

列車質量が構造物の地震時動的応答に及ぼす影響

徳永 宗正* 曾我部正道 浅沼潔 (鉄道総研)

Effect of Dynamic Interaction between Train and Structure on Seismic Behavior of Structure
 Munemasa TOKUNAGA*, Masamichi SOGABE, Kiyoshi ASANUMA (Railway Technical Research Institute)

In order to evaluate the effect of dynamic interaction between train and structure on seismic response, the authors carried out analytical simulation with varying some parameters such as modeling way of mass of train, nonlinear property of structure, mass of structure per meter and earthquake waves. The analytical simulation made it clear that the effect of dynamic interaction between train and structure can be ignored under L1 earthquake. In contrast, under L2 earthquake, dynamic interaction amplified or decreased displacement and acceleration response when the effective natural period of structure is more than 1 second. The amplified or decreased level decreased with the mass of structure per meter.

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，

(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⁾における列車荷重の取り扱い，鉛直方向の荷重計算と水平方向の地震慣性力計算とに大別される。前者は，地震動が偶発荷重であるため，その組み合わせは，列車荷重の通常の使用状態を想定して定めている。具体的には，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（複線の場合は単線）載荷線数を定め，等分布荷重として載荷する。後者も同様の考え方であるが，地震慣性力には上限が設けられている点が異なる。線路方向には，車輪とレールの摩擦力の上限を想定して0.2が，線路直角方向には，車両の転倒に関する静的な力の釣り合いから0.3がそれぞれ設けられている。

一方で，近年，各種脱線防止対策が行われるようになったこと，実際の車両の動的な挙動において，過酷な衝撃力が発生すること等が議論されるようになってきた²⁾。一般的な耐震設計では，列車/軌道/構造物の相互作用は考慮されないのが一般的であるが，実際には列車は複雑な振動挙動する移動荷重であり，更には一部鋼橋の様に単位長さ重量が小さい構造物も存在する。相互作用の状態についても，車両がレールを走行する場合と，脱線した場合とでは挙動が異なることも推定される。

以上のような背景から本論文では，列車質量が構造物の地震時動的応答に及ぼす影響に関する概略的評価を目的とし，列車質量のモデル化法，構造物の非線形特性，構造物の単位長さ重量，入力地震波をパラメータに数値解析を行った。

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 DIASTARS III を用いた³⁾。以下にその概要を述べる。

(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し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，(2-5)で示すように降伏震度 k_{hy} ，最大震度 k_{hmax} ，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，ばねの減衰比は5%で一定とした。

