

多モードに対応した主塔制振装置の開発

Multi-Modes Vibration Control of Active Mass Damper
for the Suspension Bridge Tower

大森龍一郎*, 背戸一登**, 井上浩男*, 中田成幸***

Ryuichirou OMORI, Kazuto SETO, Hiroo INOUE, Shigeyuki NAKADA

* 三井造船(株)鉄構建設事業部技術部 (〒196 東京都昭島市つつじが丘1丁目1番50号)

** 日本大学理工学部機械工学科教授 (〒101 東京都千代田区神田駿河台1丁目8番)

*** 三井造船(株)技術本部玉野研究所 (〒706 岡山県玉野市玉原3丁目16番1号)

This paper describes the development and design of Active Mass Damper (AMD) system for the suspension bridge tower (2P tower of KURUSIMA BRIDGE). This tower was anticipated the wind induced multi modes (max 5-modes) vibrations in longitudinal direction happened during the rection of the bridge. The simulation and experimental model tests have been done to estimate the abilities the AMD system. The AMD has a linearly moving mass with a pendulum driven by an AC servo motor. A controller based on the LQ control theory using pseudo-inverse matrix with filter was designed for suppressing the vibrations of the tower of multi-modes while preventing spillover instability.

The performance of the AMD was confirmed by the experiments with actual tower and observed on wind induced vibrations have been carried out.

Key Word: vibration contorol, active mass damper, wind induced vibration

1. はじめに

柔構造物の制振対策は、構造物の長大化と設計法の洗練によって、ますます重要になってきている。さらに最近では、架設時の作業性を考慮して制振装置を搭載する例や、架設構造物等のように制振対象が日々変化していくものについて制振しなければならないケースも増えてきている。またコストの面からも、少ない台数で煩雑なハードの仕様変更をすることなく、簡単に多モード・広範囲の振動を同時に制振することの出来るアクティブ制振装置の開発が重要となってきている。

今回開発を行った制振装置は、本州四国連絡橋・尾道今治ルート由来島第一大橋2P主塔制振用である。来島第一大橋は、偏平六角形断面の箱桁を有し、隅切りを施した高さ106.45mの塔を持つ吊橋である。この主塔は、既往の塔と比較すると剛性が小さく軽量で、塔高も高くないため、架設段階から高振動数の渦励振が比較的低い風速で発生し、設計風速以下に制振を必要とするモードが多く入ってくることが予想された。また、塔の架設はタワークレーンを用いて行ったが、橋脚上の面積が小さいことから塔の近傍にクレーン柱が立つ形となり、塔柱を含めた3本柱の近接による空気力干渉の影響から、複雑な振動の発生も予想された。そこで、塔の風洞試験を行った結果、各架設ステップに応じて、数モードの面外方向の振動振幅が許容値を超えることがわかり、これらのモードで制振が必要との結論が得られた。また、面

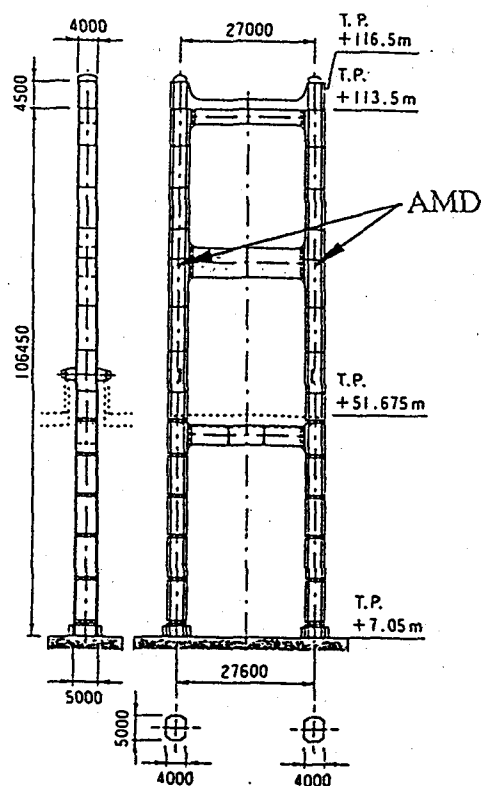


図1 来島大橋2P主塔概観図

内振動については、試験結果を検討したところ有為な振動は起こらないことが確認されたため、制振対象モードには入れないものとした。

さらに塔工事では、上部塔柱の継手に引張ボルト接合が採用されたため、塔外面足場は必要最小限しか設置されず、制振装置についても、その設置台数・盛替回数を最小限にすることが、経済性・安全性・景観上から求められた。

