

短いき裂の発生・進展と摩耗の競合を考慮した レール損傷評価

名村 明* 浦川 文寛*
谷本 啓* 中嶋 大智**

Rail Surface Fatigue Assessment Using Numerical Simulation of Concurrence of Short Crack Propagation and Wear

Akira NAMURA Fumihiko URAKAWA
Hiraku TANIMOTO Daichi NAKAJIMA

In recent years, rail head checks have occurred at the gauge corner of the head of the head hardened high rail in the curve sections with a curve radius of 600m to 800m. Therefore, we have developed a numerical model to simulate the concurrence of short crack propagation and wear at railhead. We performed simulations of curve running of one vehicle using versatile multibody dynamics analysis software to comprehend wheel loads, lateral forces and contact positions of a wheel and the rail and so on at the time of curve passage. We inputted the result of simulations into a finite element analysis of rolling contact between wheel and rail. Simulations were performed to study the effect of curve radius and rail steel grade.

キーワード：き裂，摩耗，きしみ割れ，曲線通過シミュレーション，転がり接触有限要素解析

1. はじめに

近年、曲線半径の比較的大きな区間の外軌で、熱処理レールのゲージコーナ部にきしみ割れやゲージコーナき裂と呼ばれる損傷の発生が報告されている。きしみ割れは、レール幅方向のある範囲に存在する短いき裂もしくはそれらの集合体の総称であり、列車進行方向に対してある一定の角度を持つ。また、きしみ割れ同士が連結するとはく離に至ることがある。一方、ゲージコーナき裂は、レールゲージコーナ部の上方（頭頂面寄り）に形成される損傷であり、きしみ割れと混在する場合が多い。きしみ割れとゲージコーナき裂の因果関係は必ずしも明確ではないが、きしみ割れを抑制できれば、はく離を抑制できるとともに、水平裂や横裂に進展する可能性のあるゲージコーナき裂の発見も容易になる。

本研究では、短いき裂の発生・進展と摩耗の競合を考慮したレール損傷評価法を検討し、現在敷設試験を行っているレールを含めた各種レール鋼について、曲線諸元等をパラメータとした解析を実施し、短いき裂の発生・進展の比較評価を行う。

2. レール損傷評価法の概要

短いき裂の発生・進展と摩耗の競合を考慮したレール損傷評価法の概要は以下のとおりである。

2.1 曲線通過シミュレーション

円曲線通過時の輪重、横圧、車輪とレールの接触位置等を把握するため、汎用のマルチボディダイナミクス解析ソフト SIMPACK を用いた曲線通過シミュレーションを行う。軌道条件（曲線半径、カント等）、レール形状、車両諸元、車輪形状、列車速度等を入力として、所定の車両が任意の曲線区間を通過する際の、車軸の軸受相当位置における垂直方向、進行方向及び横方向の力、車輪とレールの接触位置、アタック角等を求め、次節で述べる車輪・レールの転がり接触有限要素解析の入力とする。

2.2 車輪・レールの転がり接触有限要素解析

車輪とレールの転がり接触に伴って生じる応力等は、二つの物体間の接触を考慮した3次元FEM解析において、幾つかの拘束条件を与えることにより解くことができる。ここでは、曲線区間における接触状態を正確に解析するため、車輪、レール及び車軸を別々にモデル化し、レール上で車輪を転動させることによって、接触を再現する。解析は、汎用ソフト ADINA を用いて行う。車輪・レール

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 鉄道力学研究部 車両力学研究室

特集：鉄道力学

接触においてレール内部に発生する応力分布、ひずみ分布及び接触領域表面のトラクション分布等を、次節で述べる短いき裂の発生・進展と摩耗の競合解析の入力とする。

2.3 短いき裂の発生・進展と摩耗の競合解析

本解析プログラムは、レール表層の2次元断面（まくらぎ方向に垂直な面）を指定して、解析を行う¹⁾。本解析プログラムには様々な機能を付加しているが、本報告に使用した機能の概要を以下に示す。

(1) 短いき裂の発生

材料に累積できるひずみは有限であるため、ある限界値までひずみが累積した時点において材料の延性が限界に達し、き裂が発生するものとした。ここでは、直交せん断応力の最大（絶対）値によって生じる累積せん断ひずみが限界値に達した時点で短いき裂が発生するものとしている。

