

構造物種別における新幹線車両の地震時脱線編成数の期待値の評価

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○成田 顕次 正会員 徳永 宗正 正会員 坂井 公俊

1. はじめに

鉄道構造物において、近年の大規模地震に新幹線車両の脱線が発生している。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が進められている。脱線対策を効率的に実施するためには路線全体を俯瞰して脱線に対する性能、強度を評価し、対策を優先する路線、構造物種別、構造物形式、対策工法等を選定していく必要がある。相対的に弱点となる橋りょう区間に対しては過去に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が、盛土、トンネル区間を含む路線全体での評価は過去に例がない。そこで本稿では、路線内の構造物種別、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期待値の算出を行った。車両の地震時の脱線限界は、動的相互作用を考慮した非線形数値シミュレーションに基づき評価した。

2. 検討方法

地震時において、列車編成の中で1輪軸でも脱線した場合走行不能となり、復旧に時間を要する。本論文では、路線全体における脱線編成数の期待値の算出式として、式(1)を提案する。

$$E(N_D|L,A) = E(N|L) \times F(D|L,A) \tag{1}$$

ここで、 E は期待値、 F は累積確率密度、 N_D は脱線列車編成数、 N は走行列車編成数、 L は路線、 A は地震動規模、 D は脱線発生の有無を表す。脱線列車編成数の期待値 $E(N_D|L,A)$ は、設定した路線における走行列車編成数の期待値 $E(N|L)$ に地震動規模に依存する脱線発生累積確率密度 $F(D|L,A)$ を乗じた値である。 $E(N|L)$ は式(2)により算出される。

$$E(N|L) = L_L / (L_v n_v + t_i V) \tag{2}$$

ここで、 L_L は路線長、 L_v は車両長、 n_v は車両数、 t_i は単位時間当たりの平均運行間隔、 V は車両速度を示す。 $F(D|L,A)$ は式(3)、式(4)により算出される。

$$F(D|L,A) = \int_A P(D|L,A) dA \tag{3}$$

$$P(D|L,A) = P(D|A,T,C) \times \int_C P(C) dC \times \int_T P(T|L) dT \tag{4}$$

ここで T は構造物種別、 C は構造物の振動特性を表す。

図1に示すように、統計調査により得られた構造物毎の振動特性の確率密度分布 $P(C)$ を設定した。

脱線発生確率密度分布 $P(D|A,T,C)$ は、非線形動的解析により地震規模 A 、構造物種別 T 、構造物の振動特性 C 毎に評価した。図2に、非線形動的解析で用いた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、ばねはバイリニア形の非線形ばねとした。本研究で