このような制振条件を勘案した結果、多モードの振動を、最小の台数で、同時に制振でき、構造的にも信頼性のある形式を採用したアクティブタイプの制振装置を開発することが、最も有効であるとの結論に達した。また、装置の開発にあたり、小型模型による制振実験と、実際の構造物に作用する不確定要素を含んだ乱流境界層中での多モード振動を再現し、その制振効果を確認する実験も実施した。

本論では、開発にあたっての問題点と実験結果の概要および設計・運用の方法について述べるものである。

2. 制振計画・設計

制振条件は、発生が予想される主塔の渦励振に対して、発現風速が作業限界風速(塔頂風速 16m/s)未満の場合には最大加速度を 50gal 以下に抑え、強風時(塔頂風速 16m/s 以上の非作業時)には塔柱 400gal 以下、クレーン

600gal 以下にするものとした。また制振装置の起動条件は、装置位置の加速度が 10gal を越えた時に起動するようにセットした。

制振対象モードは、架設ステップによっても異なるが最も多い場合には曲げ・ねじれ等 5 モードにわたり、振動数域も、0.23 ~ 1.67Hz の広い範囲にわたる。(図 2 参照)

主塔の振動を許容振幅以下に抑えるために必要な減衰は、風洞試験結果より求めた。その所要減衰に、モデル化・実験等の誤差に対する余裕を 20 %割増した値を設計所要減衰とし、これを制振装置によって付加するものとした。

制振装置の設置方向は、制振モードがすべて面外振動の卓越したモードであるため、橋軸方向とした。設置台数は、曲げ・ねじれの近接固有値対策として各塔柱対称位置に 1 台ずつ合計 2 台設置した。設置位置は、最小限の 2 台の制振装置で、制振を必要とするすべての曲げ・ねじれ振動に対応可能な位置であること、装置の規模が現実的であり、かつ盛替回数が最小になること、装置へのアクセスが容易なことなどを総合的に考慮して検討した結果、架設ステップ 3-3 で道路水平材上に装置を設置し、次に架設ステップ 4-3 (中間水平材架設前) で制振能力が不足するため、塔柱 10 段にブラケット架台を取り付けて盛替えることとした。

