高速列車と線路構造物の3次元連成応答解析法に関する研究

正会員	久保 智彦
学生員	早坂 康志
学生員	服部 洋介
正会員	松浦 章夫
	正会員 学生員 学生員 正会員

<u>1.序論</u>

本研究は,超高速鉄道の開発や鉄道の自然災害に対 する信頼性の向上など現代の社会的ニーズに応えるこ とを最終目標とし,車両の走行性を考慮した鉄道構造 物の合理的で新しい数値解析法の提案を目的とする. このような社会的ニーズに対応するためには,これま でのように車両の運動解析と構造物の構造解析を別々 に行うのではなく,車両と構造物の運動を動的相互作 用として解析して,全体的な最適化を図ることが重要 である.

したがって本研究では土木系構造動力学で用いられ ている有限要素法による 3 次元骨組構造解析法と,機 械系の振動工学で用いられている鉄道車両の 3 次元運 動解析法を組み合わせ,鉄道車両がある速度で構造物 上を移動するときの構造物と車両の動的相互作用を効 率良く求める新しい数値解析法の開発を行う.また, 本研究で提案される鉄道車両と橋梁の動的相互作用に 関する数値解析法により,高速列車が橋梁を走行する 際の動力学的現象を解析できることを示し,さらに高 速鉄道における橋梁の弾性支承の適応性についても言 及する.

2.車両の力学モデル

本研究では,対象を高速鉄道に限定し,車両として は二軸ボギー車を扱い,数両連結されて列車を構成す る.車両は1車両あたり31自由度を有する3次元モデ ルとし,車両は1つの車体,2つの台車枠,4つの車輪 軸で構成され,それぞれは剛体として挙動するものと 仮定する.それぞれの構成要素は互いにばねとダンパ で結合されている.車輪は踏面勾配を一定とした鉛直 フランジ付き車輪としてモデル化した.図1に車両力 学モデルの概要図を示す.車体,台車の自由度はそれ ぞれ重心位置で上下,左右方向,ローリング,ピッチ ング,ヨーイングの5自由度を有し,車輪軸は重心位 置で上下,左右方向,ローリング,ヨーイングの4自 由度を有する.

3.線路構造物の力学モデル



線路構造物の力学モデルは有限要素でモデル化された3次元骨組構造である.構造物の主な部材は梁要素でモデル化されるが,弾性支承や地盤の影響はバイリニア特性を有するばね要素としてモデル化することも可能である.また軌道は橋梁の一部材としてモデル化される.

全体座標系における構造物の運動方程式は,質量マトリックスM,減衰マトリックスC,剛性マトリックスK,節点変位ベクトルx及び節点荷重ベクトルFを用いて,

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \tag{1}$$

と表すことができる.

4.鉄道車両の運動解析と有限要素法の連成

有限要素法による構造物の 3 次元骨組構造解析と鉄 道車両の 3 次元運動解析を連成させた解析手法を用い て,橋梁上の列車走行シミュレーションを行う場合, 橋梁と車両の動的応答を求めるために,有限要素でモ デル化された軌道を構成する要素に車輪・レール間の 作用力である輪重,横圧とこれらの力によるモーメン トを作用させなければならない.しかし,通常の有限 要素法では,節点間を移動する荷重を直接的に扱うこ とは不可能である.したがって本研究では,上述の問 題の解決を図るために,荷重作用要素に梁理論を組み 込んだ独自のアルゴリズムを誘導し,車両と構造物の 結合領域内の力の釣り合い条件に関する定式化を行っ た.以下にこれらの定式過程を示す.

本研究の解析手法では節点間を移動する荷重に関す る問題を解決するために,各時刻において軌道を表す 要素に作用する車両の輪重,横圧及びこれらの力によ るねじりモーメントを,節点荷重および節点モーメン トとして要素を構成する2つの節点に配分する方法を 採用した.これは各々の車輪軸について行われる.車 輪とレールの接触点において要素に作用する鉛直方向 荷重P,水平方向荷重Q及びねじりモーメントTは各輪 重,各横圧の合力として定義され,次式で表される.

$$P = -P_A - P_B$$

$$Q = Q_A - Q_B$$

$$T = -P_A R_{DA} - P_B R_{DB} - Q R_{LV}$$
(2)

ここで, P_A , P_B は輪重, Q_A , Q_B は横圧である.式(2) 中の R_{DA} , R_{DB} , R_{LV} は, 図2に示すように,部材中立軸 とA側, B側レールとの距離を表す.

