

論文 鉄道運行情報を用いた地震時の高速走行車両の脱線確率

成田 顕次¹ 徳永 宗正¹ 坂井 公俊²

¹正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (〒185-8540 国分寺市光町2-8-38)

E-mail: narita.kenji.97@rtri.or.jp

¹正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 (同上)

E-mail: tokunaga.munemasa.68@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (同上)

E-mail: sakai.kimitoshi.36@rtri.or.jp

効率的に地震時の脱線対策を実施するためには鉄道システム全体を俯瞰して対策を優先する路線や対象等を選定していく必要がある。本論文では、地震動情報、構造物情報、運行情報を考慮した路線全体の脱線編成数の確率密度の評価法を提案した。まず、構造物種別毎の脱線発生 の累積確率を算出した結果、橋りょうより盛土、トンネルのほうが脱線しにくい、地盤種別も大きく関係しており、G5地盤上の盛土区間とG2地盤上の橋りょう区間は、累積確率が50%となる地表面加速度が同程度であることを明らかにした。次に、橋りょう境界部の不同変位により、地表面加速度が100~200galの場合は脱線限界の低減率は0.8~0.9程度の分布が多く、200~500galの場合は低減率が広く分布しながら低下する傾向を示した。最後に、提案手法による脱線編成数と実現象を比較し、概ね整合的な結果を得た。

Key Words : seismic analysis, bridge, embankment, tunnel, attenuation relationship, derailment

1. はじめに

鉄道構造物においては、2004年に新潟県中越地震で高速走行中の新幹線車両が、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震で回送中の新幹線車両において脱線が発生した^{1,2)}。将来的に発生する大規模地震に備え、各事業者において土木構造物では構造物の耐震対策に加えて、脱線問題に対して地震計の設置、軌道の対策等、鉄道システム全体としての検討、対策が進められている。脱線対策を効率的に実施するには路線全体を俯瞰して脱線に対する性能を評価し、対策を優先する路線、構造物種別、構造形式、対策工法等を選定する必要がある。

橋りょう区間における軌道位置の振動は、地表面地震動に橋りょうの振動が加味されるため、相対的に脱線に対する弱点となりやすい。過去に橋りょう区間を対象とし、地震動の振幅と脱線の関係について多くの検討がなされており、脱線に対する fragility 曲線が算出されている³⁾が、盛土、トンネル区間を含む路線全体での評価は著者らが試行的に行った事例に限られている⁴⁾。橋りょう区間のみを対象とした検討では、橋りょう区間内の相対的な弱点箇所の評価は可能であるが、盛土、トンネル区間を含めた異種構造物間の対策の優先順位や、線

区や区間毎の脱線に対する性能の比較等は不可能である。

地震動の特性を考えると、震源から走行位置直下の地表面まで伝播する過程で地震動が増減幅し、橋りょう、盛土、トンネルといった構造物種別、またそれらの振動特性に依存して軌道面の応答特性は変化する。さらに、橋りょう区間においては隣接構造物との境界に発生する不同変位が大きい場合には、脱線の可能性は大きく上昇する。加えて、車両の性能や走行速度に依存して脱線限界は大きく変化する。新幹線車両が1編成でも脱線した場合、路線の復旧に影響を与える可能性があり、社会的な影響が大きい。編成列車の中で1輪軸でも脱線した場合、走行不能となる。脱線編成数が0と1とでは社会に与えるインパクトが大きく異なり、脱線編成数が増加するほど運行停止等の影響を受ける区間が拡大するとともに、事業者、利用者の損失が大きくなる。

本論文では、路線内の橋りょう、盛土、トンネル区間の地盤種別、構造物種別、及び列車の運行情報を考慮した路線全体の脱線編成数の確率密度の算出を行った。その際、路線全体を俯瞰した評価とすることから、地震の震源位置と構造物の距離による距離減衰の効果を概略的に考慮した。車両の脱線発生の有無は、車両/構造物の動的相互作用を考慮した数値解析に基づき評価した。

2. 検討手法

(1) 路線全体における脱線編成数の確率密度の評価方法

図-1 に、本論文で評価対象とする路線全体の脱線編成数の確率密度の評価方法を示す。先述したように、地震時の脱線現象は多くの要因に起因して発生の有無が決定する。ここでは、大きく分けて地震動情報、運行情報、構造物情報の3つの情報を考慮して脱線の有無 D (0:脱線無し, 1:脱線発生) を判定し、路線 L における脱線列車編成数 N_D の確率密度 $P(N_D|L, A)$ を評価する。2.(2)では、地震動情報としては、対象とする地震の規模（マグニチュード）、震源までの距離といった情報を考慮することで、これから地震動の振幅 A を概略的に評価する。2.(3)で後述するように、列車運行情報としては、運行本数、運行間隔、線区の最高走行速度、駅数等の情報を考慮する。2.(4)で後述するように、構造物情報としては、走行地点の構造物種別 T 、振動特性 C を考慮する。構造物種別 T が橋りょうとなった場合には構造物境界の不同変位の影響を考慮する。

ここで脱線列車編成数 N_D の確率密度 $P(N_D|L, A)$ は、各走行列車の脱線発生が独立事象であることを仮定できる場合、式(1)のように記述できる。

$$P(N_D|L, A) = E(N|L) \times P(D|L, A) \quad (1)$$

ここで、 E は期待値、 P は確率密度、 N は地震発生時刻における走行列車編成数を表す。即ち、 $E(N|L)$ は設定した路線における地震発生時の走行列車編成数の期待値、 $P(D|L, A)$ は地震動の振幅、走行位置の構造物に依存する脱線発生確率である。

