# 3613 地震時構造物の相互作用を考慮した車両運動シミュレーション

正 [土] ○前田 昌克 (J R 東海) 正 [土] 阿知波秀彦 (J R 東海) フェロー [土] 関 雅樹 (J R 東海) 正 [土] 松浦 章夫 (芝浦工大名誉教授)

Vehicle dynamics interaction simulation on structure by large earthquakes

Masakatsu MAEDA, JR Central. 1545-33, Oyama, Komaki City Hidehiko ACHIHA, JR Central, Masaki SEKI, JR Central Akio MATSUURA, Sibaura Institute of Technology Professor Emeritus

It is necessary to study both theoretically and experimentally on the derailment behavior of vehicles by grand motion. In our study, we developed a simulation program to model and formulate the dynamic interaction among a vehicle, track and structure. To enhance the precision of wheel/rail contact calculation even in short time, we employed an arithmetic algorithm to consider the influence of wheel-set role and rail tilt motion on wheel/rail contact angle. In this paper, the outline of the simulation is explained and comparative numerical results of several cases are presented

Keywords : vehicle dynamics simulation, running safety, structure, track, contact

#### 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」に東海旅客鉄道も参画し、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。

新潟県中越地震の地震対策において、軌道対策としての脱線 防止ガード及び構造物対策を確立したが、これらの対策の組み 合わせによる効果を総合的に評価する必要があった.このため、 地震時の車両、軌道、構造物の相互作用を考慮した3次元連成 応答時ミュレーション解析モデル(以降本解析モデルと称す) を開発した.既往の研究では、松本ら<sup>1)</sup>、松浦<sup>21</sup>により、車両お よび構造物双方の材料非線形、車輪の浮き上がりなどを考慮で きる3次元解析モデルが構築されている.本研究では、松浦が 提案した車両モデル及び車輪・レールの接触モデルで、より精 緻化したモデルに改善したものを使用した.今回、本解析モデ ルを用いて、脱線防止ガードと高架橋や橋台裏の地震対策の評 価に使用した.特に、想定東海波の応答が最も大きいと思われ る高架橋において、構造物の変位抑制対策をした場合、本シミ ュレーションにより脱線防止の効果を検証した.

本報告では、開発した本解析モデルを紹介すると共に、高架 橋の地震対策における解析結果について述べる.

# 2. 車両, レール及び構造物の解析モデル

## 2.1 車両の解析モデル

本報告では、図1 に示す3次元の新幹線車両を解析対象とす る.車両は、車体、台車枠及び車輪軸からなる.車両及びレー ルの運動を示す座標として、車両の長手進行方向x軸に定めた 右手・右ねじ系3次元直角方向座標の記号を、左右 y、上下 z、 ビッチング θ, ローリングφ, ヨーイングψと定める. なお, レールに関しては, 軌道外方に向かってy軸が正方向となるよう な局所座標を用いるものとする.

車体,台車枠,車輪軸及びレールの変位は、上記の座標記号 に下付き添え字 *t*, *b*, w及び r をそれぞれに付して表し、以下こ れらをまとめて「状態量」と呼ぶこととする.

車輪軸と台車枠とは、上下・前後・左右方向を軸ばねで、ま た車両と台車枠とは左右動ダンパ、ヨーダンパ、空気ばね(上 下・前後・左右)で結ばれている。これらのばね等はそれぞれ 固有の減衰を有し、また一定の特性を有するストッパを備えて いる、また、軸ダンパ及び左右動ダンパに付随する緩衝ゴムを 直列ばねで模擬した。

1車両全体としては、合計47自由度の力学モデルとなる. なお、中立静止時の車輪半径をr。とし、車両の走行速度は一 定でvとする.なお、車両数は、任意に設定が可能である.