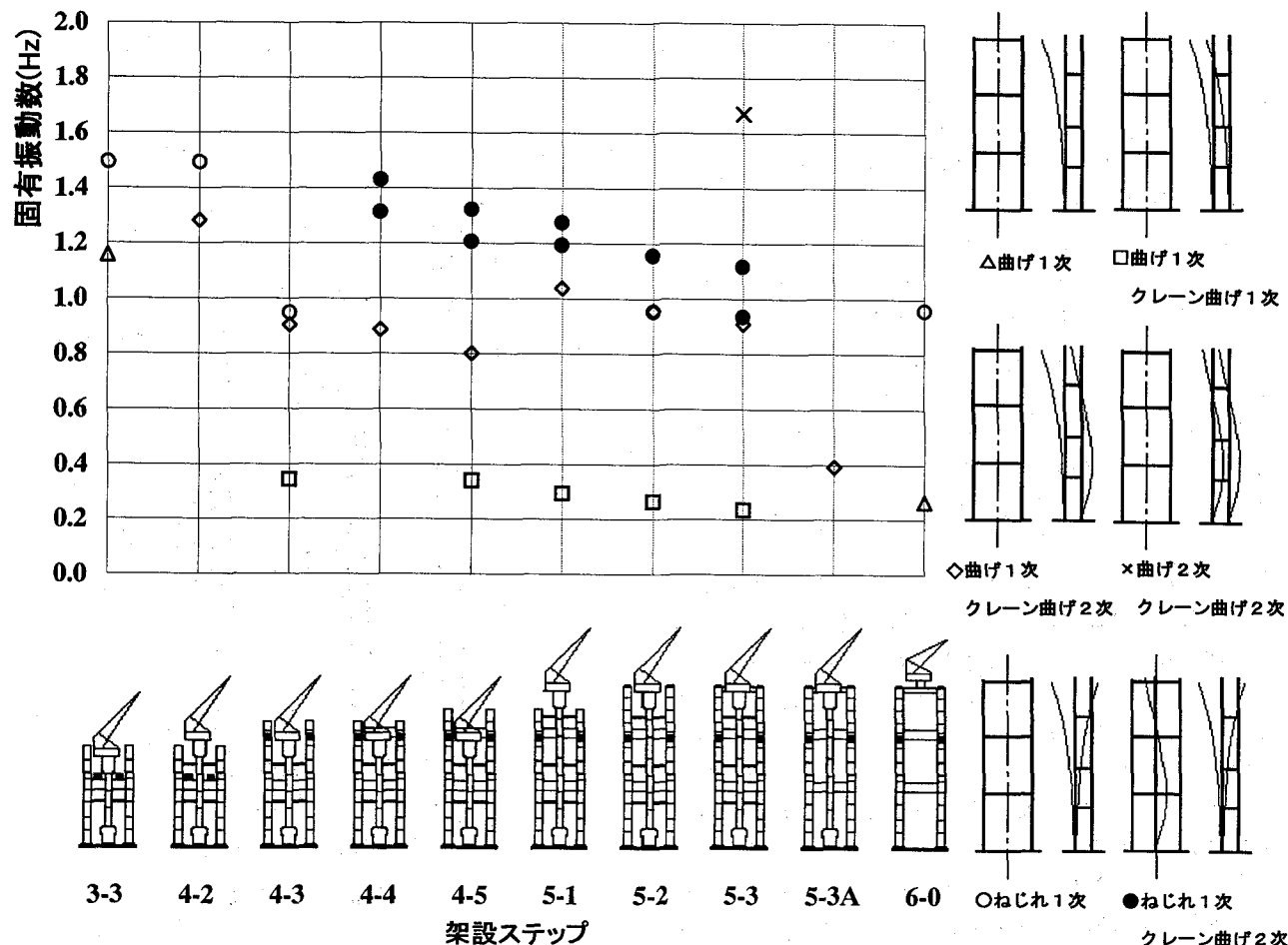


図2 制振対象モード

3. 模型試験

制振装置の開発に先立ち、装置の機械機構の挙動、制御理論の安定性、風による不規則な励振力に対する制振効果等を確認するために各種の模型試験を行った。

3.1 積層模型試験

機械機構の挙動についての検討と、制御プログラムが実機で用いられる時間領域でどのような問題を生じるかについての確認を目的として、実塔と同様な制振装置機構と時間領域で模型化を行い、試験を実施した。(図3)

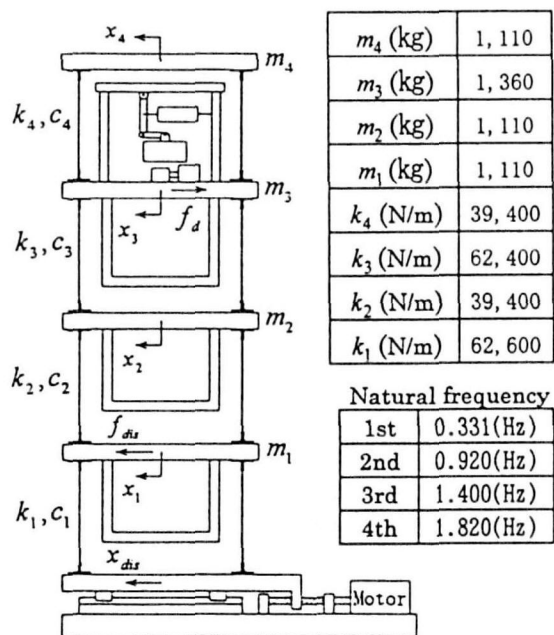


図3 積層模型概観図

模型は、主塔を模擬する制振対象構造物として、4層のマスを取ばねで積層し1方向の1～4次モードが卓越する柔軟構造物を製作した。各モードの固有周波数は、実橋のそれとほぼ一致させるように設計した。模型制振装置は、実機の制振装置と同様の構造的機構を再現して、縮尺1/5で模型化し、上から2層目のマス上に設置した。塔を振動させる励振力としては、模型構造を位置制御された加振台の上に載せることにより、風にかわる外乱力を受けられる構成とした。

