

論文 軌道変位を考慮したレール損傷時の 徐行条件の評価

西宮 裕騎¹・西本 晋平²・片岡 宏夫³

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

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

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

³正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部軌道構造 (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)

E-mail: kataoka.hiroo.77@rtri.or.jp

レールが折損した場合やレール継目部が損傷した場合、開口量などによる運転規制が鉄道事業者毎に定められている。しかし、軌道状態やレール開口量に対する徐行速度は経験的に定められたものが多く、明確な限度値は不明である。軌道・車両の条件毎に損傷部通過時の挙動を推定し、運転規制の設定に活用可能な情報を得ることはニーズが高い課題である。

本研究では、列車速度、曲線半径、レール開口量、軌道変位等の各因子が、レール開口部通過時の車両および軌道に及ぼす影響把握を目的とし、走行シミュレーション手法を構築してケーススタディを行った。その結果、列車速度や曲線半径がレール開口部通過に与える影響が大きく、レール開口量の影響は少ないことが分かった。

Key Words : track irregularity, rail failure, slowing down, rail break gaps , explicit FEM

1. はじめに

レール破断時における列車の運転中止や徐行運転は、列車の運休や遅延の大きな原因の一つとなっている。この運転中止や徐行速度等の条件は、開口量や軌道状態等によって経験的に定められており、鉄道事業者間で異なっている。本来、レール破断時には適切な応急処置を施すべきであるが、準備に時間を要する場合があるため、処置なしで通さざるを得ない場合がある。その際の運転規制の緩和は輸送障害を最小限に抑えるのに寄与するものである。

これまでに著者らは、レール破断時の走行安全性に関して、応急処置器を使用した場合の徐行速度の検討¹⁾やロングレール区間の伸縮継目撤去を目的としたレール破断時開口量の拡大の検討²⁾を行ってきた。これらの既往の研究により、応急処置器を設置した場合の徐行速度向上の提案や新幹線におけるレール破断時開口量の限度値緩和の可能性が示唆されている。また、近年実施された実物車両を用いた試験^{3,4)}においては、在来線車両を用いて急曲線中に設けたレール開口部を低速で走行させてお

り、各試験ともに脱線に至るような事象は発生していない。ただし、実軌道で想定される様々な軌道状態において、列車がレール開口部を通過した際の車両および軌道の挙動は明確にされていないのが現状である。

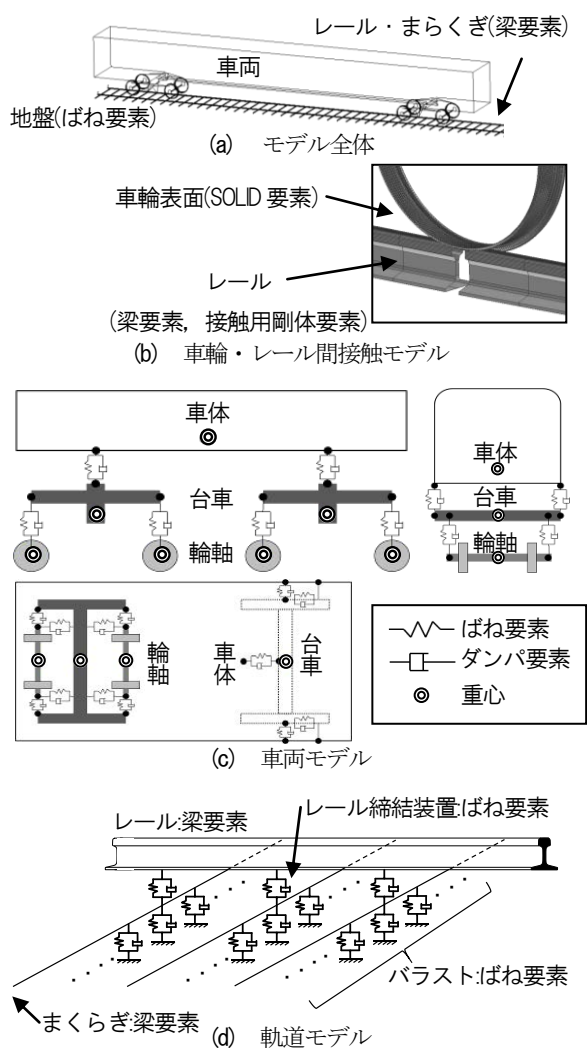
そこで、レール破断時に応急処置を施さない状態で列車が走行した場合の車両および軌道の挙動を把握し、走行安全性を確認するため、列車速度、曲線半径、レール開口量、軌道変位等を変数とした走行シミュレーション手法によるケーススタディを実施した。

2. 走行シミュレーション手法

(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²⁾。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。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。

