

フル・アクティブ式制振装置による高層ビルの地震対応

Using Fully Active Mass Dampers in High-Rise Buildings to Withstand Earthquakes

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)
早野 哲 央 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部エンジニアリング部 次長 技術士(建設部門)
今関 正 典 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部エンジニアリング部 課長 技術士(電気部門)
風間 陸 広 株式会社 IHI インフラシステム 技術本部エンジニアリング部 主査

高層ビルにおける地震時の長周期揺れが課題になっている。当社では、風揺れ対応が主体のアクティブ式制振装置を地震にも積極的に活用させることを検討してきた。本稿では、フル・アクティブ式制振装置を用いた地震対応について、取組み状況を紹介する。はじめに、フル・アクティブ方式の概念と機構について簡単に紹介した後、同方式に変位制御を組み合わせた駆動法の利点について、地震対応の観点から説明する。つぎに、地震対応のための制御法を陸上での装置単体による試験結果とともに説明した後、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で得られた実機の稼働結果を紹介する。

The attenuation of oscillations over a long period of time in high-rise buildings during earthquakes has become a subject requiring attention. IHI has studied the application of active mass dampers, which are mainly used for wind-induced vibrations, for seismic response control. This paper introduces mechanisms allowing structures to withstand earthquakes through the use of fully active mass dampers. First, the concept and mechanism of fully active mass dampers are explained in simple terms. Then, the merits of a control method that operates in combination with the driving method using fully active mass dampers with displacement control, are explained from the point of view of seismic response control. Next, after explaining the control method used for seismic response control, together with a presentation of the results of a single unit test conducted on the ground, data from an actual system that monitored the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake is introduced and its performance is evaluated.

1. 緒 言

高層ビルは、固有周期が長く、減衰が小さい構造物のため、揺れが長時間にわたって継続すると、居住者には恐怖感や船酔い現象を引き起こす。最近では、長周期地震動に関連し、高層ビルの地震時における長周期揺れが大きな課題となっている。多くの高層ビルでは、居住性を向上させるために、竣工時から制振装置が設置されている。こうした制振装置は、建物の上部に左右方向に移動できる錘おもり(以下、可動マスと呼ぶ)を設置し、センサで検出された建物の揺れに基づいて駆動させるアクティブ式と呼ばれる方式である。

しかし、これらの装置は、もともと、風揺れを対象としており、地震時には可動マスの変位が許容ストロークを超えるため、比較的小さな揺れで装置を停止させるように設計されているものが大半である。実際に、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、国内のアクティブ式制振装置の大半は、停止したといわれている。今後は、より大きな地震が襲来することが予想されており、

内閣府では、長周期地震に関する検討が進められている。地震時の制振対策では、建物の各層間にオイルダンパを挿入する方法が適用されている。

しかし、長周期に加え、地震そのものの継続時間がより長くなると、オイルダンパは熱によって効果が劣化するのではないかとの懸念も指摘されるようになった。また、弾塑性ダンパについては、建物が倒壊に及ぶ可能性がある揺れを対象としたもので、居住性を対象とするレベルでは、性能が得られる保証はない。そのような状況下、アクティブ式制振装置への期待が、急速に、高まってきている。風だけでなく、地震時にも有効活用しようというのである。地震においても、できるだけ、高い加速度レベルまで装置の稼働を継続し、わずかでも効果を得られれば、居住者の安全・安心の寄与にもつながる。本稿では、このような観点から、アクティブ式制振装置による地震対応について、当社における最近の取組みを紹介する。