図2に，構造物の力学モデルを示す。構造物は実在線区

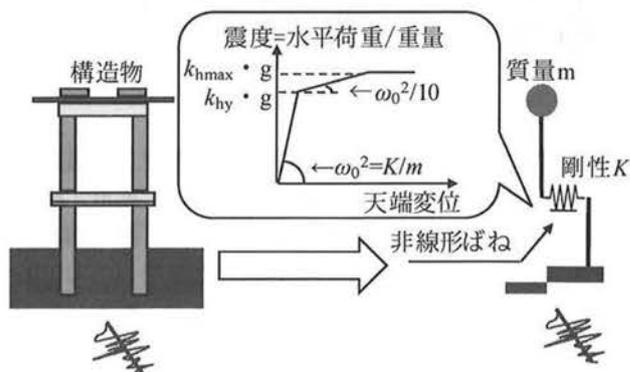


図1 1自由度系の非線形特性

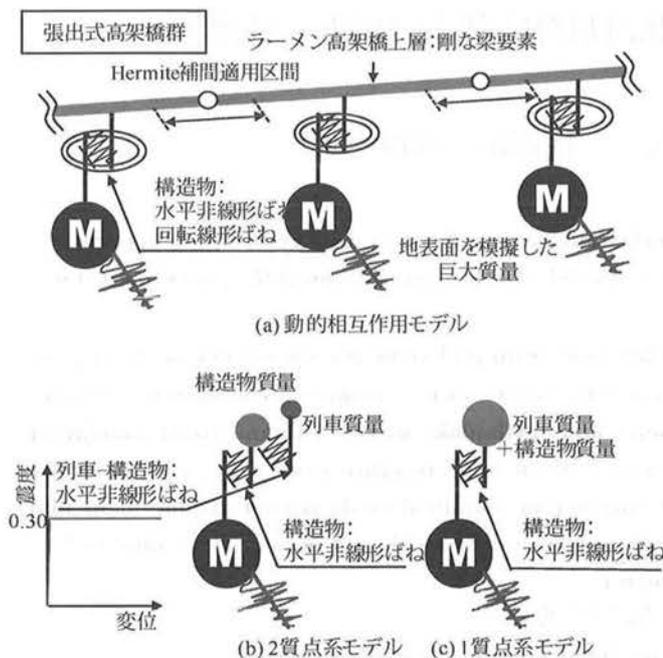


図2 構造物の力学モデル

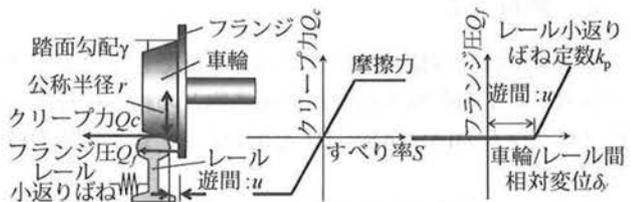


図3 車輪/レール間の力学モデル

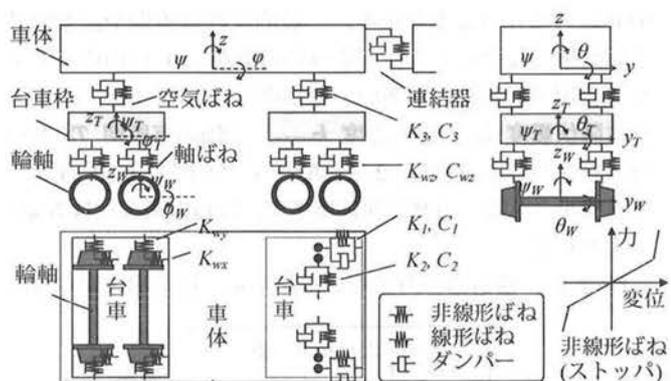


図4 車両の力学モデル

ではなく同じ構造物が連続する構造物群と仮定し、張出式ラーメン高架橋を対象とした。解析モデルは、列車/構造物間の動的相互作用を考慮したモデル (以下、「動的相互作用モデル」)、列車/構造物間の動的相互作用を一つのばねで考慮したモデル (以下、「2 質点系モデル」)、列車/構造物を一体とし、全体を質点系としたモデル (以下、「1 質点系モデル」) の3種類とした。動的相互作用モデルは、地震動継続時間において列車が走行するのに十分な距離の構造物をモデル化した。ラーメン高架橋上層には剛な梁要素を配置し構造物間はピン結合とした。2 質点系モデルにおける非線形ばねの降伏点は $0.3g$ であり、剛性は降伏以前は十分

に大きく、降伏以降は微小とした。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」) 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ほぼ一致する。

〈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。DIASTARS IIIでは、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。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定数を用いてフランジ接触力を評価した。接触点と接触角は、予め定めておいた接触関数から求めた。接触関数は、車輪とレールの幾何学形状に基づき、鉛直方向相対変位及び水平方向相対変位の関数として定義した。

なお、本論文は基礎的検討であり構造物の応答に着目していることから、列車の脱線、逸脱は考慮せず、地震時においても脱線せず車両-構造物間で相互作用を保ったまま走行するものとした。

〈2.3〉 車両の力学モデル

図4に車両の力学モデルを示す。車両の力学モデルは、従来と同様に、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、ダンパで結合した三次元モデルを用いた。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できるストップが設けられている。これら表現するため、ばねはパ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が既に実施されている⁴⁾。この車両モデルを必要編成数連結して用いた。

〈2.4〉 数値解析法

DIASTARS IIIでは、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、複数の車両からなる長大な列車と構造物との動的な連成解析を行うことができる。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う。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、 0.0001 秒を標準とした。

〈2.5〉 解析パラメータ

列車質量が構造物の地震時動的応答に及ぼす影響について検討するため、列車質量のモデル化法、構造物の非線形特性、構造物の単位長さ重量、入力地震波をパラメータに数値解析を行った。具体的なパラメータを以下に示す。

(1) 列車質量のモデル化法

列車質量のモデル化法による違いを検討するため、〈2.1〉

で示したように動的相互作用モデル, 2 質点系モデル, 1 質点系モデルの 3 通りのモデルを構築した。

(2) 構造物の非線形特性

構造物の非線形特性は降伏震度 $k_{hy}0.30$, 最大震度 $k_{hmax}0.50$, 等価固有周期 T_{eq} を $0.1s\sim 5.0s$, $0.1s$ 刻みの計 50 通りとした。

