

# 地震時脱線対策クラッシュブルストップの開発

中嶋 大智\* 鈴木 貢\* 西山 幸夫\*\*  
宮本 岳史\* 梶谷 泰史\*\*\*

Development of the Crushable Stopper for Countermeasures against Derailment in Case of Earthquake

Daichi NAKAJIMA Mitsugi SUZUKI Yukio NISHIYAMA  
Takefumi MIYAMOTO Yasushi KAJITANI

We have developed a crushable lateral displacement stopper of which gap from a center pin can be expanded only when it receives a strong impact in such a case where an earthquake occurs. An improvement of running safety of railway vehicles in case of an earthquake is expected using the stopper together with a lateral damper specially designed for countermeasures against an earthquake. This paper describes an outline of the crushable lateral displacement stopper and results of a static load test and a shaking test using a full-scale vehicle model consisting of one bogie and a half carbody on the large shaking test facility of RTRI.

キーワード：地震，脱線，台車，左右動ストップ，クラッシュブルストップ，加振試験

## 1. はじめに

車両が比較的高い加振周波数帯（1.4Hz以上）を主体とする地震動によって大きく振動すると、車体が台車の左右動ストップに強く当たることが分かっている。このとき、車輪/レール間で発生する著大な横圧や台車のロール等の影響により、車輪がフランジ高さ以上に跳び上がって脱線に至る場合がある。ストップ遊間（以下、遊間と記す）が広い場合には、強い左右動ストップ当たりが緩和されるとともに、左右動ダンパによる振動減衰効果が大きくなることにより、走行安全性向上効果が期待できる<sup>1)</sup>。また、地震のような異常時にのみ大きな減衰力を発生する地震時脱線対策左右動ダンパ<sup>2)</sup>（以下、地震対策ダンパと記す）を併用することで、走行安全性向上効果はさらに大きくなると考えられている<sup>1)</sup>。

そこで、本研究では、地震時の走行安全性向上を目的に、地震対策ダンパとの同時運用を前提として、通常時は乗り心地や車両の走行安定性に影響を及ぼさないよう、従来の遊間を維持しつつ、地震のような異常時に強いストップ当たりが生じた際に遊間を拡大する地震時脱線対策クラッシュブルストップ装置（以下、クラッシュブルストップと記す）の開発を行った。

## 2. クラッシュブルストップの概要

地震のような異常時に強いストップ当たりが生じた際に遊間を拡大するクラッシュブルストップとして、動作機構にメカニカルヒューズを用いる機械式クラッシュブルストップを試作した。本装置では、左右動ストップに一定荷重（以下、動作設定荷重と記す）が作用すると、左右動ストップゴムの支持部が遊間拡大方向に変位する構造となっている。この動作設定荷重による確実な動作を確認するため、動作設定荷重を40kN、80kNと設定したものを2個ずつ試作した。

この他、動作機構に油圧回路を用いる油圧式クラッシュブルストップも開発しているが、本稿では機械式クラッシュブルストップの開発状況を報告する。

試作した機械式クラッシュブルストップの動作概念図を図1に示す。通常時はメカニカルヒューズにより内筒と外筒が固定されることにより遊間を維持する。ここに動作設定荷重以上の力が作用することでメカニカルヒューズが破断し、ストップゴムと接続された内筒が変位し遊間を50mm拡大する。なお、メカニカルヒューズの交換により繰り返しの使用が可能となる。

機械式クラッシュブルストップの外観を図2に、メカニカルヒューズを図3に示す。全体形状は動作設定荷重40kN用、80kN用共に全長414mm（ストップゴムを含む）、最大シリンダ径110mm、最大高144mm、最大幅220mm、重さは約28kg（ストップゴムを含む）である。メカニカルヒューズには黄銅（JIS C3604B）を使用し、

