1104 曲線通過性と走行安定性を両立する一軸操舵台車の運動特性

○[機] 道辻 洋平(東大院)、須田 義大(東大) 青木 慎一(日大)、八百 滋貴 (日大)

Running Performance of Single-Axle Steering Bogie with Compatibility between Curving and High Speed Running Stability

Yohei Michitsuji, Yoshihiro Suda (The University of Tokyo) Shinichi Aoki and Shigeki Yao (Nihon University)

Compatibility between high speed running stability and good curving performance of railway vehicles has long been considered. In the design of vehicle parameters, the axle supporting rigidities are crucial to solve the problem. In order to realize higher level of compatibility, the authors propose the single-axle self-steering bogie based on the analysis of equivalent stiffness for the vehicle model. The proposed secondary longitudinal suspension mechanism replacing spring to damper enables wheelsets to realize ideal curving performance on tight curved track while achieving high speed running stability. In order to verify the performance of the newly developed steering truck, experimental platform with the 1/10 scale model vehicle is originally made. In this paper, the idea of steering bogie is explained while considering the actual bogie mechanism consists of a single-axle bogie, bolster and yaw dampers. Experimental results using the scale model vehicle with two single-axle bogies show excellent performance and high speed running stability.

キーワード:鉄道車両,操舵台車,走行安定性,曲線通過性 Keywords: Railway Vehicle, Steering bogie, Running stability, Curving performance

1. はじめに

鉄道車両における曲線通過性能と高速走行安定性の両 立は次世代の鉄道車両グランドデザインとして確立さ れるべき課題のひとつである.従来の二軸ボギー台車に おいて、軸箱支持剛性を適度に大きく設定すれば高い走 行安定性を確保できるが、曲線旋回性能が悪くなる. そ のため、この剛性の大きさは両性能のトレードオフとし て決定される(1). これに対し、台車の軸箱支持剛性の前 後非対称化という画期的なコンセプトで設計された車 両が, 操舵台車の一例として実用に供される成果を挙げ ている(2). 一方,近年における新たな台車方式として, 一軸台車が注目されている.一軸台車にはさまざまな特 徴があるが,ここでは特に,輪軸操舵が台車枠旋回運動 と等価であるという,操舵構造上の特徴に注目する.こ の構造により、台車枠・車体間支持機構のみに焦点をし ぼって,車両の曲線旋回性能と高速走行安定性の両立を 考えることが可能である.

本報では、はじめに等価支持剛性モデルによる解析手法 に基づいて、理想的な定常曲線旋回を実現する一軸操舵台 車の支持パラメータ条件を導く.そこで得られる知見をも とに、前・後輪軸の定常曲線旋回における、車体を介した相 互の干渉力を発生せず、動的な蛇行動に対して安定化作用 を有する一軸操舵台車を提案する.さらに、新規性のある 台車を低コストで実験するために開発した、1/10 スケール の軌道実験装置^{(3) (4)}を用いた曲線通過走行試験をおこなう. 提案する理論に基づいて構築された、ボルスタ・ヨーダン パ・一軸台車という要素からなる一軸操舵台車スケールモ デル実験装置を開発し、走行実験の解析により曲線旋回性 能向上を確認したので、その内容について報告する.

2. 一軸操舵台車の理論

2.1 提案車両の周波数依存剛性モデル

提案する台車構造を有する二軸一車両モデルの簡略化モ デルを図1(a)に示す.提案する台車構造とは二次前後支持 機構として高い減衰係数値を持つヨーダンパを用いるもの である.このヨーダンパは、台車枠を介して車輪ヨーを支 持するものである.ここでは特にステアリング・ヨーダンパ (SYD)とよぶこととする.このとき、車体・軸箱間に注 目するとSYDは前後軸ばねとの直列構造を形成し、これを 変位から力に変換する、ばね剛性に対応する伝達関数で表 すと以下となる.

$$K_{\sigma}(s) = \frac{Ts}{Ts+1}, \quad T = b_z c_{\sigma\sigma}/b_z k_{zz}$$
 (1)

この剛性は一次遅れ系であり,周波数に応じてまったく性 質の異なる二つのばね

$$K_{\varphi}(0) = 0, \quad K_{\varphi}(\infty) = k_{zz}$$

と考えることができる.この,低い周波数において,剛性 が零となる性質によって,ダイナミクスの定常状態である 定常曲線通過においては,等価曲げ剛性と等価せん断剛性 の両方の値を零にすることができる.これにより,定常曲 線通過中は前・後輪軸間の車体を介した連成が取り除かれ, 定常曲線通過中はクリープカ,とりわけ縦クリープの発生 をセルフステアリングによる自動調整で零化する,理想的 な曲線旋回を実現できる.

