11802 鉄道車両ボギー角アクティブ操舵台車のアクチュエータ特性を考慮した走行性能の解析

Analysis of running performance considering actuator characteristics for Active-Bogie-Steering Bogie

○学 宮島 直希 学 小宮山 誠 正 道辻 洋平 (東京農工大)
 正 須田 義大 (東大 国際・産学共同研究センター)
 正 松本 陽 佐藤 安弘 正 大野 寛之 (交通安全環境研究所)
 谷本 益久 岸本 康史 (住友金属テクノロジー)
 佐藤 興志 正 中居 拓自 (住友金属)

Naoki Miyajima, Makoto Komiyama, Yohei Michitsuji; Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT)
 Yoshihiro SUDA; University of Tokyo, Center for Collaborative Research (CCR)
 Akira MATSUMOTO, Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO;
 National Traffic Safety & Environmental Laboratory (NTSEL)
 Masuhisa TANIMOTO, Yasusi KISHIMOTO; Sumitomo Metal Technology
 Yoshi SATO, Takuji NAKAI; 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) Bogie", is one of the methods to realize the compatibility between curving performance and hunting stability. ABS bogie has active steering mechanism only between car body and bogie frame, and bogie frame is steered by actuators toward "radial steering position", which realizes no "bogie angle shortage". In this paper, the actuator consists of AC servo controlled motor and mechanism with friction is modeled to realize ideal response and tracking ability for desired actuator force. The effective control which compensates actuator friction is proposed and is investigated in experiment. Moreover, calculation of hunting stability for ABS truck by using half body model was compared with other truck model.

Keywords: active control, steering bogie, roller rig, multi-body dynamics

1. 緒言

鉄道車両の台車において、直進安定性と曲線通過性能はトレードオフの関係にあり、これまでの台車設計指針は高速走行時の直進安定性を重視し、曲線通過性能を犠牲にする傾向がみられた。しかしながら、地下鉄のような急曲線の多数ある路線に、曲線通過性能の劣る車両を走らせると、前輪外軌側に著大な横圧が発生することになり、騒音の発生、車輪フランジ摩耗やコルゲーションの発生、また最悪の場合、脱線の可能性もある。

提案する「車体・台車間にアクチュエータを備えたボギー角アクティブ操舵台車^[1]」は、一車両二台車のそれぞれの台車枠をアクティブに操舵する方式であり、従来のヨードンバ位置にアクチュエータを置き換える簡易な改造で高性能な曲線通過を期待できることが1車体の数値解析と半車体の実験で確認されている^[2]。本報告では、アクチュエータの動特性実験から、未知パラメータを同定し、詳細なモデルを構築する。構築したモデルのマルチボディ・ダイナミクスシミュレーションによって、特にアクチュエータの有する摩擦特性が、安定性に及ぼす影響を検討したのでその結果を報告する。

2. アクチュエータのモデリング

2.1 アクチュエータの定式化

図1に操舵用アクチュエータをモデル化したものを示す。操舵アクチュエータは、電圧指令値に比例したトルクを発生するACサーボモータの回転運動をボールねじにより直動シリンダ変位に変換する機構により摩擦や内部慣性の影響を受ける。装置などで潤滑油の介在しないところなどで生じる乾性摩擦と潤滑油などの粘性の影響による粘性摩擦

を考える。そのような要素のモデル化をおこなうにあたり以下の式(1)を仮定する。

$$m\ddot{x} + f_c \cdot \text{sgn}(\dot{x}) + c_v \cdot \dot{x} + k \cdot x = k_c \cdot v_c \quad (1)$$

ここで、 x はアクチュエータ直動変位、 m は内部慣性質量、 f_c は慣性摩擦力、 c_v は粘性摩擦、 k はジグの弾性係数、 v_c は指令電圧、 k_c は指令電圧から発生力の校正係数である。

2.2 パラメータ同定

式(1)において乾性摩擦力 f_c 、粘性摩擦力 c_v 、ジグの弾性係数 k は未知なパラメータである。そこで、最小自乗推定による入出力を使って同定を行う。式(1)の内部慣性質量を小さいと考え残りのパラメータを、入出力時系列によって以下のようにもとめる。

$$\mathbf{p} = \mathbf{u} \cdot (\mathbf{x}^T \cdot (\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}^T)^{-1}) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{p} = [f_c/k_c \quad c_v/k_c \quad k/k_c]$, $\mathbf{x} = [\text{sgn}(\dot{x}) \quad \dot{x} \quad x]^T$
 $\mathbf{u} = v_c$ である。