[No.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〕

#### 2.2 レールのモデル化

レールは、線路長手方向に等間隔のまくらぎで弾性支持され た連続ばりであり、輪重、横圧等の外力によって水平軸及び鉛 直軸回りの曲げ変形、レール軸回りのねじり変形が生じる.こ こでは、複雑さを避けるために、レールの力学モデルを以下の ように簡略化する.図2に示すとおり、レール分布質量は車輪 の走行に伴って移動する等価質量に集約し、レール剛性と締結 ばね特性を結合した等価的な水平ばね及び鉛直ばねを導入する こととする<sup>3</sup>.ここで、水平ばねはレール回転中心に想定され る回転ばねを水平方向のばねに換算したものである.



走行する *i* 車輪直下におけるレールの基準点の横変位を *y<sub>xi</sub>* 及びその鉛直変位を *z<sub>xi</sub>* で表す.また,レールの回転角(以下 小返り角という)は

$$\phi_{r,i} = (y_{r,i} - y_{g,i})/h_c \tag{1}$$

によって近似的に表すこととする.ここに、ygi, Zgiはそれぞ れレール支持部の水平及び鉛直変位, hc はレール回転中心から 測ったレール基準点の高さである.ここで、横変位は地震動に よる変位と通り狂いを加えたものである.

このように、モデル化されたレールは、その等価的な水平ば ね及び鉛直ばねを介して下部の路盤に設置され、構造物の上下 方向、左右方向の運動が路盤を介してレールに伝えられること となる、また、軌道の通り狂い、高低狂い及び水準狂いは、構 造物と路盤との相対変位で与えられる。

## 2.3 構造物のモデル化

構造物は、盛土、高架橋のモデルが設定可能である。ここでは、高架橋の1例を挙げる。図3に示すとおり、水平方向で高架橋柱列ごとに非線形ばねとダッシュボットで結んだモデルとした。鉛直方向については、地表面に入力した鉛直方向地震波形が、そのまま高架橋スラブ上路盤の鉛直方向応答波形となる。高架橋スラブから上部は剛としている。



水平方向のばねは、高架橋のブロックごとに定める必要があ ることから、降伏点での荷重及び変位、最大荷重点での荷重及 び変位をブッシュオーバー静的非線形解析結果により入力し、 ブロックごとに、ばね定数及び降伏後の勾配倍率を算定するよ うした.これにより、高架橋ブロックの鉛直軸回りの回転(ヨ ーイング)を自由とし、また、高架橋柱が塑性域に達した後の 回転を考慮できるようになっている.高架橋柱の非線形特性は、 より詳細に解析を実施するため標準トリリニアモデル(図4)を 採用した.



#### 2.4 車輪・レールの接触パラメータ

本論文では、この種の数値解析シミュレーションにおいて重 要となる車輪とレールとの接触状態を算出する手法として、予 め準備した車輪とレールの接触パラメータ・テーブルを用いて 逐次内挿する方法を用いている。

ここでは、短時間の演算が可能である特長を生かしつつ、接触パラメータ・テーブルを用いて、レール小返りや車輪と図5 に示すレールの2点接触にも対応できる解析手法を確立している<sup>4</sup>.

車輪形状として新幹線車両の円弧踏面、レール断面形状として 60 kg レールを用いて車輪・レールの接触バラメータを計算 している.





車輪とレールの状態量から、式(2)のようにレール接触点にお ける車輪鉛直変位 zwe 及びレール鉛直変位 zre,また車輪とレ ールとの重合部分の鉛直量 λ が得られる.

$$z_{wc} = z_w - b_w \phi_w + 0.5r \phi_w^2 - \Delta r$$
  

$$z_{rc} = z_r + z_c - \phi_w y_c$$
  

$$\lambda = z_{wc} - z_{rc}$$
(2)

ここで、b<sub>w</sub>は車輪の左右半間隔である.これらを用いて、接 触点の接触圧力はヘルツの弾性接触理論を適用して接触重合体 積の 3/4 乗に比例する<sup>5</sup>ものすると、接触点における法線力 N は下式で近似できる.

$$V = N_0 \left\{ \frac{ab(\lambda_0 + \lambda)\cos\gamma}{a_0 b_0 \lambda_0 \cos\gamma_0} \right\}^{1.5} \ge 0$$
(3)

ここに、以下の何れも中立静止時の値として、え。は車輪とレール接触点重合部分の鉛直量、a。、b。はそれぞれ単位法線力に対する接触楕円の前後半径及び左右半径である. これらは前

N

述と同様にヘルツの弾性接触理論から算出することができる.

