

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 2 報, 実大建物に適用した場合の制振性能 —

Active Vibration Control of Buildings with Large-Scale Smart Structure

— 2 st Report, Simulation Analysis of Control Performance for an Actual Building —

嶋 崎 守*・藤 田 隆 史*

Mamoru SHIMAZAKI and Takafumi FUJITA

1. ま え が き

著者らはスマート構造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。

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, 前報¹⁾では, 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の解析方法を検討し, 実験により妥当性を検証し, 制振性能の予測が可能であることを示した。一方, 著者らは, 実用化に向けてアクチュエータの大容量化を目指し, 大型ピエゾアクチュエータを製作し, そのアクチュエータ特性について検討してきた²⁾。本報は, 大型ピエゾアクチュエータを用いて, 実大建物を想定して制振性能の予測解析を行ない, 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・実用化の可能性を例証したものである。

2. 想定した実大建物

2.1 構造概要

検討対象建物は, 図 1 に示す東京都千代田区にある建物^{3)~6)}を参考に想定した。この実大建物は, 高さ 30.65 m, 総質量 273 t の 9 階建ての鉄骨造純ラーメン構造の塔状建物で, 最上階には短辺方向の揺れの 1 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バが設置されている。図 2 にその外観を, また表 1 に諸元を示す。検討対象建物は, この実大建物と柱間スパン, 階高および各階質量をほぼ同じくした。図 3 の平面図および立面図に示すように, 検討対象建物は 9 層のラーメン構造で, 同じ層の全 6 本の柱に同一の H 形鋼を用い, 各層の全柱の断面二次モーメントの総和が実大建物のそれとほぼ等しくなるようにした。また, 梁は実大建物と全く同一の H 形鋼を用いた。表 2 に検討対象建物の各層の質量と柱および梁に

用いた H 形鋼を示す。

2.2 モード解析

検討対象建物について, 制振方向である短辺方向の有限要素法によるモード解析を行なった。1 次および 2 次モードの固有振動数は 1.16 Hz, 3.74 Hz で, 参考にした実大建物のそれら (1.23 Hz, 3.85 Hz) とほぼ近い値である。また減衰比は 1 次を 0.5 % とし, それ以降は剛性比例で 3 % を上限として決定した。

3. アクチュエータ発生力の解析

3.1 大型ピエゾアクチュエータの単体特性

検討対象建物に用いる大型ピエゾアクチュエータを図 4 に示す。この単体特性についてはすでに報告している²⁾。図 5 は各印加電圧における発生力と発生変位の関係を示し

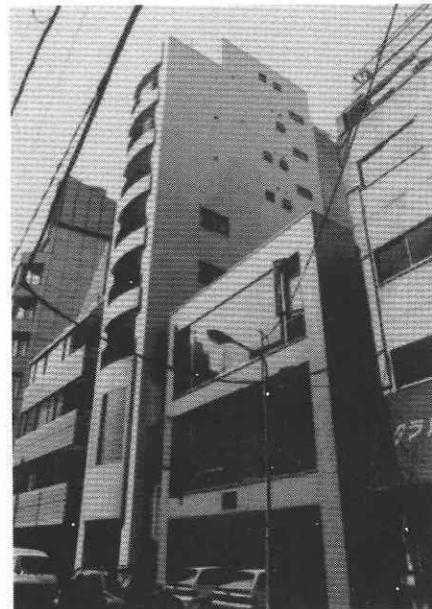


図 1 実大建物

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

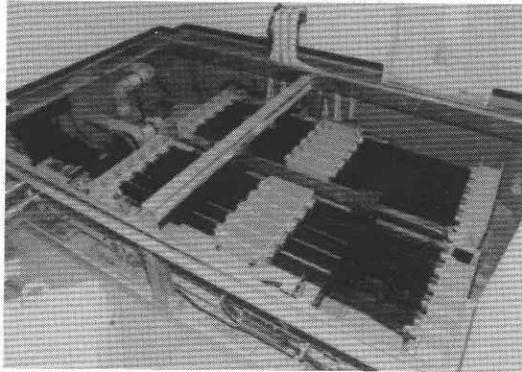


図2 アクティブ・パッシブ切換え型マスダンパ

層	柱	梁	質量 t
9	H388×402×15×15	H350×175×7×11	10.9
8	H394×398×11×18	H500×200×10×16	41.0
7			30.8
6			28.9
5			29.9
4	H400×400×13×21	H600×200×11×17	28.9
3	H400×408×21×21		29.2
2	H414×405×18×28	H600×200×11×17	32.1
1			41.5

