

地震対策品の試験車両への搭載と 新手法を用いた安全性向上効果の評価

三苦 雅史* 北村 賢一 岩波 健 (JR 東日本)
飯田 浩平 (鉄道総研)

Installation of earthquake countermeasure devices on test vehicles and evaluation of safety improvement during earthquake using new method

Masashi Mitoma*, Kenichi Kitamura, Ken Iwanami, (East Japan Railway Company)
Kohei Iida, (Railway Technical Research Institute)

After the Niigata Prefecture Chūetsu Earthquake (also known as the Chūetsu Earthquake) in 2004, we worked to develop a lateral damper as countermeasure to derailment in the event of earthquakes, as well as a lateral displacement stopper, both with the aim of upgrading running safety during earthquakes. This paper describes a study of the installation of the developed products on the Shinkansen high-speed test train ALFA-X and the results of running tests. This paper also describes the methodology, established in recent years, used in estimating the probability of seismically-induced derailment in relation to the efficacy of the developed device. Based on the results of analysis, a decision was reached to discontinue the development of the above-mentioned lateral displacement stopper. The background of this decision is described in this paper.

キーワード：台車，地震対策，脱線，走行安定性，走行安全性

(Keywords, Bogie, Earthquake countermeasure, Derailment, Running stability, Running Safety)

1. はじめに

2004年に発生した新潟県中越地震において営業走行中の新幹線列車が脱線した⁽¹⁾。以降、2011年に発生した東日本大震災での経験⁽²⁾も踏まえつつ、地震時走行安全性を向上させる(地震時に脱線しにくくさせる)ために、以下の台車部品(地震対策品)の研究開発を行ってきた。

(1) 地震対策左右動ダンパ⁽³⁾

平常時に想定されるピストン速度領域では従来の左右動ダンパと同じ減衰力特性としつつ、それを超えるピストン速度領域(地震時には十分想定されるピストン速度)で大きな減衰力を発生することで地震時の車体・台車間の揺れを抑制し、脱線しにくくする。

(2) 地震対策クラッシュブルストッパ⁽⁴⁾

地震対策左右動ダンパとの併用を前提とし、平常時に想定される中心ピン-左右動ストッパ間接触力では動作せず、地震時に発生する著大な接触力でクラッシュ動作(遊間拡大動作)し、地震対策左右動ダンパのストローク拡大によりその効果を高める。

上記の台車部品について、従来の新幹線を対象に正弦波加振に対する安全限界線図を求めることで、その効果を調べ、以下の結果が得られている⁽⁵⁾。

- ・地震対策左右動ダンパ装備により 0.6Hz 以上の周波数

領域で安全限界振幅が増大する。

- ・地震対策クラッシュブルストッパ装備により、地震対策ダンパのみに比べ 1.3Hz 以上の周波数領域で安全限界振幅が増大する。

また、大型振動台を用いて、試作機を装備した実物台車の加振実験でも効果を確認している⁽³⁾⁽⁴⁾。

これらの結果を受け、世界では初となる、地震対策品を搭載した新車設計を行い、試験車両(新幹線高速試験電車 ALFA-X)を製作し、走行試験を実施した。前報⁽⁶⁾では、開発した地震対策品の定置試験結果および通常走行時における性能確認結果を報告した。本稿では、地震対策品搭載に向けて車体・台車側で検討した事項、完成車を対象に新たな手法を用いた地震時走行安全性評価、および走行試験で得られた知見について報告する。

2. 現車搭載に向けた検討

開発品を試験車に搭載するに当たり、主に地震時における中心ピンと台車枠の強度検討及び車体と台車の干渉検討を行った。

強度検討においては、地震時における地震対策左右動ダンパ荷重及びクラッシュブルストッパと中心ピンの接触力を中心ピン及び台車枠に負荷し、FEM 解析にて強度検討を

行った。解析結果より中心ピン、台車枠共に強度上問題ないことを確認した。

干渉検討においては、地震対策クラッシュブルストップがクラッシュ動作した際の車体と台車部品の干渉検討を行った。クラッシュブルストップがクラッシュ動作した際には車体側の中心ピンと台車枠の遊間が広がることで、台車と台車カバーが一部干渉する条件があったが、台車カバーの落失につながるような大きな干渉ではないことを確認した。

