

論文 軌道条件および車両条件を考慮したレール損傷箇所 の走行安全性の体系的評価

塩田 勝利¹・西宮 裕騎²

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: shiota.katsutoshi.80@rtri.or.jp (Corresponding Author)

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: nishinomiya.yuki.78@rtri.or.jp

無線式列車制御システムの導入により軌道回路が撤去され、現行のレール損傷検知ができなくなった場合を想定すると、レール損傷箇所を車両が通常の営業速度で走行する可能性が考えられるため、そのような状況下における走行安全性を評価する必要がある。そこで本研究では、レール開口部の走行解析手法を用いて、レール損傷箇所の走行安全性に影響を及ぼすとして抽出した軌道・車両要因を組み合わせた条件にて軌道線形毎に走行解析を行う評価方法を提案した。また、提案する方法を用いて、ケーススタディを実施し、レール損傷箇所通過時の走行安全性を体系的に評価した。

Key Words: rail break gap, FEM, vehicle dynamics simulation, running safety

1. はじめに

現在、営業線において車両位置を検出するための手法として信号電流による「軌道回路」が用いられている¹⁾。一方で、無線式の車両位置検知手法が、海外および日本国内でも一部導入されている²⁾。軌道回路には、車両位置を検知する機能のほか、レール損傷（ここでいうレール損傷とは、レール破断状態をいう）を検知することが可能であるが、無線式列車制御システムの導入により軌道回路が撤去され、現行のレール損傷検知ができなくなった場合を想定すると、レール損傷箇所を車両が通常の営業速度で走行（以下、「通常走行」という）する可能性が考えられる。そのため、そのような状況下を想定して、レール損傷箇所の走行安全性を評価することが必要である。

これまでに、レール損傷箇所の走行安全性について、レール開口部の走行解析手法³⁾を用いて、徐行時の走行安全性の検討は行っているが⁴⁾、通常走行時についての検討は行われていない。また、損傷箇所の走行安全性は、軌道変位や輪重アンバランス等の軌道・車両条件が影響するとともに、曲線半径やカントといった軌道線形によっても異なることが考えられる。そのため、無線式列車制御システムが広く普及し、軌道回路が撤去され、それぞれの現場における走行安全性を検討する必要が生じた場合に、レール開口部の走行解析手法を用いて、個別に

評価を行うことは現実的でないため、より体系的に評価できる方法が必要である。

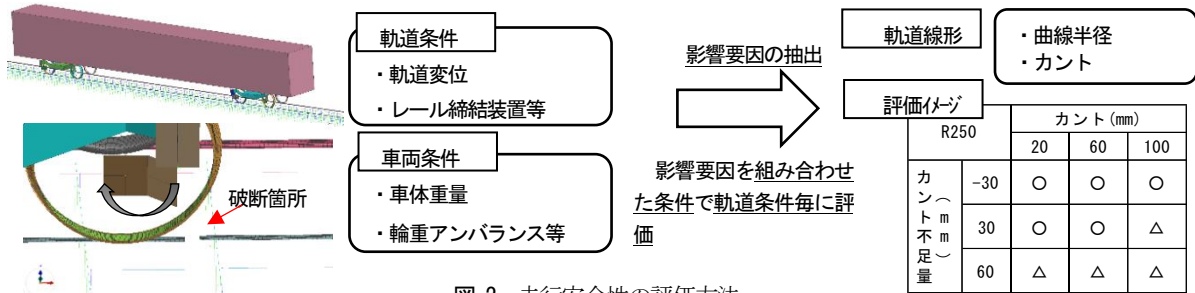
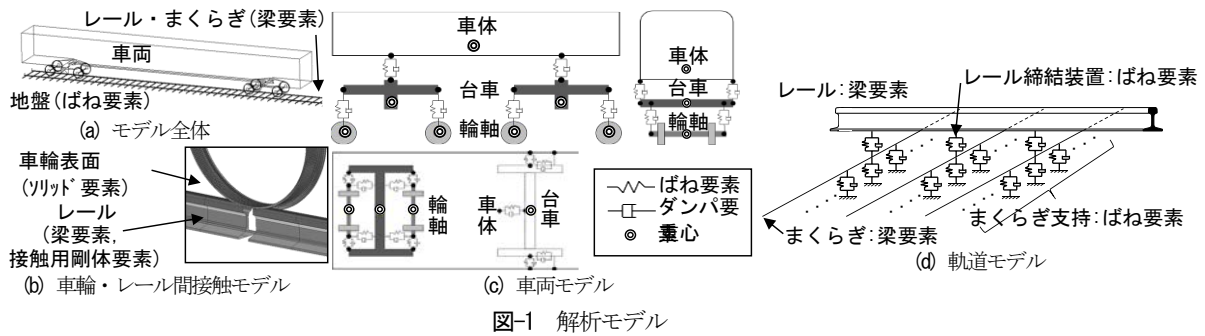
そこで本研究では、これらの課題に対し、レール開口部の走行解析手法を用いて、軌道・車両条件および軌道線形を考慮した上で、損傷箇所の走行安全性を体系的に評価する方法を提案した。本評価方法は、軌道および車両の各種条件のうち、走行安全性に影響を及ぼす要因を予め抽出し、これらの要因を組み合わせた条件にて軌道線形毎に走行解析を行うことで損傷箇所の走行安全性を体系的に評価するものである。以上の評価方法を用いて、通常走行時におけるレール損傷箇所の走行安全性について検討を行った。

2. レール損傷箇所の通常走行時を想定した走行安全性の検討方法

(1) 解析モデル

解析モデルを図-1に示す。解析モデルは過去に構築したものを用いた³⁾。本解析モデルは実車走行試験などと比較して妥当性を確認している⁵⁾。

軌道は図-1(a), (d)に示すとおり、レール・まくらぎ・下部構造を梁要素とばね要素でモデル化している。レール開口部の車輪・レール間の接触は非線形性が強い現象であるため、安定的に解析する目的で、時間積分に陽解法を用いた三次元並列有限要素解析手法を採用した。