本稿で扱うアクティブ式制振装置は、フル・アクティブ式制振装置に変位制御を組み合わせた方式⁽¹⁾である。はじめに、フル・アクティブ方式の概念と機構について簡単

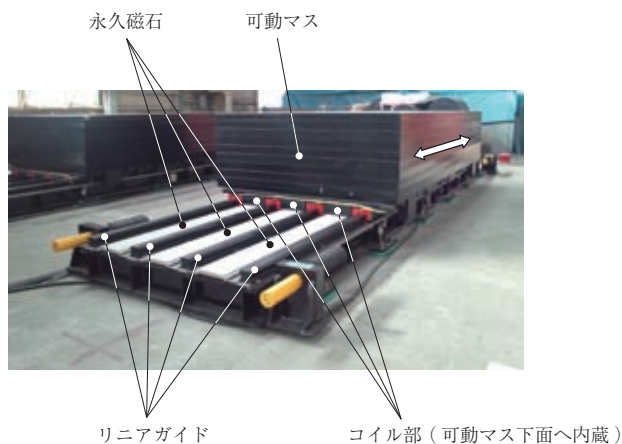
で紹介した後、同方式に変位制御を組み合わせた駆動法の利点について、地震対応の観点から説明する。つぎに、地震対応のための制御法を陸上での試験結果とともに説明した後、東北地方太平洋沖地震で得られた実機の稼働結果を紹介する。最後に、今後の展望として、より一歩踏み込んだ観点から、アクティブ式制振装置の地震対応を考える。

2. フル・アクティブ式制振装置による振動制御法

本稿で扱うフル・アクティブ方式について説明する。第1図は、本方式の機構と2軸機構の外観を示す。可動マスは、リニアガイド上に置かれ、ボールねじ機構を介してモータで直接に制御される。2軸機構の場合は、第1図-(b)に示すように、この機構を親亀小亀構造の二段重ねにすればよい。このように、パッシブ式制振装置に用いられるばね要素や減衰要素をもたず、アクチュエータのみで制御するので、フル・アクティブ方式と呼ばれている。

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の中立位置保持のために、何かしらのばね要素で可動マスが支持されていたが、本装置はいつさいのばね要素をもたない。したがって、長周期への対応には、大掛かりな吊り機構を必要とせず、コンパクトな機構にして、実現が容易である。

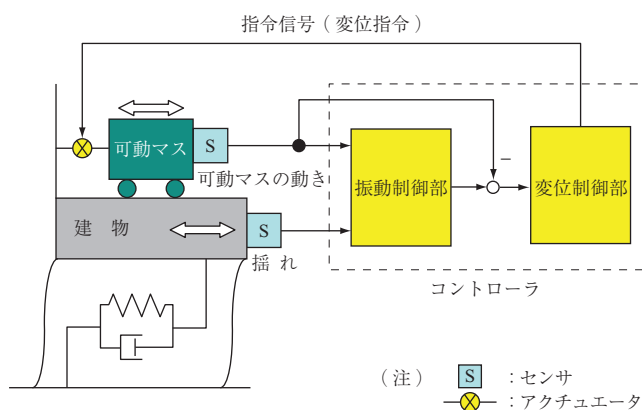
第2図に、ほかの構成例として、リニアモータ駆動型制振装置の外観を示す⁽²⁾。可動マスを駆動させるためのリニアモータは、設置フレーム上に敷設した永久磁石（固定子）と可動マスに装着されたコイル部（可動子）によって構成される。第1図に示す回転型モータの代わりに、リニアモータを用いることで、ボールねじ機構が不要になり、さらに、コンパクトにできるほか、設計速度の



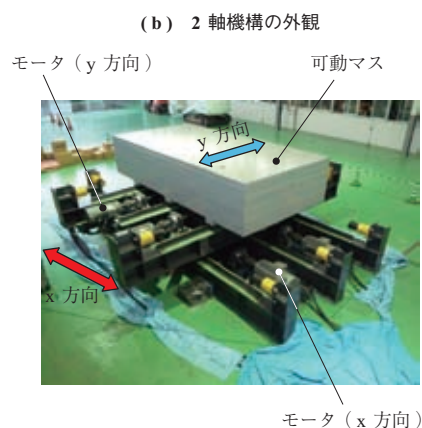
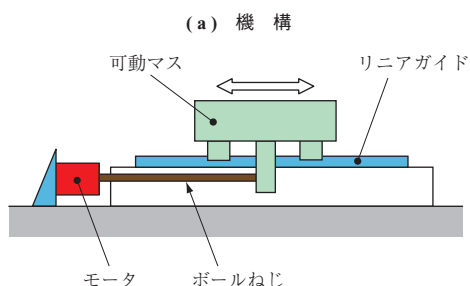
第2図 リニアモータ駆動型制振装置の外観
Fig. 2 Exterior view of a linear motor mass damper

制約条件になっていたボールねじの除去によって、より大きな速度まで対応できるので、ストロークの増長が可能になる。

これらの装置の駆動には、変位制御が用いられている。変位制御は、可動マスの指令を変位で与えて制御する方法



第3図 変位制御を用いた制振装置における制御系の構成
Fig. 3 Control system of a mass damper that uses displacement control



