

アクティブ制振技術に関する研究（その3）

——現代制御を用いた絶対制振について——

蔭山 満 野畑 有秀 寺村 彰
安井 讓 岡田 宏

A Study on Active Control Methods (Part 3)

——“Absolute Vibration Control System” by Modern Control Theory——

Mitsuru Kageyama Arihide Nohata Akira Teramura
Yuzuru Yasui Hiroshi Okada

Abstract

This paper describes the “absolute vibration control method” to reduce the acceleration response of a base-isolated building by active control at the base in order to hold the building in absolute space. The concept of advanced optional regulator theory for the application of absolute vibration control is proposed in this paper. The proposed optimal regulator theory has a unique point in that it can use feedforward components. This control method was compared with the classic control method used from the past. As a result, it was found that this control method has a better effect compared with the classic control method. It is considered that absolute vibration control by a generally-used type of large-sized actuator is possible even at time of a major earthquake.

概 要

本報告は、免震建物の基部でアクティブ制御を行なうことによって、その構造物の加速度応答を飛躍的に低減することを目的とした絶対制振手法について述べたものである。

絶対制振に現代制御の最適レギュレータ法を適用する場合の考え方を提案する。本報で提案する最適レギュレータ法は、絶対制振の場合に不可欠なフィードフォワード制御を取り入れているところに特色がある。

また、実大規模の免震建物に汎用の大型アクチュエータを用いた場合について、古典制御による方法と前述の最適レギュレータによる方法で解析を行ない、その結果の比較検討を行なった。その結果、最適レギュレータ法による結果は古典制御法に比べ非常に良好な制振性能を示し、大地震時にも一般の汎用大型アクチュエータではほぼ完全な絶対制振の実現が可能であるという考察を得た。

1. まえがき

免震建物の基部でアクティブ制御を行なうことによって、その構造物の加速度応答を飛躍的に低減することを目的とした絶対制振手法について述べる。

前報（その2）では、多質点系を対象とした絶対制振の基本原則を示すと共に、古典制御法を用いて実施した4層の試験体モデルに関する実験結果を示した。

本報告では、絶対制振に現代制御の最適レギュレータ法を導入し、古典制御法の場合との性能比較を解析的に行なった結果について報告する。最適レギュレータ法はフィードバック制御を基本とする制御法であるが、ここで用いる最適レギュレータは絶対制振の場合に不可欠なフィードフォワード制御を含めたものとするための工夫を行なっており、その考え方についても記す。

今回、新たに最適レギュレータ法を導入する目的は次の点にある。実際の建物の制御を対象とした場合、その建物質量が大きいこと、大型油圧アクチュエータを用いること等から、その制御装置が建物高次の固有振動数領域まで追従できないことが予想される。この場合でも最

適レギュレータ法では、あらかじめ装置特性が分かっているならば、それを反映した基での最適な制御系の計算が容易であり、高い制振効果を期待できると考えたためである。

解析モデルとして実大規模の5階建の免震建物を対象とし、最適レギュレータ法で行なった場合と古典制御で行なった場合との性能を比較し、続いて、1940年 El Centro NS 341 gal の大地震が作用した場合に必要な装置規模とその制振効果について検討した結果を報告する。

2. 検討モデル

次章以降の検討に用いるモデルの諸元を以下に示す。

免震建物：5階建総重量 2,500 t 基本周期 3 秒

アクチュエータ：動的出力 50 tf（静的出力 75 tf）

最大ストローク 20 cm

最大ストローク速度 50 kine

シリンダー容積（片室）10,720 cm³

シリンダー断面積 536 cm²

供給油圧 140 kgf/cm²

バルブ負荷特性 11,400 cm⁵/min・kgf

制振方法は、以下の要領で行なうこととした。すなわち、アクチュエータは、水平1方向に対し両端で計2台を使用する。そのアクチュエータと構造物の間には装置バネを付加することとして、その装置バネの剛性は2台分で免震建物の全積層ゴム剛性の2倍とする。免震建物と制振装置の概略を図-1に示す。

