

建築物の制振システムに関する 標準試験装置の開発



研究ノート

橘 英三郎*

Development of a standard experimentally testing system for active control algorithms of building vibration

Key Words : active control, building vibration, testing system, wind tunnel

1. 序

近年、建築構造の分野では「免震構造」や「制震構造」と呼ばれる新しい構造形式が実用化されている。それらの設計思想は機械工学などで古くから知られてる防振や制御理論と原理的には似ている。しかし建物の中にいる数百の人々の安全の確保や不安感の除去、設備配管の安全、数万トンといった自重、巨大地震のように数十年の期間にたった数十秒間だけといった頻度の少なさ、予測不可能なスペクトルを持つ波形、などなどの制約からこれまでなかなか実現しなかった。しかし、近年になり、多田（福岡大学教授）らを中心とする精力的な活動が人々を動かし現在では「免震構造」は100棟近くまで建設され、小堀（京大名誉教授）らを中心とする「制震構造」実現のための環境作りも実を結び、制震装置を備えた超高層ビルも竣工しはじめている。こうした状況は世界でも我が国が突出しており、本年（1992）の世界地震工学国際会議でもこの分野の論文の7割近くが日本の研究成果で占められた。

ところで、こうしたパイオニア的な挑戦には予期できないリスクも付きまとう。本稿で紹介す

る試験装置は、そうしたリスクを少しでも事前に避けることを目的としたものであるが、その前に「免震構造」や、いくつかの「制震構造」について簡単な紹介をする。

（免震構造）

通常の建物の固有周期は0.3秒前後で地震動に含まれる卓越周期に比較的近く、地震動のエネルギーを吸収しやすい。そこで建物と基礎との間に免震装置（水平方向に柔らかい特種なパッキング材）を挿入することにより全体としての固有周期を2～3秒に延ばし地震の卓越周期からずらす。この結果、柱や梁にかかる応力が軽減され、建物をクラックや倒壊から守る。ただし建物全体としては剛体のようにゆっくりと大きく揺れることになり設備関連機器等に種々の弊害が生じるので通常は油圧式ダンパーや鋼材の塑性を利用したエネルギー吸収型の減衰装置が併用される。

（振り子型制振構造）

屋上階などに数トンから数百トンの振り子を設置し、その周期を建物の1次固有周期に合わせる。建物が風などにより振動しはじめると振り子が共振し、その反力で建物自体の振動が抑制される。振り子には免振構造と同様に減衰装置が併用される。

（セミアクティブ制震構造）

免震構造や振り子型制振構造は、設計の段階で諸特性がフィックスされるが、必ずしも全ての外力に有効ではない。セミアクティブ制震構造では減衰装置の弁の開閉などをコンピューター

*Eizaburo TACHIBANA

1942年10月4日生

1966年大阪大学・工学部・構築工学科卒業

現在、大阪大学工学部建築工学科、助教授、工学博士、構造力学・計算力学

TEL 06-877-5111（内線 4962）



により高速に制御し、免震構造や振り子型制振構造の有効領域をより広範囲にする。

(フルアクティブ制振構造)

建物の振動が許容レベルを越えると自動的にサーボ油圧装置やモーターなどの人為的な加力装置が作動することにより振動を抑制する。セミアクティブでは抵抗力を受け身で調節するだけであるのに対し、フルアクティブでは能動的に加力することも含むことになる。

2. 制振構造の問題点と標準試験装置開発の必要性

制振構造では人為的に力を与えるため、下手をすると振動の増幅や応力の増加を招きかねない。従ってシステムの信頼性確保には数値シミュレーション^{1)~3)}だけでなく実験的検証が重要となる。ところで「免震構造」や「制震構造」に関する実験的な研究は大学よりも企業が先行しており、検証のための実験も各企業でなされている。そして種々の制振システムが各企業ごと

