

大規模スマート構造を適用した建築構造物のアクティブ制振

— 第 1 報, 有限要素法によるアクチュエータ発生力の解析 —

Active Vibration Control of Buildings with Large-Scale Smart Structure

— 1 st Report, Analysis of Actuator Force by Finite Elemental Method —

嶋 崎 守*・藤 田 隆 史*

Mamoru SHIMAZAKI and Takafumi FUJITA

1. ま え が き

近年, 宇宙構造物などを対象として, スマート構造と呼ばれる新しい構造概念が盛んに研究されている。著者らはこの概念を地上の大規模構造物に適用し, 高層建物や塔状建物を制振する研究を行っている^{1), 2)}。この研究では, ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造に関して, 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。また, この場合のアクチュエータとして用いる積層型ピエゾアクチュエータのアクチュエータ特性についても検討した^{3), 4)}。

スマート構造を適用した建築構造物のアクティブ制振では, アクチュエータは構造部材に組込んで使用されるため, アクチュエータ発生力は組込み部の構造に左右される。今後の大規模化および実用化には制振性能の予測は必要不可欠であり, ピエゾアクチュエータの組込み時の発生力を推定できなければならない。

本研究は, これまでの研究を基に, スマート構造を適用した建築構造物のアクティブ制振の大規模化・実用化を目指すものであり, 本報は, 大規模化のために必要となるアクチュエータの組込み時の発生力の解析方法について検討し, 実験によりその妥当性を検証したものである。

2. スマート構造を適用した縮小建物モデル

2.1 建物モデルの概要

振動実験に用いられた縮小建物モデルを図 1 に示す。本モデルは, 高さ 3.7 m, 総質量 2.0 t の 4 層鉄骨造で, 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 % である。ピエゾアクチュエータ組込み部は図 2 に示すように, 第 1 層の 4 本の各柱の柱脚部に 2 ステージあり, 全 32 個のアクチュエータを, 発生力を効率よく取出すため, 予圧縮ボルトで予圧をかけて固定

している。曲げモーメント制御の場合, 各柱の左右のアクチュエータが協調して逆相に動くことによって柱に曲げモーメントを与える構造であり, 一方, 軸力制御の場合, 各柱の左右のアクチュエータが協調して同相に動くことによって柱に軸力を与える構造である。アクチュエータには定格印加電圧の半分のバイアス電圧を予め印加し, 見かけ上アクチュエータが伸びる方向にも縮む方向にも力を発生できるようにしている。この縮小建物モデルにピエゾアクチュエータを 32 個組込んで行なった振動制御実験では, 曲げモーメント制御および軸力制御を行ない, 制御対象とした 1 次および 2 次モードの減衰比をともに 10 % にすることができた^{1)~2)}。

