

1/10 模型車両による側壁誘導試験と 数値シミュレーション

葛田 理仁* 児玉 真一* 金元 啓幸**
宇治田 寧*** 西山 幸夫#

Experiments and Simulations of Guiding 1/10 Scale Model Vehicle
by Guard Fence

Masahito KUZUTA Shinichi KODAMA Hiroyuki KANEMOTO
Yasushi UJITA Yukio NISHIYAMA

It is conceivable that a moving railroad vehicle might collide with a structure when the train derails because of a natural disaster. However, the dynamic behaviors of the vehicle and the structure have not been well examined so far from the viewpoint of the collision of the vehicle with the structure. Hence the authors conducted model experiments using a 1 to 10 scale model vehicle and obtained the data of its motions and acting forces. In the experiments, the lateral side of the model vehicle was deliberately contacted with a side wall. The authors also developed a numerical simulation program to simulate this experiment and compared the results of the experiments with the simulations. Our numerical results have shown a good coincidence with the experimental results in terms of the lateral acceleration of the vehicle and the contacting force between the vehicle and the side wall.

キーワード：車両運動，模型試験，脱線，誘導用側壁，数値シミュレーション

1. はじめに

2004年に新潟県中越地震により新幹線車両が高速走行中に脱線した事故以降，自然災害により鉄道車両に生じる被害を低減するための技術開発が盛んに行われている¹⁾²⁾。自然災害等により鉄道車両が脱線した状態で走行した場合，脱線後の車両運動の状況によっては線路に近接する構造物に接触する可能性がある。そこで，著者らは脱線後の車両挙動に関する研究の1つのステップとしてこのような状況下での現象把握に資するため，車体側面を連続的に接触させて車両を地上構造物と干渉しない位置まで誘導するようなガイド状の構造物（以下，本文では側壁と称する）に車体が接触しながら走行する場合の挙動や接触荷重を調べることを目的として，1/10 模型車両を用いた模型試験を行った。さらに，模型試験における側壁や車体左右ガイドとの接触を考慮できる力学モデルについて検討し，模型試験に対応する数値シミュレーションを実施して車両の運動形態や側壁との接触荷重等について数値シミュレーションの妥当性について検討した。

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室
** 車両構造技術研究部 車両運動研究室
*** 車両構造技術研究部 車両強度研究室
(現 研究開発推進室 計画)
研究開発推進室 設計・試作

2. 1/10 模型車両による側壁誘導試験

車体を誘導する側壁に接触して走行する車両の挙動および側壁との接触荷重を調査・測定する目的で，走行速度 100km/h（実車換算約 320km/h，模型車両の相似則については文献 3）を参照）までの模型車両走行試験を実施した。

2.1 1/10 スケール模型車両

走行試験に用いた模型車両は過去に実施した試験³⁾⁴⁾で用いたものと同じの 1/10 スケールの車両であり，標準的な新幹線車両を参考に車体重量，寸法を相似に近づけた。ばね系については，模型車両のばね系運動方程式において実車と加速度が同一となるような相似則を採用した。代表的な諸元を表 1 に示す。

表 1 主要諸元

縮尺	1/10
重量	約 50kg
車体長	2.45m
車体幅	0.34m
台車中心間隔	1.75m
軸距	0.25m
車輪径	0.086m
軌間	0.1435m

特集：鉄道力学

2.2 走行路および側壁の構成

本試験で用いた、側壁を含む走行区間の概略図を図1に示す。まくらぎ方向に対する車両の案内は、側壁手前3m程度までは走行路上の溝によって車輪を案内する方法(図2)とした。これに続く誘導区間には、車体下部が接触するような側壁を設け、側壁によって車体を案内させながら走行させて、その際の車両挙動および側壁への接触荷重を測定した。側壁は、車体と直接接する接触部と接触部を支持する支持部の2重構成とし、接触部と支持部との間にフォースセンサを設けて接触荷重を測定できるようにした(図3)。また、側壁の接触部にアルミ板を取付け、レーザー変位計により進行方向に4箇所、各箇所上下2点の合計8点の左右変位を測定した。側壁の接触部のうち、主に車体下部と接触する車体下部接触部については、ガイドライナーベース部(アルミ材)とガイドライナー(MCナイロン)との間に緩衝材を挟み、緩衝材の種類を変更することで接触剛性を変更できるようにした(図4)。緩衝材については弾性率の小さい順にA:制振ゴム(ハネナイトGP-60L)B:ウレタンゴム(ポリエーテル系シート, ショア硬さ90)C:MCナイロンの3種を使用した。