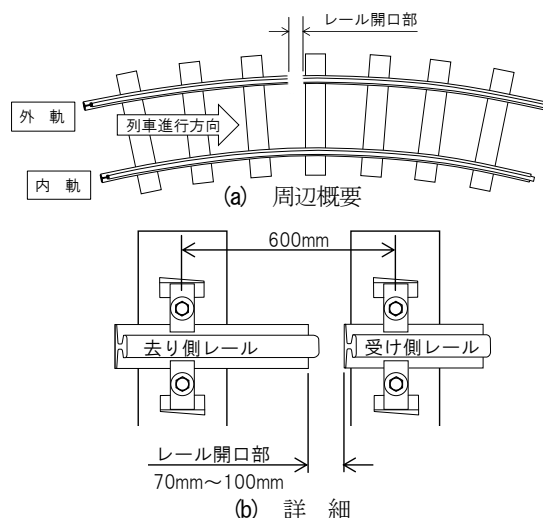


(2) 解析条件

在来線旅客車両を想定したバラスト軌道上のレール開口部を対象としたケーススタディを実施し、列車の走行速度や曲線半径・カント等の軌道線形、レール開口量、軌道変位、レール左右食い違い等の各因子が車両と軌道に与える影響を調べた。解析条件を表-1に示す。レール開口部周辺の概要を図-2(a)、レール開口部詳細を図-2(b)に示す。去り側レール変位が増加し、乗り移りに関して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に近い位置とした。

表-1 解析条件

項目	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	15km/h, 30km/h, 45km/h
レール	50kgNレール
軌間	1,067mm
カント	0~105mm
軌道構造	PC6号9形
軌道パッドばね定数	60MN/m
レール支持間隔	600mm



a) 軌道変位

軌道変位は曲線中の乗り上がり脱線に大きな影響を及ぼす通り変位と平面性変位を設定した。ただし、各軌道変位については過去に日本国有鉄道にて定められた動的軌道変位量を参考とし、通り変位(10m弦)は静的検測で27mm、平面性変位(5m)は16mm, 18mm, 21mmの3パターンを採用した。図-3に軌道変位設定の概略を示す。平面性変位については図-3(b)のように波長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。

b) レール左右食い違い

レール開口部の乗り移りの際のレールと車輪フランジの接触位置によって、乗り上がり脱線する危険性に大きく影響することが懸念される。図-4に示すように車輪フランジの直線部分(A点-B点)で接触する場合と、曲線部分(B点-C点)で接触する場合は、後者のほうが乗り上がる危険性は高くなることが推測される。したがって、レール左右食い違い量を修正円弧踏面の場合で図-4のA点からB点までの水平距離4.3mmを参考に4.0mmとし、去り側レールが軌間外側に拡大するように設定することとした。

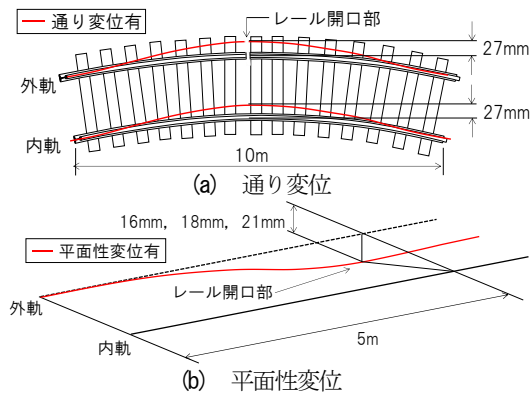


図-3 軌道変位設定の概略

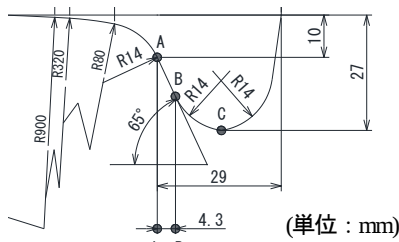


図-4 車輪踏面形状例(修正円弧踏面)

(3) 走行安全性の評価指標

走行安全性の評価は、脱線係数が目安値0.8を超過する継続時間(以下、「脱線係数超過時間」という)とレール頭部左右変位を用いた。それぞれの評価指標の目安値を表-2に示す。脱線係数超過時間は既往の研究から走行安全上問題ないとされている15msec以内⁹⁾を目安値とした。この目安値を超過した場合、ただちに脱線を意味するものではないが、徐行条件の検討を行うことを前提としてこの目安値を適用した。また、レール頭部左右変位は軌間拡大の観点から検討された許容値7mm⁷⁾を用いた。なお、過去にレール左右食違い量として4mm⁹⁾が評価指標として用いられているが、これは、(2)b)で述べたフランジ接触角の変化によって、乗り上がり脱線の危険性が増加することを避けるためであり、本研究では動的シミュレーションにより直接車輪・レールの挙動と脱線係数を確認できることから、これによらないものとした。

