半円弧状リニアモータ動吸振器を有する

1 自由度構造物の振動制御

VIBRATION CONTROL OF SINGLE-DEGREE-OF-FREEDOM STRUCTURE
WITH SEMI-CIRCULAR CURVED LINEAR-MOTOR DEVICE松 葉 裕^{*1}, 富 澤 稔^{*2}

Yutaka MATSUBA and Minoru TOMIZAWA

Vibration control theory, computer simulation and experimental verification on a hybrid mass-damper system with semi-circular curved linear-motor device for absorbing vibration are described. The control theory using output regulation with internal stability is applied in designing the system. The computer simulations of the system subjected to artificial earthquake ground motions generated in accordance with hard, quasi-resonant and soft soil conditions are presented. Shaking table tests of a steel structured model of the system for verifying realizability of the simulations are reported.

Keywords: *hybrid mass damper, output regulation, minimal order observer, feedforward control force, vibration test*

ハイブリッドマスダンパー, 出力レギュレーション, 最小次元オブザーバ,
フィードフォワード制御力, 振動実験

1. 序

これまでに、構造物の振動制御に関した多岐にわたる研究成果^{1)~8)}が報告されており、特に、超高層建築物に代表される柔構造物の強風時や小地震時における居住性改善を目指して、様々な動吸振器あるいは動吸振システム^{9)~11)}が提案されている。中でも、構造物の頂部近傍に付加質量を配し、その慣性力を構造物の応答低減のための制御力として利用するマスダンパー方式の動吸振器は、パッシブ型^{12)・13)}、アクティブ型¹⁴⁾を通して実用化件数が多く、最も実績のある制振方式である。また、近年、システムの安定性と経済性に富んだ揺動子式同調マスダンパーと優れた制振効果が期待できるアクティブ制振方式を組み合わせたハイブリッド型の動吸振器に対する諸研究^{15)~17)}が活発に行われている。高橋ら¹⁸⁾は、アクティブ型マスダンパー方式による制振システムの理論解析と振動実験について報告しており、各種フィードバック状態量の違いによる制御効果についての考察を行い、駆動に用いたリニアモータの高速度の応答性能を明

らかにしている。また、稲田ら¹⁵⁾は、多段積層ゴムに支えられた鉄骨コンクリートの柱にACサーボモータで駆動された制御力を加えるハイブリッド型マスダンパーシステムの概要を紹介し、状態フィードバックによる最適制御を行った場合の応答観測データから強風時の制振効果を評価している。しかし、アクティブ力の生起方式や、制振効果の優れた制御アルゴリズムの設計等に、未だ多くの問題が残されている。筆者らは、これまでに、鉛直面内に配し上方に開いた半円弧状の走行路上を、付加質量(揺動子)が滑走するハイブリッド型マスダンパー方式の動吸振器を提案¹⁹⁾してきた。本動吸振器は、走行路の曲率半径に等しい腕長さの単振子に相当する安定したパッシブ力とリニアモータの優れた応答性能を有する電磁力をアクティブ制御力としている。また、電磁力の作用方向を調整することで、任意の擬似的なパッシブ力を得ることができるために、走行路の曲率半径を変更することなく、最適な固有周期を実現することができるものとなっている。

本論文の一部は1995年度日本建築学会大会²⁰⁾で発表している。

^{*1} 前田建設工業(株)建築設計本部構造設計部
工修

^{*2} 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

Structural Engineering Section, Architectural Design Div., Maeda Corporation, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Science University of Tokyo, Dr. Eng.

