

(15) 主桁制振装置による張出し施工中のPC斜張橋の制振

鹿島建設技術研究所 正会員 ○新原雄二
 同 上 正会員 竹田哲夫
 同 上 大塩 真
 同 上 中野龍児

1. まえがき

一般に、施工中の橋梁は、完成後に比べて構造的に不安定であり、風や地震などの外力により励起される応答が問題となることがある。橋梁が長大化するにしたがい、風による振動が問題となり制振装置が適用される例が増えているが、これまでの事例の多くが、鋼製吊り形式橋梁(吊橋や斜張橋)の施工中の主塔独立時における制振対策である。

しかし、近年規模の大きなPC斜張橋が建設されるに伴い、PC斜張橋においても風による振動が発生することが報告されている¹⁾。PC斜張橋は、主桁と主塔を同時に伸長していく張出し架設工法で施工されることが多いが、張出し施工中に、自然風の乱れによって主桁のガスト応答が発生する。フェアリングなどによる断面形状の変更で制振することのできる渦励振とは異なり、ガスト応答は自然風の空間的・時間的変動が引き起こす強制振動であるため、断面形状の変更による制振効果は少ない。

本研究では、張出し施工中のPC斜張橋のガスト応答の制振を目的としたアクティブ型の制振装置を開発し、実際に施工中のPC斜張橋において、その制振効果を確認したので報告する。

2. 張出し施工中のPC斜張橋の風応答特性

本制振装置の性能確認実験を実施したPC斜張橋は、張出し施工時から風観測を実施しており、主桁や斜材の風応答についてのデータが得られている。その結果によれば、主桁の振動については、橋全体がヤジロベエのように揺れる1次モードのガスト応答が卓越することが示されている²⁾。このPC斜張橋の張出し長120mにおける振動モード形を図-1に示す。主桁の張出し長が長くなるにしたがい、構造系全体の重量が増し、固有振動数が低下していく。このPC斜張橋の張出し長に対する1次モードの固有振動数の変化を固有値解析により求めた結果を図-2に示す。張出し長が70mの時の1次モードの固有振動数は0.3Hz程度であるが、最大張出し長に近い120mでは0.1Hz程度にまで低下している。

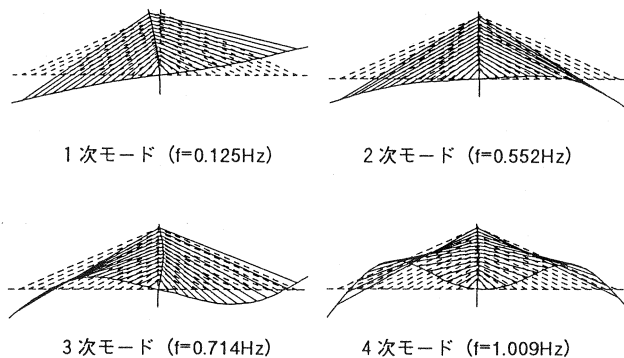


図-1 張出し施工時の振動モード(張出し長120m)

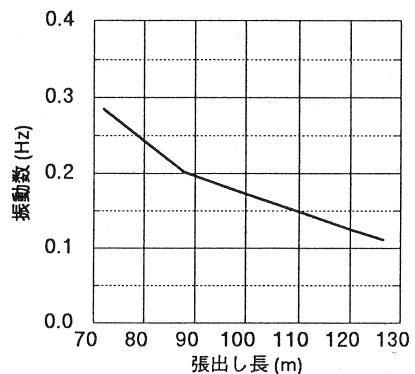


図-2 張出し長による1次モードの固有振動数の変化

3. 施工中のPC斜張橋のモデル化

風観測の結果からわかるように、施工中のPC斜張橋の振動は1次モードが支配的であるため、このモードのみに注目して1自由度系にモデル化することができる。まず、多質点モデルによる固有値解析を実施して振動モードを求め、式(1)から主桁先端(制振装置位置)での1次モードの有効質量を計算した。得られた有効質量と固有振動数から図-3に示すような1自由度系に置き換えたときのバネ定数を求めた。減衰係数は、1次モードの減衰定数を1%と仮定して定めた。表-1に1自由度化されたPC斜張橋(張出し長120m)モデルのパラメータを示す。

$$M = \frac{\sum_k m_{Gk} \phi_{1Gk}^2 + \sum_k m_{Tk} \phi_{1Tk}^2}{\phi_{1Ge}^2} \quad (1)$$