表-2 走行安全性評価に用いる指標

評価指標	目安値
脱線係数超過時間	15msec以内
レール頭部左右変位	7mm以内

3. 解析結果

ケーススタディにより得られた解析結果を次節以降に示す。なお、輪重、横圧、脱線係数の各諸量には、カットオフ周波数100Hzのローパスフィルタを適用した。

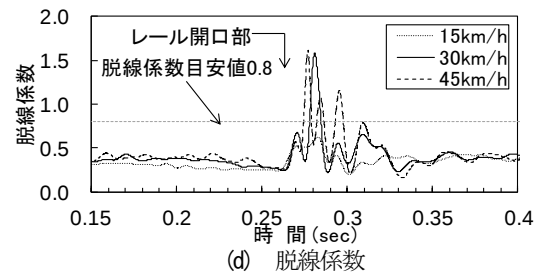
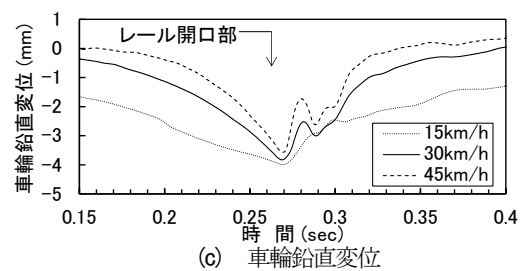
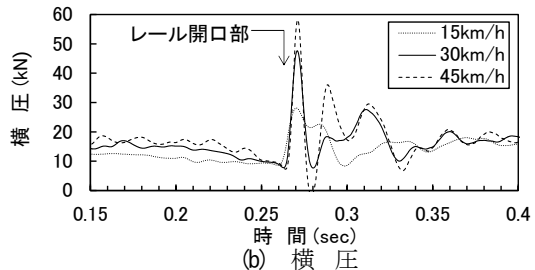
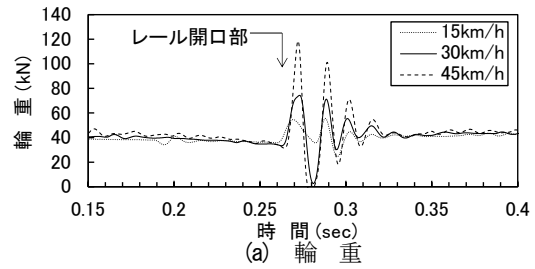


図-5 各速度におけるレール開口部通過時の時刻歴波形
その1 (曲線半径300m)

(1) 走行速度

曲線区間にあるレール開口量70mmのレール開口部を通過する際の列車速度と曲線半径の影響を把握する。外軌第1軸の解析結果の時刻歴波形を図-5, 6に示す。

図-5(a)より、輪重は列車速度の増加によりピーク値が大きくなる傾向を示した。列車速度30km/h以上の場合、受け側レールに接触した直後に輪重が抜ける傾向を示したが、列車速度15km/hの場合、そのような現象はみられなかった。

これは、図-5(c)に示したように、レール開口部の車輪落下量が大きいものの、その直後の車輪上昇が全くみられないことから確認できる。図-5(b)より、横圧についても列車速度の増加によりピーク値が大きくなる傾向を示し、受け側レール接触後の波形は列車速度によって増減傾向に差異がみられた。図-5(a) (b)より、速度の増加に伴い、車輪・レール間の接触力が急激に変化する傾向を示し、図-5(d)に示す脱線係数が変動している。

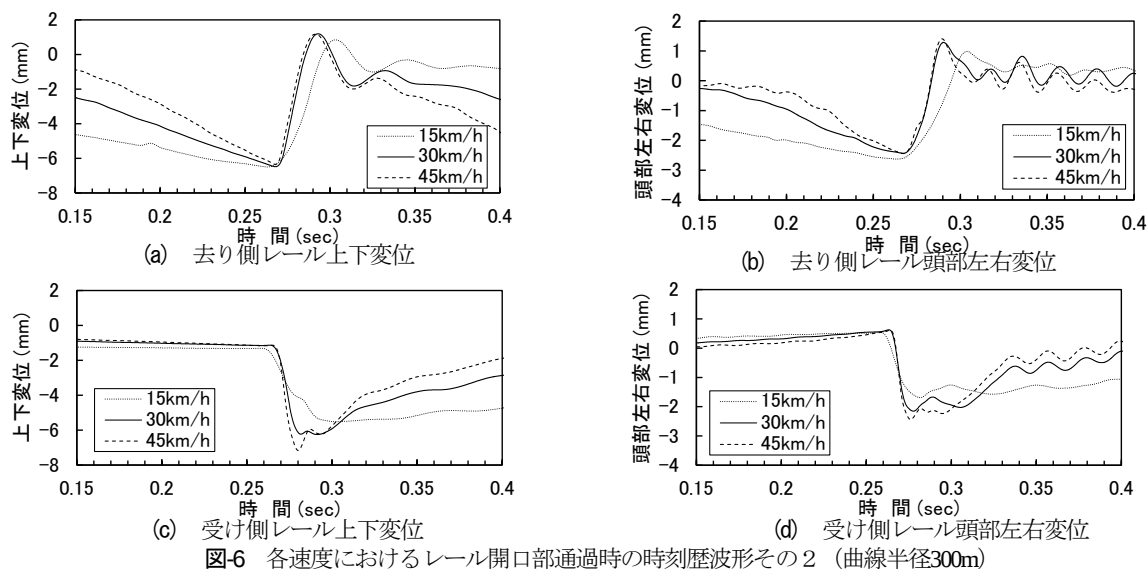


図-6 各速度におけるレール開口部通過時の時刻歴波形その2 (曲線半径300m)

