

論文 分岐器構造を考慮した走行安全性および部材強度の評価方法

塩田 勝利¹・及川 祐也¹・清水 紗希¹

¹正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 軌道構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: shiota.katsutohi.80@rtri.or.jp E-mail: oikawa.yuya.41@rtri.or.jp E-mail: shimizu.saki.69@rtri.or.jp

新しい分岐器構造を検討するためには、走行安全性の評価および軌道部材の強度評価を実施する必要がある。本研究では、走行安全性の評価と軌道部材の強度評価を分けることとし、走行安全性の評価は分岐器の線形のみを梁要素で模擬した簡略軌道モデルにより、部材強度の評価は簡略軌道モデルの解析結果の輪重、横圧を外力とし、その荷重をソリッド要素でモデル化した分岐器部材に1輪軸で静的に載荷する詳細モデルにより、それぞれ評価する手法を開発した。開発した評価手法を用いることで、分岐器全体をソリッド要素でモデル化し走行安全性と部材強度を同時に評価できるモデルより、計算時間を約70%減少できることを確認した。さらに、開発した手法を用いて分岐器構造を考慮した走行安全性に関するケーススタディを実施し、本評価手法の活用例を提案した。

Key Words : running safety, material strength, simplified track model, detail model, turnouts

1. はじめに

一般的に、新しい分岐器構造を検討するためには、走行安全性の評価および軌道材料の強度を評価する必要がある。その評価方法として、実物を製作し、走行試験による評価を実施する方法が考えられるが、新しい構造検討のために、実物の製作および走行試験を繰り返し行うことは現実的ではない。そのため、数値シミュレーションを用いて効率的に構造を検討することが現実的と言える。先行研究において、走行安全性の評価については、接触点解析を用いた分岐器における走行安全性の評価に関する研究¹などが取り組まれている。また、部材強度の評価については、有限要素法を用いてクロッシング部におけるレール支持方法の違いによりレール底部に発生する応力の差を評価するなどの研究²が取り組まれている。このように走行安全性と部材強度を個別に評価する研究は行われてきたが、これらの評価を包括的に扱った研究は少なく、新規構造を検討する際の効率的な解析方法の開発が必要であると考えられる。

そこで、本研究では分岐器構造に応じた走行安全性の評価および部材強度の評価を効率的に行う解析方法の開発に取り組んだ。

2. 分岐器構造の評価方法

本研究では、分岐器構造の走行安全性と部材強度を評価するにあたり、図1に示すように走行安全性の評価と

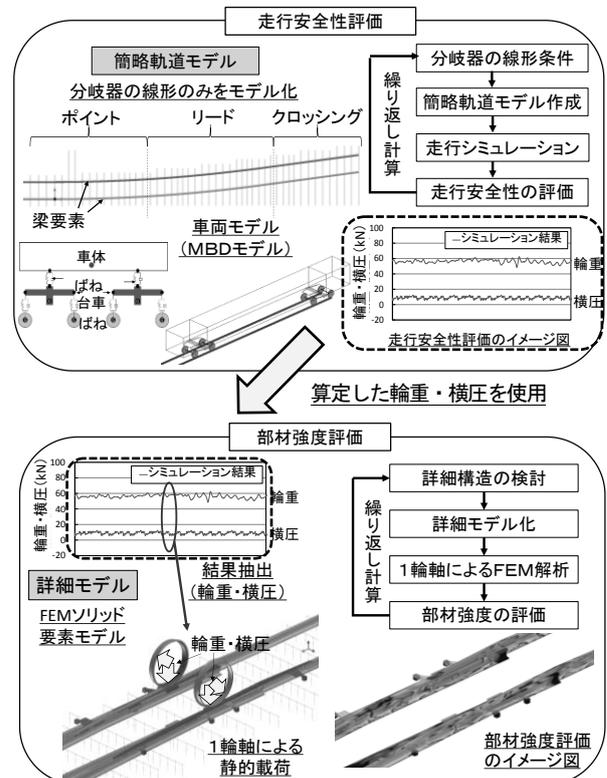


図1 評価方法の概要

部材強度の評価を分けて実施する手法を提案した。具体的には、走行安全性に関しては分岐器の線形のみを梁要素で模擬した簡略軌道モデルを用いて評価し、部材強度に関しては簡略軌道モデルの算定結果を用いて1輪軸で静的に載荷する詳細モデルを用いて評価するものである。

走行安全性の評価に関して、分岐器は一般軌道と比べると、乗り移り部やレールの断面変化があるなど複雑な構造を有しており、モデル化するにあたり作業の手間が多いなどの課題がある。そこで、分岐器部材の形状を詳細にモデル化することなく、分岐器の線形のみを梁要素で模擬することでモデル化の手間を減らし、より効率的に様々な分岐器構造の走行安全性を評価できる手法の開発に取り組んだ。

部材強度の評価に関して、その強度を正しく評価するためには、車両走行時の評価対象の軌道部材に加わる外力を正しく把握することが重要である。そこで、本評価手法では、車両走行時の軌道部材に加わる作用を簡略軌道モデルで算定した輪重、横圧を用いて、1輪軸を介し静的に載荷することで部材の応答を評価する手法の開発に取り組んだ。

