地震時の脱線メカニズムおよび脱線防止ガード機能に関する解析

正 [機] 森村 勉(東海旅客鉄道) 正 [機] 〇西村 和彦 (東海旅客鉄道) 正 [機] 睡道 佳明(上智大学) 正 [機] 曽我部 潔(上智大学)

Numerical Analysis on the Derailment Mechanism and Function of Anti-derailing Guard Rails in Times of Large Earthquakes

Tsutomu MORIMURA, Central Japan Railway Company, 1545-33 Oyama Komaki Kazuhiko NISHIMURA, Central Japan Railway Company Yoshiaki TERUMICHI, Sophia University Kiyoshi SOGABE, Sophia University

The derailment mechanism and the function of Anti-derailing guard rails in times of large earthquakes have been numerically studied. The following results were obtained. (1) Rocking derailment is the major cause of derailment due to large track excitation. (2) Anti-derailing guard rail is effective to prevent derailment due to large track excitations. (3) Vertical ground motions, light weight body and curve running on canted track have relatively smaller influence on the derailment mechanism.

Key Words : Railway, Earthquake, Derailment, Anti-derailing Guard Rail, Vehicle Dynamics Simulation

1. はじめに 平成 16 年 10 月 23 日に発生した新潟県中 越地震により,上越新幹線の浦佐~長岡間を走行中のと き 325 号が、ロッキング脱線により脱線するという事象 が発生した.この事故を受け,平成16年10月25日に国 土交通省鉄道局が設置した「新幹線脱線対策協議会」に 東海旅客鉄道株式会社も参画し,施設面,車両面で当面 とり得る対策の可能性等について検討を進めてきた.具 体的には,実験,解析及び試験敷設を実施し,その結果 に基づき, 地震時の脱線・逸脱防止に有効であり, 保守 上においても支障のない対策を確立した¹⁾.

対策を確立するにあたって, 地震時の脱線メカニズム および脱線防止ガード機能に関する検討を行った.本報 告では, 脱線メカニズム, それにかかわる車両, 軌道線 形および加振条件などの影響因子、さらに脱線防止ガー ドの機能について,車両が走行する条件で,数値シミュ レーション2)により分析した結果を述べる.

2. 数値シミュレーションモデル

2.1 車両モデル 車両モデルを図1に示す. 車体および 台車は y-z 平面で運動し、輪軸にはこの運動にヨーイン グ運動を付加する.車両の運動自由度は半車体(3 自由 度: 左右, 上下, ローリング), 一台車(3自由度: 左右, 上下, ローリング), 二輪軸(4自由度: 左右, 上下, ロ ーリング,ヨーイング)から構成し10自由度とする.こ こで、二輪軸の運動は独立でなく、同じとする.

2.2 軌道モデル 軌道モデルは図2に示すとおり, 左右 二本のレールが地盤との間で上下・左右方向にばねおよ びダンパ要素で支持され, 脱線防止ガードが地盤に対し て左右方向にばねおよびダンパ要素で支持されるモデル とする. レールに左右, 上下方向の運動自由度, また脱 線防止ガードに左右方向の運動自由度の合計6自由度を 与える.車両・軌道モデル全体では16自由度となる.車

輪とレールとの接触は,簡略化のため一点接触と仮定し, 車輪がレールから浮き上がる場合も考慮する.一点接触 から車輪の浮上への移行は、車輪とレールとの幾何学的 な位置関係から判別する. 車輪・レール間の作用力とし て, Kalker の線形理論に Lévi-Chartet の飽和則を適用し たクリープ力が働くものとする. 車輪・レール間の摩擦 係数は0.3とする.





