

弾性支持桁と高速走行車両との動的相互作用

金沢工業大学大学院 学生員 樽本晋吾
金沢工業大学大学院 学生員 元井一字
金沢工業大学 正員 松浦章夫

1. はじめに

弾性支持桁と走行車両の動的相互作用に関しては、解明すべき工学的課題が多く残されている。特に、その力学的挙動を明確にしていくことも重要な課題である。本報告では、高速鉄道に用いられる橋桁を対象として、そこに列車が走行・載荷する際に、「支持部のばね特性」が「橋桁の動的挙動と車両の走行特性」に及ぼす影響を解析するための一つの実用的な方法を導き、二三の計算例を示し、若干の考察を加える。

2. 解析の概要

まず、通常の平面骨組構造の有限要素解析手法により、弾性支持桁全体の剛性、質量マトリックスを求める。図-1に例示するように、両端部の鉛直要素部材を弾性支持部材と考える。すなわち、これらの鉛直部材に、支持部の鉛直ばね特性及び回転ばね特性に見合う諸元を与える。要素部材の水平変位、鉛直変位及び回転角に関する節点変位ベクトルをそれぞれ x, y, θ 、これらに対応する節点外力ベクトルを X, Y, M とする。以下、本研究における近似解を得るための簡略化について、二三の主要事項を述べる。まず $X=0, M=0$ として、 Y 及び y に関する縮小質量マトリックス m 、剛性マトリックス k を求め、ヤコビ法等により固有ベクトル ϕ_i を得る。任意時間における桁節点のたわみベクトル $y(t)$ は(1)式で与えられる。

$$y(t) = \sum_{i=1}^n f_i(t) \phi_i \quad (1)$$

弾性支持桁に節点外力ベクトル Y が作用する場合の運動方程式(i 次モード)はモード減衰を加え、

$$\ddot{f}_i(t) + (2\zeta_i \omega_i + C_{s,i}/m_{e,i}) \dot{f}_i(t) + \omega_i^2 f_i(t) = \phi_i^T Y / m_{e,i} \quad (2)$$

となる。 $f_i(t)$ は時間のみの関数、 ω_i は i 次の円固有振動数、 ζ_i は i 次の減衰定数、 $C_{s,i}$ は支持部の i 次の等価減衰項、 $m_{e,i}$ は i 次の等価質量である。次に、各要素内の鉛直変位を要素両節点の鉛直変位及び回転角の4量を用いた適当な曲線で表し、これを $x=0$ の仮定により、先に求めた固有ベクトル ϕ_i から、

$$\phi_i(x) = \phi_i^T G(x) \quad (3)$$

のように水平座標上の任意の点における固有モード関数で内挿する。ここに、 $G(x)$ は内挿関数ベクトルで、これが直交性を有していれば、連続関数 $\phi_i(x)$ の直交性が保証される。これを用いれば、 m 個の移動荷重列 $P_{i,w}$ ($i=1 \sim m$) が速度 v で走行する場合に対して、(2)式の節点外力ベクトル Y は、

$$Y = \sum_{i,w=1}^m G(x_{i,w}) P_{i,w} \quad (4)$$

のように表される。ここで、車輪軸の配列を $s_{i,w}$ とすると、 $x_{i,w} = vt - s_{i,w}$ となり、 i, w 車輪軸の走行軌跡は、

$$y(x_{i,w}) = y^T G_i(x_{i,w}) \quad (5)$$

となり、これが走行車両の強制入力変位となる。

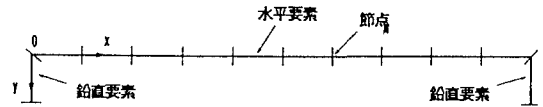


図-1 弾性支持桁の平面骨組構造有限要素モデル

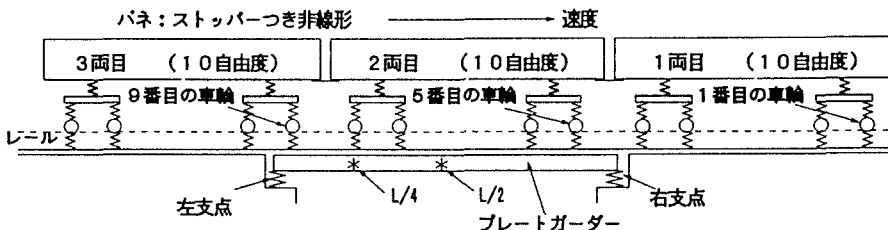


図-2 弾性支持桁と高速走行車両の動的相互作用計算に用いたモデル

3. 高速走行車両が载荷する場合の計算例

以上の解析をもとに、図-2に示した高速車両(3両編成)が支間 L の両端弾性支持桁を速度210km/hで走行する際の計算を行った。支持部の減衰係数 c_{sp} を用いて(2)式の i 次モード減衰項は、

$$C_{sei} = c_{sp} \phi_i(0) + c_{sp} \phi_i(L) \quad (6)$$

となる。この計算例では、節点を等間隔に11点設けて鉛直変位に関する固有値を求めたが、要素の両端部の境界条件を満足する3次曲線を用いた場合、3次振動モード以下では内挿関数ベクトル $G_i(x)$ の直交性がほぼ満足されることが確かめられた。

