人工物に対する安全

地震に対する鉄道車両の 走行安全性解析

Analysis of Railway Vehicle Behavior for the Earthquake

執筆者プロフィール

熊谷 則道

Norimichi KUMAGAI

1976年東北大学大学院機械工学第二修士修了
博士(情報科学)

■主として行っている業務・研究

・鉄道車両ブレーキ制御, 粘着力制御に関する研究開発

・研究開発業務の統括

■所属学会および主な活動

日本機械学会, 交通・物流部門幹事(1996

年), 同第1技術委員会委員長(1997年),

J-RAIL 実行委員等

■勤務先

正員, 鉄道総合技術研究所 研究開発推進室
室長

(〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38/

E-mail: kumagai@rtri.or.jp)

石田 弘明

Hiroaki ISHIDA

1982年東京大学工学部産業機械工学科卒業

■主として行っている業務・研究

・鉄道車両の走行安全性評価

・鉄道車両の運動性能向上の研究

■所属学会および主な活動

日本機械学会 交通・物流部門 第3技術委

員会委員(1998~2005年, 1999年委員長),

同第1技術委員会幹事(2003年)

■勤務先

正員, 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部

車両力学研究室 室長

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38/

E-mail: ishida@rtri.or.jp)

1. はじめに

2004年10月23日17時56分、新潟県中越地方を震源とするマグニチュード6.8の強い地震が発生した。震源地付近を速度約200km/hで走行していた新潟行き上越新幹線列車「とき325号」は、全10両のうち8両が脱線し、最後部車両が上り線路側に傾斜して停車した(図1)。この脱線事故で、乗客、乗務員に大きな被害がなかったことは幸いであった。しかし、新幹線列車が高速走行時に脱線したことは、地震時の走行安全性をさらに向上させる必要性を社会に認識させることになった。これに対応して、国

土交通省は新幹線脱線対策協議会を立ち上げ、2005年3月に、脱線対策などの中間的なとりまとめを行い、同年10月には耐震対策などのフォローアップを行った。鉄道総合技術研究所は新幹線関係JR会社などと共に協議会に参画している。ここでは、従前から行っている地震に関する研究開発のなかで、シミュレーションによる地震時の車両挙動について概説する。

2. 車両の振動解析

車両の振動解析のため、58自由度を有する1車両モデルを設定した(図2)。地震波は弾性支持されたレール下部の路盤の変位として入力され、レール/車輪間に作用するクリープ(微小すべり摩擦)力を考慮する。これらのシミュレーションにより、軌道面の振動周波数の高低によって車輪とそれに連動する台車・車体のロール運動が異なることが明らかとなった。周波数が0.5Hzから0.8Hzの場合には下心ロール運動となり、周波数がおおむね1.3Hzから2.5Hzでは上心ロール運動となる。周波数がおおむね

図1 脱線して傾斜した「とき325号」の最後尾車両

図2 車両挙動の解析モデル (1車両)

0.8Hz から 1.3Hz までの範囲では、下心ロールと上心ロールが混在した遷移状態の揺れ形態となる。軌道が振動し、車両が激しく揺れて (rocking, ロッキング) 脱線する形態を、従来の脱線形態と分けてロッキング脱線と名付けている。また、周波数がおおむね 2.5Hz より高い場合には跳上がり脱線、0.5Hz より低い場合には転覆による脱線形態が想定される。

2.1 下心ロールによる脱線

車体の回転中心がレール面よりも下部にあり、左右の車輪が交互に上昇する動きを行う。これを下心ロールと呼び、力士が四股 (しこ) を踏む様子に似る。軌道が左から右へ動くと、右車輪が台車枠に持ち上げられ、レール面から離れる。車体がさらに傾き、右車輪のフランジがレール面よりさらに上に上昇する [図 3(a)左図]。軌道が逆方向の動きに転じると、左車輪がレール上を右方向にすべり、下降してきた右車輪が右レール上に乗るなどして右側へ脱線する [図 3(a)右図]。

2.2 上心ロールによる脱線

回転中心が車両の上部にあり、一方の車輪フランジがレールに激しく衝突した時に、足をすくわれるように他方の車輪が上昇する動きを行う。これを上心ロールと呼ぶ。軌道が左から右へ動くと、左車輪のフランジがレールに衝撃し、その反力で右車輪が上昇してレール面から離れる [図 3(b)左図]。その間、右車輪が上昇したまま輪軸も右方向へ動く。その後、右から左へ動くと、左車輪がレール上を右方向にすべり [図 3(b)右図]、降りてきた右車輪が右レール上に乗るなどして右側に脱線する。

3. 車両の走行安全性限界

脱線に対する車両の走行安全性を評価するために車両系の周波数応答を表す線図を作成する。これは走行安全限界線図と呼ばれ、正弦波を入力波とし車両の応答を計算で求め、脱線の有無の限界線を表した図である。計算上の脱線とはレールに対する車輪の横変位が 70mm を超えた場合と定義され

図 3 ロッキング脱線のメカニズム

図 4 走行安全限界線図の例 (左右動による脱線限界振幅)

図 5 観測地震波から軌道面波までの推定例 (振動加速度)

る。厳密には車両、台車の質量、台車ストッパ間隔、ばね、ダンパの特性などにより限界線は異なる。図 4 の例などによれば、0.5Hz から 2.0Hz では一般的に車両が軽量なほど脱線に対して有利である。また、速度の影響は比較的小さい。計算結果の検証のため、半車両荷重を付加した 1 台の実用台車を用いた振動実験を行う (口絵写真 4)。

4. 観測地震波から軌道面振動までの推定手法

車両が鉄筋コンクリート高架橋上を走行するとき、地震波の卓越周波数が高架橋の固有振動数に近い場合には軌道面の振動は増幅され、車両の脱線につながる事が想定される。そこで、上述の解析モデルを用いれば、実際の地震波を入力したとき、高架橋上の車両が安全かどうかをシミュレーションすることができる。このとき重要なことは地震波の推定である。車両が受ける振動波は、地上の定点で観測された

地表観測波を基準に、地面下部の基盤を伝わる波、列車が走行する高架橋下の地表波、高架橋の振動モードを加味した高架橋上のレール振動波を順次計算して得られる。推定手法については紙面の都合で省略する。図 5 に示す推定例では、最大値が約 400Gal の観測地震波が高架橋下表面に伝播し、高架橋上の軌道面では、最大振動加速度は約 700Gal となった。

5. 地震対策の取組み

地震に対する安全対策の焦点は、構造物の剛性を高めるとともに、車両を脱線させないあるいは軌道外に逸脱させないことであろう。今後とも、地震にタフな鉄道をめざし、国土交通省、鉄道事業者など関係機関の協力のもとに、必要な強度を有する逸脱防止レール、脱線防止ガード、レールを抱込み逸脱させないための車両ガイドなど、種々の方策の性能確認をシミュレーション、振動実験、強度試験などにより鋭意行っていく。