

建築物の免震・制震(振)



井上 豊*, 向井 洋一**

Response Control of Building Structures

Key Words : building structure, base isolation, structural response control, active/passive control

表1 振動外乱の諸特性

外乱の種類	振 幅	方 向	振動数範囲, スペクトル特性	継続時間	定常性
雑 振 動	小	水平, 上下	広帯域, ランダム, 卓越振動数あり	長	定 常
交通振動	小~中	水平, 上下	狭帯域, やや調和的, 卓越振動数あり	短~長	やや非定常
機械振動	小~中	水平, 上下	狭帯域, 調 和 的, 特定振動数卓越	長	定 常
強 風	中~大	水平	広帯域, ランダム, 低振動数卓越	長	定 常
中小地震	中~大	主として水平	広帯域, ランダム, 卓越振動数あり	短	非定常
大地震	大	主として水平	広帯域, ランダム, 卓越振動数あり	短~中	非定常

1. は じ め に

建築, 土木あるいは機械系の大型構造物に対して, その振動応答を低減させるための技術開発が, 近年急速に進み, 種々の実施例が登場するとともに, 強風時や地震時における応答制御の実証例も報告されて来ている. これらの技術

について, ここでは建築物を中心にその基本的な考え方と適用の現状について紹介したい.

まず最初に, 建物に作用する動的な外乱について整理してみると, 表1に示すように分類することが出来る. このような種々の特性を持つ外乱によって生じる建物の振動応答は, 当然, 幅広く様相を異にし, したがって, その応答を制御する考え方, 手法も異って来る. 建物の応答制御の目的としては, 主として以下の3点に大別することが出来る.

- i) 機能性: 建物内で行われる作業などに対する有害な振動を低減させる.
- ii) 居住性: 建物内の人が, 振動によって不快感, 不安感を持たないように, これを抑える.
- iii) 構造安全性: 強風や大地震による建物の振動で生じる骨組の応力, 変形を安全な範囲に留める.

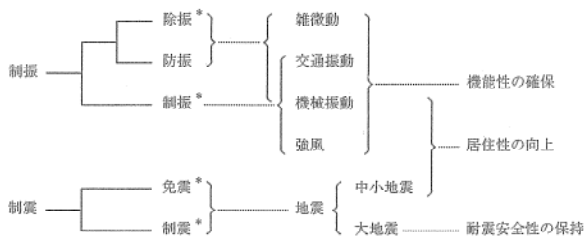
このような外乱の特性と, 応答抑制の目的から, 制振, 免震などの用語を分類してみると図1に示すように表わされる. すなわち, 地震のように極めて非定常な外乱に対しては「制震」



*Yutaka INOUE
1937年 8月 9日生
昭和35年(1960年)京都大学工学部
建築学科卒業
現在, 大阪大学工学部, 建築工学科,
教授, 工博, 建築耐震工学
TEL 06-879-7631
FAX 06-879-7634



**Yoichi MUKAI
1968年 9月 9日生
平成3年(1991年)大阪大学工学部
建築工学科卒業
現在, 大阪大学工学部, 建築工学科,
助手, 工修, 建築耐震工学
TEL 06-879-7634
FAX 06-879-7634
E-Mail yohmukai@arch.eng.
osaka-u.ac.jp



* は能動型および受動型の両者が考えられており、
 その他は、一般に受動型として考えられている。

図1 振動応答制御の諸相

の用語で、他の一般の外乱に対しては「制振」として用いられている。

種々の外乱によって生じる建造物の振動応答を低減・抑制するためには、

- 1) 外乱の入力効果を抑える
- 2) 外乱に系を共振させない
 - a. 入力振動数と系の固有振動数を離す。
 - b. 系の復元力を非線形化する。
- 3) 系の減衰性能を高める
 - a. 粘性や履歴によってエネルギーを消費させる。
 - b. 補助系にエネルギーを移動させる。

などの考え方がある。これらの技術は、一般に受動（パッシブ）型として進められて来たものであるが、ここ十年程の間に、電力等エネルギー供給によって駆動する装置も開発され、能動（アクティブ）型が登場し、あるいは両者を複

