

I-271

架設途中吊橋の能動制振への H^∞ 制御の応用

摂南大学 正 頭井 洋 ○ 摂南大学 学 山口 真弘
 神戸製鋼 上田 宏樹 神戸製鋼 三田村 武

1. 緒 言

長大吊橋では、主塔が高いため剛性が低くなり主塔独立時はもちろんキャットウォークが架設された後も渦励振による振動が生じ易い。著者らは、先にキャットウォークと塔の渦励振による共振に対する制振対策として、ストームケーブルの塔側端部をアクチュエータによりアクティブに制振した場合について最適レギュレータ理論に基づくフィードバック制御系(以下 QG 制御)を設計し、制振効果の検討を行った⁽¹⁾。その際、低次元化したオブザーバーでは、状態量を精度よく推定することはできず、同一次元最適オブザーバー(カルマンフィルター)を用いることにより LQG 制御の適用が可能になった。このように、LQG 制御では、モデルの低次元化に伴う打ち切り誤差や、モデルの線形化に伴う誤差に対する補償がなされていない。特に、制御対象となる固有振動数と制御対象とならない固有振動数が近接している振動問題では、制御対象とならない振動モードが励振されるスピルオーバーと呼ばれる不安定現象が生じやすい。

このような LQG 制御の欠点を補うロバスト制御法として H^∞ 制御法⁽²⁾があり、構造物の制振問題にも適用されつつある⁽³⁾。本文では、LQG 制御および H^∞ 制御法を塔・キャットウォーク系の渦励振による振動問題に適用し、制振効果の検討を行う。

2. 制御対象のモデル

対象としている連成振動は、塔が渦励振を起こした時の塔・キャットウォーク連成系の共振現象であり、構造や励振力の条件は文献(1)と同様である。

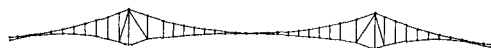


Fig-1. Tower and Catwalk Model under Construction

Fig-1 にモデルを示す。ただし、本文では、塔頂に AMD(Active Mass Dumper) を取り付けた場合を扱う。可観測な状態量として、塔頂部の水平変位、側径間中央のキャットウォーク上下変位、中央径間中央のキャットウォーク上下変位を想定した。

3. 運動方程式と状態方程式

最初に、有限要素法により Fig-1 の解析モデルにたいし、各ケーブル部材の無応力長さと自重を考慮して静的な釣合形状を求め、その後各ケーブルに導入された初期張力による剛性(幾何剛性)を考慮した固有振動解析を行う。比例減衰を仮定し、マスマトリックスと剛性マトリックスのモードシェイプとの直交性を利用すると、各次モード座標ごとに分離された運動方程式が得られる。制御対象となる 11 次を含む低次の逆対称モード 1,4,5,9,11,14,15 の計 7 個のモード座標に AMD を付加した運動方程式

$$\mathbf{M}_r \ddot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{C}_r \dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{K}_r \mathbf{q}_r = \mathbf{f}_c \mathbf{w} + \mathbf{f}_c \mathbf{u} \quad (1)$$

を作成する。ここで、 $\mathbf{q}_r$ はモード座標および AMD の変位、 $\mathbf{w}$ は渦励振による調和外力、 $\mathbf{u}$ は制御力である。制御系の設計のため、式(1)の運動方程式を状態方程式に書き直すと

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b} \mathbf{u} + \mathbf{d} \mathbf{w} \quad (2)$$

$$\mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_r \\ \dot{\mathbf{q}}_r \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_r^{-1} \mathbf{K}_r & -\mathbf{M}_r^{-1} \mathbf{C}_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}_r^{-1} \mathbf{f}_{cr} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_r^{-1} \mathbf{f}_{cr} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

