

レールきしみ割れの発生寿命予測

鉄道力学研究部 軌道力学

研究員 松田博之

1. はじめに

近年、曲線外軌レールのゲージコーナ部において、列車進行方向にある角度を持って狭間隔に並んだきしみ割れと呼ばれるき裂が多数報告されている¹⁾。きしみ割れは、成長するとき裂同士が連結して剥離に至るため、騒音の増加を招くだけでなく、場合によってはレール破断に至るケースもある。また、その発生位置がゲージコーナ部であるため、レール探傷車によるき裂の発見が容易ではない。したがって、レールの保守管理計画を立てる際に、きしみ割れの発生や進展を精度良く予測できれば、適時適切なレール交換等が可能となり、安全性の確保と同時に経済的な効果も期待できる。

これに対し、現在、鉄道総研では、きしみ割れ等の損傷を対象に、その発生寿命および進展を予測するためのレール損傷モデルの開発に取り組んでいる。このモデルは、車両運動シミュレーションによって車両走行時にレールに作用する荷重を推定し、その荷重に起因するレール損傷の発生および進展を評価するモデルである。本発表では、レール損傷モデルの中できしみ割れの発生寿命予測モデルを取り上げ、モデルの概要と実測値との比較結果について報告する。

2. きしみ割れ発生寿命予測モデルの概要

2. 1 きしみ割れ発生寿命予測のフロー

本モデルのフローを図1に示す。本モデルではまず、対象区間の曲線半径や線形、レール形状等の軌道条件および車両諸元や列車速度等の車両条件をマルチボディダイナミクス解析ソフト **SIMPACK**に入力し、曲線部の走行シミュレーションにより、車両走行時に作用する荷重やアタック角、接触位置等を推定する。**SIMPACK**は、任意の車両モデルで、車輪やレールの実測形状を適用し、曲線通過時の車両の挙動や車輪/レール間の接触を解析できる汎用ソフトである。

次に、得られた情報(車軸の軸受位置に作用する上下左右方向および走行方向の荷重、アタック角、車輪/レールの接触位置)を図2に示す有限要素モデルに入力することによりレールに発生する応力、ひずみを求める。求めた応力とひずみから車輪通過によってレールに発生するひずみエネルギー密度に相当するFPというパラメータを計算し、これが最大値となるき裂面(き裂が最初に発生する面)を探索する。さらに、そのFP値と材料特性値をある構成式(疲労損傷累積計算式)に入れ、き裂が発生するまでの荷重の繰返し数(きしみ割れ発生寿命)を評価する。

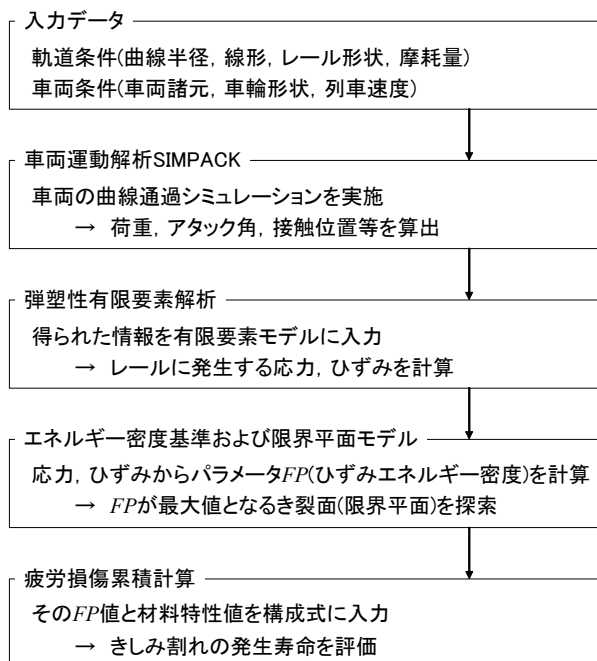


図1 きしみ割れ発生寿命予測モデルのフロー

2. 2 弾塑性有限要素モデル

車輪とレールの転がり-すべり接触における降伏および加工硬化などの局所的な材料の影響を正確に模擬するため、車輪、レールおよび車軸の有限要素モデルを別々に作成した。解析ソフトは汎用ソフトADINAである。解析対象は曲線部であるため、図2に示すように軌道の両側をモデル化した。レールは60kgレール、車輪は新幹線円弧踏面形状を持つ新幹線車輪(車輪径860mm)である。レールモデルは、長さ120mmをモデル化し、接触位置の変化に対応できるようにレール表面近傍を細かくメッシュ分割した。車輪モデルは、転がり接触における材料の応答が接触領域近傍に局限されるため、車輪とレールの接触部付近のみ細かくメッシュ分割した。車軸は、中ぐり車軸で、断面は直径が新幹線の車軸と等しくなっている。

