1201 地震時脱線現象に対する車両および構造物の

影響因子に関する研究

Æ	[機]	○飯田	浩平	(鉄道総研)	正 [土]	坂井	公俊	(鉄道総研)
Æ	[機]	宮本	岳史	(鉄道総研)	正 [土]	室野	剛隆	(鉄道総研)

A Study on the Effect Factors of Railway Vehicles and Structures for Derailment during an Earthquake

Kohei IIDA, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City, Tokyo

Kimitoshi SAKAI, Railway Technical Research Institute

Takefumi MIYAMOTO, Railway Technical Research Institute

Yoshitaka MURONO, Railway Technical Research Institute

The effects of railway vehicles and structures on derailment of commuter trains caused by an earthquake are investigated. The effect of vehicle occupancy on the running safety during an earthquake is relatively small. The trains running on ground are hard to derail by earthquakes because there are no vibration amplifiers such as viaducts. The structure damping has a effect to improve running safety of trains against earthquakes. Some effective natural periods of structures are easy to cause the derailment of railway vehicles. In addition, small yield seismic intensity of the structure improves running safety of trains, however structures are easy to deform plastically.

Keywords : Earthquakes, Railway vehicles, Viaduct, Running safety, Commuter trains, Effective natural period, Structure damping

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震や2004年の新潟県中越地震 などの大地震により,鉄道構造物や鉄道車両が被災した ことを受け,それらの地震対策について新幹線を中心に 研究開発が行われ,一部については実用化されてきた¹⁾ ~⁷⁾.一方,在来線についても,近年地震時の安全性や地 震対策に関する研究開発のニーズが高まってきている.

そこで、一般的な在来線通勤形車両を対象とし、様々 な地震動における高架橋天端の応答波に対する車両挙動 を数値シミュレーションにより求め、地震時脱線現象に 対する車両および構造物の影響因子について調査したの で、以下に報告する.

2. 検討条件

2.1 車両条件

車両はボルスタレス式の台車を装着した一般的な通勤 形車両(空車時軸重 85kN)を選定し,乗車条件として, 空車条件,定員乗車条件,満員乗車条件を設定し車体質 量を変化させた.ここで,満員乗車における乗車率は東 京圏主要区間の平均混雑率⁸⁾をもとに170%とした.また, 走行速度は100km/hとした.

2.2 軌道条件

軌道は軌間 1067mm の直結軌道とし,軌道不整のない 直線区間とした.

2.3 入力地震波条件

車両に入力する地震波は,5段階の震度階級(5弱,5 強,6弱,6強,7)に相当する線路直角方向の地表面地 震波(各震度 11 種類の波形)計 55 波とそれに対する, 下記の高架橋天端の応答波

・等価固有周期4タイプ(0.4, 0.7, 1.0, 1.3s)

・降伏震度 4 タイプ(0.4, 0.7, 1.0, 2.0G)

・減衰定数2タイプ(5%,10%)

を入力波とした. なお, 地震動は各車輪直下のレール支 持部に同波形を同時入力している. 以後, 高架橋天端の 応答波を構造物上地震波と記す.

3. 車両運動シミュレーションの概要

地震時の車両挙動を解析するために開発した車両運動 シミュレーションプログラム (VDS)⁹⁾を用いて,推定 地震動に対する車両の挙動を調査した,このシミュレー ションプログラムは,通常の車両走行シミュレーション 機能に加えて,レール下からの振動入力,車輪がレール 上でジャンプ,車両が大きくロール変位する動きなどを 精度よく解析できるように工夫したものである.このプ ログラムによる解析については,実台車を用いた加振実 験による精度の検証も行われている¹⁰⁾.

今回解析対象とした車両を図1に示すようにモデル化 した.車両モデルの概要は以下のとおりである.

(1) 車体 1 個,台車枠 2 個,輪軸 4 個について各 6 自 由度,各車輪下のレール 8 個について各 2 自由度と し,合計 58 自由度のモデルとする.