状態量を推定するためのオブザーバーに関する観測方程式は、

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_r \mathbf{x}_r \quad (4)$$

4. H^∞ 制御器の作成

H^∞ 制御では、制御対象モード以外のモード座標を除いた低次元化したモデルに対し制御器の設計を行う。まず、ロバスト安定を補償するための重み関数 $\mathbf{W}_1(s)$ と制御重み関数 $\mathbf{W}_2(s)$ を設定する。 $\mathbf{W}_1(s)$ は低次元化されていないフルオーダーモデルの応答値から低次元化されたモデルの応答値を差し引いた加法誤差を覆うように周波数領域で設定する。 $\mathbf{W}_2(s)$ は制御対象外の周波数領域で大きくなるように設定する。つぎに式(4)の関係を使い、 $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$ を時間領域に変換した $\mathbf{A}_{wi}, \mathbf{B}_{wi}, \mathbf{C}_{wi}, \mathbf{D}_{wi}, (i=1,2)$ を求める。

$$W_i(s) = C_{wi}(sI - A_{wi})^{-1}B_{wi} + D_{wi} \quad (5)$$

H^∞ 制御における一般化プラントの伝達関数の各要素はつぎの式になる。

$$C_r = \begin{bmatrix} A_{w1} & 0 & 0 & 0 & B_{wi} \\ 0 & A_{w2} & B_{w2}C_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_r & D_r & B_r \\ C_{w1} & 0 & 0 & 0 & D_{wi} \\ 0 & C_{w2} & D_{w2}C_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_r & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(5)より H^∞ 制御器 $H(s)$ を求める。実際に使用する際は、時間領域で表した A_H, B_H, C_H を使用する。

$$H(s) = C_H(sI - A_H)^{-1}B_H \quad (7)$$

H^∞ 制御器の時間更新、観測更新のアルゴリズムは、それぞれ式(8),(9)である。

$$\dot{x}_H = A_H x_H + B_H y \quad (8)$$

$$y = C_H x_H \quad (9)$$

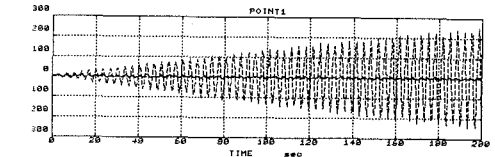


Fig-2. Time historical response on the LQG control case

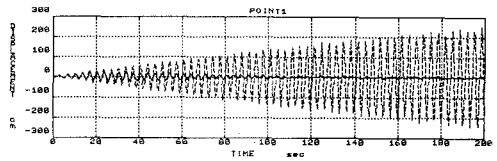


Fig-3. Time historical response on the H^∞ control case

5. 数値計算

サンプリング周期は0.05秒とし、励振力としては左右の塔頂に片振幅100kN、周期3.37秒(周波数0.297(Hz))に相当の正弦波を逆位相で入力する。Fig-2に、制振を行わない場合の応答解析結果を破線で、LQG制御による制振を行った場合の応答を実線で示す。応答の代表値として、側径間中央の鉛直変位を示している。 H^∞ 制御を行った場合の応答をFig-3に示す。Fig-2と同様、制振を行わない場合の応答解析結果を破線で示している。

どちらも、よく制振されているが、LQG制御では低次元化モデルを用いた場合、スピルオーバーのために制振できず、フルオーダーモデルを用いている。これにたいし、 H^∞ 制御では、制御対象モデルのみの低次元化モデルを用いており、制御器の設計にかなり有利になる。

6. 結 言

本研究は長大吊橋におけるキャットウォークと塔の渦励振に対する制振対策として、塔側頂部にAMDを設置した場合の制振効果の検討を数値計算によって行い、以下に示すことが確認された。

- (1) LQG制御では、低次元化モデルを用いるとスピルオーバーが生じ、同次元の最適オブザーバー(カルマンフィルタ)を用いることにより、制御モードの状態量を正確に推定でき、十分な制振効果が得られた。
- (2) H^∞ 制御では、制御対象モデルのみの低次元化モデルを用いても十分な制振効果が得られ、LQG制御に比べ制御器の次数および制御力の計算時間をかなり低減できた。

H^∞ 制御の設計はやや面倒であるが、ロバスト制御法としてその効果は大きいといえよう。

本研究ではモード座標における検討であるが、モード連成の効果や高次モードの影響を考慮した直接積分法による非線形動的応答解析を行い制振効果の検討を行う予定である。

文 献

- (1) 頭井他:吊橋の塔キャットウォーク系の渦励振による共振現象に対する能動制振の検討,土木学会,振動に関するコロキウム講演論文集,1991
- (2) 三平他:状態空間論による H^∞ 制御の解法,計測と制御,vol.29,No.2,1990
- (3) 野波他:アクティブ動吸振器を用いた多自由度構造物の H^∞ 制御,機論,vol.28,No.548,1992