$E(N|L)$ は、実際には時期や時刻に依存して変化するものであるが、ここでは平均的な値として式(2)により算出することとする。

$$E(N|L) = L_L / (L_v n_v + t_{int} \bar{V}) \quad (2)$$

ここで、 L_L は路線長、 L_v は車両長、 n_v は車両数、 t_{int} は単位時間当たりの平均運行間隔、 $\bar{V}$ は線区内の平均速度を示す。

次に、地震動の振幅、走行位置の構造物に依存する脱線発生確率 $P(D|L, A)$ は、具体的には線区 L 毎にあらかじめ設定された構造物種別 T 、構造物種別毎の振動特性 C 、および地震動の振幅 A により定まるものであり、 A 、 T 、 C がそれぞれ独立であるという仮定が一般的に成立することから、式(3)のように記述できる。

$$P(D|L, A) = \int_T \int_C P(T|L) P(C|T) P(D|A, T, C) dC dT \quad (3)$$

式(3)から分かるように、 $P(D|L, A)$ は、ランカーブや構造物の振動特性等の単純な正規分布で表現できない分布の積分となることから、ここでは、多くの

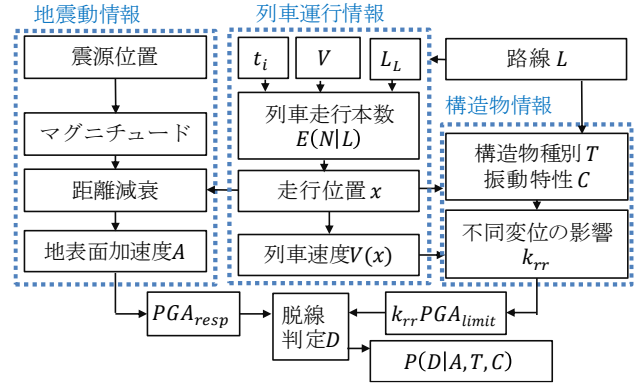


図-1 路線全体の脱線数の評価法

パラメータ分布を考慮するためモンテカルロ法を適用して、脱線列車編成数 $P(N_D|L, A)$ を $P(N_{D,i_s}|L, A)$ により近似する。 i_s は試行毎の値である。

$$N_{D,i_s} = \sum_{i_t=1}^{n_t} D \quad (4)$$

ここで、 n_t は線区内を走行する列車編成数であり式(2)に示す $E(N|L)$ と同義である。 D は編成列車毎の脱線の有無の判定結果であり、式(5)で示すように地表面加速度の最大値 PGA_{resp} と限界値 PGA_{limit} により判定する。

$$D = \begin{cases} 1 & (PGA_{resp} \geq k_{rr} PGA_{limit}) \\ 0 & (PGA_{resp} < k_{rr} PGA_{limit}) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 k_{rr} は2.(4)b)で後述する不同変位による振動変位の限界値の低減率であり 0-1 の値となる。 PGA_{resp} は A 、 L の関数であり、モンテカルロシミュレーションの試行の中で列車走行位置毎に算出される。 PGA_{limit} は T 、 C の関数であり、2.(5)で後述する数値解析により予め算出しておくデータセットである。

(2) 地震動情報のモデル化

a) 対象とする地震動

本検討では鉄道構造物の耐震設計基準⁵⁾（以下、耐震標準）で示されている L2 地震動スペクトル I、スペクトル II の2種類を対象とした。スペクトル I はプレート境界で繰り返し発生する $M_w 8.0$ 程度の海溝型地震が 60km 程度離れた地点で発生した場合の地震動を想定したものであり、スペクトル II は、 $M_w 7.0$ 程度の内陸活断層による地震が直下で発生した場合の地震動を想定している。

地震動入力に対する時刻歴応答解析は、橋りょう、盛土に対しては、鉄道設計標準の設計地震動 12 波を用いた。G0 地盤～G5 地盤用の L2 スペクトル I 地震動（以下、「L2spe.I(G0)～L2spe.I(G5)」と示す）、G0 地盤～G5 地盤用の L2 スペクトル II 地震動（以下、「L2spe.II(G0)～L2spe.II(G5)」と示す）を対象とした⁵⁾。トンネルに関しては基盤波に近い、L2spe.I(G1)、L2spe.II(G1)を適用した。

図-2 に、入力として用いた地震動の弾性加速度応答スペクトルの例を示す。

b) 震源からの走行位置までの距離減衰

図-3(a)に、震源から構造物までの地震動伝播の概念図を示す。当然のように、走行位置の地表面加速度は震源までの距離に依存して大きく変化する。そこで本検討では、式(6)の距離減衰式⁹⁾を用いて、各構造物位置の地表面最大加速度(peak ground acceleration, 以下「 PGA_{resp} 」)の変化を概略的に推定することとした。

$$\log PGA_{resp} = 0.5M_w + 0.0043D + 0.61 - \log(X + c) - 0.003X \quad (6)$$

ここで、 M_w はモーメントマグニチュード、 D は震源深さ(km)、 X は断層最短距離(km)を示す。また、式(6)で用いられている係数 c は式(7)で示すことができる。

