

第96回

鉄道車両の地震対策

はじめに

日本は世界でも有数の地震大国です。1923年に発生した関東地震（関東大震災）で鉄道が受けた被害は甚大で、鉄道においても構造物の耐震化から地震対策に取り組まれるようになりました。ここでは地震時の脱線の歴史とともに地震対策の経緯と今後について述べます。

近年の地震による脱線事例と施設側の地震対策

1995年以降に発生した地震が原因と考えられる国内の列車脱線事例を表1に示します。幸いにも表1に示した地震による列車脱線で亡くなられた乗客・乗員はいません。1995年兵庫県南部地震では複数の高架橋・橋りょうで落橋や桁ずれが生まれました。軌道が破壊されると車両が走行できないため、兵庫県南部地震以降、高架橋柱な

どの補強が行われ、新設構造物の耐震性については設計標準が改められています¹⁾。一方で構造物・軌道に目立った損傷がなく、地震の揺れにより脱線したと考えられる列車もありました（図1）。そのほかにも、2003年宮城県北部の地震では気動車列車が脱線しており（図2）、2003年十勝沖地震、2016年熊本地震（本震）でも気動車列車が脱線しました（十勝沖地震では気動車列車に組み込まれた客車の脱線でした）。2005年新潟県中越沖地震では駅停車中の電車が大きく傾くように脱線しました（図3）。2011年東北地方太

平洋沖地震では貨物列車（コンテナ貨車）が脱線しており、近年においても大きな地震時には、車両の種類を問わず脱線が発生しうることがわかります。

一方、地震発生時に列車を速やかに停止させることで、脱線発生の可能性を低減させたり、被災箇所への列車の侵入を抑制する取り組みも行われています。新幹線では早期地震警報システムにより地震発生時に強い揺れが観測もしくは予測された際、自動で非常ブレーキが作用する仕組みとなっています。また、在来線は早期地震警報の発報に従い、運転士が手動でブレーキを

表1 列車脱線が発生した日本国内の地震（1995年以降）

震央地名	発生日時	マグニチュード	震源深さ (km)	最大震度	脱線列車本数
兵庫県南部	1995年 1月17日 5時46分	7.2	18	7	16
宮城県北部	2003年 7月26日 7時13分	6.4	12	6強	1
十勝沖	2003年 9月26日 4時50分	8.0	42	6弱	1
新潟県中越	2004年10月23日 17時56分	6.8	13	7	1
新潟県中越沖	2005年 7月16日 10時16分	6.8	17	6強	1
東北地方太平洋沖	2011年 3月11日 14時46分	9.0*	24	7	2
熊本(前震)	2016年 4月14日 21時26分	6.5	11	7	1
熊本(本震)	2016年 4月16日 1時25分	7.3	12	7	1

※モーメントマグニチュード



図1 1995年兵庫県南部地震の揺れにより脱線した電車（提供：阪急電鉄）



図2 2003年宮城県北部の地震で脱線した気動車

出典：「鉄道事故調査報告書」（運輸安全委員会）（<http://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acc/RA2004-4-4.pdf>）（2020年3月10日に利用）



図3 2005年新潟県中越沖地震で脱線した電車

出典：「鉄道事故調査報告書」（運輸安全委員会）（<http://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acc/RA2008-6-2.pdf>）（2020年3月10日に利用）



(a) 2004年新潟県中越地震

出典：「鉄道事故調査報告書」(運輸安全委員会)
 (http://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2007-8-1.pdf) (2020年3月10日に利用)



(b) 2011年東北地方太平洋沖地震

出典：「鉄道事故調査報告書」(運輸安全委員会)
 (https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-acci/RA2013-1-1.pdf) (2020年3月10日に利用)



(c) 2016年熊本地震(前震)

(提供：JR九州)

図4 地震の揺れにより脱線した新幹線列車(国内では3例のみ)