第1図 フル・アクティブ式制振装置の機構と2軸機構の外観
Fig. 1 Mechanism of a fully active mass damper and exterior view of two-axis mechanism

である。第3図に、変位制御を用いた制振装置における制御系の構成を示す。変位制御は、実変位のフィードバックによるサーボ系として構成される。変位制御部では、振動制御部の制御則によって得られた変位指令に対して、実変位との突き合わせを行い、変位指令に追従させるように可動マスを駆動させる。

このような制御系に対して、地震時を想定した場合の制御特性を説明する。そのため、変位指令 u に対して、(1) 式で与えられる出力 U を実際の駆動に用いる指令とすることを考える。

$$U = Ku \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K は制御の強さであって、最大で 1.0 までとることができる正の変値であるとする。変位制御では、制御の強さ K を小さくすると、可動マスの変位指令は 0 に近づくから、実変位の応答は小さくなって、建物に固定されるようになる。

この事実を踏まえ、制御の強さを 1.0, 0.5 および 0.2 の三種類に設定したときの可動マス変位と建物変位の周波数応答の一例を第4図に示す。図の横軸は加振振動数比、縦軸は振幅倍率を表す。制御の強さに対して、それぞれ、可動マス変位の大きさが変わり、それに応じて、制振効果が変わることが分かる。そこで、 K をうまく調節すれば、可動マス変位を任意に制御できるので、地震の制御には、都合がよい。

地震では、許容ストロークの範囲内で制御させることが不可欠である。変位制御を用いれば、可動マス変位そのものが直接に制御されるので、許容ストロークに大きなマ

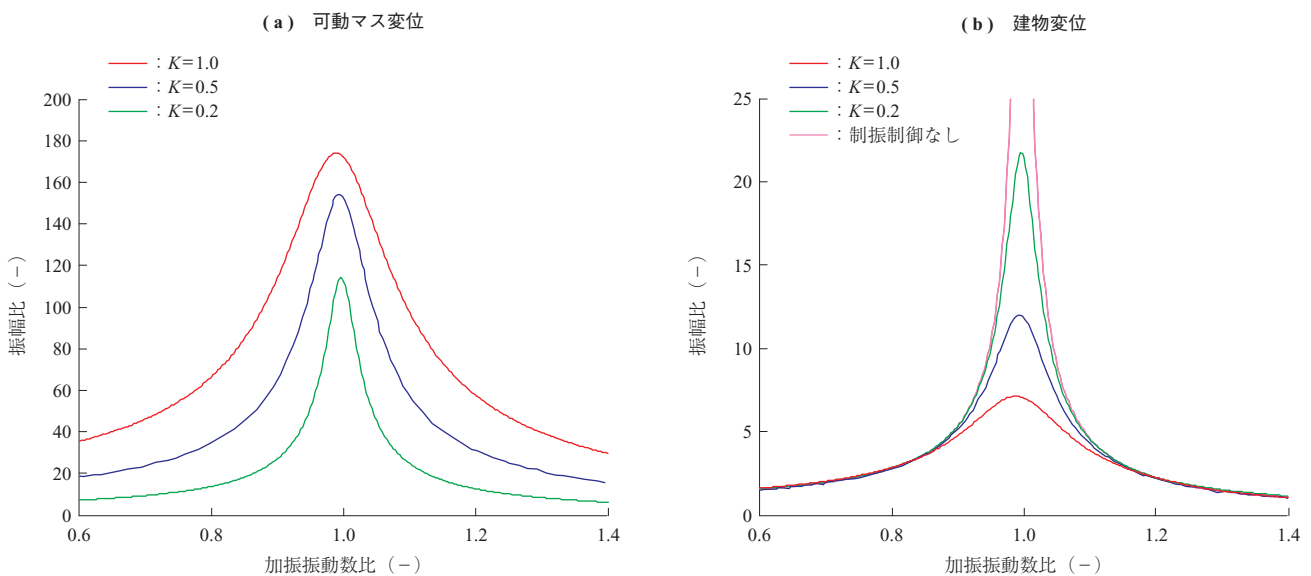
ージンを設ける必要もなく、十分に使って、効率良く制御することができる。しかも、制御に使われるパラメタは一つで済むので、極めて単純である。

