

# レール横裂進展予測モデルの開発

辻江 正裕\*      赤間 誠\*\*  
松田 博之\*\*\*      名村 明\*

## Development of a Model for Analyzing the Propagation of Transverse Cracking of Rail

Masahiro TSUJIE      Makoto AKAMA  
Hiroyuki MATSUDA      Akira NAMURA

It is important to analyze the propagation of transverse cracking accurately that causes rail failure from the view point of ensuring rail safety. Up to now, the crack propagation has been analyzed by using Finite Element Method (FEM) and so on. However in these previous methods, the subdivision of meshes has to be repeated every time when the crack to be analyzed after its new propagation. Then, we have proposed a method of crack propagation analysis by using Boundary Node Method (BNM). In this paper, we have presented how BNM program for 3-D elastic analysis has been developed and the result of the analyses of transverse cracking propagation performed by this program.

キーワード：レール損傷，横裂，き裂，進展解析，メッシュフリー法

### 1. はじめに

鉄道用レールは、車輪の通過によって、厳しい応力が負荷される。この車輪からの転動荷重がもたらす転がり接触疲労により、レール頭頂面を起点にシェリングと呼ばれるき裂が発生する。このき裂は初めレール頭頂面とほぼ平行に進展するが、ある程度進展すると、き裂はレール頭頂面とほぼ平行に進展する水平裂とレール底部へと進展する横裂に分岐する。特に横裂はより底部へと進展すると、レール破断を引き起こす危険性がある。そこで鉄道事業者においては、これらの傷を管理・予防するために探傷や削正といった対策を講じている。横裂の進展を精度よく予測することができれば、探傷を必要最小限の頻度で行うことができ、安全性を脅かすことなく経済的に管理することができる。

本研究では、はじめにメッシュフリー法による三次元弾性解析プログラムを作成し、簡単な表面き裂の応力拡大係数 ( $K$  値) 解析を行った。それらの結果を既存の解析結果と比較し、本手法の有効性を確認した。そしてレールに発生した横裂の進展解析を行ったので、以下に報告する。

### 2. メッシュフリー法による応力拡大係数解析

レールの安全性を評価する上で、発生した横裂の進展を精度良く解析することは重要である。これまでき裂の進展予測は、き裂の形状が半円または半楕円形状のまま進展するものと仮定して、解析を行ってきた。しかし横裂の場合、き裂進展の駆動力が列車通過による曲げ応力だけでなく、レール温度による熱応力やレール製造時及び運用時の残留応力を含み複雑であることから、進展した形状が半円または半楕円形状とは大きくかけ離れる場合がある。有限要素法など、既存の代表的な数値解析法を用いる場合、き裂が進展する度にメッシュを再分割して解析を行う必要があるため、多大な労力を必要とし、また場合によっては解析自体が行えないこともある。

一方、メッシュフリー法は連続体の離散解析手法において、メッシュを使わずに解析を行う手法である。き裂の進展解析など、従来の‘要素’法では、解析の途中でメッシュの更新を必要とするが、メッシュフリー法ではメッシュがないため、任意の方向のき裂進展に対して配置した節点のまま、解析を継続することができる。境界節点法 (BNM) は Mukherjee and Mukherjee<sup>1)</sup> によって提案されたメッシュフリー法であり、境界要素法をベースとし、移動最小二乗近似を形状関数として用いた手法である。そのため、次元に関しての優位性とメッシュフリーのメリットを同時に保持しており、特に三次

\* 鉄道力学研究部 (軌道力学)  
\*\* 車両構造技術研究部 (車両強度)  
\*\*\* 前 鉄道力学研究部 (現 東日本旅客鉄道株式会社)

特集：軌道技術

元表面き裂の進展解析に適していると考えられる。そこで、本研究における横裂の応力拡大係数（以下、「 $K$ 値」と記す）解析及び進展解析は、以下に示すようにBNMの三次元弾性解析プログラムを構築して行った。

