

3606 分岐器通過シミュレーションによる安全性の検討

○ 中橋 順一 [機] 土井 久代 鈴木 貢

[機] 宮本 岳史 (鉄道総合技術研究所)

Investigation on Running Safety of Passing Turnouts by Numerical Simulation

Junichi NAKAHASHI, Hisayo DOI, Mitsugi SUZUKI, Takefumi MIYAMOTO, (Railway Technical Research Institute)

Friction force between wheel and rail is one of factors, which causes flange climb derailment, and it is possible that repeated running on turnouts increases the friction force. Therefore, we have carried out a repeated running test of a vehicle passing on the Japanese No.8-type turnouts for side tracks in order to evaluate the trend of friction coefficient by measuring wheel loads and lateral forces. Furthermore, we have analyzed the influence of friction coefficient between wheel and rail on the vehicle running safety.

Keywords: vehicle dynamics simulation, turnout for side track, lateral force, wheel load, friction coefficient

1. はじめに

側線用 8 番分岐器における車両脱線は過去にも報告されているが、そのほとんどは背向（分岐側から本線側に進入する）で走行したケースであり、脱線防止ガードの設置などの対策が行われている。しかし、近年、対向（本線側から分岐側に進入する）走行中に発生することが報告¹⁾されており、分岐器付近を繰り返し走行することにより、車輪・レール間の摩擦係数が大きくなることが一因として考えられている。

過去にも、日比谷線における脱線事故調査報告書において、内軌側車輪の横圧輪重比（以下、 κ とする。）が走行を繰り返すにつれて徐々に大きくなることや、営業線において列車の運行密度の増加に伴い κ が増加し、これに合わせて外軌側車輪の脱線係数が増加すること、このとき κ は 0.5~0.6 程度まで上昇したことが報告²⁾されている。また、鉄道総研においても、構内試験線の急曲線において低速走行試験を実施し、繰り返し走行した場合に κ が上昇し、車輪がレールに乗り上がったことが報告³⁾されている。

今回、鉄道総研構内にある側線用 8 番分岐器において、走行試験を実施し、輪重 (P)・横圧 (Q) 測定を行った結果から、同一分岐器を繰り返し走行した場合に κ から摩擦係数の変化傾向を調査した。さらに、分岐器通過シミュレーションを行い、実測データと比較するとともに、摩擦係数がさらに増加した場合に横圧や脱線係数、車輪上昇量などの走行安全性に及ぼす影響を検討した。

2. 走行試験

2.1 試験概要

図 1 に走行試験区間の略図と当該分岐器の写真を示す。試験は平成 20 年 8 月 29 日の午後（以下、試験 A とする。）と平成 21 年 8 月 17 日（以下、試験 B とする。）の 2 度にわたって、鉄道総研構内試験線の旧試験台～車両門の間で行われた。測定対象の分岐器は試験車庫付近にある側線 8

番分岐器とした。分岐器通過回数は試験 A が 19 往復、試験 B が 50 往復実施した。試験当日の天候は両日ともに晴れであったが、試験 A は、前日が雨天であり、当該の走行試験以前に分岐器を通過する走行が少なかった。一方で、試験 B は直前に別の走行試験が実施されており、当該分岐器の使用頻度が高い条件であった。

供試車両は鉄道総研所有のハイブリッド車両であり、台車は試験用台車 RT-X12 台車である。新連続法用の P Q 軸が車両門方の第 1 軸に取り付けられた。P Q 軸における静止輪重の左右平均値は 39.7kN であった。

