

アメリカにおける高層建物制振技術の研究開発と実用化の現状

Research, Development and Applications of Vibration Control System for
Tall Building in United States of America

藤田 隆 史*

Takafumi FUJITA

1. ま え が き

高層建物の居住性向上,さらには,安全性向上を目的として,風や地震による高層建物の振動応答を特別な装置を用いて低減させる制振技術は,従来からのパッシブ制振技術に加えてアクティブ制振技術が登場し,より一層,注目される技術となっている。

パッシブ制振技術は,建物の最上階近傍にTMD(Tuned Mass Damper)を用いる方法と,建物の層間などにエネルギー吸収装置を用いる方法に大別される。前者の実施例として,アメリカではCiticorp Center(New York)とJohn Hancock Tower(Boston)のTMDがあり,我が国では千葉ポートタワー(千葉市),福岡タワー(福岡市)のTMDなどがある。また,後者の実施例には,アメリカのWorld Trade Center(New York)の粘弾性ダンパがあり,我が国では大宮ソニックシティビル(大宮市),アサヒビル本社ビル(東京都)の摩擦ダンパなどが挙げられる。

アクティブ制振技術については,AMD(Active Mass Damper)を用いる方法とアクティブ・テンドンを用いる方法が主に研究されているが,ほかにも種々の方法が提案されている。この技術の実施例は,現在のところ,我が国だけに限られており,京橋成和ビル(東京都),ランドマークタワー(横浜市,建設中)のAMDなどが挙げられる。

このように,パッシブ,アクティブともに,高層建物制振技術の研究開発と実用化のほとんどは,日本とアメリカでなされている。

ところで,本稿では,アメリカにおける高層建物制振技術の研究開発と実用化の現状について述べているが,筆者が1990年3月に勸産技術研究奨励会の三好研究助成により,University of California, BerkeleyのJ.M. Kelly教授,MTS Systems CorporationのN.R. Petersen氏,University of Southern CaliforniaのS.F. Masri教授を訪問した際に得た情報をもとに記述したものであり,包括的な展望ではないことを断っておく。

2. TMDを用いたパッシブ制振技術—MTS Systems Corporationによる実用化

筆者はすでにCiticorp CenterとJohn Hancock TowerのTMDを見学していたが,今回,MinneapolisにあるMTS Systems Corporationの本社を訪問し,設計者のN.R. Petersen氏から直接,当該TMDの説明を聞くことができた。

図1がCiticorp Centerの63階に設置されているTMDである。400tonのコンクリート製可動質量を12個の静圧ベアリングで油圧浮上させ,N-S,E-W方向の復元力は,運動方向に直交する方向に取り付けられたガスばね(窒素ガスを使用)によって与えられている。各方向に装備された油圧アクチュエータは,上述のばね機構から生じる復元力の幾何学的非線形を線形化するとともに,適切な減衰力を加えるためのものであり,アクティブ・コントロール用のものではない(以前は,このTMDがAMDと誤って紹介されることがしばしばあった)。図2に油圧アクチュエータの制御システムを示す。ただし,このTMDは,通常のTMDとは異なり,油圧アクチュエータによって,マスダンパの固有振動数と減衰比の,優れた最適調整機能(図2に示すように,自動化はされていないが,ダイヤル操作で最適調整が可能になっている)を有しており,セミアクティブ・マスダンパに近いものである。

Citicorp CenterのTMDの場合,建物の1次モード質量に対する質量比は2%であり,TMDの固有周期は $6.25\text{秒}\pm 20\%$,減衰比は8%~14%の間で調整可能である。また,TMDの最大作動ストロークは1.143m,限界ストロークは1.372mである。この仕様は,建物の1次モード減衰比を1%から5%に増加させ,風による振動応答のRMS値を約50%低減させるために選択されたものである。

一方,John Hancock TowerのTMDは,基本構造は同じであるが,一方向の運動に限定されたものであり,それが2基用いられている。John Hancock Towerは偏平な外形を有した高層建物であり,その58階に,66mの間

