

# 高繰り返し数領域の試験を反映した新たなレール交換周期

水谷 淳\* 細田 充\* 山本 隆一\*

The New Rail Replacement Period Reflecting the Results of Bending Fatigue Test in High-Cycle Regions

Jun MIZUTANI Mitsuru HOSODA Ryu-ichi YAMAMOTO

To estimate the service life of rails, it is necessary to clarify the relationship between the stress and the number of bending 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 tests under low stress level condition and estimate the service life of rails reflecting the results obtained in high cycle regions. As a result, possibility of extending the period of rail replacement is suggested.

キーワード：レール，レール交換周期，高繰り返し疲労，曲げ疲労試験

## 1. はじめに

レールは軌道を構成し列車の走行安全を確保するための重要な部材であり、レール損傷を防止するための保守管理が重要となっている。レール損傷を防止するための管理手法の一つとして、レールが寿命に達する前に周期的にレール交換を実施している。レール交換が必要になる要因としては、曲線部におけるレールの摩耗、頭部横裂や底部の腐食・電食等に起因するレール損傷、そして累積通過トン数（車軸軸重×車軸通過回数）による定期的な交換がある。この定期的なレール交換については、過去に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、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、実際に適用されている<sup>1)</sup>。しかしながら、実際のレール交換には多大なコストを要しており、メンテナンスコストを削減するため

に、レール交換周期の更なる延伸が望まれている。

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載荷繰り返し数の関係から推定されてきた。既往の研究<sup>1)</sup>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。S-N曲線とは、ある繰り返し応力を負荷したとき、部材が何回の繰り返しで破断するかを示した曲線である。既往の研究<sup>1)</sup>において以下のように報告されている。

- (1) 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。
- (2) 載荷繰り返し数 200万回の疲労強度（以下、200万回時間強度とする）は応力全振幅で 220~240N/mm<sup>2</sup>程度であった。

しかしながら、実軌道ではこの 200 万回時間強度よりも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。これまででは、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、これまでよりも実軌道に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低い応力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、レール交換周期の更なる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<sup>2)</sup>

図1に示した疲労データを取得した際には、実レールを対象とし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、曲げ疲労試験機の載荷

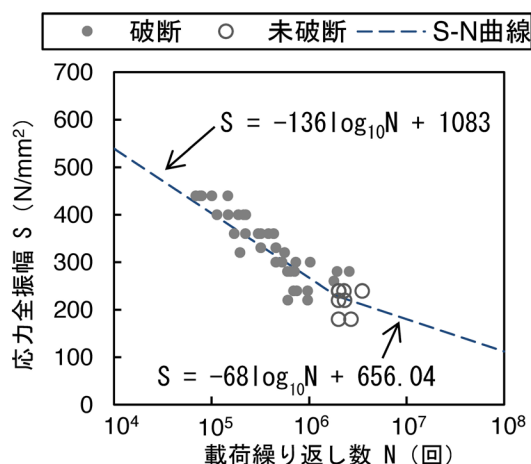


図1 既往の研究で得られた S-N 曲線<sup>1)</sup>

\* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

周波数が3Hz程度と低いため、 $10^7$ 回载荷に約38.5日と長期間を要する。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(20~25Hz程度)での平面曲げ疲労試験を実施した。一般に $10^7$ 回以下の疲労では材料の表面が起点となるのに対し、 $10^7$ 回以上の繰り返し数では材料の内部が起点となることが報告されている<sup>3)</sup>。しかしながら、鋳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、腐食環境下において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、これらの破断までの期間を繰り返し数に換算すると $10^7$ 回オーダーの繰り返し数であった。以上のことから、本研究では $10^7$ 回以上の载荷繰り返し数においても材料表面が破壊起点となる可能性が高いと考えた。

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。

### 2.1 実レールの曲げ疲労試験

図2のように実レールをスパン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。また、本試験機は荷重制御により動作しており、レール底部に発生する応力を式(1)で換算して疲労試験を実施した。

