

構造物の応答速度とアクチュエータのストロークに基づく AMD 制御式の最適化

○谷原 康介*¹ 谷 明勲*²
山邊 友一郎*³

キーワード：AMD 制振 最適化 遺伝的アルゴリズム

1 はじめに

本研究は、構造物に設置した付加質量に制御力を作用させ、その反力で構造物応答を制御する AMD 方式アクティブ制御システム^{[1][2]}を対象とする。AMD 制御では、ストロークが過大にならないように、ストローク制約の下で制御を行うことが重要で、種々の研究^{[3]-[5]}が行われている。筆者らも、これまでに AMD のストローク応答を重視することで、比較的大規模の地震時にもストロークオーバーを起こさず制御を行える制御式を提案し^[6]、制御則や AMD 特性値の遺伝的アルゴリズム(以下、GA)を用いた最適化を行っている^{[7][8]}。本研究では、制御式内部のパラメータの GA による最適化に改良を加え、シミュレーションにより提案する制御式の特徴と最適化手法の有効性を検討することを目的とする。

2 対象構造物とシミュレーション設定

本研究では、図 1(a)に示す頂部に AMD を 1 基設置した 5 層構造物を対象とする。シミュレーションでは、この構造物を、図 1(b)に示す 6 質点系せん断型モデルとして扱う。対象構造物の構造特性値の一覧を表 1 に示す。

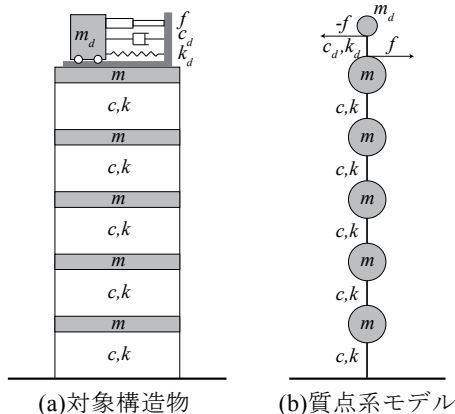


図 1 対象構造物とモデル化

表 1 構造特性値

層数	層質量 m	層剛性 k	層粘性減衰 係数 c	一次固有 周期
5	80(t)	4.00×10^4 (kN/m)	32.0 (kNs/m)	1.13(s)
付加質量 m_d	付加剛性 k_d	付加減衰 c_d	最大出力	最大スト ローク S_{max}
4(t)	100(kN/m)	6.0(kNs/m)	50(kN)	± 60 (cm)

制御シミュレーションでは、式(1)に示す運動方程式を用いて時刻歴応答解析を行う。制御力を表す項： $\{f\}$ の係数である f_{amd} を変化させることで、AMD を制御する。

アクチュエータの制御に要する時間として、1 ステップ(入力地震動の観測間隔)分の時刻遅れを考慮する。

$$\begin{cases} [M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} - \{m\}\ddot{z} \\ \{f\} = f_{amd} \{0, 0, 0, 0, 1, -1\}^T \end{cases} \quad (1)$$

アクチュエータのストローク S は、図 2 に示すように、付加質量 m_d の基礎からの相対変位 x_d と AMD 設置層の基礎からの相対変位 x_s を用いて、式(2)で表される。

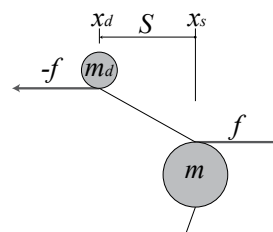


図 2 ストロークの概念図

$$\text{ストローク} : S = x_d - x_s \quad (2)$$

3 制御式

3.1 制御式の基本理論

本制御では、ストロークが指定した範囲を往復するように制御力を作用させる。制御力を作用させるタイミングを、AMD を設置した層の応答速度を相殺するように設定し、構造物全体の応答を低減することを目指す。

