

1518 適切なレール探傷周期に関する一考察

正 [機] ○辻江 正裕 (鉄道総研) 正 [土] 松田 博之 (JR 東日本)
正 [機] 赤間 誠 (鉄道総研) 佐藤 幸雄 (鉄道総研)

A study on the appropriate cycle of ultrasonic flaw detection of rail

Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-City, Tokyo
East Japan Railway Company

Ultrasonic flaw detection of rail is important for management of the crack such as rail squats, and for preventing rail failures. A lot of cost and manpower are required for inspection of rail, so we have to inspect the rail at frequency as few as possible. But now, ultrasonic flaw detection is not carried out at the optimum cycle on each line. If the ultrasonic flaw detection can be carried out at the optimum cycle on each line, an economical effect can be expected while securing safety. In this study, we estimated the propagation speed of crack, and investigated such length of crack as will cause rail failure on a selected commuter line. Then, based on those results, we examined the cycle of ultrasonic flaw detection of rail most suitable for this line.

Keywords: flaw detection of rail, ultrasonic flaw detection, squats, crack propagation, rail crack, simulation

1. はじめに

鉄道用レールは、車輪の通過によって、繰返し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、レール頭頂部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平行に進展するもの（以下、「水平裂」と記す）とレール底部へと進展するもの（以下、「横裂」と記す）に分岐する。特に横裂は、よりレール底部へと進展すると、レール破断する危険性がある。そこで鉄道事業者は、これらの傷を管理・予防するために、定期的にレールの探傷や削正といった対策法が実施されている。しかしこれらの対策法は等級線区ごとに分類されており、各線区に対応した最適な周期で行われているとは言い難い。また、これらの対策法は多くの人力と費用を要するため、さらにレール探傷車や削正車のような設備も限られていることから、各線区に応じて、できる限り必要最低限の頻度で行う必要がある。このような理由から、各線区に対応した最適な周期で対策法を講じることができれば、安全性を確保しつつ、経済的な効果を期待することができる。

そこで本研究では、ある通勤線区を対象として解析をおこない、横裂の進展速度を算出した。また過去に折損したレールの破面を観察し、脆性破壊に至るき裂の長さについてデータを蓄積した。そしてそれらの結果をもとに、適切なレール探傷周期について検討を行った。

2. 対象線区

本研究のモデルとした線区は、年間通過トン数が約27.2 百万トンの電化複線区間の通勤線区である。なお、この線区では年に一度、探傷車が走行し、そのデータをもとに、レール頭側部から2つの探傷子でレール頭部に超音波を透過させる、横裂測定器¹⁾によって精密探傷が行われている。

3. メッシュフリー法による横裂の進展解析

対象線区における横裂の進展速度を理論的に求めるため、き裂進展プログラムを構築し、解析を行った。

3.1 解析モデルの概要

レールに発生したき裂の進展を解析するために、従来は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、日射による熱応力、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、き裂の進展ごと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、場合によっては解析自体が行えないこともある。

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 によって提案されたメッシュフリー法²⁾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、特に三次元表面き裂の解析に適していると考えられる。そこで BNM の三次元弾性解析プログラムを作成し、横裂の K 値解析及び進展解析を行った。

3.2 BNM の定式化

三次元弾性問題における BNM の定式化を、Chati et al. の論文³⁾に沿って記述する。

(1) 移動最小二乗 (MLS) 近似

三次元物体 B の境界 ∂B 上における、変位 u 及びトラ

クシオン t の MLS 形状関数は次式で定義される。

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

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

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

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

また

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

a_i, 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。

$$R_u = \sum_{i=1}^n w(d_i) [p^T (s^i - s^E) a - \hat{u}_i]^2 \quad (5)$$

$$R_t = \sum_{i=1}^n w(d_i) [p^T (s^i - s^E) b - \hat{t}_i]^2 \quad (6)$$

n は $w(d_i) \neq 0$ の境界節点数, d_i は s と s_i 間の最短距離である。また \hat{u}_i 及び \hat{t}_i は, 節点値 u_i 及び t_i の近似値である。 $w(d)$ は重み関数で, 本研究では Gauss 型関数とした。

