

# 大変位振動に対応した車両2次サスペンションの試験法

鈴木 貢\* 宮本 岳史\*\* 中嶋 大智\*\*  
飯田 浩平\*\* 西山 幸夫\*\*\* 植木 健司\*\*

## Test for Performance of 2<sup>nd</sup> Suspension of Vehicle in Large Vibration

Mitsugi SUZUKI Takeufumi MIYAMOTO Daichi NAKAJIMA  
Kohei IIDA Yukio NISHIYAMA Kenji UEKI

Investigations for railway safety against seismic motion can be carried out using a numerical simulation and an experiment on a vibration table. In case that the experimental result and the numerical analysis are not in agreement, one of the reason is considered that some parameters of springs and dampers are different between normal and large vibration. We have developed a new testing device for investigating performance of the 2<sup>nd</sup> suspension of railway vehicle when it is vibrating largely due to an earthquake. This paper presents a description of the testing device and some results of the experiment.

キーワード：地震，車両，大変位振動，振動台，2次サスペンション

### 1. はじめに

地震時の車両の走行安全性の検討は、その性質上、数値シミュレーション解析と振動台上の加振試験が中心となっている。これまでに振動台を用いて実施した実台車加振実験の結果を用いて数値シミュレーションの検証を行ってきた<sup>1)</sup>。地震時には車両が大きく変位して振動するため、ばね・ダンパの特性が通常走行時とは変化する可能性がある。

地震時の車両運動シミュレーション解析を高い精度で実行するには、大変位時のばね・ダンパ特性を把握することが必要である。台車組立状態での実際の振動形態あるいは車両挙動における各部品の振動性能を把握する必要があるが、これまでは組立状態で大変位時の性能を調査する試験機は存在しなかった。

鉄道総研では、大変位時の車体/台車間の2次サスペンションの挙動調査に特化した、大型振動台により運用する車両2次サスペンション試験装置を開発した。今回、本装置を用いて大変位加振時の周波数応答測定や空気ばね作用力の測定法を検討するための加振試験を実施した。

### 2. 試験装置概要

#### 2.1 大型振動試験装置

鉄道総研の大型振動試験装置は、鉄道の大規模地震に対する被害低減、今後の耐震対策等の開発に資すること

- \* 車両構造技術研究部（車両運動）
- \*\* 鉄道力学研究部（車両力学）
- \*\*\* 研究開発推進室（設計・試作）

を目的に、国土交通省からの補助金を受け建設し、2008年度に竣工した（図1）。

最大50000kgまで積載可能な7m×5mの振動テーブル上に供試体を設置し、油圧サーボ制御方式により加振を行う。加振方向はX軸、Y軸の水平2軸方向の加振のみであるが、X軸方向については最大変位±1m、Y軸方向については最大加速度±19.6m/s<sup>2</sup>での加振が可能であり、振動台としては国内最大級の加振性能を有している。また、加速度および変位制御により0.1~20Hzまでの周波数帯において正弦波および任意の地震波を模擬した加振が可能である。更に、加振時の波形の乱れを抑制する反力補償機能も設けている。

