ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造による 骨組構造物のアクティブ制振に関する研究* (第2報, 柱の曲げモーメント制御と軸力制御の併用による場合)

鎌田 崇義^{*1}, 藤田 隆史^{*1}, 畑山 貴善^{*2}, 有壁 剛生^{*3}
 村井 信義^{*4}, 相沢 寛^{*4}, 遠山 幸太郎^{*4}

Active Vibration Control of Frame Structures with Smart Structure Using Piezoelectric Actuator (2nd Report, Vibration Control by Combined Use of Bending Moment Control and Axial Force Control of the Columns)

Takayoshi KAMADA, Takafumi FUJITA, Takayoshi HATAYAMA,
 Takeo ARIKABE, Nobuyoshi MURAI, Satoru AIZAWA and Kohtaro TOHYAMA

To apply smart structures to buildings, a new vibration control strategy is proposed for flexural-shear-type frame structures with smart structure using piezoelectric actuators. Actuators are incorporated in columns, and the response of the entire structure is reduced by control of the bending moment and axial force of the columns. These two controls are applied in combination by appropriate arrangement of actuators. Two control strategies were tested. One is model matching method and the other is H^∞ control theory. Excitation tests were conducted with a 4-story frame structure with a total weight of 2 000 kg and a height of 3.7 m having H-section steel beams incorporating actuators as columns. The effectiveness of combined use of bending moment control and axial force control of columns with smart structures was confirmed.

Key Words: Vibration Control, Frame Structure, Smart Structure, Piezoelectric Actuator, Bending Moment Control, Axial Force Control, Model Matching Method, H^∞ Control Theory, Excitation Test

1. ま え が き

近年, 構造部材にアクチュエータ/センサを組み込んだスマート構造の研究が盛んになされているが⁽¹⁾, 現在の研究の多くは, 軽量, 柔軟な宇宙構造物を対象としている. 一般にスマート構造で用いられている固体アクチュエータは, 単位容量当たりの出力は大きいものの小型で変位も微小であるため, 地上の建物などの重量のある大規模構造物には適用されていなかった. しかし, スマート構造の概念を地上構造物に適用することができれば, 高層建物の制振や鉄骨造大スパン建物の微振動制御などに, 既存の方法に比べさまざまな利点をもつ新しい制振方式を提供することができる.

著者らの一部は, スマート構造を地上の大規模構造物に適用するための基礎的研究として, 実大のH形

鋼に積層型のピエゾアクチュエータを組み込んだスマート構造を開発してはりの制振を行い, 良好な性能を確認した⁽²⁾. さらに, セン断型変形の卓越した骨組構造物の柱をスマート構造とし, 柱に組み込んだピエゾアクチュエータによってその曲げモーメントを制御することによって構造物の制振を行う方法を提案し, 制御実験を行ってその有効性を確認した⁽³⁾. しかし, 実際の建物ではスレンダーな形状をもつものや, タワー状のものなど制御対象となる低次の振動モードにおける曲げ変形の成分が大きい建物も多数あり, このような建物においては柱の軸力制御を行って建物全体に曲げモーメントを与える方法も有効な制振方法であると考えられる. 本報では, セン断変形に加え, 曲げ変形も励起されるような4層の骨組構造物の建物モデルを用い, 柱の曲げモーメント制御, 軸力制御をそれぞれ単独に行うことの有効性を調べ, さらに両者の併用がアクチュエータの配置によって行えることを示して, これを実験的にも検証した. 制御器としては, モデルマッチング法による制御器, H^∞ 制御理論による制御器の2種類を設計し, これらを用いることによって, 建物の絶対加速度のみを用いる出力フィードバック制御

* 原稿受付 1997年2月19日.

^{*1} 正員, 東京大学生産技術研究所(〒106 東京都港区六本木7-22-1).

^{*2} 正員, 住友重機械工業(株)総合研究所(〒254 平塚市夕陽ヶ丘63-30).

^{*3} 住友重機械工業(株)総合研究所.

^{*4} (株)竹中工務店 技術研究所(〒270-13 印西市大塚1-5).

