スケールモデル軌条輪による逆踏面勾配車輪を有する 独立回転輪軸の走行安定性解析*

江尻 賢治^{*1}, 道辻 洋平^{*2}, 須田 義大^{*3}, 林 世彬^{*4}, 杉山 博之^{*5}

Running Stability Analysis of Independently Rotating Wheelset with Negative Tread Conicity Using Scaled-Model Roller Rig

Kenji EJIRI^{*1}, Yohei MICHITSUJI, Yoshihiro SUDA, Shihpin LIN and Hiroyuki SUGIYAMA

^{*1} Ibaraki Univ. Graduate School of Science and Engineering
Nakanarusawa-cho 4-12-1, Hitachi-shi, Ibaraki, 316-8511 Japan

In this study, the hunting characteristics of a new-type independently rotating wheelset (IRW) with negative tread conicity is verified experimentally. In order to improve curving performance of low-floor light rail vehicles (LRVs), the new-type IRW has been proposed. In previous study conducted by Prof. Suda et al., it has been demonstrated with numerical simulation that unstable hunting motion whose frequency decreases as the running velocity increases occurs in the new-type IRW. In addition, it has been proved that the hunting stability of the new-type IRW can be improved with longitudinal stiffness. In this investigation, experimental equipment with scaled-model roller rig is developed to clarify those characteristics of the new-type IRW. It is demonstrated that the new-type IRW used in experimental vehicle has same hunting characteristics of the simulation model. Furthermore, improvement of hunting stability of the new-type IRW with longitudinal stiffness is proven.

Key Words : Railway Vehicle, Independently Rotating Wheelset (IRW), Hunting Motion, Scaled-Model Roller Rig

1. 緒 言

近年、ライトレールトランジット (Light Rail Transit, LRT) が次世代型の都市交通システムとして注目されている⁽¹⁾。ライトレール車両 (Light Rail Vehicle, 以下 LRV) では、低床化を実現するために左右の車輪が独立に回転できる独立回転輪軸 (Independently Rotating Wheelset, 以下 IRW) が広く使用されている^{(2), (3)}。IRW は輪軸のように左右車輪を結合する車軸を必要としないため、LRV の低床化が容易となる。その反面、IRW は縦クリープ力による自己操舵性が十分発生しないため、急曲線走行時において脱線係数が高くなる傾向にある。

このような背景の中で、車輪踏面に発生する重力復元力を活用した、独立回転車輪方式の自己操舵台車として EEF 台車が Frederich により考案されている^{(4)~(6)}。EEF 台車は欧州の一部の LRV で過去に実用化されている⁽⁷⁾。しかしながら、IRW や輪軸に比べ複雑なリンク機構を必要とすることや、走行速度上昇時における振動の弊害もあり、現在の営業線での実施例はない。

重力復元力による自己操舵性を有しつつ、構造が簡易な新しい IRW として、須田らは逆踏面勾配を有する IRW を提案している⁽⁸⁾。これを以下では、逆踏面 IRW と称する。逆踏面 IRW の構造は車輪の踏面勾配が逆であることを除けば、従来の IRW と同様である。しかし、逆踏面 IRW では、車輪に発生する重力復元力が軌道中心から外向きに作用する。これにより、アタック角が生じると操舵モーメントが作用する。須田らはスケールモデルの

* 原稿受付 2013 年 9 月 1 日

^{*1} 正員, 茨城大学大学院理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

^{*2} 正員, 茨城大学 工学部

^{*3} 正員, フェロー, 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1)

^{*4} 正員, 東京大学生産技術研究所

^{*5} 正員, Department of Mechanical and Industrial Engineering, The University of Iowa (Iowa City 52242, United States)

