

XY運動機構を用いた高層建物制振用マスダンパの開発と実用化

Development and Implementation of a Tuned Mass Damper
Using XY-Motion Mechanism for Vibration Control in Tall Buildings

藤田 隆 史*
Takafumi FUJITA

筆者らの開発によるXY運動機構を用いたマスダンパは、わが国で最初に実用化された高層建物制振用マスダンパである。本マスダンパは、現在までに、「千葉ポートタワー」、「福岡タワー」の2棟の超高層観光タワーに実用化されている。本解説は、これらのマスダンパの基本構造や、地震・風応答観測から得られた制振効果について述べたものである。

1. ま え が き

最近、最上階近傍にマスダンパを設置した高層建物が建設されるようになり、免震建物と並んで、新しい構造概念を持った建物として大きな関心を集めている。このマスダンパは、高層建物の、風や地震による振動を抑制する装置として登場してきたが、その設置目的は、主として、高層建物の居住性を高めることにある。そのため、地震に比べて発生頻度の高い、また、継続時間の長い風に対する制振がより重要視される。

本解説は、筆者が開発・実用化に参画した「千葉ポートタワー」および「福岡タワー」のマスダンパの、基本構造や地震・風応答観測から得られた制振効果について述べたものである。

2. XY運動機構を用いたマスダンパの基本構造

XY運動機構を用いたマスダンパの基本構造を図1に示す。本マスダンパでは、主質量(図1のM1)が直交するように重ねられた二組の直線運動機構(XY運動機構)によって支持され、平面内を任意方向に並進運動すると同時に、水平面内の回転は完全に拘束された構造となっている。したがって、図1のY方向の質量(M1)とX方向の質量(M1+M2)は多少異なることになるが、二次元マスダンパとしての長所を有している。また、本マスダンパでは、ばねと減衰装置が各方向ごとに設けられるため、X方向とY方向の振動特性を独立に設定することができ、剛性に異方性のある建物にも適用できる利点を有している。

各方向に取り付けられた多数のコイルばねは、対向す

る2本のばねが対をなしており、各コイルばねの一端は直線運動機構フレームの側端に、他端は可動質量に固定されている。各方向には2本のオイルダンパが取り付けられている。また、各方向にはオイルパッファを装着した堅固なストッパが取り付けられており、大地震の場合にも、可動質量がレールから逸脱することのないように万全の措置が取られている。

本マスダンパの固有周期の調整はコイルばねの本数変更により、必要があれば、さらに主質量の質量変更によって行うことができる。

このように本マスダンパは多くの長所を持った制振装置であるが、最大の短所は直線運動機構の摩擦にある。後述のように、3/1000~5/1000と相当に小さい摩擦係数が実現されているが、設置階の床応答加速度が3~5 Gal以下では、本マスダンパは作動しないことを意味している。したがって、5~6秒の固有周期を持つ超高層建物

表1 千葉ポートタワーのマスダンパの基本仕様

	X-direction	Y-direction
Outer size (m)	6.4×5.9×2.0 (height)	
Moving mass (×10 ³ kg)	10.40	15.46
Mass ratio (Moving mass/Primary effective mass of the tower)	1/120	1/80
Natural period (sec)	2.25	2.35
Spring constant (×10 ³ N/m)	81.1	110.7
Number of springs	18	
Damping ratio	0.15	
Maximum displacement (m)	±1.00	
Number of oil buffers	4	2

