

アシスト操舵システムの開発

車両構造技術研究部 車両振動

主任研究員 鴨下 庄吾

1. はじめに

鉄道車両の曲線通過速度向上のためには、速度向上に伴って増加する横圧に配慮する必要がある。過大な横圧の発生は車輪、レールの摩耗や脱線の危険性を伴うため、これまで様々な手法の横圧低減策が提案されてきた¹⁾。その一つの方法に、曲線走行中に輪軸を操舵して横圧を低減させる操舵台車があるが、台車の機構が複雑になるという欠点があった。

そこで、台車構造を複雑にせず、同時にフェイルセーフ性に配慮した操舵システムの検討を行った。これは、広範囲に採用されているボルスタレス台車に操舵機能を付加する方式で、輪軸自体の持つ自己操舵性を維持しつつ、最大発生力を制限した操舵力を補完して曲線通過性能を向上させるシステムである²⁾ (以下、アシスト操舵システムという)。アシスト操舵システムは万一逆操舵した場合にも安全性が確保できる範囲に操舵力の上限を制限することで、操舵制御のフェイルセーフ性を担保できる。本報告では、アシスト操舵システムの機器構成と基礎的な試験結果について述べる。

2. アシスト操舵システムの機器構成

2.1 試験台車の方式

近年の台車軸箱支持装置は、軸はり式、円錐積層ゴム式等の方式が採用される事例が多いが、本開発では試験台車としてモノリンク式ボルスタレス台車を選んだ。これは、モノリンクにアクチュエータ機能を付与すれば、簡易に台車枠-軸箱間に操舵力を与えることができ、少ない改造範囲でアシスト操舵システムを構成できることによる。また、軸はり式と比較してモノリンク式ではリンクが軸箱左右方向の支持力を負担しないため、アクチュエータで軸箱の左右変位に伴う曲げモーメントを負担する必要がなく、アクチュエータを構成し易いこともメリットとなる。このような操舵アクチュエータ(以下、アシストアクチュエータという)を取り付けたボルスタレス台車の外観を図1に示す。

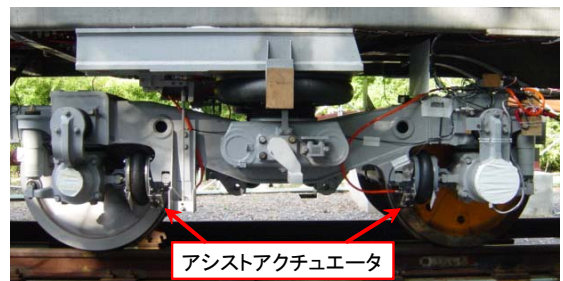


図1 アシスト操舵台車の外観

2.2 アシストアクチュエータの構造

アシストアクチュエータの断面図を図2に示す。操舵力発生には汎用ゴムベローズを応用した空気圧方式を採用した。本システムでは、モノリンクに替わりアクチュエータが軸箱の前後支持装置となるため、ゴムベローズが損傷した場合には軸箱前後支持剛性が担保できず、台車の走行安定性に障害を与える。そこで、ゴムベローズと並列にスプリングを設

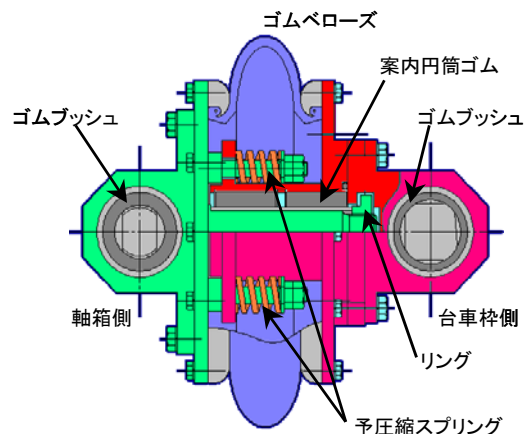


図2 アクチュエータ断面図

け、スプリングに予圧縮をかけた状態でフェイルセーフ性を確保するアクチュエータを構成した。

アクチュエータ非動作時には、アクチュエータの伸縮を予圧縮スプリングによって規制するため、従来のモノリンクと同等の軸箱前後支持剛性となり走行安定性に影響を与えない。アクチュエータを動作させる場合は、予圧縮スプリングをさらに圧縮して全長を伸張させる。予圧縮スプリングは発生力の損失とはなるものの、フェイルセーフの観点から必要な構成であると判断した。

