

台車改良による地震時走行安全性の 向上に関する解析

宮本 岳史* 石田 弘明*

Numerical Simulation Study on How to Improve Bogie for Raising Running Safety during Seismic Vibration

Takefumi MIYAMOTO Hiroaki ISHIDA

After Hyogo-ken Nanbu earthquake in 1995, we developed a vehicle dynamics simulation program(VDS) for seismic vibration, some vibration experiment using an actual Shinkansen bogie was executed, and the analysis of the railway vehicle during seismic vibration was performed energetically in Railway Technical Research Institute. Now, we are studying about improvement in running safety of the railway vehicle for seismic vibration using these developed analysis technologies. In this paper, the analysis how to improve performance for running safety is carried out through changing parameters of bogie. The bogie parameters include the performance of a spring and a damper, a stopper. However, it is difficult to improve the running safety at the abnormal case such as occurrence of earthquake, without spoiling the usual bogie performance. Some equipments that improve safety performance by being activated only when big earthquake occurs were devised. VDS proved their effects.

キーワード：地震，車両，安全，シミュレーション，脱線，対策，新幹線

1. はじめに

地震時の脱線の多くは構造物や軌道が著大な地震動によって破壊された場所で発生している。これに対し鉄道構造物の耐震補強が行われ、構造物の耐震設計法や安全性を高める技術基準が見直されてきた。一方で、軌道が変形していないところで異常の無い車両が脱線したケースもあり、この場合は地震による軌道の振動によって脱線した可能性が高いと考えられる。

鉄道総研では、1995年の兵庫県南部地震以降、地震によって軌道が振動し、車両が大きく揺れて車両各部が大変位するような場合でも解析が可能な車両運動シミュレーションプログラム(VDS)を開発し、地震時の車両挙動解析を行ってきた¹⁾。また、大型振動台上にレール、新幹線の実台車および模擬車体(半車体)を載せて大きく加振する試験を実施し、シミュレーション計算の妥当性を検証してきた^{2) 3)}。

これまで培ったシミュレーション技術を活用し、台車を改良することで地震時の走行安全性向上を図る技術方策を検討したので、これを報告する。

2. シミュレーションの概要

2.1 剛体の運動方程式

鉄道車両は、車体や台車枠、輪軸などを剛体とし、剛体間の連結要素としてはばね・ダンパを配置することでモデル化できる。

VDSでは、車両各部の剛体に関する運動方程式を地上固定座標系上で表す。地上固定座標系は、計算開始時の車両の最後位軸(一車両モデルでは進行前側から第4軸)の重心位置を水平方向の原点に、上下方向はレール面高さを原点として定義している。

基本的な運動方程式は、Newton-Eulerの運動方程式

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}_i \quad (1)$$

$$\mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i = \mathbf{n}_i \quad (2)$$

\mathbf{M}_i : 剛体 i の質量行列

\mathbf{x}_i : 剛体 i 重心の並進変位を表す位置ベクトル

\mathbf{I}_i : 剛体 i の慣性系での慣性テンソル

$\boldsymbol{\omega}_i$: 剛体 i の慣性系での角速度ベクトル

\mathbf{f}_i : 剛体 i に作用する並進外力ベクトル

\mathbf{n}_i : 剛体 i に作用する外力モーメントベクトル

を用いている。剛体の姿勢や後述の連結要素力を計算する際に必要となる回転変換は、 z 軸→ x 軸→ y 軸周りの順に行う。

* 鉄道力学研究部(車両力学)

特集：鉄道力学

マルチボディダイナミクス手法を取り入れて、計算時には、はじめに剛体の質量・慣性半径・重心位置や連結要素の取り付け位置、初期荷重などを定義する、運動方程式はシミュレーション実行中に自動導出され、これを時間 Δt 毎に積分する。ここでは数値積分にRunge-Kutta-Gill法を用いている。このように一般化して運動方程式を解く場合には、計算が不連続になるなどの特異点を生じる場合がある。本手法の場合には、剛体のロール角が90度、車体で言えば横倒しに転覆した状態が特異点となるが、通常状態から大変位して転覆直前の状態まで計算可能であり、実用上十分である。

