在来線レールの転がり接触疲労破壊特性[†]

井 上 靖 雄* 佐 藤 幸 雄* 柏 谷 賢 治*

Rolling Contact Fatigue Fracture of Conventional Line Rail

by

Yasuo INOUE*, Yukio SATOH* and Kenji KASHIWAYA*

The behavior of plastic deformation under the running surface of various conventional line rails which differ in the accumulated service tonnage was analyzed mainly by the X-ray diffraction, considering the distribution and development of texture under the running surface of rail, the pattern of pole figure and the development of texture with an increase in the accumulated service tonnage, etc. From the analysis, the following results became clear by comparing it with the rolling contact fatigue test specimen and the Shinkansen rail.

(1) The rolling contact fatigue in the conventional line is influenced by slip. The running surface of conventional line rail is subjected to larger maximum Hertz pressure than that of Shinkansen rail.

(2) The development of texture well matches the increase in the accumulated service tonnage which corresponds to the number of cycles.

Key words : Texture, Rolling contact fatigue, Rail, X-ray diffraction

1 緒 言

鉄道レールは、列車の通過によってレール頭頂面に転がり接触疲労を受ける。このためシェリングと呼ばれるレール損傷が新幹線を中心に多発している。この問題を解決するために、著者らは、転がり接触疲労による塑性変形状態の解析から着手し、これまでにシミュレーションした二円筒の転がり接触疲労試験片および新幹線レールを結晶学的に解析することによって、その破壊機構を明らかにしてきた^{1)~4)}。

これまでも在来線においてシェリング損傷が発生していたが部分的な発生であり、ほとんど問題にされてこなかった。しかし、特に新幹線が並行していない在来線の主要幹線、すなわち、北陸線や常磐線等においてシェリングが多発するようになり保守上大きな問題となってきた。これらの線区においては、航空機や高速道路と熾烈な競争をしており、120 km/h~130 km/hの高速列車が頻繁に運転されている。そのために在来線レールとしては、最も厳しい条件にさらされている。一方、在来線のシェリングの発生形態に関しては、新幹線とは異なる点が見られる。

今回、裏縦幹線の一部である信越本線より累積通過トン数の異なるレールを収集し調査を行った。これまでに明らかになっている二円筒の転がり接触疲労試験片や新幹線レールの結果とも比較して、破壊機構について結晶学的な面から考察を行ったので報告する。

2 供 試 レ ー ル

供試レールは、この研究のために長岡、新潟地区より収集した50 Nレールである。収集にあたっては、敷設条件の違いによる影響を極力排除した。すなわち、駅間の直線区間で120 km/hで走行する区間、しかも平坦な場所の中から車輪・レールの接触状態の良い箇所を選定した。そして、累積通過トン数の異なるレールを左右同一箇所から撤去した。

レール鋼は、炭素含有量が0.75%程度の高炭素鋼で引張強さは804 MPa以上となっている。また、金属組織はパーライト組織である。

実使用レールおよび疲労試験の転がり接触条件を

Table I. Condition of rolling contact.

	Shinkansen line	Conventional line	Fatigue test
Rolling direction	Definite direction	Definite direction	Definite direction
Wheel diameter (mm)	910	860	160
Radius of curvature at contacting surface of rail (mm)	600	300	
Wheel load (ton)	80	50	
Velocity of wheel (km/h)	210	100	60, 150
Maximum Hertz pressure (GPa)	0.92	0.94	0.9~1.5
Slip ratio	0	0	0, 1.4
Lubricant			Water

[†] 原稿受理 平成2年9月25日 Received Sep. 25, 1990

* 正 会 員 (財)鉄道総合技術研究所 国分寺市光町, Railway Technical Research Institute, Hikari-cho, Kokubunji

Fig. 1. The contact of wheel and rail.

Table I に示す. 新幹線, 在来線の最大ヘルツ圧が 0.92, 0.94 GPa となっているが, これは新品の車輪・レールの組み合わせで計算した値である.