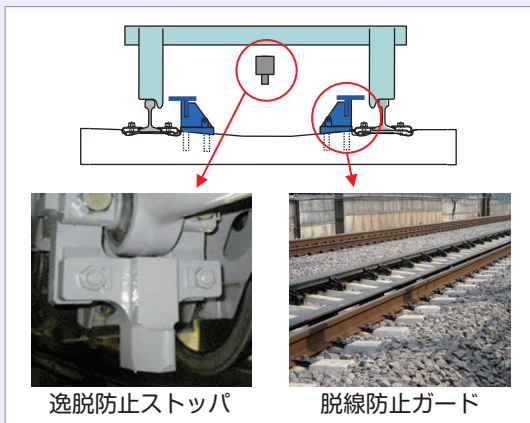


図5 脱線防止ガードおよび逸脱防止ストッパ
 (提供：JR東海)

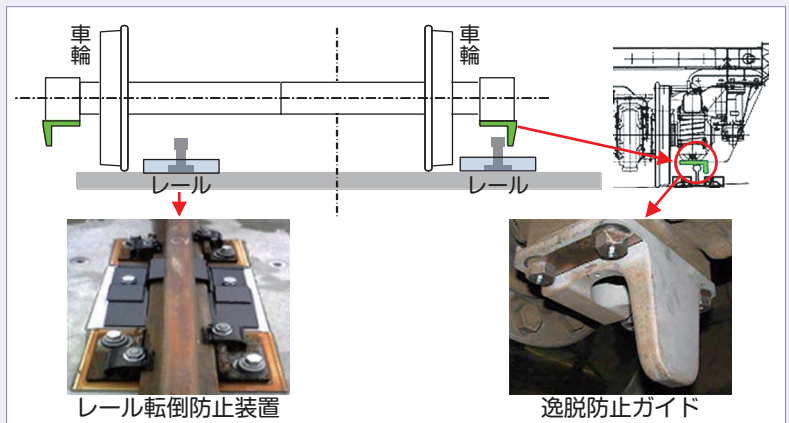


図6 逸脱防止ガイドおよびレール転倒防止装置
 (提供：JR東日本)

かけ、車両を減速、停止させる方法が一般的となっています。

地震による新幹線列車の脱線と地震対策の進展

前章で示した対策を行っても脱線が発生する場合もあり、2004年新潟県中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震および2016年熊本地震(前震)では新幹線列車が脱線しています(図4)。新潟県中越地震において、営業中の新幹線列車が高速走行時に脱線したことは、地震時の車両走行安全性をさらに向上させる必要性を世に広く認識させることになりました。新潟県中越地震以降、軌道部材や車両部品において地震対策品を用いることで、車両自体を地震時に脱線しにくくしたり、万が一脱線した場合も軌道から大きく逸脱し

ないようにするという発想で精力的に研究開発が行われています。

軌道における地震時脱線・逸脱防止技術

新潟県中越地震以降に開発された地震時の脱線防止、軌道からの逸脱防止を図る軌道側の対策技術について以下に示します。これらは新幹線を対象に開発され、現在営業線への展開が行われています。

・脱線防止ガードおよび逸脱防止ストッパ(図5)

在来線においておもに乗り上がり脱線防止を目的として設置され、実績のある脱線防止ガードを参考にし、新幹線の地震対策用の脱線防止ガードが新たに開発されました。本装置は地震時に輪軸が左右に動いた際、車輪の内側

面と脱線防止ガードが接触することで、それ以上輪軸が左右に動かないようにします。脱線防止ガードは地震時に作用する荷重に対応するため強度を強くしています。なお、この脱線防止ガードはヒンジを介して軌道内側に折り畳める構造になっており、軌道の保守作業への影響の軽減が図られています。本技術は東海道新幹線および九州新幹線で用いられています。また、車両の台車下部に逸脱防止ストッパを設け、万が一脱線防止ガードを越えて脱線してしまった場合にも、ストッパが脱線防止ガード背面に接触することで、それ以上車両が軌道から逸脱しないように考えられています。