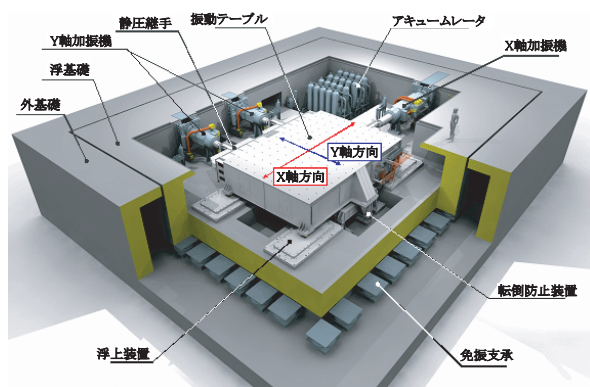


図1 大型振動試験装置

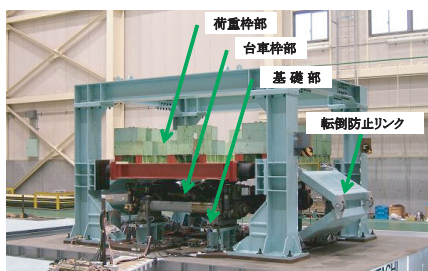
#### 2.2 車両2次サスペンション試験装置

大型振動試験装置の振動台上に設置して使用する車両2次サスペンション試験装置の外観写真と概要を図2に示し、試験体質量を表1に示す。

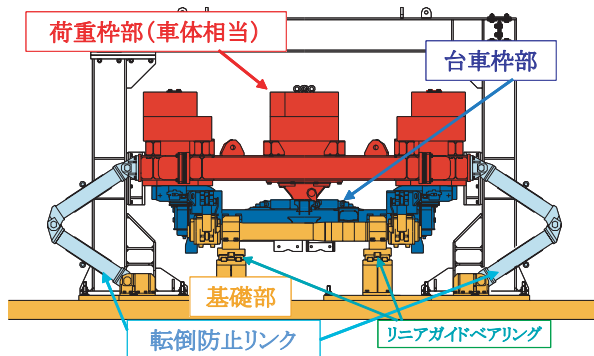
特集：鉄道力学

本装置は実物の新幹線用台車をもとに製作しており、振動台に取付ける基礎部、台車枠部、荷重枠部から構成され、転倒防止枠も含めて試験体総質量29,400kgになる。

2次サスペンションの挙動調査に特化させるため、通常の車両において複雑な挙動を示す車輪・レールを除いた。基礎部では車輪なしの軸箱付輪軸を振動台に固定している。ただし、車体が大きく振動する際には1本リンクで台車枠を引き上げる形になり、このとき台車枠が前後に変位する。この前後変位を許容するために、輪軸と振動台の間には前後方向のリニアガイドベアリングを挿入している。台車枠部は基礎部から軸ばねなどにより支持されており、通常の台車と変わらない。台車枠部と荷重枠部（車体相当）の間に供試空気ばねおよびダンパ類を配置し試験を実施する。この際、供試体の形状に合わせた取り付け用アダプタを作製することにより、様々な種類のものに対応が可能である。また、基礎部と荷重枠部の間は、荷重枠の前後方向の転倒とピッチおよびヨー回転を抑制するための転倒防止リンクが設けられている。荷重枠上にウエイトを取り付けることで、車体重量や重心高さに相当する諸元を調整する。



(a) 外観



(b) 構成概要

図2 振動台上の車両2次サスペンション試験装置

表1 車両2次サスペンション試験装置の質量 (×10<sup>3</sup> kg)

荷重枠部 (半車体)	空車相当	13.2
	(定員乗車相当)	16.2
台車枠部		1.7
転倒防止リンク		1.2
基礎部		10.3
合計	空車相当時	26.4
	(定員乗車相当時)	29.4

2.3 測定系

本試験装置における測定項目の一覧を表2に示す。本装置では主に車体・台車枠各部の加速度・変位と各部に働く力を測定した。輪重・横圧相当の力は基礎部に、左右動ダンパ力、軸ダンパ力、左右動ストッパ力は、それぞれの受座にひずみゲージを貼り、予め作用力とひずみの関係を検定し、作用力を測定した。

今回、特に着目する空気ばね関係については上下、左右変位の他、空気ばね本体内圧、補助空気室圧、左右力と上下力、差圧弁流量を計測した。空気ばね本体内圧は、圧力センサを組み込んだものを専用に試作した。空気ばね力測定については次節に述べる。

加速度、ひずみ出力ケーブルは振動台上の測定端子台に、変位計はセンサヘッドを試験体各部に設置し、アンプ類を振動台外に設置し出力を測定端子台につなぎ込み、振動台の加振データも含めて一括して1台のPC上でサンプリング周波数200Hzで記録した。なお、この大型振動試験装置に備え付けた計測システムでは測定データを最大256チャンネル、サンプリング周波数5kHzで記録可能である。

