

不規則外力を受ける構造物系の オブザーバーによる振動制御の実験的研究

岡 林 隆 敏* ・ 山 本 実**
奥 松 俊 博*** ・ 小 林 正 貴**

Experimental Study on Vibration Control of Structural Systems Subjected with Random Excitations by Observers

by

Takatoshi OKABAYASHI*, Minoru YAMAMOTO**,
Toshihiro OKUMATSU*** and Masataka KOMATSU**

This paper presents the experimental study of vibration control for the five stories building model subjected to several excitations. The structural model is controlled by the active mass damper that is driven by the DC servomotor. On the control, the state feedback is employed, and state variables are estimated by the minimal order observers. The controller is realized by the DSP (digital signal processor).

The experimental tests are performed for the structural model excited by the sinusoidal, impact and earthquake accelerations. The results shown that vibration control by the DSP is more effective than by the personal computer.

1. はじめに

土木・建築構造物は長大化、高層化の傾向にあり、超高層ビルや長大橋が多数建設されている。また高速交通機関の都市部や人口密集地域への進出等に伴い、地震、風荷重や交通荷重などの動的外乱に対する構造物の振動を克服することが重要な課題となっている。このような多様化する振動問題に対して、構造物に付加した装置により、積極的に振動を制御しようとするアクティブ振動制御の研究⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾が進められ、実用化の段階に入りつつある。

これまでの研究⁽⁵⁾⁽⁶⁾では、パーソナルコンピュータを中心とした制御システムで、現代制御理

論⁽⁵⁾に基づいた状態フィードバックを構成し振動制御を行ってきた。また、振動状態の観測には、必要な状態量全てが観測できない場合を想定して、少ない観測点から全ての状態量を推定する Luenberger の最小次元オブザーバー⁽⁷⁾⁽⁸⁾を使用した。しかし、オブザーバーを使用すると計算機の負担が大きくなり、パーソナルコンピュータをコントローラーとした場合、サンプリング周波数は低くならざるを得ない限界があった。従って、本モデルの3次振動の制御を行なうには、コンピュータの演算速度の上から制約があった。

本研究では、著者らの研究を継続し、オブザーバー

平成5年4月30日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**大学院修士課程土木工学専攻 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

***(株)フジタ (Co., Ltd. Fujita)

を用いた振動制御を実験により実現する。さらに、振動制御システムのコントローラに高速演算処理を可能にする DSP (Digital Signal Processor) を導入し、アクティブ振動制御システムの構築を行ない、アクティブ振動制御の有効性を実験的に確認するものである。

本論文では、5層塔状構造物模型を制御対象として、これを5自由度の質点系にモデル化、さらに3自由度にモデルを縮小する。この系に対して、DSP をコントローラに使用したアクティブ振動制御システムを構成する。このシステムにおいて、振動実験を行ない、正弦波外力、衝撃的加振力、地震外力が作用した場合について、その振動制御の有効性を確認する。

2. 制御対象構造物の制御理論

2-1. 制御対象構造物のモデル化

制御対象とする構造物は、図-1 a) のような5層の塔状構造物である。これを図-1 b) のような5質点系の離散モデルにモデル化する。このモデルで振動解析を行い、その解析結果と実測による固有振動数、減衰定数を表-1 に示す。また各振動モードを図-2 に