図-2は装置バネの有る場合と無い場合の無制振時の地動に対する絶対応答の伝達関数を屋上階を代表例として示したものである。なお、同図中の f_0 は装置が無い場合の基本振動数である。 f_1 は装置がある場合の基本振動数であり、制御時は制御によって変動する。

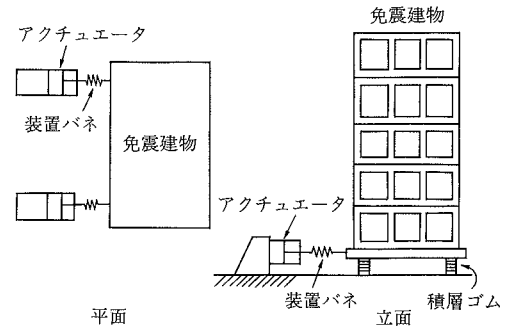


図-1 免震建物と制御装置の概要

3. 古典制御による検討

古典制御では、アクチュエータの動きを独立したマイナーループでフィードバックすることによって、その動きを命令信号に近づけるサーボ制御法を用いる。その命令信号は制振の基本原理由って導かれ、絶対制振では地動を観測して入力反射を構成するフィードフォワード制御と、その制御の漏れによって起きる構造物の絶対応答振動をスカイフックダンパーで吸収する考え方で設定されたフィードバック制御との合成信号で構成される。この場合、そのサーボ制御方式は力制御であるべきものであるが、アクチュエータと構造物の間にバネを介することによって、安定性の良い変位制御方式として構成できることを前報(その1~2)で報告してきた。

ここでは、2章で示した実大規模の免震建物モデルに対し、この古典制御手法を用いた場合の性能とその限界性について検討した。

3.1 古典制御による制御特性と性能検討

ここでは、サーボゲインを一定とし、入力反射を構成するフィードフォワードゲインは基本原理から導かれる値を用い、免震ビル1階の絶対速度応答成分のフィードバックゲインをパラメータとした解析を行なった。このパラメータスタディによる制御系の極の軌跡を図-3に示す。同図の次数は制振装置を取りつけた状態での無制振時における構造物の次数を示したものである。また、建物屋上階での地動に対する伝達関数のパラメータスタディの結果を図-4に示す。

図-3より、フィードバックゲインが大きくなる(図中の矢印方向)と制御系の固有振動数が大きくなり(虚部が増加)、減衰特性はフィードバックゲインが小さいうちは増加する方向に向かう(実部が負の方向に増大)が、ある量を越えると減少方向に向かいゼロに漸近する。このことは制御系が不安定現象に近づくことを意味している。また、当初4次であった極は、フィードバックゲインの増大とともに、その虚部(固有振動数)が急速に上昇しているのが見られる。この現象を実際の制御に当てはめて考えると、スパルオーバー(センサーまたはアクチュエータを、その理論的性能が保証された領域外で使用することによって不安定現象を起こすこと)が生じる可能性が高いことを示唆している。それゆえ、この極解析に