2.1 境界節点法の定式化

三次元弾性問題におけるBNMの定式化を、Chatl et al.<sup>2)</sup>の論文に沿って記述する。

2.1.1 移動最小二乗 (MLS) 近似

三次元物体 $B$ の境界 $\partial B$ 上における、変位 $\mathbf{u}$ 及びトラクション $\mathbf{t}$ のMLS形状関数は次式で定義される。

$$\mathbf{u}(\mathbf{s}) = \sum_{i=1}^m p_i(\mathbf{s} - \mathbf{s}^E) \mathbf{a}_i = \mathbf{p}^T(\mathbf{s} - \mathbf{s}^E) \mathbf{a} \quad (1)$$

$$\mathbf{t}(\mathbf{s}) = \sum_{i=1}^m p_i(\mathbf{s} - \mathbf{s}^E) \mathbf{b}_i = \mathbf{p}^T(\mathbf{s} - \mathbf{s}^E) \mathbf{b} \quad (2)$$

ここで $\mathbf{s}$ は $\partial B$ 上の曲線座標 $(s_1, s_2)$ における任意の点、 $\mathbf{s}^E$ は評価点の座標である。 $p_i$ は基底関数で、

$$\mathbf{p}^T(\bar{s}_1, \bar{s}_2) = [1, \bar{s}_1, \bar{s}_2, \bar{s}_1^2, \bar{s}_2^2, \bar{s}_1 \bar{s}_2], \quad m = 6 \quad (3)$$

ここで

$$\bar{s}_i = s_i - s_i^E \quad ; \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

$\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i$ は定数ではなく、次式で定義される評価関数を最小化させるように決定される。

$$R_u = \sum_{I=1}^n w(\mathbf{d}_I) \left[ \mathbf{p}^T(\mathbf{s}^I - \mathbf{s}^E) \mathbf{a} - \hat{\mathbf{u}}_I \right]^2 \quad (5)$$

$$R_t = \sum_{I=1}^n w(\mathbf{d}_I) \left[ \mathbf{p}^T(\mathbf{s}^I - \mathbf{s}^E) \mathbf{b} - \hat{\mathbf{t}}_I \right]^2 \quad (6)$$

$n$ は $w(\mathbf{d}_I) \neq 0$ の境界節点数、 $\mathbf{d}_I$ は $\mathbf{s}$ と $\mathbf{s}^I$ 間の最短距離である。また $\hat{\mathbf{u}}_I$ 及び $\hat{\mathbf{t}}_I$ は、節点値 $\mathbf{u}_I$ 及び $\mathbf{t}_I$ の近似値である。 $w(\mathbf{d})$ は重み関数で、次式のような指数型関数とした。

$$w(\mathbf{d}) = \exp \left\{ - \left( \frac{\mathbf{d}}{\alpha} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

ここで $\mathbf{d}$ は評価点からの最短距離、 $\alpha$ は指数型重み関数の形状を決定する定数である。解析では、 $w(\mathbf{d}) \neq 0$ となる各評価点の影響領域は規定せず、評価点ごとに重み関数の形状を変えることによって解析精度を向上させることを目指す。 $\mathbf{a}$ 及び $\mathbf{b}$ に関しての $R_u$ 及び $R_t$ の停留条件から

$$\mathbf{a}(\mathbf{s}) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{s}) \mathbf{B}(\mathbf{s}) \hat{\mathbf{u}} \quad (8)$$

$$\mathbf{b}(\mathbf{s}) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{s}) \mathbf{B}(\mathbf{s}) \hat{\mathbf{t}} \quad (9)$$

ここで

$$\mathbf{A}(\mathbf{s}) = \mathbf{P}^T(\mathbf{s}^I - \mathbf{s}^E) \mathbf{W}(\mathbf{s}, \mathbf{s}^I) \mathbf{P}(\mathbf{s}^I - \mathbf{s}^E) \quad (10)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{s}) = \mathbf{P}^T(\mathbf{s}^I - \mathbf{s}^E) \mathbf{W}(\mathbf{s}, \mathbf{s}^I) \quad (11)$$

