

鉄道車輪のフラットはく離に関する研究

Chawanat WIJITPATIMA* 赤間 誠 (大阪産業大学)

The research on the flat spalling of railway wheels
Wijitpatima Chawanat*, Makoto Akama (Osaka Sangyo University)

Spalling of railway wheel is a damage in which white layers are formed on the tread, and cracks are generated and propagate due to the repeated rotation of the wheel. In this study, twin-disc fatigue-wear tests were carried out under the various conditions using wheel steel disc with white layers on the surface by laser quenching, in combination with rail steel disc. In addition, elastic-plastic FEM analyses were performed in order to clarify the results of these tests. The crack growth direction and crack growth rate were estimated by applying Vector crack tip displacement and J -integral criterion.

キーワード：鉄道車輪, 白色層, フラットはく離, 有限要素法, ベクトルき裂先端変位, J 積分
(Keywords, railway wheel, white layer, spalling, finite element method, vector crack tip displacement, J -integral)

1. 緒言

鉄道車輪は車体の全重量を支えながらレール上を回転するだけでなく、駆動力や制動力等も車輪を通してレールに伝えられる。このような負荷によって、車輪には様々な損傷が発生することがある。その中でフラットはく離は、車輪がレール上を滑走したときに摩擦熱により表面の一部に白色層(マルテンサイト層)が生じ、そのあと車輪の繰返し回転によってその部分からき裂が発生し、進展してはく離する損傷である⁽¹⁾。この損傷が生じた車輪をそのまま使用すると、振動の増加によってほかの部品に影響を与えて脱線事故につながる可能性もある。

本研究では、フラットの白色層よりき裂が発生してからはく離するまでの現象を解明するため、白色層を挿入した車輪試験片とレール試験片を組み合わせた二円筒疲労-摩耗試験(以下では二円筒試験)を実施した。さらに実験結果を検証するため、弾塑性有限要素法(FEM)解析によって試験を模擬した。白色層周囲で発生するき裂の進展方向及び成長速度を評価するため、それぞれベクトルき裂先端変位(VCTD)及び J 積分を適用した。

2. 二円筒疲労-摩耗試験

(2.1) 実験方法及び実験条件

西原式二円筒疲労-摩耗試験機を用いて実験を行った。車輪及びレール試験片は両者共に、実物の車輪及びレールから採取した。各試験片の化学組成と機械的特性を、表1及び表2に示す。両試験片の寸法は同じく円筒型で、直径30mm、厚さ12mmである。車輪試験片には、表面にレーザー焼入れによって白色層が円周方向で180°ごとに2つ挿入

Table 1 Chemical compositions (wt %).

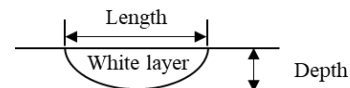
Material	C	Si	Mn	P	S
Wheel steel	0.65	0.26	0.73	0.016	0.01
Rail steel	0.68	0.26	0.93	0.016	0.01

Table 2 Mechanical properties.

Material	Ultimate tensile strength (MPa)	Proof stress (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio
Wheel steel	981 - 1030	470	197.3	8 - 12	0.3
Rail steel	934	508	183	≥10	0.3
White layer	-	1891	205	-	-

Table 3 White layer geometries of wheel specimens.

No.	White layer size(mm)		Depth/Length
	Length	Depth	
#1	1.65	0.167	0.101
#2	3.741	0.347	0.093



し、それぞれの寸法は表3の通りである。

試験は潤滑状態でいい(ほぼ1秒に1滴、潤滑剤を滴下)、最大ヘルツ接触圧力 P_{max} は1100 MPaとした。この場合、Hertz理論⁽²⁾より両試験片の接触荷重 F_n は3037 Nとなる。試験では初期には5000回転毎、200,000回転以降は10,000回転毎に両試験片の摩耗量を測定した。また試験終了後に車輪試験片を切断してナイタール溶液で腐食させ、光学顕微鏡によってき裂及びはく離の観察を行った。

〈2・2〉 実験結果

本実験では、車輪試験片を累積で 100,000 及び 420,000 回転させた 2 つの試験を実施した。その結果を、顕微鏡による試験後の車輪試験片における白色層の断面写真として図 1 及び 2 に示す。図 1 より #1 の白色層付近では、荷重出側端部で母材との界面に沿って進展しているき裂と、上に分岐してはく離に至った部分があることが分かる。さらに、白色層中心部では、白色層内において表面から母材まで、若干分岐が見られるが、ほぼ半径方向に進展しているき裂も観察された。

