

高架橋における交通振動のアクティブコントロール

AN ACTIVE CONTROL OF TRAFFIC VIBRATION ON THE URBAN VIADUCTS

矢作 枢*・吉田和彦**

By Kaname YAHAGI and Kazuhiko YOSHIDA

In order to reduce serious traffic vibration of the urban viaducts caused by running cars, an active control method is investigated using an actuator device. The principle of reducing the vibration is based on the counteractive energy of vibration provided from the actuator, which corresponds to bridge vibration characteristics. First, a series of experimental tests on a scale model was carried out, and on the basis of the results, a system of active control by the use of an actuator was developed. Second, applying the system on an actual viaduct on the Metropolitan Expressway, it was attained that the amplitude of responses was reduced to the half of the previous responses. The vibration of a building in the vicinity also became about two-thirds of the previous vibration.

1. ま え が き

走行する車両が加振源となる道路交通振動は、交通騒音や大気汚染と並んで道路公害の1つとして大きな社会問題となっている。なかでも、交通振動の問題は現象が複雑なこともあって、対策の困難な問題の1つである。

特に高架橋からの振動は、舗装面の凹凸だけでなく、桁や伸縮継手、橋脚、基礎など振動発生要因が複雑に入り組んでいることもあって、対策を一層困難にしている。また大都市圏では、連続した高架橋からの振動だけでなく平面街路からの振動も重複され、車両の重量化とスピードアップなども相まって、交通振動の問題をより厳しいものになっている。

この交通振動問題について、これまで数多くの研究成果が報告されている。たとえば建設省¹⁾では、広範な実態調査を踏まえて振動予測式の検討と対策工法の方向づけを行っている。また高架橋の防振では梶川・大嶋の研究²⁾や高橋・倉西の研究³⁾等が挙げられる。振動の伝播経路である地盤に遮断溝を設ける方法については大保・

片山の研究⁴⁾がある。その他、交通振動を現象として解明しようとする論文は数多く、それぞれ有用な知見を得ている。

首都高速道路においても、いくつかの高架橋部分で交通振動障害が発生し、防振対策が講じられてきた。その結果、良好な改善がなされた箇所もあるが、必ずしも満足のいく結果が得られない箇所もあった。

従来の制振方法は“防振”という言葉に現われているように受動的(Passive)な方法が主流であった。すなわち、動吸振器を構造物に取り付けるとか、構造物の剛性や重量を変化させるというような方法で、振動系を変化させて振動を抑制する方法がとられてきた。

一方、他の工学分野では振動を制御するのに能動的(Active)な方式も多く用いられている。すなわち構造物にアクチュエータを取り付け、振動性状に合わせた制振エネルギーを積極的に供給しようとするもので、いわゆるアクティブコントロール方式である。土木構造物の分野でも、これに類するものとして M. Abdel-Rohman & H. H. Leipholz の研究に代表される一連の研究^{5)~11)}がある。しかしこれらの多くは数値実験ないしは簡単なモデル実験にとどまっており、実用の域にまで達している例は少ない。著者らは、これらの研究を一步進め、高架橋のアクティブコントロールを実橋で試みたところ、

* 正会員 首都高速道路技術センター技術部長
(〒105 港区虎の門1-1-20)

** 三菱電機(株)鎌倉製作所応用機器部
(〒247 鎌倉市上町屋325)

比較的良好な結果を得た。本論文は基礎的な検討から実験まで一連の振動制御実験の経緯を報告するものである。

2. 高架橋の交通振動事例

交通振動制御実験の対象とした橋梁は図-1に示す2階建非対称鋼ラーメン橋脚をもつ橋梁で、基礎はφ11.0mのケーソン、根入長31mでN値50以上の礫層に支持されている。また上部構造は支間36mの鋼単純合成桁である。振動障害を受けていた建物は4階建のビルで、橋脚基礎と建物基礎は接近していて約90cmしか離れていない。また建物の床面積は33m²と小さく、その基礎としてはφ300mmの鉄筋コンクリート杭13本が上部沖積層に根入れされている。

予備的な振動計測の結果、橋脚と当該建物との卓越振動数がほぼ一致しており、共振現象が発生していることが判明した。そこで、まず受動的な防振対策工として以下の工事を実施した(図-2)。

- ① ラーメン橋脚上層部にたすき状の対傾構を設ける
- ② 橋脚下層はりの剛性を2倍にする

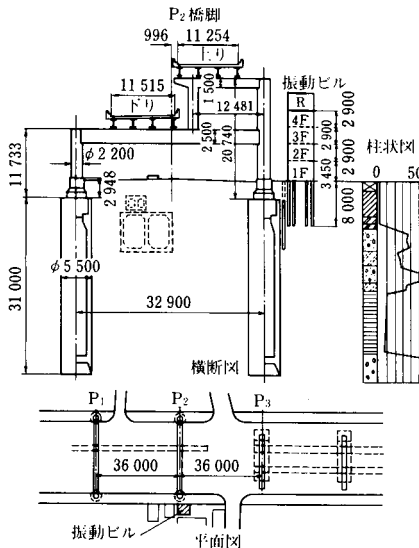


図-1 一般図 (P₂ 橋脚)

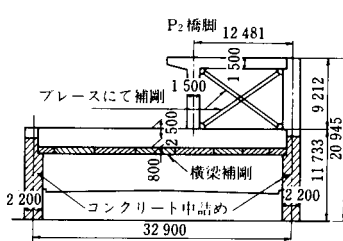


図-2 防振対策工事の概要

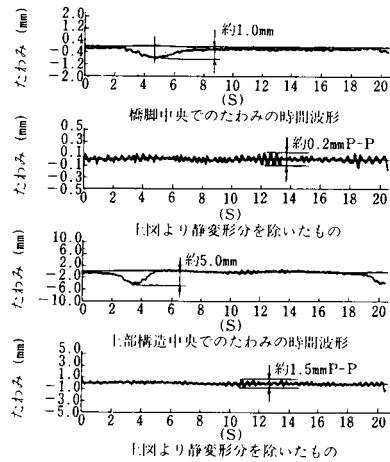


図-3 構造物変位の時間波形
(20t 車両, 上り線 60km/h 走行時)

