

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東日本研究開発センター 安全研究所 所長
堀岡 健司



2011年3月11日に発生した東日本大震災では当社の鉄道施設にも地震と津波による大きな被害が生じました。このうち、東北新幹線では仙台駅付近を走行中の試運転列車が脱線し、当社としては2004年の中越地震以来2回目の列車脱線事故となりました。今回はこの脱線事故の調査の進め方や調査内容とその結果、また調査に過程で判明した課題と教訓を記すと共に、今まで地震対策と今後の研究開発課題について記します。

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、当社の広範囲なエリアで地震、および津波による被害が発生しました。今回の東北地方太平洋沖地震は三陸沖の深さ24kmで発生したマグニチュード(Mw) 9.0の巨大地震(兵庫県南部地震の約1000倍のエネルギー)で、幸いにもお客さまの人的被害はありませんでしたが、津波による沿岸部の鉄道施設や車両の被災、内陸部も構造物や軌道の変状のほか、電化柱に傾斜や倒壊が多発するなど、今までに経験のない被害が発生しました。また、東北新幹線仙台駅付近を走行中の新幹線が脱線し、2004年10月23日に発生した中越地震による上越新幹線「とき325号」の列車脱線事故以来、新幹線で2回目の列車脱線事故となりました。

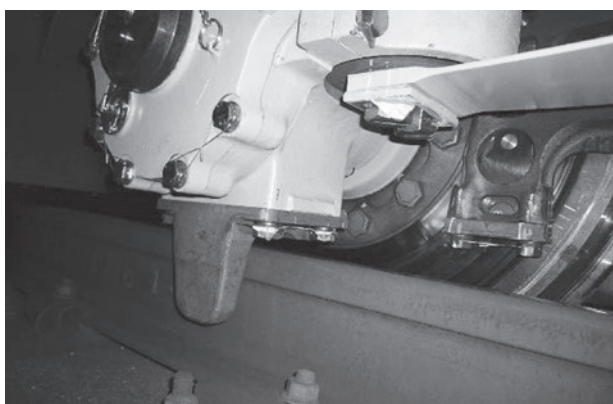


図1 脱線した車輪(上り列車の進行右側の前方から見る)

当社では、震災直後から被災状況の把握と復旧に着手しましたが、これと並行して今まで取組んできたハード面、ソフト面双方の地震対策について調査および検証を行うこととし、その一環として新幹線が脱線したメカニズムについても解明

を行うこととしました。本稿では2度の新幹線脱線の経験から、脱線現象を解明するプロセスとその過程で得た教訓、今回の地震による新たな課題について、その概要を記します。

なお脱線現象の解明にあたっては、地震動を受けた構造物の応答解析や車両挙動解析などに関して、(公財)鉄道総合技術研究所に多大なる技術指導を賜りましたことにつき、改めてこの場を借りて感謝申し上げます。

2. 脱線事故の概要

新幹線総合車両センターを発車した試運転列車(E2系10両編成)は速度約72km/hで仙台駅構内に進入中、列車を緊急停止させるシステムにより非常ブレーキが動作しました。減速中の列車は地震による強い揺れを受けて速度約14km/hで4号車の東京方台車のNo.1、No.2軸が進行左側に脱線し、約2.6m走行して停車しました。この際、図1のように脱線した台車のNo.2軸では進行右側の車両逸脱防止ガイドがレールに接触し、左側への逸脱を抑制しました。

3. 調査の概要

3.1 調査の目的

今回の地震では、試運転列車が脱線した仙台市内は震度6強の強い揺れを観測しましたが、いっぽうで同様に強い揺れを受けた宮城県全域や福島県、茨城県内を走行していた新幹線に脱線はなく、なぜ、特定の箇所脱線が発生したのかについて調査を行うこととなりました。

3.2 調査の流れ

調査は、地震動を受けた構造物、軌道、車両の損傷状

況の調査と、構造物や車両が地震動を受けた際の挙動を数値解析で再現する2方面から実施しました。

まず、実際の損傷状況の調査ですが、地震動を受けつつ列車が走行した軌道には損傷や脱線の痕跡が残ること、車両には大きなローリング挙動で台車や車体支持装置に損傷や変形が生じることから、これらの調査を行いました。この結果、脱線箇所の高架橋に顕著な損傷は認められませんでした。軌道の一部箇所では大きな軌間拡大や締結装置の損傷、車両では台車や車体支持装置を構成するダンパやストッパなどに顕著な損傷が認められました。