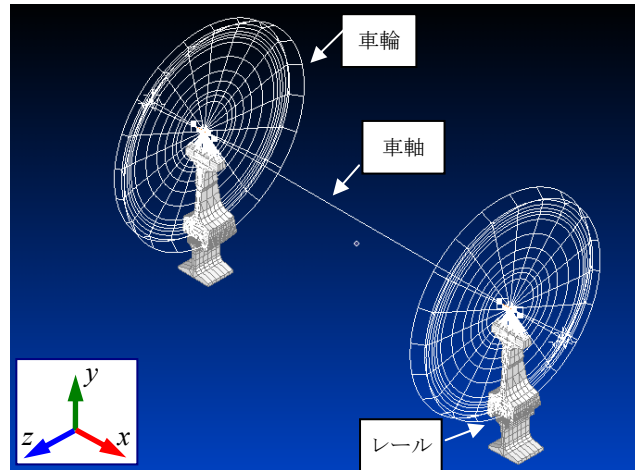


図2 FEMモデル

弾塑性有限要素解析では、車両運動解析から求めた荷重情報を与えた車輪モデルをレールモデルの頭頂面上に転がすことによって有限要素解析を行い、レールに発生する応力、ひずみを計算する。

2. 3 エネルギー密度基準および限界平面モデル

本モデルでは、エネルギー密度基準および限界平面モデルの組み合わせ手法を用いてき裂発生寿命を解析する。この手法では、有限要素解析から得られた応力とひずみを用いて、1回の車輪通過によってレールに発生するひずみエネルギー密度 FP を次式により計算し、通過サイクル中にこの FP が最大値となる面(限界平面)を、き裂が最初に発生する面と定義する²⁾。

$$FP = \left\langle \sigma^{\max} \right\rangle \frac{\Delta \varepsilon}{2} + J \Delta \tau \Delta \gamma \quad (1)$$

ここで $\langle \rangle$ はMacCauleyの括弧、 σ^{\max} はき裂面に垂直な最大応力、 $\Delta \varepsilon$ はき裂面に垂直なひずみ範囲、 $\Delta \tau$ はき裂面でのせん断応力範囲、 $\Delta \gamma$ はき裂面での工学的せん断ひずみ範囲である。定数 $J=0.2$ は材料と荷重に依存し、引張り／ねじり試験から得られる。

2. 4 疲労損傷累積計算³⁾

FP の最大値 FP_{\max} と材料定数を次式の疲労損傷累積計算式に入れて N_f を求めることで、肉眼で観察し得るき裂が発生するまでの車輪通過回数、 $0.3 N_f \sim 0.6 N_f$ が得られる。

$$FP_{\max} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f (N_f)^{b+c} \quad (2)$$

ここで、 E は弾性係数、 σ'_f 、 ε'_f は疲労強度係数および疲労延性係数、 b と c は疲労強度指数および疲労延性指数である。 $\sigma'_f=1.75 \times \sigma_B$ 、 $\varepsilon'_f=(\ln 100/100 - \varphi)^{0.6}$ 、 $b=-0.12$ 、 $c=-0.6$ となる。 σ_B は極限引張強度、 φ は絞りである。

3. きしみ割れ発生寿命予測モデルの検証

3. 1 きしみ割れ発生寿命の予測

モデルの妥当性を検証するために、予測値と実測値との比較を行う。対象区間は、新幹線の曲線部(半径610m)で、この区間では実際にきしみ割れの発生が確認されており、平成20年3月にレール交換が実施されている。