2.2 ばね・ダンパの定義

剛体間の連結要素であるばね・ダンパのモデルは、鉄道車両での実際の取り付け構造を考慮して、主に軸ばねやまくらばねに対応するばね中間点の相対変位モデル(図1)と、主に左右動ダンパやヨーダンパに対応する両端ボールジョイントモデル(図2)としている。

(1) ばね中間点の相対変位モデル

各剛体重心にはそれぞれの剛体座標系と、剛体に取り付ける連結要素のばね座標系を定義する。2つの剛体に取り付く上ばね座と下ばね座、その中間に座標系を図1のように配置する。このモデルでは上下の各ばね座の中心位置に初期ばね長さの1/2の棒が取り付けられているように考え、この棒の先端Cがばね中間点座標系上で相対変位することによって並進のばね力が発生し、また上下ばね座の相対角変位によって回転のばね力(モーメント)が発生するものとする。

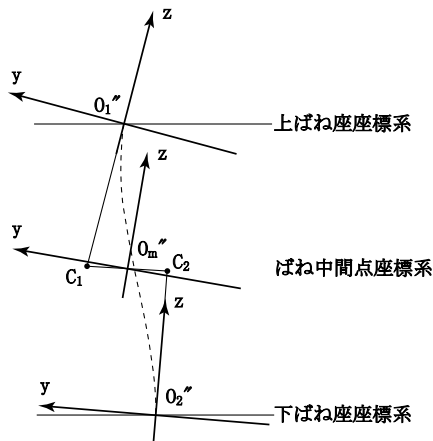


図1 ばね中間点の相対変位モデル

(2) 両端ボールジョイントモデル

各剛体にボールジョイントを介してダンパを取り付ける場合には、2つのボールジョイント中心間変位と速度を定義する。

ばね変位に対するばね力は、図3に示すような線形や折線特性、遊間のあるストップ特性のばね力を選択的に

定義する。ダンパの場合には図4に示すように、ピストン速度に対し線形や折線特性の減衰力を発生するモデルに加えて、伸縮の非対称特性を考慮したモデルも選択的に定義する。

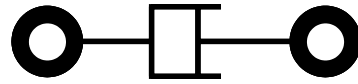


図2 両端ボールジョイントモデル

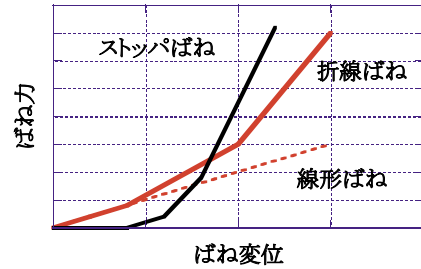


図3 ばね特性模式図

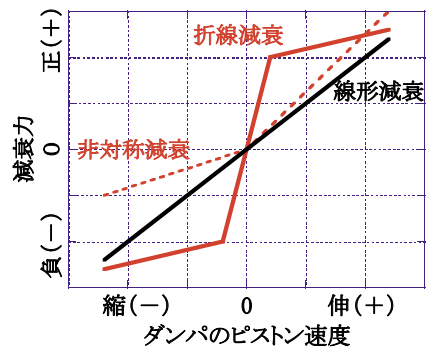


図4 ダンパ特性模式図

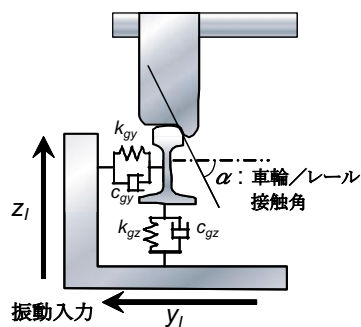


図5 レール支持モデルと振動入力

2.3 車輪・レール間作用力

車輪/レール間作用力に関しては車両と共に移動する車両座標系上での定式化を基本として記述する。一車両を支える8つの車輪を支持する各レールは、図5に示すように、それぞれ独立に上下と左右にばね・ダンパで支持されているモデルとしている。地震動に相当する加振はレール下、つまり軌道面から入力する。

