

1601 地震時の脱線メカニズムと脱線防止ガード機能に関する研究 (1/5 模型加振試験)

正 [機] ○足立 昌仁 (JR 東海) 正 [機] 森村 勉 (JR 東海)
正 [電] 石川 栄 (JR 東海) 正 [機] 深田 淳司 (JR 東海)
正 [機] 曄道 佳明 (上智大学)

1/5 model experiment on the derailment mechanism and effect of anti-derailing guard rail on large earthquakes

Masahito ADACHI, JR Central 1545-33 Ohyama, Komaki-shi, Aichi
Tsutomu MORIMURA, JR Central
Sakae ISHIKAWA, JR Central
Junji FUKADA, JR Central
Yoshiaki TERUMICHI, Sophia Univ.

The purpose of this study is to clear the derailment mechanism and effect of anti-derailing guard rail on large earthquakes because the Shinkansen train was derailed by the Mid Niigata Prefecture Earthquake in October 2004. At first, in 2005, we have designed the 1/5 scale vehicle-track model and excitation device and have introduced these devices in Komaki of JR-Central and until now we have conducted the 5000 cases of excitation experiments in order to complement the result of the full-scale bogie excitation test. As a result, we conclude that the derailment occurred in the excitation frequency range of 0.5 – 2.0Hz (full-scale corresponding value) is the rocking derailment and that the anti-derailing guard is effective for the rocking derailment.

Keywords: Earthquakes, Rocking Derailment, Model Experiment, Anti-derailing Guard Rail, Railway, Seismic Motion, Forced Vibration

1. はじめに

平成 16 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震により、上越新幹線の浦佐～長岡間を走行中のとき 325 号が、ロッキング脱線により脱線するという事象が発生した。この事故を受け、平成 16 年 10 月 25 日に国土交通省鉄道局が設置した「新幹線脱線対策協議会」に JR 東海も参画し施設面、車両面で当面とり得る対策の可能性等について検討を進めてきた。具体的には、実験、解析及び試験敷設を実施し、その結果に基づき、地震時の脱線・逸脱防止に有効であり、保守上においても支障のない対策を確立した¹⁾。

実車振動台試験については、文献 2) により報告をしているが、試験装置の制約等から、更に加振振幅を大きくしたり、多くの試験ケースで実験を行うことは困難な場合がある。このため本研究では、実物車両の特性を極力模擬した 1/5 模型を製作し、様々な地震波や正弦波による加振試験を実施した。その結果、脱線メカニズムと脱線防止ガード機能に関する新たな知見が得られたため、その報告を行うものである。

2. 1/5 模型加振試験装置

2.1 試験装置構成

図 1 に 1/5 模型加振試験装置について示す。試験装置

は、加振装置、模型軌道、模型車両の 3 つで構成される。模型は 1/5 スケールの物理的相似模型とし、相似則については表 1 に準じる。

2.2 加振装置

加振装置は、加振台、土台、油圧アクチュエータと油圧ユニットで構成される。加振台は、油圧アクチュエータと結合され、土台上で、左右方向(まくらぎ方向)に最大±100mm ストロークすることが可能である。加振周波数については、1.1～4.4Hz(実物換算値で 0.5～2Hz)の範囲内で実施する。本試験装置では、最大振幅は、例えば 1.1Hz(実車換算 0.5Hz)などの低い周波数では±100mm まで加振可能であり、周波数 4.2Hz(実物換算 1.9Hz)では 38mm(約 2700gal)で加振可能である。

2.3 模型軌道

模型軌道は、軌道本体と、レール及びレール固定部、脱線防止ガード及び取付け部にて構成される。レール、脱線防止ガードとも、軌道本体から取外しが可能な構成としている。軌道本体部分は、加振台とボルト結合にて固定され、加振時は加振台と同一の動きとなる。但し、バラスト軌道相当を模擬可能とするため、加振台に対し

て軌道本体が横方向にスライド可能なようにリニアベアリングを採用している。また、軌道本体が加振台に対して横方向にスライドする場合には摩擦力を付与可能な構成としている。レール形状は、60kg レールの断面形状をそのまま採用している。また、レールに大きい横圧が作用する場合のレール小返りを模擬するため、レール直下にゴムを挿入している。小返り抵抗については、実台車振動台試験結果²⁾をもとに設定している。

