

歩行者による歩道橋振動のアクティブコントロール

長崎大学工学部 学生員○岡部 雅彦

長崎大学工学部 正員 岡林 隆敏

オリエンタル建設(株) 正員 角本 周

1. はじめに

近年、構造が単純な点と曲線が優しいという景観的な点から、吊り床版橋の架設事例¹⁾が増加しつつある。この構造形式は、普通の橋梁に比べて重く、特に振動を励起するものではないとされているが、最近では、長径間にする傾向にあり、振動対策が必要になる場合が考えられる。本研究では、吊り床版橋の垂直外力による曲げ振動に対する、アクティブ振動制御の有効性を検討したものである。吊り床版橋では、限られた周波数域に、多くの固有振動数を有する。特定の振動数を対象に、振動制御を行なう技術は、アクティブ振動制御を行うための課題である。ここでは、レギュレータ理論、オブザーバ、カルマンフィルタを用いた振動制御について報告する。

2. 構造系の方程式

制御の対象は、橋長63.0m、総重量122.3tの吊り床版橋である。ここでは、制御則として、図-1のように、レギュレータ理論、オブザーバ、カルマンフィルタを用いた。

図-2に、振動モードと振動数を示した。

点線は、有限要素法による結果で、これをフーリエ級数により、次のように内挿した。

$$\phi_i(x) = \sum_{k=0}^n (a_{ik} \sin \Omega_k x + b_{ik} \cos \Omega_k x)$$

$$\Omega_k = k\pi/L$$

x点の変位応答は、基準座標 $q_i(t)$ と振動モード $\phi_i(x)$ により、

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n \phi_i(x) q_i(t)$$

で与えられる。基準座標は、次のような状態変数を用いると、

$$\mathbf{X}(t) = [q_1(t) \cdots q_n(t) \dot{q}_1(t) \cdots \dot{q}_n(t)]^T$$

次の状態方程式で記述することができる。

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}_1 \mathbf{F}(t) + \mathbf{B}_2 u(t), \mathbf{X}(0) = 0$$

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t)$$

構造物を5次振動まで考慮し、制御対象は3次振動までとして、計算を行っている。

3. 各種の制御理論による振動制御

a) 最適レギュレータ

全状態量がフィードバックできるとして、制御力を次式で表わす。

$$u(t) = -\mathbf{K}\mathbf{X}(t)$$

フィードバックゲイン行列は、次式より計算できる。

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_2^T \mathbf{P}$$

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{Q} - \mathbf{P} \mathbf{B}_2 \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} = 0$$

b) オブザーバを用いた場合

図-1(b)のようにb点の変位と速度のみが観測できるものとする。

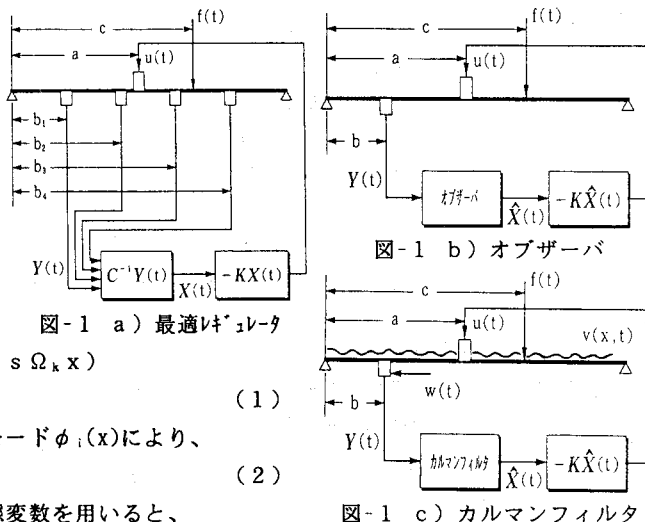


図-1 b) オブザーバ

図-1 c) カルマンフィルタ

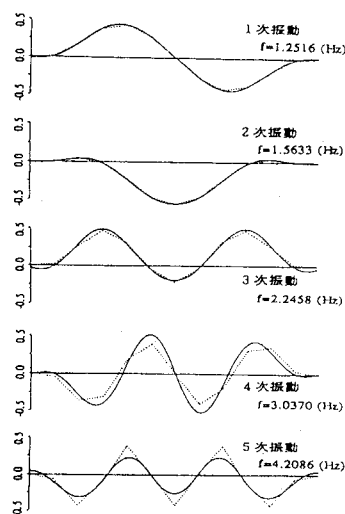


図-2 振動モード

全次元オブザーバを構成すると、状態量 $\mathbf{X}(t)$ は、次式で推定できる。

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) = & \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}_1\mathbf{F}(t) + \mathbf{B}_2\mathbf{u}(t) \\ & + \mathbf{G}\{\mathbf{Y}(t) - \hat{\mathbf{Y}}(t)\}\end{aligned}\quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{Y}}(t) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t)\quad (9)$$

