

## 構造物境界に隣接した有道床区間における浮きまくらぎの レール損傷への影響

正 [機, 土] ○細田 充 (鉄道総研)

正 [土] 水谷 淳 (鉄道総研)

正 [機, 土] 相澤 宏行 (鉄道総研)

正 [土] 山本 隆一 (鉄道総研)

### Effect of hanging sleepers on rail breakage in ballasted track sections adjacent to transition zone

Mitsuru HOSODA, Jun MIZUTANI, Hiroyuki AIZAWA, Ryuichi YAMAMOTO, Railway Technical Research Institute. 2-8-38, Hikari-cho Kokubunji-shi, Tokyo

In this study, we investigated a past case of rail breakages caused by a head transverse crack near the transition zone and estimated the stress and stress intensity factor generated in the rail by simulating the running of a car considering hanging sleepers. As a result, the estimation indicated that the stress intensity factor increased, and the crack propagation characteristic was affected by the influence of the hanging sleepers.

*Keywords* : rail breakage, stress intensity factor, hanging sleeper, transition zone

#### 1. はじめに

レールは軌道を構成する重要な部材であり、列車の走行安全性を確保するには、レール折損を防止するための保守管理が必要である。特に、レール頭部から発生する横裂（以下、「頭部横裂」という）は、レール折損の要因の約 4 割を占め、鉄道事業者はその管理に多大な労力やコストを費やしている<sup>1)</sup>。

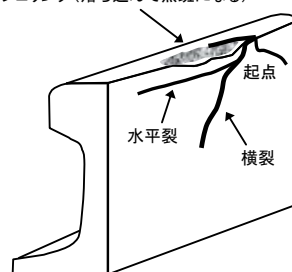
頭部横裂は、図 1 のように転がり接触疲労によるシェリングやゲージコーナキ裂から発生するものが大半を占めている<sup>1,2)</sup>。レール長手方向に水平裂が発生し、その後、頭部横裂に分岐して、レール底部方向に進展する。一般的に頭頂面から 30~40mm 程度の深さまで、頭部横裂が進展すると脆性破壊に至る<sup>1)</sup>。そのため、鉄道事業者はレール探傷車等で定期的に検査し、頭部横裂の存在が疑われる箇所については、手探傷による細密検査を実施し、頭部横裂の存在の有無および深さを確認している。頭部横裂の深さに応じて補強継目板の設置や計画的なレール交換を行っている。

頭部横裂が発生した場合に、軌道構造上の注意すべき箇所として、無道床橋梁等と有道床区間との境界近傍（以下、「構造物境界近傍」という）がある。一部の事業者においては、頭部横裂が発生した場合、一般部よりも厳しい基準で処置している<sup>1)</sup>。また、営業線で発生した頭部横裂に対して実施された超音波探傷結果では、横裂の進展速度が一般部よりも速かったことが報告されている<sup>3)</sup>。一方で、構造物境界近傍で発生した頭部横裂の進展特性に影響している因子については明らかにされていない。構造物境界に隣接した有道床区間では浮きまくらぎが発生しやすいことは広く知られており<sup>4)</sup>、列車通過時のレールの発生応力が一般部と異なることが考えられる。脆

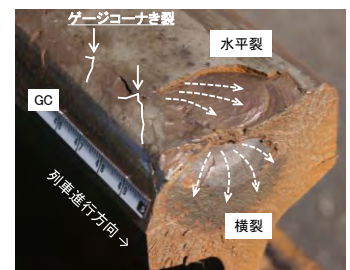
性破壊に至るき裂の深さやき裂の進展速度は、き裂先端付近の応力分布の強さを表す物理量である応力拡大係数で決まる<sup>5)</sup>。したがって、構造物境界近傍に敷設されたレールの発生応力を想定して応力拡大係数を推定することにより、当該箇所の頭部横裂の進展特性が理解できると考えられる。