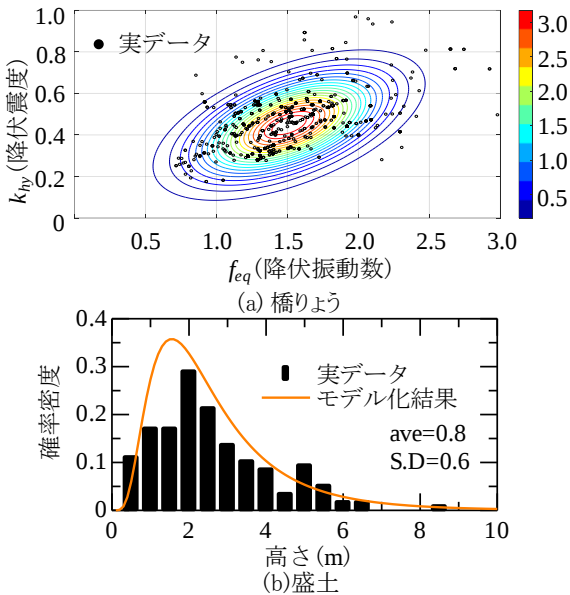


図1 構造物の振動諸元分布

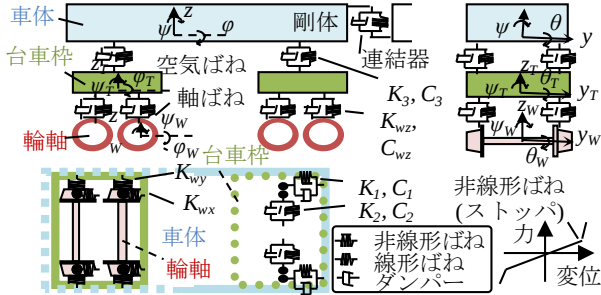


図2 車両の力学モデル

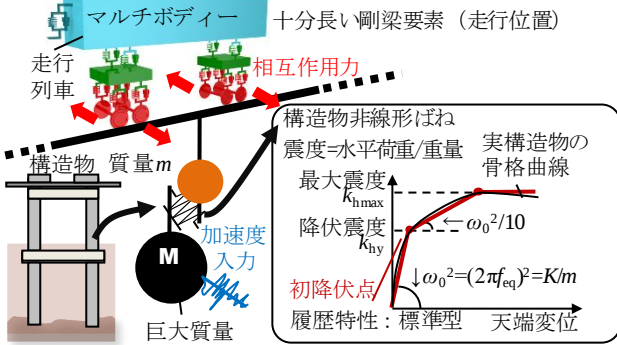


図3 構造物の力学モデル

表1 仮想路線の路線情報

路線名 線路延長 L_L	構造物種別の存在割合 $P(T L)$			運行 間隔 (t_i) 分/本	車両/ 編成 (n_v)
	橋りょう	トンネル	盛土		
A 260 km	40%	50%	10%	10,	8
B 270 km	58%	38%	4%	20,	12
C 500 km	70%	25%	5%	30	10

キーワード 鉄道橋、盛土、地震応答解析、距離減衰、脱線編成数
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2丁目8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7290

用いる車両諸元と橋梁線車両諸元を参考に仮定した¹⁾。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。

図3に、非線形動的解析で用いた構造物の力学モデルを示す。鉄道構造物は一般的に標準規格による物が多く、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ことから、構造物はトリリニア型の骨格曲線、標準型の履帯特性を持つ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_{max} 、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次共振を1次共振の1/10、3次共振は1次共振の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 γ 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。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することとした²⁾。本検討では、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、路線全体の平均的な地盤を想定してL2地震動スペクトルI(G3地盤)を用いた。トンネルに対しては、基盤皮に近いL2地震動スペクトルI(G1地盤)を用いた。

3. 解析結果

図4に、橋りょう区間における脱線限界加速度を示す。図の縦軸は、それぞれ車両が脱線する限界時の入力加速度の最大値(PGA)である。図から、降伏震度が0.7, 0.5の場合はPGAが概ね同程度である一方、降伏震度が低下するほどPGAが全体的に増加する傾向にあることが分かる。

図5に、盛土区間における脱線限界加速度を示す。図から、盛土のPGAは、5mまでは、高さが増加しても 9m/s^2 程度であり、5m以上の領域では 7m/s^2 まで緩やかに低下する傾向にある。また、図には、トンネルのPGAの値をプロットしている。本検討ではトンネルの線形ばねの剛性を十分剛としたことからPGAは1200galとなった。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。