本研究は、せん断型の1自由度構造物を制御対象として、地震外乱に対する制御則の設計法を示し、電算機による数値シミュレーションによって制御則の制振性能を確認し、さらに、振動台を用いた強制振動実験をシミュレーション結果と比較することで実構造物への適用性についても検討したものである。

2. 制御則の設計

2. 1 システム方程式

図1は、せん断形1自由度構造物の頂部に本動吸振器を設置した場合の概念図であり、本動吸振システムは2質点系振動モデルに置換することができる。従って、構造物に地動加速度 $\ddot{x}_0$ が入力する時の本動吸振システムの運動方程式は、構造物と揺動子それぞれに対して次のように記述される。

$$m_s \ddot{x}_s = -c_s \dot{x}_s - k_s x_s + \left[\frac{m_a g \hat{F}}{r} + \frac{m_a (\dot{x}_a - \dot{x}_s)^2}{r^2 \hat{F}^2} \right] (x_a - x_s) + c_a \frac{\dot{x}_a - \dot{x}_s}{r} \hat{F} - f \hat{F} - m_a \ddot{x}_0 \quad \dots (1)$$

$$m_a \ddot{x}_a = - \left[\frac{m_a g \hat{F}}{r} + \frac{m_a (\dot{x}_a - \dot{x}_s)^2}{r^2 \hat{F}^2} \right] (x_a - x_s) - c_a \frac{\dot{x}_a - \dot{x}_s}{r} \hat{F} + f \hat{F} - m_a \ddot{x}_0 \quad \dots (2)$$

ここで、 g は重力加速度を、 $\hat{F}$ は $\cos \theta$ を表しており、本論文における「 $\hat{\cdot}$ 」付きの変数は、揺動子運動角の関数であることを示している。次に、(1)、(2)の運動方程式に基づき、状態方程式、観測方程式等から成るシステム方程式を導出する。まず、状態方程式は、(1)式と(2)式を行列表現することで(3)式となる。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{\hat{A}} \mathbf{X} + \mathbf{\hat{b}} f + \mathbf{S} \mathbf{U} \quad \dots (3)$$

$$\text{ここで、} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_s \\ x_a \\ \dot{x}_s \\ \dot{x}_a \end{bmatrix}, \mathbf{\hat{b}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\hat{F}/m_s \\ \hat{F}/m_a \end{bmatrix}, \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{\hat{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_s + (k_a \hat{F}/r)}{m_s} & \frac{k_a \hat{F}/r}{m_s} & -\frac{c_s + (c_a \hat{F}/r)}{m_s} & \frac{c_a \hat{F}/r}{m_s} \\ \frac{k_a \hat{F}/r}{m_a} & -\frac{k_a \hat{F}/r}{m_a} & \frac{c_a \hat{F}/r}{m_a} & -\frac{c_a \hat{F}/r}{m_a} \end{bmatrix}$$

$$k_a = m_a g + \frac{m_a (\dot{x}_a - \dot{x}_s)^2}{r \hat{F}^3}$$

観測量を、揺動子と構造物それぞれの相対変位と相対速度とすれば、本動吸振システムの観測方程式は(4)式と

図1 動吸振システムの概念図

なる。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{I} \mathbf{X} \quad \dots (4)$$

また、制御量を構造物の相対変位と相対速度とすれば、制御方程式は(5)式となる。

$$\mathbf{Z} = \mathbf{D} \mathbf{X} \quad \dots (5) \quad \text{ここで、} \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

以上の(3)、(4)、(5)式が本動吸振システムの基本となるシステム方程式であり、次に、フィードフォワード制御を行うための外乱に関する方程式を導くことが必要となる。本動吸振システムで想定する外乱は地震動 $\ddot{x}_0$ であるが、フィードフォワード制御時に揺動子の運動によって相殺する外乱は、構造物を励起する成分のみで充分である。従って、相殺目標となる外乱が地動加速度波形における構造物の固有円振動数 ω 近傍の外乱成分であることと制御時のサンプリング時間間隔が微小であることから、時刻 t での調和励振力 $w_p = a \cos(\omega t + \xi)$ を本動吸振システムに対するシステム入力とすることで次式を得る。

$$\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{E} \mathbf{U} \quad \dots (6)$$

ただし、

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} w_p \\ w_q \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}, w_q = a \sin(\omega t + \xi)$$

