

論文 高繰り返し数領域のレール疲労寿命を考慮した レール交換周期延伸の検討

水谷 淳¹・細田 充²・片岡 宏夫³・山本 隆一⁴

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 レールメンテナンス (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)
E-mail: jun.mizutani.49@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 レールメンテナンス (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)
E-mail: hosoda.mitsuru.75@rtri.or.jp

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 軌道構造 (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)
E-mail: kataoka.hiroo.77@rtri.or.jp

⁴正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 レールメンテナンス (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)
E-mail: yamamoto.ryuichi.22@rtri.or.jp

レールの疲労寿命は曲げ疲労試験によりレール発生応力と破断に至るまでの载荷繰り返し数の関係から推定されてきた。さらに、これまでの疲労試験は実軌道での発生応力よりも高い応力条件にて行われてきた。しかしながら、より高精度な寿命推定を行うためには実軌道により近い応力条件の試験を行う必要がある。そこで、これまで実施されていない低い応力条件での曲げ疲労試験を実施し、レール交換周期延伸の可能性について検討した。その結果、湿潤状態での平面曲げ疲労試験において200万回を超える载荷繰り返し数で破断に至るケースが生じた。また、一連の結果を用いてS-N曲線を推定した結果、過去に推定したS-N曲線と比較して若干上回る傾向にあり、累積通過トン数によるレール交換周期延伸の可能性が認められた。

Key Words : rail, S-N curve, fatigue life

1. はじめに

レール損傷を防止するための管理手法の一つとして、レールの寿命に達する前に周期的にレール交換が行われている。レールの定期交換については曲げ応力によるレール底部からの疲労損傷に着目した寿命評価を行い、累積通過トン数(車軸軸重×車軸通過回数)によりレール交換周期を定めている。さらに、レール削正による寿命延伸効果を見込んだレール交換周期が提案され、実用に供されている¹⁾。また、レールの疲労寿命は、曲げ疲労試験によりレール発生応力と破断に至るまでの载荷繰り返し数の関係から推定されてきた。

既往の研究における溶接部を含む経年レールの曲げ疲労試験結果およびその結果から推定したS-N曲線を図-1に示す。経年レールの疲労強度はレールの錆肌による凹凸に影響されるため、溶接部と中間部で差異はなかった。また、载荷繰り返し数200万回を境に220~240 N/mm²程度の応力全振幅で破断、未破断が分かれる傾向を示した。しかしながら、実軌道ではこの200万回時間強度よりも

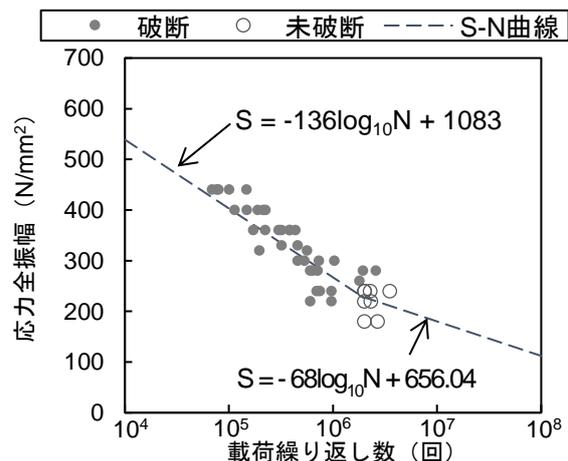


図-1 既往の研究で得られたS-N曲線¹⁾

低い応力域でレールが使用されており、その応力域での疲労に関する知見は少ない。これまでの、低い応力域でのS-N曲線には中間マイナー則(S-N曲線の傾きを1/2としたマイナー則と修正マイナー則の中間的なもの)を適用してきた。そのため、より高精度な寿命推定を行うた

めには、実軌道により近い応力条件の試験を行う必要があると考える。

そこで、本研究では、これまで実施されていない、200万回時間強度（220～240 N/mm²）よりも低い応力域である高繰り返し数領域における経年レールの曲げ疲労試験を実施して基礎的なデータを取得し、更なるレールの交換周期延伸の可能性について検討した。

