

地震時にロッキング振動する構造物上における車両走行安全性

鉄道力学研究部 車両力学研究室
主任研究員 飯田 浩平

1. はじめに

高架橋構造物が地震動を受けた場合、地震動によっては構造物天端（軌道面）において水平振動に加えロール振動が生じ得る。しかし、従来の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対象としてきた。近年、より著大な地震を対象とした検討を行うにあたって、地震動の大きさによっては軌道面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指摘されるようになった。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ターを改良し、左右およびロール振動を入力した車両挙動解析により、軌道面ロール振動の地震時走行安全性に及ぼす影響を明らかにしたので報告する。

2. 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し、車輪がレール上でジャンプしたり、車両が大きくロール変位する動きなどを精度よく解析できるように工夫したものである。本研究では、さらに軌道中心回りのロール振動を入力する機能を追加した。ロール加振は図1に示すように、軌道面のロール変位および軌間に応じて左右のレールを逆相で上下加振することで表現した。厳密にはレール自体もロール変位するが、本研究の目的に対する解析としては、レールのロール運動の影響は小さいものと考えて、これを無視している。

車両モデルを図2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自由度を持ち、車両の8個の車輪を支えるレールが独立に各2自由度をもつため、合計では58自由度を有している。なお、座標系については、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) 1車両モデルを採用し、車体-台車枠間と台車枠-輪軸間の結合要素については、ばね・ダンパ要素として、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、左右動ダンパやヨーダンパを配置している。
- (3) 車輪・レール間作用力にはKalker理論に基づいたモデルを使用する。また、車輪はレールから離れて運動する状態も計算可能である。
- (4) 加振は、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。

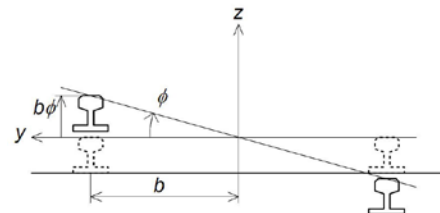


図1 軌道面ロール変位の入力

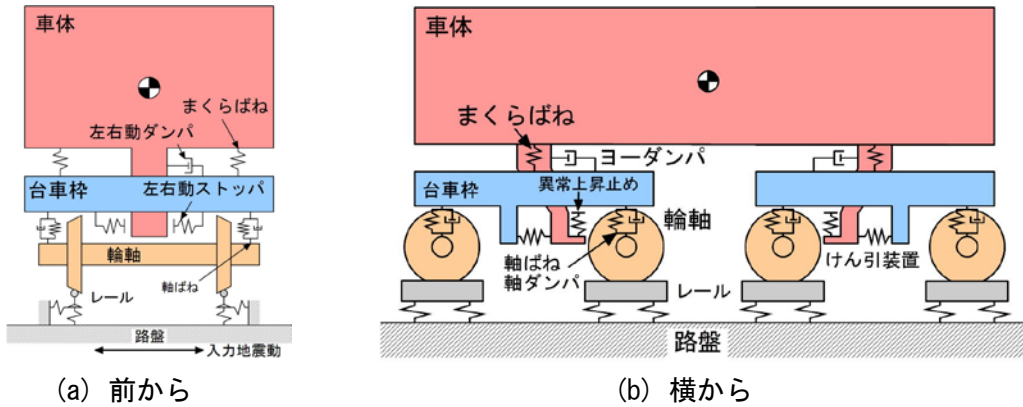


図2 車両モデル

3. 検討条件

3.1 車両および軌道条件

車両は鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）¹⁾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）を用いる。乗車条件は定員乗車条件とし、走行速度は260km/hとした。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。

3.2 入力加振波

(1) 正弦波振動

本研究では、基礎的な検討を行うため、図3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響を調べるため、軌道面の上下振動は無視した。つまり、軌道中心線は左右のみの振動となる。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。

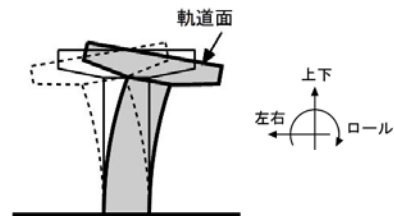


図3 高架橋変形概念図

表1 地震波解析対象構造物

構造条件	構造形式	柱高 (m)	基礎形式
1	1層ラーメン	7.1	1柱1杭
2	1層ラーメン	8.6	細径群杭
3	2層ラーメン	16.9	細径群杭
4	橋脚（上部工先行降伏）	8.0	太径群杭
5	橋脚（基礎先行降伏）	8.0	太径群杭

(2) 地震波（ランダム波）振動

地震波（ランダム波）振動は、土木構造物上の水平方向、回転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²⁾を用いた。表1に示すような5種類のラーメン式高架橋、橋脚を対象として、鉄道構造物の設計地震動（L2地震動スペクトルII（G3地盤））を入力とした動的解析を実施し、構造物上の応答波形を求めている。詳細については文献2)を参照されたい。

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0 rad/m（ロール振動なし）と0.05 rad/mの場合の時刻歴波形を図4に示す。なお、左右振幅

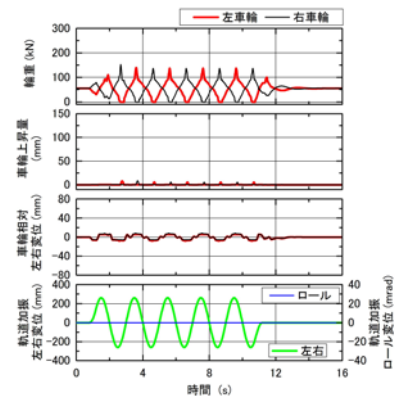
0.26m は後述する正弦波加振に対する走行安全限界線図において、軌道振幅比 0.05rad/m では脱線する加振振幅である。図4 (a)より、ロール振動のない場合には輪重がゼロになる時間があるものの、車両の振動が成長することなく、車輪上昇量も小さい値に収まっている。一方、図4 (b)のロール振動がある場合には、輪重ゼロになる時間帯が長くなり、車両の振動が成長していき、加振5波目に脱線に至ることがわかる。比較的低い加振周波数 0.5Hz で下心ロールが卓越する場合には、車両が四股を踏むように振動し、車輪上昇量がある程度以上大きくなると、急激に車輪上昇量が大きくなる。ただし、図4 (a)の軌道面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4 (b)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が、車両の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