合したハイブリッド型として実施されて来ているものもある。

ここでは、i) パッシブ制震（振）の種々の装置、ii) 特にその中で免震装置として扱われているもの、さらに、iii) アクティブ制震（振）のシステムについて簡単にふれたい。

2. パッシブ制震（振）

パッシブ型制震（振）は、ダンパー装置を建

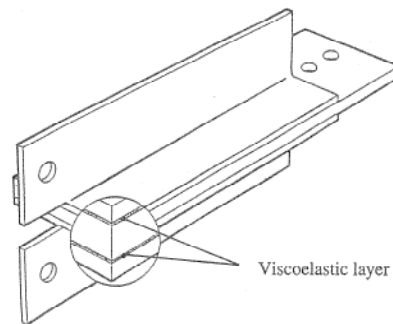
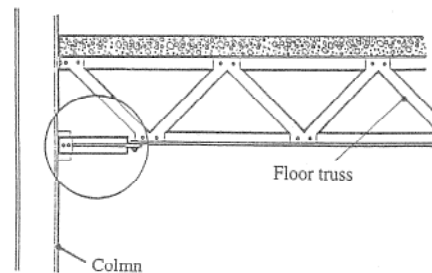


図2 粘性ダンパーの例
 (ニューヨーク世界貿易センタービル)

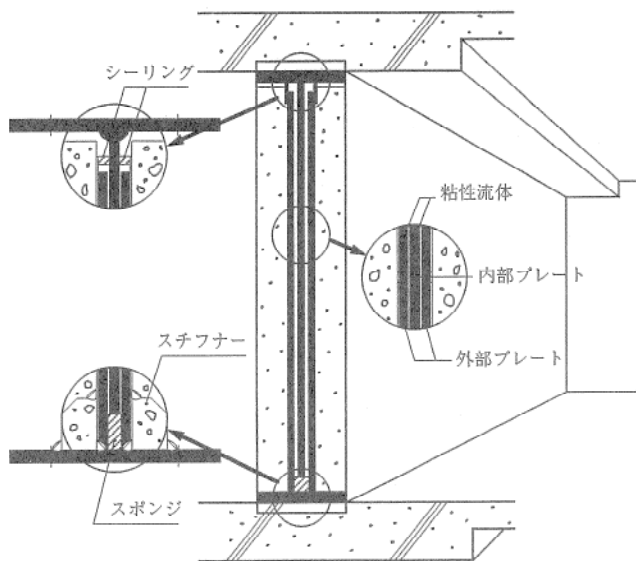
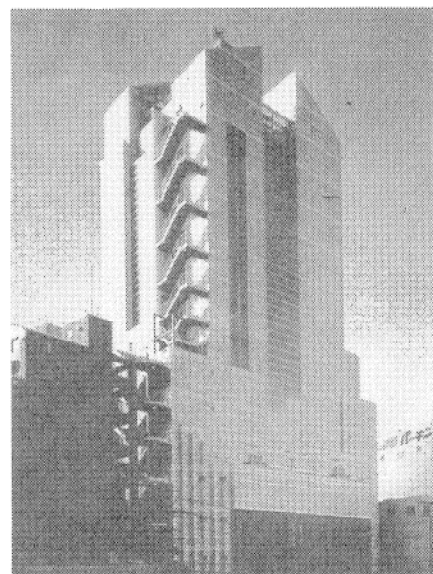


