

構造物の地震時動的応答に及ぼす列車／構造物間の動的相互作用の影響

○ [土] 徳永 宗正 (鉄道総研)

[土] 曾我部 正道 (鉄道総研)

[土] 後藤 恵一 (鉄道総研)

[土] 浅沼 潔 (鉄道総研)

Effect of Dynamic Interaction between Train Vehicle and Structure on Dynamic Behavior of Structure

○Munemasa TOKUNAGA, Masamichi SOGABE

Keiichi GOTO, Kiyoshi ASANUMA (Railway Technical Research Institute)

In order to evaluate the effect of dynamic interaction between train and structure on dynamic behavior of structure, analytical simulation has been carried out with varying some parameters such as modeling method of mass of train, nonlinear property of structure, mass of structure and input waves. The analytical simulation made it clear that the effect of dynamic interaction between train and structure can increase or decrease dynamic responses of structures because of train vehicle vibration system, in particular, in cases of light bridges such as steel bridges.

キーワード：列車質量，相互作用，動的応答，耐震設計，等価固有周期

Key Words：train mass, interaction, dynamic response, seismic design, effective natural period

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計¹⁾における，列車の地震慣性力は，定員乗車（貨車の場合は満載の70%程度）の列車荷重を用い，列車の頻度に応じて載荷線数を定め，等分布固定荷重として載荷する．さらに，慣性力として線路方向には，車輪とレールの粘着係数が0.2程度であることから0.2gの上限値が，線路直角方向には，車両には動的制震効果があることを想定して0.3gの上限値がそれぞれ設けられている．

以上の列車荷重の考慮手法は静的解析について定められたもので，動的解析においては簡易なモデル化法は提示されているが合理的なモデル化手法が提案されるまでにいたっていない．加えて，近年各種脱線防止対策が行われるようになってきており，地震時には列車／軌道間に過酷な衝撃力が発生することが明らかになっている²⁾．このような場合，構造物は地盤から入力される地震力以外に列車／構造物間の動的相互作用の影響を受けることになり，特に鋼橋の様に単位長さ重量が小さい構造物はこの影響が大きくなると予想される．

以上のような背景から本論文は，列車／構造物間の動的相互作用が構造物の地震時動的応答に及ぼす基礎的影響を

明らかにすることを目的に，数値シミュレーションによる検討を行った．具体的には，列車荷重を固定荷重としたモデル，列車／構造物間の相互作用を考慮したモデルに対して，振動周期，入力加速度を変化させた正弦波を入力し，構造物の応答の差異，差異の要因を明らかにした．

2. 解析手法

本研究では，車輪の脱線後挙動を解析できる研究用プログラムとして新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARSIII を用いた³⁾．以下にその概要を述べる．