また、(6)のシステム入力の方程式を(3)の状態方程式の外乱として取りまとめれば、次の拡大状態方程式と拡大観測方程式を得ることができる。

$$\dot{\tilde{\mathbf{X}}} = \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{X}} + \tilde{\mathbf{b}} f \quad \dots (7)$$

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{\mathbf{C}} \tilde{\mathbf{X}} \quad \dots (8)$$

ここで、

$$\tilde{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{U} \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{\hat{A}} & \mathbf{S} \\ \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} \mathbf{\hat{b}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{Y}} = [\mathbf{Y} \ 0], \tilde{\mathbf{C}} = [\mathbf{I} \ 0]$$

2. 2 非線形制御系の設計

本動吸振システムで用いているアクティブ制御力は、(7)、(8)の拡大システム方程式に対してW. M. Wonhamらが

定式化した内部安定出力レギュレーション理論²⁰⁾に基づくフィードバック制御力 f_b とフィードフォワード制御力 f_f を組み合わせた併用制御力としている。従って、アクティブ制御力 f はフィードバックゲインを $\widehat{G}_b$ 、フィードフォワードゲインを $\widehat{G}_f$ とすれば、(9)式のように表現できる。

$$f = f_b + f_f = \widehat{G}_b X + \widehat{G}_f U \cdots (9)$$

上述の理論を適用するための第1の条件は、制御システムを内部安定に保つことであり、本動吸振システムでは、従来から用いられている最適レギュレータ法に従って、過渡的な振動に対する減衰力の付与を実現している。すなわち、(10)式の2次形式評価関数を最小にすることで、(11)式のフィードバックゲインを得ている。

$$J = \int_0^\infty (Z^T Q Z + R f_b^2) dt \cdots (10)$$

$$\widehat{G}_b = -R^{-1} \widehat{b}^T \widehat{P} \cdots (11)$$

ここで、 Q は半正定な重み行列、 R は正の重み係数で、 $\widehat{P}$ は(12)式の実数リカッチ方程式の正定値解である。

$$\widehat{P} \widehat{A} + \widehat{A}^T \widehat{P} - \widehat{P} \widehat{b} R^{-1} \widehat{b}^T \widehat{P} + D^T Q D = 0 \cdots (12)$$

第2の条件は、本動吸振システムが出力レギュレーションを満足することである。出力レギュレーションは、持続的な外乱をこうむる構造物の変位応答を零に近づけることであり、本動吸振システムでは(6)のシステム入力の方程式に基づく数学的諸操作^{21), 22)}で得られる(13)式のフィードフォワードゲインによるフィードフォワード制御を行うことで実現を図っている。

$$\widehat{G}_f = -V T^{-1} \cdots (13)$$

$$\text{ここで、} V = [h, \overline{h}], T = [t, \overline{t}]$$

上式の要素ベクトル t は行列 E の固有ベクトルであり、この時の固有値を λ とすれば、 h は次式から求められる係数ベクトルである。ただし、 $\overline{}$ の付いたベクトルは共役複素ベクトルを示し、 ϕ はダミー・ベクトル。

$$\begin{bmatrix} \phi \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda I - (\widehat{A} + \widehat{b} \widehat{G}_b) & \widehat{b} \\ D & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S \\ 0 \end{bmatrix} t$$

以上より、両ゲイン共に揺動子運動角と運動角速度の関数として表されており、本動吸振システムは揺動子運動角と運動角速度の組み合わせに依存する非線形制御システムとなる。また、(9)式によると、両ゲインの他に状態ベクトル X とシステム入力ベクトル U が必要となる。状態ベクトルは(4)の観測方程式から決定されるが、一般に、システム入力ベクトルを観測することは困難な場合が多い。そこで、本動吸振システムでは、次の(14)式と(15)式から成る最小次元オブザーバ²³⁾を用いることで U の代替として推定値 $\widehat{U}$ に基づくフィードフォワード制御力を決定している。

$$\dot{\eta} = H\eta + \widehat{L} Y + \widehat{B} f \cdots (14)$$

$$\widehat{U} = \eta + N Y \cdots (15)$$

ここで、 $H = E + K S$, $\widehat{B} = K \widehat{b}$, $N = -K$

$$\widehat{L} = K (\widehat{A} + \widehat{b} \widehat{G}_b) - E K - K S K$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \beta & 0 \end{bmatrix}, \quad \alpha, \beta: \text{極指定用パラメータ}$$

