

レールきしみ割れ発生寿命予測の試み

○ [土] 松田 博之 [機] 赤間 誠 [機] 土井 久代 [土] 名村 明
 金 鷹 辻江 正裕 ((財)鉄道総合技術研究所) 伊藤 優樹 (東京電機大学)

Prediction of Head Check Crack Initiation in Rails

○Hiroyuki Matsuda, Makoto Akama, Hisayo Doi, Akira Namura, Jin Ying,
 Masahiro Tsujie (Railway Technical Research Institute) Yuuki Ito (Tokyo Denki University)

In this research, a prediction model of head check cracks initiation life in rails has been proposed, and validity of the model has been verified by comparing the predicted results with the result of the field investigation of the initiation of head check cracks. In this model, first, the software package SIMPACK, which can treat the dynamic interaction between the vehicle and track, was used to obtain the contact points of wheel and rail for both outer and inner side of the curved section, magnitudes of force at bearing positions of the axle and attack angle etc. Next, by using these data as the boundary conditions, finite element (FE) analyses by commercial code ADINA were performed to identify the stresses and strains in the railhead by utilizing discrete model of wheel, rail and axle. The maximum damage parameter was calculated by the analyses on the basis of a critical plane approach together with a multi-axial fatigue theory. Finally, the crack initiation life was predicted by using a damage accumulation rule for energy density based model.

キーワード：転がり接触疲労，きしみ割れ，き裂発生，シミュレーション，有限要素法，限界平面

Key Words : rolling contact fatigue, head check, crack initiation, simulation, finite element method, critical plane

1. はじめに

近年，新幹線や在来線においてきしみ割れと呼ばれるレールの転がり接触疲労き裂が多数報告されている。きしみ割れは，主に曲線外軌レールのゲージコーナー部において長手方向に連続的にき裂が発生しており，成長するとレールの強度低下を招くだけでなく，騒音の増加や場合によってはレール破断に至るケースもある。また，きしみ割れはその発生位置がゲージコーナー部であるため，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行を精度良く予測できれば，適時適切な設備の更新等が可能となり，安全性の確保と同時に経済的な効果も期待できる。

上記に対して，著者らは，平成 19 年度にきしみ割れ等の損傷を対象に，その発生寿命および進行を予測するための「レール損傷モデル」のプロトタイプを構築した。このモデルは，車両運動の計算力学モデル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行を評価するモデルである。

本研究は，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，実レールにおけるきしみ割れ発生の追跡調査結果との比較から，その有効性を検証した。

2. きしみ割れ発生寿命予測モデルの構成

きしみ割れ発生寿命予測モデルのフローを図 1 に示す。

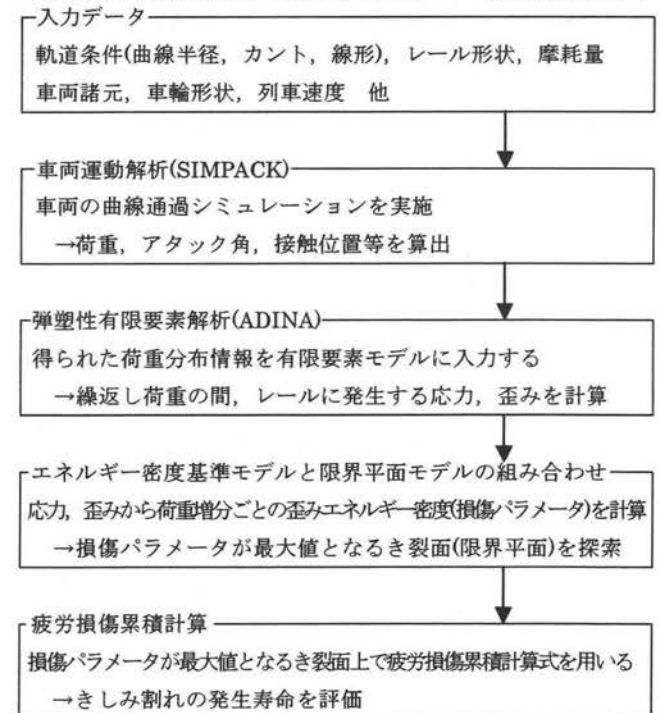


図 1 きしみ割れ発生寿命予測モデルのフロー

本モデルではまず、マルチボディダイナミクス解析ソフト SIMPACK を用いて曲線部の走行シミュレーションを実施し、車両走行時に作用する荷重を推定する。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。対象区間の曲線半径や線形、レール形状等の軌道データ及び車両諸元や列車速度等の車両データを SIMPACK に入力し、走行シミュレーション結果より、荷重やアタック角、接触位置等の情報を得る。