レール・車輪の接触は, Fig. 1 に示すようにレール頭頂面および車輪踏面が, それぞれ曲率を持っているため球面接触になっている. したがって, レールに生じる接触応力(最大ヘルツ圧) P_{max} については, Hertz の理論から式 (1) に示すように輪重と接触部の面積によって決められる.

$$P_{max} = (1.5P)/(\pi ab) \quad (1)$$

ここで, P_{max} : レールに生じる最大ヘルツ圧, P : 輪重, a : 接触部(だ円)の長軸の半幅, b : 接触部(だ円)の短軸の半幅

接触部のだ円の大きさを表す a, b は, レール横断面でのレール頭頂面の曲率半径 R_r , 接触点での車輪半径 R_w , 車輪横断面での車輪踏面の曲率半径 R_t に影響される. すなわち, レールに生じる P_{max} は, 車輪・レールの接触形状に大きく依存する. したがって, 正確な P_{max} を求めるためには, 摩耗した車輪・レールの形状を測定しなければならない. しかし, 走行する車両の車輪形状を測定することは不可能に近い. また, レールも敷設条件の違いを考慮すれば全線にわたって測定しなければならず容易ではない. そこで, 本研究のために採取した数本のレールの頭頂面曲率半径を測定し, それに適度に摩耗した車輪半径を適用して P_{max} を試算した. その結果, Table I に示した新品の車輪・レールの組み合わせで求めた P_{max} は, 累積通過トン数の増加に伴い, 新幹線では, 0.55 から 0.65 GPa 程度へと低下する傾向を示した. 一方, 在来線では 1.3 から 1.4 GPa 程度へと増加する傾向を示した.

3 測定条件

X 線の測定条件は, これまでと同じ方法で行った. すなわち, 集合組織の測定には, 回転対陰極の X 線発生装置および極点図作成システムを用い, 特性 X 線 $\text{CrK}\alpha$ によりシュルツ反射法で Fe (110) 極点図を

Fig. 2. Measuring positions of rails.

作成した. 半価幅の測定には, 平行ビームの X 線応力測定装置を用い, ϕ 一定法 ($\phi=12^\circ$) で特性 X 線 $\text{CrK}\alpha$ によって Fe (211) 回折線の広がり測定した. また, 試料の研磨についても, これまでと同様に化学研磨と電解研磨により行った.

X 線の測定位置は, Fig. 2(a), (b) に示すように中央部分 (M), ゲージ・サイド部分 (G) フィールド・サイド部分 (F) の三点について行った. ただし, 新幹線と在来線では, 車輪・レールの接触状態が異なるため, 測定位置を若干ずらした. すなわち, 在来線では, レールを撤去する前に現場で調査を行い接触の中央を (M) とした. 新幹線の場合は, これまでの研究により車輪の接触位置は, 必ずレール中央になるためレール頭頂面の中心を (M) としている.

4 測定結果

Fig. 3 は採取した在来線レールの頭頂面の写真である. レール中央に筋状の白く光っている部分が見える. これが白色層と呼ばれるもので在来線レールのほとんどの箇所で見られる. 白色層は, 新幹線レールにおいてほとんど見られず, 在来線レールの大きな特徴になっている. これは車輪の非定常転がりによってレールの表層が焼入れ状態となり, マルテンサイト変態したものである. Fig. 4 にその顕微鏡写真を示す. 接触

Fig. 3. White layer of running surface rail.

*1 列車速度に対し, 異なる相対速度で車輪が回転する現象. 広義には車輪・レール間のすべりによって発生する空転・滑走の状態.

Fig. 4. Microphotograph of metallography.