$$c = 0.0055 \cdot 10^{0.5M_w} \quad (7)$$

この距離減衰式にもとづく場合、地表面加速度の最大値 PGA_{resp} は、マグニチュード、震源深さ、断層最短距離によって決定される。図-3(b)に、構造物の相対距離と地表面加速度の関係を示す。図の結果は、スペクトルI、IIは耐震標準で定められているL2地震動スペクトルI、IIの震源深さとマグニチュードを参考にし、海溝型であるスペクトルIは、震源深さ30km、マグニチュード8.0、直下型であるスペクトルIIは震源深さ3km、マグニチュード7.0を仮定した。また、スペクトルIでは、路線との最短距離を60km、スペクトルIIでは、3kmと設定するとともに、震源域の面的な広がりやの影響は無視した。図の横軸は、震源と最も近い箇所に位置する構造物との相対的な距離を示し、図の縦軸は地表面加速度の最大値 PGA_{resp} を示す。当然のように、スペクトルI、IIともに、0km地点で、 PGA_{resp} が最大 PGA_{resp}^{max} となる。また、スペクトルIIは構造物相対距離が0に近い程、地表面加速度は大きい。一方でスペクトルIは、構造物相対距離が大きくなるほど、地表面加速度が急激に低下する。一方でスペクトルIIは、構造物相対距離が0km近傍では、スペクトルIIに比べて地表面加速度は小さいものの、相対距離が大きくなっても緩やかに低下する傾向があり、スペクトルIIに比べると地表面加速度の影響範囲が大きいことがわかる。また以降の検討では、地点ごとの断層からの距離の変化に伴う振幅レベルの一律の変化のみを考慮することとし、位相特性や周波数特性の変化については無視することとした。

(3) 列車運行情報のモデル化

路線で走行している列車編成 $E(N|L)$ が増加するほど、脱線の可能性が高まる。一方で、駅の近傍では走行速度が低下することから脱線発生確率 $P(D|L, A)$ は低下する。

表-1に、過去に脱線被害が発生した3線区の構造物、地震動、列車運行情報の一覧を示す。表の構造物種別の存在割合に着目すると、過去に脱線被害が発生した路線では、橋りょうの割合がトンネル、盛土に比べて高い。路線Aでは、線路延長が他の路線に比べて長く、橋りよ

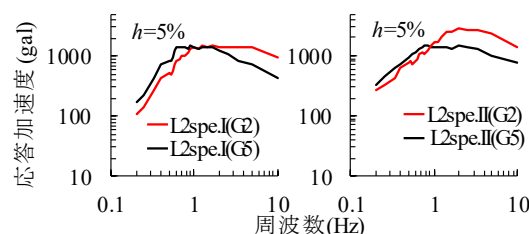
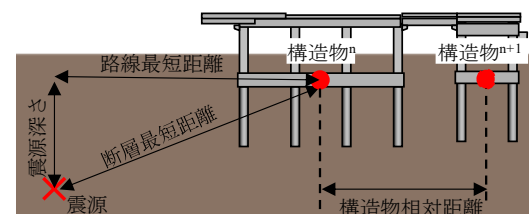
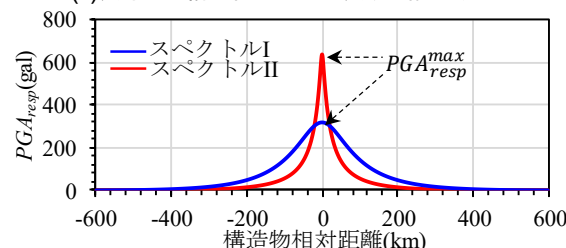


図-2 入力地震動の応答波形と弾性加速度応答スペクトル



(a)震源から構造物までの地震動伝播の概念図



(b)構造物間距離と地表面加速度の関係

図-3 震源位置と地表面加速度の関係

うの割合も72%と大きいことから、列車が橋りょう上にいる可能性が高い。また、脱線被害が発生した際の地震動に着目すると、路線Aは、マグニチュード M_w は9.0で、脱線被害が発生した近傍で観測された PGA_{resp} が、712galと路線B、Cに比べて2倍程度大きいことから、他の路線に比べて脱線被害が発生する可能性が高いこともわかる。

列車の走行位置によって走行速度が異なる。例えば、駅近くに列車がいる場合は停車のために走行速度が遅くなる。そこで本検討では、仮想のランカーブを作成し、列車の走行位置に依存する走行速度のばらつきを考慮することとした。通常、列車運行で用いられるランカーブを作成する際には、対象線区の勾配、曲線、速度制限、編成車両等の条件と、車両性能に関する引張力、列車抵抗、制動力等の関係を考慮する必要があるが、本検討では、表-1の路線延長距離、運行情報を参考に、列車の加減加速度2.5km/h/sと設定し、ランカーブを作成した。

(4) 構造物情報のモデル化

a) 橋りょうの振動特性の確率密度分布 $P(C)$

図-4(a)に、構造物の振動特性の正規分布に基づく確率密度を示す。設計図書からある実際の線区における等価固有周期の逆数である降伏振動数と降伏震度の値を抽出し統計分析した結果、降伏振動数の平均は1.51で、標準偏差は0.39であり、降伏震度の平均は0.45で、標準偏差は0.15であった¹⁰⁾。これらの値を用いて、2次元正規分布に基づく構造物のパラ

