

# 論文 鉄道高架橋群の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線

曾我部 正道\*1・後藤 恵一\*2・渡辺 勉\*2・浅沼 潔\*3

**要旨:** 本研究では、連続する鉄道構造物群に対して車両と構造物の動的相互作用を考慮したシミュレーション解析を行い、線区単位での車両走行性の評価を試みた。モデル線区において、地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線（地震動指標に対する被害発生確率）を算出し、対数正規累積分布関数の対数標準偏差が海溝型の L2 地震動スペクトル I で 0.31, 内陸活断層型の L2 地震動スペクトル II で 0.27 となることを示した。併せて、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逸脱防止ガードの効果と、車両の走行方向や地震動の入力位相差がフラジリティ曲線に及ぼす影響を明らかにした。

**キーワード:** 鉄道高架橋, 地震時車両走行性, フラジリティ曲線, 逸脱防止ガード

## 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方法を提案するとともに、基本条件での性状を明らかにした<sup>1)</sup>。本研究では、以下の各種パラメータの影響について検討を実施した。

- (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>1)</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>2)</sup>。

### 2.2 車輪／軌道間の力学モデル

図-2 に鉛直方向の力学モデルを示す。車輪とレール間の鉛直方向相対変位  $\delta_z$  は、式(1)で表される。

$$\delta_z = z_R - z_W + e_z + e_{z0}(y) \tag{1}$$

ここに、 $z_R$  と  $z_W$  はそれぞれレールと車輪の接触点における鉛直変位、 $e_z$  は図-2 に示すレール上に存在する鉛直方向の軌道変位である。 $e_{z0}$  は接触点における車輪の直径の初期接触点からの変動分で、車輪とレールの水平方向相対変位  $y$  の関数として表される。

相対変位  $\delta_z$  に対する接触点  $s$ 、接触角  $\alpha$  は、車輪とレールの水平方向相対変位  $y$  と車輪及びレールの幾何学形状に基づき定めた接触関数から算出する。車輪とレールがそれぞれ二次曲面から構成されている場合、接触面法線方向の車輪とレールの相対変位  $\delta$  と接触力  $H$  との関係は、Hertz の接触ばねにより表すことができる。

図-3 に水平方向の力学モデルを示す。車輪フランジ

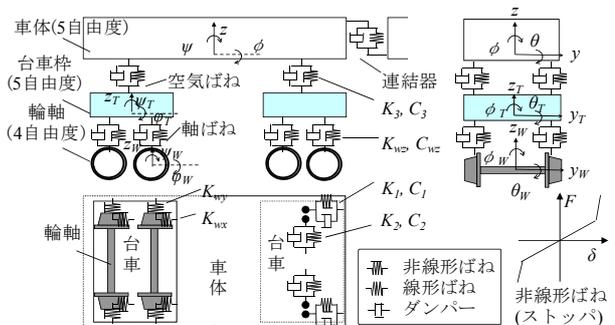


図-1 車両の力学モデル

\*1 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 主任研究員 博(工) (正会員)  
 \*2 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 研究員 工修 (正会員)  
 \*3 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 研究室長 (正会員)

