

# レール横裂進展予測モデルの開発と 適切なレール探傷周期の決定手法

鉄道力学研究部 軌道力学  
研究員 辻江 正裕

## 1. はじめに

レールに発生する傷の代表的なものとして、レール頭頂面を起点とするシェリングが挙げられる。特に横裂は大きく成長すると、レール破断を引き起こす危険性がある。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。そこで本研究では、直線区間に敷設されている普通レールを対象に、横裂測定器による探傷結果ならびに探傷車から得られたデータより、横裂の進展状況を調査した。またメッシュフリー法による横裂進展モデルを構築し、いくつかの条件で横裂の進展解析を行った。そしてそれらの結果をもとに、直線区間に発生した頭頂面シェリングの横裂に対する、適切なレール探傷周期について検討を行った。

## 2. 横裂の追跡調査

実際のレールに発生した横裂の進展状況を把握するため、また解析モデルの検証データを蓄積するために、年間通過トン数が約 27.2 百万トンの通勤線区（以下、「対象線区」と記す）において発生したシェリングについて、横裂測定器による手探傷ならびに探傷車データにより、横裂深さを追跡調査した。それらの結果を図 1 に示す。

このように、いずれの初期深さの横裂についても、通過トン数の増加に伴い、横裂深さが深くなっていることがわかる。また横裂深さが増加するにつれて、通過トン数あたりの横裂深さが変化する割合も増加していることがわかる。

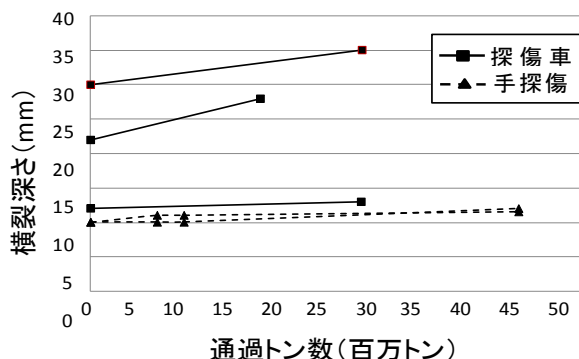


図 1 横裂深さの変化

## 3. メッシュフリー法による応力拡大係数解析

これまでき裂の進展解析は、き裂の形状が半円または半楕円のまま進展するものと仮定して行われてきた。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およ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、半円または半楕円から大きくかけ離れる場合がある。また有限要素法 (FEM) や境界要素法 (BEM) 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、場合によっては解析自体が行えないことも考えられる。

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。本研究では、メッシュフリー法の一つである境界節点法(BNM)の三次元弾性解析プログラムを構築し、応力拡大係数  $K$  値を解析により求めた。

#### 4. 横裂の進展解析

前章で得られた  $K$  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。そして実際の探傷結果と比較し、解析条件の妥当性について検証した。

##### 4.1 横裂進展予測モデル

横裂の進展解析は前述の BNM と重ね合わせの原理を用い、以下の手順で行った。

- (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) 横裂の進展は、以下の Paris 則を積分することにより得られる。

$$\frac{dL}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m \quad (1)$$

ただし  $L$  はき裂長さ、 $N$  は繰返し数、 $C$  および  $m$  は材料定数で、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。

$$\Delta K_{\text{eff}} = \begin{cases} K_{\text{max}} - K_{\text{min}} & (K_{\text{min}} > 0) \\ K_{\text{max}} & (K_{\text{min}} \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

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

##### 4.2 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および運用時の残留応力、き裂面の形状やき裂の進展角度、列車通過によ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 1 に示すように各パラメータを変化させて解析を行った。またいずれの解析においても、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。

表 1 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(度)	走行車種	輪重変動率
解析 I	100	1.0	20	通勤形電車	1.8
解析 II	0	1.0	20		
解析 III	100	0.8(横長)	20		
解析 IV	100	1.2(縦長)	20		
解析 V	100	1.0	40		
解析 VI	100	1.0	20	電気機関車	1.4

### 4.3 解析結果

表 1 で示す条件で行った，進展解析の結果を図 2 に示す．このように解析条件によって，横裂の進展状況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，横裂の進展に大きく影響を及ぼしていることがわかる．

### 4.4 横裂の追跡調査結果との比較

前節で得られた，さまざまな解析結果の妥当性を検証するために，対象線区における横裂進展速度の調査結果と解析結果を比較した．

2 章の追跡調査結果と解析 I ならびに III～V の結果から，さまざまな横裂深さにおける年間の進展速度を求めた．なお解析 II においては，き裂がほとんど進展しない結果であったために除外し，また対象線区において電気機関車は運行していないことから，解析 VI の結果についても対象外とした．これらの結果を図 3 に示す．

対象線区における横裂進展速度を推定する解析結果の条件としては，いずれのき裂についても進展速度を過小評価することなく，また解析結果がより探傷結果

に近いものであることが必要となる．したがって今回の解析結果においては，解析 I が対象線区に発生した横裂を安全側に予測し，また探傷結果に最も近い結果であると判断できる．

### 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横裂進展速度と，レールが破断に至る点，すなわち横裂進展の限界点より，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行った．

横裂の深さについて精密な探傷を行う横裂測定器は，深さが 10mm 以上の横裂を測定することができる．そこで横裂が発生（分岐）してから，この傷が探傷可能となるまでの期間を，図 4 の期間 I とする．

一方，横裂進展の限界点は，過去のレール折損事例におけるレール破面を観察することで求めることができ，この値を超えるとレールが破断する可能性が考えられる．横裂が分岐してから破断する恐れのある時期までを，図 4 の期間 I から III までを合わせた安全限界とする．