図 2 には、#2 の白色層における荷重出側端部の 420,000 回転後の場合を示す。図 1 の #1 と同様に、その端部よりき裂が発生して進展し、はく離する傾向が見られ、また母材との界面に沿って進展しているき裂も観察された。

また白色層の寸法によらず、荷重入側端部では 420,000 回転させた場合でもき裂発生は、出側端部より少なかった。なお 100,000 回転後の場合は白色層付近におけるき裂は明確に観察されなかった。

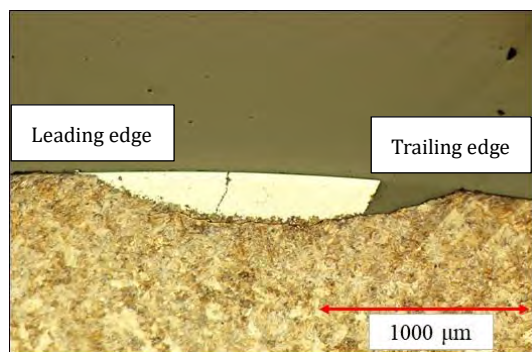


Fig.1 Microscopic features of cracks by optical microscope on white layer #1 after 420,000 cycles.

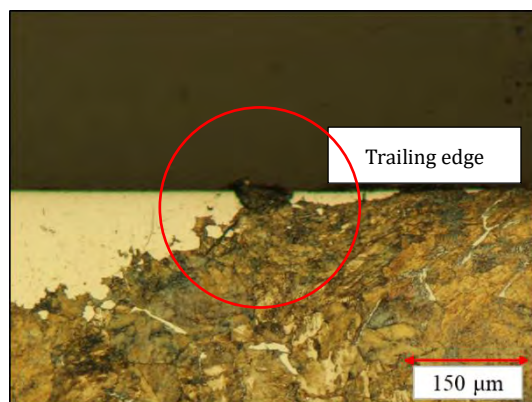


Fig.2 Microscopic features of cracks by optical microscope on white layer #2 after 420,000 cycles.

3. 弾塑性 FEM 解析

〈3・1〉 解析手法及び解析条件

FEM 解析は、汎用コード MARC を用いて実施した。図 3 に二円筒試験を対象とした FEM 解析モデルを示す。上側がレール、下側が車輪試験片である。車輪試験片には白色層が挿入してある。白色層の形状は、加藤らの論文⁽¹⁾を参考にし、長さ 2mm、厚さ 0.2mm の 1 種類で円弧状とした。同図(a)は全体、(b)は白色層近傍のメッシュを拡大して示す。円筒試験片は 1 次平面ひずみ要素を用いてモデル化し、解析精度を向上させるため、両試験片の接触部近傍及び車輪試験片の白色層を構成する要素を細かく分割した。最小要素寸法は、0.00125mm である。非適合接触で発生する応力及びひずみは接触部付近に限定されるため、両試験片の円周方向は 45°のみとした。各試験片中心部に Pilot 節点を設定し、試験片内周部の節点に接続する多点拘束を行った。Pilot 節点に全ての外部荷重と境界条件を適用した。

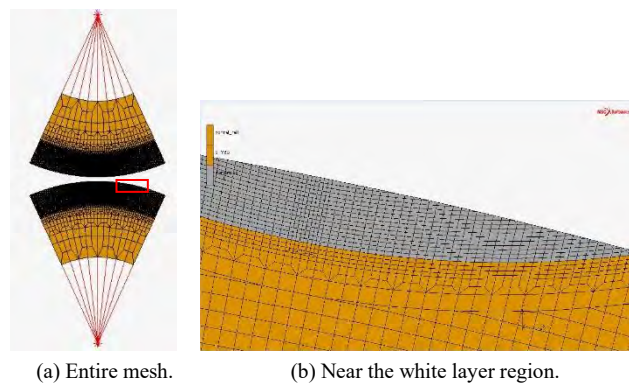


Fig.3 FEM Analysis Model.

