

# 高層ビル用制振装置の開発

Development on Tuned Active Damper for Skyscrapers

技術本部 阿比留久徳\*<sup>1</sup> 原田秀秋\*<sup>2</sup>  
 広島製作所 尾木靖夫\*<sup>3</sup>  
 東京都立大学 山崎真司\*<sup>4</sup>  
 三菱地所株式会社 溜正俊\*<sup>5</sup>

最近の高層ビルでは、地震や風による建物の揺れを抑え居住性の向上やインテリジェント設備の保護などを狙いとした制振装置の開発が盛んである。本研究では、高層ビル用の制振装置として、多段振り子を利用したチューンドマスダンパに、制御・駆動系を付加して性能アップを図ったチューンドアクティブダンパを開発した。またこの制振装置を国内最高の高さの横浜ランドマークタワーなどに実用し、実建物の振動試験や強風時の振動観測によって、建物の減衰定数を10%以上にでき、強風時の揺れを40%程度に低減できることを確認した。またこの制振性能は、理論どおりのものであることを検証した。

Recently many types of structure controlling device for wind and earthquake disturbances have been developed for the purpose of improving the residential habitability. The authors developed the Tuned Active Dampers consisting of multi-stage-pendulum type Tuned Mass Dampers and controlled-driving device that drives the TMD's mass more effectively. This TAD was applied to the Yokohama Landmark Tower that is the tallest building in Japan, and moreover the vibration test and actual wind response observations were carried out. As a result of these tests and observations, it was confirmed that (1) TAD improves the equivalent structural damping factor to more than 10% in terms of the damping constant. (2) TAD reduces the structural vibrations in a strong wind to less than 40% of the case without control. (3) This performance of TAD is the same as that expected according to theory.

## 1. ま え が き

アクティブ制振技術を用いた建造物の制振は、近年の理論的・実験的研究の進展により、本格的な実用化の時期に入りつつある。特にアクティブ方式のマスダンパは、装置がコンパクトで設置が容易で、しかも高性能なことから、高層ビルの風や地震に対する居住性向上などに多く実用され始めた<sup>(1)(2)</sup>。

当社においても高層ビル用として多段振り子を利用したチューンドマスダンパ (TMD) に、制御・駆動系を付加して性能アップを図ったチューンドアクティブダンパ (TAD) を開発し、現在までに14基の実用実績を有している。これらの装置は、制御・駆動系の付加により、同じ制振効果を有するTMDの1/5~1/6に重量を軽減している。またTMDの活用で、周期のない通常のアクティブマスダンパ (AMD) に比べ約1/5に動力や消費電力をセーブできる装置となっている。

本報では、国内最高の高さの横浜ランドマークタワーの居住性向上を狙いに設置したTADを例に、その概要と実建物での振動試験や振動観測記録に基づく制振性能について報告する。

## 2. 制振装置の概要

本装置は、建物と同じ周期を持つ多段に吊られた振動体を、最適制御理論に従って水平二方向にサーボモータで駆動している。この装置の構造・機能については既に報告<sup>(3)</sup>しており、ここでは外観と基本仕様につき図1、表1に示す。

装置の運用方法を図2に示す。常時は、モータ電流を遮断し振動体にブレーキをかけているが、 $2\text{ cm/s}^2$ 以上の建物加速度を2サイクル感知すると自動的に始動する。その後、建物と振動体の揺れに応じて、アクティブ状態、パッシブ状態、ブレーキ状態に自動的に移行し、対応風速域の拡大と安全性確保を図っている。

