

# 1612 線区単位での地震時車両走行性評価

○[上] 曾我部 正道 [土] 丸山 直樹 [土] 後藤 恵一 [土] 渡辺 勉 (鉄道総合技術研究所)

## Evaluation of Train-running Safety during Seismicity on Entire Railway Line

○Masamichi SOGABE, Naoki MARUYAMA, Keiichi GOTOU, Tsutomu WATANABE (Railway Technical Research Institute)

To evaluate train-running safety during seismicity on entire railway line quantitatively, we should use risk analysis method. A lot of studies for seismic risk management were widely performed in various kinds of fields. However, the study for fragility curve of train-running safety has not conducted and its basic characteristics has not obtained. Through this study, we clarified the *PGA* and *PGV* fragility curves on entire railway line based on a numerical analysis, as well as influence of train-running direction and phase delay of earthquake motions.

**Key Words:** Seismic train-running safety, Seismic fragility curve, Vibration displacement, Angular rotation, Anti-derailment guard

### 1. はじめに

連続する鉄道構造物群全体の地震時車両走行性や対策効果を検討するためには、線区全体を対象とし、かつ精度の高い投資判断を可能とするリスク評価システムの構築が必要不可欠となる。リスク評価の構成要素のうち、地震ハザード曲線(地震動指標に対する年超過発生確率等)については、商用ソフトも販売されており、当該研究分野において相当程度進んでいると考えられる。一方、鉄道独自のイベントツリー(被害形態の分類、被害形態毎のフラジリティ曲線(地震動指標に対する被害発生確率)、被害形態ごとの被害時コスト等)については、必ずしも十分な精度で議論がなされておらず今後の重要な検討課題であると考えられる。とりわけ、鉄道構造物上における地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線については、これまで実用レベルでの検討がなされておらず、その実態もよく分かっていない。

このような背景から、著者等は地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線の算出に関して検討を進めてきたところである<sup>1)</sup>。本研究では、以下を研究の目的とした。

- (1) 線区における車両の走行方向がフラジリティ曲線に及ぼす影響について数値実験により明らかにする。
- (2) 地震動の入力位相差がフラジリティ曲線に及ぼす影響について数値実験により明らかにする。

### 2. 解析方法

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 DIASTARSIII<sup>®</sup>を用いた。

#### 2.1 車両の力学モデル

車両の力学モデルには、車体、台車、輪軸の各構成要素を剛体質点と仮定し、これら剛体質点をばね、ダンパで結合した三次元の Multi Body System(以下 MBS という)モデルを用いた。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いる。これらを表現するため、ばねはバイリニア形の非線形ばねとした。なお力学モデルの妥当性については、実物大車両模型を用いた検証実験が既に実施されている<sup>2)</sup>。

#### 2.2 車輪/軌道間の力学モデル

脱線前の車輪/レール間の相互作用力は、鉛直方向相対変位  $\delta_z$  及び水平方向相対変位  $y$  から算定した。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小返りばね定数を用いてフランジ接触力を算出した。接触点と接触角は、予め定めておいた接触関数から求めた。接触関数は、車輪とレールの幾何学形状に基づき、鉛直方向相対変位  $\delta_z$  及び水平方向相対変位  $y$  の関数として定義することとした。

図-1 に車輪と逸脱防止ガードの力学モデルを示す。脱線後の車輪/レール間の相互作用力は、車輪と逸脱防止ガードを含む軌道構造を MBS によりモデル化し算出した。ここで、脱線後の車輪は、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。軌道構造は、外側又は内側に逸脱防止ガードを有する剛体断面モデルとした。車輪と軌道構造部材との衝突は非線形形の衝突ばねで表現した。なお、具体的な逸脱防止ガードとしては、本研究では、ガード高さ 235mm の逸脱防止ガード付きラダー型マクラギ(外側ガード方式)を解析例として用いた。

