

Hybrid Mass Driver (HMD) の実用化に関する研究 (その2)

『AVICS-2』の開発とその適用例

奥田 浩文 蔭山 満

Practical Development of Hybrid Mass Driver (Part 2)

Development of "AVICS-2" and Application to Buildings

Hirofumi Okuda Mitsuru Kageyama

Abstract

This paper describes the development of a Hybrid Mass Driver (HMD) and its application to two actual high-rise buildings. This HMD consists of an Active Mass Driver (AMD) installed on a Tuned Mass Damper supported by four Multi-Staged-Rubber-Bearings. To realize the HMD, four key technologies were developed: 1) how to correct nonlinearity of the Multi-Staged-Rubber-Bearing used in the HMD, 2) how to make an appropriate reduction model based on exciting tests on an actual building, 3) how to avoid control-spillover, and 4) how to control the AMD's stroke within its limitation when a large unanticipated external force acts on the building beyond the design level. The performance of the HMD was demonstrated through its application to high-rise buildings as a practical solution to reduce structural vibration.

概 要

本報告は、多段積層ゴムで支持されたTMDの付加マス上に、ACサーボモータとボールねじで駆動するAMDを搭載する形で構成されるHMDを開発し、実建物に適用した事例を紹介するものである。この方式のHMDを実用化するためには、大きく4種類の技術の完成度を高めなければならなかった。すなわち、1)非線形性を有する多段積層ゴムを、設定された全ての振幅レベルで建物周期に同調させるための技術、2)精密な建物低次元化モデルを、実験データのみを用いて作成する技術、であり、装置を複数基用いた場合の、3)限られた観測量下で、制御対象外の高次モード信号を抑制する技術、4)装置能力を最大限発揮するための制御技術、である。本報告では、これらの課題を解決する方法を示し、その有用性を確認した結果について述べる。

1. はじめに

筆者等は、既にACサーボモータとボールねじで駆動するアクティブマスドライバー(以下、AMD)を開発し、1994年にリバーサイド隅田高層棟に適用している。¹⁾その後、これをベースにハイブリッドマスドライバー(以下、HMD)を開発し、実機に適用したので報告する。²⁾

このHMDには、安全性の確保と装置能力を最大限引き出すことを目的として開発したストロークサチュレーション制御法^{3),4)}、およびAMDで開発した多モード制御法¹⁾が受け継がれていることを最初に述べておく。本報では、HMDの構成要素である多段積層ゴムが有する非線形性の是正法、実験データのみを用いた建物低次元化モデルの作成法、装置を複数基用いた場合の最適フィルタの構成法、などを提案し、品川インターシティA棟に適用した結果を例に、その有用性について報告する。

2. 多段積層ゴムの非線形是正法

2.1 HMDの構成

開発したHMDの概要をFig.1に示す。このHMDは、ACサーボモータとボールねじで駆動するAMDを、多

段積層ゴムで支持されるチューンドマスダンパー(以下、TMD)の上に搭載する形で構成される。この方式のHMDは、頻度の高い日常風に対しては、供給エネルギーを必要としないTMDとして働き、台風等の強風および中小地震に対しては、建物の応答レベルに応じて、TMDからHMDに滑らかに移行することが可能であり、常時のランニングコストの低減に繋がる等の長所を有する。

この長所は、AMDをTMDの上に搭載する方式、およびTMDの弾性支持装置として摩擦抵抗のない多段積層ゴムを用いることから導かれる。しかし、この多段積層ゴムを用いた方式は上述の長所と共に、HMDを構成する上での問題も有していた。すなわち多段積層ゴムが非線形性を持つことであり、これを如何にして克服するかがこの開発の最大の課題であった。Fig.1中の倒立圧縮ばね機構はこの問題を解決するために開発されたものである。

2.2 建物とTMD特性のマッチングの検討

建物の基本周期で屋上階を10Galまで加振し、その後の自由振動から、建物応答レベルと周期の関係性を求めた結果をFig.2に示す。この結果から、この範囲の振幅レベルにおいて、建物は周期3.87secで、一定の固有周期を持

つことが分かる。一方、多段積層ゴムで構成されるTMDの変位振幅レベルと固有周期の関係性を調べた結果をFig.4(b)に示す。この結果から、TMDを構成する多段積層ゴムは、その変位の増大と共に長周期化するソフトニングの剛性を有することが分かる。なお、同図は、実測値をスプライン補間して表したものである。

Fig.4(b)の非線形性を持つTMDがFig.2の建物周期に同調し、TMD本来の制振効果が期待できるのは、ある限定された狭い外力範囲の場合のみとなる。特にHMDとして用いる場合、線形で仮定するノミナルモデルと現実モデルとの大きな差は、制振効果の低下、および制御の不安定を招くことから、その対策が必須の課題となる。

2.3 非線形性は正法の構築とその効果

多段積層ゴムの持つ非線形性は正法⁵⁾として、Fig.3で示される倒立圧縮ばね機構を多段積層ゴムと並列に設置することを考える。いま、鉛直方向のピン支持間距離をH、ばねの自然長をL₀、圧縮ばね剛性をk_cとし、パッシブマスの設置床に対する相対変位をx_pとした場合、倒立圧縮ばね機構による反発力の水平成分P_xは、

$$P_x = -k_c \left(L_0 - \sqrt{x_p^2 + H^2} \right) \sin \theta \tag{1}$$

ただし、

$$\sin \theta = x_p / \sqrt{x_p^2 + H^2} \tag{2}$$

として表される。この倒立圧縮ばね機構はガイド装置で挟み込まれた構造となっており、ばね長さが自然長を超える場合は、ばね端部とばねガイドの支持部が離れる構造となっている。この場合、P_xは式(1)と(2)より、

$$P_x = \begin{cases} \frac{k_c x_p \left(L_0 - \sqrt{x_p^2 + H^2} \right)}{\sqrt{x_p^2 + H^2}} & \leftarrow \left(x_p < \sqrt{L_0^2 - H^2} \right) \\ 0 & \leftarrow \left(x_p \geq \sqrt{L_0^2 - H^2} \right) \end{cases} \tag{3}$$

として表される。

この建物(品川インターシティA棟)の場合、自然長およびばね剛性の異なる2種類の倒立圧縮ばね(コイルばね)を用いて、TMDの非線形性を是正を行っている。2種類のコイルばねはスライド可能なガイド芯の廻りに二重に設

