

腐食・電食環境下におけるレールの余寿命評価

細田 充* 片岡 宏夫*
高須 豊** 弟子丸 将*

Experimental Study on the Prediction of Fatigue Life of Corrosion Rail

Mitsuru HOSODA Hiroo KATAOKA Yutaka TAKASU Tadashi DESHIMARU

The maintenance work on rail defects, especially rail corrosion, is very important to ensure railway safety. Cross section areas of rails at railroad crossings or tunnels were reduced with time, due to corrosion. Especially, rail of reduction of railbase could result in catastrophic failures. Clarification of the fatigue life of corrosion rail is very helpful to making up a maintenance plan. In this paper, the authors analysed the relation between S-N curve and the corroded amount of railbase based on the result of fatigue test of full-scale corrosion rail. Further based on the analysis result, the authors estimated the fatigue life of corrosion rail taking the corrosion amount of railbase as a parameter.

キーワード：レール，腐食，電食，疲労寿命

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は重要である。レールにしばしば発生する損傷として、腐食および電食による折損がある。湿潤もしくは塩分の飛散が多い場所およびレールに流れる電流が漏れやすい場所といった環境、特にトンネルおよび踏切では、レールを一定期間使用していると、これらの影響で腐食による肌荒れや断面減少が生じる。さらに列車荷重の作用により断面減少が生じた部分に応力が集中し、最終的にレールが破断にいたる可能性がある。一部の鉄道事業者は超音波探傷等の検査¹⁾によりレール底部の腐食量を把握し、必要に応じてレール交換を行っているが、腐食および電食に対するレールの検査周期や処置の適正化のために腐食・電食によるレールの余寿命の把握が求められている。

鉄道総研では過去に、腐食および電食レールの疲労試験結果と腐食量の測定結果の関係を調べ、余寿命の試算を行っている。しかし、試験数が少なく、推定精度の向上が求められていた²⁾。一方、鉄道以外の腐食に関する研究では、構造物の鋼材部材に対し腐食量を測定し、その部材をモデル化した解析による形状効果の検討³⁾や腐食量の測定精度に関する検討⁴⁾、またコンクリートと鋼材の境界の腐食の挙動に関する検討⁵⁾等が行われているが、レールの腐食と余寿命に関する十分な知見があるとは言い難い。

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室
** 軌道技術研究部 軌道構造研究室（現 東海旅客鉄道株式会社）

以上のことを踏まえて本研究では、レールの腐食量の測定結果と腐食・電食レールの曲げ疲労試験結果の関係を調べ、腐食量に応じた S-N 曲線を求めて、腐食・電食レールの管理手法に寄与する余寿命評価を行った。なおトンネル、踏切等の腐食環境下にあるレールは、腐食と電食の寄与は明確に区別されない場合も多いので、以下では腐食および電食レールを全て「腐食レール」と称する。

2. 腐食レールの曲げ疲労試験

腐食レールの S-N 曲線を推定するため、踏切内において断面減少がみられた腐食レールを収集し、曲げ疲労試験を実施して応力全振幅に対する破断に至るまでの繰返し数の関係を把握した。収集した腐食レールは全て在来線の踏切に敷設されていた 50kgN レール計 36 本である。トンネルと比較し、踏切のレールの折損は局所的な減肉が大きいのが多いため本研究の試験レールとした。この腐食レールは腐食量による曲げ疲労強度の影響度の差異を把握するために、腐食の程度が段階的に異なるものを収集した。また、別途、実際の営業線で過去に折損した腐食レール（以下、「折損レール」という）計 15 本について、腐食量の分析を行った。これらのレールの概要を表 1 に示す。

表 1 試験レールおよび折損レールの概要

| | 試験レール | 折損レール |
|--------------|----------------|-----------|
| レール種別 | 50kgN レール | |
| 延長 (m) | 1.5 | 0.2 ~ 0.9 |
| 本数 | 36 | 15 |
| 直線・曲線 | R400 以上の曲線, 直線 | |
| 経過年数 (年) | 7 ~ 42 | 5 ~ 29 |
| 累積通トン (千万トン) | 4 ~ 50 | 11 ~ 50 |