*東京大学生産技術研究所 第2部

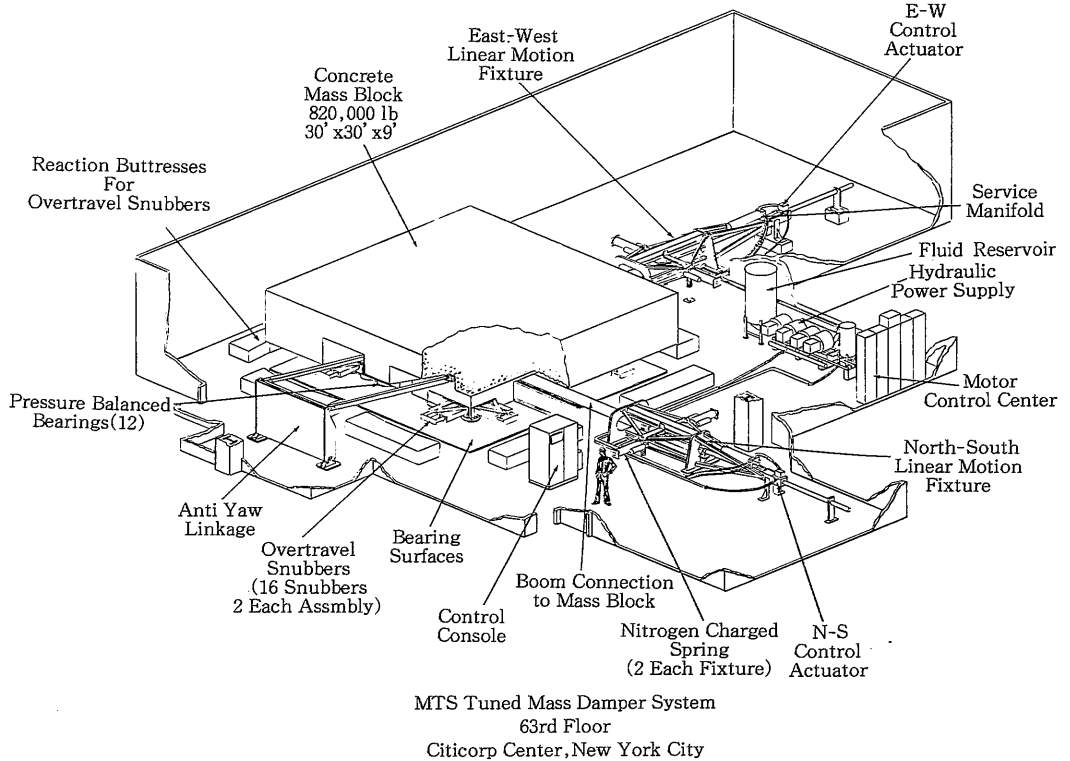
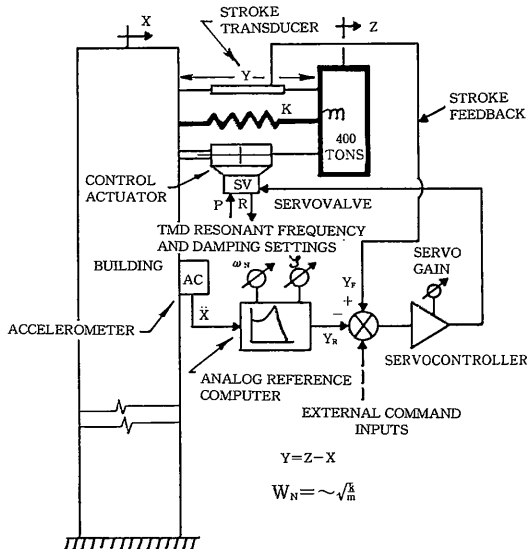