次に、得られた荷重分布情報(車軸の軸受位置に作用するレール垂直方向、横方向及び走行方向の荷重、アタック角、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、歪みを求める。求めた応力と歪みから歪みエネルギー密度を計算し、歪みエネルギー密度=損傷パラメータとして、これが最大値となるき裂面(限界平面)を探索し、疲労損傷累積計算式を用いてきしみ割れの発生寿命を評価する。

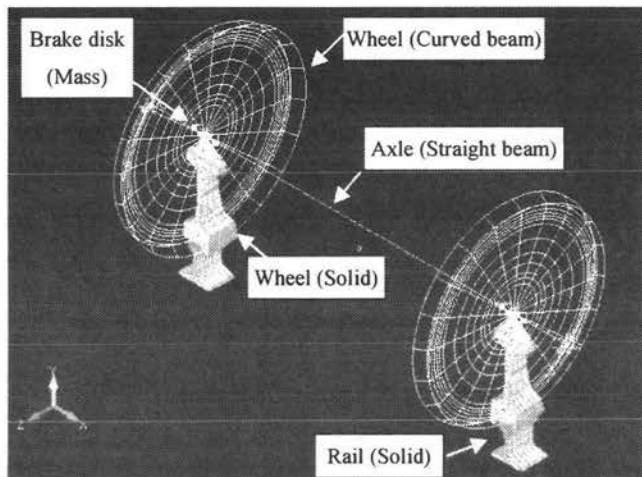


図 2 FEM モデル

3. きしみ割れ発生寿命予測モデルの解析手法

きしみ割れ発生寿命の予測は、弾塑性有限要素解析、エネルギー密度基準モデル及び限界平面モデルの組み合わせ手法及び疲労損傷累積計算を適用する。以下に詳細を示す。

3.1 弾塑性有限要素解析モデル

車輪とレールの転がりすべり接触における降伏及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、レール及び車軸の有限要素モデルを別々に作成し、レールモデルの頭頂面上に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転がすことによって有限要素解析を行う。解析ソフトは汎用コード ADINA である。解析対象は曲線部であることから、図 2 に示すように軌道の両側をモデル化した。レール形状は 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 だけをモデル化し、外軌及び内軌レール全体で 16288 要素、70082 節点からなる。接触位置の変化に対応できるようにレール表面近傍は全体的に細かな二次の固体要素でメッシュ分割を行った。

車輪モデルは、外軌および内軌側全体で 9166 要素、37080 節点からなる。転がり接触においては、材料の応答は接触領域近傍に局限されるため、車輪全体を細かくメッシュ分割する必要はない。そこで車輪のレールとの接触部分付近の円周方向で 18° 分は二次の固体要素とし、踏面付近はレール表面と同様に細かくメッシュ分割を行った。それ以外の円周部分は、断面形状が車輪の断面形状と等しくなるように複数の曲線梁要素でメッシュ分割を行い、それぞれを拘束した。

車軸モデルは、11 要素、12 節点からなる。車軸を回転させて車輪をレール上で転がすため、中ぐり車軸で、断面は直径が新幹線の車軸と等しい、回転の自由度を持つ梁要素でモデル化した。車軸と車輪は、車輪幅中心に位置する車軸の一節点と、車輪の車軸挿入穴表面の節点を結合した。

