

編成車両の地震時走行安全性解析

宮本 岳史* 石田 弘明*

曾我部 正道** 川西 智浩*** 室野 剛隆***

Analysis on Running Safety of Train Quaked by Seismic Motion

Takefumi MIYAMOTO Hiroaki ISHIDA

Masamichi SOGABE Tomohiro KAWANISHI Yoshitaka MURONO

We developed the numerical simulation program, called VDS, to analyze the dynamic behavior of a railway vehicle running on tracks quaked by the seismic motion. After the derailment accident of the Shinkansen train due to Niigata Prefecture Chuetsu Earthquake, it has become more important to clarify the running safety of a train which consists of many carbodies connected each other with couplers and dampers. Therefore we extended the ability of VDS and simulated the dynamic behavior of a Shinkansen train running on vibrating viaducts. In this paper, we describe the modeling and computing method used in the improved program VDS, calculation results of the influence of yaw- and roll-dampers equipped between carbodies on the derailment and the safety assessment method of a train against the seismic vibration whose frequency and amplitude change at random every moment.

キーワード：車両運動力学，地震，走行安全性，編成車両，シミュレーション

1. はじめに

鉄道総研では、詳細な1車両モデルによる車両運動シミュレーションプログラムVDSを用いて、大振幅で振動する軌道上を走行する鉄道車両の運動を解析し、地震時の車両挙動を明らかにしてきた¹⁾。また、車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS IIを用いて新幹線列車の地震時走行性解析を行い、連続した構造物の振動と列車走行性を調査してきた²⁾。VDSは車両、DIASTARS IIは構造物の振動特性・構造に着目し、各々その特徴を活かして地震時走行安全性の評価やその向上策の検討に活用している。

2004年10月23日に新潟県中越地震が発生し、高架橋上を高速で走行していた10両編成の上越新幹線「とき325号」が脱線した。この事故の原因調査や新幹線の地震時における安全性向上策の検討が進められていくなかで、車両間を拘束する車端ダンパ等が車両挙動に及ぼす影響や編成車両としての地震時走行安全性をさらに明確にすることの重要性が指摘された。そこで、車両運動シミュレーションプログラムVDSを拡張して、複数の車両を連結した編成車両の走行シミュレーションを可能にし、地震時における新幹線列車の大変位挙動を解析した。

本報告では、VDSプログラムの主な改良内容を記し、

- * 鉄道力学研究部 (車両力学)
- ** 鉄道力学研究部 (構造力学)
- *** 構造物技術研究部 (耐震構造)

編成車両の地震時走行安全性解析結果と、編成車両に対応するものとして新たに提案した走行安全性評価法について述べる。

2. シミュレーションプログラムの改良点と主な機能

VDSでは、車体、台車枠等の剛体間を、ボールジョイント、非線形特性を有するばねやダンパ、ストッパゴム等の要素モデルで結合し、詳細な1車両のモデルを構築する。また、地震動は各輪軸直下のレールを支持する路盤に与え、車輪とレールの接触状態を時々刻々判別しながら、両者間に働く非線形クリープ力を計算する。編成車両を扱う際にも、各車両のモデルや地震動の扱いは従来の1車両解析と同一であるが、車両間の拘束を定義する要素モデルを新たに作成したほか、各軸毎に異なる地震波形を入力する機能やその振幅を一定倍率毎に変化させて脱線の有無を自動的に判別する機能をVDSに加えた。

2.1 編成車両モデル

編成車両モデルの概要を図1に示す。新幹線列車では、車両間に連結器のほか、車体間ヨーダンパ、車端ダンパ(ロールダンパ)、気密幌が装着されている。このうち、車端ダンパと気密幌は各々、1車両モデルで使用しているボールジョイント結合のばね直列型非線形ダンパモデル、並進及び回転のダンパ並列型ばねモデルで表現する