本オブザーバがシステム入力を良好に推定するか否かは、その係数行列 H の安定性並びに特性に依存している。本動吸振システムでは、制御対象構造物が1自由度であることから、構造物の1次円振動数を ω_1 とした時に、行列 H の極が $-\omega_1$ となるような係数行列 K を設定することで ω_1 を本動吸振システムの吸振円振動数としている。

なお、係数行列 $\widehat{L}$ は、 $\widehat{G}_b$ 、 $\widehat{G}_f$ の両ゲインと同様に揺動子運動角と運動角速度の関数であり、係数ベクトル $\widehat{B}$ は、揺動子運動角の関数である。従って、本論文では、以上4種類の行列とベクトルは、装置の有効運動角と定格角速度をそれぞれ上限とする揺動子運動角と運動角速度の組み合わせに対して、事前に用意するものとした。

3. 動吸振器と構造物

本論文では、前節で誘導した制御則の有効性を確認するための数値シミュレーションとその実現を検証するための振動制御実験を実施している。数値シミュレーション用動吸振器と構造物の諸元は、写真1に示す振動制御実験用の動吸振器と構造物から成る動吸振システムの実測値を用いている。

3. 1 動吸振器の諸元

今回製作した動吸振器の実測結果より、揺動子の質量

写真1 振動制御実験用動吸振システム

図 2-1 構造物の固有振動数 図 2-2 構造物の減衰定数

は $4.36 \times 10^{-3} (\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{cm})$ 、円弧状走行路の曲率半径は 55 (cm) であり、有効運動角を $\pm 57^\circ$ に設定したことから有効ストローク長さは $\pm 46.1 (\text{cm})$ となっている。また、性能試験結果より、定格推力、定格加速度、定格速度として、それぞれ 6.0 (kgf)、1.4G、300 (cm/s) の能力を有している。

3. 2 構造物の諸元

本構造物は有効質量 $0.360 (\text{kg} \cdot \text{s}^2 / \text{cm})$ 、外形寸法 $W \times D \times H = 136 \times 136 \times 110 (\text{cm})$ のせん断型 1 層の鉄骨造で、剛性は側面に配した 2 組の引っ張りバネのバネ定数によって決定される。振動台を使った定常加振による実測値を解析した結果から、構造物の動特性は、図 2-1、図 2-2 に示す様に応答振幅に依存する非線形性を有している。従って、数値シミュレーションでは、その時々に応答振幅に対応している動特性を用いている。

4. 動吸振システムの応答特性

本動吸振システムの基本性能を把握するために実施した定常加速度入力による強制振動実験結果を次に示す。図 3-1 は、本実験で使用した入力加速度波形であり、振動台の応答を実測した時刻歴波形である。ここで、本制御則の特徴を際立たせるために、振動台の入力加速度は調和振動とし、振動数は構造物の小地震時の固有振動数近傍の 0.85 (Hz)、振幅は制御時に揺動子運動角が充分大きくなるように設定している。図 3-1 から明らかなよう

