



極値統計法による腐食レールの最大さび厚の推定および腐食程度毎のレールの疲労強度の解明

Estimation of Maximum Rust Thickness of Corroded Rails by Extreme Value Statistics and Elucidation of Fatigue Strength of Rails for Each Degree of Corrosion

鉄道総合技術研究所 水谷 淳 Jun MIZUTANI Member
鉄道総合技術研究所 細田 充 Mitsuru HOSODA
鉄道総合技術研究所 山本 隆一 Ryuichi YAMAMOTO

Focusing on the rust thickness of the rail sides, the degree of rail corrosion was quantitatively determined. It is clarified that the maximum rust thickness at the predicted point of rail rupture by bending fatigue tests can be estimated by using extreme value statistics. The fatigue strength of the corroded rail was clarified by bending fatigue tests. It was found that there was a correlation between the estimated maximum rust thickness and the fatigue strength of the rails, because the fatigue strength decreased as the estimated maximum rust thickness increased. Then, the remaining life of the corroded rail was estimated for each estimated maximum rust thickness. Based on these results, a new inspection method for corroded rails was proposed.

Keywords: Corroded Rail, Rust Thickness, Extreme Value Statistic, Fatigue Strength, Remaining Life of the Corroded Rail

1. はじめに

レールは、鉄道にとって最も重要な部材であり、列車の走行安全を確保するためには、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。レールの損傷要因のひとつに、レールの腐食がある。レールの腐食は、主にトンネルや踏切といった腐食環境下において発生し、海底等の塩分濃度が高い箇所ではより顕著になる。腐食が発生すると、レールには肌荒れが生じ、腐食が著しい場合にはレール表面に孔食が発生したり、断面減少が生じたりする。そのような箇所に列車荷重によって応力集中が生じると、き裂が発生・進展し、最終的にレールが破断に至る可能性がある。

現在、レールの腐食に関する検査は、目視検査によって腐食程度を分類したり、超音波探傷検査によるレール中心付近の底面腐食量測定が実施されている。また、経験に基づいて交換年数が定められている場合もある。しかしながら、目視検査の場合、評価者の主観によるところが大きく、判断のばらつきがあることが問題となっている。また、超音波探傷の場合、底面の探傷可能領域がレール中

心付近に限られているため、き裂の起点となり得るレール底部全体を把握して管理することが困難といった課題がある。さらに、腐食程度とレールの疲労強度との関係は明らかになっていない。一般に腐食環境においては、一定の応力下で破壊に至るまでの、載荷繰り返し数は小さくなり、疲労限度は存在しなくなるといったように、一般部での疲労現象と異なった挙動を示すことが知られている[1]。そのため、腐食したレールを適切に検査する手法や、腐食程度に応じた疲労強度の把握が求められている。

過去には、腐食レールの曲げ疲労試験結果と腐食程度との関係を調べ、余寿命の試算を実施している。ここでは、底部厚減少量と底側部腐食量の両腐食量を用いることで試験結果との一定の相関がみられたものの、疲労試験結果にばらつきが大きく、これらの腐食量を基準として管理する手法については課題が残った[2]。一方で、腐食レールはレール底面の孔食を起点として破断するケースが多いため、3D スキャナーを用いて測定したレール底面の孔食深さとレールの疲労強度との関係を調べたところ、孔食深さが深いほどレールの疲労強度が低下することが分かった[3]。しかしながら、実際の現場においてレール底面の孔食深さを直接計測するのは困難といった課題があり、現場で簡易に腐食程度を把握できる手法が求めら

連絡先:水谷 淳、〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38、公益財団法人鉄道総合技術研究所
E-mail: mizutani.jun.49@rtri.or.jp