ただし、

- M: 主桁先端での1次モードの有効質量
- m_G, m_T : 主桁と主塔の要素の質量
- ϕ_{1G}, ϕ_{1T} : 主桁と主塔の1次モード値
- ϕ_{1Ge} : 主桁先端の1次モード値

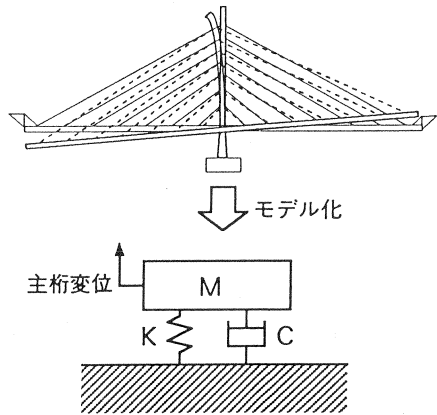


図-3 PC斜張橋の1自由度モデル化

表-1 1自由度モデルの諸元

有効質量	1760t
固有振動数	0.125Hz
減衰定数	0.01

4. 制振装置

施工中の1次モードの振動を制振する場合、主桁の先端に上下方向の制振装置を設置する方法と、主塔の頂部に水平方向の制振装置を設置する方法などが考えられる。しかし、主桁と主塔を同時に施工していくPC斜張橋では、主塔頂部に制振装置を設置することは困難であるため、主桁先端に上下方向に制振力を発生できる制振装置を設置するものとした(図-4)。

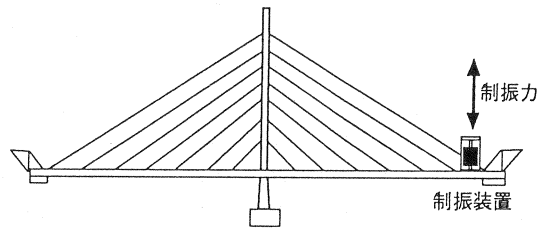


図-4 制振装置取り付け位置

対象とする1次モードの振動は、最大張出し時で0.1Hz程度という低振動数であり、有効質量も鋼斜張橋に比べ大きいので、パッシブ型の動吸振器³⁾による制振は困難であると判断された。そこで、可動マスを油圧アクチュエータで上下方向に駆動するアクティブ方式の制振装置(AMD)を採用した。

装置の設計にあたっては、張出し長120mでの橋の減衰を3倍程度に増加させることを目標としたが、最終的な装置の仕様は、施工上の制約や斜張橋の架設時の搭載重量の制限などを考慮して決定した。制振効果の向上、施工中の主桁重量のバランスの面からは、制振装置は主桁の両先端に設置することが望ましいが、今回の実験では片方の主桁上に1台設置することにした。

制振装置本体の概略図を図-5に、諸元を表-2に示す。可動マスの質量は11tonであり、張出し長120mにおける1次モードの有効質量が1760tであることから、有効質量比は約0.6%である。制振装置は、装置本体と制御コントローラおよび油圧ユニットから構成されており、それぞれキャスタを備え付けることにより、主桁の伸長に伴う移動が容易に行えるようになっている。

