

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

相澤 宏行* 細田 充* 山本 隆一**
田中 博文*** 森 健矢***

Monitoring Method to Prevent Rail Defects due to Water Drips in Tunnel from Occurring

Hiroyuki AIZAWA Mitsuru HOSODA Ryuichi YAMAMOTO
Hirofumi TANAKA Kenya MORI

There have been cases where rail defects due to water dripping in tunnels occur. This paper proposes a monitoring method to prevent this kind of rail defects from occurring. Firstly the authors investigate the cause of broken rails in tunnels, and it is revealed that rail-head irregularities and hanging sleepers cause significant bending stresses at rail foot. Field tests and numerical simulations were used to derive relationship between rail-foot stresses, rail-head irregularities and hanging sleepers. Finally, we developed a method for evaluating soundness of rails based on rail-foot stresses using data acquired by track inspection cars.

キーワード：レール損傷，レール頭頂面凹凸，浮きまくらぎ，レール応力，軌道検測車

1. はじめに

トンネル内の湿潤環境下のレールは、腐食による疲労強度低下に伴い、列車荷重を繰り返し受けることで、レール底部をき裂の起点として折損する可能性がある。そのため、レール探傷車によって取得されるレール底部の腐食量に着目した管理が行われている¹⁾。一方、レールの腐食が軽微であるにも関わらずレール底部を起点としてレールが折損することがあり、折損箇所ではトンネル天井からの漏水および著大なレール頭頂面凹凸と浮きまくらぎが確認されている²⁾。

そこで本研究では、レール折損発生箇所の調査を行い、レール折損発生に関する力学的なメカニズムを調査した。また、現地試験および車両走行シミュレーションによって、レール底部に発生する応力（以下、レール応力とする）を評価した。さらに、その結果をもとに、レールの健全度³⁾に基づいたトンネル内のレール折損を防止するための管理手法を提案する。

2. レール折損事例の調査による折損原因の推定

レールの腐食が軽微であるにも関わらずトンネル内でレール折損に至ったある一例について、レールの外観観

察および、折損箇所の軌道変位データの分析を行った。なお、調査箇所はバラスト軌道である。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 折損箇所においてはトンネル天井からの漏水が確認され、漏水がレール頭部に滴下されている箇所もあった。折損したレールの破断面には、腐食による断面欠損およびレール底部の顕著な減肉は確認されず、レール底部から発生した疲労き裂が観察された（図1 (a)）。
- (2) レール頭頂面の1mスパンの凹凸（以下、頭頂面凹凸とする、また頭頂面凹凸深さを単に凹凸量とする）を測定したところ、折損箇所の直近で頭頂面が局所的に摩耗し、最大で4mm程度の大きな頭頂面凹凸が確認された（図1 (b)）。
- (3) 軌道検測車で得られた軌道変位データをもとに推測された浮きまくらぎ（まくらぎとバラストの間に空隙が生じること、以下、空隙の大きさを浮き量とする）の量は、折損箇所近傍においては12mmであった。（図1 (c)）

上記の3点を踏まえれば、レールの腐食が軽微であることからレールの疲労強度は大きく低下していないものの、顕著な頭頂面凹凸および浮きまくらぎに起因して車両通過時に著大なレール応力が発生し、レール底部からき裂が進展して折損に至ったと考えられる。よって、次章以降、頭頂面凹凸および浮きまくらぎが発生している箇所のレール応力について検討することとする。