解析の手順は、以下の通りである。(i) レール試験片の Pilot 節点に荷重をかけ、(ii) 車輪試験片とレール試験片を接触させて滑りを生じさせながら回転させる。(iii) 試験片を予め設定した角度（車輪試験片側で 20°）まで回転させた後荷重を除去し、(iv) 最後に試験片を初期位置に戻す。これを N 回繰り返すことで、 N 回転を模擬した。

車輪試験片とレール試験片が接触しながら回転すると、接触領域に大きな応力が発生するため塑性変形が生じる。そこで、特に試験片の母材と白色層との境界面での応力変動に対する加工効果や残留応力の影響が安定する $N = 5$ とした。

〈3・2〉 適用基準とき裂モデル

白色層の中心部及び荷重出側端部付近におけるき裂に対し、転がり接触条件下でのき裂の成長速度を J 積分、き裂進展方向をベクトルき裂先端変位 (VCTD) によって、前述の実験結果を説明する。解析条件については、実験条件 (P_{max} , S_r など) と同じである。

図 1 に示す白色層#1 のき裂結果に基づいて、各部のき裂のメッシュを図 4 に示す。図 4(a)は中心部で深さ 0.1mm のき裂であり、分岐する直前のき裂長さに対応する。(b)は白色層の荷重出側端部付近の母材内の約 0.1mm のき裂である。

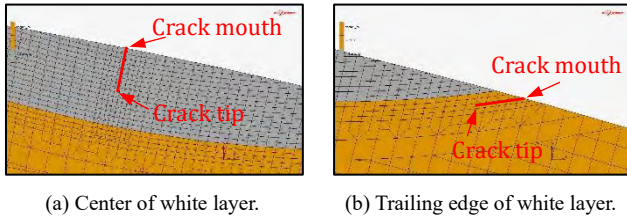


Fig.4 FE mesh around the crack tip.

〈3・3〉 ベクトルき裂先端変位

VCTD は、図 5 に示すように、モード I 及びモード II 疲労き裂進展の方向にそれぞれ作用するき裂先端開口変位 (CTOD) 及びき裂先端すべり変位 (CTSD) のベクトル和として定義されている。疲労き裂は、最大せん断応力方向の逆すべり機構によって進展し、モード I とモード II の負荷でそれぞれき裂開口とすべり変形を生み出す。

図 5(a)示すように、 $\overline{\Delta CTOD}$ は、 $\Delta CTOD$ と同じ大きさであり、本来のき裂の方向にある。き裂先端において多量のすべりが発生すると、“せん断モード疲労き裂”は本来のき裂経路に沿って進展せず、それより 45°方向に向かう。パラメータ $\overline{\Delta CTSD}_e$ は、図 5(b)のように、大きさは $\sqrt{2}\Delta CTSD$ として定義される。ベクトル $\overline{\Delta CTD}$ は次のように定義される。

$$\overline{\Delta CTD} = \overline{\Delta CTOD} + \overline{\Delta CTSD}_e \quad (1)$$

これは図 5(c)のように、混合モードき裂の結果としての駆動力を表している。これらの考察から、疲労き裂はベクトル $\overline{\Delta CTD}$ 方向に成長する⁽³⁾。

混合モード疲労き裂では、 $\overline{\Delta CTOD}$ と $\overline{\Delta CTSD}_e$ のなす角度は 45°であることに注目すると、次のことが分かる。