(3) 列車の単位長さ重量

列車の単位長さ重量は $35kN/m$ に設定した。

(4) 構造物の単位長さ重量

構造物の単位長さ重量は一般的なコンクリート構造物を想定した単位長さ重量を $350kN/m$, および超軽量な鋼構造物を想定した単位長さ重量を $35kN/m$ の 2 通りとした。

(5) 入力地震波

入力地震波は, 図 5 に示すように G3 地盤 (普通地盤) の

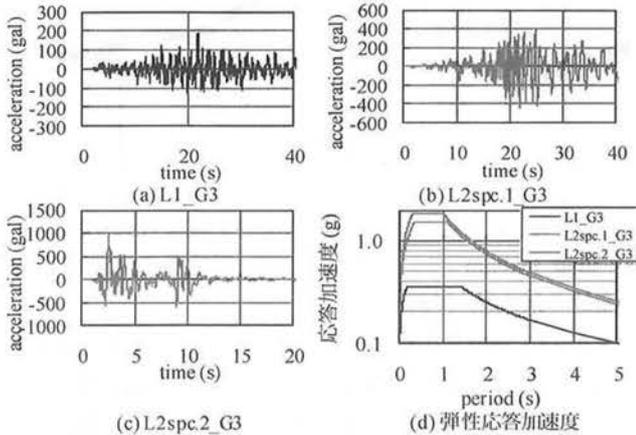


図 5 入力地震動および弾性応答加速度

地表面設計時振動 ω とし, L1, L2 スペクトル 1 (以下, 「L2spc.1」), L2 スペクトル 2 (以下, 「L2spc.2」) の 3 通りを用いた。

(2・6) 解析結果の評価指標

一般に, 構造物の耐震性能の評価指標として応答塑性率, また, 列車走行性には構造物の応答変位に加えて応答加速度が大きく影響することが知られている。本論文では, 構造物天端の応答加速度の最大値, (PSA: peak structure acceleration), 応答変位の最大値 (PSD: peak structure displacement) の 2 つの評価指標を用いた。

3. 解析結果

図 6, 図 7 に, 応答震度に対応する構造物天端の重力加速度 g により無次元化した応答加速度の最大値 (PSA), 塑性率に対応する降伏変位 δ_y により無次元化した応答変位の最大値 (PSD) の解析結果をそれぞれ示す。

(3・1) L1 地震時のモデル間の応答性状の違い

図 6, 図 7 から, L1 地震時の場合は PSA, PSD 共に 3 通りのモデルでほぼ同じ値を示していることが分かる。また, PSA は構造物が降伏しない K_{hy} が 0.30 以下の領域で耐震標準 ω に規定されている弾性加速度応答スペクトルとほぼ同様の値を示していることが確認できる。

(3・2) L2spc.1 地震時のモデル間の応答性状の違い

図 6, 図 7 から, L2 地震時には, 構造物の応答に対する列車/構造物間の相互作用の影響が大きくなることが分かる。すなわち, L2spc.1 地震時の場合は, PSA, PSD 共に同様の傾向を示しており, 構造物の等価固有周期が 1 秒程