$$F = \frac{4\sigma Z}{L - L_1} \quad (1)$$

ただし、 $F$ : 载荷荷重、 $\sigma$ : レール底部発生応力  
 $Z$ : 断面係数、 $L$ : 支点間距離、 $L_1$ : 载荷点距離

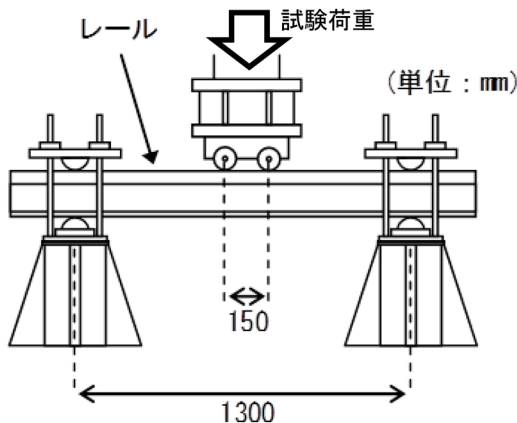


図2 実レールの曲げ疲労試験

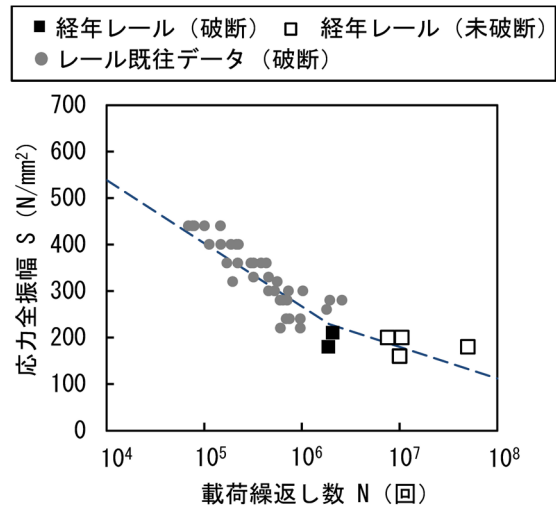


図3 実レール曲げ疲労試験結果

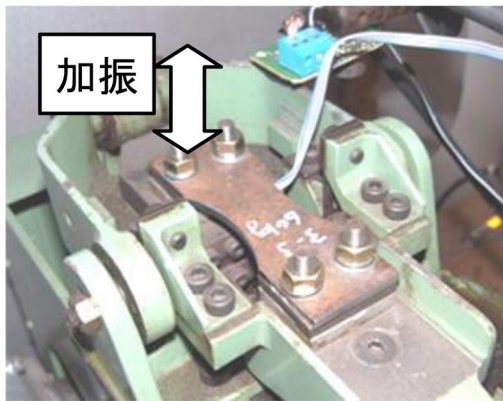
最小試験応力は $30\text{N/mm}^2$ とし、応力全振幅が既研究の200万回時間強度( $220\sim 240\text{N/mm}^2$ )より低い応力域である $160\sim 210\text{N/mm}^2$ となるように試験荷重を設定した。

試験結果を図3に示す。前述のように、経年レールの疲労強度はレールの鋳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<sup>1)</sup>、溶接部と中間部を分けずにデータをプロットした。レール6本中4本は未破断となった。载荷繰り返し数 $10^7$ 回を超えても未破断となったレールは3本あり、うち1本は $180\text{N/mm}^2$ 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。

### 2.2 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部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。本試験機は、クランク機構による曲げ角度一定運転をしており、要素試験片に単軸ひずみゲージを貼り付けて、目標とする応力全振幅となるように、試験機の曲げ角度を設定して疲労試験を実施した。载荷周波数は20~25Hzである。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。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。なお、湿潤状態における試験では、図5に示す斜線部に、水 $0.5\text{mm}^3$ を12秒に1回ずつ滴下した。

図6に試験結果を示す。図6には図3の実レールの



(a) 乾燥試験



(b) 湿潤試験

図4 要素試験片の平面曲げ疲労試験

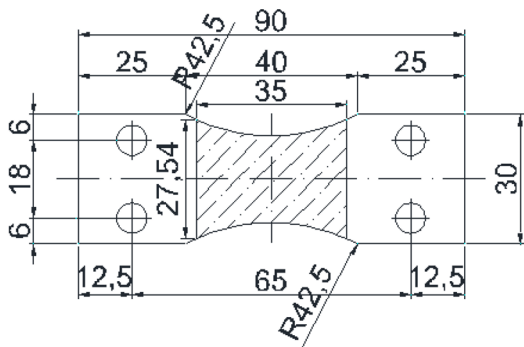


図5 要素試験片寸法

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 $360\text{N/mm}^2$ 程度であり、実レールの $220\sim 240\text{N/mm}^2$ 程度に対して、高い時間強度を示している。また、 $360\text{N/mm}^2$ より低い応力全振幅では荷重繰り返し数5,000万回で破断に至らなかった。一方、湿潤条件下では、 $270\sim 340\text{N/mm}^2$ の応力全振幅において200万回、 $250\text{N/mm}^2$ 近傍にて2,000万回を超える荷重繰り返し数で破断に至るケースが生じた。また、200万回以下の荷重繰り返し数では乾燥状態と同程度の結果となった。

