

S8-2-1

転動試験機によるレールきしみ割れ再現実験

正 [土] ○瀧川 光伸(東日本旅客鉄道(株)) 入屋 義博(東日本旅客鉄道(株))

Laboratory Experiments of Head Checks Occurrence with Twin-disc Machine

Mitsunobu Takikawa, Member (East Japan Railway Company)

Yoshihiro Iriya (East Japan Railway Company)

This paper discusses factors of causing head checks from laboratory simulations with twin-disc machine. Head checks are one of rolling contact fatigue (RCF) defects at rail gauge corner of high rails in mild curves. First vehicle/track dynamic behavior at a track site was investigated. And considering its investigated results, the laboratory simulations with a small scaled twin-disc machine was carried out. We could realize the head checks occurrence with the twin-disc machine under test arrangements calculated from the investigation results. The laboratory simulations indicated that the head checks occurrence needs slight attack angle and lateral force. The attack angle is about 0.1 degree and the lateral force is about 10kN at the head hardened rail. This would suggest that the countermeasures of head checks occurrence are found in this laboratory simulations.

キーワード：レール損傷、きしみ割れ、転がり接触疲労、三次元FEM解析、転動試験装置

Keyword: Rail defect, Head Checks, Rolling contact fatigue, 3-D FEM analysis, Twin-disc machine

1. はじめに

近年、緩曲線区間における外軌ゲージコーナ部で図1に示すような“きしみ割れ”からはく離にいたる傷が多く観察されるようになり、レール交換等のメンテナンスに苦慮している。そこで、きしみ割れの発生とはく離に至る要因を探り、きしみ割れの対策を検討するために2円筒による転動試験装置を使ったきしみ割れ再現試験を実施した。最初に、実際の軌道においてきしみ割れの発生しやすい軌道条件を探るため、レール探傷車と軌道検測車のデータ分析及び軌道の動的測定を行った。次に、そこで得られた知見をもとに実験条件を定め、転動試験装置により試験を行った結果、レール試験片に営業線と同様のはく離を伴ったきしみ割れを発生させることができた。本稿では、それらの実験結果について報告する。

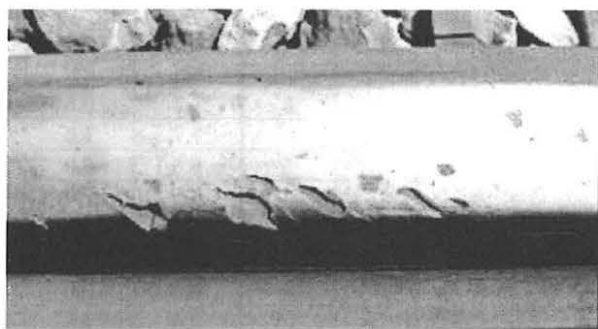


図1 外軌のレールきしみ割れ

2. 実験条件

2.1 営業線データの分析結果¹⁾

レール探傷車データを分析した結果を図2に示す。縦軸は調査した5線区の曲線延長に対してきしみ割れの発生している割合である。図より、曲線半径700~800mと400mの区間にきしみ割れが多く発生していることがわかった。曲線半径800m以下の外軌には、熱処理レールが使用されていることが関係していると考えられる。曲線中できしみ割れの発生している箇所であるが、曲線半径700~800mでは本曲線中、曲線半径400mでは緩曲線中に多く見られた。また、軌道検測車の検測データから熱処理レール区間で発生している横圧の多くは約10kNであることがわかった。曲線半径800mを超えている曲線外軌は普通レールを使用

