

レール横裂傷の進展解析

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
 東京地下鉄株式会社 正会員 柳沢有一郎

1. 目 的

レールの横裂傷は、レール折損に結びつく傷であり、横裂傷の管理は、安定輸送を確保する上で重要なテーマである。傷レール交換費用の節減および検査周期や判定基準等の見直しによる検査業務の適正化の観点から、横裂傷の進展メカニズムの解明が必要となっている。本研究では、応力拡大係数とき裂進展の推定法の深度化を図ることを目的として、横裂の応力拡大係数について検討し、き裂進展推定法を開発して横裂の進展速度を評価した。

2. き裂進展推定法

横裂は、列車進行方向から約 60° 下方に傾いた面内で成長することが知られており、柏谷らの報告より、頭部横裂はき裂の面に対して垂直な応力が支配的であるモード I で進展することが明らかになっている（図 1）¹⁾。また、柏谷らはレール鋼のき裂進展試験を実施し、有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{I\text{eff}}$ とき裂進展速度の関係を明らかにしている。疲労き裂進展則は次式で表される。

$$da/dN = 10^{-11} (\Delta K_{I\text{eff}})^3 \quad \cdots \cdots (2)$$

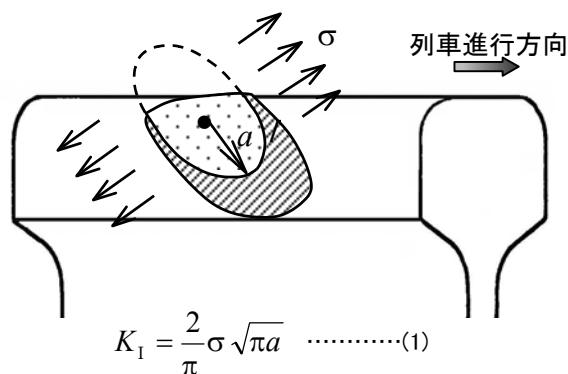
a : き裂の大きさ, N : 応力変動の繰返し数

本研究では、き裂進展に対し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て横裂の進展を予測した。

き裂進展推定法は基本的に柏谷と同じ手法とし、図 2 に示すフローチャートに基づき解析ツールを構築した。解析ツールでは、まず初期のレール頭部のき裂形状を設定し、車両条件および軌道構造条件を考慮してレール頭部曲げ応力を算定する。さらに、曲げ応力に加えて残留応力と温度応力の影響を考慮し、応力拡大係数および有効応力拡大係数範囲を算出する。この結果を式(2)に適用して得たき裂進展速度により、き裂の深さが増加するものとした。以上の計算を繰り返し、有効応力拡大係数範囲があるしきい値を越えた場合に計算を打ち切るものとした。

3. 応力拡大係数の検討

有限要素法によるき裂の応力拡大係数の解析モデルを開発し、解析結果と理論式から得られた値を比較した。解析モデルは支点間隔 1m のレールの 3 点曲げをモデル化し、鉛直荷重を 100kN、もしくは引張軸力を 1000



$$K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a} \quad \cdots \cdots (1)$$

K_I : 応力拡大係数

σ : 応力, a : 円板状き裂の半径

図 1 レール頭部横裂の破壊力学モデル

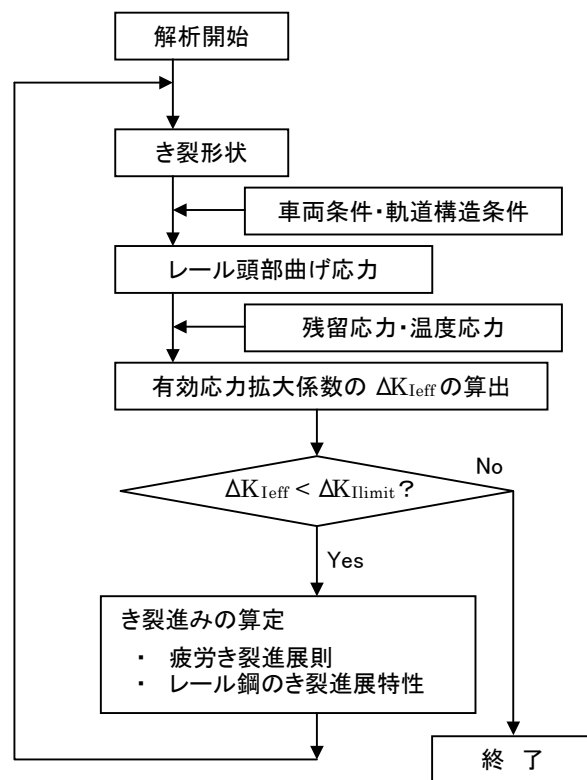


図 2 横裂進展予測のフローチャート

キーワード レール横裂, き裂, 線形破壊力学, 有限要素法, 応力拡大係数

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

kN として、き裂近傍の応力から応力拡大係数を求めた

2). 解析に用いた破断面と解析モデルを図3に、推定結果を表1に示す. 解析値は理論値と比較して大きくなっており、応力拡大係数の算出にあたっては割増を考慮する必要があることが分かった. そこで、解析と同じ条件で別途実施したき裂進展試験より得たレールの破断面のビーチマークよりだ円の大きさを読み取り、理論式を用いてだ円板状のき裂に対する応力拡大係数を算出し、理論値に乗じる補正係数を変化させながらき裂の進展状況を推定して横裂進展試験の結果と比較した. その結果、試験レールおよび実レールについて、補正係数をそれぞれ1.5もしくは1.2にすると解析値が試験結果とよく合うことを確認した(図4).

