1202 車体傾斜方式の違いによる緩和曲線通過時の乗り心地比較 Comparison of Riding Comfort in Transition Curve between Different Tilting Mechanisms

○学 面川 雅博 (新潟大・院)

正 谷藤 克也 (新潟大)

正 加藤 博之 (JR 東日本)

正 上倉 彰義 (JR 東日本)

Masahiro OMOKAWA, Katsuya TANIFUJI, Niigata University, 8050, Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata
Hiroyuki KATO, Akiyoshi UEKURA, East Japan Railway Company Nisshin-cho 2-479, Kita-ku, Saitama

Car-body tilting vehicles have been employed to speed up on curved sections in the conventional railways. In this study, an analytical model for the beam-type tilt mechanism with the tilt angle of 5 degrees and the air-spring-type tilt mechanism with the tilt angle of 2 degrees are developed on the multi-body software SIMPACK. Using these models, numerical simulations are carried out and TC_T value which is the index of the riding comfort in the transition curve is evaluated from the simulation results. As a result, TC_T values of the air-spring-type are larger than beam-type because of the difference in lateral acceleration from the tilt angles. Then, for the air-spring-type, the TC_T values of height-control-type and pressure-control-type are compared. Their performances are almost same, although there are cases in which TC_T values of pressure-control-type are smaller than height-control-type.

Key Words : Car-body Tilting Vehicle, Tilting Beam, Air Spring, Multi-Body Software, Riding Comfort

1. 緒 言

近年、鉄道は自動車や航空機との競争が激しくなり、鉄道車両の高速化が求められている。特に日本の在来線は地理的条件から曲線が多く存在するため、到達時間の短縮のためには曲線区間での高速化が課題となる。その方策として車体傾斜車両が導入されており、車体傾斜角が5度の振り子はり式と2度の空気ばね式が存在する。この中で空気ばね式は機構が簡単であるため近年採用が進められている。しかし、空気ばね式は傾斜角が小さく左右定常加速度を大きく減ずることができないため、乗り心地を損なわずにどれだけ高速化が可能であるかが検討の対象となる。そこで本研究ではマルチボディソフト SIMPACK⁽¹⁾を用いて車体傾斜車両の曲線通過シミュレーションを行い、緩和曲線中の乗り心地総合評価指標 TC_T ⁽²⁾を用いて空気ばね式と振り子はり式の乗り心地を評価、比較する。また、空気ばね式については制御方式の違いによる乗り心地への影響についても比較を行う。

2. 車両モデル

2.1 SIMPACK によるモデル化 SIMPACK は構築されたモデルの運動方程式を自動的に生成してシミュレーションが

Fig.1 SIMPACK animation

実行され、任意のパラメータを出力することができる。また、SIMPACK では図 1 に示すように、シミュレーションの車両挙動をアニメーションで表示させることも可能である。モデルは物体要素(車体、台車など)と作用力要素(軸ばね、空気ばねなど)の各要素を繋ぎ合わせ、パラメータ値を入力することで作成する。なお、本研究では車体傾斜車両の制御を行うために、MATLAB-Simulink との相互シミュレーション機能を用いて制御力を計算する。

2.2 振り子はり式の車両モデル 振り子はり式のモデルは、振り子をはりをロール方向のみの1自由度で拘束することで曲線での振り子動作を可能にしており、1車両で合計36自由度を有している。振り子はり式の制御については、目標傾斜角と実際の傾斜角との差にゲインをかけたものを振り子アクチュエータの制御力としてフィードバックさせる。ここで制御力は応答遅れを再現するために時定数1秒の一次遅れを発生させている。

2.3 空気ばね式の車両モデル 空気ばね式のモデルは空気ばねの内部変数を含め、1車両で合計38自由度を有している。空気ばね式の制御については、空気ばねの高さ情報をもとにそれぞれの空気ばね内圧を変化させ、車体を傾斜させる。本研究では比例電磁弁を想定してシミュレーションを行う。図2に示すように、目標パターンと実際の高さの差から電磁弁開度を選択し、開度に応じた割合で内圧を変化させていく。本研究では、目標と実際の高さの差が3cm以上になったときに最大開度になるように設定し、差がそれ以下の場合は線形に開度を変化させる(図2(a))。開度に応じた内圧変化割合は、図2(b)に示すように開度に応じて2次曲線的に変化するように設定した。