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

ここで d は評価点からの最短距離, α は指数型重み関数の形状を決定する定数である。 a 及び b に関しての R_u 及び R_t の停留条件からそれぞれを求め, 式(1)及び(2)に代入して,

$$u(s) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(s) \hat{u}_i \quad (8)$$

$$t(s) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(s) \hat{t}_i \quad (9)$$

また形状関数 Φ_i は

$$\Phi_i(s) = \sum_{j=1}^m p_j (s - s^E) C_{ji}(s) \quad (10)$$

$$C_{ji} = (A^{-1}B)_{ji} \quad (11)$$

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) 境界積分方程式と離散化

物体力がな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。

$$0 = \int_{\partial B} [U_{ik}(P, Q) t_k(Q) - T_{ik}(P, Q) (u_k(Q) - u_k(P))] dS_Q \quad (12)$$

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,

$$U_{ik} = \frac{1}{16\pi(1-\nu)Gr} [(3-4\nu)\delta_{ik} + r_{,i}r_{,k}] \quad (13)$$

$$T_{ik} = \frac{-1}{8\pi(1-\nu)r^2} \left[(1-2\nu)\delta_{ik} + 3r_{,i}r_{,k} \right] \frac{\partial r}{\partial n} - (1-2\nu)(r_{,i}n_k - r_{,k}n_i) \quad (14)$$

また G は横弾性係数, ν は Poisson 比, r は P と Q 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。コンマは観測点に関しての導関数を表す。前節に与えた MLS 形状関数を, ∂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(8)及び(9)を式(12)に代入し, ∂B を N_c のセルに分割すると, 次式を得る。

$$0 = \sum_{m=1}^{N_c} \int_{\partial B_m} U_{ik}(P, Q) \sum_{l=1}^{n_Q} \Phi_l(Q) \hat{t}_{kl} - \sum_{m=1}^{N_c} \int_{\partial B_m} T_{ik}(P, Q) \left[\sum_{l=1}^{n_Q} \Phi_l(Q) \hat{u}_{kl} - \sum_{l=1}^{n_P} \Phi_l(P) \hat{u}_{kl} \right] dS_Q \quad (15)$$

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。

3.3 重ね合わせの原理

本研究では, K 値を解析する際, 重ね合わせの原理⁴⁾を用いた。即ち任意の外力 T を受けるき裂のある弾性体の問題は, き裂がない弾性体が外力 T を受ける問題と, 仮想き裂面に生じる分布力 $\sigma(x, y)$ と等値逆符号の $-\sigma(x, y)$ をき裂面に受けるき裂がある弾性体の問題の和として与えられる。従って元々の問題の K 値は, き裂面上で $-\sigma(x, y)$ の分布力を受ける弾性体の K 値と等しい。ここで x, y は仮想き裂面がある平面の座標軸である (Fig. 1)。この手法によれば, 熱応力, 残留応力などを含む任意荷重の問題に, 簡単に適用することができる。

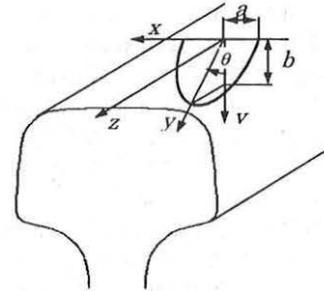


Fig.1 Crack Shape and Coordinate System

3.4 き裂の進展解析

前述の BNM と重ね合わせの原理を用いたプログラムで, レールに発生した横裂の進展を予測する手順は以下の通りである。

- (1) 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。
- (2) 初期き裂形状を仮定し, $-\sigma(x, y)$ を BNM でメッシュ分割したモデルのき裂面に負荷し, 変位外挿法⁵⁾でき裂前縁の K 値を求める。
- (3) き裂進展は, 次の Paris 則を積分することで行なう。

$$\frac{dc}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (16)$$

c はき裂長さ, N は繰返し数, C, m は材料定数である。また ΔK_{eff} は, 次式で与えられる K 値範囲である。

$$\Delta K_{\text{eff}} = \begin{cases} K_{\text{max}} - K_{\text{min}} & (K_{\text{min}} > 0) \\ K_{\text{max}} & (K_{\text{min}} \leq 0) \end{cases} \quad (17)$$

