

浮きまくらぎやレール凹凸の発生状態に着目した
経年レールの疲労寿命評価

細田 充* 高橋 信貴** 弟子丸 将*

Fatigue Life Evaluation of Aged Rails Focusing on The Occurrence State of
Hanging Sleepers and Rail-Head Surface Irregularities

Mitsuru HOSODA Nobutaka TAKAHASHI Tadashi DESHIMARU

This study analyzed the gap under hanging sleepers and the surface irregularities of rail heads obtained on the operating railway track, which affect the fatigue life of aged rails. Fatigue tests were conducted on aged rails exhibiting surface irregularities and on aged rails with a history of being laid on hanging sleepers. On the basis of the fatigue test result, we proposed a quantitative evaluation method for the safety and control value of aged rails for extended use. This method reflects the probability of hanging sleepers, as well as the variability of the fatigue strength of aged rails.

キーワード：レール，疲労寿命，浮きまくらぎ，頭頂面凹凸，疲労試験，交換周期

1. はじめに

レールの保守管理の一環で、主に大手の事業者では、レールの曲げによる疲労破壊の防止を目的として、レールの疲労寿命に達する前に周期的なレール交換を実施している。その交換周期は、累積通過トン数（軸重×車軸通過回数）に基づいて設定されている¹⁾。

レールの寿命評価に関する研究結果^{2) 3)}から、経年レールの疲労寿命は、図1に示すように、「A: 経年レールの使用履歴」および「B: 疲労試験で評価される余寿命」によって評価できると考えられる。前者は経年レールが敷設期間中に受けた累積通過トン数、後者は営業線から撤去後の経年レールの疲労試験により得られる S-N 曲線に基づき求まる通過トン数である。累積通過トン数 5.4 億トンを使用履歴とし、レール頭頂面凹凸（以下、頭頂面凹凸という）に起因して生じるレール底部曲げ応力により疲労強度上弱点部となる各種溶接部を対象に実施した試験結果により得た経年レールの S-N 曲線を図2に示す。疲労き裂は鍍肌のレール底部を起点として生じており、溶接種別毎の疲労強度の差異はほぼない。また、5 年程度暴露した累積通過トン数履歴の無い鍍肌レールの強度と比較しても差異が無かった⁴⁾。

金属材料の疲労特性には、ある応力以下で载荷したとしても疲労破壊しない限度値である疲労限度がある⁵⁾。例えば、構造物の疲労設計指針等では S-N 曲線に対して疲労破壊しない応力の値である打ち切り限界（以下、打ち切り限界という）⁶⁾が設定されている。経年レールでは応力全振幅 200MPa 程度が疲労限度と考えられており⁷⁾、それ以下の応力では疲労破壊をほとんど生じない。経年レールを対象とする応力全振幅 200MPa 未満の疲労試験結果は少ないが、疲労限度と S-N 曲線が交差する点を折れ曲がり点として疲労限度以下の領域で傾きを半減（図2 参照）し、この領域における S-N 曲線を用いた寿命評価がこれまでなされてきた。これに対し、実際の営業線で、著大な頭頂面凹凸や浮きまくらぎが存在しない場合のレールの底部曲げ応力は、応力全振幅 200MPa より十分に小さい応力領域で使用されていると考えられる²⁾。そのような応力下で使用されてきた大きな累積通過トン数履歴を負った経年レールに対して疲労試験を実施し

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

** 元 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

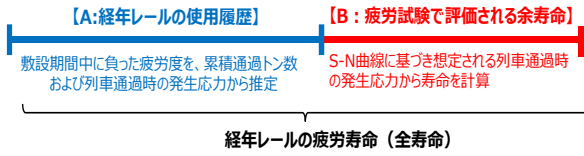


図1 経年レールの疲労寿命

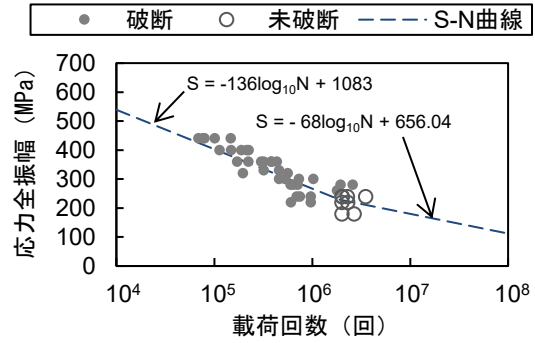


図2 既往の研究で得られた S-N 曲線

たとしても、疲労が累積していないことから図2で示した疲労試験結果や S-N 曲線との差異が小さいことが予想される。この場合、経年レールの管理で打ち切り限界を設け、その応力以下でレールを使用する場合、周期交換を実施しない方策も取り得る。