*東京大学生産技術研究所 第2部

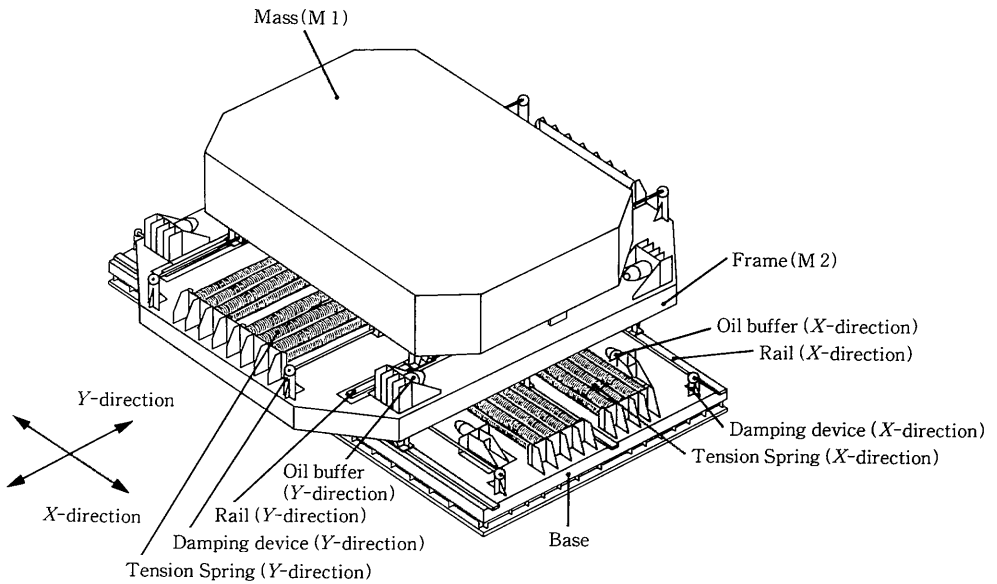


図1 XY運動機構を用いたマスダンパの基本構造

に適用する場合には、この摩擦が問題となる。

3. 千葉ポートタワーのマスダンパ

3.1 千葉ポートタワーの概要

1986年3月に竣工した「千葉ポートタワー」(図2)は、わが国で最初にマスダンパを装備した高層建物であり、千葉県が県人口500万人突破を記念して建設した高さ125m、対角長さ13mと22.5mの菱形平面を持つ鉄骨ブレース構造のタワーである。このタワーは、全体がハーフミラーガラスで覆われているため、中空で比較的軽量なわりには受風面積が大きく、風による外力の影響を受けやすい構造を有していた。そのため、構造設計の初期

段階から、本タワーの風による振動を抑制するためのマスダンパの設置が計画された¹⁾。マスダンパはエレベータ機械室の上階である塔屋に設置されている。

3.2 マスダンパの基本仕様

図3に千葉ポートタワーのマスダンパを、表1にその基本仕様を示す。ただし、この場合のX、Y方向は図1のそれと逆である。

マスダンパの質量は、一般に、建物の1次モード有効質量の1/100程度が標準的な大きさである。この場合も、X方向とY方向とで質量比は異なっているが、ほぼ標準的な質量比を採用している。マスダンパの各方向の固有周期は、タワーのそれにほぼ一致するように調整されて

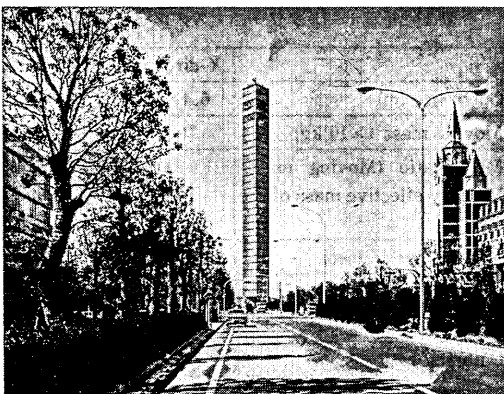


図2 千葉ポートタワーの全景

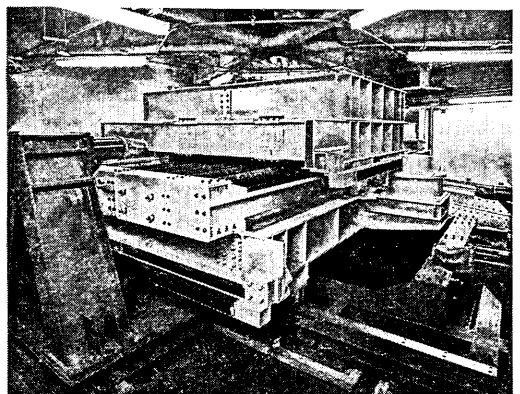


図3 千葉ポートタワーのマスダンパ

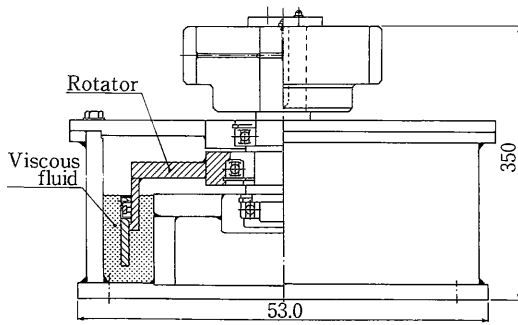


図 4 千葉ポートタワーのマスダンパの減衰装置

いる。

このマスダンパの減衰装置は、図 4 に示すような粘性ダンパであり、非常に粘度の高い粘性流体とその中で回転する回転体を収納した装置である。可動質量の直線運動がラック・ピニオン機構により粘性ダンパの回転体の回転運動に変換され、回転体と粘性流体間に発生するせん断力が本装置の減衰力となる。ただし、この減衰は非線形なものである。したがって、減衰比での表現は正確ではないが、表 1 に示した 15% の減衰比は、強地震動時の応答のような大振幅に対する等価減衰比を表している。