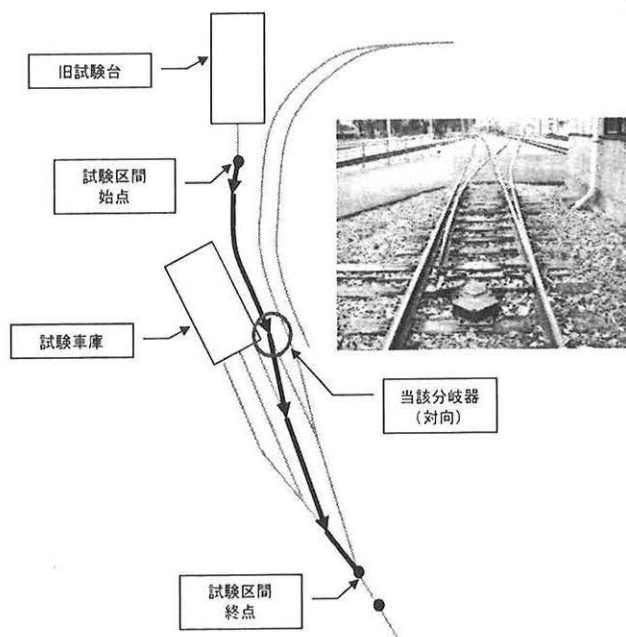


図1 走行試験区間と当該分岐器

2.2 側線用 8 番分岐器

図 2 に側線用 8 番分岐器の略図を示す。側線用 8 番分岐器はリードレール部の曲線半径が $R=100.701\text{m}$ であり本線用 8 番分岐器 ($R=118.005\text{m}$) に比べて小さい。また、トンブレールが直線であり、入射角 ($2^\circ 4' 39''$) があるため、基本レールからトンブレールに移る場合には軌道が角折れた状態になっている。さらに、基本レールとトンブレールの高さに差があり、トンブレールが最大 10 mm 高くなっている。この構造的な水準変位によって、車両の動揺や外軌側の輪重抜けが発生することから、本線用 8 番分岐器よりも脱線に対して厳しい構造である。



図2 側線用8番分岐器の略図

2.3 測定波形

図 3 に試番 A 16 における P Q 測定波形を示し、添字の 2 が当該分岐器での外軌側を示す。測定データには変動がわかりやすいように 5 Hz のローパスフィルタ処理をしている。

分岐器を対向に進入した場合、図 2 に示したようにトンブレール先端に入射角があるため、外軌側の横圧が急激に立ち上がる。その後、基本レールからトンブレールに移る際に、最大 10mm あるトンブレールと基本レールの高さの差によるトンブレール中の構造的な水準変位によって外軌側の輪重、横圧が一旦減少するが、リードレール部に進入すると、基本レールとの高さの差が戻るにつれて外軌側の輪重、横圧が増加する。走行試験では、ここで横圧および脱線係数が最大となるケースが多かった。

2.4 走行試験結果

分岐器の通過回数と κ の関係を図 3 に、通過回数と外軌側定常横圧 Q_m の関係を図 4 にそれぞれ示す。 κ および Q_m は、いずれもリード曲線中の平均値により算出した。図中の四角印が試験 A、丸印が試験 B でのデータである。一般に、鉄道車両が半径 $R=100.701\text{m}$ のような急曲線を通る場合には、アタック角が大きくなりクリープ力特性は飽和することから、 κ は摩擦係数と近似できる²⁾。

試験 A、B ともに、分岐器の通過回数が増加するにつれて、 κ および Q_m が増加した。しかしながら、試験 A では 19 回通過まで増加し続けたが、試験 B では 5 回目で κ が 0.4 を超えるとはほぼ飽和しており、試験によって κ の上昇傾向に違いが認められた。試験 A では前日の雨天の影響により試験開始時の摩擦係数が低下していたこと、試験 B では直前に分岐器通過試験が実施され、分岐器の使用頻度が高かったことが影響していると考えられる。したがって、同一分岐器を走行した場合でも、摩擦係数は天候や列車密度の影響を受けると考えられる。また、 κ の最大値は 0.469

(試験 B 50) であり、今回試験を実施した範囲では κ が 0.5 を超えるようなデータは得られなかった。

また、試験 B では 20 回目終了後、わずかに車輪、レールに残っていると考えられる油分の除去を目的として車輪、軌道全線をヘキサソで清掃した。その結果、 κ はわずかに増加傾向を示したが、 Q_m や $(Q/P)_{\max}$ はほぼ一定であった。

