

アクティブ制振システムの高層建物への適用

稲葉 学 鈴木 哲夫 蔭山 満 野畑 有秀
吉田 治 岡田 宏 安井 譲
(本社 リニューアルセンター)

Application of Active Vibration Control System to High-rise Building

Satoru Inaba Tetsuo Suzuki Mitsuru Kageyama Arihide Nobata
Osamu Yoshida Hiroshi Okada Yuzuru Yasui

Abstract

A computer operated active vibration control system capable of simultaneously controlling multiple vibration modes was installed in a high-rise building to provide a high quality wind and seismic vibration resistant living environment.

This report describes the system and vibration control effect verification tests carried out before it was installed in the building, as well as earthquake response observations after installation. The test results and earthquake observations show that large damping effects are obtained in four target vibration modes, thus verifying the system's effectiveness in high-rise buildings.

概要

複数の振動モードを同時に制振可能なアクティブ制振システムを強風時あるいは中小地震時における居住性改善を目的としてある高層建物に適用した。

本論文では、高層建物に適用したアクティブ制振システムの概要と制振効果を示した。制振効果は、制振システムが実稼働に入る前に行った制振実験と実稼働後の地震応答観測結果から確認した。その結果、制振対象とする4つの振動モードに対して高い減衰効果が得られ、本システムの有効性を確認した。

1. はじめに

筆者らは、強風時あるいは中小地震時における居住性向上を目的として、複数の振動モードを同時に制御可能なアクティブ制振システムを開発し、既に、小型装置および実大装置による検証実験を通じシステムの有用性を検証してきた^{1),2)}。そして今回、これまでの研究成果に基づき、アクティブ制振システムをある高層建物に適用した。

高層建物のように多くのモードを有する構造物に対して複数の振動モードを制御する場合に問題となるのが高次モードのスピルオーバーである。また、フルアクティブタイプの動吸振器では、強風時の静的風圧等による付加質量のドリフトが問題になる。筆者らは、これらの問題にフィルタを用いることにより解決した。

本報告では、システムの概要、フィルタを用いた制御系の設計方法、制振実験結果ならびに本制振システムを適用した建物における地震観測結果を示す。

2. 建物概要

制振装置を設置した建物は東京都墨田区に建つ33階建ての鉄骨造純ラーメン構造であり、用途は低層部が事務所、高層部が住居となっている。鉄骨造で高層部が住居ゆえ強風等による揺れを極力低減することとし、特に平面形状が扁平ゆえ短辺方向の揺れを効率よく抑制するため制振装置を設置することにした。表-1に制振装置を設置した建物概要を、写真-1に建物の全景を、写真-2に制振装置の設置状況を示す。

表-1 建物概要

用途	事務所 (低層部), 住居 (高層部)
階数	地上33階, 地下2階, 塔屋2階
高さ	軒高 133.3 m, 最後部高さ 133.4 m
重量	52,000 tf
構造	鉄骨造純ラーメン構造
設計周期 (短辺)	1次 3.46秒, 2次 1.29秒 3次 0.82秒, ねじれ1次 2.82秒



