

論文 曲線内軌における中きしみ割れの発生要因と対策法の検討

辻江 正裕¹・西村 英典²・松井 元英²・陳 樺³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部軌道力学 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38)
E-mail:tsujie.masahiro.13@rtri.or.jp

² 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部摩擦材料 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38)
E-mail:nishimura.hidenori.01@rtri.or.jp E-mail:matsui.motohide.69@rtri.or.jp

³ 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部軌道力学 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38)
E-mail:chen.hua.63@rtri.or.jp

国内在来線の一部の線区において、内軌頭頂面に「中きしみ割れ」と呼ばれる形態の損傷が確認されているが、その発生状況や発生メカニズムは明らかではない。本研究では、現地調査ならびに中きしみ割れ発生レールの断面観察より、中きしみ割れの発生状況を明らかにした。そしてマルチボディダイナミクスによる車輪/レール接触解析より、中きしみ割れの発生メカニズムについて検討した。さらに、車輪/レール接触解析に基づき、中きしみ割れの発生や進展を抑制する対策法について検討を行った。その結果、振り車両の車輪/レール接触部に発生する著大な縦クリープが中きしみ割れの発生に影響していると推定され、また中きしみ割れの進展によりレール頭頂面凹凸が顕著な箇所についてレール削正を実施することで、き裂の進展を抑制できる見通しを得た。

Key Words : head checks, low rail, multibody dynamics, simpack, wheel/rail, creepage, crack

1. はじめに

きしみ割れは図-1に示すように、曲線外軌ゲージコーナ(以下、「GC」とし、フィールドコーナは「FC」とする)部に連続的に発生する形態の損傷として、広く知られている。一方、在来線の一部の曲線区間において、きしみ割れとよく似た、「中きしみ割れ」と呼ばれる形態の損傷が、内軌頭頂面において確認(図-2)されている。中きしみ割れが発生した区間では、き裂開口部がレール頭頂面において連続的に発生し、これらを起点としてき裂が進展していることが確認されている¹⁾。探傷車によるレール頭頂面からの超音波探傷において、これらのき裂によって超音波が遮られ、レール底部まで超音波が届かないものと考えられる。また図-3に示すように、中きしみ割れが発生した区間では、レールの車輪との接触する面(照り面)の幅が複雑に変化していることから、これらの区間ではレール頭頂面の凹凸が著大になると考えられる。図-4に示すように、中きしみ割れが発生した区間を通過した列車(2017年12月測定)において、

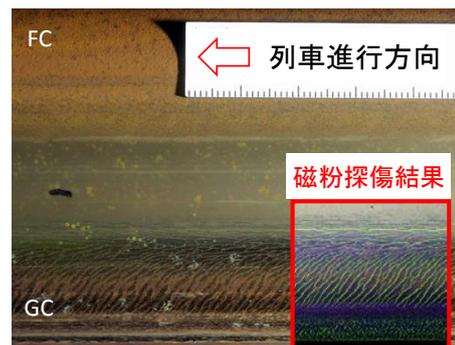


図-1 きしみ割れの外観(曲線外軌)



図-2 中きしみ割れの外観(曲線内軌)



図-3 中きしみ割れ発生箇所の外観

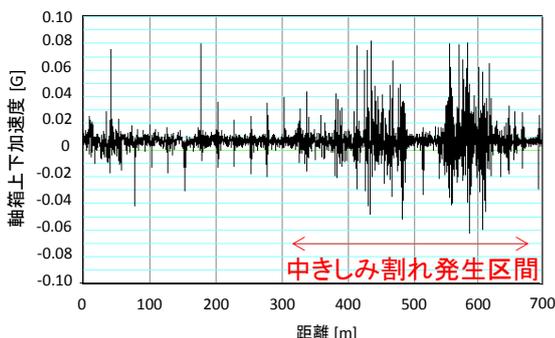


図-4 中きしみ割れ発生箇所の軸箱上下振動加速度

軸箱上下振動加速度が著大となる状況が確認されている。このように、通過する列車の軸箱上下振動加速度が著大となることはレール凹凸ならびに衝撃荷重の増大につながり、軌道状態悪化による乗心地悪化や転動騒音の増大が懸念されるほか、軌道部材の劣化につながる恐れも考えられる。しかし中きしみ割れについては、他の形態の損傷に比べ知見が乏しく、発生状況や発生メカニズムについては、明らかとなっていない。そこで本研究では、現地測定や発生レール分析により、中きしみ割れの発生状況を明らかにした。またマルチボディダイナミクスによる車輪／レール接触解析により、中きしみ割れの発生メカニズムについて検討した。さらに、中きしみ割れの対策法についても検討を行った。

