

鉄道車両／構造物間の動的相互作用が構造物の地震時応答変位に及ぼす影響

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○徳永 宗正 曾我部 正道

**1. 目的** 従来の設計標準では、地震時列車荷重を列車質量×0.3gを上限とした剛結質点とするモデル化方法が示されている<sup>1)</sup>。ところが、車体／台車枠／輪軸および複数のばね、ダンパ、ストッパから構成される複雑な振動系である鉄道車両が、地震時に構造物に及ぼす作用およびその合理的なモデル化方法は明確にされていない。特に、コンクリート床版を有さない軽量の旧鉄道開床式鋼橋等の耐震診断を行う場合、列車重量の占める割合が大きいことから、地震時列車作用の影響が大きく現れると考えられる。本稿では、地震時列車作用が構造物応答に及ぼす影響を定量化することを目的に、数値解析による検討を行った。

**2. 解析手法** 図-1に、解析モデルの概念図を示す。車両を1質点系とした剛ばねモデル、バイリニアばねモデル、車両を31自由度系および相互作用を詳細な接触モデルとした詳細モデルの3通りを構築した。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。減衰は各モードに対して5%のモード減衰を与えた。

図-2、3に、詳細モデルで用いた車両系、車輪／レール間の相互作用の力学モデルをそれぞれ示す<sup>2)</sup>。力学モデルの妥当性は、実物大車両模型を用いた検証実験により既に確認されている<sup>3)</sup>。車両は近年の高速新幹線車両を参考に諸元を設定し、0.8Hzの下心ロールと1.3Hzの上心ロールの固有振動モードを有する。近年の脱線対策および構造物応答にとって厳しい条件を想定し、車両は脱線せず相互作用を保持したまま走行する条件とした。

表-1に、解析ケースを示す。車両系、相互作用は、詳細モデル、簡易モデル(剛ばね、バイリニアばね)の3通り、構造物は、初期剛性に相当する等価固有周期  $T_{eq}$ 、および構造物単位長さ重量  $w_s$  をパラメータとした12通りにモデル化した。入力には車両／構造物系の振動特性を把握するための正弦波240通り、および設計に及ぼす影響を把握するための設計地震波24通りとした。

**3. 解析結果** 図-4に、正弦波入力の動的解析の結果から、各モデル間の差が顕著に現れると考えられる  $w_s$  が35の場合、構造物の最大応答変位スペクトルを示す。図から、簡易モデルに着目すると、 $ACC_{in}$  が50galの場合、入力周波数と  $T_{eq}$  (図中点線) が一致する場合に共振周波数となる一方、 $ACC_{in}$  が300、1000galの場合、構造物の塑性化に伴う共振周波数の低下が確認できる。また、剛ばねモデルとバイリニアばねモデルを比較すると、共振周波数は概ね一致しているが、バイリニアばねモデルのほうがピークが鈍感になっており、減衰が大きいことが確認できる。詳細モデルに着目すると、 $ACC_{in}$  が50、300gal、 $T_{eq}$  が2.0程度以下の領

