鉄道車両の地震対策用左右動ダンパの開発

鈴木　　貢*　　飯田　浩平*　　宮本　岳史*
中嶋　大智**　　遠竹　隆行***　　梶谷　泰史#

Development of Lateral Damper for Improvement of Running Safety of Railway Vehicles in Case of Occurrence of an Earthquake

Mitsugi SUZUKI　Kouhei IIDA　Takefumi MIYAMOTO
Daichi NAKAJIMA　Takayuki TOUTAKE　Yasushi KAJITANI

We developed a new lateral damper for the improvement of running safety of railway vehicles in case of occurrence an earthquake. The damper controls the shake of the vehicle, and prevents the derailment by generating a large damping force. Moreover, the damper does not require large modifications of a bogie, and maintains running performances of vehicles in normal state. We confirmed satisfactory performances of the damper using some experiments and numerical simulation. This paper describes performance of countermeasure for earthquake by the damper.
キーワード：地震，脱線，左右動ダンパ，新幹線，走行安全性，走行安全限界振幅

1．はじめに

2004年の新潟県中越地震以降，地震時における鉄道システムの安全性の向上，特に脱線を防止する方策に関する様々な検討が行われてきている。

鉄道総研ではこれまでに，地震時のような車両各部が大変位する場合においても解析が可能な車両運動シュミレーションプログラムを開発した[1)]。また，これを用いた数値計算により，台車のダンパ等を改良することで地震時の走行安全性向上を図る方策について検討した[2)]。その結果，車体・台車間に取り付けられている左右動ダンパの減衰性能を高め，車両の動揺を抑制することが，地震時の脱線対策に有効であることがわかった。

この検討結果を基に，常時の走行性能を損なうことなく，地震時のみ大きな減衰力を発生し脱線を防止する新幹線車両用の地震対策用左右動ダンパを開発した。そして，各種試験と数値計算により，地震対策ダンパの地震時走行安全性向上効果を確認した。本論文では，地震対策ダンパの概要とダンパ単体での性能試験，大型振動試験装置を用いた実台車加振実験[3)]による地震時の安全性向上効果の確認，高速試験用新幹線車両を用いた本線での通常時の機能確認のための走行試験，ならびに実験では確認できなかった加振周波数域あるいは走行中の一車両の地震時走行安全性を評価するための数値計算の結果について報告する。

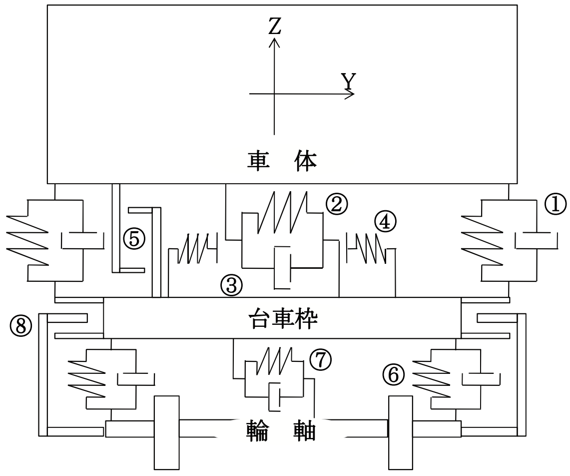
2．開発の経緯

新潟県中越地震における新幹線の脱線を受け，鉄道総研では車両側からの地震時脱線対策の取り組みとして，台車改良により走行安全性の向上を図る検討を行った。この検討では数値計算により，まくらばね減衰，左右動ダンパ減衰を現状より増大した場合，異常上昇止め間隔，車体左右動ストッパ遊間，軸箱ストッパ遊間を現状より拡大した場合について，これらの台車諸元が走行安全性に与える影響を，走行安全限界振幅を指標に用いて調査した。なお，走行安全限界振幅とは，直線区間を一定速度で走行中の新幹線一車両に対し，正弦波5波による軌道の左右加振を入力条件とし，車輪とレールの相対左右変位が70mmに達した時に脱線と判断して，この加振振幅より5mm小さい脱線しない最大の振幅のことである。図1に計算に用いた車両モデルを示す。検討の結果，左右動ダンパの減衰を大きくした場合の走行安全限界振幅は，調査対象とした全ての周波数帯で現状以上となることがわかった。異常上昇止め間隔など他の項目については，周波数により走行安全限界振幅が現状よりも大きくなる場合と小さくなる場合があることがわかっ