* 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室

** 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室
(現 鉄道国際規格センター)

*** 軌道技術研究部 軌道管理研究室

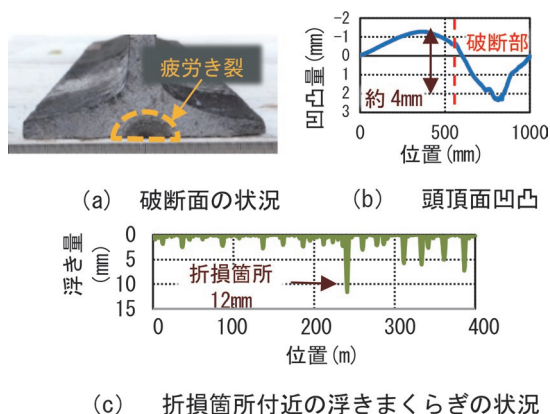


図1 折損レールと折損箇所状況

3. 頭頂面凹凸・浮きまくらぎ発生箇所のレール応力

3.1 現地応力測定

3.1.1 現地応力測定の概要

頭頂面凹凸と浮きまくらぎがレール応力に与える影響を検討するために、営業線においてレール応力の測定試験を行った。測定箇所は、軌道検測車による軸箱加速度および軌道変位データを分析することによって顕著な頭頂面凹凸および浮きまくらぎが発生していると推察される箇所を選定した。測定条件は、①頭頂面凹凸および浮きまくらぎが存在する状態と②レール交換および道床つき固めによる補修後の状態それぞれにおいて実施した。なお、補修後においても約4mmの浮き量が残っていた。

図2に、測定箇所の概要と、応力測定区間において実測された凹凸量および浮き量の分布を示す。凹凸量はレール凹凸連続測定装置⁴⁾で、まくらぎの浮き量は締結装置を緩めた状態でレール底部と軌道パッド上面の隙間を測定して得た値である。また、レール応力はまくらぎ間中央のレール底部側面に設置したひずみゲージ

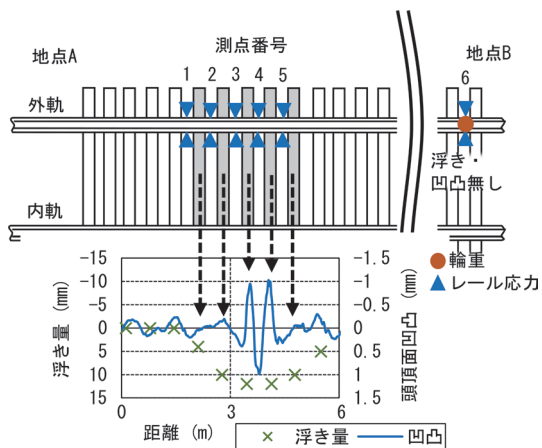


図2 現地応力測定の位置と頭頂面凹凸および浮きまくらぎの状況

表1 現地応力測定箇所の軌道および車両条件

軌道	レール	50kgN
	まくらぎ	PC6号
	まくらぎ間隔(mm)	670
	軌道パッドばね(MN/m)	110
	曲線半径(m)	300
	カント(mm)	80
車両	走行速度(km/h)	52~72
	測定輪重(kN)	42~70
	静止輪重(kN)	39, 52, 57

で、輪重はまくらぎ間中央のレール腹部に貼り付けた輪重ゲージで測定した。なお、レール応力はレール底部の軌間外側と内側の両方で測定し、これらの平均値を用いて評価することとする。6点の測点の内、測点1~5は浮きまくらぎが連続的に発生している箇所、測点6は、測点5から地点B方へ約8m離れた頭頂面凹凸も浮きまくらぎも無い箇所であり、健全箇所と位置づけた。図2より浮き量の最大値は測点4をはさむ両まくらぎにおいて12mmで、測点4を中心に浮きまくらぎが連続的に分布していることが分かる。頭頂面凹凸については、測定区間で全振幅の最大値が約2mmとなっており、浮き量と同様に測点4直上の凹凸量が最大となっている。なお、補修後は測点1, 2に浮きまくらぎが認められなかったことから、測点3~6のみ測定した。