2. 経年レールの疲労試験

図-1に示した疲労データを取得した際には、実レールを用いた曲げ疲労試験を行っているが、これを高繰り返し数領域に適用する場合、曲げ疲労試験機の载荷周波数が3Hz程度と低いためレール1本あたりの試験に時間を要する。そこで、実レールを用いた曲げ疲労試験に併せて、短時間で効率的にデータを取得できる要素試験片を対象とした高周波数での平面曲げ疲労試験を実施した。一般に10⁷回以下の疲労では材料の表面が起点となるのに対し、ギガサイクル疲労（10⁷回以上）では材料の内部が起点となることが報告されている²⁾。しかしながら、錆肌のレールでは表面効果により圧延肌と比べて疲労強度が低下することが知られている。さらに、腐食環境下で累積通過トン数が数億トンでレール表面の腐食孔を起点としてレールが折損する事例があり、これを繰り返し数に換算すると10⁷回オーダーの繰り返し数である。以上のことから、本研究では10⁷回以上においても表面が起点となる可能性が高いと考えた。

また、室内疲労試験は乾燥した室内に設置された試験機を用いて疲労試験を行っているが、実際のレールは風雨に曝される暴露環境下に数十年間敷設されており一般的な室内試験とは環境が異なっている。そこで、通常の乾燥状態での要素試験片を用いた平面曲げ疲労試験の他に、レールが暴露環境下で敷設されていることを考慮し、要素試験片に対して水を滴下した湿潤状態の平面曲げ疲労試験方法を構築し、試験を実施した。

なお、以下の試験では、敷設年数25年程度、累積通過トン数約8億トンの経年60kgレールを用いた。

(1) 実レールの曲げ疲労試験

実レールを図-2のようにスパン1,300mmでレール曲げ疲労試験機に据え付け、乾燥状態で片振りによる4点曲げの疲労試験を行った。試験本数は6本とし、うち2本はテルミット溶接部、他の4本は溶接部を含まない中間部の経年レールとした。载荷点および支持部でのフレッシング疲労（試験片と試験機の各接点との間に発生する微細な相対すべりにより生じる疲労破壊）を防止するため、各接点は回転可能なローラーとしている。応力

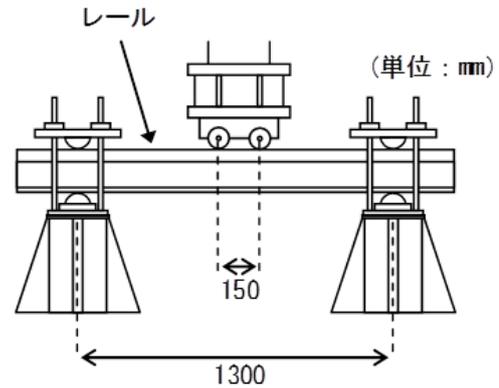


図-2 実レールの曲げ疲労試験の詳細

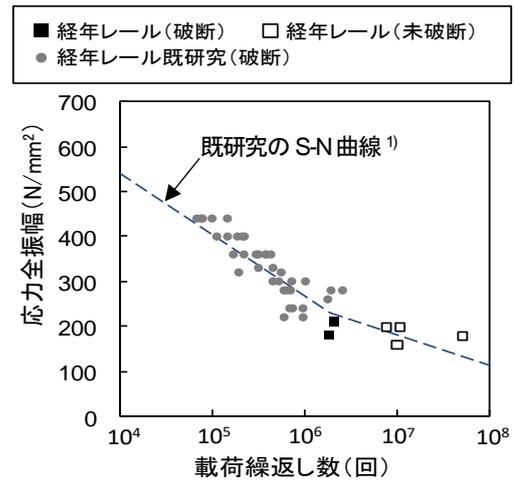


図-3 実レール曲げ疲労試験結果

全振幅は既研究の200万回時間強度（220～240 N/mm²）よりも低い応力域160～210 N/mm²とした。

試験結果を図-3に示す。経年レールの疲労強度はレールの錆肌による凹凸に影響されるため、溶接部と中間部で差異はないとの知見から¹⁾、溶接部と中間部を分けずにデータをプロットした。6本中4本は未破断となった。载荷繰り返し数1,000万回を超えても未破断となったレール試験片は3本あり、うち1本は180 N/mm²の応力全振幅、载荷繰り返し数5,000万回で未破断であった。

