

レール材の転動疲労試験におけるき裂発生・進展に及ぼす疲労指数の影響

Effect of Fatigue Index on Crack Initiation and Propagation of Rail Material in RCF Test

鉄道総研（正）*幸野 真治 （正）辻江 正裕 （正）陳 樺

Masaharu Kono, Masahiro Tsujie, Hua Chen

Railway Technical Research Institute

1. はじめに

鉄道のレール頭頂面においては、車輪の繰り返し通過による転がり接触疲労の蓄積により、きしみ割れやゲージコーナキ裂などの疲労き裂の発生が確認されており、その対策が求められている。き裂の発生に寄与する車輪／レールの接触状態については、Simpack などのマルチボディダイナミクスツールを活用して評価できるが、き裂に関する評価にはさらに別の手法が必要となる。き裂の発生および進展の評価については、先行研究¹⁾により転がり接触疲労(RCF)き裂の発生および成長と摩耗の競合をシミュレーションできるモデルが開発されている。このモデルは有限要素解析を含んでいるため計算コストが大きく、簡易にき裂の発生および進展を評価できる指標が求められる。

先行研究において、シェイクダウン理論²⁾に基づいた疲労指数により、転がり接触疲労き裂の発生を評価する手法³⁾が提案されているが、国内のレール材に適用された事例はない。そこで本研究では、この評価手法を熱処理レール材に適用した場合のき裂発生・進展の閾値を推定するとともに、疲労指数とき裂進展の関係性について評価した。

2. き裂発生評価モデル

レール表面における転がり接触疲労を評価する指標として、シェイクダウン理論に基づいた疲労指数により評価する手法が提案されている。本手法では、転がり接触疲労は車輪／レール接触部における面圧やクリープ力に依存する、という考えに基づいている。具体的には、接触応力がシェイクダウン限界を超過すると、塑性ひずみが蓄積することで転がり疲労き裂が発生すると評価する。車輪／レール間接触状態とシェイクダウン限界の関係は、Fig. 1 に示すシェイクダウンマップにより説明することができる。WP は車輪／レール間の接触状態を示す作用点であり、赤線で示す BC はレール材におけるシェイクダウン限界である。FI は疲労指数であり、シェイクダウン限界を超過した範囲に相当する。疲労指数 FI は式(1)で表される。

$$FI = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} - \frac{k_s}{p_0} \quad (1)$$

ここで F_x ならびに F_y は、それぞれ縦クリープ力ならびに横クリープ力であり、 F_z は車輪／レール間の接触力である。 k_s はレール鋼のせん断強度であり、 p_0 は最大接触面圧である。式(1)より算出される FI の値が大きいと表面疲労のリスクが高まると考えられる。

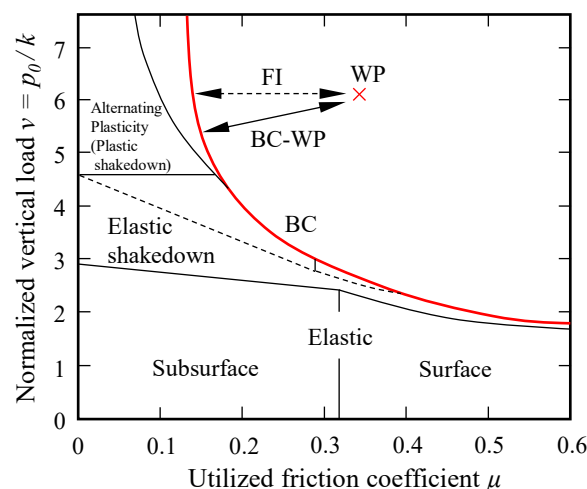


Fig. 1 Shakedown Map

3. 試験方法

熱処理レール材においてき裂発生に至る疲労指数の閾値および、き裂の進展と疲労指数の関係を明らかにするため、小型円筒試験片を用いて転動疲労試験を実施した。試験の詳細を以下に示す。

3.1 試験装置および試験片

試験は Fig. 2 に示す西原式摩耗試験機により実施した。この試験機は駆動モータによりレール試験片を回転させるとともに、すべり率負荷用歯車によって異なる回転数で車輪試験片へ回転を伝達する構造となっている。この回転数の差により、車輪／レール接触時にすべりを与えることができる。また、接触荷重は面圧負荷用コイルばねで与える。

試験片は、車輪および熱処理レールからそれぞれ切り出した $\phi 30$ mm の円筒試験片であり、せん断強度 $k_s = 1200$ N/mm² である。断面方向に曲率は設けておらず、接触状態は線接触となる。

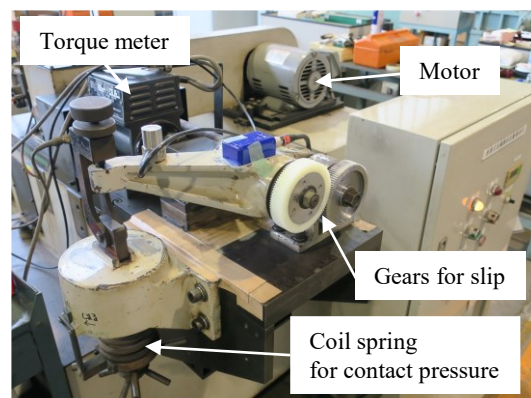


Fig. 2 Experimental apparatus

3.2 試験条件

試験条件を Table 1 に示す。き裂が発生する疲労指数の閾値の推定（き裂発生評価試験）にあたり、様々な疲労指数の条件で試験を実施する必要がある。本研究では接触面圧に加えてすべり率をパラメータとする（回転数：車輪＞レール輪）ことで、試験片接触面に作用するクリープ力を変化させた条件で試験を実施した。