車輪・レール間の接触判定は、図-1 (b) に示すとおり、レール梁要素に結合した断面形状を模擬する剛体要素の接点と、車輪表面のソリッド要素表面間で判定を行う。接触アルゴリズムにはペナルティ法を用いた。この手法では三次元で接触判定を行い、レール断面方向の多点接触および非接触状態を表現可能である。したがって、レール開口部通過時の複雑な接触状態の変化を評価可能であるといえる。車両は図-1 (c) に示すとおり、車体・台車・輪軸を剛体でモデル化し、それらをばね・ダンパで結合した三次元モデルである。

(2) 評価方法

レール損傷箇所の通常走行時における走行安全性は、前述したように、軌道変位や輪重アンバランス等の軌道条件や車両条件が影響するとともに、曲線半径やカントといった軌道線形によっても異なることが考えられる。しかしながら、それぞれの現場条件に応じた個別の評価を行うことは現実的ではない。そこで、本研究では、軌道・車両条件を考慮した上で軌道線形毎に走行安全性を判断できるよう図-2 に示す評価方法を提案した。

本評価方法では、軌道および車両の各種条件のうち、走行安全性に影響を及ぼす要因を抽出し、これらの要因を組み合わせた条件を予め設定の上、曲線半径、カント、カント不足量を変数として走行解析を行うことで、損傷箇所の通常走行時の走行安全性を体系的に評価するものである。本方法を用いることで、軌道および車両条件の影響を包括的に考慮するとともに、軌道線形毎に応じた走行安全性を判断することが可能となる。以上の評価方法を用いて、損傷箇所の通常走行時における走行安全性を検討した。

3. レール損傷箇所の軌道条件および車両条件が走行安全性に及ぼす影響

レール損傷箇所の通常走行時の走行安全性に影響を及ぼす主要因を把握するため、前節で示した解析モデルを用いて、軌道条件および車両条件をパラメータとした車両走行解析を実施した。また、曲線半径やカントといった軌道線形が損傷箇所の走行安全性に及ぼす影響についても検討を行った。

(1) 基本解析条件

基本解析条件を表-1 に示す。また、レール開口部周辺の概要を図-3 に示す。図に示す去り側レール変位が増加し、車輪の乗り移りが厳しい条件となるよう、レール開口部は列車進行方向の受け側まくらぎの端とした。なお、通常走行時の速度は 70km/h として検討を行った。

表-1 基本解析条件

設定条件	諸元
車両	在来線旅客車両
車両総重量	34t
車輪踏面形状	修正円弧踏面
走行速度	70km/h
曲線半径	600m (R600※)
レール	50kgNレール
軌間	1067mm
カント	0mm
レール締結装置及びまくらぎ	PC6号9形
軌道バッド	110MN/m
ばね定数	
まくらぎ支持	20MN/m/まくらぎ
ばね定数	
レール支持間隔	600mm
レール開口量	70mm

※曲線半径 (m) については、以降「R」を用いて表記する

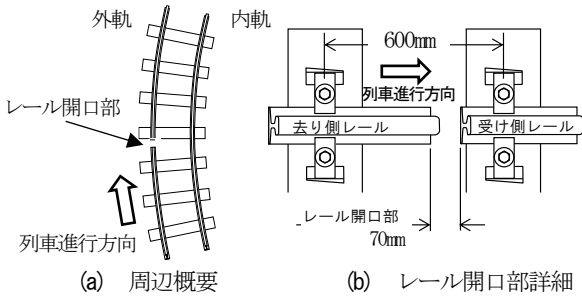


図-3 レール開口部の設定

表-2 軌道・車両のパラメータ条件

項目	諸元
レール開口形状	溶接不良折損 シェリング傷折損
レール左右目違い	4mm, 8mm
レール側摩耗	10mm
レール開口部落ち込み	3mm, 5mm
開口レール	内軌開口
開口位置	締結間中央破断
軌道変位	高低・通り27mm 軌間13mm 平面性18mm 通り平面性複合（逆位相）
レール締結装置	線ばね (e2009), 弾直I形 F型タイププレート, 犬くぎ 締結間隔700mm, 800mm
軌道パッドばね定数	30, 50, 165, 220MN/m
まくらぎ支持剛性	(鉛直) 5, 50MN/m/まくらぎ (左右) 5, 50MN/m/まくらぎ
車体質量	基本条件0.68倍 (空車仮定) 基本条件1.16倍 (150%乗車仮定)
台車・輪軸質量	駆動車仮定 (基本条件2倍) 輪軸×駆動車仮定1.3倍 台車×駆動車仮定1.3倍 輪軸・台車×駆動車仮定1.3倍
フランジ摩耗	1.5mm, 3.1mm
輪重アンバランス	1軸外軌側±30%

(2) 検討条件

前述した表-1 の基本解析条件の他、検討を行う軌道および車両条件のパラメータを表-2 に示す。

①レール開口状態

レールの開口状態について、レール開口面は一様で、開口以外の変状はない基本条件に対し、溶接不良による折損を模擬した場合は、開口部を中心に前後 45mm の範囲で落ち込み量を 1mm、シェリングによる折損を模擬した場合は、開口部を中心に前後 135mm の範囲で落ち込み量を 1mm の開口形状を設定した。レール左右目違い量は去り側レールが軌間外側に拡大するよう 4mm, 8mm を設定した。レール側摩耗量は図-4 に示す形状で 10mm に設定した。開口部の落ち込み量は開口部を中心に前後 500mm の範囲で 3mm, 5mm を設定した。また、開口レールは、基本条件の外軌開口のほかに内軌開口を設定し、開口位置も基本条件のほかに締結間中央位置を設定した。

②軌道変位

軌道変位は、設定なしの基本条件に対し、高低変位、

通り変位、軌間変位、平面性変位、通りと平面性が逆位相（通り変位と平面性変位の符号が逆になっている状態）で同時に発生する変位を設定した。各値は過去に日本国有鉄道にて定められた動的値を参考⁹⁾とし、解析上では荷重がかかった際の動的形状を入力することができないことから、静的値として、高低変位、通り変位 (10m 弦) は 27mm、軌間変位は外軌側の拡大を 13mm、平面性変位 (5m) は 18mm を設定した。図-5 に軌道変位設定の概略を示す。なお、平面性変位については図-5 に示すように波長 5m で変位させた後、レール長手方向に水準変位を維持させたままの状態とした。また、軌道変位とレール開口部の位置関係は、試算を行って輪重減少が最も大きくなる位置関係に設定した。

