

左右およびロール振動する軌道を走行する 車両挙動解析

飯田 浩平* 坂井 公俊** 宮本 岳史*

Dynamic Simulations of Railway Vehicles Running on Tracks with Lateral and Roll Vibrations

Kohei IIDA Kimitoshi SAKAI Takefumi MIYAMOTO

In this study, the effects of the roll vibration of the track on the running safety of railway vehicles are investigated. During earthquakes, the top of the viaducts vibrate in roll direction in addition to lateral and vertical directions. The vehicle dynamics simulator (VDS) is modified so as to enable us to input the roll vibration into the track. According to the sinusoidal oscillation analysis, it is shown that the running safety of railway vehicles is decreased by approximately 10% when the ratio between the roll amplitude and the lateral amplitude of the track vibration is 0.02 rad/m. In addition, it is verified that the decrease of the running safety due to the roll vibration of the track in case of the rigid-frame structure is smaller than that in case of the pier structure. This is because the roll vibration of the rigid-frame structure is smaller than that of the pier structure.

キーワード：地震，高架橋，走行安全性，車両運動シミュレーション，軌道面ロール振動

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震や2004年の新潟県中越地震などの大地震により、鉄道構造物や鉄道車両が被災したことを受け、それらの地震対策について研究開発が行われ、一部は実用化されてきた^{1)~7)}。高架橋構造物が地震動を受けた場合、高架橋天端において水平振動に加えロール振動が生じ得る。しかし、一般的なラーメン式高架橋の場合、幾何学的な構造上、その影響は小さいと推定されることに加え、ロール振動の解析精度が未検証であることから、地震時における車両挙動解析では、これまで軌道面のロール振動は無視し、左右および上下振動のみを考慮してきた⁸⁾。ただし、軌道面の上下動は左右動に比べ走行安全性への影響が大きいことから⁸⁾、車両の地震時における走行安全性評価では軌道の左右動のみを入力とすることが多い。

一方、近年の検討によると、土木構造物上に建設された電車線柱は、地震時の構造物のロール振動の影響で応答が増大することが分かっており⁹⁾、過去に発生した地震被害を再現するためにはこの影響を考慮する必要があることが指摘されている¹⁰⁾。これを受けて電車線柱の耐震設計においては、構造物のロール振動の大きさを取り入れた応答値算定法を採用している^{11) 12)}。車両におい

ても、地震動の大きさによっては構造物天端のロール振動の走行安全性への影響が無視できない可能性があると考えられる。そこで、本研究では地震時を対象とした車両運動シミュレーションプログラムを改良し、構造物天端の左右およびロール振動を考慮した車両挙動解析を行い、軌道面ロール振動の地震時走行安全性に及ぼす影響を解析的に検討したので報告する。

2. 検討条件

2.1 車両条件

解析に用いる車両は、鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限)¹¹⁾における走行安全性解析で用いた車両と同様の高速新幹線車両(ボルスタレス台車装備)とした。乗車条件は定員乗車条件とし、走行速度は260km/hとした。

2.2 軌道条件

解析に用いる軌道は軌間1435mmの直結軌道とし、軌道不整のない直線区間とした。

2.3 入力地震動

2.3.1 正弦波

本研究では、基礎的な検討を行うため、図1に示すような高架橋構造物の変形を考慮し、ロール変位が左右変位に比例すると仮定した。また、純粋なロール振動の影

* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

** 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

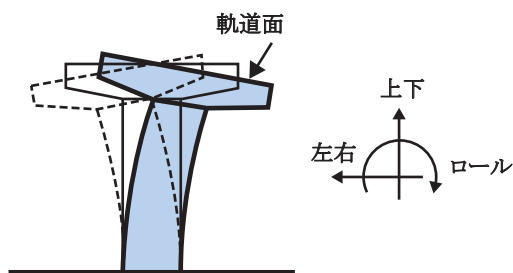


図1 高架橋変形概念図

響を調べるため、高架橋天端のロール振動に伴う軌道面の上下動は無視し、軌道中心線は上下動しないものとした。以後、左右変位に対するロール変位の割合を左右・ロール振幅比（単位：rad/m）と呼ぶ。

2.3.2 地震波（ランダム波）

地震波（ランダム波）は、土木構造物上の水平方向、ロール方向の応答波形として、過去に実施した電車線柱の影響評価に用いた波形⁹⁾を用いる。波形の算出方法の概略的な手順を示す。