・逸脱防止ガイドおよびレール転倒防止装置(図6)

軸箱下端にL型のガイド(逸脱防止ガイド)を設け、万が一の脱線後、車

輪側面または逸脱防止ガイドがレールと接触することで、輪軸、ひいては車両が大きく軌道から逸脱することを防止する機構です。脱線した車輪によってレールの締結装置が破壊されてもレールが転倒しないようにレール転倒防止装置もあわせて設置されます(図6)。本技術は東北・北海道新幹線および上越・北陸新幹線で用いられており、2011年東北地方太平洋沖地震において新幹線が脱線した際、想定どおり逸脱防止ガイドが機能したことが確認されています。

・逸脱防止ガード(図7)

軌道内にガード材を設置し、脱線後

の逸脱を防止する機構です。レールとガード材間の離隔は、脱線後に対向列車やトンネル側面などとの接触を避けるのに十分な距離を確保しつつも、それらの離隔は比較的大きくとれるため、軌道の保守作業を支障しにくいというメリットがあります。本技術は山陽新幹線で用いられています。

地震時の車両挙動解析技術

地震時の車両の安全性を高める研究開発を行うにあたり、実際に地震を起こして走行試験を行うことはできません。そこで、地震時の車両挙動を数値

シミュレーションにより推定し、安全性を評価しています。数値シミュレーションプログラムのうちの一つに鉄道総研開発の車両運動シミュレーターVDS(VDS: Vehicle Dynamics Simulator)があります。VDSは一般的な車両運動解析に加え、地震時のように大きく振動する軌道上を走行する車両の挙動解析も実施することができます²⁾。本シミュレーションプログラムは2004年新潟県中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震(前震)における新幹線脱線事故の脱線メカニズム解明にも活用されています。VDSを用いて構造物上の地震時車両挙動解析を実施する際は、図8に示すように、まず構造物の地震応答解析(地盤の応答解析、構造物の動的解析)により軌道面の応答を求め、それを入力軌道面振動として車両挙動を解析しています。地震時車両挙動解析では、「車輪・レールの相対左右変位」に着目し、その値が±70mmに達した時点で「脱線」と判定しています。そのときに輪軸の姿勢は図9に示すように車輪フランジがレール頭頂面上に完全に乗り、車輪がレールから外れる直前の状態となっています。

・正弦波加振に対する安全限界線図

車両の地震時の脱線に対する基礎的な耐性を評価するために「正弦波加振に対する安全限界線図」を求めています(図10)。これはグラフの横軸に周波数を取り、縦軸にその周波数の正弦波5波が軌道面振動として入力された際に車両が脱線しない(=「安全」)限界の加振振幅をとっています。この図をみると、その車両が脱線しやすい周波数帯域やその振幅を把握することができます。

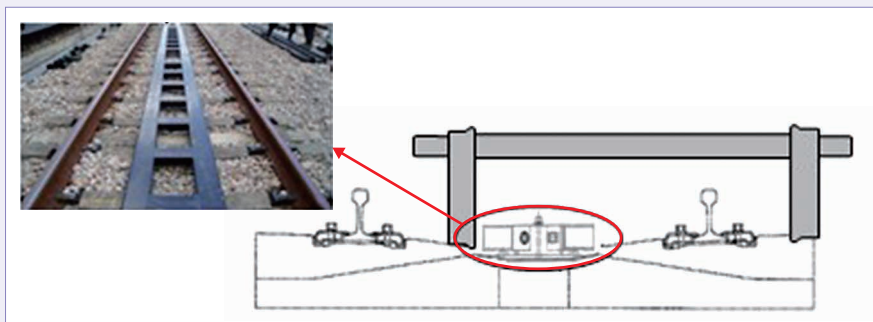


図7 逸脱防止ガード(提供: JR西日本)

