

# サブケーブルを使った斜張橋の耐風制振装置の開発 (ダンパーを用いる制振〈パッシブテンドン〉と アクティブコントロール〈アクティブテンドン〉)

細見 雅生<sup>1)</sup> 木場 和義<sup>2)</sup>

斜張橋の風による動的応答現象には渦励振、フラッター、ガスト応答などがあり、これらの風による振動に対して種々な制振対策が講じられている。このうち渦励振に対しては、構造力学的制振対策の一つである減衰の付加により、容易に振動を低減あるいは抑制できると言われている。このことからTMDなどの減衰付加の制振対策が施されることが多い。本研究ではそれとは異なる方法による耐風制振装置を検討する。ここで提案する制振装置は、斜張橋のケーブルと平行に塔から桁にサブケーブルを張り渡し、制振装置を取付け減衰を付加して制振する装置の開発を目的としている。構造力学的制振装置のコントロールの方式はパッシブ方式とアクティブ方式に大別される。この両方式について実験と解析により検討を行った。その結果、パッシブ、アクティブの両方式とも期待した減衰効果が得られ、サブケーブルを使った制振装置の効果が確認できた。この制振装置は斜張橋の風による振動に対して非常に有効で効率的な方法であると考えられる。制御方法、アクチュエータの設計、選定およびメンテナンスなど今後さらに検討を行う予定である。

## まえがき

近年、橋梁をはじめとする構造物は、設計、施工技術および高強度材料の開発、導入に伴い大型化、長大化が進んでいる。橋梁の分野では、長スパン化が可能な橋梁形式の一つである斜張橋が建設される機会が多くなっている。

斜張橋などの長スパンの橋梁は、可撓性に富んだ構造物であり長周期で振動しやすく、風による動的応答が問題になることが多い。斜張橋の風による動的応答現象には渦励振、フラッター、ガスト応答などがあり、これらの風による振動に対して種々な制振対策が講じられている。このうち渦励振に対しては構造力学的な制振対策の一つである減衰の付加により、容易に振動を低減あるいは抑制できると言われている。このことから、TMDなどの減衰付加の制振対策が施されることが多い。

本研究は、図-1に示すように斜張橋のケーブルと平行に塔から桁または桁端部の下部工にサブケーブルを張り渡し、そこに制振装置を取付け制振

する装置の開発を目的としている。ケーブルを使用して力を作用させる方式は一般的にテンドン方式 (tendon: 腱) と呼ばれている。テンドン方式による制振には斜張橋の制振などを目的とした藤野らの研究<sup>1), 2), 3)</sup>があるが、本研究では斜張橋全体の振動に対する制振を考えている。構造力学的制振装置のコントロールの方式はパッシブ方式とアクティブ方式に大別される。今回の制振装置に対しては両方式について検討することとした。パッシブにコントロールするシステムは制振装置をダンパーとバネで構成したシステム (以後パッシブテンドンと称する)、アクティブにコントロールするシステムはアクチュエーターにより制振

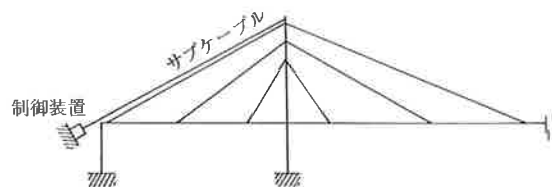


図-1 テンドン式制振装置を組込んだ斜張橋

1) 橋梁技術部技術課課長 2) 橋梁技術部技術課

力を作用させるシステム（以後アクティブテンドンと称する）である。

### 1. パッシブテンドン

3 径間連続桁を有する斜張橋の張出し架設による架設時の閉合直前の状態を対象とした模型実験および数値解析を行い、有効性の検討を行った。また、実橋規模モデルによる数値解析を行い、実現性を検討した。

#### 1.1 パッシブテンドン方式の運動方程式

パッシブテンドンの概要を図-2に示す。塔頂部の点  $\ell$  にサブケーブルを取付け、サブケーブル下端部に設けたバネ  $k_2$ 、減衰器  $c_2$  は不動点に固定するものと仮定する。サブケーブルのバネ定数を  $k_1$ 、水平からの傾斜角を  $\theta$  とする。