試験は、加振台によって、塔模型に励振力を与え、それを模型制振装置で制振することによって行った。その結果、制振装置の挙動・制御システムの安定性・シミュレーションとの整合性等が確認され、実機の開発を行う上での問題点の抽出や、制御系の有効性や信頼性についての確認をすることができた。

3.2 風洞試験

風による不規則な空気力を励振力として振動している対象に対して、振動制御をすることにより、その制振効果や問題点について確認するために試験を行った。実験諸元については表1に示す。

表1 実験諸元

縮 尺	1/67	
塔 高	1.603 m	
振動数	f1	2.88 Hz
	f2	8.15 Hz
	f3	9.00 Hz

模型は、通常の塔の風洞試験と同様に3次元弾性模型を用いた。これは、塔の剛性は芯材である剛性棒で相似し、形状は外形材で相似したものである。この試験は、具体的な対象を持ったものではなく、一般的に特性を把握するために実施したもので、来島2P塔の振動諸元とは必ずしも一致させていない。

試験は、実際の風の状態に近い乱流境界層中で実施し、空気外力により模型が実際に混在モードで振動する状態を再現させ、その振動を剛性棒に取り付けた小型に模型化した制振装置で制御するという方法で実施した。ここでは、制振・非制振での応答特性を計測することにより、実際に不規則な風で振動している構造物に対して、制振装置がどのように作用するか等の制振効果の検討・確認を行った。制振の S-gain 及び L-gain とは、制御量に掛ける重み行列の値を変化させたもので、それぞれ小さい、重み、大きい重みを示している。

試験の結果のV-A図を図4に、計測時の波形データを図5に試験結果を示す。図5 a)の波形は、風速 1.5m/s 時の面外曲げ一次振動の加振後の非制振定常振動状態と、制振装置を作動させた場合の減衰波形を表しており、図5 b)の波形は、風速 4.8m/s 時のねじれ一次振動のゼロ発振からの非制振定常振動状態と、制振装置を作動させた後の減衰波形である。このように制振装置を作動させることにより振動は明らかに抑制されていることが判る。

