

推定地震波を受ける構造物上の車両挙動

鉄道力学研究部 車両力学
研究室長 宮本岳史

1. はじめに

上越新幹線「とき 325 号」の脱線箇所付近における地震動と構造物の振動を推定した結果を用いて、地震動で揺れる構造物上を走行する新幹線車両の挙動を解析した。

鉄道総研では、1995 年の兵庫県南部地震以降、地震によって軌道が振動し、車両が大きく揺れて車両各部が大きく変位するような場合でも解析可能な車両運動シミュレーションプログラム(VDS)を開発し、地震時の車両挙動解析¹⁾を行っている。また、大型振動台上にレール、新幹線の実台車および模擬車体(半車体)を載せて大きく加振する試験を実施し、シミュレーション計算の妥当性を検証してきた²⁾。ここまで培ったシミュレーション技術を活用し、新潟県中越地震時の新幹線車両の挙動解析を行ったので、本発表ではその結果について報告する。

2. 地震時の車両運動シミュレーション (VDS : Vehicle Dynamics Simulator)について

VDS は通常の車両走行シミュレーション機能に加えて、レール支持部から振動を入力し、車輪がレールから離れて跳び上がったり、車両が大きくロール変位する動きなどを精度よく解析する機能を持つ。VDS 内では、200 系新幹線車両を、図 1 に示すような車体 1 個、まくらばり 2 個、台車 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、合計で 17 物体、70 自由度でモデル化した。まくらばりと台車間は 1 自由度の拘束条件を持って結合していることから、運動方程式上の計算自由度は 60 自由度となる。拘束条件以外の車体、台車、輪軸間はばねやダンパで接続している。

