

I-275 H_{∞} 制御理論に基づく橋梁主塔の能動制振装置の設計について川崎重工業 正員 坂井藤一, 高枝新伍, ○玉木利裕
西 義和, 村井謙一, 加賀谷博昭

はじめに 吊橋や斜張橋の架設段階では架設完了後に比べて剛性が小さく、風による振動が架設工事の安全性の点から問題になることがあり、これを抑制するために種々の制振装置が考案され、一部のものは実際の架設工事に適用されている。橋梁の架設工事では、対象構造物の動特性が工事の進行とともに大幅に変化するため、制振装置もその変化に対応できることが望まれる。この点からも能動制振が盛んに研究され、ロバスト制御も試みられるようになってきている¹⁾。著者らは実際の橋梁主塔を想定して、その力学的相似模型に H_{∞} 制御理論^{1, 2)}に基づくアクティブおよびハイブリッドの制振装置を設置し、制振効果を検証する実験を行った^{3, 4)}。本論文では主に制振装置の制御系設計について述べる。

1. 制振対象と実験装置 実際的な大型橋梁の主塔を想定し、その面外曲げ1次、2次モードを対象として縮尺1/12の力学的相似模型を図-1に示すような2重振り子方式で作製した。本装置は支持点をサーボモーターおよびボールネジで駆動することにより、任意の波形で加振できる。制振装置は主塔頂部に相当する構造物模型の下段に設置した。

アクティブ制振装置（図-1）はトルク制御型のACサーボモーターおよびボールネジにより重錘を直線駆動しその反作用で制振力を得るものである。また、ハイブリッド制振装置（図-2）は倒立振り子にバネ・ダンパーを設けこれをACサーボモーターにより駆動するものである。

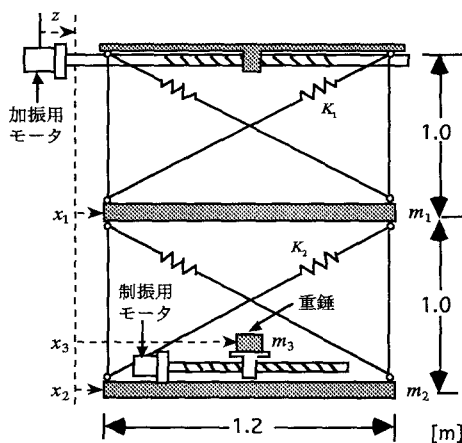


図-1 構造物模型とアクティブ制振装置

2. 制御対象のモデル化

図-1の構造物模型に対し、加振機基準位置を原点とする絶対座標 $r = [x_1 + z, x_2 + z, x_3 + z]^T$ を定義し、 $\dot{x} = [\dot{r} \quad \dot{r}]^T$ として(1)式の状態空間モデルが得られる。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + E_1 \dot{z} + E_2 z \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{k_T}{m_2} & -\frac{k_T}{m_3} \end{bmatrix}^T$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{C_1}{m_1} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{K_1}{m_1} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{K_2}{m_2} & -\frac{K_2}{m_2} & 0 & \frac{C_2}{m_2} & -\frac{C_2 + C_3}{m_2} & \frac{C_3}{m_2} \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} -\frac{k_T}{m_2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

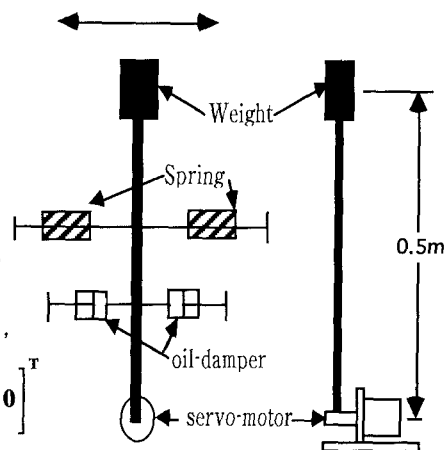


図-2 ハイブリッド型制振装置

M, C, K, k_T は質量，減衰，剛性マトリクス，トルク定数である．個々のパラメータは表－1に示す．

表－1 モデルのパラメータ（単位 m:kg, C:Ns/m, K:N/m, k_T :Nm/V）

	m_1	m_2	m_3	C_1	C_2	C_3	K_1	K_2	K_3	k_T
アクティブ制振装置	270	204	4.25	11.5	5.0	0.1	8450	64800	0	7
ハイブリッド制振装置	270	240	4.75	11.5	5.0	3	8947	75860	76	7