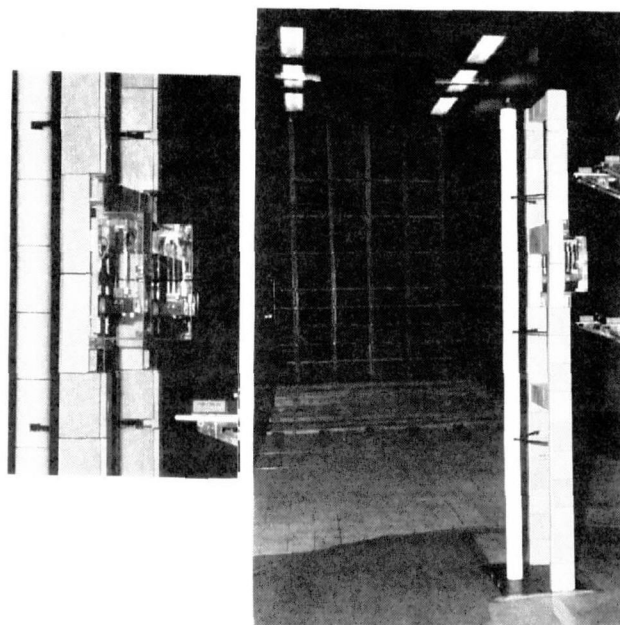


写真1 風洞試験状況

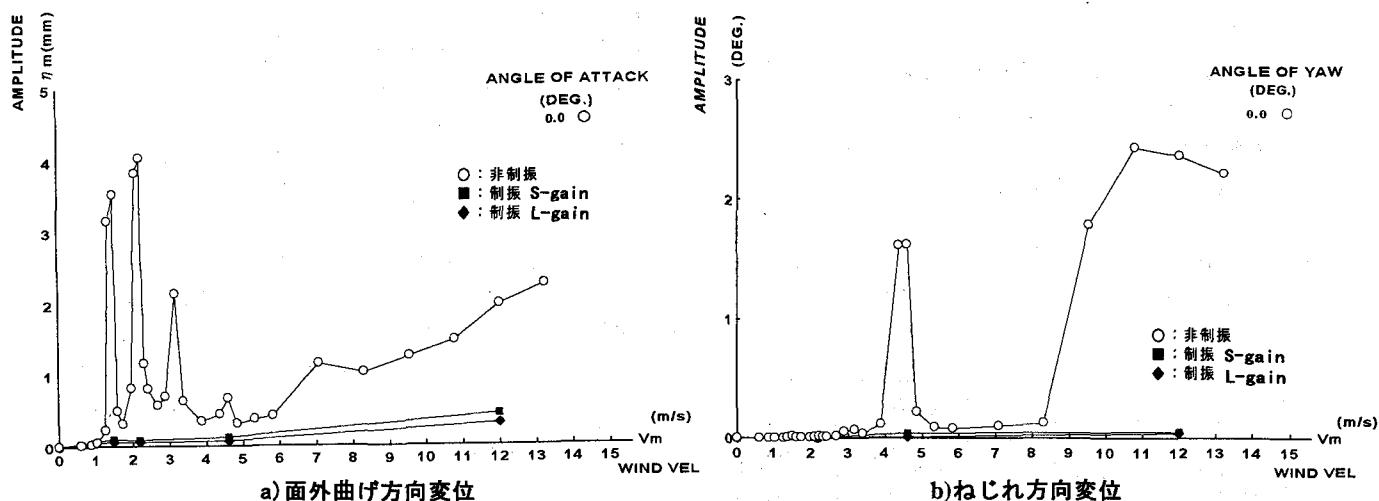


図4 風速応答振幅図

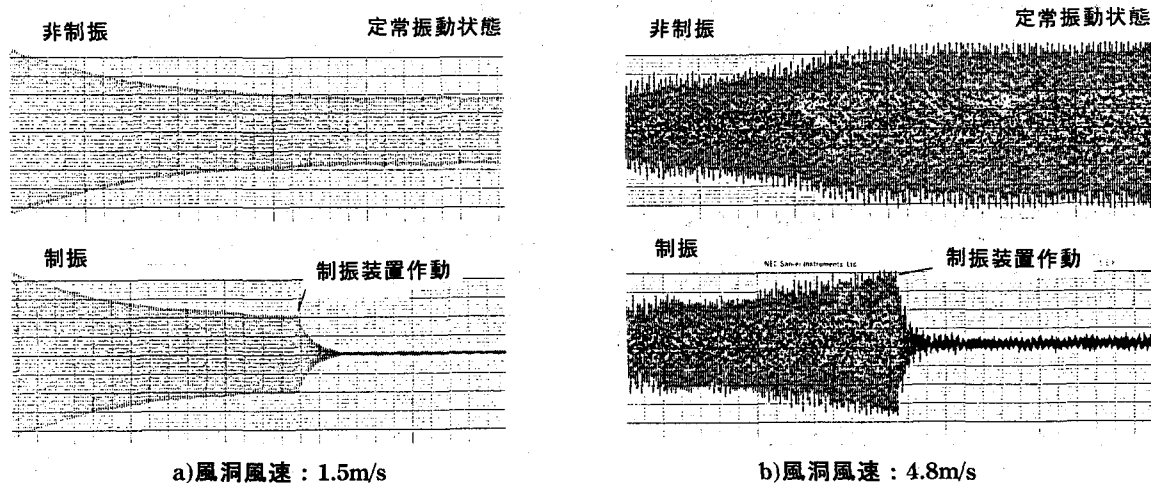


図5 制振効果

4. 制振システム

制振装置は、地上局と南北塔に取り付けられた制振装置から構成される。現場事務所に設置した制振装置地上局において、塔と制振装置の振動状態や風向風速等のすべての情報を得ることができ、制振装置に対する指令についても出すことが可能である。装置は、南北塔のそれぞれに1台ずつ設置されているが、そのどちらかが異常を起こして停止した場合は、片側のみでも制振可能なシステムとしている。

装置の形式は、重錘直動型ばね付きアクティブマスダンパである(図6)。特徴としては、リニアガイド上に据え付けられたマス(4.5t)を、ACサーボモータからラック&ピニオンを介して駆動し、マス上部にクランク機構を設けたばね付き振子を取り付けることにより、復元力のサポートをさせている。

