

個別検討内容の報告(No.5)

§ 1. 題 目 高架橋橋脚の振動制御装置

§ 2. 日 時 昭和61年11月 7日

§ 3. 発表者 桜井 孝 <東京鐵骨橋梁製作所 設計部>

§ 4. 概 要

- (1) 都市高速道路橋橋脚の振動が、隣接した4階建ての細長い建物に共振振動を引き起した。
- (2) 橋脚および建物の振動現象の解析を行った。
- (3) 橋脚に対する補剛工事を行ったが、振動は防止できなかった。
- (4) アクティブコントロールによる振動制御方法を実験的に研究し、効果があることをまとめた。
- (5) 橋脚にはテンドン方式による制御、建物にはマスダンパーによる制御を実施し、効果を確認した。

§ 5. 意見等

§ 6. 備 考

高架橋橋脚の振動制御装置

3-1 振動測定例1

図-3に示すような構造であり、共振状態にあるビルの前後にある橋脚は非対称な鋼ラーメン橋脚であり、基礎は各脚ごとに分離した円形のケーソンである。上部工は鋼単純合成板桁である。振動しているビルは、4階建ての細長い形状で橋脚に非常に接近している。またビルの前の橋脚は防振対策工事が行われており、その内容は以下のとおりである(図-4)。

- ① ラーメンの上層にブレースをかけている。
- ② 橋脚横梁の剛性を補強工事でより上げている。
- ③ 橋脚の柱部分にコンクリートを詰め橋脚の剛性を上げている。

1) 測定の概要

2) 振動エネルギー

振動エネルギーは、20t 車両走行時の静たわみに対する動たわみの比から求めた。

図-6に、橋脚と桁のリング式たわみ計によって測定された静たわみと動たわみの一例を示す。試験車の各種走行状態での動たわみと静たわみの比を図から求めまとめたものを表-1に示す。これによると、(動たわみ/静たわみ)は、橋脚の方で大きく0.17であり、動たわみ荷重として $W=20t \times 0.17 = 3.4t$ を想定しておけばよいことがわかる。

- ① 振動エネルギーの把握
- ② 振動モードの把握
- ③ 振動の伝達関数の把握
- ④ 減衰定数の把握

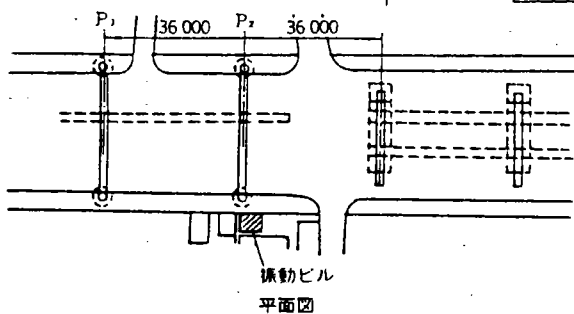
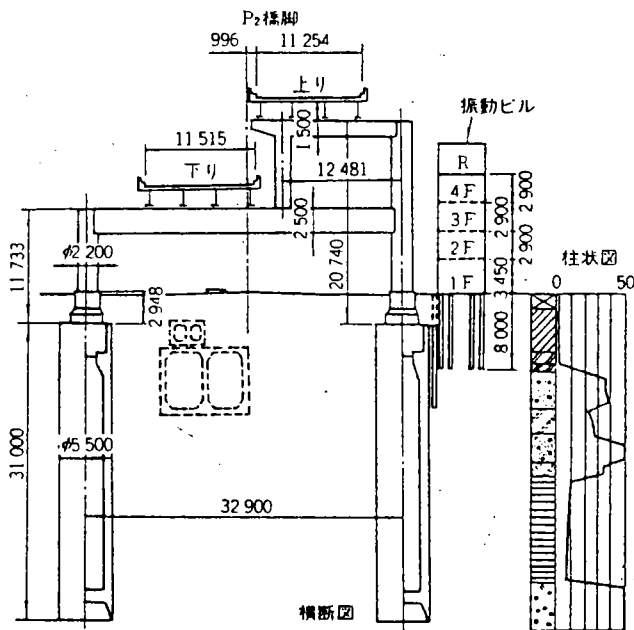


図-3 一般図 (P₁ 橋脚)

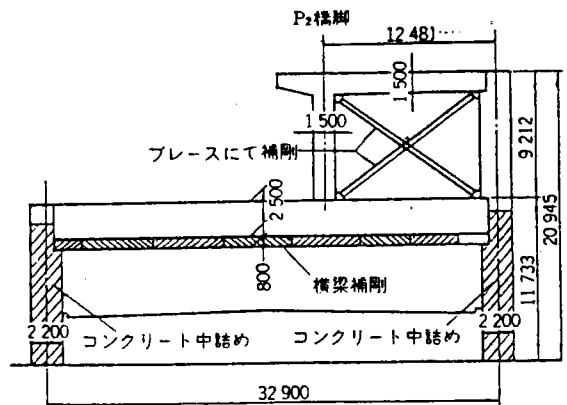


図-4 防振対策工事の概要

3) 振動モード

振動モードの形状は、加振機の取付け位置の決定に重要である。振動モードの形状は、実測および固有振動解析から推定している。実測では、各測点のパワースペクトル密度より、固有振動数および加速度実効値を読み取り、振動モードを求めた。図-7にモード図を示す。これを見ると、ビルの振動と関連の深い3.4Hzのモードは、橋脚が非対称ラーメンであることにより起こる橋軸直角方向の振動モードであることがわかる。さらに構造系を図-8のようにモデル化し、電算による固有振動解析を行い求めたモード図を図-9に示す。これを見ると固有振動解析での橋脚の2次モードが、パワースペクトルから求めた橋脚の3次のモードに合っているようである。

