

(5) ファジィ弾塑性地震応答制御における制御用アクチュエータの 周波数応答特性の最適値に関する考察

Study on Optimum Frequency Response Characteristic of Actuator on Control Effect
in Fuzzy Nonlinear Hysteretic Earthquake Response Control

山田登志郎¹⁾, 澤本佳和²⁾

Toshiroh YAMADA and Yoshikazu SAWAMOTO

1) 工博 鹿島技術研究所 第三研究部 室長 (〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

2) 工修 鹿島技術研究所 第三研究部 研究員 (〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

The authors have applied a fuzzy set theory to non-linear hysteretic response control of buildings using an active mass-actuator system, and confirmed its applicability with vibration tests and analytical studies. In the analytical studies, a practical set of optimum values for the control parameters (the natural period of the added mass in AMD system, the condition part gain constant in fuzzy inference) were derived with the actuator stroke length as the constraint.

In this study, the authors guess that the control effect in the fuzzy nonlinear hysteretic earthquake response control can be improved by changing the frequency response characteristic of the actuator, because the frequency response characteristic of the actuator has great influence on the optimum values and the control effect. The influence of the frequency response characteristic on the optimum values and the control effect is investigated. The relationship between the natural period of building structures and the frequency response characteristic of the actuator is demonstrated.

Key Word : fuzzy set theory, elasto-plastic response, nonlinear control, optimum control

1 はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震以来、構造物の安全性を確保する有力な手段の一つとして、アクティブ制震が注目されている。大地震を受ける建築構造物をアクティブな制御力方式で応答制御を行なう場合、構造物及び制震装置の規模の兼ね合いからみて、無制御時に非線形な履歴挙動をする構造物の履歴ループを減少するととどめた非線形履歴応答制御が現実的である。この非線形履歴応答制御を既存の制御理論¹⁾で行う場合、相対的にみて制御アルゴリズムが複雑となる。さらに正確な予測が困難である入力地震動の情報が必要となる場合や、対象とする系の特に同定が困難とされる非線形剛性や減衰特性を含めた構造・振動特性を厳密に知る必要がある等の解決すべき課題が幾つかある。

このような状況に対して、筆者らはこれまでに『非線形な系や動特性の変動する系に特に有効である²⁾』等、実用的な面からみた場合のファジィ制御の数多くの利点に着目した。そして、既存の手法の中で最も良いとされる制御力の大きさに制限のある逐次(瞬間)最適制御法³⁾との比較を含め、解析/実験の両面から非線形履歴応答制御に対するファジィ制御の安定性・有効性を検証した⁴⁾。次いで、固有周期が1.5秒程度までの構造物を対象として、アクチュエータのストローク長を制約条件にして(制約

応答ストローク長: S_{lim})、実状に則した制御デバイス(アクチュエータ)を組み込んだより現実的な制震システム(AMD)と構造系による連成モデル(制震系)の実挙動をほぼ忠実にシミュレート可能な解析ツールを用い、構造物の固有周期(T_s)毎に筆者らが仮定したアクチュエータの有効ストローク長($EF S_{lim}$)内で、アクチュエータのストローク長を制約条件にして、最も良い制震効果(C_E)を与える制御パラメータの実用的最適値(適正值)を評価した。そして、800Gal程度までのあらゆるレベルの地震に対してその有効性を検証した⁵⁾。さらには、新たな制御ルールを提案することにより、構造物が長周期化するにつれてアクチュエータの応答ストローク長が過大化傾向となる問題点を解決し⁶⁾、中低層から高層に至るまでの構造物の地震応答制御にファジィ理論の適用が可能なることを示した。しかしながら、制御パラメータ(ファジィ制御における前件部ゲイン定数、付加重錘の減衰固有周期)や制御ルールの最適化のみならず、アクチュエータの周波数応答特性が制震効果に与える影響を調査することにより、本制御法の制御効率がさらに改善されることが予想される。そこで本稿では、アクチュエータのストローク長の制約条件下で、構造物の固有周期(T_s)をパラメータとして、アクチュエータの周波数応答特性が制御パラメータ(付加重錘の減衰固有周期と減衰定数)の最適