提案する手法を用いて走行安全性と部材強度の評価をそれぞれ検討することにより、計算時間の短縮および各評価をそれぞれ切り分けて繰り返し検討することが可能などの利点がある。

以上の内容に基づき、走行安全性は線形のみを考慮した簡略軌道モデルによる評価、部材強度は簡略軌道モデルの解析結果を用いて1輪軸で静的に載荷する詳細モデルによる評価により実施する方法の開発に取り組むこととした。

3. 簡略軌道モデルによる走行安全性の評価方法

(1) 概要

2章で述べたように分岐器には乗り移り部やレールの断面変化があるなど一般軌道に比べて構造が複雑な箇所が存在する。これらの箇所を詳細にモデル化し、解析を実施するには手間がかかり、また、検討した線形が要件を満たさなかった場合、再度、乗り移り部や断面変化部をモデル化する必要があるため非効率である。そこで、効率的に様々な分岐器を評価するために、分岐器の線形のみを梁要素で模擬した簡略軌道モデルを用いて走行安全性を評価する手法の開発に取り組んだ。なお、走行安全性を評価する場合の解析手法として一般的にマルチボディダイナミクスを用いた解析手法が用いられることが多いが、本研究では、走行安全性の解析結果を部材強度の評価方法に用いることを想定し、非線形性を考慮した有限要素解析手法を選択した。解析には、並列化による高速化が容易である動的陽解法を用いた汎用のシミュ

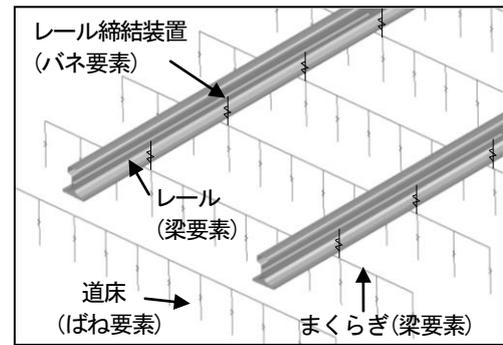


図2 簡略軌道モデル

表1 軌道モデルの各ばね定数

レール支持ばね定数 (左右) (レールまくらぎ間)	16kN/mm /1 締結
レール支持ばね定数 (上下) (レールまくらぎ間)	2000kN/mm /1 締結 (剛結相当)
まくらぎ支持ばね定数 (上下)	75.2kN/mm /まくらぎ*
まくらぎ支持ばね定数 (前後)	9.0kN/mm /まくらぎ*
まくらぎ支持ばね定数 (左右)	2.6kN/mm /まくらぎ*

*まくらぎ1本あたりのばね定数

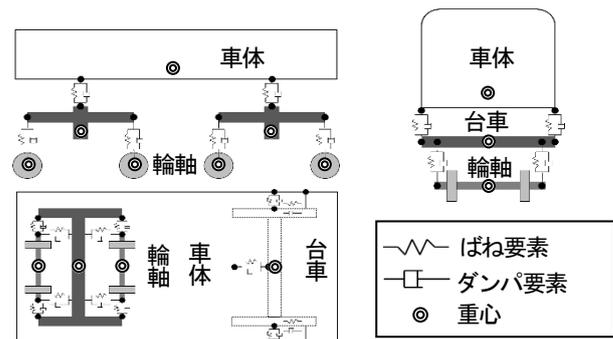


図3 車両モデル

レーションソフト「PAM-CRASH」を用いた。

(2) 解析モデル

a) 簡略軌道モデル

図2に軌道モデルの概略図を示す。レール、まくらぎは梁要素で、レールとまくらぎの間はレール締結装置を模擬したばね要素で、まくらぎ下はバラスト道床を模擬したばね要素でモデル化した。本モデルは分岐線側の線形のみを考慮した簡略軌道モデルであり、基本レールとトングレールの乗り移り部やトングレールの断面変化は考慮していない。なお、本論文における解析では表1に示すばね定数を用いた。

b) 車両モデル

図3に車両モデルの概略図を示す。車体、台車、輪軸を剛体でモデル化し、軸ばね、まくらばねおよび台車牽引リンクをばね要素およびダンパ要素でモデル化した。

表2 車両モデルの主要諸元

項目	諸元
車輪踏面	修正円弧踏面
台車中心間距離	14.4m
軸距	2.1m
台車形式	モノリンク式
ばね上質量	24.6ton
ばね間質量	1.5ton/台車
ばね下質量	1.5ton/台車
軸ばね定数 (上下)	1.12kN/mm
枕ばね定数 (上下)	1.26kN/mm
レール車輪間摩擦係数	0.3