2.4 模型車両

模型車両については、模型車両は、図1に示すように、700系半車体1台車模型とし、車体(ばね上)、台車枠(ばね間)、輪軸(ばね下)の三つから構成される。車両の質量・慣性半径は、表1の相似則に極力準じた特性としている。剛性・減衰についても、表1の相似則に極力準じた特性となるようにばね・ダンパを構成している。ただし、実車の車体支持空気ばねやオイルダンパは、変位や速度が大きくなるにつれて非線形特性を示すが、模型では、本スケールで減衰力の非線形特性を模擬することが困難である。したがって、線形特性を模擬可能なばね・ダンパを製作した。ばねはコイルばねを採用し、ダンパは、フリクションの影響が極力小さくなるように低摩擦シールを採用し、要素試験による試行錯誤の結果、最適な特性を実現することができた。

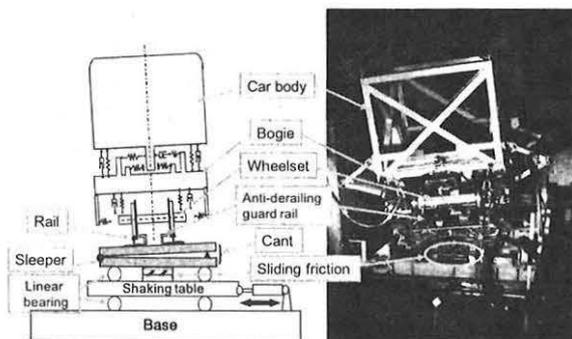


Fig. 1 1/5 scale model

Table 1 Physical law of similitude

Parameter	Scale	
Length	$1/\lambda$	1/5
Mass	$1/\lambda^3$	1/125
Moment of inertia	$1/\lambda^5$	1/3125
Stiffness	$1/\lambda^2$	1/25
Damping	$1/\lambda^{2.5}$	1/56
Acceleration	1	1
Force	$1/\lambda^3$	1/125
Time	$1/\lambda^{0.5}$	1/2.2
Frequency	$\lambda^{0.5}$	2.2
Velocity	$1/\lambda^{0.5}$	1/2.2

3. 脱線メカニズムの解明

本章では、大変位加振時の車両の脱線メカニズムを解明するため、軌道上に車両を載せた状態で正弦波加振(繰り返し10波加振)を実施した。数値はすべて実物換算である。

3.1 脱線形態

加振試験の結果、図2に示される2つの脱線挙動を観測した。便宜上、図2の右をパターン1、左をパターン2と呼ぶ。図2の一つめの図に示されるように、軌道が右に移動すると、左車輪フランジが左レールと接触し、そこを支点とし

て車両が半時計周りにロッキングして右車輪が上昇を開始しようとする。ここまでの挙動は、両パターンとも同じである。

その後の車輪の脱線挙動は、加振条件の差(詳細は3.2節参照)により2つに分かれる。パターン1の場合は、右車輪は、上昇するのとはほぼ同時に右方向に移動するため、右レールに接触しながら滑り上がる(とび上がる)。パターン2の場合は、右車輪は、フランジ高さ30mm以上に上昇後に右方向に移動し、右レール上もしくは軌間外にフランジ着地する。いずれのパターンも車両のロッキング運動に起因するロッキング脱線である。そして、これらの挙動は、車輪が回転する場合の実験³⁾や解析⁴⁾でも同様である。

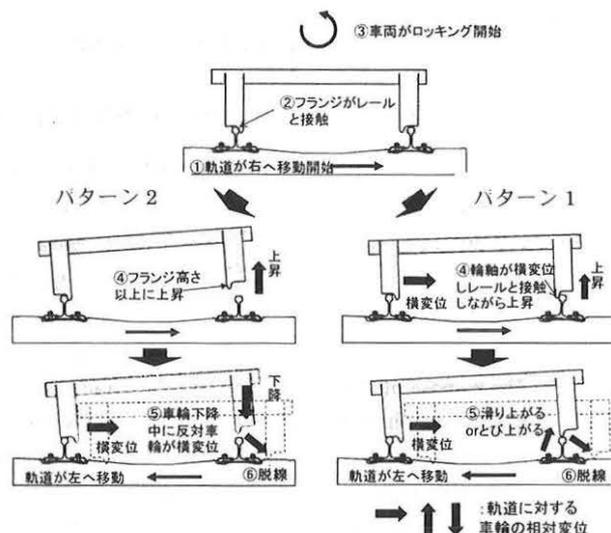


Fig.2 Pattern of derailment

3.2 正弦波加振試験による脱線防止ガード機能の確認

本節では、脱線防止ガード位置はレールからの離れ12mm、高さ7mm(実物換算で60mm、35mm)とし、正弦波10波加振時の脱線防止ガードの機能確認結果を示す。

図3、図4は、それぞれ脱線のパターン1とパターン2において、観測された脱線防止ガードの機能状況を示す。図3、図4より、いずれの場合も、左車輪は着地状態のため、左車輪の横変位を防止することにより、脱線を防止することが可能である。