2. 中きしみ割れの発生状況

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、現地調査を実施した。その詳細を以下に示す。

(1) 中きしみ割れの発生状況

さまざまな曲線区間について現地調査を実施し、中きしみ割れの発生状況を目視による外観観察により調査した。中きしみ割れ発生箇所は、振り車両が多く走行する

表-1 中きしみ割れ発生状況

曲線半径 [m]	振り線区	非振り線区
400	○ (18 / 18)	× (0 / 4)
600	○ (47 / 47)	× (0 / 14)
800	△ (6 / 7)	× (0 / 3)
1000	× (0 / 2)	× (0 / 2)
1200	× (0 / 2)	× (0 / 2)
1600以上	× (0 / 3)	× (0 / 3)

(材質はすべて普通レール)

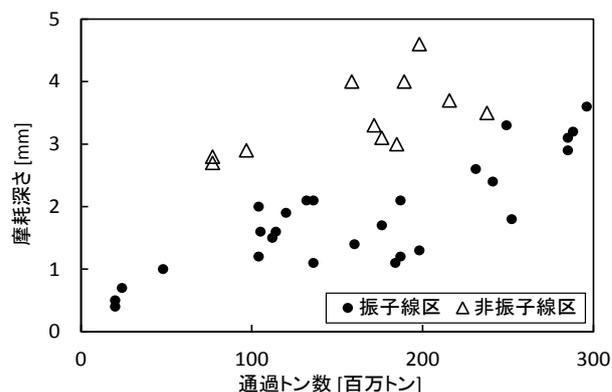


図-5 内軌頭頂面の摩耗量 (曲線半径 600m)

線区 (以下、「振り線区」とする) に集中していたことから、比較として、振り車両が走行しない線区 (以下、「非振り線区」とする) についても調査した。発生状況について、曲線半径ならびに振り線区／非振り線区で分類した結果を表-1に示す。なお、「○」は調査した全ての箇所の中きしみ割れの発生を確認したこと、「△」は調査したうちの一部の箇所の中きしみ割れの発生を確認したこと、「×」は調査した全ての箇所の中きしみ割れが確認されなかったことを示す。また括弧内の数字については、(発生が確認された箇所の数／調査した箇所の数)を示す。

表-1に示すように、中きしみ割れの発生は、振り線区の半径400～800mの曲線区間で確認できた。一方、振り線区の半径1000m以上の曲線区間や非振り線区においては、中きしみ割れの発生は確認できなかった。なお、表-1に示す中きしみ割れ発生箇所は、バラスト軌道やスラブ軌道、無道床橋梁上など、軌道構造には関係なく、その発生が確認された。

先行研究²⁾より、外軌GC部に発生するきしみ割れは半径800mの曲線区間を中心に発生していることから、曲線内軌に発生する中きしみ割れはこれらに比べると、曲率の大きい曲線区間で発生していると考えられる。

(2) 摩耗量測定

レール頭頂面を起点とするき裂の発生には、レール頭頂面に作用する応力に加え、摩耗進展と密接な関係³⁾

があるため、各調査箇所における内軌頭頂面の摩耗量を測定した。中きしみ割れ発生箇所として、振子線区の半径 600m の曲線区間、中きしみ割れが発生していない箇所として、非振子線区の半径 600m の曲線区間の摩耗量をプロットした。それらの結果を図-5に示す。

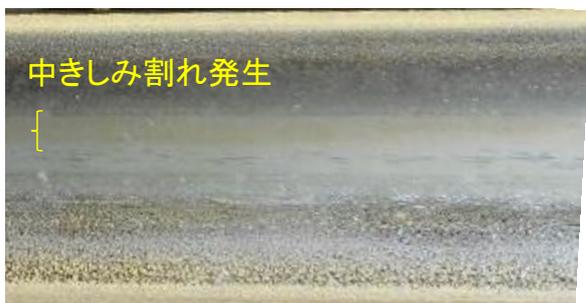
図-5に示すように、中きしみ割れ発生箇所である振子線区においては、未発生箇所である非振子線区に比べて内軌頭頂面の摩耗量が少なく、また全体的な傾向として半分程度であった。