図6に、脱線発生の累積確率密度 $F(D|A, T)$ および確率密度 $P(D|A, T)$ を示す。図の横軸は入力加速度の最大値(PGA)である。橋りょう区間の場合、不同変位の影響による脱線限界の低下を考慮するため解析により得られた限界値を10%低減させた。図から、橋りょう、盛土、トンネルの順に、PGAが増加することがわかる。確率密度に着目すると、橋りょう区間ではPGAが平均的には300gal程度、盛土区間ではPGAが900gal程度、盛土区間ではPGAが1200gal程度で増加しており、脱線するケースが増加することが分かる。累積確率密度に着目すると、橋りょう区間では入力加速度が370gal程度の時、盛土区間では入力加速度が900gal程度の時、トンネル区間では入力加速度が1200gal程度の時に脱線発生確率が50%を超えていくことが分かる。これから俯瞰的に見れば、盛土区間は橋りょう区間の3倍程度、トンネル区間は4倍程度脱線限界に達した地震動レベルが大きいことが分かる。図7に、仮想路線における脱線列車編成数の期待値 $E(N_D|L, A)$ を示す。図から、運行本数の増加とともに $E(N_D|L, A)$ は線形的に増加する事が分かる。路線A及びBは、L2スペクトルI地震動(G3)地盤を入力した場合、1~4編成程度脱線する可能性がある一方、路線CはA、Bと比較して $E(N_D|L, A)$ が大きく、L2スペクトルI地震動(G3)地盤を仮想路線に入力した場合、最大で8編成程度脱線する可能性があることが確認できる。これは、路線Cは脱線限界が低い橋りょう区間長が長いためであると考えられる。

4. まとめ

本論文では、路線内の橋りょう、盛土、トンネル区間の構造物動、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期待値の評価を目的として数値解析に基づく検討を実施した結果、構造物種別の路線長割合、構造物種別毎の脱線発生確率、列車の運行情報を考慮した脱線列車編成数の期待値を定式化した。数値解析により得られた脱線限界および仮想路線の運行情報に基づくと、脱線編成数の期待値は、L2スペクトルI地震動の場合に1~8編成程度であり、路線内の橋りょう区間長に大きく依存することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

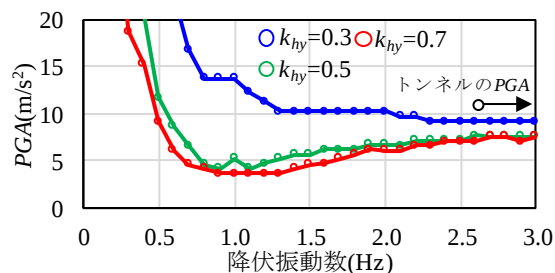


図4 橋りょうのPGA

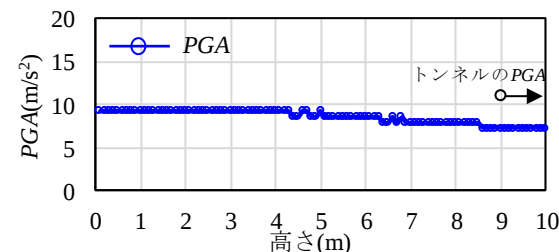


図5 盛土のPGA

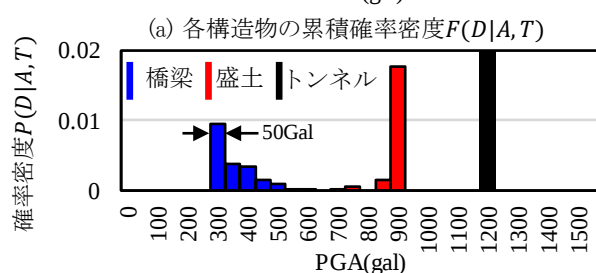


図6 各構造物の種類ごとの $F(D|A, T)$ と確率密度の関係

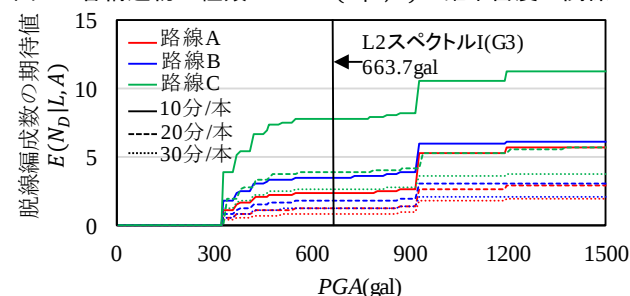


図7 仮想路線における $E(N_D|L, A)$