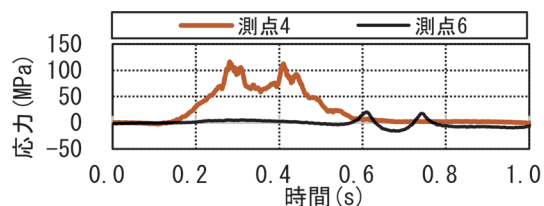
測定区間には複数の種類の車両が走行しており、走行速度および輪重には幅がある。表1に測定箇所の軌道条件および走行車両の条件を示す。

3.1.2 現地応力測定の結果

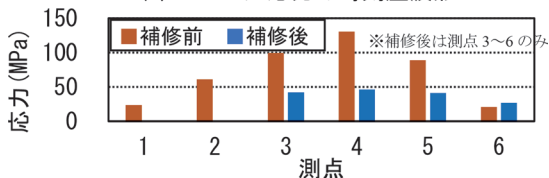
図3(a)に、ある車両の1台車が走行した際における、測点4(凹凸量および浮き量最大箇所)および測点6(凹凸量および浮き量0)において測定されたレール応力波形の一例を示す。図3(a)について、波形の1つ目のピークは台車の前軸、2つ目のピークは後軸通過時に対応している。測点4では測点6と比較して100MPa程度大きいレール応力が発生していることが分かる。

車両通過時のレール応力のピークを、測点ごとに補修前後で比較すると図3(b)のようになる。補修前のレール応力のピーク値は測点4が最大で、測点4から遠ざかるにつれ減少する傾向にある。また、補修後のレール応力は補修前と比較して顕著に低減されていることが確認された。

図4に補修前後の2両編成の列車10編成分の走行データに関する測点4および測点6で測定された輪重とレール応力を示す。補修前後で輪重、レール応力の双方が減少する傾向にあることから、走行車両や速度が異なる場合でも、頭頂面凹凸および浮きまくらぎの影響に



(a) レール応力の時刻歴波形



(b) 測点ごとのレール応力ピーク値

図3 ある車両が走行した際のレール応力

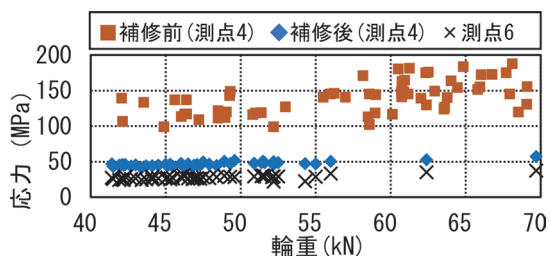


図4 測定された輪重およびレール応力

よって輪重変動が大きくなり、その結果、レール応力が増大すると考えられる。

3.2 車両走行シミュレーションおよび凹凸量・浮き量とレール応力の関係

現地応力測定により、凹凸量および浮き量が多い場合にはレール応力も大きくなることが確認された。そこで、凹凸量および浮き量をパラメータとして車両の走行を模擬したレール応力シミュレーションを行い、凹凸量、浮き量とレール応力の関係を調査した。

シミュレーションには軌道動的応答モデル⁵⁾を使用した。図5にモデルの概要を示す。本モデルの軌道は、梁であるレールを質点およびばねで表された軌道パッド、まくらぎ、まくらぎ支持ばねが離散支持する構造、車両は質量と剛体回転を考慮したばね下質量および台車枠が軸ばねで結合された構造で、車両はレールの上をレール/車輪接触ばねを介して移動する。頭頂面凹凸はレール/車輪間の強制変位で、浮きまくらぎはまくらぎ

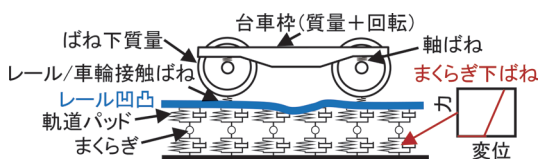


図5 車両走行シミュレーションモデル

下ばねをバイリニアの特性とすることで表現する。このモデルは、現地応力測定箇所の頭頂面凹凸および浮きまくらぎを入力した再現解析により、レール応力算出結果の精度が確認されている⁶⁾。