制振装置のシステムを図-6に示す。制御則は、主桁先端に設置した速度計の絶対速度のフィードバックを基本とした最適制御則を用いている。

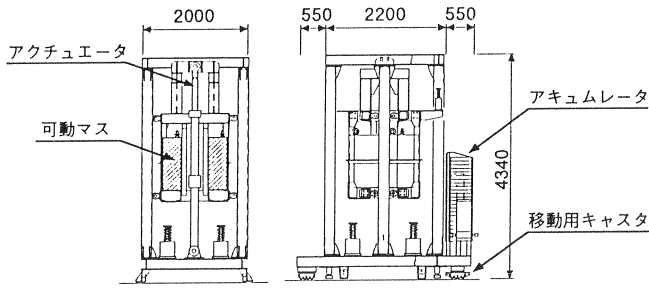


図-5 制振装置本体

表-2 制振装置の概要

可動マス質量	11000 kg
最大制御力	49033 N
最大ストローク	±550mm
振動数範囲	0.1~0.3Hz
寸法	3250×2210×4340 mm
全質量	14000 kg

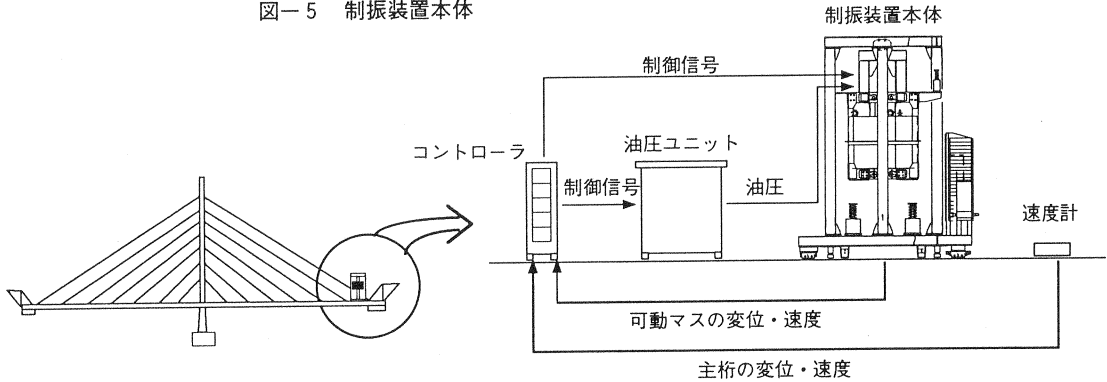


図-6 制振装置システム

5. 加振実験

本制振装置は、可動マスをアクチュエータで駆動するため、加振装置としての機能も有している。そこで、制振装置の性能確認と橋の減衰特性の把握を目的として加振実験を行った。実験時における張出し長は92mで、制振装置を84m地点に設置した。制振装置の設置状況を写真-1に示す。

まず、制振装置を用いて1次モードの固有振動数で主桁を加振して定常状態に達した後、可動マスを停止させて主桁の自由振動波形を測定し、1次モードの減衰定数を求めた。次に、同じく1次モードの固有振動数で加振して定常状態に達した後、制振装置を加振モードから制振モードに切り替え、主桁の振動を制振した場合の減衰波形を測定し減衰定数を求めた。加振振幅は、主桁先端の変位で±3.8cmと±5.1cmであり、加振実験時における1次モードの固有振動数は0.185Hzであった。

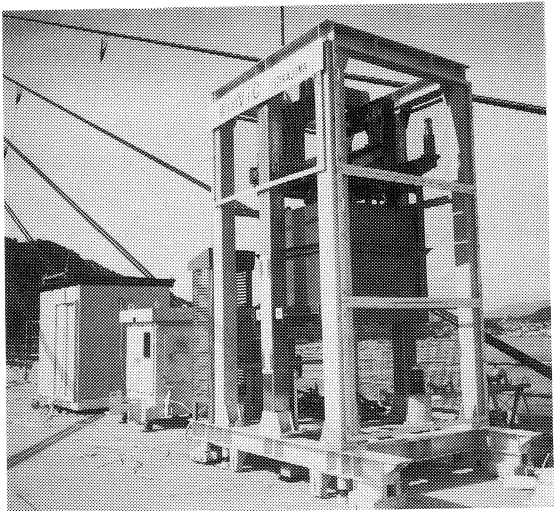


写真-1 制振装置の設置状況

加振振幅±3.8cmにおける主桁先端の振動波形を図-7に、また減衰定数を表-3に示す。非制振時における減衰定数、すなわち橋梁本体の1次モードの減衰定数は、主桁先端振幅が±3.8cmと±5.1cmのときそれぞれ0.78%と0.76%である。これに対し制振時の減衰定数はそれぞれ2.24%、2.00%であった。このことから、PC斜張橋の1次モードの減衰定数が約3倍に増加しており、制振装置が設計時の性能を有していることが確認された。

