

高架橋振動特性による鉄道車両の地震時脱線限界に関する研究

芝浦工業大学大学院 学生員 ○清水 紀明

芝浦工業大学 正会員 紺野 克昭

芝浦工業大学 正会員 松浦 章夫

1. 研究の背景

最近、鉄道構造物に対する変位制限のための設計標準が出版された¹⁾が、それによると地震時における鉄道車両の安全性評価については、車両-軌道系の動的相互作用の検討のみではなく構造物の振動特性に対しても十分な検討が必要となる。そこで本研究では、鉄道構造物としてRC高架橋を取り上げ、その橋軸直角方向の等価固有振動数の違いによる脱線限界値の変化の様子を数値シミュレーションにより調べることにした。高架橋にはフーチング位置における線路直角方向の地震動波形を与えることにする。

2. 解析モデル

(1) 高架橋のモデル化

新幹線が走行する高架橋を図-1が示すような簡単な系にモデル化をする。左図は高架橋の側面図であり、図の中央には高架橋の断面図を示している。矢印は入力する地震波である。高架橋は多自由度系であるが、地盤、基礎、上部工などの非線形性を考慮すると非常に複雑となる。ここでは、このことも考慮して高架橋に等価固有振動数を1個与えた1自由度系で近似したものを用いる。地震波は水平振動のみを採用することとする。

(2) 車両・レール・地震波のモデル化²⁾

解析の対象とする車両は、図-2に示す2軸ボギー車である。車両は、車体、台車枠及び車輪軸からなる。車両の運動を示す座標は、車両の長手進行方向を x 軸に定めた右手・右ねじ系3次元直角座標を、左右 y 、上下 z 、ピッチング θ 、ローリング ϕ 、ヨーイング ψ と定める。車体に関しては、 $y_b, z_b, \theta_b, \phi_b, \psi_b$ 、台車枠に関しては、第1、第2台車枠ごとに、 $y_{t,k}, z_{t,k}, \theta_{t,k}, \phi_{t,k}, \psi_{t,k}$ 、車輪軸に関しては、第1～4車輪軸ごとに、 $y_{w,j}, z_{w,j}, \phi_{w,j}, \psi_{w,j}$ とする。ここに、 $k=1, 2, j=1, 2, 3, 4$ である。車両全体としては合計31自由度の力学モデルとなる。これらの座標の原点は、水平面上の直線軌道に静止している車両の各質量の重心点とする。なお、車両の走行速度は一定として v とする。

レールは、線路長手方向にまくらぎ間隔等で弾性支持された連続ばりと考える。その変形は軌道面内及び軌道鉛直面内の曲げ変形、レール軸まわりのねじれ変形である。これらの変形は、輪重、横圧などの外力と支持ばねの特性及びレールの弾性特性に応じて定められる。モデル化されたレールの諸元と記号を図-3に示す。

地震波は、図-4に示すスペクトルを有するA波及びB波(NIG019, NIG028をもとにして作成)を最大振動加速度等を調節し用いることとする。

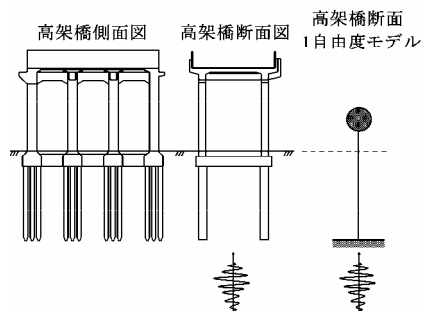


図-1 高架橋モデル

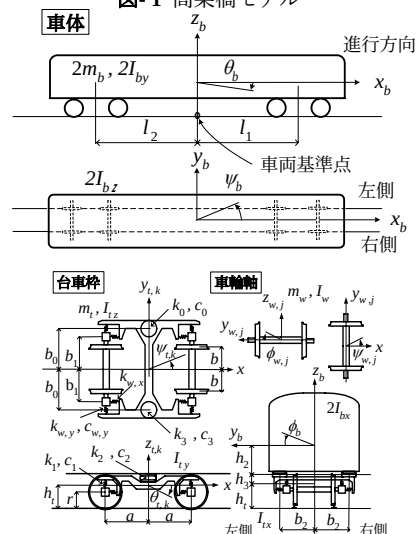


図-2 車両モデル

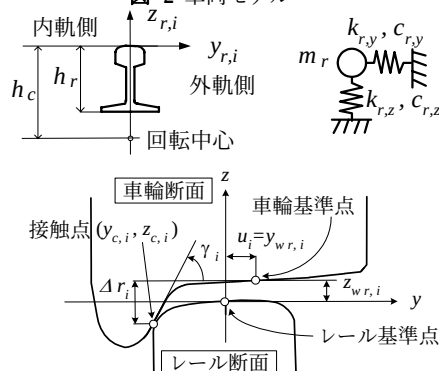


図-3 レールモデル

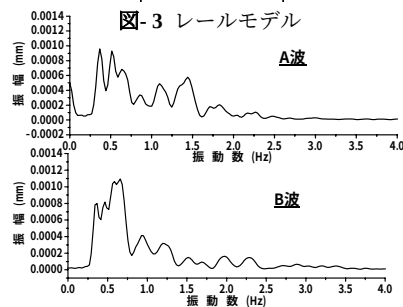


図-4 地震波の変位振幅スペクトル

キーワード RC 高架橋, 地震動, 脱線限界, 鉄道車両, 等価固有振動数

連絡先 〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5 芝浦工業大学工学部土木工学科 TEL03-5859-8357