4) 振動の伝達関数(ビルと橋梁との間の)

橋梁の主な点と建物でのパワースペクトル密度を図-10に示す。これを見ると3.4Hzの固有振動数でビルと橋梁が共振状態にあると推定される。さらに各測点間の加速度データから、伝達関数(ゲインおよび位相差)およびコヒーレンス関数を求め検討した。

図-11に橋軸直角方向についてビル前面の橋脚の測点13とビル1階の測点16の間の伝達関数およびコヒーレンス関数を示す。これを見ると橋脚とビルの振動の相関は非常に高く、橋脚の制御によりビルの振動を制御できることがわかる。

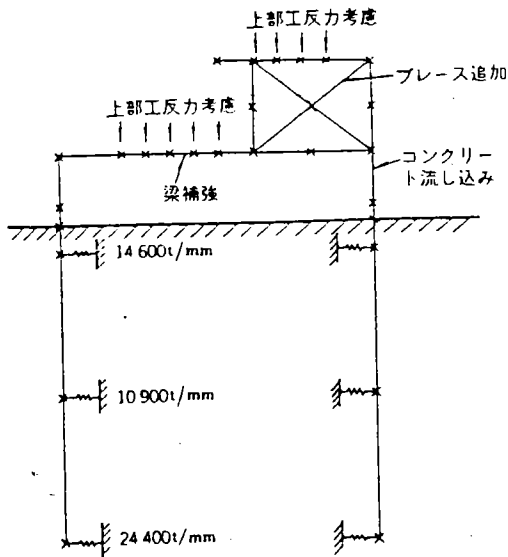
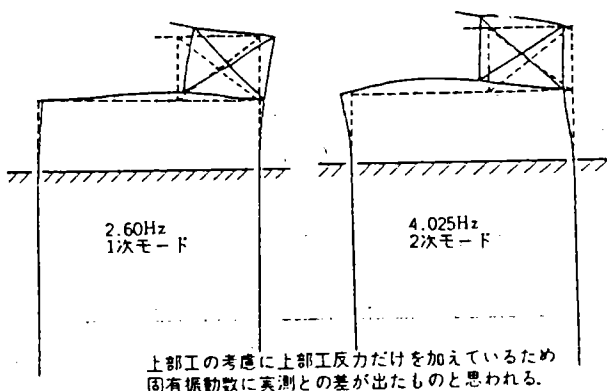


図-8 固有振動解析モデル



上部工の考慮に上部工反力だけを加えているため固有振動数に実測との差が出たものと思われる。

図-9 固有振動解析から求めた橋脚のモード

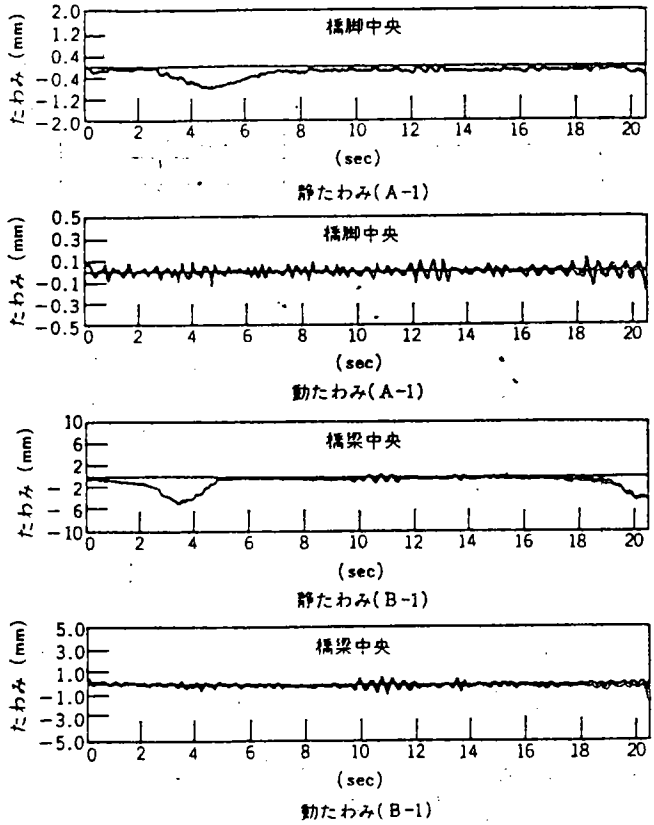


図-6 たわみの波形(20t車両, 上り線 60km/h 走行時)

表-1 (動たわみ/静たわみ)の集計(単位 mm)