に提案され、その利点が強調されている。もし客観的な立場から、それらの制振システムの得失を評価しようとするとならながら困難な問題にぶつかる。企業から報告された実験結果には個々の装置の特性が一部ブラックボックス化され、又、データー採集の着目点、実験条件などが微妙に異なっている。そのため、その得失がなかなか明確に見えてこない。何らかの共通の土俵に乗った実験結果がどうしても必要となる。それは、パイオニア的な試みにつきもののリスクを恐れ、欠点のみをあげつらう目的からでない。ただ建築構造物は失敗したからといって簡単にとり壊すといった訳にはいかない面があり、出来るなら事前に簡単なチェックのできる標準的な試験装置が欲しい。

以上のような観点から、とりあえずその「雛形でも」と考え、制振システムの標準試験装置の試作を行なった⁴⁾。以下では装置設計の経緯、概要と性能について簡単に報告する。

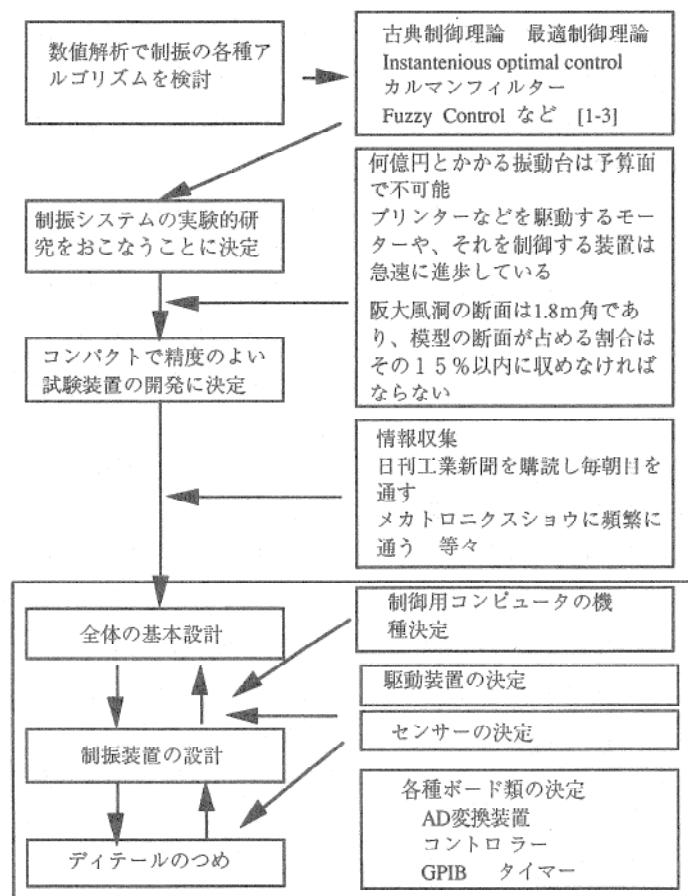


Fig. 1 開発のプロセス(現在も進行中)

3. 開発の基本方針

開発にあたっての設計方針は次の3点であった。

1. 種々の制振装置に対する試験ができること。
2. 制御効果が視覚的に確認できること。
3. Compactな装置であること。

こうした装置開発に関する設計方針が決まった経緯（あるいは私の頭にあった開発のフロー）の概要を示すとFig. 1のようになる。

4. 試験装置の概要（主にハード面）

Fig. 2に試験装置の概要を示す。振動台と構造物モデルと合わせた全体のサイズは幅114 cm, 高さ142 cm, 奥行き41 cmのコンパクトなサイズである。これらのサイズは全体が風洞内で操作可能であり、風上から見た建物の見附面積が風洞断面の1.8 m×1.8 mの断面の15%内に納まるようにしている。構造体は2層のテーブルで支えられている。下側のテーブルは地震加力用のものであり上側のテーブルはアクティブな絶対制震用のものである。通常は2つのテーブルは緊結され、一体として地震加力用利用される。絶対制震の場合は上層のテーブルを建物の基礎とみなし、地震動と逆位相にアクティブに駆動することにより静止座標系に構造物を