\* 鉄道力学研究部 車両力学研究室  
\*\* 研究開発推進室（設計・試作）  
\*\*\* 東日本旅客鉄道株式会社

特集：鉄道力学

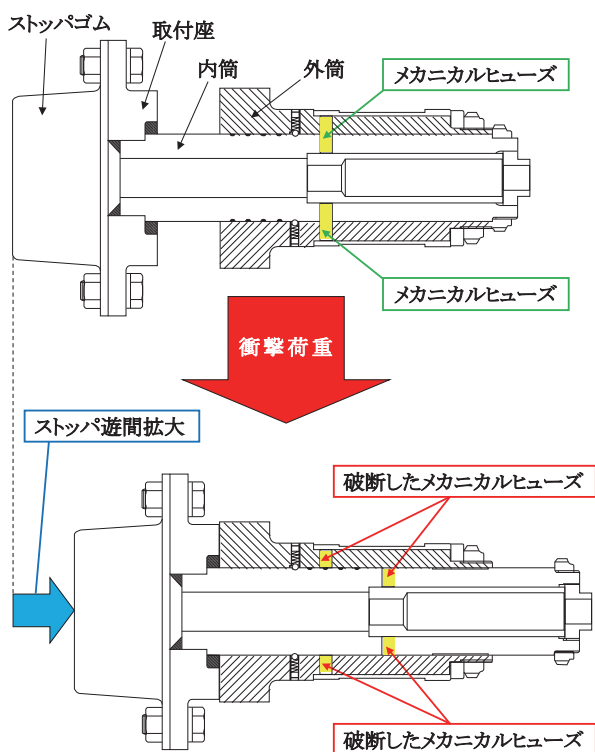


図1 機械式クラッシュブルストップ動作概念図

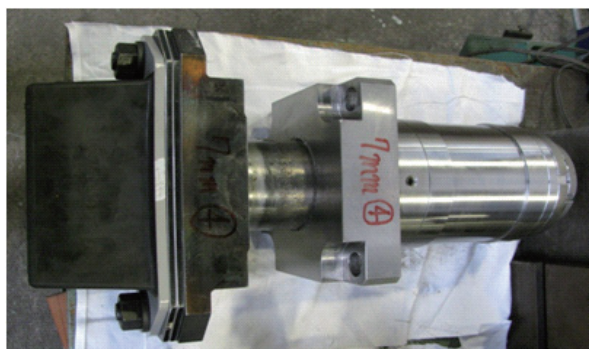


図2 機械式クラッシュブルストップ外観



図3 メカニカルヒューズ  
(動作設定荷重 80kN 用・直径 10mm × 長さ 29mm)

動作設定荷重に応じて異なるものをそれぞれ4本装着する。動作設定荷重 40kN 用では直径 7mm, 動作設定荷重 80kN 用では直径 10mm とした。

3. 静荷重試験

実台車に装備し動作設定荷重に対する基本的な動作を確認するため、静荷重試験を実施した。

3.1 試験方法

図4に示すように、門型プレス機を用いた試験装置により、メカニカルヒューズが破断するまで手動油圧ジャッキでゆっくりと荷重し、載荷荷重と可動部（内筒）の変位を測定した。