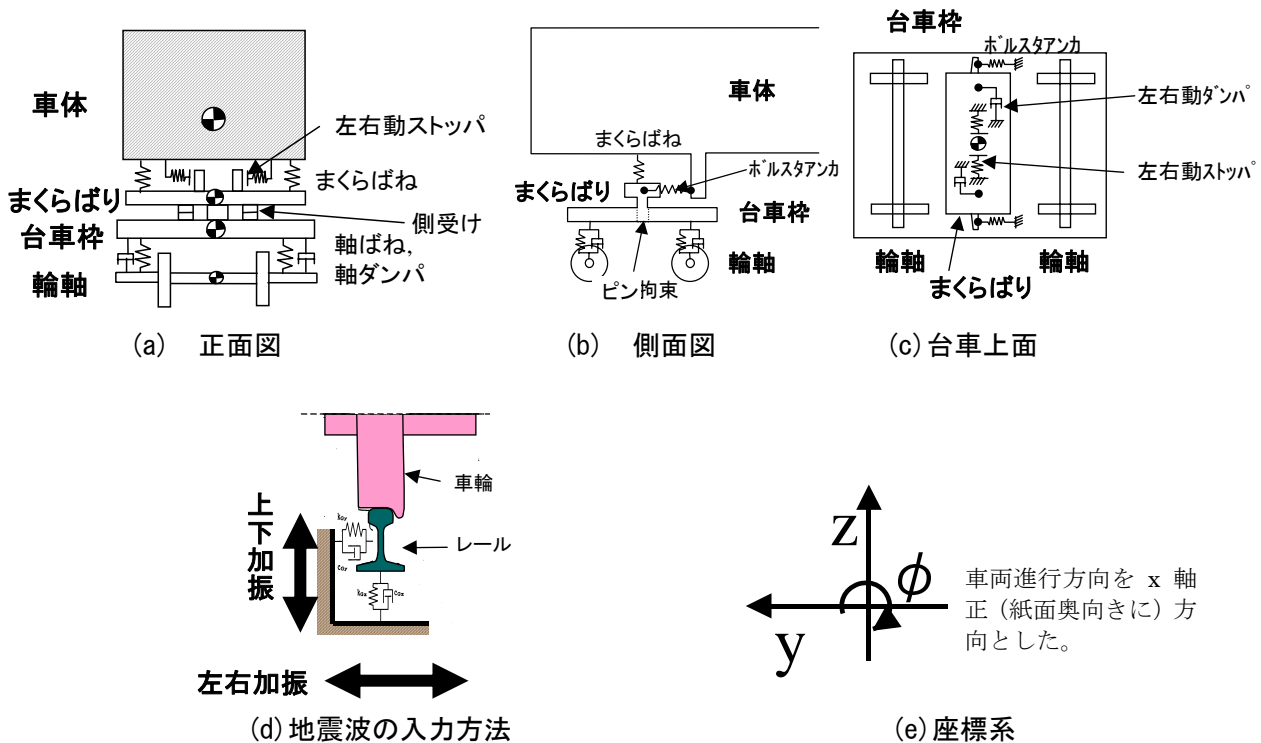


図 1 車両運動シミュレーションに用いた車両モデルと座標系の定義

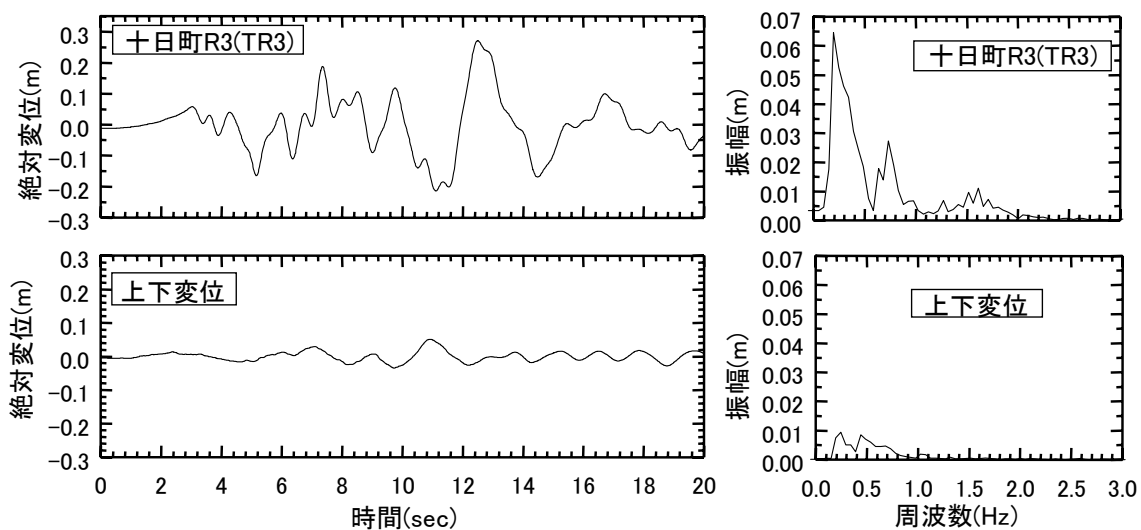
車輪を支えるレールは1車輪ずつ独立に軌道からばね・ダンパで支えられている。地震による軌道直下の振動はばね・ダンパの支持面に入力する。シミュレーション上での脱線は、車輪とレール間の相対左右変位が70mmに達したときと定義した。

3. 車両運動の解析結果

3.1 構造物毎の振動に対する挙動解析

入力地震波について、脱線地点付近の車両挙動に影響を及ぼしたと考えられる構造物天端の地震動を構造物毎に求めた。ここでは一例として、推定地震波による十日町 BL R3 の構造物上軌道面の絶対変位波形とそのフーリエスペクトルを図2に示す。図2中の水平変位の正は東方向、上下変位の正は上方向を示す。シミュレーション上の走行条件について、車両は構造物上のスラブ軌道、直線区間を走行速度204km/hで真北に向かって走行しているとき、地震が発生したものとする。つまり、シミュレーション上の座標系と地震動の関係としては、進行方向が北で、レール直角方向（左右方向）の西（左）を正とする。推定地震波で振動する軌道上を200系新幹線車両が走行した場合のシミュレーション結果例として、十日町 BL R3 上構造物天端の応答波を入力した場合の結果を図3に示す。図3に示した十日町 BL R3 上での脱線時の車両挙動は以下のとおりであった。時刻6.6秒付近で軌道が左から右へ変位する間に第3軸は左側車輪のフランジ接触から右側車輪のフランジ接触へと変位し、6.5秒手前から左車輪では100kNを超える輪重が発生し、200kNを超える左輪重最大値が発生するとともに、右車輪が上昇を開始し、6.7秒付近で右車輪が30mm程度まで上昇した。6.75秒付近で右車輪は若干下がるものの、車輪が高く上昇した状態の間に地震の左右変位が反転して軌道が左方向へ変位したため右車輪フランジ先端部分でレールに接触し、そのまま右車輪フランジがレールに乗り上がり第3軸は右方向へ脱線した(図4)。この脱線に至る付近で車体は概ね下心ロール振動を起こしている。

