

レールの寿命をあきらかにする

片岡 宏夫

軌道技術研究部(軌道構造研究室 主任研究員)



かたおか ひろお

はじめに

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折損がまれに発生する場合があります。折損を防ぐために材質の改善や管理手法の見直しなど、様々な取り組みがなされてきています。

営業線に敷設されているレールの折損防止のための管理手法としては次の2つがあります。

- ①傷を超音波探傷や目視などの検査により発見して、傷の大きさに応じた処置を施す。
- ②寿命に達する前に周期的に交換する。

その他に、レール摩耗に関しても交換基準が設けられています。

ここで、①について傷の発生したレールがどの程度の期間で折損に至るのか、②についてレールがどの程度の累積通過トン数もしくは経過年数まで使用に耐えうるのかを知ることは、安全を確保しつつコスト面からも合理的なレール管理を行う上で重要です。ここで、後者のレールが使用を開始してから破壊に至るまでの期間を寿命とよび、前者をき裂進展寿命とよびます。

レールの寿命や傷が発生したときのき裂進展寿命を把握するためには営業線での敷設経験が参考となりますが、実

軌道において走行する車両の条件や軌道条件は様々であり、日常の保守管理から得られるデータを基にすべてを理解することは困難です。そこで、室内試験により条件を整えた状態でデータを取得することが現象解明に役立ちます。

レールの寿命は長期間の繰り返し荷重による疲労破壊もしくは摩耗に支配されますが、ここでは、疲労破壊を対象として図1に示すレール曲げ疲労試験機を用いて実施した、実物大レールの幾つかの試験結果について紹介します。

寿命推定の考え方

レールの疲労寿命推定の考え方を最初に紹介します。寿命推定の流れを簡単に示すと次のようになります。

- ①営業線においてレールに作用する力、疲労破壊が想定される部位の発生応力を把握する。
- ②応力と破壊に至るまでの繰り返し数の関係を室内試験により求める。
- ③①の発生応力を②より得られた関係式に代入し、寿命を算出する。

ここで、①の発生応力については室内試験、現地測定、解析などにより評価します。その際に、実際の軌道状態を考慮した評価が必要です。

ここで紹介するのは②の部分です。



図1 レール曲げ疲労試験機

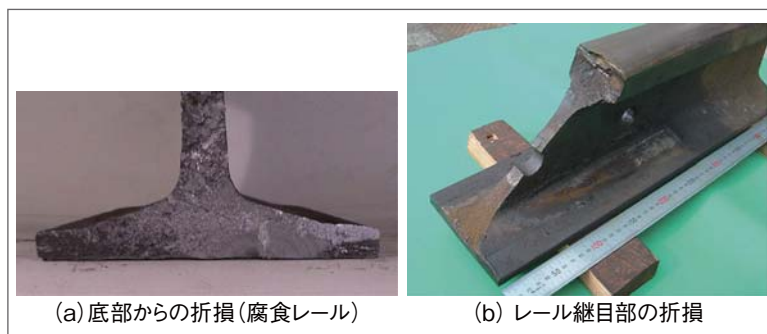


図2 レールの破壊形態の例

レールに生じる疲労破壊の形態としては、レールの曲げによる底部からの疲労破壊(図2(a)), 車輪との転がり接触疲労に起因する破壊, また定尺レールの継目部における疲労破壊(図2(b))などが挙げられます。

ロングレール区間のレールに関しては、列車通過時のレールの曲げによる底部からの疲労破壊に着目して寿命を評価しています¹⁾。実際には頭頂面シェリングなどの転がり接触疲労により生じる傷によりレールが交換されることがあり、レールの寿命はこの破壊形態に実質的に支配されているともいえますが、このような傷に対しては原則として超音波探傷を用いて管理し、折損に至る前にレールを交換することができます。また、横圧が大きい急曲線の外軌はレール摩耗により交換されるのが一般的です。以上より、レールの疲労寿命を考える上では、緩曲線や直線を想定した底部曲げによる疲労破壊を想定するのが妥当と考えています。

一方、定尺レール区間では、保守状態にもよりますが、レール継目部のレールの継目穴からの疲労破壊が寿命を支配していると考えられます。

レール曲げ疲労試験機

上で述べたレールの底部曲げ疲労やレール継目部の継目穴の疲労の試験に、図1に示した鉄道総研が所有するレール曲げ疲労試験機を用いました。その特徴を紹介します。

本試験機は2方向の同時荷重が可能な試験機であり、レールを専用の治具により拘束し、レール長さ方向(ここでは水平方向とよぶことにします)に引張・圧縮の力を負荷することができます。その状態でさらに鉛直方向の荷重を負荷することができます。