$$\mathbf{P}(\mathbf{s}^I) = \begin{bmatrix} 1 & p_2(s_1^I, s_2^I) & \cdots & p_m(s_1^I, s_2^I) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & p_2(s_1^I, s_2^I) & \cdots & p_m(s_1^I, s_2^I) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{W}(\mathbf{s}, \mathbf{s}^I) \equiv \mathbf{W}(\mathbf{d}_I) = \begin{bmatrix} w(d_1) & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & w(d_n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式(8)を式(1)、式(9)を式(2)に代入して、

$$\mathbf{u}(\mathbf{s}) = \sum_{I=1}^n \Phi_I(\mathbf{s}) \hat{\mathbf{u}}_I \quad (14)$$

$$\mathbf{t}(\mathbf{s}) = \sum_{I=1}^n \Phi_I(\mathbf{s}) \hat{\mathbf{t}}_I \quad (15)$$

ここでBNMの形状関数 $\Phi_I$ は

$$\Phi_I(\mathbf{s}) = \sum_{j=1}^m p_j(\mathbf{s} - \mathbf{s}^E) \mathbf{C}_{jI}(\mathbf{s}) \quad (16)$$

$$\mathbf{C}_{jI} = (\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B})_{jI} \quad (17)$$

で与えられる。実際の節点値は、影響領域内にある節点の近似値とそれらの形状関数から、ポスト処理で求める。

2.1.2 境界積分方程式と離散化

本項では、前項で定義された形状関数を用い、以下の手順で $K$ 値を算出する。

物体力が無い正規化形式における3D線形弾性についての標準的な境界積分方程式は、次のように記述できる。

$$0 = \int_{\partial B} [U_{ik}(P, Q) t_k(Q) - T_{ik}(P, Q) (u_k(Q) - u_k(P))] dS_Q \quad (18)$$

ここで $u_k$ と $t_k$ はそれぞれ変位とトラクションの成分であり、 $U_{ik}$ ならびに $T_{ik}$ は

$$U_{ik} = \frac{1}{16\pi(1-\nu)Gr} [(3-4\nu)\delta_{ik} + r_{,i}r_{,k}] \quad (19)$$

$$T_{ik} = \frac{-1}{8\pi(1-\nu)r^2} \left[ \{(1-2\nu)\delta_{ik} + 3r_{,i}r_{,k}\} \frac{\partial r}{\partial n} - (1-2\nu)(r_{,i}n_k - r_{,k}n_i) \right] \quad (20)$$

と表される。また $G$ は横弾性係数、 $\nu$ はPoisson比、 $r$ は着力点 $P$ と観測点 $Q$ 間の距離で、 $n_i$ は観測点 $Q$ における単位法線の成分である。前項に与えた式(16)の形状関数を用い、 $\partial B$ 上の $u_i$ と $t_i$ を近似するために用いる。積分を実行するため、境界表面をセルに分割する。式(14)及び式(15)を式(18)に代入し、 $\partial B$ を $N_c$ のセルに分割すると、次式を得る。

$$0 = \sum_{m=1}^{N_c} \int_{\partial B_m} U_{ik}(P, Q) \sum_{I=1}^{N_c} \Phi_I(Q) \hat{t}_{Ii} - \sum_{m=1}^{N_c} \int_{\partial B_m} T_{ik}(P, Q) \left\{ \sum_{I=1}^{N_c} \Phi_I(Q) \hat{u}_{Ii} - \sum_{I=1}^{N_c} \Phi_I(P) \hat{u}_{Ii} \right\} dS_Q \quad (21)$$

