

論文 軌道変位を考慮した新幹線の直結系軌道の レール開口部走行時の影響評価

西宮 裕騎¹・片岡 宏夫²

¹正会員 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

²正会員 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: kataoka.hiroo.77@rtri.or.jp

高架橋上の直結系軌道では、温度変化による桁の伸縮に伴い、レール軸力が変動し、ロングレールの破断時開口量が限度値を越えるため、伸縮継目を撤去できない箇所がある。本研究では新幹線の直結系軌道の伸縮継目の撤去を目的とし、軌道変位や車両条件を変数としたシミュレーションを行い、レール開口部の走行安全性を評価した。その結果、検討した条件下では、レール開口量が走行安全性に与える影響は少なく、平面性変位やレール支持剛性が大きな影響を与えることが分かった。また、走行安全性の指標の一つである脱線係数が目安値0.8を越える継続時間が15msec以上となるケースがあったものの、車輪上昇量は脱線までに十分余裕があり、実施した全ケースで脱線は生じなかったことから、レール破断時開口量の限度値を緩和できる可能性が得られた。

Key Words : continuous welded rails, rail break gap, FEM, vehicle dynamics simulation

1. はじめに

スラブ軌道やまくらぎ直結軌道等の直結系軌道で伸縮継目を撤去するためには、温度上昇時の最大レール圧縮軸力の限度値と、温度下降時のレール破断時開口量の限度値を再検討する必要がある¹⁾。特に新幹線軌道においては、伸縮継目が地震時の脱線対策工の施工に支障する他、ロングレール可動区間ではレールふく進による軌道パッドの抜けだしの管理が必要となる。そのため、可能な限り伸縮継目を撤去することが望まれている。

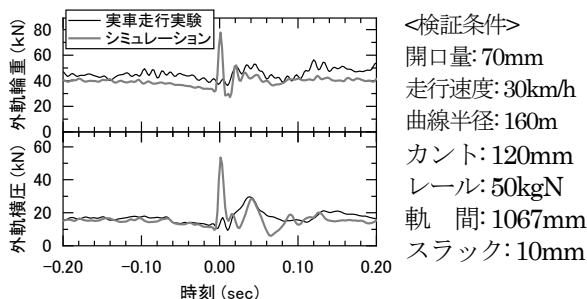
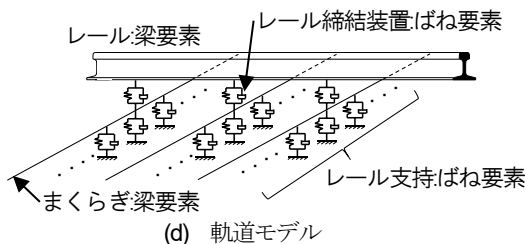
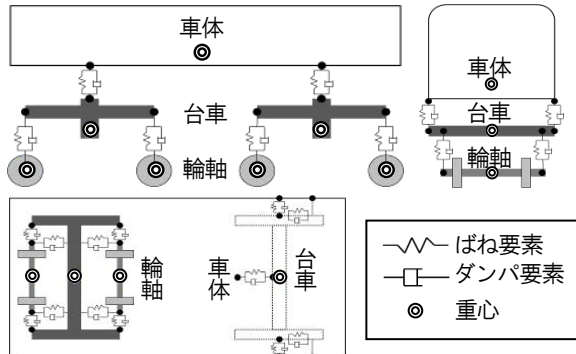
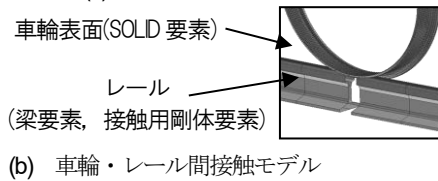
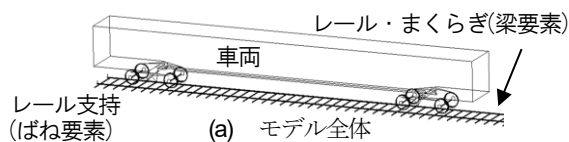
温度上昇時の最大レール圧縮軸力の限度値は、過去に温度上昇時の横方向安定性を解析し、緩和できることを確認した²⁾。一方、レール破断時開口量の限度値については、過去に直線に開口部を設定した走行試験による検証³⁾や車輪の乗り移りに関する基礎的検討⁴⁾から、一般に70mmが用いられている⁵⁾。同種の目的から、近年には、急曲線に開口部を設定した走行試験による検証も行われている⁶⁾⁷⁾。さらに、軌道変位を考慮しない条件下においては、実車走行試験との比較検証により妥当性が確認されている走行シミュレーション手法を用い、限度値緩和の可能性が検討されている⁸⁾。

本研究では伸縮継目の設置条件を定量化し、新幹線のロングレール化範囲を拡大するため、レール開口部の車

両走行を模擬可能なシミュレーション手法を用いて、軌道と車両の条件を変数とするパラメータスタディを実施してレール破断時開口量の限度値を検討した。

2. 検討手法

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¹⁰⁾。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が評価可能である。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。車両運動モデルの基本的な解析精度については、他の走行シミュレーション手