図 3-1 入力加速度波形

図 3-2 構造物頂部の相対変位応答

図 3-3 揺動子運動角

図 3-4 アクティブ制御力

図 3-5 入力加速度の推定波形

に各ピーク付近に2つの極値を有する疑似正弦波形として再現されているが、これは振動台の周波数特性および振動台と構造物との動的相互作用力の影響と考えている。図3-2中の太線はこの時の構造物頂部の相対変位応答を示すものであり、初めの5秒まではパッシブ制御、5～15秒の間はフィードバック制御、15秒以降はフィードバック・フィードフォワード併用制御（以下、併用制御）結果である。また、同図中の細線は、同条件下での数値シミュレーション結果を示しており、実験結果に酷似している。ここで、振動制御実験および数値シミュレーションにおけるサンプリング時間間隔は後述の模擬地震動入力による数値シミュレーションおよび振動制御実験に用いている20(ms)とし、フィードバックゲイン算定用の重み行列と重み係数も同じく $Q=[0.0, 0.5, 0.0, 0.0]$ 、 $R=1.0$ としている。図3-3の太線と細線は本実験と数値シミュレーションにおける揺動子運動角の応答時刻歴をそれぞれ表したもので、同様に、両者のアクティブ制御力の時間変化を示したものが図3-4である。揺動子運動角、アクティブ制御力共に実験結果と数値シミュレーション結果間に差異のないことがわかる。図3-4によると、制御方式を変更した直後に比較的大きなアクティブ制御力が発生しているが、揺動子が定常運動状態へ移行するに伴い、パッシブ力が有効に作用してくることからアクティブ制御力は徐々に減少している。次に、図3-5は、併用制御時の最小次元オブサーバによるシステム入力の推定結果であり、実験と数値シミュレーションの結果は互いに良く合致している。また、両推定結果より、本オブサーバは入力外乱を忠実に推定するものではなく制御対象とする構造物を励起する成分を検出するデバイスであることがわかる。

5. 入力地震動

制御対象とする構造物がどのような地震動をこうむるかを予め想定するには、震源位置と地震の発生機構、伝播経路等の不確定な要因を既知として設定しなければならず、一般性をもつ入力設定は困難である。他方、本動吸振システムでは、制御目標とする入力レベルの上限は設置し得る動吸振器の応答特性、ストローク長さ等のハードウェア性能で決まる。そこで、本論文における入力地震動はTajimiの方法²⁴⁾に従い、構造物の支持地盤を卓越振動数 f_g 、減衰定数 h_g とする1自由度質点系モデルに置換し、このモデルにホワイトノイズを入力した時の初期過渡状態を含む応答時刻歴として設定している。また、図2-1より、小振幅時の本構造物の固有振動数は、0.90(Hz)近傍であることから、想定する支持地盤の卓越振動数としては、構造物の固有振動数より高い場合として1.45(Hz)、ほぼ等しい場合として0.90(Hz)、低い場合として0.75(Hz)とする3種類の模擬地震動を作製した。

図4-1 硬い地盤用フーリエスペクトル

図4-2 擬共振地盤用フーリエスペクトル

図4-3 軟弱地盤用フーリエスペクトル

ここで、各模擬地震動の入力レベルは、制御時の揺動子安定性を損なわない範囲で、かつ揺動子運動角の変化による非線形性を確認できるように設定している。そこで、併用制御時における揺動子の最大運動角が $15^\circ \sim 20^\circ$ となるように、入力加速度の最大値を相対的に硬い地盤(卓越振動数1.45(Hz))の場合で16.0(Gal)、擬共振地盤(卓越振動数0.90(Hz))で7.5(Gal)、相対的に軟弱な地盤(卓越振動数0.75(Hz))で6.0(Gal)としている。従って、想定している外乱が中小地震動であることから、この時の平均的な値として支持地盤の減衰定数を3(%)とした。なお、振動制御実験を行う際に、振動台の特性を無視し得ないことから、本論文で述べた数値シミュレーションに用いた入力地震動は、上記模擬地震動を振動台で最も忠実に再現した場合の振動台の応答波形としている。この時の計測した3種類の加速度波形を各々フーリエ解析した結果が図4-1、図4-2、図4-3である。

6. 数値シミュレーション

前述した3種類の加速度波形を入力外乱とし、フィードバック制御および併用制御の有効性を確認するために、

電算機を用いた数値シミュレーションを行った。ここで、総ての数値シミュレーションにおいて、解析の刻み時間は20(ms)とし、フィードバックゲイン設定に用いる重み行列と重み係数は $Q=[0.0, 0.5, 0.0, 0.0]$ 、 $R=1.0$ としたが、この時に得られるフィードバックゲインは、後述の振動実験システムにおいて各種フィードバック制御を行った場合に、最も良好な制御結果を示すものである。