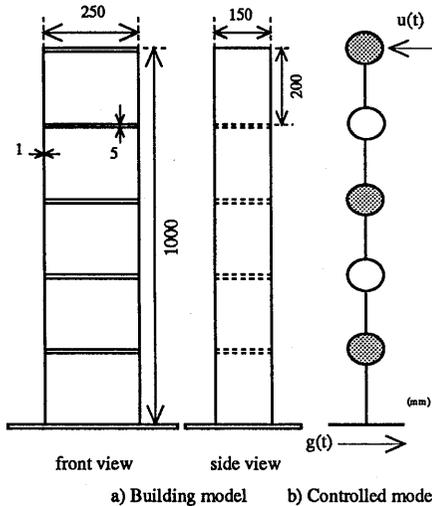


Fig. 1 Building model and five degree of freedom system

Table 1 Frequencies and damping constants

| Order | Natural Frequency (Hz) | | Damping |
|-------|------------------------|------------|---------|
| | 5 DOF | Experiment | |
| 1 | 2.43 | 2.39 | 0.0064 |
| 2 | 7.29 | 7.52 | 0.0050 |
| 3 | 12.01 | 12.70 | 0.0045 |

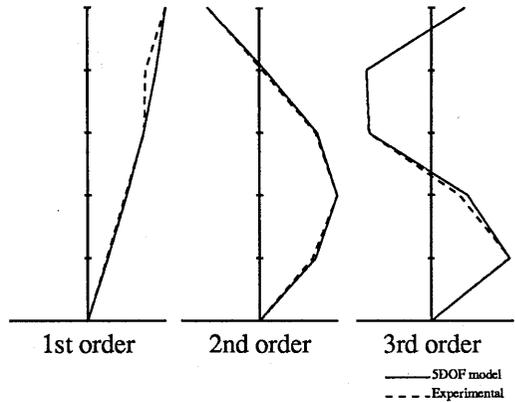


Fig. 2 Vibration modes

示す。固有振動数、振動モード共に、解析値と実測値はほぼ一致しており、モデル化の妥当性が確認できる。これらの結果は、全て、構造物の最上階に制御装置を設置した場合のものである。ここで制御対象となる構造物は、土木、建築構造物を想定しており、励起される振動は低次振動である。そこで、振動数は3次振動数までを考慮した。したがって制御モデルは5質点系モデルから質量配分により、3質点系モデルまで縮小している。

2-2. 状態方程式

外力 $f(t)$ を受ける構造系の運動方程式は、水平方向変位を $y(t)$ とすると、次式で表される。

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \tag{1}$$

ここに構造系を n 自由度系と考えると、 $m, c, k,$ は $(n \times n)$ 次元の質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。また、 $y(t)$ と $f(t)$ は n 次元ベクトルである。ここで n 次元ベクトルの基準座標 $q(t)$ を導入すると、物理座標 $y(t)$ は、

$$y(t) = \Phi q(t) \tag{2}$$

となる。ここに、 Φ は $(n \times n)$ 次元のモードマトリックスである。(2)式を用いると(1)式は次式で表せる。

$$\ddot{q}(t) + H\dot{q}(t) + \Omega q(t) = \Phi^T f(t) \tag{3}$$

$$H = \begin{bmatrix} 2h_1\omega_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2h_n\omega_n \end{bmatrix} \quad \Omega = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & \\ & \ddots & \\ & & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

ここに h_i, ω_i はそれぞれ i 次の減衰定数、固有円振動数である。さらに状態変数

$$X(t) = [q_1(t) \dot{q}_1(t) \dots q_n(t) \dot{q}_n(t)]^T \tag{4}$$

を用いると、(3)式は次のような方程式で表される。

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BF(t) \tag{5}$$

このとき m 次元の観測量 $Y(t)$ は、

$$Y(t) = CX(t) \tag{6}$$

で表すことができる。ここに A は $(2n \times 2n)$ 次元の係数マトリックス、 $F(t)$ は $2n$ 次元の外力マトリックスである。

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & A_n \end{bmatrix} \quad A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2h_i\omega_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad F_i(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

また C は、 $(m \times n)$ 次元に拡張されたモードマトリックスから構成される観測マトリックスであり、 B は外力が作用する点と、観測点が一致することから(10)式のようにする。

$$C = \begin{bmatrix} \phi_{11} & 0 & \phi_{12} & 0 & \dots & \phi_{1n} & 0 \\ 0 & \phi_{11} & 0 & \phi_{12} & \dots & 0 & \phi_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \phi_{21} & 0 & \phi_{22} & 0 & \dots & \phi_{2n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \phi_{m1} & 0 & \phi_{m2} & 0 & \dots & \phi_{mn} & 0 \\ 0 & \phi_{m1} & 0 & \phi_{m2} & \dots & 0 & \phi_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B = C^T \quad (10)$$