本研究では、経年レールを収集して疲労試験を実施し、レールの疲労特性に関するデータを取得した。また、寿命推定に影響を及ぼすような量のレール頭頂面凹凸と浮きまくらぎについて、営業線で得られた軸箱加速度を用いて推定できる頭頂面凹凸と浮き量を入力するレール疲労寿命推定方法を提案し、交換周期延伸について検討した⁸⁾。

2. 浮きまくらぎおよび頭頂面凹凸の発生状況

2.1 営業線上の浮きまくらぎの発生状況

営業線のロングレール区間のバラスト軌道を対象に、軌道検測データを用いて浮きまくらぎの発生状況を調査した。表1に分析の対象とした線区の概要を示す。経年レールの周期交換を実施している線区である、年間通過トン数約1000万トンおよび4000万トンの2線区の合計150kmの範囲における、各溶接部(Track A:16328箇所、Track B:9036箇所)の前後3m区間で浮きまくらぎの浮き量を推定することとした。軌道検測車による動的な軌道検測データに対して、軌道保守管理データベースシステムLABOCSを用いて、過去に提案された浮きまくらぎの推定手法⁹⁾を適用し、統計的な分析を行った。

推定した浮き量別に発生確率をヒストグラムにした結果を図3に示す。両線区において、95%程度の溶接部において浮き量1mm以下の発生状況となっている。また、この分布に対して、いくつかの分布関数でフィッティングした結果、信頼性工学等の分野で異常値の発生確率を求める際などにも使用されるガンマ分布が良く当てはまった。そのため、ガンマ分布を仮定して、任意の発生確率における浮き量を求めることとした。ガンマ分布における確率密度関数を以下に示す。

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \tag{1}$$

表1 分析対象の線区の概要

線区	Track A	Track B
レール種別	JIS 60kg レール	
調査延長	150 km	
軌道構造	バラスト軌道	
年間通過トン数	1000 万トン	4000 万トン
調査溶接箇所	16328 箇所	9036 箇所

ここで、 α は形状母数、 β は尺度母数であり、これら係数を図3で示した累積確率に対してフィッティングで求めた。求めた近似式は、決定係数99%程度であり、良好な一致傾向であった。

浮き量の最大値、平均値、 α 、 β 、発生確率5%および1%浮き量の値を表2に示す。ガンマ分布による累積確率で見ても、浮き量1mm以上は、5%以下の発生確率となっている。これは、例えば浮き量1mmを想定して疲労寿命を推定する場合にも95%の溶接部に発生している浮き量を包含した評価になっていることを意味する。また、より安全側の評価を行うのであれば、発生確率1%等の値を設定することも考えられるが、後述する頭頂面凹凸の設定値の発生確率や経年レールの疲労試験結果のばらつきも確率として考慮し、それらを全て掛け合わせた寿命の推定における評価となるため、それらを勘案した確率設定とする必要がある。

一方で、溶接部には頭頂面凹凸が存在し、列車通過時の衝撃荷重が大きくなり疲労強度上の弱点箇所となる。また、溶接部以外においても、浮き量が大きい場合は、頭頂面凹凸が溶接部より小さくてもレール底部の発生応力が増加することにより、疲労寿命が低下することも懸念される。そこで、同線区で溶接部の前後の3m区間を除いた25m区間毎に最大の浮き量を推定し、同様な統計分析を行った。溶接部同様、浮き量の統計値の結果を表3に、浮き量別の発生確率をヒストグラムにした結果を図4に示す。なお、この