図 6 に κ と Q_m の関係を示す。試験 A、B ともに κ が増加するにつれて Q_m は増加する傾向を示した。また、 κ が同程度であれば、 Q_m はほぼ同じであることが確認された。したがって、試験 A、B の軌道条件に差異はないと考えられる。

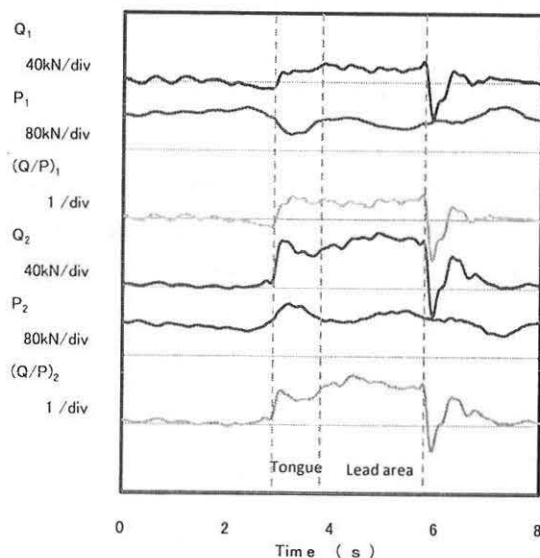


図3 波形例(試験A16)

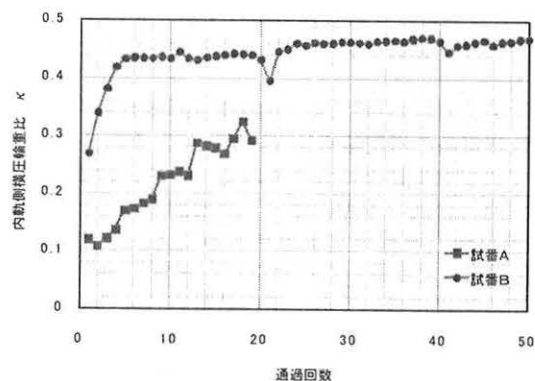


図4 通過回数と κ の関係

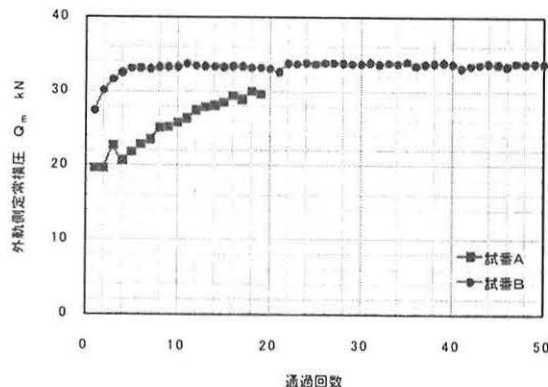


図5 通過回数と Q_m の関係

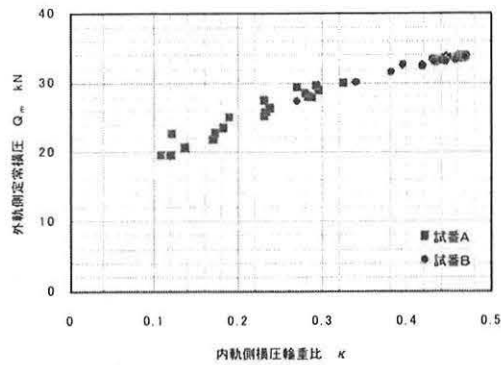


図6 κ と Q_m の関係

3. 分岐器通過シミュレーションによる検討

3.1 分岐器線形の計算モデル

シミュレーション解析には鉄道総研で開発した車両運動シミュレーションプログラム(VDS)⁴⁾を用い、シミュレーションにおける分岐器の線形は文献⁵⁾を参考に作成した。図7に側線8番分岐器の入射角計算モデルを示す。構造的な角折れを再現するために、半径 $R=220.899\text{m}$ と $R=100.16\text{m}$ が連続する近似曲線に対して基本線形との差を通り狂いとして入力した。さらに、実測した軌間、高低、水準の各軌道狂いについても軌道変位として入力した。実測通り狂いについては横圧への影響は大きいと考えられるが、一般的に実施される軌道検測データの復元処理では、基本線形と比較してリード曲線中の狂いが過大になることから、今回は基本線形で計算した。