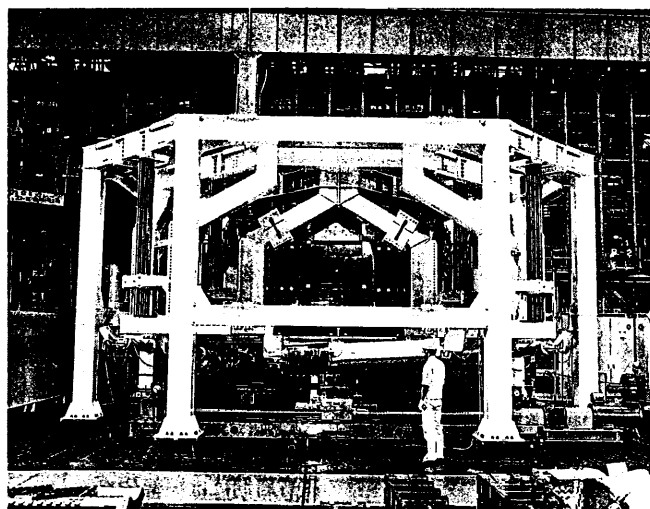


図1 高層ビル用TAD 多段振り子を利用したTADの外観を示す写真。  
TAD for skyscrapers

表1 TAD基本仕様  
Specification of TAD

台数	2基
寸法(D×W×H)	9.0×9.0×4.9m(1基当たり)
振動体重量	170t×2基=340t
周期調整範囲	4.3~6.0s
最大振幅	±1.70m
最大制御力	30tf(1方向)

また地震に対しては、④の判定値で振動体の揺れ過ぎを抑えるが、振動体の揺れが小さくなると数十sでアクティブ状態に戻り、地震の後揺れを制振するシステムになっている。

\*1 広島研究所鉄構・土木研究室長 \*4 工学部建築学科教授 工博  
 \*2 広島研究所鉄構・土木研究室主任 \*5 技術開発室副主任  
 \*3 鉄構技術部鉄構設計課

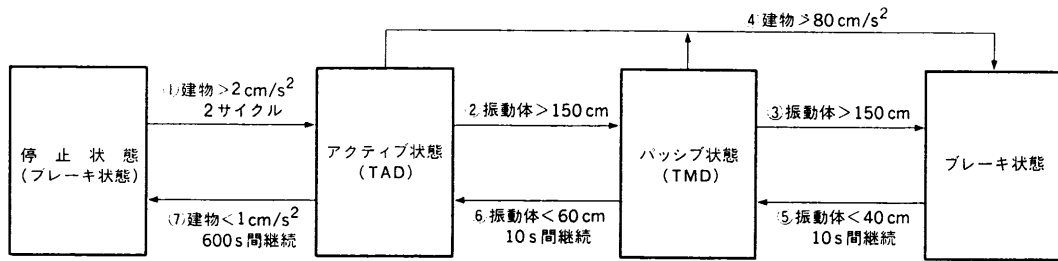


図2 TAD 運用システム 建物とTADの動きに基づく運転状態切換えシステムを示すブロック線図。  
Operating system of TAD

表2 建物の固有振動特性  
Vibration characteristics of building

並進モード			ねじれモード
1 次	2 次	3 次	1 次
周期 (s) 速度振幅 (cm/s)	周期 (s) 速度振幅 (cm/s)	周期 (s) 速度振幅 (cm/s)	周期 (s) 角速度 (rad/s)
減衰定数 (%) 速度振幅 (cm/s)	減衰定数 (%) 速度振幅 (cm/s)	減衰定数 (%) 速度振幅 (cm/s)	減衰定数 (%) 角速度 (rad/s)

296 m

3. 建物の振動特性

1993年7月に竣工した横浜ランドマークタワーは、地上70階、高さ296mで、現在日本で最も高い建物である。

当建物の振動応答やTADの制振効果を評価するため、竣工直前に加振試験を行い、建物の振動特性を計測した。

試験方法は、TADを加振機として用い、建物を共振後、加振を急停止して得られる自由振動波形から固有周期と減衰定数を求めた。対象振動モードは、X、Y方向の並進振動1、2、3次とねじれ振動1次とした。