(e) 実車走行実験との比較検証

図-1 レール開口部走行シミュレーションモデル

法¹¹⁾との比較検証を行い、妥当性を確認している⁹⁾¹⁰⁾。図-1(e)に本手法と実車走行試験⁹⁾との比較検証結果を示す。輪重・横圧ともに、受け側レールへ衝突した際の最初の鋭いピークは再現できていないものの、40msec後の次のピークは最大値が再現され、現象が概ね再現されていると考えられる。レール開口部の通過挙動⁹⁾⁸⁾を確認すると、開口部を通過した後に輪重抜けや横圧増加等の走行安全性に影響を及ぼす現象が生じており、本手法はその現象の再現が概ね可能であると考えられる。また、この実車走行試験⁹⁾はバラスト軌道で行われているが、レール開口部の通過挙動は、まくらぎから下の構造との相互作用の影響が少ないと考えられるため、手法の検証に

は十分であると考えられる。

3. 検討条件

前節で示した解析モデルを用いて、新幹線の直結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、レール開口量、曲線半径、列車速度、軌道変位等がレール開口部通過時の車両・軌道に与える影響を確認する。

(1) 基本解析条件

基本解析条件を表-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。

(2) 検討変数

ケーススタディの検討対象とする変数を表-2 に示す。

(a) 走行速度

過去の検討から、低速走行時にレール上下変位と車輪鉛直変位がレール開口量に依存して増加する傾向を示しており、走行速度は40km/h以上を対象とする。最高速度は現行の320km/hを対象とする。なお、30km/h以下については、過去に急曲線の実車走行試験⁹⁾により脱線に至る顕著な車輪上昇が生じないことが確認されているため対象外とした。

(b) 車 両

車両形式は2種類を対象とした。走行安全性に影響を与える可能性がある変数として、軸ばね支持剛性、ばね下質量、輪重アンバランスを設定した。

表-1 基本解析条件

項 目	諸 元
車 両	新幹線車両
車輪踏面形状	新幹線円弧踏面
走行速度	40～320km/h
レール	60kgレール
軌 間	1,435mm
レール締結装置	直結8形
軌道パッドばね定数	60MN/m
レール支持間隔	725mm
時間増分	1.0×10^{-6} sec

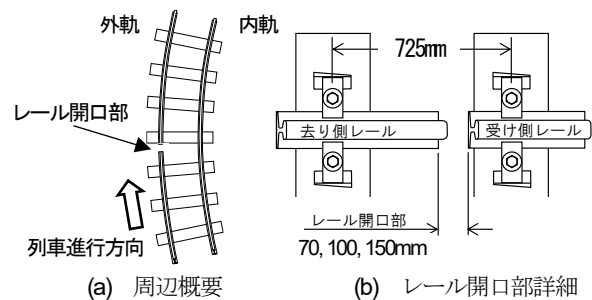


図-2 レール開口部の設定

表-2 検討変数

項 目	諸 元
軸ばね鉛直ばね定数	-30～+30%
軸ばね前後ばね定数	-30～+30%
ばね下質量	+10%
輪重アンバランス	20%(外軌側を減少)
走行速度	40～320km/h
曲線半径	800, 2000, 3500, 4000m
カント	0～200mm
軌道パッドばね定数	30, 60, 90MN/m
軌道変位	通り6, 11mm 水準7, 15mm
レール左右食違い	4mm
レール開口量	70, 100, 150mm
レール締結装置	直結8形, 弾直 I 形

(c) 軌道線形

曲線半径とカント量は共用中の新幹線軌道の諸元を参考に表-2に示す範囲で設定した。

(d) 軌道パッドばね定数

軌道パッドの鉛直ばね定数は、広く用いられている60MN/mを中心に、低ばね定数の30MN/mと劣化して硬くなった場合を想定した90MN/mを設定した。

(e) 軌道変位

軌道変位は新幹線の整備基準値等¹²⁾を参考に表-2に示す範囲で設定した。通り変位は10mの正弦波で外軌側に凸になる形状で与え、水準変位は10mの正弦波で下向きに凸になる形状で与えた。軌道変位とレール開口部の位置関係によって、車輪・レール間接触力への影響が変わるため、試解析を実施して車輪・レール間の接触力が最も大きくなる箇所を特定し、レール開口部を設置した。

(f) レール頭部左右食違い

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。例えば、図-3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)で接触する場合では、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。ここでは、レール頭部左右食違い量（以下、「レール食違い量」と称す。）を新幹線円弧踏面の水平距離4.5mm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設定することとした。なお、曲線半径が大きい区間では、レール食違いが起こりにくいことから、曲線半径800mの条件で検討を行った。