図3 粘性体を用いた制震壁（静岡メディアシティビル）



物内に設置するものが殆んどである。ダンパーとしては、前述のエネルギー吸収型と補助系にエネルギーを移すダイナミックダンパーが挙げられる。

エネルギー吸収型ダンパーとしては、粘性型、弾塑性型、摩擦型などに分けられる。

粘性型は、例えば図2に示すように、風や地震時に建物の比較的大きく変形する部分に粘性体を用いるもので、図のニューヨーク世界貿易センタービルの場合、強風時における1次振動の減衰定数0.5%程度であったものが3~4倍になり、したがって、建物の揺れはその逆数程度に小さくなったと説明されている。同様の粘性体をブレース部に用いたり(シアトル・コロムビアタワー)、非耐力壁上部と上階梁との間に用いた例(東京浜松町シーパンスS館)もある。さらにこれを大規模に用いて、図3に示すように粘性体を壁面全体に満たして用いる制震壁の例もある。この場合、粘性体の抵抗力も大きく、その配置に工夫が必要となるが、図に示す建物では、設計用の地震力が1/2~1/3に低減出来たとされている。鋼材や鉛などの塑性変形に伴うエネルギー吸収を利用したダンパーも用いられているが、これらは早期に塑性化が生じ、かつ、繰返し大変形に耐えるよう形状に工夫がなされている。鋼材を用いたダンパーを隣接する建物間に設置し、その相対変形に対して両棟に減衰性を与えるよう使用している例(船橋ザウルス人口スキー場)もある。摩擦ダンパーについても、非耐力壁部に用いて減衰性を増すよう意図されたオフィスビルの例(大宮ソニックシティビル)がある。

ダイナミックダンパーは、建物頂部に補助的な振動系を設置し、建物の揺れのエネルギーを補助系に伝え、かつ、補助系のダンパーによってこれを吸収し、建物を逆に加振することのないよう調整したもので、Tuned Mass Damper (TMD)とも呼ばれる。補助系の固有周期を建物本体の1次周期にほぼ一致させ、また補助系の質量は建物本体質量の1%程度が用いられている。図4に示すプランコ型の他に、質量一バネ型(千葉港ポートタワー)もある。水のスロッシング振動を利用した角型(香川ゴールドタワー)、

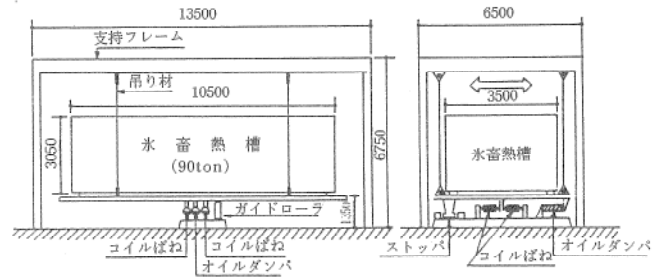


図4 氷蓄熱槽を用いた振り子式TMD(大阪OBPクリスタルタワー)

円盤型(新横浜プリンスホテル)、あるいはU字管型(大阪南港ハイアット・リージェンシーホテル)などが、高層建築物をはじめ中低層建物にも多く用いられ始めている。角型水槽TMDによる振動実験結果を図5に示す。

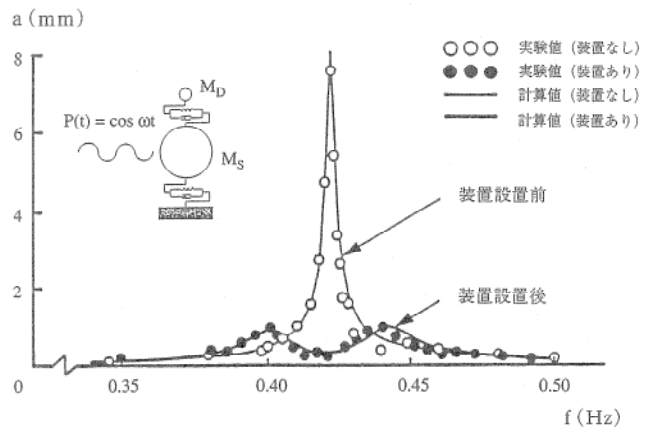


図5 スロッシングダンパーの効果

3. 免震

地震のエネルギーを建物に伝えないよう、滑りやすい建物基礎を持つ免震構造について種々考えられて来たが、約15年前頃から、図6に示すような積層ゴム支承が登場することによ

