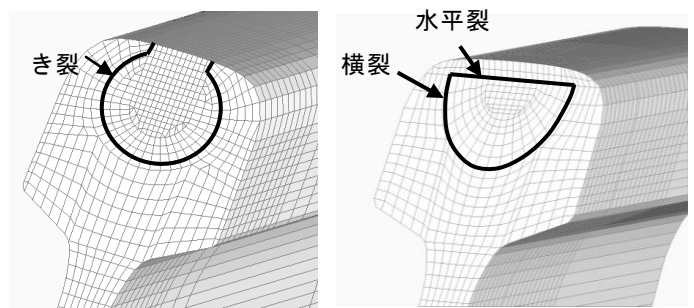


図 2 疲労き裂の進展状況例



(1) 試験レールを想定 (2) 実軌道上の横裂を想定

図 3 有限要素モデル

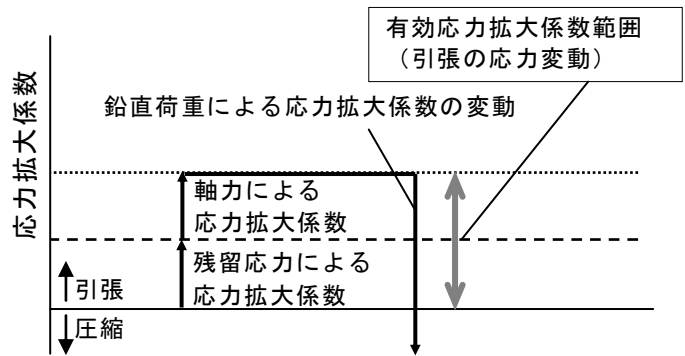


図 4 解析の有効応力拡大係数範囲の概念図

横裂進展速度が得られる。

3.3 横裂進展速度の推定

過去に開発したき裂進展解析ツール²⁾を改良し横裂の進みを推定した。推定に用いた有限要素モデルの一部を図3に示す。解析モデルは実軌道を模擬してまくらぎ14本分の長さとし、レール長さ方向の中央位置に横裂を設定した。き裂進展ツールから出力される軸力および底部曲げ応力に補正係数を反映し、き裂進展速度を算定した。

本ツールを用いた横裂進みの試算条件は、軌道種別、車両種別、レール温度等を考慮して設定した。図5に凹凸量0.50mmの場合の試算結果を示す。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、凹凸量が0.50mmの場合は48~71百万トン、0.25mmの場合は55~80百万トンであった。なお、これらの結果は前述の条件により変わり得るものである。このように車両および軌道構造条件に応じたき裂進展速度の推定が可能となった。

4. 継目穴のき裂の検討

4.1 継目穴のき裂進展試験

レールの継目穴内面を起点としたき裂の進展を再現するため、図6に示す4点曲げの繰返し载荷試験を実施した。新品の50kgN普通レールの腹部に継目穴を穿孔し、継目穴内面にレール長さ方向に対してレール底部側に45度方向（以下「下45度方向」とする）およびレール頭部側に45度方向（以下「上45度方向」とする）の2箇所に切り欠きを施した。図7にき裂進展速度と応力振幅の関係を示す。応力振幅の増加に伴いき裂の進展速度が速くなった。また、き裂進展への残留応力の影響を調べるため、継目穴周辺の残留応力を測定した結果、圧縮の応力が発生していることがわかった。

4.2 継目穴のき裂解析

4.1項の試験レールの有限要素モデルを作成して解析を行い、载荷時のき裂先端の応力拡大係数から算出されるき裂進展速度を試験結果と比較した。図7に示した応力振幅条件に対する解析結果に、上記のモデルのき裂面に残留応力を作用させた解析結果を重ね合わせることで、各応力振幅条件におけるき裂先端の有効応力拡大係数範囲を算出する。得られた有効応力拡大係数範囲から、式(1)を用いてき裂進展速度を推定した。図7に試験結果と解析結果を示す。解析により最速の進展速度傾向を概ね再現できたことがわかる。

