

ボルスタレス台車用 アシスト操舵システムの性能確認試験

梅原 康宏* 嶋下 庄吾**
石毛 真* 小島 崇*

Performance Tests of Assist Steering System for Bolsterless Truck

Yasuhiro UMEHARA Shogo KAMOSHITA
Makoto ISHIGE Takashi KOJIMA

In order to improve curving performance of a railway vehicle, we have developed an assist steering system. This system does not complicate truck structure and has the fail-safe function. As shown by the results of the running test presented in our former report, this system was able to decrease outer side lateral force of the leading axle in the curve section by about 30%. However, the running condition of the test line was different from that of a typical commercial line with respect to the running speed and the alignment of the track. Therefore, as presented in this report, we executed the bench test in the running condition that simulated that of the circular curve section of the commercial line, and confirmed that this system was able to decrease the turning lateral force by 70-90%.

キーワード：操舵台車，アシスト操舵，横圧，曲線通過性能，蛇行動安定性

1. はじめに

鉄道車両の走り装置として、曲線区間における横圧低減、車輪フランジやレールの摩耗抑制、車輪-レール間のキシリ音防止など、曲線通過性能を向上させるために様々な方式の操舵台車が提案されてきた¹⁾。

操舵台車とは、曲線通過時に車輪の転動方向が、その曲線の接線に沿うように輪軸の向きを変える台車であり、その機構により自己操舵台車、強制操舵台車、半強制操舵台車の3種類に大別できる。自己操舵台車は軸箱前後支持剛性の柔軟化や、車輪踏面勾配を大きくすることでアタック角を小さくする台車である。台車構造を簡素化できるが、操舵性と蛇行動安定性を両立する必要があり、曲線通過性能の向上には限界がある。

強制操舵台車は、油圧等のエネルギー源を用いて、輪軸や台車の姿勢を制御して操舵する台車である。曲線通過性能を最も向上させることができるが、制御フェイル時に逆操舵動作する可能性があるため、安全運行を重要視する国内の鉄道車両においては採用に至っていない。半強制操舵台車は、車体、台車の幾何学的な変位等を利用して機械的に操舵機構を動作させる台車である。曲線通過性能は大きく向上することができるが、機械式リン

ク等を備えることで台車構造が複雑となり、台車重量や製作、保守コストの増加などのデメリットもある。

このような背景を踏まえて、輪軸本来の操舵力を補助する機構により台車構造や制御機器類を複雑にせず、フェイルセーフ性も確保したシステム(アシスト操舵システム)の開発を行ってきた。まず基礎試験として、既存のモノリンク式ボルスタレス台車にアシスト操舵システムを仮設して構内走行試験を実施し、パッシブ状態と比較して円曲線中の平均横圧を30%程度低減させる結果が得られた²⁾。しかし、試験線の線路状態や走行速度が営業車両と異なった走行条件試験に留まっていた。またフェイルセーフ性確認のため逆操舵試験を実施したが、横クリープ力が飽和している影響で横圧上昇は明確に把握できなかった。

そこで本報告では、実運用に近い走行条件での性能評価を行うために実施した曲線通過性能確認試験および蛇行動限界速度確認試験の結果について述べる。

1.1 アシスト操舵システムの概要

本報告におけるアシスト操舵システムとは、台車枠-軸箱間にアシスト操舵アクチュエータを取り付けて、曲線走行中に輪軸の自己操舵特性を補完する操舵力を与えて横圧低減を図るシステムである。アシスト操舵アクチュエータは、非動作時には予圧縮ばねによりアクチュエータの最縮位置に拘束され、通常台車の軸箱前後支持

* 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 車両振動研究室

特集：車両技術

剛性を維持できるため、非制御時や制御装置の故障時には通常台車と同等の性能を確保できる。試験台車の外観を図1、アシスト操舵アクチュエータの構造および主要諸元を図2、表1に示す。