輪軸の運動に伴って、車輪に接触したレールは1点ま

たは2点において拘束された運動を行う。左右レールが剛に枕木等によって結合されているとするモデルと異なり、この場合の車輪とレールとはさまざまな相対ロール角をとり得る。そこで車輪とレールの接触問題を自由に変位する1個の車輪と、一本のレールとの関係として扱う。車輪/レールの接触幾何計算によって、予め作成される接触情報ファイルには、車輪/レールの相対左右変位と車輪ヨー角、ロール角に対する接触データが格納されており、シミュレーションプログラム実行中の任意の車輪変位に対する値を呼び出して利用する。

車輪がレールから離れる場合については、その移行判定は法線荷重によって行い、車輪が再びレールと接触する場合の移行判定は幾何学的な位置関係にもとづいて行う。車輪とレールとが離れたときには両者間の作用力はゼロとなるが、以後、車輪との接触がなければレールは外力がない場合の釣合い位置に達するまで運動を続ける。

車輪/レールの接触面内に作用する接線力については車輪/レール接触情報を利用し、車輪が転がる走行中の場合にはKalker理論に基づくクリープ力計算法によって求める。停車中の場合には、飽和特性を考慮したクーロン摩擦力を定義している。

2.4 車両モデルと計算条件

新幹線電車を図6に示すように1つの車体、2つの台車枠、4本の輪軸の合計7つの剛体として、それら剛体間をばねやダンパなどで接続した車両モデルとした。地震時挙動解析用の車両モデルとして特徴的な点は、通常の走行解析では接触することの無い各部のストッパ類が

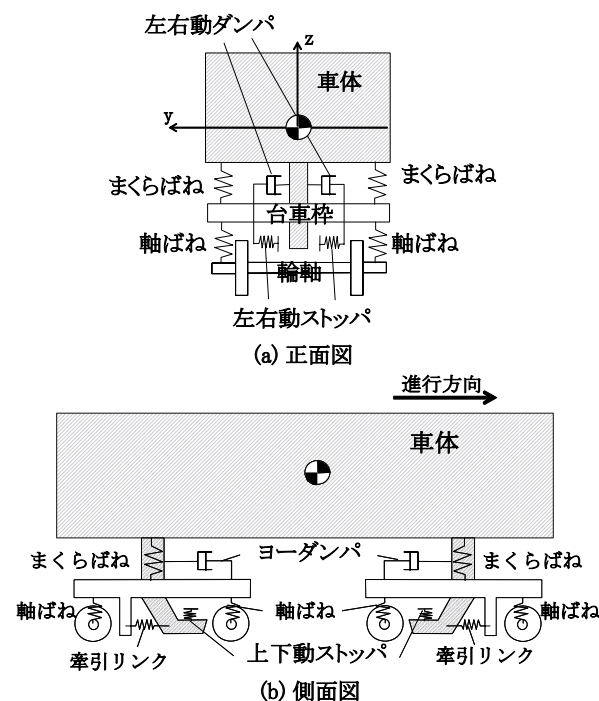


図6 車両モデル概要

重要な要素になることと、ばねやダンパの性能諸元を大変位や高速度に対応した特性に設定する必要があることである。

2.5 走行安全限界線図

地震時の走行安全性を検討するために、車輪とレール間の相対左右変位が70mmに達したときを走行安全限界(脱線)と定義した。この相対左右変位が70mm未満であれば、たとえ車輪がレールから跳び上がっても安全限界内である(脱線していない)と判断した。