本モデルを対象区間に適用し、きしみ割れ発生に要する車輪通過回数を予測する。まず、対象区間の軌道条件および車両条件をSIMPACKに入力し、新幹線車両を模擬した車両モデルの走行シミュレーション結果より、荷重やアタック角、接触位置を算出した。次に、得られた荷重(前軸)を有限要素モデルに与えた(後軸は、車輪/レール接触位置がきしみ割れ発生位置と異なる)。それらは、外軌側では垂直方向(図2のy軸方向)に-54.91kN、横方向(x軸方向)に3.93kN、走行方向(z軸方向)に4.42kN、内軌側ではそれぞれ-49.80kN(y軸方向)、3.90kN(x軸方向)、-4.57kN(z軸方向)である。アタック角は0.15°である。車輪の回転は、車軸を軸周りに7.0°回転させた。車輪レール間の摩擦係数は0.3を用いた。計算に用いた材料特性値を表1に示す。レール鋼および車輪鋼について、降伏条件はフォンミーゼスの降伏基準を用いた。また、接線係数をヤング率の1%とし、転がり接触疲労で重要な減衰する硬化速度をより正確にモデル化するため移動硬化(バウシinger効果を考慮)と等方硬化(加工硬化を考慮)の組み合わせ硬化則を用いた。

車輪通過サイクルは、①車輪をレールに接触させて荷重を負荷、②レール頭頂面で転がす、③レールから離すことにより除荷、④元の位置に戻す、である。解析では、レール頭部上を車輪が通過した際に、車輪との接触領域付近におけるレールの多数の要素について、その応力、ひずみから、FP値を計算した。応力分布の例として、フォンミーゼス相当応力の等高線を図3および図4に示す。3回の車輪通過サイクルを模擬し、得られたFPの最大値 FP_{max} は、ゲージコーナから10.7mmの位置において1.23であった。これを式(2)に代入すると、外軌レールのき裂発生までの(前軸の)車輪通過回数は $0.59 \times 10^5 \sim 1.19 \times 10^5$ 回となった。これより、後軸を含めた実際の車輪通過回数は、 $1.18 \times 10^5 \sim 2.38 \times 10^5$ 回となる。

表 1 各種材料の材料特性値

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	0.2%耐力 (MPa)	極限引張強度 (MPa)	伸び (%)	絞り (%)	接線係数 (MPa)
レール鋼 (HH340)	209.8	0.29	787.0	1213	13	26	209.8
車輪鋼 (STY80)	197.3	0.30	469.7	—	—	—	197.3
車軸鋼 (S38C)	206.0	0.30	—	—	—	—	—

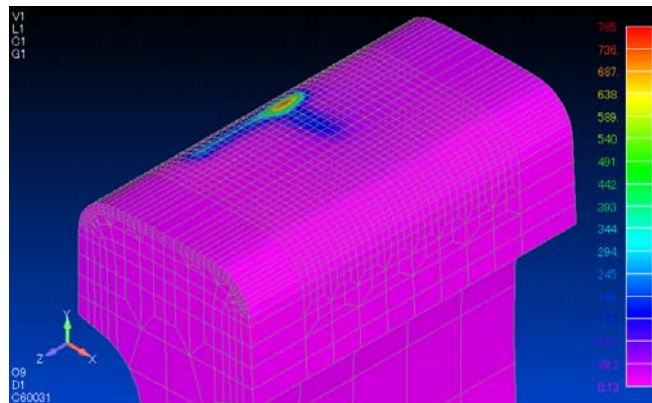


図 3 車輪通過時のフォンミーゼス応力分布(外軌)

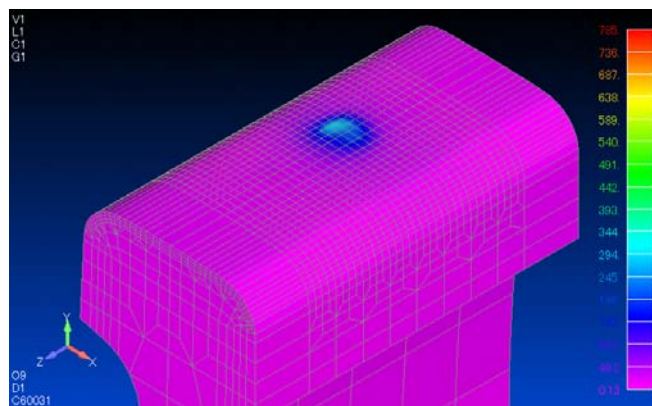


図 4 車輪通過時のフォンミーゼス応力分布(内軌)