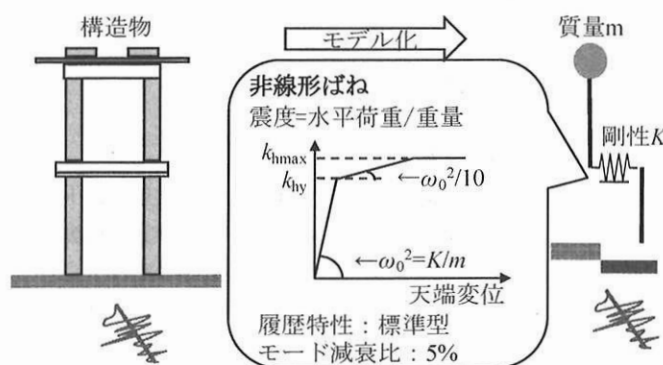


図1 1自由度系構造物の非線形特性モデル化

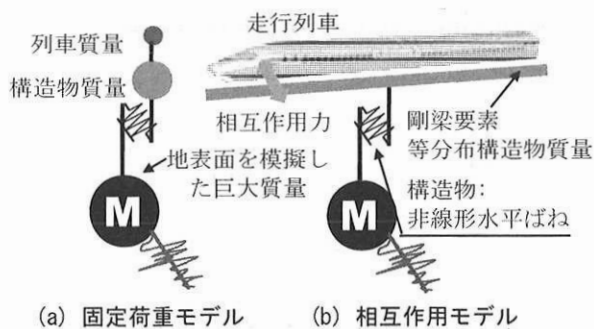


図2 解析モデル概念図

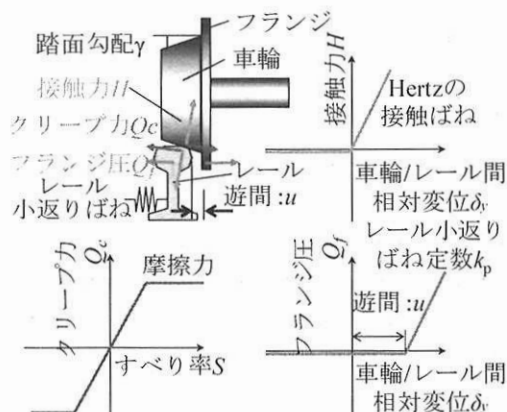


図3 車輪／レール間の力学モデル

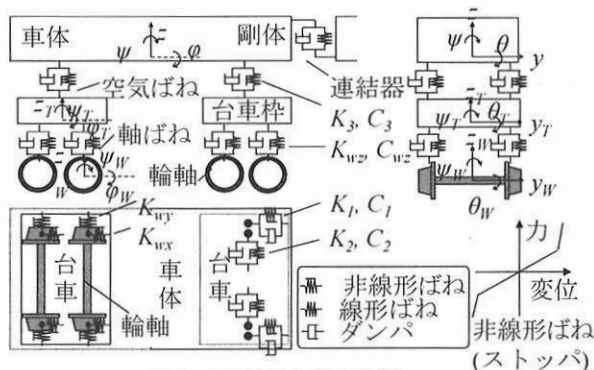


図4 車両の力学モデル

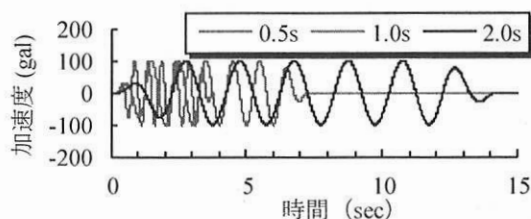


図5 入力正弦波の例

2.1 構造物の力学モデル

図1に構造物を1自由度系でモデル化の際に用いたトリリニア型の非線形復元力特性を示す。一般的な鉄道橋脚や高架橋は比較的単純な構造であり、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。骨格曲線は、降伏震度 $k_{ny}=0.30$ 、最大震度 $k_{hmax}=0.50$ 、等価固有周期 T_{eq} 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次勾配を微小とした。履歴特性は標準型、減衰比は5%で一定とした。

図2に、解析モデル概念図を示す。解析モデルは、固定

荷重モデル、相互作用モデルの2通りとした。固定1質点系モデルは、減衰や復元力特性等の条件を除けば鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)(以下、「耐震標準」)¹⁾で規定されている非線形スペクトル法で用いられているモデルに一致し、列車荷重は固定荷重としてモデル化されている。相互作用モデルは、1つの非線形ばねでモデル化した長大な構造物を想定しており、列車荷重は相互作用力を介して、1つの非線形ばねが負担する。

2.2 車輪／レール間の力学モデル

図3に車輪／レール間の力学モデルを示す。脱線前の車輪／レール間の相互作用力を、両者の鉛直方向相対変位及び水平方向相対変位を用いて算定した。具体的には、両者の接触面の法線方向にはHertzの接触ばねを、接線方向にはクリープ力をそれぞれ考慮した³⁾。車輪フランジとレールが接触した場合にはレール小返りばねを用いてフランジ接触力を評価した。接触点と接触角は、車輪およびレールの水平方向相対変位と車輪およびレールの幾何学形状にもとづき定めた接触関数から求めた³⁾。なお、車輪フランジが無限に長いと仮定し、列車は脱線せず列車／構造物間で相互作用を保ったまま走行するものとした。また、車輪／レール間の接触減衰は考慮していない。