特集：鉄道力学

こととし、連結器と車体間ヨーダンパの特性を記述する要素モデルをVDSに追加した。

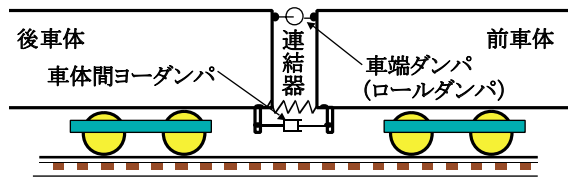


図1 新幹線列車の車体間拘束の例

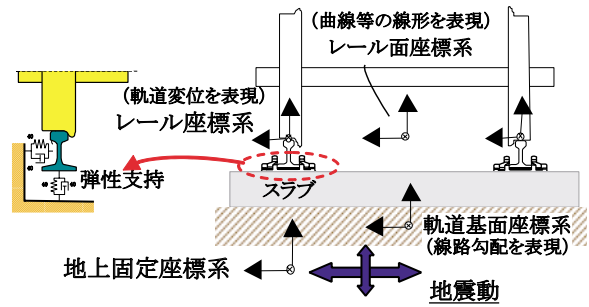
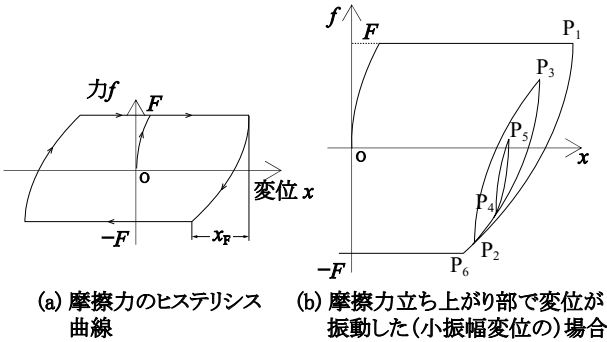


図3 地震波形の入力

2.1.1 連結器

連結器モデルは、二つの物体への取付点を定義し、その間に前後 x 方向の軸力と x 軸及び y 軸(左右軸)まわりの回転ばね力及び粘性減衰力を発生するものとした。回転ばね力は、角変位と力を複数設定することで、任意の折れ線特性を表現することができる。軸力はヒステリシスモデル³⁾とし、図2に示すような小振幅でも減衰作用を有する特性の摩擦力とした。地震時の車両挙動を解析する際には、連結器大変位時の胴受当たり等を考慮した非線形回転ばね力を適切に与えることが重要である。



(a) 摩擦力のヒステリシス曲線 (b) 摩擦力立ち上がり部で変位が振動した(小振幅変位の場合)
図2 連結器の軸力に用いる摩擦力モデル

2.1.2 車体間ヨーダンパ

車体間ヨーダンパは、構内線の急曲線通過時などにピストンストロークが大きくなると、減衰力を発生しないよう油圧をリリースする構造を採用している。そこで、ピストン変位がリリース開始点の変位を超えると減衰力が漸減して零となるような機能を、従来のダンパモデルに加えた要素を作成した。

2.2 地震波形の入力

地震動は、図3に示すように、各輪軸直下にある路盤(地上固定座標系)の変位として入力する。入力波形は、正弦波のほか、東西、南北、上下三方向の実測地震波形(変位及び速度)を時系列データで与えることができる。なお、実測地震動の場合には、通常、水平成分として南北と東西の波形が与えられるので、車両の走行方向の方位角 ϕ_z によって、式(1)の変換をシミュレーションプログラム内で行い加振ベクトル $\mathbf{x}_E, \dot{\mathbf{x}}_E$ を求める。車両運動シミュレーションでは、車両の進行方向、進行方向左、鉛