③レール締結装置

レール締結装置は広く普及している PC6 号 9 形を基本条件とし、線ばねの Pandrol e2009、直結軌道の弾直 I 形、木まくらぎの F 型タイププレート、犬くぎを想定し各条件を設定した。締結間隔は、600mm の基本条件に対し、700mm, 800mm を設定した。また、軌道パッドのばね定数は 110MN/m の基本条件に対し、柔らかい場合として 30, 50MN/m、経年劣化等により固くなった場合を想定し 165, 220MN/m を設定した。

④まくらぎ支持状態

バラスト軌道を想定し、基本条件の 20MN/m/まくらぎに対し、固い場合を想定した 50MN/m/まくらぎ、噴泥等で柔らかい場合を想定した 5MN/m/まくらぎを上下および左右支持ばねとして設定した。

⑤車両条件

空車時および乗車率 150% を想定し、車体質量を基本条件の 0.68 倍、1.16 倍に設定した。台車・輪軸質量は駆動台車を想定し、各質量を基本条件の 2 倍に設定した。さらに各質量およびその両方を駆動台車設定の 1.3 倍に設定した。フランジ摩耗は、摩耗量を基本条件の 0mm に対し、1.5mm と 3.1mm を設定した。輪重アンバランスは先頭軸の外軌側の輪重を基本条件では 0% の設定に対し、+30%、-30% を設定した。

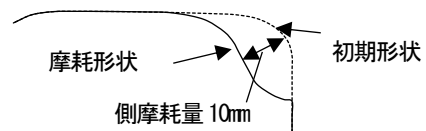


図-4 側摩耗の設定

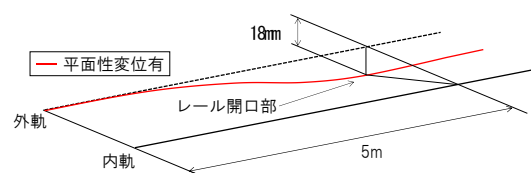


図-5 軌道変位の設定

表-3 軌道条件に関する解析結果

設定項目	設定条件	最大輪重 (kN)	最大横圧 (kN)	脱線係数目安値 超過時間 (ms)	超過時間 基本条件からの増減率 (%)
基本条件	—	283.2	41.0	8.3	—
開口形状	溶接不良	256.3	39.1	6.5	-21.7
	シェリング	265.6	38.6	6.1	-26.5
左右目違い	4mm	283.9	44.1	8.5	2.4
	8mm	285.8	44.4	8.5	2.4
側摩耗	10mm	256.4	37.3	7.6	-8.4
レール開口部 落ち込み	3mm	267.4	40.3	6.0	-27.7
	5mm	256.8	39.7	4.6	-44.6
内軌開口	—	121.3	24.5	0.0	-100.0
締結中央破断	—	160.2	35.6	3.3	-60.2
通り変位 (mm)	27	213.9	109.2	8.3	0.0
高低変位 (mm)	27	337.3	40.3	9.0	8.4
平面性変位 (mm)	18	215.0	52.1	9.3	12.0
軌間変位 (mm)	13	328.2	56.3	8.9	7.2
通り・平面性変位 (mm)	通り27・平面性18	132.2	110.1	14.4	73.5
締結種別	e2009	288.0	37.7	8.6	3.6
	弾直	286.7	42.5	8.9	7.2
	犬くぎ	275.4	38.2	7.0	-15.7
	Fタイ	285.5	39.4	8.5	2.4
締結間隔 (mm)	700	282.9	40.1	8.5	2.4
	800	330.5	39.7	9.0	8.4
軌道パッド ばね定数 (MN/m)	30	282.9	40.2	5.2	-37.3
	50	278.0	40.6	6.6	-20.5
	165	297.5	41.3	9.6	15.7
	220	311.3	41.9	10.1	21.7
まくらぎ支持 ばね定数 (MN/m/まくらぎ)	50 (鉛直)	233.2	36.6	3.4	-59.0
	5 (鉛直)	409.1	74.5	18.3	120.5
	50 (左右)	283.6	49.7	8.5	2.4
	5 (左右)	288.6	41.4	8.6	3.6

(3) 走行安全性の評価および結果の比較

走行安全性の評価は、脱線係数が 0.8 を超過する継続時間 τ (以下、「脱線係数超過時間」という) により行い、基本条件と各要因の結果を比較し、レール損傷箇所の走行安全性に影響を及ぼす要因を抽出した。なお、脱線係数超過時間による評価の目安値は 15msec であるが、本指標は損傷箇所の走行を想定したものではなく、また、目安値以内ならば営業運転が可能というものであり、目安値を超えた場合でもただちに脱線に至るものではない。なお、過去の検討⁴⁾ではレール頭部左右変位量も評価したが、これまでの検討結果から、レール締結装置が健全な状態に設定した場合は、レール頭部左右変位は 7mm を下回る。本研究でもレール締結装置は健全である条件で解析を行っており、全計算ケースで 7mm を下回っていることから、レール頭部左右変位の評価を割愛した。

(4) 解析結果

軌道条件に関する解析結果を表-3 に、車両条件に関する解析結果を表-4 に示す。

解析の結果、レール開口状態については、基本条件の結果に比べ、左右目違い設定時に横圧が微増し、脱線係数超過時間が 2.4%増加したが大きな変化はなかった。

軌道変位については、通りと平面性が逆相で同時に発生する変位を設定した場合に輪重抜けしやすく、かつ通り変位による横圧増加により、脱線係数超過時間が基本条件での結果に比べて 73.5%増加した。

レール締結装置については、基本条件結果と比べ、締結間隔の拡大や軌道パッドばね定数が固くなった場合に開口部通過時の衝撃力が大きくなり、その衝撃の反動による輪重抜けの時間が増加していると考えられ、脱線係数超過時間も、締結間隔拡大で最大 8.4%増加、軌道パッドばね定数大の場合に最大 21.7%増加した。