3. 解析結果

図-5～図-7はA波の地震波特性を用い、それぞれ高架橋の等価固有振動数1Hzで最大振動加速度500galを与えた場合(図-5)、等価固有振動数1Hzで最大振動加速度800galを与えた場合(図-6)、等価固有振動数3Hzで最大振動加速度830galを与えた場合(図-7)について、20秒間または脱線に至るまでの左右第1輪目の変位を示したものである。本研究では高架橋に地震波を与えてから20秒間で脱線しなければ非脱線としている。したがって図-5は20秒間経過しているため非脱線となっていることを示している。図-6の脱線形式は3秒を過ぎたところから右車輪が上昇し、レールに落下後に脱線を起こす浮上り2となっている。また図-7の脱線形式は6秒あたりから左車輪がレールに乗上ったまま脱線を起こす乗上りとなっていることがわかる。

図-8と図-9は、A波とB波のそれぞれの地震波特性において、速度200km/hで高架橋上を走行する車両の脱線に対する安全限界を、横軸に高架橋の等価固有振動数(Hz)、縦軸に地震波の最大振動加速度(gal)で示したものである。したがって、プロットされた点以下の最大振動加速度では脱線を起こさない安全領域、プロットされた点よりも大きな最大振動加速度では脱線を起こす脱線領域となる。高架橋の等価固有振動数が1.5Hzのとき、どちらも脱線限界時の最大振動加速度が最も小さい値となっている。これは地震波の振動数が1.5Hzに近い値であったために、車両とそれとが共振した結果であると言える。それらの高架橋の等価固有振動数と地震波の振動数が近いものを除くと、高架橋の等価固有振動数が大きくなるほど脱線限界時の最大振動加速度が大きくなっていき、安全領域が大きくなる結果となった。また、脱線形式についてみると、限界曲線に沿うようにそれぞれ特有な層になっているように見える。

なお、以上の解析において、脱線形式を得られたものについては浮上り1(片方が完全に浮上り脱輪)、浮上り2(レール頭面に落下後脱輪)、浮上り3(レールに接触しつつ脱輪)、乗上りの4種類に分類した。また脱線したとは、1車両目の第1輪が脱輪したものであるとしている。

4. まとめ

本研究において、地震動による振動の影響のみで車輪がレールから交互に大きく浮き上がる場合があり脱線が起こり得る状態に達すること、高架橋の等価固有振動数による最大振動加速度の脱線限界値が変化することがわかった。今後は、さらに脱線後の車両の運動についても検討が必要であろう。また、高架橋等から飛び出さないような効果的・経済的な安全対策も今後の課題となる。

【参考文献】

- 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編；
鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，丸善株式会社，2006年2月
- 松浦章夫；地震時における列車走行解析に関する研究，土木学会，
鉄道路学論文集—シンポジウム発表論文—第9号，p99～p104

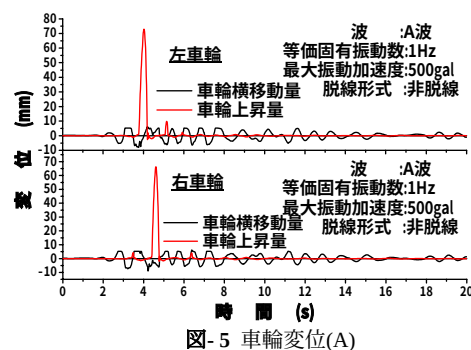


図-5 車輪変位(A)

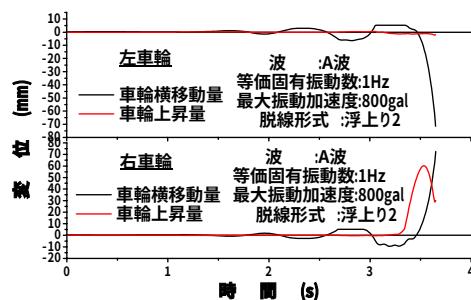


図-6 車輪変位(B)

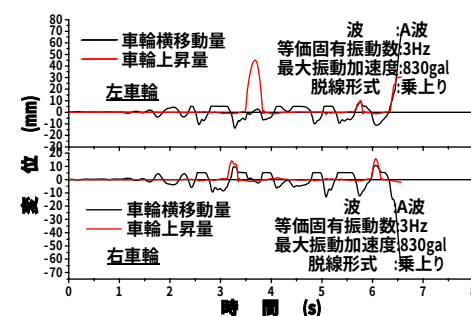


図-7 車輪変位(C)

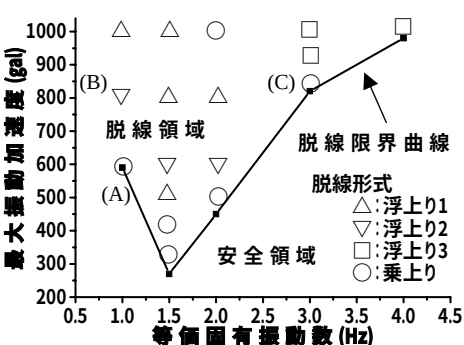


図-8 A波における限界曲線

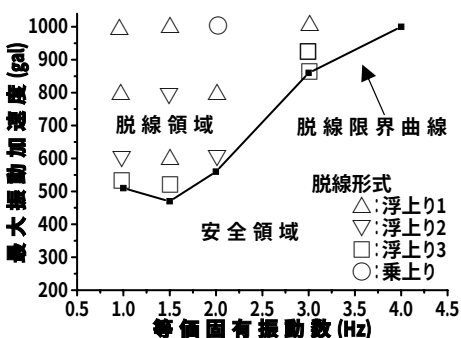


図-9 B波における限界曲線