サブケーブルから点  $\ell$  に作用する力を外力  $U$  とすれば、運動方程式は、次のようになる。

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = F + U \quad (1)$$

ここに、

$M$  : 構造物全体の質量マトリックス

$C$  :      $\times$      の減衰マトリックス

$K$  :      $\times$      の剛性マトリックス

$F$  : 外力ベクトル

$Y$  : 構造物全体の変位

$U$  : パッシブテンドンにより付加される力を表す列ベクトル、例えば、点  $\ell$  に制振力を作させる場合、次のようになる。

$$U = \{0, \dots, 0, \dot{U}, 0, \dots, 0\}^T$$

記号“および”はそれぞれ時間に関する 2 階微分および 1 階微分を示す。

コントロール力  $U$  が大きくないとき、振動形解析法により解析できる。変位が

$$Y = \sum \phi_i^T q_i$$

で表されるとする。ここに、第  $i$  モードの運動方程式は、

$$\ddot{q}_i + 2h_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{\phi_i^T F}{M_i^*} + \frac{\phi_i^T U}{M_i^*} \quad (2)$$

ここに、 $M_i^* = \phi_i^T M \phi_i$

節点  $\ell$  に作用するコントロール力のうち、たわみ振動に主として関与するのは水平方向成分のみである。節点  $\ell$  の水平方向変位を  $u_\ell$ 、ダンパ取付け点のケーブル方向変位を  $u_c$  とすると、 $U$  は点  $\ell$

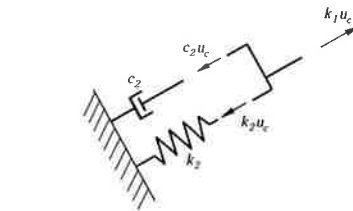
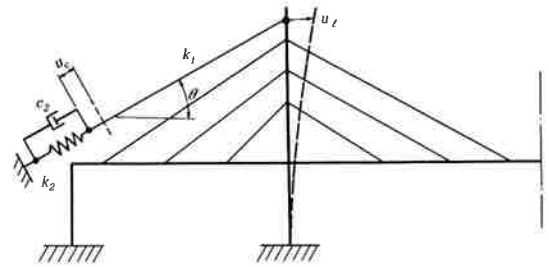


図-2 パッシブテンドン装置を組み込んだ斜張橋

における外力の水平成分のみの力として表され、

$$U = -k_1 (u_\ell \cos \theta - u_c) \cos \theta \quad (3)$$

バネ  $k_2$  と減衰器  $c_2$  の部分のつり合い方程式は、

$$k_1 (u_\ell \cos \theta - u_c) - k_2 u_c - c_2 \dot{u}_c = 0 \quad (4)$$

点  $\ell$  の変位  $u_\ell = \phi_\ell q$  を代入すると、橋が振動するときの運動方程式とつり合い方程式は、

$$\ddot{q} + 2h\omega \dot{q} + \omega^2 q = f + f_c \quad (5)$$

ここに

$$f = \frac{\phi_i^T F}{M_i^*} \quad (6)$$

$$f_c = \frac{\phi_i^T U}{M_i^*} = \frac{-\phi_\ell k_1 (\phi_\ell q \cos \theta - u_c) \cos \theta}{M_i^*} \quad (7)$$

ただし、振動次数を表す添字  $i$  は省略した。式(4)と(5)から  $u_c, \dot{u}_c$  を消去して 1 つの式にまとめると、

$$\begin{aligned} & \frac{c_2}{k_1 + k_2} \ddot{q} + \left( \frac{c_2}{k_1 + k_2} 2h\omega + 1 \right) \dot{q} + \\ & \left\{ \frac{c_2}{k_1 + k_2} (\omega^2 + k_1 \frac{\phi_\ell^2 \cos^2 \theta}{M_i^*}) + 2h\omega \right\} \dot{q} \\ & + \left( \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \frac{\phi_\ell^2 \cos^2 \theta}{M_i^*} + \omega^2 \right) q = f + \frac{c_2}{k_1 + k_2} \dot{f} \quad (8) \end{aligned}$$

になる。このように斜張橋にパッシブテンドン装置を取付けた場合の構造物全体の運動方程式は、3 階の微分方程式で表される 1 自由度の運動方程式に変換できる。1 自由度系の運動方程式で表現することにより、物理的な解釈が容易になるものとする。式(8)の速度の項より、任意の  $c_2, k_1, k_2$