3. 地震応答への適用

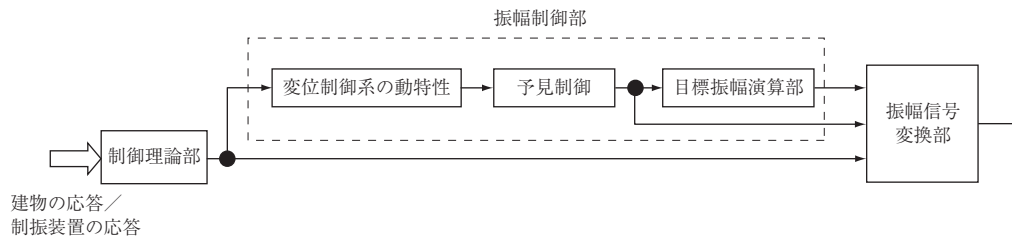
風揺れ用に設置された装置を地震にも積極的に活用するため、日常の風揺れで生じる比較的小さな加速度レベルから地震時のできるだけ大きい加速度までアクティブ作動させるための制御法を提案してきた⁽³⁾。同制御法では、大地震に対しては、風揺れに設定された制御状態から速やかに可動マスの振幅を抑制できる方法を導入しており、これによって幅広い入力にも対応できるようにしている。

第5図に、その概念を示す。図の左端の制御理論部では、建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生成される。振幅制御部は、大地震や暴風時において、可動マスの端部への衝突を回避す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、位相進み機能を導入し、制御入力を先行して推定させるようにしている。ここでは、この方法を予見制御と呼んでいる。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。

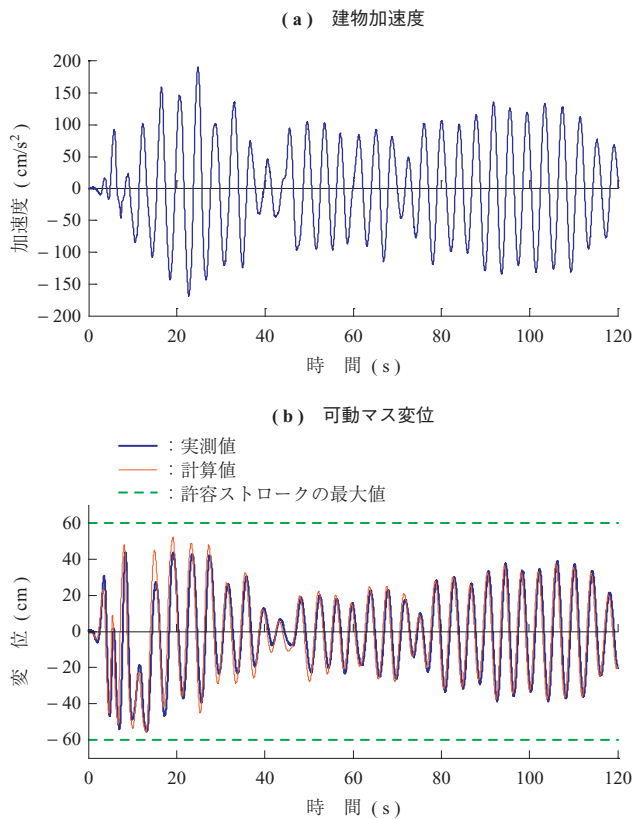
第6図に、前述の制御法を検証するため、地上で実施した模擬試験による地震時における可動マスの動的挙動結果を示す。大地震を想定し、建物の制振装置設置階における加速度レベルで 200 cm/s^2 相当の地震に対して、装置を作動させた場合の動的挙動を時刻歴応答波形で示す。実



第4図 制御の強さと周波数応答の関係
Fig. 4 Relation between control intensity and frequency response



第 5 図 制御系の概念
Fig. 5 General concept of the control system

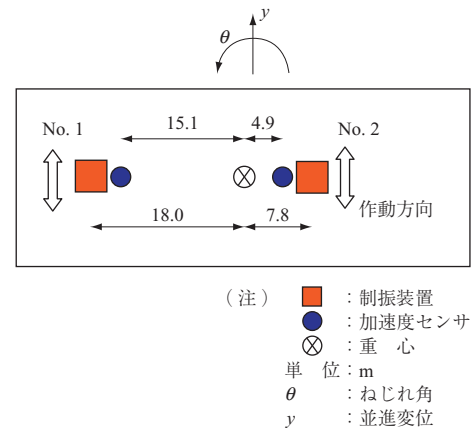


第 6 図 地震時における可動マスの動的挙動
Fig. 6 Dynamic behavior of a moving mass during an earthquake