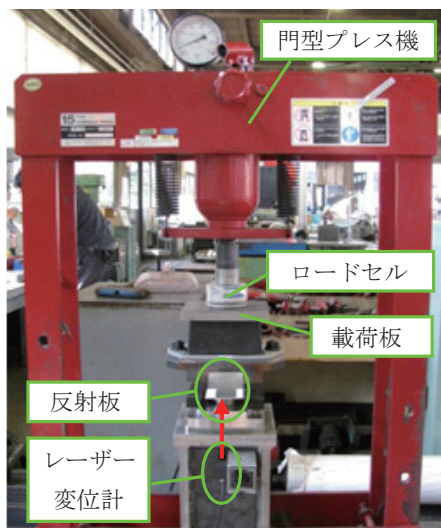


図4 静荷重試験装置

3.2 試験結果

測定結果の一例を動作設定荷重毎に図5, 図6に示す。

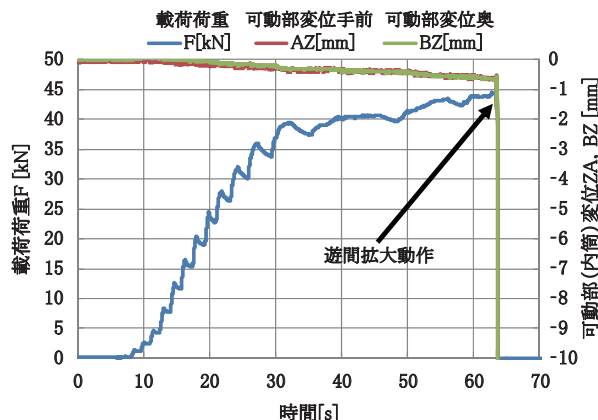


図5 測定結果の一例（動作設定荷重 40kN）

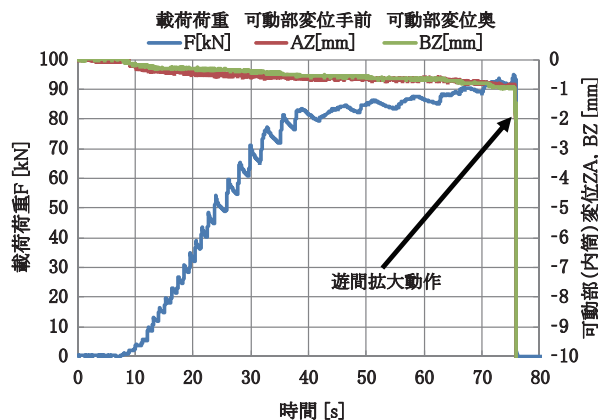


図6 測定結果の一例（動作設定荷重 80kN）

また、全試験結果を表1に示す。ここで、推定破断荷重とは事前に求めた実験式によりメカニカルヒューズの材質と直径から算出される動作荷重の推定値である。動作設定荷重80kN用は推定破断荷重より1割程度大きな値であったが、40kN用、80kN用ともに測定値のばらつきは小さいことから、安定して動作していることを確認した。

表1 静荷重試験結果

動作設定荷重	80kN		40kN		
推定破断荷重	83.9kN		43.5kN		
装置 No.	1	2	3	4	
動作荷重	1回目	94.5kN	94.4kN	45.7kN	44.0kN
	2回目	94.7kN	93.0kN	45.7kN	46.4kN
	3回目	92.4kN	92.1kN	44.4kN	44.5kN
	平均	93.8kN	93.2kN	45.3kN	44.9kN

#### 4. 実台車加振実験による動荷重試験

試作したクラッシュブルストップに、地震時の車体と台車の挙動の中で発生する衝撃的な力が作用した際の正常な動作および遊間拡大後の脱線防止効果を調査するため、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。

試験体の外観を図7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。荷重枠上にはウェイトを取り付け、この数量を変更することにより、空車相当、定員乗車相当等任意の車体質量を設定することができる。本試験では荷重枠の質量を定員乗車相当（16200kg）とした。輪重については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。

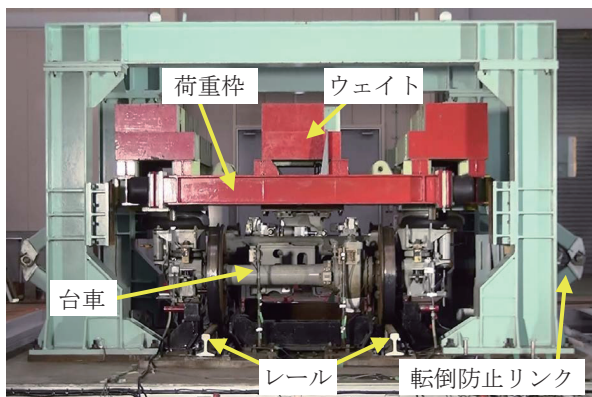


図7 実台車加振実験試験体外観

#### 4.1 ストップ遊間拡大試験

##### 4.1.1 試験条件

高い周波数成分を含む地震時には遊間が広い方が走行

安全上有利だと考えられている<sup>1)</sup>が、このことについての実験的な調査は行われていない。そこで、クラッシュブルストップの試験に先立ち、遊間を23mmに固定した条件とこれに対して遊間を30mm拡大した53mmの条件で正弦波加振を行い、残存する輪重を調査、比較することで走行安全性の向上効果を確認した。なお、この試験で設定した加振加速度については、遊間23mmの条件でストップ取り付け部の疲労荷重限度を超えない範囲でストップ当りが発生する最大のものとしたため、加振周波数毎の振幅や加速度は一律ではない。

