

1218 走行試験による輪重横圧推定式の精度確認

Accuracy of Lateral-Force/Wheel-Load Estimation Equations through the Running Tests

○正 中川 正樹 (鉄道総研) 正 村松 浩成 (J R 東海) 正 大澤純一郎 (鉄道総研)
正 西垣 拓也 (鉄道総研) 正 古川 敦 (鉄道総研)

Masaki NAKAGAWA, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

Hironari MURAMATSU, Central Japan Railway Company Junichirou OOSAWA, Railway Technical Research Institute

Takuya NISHIGAKI, Railway Technical Research Institute Atsushi FURUKAWA, Railway Technical Research Institute

The Q/P estimation equations is used to evaluate quantitative influence of various factors for flange-climb derailments. An accuracy of these equations is made sure with the field data measured with Teito Rapid Transport 03 series rolling stock. In this paper, we ascertain the transferability of these equations with the running test data carried out in RTRI. In this test, some factors such as twist of track, imbalance between right- and left- side wheel loads, which influence the cause of derailments, were changed to make clear the mechanism of this type derailment. Then we estimate the margin of these equations for derailment safety and find out that the inside Q/P ratio is most influential factor to the accuracy of these equations.

Key Words: Frange-climb Derailment, Lateral-Force/Wheel-Load Estimation Equations, Running Tests, Track Irregularity

1. 研究の背景

平成 12 年 3 月に発生した、営団地下鉄日比谷線中目黒駅構内における乗り上がり脱線事故の事故調査検討会報告書¹⁾ (以下、「報告書」という)では、輪重横圧推定式による走行安全性評価法が提案された。この輪重横圧推定式は、車両諸元や曲線線形をパラメータとして輪重、横圧、限界脱線係数を推定し、推定脱線係数比 (= 限界脱線係数 / 推定脱線係数) の大きさを走行安全性を評価するものである。限界脱線係数とは、車輪がレールを乗り上がり始める可能性が生じる時の脱線係数であり、報告書では Fig.1 に示すように、これに 2 割の安全率を加味して、推定脱線係数比 1.2 以下の場合には脱線防止ガードを敷設する等の対策をすることとしている。2 割の安全率は、脱線に対する余裕のほか、輪重横圧推定式が持つ推定誤差を見越したものである。

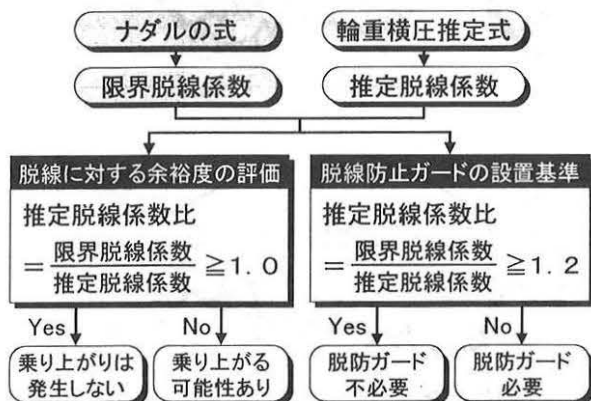


Fig.1 Estimation method of running safety level used by the estimated derailment coefficient ratio

輪重横圧推定式の推定精度は、日比谷線事故後に行われた脱線再現試験による測定データで確認されたが、これは車両に固有のパラメータや関数として、営団地下鉄 03 系の諸元を用いたものであり、一般の車両における推定精度は確認されていなかった。また、軌道狂いの影響についても、推定式の中では取り扱われていなかった。

一方鉄道総研では、国土交通省の補助金を受け、平成 13 年度、14 年度の 2 年間にわたって、構内に試験線を敷設して脱線再現試験 (以下、「走行試験」という) を行い、乗り上がり脱線メカニズムの解明等を行ってきた²⁾。この中では、試験線に軌道狂いを設定する他、車両重量やばね定数等の諸元を変更して、各種因子が乗り上がり脱線に及ぼす影響等について検討した。