いっぽう解析ですが、まず図2に示すように当該列車が最も大きな揺れを受けたと推定される地点の特定を行いました。この方法は、車両のATC運行記録と列車の最寄りにある地震計が観測した地震動記録を持ち寄り、双方の時刻歴を突き合わせて、最も揺れが大きかった時刻における列車の在線キロ程と速度を割り出し、この地点を解析地点としました。

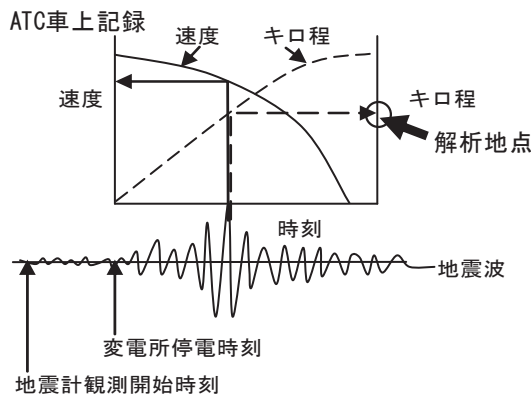


図2 解析地点の特定方法

次に、この地点における地表面の地震動、さらに地震動を受けた高架橋上の応答（線路直角方向の揺れの周波数、加速度、変位など）の推定を行いました。

解析のプロセスは図3に示すように、解析地点近くの沿線地震計で観測された本震の地震動を基準として、表層地盤の影響を除去するため比較的地盤の固い地点まで地震動を引き戻しました。次に、余震観測により得られた知見に基づく補正を加えた上で、この波形に対して解析地点の表層地盤による地震増幅を考慮し、地表面の地震動を推定しました。（図3の①～③）次に構造物上での応答は、当該箇所の地盤状況や構造物の固有周期や減衰特性が影響するため、複数の余震で地表面と構造物上の揺れを同時に測定して、当該構造物の応答傾向を把握し、これにより本震時の構造物上の応答を推定しました。（図3の④）

最後に構造物の応答を受けた車両がどのような挙動をするか、車両運動解析により挙動を推定し、脱線するか否かの判定を行いました。（図3の⑤）

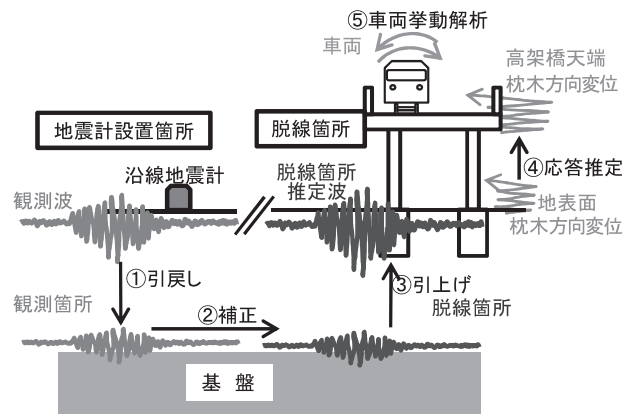


図3 解析のプロセス

3.3 実際の調査にあたって

前述のような調査の方針と流れが決まったのは3月下旬で、震災から10日以上を経過していました。本来ならばもっと早く調査に着手すべきところでしたが、今回の震災では被災規模が甚大でその範囲も広範に及んだことから、まずは被災状況の把握と復旧方針の全体計画を策定することに時間を費やしました。実際の調査は3月下旬から4月中旬にかけて進めましたが、この間にも復旧の着手が早かった関東北部や盛岡以北に在線した列車は暫定営業区間で運用することとなり、車上記録が上書きされてしまうなど、十分な調査ができなかった事象も散見されました。いっぽう被害が大きかった箇所の列車は長期間の留置を余儀なくされましたが、被災地への交通手段が制限されたことや度重なる大きな余震もあり、調査には困難を伴いました。

なお、構造物上の応答を推定するために必要な余震の測定では、本震から時間が経つにつれて余震の規模や回数が減る傾向にあり、早い段階での観測が重要であることを認識させられました。

4. 調査と解析の結果

4.1 脱線メカニズムの解析

今回の列車脱線事故は運輸安全委員会の鉄道事故調査報告書RA2013-1（平成25年2月22日）に詳細が報告されていますのでご覧いただきたいと思いますが、解析の結果から判明した脱線に至る過程は「本震の周波数成分のうち、脱線箇所の高架橋の固有周波数とおおむね一致する周波数成分が、構造物の共振現象により増幅されて高架橋上で大きな変位が現れたこと、そして、その周波数成分が、車両に上心ロールを生じさせやすい周波数帯であったことから、車両に上心ロールが生じて脱線に至ったと考えられる。」と記されており、当社の調査結果も同様となりました。

