

1. まえがき 車両走行による地盤振動の発生機構を解明することは、低振動構造物の開発上きわめて重要な意味をもっている。しかし、車両一軌道一構造物一地盤などの伝播経路において、その関連する要素が非常に多くあり、それらの相互の関連性も明確になっていない現段階では、経路全般にわたる現象を一括して検討することは、大きな困難がともなう。高架区間の地盤振動は、橋脚の振動が加振源であると見なし得るが、桁式高架橋の場合には、その橋脚に桁支承部からの変動荷重が載荷される。本報告では、振動の伝播経路の中間に位置する構造物、とくに上部構造の桁に焦点をあて、高架橋脚の負荷特性が種々のパラメータに対してどのように影響されるかを理論的に解析し、振動に対して有利な桁諸元の選定方法について検討した結果を述べる。

2. 理論解析 図-1に示すように、同種の単純支持桁が2連配置された上を、列車が走行する場合の中間支点の反力変動を求めると。列車荷重はその軸重の荷重列として近似し、その移動に対する単純支持桁の運動方程式から、支点の反力を誘導する。単純支持桁の運動方程式は、つぎのようにあらわすことができる。

$$m_{b,i_b} \ddot{f}_{i_b} + c_{b,i_b} \dot{f}_{i_b} + k_{b,i_b} f_{i_b} = P \varphi_{i_b} \quad (i_b = 1 \sim \infty)$$

ここに、 i_b は振動次数、 m_{b,i_b} 、 c_{b,i_b} 、 k_{b,i_b} はそれぞれ i_b に対する桁の等価質量、等価減衰係数、等価ばね定数であり、 f_{i_b} は基準座標、 φ_{i_b} は基本入力モードであり、それぞれ以下の関係を有する。

$$y = \sum_{i_b=1}^{\infty} f_{i_b} \cdot h_{i_b}, \quad \varphi_{i_b} = \sum_{i_w=1}^{n_w} (1 + \sigma_{i_w}) h_{i_b, i_w}$$

ここに、 h_{i_b} は桁のたわみモード関数、 n_w は荷重数、 σ_{i_w} は i_w 軸の軸

重変動率である。 h_{i_b, i_w} は i_w 軸の位置 $x_{i_w} = v t - S_{i_w}$ を h_{i_b} の x に代入したものである。なお、 t は時間、 x は左支点からの座標、 S_{i_w} は基準点からの i_w 軸の距離である。 φ_{i_b} は定常区間を考慮することとして、

$$\varphi_{i_b} = \sum_{i_w=1}^{n_w} \text{Re} \{ \bar{\varphi}_{i_b, i_w} e^{-j\omega t} \} \quad (\text{Re: 実数部}, j = \sqrt{-1})$$

とあらわすことができる。これを解くことにより、左側桁の右支点反力は、以下の式で計算することができる。

$$R_1 = -j \int_0^{l_b} 2mb/l_b \cdot x \cdot \ddot{y} \, dx + P \sum_{i_w=1}^{n_w} \epsilon_{i_w} (1 + \sigma_{i_w}) x_{i_w} / l_b \quad (\epsilon_{i_w} = 1 \text{ } 0 \leq x_{i_w} \leq l_b, \epsilon_{i_w} = 0 \text{ その他})$$

ここに、 l_b は桁支間である。同様の手法で、右側桁の左支点反力 R_2 も求めることができる。左、右側桁の支点反力を時間のづれを考慮して加え合わせると、定常状態における中央橋脚の負荷々重を求めることができる。

3. 解析結果 以下において、図-1に示す等断面の単純支持桁が2連配置されたときの中央支稜の反力に平衡する下部構造物への荷重変動特性が、桁の支間、剛性(固有振動数)、減衰などに対してどのように相異なるかを検討した結果について概略を述べる。

解析方法について: 列車の走行によって生じる橋脚の支点位置に加わる荷重変動と、列車荷重、桁諸元、軸重変動などをパラメータとして計算するための一解析手法が得られた。解析の基本は参考文献と同じ構成であるが、支点の荷重変動は桁の振動による慣性力の影響を大きく受けることが明らかになった。したがって、静力学的な影響線の重ね合せからのみでは、その特性を把握することはできない。

支間による相異: 基本固有振動数を $f_b = 150/l_b$ Hz とし、速度 200 km/h で新幹線列車が走行する場合の中央支稜の支点荷重変動の2乗和平方 P_R と、数個の周波数成分領域に分けて整理した。その結果、橋脚に加わる荷重変動は、桁支間によってかなり相異なるが、その大きさは周波数領域によって異なり、地盤振動に対して有利な支間を他の条件なしに上げることは困難である。しかし、全体的