に対して減衰付加の効果が容易に理解できる。

コントロール用のバネ，減衰器が桁に取り付けられた場合やコントロール装置が複数設置された場合も同様の式を得ることができる。

### 1 2 模型実験

使用した模型は，図-3に示すように，中央スパン410mmの斜張橋のスパン方向の半分だけを取り出してモデル化したものである。振動モードについては，鉛直たわみ1～3次振動を取扱う。模型の桁と塔は鋼材，ケーブルはピアノ線（φ0.3mm）で構成し，桁および塔は付加質量を用いることによ

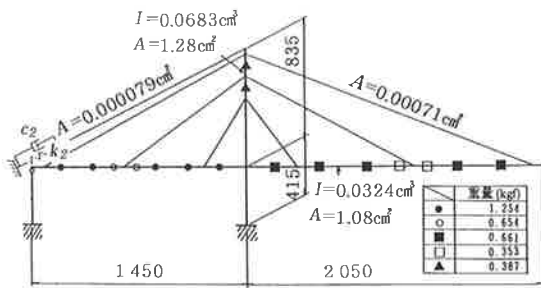


図-3 斜張橋模型

り，質量，剛性を相似させている。図-4に実験で用いたオイルダンパーの概略図を示す。シリンダーの大きさは内径φ29mm，全長230mmで，ピストンにはアルミ製の棒に円板をつけたものを用いた。この円板にあけた穴の大きさで減衰係数（ $c_2$ ）を0.019～0.162（kgf・sec/m）の範囲で調整した。

#### (1) 実験方法

制御に用いるサブケーブルの断面積（ $A_1$ ）は模型最上段ケーブルの断面積（ $A_0$ ）の1/9とした。サブケーブルのバネ定数（ $k_1=A_1E/L$ ）とダンパーと固定点間のバネのバネ定数（ $k_2$ ）の比（ $k_2/k_1$ ）

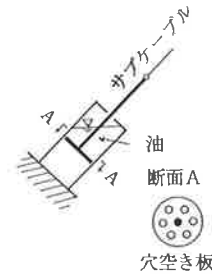
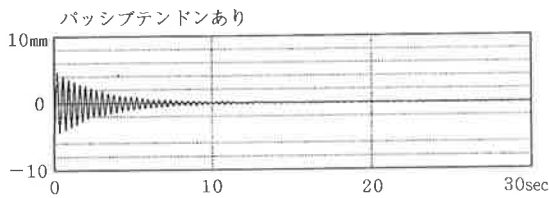
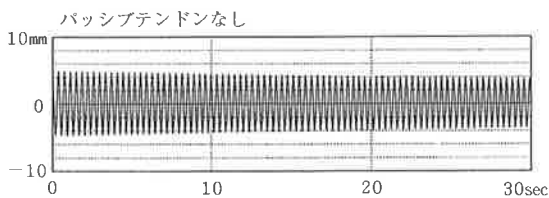
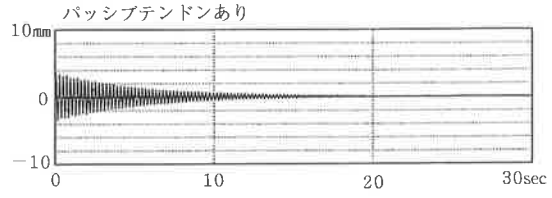
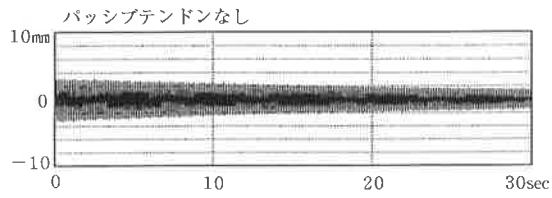


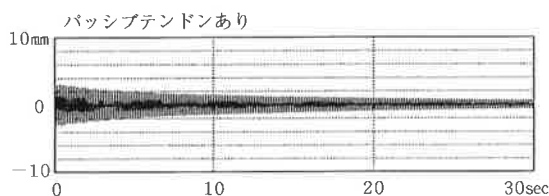
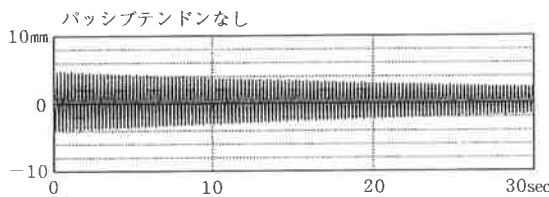
図-4 オイルダンパー