本研究では、まず、過去に構造物境界近傍で頭部横裂に起因してレール折損に至った事例について調査した。次に、当該箇所を対象として、浮きまくらぎを考慮した車両走行シミュレーション等によりレールの発生応力を推定した。さらに、得られた発生応力を用いて、応力拡大係数を推定し、構造物境界近傍における頭部横裂の進展特性について考察した。

シェリング(落ち込んで黒班になる)



(a) シェリング



(b) ゲージコーナキ裂

図 1 レール頭部横裂

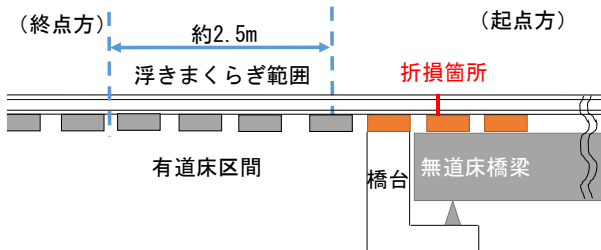
#### 2. 構造物境界近傍のレール折損の事例

過去に構造物境界近傍で発生した頭部横裂からのレール折損の事例について調査した。調査した各折損事例に共通の特徴をまとめると以下の通りである。

- ・ レール折損発生の数か月前の検査では、きしみ割れや水平裂等の頭部の損傷が認められていた。頭部横裂の深さが 30mm 未満で脆性破壊に至っている。
  - ・ 構造物境界に隣接した有道床区間で、浮きまくらぎや、10mm 以上の 10m 弦高低変位が確認されていた。
  - ・ レール長手方向におけるレール折損の発生位置は、橋梁上等で剛に支持されたまくらぎ上であった。
- 以下では、ある事例の調査結果について述べる。

レール折損箇所の概略を図 2 に示す。レール折損箇所は無道床橋梁上であり、橋台に隣接するまくらぎ上で折損している。折損したレールに関する情報を表 1 に整理する。当該レールは、50kgN レールで、累積通過トン数は約 1 億トンであった。当該箇所のレール探傷車による検査では頭部水平裂が確認されており、直近の軌道変位検査では、橋梁の終点方の有道床区間で最大で -12mm の 10m 弦高低変位が確認されていた。また、隣接した有道床区間では約 2.5m の範囲に浮きまくらぎも確認されていた。

当該レールの外観を図 3 に示す。以下ではゲージコーナを「GC」、フィールドコーナを「FC」と記す。当該レールの破断面の頭頂部には、頭頂面下ほぼ中央に黒褐色に錆びた頭部横裂が形成され、当該横裂に起因して折損していることがわかる。また、側面から見ると、頭部横



(a) 軌道構造の概略図



(b) 外観

図 2 レール折損箇所の概略

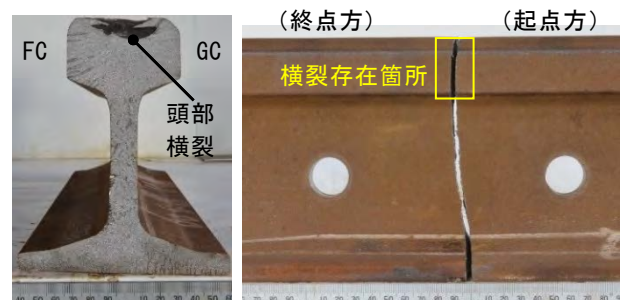
表 1 折損したレールの概況

破断時の状態	開口量約 10mm、レール温度 2.6℃	
線形	曲線区間 (R=400m 緩和曲線内)	
軌道構造	図 2 参照 ロングレール(可動区間)	
レール種別	50kgN レール(普通レール)	
累積通過トン数	約 1 億トン	
検査履歴	レール探傷車	破断 4 月前：頭部水平裂を確認、頭部横裂深さ 15mm 未満
	軌道変位	破断 2 月前：10m 弦高低変位 -12.6mm