K_{max} 及び K_{min} は, 一サイクル中の最大応力 σ_{max} 及び最小応力 σ_{min} に対応する K 値である。

3.5 解析例

本線で発生した横裂について、開発したプログラムで進展解析を行い、測定結果と比較した。

BNM モデルはレール頭部を四角柱で近似し、節点数はき裂面のみを 100、他の面は 25 とした。式 (7) の α は、節点数 100 の面については 0.5、節点数 25 の面については 1.41 とした。今回の解析では、き裂は y 軸に関して対称と仮定し、初期形状は半軸長がそれぞれ a 、 b の 1/4 楕円について解析した。垂直方向 v から列車進行方向 z への傾き θ は、あるレール破面の測定結果より、 20° と仮定した。 K 値は前縁の等分割した 19 点で解析し、進展した形状は x 及び y の二次関数とし、進展後のそれらの点を用いた最小自乗近似で求めた。また、き裂進展の駆動力は列車通過時の輪重（解析対象列車では 42kN）による曲げ応力のみとした。これは Timoshenko and Langer の弾性床の上の梁の曲げ理論⁶⁾から計算して求め、さらに動的効果を考慮し、1.5 倍して $\sigma_{max} = 14$ MPa、また $\sigma_{min} = -39$ MPa とした。まくらぎ間隔の影響を含む軌道剛性は 35MPa とした。計算結果によれば、発生する繰返し応力のピークは、解析対象とした 10 両編成列車の場合、実際の通過車輪数よりも 1.275 倍だけ多いことが分かり、進展解析における N は、これを考慮した。また式 (16) の C 及び m は、それぞれ 1×10^{-11} 及び 3.0 とした。残留応力は、詳細は不明であるが、文献⁷⁾を参考にして、頭部全体で 100MPa の一定と仮定した。開発したプログラムは熱応力も考慮できるが、日射による熱応力は、レール設置時の温度と解析時期の温度との差が小さい場合、進展速度にはそれほど影響はないため、無視した。

Fig.2 に、解析結果と実際に対象線区で測定した結果との比較を示す。探傷結果より、現場で発生していた横裂は、深さ 10mm 程度の進展初期段階の限られた結果ではあるが、解析結果とほぼ一致している。

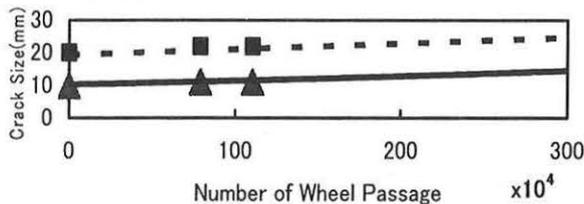


Fig. 2 Comparison of Analytical Results and Measurements
Crack width(=2a): Dotted line; Analytical, ■; Measured, □
Crack depth(=b): Solid line; Analytical, ▲; Measured, △

また横裂深さが 30mm に達するまでの解析結果を Fig. 3 に示す。これより横裂深さが 10mm から 30mm に達するまでに、車輪数で 893 万、期間にして約 34 ヶ月要する結果となった。