走行条件	橋 梁		橋 脚	
	平均した最大 静たわみ量	平均した最大片 振幅動たわみ量	平均した最大 静たわみ量	平均した最大片 振幅動たわみ量
上り (40km/h)	5.40*	0.66*, O-P	0.49	0.06*, O-P
上り (60km/h)	5.34	0.47	0.69	0.09
下り (40km/h)	—	—	0.78	0.10
下り (60km/h)	—	—	0.83*	0.14*

静たわみ量に対する動たわみ量の比率*

橋 梁	橋 脚
0.12*	0.17*

注) *: 比率は橋梁、橋脚とも(動たわみ/静たわみ)が最大となる走行条件のものを用いた。

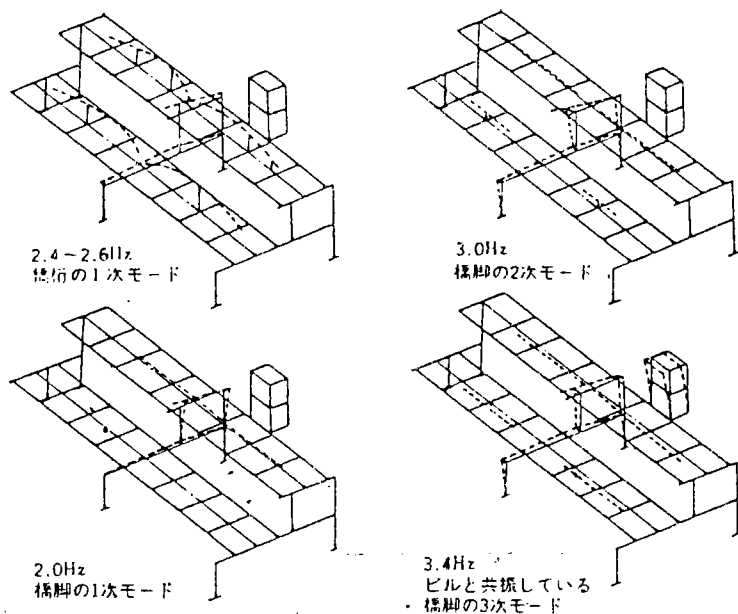


図-7 各測点のパワースペクトル密度から求めたモード波形

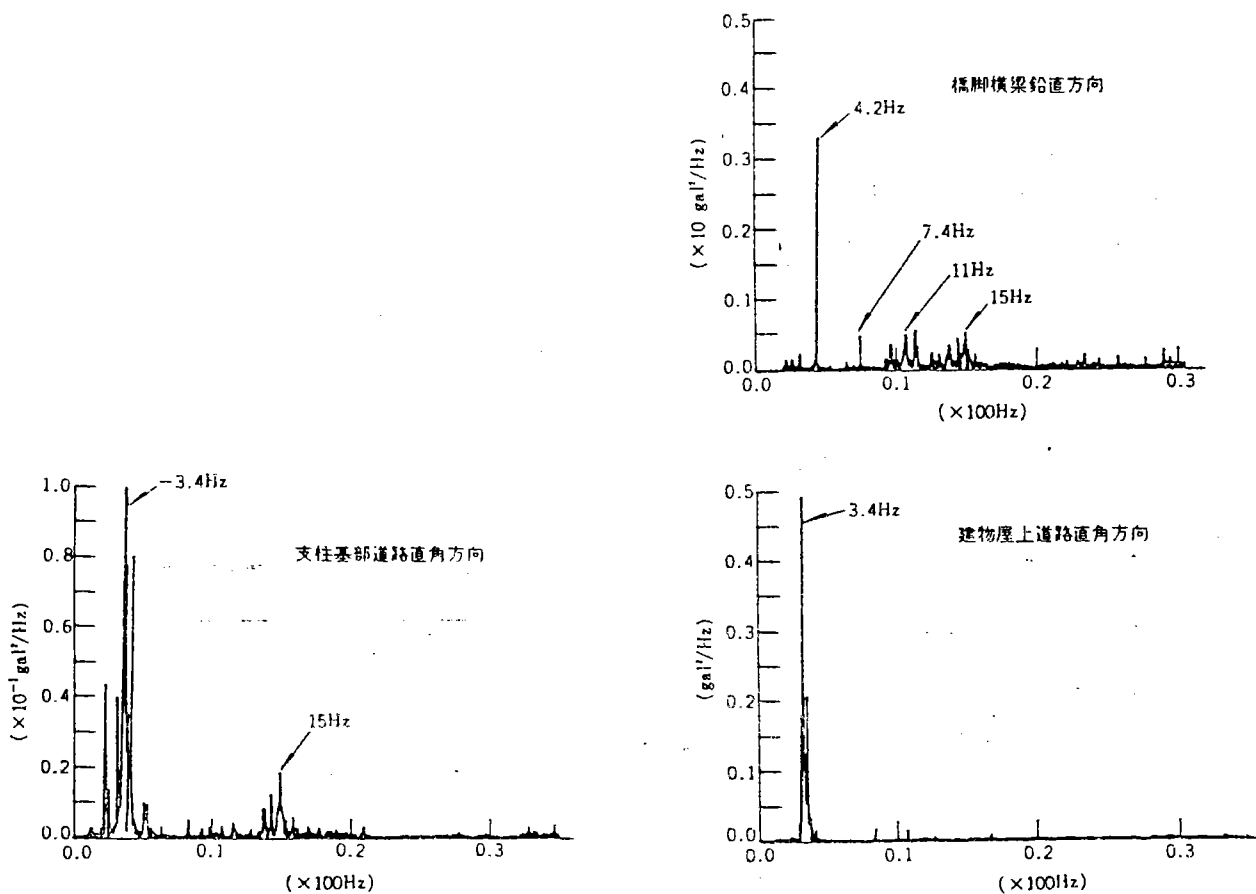


図-10 主要な点でのパワースペクトル密度

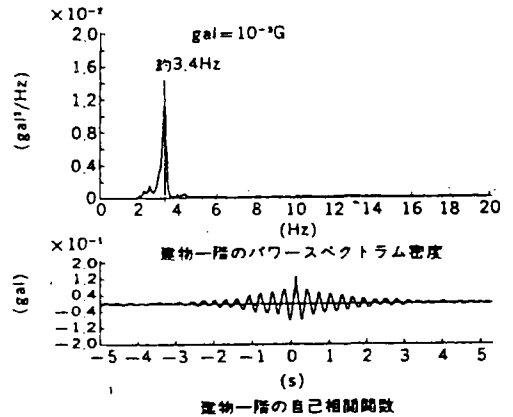


図 6. 振動ビルの実測結果

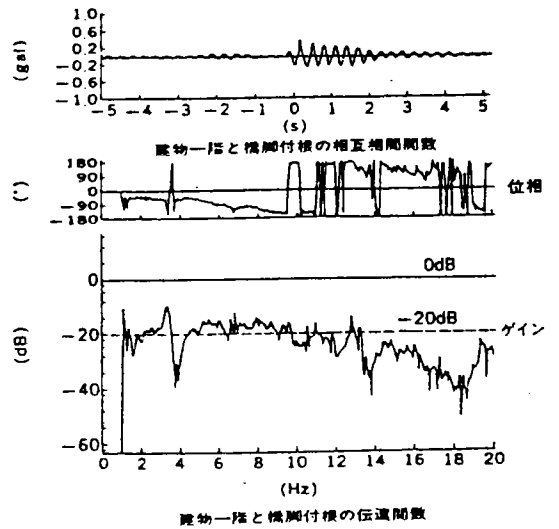


図 7. 建物と橋脚の相関関係

図 6. は、振動が問題となっている建物のパワースペクトラムと自己相関関数で、この建物は周期性の強い振動を生じており、その固有振動数は約 3.4 Hz であることがわかる。また図 7. は、この建物と橋脚との間の相関関係を示すもので、両者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おり、建物一階の振動レベルは橋脚付根部分の約 1/10 であることが確認される。

振動測定例を示したが、いずれも、3~3.5 Hz の車両走行によって励起されやすい複数のモードをもっている。これは他の測定例にも共通の現象であり注目すべきことである。

