

鉄道一般

車両

施設

電気

運転・輸送

防災

環境

人間科学

浮上式鉄道

レールの腐食状態を定量的に把握して損傷を防止する

列車の走行安全を維持するために定期的なレール交換が行われていますが、交換のタイミングが遅れた場合など少ないながらレールが損傷する場合もあります。近年発生したレールの損傷のうち、孔食や断面減少が生じた「著しい腐食」によりレール自体の疲労寿命が低下したと判断された事例が複数あります。現在腐食レールの健全度を評価できる有効な手段がなく、レールの腐食状態を適切に把握し、その結果をもとにしてレールの交換時期を提示する手法が求められています。ここでは、レールの腐食状態を定量的に把握して損傷を防止する方法として、さび厚に着目した手法について紹介します。



水谷 淳

Jun Mizutani

前 軌道技術研究部
レールメンテナンス研究室
研究員



細田 充

Mitsuru Hosoda

軌道技術研究部
レールメンテナンス研究室
副主任研究員

腐食レールの保守管理の課題

レールは列車を安全に誘導するために重要な部材です。列車の走行安全を維持するためには定期的なレール交換が欠かせません。レール交換を実施する要因のひとつに「レールの疲労」があります。

列車荷重によってレールが曲げられることでレール底部に発生する引っ張りの力が疲労による破壊を引き起こします。これを防止するため、レール交換に至るまでの列車の通過量を定めています。

レールの疲労を管理する際、「著しい腐食」が発生する箇所については、とくに注意が必要です。レールが著しく腐食することで、レール交換の目安

である列車通過量に達する前にレールが損傷する場合があります、問題となっています。

レールの腐食は、おもに踏切やトンネルの漏水が発生している箇所において発生し、海底トンネルなど、漏水の塩分濃度が高い箇所でより顕著になります。腐食が著しい場合にはレール表面にさびこぶや孔食（※参照）が発生したり、断面減少が生じたりします（図1）。そのような箇所に列車荷重が

※ さびこぶ

金属の腐食の一種。腐食が進んでさびがこぶ状に堆積した状態。

※ 孔食

金属の腐食の一種。孔があいたように、レール内部へ向かって局所的に進行する腐食。

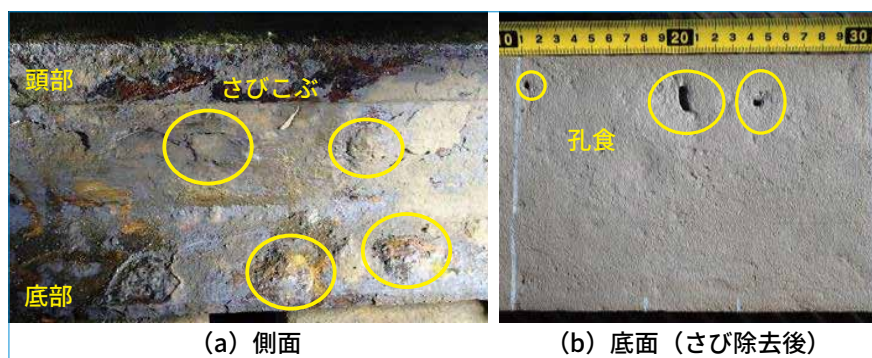


図1 著しく腐食したレール

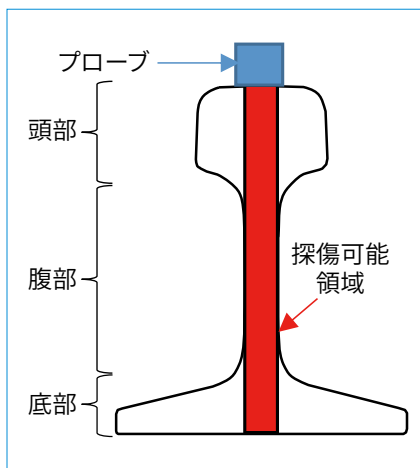


図2 超音波によって探傷可能な領域

集中すると、き裂が発生・進展し、レールが損傷する可能性があります。

現在、レールの腐食に関しては、目視検査や、レール頭頂面からの超音波探傷検査によるレール底面の断面減少量の測定が行われています。しかしながら、目視検査は、検査者によって判断のばらつきが生じてしまいます。また、超音波探傷検査も、図2に示すように、探傷可能領域がレール中央付近に限られているため、レール損傷を引き起こす可能性がある孔食などがレール中央付近から離れた位置に生じた場合、それらを発見することができません。