構造物の応答を低減するために制御力を作用させた結果、ストロークが変化するという既往の制御式に対して、本制御ではストロークが意図した通りの運動をするように制御力を作用させるため、ストロークオーバーの危険性がより小さい。本研究では、ストローク目標値： S_0 を設定しアクチュエータは $\pm S_0$ の範囲で作動するものとする。制御誤差を考慮すると、この値は装置の最大ストローク S_{max} よりも小さい値とする必要がある。

3.2 加力時刻の設定

制御力は、AMD 設置層の応答速度極大の時刻に、これを減速する向きに作用させるものとする。これは、同じ力を作用させる場合、対象の速度が大きいほど、大き

な仕事を与えられるからである。AMD 設置層になるべく大きな仕事を作用させ、AMD の付加質量に作用させる仕事をなるべく小さくすることで、応答ストロークの変化をできるだけ抑制しつつ大きな制御効果を発揮することを目的として、このような設定を行った。なお、制御力を AMD 設置層の応答速度極大の時刻にできる限り集中させるために、このときに作用させる制御力の大きさは、装置の最大出力 50kN で一定とした。

3.3 ストロークと構造物応答速度の関係

慣性反力型 AMD システムでは、図 2 に示すように制御力 f を構造物に作用させると、付加質量にその反力 f が作用し、ストローク S (式(2))は f と反対方向に変化する。

このため、構造物への加力方向とストロークの向きが異なる場合には、ストロークの絶対値は増大し、ストロークオーバーの危険性が大きくなる。反対に、構造物への加力方向とストロークの向きが同じ場合には、ストロークの絶対値は減少するので、アクチュエータは大きな仕事をすることが可能となる。そこで、本制御式では、ストロークの状態は、加力時に、構造物への加力方向と同じ向きにピークの値をとるように制御する。

この章で示した構造物応答速度と制御力とストロークの時間上の関係を、制御の概念図として図 3 に示す。

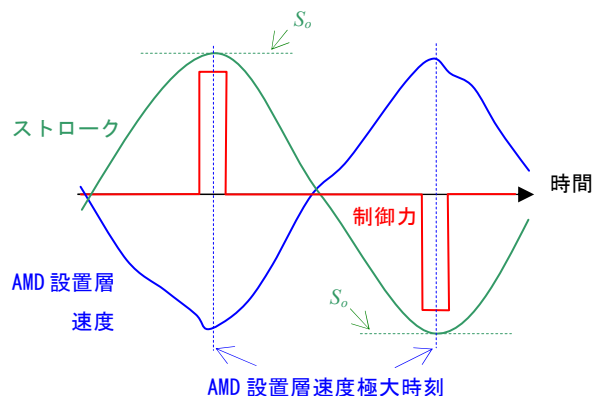


図 3 制御の概念図

3.4 作用させる仕事量の決定手法

以上より、加力時にアクチュエータがする仕事量は、次に制御力を加力する時刻に、ストロークがストローク目標値 S_0 の値をとるように決定する必要がある。このため、本制御式では、アクチュエータの仕事量を変化させた仮想的なシミュレーションを繰り返し試すことで、この条件に可能な限り近い仕事量を決定するものとする。

この仮想的なシミュレーションでは、アクチュエータが制御力を作用させる直前のステップにおいて、その時刻の構造物の応答状態を模したモデルを考える。このモデルに、地動加速度が作用しないという仮定の下、アクチュエータにある大きさの仕事量を作用させ、次に AMD

設置層の速度が極大になる時刻 t_{end} まで時刻歴応答解析を行う。仮想シミュレーションが終了する時刻 t_{end} に、モデルのストロークが目標値 S_0 を超えていれば、アクチュエータがした仕事量が大きすぎるため、作用させる仕事量を小さくして、再度仮想シミュレーションを行う。逆に、仮想シミュレーションの終了時の応答ストロークが目標値 S_0 以下ならば、次に行う仮想シミュレーションでは、作用させる仕事量をより大きくする。