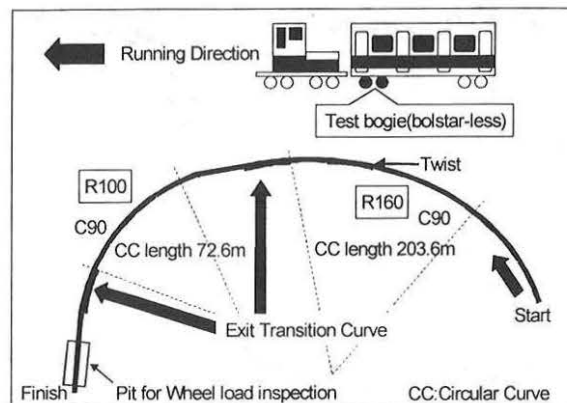


Fig.2 Test track in RTRI

本報告は、この走行試験データを用いて、車両固有のパラメータを実測値に基づいて補正することにより、輪重横圧推

定式がどの程度の推定精度を有するかを確認するとともに、報告書で示された各種パラメータの、安全に対する余裕度について検討したものである。

2. 走行試験の概要

走行試験については、静的軸重、まくらばね前後剛性を変化させた3種類の試験用車両を準備し、Fig.2に示すような異なった線形条件（曲線半径 R160m 及び 100m、カントは共に 90mm）、速度条件（5km/h、10km/h、20km/h）下で行った。

3. 軌道狂いを考慮した輪重の推定

走行中の車両の内外軌の輪重は、Fig.3に示すように、静止輪重、軌道面のねじれによる輪重増減、超過遠心力の3つの要素から推定される。

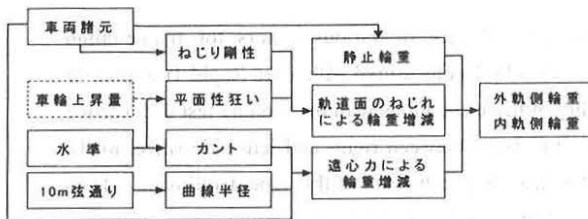


Fig.3 Wheel load estimation flow

3.1 静止輪重の推定

静止輪重は左右輪重のアンバランスを表す静止輪重比を考慮して推定される。従来の算定式では、走行中の静止輪重比の変化は考慮されていなかったが、曲線走行中における外軌側車輪の静止輪重比（以下、 γ という）は、初期設定値より

りも大きくなることが走行試験で確認された。さらに結果の分析により、曲線中の平均的な輪重の変化について、定性的に以下の知見が得られた。

- 地上 PQ 測定の結果、 γ の変動は空気ばねを採用していない車両では見られなかったことから、これは空気ばねの吸排気によるものと考えられる。
- γ は入口側緩和曲線中で増加し、円曲線中では初期設定値よりも大きくなる。この増分は γ の初期設定値が小さいほど大きくなる傾向にある。
- γ は出口側緩和曲線中で減少し、 γ の初期設定値が 1.0 程度の場合、曲線通過後の γ が初期設定値の 80～90%程度に減少する。また γ の初期設定値が小さい（0.5～0.7 程度）場合、曲線通過後の γ は初期設定値に戻る傾向にある。
- 緩和曲線で γ を直線的に変化させた場合、輪重の推定値と実測値の波形は良く一致する。
- 円曲線中での γ の増分は、速度の増加に伴い大きくなる傾向にある。

以上の結果から、 γ の値は入り口側緩和曲線～円曲線では設定値よりも大きく、推定脱線係数比が最も小さくなる傾向にある出口側緩和曲線の ECC～台車中心間距離の範囲では設定値と同等以上となるため、走行安全性を考慮する場合には、従来通りの設定値を計算に用いれば、安全側の判定になると考えられる。 γ 補正後の輪重の推定値と実測値を比較した図を Fig.4 に示す。

