

新幹線の車両走行安全シミュレーション

Vehicle dynamics simulation on running safety of Shinkansen

前田 昌克*, 阿知波秀彦*, 関 雅樹**, 松浦 章夫***
Masakatsu Maeda, Hidehiko Achiha, Masaki Seki, Akio Matsuura

*工修 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33)
**博 (工) 東海旅客鉄道株式会社 技術開発部 (〒485-0801 愛知県小牧市大山1545-33)
*** 工博 芝浦工業大学名誉教授

Development of practical and effective rail track-structure countermeasure is advanced as antiearthquake-measures recently. It's necessary to make sure of its effect beforehand in case of practical use of these track countermeasures. Authors have developed a vehicle-track-structure interaction simulation model that can analyze the effects on running safety by track countermeasures. The outline of this analysis model is described and several analysis results related to these track countermeasures are shown in this paper.

Key words : antiearthquake-measures, anti-derailment guard, track-structure, running safety of train, vehicle-track-structure interaction, numerical simulation
キーワード : 地震対策, 脱線防止ガード, 軌道・構造物, 車両走行安全, 車両・軌道・構造物相互作用, 数値シミュレーション

1. はじめに

平成16年に発生した新潟県中越地震により、上越新幹線の浦佐～長岡間の高架橋上において、新幹線列車が走行中に脱線するという事象が発生した。これは、大きな地震動による構造物の横振動が脱線の主要因として考えられている¹⁾。このような大きな地震動による高速車両の脱線挙動については、車両の挙動のみならず、実際の構造物や軌道との関連性も考慮した技術的検討を深める必要がある。

これまでに、車両および構造物双方の非線形特性、車輪の浮き上がりなどを考慮した3次元解析モデルが発表されている^{2), 3)}。さらに最近、著者らは従来の車輪・レールの接触部分のアルゴリズムを、実際の挙動に近づけるよう改良した実用的な3次元連成応答モデルを開発した⁴⁾。

JR東海では地震対策の一環として脱線防止ガードを開発している⁵⁾。実用化に当っては、この効果を確認しておくことが必要である。また、高架橋の目違いや橋台裏の段差が車両走行に及ぼす影響も調べておくことが重要である。このような技術的検討に活用できる解析ツールとして、著者らの開発した上述の3次元連

成応答モデルに脱線防止ガードの力学モデルを組み込み、さらに高架橋の目違いや橋台裏の段差の影響を分析する解析モデル(以下、本解析モデルと呼ぶ)を新たに開発した。本論文では、本解析モデルの概要と脱線防止ガードの機能や軌道・構造物に関する課題に関連した二三の解析事例を示す。

2. 全体モデルと車両及びレールの解析モデル

2.1 全体モデル

本解析モデルは、図-1に示すように車両、軌道、構造物を一体化した3次元の連成応答解析モデルである。

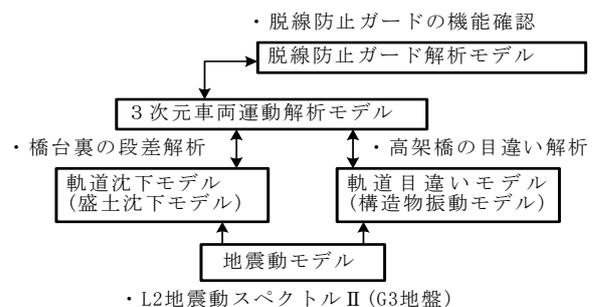


図-1 本解析で扱う解析モデルの全体像

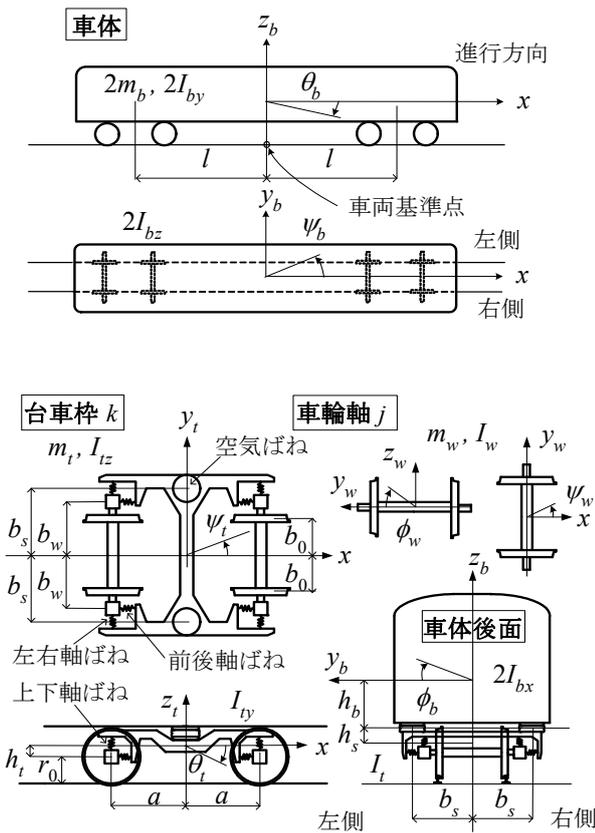


図-2 車両モデル

図-1 に示したように、本論文では、3次元車両モデルを中心として、脱線防止ガード解析モデル、軌道沈下モデル及び軌道目違いモデルを連成系として付加した。脱線防止ガードの機能確認、高架橋に生じる目違いや橋台裏に生じる軌道沈下の影響を解析する。

2.2 車両の解析モデル

本論文では、図-2 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 、ピッチング 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。本解析モデルのうち車両モデルの主な記号と諸元名称を表-1 に示す。

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これらを「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。

表-1 車両モデルの主な記号と諸元

記号	諸元名称	記号	諸元名称
m_b	半車体質量	k_{rx}	空気ばね前後ばね定数
m_t	台車質量	c_{wz}	上下軸ばね減衰係数
m_w	車輪軸質量	c_{rz}	空気ばね上下減衰係数
I_{bx}	x 軸回り車体慣性モーメント	c_{wy}	左右軸ばね減衰係数
I_{by}	y 軸回り車体慣性モーメント	b_w	左右軸ばね半間隔
I_{bz}	z 軸回り車体慣性モーメント	b_0	車輪間半間隔
I_{tx}	x 軸回り台車慣性モーメント	b_s	左右空気ばね半間隔
I_{ty}	y 軸回り台車慣性モーメント	h_b	車体重心空気ばね中心間距離
I_{tz}	z 軸回り台車慣性モーメント	h_s	台車重心空気ばね中心間距離
I_{wx}	x 軸回り車輪軸慣性モーメント	h_t	台車重心車輪軸重心間距離
I_{wy}	y 軸回り車輪軸慣性モーメント	l	前後台車中心半間隔
I_{wz}	z 軸回り車輪軸慣性モーメント	r_0	車輪半径
k_{vz}	上下軸ばね定数	m_r	レール等価質量
k_{wy}	左右軸ばね定数	k_{ry}	レール左右ばね定数
k_{vx}	前後軸ばね定数	k_{rz}	レール鉛直ばね定数
k_{rz}	空気ばね上下ばね定数	c_{ry}	レール左右減衰係数
k_{ry}	空気ばね左右ばね定数	c_{rz}	レール鉛直減衰係数