特集：軌道技術

図1にレールの曲げ疲労試験の概要を示す。支点間のスパンは1300mm、荷重点間隔は150mmであり、表2に示す試験条件で曲げ疲労試験を実施した。500万回(一部200万回)荷重後に破断していなかった場合に「未破断」と判定した。試験の結果、腐食レール36本中31本が破断に至った。

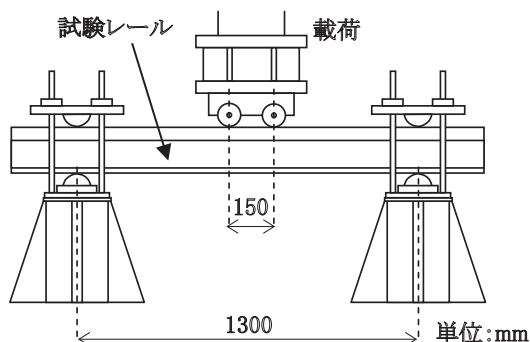


図1 曲げ疲労試験の概要

表2 試験条件

| 項目 | 試験条件 |
|--------|--------------------------|
| 試験方法 | 片振り4点曲げ |
| 最小試験応力 | 30N/mm ² |
| 荷重周波数 | 1.0～3.0Hz |
| 応力全振幅 | 160～340N/mm ² |

3. 底部および底側部の腐食量測定

レールの腐食の進展状況、すなわち各部の腐食量がレールの余寿命に寄与すると考えられることから、曲げ疲労試験を実施した試験レールおよび折損レールの各部の腐食量を測定した。本研究で対象とした腐食量は、断面減少率、粗さ等の指標も考えられるが、鉄道事業者が現在、腐食量の管理指標として用いているレール底面の基準線に対する最大減少量(以下、「底部腐食量」という)と、過去の研究²⁾により腐食レールの疲労強度との相関が示されているレール底側部の局所的なレール底部幅方向の減肉量(以下、「底側部腐食量」という)とした(図2)。測定は、レールの表面に付着した錆をサンドブラストで除去してレールの表面の素地を露出させ、レーザー変位計により各々腐食量を測定した(図3)。なお、底部腐

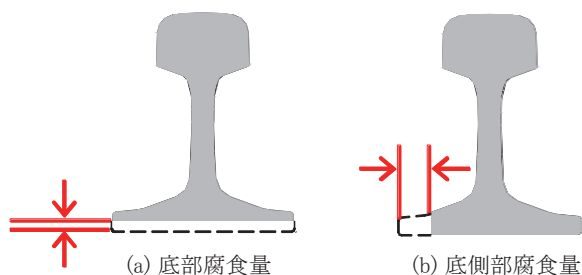
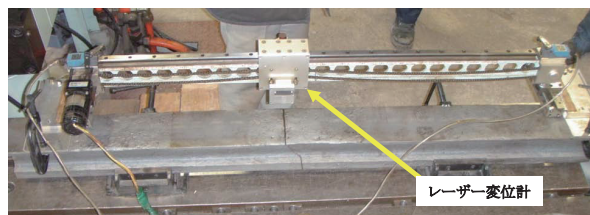
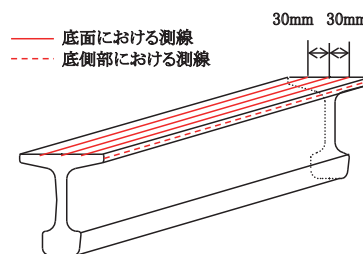


図2 各種腐食量



(a) 測定状況 (レール底面凹凸量)



(b) 測定位置

図3 レーザー変位計による測定概要

食量はレール底面中央と左右に各30mm離れた位置の3測線を測定し、底側部腐食量については、レーザー変位計による測定のほか定規による測定も行った。測定結果の例として、図4に底側部腐食量の結果を示す。

