

レール型フル・アクティブ式制振装置による高層ビルの振動制御

Use of a Rail-Guided Fully Active Mass Damper System for Vibration Control of High-Rise Buildings

小池 裕 二 技術開発本部基盤技術研究所構造研究部 主幹 博士（工学）
 今関 正典 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部開発部 課長 技術士（電気電子部門）
 風間 陸 広 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部開発部 主査

高層ビルの新しい制振装置を開発した。本装置はリニアガイド上の可動マスをモータで直接制御するもので、吊り機構やコイルばねなどのパッシブ機構をすべて除いたコンパクトで軽量の装置である。本稿では、本装置の構成および性能を、適用例をとおして紹介する。また、制御性能を高度化させるための制御法を提案し、大地震を想定した陸上試験での検証結果を紹介するとともに、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震での実際の作動結果についても言及する。最後に、新技術への取組みとして、電力回生機能を用いた省エネルギー技術について述べる。

A new mass damper system has been developed for use with high-rise buildings. This compact, lightweight system controls by means of a motor the movement of a mass mounted on its guide rails, and has been realized without any need for the employment of a passive mechanism such as a large suspended structure or coil springs. This paper describes the system's mechanism and performance through case studies on its application. In this paper, the authors propose methods for improving its control performance and examine the results of a functional test conducted at the factory as preparations for major earthquakes. The authors also discuss the dynamic behavior that the mass damper exhibited during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Finally, this report also discusses the potential for incorporating an electric energy regeneration function into the system as a new technology for saving energy.

1. 緒 言

当社は、1987 年からアクティブ式制振装置の開発に取り組んできた。初めて実用化したのは橋梁分野であり、1991 年に橋梁分野としては世界で初めてとなる制振装置が首都高速 12 号線吊橋（レインボーブリッジ）の主塔に搭載されている⁽¹⁾。高層ビルでの最初の適用は、1993 年の東京の光が丘にある J-City タワーである。さらに、1 年後に設置された新宿パークタワー（東京）の制振装置には、110 t の大型可動マスに制御効率や安全性を考慮したさまざまなインテリジェント機能が備えられ、本格的な高層ビル用の制振装置の礎が築かれた⁽²⁾。

一方、世の中の動向を見ると、高層ビルのアクティブ式制振装置は継続的に普及し、その結果、2005 年 11 月時点での総件数は 40 件を超えるようになり⁽³⁾、居住性の向上が求められる新築の高層ビルでは、制振装置は必要不可欠になった。すでに、制振装置が設置されたビルの中には、モニタリング装置を備えたものもあり、稼働時の記録から制振効果や装置の動的挙動が次第に解明されてきた。これに伴い、装置には低コストで、より高性能なものが要求されるようになってきた。また、このような制振装

置は、一般に重量物でありながら、建物の上層部に設置しなければならないことから、性能に加えて、コンパクト化も建物設計および据付け工事側の重要な要求項目となっている。すなわち、① 一階分の軒高さに収納可能な装置高さの実現 ② 平面的設置スペースの削減 ③ 軽量化、である。以上のことを考慮し、当社は、2005 年から新しい制振装置の開発および適用を進めてきた。これは、従来のばね機構と呼ばれる吊り構造やコイルばねを一切使用せずに、リニアガイド上の可動マスをモータのみの力で直接制御する方式（以下、レール型フル・アクティブ式と呼ぶ）である。装置高さを極力低くするとともに、部品点数を大幅に削減することで、コンパクト化と軽量化が可能になる。

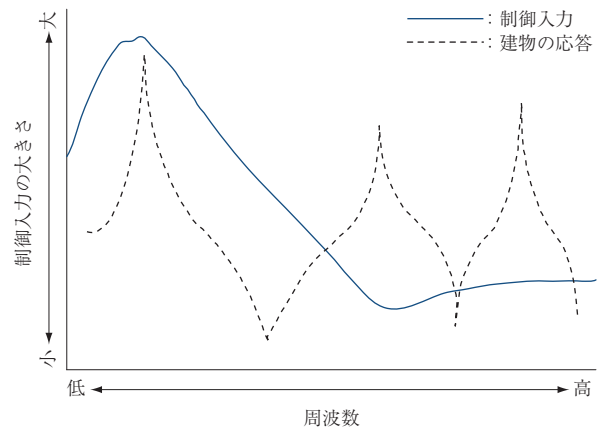
ところで、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、首都圏においても、最大で震度 5 強に達し、高層ビルが大きく揺れたことが報告されている。制振装置は、従来から風揺れに重さが置かれていたため、地震に対しては積極的な対応はなされてこなかった。この地震を契機に、今後は、地震への対応が重要な課題となっていくことが考えられる。当社では、レール型フル・アクティブ式制振装置の開発と併行して、制御法の開発も行ってきた