(g) レール開口量

レール開口量は現行の限度値70mmを基準とし、100mmと150mmを設定した。

(h) レール締結装置

レール締結装置は広く普及している直結8形を基本とし、弾直 I 形を設定した。鉛直ばね定数は直結8形が

60MN/m、弾直 I 形が40MN/mが標準となり、横方向ばね定数は直結8形が剛、弾直 I 形が130MN/mに設定した。

(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」と称す。)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-3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¹³⁾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。また、走行速度を変数とする場合、時間軸で評価を行うと低速走行時の方が脱線係数超過時間は長くなる傾向となるが、判定の目安としてこの値を適用した。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5.2mm¹⁴⁾を用いた。

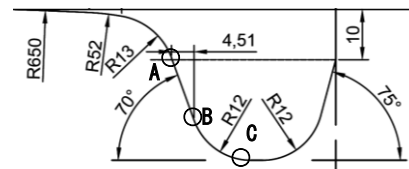


図-3 車輪踏面形状（新幹線円弧踏面）

表-3 走行安全性評価の指標

評価指標	目安値
脱線係数超過時間	15msec
レール頭部左右変位	5.2mm

4. 解析結果

ケーススタディにより得られた解析結果を以下に示す。なお、輪重、横圧、脱線係数の各諸量には、パス周波数5kHzのローパスフィルタを適用した。輪重抜けが生じた場合、脱線係数が定義できないため、時刻歴波形では便宜上の脱線係数を2.0として表示した。

(1) レール開口量

レール開口量の影響を把握するため、曲線半径、カント、走行速度毎に変化させて解析を行った。高速走行時の輪重・横圧・脱線係数の時刻歴波形を図-4(a)に、低速走行時の時刻歴波形を図-4(b)に示す。

レール開口部通過時に著大輪重が発生し、直後に輪重抜けが発生し、脱線係数が目安値を超過し、その継続時間が長くなる挙動が確認された。図-4(a)に示す高速走行時の例では開口部通過後の輪重抜けが2波確認されたが、図-4(b)に示す低速走行時の例では輪重変動が減衰せず、3～4波程度連続して輪重抜けが発生する傾向が見られた。