以上のように、現在実施されている腐食レールの検査手法は万能でないため、レール交換タイミングを判断することに苦労しています。そこで、レールの腐食状態を、検査者によらず、定量的に把握し、その結果をもとにして最適な交換周期を提案する手法（測定法と交換する基準値）が求められています。

さび厚の測定によるレール腐食状態の把握¹⁾

腐食レールはレール底面の孔食を起点として損傷するケースが多いため、レール底面の状況を直接観察することが理想ですが、敷設状態でレール底面

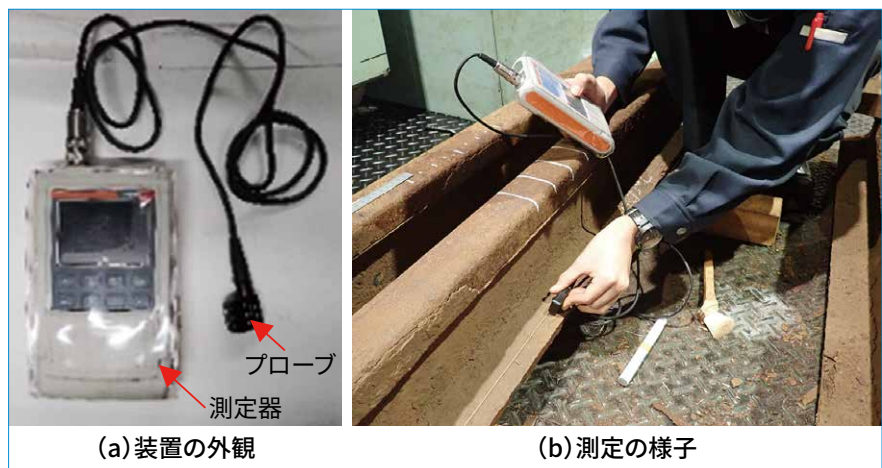


図3 電磁式小型膜厚測定器とプローブ

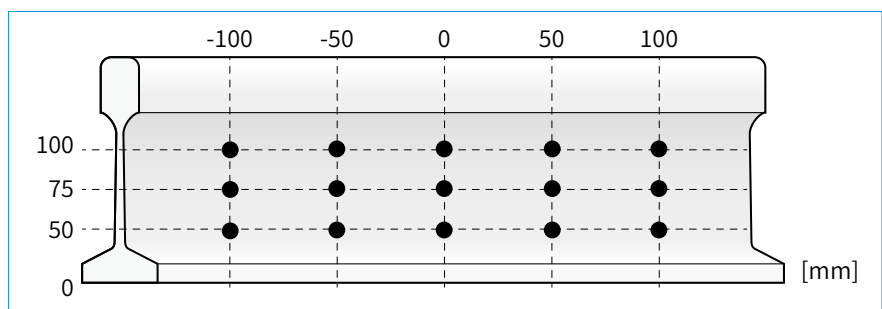


図4 さび厚測定箇所

を観察する手法がありません。

ところで、鋼構造物の分野では、実構造部位のさび厚に基づいて、部位レベルの腐食進行性を定量的に表す手法が提案されています²⁾。そこで、この手法を応用し、腐食レール腹部のさび厚から、レールの腐食状態を定量的に把握できないか試みました。

