LRT 車両の小曲線走行性能予測とスケールモデル試験*

河野 浩幸^{*1}, 須田 義大^{*2}, 山口 正博^{*1}
高崎 勝明^{*3}, 弘中 陽平^{*4}, 津田 和則^{*5}

Curving Simulation and Scaled Model Test for LRT Vehicles

Hiroyuki KONO^{*6}, Yoshihiro SUDA, Masahiro YAMAGUCHI,
Katsuaki TAKASAKI, Youhei HIRONAKA and Kazunori TSUDA^{*6} Hiroshima Research and Development Center, Mitsubishi Heavy Industries, LTD.,
1-1-1 Itozaki-Minami, Mihara-shi, Hiroshima, 729-0393 Japan

Recently, the Light Rail Transit (LRT) is expected to become high-performance transit systems in cities. In the LRT systems, there are a lot of curves of small radius (up to 100 mR) because the LRT tracks lay on the automobile roads together. So, the requirement of the vehicle performance is expected not only running stability but also curving performance. In this research, in order to develop new LRT vehicles and clear the running performance, the curving simulation and the scaled model test are carried out. The curving performance of the LRT vehicles was calculated by the improved multi-body dynamics program A'GEM. The 1/5 scaled model test equipment of the LRT vehicles was developed using three roller-rigs. This test equipment is able to simulate the relative angles of body/body and body/bogie and bogie/wheel-sets by combining three roller-rigs. The advantage of it is to simulate the curving behavior of LRT vehicles.

Key Words: Railway, Rolling Stock, Light Rail Transit, Light Rail Vehicle, Roller Rig, Curving Performance Simulation

1. 緒 言

近年, 地球への環境負荷低減等の観点から, 都市間長距離輸送における高速鉄道, 都市内短距離輸送における LRT(Light Rail Transit)が注目されている⁽¹⁾⁽²⁾. 特に LRT システムに関しては, 環境負荷低減だけでなく, バリアフリーや市街地活性化などの面からも世界各都市への導入が進んでいる. LRT 路線では道路との併用・併設軌道になることから, 路線内に小曲線部(R100m 以下)が多数存在し, 車両性能として走行安定性だけでなく, 小曲線通過性も非常に重要視される⁽³⁾⁽⁴⁾. そこで, 種々形式の LRT 車両が開発・提案されているが, その運動特性は明らかにされていないのが実情である.

本研究では, LRT 車両の開発及び運動特性を明らかにするため, まず, 小曲線走行性能予測とスケールモデル試験による解析モデル及び解析結果の妥当性検証を実施した. 解析には, マルチボディ・ダイナミクス・プログラム A'GEM⁽⁵⁾を改良して用いた. また, スケールモデル試験では, 小曲線走行模擬試験が可能な 1/5 スケールの車両回転試験装置を開発して用いた. 本試験装置は, 3 台の台車回転試験装置⁽⁶⁾⁽⁷⁾を組み合わせ,

車体/車体間や車体/台車間, 台車/輪軸間のボギー角を表現できるように構成し, 車両の曲線走行状態を模擬できるようにした.

2. 小曲線走行性能予測

2.1 解析モデル 図1に LRT 車両として広く採用されている連接車両形式の車両構成を示す. 解析モデルは, 車体, ボルスタ, 台車枠, 輪軸などの 14 剛体要素で構成し, 考慮した自由度は表1の通り計 36 自由度とした. シミュレーションには, マルチボディ・ダイナミクス・プログラム A'GEM をベースに, 編成車両の取り扱いができるように改良して用いた.

Fig.1 Configuration of LRT Vehicle

Table 1 DOF of Vehicle Model of Simulation

Description	Quantity	Lateral	Yawing	Rolling
Body	2	○	○	○
Bolster	3	○	○	○
Truck Frame	3	○	○	○
Wheelset	6	○	○	—

* 原稿受付 2006 年 6 月 12 日.

^{*1} 正員, 三菱重工業(株)広島研究所(☎729-0393 三原市糸崎南 1-1-1).^{*2} 正員, 東京大学国際・産学共同センター生産技術研究所(☎153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1).^{*3} 正員, MHI ソリューションテクノロジーズ(株)(☎729-0393 三原市糸崎南 1-1-1).^{*4} MHI ソリューションテクノロジーズ(株).^{*5} 正員, (株)リョーセンエンジニアズ(☎733-0036 広島市西区観音新町 1-20-24).