なお、本報告書では表2に示す車両諸元を用いた。

(3) 妥当性の検証³⁾

a) 概要

提案する評価方法の妥当性を検証するために、特定の分岐器形状の簡略軌道モデルの作成および解析を行い、過去に実施した走行試験⁴⁾との比較を行った。また、本研究では有限要素法を用いた解析手法を採用しているが、解析手法自体の妥当性を検証するために、マルチボディダイナミクスを用いた汎用のシミュレーションソフト「SIMPAC」⁵⁾とも比較を行った。

b) 解析対象および解析条件

対象とした分岐器は、10番片開き分岐器（図面番号：T_{30N}片共-2）とした。車両の走行方向は、対向の分岐線側とし、走行速度は20km/hとした。また、走行試験時の軌道変位を解析モデルに設定した。なお、走行安全性の評価を行うことから、検証は、解析結果と試験結果の1軸目の輪重、横圧を比較した。走行試験の測定で用いる新連続輪重・横圧測定法では輪重、横圧データを100Hzで出力していることから、本解析結果にも100Hzのローパスフィルターを施した。構築した解析モデルの概略図を図4に示す。

c) 解析結果

図5に分岐器先端から後端に向かう方向を基準にトングレーール先端-2mからトングレーール先端12mの範囲における解析結果と走行試験結果の比較したものを示す。結果を確認すると、輪重、横圧の発生するタイミングが一致しており、解析結果の輪重、横圧の平均値は試験結果のそれぞれの平均値の約89%、81%であり、解析結果と

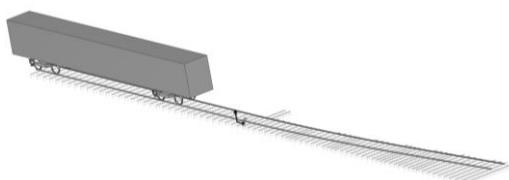


図4 解析モデル

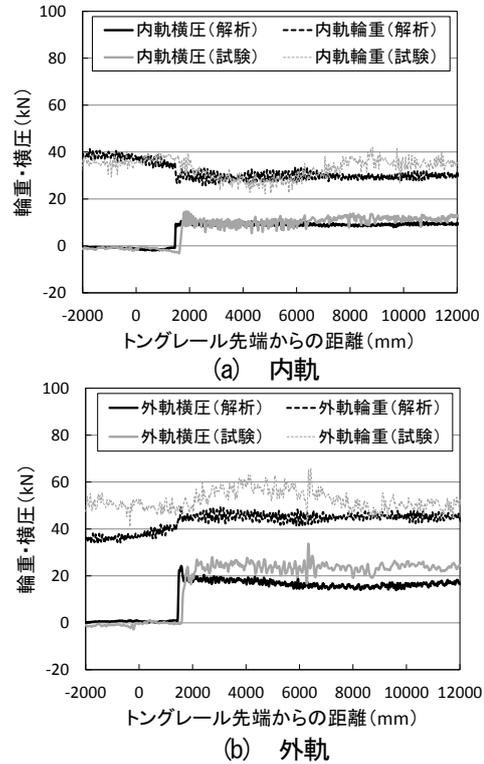


図5 簡略軌道モデル解析結果と試験結果の比較

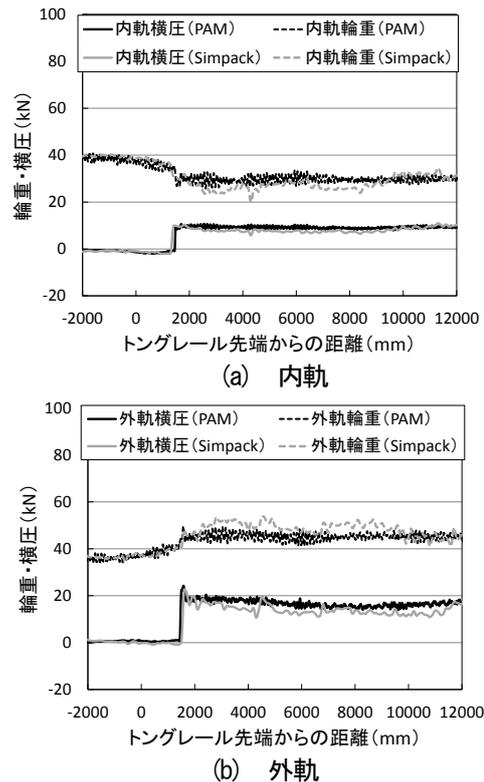


図6 本解析手法 (PAM) と SIMPAC の解析結果の比較

試験結果の傾向は概ね合致していた。外軌側の解析結果と試験結果に一部差があるが、これは、簡略軌道モデルではレールや車輪の設計断面と摩耗断面の差を考慮していないこと、摩擦係数の設定の違い、車両の輪重アンバランスを考慮していないことが影響している可能性がある。

図6に本解析手法 (PAM) と SIMPAC による解析結果

を比較したものを示す。図6の結果からSIMPACKの解析結果の輪重、横圧の平均値は、簡略軌道モデルの解析結果のそれぞれの平均値の96%、86%であった。この結果より、解析手法の違いによる影響は小さいものと考えられる。

d) 考察

簡略軌道モデルの解析結果と走行試験結果およびSIMPACKによる解析結果を比較したところ、概ね一致することを確認した。このことより、分岐器の線形のみを梁要素で模擬した簡略軌道モデルを用いて走行安全性を概ね評価できるものと考えられる。