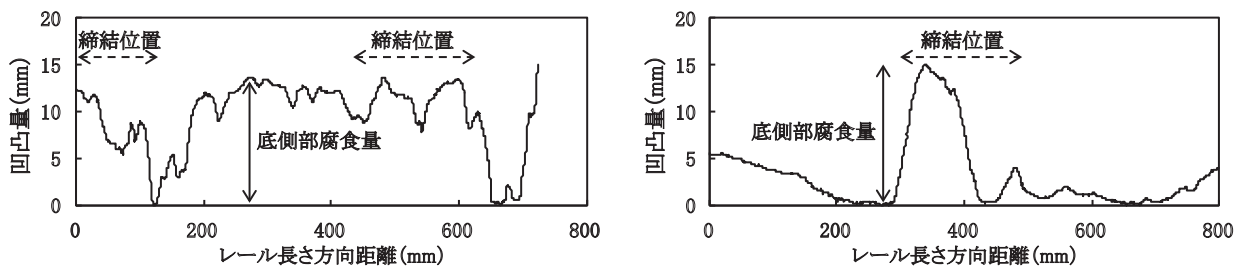
腐食量測定の結果、以下のことがわかった。

- ①締結位置と中間位置での最大底部腐食量を比較した結果、明確な傾向は確認されなかった(図5)。
- ②レーザー測定と定規測定による最大底側部腐食量は、概ね同程度であった(図6)。
- ③②より、定規測定の結果を用いて、締結位置と中間位置における最大底側部腐食量を比較した結果、締結位置の方が概ね大きかった(図7)。
- ④試験レールは底部で腐食が進行している場合、同等以上の腐食が底側部で進行している傾向にあった(図8)。
- ⑤各腐食量と経年および累積通過トン数の間に明確な傾向はなかった。
- ⑥折損レールの腐食量を測定し、試験で用いた腐食レールと比較した結果、前者は特に大きな腐食量ではなかった。また、トンネルから収集したレールの腐食量の方が、踏切で収集したレールよりも、概ね小さい値となっていた。

4. 腐食および電食レールの疲労余寿命

4.1 腐食量と疲労試験結果の関係

曲げ疲労試験結果と腐食量(底部腐食量、底側部腐食量)の測定結果の関係を検討した。なおここでの、腐食量は破断位置におけるものを用いている。曲げ疲労試験結果を腐食量毎に分類してプロットしたもの、および分類したグループ毎に算定したS-N曲線を図9に示す。曲げ疲労試験では最小応力を30N/mm²とした片振り試験であったが、0N/mm²からの応力全振幅に換算した。



(a) 締結位置，中間位置とも腐食が進んだ例 (b) 締結位置の腐食が著しい例

図4 底側部腐食量測定結果の例

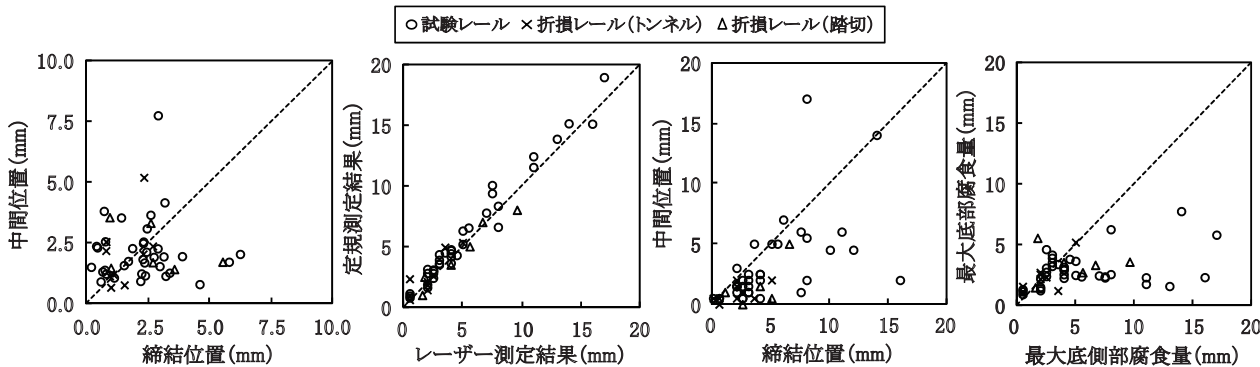


図5 底部腐食量

図6 測定方法による比較 (底側部腐食量)