##### 4.1.2 試験結果

各加振周波数における静的輪重に対する残存輪重の比（以下、輪重残存率と記す）を表2に示す。これより、加振周波数0.6Hz以下の場合には輪重残存率に遊間の違いによる有意な差は見られないものの、加振周波数0.7Hz以上の場合には遊間が広い条件で輪重残存率が大きくなっていった。以上のことから、遊間が広い場合の方が脱線に対する安全性が向上することを確認した。

表2 正弦波加振による遊間と輪重残存率の関係

加振条件		残存輪重 / 静的輪重 [%]	
周波数 [Hz]	加速度 [Gal]	遊間拡大 (53mm)	遊間固定 (23mm)
0.5	130	0.0	2.6
0.6	120	0.0	0.0
0.7	110	59.4	0.0
0.8	140	67.6	61.9
0.9	240	60.6	49.9
1.0	320	55.5	46.3
1.1	420	52.8	28.1
1.2	500	59.4	40.1
1.3	800	34.5	8.8
1.4	500	58.2	27.8
1.6	400	69.3	27.0
1.8	400	83.9	29.4
2.0	500	77.4	51.0
2.1	550	71.4	63.7
2.2	650	65.1	46.7
2.3	750	62.8	42.0
2.4	800	61.1	51.6
2.7	1000	60.3	45.4
3.0	1100	68.0	61.9

#### 4.2 クラッシュブルストップ機能確認試験

台車への取り付けの様子を図8に示す。クラッシュブルストップを既存の台車のストップ受座の位置に取り付けることは難しい。そのため、台車枠のつなぎばり上にクラッシュブルストップ支持台を溶接し、これにクラッシュブルストップを取り付けた。これに伴い、左右動ストップ高さは従来と比べて170mm程度上方へ移動する。また、中心ピン側でもストップゴムとの接触位置の変化を考慮し、当て板を装着する改造を行った。

図9に示すように、左右動ストップ作用力はクラッ

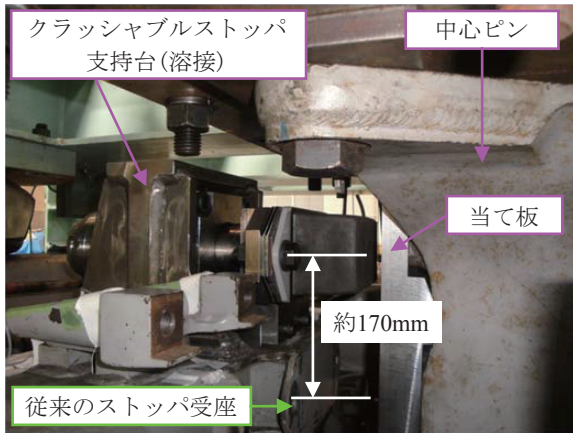


図8 台車への取り付け

クラッシュブルストップ支持台に貼付したひずみゲージにより測定した。クラッシュブルストップ支持台には上下方向力によるひずみも生じる可能性があるが、上下方向の载荷は困難であり、左右動ストップ作用力の校正は図10に示すように左右方向のみ実施した。また、左右動ストップパストロックは、図11に示すようにストップゴム底板に反射板を取り付け、レーザー変位計を用いて測定した。