た。これは、比較的微小な風揺れから、大地震までの幅広い揺れに対して制振装置を効率良く稼働させるためのものである。

本稿では、はじめに、本装置の構成について述べる。次に、本装置の高層ビルへの適用例をとおして、その制振効果や利便性を紹介する。また、制御性能の高度化を図るための制御法を取り上げ、大地震を想定した陸上試験での検証結果および東北地方太平洋沖地震での実際の作動結果から、大地震での稼働に有効であることを示す。最後に、新技術への取組みとして、電力回生機能を用いた省エネルギー技術についても紹介する。

2. レール型フル・アクティブ式制振装置の構成

本装置の機構と外観を第1図に示す。可動マスをリニアガイドで支持して、ボールねじ機構を介して直接モータで制御する。この機構を第1図-(b)に示すように、親亀小亀構造の二段重ねにすれば、二軸機構になる。従来、アクティブ式制振装置では、建物周期への同調や可動マスを中立点で作動させるために、何らかのばね要素で可動マスを支持していたが、本装置には一切のばね要素がない。ばね要素を除いたことで、そのための機構によって制約されていたストロークはより大きく設計することができる。このために、パッシブな復元要素はもたないが、中立点を中心に適切に駆動させることが可能である。これを可能にしているのが、変位制御である。変位制御は、可動マスへの指令を変位で与えて制御する方法である。力で制御する方法は、運動方程式で導入される制御力を直接使うので、設計には見通しが良い。しかし、ストロークに制約がある可動マスの制御に都合が良いのは、直接変位を制御する方法である。第2図に、変位制御に基づく制御器特性の概

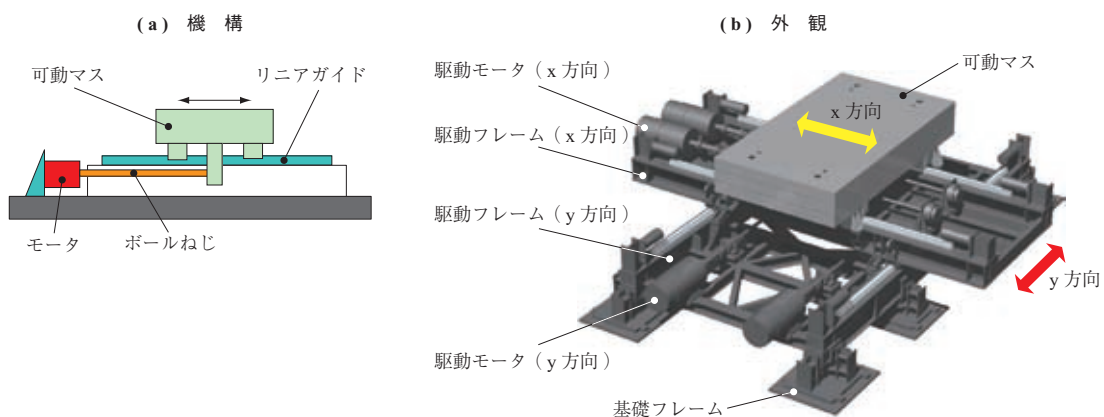


第2図 制御器の概念
Fig. 2 General idea of controller

念を示す。横軸は周波数、縦軸は制御入力の大さを表す。変位制御では、制御入力を小さくすると、可動マスは動かないように制御される。第2図は、一般的な例として、1次モードのみを制振する場合を示しているが、制振に非効率な長周期成分および制振を施さない2次以上の非対象モードに対しては、制御入力を小さくして装置が動かないようにする。