一般化した入力振動として正弦波振動を用い、一定周波数、一定振幅で5波の左右変位をレール支持部に入力して1回のシミュレーション計算を実行する。一つの加振周波数に対し加振振幅を大きくしながらシミュレーション計算を繰り返し実行して安全限界超過の有無を判別する。各加振周波数における脱線しない最大の加振振幅を安全限界振幅として図7, 8, 11, 13, 16に示す正弦波振動に対する走行安全限界線図を求めた。これらの走行安全限界線図を用いることで、大変位で振動する軌道上を走行する車両の走行安全性を比較することができる。なお、次章に示す走行安全限界線図は、代表的な新幹線車両が勾配と軌道変位の無い直線軌道を速度275km/hで走行中に加振を受けた場合の計算結果である。

3. 地震時の安全性向上策の検討

3.1 台車諸元変更

正弦波振動に対する走行安全限界線図に車両諸元が及ぼす影響を調査した。その主な結果を図7に示す。表1に示した①まくらばね減衰を大きくする、②左右動ダンパ減衰力を大きくする、③車体異常上昇止めの間隔を拡げる、④軸箱ストッパ遊間を拡げる、⑤左右動ストッパ遊間を拡げることを、それぞれ個別に変更したときには、図7に示すように、左右動ダンパの場合を除き、加振周波数全域で効果を得ることは難しいことが分かった。そこで上述の5項目を組合わせて変更した場合の走行安全限界線図を標準とともに図8に示す。このように組み合わせて諸元を変更することで、ほぼ加振周波数全域で安全限界振幅を高め、地震時の安全性を向上するこ

表1 5項目変更諸元

項目	変更
まくらばね減衰	標準の2倍
左右動ダンパ減衰	標準の2倍
車体異常上昇止め間隔	標準70mmを130mmに拡大
軸箱ストッパ遊間	上方: 標準24mmを60mmに拡大 下方: 標準28mmを35mmに拡大
左右動ストッパ遊間	標準20mmを40mmに拡大