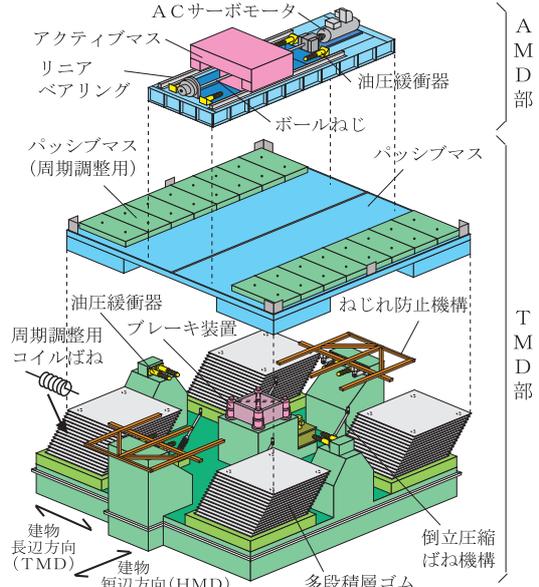


Fig.1 ハイブリッドマスドライバー(HMD)の概要 Outline of Composition of HMD

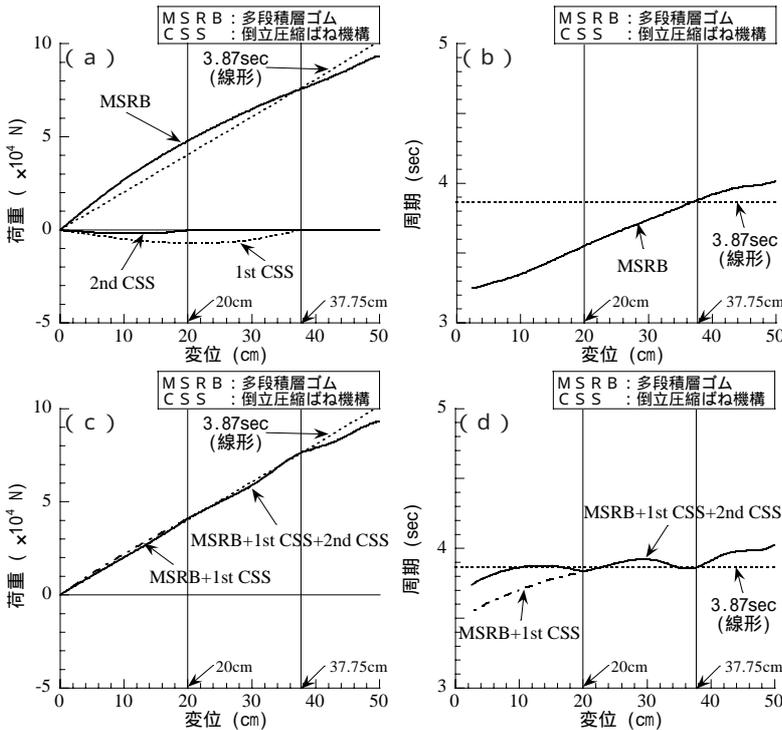


Fig.4 多段積層ゴムの非線形性は正の実験結果 Correcting Method of Nonlinearity of MSRB

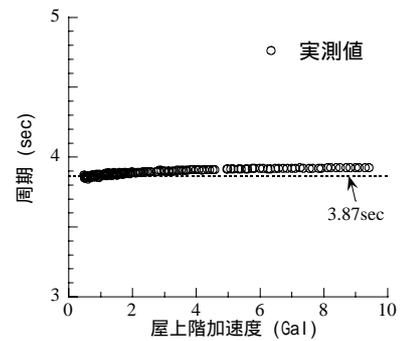


Fig.2 建物の応答レベルと周期の関係 Relation between Response and Period

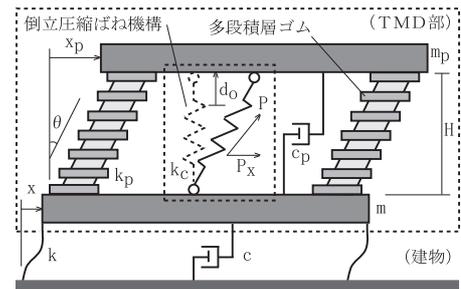


Fig.3 倒立圧縮ばね機構の概要 Concept of Compressed Spring System

置する構造とし、一つのガイド支持装置でそれらを挟み込む構造となっている。したがって、2種類の倒立圧縮ばね機構は理論式(3)で用いる H が同じ値となる。

Fig.4(a)は、同図(b)の多段積層ゴム(MSRB)を周期一定の建物に適用させる場合の復元力特性の関係、および2種類の倒立圧縮ばね機構の理論値を表したものである。

Fig.4(d)は、第1圧縮ばね(1st CSS:内側)のみを用いた場合と、それに第2圧縮ばね(2nd CSS:外側)を併用した場合の、TMDの変位と周期の関係の実測結果をそれぞれ表したものである。同図より、2種類の倒立圧縮ばねを多段積層ゴムに併設することで、TMDの周期は、その全ての振幅範囲で目標とする建物周期に対して、およそ2%以内の周期差に調整されていることが分かる。

Fig.4(c)は、同図(d)の結果を復元力特性に換算したものであり、同図の(c)と(a)を比較すると、式(3)は、実際の倒立圧縮ばね機構の特性をよく説明していることが分かる。なお、これらの諸元については、後述の5章・Table 1に一括して示す。

3. 低次元化モデルの構築

アクティブ方式やハイブリッド方式の装置による建物の制振では、現代制御理論を用いるのが一般的であるが、そのためには、まず建物の力学モデルを構築する必要がある。その際、建物には多くの振動モードが存在するため、いわゆる低次元化モデルを作成することになる。また、低次元化モデルの作成には、装置とセンサーの配置に一致させたモデルの作成が必要になる。建物の低次元化手法を提案した論文は多数紹介されているが^(例えば6),7)、加振実験による実験データのみで作成可能な手法はほとんどみられない。よって本章では、実験データのみを用いた低次元化モデルの作成法の提案と、実建物における本手法²⁾の検証結果について述べる。