左右・ロール振幅比は、土木構造物の構造形式によって変化することが考えられるため、表1に示すような5種類の構造形式、柱高さの異なる構造を対象として動的解析を実施し、土木構造物天端の応答波形を算出している。算出方法の詳細については文献9)を参照されたい。土木構造物への入力地震動は、鉄道構造物の設計地震動(L2地震動スペクトルII(G3地盤)¹¹⁾とし、各構造毎に部材の応答特性を全て線形とした場合(以下、「線形モデル」と呼ぶ)と部材の非線形性を考慮した場合(以下、「非線形モデル」と呼ぶ)についてそれぞれ応答波形を算定した。最終的に得られた構造物天端の応答波形、すなわち車両への入力地震動の例を、構造条件1の構造物で線形モデルを用いた場合について、図2に示す。

表1 解析対象とした土木構造物

構造条件	構造形式	柱高さ (m)	基礎形式 (括弧内：杭配列)
1	1層ラーメン	7.1	1柱1杭 φ1000mm
2	1層ラーメン	8.6	細径群杭 φ350mm (10×10)
3	2層ラーメン	16.9	細径群杭 φ350mm (10×10)
4	橋脚 (上部工先行降伏)	8.0	太径群杭 φ1000mm (3-2-3)
5	橋脚 (基礎先行降伏)	8.0	太径群杭 φ1000mm (3-2-3)

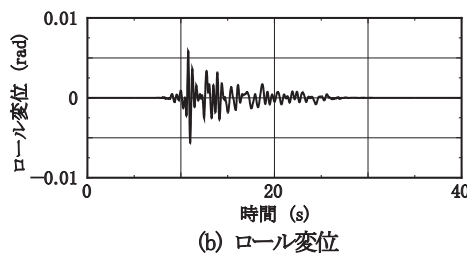
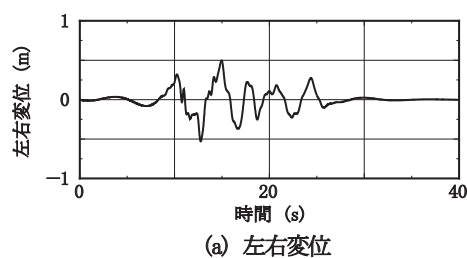


図2 構造物天端応答波形 (構造条件1, 線形モデル)

3. 車両運動シミュレーションの概要

鉄道総研の地震時の車両運動シミュレーションプログラム(VDS: Vehicle Dynamics Simulator)は、通常の車両走行シミュレーション機能に加えて、レール下から列車の進行方向に対して上下・左右・前後の並進振動を入力として与えたときの、車輪がレールから浮き上がったり、車両が大きくロール変位する挙動などを精度よく解析できるように機能を追加したものである。このプログラムによる解析については、実台車を用いた加振実験による精度の検証も行われている¹³⁾。

本研究では、VDSに軌道中心回りのロール加振を入力する機能を追加した。ロール加振は図3に示すように、軌道面のロール変位を軌間に応じて左右のレールに逆相の上下変位を与えることで表現している。厳密にはレール自体もロール変位するが、本研究では基礎的な検討として、それについては無視している。今後、解析精度向上のためには考慮する必要があると考えられる。

