

# 数値解析による逸脱防止ガードの性能評価

後藤 恵一\* 曾我部 正道\* 浅沼 潔\*

## Numerical Study on Performance Evaluation of Vehicle Guide Device

Keiichi GOTO Masamichi SOGABE Kiyoshi ASANUMA

In this study, by carrying out the numerical analysis that can present the vehicle behavior after derailment, we have evaluated the performance of the vehicle guide device against vibrational and differential displacements. Moreover, we have examined the vehicle behavior after derailment on the ballasted track. In this study, we have obtained the following results: the vehicle guide device is effective against vibrational and differential displacements. When the vehicle guide device with a height of 235mm is set up outside the gauge, the difference of fragility curve between for the case of running on sleepers and for the case running on flat slab is only a little.

キーワード：地震時走行安全性，逸脱防止ガード，マルチボディダイナミクス，有道床軌道

### 1. はじめに

2004年の新潟県中越地震において走行中の新幹線が脱線し、それ以降、各所で地震時列車走行性に関する様々な研究が進められている。鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限：以下，変位標準という）<sup>1)</sup>では、大規模地震動に対して単一の対策のみで列車の走行安全性を確保することが困難であること、従って、大規模地震動に対しては、地震早期検知システム，構造物の補強，軌道の安全対策等を利用し，鉄道システム全体として減災に努める必要があること等が指摘されている。

このうち軌道に関する対策の一つとして，脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱させないための各種逸脱防止装置の開発が挙げられる<sup>2)</sup>。このような逸脱防止装置を導入する場合には，当該装置がどのようなメカニズムで機能するのか，また，どの程度までの地震動に対して有効であるのか等を明らかにすることが重要となる。しかしながら，脱線後の挙動については十分な検討が行われておらず，逸脱防止装置の性能等について未解明な点が多いのが実情である。

また，こうした逸脱防止装置を有道床軌道に設置する場合，その影響に関する検討も必要になる。有道床軌道で高速走行中の車両が脱線した際には線路方向に離散的に存在する横まくらぎにより，車輪が跳ね上がりながら走行することも想定されるが，その挙動が逸脱防止装置等の機能にどのような影響を及ぼすかについては未解明である。

以上のような背景から，本研究ではまず，車両の脱線後の挙動を表現できる解析手法を用い，逸脱防止装置の

一つである逸脱防止ガードを対象として，振動変位及び不同変位に対する基本性能を確認した。次に，これら基本性能の確認を踏まえ，長さ6.3kmのモデル線区に対して，逸脱防止ガードの効果を評価するとともに，脱線後の車両走行に有道床軌道が及ぼす影響について検討した。

### 2. 解析手法

数値解析には，新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS III<sup>3)</sup>を用いた。

#### 2.1 車両の力学モデル

図1に車両の力学モデルを示す。車両の力学モデルは，車体，台車，輪軸の各構成要素を剛体と仮定し，これら剛体をばね，ダンパで結合した三次元モデルとした。1車両当たりの自由度は31である。実車では，各構成要素間に著大な相対変位を抑制できるストッパが設けられており，これを表現するためにばねはパイリニア形非線形ばねとした。なお，本力学モデルの妥当性は，実物大車両模型を用いた実験により既に検証されている<sup>4)</sup>。