脱線後の現場でレール上に脱線痕跡を確認した主な構造物十日町 BL R3～R5 の各構造物毎の応答波で振動する軌道上を200系新幹線車両が走行した場合のシミュレーションで得られた解析結果を表1にまとめた。解析の結果、いずれの構造物上においても推定した地震動によって車両は脱線に至ることが分かった。三つの構造物ではそれぞれに脱線するタイミングと方向が異なっていた。



(a) 時系列波形

(b) フーリエ振幅スペクトル

図2 地震波による各構造物上軌道面の絶対変位波形

表1 シミュレーション結果

構造物	状況	方向	時刻(sec)
十日町 BLR3(TR3)	脱線	右	約 6.9
十日町 BLR4(TR4)	脱線	左	約 7.7
十日町 BLR5(TR5)	脱線	右	約 7.0

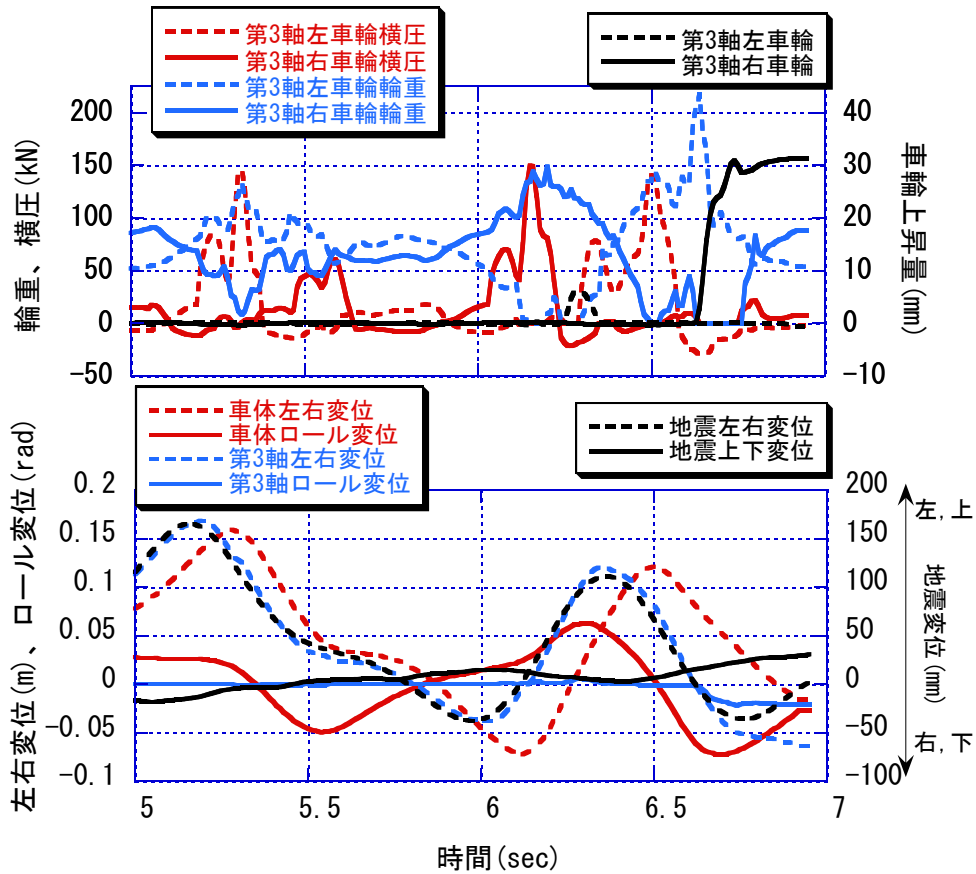


図3 車両挙動解析結果（十日町 BL-R3）走行速度 204km/h

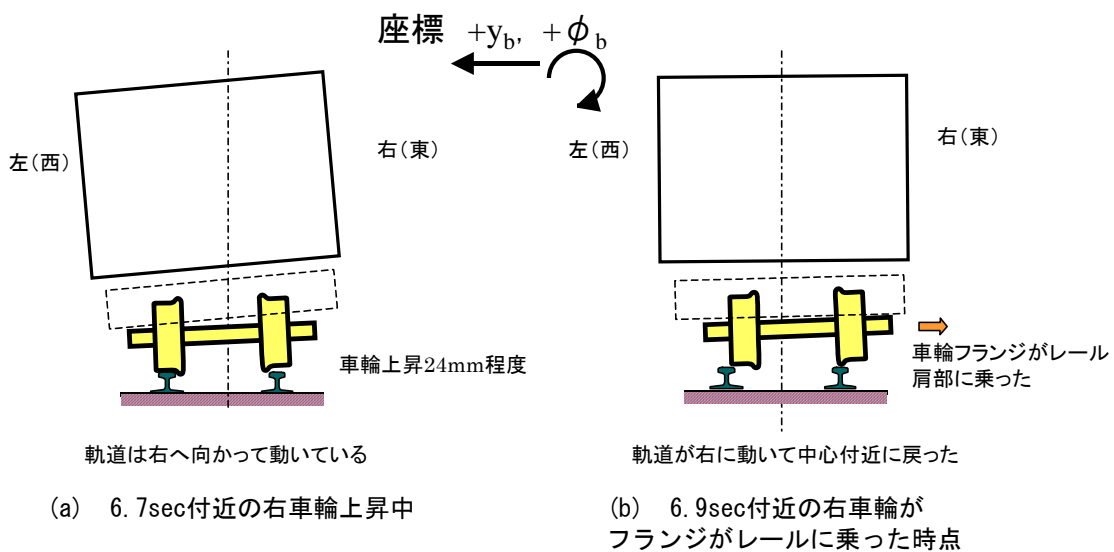


図4 シミュレーション結果における車両の姿勢(推定地震波 十日町 BL R3)

3. 2 連続した構造物上の車両挙動

脱線箇所付近の構造物の動的角折れを考慮したシミュレーションを実行する場合、各構造物上と車両の位置関係にはさまざまな組合せが考えられる。そこで入力地震波の時刻ゼロにおける車両の位置（シミュレーションの開始時刻に先頭軸（第4軸）があるキロ程）をずらしながら、シミュレーション解析を繰り返し行った。図5には推定地震波による脱線箇所付近の構造物の動的角折れシミュレーション結果を示す。図5には横軸に時刻ゼロにおける車両の位置を、縦軸にはシミュレーション結果を脱線（×印）もしくは車輪上昇量最大値（黒丸印）が発生した位置（イベント記録位置）として示した。