

周辺環境への影響を考慮した高架橋の 防振効果に関する一解析法

EVALUATING METHOD FOR VIBRATION REDUCTION OF HIGHWAY BRIDGES IN CONSIDERATION OF ENVIRONMENTAL EFFECTS

梶川 康 男*・大嶋 信 太 郎**

By Yasuo KAJIKAWA and Shintaro OHSIMA

1. ま え が き

都市内高架橋の振動が橋脚から地盤を伝わり周辺家屋を振動させている問題は、進歩しつつある橋梁技術が直面させられている解決すべき重要課題の1つである¹⁾。この種の問題は工学的な対応のみで解決できるものではないであろうが、より快適な都市環境のために寄与すべき都市内高架道路が矢面に立たされている以上、技術的な検討を十分に行い、マイナス面を少しでも減ずる努力が必要であろう。

このような振動問題は平面道路を含めて道路交通振動とよばれ、昭和 51 年に施行された振動規制法が適用されている。この規制法の内容にも問題点²⁾はあるが、周辺住民からの苦情は規制値を大きく下まわる振動のレベルから生じている場合が多い。

環境問題であるために周辺住民からの苦情が表面化し、その対策として防振工事が行われることも多く、さまざまな防振対策がとられている。ところが、防振対策を考える場合には、単純化された橋梁構造物の設計の問題とは異なり、地盤や基礎の条件など個々の橋梁の特殊な条件が複雑に関係していることが多く、その特殊な条件を加味した対策を考える必要がある。また、日常の荷重レベルであるために設計活荷重レベルとは構造物の挙動が大きく異なることも少なくないであろう。このような問題に対し、構造物の挙動を把握するための実験も重要であり、多く行われている。これらに加えて、従来あまり行われていない防振に関する解析的なアプローチも今後必要であるように思われる。

そこで、本論文では従来実施されてきた高架道路橋の振動測定あるいは防振対策工事の効果判定実験の結果³⁾

を参考にして実際の高架橋の動的挙動を把握し、その挙動が説明し得るような解析モデルを考え、そのモデル橋に対して防振対策を行い、数値計算によって各防振対策の効果シミュレートする手法を示すとともに、各防振対策について考察を示す。

2. 実在高架橋の動的挙動と防振対策に関する 従来の研究

高架橋の場合には、その発生源として、また伝達経路としての上下部構造の振動特性が重要な因子となっている。ここで、まず実験報告³⁾にみられる高架橋の動的挙動のおもな特徴を挙げると次の2点に絞られる。

1) 自動車のタイヤが伸縮継手部の段差に乗り上げ、路面に落下する際に床版端部などに高い振動数成分の振動が発生する。そして、その振動に伴って空気振動が生じ、いわゆる低周波空気振動として周辺家屋にまで伝播される。また、この成分は橋脚—地盤にも伝達されるが、地盤中で減衰されてしまい、地盤から家屋には伝達しないことが多い。

2) 自動車が支間部に進むにつれて主桁のたわみ振動が生ずる。ところが、支承板の摩擦のために支点部のたわみ角に相当する分だけ、主桁は橋脚を橋軸方向にスウェイ振動させる。また、走行車両が偏載荷されるために、主桁反力の差から橋脚は橋軸直角方向にロッキング振動をも生ずる結果となる。これらの振動は 2~4 Hz 程度であることが多く、しかも減衰性は悪く、広範囲に地盤を振動させる原因となっている。このような振動によって橋脚は主桁と連成した振動となり、しかもフーチングや基礎杭と一体となって振動しており、その動的影響が地盤に伝達され周辺家屋の振動を誘起している。また、上部構造のたわみ振動の成分も低周波空気振動として周辺家屋に達することがある。

これらの特徴は、必ずしも同時に、しかもすべての高

* 正会員 工博 金沢大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 住友セメント(株)エンジニアリング部
(前・金沢大学大学院)

架橋でみられる傾向ではないが、このような動的挙動の特徴は高架橋の防振を考える場合に十分配慮しておくことが望ましい。

ところが、従来、防振を考えるときには次の3つの区分に応じた対策が行われてきた。

- 1) 振動発生源での対策
- 2) 伝播径路部での対策
- 3) 受振部での対策

元来、振動による環境問題のうちでは平面道路の道路交通振動が主であったために、伝播径路には橋梁構造物が介在せずに、発生源としての自動車と路面、伝播径路としての地盤、受振部としての家屋での対策がそれぞれ実施されてきている。

一方、橋梁振動に対する解析では設計問題としての衝撃係数⁹⁾や振動使用性¹⁰⁾について移動荷重と上部構造の相互作用の面から詳細に行われており、特に可撓性に富む橋梁（たとえば、吊橋や歩道橋など）の上部構造の振動を制御する目的で吸振器などによる防振効果の研究⁹⁾がなされている。また、地震時の地盤と下部構造、あるいは上部構造と下部構造の相互作用に関しては多くの研究が進められている。