3. 乗り心地の比較

3.1 乗り心地総合評価指標 TC_T TC_T は一つの緩和曲線に対して適用され、緩和曲線走行時における車体振動の四つの状態量に対してそれぞれ重み付けをして合成した値で表される。乗客の姿勢別に定められており、以下のような式で求められる⁽²⁾。

$$\text{立位: } TC_T = 0.6y_p + 0.3y_j + 0.03\theta_p + 0.12\theta_j + 0.5 \quad \cdots(1)$$

$$\text{座位: } TC_T = 0.4y_p + 0.4y_j + 0.02\theta_p + 0.04\theta_j + 0.8 \quad \cdots(2)$$

Fig.2 Control of internal pressure in air spring

ここで y_p は左右振動加速度最大値, y_j は左右ジャック最大値, θ_p はロール角速度最大値, θ_j はロール角加速度最大値である。文献(2)によれば, この計算結果が3を超えると「不快」, 2以下であれば「問題なし」という評価となる。

3.2 解析条件 在来線の連続する曲線の走行シミュレーションを行い, 乗り心地を比較する。この区間は図3のように反向する2つの曲線が連続し, それぞれ曲線半径, カント量が400 m, 105 mmとする。走行速度は, 振り子式は本則+25 km/hの100 km/hとし, 空気ばね式については非車体傾斜の特急車両が走行する90 km/hから95 km/h, 100 km/hとする。軌道不整は通り狂いのみ考慮する。ここでは評価区間を図3のように設定する。なお, 特急車両を想定しているため, 座位 TC_T についてのみ比較する。

3.3 目標パターン 振り子式目標傾斜角パターンは, 図4(a)に示すように定常円曲線中において車体が5度傾斜するようなCAモードパターン⁽³⁾を用いる。CAモードは背景色を変えた緩和曲線から1秒前の立ち上がりを想定している。空気ばね式目標高さパターンについても, 振り子式と条件を合わせるために, 図4(b)に示すようなCAモードを模したパターンを用いる。目標高さは, 空気ばねの左右間隔2 mから傾斜角度が2度になるために必要な外軌側空気ばね高さを設定する。

3.4 シミュレーション結果の比較 次の4つの走行条件におけるシミュレーション結果を示す。

- (1) 振り子式 100 km/h
- (2) 空気ばね式 100 km/h
- (3) 空気ばね式 95 km/h
- (4) 空気ばね式 90 km/h

Fig.3 Track condition and evaluated sections

Fig.4 Target patterns

Fig.5 Roll angles measured on front bogie

まず図5に前台車位置で測定した各条件における傾斜角度 ϕ を示す。図6にそれぞれの傾斜方式における左右加速度 α とロール角速度 $\dot{\phi}$ のシミュレーション結果を, 表1にシミュレーション結果より算出した TC_T を示す。まず, (1)振り子式100 km/hと(2)空気ばね式100 km/hについて見ると, 図6(a)より, 左右加速度 α については振り子式のほうが空気ばね式よりも定常値が抑えられている。一方, ロール角速度 $\dot{\phi}$ については空気ばね式のほうが緩和曲線中のピーク値が小さくなっている。これらは最大傾斜角の違いによるものである。次に表1で TC_T 算出結果を見ると, どの評価区間においても両者の TC_T は「問題なし」の範囲であるが, 空気ばね式のほうが大きい値となっている。一

Fig.6 Comparison of simulation results between running conditions

Table1 Comparison of TC_T values between running conditions

Evaluated section		A	B	C	D
TC_T	(1) Tilting beam type 100 km/h	1.27	1.23	1.27	1.36
	(2) Air spring type 100 km/h	1.59	1.51	1.50	1.61
	(3) Air spring type 95 km/h	1.48	1.38	1.35	1.48
	(4) Air spring type 90 km/h	1.31	1.24	1.28	1.43

Table2 State values in TC_T (100 km/h on section A)

State value	y_p	y_j	θ_p	θ_j	TC_T
Tilting beam type	0.42	0.34	3.29	2.40	1.27
Air spring type	1.12	0.58	2.19	1.74	1.59