メータの確率密度を算出した。図から、降伏振動数は 1~2Hz の範囲で確率密度が高く、降伏震度は 0.3~0.7 の範囲で確率密度が高いことが確認できる。この 2 次元正規分布を実際の構造物が存在する範囲として k_{hy} は 0.3~0.7, f_{eq} は 0.5~2.5Hz の範囲で切断した確率密度分布を定義した。

b) 橋りょう境界部の不同変位が及ぼす影響

橋りょう区間の道路や鉄道等の交差箇所においては架道橋を配置することが一般的であり、そのような箇所では、構造形式が変わるため、構造物の振動特性も変化しやすい。本論文では不同変位として桁式高架区間や架道橋で発生する角折れを考慮して、式(8)で示す限界値の低減率 k_{rr} を算出して¹¹⁾、簡易的に振動変位の限界値を低減させることで考慮した。

$$k_{rr} = \left(1 - \left(\frac{\theta_{resp}}{\theta_{lim}} \right)^{1.8} \right)^{\frac{1}{0.7}} \quad (8)$$

ここで、 θ_{resp} は角折れの応答値、 θ_{lim} は角折れの限界値で角折れ通過時の列車速度 V の関数として与えられ、 θ_{resp} が θ_{lim} より大きい時に k_{rr} は下限値として 0 になる。

c) 盛土の振動特性の確率密度分布 $P(C)$

図-4(b)に、盛土の振動特性の確率密度を示す。図は、ある実路線の盛土高さ分布をもとに平均 0.8、標準偏差 0.6 となる対数正規分布に適合すると仮定した。同一高さにおける周期等のパラメータは上述した手順に従って設定し、この変動は考慮していない。

(5) 脱線判定 D の評価方法

脱線判定 D は、脱線前後の車両挙動を解析可能である、新幹線車両と鉄道構造物との動的相互プログラム DIASTARS III を用いて、数値シミュレーションにより算出した。以下にその概要を述べる¹²⁾¹⁴⁾。

図-5に、車両の力学モデルを示す。車両は、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、ダンパー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。また、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ーが設けられていることから、これを表現するために、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¹²⁾や、汎用の機構解析プログラムとの比較・検証が既に実施されている¹³⁾。なお、本研究で用いる車両諸元は近年の新幹線車両の諸元を参考に仮定した¹⁴⁾。

図-6に、脱線前の車輪／レール間の力学モデルの概要を示す。車輪とレールの動的相互作用力は、両者の正確な幾何学形状を考慮して、接触点と接触角から計算する。水平方向では、車輪フランジとレールとの間に遊間が確保されている場合には、接触面

表-1 新幹線路線における運行情報^{2), 7)-9)}

路線名 線路延長 L_L (km)		構造物種別の存在 割合 $P(T L)$			地震動			運行情報	
		橋り よう	トン ネル	盛 土	M_w	PGA_{resp} (gal)	PGA_{resp}^{max} (gal)	運行 間隔 (分/本)	車両/ 編成 n_v
A	269.5	60%	39%	1%	6.6	389	1676	20	8
B	496.5	72%	23%	5%	9.0	712	944	20	10
C	256.8	42%	50%	8%	7.0	398	1580	30	8

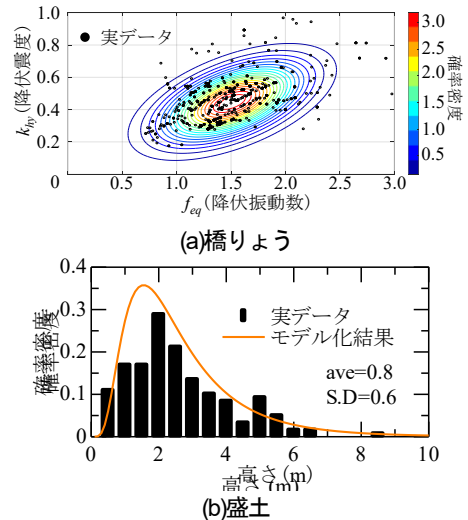


図4 構造物種別毎の振動特性の確率密度分布

の接線方向にクリープ力が働く。クリープ力は、車輪がレール上を転がりながら進むときのクリープ（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。車輪フランジとレールとが接触する場合には、レール小返りばねに基づくフランジ圧が接触面法線方向に働く。ここで、本研究では軌道不整の影響については考慮していない。脱線判定は、車輪とレールの相対水平移動量を用い、その限界値を $\pm 70\text{mm}$ とした。

a) 橋りょう

図-7に、構造物の力学モデルを示す。鉄道構造物は一般的に標準設計による物が多く、その動的挙動は1自由度系モデルで表現できることが多い⁵⁾。実務設計においても、1自由度系に基づく非線形スペクトル法により、地震時応答を推定するのが一般的である。従って構造物はトリリニア型の骨格曲線、標準型の履歴特性を持つ1自由度系でモデル化した。骨格曲線は、降伏震度 k_{hy} 、最大震度 k_{hmax} 、降伏振動数 f_{eq} 、構造物単位長さ重量 w_s をパラメータとして設定し、2次勾配を1次勾配の1/10、3次勾配は1次勾配の1/1000とした。減衰は、構造物の各モードに対して5%のモード減衰比 ξ として与えた。 w_s は、構造物と車両の単位長さ重量 ($w_r=17\text{kN/m}$) の比 a ($=w_s/w_r$) が 100 として車両/構造物間の相互作用による効果を無視できる条件で応答解析を行った。

b) 盛土

盛土の動的挙動についても橋りょうと同様に等価な 1 自由度系モデルで簡易に表現した。この時のモデル化方法は、過去に提案されている標準的な手法¹⁵⁾を用いた。具体的には、盛土の固有周期（初期剛性）を高さ等の比較的容易に入手可能な情報から推定し、非線形特性を GHE-S モデル¹⁶⁾で表現した。この時の非線形パラメータも盛土形状から簡易に評価した。今回検討を行ったケースでは、高さ 6m の盛土であっても固有周期 0.1 秒程度となっており、上述した橋りょうと比較すると相対的に高い振動数を有す。なお、本検討では地震によって盛土に破壊が生じないものと仮定した。

