

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

レールの亀裂進展を予測する

レールは列車の走行安全を確保するための重要な構成部材であり、軌道部材の中でも特にその管理には注意が払われています。しかし、今日においてもレール破断がまれに発生する場合があります。破断を防ぐために材質の改善や管理手法の見直しなど、さまざまな取り組みがなされています。ここでは、レールに発生する損傷のうち、レール・車輪の転がり接触の疲労に起因する、レール亀裂進展の予測に関する取り組みをご紹介します。



名村 明
Akira Namura
鉄道力学研究部
軌道力学研究室長
【専門分野】レール・車輪の接触、バラスト軌道



片岡 宏夫
Hiroo Kataoka
軌道技術研究部
軌道構造研究室長
【専門分野】レール、軌道部材

疲労強度と疲労亀裂進展

構造部材において、繰返し荷重（応力）により亀裂が進展し破損に至る現象を疲労破壊といいます。部材の疲労特性は、種々の応力振幅下で疲労試験を実施し、S-N曲線（☞参照）から求められます。レールの設計においては、疲労破壊に関する安全性について、直線および緩曲線を想定して、レール底部の曲げ疲労破壊を対象に照査します。S-N曲線は5年間の自然暴露をした実物レールの曲げ疲労試験結果を採用し、設計耐用期間に対応する繰返し数で破断する曲げ応力に破壊確率を考慮して疲労強度としています。レールに作用する曲げ応力は、軌道の構造条件（レールの剛性、レールの支持間隔、支持剛性）や列車走行速度、輪重により決まります。

一方、構造部材を維持・管理していくためには、発生した疲労亀裂の進展を正確に評価することが必要となります。

☞ S-N 曲線

部材が、ある繰返し応力に対して何回で破断するかを示した曲線です。縦軸に応力振幅(Stress amplitude)が、横軸に破断までの繰返し数 (Number of cycles to failure) が取られます。

す。レール・車輪の転がり接触の疲労に起因するシェリングやゲージコーナー亀裂など幾つかのレール頭部損傷の形態があり、レールの疲労寿命はしばしばこれらにより支配されます。このようなレール頭部損傷については、レール頭頂面の削正による損傷発生の予防や、目視や超音波探傷などの検査に基づく破断前の交換などにより対処しています。レール交換は超音波探傷などの検査結果をもとに判断されますが、疲労亀裂進展を精度良く予測できれば、次の検査時期や対処方法をより適切に判断することが可能となります。

転がり接触疲労による亀裂

レール・車輪の転がり接触の疲労に起因するレールの亀裂のうち、適切な処置をしないと破断に至る可能性が高い主な損傷形態に、シェリングおよびゲージコーナー亀裂があります。シェリングは主に直線区間で単発あるいは連続的に発生し、ゲージコーナー亀裂は主に曲線区間外側レールで連続的に発生します。いずれの損傷も、☞1に示すように、発生した亀裂は水平方向に進展し（水平裂と呼ばれます）、ある時点