表2 検討対象建物の柱と梁および質量

可動部質量	2,110 kg
質量比	1.70 %
固有周期	0.69 ~ 0.87 s
許容変位	±0.30 m
モータ定格出力	2.2 kW
最大制御力	7.90 kN
減衰係数	$1.47 \times 10^{-4} \text{Ns}^2/\text{m}^2$

表1 マスダンパの諸元

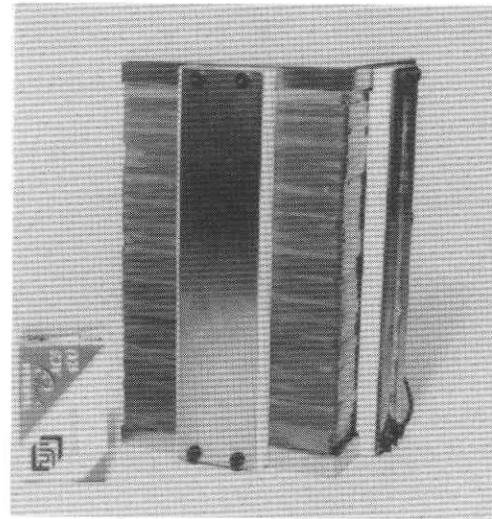


図4 大型ピエゾアクチュエータ

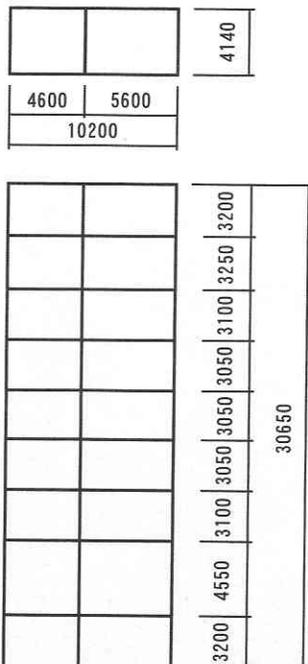


図3 想定した検討対象建物

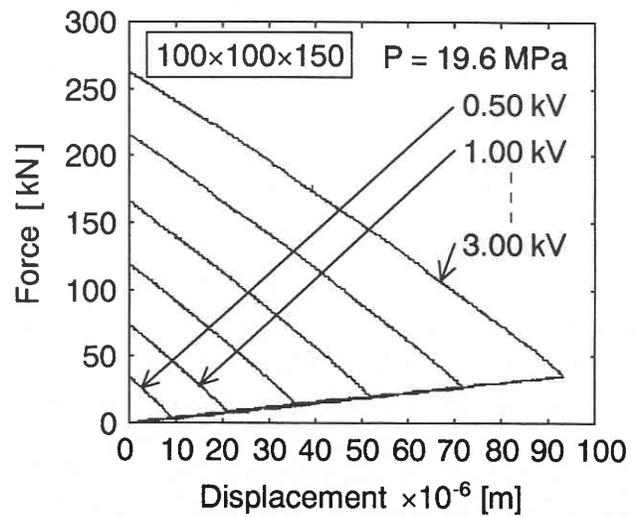


図5 大型ピエゾアクチュエータの特性

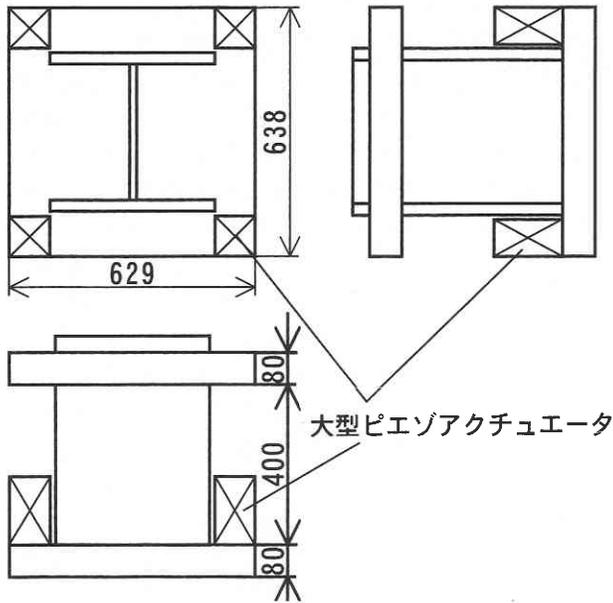


図6 実大建物の組込み部

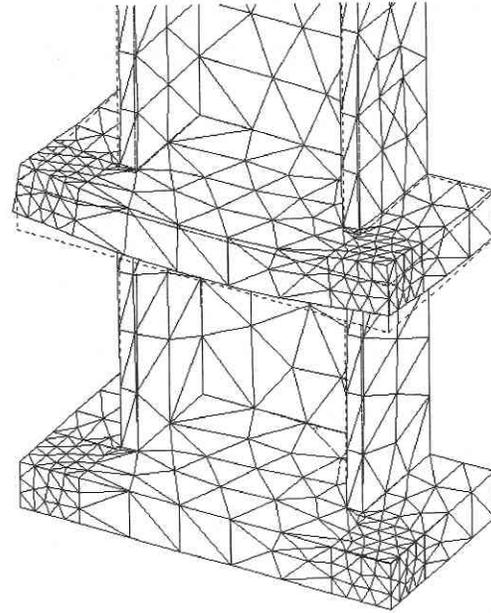


図7 組込み部の有限要素モデル (変形状態)

たものである。この大型ピエゾアクチュエータの発生力および発生変位は 90.0 kN/kV, 31.3 μm/kV であり、縦弾性係数は約 45 GPa である。

3.2 アクチュエータ組込み部形状の決定

組込み部の形状は、縮小建物モデルを参考に決定した。組込み部は 1 層めの全柱の柱脚部に 1 ステージずつ設け、1 本の柱に 4 基、建物全体で全 24 基の大型ピエゾアクチュエータを組込むこととした。図 6 に決定した組込み部の形状を示す。

3.3 アクチュエータ組込み部の剛性

組込み部の剛性解析を行なった。前報¹⁾で提案したように有限要素法により、組込み部に所定の圧力を与え、その変形量から剛性を計算した。アクチュエータ単体試験から、予圧縮力の最適値は 19.6 MPa である。またアクチュエータ発生力を ± 22.5 kN と見積もり、組込み部には最小で 19.6 kN, 最大で 64.6 kN の力を与えた。図 7 にその時の組込み部の変形状態を示す。この解析の結果、組込み部の剛性は $k_s = 1.58 \times 10^6 \text{ kN/m}$ と求められた。

3.4 大型ピエゾアクチュエータと予圧縮ボルトの剛性

大型ピエゾアクチュエータの剛性は単体試験から $k_p = 2.88 \times 10^6 \text{ kN/m}$ であることが判明している。また予圧縮ボルトは、組込み部のサイズを考慮して M 56 を使用するとした。この剛性は、縮小建物モデルに用いられた M 16 の剛性を参考に、ヤング率と形状から求めた結果 $k_b = 9.59 \times 10^5 \text{ kN/m}$ となった。