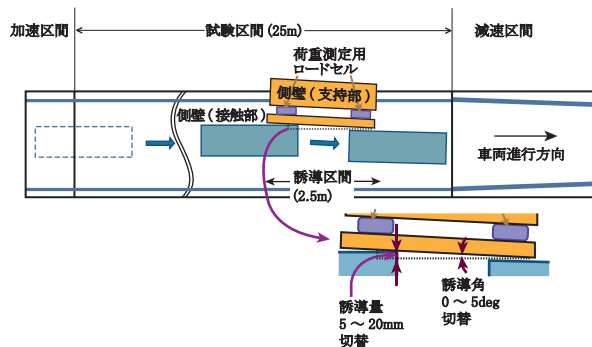


図1 1/10 模型車両側壁誘導試験 概略図

2.3 試験条件および測定項目

側壁緩衝材の種類・走行速度・側壁誘導角(側壁の設置角度)・側壁誘導量(側壁の内軌側への張出量)を各々設定して各条件で2~3回程度、全体で150試番程度の走行試験を行った。表2に今回の試験の試験条件を示す。

車両の走行速度については、車体がレーザー光を遮った時間から速度を求める方式の速度計を試験区間入口と出口とにそれぞれ設置して計測を行った。車両の加速度・角速度については、車体中央付近に前後・左右の加速度センサおよびヨー・ロール角速度センサを、各台車枠の中央付近に左右加速度センサおよびヨー角速度センサを、それぞれ設置して計測した。計測した加速度・角速度データは車上に設置したデータロガーに保存した。なお、データロガーの駆動には出力12Vのノートパソコン用充電器を使用し、なるべく車体重量が増加しないように配慮した。この他に、走行中の模型車両について、側壁部の直上から高速カメラ(1000fps)による撮影を行うとともに、減速区間の上方から高速カメラ(300fps)による撮影を行った。

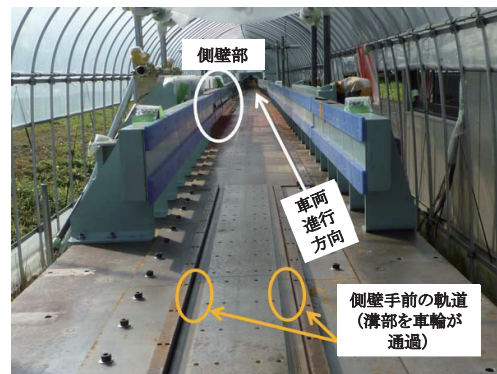


図2 側壁手前までの模型軌道

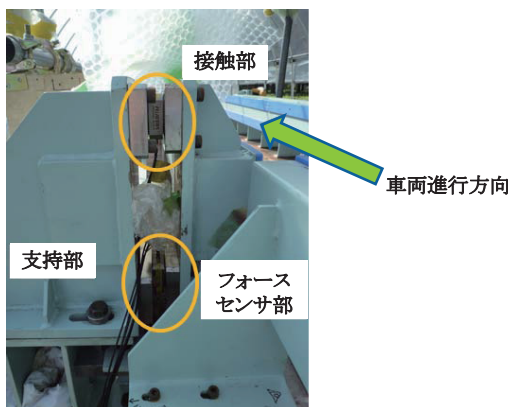


図3 接触部・支持部およびフォースセンサ部

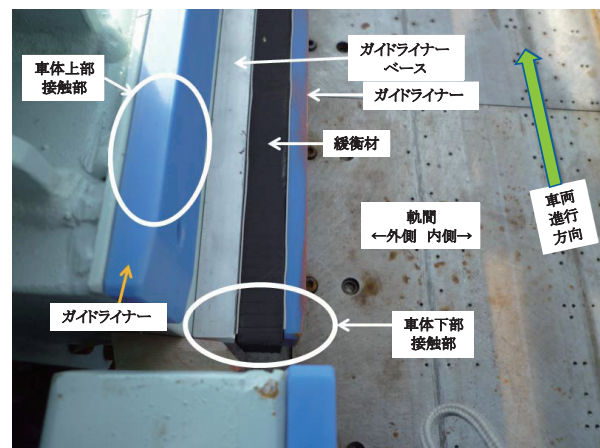


図4 車体下部接触部の構成

表2 試験条件

側壁緩衝材の種類	A, B, C	
走行速度 (km/h)	呼び	実測値
	30	20 ~ 30
	60	60 ~ 70
	100	90 ~ 100
	※実車換算 100,200,300km/h を目標	
側壁誘導角 (deg)	0.5, 1.0, 3.0	
側壁誘導量 (mm)	10, 20 0.5deg の場合のみ 10, 15	

