

地震時の車両脱線防止に向けた取り組み

宮本 岳史

鉄道力学研究部(車両力学研究室 室長)



みやもと たけふみ

はじめに

鉄道システムとしての大規模地震に対する備えとして、土木構造物の耐震補強、耐震設計の見直しが続けられ、被害軽減を目的として早期地震警報による列車制御を実用化しています。それでも、2004年10月23日に発生した新潟県中越地震により、浦佐－長岡駅間を速度約200km/hで走行していた上越新幹線とき325号が脱線しました(図1)。これを契機に、上記の地震対策に加えて、直接的な車両の脱線対策が議論され、技術開発が活発化し、そのうちのいくつかは既に実用化されています。

鉄道総研では1990年代の初めに地震時の車両挙動解析を目的としたシミュレーションプログラムの開発を開始し、1995年の兵庫県南部地震以降、精力的に機能と解析精度の向上を図ってきました。2002年には実物の新幹線台車をを用いた大型振動台における加振実験を世界で初めて実施して、軌道振動によって車輪が跳び上がる挙動を実験により再現し、シミュレーション解析の妥当性を検証しました。鉄道総研では、この車両運動シミュレーションプログラムをVDS (Vehicle Dynamics Simulation) と呼び、地震時の

脱線現象の解明、車両の地震時走行安全性解析、構造物の設計指針のための解析、地震による線区の安全性評価、地震対策技術の開発などに活用しています。

ここでは、地震時の脱線に関する鉄道総研の取り組みを紹介し、車両挙動に関する知見と脱線対策について概説します。

過去の地震と脱線の関係

1995年以降に発生した地震が原因と考えられる国内の脱線事例を表1にまとめました。1995年兵庫県南部地震以前では1968年十勝沖地震時の脱線まで遡ります。これに対し、1995年以降、地震による鉄道車両の脱線が6回発生し、2004年、2011年には新幹線車両が脱線しました。表1以外に2010年3月には台湾甲仙地震において、台湾高速鉄道の新幹線車両が高速走行中に脱線しています。なお、台湾も含め1995年以降の地震による脱線では、とても幸いなことに死傷者は出ていません。

表1に示した地震の規模(マグニチュード)と震央(震源の直上の地表点)から脱線地点までの距離の関係を図2に



図1 新潟県中越地震で脱線したとき325号

表1 列車脱線が発生した日本国内の地震(1995年以降)

地震名	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	1995.1.17 5:46	7.2	18	7	16
宮城県北部	2003.7.26 7:13	6.4	12	6強	1
十勝沖	2003.9.26 4:50	8.0	42	6弱	1
新潟県中越	2004.10.23 17:56	6.8	13	7	1
新潟県中越沖	2005.7.16 10:16	6.8	17	6強	1
東北地方太平洋沖	2011.3.11 14:46	9.0 (モーメントマグニチュード)	24	7	3*

※運輸安全委員会が列車脱線事故として調査中¹⁾の列車本数を示す。

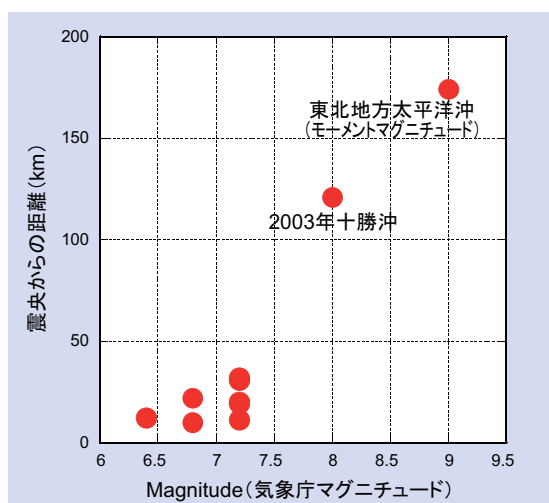


図2 脱線が発生した地震のマグニチュードと脱線地点の震央からの距離

示します。図2から、地震規模と震央からの距離に応じて、脱線が発生する傾向が分かります。また、表1に見るように過去に脱線した事例は震度6弱以上の地震であったことがわかります。ただし、震度6弱以上の地域にある鉄道車両が必ず脱線する訳ではないことにご留意下さい。

地震時の車両挙動

大規模地震であっても必ず脱線するものではないこと、一方で軌道あるいは構造物が破壊されなくても脱線する事例があることに着目して、鉄道総研では、地震時の車両挙動を知るための数値シミュレーション技術の開発に取り組んでいます。同時に、実際の新幹線台車を用いた加振実験技術を開発し、シミュレーションの検証を行いました。なお、上記に限らず、各方面で地震時の脱線メカニズムおよび脱線対策技術に関する研究開発が行われています。