4. 詳細モデルによる部材強度の評価方法

(1) 概要

新しい構造などの軌道部材の強度を正しく評価するためには、車両走行時の軌道部材に加わる外力を把握することが重要である。提案する部材強度の評価方法では、3章で述べた簡略軌道モデルの解析結果である輪重、横圧を外力として軌道部材に加えるものである。具体的には、評価対象とする分岐器構造をソリッド要素でモデル化し、簡略軌道モデルで算定した輪重、横圧を外力として1輪軸を介し静的に載荷する詳細モデルを用いることで、軌道部材の応答を評価する。

(2) 解析モデル

本章では、可動式横取り装置（以下、「横取り装置という」）を対象とし、詳細モデルを構築した。図7に詳細モデルの概略図を示す。詳細モデルでは、評価対象の

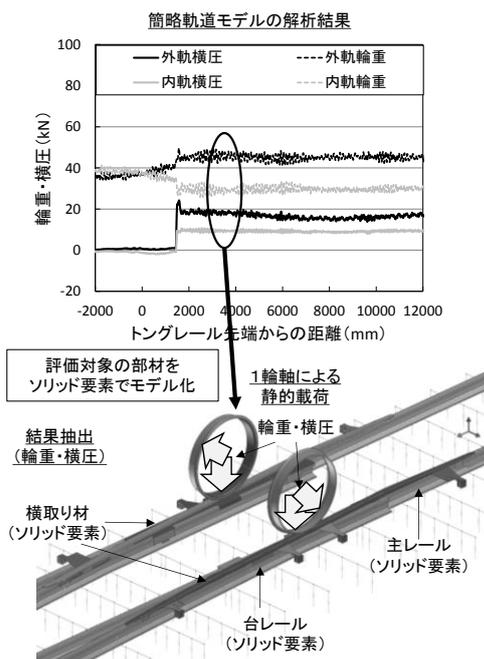


図7 詳細モデルの概略図

軌道部材をソリッド要素でモデル化する必要がある。本モデルでは、主レール、台レール、横取り材をソリッド要素でモデル化した。また、載荷方法は、任意の位置に1輪軸を配置した上で、簡略軌道モデルで算定した輪重、横圧を1輪軸の左右の車輪にそれぞれ静的に加えるものである。

(3) 比較検証

詳細モデルは軌道部材だけでなく分岐器の線形を含めてソリッド要素でモデル化したものである。そのため、1輪軸ではなく車両モデルを配置し、走行させる動的な解析を実施することも可能である。そこで、詳細モデルに車両モデルを配置し、動的な解析を実施した場合の解析結果と簡略軌道モデルの解析結果を用いて1輪軸で静的に詳細モデルに載荷した場合の解析結果を比較し、車両走行で加わる荷重による軌道部材の応答と1輪軸の静的載荷による軌道部材の応答について検証することとした。なお、詳細モデルを用いて車両走行解析を実施することで部材強度だけでなく走行安全性も同時に評価することが可能であるため、以下、このモデルを同時評価モデルという。

a) 解析対象および解析条件

解析対象は、前節で用いた横取り装置（図面番号：TGT_{SN}-1）とした。車両の走行方向は対向とし、走行速度は5km/hとした。なお、解析結果の比較として、図8に示す位置のレールに発生する直ひずみおよび横取り材に発生する直ひずみを比較することとした。位置については、レールに発生するひずみは各箇所におけるレールの腹部の中心位置とし、横取り材に発生するひずみは、各箇所における横取り材の厚み方向の中心位置とした。

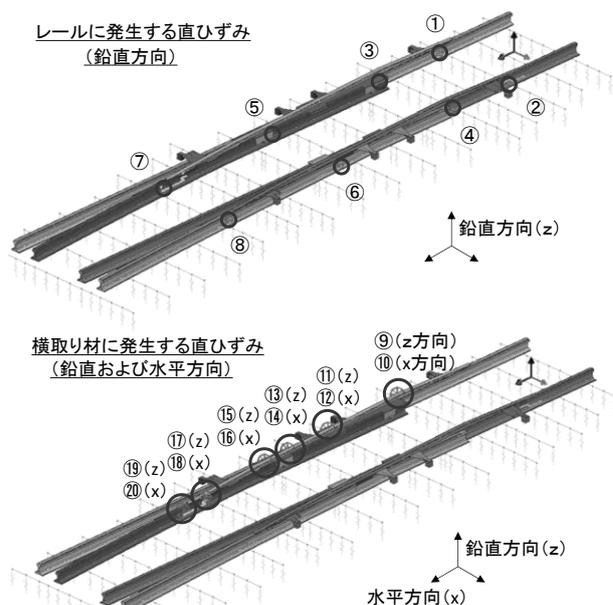
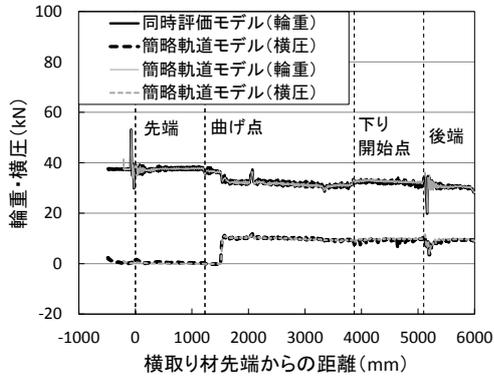
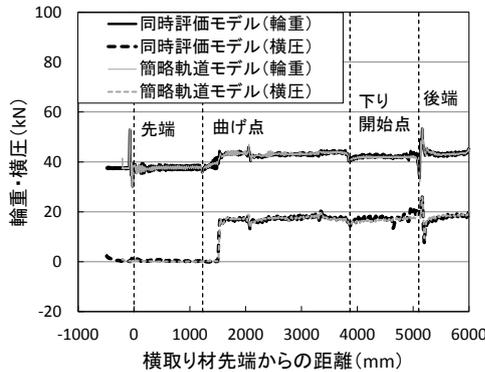