③ 柱の下層部分にコンクリートを詰めて重量を増す
これらの対策工によって、かなりの防振効果が得られることが予想されたが、結果的にはあまり思わしいものではなかった。

そこでアクティブコントロールを試みるべく、ラーメン橋脚上層部の対傾構を除去したあと、振動性状観測を改めて実施した。

振動測定は交通量の少ない夜間を選び、一般車両(大型トラック)走行時と、試験車(総重量20t)走行時に行った。

観測した変位波形の例を図-3に示す。図は上り車線を試験車が速度60km/hで走行したときのもので、橋脚P₂下層横り中央のたわみとP₂-P₂間の上部構造中央のたわみ波形である。試験車走行によって準静的な変形量が橋脚上で約1.0mm、上部構造上で約5.0mmであり、これに伴う振動変位の全振幅が、橋脚上で約0.2mm、上部構造上で約1.5mm、卓越振動数が2~3Hzであることなどが読み取れる。

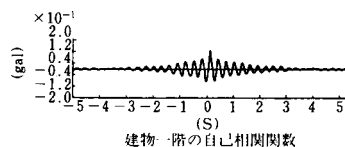
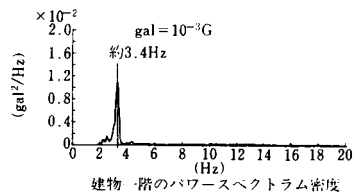
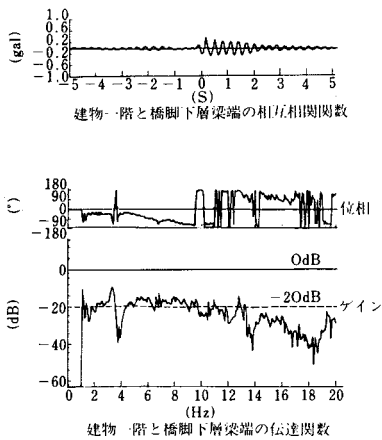


図-4 振動ビルの実測結果



図—5 建物と橋脚の相関関係

図—4 は同一の試験車走行時に得られた、当該建物 1 階でのパワースペクトルと自己相関関数である。周期性の強い振動であり、その固有振動数が約 3.4 Hz であることがわかる。また図—5 は同様に、建物 1 階と橋脚下層はり端部との相互相関関数と周波数伝達関数である。両者の間にはかなり強い相関関係があり、橋脚の振動から若干の時間遅れをもって建物の振動が生じていること、建物 1 階の振動レベルが橋脚下層はり端部の約 1/10 (ゲイン -20 dB) であることなどがわかった。

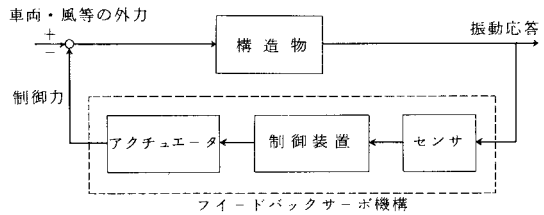
3. アクティブコントロール理論

振動のアクティブコントロールは、振動系に対してフィードバック制御系を構成し、外部から制振エネルギーを供給することにより、構造物の振動を積極的に軽減させようとするもので、従来からの受動的な方法とは表—1 にみるような違いがある。

アクティブコントロールにおけるフィードバック制御系は、構造物の振動または入力される外乱を検出するためのセンサと構造物に取り付けるアクチュエータ、およびセンサの信号に応じてアクチュエータを駆動する制御装置とから構成される。そのブロック図は図—6 のごと

表—1 受動式制御とアクティブコントロールの比較

項目 形式	形態	振動 低減 効果	システム			
			構成	特性	信頼性	コスト
受動式 (Passive)	例えば系の 散逸エネルギーとして付 与する。	限界が ある。	簡 単	系の振動 特性の変化に 対応できない	安定なシ ステム	安 価
能動式 (Active)	外部より制 振エネルギーを 供給する。	過減衰 まで可能	複 雑 (フー ドバック 制御、積 分回路)	対応でき る (適応制御)	発振の可 能性	高 価



図—6 アクティブコントロールの構成

くである。

いま、構造物の振動系が線形集中定数系であるとすれば、 N 自由度の振動系に外力 $f(t)$ とアクティブコントロールによる制御力 $u(t)$ が加わるものとして、次の運動方程式が成り立つ。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f - u \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 M, C, K : それぞれ質量、減衰、剛性を表わす $N \times N$ 次元対称マトリックス、 x : 変位ベクトル、 f, u : 外力、制御力のベクトル。

減衰が小さく、各固有モード間での連成が無視できると仮定するとき変位 x は固有モードの線形結合で表わせる。

$$x = \Phi q \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 Φ : 固有モードのマトリックス、 q : 一般化座標のベクトル。

式 (1) は固有モード Φ の直交性を利用することによって、 n 個の固有モード別の非連成運動方程式に変換される。

$$\ddot{q} + H\dot{q} + \Omega q = \Phi^T f - \Phi^T u \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\Phi^T M \Phi = I$ (単位マトリックス)、 $\Phi^T C \Phi \equiv H = \text{diag}(2h_i \omega_i)$ 、 $\Phi^T K \Phi \equiv \Omega = \text{diag}(\omega_i^2)$ ただし h_i は各次モードの減衰定数であり、 ω_i は各次モードの固有円振動数である。

制御の対象とする固有モードを r 次までとすると、式 (3) は次の $2r$ 次の状態方程式に書き換えられる。

$$\dot{y} = Ay + Bu + d \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $y = \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -H \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi^T \end{bmatrix}$, $d = \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi^T \end{bmatrix} f$.