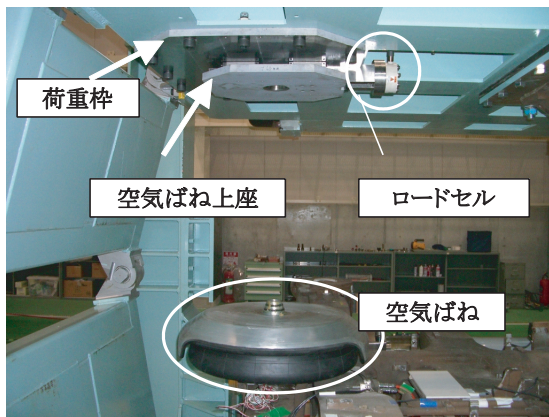
表2 測定項目一覧

項目	単位	測定範囲
輪重相当上下、横圧相当左右力	kN	0 ~ 200
左右動、軸ダンパ受作用力	kN	± 50
左右動ストッパ受作用力	kN	+ 100
振動台上下、左右加速度	m/s <sup>2</sup>	0 ~ 50
車体前後、上下、左右加速度	m/s <sup>2</sup>	0 ~ 50
台車枠左右加速度	m/s <sup>2</sup>	0 ~ 50
空気ばね、補助空気室内圧	MPa	0 ~ 1
差圧弁流量	ℓ/min	3 ~ 100
空気ばね上下、左右力	kN	± 100, ± 20
軸ばね上下変位	mm	± 25
台車枠左右変位	mm	± 10
空気ばね上下変位	mm	± 250
中心ピン上下相対変位	mm	± 250
車体上下、左右変位	mm	± 200, ± 500
左右動ダンパストローク	mm	± 100

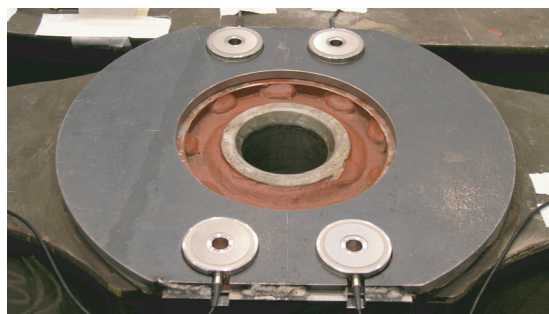
2.4 空気ばね力の測定

空気ばねに作用する力を左右と上下の2方向を独立に測定する。図3 (a) に示すように空気ばね上座を改造して、空気ばね左右力測定アダプタを荷重枠側に設置した。左右力測定アダプタは、荷重枠と空気ばね上座との間に左右方向に直動するリニアガイドベアリングを挿入し、空気ばね上座がロードセル測定軸に向かって低抵抗で滑るように設計し、空気ばね左右力をロードセルに伝達する。空気ばね上下力測定は空気ばね下座で、空気ばねの積層ゴム下と台車枠の間に図3 (b) に示す形で1空

気ばね当たり4個のロードセルを配置した。これらのロードセルは測定荷重100kNの圧電式ロードセルで、0.1Hz程度までの低い周波数の変動荷重まで測定可能である。このようにして加振中の空気ばねの上下力と左右力を測定することを可能にした。これらのアダプタを挿入することによる台車枠に対する車体高さの変化は、上下アダプタの場合に約20mm増、左右アダプタの場合に約25mm増となる。このように車体高さ変化を伴うため、現時点では上下力と左右力を同時には測定していない。空気ばね作用力測定法については、さらなる改良を予定している。



(a) 空気ばね上座(左右力測定アダプタ付)と空気ばねを上下に分離した状態



(b) 空気ばね上下力測定ロードセル (台車枠上の空気ばね下座周り)

図3 空気ばね作用力測定

### 3. 試験結果

#### 3.1 加振条件

地震時の車両挙動を調査するための加振条件として、大別して正弦波加振と地震波加振を実施する。加振方向は左右方向(まくらぎ方向)が車両に対し水平面内で最も厳しい加振方向であり、この水平加振に対する応答を調べるのが中心となる。正弦波加振では0.3~3.0Hz加振周波数一定で振幅を調節して入力し、各加振周波数毎に変化する振動モード毎の応答を調べる。地震波加振では、1995年兵庫県南部地震などで観測された代表的な地震動や、2004年新潟県中越地震時における新幹線の脱線地点での推定地震動などを加速度、速度、変位のいずれ