まくらぎ支持ばね定数については、基本条件結果と比べ、鉛直支持ばねが小さくなった場合に、開口部通過時の横圧等が増加し、脱線係数超過時間も 120%増加した。

車両状態は、基本条件結果と比べ、輪重アンバランスを外軌側が軽い設定にした場合に輪重が抜けやすい状況となり、脱線係数超過時間が 8.4%増加した。

以上の結果より、本解析条件下において脱線係数超過時間および最大輪重、最大横圧の発生傾向を考慮して各条件にて比較したところ、レール損傷箇所の通常走行時の走行安全性には、軌道条件では、通り・平面性変位、レール締結間隔、軌道パッド定数、まくらぎ支持ばね定数、車両条件では、輪重アンバランスが走行安全性に影響を及ぼすことがわかった。

(5) 軌道線形が走行安全性に及ぼす影響

前節までに、レール損傷箇所の走行安全性に影響を及

表-4 車両条件に関する解析結果

設定項目	設定条件	最大輪重 (kN)	最大横圧 (kN)	脱線係数目安値 超過時間 (ms)	超過時間 基本条件からの増減率 (%)
基本条件	—	283.2	41.0	8.3	—
車体質量	空車仮定	228.1	32.5	8.5	2.4
	150%乗車仮定	316.9	44.3	8.5	2.4
台車・輪軸質量	駆動車仮定	319.0	46.8	7.2	-13.3
	台車を駆動車仮定1.3倍	331.0	47.3	7.2	-12.7
	輪軸を駆動車仮定1.3倍	331.7	50.4	6.8	-18.1
	台車・輪軸を駆動車仮定1.3倍	341.1	50.5	6.9	-16.9
輪重アンバランス	-30%	218.1	38.0	9.0	8.4
	+30%	356.1	44.4	7.8	-6.0
フランジ摩耗	1.5mm	290.8	44.4	8.3	-0.5
	3.1mm	293.2	44.0	8.2	-1.7

表-5 線形に関するパラメータ

曲線半径	カント (mm)	カント不足量 (mm)
R250	C20	-10
	C40	30
	C80	60
R600	C20	-10
	C40	30
	C80	60
R1000	C20	-10
	C40	30
	C80	60

ぼす軌道条件および車両条件を明らかにした。本研究で提案する損傷箇所の走行安全性の評価方法は、これら抽出した軌道条件および車両条件を組み合わせ、軌道線形毎に走行解析を実施し、体系的に評価するものであるが、曲線半径やカントといった軌道線形自体と損傷箇所の走行安全性の関係性を確認する必要があると考えられる。そこで、表-1 の基本解析条件をもとに、表-5 に示す曲線半径およびカントを変数としたパラメータスタディを実施し、両者の関係性を確認した。なお、各ケース

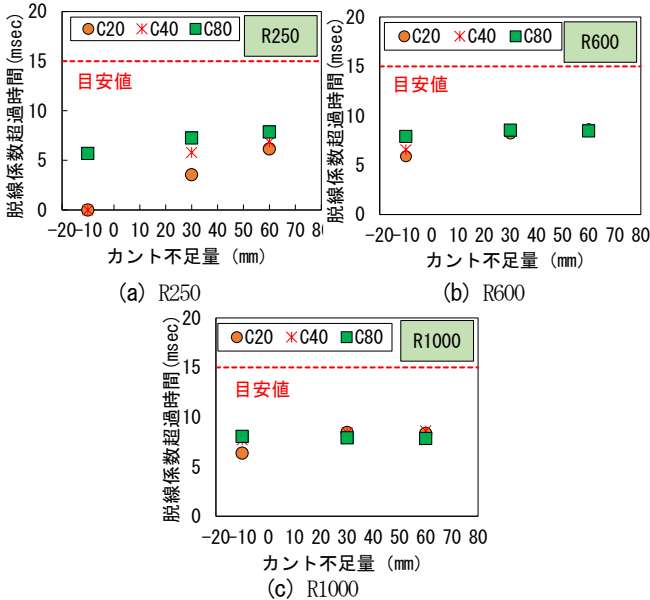


図-6 軌道線形条件を変数とした解析結果

の比較は、カント不足量を同一とし、行った。

解析結果を図-6に示す。各結果を比較すると、全てのケースで脱線係数超過時間の目安値を下回っており、軌道線形自体が損傷箇所の走行安全性に及ぼす影響は小さいことがわかった。ただし、全体の傾向として、カント不足量が小さくなる、またはカント超過の場合には、走行安全性の低下量が小さくなる傾向がみられた。また、R250のカント超過時において、低カント状態(C20,C40)と高カント状態(C80)で走行安全性の低下量に差がみられた。これは、急曲線かつ高カント状態で、カント超過の場合には、外軌側の輪重が減少しやすい状況にあることが影響し、カント量によって走行安全性に差がみられたものと考えられる。

4. 軌道条件および車両条件を考慮したレール損傷箇所の走行安全性の体系的評価

前節までにレール損傷箇所の通常走行時の走行安全性に影響を及ぼす要因について検討を行い、軌道および車両条件の要因を抽出するとともに、軌道線形と損傷箇所の走行安全性の関係を明らかにした。本節では、抽出した影響要因を組み合わせた条件にて、曲線半径、カント、カント不足量を変数とした走行解析を実施し、レール損傷箇所の通常走行時の走行安全性を体系的に評価した。

(1) 解析条件

前節までの検討結果を踏まえ、走行安全性に影響を及ぼす要因を組み合わせた解析条件を表-6に示す。

軌道変位および締結間隔は、過去に日本国有鉄道にて定められていた3級線相当の基準値⁹⁾を想定し、締結装置間隔については、基準となる間隔より3%割り増しで設定した。また、軌道パッドは110MN/mを基本に、経年劣化を考慮して30%割り増しで設定した。さらに、車両の輪重アンバランスは先頭軸外軌側が15%軽くなるよう設定した。なお、車両通過による軌道部材の変状については考慮しないこととする。また、本検討において設定する各要因の値は、レール損傷箇所の通常走行時における走行安全性評価方法の一検討であり、本提案手法を用いて実際に評価する場合には、実態を踏まえたものを設定することが望ましい。