図 4 に、この過程を表した概念図を示す。図中の縦軸が、仮想シミュレーション上で、アクチュエータが作用させる仕事量である。仮想シミュレーションを繰り返すごとに、アクチュエータが作用させる仕事量の増減幅を 1/2 倍にすることで、精度を高めていく。

本研究では、事前の検討から、作用させる仕事量は $0.0 \sim 0.4f_{max}$ の間の値を取るものとし、仮想シミュレーションの繰り返し回数は 5 回とした。これは、入力地動加速度の刻み時間の最小値 0.01 秒の間にこの仮想シミュレーションの繰り返し処理を終了させるためである。

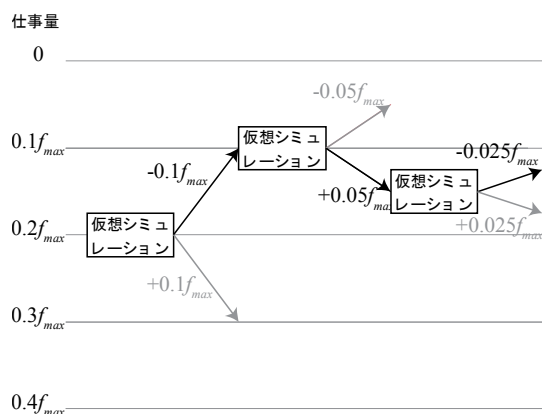


図 4 仮想シミュレーション繰り返し処理の概念図

3.2 節に記したとおり、本制御式では、作用させる制御力は 50kN で一定としているため、作用させる仕事量の大きさは、制御力を作用させる時間の長さで調節する。

なお、 $S_0=0$ の場合は、応答ストロークが 0 になるよう制御するのではなく、一切制御力を作用させない。

4 最適化に関する設定

4.1 最適化対象パラメータ (v_0 - S_0 曲線)

本制御では、応答ストロークのピークがストローク目標値 S_0 となるように制御を行うため、 S_0 の値を指定することで、作用させる制御力の大きさを間接的に操作できる。本研究では、構造物の応答に応じて S_0 の値が変化するものとし、その対応関係を図 5 に示す v_0 - S_0 曲線で表す。

v_0 - S_0 曲線の横軸 v_0 は、AMD 設置層の速度極大が判定された時刻における、AMD 設置層の速度の絶対値である。制御力を作用させる度に、この曲線からそのときの v_0 の値に対応する S_0 の値を決定する。

本研究ではこの v_o - S_o 曲線を最適化対象とする。図 5 に示すように、ある点の、1つ左側の点からの v_o 直線上の距離を、遺伝子座が奇数の遺伝子を用いて表現し、 S_o の値は遺伝子座が偶数の遺伝子を用いて表現する。なお、 v_o - S_o 曲線を用いた既往の研究^{[7][8]}から、 $v_o = 0$ の時には $S_o = 0$ になるべきであることがわかっていたので、この曲線の左端の点は原点で固定とした。

本研究では、図 5 に示す原点以外の①～⑤の 5 つの点を GA で最適化する。この曲線の範囲よりも大きい v_o に対しては、最も右側の点の S_o の値で制御を行うものとする。曲線上の各点を表す遺伝子の設定を、表 2 に示す。

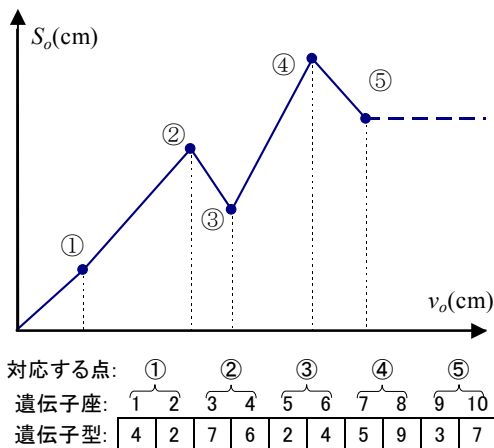


図 5 v_o - S_o 曲線

表 2 v_o - S_o 曲線の遺伝子の設定

	v_o の間隔	S_o
最小値	1 (cm/s)	0 (cm)
最大値	11 (cm/s)	50 (cm)
刻み	1 (cm/s)	5 (cm)