2.3 走行安定性設計

つぎに,走行安定性を維持するためのパラメータ設計手 法について述べる.通常,輪軸の前後支持剛性は,蛇行動

[No.03-51] 日本機械学会第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2003-12.9~11. 川崎〕

臨界速度を考慮した設計が必要である.以下では提案する SYDについて、そのパラメータ設計指針を説明する.

輪軸単体は、走行することによって蛇行動を発生する一 種の信号発生システムと考えることができる⁽⁵⁾.このとき の信号の周波数は幾何学的蛇行動による周波数

$$\omega_{\text{max}} = v_{\text{max}} \sqrt{\frac{\gamma}{b_a r_o}} \tag{2}$$

に一致する.この信号を抑制し、車両システム全体の安定 性を保つには、剛な前後支持機構によるフィードバックを かければよい.図3に示すように、パラメータ2/Tを式(1) のゲイン飽和特性の境界として、剛な前後支持機構を蛇行 動に対して実現する条件式は

 $\frac{2}{T} < \omega_{\text{max}} \tag{3}$

となる.この条件下では二つの輪軸は強固に連成し,軸ば ね剛性に依存した高い臨界走行安定性を実現することがで きる.

3. スケールモデル走行装置

3.1 台車のメカニズム

提案理論の検証をおこなうスケールモデル走行装置を図



a) Truck with proposed bogie mechanism



b) Simplified model with SYD



c) Frequency-dependent stiffness

Fig.1 Frequency-dependent stiffness model

4 に示す. モデルスケールは 1/10 であり,「高性能一軸台 車の開発」プロジェクトで開発された車両を参考にしてい る.

台車構造の詳細は図4に示されるとおりである.台車は インダイレクトマウント方式のボルスタ台車であり,台車 枠ピッチングを抑制するために平行リンクで拘束している. 車体とボルスタ間のヨー運動が輪軸の操舵運動を発生する ため,ボルスタ・車体間の支持装置は操舵性と走行安定性を 直接的に決定する.通常,ボルスタ台車であれば,この部 分に側受が設置されるが,提案台車ではSYDを設置する. 一方,通常のヨーダンパはボルスタレス台車への適用を前 提としており,提案台車ではボルスタとヨーダンパの組み 合わせる特殊な構造となる.これにより輪軸ヨー運動を, 理想的な曲線旋回と高速走行安定性を両立することが可能 である.上下方向に関しては,ボルスタと台車枠間に柔軟 なコイルばねを導入し,二次上下支持系を構成する.輪軸 は剛な防振ゴムで支持している.モデルのパラメータを表 1に示す.

ボルスタと車体間の支持装置は図5に示すように様々な 場合で比較することができる. Spring'は柔軟なばね支持で あり, Rigid はリンクでボルスタ回転を固定した場合であ る. SYD'は提案するダンパによる支持であり, このときの ダンパ減衰係数は式(3)を満たすように表 2 に基づくパ ラメータ設計をしている.



Frequency (rad/sec) Fig.2. Bode diagram of proposed serial mechanism



Fig. 3 Overview of 1/10 scaled model vehicle



Fig. 4 Detail of proposed bogie mechanism



a)Spring b)Rigid c)SYD

Fig. 5 Various suspensions between body and bolster

Table 1	Parameter of the model vehicle	

Description (Symbol)	Value (Unit) 46.5,4.8,0.2,4.5 (kg)
Body, bogie, link, axle mass	
Primary spring stiffness longitudinal, lateral, vertical	128.0,128.0,800.0 (N/mm, per axle box)
Secondary spring coefficient longitudinal lateral, vertical	8.0,72.0,40.0 (N/mm, per bogie)
Length between primary springs	150.0 (mm)
Length between secondary springs	240.0 (mm)
Length between suspensions connected with bolster	280.0 (mm)
Radius of wheel	43.0 (mm)
Length of contact point	150.0 (mm)
Tread gradient	1/8

Table 2 Parameter for obtain

Description (Symbol)	Value (Unit)
Maximum running velocity (v_{mx})	9.0 (m/s)
Hunting frequency (ω_{max})	56.0 (rad/s)
Minimum damping coefficient (cmm)	2.4 (N/m·s)
Actual damping coefficient (cod)	3.2 (N/m·s)

4. 走行軌道の概要

走行装置を走らせる軌道を図6に示す.プラットフォームは車両を定速まで加速する牽引駆動装置,急曲線を有する軌道からなる.牽引駆動装置は軌道直線部分に併設されたリニアガイド上をACサーボモータによって任意の速度

パターンで制御可能である.最大速度は2.5m/sec 程度である.車両は,緩和曲線手前で切り離され,急曲線において は慣性走行となる.