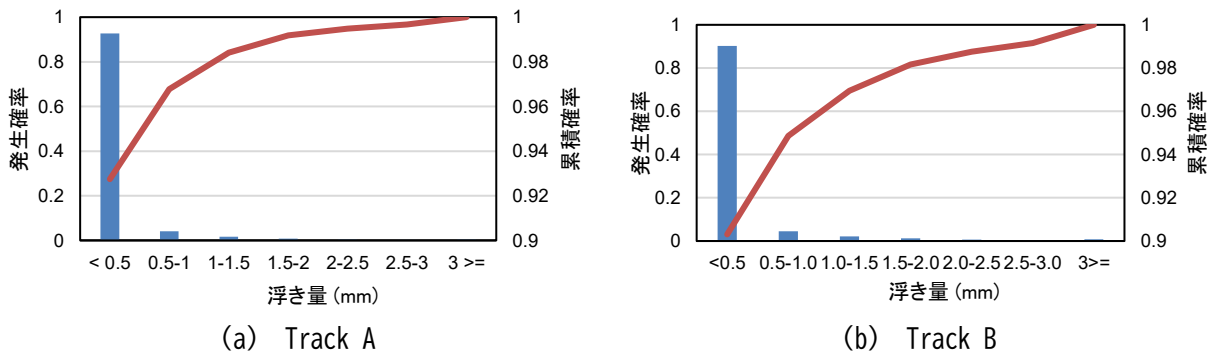


図3 浮き量（溶接部）の発生確率ヒストグラム

表2 溶接部の浮きまくらぎ発生確率

線区	Track A	Track B
最大値	5.8 mm	8.8 mm
平均値	0.11 mm	0.17 mm
α	0.11	0.11
β	1.12	1.60
1% 発生確率	1.9 mm	2.6 mm
5% 発生確率	0.8 mm	0.9 mm

表3 溶接部以外の浮きまくらぎ発生確率

線区	Track A	Track B
最大値	9.5 mm	12.7 mm
平均値	0.54 mm	0.57 mm
α	0.56	0.35
β	1.02	1.60
1% 発生確率	3.5 mm	4.5 mm
5% 発生確率	2.3 mm	2.4 mm

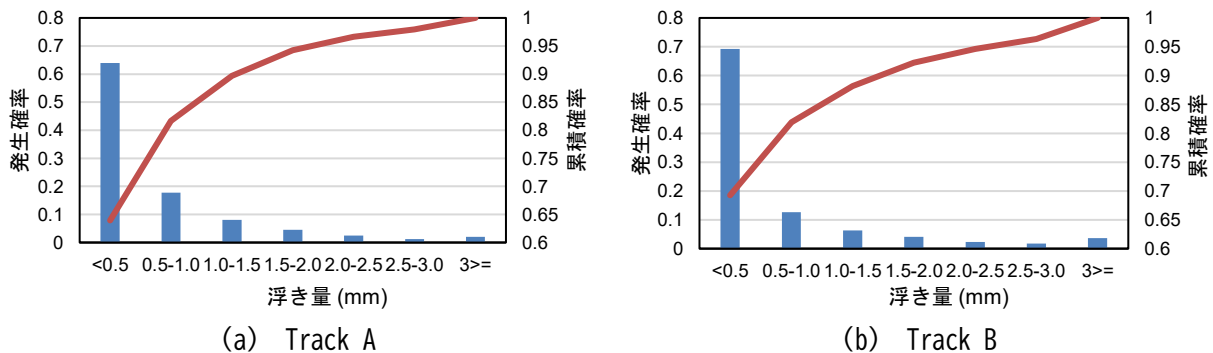


図4 浮き量（溶接部以外）の発生確率ヒストグラム

分布に対しても、いくつかの分布関数でフィッティングした結果、溶接部と同様にガンマ分布が良く当てはまった。溶接部のみを対象とした場合の結果と比較して、同じ線区でも対象延長が長く、これに応じて対象箇所数が大きくなる分、全体的に浮き量の値が大きくなっている。また、発生確率5%および1%の浮き量をみると、それぞれ2.3~2.4 mm および3.5~4.5 mm となっている。そのため、溶接部と同等の浮きまくらぎの発生確率(5%)で評価することを考えた場合、浮き量は2.5 mm 程度となる。したがって、今回の結果においては、溶接部の頭頂面凹凸が浮きまくらぎの発生に大きく影響していないように見える。この点に関しては、バラスト道床のつき固めなどの補修作業の影響やレール長手方向のバラスト道床のまくらぎ支持係数のばらつきなどの頭頂面凹凸以外の要因の影響が考えられ、さらなる研究が必要である。

2.2 営業線上の頭頂面凹凸の実態調査

グラインダ等で頭頂面凹凸を一度も削正して除去していない区間の溶接部において測定した頭頂面凹凸のデータを用いて、浮きまくらぎと同様に統計的な分析を実施した。頭頂面凹凸の測定については、レール溶接部を中心として長さ方向1 mの範囲の1 m 弦および100mm 弦の凹凸を把握するレール頭頂面凹凸測定器(図5)を用いて測定した。

表4に頭頂面凹凸データを分析した線区の概要を示す。年間通過トン数約3,000万トン(Track C)および1,700万トン(Track D)の2線区で、エンクロズアーク溶接を対象に測定した結果を整理した。これは、エンクロズアーク溶接部の凹凸進みが他の溶接種別の凹凸進みと比較して大きいという過去の調査結果²⁾に基づくものである。なお、後に記す経年レールの疲労寿命を計算する際、従来から頭頂面凹凸量のみならず凹凸進み(各溶接部の累積通過トン数1億トンあたりの100 mm 弦凹凸量)も指標として用いているため、ここでは両指標を用いて評価することとした。