止める方式に用いられる。又、2つのテーブル間にアイソレーターに相当するディバイスを挿入し免震構造の検討にも供することができる。

これらの振動テーブルはコンピュータで計算されたパルス信号で制御される。ステッピングモーターの回転は、直結されたボールねじに回転を与え、テーブルに固定されたネジ受けによりテーブルの直線運動に変換される。今回採用したステッピングモーターは電気信号1パルスにより 0.72° もしくは 0.36° 回転する。これらのいずれを選ぶかはパルス発生装置のディップスイッチの切り替えによりなされる。又、ボールネジのピッチは0.5 cmである。実際の制御にあたっては0.1秒キザミで数百パルスのオーダーで制御される。

Fig. 2に見られるように、制振の対象としては3層の構造物模型を採用している。これは実際の3階建を意味したものではなく、3次の振動モードまでを含むことのできるモデルを想定したものである。より高次のモードはどうするかといった問題もあるが、あまり細かいことは考えず、工学的な判断と経済的な制約、さらには「林に入って森を見ず」にならないためにも簡単にした。柱の水平剛性は可能な限り（座屈しない限り）柔らかくし、揺れを拡大することにより制振効果が視認できるようにした（スケー

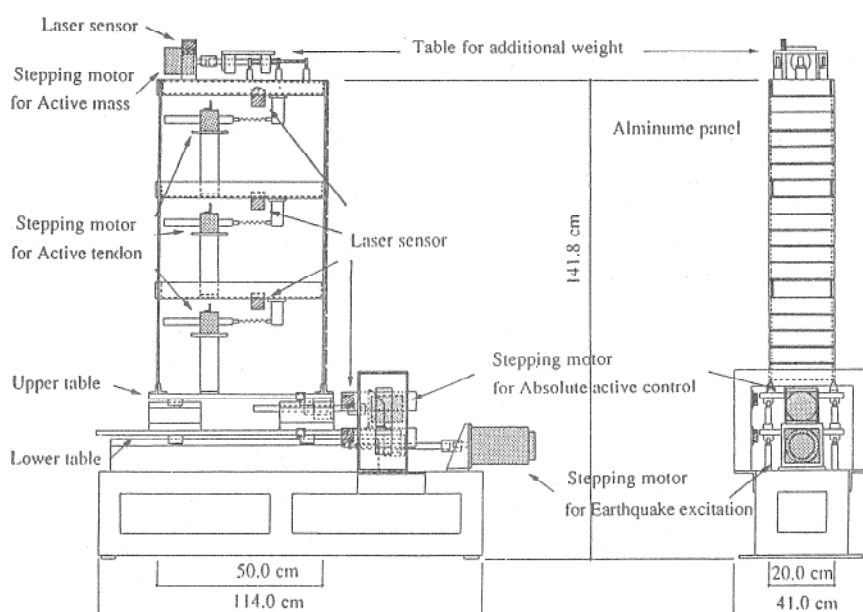
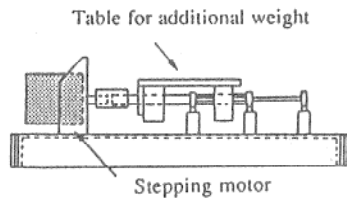
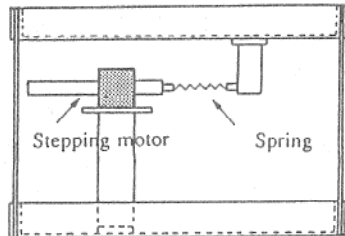
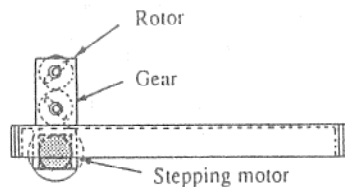


Fig. 2 試験装置の概要



(a) Active mass

(b) Active tendon
(or variable stiffness)