(2) 一車両モデルとして車体一台車枠間と台車枠一輪 軸間の結合要素については、ばね・ダンパ要素として、まくらばねや軸ばね、左右動ストッパ、軸箱上 下動ストッパ、車体異常上昇止め、左右動ダンパを 配置している。

[No. 12-79] 日本機械学会 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2012-12.5~7.東京]



図1 車両モデル



図2 脱線判定時の車輪位置

- (3) 車輪・レール間作用力には Kalker 理論に基づいた モデルを使用する.
- (4) 車輪はレールから離れて運動する状態も計算可能 とする.
- (5) 脱線判定は車輪/レール相対左右変位(車輪踏面 中心とレール頭頂面中心との左右方向の距離)によ り行い,図2に示すように,この変位が静止時の車 輪の中正位置から±70mm 以上となったときに脱線 と判定した.

4.入力地震動の作成

4.1 地表面地震波の作成

まず,以下の手順により構造物への入力地震動(地表 面地震動)を作成した.

- (1) 想定する地震規模は Mw=7.0 とする. 震源の巨視 的, 微視的特性は過去の内陸活断層による地震をも とに提案されている手法¹¹⁾に基づき設定した.
- (2)対象地点は震源近傍から遠方まで、断層を取り囲むように網羅的に設定した.地震動を計算する地点の地盤条件は全てG1地盤(耐震設計上の基盤面)とする.
- (3) 地震動は,統計的グリーン関数法¹²⁾を用いて作成 する. 地震基盤から耐震設計上の基盤面までの増幅 特性は,全国の増幅特性の平均値¹³⁾を用いる.
- (4) 上記の条件に基づき多数の地震動波形を算出する とともに、得られた波形の計測震度を算定¹⁴⁾し順に 並べる.これらの波形群の中から、前述した条件(5 段階の震度階級に相当する各11波)に合致する地震 動を概ね均等な震度分布となるように抽出した. 最終的に、55波を地表面地震動として選定した.

4.2 構造物応答の算定

前節で得られた 55 波の地表面地震動を構造物下端に 入力することで,構造物上地震波を算定する.構造物条 件としては前述したように,等価固有周期を4タイプ, 降伏震度を4タイプ,減衰定数を2タイプ考慮した計32 タイプの構造物を設定した.構造物は図3に示すように 1 自由度系でモデル化し,逐次非線形動的解析によって 構造物天端の応答を算定した.なお,構造物の非線形特 性は,図4に示すように,骨格としてBi-linear モデル, 履歴として Clough モデル(α=0.05,β=0.2)を用いた. 最終的に構造物天端の応答波形として,1760波(入力



図4 動的解析に用いる骨格曲線、履歴モデル

55 波×構造物 32 タイプ)を算定した. なおこれと併せ て地表面地震動に対する走行性についても考察を行うこ ととし,以降では合計 1815 波に対して検討を行っている.

5. 解析結果

5.1 車両条件 (乗車条件)の影響

5.1.1 正弦波加振による地震時走行安全性解析

各乗車条件における,基礎的な地震時走行安全性を把 握するため,正弦波加振に対する走行安全限界線図を求 めた.走行安全限界線図は,横軸に軌道の加振周波数を, 縦軸に左右振動の加振振幅(片振幅)をとり,各加振周 波数毎に加振振幅を5mm単位で大きくしながら正弦波5 波で加振されるシミュレーションを繰り返し実行して, 上述の脱線判定基準において脱線と判定を受ける直前の 振動振幅をプロットしたものである.つまり,各加振周 波数の振動を5波受けたときに走行安全限界線以下の振 幅であれば脱線しないことを示している.

各乗車条件における正弦波加振に対する走行安全限界 線図を図5に示す.図5(a)が振動変位での整理,図5(b) が変位振幅に2πf(f:周波数)を乗じた振動速度での整 理である.図5(b)縦軸の単位kineはcm/sである.各図 中,3乗車条件の平均値を点線で示す.また,解析対象 である構造物の等価固有周期に対応する加振周波数を破 線で示す.