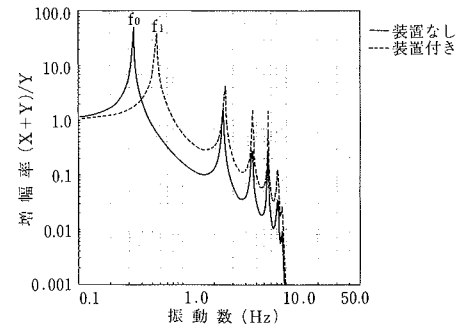


図-2 無制振時の地動に対する屋上階の伝達関数

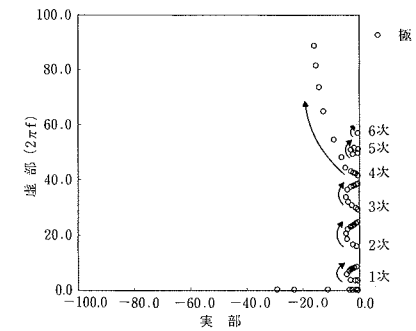


図-3 古典制御による極の軌跡

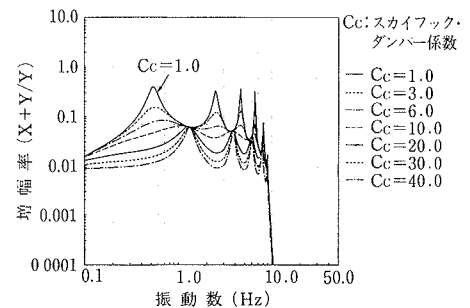


図-4 古典制御による地動に対する屋上階の伝達関数

よる安定判別で安定(実部が負)であっても、絶対速度応答に対するフィードバックゲインの大きさは実際面ではかなり制約されるものと考えられる。

図-4の伝達関数の結果は、実規模建物を対象とした場合でも、これまで用いてきた古典制御による方法で、建物の応答を地動の1/10以下に低減することが可能であることを示す。しかし、この方法では1/16程度が限界で

あることも示している。免震ビル1階の絶対速度応答のフィードバックゲインを調整する自由度しか持たないこの古典制御による方法では、極の軌跡及び伝達関数の結果から、安定性及び効果の面で限界があることが分かった。

4. 最適レギュレータによる検討

ここでは、現代制御の最適レギュレータを用いた場合の絶対制振を考える。絶対制振のためには、地動を観測して入力反射を構成するフィードフォワード制御と、構造物に入った絶対応答成分を吸収するためのフィードバック制御が必要である。しかし、最適レギュレータはフィードバック制御を基本とする制御法であり、入力反射を行なうフィードフォワード制御を含めるためには工夫を必要とする。ここではその考え方を示し、この方法を用いた最適レギュレータで2種類の評価関数を設定し、その場合の極の軌跡及び伝達関数を求めて3章の古典制御の場合と比較検討する。

4.1 絶対制振を対象とする最適レギュレータの考え方

最適レギュレータは、状態方程式を構成する状態量をフィードバックする制御手法であることから、装置特性及び地動を含めた最適制御を行なうためには、これらを含んだ状態量で構成される状態方程式を必要とする。更に、構造物の絶対応答の低減を目的とする絶対制振では、それらに対応する状態量の要素を絶対応答成分で表す必要がある。絶対応答変位 $(x+y)$ とその速度にアクチュエータ・ストローク z を含めた状態量 $\{X\}$ で表わした状態方程式は、前報(その2)で定義した $[A]$, $\{B\}$, $[D]$ 及び操作量 I を用いて次式(1)で表わされる²⁾。この状態方程式(1)に更に地動の特性を表す状態方程式(2)を含めて、絶対制振を目的とした拡大系の状態方程式(3)を構成する。状態方程式(2)は、地動の状態量 $\{Y\}$ を外乱入力 y_w とするハイパスフィルターの出力と定義し、そのフィルター特性を固有円振動数 Ω 、減衰定数 h の1質点系の相対振動で表したものである^{3),4)}。式(8)で定義される $\{X_g\}$ を用いた拡大系の状態方程式(3)は地動をシステムの一部として表現したことになる。

$$\{\dot{X}\} = [A]\{X\} + \{B\}I + [D]\{Y\} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\{\dot{Y}\} = [A_y]\{Y\} + [D_y]y_w \quad \dots\dots\dots(2)$$

式(1)~(3)で用いた表示記号の内容を次に示す。

$$\{\dot{X}_g\} = \begin{bmatrix} [A], \{D\} \\ [0], [A_y] \end{bmatrix} \{X_g\} + \begin{Bmatrix} \{B\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} I + \begin{Bmatrix} \{0\} \\ [D_y] \end{Bmatrix} y_w \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\{X\} = (\{x+y\}^T, \{\dot{x}+\dot{y}\}^T, z)^T \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\{Y\} = (y, \dot{y})^T \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$[A_y] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\Omega^2 & -2h\Omega \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 y は地動変位を表す。

$$\{D_y\} = (0, 1)^T \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\{X_g\} = (\{X\}^T, \{Y\}^T)^T \quad \dots\dots\dots(8)$$