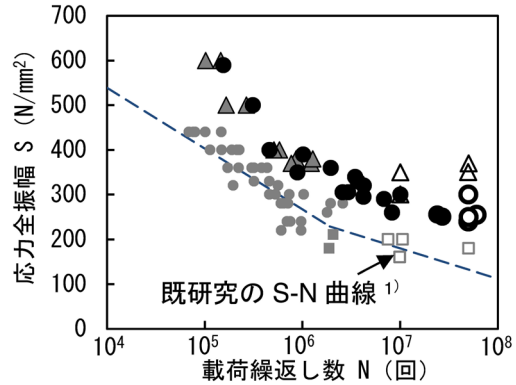


図6 要素試験片の平面曲げ疲労試験結果

### 2.3 曲げ疲労試験に関する考察

各条件の試験結果を比較すると、以下の特徴がある。

- (1) 平面曲げ疲労試験結果は200万回以下の荷重繰り返し数では乾燥状態と湿潤状態で概ね同等であった。
- (2) 乾燥状態での平面曲げ疲労試験では $360\text{N/mm}^2$ より低い応力全振幅にて200万回を超える荷重繰り返し数で破断に至らなかったが、湿潤状態では $340\text{N/mm}^2$ 以下の応力全振幅にて200万回を超える荷重繰り返し数で破断に至るケースが生じた。
- (3) 実レールの時間強度は、要素試験片の結果に比べて低下し、70%程度となった。

これらについて以下に考察する。

乾燥状態と湿潤状態の平面曲げ疲労試験結果において、200万回以下の荷重繰り返し数では荷重試験時間が短い(約22時間)ため、湿潤状態の影響が表れていないと考えられる。

実際のレールは風雨に曝される暴露環境下に長期間敷設されているが、これを試験で厳密に再現することは難しい。ただし、湿潤状態を再現した試験は一種の腐食疲労試験となっており、乾燥状態での試験に比べて実態をより反映していると考えられる。

要素試験片と実レールで試験結果に差異がみられるのは、寸法効果<sup>4)</sup>により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ことが一つの要因として考えられる。以上のことから、試験片による試験結果に対し、その70%の応力全振幅を実レールの時間強度とみなした。

要素試験片の疲労試験結果の70%の値をプロットし図7に示す。また、本研究では高繰り返し領域のレール疲労寿命に着目しているため、200万回時間強度以下の範囲におけるS-N曲線を対象とし、最小二乗法によりS-N曲線を推定した(図7中の赤線)。過去に想定した

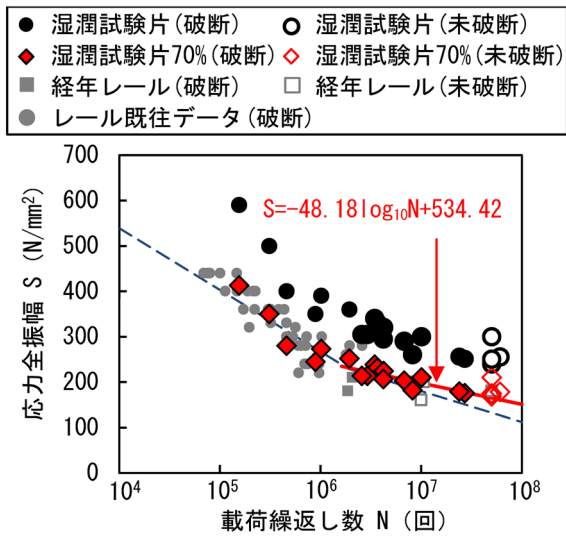


図7 S-N 曲線の比較

在来線経年レールの S-N 曲線（破壊確率 50%）<sup>1)</sup> と比較すると、200 万回時間強度以下の範囲において、今回の試験結果から得た S-N 曲線が過去の S-N 曲線（図7中の破線）を若干上回る傾向が認められた。このことからレールの累積通過トン数に基づく現行の交換周期には延伸の可能性が示唆される。

