

レール継目ボルト穴からのき裂進展速度に関する研究

鉄道総合技術研究所 正会員 ○弟子丸 将
 鉄道総合技術研究所 正会員 片岡 宏夫

1. はじめに

レール継目部における損傷の大半を占める破端は、継目ボルト穴（以下「ボルト穴」とする）の内面を起点としたき裂が原因であるが、その進展速度は明らかでない。本研究では、ボルト穴からのき裂進展速度を把握することを目的として、ボルト穴内面に切り欠きを加工した実レールのき裂進展試験を実施し、試験レールを模擬した FEM モデルを用いた解析結果を比較した。また、過去の研究より得たボルト穴周り応力を用いて、実軌道におけるボルト穴からのき裂進展速度を推定した。

2. 実レールを用いたき裂進展試験

ボルト穴内面を起点としたき裂の進展を再現するため、き裂の進展試験を実施した。図1に試験の概要を、表1に試験条件を示す。なお、参考として予備載荷により求めたき裂がない場合のボルト穴内面の45度方向の発生応力振幅を掲載した。新品の50kgN普通レールの腹部にボルト穴を穿孔加工し、ボルト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。この試験レールについて4点曲げの繰返し載荷試験を実施し、繰返し数とき裂先端位置の関係よりき裂進展速度を把握した。図2に試験結果を示す。いずれの試験レールについても上45度方向のき裂の進展速度と比較して下45度方向のき裂の方が進展速度が速くなっていた。また、荷重振幅の増加に伴いき裂進展速度が速くなるが、試験体のNo.2とNo.4では同じ荷重振幅でありながら進展速度の差が大きい結果となった。

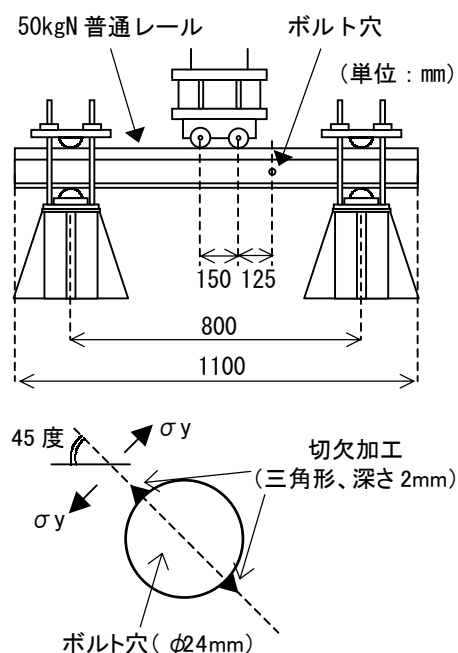


図1 き裂進展試験の概要

表1 き裂進展試験の試験条件

試験体 No.	荷重振幅 (kN)	ボルト穴内面 応力振幅※ (N/mm ²)
No. 1	195	250
No. 2, No. 4	235	300
No. 3	275	352

※ ボルト穴内面応力振幅：
 き裂がない場合に載荷荷重に対しボルト穴内面に発生する応力振幅のこと

3. き裂進展試験結果の解析モデルによる検証

2章のき裂進展試験に用いた試験レールを模擬した解析モデルを作成し、載荷時のき裂の先端付近に分布する応力の大きさの程度を表す係数である応力拡大係数とき裂進展速度を試験結果と比較した。図3に解析モデルを示す。なお、き裂先端の応力拡大係数 K_I およびレール鋼のき裂進展速度 da/dN は次式で表される¹⁾²⁾。

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \cdot \sigma_y \quad (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}) \cdots (1), \quad \frac{da}{dN} = 10^{-11} (\Delta K_{I\text{eff}})^3 \quad (\text{m/回}) \cdots (2)$$

ここで、 r ：き裂先端からの長さ(mm)， σ_y ：き裂先端の応力(N/mm²)， $\Delta K_{I\text{eff}}$ ：変動荷重作用下での応力拡大係数の最大値と最小値の差を表す有効応力拡大係数範囲であり、 $5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} < \Delta K_{I\text{eff}} < 30 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ の場合に成立する。

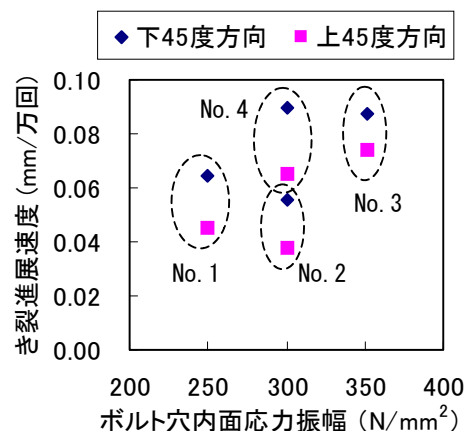


図2 ボルト穴内面の応力振幅とき裂進展速度の関係

キーワード レール継目部，ボルト穴，き裂進展速度，破壊力学，応力拡大係数

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (財) 鉄道総合技術研究所 軌道構造 TEL 042-573-7275