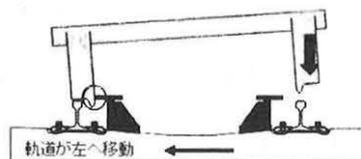


Fig.3 Pattern 1 of guard action

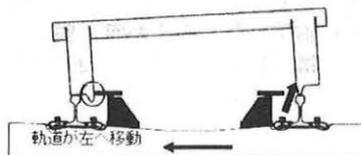


Fig.4 Pattern 2 of guard action

図5に、1/5 模型の加振試験結果を示す。横軸は加振周波数、縦軸は加振振幅とし、(a)の○印が「脱線防止ガードが有効に機能する条件」、(b)の点線が「脱線防止ガードが機能開始する条件」、(c)の実線が「車輪上昇量がフランジ高さ30mm以上となる条件」を示す。

脱線防止ガード（以下、ガード）が機能する範囲については、図5の○印の結果から、周波数、振幅条件とも非常に広範囲にわたり有効に機能することが確認できる。○印の範囲の内、色塗部分がパターン2に該当する。また、1.2Hz以下の○印の結果については、装置強度の制約から、これ以上振幅を上げられなかったため、図5の(a)の○印の範囲が、そのまま脱線防止ガード機能の有効範囲の上限を示すものではない。

また、図5において1.2Hzよりも低い周波数領域では、車輪が30mm以上上昇しても、車輪とガードが接触しない（すなわち脱線しない）領域がある。この理由は、周波数が低い領域では、下心ローリングの影響で、車両全体が大きなロッキングを生じやすいが、その反面、車両に対し横方向に作用する慣性力は小さいことから、車輪がフランジ高さ以上に上昇する場合でも、反対側の着地側車輪がレール上を横方向に滑らないためである。

3.3 実台車による正弦波加振試験との比較

図6に、実台車振動台試験²⁾（停止、バラスト軌道）において実施した正弦波加振試験（正弦波5波）の結果を示す。

図5の1/5 模型と図6の実台車の結果を比較すると、両者の(c)の実線の車輪フランジ高さ30mm上昇の条件と、(b)の点線の脱線防止ガード作用開始の条件は、比較的よく一致しており、1/5 模型加振試験の結果は、実台車の挙動を定性的に予測可能と考えることができる。

また、実台車の(a)の○印に示される脱線防止ガードが有効に機能することを確認した範囲は、パターン1が見られる高い周波数の領域である。この理由は、実台車振動台試験は、地震波加振にてフランジ高さ30mm以上上昇する脱線挙動および脱線防止ガード機能を確認しているが²⁾、正弦波5波加振の場合、地震波と比べて極めて加振条件が厳しく、強度面など、実験遂行上の制約があるためである。このため、低い周波数域に関しては、図5の(a)の○印に示されるように1/5 模型で脱線防止ガードの機能を確認した。

4. 想定東海地震波による脱線防止ガード効果

実台車振動台試験²⁾では、想定東海地震時の高架橋応答波（最大加速度1300gal、最大振幅333mm、以下、想定東海地震波と呼ぶ）に対し、振幅倍率1.0倍まで脱線防止ガード効果を確認した。なお、高架橋は東海道新幹線の標準的な構造で、これに柱の鋼板巻き補強やダンパーブレース工を施工した条件³⁾としている。

それ以上の振幅倍率での脱線防止ガード効果を確認するため、1/5 模型において想定東海地震波の振幅倍率1.5倍(0.05倍刻み)まで加振試験を行い、1.4倍まで脱線防止ガードが有効に機能することを確認できた。

よって、以下に1/5 模型加振試験結果の詳細を報告する。尚、結果の表記に関しては、すべて模型スケールとする。脱線防止ガードの離れと高さは、それぞれ16mmと4mm（実物換算80mm、20mm）である。また、車輪が中立位置にあるとき、脱線防止ガードと車輪内面の左右間隔は、8.5mm（実物換算42.5mm）となる。