図8 軌道部材に発生するひずみの比較箇所



(a) 内軌



(b) 外軌

図9 同時評価モデルと簡略軌道モデルの走行安全性の解析結果の比較

また、図9に簡略軌道モデルと同時評価モデルで横取り装置を通過した際の輪重、横圧を比較したものを示す。簡略軌道モデルと同時評価モデルでは、走行安全性に関する結果が一致することが確認できる。以降の詳細モデルの検証では、図9に示す簡略軌道モデルの解析結果を入力する荷重として用いる。

d) 解析結果

図10に詳細モデルと同時評価モデルの解析結果を比較したものを示す。図10の結果より、詳細モデルの各位置におけるひずみの解析結果と詳細モデルの各位置におけるひずみの解析結果の整合度を全体で平均すると約77%であった。一部、解析結果に差があるがこれは、解析対

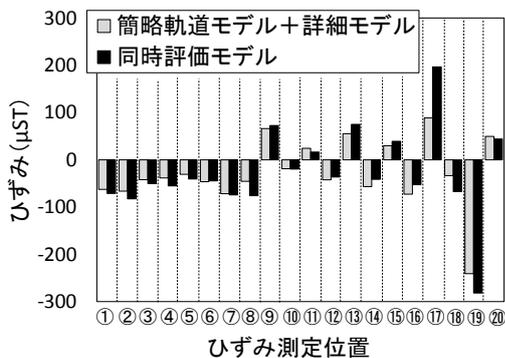


図10 解析結果の比較

象である横取り装置が複雑な構造の組み部材であるため、車両走行時と静的載荷時では、車輪と軌道部材の接触状態や軌道部材同士の接触状態などが異なる可能性が考えられ、解析結果に影響していると考えられる。これは横取り装置といった複雑な構造のため差が出ており、普通分岐器等においては大きな差は出ないと考えられるが、車両走行時と静的載荷時の接触状態の差が解析結果に与える影響の把握については、今後の課題としたい。

また、本ケースについて、走行安全性の評価および部材強度の評価に関する解析時間を比較すると、同時評価モデルに比べて、提案する評価方法では、約70%減少できることを確認した。

e) 考察

詳細モデルを用いて部材強度を評価する方法について検討を行った結果、同時評価モデルと詳細モデルで解析結果が概ね一致することを確認した。また、提案する評価方法を用いることで同時評価モデルより、計算時間を大幅に短縮することが可能である。

これらの結果より、1輪軸で静的に載荷する詳細モデルを用いることで、車両走行を模擬した部材の応答を評価できる可能性があることを確認した。

5. ケーススタディ

(1) 概要

前章までに、分岐器構造の評価を走行安全性と部材強度の2段階に分けて効率的に評価する方法を提案した。この評価方法は、新規構造の検討だけでなく、既存の分岐器構造の評価にも活用できるものと考えられる。そこで、本章では、提案する評価方法の活用例として、様々な分岐器構造の走行安全性に関するケーススタディを実施した。

対象とする分岐器は、在来線用12番片開き分岐器、構造的な平面性変位を有する側線用8番片開き分岐器の2ケースとした。

表3 解析条件

パラメータ	条件
走行速度	30km/h
	45km/h
	60km/h
通り変位 (トングレール先端位置)	変位なし
	10mm
	15mm
	20mm
水準変位 (トングレール先端位置)	変位なし
	10mm
	15mm
	20mm

(2) 在来線用12番片開き分岐器

a) 概要および解析条件

対象分岐器を在来線用12番片開き分岐器 (T_{50N}片12-101, 左開き) とし, 表3に示すパラメータの変化が走行安全性に及ぼす影響について確認した. 走行速度については, 12番分岐器分岐線側の制限速度である45km/hを基準に30km/h, 60km/hの3条件を設定した⁵⁾.