(3) 中きしみ割れの形態とレール頭頂面凹凸

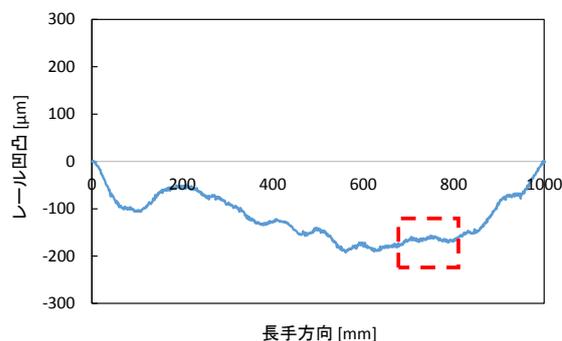
中きしみ割れの発生とレール頭頂面凹凸状態の関係を把握するため、中きしみ割れが発生したレールについて

て、頭頂面凹凸形状を測定した。測定したレールは、いずれも曲線半径600mの円曲線区間に敷設されていた内軌であり、中きしみ割れの開口部の長さに応じて3種類のレール（①頭頂面に短いき裂が連続的に発生、②連続的に発生したき裂のうち、一部が進展、③複数のき裂が大きく進展）を測定した。測定したレール頭頂面の外観ならびに凹凸形状測定結果を、き裂の段階別に図-6から図-8に示す。なお図-6から図-8の外観写真に示す範囲における凹凸形状については、各測定結果において破線で囲まれた領域に相当する。

図-6より、同程度のき裂が連続的に発生している状況では、レール頭頂面にうねりは見られるものの、局所的な凹凸形状の変化は見受けられなかった。一方、図-7に



(a) 頭頂面の外観

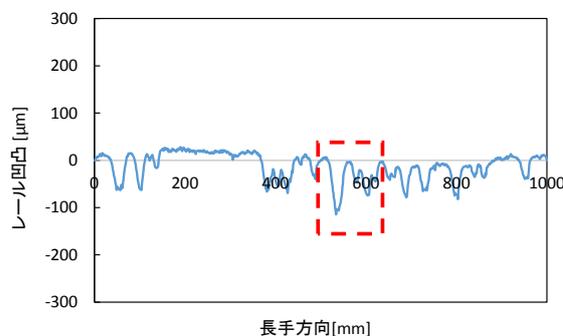


(b) 測定結果

図-6 レール頭頂面凹凸測定結果（短いき裂が発生した形態）



(a) 頭頂面の外観

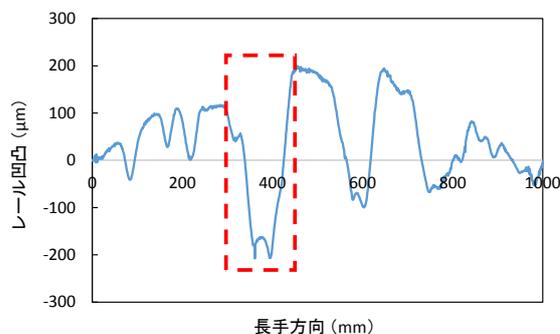


(b) 測定結果

図-7 レール頭頂面凹凸測定結果（一部のき裂が進展した形態）



(a) 頭頂面の外観



(b) 測定結果

図-8 レール頭頂面凹凸測定結果（複数のき裂が進展した形態）

示すように、連続的に発生したき裂のうち一部のき裂が進展した状況では、き裂が進展している箇所において、レール頭頂面が落ち込んでいることが確認できる。さらに図-8に示すように、複数のき裂が大きく進展している状況では、き裂の進展している領域全体が落ち込んでいることが確認できる。つまり、き裂開口部周辺が落ち込むことにより、これらの箇所を通過する車輪との接触面が広くなり、結果として照り面幅が広がったと考えられる。

3. 発生レール分析

中きしみ割れの進展状況の把握ならびに発生要因を検討するために、中きしみ割れが発生したレールについて分析を行った。その詳細を以下に示す。

(1) 発生レールの概況

き裂の進展状況や発生状況、レール頭頂面における応力履歴を確認するために、営業線に敷設していたレール（以下、「分析レール」とする）について断面観察を実施した。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、頭頂面に中きしみ割れの