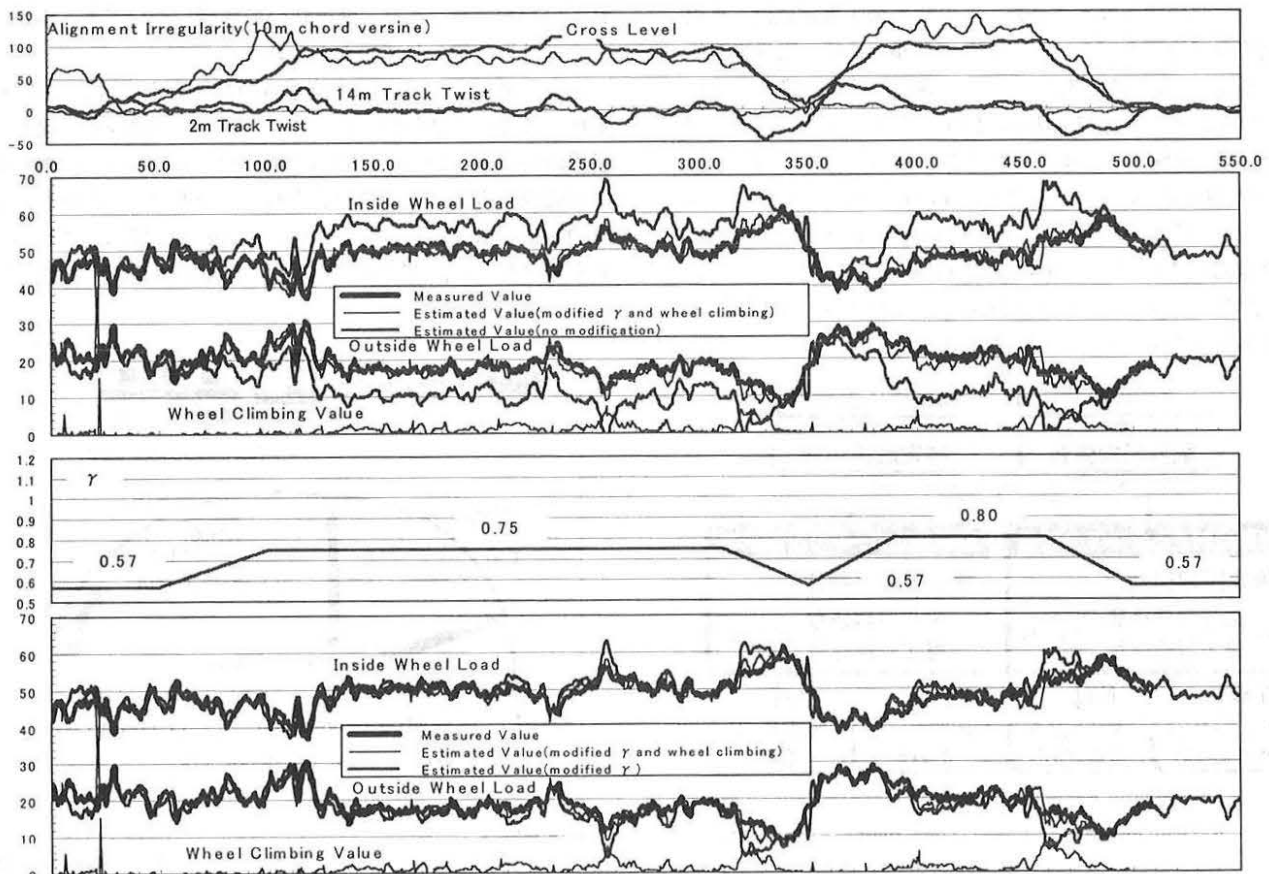


Fig.4 Comparison of the values of the wheel load, measurement and estimation

3.2 軌道面のねじれによる輪重増減の影響

軌道面のねじれによる輪重増減は、台車中心間及び軸間の平面性狂いによる車両の枕ばねと軸ばねの伸縮を起因とする。特に出口側緩和曲線では、カント遅減に伴う構造的な平面性狂いによって外軌側輪重が減少するのに加えて局所的な軌道の平面性狂いによるばねの伸縮によっても輪重増減が生じる。