直上方を各々正とする右手系を用いているため、例えば、東西(東が正)の実測地震波形で左右に加振する場合には、正負を逆転した加振波形を作成して入力する必要があるが、東西の実測地震波形をそのまま入力し、車両の走行方位角を $\phi_z = 180$ 度とすれば、同じ加振条件での計算を簡便に行うことができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_E &= \mathbf{Q}_z \mathbf{x}_m, \quad \dot{\mathbf{x}}_E = \mathbf{Q}_z \dot{\mathbf{x}}_m \\ \mathbf{x}_m &= [x_{NS} \quad x_{EW} \quad x_{UD}]^T \\ \mathbf{x}_E &= [x_E \quad y_E \quad z_E]^T \end{aligned} \quad (1)$$

$$\mathbf{Q}_z = \begin{bmatrix} \cos\psi_z & \sin\psi_z & 0 \\ \sin\psi_z & -\cos\psi_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

x_{NS}, x_{EW}, x_{UD} : 南北, 東西, 上下の加振変位
 x_E, y_E, z_E : x, y, z 方向の加振変位

シミュレーション実行時には、地上固定座標系で与えられた加振ベクトル $\mathbf{x}_E, \dot{\mathbf{x}}_E$ に各座標系(図3)間の変換を施し、頭頂面中心を原点とするレール座標系での加振ベクトルを求めて、車輪/レール間作用力の計算を行う。

車両の全軸を同相・同振幅で加振する場合には、一種類の地震動データを与えるだけで良い。台車中心間距離17.5mの新幹線1車両モデルでは、実際に地震が発生した時も、全軸同相加振に近い状態が多いと考えられるが、列車長の長い編成車両では、各号車の加振波形が位相、振幅ともに異なるとみる方が自然である。また、高架橋接合部などの構造物境界では、地震動を受けた際に動的な角折れを生じるため、そのような箇所を車両が走行した場合を想定すると、もはや車両各軸の加振波形は同一ではなくなる。そこで、より一般的な地震動を扱うことができるように、編成車両モデルでの解析にあわせて、各号車・各軸の直下を異なる地震波形で加振する機能をVDSに加えた。例えば、2台車4軸の車両を5両連結した5両編成モデルでは、各軸に対応した20個の加振波形ファイルをオフラインで作成しておき、各軸と加振波形ファイル名とを対応づけた加振仕様ファイルを用意する。車両運動シミュレーション実行時には、読み込んだ加振仕様に従って、走行する5両編成車両の第1軸～第20軸を各々異なる地震波形で加振し、1両目～5両目の車両挙動を解析する。

以下、本論文では、単一周波数・振幅の正弦波に対し、複数の周波数成分を持ち振幅が時々刻々ランダムに変化する波をすべて地震波と呼ぶ。

2.3 走行安全限界の自動判別

2.3.1 正弦波入力による走行安全限界

全軸同一の正弦波入力により走行安全限界を求める方法は、1車両モデルの場合と同じである。指定した加振周波数の正弦波を与え、加振振幅を5mm毎に増加させながら脱線の有無を判別して、脱線する直前の振幅を安全限界振幅とする。編成車両モデルでは、各号車・全軸左右車輪のレールとの相対左右変位を照査し、これが70mm以上となったときに脱線と判定するようVDSを拡張した。車輪/レール相対左右変位70mm以上のとき、車輪とレールは図4に示すような位置関係にある。

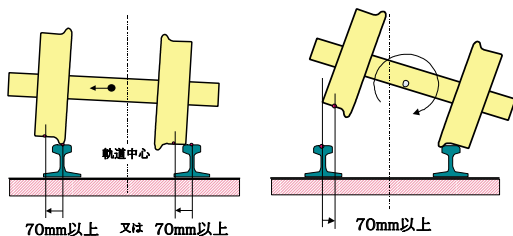


図4 脱線の判別条件

2.3.2 地震波入力による走行安全限界

各軸毎に異なる地震波を入力した場合、地震波は周波数、振幅ともにランダムな波であるため、正弦波入力時と同じような走行安全限界は求められない。そこで、各軸に入力する加振波形の振幅を一定倍率で拡大しながらシミュレーションを実行し、正弦波入力時と同じ方法で脱線の有無を判別するようにVDSを拡張した。脱線する振幅倍率の探索にはバイセクション法を用いている。編成中全車輪のうち、いずれかの車輪が脱線する直前の倍率を安全限界倍率と定義し、これを入力した特定の地震波に対する編成車両の走行安全限界と考える。