Rail

Fig.2 Track model

Supporting B

Ground

elements

脱線防止ガードが作用する条件は、図3に示す車輪の 場合,車輪が右方向に脱線防止ガードの間隔以上に移動 して, 車輪内面が脱線防止ガード左端面に接触する場合

[Na.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2009-12.2~4. 東京〕

とする. さらに、車輪内面上にある点A(車輪径基準点 より10mm下方の点)が脱線防止ガードの左上端点Bよ り上方かつ軌道中心側に移動すると、車輪は脱線防止ガ ードを乗り越えたものとみなし、それ以降脱線防止ガー ドは作用力を発生しないものとする.



Fig.3 Condition for contact force between wheel/guard rail

2.3 入力条件と脱線の判定基準 数値シミュレーション に使用する車両および軌道諸元は東海道新幹線のものを 基本とする. 脱線防止ガードの設置位置は,離れ (d_v) 80mm および高さ(d,) 20mm とする. 車両の走行速度は 300km/h とし、異なる走行速度で解析する場合には、そ の旨を記述する.入力波は,軌道と直交する水平方向お よび鉛直方向の変位としてレール下部の地盤部分に与え る.入力波として,正弦波は図4に示す形状とする.地 震波は東海道新幹線の標準的な構造の高架橋が想定東海 地震動を受ける場合の高架橋応答波とし,図5に示す加 速度を積分した変位波形とする(最大加速度 1300gal, 以 下,想定東海地震波と呼ぶ).なお,高架橋は柱の鋼板巻 き補強やダンパーブレース工を施工した条件 3)とする. 脱線の判定は、車輪がレールに対してフランジ高さに相 当する 30mm 以上上昇し、かつレールに対して左右方向 に70mm以上移動する状態とする.



Fig.5 Shape of horizontal acceleration of Tokai Earthquake

3. 数値シミュレーション結果とその分析

3.1 実物台車実験結果との比較 数値シミュレーション 結果と実物台車実験結果⁴⁾との比較を行い,数値シミュ レーションプログラムの妥当性を検証する.ここでは解 析に用いる入力波を,実験のものと合わせるため正弦波 5 波とする.

車輪が30mm上昇するときの加振振幅について実験結 果と解析結果との比較を行う.図6に示すとおり、加振 振幅が①全体として加振周波数の増加とともに減少す る、②1Hz 近辺に極小値を持つ、③1-1.5Hz のなかに極大 値を持つ傾向が実験結果と解析結果とで一致している. また車輪が30mm程度上昇する加振振幅そのものについ ても概ね一致している.次に、ロッキング挙動の時刻暦 波形について比較する.周波数1.0Hz振幅100mmで加振 したときの輪重・横圧、車輪上昇の時刻暦波形を図7に 示す.輪重について増加し減少する変動を繰り返す様子、 横圧について同様にゼロから急激に増加し概ね二つのピ ークを経てゼロに戻る変動を繰り返す様子が一致してい る.車輪の上昇については最大値に差が見られるが、変 動の様子は概ね一致している.以上のとおり、実験結果 と解析結果とに整合性がみられることから、数値シミュ レーションプログラムが妥当なものであると考える.







Fig.7 Comparison of vehicle motions and forces between experiment and simulation

3.2 正弦波加振による脱線メカニズムの分析 脱線形態 および脱線限界振幅に関する解析結果について図8に示 す.脱線防止ガードは設置せず,入力波の変位振幅が ±0.3m あるいは加速度振幅が±1500gal を超えない範囲で 解析を行う.実線より下の振幅領域(a1)では車両は脱線 せず,実線より上の振幅領域で脱線する.脱線は車両の ロッキング運動による車輪の上昇および輪軸の左右移動 により引き起こされるロッキング脱線と呼ばれる形態で ある.脱線のプロセスをより詳細にみると,斜線部分の 領域(b1)では,車輪の上昇量が比較的小さく,輪軸の左 右移動により車輪フランジがレールに衝突し滑り上がり 脱線する²⁾.実線より上でかつ(b1)を除く領域(c1)では, 車輪の上昇量が大きく,輪軸が左右移動するなかで,一 度上昇した車輪がフランジでレール頭頂面に落下し軌道 外側へ移動するか,レールを超えて軌道外側へ落下する ことで脱線する.