4. き裂進展速度の推定

3章で解析に用いた実レールの破断面を詳細に観察したところ、だ円板状のき裂としてモデル化する方が適切と考えられた. そこで、次の理論式を用いて応力拡大係数を算出し、2章のき裂進展解析法を用いて横裂の進みを推定した³⁾.

$$K_I = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad \dots\dots(3) \quad \text{ただし、} k^2 = 1 - (a/c)^2,$$

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \xi} d\xi \quad \text{の第2種完全だ円積分,}$$

K_I : 応力拡大係数, σ : 応力, a , c : だ円板状き裂の短径と長径

本研究では、軌道構造条件として在来線の有道床区間でレール頭頂面に凹凸がある場合を、車両条件として特急電車および機関車である場合を想定し、き裂深さが超音波探傷によって横裂を確実に検知できる15mmからしばしば破断に至ると考えられる35mmまで進展する間の通過トン数を試算した. なお、試算にあたってはレールの曲げ応力、温度応力および残留応力を考慮した. また、補正係数は、3章の結果を踏まえて1.3を採用した.

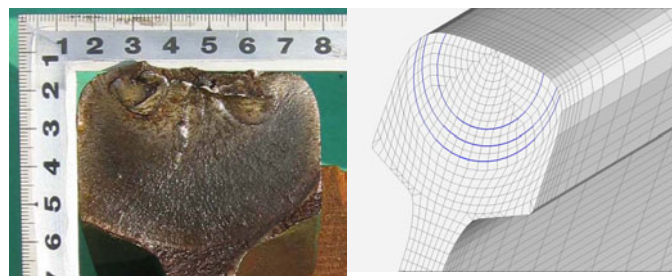
図5に通過トン数に対する応力及びき裂深さの推定結果の例を示す. き裂の進展とともにき裂先端付近の残留応力が変化している. このように、レールに生じる応力を踏まえ、各種の軌道構造条件および車両条件に応じてき裂進展速度およびき裂深さを推定することを可能とした. ただし、残留応力についてはさらなる検討が必要であると考えられる.

5. 結 論

本研究では、横裂の応力拡大係数について検討し、き裂進展推定法を開発して横裂の進展速度を評価した. 今後は、応力拡大係数を算出する際に用いた FEM モデルの解析精度の向上を検討することが必要である.

参考文献

- 1) 柏谷賢治: レール横裂成長速度予測モデル, 鉄道力学論文集, 土木学会構造工学委員会, 第8号, 2003年7月
- 2) 白鳥正樹: 数値破壊力学, 実教出版, 1980年1月
- 3) 岡村弘之: 線形破壊力学, 培風館, 1976年5月



(1) レールの破断面 (2) FEM モデル

図3 破断面と解析モデルの例

表1 応力拡大係数の推定結果

き裂先端の深さ (mm)	3点曲げ			軸力		
	応力拡大係数 (MPa・m ^{1/2})		比率	応力拡大係数 (MPa・m ^{1/2})		比率
	理論	FEM		理論	FEM	
21.7	-8.8	-24.4	2.78	18.6	25.6	1.37
26.0	-9.3	-25.8	2.79	21.3	30.3	1.42
30.3	-8.9	-26.6	3.00	22.1	33.8	1.53

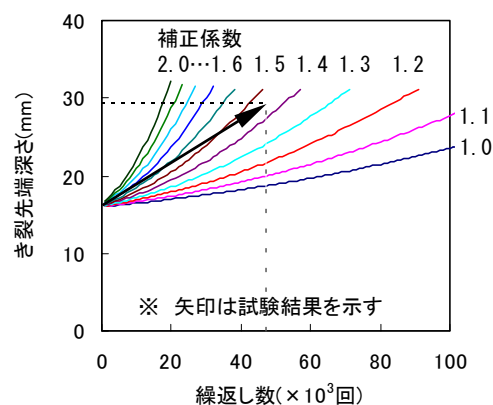


図4 補正係数の検証例

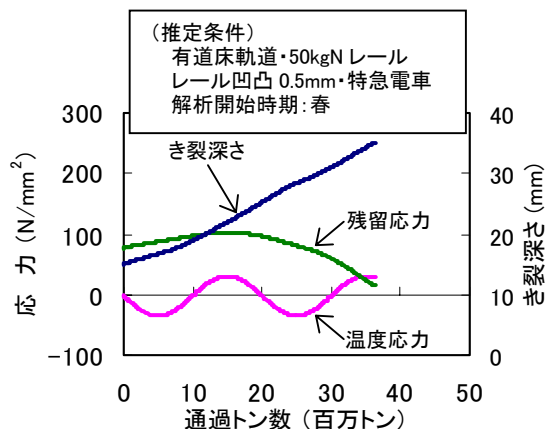


図5 推定結果の例