E-mail: hiroyuki_kono@mhi.co.jp

図2に解析モデルの詳細図を示す。2車体、3台車の編成形式であり、中間に、連接台車を有する連接車両モデルである。

連接部は、車体/車体間をピン結合とし、Z軸まわりの回転をフリー、X軸まわりの回転を拘束してモデル化した。また、台車も小曲線走行が必要なLRT車両を想定して、本形式では、ボルスタ付き台車とし、車体/台車間の結合もZ軸まわりの回転をフリーとしてモデル化した。

(a) Side View of Vehicle Model

(b) A-A View of Vehicle Model

(c) Over View of Truck Model

Fig.2 Articulated Vehicle Model for Simulation

図3に車輪/レールプロファイルのモデル図を示す。車輪とレールに関しても、LRT車両の諸元を想定し、車輪は円錐踏面形状、レールは50Nレール形状（タイププレート角1/40）とした。

また、車輪とレールの接触モデルについては、Kalkerの非線形クリープカモデルとし、FASTSIMアルゴリズム⁽⁶⁾を用いた。

(a) Wheel Profile

(b) Rail Profile

Fig.3 Model of Wheel and Rail Profile

2.2 解析条件 解析の路線条件は、図4に示すように、直線から緩和曲線を通して定常曲線を走行する条件とした。小曲線走行性能を評価する指標として、定常曲線通過時の車輪横圧やアタック角とした。

解析車両モデルの諸元値および曲線半径、走行速度などの解析条件は、後述のスケールモデル試験の章で説明する。また、走行速度およびカント量は、均衡条件として設定した。

Fig.4 Geometrical Condition of Track for Simulation

3. スケールモデル試験装置の概要

3・1 スケールモデル試験装置の機能 開発したスケールモデル試験装置の外観写真を図5に示す。本試験装置の主な機能は以下の通りであり、最大の特徴は小曲線走行状態を模擬できることである。

- ・曲線通過性の試験が可能

最小模擬曲線半径は R4m (実機換算値: R20m)

- ・直線走行安定性の試験が可能

最高模擬速度は 63km/h (実機換算値: 140km/h)

- ・LRT 車両を想定した試験装置であり、各種連接車両モデルや単一車両モデルの試験が可能

- ・スケールは 1/5

- ・相似則は次元解析より以下のようにした

$$l' = \frac{1}{5} \cdot l, \quad t' = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot t, \quad v' = \frac{1}{\sqrt{5}} \cdot v$$

ここで、 l' : 模型の寸法、 l : 原型の寸法

t' : 模型の時間、 t : 原型の時間

v' : 模型の速度、 v : 原型の速度

また、本スケールモデル試験装置の構成は、大別して、①試験台、②車両モデル、③試験計測システムから構成される。次に、それぞれについて説明する。

Fig.5 Photo of 1/5 Scaled Model Test Equipment

3・2 スケールモデル試験台 表2に試験台の基本諸元を示す。本諸元は LRT 車両を想定して決められた。特に、車両運動への軌条輪の影響を小さくするため、軌条輪径は、車輪径の2倍以上に設計した。

試験台の全体構造を図6に示す。本試験装置の最大

Table 2 Specification of Test Equipment (Roller Rig)

Description	Value	Real Equivalent Value
Max. Speed	63km/h	140km/h
Min.R of Curve	4m	20m
Gauge	287mm	1435mm
Wheel Base	360mm	1800mm
Roller Rig Diameter	300mm	—

の特徴である車両の曲線走行状態を模擬するためには、各軌条輪を、模擬曲線軌道の接線上に位置するように可動させる必要があった。これを実現させるため、まず、本試験台の構成を三層構造とすることにした。三層とは、下部から軌条輪軸をのせる軌条輪台 Bed(C)、それを二軸(1台車分)のせた軌条輪自転台 Bed(B)、そして Bed(B)をのせた軌条輪公転台 Bed(A)で構成される。また、各 Bed の動きをステッピングモータにより同時に位置制御することによって、各軌条輪を模擬曲線の接線上に正確に可動させる。この時、各 Bed を次のように可動させる。