れている。

ところで、鋼構造物の分野では、裸鋼板や実構造部位の腐食生成物層の厚さに基づき、部位レベルの腐食進行性を鋼材の平均腐食深さの経時性により定量評価する簡易手法が提案されている[4]。この手法を利用し、膜厚計を用いて腐食レールの側面の腐食生成物厚さ(さび厚)を測定し、曲げ疲労試験結果との関係を調査した[3]。しかしながら、試験本数が十分ではなく、かつ疲労試験結果にばらつきが大きく、さび厚と疲労強度の間に相関関係は見られなかった。一方で、膜厚計を用いた測定で得られる測定結果は「点」による一部分のものであり、試験体全体の結果を反映できていない可能性がある。これについては、これまでに、腐食孔のような局部腐食について極値統計理論を用いることで少ない調査結果から信頼度の高い推定、評価を行うことが可能であることが示されている[5]。このことから、数理統計的手法を用いることで、小面積の測定区画において取得した値から、大面積における最大値を推定できる可能性がある。

以上のことを踏まえて本研究では、引き続き腐食レールのさび厚に着目して、レールの腐食程度を定量的に把握した。その際に、極値統計理論を用いて曲げ疲労試験による破断予測箇所における最大さび厚を推定した。また、曲げ疲労試験を実施し、レール側面から取得した腐食量から各腐食程度のレール疲労強度に及ぼす影響を明らかにした。そのうえで、レールの腐食を考慮可能な余寿命推定手法を構築し、レールの余寿命を試算した。

2. 腐食程度の定量把握

2.1 膜厚計によるさび厚の測定

本研究では、あるトンネルにおける腐食レールを収集し、各種試験を実施した。収集した腐食レールは長さ1.5 mの60 kgレール計22本である。今回収集した腐食レールの一例をFig. 1に示す。漏水している付近では、Fig. 1のようなさびこぶが見られ、レールの側面において局部腐食が発生していると考えられる。



Fig. 1 Example of corroded rail (Side)



Fig. 2 Electro-magnetic coating thickness tester

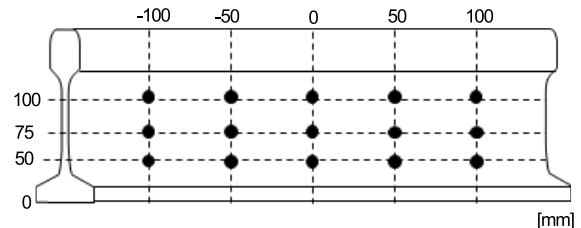


Fig. 3 Measuring points of rust thickness of corrosion rail

さびは、Fig. 2に示す電磁式小型膜厚測定器DUALSCOPE FMP40と厚膜用のプローブFKB10(測定範囲0 - 8 mm) (共に(株)フィッシャー・インストルメンツ製)を用いて測定した。測定箇所はFig. 3に示すように内外軌それぞれのレール腹部であり、レール長手方向の中心位置を0として、長手方向に±50 mm, 100 mmの位置、レール高さ方向は底面を0として、レール頭部方向に50 mm, 75 mm, 100 mmの位置を測定した。レール1本あたりの測点は30ヶ所である。これらは、後述するレール曲げ疲労試験においてレールが破断すると想定した試験体中心から±100 mmの範囲内である。また、偏差の大きいさび厚を統計的に扱うために、1ヶ所の測定箇所に対して11回ずつ測定した。その際に、各測点11回の測定で得られた平均値をそれぞれの測点の測定値とした。そして、レール1本あたり30ヶ所測定した測点のなかで最も高い測定値を、そのレールが持つ実測による最大さび厚とした。

2.2 極値統計理論による最大さび厚推定

前述のさび厚の測定は、後述する疲労試験においてレールが破断すると想定した試験体中心から±100 mmの範囲からFig. 3に示す30点を選択して行った。しかしながら、Fig. 1に示すような局部腐食が発生したレールの場合、局所的に発生したさびこぶが選択した30点に含まれているとは限らない。つまり、膜厚計によるさび厚の測定では破断予測箇所の最大さび厚を測定できていない可能性がある。