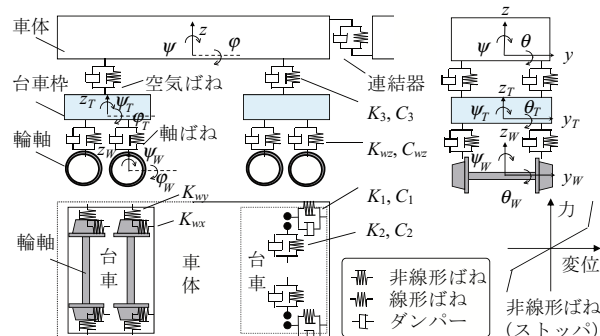


図1 車両の力学モデル

\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

特集：鉄道力学

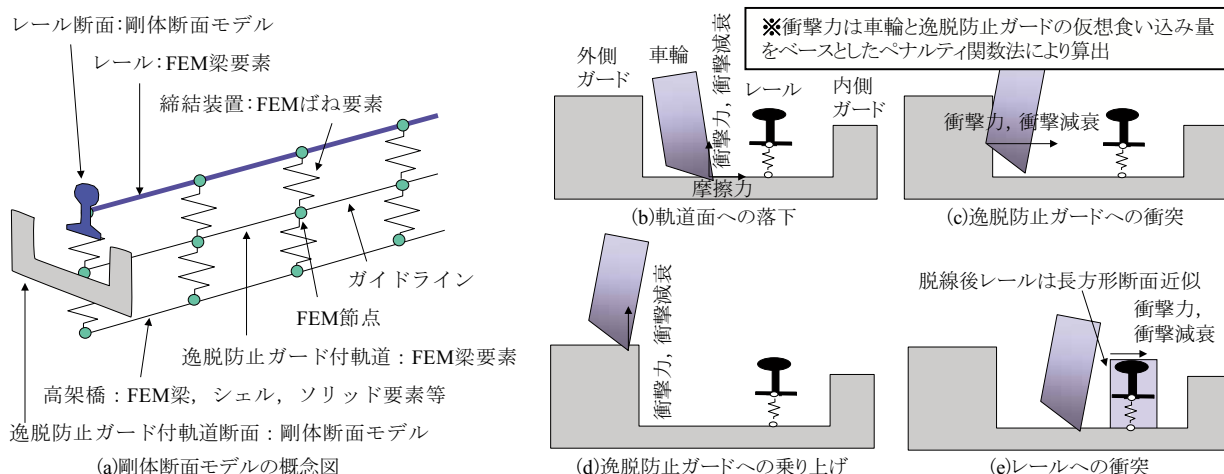


図2 車輪と逸脱防止ガードの力学モデル

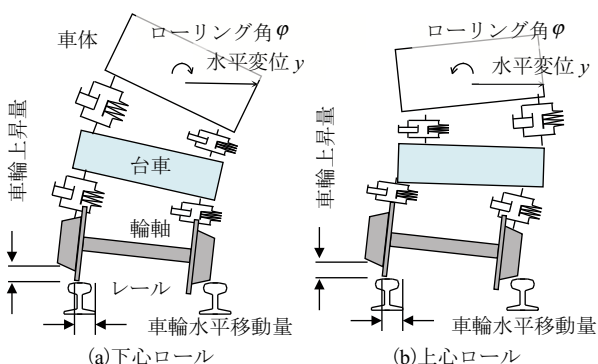


図3 地震時走行安全性の評価指標（車輪水平移動量）

効果は、ペナルティ関数法を用いて非線形の衝突ばねにより考慮するものとした。この衝突ばねについては、新幹線用車輪のフランジ形状を模擬したアタッチメントを用いたPCまくらぎの载荷実験により求めた<sup>5)</sup>。

ここで、脱線までは前節の車輪とレールの精密な幾何形状を考慮した接触モデルを、脱線後は本節の脱線後モデルを車輪ごとに使い分けることとした。脱線後のモデルでは、レールは矩形断面とし、車輪の再衝突や飛び越えも考慮できるモデルとした。ただし、レール上への再載線・走行は考慮しないものとした。

2.2 構造物の力学モデル

DIASTARS IIIでは、任意の構造形式を、様々な有限要素でモデル化できる。本研究で用いた構造物の力学モデルの詳細については、別途各章で述べる。

2.3 脱線前の車輪とレール間の力学モデル

脱線前の車輪/レール間の相互作用力は、両者の鉛直方向相対変位及び水平方向相対変位を用いて算定した。具体的には、両者の接触面の法線方向にはHertzの接触ばねを、接線方向にはクリープ力をそれぞれ考慮した。車輪フランジとレールが接触した場合には、レールの小返りばねを用いてフランジ接触力を表現した。

