レールの腹部ぜい性き裂進展特性とその影響因子の解明[†]

浦島親行* 杉野和男**

Clarification of Influencing Factors on Rail Web-Cracking Properties and Its Propagation Characteristics of Rails

by

Chikayuki URASHIMA* and Kazuo SUGINO**

Propagation Characteristics of rail web-cracking has been discussed in connection with residual stress in rails. To clarify the effect of residual stress on rail web-cracking, several testing methods for rail web-cracking were examined first and a DWWT (Drop Weight Wedge Test) method with high accuracy and good reproducibility was newly proposed. Secondly, by using this test method, the rail web-cracking properties of several kinds of rails were evaluated. DHH rails and NHH rail which were hardened by heat-treatment showed better web-cracking properties than the standard carbon rail and low alloy rail which were straightened by a roller straightener. This is caused by the differences in distribution and longitudinal residual stress between the head and the base in rails.

Furthermore, the relationship between the propagation length of web-crack and the amount of opening value on cut mouth by saw cutting along the rail web was discussed.

Key words : Rail web-cracking, Brittle fracture, COD, Rail, Residual stress, Brittle crack propagation

1 緒 言

1983年11月, AMTRAK (米国国有旅客鉄道公社)において欧州から輸入したレールの腹部ぜい性破壊により列車が脱線, 転覆して多数の死傷者を出す事故が発生した¹⁾. 事故原因が FRA (米国連邦鉄道局)によって詳細に調査され, 直接原因はレールにはないものの, 事故レールの腹部ぜい性き裂進展特性が普通炭素鋼レールと比較して悪いことが間接原因としてあげられ²⁾, これを契機に米国に輸入されるレールの腹部ぜい性き裂進展特性を規定しようとする動きに発展した. 例えば米国では AAR (米国鉄道協会)がレールの腹部ぜい性き裂進展試験法として Fig. 1 に示すような DWWT (落重試験)を提唱し²⁾, また CIS では GOST (旧ソ連邦)規格に Fig. 2 に示すような Saw-

Fig. 2. Saw Cut method in GOST standard for evaluation of rail web-cracking properties.

Cut 法によるき裂開口変位の測定を提案してきている³⁾. こうした動向から, 各国研究機関を中心に各種レールの腹部ぜい性き裂進展特性の検討がなされてきているが, その評価法としての妥当性や, 腹部ぜい性き裂進展特性に及ぼす主因子の影響など解決すべき課題が多く残されている.

そこで著者らは腹部ぜい性き裂進展特性に関して, まずその試験法として提唱されている AAR-DWWT 法妥当性の検討, 続いて現在使用されている各種レールの評価, 主影響因子の解明およびぜい性き裂進展特性制御法などについて詳細に調査, 検討を行った.

2 供試材料および実験方法

2・1 供試材料

実験に用いたレールの概要を Table I に示す. これらのレールは圧延ままと熱処理レールに大別され, 圧延ままレールはすべてローラー矯正を受けており, 熱

Fig. 1. AAR DWWT method for web-cracking test.

† 原稿受理 平成6年1月5日 Received Jan. 5, 1994

* 正会員 新日鐵(株)八幡技術研究部 〒804 北九州市戸畑区飛幡町, Yawata R&D Lab, Nippon Steel Corp., Tobata-ku, Kitakyushu, 804

** 新日鐵(株)八幡技術研究部 〒804 北九州市戸畑区飛幡町, Yawata R&D Lab, Nippon Steel Corp., Tobata-ku, Kitakyushu, 804

Table I. Details of rail used.

Classification	Steels		BHN	Rail size	Straightening	Symbol
As-Rolled rail	Plain carbon steel		260	JIS 60N AREA132 AREA136	Roller straightening	C
	Alloy Steel	Cr-V	360	JIS 60 AREA136	Roller straightening	Cr-V
		Cr-Mo	357			Cr-Mo
Heat-Treatment rail	Slack Quenched rail (NHH)		370	JIS 60 AREA132 AREA136	Partially press straightening	NHH NSII
	In-Line slack Quenched rail (DHH)		DHH340; 340 DHH370; 370	JIS 60 AREA132 AREA136	Light roller straightening	DHH

Table II. Mechanical properties of rails used.