(2) 短いき裂の進展

短いき裂の進展は、材料の微細組織と同程度の寸法である微細組織的き裂領域（ステージⅠ）と、これより大きいものの視覚的にも物理的にも寸法が小さく、小規模降伏条件が満たされない連続体破壊力学領域（ステージⅡ）に分けられる。ここでは、これらをHobson則を用いて計算する。ステージⅠでの短いき裂進展は、多結晶材料の最初の数粒子内における疲労き裂の成長を表している。き裂はすべり線に沿い、き裂面上のせん断応力によって進展するものと仮定する。き裂が先端において開口するほど十分長くなった時、ステージⅡき裂成長が起こる。この時点において、微細組織の影響は限定され、き裂成長は連続体力学によって表すことができる。き裂は、き裂面上の全垂直ひずみによって進展するものと仮定する。

(3) 摩耗モデル

摩耗モデルはArchard摩耗モデルを用いる。

3. 曲線通過シミュレーション

3.1 車両モデル

車両モデルの概要は以下の通りである。

- (1) 1個の車体、2個の台車、4個の輪軸で構成される一車両モデルとした。
- (2) 車体一台車枠間と台車枠一輪軸間の結合要素については、ばね・ダンパ要素によりモデル化しており、まくらばねや軸ばね、軸ダンパ、左右動ダンパを配置している。
- (3) 車輪・レール間のクリープ力の算出には、Kalkerのクリープ力理論の単純化非線形理論の高速計算アルゴリズムであるFASTSIMを用いた。
- (4) 対象車両は、ボルスタレス台車を装架した代表的な通勤形車両（積車相当）とした。

3.2 解析条件

軌間は1067mmとし、直線から緩和曲線を経て曲線に進入する条件とした。主な解析条件を表1に示す。走行速度は、R800m, C95mm, 速度105km/h (Case1および2)の条件におけるカント不足量21mmを基準とし、他のケースにおいても同じカント不足量となるよう設定した。車輪踏面形状は修正円弧踏面の新品および摩耗(15万km走行)形状とし、レール頭部断面形状は60kgレールの新品形状とした。本シミュレーションでは軌道変位の無い円曲線を通る状況に注目するため、車両が緩和曲線から円曲線に入り、過渡応答が収束した後の定常値を求めた。

表1 解析条件

条件	曲線半径 R (m)	カント C (mm)	走行速度 (km/h)	車輪踏面 形状
Case1	800	95	105	新品
Case2				摩耗
Case3	600	105	95	新品
Case4				摩耗
Case5	500	100	85	新品
Case6				摩耗
Case7	400	97	75	新品
Case8				摩耗

3.3 解析結果

図1に曲線半径に対する1軸と2軸の外軌側の輪重、横圧、縦クリープ力、摩擦エネルギーおよびレール接触位置を示す。摩擦エネルギー $T\gamma$ は式(1)で定義される。

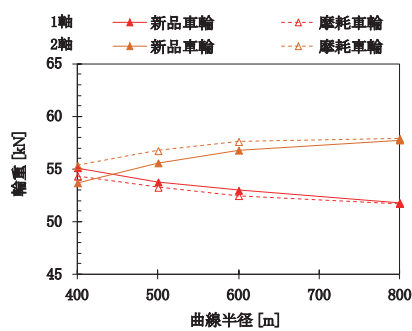
$$T\gamma = T_x \cdot \gamma_x + T_y \cdot \gamma_y \tag{1}$$