ところが、すでに述べたように実在高架橋の動的挙動から考えると走行車両と上部構造および下部構造は完全に連成して振動していることが多く、実効ある防振対策を考えるには、それらの連成振動系としての解析が必要であるが、その解析例はほとんど行われていないのが実状である。

高架橋の防振についての実験は一部で実施されている¹⁰⁾。それらには、伸縮継手部の路面段差を小さくしようとした改良や支間部の路面凹凸を平坦にしたものがあり、また、主桁の横分配効果を増すため、あるいは床版端部の補強をはかるために横構や端横桁などの2次部材の補強が行われた例もある。そして、衝撃的な振動を吸収するようにゴム支承に改良した例、あるいは主桁端部を曲げ拘束するように隣接主桁を連結板でつないだものもある。このほかに、走行速度・車両重量・走行車線などの規制を実施した例もある。これらの実施例について防振効果の程度が報告されているが、それらの実施例が少ないこともあって、効果について一般的な結論を得るに至っていないのが現状である¹⁰⁾。表-1に従来考えられてきた防振対策が振動系の質量、減衰、剛性、外力のうち、何を主に変化させることが目的であったかを示した。

防振を考える場合、実験を行うことは確かに重要であるが、その労力と費用から考えると、いろいろなケースを試行することが困難であり、解析的なアプローチの支援が是非必要であ

表-1 各種の防振対策法

防振対策法	質量M	減衰C	剛性K	外力F	本研究
質量の増加	○				
主桁・主構の補強			○		○
二次部材の補強			○		
ポスト・テンドンによる補強			○		
吸振器を取り付ける		○	○		○
粘性ダンパーを取り付ける		○			○
隣接区間桁との連結	○		○		
支承部の改良		○	○	○	
伸縮継手の改良				○	○
路面の平坦化				○	○
予想される外力と反対方向に力を加える				○	
交通規制				○	○
地盤改良			○		○

ろう。そこで、高架橋の防振を考えるための解析的アプローチの第一段階として、本論文では、まず主桁のたわみ振動と橋脚のスウェイ振動に着目して解析を行い、各防振対策の効果を評価することにした。なお、橋軸直角方向のロッキング振動については複雑な解析を必要とすることから、今回は対象としないこととした。

3. 走行荷重による高架構造の動的応答解析

本論文では主桁のたわみ振動と橋脚のスウェイ振動に着目することとし、一般によくみられる単純合成桁2連と現場打ち杭基礎上のT型単柱式コンクリート橋脚を対象にすることにした。対象とした諸元とまったく一致する高架橋は実在しないが、同規模の高架橋は多くみられることから実在する高架橋を参考にしてモデル化を行い対象モデル橋として採用した。このような高架橋を走行荷重が通過する場合の動的応答解析をここでは行う。

まず、2.で示したように自動車が支間部に進むにつれて主桁のたわみ振動が卓越し、図-2(a)のように主桁が曲げ変形をするとき、主桁下面は支承上を4Lだけ水平移動するはずであるが、通常の走行車両による振動では支承と主桁下面との大きな摩擦のために滑ることなく、主桁下面の水平移動に伴って支承や橋脚先端は一体となって橋軸水平方向に移動させられることが多い⁹⁾。このような挙動を考慮するために図-2(b)に示すよう

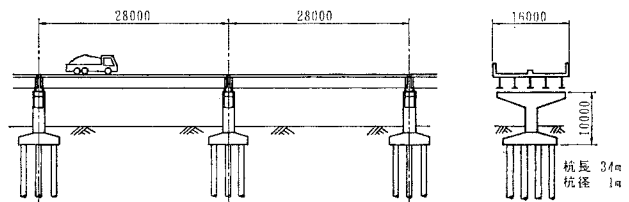


図-1 対象とした高架橋の一般図

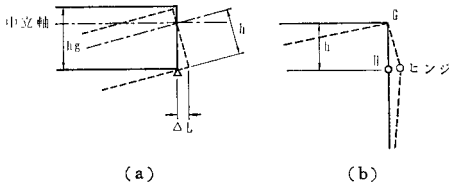


図-2 主桁と橋脚の連成振動のモデル化

に主桁の高さを考え、しかも主桁と橋脚とはヒンジで連結されているものとした。ただし、主桁の高さをモデル化した GH 部分では質量をゼロとし、剛性 I_g を無限大として扱うことにした。なお、両主桁の断面は同一の等断面ばりと仮定し、橋脚も断面一様と考えた。そして、地盤と杭基礎の部分は 3 個の弾性ばねで表わし得るものとした。これは、この種の振動問題が生じている地点は一般に軟弱な地盤を有する所が多いが、既設高架橋の防振対策として基礎の改良や地盤の改良が事実上、困難であることと周辺家屋へ伝播される振動エネルギーがおもに基礎のどの部分から放射されるのかがまだ明らかではないことなどの理由による。また、有限要素法などを用いて地盤の動的応答を解析することも可能であろうが、本論文では主として上部構造への防振対策によって地盤への入力すなわち橋脚反力を減少させることが目的であることから地盤中での振動伝播あるいは減衰については対象としないことにした。そして、等価ばねへの換算方法にはいくつかの報告¹¹⁾があり、動的に扱うべきであるが、用いることのできるデータが必ずしも十分ではないことから、ここでは地盤の付加質量や減衰は考えずに、静的な変位法¹²⁾を参考にして行った。このようなモデル化によって主桁のたわみ振動と一体となって生じている中央橋脚のスウェイ振動を表わすことにした。なお、隣接径間と 図-1 の左右の橋脚からの影響はないものとし、しかも左右の橋脚上では桁の高さを考えないものとした。図-3 に本解析で用いたモデル橋の諸元を示した。ただし、数値計算では鉛直ばね係数を無限大とした。