式 (4) を最適レギュレータ問題として扱うとき、次の二次形式の評価関数 J が導入される¹²⁾。

$$J = \int_0^\infty [y^T Q y + u^T R u] dt \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 Q, R は非負の定数を要素とする対称マトリックスで、経験的に設定されるものである。ここでの制御問題は式 (5) の評価関数 J を最小とする制御力 u を求める問題として表現される。式 (5) の被積分項第 1 項を小さくすることは、いかに無駄のない制御状態にあ

るかを意味し、また第2項を小さくすることは、いかに制御入力エネルギーを少なくすませるかを意味する。重み Q, R に応じて両者の妥協を図ることによって最適制御状態が作り出せる。しかし、ここで対象としているような複雑な構造系の場合、数多くの振動モードについて常時その状態量を検知することは困難である。

そこでここでは、単一の点の状態量を検出して、それを1つのアクチュエータにフィードバックするという最も単純な制御方式を考える。外力も1点にのみ加わるとすれば式(3)は次式のように各次モードごとの式に展開できる。

$$\ddot{q}_i + 2h_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = \varphi_{ex}^i f - \varphi_a^i u, \quad i=1 \sim n \dots (6)$$

ここで、 φ_{ex}^i : 外力 f の加わる点の i 次モードの値、 φ_a^i : 制御力 u を加える点の i 次モードの値。

いま C_M を制御ゲインとし、制御力 u が特定の検出点の振動速度 \dot{x}_β に比例するとすれば

$$u = C_M \dot{x}_\beta \dots (7)$$

検出点の振動速度 \dot{x}_β は式(2)から次式で表わせる。

$$\dot{x}_\beta = \sum \varphi_\beta^i \dot{q}_i \dots (8)$$

式(8)を式(7)に代入し、さらに各次モード間の非連成の仮定のもとで式(6)に代入して次式を得る。

$$\ddot{q}_i + 2\omega_i \left(h_i + \frac{C_M \varphi_a^i \varphi_\beta^i}{2\omega_i} \right) \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \varphi_{ex}^i f, \quad i=1 \sim n \dots (9)$$

式(9)から、特定の検出点の振動速度をフィードバックすることにより、それぞれのモードの減衰定数が次式で表わせる h_{ci} だけ改善される。

$$h_{ci} = \frac{C_M \varphi_a^i \varphi_\beta^i}{2\omega_i}, \quad i=1 \sim n \dots (10)$$

また逆に、 φ_a^i と φ_β^i とが異符号のとき減衰定数は小さくなり、さらに $|h_i| < |h_{ci}|$ の場合振動は発散することもある。

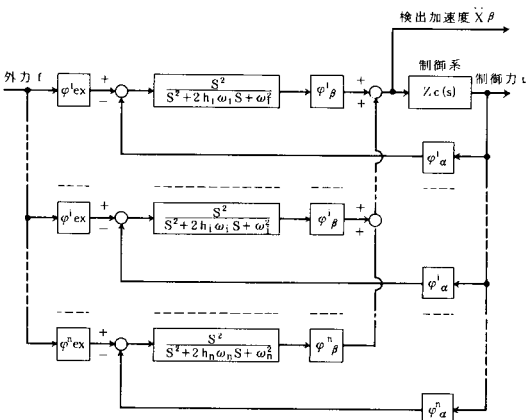


図-7 振動制御系ブロック線図

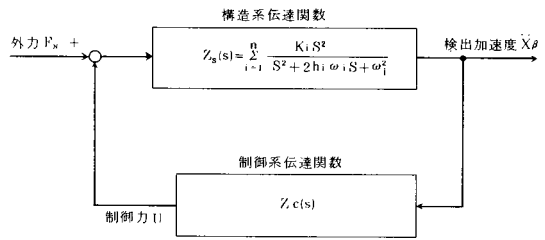


図-8 橋脚振動制御系簡易化ブロック線図

検出される状態量が振動加速度 \dot{x}_β のとき、式(7)、(8)の代わりに次式が用いられる。

$$u = C_M \int (\dot{x}_\beta) dt \dots (11)$$

$$\dot{x}_\beta = \sum \varphi_\beta^i \dot{q}_i \dots (12)$$

式(6)、(11)、(12)をラプラス変換し、ブロック線図に表わすと図-7のごとくなる。なお式(12)の伝達関数を便宜上 $Z_c(S)$ と表わした。ここで記号 S はラプラス演算子である。外力 f と制御力 u とを固有モードで正規化し、新たに F_N および U とおけば図-7は図-8に置換できる。図-8で $Z_s(S)$ は制御力から検出加速度に至る構造系の伝達関数である。この場合の一巡伝達関数 $Z_0(S)$ は

$$Z_0(S) = Z_c(S) \cdot Z_s(S) = Z_c(S) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{K_i S^2}{S^2 + 2h_i\omega_i S + \omega_i^2} \dots (13)$$

$$K_i = \varphi_a^i \cdot \varphi_\beta^i$$

で与えられる。すべての固有モードに対して K_i の値が正であれば、 $Z_s(S)$ に対して $S=j\omega$ (j : 虚数) とした周波数領域における位相応答は $+180^\circ \sim 0^\circ$ の範囲で推移する。このとき系は最小位相推移系とよばれる。 K_i のうちの1個に負のものがあれば位相応答は $+180^\circ \sim -180^\circ$ の範囲を推移することになる。このとき系は非最小位相推移系とよばれる。この場合の構造系伝達関数 $Z_s(S)$ を直列型に変換すれば

$$Z_s(S) = \frac{A S^2 (S+a)(S+b) \prod_{i=1}^{n-2} (S^2 + 2h'_i\omega'_i S + \omega_i'^2)}{\prod_{i=1}^n (S^2 + 2h_i\omega_i S + \omega_i^2)} \cdot \frac{S-a}{S+b} \dots (14)$$