Fig.8 Derailment pattern and amplitude

3.3 正弦波加振による脱線防止ガード機能の分析 正弦 波加振による脱線防止ガード機能の解析結果を図9に示 す. 点線より下の領域(a2)は、車輪がフランジ高さ相当 上昇せず、車両が脱線しない領域である. 点線と実線で 囲まれる領域(b2)は、車輪がフランジ高さ以上上昇する が、脱線には至らない領域である. 現行の鉄道システム では車輪フランジによる脱線防止ガイド機能を喪失して いる状況であり、脱線に対する蓋然域と考えられる. 丸 印の領域(c2)は、脱線防止ガードがなければ脱線し、脱 線防止ガードがあれば脱線が防止される領域である. 現 行の鉄道システムに脱線防止ガードを加えることで、脱 線防止が可能となる領域といえる. 脱線防止ガードは、 広い周波数・振幅の正弦波加振に対して、有効に機能し 脱線を防止することがわかる.





3.4 想定東海地震波による脱線防止ガード機能の分析 想定東海地震波を入力として解析を行い,脱線防止ガー ドの機能について分析を行う.実物台車実験では想定東 海地震波の入力加振のなかで最大加速度を発生する時刻 の近辺(図5の場合,14s付近)で脱線防止ガードの作 用が確認されており⁴⁾,それを含む時刻の解析結果につ いて(a)入力変位,(b)車輪・レール間左右相対変位(1,2 位)および(c)車輪上昇量(1,2位),また時刻 12.9s と 13.0s における輪軸の挙動イメージを図 10 に示す.時刻 12.9s に、2 位車輪が 37mm 程度上昇し、フランジ先端でレー ルに接触、そのまま軌道外側へ移動し、1 位車輪の移動 量が脱線防止ガードとの間隔 42.5mm を超え、13.0s に 1 位車輪内面が脱線防止ガードに接触する.1 位車輪はそ のまま脱線防止ガードに左右移動を拘束され、13.6s に 2 位車輪が軌道中心側へ移動を開始し、13.7s に 2 位車輪フ ランジがレール上から落下することで脱線が防止され る.同様に 14.1s から 14.3s まで、14.5s から 14.7s まで、 合計 3 回にわたり、脱線防止ガードが機能し脱線が防止 される.

3回の脱線防止ガードの作用のうち、1回目を除く2 回の脱線防止ガードの作用は実物台車実験で確認された 状況と同じである.脱線防止ガードの機能は実物台車実 験結果と同様であり、脱線しようとする輪軸に対し、レ ールに接地している車輪の内面に、脱線防止ガードが接 触し輪軸のレールに対する左右移動を拘束して脱線を防 止する.なお、1回目の脱線防止ガードの作用について、 実物台車実験ではフランジ高さ未満の車輪上昇であり作 用していないが⁴⁾、解析ではフランジ高さ程度の車輪上 昇とともに脱線防止ガードの作用がみられる.



Fig.10 Time history of wheel-set motions

4. 脱線メカニズムに対する影響因子の分析

4.1 上下動の影響 地震動には左右成分と上下成分とが ある.これらのうち,左右成分が車両の脱線挙動に対し て支配的となることが既往の研究で報告されている⁵⁾. 改めて上下動の影響を左右動の影響と比較する.上下動 の大きさを左右動の25%,位相差を90degとし,①左右 方向の正弦波だけの加振の場合と②上下方向の正弦波を 付加した加振の場合とで車輪が30mm上昇する限界振幅 を比較する.図11に示すとおり,上下動を付加した場合 には左右動のみの場合と比べ,1Hz 未満でほぼ同等であ り,全体として平均7%程度の低下にとどまる.ロッキ ング脱線に対しては左右動の影響が主体で,上下動は大 きな影響を及ぼさないといえる. 4.2 車体質量の影響 車体質量が脱線メカニズムに与え る影響を確認するために,車体質量の異なる二つの車両 モデルで車輪上昇が 30mm となる限界振幅を比較する. 一方は車体質量を空車相当,他方は 100%乗車相当(積 車と呼ぶ)とし両者の質量差を1車両あたり 6t とする.