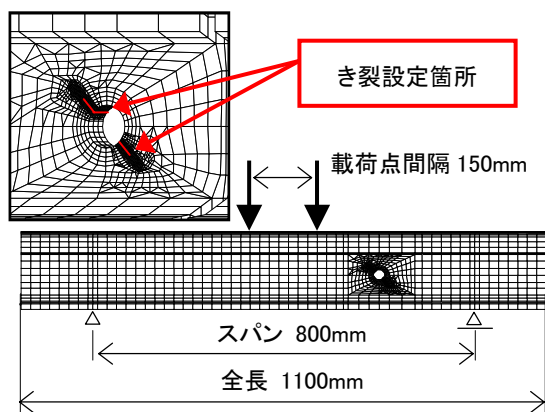


図3 レール継目部の解析モデル

表2 き裂進展速度の解析結果
および解析結果／試験結果の比率

き裂長さ	き裂方向	解析結果		解析結果／試験結果の比率	
		$\times 10^{-8}$ m/cycle			
		試験体 No. 1	試験体 No. 3	試験体 No. 1	試験体 No. 3
5mm	上45度	3.60	10.10	4.9	11.2
	下45度	3.32	9.31	3.8	5.3
10mm	上45度	4.63	10.30	10.1	16.3
	下45度	4.27	10.20	4.7	8.9
15mm	上45度	5.32	10.49	14.8	11.9
	下45度	4.75	10.33	4.6	10.6

表2にき裂長さに応じたき裂進展速度の解析結果および2章で得た試験結果に対する解析結果の比率を示す。解析より求めたき裂進展速度は試験より得たき裂進展速度と比較して同条件の場合約4～16倍とばらつきがあり差が大きかった。このようにばらつきが見られる原因としては、例えばレール腹部の残留応力の影響が考えられ、今後さらに検討が必要である。

4. 実軌道におけるき裂進展速度の検討

3章に述べたき裂進展試験の結果を用いて実軌道におけるレール継目部のボルト穴から発生するき裂の進展速度を推定した。3章のき裂進展試験結果を、載荷荷重に対しき裂が無い場合にボルト穴内面に発生する応力振幅とき裂進展速度の関係として捉え、過去の研究で得られたレール継目部のボルト穴内面の発生応力を用いて実軌道のき裂進展速度を推定した³⁾。なお、ボルト穴内面のき裂進展には、図4に示すように応力振幅のうち正の応力変動のみが寄与することから、ボルト穴内面に作用する応力変動のうち正の応力変動を算出した。表3に正の応力変動値を示す。

一方、図2に示した試験結果について、き裂進展速度が他の試験体より遅い試験体No.2を除いた3本の試験体に関する試験結果より、ボルト穴内面の応力振幅とき裂進展速度の関係式を得た。これを用いてき裂進展速度を推定した。図5に推定結果を示す。100万回載荷あたりのき裂の進みは下45度方向のき裂で4.2～6.0mm、上45度方向で2.0～4.6mmであった。3種類の継目条件のうち、摩耗継目板の場合にき裂進展速度が最も速くなる傾向であった。なお、車種による違いは明確には見られなかった。

5. まとめ

本研究では、き裂進展試験を実施し、過去の研究結果を用いて実軌道のレール継目部のボルト穴からのき裂進展速度を推定した。今後は、さらに試験本数を増やしき裂進展速度の推定精度の向上を図る予定である。

参考文献

- 岡村弘之：線形破壊力学入門,培風館,1976年5月,pp24～26
- 柏谷賢司：レール横裂の成長の推定,第142回鉄道総合技術研究所月例発表会講演要旨,2001年8月,pp15～18
- 片岡宏夫他：レール継目部の発生応力と疲労寿命推定,鉄道総研報告,15巻4号,2001年4月,pp9～14

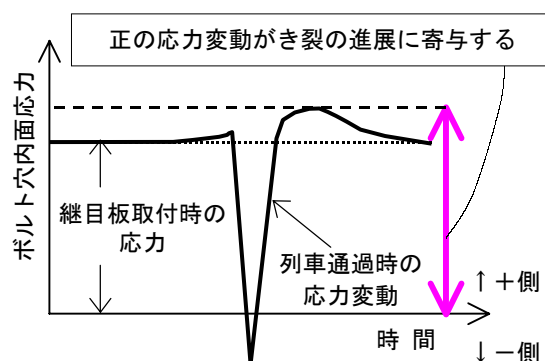


図4 ボルト穴内面に発生する応力

表3 ボルト穴内面の正の応力変動
(単位: N/mm²)

	普通	特急	機関車
普通継目板	182	194	198
摩耗継目板	233	235	225
浮きまくらぎ	146	176	176

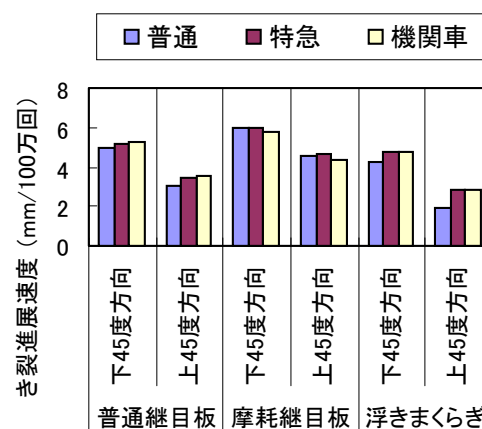


図5 き裂進展速度の推定結果