(c) Active fin

Fig. 3 制振装置

ルエフェクトを考慮の上で)。現時点では Fig. 3 に示す着脱式の 3 種類の制振ディバイスを準備している。Fig. 3 (a) はアクティブマスであり重りを載せた小さなテーブルを強制的に動かしてその慣性力を制御力として利用する。Fig. 3 (b) はアクティブテンドンであり、スプリング（筋違を代表する）の端部を強制的に動かして付加的な制御力を与える装置である。又、Fig. 3 (c) はアクティブフィンでありブラインドシャッターのような 2 枚の羽根を回転させ、風抵抗を制御することにより、風による揺れを抑制することを目的としたディバイスである。

又、近年ドーム形式の構造も多くなり、大屋根の風による振動がしばしば問題となる。その場合、Fig. 2 の装置では検証できないので、補助的に、Fig. 4 に示すドーム模型も準備した。この図では制振装置としてアクティブフィンが装着されている。Photo. 1 は風洞に設置された状態である。

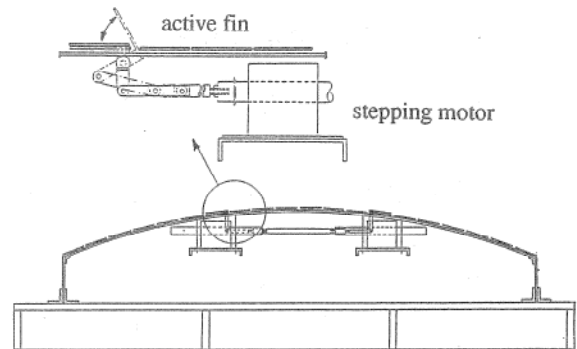


Fig. 4 ドーム模型の概要

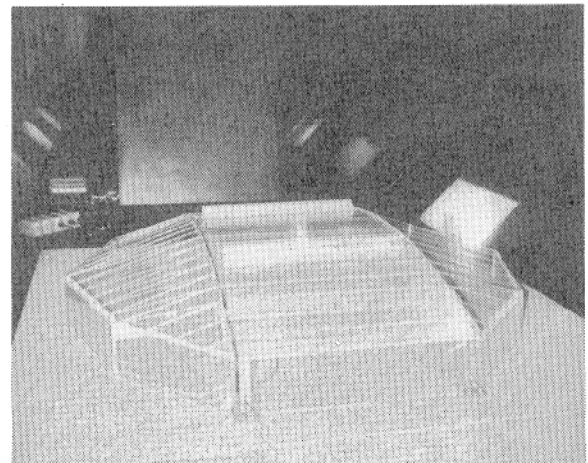


Photo 1 風洞内に設置された状態

5. 装置の概要（主にソフト面）

Fig. 5 に示すように、制御は 5 個の非接触型センサー（レーザーセンサー）と 5 台のコンピュータ、そして複数のステッピングモーターが基本となる。センサーから得られたデータは AD 変換器を介して各コンピュータに読み取られ、検証されるべき制御アルゴリズムに従って制御力を決定し、さらに制御力から、各ステッピングモーターの回転角、ひいてはパルス数を計算したうえでその信号がパルスコントロールモジュール (PC) に送られる。そこでモーターに無理がかからないようなパルス発生速度が計算され、その信号がドライバーに送られて実際のパルス電流が発生し、それによりモーターが駆動して制御を行なう仕組みとなっている。5 台のコンピュータの内、3 台が制御用であり、1 台が地震加力用で残りの 1 台が全体の統括用である。5 台のコンピュータとも GPIB により