測結果は、計算結果と良く一致し、制御アルゴリズムどおりに作動していることが確認された。本結果の動画は、ホームページ⁽⁴⁾に公開されているので、参照されたい。

4. 東北地方太平洋沖地震における稼働結果

本制御法を実装した装置は、東北地方太平洋沖地震で稼働したことが確認された。ここでは、東京地区の高層ビルを紹介する。東京地区における震度は、震度 5 弱から 5 強であった。同ビルは、144 m のオフィス兼、共同住宅であり、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、屋上階に一軸方式の装置二台が適用されている。可動マスの質量は 50 t、ストロークは ±60 cm である。



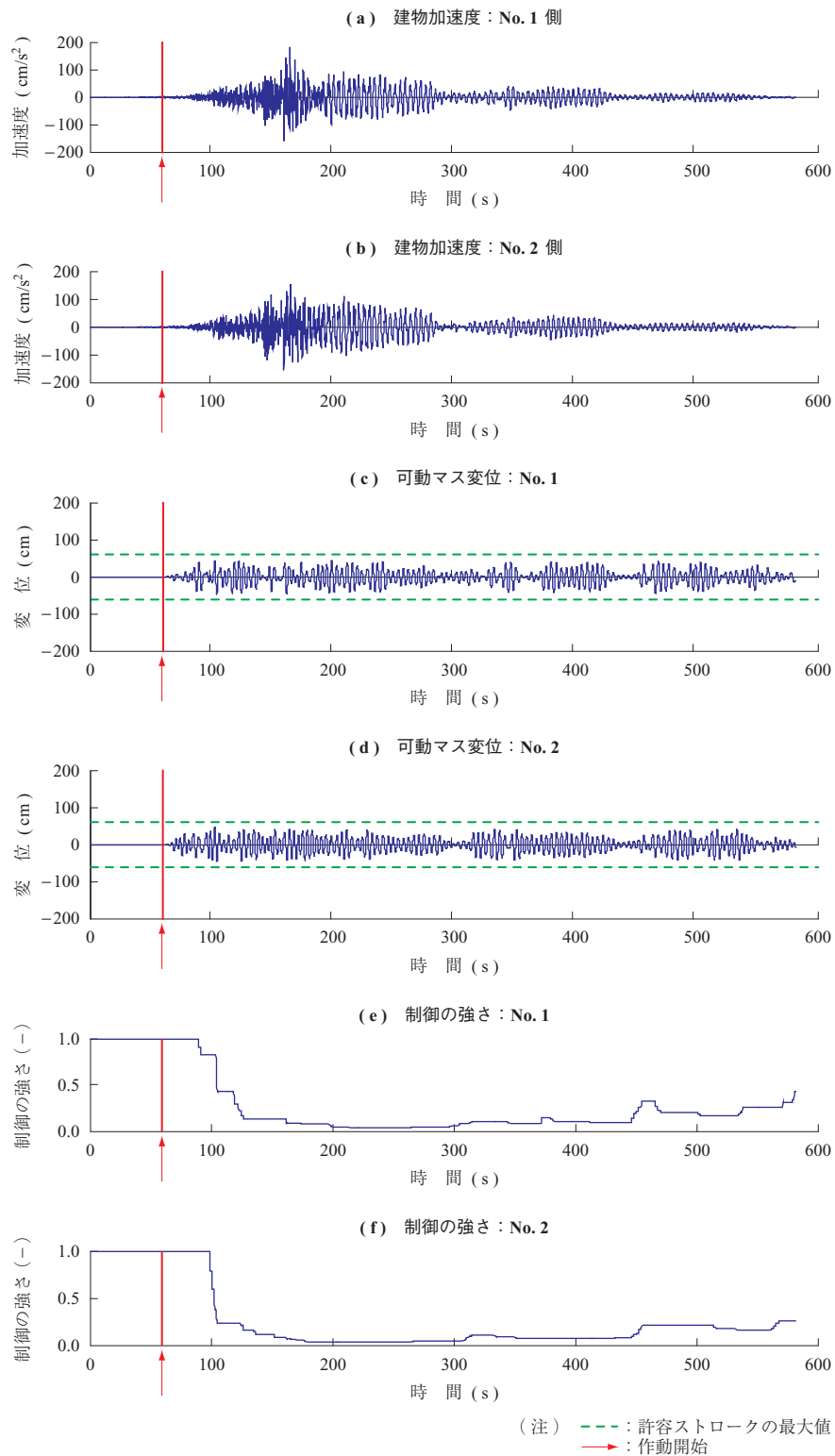
第 7 図 制振装置設置階における装置と加速度センサの配置
Fig. 7 Arrangement of mass damper and accelerometer on mass damper installation level