面下 $20\ \mu\text{m}$ 程度の深さにまで白色層が観察される。マルテンサイト化した白色層には圧縮残留応力が発生するため、その焼き境部においては残留応力の変化が著しい。このため焼き境部に微視き裂が発生しやすい。そして、発生した微視き裂は、き裂進展によってシェリングに成長する。在来線レールにおけるシェリングの連続多発区間を調査すると、その多くが白色層に起因している。今回の調査によってもその傾向が伺われた。

Fig. 5 は、レール頭頂面から内部方向に研磨しながら測定した集合組織の発達分布である。特に、車輪と

の接触面近傍（接触面下 $100\ \mu\text{m}$ まで）については、3 億 1000 万トンのデータを代表例として選び横軸を拡大して Fig. 5 (h) に示す。図における深さ方向の集合組織の発達を表す回折強度とは、極点図上において最も強い回折ピークの強度が、深さ方向にどのように変化しているかを示したものである。著者らは、ローラー圧延などによる、いわゆる静的なせん断変形の場合と転がり接触疲労などの繰返しせん断変形の場合とでは、集合組織の発達形態に違いがあることを明らかにしてきた。¹⁾⁻⁴⁾ 圧延による集合組織は、結晶のすべり方向が複雑な多重すべりによってできている。したがって、極点図上の極の最も強い回折ピークを採って単純に比較することはできず、各すべり系の成分を分析し計算する必要がある。一方、転がり接触疲労の場合、極点図は単結晶に似た単一のすべりパターンを示す。このため極点図上の極の最も強い回折ピークを用いて集合組織の発達を評価することができる。

集合組織の発達位置は、新幹線レールの場合、接触面下 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ の極表層に局在している。^{1), 4)} 一方、在来線レールにおける集合組織の発達は、Fig. 5 の (h) に示すように極表層では弱い。そして、接触面下 $100\ \mu\text{m}$ 位から発達し始め、最も発達が著しい位置は、Fig. 5 の (a) から (g) に示すように接触面下 $400\sim 700$

Fig. 5.

Fig. 5. Maximum intensity of the pole figure which develops a texture under running surface of conventional line rails.

μm となっている。これは新幹線レールに比べ数十倍深い。また、影響深さも新幹線レールが $100 \mu\text{m}$ 程度までなのに対し、在来線は $1000 \mu\text{m}$ を越えるところまで集合組織の発達が見られる。

Fig. 6 に著者らが行った転がり接触疲労試験の結果の一例を示す。この試験においては、すべりの有無にかかわらず最大ヘルツ圧が 1.2 GPa 以上になると接触面下 $500 \mu\text{m}$ 付近を中心に集合組織の発達が見られた。また、すべりを与えた場合、接触面下 $100 \mu\text{m}$ 位までの層には、集合組織の発達は見られない。

5 考 察

今回の測定で、在来線レールにおいては、集合組織が新幹線レールに比べ深い層にまで発達していることと、極く表層においては、集合組織の発達が見られないという二つの大きな特徴が明らかとなった。このことから在来線レールの頭頂面には、新幹線レールに比

べ大きなヘルツ圧が作用しているものと考えられる。前述したように疲労回数（累積通過トン数）の増加に伴い、車輪・レールの摩耗によって接触面の形状が変わり、最大ヘルツ圧も変化する。バラツキはあるが、新幹線の場合、 0.55 GPa 程度になるのに対し、在来線の場合は、最大 1.4 GPa になる場合もある。また、極く表層において集合組織の発達が弱いということから、在来線レールは、すべりの影響を受けた転がり接触疲労を受けているものと考えられる。

実使用レールにおけるシェリングの発生は、バラツキはあるものの、新幹線の場合、敷設後、1 億トンを越えるあたりから目につくようになり、1 億 5000 万トンを越えると急増し、レールの取り替えが必要になってくる。在来線レールは、白色層に起因するシェリングを除けば、新幹線レールに比較して、シェリングの発生、および、これに伴うレール交換とも寿命が

Fig. 6. Half value width and maximum intensity of the pole figure which develops a texture under surface of rolling contact fatigue test specimens.