写真-1 建物全景

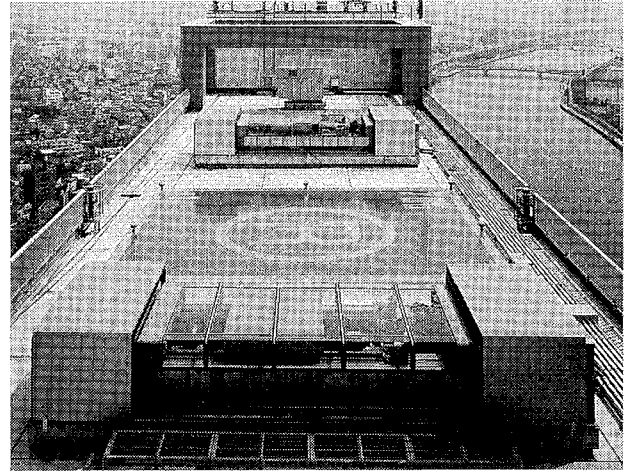


写真-2 制振装置設置状況

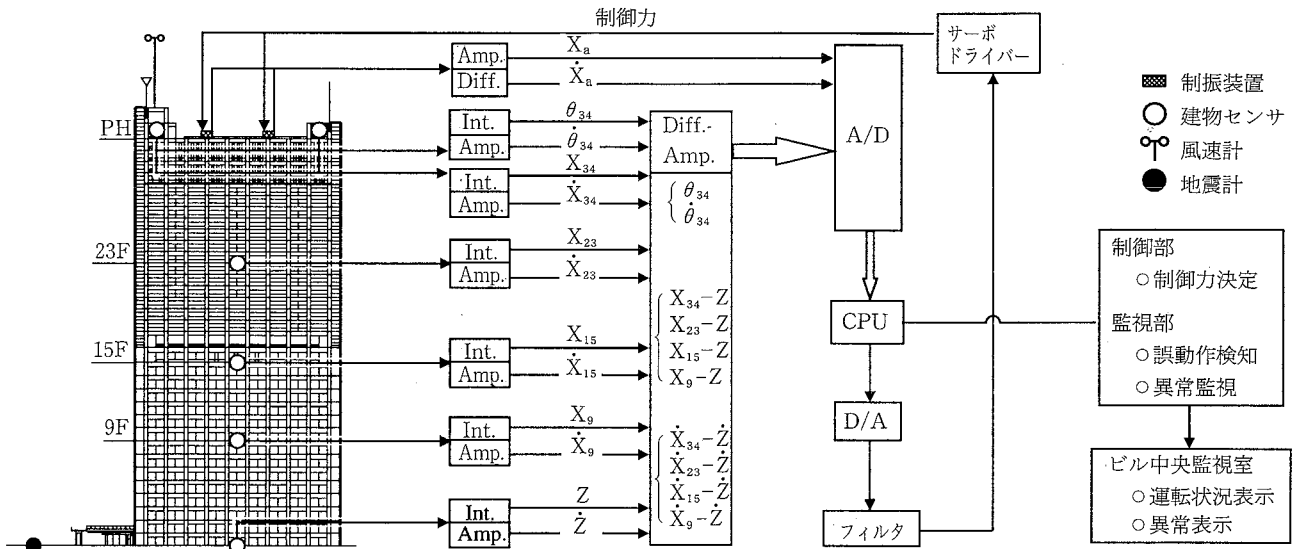


図-1 アクティブ制振システムの構成

3. アクティブ制振システムの概要

3.1 アクティブ制振システムの構成

アクティブ制振システムの構成を図-1に示す。本システムは外乱および建物の状態量を検出するセンサ、制振装置およびシステム全体をつかさどるCPU(制御部および監視部)より構成されている。CPUからの情報はまた中央管理室に表示される。

建物の屋上、23F、15F、9Fおよび基礎に取り付けた絶対速度センサから得られる相対速度と相対変位信号、制振装置に取り付けた差動トランスから得られる相対変位と相対速度信号は、共にサンプリング間隔10msのA/D変換器を通してCPUに送られ、ここで制御量が計算される。制御信号はD/A変換器、各種のフィルタを通してサーボドライバーに送られ、モータを駆動して付加質量を稼働させ建物をアクティブに制振する。

3.2 制振装置概要

制振装置はリニアベアリングで支持された付加質量(重量15tf)をボールねじを介して定格出力55kWのACサーボモータにより駆動するアクティブ動吸振器タイプである。装置の大きさは、縦・横・高さがそれぞれ約5m、2m、1.5mとコンパクトになっており、建物屋上の短辺方向に2基設置した。建物への設置に関しては屋上に鉄筋コンクリートのピットを制作し、その中に除振ラバーを介して据え付けた。図-2に制振装置の概要図を示す。

3.3 制御系概要

本制振システムの特徴は、アクティブ動吸振器タイプの制振装置で複数の振動モードを同時に制御する点にある。しかし、高層建物のように固有周期が長く、また多くのモードを有するものを対象とする場合、以下に示す技術的課題が生じる。