特集：鉄道力学

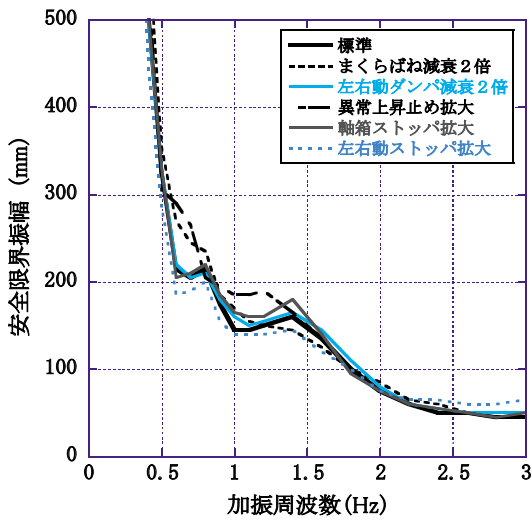


図7 車両諸元が走行安全限界線図に及ぼす影響

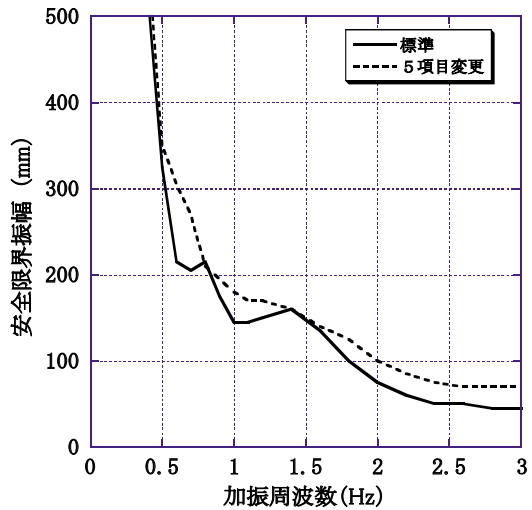


図8 5項目組合せて変更したときの走行安全限界線図

とができることが分かった。ただし、これら台車諸元を変更する際には、通常走行時の安全性や乗り心地性能などの両立を十分に考慮しなければならない。

3.2 安全性向上対策部品

通常時の走行性能を損なうことのないようにして、著大な地震時にのみ動作して安全性を高めることの出来る部品を検討した。

(1) クラッシュブルストップ

著大な地震動によって車両が大きく揺すられて、車体と台車間の左右動ストップに過大な荷重が作用した際に、図9のようにストップ座が潰れ、左右動ストップの遊間が広がる機構（クラッシュブルストップと呼ぶ）を採用したときの走行安全限界線図を図11に示す。クラッシュブルストップモデルは、通常走行状態では図10中の基本特性として遊間20mmの左右動ストップとして機能し、著大な荷重で圧壊後には遊間が拡大して図10中の圧壊後特性となるものとした。ここでは圧壊する閾値を超

えた直後にばね特性を切り替えるモデルとし、ストップが圧壊する過程における部材の塑性変形によるエネルギー吸収は考慮していない。つまり、このクラッシュブルストップモデルでは著大な地震の時にだけ左右動ストップ遊間が大きくなる機能に着目したモデル化を行っている。図11より、図10の圧壊後特性で圧壊閾値300kNのクラッシュブルストップを用いたとき、加振周波数1.8Hz以上で安全限界振幅が高くなる事が分かる。しかし、加振周波数1.6Hz以下では安全限界振幅が低くなった。そこで、低い加振周波数域における弱点を補う目的で3.1節の表1の5項目変更諸元と組み合わせたと

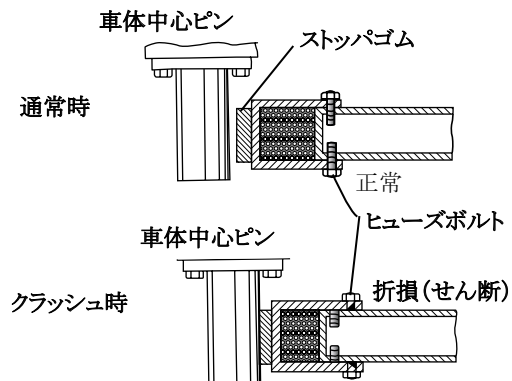


図9 クラッシュブルストップ模式図 (メカニカルヒューズタイプ)

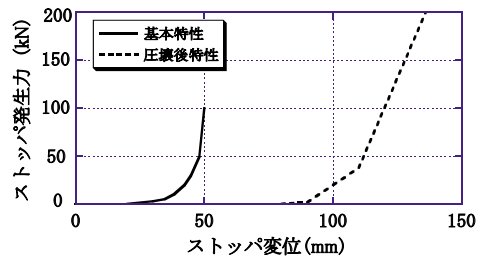


図10 クラッシュブルストップのばね特性

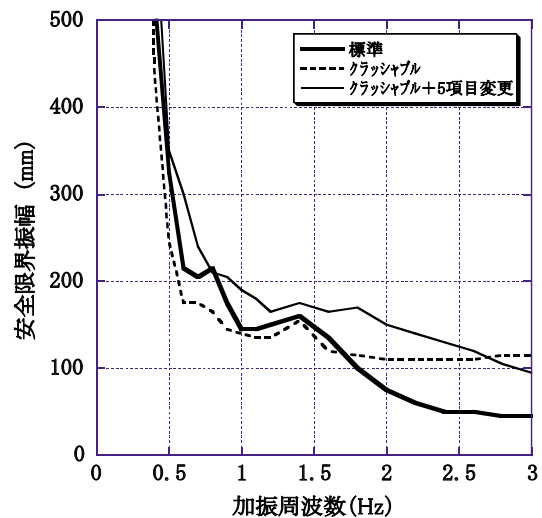


図11 クラッシュブルストップを用いた時の走行安全限界線図

きの安全限界振幅（凡例；クラッシュブルストップ+5項目変更）を求め、図11に示した5項目変更諸元と組み合わせることで、加振周波数のほぼ全域（0.8Hz除く）で標準以上の安全限界振幅が得られることが分かった。