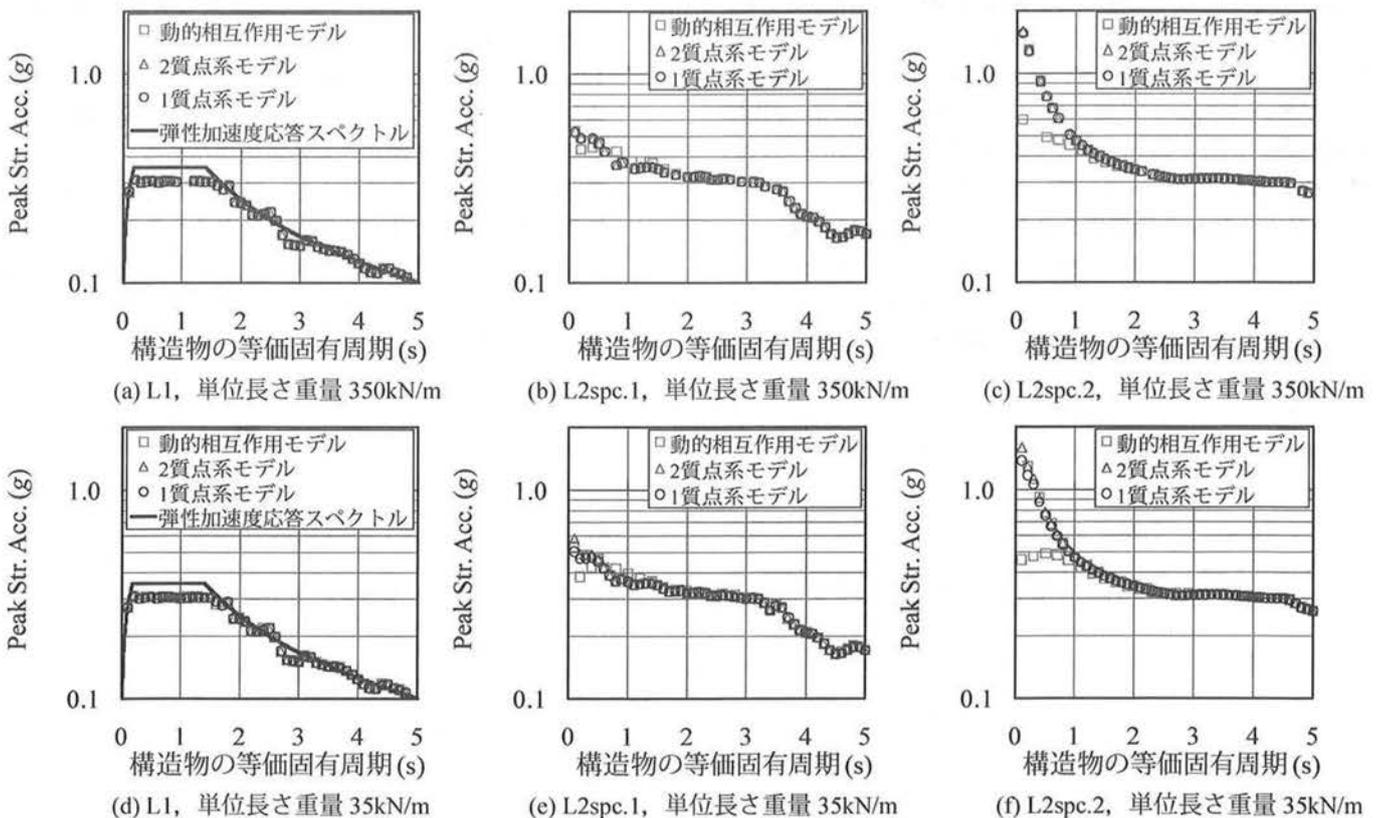
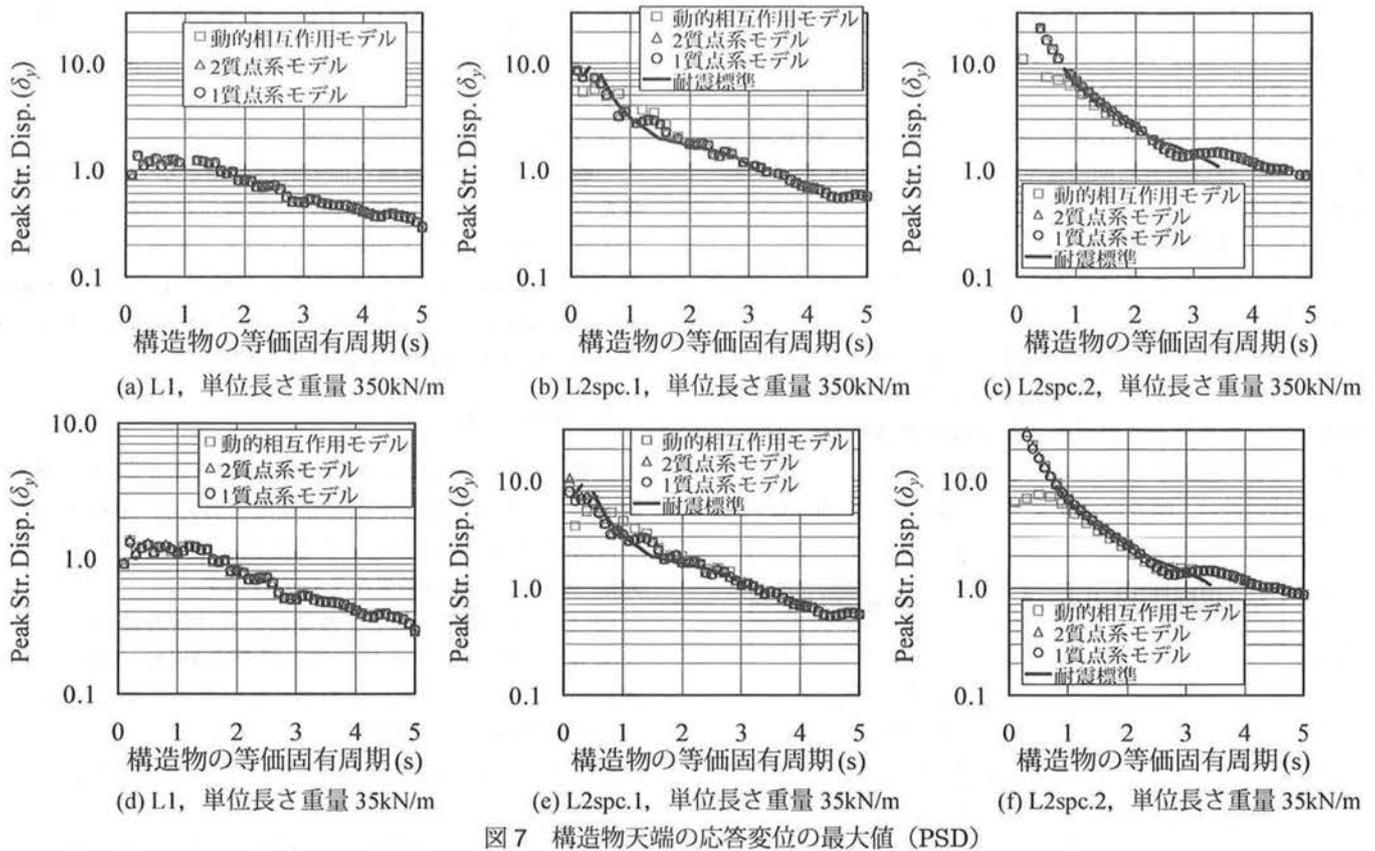