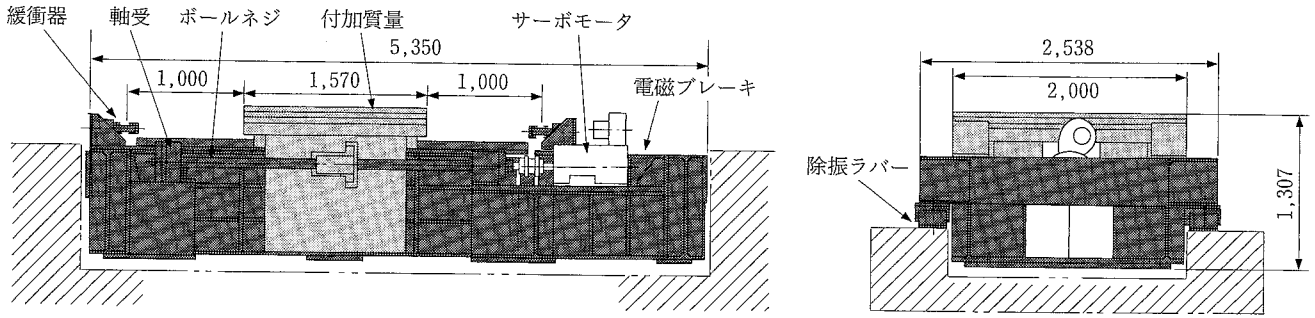


図-2 制振装置概要図

① 実際に制御を行う場合、センサの数、制御量を計算するCPUの能力といった制約により建物の全状態フィードバック制御を実現することは不可能であるため、限定された状態量のセンシング、すなわち、低次元化モデルによる制御や観測点のみの状態量を用いた出力フィードバック制御を行う必要がある。その場合、無視されたモードによるスピルオーバー不安定を生じやすくなる。

② 建物の周期が長いので、建物の状態量を正確に計測するためにはセンサの特性も長周期化する必要がある。センサの特性が長周期化すると、センサからの信号、特に変位信号にドリフト成分がのり、制御信号にもドリフト成分が含まれることになる。そのため、制振装置の付加質量がドリフトし、制振効率の劣化を招く。

本制振システムにおけるこれら技術的課題の解決策を次に示す。

3.3.1 スピルオーバー不安定対策 高次モードスピルオーバー不安定を抑制するために以下の対策を施した。

① 本制振システムの並進の制振対象は1～3次モードである。3次モードまでを積極的に制振しようとする場合、センサの数、モデル化の次数は最低でも3つにする必要があるが、高次モードのスピルオーバー不安定を抑制するために制御対象次数よりもセンサの数、建物のモデル化の次数を多く設定した（センサの数：4、モデル化の次数：5）。

② ローパスフィルタを用いて高周波数領域での制御電圧を下げ、高次モードスピルオーバーに対するロバスト性を高める。この際、ローパスフィルタもモデル化を行い、建物とフィルタのダイナミクスを考慮した拡大システムを構築してフィードバックゲインを計算する³⁾。ローパスフィルタのカットオフ周波数は3次モードと4次モードの間の2.0 Hzに設定した。

③ 5質点モデルを用いて最適制御則によりフィードバックゲインを計算し、最小ノルム法により準最適フィードバックゲインを計算する。フィードバックゲインを計算する際、評価関数を建物の相対速度に設定することにより、さらに高いロバスト性を確保する³⁾。

3.3.2 制振装置付加質量のドリフト対策 付加質量のドリフト問題を解決するために以下の2つの対策を施した。

① 付加質量の変位フィードバックを強めに設定する。ただし、制御帯域（1～3次モード）で装置の特性がフラットになる範囲で変位フィードバックを強くする。

② ハイパスフィルタを用いて低周波数領域での制御電圧を下げ、付加質量の応答を小さくする。ハイパスフィルタのカットオフ周波数の設定は、建物の1次モードにできるだけ近く設定する方がフィルタの効果はより大きくなるが、制御の点からいうとフィルタのカットオフ周波数の近辺では位相変化が大きいため建物の共振周波数に近づけることは好ましくない。そこで、建物の1次共振周波数付近でフィルタの位相変化が比較的なだらかなるようフィルタのカットオフ周波数を0.2 Hzに設定した。