2.3 車両の力学モデル

図4に車両の力学モデルを示す。車両の力学モデルとして、従来と同様に、車体、台車枠、輪軸の各構成要素を剛体と仮定し、これら剛体をばね、ダンパで結合した三次元車両モデルを用いた。1車両当たりの自由度は31である。実車では、各構成要素間に著大な相対変位を抑制するストップが設けられている。これらを表現するため、ばねはバイリニア形の非線形ばねとした。なお力学モデルの妥当性については、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⁴⁾。車両諸元は近年の高速新幹線車両を参考に設定し、0.8Hz(1.25秒)の下心ロールと1.3Hz(0.76秒)の上心ロールの固有振動モードを有する。走行速度は260km/hとした。

2.4 数値解析法

車両及び構造物に関する運動方程式を連立して解くことにより、列車と構造物との動的な連成解析を行った。効率的な数値解析を行うために、車両及び構造物の運動方程式をモーダル変換する。得られる車両及び構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、Newmarkの平均加速度法により時間増分 Δt 単位に解いていく。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が十分小さくなるまで Δt 内において反復計算を行った。この際、数値解析速度を向上させるために、時間増分 Δt 内における収束回数をモニターし、 Δt の大きさをプログラム内で自動的に調整する手法を用いた。解析に用いた Δt は、 10^{-5} 秒を標準とした。

2.5 解析パラメータ

本論文で用いたパラメータは列車荷重のモデル化手法、構造物の等価固有周期 T_{eq} 、構造物の単位長さ重量 w_s 、入力正弦波の振動周期 T_m 、入力正弦波の最大加速度である。

