

空気ばねを有する車両の動揺変位に関する調査報告

石毛 真* 飯田 忠史** 梅原 康宏*
佐々木 君章*** 古川 敦# 日比野 有**

Study of Displacement of Rolling Stock with Air Spring

Makoto ISHIGE Tadanobu IIDA Yasuhiro UMEHARA
Kimiaki SASAKI Atsushi FURUKAWA Yu HIBINO

In this study, we investigated the influence factors of the lateral displacement of the car-body which occurs when the rolling stock equipped with bolsterless bogies with air springs is passing in the curve section, using a vehicle dynamics numerical simulation program. As a result, it was cleared that the lateral displacement of air springs, the rolling displacement of the car-body and the lateral displacement of wheelsets to tracks were dominant in the car-body lateral displacement. In addition, the combination of the high passenger load factor of the vehicle, the uneven loading of the vehicle and the operation of the differential pressure valve of air springs greatly increases the lateral displacement of the car-body.

キーワード：車両動揺，空気ばね，差圧弁，偏積，車両運動シミュレーション

1. はじめに

平成 18、19 年に走行中の車両がホームと接触する事故が発生し、その原因として車両動揺変位が注目された。鉄道総研では、国土交通省の委託を受け、平成 21 年度から平成 25 年度にかけて、車両とホームの接触に関する事故事例の調査、車両や建築限界・車両限界等の諸元・規定の調査、車両動揺変位に関する走行試験、シミュレーション解析手法に関する検討等により、車両動揺変位に及ぼす影響因子の明確化および車両動揺変位の抑制方法の検討を行った。ここでは、ホーム接触事例調査および近年広く用いられている空気ばねボルスタレス台車に関して、車両動揺変位に及ぼす影響因子および車両動揺変位の抑制方法について検討した結果を報告する。

2. ホーム接触事例調査

車両とホームの接触事故に関して、鉄道総研が作成している「鉄道安全データベース」に掲載されている事例について調査を行った。抽出された接触事例 6 件に共通しているのは、乗車率が定員以上で曲線を走行している条件であった。車体の接触位置は車体下部、車体側面、車端部であり、カント不足量の条件により内軌側、外軌側いずれの方向にも接触事例があった。空気ばねを装備した車両は 6

件中 5 件であり、うち 4 件がボルスタレス台車であった。

接触事例の車両側の原因として共通するのは高い乗車率であり、2 件において差圧弁動作設定圧力過小が原因とされた。車両側の対策としては差圧弁動作設定圧力の変更、左右動ストッパゴム隙間調整が挙げられた。

3. シミュレーション解析

3.1 シミュレーションモデル

車両動揺変位に及ぼす影響因子を明確化するため、車両運動シミュレーションプログラムを構築した。ホーム接触事例に基づき、空気ばねボルスタレス台車を有する 1 車両モデルとし、車体および台車枠は各 6 自由度（並進 3 自由度、回転 3 自由度）、輪軸は各 5 自由度（並進 3 自由度、ピッチングを除く回転 2 自由度）とした。空気ばねに関しては、補助空気室との間のオリフィスを流れる空気流量や、高さ調整弁および差圧弁との間の空気流量も考慮したモデル¹⁾とした。線路形状は、直線から緩和曲線を経て曲率一定の円曲線を走行するものとした。シミュレーション計算に用いた主な計算諸元を表 1 に示す。また、曲線走行条件を表 2 に示す。

3.2 影響因子パラメータ

車両動揺変位に影響を及ぼす因子を明確化するため、影響を及ぼす可能性のあるパラメータを変化させ、各条件で計算を行うことで影響度合いを確認した。抽出したパラメータのうち、主な車両側パラメータを以下に記す。