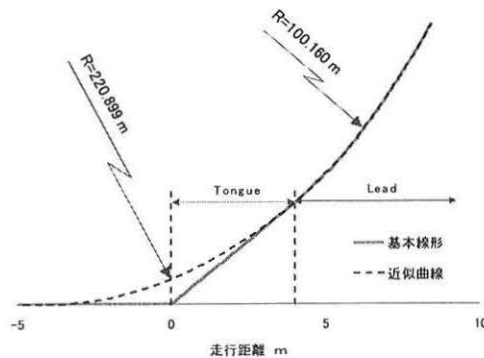


図7 側線8番分岐器の分岐器の入射角計算モデル

3.2 実測との比較

分岐器通過シミュレーションの妥当性を確認するため、計算結果を走行試験データと比較した。車両諸元は前述のハイブリッド車両およびRT-X12台車のものを用いた。

図8に進行方向先頭軸における輪重、横圧、脱線係数の実測とシミュレーション波形を示す。細線が図3の実測波形であり、太線がシミュレーション波形である。シミュレーションにおける摩擦係数は実測と κ が等しくなるように入力している。また、シミュレーション波形も実測と同様に5Hzのローパスフィルタ処理を行った。

シミュレーションと実測波形を比較すると、リード曲線での外軌側定常横圧が小さくなっていることや、クロッシング部を通過する時に発生する背面横圧まではモデル化されていないなどの違いが認められるが、波形はおおむね一致しており、シミュレーションでは走行試験を再現できていると考えられる。3.3節の検討はこのシミュレーションを用いて行うこととした。

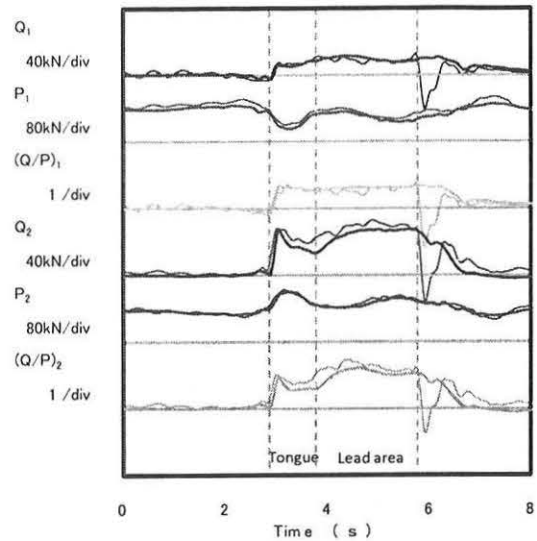


図8 実測およびシミュレーション波形の比較(試番A16)

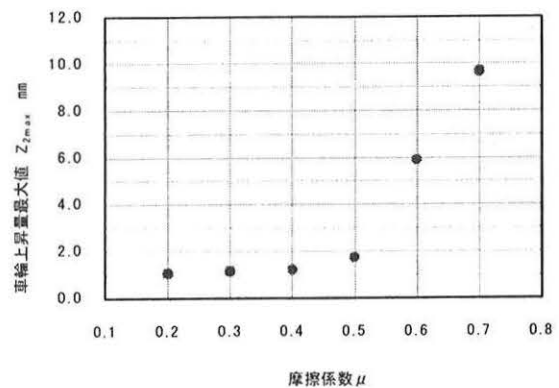
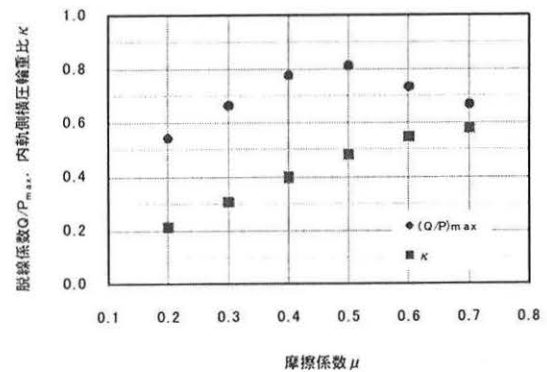
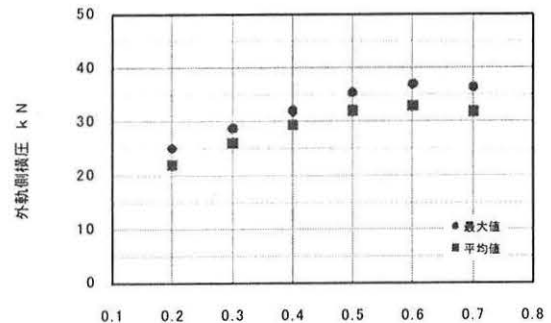