(2) 高速時高減衰力左右動ダンパ

第3.1節の検討により、安全限界振幅を高くする車両諸元のうち、左右動ダンパの減衰力を大きくすると効果があることが分かった。しかし、左右動ダンパの減衰係数は、通常時の乗り心地や車両の走行安定性に影響を及ぼすことから、地震時の対策として容易に設定諸元を変更できない。そこで、通常使用時の減衰特性をそのままにして、著大地震時にだけ大きい減衰力を発生する方策として、オイルダンパのピストンが高速に動作するときのみ、大きい減衰力を発生する高速時高減衰力左右動ダンパの効果を検討した。ここで提案する高速時高減衰力左右動ダンパの発生する減衰力としては図12のような特性を想定している。高速時高減衰力左右動ダンパでは、設計上のダンパ使用速度範囲0.2m/secを超えたときに、標準以上に減衰力がダンパ速度に比例してさらに大きくなることとした。

高速時高減衰力左右動ダンパを用いた場合の走行安全限界線図を図13に示す。図13より、提案した高速時高減衰力左右動ダンパを用いたときには、加振周波数0.6Hz以上の広い範囲で安全限界振幅が高くなることが分かる。

詳細に図14、図15に(a)標準と(b)高速時高減衰力左右動ダンパを用いたときの第1軸の左車輪の輪重・横圧、第1台車の左右動ストップと左右動ダンパ、上下動ストップの作用力、第1軸左右車輪の車輪上昇量を時刻歴波形で示す。図14は低い加振周波数0.6Hzで、図15は高い加振周波数2.0Hzの結果である。

低い加振周波数（図14）では、車輪上昇量が150mm以上と大きくなり、車輪下降時にフランジ先端がレール上に乗って脱線している。脱線直前には車体と台車間の上下動ストップが200kNを超える大きな作用力を発生して接触している。これに対し、高速時高減衰力左右動ダンパでは、標準の場合の左右動ダンパ力よりも大きな減衰力を発生し、左右動ストップと上下動ストップの作用力が小さくなって、車輪上昇量が減少している。その結果として、高速時高減衰力左右動ダンパを装備した場合には脱線しなかった。もう一方で、高い加振周波数（図15）では、標準の場合、左車輪で300kN超の横圧が発生し、車体と台車間の左右動ストップで500kN程度の著大な作用力が発生し、その結果右車輪が70mm程度上昇して、下降時にフランジ先端がレール上に乗って脱線している。これに対し、高速時高減衰力左右動ダンパでは、著大な横圧が発生した後に高速時高減衰力左右動ダンパが大きな減衰力を発生し、左右動ストップの作用力を

300kN以下に小さくしている。その結果、車輪上昇量も最大で60mm程度に減少し、車輪は跳び上がっているものの、踏面でレール上に戻り脱線に至っていない。これらのように低い加振周波数と高い加振周波数で異なる脱線時の車両挙動に対し、車体と台車の間に装着した高速時高減衰力左右動ダンパは、いずれの場合にも脱線防止効果を発揮している様子が分かる。

クラッシュブルストップと高速時高減衰力左右動ダンパを併用した場合には、それぞれの性能を変更することで効果が大きくなる。単独性能変更と併用性能変更の場合の走行安全限界線図を図16に示す。加振周波数2.4Hz以上でクラッシュブルストップ単体の安全限界振幅を下回るものの、加振周波数0.6Hz以上の広い範囲で比較的大きな効果が得られることが分かる。左右動ストップを大きく拡げて、かつ左右動ダンパによる減衰力を大きくしたことで、両者の利点が活かされ地震時走行安全性が向上したと考えられる。