3.3.3 制御系の構成 本システムでは先に述べたローパスフィルタとハイパスフィルタを合わせてバンドパスフィルタとし、フィルタのカットオフ周波数の変更が容易に行えるようデジタルフィルタにした。このバンドパスフィルタを含む制御系の構成を図-3に示す。建物モデルは並進5質点、ねじれ1質点とし、並進とねじれは非連成としている。並進モデルでは4質点の状態量を、ねじれモデルでは1質点の状態量をセンサで検出している。検出された状態量をデジタル情報としてCPUに取り込み、制御量を計算してバンドパスフィルタを通した後、アナログ信号に変換して制振装置に送り、制振装置を駆動して制御力を得ようになっている。この系を拡大システムとして状態方程式化し、最適制御理論および最小ノルム法を用いてフィードバックゲインを計算する。

3.4 可変ゲインシステム

本制振システムには、外力（地震、強風）の大小によらず常に安全且つ効率的な制御が行えるよう可変ゲインシステムが導入されている。可変ゲインシステムとは、制御の強さを表すフィードバックゲインの大きさを外力または建物の応答の大きさによって変化させ、常に制振装置の容量を超えない範囲で最大の制振効果を得るためのシステムである。

本システムにおける可変ゲインシステムは2つの部分に分けられる。1つは、建物の応答、制振装置の応答の大きさから目標フィードバックゲインを算出する部分で

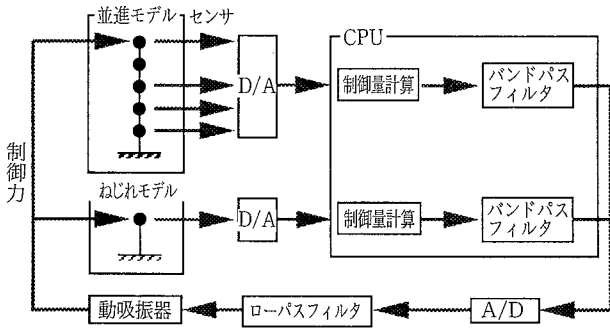


図-3 制御系の構成

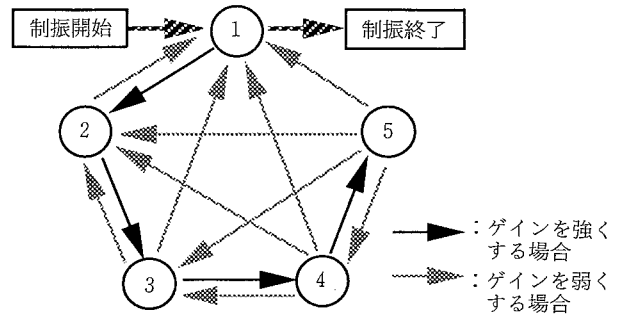


図-4 ゲイン切り替え方法

表-2 建物の固有振動数と減衰（並進）

	1次	2次	3次	4次	5次
固有振動数(Hz)	0.35	1.03	1.83	2.59	3.34
減衰(%)	0.85	1.20	1.48	0.97	0.90

表-3 建物の固有振動数と減衰（ねじれ）

	1次	2次	3次
固有振動数(Hz)	0.43	1.20	2.02
減衰(%)	1.10	1.20	0.96

あり、もう1つは、現在使用しているフィードバックゲインから目標とするフィードバックゲインに切り替える部分である。

目標ゲインの算出は、屋上階速度および制振装置付加質量変位の値によりCPUのサンプリングごとに行われる。また、目標ゲインの算出方法は地震制御時と風制御時とで異なる。目標ゲインは地震・風制御時とも5つの目標ゲイン(ゲインNo.1~No.5)が用意されている。ゲインNo.1が最も弱いフィードバックゲインで、No.5が最も強いフィードバックゲインである。