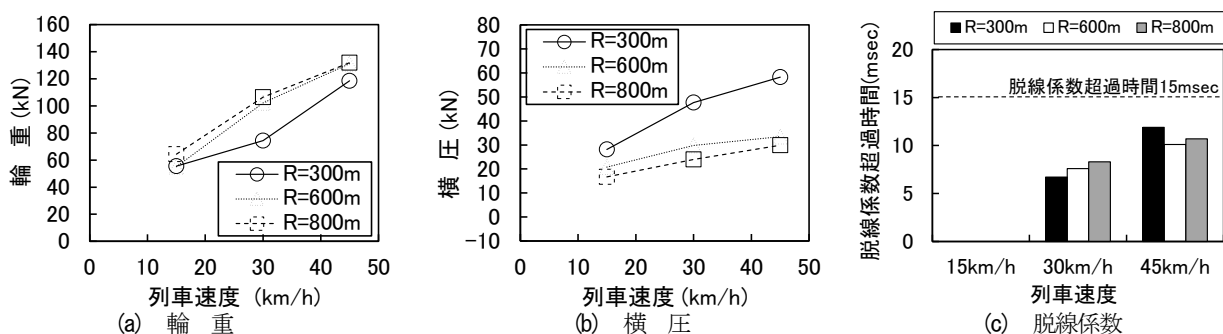


図-7 速度毎の輪重・横圧の最大値と脱線係数超過時間

図-6(a)～(d)より、去り側レールは列車速度の影響が顕著ではないが、受け側レールは列車速度の増加に伴って、レール上下変位、レール頭部左右変位とも増加しており、増加量は列車速度15km/hの場合に比べ、列車速度45km/hの場合で、レール上下変位が3割程度、レール頭部左右変位で4割程度であった。

次に、検討した曲線半径について、輪重・横圧、脱線係数と各レール変位の最大値を図-7～9にまとめる。

図-7より、輪重・横圧および脱線係数超過時間は曲線半径に関わらず、列車速度の増加に伴って大きくなる傾向を示した。輪重はいずれの曲線半径においても列車速度15km/hの場合に比べて、列車速度45km/hの場合で2倍程度、横圧も曲線半径300mの場合で2倍程度増加した。脱線係数超過時間については列車速度45km/h、曲線半径300mの場合で最大となり、その値は12msec程度であった。したがって、今回検討したいずれの場合においても15msecを下回った。図-8、9より、レール変位は受け側レール上下変位・頭部左右変位で列車速度との相関が確認できた。また、レール頭部左右変位は去り側レールおよび受け側レールともに、許容値7mmを下回った。なお、去り側レールの変位は列車速度の増加に伴って変化せず、一部減少する傾向を示しており、同様の傾向が、過去に実施した実車走行試験の開口量70mmおよび100mmの条

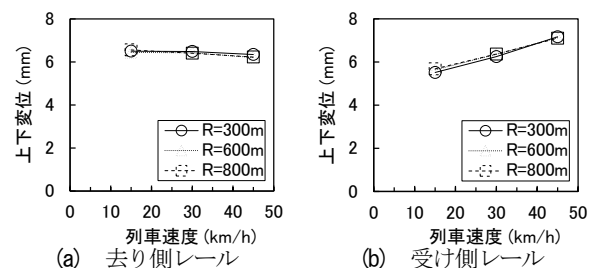


図-8 レール上下変位

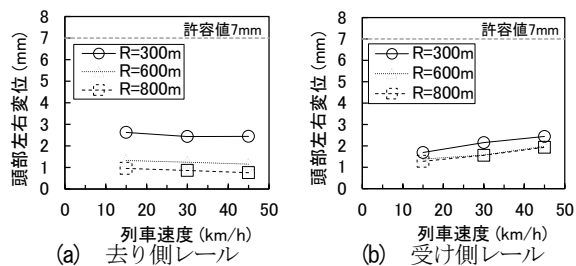


図-9 レール頭部左右変位

件で確認されている。横圧は受け側レールに接触した後増加するため、横圧の増加と去り側レール左右変位の増加の間に相関は少ないと考えられる。

以上の解析結果から、列車速度や曲線半径は輪重・横圧や脱線係数超過時間、レール変位に影響を及ぼすものの、今回検討した範囲では、脱線係数超過時間、レール頭部左右変位において、許容値を超過するケースはなかったため、走行安全上の問題は生じないといえる。

(2) レール開口量

曲線区間に存在するレール開口部を通過する際の曲線半径とレール開口量の影響を把握する。曲線半径300m～800mにおいて、レール開口量を70mm～100mmまで変化させた場合の外軌側の脱線係数超過時間を図-10に、レール変位の最大値を図-11に示す。図-10より、脱線係数は0.8を超過するものの、検討した範囲内では脱線係数超過時間は最大8msec程度であり、走行安全上の問題は生じないと考えられる。図-11より、レール頭部左右変位は去り側レールおよび受け側レールともにレール開口量の増加による変化はなかったが、曲線半径が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示した。