2.4 試験結果と考察

2.4.1 車両の運動形態

試験後に 300fps の高速度撮影動画より側壁と接触する回数と、車体が接触した部位の順序のパターンを調べた。その結果、側壁と

- ・1 回接触する場合 → P, R
- ・2 回接触する場合 → PP, PQ, PR
- ・3 回接触する場合 → PPP, PPQ, PPR, PRR

の 9 パターンが見られた。各パターンのそれぞれの英字は車体の接触部位を表し、P：車体の前角部、Q：車体側面、R：車体の後角部である。以下では車体と側壁が接触した順番に接触 1、接触 2、接触 3 と記す。もし側壁と 2 回または 3 回接触した場合は接触 2、接触 3 が存在し、パターンを表す記号が 2 文字または 3 文字となる。これらのうち、“R” は全試番のうち 1 試番のみであった。また、誘導角が 0.5, 1deg の走行速度 30km/h の場合のみ“PP”または“PP*”（*は P,Q,R のいずれか）となった。走行速度と側壁誘導角によって運動形態には特徴があり、

- ①側壁誘導角 3deg, 走行速度 30km/h の条件では全て“P”であった（全試番のうち上記以外に“P”となったのは 4 試番のみであった）。
- ②側壁誘導角 3deg, 走行速度 60km/h または 100km/h の条件では全て“PQ”であった。このとき、車体は P 部で進行方向左側の側壁と接触した後、進行方向右

側の車体左右ガイドと接触し、その次に Q 部で側壁と接触していた（全試番のうち上記以外に“PQ”となったのは 6 試番のみであり、これらは進行方向右側の車体左右ガイドとは接触せずに Q 部で側壁と接触した）。

- ③上記で言及していない大部分の試番についてはパターン PR（図 5）もしくはパターン PRR であった。これらも進行方向右側の車体左右ガイドとは接触せずに R 部で側壁と接触した。

これらの他に、試験結果から次のような結果を得た。

- ・接触 2 または接触 3 の接触 1 からの経過時間について調べると、走行速度別に 30km/h の場合は 0.264 ~ 0.410s, 60km/h の場合には 0.054 ~ 0.121s, 100km/h では 0.038 ~ 0.073s であり、接触 1 からの経過時間は主に走行速度に依存し、側壁誘導角には依存しなかった。
- ・試験区間の入口と出口での速度差について調べると、走行速度別に 30km/h の場合は 0.3 ~ 0.9km/h, 60km/h の場合には 0.1 ~ 1.2km/h, 100km/h の場合では 0.1 ~ 1.2km/h であった。

2.4.2 側壁との左右方向接触荷重

側壁との最初の接触（接触 1）とそれ以降（接触 2 以降）の接触に分けてデータ整理を行った。側壁誘導角と走行速度の条件別に整理すると、接触 1、接触 2,3 において側壁に作用した左右方向接触荷重の最小値、最大値は表 3 のようであった。

表 3 から、接触 1 での接触荷重は最小の場合 450N 程度、最大で 11.3kN 程度、接触 2 での接触荷重は最小の場合 280N 程度、最大で 11.7kN 程度であった。これより、接触 1 と接触 2,3 とでは条件によっては同程度の接触荷重が生じる場合があることが分かった。また、左右方向接触荷重は走行速度と側壁誘導角に依存する一方、側壁誘導量の大きさに対しては明確には依存しなかった。側壁緩衝材の種類による接触荷重の違いについては、側壁誘導角が小さい条件（0.5deg, 1deg）では実際の誘導量のばらつき（側壁区間の手前で車輪の案内が終了すると車体が僅かにヨー角を持ち得るため）によって側壁との接触位置が進行方向に大きく動くことによる影響が大き