例として、表 2 に評価区間 A における両者の TC_T 算出パラメータを示す。空気ばね式は最大傾斜角が小さいため、ロール角速度最大値 θ_p 、ロール角加速度最大値 θ_j は空気ばね式のほうが小さい値となっているが、左右加速度最大値 y_p 、左右ジャーク最大値 y_j は振り子はり式に比べ大きな値になっている。式(2)からも分かるように、 y_p 、 y_j の重み付け係数は θ_p 、 θ_j と比較して大きいので、 y_p 、 y_j の増大が TC_T の増加に大きく影響している。なお、空気ばね式の TC_T が振り子はり式 100 km/h のときの TC_T と同等になるのは、90 km/h で走行した場合である。また、空気ばね式の場合には速度向上に対して TC_T の値も各区間で増加している。

4. 制御方法の違いによる乗り心地への影響の比較

ここでは空気ばね式について、制御に用いる情報を変えた場合をシミュレーションにより検討する。条件としては、空気ばね高さ情報に基づいて制御を行った場合と、内

Fig.7 Control of internal pressure in air spring

Fig.8 Target patterns

圧情報に基づいて制御を行った場合を考慮する。

4.1 高さ制御モデルと内圧制御モデル 空気ばね高さ情報に基づいた制御モデルについては、前節で用いたモデルを用いる。

内圧情報に基づいた制御モデルについては、内圧の目標

Fig.9 Comparison of simulation results between control types (100 km/h)

Table3 Comparison of TC_T values between control types (100 km/h)

Evaluated section		A	B	C	D
TC_T	Height control type	1.62	1.50	1.50	1.60
	Pressure control type	1.57	1.51	1.50	1.60

パターンと実際の内圧の差から電磁弁開度を選択する。本研究では、図 7(a)に示すように、目標と実際の内圧の差が 50 000 Pa となったときに最大開度になるように設定し、差がそれ以下の場合は線形に開度を変化させる。図 7(b)に示す開度に応じた内圧変化割合は、高さ情報に基づいて制御を行った場合と同じものを用いた。

4.2 解析条件と目標パターン 曲線条件については前節と同様とし、走行速度 100 km/h の場合において比較を行

う。ここでは、目標パターンは緩和曲線にあわせた形状とし、制御の遅れを考慮して 1 秒分早める。高さ制御モデルの目標高さパターンを図 8(a)、内圧制御モデルの目標内圧パターンを図 8(b)に示す。目標内圧パターンについては、最大傾斜角が 2 度になるように設定し、内軌側の空気ばねは高さが変化しないように内圧が調整される。

4.3 シミュレーション結果の比較 図 9 に 100 km/h で走行した場合のそれぞれの制御方法の左右加速度 α とロール角速度 $\dot{\phi}$ のシミュレーション結果を、表 3 にシミュレーション結果より算出した TC_T を示す。左右加速度、ロール角速度についてみると、両者に大きな差は見られなかった。次に TC_T についてみると、評価区間 A では内圧制御モデルの値が高さ制御モデルの値よりも小さいが、他の評価区間においてはほぼ同等の値となった。

5. まとめ

本研究では振り子はり式と空気ばね式の車体傾斜車両の曲線通過シミュレーションを行い、乗り心地総合評価指標 TC_T を用いて乗り心地を比較した。また、空気ばね式について、制御方法の違いによる乗り心地への影響について比較を行った。

- (1) 振り子はり式と空気ばね式の乗り心地を TC_T を用いて比較した結果、傾斜角度の違いによる左右加速度の大きさの差が影響し、空気ばね式の値が振り子はり式よりも大きい値となった。
- (2) 空気ばね式で 2 度傾斜した場合、90 km/h で TC_T が 5 度傾斜の振り子はり式で 100 km/h の走行と同等になった。
- (3) 空気ばね式の制御方法については、空気ばね高さと空気ばね内圧を指令に用いた場合を比較した結果、今回の検討では、性能としてはほぼ同等であるが、内圧利用の場合の方が TC_T が下回る場合があった。

参考文献

- (1) G.SCHUPP, ほか 3 名, The Manchester benchmarks for rail vehicle simulation, Vehicle System Dynamics, Supplement to 31, pp.101-118, 1999
- (2) 鈴木浩明, ほか 4 名, 車体傾斜車両の緩和曲線走行時の乗り心地評価法, 鉄道総研報告, 1999
- (3) 榎本衛, ほか 3 名, 振り子列車の乗り心地を改善する, RRR, Vol.62, No.1, pp.32-35, 2005