軌条輪公転台 Bed(A)上にある軌条輪自転台 Bed(B)を図中の Point(O)を中心に公転運動 Motion(A) (車体/車体間相対角を表現)させ、同時に軌条輪自転台 Bed(B)を Bed(A)上で自転運動 Motion(B) (車体/台車間相対角を表現)させる。この時、軌条輪台 Bed(C)を Bed(B)上でそれぞれ回転運動 Motion(C) (台車/輪軸間相対角を表現)させる。

この時、曲線中での内外軌レールに生じる距離差は、左右の各軌条輪に配置された駆動用モータにより、左右の軌条輪回転に速度差を生じさせて模擬した。

以上のように、各 Bed の平面可動と軌条輪回転を連動させて同時制御することにより、車両の曲線走行状態を模擬することを可能とした。

Fig.6 Outline and Photo of Test Equipment (Roller Rig)

3・3 スケールモデル車両 本試験装置の供試車両モデルとして、単一車両モデルおよび連接車両モデルを適用可能であるが、本試験では単一車両モデルおよび2車体連接車両モデルを用意した。本報では連接車両モデルについて説明する。

本研究に用いた連接車両モデルは、中間台車に連接台車を有する2車体、3台車の編成形式であり、外観を図7、主要諸元を表3に示す。

軸ばねおよび枕ばねには、実車両を想定して、それぞれ防振ゴムとコイルばねを用いて、スケールモデルでの所定の寸法とばね特性が得られるよう工夫した。

Fig.7 Outline and Photo of scaled Vehicle Model

Table 3 Specification of Scaled Model Vehicle

Description	Value
Scale	1/5
Length	5.6m
Weight	308kg
Axle - Load	51kg
Wheel Diameter	132mm
Gauge	287mm
Wheel Base	360mm
Truck Base	2m

3・4 試験計測システム 計測項目として、横圧、輪重、車輪アタック角、車輪左右変位、車輪／軌条輪接触状態の可視化ができるようにした。計測装置の概略図を図8に示す。

横圧、輪重の測定は試験台側で実施する事とし、軌条輪に歪ゲージを貼り付け、測定した。軌条輪周方向90°毎にゲージを貼り付け、軌条輪1回転に測定値を4回計測できるようにした(間欠法)⁹⁾。そのため、軌条輪設計では横圧、輪重に対して歪検出できるように配慮して形状設計した。

車輪のアタック角と左右変位については、各軌条輪に2台の非接触変位計をセットし、車輪前後位置にて車輪(軸箱体で計測)と軌条輪の相対変位を測定し、それぞれ算出して求めた。

また、車輪／軌条輪の可視化については接触状態を確認するため、CCDカメラを軌条輪台に設置し、直線状態、曲線状態でも常に同じポイントを撮影できるように軌条輪台に取り付けた。

Fig.8 Outline and Method of Measurement System

4. スケールモデル試験

4.1 試験条件 本試験装置では、走行速度および曲線半径を種々組み合わせた条件での試験が可能であるが、今回は表5のように試験条件を設定した。補足として、対応する実機換算した値を表6にまとめる。

設定した試験条件の曲線半径に対する走行速度は、それぞれ均衡速度を想定した値となっており、カントと走行速度が均衡している状態を模擬して試験した。

Table 5 Condition of Scaled Model Test

Test Case	Radius of Curve (m)	Speed (km/h)
Case 1	4	4.5
Case 2	10	8.9
Case 3	20	13.4
Case 4	40	22.4

Table 6 Real Equivalent Value of Scaled Test Condition

Test Case	Radius of Curve (m)	Speed (km/h)
Case 1	20	10
Case 2	50	20
Case 3	100	30
Case 4	200	50

Value is 1/1 scale d equivalent

4.2 スケールモデル試験結果の概要 本試験装置を用いて、連接車両モデルの曲線走行状態のスケールモデル試験を実施した。小曲線走行模擬試験中の試験状況を図9に示す。編成車両の曲線走行中に発生する車体／車体間および車体／台車間、台車／輪軸間にそれぞれ相対角が生じている状態になっていることがわかる。また、最小曲線条件での試験結果の一部を図10に示す。

Fig.9 Photo of Curving Simulation Test

Fig.10 Results of Experiment (R=4m, V= 4.5km/h)