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プを備えている。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_0 とし、車両の走行速度は一定で v とする。また、車両数は、任意に設定が可能である。

車輪番号 i は、右(奇数)左(偶数)と交互に先頭から順に付していく。車輪軸番号 j 及び台車枠番号 k は、それぞれ先頭から順に付していく。なお、記号 j は空気ばねの番号も兼ねるが、この場合も左右交互に先頭から順に付していく。ここに、 $i = 1, 2, 3, \dots, 8$ である。以下の数式において、右辺で使われる j, k は、左辺で与えられた i を含む車輪軸または空気ばねの番号を示すこととして、同様に右辺で使われる i は、左辺で与えられた k を含む台車枠の番号を示すこととする。

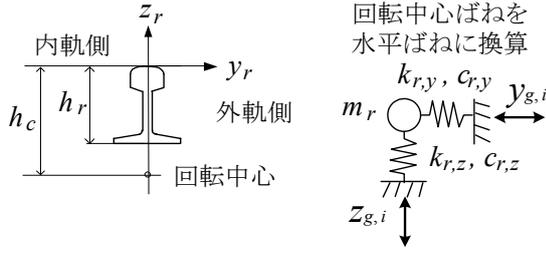


図-3 レールのモデル

2.3 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-3 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換算し、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⁹⁾。ここに、 $y_{g,i}$ 、 $z_{g,i}$ はそれぞれレール支持部の水平及び鉛直変位、 h_c 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、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 $y_{r,i}$ で表す。また、レールの回転角（以下小返り角という）は、式 (11) によって近似的に表すこととする。

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

ここで、レール支持部の水平変位 $y_{g,i}$ 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。

2.4 車両各部に作用する力

車輪番号 i 、車輪軸番号あるいは空気ばねの番号 j 及び台車枠番号 k に関して、新しい記号を式 (2) のように定めた。

$$\bar{i} = (-1)^{i+1}, \bar{j} = (-1)^{j+1}, \bar{k} = (-1)^{k+1} \quad (2)$$

前後空気ばね、上下軸ばね、上下空気ばね、左右空気ばね、前後軸ばね、左右軸ばねの伸縮量は、各運動座標を用いて式 (3) のように表される。走行する i 車輪

直下におけるレールの基準点の鉛直変位を $z_{r,i}$ で表す。

$$\begin{aligned} q_{tx,j} &= b_s (\psi_b - \psi_{t,k}) \\ q_{wz,i} &= -z_{t,k} + z_{w,j} + \bar{j} a \theta_{t,k} + \bar{i} b_w \phi_{t,k} - \bar{i} b_w \psi_{w,j} \\ q_{tz,j} &= -z_b + z_{t,k} + \bar{k} l \theta_b + \bar{j} b_s \phi_b - \bar{j} b_s \phi_{t,k} \\ q_{ty,j} &= \bar{j} y_b + \bar{j} k l \psi_b + \bar{j} h_b \phi_b - \bar{j} y_{t,k} + \bar{j} h_s \phi_{t,k} \\ q_{wx,i} &= \bar{j} \bar{k} b_w \psi_{t,k} - \bar{j} \bar{k} b_w \psi_{w,j} - \bar{j} h_t \theta_{t,k} \\ q_{wy,i} &= \bar{i} y_{t,k} + \bar{i} \bar{j} a \psi_{t,k} - \bar{i} y_{w,j} + \bar{j} h_t \phi_{t,k} \end{aligned} \quad (3)$$

上下軸ばね反力、前後軸ばね反力及び左右軸ばね反力は式 (4) のように表される。

$$\begin{aligned} F_{wz,i} &= k_{wz} q_{wz,i} + c_{wz} \dot{q}_{wz,i} + P_{1s,i} \\ F_{wx,i} &= k_{wx} q_{wx,i} \\ F_{wy,i} &= k_{wy} q_{wy,i} + c_{wy} \dot{q}_{wy,i} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、変数上のドット記号は時間に関する微分を表す。また、前後空気ばね反力、上下空気ばね反力及び左右空気ばね反力は式 (5) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} F_{tx,j} &= \bar{j} k_{tx} q_{tx,j} \\ F_{tz,j} &= k_{tz} q_{tz,j} + c_{tz} \dot{q}_{tz,j} + P_{2s,j} \\ F_{ty,j} &= k_{ty} q_{ty,j} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $P_{1s,i}$ 、 $P_{2s,j}$ は、車両重量が上下軸ばね及び上下空気ばねに及ぼすそれぞれの静止荷重である。

2.5 レールと車両の運動方程式

上記の各部の力等から、レール、車輪軸、台車枠及び車体に関する運動方程式 (7) が得られる。次頁に示すこの2階微分方程式からルンゲクッタ・ギル法により積分計算を行う。なお、輪重 P_i 、横圧 Q_i の算出方法は3章で説明する。

ここで x_i は、レールに対する車輪のアタック角によって、車輪接触点の基準点からずれる距離である。

$$x_{i,i} = -r_i \gamma_i (\psi_{w,j} - \psi_{r,i}) \quad (6)$$

ここで $\psi_{r,i}$ はレールの水平変位の変化率、 r は車輪の実際の半径、 γ はレール・車輪接触角である。なお、上記の車両の運動方程式は、その主要な構成を示したものである。下記のように他の構成要素による運動も同様の方法で誘導されるのでそれらの記述を省略している。