図1 Citicorp CenterのTMDの構造



隔を置いて、建物平面の短辺方向の振動応答を抑制するように設置されている。2基のTMDの可動質量はともに300tonである。ただし、John Hancock Towerの場合

は、建物の竣工後にTMDが設置された。そのため、可動質量は鋼製の箱に鉛の小片（人力とエレベータで運ぶため）を多数詰め込んだものとなっている。

ところで、John Hancock TowerのTMDの設置理由については、筆者は、この建物には強風によって10,348枚の窓ガラスの内、約5,000枚の窓ガラスが落下した事実があるため、その事件がTMD設置の真の理由であろうと考えていた。筆者が別の機会にJohn Hancock TowerのTMDを見学した際には、建物管理者は、TMDは安全性のためのものではないことをしきりに強調していた。John Hancock TowerのTMDの見学は相当に制限されており、筆者の場合も、TMDの写真撮影は許してもらえなかった。今回も、N.R. Petersen氏に設置理由を質問してみたが、同氏の回答も居住性を向上させるためという主旨のものであった。依然として、筆者にとっては、謎に包まれたままである。

3. エネルギー吸収装置を用いたパッシブ制振技術 —University of California, Berkeley における研究開発

University of California, BerkeleyのJ.M. Kelly教授は、免震構造の世界的権威として我が国でも有名である。

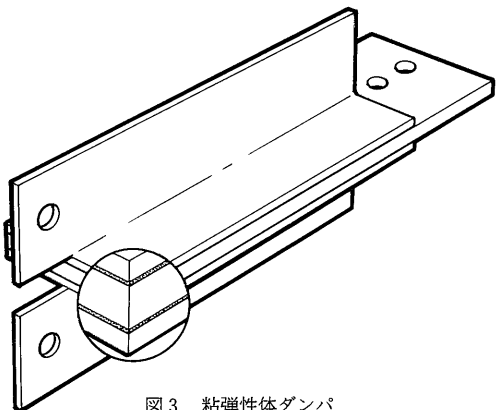


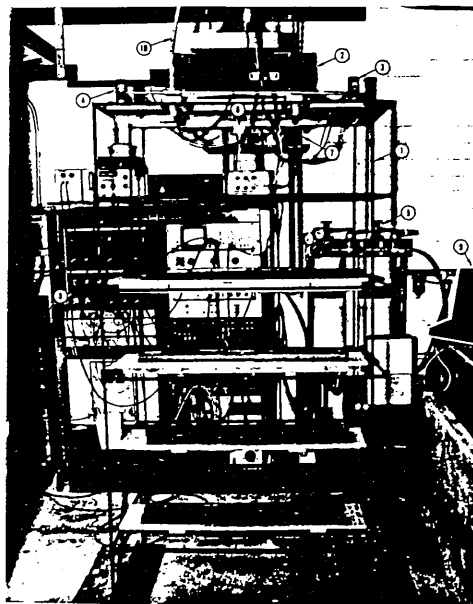
図3 粘弾性体ダンパ



図4 摩擦ダンパを用いた建物モデルの振動実験

Kelly教授と筆者とは、免震構造に関しては、これまでに幾度となく議論する機会があったが、今回の訪問では、高層建物制振技術について議論した。

Kelly教授は、制振技術に関しては、エネルギー吸収装置を用いたパッシブ制振技術を中心に研究しており、図3に示すアメリカの3M社製粘弾性体ダンパ (World Trade Centerで実用化) と、日本の住友金属(株)製摩擦ダンパ (大宮ソニックシティビルなどで実用化) を、図4に示す建物モデルに装着し (図4は摩擦ダンパを装着した場合)、振動実験による制振性能の評価や、応答解析手法の研究を実施中であつた。また、アクティブ・テンド