3. 編成車両の地震時走行安全性解析結果

本章には、改良した車両運動シミュレーションプログラムVDSを用いて、地震時における編成車両の挙動を解析した結果を記す。車両は前後対称のモデルである¹⁾。

3.1 正弦波入力による走行安全限界解析

新幹線電車の1車両モデルと3両、5両、6両の編成車両モデルを作成し、正弦波5波による全軸同相左右加振を行ったときの走行安全限界を調べた。編成車両の車体間は連結器と車体間ヨーダンパで拘束し、各号車の諸元は同一とした。解析結果を図5に示す。

図5より、1車両と編成車両とで安全限界振幅に違い

はほとんどなく、0.6Hz～1.0Hz等の一部の加振周波数においてわずかな差が生じることが分かる。全軸を同じ正弦波で加振すれば、車両間に生じる変位差が小さいため、当然、1車両と編成車両の安全限界振幅はほぼ同じになると考えられる。むしろ一部の加振周波数で差を生じたのは、全軸同相加振の場合でも、転走しながら左右に変位した全輪軸に同一方向のヨーモーメントが発生するため各車両にヨーイングが発生し、編成内の号車によってわずかに車両挙動が異なることによる。

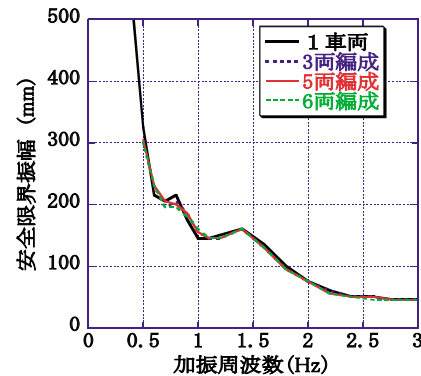


図5 走行安全限界線図(正弦波5波左右加振)

3.2 各軸毎に異なる地震波を入力した解析

編成車両の特徴が顕著に現れる事例として、不整形地盤上にある連続した複数の高架橋が地震動を受け、その振動する高架橋上を新幹線列車が走行した場合を取り上げ、解析を行った。

3.2.1 入力した地震波

傾斜角90度の基盤とせん断弾性波速度 $V_s = 100\text{m/s}$ 、厚さ20mの表層地盤があり、さらにその上に固有周期0.8sで20m間隔の橋脚を持つ高架橋がある場合を考える(図6(a))。このような不整形地盤では、基盤から表層地盤を上下に伝わる波と水平に伝わる波が干渉し、地表面の地震動は地点によって異なったものとなる。そのため、各高架橋天端の応答波に差異を生じるほか、隣接する高架橋間では軌道に動的な角折れが発生する(図6(b))。解析には、設計地震動L1波⁴⁾を基盤波として各橋脚位置の地表面波を推定し、これを入力して算定した

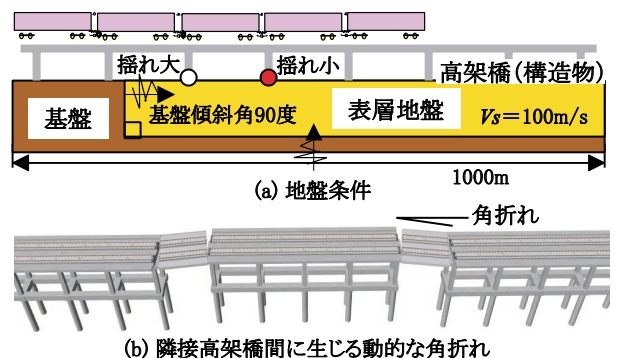


図6 解析用地震波算定に想定した条件

特集：鉄道力学

高架橋天端の応答波^{5) 6)}を地震波として用いた。この地震波は、振幅倍率 1.0 倍のときに最大 4.4mrad の動的な角折れが発生する波である。なお、角折れを生じる桁の両端では、角折れ点の前後 3m の間に、レールの横剛性とレール締結装置の弾性を考慮した緩衝区間を設け、その間の変位を補間してレール変位を算出した(図 7)。