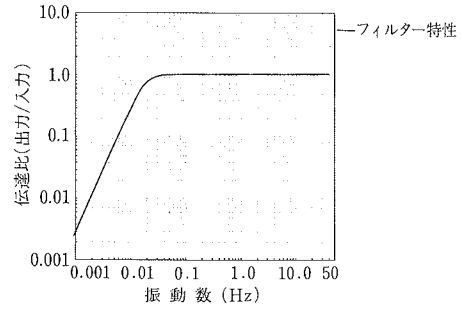


図-5 地動を形成するハイパスフィルター特性

この拡大系の状態方程式(3)を満足する状態量と操作量を用いて評価関数を設定する。評価関数を最小とし、式(3)の制御系を安定とする最適フィードバックゲインは定常リカッチ行列方程式の正定唯一解を用いることによって求められる。ところで、この方法では、状態方程式(3)の右辺第3項で示す外乱項は単に白色ガウス雑音よりなるベクトルとして定義される。それゆえ、この方法による状態フィードバック制御はここで問題とする地動入力の場合のみでなく、風による上部外乱等に対しても有効な制御を行なうことができる。

4.2 地動特性の設定について

地動特性として、 $h=0.71$ とし、 Ω の円振動数に周期換算の40秒を用いる。この場合、白色雑音と定義される y_w に対する地動加速度 y の応答特性は図-5に示す様な振動数特性として規定される。その結果、地動成分を含めるために用いる拡大系の状態方程式においても、周期換算で数秒以上の構造物の固有振動数領域では地動加速度が白色雑音と等価となる。地動加速度の卓越振動数があらかじめ分かっている場合には、この方法を活用して更に効果的な制御を行なうこともできるが⁵⁾、想定外の特性を持った地動に対しては効率が悪くなる。ここでは、特異な入力地動の想定を避けるため、その特性を平滑なものとして与えることにした。

4.3 評価関数による特性及び性能検討

評価関数 J として下記の2種類を用いて、2章で示す実大規模建物モデルに対する性能的な検討を行なった。

(評価規範1)：評価関数として式(9)を用い、絶対変位応答と速度応答に掛る $[Q]$ に単位重みを持たせる。

$$J = \int_0^{\infty} [\{\dot{X}_g\}^T [Q] \{\dot{X}_g\} + rI(t)^2] dt \quad \dots\dots\dots(9)$$

(評価規範2)：評価関数として式(10)を用い、絶対加速度応答に掛る $[Q]$ に単位重みを持たせる。

$$J = \int_0^{\infty} [\{\ddot{X}_g\}^T [Q] \{\ddot{X}_g\} + rI(t)^2] dt \quad \dots\dots\dots(10)$$

上の両評価規範の基で、操作量 I に対する重み r をパ

ラメータとし、それら最適フィードバックゲインの基での制御系の極の軌跡を求めた結果を、各々図-6と図-7に示す。更に、それらの建物屋上階絶対応答の地動に対する伝達関数を図-8と図-9にそれぞれ示す。

重み r を小さくし、フィードバックゲインが大きくなるよう設定すると、加速度応答の抑制を意図した評価規範2の場合の制御系の極の軌跡(図-7)は全ての極の固有振動数が低い方向に移動し、特に構造物の一次の極はゼロに漸近する結果を示している。