レール開口量の影響を線路線形と走行速度毎にまとめた結果を図-5に示す。図-5より、高速走行時はレール開口量が脱線係数の目安値超過時間に与える影響が小さ

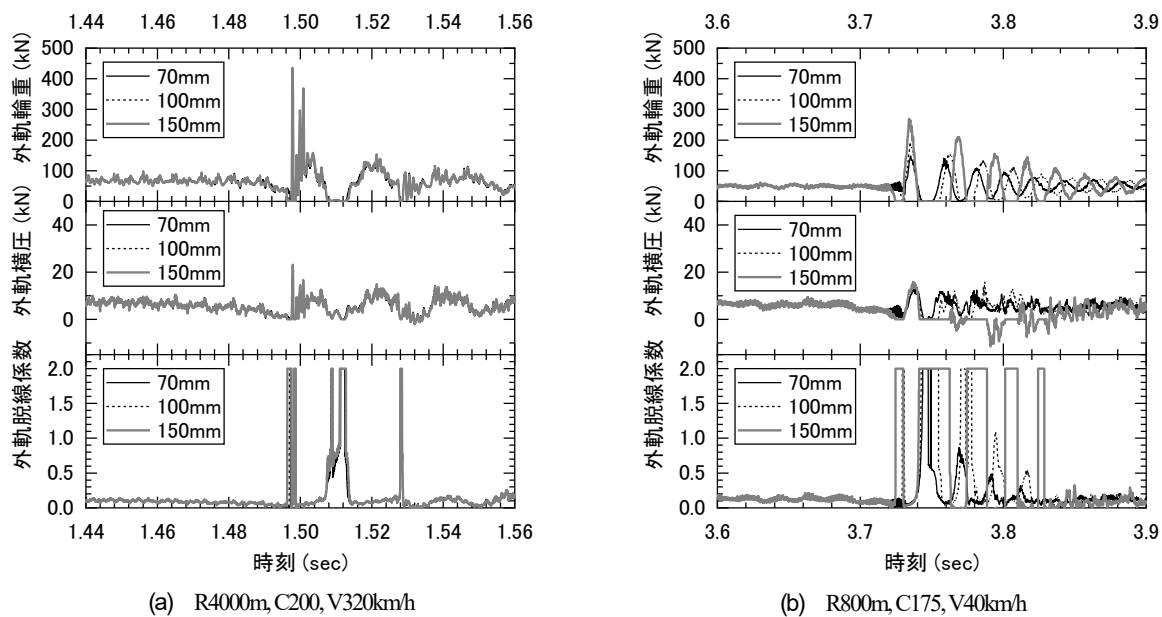


図-4 レール開口部通過時の時刻歴波形

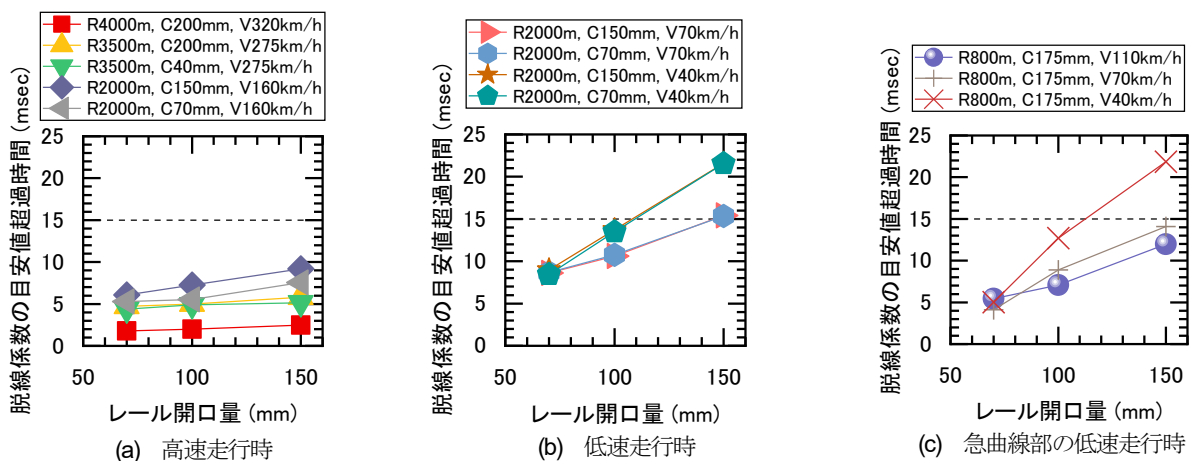


図-5 レール開口部通過時の脱線係数の目安値超過時間の推移

いが、低速走行時は顕著な影響が見られ、レール開口量が 150mm の場合は目安値を越えるケースが確認された。曲線半径 2000m、カント 150mm、開口量 100mm のケースにおいては、走行速度が 160km/h の脱線係数の目安値超過時間を基準とすると、70km/h では 1.5 倍であり、40km/h では 1.9 倍であった。

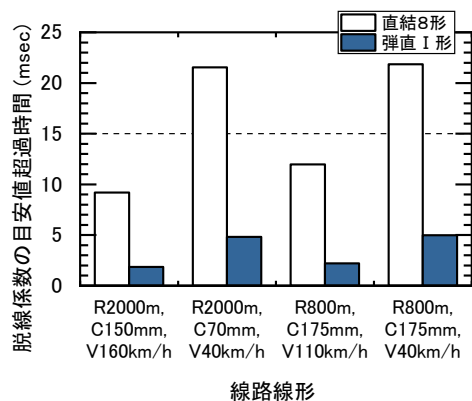


図-6 レール締結装置の影響(Gap150mm)

(3) レール締結装置種別

レール締結装置の違いによる影響を把握するため、直結 8 形と弾直 I 形の 2 タイプを検討した。線路線形と走行速度毎にまとめた結果を図-6 に示す。検討した全ケースで、脱線係数の目安値超過時間は、弾直 I 形の方が小さかった。

(4) 軌道パッドのばね定数

レール支持剛性の影響を把握するため、軌道パッドの鉛直ばね定数を変化させて解析を行った。輪重・横圧・脱線係数の時刻歴波形を図-7、図-8 に示す。鉛直ばね係数の増加に伴い、レール開口部通過直後の最大輪重と輪重抜けの継続時間が増加し、脱線係数の目安値超過時間が増加する傾向がみられた。軌道パッドのばね定数の影響を線路線形と走行速度毎にまとめた結果を図-9 に示す。30MN/m から 90MN/m へ鉛直ばね定数が増加した場合の脱線係数の目安値超過時間は、高速走行時の R4000m の例では 3.1 倍増加し、R800m の速度 40km/h の例では 2.6 倍増加した。

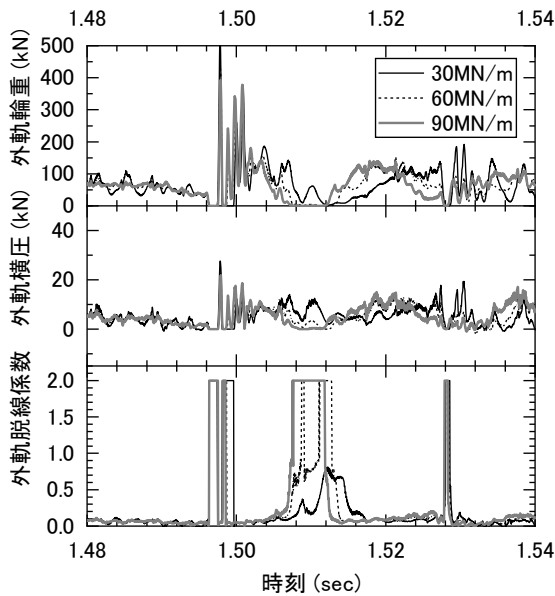


図-7 レール開口部通過時の時刻歴波形
(R4000m, C200mm, Gap150mm)

