

アクティブ制振技術に関する研究 (その2)

——多質点系構造物の絶対制振について——

蔭山 満 野畑 有秀 寺村 彰
安井 讓 岡田 宏

A Study on Active Control Methods (Part 2)

——“Absolute Vibration Control System” for Multi-layer Structure——

Mitsuru Kageyama Arihide Nohata Akira Teramura
Yuzuru Yasui Hiroshi Okada

Abstract

Social needs call for vibration control technology to improve amenity and protect important equipment in structures. At present, base isolation buildings supported by laminated rubber bearings is used for this purpose. It is possible to maintain the buildings stationary in absolute space by a so-called absolute vibration control system. This method is also an effective vibration control technique for earthquake resistance since it not only improves vibrational environment, but also prevents occurrence of stresses in the superstructures of the buildings. This paper reports on the absolute vibration control of a multi-layer structure in a continuation from Part 1 of the study which had dealt with a one-mass system.

概要

建物内の居住性の改善および重要機器の保護を目的として、制振技術に対する社会の期待は大きい。このような環境振動を改善するためには建物の応答加速度を低減することが必要であり、その方法として現在、建物を積層ゴムで支持させて免震ビル化する方法がとられている。ここでは、これら免震ビルを更に能動的に制振することによって、構造物を絶対空間に静止させる制振手法、いわゆる絶対制振手法について述べたものである。この方法は、環境振動の改善のみでなく、建物の上部構造物に応力を発生させないので耐震的にも有効な制振手法である。本報告は1質点系を対象とした前報(その1)に引き続き多質点系の絶対制振について報告するものである。

1. まえがき

高度情報化社会の進展と共に、産業分野においては超LSIに代表される超精密加工技術の開発に伴う工場内の環境振動の静寂性に対する高い要求、また高度情報化ビルにおいては地震時における情報機器の保護が至上的な命題であり、振動に対する要求は高まる一方である。この環境振動を改善するためには建物の応答加速度を低減する必要がある、その方法として現在、構造物を積層ゴムで支持して免震ビル化する方法が用いられている。

本研究では、これらの免震ビルを更に能動的に制振することによって、飛躍的な加速度応答の低減を図る方法について述べる。このような加速度低減の究極の目的は構造物を絶対空間に静止させることであり、この種の制振手法を絶対制振と呼んでいる。本報告は、1質点系を対象とした前報(その1)に引き続き、多質点系の絶対制振について報告するものである。

2. 絶対制振システムの構成

2.1 目的と原理

制振の目的として居住性および建物の耐震性の向上が挙

げられるが、居住性は建物の絶対加速度応答を抑制することによって、また耐震性は建物変形を抑制することによって達成されるものである。絶対制振は絶対応答、即ち加速度応答を低減するものであり、居住性の改善に大きな効果がある。また、図-1に示すように、構造物の基部で絶対制振の制御を行なった場合、その上部構造物の変形量は必然的にゼロとなる。このことは、絶対制振は居住性のみでなく、耐震的にも有効な方法であることを示している。

2.2 フィードフォワード制御

ここでは、一般的な免震ビルを対象とするため、図-1に示すような多質点系に対する絶対制振手法を考える。

地動加速度 $\{y\}$ とアクティブ制御力 $\{P\}$ を外力とした相対座標系での力の釣り合い式(1)を変形して、絶対座標系で示すと式(2)として示される。完全な絶対制振は式(2)右辺の外力項をゼロにすることによって達成される。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{y}\} + \{P\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$[M]\{\ddot{x} + \ddot{y}\} + [C]\{\dot{x} + \dot{y}\} + [K]\{x + y\} = [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} + \{P\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $[M]$, $[C]$, $[K]$ はそれぞれ構造物の質量、減衰、剛性を表す。また、 $\{x\}$, $\{y\}$, は構造物の地盤に対する相対変

位, 地動変位を, {P}は制御力を表す。(・)と(・・)はそれぞれ時間に対する1階微分と2階微分を示す。

式(2)の外力項をゼロとする各階の制御力をベクトル表示で示すと式(3)となる。式(3)は多層構造物を対象とした場合でも絶対応答に対する制御力は最下層のみに作用させればよいことが分かる。すなわち,

$$\begin{Bmatrix} P_n \\ P_{n-1} \\ \vdots \\ P_2 \\ P_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -k_1 y - c \dot{y} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