安全面については、フェールセーフ機能により、制振装置と地上局を結ぶ光ファイバケーブルの断線にもループバックにより異常箇所を捕うように対応していることや、停電時には、無停電電源装置を用いて制御システムを維持し、非常電源が供給され次第、自動的に制振可能な状態に復旧するものとした。重錘が暴走した場合に

は、リミッターにより非常停止するものとしており、また、緊急時には、地上局、制振装置のどちらからでも緊急停止が可能としている。

また、装置が何らかの異常を示した場合には、電話回線を介して自動的に異常情報を送信する機能もつけている。

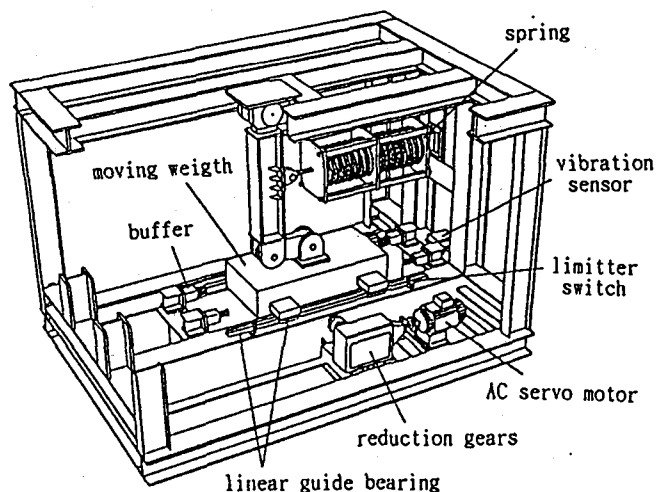


図6 制振装置概観図

制御に用いるCPUは、地上局・主塔側のそれぞれに配置され、相互監視を行うことにより、安全性を高める構成としている。それぞれの制振装置と地上局とはループを描く形で配線され、制御ラインの一つが断線等の異常を起こしたときは、ループバック機能により、異常を補うものとしている。装置を制御する制御理論には、安定性と信頼性の高い準最適レギュレータ制御を採用し、効果的な制振を行いつつ、スビルオーバー等の制御不安定現象を排除するものとした。また、簡単なソフトの変更により、 H^∞ 制御も可能とした。

表 2 制振装置諸元

重錘質量	4.5	tf/台
重錘許容振幅	± 0.3	m
装置固有振動数	0.577	Hz
適用周波数	0.234 ~ 1.670	Hz
モータ容量	AC サーボモータ 30kw/台	

塔の振動を検出するセンサーは、サーボ型速度計を使用し、安全側を考慮して、最大6個のセンサーを塔に設置するものとしたが、実設計では最もモードの多い架設ステップにおいても、4つのセンサーでも制御が不安定になることなく、十分な制振効果のあることを確認した。

5. 陸上試験

この試験は、装置の制御ソフト・ハードが所要の特性を持つことを確認することを目的としている。

ここでは、機械的な性能の確認はもちろんであるが、制御ノイズの除去や、擬似制振システムによる制御系設計及びシステム全体の妥当性の検討も行った。擬似制振システムとは、実機制振装置を用いて、まず一般化空気をファンクションジェネレータからの出力信号で模擬

し、塔の特性をパソコンでシミュレートしたものを入力し、センサー出力信号をパソコン内部で演算させ、そのセンサー出力模擬信号を実際の二台の制振装置に入力し、装置を実際に作動させ、その応答を重錘に設置した加速度計から検出し、塔モデルにフィードバックさせることにより、塔と制振装置の間で働く制振力を計算させるものである。

この結果、シミュレーションと実験結果の良い一致が見られ、制御系の妥当性及びシステム全体の有効性の確認ができた。

6. 作動試験

制振装置を実際の構造物に搭載し、制振装置作動試験を行うことにより、制振装置の性能確認を行った。

これは、制振装置自体を加振機として使うことにより、まず塔を振動させ、次に切り替えて制振装置として作動させた場合と、自由減衰させた場合を比較することにより行っている。この試験は、塔の架設初期から現在まで、十数段階にもわたって実施している。