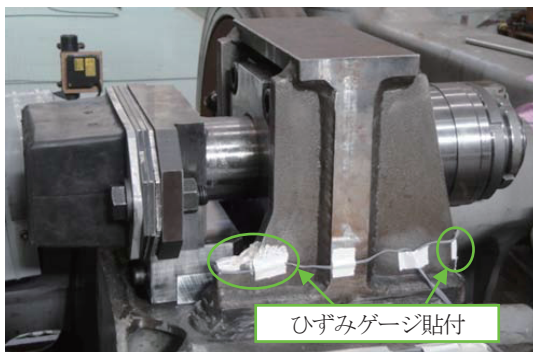


図9 左右動ストップ作用力測定

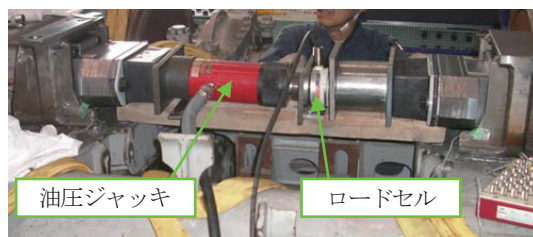


図10 左右動ストップ作用力校正作業

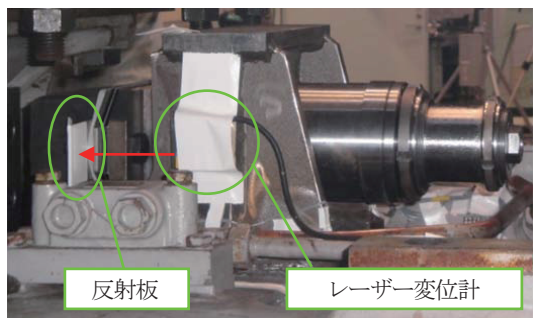


図11 左右動ストップパストロック測定

4.2.1 試験条件

正弦波および地震波で台車を左右(まくらぎ)方向に加振した。動作設定荷重毎の加振条件を表3,表4に示す。地震波加振については新潟県中越地震の十日町 BL R3高架橋上の推定地震動<sup>3)</sup>(以下、中越波と記す)を用い、振幅に対して任意の倍率(以下、加振倍率と記す)を乗じた波形で加振した。なお、クラッシュブルストップは、前述のとおり地震対策ダンパとの併用を前提としているため、その動作および効果を確認する全ての試験において地震対策ダンパを装備した条件で実施した。

表3 加振条件(動作設定荷重 40kN)

No.	周波数・加振加速度/波種・加振倍率			
	1回目	2回目	3回目	4回目
1-1	1.2Hz 500Gal	1.2Hz 600Gal		
1-2	1.0Hz 320Gal	1.1Hz 420Gal	1.2Hz 660Gal	
1-3	0.6Hz 50Gal	0.6Hz 70Gal	0.6Hz 80Gal	0.6Hz 90Gal
1-4	中越波 40%	中越波 45%		

表4 加振条件(動作設定荷重 80kN)

No.	周波数・加振加速度
2-1	1.4Hz 1100Gal

4.2.2 試験結果

遊間拡大動作した加振条件および各条件における遊間拡大動作前の左右動ストップ作用力最大値を表5に示す。

表5 加振試験結果

No.	動作設定荷重	加振条件	左右動ストップ作用力最大値
1-1	40kN	1.2Hz600Gal	42.91kN
1-2	40kN	1.2Hz660Gal	45.40kN
1-3	40kN	0.6Hz90Gal	49.96kN
1-4	40kN	中越波 45%	44.49kN
2-1	80kN	1.4Hz1100Gal	113.92kN

表5の加振条件のうち、No.1-2、正弦波 1.2Hz660Galの条件について遊間拡大動作を含む6秒間の左右動ストップ作用力と左右動ストップパストロックの時刻歴を図12に示す。機械式クラッシュブルストップでは、動作設定荷重以下の左右動ストップ作用力では遊間が維持され、動作設定荷重以上の左右動ストップ作用力によって遊間が拡大されることがわかった。

さらに、図12と同一の加振条件で、遊間を23mmに固定した場合と機械式クラッシュブルストップが遊間拡大動作した場合との輪重の時刻歴波形を比較した結果を図13に示す。遊間を23mmに固定した場合は輪重ゼロを確認したが、機械式クラッシュブルストップの遊