可動質量のストロークは各方向とも ±1 m あり、ストップが作動する確率はきわめて小さいと考えられる。

図 5 はマスダンパの X 方向の復元力特性を示したものであり、コイルばねの復元力に直線運動機構の摩擦力が重なったものである。直線運動機構の摩擦係数は約 5/1000 である。

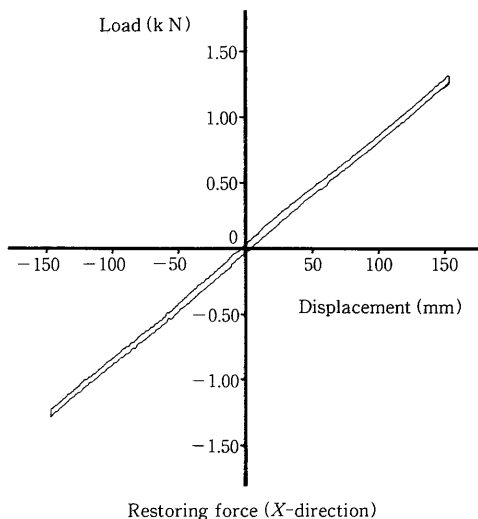


図 5 千葉ポートタワーのマスダンパの復元力特性

4. 福岡タワーのマスダンパ

4.1 福岡タワーの概要

1989年2月に竣工した「福岡タワー」(図6)は、同年3月から9月まで開催された「アジア太平洋博覧会(よかトピア)」のシンボルタワーとして建設され、博覧会終了後は、放送用アンテナ設備を設け、放送送信施設として活用されているタワーである。このタワーは、アンテナ頂部の高さ234m、建物頂部の高さ151m、一辺24mの正三角形平面を持つ鉄骨ブレース構造であり、千葉ポートタワーと同様、ハーフミラーガラスの外装で覆われている。この場合も、マスダンパはエレベータ機械室上階の塔屋に設置されている。

4.2 マスダンパの基本仕様

図7は福岡タワーのマスダンパであり、表2にその基本仕様を示す、福岡タワーのマスダンパでは、直線運動機構やストップ、ダンパに改良が加えられており、より洗練された装置となっている(前述の図1は福岡タワーのマスダンパの基本構造を示したものである)。

本マスダンパでは、千葉ポートタワーの場合と比較して、稼働質量は2倍以上になっているが、ストップを直線運動機構フレーム内に取り付けたことによって、外形寸法は逆に小さくなっている。減衰装置には、線形減衰を得るために、図8に示すような、非常に長いオイルダンパが用いられている。このオイルダンパは、通常のものとは異なり、ロッドの両端はフレームに固定され、シリンダの部分が可動質量と共に動くことによって減衰力が発生する構造となっている。また、直線運動機構の摩

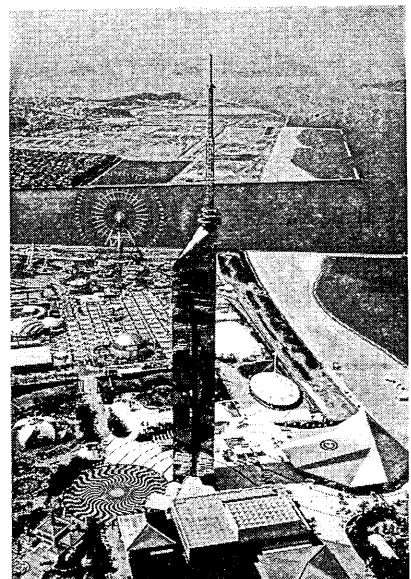


図 6 福岡タワーの全景

表2 福岡タワーのマスダンパの基本仕様

	X-direction	Y-direction
Outer size (m)	5.4×5.35×2.1 (height)	
Moving mass (×10 ³ kg)	30	25
Mass ratio (Moving mass/ Primary effective mass of the tower)	1/68.4	1/83.7
Natural period (sec)	3.16	3.13
Spring constant (×10 ³ N/m)	118	101
Number of springs	26	22
Damping ratio	0.11	0.13
Maximum displacement (m)	±1.1	
Number of oil buffers	4	4