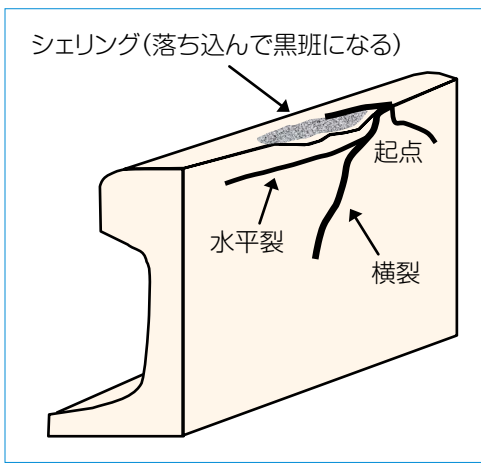


図1 頭頂面シェリングの概要

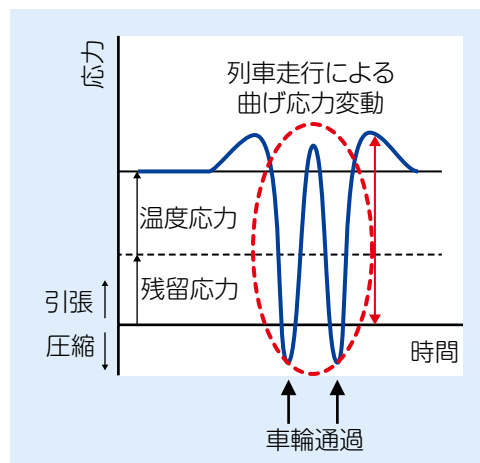


図2 冬季を想定したレール頭部の応力

落ち込みによっても応力変動は大きくなります。レール軸力による応力は、レール温度により変動し、夏季に圧縮、冬季に引張となります。図2には冬季の温度応力を示しています。冬季には亀裂を開口させる引張の温度応力が作用するため、亀裂進展速度が速くなる傾向があります。残留応力には、圧縮と引張がありますが、図2には引張の残留応力を示しています。大きな引張の残留応力がレール頭部にある場合は亀裂進展速度が速くなる可能性がありますが、残留応力分布を非破壊で測定する技術は现阶段では確立されていません。

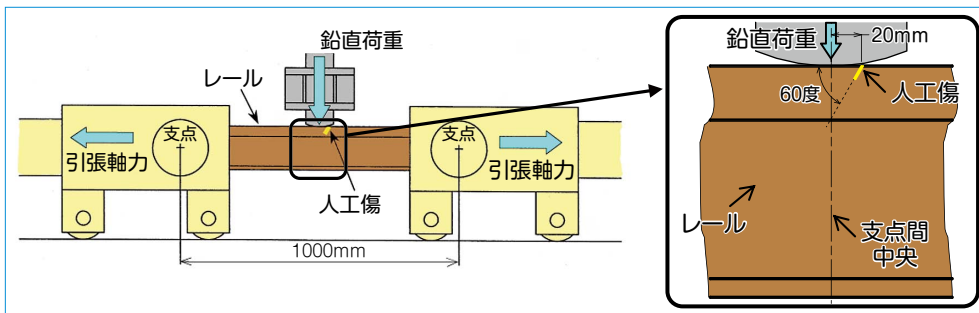


図3 試験方法

で頭部より底部方向に分岐して進展します(横裂と呼ばれます)。亀裂の発生時期や水平裂から横裂に分岐する時期を予測することは现阶段では困難です。

横裂進展に影響を及ぼす因子

転がり接触疲労によるレールの亀裂のうち、超音波探傷検査で検出可能な10~15mm以上の横裂の亀裂進展速度 da/dN は、応力拡大係数範囲 ΔK (参照)の関数として、以下の式で表されます。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

ここで、Cおよびmは実験定数です。

☞ 応力拡大係数範囲 ΔK

亀裂先端付近の詳細な破壊のメカニズムは未解明な部分が多いため、先端近傍の応力状態の程度が同じであれば、先端付近の状態も同じとみなします。応力拡大係数Kは、亀裂先端近傍の応力状態の程度を示す指標です。応力拡大係数範囲 ΔK は、応力変動に対応する応力拡大係数の変動範囲です。

実験定数を一定とすると、疲労亀裂進展速度に影響を及ぼすのは ΔK となります。 ΔK は繰返し応力の関数ですので、レール頭部に作用する応力が横裂進展の速度に影響を及ぼすことになります。

図2に示すようにレール頭部に作用する応力には、列車荷重による応力、レールの温度変化による応力(軸力)、および残留応力(☞参照)があります。列車荷重によってレール頭部に作用する応力は、車輪が亀裂直上にある時に圧縮方向(最小値)、亀裂直上から少し離れた時に引張方向(最大値)となります。また、亀裂のあるレールの頭頂面には落ち込みがありますので、