軌道には、力学モデルにおいて車輪直下に等価的なばねを挿入することにより弾性特性を考慮してあるが、桁端部にはまくらぎ間隔の補完直線を挿入して、一般部の軌道との間に生じる極端な折角及び目違いを実際に近い形に近似・平滑化した。

図-3に、支間30mの上路プレートガーダ(S橋梁；死荷重46.61t、標準断面二次モーメント $0.09315m^4$)の両端支点に、ばね定数100,000kN/m、減衰係数1527kN・s/mの弾性支持体を挿入した場合の桁及び車両の応答波形を示す。この図のように、走行車両の輪重には、支点部通過時に静的輪重約147kNに対して200から150kNの間を往復する変動が生じている。

桁のたわみは、支点部で最大5mmとなっているが、このような目違いによって比較的大きな輪重変動が現れたものと考えられる。しかし、この計算例によるたわみ波形からは、弾性支持桁の不安定化に通じるような上方変位は現れていない。

図-4には同じ条件に対する通常の単純支持桁の場合の結果を示す。このように、単純支持の場合は、桁に進入する際の大きな輪重変動は全く見られない。また、桁のたわみも高次振動の影響が少なく、比較的滑らかな波形を描いている。これに比べ、弾性支持桁では、支点及び桁のたわみが大きくなり、かつ高次振動に起因する波形が見られる。

図-5には、支持部のばね定数によって変化する桁端部の上下変位の最大値及び輪重の最小値を示す。本図によれば、支持部の弾性支持体ばね定数の減少(右方向を正)に伴い、最小輪重は減少し、たわみの最大値(下方向を正)は直線的に増大すること、また最大たわみでは左右支持部での相違は小さいが、最小輪重では後部車両の輪重ほど小さくなっている。

4. あとがき

弾性支持桁と高速走行車両との動的相互作用の解明によって、高速鉄道橋梁にも弾体支承の採用が促されれば、多くの実務的なメリットが生まれてこよう。本方法は、内挿関数ベクトル $G_i(x)$ の提案により、桁上任意点の荷重を節点荷重に置き換えて、移動荷重の解析を簡略化している。支持点数が増えた場合などの計算も可能であるが、さらに、この内挿関数ベクトルの一般特性や適応性に関する検討も行う予定である。

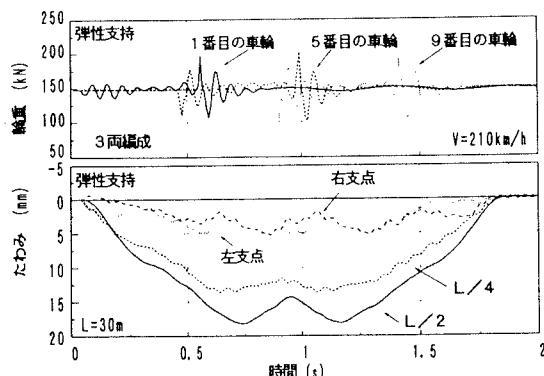


図-3 弾性支持桁の場合のたわみ及び車輪輪重波形

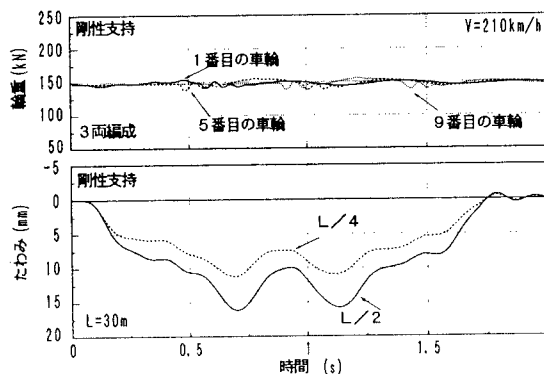


図-4 単純支持桁の場合のたわみ及び車輪輪重波形

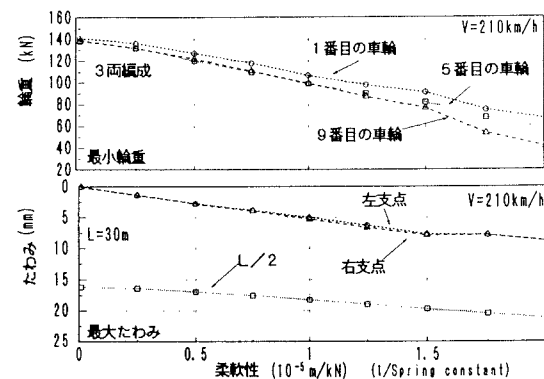


図-5 支持部ばね定数変化による輪重とたわみ