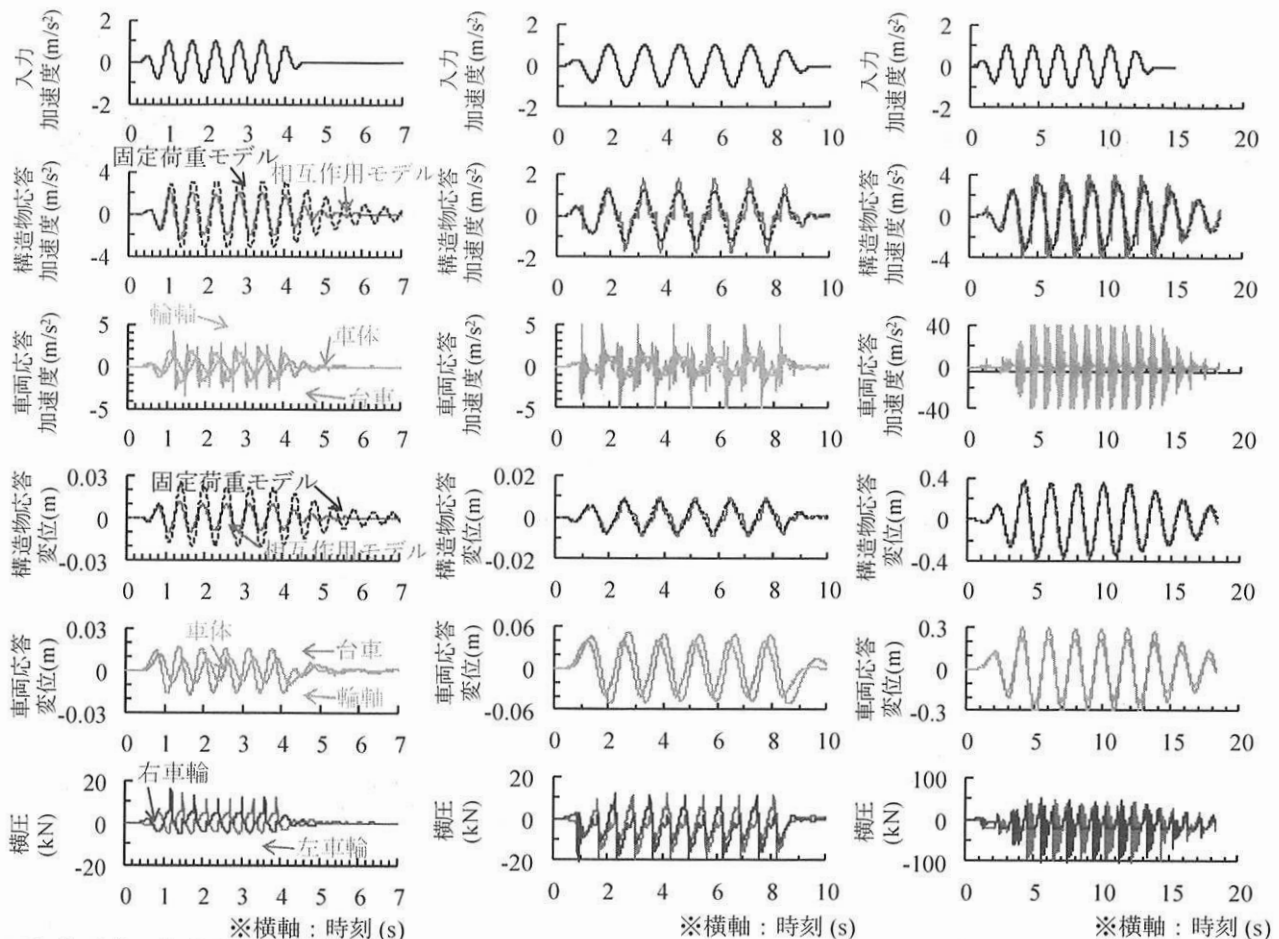


図6 $T_{eq}=0.5$, $T_{in}=0.6$, 100galの時刻歴 図7 $T_{eq}=0.5$, $T_{in}=1.3$, 100galの時刻歴 図8 $T_{eq}=2.0$, $T_{in}=1.9$, 100galの時刻歴

列車荷重のモデル化手法は、固定荷重モデル、相互作用モデルの2通りとした。構造物の等価固有周期 T_{eq} は、実構造物で存在する範囲である0.50～2.00秒の間を0.50秒刻みで変化させた31通りとし、構造物の単位長さ重量 w_s は、超軽量の鋼桁からラーメン高架橋まで想定した範囲である35, 100, 350kN/mの3通りとした。図5に解析で用いた正弦波の代表例を示す。正弦波は5波とし前後に緩衝波を付属させた。入力正弦波の振動周期 T_{in} は0.5～2.0秒の間を0.1秒刻みで変化させた16通りとし、最大加速度は100, 200, 300, 500, 1000galの5通りとした。

3. 解析結果

図6～8に動的相互作用の影響が顕著に表れた $w_s=35$ の場合の解析結果から時刻歴の代表例を示す。時刻歴として、入力加速度、構造物、車両の応答加速度、構造物、車両の応答変位、横圧を示す。台車は第1台車、輪軸は第1台車の第2輪軸に着目した。図6は、相互作用モデルの構造物の最大応答変位が固定荷重モデルを下回ったケース、図7, 8は、固定荷重モデルが相互作用モデルを上回ったケースである。図6の車両の応答変位に着目すると、車体の応答変位が台車、輪軸より小さく、車体の振動が低減されていることが確認でき、車両は反共振状態であると推定される。さらに、車体の応答変位は構造物の応答変位はより小さくになっており、車体が構造物の内側を振動していることから、