車両モデルを図4に示す。車両モデルの概要は以下の通りである。

- (1) 1個の車体、2個の台車、4個の輪軸、合計7つの剛体で車両を構成し、各剛体が6自由度をもち、車両の8個の車輪を支えるレールが独立に各2自由度

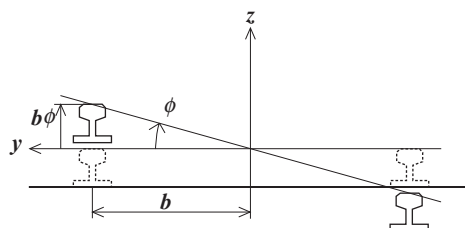


図3 軌道面ロール振動入力方法

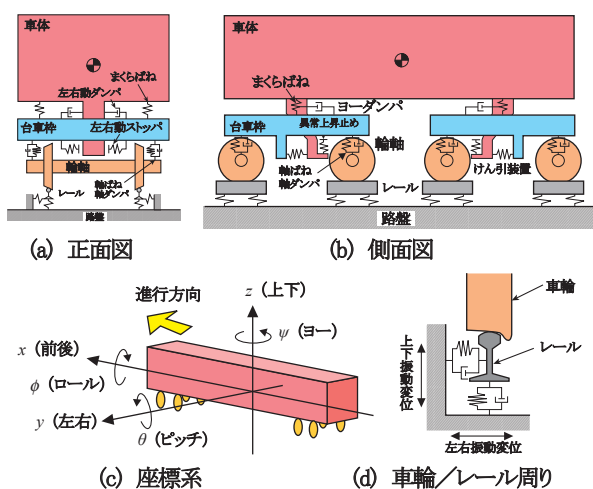


図4 車両モデル

をもち、モデル全体で合計 58 自由度を有している。なお、座標系については、図 4 (c) に示すように車両進行方向を x 軸の正の向きにとり、上下 (z) 方向は上向きを正、左右 (y) 方向は進行左向きを正とした。

- (2) 一車両モデルに必要な、車体-台車枠間と台車枠-輪軸間の結合要素については、基本的にはばね・ダンパ要素によりモデル化しており、まくらばねや軸ばね、左右動ストッパ、軸箱上下動ストッパ、車体異常上昇止め、左右動ダンパを配置している。
- (3) 車輪・レール間作用力は Kalker 理論に基づいたモデルにより求める。また、車輪はレールから離れて運動する状態も計算可能とする。
- (4) 地震動は、1 車両の 4 輪軸下の軌道が同時・同波形で振動するものとする。
- (5) 脱線判定は車輪/レール相対左右変位（車輪踏面中心とレール頭頂面中心との左右方向の距離）により行い、この変位が静止時の車輪の中正位置から ±70mm 以上となったときに脱線と判定する（図 5）。

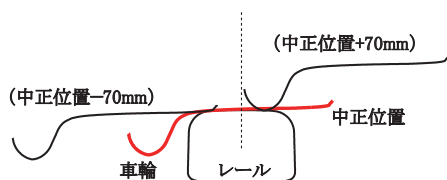


図5 脱線判定時の車輪・レールの位置関係

4. 正弦波加振に対する走行安全性解析

4.1 軌道面ロール振動の車両挙動への影響

車両挙動解析の一例として、加振周波数 0.5Hz、左右振幅 0.26m において、左右・ロール振幅比 0rad/m（ロール振動なし）と 0.05rad/m の場合の時刻歴波形を図 6、

図 7 にそれぞれ示す。なお、左右振幅 0.26m は後述する正弦波加振に対する走行安全限界線図において、加振周波数 0.5Hz、左右・ロール振幅比 0.05rad/m では脱線する加振振幅である。ロール変位が左右変位に比例すると仮定しているため、図 7 に示す加振波形において、左右加振とロール加振の位相差は 180 度（逆相）で一定となっている。図 6 より、ロール振動のない場合には輪重

