

曲線内軌における中きしみ割れ発生メカニズムの解明

辻江 正裕* 西村 英典** 木村 成克*
松井 元英** 陳 樺*

Clarification of Generation Mechanism of the Head Checks on Low Rail

Masahiro TSUJIE Hidenori NISHIMURA Shigekatsu KIMURA
Motohide MATSUI Hua CHEN

Head checks occur on the rail surface of gauge corner in high rail of curved section with radius of about 800m and the generation mechanism is already clarified. On the other hand, it has been recently reported that head checks also occurs on low rail of curved section. However, the cause of the head checks on the low rail are not clarified yet. Therefore, we conducted the on-site investigation and the analysis of the rail which is confirmed the head checks appearance in order to clarify the generation mechanism of the head checks on low rail. In addition, we conducted contact analysis between wheel and rail by using multi-body dynamics and the measurement of wheel and rail contact forces in commercial line. As a result, it is found out that the small wheel load loaded on low rail and the very large difference between the wheel diameters of the left and right wheels are the causes of the head checks on low rail.

キーワード：中きしみ割れ，内軌，車輪／レール，マルチボディダイナミクス，Simpack，軌道動特性測定

1. はじめに

きしみ割れは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(図1)が、内軌頭頂面において確認されている。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。探傷車によるレール頭頂面からの超音波探傷では、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箇所が散見されている。また中きしみ割れ発生箇所では、レール頭頂面凹凸が複雑に変化していることから、通過する列車において軸箱の上下振動加速度が著大となっていることが確認されている。またこれに伴い、乗心地や車輪転動音の悪化が懸念されるほか、軌道部材の劣化につながる恐れもある。しかし中きしみ割れについては、その他の形態の損傷に比べて知見が乏しく、発生状況や発生形態が明らかになっていない。

そこで本研究では、現地調査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。また車輪／レール接触解析および営業線での軌道動特性測定より、中きしみ割れの発生メカニズムについて検討を行った。

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 材料技術研究部 摩擦材料研究室



図1 中きしみ割れの外観

2. 現地調査

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。

2.1 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でも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でも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でも中きしみ割れが確認されなかったことを

特集：鉄道力学

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。これらの結果より、中きしみ割れは振り線区の半径400～800mの曲線区間において発生する形態の損傷であると考えられる。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。

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)

2.2 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、摩耗進展とも密接な関係があるため、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、振り線区の半径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、非振り線区の半径600mの曲線区間における摩耗量をプロットした。それらの結果を図2に示す。

図2に示すように、中きしみ割れ発生箇所である振り線区においては、未発生箇所である非振り線区に比べて内軌頭頂面の摩耗量が少なく、全体的な傾向としてはその半分程度であった。

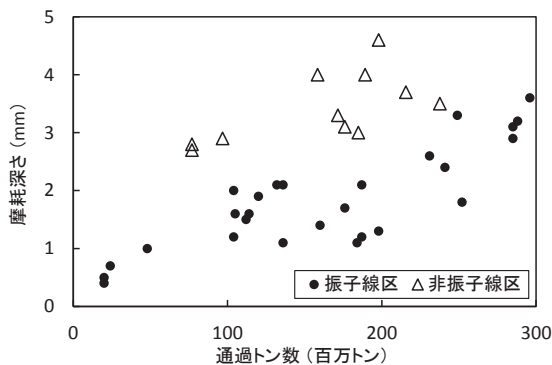


図2 摩耗量測定結果

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の検討のために、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。

3.1 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発生が確認されている。

3.2 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、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3に示す。

図3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が考えられる。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。

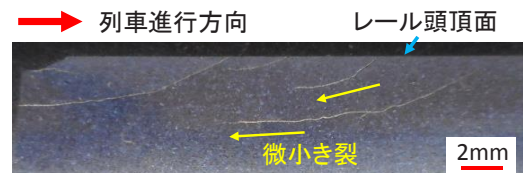


図3 き裂進展状況

3.3 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。その結果を図4に示す。

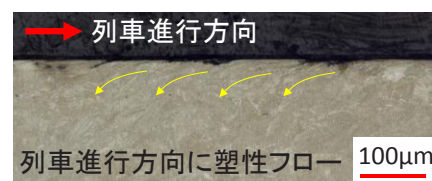


図4 断面組織観察結果

図4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よって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／レールの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／レール接触解析を実施した。