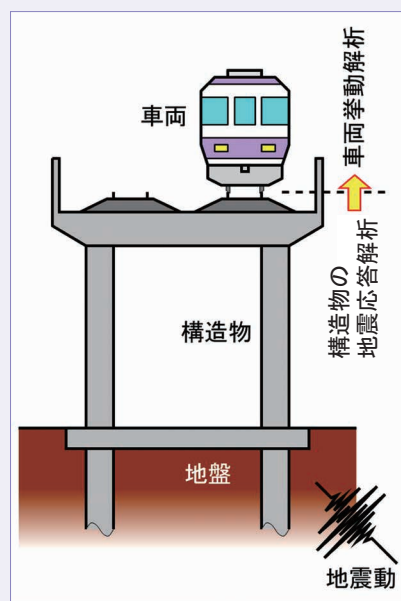


図8 VDSによる構造物上の地震時車両挙動解析

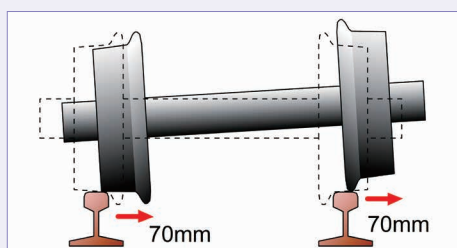


図9 地震時走行解析の脱線判定基準

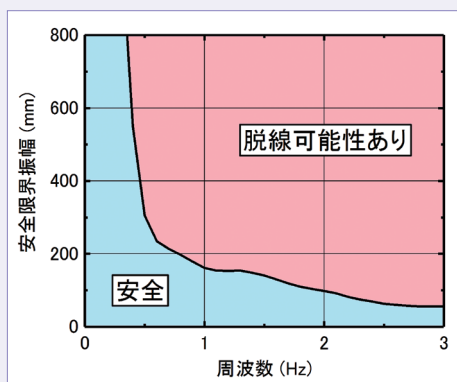


図10 正弦波加振に対する安全限界線図(新幹線車両, 速度260km/h)