一方、制振の対象モードでは制御入力を大きくして積極的に作動させることで、装置を効率的に制御させている。さらに、変位制御ではストロークの管理が容易なので、揺れの大きさに応じて制御の強さを適宜変化させる振幅制御機能と組み合わせることで、許容ストロークの範囲内で最大限の性能を発揮することができる。以上が本装置の構成であり、以下に主な特長を挙げる。

- (1) 吊り機構やばね機構をもたないシンプルな構造であり、装置高さを住居ビルの平均的な軒高の3.5 m以下に抑えることができる。



第1図 レール型フル・アクティブ式制振装置
Fig. 1 A rail-guided fully active mass damper system

- (2) 軽量の可動マスをロングストロークで駆動させ、変位制御によってストロークエンドまで効率的に制御できる。
- (3) 変位制御と振幅制御機能の採用によって、小さな揺れから大きな揺れまでを効果的に制御でき、地震時の床加速度が数百 Gal までは装置の運転を継続し、長周期地震への対応が期待できる。
- (4) ロバスト制御理論と組み合わせれば、ストロークの効率化および複数の振動モードにおける高減衰化が可能である。

3. 高層ビルへの適用

本方式が初めて採用されたのは、第3図の銀座三井ビルディング（東京）である。本建物は、高さが121 mのホテル兼オフィスであり、地震に対応するために層間ダンパが挿入されている。風でビルが揺れても、通常の建物よりも2倍程度の減衰ができることから、減衰の不足分を補うために本装置が適用され、居住性を確保している。この例では、層間ダンパが不得手とする小振幅時の制振効果をアクティブ式制振装置に負担させている。装置には、短辺方向の揺れを低減する可動マス6 t、ストローク ± 0.6 mの一軸方式2台が採用された。

続いて適用されたのが、2006年に竣工した東京ミッドタウンタワーである（第4図）。ここには、一方向の可動マス質量がそれぞれ40、50 t、ストロークが ± 1.5 mの大型二軸方式⁽⁴⁾が適用されている。同建物は、東京地区で最も高い248 mの建物であるが、ロングストローク



第4図 東京ミッドタウンタワー
Fig. 4 Tokyo Midtown Tower

機構を採用することで、可動マスの質量を数十 t にまで抑え、装置の軽量化を図っている。

同様の二軸方式は、海外のビルにも適用されている（第5図）。第5図-(a)のビルでは、竣工時は制振装置を備えていなかったが、その後、強風時の居住性向上が必要になり、2007年に第5図-(b)の装置2台が屋上に設置された。各方向の可動マス質量は、それぞれ10、30 tであり、ストロークは二方向とも0.6 mである。このような既設ビルへの適用は、今後、居住性の観点から国内および海外においても期待されるが、レール型フル・アクティブ式制振装置であれば、軽量で高性能を発揮できるので、揚重などの設置コストを低減できる。