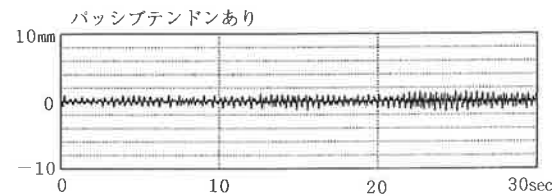
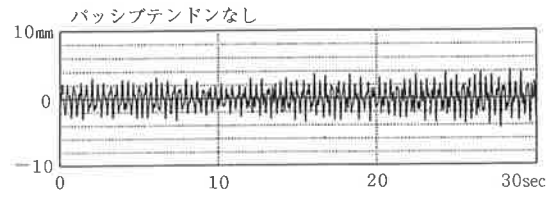
(a) 1次モードの自由減衰振動



(b) 2次モードの自由減衰振動



(c) 3次モードの自由減衰振動



(d) 不規則外力による振動

図-5 パッシブテンダンの模型の応答

は、 $k_2$ のバネを替えることによって2種類設定した。また、ダンパーの減衰係数はピストンの円板を取り替えて6種類設定した。以上の条件で、鉛直たわみ1～3次のモードで加振し、自由減衰振動時の減衰（対数減衰率）を計測した。

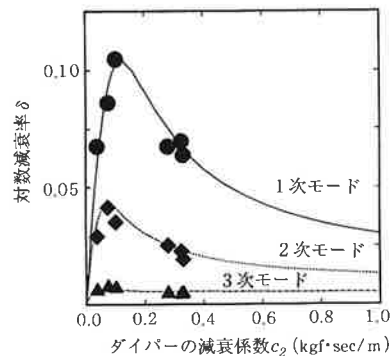
この自由振動の実験で最も効果があった減衰係数条件で、不規則な外力が作用する時の応答を計測した。不規則外力は主桁模型の先端のおもりをサーボモータによりランダムに上下方向に動かすことにより与えた。

(2) 実験結果と解析結果の比較

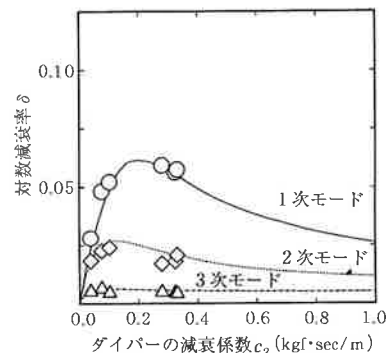
図-5 (a)に  $A_0/A_1=9$ ,  $k_2/k_1=0.1$ ,  $c_2=0.05$  (kgf·sec/m) としたときの1次モードの自由減衰振動の波形を示す。パッシブテンドン装置のないとき対数減衰率  $\delta = 0.003$ であったものが、装置を取り付けることにより  $\delta = 0.125$ に増大している。また、図-5 (b), (c)に示すように2次モード、3次モードにおいても、効果に差はあるが、パッシブテンドンにより減衰は増大しており、複数のモードに対して効果があるといえる。図-5 (d)は不規則外力としてホワイトノイズを作用させたときの応答である。この場合パッシブテンドンにより応答はr.m.s値で約1/3に低減された。この制振システムはガスト応答のような不規則な外力に対しても有効であるといえる。

図-6に、自由振動時の減衰効果の解析値と測定結果を示す。横軸はダンパーの減衰係数 ( $c_2$ )、縦軸は模型の対数減衰率 ( $\delta$ )である。解析値は式(8)を外力  $f=0$ 、初期条件を  $y=D_0$ ,  $\dot{y}=0$  ( $D_0$ : 初期振幅)としてルンゲクッタギル法で解き、その波形より対数減衰率を読みとったものである。

図-6からわかるように、解析値と計測値はよく一致している。今回提案のパッシブテンドン装置の効果が実験によっても確認できたといえる。し



(a)  $k_2/k_1=0.095$



(b)  $k_2/k_1=0.833$

図-6 パッシブテンドンの模型の減衰特性

かし、モードにより制振効果に差のあることがわかる。1次モードと2次モードについては大きな制振効果が期待できるが、3次モードに対してはダンパーの減衰係数を大きくしても対数減衰率の変化は小さく、大きな制振効果を示さない。これは、減衰係数が一定のとき、高次のモードに対しては、振動数が高くなることから対数減衰率の値が相対的に小さくなること、また、構造物の動きに対するダンパーの移動量が相対的に小さくなり、減衰力が十分に得られなくなるためである。 $\delta$ は適当な  $c_2$  の値で最大値をとり、 $c_2$  に最適となる値があることがわかる。