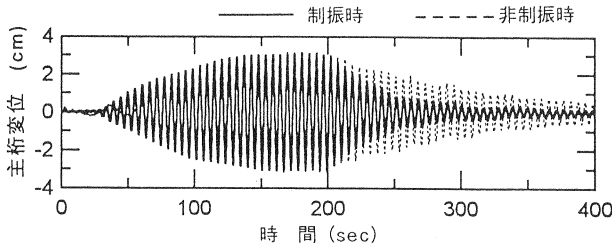


図-7 主桁の変位波形(加振振幅±3.8cm)

表-3 制振時と非制振時の減衰定数

加振振幅	非制振時	制振時
±3.8cm	0.78%	2.24%
±5.1cm	0.76%	2.00%

6. 風応答観測

制振装置を制振モードに保持したまま風観測を実施し、冬季の季節風によるPC斜張橋のガスト応答に対する制振装置の制振効果の確認を行った。制振装置が作動し始めるトリガー値は、主桁の変位で片振幅1cmである。また、計測は主桁変位がトリガー値を越えた後に10分間行った。計測した10分間の平均風速と主桁先端の振幅のRMS値を図-8に示す。

なお、制振装置を設置した主塔側では、非制振時の風観測を行っておらず、したがって非制振時の主桁応答値は、反対側の主塔で行った同じ張出し長における観測値を用いている。構造的には、両主塔とも同じであるが、風環境、観測時期などが、今回の観測値とは異なっている。

図-8より、風速が8m/secを越えるくらいの風速域では、制振装置により主桁の振幅が1/2~2/3に低減していることがわかる。本装置の可動マスの有効質量比は約0.6%と、一般の制振装置に比べれば小さいが、本装置の制振効果を確認することができた。

今回は、制振装置を片側の主桁上のみ設置したが、重量のバランスを図る上でも両方の主桁に設置する方が望ましく、また、この方が制振効果もさらに大きくなる。

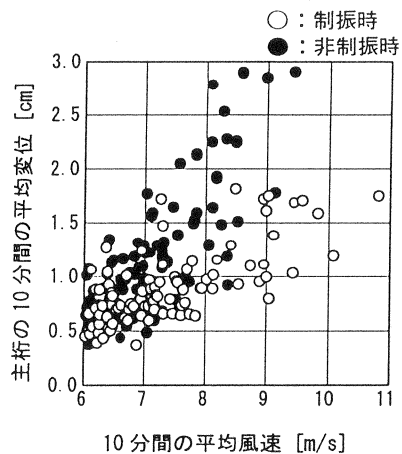


図-8 主桁振幅のRMS値

7. まとめ

張出し施工中のPC斜張橋のガスト応答の低減を目的とした制振装置を開発し、実際に施工中の長大PC斜張橋において制振効果を確認した。加振実験および風観測から以下の結論を得た。

- ・本制振装置により、PC斜張橋の1次モードの減衰定数を3倍にすることができた。
- ・本制振装置により張出し施工時の主桁のガスト応答を低減できることが、風観測により示された。

参考文献

- 1) 久我, 竹田他: 呼子大橋(PC斜張橋)の施工時耐風性観測, プレストレストコンクリート, Vol30, No.4, pp62~69, 1988年7月。
- 2) 田口, 上野他: 風応答観測データを用いたPC斜張橋施工時の主桁振動予測, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, 平成7年9月。
- 3) 大久保, 加納: 秩父橋の架設時耐風制振装置, 第16回日本道路会議論文集, pp623~624。