また上記の 2 例は、細長い形状の小規模なビルが振動しており、固有振動数が 2 例とも 3~3.5 Hz 程度と共通している。このことから、詳細には検討していないが、振動しやすい小規模なビルの固有振動数は 3~4 Hz 程度である場合が多いのではないかと想定される。

2. 制御装置開発の経過

② 振動の実測

以下に示す目的で行った。

- ① アクティブコントロールは、振動エネルギーを熱エネルギーに変換するものであるから、加振装置の規模を推定するために振動のエネルギーを測定する必要がある。
- ② 加振位置を決定するため、実測および固有振動解析により振動モードを把握する。
- ③ 制御対象モードを把握し、また防振効果を知るために橋梁とビル間の振動の伝達関数を求める。
- ④ 防振効果の推定のために振動体の減衰定数を把握する。
- ⑤ アクティブコントロール機構の設定

現在、アクティブコントロールの方式として上記のテンドン方式と、マスダンパー方式を設定している。

③ 基本モデルによる模型実験

上記⑤のテンドン、マスダンパー両方式に対し、対象とする橋梁構造について簡易な模型を作製し、テンドンおよびマスダンパーによる装置を設置し装置の基本的な特性を把握するもので、以下の目的で検討する。

- ① テンドンおよびマスダンパーの基本的特性の把握。
- ② アクティブコントロールでは、加速度センサーにより感知された加速度を積分して得られた速度に対する加振力の比（ゲイン）を上げた場合、すなわち感度を上げた場合、ある程度までは制振効果が上がるが、それ以上に感度を上げると逆に発振してしまう。このゲインの上限は、振動している橋梁の構造系や制御装置、加振装置などにより決定されるので、安定に制御できるゲインをできるだけ高くすべく装置を開発する必要がある。このための装置の開発を行うと同時に実機での目標ゲインを設定し、防振効果の推定資料とする。

④ スケールモデルによる模型実験

実際の橋梁と同様なモード特性と固有周期をもったスケールモデルを作製し、③までに開発されたアクティブコントロール装置を取り付けて実験を行い、実機設計のための種々の検討を行うものである。