4.2 入力地震動

表 3 に示す 3 つの地震動の最大加速度を 100cm/s^2 に基準化したグループと、 200cm/s^2 に基準化したグループの 2 通りを対象に最適化を行う。それぞれの地震波の特性を示すため、 100cm/s^2 に基準化したこれらの地震波を本研究で扱うモデルに入力した際の、5 層目の最大応答変位、最大応答速度、最大応答ストロークも表 3 に示す。なお、表 3 中の値は、図 1(b) に示す 6 層モデルで、AMD 装置に制御力を作用させない場合の結果である。

表 3 最適化波一覧

地震波名	5 層目最大 応答変位 (cm)	5 層目最大 応答速度 (cm/s)	最大応答 ストローク (cm)
El Centro	6.63	47.6	14.4
Hachinohe	6.52	45.9	15.7
BCJ-L1	8.15	58.2	19.9

最適化結果の制御効果は、表 4 に示す 3 つの地震動を検証波とし、それぞれ 100 、 200cm/s^2 に基準化したものを用いて検討した。

表 4 検証波一覧

地震波名	5 層目最大 応答変位 (cm)	5 層目最大 応答速度 (cm/s)	最大応答ス トローク (cm)
BCJ-L2	9.90	68.2	23.0
JMA Kobe	6.99	52.2	16.6
Urakawa	9.08	61.6	24.1

4.3 評価値

GA による最適化では、1 つの地震波に対するシミュレーションに対して、以下の 4 つの評価指標を考える。

- ev_1 : ストローク制限

$$ev_1 = \begin{cases} 0 & (\max |S(t)| > S_{\max}) \\ 1 & (\max |S(t)| < S_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

S_{\max} : AMD 装置のストロークの可動限界値

式(3)に示す ev_1 は、最大応答ストロークが装置の可動域(S_{\max})を超えていないかどうかを評価する。ストロークが S_{\max} 以下の場合、その大小によらず評価値は 1 となる。

- ev_2 : 応答低減比

式(4)に示す ev_2 は、構造物最上層の最大応答変位の低減を評価する。同じ入力に対する制御結果を比較する場合、応答の低減効果が大きいほど $x(5,t)$ の最大値が小さくなり、 ev_2 の値は大きくなる。分子の定数 P の値は、最適化波の基準化加速度に比例した値とする(式(5))。

$$ev_2 = \frac{P}{\max_t |x(5,t)|} \quad (4), \quad P = \begin{cases} 0.5(100\text{gal}) \\ 1.0(200\text{gal}) \end{cases} \quad (5)$$

$x(5,t)$: 制御時の構造物 5 層目の時刻 t における応答変位

- ev_3 : アクチュエータの仕事率

本シミュレーションでは、アクチュエータが作用させる制御力に最大値の制限を設けているが、最大仕事量の限界は設けていない。式(6)に示す ev_3 は、AMD 装置が制御中に作用させた最大の仕事量に対する評価を表し、AMD の仕事量が小さいほど高い評価となる。なお、 ev_3 は、 $0.0 \sim 2.0$ の間の値となるように係数調整を行った。

$$ev_3 = \frac{120 \cdot f_{\max}}{\max_t \left(\int_{0.2}^t |f(t) \cdot (S(t) - S(t - \Delta t))| dt \right) + 60 \cdot f_{\max}} \quad (6)$$