Fig.1. Actuator model

実験により入力として指令電圧，出力として変位とその差分，それに校正係数の値が分かれば式(2)を使って未知パラメータを求めることができる。そこで，アクチュエータ単体の両端をジグで拘束した状態で，正弦波入力に対する応答から未知パラメータの同定を行った。このときのアクチュエータ直動変位と指令電圧を観測する。これらの値と式(2)によって，乾性摩擦力 $f_c = 1.54$ ，粘性摩擦 $c_v = 0.0389$ ，ジグの弾性係数 $k = 1.79$ と同定した。

3. 数値解析

3.1 解析手法

走行安定性を評価するために，限界速度は走行速度を徐々に上げていき，外乱による蛇行動振幅が収束せず，発散しない速度とする。また，ある速度一定下における輪軸の左右変位の波形より減衰比 λ を求めて評価することにした。減衰振動において第1山目のピークを x_1 ，同様にそれ以降を $x_2, x_3, x_4 \dots$ とすると，対数減衰率 λ は次のように表される。

$$\lambda = \log \frac{x_1}{x_3} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3)$$

式(3)を利用し，輪軸の左右変位に対して対数減衰率をとり減衰比の値から走行安定性解析を行う。

数値シミュレーションは，マルチボディ・ダイナミクス解析ソフト A'GEM^[3] に式(1)を反映させて使用した。車輪踏面形状は急曲線用円弧踏面^[4]を使用し，レールは 50kgN レールを使用する。

3.2 解析条件

直線走行中に車体台車間のアクチュエータから外乱を与え，強制的に輪軸を動かしその後の輪軸の左右変位を見て走行安定性を検証する。今後の台上試験による検証を視野に入れ，半車体モデルで解析を行う。走行安定性を比較するために以下の3つの台車で検討した。

- (a) 通常のヨーダンパ無しボルスタレス台車
- (b) ヨーダンパ付きボルスタレス台車
- (c) ボギー角アクティブ操舵台車

表1に今回数値解析に使用した各台車の摩擦パラメータを示す。走行速度は 10m/s から 10m/s ずつ走行速度を上げて 50m/s までの各台車の減衰比を求める。

4. 数値解析結果

表2に各台車の限界速度を示す。限界速度は通常のヨーダンパ無しボルスタレス台車が一番低く，ボギー角アクティブ操舵台車が一番高いことがわかる。

図2に走行速度 30m/s の時の各台車の前軸の左右変位を示す。通常のヨーダンパ無しボルスタレス台車の減衰が遅く，ボギー角アクティブ操舵台車の減衰が早いことがわかる。

図3に各台車の走行速度に対する減衰比を示す。通常のヨーダンパ無しボルスタレス台車やヨーダンパ付きボルスタレス台車は走行速度が上がると減衰比が直線的に下がることが分かり，限界速度も低いことが分かる。ボギー角アクティブ操舵台車は走行速度による減衰比が高く，限界速度が高い。

Tab.1. Friction parameters

	(a)	(b)	(c)
c_v :Viscous friction [kN/m·s]	0	66.0	0.0389
f_c :Dry friction [kN]	0	0	1.54

5. 結 言

本報告ではボギー角アクティブ操舵台車の高速走行安定性の解析手法について説明し，通常のヨーダンパ無しボルスタレス台車，ヨーダンパ付きボルスタレス台車と比較し高速走行安定性解析を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 操舵用アクチュエータを定式化し，アクチュエータの動特性実験から未知パラメータである乾性摩擦力と粘性摩擦係数を求めた。
- 2) ボギー角アクティブ操舵台車の非常に高い高速走行安定性を持つことが分かり，有効性を確認することが出来た。

今後は，台上試験装置を使って数値解析の妥当性を検証する予定である。

参考文献

- [1] 松本 他，ボギー角アクティブ操舵台車の研究開発（第2報），JRAIL2003,pp.115-118.
- [2] 小宮山 他，ボギー角アクティブ操舵台車の一車両モデルにおける操舵モーメント配分手法，日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集 (7)，pp37-38，2006
- [3] Anderson.R.J,A'GEM Rail Vehicle Dynamics Software Package Users Manual 1996.
- [4] 日本機械学会編，鉄道車両のダイナミクス，1994，pp.242，電気車研究会

Tab.2. Critical velocity

	(a)	(b)	(c)
Velocity [m/s]	40.2	56.1	73.3

Fig.2. Lateral displacement response

Fig.3. Calculation of hunting stability