(2) 要素試験片の平面曲げ疲労試験

平面曲げ疲労試験は、図-4のように経年レール底部から切り出した要素試験片をレール底面が引張り側となるように試験機に据え付け、片振りの試験を実施した。载荷周波数は20～25Hzである。乾燥状態における試験を16本、湿潤状態における試験を21本行った。湿潤状態における試験では、図-4(c)に示す斜線部に、水0.5mm³を12秒に1回ずつ滴下した。

図-5に試験結果を示す。図-5には図-3の実レールの曲げ疲労試験結果も併せて記載している。乾燥状態での200万回時間強度は360 N/mm²程度であり、実レールのそれが220～240 N/mm²程度であるのに対して、高い時間

3. レール疲労寿命の試算

前章の結果より、交換周期延伸の可能性が認められたため、過去に構築した累積損傷被害則に基づく寿命評価法¹⁾を用いてレールの疲労寿命の試算を行った。図-7に寿命予測のフローチャートを示す。ここではレール溶接部を仮定し、疲労被害の累積とともにその凹凸も列車荷重の累積に比例して大きくなるとしている。今回実施した試算において疲労強度を決定する際、本研究で得られた図-6のS-N線図を用いた。

疲労寿命予測の計算条件および種々の数値は主に参考文献1)によるものとした。2種類の車種を想定し、静止輪重はそれぞれ電気機関車：79 kN，交直流特急電車：59 kNとした。また、列車速度はそれぞれ電気機関車：100km/h，交直流特急電車：130km/hとした。レール溶接部の凹凸に応じたレール曲げ応力の算出には表-1に示すレール溶接部曲げ応力の推定式を用いた。軌道条件はバラスト軌道、浮きまくらぎありを想定している。また、累積通過トン数の増大とともにレール溶接部レール頭頂面の局所的な凹凸が大きくなる条件を仮定した。凹凸進み量は過去に実施した測定結果を踏まえ、エンクローズアーク溶接部を0.1 mm/億トン、それ以外の溶接部を0.05 mm/億トンとした¹⁾。なお、ここではレール凹凸の削正はなしとしている。また、S-N曲線の破壊確率は0.1%とした。

表-2にレール疲労寿命の推定結果を示す。今回の計算条件下においては、列車種別による疲労寿命推定結果の違いはほとんどなかった。凹凸進み量が大きいエンクローズアーク溶接部における推定寿命は50kgNレールで7億トン程度、60kgレールで10億トン程度であった。これは、従来の在来線におけるレール交換周期である、50kgNレール：6億トン、60kgレール：8億トンを上回る数値である。また、表-2の結果と既往の研究で得られたS-N曲線から求めた疲労寿命の推定結果¹⁾を比較した結果を図-8に示す。本研究で得られたS-N曲線から求めた推定寿命は、既往の研究で得られたS-N曲線から求めたそれを50kgNレールでは約1割、60kgレールでは約3割上回ることが分かる。このことから、今回の計算条件下においては、レールの累積通過トン数による交換周期の延伸の可能性が示された。

ただし、実際に交換周期の延伸を検討する場合には、対象とする実レールの疲労試験も併せて実施するとともに、使用する車両や軌道条件に応じたレール曲げ応力推定式を用いて疲労寿命予測をする必要がある。

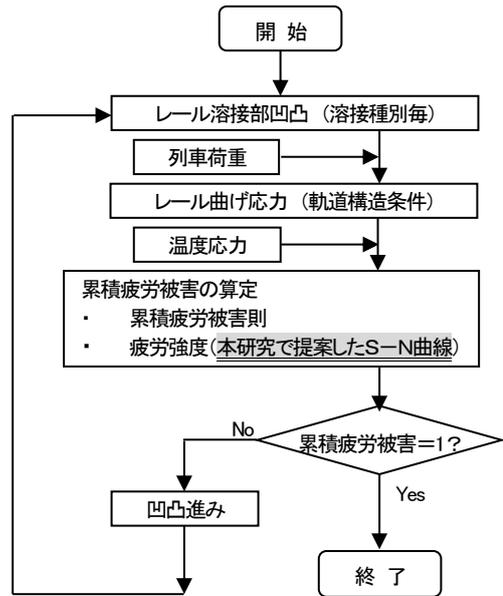


図-7 寿命予測フローチャート

表-1 レール溶接部曲げ応力の推定式

車両	レール種別	レール曲げ応力推定式 (N/mm ²)
電気機関車	60kg	$y = 34.47V + 8.45W + 53.04$
	50kgN	$y = 39.80V + 10.77W + 66.41$
交直流特急電車	60kg	$y = 40.08V + 10.69W + 42.84$
	50kgN	$y = 45.50V + 13.28W + 53.61$