⑤ 実機の設計、製作、取付け

④までに開発された装置を、③で実測された振動エネルギーをもとにスケールアップし、実機の設計、製作、取付けを行う。

なお、現時点では、図-2の実線の部分まで検討が終わり、基本モデルによる模型実験により実機の規模を推定している段階であるが、効果は十分あり、また規模も十分可能であるという結果がでている。

1-2 加振方法の検討

最適制御力ベクトル $U_0(t)$ を加えることにより、振動を最も効果的に減衰させることができるが、制御力を加える方法は幾つか考えられる。ここでは以下の3方法を考えた(図-1)。

それぞれの方法の概要を示す。

① テンドン方式

振動部材にアームを介して取り付けられたテンドン棒を加振機により押引きし、制御力を加えるものである。

長所としては以下のことが挙げられる。

- ② 柱を建てる等、路下を占用する必要がない。
- ③ テンドン棒を介して力の形で制御力を加えるため、複数のモードを制御することができる。
- ④ 機械的な部分が少ないので維持管理が容易である。

短所としては以下のことが挙げられる。

- ⑤ 構造によっては、テンドンを取り付けられない場合がある。またモード波形によっても制御不可能な場合がある。
- ⑥ 振動モード波形の腹に加振力を加えることができないので効率が他の2案より悪い(大きな力があるが、アームを長くするか歯車を用いた減速機を入れるなどして対応できる)。

② マスダンパー方式

マスと振動体との間に加振機を置き、マスに加速度を与え、その反力で振動体を加振する機構である。

長所としては、

- ② 地面で反力をとる必要がない。
- ③ 振動体のどの位置にでも取り付け、加振することができるため振動モード波形の腹に取り付け、効率よく制御できる。

短所としては、

- ② 新たに振動系を付加することになるため、制御技術的に難しく、また複数のモードを一つに加振機で制御することも困難である。

①のテンドン方式は、橋梁に取り付けることを検討し、②のマスダンパー方式は、現時点では比較的単純な振動をしている建物に取り付けることを検討中である。

4. 基本モデルによる模型実験

ここでは、テンドン方式による実験結果について述べる。

基本モデルによる模型実験の目的は以下のとおりである。

- ① 基本的制御特性の把握
- ② 実機における防振効果および加振機の規模の推定

実験装置の概要を図-18に示す。振動体はラーメン橋脚を想定し、両端固定の板を使用した。加速度計および制御器の特性を検討するため、振動板の固有周期は橋脚の固有周期に合わせてある。またテンドンアームの位置は、たわみ角が最大となる位置に取り付け、制御効果を上げるようにしている。

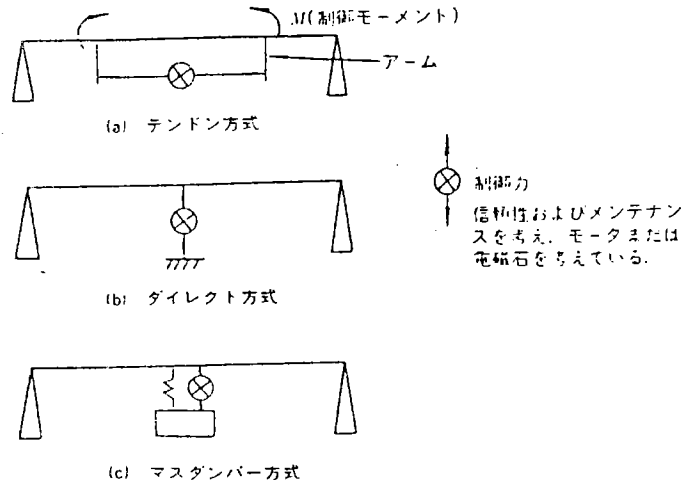


図-1 振動制御方式

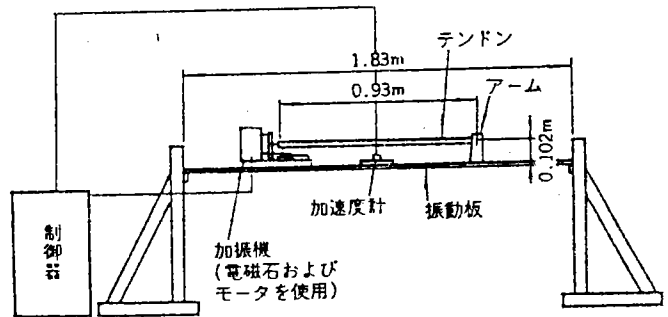


図-18 実験装置の概要

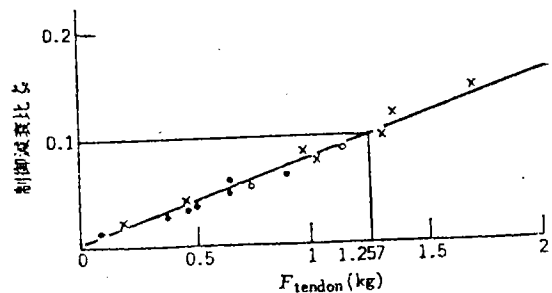


図-19 C_r-F_{tendon} の関係

1) テンドン方式の基本的特性

3. の「振動の実態」で述べたように、振動モード波形の腹に加える制御最大力 F_{max} と動たわみ荷重 W 、制御減衰比 ζ_c の間には次の関係がある。

$$F_{max} = k\zeta_c W$$

ここで、 k は実験により定める定数であり、一定の動たわみ荷重 ($W=4.25 \text{ kg}$ の重りを載せておき、これを取り除くことにより行った) による振動に対し、テンドンに加える力を変化させ、制御減衰比 ζ_c と制御力との関係を求め、決定する。

