

鉄道車両と高架橋との動的相互作用を考慮した地震時脱線限界に関する研究

芝浦工業大学大学院 学生会員 ○清水 紀明

芝浦工業大学 正会員 紺野 克昭

元芝浦工業大学 正会員 松浦 章夫

1. 研究の背景

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、橋脚の自由度の違いによる結果の比較や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。なお、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⁾

2-1. 車両モデル

解析の対象とする車両は、図-1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、すべての解析において車両の走行速度は一定として200km/hとする。

2-2. レールモデル

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する。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-2に示す。

3. 高架橋の自由度の違いによる解析(解析-1)

解析は高架橋を図-3に示した次の3つのケース、(A)剛体、(B)1自由度、(C)2自由度について行う。各ケースにおいて模擬地震波(振幅変調波)の振動数を変化させていき、脱線したときの振幅(限界振幅)を調べていく。

図-4のように1自由度と2自由度において、地震波振動数が0.6~2.0Hz位まではほぼ同じような限界振幅で脱線し、2.1~3.0Hzでは高振動数になるにつれて差異が生じた。この差異はバネや上心ロール(車体の回転中心が車両の上部にあり、車体のロール回転に合わせて車軸が左右に移動する車両挙動で、水平変位と横圧が大きくなる)の影響といえる。一般的な高架橋での振動数領域(0.6~2.0Hz)では1自由度でシミュレートした場合でも2自由度の場合とほぼ同等の解析結果が得られることがわかった。したがって、以下の解析では1自由度でシミュレートを行うこととする。また、剛体の場合、同領域では、1自由度、2自由度よりも限界振幅が大きいことが分かる。

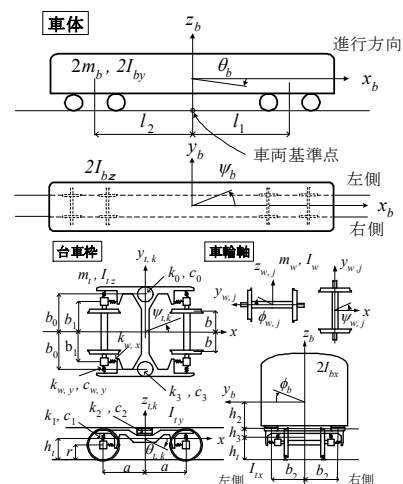


図-1 車両モデル

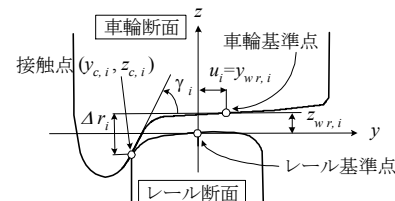
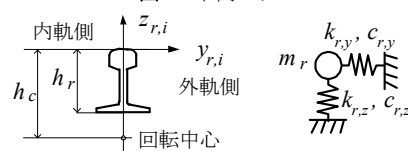


図-2 レールモデル

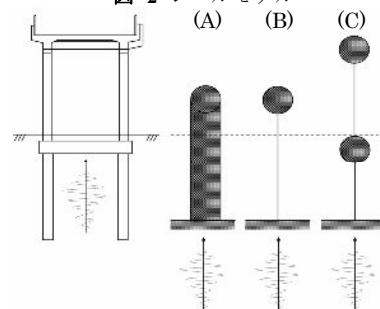


図-3 高架橋モデル

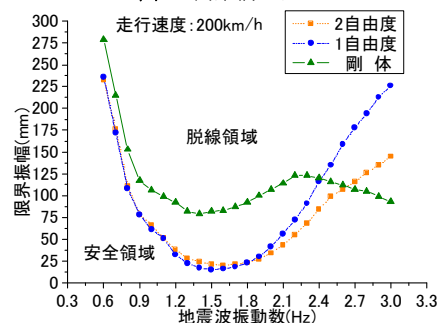


図-4 高架橋の等価固有振動数 1.6Hzにおける脱線限界曲線

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

4. 等価固有振動数の違いによる脱線限界値の変化と車輪挙動(解析-2)

新潟県中越地震の際、K-NET の観測点において観測された地震波について、脱線限界値と脱線形態を求める。高架橋は1自由度とし、等価固有振動数を1.0~4.0Hzまで変化させていく。解析に用いた地震波の正規化したフーリエスペクトルを図-5に示す。

図-6~図-8は小千谷波(NIG019)を用い、それぞれ高架橋の等価固有振動数1.0Hzで最大振動加速度840galを与えた場合(図-6)、等価固有振動数1.0Hzで最大振動加速度800galを与えた場合(図-7)、等価固有振動数3.0Hzで最大振動加速度830galを与えた場合(図-9)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。図-6の脱線形式は約3.3sから左車輪が上昇し始め、70mm上昇したところで落下が始まり、その後左車輪はレールに衝突する前に右車輪が内軌側へ脱線する浮上りとなる。図-7の脱線形式は3s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飛上り1となる。また図-8の脱線形式は6sあたりから横圧により左車輪がレールに乗り上がり、そのまま脱線を起こす乗り上がりとなる。

各地震波に対する解析結果を図-9、図-10に示す。いずれも図-5に示したフーリエ振幅が大きくなる時の地震波振動数において最大振動加速度が小さくなった。これは、構造物の等価固有振動数と地震波の振動数の値が近く共振するためであるといえる。また、高架橋の等価固有振動数が高振動数領域になるほど安全領域が大きくなり脱線しにくくなる結果となった。

以上の解析において、車輪の挙動から脱線形式が得られた。それらを浮上り(片方が完全に浮上り脱輪)、飛上り1(レール頭面に落下後脱輪)、飛上り2(レールに接触しつつ脱輪)、乗り上がり(片方の車輪が横圧により乗り上がって脱輪)の4種類に分類した。これらは脱線限界曲線に沿うようにそれぞれ特有の層になっているように見え、脱線限界曲線付近においては脱線防止ガードが有効とされる飛上り2と乗り上がりが多く見られた。また、等価固有振動数ごとに最大振動加速度に沿って見ていくと浮上り、飛上り1、飛上り2、乗り上がりの周期で繰り返しているように見える。

5. 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、脱線防止ガードの設置やその設置位置で脱線しにくくできることがわかった。今後は、さらに様々な地震波や模擬地震波での検証による解析精度の向上を図ると共に、高架橋のみでなく盛土での解析、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。

謝辞：解析には、K-NETの地震記録を使用しました。

参考文献 1) 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、鉄道力学論文集—シンポジウム発表論文—第9号、p99~p104