最小位相推移系

全域通過フィルター

ここで、 $A = \sum_{i=1}^n K_i$ 、 $a, b > 0$ である。すなわち伝達関数 $Z_s(S)$ は $S=j\omega$ とおいた周波数領域において最小位相推移系の周波数伝達関数と全域通過フィルター(ゲイン1、位相 $0 \sim -180^\circ$) との直列結合とみなすことができる。

一方、制御系の伝達関数 Z_c は式(12)によるとき

$$Z_c(S) = \frac{C_M}{S} \dots \dots \dots (15)$$

で表わせるが、これは $S=j\omega$ とおいた周波数領域では位相遅れ -90° をもつ最小位相推移系である。

一巡伝達関数 $Z_c(S)$ が周波数領域で非最小位相推移系のとき、周波数帯域によっては振動が増幅ないしは発散する可能性をもつ。このとき、周波数領域で最小位相推移系である $Z_c(S)$ に適切な位相補償回路を直列結合して、位相遅れを補償する必要がある。補償の方法としては、ほかにも別の検出点からの情報を加算する方法とか、Smith 法¹³⁾とよばれる方法もあるが、ここでは省略する。

4. 振動制御実験

単一のアクチュエータを用いて構造物に制御力を加える方式として、図-9に示したような次の3方式が考えられる。

- (1) テンドン方式 構造物の隔たった2点間を結ぶテンソンを介して制御力を加えるもので、作用力の反力が構造系内部で処理されるので、余分の部材や基礎を必要としない。
- (2) ダイレクト方式 構造物に作用させる制御力の反力を地盤でとるもので、制御位置によっては制御力が非常に小さくて済むが、余分の柱や基礎が必要となる。
- (3) マスダンパ方式 構造物に作用させる制御力の反力を、ばねを介して取り付けられた質量でとるので、基礎は必要としないが、制御方向によっては構造がやや複雑になる。

以下では、(1)のテンソン方式の適用について検討する。そのとき式(6)以下での制御力を加える点の*i*次モード ϕ_i^0 は、テンソンで結ぶ2点間のモード差 $\Delta\phi_i^0$ に置き直さなければならない。

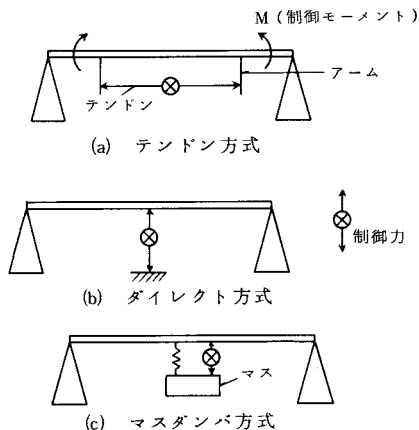


図-9 振動制御方式

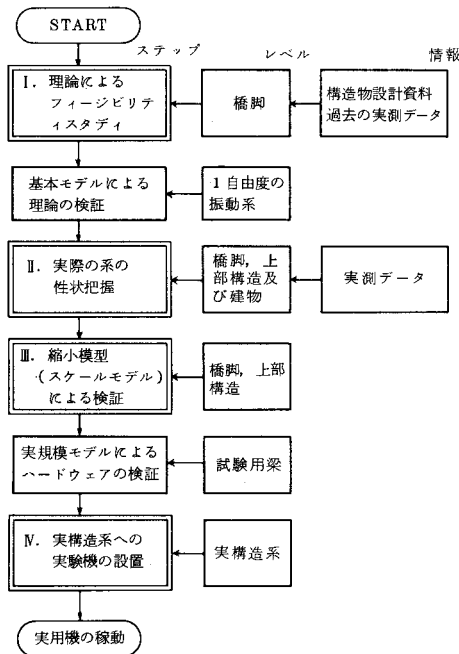


図-10 振動制御装置開発の流れ

振動制御実験は、制御装置の開発と並行して行ってきたもので、その流れは図-10のごとくであった。すなわち、第1ステップは理論的フィージビリティスタディとそれに続く1自由度系の基本モデルによる理論の検証である。第2ステップは現地での振動実測を中心とした実際の系の振動性状把握であり、その結果の一部は2.で述べた。第3ステップは縮小モデル(スケールモデル)による実験と、それに続く実規模モデルによるハードウェアの検証である。そして最後の第4ステップが実構造系への実験装置の設置と振動制御実験である。

このうち第1ステップについては肯定的に推移した。また第2ステップについてはその一部を2.で述べたので、ここでは主に第3ステップ以降について述べる。

(1) スケールモデルによる制御実験

制御の対象となる構造系は、当該建物に近接する橋脚 P_2 とその前後の橋脚、およびその間の上部構造とした。実系の鉛直方向と橋軸直角方向の固有振動数と固有モードに着目してモデル化することとし、橋軸方向については剛とみなした。また基礎も剛とした。モデルの材料にはアルミニウムを使用し、寸法比を1/15、重量比を1/10 000とした。