＊　鉄道力学研究部　車両力学研究室
＊＊　前 鉄道力学研究部　車両力学研究室
（現 フリーゲージトレイン技術研究組合（出向））
＊＊＊　車両構造技術研究部　車両運動研究室
＃　東日本旅客鉄道株式会社

た。このことから，左右動ダンパの減衰を大きくすることが，地震時走行安全性の向上に最も有効であるという知見が得られた。しかし，左右動ダンパの減衰は通常走行時の乗り心地に大きく影響するため，単純にこれを変更することは現実的ではない。そこで，ピストン速度が速くなる地震のような異常時のみに大きな減衰力が発生する条件で走行安全限界振幅について調査した。その結果，この条件での走行安全限界振幅は，広い周波数帯で現状よりも大きくなり，少なくとも現状より小さくならないことがわかった。これにより，異常時のみに大きな減衰力が発生する条件としても，走行安全性の向上に十分有効であるという知見が得られた。

今回，この検討により得られた知見を基に，1）地震時には大きな減衰力が発生することで脱線を防止する，2）通常時には従来の左右動ダンパと同等に機能し乗り心地の向上を図る，3）装備に際しては台車や車両に大幅な構造変更を必要としないといった特徴を有する，新しい左右動ダンパ（以下，地震対策ダンパと記す）の開発を行った[4]。



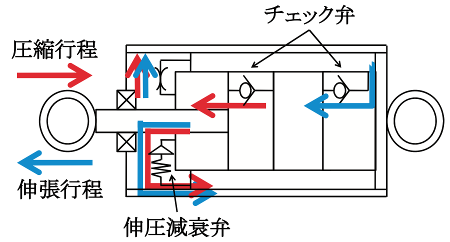
①:まくらばね(上下)　②:まくらばね(左右)
③:左右動ダンパ　④:左右動ストッパ
⑤:車体異常上昇止め　⑥:軸ばね(上下)
⑦:軸ばね(左右)　⑧:軸箱ストッパ

図１　車両モデル（正面図）の概要

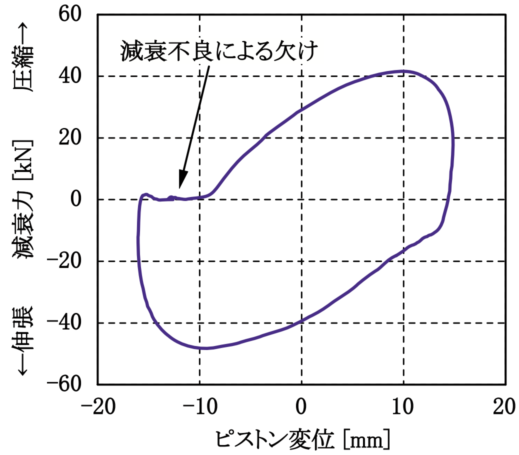
３．地震対策ダンパの概要

地震対策ダンパには，地震時には大きな減衰力の発生が，通常時には現行の左右動ダンパ（以下，現行ダンパと記す）と変わらぬ減衰性能が要求される。このため，ダンパのピストン速度（以下，ピストン速度と記す）に応じた減衰性能を設定することで要求性能を実現した。走行中の車両が大規模地震に遭遇した場合には，車体と台車は通常走行時よりも大きく振動し，ピストン速度が増大する。そこで，地震対策ダンパは，ピストン速度が200mm/sec以下の通常使用する速度域では発生する減衰力を現行のままとし，ピストン速度が高速となる速度域では大きな減衰力が発生する減衰特性とした。

