曲線内軌の中きしみ割れ発生状況調査と その発生箇所における車輪／レール接触に関する検討

辻江 正裕^{*1}, 三浦 芽久^{*2}, 陳 樺^{*3}, 曄道 佳明^{*4}

A study of the head checks development on the low rail and the contact condition between wheel/rail on its appearance site

Masahiro TSUJIE^{*1}, Megu MIURA^{*2},
Hua CHEN^{*3} and Yoshiaki TERUMICHI^{*4}

^{*1,*3} Railway Technical Research Institute

2-8-38 Hikaricho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan

^{*2} Department of Science and Technology, Graduate School of Sophia University

7-1 Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan

^{*4} Department of Science and Technology, Sophia University

7-1 Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8554, Japan

Received: 21 September 2018; Revised: 23 March 2019; Accepted: 14 May 2019

Abstract

Rail is the peculiar element constructing the railway system. The phenomenon such as wear or defect of rail will be caused by the repeated wheel and rail rolling contact on the rail surface. Especially, the cracks called head checks are generated continuously on the gauge corner side of the high rail due to the plastic deformation caused by the severe contact with the wheels. The occurrence situations and the initiation factors of the head checks are widely known because the head checks are generated in many curved sections of which radii are about 800m. On the other hand, some head checks are confirmed to appear on the low rail in the curved section. However, the occurrence situations of the head checks of the low rail are not clarified because the appearance of this type of the head checks is limited. Furthermore, the initiation factors of this type of the head check are also not clarified. In this research, we conducted the site investigation and the analysis of the rail which has the head checks to clarify the appearance situations of the head checks of the low rail. In addition, we conducted the wheel and the rail contact analysis by use of the multi-body dynamics tool by constructing a model of the site of the head checks appearance of the low rail to examine the initiation factors of the head checks of the low rail.

Keywords : Head checks, Low rail, Wheel / rail, Rolling contact, Multibody dynamics, Simpack

1. 緒 言

鉄道用レール（以下、「レール」とする。）は、鉄道システムを構築する上で重要な構成部材であり、車両を支持するだけでなく、車両の案内、駆動力や制動力の伝達など、重要な役割を担っている。そして、通過する車輪との転がり接触により、レールにはシビアな接触荷重やすべりがもたらされる。その結果、レールには摩耗のほか、シェリングやきしみ割れといった、さまざまな形態の損傷が引き起こされる。シェリングについては、大きく進展するとレール折損を引き起こす危険性があることから、実験(細田他, 2012, Michael and Rolf, 2013a, 2013b)や解析(辻江他, 2010, Anders et al., 2014)によりき裂進展状況を明らかにするとともに、さまざまな対策法(石田, 阿部, 1995, 佐藤他, 1998)が提案されている。また、きしみ割れは、曲線外側のレール（以下、「外軌」とする。）の軌間内側「ゲージコーナ」部（以下、「GC」とする。一方、軌間外側「フィールドコーナ」部は以下、「FC」

No.18-00377 [DOI:10.1299/transjsme.18-00377], J-STAGE Advance Publication date : 22 May, 2019

^{*1} 正員, (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

^{*2} 元 上智大学大学院理工学研究科 (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1)

^{*3} (公財) 鉄道総合技術研究所

^{*4} 正員, フェロー, 上智大学理工学部

E-mail of corresponding author: tsujie.masahiro.13@rti.or.jp

とする.)の頭側部に多く発生(図1)していることが確認されている。そしてその発生については、実験(瀧川, 入屋, 2007)や解析(松田他, 2008)により検討されているほか、営業線のレールにおいてその発生を検知する手法(瀧川他, 2008), ならびにその発生を抑制する手法(元好他, 2010)が提案されている。