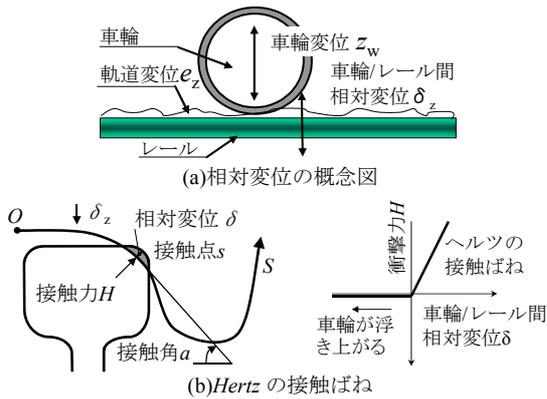


図-2 車輪とレール間の鉛直方向の力学モデル

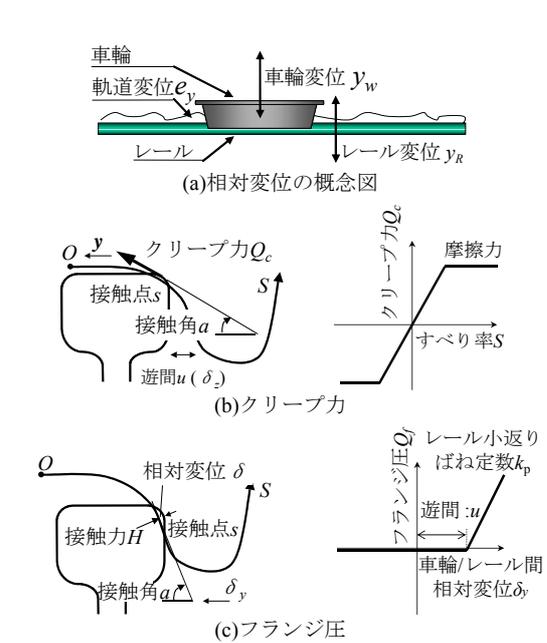


図-3 車輪とレール間の水平方向の力学モデル

とレールの水平方向相対変位  $\delta_y$  は、式(2)のように表すことができる<sup>1)</sup>。

$$\delta_y = y - u(\delta_z) = y_w - y_R - e_y - u(\delta_z) \quad (2)$$

ここに、 $y$ は車輪とレールの水平方向相対変位、 $y_R$ と $y_w$ はそれぞれレールと車輪の接触点 $s$ における水平変位、 $e_y$ はレール上に存在する水平方向の軌道不整、 $u(\delta_z)$ は車輪フランジとレールの遊間で、鉛直方向相対変位  $\delta_z$  の関数として表すことができる。

相対変位  $\delta_y$  に対する接触点 $s$ 、接触角 $a$ は、車輪とレールの鉛直方向相対変位  $\delta_z$  と車輪及びレールの幾何学形状に基づき定めた接触関数から算出する。

$\delta_y < 0$  の時、車輪フランジとレールは非接触と考える。この場合には、車輪とレールの接触面の接線方向にクリープ力(すべり力)が働く。クリープ力  $Q_c$  は、車輪がレール上を転がりながら進む時のクリープ(すべり)により発生する接線力で、すべり率が大きくなると摩擦力を上限として飽和する<sup>1)</sup>。