5. 解析結果と試験結果の比較

解析結果とスケールモデル試験結果について、横圧および車輪アタック角について比較した。

まず、横圧に関して図11に示す。同図は先頭台車の第1軸、第2軸の外軌側車輪の横圧を示している。第1軸の外軌横圧は曲線半径が小さくなるに従い増大するが、第2軸外軌横圧は比較的小さいものの、最小曲線条件で増大する傾向にある。これは特徴的であり、最小曲線条件で、第2軸の内軌側車輪がフランジ接触を起こしていることに起因するものである。

また、横圧に関して、解析結果とスケールモデル試験結果は、定性的にも定量的にもよく対応することが確認できた。

Fig.11 Results of Calculation and Experiment (Lateral Force)

次に、図12に先頭台車（第1軸、第2軸）、中間台車（第3軸、第4軸）の車輪アタック角について、解析結果とスケールモデル試験結果を比較した結果を示す。

アタック角について、第1軸に関しては、R20m（実機換算値 R100m）以下になると、急激に増大する傾向にあるが、第2軸では小さい状態を保ちつつ、最小曲線条件でプラス方向に若干増大する傾向を示す。

また、中間台車の第3軸と第4軸のアタック角を、先頭台車と比較すると、第1軸と第2軸の関係とほぼ同様な傾向にあるが、R20m（実機換算値 R100m）以下になると、アタック角が若干プラス側になる傾向となっており、最小曲線条件で、先頭台車の第1軸アタックが他軸と比べて、最大で、厳しい状態になっていることがわかる。

車輪アタック角についても、解析結果とスケールモデル試験結果を比較し、よく対応する結果が得られることを確認できた。

(a) Front Bogie (Axle of No.1 and No.2)

(b) Middle Bogie (Axle of No.3 and No.4)

Fig.12 Results of Calculation and Experiment
(Angle of Attack)

6. 結 言

小曲線走行が多い LRT 車両を対象に取り組んだ本研究により、得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 3 台の台車回転試験装置と三層の軌条輪支持機構を組み合わせることによって、連接車両などの車体間相対角や車体/台車間のボギー角、台車/輪軸間の相対角をそれぞれ表現可能な 1/5 スケールモデル試験装置を開発した。最小 4mR（実機換算値 20mR）までの小曲線走行模擬試験が可能。
- (2) マルチボディ・ダイナミクス・プログラム A'GEM をベースに、連接車両モデルを取り扱えるように改良し、LRT 車両の運動解析モデルを構築した。そして、各種条件での小曲線走行性能解析を実施し、その運動解析結果について考察した。
- (3) 上記スケールモデル試験結果および小曲線走行性能解析結果を比較した結果、両者がよく対応することを確認し、解析モデルおよび解析結果の妥当性を検証できた。
- (4) 以上より、種々形式の LRT 車両の運動特性について、理論的・実験的に詳細検討していくためのベースを構築することができた。

参考文献

- (1) Suda, Y., Importance of Low Floor Vehicle for LRT and Future, Rolling Stock and Technology, Vol.3-9, No.26,(1997),pp.5-12.
- (2) Satoda, K., Trend of Low Floor Tram in Europe (in Japanese), The Railway Pictorial, Vol.44-7, No.593, (1994), 19-31.
- (3) Kono, H. and Suda, Y. et al., Curving Performance of LRT Vehicle, Proceedings of the 8th Transportation and Logistics Conference, No.99-59, (1999), pp.211-214.
- (4) Kono, H. and Suda, Y. et al., Curving Performance Evaluation of Railway Vehicle by Multi-Body Dynamics, Proceedings of the 11th Transportation and Logistics Conference, No.2-50,(2002),pp.193-194.
- (5) R.J.Anderson, A'GEM Rail Vehicle Dynamics Software Package Users Manual, (1994).
- (6) Miyamoto, M. and Suda, Y., Introduction to Vehicle Dynamics -Roller Rig for Vehicle Test- (in Japanese), Rolling Stock and Technology, Vol.3-2, No.19, (1997), pp.39-44.
- (7) Matsumoto, A. et al., Roller Rig for Bogie (in Japanese), Railway Electric Rolling Stocks, Vol.42, No.11, (1990),pp.24-27.
- (8) J.J.Kalker, A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact, Vehicle System Dynamics 11, (1982), pp.1-13.
- (9) Railway Technical Research Institute ed., Manual and Descriptions of Speed Up Test for Conventional Railway (in Japanese), Ken-yusha, Inc., (1993), pp.67-77.