間拡大動作後の時刻では、輪重変動の減少および最大10.1kNの残存輪重の増加を確認した。これは20.3%の輪重残存率の増加に相当している。

中越波45%の条件について遊間拡大動作を含む6秒間の左右動ストップ作用力と左右動ストップストロークの時刻歴を図14に示す。地震波加振の場合も正弦波加振の場合と同様に動作設定荷重以下の左右動ストップ作用力では遊間が維持され、動作設定荷重以上の左右動ストップ作用力によって遊間が拡大されることを確認した。さらに、図14と同一の加振条件で遊間を23mmに固

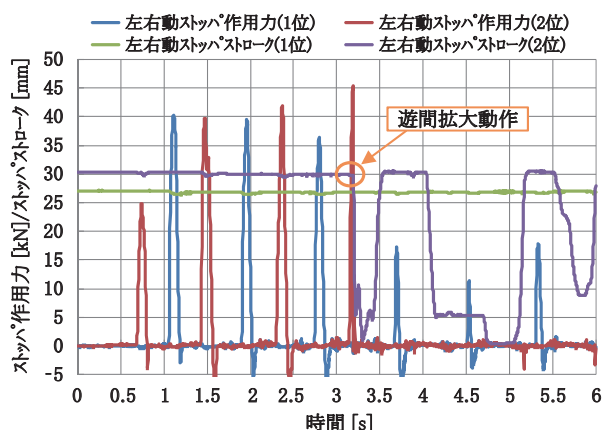
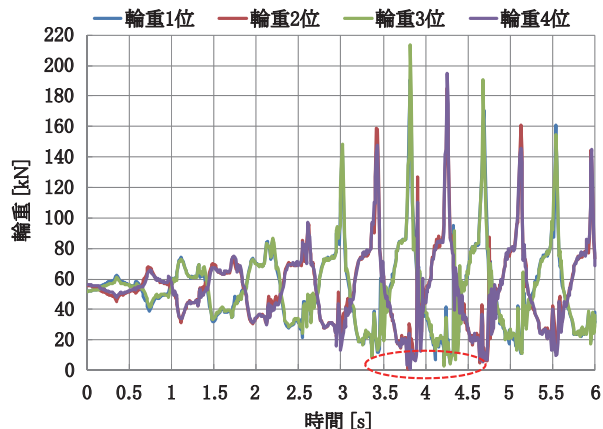
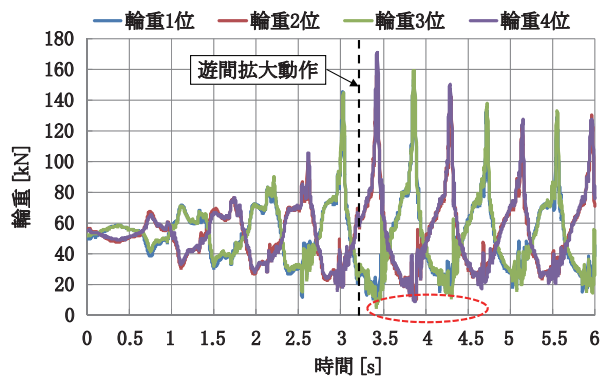


図12 左右動ストップ作用力とストップストロークの関係（動作設定荷重40kN・正弦波1.2Hz 660Gal）



(a) 遊間23mm固定



(b) 機械式クラッシュブルストップパ（動作）

図13 輪重の時刻歴波形比較（正弦波1.2Hz 660Gal）

定した場合と機械式クラッシュブルストップパが遊間拡大動作した場合との輪重の時刻歴波形を比較した結果を図15に示す。遊間を23mmに固定した場合も輪重ゼロは確認されなかったが、機械式クラッシュブルストップパの遊間拡大動作後の時刻では、輪重変動の減少および最大10.9kNの残存輪重の増加を確認した。これは18.2%の輪重残存率の増加に相当している。