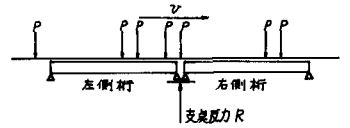


図-1 列車が走行する2連配置桁

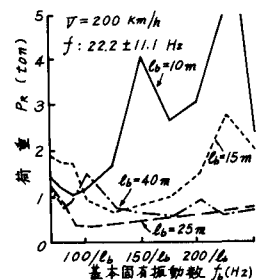


図-2 桁固有振動一荷重変動

には支間が長いほど P_R は減少する傾向を有するものと言える。

桁固有振動数による相異： 列車走行速度 200 km/h, 桁の減衰定数 $\delta_b = 0.05$ のときの, 桁の固有振動数に対する P_R を計算した。その結果, 全体的には上と同様に長支間ほど P_R は小となり, 周波数領域によって固有振動数に対する関係は多様であることが認められた。図-2 に, 結果の一例として周波数領域 22.2 ± 11.1 Hz の場合を示すが, 全体的に $f_b = 100/l_b$ Hz 附近に極小値を有する。また, f_b が $90/l_b$ Hz 以下においては急激な荷重の増大がみられるが, これは速度パラメータ α が $\alpha = v/(2f_b l_b) > 0.309$ となり, 基本固有振動数と荷重列との共振作用によるものである(参考文献)。同図にあらわれる各部のピークは, 荷重列と支間との関係で定まる基本入力モード関数スペクトル $\bar{\varphi}_{i_a, i_b}$ に含まれる周波数のうち, 大きな振幅を有する周波数と, 桁の基本固有振動数あるいは高次の固有振動数とが接近するときに発生するものである。たとえば, 図-2 の $f_b = 150/l_b = 15$ Hz における $l_b = 10$ m のピークは, 図-3 に示すように比較的大きな成分を有する $i_a = 7$ (15.6 Hz), $f_b = 225/l_b = 22.5$ Hz におけるピークは, $i_a = 10$ (22.2 Hz) と接近するため生じたものである。このように, 支間が 10 m, 15 m のように, 短支間の場合には $f_b = 10$ Hz 前後で荷重 P_R が最小となり, これから離れるに従って増大する傾向が見られる。

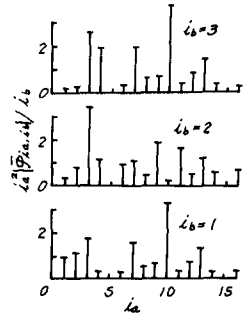


図-3 $\bar{\varphi}_{i_a, i_b}$ ($l_b = 10$ m)

軸重変動による影響： 軸重変動による影響を調べるために, 図-4 に示した車両軸箱上下振動加速度の実測例を用いて, P_R の計算を行ったところ, その影響はとくに周波数の大きい領域で顕著にあらわれ, ばらつきも大となることが認められた。

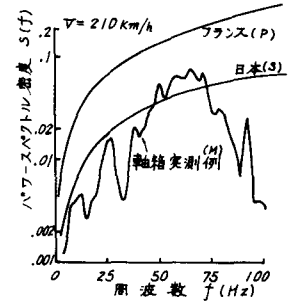


図-4 軸重変動力スペクトル

最適桁パラメータの検討： 地盤振動に対して比較的重要な周波数領域 $10 \leq f \leq 30$ Hz における橋脚Pの振動レベルを橋脚の上下変位の単位リアクタンس $X_p = 1.0 \mu/ton$ に対して求めたものを図-5 に示す。本図は, 桁の基本固有振動数に対する振動レベルの変化の様子を, 軸重変動(図-4)を考慮した 10 case の計算結果を平均したものである。

振動レベルを最小にするには, どの支間においても $f_b = 10$ Hz となっており, 最小値の支間による差異は少ないものと言える。

以上の関係を考慮して, 少なくとも大きな振動の発生を避けるため桁剛性の範囲を求める試みを行った。すなわち, 成分の小さい $i_a = 5$ 以下の i_a に相当する周波数で, しかもこの範囲に対して荷重列による共振を避ける条件を与えよとし, 以下の条件が提案される。($\alpha = v/(2l_b f_b)$)

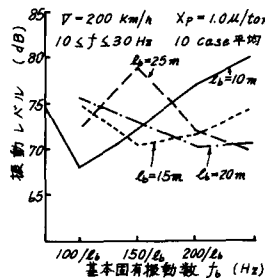


図-5 振動レベル

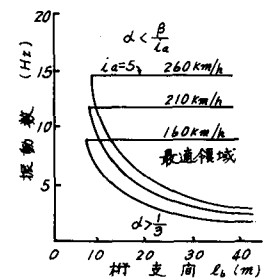


図-6 最適値領域

$$\beta/5 \leq \alpha \leq 1/3$$

$$\beta = l_b / (2l_a), l_b: \text{車両長}$$

この条件式を, 具体的なパラメータであらわすと図-6 のようになる。

4. あとがき 本報告では, 高架橋区間に生じる地盤振動に関連して, 桁の支点反力特性, すなわち橋脚の負荷特性を理論的に検討した。このような検討を行ったのは, 橋脚の負荷特性と地盤振動特性とが密接に関連するものと考えられるからである。ここでは, 低振動構造物の開発に必要な解析の一方法を提示したにすぎないが, 今後はここで考慮されなかった他の条件などの詳細な検討とともに, 新幹線総合試験線の走行試験における実測結果とのつき合わせも予定している。

参考文献, 松浦, 高速鉄道における橋桁の動的挙動に関する研究, 土木学会論文報告集第256号, 1976年12月