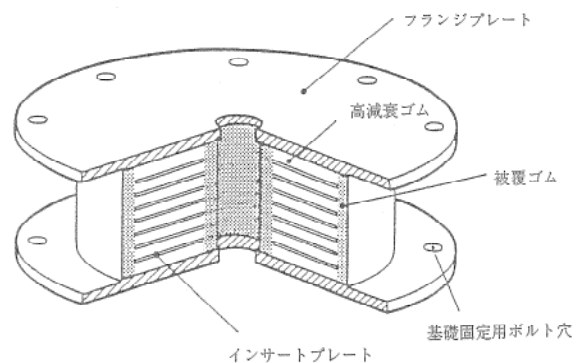


図6 高減衰積層ゴム支承

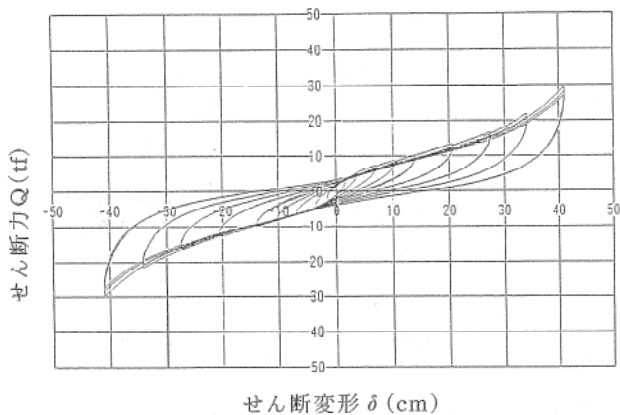


図7 高減衰積層ゴム支承の荷重 - 変形関係

て、本格的な実用化への道が踏み出された。この支承は、薄いゴム層と鋼板を何十層も交互に重ね合わせて接着したもので、建物の重さを支えるとともに、横方向には図7に示すようにゴムの大きい変形によって軟らかいバネを実現し、地震の激しい揺れの上部建物に及ぼす影響を減少させるものである。これとダンパーを組み合わせるか、あるいは、エネルギー吸収能力を持たせるよう作られたゴムを用いることによって、大地震時には瞬時的に20~30cmの大変形が生じることもありうるが、これもすぐに減衰するよう考えられている。

我が国では、このような積層ゴム支承、さら

<南北方向>

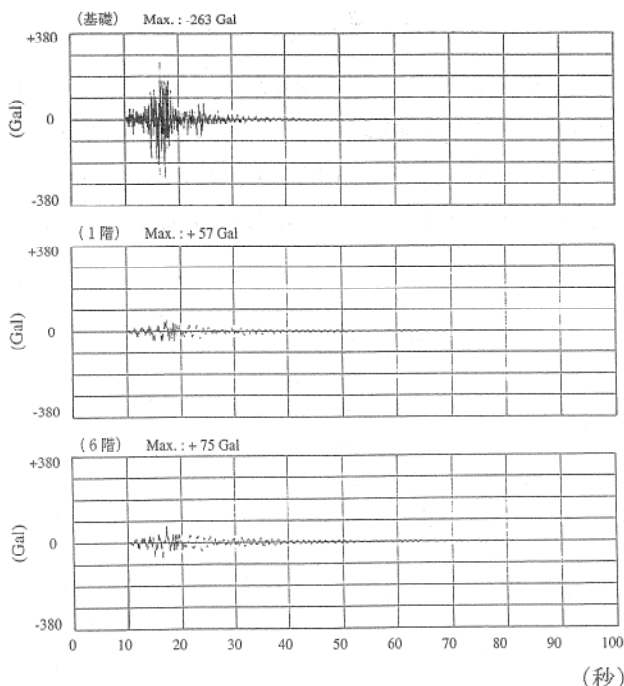


図8 郵政省WESTビルでの地震観測記録

にはテフロン系のすべり膜面を持つ支承などを用いた免震建物が昭和60年頃から登場し、現在約80棟が建設されている。本年1月17日の兵庫県南部地震時には、神戸市北区に建設された2棟の免震建物で地震観測記録が得られたが、そのうちの1例については本誌前号の研究ノート欄で紹介した。もう一つの例として6階建郵政省WESTビルにおける観測記録を図8に示す。建物基礎上で263Gal(=cm/s²)であった加速度が、免震装置を経て、建物1階で57Gal、6階で75Galと大きく低減していることが分る。阪神大震災時において、このように明瞭に免震効果が立証されたことを受けて、免震建物に対する関心が急速に高まり、本年3月~7月の間に30件以上の免震建物建設が申請されると云う状況にある。