f_{\max} : 最大制御力、 $f(t)$: 時刻 t に作用させる制御力

- ev_4 : 累積変位

式(7)、(8)に示す ev_4 は、構造物最上層の累積移動距離を示す。同じ入力に対する制御結果を比較する場合、構造物最上層の移動距離が小さいほど ev_4 は大きくなる。

$$ev_4 = \frac{Q}{\sum_{i=1}^n |x(5, i \cdot \Delta t) - x(5, i \cdot \Delta t - \Delta t)|} \quad (7)$$

$$Q = \begin{cases} 5000(100gal) \\ 10000(200gal) \end{cases} \quad (8)$$

n :入力地震動の観測時間数

さらに、式(9)に示す $ev_1 \sim ev_4$ の4つの評価指標の積を、入力した地震波に対する評価値 Ev_{wave} とする。応答ストロークが装置の限界を超える場合には、 ev_1 が0となり、他の評価指標の値に関わらず、 Ev_{wave} も0となる。

$$Ev_{wave} = ev_1 \cdot ev_2 \cdot ev_3 \cdot ev_4 \quad (9)$$

本報では、表3に示した複数の地震波に対して最適化を行うため、式(10)に示す各地震波に対して求めた Ev_{wave} の積を適応度とし、これを最大化する。

$$\text{適応度: } Ev = Ev_{El_Centro} \cdot Ev_{Hachinohe} \cdot Ev_{BCJ-L1} \quad (10)$$

4.4 GAの基本設定

GAの設定を表5に示す。既報^{[7][8]}では適応度の高い個体から順番に交配を行い、次世代の個体を残すランキング選択を用いて最適化を行い、1個体のエリート保存も行っていった。しかし、この方法では、早い段階で上位個体が最も適応度の高い個体とほぼ同じ遺伝子ばかりになってしまう問題があった。このため、本研究では、エリート保存を用いず、ルーレット選択を用いることとした。また、本研究で行った最適化の妥当性について検討するため、同じ条件の下、乱数系列を変えた最適化を行って、結果の収束性についても検討を行う。

表5 GAの初期設定

1世代個体数	40
終了世代	500
突然変異率	5.00%
乱数系列	1,2,3

5 最適化の実行結果

最大加速度を 100cm/s^2 で基準化した地震波に対する最適化の結果、最も適応度の高かった個体を図6に示す。

乱数系列1と3の結果を比較すると、 $v_o=20(\text{cm/s})$ よりも右側の範囲で異なる点をとっているにもかかわらず、適応度が同じ値となっている。これは、 100cm/s^2 で基準化された入力波に対して、AMD設置層速度の絶対値である v_o が $20(\text{cm/s})$ を超える場合がほとんどないためと考えられる。これを確認するため、 100cm/s^2 に基準化したEl Centro波を、乱数系列1の最適化結果を用いて制御したときの、5層の応答速度の時刻歴を図7に示す。

既報^[8]と今回の最適化は、 v_o-S_o 曲線のデコード形式や、累積変位を評価する評価指標の有無等、最適化の設定に違いはあるが、図6に示すように、 100cm/s^2 基準化波に対する最適化結果は、ほぼ同じ概形となっている。また、乱数系列1,3と、乱数系列2の適応度に大きな差が見られる。これは、本最適化方法では、初期の選択によっては初期収束が起こる場合があるためと考えられる。これを確認するために、乱数系列1,2の進化曲線の比較