以上よりアクチュエータ発生力 F を式(1)から算出する

と、 $F = 15.4 \text{ kN/kV}$ となった。

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

4. アクティブ制振システムの設計

実大建物の有限要素法を用いた解析モデルから、1 次モードの運動方程式は以下のようになる。

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

ただし、

$$f = \{\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_{12} \ \phi_{23}\} \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \end{Bmatrix} a \cdot u \cdot 12r$$

である。ここで、 $q, \xi, \omega, \beta, z, \phi_i, a, u, r$ は、それぞれモード変位、減衰比、固有振動数、刺激係数、入力地震動の変位、アクチュエータにより柱にモーメントの作用する節点 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。制御則にはモデルマッチング法を用いる。制御目標は 1 次モードの減衰比を 5% にすることと

研究速報

し、制御に必要な全出力は全て観測可能とした。このシステムの制御限界はアクチュエータ最大印加電圧で決まり、 ± 2.5 kVとした。

制振性能の比較のために、アクティブマスダンパによる制御システムも設計した。アクティブマスダンパの諸元は表2に示したアクティブ・パッシブ切換え型マスダンパの諸元を参考に、可動質量2.11 t (質量比2.02%)、最大制御力7.90 kN、許容変位 ± 0.3 m、固有振動数0.98 Hz (最適パッシブ)、減衰比8.7% (最適パッシブ)とした。ただし、減衰比はマスダンパ変位の抑制を考慮した場合として15.0%の場合についても設計した。アクティブマスダンパによる制振の場合、制御則には最適レギュレータを用い、大型ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造による制振の場合と同様、制御目標は1次モードの減衰比を5%にすることとし、制御に必要な全状態量は全て観測可能とした。この場合の制御限界は許容変位と最大制御力で決まる。