図7 底側部腐食量

図8 底側部腐食量と底部腐食量

応力全振幅の換算式は式(1)に示すとおりである。なお、腐食レールの真破断強度はレール鋼と同一とみなし、 1500N/mm^2 とした。

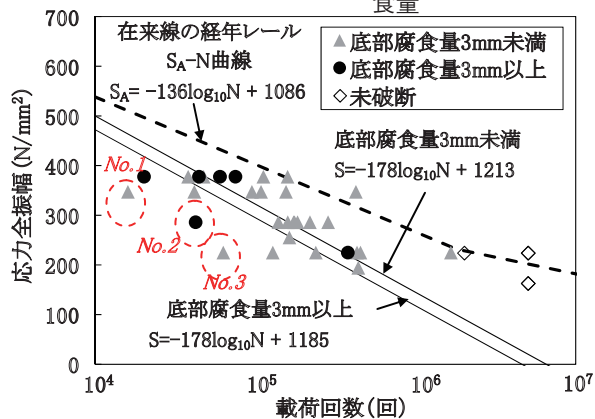
$$\sigma'_A = \sigma_T \cdot \sigma_A / (\sigma_T - \sigma_{\min}) \quad (1)$$

ここで、 σ'_A ：換算後の応力全振幅（応力0 N/mm²からの完全片振り）、 σ_T ：試験片の真破断強度、 σ_A ：試験時の応力全振幅、 σ_{\min} ：試験時の最小応力

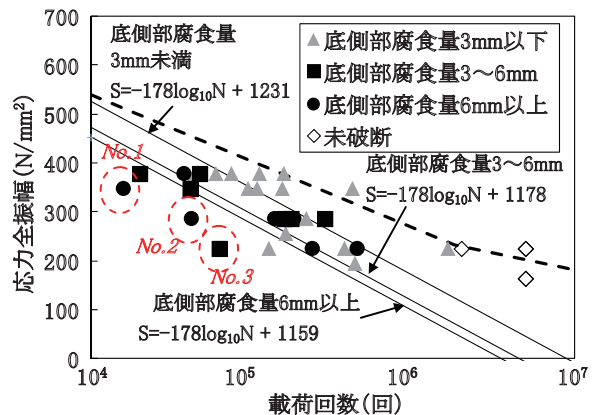
図9のS-N曲線の算定は、以下の考え方で行った。

- ①腐食量毎に分類した腐食レールの各S-N曲線は、同じ傾きを有しているとした。この傾きは、今回の腐食レール全ての試験結果を用いて、重み付きプロビット法を用いて算出した。
- ②腐食量毎に分類した腐食レールの試験結果と①の傾きから最小二乗法により切片を求めた。
- ③試験レールごとの累積通過トン数の履歴の違いを考慮しないこととした。
- ④過去の腐食レールの研究より、疲労限度が存在しないものとした。

図9中には過去の研究で得られた在来線の経年レールのS-N曲線（以下、「 S_A -N曲線」と称する）も併せて示した²⁾。なお、試験レールの摩耗による断面減少を考慮した応力全振幅によるS-N曲線の算定も別途実施したが、鉄道事業者では現在レールの摩耗量を腐食レールの交換の指標としていないため、ここでは新品形状の公称応力を用いて評価している。



(a) 底部腐食量による分析



(b) 底側部腐食量による分析

図9 腐食量毎のS-N曲線

図9より同程度の腐食量に対する疲労試験結果のばらつきは大きかったものの、底部腐食量および底側部腐

特集：軌道技術

食量のどちらの分類においても腐食量が小さいデータは、 S_A -N 曲線に近い領域、すなわち腐食していないレールに近い値として分布し、腐食量が大きくなるに伴い、 S_A -N 曲線から左下方向に離れていく傾向がみられた。腐食量毎に分類して S-N 曲線を求めた結果、腐食量が大きいグループの方が切片の低下が大きくなる、すなわち疲労強度が低下する結果が得られた。