$n_Q$  節点は点  $Q$  の影響領域内にあり、 $n_P$  節点は点  $P$  の影響領域内にある。

境界積分方程式(21)から、変位とトラクションが算出される。そして本研究では、得られた変位から、変位外挿法により  $K$  値を求める。

### 2.2 3D 表面き裂の応力拡大係数解析

$K$  値解析の例として、一様引張りを受ける平板中の半円形表面き裂 (半径 =  $a$ ) の場合の解析結果を示す。

図1は、変形前の形状と BNM により解析した変形後の形状で、それぞれの節点配置を示している。式(21)の積分に用いるセルの個数は、各面とも全て1とした。節点の個数は、き裂面 ( $xy$  面)、 $x$  方向の対称面 ( $yz$  面) 及びき裂口がある面 ( $zx$  面) のセルについては100, その他の面については25とし、いずれも格子状の規則的な配列とした。有限要素法 (FEM) 及び境界要素法 (BEM) のような '要素' 法では、図2 (a) に示すように、き裂前縁にメッシュ線を一致させた要素分割を行わなければならない。専用のプリ処理ソフトを使用する必要があり、手間がかかる。さらに、き裂が進展した場合は、移動するき裂前縁に沿って逐次要素分割を変更しなければならない。BNM では図2 (b) に示すように、格子状の規則的な配置で良く、き裂が進展してもこの配置はそのままが良いため、非常に効率的である。この解析においては、格子状の各セルの積分点数を  $20 \times 20$  とした。初期のき裂前縁は節点を通らず、節点間にある。き裂面では、基底関数にき裂の変位場の特性 ( $\sqrt{r}$ ; ここで  $r$  はき裂先端からの距離) を表現できる関数 (エンリッチ関数)  $\gamma_i$  を付加した。 $\gamma_i$  としては次式が用いられる。

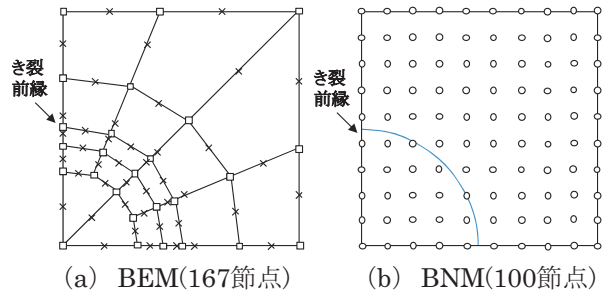


図2 き裂面の接点配置

$$\begin{cases} \gamma_1 = \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \gamma_2 = \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ \gamma_3 = \sqrt{r} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\theta \\ \gamma_4 = \sqrt{r} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\theta \end{cases} \quad (22)$$

ここに  $(r, \theta)$  は、図3に示すような、き裂先端位置を原点とする極座標系である。よってき裂近傍にある変位場は、式(14)の代わりに次式で近似される。

$$u(\mathbf{s}) = \sum_{I=1}^n \Phi_I(\mathbf{s}) \hat{u}_I + \sum_{I \in C} \Phi_I(\mathbf{s}) \sum_{k=1}^4 \gamma_k(\mathbf{s}) \mathbf{a}_I^k \quad (23)$$

ここで  $C$  はき裂先端近傍の変位について、変位場の特性を考慮する節点を集めた集合、 $\mathbf{a}_I^k$  は、節点に割り付けられる節点自由度ベクトルである。式(7)の  $\alpha$  は、節点数100の面については0.22, 節点数25の面については1.41とした。