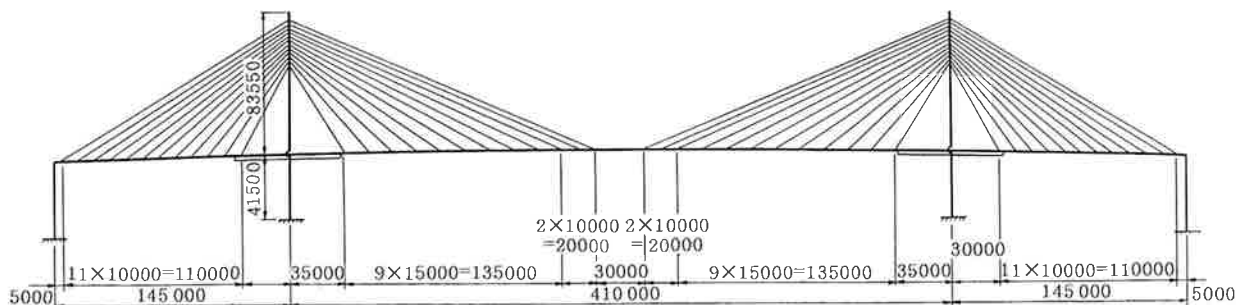


図-7 実橋規模モデルの寸法

### 1.3 実橋規模モデルによる数値解析

解析モデルに実橋相当のモデルを用いて数値解析を行い、その減衰効果を検討した。実験は架設時を対象として実施したが、ここでは完成時を対象として解析を行った。解析モデルを図-7に示す。スパンは145.0+410.0+145.0mのマルチケーブル斜張橋である。鉛直たわみ1～3次の固有振動モードを図-8に示す。支承は橋軸方向にオールフリー構造としているため、2次モードでは橋軸方向の移動が卓越している。数値計算による効果の検討は、ダンパーを桁の外側の下部工に固定した下部工結合タイプと桁上で固定した桁結合タイプの2種類について行った(図-9)。

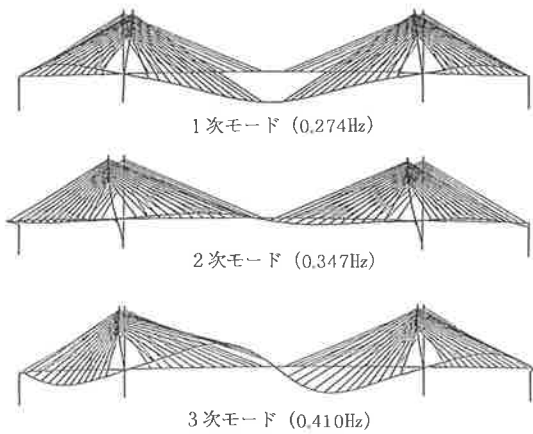
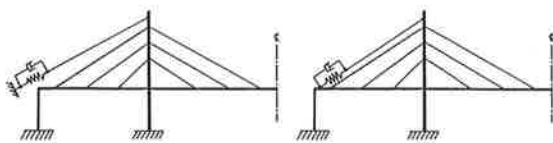


図-8 モード形状と固有振動数



(a) 下部工結合タイプ (b) 桁結合タイプ

図-9 数値解析に使用したパッシブテンドン

#### (1) 解析結果

図-10に  $k_2/k_1=0.1$ ,  $A_0/A_1=2$  のときの下部工結合タイプ、桁結合タイプの減衰特性曲線を示す。横軸はダンパーの減衰係数 ( $c_2$ )、縦軸は対数減衰率 ( $\delta$ ) である。図中の  $c_2=3(\text{tf}\cdot\text{sec}/\text{cm})$  の縦線は、建築の分野で一般的に用いられているダンパーの減衰係数の最大値を示している。1次モードについては、両タイプとも同程度の効果が得られるが、2次モード、3次モードに対する効果は、下部工結合タイプと桁結合タイプで差が現われている。2次モードは上部工全体としての橋軸方向の変位

が大きい、ケーブルの伸び量は小さいモードである。このことから、2次モードでは桁の外側の下部工にダンパーを固定した下部工結合タイプの方が大きな効果が得られている。

図-10の縦軸と横軸のスケールを剛性および振動数を使用して変更したものを図-11に示す。 $k_1/k_2=1, 0.1$  の場合に、 $A_0/A_1=1\sim 5$  とパラメータを変化させたときの計算結果を示してある。下部工結合タイプ、桁結合タイプとも、各モードごとに同一の線上に重なっている。図-11を使用することにより、パラメータが変化した場合も1つの曲線を使用して減衰の効果を推定できる。