曲げ疲労試験を行う場合には、レールを一定の間隔の支持台に載せ、中央を載荷します。支持部はローラーが設置され、回転は自由です。水平方向荷重用の治具を用いた場合でも治具ごと回転が可能となっています。

レール曲げ疲労試験機の主要諸元は表1のとおりです。

表1 レール曲げ疲労試験機の主要諸元

項目	値
鉛直荷重	±750kN
ピストンストローク	±50mm
動的特性	±4mm / 5Hz
水平荷重	±1000kN
ピストンストローク	±50mm
動的特性	±3mm / 5Hz

疲労試験

初めに、レール曲げ疲労試験機を用いて実施してきたレールの疲労試験について紹介します。疲労試験を行う場合、荷重を何段階かに変えて着目する部位の応力と破壊に至るまでの繰り返し数の関係を調べます。

(1) 底部曲げ疲労試験

①レール溶接部および中間部

底部からの曲げによる疲労破壊については、母材と比較し強度が低下する可能性のあるレール溶接部の試験を行いました。曲げ疲労試験としては載荷点を一点とした3点曲げと、一定の範囲で応力を等しく設定できる4点曲げの方法がありますが、近年ではレール溶接部と中間部を含めた試験として、図3に示すような4点曲げ試験を行っています。

図4に試験により破壊したレールの破面の例を示します。新品レール溶接部について試験を行うと、各種溶接種別、レール中間部で疲労特性には差異がみられます。しかし、営業線で敷設実績のある経年レールについて疲労試験を実施した結果、破壊が必ずしも溶接部(熱影響部を含む)で生じるとは限らず、その近傍の中間部からの破壊もあり、それらの疲労強度に差異があまりないという知見が得られました。これはレールは長期間にわたり暴露環境下で使用されているために錆肌を呈しているためと考えています。

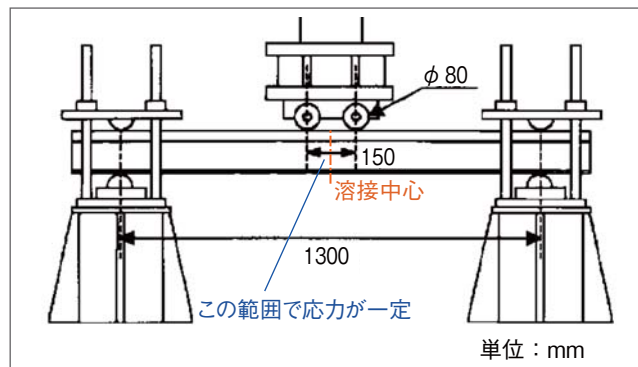


図3 曲げ疲労試験状態図



図4 疲労試験による底部破面の例

試験結果を図5に示します²⁾。図5では、縦軸に試験時の底部の曲げ応力全振幅、横軸を破壊に至るまでの繰返し数として整理しており、それらの関係を示す曲線をS-N曲線とよびます。同図は新幹線と在来線において一定期間使用されていた経年レール溶接部の試験結果であり、それぞれについてS-N曲線を求めています。