裂は頭部領域をほぼ垂直に進展している。一般的にき裂は最大主応力が発生した方向に対して垂直に進展するため<sup>5)</sup>、レール頭部において、最大主応力として、レール長手方向の引張応力が発生したことが推察される。

破断面における頭部領域の拡大を図 4 に示すが、平滑で疲労き裂の進展を示唆するビーチマーク（同心円状の線模様）が認められる。一方、この黒褐色に錆びた領域以外は、銀白色で凹凸のある破断面の形態を呈しており、頭部横裂が頭頂面下 13mm の深さまで進展した後、脆性破壊したものと判断される。

以上のように、頭部横裂が進展し、一般部の折損事例と比較して浅い 13mm 程度の深さ位置から脆性破壊したことが確認された。また、本レール折損箇所では、橋梁の終点方の有道床区間で浮きまくらぎが発生していた。浮きまくらぎは軌道の支持状態が悪化することで発生し、列車通過時に動的な上下変位が増大する（以下、この現象を「あおり」と記す）。そして、あおりによって橋台上のまくらぎを支点としたアップリフトが発生することで上に凸の曲げが生じる。その結果、折損箇所のレール頭部に著大な引張応力が発生し、横裂深さが 13mm 程度と浅い深さから脆性破壊した可能性がある。



(a) 破断面 (b) GC 側側面

図 3 当該レールの外観

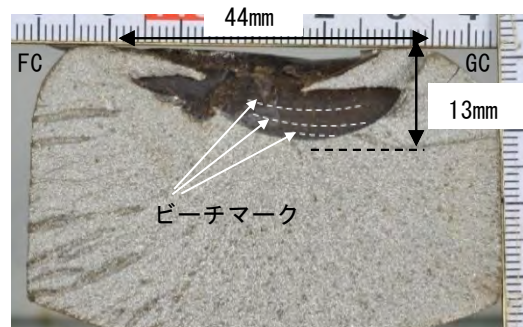


図 4 破断面における頭部領域の拡大

### 3. レール折損箇所の発生応力、応力拡大係数の推定

上記レール折損箇所におけるレールの発生応力（曲げ応力、軸力および残留応力）を車両走行シミュレーション<sup>6)</sup>等を用いて推定する。次に、発生応力に基づきレール頭部の応力拡大係数を算定することによって、脆性破壊発生の可能性について検証する。なお、ここで推定する応力および応力拡大係数の推定結果は、あくまでも条件を仮定した上での一例である。

3.1 列車通過時のレールの曲げ応力の推定

車両走行シミュレーションで列車通過時に発生するレールの曲げ応力を推定する。模擬した軌道の概略図を図5に示す。列車を橋台上のまくらぎから、まくらぎ20本程度終点方(12.77m)に離れた箇所から起点方へ向かって走行させた(走行開始位置をx=0mとした)。図5中の橋台上のまくらぎ中央をS1、橋台上のまくらぎから起点方にまくらぎ1, 2本分のまくらぎ中央S2, S3として、それぞれのレールの曲げ応力を求めた。シミュレーションで計算されるレール底面の曲げ応力を、中立軸からの距離によってレール頭頂面の曲げ応力に換算した。

$$S = \frac{81.4}{71.6} S' \quad \dots (1)$$

S: レール頭頂面の曲げ応力, S': レール底面の曲げ応力  
折損箇所はまくらぎ中央ではないが、中央位置からの離れは40mmと小さいため、折損箇所の曲げ応力はS2を参照するものとした。まくらぎ間隔は、実際の現場における軌道の条件をもとに有道床区間を0.50~0.74m、橋梁区間を0.50~0.55mとした。