2.4 脱線後の車輪と逸脱防止ガードの力学モデル

図2に車輪と逸脱防止ガードの力学モデルを示す。DIASTARS IIIでは、脱線後の車両挙動を評価するために、マルチボディダイナミクスによる逸脱防止ガードを含む軌道構造と車輪をモデル化する手法を新たに提案した。

軌道構造は、軌間内及び軌間外（以下、内側及び外側）に逸脱防止ガードを有する剛体断面モデルとした。車輪は、解析の高速化を図るため区分的な直線（円錐台形）により近似するモデルとした。

ただし、車輪と逸脱防止ガード及び軌道構造間の衝突

2.5 解析結果の評価手法

図3に地震時走行安全性の評価指標を示す。評価指標には、車輪とレールの相対水平移動量（以下、車輪水平移動量という）を用い、その限界値は±70mmとした。これは、車輪がレールから落ちる直前の状態を表している<sup>1)</sup>。また、逸脱防止ガードを考慮した場合は、車輪が逸脱防止ガードに乗り上げた時点で逸脱と判定した。

3. 逸脱防止ガードの基本性能の検討

3.1 検討方法

本章では逸脱防止ガードについて、正弦波加振による振動変位に関する性能評価及び角折れ・目違い走行による不同変位に関する性能評価を実施した。

図4に本検討で設定した逸脱防止ガードのパラメータ及びその説明図を示す。本検討では、車輪と逸脱防止ガードの離隔を400mmに固定し、軌道面からの高さを174mm（レール高さ）と87mm（レール高さの1/2）に設定した。なお、上記2ケースについてそれぞれ内側及び外側に逸脱防止ガードを設置した場合の検討を行った。

3.1.1 振動変位に関する検討

本検討では2本の剛な梁要素で軌道をモデル化し、左右方向の正弦波を入力した。車両は1両編成とした。

また、正弦波の振動数は0.5Hz～3.0Hzとし、各振動数における脱線限界及び逸脱限界振幅を見極めるため、加振振幅を線形に漸増させながら検討した。

### 3.1.2 不同変位に関する検討

図5に角折れ及び目違いの基本形状モデルを示す。不同変位は解析中常に固定される静的な左右の角折れ・目違いとしてモデル化し、具体的な不同変位の形状は、変位標準に準じて定めた。また、角折れ・目違いが生じる前後の区間には、曲率の不連続を解消するために緩衝区間を設けた<sup>1)</sup>。

ここで、軌道構造は60kgレールとスラブ軌道を想定し、角折れのスパン長については10m及び20mとした。また、車両は1両編成とし、列車速度は270km/hとした。

## 3.2 検討結果

### 3.2.1 振動変位に関する検討結果

図6(a)に正弦波1波の解析結果を示す。図には脱線限界振幅も併せて示した。逸脱防止ガードを設置していない場合には、逸脱限界振幅が脱線限界振幅と等しくなる。図より逸脱防止ガードの効果により、一部の加振振動数を除き全体的に逸脱限界が向上していることが確認できる。逸脱防止ガードの高さの違い(Case1とCase2)に着目すると、逸脱防止ガードの高さが高いCase1で逸脱防止効果が大きくなるのが分かる。また、逸脱防止ガードの設置位置の違い(内側と外側)に着目すると、0.5～0.7Hzでは外側、0.8～3.0Hzでは内側で逸脱防止効果が大きくなる傾向にあった。これは、脱線モードに起因するものと考えられる。

図6(b)に正弦波5波の解析結果を示す。この場合においても、逸脱防止ガードの効果により逸脱限界が向上していることが確認できる。しかし、外側の場合では低振動数領域で限界値が向上していない領域が存在することも分かる。逸脱防止ガードの高さの違い(Case1とCase2)に着目すると、高さの高いCase1でより大きな逸脱防止効果が確認できるが、Case2の低振動数領域では内側及び外側の両者において限界値の向上は見られない。これは、正弦波5波については逸脱防止ガードにある程度の高さがなければその効果が発揮されない可能性があること示している。