Steels		0.2% Proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation El (%)	Reduction of area R. A (%)	Vickers hardness Hv	Absorbed energy $_{20}E_{20}$ °C (J)
Plain carbon steel		519	902	13.7	23.2	276	11
Alloy steel rail	Cr-V	675	1127	10.5	17.6	338	7
	Cr-Mo	683	1135	14.0	25.8	345	12
Slack quenched rail (NHH)		521	911	13.3	23.6	580	10
In-line slack quenched rail (DHH)	DHH340	593	1010	13.0	24.3	307	10
	DHH370	630	1050	12.5	20.8	320	10

* Cut out position of Specimens.

処理レールはインライン熱処理レールで軽度のローラー矯正を実施している以外はすべて部分的にプレス矯正を行っている。レール形状は JIS 60, AREA 132 および 136 の 3 種類である。各レールは市販レールから採取し、いずれも JIS および AREA 規格値を満足したもので、その化学成分および規格に応じて採取した試験片の機械的性質は割愛した。ただし、腹部ぜい性き裂進展特性と関連すると思われるレール腹部の垂直方向に採取した試験片の機械的性質を Table II に示す。なお、引張試験片は平行部直径が 6 mm の JIS 4 号相似試験片、衝撃試験片は腹部中立軸のレール長手方向に U ノッチを与えた JIS 3 号試験片を用いた。それぞれの値は各レール形状によってさほど差がなかったため、おのおの 2 本づつの平均値を示す。ビッカース硬さはレール垂直方向の腹部中立軸断面を各レール形状ごとに 20 点測定し、その平均値を示す。

各レールの引張強さは合金鋼レールが最も高く、続いて熱処理レール、普通炭素鋼レールの順となっている。熱処理レールの中、NHH レールは頭部のみを熱処理しているため、腹部強度は普通炭素鋼レールとほとんど変わらない。延性は合金鋼の Cr-V レールが最も低く、他のレールはほぼ同じレベルを示す。室温

(20°C)での衝撃値は Cr-Mo レールが最も高く、熱処理レールおよび普通炭素鋼レールがほぼ同等でこれに続き、Cr-V レールが最も低い。

Fig. 3 は各レールの各部表面長手方向残留応力測定結果を示す。残留応力は 2 軸ひずみゲージをレール各部に貼付後、幅 20 mm、長さ 25 mm、板厚 4~5 mm のキャラメル形に切断して開放されたひずみ値から求めた。各レールの残留応力は 2 つに分類され、1 つはレール頭部および底部が引張、他の部分が圧縮残留応力のローラー矯正を受けたレール、もう 1 つは頭部から腹部にかけて圧縮、底部が引張残留応力を示す熱処理レールである。

Fig. 3. Longitudinal residual stress distribution of rail used.

先端は Saw-Cut ままで、特別な加工は付与していない。ぜい性き裂は Saw-Cut 端の約 0.1 mm の切欠き半径を有するコーナーを起点として発生する。実験には最大位置エネルギー 400 kgm の自家製落重試験機を使用した。

2・2・3 腹部ぜい性き裂進展特性に及ぼす影響因子の検討 腹部ぜい性き裂進展特性の主影響因子と考えられる残留応力および破壊じん性値の影響について検討した。

残留応力の影響を明らかにするために、レール残留応力を除去した場合の腹部ぜい性き裂進展特性を検討した。応力除去焼なまし (SR) は 525°C で 1 時間保定後、炉中除冷により行った。その結果、レール残留応力は Fig. 6 に例示するようにほぼゼロとなった。なお、この応力除去焼なまし条件では、レールの顕微鏡組織や機械的性質に変化がないことを別途確認している。

一方、破壊じん性値の影響については、腹部ぜい性き裂進展実験を行ったレールの腹部中立軸 (N. A) から Fig. 7 に示す要領でレール垂直方向に厚さ $B=8$ mm, 幅 $W=16$ mm の破壊じん性試験片を採取し、初期切欠き 5 mm の先端から疲労予き裂を 3 mm 付与 ($a/w=0.5$) 後 ASTM E-399 に準じて室温で破壊じん

Fig. 6. An example of residual stress distribution in an annealed rail.