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

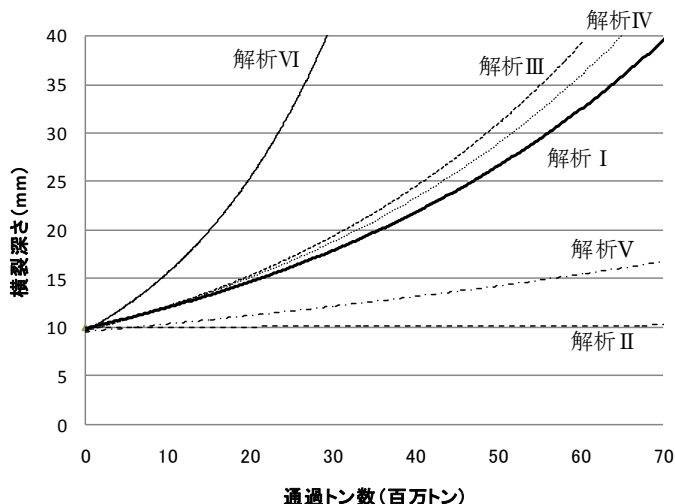


図 2 横裂進展解析結果

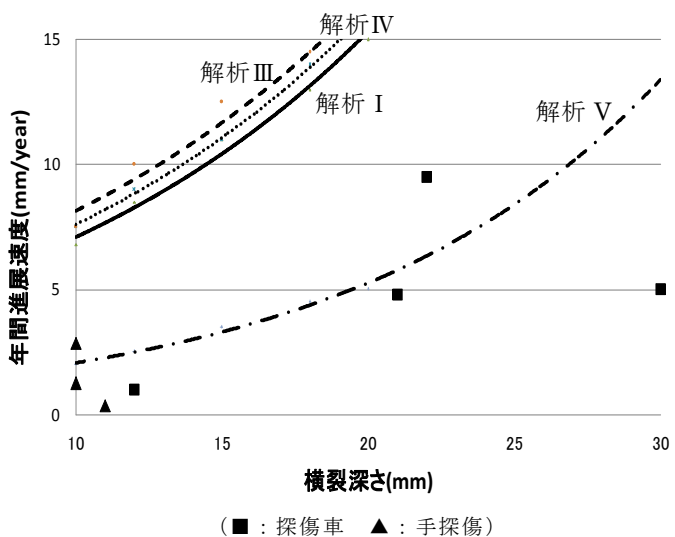


図 3 探傷結果と解析結果の比較

と期間Ⅱを合わせた期間)を新たに設け、その範囲内で横裂を管理するのが望ましいと考えられる。

期間Ⅰでは横裂測定器による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回行うことを目安にするのがよいとされる<sup>1)</sup>。横裂の深さが30mmに達するとレール交換を行うとすると、図2の解析Ⅰの結果より、対象線区において10mmから30mmまで進展するのに約56百万トン、対象線区の年間通過トン数(約27.2百万トン)から期間に換算すると約25ヶ月要することから、25ヶ月の間に2回、つまり12.5ヶ月に1回の周期で探傷を行うのが望ましいと考えられる。探傷および推定の手順は以下の通りである。

初回の探傷周期より、次に探傷を行う時の横裂深さを推定する。そして次の探傷周期に再度、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横裂深さが管理基準に達するまでの時期を推定し、レール交換計画を立てる(図5)。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知できるものと考えられる。

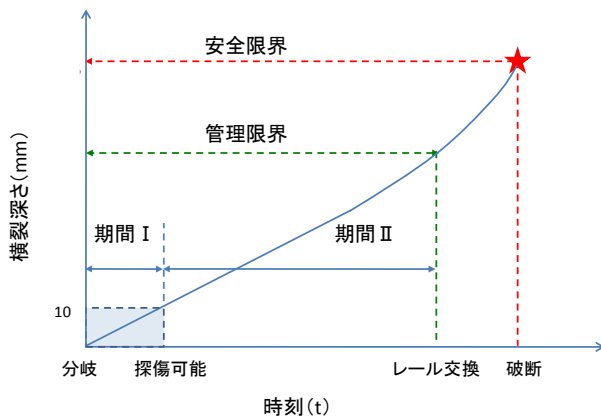


図4 き裂進展とレール管理の関係

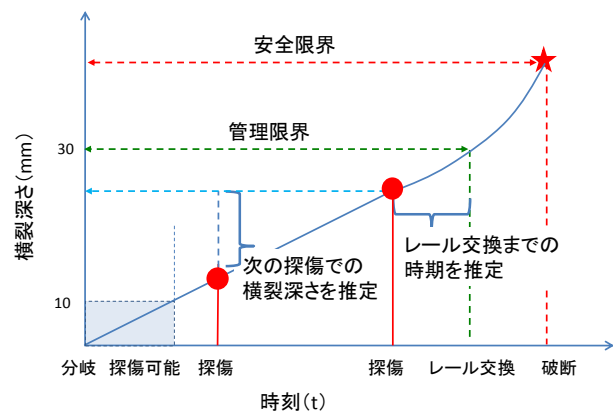


図5 探傷および推定の手順

## 6. おわりに

本研究では、レール横裂の進展モデルを開発し、探傷結果と解析結果を照合させて横裂の進展速度を推定した。そして、横裂の探傷が可能となってからレール交換するまでの期間を、き裂進展を安全側に予測する解析条件で算出することにより、横裂の進展速度を考慮して、安全性を脅かすことなく経済的にレールを管理することができる探傷周期の設定手法を提案した。

## 参考文献

- 1) 西島敏: 金属疲労のおはなし, 日本規格協会, pp.167-170, 2007