円曲線走行中は外軌側前後のアクチュエータを伸張させ、軸距を拡大して輪軸を操舵する。内軌側アクチュエータは最縮状態を維持する。アクチュエータの空気圧制御バルブには、指示された目標内圧に実内圧を追従させる比例弁を使用し、力制御でアクチュエータを動作させた。

アシストアクチュエータの最大発生力、予圧縮力は、半径 100m の円曲線区間を走行したデータから策定した。走行中、縦クリープ力により生じた自己操舵力は約 9.2kN と見込まれたため、非制御時にも 10kN 程度の予圧縮力付加が必要となる。同時に、発生力として自己操舵力相当分を想定し、発生力目標を 10kN とした。また、アクチュエータ最大ストロークは、通過曲線半径に対する幾何学的な軸箱挙動から策定した。レール-車輪間の位置関係が完全なラジアル位置となるまでに必要なストロークから、曲線半径 100m のような急曲線では少なくとも 10mm ストロークが必要で、半径 400m では 3mm 程度のストロークで明確な効果を得られると考えられる。

2.3 操舵制御コントローラ

アシスト操舵用コントローラとして、地上データを用いた予見制御方式およびジャイロなどのセンサを使用した自立制御方式の 2 方式について検討した。

予見制御方式は制御付き振り車両で採用されている方式で、絶対的な走行位置参照ポイントから進行距離の累算を行って現在位置を検出し、車上に持たせた線形データに整合した操舵制御パターンを生成する方式である。複雑なシステムとなるためコストが上昇し、地上データのメンテナンスも必要となる。これに対して、自立制御方式は車載したセンサ情報から操舵パターンを生成する方法である。信号検出後のデータ処理に伴う制御動作遅れが構造的に発生するが、信号処理方法によってはこの軽減が可能である。センサは比較的安価で、メンテナンスの手間も少ない。また、予見制御方式は地上データを持たない線区での制御が不可能であるが、自立制御方式では走行する線区が限定されない。ただし、センサフェイル時には誤った制御指令を出力するため、センサ類の健全性、操舵制御の正常性を診断する機能が別途必要となる。本試験ではコストやメンテナンス性などを考慮して自立制御方式のコントローラを主体に試験を行った。

自立制御方式は車体ヨー角速度信号と走行速度からリアルタイムに車両走行位置の曲率を推定し、得られた曲率に対応して目標操舵制御圧力を逐次決定している。ただし、緩和曲線部にように走行位置変化に伴って曲率が変化している状態の動作遅れを補償するため、曲率の変化率に関しても一定の評価重みに基づいて制御圧力を調整する構成とした。つまり、曲率および曲率の変化分に対して所定のゲインを掛けた和を操舵制御目標値、すなわちアクチュエータ発生力として与える方式を考案した。このような自立制御方式のコントローラの構造を図 3 に示す。コントローラのハードウェアにはリアルタイム OS を搭載した工業用コンピュータを使用した。

3. シミュレーション結果

曲線半径 200m~600m の円曲線通過時の横圧発生状況をシミュレーションによって求めた。外軌側軸箱のみ 3mm 強制的に変位させて曲線通

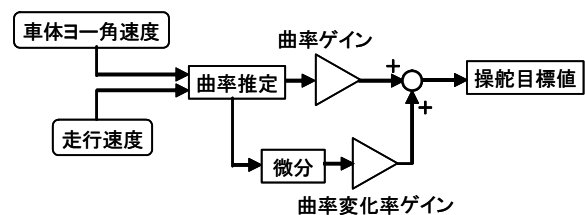


図 3 コントローラの構造

過した際の先頭軸外軌側発生横圧から平均横圧を求めた。逆操舵では内軌側軸箱のみ強制的に変位させた(図4)。アシスト操舵による横圧低減はいずれの曲線半径においても確認され、半径300mにおいて30%程度の平均横圧低減が期待できることがわかった。曲線半径が小さくなるにつれ、同等の横圧低減効果が得られるアクチュエータの必要ストロークは拡大する傾向がある。また、制御フェイル等により逆操舵した場合の横圧上昇の割合は、通過曲線半径が大きいほど上昇するが、最大操舵ストロークを制限すれば、台車の走行安全性に影響を及ぼすレベルには至らないと考えられる。急曲線における逆操舵で横圧上昇幅が少ないのは、レール-車輪間の横クリープ力が飽和状態に近いためである。