c) トンネル

トンネルは、ほぼ均一な地盤中や安定した地山中に位置するものと仮定し、図-7 に示す構造物ばねを十分剛な線形要素としてモデル化した。

3. 各種要因が脱線限界に及ぼす影響

(1) 脱線限界の評価結果

図-8 に、橋りょう区間における脱線限界加速度 PGA_{lim} を示す。横軸は構造物の降伏振動数で、縦軸は加振振幅を 50~11000gal の範囲で徐々に増加させたときの車両が脱線する限界時の入力加速度の最大値 PGA_{lim} である。図から、地盤の違いに着目すると、G5 地盤の方が G2 地盤に比べて PGA_{lim} の限界値が小さい傾向があることがわかる。特に降伏振動数が 1.0Hz 以下の領域でこの傾向が顕著である。これは、図-2 に示す入力地震動の弾性応答加速度スペクトルから、G5 地盤は G2 地盤に比べて車両系の動的増幅に寄与する 1.0Hz 以下の成分が多いためと考えられる。また、降伏震度の違いに着目すると、降伏震度 0.7、0.5 の場合は PGA_{lim} の限界値が概ね同程度である一方、降伏震度が 0.3 の場合は PGA_{lim} が全体的に増加する傾向にあることが分かる。これは、構造物が降伏すると車両に伝達する加速度が増加しにくくなるためと考えられる。スペクトル I、II の違いに着目すると、スペクトル I の方が限界値が僅かに小さいことがわかる。これはスペクトル I の場合、スペクトル II に比べて継続時間が長く、車両系の振動が増幅し易くなるためと考えられる。

図-9 に、盛土区間における脱線限界加速度 PGA_{lim} を示す。スペクトル I、II とともに G2 地盤では、盛土の高さ 7m 程度まで盛土の高さが高くなると、限界値も増加する傾向がみられ、7m 以降で限界値が緩やかに低下する傾向がみられる。また、G2 地盤に比べ G5 地盤の限界値が低い傾向が確認できる。ス

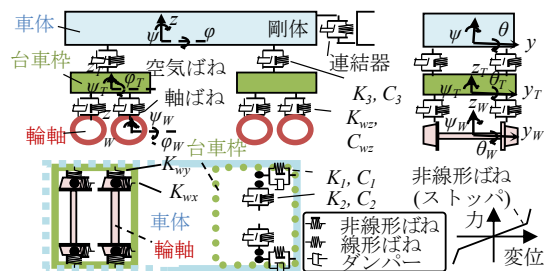


図-5 車両の力学モデル

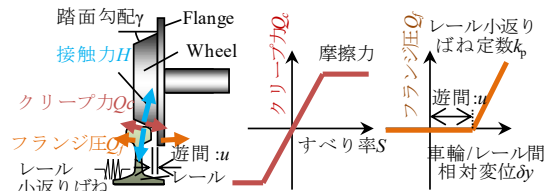


図-6 車輪/レール間の力学モデルの概要

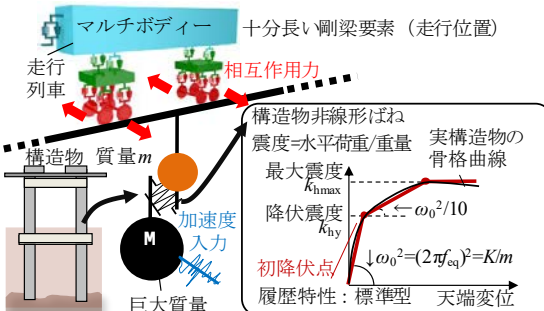


図-7 構造物の力学モデル

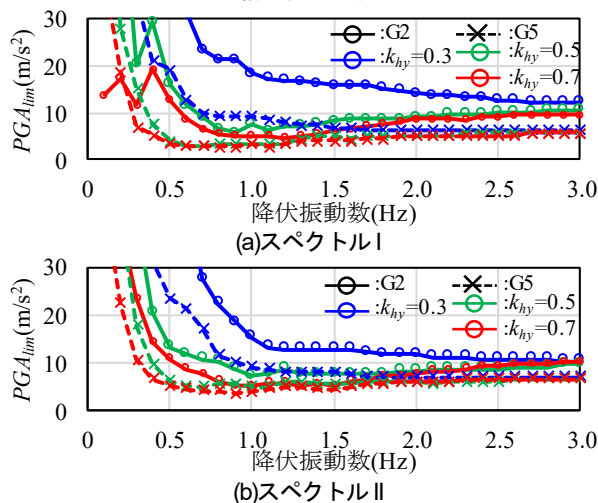


図-8 橋りょうの脱線限界 PGA_{lim}

ペクトル I、II では傾向に大きな違いはなく、限界値は 7m/s² 程度以上であることがわかる。盛土は橋りょうよりも固有振動数が高い領域にあることから、高さが限界値に与える影響が小さいと考えられる。

なお、軟弱地盤上の盛土は地盤改良（耐震補強）等が施工されている例が多く、このような場合には G1~G3 地盤の性能を保有している場合が多いことに留意されたい。

図-9 には、トンネル区間における脱線限界加速度 PGA_{lim} の値もプロットしている。その際に、前述した通りばねの固有振動数を十分剛としたモデルを用いており、設定した地震動がそのまま車両に入力されて

いる。限界値はスペクトル I で 12m/s^2 、スペクトル II で 16m/s^2 であった。これからトンネルは橋りょう、盛土に比べて入力加速度の限界値が高いことが分かる。

