大形piezoアクチュエータを用いたスマート構造による 建築構造物のアクティブ制振*

嶋崎 守^{*1}, 藤田隆史^{*1}, 畑山貴義^{*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 Buildings with Smart Structure Using Large-Scale Piezoelectric Actuators

Mamoru SHIMAZAKI^{*5}, Takafumi FUJITA, Takayoshi HATAYAMA,
Takeo ARIKABE, Nobuyoshi MURAI, Satoru AIZAWA and Kotaro TOYAMA

^{*5} Institute of Industrial Science, University of Tokyo,
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

Applicability of a smart structure using piezoelectric actuators was investigated for active control of wind-induced vibration of buildings in which piezoelectric actuators of stack type were attached to the bottom parts of the columns for their bending moment control. A large-scale piezoelectric actuator consisting of 30 piezoceramic plates of a 100 mm×100 mm×5 mm^H outer size was fabricated and tested, showing satisfactory results that the maximum displacement under a 196 kN initial compressive load was 94×10^{-6} m, and the maximum force under zero displacement condition was 270 kN, when a 3.0 kV voltage was input. Simulation studies showed that the smart structure using the large-scale piezoelectric actuators could have almost the same performance as a current active mass damper for an actual 9-story building of a 30.65 m height and a 273 t total mass.

Key Words: Vibration Control, Building, Smart Structure, Large-Scale Piezoelectric Actuator, Practical Application

1. ま え が き

著者らは高層建物や塔状建物にpiezoアクチュエータを用いたスマート構造を適用し、既存の方法に比べてさまざまな利点をもつ可能性のある新しい制振方式の研究を行っている^{(1)~(3)}。これまでの研究では、縮小建物モデルを用いた振動制御実験により、アクティブマスダンパと同等の制振性能を有することを確認した。今後の実用化には、アクチュエータの大型化と、それを用いた場合の制振性能の予測が必要になる。

本研究では、制振性能の予測に必要なアクチュエータ発生力を解析し、実験により妥当性を検証している。また現在の技術で比較的容易に製作可能な大形piezoアクチュエータを製作してアクチュエータ特性を実験的に検討している。さらに実大建物を想定してアクティブマスダンパとの比較を行って、大形piezoアクチュエータを用いたスマート構造による建築構造

物のアクティブ制振の技術的な可能性を示している。

2. アクチュエータ発生力の解析

2.1 縮小建物モデル 振動制御実験⁽²⁾に用いた4層建物モデル(図1)は、高さ3.7 m、総質量2.0 tで、図2に示すように、第1層の各柱脚部にある2段のステージ部に、25×25×36^H mmのpiezoアクチュエータが各ステージ部に4個、合計8個組込まれ、各柱の外側と内側のアクチュエータを逆位相で動かすことで柱に曲げモーメントを与える構造を有している。各アクチュエータは、力の伝達効率向上のために予圧縮力をかけて固定され、さらにバイアス電圧を予め印加することで、伸びる方向にも縮む方向にも力を発生する。制御対象の1次および2次の固有振動数と減衰比は、それぞれ9.3 Hz, 0.4%, 27.1 Hz, 0.6%で、実験ではこの減衰比をとともに10%にすることができた⁽²⁾。

2.2 アクチュエータ発生力 25×25×36^H mmのpiezoアクチュエータの単体での発生力および発生変位は21.2 kN, 29.7 μmである⁽⁵⁾。これは変位を完全に拘束した場合に取出せる力 F_p 、および変位を全く拘束しない場合に発生する変位 D_p であるが、スマート構造では構造部材に組込んで使用するため、アク