車軸と車輪の密度と体積から自重を考慮した。車輪に装着されているブレーキディスクは、その重心に位置する質量要素でモデル化した。

本解析におけるモデル化を用いれば、塑性変形が接触部分で発生したとき接触領域が大きくなって接触条件が更新され、有効接触荷重の減少を正確に表現できる。

3.2 エネルギー密度基準モデル及び限界平面モデル

車輪-レールの接触条件では、接触表面で転がりすべり接触荷重の繰返しによるせん断変形の累積によってき裂が発生する。このような条件では、主応力と主歪みテンソルは時間によって変化するため、疲労き裂の発生する限界平面(き裂面)が存在する。そこで本研究では、エネルギー密度に基づくモデルと限界平面モデルの組み合わせモデルを用いてき裂の発生寿命を解析する。この手法は、レールに発生する応力と歪みを用いて歪みエネルギー密度を表し、その歪みエネルギー密度を各材料平面上の損傷パラメータとして荷重増分ごとに計算する。荷重サイクル中に損傷パラメータが最大値となる材料内の限界平面を、き裂(が発生する)面と定義し、この平面においてき裂発生寿命を評価する。損傷パラメータ FP は、次のように定義する¹⁾。

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

ここで $\langle \rangle$ は MacCauley の括弧、 σ^{\max} はき裂面に垂直な最大応力、 $\Delta \varepsilon$ はき裂面に垂直な歪み範囲、 $\Delta \tau$ 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歪み範囲である。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。

3.3 疲労損傷累積計算²⁾

損傷パラメータが最大値 FP_{\max} となるき裂面上で、次の疲労損傷累積計算式を用いて疲労き裂による破断までの繰返し数 N_f が求められる。

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

ここで E は弾性係数、 σ'_f 、 ε'_f は疲労強度係数及び疲労延性係数、 b と c は疲労強度指数及び疲労延性指数である。

σ'_f 、 ε'_f 、 b 、 c は、Manson の近似式によって求める。

$$\sigma'_f = 1.75\sigma_B \quad (3)$$

$$\varepsilon_f = \ln \frac{100}{100 - \phi} \quad (4)$$

$$\varepsilon'_f = \varepsilon_f^{0.6} \quad (5)$$

$$b = -0.12 \quad (6)$$

$$c = -0.6 \quad (7)$$

ここで σ_B は極限引張強度, ε_f は真破断延性, ϕ は絞りである. $\sigma'_f, \varepsilon'_f$ を求め, それらを代入して(2)式を解くと, N_f が求められる.

肉眼で観察し得るき裂(約 0.2mm)が発生するまでの繰返し数 N_c は, $0.3 N_f \sim 0.6 N_f$ となる. そのため, き裂が発生するまでの繰返し数 N_c をき裂発生寿命(車輪通過回数)とする.

4. きしみ割れ発生寿命予測モデルの検証

きしみ割れ発生寿命予測モデルの妥当性を検証するために, 実レールにおけるきしみ割れ発生の追跡調査結果との比較を行う.

4.1 対象区間

対象区間は, 東北新幹線下り線の R=610m の曲線部である. この区間では, 実際に曲線外軌レールゲージコーナー部において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. 表 1 に対象区間の軌道条件を示す. 走行車種は 200 系, 400 系, E1~E4 系であり, 走行速度は 110km/h である. なお, この区間ではレール探傷車による傷の検査が年 3 回行われている.

4.2 きしみ割れ発生寿命の予測

先に述べたきしみ割れ発生寿命予測モデルを対象区間に適用し, きしみ割れ発生に要する繰返し数 N_c (車輪通過回数)を予測する.