また実系の振動が部材の曲げ振動であると考え、模型各部の断面二次モーメントを次式から求めた。

$$\frac{I_M}{I_P} = (\text{材料ヤング率の逆比}) \times (\text{重量比}) \times (\text{寸法比})^3 \dots \dots \dots (16)$$

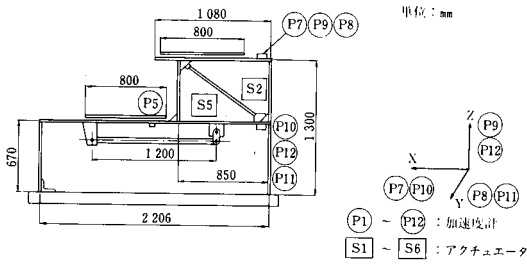


図-11 スケールモデル外観図

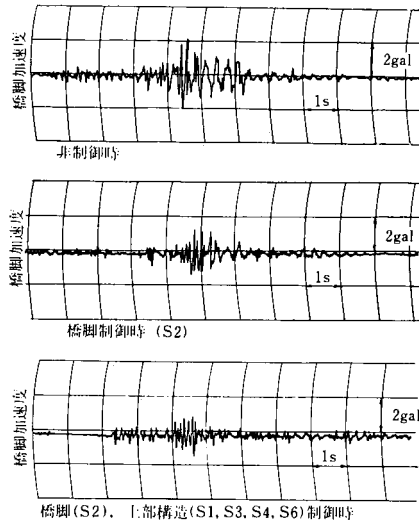


図-12 スケールモデル実験結果の一例
(走行荷重による応答加速度 P_i の時間波形)

このようにして得られたスケールモデルは図-11のごとくである。モデルには任意の組合せで制御のON-OFFが可能な6台のアクチュエータ(10W, DCサーボモータ駆動)と、12台のサーボ型加速度計を取り付けた。

実験の結果、橋脚の橋軸直角方向の振動制御にはS5よりもS2の位置のアクチュエータの方が有利であること、また橋脚の制振には、橋脚と上部構造(桁の曲げ振動制御用)の両方のアクチュエータを用いるとき最も大きな効果があるものの、橋脚に設置したアクチュエータのみでもある程度の効果が得られることなどがわかった。

図-12は、下り線にあたる上部構造に重量5.5kgの模型トラックを走行させたときの実験結果の一例である。橋脚の制御により、振動振幅が約1/2に低減されること、橋脚と上部構造との同時制御では、さらに振動レベルが低減されることが観察される。

(2) 実規模モデルによる制御実験

写真-1に示すようなモデルを用いて制御実験を行った。実験の目的は、実橋に取り付ける制御装置の仕様を決めることにある。モデルは比較的小規模であるが、そこに与える振動は実橋で想定される振動レベルよりも高いものとした。制御実験の結果、実橋に用いる制御装置の仕様を表-2のごとく設定した。

実験結果の一例を図-13に示す。モデルのはり上を人力で加振したときの例であるが、非制御時に比べて制御時の振動振幅が約1/3に低減されることがわかる。これらの結果から実橋での振動振幅を1/2、すなわち振動レベルで-6dBの低減をねらうこととした。また制御

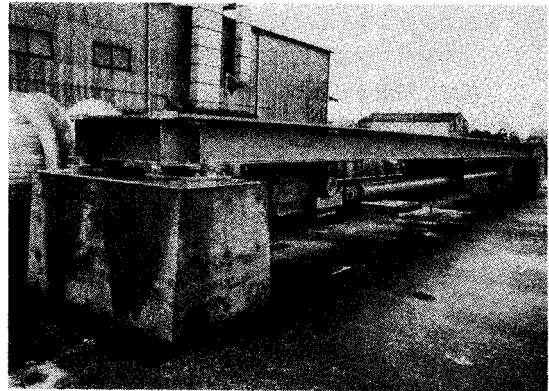


写真-1 実規模モデルの概要

表-2 振動制御装置実験機の仕様

項目	仕様
方式	テンドン駆動方式 加速度計 ACサーボモータ+ホールセンサー+アナログ処理
基本条件	温度範囲 -5 ~ +40℃ 連続運転 3相 200±20V 50/60Hz 3.8kVA
主要構成	テンドン機 一式 アクチュエータ 一式 制御盤 一式 加速度計 1個 ケーブル 一式
制御性能	5gal以下 2~51Hz 橋軸直角方向 橋脚ブレース方向 約1/2
出力性能	電報出力 モータ出力 制御・点検中・電源等 500rpm 約7ton
駆動仕様	モータ定格出力 2.2kW モータ最大回転数 500rpm 最大制御力 約7ton
構造	防滴構造
設置場所	テンドン機・アクチュエータ 制御盤
外形寸法	テンドン機 φ500×10m アクチュエータ 930×800×940H 制御盤 670×500×1370H
重量	テンドン機 2.9ton アクチュエータ 1.5ton 制御盤 0.2ton

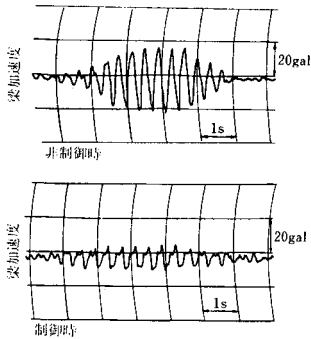


図-13 実規模モデル実験結果

すべき周波数帯域を 2~5 Hz とした。

(3) 実橋での制御実験

実橋へのテンドン棒の取付け状況を図-14 に示す。また図-15 に示す P₁~P₆ の位置にそれぞれ三軸成分の加速度計をセットした。

制御実験に先立ち、改めて振動測定を実施したが、その目的は次の 4 項目である。

- (1) 制御すべき周波数帯域の再確認
- (2) 制御すべき検出点の選択
- (3) 制御力を加える点からみた検出点までの伝達関数
- (4) 制御装置の規模の妥当性の検証