絶対制振に必要な制御力は, その構造物の基部のみに作用させればよく, その力は積層ゴムの剛性と減衰係数に地動変位および地動速度を乗じた弾性力と減衰力を加算したもので与えられる。

このような地動入力成分を用いて制御する方法をフィードフォワード制御という。このフィードフォワード制御は地動入力が構造物に入らないようにするもので, ここではこの方法を入力反射法と呼ぶことにする。現実的には装置特性その他による制御の漏れが生ずるため, このフィードフォワード制御のみで完全な絶対制振は不可能であり, フィードバック制御を併用することになる。

2.3 フィードバック制御

フィードフォワード制御に対するフィードバック制御の基本的な考え方を, ここでは簡単のため1質点系によってその説明を行なうことにする。

図-2は式(3)で与えられる理論制御力Pに対し, 実際の制御力Fの振幅に誤差があった場合の加速度応答倍率(x+y)/yを示したものである。この様に, フィードフォワード制御力Fが理論制御力Pとわずかに異なる場合でも, 構造物の共振振動数での制振効果が悪くなる。これを改善するため, 応答速度を感知して制御する速度フィードバックによる減衰力を付加することを考える。この減衰力として, 下部の積層ゴムの相対変形速度 \dot{x} に比例する力を用いる方法と絶対速度 $(\dot{x}+\dot{y})$ に比例する力を用いる方法とがある。

図-3と図-4はそれぞれ, 上記2種類の減衰力の効果を加速度応答倍率で比較したものである。両図から, ピークレベルを低減する効果が同じであることが分かる。とこ

ろで, 図-3の相対速度をフィードバックしたものをみると, 固有振動数より高い振動数領域では, 無制振時に比べて逆にそのレベルが上昇していることが分かる。この減衰力は地面にダンパーを取り付けた場合に相当し, パッシブ系でも構成可能な効果を示すものである。それに対し, 図-4の絶対速度をフィードバックしたものは高い振動数領域において, 無制振時の伝達率を上回ることなく, それに収束していることが分かる。絶対速度をフィードバックした場合の制御による減衰力は空中の静止座標点にダンパーを取り付けたかのような効果を示すため, スカイフックダンパーと呼ばれる。この効果はアクティブ制御のみによって得られるものである。以上の比較より, 絶対制振を目的とした場合のフィードバック制御方式はスカイフックダンパー方式が適していることが分かる。

2.4 反力方式

構造物に制御力を与えるためには, その制御力と釣り合う反力を取らなければならない。絶対制振の場合, 基部で制御するので, 図-5(b)のように地盤に直接的な反力を取ることが可能である。ここでは, この方式を固定反力方式と呼ぶ。地盤に直接的な反力を取らないで制御力を得る方法としては図-5(a)に示すように付加マスを動かすことによってその慣性力を反力として制御力を得る方法が一般的に用いられている。この方式を慣性反力方式と呼ぶ。この両者の反力の取り方は, 現実的に得られる制御力で比較した場合, 次の点で, 大きな違いとなって現れる。

中規模の免震ビルを対象とした場合, 数100 galの巨大地震に対し, 絶対制振を固定反力方式で行なう場合に必要なアクチュエータは, それら地震動の最大変位, 最大速度, 最大加速度を包絡し, かつ出力性能として数10 tonあれば対処可能である。この程度の能力は油圧アクチュエータを考えた場合, 現実的な装置といえる。