動的応答解析にはモーダル解析を用いることとした。そこで、 r 部材の端部から x_r の距離の点における、時間 t の動的変位は次式で表わされるものとする。

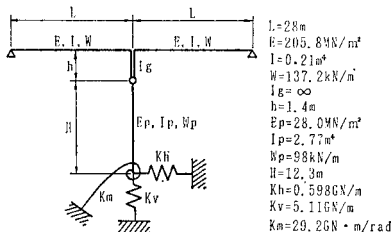


図-3 モデル橋（基準構造）の諸元

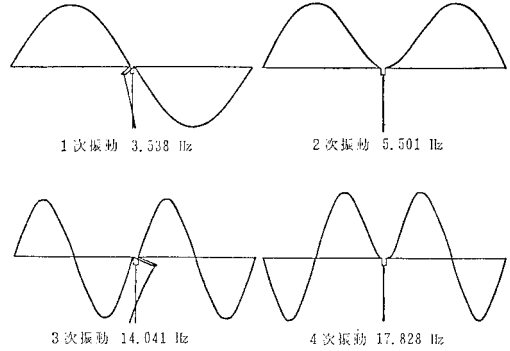


図-4 基準構造の固有モード図

$$y(x_r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \varphi_{nr}(x_r) \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $q_n(t)$ は n 次モードでの一般座標を示し、 $\varphi_{nr}(x_r)$ は r 部材の n 次の基準関数を示している。なお、 r 部材の n 次の振動モードは次式で表わされるものとする。

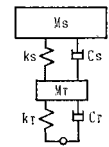
$$\begin{aligned} \varphi_{nr}(x_r) = & A_{nr} \sin \beta_{nr} x_r + B_{nr} \cos \beta_{nr} x_r \\ & + C_{nr} \sinh \beta_{nr} x_r + D_{nr} \cosh \beta_{nr} x_r \\ & \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

この式 (2) で表わされる振動モードに対し動的 4 連モーメントの定理による固有振動解析¹³⁾を行い、モード係数 $A_{nr}, B_{nr}, C_{nr}, D_{nr}$ を求めた。図-3 に示した基準のモデル橋の固有振動数と固有振動モードを 図-4 に示した。なお、各モード係数は次式の正規化条件を満たすように決定した。

$$\sum_{r=1}^3 \int_0^{l_r} \rho_r \cdot \varphi_{nr}^2(x_r) dx_r = 1 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 l_r は r 部材の部材長、 ρ_r は r 部材の単位長さ当たりの質量である。

そして、走行荷重が 図-5 に示したような 2 自由度系にモデル化できるとすると、 n 次モードでの一般座標に関 図-5 自動車荷重モデル



$$\begin{aligned} \ddot{q}_n(t) + 2h_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) \\ = \{C_T(\dot{z}_T - \dot{y}_V) + k_T(z_T - y_V) \\ - (M_S + M_T)g\} \varphi_{ni}\{V(t-t_0)\} \dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、 ω_n は高架橋の n 次の振動数であり、 h_n は減衰定数（本論文の数値計算では上部構造の減衰定数を構造全体の代表値と考え、0.02 を採用）である。なお、 $\varphi_{ni}\{V(t-t_0)\}$ は走行荷重が i 部材に載荷されているときの載荷点の基準関数値である。また、 y_V は載荷点の変位を示しており、橋梁の変位と路面凹凸値を加えた値である。

そして、2 自由度系にモデル化された自動車に関して

$$M_S \ddot{z} + C_S(\dot{z} - \dot{z}_T) + k_S(z - z_T) = 0 \dots\dots (5)$$

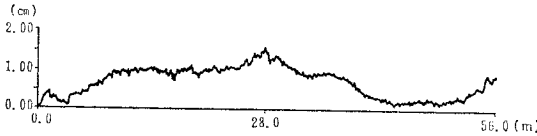


図-6 標準として用いた実測路面凹凸

$$M_T \ddot{z}_T + C_S (\dot{z}_T - \dot{z}) + k_S (z_T - z) + C_T (\dot{z}_T - \dot{y}_V) + k_T (z_T - y_V) = 0 \dots (6)$$

が成り立つ。

数値計算においては主桁と橋脚の振動を表わす式(1)、(4)と自動車の振動を表わす式(5)、(6)を連立させて、ニューマークのβ法で逐次積分を行い、高架橋の動的応答値を求めた。なお、βは1/6を採用し、数値積分の時間間隔は1/100秒とした。そして、各ステップでの加速度の仮定値と計算値とが1/1000の差以下になるまで繰返し収束計算を行った。