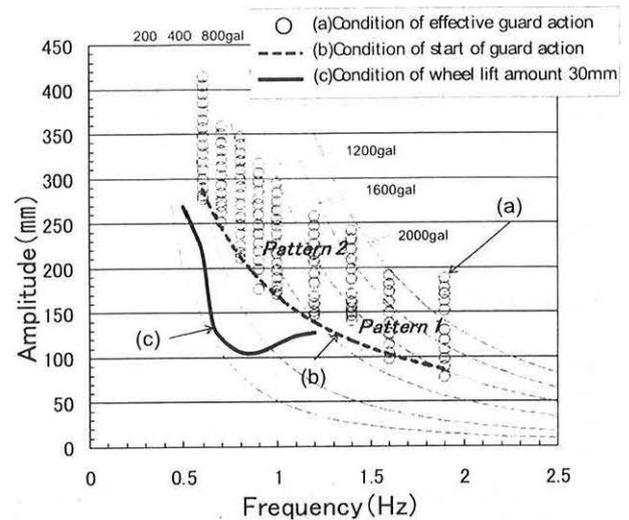


Fig.5 Excitation condition of guard action by 1/5 scale model

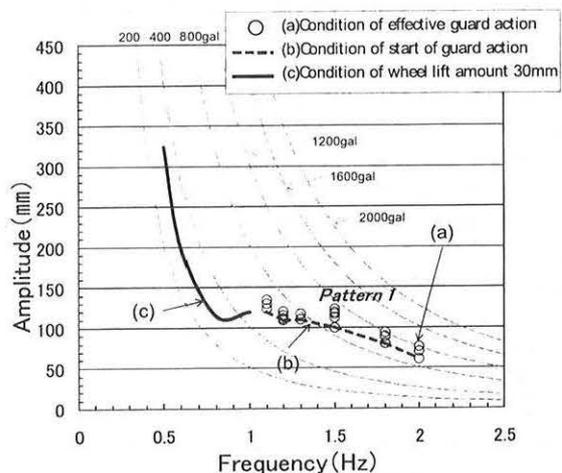


Fig.6 Excitation condition of guard action by full scale model

図7に、想定東海地震波の振幅倍率1.4倍で加振した場合の、1/5 模型加振試験装置の振動台（＝軌道）の左右変位の出力結果を示す。また、ガードの作用状況を詳しく示すため、図8、図9、図10に、時刻3-5秒における振動台の左右変位、1位と2位の輪軸左右変位、1位と2位の車輪上下変位を示す。

実台車振動台試験の想定東海地震波の振幅倍率1.0倍の加振試験結果²⁾では、加速度最大地点付近で、左右交互に2回ガード作用が確認されている。一方、1/5 模型の振幅倍率1.4倍では、図9に示されるように、輪軸左右変位は、時刻A、B、Cで約8mmの変位が拘束されており、3回ガードが作用していることが確認できる。この3回のうち、時刻B、Cにおけるガードの作用状況は、実台車振動台試験²⁾の振幅倍率1.0倍で観測された結果と概ね一致する。

車輪挙動の詳細は以下の通りである。車輪上昇については、図10の時刻A、B、Cに至る前に、まず、車両のロッキングにより、フランジ高さ6mm（実物換算30mm）以上に上昇する。一方、輪軸の左右変位については、図9と図10とから、車輪上昇量がフランジ高さ6mmを越えた後に、輪軸の横移動が生じる。そして、時刻A、B、

Cの時に、脱線防止ガードが着地側車輪に作用する。このとき、反対側の上昇車輪は下降中もしくはフランジ着地状態である。

正弦波との比較では、例えば時刻 B、C の脱線時の加振周波数は実物に換算すると約 1.2Hz であり、前述の挙動は、正弦波加振試験で観測された挙動とも一致する。

また、他の地震動に関しては、L2 地震動の応答波において振幅倍率を大きくした加振試験も行い、ロッキング脱線形態および脱線防止ガード機能を確認した。

5. おわりに

本研究で、実車特性を極力模擬した 1/5 スケールの 700 系半車体 1 台車の車両と軌道および加振装置を設計製作し、正弦波加振試験、地震波加振試験により、脱線メカニズムおよび脱線防止ガード効果に関し、以下を確認した。