ここで、求めた S-N 曲線から大きく離れた試験結果について考察する。図 9 に示す No.1, 2, 3 の結果は底部腐食量 3mm 以上および底側部腐食量 6mm 以上の S-N 曲線から離れているが、No.1 および No.2 のレールについては、底部腐食量および底側部腐食量の両方もしくは片方が、今回の試験結果の中でも大きなものとなっていた。No.3 のレールは破断位置の腐食量は特に大きいとはいえ、上記の手法のみでは測定できない腐食孔の先端の微細な径等が影響している可能性がある。

4.2 腐食量に応じた S-N 曲線の推定

今回の腐食レールの疲労試験結果にはばらつきはあるものの、底部腐食量および底側部腐食量との間に一定の相関が認められたことから、腐食レールの試験結果より疲労寿命を推定するために、腐食量を変数とした S-N 曲線を算出する。算出方法は 4.1 節で求めた S-N 曲線の求め方を基本としているが、S-N 曲線の傾きは一定として、切片のみ腐食量に応じて一定の割合で低下するものとした。S-N 曲線の式は以下のように検討した。

$$S = -a(\log_{10}N) + (bf_1 \cdot f_2 + c) \quad (2)$$

ここで、S: 応力全振幅 (N/mm^2)、N: 繰返し数 (回)、 f_1 : 底部腐食量 (mm)、 f_2 : 底側部腐食量 (mm)、a, b, c: 係数

腐食量の変数は底部腐食量と底側部腐食量の両方の切片の低下を考慮し、それぞれの値を掛け合わせた値とし

表 3 算出した S-N 曲線に関する係数

| 係数 | | | 相関係数 R | 標準偏差 (N/mm^2) |
|------|------|-----|--------|-------------------|
| a | b | c | | |
| -100 | -2.1 | 830 | 0.718 | 42.1 |

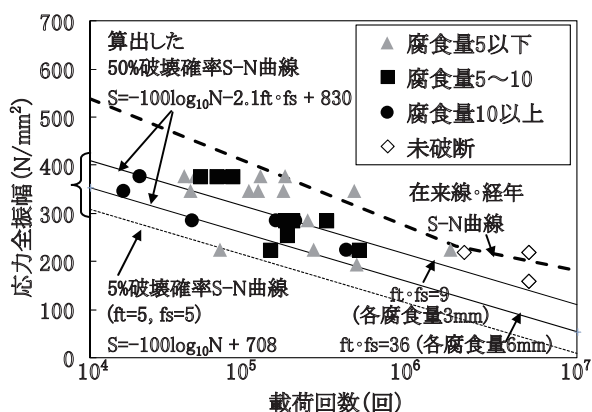


図 10 算出した S-N 曲線

た。係数 a, b, c は試験結果から最小二乗法により決定した。算出した係数を表 3 に、50% 破壊確率の S-N 曲線を図 10 に示す。図中には $f_1 \cdot f_2 = 9$ (各腐食量 3mm) および 36 (各腐食量 6mm) に応じた S-N 曲線を示した。相関係数は 0.6 ~ 0.7 程度であり、腐食量に応じた S-N 曲線の算出に際し一定の相関が得られた。なお、試験結果と S-N 曲線から標準偏差を算出し、図 10 中に標準偏差を一定とした $f_1 \cdot f_2 = 25$ (各腐食量 5mm) の 5% 破壊確率の S-N 曲線を参考として記載したが、概ね全ての試験結果がこの曲線よりも上方にある結果となっている。

