

I-435

塔状構造物のアクティブ制振における制御則について

北海道大学工学部 正員 小幡 卓司
 北海道大学工学部 学生員 下田 和敏
 京都府 藤井 和宏
 北海道大学工学部 正員 林川 俊郎
 北海道大学工学部 正員 佐藤 浩一

1. まえがき

近年、土木構造物においても吊橋や斜張橋の主塔をはじめとして、地震や風に起因する振動を制御装置を付加することにより制御しようとする研究が盛んに行われている。この制振方法にはパッシブ制御とアクティブ制御に大別することができるが、比較的不規則な外力を受ける土木構造物については、ある程度広範囲の振動数に応じた制振効果を期待できるアクティブコントロールが有利な場合が多いと思われる。

アクティブ制振において重要な問題は、制御理論とリアルタイム制御を行うための演算時間である。そこで、本研究では制御理論に関して検討を加えるため、すぐれたロバスト性を有するが、メンバーシップ関数、制御規則の設計が難しいと言われている Fuzzy 制御理論と、ロバスト性に関しては Fuzzy 制御ほどではないが、システムの設計方法が理論的に確立されている最適レギュレータを用いた状態フィードバック制御を用いて、塔状構造物の制振に関する数値シミュレーションを行い、その有効性と特性について比較し、検討したのでここに報告するものである。

2. 構造物のモデル化と時刻歴応答解析

本研究では、図-1のような3層の塔状構造物を想定し、その構造物を3質点系にモデル化し、解析を行うこととした。図-1に構造物の一般図を示す。

一般に多自由度系の運動方程式は、式(1)の様に表すことができる。

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} + \{U(t)\} \cdots (1)$$

M : 質量マトリックス C : 減衰マトリックス

K : 剛性マトリックス $F(t)$: 外力ベクトル

$U(t)$: 制御力ベクトル

ここで、 $U(t)$ は各制御理論によって求められた時刻 t における制御力ベクトルである。多自由度系の時刻歴応答解析にはニューマークの β 法を採用した。時間刻みは 0.01(sec)、 β に関しては $\beta = 0.25$ とし、減衰マトリックス C には Rayleigh 減衰マトリックスを用いた。

3. 解析理論

3-1 最適制御理論(最適レギュレータの設計)

一般に最適制御理論による制御システムは式(2)、および式(3)のように表すことができる。

$$\frac{d\{\dot{X}_s\}}{dt} = [A]\{X_s\} + [B]\{U_s\} \cdots (2) \quad \{X_s\}: \text{状態ベクトル} \quad \{U_s\}: \text{制御ベクトル}$$

$$\{Y_s\} = [D]\{X_s\} \cdots (3) \quad [A]: \text{システム行列} \quad [B]: \text{制御行列}$$

$$\{U_s\} = -[F_s] \cdot \{X_s\} \cdots (4) \quad \{Y_s\}: \text{出力ベクトル} \quad [D]: \text{出力行列}$$

$$J_d = \sum_{i=0}^{\infty} (X_s^T Q_d X_s + U_s^T R_d U_s) \geq 0 \cdots (5) \quad [F_s]: \text{フィードバックゲイン}$$

$$[Q_d], [R_d]: \text{重み行列}$$

ここで、式(2)は状態方程式、式(3)は出力方程式と称されるものである。式(2)中の状態ベクトル $\{X_s\}$ は、ある時刻 t における各層の変位、速度を表し、制御ベクトルは制御力そのものを表す。制御力 $\{U_s\}$ は状態ベクトルとフィードバックゲインの積で表され、式(4)によって求められる。一般に、最適レギュレータの設計法では式(5)のような評価関数が最小になるように、式(4)中のフィードバックゲイン $[F_s]$ を求める。なお、制御力の最大値は 6.0 N と設定した。

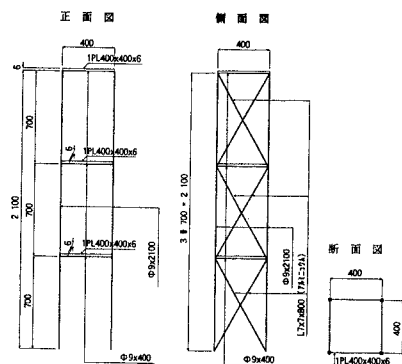


図-1 構造物一般図

3-2 Fuzzy 制御理論

まず、制御規則は各層の応答速度、応答加速度ならびに制御力をパラメータとした前件部2変数、後件部1変数からなる直接法による Fuzzy 推論を採用した¹⁾。本研究では以下のような推論規則例を25組設定し、解析を行った。