シミュレーションで設定した軌道および車両のパラメータは、当該事例の軌道および車両条件を参考に、表2と表3に示すように設定した。車両モデルは1台車2軸である。浮きまくらぎは、設定した浮き量に対して、まくらぎ下面とバラストが接触するまでは、まくらぎ下ばね係数を著しく小さくし、接触後は表2に示す有道床区間の値とすることで考慮した。橋台から起点方のまくらぎ下ばね係数は、剛に支持されていることを想定して、有道床区間の10倍の値とした。

解析条件を表4に示す。本解析では、輪重とまくらぎ浮き量を変更して4条件の解析を行った。また、まくらぎ浮き量は、0mm, 10mmと15mmとした。なお、橋梁から終点方に5本目のまくらぎ(図5の白抜き矢印箇所)の浮き量は、設定した値の半分とした。

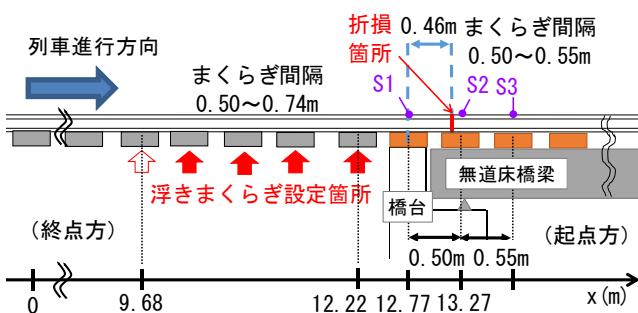


図5 シミュレーションで模擬した軌道の概略図

表2 軌道のパラメータ

レール種別	50kgN	
軌道パッドばね (MN/m)	110.0	
まくらぎ下ばね (MN/m)	有道床区間	40.0
	橋梁区間	400.0
軌道パッド減衰 (kNs/m)	98.0	
まくらぎ質量 (kg)	80.0	

表3 車両のパラメータ

ばね下質量 (kg)	635.0
軸ばね (kN/m)	1030.0
軸ばね減衰 (kNs/m)	19.6
台車枠質量 (kg)	770.0
台車ピッチング慣性半径 (m)	1.1

図6に車輪走行位置(図中の横軸は車両の1輪軸目の位置)の変化に伴う折損箇所(S2)におけるレール底面およびレール頭頂面の曲げ応力の変化を示す。なお、正の値が引張応力、負の値が圧縮応力である。折損箇所は、支持ばね係数が大きい橋梁上であり、列車通過時の下に凸に曲げ変形して発生するレール底面の引張応力は小さく、どの解析条件においても最大で30 N/mm<sup>2</sup>程度であることがわかる。次に、レール頭頂面の曲げ応力について、有道床区間に浮きまくらぎが存在しない条件1の場合、折損箇所の最大の応力は40N/mm<sup>2</sup>程度であるが、15mmのまくらぎ浮き量が存在する条件4の場合、130N/mm<sup>2</sup>程度の著大な応力が発生することが分かる。また、発生応力は輪重およびまくらぎ浮き量が大きいほど大きくなる。これは、有道床区間の浮きまくらぎ発生箇所において列車通過時にレールが大きく沈み込んだことで、支持ばね係数が大きい橋梁上においてアップリフトによる上に凸の曲げ変形が生じ、レールの頭部において著大な引張応力が発生したためと考えられる。次に、図7に各まくらぎ上におけるレール頭頂面の曲げ応力の最大値、応力振幅(最大値-最小値)を解析条件ごとに示す。浮きまくらぎが存在した場合、より大きな曲げ応力および応力振幅が発生していることが分かる。また、S1,S2と比較して、S3では、発生する応力が小さかった。

表4 解析条件(列車速度は70km/h)