擦係数は約3/1000であり、より小さな摩擦係数が実現されている。

5. 千葉ポートタワーでの地震・風応答観測から得られたマスダンパの制振効果

5.1 観測システム

筆者らは、他の関係者と共に、千葉ポートタワーの地震応答、風応答、および、それらに対するマスダンパの制振効果を観測するため、「千葉ポートタワー地震・風観測研究委員会」(脚注参照)を組織し、1987年8月より観測を開始した。図9は、本委員会によって設置された計測機器の配置を示している。タワーの上空132mの位置にプロペラ型風向風速計、マスダンパ室(P2F)および1階の床面におのおの加速度計2台、マスダンパに変位計2台および地上90mの外壁面にリラクタンズ型風圧計10台が設置されている。

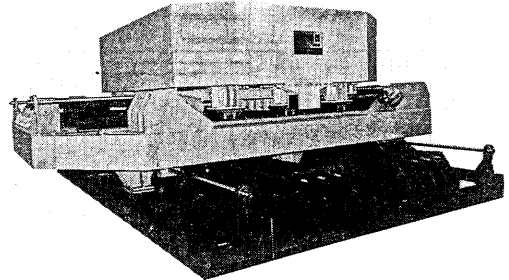


図7 福岡タワーのマスダンパ

5.2 地震応答の観測結果

図10は、1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震の際の、マスダンパ設置階の変位と加速度の観測結果および解析結果を示したものである²⁾。変位応答を見ると、マスダンパがない場合(解析結果だけが示されている)には応答が減衰せずにいつまでも続いているのに対して、マスダンパがある場合にはすぐに減衰しており、残留振動に対するマスダンパの制振効果が明瞭に現れている。

しかし、地震動初期の段階で発生する最大変位応答を低減する効果は認められない。このことは、従来から指摘されてきたことであり³⁾、地震動初期の段階ではマスダンパが十分には振動していないことによる。また、加速度応答を低減する効果も見られない。これは、加速度応答では2次モードが卓越しているためで、1次モードに対して調整されたマスダンパでは制御できないモードである。

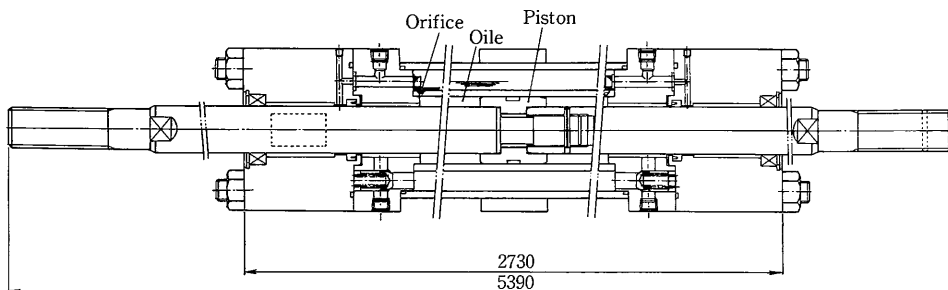


図8 福岡タワーのマスダンパの減衰装置

(注) 千葉ポートタワー地震・風観測研究委員会
委員長 藤田隆史(東京大学)
委員 大熊武司(神奈川大学)、神田 順(東京大学)、(株)日建設計、(株)竹中工務店、日本板硝子(株)、三菱製鋼(株)、三共アルミニウム工業(株)

この観測結果からもわかるように、マスダンパは、地震に対して、高層建物の耐震性向上のための効果はあまり期待できないが、居住性向上の効果は十分に期待できるものである。