$\delta_y \geq 0$  の時、車輪フランジとレールは接触していると

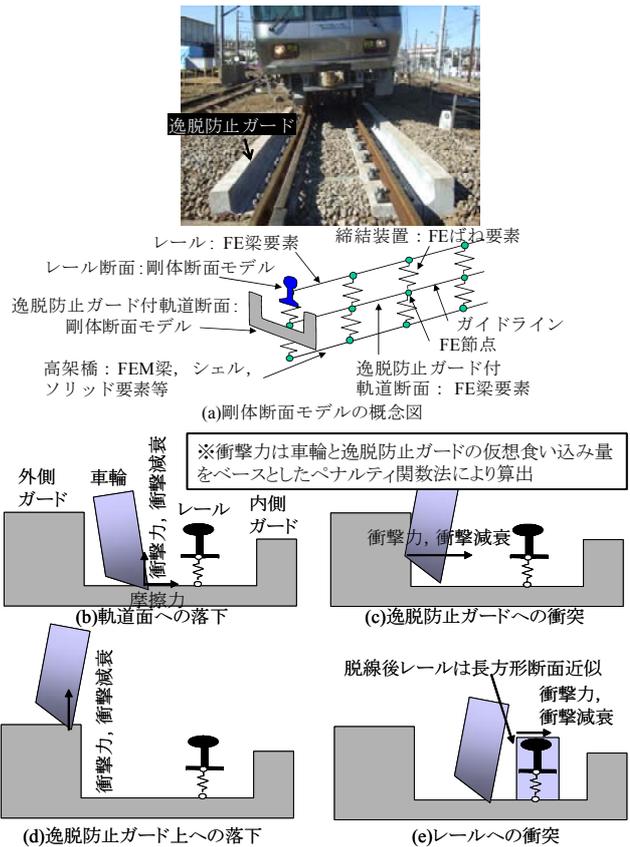


図-4 車輪と逸脱防止ガードの力学モデル

考える。フランジ接触については、レールの小返りばね  $k_p$  を用いて接触力  $H$  の水平分力に相当するフランジ圧  $Q_f$  のみを考慮する。

図-4 に車輪と逸脱防止ガードの力学モデルを示す。脱線後の車両挙動を評価するために、MBSにより逸脱防止ガードを含む軌道構造と車輪をモデル化した。

車輪の逸脱防止ガードへの衝突時の作用力により、逸脱防止ガード及び軌道構造には動的挙動が生じる。この作用力による逸脱防止ガード及び軌道構造の動的挙動を評価するため、その重心位置の線路方向に新たに有限要素(以下 FE という)節点を用いてガイドラインを定義する。このガイドラインを通じて作用力が FE に伝えられる。軌道構造は、外側及び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、逸脱防止ガード及びレールは、解析の高速化を図るため区分的な直線により近似するモデルとした。

脱線までは図-2、3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、脱線後は図-4の脱線後モデルを車輪ごとに使い分ける。なお、本研究では、外側ガード方式のラダー型マクラギ(図-4(a)参照)の諸元を用いて検討を行った。

### 2.3 構造物の力学モデル

図-5 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-5(a)に示すように構造物データベ

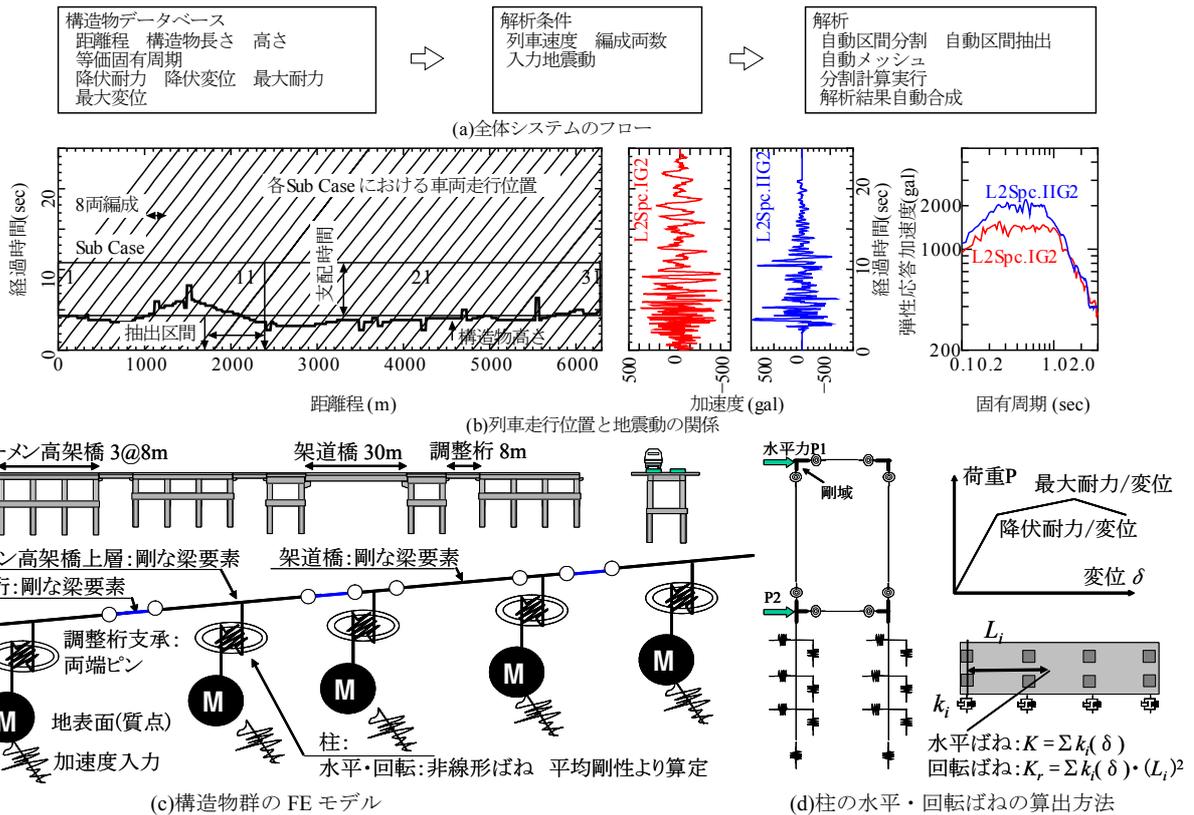


図-5 連続する構造物群の解析システム

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、線区全線に車両を乗荷して、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-5 (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FE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プリラン区間、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。高架橋の高さや配置は実線区の配置を統計的に分析して定めた。図-5 (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-5 (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、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。解析の際には、脱線限界、逸脱限界を見極めるために、これらの地震動の振幅を元波の10~150%の範囲で線形に19段階変化させて入力した。

図-6に地震動位相差の設定方法を示す。式(3)に示せん断波(S波)の伝達経路差から簡易に設定した。

$$\Delta t_i = x_i / V_s = L_{bi} \cdot \sin \phi / V_s \quad (3)$$

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、 $V_s$ は工学基盤のせん断波速度、 $L_{bi}$ 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 $\Delta t$ 単位で解く。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

図-7に地震時の車両走行性の評価指標と脱線モードを示す。車両の脱線限界の目安値には、車輪のフランジ

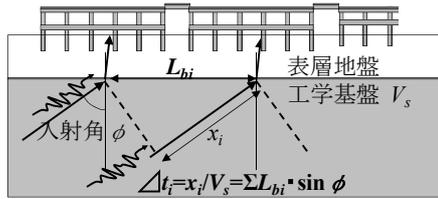


図-6 地震動位相差の設定方法

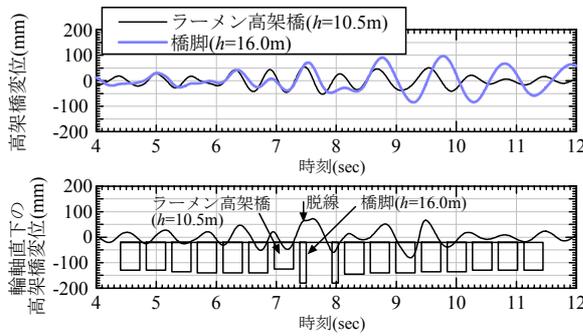


図-8 時刻歴波形の例 (Sub Case 8, 1号車, 海溝型 L2 地震動スペクトル I,  $PGA = 240gal$ , 位相差無)

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。

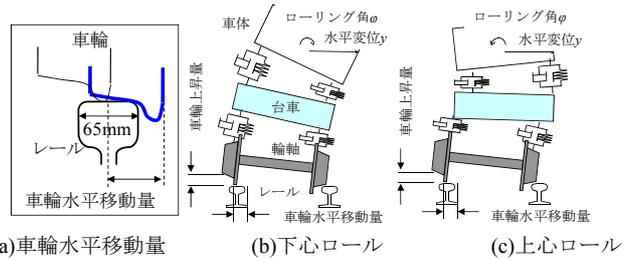
### 3. 解析結果

#### 3.1 時刻歴波形

図-8 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 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-7 参照, 座標系は図-1 参照)。

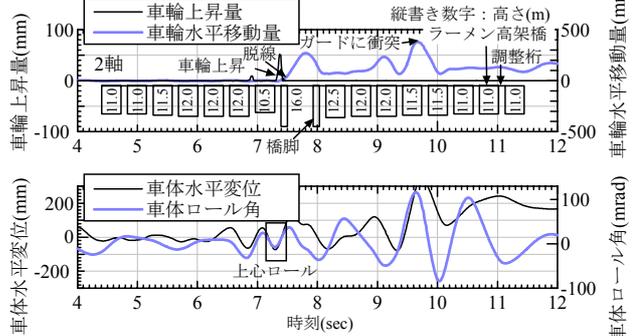
#### 3.2 地震時車両走行性の基本性状

図-9 にモデル線区全体の諸元を、図-10 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 (隣り合う構造物の橋軸線同士がなす角度



(a)車輪水平移動量 (b)下心ロール (c)上心ロール

図-7 地震時の車両走行性の評価指標と脱線モード



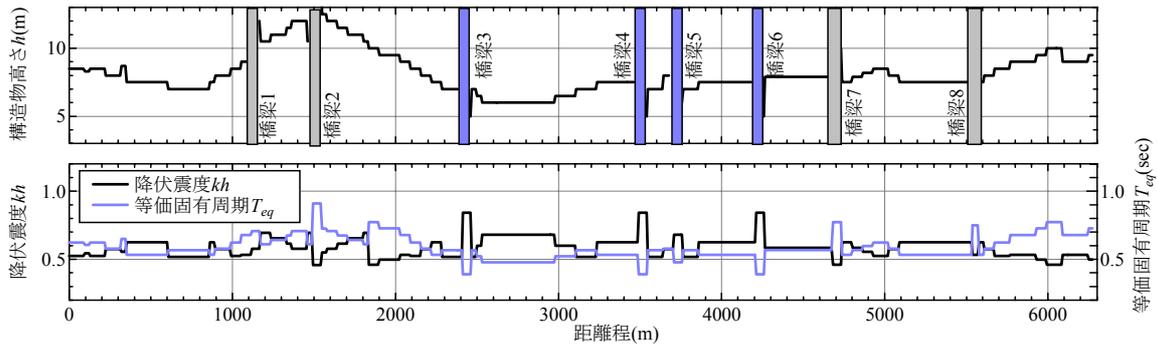


図-9 連続する構造物群の構造物諸元

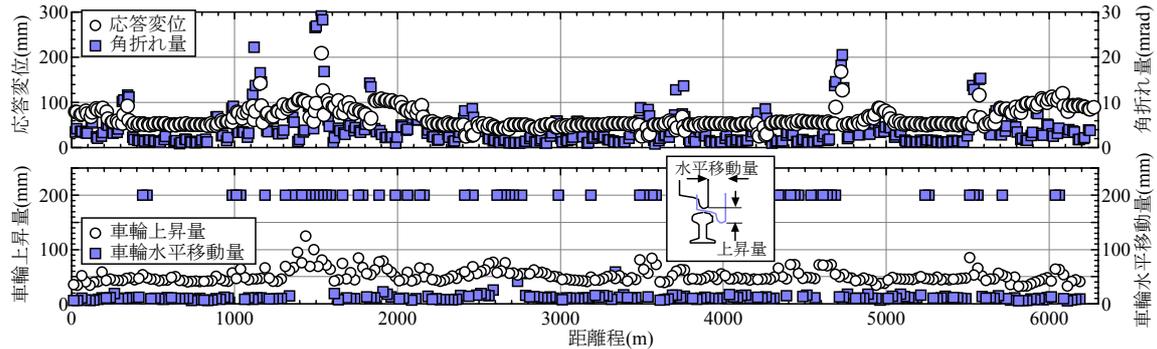


図-10 連続する構造物群の解析結果(海溝型L2地震動スペクトルI,  $PGA = 240gal$ , 位相差無)

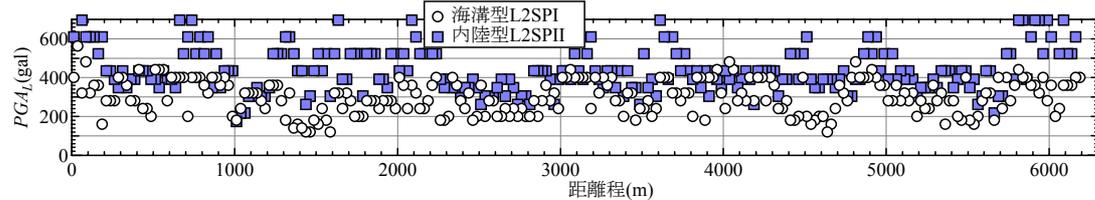


図-11 連続する構造物群の限界地表面加速度  $PGA_L$  (地震動の位相差無)

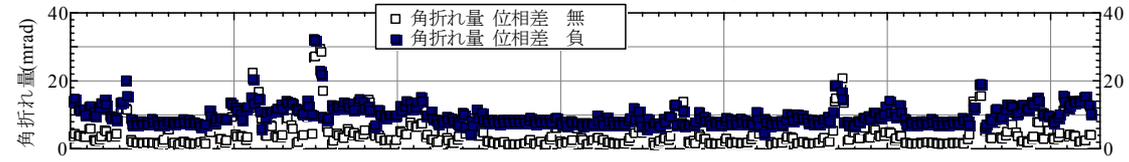


図-12 位相差が連続する構造物群の応答に及ぼす影響(海溝型L2地震動スペクトルI,  $PGA = 240gal$ )

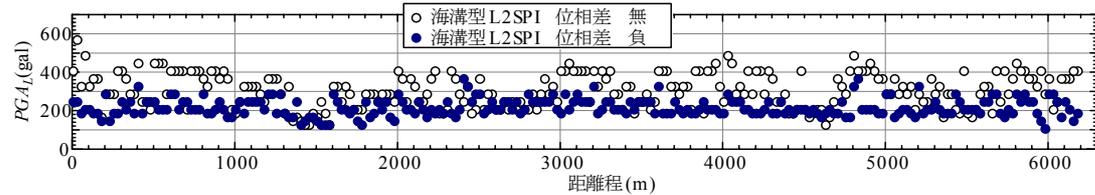


図-13 位相差が連続する構造物群の限界地表面加速度  $PGA_L$  に及ぼす影響

ここに、 $P_{dir}(PGA)$ は  $PGA$  に対応した被害発生確率、 $\Phi$ は正規標準累積分布関数、 $\overline{PGA}$ は被害発生地表面入力加速度の平均値、 $\sigma$ は対数正規分布標準偏差である。

対数正規累積分布関数の対数標準偏差 $\sigma$ が海溝型のL2地震動スペクトルIで0.31、内陸活断層型のL2地震動スペクトルIIで0.27となった。

図-15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、海溝型L2スペクトルIで若干の差異が見られるものの、フラジリティ曲線上において車両の走行方向の影響は小さかった。

図-16に地震動の位相差がフラジリティ曲線に及ぼ

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

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。

解析結果の換算条件  
 1日当たりの列車本数 16両編成 144本 :6分に1本 360秒に1本  
 列車間隔 27000m 構造物区間 6300m  
 列車速度 270km/h(75m/s)  
 車両長25mを評価単位とすると占有時間 0.33秒  
 25mの評価単位に車両が存在する確率 0.0148  
 当該線区を走行している車両の期待値 3.674両