4.3 腐食レールの余寿命評価

上記で得られた S-N 曲線を用いて軌道構造条件および車両条件に応じた疲労余寿命 (以下、「余寿命」という) を試算した。余寿命推定の考え方は以下の通りである。

- ①底部腐食量および底側部腐食量の両方を考慮できる式 (2) の標準偏差を一定とした破壊確率 5% の S-N 曲線を用いることとした。
- ②腐食レールについては、累積通過トン数の増加に伴い腐食量が一定の速度で増加し、それに伴い S-N 曲線も傾きを維持しながら、上記で算出した S-N 曲線より、一定速度で切片が低下するとした。
- ③余寿命推定開始時の腐食量の初期値と、その腐食量に達する間の経過年数を設定することで腐食量の進み速度を決定した。底部腐食量および底側部腐食量とも同じ初期値および同じ速度で進行するものとし、また年間通過トン数が 500 ~ 2000 万トンと想定した。

余寿命推定に際し、図 11 に示す余寿命推定フローチャートにより、各種軌道構造条件、車両条件を設定しレール底部曲げ応力に換算して計算を行った。表 4 に軌道構造条件を、表 5 に車両条件を示す。軌道構造は在来線のバラスト軌道の 50kgN ロングレールを想定し、浮きまくらぎの有無および溶接部のレール頭頂面凹凸量による変化を考慮できる表 6 に示す応力推定式を用いている。曲線の場合、横圧は輪重横圧推定式⁶⁾より各車両および曲線半径に応じて算出し、別途実施した軌きょうモデルによる有限要素解析から、底部曲げ応力を算定した。車両条件については、貨物列車を想定した電気機関車および 485 系を設定した。

余寿命予測の計算条件は次の通りである。

- ①レール温度は平均を 25°C、標準偏差を 5°C、ロングレール設定温度を 25°C と想定した。
- ②腐食レールについては、腐食量 0mm の場合の 100mm 弦頭部凹凸の初期値を 0.1mm とし、1m 弦凹凸の初期値は溶接仕上がり精度を考慮して 0.3mm とした。
- ③100mm 弦の凹凸進みは在来線のロングレール溶接部を想定して 0.05mm/億トンとし、1m 弦の頭部凹

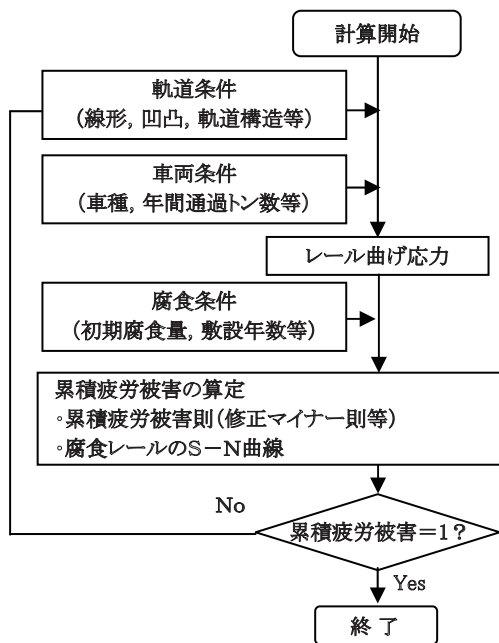


図 11 余寿命推定フローチャート

表 4 軌道構造条件

| 項目 | 条件 |
|---------|------------------|
| 新幹線・在来線 | 在来線 |
| 軌道種別 | 有道床* |
| 直線・曲線 | 直線, R400m |
| レール種別 | 50kgN |
| 軌道 | ばね係数 (MN/m) 110 |
| パッド | 減衰係数 (kN・s/m) 98 |
| 浮きまくらぎ | 有り |

※ ばね係数 300MN/m, 減衰係数 75kN・s/m

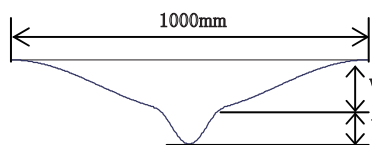
表 5 車両条件

| 直線・曲線 | 車種 | 静止輪重 (kN) | 横圧 (kN) | 速度 (km/h) |
|-------|------|-----------|---------|-----------|
| 直線 | EL | 79 | 0 | 100 |
| | 485系 | 59 | 0 | 130 |
| R400m | EL | 79 | 29 | 70 |
| | 485系 | 59 | 20 | 70 |