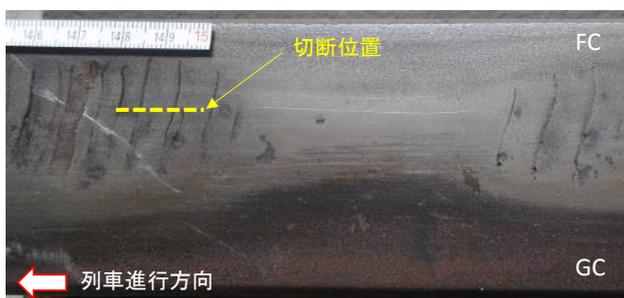


図-9 分析レールの外観

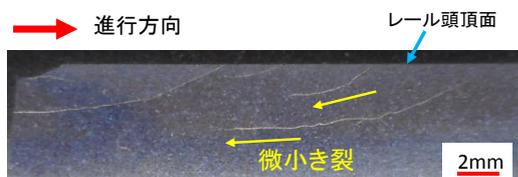


図-10 き裂進展状況観察結果



図-11 塑性流動観察結果

発生が確認されている。分析レールの頭頂面の外観を図-9に示す。

(2) き裂進展状況

レール頭頂面を起点とする中きしみ割れのき裂進展状況を確認するため、図-9に示す破線に沿ってレールを切断し、断面を観察した。断面観察結果の一例を図-10に示す。

図-10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、列車進行方向とは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た。したがって、探傷車によ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。本研究で観察した範囲内では、き裂は最大 4mm 程度の深さまで進展していた。

(3) 塑性流動

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の履歴を確認するために、分析レールの頭頂面表層における断面組織を観察した。図-10の切断面について観察した結果を図-11に示す。

図-11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、列車進行方向に塑性流動が確認された。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。これらの結果より、曲線内軌に発生する中きしみ割れは、通過する車輪との転がり接触に起因する、列車進行方向に作用する縦クリープ力が大きく寄与していると考えられる。

4. 車輪／レール接触解析

中きしみ割れの発生要因を検討する上で、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、中きしみ割れの発生が確認される曲線区間をモデルとして、車輪／レール接触解析 (Simpack 2017) を実施した。

(1) 解析条件

車輪／レール接触解析は、2章で記載した現地調査結果に基づき、中きしみ割れの発生を確認した箇所 (Case1)、ならびに比較のために振り線区で中きしみ割れが発生していない箇所 (Case2) を対象に、モデル化した。なお車両モデルについては、振り線区においてのみ中きしみ割れの発生が確認できたことから、振り車

表-2 解析条件

解析条件	Case1	Case2	Case3
曲線半径 [m]	600	1200	600
カント [mm]	100	55	100
スラック [mm]	0		
縦断勾配 [%]	10 (下り勾配)	水平	10 (下り勾配)
車両形式	振り車両		非振り車両
走行速度 [km/h]	115		
レール断面形状	JIS 50 kgN		

表-3 車両条件

車両条件	振り車両	非振り車両
重量 [kg]	40000	
車輪踏面形状	修正円弧踏面	
車輪径 [mm]	810	860

両をモデルとしたほか、車両の影響についても検討するため、中きしみ割れ発生箇所における非振り車両のモデル (Case3) についても検討を行った。解析条件ならびに車両条件を表-2、表-3に示す。なお表-2に示すように、車両種別の影響について評価するために、非振り車両については振り車両と同じ走行速度の条件で解析を行った。

(2) 解析結果

前章より、中きしみ割れの発生には縦クリープが影響していると考えられる。また2章(2)より、内軌の摩耗量も中きしみ割れの発生に影響していると考えられる。そこで本節では、縦クリープや摩耗に影響を及ぼす因子として考えられる、輪重や左右の車輪における輪径差、車輪/レール接触面に作用する縦クリープ率について検討を行った。なお本研究では、車輪/レール間において進行方向の縦クリープが発生するという観点から、車両の前台車前軸における解析結果について評価した。以下に解析結果を記述する。

a) 輪重

車両が曲線区間を通過する際に、左右の車輪からレールに作用する輪重について、解析結果を図-12に示す。

図-12に示すように、Case1およびCase2では、外軌側で大きい値の輪重が作用していることが確認できる。これは、曲線半径の差に対してカント不足量がCase1で大きいため、超過遠心力が作用した影響が考えられる。曲線半径1200mのCase2では、外軌と内軌の左右輪重比がおよそ6:4であるのに対し、曲線半径600mのCase1では、外軌と内軌の左右輪重比がおよそ7:3であった。また、内軌に作用する輪重の値は、曲線半径の小さいCase1のほうが、Case2よりも10kN程度低いことが確認できた。