ここで、 T_x :縦クリープ力、 γ_x :縦クリープ率、 T_y :横クリープ力、 γ_y :横クリープ率である。

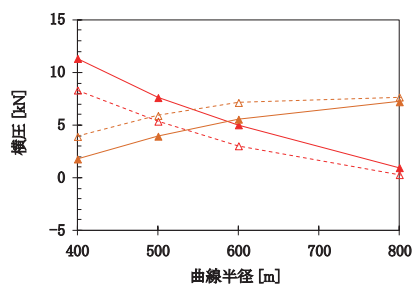
図1(a)および(b)より、曲線半径の増加とともに、1軸の輪重・横圧は減少、2軸は増加し、R600m以上で2軸の横圧が1軸より大きくなるのがわかる。図1(c)より、縦クリープ力は概ね進行方向と逆向きに発生し、1軸の値は2軸に比べて大きい。図1(d)より、2軸の $T\gamma$ は1軸と比較して小さく、全ケースで15J/mを下回った。1軸については、曲線半径の増加とともに $T\gamma$ は減少する。図1(e)より、1軸については曲線半径が小さい程レール接触位置がゲージコーナに近づく。また、1軸と2軸を比較すると、全ての条件で1軸の方がよりゲージコーナに近い位置に接触点が現れる。

3.4 車輪・レールの転がり接触有限要素解析に用いる輪軸の選定

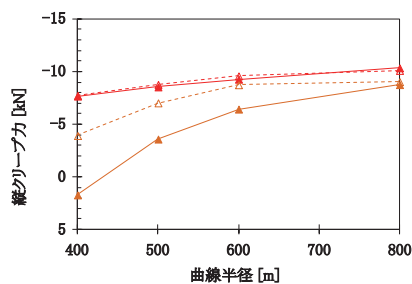
1軸と2軸の解析結果と比較すると、曲線半径が大きい条件での横圧と輪重は2軸の方が大きい。しかし、レール



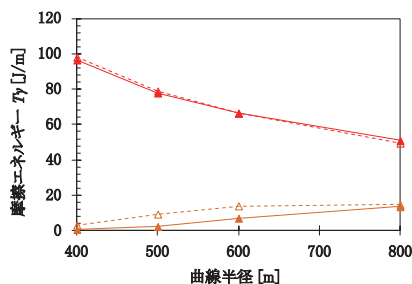
(a) 輪重



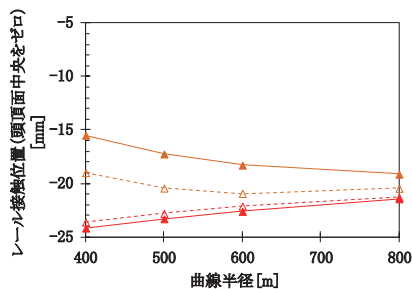
(b) 横圧



(c) 縦クリープ力



(d) 摩擦エネルギー $T\gamma$



(e) レール接触位置

図1 外軌側解析結果

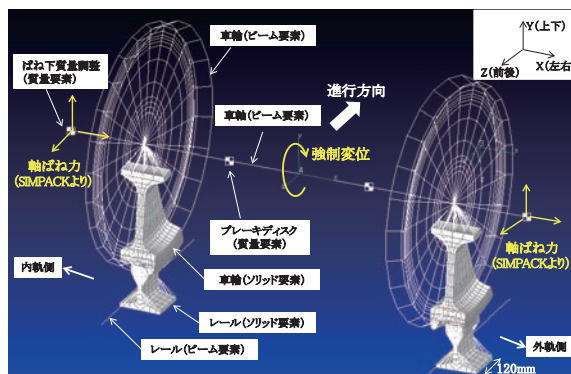


図2 転がり接触解析の有限要素モデル

ルの転がり接触疲労(RCF)や摩耗と関係が深い縦クリープ力は1軸の方が大きく、かつ、実軌道で観察されるき裂の発生位置と解析で得られたレール・車輪の接触位置は、2軸よりも1軸の方が近い。また、ヨーロッパではRCFと摩耗の評価指標として $T\gamma$ が広く使用されており、文献²⁾では $T\gamma < 15$ J/mの領域におけるRCFによるダメージをゼロとしている。2軸の $T\gamma$ は全条件で15 J/m以下であり、き裂の進展は1軸が支配的であると考えられることから、車輪・レールの転がり接触有限要素解析には1軸の結果を用いることとする。

4. 車輪・レールの転がり接触有限要素解析

4.1 解析モデル

解析モデルの概要を図2に示す。本モデルはレール、車輪、車軸から構成され、車軸中心に回転方向の強制変位を与えることで、レール上で輪軸が転がりながら進行する状態を再現するものである。