を行ってシステム全体を簡素化している。

2. 基礎理論

2.1 スマート構造による柱の曲げモーメント制御と軸力制御 本研究で用いた建物モデルを図1に示す。高さ約3.7 m, 1層約500 kgで4層からなる約2 tのモデルで、加振方向(短辺方向)にはブレースが入っており、低次の振動モードにはせん断変形成分に加え、曲げ変形成分を多く含むものとなっている。柱であるH形鋼へのアクチュエータの組込み方法は、図2に示すようにH形鋼から出した2本の腕の間に4個のピエゾアクチュエータを挟み込む形としており、1本の柱につき最下部に2ステージ(アクチュエータ8個分)の取付部がある。アクチュエータ取付部分は弱軸、強軸方向の断面二次モーメントがH形鋼のそれと等しくなるような断面形状となっており、取付けの際にはボルトとナットを用いてあらかじめアクチュエータに圧縮力を与えている。これは、ピエゾアクチュエータの変位が微小であるため、取付部のがた等による発生力の低下を防いでいる。さらに、アクチュエ

ータにはあらかじめバイアス電圧を印加しておき、柱の曲げモーメント制御のみを行う際には一本の柱の内側と外側のアクチュエータに逆位相の指令電圧を、軸力制御のみを行う際には同位相の指令電圧を加えるものとする。図3はその概念を示したものであるが、柱の曲げモーメント制御では建物の第1床スラブにせん断力を与え、軸力制御では回転モーメントを与えて建物全体の制振を行う。

2.1.1 柱の曲げモーメント制御 図4に示すようにピエゾアクチュエータ取付部をモデル化する。 H, h, r は図中に示すとおり、それぞれベースからアクチュエータ取付部中心までの長さ、アクチュエータを取付けているうでの間隔の1/2の長さ、H形鋼の中心からアクチュエータ中心までのうでの長さで、 L は柱の長さ、 F_{ex} は実験で得られたピエゾアクチュエータ1個あたりの発生力である。このとき、4個のアクチュエータからのモーメントが固定端に及ぼすせん断

Fig. 1 Building model

Fig. 2 Piezoelectric actuator mounting portion

Fig. 3 Concept of bending moment control and axial force control of columns

Fig. 4 Model of piezoelectric actuator mounting portion

力 F_{all} は、床スラブが剛であるとする以下に示すとおりとなる。

$$F_{all} = \frac{48hr}{L^3}(L-2H)F_{ex} \quad \dots\dots\dots (1)$$

2・1・2 柱の軸力制御 ピエゾアクチュエータを取付ける柱を図5のようにモデル化する。ここで、アクチュエータ取付部のH形鋼の長さ、剛性を L_{Ha} , k_{Ha} , 取付部上端から第1床スラブまでのH形鋼の長さ、剛性を L_{Hb} , k_{Hb} , アクチュエータがステージに与える力を F , このときのステージの変位を Δx , 第1床スラブの変位を y_b , 柱がベースを押す力を f_{Ha} , 第1床スラブを押す力を f_{Hb} とする。このとき、

$$F = f_{Ha} + f_{Hb} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$f_{Ha} = k_{Ha}\Delta x \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$f_{Hb} = k_{Hb}(\Delta x - y_b) \quad \dots\dots\dots (4)$$

より、

$$f_{Hb} = \frac{k_{Hb}}{k_{Ha} + k_{Hb}}F - \frac{k_{Ha}k_{Hb}}{k_{Ha} + k_{Hb}}y_b \quad \dots\dots\dots (5)$$

である。ここで

$$k_{Ha} : k_{Hb} = L_{Hb} : L_{Ha}$$

より、

$$f_{Hb} = \frac{L_{Ha}}{L_{Ha} + L_{Hb}}F - \frac{k_{Ha}k_{Hb}}{k_{Ha} + k_{Hb}}y_b \quad \dots\dots\dots (6)$$

右辺第2項は柱の剛性に関する項であるから、ピエゾアクチュエータの発生力は、 $L_{Ha}/(L_{Ha} + L_{Hb})$ 倍されて、建物に伝わることになる。