極値統計理論による最大さび厚推定は、局部腐食を受けている装置・機器・部品などにおいて、小面積の測定区画 s から採取した最大局部腐食の大きさをを用いて、大面積 S を持つ装置・機器・部品などの最大局部腐食の大きさを推定する手法である。本手法は孔食深さの最大値推定に用いられることが多いが、すき間腐食やさびこぶ下腐食等の孔食以外の局部腐食挙動の予測にも用いられている[5]。今回収集した腐食レールでは、レールの側面において局部腐食が発生していると考えられる。そのため、レール側面の腐食状態についても極値統計理論を用いて最大局部腐食の大きさを推定できる可能性がある。そのため、極値統計理論を用いて破断予測箇所の最大さび厚を推定可能であるか確かめることとした。

極値統計理論を用いた最大値の推定においては、得られたデータの分布が二重指数分布に従うことを示す必要がある。そのため、さび厚の極値分布を調べた。極値統計理論の手順を以下に示す。

① 極値推定対象面積 S の決定

さび厚を測定したレール側面を極値推定対象面積 S とし、次のように定めた。

$$S = \text{長手方向長さ} \times \text{高さ} \times (\text{内軌側} + \text{外軌側}) \\ = 200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 2 = 20000 \text{ mm}^2$$

② 測定区画 s の決定

極値推定対象面積 S と同じ母集団から無作為に抽出した N 個の小区画を用いて、標本となる区画面積 s を定めた。ここでは、 $s = 10 \text{ mm}^2$ (プローブ接地面積) $\times 30$ (小区画の個数 N) $= 300 \text{ mm}^2$ とした。なお、極値推定対象面積および区画面積から求められる再現期間 $T (= (S+s)/s)$ は 67.67 となった。

③ データ採取および整理

小区画 N 個について、さび厚 t を測定した。測定したさび厚データを小さい順に並べ、それぞれ $t_j (j = 1 \sim N)$ とした。つまり以下の式(1)となるように並べた。

$$t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_N \quad (1)$$

式(2)を用いそれぞれの $j (j = 1 \sim N)$ について基準化変数 y_j を計算した。

$$y_j = -\ln[-\ln\{j/(N+1)\}] \quad (2)$$

④ 極値統計用紙へのプロットおよび分布直線の作成

極値統計用紙の座標横軸にさび厚 t 、縦軸に基準化変数 y_j をとり、採取したデータをプロットした。また、得られたプロットから最小二乗法により分布直線を作成した。

ある 1 本の試験レールについてさび厚 t_j の極値統計用紙を Fig. 4 に示す。得られた t_j の極値分布が直線上に分布

していることを確認した。他のレールについても同様に直線状に分布していることを確認した。極値統計用紙上では二重指数分布は直線状に分布する性質があることから、分布の直線性から t_j の極値分布が二重指数分布であると判断した。そのため、今回は、 t_j を極値統計理論から推定することが可能であると判断した。

推定最大さび厚 t_{max} は以下の式(3)~(7)を用いて求めることができる。

$$t_{max} = a \cdot y + b \quad (3)$$

$$y = -\ln[-\ln\{(T-1)/T\}] \quad (4)$$

$$T = (S + s)/s \quad (5)$$

$$a = \frac{\{N \cdot \sum(y_j t_j) - \sum y_j \cdot \sum t_j\}}{\{N \cdot \sum(y_j)^2 - (\sum y_j)^2\}} \quad (6)$$