フィードバックゲインの切り替え方法を図-4に示す。制振開始時は、地震、風とも一番弱いゲイン(ゲインNo.1)を選択し、建物の応答、制振装置の応答を監視しながら徐々にゲインを強くしていく。目標ゲインが現在用いているゲインより大きい場合、すなわち、ゲインを強くする場合は、1段階ずつ上げてゆく。逆に、ゲインを弱くする場合は、直ちに目標ゲインに達するようになっている。制振終了後はゲインを徐々に弱くしてゆき、一番弱いゲインに達した後、システムを停止する。

3.5 加振判定システム

加振判定システムは、万が一アクティブ制振システムに異常が生じ、システムが建物を制振ではなく加振した場合にそれを検知し、システムを停止させる役割がある。本システムにおいては、制振装置が建物にした仕事を計算し、その仕事の値により制振システムが加振状態であるかどうかを判断している。そして、制振装置がある一定時間以上建物を加振している状態が継続した場合、システムを停止する。

4. 制振効果確認実験

4.1 建物モデルの同定

制御系を設計する際に必要な建物の力学モデルを構築するために屋上階に設置された動吸振器を起振機として

用いて共振実験を行った。なお、用いた測点は、制御用のセンサ設置階の他、高さ方向に7点増やした計12点で測定を行った。表-2に並進方向、表-3にねじれ方向の各モードの固有振動数と減衰を示す。また、図-5に加振力で基準化した屋上階での並進方向の変位応答曲線を示す。図中の実線は、実験から得られた建物の5質点低次元化モデルを用いて解析により求めた共振曲線を示している。実験と解析から得られた共振曲線はよく一致しており建物のモデル化の妥当性が示されている。

4.2 制御系の同定

建物の同定実験に続き、デジタルバンドパスフィルタと動吸振器を含めた制御系の同定実験を行った。実験は制御量に対する動吸振器付加質量の相対速度の周波数応答を計測した。結果を図-6に示す。図中点線で示されているのは数学モデルを用いて解析により求めた結果である。図より、モデルと実際の系に若干の狂いが生じているのがわかる。したがって、制御をする際に重要になる位相が一致するようにモデルのパラメータを修正した。修正後の周波数応答を同図に実線で示す。

4.3 制振実験

制振システムが実稼働状態にはいる前に制振効果を確認する実験を行っている。実験方法は、まず、動吸振器を加振機として用い、本建物の固有振動数で定常状態になるまで加振する。その後、動吸振器を停止し、制御に切り換え、建物の自由振動波形を計測することで行っている。図-7に本システムの制御目標である3次モードまでの非制振時の自由振動波形を示す。非常に継続時間の長い波形を示しており、減衰が小さいことがわかる。次に、制振を行った場合の実験結果を図-8に示す。このときの1次モード減衰は約8%である。図よりわかるように、高次モードに対しても大きな減衰が得られており、本制振システムの目標である多モード制御が実現されているのがわかる。さらに、並進1次、ねじれ1次モード