絶対速度と変位の抑制を意図した評価規範1の場合の極の軌跡(図-6)では、重み r を小さくし、フィードバックゲインが大きくなるよう設定すると、構造物の一次と二次の極は固有振動数が上がる方向に向かう。古典制御の極の軌跡(図-3)と比較すると、古典制御の場合は虚軸上に漸近し、不安定系に近づく傾向にあるが、現代制御の最適レギュレータではその傾向が回避され、フィードバックゲインを大きくするほど、制御系の安定性が良くなる方向にあることを示している。構造物の二次の極はその固有振動数が漸次上昇する傾向を示し、スピルオーバーの可能性を示唆している。しかし、古典制御の極の軌跡(図-3)の四次の極と比較すると、その上昇勾配は低く、古典制御の場合よりスピルオーバーを起こすまでにかかなり大きなフィードバックゲインが確保できることを示している。伝達関数の結果で見た場合、評価規範2の基(図-9)では高い振動数ほど伝達関数が小さくなっており、加速度低減の意図が反映されていることが分かる。評価規範1の基(図-8)では、低い振動数から高い振動数まで一様に低減する傾向を示しており、評価関数を使い分けることによって目的に応じた制振が可能であることが分かる。

古典制御の場合と比較すると、古典制御による伝達関数では、 $1/16$ 以下に設定することは出来なかったが、図-8に代表されるように、現代制御では全ての振動数範囲で、 $1/16$ 以下に設定することが可能であることを示している。

5. 地震応答制御に関する検討

ここでは4.3節で示した2種類の評価関数に含まれる重み r に対するパラメータスタディを行ない、地動に対する制御力の伝達特性を検討し、地震動の特性によって、どのような重みによる制御系が制御力の面から見た場合に効果的であるかを検討する。この検討結果と極の軌跡のスピルオーバーの検討を合わせて、現実的に可能と考えられる制御系に大地震(1940年 El Centro NS 341 gal)が作用した時に必要な制御力と構造物の応答について解析し、検討する。

評価規範1の基で、重み r をパラメータとした場合の地動変位に対する制御力の伝達率を図-10に、地動速度に対する伝達率を図-12にそれぞれ示す。更に、評価規範2の基で求めた同様な伝達率を図-11と図-13に示す。

ここで、無制振の場合の固有振動数である f_0 と f_1 に着

目すると、両評価規範で求めた力の伝達率は f_0 で定点をなし、 f_0 より低い振動数領域と高い振動数領域で伝達率が逆転する傾向を示す。 r を大きくし、制振効果を小さく設定しても、 f_1 で大きな力が必要となり、逆に、 r を小さく、大きな制振効果を設定すると f_1 での力は小さくなるが、 f_0 より低い振動数で大きな力が必要となる。また、 f_0 で定点を通るために、 f_0 点での制御力より小さくすることはできない。以上の検討も踏まえて、大地震に対する絶対制振の実現性を考えると、それは f_1 より低い振動数領域の地震動の特性に依存すると考えられる。一般に地震動の特性は、速度一定といわれるが、数秒より長い成分の傾向は変位一定ともいわれる。いずれにしても、速度一定と変位一定の間にあると思われる。

そこで、地動変位一定条件の基で制御力が有利となる力の伝達率を捜すと、評価規範1に対する図-10の r が0.1より小さい重みでは f_1 より低い振動数で地動変位に対する力の伝達率が一定に近い特性を示し、効率的な制御となることを示している。更に、先のスピルオーバーの問題を考慮して、図-6の極の軌跡でその固有振動数が10 Hz以内となる $r=0.001$ の場合をその代表例として取り上げる。地動速度一定条件に対しては、評価規範2の図-13で f_1 より低い振動数で地動速度に対する力の伝達率が一定に近い $r=3.0$ の場合を代表例として取り上げる。比較のため、3章の古典制御より図-3の極軌跡でその固有振動数が10 Hz以内で最大のフィードバックゲインであるものを取り上げる。この3種類の制御系の地動に対する絶対応答の伝達率(屋上階)を図-14に示す。