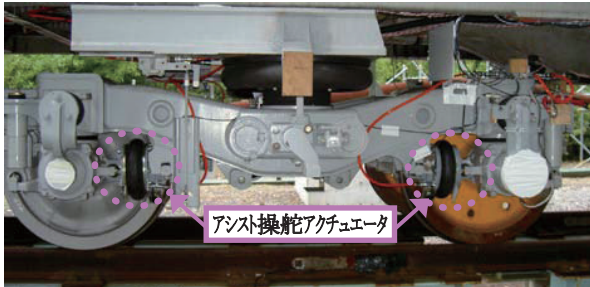


図1 アシスト操舵試験台車

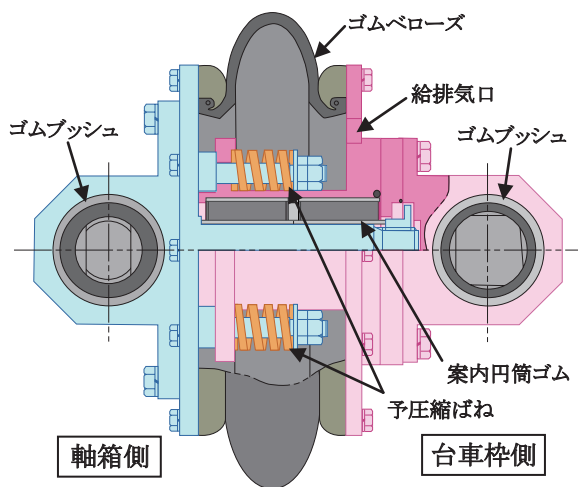


図2 アシスト操舵アクチュエータの構造

表1 アシスト操舵アクチュエータの主要諸元

アクチュエータ最大ストローク		4.5mm
ゴムベローズ	有効受圧面積	0.044m ²
	発生力	26.4kN (600kPa時)
予圧縮ばね	ばね定数	1.47kN/mm
	予圧縮量	10mm
	予圧縮力	14.7kN
案内円筒ゴム	ばね定数	0.82kN/mm

2. 曲線通過性能確認試験

2.1 概要

2.1.1 曲線走行試験装置

独立行政法人交通安全環境研究所が所有する都市内鉄道用台車試験設備^{3) 4)}を使用して、曲線通過性能確認試験を実施した。本試験装置はレール断面形状を模擬した軌条輪上に供試台車を搭載し、軌条輪の回転によって車両の走行状態を再現する。供試台車には半車体に相当する荷重枠を搭載し、荷重枠は固定装置によって地上から支持される。曲線走行状態を模擬する際は、図3に

示す以下の3つの動作を協調させて曲線走行を再現する。

- ① 軌道の平面線形を模擬する前後軌条輪の相対ヨー角度の構成
- ② 内外軌の経路差を模擬する軌条輪の回転数差の付与
- ③ ボギー角変位を模擬する荷重枠支持点の左右移動

これらの動作に加えて、カント過不足により発生する超過遠心力を考慮し、地上側から荷重枠に横方向力を付与できる構造となっている。ただし本試験においては、横方向力付与装置の制限により必要な超過遠心力が得られない条件が生じるため、全条件を均衡カント相当で実施した。

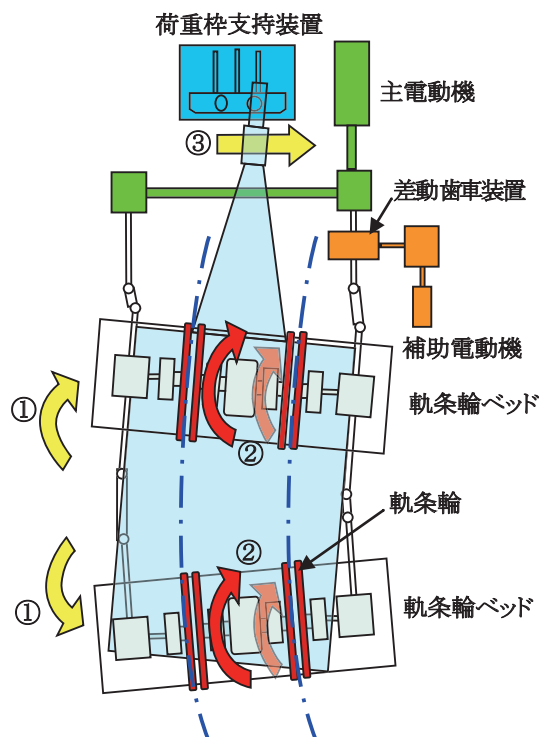


図3 曲線通過模式図

2.1.2 試験条件

供試台車および荷重枠（半車体模擬）の主要な諸元を表2に、曲線半径および速度条件を表3に示す。本試験では、アシスト操舵アクチュエータの設定ストロークにおいて操舵制御の横圧低減効果が期待できる曲線半径300m～600mについて試験を実施した。曲線走行試験装置による曲線走行模擬動作が完了した後、アクチュエータ制御圧力を段階的に最大制御圧力（600kPa時）まで上昇させ、各制御圧力における発生横圧、アクチュエータストロークなどの物理量を計測した。アシスト操舵アクチュエータは伸張方向にのみ動作可能なため、操舵制御時には両軸外軌側のアクチュエータを動作させ、逆操舵制御時には両軸内軌側のアクチュエータを動作させる。軌条輪-輪軸間のヨー方向の相対角であるアタック角