図 6 構造物天端の応答加速度の最大値 (PSA)



度の領域で動的相互作用モデルが1質点系モデル、2質点系モデルをPSAで15%程度、PSDで60%程度上回り、逆に等価固有周期が0.5秒より小さい領域でPSAで15%程度、PSDで30%程度下回っている。これは、列車の固有振動数が存在する1.0Hz(固有周期1.0s)、2.5Hz(固有周期0.4s)付近において、列車/構造物間の相互作用が大きくなることに起因すると考えられる。また、継続時間が長く繰返し回数が多いL2spc.1の場合は、列車/構造物間の相互作用が構造物の応答を緩和、あるいは増幅する、のかどちらの可能性もあることを示唆していると考えられる。

(3・2) L2spc.2地震時のモデル間の応答性状の違い

L2spc.2の場合は、構造物の等価固有周期が1秒程度以下の領域で動的相互作用モデルが1質点系モデル、2質点系モデルをPSAで40%程度、PSDで50%程度下回っていることが確認できる。これは、単発的な荷重が作用するL2spc.2の場合は、列車の固有振動を励起するのに十分な繰返し作用が働かず、列車/構造物間の相互作用が構造物の応答を緩和するためと考えられる。

また、L2spc.1、L2spc.2地震時共に、構造物の単位長さ重量が小さいほど列車質量が構造物の地震時動的応答に及ぼす影響は大きくなる傾向にあることが確認できる。

4. 結論

本論文では、列車質量が構造物の地震時動的応答に及ぼす影響に関して解析的検討を行い、以下の知見が得られた。

- ・L1地震時の場合、列車質量が構造物の地震時動的応答に及ぼす影響は小さい。

- ・L2spc.1地震時の場合、構造物の等価固有周期が1秒程度の領域で、列車/構造物間の相互作用が構造物の地震時応答変位を増幅させる可能性がある。一方、構造物の等価固有周期が0.5秒程度の領域では、列車/構造物間の相互作用が構造物の地震時応答変位を緩和させる可能性がある。
- ・L2spc.2地震時の場合、構造物の等価固有周期が1秒程度以下の領域で、列車/構造物間の相互作用が構造物の地震時応答変位を緩和させる可能性がある。
- ・構造物単位の長さ重量が小さいほど列車質量が構造物の地震時動的応答に及ぼす影響は大きくなる傾向にある。入力地震波、列車/構造物間の相互作用が卓越する構造物の等価固有周期領域の関係、そのメカニズムに関しては今後も追加検討が必要である。

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。
- (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。
- (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) 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。