3. 試験車両への搭載

2019年5月～12月にかけて、試験車両にこれらの開発品を搭載し、速度320～400km/hでの12回の現車走行試験にて性能を確認した。図1に試験車両に搭載した地震対策左右動ダンパと地震対策クラッシュブルストップを示す。試験測定は、3号車、6号車、7号車にて実施した。走行試験期間中大きな地震は発生せず、通常走行時の性能について確認した。地震対策左右動ダンパについては、ダンパ速度が通常時のダンパ速度内であった。クラッシュブルストップについても中心ピン接触時の応力に関して、降伏破壊、疲労破壊を超えた入力は認められなかった。よって両開発品は、地震時以外の通常走行時においては、強度および耐久性に問題ない。詳細な試験結果については前報⁶⁾にて報告済みである。

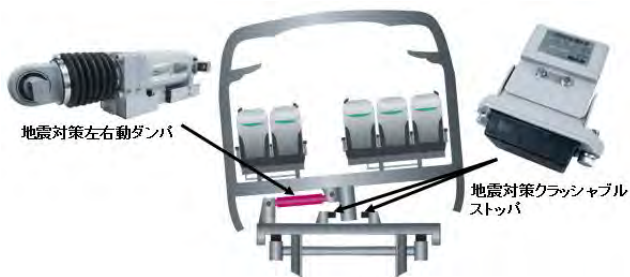


図1 試験車両に搭載した地震対策品

Fig. 1. Developed devices installed on test train

4. 新たな評価法を用いた地震対策品の評価

前章で述べた検討を経た、完成車としての試験車両諸元において、シミュレーションにより地震対策品の効果を正弦波加振に対する安全限界線図で確認した。その結果、地震対策左右動ダンパは当初の目論見どおりの効果が確認できたが、クラッシュブルストップについては、高い周波数領域で安全限界振幅が増大する一方、低い周波数領域では安全限界振幅が減少することがわかり、現実的な地震波に対する走行安全性向上効果の判断ができなかった。そこで、近年開発した、地震時軌道面振動波形から脱線発生確率を推定する手法を用いて、確率的観点から地震時走行安全性向上効果を調べた。

〈4・1〉 地震時脱線発生確率推定法の概略 脱線発生確率推定の前提条件は以下の通りである。

- (a) 想定した地震は発生したものとする（地震自体の発生確率は考慮しない）。
- (b) 一般性を有する軌道面振動（275種）に発生への偏りは無いものとする。
- (c) 車両は想定した地震に遭遇したものとする（車両の存在確率は考慮しない）。
- (d) 軌道上各地点は同様の波形で振動したものとする（隣接構造物間の動的な角折れや目違いは考慮しない）。

手法のフローを図2に示す。詳細については文献(7)を参照されたい。

〈4・2〉 評価結果 現実的な地震時軌道面振動として、過去に発生した代表的な地震の地表面地震動に対する、構造物天端応答を算出した。構造物条件は以下の通りである。

構造物固有周期：0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 秒

構造物減衰：5%

構造物降伏震度：0.5

地震対策品を装備している試験車両の地震対策無し相当として、左右動ダンパについては従来車の左右動ダンパ特性、クラッシュブルストップについてはクラッシュ動作無し（具体的には動作荷重を大きな値に設定）とした。地震対策無し、地震対策左右動ダンパのみ装備、地震対策左右動ダンパおよびクラッシュブルストップ装備の各条件で上記地震時軌道面振動に対する脱線発生確率推定値の比較を図3に示す。図3(a)が地震対策なしと地震対策左右動ダンパのみ装備の比較、図3(b)が地震対策左右動ダンパを装備した上でクラッシュブルストップ装備の有無の比較である。それぞれの図において、斜め45度の破線上に解析結果のプロットがあれば地震対策品の有無で脱線発生確率が等しく、破線よりもプロットが下であれば地震対策品装備により脱線発生確率が減少、すなわち安全性が向上することを意味する。図3(a)より、地震対策左右動ダンパは現実的な地震波に対して脱線発生確率を最大5割低減することがわかる。一方、図3(b)より、地震対策クラッシュブルストップ装備により、地震対策左右動ダンパのみ装備の場合よりも脱線発生確率が増加していることがわかる。この原因の一つとして、前述したようにクラッシュブルストップ装備により低い周波数領域で安全限界振幅が減少するが、現実的な地震時軌道面振動において、低い周波数領域の振幅成分が高い周波数領域よりも大きいことが挙げられる。