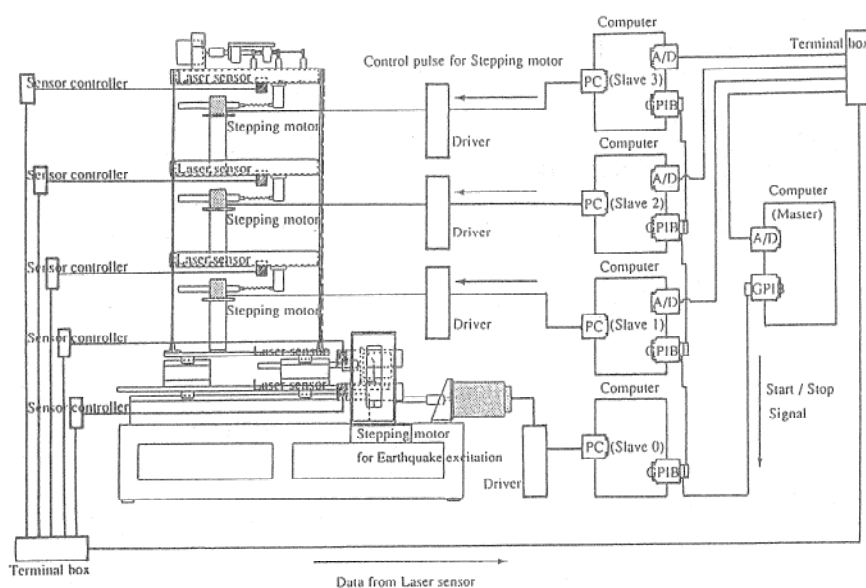


Fig. 5 試験装置の制御関係

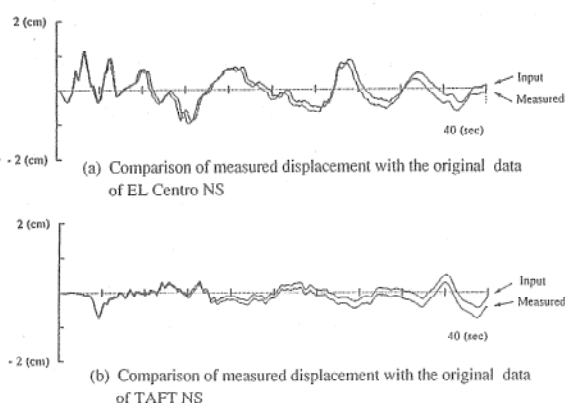


Fig. 6 地震波形の再現性

連結されており、又、センサーからのデータは、統括用、制御用、の4台のコンピュータに平行して読み取られる。

制御用に用いている言語はC言語であり、FORTRAN言語やBASIC言語などで必要となるアセンブラー言語とのリンケージは不要となっている。

6. 地震加力装置の再現性

Fig. 6に2つの地震記録(El Centro NS, TAFT NS)の変位について、コンピュータから送られたインプットデータと実際のテーブルのセンサーから測定されたデータとの比較を示す。