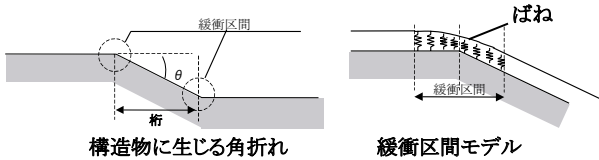


図 7 隣接高架橋間の角折れとレール変位

このように複雑に振動する高架橋上を走行する場合には、時々刻々、車両は各軸毎に異なる地震波を受けることになる。車両運動シミュレーションに入力する各軸毎の地震波は、次の手順で作成した。

- (1) 前述の方法である時刻 t における高架橋区間全体の変形状態を算定する。
- (2) 列車速度と走行開始位置から、時刻 t における各軸の高架橋上での走行位置を計算する。
- (3) (1) の変形計算結果から、(2) の各軸位置における時刻 t の変位を計算する。

以上の方法により、走行速度 300km/h と 100km/h の場合について、編成中央の走行開始位置を 5 通り設定した各軸毎の地震波を作成した。走行開始位置は、高架橋の大きな動的角折れ発生箇所を編成の中間車両が通過するような位置をあらかじめ試算で求め、これを基準に 5m ずつずらして設定した。以下、これらをタイミング①～⑤ (300km/h)、①'～⑤' (100km/h) と記す。5 両編成の各号車先頭軸に入力した地震波の例を図 8 に示す。

3.2.2 走行安全限界 (安全限界倍率)

前項に述べた地震波を各軸に入力し、1 車両と編成車両の走行安全限界を調べた。走行速度 300km/h と 100 km/h のときの結果を各々、図 9(a), (b) に示す。両図に示した安全限界倍率とは、変位倍率 1.0 倍から振幅を 0.05 倍ステップで拡大してシミュレーションを行い、脱線と判定される直前の最大倍率をプロットしたものである。なお、1 車両の場合には、編成中の脱線車両を考慮して中間車両 (300km/h) または 3 両編成先頭車両 (100km/h) と同一の地震波を入力した。

図 9 では、図 5 に示した同相の正弦波振動に対する走行安全限界線図に比べて、編成車両数が走行安全限界に及ぼす影響が明確に現れている。地震波の各軸間の位相差や振動振幅の相違が、車両にヨー角を生じさせ、隣接車両間のヨー角差、ロール角差によって車体間ヨーダンパや連結器が力を発生して、編成としての車両運動に影響を及ぼしていると考えられる。

図 9(a) に示すとおり、走行速度 300km/h・タイミング

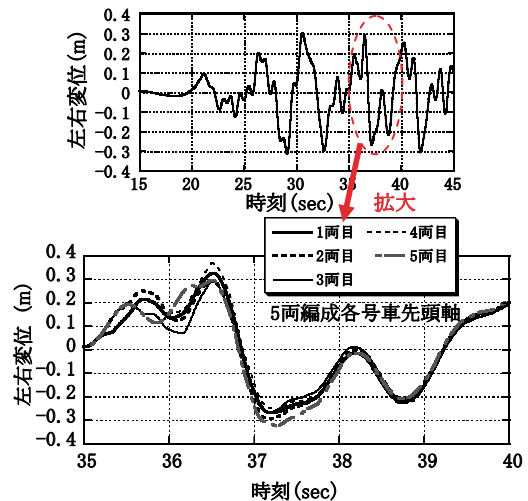
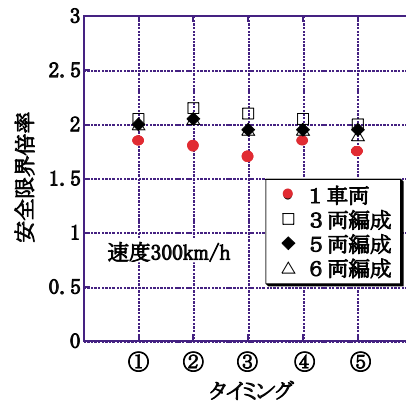
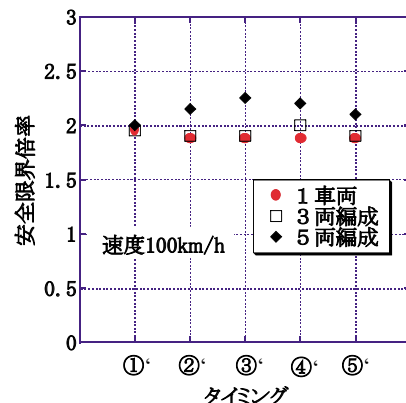