次に、それらの時刻歴応答解析を行なった。但し、入力加速度記録の長周期の誤差成分を除去するため、10秒のハイパスフィルターを通過させたものを元の341 galに基準化して用いている。その入力の各成分の波形を図-15に示す。無制振の場合と3種類の制振時の加速度応答波形及び制御力を図-16~図-19に示す。最適レギュレータを用いた結果について比較検討する。図-17は評価規範1を用い、地動変位一定とした場合に適した制御系の制御力とその応答を示したものである。その最大制御力は64 tfで、最大応答加速度は3.2 galである。図-18は評価規範2を用い、地動速度一定とした場合に適した制御の結果を示したものであり、その最大制御力は45 tfで、応答加速度は70 galである。 f_1 より低い振動数で地動変位一定とした場合に適した制御は、地動速度を一定とした場合に適した制御に比べて、制御力に対する制振効率が良い。これは地震入力として用いたEl Centro地震が f_1 より低い振動数で地動変位一定に近い特性を有するためと考えられる。古典制御の場合の解析結果を図-19に示す。その最大制御力は68 tfで、最大応答加速度は44 galである。この古典制御の結果は評価規範1を用いた図-17の結果に対して、制振効果及び制御力の両面で劣っている。この両者はスピルオーバーに対し同様な基準で現実的な制御系を想定したものであるが、装置