表5の加振条件では、いずれも片側の遊間拡大動作が行われた後、反対側には強い左右動ストップ作用力がみられず、遊間拡大動作は片側のみとなっていた。そこで、

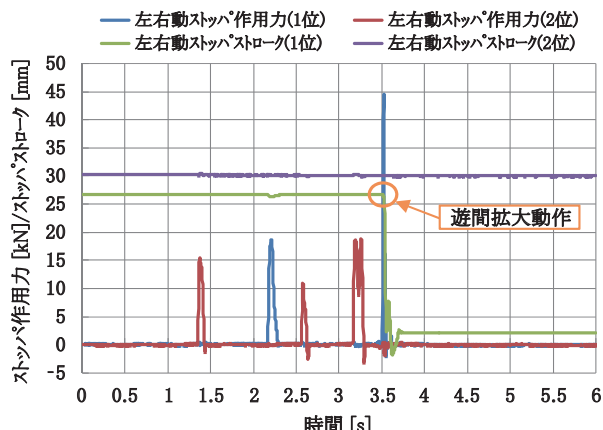
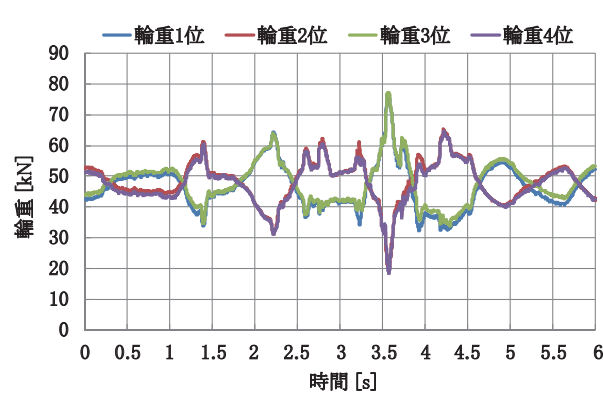
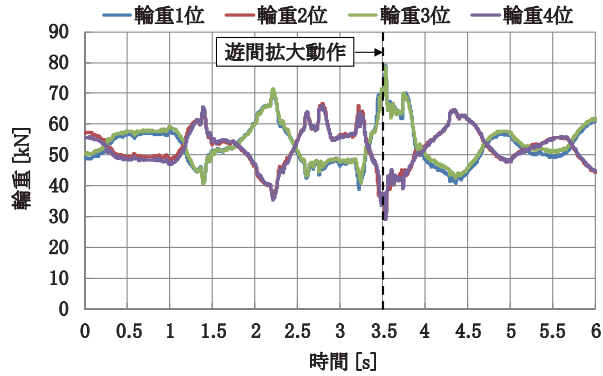


図14 左右動ストップ作用力とストップストロークの関係（動作設定荷重40kN・中越波45%）



(a) 遊間23mm固定



(b) 機械式クラッシュブルストップパ（動作）

図15 輪重の時刻歴波形比較（中越波45%）

特集：鉄道力学

遊間拡大動作時とその前後 1 周期における台車枠から見た中心ピンの動きを調べた。正弦波 0.6Hz90Gal の条件について結果を図 16 に示す。ここで、縦軸は中心ピン絶対上下変位、横軸は 2 位側を基準とした台車枠—中心ピン相対左右変位である。これにより、片側の遊間拡大動作が行われた後、中心ピンは遊間が拡大した側の左右動ストッパに寄った状態で変位していることがわかった。車体は空気ばねの復元力によって中心に戻るため、片側に寄った状態で振動することによる支障はないと考えられる。ただし、遊間拡大に伴って車体の左右方向可動範囲が大きくなるため、遊間拡大量によっては車両限界を侵す恐れがあることは留意しておく必要がある。