図 8 入力地震波の例 (300km/h, タイミング③, 2.0 倍)



(a) 走行速度 300km/h



(b) 走行速度 100km/h

図 9 各軸毎に異なる地震波を入力したときの走行安全限界

①～⑤では、編成車両の安全限界倍率が 1 車両に比べて高くなった。編成車両の中では、5 両編成及び 6 両編成より 3 両編成の方が安全限界倍率が大きく、5 両編成と 6 両編成とでは顕著な差が見られなかった。なお、図 9(a) 中の条件で編成車両が走行安全限界を超過するとき、多くの場合に、3 両編成では先頭車、5 または 6 両編成では中間車が最初に走行安全限界に達し、その時刻は 37.1～37.3 秒付近 (図 8) であった。

図9(b)に示すとおり、走行速度100km/h・タイミング①'～⑤'では、編成車両の安全限界倍率が1車両と同じか、もしくは1車両よりも高くなった。また、編成車両の中では、3両編成より5両編成の方が安全限界倍率が大きくなった。図9(b)中の条件で最初に走行安全限界に達するのは編成車両の先頭車が多く、その時刻は、図9(a)と同様に37.1～37.3秒付近であった。

本検討に用いた地震波では、1車両に比べて編成車両の方が総じて安全限界倍率が大きくなった。すなわち、1車両モデルの解析を行えば、走行安全上厳しい結果を得ることができるといえる。ただし、同じ地震動を受けた高架橋上の走行でも、図9(a)に示す速度300km/hの場合と図9(b)に示す速度100km/hの場合とでは、同一車両モデルの間で安全限界倍率に差異を生じている。1車両と5両編成では速度100km/hの方が安全限界倍率が大きくなっているのに対し、3両編成では逆に速度100km/hの方がわずかに安全限界倍率が小さくなった。

以上のように編成車両モデルを用いて各軸毎に異なる地震波を入力した場合の走行安全限界は、タイミング（走行速度や走行開始位置）や編成車両数によって異なる結果となる。したがって、編成の影響が顕著に現れる具体的な走行条件を仮定した場合に、編成車両の走行安全性を一般的に評価することは難しく、多くの条件で解析を行う必要があることが分かった。1車両モデルとの相違についても、さらに別の様々な地震波による解析を進めた上で結論付ける必要があると考えられる。

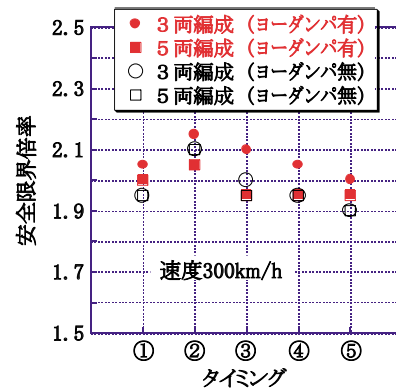
3.2.3 車体間拘束が走行安全限界に及ぼす影響

3両編成と5両編成のモデルを用いて、車体間ヨーダンパや車端ダンパ（ロールダンパ）の有無が走行安全限界に及ぼす影響を調査する。入力する地震波は、前項と同じ走行速度300km/h・タイミング①～⑤と走行速度100km/h・タイミング①'～⑤'である。車体間に連結器と車体間ヨーダンパが装着された編成車両を標準として、車体間ヨーダンパを外した場合と、車端ダンパを取り付けた場合についてシミュレーションを実施した。