E-mail: 12nd205a@hcs.ibaraki.ac.jp

曲線走行実験もおこなっており、逆踏面 IRW が優れた曲線通過性能を有していることを実験的に確認している。

杉山らは車輪に生じる微小な縦クリープ力の影響まで含めた、逆踏面 IRW の線形モデルを構築し、数値解析をおこなっている⁽⁹⁾。ここで得られた解析結果から、走行速度上昇に伴い振動数が減少するという、特徴的な蛇行動を引き起こすことが示唆されている。また、線形モデルの走行安定性解析によって、軸ばね前後支持剛性の向上により、臨界走行速度が向上することも明らかにしている。

優れた曲線通過性能を有する逆踏面 IRW の実用化を目指すうえでは、実験を含めた走行安定性のさらなる解明が必要である。そこで本稿では、まず従来の逆踏面 IRW 単体モデルから半車体モデルへの拡張をおこない、軸ばね前後支持剛性と臨界走行速度の関係を数値解析により明らかにする。また、スケールモデルによる軌条輪走行実験装置を開発し、数値解析と走行実験の両面から、逆踏面 IRW の臨界走行安定性と支持剛性の関連性を明らかにする。さらに、走行速度上昇に伴う蛇行動振動数の低下傾向についても、実験により確認したので、その内容について報告する。

記 号

本稿で使用する記号を以下にまとめる。

y_w : 輪軸の左右変位

z_w : 輪軸の上下変位

ϕ_w : 輪軸のロール角

ψ_w : 輪軸のヨー角

θ_r : 右車輪のピッチ角

θ_l : 左車輪のピッチ角

$\Delta\theta_w$: 車輪の左右ピッチ角差 ($\Delta\theta_w = \theta_r - \theta_l$)

y_t : 台車の左右変位

z_t : 台車の上下変位

ϕ_t : 台車のロール角

y_b : 車体の左右変位

z_b : 車体の上下変位

ϕ_b : 車体のロール角

m_w : 輪軸の質量

J_{wz} : 輪軸のヨー慣性モーメント

J_{wy} : 輪軸のピッチ慣性モーメント

m_t : 台車の質量

m_b : 車体の質量

J_{bx} : 車体のロール慣性モーメント

r_0 : 輪軸中立位置での車輪半径

γ_0 : 輪軸中立位置での踏面勾配

γ_1 : 踏面勾配の変化率

κ_{11} : 縦クリープ係数

κ_{22} : 横クリープ係数

P : 輪重

V : 走行速度

$2b$: 左右車輪/レール接触点間距離

$2b_x$: 軸ばね間の左右方向の距離

$2b_z$: コイルばね間の左右方向の距離

h_t : 台車重心からコイルばねの左右方向復元力作用点までの上下方向の距離

h_b : 車体重心からコイルばねの左右方向復元力作用点までの上下方向の距離

R_0 : 中立位置での軌条輪半径
 k_x : 軸ばねの前後支持剛性
 k_y : コイルばねの左右支持剛性
 k_z : コイルばねの上下支持剛性
 M_{anti} : 軌条輪上で作用する反操舵モーメント

2. 実験装置

2・1 軌条輪装置

逆踏面 IRW の走行安定性を解明するために、図 1 に示すような 1/10 スケールの実験装置を使用する。本実験装置はレールに相当する軌条輪装置と、半車体の実験車両より構成されている。図 2 に制作した軌条輪装置を示す。同図に示すように軌条輪装置では、左右軌条輪それぞれに回転用モータが軸受を介して取り付けられている。軌条輪の半径は 200[mm]であり、最大約 220[rpm]で回転可能である。よって、最大で約 4.6[m/s]での走行実験が可能である。これは、実車スケールで 52[km/h]に相当し、LRV の営業速度を十分に模擬できる^{(10), (11)}。