第 7 図に、制振装置設置階における装置と加速度センサを示す。並進変位 y の正方向に向かって、左側を No. 1、右側を No. 2 と呼ぶ。装置の設置位置には、制御のための加速度センサが配置されている。本装置は、設置階での建物加速度が 200 cm/s^2 までは、アクティブ作動を継続するように制御される。

また、同装置の制御器には、竣工時からモニタリング機能を備えており、稼働時の建物加速度、装置の動的挙動および制御状態がデータとして継続的に記録されるようになっている。

第 8 図に、同機能で得られた観測結果を時刻歴応答波形で示す。第 8 図 - (a) に建物加速度：No. 1 側、- (b) に建物加速度：No. 2 側、- (c) に可動マス変位：No. 1、- (d) に可動マス変位：No. 2、- (e) に制御の強さ：No. 1、- (f) に制御の強さ：No. 2、を示す。建物加速度および可動マス変位の最大値を、第 1 表に示す。

建物加速度の最大値は、稼働限界加速度の 200 cm/s^2 に達しなかったため、装置は、地震発生とともに作動を開始し、そのまま稼働を継続している。その後、100 秒付近からは、振幅制御機能によって制御の強さが速やかに降



第 8 図 東北地方太平洋沖地震において観測された制振時の時刻歴応答波形

Fig. 8 Controlled time-history responses monitored during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

第 1 表 建物加速度および可動マス変位の最大応答値

Table 1 Maximum values for building acceleration and the displacement of a moving mass

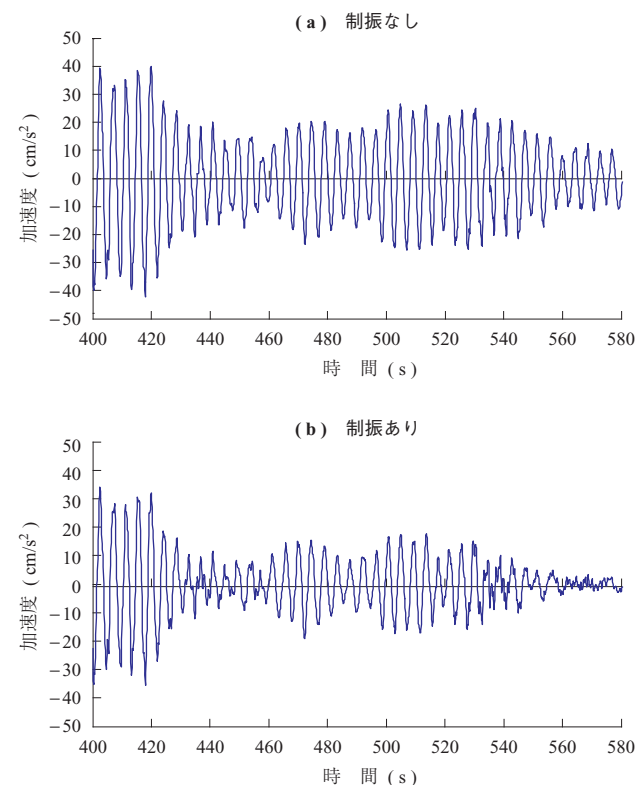
建物加速度 (cm/s^2)	No.1 側	183
	No.2 側	155
可動マス変位 (cm)	No.1	47.8
	No.2	47.7

下し、許容ストローク内を維持しながら制振作動を継続している。各装置における制御の強さは、No. 1 で 0.042、No. 2 で 0.037 まで降下している。同機能によって、可動マスは、端部に衝突することなく、最大で、許容ストロークの約 80% に抑制しながら作動しており、ストロークが