5. 制振性能の予測

シミュレーションには、入力地震動としてエルセントロNS波を用いた。図8に制振性能を示す。大型ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造による制振の場合、図は上から、屋上の応答加速度、制御電圧、1個あたりの大型ピエゾアクチュエータの駆動に必要な電流量である。また、

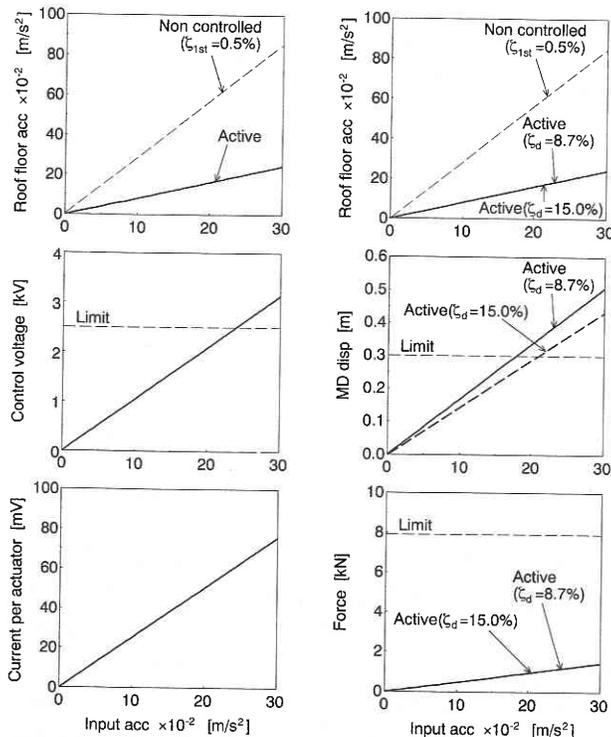


図8 制振性能の比較

アクティブマスダンパによる制振の場合、図は上から、屋上の応答加速度、マスダンパ変位、制御力である。この解析では制御目標を同じにしているため、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を評価する。スマート構造による場合、制御電圧の限界である ± 2.5 kVまでアクティブ制御が可能なのは地震動の入力加速度が 0.24 m/s²までである。一方、アクティブマスダンパによる場合、制御力は十分に余裕があるが、マスダンパ変位が許容変位を越えてしまうために、アクティブ制御が可能なのは減衰比が8.7%の場合では、 0.18 m/s²、また15%の場合では 0.21 m/s²までである。この解析においては、大型ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造による制振の場合のほうが、アクティブマスダンパによる制振の場合よりも有利であった。この解析で用いた各仕様は、現実に用いられている一般的な仕様をもとにして決定したものである。ただし、双方の場合とも、十分な最適化を経たものではなく、この結果から一概に優劣をつけられるものではない。しかし、スマート構造によるアクティブ制振の十分な大規模化・実用化の可能性を示すものである。

6. あとがき

高さ30.65 m、総質量273 tの塔状建物を想定して大規模スマート構造を適用し、大型ピエゾアクチュエータ24基を用いてアクティブ制振性能の予測解析を行なった結果、入力加速度 0.24 m/s²までのエルセントロNS地震波にアクティブ制振が可能であることが判明した。これはアクティブマスダンパによる制振の場合と比較しても同等の性能であり、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・実用化の技術的な可能性を示したと言える。

(1999年8月16日受理)

参考文献

- 1) 嶋崎, 藤田: 生産研究, 51-11 (1999), 741-744.
- 2) 嶋崎, 藤田, 畑山, 有壁, 村井, 相沢, 遠山: 生産研究, 50-2 (1998), 99-102.
- 3) 田中, 藤田, 平澤, 蔵, 荒井, 石黒, 大山, 石井: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), B 構造I (1994), 983-984.
- 4) 石井, 田中, 中山, 佐々木, 中村: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), B 構造I (1994), 985-986.
- 5) 石黒, 藤田, 田中, 荒井, 大山, 石井, 村越, 中村: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), B 構造I (1994), 987-988.
- 6) 大山, 藤田, 田中, 村越, 石井, 中村, 宮野, 洞: 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), B 構造I (1994), 989-990.