まず, 対象区間の曲線半径やカント, レール形状(交換後のため新品), 列車速度等の条件を 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, 車軸の軸受位置に SIMPACK で得られた荷重(第 1 軸)を与えた. 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 0.0026rad である. 車輪の回転は, 車軸を軸周りに 0.122rad 回転させた. レールは実際の軌道と同じように内側に 1/40 傾けた方向のみを拘束した. 車輪レール間の摩擦係数は 0.3 を用いた. 計算に用いた熱処理レール鋼(HH340), 車輪鋼(STY80)及び車軸鋼(S38C)について, 機械的特性を表 2 に示す.レール鋼及び車輪鋼について, 降伏条件は von Mises 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(パウシンガー効果を考慮)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, 次に示す 4 つの局面で表現した. 第一局面: 車輪をレールに接触させて荷重を負荷する, 第二局面: 車輪をレール頭頂面で転がす, 第三局面: 車輪をレールから離すことにより除荷する, 第四局面: 車輪を元の位置に戻す, 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, 図 2 に示す各座標軸 x, y, z 周りに 0° から 180° まで 5° ごとに回転した面について, (1)式を用いて FP 値を計算した. 応力分布の例として, von Mises 相当応力の等高線を図 3,4 に示す. 3 回の車輪通過サイクルを模擬し, 得られた FP 値の最大値 FP_{max} は, ゲージコーナーから 10.7mm の位置(レール中心から 21.8mm)において 1.23 であった(1回目:0.734, 2回目:1.16). (2)式に代入して N_f を求めると, $N_f = 1.98 \times 10^5$ となり, 外軌レールのき裂発生寿命(車輪通過回数)は $N_c = 0.59 \times 10^5 \sim 1.19 \times 10^5$ 回となった.

表 1 対象区間の軌道条件

レール	材質	カント	スラック	軌道構造	年間通トン
60kg	熱処理	180mm	0mm	弾性直結	約 35.7MGT

表 2 各種材料の機械的特性

	ヤング率 (MPa)	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)	209820	0.29	787	1213	13	26	209.8
車輪鋼 (STY80)	197300	0.3	469.7	-	-	-	197.3
車軸鋼 (S38C)	206000	0.3	-	-	-	-	-

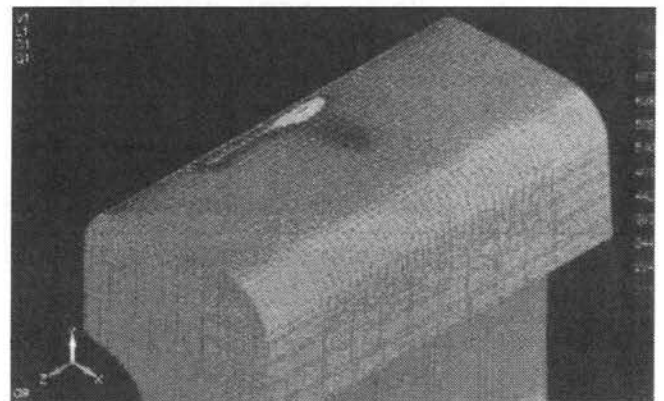


図 3 外軌レールにおける車輪通過時の von Mises 応力分布

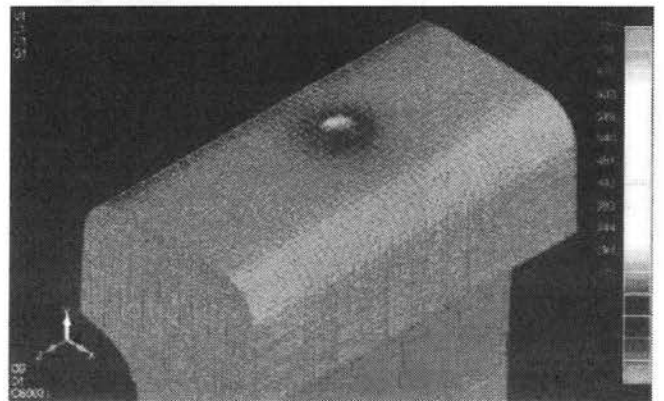


図 4 内軌レールにおける車輪通過時の von Mises 応力分布

4.3 きしみ割れ発生の現地調査

実レール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。

(1) 調査概要

調査は、レール交換直後から約 2 ヶ月おきに行った。表 3 に調査日及び累積通過トン数を示す。なお、表中には列車ダイヤから調べたレール片側分の車輪通過回数を併記した。調査方法は、外観観察及び浸透探傷検査により、きしみ割れ発生の有無及び傷の長さ(断面方向)を測定した。また、レール断面形状測定器を用いて、摩耗量(GC45 度)を測定した。