一方, 慣性反力の場合, 地動成分yに対し, アクチュエータのストローク変位 Z_D と速度 Z_V は次の式(4), (5)で概算される。

$$Z_D = (\omega_0/\omega)^2 \mu y \quad \dots\dots(4)$$

$$Z_V = (\omega_0^2/\omega) \mu y \quad \dots\dots(5)$$

但し, ω_0 : 免震ビルの固有円振動数, ω : 地動成分の円振

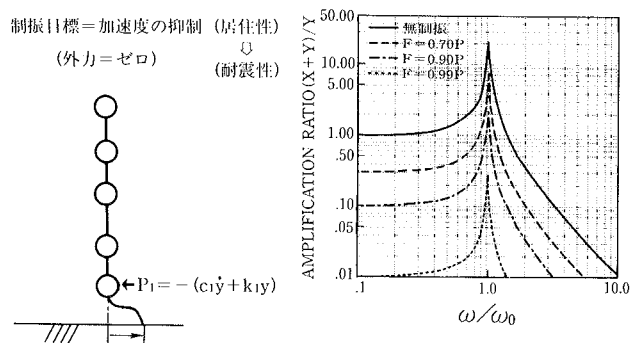


図-1 絶対制振の制御力と位置

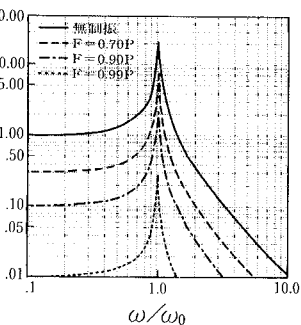


図-2 入力反射に誤差のある制御の地動に対する加速度応答倍率

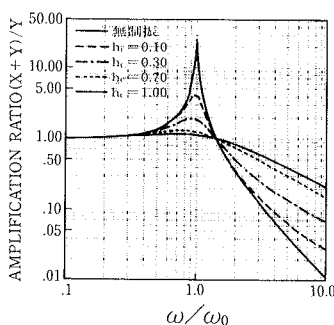


図-3 相対速度フィードバック制御の地動に対する加速度応答倍率

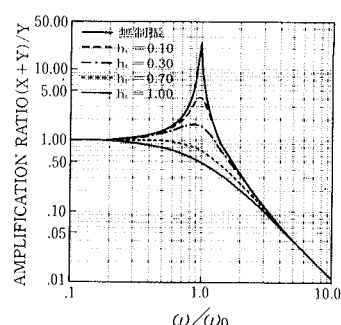
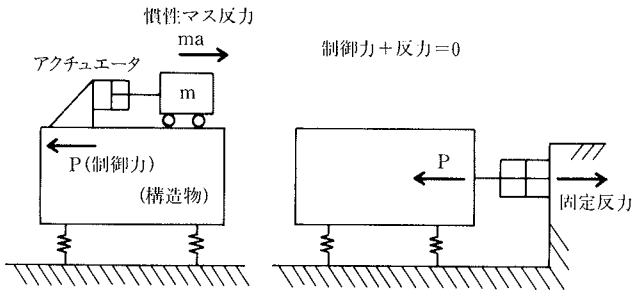


図-4 絶対速度フィードバック制御の地動に対する加速度応答倍率



(a) 慣性反力方式 (b) 固定反力方式
図-5 アクティブ反力の取り方

動数, $\mu = \text{建物重量} / \text{付加マス重量}$

例えば, 付加マスの質量比 1% ($\mu = 100$) で, 固有周期 3 秒の免震ビルを制振することを考える。地震動に周期 3 秒の地動変位で 5 cm あるとすると, アクチュエータのストローク変位で 5 m, 速度で 1000 kine が必要となり, 現実的な装置で実現不可能となる。このような考察によって, 地震動を対象とした絶対制振は固定反力方式に限定されることが分かる。

2.5 装置バネ

上述した基本的な考察に従って, 入力反射とスカイフックダンパー方式を併用した制御を固定反力方式で行なうことになる。ところで, 現実の制御の場合, 固定反力方式でアクチュエータを構造物に剛結したとき, アクチュエータと構造物とで構成される系の固有モードの影響によって, このままの形では, 絶対制振を実現できない。そこで, 図-5 に示すように, アクチュエータと構造物の間にバネを介して制御する方法によって, この問題の解決を図った。

3. システムの制御に関する基本的検討

本章では, 制御用バネを用いた場合の制御式とサーボ電流の制御法を示す。続いて, 制御用バネ剛性のパラメータ解析を通じて, バネを介して制御することの有効性について記す。

3.1 制御方程式

図-6 に示す制御用バネ k_s を考慮した検討モデルで, 地動に対する絶対対応答の振動方程式は式(6)で示される。

$$[M]\{\ddot{x} + \dot{y}\} + [C]\{\dot{x} + \dot{y}\} + [K_a]\{x + y\} = [C]\{\dot{y}\} + [K_a]\{y\} + \{k_z\}z \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに, $[K_a]$ は $[K]$ に次式の $\{k_z\}$ を加えたもの。

$$\{k_z\} = (0, \sim 0, k_s)^T \quad \dots\dots\dots(7)$$

式(6)の右辺の外力項をベクトル表示で陽に示すと(8)式となる。

$$[C]\{\dot{y}\} + [K_a]\{y\} + \{k_z\}z = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ c_1 \end{Bmatrix} \dot{y} + \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_1 + k_s \end{Bmatrix} y + \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_s \end{Bmatrix} z \quad \dots\dots\dots(8)$$

