

橋梁低周波振動のアクティブ制御に関する研究

長岡技術科学大学 学生員○長谷川 靖
 長岡技術科学大学 正会員 丸山 暉彦
 長岡技術科学大学 正会員 高橋 修
 長岡技術科学大学 正会員 川谷 亮治
 備前河ブリッジ 正会員 寺田 博昌

1. はじめに

近年、橋梁の長大化や交通量の増加によって、交通荷重に起因する橋梁本体からの低周波振動の発生が社会問題となっている。以前よりこの問題に対して、様々な制振方法の研究が行われている。本研究は、制振方法にアクティブマスダンパによるフィードバックコントローラを構成し、大型の模型橋に対して制振実験を行い、この方法における振動制御の有効性及び実橋への適用性についての検討を行った。なお、コントローラの設計方法として、制御の分野で用いられている最適レギュレータ法を、またフィードバック制御系の安定性判別法として、スモールゲイン定理¹⁾を用いた。

2. 制御系の構成

実験に用いた模型橋のモデリングにおいて、①同一の材質、一様な断面を持ち弾性変形のみが生じる、②両端単純支持されていると仮定し、モード解析法を用いると、次式が得られる。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = CX(t) + Du(t) \quad (2)$$

$$X = [\psi_1 \ \dot{\psi}_1 \ \psi_2 \ \dot{\psi}_2 \ \dots \ \psi_n \ \dot{\psi}_n \ x_n \ \dot{x}_n]^T \quad (3)$$

(3)式中 x_n , \dot{x}_n は、アクチュエータの動特性を表す状態量である。また A , B , C , D は係数行列で橋の諸元や周波数特性より同定する。なお本研究では、2次モードまでを良好に同定でき、これを制御モデルとした。

$$J = \int_0^{\infty} [X^T Q X + u^T R u] dt \quad (4)$$

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + C^T Q C = 0 \quad (5)$$

$$u = (-R^{-1}B^T P) X (=KX) \quad (6)$$

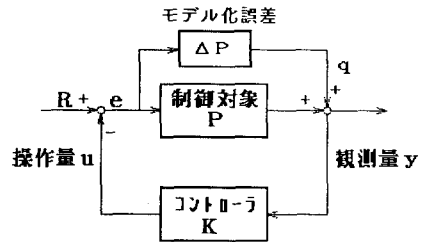
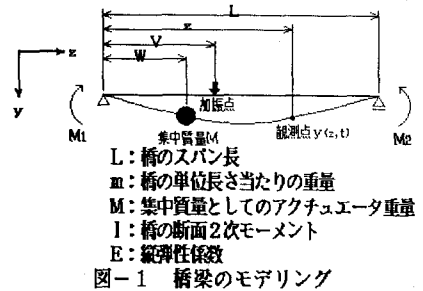
制御モデルに対し、(4)式の評価関数を最小にするような操作量 u を計算する。これは、(5)式のリカッチ型行列方程式の正定解 P を用いて、(6)式のフィードバック則から計算する。(4)式中、 Q は各状態量の重み行列であり、 R は操作量 u の重みとなる。特に Q の対角偶数項に大きな重みをつけることによって各振動モードの減衰力を増し、 R は操作量全体の大きさに影響を与えることができる²⁾。なお制御対象の状態量は、状態観測器によって推定する²⁾。

3. 制御系の安定性判別

コントローラ設計段階からスプillover問題を議論することは、良好な制御を行う上で重要である。本研究においては、スモールゲイン定理を基に、模型橋の周波数特性実測値と制御モデルの周波数特性との誤差を用いて制御系の安定性判別を行う。この方法は、制御対象を良好にモデル化できない場合においても、制御系の安定性を判別できる利点がある。図-2にモデル化誤差の考え方を示す。

4. 実験システムの構成

図-3に、本研究で構成した実験システム概略図を示す。本実験において制御対象に用いた模型橋は、スパン8mの鋼製I型鋼(2本)を溝型鋼で連結し、これを単純支持して構成している。



そのため、この模型橋は実橋を想定した柔軟性のある構造である。

$$\mathbf{X}_d(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_d(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{y}(k) \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_d(k+1) = \mathbf{K}_d \mathbf{X}_d(k+1) \quad (8)$$

この実験システムにおいて、図中のパソコン内に(7)、(8)式に示した離散時間系コントローラを実装し、観測量 $\mathbf{y}(k)$ を検出すると直ちに制御演算がなされ、操作量 $\mathbf{u}_d(k+1)$ が算出される。