(1) 乗車率

接触事例の原因において高い乗車率が共通しているこ

* 車両構造技術研究部 走り装置研究室
** 車両構造技術研究部 車両運動研究室
*** 研究開発推進室
軌道技術研究部

表1 計算諸元

項目		値
車体質量	空車	18400kg
乗客質量	積車 (100%)	8300kg
	満車 (250%)	20700kg 座位 3080kg, 立位 17620kg
台車ばね間質量		3360kg/ 台車
台車ばね下質量		1270kg/ 軸
車体長		19.5m
車体幅		2.78m
車体重心 高さ	空車	1.630m
	積車 (100%)	1.699m
	満車 (250%)	1.744m
台車中心間距離		13.8m
台車軸距		2.1m
軸ばね上下剛性		1490kN/m/ 軸箱
空気ばね 左右剛性	静的 (空車時)	133kN/m/ 台車片側
	動的 (空車時)	150kN/m/ 台車片側
差圧弁動作設定圧力		120kPa, 70kPa
軌間		1067mm
レール締結装置左右剛性		15.8kN/mm/ 片側
まくらぎ左右剛性		(0.171 × (静止輪重 kN) +34.0) kN/mm/ まくらぎ
曲線諸元	曲線半径	200m, 300m, 400m, 500m
	カント	105mm, 89mm, 72mm, 61mm
	スラック	0mm

表2 曲線走行条件

曲線 条件	半径 m	200	300	400	500	
	カント mm	105	89	72	61	
速度 km/h	低速	10	10	10	10	
	カント 不足量	60mm	63	73	79	85
		70mm	65	75	82	88
超過遠心 加速度 m/s ²	低速	-0.93	-0.79	-0.64	-0.55	
	カント 不足量	60mm	0.55	0.55	0.55	0.55
		70mm	0.64	0.64	0.64	0.64

とから、比較のため、空車、積車 (乗車率 100%)、満車 (乗車率 250%) を設定した。

(2) 差圧弁動作圧力

想定した車両諸元の差圧弁動作圧力 120kPa および差圧弁が動作しやすくなる条件として 70kPa を設定した。

(3) 偏積

超過遠心加速度の作用による乗客の車内での左右方向の移動を模擬するため、満車 (250% 乗車) の場合において偏積を考慮した。偏積は立位客の静的な重心移動によるものとし、立位客の重心移動量は 150mm とした。このときの車体と乗客 (250% 乗車) を合わせた重心移動量は 68mm となる。

3.3 計算条件

前節の影響因子パラメータの組合せによる計算条件を表3に示す。

表3 計算条件

No.	乗車率	偏積	差圧弁動作圧
1	空車	なし	120kPa
2	積車 (100%)	なし	120kPa
3	満車 (250%)	なし	120kPa
4	満車 (250%)	なし	70kPa
5	満車 (250%)	あり	120kPa
6	満車 (250%)	あり	70kPa

4. 計算結果

4.1 車両動揺変位の内訳

曲線走行時の車両の動揺変位において、車両および軌道の各部の変位の寄与度を見積もるため、台車中心断面における各部の変位を算出した。ここでは変位の要素として、空気ばね左右変位、車体ロール角による左右変位、軸ばね左右変位、輪軸左右変位、レール小返り、まくらぎ変位を求めた。

4.1.1 低速走行時の内軌側への車体変位

R200 曲線低速走行時の内軌側への変位を図1に示す。空気ばね左右変位の影響が最も大きく、次いで車体ロール角による左右変位となる。いずれも乗車率が高くなるほど大きくなり、偏積があると更に大きくなる傾向がある。偏積がある場合に差圧弁は動作しやすくなり、特に超過遠心加速度が大きく差圧弁動作圧が低いと流量も大きくなり、空気ばね左右変位、車体ロール角による変位ともに著しく大きくなる傾向がある。輪軸左右変位は低速においても外軌寄りとなるため、車体変位を減少させる方向に作用する。レール小返りについても、外軌レールの小返りが輪軸左右変位に影響するため、車体変位を減少させる方向に作用する。まくらぎ変位、軸ばね左右変位の値は小さく影響度は極めて低い。