図5より,加振周波数1.4Hz以下の領域で,乗車条件 の影響が安全限界線図に現れており,加振周波数0.5Hz ~1.4Hz では空車から満員乗車になるに従い安全限界振 幅が大きくなっている.また,3条件の平均値は定員乗 車条件の安全限界線図とほぼ一致している.図5(b)より, 軌道の振動速度で整理した安全限界線図は,100kineを中 心として,50 kine~150kineの範囲に安全限界振幅がほぼ 収まっていることがわかる.

5.1.2 各地震波に対する車両挙動解析結果

第4章で求めた全ての地震波に対する車両挙動を解析 し、脱線した地震波数を図6に示す.なお、各震度にお ける地震波数は363波である.図6より、震度6弱から 脱線する地震波数が増えているが、満員乗車条件におい ては震度5強でも脱線する地震波がわずかに(3波)存 在した.震度5強で脱線した地震波は何れも地表面にお ける計測震度5.4,減衰定数5%・等価固有周期0.4sの構 造物上のものであった.震度6弱以上における乗車条件





図6 各震度の全地震波に対する脱線地震波数

の影響は後述する構造物パラメータの影響に比べ顕著で はなかった.

5.2 構造物条件の影響

本節では,構造物条件の影響として,地表面地震波に 対する車両挙動解析結果を示した後、各構造物パラメー タの影響を示す.

5.2.1 地表面地震波に対する車両挙動

地表面地震波に対する脱線地震波数を図7に示す.各 震度における地表面地震波数は11波である.図7より, 構造物による振動増幅がない地表面地震波に対して,震 度6弱までは脱線せず、震度6強でも全33ケース中1 ケース(計測震度:6.4)のみの脱線であった.

5.2.2 構造物の減衰の影響

高架橋の減衰定数が 5%と 10%の場合における脱線ケ ース数を図8に示す.以後,構造物パラメータの影響を 示す際には車両の乗車条件の区別をせず,3条件を合わ せた数を示す.図8より,減衰定数が10%の場合には5% の場合に比べ,震度6弱で約5割,震度6強で約7割, 震度7で約9割の脱線ケース数となっており、地震動が 大きくなるほど構造物の減衰の影響が小さくなっていた.

5.2.3 構造物の等価固有周期の影響

構造物の等価固有周期の影響を図9に示す、図9より、 震度6弱で、等価固有周期の影響が現れ、周期0.4s(周



図7 各震度の地表面地震波に対する脱線地震波数



波数 2.5Hz), 1.0s (1.0Hz) が比較的脱線が生じやすい等 価固有周期であった. 震度が大きい場合には等価固有周 期の影響が小さくなっているように見える.これは,震 度が大きくなると構造物が塑性化することで、実質的な 固有周期や減衰が変化するためであると考えられる. そ こで,最も塑性化しにくい降伏震度 2.0G の場合を抽出し た結果を図10に示す.図10より,構造物の塑性化の影 響を排除した場合には上述の等価固有周期 0.4s, 1.0s が 比較的脱線しやすいという傾向がより明確に現れた.

5.2.4 構造物の降伏震度の影響

構造物の降伏震度の影響を図 11 に示す.図 11 より, 降伏震度が小さいほど脱線ケース数が少なかった.これ



図9 等価固有周期の脱線ケース数に及ぼす影響



図10 等価固有周期の脱線ケース数に及ぼす影響 (降伏震度 2.0G を抽出)



図 12 各震度における構造物の応答塑性率

は構造物が塑性化し、実質的な減衰が大きくなったため と考えられる.ただし、図 12 に示すように、降伏震度が 小さいと応答塑性率が大きくなり、高架橋自体の崩壊の 危険性が高まるとともに、変位が大きくなり、連続する 高架橋では角折れ・目違いの影響も大きくなることに留 意する必要がある.