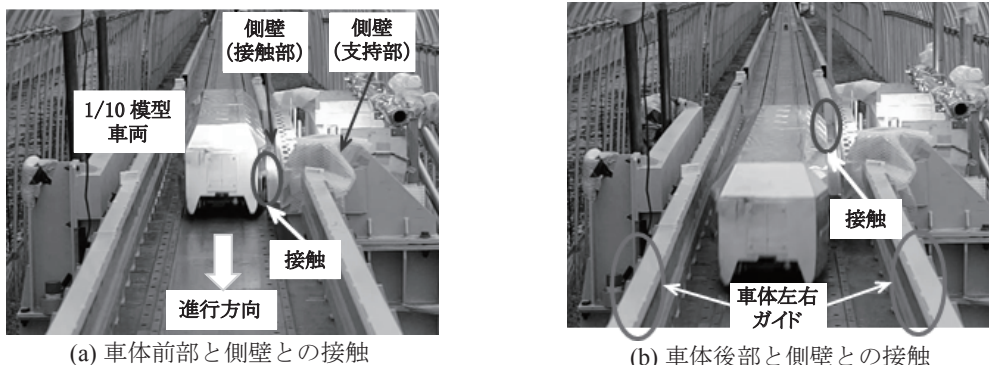


図5 模型車両と側壁との接触パターン（パターン PR の場合）

表3 左右方向接触荷重の最小値，最大値（単位 [kN]）

(a) 接触 1				(b) 接触 2, 3			
走行速度 (km/h)	側壁誘導角 (deg)			走行速度 (km/h)	側壁誘導角 (deg)		
	0.5	1	3		0.5	1	3
30	0.451 ~ 0.941	0.768 ~ 1.83	1.52 ~ 4.02	30	0.284 ~ 0.666	0.341 ~ 0.995	
60	0.929 ~ 2.21	1.83 ~ 3.57	3.01 ~ 7.08	60	0.579 ~ 2.25	1.57 ~ 3.65	1.49 ~ 5.53
100	1.05 ~ 2.09	2.34 ~ 3.47	5.56 ~ 11.3	100	1.67 ~ 3.33	2.61 ~ 5.12	2.73 ~ 11.7

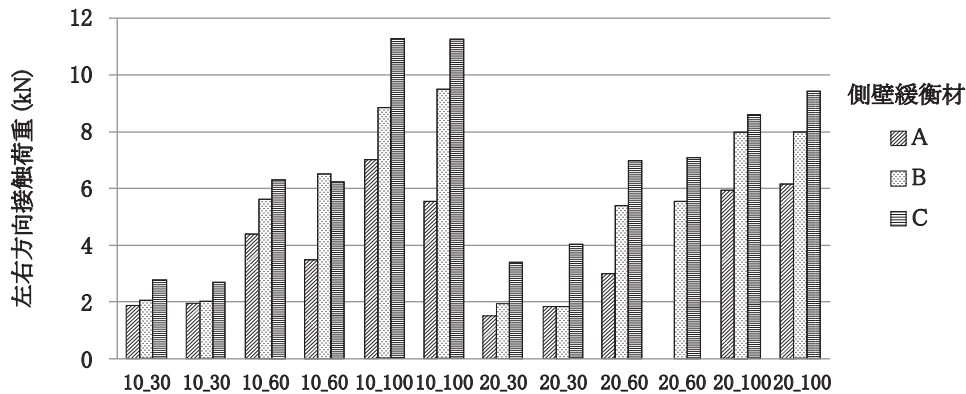


図6 左右方向接触荷重（側壁誘導角 3deg，接触 1 の場合）
（横軸の条件表示は（誘導量）_（走行速度）を表す）

いことが示唆され、緩衝材種別による差異は明確にならなかった。一方、側壁誘導角 3deg の条件では側壁への接触位置のばらつきが他の条件よりも小さい傾向にあり、大部分の試番で接触荷重の大きさが緩衝材 A < 緩衝材 B < 緩衝材 C となっていることが図 6 より見て取れる。

2.4.3 車体左右加速度

前項と同様に、側壁との最初の接触（接触 1）とそれ以降（接触 2 以降）の接触に分けてデータを整理した。表 4 (a) には側壁誘導角と走行速度の条件別に整理した接触 1 での車体左右加速度の最小値，最大値（単位 [m/s²]）を示す。表 4 より、加速度の大きさは接触 1 では最小の場合 17m/s² 程度，最大で 748m/s² 程度であった。一般に、測定された加速度には弾性振動等の剛体運動として扱う周波数域よりも高周波の成分が含まれるため、表 4 (b) には原波形に 0.2 ~ 50Hz のバンドパスフィルタ (BPF) 処理を行った後で求めた、接触 1 での車体左右加速度の最小値，最大値を示した。バンドパスフィルタ処理後の車体左右加速度は最小の場合 1m/s² 程度，最大で 34m/s² 程度，接触 2 では最小の場合 0m/s² 程度，最大で 37m/s² 程度であった。

3. 模型車両走行試験に対する数値シミュレーション

3.1 車両のモデル化

既開発の 3 次元車両運動シミュレーション⁵⁾ を拡張し、走行中に側壁と接触して走行する現象を解析することが可能な数値シミュレーションプログラムを開発した。1 車両は輪軸 4 個，台車枠 2 個，車体の合計 7 個の剛体から構成され，それぞれが 7 自由度（回転姿勢をオイラーパラメータで表現するため）を持っており，計算の際には合計で 49 自由度となる。

3.2 側壁及び側壁と車体との接触のモデル化

側壁については、側壁の支持部と慣性系の間をばね要素で結び、側壁の剛体運動の固有周期が実測値と概ね符合するようにばね定数を与えた。側壁の接触部と支持部の間には、4 箇所にはばね要素をおいた。このばね要素は実験におけるフォースセンサに相当する。側壁の接触部と車両の間の接触荷重は接触ばねにより表現した。緩衝材 A ~ C 各々について FEM を用いた部材レベルでの

表4 接触 1 での車体左右加速度の最小値・最大値（単位 [m/s²]）

(a) 原波形				(b) BPF 後			
走行速度 (km/h)	側壁誘導角 (deg)			走行速度 (km/h)	側壁誘導角 (deg)		
	0.5	1	3		0.5	1	3
30	-17 ~ -43	-14 ~ -86	-87 ~ -190	30	-2 ~ -4	-1 ~ -6	-11 ~ -13
60	-35 ~ -91	-77 ~ -150	-230 ~ -447	60	-5 ~ -7	-5 ~ -11	-10 ~ -27
100	-36 ~ -151	-103 ~ -225	-302 ~ -748	100	-6 ~ -10	-7 ~ -13	-12 ~ -34

検討を行い、側壁の接触部に荷重を載荷した場合の表面変位から、ばね定数の範囲を $k=9 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7 \text{N/m}$ と見積もり、シミュレーション結果と試験結果とを比較しながらばね定数を絞り込み、 $k=1.8 \times 10^6 \text{N/m}$ (緩衝材 A)、 $2.8 \times 10^6 \text{N/m}$ (緩衝材 B)、 $3.8 \times 10^6 \text{N/m}$ (緩衝材 C) 程度の値を用いることとした。側壁と車体進行方向左側面の接触については両者を線分とみなして時刻歴解析中の各時刻ステップにおいて線分の交差判定を行い、車体前角部と側壁、車体後角部と側壁、および車体側面と側壁の接触が模擬できるようにした。また、側壁の場合と類似した力学モデルで誘導区間通過後の進行方向左右にある車体左右ガイド等についても接触判定を行って接触を考慮できるようにした。

軌道については、全長 20m の平板状の走行区間を設け、側壁を 11 ~ 13.5m の部分に配置し、模型試験の場合と側壁誘導角・側壁誘導量・走行速度を同等の条件として与え、数値シミュレーションを実行した。図 7 には数値シミュレーションの結果を可視化した例を示す。

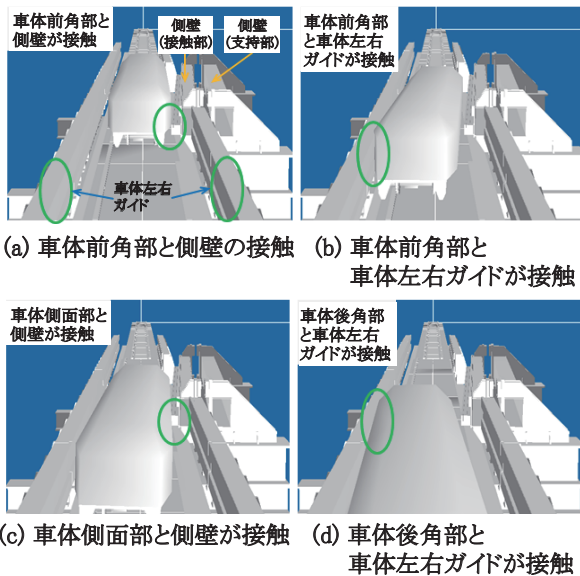


図 7 数値シミュレーションの例 (誘導角 3deg, 誘導量 20mm, 速度 60km/h の場合, パターン PQ)