* 原稿受付 2000年8月10日。

*¹ 正員、東京大学生産技術研究所(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)。

*² 正員、住友重機械工業(株)総合技術研究所(〒254-0806 平塚市夕陽ヶ丘63-60)。

*³ 住友重機械工業(株)総合技術研究所。

*⁴ (株)竹中工務店技術研究所(〒270-1352 印西市大塚1-5)。

E-mail: shima@iis.u-tokyo.ac.jp

Fig. 1 Scale model of building

Fig. 2 Piezoelectric actuators attached to column

チュエータ発生力 F は、図 3 に示すようにアクチュエータの剛性 k_p ($25 \times 25 \times 36^{\text{H}}$ mm の剛性は単体特性試験⁽⁵⁾ から $k_p = 7.81 \times 10^5$ kN/m が得られている) と組込み部全体の剛性 k の交点で決まる。縮小建物モデルでは、アクチュエータは発生力測定用の荷重計を介して予圧縮ボルトにより固定されているため、組込み部全体の剛性 k は、ステージ部の剛性 k_s 、予圧縮ボルトの剛性 k_b 、および荷重計の剛性 k_l が直列に接続された状態の剛性である。また、ステージ部の剛性 k_s は、柱に曲げモーメントを与えるようにアクチュエータを駆動させた時のアクチュエータ発生力とステージの変形量から求まる剛性である。以上から、アクチュエータ発生力 F は次式で表される。

$$F = \frac{F_p}{(k_s^{-1} + k_p^{-1} + k_b^{-1} + k_l^{-1}) \cdot k_p} \dots\dots\dots (1)$$

2.3 ステージ部の剛性解析 解析には FEM を用いた。建物モデルの低次の振動モードはせん断形変

Fig. 3 Force and displacement produced by piezoelectric actuator

Fig. 4 FEM analysis of stage for installation of piezoelectric actuator

形が支配的で、また 2 階床スラブは十分に剛であるとし、FEM モデルは第 1 層の 1 本の柱のみを考え、上端面の回転を拘束した。ステージ部の剛性は、第 1、第 2 ステージに力を与えたときのステージ変位から算出した。図 4 に変形状態の FEM モデルを示す。この解析によりステージ部の剛性は、第 1 ステージは $k_{s1} = 2.80 \times 10^5$ kN/m、第 2 ステージは $k_{s2} = 1.85 \times 10^5$ kN/m と求められた。

2.4 予圧縮ボルトと荷重計の剛性計測 予圧縮ボルトと荷重計の剛性は、ピエゾアクチュエータの単体特性実験⁽⁴⁾⁽⁵⁾ と同じ方法で直接計測し、予圧縮ボルトは $k_b = 5.30 \times 10^5$ kN/m、荷重計は $k_l = 2.80 \times 10^5$ kN/m と同定された。以上から式(1)を用いてアクチュエータ発生力を推定すると、第 1 ステージは 2.63 kN/50 V、また第 2 ステージは 2.24 kN/50 V となった。

2.5 静的加力実験結果との比較 縮小建物モデルにアクチュエータを荷重計と予圧縮ボルトを介して、予圧縮力 9.80 kN をかけて組込み、50 V のパイ

アス电压印加後, そこを基準に, 柱に曲げモーメントが作用するように外側と内側のアクチュエータとで正負逆の電圧(± 25 V, ± 50 V)を静的に印加した状態でのアクチュエータ発生力およびステージ変位を測定した。図5はその関係を示したもので, 実験結果と, 2・3節で得られた解析結果(破線)は, ほぼ良好な一致が得られた。

3. 大形ピエゾアクチュエータの特性

3・1 実験装置 図6に製作した大形ピエゾアクチュエータの構造を示す。外形寸法は $102 \times 102 \times 170$ mmで, $100 \times 100 \times 5$ mmの圧電セラミック板30枚が上下の鋼製板と側面の4本の支柱で固定されている。図7に示すように, 実験はアクチュエータを鋼製ブロックで上下から挟み込み, 材料試験機により荷重計を介して加圧する方法で, アクチュエータの発生力, 発生変位, および回路中に挿入された抵抗を介して駆動電流量を計測した。実験には2基のアクチュエータA, Bを使用し, 予圧縮力19.6 MPaのもとで各特性を測定した。