☞ 残留応力

部材に対して熱処理、溶接、機械加工などを行った後で、外力が作用しなくても存在する応力のことです。部材全体では圧縮と引張の残留応力が釣り合っていますが、圧縮残留応力が生じている箇所では亀裂進展速度が遅く、引張残留応力が生じている箇所では亀裂進展速度が速くなる可能性があります。

室内試験による亀裂進展速度の評価^{1),2)}

横裂の進展速度には、ばらつきがあることが知られています。現場の状況はさまざまであり、条件をコントロールできる室内試験で進展の状況を調べることができれば、進展速度の予測に有益な情報を得ることができます。そこで、室内試験により横裂の進展を再現し、レールに発生する応力と横裂進展速度の関係を調べました。

列車荷重による曲げ応力はレール頭部では圧縮側の変動が大きく、それだけでは横裂が進展しにくいですが、温度変化に伴う引張の温度応力がある場合に、引張側の応力変動が大きくなり、亀裂進展を促進すると考えられます。そこで、鉄道総研の所有する、レール長さ方向と鉛直方向に同時に载荷できるレール曲げ疲労試験機を用いて試験を実施しました。

直線区間で生じるシェリングからの横裂は、列車進行方向に対して60°程

表1 試験条件

項目	値, 内容
傷種別	人工傷, 現場発生傷
引張軸力	754kN, 377kN
底部応力全振幅*	140N/mm ² , 70N/mm ²
最大繰返し数	210万回

* 応力全振幅は小20万回, 大10万回, もしくは小40万回, 大20万回を組み合わせ繰返し負荷

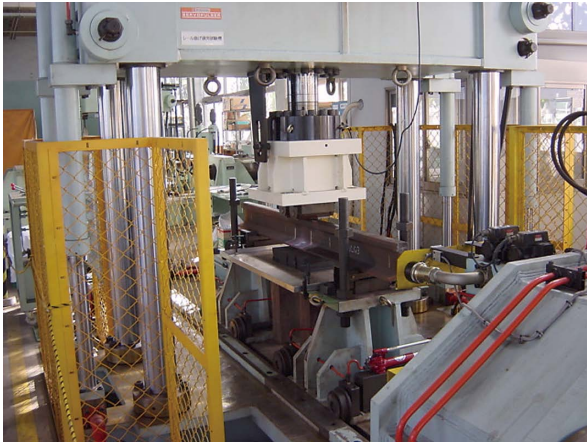


図4 試験状況

度下方に傾いた面内で成長することが知られています。試験機でこれを再現するために、レールに鉛直方向の荷重を加えた際にレール頭部に発生する応力の予備解析を行い、載荷位置を決定しました。経年履歴のあるレールの頭部に傾きを60°とした半円状の人工傷を加工したもの、および現場で亀裂が発生したものを供試体としました。

横裂進展試験の概要を図3に示します。人工傷からの亀裂は実際の亀裂と比較して進展しにくいいため、レールの頭部を下にして予備載荷を実施して予亀裂を発生させた後にレールの頭部を上に戻して本載荷を実施しました。

本試験機ではレール試験片が支点回りに回転できるようになっています。試験条件を表1に、試験状況を図4に示します。引張軸力は冬季の温度下降量50℃に相当する754kN(50kgレールの場合)とし、一部25℃相当の377kNの条件も行いました。また、表1に示すように応力全振幅を所定の回数ごとに変化させ、傷の進展状況が破断面から判断できるようにしました。

本試験で破断に至った人工傷レール

の例を図5に示します。このように、列車荷重相当の鉛直荷重によりレール頭部に圧縮の繰返し曲げ応力が作用する場合でも、一定の引張軸力下で横裂が進展することを確認しました。また、疲労亀裂がレール断面に対し斜めに進展する状況も再現することができました。