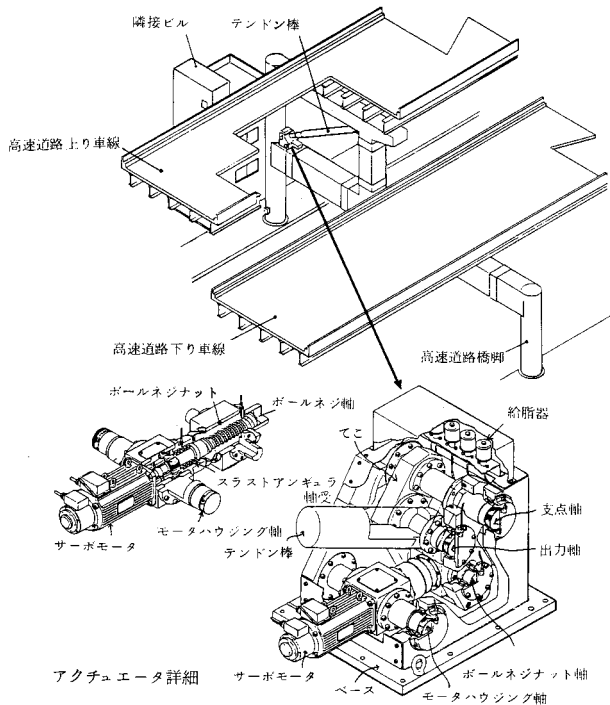
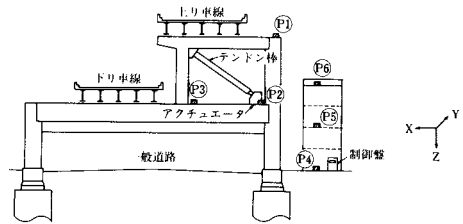


図-14 振動制御装置装着状況

代表的な加速度波のパワースペクトルを図-16 に示すが、これからは橋軸直角方向 (X 方向) の制御周波数帯域を 2~5 Hz とすれば建物の振動に対して効果的であることが再確認できた。制御すべき検出点は、建物の振動と最も相関の強い振動をもつ検出点とすべきであるが、その意味で建物 1 階での X 方向加速度に対する橋脚各点での加速度のコヒーレンスと相互相関関数を求め、図-17 に示した。図からみて、建物振動に対して P_{2x} が最もコヒーレンスが高く、しかも相互相関関数がラグの正負でその様相を異にしていることからみて、これを制御すべき検出点とした。

制御力から検出波 P_{2x} までの伝達関数は、アクチュエータにランダムノイズ(片振幅約 3t)を与えて求めた。その結果を $S=j\omega$ とおいた周波数領域で図示したのが図-18 である。図から P_{2x} の応答レベルがほぼ 1 gal/t 以下であること、また位相応答が $-180^\circ \sim +180^\circ$ の範囲に及んでいることが読み取れる。また 2~5 Hz の範囲で応答曲線のピークが多くあることからみて、構造物の共振点がこの周波数範囲に数多く存在することがわかる。