操作量は、電磁式アクチュエータを介し、カウンターウェイト2Kgから最大100Nの慣性力を用いて制振を行う。この時、操作量算出は高次の行列演算を行なうため、演算速度を高める考慮を必要とする。今回構成した制御システムでは、高速なCPU(i386)を用いてサンプリングタイム500Hzでの制御を可能にした。また、1次～3次モードが良く観測できるスパン1/5地点にも加速度センサを設置し、この地点の出力を用いて制振効果の評価を行う。

5. 実験結果

図-4に模型橋のスパン1/4地点を打撃加振したときの自由応答を示す。この図は上段に打撃から2secの振動波形、下段にその周波数スペクトルを示す。打撃によって複雑な振動が励起され、1次～3次モードがそれぞれ9.0Hz, 33.5Hz, 77.0Hzで卓越している。

図-5に良好な設計例として、スパン1/4コロケーション制御を行うコントローラの安定性判別を示す。このコントローラは、2次モードモデルに対し、1、2次モードを積極的に低減させる目的で、最適レギュレータのQおよびRを設定している。この図より、モデリングの際に無視した高周波数帯全域において約-15~-20dB下回っており、制御系の安定性を確保している。

図-6に制御結果を示す。振動波形は0.5sec以内に収束し、振動スペクトルは1、2次モード共に-20dB以上の高い減衰効果を示している。またモデリングの際に無視した3次モード以上の周波数に対してスピルオーバーを励起させていない様子から、スピルオーバーに対してロバスト性の強いコントローラであることが伺える。

6. 結論

本研究の結果、アクティブコントローラによって柔軟な模型橋を良好に制振できた。これによって、最適レギュレータ法によるコントローラ設計の有効性及びスピルオーバーに対するロバスト性の強いコントローラを設計する上で、スモールゲイン定理を用いることの有効性も確認できた。今後の実橋への適用については、アクチュエータ出力の上限問題等の検討を必要とする。

なお、この研究を推進するにあたり有意義なご指導を頂いた長岡技術科学大学鳥居教授、矢鍋教授並びに池田助教授に御礼申し上げます。

参考文献 1) 木村英紀: LQGからH ∞ へ 計測と制御 Vol.29, No.2 1990年

2) 川谷亮治、鳥居邦夫、寺田博昌: 柔軟構造物の能動型制御におけるスピルオーバー対策 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集

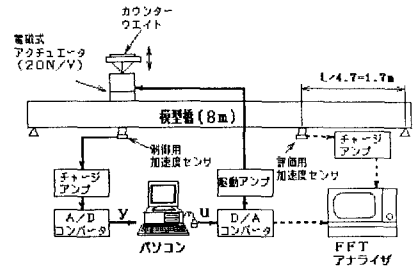


図-3 実験システム

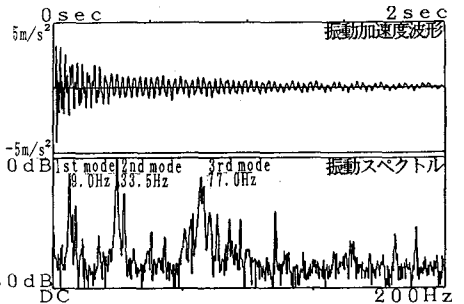


図-4 自由応答

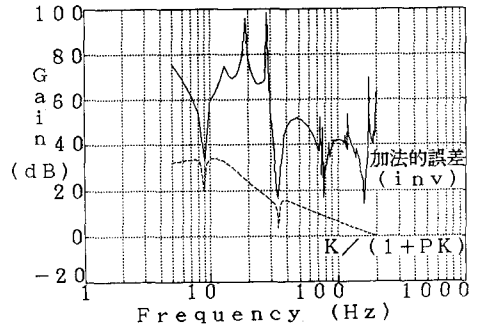


図-5 安定性判別

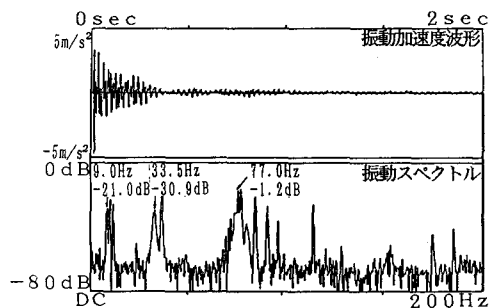


図-6 制御結果