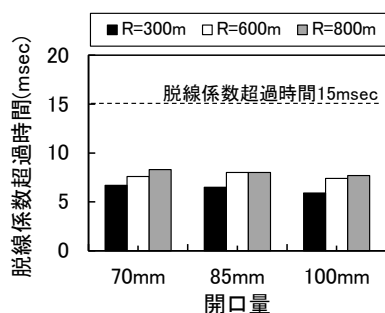
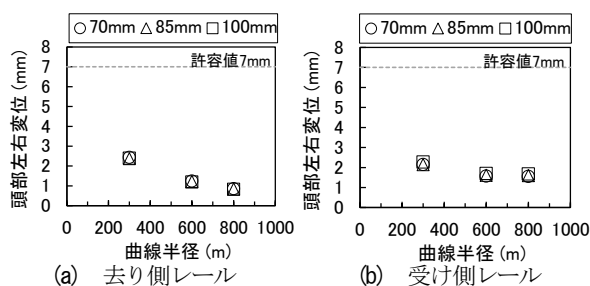


図-10 開口量と曲線半径毎の外軌の脱線係数超過時間



(a) 去り側レール (b) 受け側レール

図-11 レール頭部左右変位

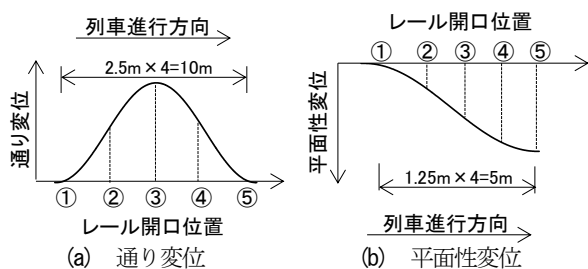
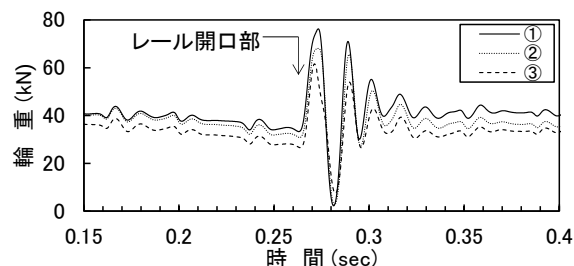


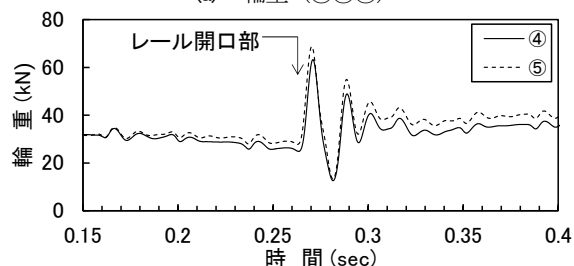
図-12 レール開口位置

(3) 軌道変位および軌道線形

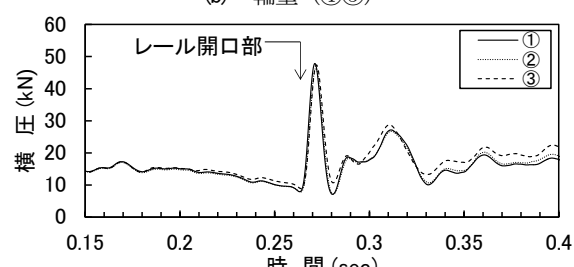
軌道変位がある曲線区間にレール開口部がある場合のレール開口部通過時の軌道変位の影響を把握する。また、軌道変位がある場合、軌道変位とレール開口部の位置関係によって輪重・横圧・脱線係数などが変動することが考えられるため、この位置について検討する。さらに、カントの影響についても検討する。



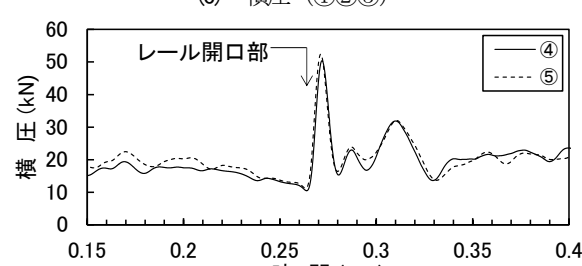
(a) 輪重 (①②③)



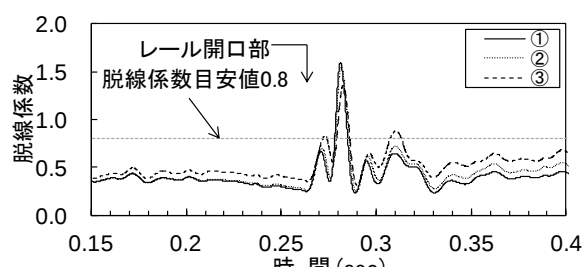
(b) 輪重 (④⑤)