今回は、海底トンネルで腐食したレールを22本収集し、電磁式小型膜厚測定器と厚膜用のプローブ（図3）を用いてさび厚を測定しました。なお、電磁式小型膜厚測定器は、塗装やめっきなどの皮膜の厚みを測定する装置ですが、さび厚の測定にも利用できることが過去の研究によって示されています²⁾。測定箇所は、図4に示すように、レール長手方向の中心位置を0として、長手方向に ± 50 、 ± 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、75、100mmの位置

としました。レール1本あたりの測点はレール腹部の両側の計30か所です。また、電磁式小型膜厚測定器はプローブ設置位置の数ミリのずれで計測結果が変わることが知られており、複数回の計測をすることが望ましいため、1か所の測定箇所に対して11回測定を行いました。

ところで、局所的にさびこぶが発生したレールの場合、30か所の測定データにそのレールがもつ最大さび厚が含まれない可能性が懸念されます。そこで、極値統計法^{3) 4)}（※参照）を用いて、レールがもつ最大さび厚の推定を試みました。なお、ここでは小面積 s

※ 極値統計法

小面積の測定区画 s から取得した値を用いて、大面積 S をもつ装置・機器・部品などにおける最大値を統計的に推定する手法。

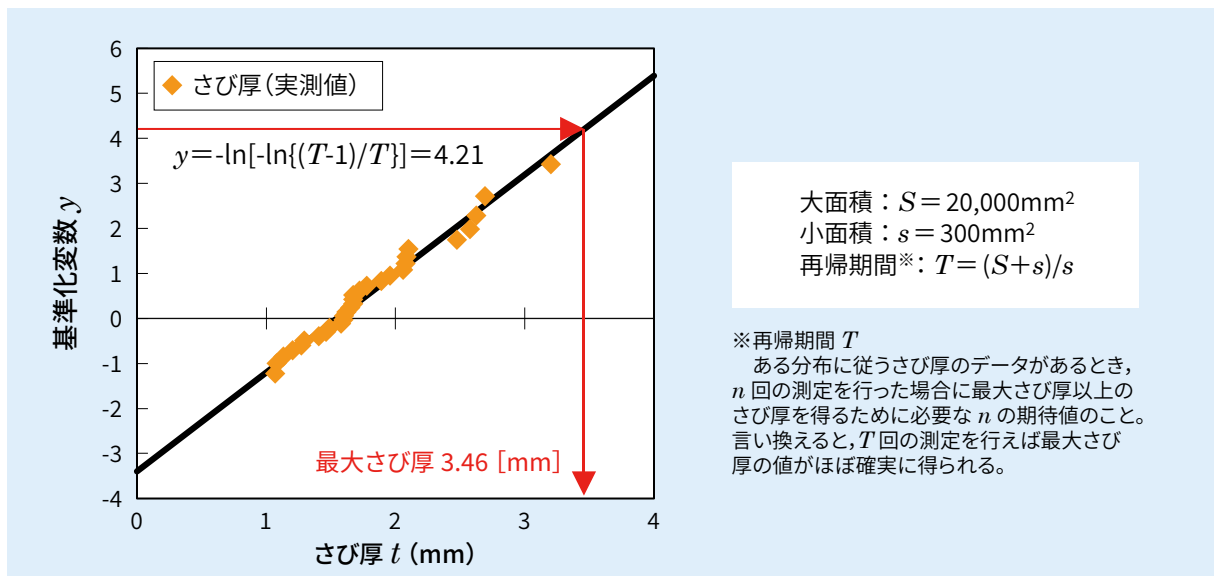


図5 最大さび厚の推定例

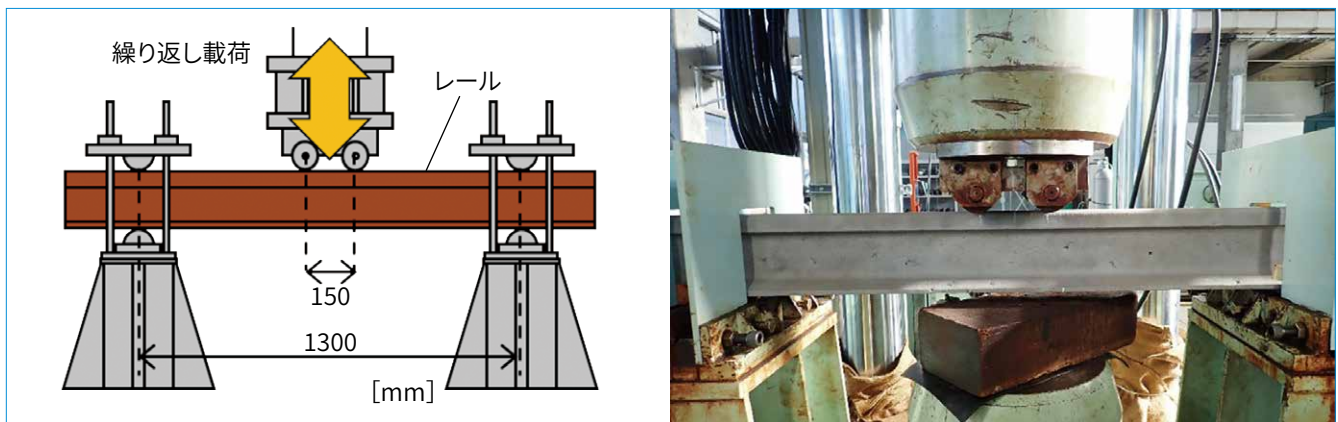


図6 レール曲げ疲労試験の様子

はプローブを当てて測定した面と考えると「プローブ接地面積 $10\text{mm}^2 \times$ 測点 30 か所 $= 300\text{mm}^2$ 」とし、大面積 S はさび厚を測定した範囲のレール腹部と考えると「レール腹部の長手方向長さ $200\text{mm} \times$ レール腹部の高さ $50\text{mm} \times 2$ (内側+外側) $= 20,000\text{mm}^2$ 」としました。