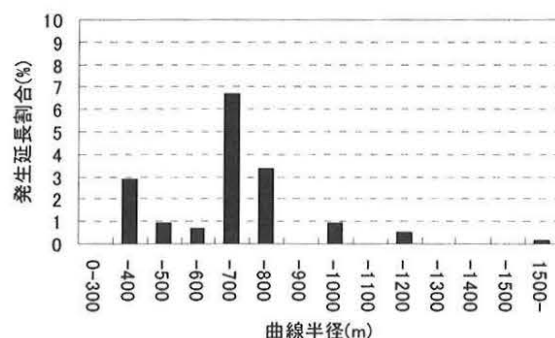


図2 各曲線でのきしみ割れの発生延長割合

しているが、そこできしみ割れが発生している箇所の横圧の多くは約 5kN であることもわかった。

また、きしみ割れの発生している曲線半径 800m の区間で軌道の動的測定を実施した結果をまとめると表 1 のようになった。この結果はボルスタレス台車の車両について整理した表である。同様の速度でも旧型車（ボルスタ付台車）の場合、輪重は大きく、横圧は小さな値となっていた。

表 1 軌道の動的測定結果 (R800m)

レール	列車速度 km/h	輪重 kN	横圧 kN	小回り角 deg	アタック 角 deg
50N 熱処理	80	40~50	8~10	0.0~ -0.05	0.1~ -0.1°

2.2 三次元有限要素解析

(1) 解析条件

実際のレール/車輪間に発生している接触圧を転動試験装置でも同じ状態にするために、図 3 に示す三次元有限要素モデルによる弾性解析を行った。レール断面方向におけるモデルの要素間隔はレール/車輪接触部を 2.5mm、その他を 5.0mm とした。諸条件としては、縦弾性係数を $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比を 0.3、静摩擦係数を 0.5、動摩擦係数を 0.3 とした。さらに、計算で使用した車輪形状は修正円弧路面、レール形状としては 60kg 及び 50N とした。そのモデルの概要を表 2 に示す。また、きしみ割れ再現実験を実施するために選定した計算条件を表 3 に示す。

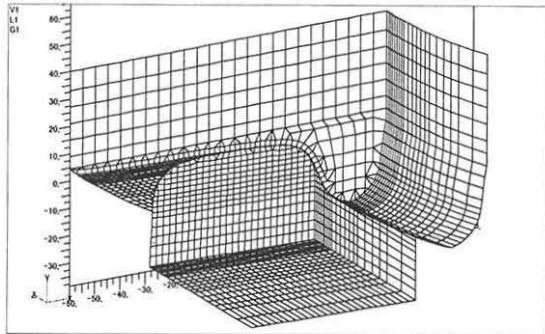


図 3 計算で使用した有限要素モデル

表 2 計算したモデルの概要

		実物モデル	転動装置試験片
レール	直径	∞	430mm
	頭部形状	60kg: R13-R50-R600 50N: R13-R80-R300	60kg: R6.5-R25-R300 50N: R6.5-R40-R15
車輪	直径	860mm	430mm
	路面形状	修正円弧路面 R14-R80-R320-R900	R7-R40-R160-R450

(R: 形状半径(mm)を示す)