かの波形で入力することができる。

大変位時のサスペンション構成要素のばね・ダンパ諸元の同定のために、上下系諸元については上下加振試験の実施が必須となるが、本装置を運用する大型振動台は水平方向の加振のみ可能であるため上下加振を行うことが出来ない。そこで、上下系諸元の同定については荷重枠部をクレーンと電磁吸着器で一定の高さまで吊り上げ、切り離し、上下方向に自由振動させる方法で加振を行い、各部の変位および加速度を測定して実施した。

#### 3.2 左右加振による周波数応答試験

左右動ダンパの装備条件を変え、0.3~3Hzまでの周波数帯で正弦波による加振を行い、各部の変位および加速度を測定した。この際、加振振幅は加振加速度が全ての周波数で一定となる大きさとした。また、今回は中心ピンが車体左右動ストッパに接触しない条件で加振を行った。

各加振周波数毎にストッパ類に当たらない範囲の振幅で加振し、周波数毎の加振振幅に対する荷重枠左右変位の関係を整理し、周波数応答曲線を求めた。左右動ダンパのある場合となしの場合について、周波数応答試験結果を図4に示す。図4からは、加振周波数0.6Hzおよび1.3Hz付近における左右動ダンパの減衰効果を確認することが出来る。

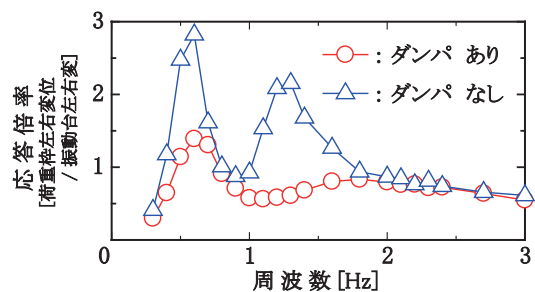


図4 左右加振の周波数応答試験結果

#### 3.3 空気ばね作用力測定試験

正弦波で左右に加振周波数0.5Hz 50Galで加振したときの空気ばねの左右変位と空気ばね左右力の測定結果例を図5に示す。図5(a)には車体一台車枠左右変位と、空気ばね上下変位の関係と同時に測定した空気ばね内圧のリサージュを、図5(b)には空気ばね左右力と車体一台車左右変位の関係を示した。この加振条件で振動する際に空気ばねの挙動は、図5(a)から、左右変位が負のときには空気ばねが上下に伸びて内圧は低下し、左右変位が正のときには空気ばねは上下に縮み内圧が上昇することが分かる。なお、左右一対のもう一方の空気ばねは対称な挙動となる。このときの空気ばね作用力は図5(b)のように変化し、左右変位に伴うヒステリシス損失がみられる。

通常の車両運動シミュレーション上で空気ばね左右力を線形ばねモデルで定義する場合には、図5(b)中に赤

特集：鉄道力学

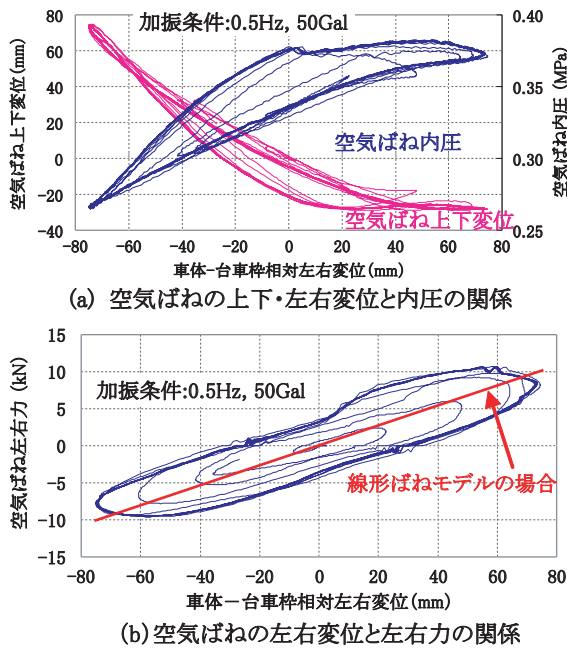


図5 左右加振時の空気ばねの変位と力

実線で示す形となる。この左右変位に伴うヒステリシス損失は、空気ばね左右変位にともなう減衰と考えられる。この空気ばねの左右方向の減衰効果は、左右加振に対し車体のロール振動が起こり、その結果空気ばね内容積変化が生じることで、この内容積変化に伴って減衰効果が発生していることと、空気ばねゴムの変形による損失によるものと考えられる。今後、この空気ばねの左右減衰力について詳しく調査する予定である。