表 6 レール溶接部の底部曲げ応力の推定式

| 軌道条件 | 車両条件 | レール曲げ応力推定式 (N/mm ²) |
|----------|------|---------------------------------|
| 浮きまくらぎ無し | EL | $S = 50.7V + 8.91W + 54.4$ |
| | 485系 | $S = 56.8V + 10.6W + 39.1$ |
| 浮きまくらぎ有り | EL | $S = 48.8V + 8.71W + 70.8$ |
| | 485系 | $S = 54.3V + 10.4W + 54.4$ |

※ 図中VおよびWは下図による

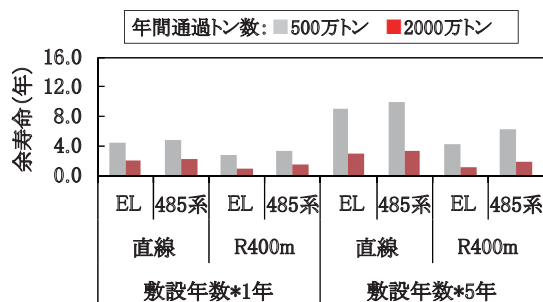


*式は直線に対応するものであり, 曲線の場合はこの値に対し, 横圧による増分を与えている。

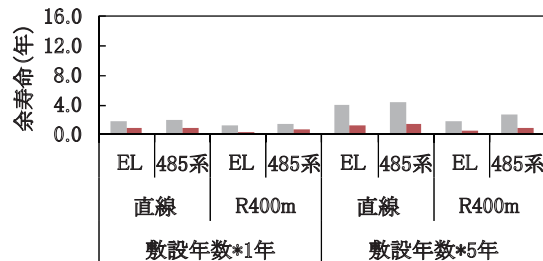
凸進みは 100mm 弦の頭部凹凸進みと同じとした。
 なお, 今回の試算では凹凸の削正を実施せず, 応力低減効果を考慮しないものとした。

- ④軌道構造条件として, 浮きまくらぎの有無を考慮した。
- ⑤列車荷重として, それぞれ 1 車種のみが走行する場合を想定した。
- ⑥線形については直線と曲線半径 400m の曲線を想定した。

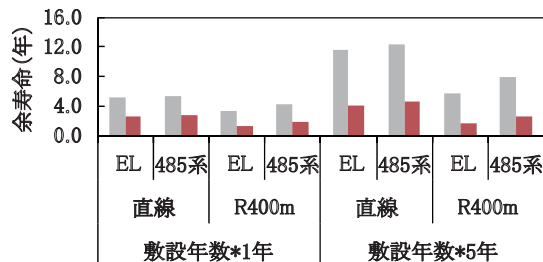
図 12 に腐食レールの余寿命の推定結果を示す。本計算の条件では曲線 R400m の場合に, 横圧による底側部曲げ応力が大きくなるため, 直線と比較して余寿命が



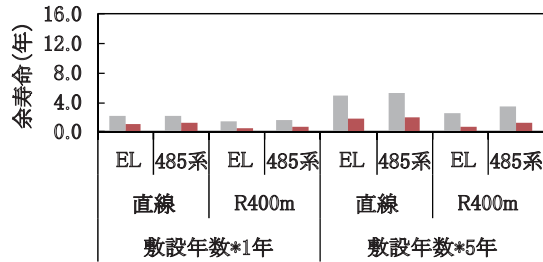
① 各腐食量3.0mmからの余寿命



② 各腐食量5.0mmからの余寿命 (a) 浮きまくらぎ有



① 各腐食量3.0mmからの余寿命



② 各腐食量5.0mmからの余寿命 (b) 浮きまくらぎ無

図 12 余寿命推定結果

特集：軌道技術

1/2 程度となった。初期の腐食量が 3.0mm の場合、敷設からの経過年数が 1 年という非常に腐食環境の厳しい条件下では余寿命が 1.0～4.8 年であったのに対し、経過年数が 5 年の場合は余寿命が 1.2～10.0 年であった。