レールは車輪と接触する120 mmのみをソリッド要素(6面体)で、その前後290 mmをビーム要素でモデル化した。レール表面の細かな形状および接触位置を表現できるように、レール長手方向では1 mm、断面方向についてはゲージコーナ付近で0.8 mm、頭頂面付近では1 mmでメッシュ分割した。また、表層付近のレール内部の応力分布を精度よく計算するため、深さ方向については表層から3 mmまでを0.5 mmでメッシュ分割した。

車輪はレールとの接触部分付近の円周方向で30°分をソリッド要素(6面体)とし、その他の円周部分は車輪の断面形状と等しくなるよう、複数のビーム要素でモデル化した。車輪踏面のソリッド要素部分はレール表面と同様、円周方向で0.9 mm、断面方向で0.8 mmと、細かくメッシュ分割した。車軸はビーム要素でモデル化し、車輪と剛体要素で結合した。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。また、ばね下質量が所定の値となるよう、車軸の両端に質量要素を設置して微調整を行った。車軸の軸受相当位置に、曲

特集：鉄道力学

線通過シミュレーションで求めた3方向の軸ばね力を用いることで、任意の軌道条件における車両の走行状態を模擬する。レールと輪軸の相対位置は、アタック角にしたがってモデルの輪軸を回転させ、さらに外軌側のレールと車輪の接触位置がモデル上で一致するように、輪軸を平行移動させることで決定した。

解析計算では、最初の0～1秒で輪軸をレールのソリッド要素端から37.5mmの位置に所定の軸ばね力で押し付けた後、次の1～2秒で輪軸を車軸回りに0.128 rad/secで回転させる。輪軸を回転させる際の時間ステップは0.02秒とする。

4.2 解析結果

短いき裂の発生・進展と摩耗の競合解析において、摩耗に影響するパラメータはレール・車輪の接触面圧、き裂の発生・進展に影響するパラメータは主にレール内部のYZ平面のせん断応力 τ_{yz} である。また、短いき裂の発生・進展と摩耗の競合モデルに入力するデータは、ある時刻での1ステップ分の解析結果である。ここでは、輪軸が概ねレールモデルの中央に到達する1.6秒での結果を示す。

図3は、新品車輪(case1,3,5および7)での接触領域内のせん断応力 τ_{yz} の最大値を、レール表面からの深さ毎に表わしたものである。図より、せん断応力 τ_{yz} が最大となるのは、レール表層であることがわかる。図4に、Case2の外軌レール表層のせん断応力 τ_{yz} を示す。図より、分布幅が3.5mmで、レール頭頂面中央から-21.9mm位置で最大値296.8MPaとなっていることがわかる。図5にせん断応力 τ_{yz} の最大値とその発生位置を示す。