条件	輪重(kN)	まくらぎ浮き量(mm)
条件1	80	0
条件2	60	10
条件3	80	10
条件4	80	15

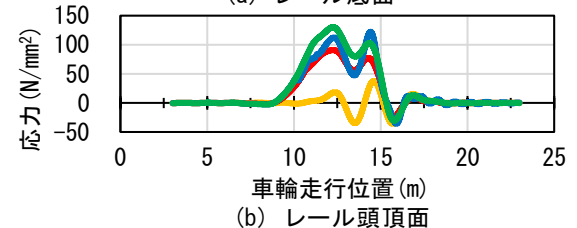
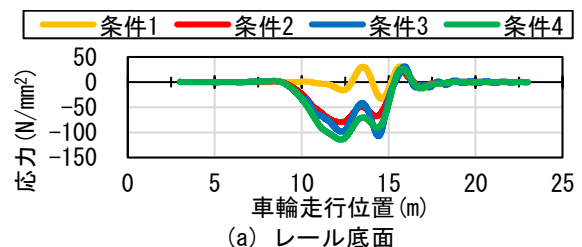


図6 折損箇所における曲げ応力(S2)

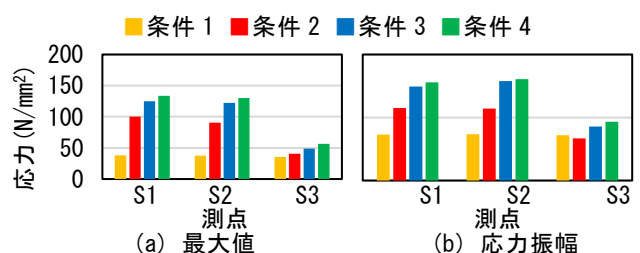


図7 各まくらぎ上におけるレール頭頂面の曲げ応力

3.2 レール頭部の応力拡大係数の推定

応力拡大係数  $K$  は、き裂先端付近の応力分布の強さを表す物理量であり、これが破壊靱性  $K_c$  に至ると脆性破壊が発生する<sup>6)</sup>。レール鋼の  $K_c$  はおよそ  $35\sim 40\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  である<sup>7)</sup>。また、応力拡大係数  $K$  に関わる因子としては、き裂 (形状, 角度, 位置等) および列車走行によって発生する曲げ応力, 軸力および残留応力がある。

半楕円形の表面き裂に対する応力拡大係数  $K$  は以下の式(2)~(4)で表される<sup>8)</sup>。

$$K = S_u \sqrt{\pi \frac{a}{Q} F_s} \quad \dots (2)$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \quad \dots (3)$$

$$F_s = \left[ M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] g f_\theta f_w \quad \dots (4)$$

ここで、 $a, b, c, t$  はき裂の形状に関するパラメータであり、 $F_s$  を決める  $M_1, M_2, M_3, g, f_\theta, f_w$  もこれらの値で算定される。今回は、2章の破断面の観察より設定した表5の値を用いた。また、 $S_u$  はき裂面に付加される引張応力であり、今回は列車走行によって発生するレール頭頂面の曲げ応力, 軸力, 残留応力を合わせた値とした。き裂進展に寄与する正の応力拡大係数  $K$  は引張応力が付加されたときに表れることから、測点 S2 の最大値を用いた。

次に軸力について、開口量  $l$  が本事象発生時の 10mm となる場合の温度下降量  $\Delta T$  を求め、その温度下降量で生じる軸力  $P$  を以下の式にて求めた<sup>4)</sup>。

$$\frac{3(EA\beta)^2}{4\gamma} \Delta T^2 + LEA\beta \Delta T - lEA = 0 \quad \dots (5)$$

$$\Delta T = 18.6 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

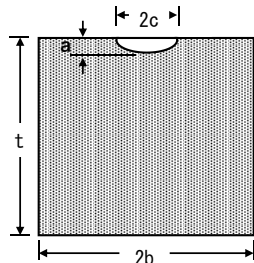
$$P = E\beta\Delta T = 43.5 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad \dots (6)$$