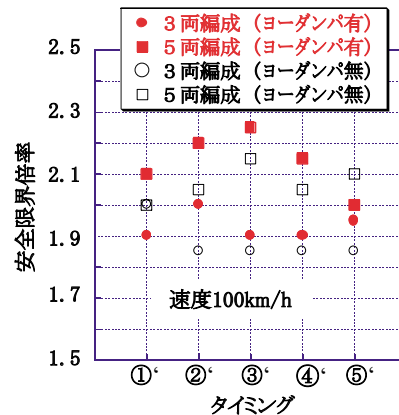
(1) 車体間ヨーダンパ

車体間ヨーダンパ有りとしのときの走行安全限界を図10(a), (b)に示す。図10(a)が走行速度300km/h、図10(b)が走行速度100km/hの場合である。

図10(a)に示す走行速度300km/hの場合、3両編成の車体間ヨーダンパ有りのときが、いずれのタイミングでも安全限界倍率がもっとも高かった。3両編成では、車体間ヨーダンパを付けることで安全限界倍率が増加している。5両編成では、3両編成の場合に比べて車体間ヨーダンパの影響が小さく、タイミング②のように、車体間ヨーダンパを装着することで安全限界倍率が小さくなる場合もあった。ただし、安全限界倍率がもっとも小さいタイミング⑤では、3両編成、5両編成ともに車体間ヨー



(a) 走行速度300km/h



(b) 走行速度100km/h

図10 車体間ヨーダンパの有無と走行安全限界 (各軸毎に異なる地震波を入力した場合)

ダンパ有りの方が安全限界倍率が向上した。

図10(b)に示す走行速度100km/hの場合、5両編成のヨーダンパ有りがタイミング⑤を除いて安全限界倍率をもっとも高くなった。3両編成ではタイミング①', 5両編成ではタイミング⑤'のときに、車体間ヨーダンパ有りの方が安全限界倍率が小さくなったが、他の4タイミングでは車体間ヨーダンパを付けることで、安全限界倍率が増加している。安全限界倍率をもっとも小さい3両編成のタイミング②'～⑤'では、車体間ヨーダンパ有りの方が1.85倍から1.9倍へと倍率が向上した。

以上の結果から、タイミングによるが、本解析に用いた地震波に対し、車体間ヨーダンパを装着した場合には、編成車両の地震時走行安全性が高くなる傾向にあることが分かった。

(2) 車端ダンパ（ロールダンパ）

車端ダンパを装着した場合の走行安全限界を標準の場合とともに図11(a), (b)に示す。図11(a)が走行速度300km/h、図11(b)が走行速度100km/hの場合である。

図11(a)に示す走行速度300km/hの場合、3両編成では、車端ダンパ有りのとき、安全限界倍率は4タイミングで無しのとときと変わらず、タイミング③のみで大きくなった。また、5両編成では、車端ダンパを装着したときに

特集：鉄道力学

全タイミングで安全限界倍率が向上した。安全限界倍率をもっとも小さい5両編成のタイミング③、④、⑤では、車端ダンパ有りの方が安全限界倍率が向上した。

図11(b)に示す走行速度100km/hの場合、3両編成では、車端ダンパ有りのときに安全限界倍率が無しの場合と同じかもしくは大きくなった。5両編成では、元々3両編成より安全限界倍率が大きい、タイミング①'、②'で車端ダンパを付けたときの方が、逆に安全限界倍率が小さくなった。安全限界倍率をもっとも小さい3両編成のタイミング①'と③'~⑤'のうち、タイミング⑤'では車端ダンパ有りの方が安全限界倍率がわずかに減少したが、その他のタイミングでは1.9倍のままで変化がなかった。

以上の結果から、タイミングによるが、本解析に用いた地震波に対し、車端ダンパを装着した場合には、編成車両の地震時走行安全性が総じて高くなる傾向にあることが分かった。