ここに、 $\mathbf{Y}(t) = [y(b, t) \ \dot{y}(b, t)]^T$ である。ここで求められた $\hat{\mathbf{X}}(t)$ を、(5)式の $\mathbf{X}(t)$ の代りに用いて制御を行う。

c) カルマンフィルタを用いた場合

構造物に作用する風や、計測器の雑音により、制御系に雑音が入り込む。このような系の挙動を推定するものが、カルマンフィルタである。カルマンフィルタの式は(9)式と同じ式になる。オブザーバでは、ゲインマトリックスを極配置²⁾により決めるのに対して、カルマンフィルタでは、リカッチの方程式²⁾により求める。

4. 数値解析と考察

これらの理論による制御の効果を検討するために、周波数応答関数と自由振動による時間歴応答の計算をした。オブザーバ設計のための極は、 $\lambda_1 = -1.57 \pm 7.70i$ 、 $\lambda_2 = -1.96 \pm 9.62i$ 、 $\lambda_3 = -2.82 \pm 13.82i$ 、としている。

図-3と4で、破線が制御なし、実線が最適レギュレータとオブザーバによる制御をかけた場合である。各振動数の応答が低下しているが、特に1次振動の低下が著しい。アクチュエータは1個の場合を考えているので、設置場所によって応答は変化する。オブザーバを用いることによる制御の劣化は、認められないようである。

図-5と6は、自由振動の時の制御の効果を調べたものである。図のように、減衰が大きくなり、急激に減衰している様子を見ることができる。オブザーバを用いた場合と用いていない場合の差は現われていない。

歩行者を荷重と考えた場合、カルマンフィルタの計算結果は、講演時に報告する。今後、 H_∞ 制御理論による検討が必要となる。

5. まとめ

吊り床版橋の振動制御のために、基礎的な制御則を適用して、制御効果を調べた。その結果、オブザーバを用いても、制御効果の劣化は認められなかった。実際の制御では、少ない加速度計で各次の状態量を推定する必要があるため、オブザーバの適用は必要となる。

[参考文献] 1) 梶川康男・津村直宜・角本周：PC吊床版歩道橋の振動とその使用性、構造工学論文集、Vol. 36A, pp. 685-695, 1990年。2) 白石昌武：入門現代制御理論、啓学出版、1987年。

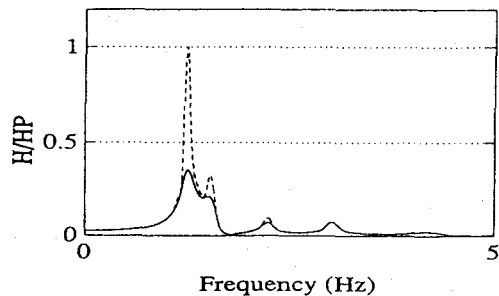


図-3 周波数応答関数 (最適レギュレータ)

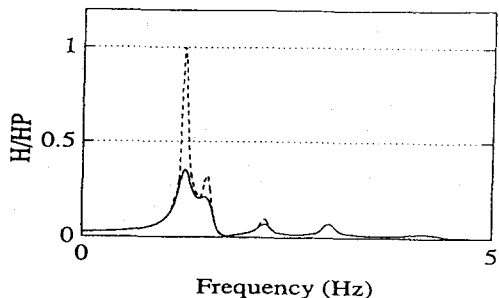


図-4 周波数応答関数 (オブザーバ)

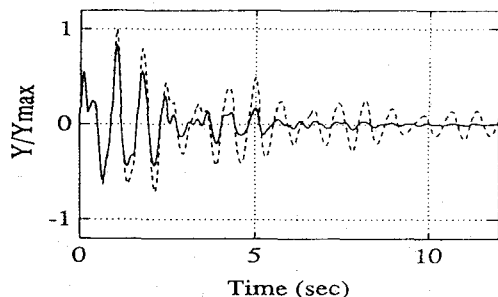


図-5 変位応答 (最適レギュレータ)

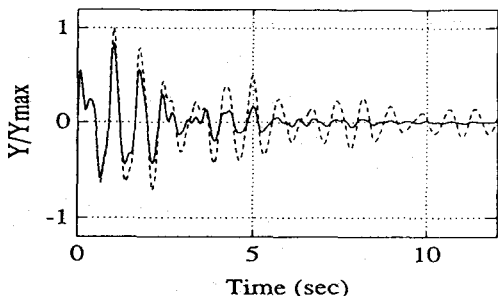


図-6 変位応答 (オブザーバ)