輪重推定式の平面性狂いに実測値を代入して輪重を推定したところ、局所的に実測値と異なって推定されることがわかった。この事象は、外軌側で車輪上昇が発生している箇所が生じていることから、車輪が上昇することによる軌道面のねじれの緩和が推定式に反映されていないことが誤差の原因と考えられた。そこで新たに車輪上昇量を考慮した補正法について検討した。結果を Fig.4 に示す。図より Estimated value(modified γ and wheel climbing)と Measured value がよく一致していることがわかる。

なお車輪上昇量は軌道面のねじれを緩和する方向に作用するため、走行安全性を考慮する場合には、これまで通り、車輪上昇量を考慮せずに内外軌の輪重を算定すれば、安全側の判定になると考えられる。

3.3 超過遠心力による輪重増減の影響

曲線通過時の車両には曲線半径、カント及び速度に依存した遠心力が作用するため、車両には遠心力と輪重の軌道水平方向の分力の差に起因するロールモーメントが発生し、これによる内外軌の輪重増減が生じる。これは走行速度が均衡速度以下の場合、外軌側輪重の減少分として作用し、均衡速度以上の場合には増加分として作用する。

遠心力はカント・曲線半径の関数として表されるが、設計値ではなく、各地点の 10m 弦正矢通り狂いと水準狂いから曲線半径とカントを算出し輪重推定式に入力することで、3.1、3.2 以外の要因による実測値の輪重変動をほぼ説明できることがわかった。脱線防止ガード設置の検討の場合には、推定脱線係数比の目安値 2 割の余裕度、軌道狂いの影響は含まれるものとして考えることができるので、曲線諸元として設計値を使用すればよく、詳細な走行安全性の検討を行う際には、曲線諸元として軌道狂いに基づく実測値を使用するのが望ましいといえる。

4. 軌道狂いを考慮した横圧の推定

横圧の推定は Fig.5 に示すように、内軌側横圧、空気ばねのねじれに伴う輪軸横圧、超過遠心力による輪軸横圧の 3 要素から行われる。

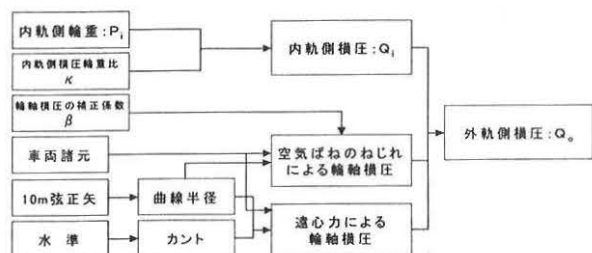


Fig.5 Lateral force estimation flow

4.1 内軌側横圧と内軌側横圧輪重比の関係

内軌側横圧は、内軌輪重と内軌側横圧輪重比 κ の積で表さ

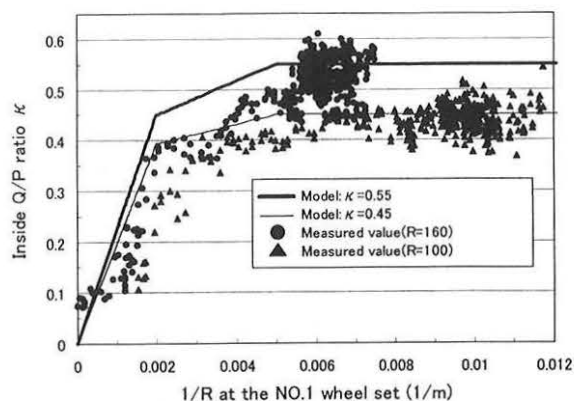


Fig.6 The relation between $1/R$ and κ at the NO.1 wheel set (R =curve radius)