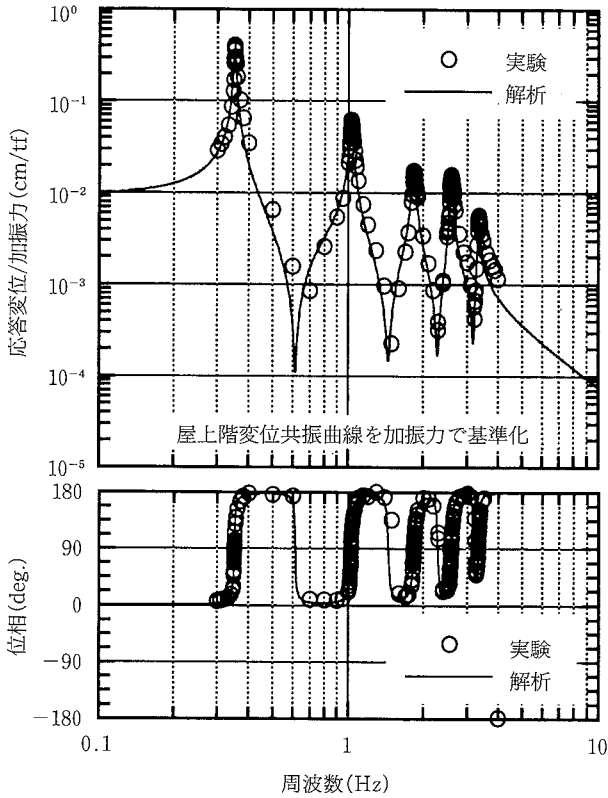


図-5 屋上階での共振曲線

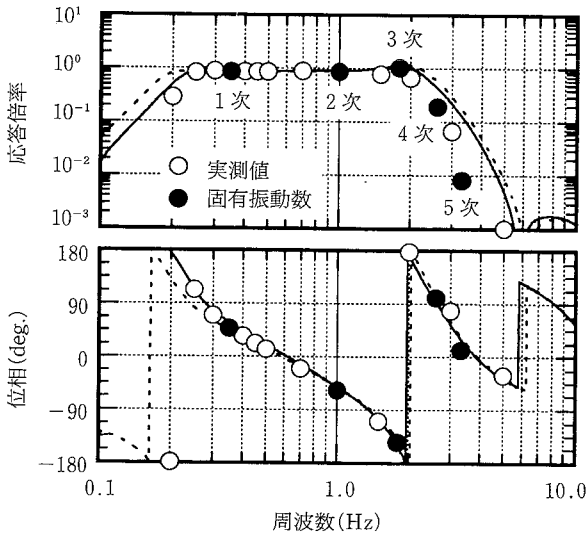


図-6 制御系の動特性

に対して20%以上の減衰を付加した場合の制振波形を図-9に示す。このように非常に強いゲインでもシステムは安定しており、バンドパスフィルタ挿入による準最適制御が高次モードのスピルオーバーに対して有効であることを確認した。