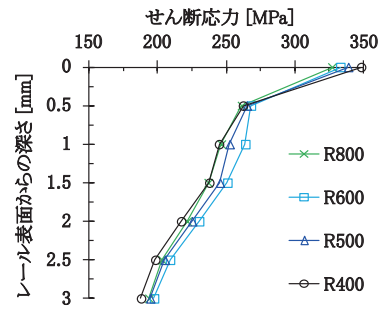


図3 深さ別せん断応力最大値

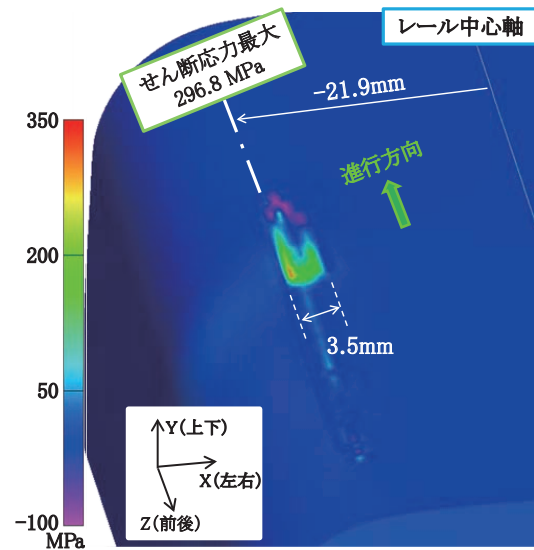


図4 レール表面のせん断応力 τ_{yz} の分布

5. 短いき裂の発生・進展と摩耗の競合解析

5.1 解析プログラム

解析には、鉄道総研が開発した「短いき裂の発生・進展と摩耗の競合モデル」を用いた解析プログラムを使用した¹⁾。このプログラムでは、解析例(図6)のように、レール表層の断面(まくらぎ方向に垂直な面)内に発生する二次元のき裂進展を模擬する。き裂の進展と同時に、レール表面を逐次減少させることで摩耗を、また結晶粒を歪ませることで塑性変形および加工硬化を模擬する。

き裂の発生および塑性変形は式(2)～(4)によって決定する³⁾。

$$\gamma_{i+1} = \gamma_i + \Delta\gamma_i \quad (2)$$

$$\Delta\gamma_i = C \left[\frac{\tau_{\max}}{k_{\text{eff}}} - 1 + \exp \left[-\frac{\tau_{\max}}{k_{\text{eff}}} (1 + 0.439 \frac{\tau_{\max}}{k_{\text{eff}}}) \right] \right] \quad (3)$$

$$k_{\text{eff}} = k_0 \max(1, \beta \sqrt{1 - e^{-\gamma_i}}) \quad (4)$$

ここで、 γ は車輪通過ごとに累積するせん断ひずみの正接、 $C = 2.37 \times 10^{-3}$ は定数、 k_0 (Pa)は初期せん断降伏

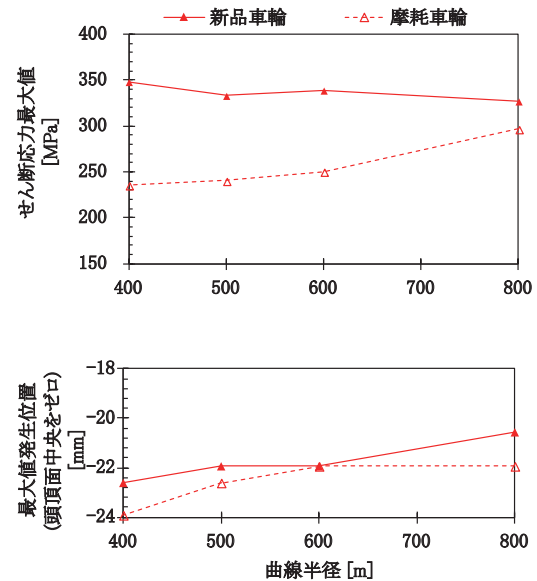


図5 レール表面のせん断応力 τ_{yz} の最大値とその発生位置

応力であり式 (5) で定まる。

$$k_0 = 8.0 \times 10^7 H_n \quad (5)$$

ここで、 H_n はナノ硬さ（押付け荷重 30 mN）であり、材料相によって異なる値を使用する。また、 β も材料相ごとに定まる定数（初析フェライト：1.48，パーライト：1.55）， τ_{max} は断面内の直交せん断応力最大値である。き裂の発生条件である γ の限界値 γ_c は、文献⁴⁾ のきしみ割れ発生角度（レールの長手方向とき裂がなす角）の平均値 19.08° を使用して $\gamma_c = \tan(90^\circ - 19.08^\circ) = 2.89$ とした。

5.2 解析条件

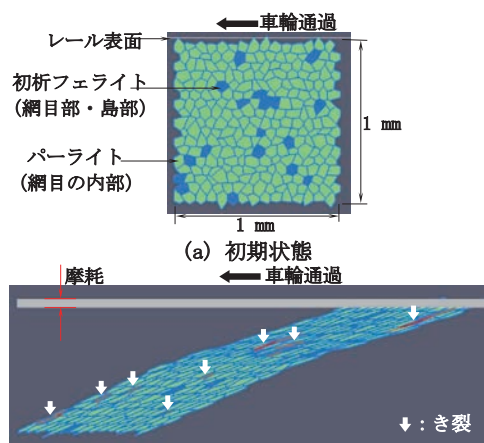
実材料の鋼種を想定した解析用鋼材の初析フェライト相およびパーライト相の硬さを表 2 に示す。鋼種 A および B は初析フェライトおよびパーライトを有する材料を、鋼種 C、D および E はパーライト相のみの材料を想定している。初析フェライトおよびパーライトの体積分率に応じて母材のバルク硬さが定まるものと仮定し、初析フェライトの硬さを 100HV としてパーライトの硬さを算出した。さらに、ナノ硬さは、それぞれバルク硬さを 2.5 倍⁵⁾ して求めた。レールの摩耗量は、営業線で実施された現地試験結果⁶⁾ を参考に決定した。