当初，地震対策ダンパの試作にあたり，鉄道車両用の左右動ダンパとして実績のあるユニフロー方式の油圧回

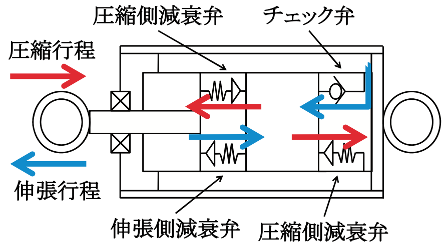


(a)ユニフロー方式の油圧回路概略図

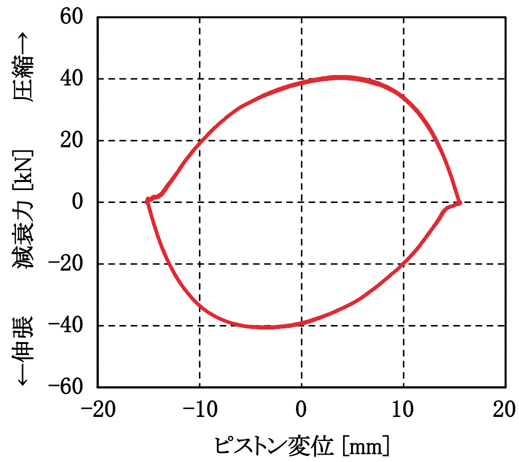


(b)ピストン変位と減衰力のリサージュ
(ピストン速度 600mm/sec時)

図２　ユニフロー方式のダンパの単体性能試験結果



(a)バイフロー方式の油圧回路概略図



(b)ピストン変位と減衰力のリサージュ
(ピストン速度 600mm/sec時)

図３　バイフロー方式のダンパの単体性能試験結果

路で検討を進めた。ユニフロー方式の地震対策ダンパ単体での性能試験結果を図2に示す。この方式ではピストン速度が高速になるにつれ，大きな内圧変動による気泡の発生や，作動油の移動量増加による底板からの吸い込み不良により減衰性能が低下することがわかった。これを解消するため，改めてバイフロー方式の油圧回路で検討を行った。バイフロー方式の地震対策ダンパ単体での性能試験結果を図3に示す。この方式では，ピストンおよびシリンダ形状を決定する自由度が高いことから，内圧の上昇を抑え，作動油の移動量を少なくする効果が期待できる。この結果，ピストン速度が600mm/secとなる場合においても目立った減衰不良がなく，安定した減衰性能が実現できることを確認した。以上の検討結果を踏まえ，地震対策ダンパにはバイフロー方式の油圧回路を採用した。

試作した地震対策ダンパの外観図を図4に，主要寸法を表1に示す。取り付け長およびダンパストロークは互換性を考慮し現行ダンパと同じとした。その一方で，外径およびシリンダ内径は，大きな減衰力の発生に伴い上昇する内圧に耐えうるよう堅牢な構造としたため，現行ダンパに比べ大きくなっている。

図４　地震対策ダンパの外観図

表１　地震対策ダンパの主要寸法

（単位：mm）

	地震対策ダンパ	現行ダンパ
外　径	156	90
取付長	455	
ストローク	135	
シリンダ内径	90	70
ピストンロッド外径	35	

４．性能確認試験

４．１　単体での性能確認

地震対策ダンパ単体での減衰性能を調査するため，ダンパ試験機により正弦波加振試験を実施した。この際，比較のため現行ダンパについても併せて試験を実施した。試験結果として，ピストン速度と最大減衰力の関係を図5に示す。この結果，ピストン速度が200mm/sec以下の通常時では，地震対策ダンパの減衰性能は現行ダンパと変わらないこと，ピストン速度が200mm/secを超える地震のような異常時では，地震対策ダンパが発生する減衰力は現行ダンパに比べ大きく，その大きさはピストン速度600mm/sec時で約2倍となることを確認した。

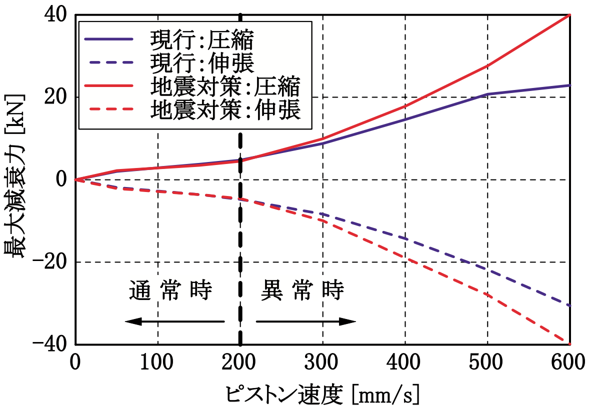


図５　ダンパ単体の試験性能線図（FV線図）

４．２　大型振動試験装置による性能確認

４．２．１　試験概要

台車に実装した状態で大変位が生じた際の地震対策ダンパによる走行安全性の向上効果を確認するため，鉄道総研所有の大型振動試験装置（以下，振動台と記す）上に設置した試験体を用いて加振試験を実施した。また，この試験では，輪重がゼロ（車輪がレールから離れることに相当する）となる現象に注目し，この際の加振条件を調査した。