Fig. 7. Specimen details for fracture toughness test.

性試験を行った。得られた破壊じん性値 (K_{Ic}) と腹部ぜい性き裂長さの相関よりその影響を調べた。

3 実験結果および考察

3・1 腹部ぜい性き裂進展特性評価法

Fig. 8 および Fig. 9 に AAR-DWWT 法の静的にくさび力を与えた場合のレール端部のき裂開口変位量 (COD) と初期切欠き先端近傍のひずみ分布測定結果を示す。腹部ぜい性き裂進展特性特性に影響を与えると考えられる初期切欠き近傍のひずみ分布は、本試験法の場合レール両面で一致せず、また COD との間に直線関係が見られず、さらにレール支持条件によっても大きく変化していることが分かる。これらの結果はレール形状が変わっても同様であった。ちなみに、

Fig. 8. An example of measured result of initial notch tip strain distribution on web by AAR DWWT method (No. 1 rail support condition, ref. Table I).

Fig. 9. An example of measured result of initial notch tip strain distribution on web by AAR DWWT method (No. 2 rail support condition, ref. Table I).

Fig. 10. An example of measured result of initial notch tip strain distribution on web by modified DWWT method.

JIS 60k の普通炭素鋼レールを用いて 5 本の腹部ぜい性き裂進展試験を行った結果、ぜい性き裂進展長さが大きくばらつき最大で 2 倍も異なった。5 本のレールの残留応力や破壊じん性値はほとんど変わらないことから、AAR-DWWT 法は再現性に乏しく、腹部ぜい性き裂進展特性評価法として基本的な問題があることが分かった。この原因は本試験法ではレールを横に寝せてくさび力を付与しているため、初期切欠き近傍にくさび力以外に予期しない曲げ応力などが負荷するためと推察された。

そこで、著者らはレールにくさび力のみが負荷する方法として、レールを長手方向に直立させてくさび力を付与する方法 (Modified DWWT) を考案し、その概要を Fig. 5 に示す。本法についても AAR-DWWT 法と同様に初期切欠き先端より 5 mm 離れた中立軸 (N. A) 上のひずみ分布を測定した。結果の一例を Fig. 10 に示す。新試験法 (Modified DWWT) の初期切欠き先端近傍のひずみ分布はレール両面でよく一致し、かつ COD 値との間に直線関係があることが分かる。また、再現性も非常に優れたものであった。したがって、本研究では新しい DWWT 法により腹部ぜい性き裂進展特性を評価した。

3・2 各種レールの腹部ぜい性き裂進展特性

Fig. 11 に海外重荷重鉄道向けに供されているレールの腹部ぜい性き裂進展試験結果を示す。Fig. 12 はき裂進展状況を例示した。各種レールの中では熱処理レール (Heat-treated R) の腹部ぜい性き裂進展長さが圧延ままレール (Roller straightening R) のそれと比較して非常に短く優れた腹部ぜい性き裂進展特性を示す。圧延ままレールの中では、特に低合金鋼レールの進展長さが非常に大きく、Cr-V の場合 Fig. 12 (b)

Fig. 11. Web crack propagation length in various rails.

(a) Heat-treated DHH370 rail

(b) As-recieved Cr-V rail

Fig. 12. An example of appearance of web crack propagation in rails.