ここで外力として、構造物の基盤に作用する地震外力 $g(t)$ と、構造物の最上層に作用する制御力 $u(t)$ を考える。この場合、(1)式の $f(t)$ は次式ようになる。

$$f(t) = b_1 g(t) + b_2 u(t) \quad (11)$$

地震力は全質点に作用し、制御力は最上点にのみ作用するものとするから、

$$b_1 = [1 \dots \dots \dots 1 \ 1]^T \quad (12)$$

$$b_2 = [0 \dots \dots \dots 0 \ 1]^T$$

となる。これを用いると(5)式は

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_1 g(t) + B_2 u(t) \quad (13)$$

となる。このとき B_j は

$$B_j = [B_{ji}] \quad (j = 1, 2) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (14)$$

$$B_{ji} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \phi_j^T b_i \end{bmatrix}$$

となる。ただし、 ϕ_j は C の j 列ベクトルである。

2-3. 制御則

制御力 $u(t)$ は、フィードバックゲインマトリックス K により

$$u(t) = -KX(t) \quad (15)$$

で与えられる。 K は最適レギュレータ理論⁽⁷⁾を用いて、リカッチ型方程式(10)を解くことにより(17)式で与えられる。

$$A^T P + PA + Q - PB_2 R^{-1} B_2^T P = 0 \quad (16)$$

$$K = R^{-1} B^T P \quad (17)$$

Q と R は、制御系に対する評価関数の重みマトリックスであり、本研究では、 $Q = I$ (I は単位マトリックス)、 $R = 1$ として K を求めている。

2-4. オブザーバーを用いた振動制御

最小次元オブザーバーを用いた振動制御を構成する。(13), (6)式のような構造系に対し、最小次元オブザーバーは $(n-m)$ 次元の動的モデルとして次のように表される。

$$\dot{\omega}(t) = \hat{A}\omega(t) + \hat{B}_1 g(t) + \hat{B}_2 u(t) + GY(t) \quad (18)$$

$$\hat{X}(t) = \hat{C}\omega(t) + \hat{D}Y(t) \quad (19)$$

ここに、 \hat{A} 、 \hat{B}_1 、 \hat{B}_2 、 G 、 \hat{C} 、 \hat{D} は係数マトリックスであり、Gopinath の方法⁽⁷⁾⁽⁸⁾により求められる。

また、このときのオブザーバーの極配置の設定⁽⁸⁾は、

$$\lambda^1 = -4.72 \pm 47.01 i$$

$$\lambda^2 = -7.98 \pm 79.40 i$$

とする。ただし、 $i^2 = -1$

ここで時間刻みを Δt として、(18)式を差分表示する。状態遷移マトリックスに次のような Pade 近似を用いると、

$$e^{\hat{A}\Delta t} = (I - \hat{A}\Delta t/2)^{-1} (I + \hat{A}\Delta t/2) \quad (20)$$

(14)式は次のような差分式で表せる。

$$\begin{aligned} \omega_{n+1} = & (I - \hat{A}\Delta t/2)^{-1} (I + \hat{A}\Delta t/2) \omega_n \\ & + (I - \hat{A}\Delta t/2)^{-1} \hat{B}_1 (g_n + g_{n+1}) \Delta t/2 \\ & + (I - \hat{A}\Delta t/2)^{-1} \hat{B}_2 (u_n + u_{n+1}) \Delta t/2 \\ & + (I - \hat{A}\Delta t/2)^{-1} G (Y_n + Y_{n+1}) \Delta t/2 \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $\omega_j = \omega(j\Delta t)$ 、 $g_j = g(j\Delta t)$ 、 $u_j = u(j\Delta t)$ 、 $Y_j = Y(j\Delta t)$ である。また、 I は単位行列である。(19)式により ω が得られ、(19)式により、状態推定量 $\hat{X}(t)$ が求まる。この $\hat{X}(t)$ から(15)式において