テンドンに加える最大制御力 F_{tendon} と、振動モード波形の腹に加える制御最大力 F_{max} との関係は、モード波形およびアーム長から、

$$F_{max} = \frac{1}{3.2} F_{tendon}$$

となる。また $W=4.25 \text{ kg}$ の動たわみ荷重による、 F_{tendon} と ζ_c との関係は実験から 図-19 のとおりである。

この図から、 F_{tendon} と ζ_c とは正比例の関係にあり、

$$F_{tendon} = 3.2 F_{max} = 12.57 \zeta_c$$

$$\therefore F_{max} = 3.93 \times \zeta_c = k\zeta_c W$$

したがって、 $W=4.25 \text{ kg}$ とすれば $k=0.92$ となる。

また制御ゲイン (加振力と振動体の速度との比) と ζ_c との関係も正比例の関係にあり 図-20 に示すとおりである。制御ゲインを上げ ζ_c を大きくして行った場合、ある一定以上 ζ_c を大きくすると、不安定な状態になり、逆に発振したが、この基本モデルでは安定に制御できる範囲は減衰比で 0.2 であった。この安定に制御できる範囲については、さらにスケールモデルによる実験等で検討する必要があるが、実験の場合、今回の結果の $\zeta_c=0.2$ の半分の 0.1 程度十分可能であると考えている。また制御した場合としない場合の振動波形を 図-21 に示す。

2) 実験における防振効果および加振機の規模の推定

3. の「振動の実態」で述べた振動測定例 1 の橋脚に対し、テンドンを取り付けた場合の防振効果および加振機の規模について検討した。

3. で述べたように、橋脚に対する動たわみ荷重は、20t 車両程度の走行で $W=3.4 \text{ t}$ であった。

また上記の検討から、 $k=0.92$ 、 $\zeta_c=0.1$ とすると、

$$F_{max} = 0.92 \times 0.1 \times 3.4 = 0.31 \text{ t}$$

となる。

テンドンを 図-22 のように取り付けたとすると、アーム長を 2m と設定し、 $F_{tendon}=1.1 \text{ t}$ である。

これに対し、加振機の動力源に定格出力が 3kW、定格トルクが $1 \text{ kg}\cdot\text{m}$ 、定格回転数 8 rad/sec 、重量 67kg ぐらいのモータおよび減速比 1/1000 程度の減速機を使用すればよく、これは十分実現可能な規模である。

また防振効果は、振動の実測の結果から、構造減衰率 $\zeta_0=0.03$ とし $\zeta_c=0.1$ とすると、

$$\epsilon = \frac{\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta_c} = \frac{1}{4.3}$$