すなわち、車体と台車の相対的な運動を抑制するヨーダンパ、左右動ダンパ及び上下ストッパに関する記述、また、ヨーダンパ、左右動ダンパ、後述する脱線防止ガードのばね及び軸ダンパに付随する直列ばねの効果の記述、各ばね要素のストッパ特性、特に空気ばねの非線形特性に関する記述を省略した。

$$\begin{aligned}
m_r \ddot{y}_{r,i} &= -k_{ry}(y_{r,i} - y_{g,i}) - c_{ry}(\dot{y}_{r,i} - \dot{y}_{g,i}) + Q_i \\
m_r \ddot{z}_{r,i} &= -k_{rz}(z_{r,i} - z_{g,i}) - c_{rz}(\dot{z}_{r,i} - \dot{z}_{g,i}) - P_i \\
m_w \ddot{y}_{w,j} &= F_{wy,2j-1} - F_{wy,2j} + Q_{2j-1} - Q_{2j} \\
m_w \ddot{z}_{w,j} &= -F_{wz,2j-1} - F_{wz,2j} + P_{2j-1} + P_{2j} \\
I_{wx} \ddot{\phi}_{w,j} &= (F_{wz,2j-1} - F_{wz,2j})b_w - (P_{2j-1} - P_{2j})b_0 + (Q_{2j-1}r_0 - Q_{2j}r_0) \\
I_{wy} \ddot{\psi}_{w,j} &= -\bar{j}(-F_{wx,2j-1} + F_{wx,2j})b_1 - (T_{2j-1} + T_{2j})b_0 + Q_{2j-1}x_{l,2j-1} + Q_{2j}x_{l,2j} \\
m_l \ddot{y}_{l,k} &= F_{ly,2k-1} - F_{ly,2k} - F_{wy,4k-3} + F_{wy,4k-2} - F_{wy,4k-1} + F_{wy,4k} \\
m_l \ddot{z}_{l,k} &= -F_{lz,2k-1} - F_{lz,2k} + F_{wz,4k-3} + F_{wz,4k-2} + F_{wz,4k-1} + F_{wz,4k} \\
I_{lx} \ddot{\phi}_{l,k} &= (F_{ly,2k-1} - F_{ly,2k})b_s - (F_{ly,2k-1} - F_{ly,2k})h_s - (F_{wz,4k-3} - F_{wz,4k-2} \\
&\quad + F_{wz,4k-1} - F_{wz,4k})b_w - (F_{wy,4k-3} - F_{wy,4k-2} + F_{wy,4k-1} - F_{wy,4k})h_l \\
I_{ly} \ddot{\theta}_{l,k} &= -(F_{wz,4k-3} + F_{wz,4k-2} - F_{wz,4k-1} - F_{wz,4k})a \\
&\quad - (F_{wx,4k-3} - F_{wx,4k-2} + F_{wx,4k-1} + F_{wx,4k})h_l \\
I_{lz} \ddot{\psi}_{l,k} &= (F_{lx,2k-1} - F_{lx,2k})b_s - (F_{wx,4k-3} - F_{wx,4k-2} - F_{wx,4k-1} + F_{wx,4k})b_w \\
&\quad - (F_{wy,4k-3} - F_{wy,4k-2} - F_{wy,4k-1} + F_{wy,4k})a \\
2m_b \ddot{y}_b &= -F_{by,1} + F_{by,2} - F_{by,3} + F_{by,4} \\
2m_b \ddot{z}_b &= F_{bz,1} + F_{bz,2} + F_{bz,3} + F_{bz,4} \\
2I_{bx} \ddot{\phi}_b &= -(F_{bz,1} - F_{bz,2} + F_{bz,3} - F_{bz,4})b_s - (F_{by,1} - F_{by,2} + F_{by,3} - F_{by,4})h_b \\
2I_{by} \ddot{\theta}_b &= -(F_{bz,1} + F_{bz,2} + F_{bz,3} + F_{bz,4})l \\
2I_{bz} \ddot{\psi}_b &= -(F_{by,1} - F_{by,2} + F_{by,3} - F_{by,4})l + (-F_{lx,1} + F_{lx,2} - F_{lx,3} + F_{lx,4})b_s
\end{aligned} \tag{7}$$

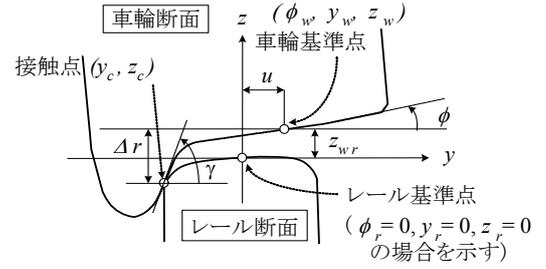


図-4 車輪とレールの接触状態

これらの車輪とレールの接触状態を表す諸量は、演算途中で定められた車輪・レールの相対変位 u 及び車輪・レール相対角 ϕ から内挿法により算出される。なお、上記の車輪半径 r は、これらの接触パラメータと r_0 を用いて再計算される。

図-5 には、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・レールの接触パラメータを計算した例を示す。独立パラメータ u 及び ϕ の範囲とそれらの刻み間隔 Δu 及び $\Delta \phi$ を以下に示す。

$$\begin{aligned}
-120 \leq u \leq 120, \Delta u = 0.1, \quad (\text{単位 ; mm}) \\
-0.2 \leq \phi \leq 0.04, \Delta \phi = 0.01, \quad (\text{単位 ; rad})
\end{aligned} \tag{9}$$

以上の独立パラメータに基づいて、車輪・レールの接触パラメータを収納するテーブルが作成される。

3. 車輪とレールの接触メカニズム

本論文では、鉄道車両運動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。

3.1 車輪・レールの接触パラメータ

車輪とレールの状態量から、下式のように車輪・レールの相対変位 u 及び車輪・レール相対角 ϕ が得られる。以下、車輪番号 i の表記を省略する。

$$\begin{aligned}
u &= \mp y_w \mp r \phi_w - y_r \\
\phi &= \mp \phi_w - \phi_r
\end{aligned} \tag{8}$$

ここで、 \pm は上下それぞれに右左の車輪が対応し、 r は接触点によって変化する車輪半径 ($r = r_0 + \Delta r$) を示す。符号の正負については、以下においても同様とする。これらの 2 量を独立パラメータとして、与えられた車輪及びレールの断面形状に対応して、車輪・レールの接触パラメータが算出される。

すなわち、車輪・レール接触パラメータは、一部を図-4 に示すように、レール上の鉛直接触点位置 z_c 、水平接触点位置 y_c 、同点の接触勾配 γ 、車輪半径鉛直増分 Δr であり、さらに、ヘルツの弾性接触理論に基づいて得られる単位法線接触力に対する接触楕円の前後半径 a 、左右半径 b である。