### 3.2.2 不同変位に関する検討結果

図7に列車速度270km/hでの不同変位に対する逸脱限界を示す。図7(a)、(b)より、角折れに関しては、折れ込み及び平行移動の両者について逸脱防止ガードの効果により限界値が大きく向上していることが確認できる。また、逸脱防止ガードの高さが高いほどその効果も大きいことが分かる。逸脱防止ガードの設置位置の違い(内側と外側)については、大きな差は見られなかった。

図7(c)より、目違いに関しても、逸脱防止ガードの設置により限界値が大きく向上していることが確認でき

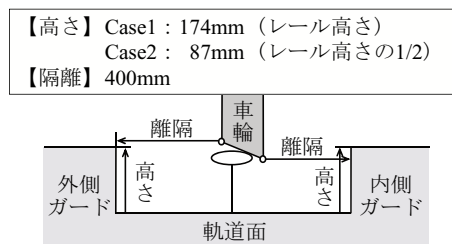


図4 逸脱防止ガードのパラメータ

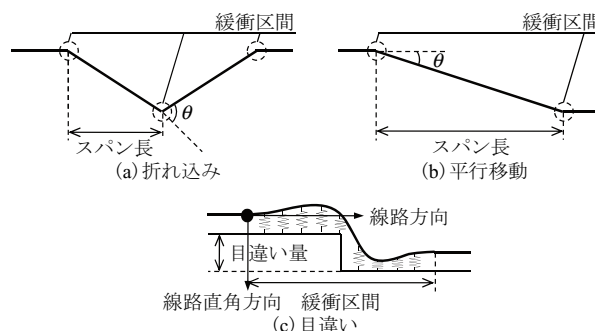
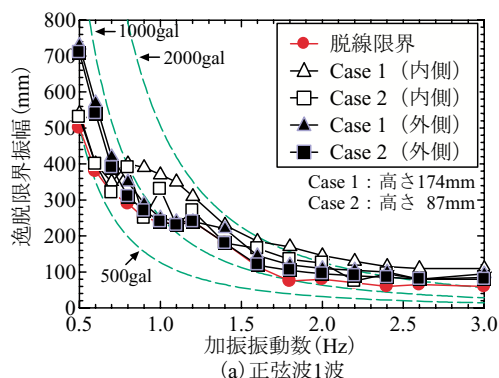
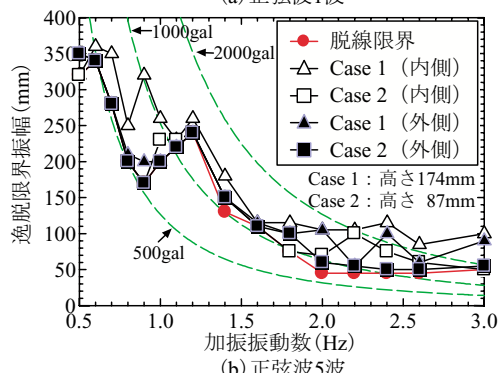


図5 不同変位の基本形状



(a) 正弦波1波



(b) 正弦波5波

図6 正弦波に対する脱線及び逸脱限界

る。また、逸脱防止ガードの高さが高いほどその効果も大きくなるのが分かる。逸脱防止ガードの設置位置の違いについては、外側よりも内側の方が逸脱防止効果が高くなる傾向にあった。