2・2 実験車両

実験車両は実車両の 1/10 スケール相当で製作されており、図 3 に示すように逆踏面 IRW、台車枠および半車体により構成されている。車体は前後、ピッチおよびヨー運動を拘束するために、図 1 に示すように 3 本の平行リンクにより軌条輪装置後部から支持されている。台車枠も同様の方法で車体後部から 3 本の平行リンクで支持されている。図 4 に示すように車体は台車枠から 4 個のコイルばねによって支持されている。逆踏面 IRW は台車枠の中心ピンに取り付けられており、ヨー方向に回転することができる。さらに、図 5 に示すように逆踏面 IRW のヨー方向の回転は、台車枠から 2 個の前後軸ばねによって支持されている。検証を容易にするために、逆踏面 IRW の左右および上下軸ばねは省略された構造になっている。実験車両の自由度は、車体および台車枠の左右変位、上下変位、ロール角、逆踏面 IRW のヨー角および左右車輪のピッチ角である。ここで、逆踏面 IRW の左右変位、上下変位およびロール角は台車枠のそれらと一致する。図 6 に示すように、逆踏面 IRW のヨー角は台車枠前方に設置されているレーザー変位センサにより、逆踏面 IRW に取り付けられた反射板の前後変位から算出できる。図 7 に示すように、逆踏面 IRW の左右変位は、軌条輪装置に固定されたレーザー変位センサにより台車枠の左右変位を計測することで得られる。

Fig. 1 1/10 scaled-model experimental equipment

Fig. 2 Roller rig test stand

Fig. 3 Composition of experimental vehicle

Fig. 4 Coil springs between body and bogie frame

Fig. 5 Primary springs between negative tread IRW and bogie frame

Fig. 6 Method for measurement of yaw angle of negative tread IRW

Fig. 7 Method for measurement of lateral displacement of negative tread IRW

3. 数値解析

3・1 実験車両の運動方程式

図8に実験車両のシミュレーションモデルを示す。また、表1はこのモデルの一般化座標を示している。走行速度 V で走行している逆踏面 IRW の線形運動方程式は、行列形式で以下のように記述できる⁽⁹⁾。

$$\mathbf{M}_w \ddot{\mathbf{x}}_w + \mathbf{C}_w \dot{\mathbf{x}}_w + \mathbf{K}_w \mathbf{x}_w = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここで、

$$\mathbf{x}_w = [y_w \quad \psi_w \quad \Delta\theta_w]^T, \quad \mathbf{M}_w = \text{diag}[m_w, J_{wz}, J_{wy}],$$

$$\mathbf{C}_w = \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 2\kappa_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 2\kappa_{11}b^2 & -2\kappa_{11}br_0 \\ 0 & -\kappa_{11}br_0 & \kappa_{11}r_0^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_w = \begin{bmatrix} \frac{2P\gamma_1}{r_0} & -2\kappa_{22} & 0 \\ -\frac{2\kappa_{11}b\gamma_0}{r_0} & 2Pb\gamma_0 & 0 \\ \kappa_{11}\gamma_0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

である。この運動方程式を拡張することにより、実験車両の運動方程式を導出する。表1より実験車両は y_w , ψ_w , $\Delta\theta_w$, y_b , z_b および ϕ_b に関する 6 自由度で表される。従属変数 z_w および ϕ_w は近似的に

$$z_w = 0 \quad (2)$$

$$\phi_w = -\frac{\gamma_0}{b} y_w \quad (3)$$

となる。軌条輪上ではレール上とは異なり、輪軸には以下の反操舵モーメントが作用する⁽¹²⁾。

$$M_{anti} = \frac{2Pb^2}{R_0 + r_0} \psi_w \quad (4)$$

これより、実験車両の運動方程式は以下のように導出できる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (5)$$

ここで、

$$\mathbf{x} = [y_w \quad \psi_w \quad \Delta\theta_w \quad y_b \quad z_b \quad \phi_b]^T, \quad \mathbf{M} = \text{diag}[m_r, J_{wz}, J_{wy}, m_b, m_b, J_{bx}],$$