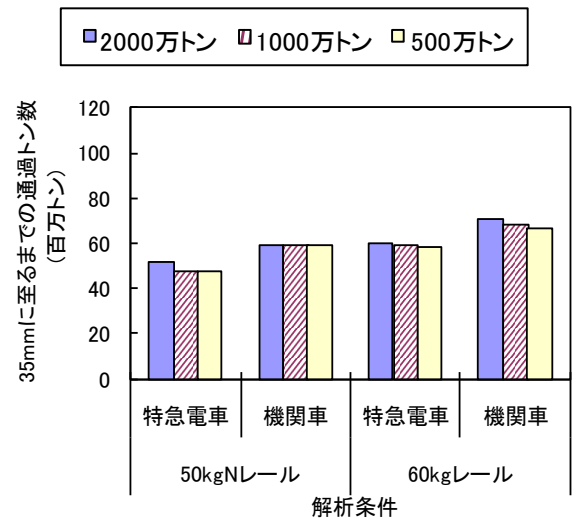


図5 試算結果（凹凸量0.50mm）

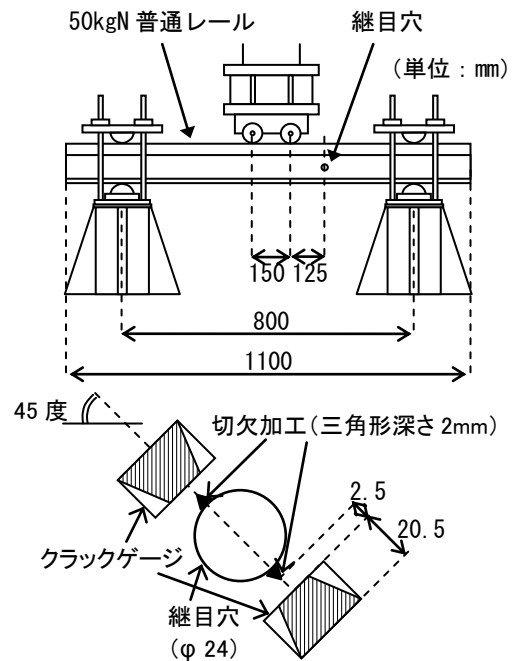


図6 継目穴のき裂進展試験の概要

4.3 継目穴のき裂進展速度の推定

4.2 項で述べた解析でモデルの妥当性が検証できたことから、動的有限要素解析を用いて実軌道を想定したレール継目部の継目穴からのき裂の進展速度を推定する解析システムを構築した。解析モデルは軌きょうの半分を模擬した有限要素モデルであり、レール、継目板、継目板ボルトおよびまくらぎにより構成される。

解析は、レールの鉛直方向の引張応力を再現するようにボルト軸力を外力として継目板に負荷し、さらに上45度および下45度のき裂面に残留応力を等分布に作用させた状態で、移動荷重を与えた動的解析を行い、継目穴き裂の有効応力拡大係数範囲を算定する。なお、輪重変動については別途梁モデルを用いた輪重変動解析モデルにより求めた³⁾。

図8にき裂先端の有効応力拡大係数範囲の解析例を、図9にき裂進展速度の試算結果を示す。応力拡大係数の変動が全てき裂進展に寄与する結果となっている。試算結果より継目板の状態が標準および摩耗継目板のき裂進展速度は下45度方向のき裂で、標準の場合0.04~0.08mm/万回程度、摩耗継目板の場合0.17~0.20mm/万回程度であった。なお、図9の試算結果は、標準・特急列車の有効応力拡大係数範囲の解析の結果に、過去に実施した測定結果の各継目状態・列車条件の継目穴内面応力の変動と、標準・特急列車の継目穴内面応力の変動との比率を乗じて、各条件下の有効応力拡大係数範囲を求め、き裂進展速度を算出した。

5. まとめ

本研究では、頭部横裂および継目穴き裂の進展特性を試験により把握し、き裂進展解析ツールの深度化を行った。今回得られた知見により今後のレール管理手法の見直しに活用できると考えている。

参考文献

- 1) 柏谷賢治他：レール横裂成長速度予測モデル、鉄道力学論文集、第7巻、pp.79-85、(2003)
- 2) Deshimaru, T. et al：Experimental Study on the Prediction Method of Transverse Crack Growth Rate, IHHA Conference 2011, (2011)
- 3) 片岡宏夫他：レール継目部の動的応力解析と寿命推定、鉄道総研報告、Vol.19、No.2、(2005)

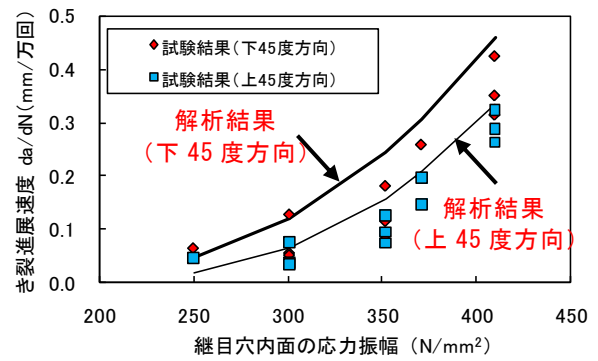


図7 試験結果と解析結果の比較
(き裂長さ10mm)

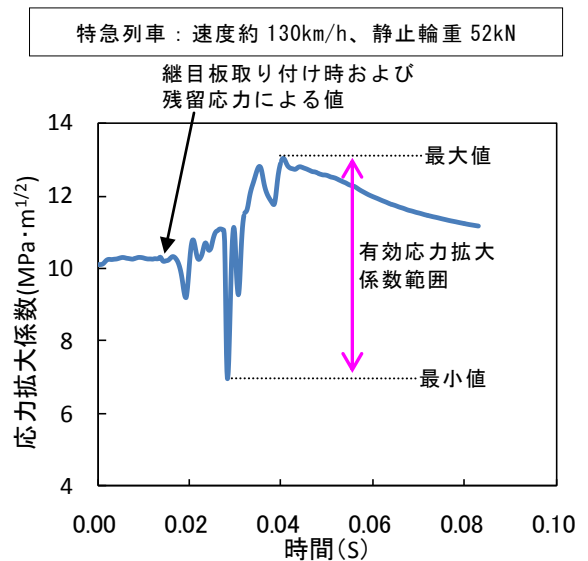


図8 有効応力拡大係数範囲の動的解析例
(き裂長さ5mm)

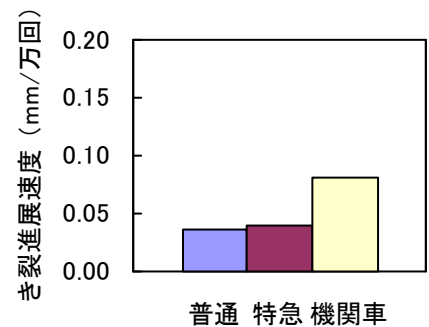


図9 き裂進展速度の試算結果
(継目部標準条件)