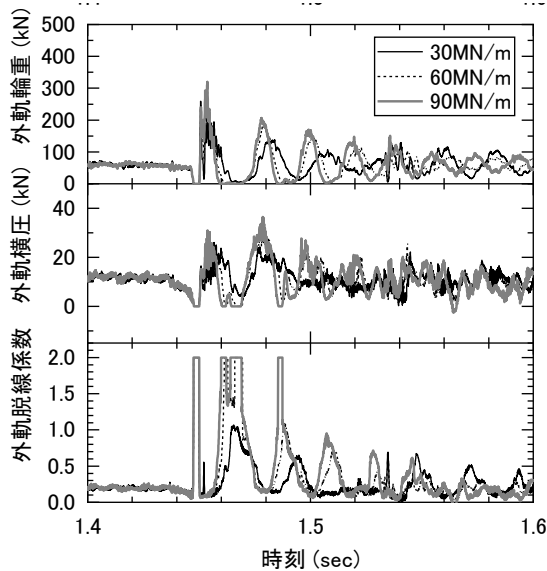


図-8 レール開口部通過時の時刻歴波形
(R800m, C175mm, Gap150mm)

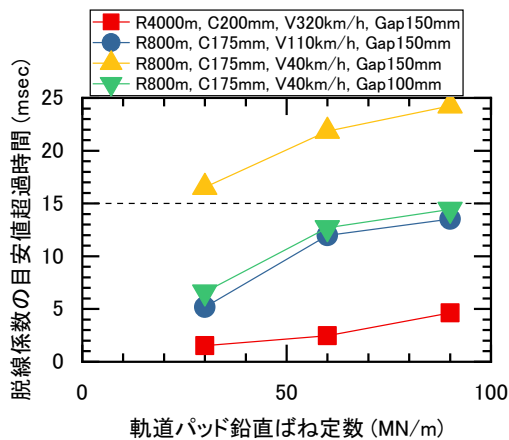
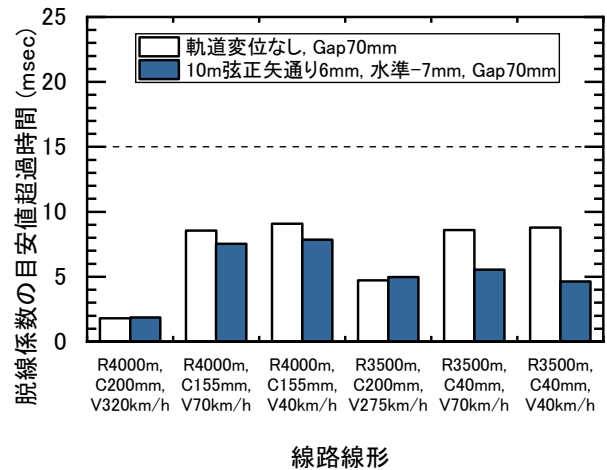


図-9 軌道パッドの鉛直ばね定数の影響

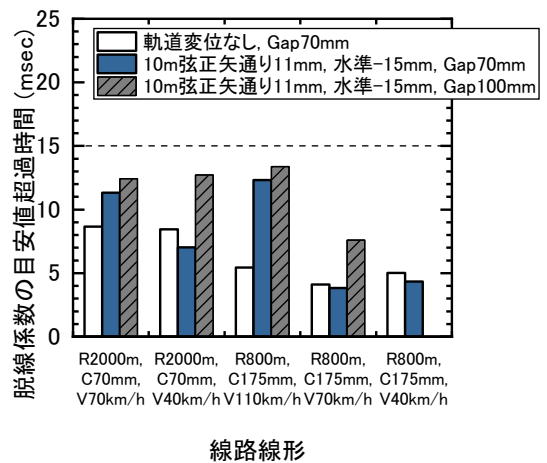
(5) 軌道変位

軌道の影響を把握するため、曲線半径、カント、走行速度毎に変化させて解析を行った。軌道変位の影響を線路線形と走行速度毎にまとめた結果を図-10に示す。

図-10より、高速走行時のケースについては、軌道変位が脱線係数の目安値超過時間に与える影響が少ないものの、低速走行時のケースでは差が大きいことが分かった。高速走行時と低速走行時の2つの条件について、輪重・横圧・脱線係数の時刻歴波形を図-11に示す。図-11より、軌道変位によりレール開口部通過時の横圧が増加し、脱線係数の目安値超過時間が増加することが確認された。図-11(a)の高速走行時のケースでは、輪重抜けが生じる継続時間に与える影響は少なかった。図-11(b)の低速走行時のケースでは、開口部通過後の輪重抜けの継続時間が増加し、同時刻の著大横圧の発生時間も増加していることから、脱線係数の目安値超過時間が増加する傾向が確認された。