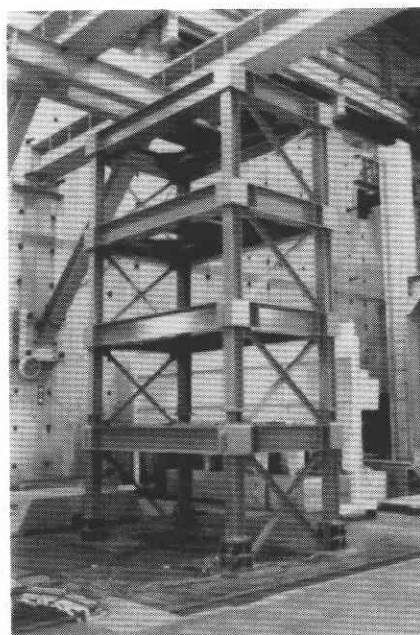


図 1 縮小建物モデル

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

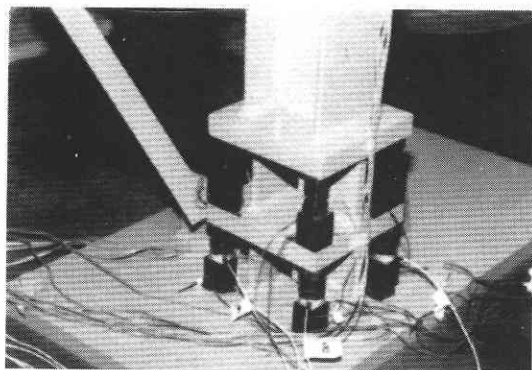


図2 アクチュエータ組込み部

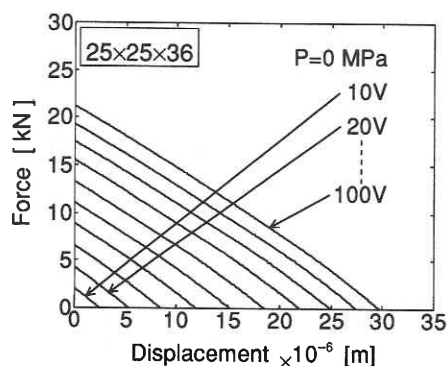


図3 ピエゾアクチュエータ 25×25×36 の特性

2.2 ピエゾアクチュエータの単体特性

縮小建物モデルに組込まれたピエゾアクチュエータ 25×25×36 の単体特性についてはすでに報告している⁴⁾。図3は発生力と発生変位の関係を示したものである。このピエゾアクチュエータの定格印加電圧 100 V での発生力および発生変位、すなわち、最大発生力および最大発生変位は 21.2 kN, 29.7 μm, であり、また、縦弾性係数は約 45 GPa である。

2.3 ピエゾアクチュエータの発生力

スマート構造では、アクチュエータを構造部材に組込んで使用するため、アクチュエータの組込み時の発生力は、組込み部全体の剛性に左右されることになる。本縮小モデルの場合、アクチュエータは発生力測定用のロードセルを介して予圧縮ボルトにより固定されているため、組込み時の発生力は、組込み部の剛性 k_s 、予圧縮ボルトの剛性 k_b 、およびロードセルの剛性 k_l に左右されることになる。組込み時の最大発生力 F_{max} は、以下のように表わせる。

$$F_{max} = \frac{F_p}{\left(k_s^{-1} + k_p^{-1} + k_b^{-1} + k_l^{-1}\right)^{-1} \cdot k_p} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F_p はピエゾアクチュエータ単体での最大発生力

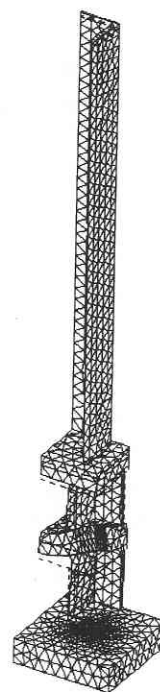


図4 柱の有限要素モデル (変形状態)

である。したがって、組込み時の発生力を推定するためには、組込み部全体の剛性が既知でなければならない。

3. アクチュエータ組込み部の剛性解析

スマート構造におけるアクチュエータ発生力は、組込み部全体の剛性に左右される。そのアクチュエータ発生力を解析するために、ここでは組込み部の剛性解析を有限要素法により行なった。解析では、ある 1 本の柱に組込まれたアクチュエータによってその柱に加えられたモーメントが他の柱に及ぼす影響は無視できると仮定し、第 1 層の柱 1 本だけを考えた。解析モデルの柱の高さは第 1 層床スラブの下端までとし、上端面の回転を拘束する。組込み部の剛性は、第 1 (下段) および第 2 (上段) ステージのアクチュエータ組込み部に力を与え、それによるステージ部の変位量から算出した。与える力は、縮小モデルの振動制御実験を参考に決定した。実験では 9.80 kN の予圧縮力を加えた後、50 V のバイアス電圧を印加した上で、最大 ± 50 V の範囲で制御が行われた。この時の発生力はロードセルにより計測されており、それは概ね ± 1.96 kN であった。したがって、組込み部には最小で 9.80 kN、最大で 13.72 kN の力が作用したことになる。これらから、解析モデルに与える力は、11.76 kN を与えた変形量を基準として、その状