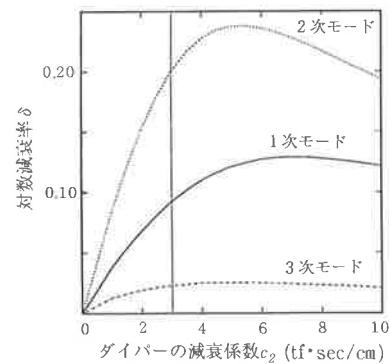
#### (2) 実橋におけるパッシブテンドン方式の実現性

以上の結果を利用して、実橋に適用した場合の装置の規模を検討する。入手が比較的容易な粘性ダンパーの減衰係数の最大値は約  $3 \text{tf}\cdot\text{sec}/\text{cm}$ 、最大減衰力は約  $65 \text{tf}$  であり、これを利用するものとする。

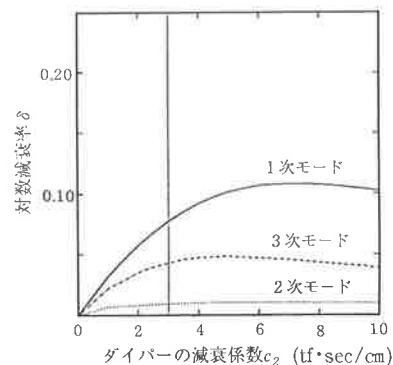
装置の条件を次のとおりとする。

下部工結合タイプ

$$k_2/k_1=0.1$$

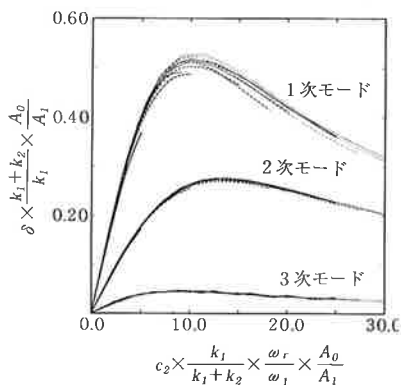


(a) 下部工結合タイプ

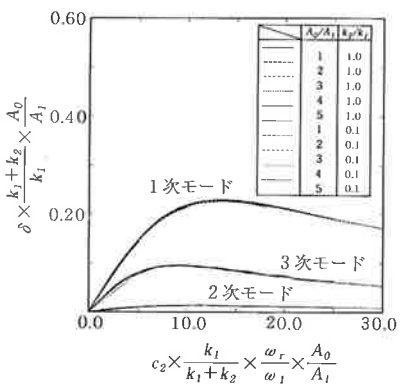


(b) 桁結合タイプ

図-10 実橋規模モデルの減衰特性



(a) 下部工結合タイプ



(b) 桁結合タイプ

図-11 無次元化した減衰特性

$$A_0/A_1 = 2$$

$$c_2 = 3\text{tf} \cdot \text{sec}/\text{cm}$$

図-10に上記の条件を当てはめると、1次モードに対する減衰効果は対数減衰率 $\delta \doteq 0.1$ と読みとれる。スパン中央に50cmのたわみ量が生ずるものとする。このときの塔頂の水平変位はモード図(図-8)から約15cmと読みとれる。これよりサブケーブルの伸び量 $\Delta l = 0.13\text{m}$ と計算できる。

$$A_0 = 0.02686\text{m}^2 \text{ であるから}$$

$$A_1 = A_0/2.0 = 0.01343\text{m}^2$$

また、ケーブルの長さ $L = 169.51\text{m}$ であるから

$$k_1 = A_1 E/L = 1664\text{tf}/\text{m}$$

装置の条件より

$$k_2 = 0.1 \times k_1 = 166\text{tf}/\text{m}$$

制振装置全体のバネ定数は

$$k = k_1 \cdot k_2 / (k_1 + k_2) \doteq 151\text{tf}/\text{m}$$

サブケーブルの張力変化は

$$\Delta T = k \cdot \Delta l = 0.13 \times 151 \doteq 20\text{tf}$$

サブケーブルの応力度の変化は

$$\Delta \sigma = \Delta T/A_1 = 20,000/134.3 \doteq 150\text{kgf}/\text{cm}^2$$

減衰装置取付け部の変位は

$$y = \Delta T/k_2 = 20/166 = 0.120\text{m}$$

減衰力は1次モードの振動数 $f = 0.274\text{Hz}$ より

$$P_c = c_2 \cdot \dot{y} = c_2 \cdot 2\pi f \cdot y = 3 \times 20 = 60\text{tf}$$