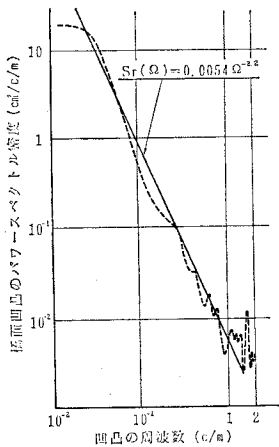


図-7 標準路面のスペクトル密度

路面凹凸についてはモデルとした橋での実測値がないことから、一般道路橋の実測結果¹⁴⁾からほぼ同じ支間長を有し、しかも路面凹凸のスペクトルの形状が高架橋のものと類似していると思われる橋梁での実測値(完成1年後に測定)を用いることにした。図-6にその凹凸値を示し、また図-7には最大エントロピー法で求めた凹凸スペクトルを示した。なお、実測路面は10cm間隔で

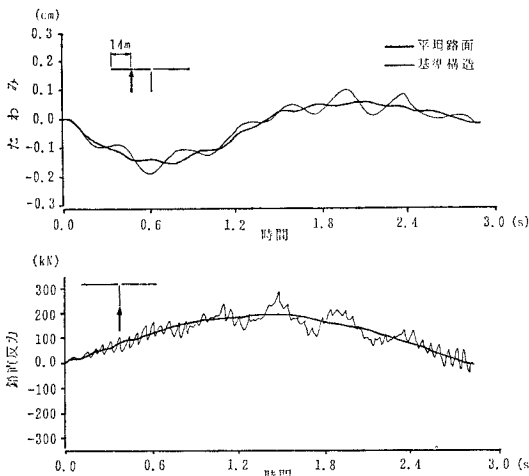


図-8 動的応答結果の一例

あり、自動車モデルへの入力には載荷点とその前後の3個分を算術平均とした値を用いた。

数値計算の一例として、図-5に示した走行荷重が走行速度20m/s(72km/h)でモデル化した高架橋を通過するときの応答結果を図-8に示した。また、図中には路面凹凸がまったくない平坦路面のときの結果をも参考までに示した。なお、支点反力については影響線を求めておき、走行荷重による影響と各部分がつ慣性力による影響から反力を計算した。

4. 高架橋への防振対策

3.で示したモデル橋(以下、基準構造とよぶ)に対して、施工の可能性も考えて表-1のうちのいくつかの防振対策を想定して、その動的応答計算を行った。その応答量を基準構造の応答量と比較し、防振効果を求めた。結果については5.で示す。ここでは、次の7種類の対策を今回考えた。

(1) 地盤の改良

都市内高架橋は、その立地条件の制約から軟弱な地盤上にあることが多く、また、軟弱な地点で特に振動が問題となっていることが多い。そこで、基準構造では地盤のN値を7として扱ったが、地盤改良工事によってN値を15にした場合、高架橋の振動がどのように変化するかを求めた。以下に示す(2)~(7)までの対策はどちらかといえば発振源対策であるが、まず、伝播径路である地盤条件の変化を考えた。本論文では地盤や杭基礎は等価ばねで表わしているので、N値が15になると水平方向のばね係数が1.03GN/m、回転ばね係数は29.9GN・m/rad、換算

表-2 高架橋の固有振動数 (Hz)

	基準構造	地盤改良時	剛性増加時
1次	3.538	3.539	3.872
2次	5.501	5.501	6.026
3次	14.041	14.042	15.377
4次	17.828	17.828	19.529

高さは11.8mとなる。このような等価ばねをもつモデル橋の固有振動数を表-2に示したが、基準構造の固有振動数とほとんど変化がない。

(2) 動吸振器の取付け

歩行者の歩調と共振し、大きく振動する歩道橋に吸振器を取り付け、防振効果が発揮できたとの報告¹⁵⁾がある。また、吊橋の振動対策として吸振器の取付けが検討されている。その施工性から考えると容易に取り付けることが可能であり、効果が明らかであれば有効対策となる。そこで、図-9に示したように両支間中央点に2トン重(19.8kN)の重錘をもつ吸振器を考えた。また、

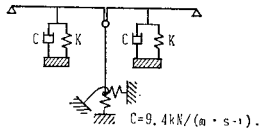


図-9 吸振器の取付け

ねについては高架橋の1次振動を制御することを目的に吸振器の固有振動数が2~3.2 Hzとなるような値をとり、それぞれに対して動的応答解析を行い、吸振器取付けによる防振効果の程度を検討した。