図6に引張軸力754kNの場合に破断に至った人工傷レールの破断面の例を示します。疲労亀裂が深さ30mm程度まで進展した後急進して破断しており、疲労破面には疲労亀裂の進展を特徴づけるビーチマークが見られました。なお、本試験では試験時間の制約から大きな応力条件を設定しており、実際にはこれより深い位置から急進的に進展します。

引張軸力754kNの条件では、所定の繰返し数に対し、9本中4本のレールが破断しました。破断した4本について破断面のビーチマークから進展速度を算出したところ、底部の曲げ応力変動140N/mm²に対し亀裂進展が一番速かった供試体では0.59mm/万回となりました。仮に、曲げ応力変動が半分の70N/mm²であり、亀裂進展速



図5 試験による横裂の進展例

度が応力変動の3乗に比例すると仮定すると、その場合の亀裂進展速度は $0.59 \times (70/140)^3 = 0.07 \text{mm/万回}$ 程度となり、およそその進展速度をつかむことができます。実際には、亀裂面の形状は室内試験と現場で同一ではないので、形状の効果を考慮して後述するような数値計算により予測していくことが必要となります。

また、引張軸力377kNとした場合には4本中1本のレールが破断しており、引張軸力が下がることにより破断のリスクが減る傾向がみられます。

このような破断の有無や進展速度のばらつきは、先に述べたレール頭部内の残留応力の影響が大きいと考えられています。こうしたばらつきがあるなかで、最も速い亀裂進展速度はどの程度かを知ることが重要です。本試験では限られた本数ではありますが、有益なデータを得ることができました。

解析による亀裂進展予測³⁾

亀裂進展予測に必要な応力拡大係数は、さまざまな条件に対して解が得られており、それらはハンドブックなどの形でまとめられています。ただし、形状や応力分布が複雑になると、コンピューターによる解析が必要となりま

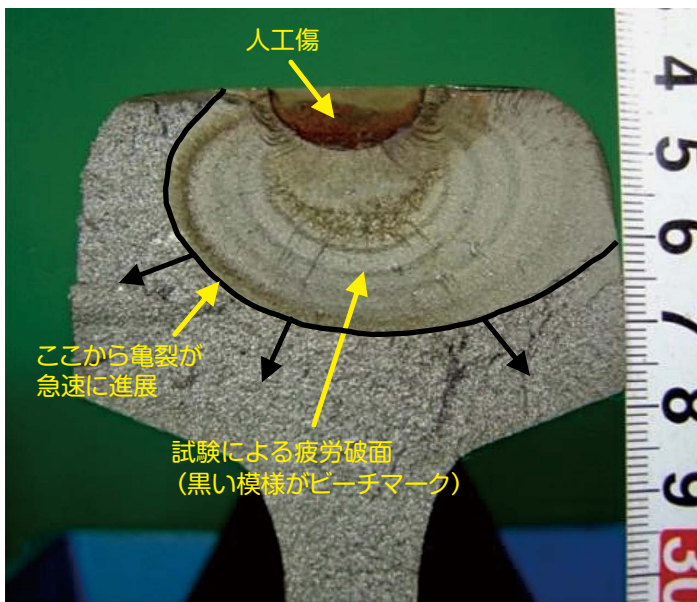


図6 破断面の例

す。有限要素法などの既存の代表的な解析手法を用いる場合、亀裂が進展するたびに形状を表すメッシュの再設定を行う必要があります。計算を効率的に進めることは困難です。一方、メッシュフリー法はメッシュを使わずに解析を行う手法で、メッシュがないため任意の方向の亀裂進展に対して、はじめに定義した節点のまま解析を継続することができます。ここでは、メッシュフリー法のひとつである境界節点法による三次元弾性解析例を紹介しします。