上記の計算よりバネ定数( $k_2$ )、ダンパーの減衰力( $P_c$ )など、入手が容易な装置を用いてシステムを構成することが可能であると考ええる。

## 2. アクティブテンドン

アクティブテンドン方式は塔から桁あるいは固定端に張り渡したサブケーブルにアクチュエータを組み込んで振動を制御しようとするシステムである(図-12)。

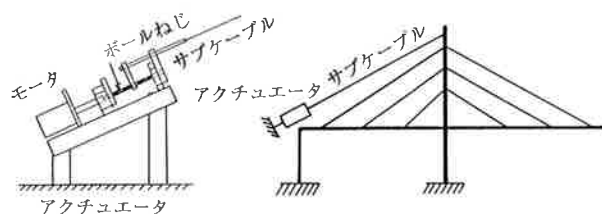
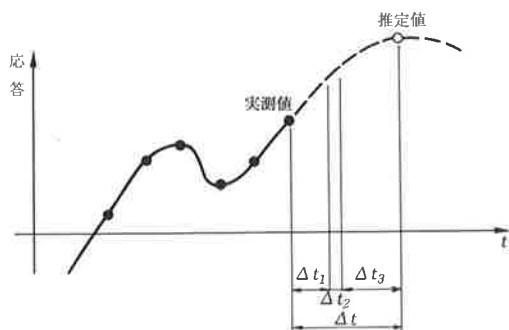


図-12 アクティブテンドンを組込んだ斜張橋模型

### 2.1 模型実験

アクティブテンドン方式の制振効果を模型実験により検討した。実験にはパッシブテンドンの検討時に使用した模型のバネとダンパーをアクチュエータに取り替えたものを使用した。アクチュエータには定格出力5ワットのDCサーボモータを使用した。

模型を各固有振動モードで加振し、その後の自由減衰振動を対象として制御を行った。制御則としては速度比例制御<sup>4)</sup>と線形二次最適制御<sup>5)</sup>の2種類の方法を使用した。制御力は計測した変位から瞬時に計算し作用させる必要がある。しかし、作用させる制御力の計算処理による時間遅れと、使用するモータの性能による時間遅れが発生することは避けられない。この問題に対する処理として、制御力が作用するときの応答を測定データから予測し、その予測値から制御力を計算し作用させることとした。図-13にこの考え方の概要を示す。図に示すように渦励振時の振動のように調和的な振動である場合、本方法により効果的な制御力を与えられるものとする。



$\Delta t_1$ : 応答の●値を計測および応答の○値を推定し、○値に対応する制御力を計算  
 $\Delta t_2$ : 計算終了からモータ駆動スタートまでの遅れ時間  
 $\Delta t_3$ : モータ駆動スタートから制御力発生までの遅れ時間  
 $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$   
 制御力計算開始から制御力発生までの遅れ時間

図-13 応答値と制御力の関係

## 2.2 実験結果

模型の張出部端部をたわみ1次の固有振動数と同じ周波数の外力でたわみ加振し、速度比例制御と最適制御を使用して制御した。結果を図-14、15に示す。それぞれの図において(a)は制御しない場合の桁の張出し部先端の変位、(b)は制御した場合の変位、(c)はアクチュエータで作用させた制御力を示す。横軸は時間である。5 secでアクチュエータを作動させた。図より両方式とも大きな制振効果を示していることがわかる。ここでは省略するが、たわみ2次、3次モードにおいても速度比例制御、最適制御とも十分な効果が得られている。

図-14、15(c)の破線は計算制御力の理論値を包絡した線である。実線は実際に作用した制御力である。アクチュエータ作動直後はモータの性能および試作した増幅器の不備から理論通りの制御力が作用していない。アクティブ制御についてはメンテナンスの問題も指摘されており、これらの点について今後さらに検討を行う予定である。

## 3. 結論

パッシブ、アクティブ制振とも期待した減衰効果が得られた。

パッシブテンドン方式ではモードごとに最適な減衰係数が存在し、振動モード形状を考慮して設置すれば、複数の振動モードに対して有効に作用すると考えられる。しかし、高次の振動モードに