図9 シミュレーション結果 (μ_{in} と μ_{out} が同じ場合)

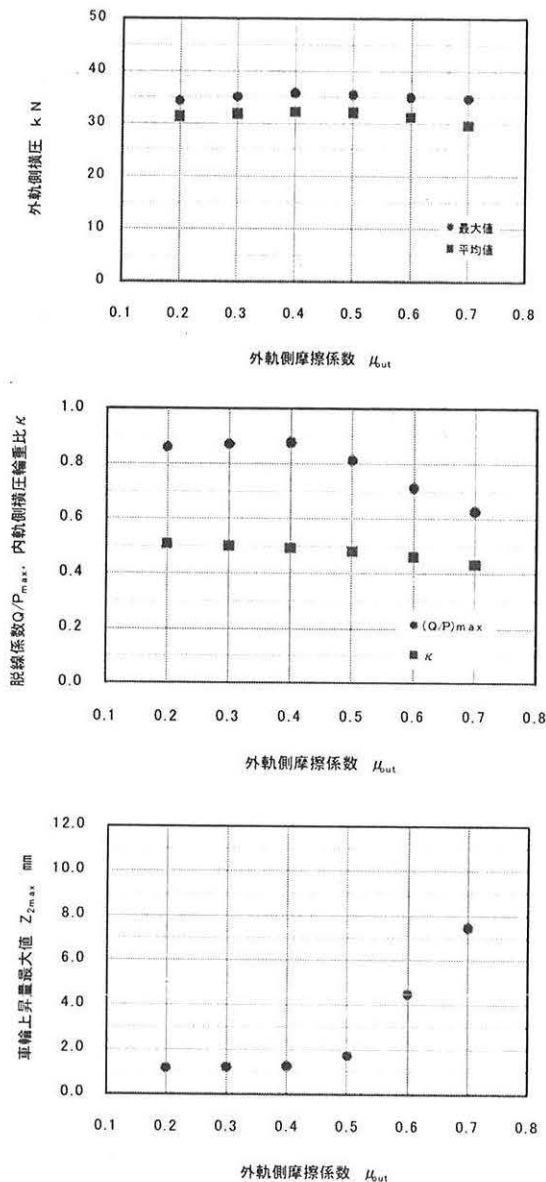


図 10 シミュレーション結果
(μ_{out} のみ変えた場合、内軌側摩擦係数は 0.5 で一定)

3.3 車輪・レール間の摩擦係数の影響

今回の走行試験では、 κ が 0.47 までしか上昇しなかったが、摩擦係数がさらに上昇した場合に横圧、脱線係数、車輪上昇量におよぼす影響を、前述の分岐器通過シミュレーションで検討した。走行速度はすべて 20km/h とし、その他の条件は 3.2 節で確認した計算モデルと同様である。