車輪とレールの状態量及び接触バラメータから、下式のよう に車輪・レール間の接平面内に生じる横すべり率 c<sub>y</sub>、縦すべり 率 c<sub>x</sub> 及びスピン率 c<sub>xy</sub> が得られる.

$$c_{y} = \left[ \left\{ \left( m \mathcal{K}_{w} \ mr \mathcal{K}_{w}^{*} \pm v \psi_{w} \right) - \left( \mathcal{K}_{y} \pm \partial y_{w} / \partial x \cdot v \right) \right\} \cos \gamma - \mathcal{K} \sin \gamma \right] / v$$

$$c_{y} = \left\{ \left( \psi \mathcal{K}_{w} b_{w} \right) m \left( r / r_{0} - 1 \right) v \right\} / v$$

$$c_{yy} = \left( m \mathcal{K}_{w} \cos \gamma - v / r \sin \gamma \right) / v$$
(4)

ここに、状態量の直上に付したドットは時間微分を表す. なお、上式の横すべり率には接触点の車輪横変位速度と同点 のレール物質横変位速度との差が用いられている.これらに、 車輪・レール間の摩擦係数及び接触楕円半径を加え、カルカ ーのクリープ理論<sup>n</sup>及び ルビシャルテ のモデル<sup>®</sup>を用い て、横すべりカT<sub>ey</sub>と縦すべりカ T<sub>ex</sub>が求められる.以下の 式のように、解析モデルにおいて車輪に与える外力として、 横圧 Q,車両進行方向力である縦接線力 T 及び輪重 P を算 出することができる.

$$Q = N \sin \gamma - T_{cy} \cos \gamma$$

$$T = -T_{cx}$$

$$P = (N - Q \sin \gamma) / \cos \gamma$$
(5)

## 3. 解析事例

2章で説明した本解析モデルで、高架橋及び橋台裏の地震対 策について検討を行った、本報告では、高架橋における解析結 果について以下に示す、

# 3.1 構造物と解析条件

解析の対象とした構造物は、図6に示すように地盤から地震動 を受ける延長約 500 m の 20 ブロックを有する高架橋である. 高架橋の解析モデルの諸元等は、典型的な実高架橋に基づいて 定めたものである.高架橋柱は、実高架橋のプッシュオーバー 解析の結果を反映した標準トリリニア形の履歴非線形特性を有 するばね要素でモデル化した.車両の走行速度は 270 km/h で あり直線走行とした.



図6 解析条件(高架橋の走行)

東海道新幹線の高架橋は、標準設計のものが連続しており、 線路方向には比較的均一であると考えられるが、地盤条件の変 化に伴う高架橋の基礎形式の変化箇所等で高架橋間に目違い (不同変位)が生じる可能性がある.高架橋の設定条件では、 20ブロックの等価固有周期は0.52~0.81s、降伏震度は0.38~0.52 である.ブロックごとに基礎形式、橋長などの諸元が異なるた め、高架橋ブロック間境界では相対水平目違い(ブロック間水 平ずれ)が発生する.この水平目違い箇所の軌道には,バラス ト軌道による実物台水平目違い試験<sup>80</sup>及び横圧の影響を参考 にして定めた片側2.4 m 長の緩和曲線を挿入した.また,車両 の脱線条件として,車輪レール水平相対変位が 70 mm を超え た時点で脱線と判定した.

## 3.2 入力地震動

地表面への入力地震動は、L2specII (G3地盤) (図7) 及び最 も応答する想定東海地震波 (G3地盤) (図8)の左右加速度と した.また、地震動の主要な波形部分と高架橋上の列車とのタ イミングも考慮し、0.1secごとに列車のスタート位置を変えて、 解析している.



