

IV-401 車両と軌道の動的相互作用シミュレーションと二三の計算例

金沢工業大学 正会員 松浦章夫
金沢工業大学大学院 田中弘紀
金沢工業大学大学院 杉本達重

1. はじめに

車両と軌道の動的相互作用の解析を行う際には、車輪・レール間の接触部の力学特性を出来るだけ厳密に取り入れることが肝要であろう。本報告では、現時点で得られる車輪・レール間の接触条件式を用い、レールの弾性特性などを新たに取り入れて、不整のある通常の軌道や、大きな狂いのある軌道、さらに地震などで振動する軌道上を走行する高速車両の動的挙動を解析するシミュレーション・システムの開発状況を述べる。ここでは、1車両を解析の対象とする。全体は39自由度の運動方程式となるが、本手法の概要と特徴を、「車両」、「レール」及び「車輪とレールの接触条件」に分けて述べ、解析例を示して若干の考察を行う。

2. 車両と軌道の動的相互作用シミュレーションの解析と特徴(図-1)

(1) 車両に関して 車両の自由度は、車体左右 y_B 、上下 z_B 、ローリング ϕ_B 、ピッチング θ_B 、ヨーイング ψ_B の5個、台車枠左右 y_{Tk} 、上下 z_{Tk} 、ローリング ϕ_{Tk} 、ピッチング θ_{Tk} 、ヨーイング ψ_{Tk} ($k=1,2$)の10個、車輪軸左右 y_{wj} 、上下 z_{wj} 、ローリング ϕ_{wj} 、ヨーイング ψ_{wj} ($j=1\sim4$)の16個、合計31個である。車体と台車枠とは上下、左右方向に対しまくらばねで、ヨーイング角に対しボルスター・アンカで、台車枠と車輪軸とは上下、左右、前後に軸ばねで結合され、左右前後の軸ばねを除いて、ストローク20～30mmで作用するストッパーを設ける。ばねの非線形性と伴に、ローリング角変化に伴う上下左右ばねの作用方向の変化も非線形特性として考慮し、大きなローリング角への対応を可能とする。

(2) レールについて レールは締結間隔で支持された連続はりであるが、ここでは、これを移動車輪の直下における等価的な質量・減衰・ばね系とする。ただし、レールの質量は左右運動に対する場合のみに考慮する。したがって、自由度に数えられる等価質量は8個となる。レールの上下たわみ剛性 EI 及び曲げねじり剛性 C を考慮した小返り特性から、輪重 P 及び横圧 Q の作用に対応して、等価的な上下ばね係数 k_{Rz} 、左右ばね係数 k_{Rx} を求める。これらの係数は、軌道パッドとレール底面との接触条件に従う非線形特性を有するものである。また、レール・車輪の非接触時にはレールの上下振動は無視するが、接触時にはその上下変位が刻々変化する車輪・レールの左右相対変位により一義的に定められるものとする。

(3) 車輪とレールの接触条件について 車輪踏面及びレール頭面の断面形状から、車輪基準点とレール基準点との左右相対変位を変化させて接触点位置を求め、その点における踏面勾配 γ 、両者の接触半径をあらかじめ求めておき、クリープ力算定の基礎データとする。また、2点接触の場合に対応するため、各点の踏面勾配 γ_1 、 γ_2 を求めておく。任意時間における横圧 Q は、輪重 P と仮定横圧 Q' 及び踏面勾配 γ から法線力 N を求め、摩擦力で飽和するクリープ力 Q_{cr} を弾性接触論から算出する。このクリープ力から接線力 T 、横圧 Q が定まるが、 Q を先の仮定横圧 Q' に収めさせる。2点接触の場合は、微小有限移行区間を設け、輪重 P_1 、 P_2 をその間で線形案分して対応する横圧 Q_1 、 Q_2 を求め、合計の横圧 Q を得る。

3. 車両と軌道の動的相互作用シミュレーション計算例

以下において、本手法による二三の計算例を示す。車両及びレールには新幹線の標準的な諸元を用いた。数値積分間隔は車輪踏面勾配に応じて自動設定する。

(1) 水平正弦波横振動を軌道に与えた場合 図-2

には、振幅5mm、周波数0.9Hzの水平正弦波横振動を静止状態から5秒間軌道に与えた場合の、走行車両の先頭車輪軸の応答を示す。この場合は、輪重変動、横圧変動及び車輪の上下動は、繰り返し数の増加とともに増大する傾向を示しており、3秒付近からは、

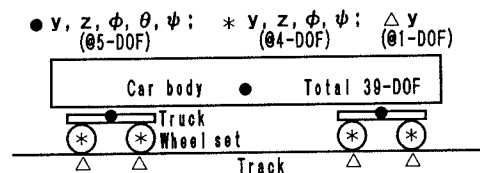


図-1 シミュレーションモデル

輪重がゼロ，すなわち片側の車輪がレールから浮き上がり，全体にロッキング動が現れている。

このように，車両には比較的大きな運動が生じるが，図に見られるように，反対側の車輪は依然としてレールに接触し，この点がロッキングの回転軸となり，安定走行状態を保っている。

