

## HMD制振構法の開発（その2）

### — 装置概要と試験結果 —

井出 知良\* 今岡 達彦\*\* 川久保政茂\*

**要約：** 近年、超高層ビルでは地震や強風に対する構造安全性のみならず、台風や季節風などによる風揺れに対する居住性能の確保が重要な課題となっている。本論文では都内に建設される超高層ビルを対象とした制振装置の概要および製作時に行った試験結果について報告する。開発した制振装置はチューンドマスダンパを基本としながら、設計者が意図した挙動を実現するようアクティブ制御が可能なハイブリッドマスダンパ（HMD）である。制御アルゴリズムにはモデルフォロイング制御則を用いている。製作後の性能確認試験により、適切なゲイン設定を行うことにより十分な制御精度が確保できることを確認した。

**キーワード：** 制振装置，超高層ビル，風揺れ，ハイブリッドマスダンパ，モデルフォロイング制御，居住性能

**目次：** 1. はじめに  
2. 制振装置  
3. 性能確認試験  
4. おわりに

### 1. はじめに

近年、超高層ビルでは地震や強風に対する構造安全性のみならず、台風や季節風などによる風揺れに対する居住性能の確保が重要な課題となっている。特に超高層ビルを住居やホテルとして利用する場合、居室としての居住性能を確保する必要がある。このようなニーズに対応するために制振装置の研究開発が盛んに行われ、実用段階を迎えている。本論文では都内に建設される超高層ビルを対象に開発した制振装置の概要および製作後工場において行った試験結果について報告する。

### 2. 制振装置

#### 2.1 概要

本制振装置は超高層建築物の風揺れ対策として設置される。同建物は地上41階、地下6階、最高高さ183.85mの鉄骨造建物である。建物用途は4～16階が事務室、19～38階がホテル客室として利用される。制振装置設置階の平面図を図1に、断面図を図2に示す。図1には制振装置の設置位置を併せて示す。事前に行った再現期間1年の風に対する応答解析結果を『建築物の居住性能評価指針（建築学会）』（以下、指針と称す）にプロットしたものを図3に示す。再現期間1年の風に対して、制振装置を設置しない場合、U方向でH-4、V方向はH-2とH-3の間に位置していた。指針によれば事務所として性能評価では、同方向とも『この範囲を上回ら

ないようにすべきレベル（H-4）』を満足している。しかし建物上層階はホテル客室として利用されるため、居室としてH-3以下にする必要がある。一方、図3によれば制振装置を設置した場合、約半分程度まで応答を低減することができる。居住性能の評価では、各方向ともH-2とH-3の間に位置しており、制振装置を設置することにより、指針が規定している居室として『この範囲を上回らないようにすべきレベル（H-3）』以下にすることを可能とした。制振装置の外観を写真1に示す。本制振装置はパッシブ型のチューンドマスダンパ

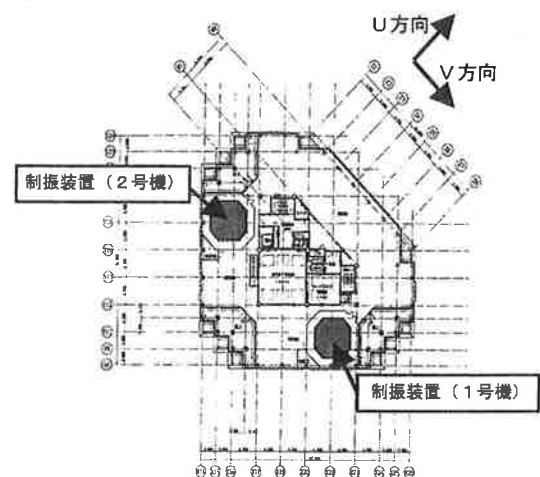


図1 平面図（41階）

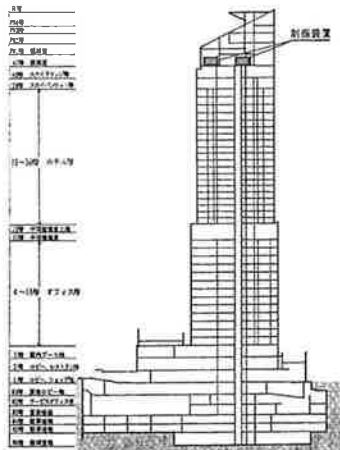


図2 断面図

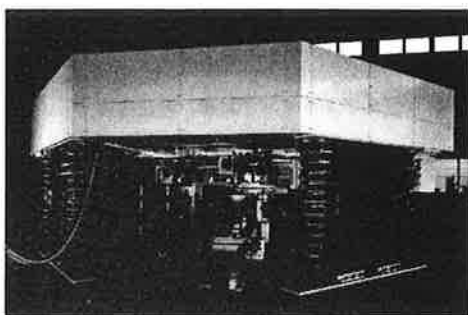


写真1 制振装置

(以下、TMDと称す)を基本としながら、モデルフロロイング制御則により設計者が意図したTMDとしての挙動を実現させるためにACサーボモータを用いてアクティブ制御を行うハイブリッド型の制振装置である。