き裂の進展に及ぼす疲労指数の影響の評価（き裂進展評価試験）においては、予備試験の結果から、確実にき裂が発生し、なおかつ疲労指数に大きな差が出るような 2 条件を選定し、転動回数をパラメータとして転動疲労試験を実施した。

Table 1 Experimental Condition

Evaluation item	Maximum contact pressure, MPa	Line contact length, mm	Load, kgf	Slip ratio, %	Rotational speed, rpm	Rotation number, $\times 10^4$
Crack initiation	900	8	120	0.5, 1.0, 2.0, 3.0	1000	10
	1050	4	90			
	1200		120			
Crack propagation	900	4	67.5	5.0	1000	1, 2, 4, 8
	1200		120			

4. 試験結果および考察

き裂発生評価試験における、疲労指数の算出結果およびレール試験片のき裂発生状況を Fig. 3 に示す。同図の白抜きのプロットは、き裂の発生しなかった条件を示している。同図より、き裂の発生が見られなかった試験条件のうち、最も高い疲労指数の値は -0.8 であった。また、き裂の発生が見られた試験条件のうち、最も低い疲労指数の値は -0.75 であった。したがって、車輪材／熱処理レール材の転がり接触においては、疲労指数が -0.8 より高い数値になるとき裂の発生に至ると推定される。つまり、疲労指数を低減させることでき裂の発生を抑制できると考えられる。

き裂進展評価試験において、各条件でレール試験輪に発生したき裂の最大長さを Fig. 4 に示す。接触面圧 900 MPa の条件では疲労指数は -0.75 、接触面圧 1200 MPa の条件では疲労指数は -0.50 であり、いずれも -0.8 を上回っている。また、いずれの接触面圧においてもき裂が発生していることから、き裂発生評価試験の結果と一致する。き裂の最大長さについても、転動回数が多いほど概ね増加する傾向にあることが確認できる。さらに、疲労指数が大きい方がき裂の最大長さも長くなっていることが分かる。したがって、試験片の接触状態から算出される疲労指数の値が増加するにつれて、き裂の進展を促進する傾向が確認できた。つまり、疲労指数を低減させることでき裂の進展を抑制できると考えられる。

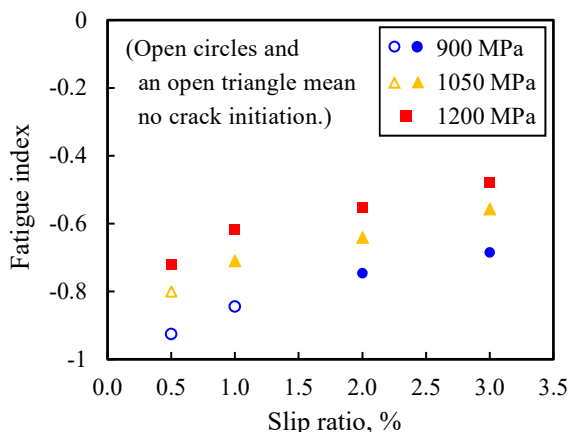


Fig. 3 Fatigue indexes in the crack initiation tests

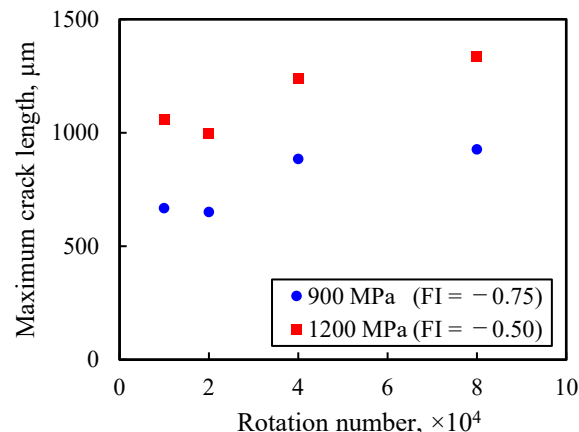


Fig. 4 Maximum crack lengths in the crack propagation tests

5. おわりに

熱処理レール材を用いた転動疲労試験において、き裂の発生に至る疲労指数の閾値を推定し、また疲労指数が増加するほどき裂の進展を促進する傾向が確認できた。今後は実断面形状を有する車輪・レール試験輪を用いた転動疲労試験を行い、疲労指数を低減した際のき裂の抑制効果について検証する予定である。

文献

- 1) 赤間・村橋：転がり－滑り接触条件下における疲労き裂成長と摩耗の競合，鉄と鋼，Vol. 105, No. 6, (2019), pp. 70-81.
- 2) A. F. Bower & K. L. Johnson: Plastic flow and shakedown of the rail surface in repeated wheel-rail contact, Wear, 144, (1991), pp. 1-18.
- 3) Anders Ekberg and Elena Kabo : Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading -an overview, Wear, 258, pp.1288-1300, (2005).