4.1 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。

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

4.2 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2.2節に示した、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。

4.2.1 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載荷される輪重について、解析結果を図5に示す。

図5に示すように、いずれにおいても外軌側では高い値の輪重が載荷されていることが確認できる。これは軌道条件が曲線区間であることに加え、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。曲線半径1200mのCase2では、外軌と内軌の左右輪重比がおおよそ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およそ7:3であった。また、内軌に載荷される輪重の値は、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の結果を比較すると、内軌に載荷される輪重の値は、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程度低いことが確認できた。

これらの結果より、図2に示した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、上記の内軌に載荷される輪重の差が影響していると考えられる。

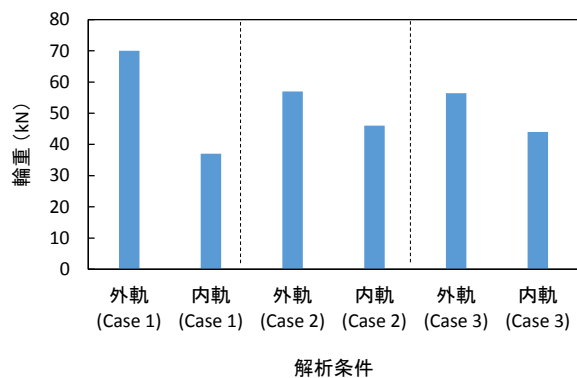


図5 解析結果（輪重）

4.2.2 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6に示す。また関連研究¹⁾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（車輪がレール上を幾何学的に円周方向の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

特集：鉄道力学

は、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、その値を図6に重ねてプロットした。

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

ここで、 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6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、Case1と非振り車両であるCase3の結果を比較すると、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となる輪径差については、表3に示す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。

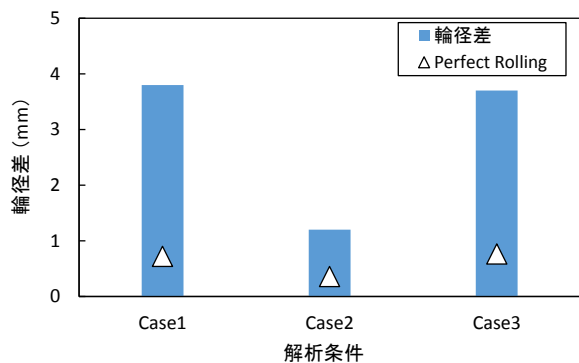


図6 解析結果（輪径差）

4.2.3 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7に示す。

図7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6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6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から、一つの要因として、車輪径の差が影響したと考えられる。

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。

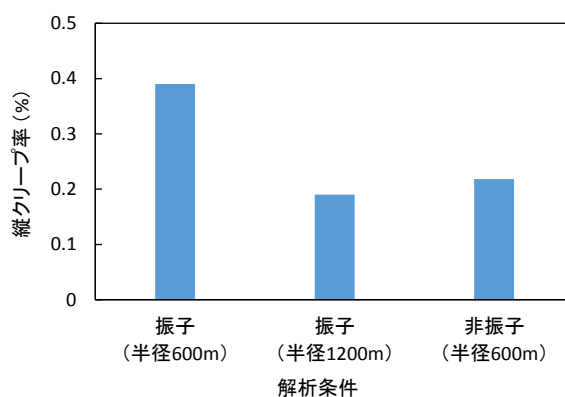


図7 解析結果（縦クリープ率）

5. 軌道動特性測定

実際の営業線における車輪／レール接触状態を明らかにするために、軌道動特性測定を実施した。

5.1 測定箇所の概要

軌道動特性測定は、中きしみ割れ発生箇所、ならびに未発生箇所をそれぞれ1箇所ずつ（以下、これらの測定箇所をそれぞれ「測点A」「測点B」とする）選定した。各測点の軌道諸元を表4に示す。

表4 測定箇所の軌道諸元

測定条件	測点A	測点B
曲線半径 [m]	600	1200
カント [mm]	100	55
スラック [mm]	0	
縦断勾配 [%]	10 (下り勾配)	水平
軌道構造	バラスト軌道	
走行速度 [km/h]	80 [非振り(普通)] 115 [振り(特急)]	90 [非振り(普通)] 115 [振り(特急)]