を図8に示す。

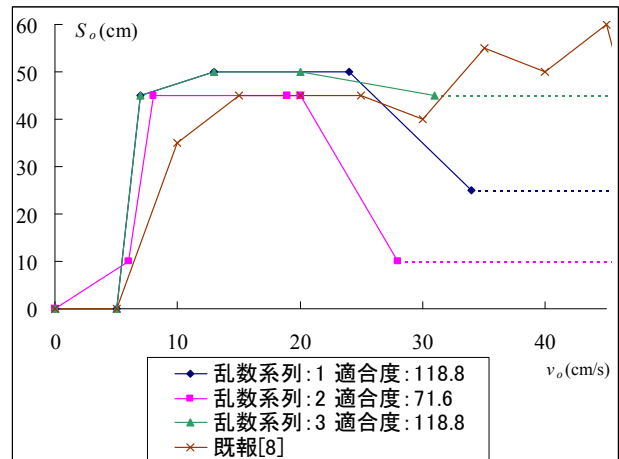


図6 100cm/s^2 基準化地震波に対する最適化結果

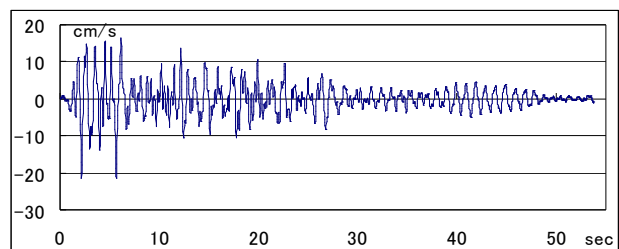


図7 100cm/s^2 El Centro 波に対する応答速度

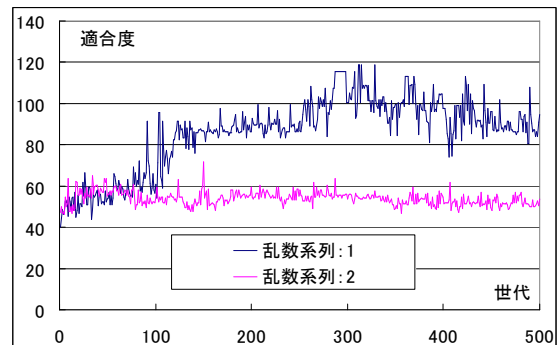


図8 乱数系列1,2の進化曲線の比較

次に、 200cm/s^2 で基準化した地震波に対する最適化結果を図9に示す。図6に結果を示した 100cm/s^2 の最適化結果と比較して、入力地震波の加速度が2倍のため、構造物の応答速度も約2倍となる。しかし、 v_o-S_o 曲線が点を取る領域を比べると、図6ではおよそ $v_o=30(\text{cm/s})$ までの範囲で点が分布しているが、図9では $v_o=20(\text{cm/s})$ までの範囲内に収まっている。

$v_o=15(\text{cm/s})$ 以降の範囲では、今回の設定では最大の $S_o=50(\text{cm})$ が最適となる結果となった。これは、構造物の応答が大きい場合には、可能な限り大きな制御力を作用させるためと考えられる。

6 制御効果

100cm/s^2 に基準化した最適化波を用い、乱数系列3の場合の最適化結果を用いた場合の、検証波に対する制御

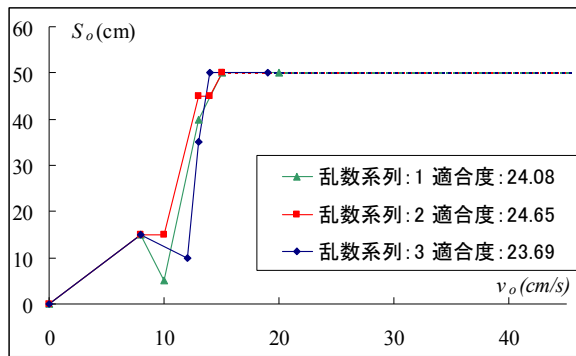


図9 200cm/s² 基準化地震波に対する最適化結果

効果を表6に示す。

最大応答ストロークは、ストローク目標値 S_o の最大値である $S_o=50(\text{cm})$ とほぼ同じ値となる。これより、3.4節に示したアクチュエータの仕事量決定式が、この程度の規模の地震波に対しては有効であることが確認できる。