次に、検討に用いる軌道線形条件を表-7に示す。曲線半径はR250, R600, R1000の3条件を設定した。カント及びカント不足量は同表に示す6条件を設定した。なお、カント不足量は、曲線半径とカント量を一定値とし、走行速度を変化させて設定した。これらの評価条件に基づき、まくらぎ支持状態がバラスト軌道を想定した20MN/m/まくらぎと直結系軌道を想定した100MN/m/まくらぎの2パターンで走行解析を実施した。

(2) 走行安全性の評価方法

走行安全性の評価は、脱線係数超過時間が15msec以内⁷⁾であることを一つの目安とした。一方、3.(3)節にて上述したように、この指標以内であれば通常速度で営業運転が可能であることから、非常に厳しい評価を与えるものである。また、本研究では損傷箇所を一時的に走行するという、異常時の走行を想定しており、通常走行を

表-6 解析条件

設定条件	諸元
車両	在来線旅客車両
車両総重量	34t
車輪踏面形状	修正円弧踏面
輪重アンバランス	先頭軸外軌側-15%
軌間	1067mm
レール締結装置及びまくらぎ	PC6号9形
軌道パッドばね定数	143MN/m
レール支持間隔	660mm
まくらぎ支持ばね定数	20MN/m/まくらぎ 100MN/m/まくらぎ
軌道変位	通り19mm・平面性18mm 逆位相で同時発生

表-7 軌道線形条件 (表中数値は走行速度)

(a) R250		(b) R600		(c) R1000		
カント (mm)		カント (mm)		カント (mm)		
カント不足量 (mm)	0	20	40	60	80	105
-60	-	-	-	-	24.5	34.5
-40	-	-	-	24.5	34.5	42.5
-20	-	-	24.5	34.5	42.5	49
0	-	24.5	34.5	42.5	49	54.7
20	24.5	34.5	42.5	49	54.7	60
40	34.5	42.5	49	54.7	60	64.7
60	42.5	49	54.7	60	64.7	70.2

想定した上述の評価指標のみで判断することは必ずしも適切でないと考えられる。

そこで、脱線係数超過時間が 15msec を越えた場合には、脱線に至る挙動かどうかの判断指標として車輪上昇量に着目し、走行安全性の評価を行うこととした。車輪上昇量に関する走行安全性の目安値を提案した事例は現状では少ないが、飯田ら⁸⁾は空気ばねパンク時の異常時に限り、車輪上昇量 2mm を目安値として評価を行っている。ここで、車輪上昇量 2mm とは図-7 の車輪フランジとレールの幾何学的形状で示すように、車輪フランジとレールが面で接触している状態から乗り上がり方向に車輪が上昇した場合においても、車輪とレールが2点以上で接触する状態となる上昇量である。車輪上昇量が 2mm を超えると、車輪フランジの直線部でレールと1点接触する状態となり、条件によっては乗り上がり脱線につながる恐れがあるものである。そのため、車輪上昇量が 2mm 以内であれば、車輪とレールが 2 点以上で接触しており、少なくとも乗り上がり開始状態に至っていないことを示すものである。そこで本件においても、車輪上昇量 2mm を目安値とし、評価を行うこととした。

次に、図-8 に損傷箇所通過時における車輪上昇量の時刻歴波形例を示す。波形から、まず、車輪が受け側レールに乗り移った際の衝撃により、受け側レールが一時的に下降してレール・車輪間の距離が離れるため、相対的に車輪が上昇することがわかった。その後、再び下降したレールが元の位置に戻ることで車輪上昇量が減少するが、次にフランジ部とレールが接触することにより、車輪上昇している現象がみられる。上記現象を鑑み、本研究では車輪上昇量をピーク毎に算定することとした。以上の検討より、レール損傷箇所の走行安全性評価は、①脱線係数超過時間、②乗り移り後の衝撃によるレール下降分を含む車輪上昇量、③レール下降の影響がなくなった後の車輪上昇量の3段階に分けて評価を行った。

(3) 解析結果

まくらぎ支持ばね定数 20MN/m/まくらぎの結果を表-8

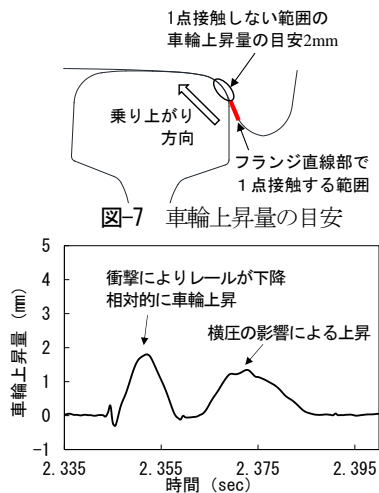


図-8 車輪上昇量の時刻歴波形

に、100MN/m/まくらぎの結果を表-9 に示す。全体の傾向として、同一曲線半径、同一カントの場合、カント不足量が大きくなるほど脱線係数超過時間と車輪上昇量が増加する傾向となった。また、同一曲線半径、同一カント不足量の場合でもカントが大きくなるほど同様の傾向となった。これらは、損傷箇所通過時の走行速度が影響していると考えられ、速度が大きいほど乗り移り時の著大輪重・横圧が大きくなることで、衝撃の反動による輪重抜け時間の増加および横圧増加の影響により走行安全性が低下しているものと考えられる。

表-8 解析結果(まくらぎ支持ばね 20MN/m)