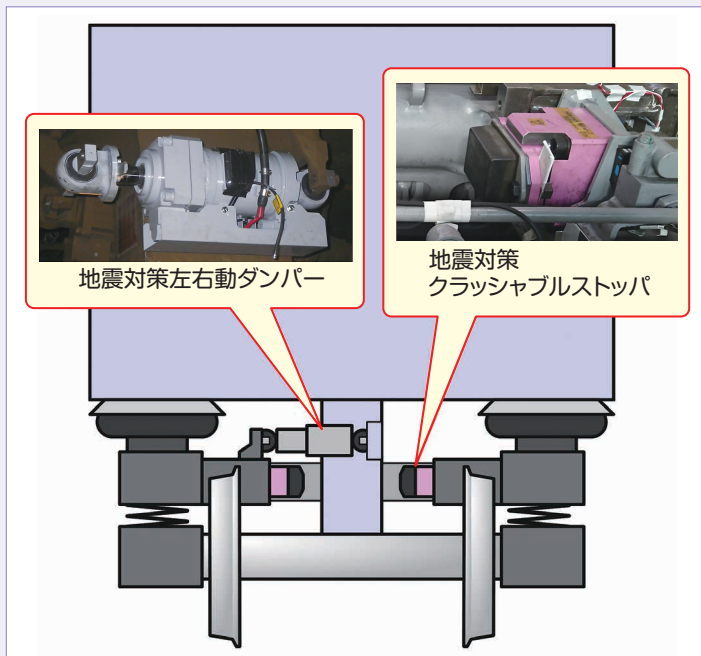


図11 地震対策左右動ダンパーと地震対策クラッシュャブルストップ

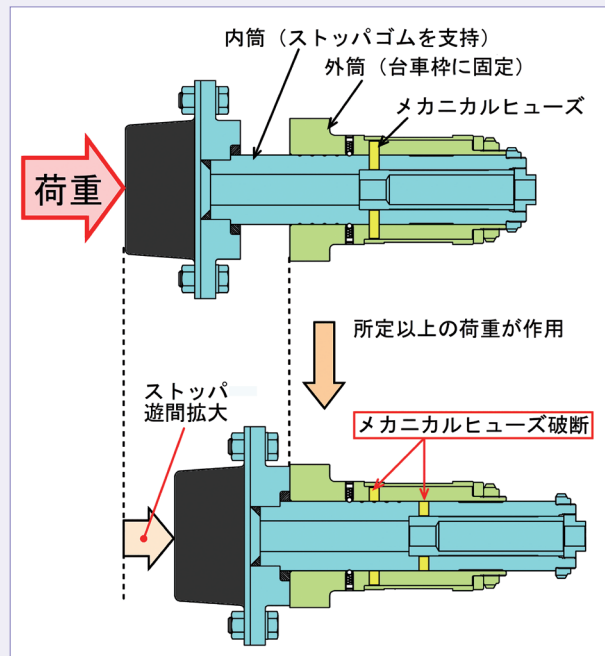


図12 地震対策クラッシュャブルストップの動作

地震時に車両を脱線させにくくする車両部品

鉄道総研ではVDSを用いて地震時に車両を脱線しにくくする車両部品について検討を進めてきました。車両は地震時の安全性はさることながら、平常時においても高速走行時の走行安定性、曲線通過時の走行安全性、乗客の乗り心地といったさまざまな要求を満足する必要があります。そこで、平常時に起こりうる車両挙動の範囲内においては従来の特性としつつ、地震時のように極端な挙動時に脱線をしにくくさせる特性となる車両部品の検討を行い、次に示す2つの地震対策車両部品を提案しています(図11)。

・地震対策左右動ダンパー

従来の左右動ダンパーが想定している使用領域内では従来の減衰力特性としつつ、地震時においてそれを超えるピストン速度となった場合には、より大きな減衰力を発生させることができるものが地震対策左右動ダンパーです。これにより、地震時に車両の揺れを小さくし、脱線しにくくすることができます。

一部の新幹線車両で用いられているフルアクティブ制振制御台車(車体・台車間に配置した電動アクチュエーターで左右方向の揺れを抑え乗り心地を向上する台車)の左右動ダンパーと置き換え可能な地震対策左右動ダンパーを製作し、大型振動台での実台車加振試験や試験車両による走行試験でその効果や量産化に向けての課題の確認を行っています。

・地震対策クラッシュャブルストップ

通常走行時にも時々接触し、車体がある程度以上左右変位することを抑制している車体左右動ストップについて、図12に示すように地震時のように大きな荷重が作用した際にストップ遊間が拡大するようにクラッシュ機構を付加したものが地震対策クラッシュャブルストップです。ストップ遊間が拡大すると、ストップ当たりが緩和されるとともに左右動ダンパーのストロークが大きくなり、地震対策左右動ダンパーを使用していた場合、より有効に減衰力を発生させることができます。大型振動台での実台車加振実験により、地震時の安全性向上効果を確認しています。

今後の展開

今後、新幹線の営業線に展開されている地震時脱線・逸脱防止技術の適用区間拡大が鉄道事業者により計画されています。また、車両の地震対策部品についても、営業列車に適するようにブラッシュアップが行われていくと考えられます。一方で、在来線の地震対策についても関心が高まっています。とくに大都市圏では輸送密度が高く、大地震に遭遇した場合に被害が大きくなる可能性があります。鉄道総研では今後、在来線の地震対策についても研究開発を進めていく計画です。

(飯田浩平/鉄道力学研究部
車両力学研究室)

文献

- 1) 運輸省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999
- 2) 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), 日本機械学会論文集(C編), 64巻, 626号, pp.3928-3935, 1998