制御装置との連成については, 次の油圧アクチュエータの流量式と, バネと油圧の釣り合い式によって考慮する。

$$a\dot{z} = K_1 I - K_2 p - (\beta V / 2) \dot{p} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$ap = k_s(z - x_1) \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここに, a : 油圧シリンダーの断面積, p : 油に掛かる負荷圧力, z : 油圧シリンダーの伸縮変位, I : サーボ駆動電流, K_1 : 駆動電流に対する油の流量係数, K_2 : 負荷圧力に対する油の流量係数, β : 油の体積圧縮率, V : シリンダーの内部容積

ここで, 次式で表される状態量 $\{X\}$ を定義する。

$$\{X\} = (\{x + y\}^T, \{\dot{x} + \dot{y}\}^T, z)^T \quad \dots\dots\dots(11)$$

式(11)を用いると, 式(6)~(10)は一般的な状態方程式である式(12)としてまとめられる。

$$\dot{\{X\}} = [A]\{X\} + [B]I + [D]\{Y\} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに,

$$\{Y\} = (y, \dot{y})^T \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & , & [E] & , & \{0\} \\ -[M]^{-1}[K_a] & , & -[M]^{-1}[C] & , & [M]^{-1}\{k_z\} \\ (A_d) & , & (A_v) & , & -A_z \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\{K_z\} = [M]^{-1}(0, 0, k_s)^T \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$(A_d) = (0, 0, d_1) \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$(A_v) = (0, 0, V_1) \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$A_z = K_s \beta V / 2a^2 + k_s \beta V \quad \dots\dots\dots(18)$$

$$d_1 = 2K_2 K_s / (2a^2 + k_s \beta V) \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$V_1 = k_s \beta V / (2a^2 + k_s \beta V) \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \{0\} & , & \{0\} \\ \{D_d\} & , & \{D_v\} \\ -d_1 & , & -v_1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$\{D_d\} = [M]^{-1}(0, 0, k_1 + k_s)^T \quad \dots\dots\dots(22)$$

$$\{D_v\} = [M]^{-1}(0, 0, c_1)^T \quad \dots\dots\dots(23)$$

$$\{B\} = (\{0\}^T, \{0\}^T, 2aK_1 / (2a^2 + k_s \beta V))^T \quad \dots\dots\dots(24)$$

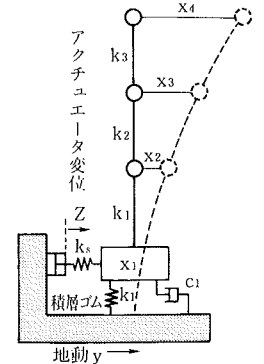


図-6 検討モデル

なお, 式(14)の中の $[E]$ は単位行列を表す。

3.2 サーボ電流の制御式とその安定解析法

フィードフォワード方式による入力反射とフィードバック方式のスカイフックダンパーを併用する考え方によってサーボ電流 I を制御する。その電流制御の方法を次に示す。フィードフォワードによる入力反射を変位制御で考えると, アクチュエータに対する収縮変位の命令値 z_0 は式(8)の右辺 = 0 より,

$$z_0 = -(1/k_s) \{c_1 \dot{y} + (k_1 + k_s) y\} \quad \dots\dots\dots(25)$$

更に, フィードバックによるスカイフックダンパー (減衰係数 c_0) を併用した場合, 式(25)の命令信号 Z_0 は式(26)として構成される。

$$z_0 = -(1/k_s) \{c_1 \dot{y} + (k_1 + k_s) y + c_0 (\dot{x}_1 + \dot{y})\} \quad \dots\dots\dots(26)$$

この命令信号 Z_0 に追従するように電気油圧アクチュエータをサーボ制御で駆動させる場合、式(25)の命令信号 z_0 と式(12)の駆動電流 I はサーボアンプゲイン K_A とアクチュエータのストローク単位当たりの出力電圧 G_0 を介して、次の関係で結ばれる。