地震時の車両挙動は、地震動による軌道の横方向振動の主たる周波数成分により変化し、図3に示すような振動モードで揺れて、脱線すると考えられます。地震動が低い周波数の場合には車体が左右に揺れ、左右の車輪が交互にレールから離れて上昇しては再びレール上に戻ります。回転中心が車両の下部にある、このような動きを下心ロールといいます。この車両の動きの中では、上昇した車輪がレール上に戻る際、車輪のフランジがレール上に乗るなどして脱線します。地震動が高い周波数の場合には台車が強く左右に揺れ、左右車輪のフランジが交互にレールへ強く衝突します。回転中心が車両の上部にあるこのような動きを上心ロールといいます。このとき車輪とレールの間に

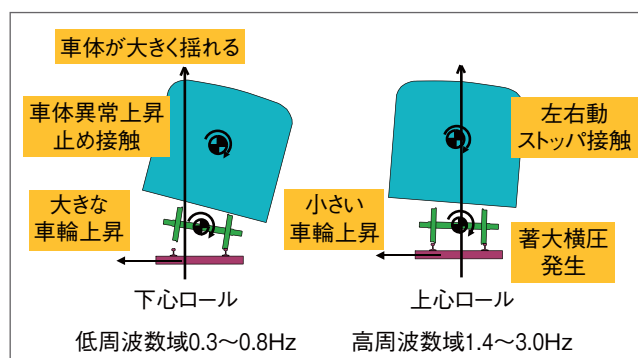


図3 左右の正弦波振動の加振周波数に対応した車両挙動

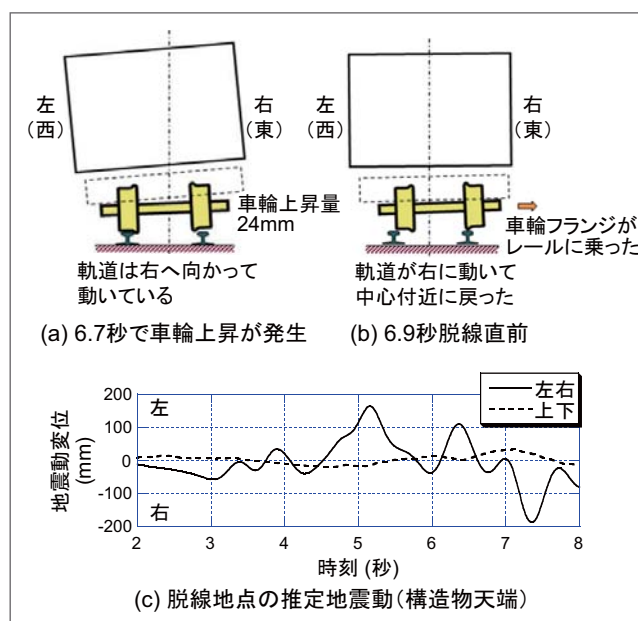


図4 新潟県中越地震の脱線時の推定挙動

大きな横圧が発生し、この横圧が発生したのと反対側の車輪がレールから離れて、軌間外に脱線します。この大きな横圧は軌道に損傷を与える可能性も考えられます。

(1) 脱線解析例 一新潟県中越地震時の車両挙動²⁾

新潟県中越地震における新幹線脱線地点での地震動、地盤および構造物の揺れを推定して、構造物上の軌道の振動を求め、その上を走行する車両の挙動をVDSにより解析しました。この結果、脱線開始地点付近の地表面では概ね390galの振動加速度最大値が発生し、このときの構造物の天端（最頂部）では700gal程度の振動加速度最大値の振動となって、新幹線が走行する軌道を揺らし、その結果として図4に示す車両挙動で脱線に至ったと推定されました。端的に言えば、地震動により車両が揺すられて、車輪がレールから離れて上昇し、車輪のフランジがレールの上に乗って脱線したものとと言えます。

ここに示した一連の解析技術は、このように脱線現象の解明はもとより、発生が危惧される地震動に対する鉄道構造物や車両の被害推定、被害軽減のための対策効果の検討などに用いることができます。

脱線対策技術

2004年新潟県中越地震における新幹線脱線以降、国土交通省とJR各社を中心にして新幹線脱線対策協議会が設置され、脱線対策に関する議論がなされています。新幹線を保有するJR各社は、土木構造物の耐震性向上推進および早期地震警報システム導入、非常ブレーキでの停止距離短縮策を実施しているほか、それぞれに以下のような地震時の脱線・逸脱対策に取り組んでいます³⁾。