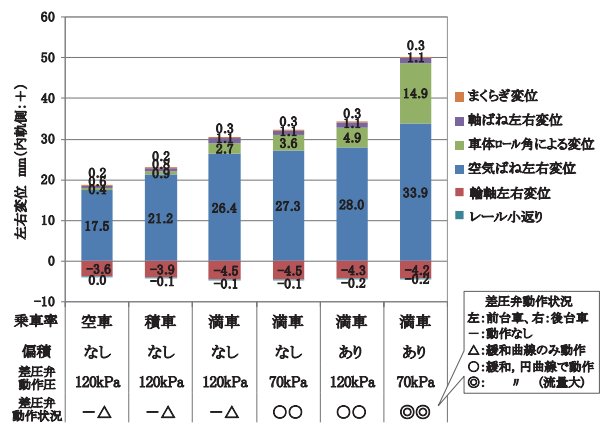


図1 内軌側への左右変位 (曲線半径 200m, カント 105mm, 速度 10km/h, 超過遠心加速度 -0.93m/s²)

4.1.2 外軌側への車体変位

R400 曲線カント不足量 70mm 走行時の外軌側への変位を図2に示す。空気ばね左右変位の影響が最も大きく、

6～7割を占めている。次に輪軸左右変位と車体ロール角による左右変位の影響が大きいが、条件によっては輪軸左右変位よりも車体ロール角による左右変位の方が大きくなる。空気ばね左右変位は乗車率が高くなるほど大きくなり、偏積があると更に大きくなる傾向がある。偏積がある場合に差圧弁は動作しやすくなり、特に差圧弁動作圧が低いと流量も大きくなり、空気ばね左右変位、車体ロール角による変位ともに大きくなる傾向がある。まくらぎ左右変位、レール小返り、軸ばね左右変位の値は小さく影響度は低い。

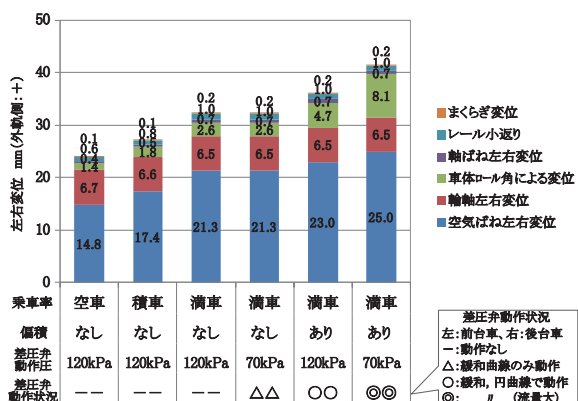


図2 外軌側への左右変位（曲線半径400m, カント72mm, 速度82km/h, 超過遠心加速度0.64m/s²）

4.2 車体とホームの隙間

各計算条件における車体中央と内軌側ホームの隙間と超過遠心加速度の関係を図3に、車端部と外軌側ホームの隙間と超過遠心加速度の関係を図4に示す。ここでは車体側面と車両限界との隙間10mm、車両限界と建築限界の隙間50mm、建築限界とホームの隙間10mmとした。図より以下のことがわかる。

- ・車体とホームの隙間は超過遠心加速度の絶対値の増大とともに小さくなる傾向である。
- ・乗車率が高い方が隙間は小さくなる。
- ・偏積により隙間は更に小さくなる。
- ・偏積があり、差圧弁が動作しやすい状況において、超過遠心加速度が0.6～0.7m/s²を超えると隙間が大幅に小さくなる。

5. 考察

5.1 車両動揺変位に影響を及ぼす要素

車両動揺変位において影響の大きい要素は、空気ばね左右変位、車体ロール角による変位および軌道に対する輪軸左右変位であることが明らかとなった。これらの要素について影響が大きくなる要因を以下に整理する。