試験結果を表2に示す。建物の固有周期には振幅依存性がみられ、振幅の対数値と周期とがほぼ直線の関係にある。また制振対象の並進1次振動に着目すると、今回の加振振幅範囲では、固有周期の最大値と最小値間に約4%の違いが認められる。こうした建物の周期変動に対しても本TADは、安定した制振効果を保持可能である。また減衰定数にも振幅依存性が見られるが、振幅の対数値に対し必ずしも直線の関係ではなく、振幅が大きくなると頭打ちとなる傾向がある。

4. 制振装置の性能確認試験

4.1 自由振動試験

TADにより建物に付加される減衰定数の確認を目的とする。試験方法は、建物を制振対象モードのX、Y1次で加振し、その後装置を本来のTADとして作動させ建物振動を計測した。また駆動電源を遮断し、TMDとして作動させた場合についても併せて計測した。

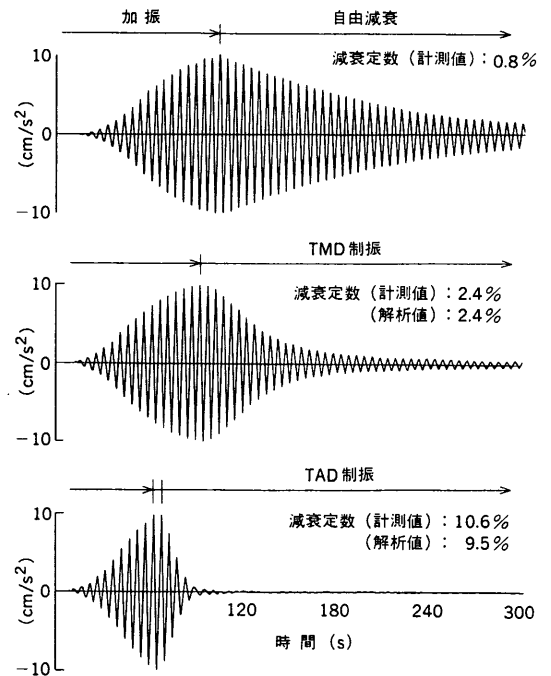


図3 自由振動試験結果 加振停止後の自由振動波形から、TADとして作動すると建物減衰が非常に大きくなることを示す。  
Results of free vibration test

X方向での計測結果を図3に示す。Y方向についても同様の結果が得られている。また同図には、解析値並びに加振後装置を固定した非制振状態の自由振動波形も併せて示している。建物の

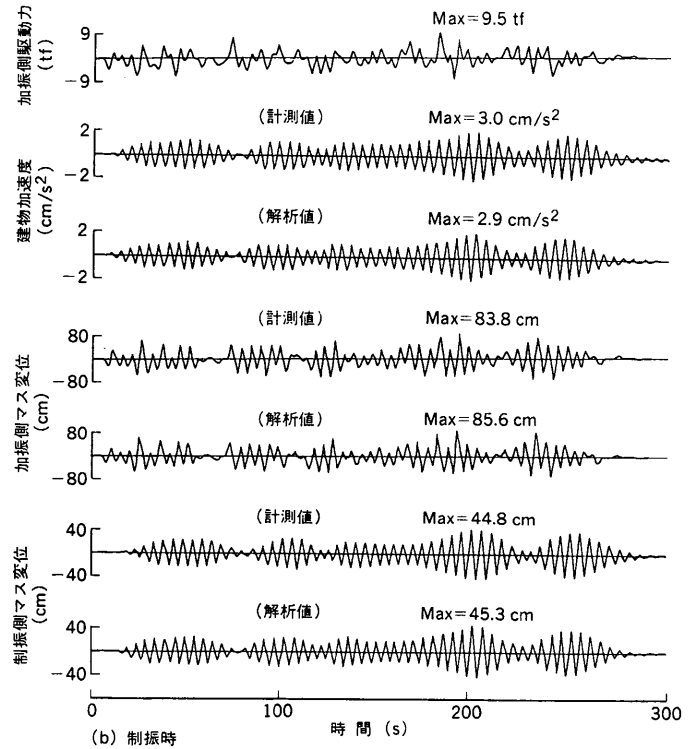
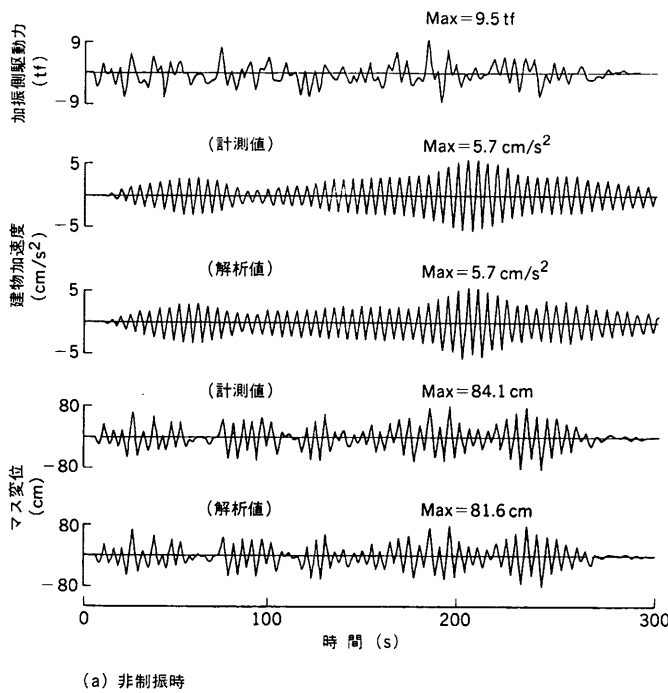