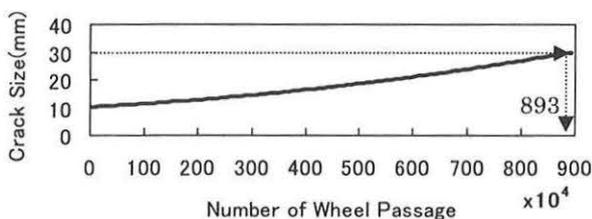


Fig.3 Analytical Prediction of Crack Depth up to 30mm

4. 折損レールの破面観察

本章では、レールが脆性破壊に至るき裂の深さを調べるために、折損したレールの破面を観察した結果について報告する。

4.1 破面の概要

破面観察したレールは、JR 発足以降に鉄道総研にコンサルティング依頼のあった折損レールで、頭頂面シェリングから分岐した横裂を起点として、折損したものに限定した。

Fig.4 に破面観察の一例を示す。頭頂面の軸心位置を中心に、半楕円状に広がっているのが疲労破面であり、ピーチマークとも呼ばれる、疲労破面を特徴づける模様である。この破面は頭頂面から数ミリ下の位置から発生しているが、この部分で水平裂と横裂が分岐していることになる。水平裂との分岐に近い部分の破面（点線で囲まれた領域）は、凹凸が少なく比較的滑らかである。この付近の領域では、比較的緩やかにき裂進展していると考えられる（以下、「緩速進展領域」と記す）。しかし、よりレール底部方向へ進むにつれて、破面の凹凸は粗くなる（破線と点線で囲まれた領域）。この領域では、緩速進展領域と比べると進展速度が速くなっていると考えられる。そしてこの領域の外側、すなわち破線の外側の領域では、破面の凹凸がさらに粗く、金属の光沢も確認されることから、この領域では脆性破壊したものと考えられる。本研究では、疲労破壊領域における 2 つの領域のうち、レールが破断に至る、き裂の最深部を目視により測定した。

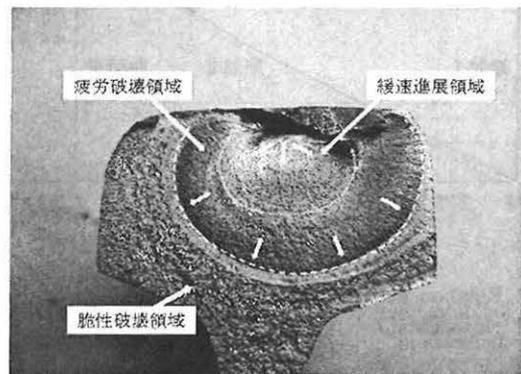


Fig.4 An Example of Observation Result on Crack Face.

4.2 破面観察結果

レールの破面の観察により、疲労破壊領域の深さの最大値、すなわちレールが破断に至った際のき裂深さの分布を調べた。その結果を Fig.5 に示す。

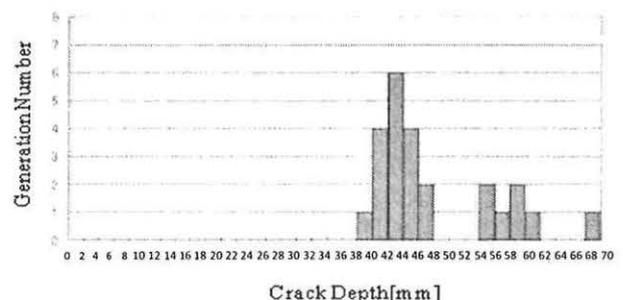


Fig.5 Distribution of Crack Depth.

破断に至ったき裂の深さは、42~44mm をピークに 38 ~ 70mm と幅広い分布となっており、特に最小値は

38.5mm であった。なお調査した限りでは、折損レールのき裂分布において、レール種別に大きな差は見られなかった。

5. 適切なレール探傷周期の検討

実際のレール探傷、ならびに解析により得られたき裂進展速度と、破面観察により得られたレールが破断に至るき裂長さの結果より、対象線区における適切なレール探傷周期について検討をおこなう。

横裂が水平裂より分岐してから、時系列で進展するイメージを Fig.6 に示す。横裂進展速度は、解析により得られた結果を用いた。

横裂の精密な探傷に使用される横裂測定器は、深さが 10mm 以上の横裂を測定することができる。そこで横裂が分岐してから、この探傷が可能となるまでの期間を、Fig.5 の期間 I とする。

レールの破面を観察した結果より、レールが破断に至った際のき裂深さの最小値は 38.5mm であったことから、この値を超えるとレールが破断する可能性がある、とした。横裂が分岐してから、破断する恐れのある時期までを、Fig.6 における期間 I から III までを合わせて安全限界とする。