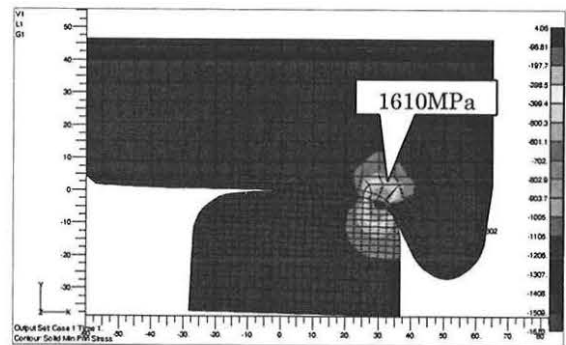
表 3 計算条件

輪重 (kN)	横圧 (kN)	小回り角 (deg)	アタック角 (deg)	接触角 (deg)
50	5, 10	0.0	0.0, 0.1	1.4

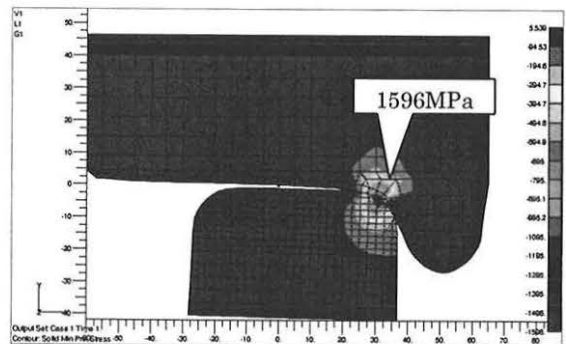
(2) 解析結果

解析では、実際のレール設計形状と車輪設計形状の接触で生じる圧縮主応力が、転動装置のレール試験片と車輪試験片で生じる圧縮主応力と同じになるようにして実験条件を算出した。横圧が 10kN の場合、最大圧縮主応力はアタック角が 0.0° のときで約 1400MPa、アタック角が 0.1 度のときで約 1600MPa であった。その中で例として、アタック角が 0.1° 場合について実車相当の設計断面に関して解析した結果を図 4 に示す。この計算では、アタック角による主応力の違いは見られたが、レール種別による大きな違いは見られなかった。

以上の解析から得られた実験条件をまとめると表 4 のとおりとなった。



(1) 修正円弧と 50N



(2) 修正円弧と 60kg

図 4 解析結果 (横圧 10kN、アタック角 0.1°)

表 4 実験条件 (1/2 モデル)

レール試験片	アタック角 deg	実車横圧 kN	ラジアル荷重 (輪重) kN	スラスト荷重 (横圧) kN	試番
50N 小回り角: 0.0° 接触角: 1.4° 実車輪重: 50kN	0.0	5	7.7	0.8	①
		10	7.7	1.5	②
	0.1	5	8.9	0.9	③
		10	9.9	2.0	④
60kg 小回り角: 0.0° 接触角: 1.4° 実車輪重: 50kN	0.0	5	7.9	0.8	⑤
		10	7.8	1.6	⑥
	0.1	5	8.9	0.9	⑦
		10	9.6	1.9	⑧

(車輪試験片: 修正円弧路面)

3. 転動試験装置によるきしみ割れ再現実験

3.1 転動試験装置の概要²⁾

図 5 に示す転動試験装置を使用して外軌のゲージコーナに発生しているきしみ割れの再現実験を実施した。試験装置の仕様を表 5 に示す。この転動試験装置はレール/車輪間の疲労や摩耗に関する現象を評価するために製作されたものである。転動試験装置に取り付け可能な試験片サイズは 1/2 モデルと 1/4 モデルの 2 サイズであるが、今回の実験は急曲線の横圧と比べて小さいことと転動試験装置で制御可能な荷重を考慮して、1/2 モデルで行うことにした。

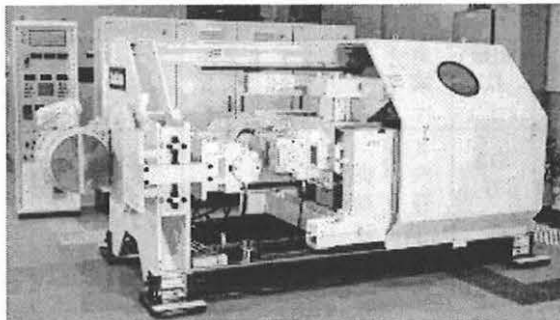


図 5 転動試験装置

表 5 転動試験装置の仕様 (1/2 モデル)

項 目		仕 様
本 体	回転速度	100~2000rpm
	荷重	ラジアル荷重: max100kN スラスト荷重: max40kN
	ねじれ角 (アタック角)	-3.0~+4.0°
	接触角	0.0~3.0°
	雰囲気条件	乾燥, エアー, 散水, 塗油
試 験 片	試験片直径	車輪試験片: $\phi=430\text{mm}$ レール試験片: $\phi=430\text{mm}$ (1/4モデルの場合: $\phi=215\text{mm}$)
	形状 (形状半径等)	車輪試験片: 実物の1/2 レール試験片: 実物の1/2
	材質	車輪試験片: 車輪材 レール試験片: レール鋼