3.1 低次元化モデルの作成法

対象となる建物の振動方程式は、

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (4)$$

で表される。ここで、 M, C, K は質量、減衰係数、剛性マトリクスをそれぞれ表す。また、 X は地面と建物の相対変位ベクトル、 F は外力ベクトルをそれぞれ表す。外力(加振力)が建物の最上階に加わる場合、外力ベクトル F は、

$$F^T = (\tilde{F} \ 0 \ \dots \ 0) \quad (5)$$

となる。なお、本章では、以降、添字 i はモードを、 j は建物の層をそれぞれ表すものとする。

次に、モードマトリクス \tilde{U} を用いて、

$$X = \tilde{U}q \quad (6)$$

で表される座標変換を行う。式(6)を式(4)に代入して整理すると、

$$\tilde{U}^T M \tilde{U} \ddot{q} + \tilde{U}^T C \tilde{U} \dot{q} + \tilde{U}^T K \tilde{U} q = \tilde{U}^T F \quad (7)$$

となる。いま、加振点における i 次モード形 \tilde{U}_i を1.0に正規化して用いると、式(7)右辺の外力項は物理座標系の F

に等しくなる。よって、 C が比例型減衰であれば、式(7)左辺の各項は対角マトリクスとなるので、 i 次モードの加振力 \tilde{F}_i に対する応答は、

$$m_i \ddot{q}_i + c_i \dot{q}_i + k_i q_i = \tilde{F}_i \quad (8)$$

で表される。ここで、 $m_i = \tilde{U}_i^T M \tilde{U}_i, c_i = \tilde{U}_i^T C \tilde{U}_i, k_i = \tilde{U}_i^T K \tilde{U}_i$ をそれぞれ表す。 h_i, ω_i を i 次モードの減衰定数、固有円振動数とすると、式(8)は、

$$m_i (\ddot{q}_i + 2h_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i) = \tilde{F}_i \quad (9)$$

に変換できる。

i 次モードの加振力 \tilde{F}_i に対する j 層の応答を x_{ji} と定義すると、式(6)より、

$$\dot{x}_{ji} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dots + \dot{q}_n \quad (10)$$

が成り立つ。式(10)において、共振点では共振モードの影響が支配的である(q_i が他の項に比較して大きい)ので、

$$\dot{x}_{ji} \approx \dot{q}_i \quad (11)$$

と近似すると、 i 次モードの加振力 \tilde{F}_i が定常であれば、式(9)から、

$$m_i (2h_i \omega_i) \dot{x}_{ji} = \tilde{F}_i \quad (12)$$

の釣り合い式が成り立つ。

式(12)をモード質量 m_i について解くと、

$$m_i = \tilde{F}_i / (2h_i \omega_i \dot{x}_{ji}) \quad (13)$$

が得られる。ここで、式(13)右辺の $h_i, \omega_i, \dot{x}_{ji}, \tilde{F}_i$ の値は起振器実験から得られるので、 m_i も実験データから求めることができる。この時のモード減衰係数、剛性はそれぞれ、

$$c_i = m_i (2h_i \omega_i) \quad (14)$$

$$k_i = m_i \omega_i^2 \quad (15)$$

から求まる。いま、 $1 \sim n_r$ 次までの低次元化モデルを作成するために、式(13)~(15)の値を対角要素とした、

$$\hat{m} = \text{diag}(m_1 \ \dots \ m_{n_r}) \quad (16)$$

$$\hat{c} = \text{diag}(c_1 \ \dots \ c_{n_r}) \quad (17)$$

$$\hat{k} = \text{diag}(k_1 \ \dots \ k_{n_r}) \quad (18)$$

で表されるマトリクスを作成する。ここで、 n_r は制御用センサーの数であり、低次元化モデルの次数に等しい。

式(16)~(18)の各マトリクスは式(7)左辺の各項に等しく、これらを物理座標系へ変換すれば低次元化されたマトリクス $\hat{M}, \hat{C}, \hat{K}$ が得られる。しかし、制御用センサーの数には限りがあるので、 \tilde{U} の全ての要素を求めることはできない。そこで、センサー位置での \tilde{U} の要素を持つ低次元化された \hat{U} を用いて座標変換を行う。 \hat{U} の要素 u_{ji} を、

$$u_{ji} = x_{ji} / x_{n_0i} \quad (19)$$

で定義する。ここで、 x_{n_0i} は i 次モードの加振位置の応答を表す。また、 j はセンサー位置 ($j=1 \sim n_r$) を、 i はモードの次数 ($i=1 \sim n_r$) をそれぞれ表す。

式(16)~(18)および \hat{U} から、物理座標系での低次元化された質量、減衰係数、剛性マトリクスは、それぞれ、

$$\hat{M} = (\hat{U}^T)^{-1} \hat{m} \hat{U}^{-1} \quad (20)$$

$$\hat{C} = (\hat{U}^T)^{-1} \hat{c} \hat{U}^{-1} \quad (21)$$

$$\hat{K} = (\hat{U}^T)^{-1} \hat{k} \hat{U}^{-1} \quad (22)$$

として得ることができる。

3.2 低次元化手法の検証

対象となる建物(品川インターシティA棟)は, Fig.5に示す様に地上32階の高層建物であり, センサーおよび制振装置が一組ずつ対称な位置に設置されている。本建物での制振対象は, 並進1,2次モードおよびねじれ1次モードであるので, 高次モードのスパルオーバー不安定を抑制するために, 並進・ねじれ各3次モードまでのモデル化を行う。モデル化に当たり, ここでは2基の制振装置を介して並進とねじれ振動が連成する振動モデルを考える。同一階に設置されたセンサーの出力信号 ${}_s x_{ji}$, ${}_s x_{ji}$ は並進成分 ${}_s x_{ji}$ とねじれ成分 θ_{ji} に, 制振装置の加振力 ${}_a \tilde{F}_i$, \tilde{F}_i は並進成分 ${}_x F_i$ とねじれ成分 θ_{F_i} に, それぞれ分離でき,

$${}_s x_{ji} = \frac{a {}_s x_{ji} + b {}_s x_{ji}}{2} \quad (23)$$

$$\theta_{ji} = \frac{a {}_s x_{ji} - b {}_s x_{ji}}{s L_j} \quad (24)$$

$${}_x F_i = a \tilde{F}_i + b \tilde{F}_i \quad (25)$$

$$\theta_{F_i} = L_E \frac{a \tilde{F}_i - b \tilde{F}_i}{2} \quad (26)$$

となる。ここで, ${}_s L_j$ は Fig.5 中の同一階に設置されたセンサー間の距離を, L_E は制振装置間の距離を表す。

本低次元化手法を並進・ねじれ連成系の低次元化モデル作成に適用するためには, 式(4)~(18)中の x_{ji} を ${}_s x_{ji}$ と θ_{ji} に, \tilde{F}_i を ${}_x F_i$ と θ_{F_i} に置き換えた場合の \hat{M} , \hat{C} , \hat{K} を式(20)~(22)から求めればよい。