測点 A ならびに測点 B は、いずれも同一線区であり、同じ車両が通過する。なお、これらの線区においては、振り車両である「特急」と非振り車両である「普通」の 2 種類の列車が通過する。本研究においては、各測点を通過した特急列車 7 編成、普通列車 4 編成について測定を行った。

5.2 測定結果

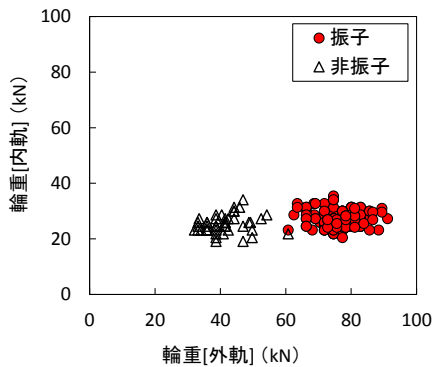
各測点を通過した車両における測定結果を以下に示す。

5.2.1 輪重

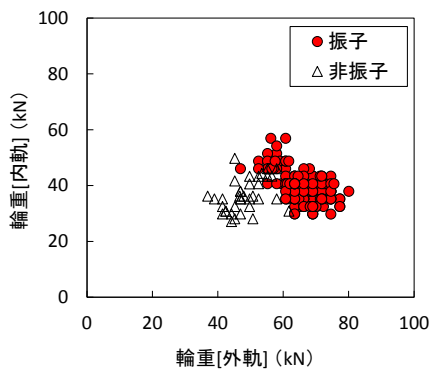
各測点における内軌・外軌の輪重測定結果を箇所別に図 8 に示す。なお各車両の静止輪重は、振り（特急）で約 50kN、非振り（普通）で約 38kN である。

図 8(a) に示すように測点 A においては、特急の測定値では外軌側では内軌側の 2～3 倍の値が測定された。また同じ箇所における普通との測定結果と比べると、特急では外軌側の輪重が高い値となっていることが確認できる。これは、特急が振り車両であるため、車体重心が外軌側に偏っている影響であると考えられる。

一方、図 8(b) に示す測点 B においては、普通では外軌側と内軌側で同程度の値であり、特急では外軌側で内軌側の 1～2 倍の値となった。この箇所において設定されたカント量は、通過する普通に対して概ね均衡カント



(a) 測点 A



(b) 測点 B

図 8 輪重測定結果

であること、また特急の振り角が測点 A に比べると小さいこと、が原因であると考えられる。

これらの結果より、中きしみ割れの発生が確認された測点 A においては、内軌に載荷される輪重が少ないことから、内軌の摩耗量が減少し、中きしみ割れの発生に影響したと考えられる。

5.2.2 車輪位置

車輪／レール間の接触位置を明らかにするために、内軌側のマクラギ上（軌間外側）に取り付けたレーザ変位計により、通過する車輪のレールとの相対位置を測定した。本研究で示す車輪位置は、図 9 に示すように内軌 FC 側の側面と車輪端面の距離である。なお、輪軸の中心と軌間中心が一致する場合、この値はおよそ 23mm となる。つまり、測定値が 23mm より小さくなると輪軸は曲線外方へと移動し、逆に大きくなると輪軸は曲線内方へと移動していることになる。

両測点において測定した、車輪位置の測定結果を図 10 に示す。

両測点における測定結果を比較すると、図 10 に示すように、輪軸ごとにばらつきは見られるものの、両測点で概ね同程度の値が測定された。これらの箇所において軌間ゲージを用いて軌間変位を静的に測定した結果、測点 A においては +1mm、測点 B においては +4mm の軌間変位が測定された。したがって、これらの測点における軌間変位の差が影響し、内軌側の車輪／レール間の距離に差が見られなかったと考えられる。