LEGEND

- 1 - FRAME
- 2 - EXCITER
- 3 - RHS THRUSTER
- 4 - LHS THRUSTER
- 5 - COMPRESSED GAS
- 6 - ACCELEROMETER
- 7 - DISPLACEMENT FOLLOWER
- 8 - MICROCOMPUTER
- 9 - VIDEO TERMINAL
- 10 - PNEUMATIC SUPPLY LINE
- 11 - NOZZLE

図5 最適パルス制御による建物モデルの振動制御実験

ンを用いたアクティブ制振技術の研究にも着手していた。

Kelly教授との議論では、免震構造の研究は、原子力施設への応用を除いては、ほぼ終了すべき時期にきていること、強地震動に対する高層建物のアクティブ制振技術には否定的であるなどの点で、筆者の意見と一致した。

4. アクティブ制振技術—University of Southern Californiaにおける研究開発

University of Southern CaliforniaのS.F. Masri教授は、同大学のCivil EngineeringとMechanical Engineeringの教授を兼担しており、アメリカにおけるアクティブ制振技術研究のリーダーの一人である (National Science FoundationがサポートしているPanel on Structural Control Researchのメンバーである)。

Masri教授は最適パルス制御というユニークなアクティブ振動制御手法を提案し、その有効性を理論解析だけでなく、実験によっても示している。図5は、6層の

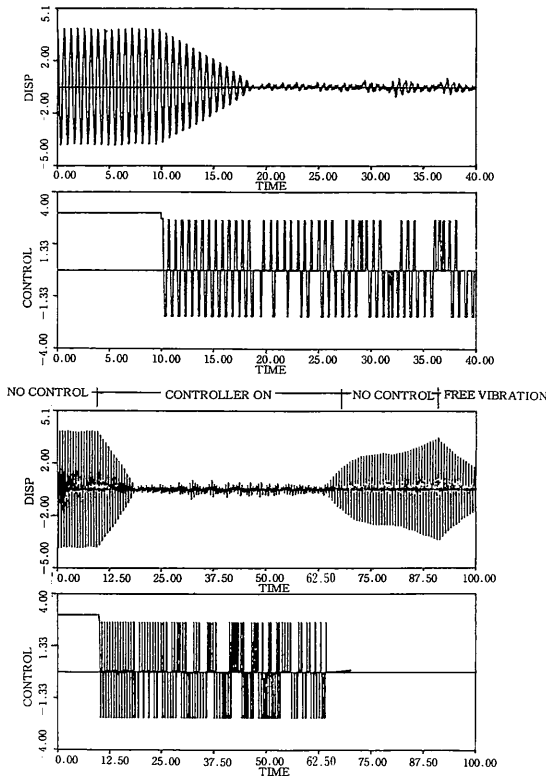


図6 最適パルス制御の実験結果

建物モデル(総質量約160kg)の屋上階に、パルス制御のアクチュエータとして、左右2個の圧縮空気噴出装置(0.862MPaの圧縮空気)を用いた場合の実験装置を示している。この実験では、最上階に取り付けた電磁加振機で建物モデルを加振し、圧縮空気噴出装置から間欠的な空気ジェットを噴出させることによって建物モデルの振動応答を制御する。図6は、正弦波加振時の建物モデルの応答変位と制御信号を示したもので、振動が効果的に抑制されている。このほかに、同教授は、衝突ダンパの質量とストップの間隔を制御するセミアクティブ衝突ダンパを考察し、それを建物モデルに用いたセミアクティブ制御システムの実験も行っている。

最適パルス制御の最大の長所は、比較的簡単な制御則により、制御対象が線形系だけでなく、非線形にも適用可能な点にある。

5. あ と が き

今回の訪問には含まれていなかったために本稿では述べなかったが、アメリカでの高層建物制振技術、特に、アクティブ制振技術は、Princeton UniversityのM. Shinozuka教授、State University of New York at BuffaloのT.T. Soong教授(両教授とも上述のパネルのメンバーである)などを中心としたグループが活発な研究を展開していることを付記しておく。

(1991年2月25日受理)