なお、実軌道においては低い応力域でレールが使用されることから、この試験結果を用い、低い応力域では傾きを半分とした疲労曲線を使用して、寿命推定を行っています。

レールの底部曲げ疲労については、この他に腐食レールについても同様の疲労試験を行い、腐食量と寿命の関係を調べています。

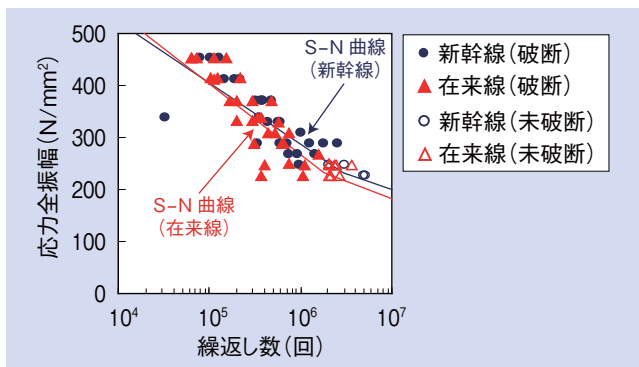


図5 経年レールの推定S-N曲線

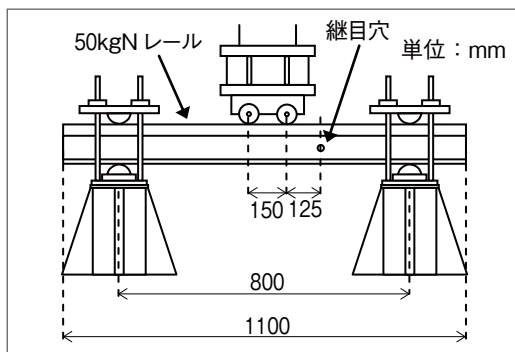


図6 継目穴の疲労試験状態図

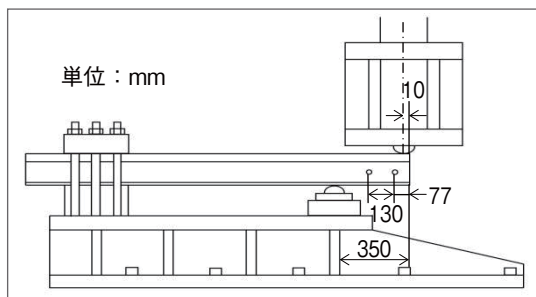


図7 経年レール継目部の疲労試験状態図

(2) 継目穴からの疲労試験

定尺レールでは、継目穴からき裂が発生し、斜め方向に進展して破壊に至ることがあります。このようなレール端部の破壊をレールの破端と呼んでいます。

継目穴に発生する応力と破壊に至るまでの回数との関係を知るために、レールの腹部に継目穴と同じ大きさの穴をせん孔して、そこから傷を発生させる試験方法を考えました。事前に解析を行って、支持間隔、せん孔位置を検討し、図6に示す試験により継目穴から45度方向に進展する傷を再現しました。

さらに、営業線で敷設されていたレール継目部のレールの疲労試験を実施しました³⁾。実際の継目穴はレール端からの離れが小さいため、上述の3点曲げの形式ではレール単体の疲労試験を行うことができません。そこで、図7に示すような片持ち梁の試験方法としました。この方法により新品の継目穴の疲労試験と同様に、図8に示すような斜め45度の傷を再現し、図9に示すような継目穴の発生応力と破断までの繰返し数の関係を得ることができました。

これらの結果は、レール継目部の寿命評価以外に、レール腹部にせん孔をした場合の安全性評価にも活用しています。

き裂進展試験

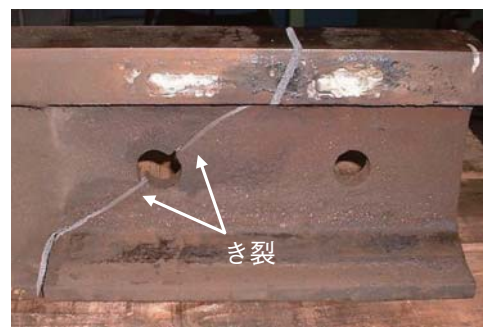


図8 疲労試験による継目穴き裂の例

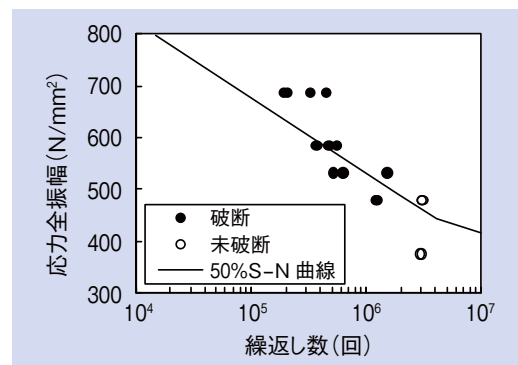


図9 経年レール継目部の推定S-N曲線

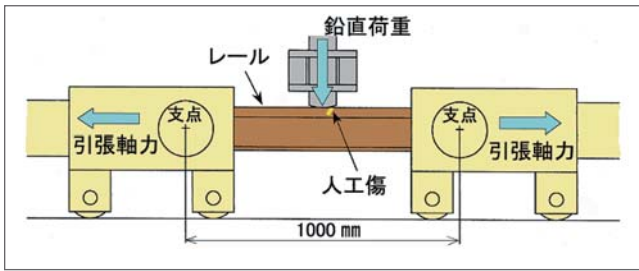


図10 レール頭部横裂の進展試験状態図

ここまで紹介してきた幾つかの疲労試験は、レールの寿命評価を目的としていました。一方、傷を発見した場合にどの程度の期間で破断に至るかを知ることは適切な処置を行うために重要です。そこで、近年、レール曲げ疲労試験機を用いたき裂進展試験を進めています。き裂進展試験では、あらかじめき裂を発生させたレールに繰り返し载荷することにより、負荷条件とき裂の進展速度の関係を調べます。