は、軌条輪と一体に移動する軌条輪ベッドにレーザ式変位計を設置し、軸箱部に取り付けたターゲットまでの距離を計測し、内外軌の偏差からアタック角に換算した。また同様の測定方法で軌条輪-輪軸間の相対左右変位を計測した。車輪に発生する横圧は、新連続式輪重・横圧測定装置によって計測し⁵⁾、フィルタリング処理を行った後、一定時間での平均横圧として整理した。

表2 供試台車と荷重枠の主要諸元

台車	重量	4910kg
	ゲージ	1067mm
	軸距	2100mm
	車輪径	860mm
	車輪路面	修正円弧
荷重枠	重量(半車体模擬時)	13800kg
	荷重枠支持～台車中心間距離	10m

表3 曲線半径と速度条件

曲線半径 [m]	速度 [km/h]
300	20, 30, 40, 55
400	40, 50, 60, 65, 75
500	40, 50, 60, 75, 85
600	60, 70, 80, 90, 100

2.2 試験結果

2.2.1 横圧低減効果

通常台車の軸箱前後支持剛性と同等である非制御状態における先頭軸外軌側の横圧を曲線半径別に整理した結果を図4に示す。走行速度変化に対して横圧の変化は明確ではなかった。これは試験条件として均衡カントを想定したため、超過遠心力発生に伴う横圧およびレール-車輪間の接触位置変化に起因する横圧変化が、速度に影響されていないためであり、幾何学的要因に依存する轉向横圧の変化が支配的である。また、走行速度毎に横圧にばらつきが見られるのは、曲線走行試験装置側で生じる軌条輪相対ヨー角の誤差等が影響している可能性がある。

最大制御圧力でのアシスト操舵制御における先頭軸外軌側の横圧を曲線半径別に整理した結果を図5に示す。いずれの曲線半径、走行速度に関してもアシスト操舵制御による横圧低減効果が認められ、本アシスト操舵システムを用いることで曲線走行時に轉向横圧の低減効果を得られることが確認された。実施した試験条件では、横圧の走行速度に対する依存性が低いため、曲線半径毎に平均値を求め、その低減効果を比較した。最大制御圧力でのアシスト操舵制御時と非制御時の横圧を曲線半径別に整理した結果を図6に示す。曲線半径が小さくなるに従って、横圧は大きくなる傾向が確認できる。そして、非

制御状態で発生する轉向横圧の70～90%に相当する横圧を操舵制御により低減できることが分かった。いずれの試験条件においても最大制御圧力において、アクチュエータはほぼ設定した最大ストロークまで動作しており、曲線半径が大きいほど相対的な横圧低減効果は顕著であった。これは、軌条輪-輪軸間の相対角度を0°にする(実軌道ではラジアル位置に相当する)ために必要となるアクチュエータストロークは、曲線半径の増加に応じて減少するので、アクチュエータのストローク制限から小半径の曲線ではラジアル相当位置がとれなかったのに対して、曲線半径が大きくなるとラジアル相当位置に近づくためである。

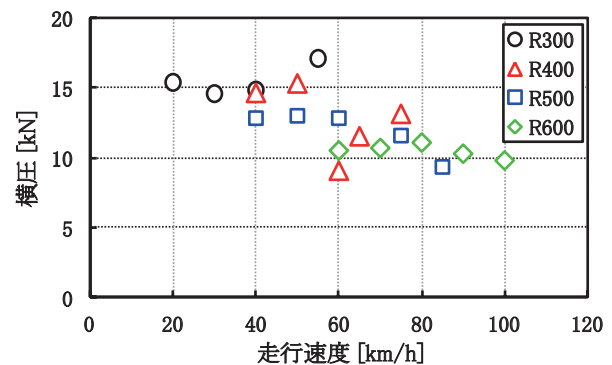


図4 非制御時の横圧

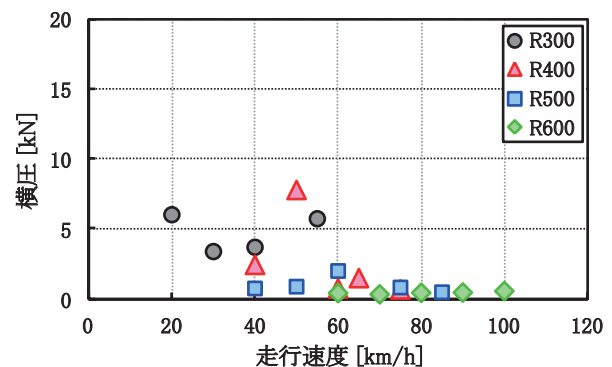


図5 操舵制御時の横圧

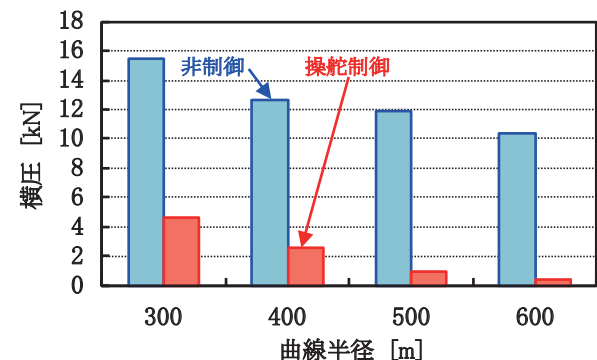


図6 操舵制御時と非制御時の曲線半径毎の横圧比較

特集：車両技術

2.2.2 アタック角と横圧の関係

輪軸の幾何学的挙動に対する横圧変化に着目し、アタック角と横圧の関係について検討した。まずアシスト操舵アクチュエータへ段階的に加圧した制御圧力と、アクチュエータストロークによって構成されるアタック角の関係を調査した。曲線半径300mにおける試験で計測されたアクチュエータ制御圧力とアタック角をそれぞれ一定時間幅で平均した速度別のグラフを図7に示す。速度条件に関わらずアクチュエータ制御圧力の増加に伴ってアタック角が0°に漸近していくことが確認できる。また、曲線半径毎にアタック角と横圧の関係を図8に示す。試験した条件の範囲内ではほぼ比例関係を示しており、曲線半径が小さくなるにつれて傾きが大きくなる傾向を確認できる。次に曲線半径300mにおける試験で計測されたアタック角に対し、その時点の発生横圧をプロットしたグラフを図9に示す。これまでの試験結果と同様に走行速度への依存が見られない。他の曲線半径での試験結果においても速度条件との相関は不明確であった。

以上のように、曲線通過における定常状態での評価に関して、転向横圧は走行速度条件に依存せず、軌条輪-輪軸間のアタック角に応じて変化していることが確認された。

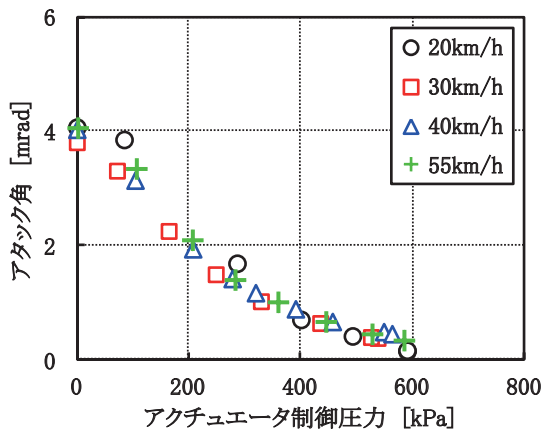


図7 アクチュエータ制御圧力とアタック角

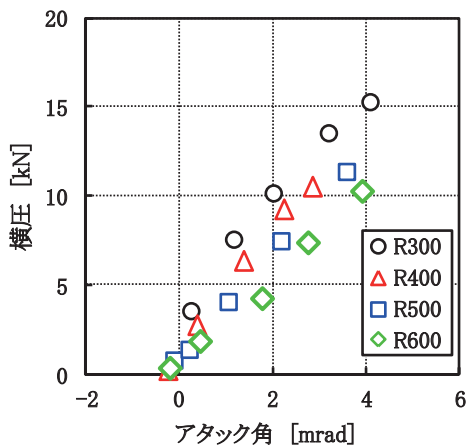


図8 アタック角と横圧 (曲線半径比較)

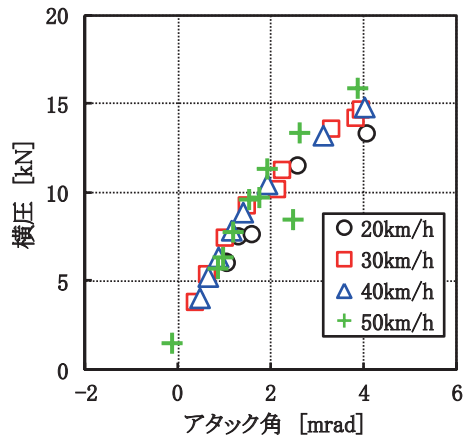


図9 アタック角と横圧 (速度比較)

2.2.3 逆操舵動作時の横圧

アシスト操舵システムの構成要素である制御コントローラやセンサなどで故障が発生し、逆操舵指令がアシスト操舵アクチュエータに入力されるようなフェイル状態を想定するため、両軸内軌側のアクチュエータを動作させて逆操舵動作確認試験を実施した。前項の検討から走行速度の影響は小さいと考えられるため、試験条件として、アシスト操舵の制御効果と逆操舵の影響が明確に判別できる曲線半径について検討を進めた。アクチュエータ制御圧力と横圧の関係について、操舵制御の場合を図10、逆操舵制御の場合を図11に示す。

図10を見ると、操舵動作ではアクチュエータ制御圧力100kPa付近から横圧が低減しはじめ、制御圧力の上昇に伴って転向横圧が低減していく。このような傾向はすべての曲線半径で確認できる。一方、図11の逆操舵動作においては、アクチュエータ制御圧力300kPaあたりまで横圧上昇がみられない。このような特性は他の走行条件でも同様で、逆操舵制御はある特定の圧力まで実質的な逆操舵が起らないことを確認した。さらに曲線半径が小さくなるに従って、明確な横圧上昇が確認できるアク

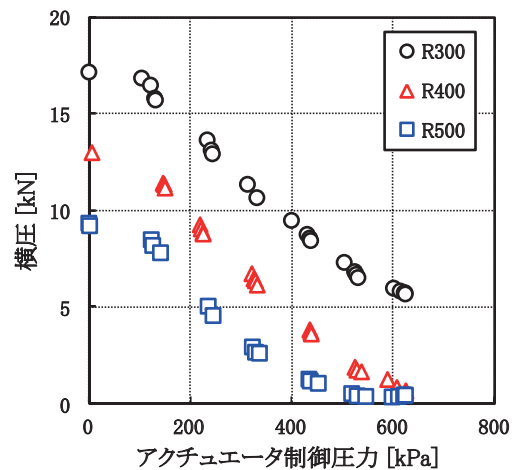


図10 アクチュエータ制御圧力と横圧 (操舵)

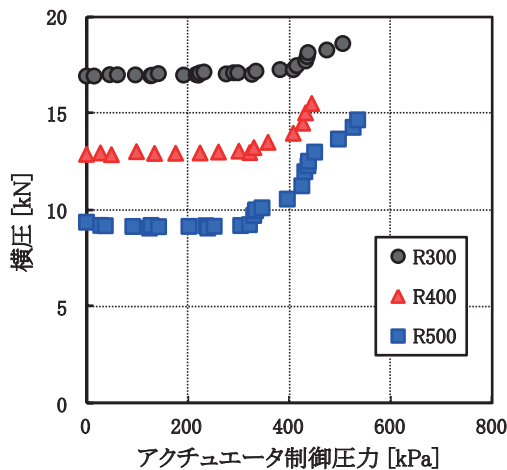


図 11 アクチュエータ制御圧力と横圧（逆操舵）

チュエータ制御圧力は上昇する傾向がある。

上記のような制御圧力に対する横圧変化が操舵、逆操舵で異なる事象は、アシスト操舵アクチュエータの内部構造と輪軸に作用する縦クリープ力の方向に起因している。一般的な鉄道車両で特に発生横圧が問題となるのは先頭軸であることから、ここでは先頭軸について議論を展開する。また定置試験においては、付随台車で実施したため、加減速中の挙動は除外する。

円曲線区間を走行中の一体輪軸には、踏面形状と車輪周速度差に応じて発生した縦クリープ力による自己操舵力が生じている⁶⁾。今回の試験においても縦クリープ力の発生方向は、非制御状態での軸箱前後変位計測結果から判断でき、外軌側車輪ではアクチュエータの伸張方向、内軌側車輪ではアクチュエータの圧縮方向に働くことが確認できた。また、アクチュエータ内部には非制御時の軸箱前後支持剛性を担保する目的で、予圧縮を与えたばね要素を備えている。

上面から見た台車と各作用力の付与される方向を図12に示す。逆操舵となる内軌側のアクチュエータに発生力が生じた場合は、予圧縮ばね力と縦クリープ力の合力によってアクチュエータの伸張動作が妨げられ、一定の操舵制御力の範囲では軸箱が変位せず、発生横圧に影響を及ぼさない。一方、操舵方向である外軌側のアクチュエータに発生力が生じた場合は、縦クリープ力と操舵力が同方向に作用するため、小さな操舵力で予圧縮ばね力に打ち勝って伸張動作が起き、転向横圧を低減させることができる。

上記のような特性に着目すると、予圧縮ばね力の範囲内にアクチュエータ発生力を制限すると、逆操舵方向に操舵指令が入力された場合においても横圧上昇を回避することができる。フェイルセーフ性の確保と横圧低減効果のトレードオフの観点から、逆操舵時においても現状

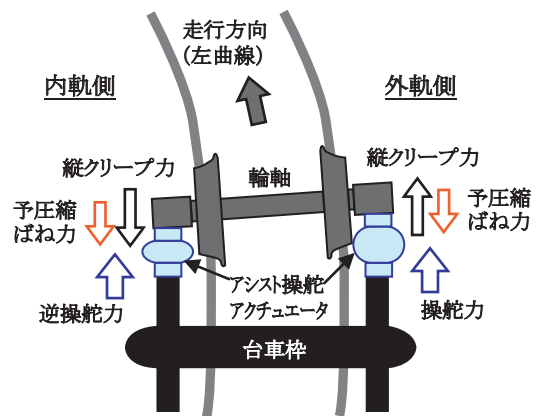


図 12 操舵力と縦クリープ力の作用方向

より発生横圧を悪化させることのない上記条件の最大操舵力制限が有効的である。

3. 蛇行動限界速度確認試験

アシスト操舵アクチュエータは、非制御時には通常台車の軸箱前後支持剛性を維持するが、操舵動作時には前後剛性が案内円筒ゴム剛性と内部に込められた空気の高圧縮性により決まるため、等価的に軸箱前後支持剛性が大きく低下する。2.2.3項で提示した最大操舵力以下であっても直線走行中にアクチュエータに圧力が付与された場合などは走行安定性の低下が懸念されるため、操舵制御時の蛇行動限界速度確認試験を実施した。

3.1 試験条件

蛇行動限界速度確認試験における供試台車には、曲線通過性能確認試験と同じアシスト操舵試験台車を使用した。試験装置は、鉄道総研が所有する車両試験台を使用した。試験時の台車付近の様子を図13に示す。本試験では、車両試験台で直線走行状態を再現し、走行速度毎に片軸の軌条輪を左右方向に強制加振させ、その後の応答から台車安定性を判別するものである。ここでは、加振後における輪軸左右変位の小振幅振動が収束しなくなる速度を蛇行動限界速度とした。アシスト操舵アクチュエータの制御圧力を段階的に変化させ、軸箱前後支持剛性と蛇行動限界速度の関係を調査した。なお、高速走行状態での継続的なフランジ当たりを避けるため、全部位のアクチュエータに同じ制御圧力を与えて輪軸に静的なアタック角がつくことを防止し、軸箱前後支持剛性が変化する状態を模擬している。また、アシスト操舵アクチュエータを通常のモノリンクに復位し、比較試験を行った。

特集：車両技術

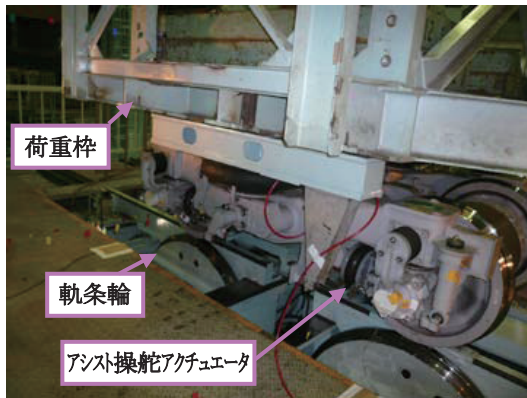


図 13 蛇行動限界速度確認試験状況

3.2 試験結果

蛇行動限界速度確認試験結果を表4に示す。アシスト操舵アクチュエータが非制御時での蛇行動限界速度は250km/hであり、通常モノリンクの蛇行動限界速度は260km/hであった。なお非制御時についてのみ数回試験する機会があり、その中で一番低い値を比較に用いた。制御圧力200kPa以下では、予圧縮ばね構造の効果により、アシスト制御圧力を付加した場合でもアクチュエータのストロークが確認できず、蛇行動限界速度にも大きな変化が認められなかった。予圧縮ばねによる保持力とアクチュエータ発生力がほぼ均衡する制御圧力300kPaおよび400kPaにおいて、蛇行動限界速度は230km/hであった。非制御時や通常モノリンクと比較すると20～30km/h程度低下しているが、この速度は国内で使用する在来線向け台車の蛇行動安定性として十分な性能である。また必要に応じて、台車ヨーダンパを取り付けることにより、蛇行動限界速度を向上させることが可能である。制御圧力500kPa以上の場合には、アクチュエータが機械的な伸張方向のストップ位置で制御圧力によって保持されているため、蛇行動限界速度は非制御時や通常モノリンクと同等の速度域まで上昇した。

以上の結果により、アシストアクチュエータの動作中の軸箱前後剛性の低下は、蛇行動限界速度の低下をもたらすものの、実使用に支障する影響がないことを確認した。

表4 アクチュエータ制御圧力と蛇行動限界速度

軸箱前後支持装置	アクチュエータ制御圧力[kPa]	蛇行動限界速度[km/h]
アシスト操舵 アクチュエータ	0	250
	100	260
	200	260
	300	230
	400	230
	500	260
	600	250
モノリンク	—	260

4. まとめ

モノリンク方式ボルスタレス台車に適用したアシスト操舵システムの曲線通過性能確認試験および蛇行動限界速度確認試験の結果から、以下に示す知見が得られた。

- (1) 曲線半径300～600mでの曲線通過性能確認試験において、アシスト操舵制御では非制御状態に比べて轉向横圧を70～90%低減できた。
- (2) 逆操舵動作時のアシスト操舵システムの特性に関して、逆操舵制御力と発生横圧の上昇を定量的に把握した。
- (3) 操舵制御のフェイルセーフ性確保のため、最大アクチュエータ制御圧力を制限する手法が有効で、完全な逆操舵方向に制御力が付加された場合にも横圧上昇を防止できることを確認した。
- (4) 操舵制御時における軸箱前後支持剛性が低下した状態で蛇行動限界速度確認試験を実施し、通常モノリンクより20～30km/h程度の限界速度低下が見られたが、在来線の営業運転において支障をきたす安定性低下に至らないことを確認した。

以前の基礎試験、今回実施した曲線通過性能確認試験および蛇行動限界速度確認試験の結果からアシスト操舵システム全体の有用性を示した。今後、アシスト操舵システムの実用化に向けて、今回獲得したフェイルセーフ性向上策を組み込んだ制御方法や、飛来物による損傷を防止するためベローズを用いないアシスト操舵アクチュエータの開発等に取り組んでいく。

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，石毛真，渡辺信行，梅原康宏，畠田憲司：ボルスタレス台車用アシスト操舵システムの基礎検討，鉄道総研報告，Vol.22, No.9, pp.5-10, 2008
- 3) 松本陽，佐藤安弘，谷口哲夫：都市内鉄軌道用台車試験設備の開発（第1報），交通安全公害研究所研究発表会講演概要，Vol.19, pp.19-22, 1989
- 4) 佐藤安弘，松本陽，大野寛之，陸康思：台上試験による鉄道車両の曲線通過性能の評価と諸問題の解決，交通安全環境研究所研究発表会講演概要，Vol.4, pp.187-190, 2004
- 5) 石田弘明，松尾雅樹，手塚和彦，植木健司：鉄道車両の新しい輪重，横圧，脱線係数連続測定法（測定装置の開発），日本機械学会論文集（C編），Vol.614, No.63, pp.3417-3423, 1997
- 6) 日本機械学会：鉄道車両のダイナミクス，電気車研究会，pp.13-14, 1994