4. アクティブ制震(振)

免震構造を含むパッシブ制震(振)システムに対し、油圧アクチュエーターやサーボモーターを用いて装置を駆動させるアクティブ制震(振)システムは、1989年に最初に実建物に適用された。強風や地震による建物の揺れをセンサー(地震計)で検知し、制御コンピュータを通じて駆動装置を動かして、制御力を建物に作用させて振動応答を抑えようとする図9(b)の閉ループ制御が、現在、一般的に用いられている。これをさらに進めて、入力となる地震動をセンサーで計測し、その入力効果を低減させるべき制御力を、同時に建物に与えようとする同図(a)の

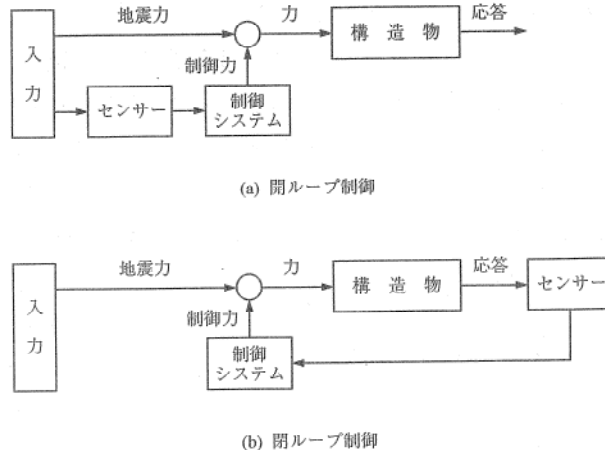


図9 アクティブ制御のループ構成

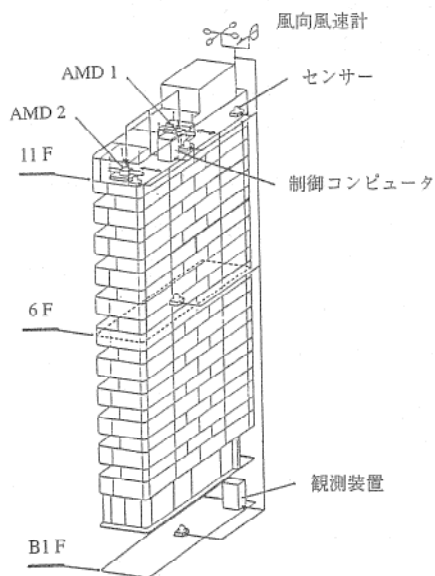
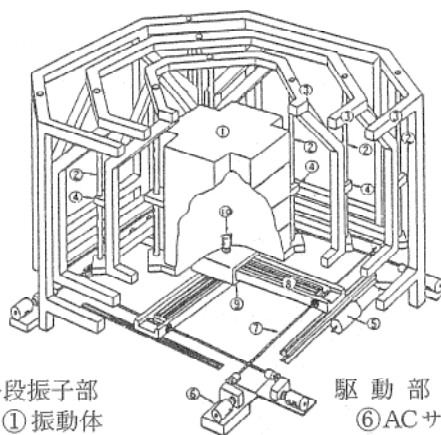


図10 AMDによる制御の例(東京京橋成和ビル)

開ループ制御の考え方に沿った制御システムの開発も進められている。

まず、前述のTMDに対して、アクティブ化されたものとしてAMD、あるいは両者の切換え等が行われるハイブリッド型としてHMDなどと呼ばれるものが挙げられる。世界中での第1号は図10に示される11階建鉄骨造建物で、屋上に設置された2台のAMDの重錘をそれぞれ油圧アクチュエーターで押し引きして、その反力を建物に伝え、短辺方向振動と鉛直軸廻り振れ振動の制御が行われた。1990年夏の台風時におけるこの建物での観測結果を図11に示すが、応答は非制御時の1/3以下となってい