現在までの状況では、設計値と同様な減衰を付加でき、問題なく所定の制振性能も満たしていることから、極めて良好に稼働していると思われる。また、試験的に制御ソフトを H^∞ 制御等に変更しての試験も行ったが、これについても良好な結果が得られている。

架設中に行った試験データを図7に示す。このステップでは、面外曲げ一次のモード(固有振動数 1.206Hz)が制振対象となっているが、自由減衰波形と制振作動波形を比較しても明らかなように減衰は増加しており、設計値とも良い対応であることから、制振性能の確認ができる。

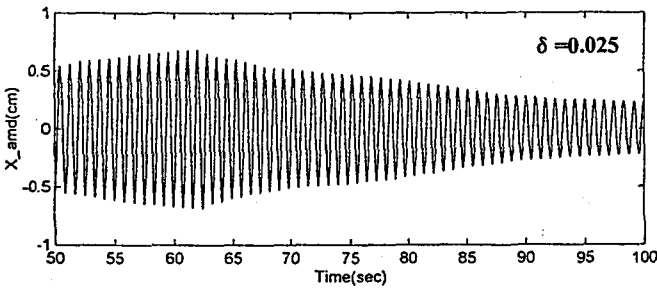


図 7 (a) 非制振時主塔変位

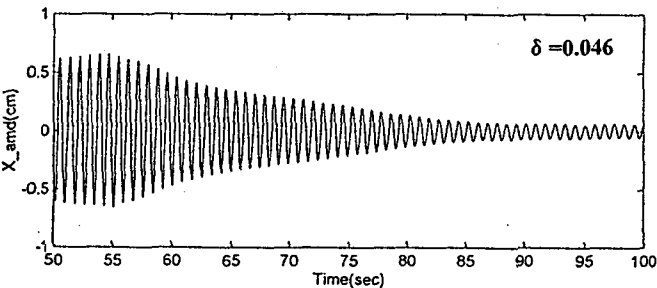


図 7 (b) 制振時主塔変位(準最適制御時)

表 3 構造減衰

制御手法	構造減衰率 δ
設計値	0.034
非制振	0.025
H^∞ 制御	0.049
準最適制御	0.046

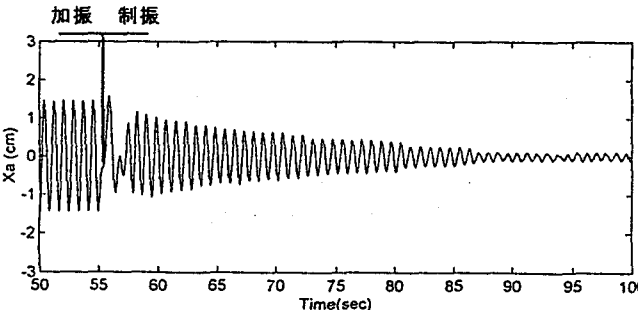


図 7 (c) 制振時重錘変位

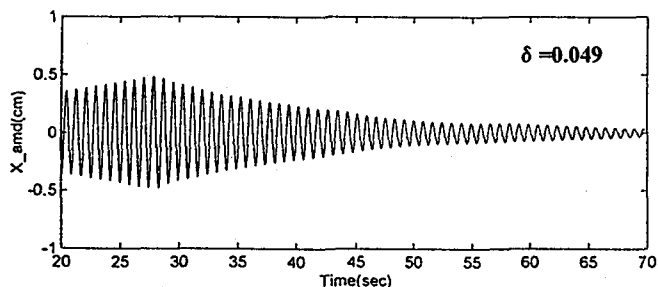


図 7 (d) 制振時主塔変位 (H ∞ 制御時)

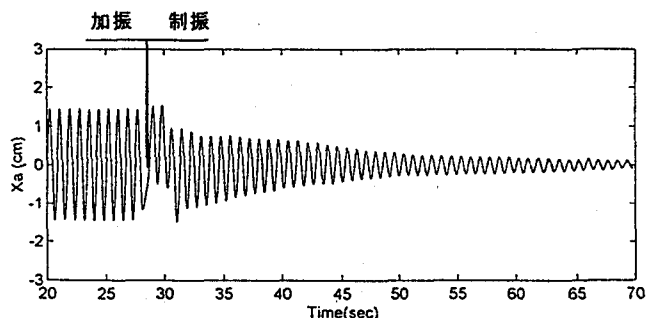
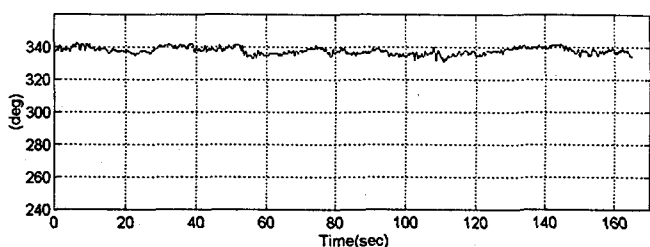