図 12 に示すとおり, 概ね 1.0Hz 以上の領域では空車の 方が限界振幅が 10%程度低下し, 1.0Hz より小さい領域 ではその逆となる.車体質量が小さい場合,車体のロー リング運動の共振周波数が増加するため,限界振幅が図 中の右方向へ移動すると解釈できる.このように,限界 振幅の増減は周波数により一定ではなく,限界振幅の増 減量も大きくないことから,空車・積車程度の車体質量 の差が脱線メカニズムに与える影響は小さいといえる.



Fig. 11 Effect of vertical excitation



Fig. 12 Effect of car body weight

4.3 曲線でのカントの影響 図 13 に示すようにカント のある曲線を高速走行することが地震時の脱線メカニズ ムに与える影響を確認するため,速度 270km/h で直線お よび曲線(2500m,Cn200mm)を走行する場合に分けて脱線 限界振幅を比較する.曲線走行の解析では,数値シミュ レーションにおいて車両に遠心力を与え,重力や入力変 位は軌道面水平方向と垂直成分に分け,さらに車輪とレ ールとのアタック角を 0.003rad と仮定して解析を行う.



Fig.13 Vehicle track model at canted track

図14に示すとおり,脱線限界振幅は1.3Hzおよび1.4Hz では10%程度低いが、それ以外は同等以上である.曲線 高速走行時には、曲線内側の車輪が上昇しやすくなるも のの、大きく上昇する車輪は脱線とは逆方向となる曲線 外側への定常力を受けるため、車両は必ずしも脱線しや すくなるわけではないといえる.



Fig. 14 Effect of curve running at canted track (V270km/h)

5. 結論

地震時の脱線メカニズムとその影響因子,脱線防止ガ ードの機能について解析するため,筆者らが開発した数 値シミュレーションプログラム²⁾を拡張した.この数値 シミュレーションプログラムを用いた解析結果を,別途 行われた実物台車実験⁴⁾の結果と比較し,数値シミュレ ーションの妥当性を検証したうえで,上記の解析を行い 以下の結論を得た.

(1)脱線メカニズムについて,正弦波による解析により, 脱線は車両のロッキング運動による車輪の上昇および輪 軸の左右移動により引き起こされること,また脱線の形 態はロッキング脱線と呼ばれる形態であることを確認し た.

(2)脱線防止ガード機能について,正弦波による解析によ り,広い周波数および振幅範囲の入力振動に対して脱線 を防止する機能をもつことを確認した.さらに想定東海 地震波を用いた解析により,輪軸の左右移動を拘束して 脱線を防止する脱線防止ガードの機能を確認した.これ は実物台車実験⁴⁾でみられた脱線防止ガードの機能と一 致するものである.

(3)脱線に対する影響因子について,正弦波による解析に より,地震動の上下方向成分,空車・積車程度の車体質 量の差,曲線カント走行を対象として解析した結果,そ れぞれが脱線メカニズムに大きな影響を与えないことを 確認した.

参考文献

1)森村勉、関雅樹,新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対 策について,J-Rail2009

2) 西村和彦, 曄道佳明, 森村勉, 曽我部潔, "振動軌道上にお ける高速鉄道車両の走行安全性に関する解析的研究", 日本機 械学会論文集 Vol.C-74-744,pp2023-2030, 2008-8

3) 吉田幸司,松田猛,阿知波秀彦,関雅樹,高架橋のダンパー ブレース補強による東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策, J-Rail2009

4) 三輪昌弘,坂上啓,足立昌仁,村松浩成,実台車を用いた脱線防止ガードの効果確認試験,J-Rail2009

5) 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、日本機械学会論文 Vol. C-64-626, pp236-243, 1998.10