3・2 変位ヒステリシス 図8はAの発生変位と印加電圧の関係を示したものである。この実験では1.5 kVのバイアス電圧を印加した。変位ヒステリシ

Fig. 6 Configuration of large-scale piezoelectric actuator

Fig. 7 Test apparatus

Fig. 5 Relationships between force and displacement of actuators in stages

Fig. 8 Hysteretic characteristics of actuator displacement

スは約 16% で、 $25 \times 25 \times 36^H$ mm のものと同程度であった。

3.3 発生力と発生変位 アクチュエータに所定の電圧を印加して変位させ、電圧を一定に保ったまま元の変位に戻るまで装置で加圧し、単体での発生変位および発生力を測定した。図 9 は A の結果で、発生変位および発生力は、 $94 \mu\text{m}/3 \text{ kV}$ 、 $270 \text{ kN}/3 \text{ kV}$ であった。ところで、発生変位 D_p は、積層数 n 、圧電定数 d_{33} 、印加電圧 V を用いて以下のように表せる。

$$D_p = n d_{33} V \quad \dots\dots\dots (2)$$

また発生力 F_p は、図 3 に示したように、アクチュエータの剛性 k_p を用いて以下のように表せる。

$$F_p = k_p D_p = Y S D_p / h \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで Y 、 S 、 h は、それぞれアクチュエータの縦弾性係数、断面積、高さである。以上から、発生変位および発生力は、圧電材料と形状が決定されれば求められ、本アクチュエータの場合、発生変位はほぼ設計値どおりであり、発生力は設計値を 30% 上回った。また A と B の個体差はなく、縦弾性係数は 40~50 GPa で、 $25 \times 25 \times 36^H$ mm のものとほぼ同じであった。

3.4 正弦波電圧印加時の電流 図 10 は A の電流と周波数の関係である。電流は周波数に依存し、アクチュエータの静電容量を $3.5 \mu\text{F}$ と同定した計算結

Fig. 9 Relationship between force and displacement

Fig. 10 Relationship between current and frequency

果とよく一致している。また個体差はなかった。ただし、静電容量は設計値と比較して 40% ほど大きくなった。

4. 実大建物に対する制振性能

4.1 実大建物の概要 実大建物は、図 11 に示す東京都千代田区に実在する建物⁽⁶⁾をモデル化した。この建物は、高さ 30.65 m、総質量 273 t の 9 階建て鉄骨造で、短辺方向の一次モードを制振するためのアクティブ・パッシブ切換え型マスダンパが最上階に設置されている⁽⁶⁾。この建物を、図 12 および表 1 に示すような柱とはりからなる 9 層のラーメン構造(短辺方向は 4.14 m の 1 スパン、長辺方向は 4.60 m と 5.60 m の 2 スパン)にモデル化した。FEM によるモード解析の結果、短辺方向の 1 次および 2 次の固有振動数は 1.16 Hz、3.74 Hz で、減衰比は 1 次を 0.5% とし、それ以降は剛性比例で 3% を上限とした。アクチュエータ組込み部は第 1 層の各柱の柱脚部に 1 ステージ設け、1 本の柱に 4 基、建物全体で計 24 基の大形ピエゾアクチュエータを予圧縮ボルト(M 56)で固定

Table 1 Specifications of building

Story	Height [m]	Mass [t]	Column	Beam
9	3.20	10.9	H388×402×15×15	H350×175×7×11
8	3.25	41.0		
7	3.10	30.8	H394×398×11×18	H500×200×10×16
6	3.05	28.9		
5	3.05	29.9	H400×400×13×21	
4	3.05	28.9		H600×200×11×17
3	3.10	29.2	H400×408×21×21	
2	4.55	32.1		
1	3.20	41.5	H414×405×18×28