一方、近年、曲線内側のレール(以下、「内軌」とする.)のレール頭頂面において、中きしみ割れと呼ばれる、きしみ割れに似た形態のき裂の発生が、一部の線区において確認されている(図2)。中きしみ割れが発生した区間では、レール頭頂面において連続的にき裂開口部が確認されており、これらの開口部を起点として、き裂がレール内部へと進展している。これらの区間では、通常、レール頭頂面から実施している超音波探傷において、超音波がレール表層のき裂によって遮られるため、レール内部へと超音波が伝播せず、頭頂面からの超音波探傷検査が実施できない状況にある。また図2に示すように、これらの区間ではレール頭頂面における車輪との接触面(以下、「照り面」とする.)が変化していることから、レール頭頂面における凹凸形状が複雑に変化していると考えられ、当該区間を通過する車両においては軸箱の上下振動加速度が顕著になっていることが確認できる(図3)。このような上下振動を伴って車輪が通過することから、これらの区間では軌道部材の劣化を促進させる恐れが考えられる。しかし、このような中きしみ割れの発生に関しては、その他の形態の損傷に比べて知見が乏しく、その発生要因だけでなく、発生状況についても明らかになっていないのが現状である。

Fig. 1 The appearance of head checks of the high rail.

Fig. 2 The appearance of head checks of the low rail.

Fig. 3 Examples of the vertical axle-box acceleration at the head checks appearance section of the low rail.

そこで本研究では、営業線の曲線内軌における中きしみ割れの発生状況を明らかにするために、中きしみ割れが発生した区間を中心に現地調査を実施するとともに、中きしみ割れが発生したレールについて断面観察等の分析を行った。さらに、中きしみ割れの進展に影響を及ぼす因子を明らかにするために、中きしみ割れが発生していたレールの頭頂面状態に基づき、マルチボディダイナミクスツールを活用した車両運動解析を実施し、中きしみ割れ発生箇所における車輪／レール接触状態について検討を行った。

2. 現地調査結果

本章では、営業線における中きしみ割れの発生状況を明らかにするために、国内在来線の曲線区間において現地調査を実施した。以下にそれらの結果を示す。

2・1 中きしみ割れ発生箇所の概要

中きしみ割れの発生状況を把握するために、中きしみ割れの発生が確認されている営業線の曲線区間において現地調査を行った。調査した線区は年間通過トン数が 800 万トンで、振子車両の特急や貨物列車が走行する。現地調査した曲線の総数は 44 であり、これらの箇所においてレール削正を実施した履歴はない。中きしみ割れの発生が確認された曲線について、曲線半径別に分類した結果を図 4 に示す。

Fig. 4 The ratio of the curve radius at the head check appearance of the low rail.

このように、中きしみ割れは曲線半径 400～600m の曲線区間において多く発生していることが確認できる。曲線外軌の GC 部に発生するきしみ割れは、曲線半径 700～800m の曲線区間に多く発生する(瀧川, 小野寺, 2004)ことから、中きしみ割れはこれらに比べると、曲率の高い曲線区間で発生していると考えられる。

2・2 中きしみ割れ発生状況

前節に記載した在来線の曲線区間において、中きしみ割れの発生状況を調査した。その結果、中きしみ割れの発生形態に基づき、図 5 に示すように 2 つの形態の中きしみ割れが確認された。

Fig. 5 The classification results of head checks appearance of the low rail.

(1) 連続的に発生する形態

この形態の中きしみ割れは、曲線区間において連続的に発生している形態であった。外観上の特徴として、レール長手方向に対して照り面の幅に変化は見られず、またはく離している箇所もごく僅かであった。またこの形態の中きしみ割れ発生区間においては、図3に示すような通過する車両の上下振動は確認できなかった。この形態の中きしみ割れが発生した照り面上を指でレール長手方向に触診すると、列車進行方向では滑らかであるのに対し、列車進行方向と逆方向では指が引っかかる感触であった。つまり、中きしみ割れが発生しているレール頭頂面が、魚の鱗状になっていると考えられる。