$$u(t) = -K\hat{X}(t) \quad (22)$$

として制御力が得られる。図-3 に構造系とオブザーバーの関係を示した。

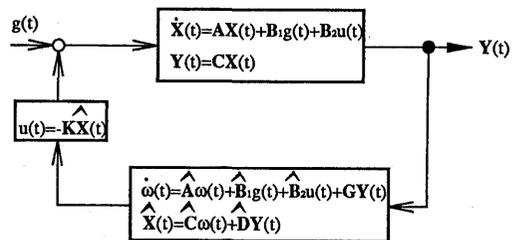


Fig. 3 Block diagram of controller

3. 振動制御システム

3-1. アクティブ振動制御システム

本実験で使用した振動制御システムを図-4に示す。信号処理の流れについて、以下に説明する。

振動制御実験では5層塔状構造物模型を制御対象とし、電磁式振動台上に固定する。構造物の振動状態を観測するセンサーには、ひずみゲージ式加速度計 AS-2GB(共和電業)を用いる。構造物の最上層と、地盤上に相当する振動台上に加速度計を設置し、加速度を観測する。観測された加速度は、積分器により速度に変換され、A/D変換によりコントローラに取り込まれる。コントローラ内で制御力を計算しD/A変換により出力される。フィルタにより電気的なノイズを除去し、サーボアンプによりゲインを調整した後、アクチュエータが起動される。アクチュエータが作動することにより制御力が発生し、構造物の振動を制御する。

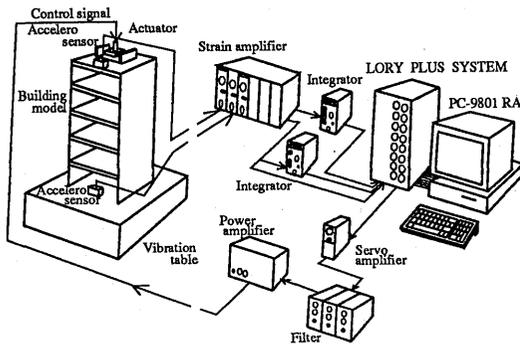


Fig. 4 Experimental setup

3-2. アクチュエータ

本研究では、質量体を加速度運動させて、制御力を発生させる Active Damper Mass を用いる。実験で使用したアクチュエータの構造を図-5に示す。構造物の振動方向に設置した2本のガイド上に質量体が直線往復運動をすることによって、構造物に対し制御力を発生させる機構になっている。アクチュエータの設置位置は、制御する各次振動数の振動モードの節にならないような位置とし、また少ない制御力で効果的に制御が効くように、比較的振幅の大きくなる位置を選択する。したがって、1次から3次振動数の振動モードを考慮して、アクチュエータは最上階に設置した。またアクチュエータの動特性は、各振動周波数に対して一定の力を発生することが確認でき、単位電圧あたりに対する出力は約70 gf/Vである。