### 2.2 制御アルゴリズム

本制振装置では制御アルゴリズムとしてモデルフロロイング制御(モデル追従制御)を採用した。この制御アルゴリズムは、航空機のオートパイロットなどに多く使用されていたアクティブ制御アルゴリズムで、その名が示す通り、制御対象(プラント)の応答を任意のモデル(規範モデル)の応答に追従させることを目的としている。本制振装置においては設計で意図したTMDをコンピュータ内で構築し、外乱(41階の揺れ)に対する応答を算出、実際のTMD(プラント)の挙動との差異を評価、プラントの挙動が規範モデルに追従するよう制御力を加えるというものである。制御アルゴリズムのブロック線図を図4に示す。制御力  $F_c$  は(1)式で算出する。本制御アルゴリズムの最大の特徴は、プラントの動特性がはっきりと特定できない場合(図4の Gray Box に相当)においても、アクティブな制御が可能である。従って内存する摩擦や積層ゴムの力学的特性(復元力特性、減衰特性など)の非線形性の影響を受けることなく、アクティブ制御が可能である。

### 2.3 ハードウェア

本制振装置は鋼製の可動マス(U方向 110ton, V方

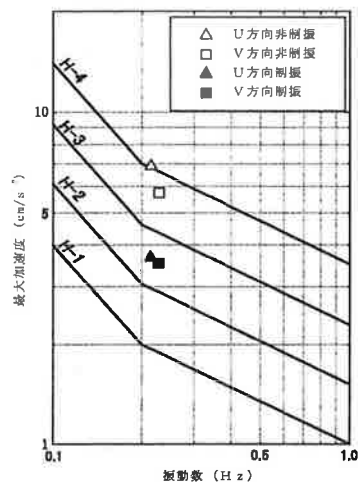


図3 水平振動に関する性能評価基準

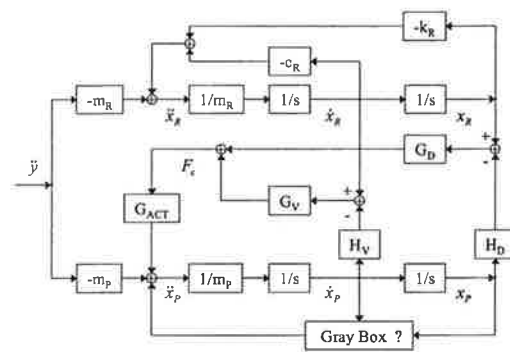


図4 ブロック線図

表1 制振装置諸元

	U方向	V方向
総重量 [ton]	150	
可動マス重量 [ton]	110	100
設計周期 [sec]	4.4	4.15
周期調整範囲 [%]	-15~5	-15~5
実用変位 [cm]	-60~+60	-60~+60
最大変位 [cm]	±80	±80
モータ容量 [kW]	11×2台	11×2台

$$F_c = G_v \cdot (\dot{x}_R - H_v \cdot \dot{x}_P) + G_D \cdot (x_R - H_D \cdot x_P) \quad (1)$$

- $F_c$  ; 制御力
- $G_v$  ; 速度差フィードバックゲイン
- $G_D$  ; 変位差フィードバックゲイン
- $H_v$  ; 速度フィードフォワード
- $H_D$  ; 変位フィードフォワード
- $\dot{x}_R$  ; 規範モデルの応答速度
- $x_R$  ; 規範モデルの応答変位
- $\dot{x}_P$  ; プラントの応答速度
- $x_P$  ; プラントの応答変位

向 100ton), 多段積層ゴム, ACサーボモータを主とする駆動部から構成される。装置諸元を表1に示す。装置の総重量は1基あたり約150tonで、建物41階に2基設置する。使用したACサーボモータは、消費電力11k