(2) 構造種別毎の脱線発生 の累積確率密度

構造物種別毎の基本的な特性を見るために、2. (4) に示す振動特性の確率密度を仮定して、構造物種別毎の脱線発生 の累積確率 $F(D|A, T)$ を算出する。 $F(D|A, T)$ は式(9)により定義される。

$$F(D|A, T) = \int_A \int_C P(C|T)P(D|A, T, C)dC dA \quad (9)$$

図-10、図-11 に橋りょう、盛土・トンネルの脱線発生 の累積確率 $F(D|A, T)$ を示す。(a)が、スペクトル I、(b)がスペクトル II を示す。橋りょう区間の場合は、振動特性 C のばらつきにより、 PGA_{resp} の増加に依存して $F(D|A, T)$ も増加することとなる。実際には不同変位の影響により隣接構造物の位相差に応じて脱線限界が低下するが、ここでは考慮せずに振動変位のみを考慮した結果である。図-11 にトンネルの脱線確率を黒線で示す。トンネルでは振動特性の分布を設定していないことから、 PGA_{resp} の限界値で $F(D|A, T)$ が 0 から 1 に急増する。また図から、同一地盤の場合には、橋りょう、盛土、トンネルの順に、 $F(D|A, T)$ が低下する関係が成り立つ場合が多く、脱線しにくい構造種別である傾向が分かる。G2 地盤の場合、 $F(D|A, T)$ が 50%に達する PGA_{resp} は、橋りょうに対して盛土は 1.3~1.7 倍程度、トンネルは 1.2~1.6 倍程度である。地盤種別の影響に着目すると、橋りょう区間、盛土区間共に、地盤が悪くなるほど $F(D|A, T)$ は増加する傾向にあり、G2、G5 地盤を比較すると $F(D|A, T)$ が 50%に達する PGA_{resp} が概ね 1.5~2.0 倍程度である。俯瞰してみれば、橋りょうより盛土、トンネルのほうが脱線しにくい、地盤種別も大きく関係しており、G5 地盤上の盛土区間と G2 地盤上の橋りょう区間は、 $F(D|A, T)$ が 50%となる PGA_{resp} が同程度である。また、スペクトル I の場合はトンネルより G2 地盤の盛土の方が脱線しにくい傾向であることが分かる。

(3) 不同変位による脱線限界の低減率の確率密度

橋りょう境界部の不同変位による脱線限界の低減率の基本的な特性を見るために、式(8)に基づき低減率 k_{rr} の確率密度 $P(k_{rr}|A, C)$ を算出する。折れ角 θ は、簡易評価法¹⁷⁾から得られる相対変位 d_r を用いて、 $\theta = 2 \times d_r / L_b$ の関係から算出した。 L_b はスパン長であり平均的な値として 25m とした。橋りょうの振動特性は 2. (4) に示す振動特性の確率密度、地盤種別は G1~5 地盤がそれぞれ 10%、30%、40%、

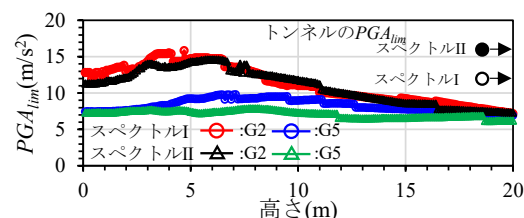
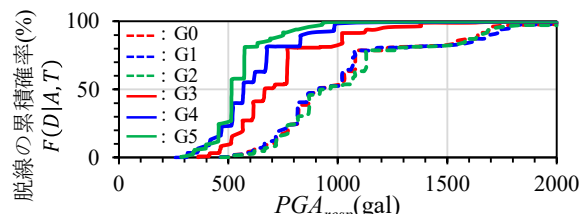
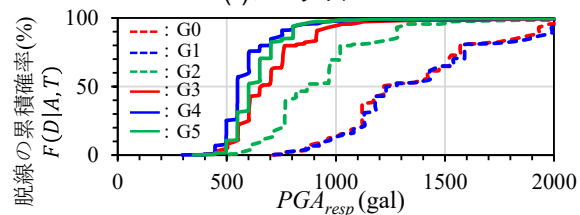


図-9 盛土の脱線限界 PGA_{lim}

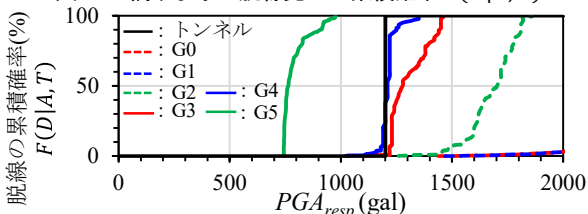


(a) スペクトル I

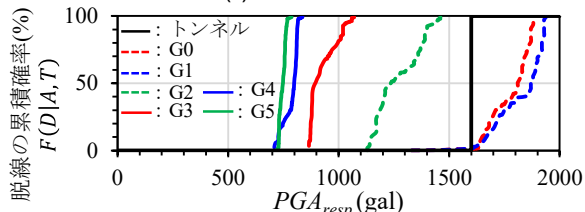


(b) スペクトル II

図-10 橋りょうの脱線発生 の累積確率 $F(D|A, T)$



(a) スペクトル I



(b) スペクトル II

図-11 盛土・トンネルの脱線発生 の累積確率 $F(D|A, T)$

10%、10%、地震動はスペクトル I を仮定した。

図-12 に、不同変位による脱線限界の低減率の確率密度 $P(k_{rr}|C, A)$ を示す。図から、 PGA_{resp} の増加とともに k_{rr} が低下する傾向が確認できる。L1 地震動の規模である 100~200gal の場合、 k_{rr} は 0.8~0.9 程度の分布が多く、変位制限標準で規定されている 10%の低減率と同程度であることが分かる¹⁸⁾。200~500gal の場合は、 k_{rr} が広く分布しながら平均値が低下する傾向にあり、脱線に寄与する不同変位の割合が増加する領域であることから分かる。 PGA_{resp} が 600gal 以上となると k_{rr} が多くの場合で 0 となり、振動変位と不同変位の両方を考えると、橋りょう区間の脱線確率がほぼ 100%となること分かる。