となり、上記の規模のモータを用いて $\epsilon=1/4.3$ にすることができる。

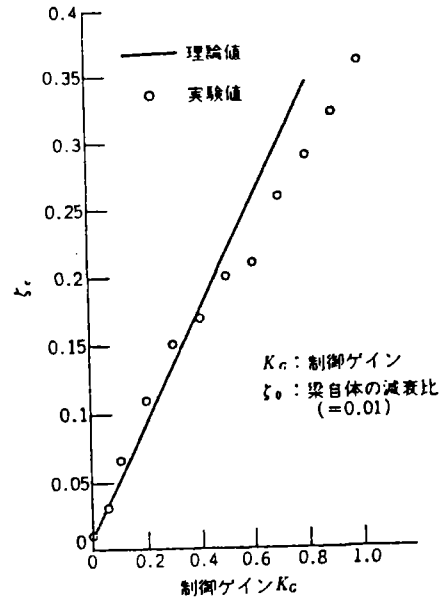


図-20 制御ゲインと ζ_c の関係

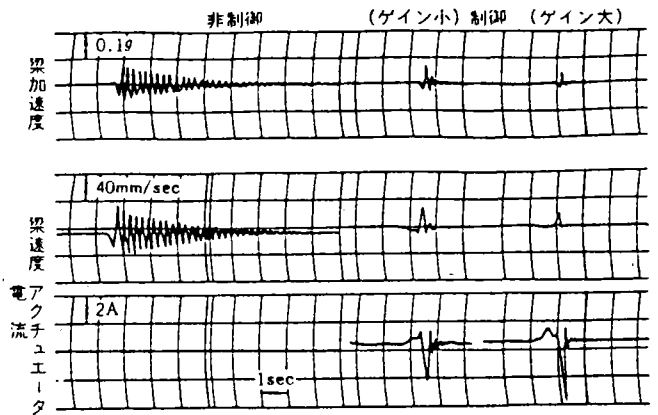


図-21 防振効果の測定データ例

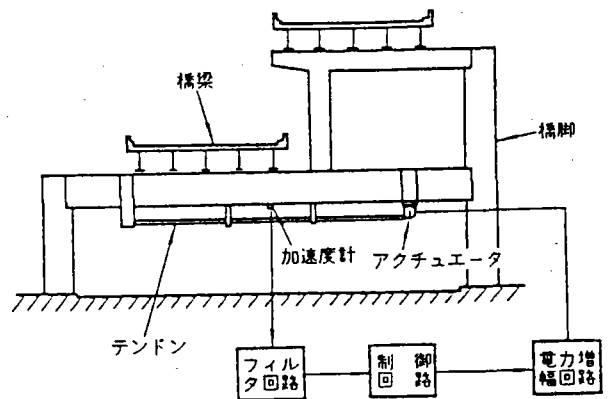


図-22 橋脚振動制御装置の装着

4. スケールモデルによる振動制御実験

実際の構造物に装着する振動制御装置の設計に先立ち、実系を 1/15 に縮小した模型 (スケールモデル) で制御実験を行った。実験の目的は、近接した固有振動数を持つ複数のモードでの制御効果の確認と、複数の制御箇所における効果の比較などである。

実系の道路直角方向の振動 (模型では道路方向を剛とした) の固有振動数、固有モード形状が模倣できるようにした。また構造体の材質にはアルミニウムを使用し、形状比を 1/15 としたほか、重量比を 1/10,000 とした。更に実系では主として部材の曲げによる振動が生じているものと考え、模型各部の断面 2 次モーメントの値は次式によって与えた。

$$\frac{I_{MO}}{I_{RE}} = (\text{材料のヤング率の逆比}) \times (\text{重量比}) \times (\text{形状比})^3$$

ここで、 I_{MO} : 模型の部材の断面 2 次モーメント

I_{RE} : 実物の部材の断面 2 次モーメント

任意の組合せて制御の ON-OFF ができる 6 台のアクチュエータ (10 W の DC サーボモーターで駆動) と、12 台のサーボ形加速

度計 (制御用/振動計測用) を装着した (図 9.)。実験中のデータはいったんデータレコーダーに記録させた後、FFT アナライザなどにより解析を行った。

4.2 実験結果

上り線にあたる橋梁の一つに、5 kg のステップ状荷重を与えて観察した橋脚の加速度波形を図 10. に示す。非制御時に約 10 秒程続いた自由振動が、橋脚の制御により約 3 秒程で減衰してしまふことがわかる。また橋梁部分も含めたすべてのアクチュエータを用いると更に振動が低減されることがわかる。

図 11. は、下り線にあたる橋梁に重量約 5.5 kg の模型トラックを走行させて起こした走行荷重による実験結果である。ステップ状荷重の場合と同様に、橋脚又は橋脚と橋梁の制御により振動が低減されることがわかる。また制御後に残る振動は、比較的高い周波数成分であることも観察される。

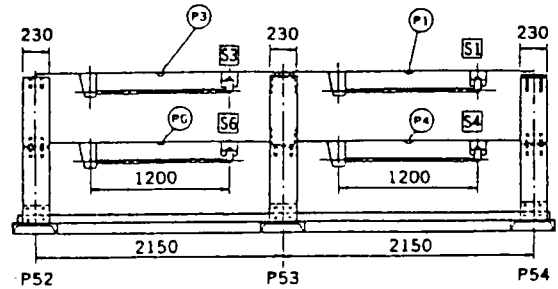
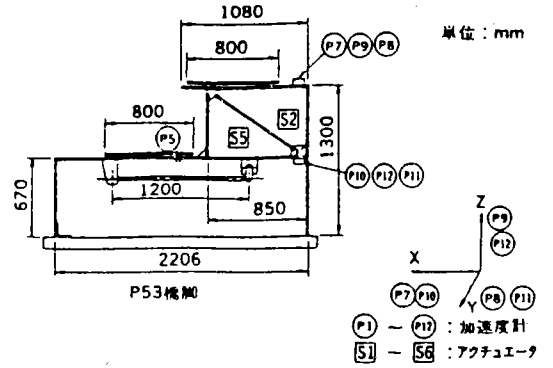


