

フラット剥離と摩耗に及ぼす車輪転がり方向逆転の影響

Effect of Wheel Rolling Direction Reversal on Flat-Induced Shelling and Wear

阪産大・工（正）*赤間 誠 阪産大・工（非）福村 貴史

Makoto Akama*, Takashi Fukumura*

*Osaka Sangyo University

1. はじめに

鉄道車輪の損傷の一つにフラット剥離と呼ばれる損傷がある。フラット剥離の発生には様々な要因があるが、その中でも急ブレーキなどで車輪が滑走した際、摩擦熱によって車輪踏面表面に形成される白色層（WEL）が大きな要因とされている。WEL 付近は、車輪の繰返し転動によってき裂が発生・進展し、やがてははく離に至る¹⁾。はく離が発生すると車輪の円周形状が不整となることで大きな振動が発生し、乗り心地の悪化や事故の原因にもなる。また列車は一般的に折り返し運転を行い、終着駅に到着すると進行方向が逆になる。そのとき、車輪の転がり方向は逆転する。フラット剥離に与える影響のうち、転がり方向の逆転の影響については、これまでほとんど研究されていなかった。日本における新幹線列車のように曲線部の少ない路線を走行する車両では、車輪踏面のほぼ同じ部分がレールに接触しながら回転するため、この影響を考慮することは重要である。そこで本研究では、車輪の転がり方向を逆転させた場合、WEL 付近のき裂や摩耗に及ぼす影響を調査するため、二円筒試験機による実験と、それを模擬した有限要素法（FEM）解析を実施した。

2. 実験方法

実験は西原式二円筒摩耗試験機を用いて、車輪試験片を高速側とし、接触部には1秒間に約1滴の割合で5%の鉱物油を含む水を滴下する潤滑条件で実施した。車輪とレールそれぞれの試験片は、実際の車輪及びレールから採取し、直径は30mm、幅は12mmである。滑り率（ S_r ）は1%で、最大 Hertz 接触圧は1100MPaである。車輪試験片にはのレーザー焼入れ処理を加えることによって、ほぼ長さ3mm、深さ0.3mmのWELをそれぞれ1箇所挿入している。実験は2回実施した。最初の実験は、300,000回転まで転がり方向は変えずに行い、次の実験は150,000回転で車輪試験片の転がり方向を逆転した。各試験片は、表面の剥離の様相は試験の途中で数回、表面に発生したき裂の断面形態は試験終了後に切断して、光学顕微鏡で観察し撮影を行った。

3. 解析手法

FEM 解析は、汎用コード MARC を用いて実施した。図1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 WEL を形成してあり、形状は実験と同じで、長さ3mm、厚さ0.3mmの円弧状とした。同図(a)は全体、(b)はWEL近傍のメッシュを拡大して示す。最初の回転方向（Forward）でレール試験片と最初に接触するWEL端部をA点、次に接触する端部をB点とする。逆回転（Reverse）では最初に接触する端部がB点、次がA点となる。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節点に荷重3037Nとすべての境界条件を適用した。また試験片間の摩擦係数は0.1、また $S_r = 1\%$ とした。

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 25° ）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WEL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、同一の転がり方向でN=10とした。

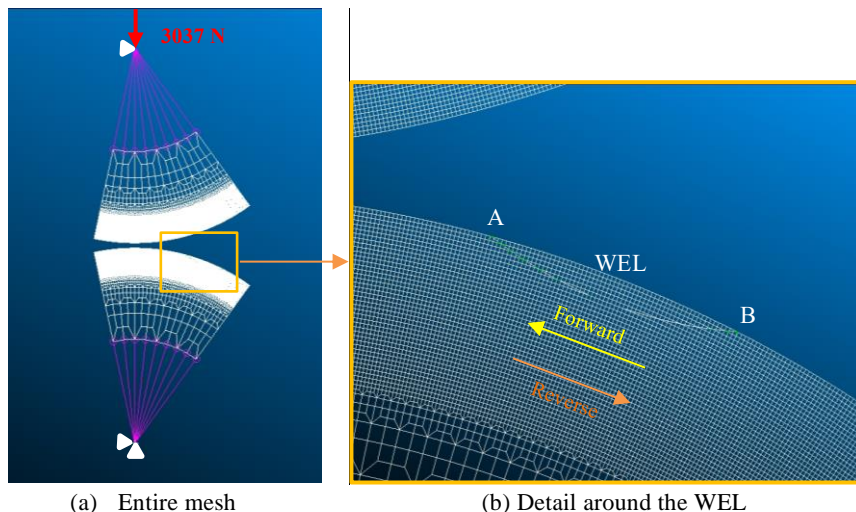
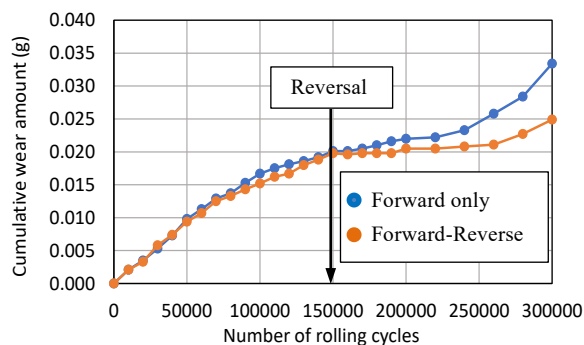