列車／構造物間の相互作用力は構造物を内側に動かす方向に働くと考えられる。逆に図7, 8では、車体の応答変位が台車、輪軸より大きく、車体の振動が増幅されていることが確認でき、車両は共振状態であると推定される。特に、図7では、 T_{in} が車両の固有周期である1.25秒に近く、車体の変位が構造物を大きく回っていることから、車両が顕著な共振現象に至っていると考えられる。図7, 8では、車体が構造物の外側を振動していることから、列車／構造物間の相互作用力は構造物を外側に動かす方向に働き、結果として相互作用力の影響で構造物の変位が大きくなったと考えられる。また、構造物や輪軸、台車の応答加速度には車輪／レール間の接触、もしくは車輪／脱線防止ガードに起因する高周波成分や衝撃成分が確認できることから列車／構造物間で顕著な接触現象が発生していると推察される。

図9に固定荷重モデルの最大応答変位を示す。固定荷重モデルの場合、構造物単位長さ重量の違いによる応答の違いはない。構造物が降伏する300galまでは入力正弦波の最大加速度に比例して、応答変位も増加している。500gal, 1000galの場合には、構造物の降伏震度 k_{hy} が0.3であることから入力が長周期の領域で振動が増幅されており応答が大きくなっていることが分かる。

図10～12に $w_s=350, 100, 35$ kN/mの場合の、相互作用モデルと固定荷重モデルの最大応答変位の比をそれぞれ示

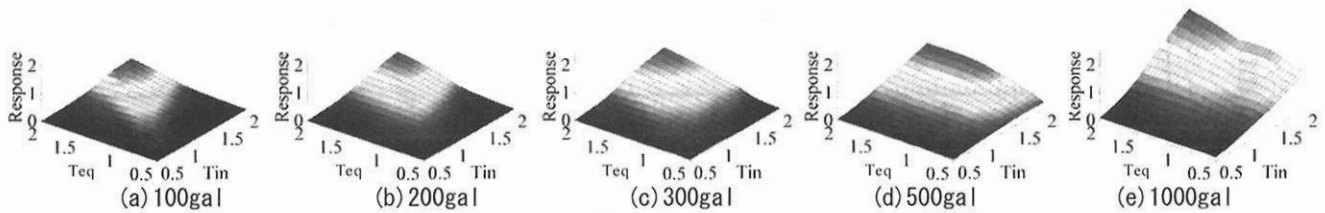
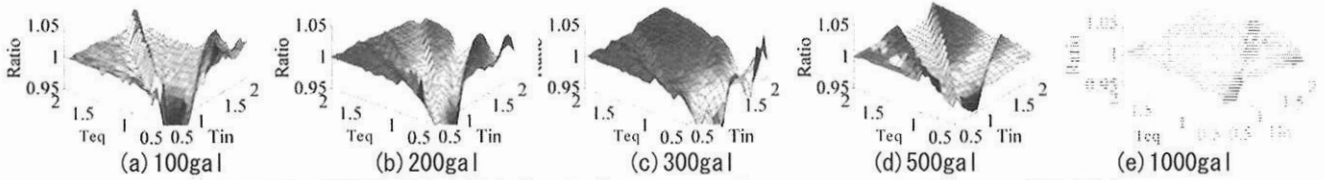
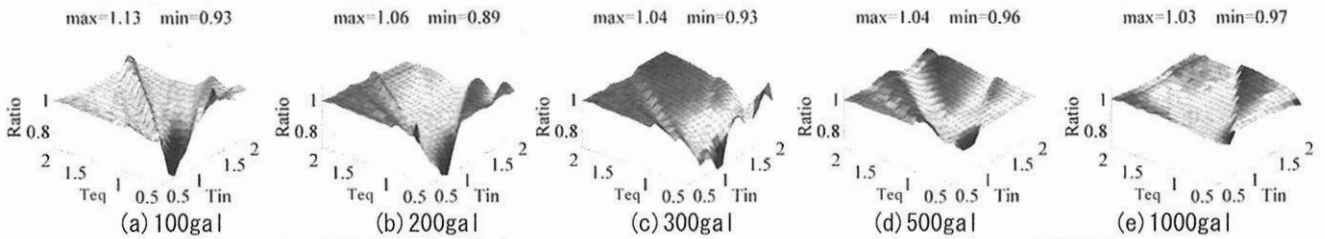
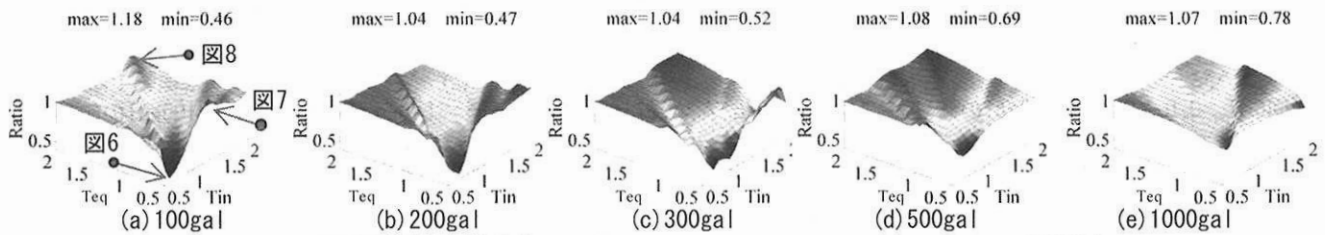