6. 1 相対的に硬い地盤上の構造物制御

構造物の固有振動数よりも地盤の卓越振動数の方が高い場合の数値シミュレーション結果を次に示す。図5-1は構造物頂部の相対変位応答であり、太線はフィードバック制御を行った場合、細線は非制御時の解析結果である。同様に、非制御時の相対変位応答を細線で表し、併用制御時の相対変位応答を太線で比較した結果が図5-2である。図5-3は両者の解析時における揺動子運動角の時刻歴で、細線がフィードバック時のものを示し、太線が併用制御時のものを示している。相対的に硬い地盤上の場合、両者の制御結果において構造物の応答値は同程度に低減されており、明確な差異は認められない。なお、併用制御におけるシステム入力 の推定結果(太線)と入力した模擬地震動(細線)を併記した結果が図5-4である。

(硬い地盤の場合)

図5-1 フィードバック制御時の相対変位応答

図5-2 併用制御時の相対変位応答

図5-3 揺動子運動角

図5-4 入力加速度の推定波形

6. 2 擬共振地盤上の構造物制御

前掲の数値シミュレーションと同様に、フィードバック制御と併用制御をそれぞれ行った場合の構造物の相対変位応答が図6-1と図6-2(細線は非制御時)であり、揺動子運動角の時刻歴結果が図6-3である。この場合は、構造物の固有振動数と地盤の卓越振動数が近いために非制御時の相対変位応答はかなり励起されており、フィードバック制御のみを行った場合には、少なからず、揺れが生じている。しかしながら、併用制御時においては、前節と同水準の優れた制振性能を保持している。また、図6-4は、この時のシステム入力 の推定結果(太線)を示すもので、入力地震動(細線)に追従する曲線として推定していることがわかる。

6. 3 相対的に軟弱な地盤上の構造物制御

図7-1、図7-2、図7-3は、両制御時の構造物の相対変位応答と揺動子運動角の時刻歴をそれぞれ示したものである。6.1節の結果と同様に、構造物の相対変位応答は、非制御時において応答増幅率がさほど大きくならないことから、フィードバック制御において充分に小さくなり、併用制御時のものとほぼ同等の結果を示している。なお、軟弱地盤の場合の入力地震動(細線)と併用制御時のシステム入力 の推定結果(太線)を示したものの

(擬共振地盤の場合)

図 6-1 フィードバック制御時の相対変位応答

図 6-2 併用制御時の相対変位応答

図 6-3 揺動子運動角

図 6-4 入力加速度の推定波形

(軟弱地盤の場合)

図 7-1 フィードバック制御時の相対変位応答

図 7-2 併用制御時の相対変位応答

図 7-3 揺動子運動角

図 7-4 入力加速度の推定波形

が図7-4である。

以上、6通りの制御結果から、フィードバック制御のみを行った場合には、ある程度の制振効果が期待されるものの、構造物を励起し易い地震動に対しては吸振仕切れない場合があることがわかる。

7. 振動制御実験

前節の数値シミュレーション結果によると、理論上、併用制御が構造物の応答低減に有効であることがわかった。そこで、写真1に示した動吸振システムによる振動制御実験を行い、実験結果と数値シミュレーション結果とを比較検討することで本動吸振システムの実現可能性を確認した。図8は、本実験における動吸振システムの系統図である。本動吸振システムは計測データの取り込み、制御演算等の処理にパーソナルコンピュータ (CPU:i486DX_33MHz) を使用することで最短5(ms)間隔の制御が可能であるが、本実験におけるサンプリング時間は数値シミュレーションと同様に20(ms)としている。ここで、観測する状態量は、変位センサーによる構造物頂部と振動台の絶対変位および運動角エンコーダによる揺動子の運動角度の3種類であり、観測量として必要となる構造物頂部と揺動子の相対変位と相対速度は、この3種類の状態量を演算処理することにより求めている。なお、本実験で使用したフィードバック制御と併用制御における各ゲインおよび最小次元オブザーバの吸振円振動数は数値シミュレーションで用いたものである。