値や最適制震効果に与える影響を調査する。そして、この結果を基に T_s とアクチュエータの最適周波数応答特性との関係を明らかにする。

2 解析方法

2. 1 制御システムと解析ツール

制御システムは文献⁵⁾に示されたものと同様で、図-1に示したような制御デバイスにアクチュエータを用いた最上階制御である。ファジィ制御における推論法もIf～then形式によるmin・max-重心法であり、制御ルールと帰属度関数も、表-1、図-2に示したものをを用いる。なお、図-2に示した v_{lm1} 、 c_{lm1} はファジィ推論における前件部変数(最上階の相対速度 v_T)と作用制御力(c)のゲイン定数である。また制御パラメータの最適値を評価する際に用いる解析ツールは構造物-制震装置の連成系のシミュレーション解析法⁵⁾である。一般に、アクチュエータシステムが図-1に示した駆動機械系と制御回路

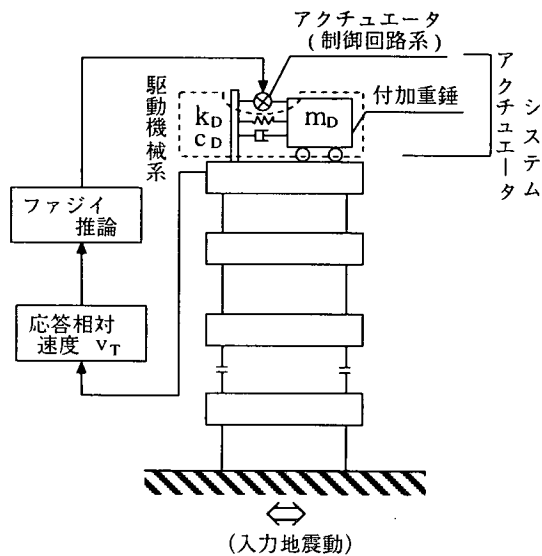


図-1 制御システム

表-1 制御ルール

前件部 v_T	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
後件部 c	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB

NB = Negative Big NM = Negative Medium
 NS = Negative Small ZR = Zero
 PS = Positive Small PM = Positive Medium
 PB = Positive Big

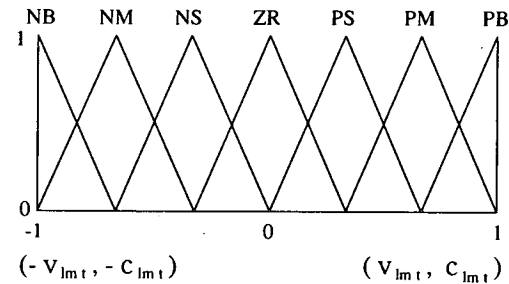


図-2 帰属度関数の形状

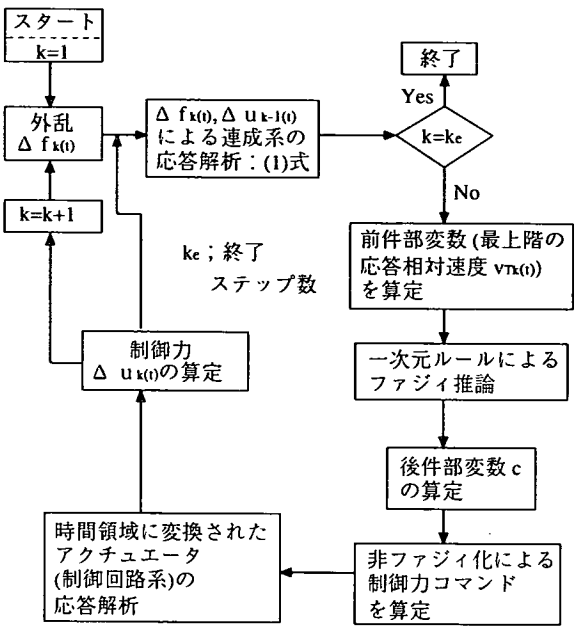


図-3 シミュレーション解析法のフローチャート

系で構成され、前者については付加重錘の質量 (m_D) 及びそのばね定数 (k_D) と減衰係数 (c_D) からなる2次遅れ系でモデル化可能であるから、(1)式に示したような付加重錘を含めた構造物の連成系の非線形運動方程式(増分形式(Δ)表示)が定式化可能である。そしてこれに制御回路系(アクチュエータ)の周波数応答特性を時間領域に変換したものとファジィ推論による制御アルゴリズムを組込めば、構造物-制震装置-ファジィ制御の連成系の弾塑性時刻歴応答解析が可能となる。以上の解析法のフローチャートを図-3に示す。

$$M\Delta\ddot{x}(t) + C\Delta\dot{x}(t) + K(t)\Delta x(t) = \Delta z(t) + F\Delta f(t) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに

- C : 連成系の減衰マトリックス
- $K(t)$: t 時刻での連成系の剛性マトリックス
- $x(t)$: t 時刻での相対変位ベクトル
- $z(t)$: t 時刻での外乱ベクトル
- F : 制御力入力マトリックス
- $f(t)$: t 時刻での制御力ベクトル

2. 2 解析パラメータ

まず、制御対象とする構造物の固有周期 T_s は0.37秒(以下ではs-37と略記)、0.69秒(s-69) 0.99秒(s-99)、1.43秒(s-143)の4種類を選定した。そして、何れの構造物もバイリニア型の復元力特性と、一次のモード減衰定数が1%である剛性比例型減衰を持つ基礎固定のせん断型質点系モデルとした。制震効果に影響を及ぼす制御パラメータは、既報⁵⁾の結果から前件部ゲイン定数比(G_v)、構造物の一次固有周期(T_s)に対する付加重錘の減衰固

有周期 T_D の比(T_R)及び付加重錘の減衰定数(h_D)であるが、 G_V は構造物の一次固有周期が一定であればその最適値 $optG_V$ はほぼ一定と見なして良いことから⁵⁾、 T_R と h_D に限定した。アクチュエータの周波数特性は既報⁵⁾⁶⁾で利用したもの(共振角周波数 $\omega_A=220\text{rad/sec}$ 、減衰定数 $h_A=0.55$ (図-4))をベースとして、 ω_A と h_A をパラメータとした。その他、入力地震波をパラメータとして加えた。以上の制御パラメータの詳細を表-2示す。その他、制御すべき損傷指標は累積塑性変形倍率(η)と最大塑性変形倍率(ξ)を採用する。なお、制御力及び付加重錘重量は構造物全重量の3%に固定した。ここで、制震効果(C_E)とは建物各層($i=1,2,\dots$)で生じる累積塑性変形倍率(η_i)及び最大塑性変形倍率(ξ_i)の内の最大値($\max \eta_i$ 、 $\max \xi_i$)の無制御時に対する制御時の比率とする。

3 解析結果

解析結果を図-5~8、及び表-3に示す。ここで、図

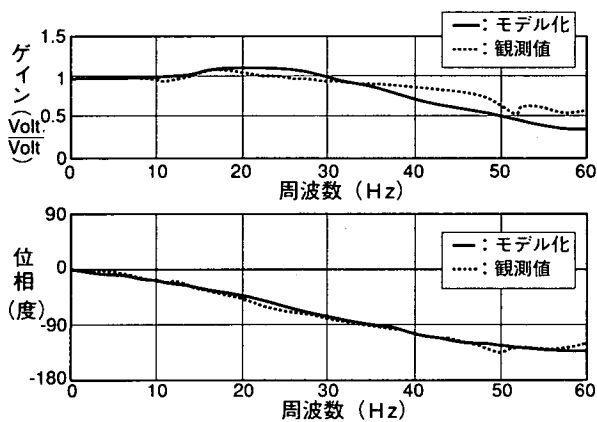


図-4 アクチュエータシステムの伝達特性(ボード線図)

表-2 解析パラメータ

構造物	s-37	s-69	s-99	s-143
入力地震波* (Max. Acc.: Gal)	E (750) (T (700))	T (670) (E (600))	E (680) (T (640))	T (630) (E (580))
T_R (sec)	0.1~3.3 (0.1 or 0.2刻み)			
h_D	0.00~0.99 (原則として、0.05刻み)			
ω_A (rad/sec)	140, 180, 220, 250			
h_A	0.25, 0.55, 0.85			

* ; 継続時間30秒 (E;エルセントロ, T;タフト)