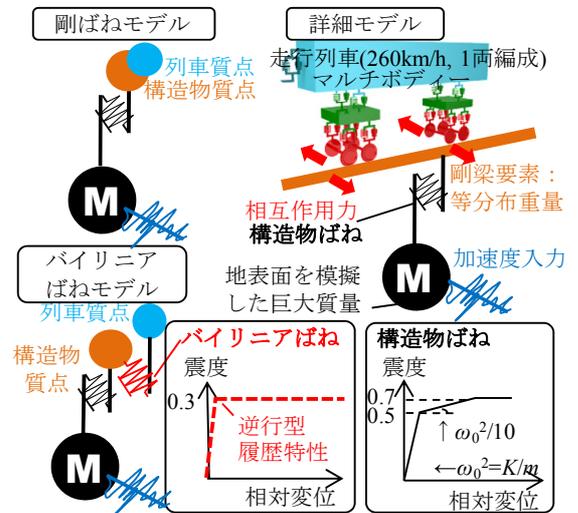


図-1 解析モデル概念図

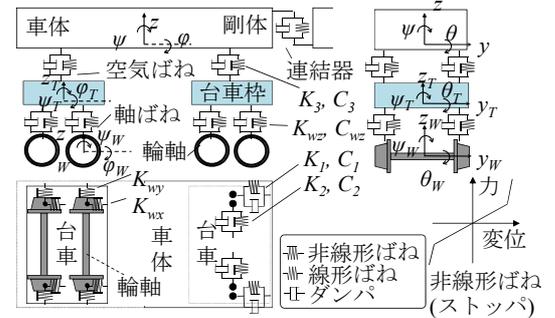


図-2 31自由度車両系の力学モデル

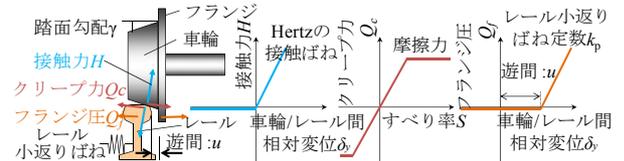


図-3 車輪／レール間の相互作用の力学モデル  
表-1 解析ケース

車両系、相互作用のモデル化	<ul style="list-style-type: none"> <li>剛ばねモデル</li> <li>バイリニアばねモデル</li> <li>詳細モデル</li> </ul>
構造物のモデル化	$T_{eq} = 0.5, 1.0, \dots, 3.0$ $w_s = 35$ (軽鋼橋), $350$ (コンクリート橋)
入力	正弦波 (5波)
	地震波
$T_{eq}$ : 等価固有周期(s)	$w_s$ : 構造物単位長さ重量(kN/m)
$T_{in}$ : 入力正弦波周期(s)	$ACC_{in}$ : 入力正弦波加速度 (gal)

キーワード：鉄道車両、動的相互作用、耐震設計、列車荷重、数値解析、マルチボディー

連絡先：〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 構造力学研究室 TEL:042-573-7290

域で、簡易モデルとの違いが顕著に現れている。入力周波数が0.5~2.0Hz程度の領域では詳細モデルの応答が小さくなり、入力周波数が0.5以下の領域では詳細モデルの応答が大きくなる場合もある。これは、車両の固有振動が励起される0.5~2.0Hz程度の構造物振動が支配的な場合は、車両/台車枠間の上下左右枕ばねの粘性減衰、車輪/レール間の動摩擦による履歴減衰等の影響が大きく現れるためと考えられる。一方、 $ACC_{in}$ 、 $T_{eq}$ が大きい場合は、共振周波数が低くなることから、0.5~2.0Hz程度の領域の振動成分が相対的に少なくなり、詳細モデルと簡易モデルの応答スペクトルが概ね一致していることが確認できる。

図-5に正弦波入力で得られた応答スペクトルの一致度を示す。一致度として詳細モデルを基準とした応答スペクトルの相関係数を用いた。図から、図-4で示したように $w_s$ が35kN/m、 $T_{eq}$ が2.0秒程度以下の領域で、相関係数が小さくなっていることが確認できる。 $ACC_{in}$ が1000galの場合や $w_s=350$ の場合は、相関係数がほぼ1であり、応答スペクトルが一致している。

図-6に地震波入力で得られた最大応答変位の応答スペクトルの一致度を示す。一致度は、詳細モデルを基準とした最大応答変位の比から求めた。図から、簡易モデルを用いることで、 $w_s$ が35N/mの場合-50~+100%程度、 $w_s$ が350kN/mの場合-5~+20%程度の精度で設計地震動に対する詳細モデルの応答変位を評価できることが確認できる。固有振動が励起されやすいL1、L2spe.1地震動の場合、特に $T_{eq}$ が0.5~2.0秒程度の場合に差が大きくなり、概ね応答変位を過大に評価する傾向にあるが、一部応答変位を過小に評価する場合があり、今後詳細にメカニズムを明らかにする必要がある。剛ばねモデルとバイリニアばねモデルを比較すると、正弦波入力の場合と同様にバイリニアばねモデルの方が応答を小さく評価する傾向にある。

**4. まとめ** ①鉄道車両を詳細な振動系として考慮した場合、車両系の減衰等の影響により、0.5~2.0Hz程度の構造物振動が支配的な領域で、設計の想定より構造物応答変位は小さくなる。②コンクリート橋のように重量が大きい構造物の場合、剛ばねモデルにより構造物地震時応答変位を評価できる。③上部工が開床式鋼橋のように軽量の構造物の場合、動的相互作用の影響を考慮して評価することが望ましい。