具体的な解析結果は、脱線箇所の高架橋上の線路直角

方向の応答値は、最大加速度が約1067gal、卓越周波数が1.5~1.7Hz、最大変位が約167mm(脱線時刻前後で約140mm)となり、この応答を受けた車両の挙動は、解析の結果、前後台車4軸の左車輪フランジが左レール頭頂面に乗り、そのまま左車輪が左方向に変位して脱線する結果となりました。(なお実際の脱線は前台車2軸であり、この点では解析結果と相違する結果となりました。)

4.2 実際の軌道、車両の損傷

これに対して実際に確認した軌道の損傷は、脱線箇所の盛岡方の一部に軌間拡大が顕著な箇所を認め、これは後述の車両側の損傷が顕著な号車と位置関係が一致し、4.1の解析で大きな応答変位が生じた箇所でした。

車両、特に台車と車体支持装置の損傷状況は、車両が大きくローリング挙動したことによる空気ばね高さ調整弁の連結棒の破損、動揺防止左右動ダンパのピストンの破損、また車体中心ピンが左右動ストッパゴムに強く衝撃したことによるストッパゴム台車側取付部の顕著な変形が認められました。



図4 地震動を受けた車両が大きくローリング挙動して、空気ばね高さ調整弁連結棒が損傷した事例

4.3 解析結果と実際の損傷の比較

車両の動揺防止左右動ダンパには故障記録機能がありますが、この記録を読み出したところ図5に示すとおり1.5~1.6Hz程度で±1Gを超える加速度を記録しており、4.1で記した高架橋上の応答解析結果を裏付ける結果となりました。また車両運動解析から、輪軸に作用した横圧、左右動ストッパに作用した作用力も推定することができ、著大な力により軌間拡大や、台車や車体支持装置に変形や損傷が生じたことを裏付けることができました。

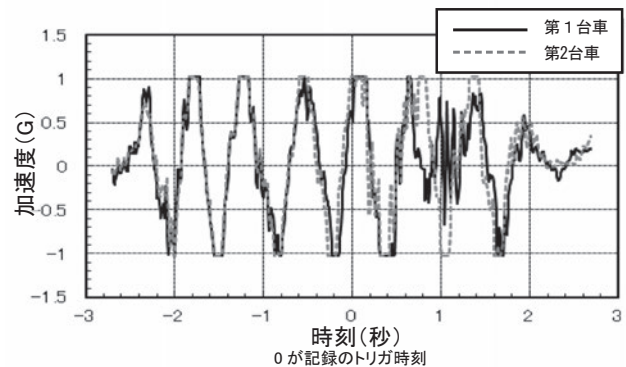


図5 脱線した車両の動揺防止左右動ダンパの地震時の加速度記録(記録の上限は±1Gで、それ以上のピークはこのグラフには表示されていない)

このように、今回の地震においても、一連の解析は高い精度で実際の損傷状況と一致する結果となり、今後の地震対策を検討するうえで有効なことが確認できました。

5. 当社の地震対策と今後の取組み

5.1 当社の地震対策

1978年の宮城県沖地震では建設中の東北新幹線で構造物に被害が生じて耐震設計法が発展する契機となり、その後も1995年の兵庫県南部地震、2004年の中越地震を経験して、当社では図6に示すとおり「地震時に列車をいち早く停止させる」「地震動を受けても地上構造物を大きく損傷させない」「脱線しても被害を拡大させない」というプロセスごとの目標を定め、これに対して様々な対策を実施してきました。

	対策前	対策後
列車をいち早く止める	主要動到達後に警報発信 S波(主要動) P波 警報発信 列車停止	早期地震検知 S波(主要動) P波検知 警報発信 列車停止
構造物を大きく損傷させない	構造物が崩壊 せん断破壊	耐震補強 コンクリート巻きたて等
脱線しても、被害を拡大させない	脱線後、車両が逸脱 レール締結装置が破損	逸脱防止 L型車両ガイド レール転倒防止装置 脱線対策用継目板

図6 今までに実施してきた地震対策

今回の地震でも、地震時に列車をいち早く停止させるシステムは広範囲の列車で機能し、継続して実施してきた高架橋柱、橋脚の耐震補強工事により構造物に顕著な損傷は発生しませんでした。また中越地震の脱線の教訓から導入した列車脱線時の車両逸脱防止ガイドは、比較的低速での脱線ではあったものの機能を果たしました。

運輸安全委員会の報告書にもこの点についての記載がありますが、いっぽうでは今回の脱線の再発防止対策として、「今回の脱線箇所の振動特性を精査し、必要に応じて高架橋の共振の関わる対策等を、その効果を検証した上で実施することが望まれる」としています。