(a) R250

R250	カント (mm)					
	0	20	40	60	80	105
カント不足量	-60	-	-	-	*	◇
					28.7ms	31.0ms
	-40	-	-	-	*	◇
					28.3ms	31.4ms
	-20	-	-	-	◇	◇
					1.9mm, 0.3mm	2.4mm, 0.4mm
	0	-	-	-	◇	◇
					27.7ms	31.6ms
	20	-	-	-	◇	◇
					2.0mm, 0.4mm	2.5mm, 0.5mm
	40	-	-	-	◇	◇
					30.9ms	32.5ms
60	-	-	-	◇	◇	
				2.1mm, 0.5mm	2.5mm, 0.8mm	2.5mm, 0.5mm
80	-	-	-	◇	◇	
				29.6ms	32.8ms	33.8ms
105	-	-	-	◇	◇	
				2.1mm, 0.5mm	2.6mm, 0.8mm	2.6mm, 0.5mm
120	-	-	-	◇	◇	
				33.8ms	33.4ms	33.0ms
140	-	-	-	◇	◇	
				2.9mm, 0.9mm	2.7mm, 0.5mm	2.6mm, 0.5mm
160	-	-	-	◇	◇	
				33.3ms	36.4ms	38.2ms
180	-	-	-	◇	◇	
				2.8mm, 0.5mm	2.7mm, 0.7mm	2.8mm, 0.8mm

(b) R600

R600	カント (mm)					
	0	20	40	60	80	105
カント不足量	-60	-	-	-	○	*
					10.9ms	17.2ms
	-40	-	-	-	○	*
					0.6mm, 0.4mm	1.0mm, 0.7mm
	-20	-	-	-	○	*
					11.1ms	15.5ms
	0	-	-	-	○	*
					0.7mm, 0.4mm	0.9mm, 0.6mm
	20	-	-	-	○	*
					11.6ms	15.3ms
	40	-	-	-	○	*
					0.7mm, 0.4mm	0.9mm, 0.6mm
60	-	-	-	○	*	
				11.7ms	14.7ms	17.9ms
80	-	-	-	○	*	
				0.8mm, 0.4mm	0.9mm, 0.6mm	1.3mm, 1.0mm
105	-	-	-	○	*	
				11.6ms	13.7ms	17.7ms
120	-	-	-	○	*	
				0.8mm, 0.4mm	0.9mm, 0.6mm	1.3mm, 1.0mm
140	-	-	-	○	*	
				13.7ms	17.9ms	24.0ms
160	-	-	-	○	*	
				0.9mm, 0.6mm	1.4mm, 1.0mm	1.8mm, 1.3mm
180	-	-	-	○	*	
				17.9ms	23.7ms	28.4ms
200	-	-	-	○	*	
				1.4mm, 1.0mm	1.8mm, 1.3mm	2.2mm, 1.6mm

(c) R1000

R1000	カント (mm)					
	0	20	40	60	80	105
カント不足量	-60	-	-	-	*	*
					19.2ms	32.3ms
	-40	-	-	-	*	*
					16.9ms	26.8ms
	-20	-	-	-	*	*
					1.8mm, 0.6mm	1.8mm, 1.0mm
	0	-	-	-	*	*
					16.6ms	25.6ms
	20	-	-	-	*	*
					1.9mm, 0.6mm	1.9mm, 1.0mm
	40	-	-	-	*	*
					16.3ms	24.8ms
60	-	-	-	*	*	
				1.9mm, 0.6mm	2.0mm, 1.0mm	1.8mm, 1.1mm
80	-	-	-	*	*	
				16.7ms	24.5ms	32.8ms
105	-	-	-	*	*	
				2.0mm, 0.7mm	2.1mm, 1.0mm	1.9mm, 1.1mm
120	-	-	-	*	*	
				24.3ms	31.4ms	41.9ms
140	-	-	-	*	*	
				2.2mm, 1.1mm	2.1mm, 1.2mm	1.2mm, 0.8mm
160	-	-	-	*	*	
				31.1ms	38.7ms	47.3ms
180	-	-	-	*	*	
				2.1mm, 1.3mm	1.7mm, 1.3mm	2.2mm, 2.2mm

表中の数値および記号
 ※中段数値は脱線係数目安超過時間
 下段左数値は乗り移り時の衝撃を含む車輪上昇量
 下段右数値は乗り移り時の衝撃を除く車輪上昇量
 ※評価
 ○ : 脱線係数超過時間が15msec以内
 * : 15ms以上で乗り移り時の衝撃を含む車輪上昇量が2mm以内
 ◇ : 15ms以上で乗り移り時の衝撃を除く車輪上昇量が2mm以内
 ▲ : 15ms以上かつ車輪上昇量が2mmを超え

表-9 解析結果(まくらぎ支持ばね 100MN/m)
(a) R250

R250		カント (mm)							
		0	20	40	60	80	105		
カント不足量 (mm)	-60	-	-	-	-	*	*		
						24.9ms	24.9ms		
						0.9mm, 1.0mm	1.4mm, 1.7mm		
	-40	-	-	-	-	*	*		
						24.7ms	23.1ms	29.4ms	
						1.0mm, 1.1mm	1.6mm, 1.6mm	1.6mm, 1.9mm	
	-20	-	-	-	-	*	*		
						25.6ms	23.2ms	28.6ms	35.2ms
						1.1mm, 1.3mm	1.4mm, 1.7mm	1.6mm, 1.9mm	1.4mm, 2.0mm
	0	-	-	-	-	*	*		
						26.3ms	23.2ms	28.3ms	37.9ms
						1.1mm, 1.5mm	1.7mm, 1.7mm	1.6mm, 2.0mm	1.5mm, 2.1mm
20	-	-	-	-	*	*			
					26.0ms	22.6ms	27.9ms	37.1ms	
					1.0mm, 1.6mm	1.5mm, 1.8mm	1.8mm, 2.0mm	1.6mm, 2.3mm	
40	-	-	-	-	*	*			
					22.5ms	28.3ms	28.1ms	37.1ms	
					1.4mm, 1.9mm	1.8mm, 2.1mm	1.7mm, 2.0mm	1.5mm, 2.3mm	
60	-	-	-	-	*	*			
					28.3ms	33.0ms	37.0ms	40.5ms	
					1.8mm, 2.2mm	1.7mm, 2.3mm	1.5mm, 2.4mm	1.5mm, 2.5mm	