図 7 (e) 制振時重錘変位

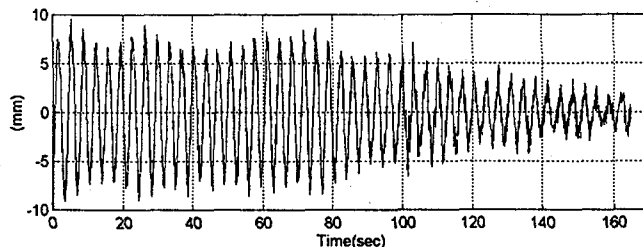
7. 観測結果

制振装置は、塔の加速度の平均値が 10gal を超えて起動すると同時に風速や塔の振動データを自動的にハードディスクに取り込むものとしている。制振装置搭載後から現在に至るまでに数度作動しているが、その中から塔

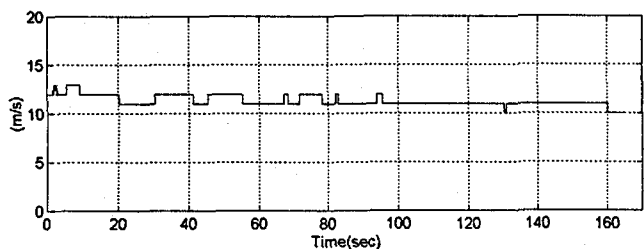
が渦励振で揺れたと思われるデータについて、図 8 に示す。波形から、制振装置が作動すると同時に塔の振幅が減少していく様子が読みとれる。



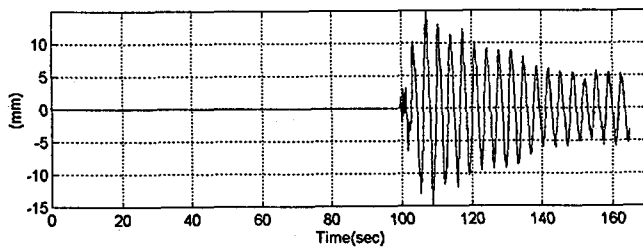
風向(deg)



塔振幅(mm)



風速(m/s)



重錘振幅(mm)

図 8 動態観測結果(1995.12 計測)

8. 総合評価

制振装置は予定通り、塔の架設時から搭載され、塔工事が進むにつれての、盛替、制御ゲイン調整等も順調に行われ、現在に至るまで、何のトラブルもなく、ほぼ設計通りの性能を発揮している。なお、塔の制振対策は、桁架設時まで実施する予定である。

今後の課題としては、より有効な制振制御システムの開発として、コンパクトな制振装置の開発、センサー数の最小化、制振性能の効率化等があげられる。

謝 辞

本研究は、本州四国連絡橋来島大橋 2 P 塔の制振対策の一環として検討を行った結果をまとめたものである。

ここに、貴重な検討のきっかけを頂いた本州四国連絡橋公団第三建設局の関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中田、久谷、井上 et al., 多モードを対象とする柔構造物のアクティブ制振, 日本機械学会 D&D'95、1995
- 2) 土井、背戸、井上 et al., 長大橋主塔模型構造物の揺れ制御の研究, 日本機械学会 D&D'95、1995
- 3) 背戸、大森、井上, 柔構造物の多モードアクティブ制振手法の基礎的研究, 第 50 回土木学会年次学術講演会論文集、1995
- 4) S.Nakada, K.Yamaguchi, R.Omori, et al., Multi-Mode Vibration Suppression of Active Mass Damper System for an Actual Suspension Bridge Tower, The Third International Conference on MOVIC、1996.

(1996 年 9 月 6 日受付)