上記二つの力学モデルを輪軸単位で使い分けることとした。

#### 2.3 構造物の力学モデル

図-2 に連続する構造物群全体の解析システムを示す。本システムでは、図-2 (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う。線区全体の評価を行う場合には、線区全線に車両を載荷して、洩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-2 (b) に示すように 8 両編成を 1 Sub Case として分割解析を行う手法を提案した。具体的には、地震動ごとに予め検討しておいた支配時間(脱線が発生するパワーを最も有する時間帯)から、各 Sub Case の抽出区間を計算する。例えば Sub Case 11 の場合、必要な抽出区間は距離程 1700~2400m となる。この抽出した区間を自動メッシュにより有限要素(以下 FE という)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き半無限走行領域としてフリラン区間、ポストラン区間を設けた。よって走行性の評価単位の精度は車両の観点から見れば 1 車両長の 25m 間隔、輪軸の観点から見れば輪軸間隔単位となる。

本研究では、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-2 (c) は抽出区間の具体的な FE 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-2 (d) に示すように予めブッシュオーバー解析に

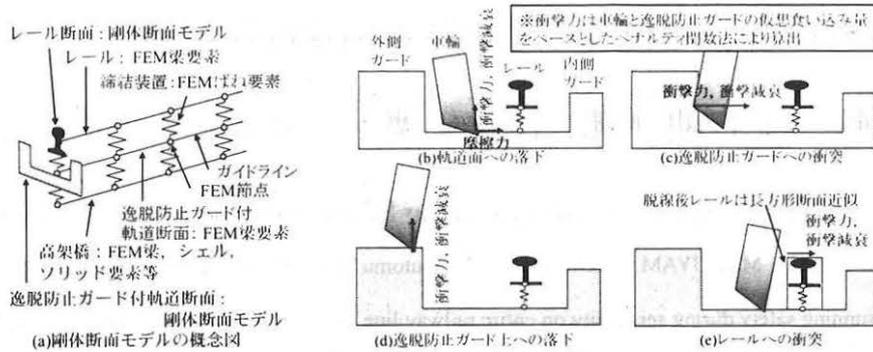


図-1 車輪と逸脱防止ガードの力学モデル

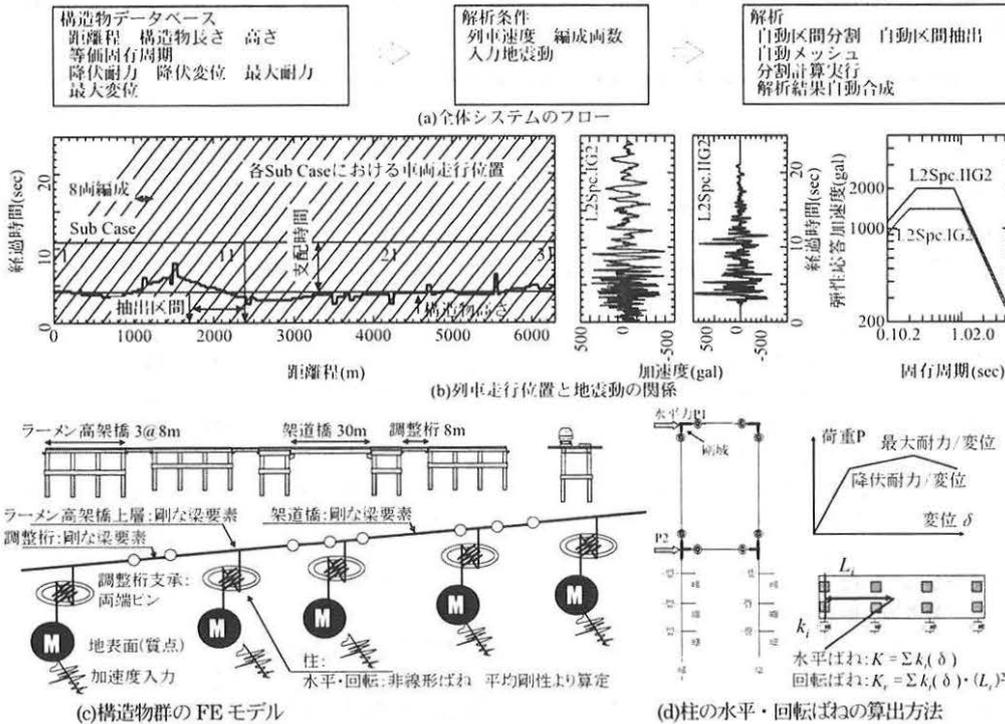


図-2 連続する構造物群の解析システム

より骨格線を求めておき(データベースの入力項目)、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(耐震標準)<sup>3)</sup>に定める海溝型のL2スペクトルI地震動及び内陸活断層型のL2スペクトルII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-3に地震動の位相差の設定方法を示す。式(1)に示すせん断波(S波)の伝達経路差から簡易に位相差を設定した。