つぎに、同じ曲線半径における車両形式の影響として、Case1ならびにCase3の結果を比較した。その結果、

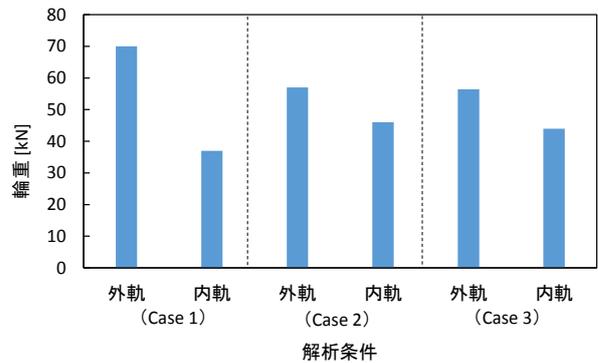


図-12 解析結果 (輪重)

内軌に作用する輪重の値は、振り車両であるCase1のほうが非振り車両であるCase3よりも10kN程度小さいことが確認できた。Case3と比べると、Case1では車両モデルが振り車両であるため、車体重心が曲線外方へ移動した影響が考えられる。

これらの結果より、図-5に示す中きしみ割れ発生箇所と未発生箇所における摩耗量の違いは、図-12に示すような内軌に作用する輪重の差が影響していると考えられる。

b) 輪径差

車両モデルが曲線区間を通過する際の、左右の車輪/レール接触点における車輪の輪径差について、解析結果を図-13に示す。また関連研究⁴⁾より、左右の車輪がすべりを伴わずに転動する、パーフェクトローリング (レール上を車輪が幾何学的にみて、円周方向にすべりを生じないで転動する状態) に必要な左右の車輪間における輪径差は、以下の式(1)で与えられる。そこで、解析における車両モデルについて、パーフェクトローリングのための輪径差を算出し、その値も図-13に重ねてプロットした。

$$\Delta r_e \cong \frac{r}{R} G \quad (1)$$

なお式(1)において、 Δr_e はパーフェクトローリングを実現するための輪径差、 r は車輪半径、 R は曲線半径、 G は軌間である。

図-13に示すように、振り車両においては、Case2と比べると曲線半径の短いCase1で、内外軌における輪径差の値が大きくなっていることが確認できる。またCase1においては、パーフェクトローリングのための輪径差の値と比べると、輪径差が著大となっていることが確認できる。したがって、Case1の曲線区間においては内外軌の輪径差が著大となり、外軌側車輪の接触部に比べて、内軌側の車輪では車輪1回転あたりの転動量が不足していることが明らかとなった。

また、車両形式の差であるCase1とCase3での結果を

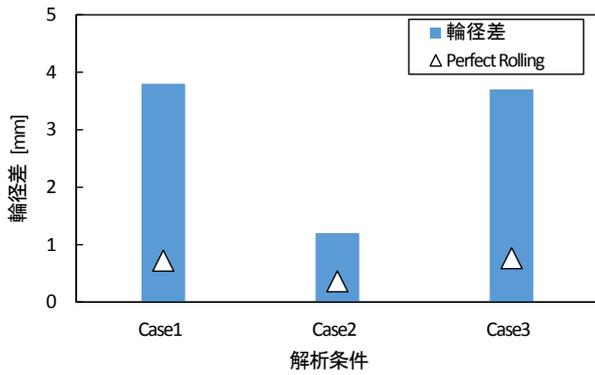


図-13 解析結果（輪径差）

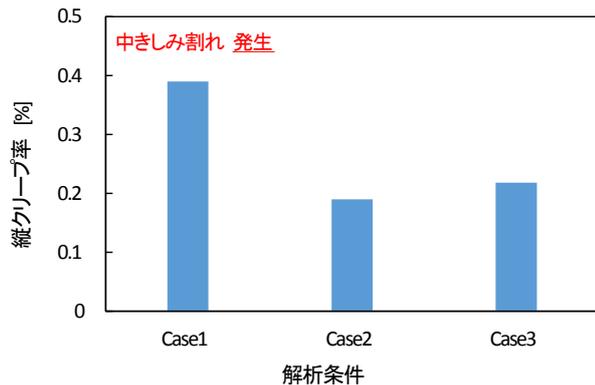


図-14 解析結果（縦クリープ率）

比較すると、わずかに Case1 における輪径差が大きくなっている結果であった。一方、パーフェクトローリングのための輪径差については、表-3 に示すように振り車両と非振り車両における車輪径の差が影響し、Case1 のほうが低い値となった。