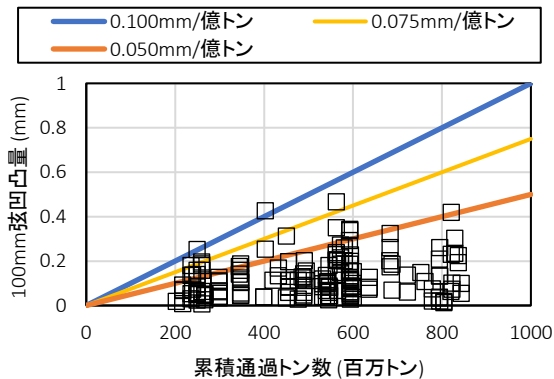
図6に頭頂面凹凸量と累積通過トン数の関係を示す。Track Cの2点を除いて凹凸進みが0.1 mm/億トンに収まっていることがわかる。次に頭頂面凹凸量別および凹凸進み別の統計値を表5に示す。両線区にお



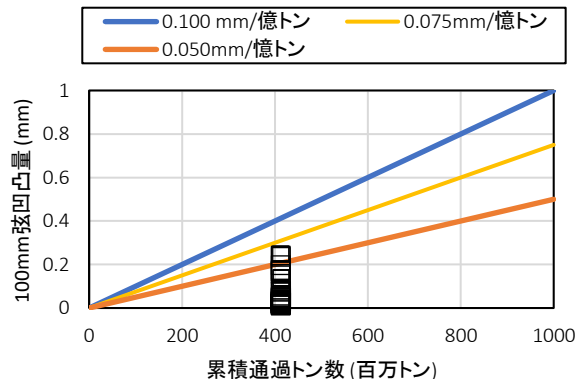
図5 レール頭頂面凹凸測定器の概要

表4 分析対象線区の概要

線区	Track C	Track D
年間通過トン数	3000万トン	1700万トン
累積通過トン数	2~8.5億トン	4.3億トン
軌道構造	バラスト軌道	スラブ軌道
溶接箇所数	164箇所	100箇所



(a) Track C



(b) Track D

図6 頭頂面凹凸量と累積通過トン数の関係

表 5 溶接部の頭頂面凹凸の発生確率

種 別	頭頂面凹凸別		凹凸進み別	
	Track C	Track D	Track C	Track D
最大値	0.47 mm	0.25 mm	0.11 mm	0.06 mm
平均値	0.13 mm	0.07 mm	0.03 mm	0.02 mm
形状母数 α	0.93	0.64	1.79	1.22
尺度母数 β	9.12	7.58	1.46	1.50
1% 発生確率	0.40 mm	0.27 mm	0.09 mm	0.08 mm
5% 発生確率	0.26 mm	0.17 mm	0.06 mm	0.05 mm

いて、95 %程度の溶接部において、頭頂面凹凸量が0.26 mm 以下、凹凸進みが0.05 mm/億トン以下であった。さらに、図 6 に示す凹凸量の頻度分布が図 3 に示すような分布を示したことから、フィッティングから求めたガンマ分布による確率密度関数から発生確率 1 %の頭頂面凹凸量および凹凸進みをみると、それぞれ0.27~0.40 mm および 0.08~0.09 mm/億トンであった。

3. 経年レールの疲労試験

前章に示した浮き量 7mm といった大きな浮きまくらぎが発生している中間部（溶接部等を除いた一般区間）もしくは凹凸量 0.5mm といった大きな頭頂面凹凸が発生している溶接部の中から、交換周期に達するような経年レールを収集して 4 点曲げの疲労試験を実施し、応力と破断回数の関係（S-N 線図）を求めたこととした。

表 6 に営業線から収集した経年レールの使用履歴や諸元を示す。累積通過トン数 6.0~9.2 億トンの使用履歴を有する未削正の溶接部の経年レール、および浮き量の大きな中間部等の経年レールを試験対象とした。未削正の溶接部では、頭頂面凹凸が最大 0.5mm に達していた。また、中間部で著大な浮きまくらぎが発生していると、頭頂面凹凸がなくても、溶接部以上に列車通過時のレールの底部曲げ応力が大きくなる場合があるため、浮き量が最大 7mm 程度 of 中間部の経年レールも収集した。試験本数は 45 本とし、このうち、ガス圧接部（GPW）20 本、テルミット溶接部（TW）5 本、中間部 10 本、伸縮継目 10 本とした。なお、伸縮継目については採取したトングレールの断面が左右非対称であることから、レール頭部に一部、载荷のための加工を施して疲労試験を実施した。