に示すように 1 m のレール全長をき裂が貫通した。熱処理レールと圧延ままレールのき裂進展長さの違いはその進展挙動に起因し、熱処理レールの場合初期切欠き先端から発生したぜい性き裂は直ちに底部側へ進展 (Fig. 12 (a)) するのに対し、圧延ままレールでは腹部のはば中立軸を真つ直ぐにレール長手方向に進展する。この進展挙動の違いは後述するように基本的にはレール頭部と底部の長手方向表面残留応力分布の相違に関連している。

腹部ぜい性き裂進展特性のもう 1 つの評価法に Saw-Cut 法による切欠き開口変位量がある。各種レールの腹部ぜい性き裂進展長さと Saw-Cut 法による切欠き開口変位量の関係を調べ結果を Fig. 13 に示す。

Fig. 13. Relationship between web crack propagation length and COD (cut mouth opening values) in Saw Cut test.

両者には比較的良好な相関が見られ、ほぼ1本の曲線で表示できる。すなわち、切欠き開口変位量が約 3.5 mm 以下ならば腹部ぜい性き裂進展長さも約 400 mm 以下で比較的小さいが、それ以上の切欠き開口変位量になると急激にき裂進展長さが長くなることが分かる。GOST 規格では切欠き開口変位量を 3.7 mm 未満と規定しているが、その根拠は腹部ぜい性き裂進展長さが急激に長くなる限界値と関連があると推察される。この結果から、Saw-Cut 法は腹部ぜい性き裂進展特性を簡易的に評価できる一手法であるといえる。

3・3 腹部ぜい性き裂進展特性に及ぼす影響因子

Fig. 11 における各種レールの腹部ぜい性き裂進展特性の違いが何に起因しているかを明らかにするために、まず残留応力の影響について検討した。Fig. 14

Fig. 14. Comparison in web crack propagation length between as-recieved rails and annealed (SR) rails.

に残留応力除去レール (SR; 図中黒塗り) とプロパーレール (As R; 図中白抜き) の腹部ぜい性き裂進展試験結果を比較して示す。各種レールの腹部ぜい性き裂進展長さは残留応力除去によってほぼ同一となり、き裂進展長さに残留応力が大きく影響していることが分かった。

どの部位の残留応力がどのように腹部ぜい性き裂進展特性に影響しているかについて調べるために、レール頭部 (oh') と底部 (ob') の表面長手方向残留応力に着目してき裂進展長さとの関係で整理を試みた。すなわち、レール腹部をベースとした頭部と底部の表面長手方向残留応力の和 ($oh' + ob'$) が腹部ぜい性き裂を開閉口させる駆動力と考えて、その和 (き裂開口評価力; $oh' + ob'$) と腹部ぜい性き裂長さの関係で整理した。

その結果、Fig. 15 に示すように両者の間に非常に良い相関があることが分かった。本結果から、レールの腹部ぜい性き裂進展長さはき裂開口評価力によって一義的に決まることを明らかにした。すなわち、例えば腹部ぜい性き裂進展長さを 200 mm 以下に制御したい場合、き裂開口評価力を約 300 MPa 以下にする必要がある、また、逆にき裂開口評価力が分かれば腹部ぜい性き裂進展長さを予測できることが分かった。

一方、腹部ぜい性き裂の進展方向は、レール頭部と底部の表面長手方向残留応力の差 (き裂進展方向力; $oh' - ob'$) に起因していると考えて、き裂進展方向力とき裂進展方向の関係を整理した。結果を Fig. 16 に示す。本実験の範囲内では、腹部ぜい性き裂進展方向力が 80 MPa 以下ならば腹部を真っ直ぐに進展し、170 MPa 以上ならば引張側に残留応力の大きい方へ進展することが分かった。

Fig. 15. Relationship between web crack propagation length and crack opening evaluation force (Pseudo-residual stress).

Fig. 16. Relationship between web crack propagation length and crack propagation changing force.