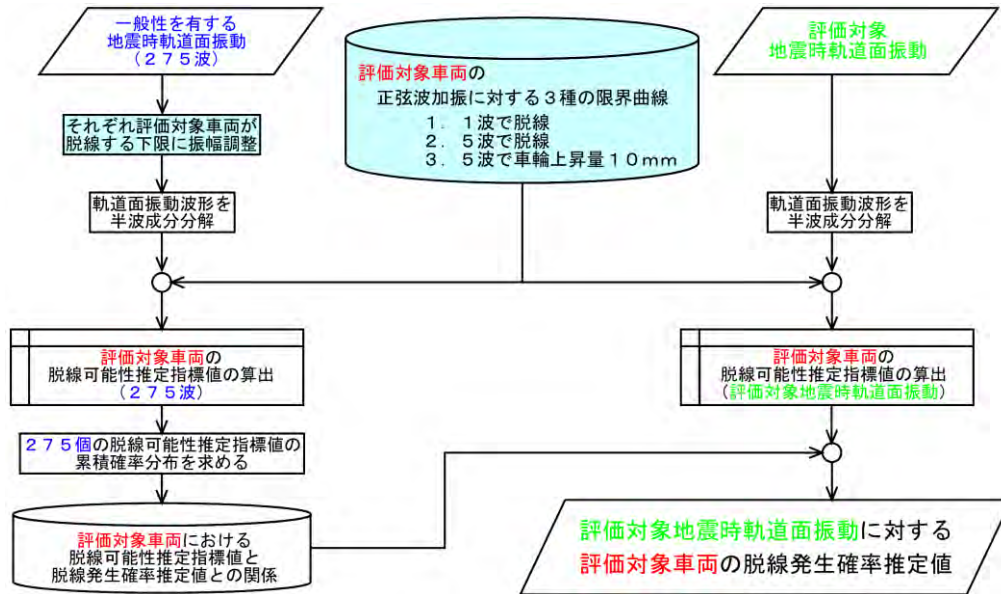
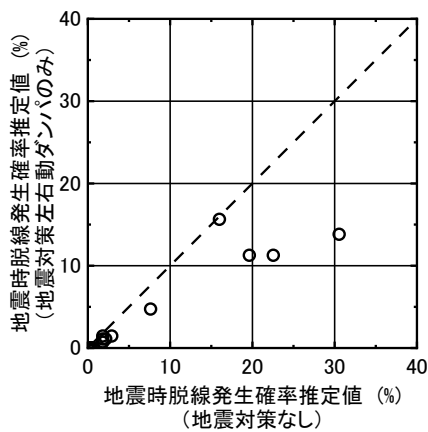
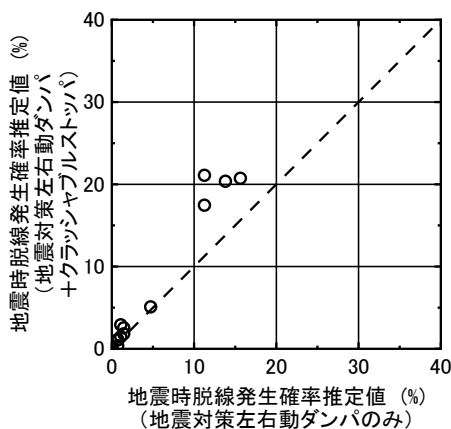


図 2 地震波から脱線発生確率を推定する手法のフロー

Fig. 2. Flow chart of derailment occurrence probability estimation during an earthquake.



(a) 地震対策左右動ダンパの効果



(b) クラッシュブルストッパの効果

図 3 地震対策品の有無による地震時脱線発生確率の比較

Fig. 3. Comparison of derailment occurrence probability during earthquakes between with and without earthquake countermeasures.