(1) 空気ばね左右変位

空気ばね左右変位の大きさは、主に車体に作用する超

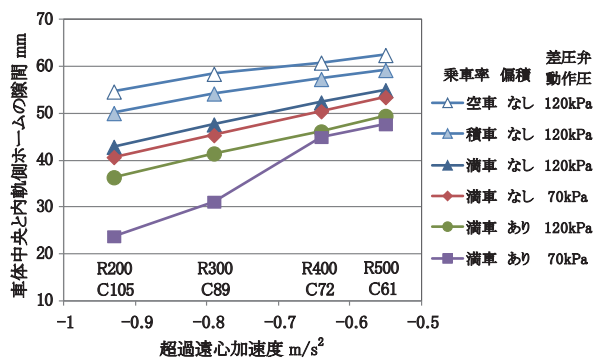


図3 車体中央と内軌側ホームの隙間と超過遠心加速度の関係（速度10km/h）

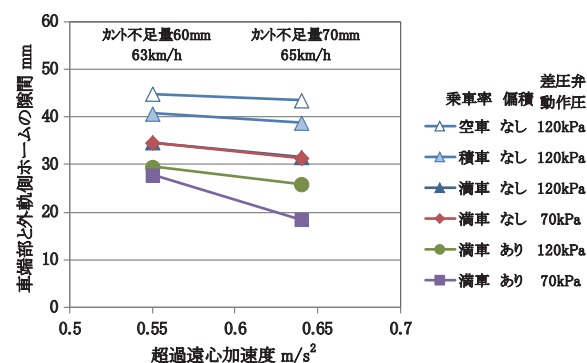


図4 車端部と外軌側ホームの隙間と超過遠心加速度の関係（曲線半径200m, カント105mm）

過遠心力と空気ばねの左右剛性により決まる。ボルスタレス台車の場合、曲線通過時の走行安全性を考慮すると、台車旋回抵抗を発生させる空気ばねの前後剛性は小さい方が望ましく、前後左右等方性の空気ばねでは必然的に左右剛性も小さくなる。従って、超過遠心力作用時の空気ばね左右変位は比較的大きな値となる。

(2) 車体ロール角による変位

車体ロール角による変位は、主に超過遠心力と車体重心高さ、車体ロール剛性により決まる。乗客を含む車体の重心高さと空気ばね取り付け高さには高低差があるため、超過遠心力が作用した場合に車体のローリングを生じる。車体重心高さは、極力低くすることが望ましいが、特に立位客の多い通勤型車両では乗車率が高くなるほど重心は高くなる。一方、空気ばね上下剛性を高くすれば車体ロール剛性は上がるが、走行安全性や乗り心地の面からあまり大きな値は望ましくない。従って、超過遠心力作用時の車体ロール角は比較的大きな値となる。

(3) 輪軸左右変位

輪軸は軌道に対してフランジ遊間の分だけ左右方向に移動が可能であり、一般に曲線において輪軸は外軌側に寄って転走することにより、軌道に対する輪軸左右変位が生じる。フランジ摩耗やレール側摩耗はフランジ遊間を増大させるため、その分輪軸左右変位は大きくなる。

5.2 車両動揺変位を増大させる要因

車両動揺変位を大きく増大させる要因としては、高い乗車率に加え、偏積と差圧弁動作の複合であることが明らかとなった。この複合要因について以下に整理する。

(1) 高い乗車率

空気ばねの左右剛性は内圧上昇とともに高くなるが、その割合は小さいため、乗車率の向上に伴い超過遠心力作用時の空気ばね左右変位は大きくなる。立位客の増加とともに車体重心も高くなるため、車体ロール変位も大きくなる。

(2) 偏積

偏積は超過遠心力の作用による乗客の重心移動によって生じるが、車体自体の重心オフセットや超過遠心力作用による車体左右変位およびロール変位による偏重心も偏積と同様の効果をもつ。偏積が生じると、左右の空気ばねの負担荷重が不均等となって空気ばねの内圧差が大きくなり、差圧弁が動作しやすくなる。今回の検討では立位客の重心移動は静的に生じるものと仮定したが、実際には左右方向の車体振動や車両の加減速などにより、重心移動は動的に生じることが予測され、動揺変位に対する乗客の慣性の影響もあるものと考えられる。