Fig. 11 Actual building

することとした。

4.2 アクチュエータ発生力の解析 実大建物のアクチュエータ組込み部の形状は、縮小建物モデルのそれを参考に図13に示すように決定した。ステージ部の剛性は2.3節と同様、FEM解析の結果、 1.58×10^6 kN/mとなった。大形piezoアクチュエータの剛性は単体特性試験から 2.88×10^6 kN/m が得られた。また予圧縮ボルトの剛性は、縮小建物モデルに用いた M16 の剛性計測結果を考慮して 9.59×10^5 kN/m とした。大形piezoアクチュエータ単体の発生力は特性実験から 90.0 kN/kV であり、以上から、アクチュエータ発生力は 15.4 kN/kV となった。

4.3 制御系の設計 実大建物の短辺方向の一次モードについての運動方程式は

$$\ddot{q} + 2\zeta\omega\dot{q} + \omega^2q = -\beta\ddot{z} + f$$

$$f = \{\phi_1 \quad \phi_2 \quad \phi_{12} \quad \phi_{23}\} \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

Fig. 12 Building with smart structure using large-scale piezoelectric actuator

Fig. 13 Stage in building

$$\times a \cdot u \cdot 12l \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで、 $q, \zeta, \omega, \beta, z, \phi_i, a, u, l$ は、それぞれモード変位、モード減衰比、固有円振動数、刺激係数、地震動変位、アクチュエータによりモーメントの作用する柱の節点 i の回転角、アクチュエータの単位印加電圧あたりの発生力、印加電圧、柱の中心からアクチュエータの中心までの距離である。

制御系の設計にはモデルマッチング法⁽⁷⁾を用いる。式(4)を $\xi = q + \beta z$ なるモード絶対座標を用いて書き換えると

$$\ddot{\xi} + 2\zeta\omega(\dot{\xi} - \beta\dot{z}) + \omega^2(\xi - \beta z) = f \dots \dots \dots (5)$$

となり、式(5)をラプラス変換すると

$$L(\ddot{\xi}) = \frac{\beta(2\zeta\omega s + \omega^2)}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} L(\dot{z}) + \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2} L(f) \dots \dots \dots (6)$$

となる。式(6)について、図14に示すような制御システムを考える。ここで 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、外乱を表わすものとする。このシステムにおいて、 $y = L(\ddot{\xi})$ 、 $d = L(\dot{z})$ 、 $u = L(f)$ とおくと、 y は次式で表される。

$$y = P_{dy}d + P_{uy}u \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 P_{dy} および P_{uy} は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ある。また、 $u = C_{ru}r + C_{yu}(y + v)$ より

$$y = (1 - P_{uy}C_{yu})^{-1}(P_{uy}C_{ru}r + P_{uy}C_{yu}v + P_{dy}d) \dots \dots \dots (8)$$

となる。ここで、 C_{ru} 、 C_{yu} はそれぞれ、制御器の目標値および制御量から制御入力までの開ループ伝達関数である。これらから次の三つの伝達関数 W_{ry} 、 W_{vy} 、 W_{dy} が得られる。

$$W_{ry} = (1 - P_{uy}C_{yu})^{-1}P_{uy}C_{ru} \dots \dots \dots (9)$$

$$W_{vy} = (1 - P_{uy}C_{yu})^{-1}P_{uy}C_{yu} \dots \dots \dots (10)$$

$$W_{dy} = (1 - P_{uy}C_{yu})^{-1}P_{dy} \dots \dots \dots (11)$$

これらはそれぞれ、目標値、ノイズ、外乱から制御量までの閉ループ伝達関数である。モデルマッチング法によりプロパな制御系が設計されるためには上記の伝達関数が以下の三つの条件を満たす必要がある。

Fig. 14 Control system block diagram

Fig. 15 Transfer functions

- (1) W_{ry} , W_{vy} の相対次数は P_{uy} の相対次数以上である。
 - (2) W_{ry} , W_{vy} の零点は P_{uy} の零点をすべて含む。
 - (3) $(1+W_{vy})$ の零点は P_{uy} のすべての極を含む。
- なお、モデルマッチング法に関する詳細は文献(7)を参考にされたい。