(b) R600

R600		カント (mm)							
		0	20	40	60	80	105		
カント不足量 (mm)	-60	-	-	-	-	*	*		
						17.4ms	26.7ms		
						0.9mm, 0.7mm	0.6mm, 1.2mm		
	-40	-	-	-	-	*	*		
						17.0ms	25.1ms	29.8ms	
						0.9mm, 0.7mm	0.6mm, 1.1mm	0.6mm, 1.4mm	
	-20	-	-	-	-	*	*		
						16.8ms	24.8ms	28.6ms	34.3ms
						0.9mm, 0.7mm	0.6mm, 1.2mm	0.5mm, 1.4mm	0.7mm, 1.7mm
	0	-	-	-	-	*	*		
						16.8ms	24.3ms	28.0ms	32.1ms
						0.7mm, 0.7mm	0.7mm, 1.1mm	0.6mm, 1.4mm	0.5mm, 1.6mm
20	-	-	-	-	*	*			
					16.6ms	23.7ms	27.7ms	31.4ms	
					0.9mm, 0.7mm	0.5mm, 1.2mm	0.6mm, 1.4mm	0.7mm, 2.0mm	
40	-	-	-	-	*	*			
					23.3ms	27.2ms	31.2ms	35.8ms	
					0.6mm, 1.2mm	0.5mm, 1.5mm	0.6mm, 1.8mm	0.7mm, 2.1mm	
60	-	-	-	-	*	*			
					27.4ms	30.8ms	34.4ms	39.2ms	
					0.5mm, 1.5mm	0.6mm, 1.8mm	0.7mm, 2.1mm	0.8mm, 2.6mm	

(c) R1000

R1000		カント (mm)							
		0	20	40	60	80	105		
カント不足量 (mm)	-60	-	-	-	-	*	*		
						24.6ms	36.1ms		
						0.1mm, 1.0mm	0.2mm, 1.1mm		
	-40	-	-	-	-	*	*		
						24.3ms	32.0ms	50.5ms	
						0.1mm, 1.0mm	0.1mm, 1.2mm	0.3mm, 1.6mm	
	-20	-	-	-	-	*	*		
						24.1ms	31.9ms	44.2ms	47.4ms
						0.1mm, 1.0mm	0.1mm, 1.3mm	0.2mm, 1.4mm	0.5mm, 1.7mm
	0	-	-	-	-	*	*		
						23.7ms	31.7ms	42.1ms	49.8ms
						0.1mm, 1.0mm	0.1mm, 1.3mm	0.2mm, 1.5mm	0.5mm, 1.7mm
20	-	-	-	-	*	*			
					23.3ms	31.0ms	40.8ms	45.9ms	
					0mm, 1.1mm	0.1mm, 1.4mm	0.2mm, 1.5mm	0.4mm, 1.9mm	
40	-	-	-	-	*	*			
					30.4ms	38.8ms	45.2ms	44.5ms	
					0.1mm, 1.4mm	0.2mm, 1.5mm	0.4mm, 1.6mm	0.3mm, 1.8mm	
60	-	-	-	-	*	*			
					37.4ms	42.4ms	43.5ms	41.5ms	
					0.2mm, 1.5mm	0.3mm, 1.5mm	0.2mm, 1.7mm	0.2mm, 2.0mm	

※評価は表-8と同じ

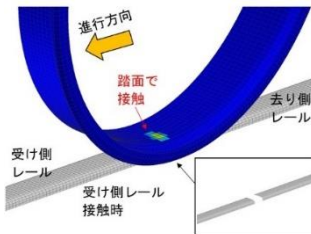


図-9 接触状況

次に、脱線係数超過時間に着目して比較すると、まくらぎ支持ばね定数が 20MN/m まくらぎの R600 の一部のケースを除き、全 186 ケース中 178 ケース(96.7%)で目安値の 15msec を大きく上回る結果となった。これは軌道変位や輪重アンバランス等の走行安全性に影響を及ぼす要因が影響していると考えられ、曲線半径によらず走行安全性が低下した。

続いて、車輪上昇量に着目すると、まくらぎ支持ばね定数 20MN/m まくらぎの条件において、R1000 では、カント不足量が大きく、カントも大きいケースで、レールの下降の影響がなくなった後においても車輪上昇量が 2mm を超えるケースが 7 ケース確認された。これは、R1000 では、曲線半径が大きく、走行速度が高いため、受け側レールに車輪が乗り移る際に図-9 に示すように車輪踏面で接触した際の衝撃が大きく、また、レール下降の影響もあり瞬間的に 0.5mm 程度跳ね上がる挙動となる。その後、フランジ部とレールが接触し、大きな横圧が発生することで車輪が上昇する挙動となっている。また、まくらぎ支持ばね定数 100MN/m まくらぎの条件においては、全ての曲線半径でカント不足量が大きい、またはカントが大きいケースにて、レールの下降の影響がなくなった後においても車輪上昇量が 2mm を超えるケースが 27 ケース確認された。これは、まくらぎ支持ばねが大きくなることでレールの沈下や小返りが抑制され、衝撃荷重の分散が小さくなるため、乗り上がり方向への力が働きやすくなり、車輪が上昇しているものと考えられる。なお、車輪上昇量が 2mm を超えたケースにおいても、脱線挙動は確認されず、最大車輪上昇量は 3mm 以内となり、これはフランジ高さの 1 割程度であることから、ただちに脱線に至るものではないと考えられる。

(4) 走行安全性の確保に関する一検討

レール下降の影響がなくなった後の車輪上昇量が 2mm を超えたケースについて、平面性変位の設定を現行の 18mm から 14mm, 10mm と小さくすることによる影響について追解析を実施し、検討を行った。なお、同一カントにおいてはカント不足量が大きいほど車輪上昇量が大きくなることから、同一カントで複数のケースが 2mm を超えている場合にはカント不足量 60mm を代表ケースとして解析を実施した。解析結果を表-10 に示す。解析の結果、平面性変位を小さく設定することで車輪上昇量が 2mm 以内となることがわかった。そのため、車輪上昇量が 2mm を超える箇所については軌道変位の管理水準を高める対策も有効であると考えられる。