(2) 不連続に発生する形態

この形態の中きしみ割れは、レール長手方向に対して不連続に発生している形態であり、照り面の幅が長手方向に対して複雑に変化していた。特に、き裂開口部が密集している領域では照り面は広く、開口部が見られない箇所では照り面幅は狭くなっていた。したがって、この形態の中きしみ割れが発生した箇所においては、車輪／レール接触状態が長手方向に対して複雑に変化していると考えられる。なお、図2に示す中きしみ割れは、この不連続に発生する形態に分類される。また、この形態の中きしみ割れが発生した照り面上についても指で触診した結果、前項に記述した連続的に発生する形態の中きしみ割れと同様、レール頭頂面が鱗状になっていると推測される結果であった。

つぎに、現地調査した44箇所において確認された中きしみ割れについて、上記の2つの形態に分類し、その発生箇所数を集計した。その結果を曲線半径別に図6に示す。

Fig. 6 Number of occurrences by curve radius.

本研究で行った現地調査での範囲内においては、不連続に発生した形態の中きしみ割れが僅かに多い結果となった。なお図6に示すように、曲線半径別に集計した結果、2種類の形態の中きしみ割れについて、その発生傾向に明確な差は見受けられなかった。

図2に示すように不連続な形態の中きしみ割れ発生箇所においては、外観からも確認できるようにレール頭頂面凹凸が顕著であり、図3に示すように通過する列車の上下振動が著大となっている。このように不連続な形態の中きしみ割れが発生した区間では、連続的な中きしみ割れが発生した区間と異なり、列車の上下振動が著大となることで、乗心地の悪化や軌道部材の劣化、車輪／レール間の転動音の増大など、軌道保守の観点から問題となっている。そこで本研究では以下、この不連続に発生する形態の中きしみ割れにおけるき裂の進展に着目して検討する。

2・3 レール頭頂面凹凸

前節(2)に示す不連続な形態の中きしみ割れが発生したレールについて、図3に示すような上下振動を励起させるレール頭頂面凹凸の状態を確認するため、レール頭頂面の凹凸形状を測定した。はじめに固定式の凹凸測定器(測定延長:1m)により、当該レールの頭頂面凹凸形状を測定した。また比較のため、前節(1)に示す連続的な形

態の中きしみ割れが発生したレールについても、頭頂面の凹凸形状を測定した。それらの結果を図7に示す。なお、いずれのレールとも曲線半径 600m の円曲線区間に敷設されたレールであり、レール頭頂面がはく離していない箇所を選定して測定した。

Fig. 7 The measurement results of the rail surface irregularity.

図7(a)に示すように、連続的な形態の中きしみ割れが発生したレールについては、わずかな凹凸形状の変化が見られるものの、ほぼ平坦であることが確認できた。一方、図7(b)に示すように、不連続な形態の中きしみ割れが発生したレールにおいては、頭頂面の凹凸形状が複雑に変化していることが確認できた。

つぎに、頭頂面の凹凸形状が顕著であった、不連続な形態の中きしみ割れが発生したレールにおける凹凸形状の波長を明らかにするために、レール凹凸連続測定装置(田中, 清水, 2013)を用いてレール頭頂面の凹凸形状を測定した。測定したレールは、曲線半径 600m の円曲線区間の内軌レールである。測定した凹凸形状の結果を図8に示す。

Fig. 8 The measurement results of the rail surface irregularity where the head checks appear on the low rail. The saturation of the measurement results at every 25m interval is due to the rail joint.

図8より、測定した不連続な形態の中きしみ割れが発生したレールでは、凹凸形状が複雑に変化しており、その振幅は大部分が $\pm 0.3\text{mm}$ 程度、最大で 1.0mm であることが確認できた。なお図8において、25m 間隔で測定値が上下方向に飽和している箇所は、レール継目箇所である。

つぎに、測定した凹凸形状について卓越した波長を明らかにするために、パワースペクトル解析を行った。なおパワースペクトル解析については、凹凸形状の振幅がより顕著であったレールについて行った。なお、レール

端部における締結部の影響を除去するために、両端部を除いた延長 20m の区間（図 8 に示す赤枠の範囲）の測定結果について行った。その結果を図 9 に示す。

Fig. 9 The results of the power spectrum analysis of the rail surface irregularity.