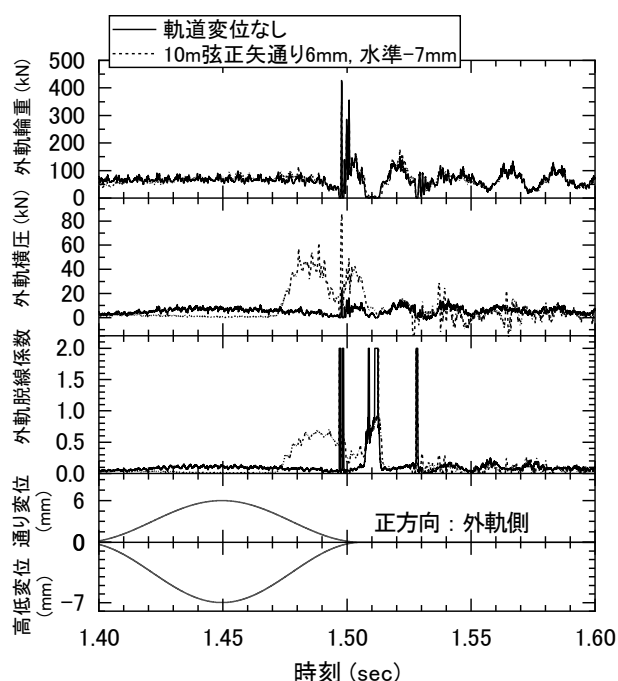


(a) 高速走行区間の軌道変位

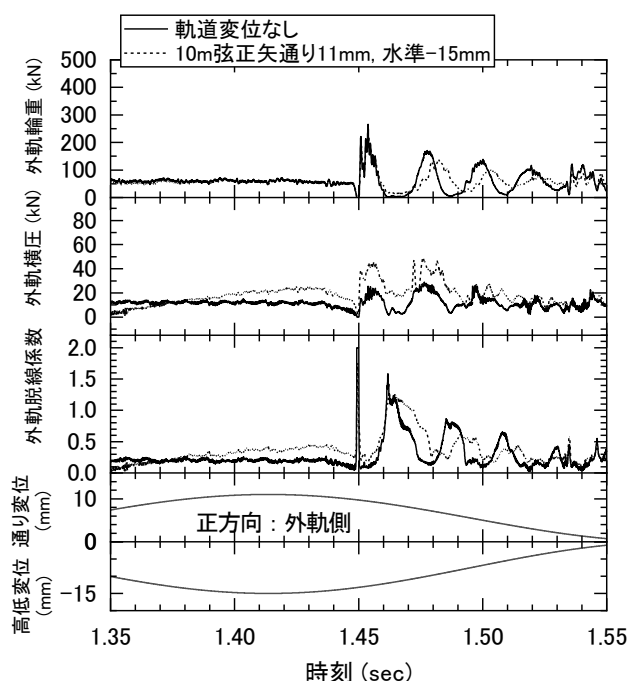


(b) 低速走行区間の軌道変位

図-10 軌道変位の影響(Gap70mm)



(a) R4000m, C200mm, V320km/h, Gap100mm



(b) R800m, C175mm, V110km/h, Gap100mm

図-11 レール開口部通過時の時刻歴波形

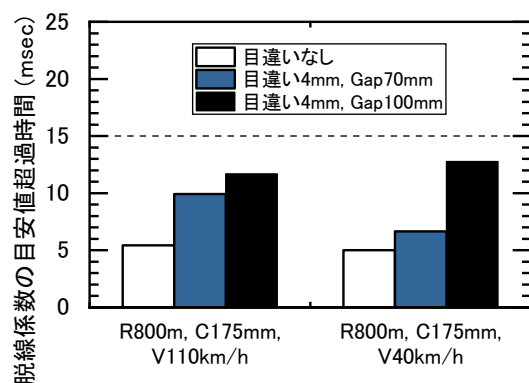


図-12 レール食違いの影響
線路線形

(6) レール食違い

レール食違いの有無による影響をまとめた結果を図-12に示す。図-12より、走行速度110km/hのケースでは、レール食違いにより脱線係数の目安値超過時間が1.8～2.2倍に増加し、40km/hのケースでは、1.3～2.5倍に増加した。110km/hのケースについて、車輪・レール間の接触力の時刻歴波形を図-13に示す。図-13から、レール食違いを設定したケースでは、開口部通過直前に食違いによる軌間拡大によって横圧が低下し、開口部の受け側レールへ接触した瞬間の横圧が増加している。さらに開口部通過後の輪重抜けの継続時間が長くなる現象がみられた。

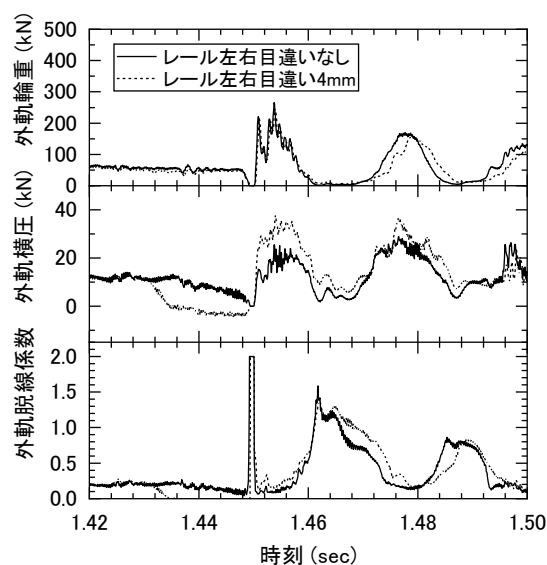


図-13 レール開口部通過時の時刻歴波形
(R800m, C175mm, V110km/h, Gap100mm)