加振実験から得られた結果をもとに, 並進・ねじれ連成系の低次元化モデルを作成し, 実測結果との比較を行った。Fig.6の上段に並進加振力に対するセンサー設置階の応答加速度伝達関数を, 下段にねじれ加振力に対するそれを示す。低次元化モデルを用いて計算した伝達関数は, モデル化された振動数領域で実測値とよく一致しており, 本低次元化手法の有効性が確認できる。

4. 最適フィルタを含む制御システムの構築

一般に, 単一装置を用いる場合の最適フィルタ⁴⁾に比較して, 制振装置を複数基用いる場合のそれはその構成が複雑となる。本章では, 2基の制振装置を用いた場合の最適フィルタの構築を主とした制御システムの構成法について述べる。

4.1 拡大系状態方程式の定式化

制御システムの構成を Fig.7 に示す。既報の手法^{3),4)}により, 変位制御型に特性変換された AC サーボモータで駆動する装置(a)のAMDの状態方程式は,

$$\dot{Z}_a = A_{za} Z_a + B_{za} u_{za} \quad (27)$$

ただし,

$$Z_a^T = (z_a \quad \dot{z}_a \quad \ddot{z}_a), \quad A_{za} = A_{0a} - B_{za} G_a,$$

$$A_{0a} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\alpha_{a1} & -\alpha_{a0} \end{bmatrix},$$

$$B_{za}^T = (0 \quad 0 \quad \beta_a), \quad G_a = (g_{a0} \quad g_{a1} \quad 0)$$

で表される。ここで, α_{a1} , α_{a0} , β_a は AC サーボモータの動特性係数, g_{a0} , g_{a1} はAMDのストロークおよびストローク速度に掛かるマイナーループゲイン, z_a はAMDストローク, A_{0a} はモータ本来の速度制御型特性マトリクスをそれぞれ表す。式(27)と, 同様の定式化で得られる装置(b)の状態方程式とを一つにまとめると,

$$\dot{Z}_g = A_{zg} Z_g + B_{zg} U_{zg} \quad (28)$$

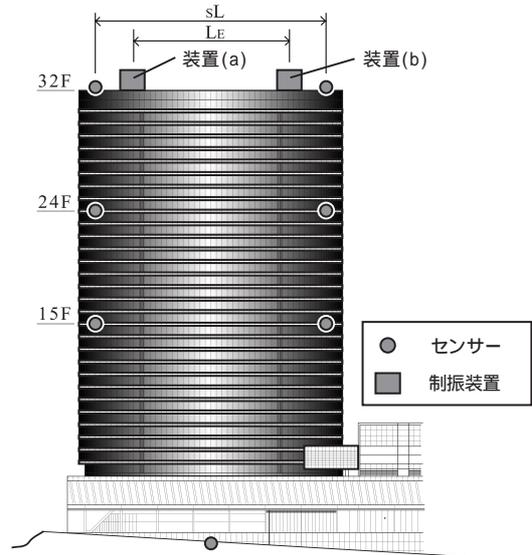


Fig.5 センサー・制振装置本体の配置
Arrangement of Sensor and Device

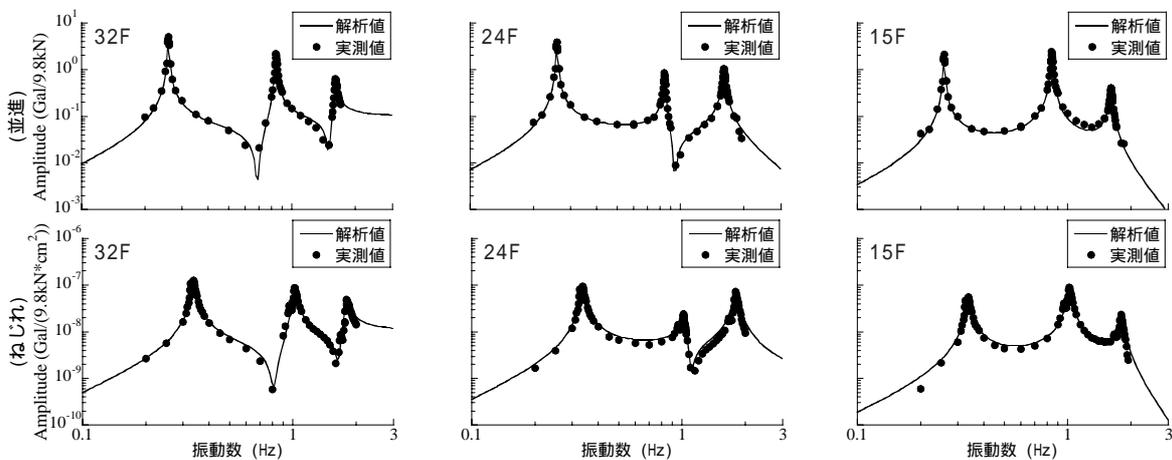


Fig.6 実測値と低次元化モデルを用いた解析値の比較
Comparison between Measured Responses and Calculated Ones from Reduction Model

ただし,

$$Z_g^T = (\dot{z}_a \quad \dot{z}_a \quad \ddot{z}_a) \quad (z_b \quad \dot{z}_b \quad \ddot{z}_b), \quad U_{zg}^T = (u_{za} \quad u_{zb}),$$

$$A_{zg} = \begin{bmatrix} A_{za} & [0] \\ [0] & A_{zb} \end{bmatrix}, \quad B_{zg} = \begin{bmatrix} B_{za} & [0] \\ [0] & B_{zb} \end{bmatrix}$$