ここで、 $E$ : ヤング率 ( $=2.05 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ ),  $A$ : レール断面積 ( $=6420 \text{ (mm}^2\text{)}$ ),  $\beta$ : 線膨張係数 ( $=1.14 \times 10^{-5} \text{ (}^\circ\text{C)}$ ),  $L$ : 橋梁長さ ( $=12190 \text{ (mm)}$ ) である。

また、残留応力は、過去に測定した経年普通レールの値<sup>9)</sup>を参考とし  $50 \text{ N/mm}^2$  とした。

表 5 き裂形状のパラメータ

横裂深さ $a$ [mm]	13
横裂幅 $2c$ [mm]	44
平板の幅 $2b$ [mm]	65
平板の高さ $t$ [mm]	153



条件 1~4 について式(2)で計算した折損箇所における応力拡大係数の値を表6にまとめた。この結果から、浮きまくらぎが 10mm 以上発生していた場合の応力拡大係数は破壊靱性  $K_c$  ( $35\sim 40\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ) に近い値であり、本レール折損箇所では脆性破壊が発生しうる応力状況下にあったと考えられる。さらに、頭部横裂の進展速度は、応力振幅から求められる応力拡大係数範囲 (変動する応力が発生した場合の最大応力, 最小応力から算定される

それぞれの応力拡大係数の差) を主なパラメータとして決定される<sup>5)</sup>。このため、浮きまくらぎによって列車通過時の応力振幅も増大し、応力拡大係数範囲および頭部横裂の進展速度も増大すると考えられる。

以上、構造物境界に隣接し、浮きまくらぎが発生している有道床区間を列車が通過することによって、橋台および無道床橋梁で剛に支持されたまくらぎ上のレール頭部に発生する曲げ応力が増大した。これにより、一般部と比較してレールの脆性破壊に至る頭部横裂の深さが浅くなり、かつ進展速度も増大することが推定された。そこで、構造物境界近傍に頭部横裂が発生した場合は注意が必要であり、かつ、隣接する有道床区間の浮きまくらぎの管理も重要であることが言える。

表 6 折損箇所における応力拡大係数

	曲げ応力 [N/mm <sup>2</sup> ]	軸力 [N/mm <sup>2</sup> ]	残留応力 [N/mm <sup>2</sup> ]	応力拡大係数 $K$ [MPa $\cdot$ m <sup>1/2</sup> ]
条件 1	38	44	50	23
条件 2	91	44	50	33
条件 3	122	44	50	38
条件 4	130	44	50	39

4. 結言

本研究では、過去に構造物境界近傍で発生した頭部横裂からレール折損に至った事例について調査し、当該箇所を想定した車両走行シミュレーション等によりレールに発生する応力および応力拡大係数を推定した。その結果、浮きまくらぎの影響で応力拡大係数が増大し、頭部横裂の進展特性に影響することを考察した。

参考文献

- 1) 新版軌道材料編集委員会編：新版軌道材料, pp.76-83. 2011
- 2) 例えば、石田誠：鉄道技術 来し方行く末 レールシェリング対策, RRR, pp.30-33, 2013
- 3) 堀克則, 福井義弘, 佐藤新一：JR 西日本におけるシェリング傷管理手法の見直し, 土木学会年次学術講演会, Vol.63, IV-047, 2008
- 4) 例えば、保線工学編集委員会：保線工学 (上), pp.265-295. 2016
- 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) 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
- 7) 西田新一, 浦島親行, 榎本弘毅：レール鋼の疲労き裂伝ば過程における残留応力の影響, 材料, No.32-352, pp.57-63, 1983
- 8) J.C.Newman, Jr. and I.S.Raju : Stress intensity factor equations for cracks in three-Dimensional finite bodies, NASA TM-83200, 1981
- 9) 細田充, 水谷淳, 山本隆一：鉄道レールの頭部から発生するき裂の進展速度に及ぼす残留応力およびき裂発生位置の影響, 土木学会論文集, Vol.75, pp.623-633, 2019