表-10 平面性変位の設定による車輪上昇量

まくらぎ支持ばね定数 (MN/m/まくらぎ)	曲線半径	カント (mm)	カント不足量 (mm)	平面性 14mm		平面性 10mm	
				車輪上昇量1 (mm)	車輪上昇量2 (mm)	車輪上昇量1 (mm)	車輪上昇量2 (mm)
20	R1000	40	60	1.8	1.7	-	-
		60		1.7	2.0	-	-
		80		1.6	1.8	-	-
		105		1.5	1.8	-	-
100	R250	0	60	1.4	1.9	-	-
		20		1.4	2.0	-	-
		40		1.3	2.0	-	-
		60		1.1	2.1	0.9	1.7
	80	1.1		2.2	0.8	1.8	
	105	1.0		2.3	1.2	2.0	
	R600	40		0.4	1.8	-	-
		60		0.5	2.2	0.3	2.0
80		0.9	1.9	-	-		
105		1.0	2.1	0.7	1.9		
R1000	80	0.1	1.4	-	-		
	105	0.2	1.5	-	-		

(5) 考察

レール損傷箇所での走行安全性に影響を及ぼす軌道および車両要因を組み合わせた条件にて軌道線形毎に走行解析を実施した結果を以下にまとめる。

- ・カント不足量が大きくなるほど、また、同一カント不足量でもカントが大きくなるほど走行安全性が低下する傾向がみられることがわかった。
- ・軌道線形自体が損傷箇所の走行安全性に及ぼす影響は小さいことから、走行安全性の低下が懸念される箇所については、走行安全性に影響を及ぼすとして抽出した軌道・車両条件の管理を強化することにより、走行安全性の低下を防ぐことが可能であると考えられる。
- ・カント不足量が小さい場合、すなわち走行速度が低い場合には、走行安全性が低下しにくい傾向が認められたため、徐行により走行安全性の低下を抑えられると考えられる。ただし、高カント区間では低速時には外軌側輪重が減少し、走行安全性が低下する可能性を高めることになるため、カント逡減分を含む平面性変位を確認しながら徐行速度を検討することが必要である。なお、本検討では繰り返し通過による部材や道床の変状等は除外したため、別途検討の余地が残されている。

5. まとめ

本研究では、レール損傷箇所を車両が通常の営業速度で走行することを想定し、損傷箇所の走行安全性に影響を及ぼすとして抽出した軌道および車両要因を組み合わせた条件にて、軌道線形に走行解析を行うことで、損傷箇所通過時の走行安全性を体系的に評価する方法を提案した。また、提案する方法を用いて、ケーススタディを実施し、損傷箇所通過時の走行安全性を明らかにした。

無線式列車制御システムの導入により、軌道回路が撤去され、それぞれの現場における走行安全性を検討する場合には、本研究にて提案する評価方法を用いて、検討する線区の実態を踏まえた設定値を適用することにより体系的に評価することが可能であると考えられる。

REFERENCES

- 1) 寺田夏樹：軌道回路, RRR, Vol.71, No.5, pp.28-31, 2014. [Terada, N.: track circuit, RRR, Vol.71, No.5, pp.28-31, 2014.]
- 2) M.Dhanasekar, Wirtu, L Bayissa.: High speed detection of broken rails, rail cracks and surface faults, CRC for Rail Innovation(An Australian Government Initiative), 2011.
- 3) 片岡宏夫, 西宮裕騎, 平出壮司：スラブ軌道におけるロングレールの敷設範囲拡大, 鉄道総研報告, 第29巻, 第8号, pp.11-16, 2015. [Kataoka, H. and Nishinomiya, Y. and Hiraide, S.: Expansion of the Application Range of the Continuous Welded Rail in the Slab Track, RTRI Report, Vol.29, No.8, pp.11-16, 2015.]
- 4) 西宮裕騎, 西本晋平, 片岡宏夫：軌道変位を考慮したレール損傷時の徐行条件の評価, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第21号, pp.145-152, 2017. [Nishinomiya, Y. and Nishimoto, S. and Kataoka, H.: Safety Analysis of a Vehicle Running on a Broken Rail In High-speed Ballast-less Track with due Consideration on Track Irregularity, Journal of railway engineering, Vol.21. pp.145-152, 2017.]
- 5) 西宮裕騎：動的陽解法有限要素法を用いた鉄道車両の走行解析手法の構築, 土木学会論文集A2 (応用力学), 第74巻, 第2号, pp.649-660, 2018. [Nishinomiya, Y.: DEVELOPMENT OF THE VEHICLE RUNNING SIMULATION METHOD WITH AN EXPLICIT DYNAMIC FINITE ELEMENT METHOD, Journal of FSCE A2, Vol.74, No.2, pp.649-660, 2018.]
- 6) 保線工学(下), 鉄道現業者, p.12, 2018. [Hosen Kogaku(Ge), Tetsudogengyousya, p.12, 2018.]
- 7) 石田弘明, 松尾雅樹, 藤岡健彦：鉄道車両の高周波輪重変動下における走行安全性評価に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 第71巻, 第702号, pp.454-461, 2005. [Ishida, H. and Matsuo, M. and Fujiooka, T.: Safety Assessment Method of Railway Vehicle under Oscillatory Wheel Load Fluctuation, Transactions of the JSME, Vol.71, No.702, pp.454-461, 2005.]
- 8) 飯田忠史：空気ばねパンク時の走行安全性評価, Rolling Stock&Machinery, 日本鉄道車両機械技術協会, Vol.26, No.3, pp.22-26, 2019. [Iida, T.: Evaluation of a runningsafety for railway vehicle under the air spring deflation, Rolling Stock&Machinery, Vol.26, No.3, pp.22-26, 2019.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

SYSTEMATIC EVALUATION OF RUNNING SAFETY ON BROKEN RAIL CONSIDERING TRACK AND VEHICLE CONDITIONS

Katsutoshi SHIOTA and Yuki NISHINOMIYA

Assuming that track circuit has been removed due to the introduction of the wireless train control system and the current rail break detection cannot be performed, vehicles may run on broken rail at normal commercial speed. It is necessary to evaluate running safety in such a situation. In this study, we proposed an evaluation method that performs running simulation for each track alignment under the condition of combining track and vehicle factors that affect train running safety of derailment by using running simulation on broken rail. Consequently, it is possible to systematically evaluate the running safety on broken rail by summarizing the analysis results for each track alignment considering the track and vehicle condition.