〈4・3〉 クラッシュブルストッパ機能停止 前項の解析結果により、試験車両の全台車においてクラッシュブル機能を停止させることとした。図 4 にクラッシュブル機能を停止し新たに試験車両に搭載したクラッシュブルストッパ (以下、機能停止品) を示す。機能停止品と中心ピンとの遊間はクラッシュブルストッパと中心ピンの遊間と同等とし、走行への影響がないように配慮した。また、地震時にクラッシュブルストッパのピンが破断する荷重である 120kN に耐えうる設計とし、FEM 解析にて強度上問題がないことを確認した。



図 4 クラッシュブル機能を停止した左右動ストッパ

Fig. 4. Lateral displacement stopper without crushable function

〈4・4〉 クラッシュブルストッパ取り外し後の調査結果 取り外したクラッシュブルストッパについて、分解調査を行った。特に地震時に大きな衝撃を受け破断するピンについて (以下、破断ピン) について状態の調査を行った。なお、調査部位に記載の海側は東北新幹線の新青森方に向かって右側を示し、山側は東北新幹線の新青森方に向かって左側を示す。

調査部位：台車形式の異なる各 3 台車の海側山側
計 6 箇所

調査方法：目視でのピンの状態確認、浸透探傷試験

図 5 と図 6 に各台車における山側及び海側の破断ピンの状態をそれぞれ示す。なお、一つのクラッシュブルストップにつき、破断ピンは 6 本取り付けられている。図 5 及び図 6 より通常走行時の中心ピンのストップ当たりにより、ピンの中央部分（地震荷重が負荷された時に破断する部分）にストップ部品との接触痕が見受けられた。そこで、浸透探傷試験を行い、傷の有無を確認した。

図 7 と図 8 に各台車における山側及び海側の破断ピンのカラーチェック写真をそれぞれ示す。図 7 及び図 8 より傷は見受けられず、通常走行における中心ピンとクラッシュブルストップの接触においては、破断ピンに大きな影響はなく、地震時以外の通常走行時の強度や耐久性には問題がないと言える。



図 5 山側破断ピンの状態

Fig. 5. Break pin on the mountain side



図 6 海側破断ピンの状態

Fig. 6. Break pin on the sea side



図 7 山側破断ピンの浸透探傷試験結果

Fig. 7. Liquid penetrate test of the break pin on the mountain side



図 8 海側破断ピンの浸透探傷試験結果

Fig. 8. Liquid penetrate test of the break pin on the sea side

5. まとめ

従来よりも地震時走行安全性を向上させることを目的とし、世界では初となる、地震対策左右動ダンパおよび地震対策クラッシュブルストップを搭載した新車設計を行い、試験車両を製作し、走行試験を実施した。完成車としての試験車両諸元を対象に、シミュレーションにより、現実的な地震時軌道面振動に対する走行安全性向上効果を評価した結果、地震対策左右動ダンパは脱線発生確率を最大 5 割低減することがわかった。一方、地震対策クラッシュブルストップは地震対策左右動ダンパのみを装備した場合に比べ、脱線発生確率が上昇することがわかった。これにより、試験車両 ALFA-X においては、全台車の地震対策クラッシュブルストップを交換し、クラッシュブル機能を停止させた。今後は地震対策左右動ダンパを中心にさらなる耐脱線性能向上に向けて開発を進めていく。

文 献

- (1) 航空・鉄道事故調査委員会：「東日本旅客鉄道株式会社上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故」，事故調査報告書，RA2007-8 (2007)
- (2) 堀岡健司：「東北地方太平洋沖地震における新幹線脱線メカニズム解明と地震対策について」，JR EAST Technical Review, No.45, pp.13-16 (2013)
- (3) 鈴木貢・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)
- (4) 中嶋大智・鈴木貢・西山幸夫・宮本岳史・梶谷泰史：「地震時脱線対策クラッシュブルストップの開発」，鉄道総研報告，Vol.27, No.10, pp.17-22 (2013)
- (5) 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)
- (6) 高杉誠・江戸義博・岩波健・山下忠志・飯田浩平・中嶋大智・小川貴之，佐々木裕泰：「地震に強い台車の開発～高速試験車 ALFA-X 台車への地震対策ダンパ，クラッシュブルストップの搭載～」，第 27 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2020) 講演論文集，S6-1-1 (2020)
- (7) 飯田浩平・宮本岳史・川西智浩：「地震時における鉄道車両の脱線可能性を地震波から推定する方法」，日本機械学会論文集，Vol.85, No.874, DOI: 10.1299/transjsme.18-00339 (2019)