Fig. 8 Simulation model of experimental vehicle

Table 1 Generalized coordinates of experimental vehicle

	Lateral	Vertical	Roll	Pitch	Yaw
Body	y_b	z_b	ϕ_b	-	-
Bogie frame	$y_t=y_w$	$z_t(y_t, \psi_w)=z_w(y_w, \psi_w)$	$\phi_t(y_t, \psi_w)=\phi_w(y_w, \psi_w)$	-	-
IRW				$\Delta\theta_w$	ψ_w

$$\mathbf{C} = \frac{1}{V} \begin{bmatrix} 2\kappa_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 2\kappa_{11}b^2 & -2\kappa_{11}br_0 \\ 0 & -\kappa_{11}br_0 & \kappa_{11}r_0^2 \\ \hline \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & 0 & K_{14} & 0 & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{41} & 0 & 0 & K_{44} & 0 & K_{46} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{55} & 0 \\ K_{61} & 0 & 0 & K_{64} & 0 & K_{66} \end{bmatrix}$$

となり、 $\mathbf{K}$ の要素は以下ようになる。

$$K_{11} = 2P\gamma_1 + k_y \left(1 + \frac{h_t\gamma_0}{b} \right)^2 + 2k_z \frac{b_z^2\gamma_0^2}{b^2}, \quad K_{12} = -2\kappa_{22}, \quad K_{14} = K_{41} = -k_y \left(1 + \frac{h_t\gamma_0}{b} \right),$$

$$K_{16} = K_{61} = -k_y h_b \left(1 + \frac{h_t\gamma_0}{b} \right) + \frac{2k_z b_z^2 \gamma_0}{b}, \quad K_{21} = -\frac{2\kappa_{11} b \gamma_0}{r_0}, \quad K_{22} = 2Pb \left(\gamma_0 - \frac{b}{R_0 + r_0} \right) + 2k_x b_x^2,$$

$$K_{31} = \kappa_{11}\gamma_0, \quad K_{44} = k_y, \quad K_{46} = K_{64} = k_y h_b, \quad K_{55} = 2k_z, \quad K_{66} = k_y h_b^2 + 2k_z b_z^2$$

3・2 実験車両の数値解析

実験車両における蛇行動特性を検証するために、式(5)について固有値解析をおこなう。表2に解析に使用した実験車両の諸元を示す。図9は固有値解析より算出した走行速度と軸ばねの前後支持剛性に対する蛇行動振動数の関係である。同図より、走行速度の増加に伴い蛇行動振動数が減少する性質を確認できる。また、図中の破線は車両の蛇行動に関するモードの固有値の実部の正負が切り替わる点を結んだものであり、振動数がこの線よ

りも低いとき車両が不安定状態であることを示している．同図から，軸ばねの前後支持剛性の増加に伴い不安定化する走行速度（臨界走行速度）が向上することを確認できる．

4. 走行実験

4・1 実験方法

図 9 に示す逆踏面 IRW の蛇行動特性を走行実験により検証する．測定項目は以下の 2 項目である．

- 項目 1. 蛇行動振動数の走行速度上昇に伴う変化
- 項目 2. 前後支持剛性の増加に伴う臨界走行速度の変化

走行実験は $k_x=300, 460, 680$ [N/m] の 3 種類の軸ばねを使用して実施する．

項目 1 の実験では，実験車両の定常走行時に逆踏面 IRW に外乱として初期ヨ一角を与えることで，自由振動波

Table 2 Parameters of the experimental equipment

Symbols	Values	Units
m_t, m_b	5.41, 15.7	kg
J_{wz}, J_{wy}, J_{bx}	0.0209, 0.00226, 0.331	kg·m ²
r_0	0.0509	m
γ_0	0.351	-
γ_1	18.0	m ⁻¹
R_0	0.200	m
b, b_x, b_z	0.0745, 0.113, 0.155	m
h_t, h_b	-0.0134, -0.0398	m
k_y, k_z	176400, 29400	N/m
P	106	N
κ_{11}, κ_{22}	39.1, 35.5	kN