W, 瞬間最大トルク 100Nm, 瞬間最大加振力 12.57N で, 1 方向あたり 2 台, 合計 4 台設置している。(制振装置 1 基あたり) また制振装置が停電時や大地震時にパッシブ制御へ移行した場合, AC サーボモータは外部抵抗と接続され減衰装置として機能する。

TMD として水平方向の剛性を得るために, 多段積層ゴムを使用しているが, 固有周期の微調整はコイルばねの増減で行うことができる。本制振装置は, 季節風や台風など年数回程度発生する風を対象としているが, 大地震時には可動マスが常用変位を超える可能性がある。その際過大な変形を抑制するために各方向には正側, 負側それぞれに 2 基のオイルバッファを設置した。なおオイルバッファのストロークは 20cm である。

### 3. 性能確認試験

#### 3.1 概要

採用した制御アルゴリズムにおいて, 規範モデルに対する追従性を向上させるためにはフィードバックゲイン  $G_v$ ,  $G_d$  を可能な限り大きな値とする必要がある。しかし実際にはコンピュータを用いることによる制御遅れ, AC サーボモータの剛性や応答性, 駆動系の動特性, 測定機器やフィルターの動特性およびノイズ特性等の影響により, 採用できるフィードバックゲインの値には上限(安定限界ゲイン)が存在する。本試験では製作が完了した時点で, 安定限界ゲインおよびその時の制御精度を把握することを目的とする。

#### 3.2 試験方法

試験は制振装置を定盤上に固定した状態で行った。外乱すなわち設置階の応答(図4の  $\dot{y}$  に相当する)は, ファンクションジェネレータから正弦波として入力した。従って制振装置に対する直接的な入力はなく, 規範モデルが外乱により応答, その応答を実際の制振装置(プラント)が追従するよう AC サーボモータによる制御を行った。試験は U, V 方向単独の場合と U V 方向同時の場合について行った。なお外乱の振動数は U 方向 0.228Hz, V 方向 0.241Hz とし, 各方向とも制御遅れは 500Hz (2 msec), フィードフォワードゲイン  $H_v$ ,  $H_d$  は 1.0 とした。

#### 3.3 試験結果

ここでは U 方向の試験結果について述べる。図5に速度差比例ゲイン  $G_v$  のみ与えた場合の制御精度を示す。制御精度はプラントに対する規範モデルの応答変位の比率とした。速度差比例ゲイン  $G_v$  の値を大きくするに従い, プラントの応答が規範モデルに近づくことが分かる。ただし  $G_v=85$  ではプラントの応答速度波形に発振の兆候が見られた。次に速度差比例ゲインを  $G_v=60$  に固定して, 変位差比例ゲイン  $G_d$  の値を変化させた場合を図6に示す。 $G_d$  の値を大きくするに従い, 制御精度が更に向上している。 $G_d=1000$  での制御精度は 0.95 以上と

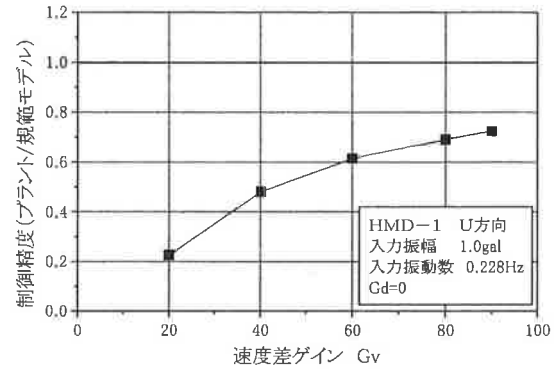


図5 速度差ゲイン  $G_v$  を変化させた場合の制御精度

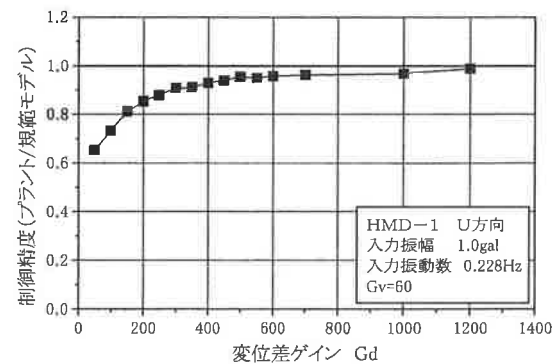


図6 速度差ゲイン  $G_d$  を変化させた場合の制御精度

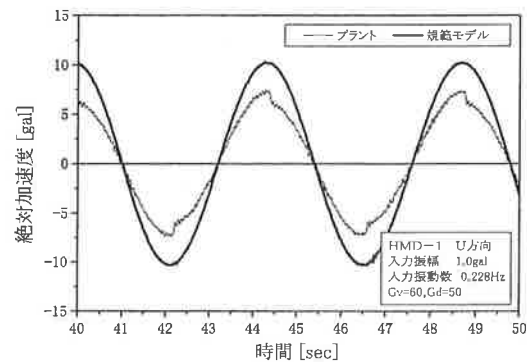


図7 応答加速度波形( $G_v=60, G_d=50$ )