図-14より、脱線係数の目安値超過時間は、比較的值が大きかったR800m, 速度110km/h, 開口量150mmの条件について、輪重アンバランスを増やした場合に14%、軸ばね鉛直剛性を低下させた場合に6%増加し、ばね下質量を増やした場合に9%増加した。

5. 考 察

前節の解析結果を基に、各因子の影響度について考察する。

(7) 車 両

車両条件による影響をまとめた結果を図-14に示す。

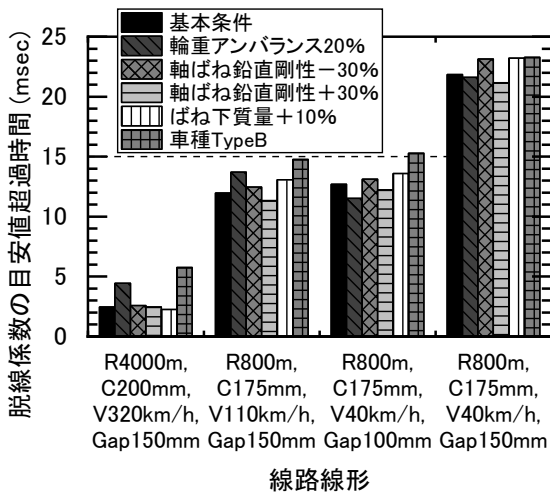


図-14 車両条件による影響

(1) レール開口量

高速走行時にはレール開口量が走行安全性の指標に与える影響は少ないが、走行速度が40～70km/hの場合、開口量100mmのケースでは脱線係数の目安値超過時間が目安値15msecを下回るものの、150mmのケースでは22～23msec程度となり、目安値を上回った。目安値を上回るケースでも、脱線に至る挙動が確認されていないことから、直ちに走行安全上の問題は生じない。

(2) 軌道パッドのばね定数

軌道パッドのばね定数を増加させた場合、開口部通過時の車輪・レール間の接触力が増加するため、その後に発生する輪重抜けの継続時間が増加すると考えられる。脱線係数の目安値超過時間は最大24msecであり、目安値15msecを越えているものの、脱線に至る挙動は確認されていない。

(3) レール締結装置種別

弾直I形レール締結装置は直結8形に比べ、横ばね定数と小返り抵抗が小さく、レール左右方向の支持剛性が小さいため、開口部通過時の車輪・レール間の著大接触力が緩和されたと考えられ、脱線係数の目安値超過時間が低減されたと考えられる。

(4) 軌道変位

曲線半径が2000m以上では、軌道変位が脱線係数の目安値超過時間に与える影響が小さく、曲線半径800mのケースでは顕著な影響を与えることが分かった。曲線半径800mでは、設定した軌道変位量が大いことも要因の一つと考えられ、管理基準を厳しくすることで、影響を小さくすることが可能である。

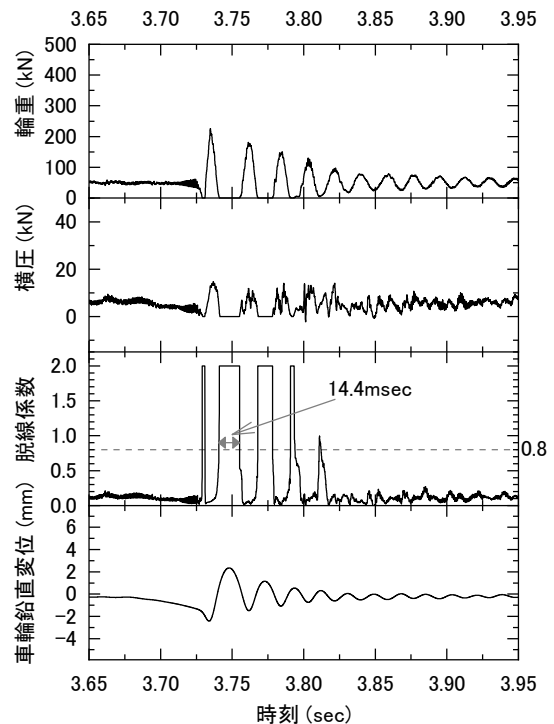


図-15 レール開口部通過時の車輪上昇量
(R800m, C175mm, V40km/h, Gap100mm, Pad90MN/m)