図 9 に内外軌の摩擦係数を同じ値で 0.2~0.7 の範囲で変化させた場合のシミュレーション結果を示す。平均値、最大値ともにリード曲線中のデータで整理した。

外軌側横圧では、最大値、平均値ともに $\mu = 0.6$ までは摩擦係数の増加に伴って増加するが、0.5 から飽和し始め、0.7 では減少に転じた。脱線係数 $(Q/P)_{max}$ は、0.5 で最大になった後、減少する傾向を示した。 κ は、0.5 までは摩擦係数とほぼ等しいが、それ以上では上昇は緩やかになり、0.6 で飽和した。車輪上昇量は、摩擦係数 0.5 までは 2mm 以下で、ほとんど上昇しなかったが、0.6 を超えるとリード曲線中央で車輪が上昇し、0.7 では約 10 mm 上昇した。

さらに、外軌側摩擦係数（以下、 μ_{out} とする。）のみ変

化させた場合のシミュレーション結果を図 10 に示す。内軌側摩擦係数は 0.5 で一定とした。

外軌側横圧では最大値、平均値ともにほぼ一定であり、差異は認められなかった。一方で、脱線係数の最大値は、 μ_{out} が小さい方が大きい傾向であり、 μ_{out} が 0.5 より大きくと減少する傾向が認められた。 κ は、 μ_{out} の増加に伴い緩やかに減少するが、内軌側摩擦係数が一定であるため、ほぼ一定である。車輪上昇量最大値は脱線係数が減少し始めた摩擦係数 0.5 付近から大きくなる傾向であった。

これらの結果から、摩擦係数 0.5 以上では車輪上昇量最大値が大きくなる。ただし、直ちに脱線に至るものではない。また、摩擦係数が 0.5 を超えた時の脱線係数は約 0.6~0.75 であり、従来から走行安全性の判定に用いられている摩擦係数 0.3 とした時の脱線係数の目安値 0.95 より小さい。したがって、車輪・レール間の摩擦係数を把握することが重要である。

4. まとめ

今回、分岐器通過の走行試験および車両運動シミュレーション解析の結果得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 分岐器の通過回数が増加するにつれて、内軌側横圧輪重比および外軌側平均横圧は増加した。しかしながら、試験によって κ の上昇傾向に違いが認められ、同一分岐器を走行した場合でも、摩擦係数は天候や列車密度の影響を受けると考えられる。
- (2) シミュレーションにおいて、内外軌の摩擦係数を同じ値で 0.2~0.7 の範囲で変化させた場合、外軌側横圧や脱線係数は、摩擦係数が 0.5 および 0.6 までは摩擦係数の増加に伴って増加するが、それ以上になると減少する傾向を示す。車輪上昇量最大値は、摩擦係数 0.5 まではほとんど上昇しないが、0.6 を超えるとリード曲線中央で車輪が上昇し、0.7 では約 10 mm 上昇した。
- (3) 外軌側摩擦係数のみ変化させた場合、外軌側横圧はほぼ一定であったが、脱線係数は、 μ_{out} が小さい方が大きい傾向であった。
- (4) 摩擦係数 0.5 以上では車輪上昇量最大値が大きくなる。直ちに脱線に至るものではないが、極端に高い摩擦係数ではフランジが乗り上がる可能性が高まると考えられる。

今後、実測通り狂いを入力できるようにすることで、解析精度のさらなる向上を目指したいと考えている。また、実車が走行中の外軌側フランジの摩擦係数を把握することが課題である。

参考文献

- 1) 桃崎秀二、片折暁伸：車輪削正が低速乗り上がり脱線へ及ぼす影響に関する基礎試験（繰返し走行条件下における摩擦状態の変化） 土木学会 鉄道力学論文集 第 13 号 2009.07
- 2) 帝都高速度交通営団 日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書、事故調査検討会 2000.10
- 3) 石田弘明、古川敦：急曲線部の低速脱線走行試験、平成 14 年鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2002)
- 4) 宮本岳史、石田弘明、松尾雅樹：地震時の鉄道車両挙動解析、日本機械学会論文集 (C 編)、64 巻 626 号、pp.3928-3935、1998.
- 5) 藤本裕、石田弘明：側線 8 番分岐器通過時の車両運動解析、鉄道総研報告 Vol9 No.8、1995.08