## 4. 有道床軌道における脱線後挙動の検討

本章では、3章での逸脱防止ガードの基本性能を踏まえた上で、有道床軌道を想定した営業線における逸脱防止ガードの効果について検討した。

特集：鉄道力学

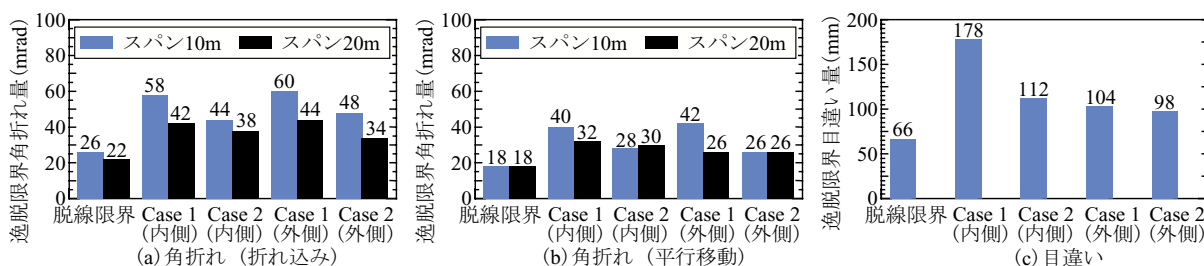


図7 不同変位に対する脱線限界及び逸脱限界

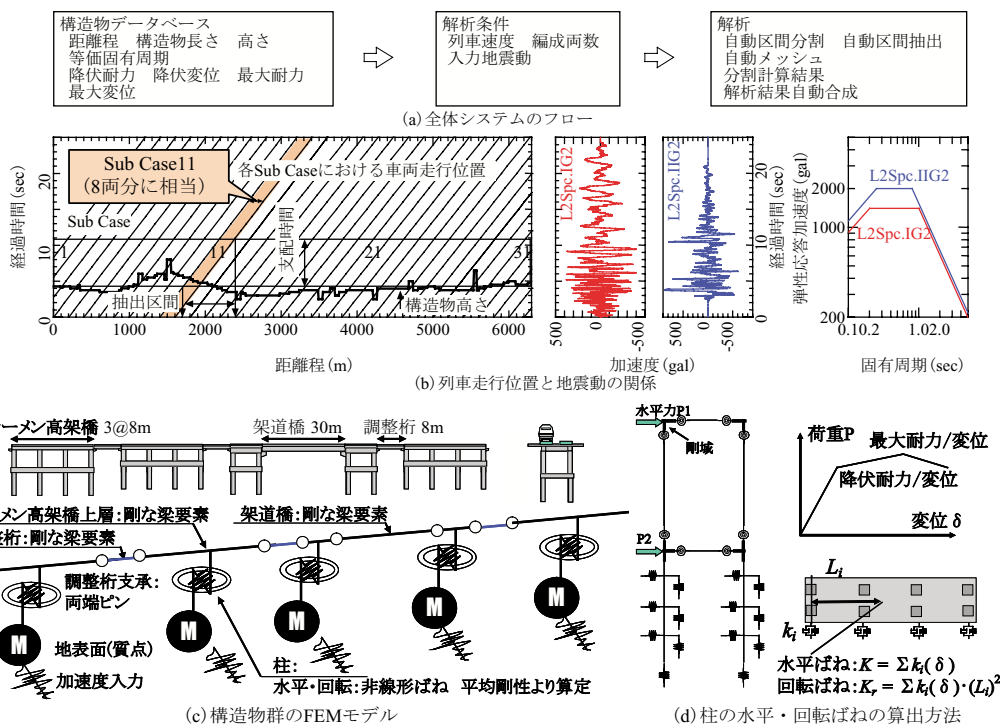
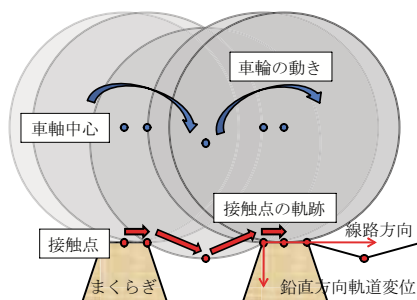