図 7 にレール曲げ疲労試験機の概要、表 7 に試験条件を示す。試験体を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。スパン 1,300 mm でレールを支持し、载荷点および支持部でのフレッティング疲労（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、本試験では最小応力 30MPa の片振り試験であったが、実軌道上においては応力 0MPa からの片振り状態であるため、過去の研究に則り、応力全振幅の換算を行った。応力全振幅の換算式を式(2)に示す。溶接部各種の破断強度は、ここでは表 8 に示す各溶接種別の静的曲げ試験等における破断強度を用いた。

$$\sigma'_A = \sigma_T \cdot \frac{\sigma_A}{(\sigma_T - \sigma_{min})} \tag{2}$$

ここで、 σ'_A ：換算後の応力全振幅、 σ_T ：試験片の破断強度、 σ_A ：試験時の応力全振幅、 σ_{min} ：試験時の最小応力である。

図 8 に試験結果（図中の矢印は未破断であることを示している）を、表 9 に試験結果から求めた S-N 曲線

表6 収集した経年レールの諸元

線別	在来線	新幹線
レール種別	50kgN, 60kg	60kg
累積通過トン数	約6~9.2億トン	約8億トン
試験体種別	溶接部(GPW) 溶接部(TW)	溶接部(GPW) 中間部(浮きまくらぎ)
敷設時最大浮き量	最大1.90mm	最大7mm
最大レール凹凸量	最大0.50mm	最大0.03mm(削正有)

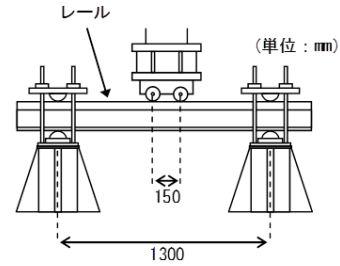


図7 実レールの曲げ疲労試験の概要

表7 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	30MPa
試験環境	常温, 大気中
載荷周波数	2.0~5.0Hz

表8 破断強度

溶接種別・母材	破断強度 (単位:MPa)
母材	1500
ガス圧接	861
テルミット溶接	683

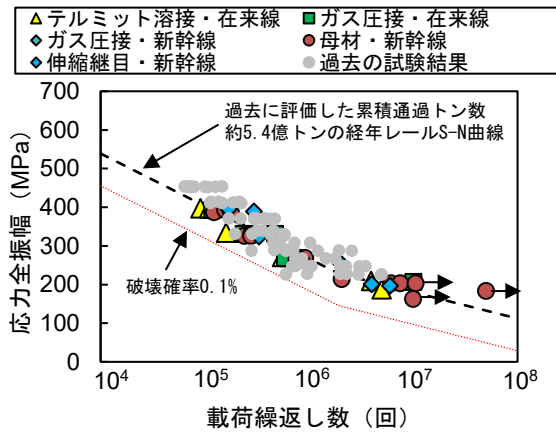


図8 実レールの曲げ疲労試験の結果

表9 S-N 曲線の切片

項目	切片
本試験の全供試体	1085
累積通過トン数7.4億トン (平均6.5億トン)以下	1075
累積通過トン数7.5億トン (平均8.0億トン)以上	1098
過去に提案されたS-N曲線 (平均5.4億トン)	1083
破壊確率0.1%のS-N曲線	993

の切片を示す。応力全振幅 200MPa 以上の領域では、全ての試験体が破断に至った。ここでは、傾きを固定し切片の変化に着目することでパラメータの影響度を把握する目的で、過去の研究で得られた S-N 曲線²⁾ から引き続き S-N 曲線の傾きをどの条件においても-136 で一定にして、切片を最小二乗法で求めた。切片の値に着目すると、今回の試験結果から求まる S-N 曲線と過去の累積通過トン数 5.4 億トンの経年レールの S-N 曲線ではほぼ同じ結果だった。また、破壊確率 0.1% (過去に提案した在来線における経年レールの疲労強度のばらつきを考慮して設定した下限値) の S-N 曲線の切片を上回っていることがわかる。さらに、本試験結果から、7.5 億トン未満 (平均累積通過トン数 6.5 億トン) および 7.5 億トン以上 (平均累積通過トン数 8.0 億トン) に分類して同様に切片を求めた結果、これらも同程度の値となった。以上から累積通過トンが多く、かつ最大 0.5mm 程度の頭頂面凹凸または最大 7mm 程度の浮きまくらぎが発生している状態で敷設されていても、さらに継続して使用するのに十分な疲労強度があることを確認できた。また、応力全振幅が 180MPa 以上 200MPa 未満の領域では、破断、未破断が分かれる傾向を示したが、180MPa 未満の応力全振幅では全て未破断であった。載荷回数 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 (図 8 中に黒矢印が付してあるもの) あり、うち 1 本は応力全振幅 180MPa の条件で、他の試験体よりも高サイクルとなる 5,000 万回まで載荷したが未破断であった。