以上の結果から、腹部ぜい性き裂進展特性はレール頭部および底部の表面長手方向残留応力に大きく影響を受け、これらの残留応力が分かればき裂進展長さおよび方向を予測でき、またこれら残留応力の制御によって腹部ぜい性き裂進展特性を制御できることを明らかにした。

腹部ぜい性き裂進展特性に影響すると考えられるもう1つの因子に破壊じん性値がある。Igweomezie⁴⁾らは腹部ぜい性き裂進展特性の評価法として、Saw-Cut法で求めたレール端部でのき裂開口量からレール残留応力を求め、残留応力値とSaw-Cut長さから K 値を求めて、 $K \geq K_{ic}$ あるいは $K < K_{ic}$ で腹部ぜい性き裂進展特性の可否を判定する方法を提案している。著者らはこの方法の妥当性を検証する意味からも腹部ぜい性き裂進展特性と破壊じん性値との相関を検討した。本来、腹部ぜい性き裂進展特性と K_{ic} 値との相関を検討するべきであるが、試験片採取位置がレール腹部であるために十分な板厚 B が採れず、 K_Q 値との関係で検討を行った。しかし、破壊じん性値と関連があるかどうかの定性的な判断は可能であると思われる。

Fig. 17は K_Q 値と腹部ぜい性き裂進展長さの関係を示す。なお、 K_Q 値の一部には平面ひずみ状態を満足する K_{ic} 値も含まれている。ちなみに、各レールの $P-\delta$ 曲線はASTM規格のE399で定義されているタ

Fig. 17. Relationship between web crack propagation length and fracture toughness.

イプⅡあるいはⅢであった。Fig. 17の破線で囲った残留応力除去焼なましレールの結果から明らかなように、 K_Q 値が約 $30 \sim 60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と大きく変わっているにもかかわらず、腹部ぜい性き裂進展長さはほぼ同じとなっている。このことから、破壊じん性は腹部ぜい性き裂進展長さにはほとんど影響しないといえる。

くさび力による腹部ぜい性き裂の進展特性はぜい性き裂の発生特性を評価する K_{ic} 値よりはむしろぜい性き裂の伝ば停止破壊じん性値 K_{Ia} 関係しており、 K_{Ia} との相関で評価する方が妥当である。しかし、本実験の場合、レールによっては初期切欠きから発生したぜい性き裂が直ちにレール底部へ貫通するため、統一的に K_{Ia} との相関では評価できなかった。また、Table IIに示した機械的性質（特に延性および衝撃値）と腹部ぜい性き裂進展長さとの間にも特に相関は認められない。

4 結 論

レール腹部ぜい性き裂進展特性の評価法および各種因子の影響について検討し、本実験の範囲で以下の結論を得た。

(1) レール腹部ぜい性き裂進展特性評価法として、AAR-DWWT法に代わる再現性のよい新試験法を開発した。

(2) 各種レールの中では熱処理レールの腹部ぜい性き裂進展特性が圧延ままレール（ローラー矯正材）のそれより優れている。

(3) Saw-Cut法と腹部ぜい性き裂進展長さの間には良い相関があり、Saw-Cut法は腹部ぜい性き裂進展特性の簡便法として使用できる。

(4) 腹部ぜい性き裂進展特性はレール頭部および底部の表面長手方向残留応力に主に影響され、破壊じん性値(K_Q)は主影響因子ではない。

(平成5年9月21日 日本材料学会第7回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) R. R. John, "Task force report; Rail failure evaluation", U. S. DOT Transportation System Center, Cambridge, 23 (1984).
- 2) O. Orringer and P. Tong, Proc. of ASCE Conf., Detroit, 62 (1985).
- 3) The State Standard of the USSR (GOST 18257-82), Crp. 2 (1983).
- 4) J. O. Igweomezie, S. L. Kennedy and N. R. Gore, Proc. of Fifth Int. Heavy Haul Conf., Beijing, 256 (1993).
- 5) C. Urashima and K. Sugino, Proc. of Fifth Int. Heavy Haul Conf., Beijing, 243 (1993).
- 6) Annual Book of ASTM Standards, Part 31, 955 (1972).