図 9 に示すように、頭頂面凹凸形状を測定したレール（図 8 の赤枠内）においては、空間周波数 6.3[1/m]が卓越していることが確認できた。したがって、本研究で測定した、不連続な形態の中きしみ割れが発生した測定レールについては、頭頂面に形成された凹凸形状の波長は 1/6.3m, すなわち約 160mm であると考えられる。

3. 発生レール分析

本章では、中きしみ割れの発生要因を検討するために、営業線に敷設していた中きしみ割れの発生が確認されたレール（以下、「分析レール」とする。）についてレール交換を実施し、中きしみ割れのき裂進展状況ならびにレールの断面組織観察を実施した。

3・1 外観観察

分析レールは、半径 600m の曲線区間の内軌に敷設していたレールであり、2.2 節(2)に分類される不連続な形態の中きしみ割れの発生が確認されている。分析レールの頭頂面の外観を図 10 に示す。

Fig. 10 Appearance of the analytical rail.

Fig. 11 The definition of the angle of crack mouth.

図 10 に示すように、分析レールにおいては、レール長手方向に対して照り面幅が変化し、照り面幅の広い箇所にのみき裂の開口部が集中して存在していることが確認できる。また全体的に照り面の位置がレールの FC 側に偏っていることも確認できる。

関連研究(Steenbergen, 2017)より、車輪／レール間に作用するクリープ力の作用する方向に対して、直角方向にき裂開口部が形成される。そこで、中きしみ割れの発生要因となる車輪／レール接触力を推定するために、レール

ル頭頂面の中きしみ割れ開口部について、その角度を測定した。なお本稿では、開口部の角度を列車進行方向に対して、図 11 に示すように定義した。

Fig. 12 The measurement results of the angle of crack mouth. It seems that all the measurement results are distributed between 66 and 80 degrees.

図 12 に示すように、分析レールの頭頂面において確認された中きしみ割れの開口部については、66～80°程度であることが確認された。したがって、これらの開口部に対して、直角方向に作用した車輪との接触によるクリープ力が、中きしみ割れの発生に影響を及ぼした可能性が考えられる。

3・2 断面観察

レール頭頂面を起点とする中きしみ割れの進展状況、ならびに車輪／レール接触によってもたらされた応力履歴を確認するために、分析レールの断面観察を実施した。それらの結果を以下に記述する。

(1) 中きしみ割れの進展状況

中きしみ割れの進展状況を確認するために、図 10 に示す破線に沿ってレールを切断し、断面観察を実施した。断面を光学顕微鏡で観察した結果の一例を図 13 に示す。

Fig. 13 The observation results of the crack propagations. Some crack propagate in the direction opposite to the train running direction starting from rail surface. Some cracks propagate into a layered structure inside the rail.

図 13 に示すように、中きしみ割れはレール頭頂面を起点として概ねレール頭頂面と平行に、列車進行方向と逆方向に進展していることが確認できた。また、一部のき裂が、レール内部で層状に重なり合っていることも確認できる。したがって、鉄道事業者において定期的に行っているレール頭頂面からの超音波探傷では、最表層のき裂によって超音波が遮られ、最深部のき裂を検出できない可能性も考えられる。

(2) 断面組織観察

中きしみ割れの発生ならびに進展に影響を及ぼしたと考えられる、車輪／レール間に作用した応力履歴を確認するために、分析レールの断面組織観察を実施し、レール頭頂面の表層における塑性流動を観察した。断面組織観察は図 10 に示すレール長手方向の断面、ならびに中きしみ割れ開口部のレール横断方向の断面について実施し

た．観察前の処理として，切断面をエメリー紙による研磨ならびにバフ研磨を実施し，3%ナイトール溶液（硝酸アルコール溶液）によるエッチングを行った後，光学顕微鏡にて断面組織を観察した．それらの結果を図 14 に示す．

Fig. 14 Observation results of plastic flow.