4. おわりに

地震時の鉄道の安全性を向上する方策については、現在さまざまな検討が進められている。ここでは計算機シミュレーションにより、車両側で取り得る地震対策の可

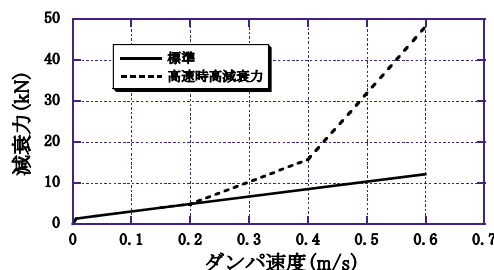


図12 高速時高減衰力左右動ダンパ特性

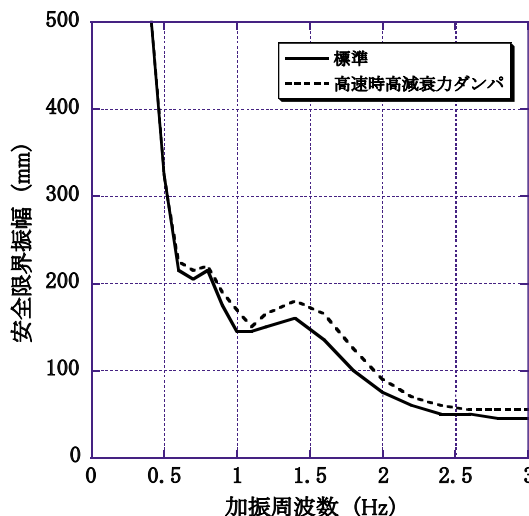


図13 高速時高減衰力左右動ダンパを用いた時の走行安全限界線図

特集：鉄道力学

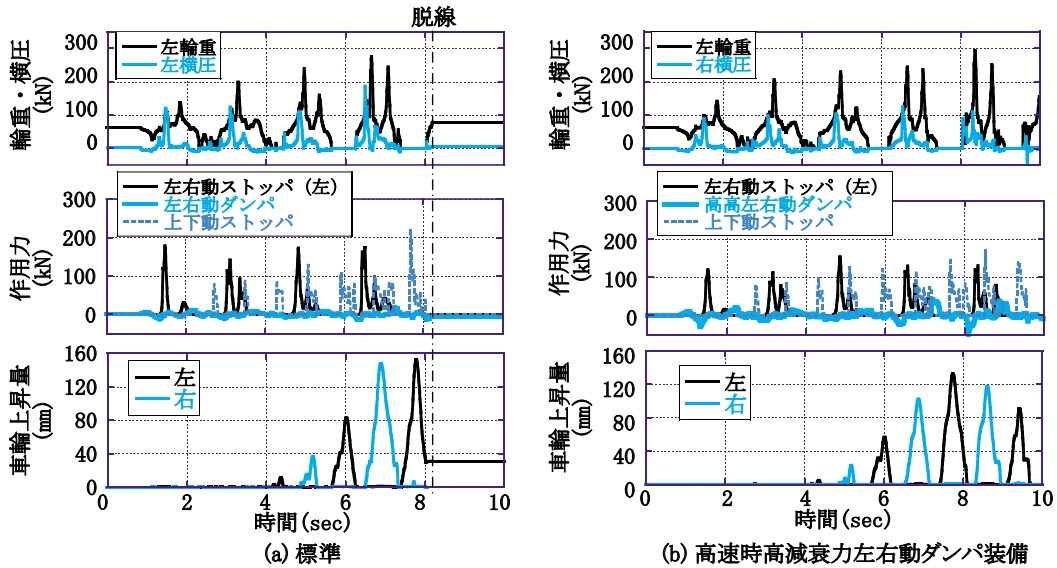


図14 高速時高減衰力左右動ダンパを装備したときのシミュレーション結果（加振周波数 0.6Hz, 振幅 225mm）

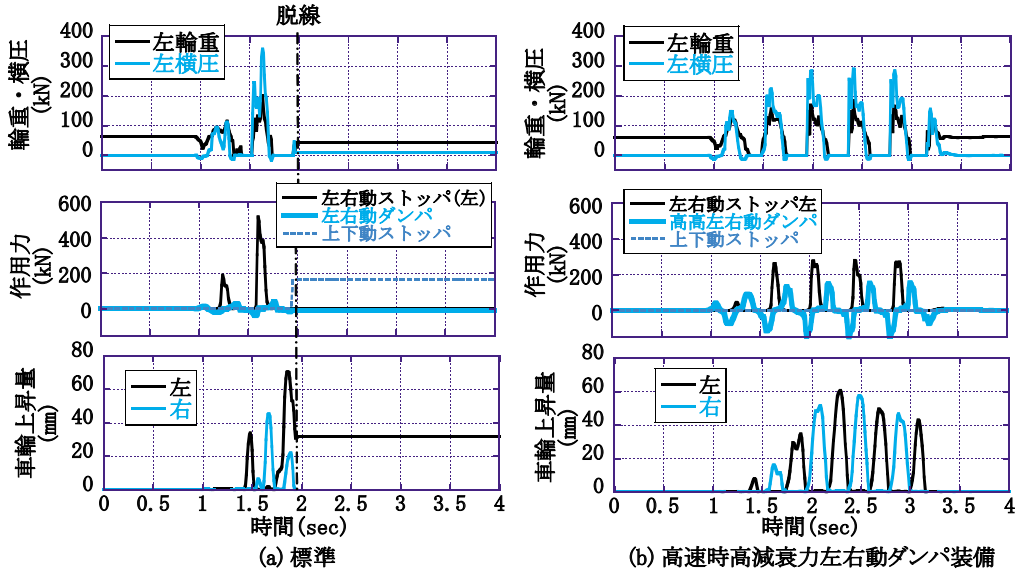


図15 高速時高減衰力左右動ダンパを装備したときのシミュレーション結果（加振周波数 2.4Hz, 振幅 60mm）