図4 強制加振試験結果と解析結果 解析結果と試験結果は良く対応しており、理論どおりの制振効果が得られている。  
Forced vibration test results and theoretical ones

表3 強制振動試験結果  
Results of forced vibration test

		(cm/s <sup>2</sup> )	
		計測値	解析値
非制振	最大値	5.7	5.7
	rms 値	2.1	2.1
制振	最大値	3.0	2.9
	rms 値	1.1	1.1
制振比率	最大値	0.53	0.51
	rms 値	0.52	0.52

減衰定数は、TADにより10%程度に増加しており、大きな減衰付加効果が確認できる。またこの結果は、TAD制振時、TMD制振時共に解析結果と良く対応している。

4.2 強制振動試験

不規則な揺れに対するTADの制振効果確認を目的に建物に設置した2基のTADのうち1基を加振機として用い、風力を模擬したランダム加振を行った。他の1基については、振動体の動きを固定した場合（非制振）とTADとして作動した場合（制振）の二つの状態にして、それぞれ建物振動を計測した。

非制振時、制振時について試験結果を解析結果と比較してそれぞれ表3、図4に示す。同表図はいずれもX方向での結果であるが、Y方向についても同様の結果が得られている。

解析では、建物を3章で計測した1次の振動特性に基づき等価な1質点系とし、2基のTADと合わせて3質点系にモデル化した。そして加振機として用いたTADの駆動力を入力し、建物並びにTADの振動応答を求めた。解析結果は、計測結果と良く対応しており、TADは理論どおりに作動していることが確認できる。また非制振時に対する制振時の建物加速度計測値は、最大値が53%、rms値が52%に低減している。この結果は、TADが1基の場合の制振効果であり、2基の装置が同時に働く実際の揺

れに対しては、制振効果はより高いものとなる。

5. 振動観測

本建物では、風や地震外力の性質、それに対する建物の振動応答特性、TADの作動状況とその効果を調査・把握するため、総合的な観測システム<sup>(4)</sup>を用いて振動観測を実施している。

1993年10月から1年間の観測記録によると、冬季の約3か月間にTADは、季節風と思われる10min間平均頂部風速が20m/s前後の風で合計7回作動している。本報ではTADが作動した記録のなかでも継続時間の長い二つの記録から制振効果を検討した。