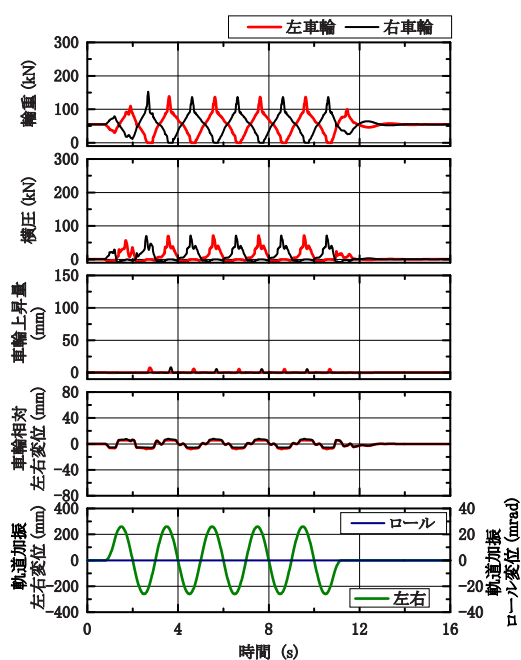


図6 時刻歴応答波形（周波数 0.5Hz、振幅 0.26m）
（左右・ロール振幅比 0rad/m）

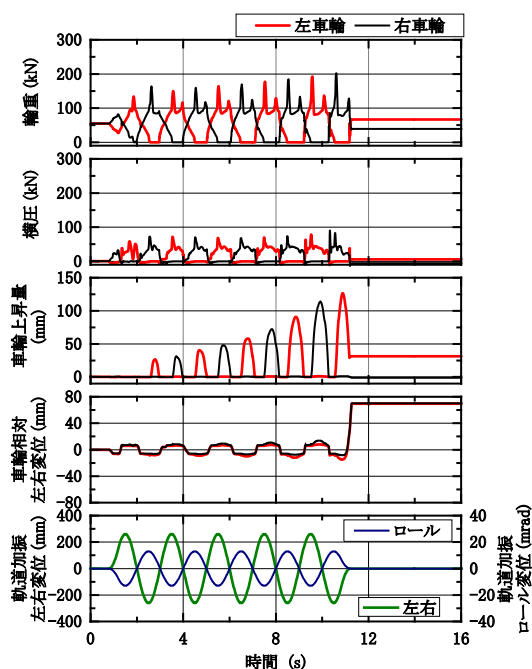


図7 時刻歴応答波形（周波数 0.5Hz、振幅 0.26m）
（左右・ロール振幅比 0.05rad/m）

特集：鉄道力学

がゼロになる時間があるものの、振動が発散することもなく、車輪上昇量も小さい値に収まっているが、図7のようにロール振動がある場合には、輪重ゼロになる時間帯が長くなり、振動が成長していき、加振5波目に脱線に至ることがわかる。比較的低い加振周波数0.5Hzで、車両が四股を踏むように振動する下心ロール時には、車輪上昇量がある程度以上大きくなると、急激に車輪上昇量が大きくなり、図6の軌道面のロール振動がない場合においても、さらに加振振幅を大きくすると、図7と同様に振動が成長する様子が見られる。他の加振条件でも同様の傾向が見られることから、軌道面のロール振動は輪重減少を助長する影響はあるが、車両挙動自体を大きく変えるほどの影響はないといえる。

4.2 正弦波加振に対する走行安全性解析

軌道面ロール振動の地震時走行安全性に及ぼす基本的な影響を把握するため、正弦波加振に対する走行安全限界線図を求めた。走行安全限界線図は、横軸に軌道の加振周波数を、縦軸に左右振動の加振振幅（片振幅）をとり、各加振周波数毎に加振振幅を5mm単位で大きくしながら正弦波5波で加振するシミュレーションを繰り返し実行して、脱線判定基準において脱線と判定を受ける直前の振動振幅（走行安全限界振幅）をプロットしたものである。つまり、各加振周波数の振動を5波受けたときに走行安全限界線以下の振幅であれば脱線しないことを示している。本研究では、軌道面のロール振動振幅が左右振動振幅に比例すると仮定し、左右・ロール振幅比を0（ロール振動なし）～0.1rad/mの範囲で変化させて走行安全限界線図を求めた。得られた走行安全限界線図を図8に示す。図8より、左右・ロール振幅比が大きくなるに従い、走行安全限界振幅が小さくなり、走行安全性が低下することがわかる。

左右・ロール振幅比0の場合を基準として、ロール振幅比による走行安全限界振幅の低下割合を図9に示す。

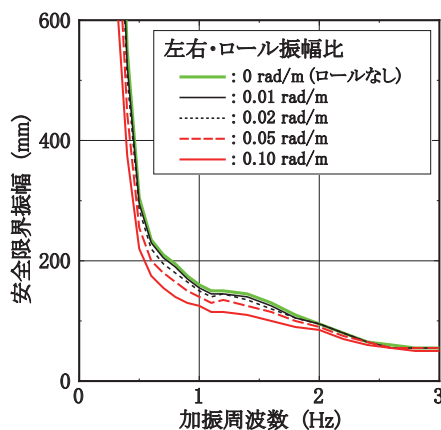


図8 正弦波加振に対する走行安全限界線図（軌道面ロール振動の影響）

図9より、左右・ロール振幅比が0.02rad/m程度であれば、低下割合は高々10%程度であるが、0.05rad/mより大きくなると、低下割合が周波数2Hz以下の領域で10%を超え、加振周波数が低くなるにしたがい低下割合が大きくなる傾向であることがわかる。なお、走行安全限界振幅を5mm単位で求めているため、走行安全限界振幅の小さい高周波数領域では低下割合の分解能が粗いことに注意を要する。