5. 地震応答観測

建物の竣工(1994年8月)以来、強風および地震時の観測を継続しており、多くの観測記録が得られている。ここでは、1995年1月10日茨城県沖で発生した地震(東

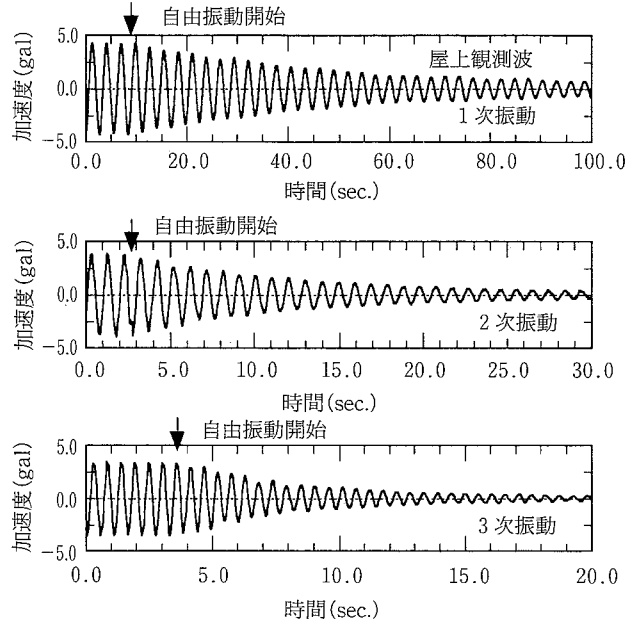


図-7 非制振時の自由振動波形

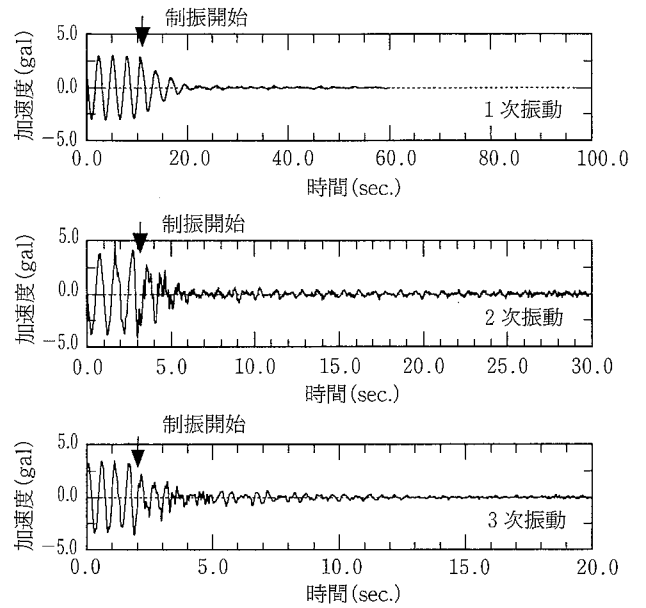


図-8 制振時の自由振動波形

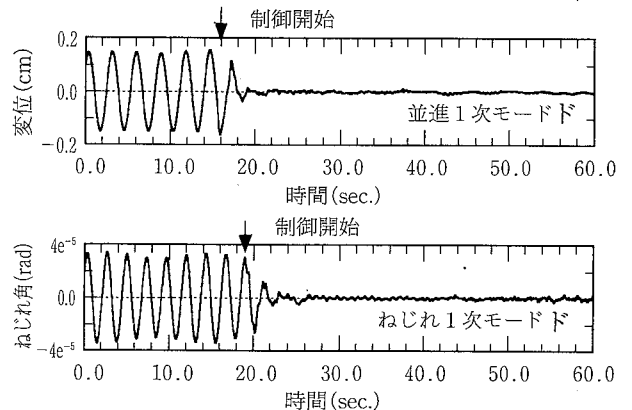


図-9 ハイゲインコントローラーによる制振結果

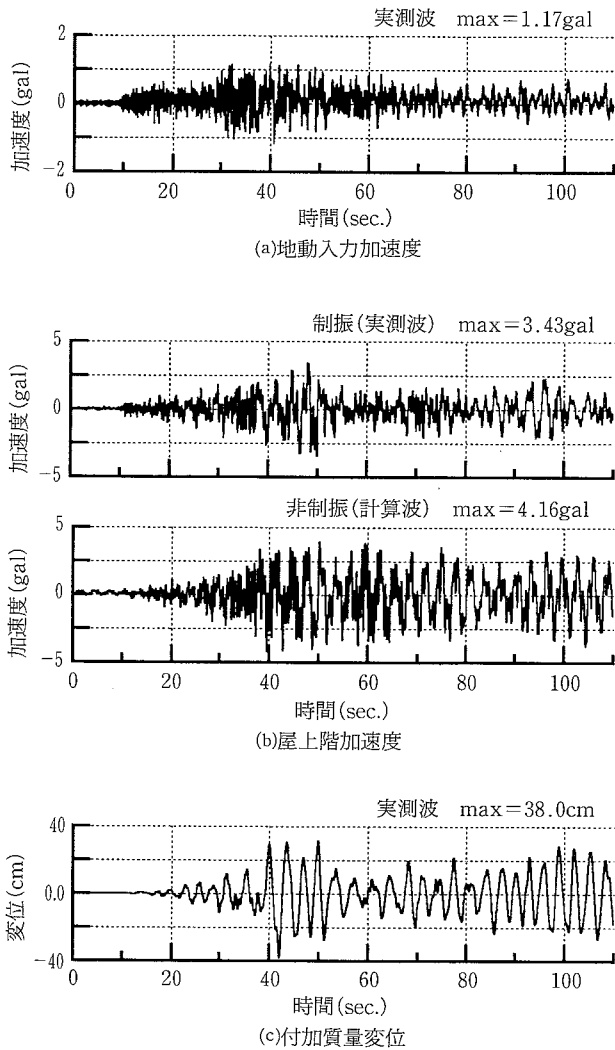


図-10 地震応答観測記録

京震度2)の観測記録を図-10に示す。図中の実測波は観測された記録波であり、計算波は実験で得られた5質点建物モデルを用いて数値解析により得られた波形である。なお、解析の際に、観測された波形をスペクトル解析して建物固有周期を調べ、この固有周期と解析モデルの固有周期が一致するようにモデルの剛性を調整した。図-10(b)に屋上階加速度波形を示す。制振時と非制振時の加速度波形を比較すると、制振時は最大値が約4/5、観測開始から50秒以降の応答が約2/3になっている。