$$I = K_A G_0 (z_0 - z) \quad \dots\dots\dots(27)$$

式(26)によって式(27)は式(28)で表される。

$$I = (B_1)\{X\} + (B_2)\{Y\} \quad \dots\dots\dots(28)$$

ここに、

$$(B_1) = (\{0\}^T, (0 \sim 0, -K_A G_1), -K_A G_0) \quad \dots\dots\dots(29)$$

$$(B_2) = (-K_A G_2, -K_A G_3) \quad \dots\dots\dots(30)$$

であって、 G_1, G_2 および G_3 は G_0 を用いて以下のように表される。

$$G_1 = G_0 c_c / k_s \quad \dots\dots\dots(31)$$

$$G_2 = G_0 (k + k_s) / k_s \quad \dots\dots\dots(32)$$

$$G_3 = G_0 c_1 / k_s \quad \dots\dots\dots(33)$$

以上がシステムの基本的な考え方とその構成方法である。

次に、このような方法によって構成されたシステムの制振効果およびシステムの安定判別の方法を記す。地動に対する状態量の伝達関数は式(28)を式(12)に代入し、そのラプラス変換によって、式(34)で表される。

$$X(s)/Y(s) = \frac{\text{adj}(sE - A)}{\det(sE - A)} D \begin{Bmatrix} 1 \\ s \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots(34)$$

ここに、

$$[A] = [A] + \{B\} (B_1) \quad \dots\dots\dots(35)$$

$$[D] = [D] + \{B\} (B_2) \quad \dots\dots\dots(36)$$

であって、 s はラプラスの演算子を示す。

この式(34)より、フィードフォワード制御に関係する式(36)の $[D]$ は分子にあるため、 (B_2) を定義する式(30)の G_2 および G_3 の選択いかんによって式(34)の値が無大すなわち発振現象を起こす不安定なシステムとなることはない。しかし、フィードバック係数 G_0 の選択いかんによって、式(37)を無限大、制御系を不安定にすることがありえるので、次に示すような検討が必要である。

$$\det(sE - A) = 0 \quad \dots\dots\dots(37)$$

式(37)は $[A]$ 行列の固有値を意味し、その固有値 S を制御の分野では極と呼んでいる。この極は特殊な場合を除いて共役な複素数として求められる。この複素数の内、一つでもゼロを含む実部を持つ極があった場合、正の時間方向に対し式(37)を満足し、制御系として不安定で、発振現象を起こすことを意味する。このような極の位置で制御の安定性を見ることは極安定判別法と呼ばれる。逆に極が負の実部を持つ場合、負の時間方向に対する発振を示し、実際の時間すなわち、正の時間方向では振動の減衰性を意味し、その値が大きいほど制御系として安定であることを示す。この極が安定な場合の制振効果、すなわち地動入力に対する応答の伝達関数は式(37)で $s = i\omega$ とした解析で求められる。式(37)の伝達関数の振幅は不安定な系であっても同じ結果を示すため、制御系の制振効果を見るためには、まず、制御系の安定性を確認する必要がある。安定判別の方法として、

極安定判別法以外にも伝達関数を用いたナイキスト安定判別の方法もあり、実験時に安定性を確認および不安定な制御系を修正する場合の補償回路を検討する上で有効な方法であるが、ここではその詳しい紹介を省略する。

3.3 装置バネの効果

ここではバネを介することによる制振効果の検討を目的として、バネ剛性をパラメータとした場合の解析を行なった。解析モデルとして設定した建屋およびアクチュエータは次のとおりである。

建屋モデルとして、3階建免震建物：全重量5 ton の4質点系で最下層に基本周期1秒で減衰定数 $h = 2\%$ の積層ゴムがあり、その上部はせん断型剛性の3層フレーム ($h = 0\%$) で構成されたものとする。アクチュエータとして、2 ton 用小型の油圧アクチュエータの定数を解析モデルとした。

以下に、バネ定数のパラメータとして $k_s = 1 \sim 10^8$ kgf/cm を用いた場合の解析結果を示す。なお、フィードバックゲインの設定は基本モードに対するスカイフックダンパーの等価減衰定数 h_c を次の式(38)で概算した72%の値を用いている。

$$h_c = G_1 k_s / \{2G_0 \sqrt{\sum_{i=1}^n m_i} (k + k_s)\} \quad \dots\dots\dots(38)$$

ここに、 m_i は構造物の i 層目の質量を表す。

図-7 はバネ定数をパラメータとした場合の安定性を見るため、それらの極を S 平面で記したものである。この結果ではすべての極の実部が負であり、制御系として安定であることを示している。バネ定数が大きくなると虚数部が大きくなりながら実数部がゼロに近づく。これは装置バネを硬くすると、固有値が大きくなりながら、制御系は不安定方向に向かう傾向を示している。一方この極を制御による減衰特性としてみた場合、この図で45度の勾配上にあるときが減衰定数 $h = 71\%$ であり、この値が制振時における最適減衰であり、装置バネの剛性の最適値のあることが分かる。