図 14 に示すように，中きしみ割れが発生したレール頭頂面においては，レール長手方向に対しては列車進行方向に，またレール横断方向に対しては FC 方向（曲線内方）に塑性流動が確認された．塑性流動の深さについては，長手方向では約 $30\mu\text{m}$ ，断面方向では約 $10\mu\text{m}$ であった．したがって，断面方向よりも長手方向に対して，大きなクリープ力が作用していたと考えられる．なおこの傾向は，中きしみ割れの開口部が密集して発生していない箇所においても同様に確認された．つまり中きしみ割れが発生したレールについては，図 15 に示す方向に塑性流動が確認されており，3.1 節で記載したき裂開口部の角度ならびに関連研究(Steenbergen, 2017)における，き裂開口部と作用したクリープ力の方向との関係と一致している．なお塑性流動の深さに比例した力がレール頭頂面に作用したと考えると，力の作用する方向から考えられるき裂開口部の角度（図 11 の θ ）はおおよそ 70° と概算できる．したがって，図 12 に示すき裂開口部の観察結果と概ね一致すると考えられる．

Fig. 15 Illustration of the direction of plastic flow and the crack mouth of head checks.

図 13 に示すように，レール頭頂面の開口部を起点としてき裂がレール頭頂面と平行に進展していることから，き裂面にせん断力が作用していると考えられること，図 14 に示す断面組織観察結果より列車進行方向や FC 側に塑性流動が確認できることから，図 15 に示す方向に作用したクリープ力がき裂進展の主な要因であると考えられる．したがって，曲線内軌の車輪／レール接触部に作用する列車進行方向を主とするクリープ力がレール頭頂面表層において塑性変形をもたらすとともに，レール表層に剪断力を作用させ，き裂進展に影響を及ぼしている可能性が考えられる．

4. 車輪／レール接触解析

中きしみ割れの発生ならびに進展を検討する上で、車輪／レール接触状態を明らかにすることは非常に重要である。そこで本章では、中きしみ割れが発生した軌道をモデルとして、マルチボディダイナミクスによる車両運動解析を実施し、中きしみ割れ発生箇所における車輪／レール接触状態を検討した。以下にその詳細を記述する。

4・1 解析モデルの概要

車輪／レール接触解析はマルチボディダイナミクスツールである Simpack(ver. 2017)を用いて行った。

軌道条件は、2.3 節においてレール頭頂面凹凸形状を測定した、中きしみ割れの発生したレールが敷設されていた線区を対象にモデル化した。解析モデルの概要を以下の表 1 に、またモデル全体のイメージを図 16 に示す。

Table 1 The outline of analytical model.

Curve radius	600 [m]
Cant	24 [mm]
Gauge widening	0 [mm]
Rail surface irregularity as the head checks appearance	Wavelength 160 [mm] Amplitude ± 0.3 [mm] Section length 1.0 [m]
Profile of rail	Measured
Profile of wheel	Designed
Running Speed of vehicle	10 [m/s]

Fig. 16 The overview of analytical model. This curved section model consists of the one circular curved section, the two transition curved section and the straight sections. The radii of the circular curved section is 600m. Especially, the rail surface irregularity is modeled of the low rail at the center of the circular curved section which simulate the head checks appearance.

表 1 ならびに図 16 に示すように、解析モデルは半径 600m 曲線区間とその前後に直線ならびに緩和曲線で構成される 1 曲線区間をモデルとしている。また、中きしみ割れの発生が確認されたレールとして、2.3 節で記載したようにレール頭頂面において約 160mm の波長の凹凸が卓越していたことから、円曲線区間中央部の内軌のみ、波長 160mm、振幅 ± 0.3 mm の凹凸形状を中きしみ割れ発生レールとして、内軌のみ円曲線中央部を起点として延長 1m の区間にモデル化した。

一方、通過する車両については、在来線通勤型車両をベースにモデル化し、10m/s で走行させた。なお円曲線区間におけるカント量は、この車両に対する均衡カントとして 24mm と設定した。