となる。

式(28)と、2章および3章で得られた、TMD特性を含めた建物特性とを一つにまとめた拡大系状態方程式は、

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + BU_{zg} \quad (29)$$

ただし,

$$\bar{X}^T = (\bar{X}_s^T \quad Z_g^T), \quad A = \begin{bmatrix} A_s & B_s C_z \\ [0] & A_{zg} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} [0] \\ B_{zg} \end{bmatrix}, \quad C_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

となる。ここで、式(29)の U_{zg} はフィルタの出力を用いる。

いま、装置(a)に設定されるフィルタ特性を、

$$\dot{X}_{fa} = A_{fa} X_{fa} + B_{fa} u_a, \quad u_{za} = C_{fa} X_{fa} \quad (30)$$

と表す。式(30)と、同様の定式化で得られる装置(b)に設定されるフィルタ特性とを一つにまとめると、

$$\dot{X}_f = A_f X_f + B_f U_f, \quad U_{zg} = C_f X_f \quad (31)$$

ただし,

$$X_f^T = (X_{fa}^T \quad X_{fb}^T), \quad U_f^T = (u_a \quad u_b),$$

$$A_f = \begin{bmatrix} A_{fa} & [0] \\ [0] & A_{fb} \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} B_{fa} & [0] \\ [0] & B_{fb} \end{bmatrix}, \quad C_f = \begin{bmatrix} C_{fa} & [0] \\ [0] & C_{fb} \end{bmatrix}$$

となる。

TMD特性を含めた建物特性、変位制御型のACサーボモータで駆動するAMD特性、およびフィルタ特性を含めた拡大系状態方程式は、式(29)と(31)とを一つにまとめることにより、

$$\dot{X}_G = A_G X_G + B_G U_G \quad (32)$$

ただし,

$$X_G^T = (\bar{X}_s^T \quad Z_g^T \quad X_f^T), \quad A_G = \begin{bmatrix} A & BC_f \\ [0] & A_f \end{bmatrix}, \quad B_G = \begin{bmatrix} [0] \\ B_f \end{bmatrix}$$

として表される。

4.2 最適フィルタの構成法

式(32)を用いて最適制御理論から求まるフィードバックゲインベクトル K を、

$$K = (K_s \quad K_z \quad K_f) \quad (33)$$

ただし、 K_s, K_z, K_f : TMDを含めた建物、AMD、およびフィルタへのフィードバックゲイン

と表し、式(32)の制御量 U_G をフィルタへのゲイン K_f と他のゲインに分離すれば、

$$U_G = -([0] \quad [0] \quad K_f) X_G - (K_s \quad K_z \quad [0]) X_G \quad (34)$$

となる。式(34)の第2項を U_R とし、第1項を式(32)の A_G 内部に移項すると、式(32)は、

$$\dot{X}_G = A_{Gf} X_G + B_G U_R \quad (35)$$

ただし,

$$A_{Gf} = \begin{bmatrix} A & BC_f \\ [0] & A_f - B_f K_f \end{bmatrix}, \quad U_R = -(K_s \quad K_z \quad [0]) X_G$$

$$= -(K_s \quad K_z) \bar{X}$$

となる。式(35)の A_{Gf} は、式(31)で当初設定したフィルタの特性マトリクス A_f に、フィルタへのゲイン K_f を用いることで、

$$A_{f(opt)} = A_f - B_f K_f \quad (36)$$

に修正されるものであり、式(36)が最適フィルタの特性マトリクスとなる。

最適フィルタの状態方程式と出力方程式は、 $U_R = U_f$ の関係性を考慮すると、

$$\dot{X}_f = A_{f(opt)} X_f + B_f \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} u_{za} \\ u_{zb} \end{Bmatrix} = C_f X_f \quad (37)$$

で表される。式(37)より、最適フィルタでは操作量 u_a (あるいは u_b)から u_{za} (あるいは u_{zb})として流れる出力信号だけでなく、他方からの干渉成分も生じることが分かる。この時の、フィルタへの操作量を u_a とした伝達関数(u_b も同様の形で構成)は、

$$g_{(za/a)} = (C_{fa} \quad 0) [sI - A_{f(opt)}]^{-1} \begin{Bmatrix} B_{fa} \\ [0] \end{Bmatrix} \quad (38)$$

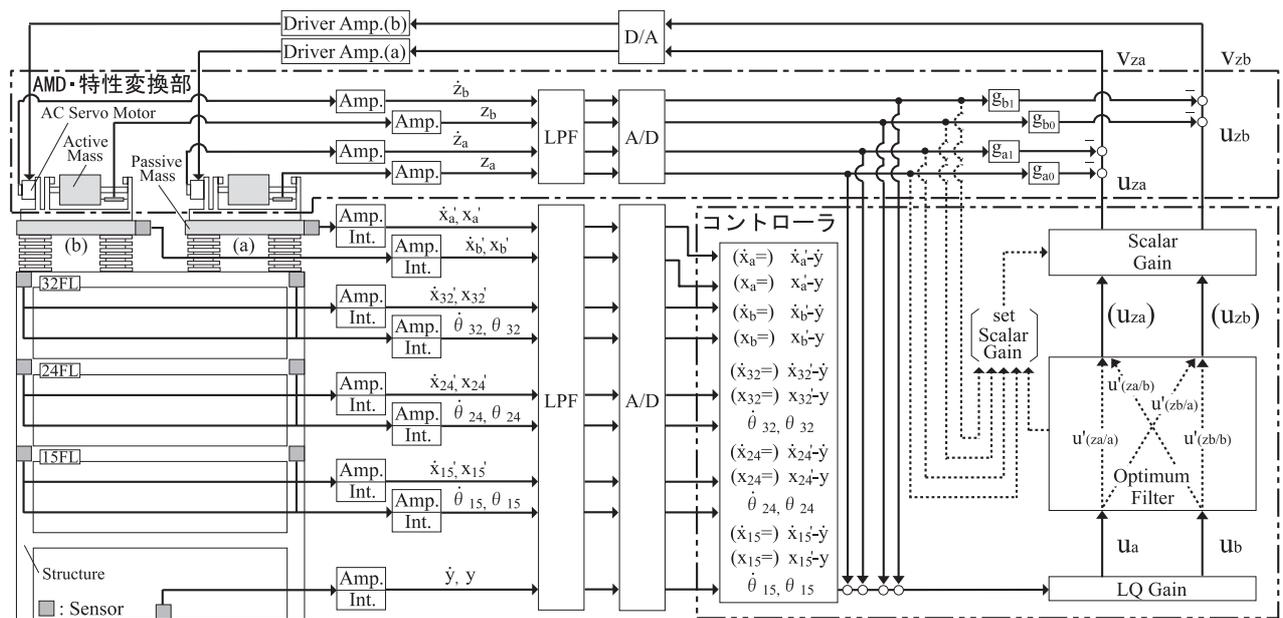


Fig.7 制御システムの構成
Block Diagram of Control System

$$g_{(zb/a)} = \begin{pmatrix} 0 \\ C_{fb} \end{pmatrix} [sI - A_{f(opt)}]^{-1} \begin{Bmatrix} B_{fa} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (39)$$

