

連続PC桁における地震時走行安全性の基本特性

(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 池田 学

1. はじめに

鉄道の長大橋では連続桁が多く用いられるが、連続桁の地震時走行安全性についてはケーススタディが一部行われている程度で、地震時走行安全性評価に対する知見が体系化されるには至っていない。一方で、大規模地震時に高速列車が脱線する事象が発生していることから、連続PC桁における地震時走行安全性の基本特性の把握を目的とし、非線形動的相互作用解析を行った。

2. 解析モデル

図1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。本研究で用いる車両諸元は新幹線車両諸元を参考に仮定したり、脱線限界は、車輪とレールの相対水平移動量70mmとした。

図2に、非線形動的解析で用いた連続桁の力学モデルを示す。橋脚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 $k_{hy}^s=0.5$ 、最大震度 $k_{hmax}^s=0.7$ 、固有振動数 $f_{eq}^s=0.5\text{Hz}$ 、 1.0Hz 、 2.0Hz とした。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1/100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。桁は、既設のPC連続桁の設計図面を参考に、橋長400m(59m+94m×3+59m)の5径間で、桁の自重は446.69kN/m、橋軸直角方向の断面二次モーメント I_y は76.74m⁴、鉛直方向 I_z は90.12m⁴とした。中間スパンを単純梁として固有振動数を算出すると1.71Hzを有する桁である。また、軌道を剛とし、桁の変形を無視した剛軌道モデルも併せて検討した。入力地震動は、L1地震動G4地盤を用い、加振振幅を50~900galの18分割とし、数値解析によって車両が脱線した際の入力加速度

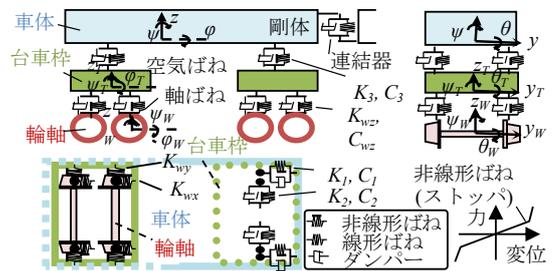


図1 車両の力学モデル

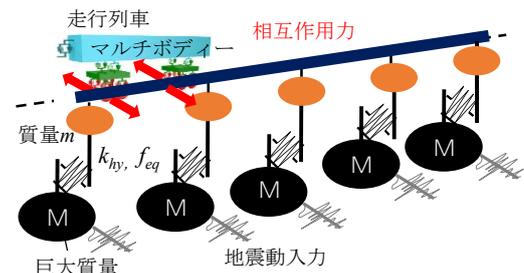


図2 構造物の力学モデル

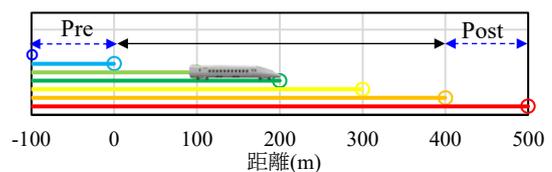


図3 最大入力加速度時の走行位置の関係

の最大値を脱線限界入力加速度 PGA_{lim} とした。

図3に、列車走行位置を示す。走行位置による脱線限界入力加速度に対する影響を考慮するために、対象橋りょうの前後に pre 区間, post 区間を設置し、入力地震動の最大加速度の時刻における、先頭車両の位置を変化させ、網羅的に解析を行った。

3. 解析結果

図4に、橋脚の各固有振動数における軌道面の最大加速度の分布を示す。図の横軸は、距離を示し、縦軸は軌道面上の最大応答加速度 PTA_{res} を示す。図には、剛軌道モデルで検討した際の車両が脱線する限界時の構造物の加速度 PSA_{lim} の結果も示す。図(a), (b), (c)は、固有振動数 $f_{eq}^s=0.5\text{Hz}$ 、 1.0Hz 、 2.0Hz の結果で、入力加速度の最大値 PGA_{res} における、 PTA_{res} の結果である。図から、入力加速度の最大値 PGA_{res} の増加と共に、 PTA_{res} も増加する。特に支点部に比べてスパン中央部で PTA_{res} の値が高

くなる傾向があり、支点間の面外方向の曲げ振動が影響していると考えられる。図(a)~(c)の結果から、入力加速度の最大値 PGA_{res} が 0.8m/s^2 の時、橋脚 $f_{eq}^s=2.0\text{Hz}$ の場合、支点部に比べてスパン中央部で PTA_{res} が 5m/s^2 から 15m/s^2 に3倍程度増加する。一方で、橋脚の固有振動数が低い $f_{eq}^s=0.5\text{Hz}$ の場合、スパン中央部での加速度は支点部に比べて1.2倍程度にしか増加しない。桁の面外曲げの固有振動数が 1.7Hz 程度であることから、橋脚の固有振動数が桁の固有振動数より低い場合は、桁の変形を励起する成分が伝達されない。一方で、橋脚の固有振動数が桁の固有振動数よりも高い場合は、桁の変形を励起する成分が伝達されるため支点部に比べてスパン中央部で加速度が大幅に増加すると考えられる。