3.2 車輪・レール間の接触力の算定

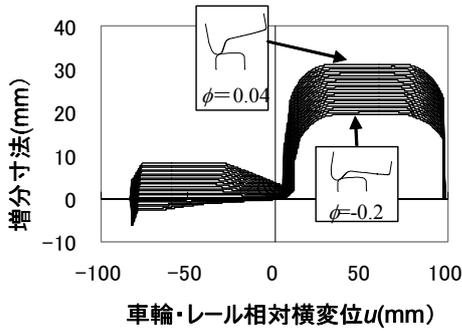
車輪とレールの状態量から、式 (10) のようにレール接触点における車輪鉛直変位 z_{wc} 、レール鉛直変位 z_{rc} 、及び車輪とレールとの重合部分の鉛直量 λ が得られる。なお、車輪ごとの番号は省略する。

$$\begin{aligned}
z_{wc} &= z_w - b_w \phi_w + 0.5r \phi_w^2 - \Delta r \\
z_{rc} &= z_r + z_c - \phi_w y_c \\
\lambda &= z_{wc} - z_{rc}
\end{aligned} \tag{10}$$

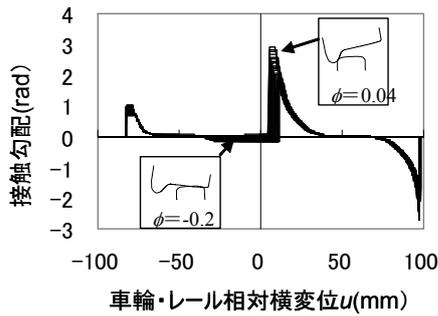
ここで、 b_w は車輪の左右半間隔である。これらを用いて、接触点の接触圧力はヘルツの弾性接触理論を適用して接触重合体積の 3/4 乗に比例する⁷⁾ものすると、接触点における法線力 N は式 (11) で近似できる。

$$N = N_0 \left\{ \frac{ab(\lambda_0 + \lambda) \cos \gamma}{a_0 b_0 \lambda_0 \cos \gamma_0} \right\}^{1.5} \geq 0 \tag{11}$$

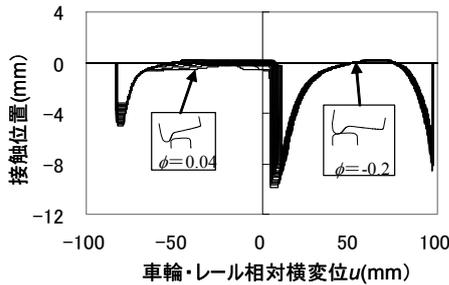
ここに、以下の何れも中立静止時の値として、 λ_0 は車輪とレール接触点重合部分の鉛直量、 a_0 、 b_0 はそれぞれ単位法線力に対する接触楕円の前後半径及び左右半径である。これらは前述と同様にヘルツの弾性接触理論から算出することができる。



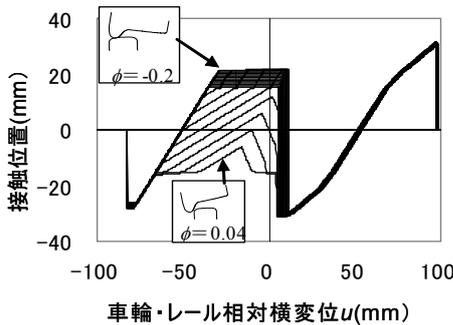
(a) 車輪半径鉛直増分 Δr



(b) 接触勾配 γ



(c) 鉛直接触点位置 z_c



(d) 水平接触点位置 y_c

図-5 車輪・レール接触パラメータ

車輪とレールの状態量及び接触パラメータから、次式のように車輪・レール間の接平面内に生じる横すべり率 c_y 、縦すべり率 c_x 及びスピン率 c_{xy} が得られる。

$$c_y = \left[\left\{ \left(\mp \dot{y}_w \mp r \dot{\phi}_w \pm v \dot{\psi}_w \right) - \left(\dot{y}_r \pm \partial y_g / \partial x \cdot v \right) \right\} \cos \gamma - \dot{\lambda} \sin \gamma \right] / v \quad (12)$$

$$c_x = \left\{ \left(\dot{\psi}_w b_w \right) \mp (r/r_0 - 1) v \right\} / v$$

$$c_{xy} = \left(\mp \dot{\psi}_w \cos \gamma - v/r \sin \gamma \right) / v$$

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。これらの値に、車輪・レール間の摩擦係数及び接触楕円半径を与えて、横圧 Q_i 及び縦接線力（車両進行方向の力） T_i を後述の式 (16) で算出することができる。

3.3 車輪とレールの接触力

車輪・レール間に働く接触力、すなわち横圧 Q_i 及び縦接線力 T_i は、輪重 P_i に対して前述の車輪・レール接触パラメータ及びクリープ係数を用いて、以下のように計算される。

式 (11) で得られた接触面に作用する法線力の各車輪軸に対する値を、式 (13) のように表すこととする。

$$P_{n,i} = N(i \text{ 車輪に対して}) \quad (13)$$

この法線力と式 (12) で得られたすべり率等を用いて、接線力が求められる。以下ではレール座標を用いる。すなわち、クリープ率、スピン率及び接触楕円半径を与えることによって、線形縦接線力及び線形横接線力を以下の式 (14) のように定めることができる。

$$T'_{cx,i} = -G a_i P_{n,i}^{2/3} C_{11} c_{x,i} \quad (14)$$

$$T'_{cy,i} = -G a_i P_{n,i}^{2/3} C_{22} c_{y,i} - G a_i^{3/2} P_{n,i} C_{23} c_{xy,i}$$

ここに、 $a_i = e_{a,i} e_{b,i}$ としたが、さらに、 G は鋼のせん断弾性係数であり、係数 C_{11} 、 C_{22} 、 C_{23} はカルカーの無次元クリープ係数⁹⁾である。縦接線力及び横接線力をルビ・シャルテのモデルを用いて、式 (15) によって計算することができる⁸⁾。

$$T_{cx,i} = T'_{cx,i} \varepsilon_i \quad (15)$$

$$T_{cy,i} = T'_{cy,i} \varepsilon_i$$

ここに ε_i は式 (16) に示すようにクリープ力の非線形性による飽和特性を考慮したパラメータである。

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\left[1 + \left\{ \sqrt{T_{cx,i}^2 + T_{cy,i}^2} / (\mu P_{n,i}) \right\}^\beta \right]^{1/\beta}} \quad (16)$$

また、 μ は車輪・レール間の摩擦係数であり、 β は飽和への漸近度を定めるパラメータである。なお、 β の推奨値は 1.5 である。これらの値から、横圧及び縦接線力が式 (17) のように計算される。

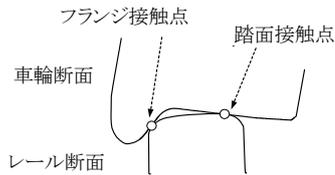


図-6 2点接触状態

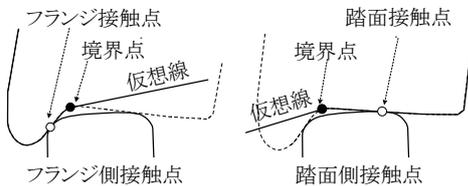


図-7 2点接触に対応する2つの車輪形状

$$\begin{aligned} Q_i &= P_{n,i} \sin \gamma_i - T_{cy,i} \cos \gamma_i \\ T_i &= -T_{cx,i} \end{aligned} \quad (17)$$