2・2 運動方程式 制御対象を図6に示すような n 層の骨組構造物とし、柱の最下層に p ステージのアクチュエータを設置するものとする。各層の質量および重心回りの慣性モーメントをそれぞれ下から $m_1 \sim m_n$, $I_1 \sim I_n$ とすると、このモデルに対する運動方程式は以下になる。

$$[M_s]\{\ddot{X}\} + [C_s]\{\dot{X}\} + [K_s]\{X\}$$

Fig. 5 Model of column

$$= \{F_P\} + \{M_P\} - [M_s] \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \ddot{z} + \{w_f\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

状態変数 $\{X\}$ は、各層の地面に対する相対せん断変位、および重心回りの回転で、

$$\{X\} = \{\{x\}\{\theta\}\}^T = \{x_1 x_2 \dots x_n \theta_1 \theta_2 \dots \theta_n\}^T$$

であり、 $\{F_P\}$, $\{M_P\}$ はそれぞれ、ピエゾアクチュエータの力が建物に与えるせん断力、およびモーメントである。 $[M_s]$, $[C_s]$, $[K_s]$ は、それぞれ建物モデルの拡張された質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスで、その他以下に示すとおりである。

$$[M_s] = \begin{bmatrix} [M_m] & 0 \\ 0 & [M_I] \end{bmatrix},$$

$$\begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} = \{11 \dots 100 \dots 0\}^T$$

$$\{F_P\} = \{p_{f1}\} \sum_{j=1}^p K_{Pj} u_{fj},$$

$$\{M_P\} = \{p_{m1}\} 16 L_s \sum_{j=1}^p K_{hj} K u_{mj}$$

$$\{p_{f1}\} = \{10 \dots 000 \dots 0\}^T,$$

$$\{p_{m1}\} = \{00 \dots 010 \dots 0\}^T$$

ただし、 $\ddot{z}$ は地動加速度、 $\{w_f\}$ は風外力、 u_{fj} , u_{mj} はそれぞれ j ステージのアクチュエータへの曲げモーメント制御、軸力制御のための制御電圧、 L_s は2本の柱間の距離の1/2の長さ、 K_{Pj} は j ステージのアクチュエータ16個が上下の階に与える単位電圧当たりのせん断力、 K は1個のアクチュエータの単位電圧当たりの発生力で、 $K_{hj}K$ は j ステージのアクチュエータ1個が与える単位電圧当たりの軸力である。

式(7)を、 $\{X\} = [T]\{Q\}$ なる座標変換を行ってモード分解する。ただし、 $\{Q\} = \{q_1 q_2 \dots q_{2n}\}^T$ である。ここから、建物の i 次モードに関する運動方程式は以

Fig. 6 Analytical model

Case where the signs of t_{li} and t_{n+1i} are the same Case where the signs of t_{li} and t_{n+1i} are opposite

Fig. 7 Combined use of bending moment control and axial force control

下のようなになる。

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{1}{m_i^*} \left(t_{li} \sum_{j=1}^p K_{pj} u_{fj} + t_{n+1i} 16L_s \sum_{j=1}^p K_{hj} K u_{mj} \right) - \beta_i \ddot{z} + \nu_{fi} \quad (8)$$

ここで、 ω_i , ζ_i , β_i , ν_{fi} はそれぞれ i 次モードの固有振動数、減衰比、刺激係数、風外力で、 t_{ij} はモーダルマトリックス $[T]$ の ij 成分である。