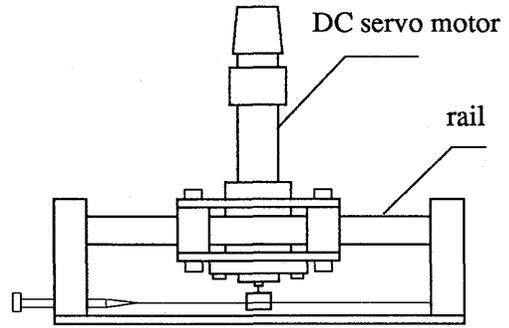


Fig. 5 Active mass damper

3-3. DSPについて

本研究では、A/D, D/A変換のサンプリング周波数を高速するため、DSPをアクティブ振動制御システムに導入する。振動制御システムのコントローラにDSPを搭載したLORY PLUS SYSTEM (MTT製)⁽⁹⁾を用いる。これは、DSPを中枢として機能する各種信号処理用I/Oボードを組み合わせたシステムであり、高速多チャンネル信号処理を可能にしている。またこのシステムを起動するプログラムは、PC-9801上で作動するホストプログラムとDSPボード上で作動するターゲットプログラムで構成され、両プログラムとも、MS-DOS上で開発することができる。このシステムを用いることにより、A/D, D/A変換を行なうサンプリング周波数は、1 KHzに設定して実験を行なっている。図-6にDSPとソフトウェア、ハードウェアとの関連を示す。

| | | |
|----------|---|--|
| Software | AT&T DSP32 and DSP32C | Microsoft C |
| Program | Host program Coff format execution code | Target program MS-DOS execution file |

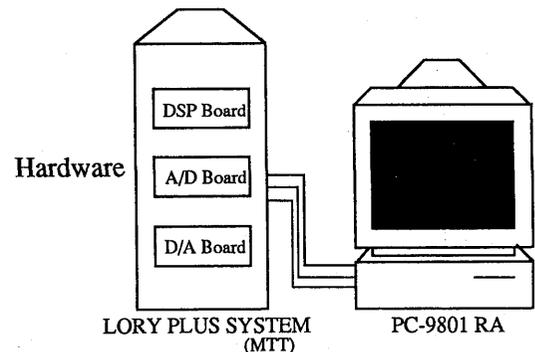


Fig. 6 Hardware of Controller

4. 実験による振動制御効果の検討

本研究では、正弦波外力、衝撃的加振力、地震外力に対して振動実験を行なった。実験では、構造物模型を振動台で加振するが、振動台のコントロールはパーソナルコンピュータにより行なう。

(1) 正弦波外力による振動

正弦波外力に対する制御効果について検討する。図-7は、各次振動数の正弦波外力で振動台を動かし、構造物を共振させ十分に定常状態になった後、制御力を加えたものである。縦軸が構造物模型の第5層の加速度応答 (gal)、横軸が時間 (sec)を表しており、制御力を加えた前後10秒間を表している。図-7 (a)の1次振動では、制御を加える前後を比較すると、約80%の加速度応答の減少が見られ、図-7 (b)の2次振動では、約60%の減少が見られる。1次振動に比べると2次振動の場合では、若干、制御効果が少なくなっているが、応答性は1次振動よりも良くなっており、図-7 (a), (b)ともに振動制御の効果は十分である。しかし、図-7 (c)の3次振動の場合では、(a),