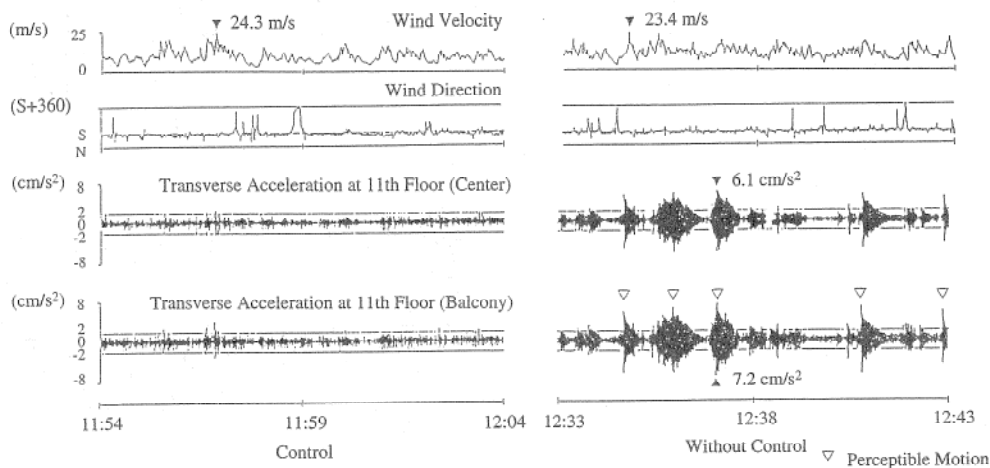
- | | |
|-----------|-------------|
| 多段振子部 | 駆動部 |
| ① 振動体 | ⑥ ACサーボモーター |
| ② ロープ | ⑦ ボールねじ |
| ③ 鉄製フレーム | ⑧ X・Yビーム |
| ④ 固有周期調整器 | ⑨ X・Yジョイント |
| ⑤ 枠間ダンパ | ⑩ 摺動結合部 |

図12 アクティブ型ダイナミックダンパーの例(横浜ランドマークタワー)

る。

図12に示すものは、超高層建築物の頂部に設置される振子の重錘の振れを、センサー信号に基づいてサーボモーターとボールねじを用いて拡大して生じさせ、応答制御を行うものである。建物1次周期6秒に対応する振子の吊りを3段に吊り直して縮めた多段振子を採用している。これと同型のシステムが図13の大阪南港コスモタワーにも設置されている。重量の大きい超高層建築物に対して効果的な制御を行うためには大きい重錘が必要となるが、屋上ヘリポート部を重錘として用いた例を図14に示す。

その他、身近な実施例としては、関西空港管



Observation Records of Typhoon 11 on August 10, 1990

図11 台風時におけるAMDによる制御効果



図13 多段振り型HMDの設置される超高層建物
(大阪南港コスモタワー)

制塔に振り型、大阪弁天町 ORC 200 ビルに多段積層ゴム支持による重錘タイプ、さらに、大阪梅田新道の同和火災フェニックスタワーでは、親亀・子亀方式の2重質量システムを用い、上部の小型質量をアクティブ駆動させて、より大きい下部質量を効果的に動かす制御システムが使用されている例などがある。