で表される。

実際の制御ではデジタルフィルタとして用いるため、

$$s = \frac{2}{T_d} \left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right) \quad (40)$$

の関係から、例えば、式(38)の伝達関数を、

$$H_{(za/a)} = \frac{u'_{(za/a)}}{u_a} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_f} z^{-n_f}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_f} z^{-n_f}} \quad (41)$$

あるいは、

$$u'_{(za/a)}(k) = \sum_{i=1}^{n_f} b_i u_a(k-i) - \sum_{i=1}^{n_f} b_i u'_{(za/a)}(k-i) \quad (42)$$

に変換すると、最終的なデジタルフィルタの出力は、

$$u_{za}(k) = u'_{(za/a)}(k) + u'_{(zb/a)}(k) \quad (43)$$

$$u_{zb}(k) = u'_{(zb/a)}(k) + u'_{(zb/b)}(k) \quad (44)$$

としてそれぞれ表される。コントローラ内部における最適フィルタの出力計算に式(43)と(44)を用いることによって、式(37)の状態量を逐次計算することなく、フィルタの出力を求めることが可能となる。

4.3 装置特性と最適フィルタ特性

後述の5章で示す建物(品川インターシティA棟)に適用するAMDの伝達特性をFig.8に示す。解析値と実測値はよく一致しており、解析モデルの妥当性が確認できる。

当初設定したフィルタとそれを修正したデジタル最適フィルタの関係をFig.9に示す。なお、式(33)のフィードバックゲインは、建物速度と軽い重みをTMD変位に与える方法で算出している。当初設定したフィルタは同図の(a),(b)共にハイパスカットオフ振動数を0.20Hz、ローパスカットオフ振動数を0.84Hzとした4種のパワース型バンドパスフィルタで構成される。同図中の当初設定のフィルタでは、後述の建物の並進2次をカットオフ振動数としているが、最適フィルタでは最適制御を実現するため、その通過帯域を広げていることが分かる。

5. 実建物における制振性能確認実験

5.1 建物と制振装置の概要

品川インターシティA棟(Photo 1, Table 1参照)は、今回開発したHMDの2例目に相当するものである。同建物とHMDを設置した屋上階の位置関係の詳細をFig.10に示す。

同建物は品川再開発(A地区)の一環として計画されたものであり、同地区の最も駅寄りのA棟は偏平な超高層ビルとならざるを得ない敷地条件となっていた。また、この位置は同地区への玄関口に相当することから、その形状を斬新な長楕円形とし、本再開発地区の象徴的な建物として計画された。この形状は風洞実験の結果から揺れ易さが懸念されていたが、今回開発したHMDによってこの問題の解消が図れるとして実施に移された。

本装置の設置目的(設定性能)と適用範囲をTable 2に一

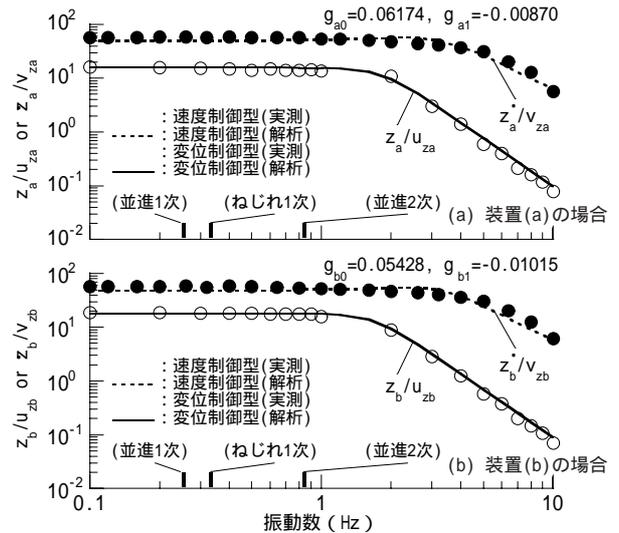


Fig.8 AMDの伝達特性
Transfer Function of AMD

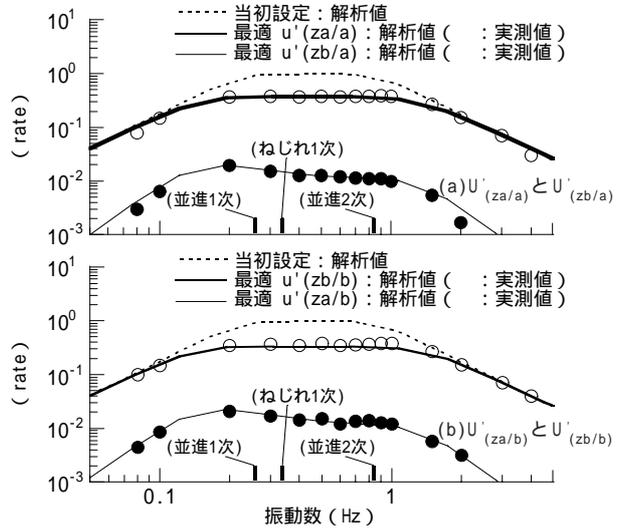


Fig.9 当初設定フィルタと最適フィルタの比較
Comparison between Original and Optimum Filter

A棟(適用建物)