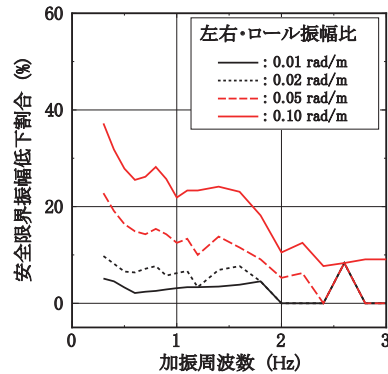


図9 走行安全限界振幅低下割合

5. 地震波（ランダム波）に対する車両挙動解析

5.1 構造物型式の違いによるロール振動の影響割合

表1に示した各構造物天端の、地震波に対する応答波（構造物応答波）の左右およびロール変位に一定の倍率を乗じたものを車両に対する入力地震動とし、0.01倍刻みで倍率を変化させつつ車両挙動を解析し、車両が脱線しない限界の倍率（以下、走行安全限界倍率）を求めた。入力地震動については、左右振動のみとした場合とロール振動も加えた場合について解析した。得られた結果を表2に示す。表2より、構造条件4、5（橋脚形式）の方が1～3（ラーメン式高架橋）よりも軌道面ロール

表2 構造物応答波に対する走行安全限界倍率

構造条件	構造モデル	走行安全限界倍率		安全限界低下割合 (%)
		軌道面振動		
		左右動のみ	左右・ロール	
1	線形	0.76	0.71	6.6
2	線形	0.81	0.79	2.5
3	線形	0.81	0.76	6.2
4	線形	0.45	0.34	24.4
5	線形	0.45	0.37	17.8
1	非線形	0.75	0.73	2.7
2	非線形	0.83	0.82	1.2
3	非線形	0.72	0.71	1.4
4	非線形	0.63	0.51	19.0
5	非線形	0.62	0.55	11.3

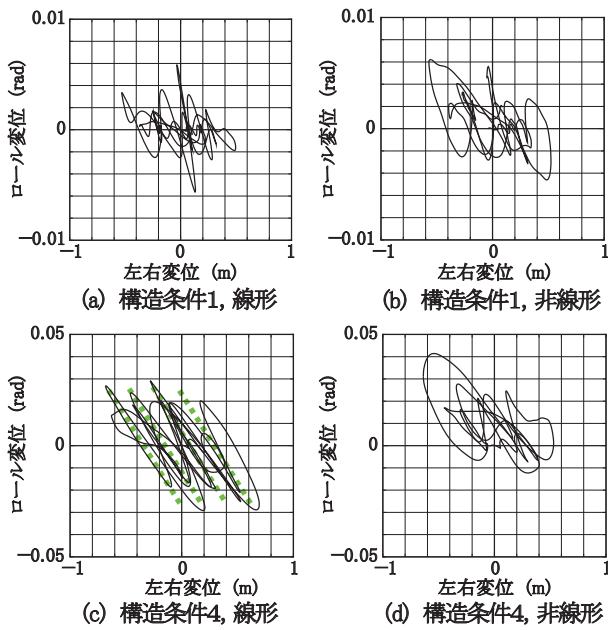


図 10 構造物応答波の左右・ロール変位のリサージュ図

振動による走行安全限界倍率の低下割合が大きいがわかる。この原因を調べるため、構造条件 1 (1 層ラーメン式高架橋) と 4 (橋脚形式 (上部工先行降伏)) の構造物応答波の左右変位・ロール変位のリサージュ線図を図 10 に、左右変位およびロール変位のフーリエ振幅スペクトルを図 11 に、それぞれ示す。各図中、(a)、(b) が構造条件 1、(c)、(d) が構造条件 4 であり、(a)、(c) が線形モデル、(b)、(d) が非線形モデルである。図 10 (a)、(b) より、構造条件 1 では左右最大振動振幅は 0.5m、ロール最大振動振幅は 0.006rad で、左右振動に対する比率は 0.012rad/m であった。一方、図 10 (c)、(d) より、構造条件 4 では左右最大振動振幅 0.7m、ロール最大振動振幅 0.03rad で、左右振動に対する比率は 0.04rad/m であった。また、構造物応答波の周波数特性は、構造物の振動特性やその非線形性に加え、構造物に対する入力地震波形の影響も含んでいるが、今回の解析条件では大まかな傾向として構造条件 4 のフーリエ振幅 (図 11 (c)、(d)) は構造条件 1 のフーリエ振幅 (図 11 (a)、(b)) と比較するとピークがより低周波数側に存在している。橋脚形式のほうがラーメン式高架橋に比べ軌道面の左右・ロール振幅比が大きき⁹⁾、また 4.2 節の検討からロール振動の影響は低周波数側で大きくなることから分かっており、これらの効果が相互に重なり、構造条件 1 に比べて構造条件 4 の走行安全限界倍率の低下割合が大きくなったと考えられる。構造物の部材の非線形性については、構造物応答解析の際に線形モデルを用いた方が非線形モデルを用いた場合よりも走行安全限界倍率の低下割合が大きくなった。これらの傾向は、電車線柱において土木構造物のロール振動の影響を考察した結果と概ね一致している⁹⁾。