c) 縦クリープ率

前項に記載のように、内外軌の輪径差に起因して、車輪／レール接触部に縦クリープが発生すると考えられる。そこで、内軌側の車輪／レール接触部に発生する縦クリープ率について、解析結果をまとめた。これらの結果を図-14に示す。

図-14 に示すように、振り車両においては、曲線半径の短い Case1 で約 0.4%の縦クリープ率が発生している結果となった。また Case2 における結果と比べると、その値は 2 倍程度であることが確認できた。このような差が出た要因として、図-13 に示すように、パーフェクトローリングに対して輪径差が著大であることが考えられる。一方、同じ曲線半径における非振り車両での条件である Case3 については、約 0.2%の縦クリープ率が発生している結果となった。このような結果となった要因として、図-13 に示す輪径差の差に加え、表-3 に示すように振り車両では小径車輪を採用していることが考えられる。つまり車輪径が小さいために、輪径差に対して発生するクリープが大きくなることが影響していると考えられる。

表-4 解析条件

条件	外軌	内軌
1	乾燥	乾燥
2	乾燥	潤滑
3	潤滑	乾燥
4	潤滑	潤滑

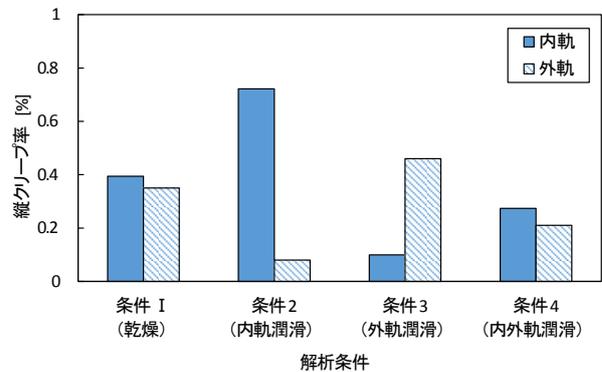


図-15 解析結果（潤滑効果）

これらの結果より、半径 600m の曲線区間を走行した振り車両の内軌側車輪／レール接触部において発生した著大な縦クリープが、中きしみ割れの発生につながった可能性が考えられる。

5. 中きしみ割れ対策法の検討

中きしみ割れの発生ならびに進展を抑制する手法について、前章で行った車輪／レール接触解析をもとに、検討を行った。

(1) 中きしみ割れ発生への対策法

中きしみ割れの発生には縦クリープが影響していることから、内軌の車輪／レール接触部に発生する縦クリープを減少させることで、中きしみ割れ発生抑制が期待できる。そこで、車輪／レール接触部を潤滑させて摩擦係数を低減させることにより発生する縦クリープへの影響について検討した。

内外軌をそれぞれ潤滑した条件で、曲線半径600mの曲線区間を振り車両が通過した際、内軌側の車輪／レール接触部に発生する縦クリープを算出した。解析条件を表-4に、また結果を図-15に示す。なお表-4に示す解析条件について、「乾燥」については摩擦係数を0.4、「潤滑」については油潤滑などを想定し、摩擦係数を0.1とした。

図-15に示すように、内外軌ともに潤滑した条件4にお

いては、内軌に発生する縦クリープが、**図-14**に示す非振子車両において発生する縦クリープの結果と同程度となった。また外軌のみを潤滑した条件3とは異なり、外軌に発生する縦クリープも抑制できていることが確認できる。これらの結果より、内外軌を潤滑することで、発生する縦クリープを減少することが期待できる。ただし、ここで示す解析結果は、摩耗の影響を考慮していないことから、レールの潤滑による中きしみ割れ発生に対する抑制効果については、さらなる検証が必要である。