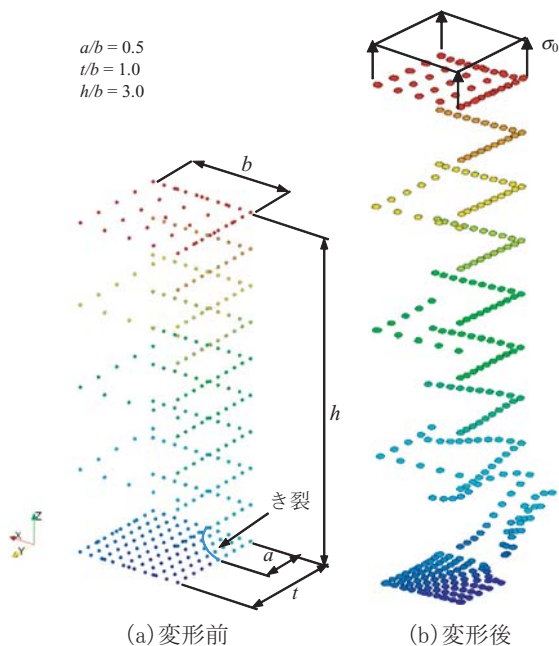


図1 節点の配置と変形前後の形状

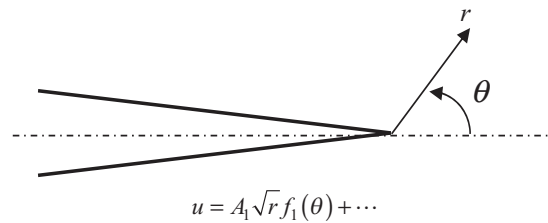


図3 き裂先端近傍の座標系と変位

$K$  値は、 $x$  方向対称面からの角度  $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  及び  $90^\circ$  (すなわち  $2\phi/\pi = 0, 1/3, 2/3, 1$ ) におけるき裂前縁の4点について、変位外挿法で求めた。得られた解析結果について、同じ問題の有限要素法による西岡らの結果<sup>3)</sup>, ならびに境界要素法による木須らの結果<sup>4)</sup> と比較したものを、図4に示す。このように、メッシュフリー法における半円形表面き裂の  $K$  値解析結果は、いずれの数値解析結果とも概ね一致する結果となった。

特集：軌道技術

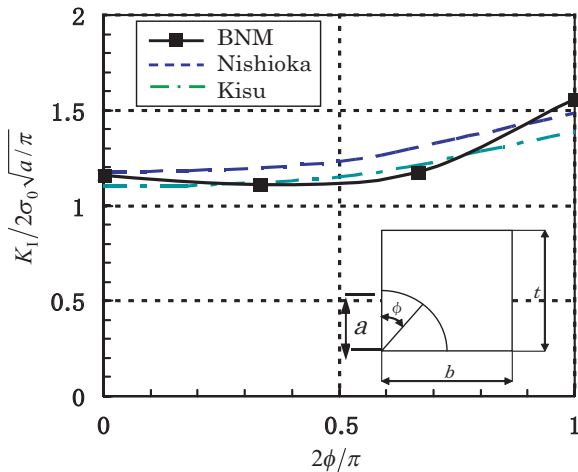


図4 半円き裂のK値の比較

3. 横裂の進展解析

本章では、2章の解析で得られたK値により、以下の手順で横裂の進展予測モデルを構築し、横裂の進展解析を行った。

3.1 横裂進展予測モデル

前述のBNMと重ね合わせの原理を用い、以下の手順で、レールに発生した横裂の進展予測を行った。

- (i) き裂のないレール頭部の応力解析を行い、仮想き裂面上の応力分布  $\sigma(x, y)$  を求める。この解析は、き裂のない場合を対象とするため、材料力学による計算や測定結果などで簡単に求めることができる。
- (ii) 初期き裂形状を仮定し、(i) で求めた応力分布の等値逆符号である  $-\sigma(x, y)$  を、BNMモデルのき裂面に負荷する。そして変位外挿法により、き裂前縁のK値を求める。
- (iii) き裂進展は、次のParis則を積分することで行なう。

$$\frac{dc}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (24)$$

ただし  $c$  はき裂長さ、 $N$  は繰返し数、 $C$  および  $m$  は材料定数である。先行研究<sup>5)</sup>より、材料定数  $C$ 、 $m$  をそれぞれ  $1 \times 10^{-11}$  ならびに  $3.0$  とした。また  $\Delta K_{\text{eff}}$  は、次式で与えられるK値範囲である。

$$\Delta K_{\text{eff}} = \begin{cases} K_{\text{max}} - K_{\text{min}} & (K_{\text{min}} > 0) \\ K_{\text{max}} & (K_{\text{min}} \leq 0) \end{cases} \quad (25)$$

ただし  $K_{\text{max}}$  及び  $K_{\text{min}}$  は、1サイクル中の最大応力  $\sigma_{\text{max}}$  及び最小応力  $\sigma_{\text{min}}$  に対応するK値である。

3.2 レールの曲げ応力

列車通過によってもたらされるレールの曲げ応力は、横裂進展に大きな影響を及ぼす。このレール曲げ応力は、輪重によってもたらされる曲げ応力だけでなく、列車編成や軸距・台車中心間距離、輪重変動などの影響も受ける。本研究では、以下の手順でレールの曲げ応力を算出し、解析モデルに反映させた。