$$\Delta t_i = x_i / V_s = L_{bi} \cdot \sin \phi / V_s \quad (1)$$

ここに、 $\Delta t_i$ は構造物*i*と*i-1*との到達時間差、 $x_i$ は構造物*i*と*i-1*との伝播経路差、 $V_s$ は工学基礎のせん断波速度、 $L_{bi}$ は構造物*i*と*i-1*との距離、 $\phi$ は入射角である。具体的には $V_s=400\text{m/s}$ 、 $\phi=30^\circ$ を想定した。各ブロック間での位相差は0.04(s)である。

#### 2.4 数値解析法

車両及び高架橋に関する運動方程式をモーダル変換し、Newmarkの平均加速度法により時間増分 $\Delta t$ 単位に解いていく。

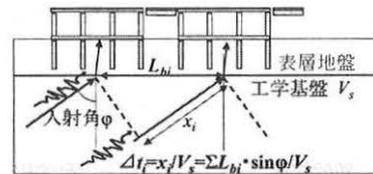


図-3 地震動の入力位相差の設定方法

ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が小さくなるまで $\Delta t$ 内において反復計算を行う。

#### 2.5 評価指標

車両の脱線限界の目安値には、車輪のフランジがレールから外れて水平に移動した量の限界として70mmを適用した。また逸脱は、車輪が逸脱防止ガードに乗った場合で判定した。

### 3. 解析結果

#### 3.1 地震時車両走行性の基本性状

図-4に脱線が生じたケースの時刻歴波形の例を示す。ラーメン高架橋と橋脚の変位を見ると、7秒で相対変位50mmを生じていることが分かる。輪軸直下の構造物の変位を見ると7秒前後で

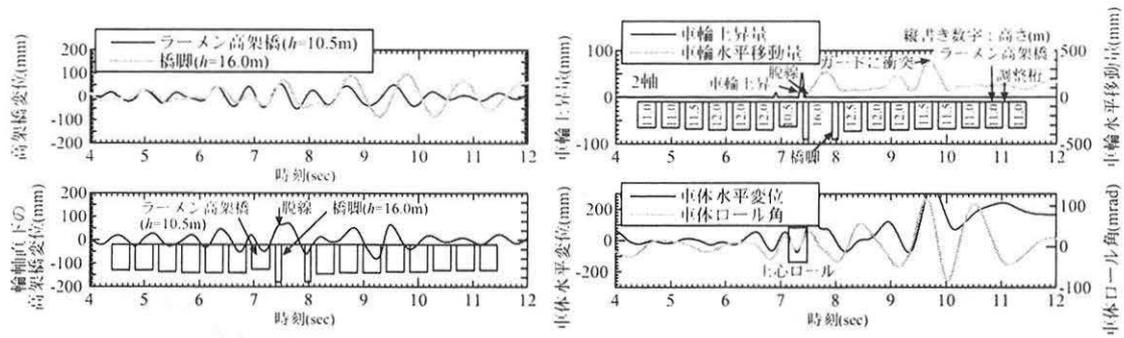


図-4 時刻歴波形の例(海溝型L2スペクトルI,  $PGA=240gal$ )