4・2 解析結果

前節で記述した解析モデルにより車両運動解析を実施し、中きしみ割れ発生箇所における車輪／レール接触状態について検討した。前軸ならびに後軸の内軌側の車輪／レール接触部における縦クリープ力の解析結果を図 17 に示す。なお図中における縦クリープ力については、正の方向が列車進行方向である。また横軸については、円曲線中心を基準として、正の方向に 1m の範囲で中きしみ割れの発生を模擬したレール頭頂面凹凸をモデル化している。

Fig. 17 Analytical results of the longitudinal creep force. The range between 0 and 1 on the horizontal axis is the area simulated the head checks appearance of the low rail. The longitudinal force generated at the front axle in low rail of vehicle are plotted with the solid line, and the longitudinal force generated at the rear axle in low rail are plotted with the dashed line.

図 17 に示すように、前軸ならびに後軸とも車輪／レール接触部において縦クリープ力が発生していることが確認できる。特に前軸においては、列車進行方向に縦クリープ力が発生していることから、前軸の内軌側の車輪／レール接触面において発生した縦クリープ力が、中きしみ割れの発生ならびに進展に影響を及ぼしていると考えられる。また、中きしみ割れ発生箇所の凹凸形状を定義した区間（図 17 に示す $x=0\sim1$ の範囲）において、前軸ならびに後軸で発生した縦クリープ力が変動していることが確認できる。つまり、中きしみ割れの発生箇所に生じたレール頭頂面の凹凸形状変化によって縦クリープ力が変動し、より著大な縦クリープ力が作用することで、中きしみ割れの進展に寄与していると考えられる。

4・3 考察

前節で記述したように、中きしみ割れ発生をモデル化した区間においてはレール頭頂面の凹凸形状変化によって縦クリープ力が変動し、き裂進展を促進させる要因となっている可能性が示唆された。そこで本節では、縦クリープ力に変動が見られた要因について検討を行った。以下にその結果を示す。

はじめに、レール頭頂面の凹凸形状変化に伴う輪重変動について、検討を行った。図 16 に示す解析モデルによる、前軸（内軌側、外軌側）における輪重の解析結果を図 18 に示す。

Fig. 18 Analytical results of the wheel load. The range between 0 and 1 on the horizontal axis is the area simulated the head checks appearance of the low rail. The wheel load generated at the inner wheel (low rail) of the front axle are plotted with the solid line, and the wheel load generated at the outer wheel (high rail) of the front axle are plotted with the dashed line.

図 18 に示すように、中きしみ割れ発生区間において、モデル化したレール頭頂面凹凸の影響を受けて輪重が変動していることが確認できる。特にその変動は、中きしみ割れの発生をモデル化した内軌側で大きいことが確認できる。なお、内軌側の輪重が著大となっている箇所はいずれもレール頭頂面の凹部であり、逆に輪重が減少している箇所はいずれもレール頭頂面の凸部であった。また、内軌側と外軌側で輪重変動の位相が逆転していることも確認できる。これは、内軌側の車輪がレール頭頂面の凹凸の影響により輪重変動がもたらされ、その上下方向の変動が反力となり、結果として外軌側の車輪／レール間の接触力に逆位相で影響したものと考えられる（図 19）。

Fig. 19 The mechanism of the wheel load variation on high and low rails.

Fig. 20 An example of rail surface irregularity and head checks. In addition, plastic deformation is observed at concave area.

図 20 に示すように、実際に中きしみ割れが発生したレールの頭頂面の外観からも、レール凹部において中きしみ割れの発生が確認できるのに対し、凸部では中きしみ割れの発生は目視では確認できなかった。また凹部の FC 側のみで塑性流動が確認できることから、これらの箇所においては、レール頭頂面の凹凸形状変化に起因する輪重変動により、車輪／レール接触状態が著大となっていると考えられる。

つぎに、図 17 に示す縦クリープ力の変動が発生したほかの要因として、縦クリープ率の影響について検討を行った。4.1 節に記述したモデルによる、前軸内軌側の車輪／レール接触面における縦クリープ率の解析結果を図 21 に示す。また参考までに、横クリープ率の結果についても合わせて示す。なお横クリープ率については、FC 側を正として示す。

Fig. 21 Analytical results of the longitudinal creep ratio and the lateral creep ratio on the low rail at the front axle. The range between 0 and 1 on the horizontal axis is the area simulated the head checks appearance of the low rail.