3.2.1 列車編成とレールの曲げ応力

本項では、横裂進展の駆動力となる、列車通過時の輪重による曲げ応力について検討する。通過列車として、10両編成の通勤形電車（輪重は42kNとする）を考えると、曲げ応力はTimoshenko and Langerの弾性床上の梁の曲げ理論<sup>6)</sup>から、次のように算出される。 $N$ 個の輪重が連続して作用する場合、先頭の車輪からの距離を  $x_w$ 、先頭の車輪から  $j$  番目の車輪までの距離を  $d_j$  とすると、曲げモーメント  $M(x_w)$  は次式で求められる。

$$\begin{aligned} M(x_w) &= \sum_{j=1}^N M_-(x_w - d_j) & 0 \leq x_w \\ M(x_w) &= \sum_{j=1}^n M_+(x_w - d_j) + \sum_{j=n+1}^N M_-(x_w - d_j) & d_{n+1} \leq x_w \leq d_n \\ M(x_w) &= \sum_{j=1}^N M_+(x_w - d_j) & x_w \geq d_N \end{aligned} \quad (26)$$

ここで

$$\begin{aligned} M_+(x_w) &= -\frac{P}{4\beta} e^{-\beta x_w} (\cos \beta x_w - \sin \beta x_w) \\ M_-(x_w) &= -\frac{P}{4\beta} e^{+\beta x_w} (\cos \beta x_w + \sin \beta x_w) \end{aligned} \quad (27)$$

とし、また  $d_1 = 0$  とした。 $P$  は輪重、 $\beta$  は支持剛性  $k$  とレールの曲げ剛性  $EI$  の関数で、次式で与えられる。

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{k}{4EI}} \quad (28)$$

ただし、 $E$  はヤング率、 $I$  はレールの断面二次モーメントである。算出された曲げモーメントより、曲げ応力は次式で与えられる。

$$\sigma(x) = \frac{M(x_w)}{I} \xi \quad (29)$$

ここで、 $\xi$  はレール表面の曲げの中立軸からの距離である。 $P = 42\text{kN}$ 、まくらぎ間隔の影響を含む支持剛性を  $35\text{MPa}$  として  $\beta = 1.078/\text{m}$ 、 $I = 3.09 \times 10^{-5}\text{m}^4$ 、 $\xi = 0.0965\text{m}$  を代入し、車輪間の距離を考慮すると、図5のように列車通過時の曲げ応力分布が求まる。

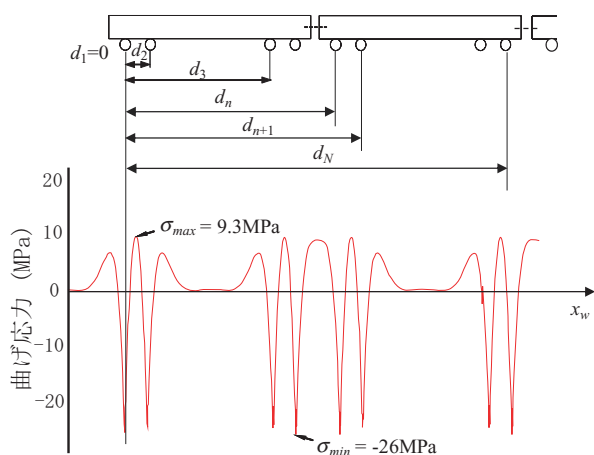


図5 列車通過時のレール曲げ応力

3.2.2 輪重変動率

列車走行時に発生するレール曲げ応力は、頭頂面シェリングによるレール凹凸形状の影響を受け、列車停止時に発生するものよりも高くなる。先行研究<sup>7)</sup>より、表1ならびに図6の軌道構造条件においては、レール凹凸形状に基づく曲げ応力算出式が、式(30)のように与えられる。ただし車両の条件として、通勤形電車は静止輪重が53kNで走行速度が90km/h、電気機関車は静止輪重が79kNで走行速度は100km/h、を想定している。

表1 軌道構造条件

軌道	有道床	
レール	60kg	
軌道 パッド	ばね係数 (MN/m)	110
	減衰係数 (kN・s/m)	98
浮きまくらぎ (mm)	1	

通勤形電車： $y = 36.47 V + 4.436 W + 40.75$   
 電気機関車： $y = 34.47 V + 8.450 W + 53.04$  (30)  
 (ただし、VならびにWは図6による)