図8 脱線後における有道床軌道上の車両挙動の検討モデル

4.1 検討方法

図8に脱線後における有道床軌道上の車両挙動の検討モデルを示す。本章では、図8(a)に示すように構造物データベースと解析条件に基づき、自動的に解析区間を抽出して解析モデルを作成し、解析実施後は、解析結果を合成して全体線区の評価を行った。脱線後における有道床軌道上の車両挙動を検討する場合、線区全線に車両を乗荷して、漏れなく解析するのが理想的であるが、この場合、構造物や車両の自由度が膨大となる。そこで図8(b)に示すように8両編成を1Sub Caseとして分割解析を行う手法を用いた。具体的には、地震動ごとに予め検討しておいた支配時間(地震動ごとの脱線の発生する可能性が最も高い時間帯)から、各Sub Caseの抽出区間を計算した<sup>6)</sup>。例えばSub Case 11の場合、必要な抽出区間は距離1700~2400mとなる。この抽出した区間を自動メッシュによりFEMでモデル化する。なお抽出区間の前後には、抽出区間前後の構造物の平均的な振動特性に基づく半無限走行領域を設けた。

本検討では、6.3kmの複線の新幹線高架橋を解析対象



とした。3径間、ブロック長24mの調整桁式ラーメン高架橋を構造物群の基本単位とした。図8(c)は抽出区間の具体的なFEMモデルの例である。高架橋の上層及び桁は剛な梁要素でモデル化した。構造物の非線形性は、図8(d)に示すように予めプッシュオーバー解析により骨格線を求めておき(データベース入力項目)、これに基づき重心位置に標準バイリニア型の非線形水平及び回転ばねを設けて考慮した。構造物の減衰定数 $\xi$ は5%とした。

入力地震動には鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)<sup>7)</sup>に定める海溝型のL2スペクトルI地震動及び