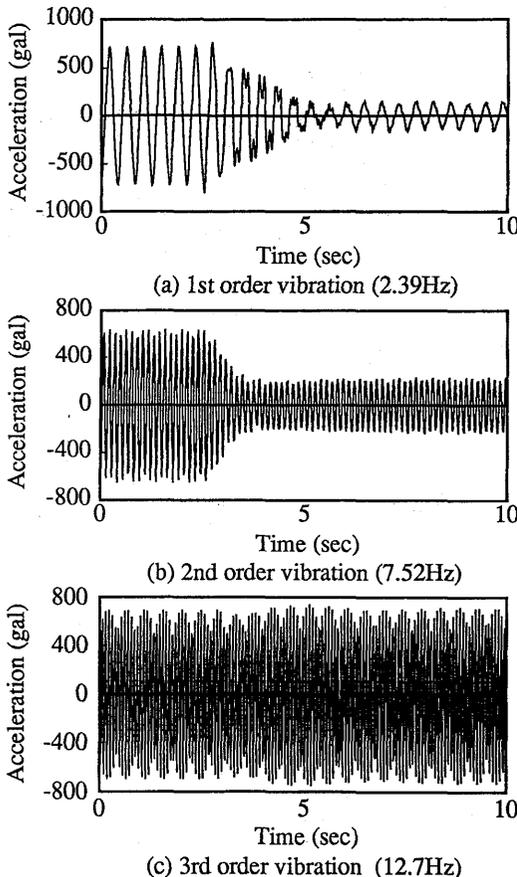


Fig. 7 Responses for sinusoidal excitation

(b)と同様に制御力を加えているにもかかわらず制御効果は現われていない。

(2) 衝撃力による振動

次に衝撃的加振力に対する制御効果について検討する。これはそれぞれの固有振動数の周波数を持ったパルス状の力を加え、構造物を自由振動させた場合である。図-8が制御がない場合、図-9が制御がある場合である。図-8, 図-9とも正弦波外力の場合と同様に、縦軸が第5層の加速運動応答、横軸が時間を表しており、外力を加えた後の20秒間を表している。1次振動では、図-8 (a)の制御がない場合、構造物は20秒経過しても振動が持続しているが、図-9 (a)の制御がある場合では3秒経過後、振動は十分に小さくなっており、7秒経過後はほとんど止まっている。2次振動では、構造物の振幅が1次振動に比べ小さいため、図-8 (b)の制御がない場合は図-8 (a)ほど振動は継続していないが、図-9 (b)の制御がある場合は、図-9 (a)に比べ応答性が良くなっており、5秒を経過した付近からほとんど静止しているといえる。