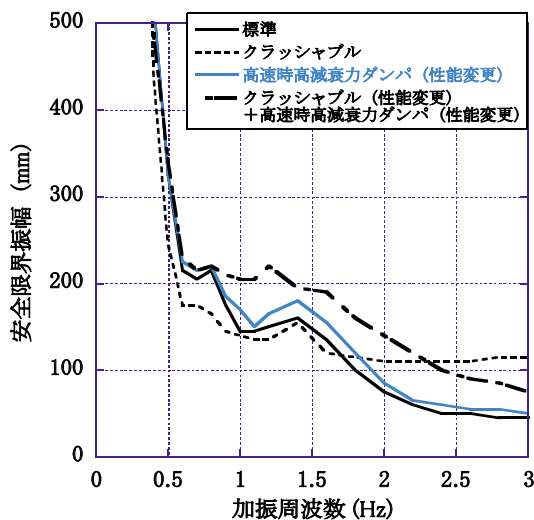


図16 高速時高減衰力左右動ダンパとクラッシュャブルストッパを併用した時の走行安全限界線図

能性を示した。なかでも高速時高減衰力左右動ダンパを基本とした対策に脱線防止効果が期待できる。

今後は、実物で有効に機能する安全性向上策を提案すべく、実証的な研究を進めていきたいと考えている。

文献

- 1) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析, 機械学会論文集 C 編, Vol.64, No.626, pp.3928-3935, 1998
- 2) 宮本岳史, 松本信之, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.706, pp.1849-1855, 2005
- 3) 星野宏則, 宮本岳史, 石田弘明: 地震時の車両挙動を解明する, RRR, Vol.64, No.1, pp.24-27, 1992