-5は S_{lim} の制約条件下で、 ω_A が制御パラメータの最適値($optT_R$ 、 $opt h_D$)を用いた時の制震効果(C_E)に与える影響を示し、図-6は同様にして h_A が C_E に与える影響を示している。また、図-7、8は S_{lim} の制約条件下で、 ω_A が制御パラメータの最適値に与える影響を示している。一方、表-3は有効ストローク長 $EF S_{lim}$ での各地震波、各損傷指標別の有効ストローク長 $EF S_{lim}$ での C_E の平均値

($AVE C_E$)を全構造物について示し、また各構造物毎の全ての地震波、損傷指標に対する $AVE C_E$ の平均値を示している。ここで $EF S_{lim}$ とは、やや恣意的ではあるが実的な面から見て以下に示す範囲のものとした。まず、その最小値は、 ω_A が220rad.の時の C_E が、2つの入力地震波、2つの損傷指標に依らず0.7以下となるアクチュエータの最小ストローク長であり、その最大値は構造物の T_S に応じて設定した。これにより、各構造物の $EF S_{lim}$ はs-37で8cm~50cm、s-69で24cm~75cm、s-99で28cm~100cm、s-143で64cm~150cmとなる。これより以下のことが言える。

- a. ω_A が C_E に与える影響を各損傷指標と比較すると、構造物の T_S や入力地震波の違いによらず、どちらかといえば $\max \eta_i$ より $\max \xi_i$ の方がその与える影響は大きい。これは、制御すべき損傷指標が $\max \xi_i$ であれば、アクチュエータの ω_A の値をより慎重に配慮した方が良いことを示唆している。
- b. 大略 S_{lim} が小さい時は ω_A が大きい場合が、 S_{lim} が大きい場合は ω_A が小さい場合の方が、 T_S によらず制震効果良い傾向にあり、 T_S が大きくなる程この傾向が顕著である。これは T_S が大きくなる場合は ω_A の値をより慎重に配慮した方が良いことを示唆している。
- c. h_A が C_E に与える影響は、入力地震波、損傷指標及び T_S が変化してもほとんどない。
- d. 一方、 ω_A が制御パラメータの最適値に与える影響は入力地震波、損傷指標及び T_S に関係なく $optT_R$ 、 $opt h_D$ 共大きい。この内 $opt h_D$ は ω_A が小さくなると、大略大きくなる傾向にある。
- e. 図示はしていないが、 h_A が制御パラメータの最適値に与える影響は、入力地震波、損傷指標及び T_S に関係なく S_{lim} の小さい範囲で僅かにある程度で、これはc項の結果と符号している。
- f. 表-3の結果から、 $EF S_{lim}$ における $AVE C_E$ の最小値を与える最適なアクチュエータの伝達応答特性(特に ω_A)も、損傷指標や入力地震波の影響を受けることが分かる。しかしながら、構造物毎の全ての $AVE C_E$ の平均値でみると、構造物の違い(T_S)に依らず、アクチュエータの最適な伝達応答特性はほぼ一定であることが言える。このことは、損傷指標や入力地震波、さらには T_S に関係なく、($EF S_{lim}$ における)最適なアクチュエータの伝達応答特性(特に ω_A)が存在することを示唆している。今回の考察では、 $\omega_A=220\text{rad/sec}$ であった。ただし、 $EF S_{lim}$ の範囲に依存してアクチュエータの最適伝達応答特性が変化する可能性があることはいうまでもない。

4 おわりに

既報^{4)~6)}で提案したファジィ非線形履歴応答制御法の制御効率の改善を目的として、アクチュエータのストローク長を制約条件として、アクチュエータの周波数応答特性が制御パラメータ(付加重錘の減衰固有周期)の最適値や最適制震効果に与える影響を調査した。さらに、これ