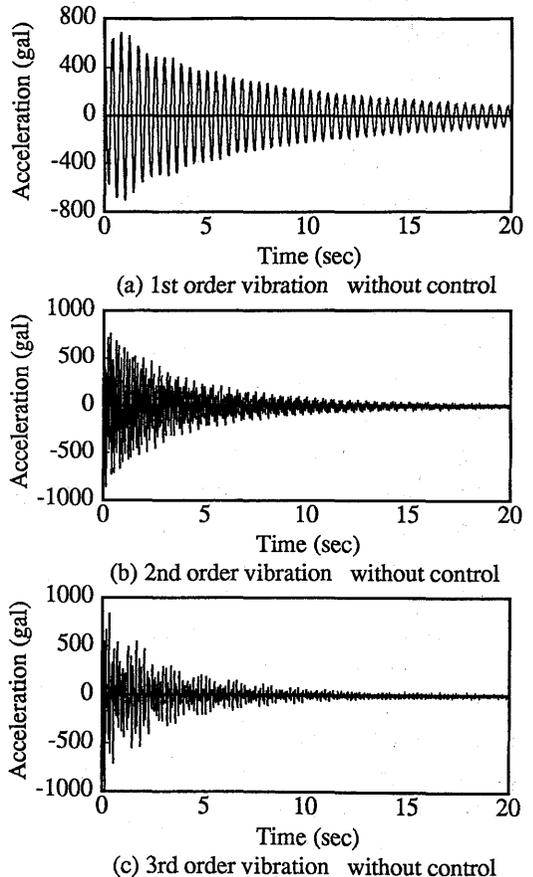


Fig. 8 Responses for impulse excitation

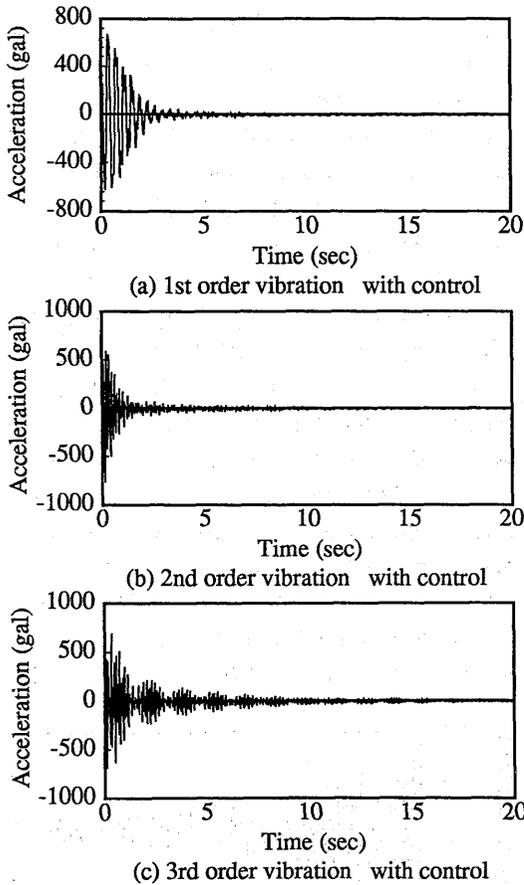


Fig. 9 Responses for impulse excitation

3次振動の場合は図-8(c)と図-9(c)を比較すると約50%の制御効果が現れていることがわかる。従来のコントローラ⁽⁶⁾では、3次振動の制御はできていなかった。これはA/D,D/A変換のサンプリング周波数を1kHzで行なっているためであると考えられる。

(3) 地震外力による振動

最後に地震外力に対する制御効果について検討する。本研究では、地震外力にELCentro地震外力NS成分を用いる。図-10はELCentro地震外力NS成分20秒間の応答波形であり、図-11は地震外力を入力したときの振動台20秒間の加速度である。このような振動台に構造物を乗せて振動実験を行なった。図-12はそのときの構造物の第5層の加速度応答である。図-12(a)の制御がない場合に対し図-12(b)の制御がある場合を比較すると、初期の0秒から2秒までの最大応答に対しては約10%程度の加速度応答の減少しか見られず、初期の衝撃的な外力に対する振動には制御が十分でないと言える。しかし、2秒以後の応答波形全体では、およそ60%程度の制御効果が現れている。

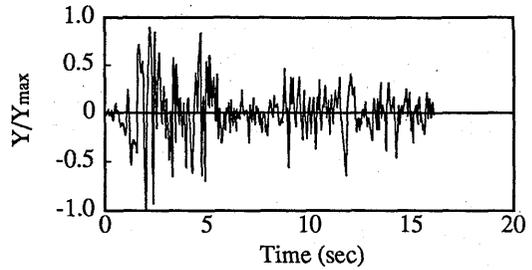


Fig.10 ELCentro (N-S) Earthquake excitation

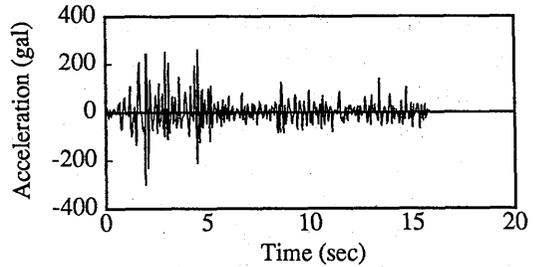


Fig.11 Acceleration of vibration table

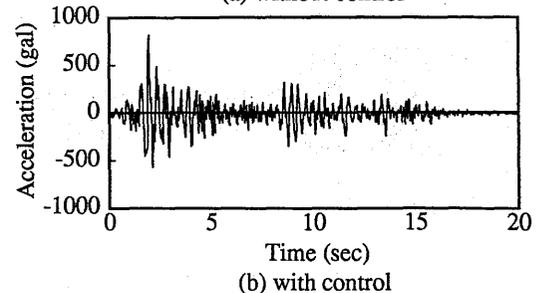
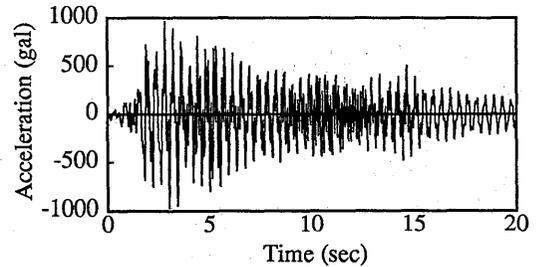