(1) 頭部横裂進展試験

レール・車輪の転がり接触に起因する頭頂面シェリングから分岐した頭部横裂の検査はレールの主要な管理項目の一つです。

列車通過時にレール頭部に発生する曲げ応力は圧縮の変動が大きく、軌道のアップリフト（浮き上がり）による引張の変動は比較的小さくなります。それにもかかわらず傷が進展するのは、寒暖により生じるレール長さ方向の軸力や引張りの残留応力の寄与があるためと考えられています。

そこで、2軸の载荷ができる特徴を生かし、引張りの軸力が作用している状態で頭部に圧縮の曲げ変形を繰り返し与えることにより、傷が進展する様子を再現し、応力と進展速度の関係を試験的に調べました⁴⁾。

図10に示すように、頭部に人工傷を加工したレールに一定の引張りの軸力を载荷した状態で、中央に载荷する3点曲げの試験方法としました。

本試験においても、事前の解析により载荷点近傍の応力分布を調べて試験条件を決定し、図11に示すように、実際の横裂と同様に傷が斜めに進展する状況を再現しました。また、鉛直荷重を周期的に変化させることにより、図11(b)に示すような縞模様のビーチマークを発生させて、傷の進展状況がわかるようにしました。

(2) 継目穴からのき裂進展試験

継目穴からのき裂の進展試験は、図6の疲労試験の同様の支持条件、穴のせん孔位置とし、あらかじめ穴に人工的な切り欠きを設けておきます。図6の疲労試験の経験より45度方向にき裂が進展することがわかっているため、その方向の表面にクラックゲージを貼り付け、進展の状況を

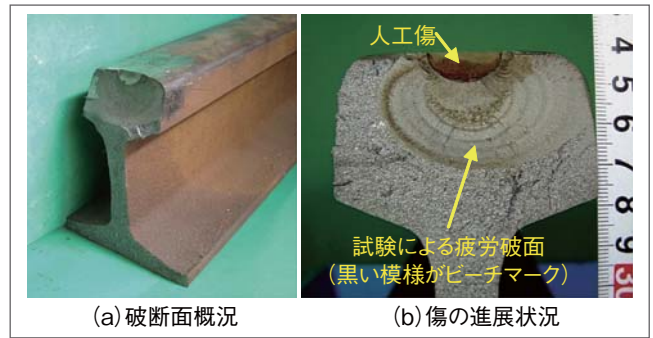


図11 頭部横裂進展試験の結果例

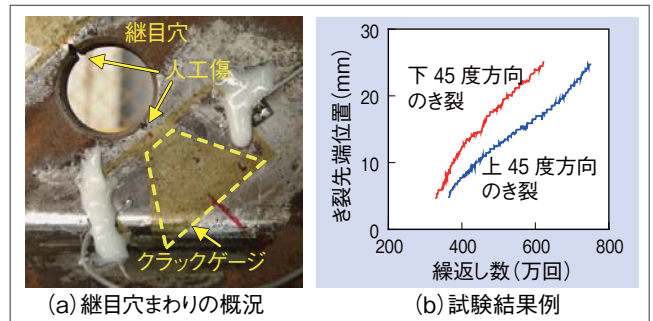


図12 継目穴からのき裂進展試験

直接計測できるようにしました。

この方法により、図12に示すように、荷重条件に対して継目穴からのき裂の進展状況を正確に求めることができるようになりました。

おわりに

以上のように、構成を工夫することにより、本試験機を様々な用途に用いることができます。これらの試験結果を用い、営業線の様々な条件下における推定応力を当てはめて寿命や傷のき裂進展寿命を推定することにより、レールの交換周期の延伸や、レール傷の検査周期や処置方法の見直しに役立てることができると考えられます。今後も本試験機を活用しつつ、各種の応力測定試験結果や解析結果、また、実際の経験も踏まえて包括的に現象の解明に努めていきたいと考えています。RRR

文献

- 1) 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, 1990
- 2) 弟子丸将, 他: 経年ロングレールの疲労寿命推定, 鉄道総研報告, Vol.20, No.4, 2006
- 3) 片岡宏夫, 他: レール継目部の動的応力解析と寿命推定, 鉄道総研報告, Vol.19, No.2, 2005
- 4) 弟子丸将, 他: レール横裂進展速度に関する研究, 新線路, Vol.61, No.3, 2007