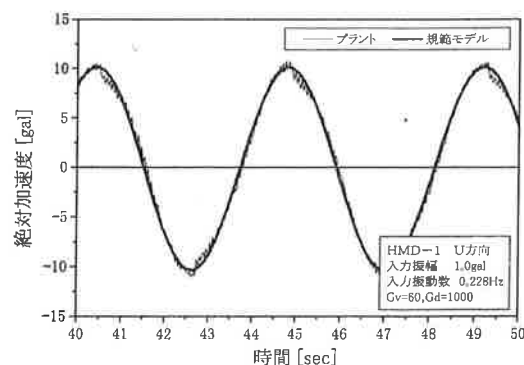


図8 応答加速度波形( $G_v=60, G_d=1000$ )

なった。速度差比例ゲイン  $G_v=60$  とし、変位差比例ゲインを  $G_d=50, 1000$  とした場合の応答加速度波形を図7, 8に示す。図7においてプラントの応答加速度がピークを迎えた直後に急激な変動が見られるが、これは摩擦による影響と考えられる。図9, 10, 11には入力加速度の振幅を1, 5, 10galとした場合の履歴曲線を示す。1gal入力においてプラントの履歴曲線が滑らかになっていないが、これはボールねじなど駆動系の特性によ

るものと考えられる。いずれの入力レベルにおいても、規範モデルとプラントの履歴形状はよく一致しており、十分な精度で制御が行われていると考えられる。

#### 4. おわりに

以上実建物を対象としたハイブリッド型制振装置の概要と性能確認結果について報告した。今後、建物に設置した状態において試験を行う予定である。

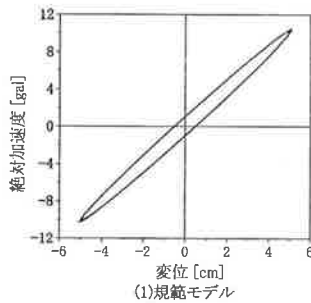


図9 履歴曲線(1gal 入力)

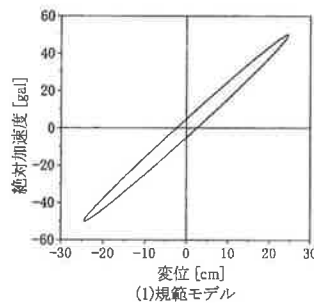


図10 履歴曲線(5gal 入力)

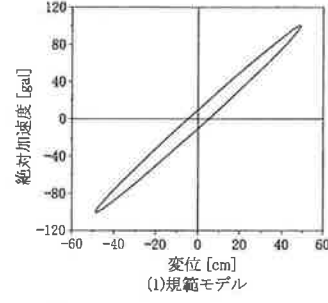


図11 履歴曲線(10gal 入力)

#### 謝辞

なお本制振装置に開発は、日本大学理工学部建築学科石丸研究室との共同研究である。

#### 参考文献

- 1) 川久保政茂・木村正彦・今岡達彦 HMD制振構法の開発(その1) 東急建設株式会社技術研究所報No.21 pp.159-164 1995年10月
- 2) 今岡達彦・川久保政茂・他4名 ハイブリッド制振装置開発に関する基礎的研究 日本建築学会大会学術講演会梗概集 pp.859-860 1995年8月

## DEVELOPMENT OF HMD STRUCTURAL CONTROL SYSTEM (PART 2) OUTLINE OF FULL-SCALE HMD AND RESULT OF EXPERIMENTS

T.Ide, T.Imaoka and M.kawakubo

Recently, in order to mitigate feel uncomfortable of residents in ultra-high-rise and slender buildings by earthquake and wind loads, many kinds of vibration control system have been developed. This paper presents outline of full-scale Hybrid Mass Damper (HMD) and result of experiments. The HMD is comprised of weights, springs and dampers to absorb energy. Its basic movements are determined by a passive type TMD (Tuned Mass Damper), which adjusts itself to the natural period of the building to which the device is attached, but the device also includes an active control system to control micro-vibration and to improve control stability.