$$b = \left\{ \sum t_j - a \cdot \sum y_j \right\} / N \quad (7)$$

このとき t_{max} は、分布直線を再現期間 T まで外挿したときの x 座標に相当するため、Fig. 4 に赤線で示すようにも求めることができる。

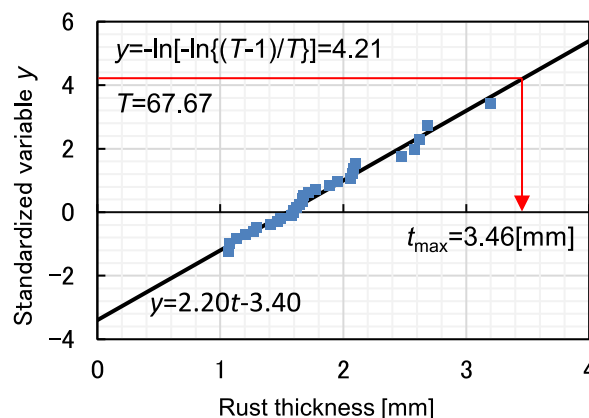


Fig. 4 Example of a gumbel paper

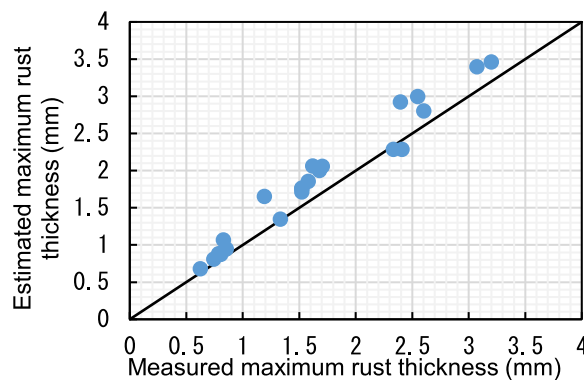


Fig. 5 Comparison of measured and estimated maximum rust thickness

各試験レールについてさび厚を推定した結果を Fig. 5 に示す。横軸を実測による最大さび厚、縦軸を極値統計理論から求めた推定最大さび厚とした。推定値は実測値より最大で 0.5 mm 程度上回り、推定値の方が実測値を上回るケースが大半であった。このことから、極値統計理論から求めた推定値は安全側の評価ができ、局部腐食を受けたレールの腐食量を定量的に評価できると考えられる。

3. 腐食レールの曲げ疲労試験

腐食レールの疲労強度を推定するため、曲げ疲労試験を実施して、底部の応力全振幅と破断に至るまでの繰り返し数の関係を把握した。

3.1 試験方法

レールの曲げ疲労試験の状況および試験条件を Fig. 6、Table 1 に示す。支点間のスパンは 1300 mm、载荷点間隔は 150 mm であり、片振り 4 点曲げによる曲げ疲労試験を実施した。载荷周波数は 3.0 Hz とした。なお、载荷点および支点でのフレッチング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た。最大载荷回数は 200 万回とし、200 万回を超えても破断しない場合は「未破断」と分類した。

3.2 試験結果

試験の結果 22 本中 20 本が破断に至った。破断したレールは、レール底面の腐食孔からき裂が進展し、破断に至っていた。曲げ疲労試験結果を推定最大さび厚毎に 3 段階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 Fig. 7 に示す。なお、図中には過去の研究で得られた腐食環境ではない一般的な区間に敷設された新幹線経年レールの S-N 曲線も併せて示した[6]。なお、今回の曲げ疲労試験は、最小応力 σ_{min} を 30 N/mm² とした応力全振幅 σ'_A の片振り試験であったが、Fig.7 にプロットする際に 0 N/mm² からの応力全振幅 σ'_A に換算した。換算式は式(8)に示すとおりである。なお、腐食レールの真破断強度 σ_T はレール鋼と同一とみなし、1500 N/mm² とした。

$$\sigma'_A = \frac{\sigma_T \cdot \sigma_A}{\sigma_T - \sigma_{min}} \quad (8)$$

S-N 曲線は以下の考え方に従って算定した。

- ① 各グループの S-N 曲線は、同じ傾きを有していることとした。この傾きは、新幹線の経年レールの S-N 曲線の傾き[6]と同様とした。

Table 1 Test conditions

Test method	4 point pulsating bending test
Min. Stress	30 N/mm ²
Loading frequency	3.0 Hz
Stress amplitude	220~370 N/mm ²