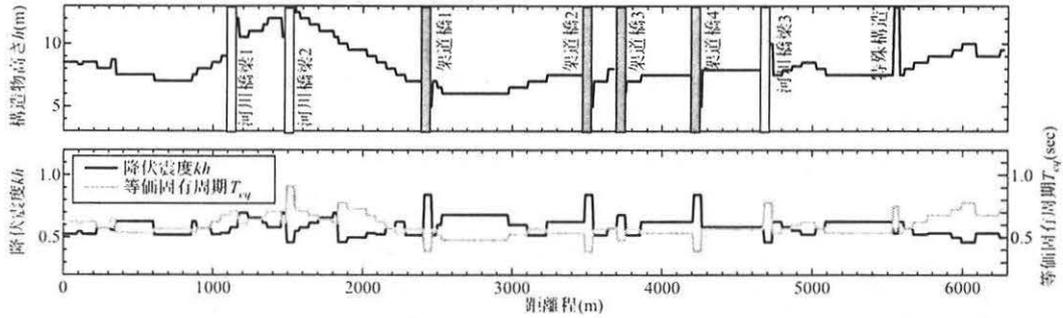


図-5 モデル線区の構造物諸元

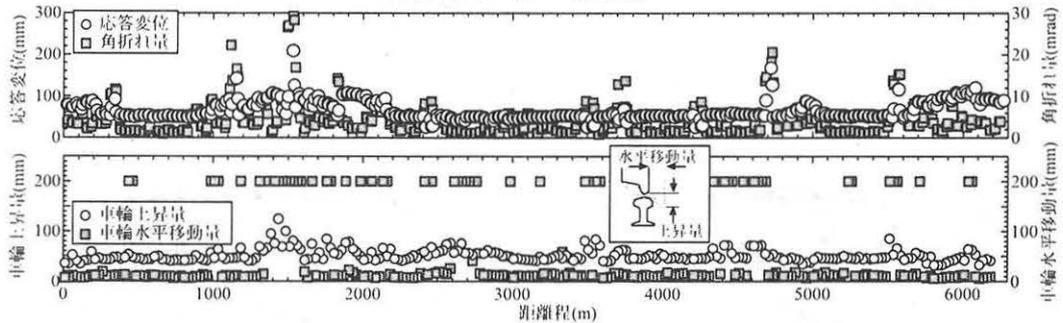


図-6 モデル線区の解析結果(海溝型L2スペクトルI,  $PGA=240gal$ )

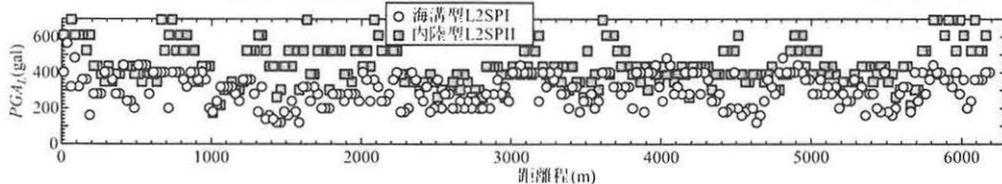


図-7 モデル線区の限界地表面加速度  $PGA_L$

2Hz、全振幅 80mm の加振を受けていることが分かる。車輪上昇はラーメン高架橋と橋脚の間の調整桁上ではじまり、車輪水平移動量が 70mm を超えて脱線している。脱線した車輪は 9.7 秒に逸脱防止ガードに衝突している。脱線時刻において車体水平変位と車体ロール角は完全に同位相となっており、上心ロールによる脱線であると判断される。

図-5 にモデル線区全体の諸元を、図-6 に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、海溝型は 8 秒後、内陸活断層型は 6 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った。

図-7 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。

### 3.2 地震時車両走行性のフラジリティ曲線

図-8 にモデル線区の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線を示す。図中に示す仮定に基づき図-7 に示した数値解析結果を整理した。逸脱防止ガード付きラダー型マクラギは、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。また、図からガード高さが低い場合(135mm)には、逸脱防止効果が薄れることが読み取れる。