頭頂面凹凸は波長0.5mの正弦波とし、その振幅を1~5mmに設定した。浮きまくらぎは浮いているまくらぎの連続数(以下、浮き連続数とする)を1~15本、最大浮き量を1~15mmとして軌道長手方向に対して正弦波状に設定した。レール応力が最大となる条件は浮き量が最大の箇所で輪重が最大となる場合であると予想され、頭頂面凹凸のみを入力した試解析によって輪重の最大値は凹凸量最大箇所の近傍で発生することを確認したため、浮き量が最大の箇所と凹凸量が最大の箇所は一致するように設定した。その他の軌道および車両のパラメータは表2の通りであり、車両は在来線を走行する一般的な特急車両相当である。解析の時間ステップは 1×10^{-5} (s)とする。

各凹凸量および浮きまくらぎ条件についてシミュレーションを行い、凹凸量および浮き量が最大の箇所におけるレール(梁)の曲げ応力を算出した。凹凸量および浮き量のレール応力との関係を図6に示す。なお、浮き量が同じでも浮き連続数によって発生する応力は異なるため、ここでは応力が最大となる浮き連続数の場合のみをプロットしてある。現地応力測定と同様に、凹凸量と浮き量が大きいほど、レール応力が増大する傾向にあることが分かる。また一例として、レール応力 σ_m を、凹凸量 z 、浮き量 d について重回帰分析した結果を合わせて図6中に示す。回帰式からも、頭頂面凹凸と浮きまくらぎの両者がレール応力の増大に影響することとなり、両者が重畳した場合に大きなレール応力が発生すると言える。なお、図6より浮き量10mm以上では応力の増加

表2 軌道および車両のパラメータ

軌道	レール	50kgN
	まくらぎ	PC6号
	まくらぎ間隔(mm)	661
	軌道パッドばね(MN/m)	110
	まくらぎ下ばね(MN/m)	40
	軌道パッドばね減衰(kNs/m)	98.0
車両	まくらぎ下ばね減衰(kNs/m)	98.0
	走行速度(km/h)	71
	静止輪重(kN)	58.4
	ばね下質量(kg)	694
	軸ばね(kN/m)	850
	軸ばね減衰(kNs/m)	19.6
	台車枠質量(kg)	1183
台車枠ピッチング慣性半径(m)	0.726	

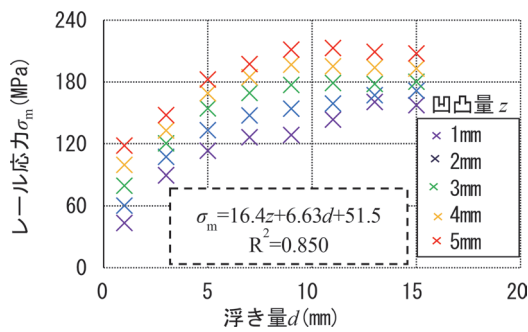


図6 頭頂面凹凸量・浮き量・レール応力の関係

の程度が小さくなっているが、レール応力の重回帰分析は凹凸量と浮き量の線形式によって回帰を行っているため、回帰式は浮き量が10mmよりも小さい場合には浮きまくらぎの影響をやや小さく、10mm以上の場合はやや大きく評価している場合がある。

4. トンネル内の新しいレール管理手法の提案

4.1 健全度の導入

トンネル漏水箇所においては、頭頂面凹凸および浮きまくらぎによる著大なレール応力の発生と、腐食によるレールの疲労強度の低下⁷⁾の可能性があり、両者がレール折損の原因になると考えられる。すなわち、レール底部からの折損を防止するためには、レールの発生応力とレールの腐食状態の双方を適切に状態監視する必要がある。そこで、レール応力と疲労限度を考慮したレールの「健全度」を以下のように定義することとする。