測定したさび厚 t は、小さい順に並べ、それぞれ t_j ($j = 1 \sim 30$) とします。そして、それぞれの j ($j = 1 \sim 30$) について、測定箇所数 (30か所) に1を加えた値 (30+1) で割って累積分布関数 F_j を算出します。これを以下の式のように2回対数を取ることによって標準化変数 y_j を導出します。

$$y_j = -\ln\{-\ln(F_j)\} = -\ln\{-\ln[j/(30+1)]\}$$

ここで、縦軸に先ほど導出した標準化変数、横軸にさび厚をとり、あるレールの実測データをプロットした例が図5になります。極値統計法を適用する際に、実測値が直線的に分布するかどうかを判定する必要があります。図5は実測値が直線上におおよそ分布しており、極値統計法が適用可能であるといえます。この例を含め、今回測定対象としたすべてのレールにおいて、さび厚の実測値が直線的に分布することを確認しました。そのため、局部のさび厚測定により測定したレールのさび厚を推定することができると判断しました。

以上のように、現在は目視によって定めている腐食程度のカテゴリを、さび厚

の測定および統計的な処理を実施することによって、定量的に行うことが可能と考えています。

レール腹部のさび厚とレール疲労強度の関係

著しく腐食したレールがほとんど腐食していないレールと比較してどの程度早期に損傷しうるかを把握することは、著しく腐食したレールの交換時期を定めるために重要です。そのため、さび厚を測定したレールに対して曲げ疲労試験を実施して、レール底部に作用する応力に対する破断に至るまでの繰り返し载荷数の関係を調査しました。

レール曲げ疲労試験の様子を図6に示します。レール底部に引張応力のみ



図7 レール曲げ疲労試験後のレールの一例(破断面)