**参考文献** 1) 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，1999. 2) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路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，No.513/I-31，pp.129-138，1995.4 3) 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，pp.1849-1855，2005.6

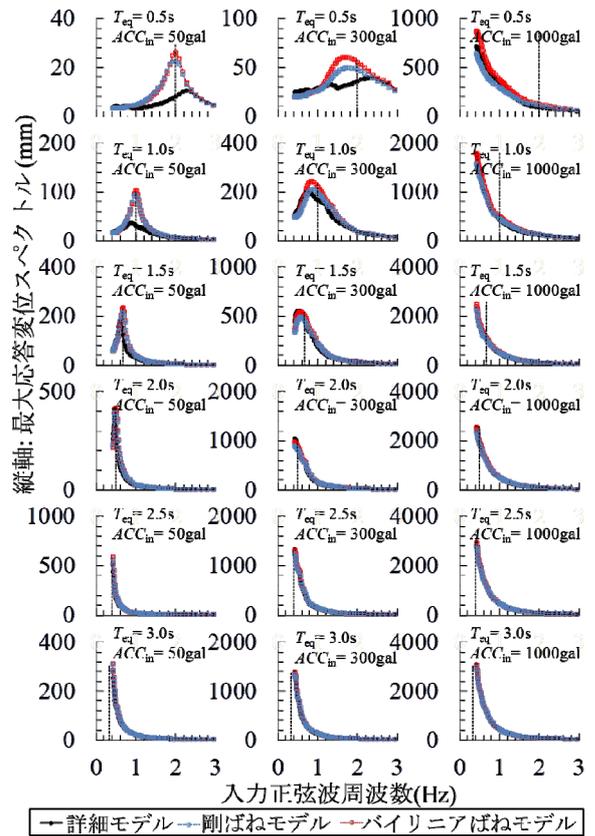


図-4 最大応答変位スペクトル ( $w_s = 35$ )

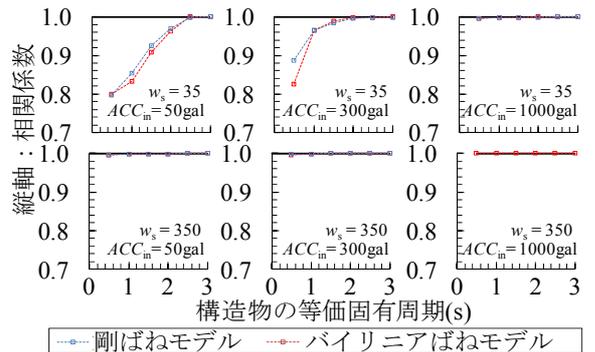


図-5 スペクトル一致度(正弦波入力)

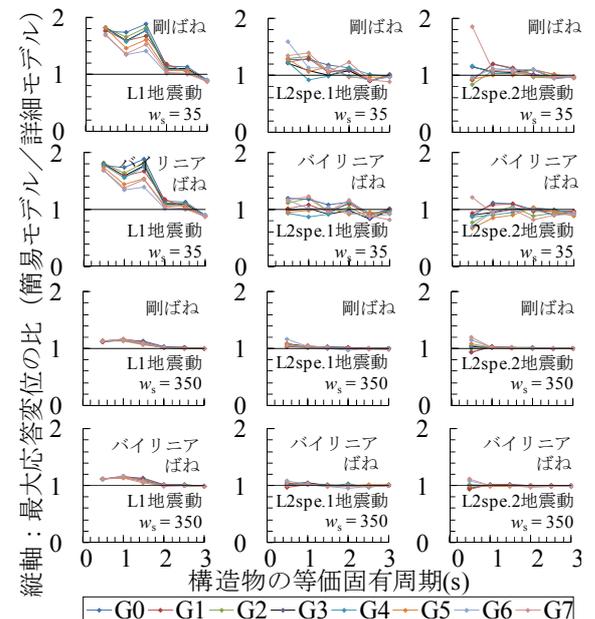


図-6 最大応答変位一致度(地震波入力)