図9 構造物最大応答変位 (m)

図10 構造物最大応答変位の比 (相互作用モデル/固定荷重モデル, $w_s=350\text{kN/m}$)図11 構造物最大応答変位の比 (相互作用モデル/固定荷重モデル, $w_s=100\text{kN/m}$)図12 構造物最大応答変位の比 (相互作用モデル/固定荷重モデル, $w_s=35\text{kN/m}$)

す。図から、 $T_{eq} = T_{in}$ や $T_{eq} = 2T_{in}$ 程度の領域で相互作用モデルの変位が固定荷重モデルより大きくなっており、 $T_{eq} = 0.5T_{in}$ 程度の領域で逆に小さくなっている。これらは、車両が共振状態もしくは反共振状態になるかに起因していると推察される。入力正弦波の最大加速度が大きくなるほど、両モデルの差異は小さくなる傾向にある。これは、入力加速度が大きいくほど構造物の振動エネルギーが大きくなり、相互作用の影響を受けにくくなるためと考えられる。構造物の単位重量に依存して、最大応答変位の比の T_{in} 、 T_{eq} に対する傾向は変化しないが、 $w_s = 350$ の場合差異は5～+5%程度、 $w_s = 100$ の場合-10～+15%程度、 $w_s = 35$ の場合-50～+20%程度と、構造物の単位重量が小さくなるほど相互作用モデルと固定荷重モデルで差異が大きくなることが確認できる。これは、構造物の単位重量が小さいほど構造物の振動エネルギーが小さくなり、相互作用の影響を受けやすくなるためと考えられる。

4. まとめ

本論文では、列車/構造物間の動的相互作用が構造物の地震時動的応答に及ぼす基礎的影響を明らかにすることを目的とし、正弦波による解析的検討で以下の結論が得られた。

- (1) 列車/構造物間の相互作用の影響により、構造物の最大応答変位は変化し、車両変位が小さい場合は構造物の変位を抑える方向に、逆に車両変位が大きい場合には構造物の変位を増幅させる方向に相互作用が働くことが明かとなった。
- (2) 構造物の最大応答変位に及ぼす列車/構造物間の相互作用の影響は、構造物が鋼橋のように軽量になるほど顕著となり、最大で-50～+20%程度変化させる可能性がある。

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，2000.10
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - 変位制限，丸善，2006.2
- 3) 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
- 4) 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