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

ここで、 f_h は健全度、 σ_m はレール応力、 σ_c は疲労限度（レールにき裂が発生し、折損が発生するレール応力の限度値。明かり区間の経年レールの場合220MPa）である。 σ_m は漏水に伴う頭頂面凹凸や浮きまくらぎによるレール応力の増大を、 σ_c は腐食によるレールの疲労強度低下を反映する。したがって、健全度 f_h を使用することにより、従来のレール底部腐食量の管理に加えて、腐食が軽微な場合も含めて、折損防止の観点からレールを管理するための優先順位を決定することができるようになる。

近年、軌道検測車による軸箱加速度や軌道変位データを軌道保守管理データベースシステム「LABOCS」⁸⁾によって分析することで、一定の精度で凹凸量および浮き量を分析することができるようになってきている^{9) 10) 11)}。凹凸量と浮き量が求められれば3.2節の車両走行シミュレーションで得られた関係によってレール応力 σ_m が求められる。また、疲労限度 σ_c はレール探傷車から得ら

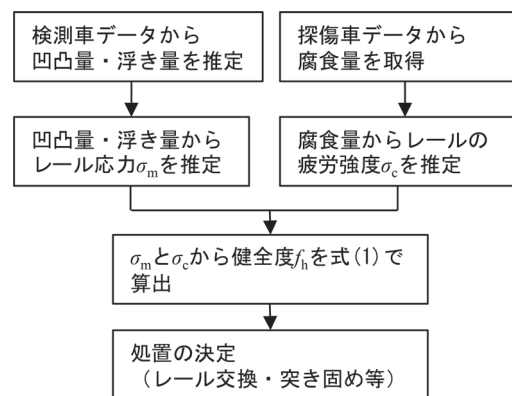


図7 レール健全度の算出フロー

れるレール底部腐食量データから求められる。 σ_m と σ_c が求めれば、式(1)により対象区間のレールの健全度 f_h をキロ程ごとに算出することができる。すなわち、軌道検測車およびレール探傷車のデータから、現場調査を実施することなく、健全度に基づいてレールを保守する箇所のスクリーニングまたは優先順位付けを行うことができる。レール健全度の算出フローを図7に示す。

一般的に疲労限度の8割程度の応力が発生した場合に、金属材料にはき裂が発生するとされている¹²⁾。よって、健全度 f_h が0.2を下回らないよう頭頂面凹凸および浮きまくらぎを解消する保守作業を行うことで、レール折損のリスクを低減することが可能になる。

4.2 営業線データへの適用例

実際の軌道検測車およびレール探傷車によって得られたデータをもとに、図7のフローに沿って健全度を算出した結果の一例を図8に示す。

図8の作成および活用の方法は以下の通りである。

- (1) 軌道検測車による軸箱加速度および軌道変位データから凹凸量と浮き量を推定する。凹凸量あるいは浮き量のしきい値を予め定めておき、評価対象箇所を限定する。例としてしきい値を浮き量6mmとする場合、評価対象箇所は図8中1段目の赤い四角の箇所のみである。浮き量がしきい値を超過したことから、この箇所における凹凸量も推定する。また、探傷車データから当該箇所のレール底部腐食量を取得し、健全度計算のための σ_c を求める。本区間については、腐食状態に応じたS-N曲線の200万回疲労強度⁷⁾を設定することとした。
- (2) 推定された凹凸量と浮き量から健全度計算のための σ_m を求め、 σ_m と σ_c から健全度 f_h を算出する。健全度がしきい値（例えば0.2）を下回る場合、当該箇所の現地で、詳細に頭頂面凹凸や浮きまくらぎの状況を把握する。
- (3) 現地での調査結果に基づき、道床つき固めやレー