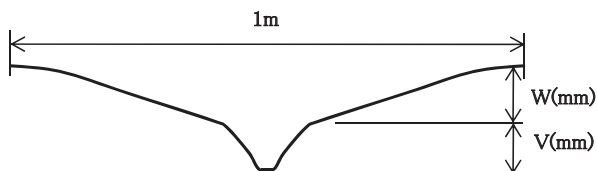


図6 レール頭頂面凹凸のイメージ

シェリングによる落ち込みVを0.50mm、Wを0mmとした場合の曲げ応力を算出すると、電気機関車においては70MPa、通勤形電車においては59MPaの曲げ応力がレール頭頂面に負荷される結果となった。それぞれの車両が停止している際の曲げ応力から輪重変動率(最大輪重/静止輪重)を計算すると、電気機関車で1.4倍、通勤形電車で1.8倍となった。そこで本研究においても、動的効果を反映させるため、静止輪重における曲げ応力の値に、これらの輪重変動率を加味して解析を行った。

解析対象である通勤形電車においては、図5に示すように求められた静止輪重負荷時の応力分布に、動的効果を考慮して1.8倍し、 $\sigma_{max} = 16.8\text{MPa}$ 、 $\sigma_{min} = -46.8\text{MPa}$ とした。また列車通過によって発生する繰返し応力のピーク回数は、解析対象とした10両編成の場合、実際の通過車輪数の1.275倍となる。進展解析における繰返し数Nは、これを採用した。

3.3 解析条件

横裂の進展には、レール温度による熱応力や製造時及び運用時の残留応力、き裂面の形状やき裂の進展方向、列車が通過することによりもたらされる曲げ応力が影響すると考えられる。そこでこれらのパラメータが横裂進展にもたらす影響について検討するため、表2に示すように各パラメータを変化させて進展解析を行った。なお、レール温度による熱応力や製造時および運用時の残

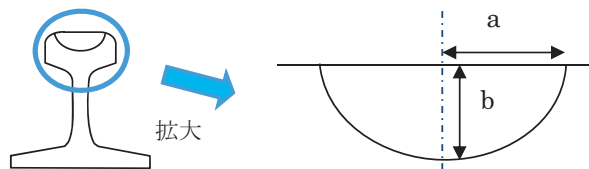


図7 アスペクト比の定義

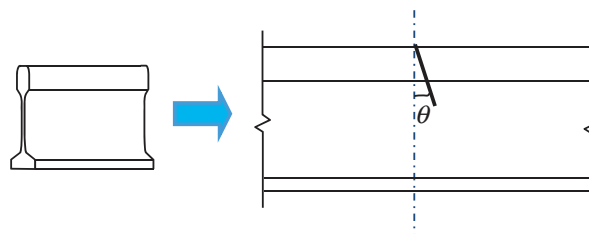


図8 き裂面進展角度の定義

表2 横裂進展解析の条件

	平均応力 (MPa)	き裂面アスペクト比	き裂進展角度 (°)	走行車種	輪重変動率
解析I	100	b/a=1.0	20	通勤形電車	1.8
解析II	0	b/a=1.0	20		
解析III	100	b/a=0.8	20		
解析IV	100	b/a=1.2	20		
解析V	100	b/a=1.0	40		
解析VI	100	b/a=1.0	20	電気機関車	1.4

特集：軌道技術

留応力については、両者を合わせた平均応力がレール全体に一樣に分布するものとした。き裂面のアスペクト比ならびにき裂進展角度は、図7及び図8のように定義した。また車両の静止輪重は、通勤形電車においては42kN、電気機関車においては79kNとした。いずれの条件においても、初期の横裂深さは、横裂探傷器による探傷が可能となる10mmとした。