作動遅れによる若干の相違があるも、ほぼ忠実に再現されていることがわかる。(原稿作成時

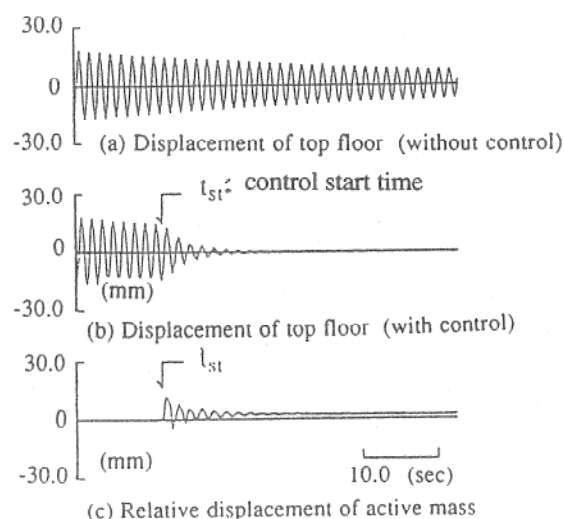


Fig. 7 自由振動時のアクティブマスによる制御

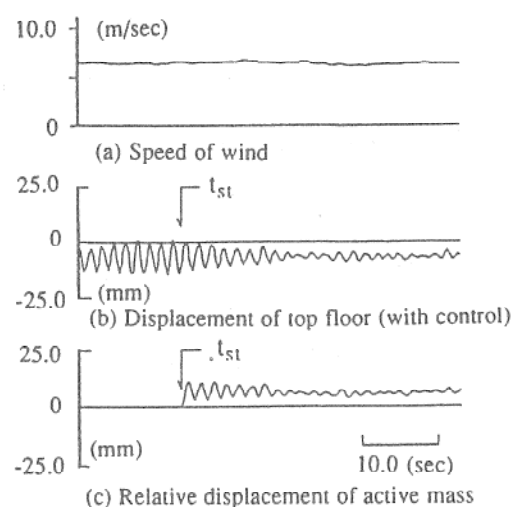


Fig. 8 風洞内の風荷重下におけるアクティブマスによる制御

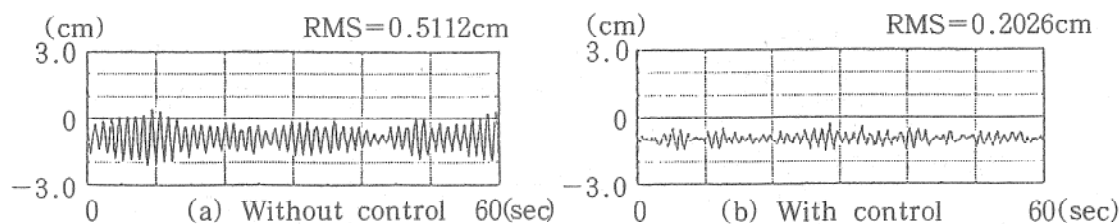


Fig. 9 風洞内の風荷重下におけるのアクティブフィンによる制御

ではグラフ上で相違が殆ど識別できない程度まで改良が進んでいる)

7. 制振予備実験

Fig. 2 に示す 3 層模型を使った制振の予備実験の結果を紹介する. アクティブマスによる自由振動に対する制振実験結果を Fig. 7 に, 又, アクティブマスによる風洞実験結果を Fig. 8 に示す.

アクティブフィンの風洞実験による制振実験結果を Fig. 9 に示す.

8. 結 び

本試験装置はまだ開発の途にあり, 又, 検証の範囲も制御アルゴリズムに限られたもので, 本来の目的を十分に満たしたものとは言いがたい. ロケット開発で言うならペンシル型ロケット程度と言えようか. しかしながら, 制御ソフトの扱いの面では実際とほぼ同程度か, もしくは実際のレベルを越えているといえる. ノイズ処理の問題, 演算の高速化の問題, 加速度レベルでの地震波の再現性の問題など, なお多くの問題を抱えている. この紙面をお借りして, こうした方面に詳しい諸氏にご批判や, ご教示を頂きたいものと期待している.

謝 辞

この試験装置の開発を進めるにあたり, ご指導を頂いた井上豊教授に感謝の意を表します. 又, 大学院生の向井洋一君, 川上潤君には, 実

質的な諸々の作業を担当していただきました. さらに, この試験装置の開発に必要な経費の一部を鴻池組からの奨学寄付金でまかないました. ここに記して感謝致します.

文 献

- 1) Hatada T., Tachibana E. and Inoue Y., "Generalized optimal control algorithms for civil engineering structures", Proc. of twelfth Canadian Congress of applied mechanics, 1989, pp.770-771
- 2) Creamer B., Tachibana E. and Inoue Y., "Application of fuzzy theory for the active control of the dynamic response in buildings", Proc. European Conference on New Advances in Computational Structural Mechanics : 1991, pp.411-418
- 3) Tachibana E., Inoue Y. and Creamer B., "Fuzzy theory for the active control of the dynamic response in buildings", Microcomputers in Civil Engineering, Vol.7, 1992, pp.179-189
- 4) Tachibana E., Inoue Y. and Yamada Y., "Development of a compact, experimentally testing system for active control algorithms of building vibration", Proc. of tenth world conference on earthquake engineering, 1992, pp.2637-2642