Fig. 9 Characteristics of hunting frequency of experimental vehicle

形を計測する．その結果より蛇行動周期 T_w を読み取り，その逆数として蛇行動振動数 f_w を算出する．蛇行動振動数計測方法を示す例として，図 10 に $k_x=680[\text{N/m}]$ ， $V=0.5[\text{m/s}]$ で，輪軸に初期ヨー角を与えた場合の時系列波形を示す．この例では， $f_w=3.85[\text{Hz}]$ と算出される．このようにして，複数の異なる走行速度で振動数を算出する．

項目 2 に関して，逆踏面 IRW の左右変位が $\pm 5[\text{mm}]$ （アタック角 $0[\text{deg}]$ 時のフランジ遊間）を超える時に実験車両が不安定化していると判断し，そのときの走行速度を臨界走行速度と定義している．本実験装置では図 11 のように振幅 $0.15[\text{mm}]$ 程度のわずかな通り狂いが軌条輪に発生している．この加振により，実験車両は臨界走行速度を超えると，不安定化することが予想される．このことから，走行実験では数値解析において十分に安定となる走行速度から実験を開始し，約 10 秒ごとに走行速度を $0.1[\text{m/s}]$ 上昇させていく方法で実施する．各軸ばねに関して 10 回臨界走行速度を計測し，その平均を実験結果とする．図 12 はこの実験の 1 例として， $k_x=680[\text{N/m}]$ の軸ばねを使用した走行実験時の逆踏面 IRW の左右変位 y_w の時系列波形と走行速度 V の指令値 V_d の変化を示したものである．この例では $V_d=3.2[\text{m/s}]$ が臨界走行速度となる．なお， V_d は指令値であるが，指令後約 1 秒で $V_d=V$ となることを確認している．

Fig. 10 An example of measurement of hunting frequency

Fig. 11 An example of alignment irregularity on roller rig ($V=3$ [m/s])

Fig. 12 An example of running experiment for critical velocity

4・2 逆踏面 IRW の蛇行動振動数

図 13 は蛇行動振動数の数値解析結果と走行実験結果を比較したものである。なお、走行速度 0[m/s]での振動数は非走行時の重力復元力と軸ばねによる単振動を測定した結果である。図 13 より、同一前後支持剛性において走行速度が上昇するにつれ振動数が低下していく傾向が確認でき、数値解析結果ともよく一致している。実験では不安定となる走行速度においても振動数の計測を試みているが、フランジ遊間による左右変位量の制限によって、

周期を読み取ることが困難であった。しかしながら、安定状態における計測結果から、不安定領域でも数値解析と同様の実験結果になることが予想される。

4・3 逆踏面 IRW の臨界走行速度

図 14 は数値解析により得られた臨界走行速度と、走行実験の臨界走行速度の平均を比較したものである。数値解析の結果はシミュレーションモデルの固有値の実部がすべて負となる走行速度を安定領域、それ以外を不安定領域と定義している。走行実験で計測した臨界走行速度は前後支持剛性の増加に伴い増加している。さらに走行実験結果は数値解析結果とほぼ一致している。この結果は逆踏面 IRW の蛇行動の不安定化に対する、前後支持剛性の増加の有効性を示している。一方で、走行実験結果は前後支持剛性が小さいときに、臨界走行速度に大きなばらつきがみられる。これは支持機構の前後支持剛性に対して、乾性摩擦の影響が大きいため、蛇行動を開始する走行速度にばらつきが生じることが原因として考えられる。

Fig. 13 Comparison of the natural frequencies between numerical simulations and experimental results

Fig. 14 Comparison of critical velocity between numerical simulation and experimental results

5. 結 言

本報では、これまで実験的に未解明であった、逆踏面勾配独立回転輪軸（逆踏面 IRW）の蛇行動特性および走行安定性に対する軸ばね前後支持剛性について分析した内容を述べた。検証のために、軌条輪と半車体の実験車両からなる、1/10 スケールの軌条輪走行実験装置を製作し、数値解析とあわせて傾向をまとめた。得られた知見を以下に示す。