(2) 中きしみ割れ進展への対策法

1章に記載したとおり、中きしみ割れ発生区間では、

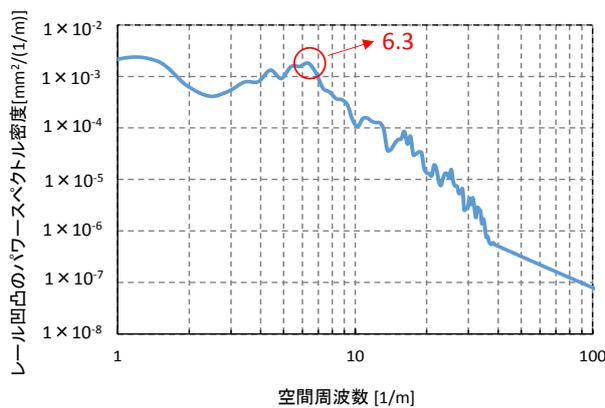


図-16 レール凹凸のパワースペクトル

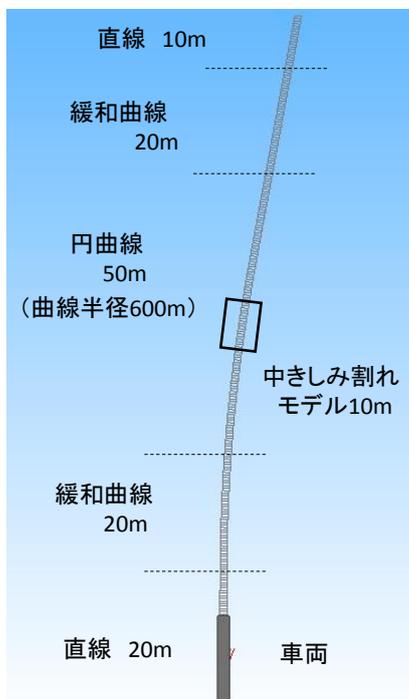


図-17 中きしみ割れ発生モデルの概要

き裂の進展によりレール頭頂面凹凸が顕著になり、通過する列車の上下振動や転動音が顕著となるほか、軌道部

材への悪影響が懸念される。そこで本節では、レール頭頂面凹凸の振幅と発生する縦クリープの変動について検討を行った。

はじめに、中きしみ割れが顕著に発生した半径600mの曲線区間 (**図-2**) におけるレール頭頂面凹凸形状について、レール凹凸連続測定装置⁹⁾により測定した。そして、測定結果についてパワースペクトル密度を算出した結果、1/6.3m (波長約160mm) の周波数が卓越していることが明らかとなった (**図-16**)。そこで、半径600mの曲線区間の解析モデル (**図-17**) を構築し、さらに中きしみ割れの発生を模擬した波長160mmのレール凹凸を、内軌側頭頂面にモデル化した。そして、内軌側頭頂面に形成したレール凹凸の振幅を±0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15mmの6パターン設定した (**表-5**)。そして、それぞれの振幅の凹凸モデルを通過した際に、内軌側の車輪/レール接触部に発生する縦クリープについて解析し、凹凸がない場合に発生する縦クリープ率との変動率を算出した。その結果を**図-18**に示す。

図-18 に示すように、レール頭頂面凹凸の振幅が±0.05mmを超過すると、縦クリープの変動率が増加していることが確認できる。つまり振幅がこの値を超過すると、縦クリープがより著大となり、き裂進展を促進させると考えられる。したがって、振幅が±0.05mmに達する前にレール削正を実施し、頭頂面凹凸を除去することで、促進するき裂進展の予防が期待できる。ま

表-5 解析条件

条件	振幅 [mm]	波長 [mm]
1	±0.025	160
2	±0.05	
3	±0.075	
4	±0.1	
5	±0.125	
6	±0.15	

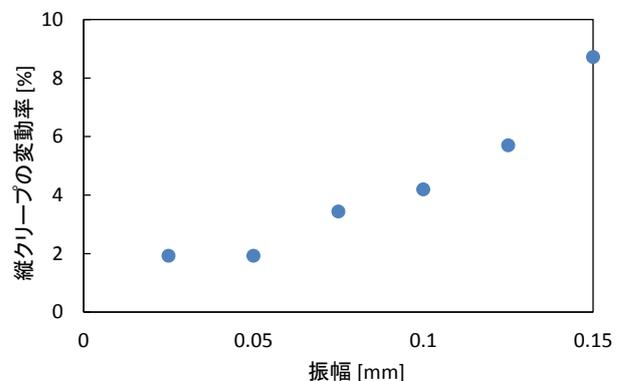


図-18 縦クリープの変動率

た頭頂面凹凸による輪重変動や転動音の増加を防ぐこと

ができることから、軌道部材の劣化や沿線騒音を抑制する効果が期待できる。ただし本研究では波長約 160mm の凹凸のみを対象に検討した結果であることから、その他の波長については、さらに検討する必要がある。