4. 脱線編成数の確率密度の評価結果

図-13に、表-1に示す実線区 A, B, C の脱線編成数の確率密度を示す。縦軸は、図-1 で示すフローに基づき式(1)により算出された脱線列車編成数 N_D の確率密度 $P(N_D|L, A)$ であり、横軸は PGA_{resp}^{max} であり、図-3 で示す距離が 0 の位置の地表面加速度である。線区 B では海溝型の地震であったことからスペクトル I, 線区 A, C では直下型の地震であったことからスペクトル II の結果をそれぞれ用いた。これらの線区では実際に 1 編成の脱線が発生していることから、その結果も同図に記載しているが、横軸の PGA_{resp}^{max} は明確にはわからないことから、路線近くで観測された最大の地表面加速度に近い値とした。

図から、 $P(N_D|L, A)$ の解析結果がばらつきを持ちながら PGA_{resp}^{max} とともに増加することが分かる。脱線が発生する可能性があるのは PGA_{resp}^{max} が100~200gal 以上の場合であるが、地震動が小さい場合には脱線が発生する確率は非常に小さく、列車が震源に近く PGA_{resp} が PGA_{resp}^{max} に近い位置を走行しており、かつ、地盤が悪く、固有振動数が低い橋りょう区間を通過している、等の悪条件が重なった場合である。線区 A, B を比較すると線区 B の方が N_D が多い傾向にあるが、これは路線長が長く走行列車している列車が長いこと、海溝型の地震であり影響範囲が広いことが起因していると考えられ、脱線確率 $P(D|L, A)$ は同程度である。線区 C は A, B と比較して N_D が少ない傾向にあるが、これはトンネル区間の割合が多いことが起因していると考えられ、線区 C は脱線が起こりにくい路線であると言える。

実際の脱線現象と比較すると、各線区とも解析結果は整合的であるが、線区 A では N_D が 0 や 2 となる確率も一定程度あることが分かる。線区 B の解析結果は N_D が 2 となる確率が最も高いが、実際には 1 編成の脱線であった。震源地に近いのが回送中の低速車両のみであったためと考えられる。線区 C は PGA_{resp}^{max} が 1500gal に達してもトンネル区間の割合が多いことから N_D が 0 となる確率が最も高く、900gal でも脱線が発生する確率は 20~30%程度である。実際には 1 編成の脱線が生じており、震源に近い橋りょう上を走行していたという悪条件が重なったことが遠因であると考えられる。即ち、過去の脱線事例は低速の列車が脱線しているが、対象線区の地震動規模が大きいことが影響して低速であっても脱線したことが考えられる。

なお、これらの解析結果は、構造物の振動特性を各線区毎に可変としていないこと、運行情報も限られたものしか用いていないことから、より詳細に検討する場合には適切に入力情報を作成するのがよい。

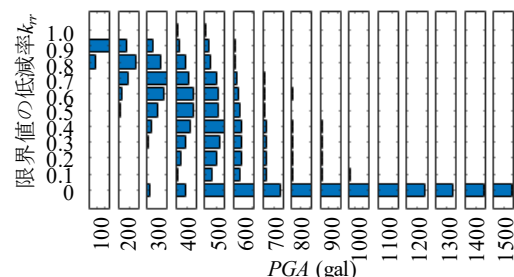


図-12 不同変位による脱線限界の低減率の確率密度 $P(k_{rr}|A, C)$ (スペクトル I)

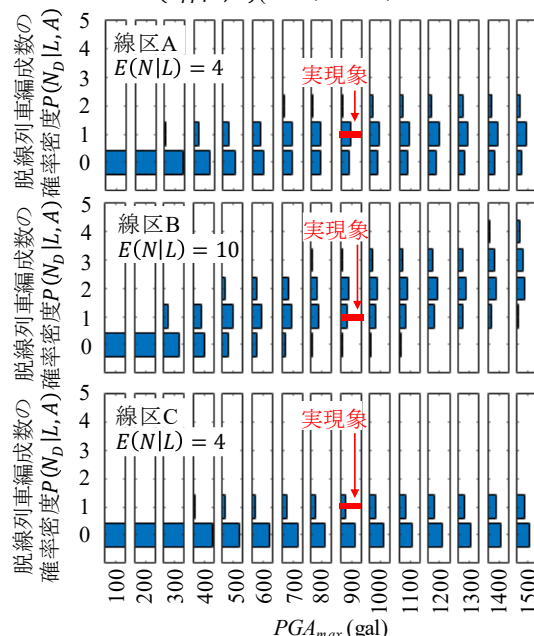


図-13 実線区の脱線編成数の確率密度

5. まとめ

本論文では、地震の震源位置と構造物の距離の変化に伴う地震動の減衰を考慮し、路線内の橋りょう、盛土、トンネル区間の構造物種別、地盤種別および列車の運行情報を考慮した路線全体の脱線編成数の確率密度の算出を実施し以下の結論を得た。