①-⑥ 加速度計は、各測定点とも X、Y、Z 軸の 3 方向

図-15 加速度計配置図

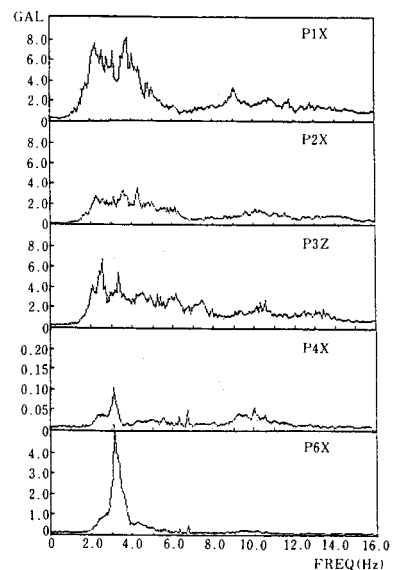


図-16 橋脚と建物の加速度パワースペクトル例

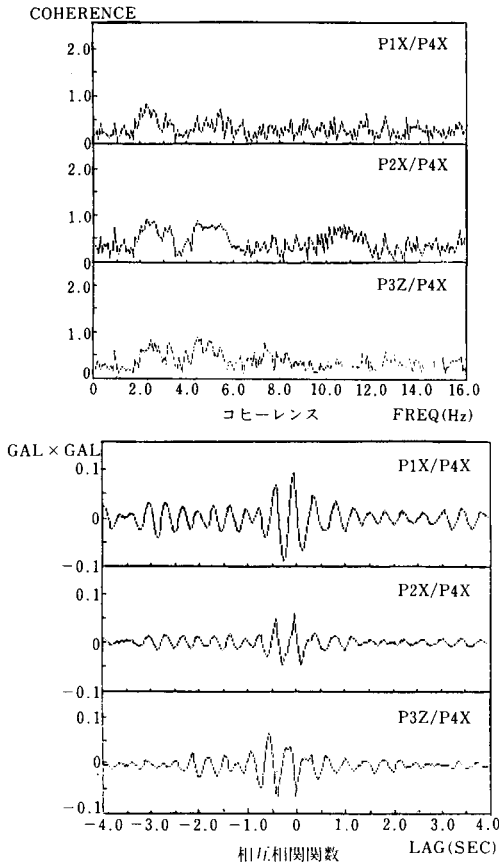


図-17 建物振動と橋脚振動間の相関（一例）

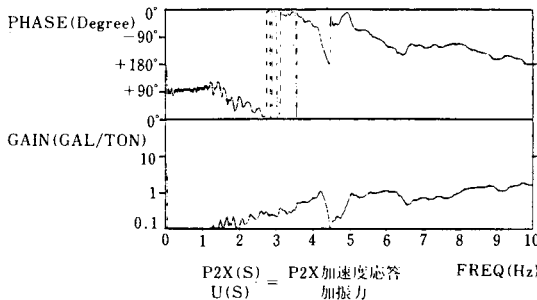


図-18 橋脚伝達関数（測定結果）の一例

制御すべき加速度は図-16からみて、 P_{2x} で数ガル前後と考えられるので制御能力7tはほぼ妥当であると判断した。

図-18からみて橋脚伝達関数 $Z_s(S) = P_{2x}(S)/U(S)$ は $S=j\omega$ とおいた周波数領域において非最小位相推移系である。この測定結果をもとに curve fit 法により算出した $Z_s(S)$ (式(14)) を $S=j\omega$ とおいて周波数領域で図示したのが図-19である。図のごとく4Hzを越える付近で 0° よりさらに位相遅れを示している。した

がってこのままで制御系を構成すれば橋脚振動はむしろ増大することもあり得る。これを実験的に確認した結果が図-20である。図の縦軸は単位のない相对比较としたが、非制御時に比べて4Hz前後でパワースペクトルが増大していることが読み取れる。

制御系を周波数領域で最小位相推移系にするには、制御系伝達関数 $Z_c(S)$ に適当な補償回路を結合させてやる必要がある。回路の選択にあたっては、一巡伝達関数の周波数領域における位相特性を $0^\circ \pm 90^\circ$ 以内とすること、またゲイン特性を一定値に近づけることを考慮した。

このような条件のもとで算出した位相補償回路を含む制御系の伝達関数基本式は次式のごとくである。

$$Z_c(S) = \frac{C_M}{S} \cdot \frac{1}{1 + \frac{S}{\omega_1}} \left(\frac{1}{1 + \frac{S}{\omega_2}} + \frac{\omega_3}{1 + \frac{S}{\omega_3}} \right) \cdot \frac{1}{1 + 2\zeta \left(\frac{S}{\omega_4} \right) + \left(\frac{S}{\omega_4} \right)^2} \dots (17)$$

ここで、 $\omega_1 \sim \omega_4$ は橋脚構造との関連で設定した周波数、 $1/2\zeta$ ：ローパスフィルターの尖鋭度 (≈ 1)、 C_M ：比例定数 (ゲイン)。

制御系の伝達関数には、さらに加速度検出回路や演算増幅器などの回路特性が加味されるが、それらを加味して得られた制御系伝達関数 $Z_c(S)$ を $S=j\omega$ として示すと図-21のごとくである。

ここに得られた制御系伝達関数 $Z_c(S)$ を用いてオープンループの一巡伝達関数 $Z_o(S)$ (式(13)) を求めた

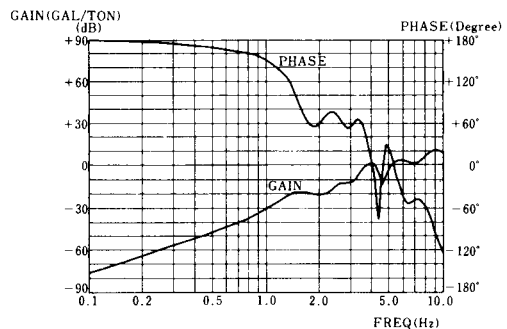


図-19 P_{2x} における $Z_s(j\omega)$

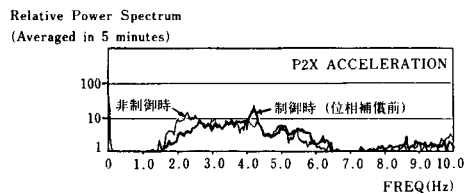


図-20 P_{2x} のパワースペクトル (位相補償前)

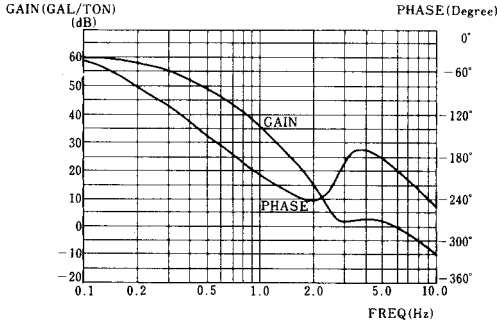


図-21 制御系伝達関数 $Z_c(j\omega)$ (解析結果)

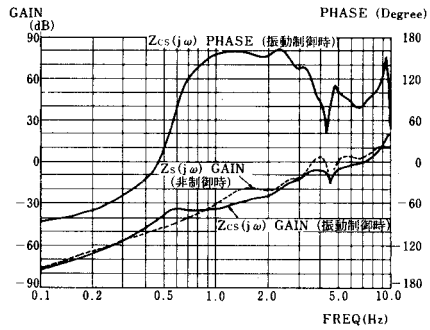


図-23 クローズドループ伝達関数 $Z_{cs}(j\omega)$ (解析結果)

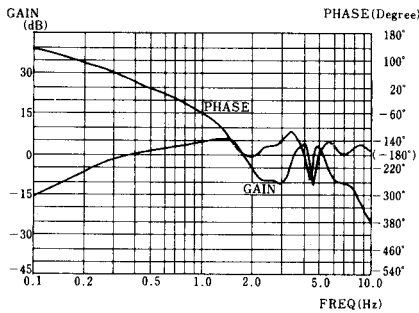


図-22 オープンループ伝達関数 $Z_0(j\omega)$ (解析結果)