6. まとめ

本研究では、中きしみ割れの発生状況ならびに中きしみ割れの発生メカニズムについて検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 現地調査より、中きしみ割れの発生は、振り車両の走行する割合が高い線区（振り線区）の半径400～800mの曲線内軌で確認した。また同じ曲線半径でも、中きしみ割れが発生した振り線区では、未発生箇所である非振り線区に比べて内軌の摩耗量が少なかった。
- (2) 中きしみ割れはレール頭頂面を起点として、列車進行方向とは逆方向に進展していることが確認できた。一方、レール表層においては列車進行方向に塑性流動が確認できたことから、列車進行方向に作用した縦クリープが中きしみ割れの発生ならびに進展に影響していると考えられる。
- (3) 車輪／レール接触解析より、中きしみ割れが発生した区間においては、未発生箇所に比べて、内軌側に作用する輪重が小さいことが明らかとなった。作用する輪重が減少したことにより、内軌の摩耗量減少につながったと考えられる。また中きしみ割れ発生箇所では、パーフェクトローリングのための輪径差に比べて、著大な輪径差であることが確認できた。この著大な輪径差によって、内軌側の車輪／レール接触部に列車進

行方向の縦クリープが発生したと考えられる。

- (4) 中きしみ割れの発生によりレール頭頂面凹凸（波長160mm）が顕著になった箇所では、凹凸の振幅が±0.05mmを超過すると、列車通過時に発生する縦クリープが大きく変動することを確認した。したがって、凹凸の振幅が±0.05mm以上になる前にレール削正を実施することで、中きしみ割れの成長を抑制することが期待できる。また同時に、通過する列車の輪重変動や、それによる軌道部材の劣化を抑制することが期待できる。

参考文献

- 1) 辻江正裕, 兼松義一, 猿木雄三: レール中きしみ割れの発生状況調査, 第 72 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2017.
- 2) 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), pp.421-422, 2004.
- 3) Y. Zhou, S. Wang, T. Wang, Y. Xu, Z. Li: Field and laboratory investigation of the relationship between rail head check and wear in a heavy-haul railway, Vol.315, *Wear*, pp.68-77, 2014.
- 4) 松本陽, 佐藤安弘, 谷本益久, 康琦, 古田勝: 急曲線通過中における台車／車軸姿勢の実態把握について, 第 3 回鉄道技術連合シンポジウム論文集, pp.199-202, 1994.
- 5) 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, 鉄道工学論文集, Vol.17, pp.19-26, 2013.

(2019.4.5 受付)

A STUDY OF THE INITIATION FACTOR AND THE COUNTERMEASURE METHOD FOR THE HEAD CHECKS ON THE LOW RAIL

Masahiro TSUJIE, Hidenori NISHIMURA, Motohide MATSUI and Hua CHEN

The head checks is one of the most famous cracks generated on the railway rail. Generally, the head check is generated at the gauge corner of the rail surface of the high rail in the curved section. On the other hand, occurrence of some head check was confirmed on the low rail in the curved section. However, the occurrence situation of the head check on the low rail is not clarified. Furthermore, the initiation factors of this typed head check are not also clarified. In this research, we conducted the on-site investigation and the analysis of the rail which had the head check on its surface, in order to clarify the occurrence situation of the head check on the low rail. In addition, we conducted the wheel and the rail contact analysis by use of multibody dynamics (Simpack) in which the curved sections with the head check appearance site and the no head check appearance site were modeled. Especially, we conducted the wheel and the rail contact analysis with the vehicle models of the tilting train and the non-tilting train. Moreover, we examined the initiation factor of the head check in the low rail based on the wheel and rail contact conditions. Finally, we examined the countermeasure method for the initiation and the propagation of the head checks on the low rail based on the wheel and the rail contact analysis.