5.1 1994年2月21日の強風

この記録でTADは、13時40分ごろ始動し、15時20分ごろに停止状態に戻った。この間の建物頂部の10min間平均風速は14時ごろの21m/sを最高に18~20m/sを推移した。

制振効果の検討は、14時12分から10min間の建物応答記録に基づき、先ず建物1次振動に着目した1質点系で、高次振動を含む観測建物応答を再現できる等価なモデル風力Fを逆算した。

$$F = M_s \ddot{x}_s + C_s \dot{x}_s + K_s x_s - R + U \tag{1}$$

ここで、

$$R = C_d (\dot{x}_d - \dot{x}_s) + K_d (x_d - x_s)$$

$M_s, C_s, K_s$ : 建物1次振動の一般化質量, 減衰係数, ばね

$C_d, K_d$ : TADの減衰係数, ばね

$U$ : TADの制御力 (観測値)

$\dot{x}_s$ : 建物加速度 (観測値)

$x_d - x_s$ : TADの相対変位 (観測値)

次にこの風力を外力として非制振時の建物応答加速度を求め、制振時の観測記録と比較した。

検討結果を図5に示す。同図には、1次振動成分に対する制振

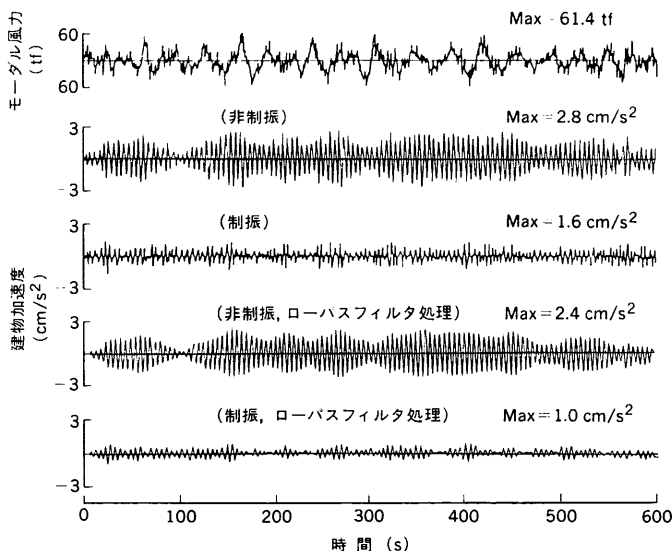


図5 強風観測に基づく制振効果の検討結果 制振対象とした建物の1次振動成分はTADにより42%に低減する。 Results of performance on wind observation

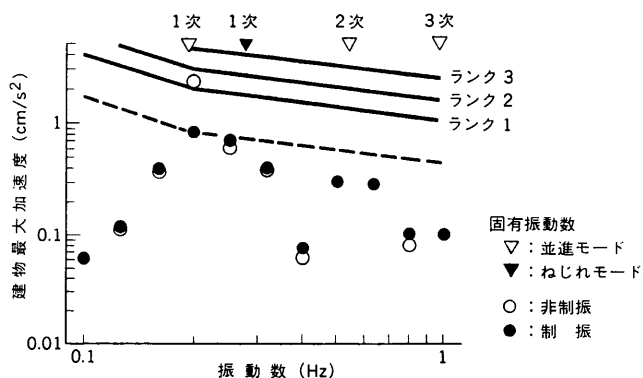


図6 制振, 非制振時応答の1/3オクターブバンド分析結果 周波数帯域ごとの建物加速度を居住性能評価曲線と比較した。居住性は1次振動成分で決まっており, TADの有効性が分かる。 Results of 1/3 octave band analysis of structural response

効果を見るために0.24 Hzのローパスフィルタ処理した波形も併せて示している。非制振時に対する制振時の加速度比は、フィルタ処理がない場合57%, フィルタ処理して1次振動成分に着目すると42%である。