式(6)の分母の第1項に示したように、アクチュエータが発揮する仕事量は、アクチュエータの出力とストロークの変化する速度の積で表される。このため、制御力が一定であり、かつ応答ストロークを指定した S_o の範囲で往復させる本制御では、アクチュエータが発揮しなければならない仕事率は入力地震波の規模によらず、ほぼ同じ値となる。これは、表6からも確認できる。

表6 100cm/s² 基準化波に対する最適化結果の制御効果

検証波の基準化加速度	検証波	最大応答ストローク (cm)	5層最大応答変位低減率(%)	最大仕事率 (kJ/s)
100cm/s ²	BCJ-L2	50.9	47.6	145.6
	Kobe	50.5	33.7	136.4
	Urakawa	51.5	42.2	147.6
200cm/s ²	BCJ-L2	52.8	38.8	142.5
	Kobe	52.1	14.4	131.8
	Urakawa	52.8	34.2	141.1

次に、200cm/s² で基準化した地震波を用いた最適化結果で、最も適応度が高かった乱数系列2の場合の、検証波に対する制御効果を表7に示す。

表7 200cm/s² 基準化波に対する最適化結果の制御効果

検証波の基準化加速度	検証波	最大応答ストローク (cm)	5層最大応答変位低減率(%)	最大仕事率 (kJ/s)
100cm/s ²	BCJ-L2	51.6	48.9	142.7
	Kobe	50.8	31.2	137.5
	Urakawa	50.1	59.7	137.0
200cm/s ²	BCJ-L2	52.9	41.1	137.1
	Kobe	54.7	13.2	125.3
	Urakawa	53.0	35.7	147.0

図6, 9に示すように、制御に用いた v_o - S_o 曲線の形は基準化の加速度レベルで異なるが、構造物の応答が大き

いときには、ストローク目標値 $S_o=50(\text{cm})$ とするという設定は同じため、最大応答ストロークと最大仕事量は表6, 7ともほぼ同じ結果となっている。

JMA Kobe 波のように構造物の応答が急激に大きくなる地震波の場合、加速度が2倍になると構造物の最大応答変位低減率が大きく減少している。一方、Urakawa 波のように構造物の振幅が徐々に大きくなる地震波の場合は、加速度の増加による低減率の減少は少なくなっている。このような地震波の特性と制御効果の関係を検討するために、今後は最大速度など、加速度以外の指標で基準化した地震波群を用いた最適化を行う予定である。

7 まとめ

100, 200cm/s² の最適化に用いた地震波および検証波に対しては、提案する制御式に基づいて、ストロークを目標値に近い値で制御し、応答の低減効果を得られることが確認できた。しかし、入力地震波の規模が大きくなるほど、 S_o と応答ストロークの誤差が大きくなるため、さらに大きな地震波に対する制御を考える場合には、制御則に関してさらに検討を行う必要がある。

また、乱数系列を変えた最適化の結果が、ほぼ同様の結果に収束したことから、本報で用いた最適化手法も有効であると考えられる。しかし、図8に示す初期収束の問題や、地震波のどのような特性により最適化結果が決定されるかを、今後さらに検討することが課題となる。

【参考文献】

- [1]武田寿一/編著：『構造物の免振・棒振・制振』, 技法堂出版, 1988.5.
- [2]小堀鐸二/著：『制振構造 理論と実際』, 鹿島出版会, 1993.9.
- [3]山本雅史, 鈴木祥之：アクティブマスダンパーのストローク制約を考慮した極配置アルゴリズムによる実大構造物の制震に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.127-132, 1998.12.
- [4]奥田浩文, 蔭山満：スピルオーバーの防止とAMDストローク制御下における可変ゲインの設定を考慮した最適制御手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第532号, pp.87-94, 2000.6.
- [5]Materazzi AL, Ubertini F: Robust structural control with system constraints, Structural Control Health Monitoring vol.19, pp.472-490, 2011.2.
- [6]谷原康介, 谷明勲, 山邊友一郎：構造物の応答速度とアクチュエータのストロークに基づくAMD制御アルゴリズム, 日本建築学会学術講演梗概集, pp881-882, 2012.9.
- [7]谷原康介, 谷明勲, 山邊友一郎：構造物の応答速度とアクチュエータのストロークに基づくAMD制御式の最適化, 第35回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 報告, pp299-302, 2012.12.
- [8]谷原康介, 谷明勲, 山邊友一郎：構造物の応答速度とアクチュエータのストロークに基づくAMD制御式の最適化, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第53号・構造系, pp205-208, 2013.6.