4. 浮きまくらぎおよび頭頂面凹凸量の発生確率を考慮した経年レールの疲労寿命の評価

前章で述べた疲労試験結果より、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則に基づく寿命評価法^{1) 2)}を用いてレールの疲労寿命を試算した。図9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対象として評価した。未削正または浮きまくらぎが存在する平均累積通過トン数8億の経年レールでも、過去のS-N曲線と同等の強度が得られたことから、経年レールを収集した時点で経験している履歴からの余寿命を求め、経年レールの履歴に加えることで、全体の疲労寿命を推定することとした。なお、疲労強度の特性曲線には、過去の研究で得られた図2のS-N線図を用いた。また、表10に示す通り、レール溶接部の頭頂面凹凸(VおよびW)および浮きまくらぎの浮き量(H)に応じたレールの底部曲げ応力を推定した。破壊確率は、浮きまくらぎの発生確率が5%、頭頂面凹凸進みが1%およびS-N曲線については下限値である0.1%の発生確率とした。なお、過去の調査結果では、レール溶接部での頭頂面凹凸は最大で0.10mm/億トン程度であると考えられている。

表11にレールの寿命推定結果を示す。ここで、溶接部については頭頂面凹凸進みを0.10mm/億トン、浮きまくらぎの発生確率を5%として、浮き量は1.0mmとした。中間部の浮きまくらぎ箇所については、頭頂面凹凸進みはないものとし、浮きまくらぎの発生確率を5%として、浮き量は2.5mmとした。溶接部の条件における推定寿命は50kgNレールで10.8億トン程度、60kgレールで11.7億トン程度であった。また、中間部の大きな浮きまくらぎが生じている箇所を想定して算定した推定寿命は、溶接部と比較して長い寿命と推定された。以上の結果から、レールの疲労寿命は現行の交換周期である6~8億トンよりも余裕があることが示された。

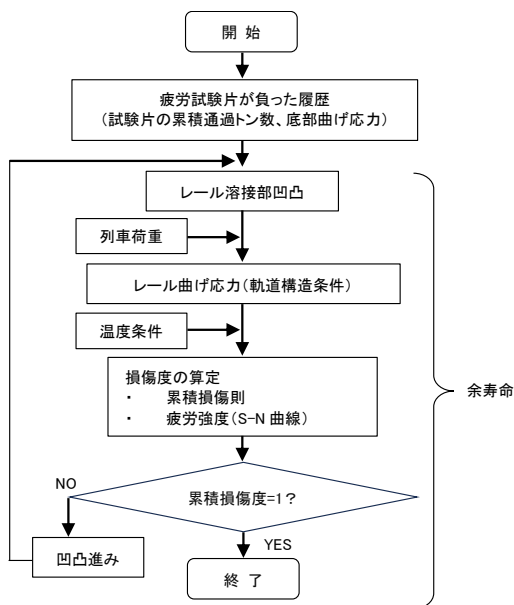


図9 寿命予測フローチャート

表10 レール底部曲げ応力の推定式

レール種別	推定式(単位はMPa)
50kgN	$30.8V+10.0W+6.8H+50.0$
60kg	$38.4V+5.0W+3.6H+41.9$

※ V, W, H はいずれも単位:mm

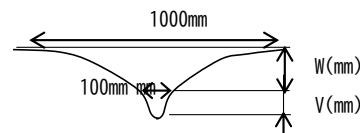


表11 寿命推定結果

レール種別	溶接の有無	レール凹凸進み (mm/億トン)	浮き量 (mm)	推定寿命 (億トン)
50kgN	あり	0.1	1.0	10.8
	なし	0	2.5	20.7
60kg	あり	0.1	1.0	11.7
	なし	0	2.5	39.2