次にそれらの制振効果をみるため、式(34)を用いて地動に対する絶対応答の伝達比を求めたものが図-8であり、地動に対するアクチュエータストロークの伝達比を示したものが図-9である。図-8より、バネが柔らかい場合、よ

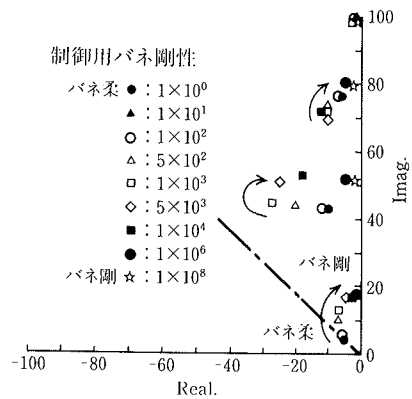


図-7 装置バネの剛性による極移動

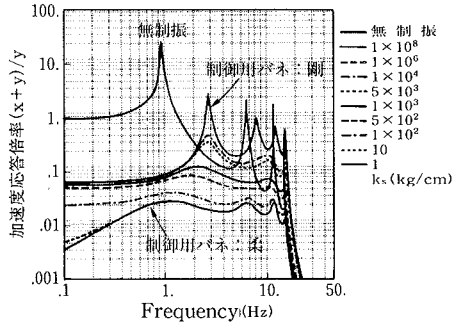


図-8 装置バネの剛性と制振効果の関係 (地動に対する伝達比)

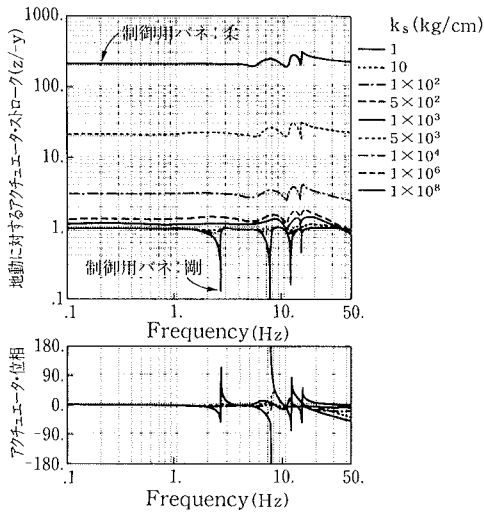


図-9 装置バネの剛性とアクチュエータストロークの関係 (逆地動に対する伝達比)

い制振効果を示すが、図-9から大きなアクチュエータストロークを必要とすることが分かる。このことは、微振動問題に対してはその制御が容易になることを示しているとも言える。一方、バネが固い場合にはその固有振動数で本来の制御をなしえないことを示している。これらの解析よりバネを介した制御の利点が理解される。

4. 実験による検証

4.1 試験装置

図-10で示す積層ゴムで支持された総重量10 tonの4層鉄骨造モデルを振動台上にセットし、正弦波と地震波による加振実験を実施した。制御力は図に示されるように2台のアクチュエータを用いて1層目の基部にバネを介して与えている。

4.2 試験結果とその検討

正弦波加振による1層と屋上の振動台に対する伝達率を図-11に示す。同図の(a)は無制振の場合であり、(b)はフィードバック制御のみ(スカイフックダンパー付加)、(c)はフィードフォワード(入力反射)とフィードバック制御を行なった場合の結果である。なお、(b)と(c)には計算結果も併記している。(b)のフィードバックのみの制御を行なった場合をみると、1次の応答倍率は4倍程度になって

おり、無制振時の12倍程度から約1/3に抑制されており、制御によって減衰が増加したことが分かる。フィードフォワードとフィードバック制御を行なった(c)の結果は、全周波数帯域で(b)の伝達特性の1/10程度に低減されており、フィードフォワード制御の有効性が確認できる。図-11にE1-centro地震波入力の測定波形を示す。各試験の振動台上加速度を100 galに基準化し、各々比較できるようにして示した。この制御方法はバネを介して制御するため、無制振時に比べ固有振動数が変化し単純に比較するのは難しいが、(b)の応答波形に表れる減衰性、(c)の最大加速度応答が(a)の無制振に比べ大幅に低減される様子が見られる。