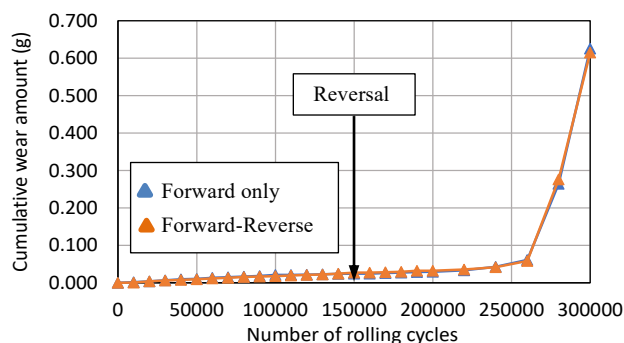
Fig. 1 FEM analysis model

4. 実験結果

実験で得られた各試験片の累積摩耗量を図 2 に示す。車輪試験片の場合、転がり方向を逆転させた直後は摩耗速度が減少する傾向を示した。これに対してレール試験片の場合は、累積摩耗量に対して車輪の転がり方向の逆転の影響はなく、220,000 回転以降摩耗速度は急増した。これは図 3 に示すように、220,000 回転以降、一方向転がり試験及び 150,000 回転後の転がり方向逆転試験いずれの場合も表面に疲労摩耗の特徴である多くのき裂が発生して進展・剥離したためであると考えられる。また一旦転がり方向の逆転によって減少した車輪試験片の摩耗速度は、相手側のレール試験片表面の荒れによって徐々に増大した。



(a) Wheel specimen



(b) Rail specimen

Fig. 2 Cumulative wear amounts

5. 解析結果

図 4 に、回転数による B 点付近の円周方向の残留応力分布の変化を示す。(a)は 1 回転後、(b)は 10 回転後、(c)は転がり方向を逆転させて 1 回転後、そして(d)は 10 回転後である。最初は回転が進むにつれ、引張残留応力が增大するが、逆転させて回転が進むと徐々に減少することがわかる。また A 点付近においては、回転が進むにつれ、圧縮残留応力が增大するが、転がり方向逆転後に回転が進むと、徐々に減少することがわかった。これより、車輪試験片の転がり方向を逆転させると WEL 端部 B 点の引張残留応力が減少し、両試験片が接触するごとに、B 点付近に発生したき裂の進展に密接に関係がある円周方向応力の変動範囲が減少し、そのため摩耗速度が減少したものと考えられる。

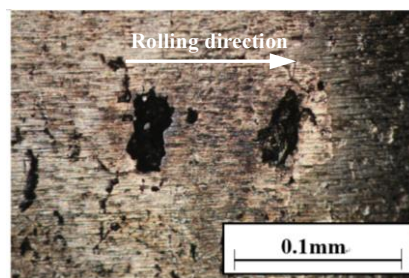
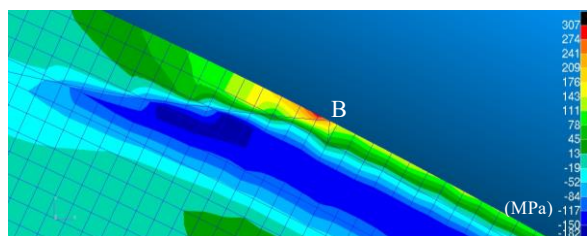
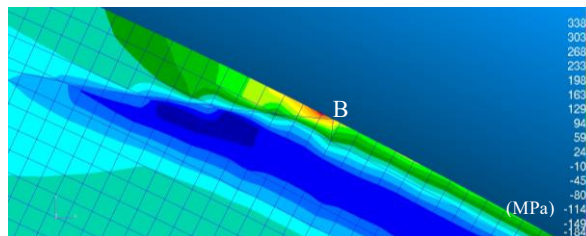


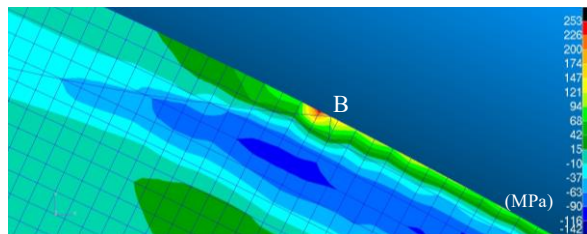
Fig. 3 Shelling on rail specimen surface
(Forward-Reverse: after 240,000 cycle)



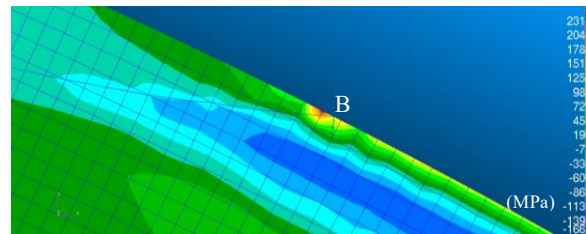
(a) After forward rotation 1 cycle



(b) After forward rotation 10 cycles



(c) After reverse rotation 1 cycle



(d) After reverse rotation 10 cycles

Fig. 4 Change in circumferential stress at point B with rotation cycles

6. おわりに

車輪試験片の転がり方向を逆転させた場合、WEL 端部付近の引張残留応力が減少し、摩耗速度が一旦低下することがわかった。しかしレール試験片の荒れに伴い、車輪試験片の摩耗速度は徐々に増大した。

文献

- 1) W. Chawanat and M. Akama : Tribology Online, 19, 4 (2024), pp. 277-286.