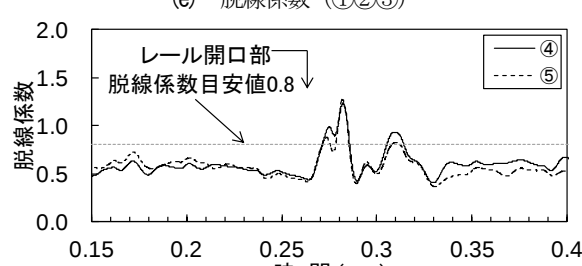
(c) 横圧 (①②③)



(d) 横圧 (④⑤)



(e) 脱線係数 (①②③)



(f) 脱線係数 (④⑤)

図-13 レール開口位置が異なる場合のレール開口部通過時の時刻歴波形例(曲線半径300m)

a) レール開口位置

図-12に、通り変位および平面性変位がある曲線内のレール開口位置概略を示す。図-12(a)より、通り変位がある曲線内外軌のレール開口位置は通り変位の弦長10mを4等分し、列車進入側から2.5m毎にレール開口位置を設定し、5パターンについて検証した。図-12(b)より、平面性変位がある場合は、通り変位と同様、5mを4等分し、列車進入側から1.25m毎にレール開口位置を設定し、5パターンについて検証した。なお、レール開口位置の検証は列車速度30km/h、曲線半径300mで実施する。

図-13に平面性変位がある曲線内でレール開口位置が異なる場合を比較した外軌第1軸の解析結果の時刻歴波形を示す。ただし、図中の凡例は図-12で示したレール開口位置を示す。

図-13(a)(b)より、輪重はレール開口が①、②にある場合に比べて、③～⑤にある場合でピーク値が小さくなった。これは軌道面のねじれを起因として台車が3点支持となり輪重が抜ける傾向にあるためである。一方、図-13(c)(d)より、横圧は受け側レール接触直後の波形に差異があり、レール開口が①、②にある場合に比べて、③～⑤にある場合で最大10kN程度大きいことが確認された。

脱線係数はいずれのレール開口位置でも輪重減少時に増加していることがわかるが、レール開口位置によってその作用時間は異なる傾向となった。したがって、レール開口位置が異なる場合の脱線係数超過時間の比較を図-14に示す。なお、通り変位がある曲線内についても同様の解析を実施し、脱線係数超過時間を算出した。通り変位についてはレール開口が⑤にある場合で最大となり8.9msec、平面性変位についてはレール開口が④にある場合で最大となり14.5msecとなった。このように軌道変位種別毎のレール開口位置の走行安全性への影響を把握した。

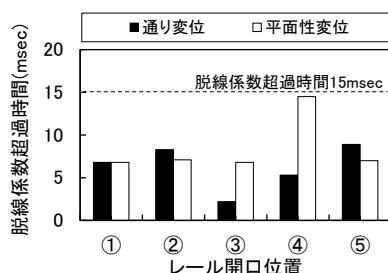


図-14 レール開口位置での脱線係数超過時間の比較

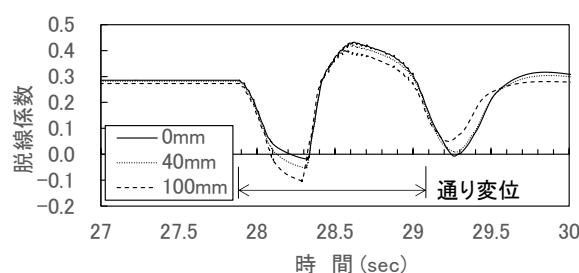
b) カント

カントは速度や車両種別を考慮して設定されるため、同じ曲線半径でも異なるカント量が設定されている。そこで、曲線通過時にカントが与える影響を検討した。ここではカントの影響を明確に評価するため、レール開口部がない軌道による走行シミュレーションを実施した。

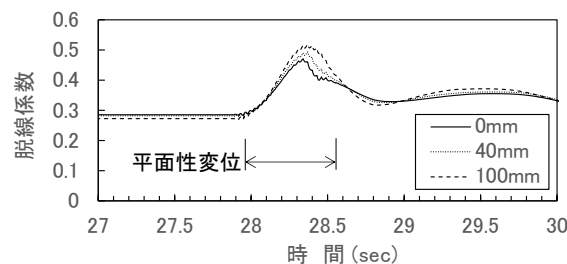
解析モデルは過去に車両と軌道の相互作用を考慮したシミュレーションの精度検証が実施されている汎用のマルチボディダイナミクスツールを用いた⁹⁾。解析条件を表-3に示す。曲線半径は300m～600mを対象とし、列車速度は15km/h～45km/hとした。さらに、軌道変位は前節までと同様、通り変位と平面性変位を検討し、変位量はそれぞれ27mmと16mmを採用した。図-15に第1軸外軌の脱線係数の時刻歴波形を示す。