図-13は3種類の地震波を入力した場合の高さ方向の地動に対する最大応答倍率の分布を示したものであり、同図(c)にみられるごとくフィードフォワードとフィードバックを併用した制御では、すべての地震波でほぼ完全に近い絶対制振が実現されている。

最後に解析結果について述べる。試験結果にロッキング振動が表れたため、2章で示した式(6)の最下行にロッキング項を加えて計算を行なった。また、解析におけるフレームの定数は、無制振時の伝達特性から逆算した値を用いた。

図-11(b)(c)に制御時の解析結果を実験値とともに併記してある。同図の(b)から、フィードバックのみの制御の場合には実験結果と非常に良く一致していることが分かる。この制御によって得られた減衰定数は、1次17%、2次16%、3次3%であることが式(3)の極の計算から得られた。同図(c)をみると、さらにフィードフォワードとフィードバックを併用した制御結果も大旨良い対応を示しているが、高次において若干形状が異なっているのが認められる。これは積層ゴムの定数によって与えるフィードフォワードゲインの設定誤差によるものと考えられる。

5. あとがき

多層構造の免震建物を対象とした場合でも、その基部で制御することによって絶対制振が可能であることを解析および振動台実験によって検証した。今後、実規模建物への適用に向けて研究を展開していきたい。

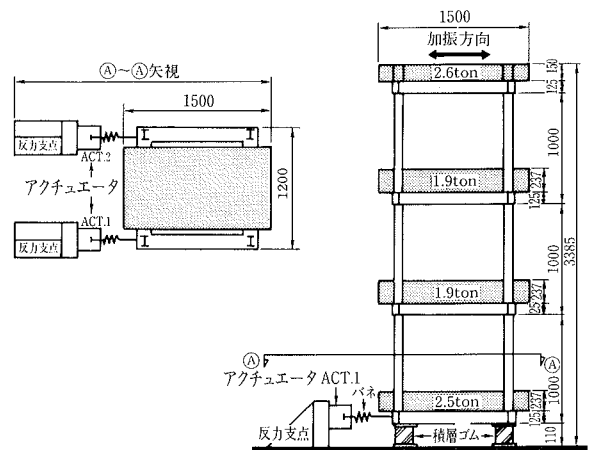
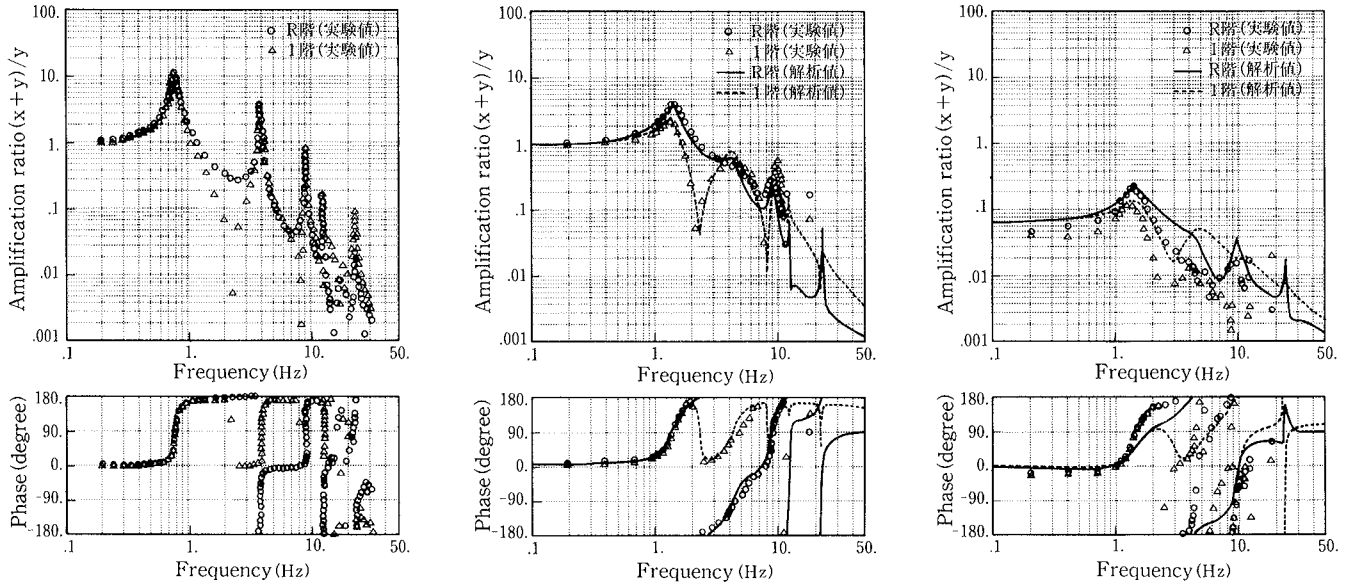