(3) 差圧弁動作

通常差圧弁の動作圧力は、カント区間停車時にカント負けを起こさないように設定される。差圧弁の動作圧力設定が適正であれば、定常的な超過遠心力作用時において差圧弁が動作することはないと考えられるが、今回の検討において、動作圧力を低く設定した場合および偏積がある場合に差圧弁が動作する状況が確認された。超過遠心力が作用して車体が傾斜した場合、通常空気ばね高さ調整弁が傾斜を元に戻す方向に給排気動作を行うが、このとき差圧弁が動作していると高さ調整弁の給排気の効果が相殺され、車体は傾斜したままとなり、定常的に大きな車両動揺変位を引き起こすものと考えられる。

5.3 車両動揺変位を抑制する方法

車両動揺変位を大きく増大させる要因として、高い乗車率、偏積、差圧弁動作の組み合わせが挙げられた。これら3つの要因のうち、高い乗車率については発生を前提とせざるを得ない事象であることから、偏積と差圧弁動作が複合して発生することを避けることが車両動揺変位の抑制に繋がるものと考えられる。以下に車両動揺変位を抑制する方法について整理する。

(1) 偏重心の抑制

乗客の重心移動による偏積の他に、車体の重心オフセットや動揺による車体変位が重畳して偏重心を引き起こすことから、偏重心の抑制が重要である。その方策として以下の項目が挙げられる。

- ・乗客重心移動の抑制
- 吊り手、手すり増設による立位客姿勢保持性向上

- ・車体自体の重心オフセットの抑制
- ・空気ばね左右変位の抑制
- 異方性空気ばね採用、左右動ストッパ隙間縮小
- ・車体ロール変位の抑制
- 空気ばね左右間隔の拡大、アンチローリング装置、車体の低重心化

(2) 差圧弁動作圧力の適正化

差圧弁の動作圧力には、曲線停止時のカント負け発生防止の観点から下限値が存在し、その値を上回るように設定される。しかし、ホームとの接触事例においては、高い乗車率と差圧弁動作圧力過小が原因とされた例が複数あり、現実的には差圧弁の動作圧力設定が低く、超過遠心力が作用した際に差圧弁が動作するケースがあるものと考えられる。差圧弁の動作圧力は、一般に車体質量、乗客質量、重心高さ、超過遠心力、カント等を考慮して設定されるが、動作圧力下限値を過小に見積もらないためには、車体の重心オフセットや乗客の重心移動などによる偏重心も考慮することが必要である。一方で、差圧弁動作圧力には、構造的な軌道ねじれを有する緩和曲線における輪重抜け防止の観点から上限値が存在するため、動作圧力設定の際には、空気ばね上下剛性、台車中心間距離、カント遞減倍率等から求まる上限値を超えないことを確認する必要がある。空車時と満車時では差圧弁動作圧力の上限値が異なるため、輪重抜け防止の観点からは空気ばねの内圧すなわち乗車率に応じて動作圧力が変化する応荷重差圧弁の適用が有効である。

6. おわりに

空気ばねボルスタレス方式台車を有する車両運動シミュレーションプログラムを用いて、車両諸元、走行条件が車両動揺変位に及ぼす影響について検証し、動揺変位への影響因子を明確化するとともに、車両動揺を抑制する方法について検討を行った。その結果、車両動揺変位において影響の大きい要素は、空気ばね左右変位、車体ロール角による変位および軌道に対する輪軸左右変位であることが明らかとなった。また、車両動揺変位を大きく増大させる要因としては、高い乗車率に加え、偏積と差圧弁動作の複合であることが明らかとなった。さらに、車両動揺変位を抑制する方法としては、乗客重心移動の抑制などによる偏重心の抑制と、偏重心も考慮した差圧弁動作圧力の適正化が挙げられた。

文献

- 1) 下澤一行，遠竹隆行：非線形減衰特性を考慮した上下系空気ばねモデルの検討，鉄道総研報告，Vol.22, No.2, pp.35-40, 2008