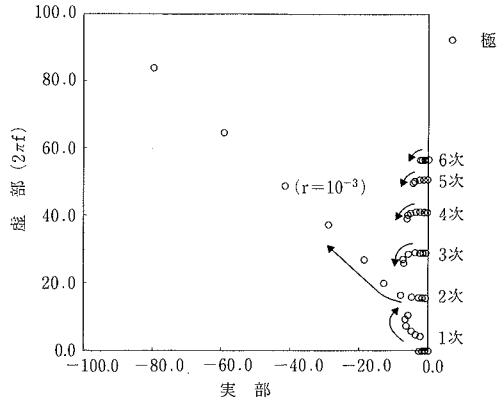


図-6 評価規範 1 による極の軌跡

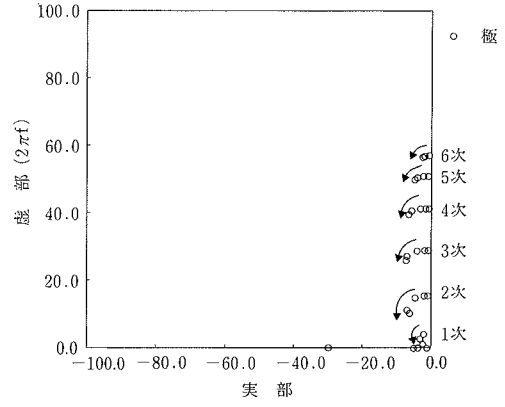


図-7 評価規範 2 による極の軌跡

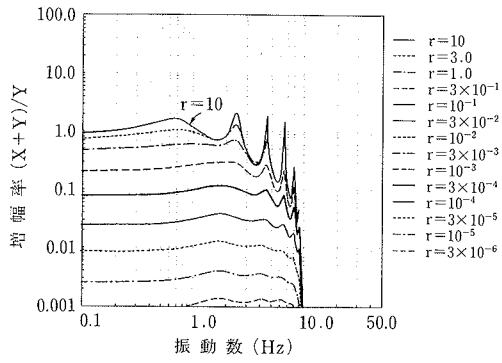


図-8 評価規範 1 による地動に対する屋上階の伝達関数

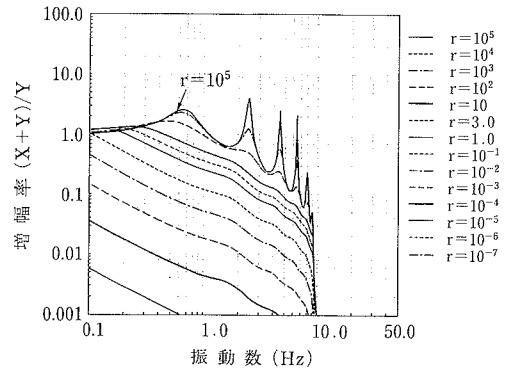


図-9 評価規範 2 による地動に対する屋上階の伝達関数

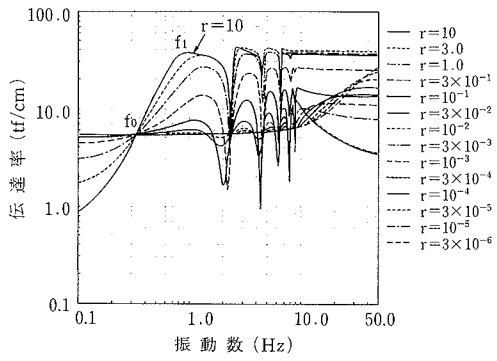


図-10 評価規範 1 による地動変位に対する制御力の伝達率

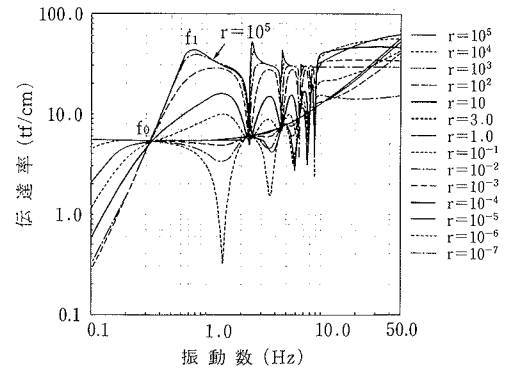


図-11 評価規範 2 による地動変位に対する制御力の伝達率

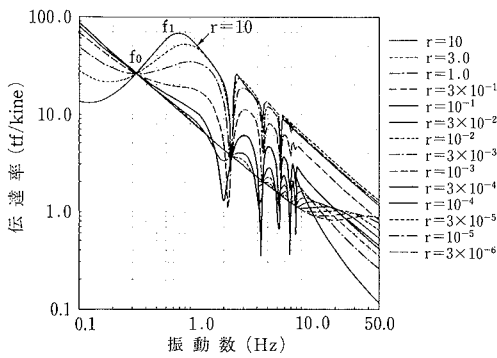


図-12 評価規範 1 による地動速度に対する制御力の伝達率

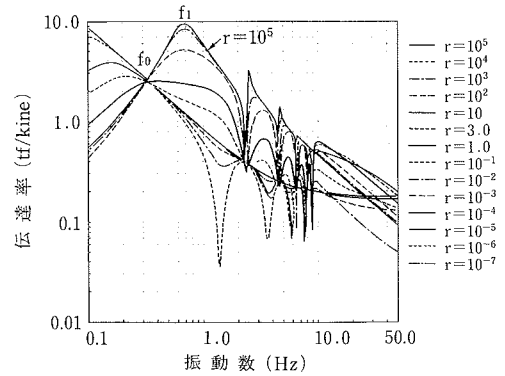


図-13 評価規範 2 による地動速度に対する制御力の伝達率

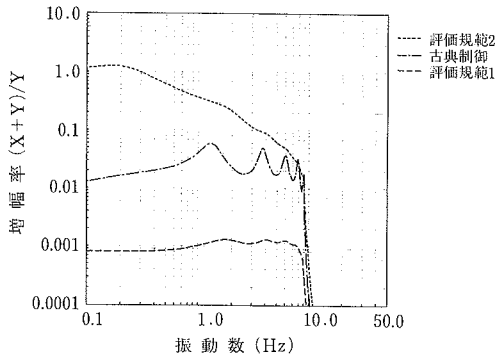


図-14 各種制御系による地動に対する屋上階の伝達関数

特性をあらかじめ反映し、しかもフィードバックの自由度が多い現代制御の最適レギュレータは古典制御に比べ効率的で効果の良い制御が可能であることを示している。

次に大地震時の実大規模の免震建物に対する絶対制振の実現性の面から見た場合、図-17の制御力 64 tf は設定したアクチュエータの動的最大出力 50 tf を越えているが、アクチュエータの動的最大出力値は線形範囲の出力を示すものであり、非線形領域を含めた静的最大出力は 75 tf であることを考慮すると、ここで設定した装置でも制御することが不可能ではないと考えられる。動的最大出力 50 tf の出力では El Centro 地震を 266 gal とした場合、完全な制御が可能であり、かなりの大地震にこの制振手法が対処できることを示している。