図6に検討結果の1/3オクターブバンド分析結果を示す。この図からTADによる制振効果は、1次振動成分に対するものであることが分かる。また同図には、日本建築学会による居住性能評価指針<sup>(6)</sup>の振動クライテリアを実線で示している。この直線こう配と1/3オクターブバンド分析結果を比較すると、居住性に対しては1次振動成分が支配的であると言える。

すなわち本建物の場合、制振効果の評価尺度として1次振動成分に着目する方が適当であり42%の低減率が得られている。この制振効果については、後述の台風時の観測結果(図7)からも推察されるように、制振効果が出始めた振動レベルでの結果であり、振動レベルが大きくなると制振効果も上昇することが予想される。

5.2 1994年9月30日の台風26号

台風26号は、紀伊半島に上陸し、富山湾から日本海に抜ける進路をとった台風で、横浜からは最短距離で約300 km離れた位

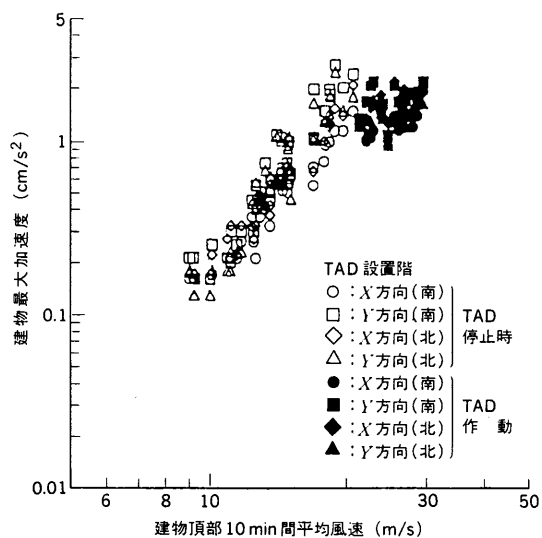


図7 台風26号接近時の振動観測結果 TAD停止時は風速の上昇に合わせて建物加速度も急速に増大するが、TAD始動でその増分は頭打ちとなり、振動振幅も低減する。 Results of observation under 26th typhoon in 30 Sep. 1994

置を通過している。TADは、建物頂部の10 min間平均風速が21 m/s程度になった0時20分ごろに始動し、その後約3h連続作動した。この間、建物頂部の平均風速は徐々に高くなり、2時ごろに最大の29.6 m/sを記録した。

図7に建物頂部10 min間平均風速と、建物最大加速度の関係を示す。同図には、TAD始動前の記録も併せて示している。始動前の非制振時は、風速の上昇に合わせて建物加速度は急速に増大するが、TADが始動するとその増分は小さくなっている。またTAD作動中は高風速にもかかわらず、作動直前の20 m/s付近の加速度よりむしろ小さくなっており、強風時のTADの制振効果が確認できる。

6. む す び

高層ビル用として開発した制振装置の実機試験と振動観測記録から、本装置が理論どおりの十分な制振性能を有することを確認した。今後も引き続き実機データの収集を行い、地震や台風時などのより大きな振動レベルに対する制振性能を検証する。また、さらに制御性や応答性に優れたリニアモータを駆動装置に適用するなど、高次の振動成分を含む地震制振にも対応できる装置の開発を予定している。

参 考 文 献

- (1) 浮田高志ほか、大阪弁天町・ORC 200 シンボルタワーの制振装置、日本建築学会大会学術講演梗概集(1992-8) p.953
- (2) 有田彦ほか、超高層ビル用V字型ハイブリッドマスタングの開発と適用、日本建築学会大会学術講演梗概集(1993-9) p.807
- (3) 阿比留久徳ほか、高層構造物の制振技術、三菱重工技報 Vol.27 No.5 (1990) p.447
- (4) 澤田昇次ほか、横浜ランドマークタワーの風・地震観測、日本建築学会大会学術講演梗概集(1994-9) p.71
- (5) 日本建築学会、建築物の振動に関する居住性能評価指針同解説、日本建築学会(1991-4)