表 3 測定日及び累積通過トン数

調査日	累積通過トン数 (MGT)	片側車輪通過回数(×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

(2) 調査結果

図 5 に調査結果を示す。調査の結果、4 月の調査ではきしみ割れの発生が認められなかったが、6 月の調査では交換から約 2.7 ヶ月で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。

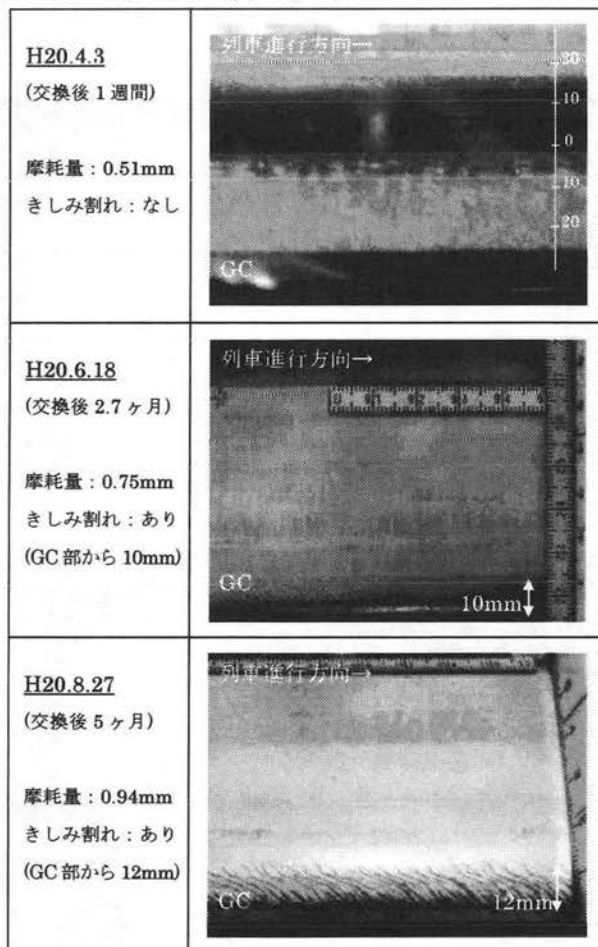


図 5 現地調査結果

4.4 きしみ割れ発生寿命予測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 0.59×10^5 (交換後 1 週間に相当) ~ 1.19×10^5 回 (交換後 0.5 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。

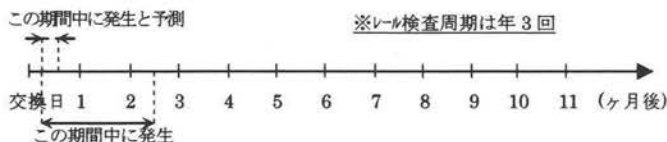


図 6 予測結果と現地調査結果の比較

5. まとめ

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。

本モデルは理論的な手法によりきしみ割れの発生を予測するものであり、効率的に軌道保守を実施するためのツールとして利用できる可能性があると考えられる。しかし、予測には誤差が存在し、予測より若干早くき裂が発生したり、遅く発生したりする可能性がある。前者の要因として、本モデルではレール車輪の接触面を平滑であると仮定して解析しているのに対して、実際の接触面には何らかの凹凸が存在(粗さ接触)し、部分的に大きな応力が生じることが考えられる。後者の要因として、本モデルではレール車輪の接触位置はまったく同じとして解析しているのに対して、実際には前軸と後軸や車両の違いによって接触位置が若干変動する(累積損傷が小さくなる)ことが考えられる。また、本モデルでは発生時のき裂長さを 0.2mm 程度としているため、発生と定義したき裂の大きさの相違も予測誤差の要因となり得ると考えられる。したがって、実用上は発生寿命を予測より若干早く見積もることで安全側の評価になると考えられる。

今後は、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についても検討する予定である。

謝辞：現地調査にご協力頂いた大宮新幹線保線技術センターの関係者の方々に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Jiang Y. and Sehitoglu H. : A model for rolling contact failure, Wear, 224, 38-49, 1999.
- 2) 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.