822 レール中のき裂成長と検査

Crack Growth in Rail and Inspection

柏谷 賢治 (鉄道総研)

Kenji KASHIWAYA, Railway Technical Research Institute

1. はじめに

日本の鉄道におけるレールの主な損傷はシェリングと呼ばれる転がり接触疲労損傷で、図1に示すように、車輪との接触面からき裂が発生し、まず水平裂が成長し、まれにき裂が分岐し、下方に向かって半円状に成長する横裂になると、頭部いっぱい成長した後、脆性破壊によりレール折損に至る。検査は、速度 30km/h の超音波レール探傷車で行われるが、き裂が確認されると人手による詳細な超音波探傷も実施される。後者の人手による検査には多大な労力と技量を要する。ここでは、破壊力学による横裂の成長速度の推定と人手による検査の合理化について述べる。

2. 横裂の成長速度の推定

レール折損に至る横裂の成長速度を把握することは、検査周期を決定するために不可欠なことである。この横裂の成長を実際の線路で追跡測定できればよいが、レール管理上、レール折損に至るものを放置することは許されないため、実施できない。そこで、破面観察からき裂形状を求め、破壊力学によって横裂の成長速度を推定することにした。

コンパクトテンション型試験片を用いて疲労試験を行った結果、レール鋼のき裂進展速度は、応力比 0.1 以上であれば、 $6 < \Delta K < 30 \text{ MPa m}^{1/2}$ の範囲で $10^{-11} (\Delta K)^3 \text{ m/cycle}$ であった。この試験で、き裂開口の圧縮応力範囲を捨て、き裂開口の引張応力範囲のみ採用すれば、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} が得られることがわかった。

レールは列車の通過により繰り返し曲げ変形を受け、レール頭部内に動的応力 ($\sigma_{\text{max}} \sim \sigma_{\text{min}}$) が発生する。レール頭部上部の応力の実測例を図2に示す。これは電車より重たい電気機関車の6つの車輪が通過した例である。車輪通過の前後に約 25MPa の引張応力が発生していることがわかる。通常、車輪通過の圧縮応力の 20 ~ 25 % の大きさの引張応力が発生する。わずかな引張応力に見えるが、き裂成長には重要な役割を果たす。

気候に支配されるレール温度が熱膨張収縮による軸応力 σ_t (レール断面内一様な静的応力) を決める。例えば、東京ではレール温度は一年間に -5 ~ 55 °C ほど変化する。レール温度 27 °C でレールを固定した場合、真冬には最大 70MPa の引張の軸応力が発生する。

また、レール内部の残留応力 σ_r もき裂先端での静的応力となる。これはレール断面内で一様ではない。実使用レール断面内の残留応力分布の実測結果を図3に示す。頭部の中心と底部中央に大きい引張残留応力がある。この頭部内の引張残留応力の存在

が、曲げの圧縮応力でも横裂を成長させるのである。

破壊力学計算に用いたき裂モデルは破面観察から決定した。破面の一例を図4に示す。半円状にき裂が成長していることが伺える。採用したき裂モデルを図5に示す。ここで、半円状き裂でなく円板状き裂を採用した訳は、頭頂部の大きい圧縮残留応力により、き裂が上表面で開口できないからである。破壊モードについては、混合モードの水平裂から分岐した横裂はモード I のみで成長するとみなす。二軸疲労き裂進展試験からも知られているように、モード I と II の混合モードで進展するき裂は、分岐してモード I のみで進展するき裂になる。さらに、破面からもモード I のみで成長した様子が伺える。

以上の事柄をもって計算を行ってみると、頭部中央での横裂は大きい引張残留応力 σ_r に助けられて成長し、横裂が大きくなると、引張残留応力 σ_r の効果が薄れ、その後の成長はレール軸応力 σ_t に依存してくることがわかった。その様子を表す計算結果の一例を図6に示す。軌道状態が悪く、機関車ばかりが通過したと同等な厳しい条件下で、左半分は引張軸応力が作用する冬場を想定した場合、右半分は軸応力が作用しない場合である。実線の円と円の間隔は車輪通過百万回を表す。破線はその中間を表す。

3. 検査の合理化

従来、人手による超音波探傷はレール頭頂面からの斜角 70 ° 反射法で行われてきた。小さい横裂の検出には有効であったが、大きい横裂の検査には反射エコーが返ってこない場合があり、不確実であった。また、水平裂に遮られ、検出できない場合もある。そこで、錆びた頭側面から探傷する二探触子斜角透過法を開発した。この方法は、検査員の技量を要せず、迅速かつ確実に探傷できる長所を有している。反射法は横裂からエコーが返ってこない場合や他の障害物によって超音波が遮られた場合には、「横裂無し」もしくは「横裂は小さい」と判定され、レール折損を許してしまう。透過法は超音波を遮るものは全て「横裂あり」と判定し、フェイルセーフな方法である。

タイヤ形探触子を用いると、錆びたレール側面を水で湿らせるだけで超音波を入射できる。タイヤ形探触子でレール頭部を前後斜めに挟み、ゆっくり走行させ、超音波が遮られたら、警報で知らせてくれると同時に遮られた距離から横裂の大きさ(幅)を表示する探傷装置を開発し、素人でも迅速かつ確実に検査できると重宝されている。

図2 機関車通過によりレール上部に発生した応力

図3 レール軸方向の残留応力分布

図4 レール頭部横裂による破面

応力拡大係数: $K_I = \frac{2}{\pi} \sigma \sqrt{\pi a}$
 σ : 応力
 a : 円板状き裂の半径

図5 レール頭部横裂の破壊力学的き裂モデル

レール頭頂部の動的曲げ応力を
 $\sigma_{\max} = 20 \text{ MPa} \sim \sigma_{\min} = -100 \text{ MPa}$ とした場合

図6 レール頭部横裂の成長速度の計算例