2.3 柱の曲げモーメント制御と軸力制御の併用

式(8)において、右辺中かつこの u_{fj} および u_{mj} の係数 $t_{li} K_{pj}$, $t_{n+1i} 16L_s K_{hj} K$ の正負はモーダルマトリックス t_{li} , t_{n+1i} の正負と同じである。図7に示すようにアクチュエータに曲げモーメント制御、軸力制御の制御電圧を同時に印加する場合、 t_{li} , t_{n+1i} の符号が同じならば柱の外側、逆ならば内側のアクチュエータへの指令電圧が反対側に比べて大きくなる。したがって、同じ能力のアクチュエータが複数個使用可能な場合には、柱の両側で配置するアクチュエータの個数を変えたほうがその能力をより有効に利用できることになる。そこで、1本の柱に n 個のアクチュエータを取付ける場合の最適なアクチュエータ配置について考える。 t_{li} , t_{n+1i} の符号が同じであるとき、図8に示すようにアクチュエータを柱の外側に a 個、内側に $(n-a)$ 個配置した場合(ただし $n \geq a \geq n/2$)、すべてのアクチュエータの能力を同等に使うことを考えると、これは次のようなアクチュエータ配置に相当する。

図8(a)の場合、軸力制御に $n/2$ 組、曲げモーメント制御に $(2a-n)/2$ 組のアクチュエータを配置した場合と等価であり、図8(b)の場合、軸力制御に $(2a$

(a) Case of actuator forces on the outside and inside having the same direction

(b) Case of actuator forces on the outside and inside having opposite directions

Fig. 8 Arrangement of actuators

$-n)/2$ 組、曲げモーメント制御に $n/2$ 組のアクチュエータを配置した場合と等価になる。図8(a), (b) どちらの場合でも、 a は大きければ大きいほどより効果的であり、結局 $a=n$ つまり、アクチュエータをすべて外側に配置するのが最も効率が良いことになる(ただし、純せん断モデル、純曲げモデルに関しては、アクチュエータをどのように配置しても性能は変わらない)。同様に、 t_{li} , t_{n+1i} の符号が逆であるときは、アクチュエータをすべて内側に配置するのがもっとも効率が良い。

3. 制御器の設計

制御則には前報と同じく、モデルマッチング法と、 H^∞ 制御理論を用いる。式(8)において

$$\frac{1}{m_i^*} \left(t_{li} \sum_{j=1}^p K_{pj} u_{fj} + t_{n+1i} 16L_s \sum_{j=1}^p K_{hj} K u_{mj} \right) = f_i$$

と置き換えると、

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = f_i - \beta_i \ddot{z} + \nu_{fi} \quad (9)$$

ここで、 $\xi_i = q_i + \beta_i z$ としてモード絶対座標を用いて書き換えると、

$$\ddot{\xi}_i + 2\zeta_i \omega_i (\dot{\xi}_i - \beta_i \dot{z}) + \omega_i^2 (\xi_i - \beta_i z) = f_i + \nu_{fi} \quad (10)$$

風による外乱項 ν_{fi} を無視して、式(10)をラプラス変換すると、

$$L(\ddot{\xi}_i) = \frac{2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2} \beta_i L(\dot{z}) + \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2} L(f_i) \quad (11)$$

となる。

3.1 モデルマッチング法による制御器の設計⁽⁴⁾

式(11)で表される一つのモードに対して、図9に示すような制御システムを考える。 r , u , y , v , d はそれぞれ、目標値、制御入力、制御量、観測ノイズ、外乱を

Fig. 9 Control system block diagram
(Model matching)

Fig. 10 Transfer functions (Model matching)

表すものとする。このシステムにおいて、

$$y = L(\ddot{\xi}_i), \quad d = L(\ddot{z}), \quad u = L(f_i)$$

とおくと y は次式で表される。

$$y = P_{dy}d + P_{uy}u \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 P_{dy} , P_{uy} はそれぞれ、プラントの外乱および制御入力から制御量までの開ループ伝達関数で以下に示すとおりである。

$$P_{dy} = \frac{\beta_i(2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2)}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2}, \quad P_{uy} = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2}$$

ここで、 W_{ry} , W_{vy} , W_{dy} をそれぞれ目標値、ノイズ、外乱から制御量までの開ループ伝達関数であるとする。モデルマッチング法によってプロパな制御器が設計されるためには上記の伝達関数が実現条件、連結条件、次数条件の三つの条件を満たす必要がある。制御系の設計は以下の三つの指針を満たすよう、外乱 d から制御量 y までの伝達関数を指定することによって行った。