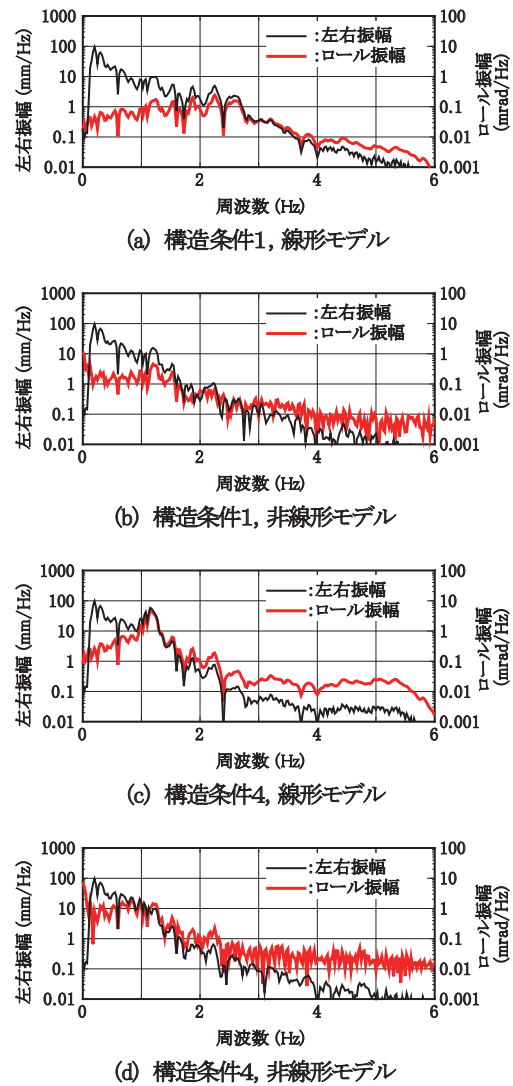


図 11 構造物天端応答の周波数特性

5.2 正弦波加振との比較

図 10 (c) の構造条件 4 で線形モデルを用いて構造物応答波を求めた場合について、図中点線で示すように、プロットが右下がり、つまり左右変位が正側に推移するときロール変位が負側に向かい、かつその傾きが一樣である傾向がリサージュ線図上で図 10 (a)、(b)、(d) に比べ明確となっている。これは、図 11 のフーリエ振幅スペクトルにおいて、図 11 (c) の構造条件 4 (線形モデル) が他に比べ、左右振幅およびロール振幅のピークが明瞭かつ周波数が一致していることによる。一方、4 章で述べた正弦波加振では、左右・ロール振幅比および位相を一定としているため、リサージュ線図上では 1 本の直線となる。そこで、正弦波加振における走行安全限界の低下割合と地震波の結果とを比較するため、構造条件 4 で線形モデルの場合について、左右振動およびロール振動に図 11 (c) から求めた構造物の固有周波数 1.2Hz を包含するように 0.8Hz ~ 1.6Hz のバンドパスフィルタ