6. 考察

今回,限られた条件においてではあるが,在来線車両 の地震時走行安全性に関する車両側・構造物側の影響因 子について検討を行った. その結果, 比較的積空差の大 きい在来線通勤形車両においても乗車率の影響は構造物 パラメータに比べ顕著ではないことがわかった. 構造物 パラメータについては、構造物の減衰を大きくすると、 車両の脱線が生じ始める震度を大きくすることができる. 震度が大きい場合に構造物の減衰の影響が小さくなるの は構造物塑性化による減衰効果が支配的になってくるた めであると考えられる.構造物の等価固有周期について は車両の脱線に対して厳しい周期帯があることがわかっ た.そして,悪い条件が重なると震度5強程度の地震動 で脱線が発生し得ることがわかった. 今回の検討におい ては構造物の等価固有周期 0.4s(周波数 2.5Hz) が厳し い傾向となったが、この周波数帯では車両は上心ロール の振動モードとなるため、脱線防止ガードや逸脱防止ガ ードなどの地上側の対策が有効に機能すると考えられる. 構造物の降伏震度に関しては、小さいほうが有利な結果 となった.

なお、本研究は車両については一般的なボルスタレス 式台車を装着した車両を対象とし、軌道については直線 区間を対象とした.一方、在来線にはボルスタレス式以 外にも様々な型式の台車があり、また軌道についても多 くの曲線区間がある.これらの地震時走行安全性への影 響についても、今後研究を深めていきたい.

7. まとめ

ボルスタレス式の台車を装着した一般的な在来線通勤 形車両を対象とし、震度の異なる地震動における高架橋 天端の応答波に対する車両挙動解析を行い,地震時脱線 現象に対する車両および構造物の影響因子について調査 した結果,以下のことがわかった。

- (1) 車両の乗車率の影響は構造物パラメータに比べ顕 著ではない.
- (2) 高架橋による振動増幅効果のない地表面において は震度6強程度の揺れまで殆ど脱線しない.
- (3) 車両条件,構造物条件で悪い条件が重なり振幅が 増幅されると震度 5 強程度の地震動で脱線が発生し 得る.
- (4) 高架橋の構造減衰は車両の脱線をしにくくさせる 効果がある.
- (5) 車両の脱線に対して厳しい高架橋の等価固有周期 帯が存在する.今回の検討では,車両の上心ロール 振動を起こす,比較的短い固有周期帯で厳しい結果 となったが,これに対しては脱線防止ガードや逸脱 防止ガードといった地上側の対策が有効に機能する と考えられる.
- (6) 高架橋の降伏震度が小さく, 塑性化しやすい方が 車両は脱線しにくくなる.しかし,高架橋自体の耐 震性等について留意する必要がある.

本研究が,在来線の地震時走行安全性向上を検討して いく一助となれば幸いである.

参考文献

- 宮本岳史,石田弘明:台車改良による地震時走行安全性の 向上に関する解析,鉄道総研報告,21巻12号,pp.35-40, 2007
- れ谷泰史ほか:車両逸脱防止L型ガイドの開発, JR EAST Technical Review, No. 29, pp.27-30, 2009
- (5) 飯田浩平ほか:大型振動試験装置を用いた実台車脱線実験, 日本機械学会論文集(C編),77巻781号,pp.3223-3236, 2011
- 森村勉ほか:実物台車振動台実験による鉄道車両の地震時 脱線メカニズムの検証,日本機械学会論文集(C編),76 巻764号,pp.825-834,2010
- 5) 森村勉ほか: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,日本機械学会論文集(C編),76巻 770号,pp.2447-2453,2010
- 角南浩靖ほか:脱線時の車両の逸脱防止に関する実台車走 行試験,日本機械学会論文集(C編),76巻770号, pp.2462-2471,2010
- 7) 浅沼潔ほか:逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発,鉄道総研報告,23巻2号,pp.27-32,2009
- 国土交通省:三大都市圏における都市鉄道平均混雑率の推 移,http://www.mlit.go.jp/statistics/details/ tetsudo list.html
- 9) 宮本岳史ほか:地震時の鉄道車両の挙動解析,日本機械学 会論文集(C編),64巻626号,pp.1236-1243,1998
- 宮本岳史ほか:大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加 振実験,日本機械学会論文集(C編),71巻706号, pp.1849-1855,2005
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.pdf, 2008
- 12) 釜江克宏ほか:地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測 -,日本建築学会構造系論文報告集,No.430, pp.1-9, 1991
- 13) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 耐 震設計,丸善出版,2012
- 14) 気象庁:計測震度の算出方法, http://www.seisvol. kishou.go.jp/eq/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm