

1106 ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発

(第2報・シミュレーションと台上実験の結果)

R&D of Active-bogie-steering Truck: 2nd report; results of simulation and stand test

○正 松本 陽 佐藤安弘 正 大野寛之 水間 毅 (交通安全環境研究所)

正 須田義大 正 道辻洋平 (東京大学)

谷本益久 (住友金属テクノロジー) 正 中居拓自 佐藤與志 (住友金属)

Akira MATSUMOTO, Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO, Takeshi MIZUMA;
National Traffic Safety & Environment Laboratory (NTSEL)
Yoshihiro SUDA, Youhei MICHITSUJI; University of Tokyo,
Masuhisa TANIMOTO; Sumitomo Metal Technology,
Takuji NAKAI, Yoshi SATO; Sumitomo Metal

Railway truck is necessary to have excellent curving performance as well as high speed hunting stability, but generally they are contrary to each other. "Active-bogie-steering (ABS) truck", is one of the methods to realize the compatibility between curving performance and hunting stability. ABS truck has active steering mechanism only between car body and truck frame, and truck frame is steered by actuators toward "radial steering position", which realizes no "bogie angle shortage". Validity tests were carried out on the truck rolling test stand, and we have also carried out numerical simulation using multi-body dynamics simulation program A/GEM. The results of stand tests and numerical simulations show that "bogie angle shortage" is reduced proportionally by bogie-steering actuator force, therefore active-bogie-steering can remarkably reduce the lateral contact force of the outside wheel of leading axle even in sharp curve.

Key word: Rolling stock, Steering truck, Curving, Test stand, Derailment

1. まえがき

鉄道車両の台車においては、直進安定性と曲線通過性能とは一般的に相反する関係にあり、このため、これまで高速走行時の直進安定性の悪化を嫌って、曲線通過性能を犠牲にする傾向が見られた⁽¹⁾。しかしながら、地下鉄のような急曲線の多数ある路線を、高速走行を重視した曲線通過性能の劣る車両を走らせると、急曲線部において脱線などの最悪の事態を引き起こす可能性もある。

われわれは、直進安定性と曲線通過性能を両立させる技術として、「曲直両用新円弧踏面」⁽²⁾、「前後軸剛性非対称支持」⁽³⁾、「後輪独立回転車輪」⁽³⁾など踏面形状や輪軸の改良に関する研究を進めてきた。これらの一部はすでに実用化されており、他のものも、シミュレーションや台上試験結果から、直進安定性と曲線通過性能が十分に両立し、急曲線通過時の脱線係数が大幅に低下することが実証されている⁽⁴⁾。

ここで提案するボギー角アクティブ操舵台車は、アプローチを変えて、「車輪軸はひとまずおいて、台車枠そのものをアクティブに操舵してやろう」というもので、非常に簡単な構造で実現できる。前報⁽⁵⁾では、第一段階の台上試験で、本方式の基本的な特性を把握し、有効性が確認されたことを述べたが、本報では、その後、実施した台上試験と数値シミュレーションからも有効性が検証されたことを述べる。

2. 「ボギー角アクティブ操舵台車」の概要

2.1 ボギー角アクティブ操舵台車

ここで提案する「ボギー角アクティブ操舵台車(Active Bogie-Steering Truck: ABS 台車)」は、曲線に応じて台車枠自体を車体に対して、アクティブに操舵してやろうという方式で、輪軸の操舵リンク等は用いずアクチュエータの付加のみという簡単な構造で曲線通過性能の向上が図れる。

具体的には Fig.2 に示すように台車の左右に車体との間にアクチュエータを挿入し、曲線通過中に台車の旋回をアシストする構造とする(たとえば、台車が操舵不足

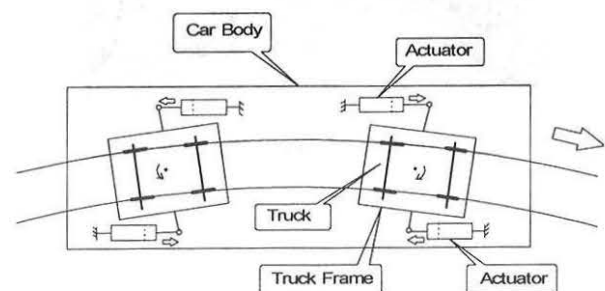


Fig.1 Concept of active bogie-steering (ABS) truck

とならずに、接線方向に向くように操舵する)。これまでの曲線通過性能の向上をねらった操舵台車は、「ボギー角連動車軸操舵方式」などが実用化されつつあるが、すべて各車軸を操舵するもので、台車枠そのものを操舵する、構造が簡単な本方式が検討されなかったのは、いわば盲点とも言える。

3. 台車試験機による走行実験

3.1 実験の概要

(1) 試験機及び供試台車

実験に用いた台車試験機は、当研究所に設置されている都市内鉄軌道用台車試験設備で、半車体・一台車を軌条輪上に搭載し、曲線走行状態も再現できる機能を持つものである。実験に用いた台車は、営団地下鉄銀座線・丸の内線で用いられているものと類似の台車（車輪踏面は銀座・丸の内線で使用中のものと同一形式の円弧踏面）を基本とし、ボギー角操舵を行う電動式アクチュエータを付加した。なお、アクチュエータは前年度のもののに対し、双方向に動作可能なように改良を加えた。

(2) 実験方法

曲線通過状態を再現するためには、半車体モデルでは車体相当部分（以下、荷重枠と呼ぶ）の支持点をオフセットする必要があるが、このためには試験機のかなり大がかりな改造を必要とするため、本実験では荷重枠を正対状態（支持点をオフセットしない）にして実験を行った。この状態でも、曲線中における車体とレール接線方向との幾何学的相対角度を補正してやることにより、曲線中の台車の挙動特性を把握できると考えたからである。

実験は、直線走行状態から曲線部に進出し、定常円曲線走行状態とした後、ボギー角操舵用アクチュエータを作用させ、作用力を徐々に増加していった台車の挙動（ボギー角、左右変位、輪重、横圧、アタック角等）の変化を調べる方法で行った。実験を行った曲線半径は、半径400m～180m程度の範囲である。実験状況を Fig.2 に示す。

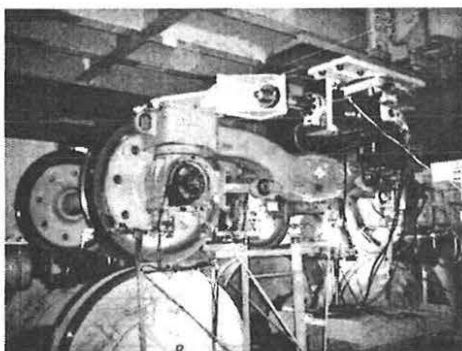


Fig.2 Test truck on rolling test stand

3.2 実験結果の概要

本実験に用いた車輪踏面の輪径差獲得可能範囲は、理論計算によれば 350～400mR 程度であり、それより曲線半径の小さな曲線では、操舵不足状態となり、後車軸には輪径差不足のために前後方向のすべりが発生して台車の旋回を妨げる方向のモーメントが生じる。また、前車軸には車輪・レール間にアタック角が付くため、横方向のクリープ力が発生して、やはり台車の旋回を妨げる。これらの力のため、前車軸の外側車輪には著大な横圧（脱線や摩耗の主たる原因となる）が発生することになる。

しかしながら、この状態でボギー角操舵用アクチュエータに力を付加していけば、台車枠の車体に対する角度（ボギー角）の操舵不足分が徐々に解消して、横圧も低下していくはずである。なお、本実験では、荷重枠を正対状態にセットしてあるので、試験機上でボギー角 0 のときが、曲線での台車の理想操舵状態（台車が曲線の接線方向に向く、いわゆるラジアル操舵状態）に相当する。

3.2.1 ボギー角操舵の効果

Fig.3 は、アクチュエータのシリンダに付加した作用力とそのときのボギー角不足量との関係を、曲線半径をパラメータとして表したものである。ボギー角不足量は、アクチュエータの作用力の増加に対して、ほぼ直線的に減少していく。すなわち、半径 180m の曲線では、操舵しない場合（アクチュエータ力がほぼ 0 の時）に 0.4° 程度あったボギー角不足が、11kN 程度の操舵力をかけるとほぼ 0° になっている。

ボギー角と前軸外軌側車輪に発生する横圧の間には Fig.4 に示すようにほぼ比例関係が成り立つため、アクチュエータ作用力と横圧の間には Fig.6 に示すような直線関係があり、Fig.5 に示すようにアクチュエータ作用力を増加させると、横圧を減少できることがわかる。

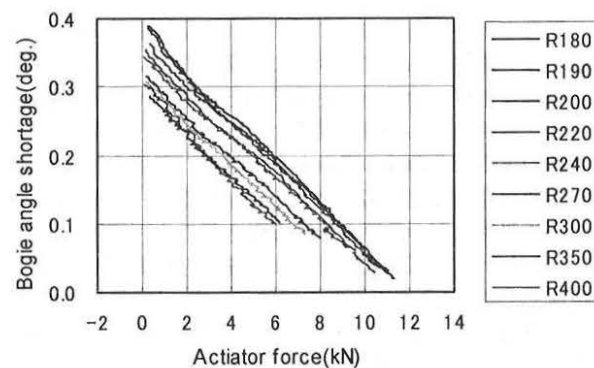


Fig.3 Reduction of bogie angle shortage by actuator

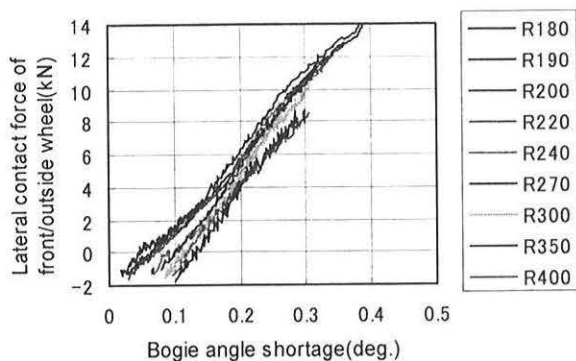


Fig.4 Lateral contact force vs. bogie angle

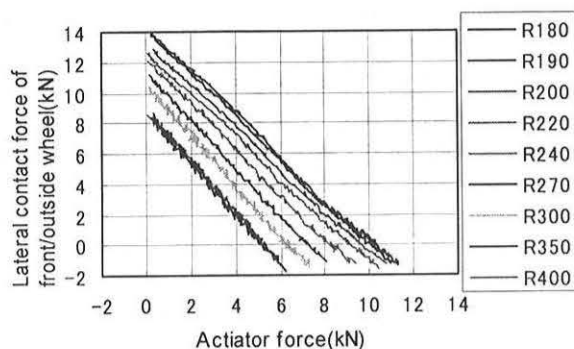
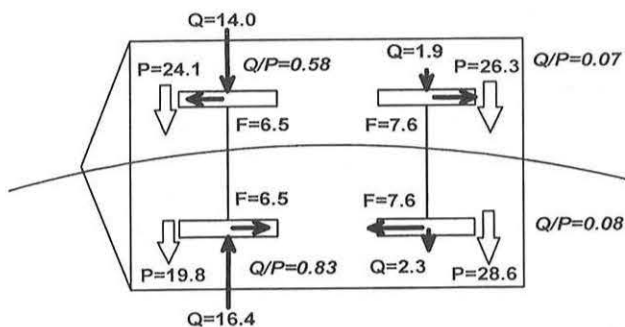


Fig.5 Reduction of lateral force by bogie-steer

3.2.2 台車内における力の変化

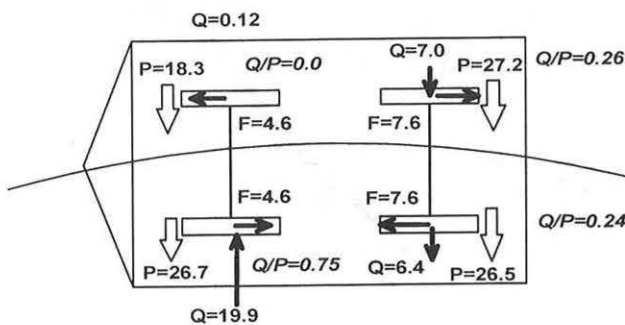
ボギー角操舵を行うことによる台車内の力の変化を Fig.7 に示す。(a)は操舵を行わないで半径 180mR の曲線を通過する場合、(b)は約 10kN の操舵力を加えてボギー角不足を 0 とし、外軌側車輪横圧をほぼ 0kN に減少させた場合を示す。

操舵を行わない場合、 0.39° のボギー角不足があり、外軌側車輪にはフランジ反力による 14kN の横圧、 $Q/P=0.58$ の脱線係数が生じている。後輪軸の横変位は



$F_{actuator} = 0 \text{ kN}$, $\theta_{bogie} = -0.39^\circ$.

(a) Without steering



$F_{actuator} = 10 \text{ kN}$, $\theta_{bogie} = -0.06^\circ$

(b) Bogie-steering

Fig.6 Change of forces in bogie by bogie-steering

小さいため、輪径差不足による反操舵方向の縦方向クリープ力が 1 輪あたり 7.6kN 程度、前車軸には逆に操舵方向に 6.5kN の縦クリープ力が働いている。後輪軸のアタック角は小さいため、横圧は 2kN 前後と小さい。前輪内軌側車輪の輪重横圧比は 0.83 程度ある。

これに対して、操舵を加えると、ボギー角不足はほぼ 0 となって外軌側車輪横圧はほぼ 0 となり、この結果脱線係数 Q/P もほぼ 0 となる。内軌側車輪では輪重 (19.8kN→26.7kN)、横圧 (16.4kN→19.9kN) とも増加しているが、輪重横圧比はあまり変化していない (0.83→0.75)。後輪軸では、内外軌とも横圧がやや増加し、縦クリープ力は変化していない。

このようにボギー操舵により前軸外軌側車輪の横圧が低減した影響は、前軸内軌側車輪の輪重と横圧の増加という形で現れることがわかる。実験結果で見る限り増加による悪影響はないと考えられるが、強制操舵による台車内の力の変化は今後検討していく必要があると考えている。

4. 数値シミュレーション結果との比較

台上試験と理論計算値との比較を行うため、マルチボディ

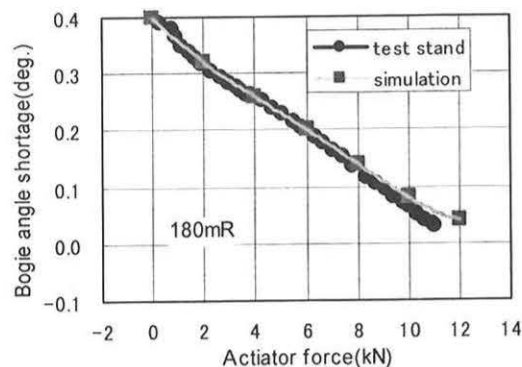


Fig.7 Comparison between simulation and stand test (actuator force / bogie angle)

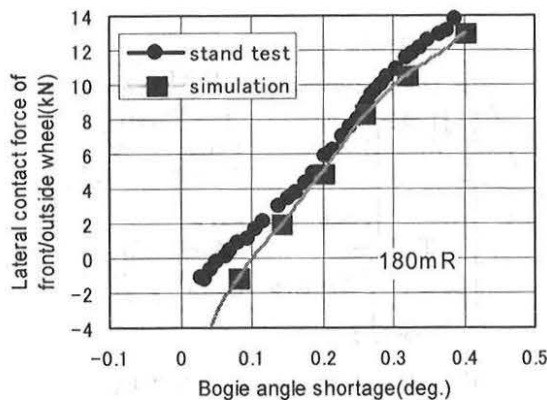


Fig.8 Comparison between simulation and stand test (bogie angle / lateral force)

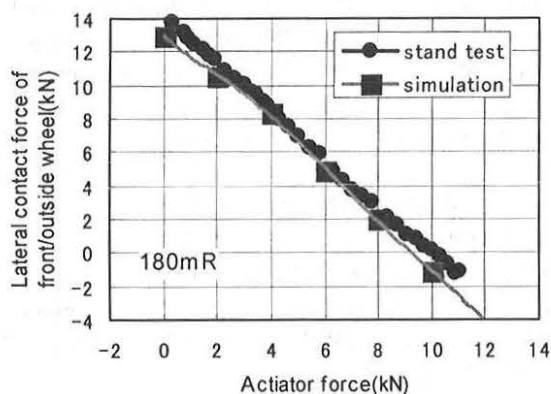


Fig.9 Comparison between simulation and stand test (actuator force / lateral force)

・ダイナミクス・シミュレーション・プログラム A'GEM を用いて、シミュレーションを行った。今回行ったのは、台上試験と同様な半車体モデルについてである。Fig.7 から Fig.9 に、半径 180mR の曲線において強制操舵を行った場合の、アクチュエータ力、ボギー角不足量、前軸外軌側横圧との関係を示す。

各図からわかるように、シミュレーション結果と台上試験結果はよく一致している。ただ、ここでは示していないが、前車軸アタック角については、実験では計算値に比べて減少量が小さい。この点については今後検討を要する。

5. まとめ

ボギー角をアクティブに操舵する方式の基本的な特性を検証するため、台車試験機による各種の曲線通過実験およびマルチボディ・ダイナミクス・シミュレーション・プログラムによるシミュレーションを行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) ボギー角を操舵するためのアクチュエータの作動力に対して、ほぼ直線的に台車のボギー角不足量は減少する（実曲線通過状態ではラジアル操舵に近づく）。

- 2) ボギー角不足量と前軸外軌側車輪の横圧は、ほぼ比例関係にあるので、ボギー角を操舵すると横圧は直線的に減少し、急曲線でも 0 にすることが可能である。
- 3) 以上について、台上試験結果とシミュレーション結果はよく一致し、これらにより、ボギー角をアクティブに操舵することにより、急曲線において横圧を顕著に減少させることが可能であることが検証された。
- 4) アタック角については、ボギー角操舵によって減少するが、台上試験では、シミュレーションより減少程度が小さい。
- 5) ボギー操舵により前軸外軌側車輪の横圧を低減させた影響は、前軸内軌側車輪の輪重と横圧の増加という形で現れるが、悪影響はないと考えられる。

今回報告したものは、定常的な力の付加による実験結果であるが、現在、直線・曲線走行に動的に対応できるコントローラを用いた実験を進めている。また、軸箱支持剛性の影響の調査やアタック角も同時に減少させるため輪径差をより大きく獲れる路面形状との組み合わせによる性能向上なども行う予定である。

6. あとがき

前報では、初期の特性試験により、「ボギー角アクティブ操舵方式」の有効性が確認できたことを報告したが、本報では、その後の台上試験結果および計算機シミュレーションの結果との比較について述べた。今後、実用化に向けてシステムの改良や台上試験の深度化のみならず、実車に装架した走行試験も行いたいと考えている。

本研究の実施に当たっては、(財)メトロ文化財団の公益基金による研究費補助を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 松本、"ビューティフル・カーヴィング"をめざして— 鉄道の曲線通過に関わる研究課題とその成果—、機械学会第 9 回交通・物流部門大会、2000、p1
- (2) 松本ほか、急曲線台車の研究開発（第 1 報）— 曲・直両用新路面形状の設計法と性能評価—、27 回交通安全公害研究所発表会、1997
- (3) Suda, Y.: Improvement of High Speed Stability and Curving Performance by Parameter Control of Trucks for Railway Vehicles Considering Independently Rotating Wheelsets and Unsymmetric Structure, JSME International Journal, Series III, 1990, 33-2, p176
- (4) Matsumoto, A. and et. al : Compatibility of curving performance and hunting stability of railway bogie, 16th IAVSD symposium, 1999
- (5) 松本ほか、ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発（第 1 報）、機械学会第 11 回交通・物流部門大会、2002、p273