3. ループ整形設計手順による制御系の設計

MacFarlane, Glover²⁾らによって提案されたループ整形手順を適用して，次のように制御系を設計する．

- 1) 制振目的：特に1次モードの制振に着目し，対数減衰率で0.1以上に増大する．さらに制振装置のストロークやモータの定格を満足し，加速度計のドリフトやノイズの影響を受けない制御系とする．
- 2) ループ整形：制御目的を達成するために，(2)式に示す整形関数を考え，図－4のような拡大プラント系 $G_w = W_p G_{nom}$ を構成する．ただし $G_w = C(sI - A)^{-1}B + D$ である．この時， G_w に対する最大安定マージンはアクティブ，ハイブリッド制振装置でそれぞれ $\varepsilon_{max} = 0.345, 0.358$ であり，この整形関数は適当であると言える．

$$W_p = \begin{bmatrix} W_1 & 0 \\ 0 & W_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

$$W_1 = \frac{3(s^2 + 50s + 50^2)}{s^2 + 3s + 4^2}, W_2 = \frac{300(s^2 + s + 1)}{s^2 + 0.02s + 0.02^2}$$

アクティブ制振装置

$$W_1 = \frac{5000}{s^2 + 3s + 4^2}, W_2 = \frac{200(s^2 + s + 1)}{s^2 + 0.02s + 0.02^2}$$

ハイブリッド制振装置

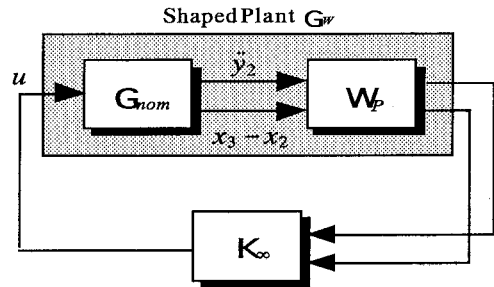
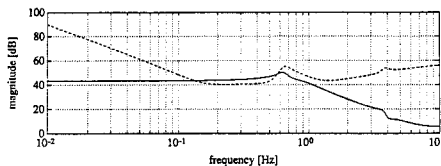
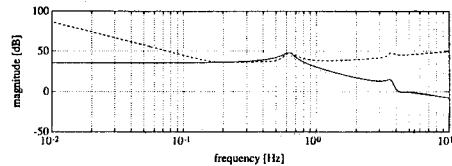


図-4 ループ整形

- 3) 最終コントローラ：拡大プラント G_w に対する安定化コントローラ K_∞ より，14次の最終コントローラ $K_\infty W_p$ が得られる．制振装置のコントローラの伝達関数を図－5に示す．



アクティブ制振装置



ハイブリッド制振装置

図－5 最終コントローラ $K_\infty W_p$ のボード線図

おわりに 本論文では H_∞ 制御理論による制振装置設計について述べた．本装置の振動実験による検証については文献[3,4]に示されている．

【参考文献】 1) 川谷，松嶋：正規化既約分解表現に基づく橋梁のロバスト制振制御，システム制御情報学会論文誌，Vol.6, No.1, pp48-56, 1993. 2) D.C.McFarlane and K.Glover: Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 138, Springer Verlag, 1990. 3) 西，村井，加賀谷，坂井，高枝，玉木： H_∞ 制御理論に基づく橋梁主塔の振動制御，計測自動制御学会学術講演会，1993. 4) 坂井，高枝，玉木，西，村井，加賀谷： H_∞ 制御に基づく橋梁主塔の能動制振装置の模型実験による検証，土木学会年次大会講演概要集，第I部門，1993.