- (1) 建物の一次モードの減衰比を 10%にする
- (2) 制御信号のドリフト防止のため、外乱から制御入力への伝達特性に 1 Hz のハイパス特性をもたせる
- (3) 高周波のノイズ対策として、ノイズから制御入力への伝達特性に、100 Hz で 2 次のローパス特性をもたせる

一次モードにおける伝達関数 W_{dy} , W_{du} , W_{vu} を図 10 に示す。制御器の次数は 4 次である。なお、モデルマ

Fig. 11 Control system block diagram (H^∞)

Fig. 12 Transfer functions (H^∞ control theory)

atching法に関する詳細は文献(4)を参考にされたい。

3・2 H^∞ 制御問題の適用

H^∞ 制御理論による制御器の設計は、ロバスト安定性と制御性能を同時に考慮する混合感度問題として行った。図 11 に制御器のブロック線図を示すが、モデルの変動として前報で用いた乗法的変動に加え、制御信号のドリフト防止のための加法的変動を考慮した。ここで、 w は仮想的な外乱であり、仮想的出力として z_T , z_S , z_R を用いて、これらに対する周波数重み関数 W_T , W_S , W_R を設定した。モデルマッチング法による設計と同じく、制御器は建物の一次モードの減衰比を 10%にするようなものとし、設計された制御器の重み関数、および制御、非制御時の外乱からモード加速度への開ループ伝達関数は図 12 に示すとおりである。重み関数は、高振動数でのノイズ対策のため W_T を高周波数帯域でゲインが高くなるような関数とし、共振周波数での制御のため W_S は建物の一次モード固有振動数でゲインが高くなるような関数とした。また、制御信号のドリフト防止の観点からは、 W_R は低周波数帯域でゲインを高くすることが望ましいが、制御器の次数を抑えるため本研究では定数とした。このとき制御器の次数は 6 次となる。

4. 振動制御実験

4・1 実験モデル 振動台での加振実験によって

同定された建物モデルの非制振状態でのモードパラメータは表1に示すとおりで、実験によって固有振動数で1～3次、減衰では1次が求まっている。本実験で用いた piezoアクチュエータは前報と同じく積層型のもので、その仕様は表2に示すとおりである。

図13に本実験での制御システムを示す。建物モデルの2, 3, 4, 屋上階の絶対加速度を取込んでDSPで建物の一次モード加速度を求めて制御電圧を計算している。なお、本研究ではすべてのアクチュエータに印加される制御電圧の絶対値が同じになるようにしている。制御のサンプリングタイムは1msである。

4・2 ピエゾアクチュエータによる正弦波加振実験

ピエゾアクチュエータ16個を第1ステージに組み込み、アクチュエータによる建物の正弦波加振実験を行っ

Table 1 Modal parameters of building model

Mode	Natural Frequency(Hz) (Experiment)	Natural Frequency(Hz) (Identification)	Damping Ratio(%) (Identification)
1st	16.3	16.3	1.0
2nd	42.0	47.0	
3rd	72.5	72.5	

Table 2 Specifications of piezoelectric actuator

Manufacturer	Tokin corporation
Type	NLA-25×25×36
Dimension (mm)	25×25×36
Rated voltage (V)	100
Max. displacement ($\mu\text{m}/100\text{V}$)	30
Provided force (kN/100V)	19.8

た。第2ステージには取付ステージ部の局部変形を抑えるため、piezoアクチュエータと同寸法のアルミブロックを16個用意してこれを組込んだ。加振周波数は2～48Hzで、加振の振幅は2～25Hzが $\pm 15\text{V}$ 、25～48Hzが $\pm 6\text{V}$ の電圧一定加振とした。加振方法は曲げモーメント型加振、軸力型加振と、外側、内側のアクチュエータそれぞれ8個のみの加振の4とおりとした。ここでの加振能力の大小が制御を行うときの制御効果に対応することになる。図14は加振結果で横軸に周波数、縦軸に最上階加速度をとったものである。アクチュエータ16個を用いた加振では、一次モードにおいては軸力加振が若干勝っているもののほぼ同等の加振能力があり、二次モードにおいては曲げモーメント加振が軸力加振の約5倍の能力をもっている。さらに、軸力加振では39Hz付近に反共振点があって、一次モードの場合と位相が反転している。この結果、アクチュエータ8個での加振では、一次モードでは外側、二次モードでは内側で加振した場合に大きな加振能力が得られ、特に一次モードにおいては曲げ