4.4 踏切部およびトンネルにおける腐食および電食レールの管理について

腐食レールの管理については定期交換が有用であるが、以上の検討結果より、踏切部のレールの腐食量を交換基準の指標とすることは、実務上一定の有用性があると考えられる。腐食量に応じた腐食レールの余寿命の計算結果については、実際に折損したレールの腐食量と敷設年数および年間通過トン数が同程度の試算結果と比較して、ばらつきを考慮すると妥当性のある結果になっていると考えられる。また、現行の底部腐食量に加えて、底側部腐食量も考慮することで、より予測の精度が上がると考えられる。

ただし、腐食レールの減肉の様相は様々であり、疲労試験結果もばらつきが大きく、かつ、腐食孔の先端の径は非常に微細であるため超音波探傷で測定することが難しく、上記の腐食量のみを基準として折損を全て防止するのは困難である。また、浮きまくらぎ等の軌道状態によりレールの曲げ応力が大きくなることも腐食レールの寿命に影響するため、腐食レールの管理については腐食量のみではなく、軌道状態にも注意する必要がある。

一方、トンネル内の腐食レールについても今回の検討結果が有効であると考えられるが、腐食量が小さくても折損する場合がある。トンネルでは漏水等により、腐食摩耗が進行することで、レール頭頂面に局所的な凹凸が生じ輪重変動が大きくなることもある。トンネル内のレールについてはこれらの点にも注意する必要がある。

5. まとめ

踏切の腐食レールを収集し、曲げ疲労試験を実施して応力振幅と破断に至るまでの繰返し数の関係を把握した。また、試験終了後のレールの腐食量を測定し、試験結果との関係を把握した。これらの結果より腐食量に応じた S-N 曲線を定義し、腐食レールの寿命評価を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 腐食レールの底部腐食量と底側部腐食量を比較した結果、それらは必ずしも一致しなかった。た

だし、底部厚減少量が進行している場合には、概ね同等以上の腐食が底側部で進行していることが明確になった。

- (2) 曲げ疲労試験結果と腐食量の関係について検討した結果、底部厚減少量と底側部腐食量の両腐食量において試験結果との一定の相関が認められた。この結果を用いて、腐食量を変数として切片が低下する S-N 曲線を算定し、腐食レールの余寿命を試算するモデルを提案した。
- (3) 腐食レールの管理については定期交換が有用であるが、検討結果より、踏切部のレールの腐食量を交換基準の指標とすることは、実務上一定の有用性があると考えられる。また、現行の底部腐食量に加えて、底側部腐食量も考慮することで、より効率的な管理ができると考えられる。浮きまくらぎ等による軌道状態によりレールの曲げ応力が大きくなることも腐食レールの寿命に影響するため、腐食レールの管理については腐食状況を腐食量のみではなく、軌道状態にも注意する必要がある。
- (4) トンネルでは漏水等により、腐食摩耗が進行することで、レール頭頂面に局所的な凹凸が生じ輪重変動が大きくなることもあるため、これらの点にも注意する必要がある。

文献

- 1) 高尾賢一他：レール底部腐蝕検知装置の開発，土木学会第 63 回年次学術講演会，4-257 (2001)
- 2) 弟子丸将，片岡宏夫：腐食および電食レールの余寿命と腐食量の研究，土木学会第 63 回年次学術講演会，4-052 (2008)
- 3) 田村功他：海洋環境において腐食した鋼管の形状計測と残存耐力に関する検討，土木学会構造工学論文集，Vol.51A，(2005)
- 4) 杉浦邦征他：海洋環境において腐食した鋼管の形状計測と残存耐力に関する検討，土木学会構造工学論文集，Vol.52A，(2006)
- 5) 貝沼重信他：例えば，鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的腐食表面性状の数値シミュレーション等，土木学会構造工学論文集，Vol.62 No.2，440-453，(2006)
- 6) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所著：鉄道構造物等設計標準・同解説—軌道構造，丸善出版株式会社，(2012)