Photo 1 品川インターシティの外観
Location of Shinagawa Inter City Building A

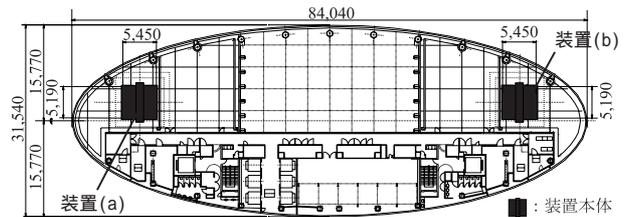


Fig.10 装置本体設置階の平面
32nd Floor Plans

括して示す。なお、風洞実験による事前の応答予測から、建物短辺方向にはHMDとして、長辺方向にはTMDとして機能する装置(Fig.1参照)を用いれば、上述の目的は達成されることが知られている。

5.2 制振効果の確認

5.2.1 自由振動実験の結果 自由振動実験はHMDの動力装置を加振源として用い、建物応答が十分に成長した段階で、本来のHMDに切り換える方法で行った。なお、制振対象は並進1,2次、およびねじれ1次としている。制振時と非制振時の比較をFig.11に示す。同実験では居住性を対象とした本来の使用範囲を超える建物応答を励起して行っているため、並進1次とねじれ1次の波形では、制振開始から自由振動波形の減衰が指数的ではなく、直線的に速く減衰するサチュレーション制御^{3),4)}の特長が顕著に見られる。ちなみに、制振時の最大減衰性能(可変のスカラーゲインが1.0^{3),4)}の場合)をTable 3に示す。

5.2.2 風外力による制振効果 1998年9月16日に関東地方を通過した台風5号を捉えて、制振時と非制振時の比較観測を行った。この非制振時とはTMDのパッシブマスにも非常用ブレーキ(Fig.1内ブレーキ装置)を掛け、TMDとして機能しない状態で観測したものである。

平均風速がほぼ同じ風速20m/s時の、制振時と非制振時について、建物屋上階のセンサー位置での観測加速度波形をFig.12(a)に示す。これらの結果から強風時のHMDの制振効果が顕著に見られる。Fig.12(b)は同図(a)の観測波形を振動数成分で表したものである。これらの結果から、非制振時の建物応答は並進1次とねじれ1次が卓越していることが分かる。また、この結果は事前に風洞実験で予測した結果によく一致していることを付記しておく。制振時はこれら二つのモードがよく抑えられており、HMDが設計通りの機能を果たしていることが分かる。

Fig.12(c)はその時のパッシブマスの変位を表したものであり、この程度の風では、パッシブマスの許容限度を想定してブレーキ装置を作動させる50cmの振幅に対して十分に余裕があることが分かる。

Fig.12(d)はその時のアクティブマスの動きとコントローラ内のスカラーゲイン(可変ゲイン)^{3),4)}の変化を示したものである。なお、同図の右の縦軸はスカラーゲインの値を、左の縦軸はアクティブマスの変位を表している。この結果から、時々スカラーゲインが作動するが、全体的にはアクティブマスの動きに余裕があることが分かる。また、スカラーゲインの作動によって、アクティブマスの変位が設定稼働限界の80cm内によく抑えられていることが分かる。なお、アクティブマスの実稼働限界は105cmであるが、非常時を想定してストロークに25cmの安全余裕を与えている。今後、観測データの蓄積を通じて、スカラーゲインを用いたストロークサチュレーション制御の安全性が確認されれば、ストローク安全余裕として用いている25cmを縮小し、アクティブマスの稼働限界を拡大して、装置能力の有効利用を図ることも考えられる。

同観測結果を再現期間1年時(平均風速26.1m/s)に換算した場合の居住性能⁹⁾をFig.13に示す。並進1次、ねじれ1次共に、Table 2で示す設定性能以上の、ランク(H-2以下)まで応答を低減していることが分かる。

Table 1 建物と制振装置本体の概要
Specification of Installed Building and Device

建物	
・名称	品川インターシティA棟(用途:事務所ビル)
・階数	地上32階,地下3階,塔屋1階
・高さ	軒高144.15m,最高高さ144.15m
・総質量	5.0 × 10 ⁷ kg
・振動諸元(実測値)	固有振動数 短辺1次0.26Hz,短辺2次0.84Hz ねじれ1次0.33Hz 減衰定数 短辺1次0.65%,短辺2次0.78% ねじれ1次2.37%
装置(1基当たり)	
・全体系	大きさ(B × D × H) 545cm × 519cm × 296cm
・AMD部	質量7.5 × 10 ³ kg,最大ストローク105cm 最大制御力24.5kN,モータパワー37kW
・TMD部	質量6.8 × 10 ⁴ kg,最大ストローク75cm ・倒立圧縮ばね/本 初期圧縮長(do=Lo-H) 7.41cm(内側・第1圧縮ばね) 2.20cm(外側・第2圧縮ばね) ピン支持間距離[取付長](H) 90.0cm(内側・第1圧縮ばね) 90.0cm(外側・第2圧縮ばね) ばね剛性(kc) 156.99N/mm(内側・第1圧縮ばね) 247.96N/mm(外側・第2圧縮ばね)

Table 2 設置目的と適用範囲
Purpose and Coverage

設置目的(設定性能)
・日常風(再現期間1年)による建物水平方向の応答を居住性能評価基準 ⁹⁾ のランク 以内におさめ、居住性を改善することを主目的とする。
・レベル0~1(再現期間1年~100年程度)の風に対する建物応答を約1/2~1/3に低減し、揺れによる不快感を小さくする。
・中小地震の建物応答(特に後揺れ)を素早く収束する。
適用範囲
・風外力に対してはレベル1、地震外力に対しては気象庁震度階 程度までとし、それ以上の外力が作用した場合には、ストッパー等を作動させることにより、建物に悪影響を及ぼすことなく装置を停止状態とする。