7. 1 実験結果

以上の条件の下で卓越振動数が0.90(Hz)の模擬地震動を入力外乱とする振動制御実験の実測結果を次に示す。図9-1中の太線は非制御時における構造物頂部の相対変位応答の計測結果であり、同図に細線で再録した数値シミュレーション結果と良く合致していることから、制御対象構造物の動特性の見積もりが適切に行われていることがわかる。図9-2、図9-3は、フィードバック制御時の構造物の相対変位応答と揺動子運動角の時系列（共に太線）を示すもので、細線で記した数値シミュレーション結果に酷似していることがわかる。同様に、併用制御

を行った場合の構造物の変位応答と揺動子運動角を示したものが、図9-4と図9-5である。この時の最小次元オブザーバによるシステム入力（推定結果）が図9-6であり、いずれの図においても同条件下で解析した数値シミュレーション結果を細線で併記している。以上、併用制御時の実験結果においては、かなりの応答低減が認められるものの、数値シミュレーション結果に比べて若干の違いが現れている。これは、図9-6で示したように、システム入力（推定）が数値シミュレーション時のものと比較して乱れていることに起因しており、計測時の観測雑音、A/D変換ボードの分解能力等の影響によるものと考えられる。

図9-1 非制御時の相対変位応答

図9-2 フィードバック制御時の相対変位応答

図8 動吸振システム系統図

図9-3 フィードバック制御時の揺動子運動角

8. 結論

本動吸振システムは、稼働時に時々刻々必要となる観測量は構造物頂部と揺動子の相対変位量のみであるが、非定常な地動外乱に対して良好な制振効果を発揮することが明らかになった。特に、併用制御を行った場合には、構造物の固有振動数に近い卓越振動数を有する外乱をこうむった場合でも相対変位応答を一定の振幅内に納めることができ、合理的な制御設計になっていることがわかった。なお、システム入力 の推定では、実験結果が数値シミュレーション結果に対して若干の精度不足を示しているが、これは計測方法、計測機器等を改善することで、より優れた制御効果を発揮し得るようになるものと思われ