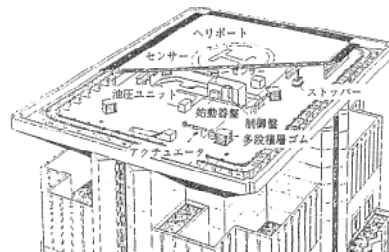
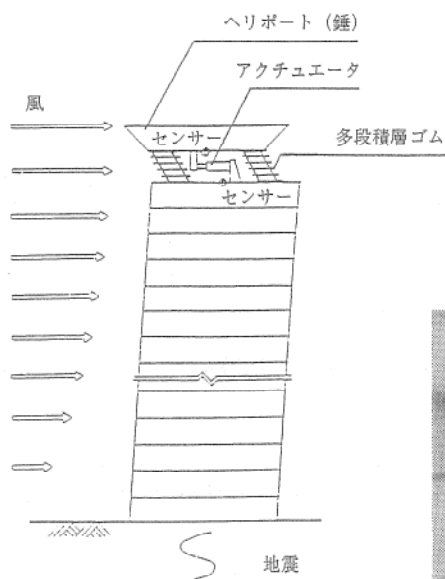
全く異った考え方による建物応答制御として、

可変剛性機構の例を図15に示す。3階建建物の両側面に設けられた各階のV型ブレースと梁とを、指令に応じて緊結したり、滑らせたりして時々刻々剛性を調節するものである。1階床で計測した地震動のスペクトルを短時間で分析し、地震動に対して建物固有周期が最も有利となるよう指令が出される仕組みである。図16に示す制御効果のシミュレーションによると、可成りの応答低減となっていることが分る。

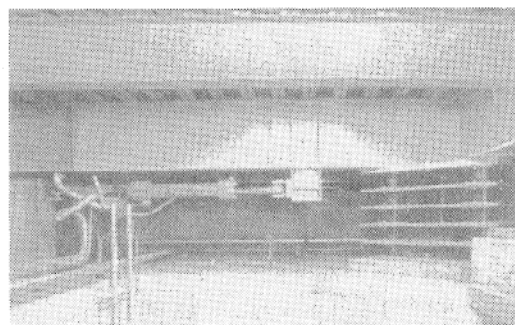
最後に、筆者らの研究室で開発を進めている、対風制振システムについて紹介する。図17に示すアクティブフィンと呼ばれる受風板を建物屋上に設置し、風によってフィンの受ける抗力を風向方向振動に、揚力を風向直交方向振動に同時に最も効果的な減衰を生じさせるよう回転させるものである。企業の研究室と共同して行った制振実験結果を図18に示すが、特に風向直交方向の振動応答低減に有効となる結果が得られた。

5. おわりに

建物の振動応答の制御について、パッシブ方式及びアクティブ方式の現況を述べた。しかし、この分野では近年急速に研究開発が進められ、実施例も急増して来ており、新しいアイデアや



制振装置配置図



アクチュエータ及び多段積層ゴム

図14 ヘリポートを利用したAMDの例(大阪梅田アブローズタワー)

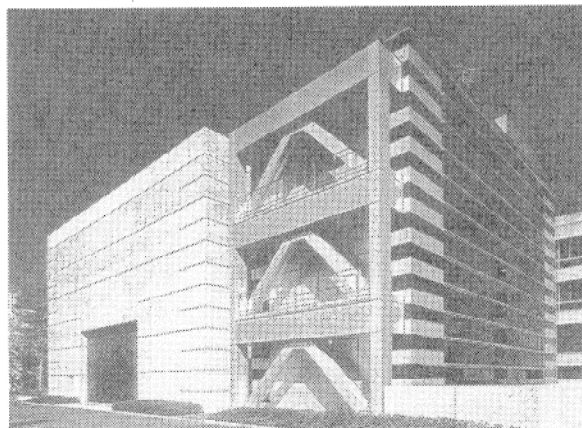
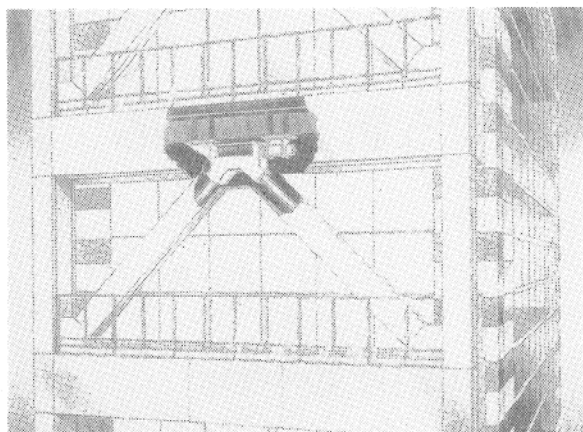