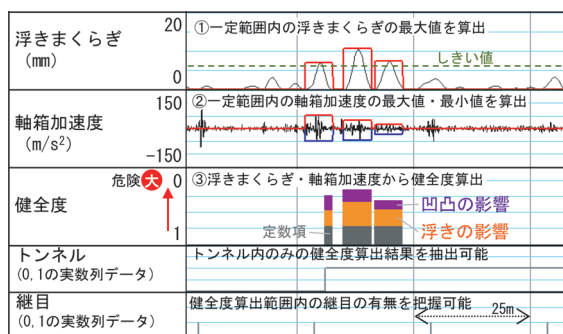


図8 営業線データに対する健全度算出フローの適用例

ル交換等、処置を決定する。

5. まとめ

本研究では、漏水を伴うトンネル内においてレールの折損を防止するためのレール管理手法について検討した。その内容は下記の通りである。

- (1) 過去に発生したトンネル内でのレール折損事例を分析した。その結果、折損箇所においては、トンネル天井からの漏水、レールの頭頂面の局所的な摩耗に伴う凹凸、顕著な浮きまくらぎが確認された。さらに、レール底部の腐食状態は軽微であるにも関わらず、レール底部からき裂が進展し、レール折損が発生している例があった。
- (2) 営業線において、頭頂面凹凸が約2mm、浮きまくらぎが12mm発生している箇所のレール応力を測定した。その結果、頭頂面凹凸や浮きまくらぎが存在しない箇所と比較してレール応力が顕著に大きく、疲労限度レベルの応力が発生していることが分かった。
- (3) 頭頂面凹凸および浮きまくらぎ発生箇所の車両走行を模擬したシミュレーションを実施し、凹凸量と浮き量がレール応力の増加に与える影響を定量的に評価した。
- (4) 頭頂面凹凸および浮きまくらぎによって定まるレール応力と、レール底部腐食量に基づくレールの疲労限度を組み合わせた指標であるレールの健全度を導入し、健全度に基づいたレールの管理手法を提案した。

文献

- 1) 新版軌道材料編集委員会編：新版軌道材料，pp.41-42, 2011
- 2) 太山敦，橋本克樹：トンネル内レール折損事象と腐食レールの管理強化，日本鉄道施設協会誌，Vol.59, No.5, pp.345-348, 2021
- 3) 細田充，相澤宏行，山本隆一：トンネル漏水箇所におけるレール折損の原因調査と管理手法の提案，新線路，Vol.76, No.909, pp.21-23, 2022
- 4) 田中博文，清水惇：波状摩耗管理のための可搬型レール凹凸連続測定装置の実用化，鉄道総研報告，Vol.29, No.8, pp.35-40, 2019
- 5) 石田誠，三浦重，河野昭子：軌道動的応答モデルとその解析結果，鉄道総研報告，Vol.11, No.2, pp.19-26, 1997
- 6) 相澤宏行，細田充，山本隆一：連続的にレール頭頂面凹凸および浮きまくらぎが発生している箇所のレール応力解析モデル，第77回土木学会年次学術講演会，I-148, 2022
- 7) 細田充，片岡宏夫，高須豊，弟子丸将：腐食・電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.5-11, 2013
- 8) (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道保守管理データベースシステム「LABOCS(ラボックス)」：<https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd45/rd4530/rd45300102.html> (参照日：2023年2月14日)
- 9) 田中博文，松本麻美，原田祐樹，桶谷栄一：軌道検測車で測定される軸箱加速度を活用したレール波状摩耗の状態評価と管理手法に関する研究，構造工学論文集，Vol.63A, pp.541-549, 2017
- 10) 楠田将之，松本麻美，片岡宏夫：軌道変位データに基づく浮きまくらぎ検出手法，土木学会論文集A2(応用力学)，Vol.74, No.2(応用力学論文集Vol.21)，pp.I_543-I_551, 2018
- 11) 楠田将之，田中博文，片岡宏夫：浮きまくらぎ検出に対する各種軌道諸元の影響確認と実務適用に向けた計算手法の構築，構造工学論文集，Vol.65A, pp.52-62, 2019
- 12) 村上敬宣：金属疲労微小欠陥と介在物の影響，養賢堂，2004