3.2 きしみ割れ再現実験

レール試験片は、形状として 50N と 60kg、試験片の材質としては普通と熱処理の計 4 種類を用意した。再現実験は、今後のきしみ割れ対策に関する実験を 50N 形状で実施することを考慮して 60kg 形状で行うことにした。また、車輪試験片の踏面形状は、現在の実際の車両に合わせて修正円弧踏面とした。

転動試験装置に 1/2 モデルの試験片を取り付けた状態を図 6 に示す。輪重に相当するラジアル荷重及び接触角は車輪試験片側、横圧に相当するスラスト荷重及びアタック角はレール試験片側で制御する。散水は転動試験装置の上側からレール試験片に向かって行う。散水量も制御すること

が可能で、今回の実験では実験状況を見ながら必要に応じて 10~15mmL/min の水量で潤滑した。

きしみ割れの再現実験は、営業線での発生状況を考慮した条件で熱処理タイプと普通タイプの 2 種類のレール試験片で行った。

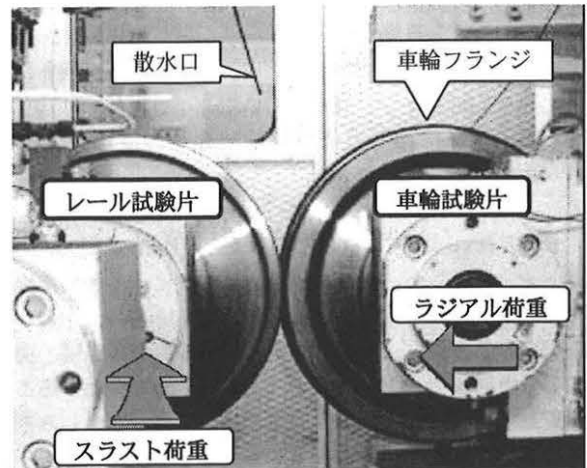


図 6 転動試験装置

(1) 熱処理タイプにおける再現実験

熱処理タイプにおけるきしみ割れの再現実験は、試行錯誤の実験となったため、結果的には表 6 に示す順番で実施された。実験条件の大きな違いとしては、最初アタック角のない条件 (表 4 の試番⑥)、続けてアタック角がある条件 (表 4 の試番⑧) で実施したことである。雰囲気としては結果的に乾燥と水潤滑の 2 条件となったが、これは車輪試験片及びレール試験片の踏面にできる波状摩耗の状態によって変更をした。1 枚目の車輪試験片は波状摩耗がひどくなったため、935 万回転で 2 枚目に交換をした。すべり率は従動運転で行ったため、試験片温度、雰囲気の状態及び波状摩耗の状態が大きく変動し、最大で 2% 程度にまでなる場合もあった。

この条件により実験を行った結果から確認できた点を以下に示す。

表 6 熱処理レール (60kg) の実験順番

条件	回転数 (マデ)	車輪片	すべり	ラジアル kN	スラスト kN	ねじれ角 deg	接触角 deg	雰囲気
No. 1	400 万	1 枚目	従動運転	7.8	1.6	0.0	1.4	水
No. 2	800 万							乾燥
No. 3	815 万							
No. 4	935 万	2 枚目		9.6	1.9	0.1		水
No. 5	1070 万							

- ・ アタック角がない場合、きしみ傷はほとんど発生しなかった。
- ・ アタック角を 0.1° に設定した後 180 万回転(通トン換算：1800 万トン) できしみ傷が発生した。ただし、途中で車輪試験片を交換している。
- ・ アタック角変更後 260 万回転(通トン換算：2600 万トン) できしみ傷からの大きなはく離が発生した。ただし、レール試験片はトータルで 1060 万回転(通トン換算：1.06 億トン) 経過していた。
- ・ はく離が発生したときのレール輪の表面硬さは約 340HV であった。