(1)　試験体

試験体の外観図を図6に，各部の質量特性を表2に示す。試験体は新幹線半車体モデルとなっており，振動台上に敷設されたレール，その上に配された実物の新幹線台車，車体を模擬した荷重枠，荷重枠の転倒防止と前後、ピッチングおよびヨー方向の運動を拘束するための転倒防止リンクから構成される。荷重枠上にはデッドウエイトが取り付けられており，この数量を変更することにより空車相当，定員乗車相当など任意の車体質量を設定す

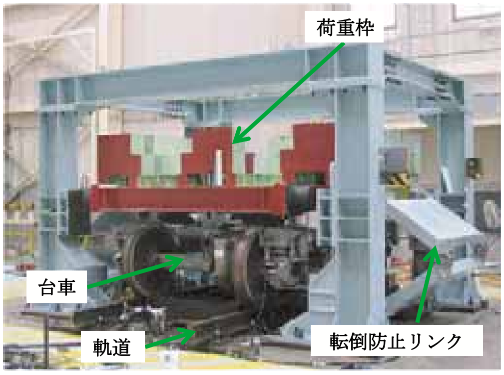


図６　振動台試験で使用した試験体外観図

ることができる。この試験体に変位センサを取り付け，荷重枠と台車の変位と加速度や，左右動ダンパ，軸ダンパおよび車体左右動ストッパの作用力などを測定した。輪重，横圧については，4つの車輪直下のレールに貼付したひずみゲージにより測定した。

(2) 加振条件

試験では，正弦波および地震波で左右（まくらぎ）方向に加振した。正弦波加振の場合の条件の詳細を表3に示す。地震波加振では，新潟県中越地震の十日町 BL R3 高架橋上の推定地震動（図7）[5] を用い，これに任意の倍率（以下，加振倍率と記す）を乗じた振幅（50, 60, 65 %）の波形で加振した。

表2　試験体の各部質量

項　目	条　件	質　量 [kg]
荷重枠	空車相当	13,200
	定員乗車相当	16,200
台　車		5,110
転倒防止リンク（2組分）		1,480
合計*	空車相当	19,050
	定員乗車相当	22,050

*. 合計値には転倒防止リンク質量の1/2が含まれる

表3　振動台試験での正弦波加振条件一覧

加振種別	加振加速度 / 加振倍率（設定値）
正弦波 0.5Hz	120, 130, 140, 150 Gal
正弦波 0.7Hz	110, 115, 120, 125 Gal
正弦波 1.0Hz	300, 350, 400 Gal
正弦波 1.2Hz	400, 450, 500, 550, 600 Gal
正弦波 1.3Hz	550, 600 Gal
正弦波 1.6Hz	500, 600 Gal

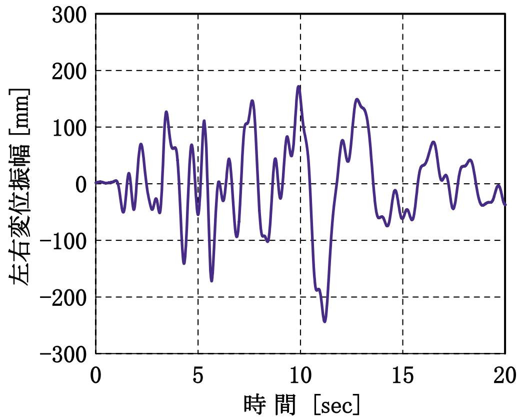


図7　新潟県中越推定地震動（基本波形）[5]