(3) 粘性ダンパーの取付け

大きな粘性をもつ減衰器を取り付け、振動を減少させる試みは多くみられる。1つには桁端ダンパーがあるが、

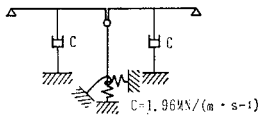


図-10 粘性ダンパーの取付け

図-10のように支間中央点と地表との間に減衰器を取り付けることにして動的応答解析を行った。その減衰係数として1.96 MN/(m・s⁻¹)を採用した。

(4) 主桁の補強

橋梁の振動が問題になると、その剛性不足がよく議論され、剛性を高めるための対策がよく考えられている。剛性を高めるには主桁フランジに鋼板を添加するか、あるいはポスト・テンドンによる補強などがある。また、直接的ではないが、2次部材を補強することにより主桁の横分配効果を高めて、全体の剛性を高めることもある。いずれの補強方法を採用しても結局ははりの剛性を大きくすることでモデル化される。そこで、主桁の剛性増加によってどのような防振効果があるかを検討するために、ここでは主桁の断面2次モーメントを実際の値から算出した基準構造の値の1.2倍に大きくしたときの防振効果を検討した。なお、剛性を高めた構造の固有振動数を表-2に示した。

(5) 伸縮継手の改良

伸縮継手部は竣工時から多少の凹凸は避けがたく、その凹凸によって走行車両の車輪は衝撃を受け、その反作用として床版も大きな衝撃を受ける。この繰返しによって凹凸は少しずつ進行し、継手部付近の路面の不整・段差は顕著なものになるというのが一般的にみられる傾向である。この不整は自動車の走行性やRC床版の損傷の点からも重要視され、常に監視され補修されている¹⁶⁾。

粘性係数については臨界減衰時の粘性係数のほぼ10~20%の値のとき、最も効果があるとの報告¹⁾から9.4 kN/(m・s⁻¹)とした。重錘を支持するば

従来、上部構造の衝撃係数に対する検討では伸縮継手部での段差があまり影響しないとされてきたが、近年、地盤振動や低周波空気振動の問題が生じて以来、橋台や橋脚上での衝撃は大きな要因としてクローズアップされてきた。継手の支持方法や継手構造そのものの改良も必要であるが、舗装材料の開発も期待されている。ここでは、継手を改良し、その付近の路面不整を平坦にした場合の防振効果を求めた。実際には図-6に示した路面凹凸のうち、走行自動車が進入する左側橋脚上の大きな段差を4 m 区間にわたり補修し、さらに中央橋脚上の凹凸を前後それぞれ2 m 区間について補修したとして、数値計算では路面をその区間で平坦なものとして扱った。

(6) 交通規制

大型車に対して中央寄り車線を走行させたり、あるいは重量超過の大型車の通行を制限するという交通規制も行われている。前者の規制は高架橋の振動から考えると橋軸直角方向の橋脚のロッキング振動を減少させる点で有効であることが実験的に確かめられている¹⁰⁾。後者については、その規制の効果は明らかではない。ところが、高架道路の交通量が比較的少ない早朝・深夜に高速度で走行する大型車が周辺住民の睡眠を妨げるという苦情は多い。そこで、規制速度超過車の高架橋の振動に対する影響をみるため、裏返せば速度超過車の指導あるいは取締りの強化が防振上有効か否かを確かめるために、走行速度を20 m/s (72 km/h) から30 m/s (108 km/h)にした場合の動的応答を求めた。

(7) 路面の平坦化

橋梁の舗装路面の凹凸性状は文献14)で報告したように、そのスペクトルが路面周波数の指数関数で表わされることが明らかとなっている。このような凹凸スペクトルを用いた解析によると支間部の路面性状が上部構造の動的応答に大きく影響することが報告されている。そこで、ここでは(5)で示した伸縮継手部の改良を実施し、さらに現状の路面を舗装の打換えあるいはオーバーレーなどによって支間全体にわたり平坦化した場合の防振効果を求めた。どの程度までの平坦化が実施できるかが明らかではないので、左支点を基準とした現状の凹凸高さを $\sqrt{1/4}$ 、 $\sqrt{2/4}$ 、 $\sqrt{3/4}$ (以下、路面改良1, 2, 3とよぶ)の高さにした場合を考えた。これは、図-7に示した路面スペクトルの指数($n=-2.2$)はそのままとして、パラメーター a の値を現状の値($a=0.0054$)の1/4, 2/4, 3/4倍にしたことと同じである。

なお、表-1には以上の(1)~(7)のほかにも質量の増

加，隣接径間げたとの連結，支承部の改良，予想される外力と反対方向に力を加えるなどの防振対策をも示したが，これらについては設計上あるいは施工上の問題が残されており，今後さらに検討する必要はあるが，今回は考えないことにした。

5. 数値計算と防振効果

基準構造に 4. で示した防振対策を想定した場合の動的応答計算を行った。その動的応答値として，支間中央点での動的たわみと振動速度，橋脚上端の水平変位および橋脚下端での 3 方向反力を選び，その 1 秒間の実効値を求めた。その一例を 図-11 に示した。なお，地盤改良と吸振器の取付けについては基準構造とほとんど同じなので図示していない。また，路面改良については路面改良 1 (基準路面の $\sqrt{1/4}$ の凹凸) のみを示した。ここで，1 秒間の実効値を選んだのは，この種の振動測定には人間の反応との関係から時定数が約 1 秒 (メーターの動特性が Slow) の振動レベル計が一般に用いられることが多いことによる。そして，振動規制法では道路交通振動のような振動レベルの変動が不規則である場合には 5 秒間隔 100 回の振動レベル読取り値の 80% 上端値 (L_{10}) を評価対象としているが，この値には通過大型交通量の影響が大きく現われることから，長い自動車列を対象としない本解析値の評価には不向きであり，また，基本的には実効値のピークを小さくすることが住民