図-9 に車両の走行方向がフラジリティ曲線に及ぼす影響を示す。解析対象モデルでは、フラジリティ曲線上において車両の走

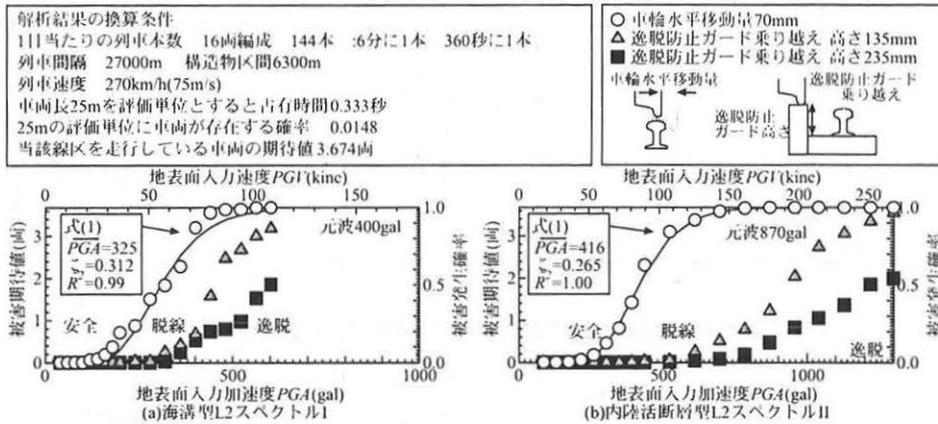


図-8 モデル線区の地震時車両走行性に関する fragility 曲線

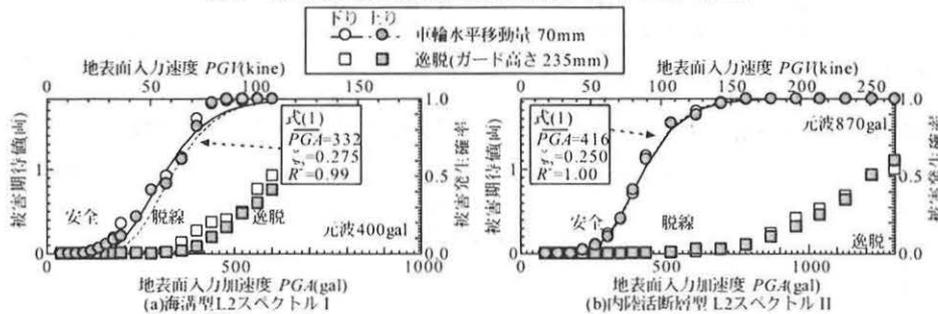


図-9 車両の走行方向が fragility 曲線に及ぼす影響

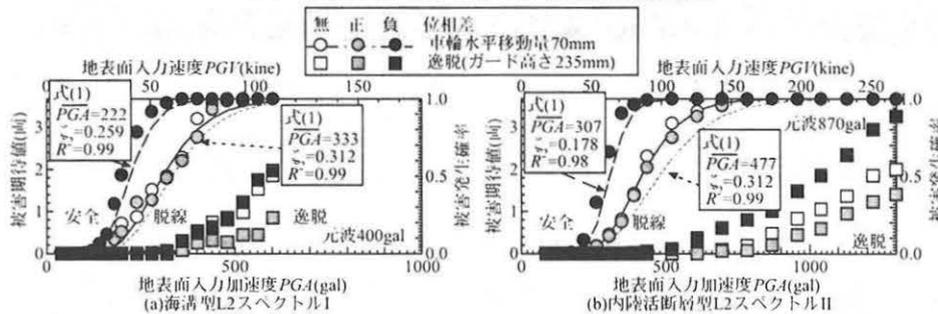


図-10 地震動の位相差が fragility 曲線に及ぼす影響

行方向の影響は見られなかった。

図-10 に地震動の位相差が fragility 曲線に及ぼす影響を示す。車両と同方向に地震動が伝搬する場合を正、逆方向を負と定義した。図から、地震動が車両の進行と逆方向から伝搬する場合に走行性が低下することが分かる。これは、車両の走行により地震動の時間軸が見かけ上圧縮されるため、同一の振幅で加振振動数を高めれば脱線の危険性が増すという、車両の正弦波加振による安全限界曲線の傾向と一致する<sup>2),4)</sup>。

#### 4. 結論

地震時車両走行性に関する fragility 曲線の算出に関して検討した。本研究の解析対象構造物に関して得られた知見は以下の通りである。

- (1) fragility 曲線を算出し、大規模地震動に対しても逸脱防止ガードが効果を発揮すること、ガードの高さは高い方が効果を発揮することを示した。
- (2) fragility 曲線上において車両の走行方向の影響は見られ

なかった。

- (3) 地震動が車両の進行と逆方向から伝搬する場合に走行性が低下することが分かった。これは、車両の走行により地震動の時間軸が見かけ上圧縮されるためであると考えられる。

今後更に、各種パラメータに関する検討を進め、深度化を図る予定である。

#### 参考文献

- 1) 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車両走行性, 土木学会鉄道力学論文集, Vol.13, pp.177-184, 2009.
- 2) 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.
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説一耐震設計, 丸善, 1999.
- 4) 曾我部正道, 金森真, 呂佳敏: PC エキストラードロード橋の地震時列車走行性解析, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, pp.29-34, 2007.