- ① 1/5 模型加振試験と実台車振動台試験との整合性を調べるため、正弦波加振試験時の車輪がフランジ高さ以上上昇する時の加振条件、脱線防止ガードが作用する時の加振条件について比較した結果、両者は概ね一致しており、1/5 模型加振試験で実物の脱線挙動を概ね予測可能であることを確認した。
- ② 1/5 模型にて正弦波加振を行い、2つの脱線パターンが見られたが、いずれも車両はロッキングに起因して脱線（以下、ロッキング脱線）に至ることを確認した。このロッキング脱線では、軌間外に脱線しようとする車輪の反対側の車輪は着地状態のため、脱線防止ガードは広範囲の加振周波数、振幅に対して有効に機能することを確認した。
- ③ 1/5 模型にて地震波（想定東海地震波、L2 地震波）加振を行った結果、脱線形態はロッキング脱線であり、正弦波加振試験で観測されたロッキング脱線とも挙動が一致することを確認した。
- ④ 1/5 模型にて想定東海地震の高架橋応答波について振幅倍率を高めた加振試験を行い、1.4 倍まで脱線防止ガードが有効に機能することを確認した。

6. 謝辞

模型の設計、製作、試験を進めるにあたり、多くのご支援をいただいた日本車輛製造㈱の沖松技師長(H17 年度当時)、台車設計部の新村様、此川様、國井様、試験係の鈴木様他多くの方々に、謝意を表します。

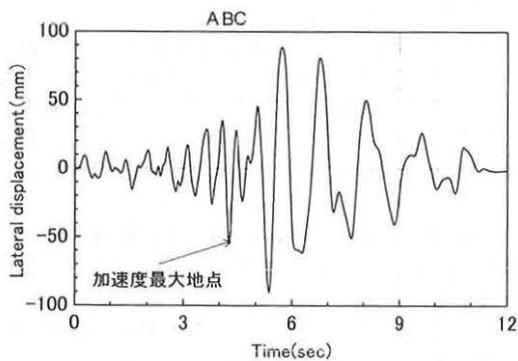


Fig.7 Shaking table lateral displacement in 1/5 scale test

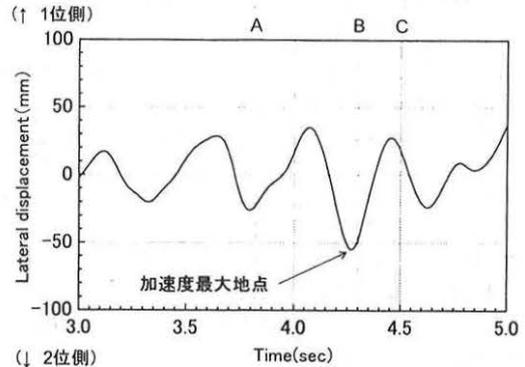


Fig.8 Shaking table lateral displacement (3-5 sec)

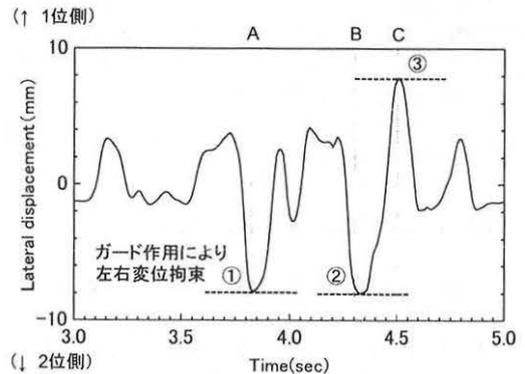


Fig.9 Wheelset lateral motion (3-5 sec)

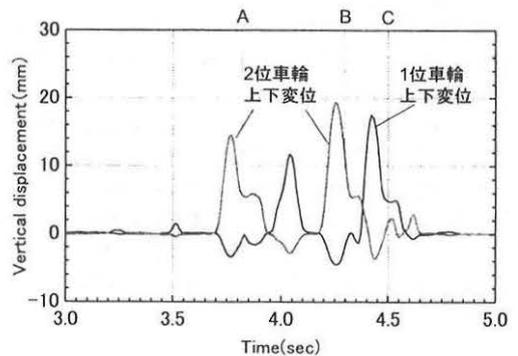


Fig.10 Wheel vertical motion (3-5sec)

参考文献

- 1) 森村勉、関雅樹：新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について、J-RAIL2009
- 2) 三輪昌弘、坂上啓他：実台車を用いた脱線防止ガードの効果確認試験、J-RAIL2009
- 3) 西村和彦、曄道佳明、森村勉、深田淳司：回転軌条輪上での大変位加振時の脱線メカニズム(軌条輪上での 1/10 模型加振実験)、J-RAIL2009
- 4) 森村勉、西村和彦、曄道佳明、曾我部潔：地震時の脱線メカニズムおよび脱線防止ガード機能に関する解析、J-RAIL2009
- 5) 吉田幸司、松田猛、阿知波秀彦、関雅樹：高架橋のダンパーブレース補強による東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策、J-RAIL2009