の反応から考えると最善であるとの判断²⁾から，実効値の最大値を防振効果の判定対象とした。さらに，道路交通振動の測定には補正加速度の基準加速度 (10^{-6} m/s^2) に対するデシベル表示がなされ，実験報告などにも何デシベルの増減という表現が用いられていることから，防振対策の判定には次式で表わされるデシベル表示の改善度 (β) を用いることとした。この改善度は言い換えれば着目した応答量の増減をその対数差で示したものである。

$$\beta = 20 \log_{10}(a_0/a) \dots\dots\dots (7)$$

ここに， a_0 は対象とする応答量の基準構造での最大実効値であり， a は対象とする動的応答量の防振構造での最大実効値である。

図-12(a) には表-3 に示した 20 トン重 (196 kN) の大型車が 20 m/s の走行速度で通過したときの改善度を示した。また，同じ車両の積荷 (ばね上の重量) を 5 トン重 (49 kN) だけ軽くした 15 トン重 (147 kN) の大型車が 20 m/s の走行速度で通過したときの改善度も求めたが，図-12(a) に示した 20 トン重の車の走行時における改善度とほとんど同じ結果が得られた。そして，連行車両が通過するときの改善度をみるために，先行車両 (上記の 15 トン重の車両) と後続車両 (上記の 20 トン重の車両) が支間長の半分の車頭間隔 (14 m) で走行したときの改善度を 図-12(b) に示した。また，支間長分の車頭間隔 (28 m) で走行したときの改善度も求めたが，図-12(b) に示した車頭間隔 14 m のときの改善度とほとんど同じ結果が得られた。ただし，吸振器については前述したように吸振器のばね係数をいろいろ変更して計算したが，その改善度に変化がないために 図-12 には代表値として固有振動数が 2.5 Hz の場合について示した。

ここで，順にモデル橋に対する防振効果について考察を加える。なお，高架橋の主桁や橋脚のどのような挙動が周辺住民の振動感に影響するかが，まだ十分には明らかになっていないことから，地盤振動については橋脚上端の水平変位と橋脚下端の反力の改善度から判定を行うこととした。低周波空気振動については，その発生メカニズムが研究され始めたところであり^{17)~19)}，本解析結果からでは十分な判定ができないため，ここでは扱わないことにした。

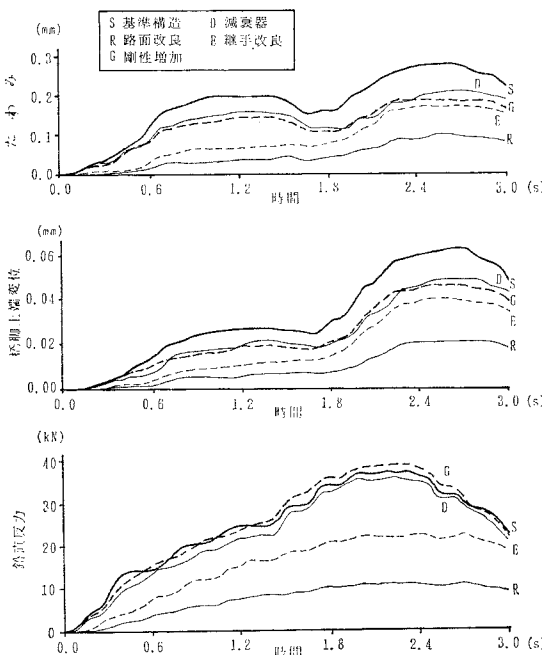


図-11 動的応答量の実効値の一例

表-3 自動車荷重の諸元

標準走行速度	20 m/s (72 km/h)	
標準自動車荷重	196 kN	(ばね上部 176.4 kN / ばね下部 19.6 kN)
ばね定数	懸架部 (k _S)	5.87 MN/m
	タイヤ部 (k _T)	11.76 MN/m
減衰係数	懸架部 (C _S)	24.70 kN/(m·s ²)
	タイヤ部 (C _T)	29.40 kN/(m·s ²)