亀裂進展予測の手順は、以下の通りです。

- (i) 亀裂のないレール頭部の応力解析を行い、最大荷重作用時と最小荷重作用時の応力分布を求めておきます。この解析は、亀裂のない場合を対象とするため、比較的簡単な計算で求めることができます。
- (ii) 初期亀裂形状を与え、(i)で求めた応力分布をもとに亀裂面が自由表面となるよう境界節点法モデルに応力を負荷し、亀裂前縁の応力拡大係数範囲 ΔK を求めます。
- (iii) この ΔK を亀裂進展速度式に代入することにより亀裂進展量を求め、亀裂形状を更新します。
- (ii) と (iii) を繰り返すことにより、

亀裂進展を予測します。この際、境界節点法モデル自体は、はじめに定義した節点のまま解析を継続することができます。

列車荷重による応力および残留応力を一定とし、レール軸力による応力を月毎に変化させた解析例を図7に示します。レール軸力による応力がレール温度により変動することに対応して、冬季に亀裂進展速度が速くなる傾向がわかります。

列車荷重による影響を確認するため、図8に示す2条件について、亀裂深さが15mmから約22mmまで進展する際の亀裂進展の平均速度を算出しました。横圧が負荷されていない解析IIでは進展速度が多少遅くなっています。輪重に加えて横圧を負荷すると、それだけ亀裂進展の原因となる応力振幅に影響を及ぼすためと考えられます。

おわりに

室内試験による亀裂進展速度の評価に関連して述べたように、列車荷重相当の応力およびレール軸力相当の応力を制御した条件下でも、亀裂進展速度はばらついています。これは、レール頭部内の残留応力分布の影響が大きいと考えられています。敷設されたレール

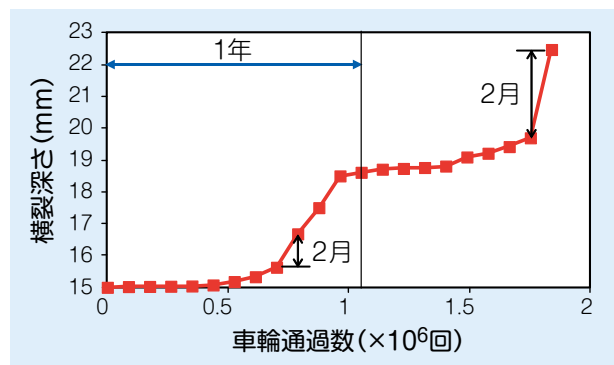


図7 横裂進展解析結果例

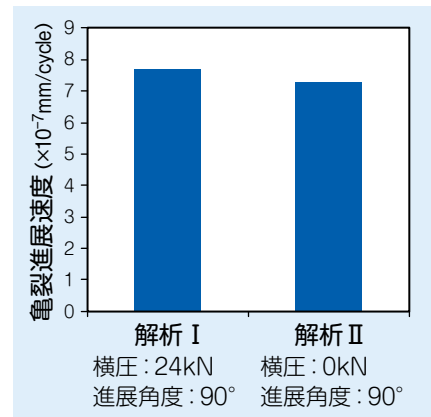


図8 条件別の亀裂進展速度

ルにおける亀裂進展速度を超音波探傷により調査した結果は、列車荷重およびレール軸力の変動などによりさらにはばらつきが大きくなる傾向があります。現段階では、最も速い亀裂進展速度を用いて、超音波探傷検査時期や対処方法を安全側に判断することになります。亀裂進展速度をより正確に見積もるためには、レール軸力や残留応力を非破壊で測定する技術の開発を進めるとともに、室内試験や現地調査などのデータの蓄積や解析技術の改良に取り組む必要があります。[RRR]

文献

- 1) 弟子丸将, 片岡宏夫, 柳沢有一郎: レール横裂進展速度に関する研究, 新線路, Vol.61, No.3, 2007
- 2) 細田充, 片岡宏夫, 小谷隼, 弟子丸将: レール頭部横裂の進展予測手法の構築, 鉄道総研報告, Vol.26, No.2, 2012
- 3) 辻江正裕, 赤間誠, 松田博之, 名村明: レール横裂進展予測モデルの開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.12, 2010