4.2.2　正弦波加振での試験結果

正弦波加振試験の結果，空車条件で輪重がゼロとなった際の振動台左右変位振幅を図8に示す。加振周波数 0.7Hz 以上の加振条件では，地震対策ダンパを装備した

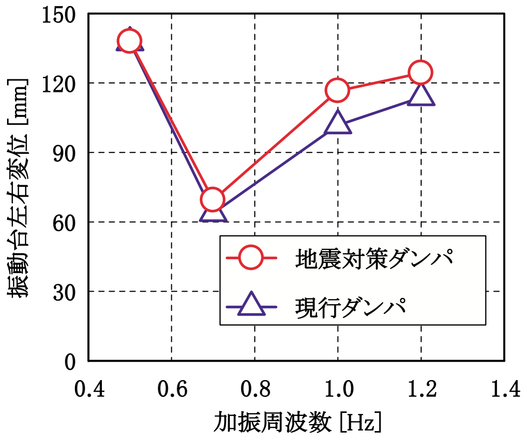


図8　輪重ゼロが観測された振動台左右変位

表4　現行ダンパで輪重がゼロとなる加振条件での比較

加振条件		輪重 [kN]		車体左右変位 [mm]	
周波数 [Hz]	加速度 [Gal]	現行	地震対策	現行	地震対策
0.5	130	0.0	0.9	121.0	113.8
0.7	115	0.0	10.9	124.0	114.1
1.0	350	0.0	3.8	116.1	108.4
1.2	550	0.0	2.8	82.0	78.5

場合の加振振幅は，現行ダンパを装備した場合のものに比べ大きくなっていることから，軌道の左右振動に対する走行安全性が向上していることがわかった。

地震対策ダンパを装備し，現行ダンパを装備した場合に輪重ゼロが観測されたのと同じ加振条件での輪重最小値を表4に示す。地震対策ダンパを装備した場合には，現行ダンパを装備した場合に輪重がゼロとなる加振条件においても輪重が残存し車輪がレールから離れていないこと，車体左右変位が小さくなっていることから，車体動揺が抑制され，走行安全性が向上していることがわかった。

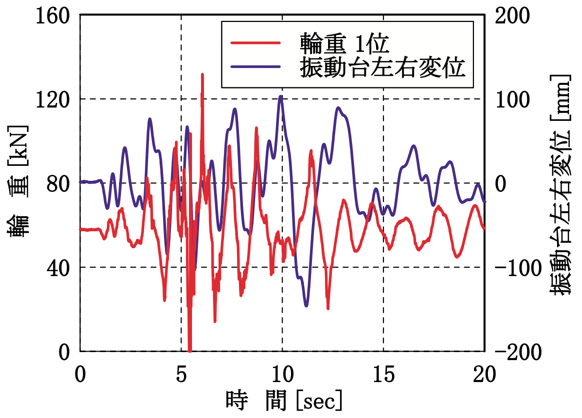
なお，本試験では，所定の許容荷重を超える条件で加振を重ねたため，現行ダンパが破損に至るという事象が発生した。このため，現行ダンパ装備した場合の加振周波数1.3Hz以上の加振条件でのデータを取得することができなかった。そこで，地震対策ダンパ，現行ダンパを装備した場合の双方のデータが存在する加振周波数 1.2Hz までのものを試験結果として採用した。

4.2.3　地震波加振での試験結果

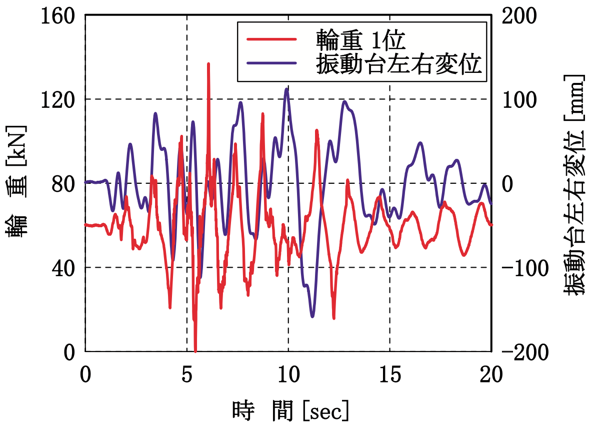
地震波加振の結果，定員乗車の条件で現行ダンパを装備した場合には加振倍率60%，地震対策ダンパを装備した場合には加振倍率 65% の時にそれぞれ輪重がゼロとなった。この際の輪重と振動台左右変位の時刻歴波形を図9に示す。地震対策ダンパを装備した場合には現行ダンパを装備した場合に比べ，1割程度大きな倍率の加振まで輪重がゼロとならず，走行安全性が向上しているこ