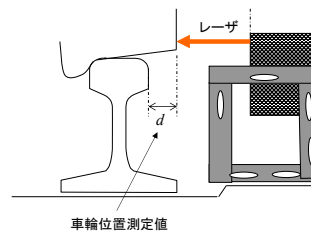


図 9 車輪位置測定の概要

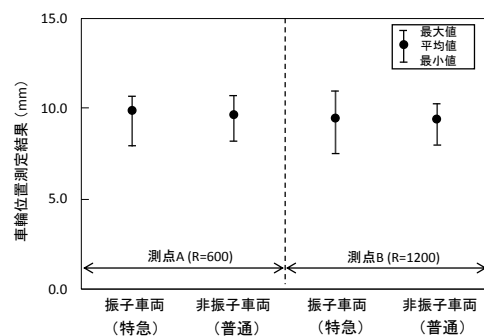


図 10 車輪位置測定結果

特集：鉄道力学

5.3 考察

前章で記述した軌道動特性測定結果について、より正確な車輪／レール接触状態を明らかにするためには、車輪／レール接触位置をもとに検討する必要がある。そこで本研究では、通過した車輪とレールの接触位置をより詳細に明らかにするため、車輪ならびにレールの断面形状を測定し、前述の車輪位置情報に基づき車輪／レール接触位置について検討を行った。なお、車輪／レールの断面形状測定は、Miniprofを用いて行った。レール断面形状は軌道動特性測定箇所の内軌ならびに外軌について測定し、車輪断面形状については測定箇所を通過した編成のうち特急のみ4編成について、M車とT車を1両ずつ全ての車輪について測定した。

5.2.2 で得られた車輪位置測定結果をもとに、測定した車輪／レール断面形状を幾何的に重ね合わせ、車輪／レール間の接触位置を算出した。なお、重ね合わせた結果の一例を図11に示す。

図11に示すように、外軌側においてはレールのGC部と車輪のフランジのど部、内軌側においてはレールのFC側頭頂面と車輪の反フランジ側踏面部において接触していることが確認できる。なお図11においては、外軌側車輪接触位置における輪径差が踏面中心の輪径に比べて+8.30mm、内軌側における車輪接触位置における輪径差は-0.45mmであることが確認された。つまり図11の例においては、左右の輪径差が8.75mmと算出された。

以上のように、車輪／レール断面形状を重ね合わせるにより得られた車輪／レール接触点より、各測点を通過した車輪における左右の輪径差について算出した。その結果を図12に示す。

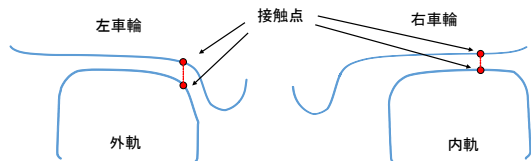


図11 車輪／レール接触位置の例

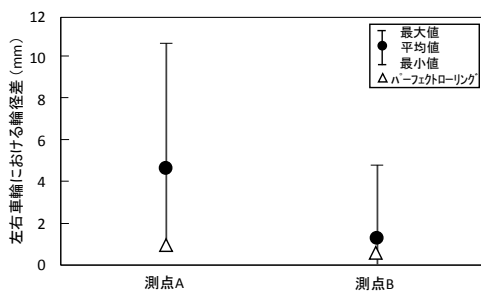


図12 輪径差算出結果

図12に示すように、中きしみ割れが発生している測点Aにおいては、平均4.7mm程度の輪径差が確認された。一方、中きしみ割れが未発生である測点Bにおいては、平均1.4mm程度の輪径差が確認できた。

このような左右車輪の輪径差によって、車輪／レール接触面には縦クリープ力が発生することが考えられる。そして、このような縦クリープ力がレール表面にせん断力をもたらし、中きしみ割れの発生に影響したものと考えられる。

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。

- ・ 現地調査より、中きしみ割れは、振子車両の走行する割合が高い線区（振子線区）の半径400～800mの曲線内軌で発生していることを確認した。また中きしみ割れ発生箇所では、未発生箇所と比べて内軌の摩耗量が少なかった。
- ・ 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。
- ・ 車輪／レール接触解析ならびに軌道動特性測定より、中きしみ割れが発生した区間においては、未発生箇所と比べて、内軌側に載荷される輪重が少ないことが明らかとなった。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、著大な輪径差となっていることを確認した。したがって、この著大な輪径差により内軌側の車輪／レール接触部に列車進行方向の縦クリープが発生し、中きしみ割れの発生ならびに進展に至ったものと考えられる。

文献

1) 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講演論文集, pp.199-202, 1994