軌道については軌間 150mm でレール頭頂面半径は 30mm. であり直線 9.3m,入口緩和曲線(2.7m)・定常曲線 (5.4m)・出口緩和曲線(2.7m)・出口直線(3m)から構成される. 緩和曲線はサイン逓減曲線であり,定常曲線半径は 3.3m である. レールカントは 6mm であるが任意に調整可能で ある. 曲線区間全体には下り勾配(13‰)が設定され,慣性 走行後に車両が止まらないようになっている. また,軌道 レールには任意の箇所にひずみゲージを設定し,レールに 作用する垂直力と横圧を計測可能である.

5. 実験結果

5.1 曲線通過性の検証

スケールモデル車両に設置したレーザー変位センサによ り,輪軸左右変位,アタック角の非接触計測が可能である. これらの計測データからボルスタ・車体間のさまざまな支 持装置における走行実験結果を比較する.

前軸と後軸アタックアングルの定常曲線中の平均値を, それぞれの支持機構において比較したものが図 7 である. 図の縦軸はアタック角平均値であり,横軸はさまざまな支 持装置での比較である.図示されるように'Spring'おける前 軸アタック角が大きいことがわかる.この値は 'Rigid' に おいてさらに大きくなっており,操舵性が悪化しているの がわかる.一方, 'SYD' においては前軸・後軸ともに極め て小さなアタック角となっており,曲線形状に沿った操舵 がなされていることを示す.

図 8 は地上センサによって取得したデータから輪重・横 圧比を計算したものである.アタック角の計測結果が示す ように、この場合においても'Rigid'の前軸内軌の値が大き く 'Spring'より操舵性が悪いことを示している.提案する 'SYD'の場合,全ての車輪についてこの値が小さくなって おり、輪軸の発生する横クリープ力がきわめて小さいこと を示している.

図9は車体下部に設置した CCD によって,定常曲線通 過状態における前軸外軌の映像を示したものである.図示 されるように提案支持方式では,フランジ接触していない 状態を確認できる.



Fig. 6 Overview of experimental setup



Fig. 7 Comparison of various suspensions



Fig. 8 Ratio of Lateral/Vertical applied force for rail obtained with ground sensor



Fig.9. View from CCD for leading outside wheel

5.2 走行安定性実験の結果

図 10 は直線走行において,先頭軸減衰比の走行速度依存性を示したものである.図の縦軸が減衰比であり,横軸が走行速度である.曲線通過性と同様に3種類の支持機構で比較している.

図示されるように'Spring' は全体的に減衰比が小さいの に比較して 'Rigid' はより大きな減衰比を有している.こ のことは前後支持剛性と走行安定性の関係にそっている. 一方,提案する'SYD' においては、走行速度の増大と共に 減衰比が比例的に上昇しているのがわかる.数値解析によ れば、この上昇傾向は更なる走行速度増大までつづき、や がて'Rigid'に漸近していく傾向にある.これは、走行速度 の増大により、蛇行動周波数も増大し、これによりボルス タ・車体間のダンパが非常に固く作用し、等価的に'Rigid 'に一致した作用をすることに起因する.結果として、優



Fig. 10 Experimental results of damping ratio

れた定常曲線通過を実現しながら、高い臨界走行速度を有 する車両を実現することができる.

6. 結論

本報告では周波数依存剛性という考えのもとで操舵性台 車設計手法について述べ,提案理論によって設計された台 車模型実験によってその有効性を検証した.結果を以下に 示す.

(1)周波数領域で等価支持剛性を拡張して考えることにより、蛇行動臨界速度を高めつつ、理想的な曲線旋回を実現する支持機構とパラメータ設計手法を明らかにした。

(2) 提案する台車構造によって, 輪軸は急曲線においても 純粋転がり可能となり横圧, 脱線係数の大幅な低減が可能 である.

(3) ステアリング・ヨーダンパを備えた台車では,走行速度の増大により剛支持台車の蛇行動限界速度を有する.

今後は、過渡特性である緩和曲線通過性能の向上と、低 速走行時の安定性の向上を視野に入れたアクティブ操舵台 車への拡張をおこなう予定である.

参考文献

- Wickens, A. H., Steering and Dynamic Stability of Railway Vehicles, Vehicle System Dynamics, 5, (1975/76), 15.
- [2] Suda, Y., Anderson, R. J., Improvement of Dynamic Performance of Trucks with Longitudinally Unsymmetric Structures by Semi-Active Control for Rail Vehicles, JSME Int Journal, Series C, 37-3, (1994), 542-548.
- [3] 須田,道辻,藤井,岩佐,小峰:一軸台車スケールモ デル車両の走行安定性と曲線通過特性,日本機械学会機 械力学・計測制御部門講演会講演論文集,2002,9
- [4] Michitsuji, Y., et al., Evaluation of Running Motion with Simulation and Experimental Platform for Single-Axle Scale Model Vehicle. Proc of the International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, 2003.
- [5] 谷藤,道辻:鉄道車両の走行安定性判別のための一手 法と操舵性台車設計への応用,機械学会論文集,2000 年1月,第66巻641号C編,pp247-254