きしみ割れはアタック角による条件変更後、通トン 1800 万トンで発生した。レール探傷車データによると営業線にできしみ割れが最も早く発見されたのは 1100 万トンのレールであることから、実験においても条件がそろえば、実際の場合と同様に 1000 万トン代できしみ割れが発生することを確認した。さらに、最終的には目的であったきしみ割れからののはく離現象を再現することができた。累積通トンとしては 1 億トンを超えており、金属疲労が蓄積されていたと考えられる。その時のレール試験片の状態を図 7、摩耗形状を図 8 に示す。



図 7 きしみ傷からののはく離

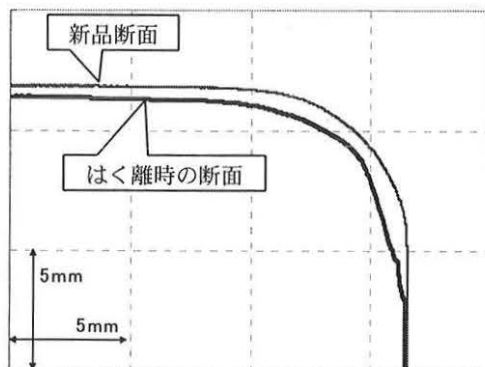


図 8 はく離したときのレール試験片の形状

(2) 普通タイプにおける再現実験

レール試験片にはく離が発生したため、レール試験片を普通タイプ(60kg 形状)に変更して再現実験を再開した。

普通タイプにおける実験の順番を表 7 に示す。車輪試験片は 2 枚目をそのまま使用したが、途中で波状摩耗がひどくなったため、3 枚目に変更した。荷重条件は営業線の分析データ及び熱処理タイプの実験で得られた知見を参考に表 4 における試番③で行うこととした。

この条件で実験を行った結果からわかったことは以下のとおりである。

- ・ 380 万回転(通トン換算：3800 万トン) できしみ傷が発生した。
- ・ 680 万回転(通トン換算：6800 万トン) 経過した時点ではく離は発生していない。

表 7 普通レール(60kg)の実験順番

条件	回転数 (万回)	車輪片	すべり	ラジアル kN	スラスト kN	ねじれ角 deg	接触角 deg	雰囲気
No. 6	315 万	2 枚目	従動 運転	8.9	0.9	0.1	1.4	水
No. 7	680 万	3 枚目						

4. まとめ

営業線で得られたデータをもとに転動試験装置を使用しできしみ割れの再現実験を行なった結果、営業線とはほぼ同様のきしみ傷とはく離を再現することができた。これまでの実験結果から考察するときしみ割れの発生については次のことが関係していると思われる。

- ・ きしみ割れの発生には横圧だけでなく、アタック角も必要である。
- ・ 熱処理レールの場合、きしみ割れは比較的少ない通トン(1000 万トン代)でも発生する。
- ・ きしみ割れからはく離に至るには、金属疲労の蓄積(一定の時間)が必要となる。

今後は普通タイプの試験片で引き続き実験を行ない、きしみ割れの発生状況を確認する予定である。その後は材質を変更したレール試験片できしみ割れの発生状況を確認し、その結果から得られたきしみ割れの発生しにくい材質のレールを営業線に試験敷設して、きしみ割れ対策として有効性を評価する予定である。

参考文献

- 1) 瀧川、小野寺：レールきしみ割れの発生傾向分析、J-RAIL2004 講演論文集、pp421-422、2004.12
- 2) 瀧川、村越、本：レール頭面形状と摩耗に関する分析、鉄道力学論文集第 7 号、pp61-66、2003.7