このように横圧 Q_i の算定には、式 (11) 及び式 (13) で示した車輪とレールとの接触変形を考慮して求めた法線力が直接に利用されているため、従来の解析³⁾のように輪重と法線力が接触勾配に伴う静力学的な力の釣合い式を用いた逐次繰り返し計算は不要となる。

なお、ここで算定された横圧 Q は構造物の外力として後述する式 (18) 及び式 (19) において使用される。

3.4 2点接触に対応する車輪・レール間の接触力

図-5 に示した車輪・レール接触パラメータによれば、水平接触点位置 y_c は、車輪・レール相対角が負の場合 ($\phi < 0$)、車輪踏面接触とフランジ接触との遷移区間 ($6 \text{ mm} < u < 12 \text{ mm}$) では、約 20 mm から約 -30 mm に急変している (図-5(d))。このような急変箇所では、図-6 に示すように接触点が2箇所同時に存在する可能性がある。

そこで、このような場合に従来のように1点接触に内挿近似するのではなく、2点接触としてそれぞれの接触力を算定できるように、車輪踏面部分とフランジ部分に車輪を仮想的に分離して、それぞれに対する2種類の車輪・レール接触パラメータ・テーブルを追加し採用することとした。なお、前項で誘導した車輪・レール間の接触力の定式化は、両者ともに共通して有効である。

以下において、2点接触の導入方法を簡単に述べる。まず、図-7 に示すように、車輪断面をフランジ側 (左側) と踏面側 (右側) の2種類に分割する。

フランジ側と踏面側を分ける境界点は、車輪断面形状やレール断面形状に依存するが、設定にはある程度の試行錯誤を要する。踏面側及びフランジ側に対して、3.1~3.3 と同じ方法を適用して、それぞれの接触パラ

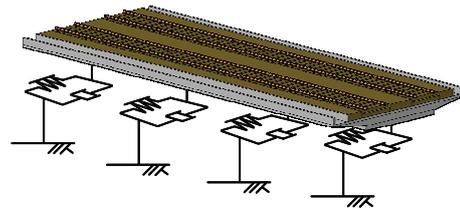


図-8 構造物モデル (8本柱の例)

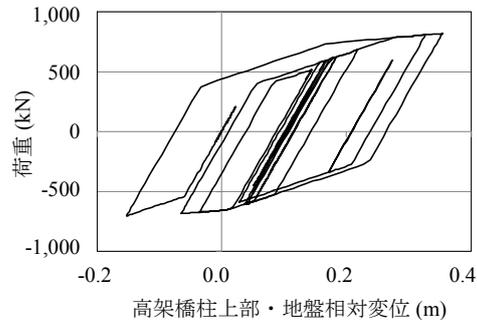


図-9 トリリニアモデルによる応答の例

メータを算定する。各接触パラメータを用いて、上記と同様にそれぞれの輪重、横圧及び縦接線力等の接触力を算定することができる。最終的な輪重、横圧及び縦接線力は、踏面側で求めたものとフランジ側で求めたものの和によって求められる。

踏面側あるいはフランジ側で求めた荷重が常に同時に存在するものではなく、車輪がレールから完全に遊離しているときは、両者ともゼロとなり、1点接触の場合はどちらかの荷重がゼロとなる。しかし、両者の接触点が近接してそれらが重複する場合は、それぞれの算定した荷重を加えたのでは誤差が大きくなる可能性がある。このことを考慮して、両者の接近時 (例えば接触楕円半径の合計の70%以内に近接する場合) には、1点接触であると判断し、図-4 に示す分割前の車輪・レール接触パラメータを用いることとする。

4. 構造物のモデルとフローチャート

4.1 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-8 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ポットで結んだモデルとした。上下方向は地表面と剛結されていると設定した。高架橋スラブは変形が微小であることから、上部は剛で設定した。

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プ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を採用した。図-9 にトリリニアモデルによる応答の解析例を示す。

高架橋にかかる荷重及びモーメントは、各車輪から a 与えられる車輪横圧、地震動による柱の相対変位を基にしたばね、減衰定数により算定する。すなわち、全ての柱列に対して、線路直角水平方向の併進荷重及び鉛直軸回りの回転モーメントを用いてブロック単位での運動方程式を立てる。なお、これらの運動方程式が車両の運動方程式と連成されるので、全体の積分間隔と同じ間隔で数値積分が実行される。

線路直角水平変位 y_s 及び鉛直軸回りの回転角 ψ_s に関する運動方程式を式 (18) に示す。ここで、 is は車輪軸、 js は高架橋のブロック番号である。

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{s,js} &= \left\{ -F_{s,js} \pm F_Q + F_{sl,js} + F_{sr,js} \right\} / m_{ss,js} \\ \ddot{\psi}_{s,js} &= \left\{ M_{s,js} + 0.5L_{ss,js} \left(-F_{sl,js} + F_{sr,js} \right) \right\} / J_{ss,js} \end{aligned} \quad (18)$$

ここに、 F_Q は式 (19) に示すように車両から作用する荷重である。本式において、 $\Sigma \Sigma$ は高架橋ブロック単位ごとに載荷される車輪横圧を合計する演算記号である。これが車両と構造物の相互作用の効果を与えることとなる。

$$F_Q = \sum_{is} \sum_{js} \delta_{is,js} \cdot Q_{is,js} \quad (19)$$

これらの記号を以下に整理して示す。

F_s : 高架橋ブロックにかかる柱からの荷重

F_{sl} : 高架橋ブロック起点側にかかる荷重

F_{sr} : 高架橋ブロック終点側にかかる荷重

F_Q : 高架橋ブロックに車輪横圧によりかかる荷重

M_s : 高架橋ブロックにかかるモーメント

m_{ss} : 高架橋ブロックの質量

J_{ss} : 高架橋ブロックの回転慣性

L_{ss} : 高架橋ブロックの長さ

$\delta_{is,js}$: クロネッカーのデルタ関数 (is が js に存在するとき1, 他は0)

レール支持部における鉛直変位 z_{gi} 及び水平変位 y_{gi} は、2.3 に既述されているが、これらは後述する軌道の目違いや軌道の段差を加え合わせて、線路直角方向 y_s 及びヨーイング角 ψ_s から着目する位置に応じて算定される。