図 9. スケールモデルの概要

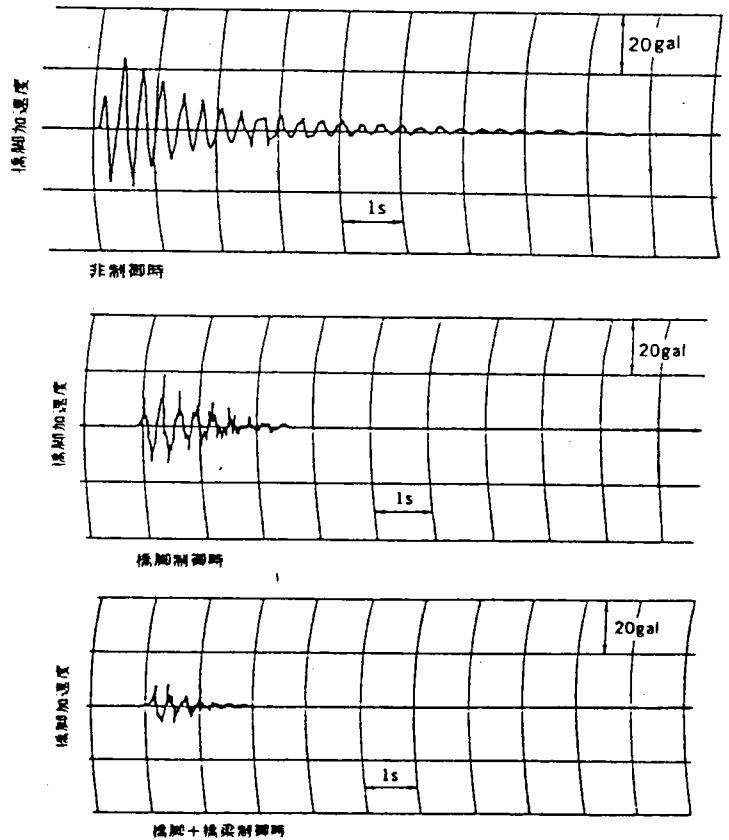


図 10. スケールモデル実験結果 (ステップ応答の時間波形)

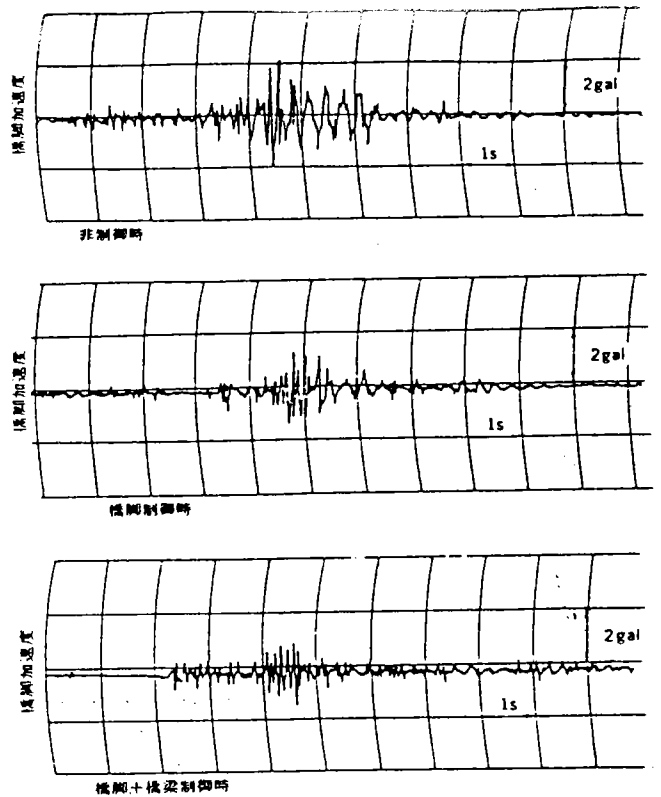


図 11. スケールモデル 実験結果 (走行荷重による応答の時間波形)

5. 実規模モデルによる振動制御実験

図 12. は、全長約 16 m、重量約 20 t (制御に用いる機器の重量を含む) の試験用橋梁に取り付けた高速道路用振動制御装置の実規模モデルの写真である。構造体となる橋梁の重量は実系モード重量の約 1/30 であるが、アクチュエータ部分 (3 kW 程度の AC サーボモータで駆動) 及び制御機器については、実橋脚への装着を予定している装置と同等の性能を持ったものとなっている。試験は実際の振動レベルより高い振動を与え、ハードウェアの検討を主目的として行っている。

図 13. は、体重約 55 kg の人間が橋梁上をゆっくり歩くことにより起こした振動を、橋梁のスパン中央に取り付けた加速度計により観察したものである。橋梁に制御を加えることにより、振動を約 1/3 程度に低減できることがわかる。

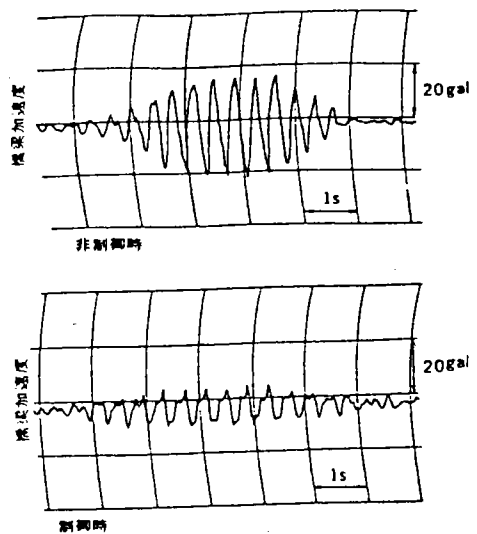


図 13. 実規模モデル 実験結果

参考文献

- (1) 上前、徳良、高橋、飯島 「橋梁振動の制御装置開発に関する基礎的研究
(上)」 橋梁と基礎、1982.12
- (2) 上前、徳良、高橋、飯島 「橋梁振動の制御装置開発に関する基礎的研究
(下)」 橋梁と基礎、1983.1
- (3) 宮内、小島 「5-4-6橋脚振動制御実験(その2)」
首都高速道路公団技報第17号 1985
- (4) 藤野、丸山、亀井、古石、富沢 「高速道路用振動制御装置」
三菱電気技報 Vol.57 No.7 1983