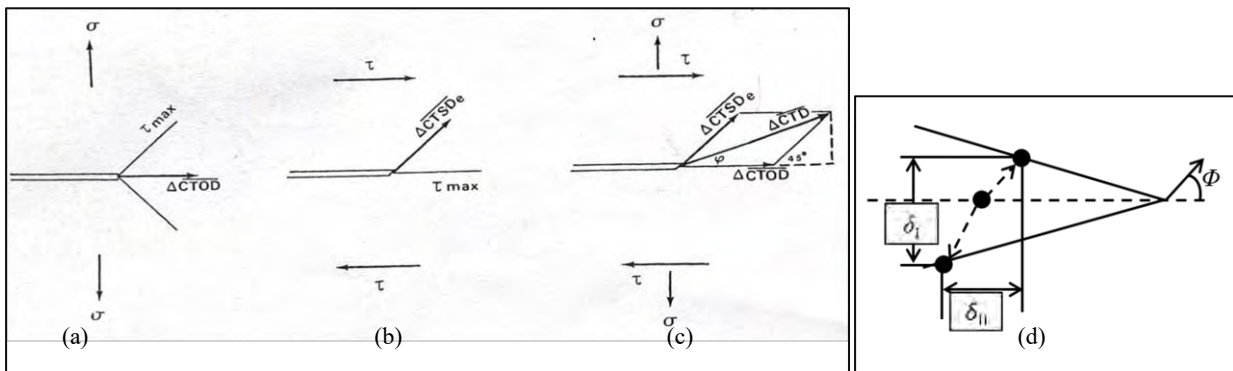


Fig.5 Definition of Vector crack tip displacements: (a) mode I loading; (b) mode II loading; (c) mixed mode loading; (d) Relationship between δ_I , δ_{II} and Φ

$$\Delta CTD = \sqrt{(\Delta CTOD)^2 + 2\Delta CTSD^2 + 2\Delta CTOD * \Delta CTSD} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta CTOD = \Delta \delta_I = \delta_{I\max} - \delta_{I\min}$ 、 $\Delta CTSD = \Delta \delta_{II} = \delta_{II\max} - \delta_{II\min}$ である(図 5 参照)。 $\delta_{I\min}$ 及び $\delta_{II\min}$ は、それぞれの解析上の各時間ステップによって変化したき裂開口方向とすべり方向のき裂先端変位の最小値、 $\delta_{I\max}$ 及び $\delta_{II\max}$ は、それぞれの最大値である。き裂進展方向は、図 5(d)のき裂先端変位に注目すると、本来のき裂方向からの角度は次式で得られる。

$$\Phi = \sin^{-1} \frac{\Delta CTSD}{\Delta CTD} \quad (3)$$

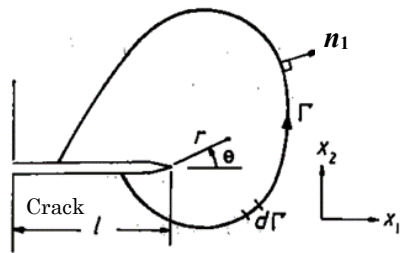
FEM 解析は、モード I と II のき裂先端変位の範囲を求めて、式(2)及び(3)に代入して混合モード荷重下での進展方向を算出する。

〈3・4〉 J 積分法

J 積分は、弾塑性破壊力学においてき裂成長速度を評価するための基準の 1 つであり、き裂の成長に伴うエネルギー解放率に基づいたものである。繰り返し負荷を受けてき裂先端に大きな塑性領域が発生する場合には適用できなくなる応力拡大係数(K 値)に対して、J 積分はその状態でも適用することが可能であるという特徴がある。J 積分は次式で表現される。

$$J = \int_{\Gamma} (Wn_1 - T \cdot \frac{\partial u}{\partial x_1}) d\Gamma \quad (4)$$

図 6 に示したように、 W はひずみエネルギー密度、 Γ はき裂先端を下から上面まで反時計回りまわる経路、 T は Γ 上に働く表面力、 u は変位ベクトル、 n_1 はその単位法線の x_1 軸に平行な方向の成分である⁽⁴⁾。しかし、除荷がある場合、あるいはき裂成長などにより、き裂後方に局所的除荷が生じる場合は、J 積分は厳密に定義できない。そこで本解析では、除荷に至らない $N = 1$ 回転後にき裂先端の J 値を求めたことにした⁽⁵⁾。

Fig.6 Independent contour around the crack tip⁽⁶⁾.

4. FEM 解析結果

〈4・1〉 VCTD 基準によるき裂進展方向の評価

き裂進展方向 ϕ をより正確に求めるため、 $N=5$ 回転後のき裂先端変位を用いて算出した。その結果、 ϕ は約 36.7° であった。これは、解析のモデル上で長さ 2 mm 深さ 0.2 mm の白色層に挿入した深さ 0.1 mm のき裂が、転がり接触条件下での混合モード荷重によってその先端から 36.7° 方向に傾いて進展するということを意味している。これに対して、実験で $420,000$ 回転した#1 の白色層である図 1 では、き裂進展角度は $\phi \approx 30^\circ$ となっている。