第6図に、2009年に竣工したラ・トゥール青葉台（東

(a) 銀座三井ビルディング



(b) 制振装置

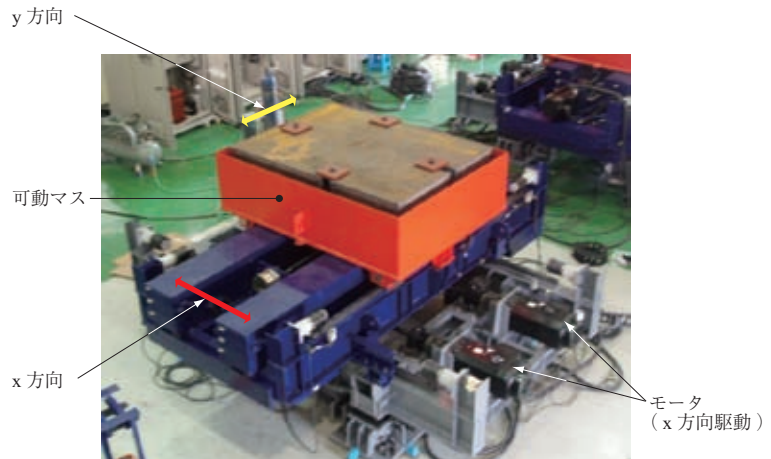


第3図 銀座三井ビルディングと制振装置の外観
Fig. 3 Ginza Mitsui Building and mass damper

(a) ビルの外観



(b) 制振装置

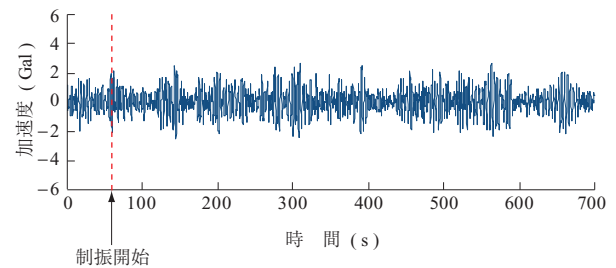


第 5 図 海外で適用されたビルと制振装置の外観
 Fig. 5 Mass damper applied to a building in a foreign country

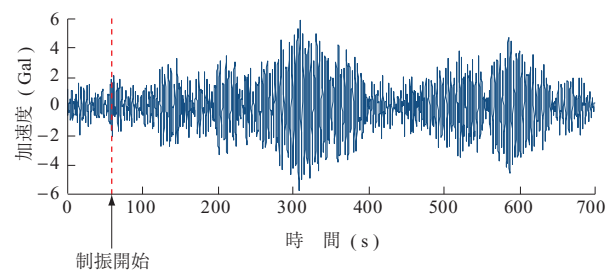


第 6 図 ラ・トゥール青葉台⁽⁵⁾
 Fig. 6 La Tour Aobadai

(a) 制振あり (実測値)



(b) 制振なし (計算値)

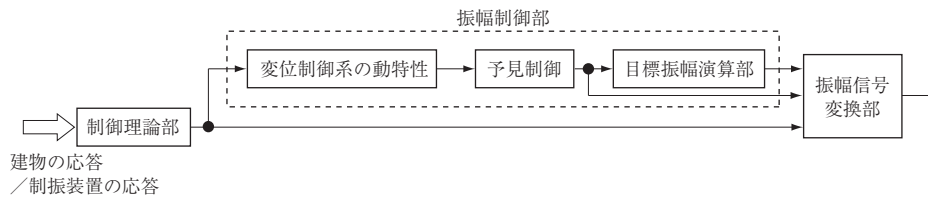


第 7 図 2009 年の台風 19 号での制振効果
 Fig. 7 Control performance during Typhoon No. 19 in 2009

京)の外観を示す。この建物は、高さが 144 m のオフィス兼共同住宅で、平面形状がへん平であることから、短辺方向の揺れを低減するために一軸方式の装置 2 台が適用された。可動マスの質量は 50 t、ストロークは ± 0.6 m である。第 7 図に、2009 年 10 月に東京を襲った台風 19 号における稼働記録を解析し、制振装置による効果を示す。第 7 図 - (a) は制振時に実測された建物端部の加速度を示す。一方、第 7 図 - (b) は非制振時の建物加速度であり、制振時の建物加速度 (第 7 図 - (a))、可動マス変位および建物モデルを用いて求めた計算値である。制振装置によって、1/3 程度まで低減されていることが分かる。

4. 制御性能の高度化

ビルが風で揺れるときは、より高い制振効果を発揮させ、地震時は、できるだけ大きい加速度までアクティブ作動させることを目的とする制御法を提案し、制御性能に対する一層高い要求に対応する。そのために、風で揺れるときの制御の設定を通常よりも高くしておき、大地震時に、より速やかに可動マスの振幅を抑制できる方法を開発することで、幅広い入力にも対応できるようにする⁽⁶⁾。第 8 図に、制御系の概念を示す。図の左端の制御理論部は、建



第 8 図 制御系の概念
Fig. 8 General idea of control system

物および制振装置の応答から制御理論に基づいて制御入力を生成するブロックであり、制御器に基づき変位指令が計算される。振幅制御部は、大入力時に端部への衝突を避けるために振幅を制御するブロックであり、許容ストロークの範囲内で作動できるようにする。このブロックでは、急激な入力の変化にも速やかに対応できるように、位相進み補償を導入し、制御入力を先行して推定させる。ここでは、この方法を予見制御と呼ぶ。予見制御は、制御理論部で得られた制御入力に変位制御系の動特性をとおした出力に対して実施される。予見制御の出力は、目標振幅の演算部へ入力され、適切な振幅の大きさが決定される。本手法に基づく制御性能の一例を第 9 図に示す。建物の床レベルで 200 Gal 相当の大地震を想定し、装置を作動させた