れる。 κ は、内軌側での車輪／レール間の摩擦係数や台車・輪軸の轉向性能の影響を受けるため、摩擦係数が大きい場合、また曲線半径が小さく車両が旋回しにくい場合、さらに内外軌の輪径差を取りにくい車輪踏面形状を採用した場合等に増加する。そこで 10m 弦正矢通り狂いから算出される曲率を横圧推定式に入力して算定される推定値と、走行試験における実測値とを比較したところ、Fig6 に示すように、散砂などの特殊条件を除いて、従来、定数として用いられてきた $\kappa=0.55$ 以下となった。この κ の設定は、営団 03 系の諸元を用いた時刻歴シミュレーション結果を踏まえて行っているが、通常、走行安全性を評価する場合には、従来通り $\kappa=0.55$ を用いて差し支えないものと考えられる。

4.2 空気ばねのねじれを考慮した輪軸横圧の推定

空気ばねのねじれの反力による輪軸横圧は、枕ばねの前後剛性と台車の回転変位の積に補正係数 β (台車に生じるヨーモーメントの前軸の負担割合に相当) を乗じたものである。この β の推定も、営団 03 系の諸元を用いたシミュレーション結果を基にしており、空気ばねの柔剛別、曲線半径別に算出される。10m 弦正矢通り狂いを曲率の算定に用いて、走行試験の実測値から β を逆算したところ、Fig.7 に示すように、既往のシミュレーション結果より小さい値となった。従って走

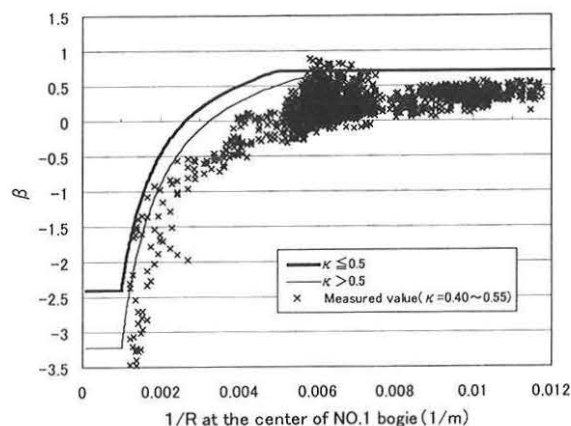


Fig.7 The relation between $1/R$ and β at the center of NO.1 bogie (R =curve radius)

行安全性を評価する場合については、従来通りの推定式を用いれば、安全側の判定を得ることができると考えられる。

4.3 超過遠心力により輪軸に作用する横圧

超過遠心力により輪軸に作用する横圧は、曲線半径、カント及び速度に依存して生じ、走行速度が均衡速度以下（カント超過）の場合には外軌側に対して負の横圧になり、均衡速度以上（カント不足）の場合には正の横圧になる。これらを踏まえた上で、推定式に、10m 弦正矢通り狂い、水準狂いを入力して Fig.5 に示したフローで横圧の推定を行った。

5. 軌道狂いを考慮した限界脱線係数の推定

限界脱線係数推定には、Fig.8 に示すように従来から用いられているナダルの式を用いるが、この際の摩擦係数にはアタック角の関数となる等価摩擦係数を用いている。これは車両が走行している位置における線路線形（曲率）の差異を忠実に反映することを目的としたものであり、結果的には摩擦係数を一定とした場合の限界脱線係数より大きな値を与えることになる。このアタック角の推定モデルは曲線半径とスラックの関数として表される。

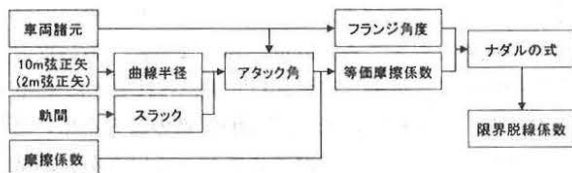


Fig.8 Critical derailment coefficient estimation Flow

このモデルの妥当性の検証のため、走行試験における実測値と推定値の比較を行った結果、設定モデルが実測値の平均的な値を捉えること及び空気ばねの前後剛性の差異がアタック角には影響しないことがわかった。また 10m 弦通り狂いから求められる曲線半径と軌間から求められるスラックを用いて算定したアタック角は、Fig.9 に示すように、継ぎ目部で角折れのような局所的な軌道変異が存在する場合を除き、実用上問題ない精度で求まることがわかった。さらに、角折れのような局所的な通り変位がある場合においても、2m 弦正矢を用いると、より精度の高い推定ができた³⁾。