解析プログラムでは、き裂起点と粒界の初期の断面形状をランダムに与えた解析を複数回行うため、同一条件・同材種での解析を行った場合でも解析毎にき裂進展の状況に差が生じる。そのため、解析によってはき裂がほとんど進展しない場合や解析領域外まで進展する場合がある。そこで、最大き裂長さの中央値が収束する計算回数として 100 回を採用した。

解析領域外まで進展するき裂を考慮した上で解析結果を定量的に評価するために、各条件・鋼種ごとに行う 100 回の解析結果のうちの最大き裂長さの小さい方から 50 番目のき裂を、その条件・鋼種の解析結果の評価指標として用いることとする。

5.3 解析結果

き裂進展解析の結果、全条件の全鋼種でき裂が発生し、解析領域外（き裂長さ 2-3mm 以上）まで進展した。例として Case2 の結果を図 7 に示す。硬さが大きい鋼種ほど、き裂長さの進展寿命は長くなった。解析結果は車輪通過 5000 回に 1 回出力しており、最大き裂長さが車輪



(b) 負荷によってき裂発生，摩耗および変形した様子

図 6 解析例

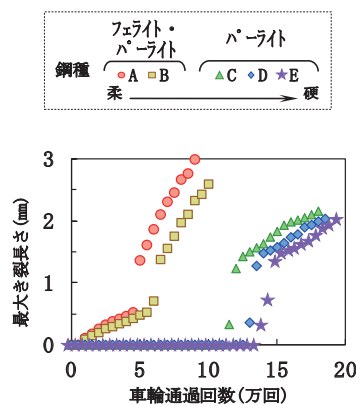


図 7 最大き裂長さの推移

5000 回の通過当たり 0.2 mm 以上増加している現象を急進き裂の発生と呼ぶこととする。全条件・全鋼種でき裂が発生・進展したため、この急進き裂の発生までの車輪通過回数を評価することによって解析結果を考察することとする。

図 8 は軌道の曲線半径と急進き裂が発生するまでの車輪通過回数の関係である。いずれの鋼種でも車輪が摩耗形状の方が急進き裂の発生は遅くなる傾向にある。

5.4 考察

急進き裂発生時の車輪通過回数は、全ての解析条件で 10^5 回オーダー以下であった。営業線においても、レール交換後 100 万トン（軸重 10 トンの場合、 10^5 回）

表 2 解析用鋼の初析フェライト相およびパーライト相の硬さ

解析用鋼種	A	B	C	D	E
バルクの硬さ (HV)	270	310	360	375	390
ナノ硬さ H_n (N/mm ²)	初析フェライト	250	250	—	—
	パーライト	724	836	900	938

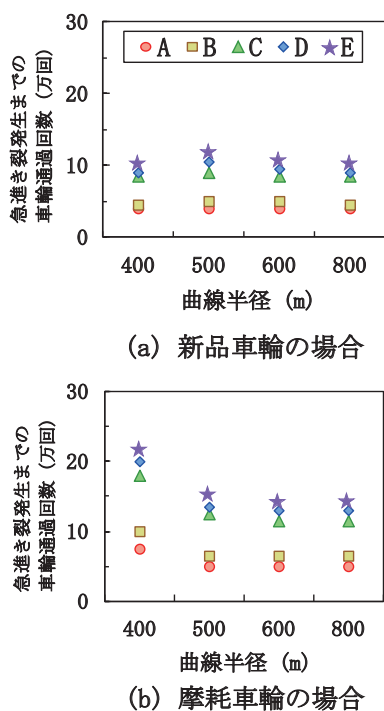


図8 急進き裂発生までの車輪通過回数

の時点できしみ割れが発生している⁷⁾。きしみ割れが発生するような緩曲線においては、急進き裂発生後のき裂（水平裂やそれから分岐するはく離・横裂）進展メカニズムに影響を与える諸因子の定量的評価が重要である。