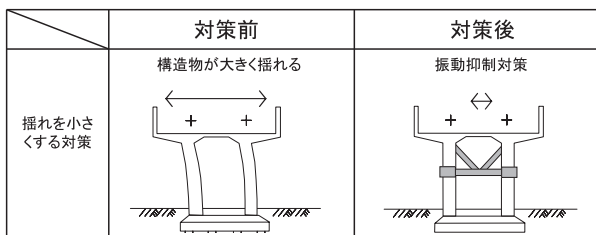


図7 今回の脱線箇所に対する対策（イメージ）

また、「高速走行を前提とする新幹線構造物においては、今回の事故と同様な、車両の走行安全性上で問題となる共振現象が生じることが想定される場所を明らかにするための研究、ならびに適切な対策を実施するための研究や技術開発を進めていくことが望まれる」とも記載しています。

5.2 東北地方太平洋沖地震後の取組み

今回の地震被害を受けて、当社では列車緊急停止の検知体制を強化するため地震計を増設、2012年に緊急地震速報（気象庁）を新幹線早期地震探知システムと接続しました。また耐震補強では、地震被害のリスクが高いせん断破壊先行型の高架橋柱、橋脚の補強については、新幹線と首都圏、仙台圏は終了していますが、残る曲げ破壊先行型の高架橋柱、橋脚のうち、強い地震動で被害が生じる恐れがあるものの対策を前倒して実施しています。また電化柱、駅やホーム天井の耐震補強、中越地震の教訓である列車脱線時の車両逸脱防止対策の地上側工事も引き続き実施しています。

今回の地震で課題となった「車両の走行安全性上で問題となる共振現象が生じることが想定される場所を明らかにする」という点では、地震動（加速度応答スペクトル）、線幹線沿線の地盤状況、構造物ごとに異なる応答特性、車両の運動特性など、様々なパラメータが関与する難しいテーマと考えますが、現在、効果的な評価方法について研究開発を進めています。

また、車両側の対策として、より大きな揺れ受けても脱線しにくくする方策についても研究開発を進めています。地震動

を受けた車両の脱線を抑制するには、図8に示すように車体のローリング挙動を中心とした振動の減衰を大きくすることが有効ですので、車体-台車間の左右動ダンパの減衰力を高めること、またローリング挙動を抑えることができないとした場合、車体中心ピンが台車に衝撃することで発生する強い横圧を抑えるためにストップ間隔を拡げることの有効性が車両運動解析から判明しています。これらの知見から（公財）鉄道総合技術研究所では、これらの機能を有する「地震動対策左右動ダンパ」、「クラッシュプル左右動ストップ」を開発中であり、当社としても前者の「地震動対策左右動ダンパ」については実用化に向けた車両での評価を検討する予定です。

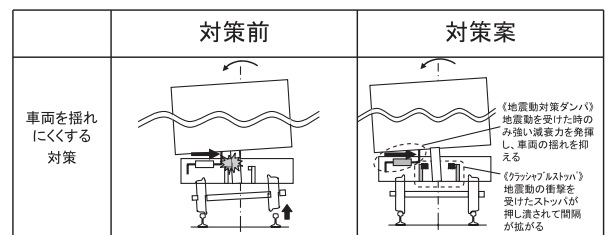


図8 地震動を受けた車両が脱線しにくくする対策案

6. おわりに

今回は東北地方太平洋沖地震で発生した新幹線脱線事故の原因究明に携わった一員として、当時の教訓と課題を記させていただきました。当たり前のことですが、原因究明にあたっては、現地の詳細な状況、また観測データなどをより多く集めることが大切です。とは言いつつも、大地震の後では災害救助や被害状況の把握、さらには復旧作業で現地が輻輳することが常であり、原因究明が捗らないのも現実の課題となります。効率的な調査にあたっては早い段階での方針や手順の確立、そのためには過去の教訓を記録として残すこと、また経験者のアドバイスを活用することが有効と感じました。いっぽう、近年では社会インフラや鉄道システムの情報化が進んでおり、車両や地上設備が記録したデータを活用することで、従来では困難と思われた分析も可能になりました。今後はこれらのデータを活用することで、さらに効果的な原因究明が可能になると思います。

地震国の日本では巨大地震のリスクは避けて通れません。地震対策は、安全性を向上させるために不可欠なものです。いっぽうで経済性という点での負担も生じます。安全性、経済性の双方の観点で合理的な対策について、今後とも研究開発の視点からアプローチしていきたいと考えています。