制御系は、モード減衰比が5%になるように、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設計した。図15に設計された制御器の制振性能を示す。このシステムの制御限界はアクチュエータの最大印加電圧で決まることになり、その限界を ± 2.5 kV とした。

制振性能の比較のため、アクティブマスダンパによる制振システムも設計した。アクティブマスダンパは可動質量 2.11 t、最大制御力 7.90 kN、許容変位 ± 0.3 m とし、4・1 節の実大建物に設置されているアクティブ・パッシブ切換え型マスダンパと同じ値とした。固有振動数、減衰比は最適同調値の 0.98 Hz、8.7% とした。ただし、減衰比はマスダンパ変位を抑制するために 15.0% の場合についても検討した。制御則は最適レギュレータを用い、制御目標は、この場合も一次のモード減衰比を 5% にすることとした。このシステムの制御限界はマスダンパの変位で決まることになり、その限界値を実際の場合と同じ ± 30 cm とした。

4・4 制振性能の比較 制振性能の予測解析には外乱入力としてエルセントロ NS 波を用いた。両者のアクティブ制振システムは、いずれも強風時の居住性向上を目的としたシステムであるため、風を外乱入力として用いる方が望ましいが、本解析は相対評価であるため、便宜上、地震動を用いることにした。

Fig. 16 Control performances of smart structure and active mass damper

図16に制振性能を示す。スマート構造の場合、図は上から、屋上の応答加速度、制御電圧、大形ピエゾアクチュエータ1基の駆動に必要な電流量である。またアクティブマスダンパの場合は、屋上の応答加速度、マスダンパ変位、制御力である。両者は制御目標が同じため、加速度低減効果は同等である。したがって制振性能は、アクティブ制御が限界となる地震動の大きさで比較する。スマート構造の場合、地震動の入力加速度が 0.24 m/s^2 で制御電圧の限界となる。一方、アクティブマスダンパは、マスダンパの減衰比が 8.7% の場合は 0.18 m/s^2 、15% の場合は 0.21 m/s^2 でマスダンパ変位が限界となる。この結果は、スマート構造の方がやや優れていることを示しているが、両者とも十分な最適化を経たものではなく、この結果だけで優劣はつけられない。しかし、スマート構造はアクティブマスダンパと同等の制振性能をもつことは示されたと考えられる。

5. あとがき

大形ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造による建築構造物のアクティブ制振の実用化を目指した研究の結果、以下の結論が得られた。

- (1) FEM によるアクチュエータ発生力の解析は、縮小建物モデルを用いた静的加力実験結果との比較により、その妥当性が示された。

(2) 最大変位 $94\text{ }\mu\text{m}/3.0\text{ kV}$, 最大発生力 $270\text{ kN}/3.0\text{ kV}$ の大形ピエゾアクチュエータの実現が確認された。

(3) 高さ 30.65 m , 総質量 273 t の実大建物に大形ピエゾアクチュエータ 24 基を用いたスマート構造を適用した場合の制振性能の予測解析によって, 本スマート構造はアクティブマスダンパと同等の性能を有することが示された。

文 献

- (1) 藤田隆史・ほか 5 名, 機論, **61**-584, C (1995), 1337-1342.
- (2) 鎌田崇義・ほか 6 名, 機論, **62**-599, C (1996), 2577-2584.
- (3) 鎌田崇義・ほか 6 名, 機論, **63**-615, C (1997), 3743-3750.
- (4) 嶋崎 守・藤田隆史, 機講論, **95**-10, V (1995), 43-44.
- (5) 嶋崎 守・藤田隆史, 機講論, **96**-5 (I), B (1996), 80-83.
- (6) 田中 清・ほか 7 名, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), 構造 I (1994), 983-984.
- (7) 田川泰敬・ほか 3 名, 機論, **54**-507, C (1988), 2689-2696.