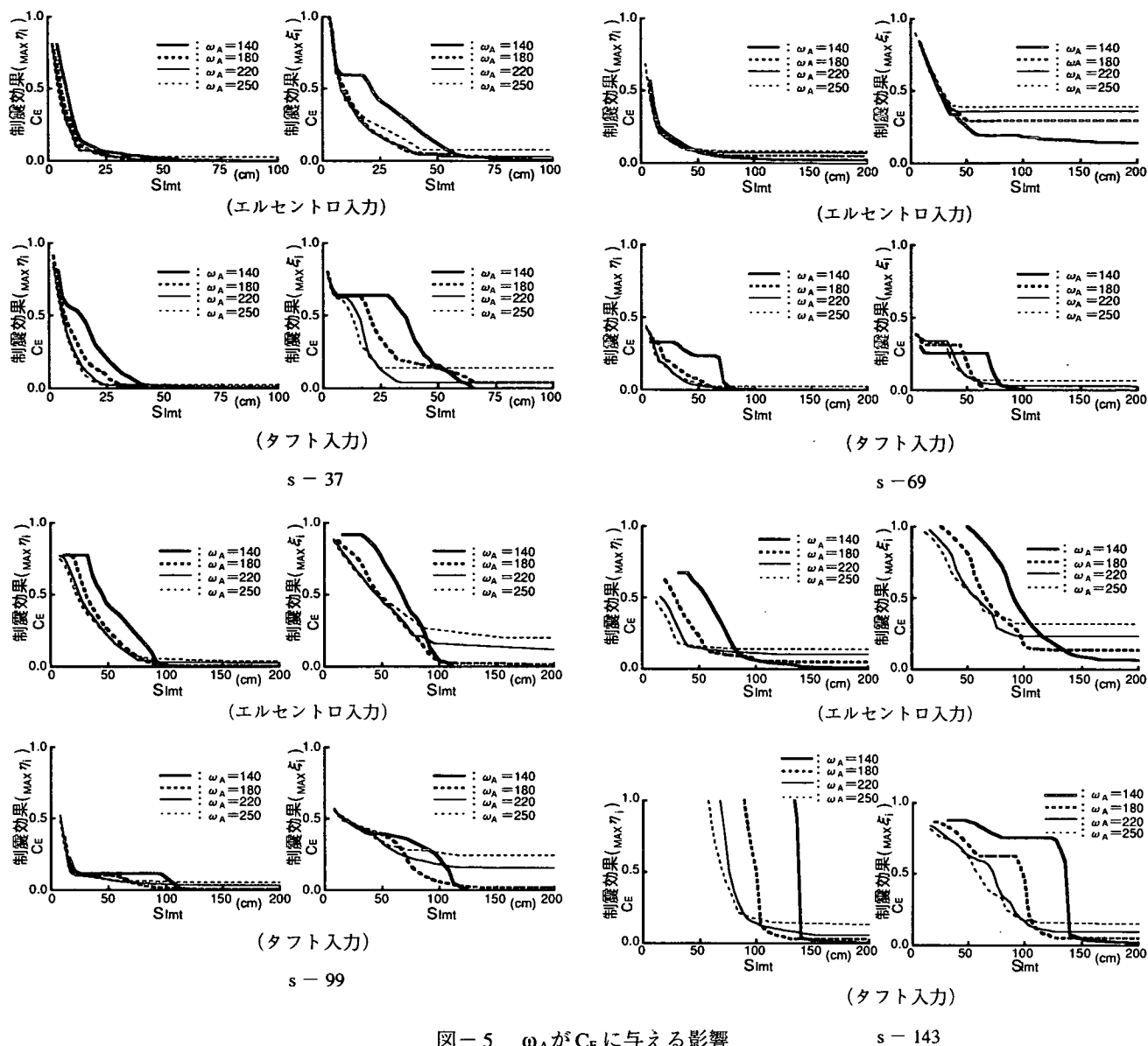


図-5 ω_A が C_E に与える影響

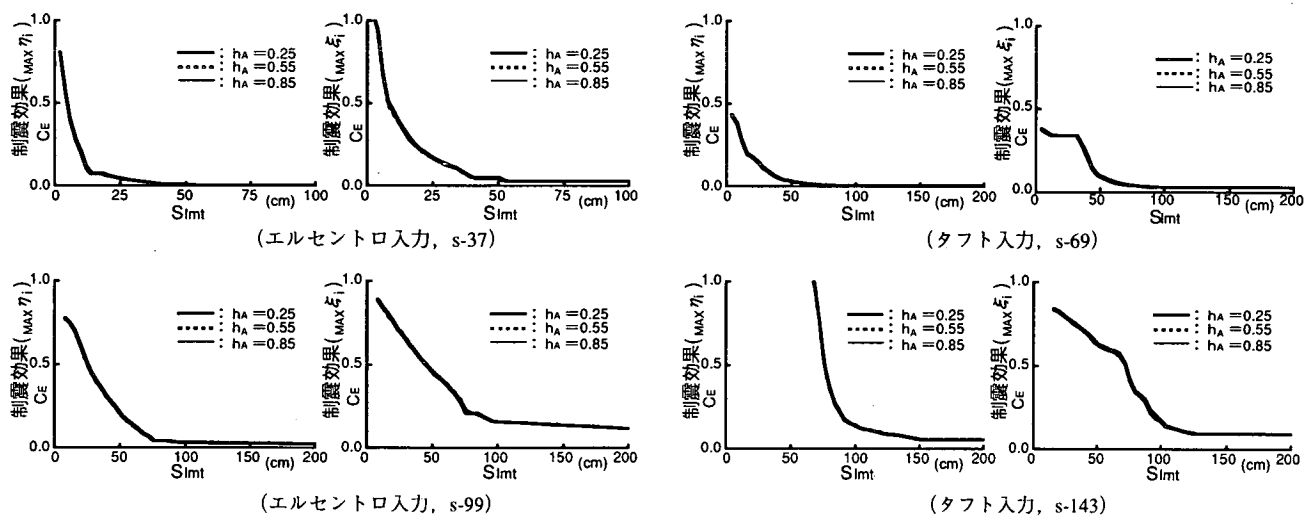


図-6 h_A が C_E に与える影響

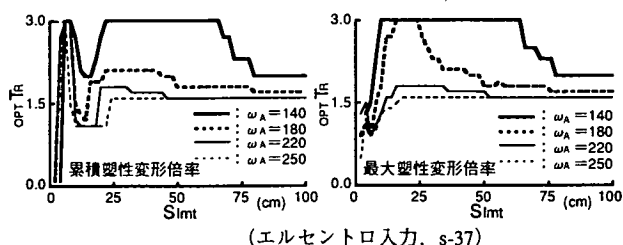


図-7 ω_A が $OPT Tr$ に与える影響