3. 2 きしみ割れ発生の現地調査

実軌道におけるきしみ割れ発生寿命を調べるため、対象区間においてレール交換後からの追跡調査を実施した。調査は、レール交換直後から約2ヶ月おきに実施し、外観観察および浸透探傷により、きしみ割れ発生の有無を確認した(表2)。

調査結果を図5に示す。調査の結果、交換後1週間の調査ではきしみ割れの発生が認められなかったが、交換後約2.7ヶ月の調査で、ゲージコーナから10mmの位置においてきしみ割れの発生が認められた。したがって、調査箇所におけるき裂発生までの車輪通過回数は、 $0.51 \times 10^5 \sim 6.07 \times 10^5$ 回であった。

3. 3 予測結果と現地調査結果の比較

図6に予測結果と現地調査の結果を示す。予測結果は 1.18×10^5 (交換後2週間に相当)～ 2.38×10^5 回(交換後1ヶ月に相当)であるのに対し、現地調査結果は 0.51×10^5 (交換後1週間)～ 6.07×10^5 回(交換後2.7ヶ月)であった。今回の現地調査結果からきしみ割れの発生時期を明確に特定することはできないが、予測した発生時期が現地調査結果から得られた発生時期と重なっていることから、予測結果はほぼ妥当と思われる。

4. まとめ

開発したレールきしみ割れ発生寿命予測モデルを用いて、きしみ割れ発生までの車輪通過回数を予測し、本線における調査結果と比較した。その結果、予測モデルによりきしみ割れの発生時期を概ね妥当に評価することができた。今後、曲線半径等の条件が異なる区間についても検証を行い、本モデルの精度向上を図るとともに、きしみ割れ進展予測モデルとの組み合わせにより、きしみ割れの発生から進展までを予測できるモデルとして実用化を図りたい。

参考文献

- 1) 小林潤 :レール材質の面からのきしみ割れ対策手法の研究, 日本鉄道施設協会誌, 2009.1
- 2) Jiang Y. and Sehitoglu H. : A model for rolling contact failure, Wear, 224, 38-49, 1999.
- 3) 金属材料 疲労強度の設計資料 IV 低サイクル疲労強度, 日本機械学会, 1983.

表 2 測定日および累積通過トン数

調査日	累積通過トン数 (MGT)	片側車輪通過回数 ($\times 10^5$ 回)	記事
H20.3.27	0	0	交換実施日
H20.4.3	0.7	0.51	交換後1週間
H20.6.18	8.4	6.07	交換後2.7ヶ月
H20.8.27	15.0	11.26	交換後5ヶ月

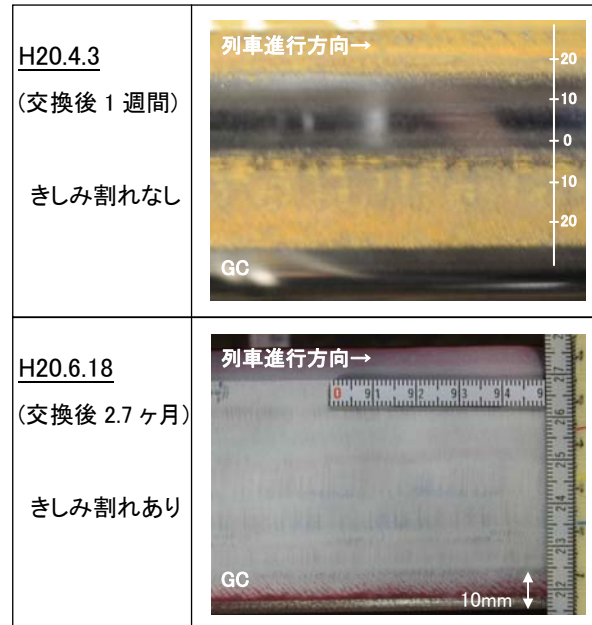


図 5 現地調査結果

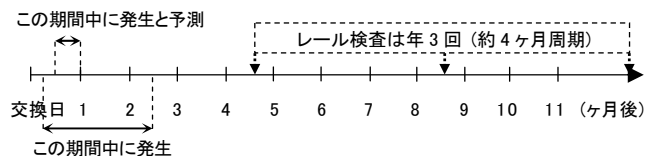


図 6 予測結果と現地調査結果の比較