規則例：もし加速度が負で、速度が負ならば、制御力は正で大

IF a is A and v is V THEN u is U

A, V, U : 加速度, 速度および制御力の Fuzzy 集合

図-2(a)に加速度および速度のメンバーシップ関数を、図-2(b)に制御力のメンバーシップ関数を示す。また、表-1は今回用いた25規則の場合の規則表である。

なお、Fuzzy 関係の合成法には $\max$ - $\min$ 合成を、確定値の計算には重心法を用いている。また、観測された状態量に対する制御力の発生感度の調整を行うために $|v_{MAX}|$ 、 $|a_{MAX}|$ を変化させ、それぞれの振動モードに対応したメンバーシップ関数を設定した²⁾。また、制御力の最大値は最適制御と同様に $F_{MAX} = 6.0$ N に設定した。

4. 解析結果

前述のような2つの制御理論を用いて、表-2に示すような12ケースについて時刻歴応答解析を行った。表-2における“上層制御”“中層制御”および“下層制御”とは、制御力の作用位置を表している。また、“自由振動”における“1次卓越”等においては1次～3次モードが卓越するような初期変位を設定し、その際の応答を解析した。“強制振動”に用いた入力地震波については1993年1月15日に発生した釧路沖地震の際に千代田大橋において観測された橋軸方向の加速度応答波形を最大加速度100.0(gal)として使用することとし、解析には主要動部分のみを用いた。図-3(a)、(b)に解析結果の一例として、最適制御とFuzzy制御により中層に制御力を作用させた場合の応答変位を示す。なお、図中の細線は無制御時の応答変位を表している。図-3より両者とも制御時にはかなり振動が抑制されていることがわかる。

5. あとがき

以上のように本研究は、アクティブ振動制御における最適制御理論とFuzzy制御理論の両方により数値シミュレーションを行い、その有効性と特性について比較検討を加えたものである。

地震力を受ける構造物にアクティブ制振を行う場合、Fuzzy制御、最適制御ともに、かなり変動振幅が低減され、また同程度の効果が発揮し得ることわかった。自由振動に対する制振効果は、両理論とも約5秒程度で急速に振動が抑制された。しかしながら、両理論についてわずかながらの制振特性の差異が認められた。最適制御の場合、自由振動の応答値には指数関数的な減衰効果が認められ、制御力の発生履歴はその応答変位特性に類似する傾向があると思われる。一方、Fuzzy制御を用いたときの自由振動に対する制振特性は、応答値の減衰過程が直線的であり、制御力の発生履歴はその応答加速度特性に類似する傾向があると思われる。

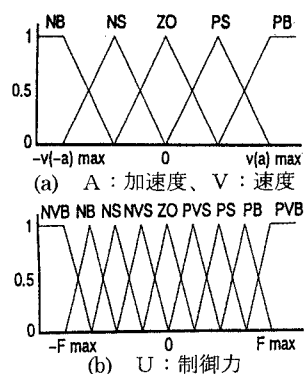


図-2 メンバーシップ関数

表-1 規則表

	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PVB	PVB	PB	PVS	NVS
NS	PVB	PB	PS	ZO	NS
ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
PS	PS	ZO	NS	NB	NVB
PS	PVS	NVS	NB	NVB	NVB

表-2 時刻歴
応答解析ケース

	自由振動	強制振動
上層制御	1次卓越	釧路沖地震 (千代田大橋)
	2次卓越	
	3次卓越	
中層制御	1次卓越	釧路沖地震 (千代田大橋)
	2次卓越	
	3次卓越	
下層制御	1次卓越	釧路沖地震 (千代田大橋)
	2次卓越	
	3次卓越	

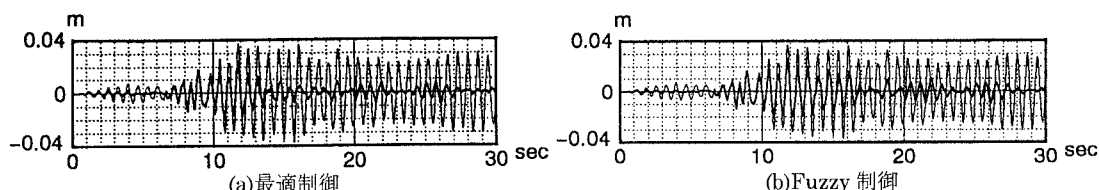


図-3 解析結果

【参考文献】

- 1) 小幡卓司、斉藤慎吾、林川俊郎、佐藤浩一：Fuzzy制御理論を用いた塔状構造物のアクティブ振動制御について、鋼構造年次論文報告集第2巻, pp.281-286, 1994.
- 2) 小幡卓司、下田和敏、藤井和宏、林川俊郎、佐藤浩一：塔状構造物のアクティブコントロールについて土木学会北海道支部論文報告集第51号(A), pp.334-339, 1995