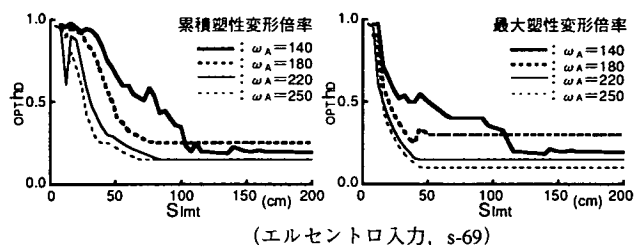
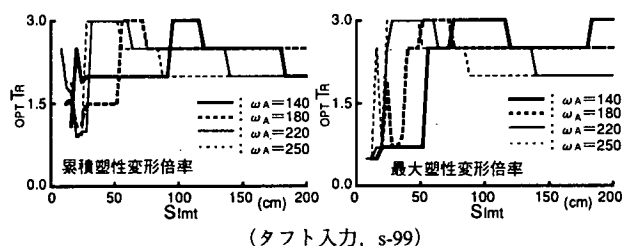


図-8 ω_A が $OPT h_D$ に与える影響

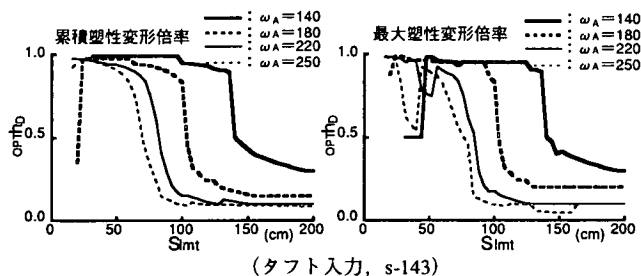


表-3(a) ω_A , h_A と $AVECE$ の関係 (s-37)