次に、屋上階加速度のフーリエスペクトルを図-11に示す。制振時と非制振時のフーリエスペクトルを比較すると、制振時の1~3次モードのピークが約1/3程度に抑えられており、本制振システムが複数モードに対して制振効果があることを確認した。

最後に、図-12に制振装置が吸収した瞬間仕事量とその積分値を示す。瞬時値を見ると、若干負の値を示しているがおおむね正の値を示しており、また、積分値はほぼ正方向に単調に増加しているため、制振装置は建物を制振するよう作用していたことがわかる。

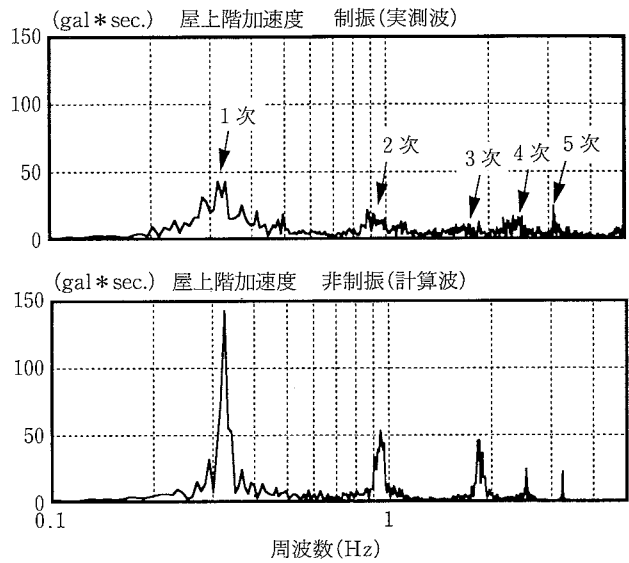


図-11 屋上階加速度のフーリエスペクトル

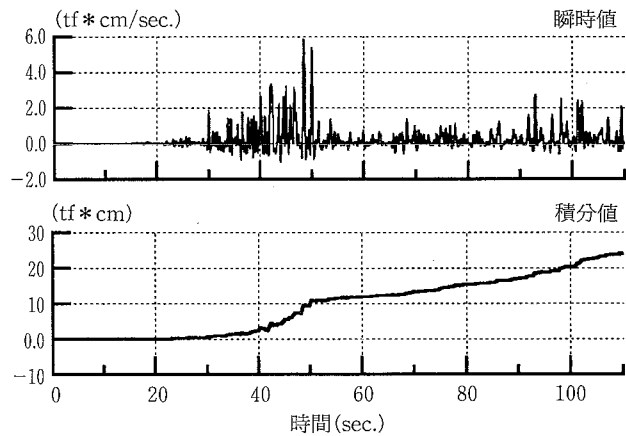


図-12 制振装置が吸収した仕事量

6. まとめ

実建物に設置した制振システムの概要を述べた。また、制振実験および地震応答観測から本システムの複数の振動モードに対する制振効果を確認した。

謝辞

本研究開発はトキコ(株)と共同で進めたものであり、開発者各位に感謝します。また、基礎研究の段階で御指導を頂いた慶應義塾大学元教授下郷先生、吉田教授に感謝します。

参考文献

- 1) 吉田, 他: サーボモータ駆動型動吸振器を用いた高層建物のアクティブ制振, 日本機械学会論文集, Vol. 57, No. 534C, p. 130~135, (1991)
- 2) 鈴木, 他: 大型アクティブ動吸振器による高層建物の振動制御, D&D 講演論文集, Vol. A, p. 365~368, (1992)
- 3) 渡辺, 他: 中高層建物に対する低次元化アクティブ制振の研究, 日本機械学会論文集, Vol. 58, No. 546C, p. 66~73, (1992)