通り変位については, 走行速度45km/hでトンダレール先端位置において左右レールともに外軌側 (右レール側) に, 逓減距離5mで20mm, 15mm, 10mmの通り変位と変位なしの4条件を設定した. 水準変位については, 走行速度45km/hでトンダレール先端位置において右レールが低くなるよう逓減距離5mで20mm, 15mm, 10mmの水準変位と変位なしの4条件を設定した. 走行安全性の評価には, 右車輪 (曲線外軌側) の輪重横圧が影響することから, 右車輪の1軸目の解析結果を評価対象として

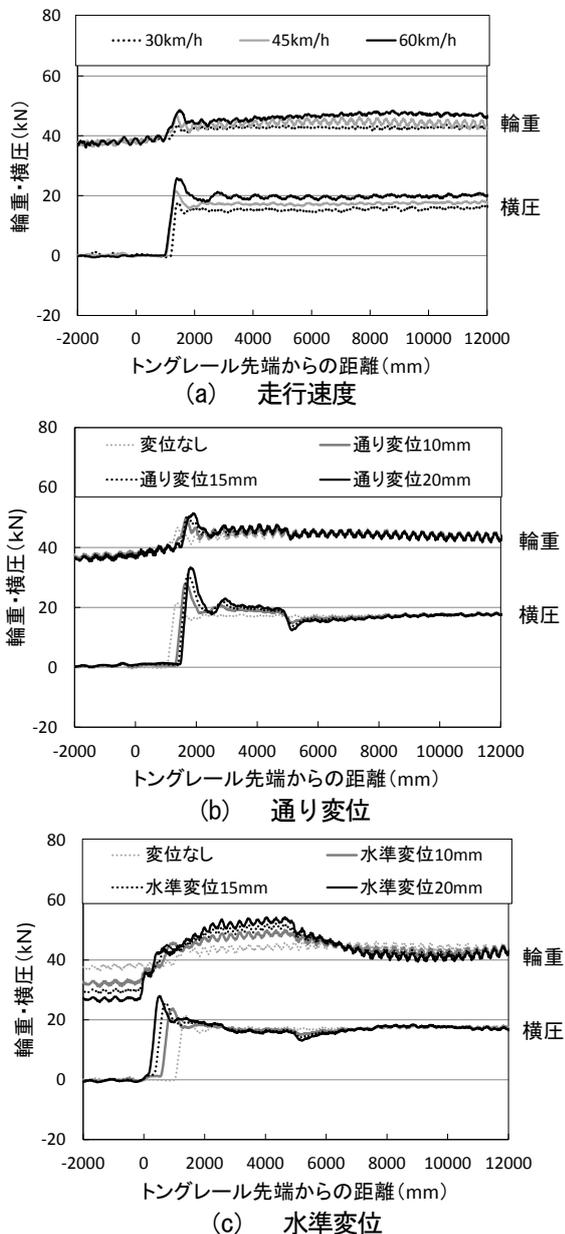


図 11 各ケースにおける解析結果

用いることとした. なお, 解析手法の特徴により, 解析結果に微小な振動が生ずるため, 解析結果には50Hzのローパスフィルターを施した.

b) 解析結果

図11に各ケースにおける解析結果を示す.

走行速度の影響については, 速度が上がるにつれて発生する輪重および横圧ともに増加する傾向がみられた. これは, 速度増加により輪重, 横圧の定常分が増加したものと考えられる.

通り変位の影響については, 変位が大きくなるにつれて輪重の変動はあまりみられないが, 横圧が増加する傾向がみられた. これは, 外軌側に膨らむ軌道変位により車両が外軌側に寄り, その影響を受けて横圧が増加した結果と考えられる.

水準変位の影響については, 変位が大きくなるにつれて輪重が減少し, 横圧が増加する傾向がみられた. これは, 外軌側が低くなるにつれて外軌側の輪重が減少するとともに, 内軌側の輪重が増加することにより, 転向横圧が増加した結果と考えられる.

c) 考察

在来線用12番分岐器の分岐線側対向走行において, 走行速度, 通り変位, 水準変位を設定した上で解析を実施した結果, 各パラメータが走行安全性に及ぼす影響を評価できることを確認した.

これらの結果が示すように, 簡略軌道モデルを用いて既存の分岐器構造における走行安全性の評価が可能であることを確認した.

(3) 側線用8番片開き分岐器

a) 概要および解析条件

構造的な平面性変位を有している側線用8番分岐器 (T_{50N}片8-201) を対象に簡略軌道モデルを作成し, 走行安全性を評価した.

側線用8番分岐器では, トンダレールが基本レールより10mm高くなっており, ポイント部で構造的に10mmの平面性変位が存在していること, さらに, 直線ポイントであるためトンダレール先端で軌道の角折れが存在していることなどの特徴を持っている. この構造的な平面性変位や軌道の角折れにより外軌側の輪重が減少し, 横圧が増加しやすい傾向があるため, 車両条件, 軌道状態, レールと車輪の接触状態, 気象条件などについて悪条件が重なると脱線することがあり, 走行安全性を把握することは重要である. そこで, 上記の条件を考慮し, 線形のみを梁要素でモデル化した簡略軌道モデルを作成し, 走行安全性を評価することとした.