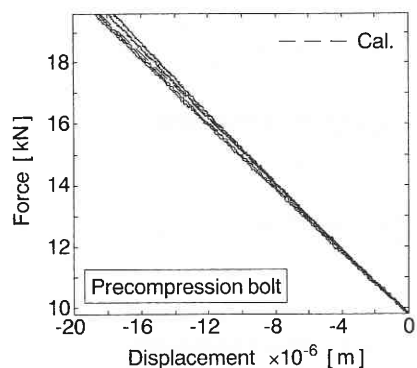


図5 予圧縮ボルトの剛性

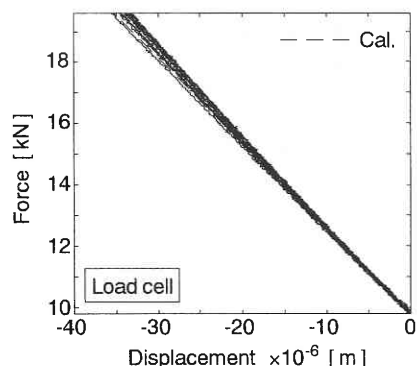


図6 ロードセルの剛性

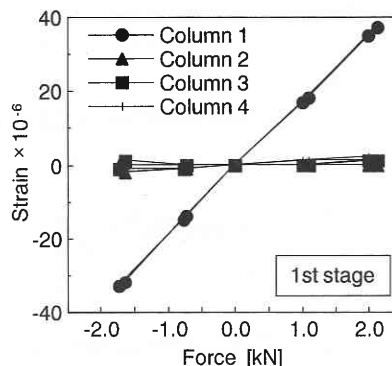


図7 組込み部のひずみと発生力の関係

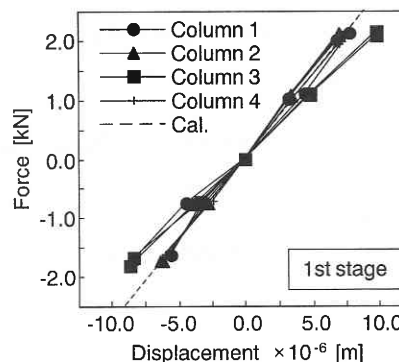


図8 組込み部の剛性

態から ± 1.96 kNの力を与えた場合の変形量から剛性を算出する。図4は一方に9.80 kN、もう一方に13.72 kNの力を与えた時の変形状態である。この解析により組込み部の剛性は、第1ステージは $k_1=2.80 \times 10^5$ kN/m、また第2ステージは $k_2=1.85 \times 10^5$ kN/mと求められた。

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直接測定した。測定はピエゾアクチュエータの単体特性の測定^{3), 4)}と同じ方法で行った。図5および図6はそれぞれの剛性測定結果であるが、双方ともおおむね線形であり、最小二乗近似により剛性は、予圧縮ボルトは $k_b=5.30 \times 10^5$ kN/m、またロードセルは $k_l=2.80 \times 10^5$ kN/mと同定された。

以上より解析的に求められた組込み部の剛性 k_s 、また、実験的に同定された予圧縮ボルトおよびロードセルの剛性 k_b 、 k_l より、式(1)を用いて組込み時の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、また第2ステージは2.24 kNとなり、アクチュエータ単体での最大発生力の1/10程度になった。

5. 静的加力実験結果との比較

静的加力実験によって、アクチュエータの組込み時の発

生力を計測し、推定された発生力と比較した。実験は第1層の1本の柱について第1、第2ステージにピエゾアクチュエータ8個を予圧縮力9.80 kNをかけて組込み、50 Vのバイアス電圧を印加後、柱にモーメントが加わるように左右のピエゾに正負逆の電圧を印加し、この状態での発生力、ステージの変位と組込み部のひずみを測定した。これを4本のすべての柱について行った。発生力は組込まれたロードセルにより、また変位については、各ステージの上下の板間の変位を非接触型変位計により測定した。組込み部のひずみは、それぞれのアクチュエータ個々の発生力に比例したひずみが発生する位置に貼付されたひずみゲージによって測定した。

図7は各印加電圧における第1ステージに組込まれたアクチュエータの発生力と組込み部のひずみの関係を示したものである。これによると、アクチュエータを組込んだ柱以外の3本の柱の組込み部のひずみは、アクチュエータを組込んだ柱のそれに比べ無視できるほど小さく、このことは組込み部の剛性解析時に、1本の柱のアクチュエータにより加えられたモーメントが他の柱に及ぼす影響は無視できると仮定したことが妥当であることを示している。また、第2ステージについても同様の結果であった。