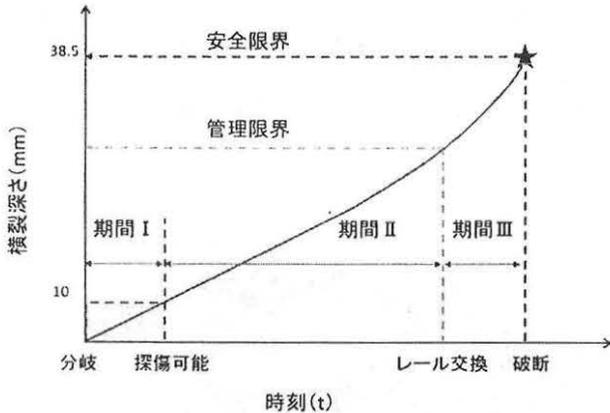


Fig.6 Relation between Crack Progress and Ultrasonic Inspection.

しかし実際には測定誤差や応力変動などが考えられることから、レールが破断する安全限界よりも厳しい条件で管理する必要がある。そこで安全限界に安全率を考慮した、管理限界（期間 I と II を合わせた期間）の範囲内で、き裂を管理するのがよい。

期間 I では探傷が不可能であるため、期間 II において探傷して管理する必要がある。探傷周期は、この期間 II において 2 回行うことを目安としておこなうとよい⁸⁾。横裂深さが 30mm でレール交換を行うとすると、解析結果より対象線区において横裂が 10mm から 30mm まで進展するのに約 34 ヶ月要することから、34 ヶ月の間に 2 度、つまり 17 か月に 1 度の周期で探傷を行うとよいと考えられる。手順としては、以下のとおりである。

初回の探傷結果より、次に探傷を行う時の横裂深さを推定する。そして次の探傷時期に再度、探傷を行う。2 回目の探傷では、1 回目の探傷結果と比較・整合を行うとともに、2 回目の探傷結果からき裂深さが管理限界に到達する時期を推定し、レール交換計画を立てなければならぬ (Fig.7)。期間 II において 2 回探傷を行うので、万が一、初回の探傷でき裂を見落としていたとしても、2 回目の探傷でき裂を検出することができると考えられる。

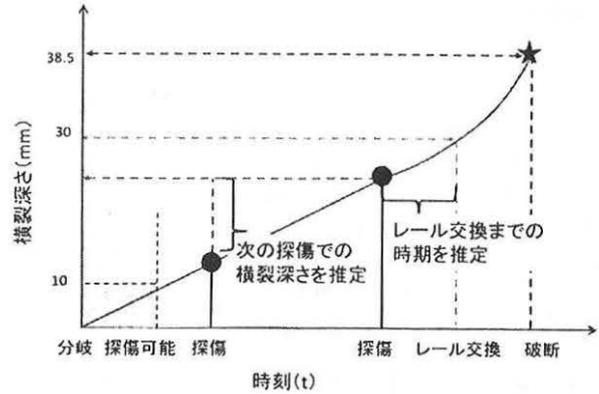


Fig.7 Results of Ultrasonic Inspection and Estimating Method.

6. まとめと今後の予定

本研究では、ある通勤線区を対象に、横裂進展速度を解析によって算出し、またレールが破断する横裂深さの値を組み合わせることで、適切な探傷周期について検討を行った。このように線区毎に探傷周期を決めることができれば、レール破断に対する安全性を確保しつつ、事業者が必要とする最小限の頻度でレール探傷を行うことが可能となる。今後、より多くの線区を対象に検討を行うこと、また解析モデルの精度を向上させることを課題としている。

参考文献

- 1) 寺下善弘, 設楽英樹: レール等に潜む損傷の検査法, RRR, 2008. 5, pp. 22-25, 2008.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 岡村弘之: 線形破壊力学入門, 培風館, 1989.
- 5) 結城良治, 木須博行: 有限要素法による弾性解析, 培風館, 1989.
- 6) S. Timoshenko and B.F. Langer: Stress in Railroad Track, ASME Transaction, 54, pp. 277-293.
- 7) 柏谷賢治, 赤間誠: シェリング傷のき裂進展速度に関する研究, 部内資料, 鉄道総合技術研究所, 2000.
- 8) 西島敏: 金属疲労のおはなし, 日本規格協会, pp. 167-170, 2007