3.3 シミュレーション結果

3.3.1 車両挙動

走行シミュレーションの結果、2.4.1 項に示した①～③の特徴を数値シミュレーションによってほぼ正確にとらえることができた。①については次項の図 9 (c) で側壁誘導角 3deg, 30km/h の条件では接触 2 以降の荷重データが存在しないことから接触 2 が発生しないことが確かめられる (試験結果表 3 (b) の 3deg, 30km/h が空欄となっていることに対応する)。②については、計算結果から車両挙動を可視化すると図 7 に示すようになることから確認できる。③については、計算結果にお

いても側壁区間通過中に P 部→R 部の順で接触し進行方向右側の左右ガイドとは接触しないことを確かめた。一例として、緩衝材 C, 側壁誘導角 1deg, 側壁誘導量 20mm, 100km/h の条件の側壁区間での車両左右加速度 (BPF 後) の波形を図 8 に示す。図 8 より、計算結果と試験結果の加速度波形は概ね一致しており、側壁と接触する際の加速度の大きさや時間間隔についても計算結果はよく特徴を捉えていることが見て取れる。

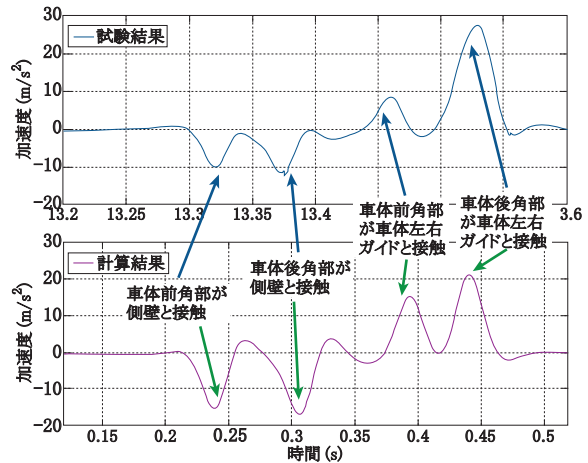


図 8 車体左右方向加速度 (試験結果と計算結果の比較, 誘導角 1deg, 誘導量 20mm, 速度 100km/h)

3.3.2 接触荷重

計算から得られた、側壁と車両が接触したときに作用する左右方向接触荷重について、側壁との最初の接触 (接触 1) とそれ以降 (接触 2, 3) の接触に分けてデータを整理した。側壁誘導角と走行速度の条件別に、接触 1, 接触 2, 3 において側壁に作用する左右方向接触荷重の範囲を試験結果と併せて図 9 に示す。図 9 より、本研究で開発したシミュレーションモデルによって側壁との接触荷重を定量的に概ね正しく推定できていることが確認できる。

3.3.3 車体左右加速度

計算により得られた車体左右加速度について試験結果との比較を行った。図 10 には接触 1 における車体左右加速度に対して 2.4.3 項と同じバンドパスフィルタ処理を行った結果得られた左右加速度の範囲を試験結果と併せて示す。図 10 より、計算結果の方が試験結果に比べてやや絶対値が大きくなる場合があるが、概ね定量的に正しく推定できていることが分かる。