レール溶接部凹凸モデル

表-2 疲労寿命の推定結果 (億トン)

車両	レール種別	凹凸進み	
		0.05mm/億トン	0.1mm/億トン
電気機関車	60kg	14.0	9.7
	50kgN	9.8	7.0
交直流特急電車	60kg	13.7	9.3
	50kgN	10.1	7.0

*バラスト軌道、浮きまくらぎを想定

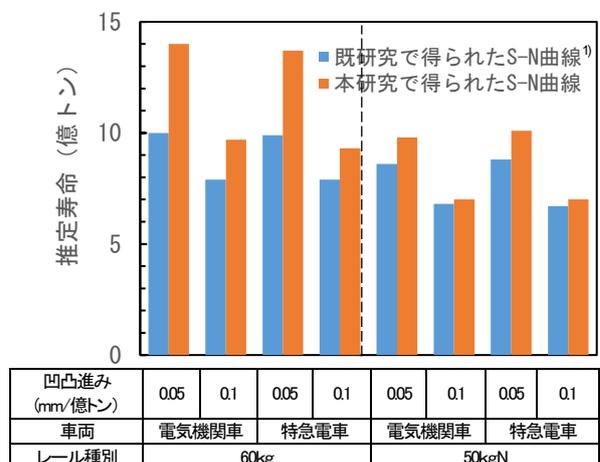


図-8 疲労寿命の推定結果の比較

4. おわりに

本テーマでは、これまでに十分なデータが取得されていない 200 万回時間強度よりも低い応力域における高繰り返し数領域の疲労試験を実施し、レール交換周期の延伸の可能性について検討した。その結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 要素試験片の平面曲げ疲労試験結果では、実レールの曲げ疲労試験と比べて、寸法効果に起因し、曲げによる腐食孔まわりの実効的な応力勾配が異なっているため、後者の時間強度は前者の 70%程度となった。
- (2) 乾燥状態での平面曲げ疲労試験では 360N/mm²より低い応力全振幅にて 200 万回を超える载荷繰り返し数で破断に至らなかったが、湿潤状態では 340 N/mm²以下の応力全振幅にて 200 万回を超える载荷繰り返し数で破断に至るケースが生じた。
- (3) 200万回を超える载荷繰り返し数の試験結果を用い

てS-N曲線を推定した結果、過去の経年レールのS-N曲線と比較して上回る傾向にあった。

- (4) 実際に交換周期の延伸を検討する場合には、対象とする実レールの疲労試験も併せて実施するとともに、使用する車両や軌道条件に応じたレール曲げ応力推定式を用いて疲労寿命予測をする必要がある。

参考文献

- 1) 弟子丸将, 片岡宏夫, 阿部則次, 大野宗伸: 経年ロングレールの疲労寿命推定, 鉄道総研報告, Vol.20, No.4, pp.5-10, 2006
- 2) 中村孝: 金属疲労の基礎知識, 鑄造工学, 第 79 巻, 第 2 号, pp.58-69, 2007
- 3) 日本機械学会: 金属材料 疲労強度の設計資料 I,

(2018.4.6 受付)

STUDY ON THE EXTENTION FOR REPLACEMENT PERIOD OF RAIL TAKEING INTO ACCOUNT THE FATIGUE LIFE OF RAIL ON THE REGION OF THE HIGH CYCLIC NUMBER

Jun MIZUTANI, Mitsuru HOSODA, Hiroo KATAOKA and Ryuichi YAMAMOTO

To estimate the service life of rails, it was necessary to clarify the relationship between the stress and the number of cycles to failure through the bending fatigue test. In the past, bending fatigue tests were conducted with higher stress level than the stress generated in the real track. In this study, we carried out bending fatigue test on laid rails and test pieces taken out from the bottom of the rails with low stress.

In bending fatigue tests using test pieces in a wet environment, they fractured more than two million loading cycles. We estimated S-N curve using the test results which were given in the region of the high cyclic number. As a result, it exceeded the old one. From the above, possibility of extending the rail replacement period is suggested.