図15 ブレースを用いた可変剛性機構の例(東京調布鹿島技研振動台建屋)

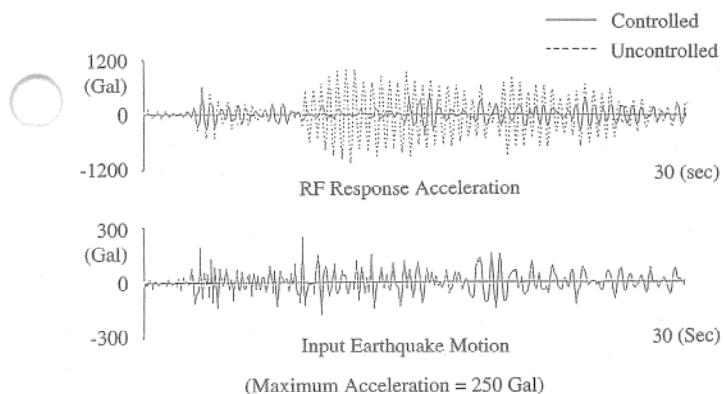
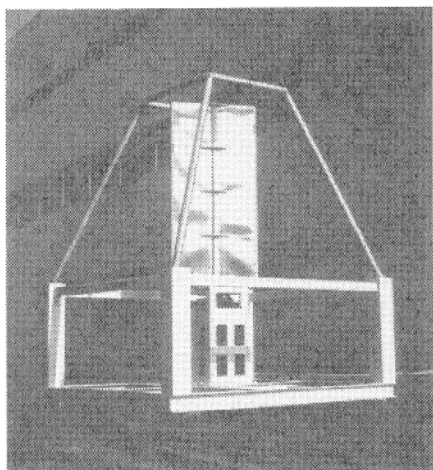
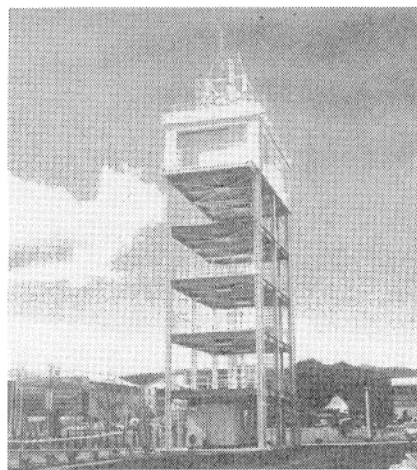


図16 可変剛性機構の制御効果シミュレーション

システムが次々と登場している。特に、阪神大震災における多数の建物の壊滅的被害を目のあたりにすると、未知の地震外乱に対しては、応答制御構造を導入することの重要性が強く指摘されるであろう。すなわち、中低層建物については免震型の制御、高層建物では制震型のシステムが一般に有効と考えられるが、さらに新しい試みの登場する余地も多く、今後の発展に期待が高まって来ている。

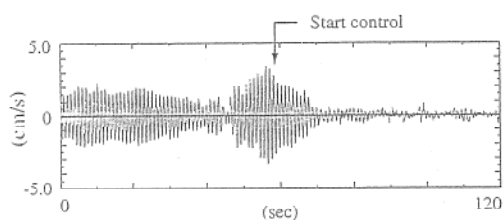


(a) 制御装置

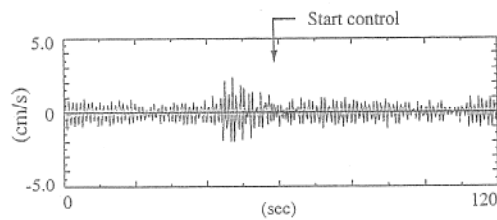


(b) アクティブフィンを設置状況

図17 アクティブフィン



(a) 風向直交方向の速度応答(最上階)



(b) 風向平行方向の速度応答(最上階)

図18 アクティブフィンによる制振実験結果