ω_A	h_A	AVE C_E				AVE C_E の平均値
		エルセントロ		タフト		
		$\max \eta_i$	$\max \xi_i$	$\max \eta_i$	$\max \xi_i$	
140	0.55	0.096	0.382	0.209	0.499	0.296
180	0.55	0.060	0.184	0.108	0.343	0.174
220	0.25	0.057	0.179	0.066	0.201	0.126
	0.55	0.055	0.174	0.066	0.199	0.124
	0.85	0.054	0.170	0.066	0.201	0.123
250	0.55	0.065	0.219	0.064	0.232	0.145

表-3(b) ω_A , h_A と $AVECE$ の関係 (s-69)

ω_A	h_A	AVE C_E				AVE C_E の平均値
		エルセントロ		タフト		
		$\max \eta_i$	$\max \xi_i$	$\max \eta_i$	$\max \xi_i$	
140	0.55	0.095	0.294	0.246	0.247	0.220
180	0.55	0.090	0.346	0.079	0.183	0.174
220	0.25	0.097	0.382	0.050	0.164	0.173
	0.55	0.096	0.387	0.049	0.162	0.174
	0.85	0.096	0.395	0.049	0.159	0.175
250	0.55	0.104	0.418	0.058	0.154	0.183

表-3(c) ω_A , h_A と $AVECE$ の関係 (s-99)

ω_A	h_A	AVECE				AVECE の平均値
		エルセントロ		タフト		
		$\max \eta_i$	$\max \xi_i$	$\max \eta_i$	$\max \xi_i$	
140	0.55	0.336	0.536	0.111	0.353	0.334
180	0.55	0.186	0.358	0.064	0.268	0.219
220	0.25	0.158	0.363	0.062	0.287	0.218
	0.55	0.158	0.365	0.062	0.286	0.218
	0.85	0.158	0.368	0.062	0.285	0.218
250	0.55	0.162	0.413	0.069	0.322	0.242

表-3(d) ω_A , h_A と $AVECE$ の関係 (s-143)

ω_A	h_A	AVE C_E				AVE C_E の平均値
		エルセントロ		タフト		
		$\max \eta_i$	$\max \xi_i$	$\max \eta_i$	$\max \xi_i$	
140	0.55	0.103	0.406	1.879	0.655	0.761
180	0.55	0.073	0.240	0.654	0.318	0.321
220	0.25	0.116	0.264	0.267	0.220	0.217
	0.55	0.113	0.267	0.265	0.223	0.217
	0.85	0.111	0.264	0.265	0.226	0.217
250	0.55	0.143	0.339	0.230	0.219	0.233

に基づきアクチュエータの最適な周波数応答特性と構造物の固有周期との関係について検討した。その結果、アクチュエータの周波数応答特性の内、共振角周波数 ω_A が制御パラメータの最適値や最適制震効果に影響を与えること、また対象とした ω_A や地震波の数は限られてはいるが、構造物の一次固有周期(T_s)にあまり関係なく一定の最適な ω_A が存在することが分かった。今後はより多くの地震波や ω_A の値を用いて、より詳細な検討を実施していく予定である。

参考文献

- 1) Yang J.N., et al; New Optimum Control Algorithms for Structural Control, Journal of EM. Div. ASCE, Vol.113, No.9, pp1369~1386, Sept., 1987
- 2) 村上周太, 前田幹夫; ファジィ制御の方法論 (ミニ特集: ファジィ制御), 計測と制御, Vol.28, No.11, pp11~

16, 1989年11月

- 3) 野田 茂; 制御力拘束を有する非線形構造物の地震応答のアクティブコントロール、アクティブ制震(振)シンポジウム論文集, pp65~70, 1992年3月
- 4) 山田登志郎, 鈴木宏一, 他; ファジィ理論による建築構造物の非線形履歴応答制御 (ファジィ理論の建築構造物の地震応答制御への適用性に関する研究 (I)), 日本建築学会構造系論文集, pp59~68, 1994年12月
- 5) 山田登志郎, 澤本佳和; アクチュエータのストローク長を制約条件とした建築構造物のファジィ弾塑性地震応答制御, 計算工学講演会論文集, Vol.1, No.2, pp657~660, 1996年5月
- 6) 山田登志郎, 澤本佳和; ファジィ理論による高層構造物の弾塑性地震応答制御, 計算工学講演会論文集, Vol.2, No.3, pp837~840, 1997年5月