場合の動的挙動を、地上での模擬試験によって確認した結果である⁽⁷⁾。第 9 図 - (b) で、赤い破線は可動マス変位における許容ストロークの最大値であり、± 60 cm としている。実測結果は計算結果と良く一致し、本手法の妥当性を確認した。

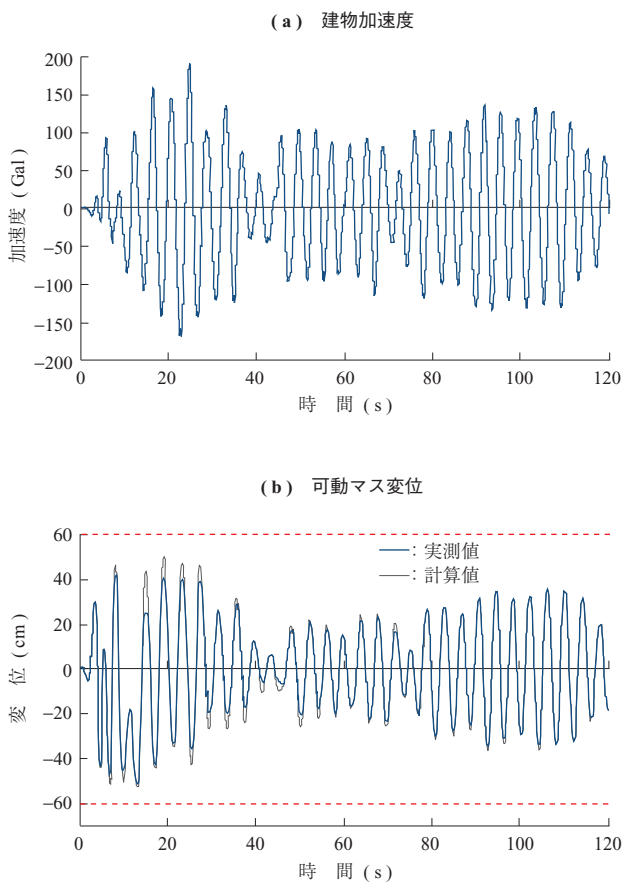
本手法の有効性は、東京地区の高層ビルにおいて、東北地方太平洋沖地震によって実証された。備え付けのモニタリング装置で記録された稼働データによると、装置設置階での加速度は、最大で約 180 Gal まで達したが、制御手法どおりに制振装置は作動を継続した。このときの制振装置の最大変位は、許容ストロークの約 80% であり、ストロークを十分に活用していることが確認された。また、同データと建物モデルによる解析の結果、地震の主要動が過ぎ去り、建物が自由振動に入った時点より徐々に制振効果が発揮されるようになり、揺れを RMS 値でほぼ半減していることも確認した。

5. 省エネルギー化

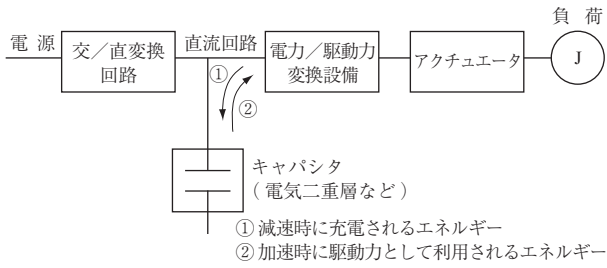
アクティブ式制振装置は、動力を用いるので、言うまでもなくエネルギー消費を伴う。したがって、制振装置においても、地球環境への負荷低減を配慮した省エネルギー化の実現は、重要な技術課題である⁽⁸⁾。制振装置の使用電力は、可動マスの加減速に同期して力行^{りきこう}と回生が繰り返される。可動マスを加速する力行電力は、電源側から供給される。逆に、可動マスを減速する回生電力は、電動機が発電機となり、余剰電力として抵抗器に流れ、熱として廃棄されている。