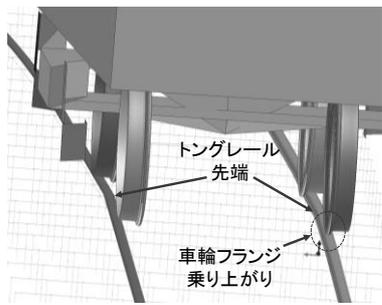


図12 車輪フランジの乗り上がり³⁾

表4 解析条件

パラメータ	条件
走行速度 (軌道変位なし・摩擦係数0.3)	20km/h
	30km/h
	40km/h
水準変位 (トングレール先端位置) (速度20km/h・摩擦係数0.3)	変位なし
	10mm
	15mm
	20mm
レール・車輪間 摩擦係数 (速度20km/h・軌道変位なし)	0.2
	0.3
	0.4

これまでの研究において簡略軌道モデルを用いて悪条件を設定した場合に、図12に示すように車両が乗り上がる挙動を再現できることを確認した³⁾。実際の脱線は、様々な要因が相互に影響し発生するものと考えられる。そこで本研究では、走行速度、水準変位、レール車輪間の摩擦係数といった走行安全性の低下に影響を及ぼす要因についてこれらの要因の変化が走行安全性に及ぼす影響を把握することを目的に、表4に示す条件でパラメータスタディを実施した。なお、水準変位については、走行安全性の低下に与える影響が大きくなるようトングレール先端位置において逡減距離2mで各値を設定した。

b) 解析結果

解析結果を図13に、各ケースの脱線係数の最大値を示したものを図14に示す。

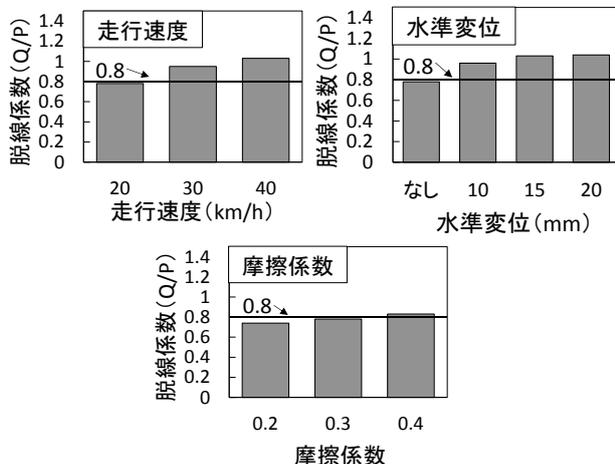
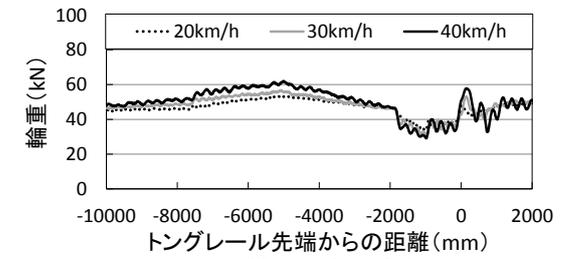
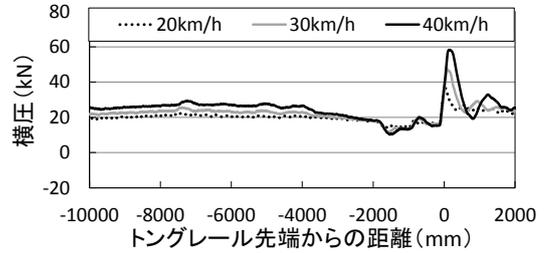


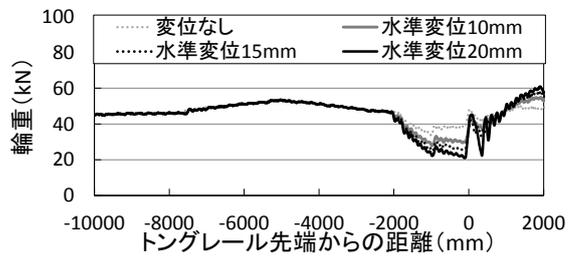
図14 各ケースにおける脱線係数の最大値



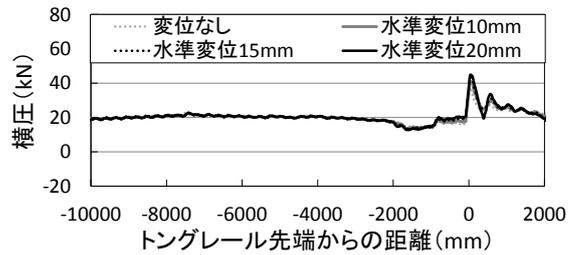
(a) 輪重 (走行速度)