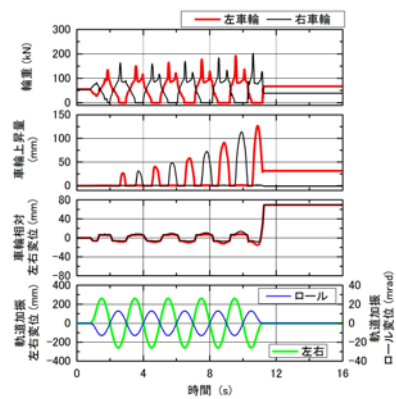
軌道面ロール振動の地震時走行安全性に及ぼす基礎的な影響を把握するため、正弦波加振に対する走行安全限界線図を求めた。走行安全限界線図は、横軸に軌道の加振周波数を、縦軸に左右振動の加振振幅（片振幅）をとり、各加振周波数毎に加振振幅を 5mm 単位で大きくしながら正弦波 5波で加振されるシミュレーションを繰り返し実行して、脱線と判定を受ける直前の振動振幅（走行安全限界振幅）をプロットしたものである。つまり、走行安全限界線以下の振幅であれば各加振周波数の振動を 5波受けても脱線しないことを示している。本研究では、軌道面のロール振動振幅が左右振動振幅に比例すると仮定しており、左右・ロール振幅比を 0（ロール振動なし）～0.1rad/m の範囲で変え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5に示す。図5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、ロール振動による走行安全限界振幅の低下割合を図6に示す。図6より、左右・ロール振幅比が 0.02 rad/m 程度



(a) 左右振動のみ



(b) 左右振動およびロール振動

図4 正弦波加振に対する車両挙動解析結果（加振周波数 0.5Hz, 左右加振振幅 260mm）

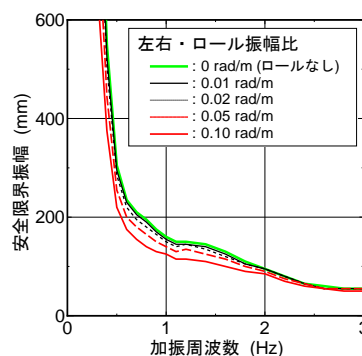


図5 正弦波加振に対する安全限界振幅

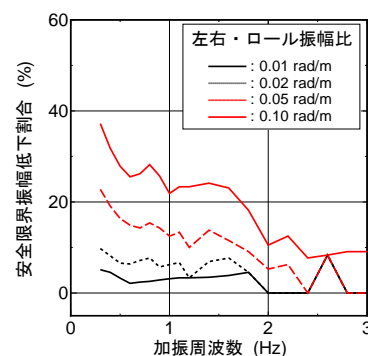


図6 安全限界振幅低下割合

であれば、低下割合は10%程度であるが、0.05 rad/m より大きくなると、周波数2Hz以下の領域で低下割合が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。

5. 地震波（ランダム波）に対する車両挙動解析

表1に示した各高架橋天端の設計地震動に対する応答波を基準加振波とし、0.01倍刻みで基準加振波に掛ける振幅倍率を変化させつつ車両に入力した場合の挙動を解析し、車両が脱線しない限界の振幅倍率（以下、安全限界倍率）を求めた。比較のため、左右動のみ入力した場合とロール振動も加えた場合について解析した。その結果を表2に示す。表2より、ラーメン式高架橋（構造条件1～3）の場合にはロール振動の影響による走行安全限界倍率の低下割合が3%程度であるのに対し、橋脚形式（構造条件4、5）の場合は安全限界倍率の低下割合が10～20%程度となった。紙面の都合上図示は割愛するが、今回の解析条件で軌道面ロール振動と左右振動とのリサージュ図を調べた結果、ラーメン高架橋の左右振幅に対するロール振幅の比は橋脚形式に比べ1/3程度であり、これがラーメン高架橋ではロール振動による安全限界倍率の低下が小さい原因であると考えられる。

また、正弦波加振の解析と比較した結果、左右振動とロール振動の卓越周波数が一致し、かつその振幅比が一定となる傾向が強い場合には、地震波加振における軌道面ロール振動による走行安全限界の低下割合と正弦波加振における低下割合がおおよそ一致することを確認した。

表2 ロール振動が走行安全限界倍率に及ぼす影響

構造条件	安全限界倍率		
	左右のみ	ロール有	低下率(%)
1	0.75	0.73	2.7
2	0.83	0.82	1.2
3	0.72	0.71	1.4
4	0.63	0.51	19.0
5	0.62	0.55	11.3

6. おわりに

地震時を対象とした車両運動シミュレーターを改良し、軌道面ロール振動の地震時走行安全性に及ぼす影響を調査した。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り、左右・ロール振幅比が0.02rad/m程度では約10%小さくなった。
- (3) 構造物の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り、ラーメン式高架橋のほうが、橋脚形式よりも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が小さかった。

なお、構造物の回転挙動については、未解明な部分が多く残されており、レールのロール変位とともに、これらの地震時における評価法を改善することが、さらなる信頼性、解析精度向上に向けての課題である。

参考文献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，2006.
- 2) 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.