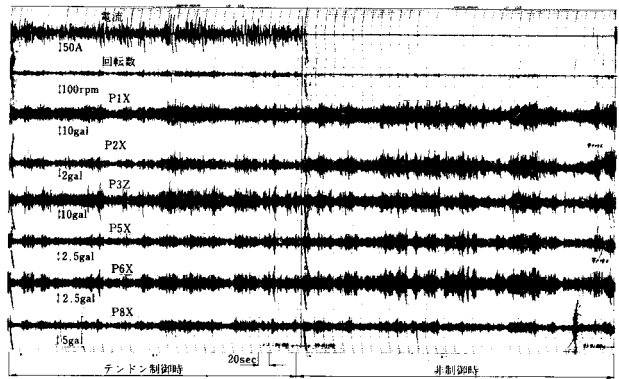


図-24 振動制御時/非制御時の時間波形比較

結果を $S=j\omega$ として示したのが図-22である。このループのクローズドループ伝達関数 $Z_{cs}(S)$ がこの振動制御系の伝達関数である。 $Z_{cs}(S)$ は次式で与えられる。

$$Z_{cs}(S) = \frac{Z_s(S)}{1 + Z_0(S)} \dots\dots\dots (18)$$

この $Z_{cs}(S)$ と橋脚伝達関数 $Z_s(S)$ とを比較することによって制御効果を推定できる。 $S=j\omega$ とおいた周波数領域における両者の比較が図-23である。この図からみて 1~8 Hz の範囲で振動低減が期待できることがわかる。しかし 9 Hz 以上と 0.6 Hz 付近はやや加振状態にあると考えられる。

このようにして開発してきた振動制御装置の具体的な効果を最終的に一般車両の走行時に検証した。図-24に、橋軸直角方向数点の加速度波形とアクチュエータの駆動モータの電流および回転数のモニタ波形を、振動制御時と非制御時とで比較した。非制御時には橋脚や建物で数ガル程度の加速度が記録されているが、 P_{2x} 制御による振動制御を行うことによって P_{2x} の振幅が約 1/2、建物の加速度が約 2/3 に低減していることがわかる。これは一応当初の目標を満足するものである。このうち P_{2x} と P_{6x} についてパワースペクトルに直した図が図

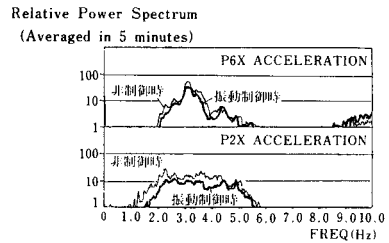


図-25 振動制御時/非制御時のパワースペクトル比較

図-25である。振動制御を行うことによって、2~5 Hz の範囲で、特にピーク値をとる部分を中心に振動レベルが制御されていることが確認できた。

5. あとがき

以上によって振動制御装置による橋脚のアクティブコントロールの有効性が、位相補償法の適応性ととも確認された。

また制御系解析の過程で懸念された 9 Hz 以上と 0.6 Hz 付近での加振状態の可能性については、実測の上でも認められた。9 Hz 以上に対しては、アクチュエータの駆動モータの回転数を検出しているタコジェネレータ

出力を制御系に帰還（いわゆるタコジェネ帰還）し、ダンピング効果を与えることで安定化できた。0.6 Hz 付近については、外乱スペクトルのレベルが僅少であり問題とするに足りぬことが判明したので無視した。

本論文ではテンドン方式による振動制御装置について、その有効性と実用性を論じてきた。しかしマスダンパ方式の振動制御も大いなる可能性を秘めていることがわかってきた。この方式についても現在開発中である。また、これらの振動制御システムは風や地震による振動に対してもそのまま有効であり、すでに実用化の検討に着手している。これらの研究成果については次の機会に報告したい。

最後に、本研究をまとめるにあたって全面的にご指導いただいた首都高速道路公団 上前前理事、玉野理事を始めとして工務部設計技術課の皆様、また三菱電機（株）の鎌倉製作所と中央研究所の関係者の皆様に深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 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，1979 年。
- 2) 梶川・大嶋：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，土木学会論文報告集，第 341 号，1984 年 1 月。
- 3) 高橋・倉西：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，1981 年 4 月。
- 4) 大保・片山：等価質点系モデルを用いた遮断溝の振動軽減効果に関する数値解析，土木学会論文報告集，第 335 号，1983 年 7 月。
- 5) Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H.H. : Active Control of Flexible Structures, J. of the Structural Division, ASCE, Vol.104, No.ST 8, Aug., 1978.
- 6) Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H.H. : General Approach to Active Structural Control, J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.105, No.EM 6, Dec., 1979.
- 7) Abdel-Rohman, M., Quintana, V.H. and Leipholz, H.H. : Optimal Control of Civil Engineering Structures, J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.106, No.EM 1, Feb., 1980.
- 8) Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H.H. : Automatic Active Control of Structures, J. of the Structural Division, ASCE, Vol.106, No.ST 3, Mar., 1980.
- 9) Abdel-Rohman, M. and Leipholz, H.H. : Stochastic Control of Structures, J. of the Structural Division, ASCE, Vol.107, No.ST 7, July, 1981.
- 10) Udwadia, F.E. and Tabaie, S. : Pulse Control of Single Degree-of-Freedom Systems, J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.107, No.EM 6, Dec., 1981.
- 11) Udwadia, F.E. and Tabaie, S. : Pulse Control of Structural and Mechanical Systems, J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.107, No.EM 6, Dec., 1981.
- 12) Schultz, D.G. and Melsa, J.L. : 状態関数と線形制御系（日本語版：久村訳），学献社，1970.
- 13) 伊藤正美：自動制御概論，昭晃社，1968.

(1984.7.27・受付)