とがわかった。

地震対策ダンパを装備し，現行ダンパを装備した場合に輪重ゼロが観測された加振倍率60%の加振条件での輪重最小値を表5に示す。正弦波加振試験の結果と同様に，地震対策ダンパを装備した場合には，現行ダンパを装備した場合に輪重がゼロとなる加振条件においても輪重が残存し車輪がレールから離れていないこと，車体左右変位が小さくなっていることから，車体動揺が抑制され，走行安全性が向上していることがわかった。



(a)現行ダンパ装備時
(振幅倍率 60%)



(b)地震対策ダンパ装備時
(振幅倍率 65%)

図9 輪重ゼロ観測時の時刻歴波形

表5 現行ダンパで輪重がゼロとなる加振条件での比較

現行ダンパ		地震対策ダンパ	
輪重ゼロ観測部位	車体左右変位 [mm]	輪重最小値 [kN]	車体左右変位 [mm]
1位	83.1	7.2	80.0
3位		8.2	

4.3 数値計算による性能確認

4.3.1 計算概要

振動台での加振試験では，試験体が停止状態の半車体モデルであること，転倒防止リンクを有することなどの理由から，走行する車両を模擬した条件であるとは言い難い点がある。そこで，地震対策ダンパを装備した場合の走行安全性の向上効果を確認するため，試験で得られた減衰性能を反映した，速度275km/hで走行する新幹線1両モデルでの数値計算[1]を行い，走行安全限界振幅を調査した。また，比較のため，現行ダンパと同じ減衰性能の条件についても計算を行った。

4.3.2 数値計算の妥当性についての検証

地震時を模擬した数値計算では，一般的な車両運動解析とは異なり大変位を対象とした計算を行うこととなる。そこで，走行状態を模擬した数値計算に先立ち，振動台試験を模擬した計算を行い，その結果と試験結果を比較して数値計算の妥当性を検証した。検証結果の一例として，輪重の時刻歴波形を図10に示す。計算結果では，試験結果にある急峻なピークこそ再現できていないものの，全体の変動の様子については良く再現されており，特に輪重がゼロとなるタイミングについては良く一致していることが確認できた。このことから，地震のような状況を模擬した場合についても，数値計算により妥当な走行安全性の評価結果を得ることができると考えられる。

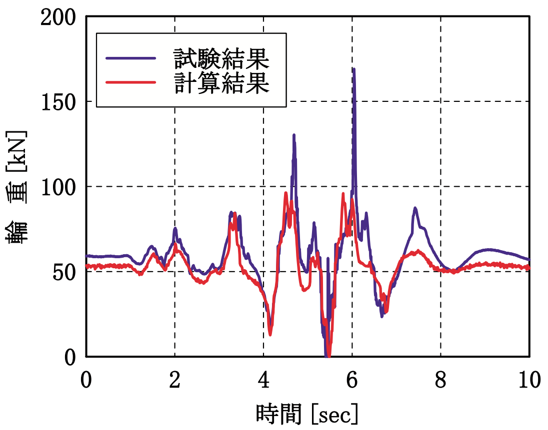


図10 計算結果と測定結果の比較による検証例

4.3.3 走行状態を模擬した計算結果

数値計算により得られた走行安全限界振幅を図11に示す。地震対策ダンパを装備した場合の走行安全限界振幅は，現行ダンパ装備時のものに比べ小さくなることはなく，広い周波数帯で大きくなっており，最大で17%程度大きくなった。また，この効果は，1.2Hz～2.4Hzの周波数帯において大きいことから，地震対策ダンパは，特に車体上心ロールによる脱線防止に効果が期待できることがわかった。