### 3. レール疲労寿命の試算<sup>2)</sup>

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<sup>1)</sup>を用いてレールの疲労寿命の試算を行った。図8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想定し、その凹凸が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、既研究および本研究で得られた図7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既研究<sup>1)</sup>によるものとした。軌道上を列車が走行したときに発生するレール底部曲げ応力を推定するため、図9に示すレールを有限間隔支持とする軌道応答モデルを用いた。計算条件として、列車荷重、軌道構造およびレール頭頂面凹凸量を考慮している。今回の計算では、2種類の車種を想定し、静止輪重をそれぞれ電気機関車：79kN、交直流特急電車：59kN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、浮きまくらぎが1mmある状態を想定した。また、累積通過トン数の増大とともにレール溶接部のレール頭頂面は局所的な凹

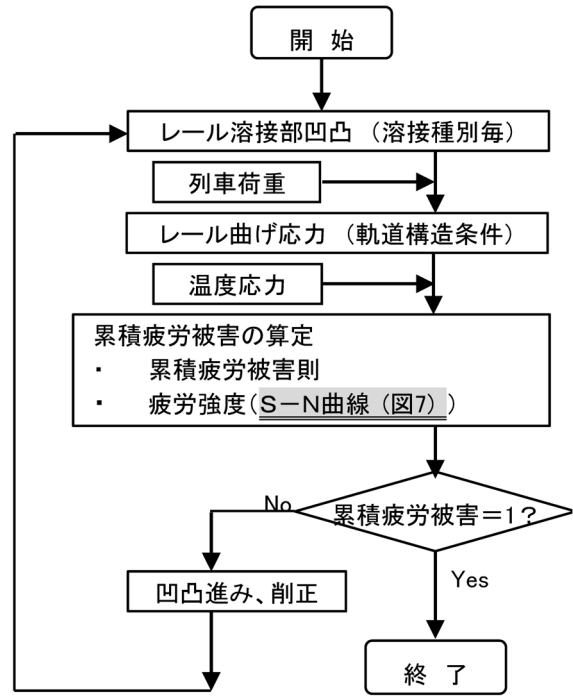


図8 寿命予測フローチャート

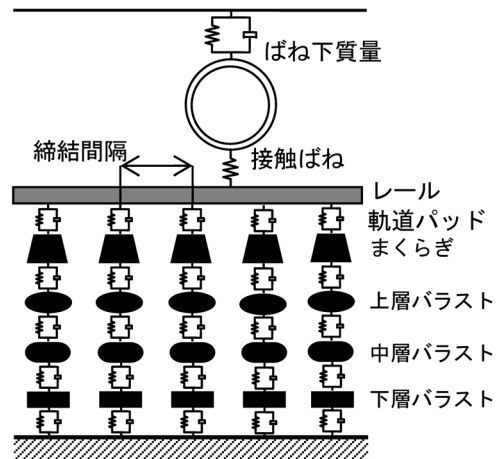


図9 軌道動的応答モデル

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 <sup>2</sup> )
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 レール削正を実施しない場合のレール疲労寿命の推定結果 (単位:億トン)

車両	レール種別	凹凸進み (mm/億トン)	
		0.05	0.10
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

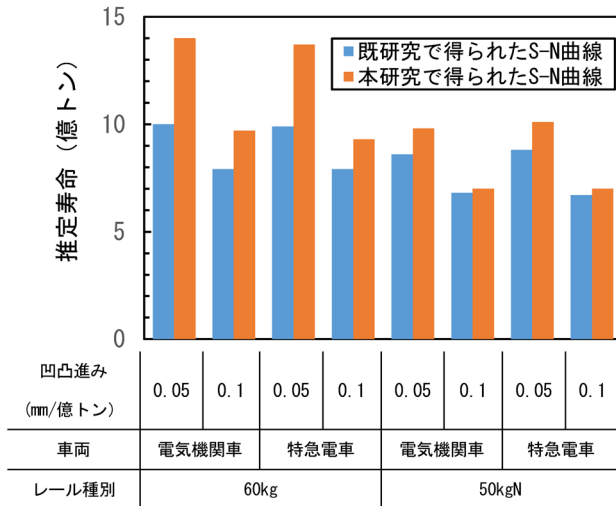


図10 疲労寿命の推定結果の比較 (S-N曲線の違い)

表3 レール削正を実施した場合のレール疲労寿命の推定結果 (単位:億トン)

車両	レール種別	凹凸進み (mm/億トン)	
		0.05	0.10
電気機関車	60kg	23.7	15.7
	50kgN	14.9	10.5
交直流特急電車	60kg	24.6	15.4
	50kgN	16.4	10.9