十分に活用されていることが分かる。

可動マスの運動から制御力を算出し、制振装置による建物加速度の低減量を求めることで、非制振時の加速度応答を求める。これと実測された制振時の応答とを比較することで、制振効果を確認する。ここで、**第1表**の結果のように、建物加速度は、端部に近い No. 1 側で大きくなっていることから、建物の振動に弱いねじれを伴っている。そのため、計算には、並進とねじれを考慮した力学モデルを用いる。

第9図に、建物加速度の時刻歴応答波形を時間領域で拡大して示し、No. 1 側での応答を制振有無で比較示す。400 秒を過ぎた時点での建物加速度は、非制振時において約 40 cm/s^2 の振動が残留しているが、制振時は、それよりもやや小さくなっており、徐々に制振効果が発揮されている。570 秒以降を見ると、非制振時は、まだ約 10 cm/s^2 程度の振動が残留しているのに対して、制振時は振動がほぼ消滅している。500 秒以降で求めた建物加速度の RMS (Root Mean Square) 値は、制振なしの場合が約 13 cm/s^2 であるのに対して、制振時は約 7 cm/s^2 であり、 $1/2$ 程度に低減されていることが確認された。



第9図 建物加速度の時刻歴応答波形による制振有無の比較
Fig. 9 Comparison of time-history responses for building acceleration with and without control

5. 今後への展望

風揺れ用に設置した装置を地震にも有効活用する方法について述べたが、さらに高い効果を発揮させる方策について考える。

これまで、地震対策のためにオイルダンパなどの層間ダンパを備えた建物に、風揺れ用のアクティブ式制振装置を設置し、役割を分担する方法が採られている。近年の免震建物の普及を踏まえると、免震建物にアクティブ式制振装置を適用し、免震と制振とを併用する可能性が考えられる。免震とアクティブ制振の併用に関する研究は、1980年代末に、小泉ら⁽⁵⁾によって発表されている。このなかで、免震とアクティブ式制振装置の併用は、制御力と制御パワーは大きくなるが、加速度応答の低減には優れていることが述べられている。

免震装置によって短周期成分が減じられるので、残留する長周期成分をアクティブ式制振装置で積極的に制御させることができれば、適用の意義は高いといえる。課題は、免震層に積層ゴムを用いた場合には、固有周期の振幅依存性があるので、① この変動を考慮した制御系の構築が必要であること ② 制御力と制御パワーをできるだけ低減させること、であろう。

一方、フル・アクティブ方式の利点は、コンパクトな構造にある。コンパクトであれば、狭い空間にも、力量が大きい装置を置くことができるので、地震対応にも有利である。こうした発想があれば、やがては、地震対応のために、広い空間に多数の装置を敷設するような構想も浮上するのではないかと期待している。

6. 結 言

フル・アクティブ式制振装置を用いた地震対応について、筆者らの取組み状況を紹介した。地震時において、可能な限り大きな加速度レベルまで稼働を継続するための制御法を構築し、東北地方太平洋沖地震での稼働記録によって、その有効性が実証された。アクティブ式の良いところは、制御によってパッシブ式では成し得なかったことを実現できることである。その意味では、アクティブ式は、まだ、大きな可能性を秘めているといえよう。今後は、居住空間の安全・安心に貢献するべく、さらなる高機能化を追求していく。

最後に、東日本大震災において被災された方々におかれましては、深くお見舞い申し上げます次第である。

参 考 文 献

- (1) 小池裕二：レール型フル・アクティブ式制振装置の高層ビルへの適用 日本振動技術協会振動技術第 21 号（2010 年 3 月） pp. 27 - 32
- (2) 今関正典：リニアモータ駆動型制振装置 日本建築協会建築と社会（2011 年 9 月） 25
- (3) 小池裕二, 今関正典, 風間陸広：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 8 月） pp. 819 - 820
- (4) 株式会社 IHI インフラシステム：オンライン（入手先）< http://www.ihico.jp/vibration_control/movie/product_01_1.html >（参照 2013-01-25）
- (5) 小泉孝之, 古石喜郎, 辻内伸好：アクティブマスダンパによる構造物の振動制御（地震入力に対するアクティブマスダンパとダイナミックダンパの性能比較） 日本機械学会論文集（C 編） 第 55 巻 515 号（1989 年 7 月） pp. 1 602 - 1 608