5. 周期交換の延伸および応力の打ち切り限界の設定

前章に示したように、収集した経年レールは供用期間中と同様な保守状態であれば、疲労は大きく累積されないことが推定される。また、別途実施している、 $10^8 \sim 10^9$ の载荷回数の超高サイクル領域での疲労試験でも、疲労限度以下であれば疲労破壊が発生しないという結果が得られており、累積通過トン数が10億トン以上に達してさらに使用しても良いとされている³⁾。これは、レール底部の疲労破壊が発生する可能性が低いことを示している。さらに、構造物の疲労設計等では一般に、一定の発生応力以下で使用される場合、発生応力の打ち切り限界を定め、それ以下の使用環境下であれば、累積疲労を考慮しなくてもよい、というものである。各事業者の判断にもよるが、良好な軌道状態が維持されていれば車通過時の底部曲げ応力が小さいことを想定することができ、かつ、表面が錆肌で安定している場合には、疲労強度が低下することは考え難く、累積通過トン数による周期交換を実施しないといった判断もありうると思われる。

ここで、周期交換を実施しないための底部曲げ応力の打ち切り限界の検討の方法については、過去の研究でも提案しているレールの疲労限度と底部曲げ応力の比から求められる健全度⁹⁾を指標として、一定の値以上で健全度を保つような保守管理を実施すればよいと考えられる。

レールの健全度は以下の式で表される。

$$f_h = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \quad (3)$$

ここで、 f_h は健全度、 σ_m はレールの底部曲げ応力(MPa)、 σ_c は疲労限度(MPa)である。応力全振幅 200MPa を疲労限度として、かつ、ロングレールの温度低下時の引張軸力を安全側に考慮して 120MPa 作用すると考えると、耐久限度線図から得られる疲労限度の補正式⁴⁾は以下のようになる。

$$\sigma_c' = \sigma_c \left(1 - \frac{\sigma_{min}}{\sigma_T} \right) \quad (4)$$

ここで、 σ_c' は補正した疲労限度、 σ_{min} は引張軸力(120MPa)、 σ_T はレールの真破断強度(1500MPa)である。これらの値から σ_c' は184MPaとなり、健全度を求める式(3)の σ_c の値として代入する。

次に、底部曲げ応力 σ_m については、例えば表10の推定式に示したように、頭頂面凹凸量と浮き量によって決まることから、推定式を用いて健全度を求めると図10の通りとなる。頭頂面凹凸量と浮き量が大きくなるに伴い、底部曲げ応力が大きくなり、健全度が低下することが分かる。ここで、一般的な金属材料においてはき裂発生限度を疲労限度の2割減(疲労限度はレールが折損する応力の限度、き裂発生限度はき裂が発生する応力の限度)としていることから、健全度0.2以上で管理されていれば、安全に使用できると考えられる。そのため、ここでは余裕を見て健全度0.3未満の値を見ていくと、50kgNレールで、浮き量8mm以上かつ凹凸量0.5mm以上の条件では、0.3未満となっている。

なお、軌道の保守管理の実務において、健全度が0.3以下となった場合、バラストの突き固めによる浮きまくらぎの解消、レール削正による頭頂面凹凸の解消、さらにレールの交換といった処置の検討を行うことになる。他方、レール健全度が0.3を上回る場合には、予測した推定寿命まで交換周期までレールの交換周期を延伸することができる。

今後、レールを長く使用する場合に、頭頂面凹凸が大きくなることも考えられるため、そのような箇所ではレール削正や部分的なレール交換等の保守管理が必要である。さらに、著大な浮きまくらぎが発生している区間も想定され、このような場所では現状でもレール折損のリスクがあることから、本手法を活用し

てレール管理を実施することが望ましい。また、50kgN レールと比較して、60kg レールは健全度 0.3 に対して、余裕のある状態であることがわかる。経年レールの疲労試験において、浮き量 7mm 程度が発生していても強度が低下しなかったのは、健全度が 0.3 以上となる状態で使用されていたためと考えられる。ただし、底部曲げ応力は輪重が増大するに伴って値が大きくなるため、重量の重い列車が通過する線区等では注意が必要である。

なお、従来通りのレール交換が安全側の管理となることは言うまでもなく、今後、レール頭部の損傷状況等も勘案して、判断を検討するべきである。また、一定の経年を有するレールに対し、疲労試験の実施によって疲労強度を確認することやレール底部の腐食状況を検査することは、今後も有効である。