新幹線車両の脱線後の逸脱対策としては、JR東日本が導入した台車の軸箱下に取り付けるL型車両ガイドがあり、現在同社の全ての新幹線車両に取り付けられています。L

型車両ガイドとは、脱線した際にレールに掛かって、車両がさらに軌道外へ逸脱するのを防止するものです。同社は、このL型車両ガイドと同時に、レール転倒防止装置(図5)、レール継目部の強化などの技術開発を行い、導入を進めています。JR東海は、脱線防止ガードの敷設・導入を進め、これを有効に機能させるための土木構造物対策を併せて実施しています。さらに、この脱線防止ガードを利用した脱線後の車両の逸脱防止ストッパも開発し、車両に順次装備している最中です。JR西日本とJR九州は、脱線した際に車両がさらに軌道外へ逸脱するのを防止する逸脱防止ガード(図6)を軌道内に敷設するための技術開発に取り組んでいます。JR西日本は開発した対策技術の現場への導入を始めています。このほか、鉄道総研で開発中の車両側での対策技術について次章で紹介します。

鉄道総研が取り組む車両の脱線対策技術

車両側での脱線対策技術については、脱線の発生確率を下げる目的で、言い換えれば、少しでも脱線しにくい車両を目指して開発を進めています。車両の走り装置である台車には、様々なばね・ダンパあるいはストッパが取り付けられています(図7)。これらの性能や形状を適切に変更することで、地震時の走行安全性が向上するものを、シミュレーション技術を駆使して探索しました。走行性能あるいは乗り心地を、悪化させることなく、地震時に大きな振動を受けたときのみ、確実に安全性を向上するのはとても難しいことです。この検討の中から地震時安全性向上の可能性を見いだした2つの技術について紹介します。

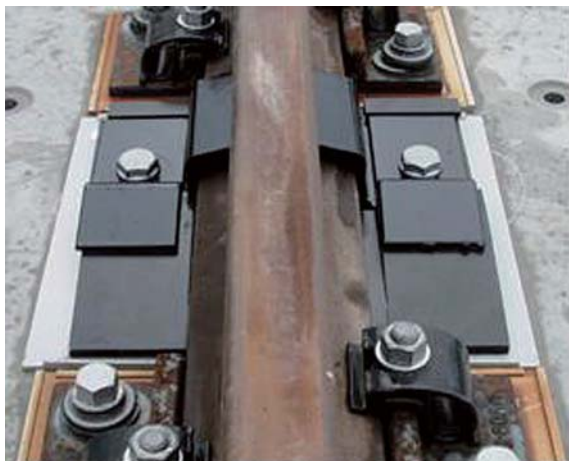


図5 地震時脱線対策用スラブ軌道用レール転倒防止装置

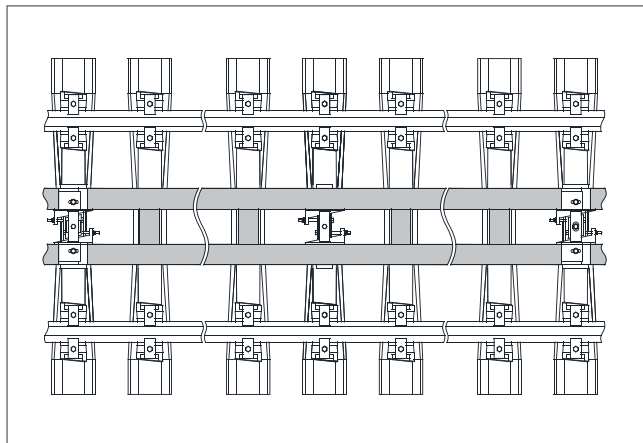


図6 地震時脱線対策用逸脱防止ガード(バラスト軌道用)