表-3 解析条件

項目	諸元
レール種別	50kgN レール
軌 間	1,067mm
レール鉛直支持ばね	30MN/m/締結
レール横支持ばね	35MN/m/締結



(a) 通り変位



(b) 平面性変位

図-15 カントが変化した場合の脱線係数の時刻歴波形例 (曲線半径300m)

図-15(a)より、通り変位がある曲線内を列車が走行した場合、脱線係数は通り変位の中央部付近でピークを生じ、カントが小さいほど、大きくなる傾向を示した。一方、図-15(b)より、平面性がある場合は平面性変位の終端付近でピークを生じ、カントが大きいほど、大きくなる傾向を示した。これらは輪重と横圧のバランスで決定され、カントと軌道変位による輪重・横圧の変動に依存する。通り変位の場合はカントが小さいほど外軌輪重の値が大きくなるものの、通り変位による横圧の増加分の影響が大きかったことが示唆される。平面性変位の場合はカントによる横圧の差は顕著でないが、カントの増加により車両の重心が内軌側へ移動し、外軌輪重の値が全体的に小さくなる。そこに平面性変位による輪重減少が発生したことによって脱線係数が大きくなったと推測される。なお、曲線半径が600m、800m、また列車速度が

15km/h, 45km/hの場合でも同様の傾向を示した。以上より、各軌道変位がある場合にカントが列車の走行安全性に及ぼす影響を把握した。

c) 平面性変位量

軌道変位とレール開口位置、カントの影響を検討した結果を基に、平面性変位を設け、レール開口位置を図-12の④、カントを在来線における最大カントである105mmとし、列車速度30km/hの条件で、変位量を増加させた場合の検討を行った。その結果を図-16に示す。

図-16より、脱線係数超過時間は各曲線半径とともに平面性変位量の増加に伴って大きくなる傾向を示し、曲線半径300m, カント105mmの条件では平面性変位全てのケースにおいて15msecを上回った。一方で、去り側レール頭部左右変位は曲線半径に依存し、平面性変位量の増加によって変動しなかった。

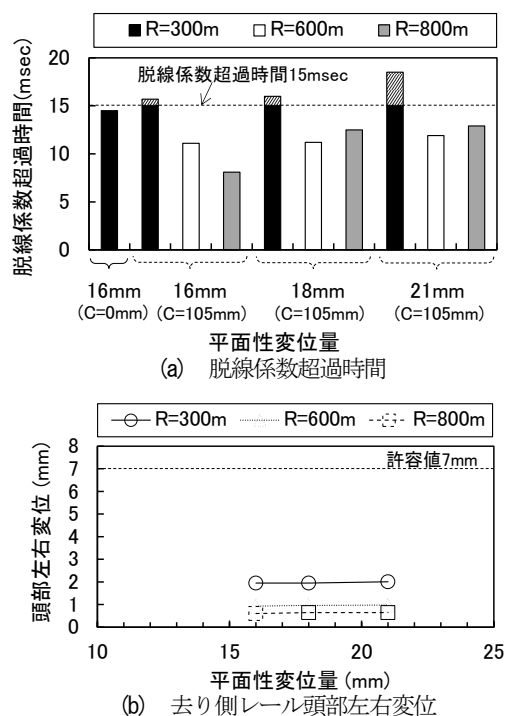


図-16 カントと平面性変位量との関係

(4) レール左右食い違い

レール左右食い違いがレール開口部に発生した場合の横圧と脱線係数の時刻歴波形例を図-17に示す。なお、曲線半径300mの場合について検討した。横圧は去り側レールが軌間外側に拡大しているため、レール開口部直前で大きく減少している。しかし、受け側レール接触直後はレール左右食い違いの影響から横圧が比較的大きいため、脱線係数超過時間が長くなっていることがわかる。その時間の増加量はレール左右食い違いが無い場合の6.7msecから9.5msecまで増加した。

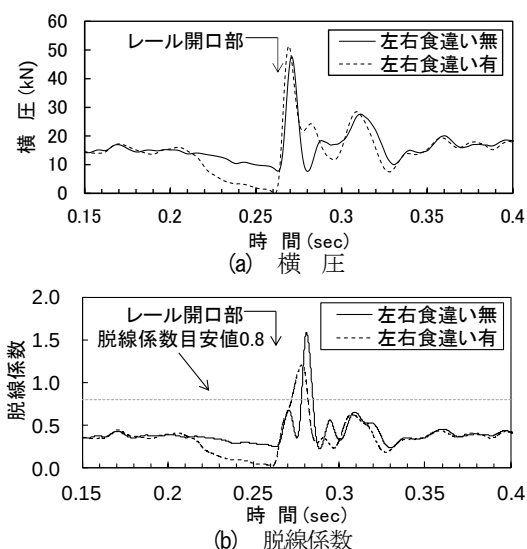


図-17 レール左右食い違いの有無におけるレール開口部通過時の時刻歴波形例

(5) 内軌の開口

内軌にレール開口が発生した場合について検討を行った。なお、これまでとは異なり、平面性変位の方向を反転させ、内軌が沈み込む方向に平面性変位がある場合を想定した。解析の結果、図-18に示したとおり、輪重は受け側レールの接触した直後にピーク値を生じ、外軌開口の場合と同様の傾向が確認できたが、車輪は外軌に沿って曲線を通過するため、横圧は外軌開口の場合と比べて大きく減少した。したがって、レール開口部通過後に輪重が抜ける傾向はあるものの、その時間は7msec程度であり、同時刻の横圧が概ね0となるため、脱線係数目安値0.8を下回り、走行安全上問題ないといえる。また、レール変位についてもレール上下変位、レール頭部左右変位の最大値はどちらも1mm程度であった。