Fig. 13 Control system

Fig. 14 Sinusoidal excitation by piezoelectric actuators

Fig. 15 Vibration control results against wide-band random wave (Model matching)

Fig. 16 Vibration control results against wide-band random wave (H^∞ control theory)

Fig. 17 Vibration control performance

モーメント加振と軸力加振の能力がほぼ同じであったため、外側8個のアクチュエータで加振しただけで、16個のアクチュエータを用いた場合とほぼ同等の加振能力があった。

4・3 振動制御実験 1~30 Hz で一様なパワースペクトルをもつ広帯域ランダム波を入力波とする振動制御実験を行った。実験は16個のアクチュエータを第1ステージに組込んで行った。図15, 16はそれぞれ、モデルマッチング法、および H^∞ 制御理論による制御器で制御を行った場合の時刻歴応答波形である。図は左から非制振の場合、柱の曲げモーメント制御のみを行った場合、軸力制御のみの場合、外側8個のアクチュエータだけで制御を行った場合で、上から振動台加速度、建物モデルの2階~最上階加速度、制御電圧である。制御器は、曲げモーメント制御において建物の一次モードの減衰比が10%となるよう設計し、軸力制御、外側8個による制御ではアクチュエータの制御電圧が曲げモーメント制御の場合と同じになるよう設計した。結果として、モデルマッチング法を用いた場合と H^∞ 制御理論を用いた場合、ともに軸力制御では減衰比を約11%、外側8個での制御では約10.5%となるような制御器となっている。制振性能はどの制御方法でもほぼ同等で、最上階加速度の最大値、rms値ともに非制振の場合の1/3以下に抑えることができる。図17は制振性能を最上階加速度に注目して図示したものである。振動台加速度に若干のばらつきがあったが図はこれらを平均したもので代表させている。柱の曲げモーメント制御、軸力制御では制御方法によらず、最大値、rms値ともにほぼ同等な制振性能をあげていることがわかり、本実験モデルの一次モー

ドの制御では外側8個のアクチュエータを使用するだけでも、これと同じ性能をあげることができている。また、制御器設計にモデルマッチング法を用いた場合と H^∞ 制御理論を用いた場合でも、性能上ほとんど差異はなかった。

5. あとがき

本研究ではスマート構造によって地上の構造物のアクティブ制振を行う方法の一つとして、建物の柱にピエゾアクチュエータを組込んでスマート構造とし、柱の曲げモーメント、軸力を制御することによってアクティブ制振を行う方法を提案し、以下のような結論を得た。

- (1) 振動モードにせん断型変形だけでなく曲げ変形も多く含むような建物では、柱の軸力制御が制振方法として有効であることを実験的にも確認した。
- (2) 柱の曲げモーメント制御、軸力制御を併用することは、ある単一のモードに関しては柱の片側にアクチュエータを固めて配置することで実現できることを示し、4層の骨組構造物の一次モードの制御で実験的にもその有効性を確認した。
- (3) 絶対加速度のみをフィードバックする制御器として、モデルマッチング法によるもの、 H^∞ 制御理論によるものの2種類を設計し、同等の性能を得た。

文 献

- (1) 例えば, Wada, B. K., *AIAA/ASCE/AHS/ASC 30th SDM Conf.*, (1989).
- (2) 藤田隆史・ほか5名, 機論, **61**-584, C(1995), 1337-1342.
- (3) 鎌田崇義・ほか6名, 機論, **62**-599, C(1996), 2577-2584.
- (4) 田川泰敬・ほか3名, 機論, **54**-507, C(1988), 2689-2696.