図9-4 併用制御時の相対変位応答

図9-5 併用制御時の揺動子運動角

図9-6 入力加速度の推定波形

れる。

以上の諸結果から判断して、本動吸振システムの実用化妥当性および半円弧状リニアモータを駆動装置としたことによる優れた制振応答特性が確認できた。

参考文献

- 1) 玉井宏章、近藤一夫、花井正実: プレース付架構制振装置のオンライン・コンピュータ制御地震応答実験、日本建築学会構造系論文報告集、411号、pp. 107~116、1990年5月
- 2) 奈良岡浩二、勝倉裕: 構造物の振動の実現可能な準最適併合制御に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、424号、pp. 125~134、1991年6月
- 3) 石丸辰治、新谷隆弘、中島徹、今岡達彦、山口伸夫、川久保政茂: モデル・フォロイング制御則によるハイブリッド同調多重ダンパー (HTMMD) の実験的研究、アクティブ制振(振)シンポジウム論文集、1992年3月
- 4) 山田就康、西谷章: H^∞ 制御理論による構造物の制振、日本建築学会構造系論文報告集、444号、pp. 23~31、1993年2月
- 5) 浅野幸一郎、中川肇: 飽和型アクティブ制御力下の弾塑性構造物のランダム地震応答解析、日本建築学会構造系論文報告集、450号、pp. 49~57、1993年8月
- 6) 三山剛史、秋山宏: 建物のエネルギー吸収層に用いる柱の変形能力に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、450号、pp. 117~125、1993年8月
- 7) 田村和夫、柴慶治、岡田敬一、和田章: 能動型同調質量ダンパーを設置した高層建物の強風に対する制振特性評価、日本建築学会構造系論文報告集、465号、pp. 61~70、1994年11月
- 8) 長島一郎、西山正三: アクティブマスダンパーを用いた建物の振動制御 (その1 複数モード制御手法とその制御性能に関する研究)、日本建築学会構造系論文報告集、468号、pp. 27~37、1995年2月
- 9) 勘坂幸弘、水田幹夫、後関幸吉、高橋泰彦、関松太郎、佐野剛志: 曲げ変形に対する高減衰システム「ダブルカラムダンパー」の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) pp. 779~780、1995年8月
- 10) 井上望、山田祐司、横山浩明、橋英三郎: 2棟連結による制振(振)システムに関する研究 (その6 高層建物モデルの検討)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) pp. 785~786、1995年8月
- 11) 西村拓也、向井洋一、橋英三郎、井上豊: アクティブフィンによる2方向制振に関する実験による検証 (その1 風と直交する向きの建物の揺れの制御)、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) pp. 799~800、1995年8月
- 12) 長瀬正: 高架水槽を用いた振り子式TMD、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) pp. 741~742、1995年8月
- 13) 山田祐司、井上望、伊藤真二、横山浩明、太田寛、丸尾将文、長井国雄: パッシブ型2方向制振装置の実用化、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) pp. 753~754、1995年8月
- 14) 池田芳樹、山田和彦、佐々木勝康、小堀紀英、小堀鐸二: 実用化したアクティブ・マス・ドライバ・システムの制振効果、日本建築学会構造系論文報告集、420号、pp. 133~141、1991年2月
- 15) 稲田泰夫、小川雄一郎、田村和夫、前林和彦、柴慶治: 大型ハイブリッドマスダンパーシステムの開発と超高層建物への適用、第2回 振動制御コロキウムPART B 講演論文集、pp. 95~102、1993年8月
- 16) 金子美香、三田彰、柴慶治: ハイブリッドマスダンパーのエネルギー吸収特性に関する解析的検討と検証実験、日本建築学会構造系論文報告集、459号、pp. 65~72、1994年5月
- 17) 山田登志郎、石田雅利、澤本佳和: 建築構造物のファジィ非線形履歴応答制御における制御パラメータの適正値について (ファジィ理論の建築構造物の地震応答制御への適用性に関する研究 (II))、日本建築学会構造系論文報告集、473号、pp. 95~105、1995年7月
- 18) 高橋良典、片山和喜、村井信義、藤田隆史: リニアモータを利用したアクティブ制振システムに関する研究 (その1 1自由度システム)、日本建築学会構造系論文報告集、412号、pp. 89~99、1990年6月
- 19) 松葉 裕、富澤 稔、松村恒夫: ハイブリッド型吸振器をもつ自由度構造物の非線形制振、日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) pp. 895~896、1991年9月
- 20) W.N. Wonham and J.B. Person: Regulation and Internal Stabilization in Linear Multivariable Systems, SIAM J. Control, Vol. 12, No. 1, pp. 5~18, 1974
- 21) 木村英紀、井上雄二郎: 多変量制御系の理論と応用-VII、システムと制御、Vol. 22, No. 11, pp. 683~692, 1978年
- 22) 水野 毅: 能動形動吸振器系の出力レギュレーション制御、計測自動制御学会論文集、Vol. 24, No. 4, pp. 400~405, 1988年
- 23) 木村英紀: 多変量制御系の理論と応用-V、システムと制御、Vol. 22, No. 9, pp. 560~568, 1978年
- 24) Tajimi, H.: A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure During an Earthquake, Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering, Vol. II, Tokyo and Kyoto, Japan, pp. 781~797, 1960
- 25) 松葉 裕、富澤 稔、前田安治、松村恒夫: 円弧状リニアモータ動吸振器をもつ模型構造物の振動制御実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) pp. 857~858、1995年8月

(1995年10月31日原稿受理、1996年4月22日採用決定)