4.4 通常走行時の性能確認

地震対策ダンパを装備した場合においても，通常時の

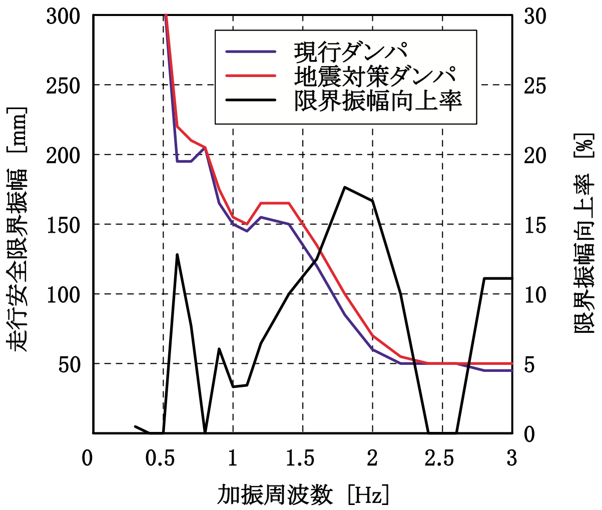


図 11　数値計算による走行安全限界振幅

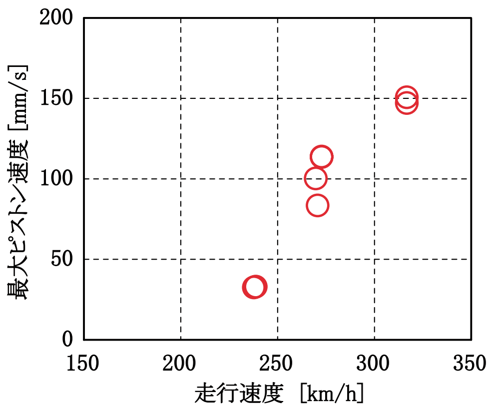


図 12　現車試験で観測されたピストン速度の最大値

走行性能を損なわないことを確認するため走行試験を実施した。高速試験用新幹線車両に地震対策ダンパを実装し，245km/h ～ 315km/h の走行速度における，ピストン速度を測定した。この結果，観測されたピストン速度の最大値は約150mm/secであった（図12）。ダンパ単体での試験結果より，ピストン速度 200mm/sec 以下の減衰性能は現行ダンパのものと変わらないことから，地震対策ダンパは通常時の走行性能を損なわないことが確認できた。

5．おわりに

地震時における鉄道車両の脱線を防止する方策のひとつとして地震対策ダンパを提案，試作し，各種試験によりその効果を確認した。その結果を以下にまとめる。

(1) ダンパ単体での加振試験により，ピストン速度が 200mm/sec 以下の通常時では，地震対策ダンパの減衰性能は現行ダンパと変わらないこと，ピストン速度が 200mm/sec を超える地震のような異常時では，地震対策ダンパが発生する減衰力は現行ダンパに比べ大きく，その大きさはピストン速度600mm/sec時で約 2 倍となることを確認した。
(2) 振動台での加振試験により，地震対策ダンパを装備した場合の輪重がゼロとなる加振振幅は，現行ダンパを装備した場合に比べ大きいことから，走行安全性が向上していることを確認した。
(3) 数値計算により，地震対策ダンパを装備した場合の走行安全限界振幅は現行ダンパを装備した場合に比べ大きいことから，走行安全性が向上していることを確認した。
(4) 現車での走行試験により，測定されたピストン速度の最大値は200mm/sec以下であることから，地震対策ダンパを装備しても常時の走行性能を損なわないことを確認した。

今後は，様々な車両での使用に対応できるようダンパの小型軽量化を図るとともに，現在，新幹線車両で採用されている振動制御装置と併用できるよう検討を進めていきたいと考えている。

謝　辞

地震対策ダンパの開発にあたり，ご協力いただいた KYB 株式会社の関係各位に対し，この場を借りて深く感謝の意を表す。

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－上下，左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーションー，日本機械学会論文集 C 編，Vol.64，No.626，pp.236-243, 1998
2）宮本岳史，石田弘明：台車改良による地震時走行安全性の向上に関する解析，鉄道総研報告，Vol.121，No.12，pp.35-40, 2007
3）宮本岳史ほか：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集　C 編，Vol.71，No.706，pp.1849-1855, 2005
4）宮本岳史：高減衰力ダンパおよび鉄道車両，特開 2008-284885
5）新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析，鉄道総研報告，特別第 52 号，2008.12