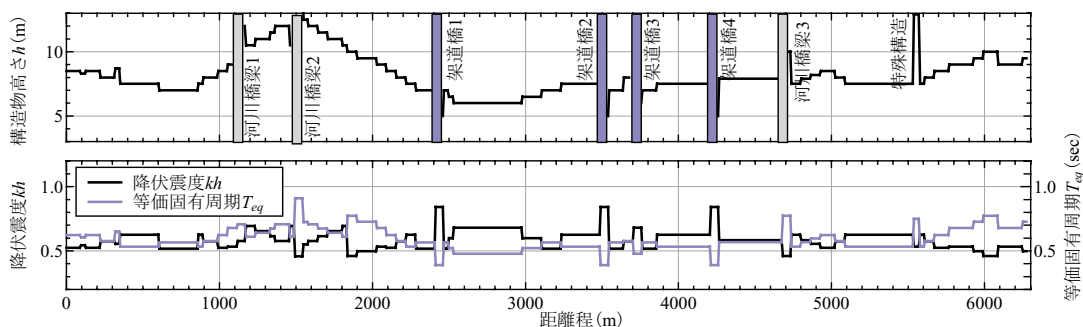


図10 モデル線区の構造物諸元

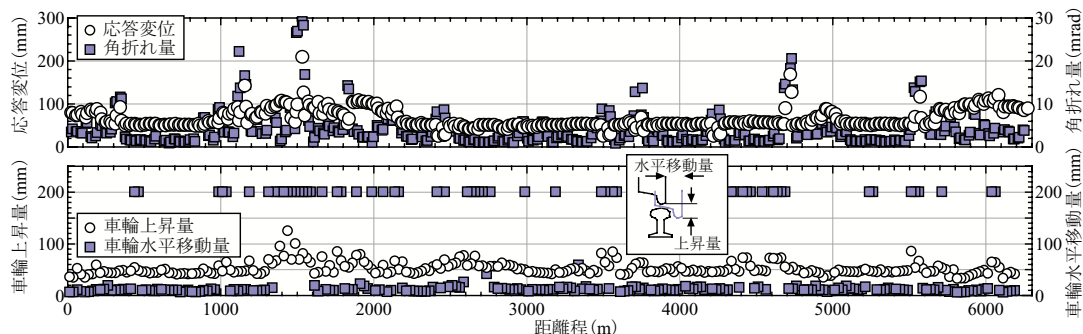


図11 モデル線区の解析結果（海溝型L2スペクトルI,  $PGA=240gal$ ）

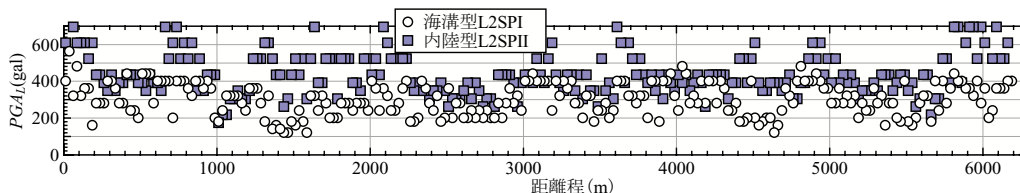


図12 モデル線区の限界地表面加速度  $PGA_L$

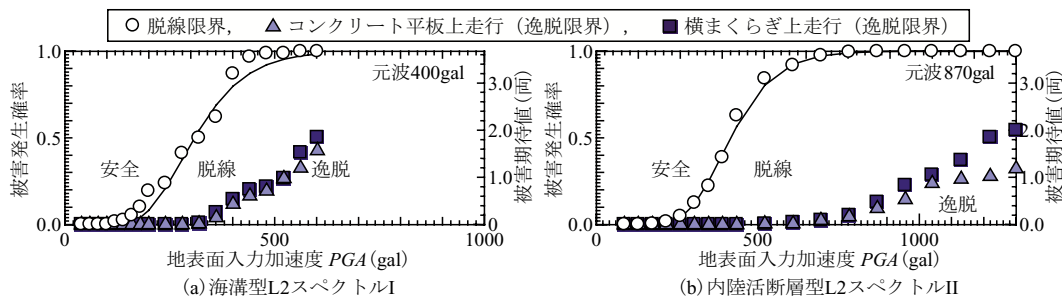


図13 モデル線区地震時走行安全性に関するフラジリティ曲線

内陸活断層型のL2スペクトルII地震動を用いた。地盤はG2地盤（洪積層）を想定した。車両の応答は非線形性が強いので、地震動の地表面入力加速度最大値PGAを線形に漸増させながら検討を行った。

図9に、脱線後における有道床軌道上の車両挙動検用軌道変位モデルを示す。DIASTARS IIIでは車輪と軌道表面とは線路方向に1点で接触するモデルであるため、非現実的な落下量が生じないように車輪径とまくらぎ寸法・間隔から定まる落下限界を考慮する必要がある。このため、図に示すように落下限界時の車軸中心位置に基づいてまくらぎ形状関数を軌道表面に定義した。

また、本検討における逸脱防止ガードは、営業線におけるその効果を検討する目的から、既に開発されている

逸脱防止ガードの諸元<sup>2)</sup>を参考にし、離隔400mm、軌道面からの高さ235mmの外側タイプとした。

#### 4.2 検討結果

図10にモデル線区全体の諸元を、図11に線区全体の解析結果を示す。海溝型L2スペクトルI、地表面入力加速度 $PGA=240gal$ の場合の応答について示した。車両の応答は1両単位の最大値で整理し、8秒後の走行位置で図中に整理して示した。車輪の水平移動量が200mmを超えたものは200mmとして示した。高橋脚の河川橋梁は隣接ラーメン高架橋よりも等価固有周期が長く、変位が大きくなる傾向にある。架道橋は逆に隣接ラーメン高架橋よりも等価固有周期が短く、変位が小さくなる傾向にある。こ