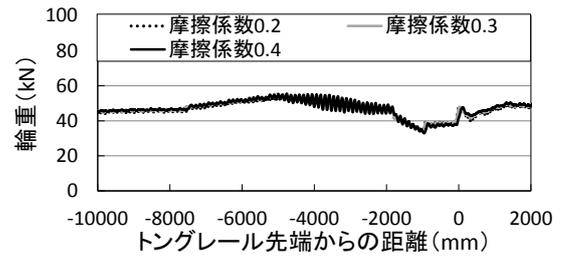
(b) 横圧 (走行速度)



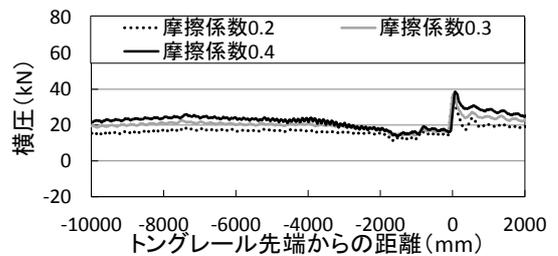
(c) 輪重 (水準変位)



(d) 横圧 (水準変位)



(e) 輪重 (摩擦係数)



(f) 横圧 (摩擦係数)

図13 解析結果

走行速度の影響については、速度が上がるにつれ、発生する横圧の最大値が大きくなる結果となった。また、輪重については、若干大きくなる傾向がみられた。脱線係数を確認すると、走行速度が上がるにつれ大きくなり、30km/h以上では、脱線係数の目安値である0.8を超える結果となった。これらは、トングレール先端位置では角折れが存在するため、走行速度が増加するにしたがい、角折れでの衝撃が大きくなるため、発生する横圧が大きくなった結果を表しているものと考えられる。

水準変位の影響については、変位が大きくなるにつれ、輪重の減少量が大きくなる結果となった。また、横圧についても同様に、変位が大きくなるにつれ、増加する傾向がみられた。脱線係数を確認すると、変位の増加に応じて大きくなり、水準変位を設定した全てのケースで脱線係数の目安値である0.8を超える結果となった。これらは、本分岐器は構造的に平面性変位を有していることに加え、外軌側のみ低くなるよう設定していることにより、輪重が大きく減少した結果を表しているものと考えられる。水準変位は、外軌側の輪重の減少および横圧の増加に関連し、走行安全性に大きく影響を与えるものと考えられる。

摩擦係数の影響については、摩擦係数が小さくなるにつれ、平均的に横圧が減少する傾向となった。輪重については摩擦係数の大きさに関わらずあまり変動はみられない結果となった。これらの結果より、レール塗油などにより摩擦係数を小さくすることは、横圧の低減に有効であるものと考えられる。

c) 考察

構造上の軌道変位を有している側線用8番分岐器を対象にパラメータスタディを実施し、各条件の変化が走行安全性に及ぼす影響を評価できることを確認した。

以上の結果より、簡略軌道モデルを用いて、脱線対策に関する検討を行うことが可能であると考えられる。

6. まとめ

新しい分岐器構造を検討するためには、走行安全性の評価および軌道部材の強度評価を実施する必要がある。そこで、本研究では分岐器構造の評価を分岐器の線形のみを考慮した簡略軌道モデルによる走行安全性の評価と、簡略軌道モデルの算定結果を用いて1輪軸で静的に載荷する詳細モデルによる部材強度の評価に分けて実施する手法を開発した。

また、開発した評価方法を用いて、在来線用12番片開き分岐器、側線用8番片開き分岐器の走行安全性に関するケーススタディを実施した。その結果、簡略軌道モデルを用いて、軌道状態や走行条件が走行安全性に及ぼす影響を把握できることを確認し、本評価手法の活用例を示した。今後は、本評価方法の高精度化について検討するとともに、さらなる活用法などについても検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 中橋順一：車輪／トングレールの接触を考慮した分岐器通過解析，鉄道総研報告 vol.27, 2013.
- 2) 及川祐也他：新幹線用レール鋼製ノーズ可動クロッシングの開発，鉄道総研報告 vol.29, 2015
- 3) 塩田勝利，及川祐也：分岐器の線形のみを考慮した簡略モデルによる走行安全性の評価手法，第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム，2017.
- 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，2014.
- 5) 佐藤泰正：分岐器の構造と保守，日本鉄道施設協会，p.150, 2013

(2018.4.6 受付)

EVALUATION METHOD OF TRAIN RUNNING SAFETY AND TRACK MATERIAL STRENGTH IN CONSIDERATION OF TURNOUTS STRUCTURE

Katsutoshi SHIOTA, Yuya OIKAWA

In order to examine a new turnout structure, we have to carry out evaluation of its train running safety and track material strength. Therefore, in this study, we proposed a method to evaluate train running safety and a method to evaluate track material strength separately. Regarding the evaluating the train running safety, we used a simplified track model in consideration of only the linear shape of turnout. Regarding the evaluating the track material strength, we used a detail model which applies the static load of 1 wheel-set to the track material based on the output of simplified track model.

In addition, we carried out case studies of the No.12 simple turnout and the No.8 side track turnout with respect to evaluation of train running safety. As a result, we confirmed that we could grasp the effects of track condition on train running safety by using the simplified track model and could show an example of its usage of the evaluation method.