Fig.12 Top floor acceleration of building model by experiment

応答の初期の制御が十分でない点は、幾つかの理由が考えられる。まず、制御則が定常応答に対応したものであり、平均的な応答レベルを低下させるものになっている点が上げられる。さらに、アクチュエータの動特性、オブザーバーの動特性が考えられる。このような点を改善した制御の方法が望まれる。

5. おわりに

本研究は、オブザーバーを用いた振動制御において、DSP を用いたコントローラーの制御効果について考察を加えたものである。得られた結果を要約すると、次のようになる。

- (1) オブザーバーの演算時間を短縮し、A/D,D/A 変換のサンプリング周期を高速にするために、DSP を用いたコントローラーを適用した。オブザーバーを用いたコントローラーを DSP を用いたシステムにより実現することができた。
- (2) A/D, D/A 変換のサンプリング周波数の設定は、パーソナルコンピューターを中心とした振動制御システムでは33.3Hz が限界であったが、DSP を導入した振動制御システムでは大幅に改善され、1 KHz に設定することも可能になった。
- (3) 正弦波外力による振動制御実験は、1次、2次振動に対して制御効果は十分に現われているが、3次振動に対しては制御効果は現れなかった。衝撃力による振動制御実験は、1次、2次振動に対しては制御効果は現れており、3次振動に対しても制御効果は現れていた。
- (4) 地震外力による振動制御実験は、初期の応答に対してはわずかな制御効果しか認められないが、それ以後の応答波形全体にわたっては、およそ60%程度の制御効果が現われている。
- (5) 構造物の振動制御において、コントローラに DSP を使用すると、制御効果が改善されることが確認できた。

これまでの研究で、オブザーバが振動制御に有効であることが確認できた。すでに、理論的な検討を行なっている、 H^∞ 制御理論の振動制御への有効性を確認したい。

最後に、本研究はオイレス工業㈱の援助を受けて行なったものである。

[参 考 文 献]

- 1) T. T. Soong: Active Structural Control Theory and Practice, Longman Scientific & Technical, 1990.
- 2) H. H. E. Leipholz and M. Abdel-Rohman: Control of Structures, Marinus Nijhoff Publishers, 1986.
- 3) 土木学会構造工学委員会、振動制御委員会：PART A・構造物の振動制御，振動コロキウム，土木学会，1997，7．
- 4) 小堀鐸二，坂本光雄：アクティブ・マス・ドライバシステム，制振構造の現状－高層建物の制振－，日本建築学会関東支部構造部会，1989，12．
- 5) 岡林隆敏，奥松俊博，古江照巳：オブザーバーを用いた構造物の振動制御，長崎大学工学部研究報告，第21巻第37号，pp.189－194，1991．
- 6) 岡林隆敏，奥松俊博，古江照巳：オブザーバーを用いた構造物の振動制御に関する実験的研究，長崎大学工学部研究報告，第22巻第38号，pp.79－85，1991．
- 7) 白石昌武：入門現代制御理論，啓学出版株式会社，1989．
- 8) 岩井善太，井上昭，川路茂保：オブザーバ，コロナ社，1988．
- 9) LORY PLUS SYSTEM/DSP4100シリーズ 取り扱い説明書，第3版，エムティティ株式会社．
- 10) 雀衛民，野波建蔵，西村秀和： H^∞ 最適制御による多自由度構造物のアクティブ振動制御，日本機械学会シンポジウム講演論文集，pp.189－195，1991，9．
- 11) 野波健蔵，西村秀和，雀衛民： H^∞ 最適制御によるアクティブ動吸振器を用いた多自由度構造物の振動制御，日本機械学会シンポジウム講演論文集，pp.196－202，1991，9．