(2) 実地震動を軌道に与えた場合 図-3には，1995年1月17日の兵庫県南部地震の気象庁神戸観測所観測波形のNS及びUD成分を軌道の水平横・鉛直振動として与えた場合の，前部台車後車輪軸（第2車輪軸）の応答を示す。主要動の開始後，B車輪は輪重，横圧とも極大値をとった後，いったん浮き上がり，A車輪は輪重，横圧の急増を示すが，その直後（5.3秒付近）で車輪はレールに対して大きく変位する。

すなわち，B車輪は，軌間内でレールから浮き上がった後，車輪フランジ先端がレール頭面に落下し急激に軌間外方に向かう。一方，反対側のレール上を走行中のA車輪が，このB車輪の外方移動に伴って，軌間内に向かって急速に移動している。

(3) 通り及び高低軌道狂いのある軌道の場合 図-4には，通常の軌道に存在する軌道狂いにより生じる先頭車輪軸の左右動及び車体前部心皿上床面の左右振動加速度波形を示す。軌道狂いサンプル波形は，

$$\text{通り狂い； } S(f_R) = 10^{-9} / f_R^3 \quad (\text{m}^3)$$

$$\text{高低狂い； } S(f_R) = 2 \times 10^{-9} / f_R^3 \quad (\text{m}^3)$$

で表されるパワースペクトル密度からランダム抽出して得たものである。このように，車輪軸は軌間内を両側のレール側面に交互に接触し，左右動を繰り返しながら走行している。

車輪フランジがレール側面に接触，あるいは接近する位置は，概ねレールの軌間内方への偏奇が増加しつつある時である。車輪軸の左右動は軌道狂い波形とほぼ同周期であるがやや大きな振幅を有する。車体の左右振動加速度波形の形状は，車輪軸の左右変位波形に近いが，車輪フランジのレール接触時点に対応した鋭いピーク波形が認められる。

4. あとがき

ここで示した車両と軌道の動的相互作用シミュレーションは，レールの弾性特性と車輪・レール間接触部の力学特性を出来るだけ忠実に取り入れ，さらに2点接触条件を表す計算上のモデルとして微小有限移行区間を設けたところに特色がある。今後は，これらのパラメータが結果に及ぼす影響等を詳細に調べ，必要に応じて改良を加えていく予定である。

文 献 松浦章夫；「振動軌道上の車両の走行安全に関する研究」 阪神・淡路大震災に関する学術講演会 1996. 1

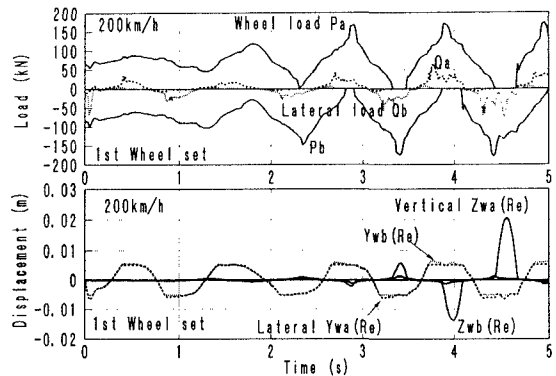


図-2 水平正弦波横振動を軌道に与えた場合

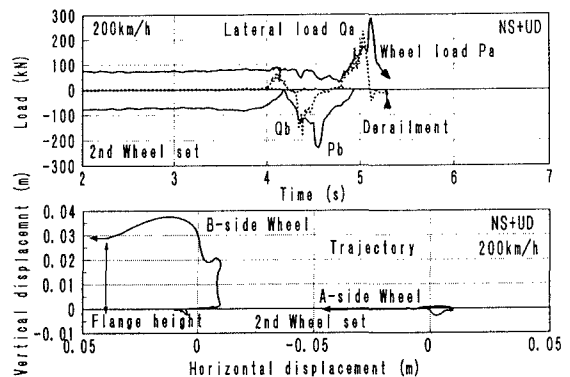


図-3 実地震動を軌道に与えた場合

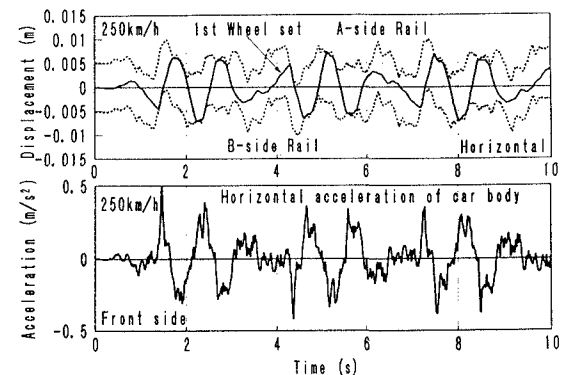


図-4 通り及び高低軌道狂いがある場合