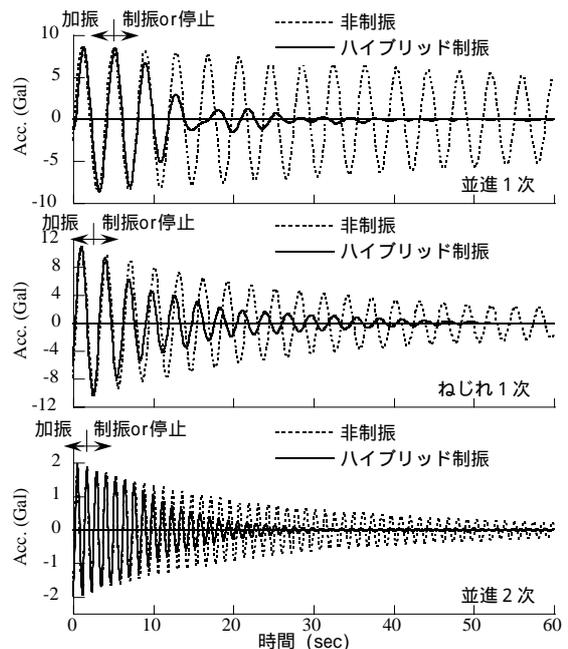


Fig.11 自由振動実験による制振効果
Free Vibration Test

Table 3 減衰性能
Damping Characteristics

	並進1次	ねじれ1次	並進2次
非制振	0.65	2.37	0.78
ハイブリッド制振	12.5	8.90	4.90

5.2.3 地震外力による制振効果 2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震による制振効果の一例をFig.14に示す。図中,制振時の波形は実測結果であり,非制振時のそれは装置調整時期に得られた低次元化モデル(3章参照)に,実測された1階加速度波形を入力した場合の解析結果である。同図より,非制振時に対する制振時の応答は,最大値で約31%,rms値で約26%に低減されており,良好な制御が達成されていることが分かる。

6. まとめ

本研究の結果をまとめると,以下となる。

- (1)開発した倒立圧縮ばね機構を,多段積層ゴムで構成されるTMDの非線形正法として用いる方法を示し,その有用性を検証した。
- (2)実験データのみを使用した低次元化モデルの作成法を提案し,その有効性を確認した。
- (3)2入力2出力系となる,最適フィルタの構築を中心とした制御コントローラの構成法を示した。
- (4)台風時,地震時の観測等によってHMDが有効に機能し,建物応答を大幅に低減していることを確認した。

謝辞

本件の計画および実施に当たりご協力頂いた(株)日本設計の小林秀雄氏ら関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 鈴木哲夫, 蔭山満ほか: 中高層建物のアクティブ制振システム(その15)~(その17), 日本建築学会学術講演梗概集 B構造, pp.899~904, (1994.9)
- 2) 蔭山満, 奥田浩文, 稲葉学, 中村充, 小林秀雄: ハイブリッド型動吸振器の開発とその実機適用に関する研究(その1)~(その4), 日本建築学会学術講演梗概集 B-2構造, pp.811~818, (2000.9)
- 3) 奥田浩文, 蔭山満, 鈴木哲夫, 安井謙: Hybrid Mass Driver(HMD)の実用化に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No.58, pp.7~12, (1999.1)
- 4) 奥田浩文, 蔭山満: スピルオーバー防止とAMDストローク制約下における可変ゲインの設定を考慮した最適制御手法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第532号, pp.87~94, (2000.6)
- 5) 吉田治, 蔭山満, 奥田浩文, 鈴木哲夫: 倒立圧縮ばね機構を併用した非線形特性の修正法について - TMDに適用した場合の効果の検討 -, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2構造, pp.823~824, (1997.9)
- 6) BRUCE C.MOORE: Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.AC-26, No.1, pp.17~32, (1981.2)
- 7) 背戸一登, 光田慎治: 不可制御・不可観測性の活用による弾性構造物の低次元化物理モデル作成法と振動制御法, 日本機械学会論文集(C編)57巻, 542号, pp.281~287, (1991.10)
- 8) 日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針 同解説, (1991.4)

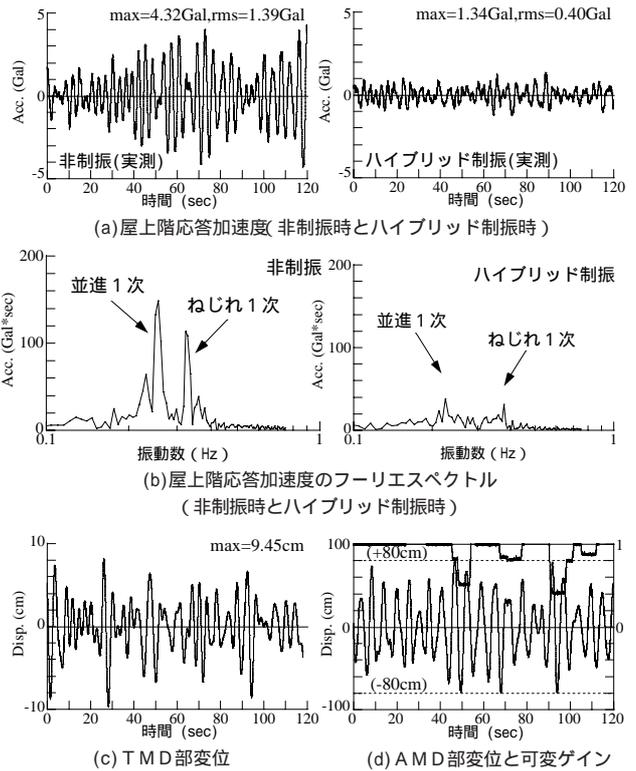


Fig.12 風外力時の制振効果
Time Response under Strong Wind

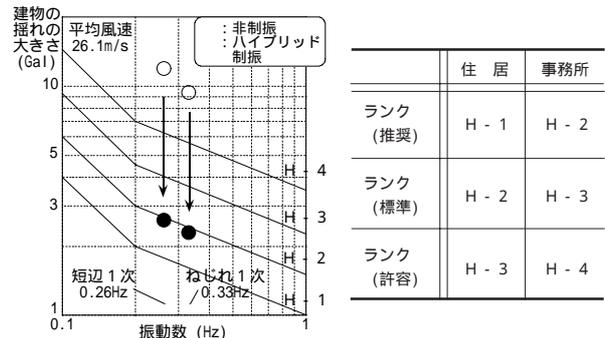


Fig.13 居住性能評価
Habitability to Building Vibration

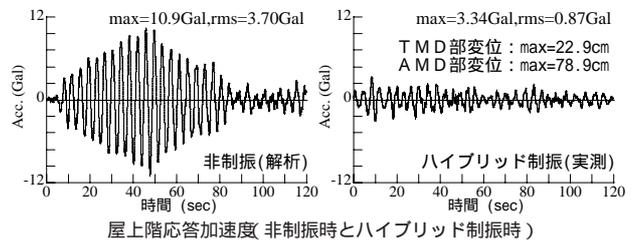


Fig.14 地震外力時の制振効果
Time Response under Earthquake