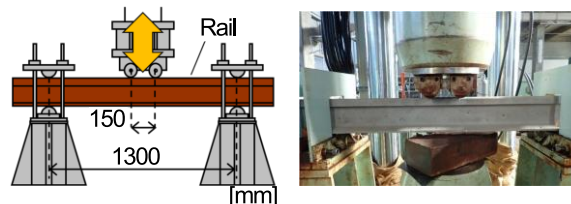


Fig. 6 Rail bending fatigue test

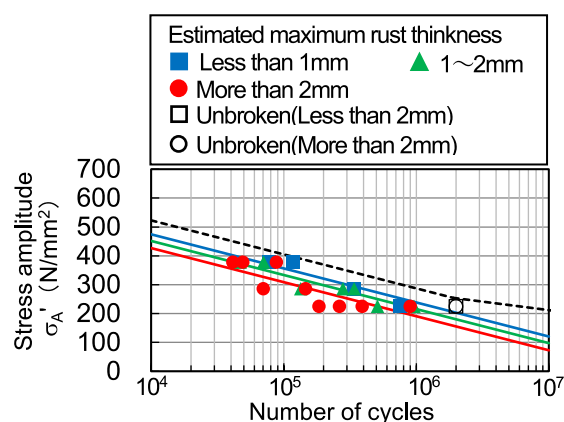


Fig. 7 Results of rail bending fatigue test

- ② 各グループの試験結果と①の傾きから、最小二乗法により切片を求めた。
- ③ 過去の腐食レールの研究[2]から、疲労限度は存在しないものとした。
- ④ 試験レール毎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。

腐食したレールの疲労強度は過去の研究で得られた新幹線の経年レールの疲労強度と比較して大きく低下していた。また、推定最大さび厚が大きいほど疲労強度が低下していた。このことから、推定最大さび厚とレールの疲労強度に相関関係があることが分かった。

ここまでの議論により、極値統計理論を用いて算出したレール側面の推定最大さび厚を用いてレールの疲労強度を評価できることが判明した。一方で、レール側面のさび厚と疲労強度が相関を示すメカニズムについては現時点では不明である。先行研究により、鋼材の腐食生成物層の厚さと平均腐食深さに相関関係があることが示されている[4]。腐食環境下にあるレールの側面と底面の腐食程度に相関があるとすれば、側面のさび厚と底面の孔食深

さに相関を見出せる可能性がある。また、レール底面にある孔食は、列車通過に伴う曲げ変形によって応力集中が発生し、破壊起点となるため、孔食深さが大きいほど疲労強度が低下する[3]。以上より、レール側面のさび厚が大きいほど、レール底面の孔食深さが大きくなり、疲労強度が低下するといえる可能性がある。そのため、今後はレール側面のさび厚と疲労強度が相関を示すメカニズムの解明のために、レール側面のさび厚とレール底面の孔食深さの関係を明らかにする必要がある。

4. 腐食レールの余寿命評価

3節にて、トンネル内の腐食レールは一般的なレールと比較して疲労強度が低下すること、推定最大さび厚が大きいほど疲労強度が低下することを確認した。ここでは、腐食したレールの余寿命を、3段階に分類した推定最大さび厚毎に累積疲労被害則に基づく寿命評価法を用いて推定することを試みた。

腐食環境ではない一般的なロングレール区間における弱点箇所はレール溶接部である。列車の繰り返し通過に伴いレール頭頂面に局所的な凹凸が発生し、一般部よりもレール底部に発生する応力が大きくなるためである。そのため、ロングレール区間におけるレールの余寿命評価では、レール破断がレールにおける弱点箇所では起きるといった仮定のもと、レール溶接部のレール底部に発生する応力と破断に至るまでの繰り返し数によってレールの疲労寿命を定めている[6]。今回は、レールの腐食が発生し、疲労強度が低下している箇所が弱点箇所であるとの仮定の下、推定最大さび厚の大きさによって余寿命推定を実施した。また、腐食は、トンネルに敷設されている間に進行し、それに応じて疲労強度が低下していくと考えられる。そのため、本寿命推定では腐食の進行による疲労強度の低下を考慮できるようにした。本余寿命評価の計算条件は以下のとおりである。