図5に、連続PC桁の走行車両の脱線位置と脱線限界入力加速度 PGA_{lim} の関係を示す。また、図には剛軌道走行時の脱線限界入力加速度 PGA_{lim}^r の結果も示す。図から、橋脚の f_{eq}^s が 0.5Hz の場合、剛軌道モデルと比較して脱線限界入力加速度が 6.5m/s^2 から 3.5m/s^2 に0.5倍程度に低下し、桁端部に脱線が集中するが、桁上では脱線限界入力加速度が高くなる傾向がある。橋脚の f_{eq}^s が 1.0Hz の場合、剛軌道走行時と比較して脱線限界入力加速度が 4.0m/s^2 から 2.5m/s^2 に、0.6倍程度に低下、橋脚の f_{eq}^s が 2.0Hz の場合、剛軌道走行時と比較して脱線限界入力加速度が 7.0m/s^2 から 5.5m/s^2 に、0.8倍程度に低下する。走行位置毎の脱線箇所に着目すると、 f_{eq}^s が 0.5Hz の場合、走行車両が桁端部で脱線の傾向がある。これは、軌道面上の加速度応答による影響ではなく、桁端部に生じる不同変位(角折れ)によって生じた脱線であると考えられる²⁾。 $f_{eq}^s=1.0\text{Hz}$ の場合、スパン中央である 100m 、 200m 、 300m 付近で PTA_{res} が増加するため、剛軌道走行時に比べて脱線限界入力加速度 PGA_{lim} が低下したと考える。

4. まとめ

非線形動的相互作用解析を用いて、連続PC桁における地震時走行安全性に関する検討を行った結果、固有振動数が高い橋脚の場合、支点間の面外方向の曲げ振動が影響し、スパン中央で軌道面上の応答加速度が増加し、剛軌道走行時に比べて脱線限界入力加速度が0.6程度に低下する。橋脚の固有振動数が低い場合、端部の折れ角の影響により脱線限界入力加速度が0.5倍程度に低下する。

参考文献

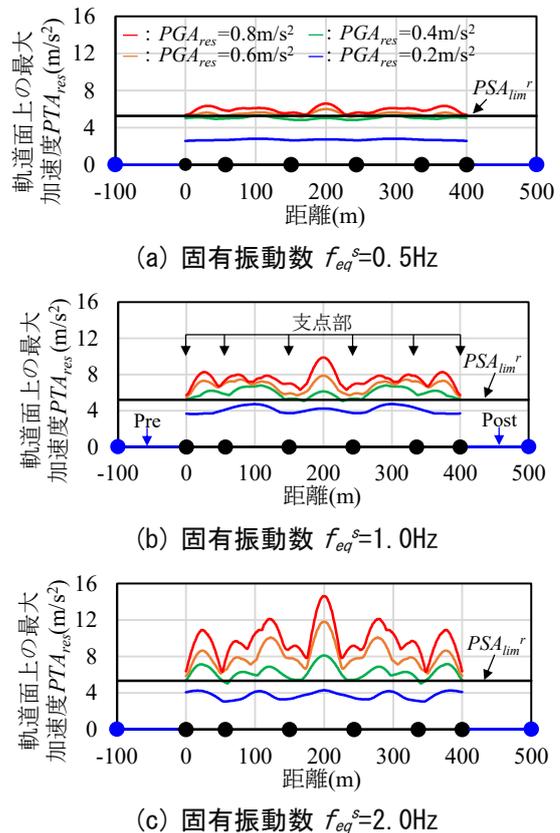


図4 入力加速度と軌道面上の最大加速度の関係

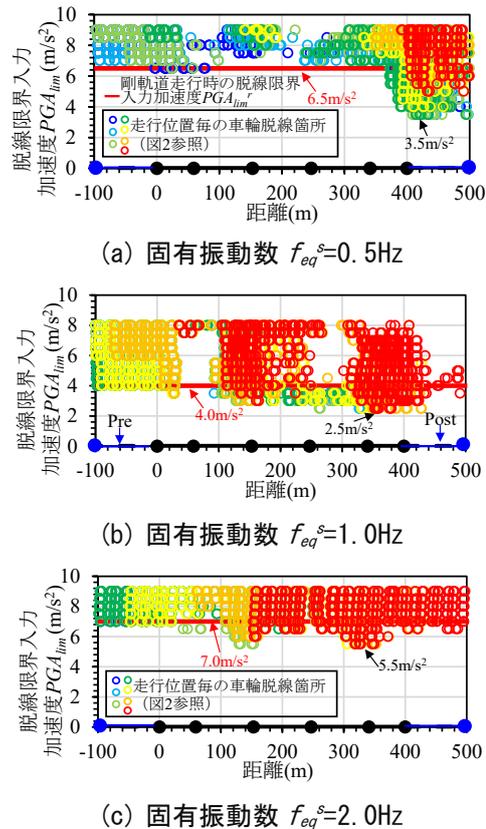


図5 脱線箇所と脱線限界入力加速度の関係

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) 徳永宗正, 成田顕次, 後藤恵一: 鉄道構造物の大規模地震を想定した地震時走行安全性の簡易評価手法, 土木学会論文集A, Vol.76, No.2, pp.376-394, 2020