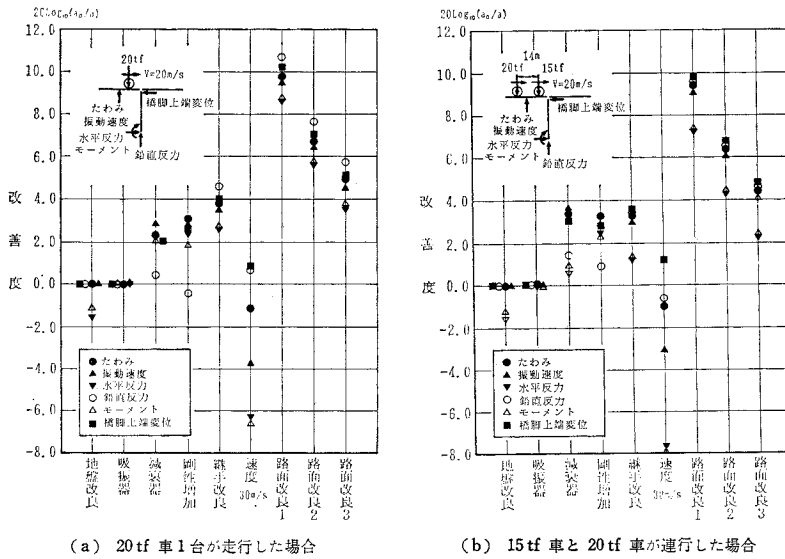


図-12 各防振対策での改善度

(1) 地盤改良

地盤の N 値を7から15に改良することによって、橋脚下端での水平反力とモーメント反力がわずかに増加し、他の応答量はまったく変化しない。地盤改良によって高架橋の動きが多少制御できることを期待したが、反力に関して地盤改良はマイナス効果となる。したがって、振動伝播特性が変化することを考慮しなければ、地盤改良の防振効果は判断できないことになる。

(2) 吸振器の設置

図-12には吸振器の固有振動数が2.5 Hzの場合の改善度を示してあるが、ばね係数をいろいろと変えて計算を行ったが、ほとんど防振効果はないという結果になった。これは吸振器の重錘が振動エネルギーを吸収するのに十分な動きを生ずる前に車両が通過してしまうためとも考えられる。この結果から、上下部構造の総重量が約700トン重の高架橋を小さな重錘で制御するのは難しいと思われる。

(3) 減衰器の取付け

粘性ダンパーを取り付けることで上部構造のたわみを2~4 dB小さくすることができ、それに伴い振動速度と橋脚上端変位も同程度小さくすることができる。ところが、橋脚下端での反力についての減少は0~2 dBであり、地盤振動に対しての防振効果は小さいように思われる。

(4) 剛性の増加

上部構造の剛性を高めることで、橋脚下端での鉛直反

力を除いて応答値を2~4 dB小さくすることができるが、剛性増では発生源としての自動車の振動を抑えることはあまりできないために鉛直反力は減少しない。地盤振動の主原因が橋脚の鉛直反力であれば(3)の減衰器の取付け同様、防振効果がないこととなる。逆に、水平反力が主原因であるとすれば、防振効果はあることになる。

(5) 継手の改良

伸縮継手部付近の凹凸(図-6では約4~5 mmの段差)を平坦にすることでほぼ2~4 dBの防振効果が期待できる。

特に、(3),(4)では減少できなかった橋脚下端での鉛直反力を約4 dB小さくできる。従来の実験報告によると段差量1 mm当たり、振動レベルを約0.5~0.7 dB減少できるとされており²⁰⁾、解析による防振効果も実験報告とほぼ一致した結果が得られた。

(6) 速度 30 m/s—速度規制

図-12では速度20 m/sの応答に対する30 m/sの応答を示してあるため、速度30 m/sでの走行時に応答がどれだけ大きくなるかを示していることになる。そのため、速度規制という観点からすれば30 m/sで走行している自動車を20 m/sに規制することになるので改善度は逆符号となる。一部を除いて、どの応答量も速度規制によって改善される。特に橋脚下端の水平反力とモーメント反力の改善度は大きく6~8 dBである。また、上部構造のたわみや振動速度も1~4 dBほど小さくなっている。ところが、橋脚上端変位と鉛直反力についてはあまり改善されず、走行状態によっては卓越する振動モードに変化が生じたり、あるいは振動が十分発達しないうちに車両が通過し、むしろ30 m/sの方が小さい場合もある。(3),(4)と同様、地盤振動にどの反力が影響するかによって防振効果の判定が左右されることになる。参考までに、実験報告によれば振動レベルへの走行速度(V km/h)の影響度は $0.1V \sim 0.2V$ dBといわれている²⁰⁾。これによると10 m/sの速度差で4~7 dB程度の減少が期待されることになるが、この報告は速度70 km/h以下での考察であり、70 km/h以上では、この傾向が変わることもあるように思われる。

(7) 路面の改良

伸縮継手部の凹凸を平坦にし、しかも支間部の路面性状の程度を現状のものから改良したとすると、路面改良1(現状の $\sqrt{1/4}$ 倍)では8~10dB程度、改良2(現状の $\sqrt{2/4}$ 倍)では4~8dB程度、改良3(現状の $\sqrt{3/4}$ 倍)では2~6dB程度の防振効果が期待できる。(5)の伸縮継手部の改良ですでに2~4dBの効果があるので、支間部の路面凹凸を少なくすることによってさらに大きく振動を減らすことができる。特に、他の方法では橋脚下端の鉛直反力を減少させることは困難であったが、路面改良によれば鉛直反力をも減少させることができる。これは路面の凹凸が小さいことで橋梁への入力である自動車振動そのものが小さくなるため、発生源対策として平面道路の防振対策として効果ある1つとして挙げられている²⁰⁾。ところが、盛土部と異なり、橋梁の路面の不整を改良することや完成時の仕上り精度を現行より上げることは難しいことであろう。また、路面の不整は時とともに進行していくことから、路面の維持・補修は実際上、大きな負担を伴う。したがって、舗装材料や舗装技術を開発し、路面の不整があまり進行しないようにできれば有効な防振対策といえる。