図-10 試験体

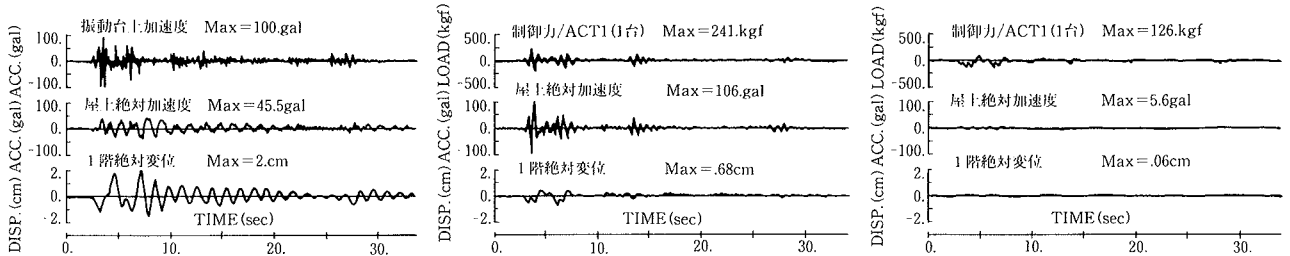


(a) 無制振時

(b) 絶対速度フィードバック制御時

(c) フィードフォワードとフィードバック制御の併用時

図-11 振動台 (正弦波加振) に対する伝達率

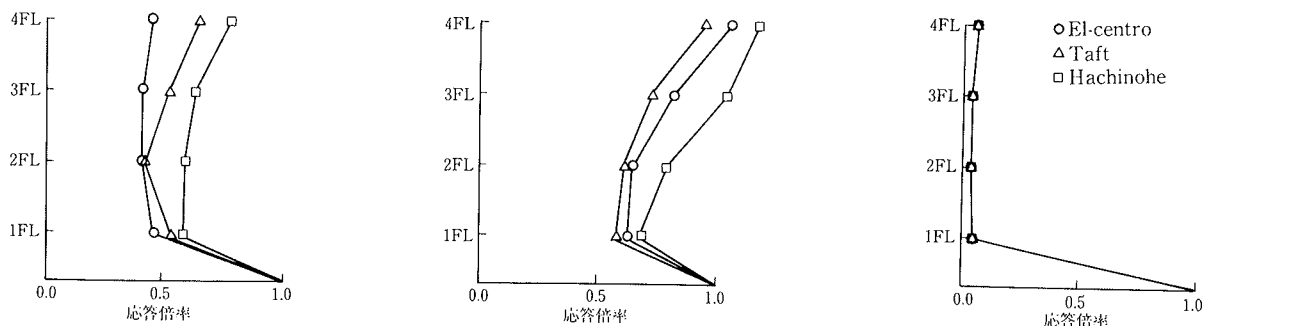


(a) 無制振時

(b) 絶対速度フィードバック制御時

(c) フィードフォワードとフィードバック制御の併用時

図-12 振動台 (El-centro 100 gal 入力) に対する観測波



(a) 無制振時

(b) 絶対速度フィードバック制御時

(c) フィードフォワードとフィードバック制御の併用時

図-13 振動台 (各地震波入力) に対する最大加速度応答倍率

参考文献

1) 田中基八郎, 三枝省三: 振動モデルとシミュレーション, 応用技術出版, (1978)

2) 増淵正美: システム制御, コロナ社出版, (1987)

3) 蔭山, 野畑, 寺村, 鈴木, 関, 岡田, 武田: 建造物の制振に関する研究 (その1) ~ (その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, p. 503~510, (1988. 10)

4) 蔭山, 野畑, 他: 建造物の制振に関する研究 (その5) ~ (その6), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, p. 563~566, (1989. 10)

5) 蔭山, 野畑, 他: アクティブ制振技術に関する研究 (その1), 大林組技術研究所報, No. 39, p. 113~118, (1989. 8)