急進き裂発生時の車輪通過回数を曲線半径毎に比較すると新品車輪より摩耗車輪の方が発生が遅くなっており、その傾向はR400mで顕著である。これは、作用するせん断応力の違いが影響していると考えられる。

本解析においては、R400mの場合でも車輪踏面形状による差はあるものの、急進き裂が発生した。解析条件によってレールの摩耗率を変化させたが、急進き裂発生時の車輪通過回数に大きな差異はなかった。これには種々の因子が影響していると思われるが、R400m等の摩耗の進行が速い条件では、 10^5 回程度の車輪通過数でもレール断面形状変化に伴う車輪・レール接触点の変化が生じることが影響している可能性がある。今回の解析では、解析断面におけるレールの摩耗率は考慮しているものの、摩耗に伴う車輪・レール接触点の変化やせん断応力の変化を考慮していないため、急曲線における急進き裂発生までの車輪通過回数を小さく評価している可能性がある。

急進き裂発生までの車輪通過回数は、全ての解析条件で小さなものから順に鋼種A, B, C, D, Eの順であった。これは、式(2)-(5)が示すとおり作用するせん断応力が同じ場合、材料が硬いほど累積せん断ひずみが小さくなることによる。フェライト・パーライト複合組織鋼である鋼種AおよびBの急進き裂発生が相対的に早いのは、軟らかい組織である粒界等の初析フェライト相か

らき裂が早い時期に発生するためである。パーライト単一組織鋼である鋼種C, DおよびEは、初析フェライト相がないため、急進き裂発生が相対的に遅い。本解析結果から判断すると、パーライト単一組織鋼でバルク硬さが硬い鋼種ほどき裂発生寿命が長いことになる。ただし、本解析では鋼種毎にひずみ硬化率 β および臨界せん断ひずみ γ_c を変化させていないため、これらの値が鋼種毎に異なる場合には、解析結果も異なってくる可能性がある。一般的には硬い材料ほど延性が低い(γ_c が小さい)とされていることから、鋼種によってき裂発生角度が異なる場合には補正が必要である。

6. まとめ

きしみ割れを想定した曲線通過シミュレーション、車輪・レールの転がり接触有限要素解析および短いき裂の発生・進展と摩耗の競合解析から構成されるレール損傷評価法を構築した。構築したモデルを用いて、短いき裂の発生・進展のレール鋼種による違いを比較評価するため、初析フェライトとパーライトの体積分率および硬さを考慮した、短いき裂の発生・進展と摩耗の競合解析を行った。その結果、全般的にき裂発生寿命は10万回オーダー以下でありレール全寿命と比較して非常に短いこと、レール鋼種に関しては、パーライト単一組織鋼でバルク硬さが硬い鋼種ほど、き裂発生寿命が相対的に長くなること、等がわかった。

文献

- 1) Akama M., et al., Numerical simulation of competition between short crack propagation and wear in railhead, World Congress on Railway Research (WCRR) 2011.
- 2) Burstow, M. C.: Whole life rail model application and development for RSSB – continued development of an RCF damage parameter, Rail Safety and Standards Board, London, 2004.
- 3) Vasić, G., et al. : Influence of partial slip and direction of traction on wear rate in wheel-rail contact, Wear, Vol.270, pp.163-171, 2011.
- 4) 小木曾清高ら：渦電流によるきしみ割れ深さ測定の検討, J-RAIL2013 予稿集, 2013
- 5) Garnham, J. E., et al. : Predicting the life of steel rails, Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit, Vol.221, pp.45-58, 2007.
- 6) 小木曾清高ら：曲線外軌への耐きしみ割れ用レール適用に関する研究, J-RAIL2014 予稿集, 2014
- 7) 松本剛明ら：レール頭頂面に発生するきしみ傷の管理手法に関する研究, 土木学会第69回年次学術講演会, VI-396, 2014