- ① Fig. 8 に示す余寿命評価のフローチャートにより、あるトンネルの軌道構造条件 (Table 2)、車両条件 (Table 3) を設定し、レール底部曲げ応力に換算して余寿命を推定した。腐食したレールの中に溶接部があった場合にレール底部に発生する曲げ応力が最も高くなることから、本余寿命推定では安全側の評価としてレール底部曲げ応力をレール溶接部の頭頂面凹凸量を考慮できる応力推定式 (Table 4) から算出した。レール頭頂面の凹凸形状は、Table 4 の下部に示すような、下に凸の形状で、短波長 (以下、100 mm

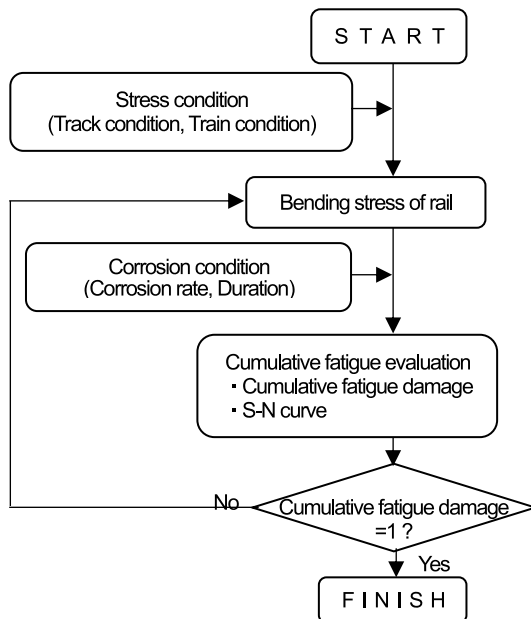


Fig. 8 Flow chart of estimating remaining life of rail

Table 2 Track structure

Track type	Slab track
Straight or curve	Straight line
Rail	60 kg rail

Table 3 Train conditions

Type of train	Axle load (ton)	Speed (km/h)
A	11.75	160
B	12.50	100

Table 4 Condition of stress equation

Type of train	Stress equation (N/mm ²)
A	$\sigma = 36.7V + 20.1W + 23.7$
B	$\sigma = 35.3V + 9.4W + 35.9$

Model of rail top surface shape

σ : Rail bottom bending stress
 V : 100mm unevenness, W : 1m unevenness

Table 5 Estimated results

Estimated maximum rust thickness	Corrosion period (year)	Remaining life (year)
Less than 1 mm	9.4	6.6
1~2 mm	9.4	4.3
More than 2 mm	4.8	2.4

と長波長 (以下、1m 弦凹凸量 W とする) との組み合わせでモデル化した。 V は、溶接

部 1 m間 (溶接前後 500mm ずつ) の 100mm 弦正矢の最大値とし、 W は、1 m弦正矢の最大値から V の値を引いたものとした。今回は、 V を 0.2 mm、 W を 0.1 mm で固定した。なお、現地応力測定を実施し、本応力推定式が妥当であることを確認した。

- ② 推定最大さび厚ごとに定められた腐食レールの S-N 曲線 (Fig. 7 実線) をもとに、破壊確率 0.01% の S-N 曲線を算出し、余寿命算定に用いた。なお、ここでの破壊確率は過去に行われた寿命推定の条件[6]をもとに、新幹線基準の管理を行う場合の値を用いた。
- ③ レールがトンネル内に設置された期間 (以下、「腐食年数」という) の経過に伴い、レールが一定の速度で腐食すると仮定し、それに伴い S-N 曲線も傾きを維持しながら切片が低下することとした。なお、切片の低下速度は各腐食年数を考慮して、Fig. 7 黒破線が Fig. 7 実線に腐食年数の期間で低下するように決定した。また、腐食年数は推定最大さび厚で 3 段階に分類した各カテゴリーに属するレールのうち、最も設置期間が短いレールの年数を用いた。
- ④ 車両の通過割合は車種 A: 44%、車種 B: 56% とした。また、列車通過時に発生する応力のばらつきは、現地応力測定の結果から 2.7 N/mm^2 とした。
- ⑤ 累積疲労被害が 1 になるまでに要した通過トン数 (車軸通過数 \times 車軸軸重) を、レールを収集したトンネルの年間通過トン数で除することで余寿命を示した。