次に, *P*, *Q* 及び*T* を分配するために使用する形状関 数を以下のように設定する.

$$F_i(x_p) = 2x_p^3 - 3x_p^2 + 1, \qquad S(x_p) = -x_p + 1$$

$$M_i(x_p) = x_p^3 - 2x_p^2 + x_p, \qquad M_i(x_p) = x_p^3 - x_p^2 \qquad (3)$$

式(3)の x_nは要素端点から車輪軸位置までの距離 x_{iw}と

キーワード 動的相互作用,数値解析,高速鉄道,走行安全,弾性支承 連絡先 〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14 芝浦工業大学工学部土木工学科 TEL 03-5476-3047



荷重が作用する要素の長さLの比($=x_{iw}/L$)である.ただし x_p は1を超えない値,すなわち0 x_{iw} <Lの範囲内の値をとる.

式(2),(3)より,要素に作用する鉛直方向,水平方向 荷重及びねじりモーメントを,形状関数を用いて次の ような節点 *i,j* に作用する節点荷重,節点モーメントに 変換する.それらはベクトルの形で式(4)で与えられる.

$$J_{i} = \left\{ \begin{array}{ccc} 0 & F_{i}(x_{p}) \cdot Q & F_{i}(x_{p}) \cdot P \\ & S(x_{p}) \cdot T & -M_{i}(x_{p}) \cdot PL & M_{i}(x_{p}) \cdot QL \right\}^{T} \\ f_{j} = \left\{ \begin{array}{ccc} 0 & \left(1 - F_{i}(x_{p})\right) \cdot Q & \left(1 - F_{i}(x_{p})\right) \cdot P \\ & \left(1 - S(x_{p})\right) \cdot T & -M_{j}(x_{p}) \cdot PL & M_{j}(x_{p}) \cdot QL \right\}^{T} \end{array}$$

$$(4)$$

これらの置換作業を要素に位置する全車輪軸について行い,その作業によって得られた各々の荷重を各々の節点に対して足し合わせることによって,最終的に 節点荷重はこれらの合力,すなわち,

$$\boldsymbol{F}_i = \sum \boldsymbol{f}_i, \quad \boldsymbol{F}_j = \sum \boldsymbol{f}_j$$
 (5)

となり,これらが構造物の強制入力となる. 5.計算例

計算例の解析対象橋梁には図3に示すHBvを選定した.上部工は全長246.8m,スラブ軌道直結式の4径間連続部分合成桁である.下部工はP4,P6,P7は鋼製門型ラーメン橋脚,P5,P8は鉄筋コンクリート壁式橋脚である.支承はP4,P8では積層ゴム,P5,P6,P7では鉛プラグ入り積層ゴムがそれぞれ適用されている. 解析モデルは図4に示すように,複線分を考慮した立体骨組モデルとし,総節点数247,総要素数286,総自由度1414である.

走行する列車は新幹線車両 6 両編成列車として下り 線を走行するものとする.軌道狂いを考慮する場合に おいては,過去に得られた空間周波数に対応する軌道 狂いスペクトル密度から高低狂い,水準狂い及び通り 狂いを抽出して与えた. 列車走行速度 250km/h,軌道狂いを考慮しない場合の 下り線桁のたわみ及びねじり角の時刻歴応答波形を図 5,図6にそれぞれ示す.各径間中央のたわみは極めて 滑らかな曲線を描いており,第1径間中央で最大値約 10.8mm が現れている.第1径間の使用限界状態に関す るたわみ限度は 39.6mm であり,たわみ限度を大きく下 回っている.各径間中央のねじり角も非常に滑らかな 曲線を描いており,第1径間で最大値0.438mrad が現れ ている.本解析モデルではゴム支承の回転に関する拘 束を全て自由として計算を行っており,桁のねじり角 は最大値を与えているものと考えられる.実際にはゴ ム支承には回転実剛性が存在するため,桁のねじり角 も小さくなることが予想される.

図7に列車走行速度は250km/h,軌道狂いを考慮した 場合の1両目後台車A側車輪及びB側車輪の脱線係数 の時刻歴応答波形を示す.部分的にA側車輪に瞬間的 な脱線係数の大幅な増加が見られる.これは軌道狂い によるA側レールとB側レールの高低差により傾きが 生じ,車輪フランジがレールに衝突するためと考えら れる.この時,車輪軸はレール頭部の弾性反発力を受 けるため,B側車輪のクリープ力が若干大きくなる. 軌道狂いを考慮した場合においても最大値は走行安全 に関する脱線係数の限界値0.8の半分以下であり,走行 安全に対する影響は小さいと考えられる.

<u>6.まとめ</u>

高速列車が橋梁上を走行する際の列車及び橋梁の動 力学的現象の解析を行うために,有限要素法による構 造物の立体骨組構造解析と鉄道車両の3次元モデルを 連成させたシミュレーション手法を開発し,その定式 化を行った.また,橋梁の弾性支承の適応性について も検討が可能であることを示した.全ての自由度の変 形を考慮できる本解析手法により,車両と橋梁の動的 相互作用に関するより詳細な検討が期待される.