- *1 神戸大学大学院工学研究科 博士課程前期
- *2 神戸大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)
- *3 神戸大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)

A Study on Optimization of AMD Control Algorithm based on Stroke of Actuator and Response Velocity of Structure

○Kosuke TANIHARA*¹

Akinori Tani*²

Yuichiro YAMABE*³

Keywords : Active Mass Damper, Optimization, Genetic Algorithm, Vibration Control

Introduction

In this paper, an active control algorithm of buildings using AMD (Active Mass Damper) system is discussed. Authors have already proposed a basic control algorithm based on strokes of an actuator and response velocity of a structure, and the effectiveness of proposed algorithm is verified by active control simulations. In this paper, parameters using in the proposed control algorithm are optimized using Genetic Algorithm (GA), and the effectiveness of proposed optimization method is verified and discussed based on results of active control simulations.

AMD Control Algorithm

In vibration control by AMD system, limitation on the stroke of actuator is one of the most important problems. When a large seismic wave activates the building with AMD system, the stroke of the actuator has possibility to become larger than the limitation. In order to solve this problem, authors propose a new AMD control algorithm in consideration of states of the stroke of the actuator.

In this algorithm, the actuator can apply control force to make displacements of strokes of the actuator within designated maximal stroke of the actuator (S_o). Active control forces are activated when velocities of the top story of the building become maximal or minimal. Using this algorithm, AMD system can perform maximal effect on reducing velocities of the building within designated stroke of the actuator S_o . In this algorithm, control forces should also be adjusted when the stroke of the actuator reaches to S_o . In this algorithm, virtual simulations are introduced, and amounts of control forces are determined iteratively under simple assumptions. In this virtual simulation, if response strokes of the actuator are larger than S_o , amounts of control forces are reduced, and if response strokes of the actuator are smaller than S_o , amounts of control forces are increased. In this study, S_o is assumed to vary in accordance with velocities of the top story of the building (v_o). Therefore, the relationship between v_o and S_o is defined in a two dimensional plane.

Optimization of v_o - S_o Curve

In this paper, the relationship between v_o and S_o is optimized using GA. Optimizations are performed based on earthquake response analysis using three seismic waves, i.e., El Centro, Hachinohe, BCJ-L1, in which maximal accelerations are normalized to 100 and 200cm/s², respectively. To evaluate fitness values in GA operations, following four evaluation indexes are introduced, i.e., 1) whether active control can be performed within the limitation of the stroke of the actuator or not, 2) reduction ratios of displacements of the top story of the building, 3) amounts of energy of AMD system, 4) total trip distances of the top story of the building. The total fitness values of GA operations are evaluated as multiplication of fitness values of these 4 indexes in each seismic wave. The final fitness values are also evaluated as multiplication of total fitness values of 3 seismic waves. Optimizations by GA are performed under different 3 random seeds in order to verify whether same optimum solutions can be obtained or not.

Result of Optimization

Simulation results show that proposed algorithm is effective and employed AMD system can control the objective building within the limitation of the strokes of the actuator and designated S_o optimized by GA. However, errors of response strokes of the actuator become large when maximal acceleration values of input seismic waves become large. Optimization results using 3 different random seeds become almost the same but not identical. Therefore, proposed optimization method by GA is considered to be effective.

*1 Graduate Student, Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University

*2 Professor, Dr. Eng., Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University

*3 Associate Professor, Dr. Eng., Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Kobe University