解析と実験結果が厳密に一致していないことについては、以下のような理由が考えられ、今後の検討事項とする。

(1) 実験結果にばらつきの影響があること。

(2) き裂面及び両試験片の接触面における摩擦係数は、き裂先端の変位に対して支配的な因子のため、それを正確に検討する必要があること。

〈4・2〉 J 積分法によるき裂成長速度の評価

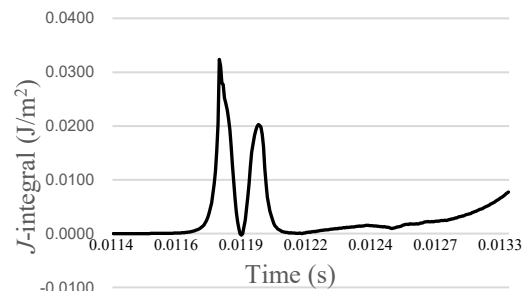
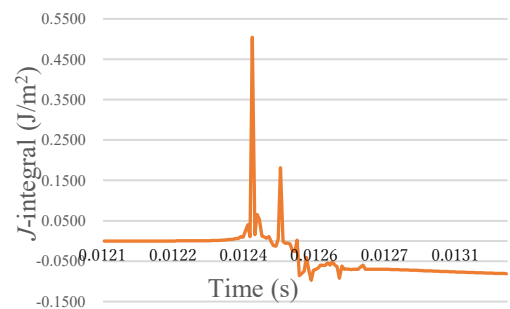
図 7 及び 8 は、それぞれ白色層の中心部及び荷重出側端部付近におけるき裂先端の J 積分の解析結果を示す。縦軸は J 積分値、横軸は 1000 rpm の回転速度に対応する実時間を表わし、 0 秒の時点から回転し始めるとした。グラフより、中心部での J 積分の最大値は約 0.0324 J/m^2 に対して荷重出側端部付近のき裂先端の最大値は約 0.505 J/m^2 ということが分かる。これは、車輪・レール両試験片が、それぞれ 1.18×10^{-2} 及び 1.241×10^{-2} 秒間の時点まで回転した時点で、き裂に対して一番影響を与えることを意味している。また、複数のき裂がある場合、 J 積分値が高いほどき裂成長速度が高く、進展しやすいものと判断される。そのことから、2・2 節で記述した $420,000$ 回転させた場合の#1 白色層の実験結果で、荷重出側端部のき裂の方が中心部のき裂より速く進展したことが説明できる。

5. 結言

鉄道車輪のフラットはく離の現象を明らかにするため、二円筒試験を実施し、さらに実験におけるき裂発生及び進展などの結果を基にして FEM 解析を行い、 J 積分及び VCTD 基準を適用した。その結果を以下に纏める。

(1) $420,000$ 回転後、白色層の寸法によらず荷重出側端部においてき裂発生・進展が観察された。

(2) #1 の白色層において、中心部よりも荷重出側端部でき裂が速く進展してはく離に至ったことは、後者の J 積分の最大値はるかに大きかったためであると推測される。

Fig.7 J -integral results of the central crack on White layer.Fig.8 J -integral results of the trailing edger crack nearby White layer.

謝辞

白色層は、富士高周波工業株式会社殿にレーザー焼入れで挿入して頂いた。ここに深謝の意を表します。

文 献

- (1) 加藤孝憲, 菅田淳, 牧田太郎, 元屋敷靖子, 山本三幸, 中山英介, 白色層を起点とした鉄道車輪鋼の転がり接触下における疲労損傷評価, 材料, Vol.56, No.12(2007), pp.1150-1155.
- (2) Johnson K., "Normal contact of elastic solids - Hertz theory, In Contact Mechanics" (1985), pp.84-106.
- (3) Chingshen Li., "Vector CTD criterion applied to mixed mode fatigue crack growth", Fatigue Fract. Engng Mater. Struct, Vol.12, No.1, pp.59-65, 1989.
- (4) Qinglin Lian, Guanyu Deng, Ali Al-Juboori, Huijun Li, et al., "Crack propagation behavior in white etching layer on rail steel surface", Engineering failure analysis, No.104, pp.816-829, 2019.
- (5) M. Kráčařik, W. Daves, T. Antretter, "Calculation of crack driving forces of surface cracks subjected to rolling/sliding contact", Engineering fracture mechanics, No.152, pp.10-25, 2016.
- (6) 久保司郎: 「 J 積分および修正 J 積分の評価とその方法」, 材料, 1985, 34 巻, 379 号, pp. 359-369.