4.2 解析のフローチャート

本解析モデルの概略フローチャートを図-10 に示す。ソースプログラムはフォートラン言語で記述した。

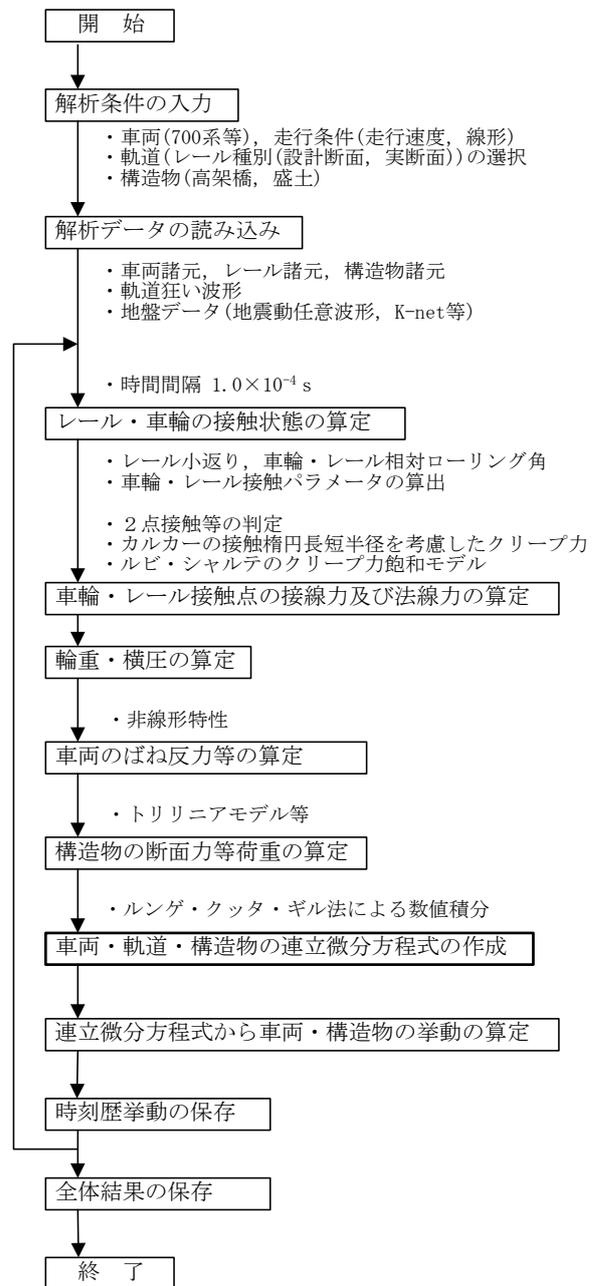


図-10 本解析モデルの概略フローチャート

5. 鉄道の地震対策に対応したシミュレーション解析

前述のように、JR東海では地震対策の一環として軌道や構造物に対する具体的な検討を進めているが、これらの有効性を評価するため、本解析モデルによりシミュレーション解析を行った。

ここでは、脱線防止ガード及びその解析モデル、高架橋ブロック境界に発生する軌道の水平目違いや橋台裏に発生する軌道の段差に関して、これらの具体的なメカニズムや本解析モデルへの組み込み方法に関する事項を概説する。

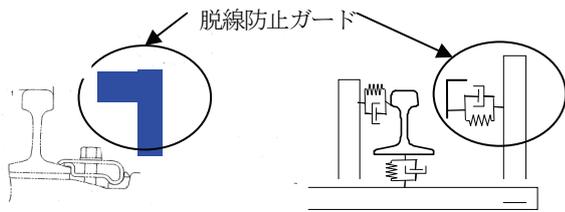


図-11 脱線防止ガード及びその解析モデル

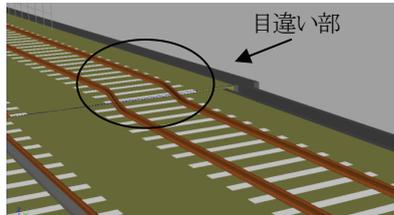


図-12 高架橋ブロック境界の水平目違い

5.1 脱線防止ガード

脱線防止ガードは、レールの側方に連続したガード材を設置し、車両の脱線を防止する対策である。脱線防止ガードの解析モデルを図-11に示す。

解析モデルにおいては、レール側面からの離れ及びレール頭頂面からの高さを自由に設定することが可能である。力学特性としては、左右方向に非線形のばね及びダンパ要素をまくらぎ上に支持されるものとした。車輪からは左右方向の荷重を受けるものとして上下方向のばねは設定していない。また、脱線防止ガードの質量は車輪軸と比較して微小であるため考慮していない。左右方向のばね定数は、脱線防止ガードの性能確認の試験結果¹⁰⁾により 10 kN/mm とした。算出した脱線防止ガードにかかる荷重は、式(7)の y_w , ϕ_w , ψ_w に関する方程式内で、横圧 Q の一部として用いられる。

5.2 高架橋の目違い (不同変位)

東海道新幹線の高架橋は、その多くが標準設計で建設され、柱断面が比較的小さいこと、橋軸方向の両端部で 3 m の張出し式の構造を有すること、バラスト軌道であることなどの特徴がある。特に、張出し式の構造は、東海道新幹線の高架橋に特徴的な構造であり、スラブ軌道の本格的な採用に伴うたわみ等の変位規制からゲルバー式の構造が主となった後の新幹線高架橋と異なる。これらの構造的な特徴に起因して、地震時に水平方向の振動変位や、隣接する高架橋間の相対変位によって、図-12に示すように軌道に大きな水平目違いが生じる。車両の走行安全を確保するためには、これらブロック境界における目違を極力抑制することが必要である。なお、本解析モデルでは、任意な地震動の入力が可能である。

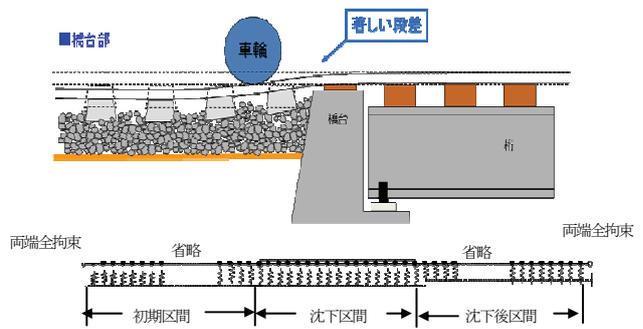


図-13 橋台裏と橋台裏解析モデル

本解析の高架橋は、既述のとおり水平方向に対して、高架橋スラブが橋柱列ごとに非線形ばねとダッシュポットで結ばれたモデルとしており、同一の地震動に対してもブロックごとに異なる水平変位が生じる。これがブロック間の水平目違いの原因となる。