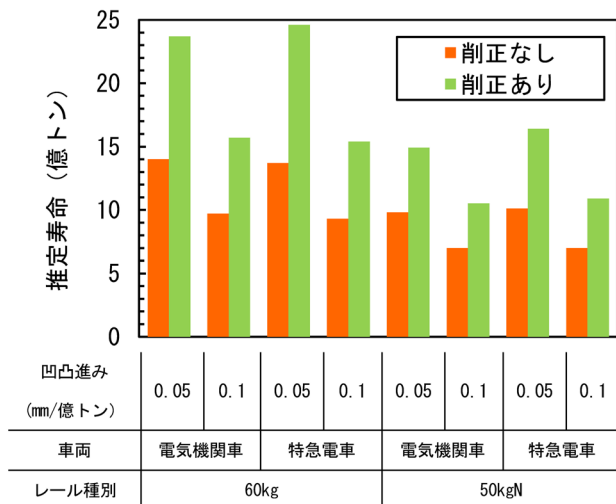


図11 疲労寿命の推定結果の比較 (レール削正の有無)

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0.1mm/億トン、それ以外の溶接部を0.05mm/億トンとした<sup>1)</sup>。また、レール削正の有無をパラメータとし、レール削正を実施する場合には、通過トン数1億トン毎に0.08mm削正した。

疲労寿命を算出する際に破壊確率を決める必要があるが、過去に在来線のレール寿命を算出した際と同様に0.1%とした<sup>1)</sup>。なお、前章で推定したS-N曲線は破壊確率50%のものであり、これを用いて0.1%破壊確率S-N曲線を算出する必要がある。算出方法には標準偏差一定の場合と変動係数一定の場合の2方法があるが、過去に実施した検討により標準偏差を一定とする方法が安全側の評価となることが判明している<sup>5)</sup>。そこで、本研究で得られた50%破壊確率S-N曲線から標準偏差一定の場合における0.1%破壊確率S-N曲線を算出した。

表2に本研究で得られたS-N曲線を用いて、レール削正を実施しない場合のレール疲労寿命を推定した結果を示す。また、図10に本研究と従来のS-N曲線の違いによるレール疲労寿命の推定結果を比較して示す。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。さらに、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割上回った。

表3にレール削正を実施した場合のレール疲労寿命を本研究で得られたS-N曲線を用いて推定した結果を示す。また、図11にレール削正の有無によるレール疲労寿命の推定結果を比較して示す。定期的なレール削正を実施した場合、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10億トン程度、60kgレールで15億トン程度であった。このことから、定期的なレール削正によって更なるレール交換寿命の延伸が可能と考えられる。

以上の結果から、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、より厳密な検討を実施する場合には、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。

また、今回の試算では、凹凸進み量を過去に実施した測定結果より、エンクローズアーク溶接部を0.1mm/億トンとした。しかしながら、現行のエンクローズアーク

溶接部は耐摩耗性を向上させる観点からレール頭頂部に硬化肉盛棒を適用していることから、凹凸進み量が低減している可能性がある。よって、今後レール溶接部の凹凸進み量のデータを調べることにより、更なる交換周期の延伸を図ることが可能である。

#### 4. まとめ

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) 実レールの曲げ疲労試験と要素試験片の平面曲げ疲労試験の結果を比較したところ、前者の時間強度は後者の70%程度となった。この理由として、寸法効果に起因して、曲げによる腐食孔まわりの実効的な応力勾配が異なることが挙げられる。
- (2) 乾燥状態での平面曲げ疲労試験では $360\text{N/mm}^2$ より低い応力全振幅にて200万回を超える載荷繰返し数で破断に至らなかったが、湿潤状態では $340\text{N/mm}^2$ 以下の応力全振幅にて200万回を超える載荷繰返し数で破断に至るケースが生じた。
- (3) 200万回時間強度以下の高繰返し数領域の曲げ疲労試験結果を用いてS-N曲線更新し疲労寿命を推定した結果、既往研究の推定値と比較して上回る傾向にあった。
- (4) より厳密な検討を実施する場合には、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。

#### 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) 水谷淳, 細田充, 片岡宏夫, 山本隆一:高繰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, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第22号, pp.173-177, 2018
- 3) 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
- 4) 日本機械学会:金属材料 疲労強度の設計資料 I (改訂第2版), 日本機械学会, 2003
- 5) 片岡宏夫, 阿部則次, 若月修, 石田誠:レールの疲労寿命, 日本鉄道協会誌, 42巻4号, 2004