1. 逆踏面 IRW の輪軸単体モデルを 6 自由度半車体モデルに拡張し、固有値解析を実施した。その結果、先行研究において解析された逆踏面 IRW 単体モデルと同様に、走行速度上昇に伴い振動数が低下しながら不安定化する蛇行動が確認された。
2. 数値解析と走行実験の両面から、逆踏面 IRW の蛇行動振動数と走行速度の関連性を明らかにした。具体的には、軌条輪走行実験を実施し、走行速度上昇に伴い逆踏面 IRW の蛇行動振動数が減少する傾向を確認した。また、支持剛性の異なる 3 種類の場合で実験をおこなったが、走行実験で得られた振動数は数値解析結果とおおむね一致していることを確認した。この結果は、逆踏面 IRW が走行速度上昇に伴い振動数が増加する従来型の輪軸とは異なる蛇行動特性を有することを示している。
3. 数値解析と走行実験の両面から、逆踏面 IRW の臨界走行速度と支持剛性の関連性を明らかにした。走行実験より、軸ばねの前後支持剛性の増加により、逆踏面 IRW の走行安定性が向上することを示した。これより、逆踏面 IRW の蛇行動特性は従来型の輪軸と異なるものの、両輪軸とも前後支持剛性の増加が走行安定性向上に有効であることが明らかとなった。また、数値解析結果と実験結果の傾向はおおむね一致しているため、提案する数値解析モデルを活用し、所定の臨界走行速度を実現する車両パラメータ設計手法への応用が可能である。

文 献

- (1) Yoshihiro, S., "Importance of Low Floor Vehicle for LRT and Future", *Rolling Stock and Technology*, Vol. 3-9, No.26 (1997), pp.5-12.
 - (2) Goodall, R., and Li, H., "Solid Axle and Independently-Rotating Railway Wheelsets –A Control Engineering Assessment of Stability", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 33 (2000), pp.57-67.
 - (3) 松本陽, 水間毅, "新しい軌道系交通システムの動向とその技術", 計測と制御, Vol. 45, No. 9 (2006), pp. 791-795.
 - (4) Frederich, F., "Dynamics of a Bogie with Independent Wheels", *Supplement to Vehicle System Dynamics*, Vol. 19 (1989), pp. 217-232.
 - (5) Frederich, F., "Possibility as Yet Unknown or Unused Regarding the Wheel/Rail Tracing Mechanism", *Rail International*, (1985), pp. 217-232.
 - (6) 道辻洋平, 須田義大, "スケールモデル実験装置を用いた独立回転車輪パワーステアリング台車の走行性能", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 71, No. 703 (2005), pp. 103-110.
 - (7) 須田義大, "台車の技術 最近の動向と課題", 鉄道車両と技術, No. 121 (2006), pp. 2-6.
 - (8) Yoshihiro, S., Wenjun, W., Minoru, N., Shihpin, L., and Yohei, M., "Self-Steering Ability of the Proposed New Concept of Independently Rotating Wheelset using Inverse Tread Conicity", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 50 (2012), pp.291-302.
 - (9) 小松祐太, 杉山博之, 道辻洋平, 須田義大, "逆踏面勾配車輪を有する独立回転輪軸の走行安定性に関する研究", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 771 (2010), pp. 331-339.
 - (10) 河野浩幸, 須田義大, 山口正博, 高崎勝明, 弘中陽平, 津田和則, "LRT 車両の小曲線走行性能予測とスケールモデル試験", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 724 (2006), pp. 205-210.
 - (11) Jan, K., Petr, B., "Curving Behaviour of 2-Axle Bogie with Independently Rotating Wheels – Simulations and Scaled Roller Rig Tests", *Proceedings of IAVSD2013*, paper 17.1(2013).
 - (12) Rao, V. D., "Lateral Stability Simulation of a Rail Truck on Roller Rig", *JSME International Journal Series C*, Vol. 45, No. 1 (2002), pp. 168-175.
-