この廃棄されていた回生電力をインバータの直流中間回路部に挿入された蓄電デバイスに一時的に蓄電し、力行時に再利用するとともに、一次側電力を抑制して、電力設備の軽減が図れるシステムを提案している。

第 10 図に回生電力再利用の基本概念を示す。インバータの直流中間回路部にキャパシタンスが非常に大きい電気二重層などのキャパシタ（コンデンサ）を設置し、回生時においてキャパシタに電力を蓄えるとともに、力行時



第 9 図 地震時における可動マスの動的挙動
Fig. 9 Dynamic behavior of moving mass at the time of earthquake



第 10 図 回生電力再利用の基本概念

Fig. 10 General idea of electric power regeneration for reuse

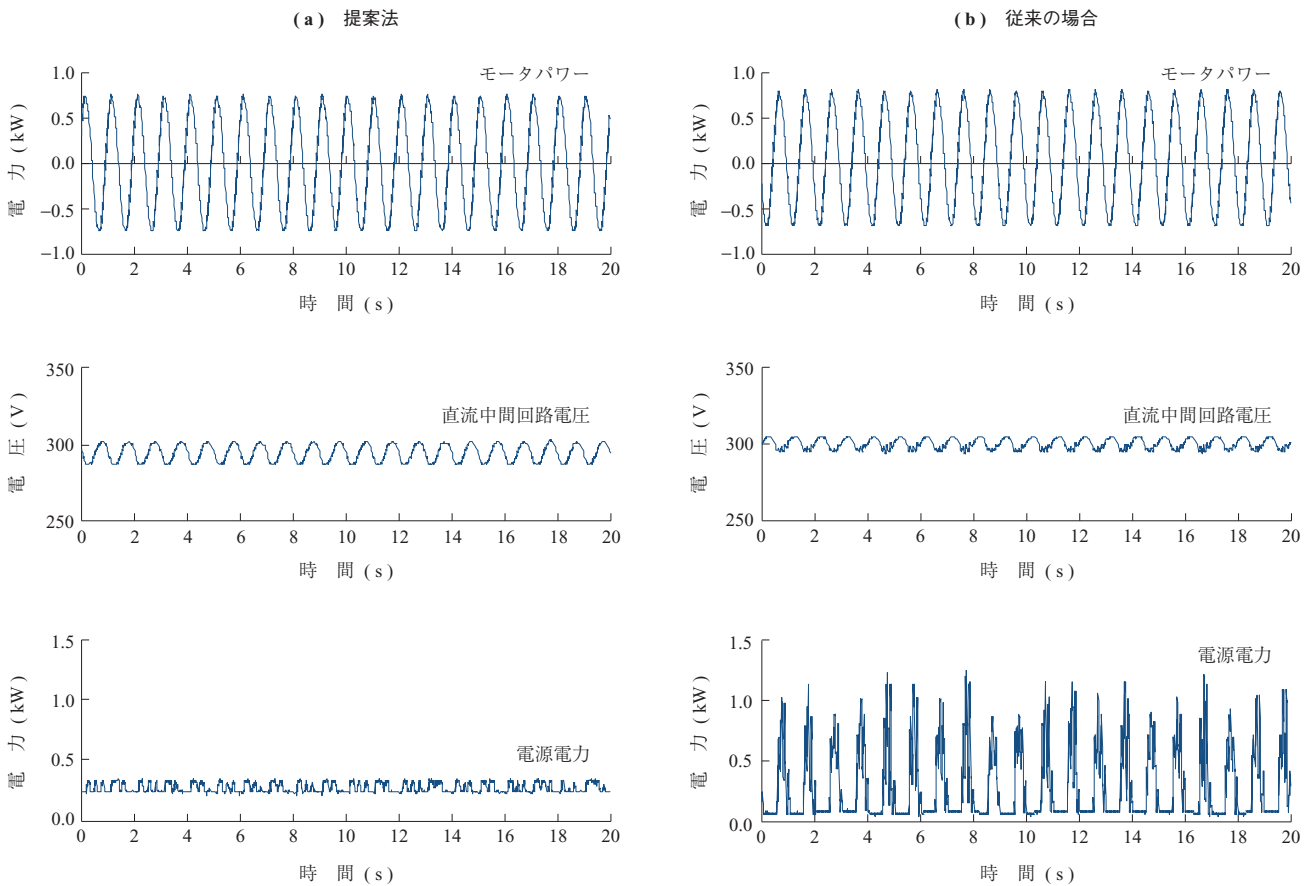
に、このキャパシタから電力を供給できるようにする。このシステムを用いることで、制振装置に必要な電力を従来の 1/3 以下に低減し、一次側の電源設備を軽減できる。