(5) レール食違い

レール食違いが脱線係数の目安値超過時間に与える影響は大きいので、破断時に食違いが発生しやすい曲線半径が小さい区間では注意が必要である。

(6) 車両

輪重アンバランスは走行安全性に影響を与えるが、新幹線の基準で良好に車両が整備された場合、輪重アンバランスは10%程度に収まると考えられ、本検討結果より影響は少ないと考えられる。

検討した範囲内の軸ばね剛性やばね下質量の変化が走行安全性に与える影響は限定的であり、車両形式が変わった場合でも、検討した範囲内の変更であれば走行安全上の問題は生じないと考えられる。ただし、現行の新幹線車両と著しく構造が異なる車両については本研究の対象外である。

(7) 総合

検討した全てのケースで脱線に至る挙動は確認されなかったため、レール開口量の限度値を100mm程度まで緩和しても問題ないと判断できる。曲線半径800mでレール開口量を100mmまで拡大した場合には、脱線係数の目安値超過時間が最大14.4msecとなった。このケースのレール開口部通過時の車輪・レール接触力と車輪上昇量の時刻歴波形を図-15に示す。図-15より、車輪鉛直変位は2.4mm程度に達しているが、その後車輪が落下してレールと接触した際の脱線係数はほぼ0となっており、

直ちに走行安全性に問題を生じる挙動ではない。また、100mm以上の拡大については、個別の検討により緩和が可能であると考えられる。

以上の結果から、スラブ軌道等の直結軌道において、レール破断時開口量を拡大し、伸縮継目を撤去してロングレールの敷設範囲を拡大することが可能である。しかし、レール開口量を大きく拡大する場合には、軌道変位やレール左右食違いが走行安全性に与える影響が大きい。ため、軌道を良好に整備する等の対策が必要であると考えられる。

6. まとめ

本研究では伸縮継目の設置条件を定量化し、新幹線のロングレール化範囲を拡大するため、軌道変位や車両種別等を考慮した温度下降時の破断時開口量の限度値を検討した。レール開口部の走行シミュレーションツールを用いて、ケーススタディを実施し、脱線係数が目安値0.8を越える継続時間を用いて走行安全性の評価を行った結果、15msecを越えるケースがあったものの、脱線に至るまでには相当な余裕があり、走行安全性に問題を生じる挙動ではなかった。また、検討した全てのケースで脱線に至る挙動は確認されなかった。

得られた知見を基に、走行安全性を確保した上でレール破断時開口量の限度値を拡大し、既設の伸縮継目を撤去することが可能となる。なお、適用にあたっては、車両と軌道が現行の新幹線の基準で良好に整備されていることが前提となる。

参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説－軌道構造，pp.173-186，丸善出版株式会社，2012

- 2) 片岡宏夫，西宮裕騎：スラブ軌道の横方向安定性評価，日本鉄道施設協会誌，第51巻，第6号，pp453-456，2013.6
- 3) 佐藤吉彦，椎名公一，篠田七次：レール開口部走行試験，鉄道技術研究所速報，1985
- 4) 佐藤吉彦，梅原利之編：線路工学，pp301-304，日本鉄道施設協会，1987.2
- 5) 日本鉄道施設協会：全国新幹線網建造物設計標準解説，pp51-52，日本鉄道施設協会，1972.1
- 6) 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，S2-6-4，pp493-496，2013.12
- 7) 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，2009.10
- 8) 西宮裕騎，片岡宏夫，平出壮司：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-RAIL2013，S2-1-3，2014.12
- 9) 西宮裕騎，片岡宏夫，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，2015.8
- 10) 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(STECH2015), 3C13, 2015
- 11) 土井久代，宮本岳史，古川敦，穴見徹広：レール研削と低速時の車輪フランジ乗り上がりに関する一考察，日本機械学会論文集(C編)，第77巻，第781号，pp122-133，2011.9
- 12) 保線工学編集委員会：保線工学<下>，鉄道現業者，2018
- 13) 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，pp454-461，2005.2
- 14) 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

(2018.4.6 受付)

SAFETY ANALYSIS OF A VEHICLE RUNNING ON A BROKEN RAIL IN HIGH-SPEED BALLAST-LESS TRACK WITH DUE CONSIDERATION ON TRACK IRREGULARITY

Yuki NISHINOMIYA and Hiroo KATAOKA

In the ballast-less track on viaducts, the rail axial force increase by expansion of girders by temperature change. Because of this influence, the length of rail breakage gap exceeds the existing limit value and there are rail expansion joint that cannot be removed.

In this study, a safety analysis of a vehicle running on a broken rail was carried out and its analysis consists of case studies with track irregularity and vehicle condition as variables for the purpose of removing expansion joints on the ballast-less high-speed track.

As a result, a running safety impact of rail breakage gap was small under the examined conditions, and an impact of twist of track and a stiffness of rail support were large. There were cases that the time during which derailment coefficient continues to exceed the limit 0.8, which is one of the index of running safety are 15msec or more. However, vehicles didn't derail in all cases examined in this study. Therefore, it was clarified that the limit value of the rail breakage gap can ease under the assumed conditions.