- (1) 橋りょう上で、車両が脱線する限界時の地表面加速度の最大値を計算した結果、G5地盤がG2地盤に比べ車両系の動的増幅に寄与する1.0Hz以下の成分が多いため脱線限界となる地表面加速度が小さい傾向がある。また、スペクトルI, IIの違いに着目すると、スペクトルIの方が地震の継続時間が長く、車両系の振動が増幅しやすいため、限界値が小さい。
- (2) 盛土、トンネルで車両が脱線する限界時の地表面加速度の最大値を計算した結果、盛土では橋りょうよりも固有振動数が高い領域にあることから、盛土高さが限界値に与える影響が小さく、限界値は 7m/s^2 程度以上である。トンネルでは、限界値はスペクトルIで 12m/s^2 、スペクトルIIで 16m/s^2 である。
- (3) 構造物種別毎の脱線の累積確率を算出した結果、橋りょうより盛土、トンネルの方が脱線しにくい、地盤種別も大きく関係し、G5地盤上の盛土とG2地盤上の

橋りょうは、累積確率50%となる地表面加速度が同程度である。また、スペクトルIの場合はトンネルよりG2地盤の盛土の方が脱線しにくい傾向にある。

- (4) 橋りょう境界部の不同変位による脱線限界の低減率を簡易式を用いて評価した結果、地表面加速度の増加とともに低減率が低下し、L1地震動の規模である100~200galの場合、低減率は0.8~0.9程度の分布が多く、200~500galの場合は、低減率が広く分布しながら平均値が低下する傾向にあり、600gal以上となると低減率が多くの場合で0となる。
- (5) 地震動情報、運行情報、構造物情報を考慮した路線全体の脱線編成数の確率密度の評価法を提案した。提案手法に基づく、脱線が発生する可能性があるのは PGA_{resp}^{max} が100~200gal以上の場合である。海溝型地震、路線長が長く、走行している列車が多い場合、脱線する編成数が多くなる。一方、トンネル区間の割合が多い路線は脱線発生確率が低くなる。また、評価結果は実際の脱線編成数と概ね整合的であった。

参考文献

- 1) 鉄道の地震時走行安全研究会：鉄道の地震時走行安全，鉄道工学シンポジウム論文集，No.10，pp.85-93，2006。
- 2) 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書，RA2017-8，2017。
- 3) 曾我部正道，後藤恵一，渡辺勉，浅沼潔：鉄道高架橋の地震時走行安全性に係るフラジリティ曲線，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，2010
- 4) 成田顕次，徳永宗正，後藤恵一，坂井公俊：橋りょう，盛土，トンネル区間の構造物種別を考慮した路線全体の地震時脱線確率，第26回鉄道技術連合シンポジウム（J-RAIL2019），pp.542-pp.545，2019。
- 5) 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，2012。
- 6) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，Vol.523，pp.63-70，1990。
- 7) 高津俊司，土井充：日本の高速鉄道-その軌跡と今後の展望-，鉄道ピクトリアル，Vol.58，No.2，pp.142-pp.153，2008。
- 8) 運輸安全委員会：事故調査報告書説明資料，RA2013-1-1，2013。
- 9) 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書，RA2007-8，2007。
- 10) 成田顕次，徳永宗正，曾我部正道：非線形性を考慮したRC高架橋の不同変位の地震時応答の推定手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.871-876，2019。
- 11) 徳永宗正，成田顕次，池田学：構造物の非線形化を考慮した地震時走行性の評価手法，鉄道総研施設研究ニュース，No.347，pp.7-8，2019。
- 12) 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. 706，2005。
- 13) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物の連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，Vol. 513/I-31，pp. 129-138，1995。
- 14) 松本信之，田辺誠，涌井一，曾我部正道：非線形応答を考慮した鉄道車両と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 A，Vol. 63，No. 3，pp. 533-551，2007。
- 15) 坂井公俊，荒木豪，室野剛隆：等価1自由度モデルを用いた盛土の地震時非線形挙動の評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.73，No.1，pp.174-186，2017。
- 16) 室野剛隆，野上雄太：S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.494-497，2006。
- 17) 成田顕次，徳永宗正，池田学：降伏震度が異なるRC高架橋境界部の地震時相対変位の推定手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，2020(掲載予定)
- 18) 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。

(2020. 4. 3 受付)

DERAILMENT PROBABILITY OF HIGH-SPEED RAILWAY DURING AN EARTHQUAKE USING OPERATION INFORMATION

Kenji NARITA, Munemasa TOKUNAGA and Kimithoshi SAKAI

In order to efficiently implement derailment countermeasures, routes and targets for which countermeasures are prioritized have to be selected considering the entire railway system. This paper proposed a method for evaluating the probability density of the number of derailed trains on the entire line considering the seismic motion information, operation information, and structural information. First, as a result of calculating the cumulative probability of derailment occurrence for each type of structure, embankments and tunnels are less likely to derail than bridges, in addition, the ground classification also significantly affect the result. It was clarified that the surface acceleration at which the cumulative probability becomes 50% is almost the same in the embankment section on G5 ground and in the bridge section on G2 ground. Next, due to the differential displacement of the bridge boundary, the derailment limit decreases 10~20% when the ground surface acceleration is 100 to 200 gal, and the reduction rate significantly decreases when it is 200 to 500 gal. Finally, the number of derailed trains calculated by the proposed method and actual phenomena were compared, and almost consistent results were obtained.