第 11 図は、制振装置を模擬する簡単な負荷駆動装置によって、正転および逆転時における一次側の電力状況を試験で確認したものである。0.5 Hz、 $\pm 2\,400$ rpm で正弦波駆動して、本手法を適用させた場合とさせない場合の一次側電力を比較したものである。第 11 図 - (a) の状態は本手法を適用した場合、- (b) は従来の場合である。図中の上段のモータパワーは、モータの回転数とトルクによって

算出された値であり、第 11 図 - (a) および - (b) いずれも、約 1 kW である。これに対し、下段の一次側電力のピーク値は、第 11 図 - (a) では一次側電力の変動分がほぼ消滅し、- (b) の 1/3 程度に小さくなっていることが分かる。

6. 結 言

高層ビルの制振装置として、レール型フル・アクティブ式制振装置の適用例を取り上げ、特長や利便性について述べるとともに、アクティブ式で課題となるエネルギー消費を改善するため、回生電力を用いた省エネルギー方式についても述べた。また、東北地方太平洋沖地震に関連して、制御性能の高度化について紹介した。風揺れ対応に重きが置かれてきた、これまでの制振装置の概念に対して、大地震においても装置能力の範囲内で積極的に稼働させることを提案し、それを実現させるための制御法を紹介した。その有効性は、陸上試験での検証後、東北地方太平洋沖地震において実証された。しかし、近い将来には、東北地方太平洋沖地震を超える巨大地震の襲来が予想されており、と



第 11 図 一次側電力の実測結果による比較

Fig. 11 Comparison of measured primary side electric power

りわけ、長周期地震への対応は急務である。最初の適用から 20 年が経過し、高層ビルへの制振装置の設置が必要不可欠となった現在、制振装置が高層ビルの安全・安心へ果たす役割はますます大きく、本稿が多少なりとも参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 上條建夫, 能勢 卓, 川上剛司: 首都高速道路 12 号線吊橋主塔の振動性状と制振装置の効果 石川島播磨技報 第 33 卷 第 2 号 1993 年 3 月 pp. 86 - 91
- (2) 谷田宏次, 小池裕二, 牟田口勝生, 村田 保, 今関正典: 超高層ビル用 V 字型ハイブリッド式制振装置の開発 石川島播磨技報 第 35 卷 第 6 号 1995 年 11 月 pp. 388 - 394
- (3) 社団法人日本建築学会: アクティブ・セミアクティブ振動制御技術の現状 丸善株式会社 2006 年 6 月 p. 26
- (4) 常木康弘, 鳥井信吾, 末岡利之, 宇田川貴章, 今関正典, 白木博文: 東京ミッドタウンプロジェクトタワー棟 (A 棟) の構造設計 建築技術 No. 2 2007 年 8 月 pp. 172 - 177
- (5) 東京都・超高層ビルデータベース < <http://www.eonet.ne.jp/~building-pc/tokyo/to.htm> > (参照 2010-06-01)
- (6) 小池裕二: 各社技術説明 株式会社 IHI 日本振動技術協会 振動技術 創立 10 周年記念号 No. 20 2009 年 12 月 pp. 14 - 15
- (7) 小池裕二, 今関正典, 風間睦広: 大地震に対する AMD の制御法と作動試験 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集 I 2009 年 9 月 pp. 819 - 820
- (8) 須田義大, 中代重幸, 中野公彦: 回生された振動エネルギーを利用するアクティブ制御に関する研究 日本機械学会論文集 (C 編) Vol. 63 No. 613 1997 年 9 月 pp. 3 038 - 3 044