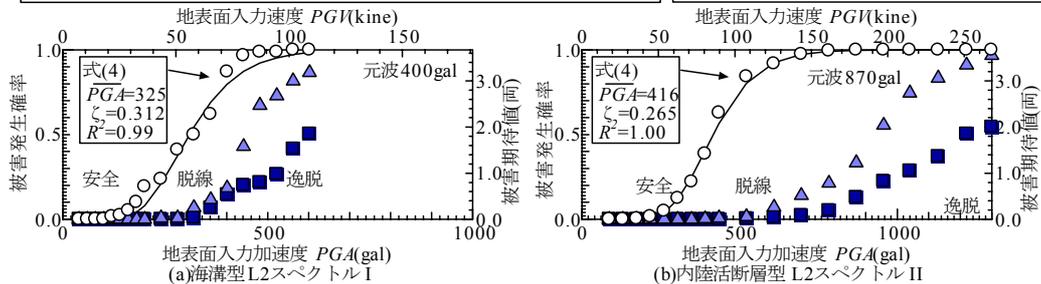
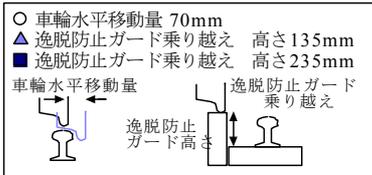


図-14 モデル線区の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線（地震動の位相差無）

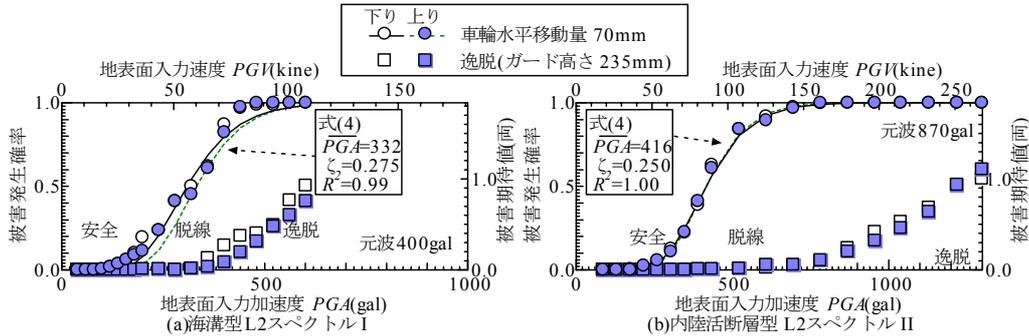


図-15 車両の走行方向がフラジリティ曲線に及ぼす影響（地震動の位相差無）

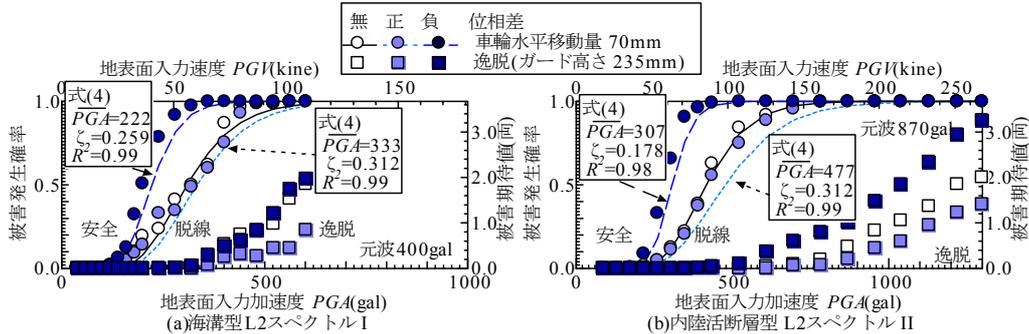


図-16 地震動の位相差がフラジリティ曲線に及ぼす影響

- (1) 地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線（地震動指標に対する被害発生確率）を算出し、対数正規累積分布関数の対数標準偏差が海溝型の L2 地震動スペクトル I で 0.31, 内陸活断層型の L2 地震動スペクトル II で 0.27 となることを示した。
- (2) 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。
- (3) 車両の走行方向の影響は、海溝型 L2 スペクトル I で若干の差異が見られるものの、小さい。
- (4) 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。

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-耐震設計, 丸善, 1999
- 4) 曾我部正道, 金森真, 呂佳欣: PCエクストラードボン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