長い。この要因を結晶学的な面から考察すると、一つの考え方として接触面表層へのダメージの集中が挙げられる。すなわち、新幹線レールの場合、ダメージが極く表層（接触面下 10~20 μm ）に局在するため、き裂が発生しやすい。一方、在来線レールの場合、新幹線に比べ極表層にダメージが蓄積しにくいことから、き裂の発生は遅くなるものと考えられる。

Fig. 7 は集合組織の発達を疲労回数に相当する累積通過トン数で整理したもので各通過トン数における G. S., M., F. S. の最大値をプロットした。バラツキはあるが、累積通過トン数の増加に伴って集合組織も発達している。

Fig. 8 は半価幅の測定結果である。転がり接触疲労試験片の結果と同じように疲労回数に相当する累積通過トン数が増加しても顕著な変化は認められない。このように集合組織が発達してもそれほど半価幅に変化がないのは、著者らが前報で述べているように塑性変

Fig. 7. Variation of maximum intensity on texture by accumulated service tonnage.

Fig. 8. Variation of half value width by accumulated service tonnage.

形が繰返し応力の作用によって生じるため、転位がセル壁に集まって安定配列をとり、半価幅を増加させるほど微視ひずみが残留していないからである。このことから転がり接触疲労度の判定には、半価幅よりも集合組織の発達を測定する方に優位性がある。

Fig. 9 は在来線レールの極点図である。代表例として 3 億 1000 万トンの左右レールを示す。極点図は、G. S., F. S. とともに $\{110\}$ の極が鮮明に現れている。接触面は $\{111\}$ になっており、すべり面 $\{112\}$ が接触面に 20° から 30° の角度を持って $[111]$ 方向にすべっている。図中の $\blacktriangle$ 印は $[111]$ のすべり方向を示す。この極点図のパターンは、Fig. 10 (b) に示す転がり接触疲労試験片の極点図と一致する。このことから在来線レールは、すべりの影響を受けた転がり接触疲労を受

Fig. 9. $\{110\}$ Pole figures of conventional line rail (310.0×10^6).

けていると断定できる。そして、すべりの影響がある
ことと大きなヘルツ圧が作用していることが、車輪の

非定常転がりを生む要因の一つになっている。

結晶のすべり方向がレールの幅方向になっている理

Fig. 10. $\{110\}$ Pole figures of rolling contact fatigue test specimens.

由の一つとして、車両の蛇行動によって発生する車輪のすべりの影響が考えられる。在来線の場合、急曲線の通過を容易にするため車輪路面の勾配が新幹線の1/40に比べ1/20となっている。このため車輪は幅方向へ動きやすい条件下にあり、結果として在来線レールの頭頂面は車輪によって幅方向へすべりの影響を受ける。在来線レールの場合、新幹線に比べレール長手方向へのき裂（水平裂）が比較的短いのは、一つには、このレール幅方向にすべる成分の影響によるものと考えられる。

6 結 言

累積通過トン数の異なる在来線レールの頭頂面下における塑性変形挙動が、主として集合組織の観点から解析された。これまでに明らかになっている転がり接触疲労試験片および新幹線レールの結果と比較することによって以下のことが明らかとなった。

(1) レール頭頂面下における集合組織の発達分布および極点図のパターンから、在来線レールにおける転

がり接触疲労は、すべりの影響を受けている。また、在来線レール頭頂面には、新幹線レールに比べ大きなヘルツ圧が作用している。

(2) 繰返し数に相当する累積通過トン数の増加と集合組織の発達が良く対応する。

（平成2年7月20日 第27回 X線材料強度に関するシンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) 柏谷賢治, 井上靖雄, 佐藤幸雄, 松山晋作, 材料, **36**, 786 (1987).
- 2) 柏谷賢治, 井上靖雄, 佐藤幸雄, 材料, **37**, 592 (1988).
- 3) 井上靖雄, 佐藤幸雄, 柏谷賢治, 材料, **38**, 601 (1989).
- 4) 井上靖雄, 佐藤幸雄, 柏谷賢治, 第26回 X線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, 48 (1989).
- 5) 加藤八洲夫, “レール”, p. 127 (1978) 日本鉄道施設協会