以上に、本論文で取り上げたモデル橋に対する各防振対策の防振効果を述べてきたが、これらはモデル橋についての結果であり、必ずしも他の高架橋に対して認められた防振効果ではないことはいままでの間であろう。しかし、類似した条件の高架橋の防振対策を考える場合、これらは参考になるものと思われる。

6. あとがき

高架橋の振動が原因で周辺家屋が振動する問題に対して、まず第一段階の研究として、本論文では実際の動的挙動からモデル化を行い、上部構造と下部構造を連成させて解析を行い、いろいろな防振対策の効果を解析的に求めることをモデル橋を例に試みた。しかし、まだ橋脚の橋軸直角方向のロッキング振動を考慮していないこと、支承での摩擦の取扱いや低周波空気振動の評価などの問題が残されており、本論文で行った解析的なアプローチだけから防振効果を予測することは十分とはいえ今後、実際の高架橋を対象に、この種の解析を行い、実測値との比較をすることによってモデルや解析法をさらに検討する必要がある。

最後に、多くの資料を提供していただき、しかも多くの有益な助言をいただいた阪神高速道路公団の諸氏に謝

意を表わすとともに、図面のトレースに協力いただいた金沢大学工学部の井原明美技官に感謝します。

参考文献

- 朝日新聞社：“忘れるな自動車公害の深刻さ”，朝日新聞(1983年1月30日刊)社説。
- 梶川康男：振動公害基準値に関する基礎的研究Ⅱ，振動解析と評価について，日本衛生学雑誌，第33巻2号，pp. 402~409, 1978年。
- 南荘 淳：高架橋の振動性状に関する実験的検証，阪神高速道路公団技報，第2号，pp. 181~193, 1982年。
- 小松定夫・川谷充郎：斜張橋の自動車走行による動的応答と衝撃係数に関する研究，土木学会論文報告集，第275号，pp. 13~28, 1978年。
- 岡林隆敏：走行車両による道路橋の二乗平均応答解析，土木学会論文報告集，第286号，pp. 15~27, 1979年。
- 梶川康男：振動感覚を考慮した道路橋の使用性解析に関する考察，土木学会論文報告集，第304号，pp. 47~58, 1980年。
- 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文報告集，第325号，pp. 23~33, 1982年。
- 松本嘉司・佐藤秀一・西岡 隆・塩尻弘雄：歩行者の特性を考慮した歩道橋の動的設計に関する研究，土木学会論文報告集，第205号，pp. 63~70, 1972年。
- 高橋龍夫・倉西 茂：動吸振器による可撓性構造物の振動抑制について，土木学会論文報告集，第308号，pp. 15~24, 1981年。
- 阪神高速道路公団：防振関係調査整理業務報告書，1980年。
- 石井 清：基礎一地盤系の等価ばね，等価減衰，土木学会論文報告集，第289号，pp. 157~160, 1979年。
- 建設産業調査会編：基礎設計・施工ハンドブック，pp. 212~261, 1977年。
- 岡本舜三：建設技術者のための振動学，オーム社，pp. 119~128, 1967年。
- 本田秀行・城戸隆良・梶川康男・小堀為雄：道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査，土木学会論文報告集，第315号，pp. 149~155, 1981年。
- 松崎恵一・西岡 隆・松本嘉司：歩道橋に取り付けた吸振器の効果について，土木学会論文報告集，第261号，pp. 129~131, 1977年。
- 加藤修吾・吉川 紀・山崎信之：鉄筋コンクリート床版の健全度判定のための基礎資料収集について，土木学会関西支部，「既設の橋梁構造物およびその構成部材の健全度，耐久性の判定」に関するシンポジウム論文集，pp. 83~90, 1983年。
- 今市憲作・辻本良信・高島 伸・北川晃一：道路橋の振動に伴う音響放射の理論解析，日本機械学会論文集，第46巻408号，pp. 904~912, 1980年。
- 足立義雄・岡村宏一・島田 功：道路橋床版の低周波域における振動性状について，土木学会論文報告集，第330号，pp. 37~48, 1983年。
- 大島俊之・能町純雄：走行車両により橋梁より放射される低周波空気振動の解析，日本音響学会誌，39巻1号，pp. 11~18, 1983年。
- 建設省道路局・土木研究所：道路交通振動の対策に関する研究，第33回建設省技術研究会道路部門指定課題論文集，pp. 146~176, 1979年。

(1983.5.23・受付)