更にこの建物設定では免震建物の固有周期を 3 秒としたが、現在の技術では 4 秒の積層ゴムを用いることも可能であり、その場合の制御力はここで示した制御力 64 tf の約半分の力で制御可能であること等を考慮すると、実大規模の免震建物に大地震が作用した場合でも汎用の大型アクチュエータによって、ほぼ完全な絶対制振の実現が可能であると考えられる。

6. まとめ

絶対制振を目的としてフィードフォワード制御を含む最適レギュレータの考え方を示した。実大規模の免震建物に汎用の大型アクチュエータを用いた場合の絶対制振について、古典制御による方法と最適レギュレータによる方法で、性能面および El Centro 波地震入力に対する検討を行なった。その結果、最適レギュレータを用いた方法は古典制御手法に比べ非常に良い制振効果が得られることが分かった。実大規模の免震建物に対し大地震が作用した場合でも、汎用の大型アクチュエータを用いてほぼ完全な絶対制振の実現が可能であるという考察を得た。

参考文献

- 1) 蔭山, 野畑, 他: 構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)
- 2) 蔭山, 野畑, 他: アクティブ制振技術に関する研究 (そ

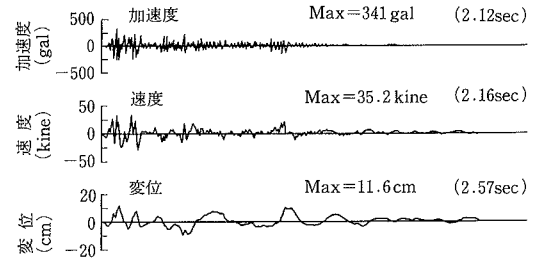


図-15 入力波成分

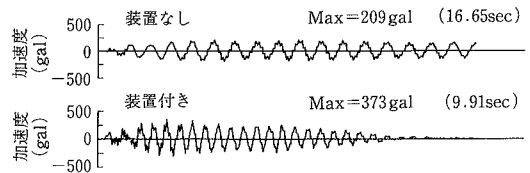


図-16 無制振時の応答加速度

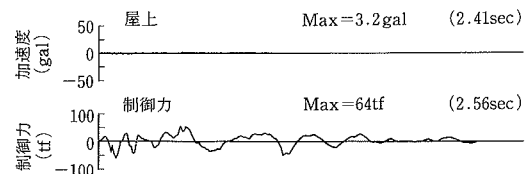


図-17 評価規範 1 を代表した制御時の応答加速度と制御力

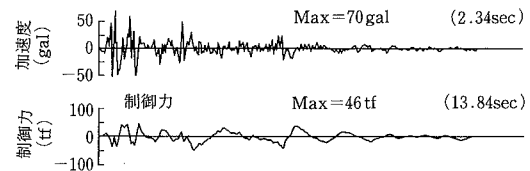


図-18 評価規範 2 を代表した制御時の応答加速度と制御力

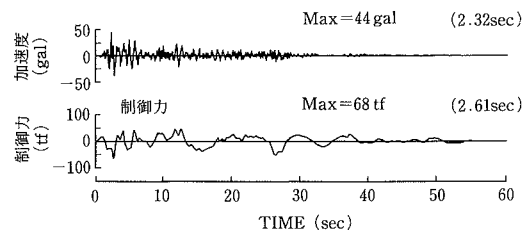


図-19 古典制御を代表した制御時の応答加速度と制御力

- 2), 大林組技術研究所報, No. 41, p. 26~31, (1990. 8)
- 3) 蔭山, 野畑, 他: 構造物の制振に関する研究 (その7), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, p. 893~894, (1990. 10)
- 4) 蔭山, 野畑, 他: 構造物の絶対制振に関する研究, 第8回日本地震工学シンポジウム, p. 1863~1868, (1990. 12)
- 5) 吉田, 下郷, 西村: アクティブ動吸振器による不規則振動の最適制御 (フィードフォワード併合制御の効果に関する実験的考察), 日本機械学会論文集 C, Vol. 53, No. 495, (1987)