4. 構内走行試験結果

アシスト操舵システムを試験用台車に組み込んで、鉄道総研構内の試験線で走行試験を実施した。試験台車の先頭側はPQ測定輪軸で、曲線通過中の発生横圧でアシスト操舵制御の効果を評価した。走行試験は曲線半径100mの曲線で実施し、アクチュエータ最大ストロークは10mmとした。曲線進入時の走行速度は約18km/hであった。

自立制御によりアシスト操舵を行った場合と、パッシブ状態での横圧発生状況を比較して図5に示す。操舵力はほぼ想定通りに出力され、自立制御方式で適切なアシスト操舵を実現できる可能性が示された。アシスト操舵により、円曲線中の平均横圧で28%の低減が達成された。外軌側横圧には数カ所でピークが生じており、その位置での横圧低減効果は明確ではない。試験で使用したアクチュエータは伸張時の剛性が内部に込められた空気の圧縮性で維持されるため、リンク剛性が低下した状態となり、外乱を受け易くなる傾向がある。

システムのフェイルセーフ性検証のため、逆操舵走行による試験を実施した。走行開始直後より内軌側アクチュエータに最大操舵力を与えて曲線全体を走行し、横圧を計測した。外軌側平均横圧の上昇幅は円曲線で1%の増加に留まったが、これはシミュレーションと同様に横クリープ力が飽和状態に近いためと考えられる。

5. 高速走行ベンチ試験結果

営業線の線路形状に近い、より大きな曲線半径を高速で走行する状況でのアシスト操舵台車の制御効果を把握するため、ベンチ試験を実施した。ベンチ試験は(独)交通安全環境研究所の都市内鉄軌道用台車試験設備を使用した。本試験装置は、①軌条輪のヨー角方向回転による平面線形の再現、②内外軌軌条輪の回転速度差による行路差の再現、③荷重枠支持点左右移動によるボギ

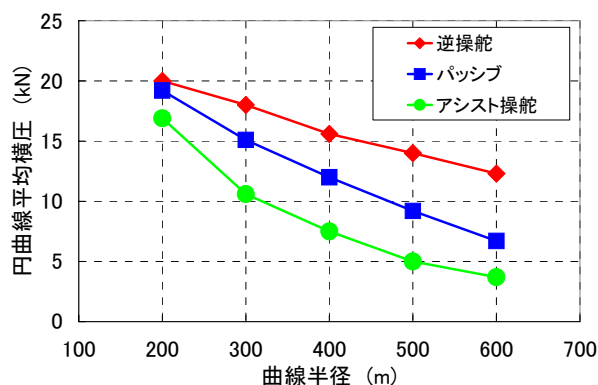


図4 シミュレーション結果

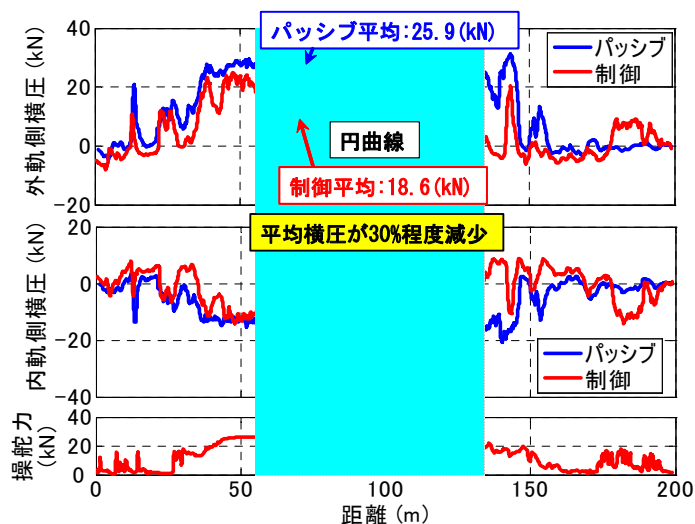


図5 走行試験結果

一角の再現などを協調させて台車の曲線走行状態を模擬できる試験装置である（図6）。

ベンチ試験で実施した，曲線半径 400m，速度 65km/h，均衡カント走行状態での定常円曲線走行中の発生横圧を図7に示す．パッシブに比べ，操舵制御力を上昇させていくと轉向横圧が大きく低下していくことがわかる．設定した曲線半径 400m では，アクチュエータ最大ストロークではほぼラジアル位置までの操舵動作が可能であり，地上側から計測した軌条輪と車輪のアタック角も 0° 程度となっているため，轉向横圧が 0 付近まで低下する．なお，ベンチ試験でのアクチュエータ最大ストロークは 4.5mm とした．