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¹¹⁾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。なお、この緩和曲線長は任意に設定可能である。緩和曲線は多項式¹²⁾を内挿した。これらは、式(7)の y_g に挿入されていく。

5.3 橋台と盛土間 (橋台裏) の段差を考慮した解析

地震動を受けて橋台裏付近の盛土が沈下した場合、図-13に示すように、現在の軌道構造では段差や不支持区間の発生および軌道座屈などにより列車の走行安全性が低下することが考えられる^{12), 13)}。本解析モデルを橋台裏等の段差についても使用できるように、レール長手方向をまくらぎ間隔の梁要素に分割し、節点を上下方向とピッチング方向の自由度を設定したモデルを構築した。本軌道モデルの長さは全長 160 m であり、沈下区間は任意に設定することができる。解析条件として盛土沈下量を与えたあと、通常有限要素法¹⁴⁾で用いられる Hermite 補完によりレールの沈下形状を導き出す。このようなレールの形状に 2 章で説明した車両モデルを走行させ車両の挙動の評価を行う。これらは、式(7)の z_g に用いられる。

6. 解析事例

6.1 脱線防止ガードの効果検証

解析例として、標準的な高架橋上を車両 1 両が地震時に 270 km/h で走行する場合のシミュレーション解析を行った。地震動は、図-14に示すように、L2 地震動スペクトル II (G3地盤) と称する地表面応答波¹⁵⁾を高架橋のフーチングに水平方向に与えた。なお、新潟県中越地震では脱線は左右動が主要因であったことと、実際に鉛直方向の地震動の影響は小さいので、本解析例では鉛直方向の地震動を与えることは省略した。

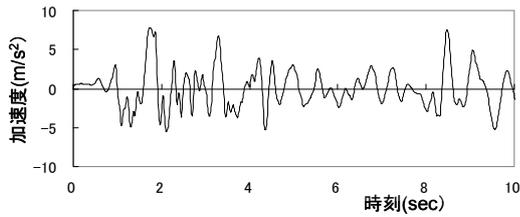


図-14 地震動の時刻歴加速度波形
(L2 地震動スペクトルⅡG3)

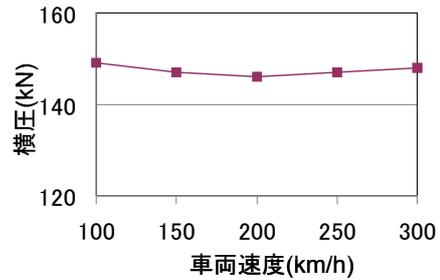


図-16 L2 地震動スペクトルⅡ (G3)による
最大車輪横圧 (速度別)

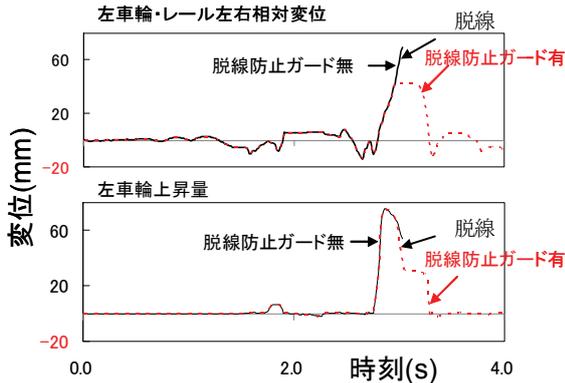


図-15 模擬地震動による先頭車輪の運動
(脱線防止ガード 黒実線：無, 赤点線：有)

また、脱線防止ガードはレール側面から離れ 80 mm、レール頭頂面からの高さを 20 mm に設定した。解析では車輪・レールの水平横相対変位が 70 mm を超す時点で脱線であると判定した。

本解析モデルによる先頭左車輪の車輪・レール相対変位及び車輪上昇量の時刻歴応答曲線を 図-15 に示す。脱線防止ガードを設置しない場合は 2.6 s で大きな地震動により車輪横移動量及び車輪上昇量が上昇し、3 s において車輪・レールの水平横相対変位が 70 mm に達して、脱線の判定となっている。一方、脱線防止ガードを設置した場合、同様に車輪横移動量及び車輪上昇量は上昇しているが、脱線防止ガードにより車輪とレールの相対変位が抑制されて、脱線判定は見られないことが確認された。このように、脱線防止ガードのモデルを導入することによって脱線防止の効果が発揮されることを確認した。

6.2 地震動による走行速度別の影響

新幹線車両 1 両が直線走行時に地震動を受けた際の車両の挙動を、前述した解析モデルでシミュレーション解析した。この場合においても、L2 地震動スペクトルⅡ (G3) による地震波をレール直下に水平方向に作用させた。鉛直方向は 0 とした。

出力値として、走行安全の指標の 1 つである横圧を選定した。各走行速度別 (100 km/h~300 km/h) にお

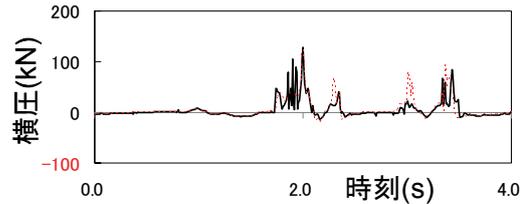


図-17 L2 地震動スペクトルⅡ (G3)による
時刻歴応答波形 (破線：100 km/h, 実線：270 km/h)

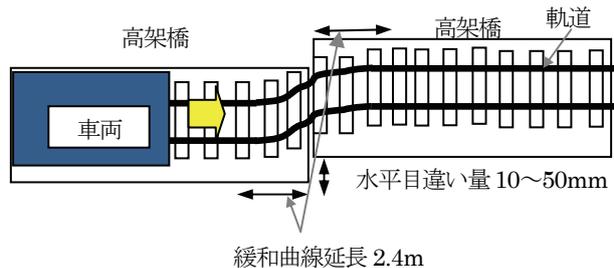


図-18 高架橋の水平目違い走行の解析条件

る車輪1両全車輪の最大横圧を 図-16 に示す。速度増加に伴う傾向は明確に現れていない。なお、図示は省略したが車輪上昇量でも同様の結果となっている。

図-17 に 100 km/h と 270 km/h の時系列応答波形を示す。この時系列波形では、一部波形に違いが確認されており、時刻によっては 100 km/h の方が大きい場合があることも確認された。走行速度により横圧の発生状況に違いがあることを確認した。