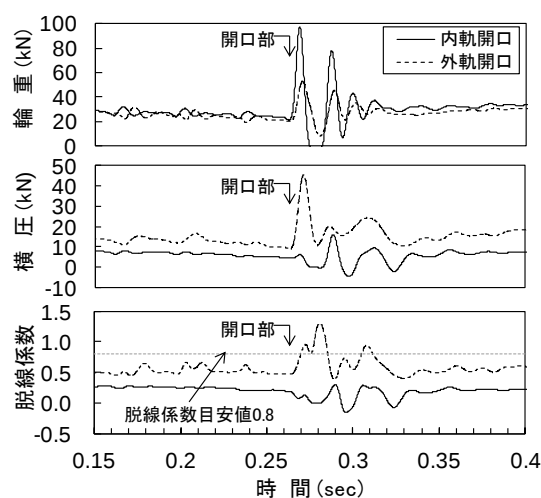


図-18 内軌が開口した場合の時刻歴波形例

4. 考察

前章では列車速度や曲線半径、軌道線形および軌道状態等の各因子がレール開口部通過時の走行安全性に及ぼす影響について検討した。検討した条件下では、評価指標とした脱線係数超過時間とレール頭部左右変位の観点から、列車速度、曲線半径やカント、軌道変位が最も影響度が高いことが確認された。レール破断時の徐行条件を検討する場合は、影響度の大きい項目を十分考慮して定めるべきである。また、検討した条件下では走行シミュレーションにおいて脱線に至るような車輪上昇は発生していないが、評価指標として用いた脱線係数超過時間が長い条件があるため、安全率を設けた徐行条件を設定するのが妥当と考えられる。

なお、適用に至っては通過させる軸数が多い場合、監視により軌道の変状に注意する必要がある。また、レール破断時の破面がレール長手方向に極端に傾いていたり、レール頭部が大きく欠損している等のレール破断箇所が特殊な場合は除外して考えることが望ましいと考えられる。

5. まとめ

レールが折損した場合を想定し、列車速度、曲線半径、レール開口量、軌道変位等の各因子が、レール開口部通過時の車両および軌道に及ぼす影響把握を目的とし、走行シミュレーション手法を用いてケーススタディを行った。その結果、列車速度や曲線半径がレール開口部通過に与える影響が大きく、開口量の影響は少ないことが分かった。

今後は、レール継目部が損傷した場合や、道床状態が悪く浮きまくらぎが発生している条件での影響評価を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 片岡宏夫, 西宮裕騎, 土井久代: レール折損時における応急処置後の列車徐行速度向上の可能性, 鉄道総研報告, 第23巻, 第10号, pp.47-52, 2009.10
- 2) 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, 2015.8
- 3) 戸矢真琴, 堀山功, 堀雄一郎: 曲線部におけるレール開口部走行試験, 第20回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2013, pp.493-496, 2013
- 4) 西宮裕騎, 平出壮司, 片岡宏夫: 試験線におけるレール開口部走行試験, 第21回鉄道技術連合シンポジウム J-Rail2014, S2-1-3, 2014
- 5) Nishinomiya, Y, Kataoka, H and Hiraide, S : Development of the vehicle dynamic simulation model of running on rail gaps, *Proc. of International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems*, 3C13, 2015.
- 6) 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, 2005.2
- 7) 阿部則次, 長藤敬晴, 船田智己, 松川浩和, 熊崎弘: 防振形レール締結装置の開発, 鉄道総研報告, 第9巻, 第12号, pp.13-18, 1995.12
- 8) 西宮裕騎, 細田充, 田中博文: マルチボディダイナミクスによる車両運動解析の妥当性検証に関する一考察, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016.9

(2017.4.7 受付)

A STUDY ON THE CONDITION OF SLOWING DOWN AT RAIL FAILURE IN CONSIDERATION OF TRACK IRREGULARITY

Yuki NISHINOMIYA, Shinpei NISHIMOTO and Hiroo KATAOKA

In the case of a rail failure or a rail joint failure, the regulation for train operation based on the length of rail break gaps is determined for each railway company. However, the limit velocity and the length of rail break gaps are often determined experimentally, and the clear limit values are unknown. There is a great need for planning of the theoretical regulations for train operation.

In this study, a case study was conducted using a vehicle running simulation method for the purpose of understanding the influence of train speed, curve radius, rail displacement. As a result, it was clarified that the influence of the train speed and curve radius on the passage of a rail break gap is large and the influence of the length of rail break gap is small.