図8は第1ステージおよび第2ステージの発生力と変位

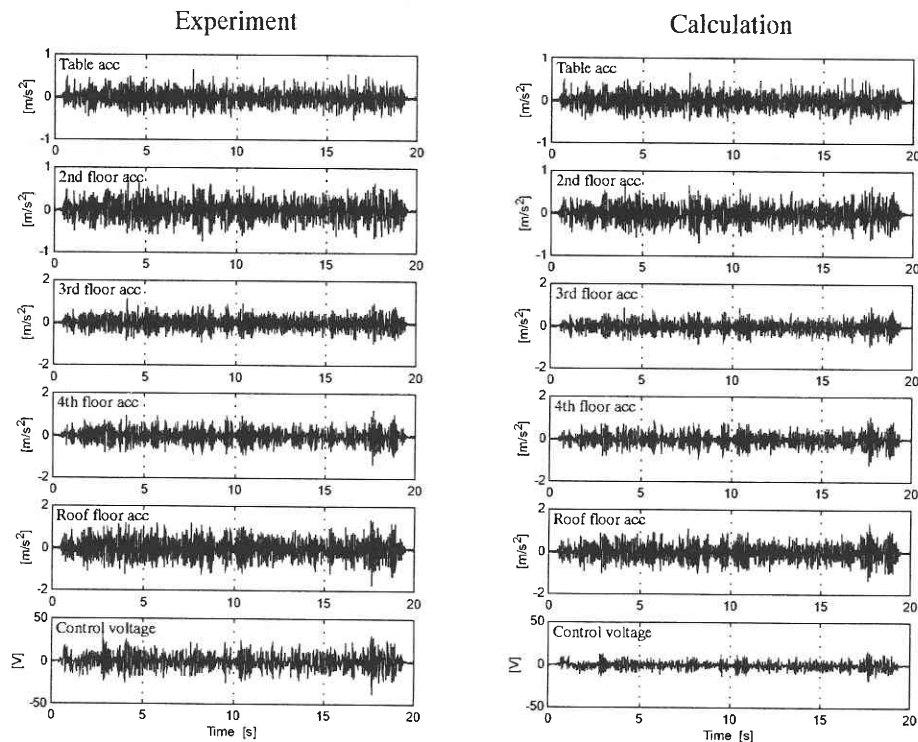


図9 時刻歴応答波形による振動実験結果との比較

の関係を示したもので、各組込み部の剛性を表わしている。図には FEM による解析結果も示しているが、実験結果と解析結果は良く一致しており、組込み部の剛性はかなり正確に推定できているといえる。ただ、実験では組込み時のアクチュエータの発生力は ± 50 V のピークピークで第 1 ステージでは 3.51 ~ 3.96 kN、また第 2 ステージでは 3.27 ~ 3.72 kN である。解析では第 1 ステージで 2.63 kN、また第 2 ステージで 2.24 kN であり、30 ~ 60 % の誤差がある。これは、組込み部の剛性が正確に推定できても、発生力を左右する組込み部全体の剛性について、未考慮の要因があるものと考えられる。しかし、この程度の誤差で発生力が推定できたことは大規模化・実用化にとって重要な進展である。

6. 振動実験結果との比較

本章では、推定されたアクチュエータの組込み時の発生力を用いて制振シミュレーション解析を行ない、縮小建物モデルを用いた振動実験結果と比較する。解析での入力波には振動実験で実際に入力された加速度波を用いる。図 9 は解析結果と振動実験結果とを時刻歴波形で比較したものである。制御電圧以外の各階の時刻歴応答はかなりよく一致している。しかし、制御電圧については、解析結果は実験結果の半分程度となっている。これは、振動実験の場合、

シミュレーション通りの制振効果が実現されにくいことに起因していると思われる。

7. あ と が き

スマート構造を適用した建築構造物のアクティブ制振の大規模・実用化を目指し、そのために必要となるアクチュエータの組込み時の発生力について、有限要素法を用いた解析方法を提案して発生力を推定した。その結果、縮小建物モデルを用いた静的加力実験結果と比較し 30 ~ 60 % の差で概ね推定できることを確認した。また、推定されたアクチュエータの組込み時の発生力を用いて制振シミュレーション解析を行ない、制振効果を振動実験結果と比較し、概ね妥当な結果が得られ、制振性能の予測が可能であることが実証された。

(1999 年 8 月 13 日受理)

参 考 文 献

- 1) 鎌田, 藤田, 畑山, 有壁, 村井, 相沢, 遠山: 日本機械学会論文集 C 編, 62-599 (1996), 2577-2584.
- 2) 鎌田, 藤田, 畑山, 有壁, 村井, 相沢, 遠山: 日本機械学会論文集 C 編, 63-615 (1997), 3743-3750.
- 3) 嶋崎, 藤田: 生産研究, 48-6 (1996), 335-338.
- 4) 嶋崎, 藤田: 生産研究, 48-9 (1996), 449-452.