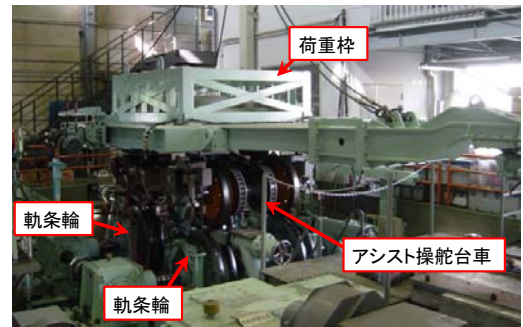


図6 ベンチ試験装置の外観

構内走行試験と同様に，逆操舵時の横圧上昇を調査した．最大操舵力で逆操舵動作した際は 30% 程度横圧が上昇したが，操舵力を予圧縮ばね力相当程度までに制限した状態（操舵力 1.3kN）では明確な横圧上昇は生じなかった．また，正規方向に 1.3kN の操舵力を加えた場合（図7）には 60%以上轉向横圧が低減しており，このような最大操舵力制限によって逆操舵時にも横圧上昇が発生せず，正常時には一定の効果を得られる操舵制御が可能である．

6. まとめ

モノリンク式のボルスタレス台車を対象として，大幅な改造を伴わずに構成可能なアシスト操舵システムについて検討し，以下の点を明らかにした．

- (1) ボルスタレス台車のモノリンクを交換し，簡易に操舵台車を構成できる．
- (2) 構内走行試験結果から，曲線半径 100m の円曲線中でパッシブの状態に比べ，30%程度の横圧低減が達成できることがわかった．
- (3) 操舵制御コントローラは，地上データ等を使用せず，車両に搭載したセンサ情報を使用して制御を行うことが可能である．
- (4) 高速走行ベンチ試験で，曲線半径 400m の定常的な円曲線での轉向横圧を 90%程度低減させた．
- (5) アクチュエータの最大発生力制限で，逆操舵時にも横圧を上昇させないことを確認した．

今後，本線での走行試験を実施し，アシスト操舵システムの横圧低減効果を確認することを検討している．本線での走行にあたり，アシストアクチュエータの適切な仕様の策定，車両搭載可能なアクチュエータの製作，操舵制御コントローラの性能向上などに取り組みたいと考えている．

参考文献

- 1) 佐藤栄作：操舵台車における横圧と最近の操舵台車の技術動向，鉄道車両と技術，No. 7，pp. 12-19，1997
- 2) 鴨下庄吾 他 4 名：ボルスタレス台車用アシスト操舵システムの基礎試験，鉄道総研報告，Vol. 22，No. 9，pp. 5-10，2008

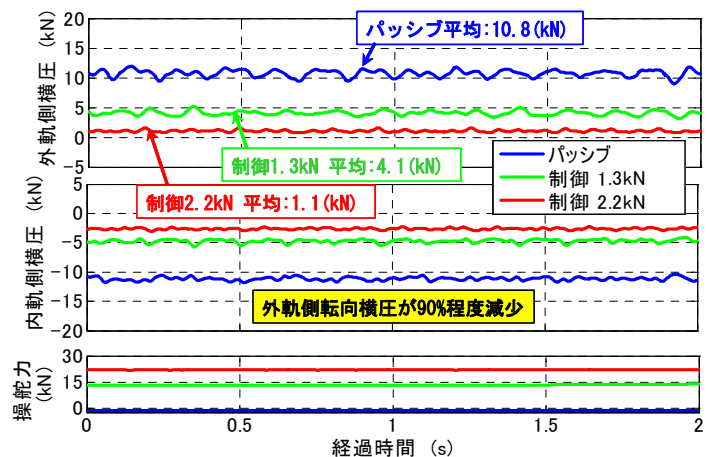


図7 高速走行ベンチ試験結果