6. 推定式を構成する各要素の安全に対する余裕度の検討

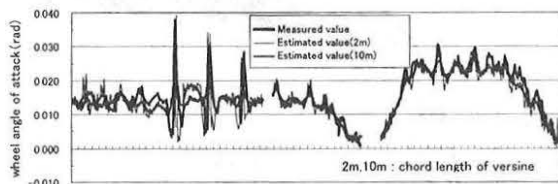


Fig.9 Comparison of wheel angle of attack, measured value and estimated value³⁾

輪重横圧推定式に、設計値を入力して算定される値（以下、理論値:Theoretical value）と、前章までに述べた方法を用いて補正した値（以下、推定値:Estimated value）とを比較した上で、理論値のもつ特徴についてまとめると、以下のようなになる。

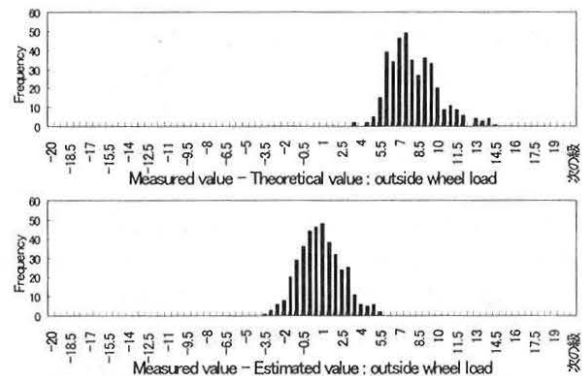


Fig.10 Comparison of wheel load, theoretical value and estimated value

- ① 理論値は、 γ を推定値よりも安全側に設定している。この影響は曲線全体が対象となるため、Fig.10 に示すように頻度分布全体（平均値）を安全側に移行させる。
- ② 理論値は、車輪上昇量を考慮していないため、平面性狂いを実際よりも大きく（安全側）設定している。この影響は車輪上昇量の大きさにより異なるため、頻度分布を部分的に安全側に移行させる。
- ③ 理論値は、補正係数 β に営団 03 系車両を対象にした検討結果に基づくモデルを採用している。走行試験で採用した車両の β はこれよりも小さく、この影響は曲線全体が対象となるため、頻度分布全体（平均値）を安全側に移行させる。
- ④ 理論値は、内軌側横圧輪重比 κ に $\kappa=0.55$ を採用している。実際の κ が 0.55 よりも小さければ、頻度分布全体（平均値）を安全側に、大きければ危険側に移行させる。

7. まとめ

本報告においては、推定脱線係数比を、各種設計値を用いて算定する方法に対して、実際の車両諸元及び軌道狂いを反映させた算定式を提案し、その精度及び各パラメータの安全に対する余裕度を検討した。

精度については、各種補正方法を用いることにより、種々の車両、線形条件に対して、ほぼ十分な精度で輪重、横圧及び脱線係数を推定できた。

安全に対する余裕度については、①外軌側車輪の静止輪重比 γ を考慮しない場合の推定輪重（理論値）、②車輪上昇量を考慮しない推定輪重（理論値）、③補正係数 β を考慮しない場合の推定横圧（理論値）については、いずれも考慮した場合よりも安全側の評価となる。内軌側横圧輪重比 κ については、特殊条件を除けば、従来通り $\kappa=0.55$ を用いて差し支えないものと考えられる。

【参考文献】

- 1)運輸省事故調査検討会：「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」, 2000.10
- 2)石田他：「急曲線部の低速脱線走行試験」, 平成 14 年度鉄道技術連合シンポジウム, S7-2-1, 2002.11
- 3)大澤他：「軌道狂いを考慮した輪重横圧推定式の走行試験による検証」, 第 58 回土木学会年次学術講演会, IV-058, 2003.9