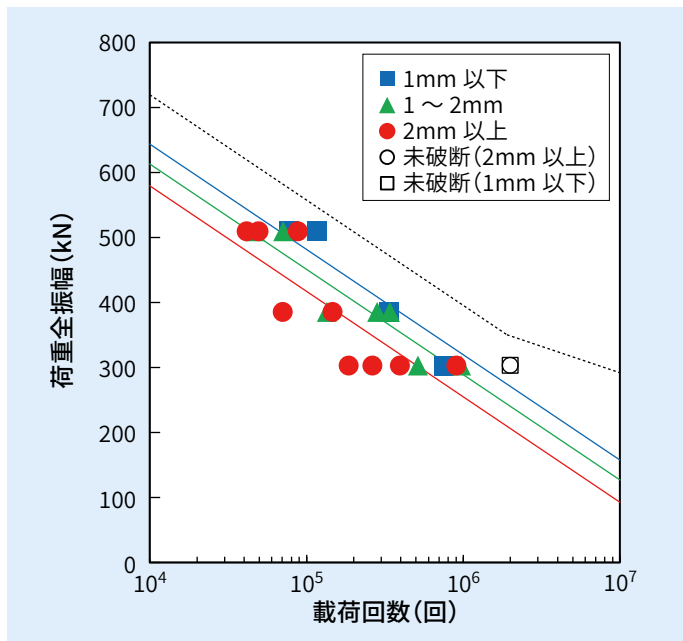


図8 最大推定さび厚ごとの疲労試験結果

が作用する試験条件にて曲げ疲労試験を実施しました。最大载荷回数を200万回とし、200万回を超えても破断しない場合は「未破断」と分類しました。

試験の結果、22本中20本が破断しました。破断したレールは、すべてレール底面の孔食から疲労き裂が進展していました(図7)。

曲げ疲労試験結果を図8に示します。横軸が载荷回数、縦軸が荷重全振幅(図9参照)とし、推定最大さび厚ごとに1mm以下、1~2mm、2mm以上の3段階に分類してプロットしたものの、および分類したグループごとの分布データより算出した「一定の振幅で繰り返し負荷される荷重と破断までの繰り返し回数の関係を示した直線」を示しています。なお、図中には、過去の研究⁵⁾で得られたほとんど腐食していないレールの試験結果から得た直線もあわせて示しています(黒点線)。

推定最大さび厚が大きいグループ

荷重全振幅

荷重全振幅=最大荷重-最小荷重
なお、本試験は最小応力を41.3kNに固定している。

のS-N曲線ほど、グラフの左側、すなわち低繰返し数側に分布していることがわかります。このことから腐食したレールはほとんど腐食していないレールと比較して、同じ荷重が繰返し負荷された場合に、少ない繰返し数で破断することがわかりました。また、推定最大さび厚が大きいほど、より少ない繰返し数で破断することもわかり、レール腹部の推定最大さび厚とレールの疲労寿命に相関関係があると判断しました。

現場におけるさび厚を指標とした腐食レールの管理手法の提案

今回、レールの腐食状態を把握する新しい方法として、レール腹部のさび厚に着目した手法について試みました。その結果、電磁式小型膜厚測定器を用いてレールの腐食状態を定量的に把握できること、測定したさび厚が大きいほどレールの疲労寿命が低下することがわかりました。

そこで、さび厚を指標とした腐食レールの管理手法として以下を提案します。

- ①目視検査にてさびこぶが顕著なレールを発見する。

②さびこぶが顕著なレールに対して電磁式小型膜厚測定器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、交換計画を立てる。

今後は、より高速で大量にレール腹部のさび厚を取得する手法を開発することで、より実効的な腐食レールの維持管理手法を提案していきます。**RRR**

文 献

- 1) 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, pp.312-315, 2019
- 2) 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.483-494, 2012
- 3) 三浦健蔵: 腐食メカニズムと余寿命予測, コロナ社, 2007
- 4) 村上敬宣: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響(OD版), 養賢堂, 2008
- 5) 弟子丸将, 片岡宏夫, 阿部則次, 大野壮伸: 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