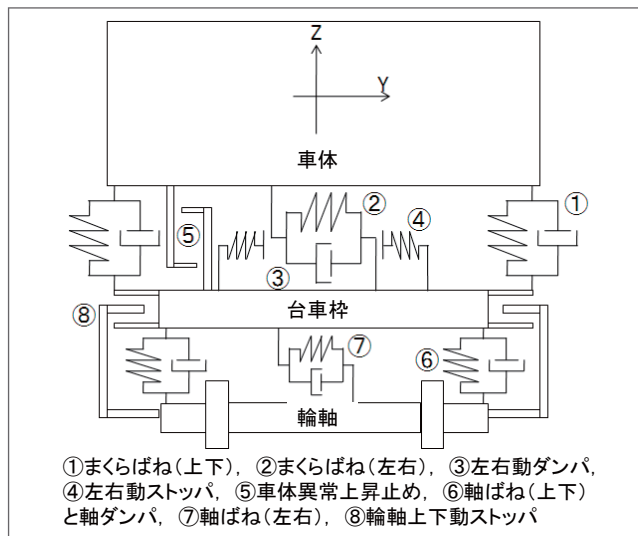


図7 車体支持装置の概念図

(1) 地震時脱線対策左右動ダンパ

車体と台車間の左右振動を減衰させるための左右動ダンパ(図7)の性能を変更して、地震時の安全性向上を図ることができます。通常走行時の減衰性能は変えずに、極端な揺れのときに大きな減衰力を発生する性能とした地震時脱線対策左右動ダンパ(地震対策ダンパ)を開発しました。図8に示すダンパの減衰性能線図のように、通常使用範囲のピストン速度では、地震対策ダンパも現行ダンパと同じ減衰力で、通常よりも速いピストン速度のときに地震対策ダンパは大きな減衰力を発生する性能としました。この性能設定をダンパ内の油圧回路の工夫によって実現しましたので、特別に制御機器などを搭載する必要がありません。このダンパを新幹線車両に採用した場合、周波数を変えながら正弦波で加振して車輪が跳び上がる振動台左右変位を調べた結果を図9に示します。従来のダンパの場合に比べて地震対策ダンパを用いた場合には、大きな振動振幅まで車輪が跳び上がりにくくなりました。例えば、加振周波数1Hzであれば15mm程度大きな振幅の揺れまで、車輪が跳び上がらないことを示しています。地震動は、さまざまな周波数成分を含んでいます。これに対し地震対策ダンパは幅広い周波数帯域で安全性向上効果を発揮します。

(2) クラッシュブル左右動ストッパ

車体と台車間には、大きな左右変位が生じないようにする左右動ストッパがあります(図7)。地震時に左右に振動するレールが激しく車輪フランジに当たると、台車と車体の間でも大きく揺れて左右動ストッパに強く接触します。このような場合に、左右動ストッパの一部をわざと破壊することで車体とストッパの隙間を拡げ、ストッパに当りにくくして脱線を防ぐクラッシュブルストッパ装置を考案しました。このクラッシュブルストッパには、隙間が拡がることにより先にご紹介した地震対策ダンパの作用域が増えるという相乗効果が見込まれます。現在、機械式(図10)と油圧式の2種類のクラッシュブルストッパを試作し、その効果を確認中です。

おわりに

これまでの地震時に車両が脱線する際の挙動解析から脱線対策を開発するに至るまでの経緯を紹介しました。車両の脱線対策は、安全性向上を図り、かつ通常の走行を阻害しないよう、メンテナンスに問題が生じないように、多面的な検討の結果、一步一步進んでいます。今後も、将来の地震による脱線被害を小さくするための研究開発を続けていきます。RRR

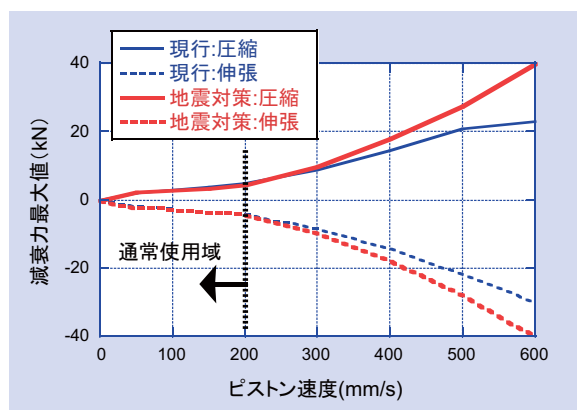


図8 地震対策ダンパの減衰性能比較

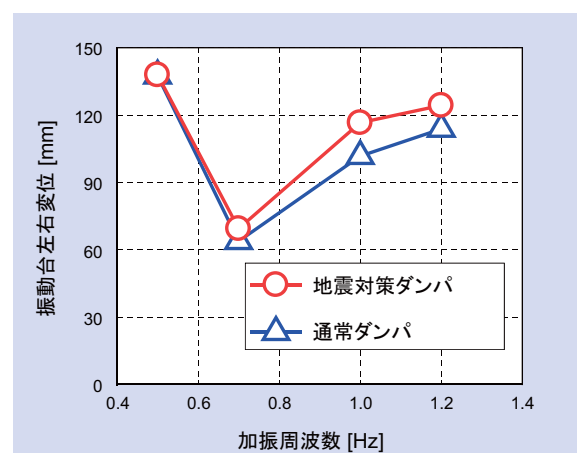


図9 正弦波加振試験結果



図10 機械式クラッシュブルストッパ原理試作機

文献

- 1) 運輸安全委員会ホームページ, <http://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/railway/index.php>
- 2) 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52号, 2008.12
- 3) 国土交通省ホームページ, http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000026.html