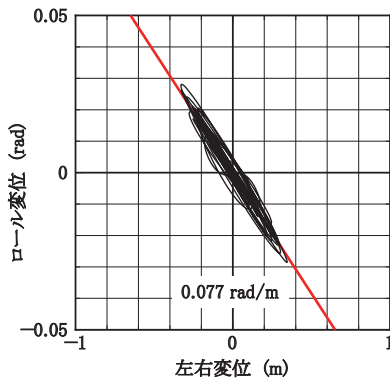


図 12 0.8～1.6Hz のバンドパスフィルタ後の左右・ロール変位のリサージュ図（構造条件 4，線形）

処理を行った場合のリサージュ線図を図 12 に示す。図 12 では、リサージュ線図がおおよそ傾き 0.077rad/m の直線に沿っていることがわかる。

図 9 に示した走行安全限界振幅低下割合より、正弦波加振時の周波数 1.2Hz における低下割合は左右・ロール振幅比 0.1rad/m のとき 25% 程度である。一方、表 2 より構造物条件 4 で線形モデルの場合の地震波に対する走行安全限界倍率の低下割合は 24% であった。このことから、高架橋天端の左右振動とロール振動の振幅比と位相差が一定となる傾向が強い場合には、地震波に対する軌道面ロール振動による走行安全限界低下の割合を正弦波加振の解析でおおよそ予測できるといえる。

6. おわりに

地震時を対象とした車両運動シミュレータを改良し、軌道の左右振動に加えてロール振動を入力した場合の車両挙動解析を行い、軌道面ロール振動が地震時走行安全性に及ぼす影響を解析的に検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 軌道面のロール振動は輪重減少を助長するが、車両挙動自体を大きく変えるものではない。
- (2) 正弦波振動に対する走行安全性解析では、軌道面のロール振動が大きくなるに従い走行安全限界振幅が小さくなった。ロール振動がない場合に対する低下割合は、左右・ロール振幅比が 0.02rad/m 程度では約 10% であるが、0.05rad/m より大きくなると、低下割合が周波数 2Hz 以下の領域で 10% を超え、加振周波数が低くなるにしたがい低下割合が大きくなる傾向が認められた。
- (3) 構造物型式により軌道面ロール振動の走行安全性への影響割合が異なる。例えばラーメン式高架橋においては、軌道面ロール振動を考慮したときの走行安全限界倍率の低下割合は、今回の解析条件では最大 7% 程度であった。

- (4) 構造物天端の左右振動とロール振動の振幅比と位相が一定となる傾向が強い場合には、地震波に対する構造物応答の軌道面ロール振動による走行安全限界の低下割合を正弦波加振の解析でおおよそ予測できる。

今回、軌道面のロール振動を考慮可能としたことから、地震による車両脱線のメカニズムについて、より詳細な検討が可能となった。ただし、構造物のロール挙動評価については、解析精度の面からの問題点も残されている。また、軌道面のロール振動については、レールのロール変位を考慮していない。これらを改善することが、さらなる信頼性、解析精度向上に向けての課題である。

文献

- 1) 宮本岳史，石田弘明：台車改良による地震時走行安全性の向上に関する解析，鉄道総研報告，Vol.21，No.12，pp.35-40，2007
- 2) 梶谷泰史ほか：車両逸脱防止 L 型ガイドの開発，JR EAST Technical Review，No. 29，pp.27-30，2009
- 3) 飯田浩平ほか：大型振動試験装置を用いた実台車脱線実験，機論 C 編，77 巻 781 号，pp.3223-3236，2011
- 4) 森村勉ほか：実物台車振動台実験による鉄道車両の地震時脱線メカニズムの検証，機論 C 編，76 巻 764 号，pp.825-834，2010
- 5) 森村勉ほか：地震時の脱線メカニズムおよび脱線防止ガード機能に関する解析，機論 C 編，76 巻 770 号，pp.2447-2453，2010
- 6) 角南浩靖ほか：脱線時の車両の逸脱防止に関する実台車走行試験，機論 C 編，76 巻 770 号，pp.2462-2471，2010
- 7) 浅沼潔ほか：逸脱防止機能を有するパラスト・ラダー軌道の開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.2，pp.27-32，2009
- 8) 宮本岳史ほか：地震時の鉄道車両の挙動解析（上下，左右に振動する軌道上の車両運動シミュレーション），機論 C 編，64 巻，626 号，pp.1236-1243，1998
- 9) 加藤尚ほか：構造物－電車線柱一体モデルによる地震応答特性の評価，鉄道総研報告，Vol.26，No.11，pp. 17-22，2012
- 10) 坂井公俊ほか：電車線柱と橋梁の相互作用の簡易な耐震評価法の提案，土木学会第 63 回年次学術講演会概要集，2008
- 11) (公財) 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，2012
- 12) (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道技術推進センター：電車線路設備耐震設計指針・同解説，2013
- 13) 宮本岳史ほか：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 編，71 巻，706 号，pp.1849-1855，2005