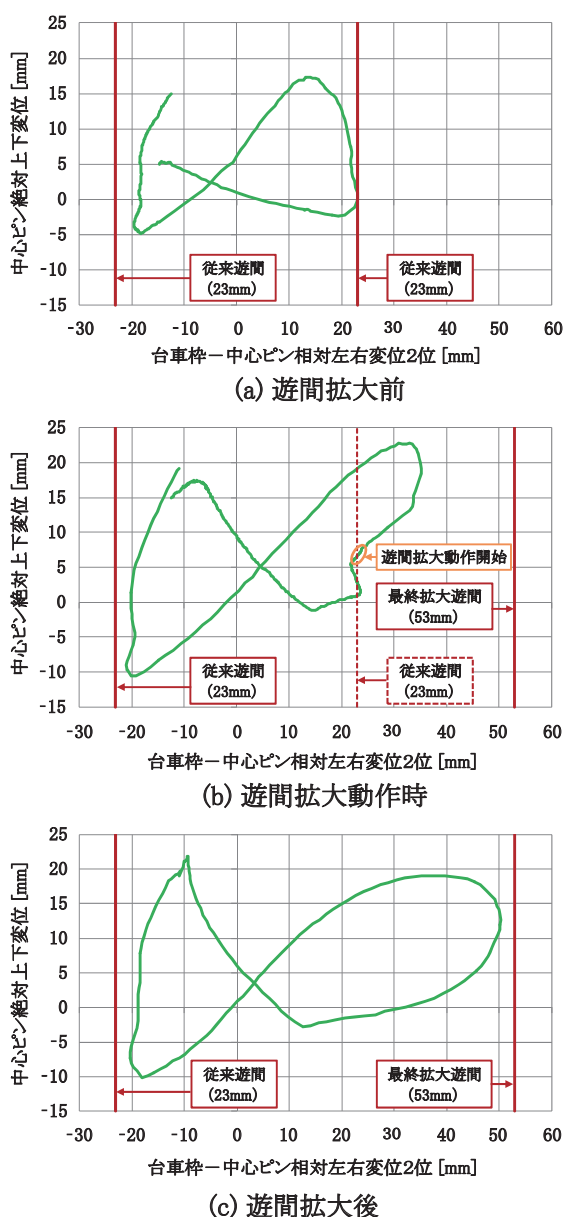


図 16 台車枠から見た中心ピンの動き (正弦波 0.6Hz 90Gal)

5. まとめ

地震時の走行安全性向上を目的に、地震対策ダンパとの同時運用を前提として、通常時は従来の遊間を維持し、地震のような異常時に強いストッパ当りが生じた際には遊間を拡大するクラッシュブルストッパを提案し、動作機構にメカニカルヒューズを用いる機械式クラッシュブルストッパを動作設定荷重 40kN 用、80kN 用の 2 種類試作した。これらの試作装置を用いて、静荷重試験による動作安定性確認および大型振動試験装置における加振試験による動作確認を行った。結果を以下にまとめる。

- (1) 静荷重試験の結果、動作設定荷重 80kN 用の動作荷重はメカニカルヒューズの推定破断荷重より 1 割程度大きな値であったが、40kN 用、80kN 用ともに測定値のばらつきは小さく、動作の安定性を確認した。
- (2) 遊間を 23mm に固定した条件と 30mm 拡大した 53mm の条件で 0.3Hz ~ 3.0Hz の範囲で正弦波加振試験を行った結果、加振周波数 0.6Hz 以下の場合には輪重残存率に遊間の違いによる有意な差は見られなかった。一方、加振周波数 0.7Hz 以上の場合には遊間拡大の条件で輪重残存率が大きくなっており、遊間が広い方が走行安全上有利であることを確認した。
- (3) 加振試験の結果、機械式クラッシュブルストッパでは、左右動ストッパ作用力が動作設定荷重以下では遊間が維持される一方、動作設定荷重以上では遊間が拡大され、遊間拡大動作後は輪重変動が減少し、残存輪重が増加することがわかった。また、片側の遊間拡大動作が行われた後、中心ピンは遊間が拡大した側の左右動ストッパに寄った状態で変位することがわかった。車体は空気ばねの復元力によって中心に戻るため、片側に寄った状態で振動することによる支障はないと考えられる。

今後は、機械式クラッシュブルストッパの疲労試験を実施する一方、並行して油圧式クラッシュブルストッパの開発を進めていくことを予定している。

文献

- 1) 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.21, No.12, pp.35-40, 2007
- 2) 鈴木真, 飯田浩平, 宮本岳史, 中嶋大智, 遠竹隆行, 梶谷泰史: 鉄道車両の地震対策用左右動ダンパの開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.6, pp.17-22, 2011
- 3) 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