3.4 横裂進展解析結果

表2に示す条件で行った。進展解析の結果を図9に示す。

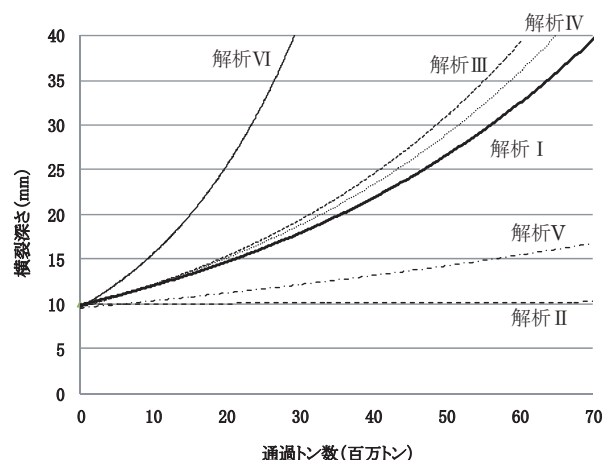


図9 横裂進展解析結果

解析IならびにIIの結果より、平均応力によって進展速度に大きな違いが見られた。これは平均応力によって、き裂進展に影響を及ぼすK値範囲が大きく変化するからである。

き裂面のアスペクト比を $b/a = 1.0, 0.8, 1.2$ と変えた解析IならびにIIIやIVの結果は、進展速度に若干の違いが見られるものの、ほぼ同じ傾向を示した。これはアスペクト比の違いからは、き裂面に作用する応力に対して、進展速度に影響を及ぼすほどの変化がもたらされないためと考えられる。

解析Iならびに解析Vの結果より、き裂の進展角度によって進展状況は大きく異なる結果となった。分岐き裂である横裂の進展においては、き裂面に対して垂直な成分の応力が駆動力となるため、進展方向がより垂直に近いほど、その値は大きくなることが影響していると考えられる。

通勤形電車のみが通過した条件(解析I)と電気機関車のみが通過した条件(解析VI)の結果より、走行車種の違いによって、き裂の進展状況は大きく変化することがわかる。これは通勤形電車と電気機関車のように輪重

が異なる車両が通過すると、レールに負荷される曲げ応力も変化するため、き裂進展に作用するK値範囲にも影響を及ぼしていると考えられる。

このように解析条件によって、横裂の進展は大きく異なる結果となった。特に平均応力や走行車種、き裂進展角度が、き裂の進展に大きく影響を及ぼしていることがわかる。

4. まとめ

横裂の進展速度を理論的に求めるために、メッシュフリー法による横裂進展モデルを構築した。そして、レール温度による熱応力や製造時及び運用時の残留応力を合わせた平均応力、き裂面のアスペクト比や進展方向の角度など初期のき裂形状、走行する車種の条件を変えて横裂の進展解析を行った。その結果、横裂の進展は平均応力やき裂進展角の影響を大きく受けることが明らかになった。また走行車種によっても進展速度が大きく変わることが確認された。本モデルを用いて様々な条件で解析を行い、得られた解析結果と実際の探傷結果と照合することで、横裂の進展速度を合理的に評価する解析条件を決定することができる。そしてその条件における解析結果より、当該線区における横裂進展速度を推定することができる。

文献

- 1) Mukherjee. YX and Mukherjee. S: The boundary node method for potential problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.40, pp.797-815, 1997.
- 2) Chati. MK and Mukherjee. S: The boundary node method for three-dimensional linear elasticity, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.46, pp.1163-1184, 1999.
- 3) 西岡俊久 他: 表面半円形き裂の応力拡大係数の有限要素解析, 日本機械学会論文集 (A編), vol.45, pp.717-725, 1979
- 4) 木須博行 他: 境界要素法による表面き裂の応力拡大係数の解析 (第2報, 応力拡大係数の精度よい決定法), 日本機械学会論文集 (A編), vol.51, pp.660-669, 1985
- 5) 柏谷賢治, 他: レール横裂成長速度予測モデル, 鉄道力学論文集, vol.7, pp.79-84, 2003
- 6) S.Timoshenko and B.F.Langer: Stress in Railroad Track, ASME Transaction, 54, pp.277-293.
- 7) 石田誠 他: レール頭頂面凹凸と溶接部曲げ疲労の関係, 鉄道総研報告, vol.4, No.7, pp.8-15, 1990