# 3.3 地震対策

本解析モデルでは、当社が検討を進める地震時の脱線・逸脱防止対策の内、①脱線防止ガード、②高架橋目違い対策 (PC鋼棒)、③高架変位対策 (X型ブレース工法)の3つを解析条件に合わせて組み込んでいる.

図9 に①脱線防止ガード,②高架橋目違い対策 (PC鋼棒), ③高架変位対策 (X型ブレース工法)のばねを組み込んだ構造 物モデルを示す.



図9 高架橋の解析モデル(脱線対策を含む)

# 3.4 解析結果と考察

解析の結果、前項①~③の対策を実施しない場合(以降、「対 策無」とする), L2specII (G3地盤) では, 全体の約80%で解 析上の脱線判定となった. また, 前項の①脱線防止ガードのみ を設置した場合においても、解析上脱線判定となる場合もあっ た.事象として、構造物の横方向の振動変位が大きく、かつ構 造物境界での不同変位(月違い)が大きい場合に脱線が発生し ていることが確認された、一方、前項①~③の対策を全て設置 したケース(以降,「対策有」とする)でL2specII(G3地盤)の 地震動で解析した結果,全てのケースで脱線を防げることを確 認した、一方、最も応答をすると想定される想定東海地震波(G3 地盤)の場合でも、脱線防止ガードのみでは、解析上の脱線判 定となった.しかし、対策有の場合、脱線を防止することが確 認された、L2specII (G3地盤)の地震動入力で対策無の場合に 2.5sec.で車両の第4軸が脱線判定となった事例と対策有との比 較を図11、想定東海地震波の地震動入力で脱線防止ガードのみ の場合14.4sec.で車両の第2軸が脱線判定となった事例と対策有





との比較を図11に示す. 図10(a)より、対策無での2.0s以降の大きな高架橋応答左右動に対し、対策有では、水平応答変位が小さくなっており、X型ブレース工法による変位抑制効果が確認できる.また、図10(d)(e)で対策有では、右側車輪が脱線防止ガードにより変位を抑制し脱線を防いでいることが確認される. 一方、想定東海地震(図11)で、14.3seeに通過している高架橋の 目違い量(図11(b))で脱線防止ガードのみの場合大きくなっている.この目違いによる軌道狂いの影響で、脱線防止ガードのみの場合大きくなっている.との場合脱線していると考えられる(図11(a)).

## 4. まとめ

本報告で得られた結果をまとめると、地震時の車両挙動に対 して、車両、軌道及び構造物組み合わせた3次元連成応答モデ ルを開発した.また、L2地震及び最も応答をすると想定される 想定東海地震において、シミュレーション解析を試み、脱線防 止ガード、高架橋変位対策及び目違い対策を併せて実施した場 合には、脱線を防げることを確認した。

今回の解析結果より、脱線防止ガード、高架橋変位対策及び 目違い対策の組み合わせが必要であると考えられる.

#### 参考文献

- 1) 松本信之,田辺誠, 湧井一,曽我部正道:非線形応答を考慮 した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究,土 木学会論文A,Vol63,NO3,pp533-551,2007.7
- 2) 松浦章夫:地震時における列車走行解析に関する研究,土木 学会 鉄道力学論文集,第9号,2005.7.
- 3)星野陽一:レールのねじりに関する実用的解析法,土木学会 論文集,NO.210, pp33-46, 1973.
- 4)前田昌克,阿知波秀彦,松浦章夫:車両走行解析シミュレーションにおける車輪接触アルゴリズムの改善とその応用,土木学会鉄道力学論文集,第13号,2009.7.
- 5)S. Timoshenko: 材料力学 (下巻), 北畠顯正, 片山健次郎 訳, コロナ社, 1955.
- 6)日本機械学会編:鉄道車両のダイナミクス, ㈱電気車研究会, 1996.
- 7)Kalker, J. J. : Survey of Wheel-rail Contact Theory, Vehicle System Dynamics, pp317-358, 1979.
- 8)佐藤吉彦、三浦重,高井秀之,長沢孝哉:高架橋の水平目違 いおよび水平角折れに対する軌道の変形特性試験,鉄道技術 研究所速報,1985.3