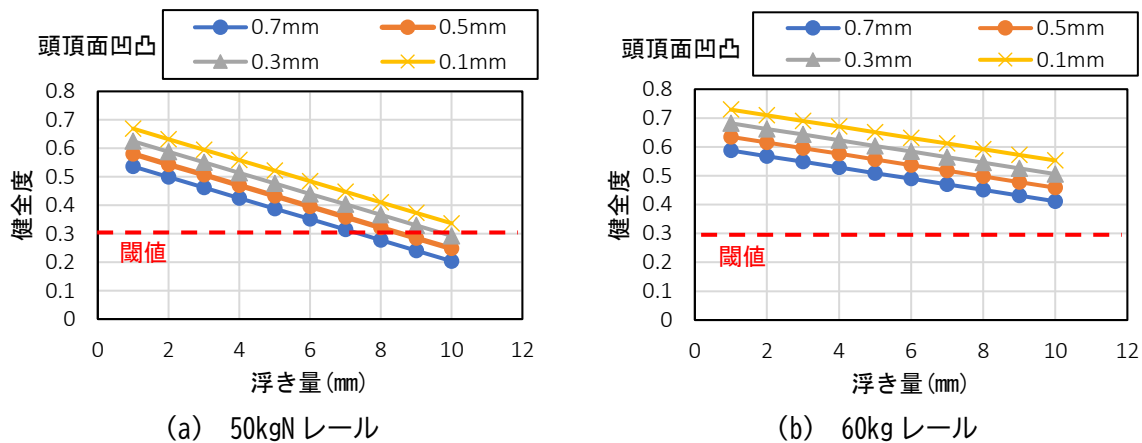


図 10 レール健全度と頭頂面凹凸および浮き量の関係

6. まとめ

本研究では、鉄道の経年レールの疲労寿命に影響すると考えられる浮きまくらぎや頭頂面凹凸に着目し、営業線におけるそれらの発生状況について統計的に分析した。また、大きな浮きまくらぎや頭頂面凹凸が発生している場合の経年レールの疲労試験を行い、経年レールの疲労特性に関するデータを取得するとともに、浮きまくらぎや頭頂面凹凸の発生確率および経年レールの疲労強度のばらつきを考慮したレールの保守管理における安全性の定量的な評価方法について提案した。その内容をまとめると次の通りである。

- (1) 経年レールの疲労寿命を推定する際の応答値であるレールの底部曲げ応力に影響する浮きまくらぎおよび頭頂面凹凸の発生状況を、営業線における検査データ等に基づいて統計的に評価した。浮き量および頭頂面凹凸量ごとに、確率密度関数によって評価した結果、ガンマ分布が良く当てはまることを確認した。
- (2) 現行の経年レールの交換周期である累積通過トン数 8 億トンに達し、かつ大きな浮きまくらぎや頭頂面凹凸が生じている経年レールに対して曲げ疲労試験を実施した。その結果、現行の交換周期に達したレールも、過去に試験した経年レール(累積通過トン数 5.4 億トン)と同程度の疲労強度が確認された。
- (3) (2)の疲労試験の結果より、経年レールの S-N 曲線は累積通過トン数に拠らず同一であり、浮きまくらぎや頭頂面凹凸が一定の値以下であれば、さらに交換周期を延伸することが可能である見通しが得られた。
- (4) 交換周期の延伸および撤廃した場合に、大きな浮きまくらぎや頭頂面凹凸が生じる環境で使用される場合に、レール底部曲げ応力が大きくなることでレール折損に至る可能性がある。このような箇所でのレール折損を防止するための指標として、レールの底部曲げ応力と疲労限度から求められるレール健全度を

提案した。

- (5) レール健全度が 0.3 を下回らないように、頭頂面凹凸および浮きまくらぎを管理することによって、レール底部からの疲労破壊の発生を回避することができると考えられる。なお、腐食や頭部傷等の損傷については別途超音波探傷等で管理する必要がある。

文献

- 1) 例えば新版軌道材料編集委員会：新版軌道材料，鉄道現業社，pp.41-42，2011
- 2) 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
- 3) 水谷淳，細田充，片岡宏夫，山本隆一：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，鉄道工学シンポジウム論文集，第22号，pp.173-177，2018
- 4) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，pp.33-40，2011
- 5) 例えば村上敬宣：金属疲労微小欠陥と介在物の影響，養賢堂，2004
- 6) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，pp.33-50，2012
- 7) 細田充，水谷淳，岩崎幹大，山本隆一：鉄道の経年レールの底部の表面粗さによる疲労限度の予測手法と疲労試験方法の違いによる影響，日本機械学会論文集，Vol.86，No.888，DOI:10.1299/transjsme.20-00147，2020
- 8) 細田充，高橋信貴，弟子丸将：レール応力に影響を及ぼす浮きまくらぎやレール凹凸の発生状態に着目した経年レールの疲労寿命評価，日本機械学会論文集，Vol.91，No.941，16頁，2025
- 9) 相澤宏行，細田充，山本隆一，田中博文，森健矢：トンネル漏水箇所におけるレール折損の原因推定と管理手法の提案，鉄道総研報告，Vol.37，No.8，pp.11-12，2023