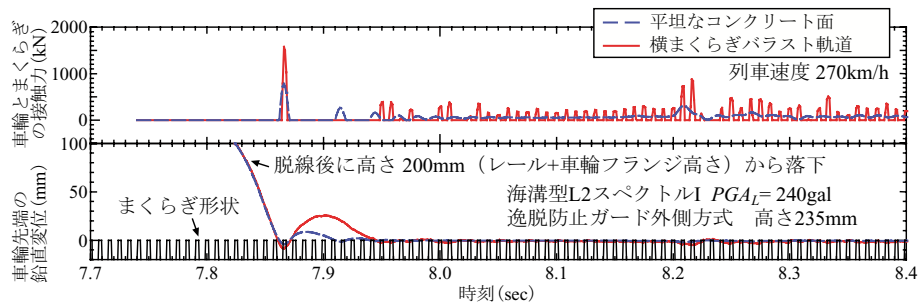


図 14 脱線後車輪の鉛直挙動と車輪とまくらぎ間の接触力の関係

これらの構造物境界で角折れが生じやすいため、車輪上昇量や水平移動量も大きくなる傾向にあることが分かる。

図 12 に車輪の水平移動量が 70mm を超える限界地表面入力加速度  $PGA_L$  を示す。同規模の波の繰り返し数が多い海溝型の方が、厳しい  $PGA_L$  となっている。線区内では振動特性の変化地点で  $PGA_L$  が低くなる傾向にあることが読み取れる。

図 13 にモデル線区の地震時走行安全性に関する fragility 曲線を示す。図 12 に示す数値解析結果を被害期待値及び被害発生確率に整理した。図より、逸脱防止ガードは、それぞれの地震動の元波に対して逸脱被害発生確率 10% 程度であり、かなりの大規模地震動に対しても効果を発揮することが分かった。これは 3 章でも示したように、逸脱防止ガードが振動変位及び不同変位による逸脱防止に有効であること、特に本検討においては、構造物境界で発生する角折れに対して、十分な逸脱防止性能を発揮したためであると考えられる。また、図から平坦なコンクリート上を走行した場合も、有道床軌道上を走行した場合も逸脱に関する fragility 曲線に大きな差がないことが分かった。

図 14 に脱線後車輪の鉛直挙動と車輪とまくらぎ間の接触力の関係を示す。平坦なコンクリート上を走行する場合に比べ、まくらぎ上を走行する場合はやや跳ね上がりが大きい傾向が読み取れる。車輪とまくらぎ間の接触力については、車輪落下直後に 1500kN の著大な力が生じている。新幹線車輪フランジ形状の重錘を用いた衝撃載荷実験<sup>5)</sup> より、実際の PC まくらぎの耐荷力は 800kN ～ 900kN との結果が得られているが、これに照らすと、落下直後に接触するまくらぎは破壊する可能性が高い。その後の走行では耐荷力を超える接触力は生じなかった。

これらの挙動は、現時点で得られる情報に基づいた数値解析の結果であるが、車輪とまくらぎとの接触はねに依存する。よって、この点については実験及び有限要素法を用いた詳細な数値解析により、更に精度を向上させていきたいと考えている。

## 5. 結論

(1) 脱線後の車両挙動を評価できる手法を用いて、逸脱

防止ガードの振動変位及び不同変位に対する基本性能を評価した。その結果、逸脱防止ガードは、振動変位及び不同変位に対して大きな走行安全性向上効果を有していること、また、その効果は逸脱防止ガードの高さが高い場合に大きくなることを示した。

- (2) モデル線区での地震時走行安全性解析を実施し、当該線区における fragility 曲線を算出した。その結果、高さ 235mm の逸脱防止ガードを軌間外に設置した場合、L2 地震動クラスの元波に対する逸脱被害発生確率は 10% 程度であり、かなりの大規模地震動に対しても効果を発揮することを確認した。
- (3) 脱線後に平坦なコンクリート上を走行した場合も、有道床軌道上を走行した場合も逸脱に関する fragility 曲線に大きな差がないことを示した。

## 文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，丸善，2006
- 2) 浅沼潔，曾我部正道，渡辺勉，岡山準也，涌井一：逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発、鉄道総研報告，Vol.23，No.2，2009
- 3) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.129-138，1995
- 4) 宮本岳史，松本信之，曾我部正道，下村隆行，西山幸夫，松尾雅樹：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.72，No.706，pp.1849-1855，2005
- 5) 後藤恵一，曾我部正道，浅沼潔，渡辺勉：鉄道車輪と PC まくらぎの接触力に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.769-774，2010
- 6) 曾我部正道，原田和洋，浅沼潔，丸山直樹，渡辺勉：連続する鉄道構造物群の地震時列車走行性，鉄道力学論文集，No.13，pp.177-184，2009
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，1999