対しては、振動数が高くなることから減衰力が相対的に小さくなるため効果は小さくなる。

アクティブテンドン方式についても、十分な減衰効果を得ることができる。しかし、制御方法、アクチュエータの開発およびメンテナンスなど今後検討すべき課題が残されている。

パッシブ、アクティブ両方式ともそれぞれに利点があり、対象とする橋の規模、特性に合わせて適用することが可能と考える。

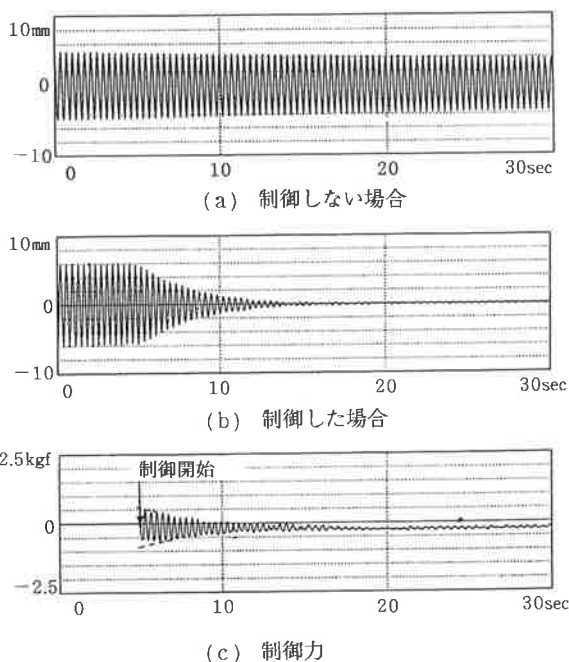


図-14 速度比例制御

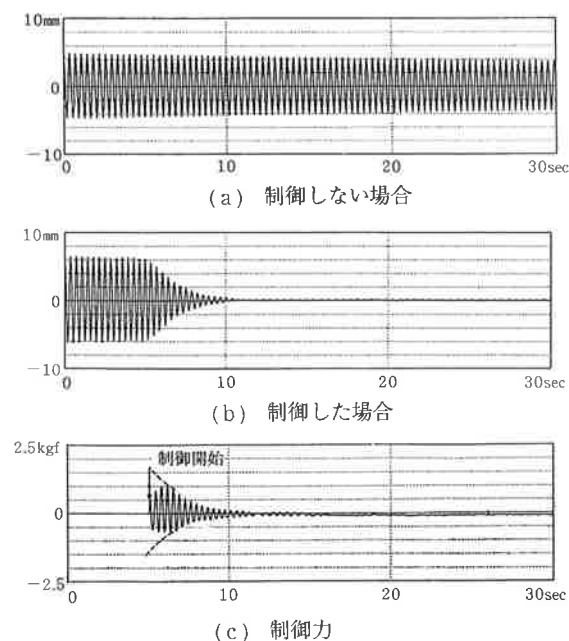


図-15 最適制御

## あしがき

パッシブテンドン方式，アクティブテンドン方式とも期待した減衰効果が得られた。斜張橋のテンドン式制振装置の効果が確認できた。この制振装置は斜張橋の風による振動に対して非常に有効で効率的な方法であると考えられる。しかし，制御方法，アクチュエータの開発およびメンテナンスなどの課題が残されており，今後さらに検討を行う予定である。

本研究は立命館大学工学部土木工学科構造研究室との共同研究として実施したものです。本文は共同研究報告書をもとにしてまとめたものです。本文をまとめるにあたっては構造研究室の小林紘士教授に指導して頂きました。ここに深く感謝の意を表します。また，実験と解析は当時大学院生の北川勝也君と学部4回生の大塚信也君，荒木信夫君に負うところが大きい。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Thumanoon Susumpow and Yozo Fujino : Active Control of Cable and Cable Structure System, Proceedings of First International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC), 1992.9.
- 2) 比江島慎二・藤野陽三：桁端ダンパーによる橋梁の交通振動の軽減，土木学会論文集，No.465/ I - 23, 1993.4.
- 3) Pennung Warnitchai, Yozo Fujino, Benito M.Pacheco and Pemi Agret : An Experimental Study on Active Tendon Control of Cable Stayed Bridges, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.22, 1993.
- 4) 横山隆一他訳：デジタル制御システム—解析と設計—，日刊工業新聞社，1990.9.
- 5) 土木学会構造工学委員会振動制御小委員会：構造物の振動制御，振動制御コロキウムpart A, 1991.7.