Table 5 に腐食レールの余寿命推定結果の例を示す。推定最大さび厚が大きいほど余寿命は短くなった。推定最大さび厚が 2 mm 以上の腐食レールの余寿命は、今回の余寿命推定条件下では、おおよそ 2.4 年であった。

例えば、本研究結果をもってレールの腐食検査をする場合、以下の手法を提案する。

- ① 目視検査にてさびこぶが顕著なレールを調査する。
- ② さびこぶが顕著なレールを発見した際に、さび厚が大きいと考えられるさびこぶに対して膜厚計を用いてさび厚を測定する。
- ③ さび厚が大きい箇所を要注意箇所とし、軌道構造、車両条件に応じた余寿命推定を実施し、交換計画を立てる。

5. まとめ

腐食レールのさび厚に着目して、レールの腐食程度を定量的に把握した。その際に、極値統計理論を用いて曲げ疲労試験による破断予測箇所における最大さび厚を推

定した。また、曲げ疲労試験を実施し、各腐食程度のレール疲労強度を明らかにした。そのうえで、レールの腐食を考慮可能な余寿命推定手法を実施した。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 試験体の破断予測箇所における最大さび厚について、極値統計理論を用いて推定可能かを検討した。得られた極値分布が直線上に分布しており二重指数分布に従うことを確認した。そのため、破断予測箇所の最大さび厚を推定可能であると考えた。
- (2) 腐食したレールの疲労強度は過去の研究で得られた新幹線の経年レールの疲労強度と比較して大きく低下していた。また、推定最大さび厚が大きいほど疲労強度が低下しており、推定最大さび厚とレールの疲労強度に相関関係があることが分かった。
- (3) 腐食の進行による疲労強度の低下を考慮可能な腐食レールの余寿命評価手法を考案した。
- (4) 目視検査においてさびこぶが顕著なレールを発見した際に、さびこぶに対して膜厚計を用いてさび厚を測定し、さび厚が大きい箇所を要注意箇所とし、軌道構造、車両条件に応じた余寿命推定を実施してレール交換計画を立てることを提案する。

参考文献

- [1] 日本機械学会: “疲れ強さの設計資料 (III)”, 日本機械学会, pp. 1 (1974)
 - [2] 細田充, 片岡宏夫, 高須豊, 弟子丸将: “電食・腐食環境下におけるレールの余寿命評価”, 鉄道総研報告, Vol. 27, No. 4, pp. 5 - 10 (2013)
 - [3] 水谷淳, 細田充, 山本隆一: “レール腐食量の定量把握と腐食程度毎のレール疲労強度”, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 東京, 2019 年 12 月 4 - 6 日, pp. 312 - 315 (2019)
 - [4] 貝沼重信, 山本悠哉, 伊藤義浩, 林秀幸, 押川渡: “腐食生成物層の厚さを用いた無塗装普通鋼材の腐食深さとその経時性の評価方法”, 材料と環境, Vol. 61, No. 12, pp. 446 - 453 (2016)
 - [5] 石川雄一, 尾崎敏範: “極値統計解析による局部腐食損傷の予測”, 日本金属学会会報, 第 21 巻, 第 3 号, pp. 133 - 140 (1982)
 - [6] 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)
- (2020 年 5 月 26 日受理、2020 年 10 月 13 日採択)