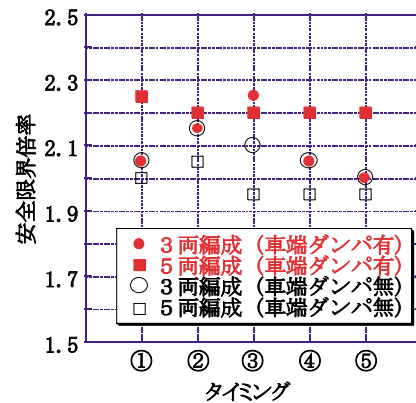
4. 結論

車両運動シミュレーションプログラムVDSを改良し、編成車両の地震時走行安全性解析を可能にした。正弦波と各軸毎に異なる地震波を入力した解析を行い、以下の結果を得た。

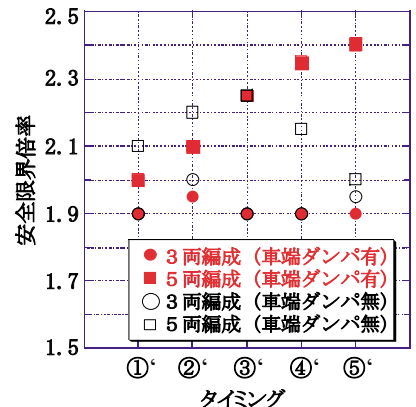
- (1) 各軸毎に異なる地震波を入力した解析を行えば、正弦波同相加振より編成車両の影響が顕著に現れる。この解析では、本報告に提案した安全限界倍率を用いることで編成車両の走行安全性が比較・評価できる。
- (2) 各軸毎に異なる地震波を入力した場合の走行安全限界は、タイミング（走行速度、走行開始位置）や編成車両数によって変化するため、編成車両の走行安全性を一般的に評価するのは困難であることが分かった。
- (3) 本解析に用いた地震波に対しては、タイミングによるが、車体間ヨーダンパや車端ダンパを装着すると、編成車両の地震時走行安全性が高くなる傾向にあった。

5. おわりに

本解析に用いた地震波は、設計地震動L1波をベースに作成した線路方向に不整形な地盤の上にある高架橋天端の応答波という一例である。実際には、地震動そのものが千差万別であることに加えて、種々の特性をもつ鉄道構造物が様々な形で連なり、地震発生時の車両の走行速度や位置も様々である。したがって、編成車両モデルの運動解析により、列車の走行安全性を一般的な形で評価することは難しい。しかし、各軸毎に異なる地震波を入力した編成車両のシミュレーションを行えば、1車両の全軸同相加振より現実的な走行状態を模擬することができる。本報告に述べた解析と評価の手法は、個別具体的



(a) 走行速度300km/h



(b) 走行速度100km/h

図11 車端ダンパの有無と走行安全限界 (各軸毎に異なる地震波を入力した場合)

な地震動と個々の構造物群に対し、列車の地震時走行安全性を評価する際に活用できると考える。

文献

- 1) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.64, No.626, pp.236-243, 1998
- 2) 松本信之, 曾我部正道, 涌井一, 田辺誠: 構造物上の車両の地震時走行性に関する検討, 鉄道総研報告, Vol.17, No.9, pp.33-38, 2003
- 3) 早勢剛, 長南征二, 深澤香敏: 鉄道車両連結器用緩衝装置の高機能化に関する研究, 日本機械学会論文集 (C編), Vol.67, No.654, pp.201-208, 2001
- 4) (財) 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, 1999
- 5) 川西智浩, 室野剛隆, 宮本岳史, 曾我部正道: 地盤の不整形性が地震時の車両の挙動に及ぼす影響 (その1), J-rail 2006, SS7-4 (2604), 2006
- 6) 宮本岳史, 曾我部正道, 川西智浩, 室野剛隆: 地盤の不整形性が地震時の車両の挙動に及ぼす影響 (その2), J-rail 2006, SS7-4 (2605), 2006