6.3 目違いに伴う通り狂いによる影響

前述のように、標準設計で建設された高架橋が連続した東海道新幹線の線路は線路方向に比較的均一であると考えられるが、地盤条件の変化に伴って高架橋の基礎形式は変化しており、地震動による揺れに伴って、このような箇所等では高架橋ブロック間に目違い (不同変位) が生じる可能性がある。

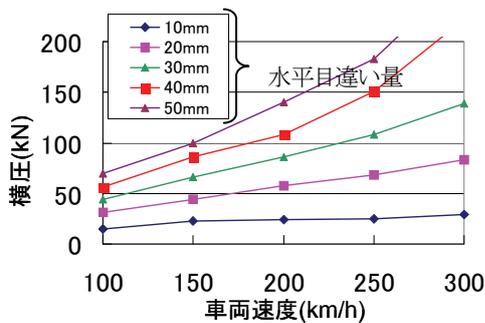


図-19 水平目違い部走行時の最大車輪横圧

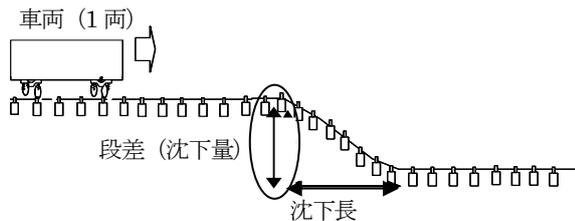


図-20 解析条件 (橋台裏の段差走行)

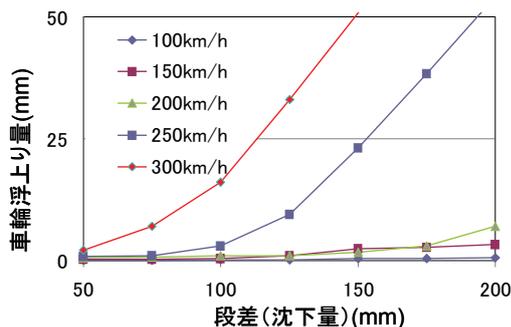


図-21 段差走行時の最大車輪浮上り量

新幹線車両1両が図-18のように高架橋の水平目違いによる通り狂いが生じている箇所を走行した際の速度別の車輪の挙動を解析した。高架橋の水平目違い量は0mm～50mm間の10mmピッチとする。

各走行速度別(100km/h～300km/h)における1両全車輪の最大横圧を図-19に示す。解析では、輪重、横圧、車輪・レール相対変位及び車輪上昇量を算出したが、横圧における車両の走行速度の影響が最も大きい。地震動の場合とは異なり、高速になるほど車輪横圧は増大することが確認される。

6.4 橋台と盛土間(橋台裏)の段差を考慮した解析

図-20に示すように、地震動等により生じた橋台裏軌道の沈下を想定した、段差箇所を車両1両が走行する際の車両の挙動をシミュレーション解析した。段差は50mm～200mm間の25mmピッチとした。軌道形状

はまくらぎ及びレール自重により自由沈下させた後、その直下に空洞が生じるが、その空洞が道床バラストにより埋め戻されると仮定し、この区間のまくらぎ下に通常の道床ばね定数を設定した。なお、この場合では通り狂いは設定していない。

各走行速度別(100km/h～300km/h)における1両全車輪の最大車輪浮上り量を図-21に示す。高架橋の目違いの場合と同様に、高速になるほど車輪上昇量が大きくなっていることが確認される。

7. あとがき

本論文で得られた結果をまとめると以下のとおりとなる。

- (1) 著者らが過去に開発した高速鉄道車両の3次元運動解析シミュレーションモデルを発展させ、車両、軌道及び構造物相互の連成効果を導入した新しい連成応答解析モデルを開発した。二三の解析事例によって、新幹線の走行安全シミュレーションに関する一つの解析ツールとして、実際の地震対策等に活用できる見通しが立った。
- (2) 本論文において開発した新幹線の走行安全シミュレーションの解析ツールを用いた解析事例により、脱線防止ガードの地震動による効果の確認が解析上可能になった。
- (3) さらに、本論文における解析事例により、地震動による車輪横圧は車両走行速度によって大きく変化しないことが分かった。一方、高架橋等の目違い部の走行では車両走行速度の増加に伴って車輪横圧が上昇すること、橋台裏などの段差部の走行では、段差の大きさと共に車両走行速度に応じて車輪がレールからの浮き上がる量が大きくなることが確認された。

高架橋ブロック境界に生じる目違い部の走行解析における横圧の増加は、車輪のアタック角の増加によるものと推定される。また、段差に関する走行解析では、軌道の通り狂いを設定していないが、車輪上昇量が大きいほど通り狂いを考慮すると、より脱線しやすくなる。今後もアタック角及び段差の影響については、さらに詳細な検証していくこととする。

また、本解析モデルの車両運動部分については、実物大の台車による振動台加振試験¹⁰⁾の結果と挙動が概ね一致していることが確認されているが、今後も新幹線車両の走行試験による対比及び摩擦係数などの違いによる検討を行い、本解析モデルの精度向上を高めていくこととしたい。さらに、走行解析モデルの実務的有効性に着目して、高架橋及び橋台裏に対する車両走行解析を継続し、軌道を含めた鉄道インフラの改善に、

さらに、レール摩耗による車両動揺の影響、急曲線・分岐器通過に伴う車両の走行安全性にも本解析モデルを活用していきたい。

参考文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書 上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故，2007.11.
- 2) 松本信之，田辺誠，涌井一，曾我部正道：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, Vol 63, NO3, pp 533-551, 2007.7.
- 3) 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.
- 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) 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，第16回鉄道技術連合シンポジウム，2009.12.
- 6) 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.
- 7) S. Timoshenko：材料力学（下巻），北島顯正，片山健次郎 訳，コロナ社，1955.
- 8) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクス，(株)電気車研究会，1996.
- 9) Kalker, J. J. : Survey of Wheel-rail Contact Theory, Vehicle System Dynamics, pp 317-358, 1979.
- 10) 村松浩成，可知隆，三輪一弘，渡邊康人，船田智巳，生田周史：実台車を用いた加振試験による脱線防止ガードの設計仕様の検討，第16回鉄道技術連合シンポジウム，2009.
- 11) 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.
- 12) 松浦章夫：有限要素解析法の基礎，三恵社，pp 32-33, 2007.1.
- 13) 垂水尚志，岡田勝也：地震時の橋台裏盛土の変状機構と対策，鉄道技術，pp 377, 1985.10.
- 14) 鉄道総合技術研究所：兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書 鉄道総研報告特別第4号，1996.4.
- 15) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震標準，丸善株式会社，1999.10.
- 16) 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，第16回鉄道技術連合シンポジウム，2009.

(2009年9月24日受付)