4. まとめ

鉄道車両が脱線した状態で走行した場合には、車両が線路に近接する地上構造物と接触する可能性がある。そこで、車両の車体側面を連続的に接触させて車体を地上

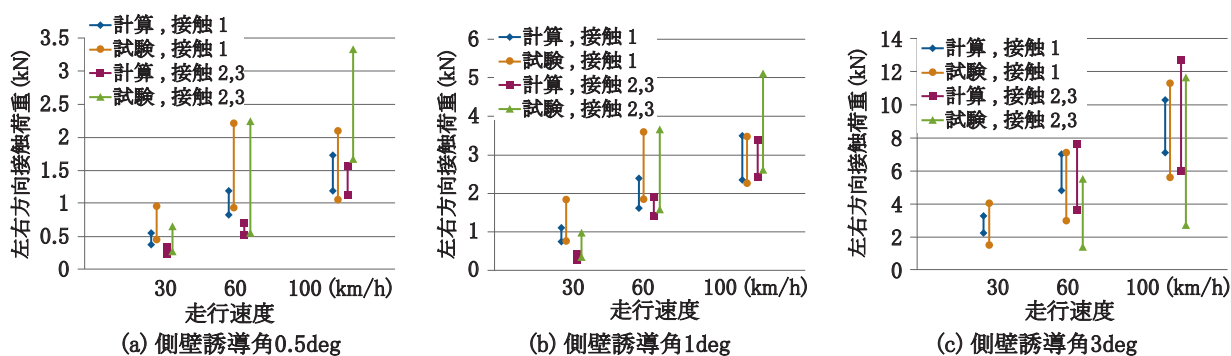


図9 左右方向接触荷重の範囲（試験結果と計算結果）

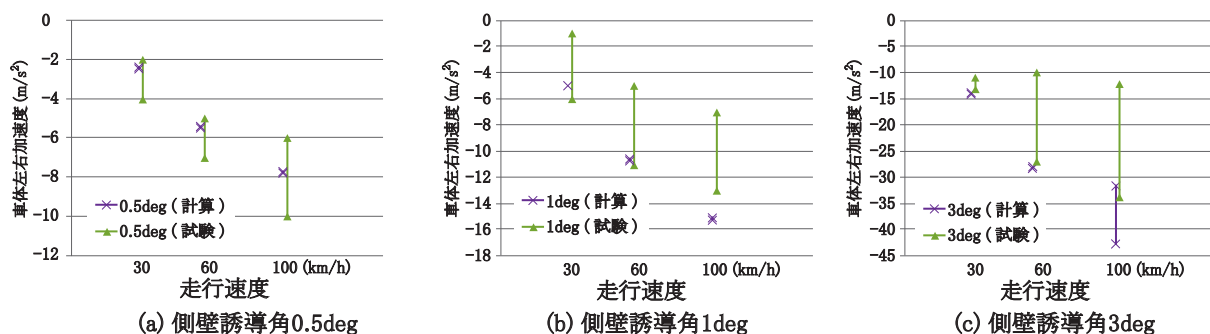


図10 車体左右加速度（BPF後）の範囲（試験結果と計算結果）

構造物と干渉しない位置まで誘導するようなガイド状の構造物（側壁）を設置することを想定し、その実現可能性を検討するために模型車両を用いてガイド状構造物に接触したときの車両の挙動や接触荷重を測定し、また模型試験に相当する数値シミュレーションを行った。本論文の結論は以下の通りである。

- ①1/10 スケールの模型車両を用いて側壁に車両が接触しながら走行する場合の挙動や接触荷重について模型試験を行い、側壁によって誘導される際の車両と側壁との接触形態・接触時の車両各部の加速度および接触荷重等について調べた。
- ②模型試験における車両と側壁や車体左右ガイドとの接触を考慮できる力学モデルについて検討し、従来の3次元車両運動シミュレーションを拡張して模型試験に対応する数値シミュレーションを開発した。シミュレーションの結果、側壁との接触による特徴的な車両の運動形態や側壁との接触荷重、剛体運動としての車体左右加速度等については概ね試験結果と合致した。

謝辞

模型車両の走行試験の実施にあたり、ご協力頂いた東

日本旅客鉄道株式会社安全研究所の諸氏に心より感謝申し上げます。

文献

- 1) 佐々木浩一，鈴木史比古：模型列車による新幹線車両の高速脱線・列車座屈解析，JR EAST Technical Review, No.29, pp.17-20, 2009
- 2) 鈴木史比古，佐々木浩一：編成挙動に与える脱線軸の影響，日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.511-514, 2009
- 3) 葛田理仁，植木健司，西山幸夫，前橋栄一，宮本岳史：1/10 新幹線模型車両の加振試験に関する報告，日本機械学会第19回交通・物流部門大会講演論文集, pp.93-96, 2010
- 4) 植木健司，葛田理仁，宮本岳史，前橋栄一，鈴木史比古，佐々木浩一：脱線後にまくらぎ上を高速走行する車両の縮尺模型試験，日本機械学会第19回交通・物流部門大会講演論文集, pp.97-100, 2010
- 5) 例えば 葛田理仁，植木健司，宮本岳史：脱線した鉄道車両の有道床軌道上走行の数値シミュレーション，日本機械学会 Dynamics and Design Conference 講演論文集, 2012