3.4 異常時試験（パンク時の空気ばね左右力）

地震時に何らかの理由で空気ばねの空気が抜けてしまうトラブルが発生する可能性は十分に考えられる。このとき空気ばねの金属の上面板は、テフロン板を介して空気ばね内の積層ゴムに接触し、上下荷重が伝達される。この空気ばねパンク状態で加振された場合の空気ばね作用力を測定した結果を図6に示す。図6の縦軸に示した空気ばね左右力と上下力の比は、いわば摩擦係数に相当するものと考えられ、その値は左右の空気ばね（1位と2位）で若干差があるもののおよそ0.15~0.2程度であることが確認できた。

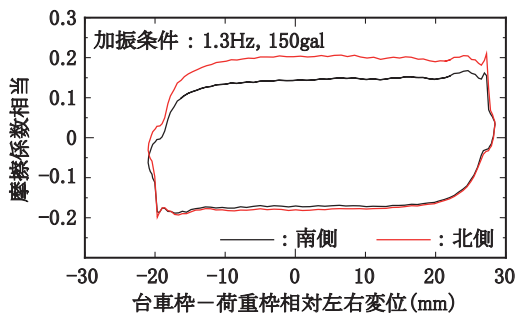


図6 パンク時の空気ばね左右力測定結果

3.5 上下加振試験

振動台上に設置した状態で、車体相当の荷重枠上部をクレーンで20mm程度引き上げ、静止させた後、クレーンと荷重枠の間に設置したリフティングマグネットの電磁力をカットして自由振動させる。このようにして実施した転倒防止リンクの影響を確認した実験結果を図7に示す。図7により、転倒防止リンクありの場合には、振動減衰が早く摩擦抵抗が大きいことが分かった。従って、転倒防止リンクの低抵抗化改造し再実験を準備中である。

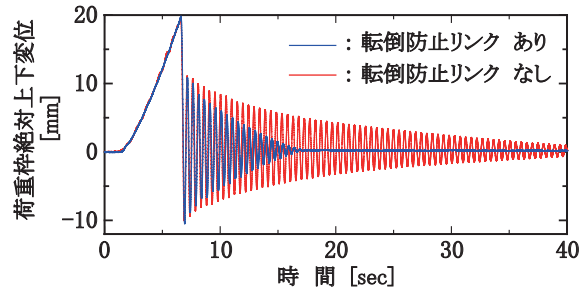


図7 上下加振結果（転倒防止リンクの有無比較）

4. まとめ

地震時のような大変位振動下における車両の2次サスペンションの特性を調査するための試験装置を開発し、各種加振試験を実施した。本装置は車体一台車間の空気ばねやダンパ、牽引装置などを在姿状態で大きく加振し、その時の応答を測定することができる。

在姿状態で空気ばね作用力測定法を開発した結果、単体試験では再現しえない、複雑な車両挙動中での空気ばね作用力の測定が可能となった。これにより従来は無視出来るほどに小さいものと考えられていた空気ばね左右方向振動時の振動減衰効果を調査することができた。

ただし、3.5節で示したように転倒防止リンクの減衰効果が大きいことが分かり、これを改造した再実験を予定している。これにより良好な結果が得られれば、この2次サスペンション試験法により、大きな左右振動に対する車両の応答性能を精度良く把握することができるようになる。

今後は、本試験法で得られるデータをもとに、大変位時の2次サスペンション周りのばね・ダンパ諸元の同定を進め、シミュレーション技術の高精度化を図りたいと考えている。

文献

- 1) 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，機論C, 71-706, 1849-1855, 2005