この図5から、入力した推定地震波の時刻ゼロのときに、車両の第4軸がキロ程約 205k786m～826m もしくは 205k646m にあったタイミングで走行している場合に、十日町 BL R3 から R6 の間で脱線することが推測されることが分かる。このように動的角折れを考慮し連続する構造物上を走行する車両の挙動を解析することにより、実際の脱線地点周辺でシミュレーションでも脱線することが示された。

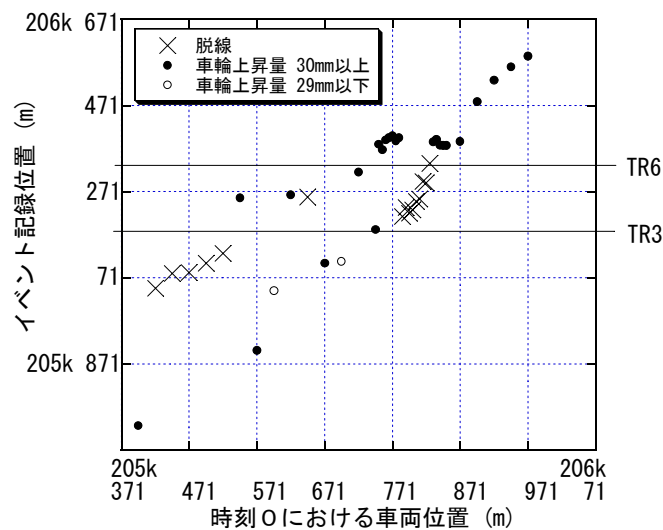


図5 角折れを考慮したシミュレーション結果

（時刻ゼロにおける車両第4軸の位置とイベント（脱線や車輪上昇ピーク）が記録された位置）

4. おわりに

本シミュレーションにより、200系新幹線車両が速度204km/hで走行するとき、地震波開始後約6.9秒の時点において、右側車輪がフランジ高さ以上に上昇した状態で軌道振動の方向変化により輪軸が横方向へ移動し、降りてきた車輪のフランジ先端がレール上に乗って脱線すると推定された。ただし、編成内全ての車両の脱線に至る事象がシミュレーションと完全に合致するものではない。今回のシミュレーション解析を通じて、新潟県中越地震では地震動により車両が動揺したために脱線した可能性を示すとともに、その時の車両挙動を推定することができた。

参考文献

- 1) 宮本, 石田, 松尾: 地震時の鉄道車両の挙動解析, 機論 C, 64-626, pp. 3928-3935, 1998
- 2) 宮本, 松本, 曾我部, 下村, 西山, 松尾: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 機論 C, 71-706, pp. 1849-1855, 2005