図 21 に示すように、前軸内軌側の車輪／レール接触面において、列車進行方向の縦クリープ率の発生が確認できる。また、中きしみ割れをモデル化した区間を通過した際に、縦クリープ率に変動していることが確認できる。またこれらの変動のうち、レール頭頂面形状の凸部において値が大きくなっていることが確認できた。なお横クリープ率についても、縦クリープ率と同様の傾向であった。

図 18 ならびに図 21 より、中きしみ割れの発生によるレール頭頂面凹凸をモデル化した区間において、内軌側の車輪／レール接触面で輪重ならびに縦クリープ率に変動し、結果として縦クリープ力が著大となっていることが確認できた。特に、レール頭頂面の凹凸形状変化に起因した上下系の振動である輪重変動だけでなく、縦クリープ率も変動し、縦クリープ力に影響を及ぼしていることが明らかとなった。これらの結果より、輪重や縦クリープ率の変動を抑制する対策法を講じることで、不連続な形態の中きしみ割れの進展を抑制することが期待できる。

5. 結 言

本研究では、曲線内軌の頭頂面に発生する中きしみ割れについて、その発生状況を明らかにするために、現地調査ならびに発生レール分析を実施した。そして中きしみ割れが発生した区間をモデルに、車輪／レール接触解析を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・曲線内軌の頭頂面に発生した中きしみ割れは、曲線半径 400～600m の曲線区間で多く確認された。またその発生形態は、連続して発生する形態と不連続に発生する形態があることがわかった。
- ・中きしみ割れが発生したレールの断面観察より、中きしみ割れはレール頭頂面の開口部を起点とし、列車進行方向と逆方向に進展していることが確認された。また、き裂開口部の角度ならびに断面組織観察より、列車進行方向に作用した縦クリープ力が、中きしみ割れの進展に影響していると考えられる。
- ・不連続な形態の中きしみ割れ発生箇所をモデルに車輪／レール接触解析をした結果、レール頭頂面の凹凸形状の変化により、発生するクリープ力が変動していることが確認された。特に凹凸形状の変化に起因した輪重変

動だけでなく、縦クリープ率も変動し、著大になっていることが明らかとなった。したがって、これらの箇所におけるレール頭頂面の凹凸形状が、中きしみ割れの進展に影響しているものと考えられる。

謝 辞

本研究で行った現地調査において、九州旅客鉄道株式会社の関係者の方々に多大なるご協力を頂いた。ここに深い謝意を表する。

文 献

- Anders, E., Bengt, A. and Elena, K., Wheel/rail rolling contact fatigue-Probe, predict, prevent, Wear, Vol.314 (2014), pp.2-12.
- 細田充, 片岡宏夫, 弟子丸将, 小谷隼, レール頭部横裂の進展予測手法の構築, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.16 (2012), pp. 7-14.
- 石田誠, 阿部則次, レールシェリング予防削正効果に関する実験的研究, 鉄道総研報告, Vol.9, No.12 (1995), pp. 19-24.
- 松田博之, 赤間誠, 土井久代, 名村明, 金鷹, 辻江正裕, 伊藤優樹, レールきしみ割れ発生寿命予測の試み, 第 16 回 鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-rail2008) (2008), pp. 537-540.
- Michael, S. and Rolf, D., On the mechanism of squats formation on train rails-Part1: Origination, International Journal of fatigue, Vol.47 (2013a), pp.361-372.
- Michael, S. and Rolf, D., On the mechanism of squats formation on train rails-Part2: Growth, International Journal of fatigue, Vol.47 (2013b), pp.373-381.
- 元好茂, 瀧川光伸, 小林潤, レールきしみ割れ対策手法の開発, 第 18 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-rail2010) (2010), pp. 553-554.
- 佐藤幸雄, 辰巳光正, 柏谷賢治, 上田正治, 横山泰康, 耐シェリング用バイナイトレールの開発, 鉄道総研報告, Vol.10, No.12 (1998), pp. 15-20.
- Steenbergen, M., Rolling contact fatigue: Spalling versus transverse fracture of rails, Wear, Vol.380-381 (2017), pp.96-105.
- 瀧川光伸, 小野寺孝行, レールきしみ割れの発生傾向分析, 第 12 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-rail2004) (2004), pp. 421-422.
- 瀧川光伸, 入屋義博, 転動試験機によるレールきしみ割れ対策の研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.11 (2007), pp. 39-44.
- 瀧川光伸, 斎藤直樹, 日比野俊, レールきしみ割れに対する渦電流探傷試験, 非破壊検査, Vol.57, No.7 (2008), pp. 306-310.
- 田中博文, 清水惇, 効率的な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開発と活用法, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.17 (2013), pp. 19-26.
- 辻江正裕, 赤間誠, 松田博之, 名村明, レール横裂進展予測モデルの開発, 鉄道総研報告, Vol.24, No.12 (2010), pp. 41-46.

References

- Anders, E., Bengt, A. and Elena, K., Wheel/rail rolling contact fatigue-Probe, predict, prevent, Wear, Vol.314 (2014), pp.2-12.
- Hosoda, M., Kataoka, H., Deshimaru, T. and Kotani, J., Experimental stud on the prediction method of transverse crack growth rate in rail head, Journal of railway engineering, Vol.16 (2012), pp.7-14 (in Japanese).
- Ishida, M. and Abe, N., Experimental study on the effect of preventive grinding for rail shellings, RTRI Report, Vol.9, No.12 (1995), pp.19-24 (in Japanese).
- Matsuda, H., Akama, M., Doi, H., Namura, A., Jin, Y., Tsujie, M. and Ito, Y., Prediction of head checks initiation of rails, J-Rail 2008 (2008), pp.537-540 (in Japanese).
- Michael, S. and Rolf, D., On the mechanism of squats formation on train rails-Part1: Origination, International Journal of fatigue, Vol.47 (2013a), pp.361-372.
- Michael, S. and Rolf, D., On the mechanism of squats formation on train rails-Part2: Growth, International Journal of fatigue,

Vol.47 (2013b), pp.373-381.

- Motoyoshi, S., Takikawa, M. and Kobayashi, J., A study on development of control measures of rail head checks, J-Rail 2010 (2010), pp.553–554(in Japanese).
- Satoh, Y., Tatsumi, M., Kashiwaya, K. Ueda, S. and Yokoyama, Y., Development of anti-darkspot bainitic steel rail, RTRI Report, Vol.10, No.12 (1998), pp.15-20 (in Japanese).
- Steenbergen, M., Rolling contact fatigue: Spalling versus transverse fracture of rails, Wear, Vol.380-381 (2017), pp.96-105.
- Takikawa, M. and Onodera, T., Analysis of track conditions under which head checks are occurring, J-Rail 2004 (2004), pp.421–422(in Japanese).
- Takikawa, M. and Iriya, Y., A study on countermeasure against head checks with twin-disc machine for rail/wheel, Journal of railway engineering, Vol.11 (2007), pp.39–44 (in Japanese).
- Takikawa, M., Saito, N. and Hibino, S., Eddy-current test for detecting head checks on rail crown, Journal of the Japanese society for non-destructive inspection, Vol.57, No.7 (2008), pp.306–310 (in Japanese).
- Tanaka, H. and Shimizu, A., Development and field application of portable continuous measurement device for rail surface irregularity for efficient maintenance of rail corrugation, Journal of railway engineering, Vol.17 (2013), pp.19–26 (in Japanese).
- Tsujie, M., Akama, M., Matsuda, H. and Namura, A., Development of a model for analyzing the propagation of transverse cracking of rail, RTRI Report, Vol.24, No.12 (2010), pp.41-46 (in Japanese).