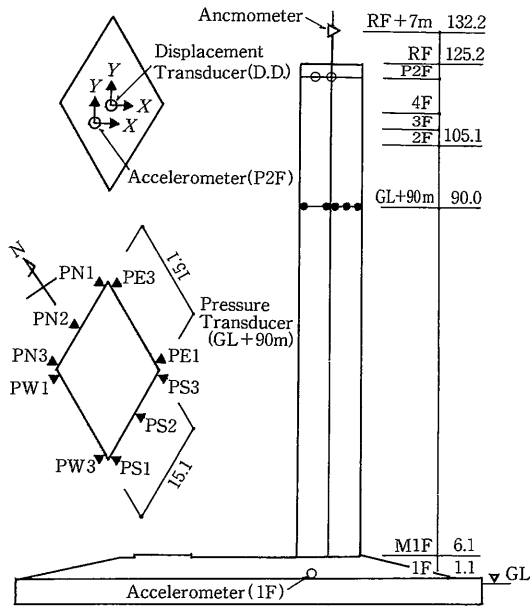


図9 千葉ポートタワーの地震・風観測システム

5.3 風応答の観測結果

表3は、観測の初期段階に得られた強風記録の主なものを示している。図11は、表3に示した台風8719号の風向きがSSEとなった後半部分での応答加速度と、同じSSEの風向きと同程度の風速を持つ1988年2月5日の強風時の応答加速度を、RMS値で比較したものである⁴⁾。ただし、両者の中間時点には、マスダンパのばねと減衰装置に改良が加えられ、風による比較的小さな応答加速度にも効果がでるような調整がなされている。したがって、図に示された応答加速度 (RMS値) の差はマスダンパの制振効果を表すものと考えられる。この結果によると、風速20m/sの場合、X方向で約40%、Y方向で約50%の応答加速度の低減が得られている。

表3 強風記録リスト

Date	Max. of Mean Wind Velocity	Wind Direction	Recorded Duration	
Typhoon 8712	31 Aug. 1987	22.4 m/s	S	11.5 hrs.
Typhoon 8713	16 Sep. 1987	21.7	N	12.0
Typhoon 8719	17 Oct. 1987	30.9	S to SSW	14.0
Run 880205	05 Feb. 1988	28.4	SSW	10.5

この観測結果が示しているように、マスダンパは風に対しては良好な制振性能を有している。

6. あとがき

千葉ポートタワーのマスダンパは、わが国で最初に実用化された高層建物制振用マスダンパであったため、経験不足の点が多く、設置後に多少の改良を要する個所もあったが、改良後は、本解説で述べたように、所定の制振効果を発揮している。また、マスダンパを装備した高層建物の地震/風応答観測は世界でも例を見ない貴重なものであり、「千葉ポートタワー地震・風観測研究委員会」の研究活動は今後ますます有意義なものになると考えている。なお、本解説で述べた観測結果は「千葉ポートタワー地震・風観測研究委員会」によるものであることを断っておく。

マスダンパが装備されているのは、現在のところ、主に観光タワーであるが、設計・計画中のいくつかの高層建物でマスダンパの採用が予定されている。その代表例として、横浜市の「みなとみらい21 (MM21)」に建設中の「ランドマークタワー」(地上73階、地下3階、塔屋2階、軒高278m)があげられる。今後、超々高層オフィスビル、超々高層ホテル、超高層集合住宅などが数多く建設されることはほぼ確実であり、これらの建物の性能と

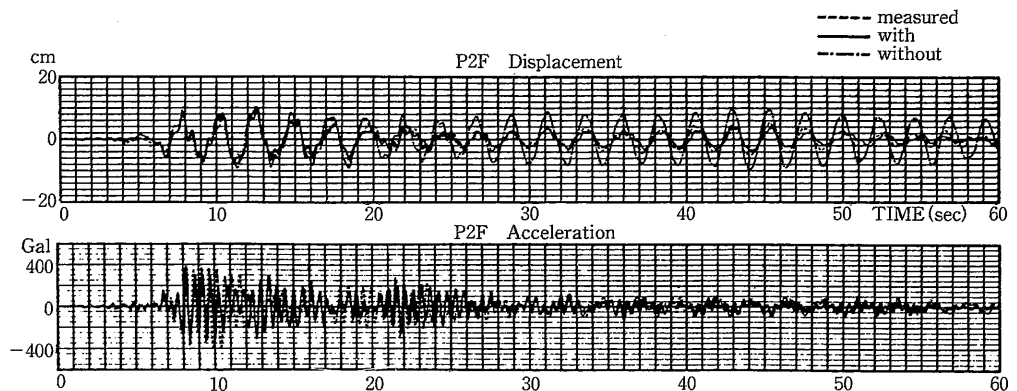


図10 千葉県東方沖地震(1987年12月17日)による応答変位と応答加速度の観測および解析結果

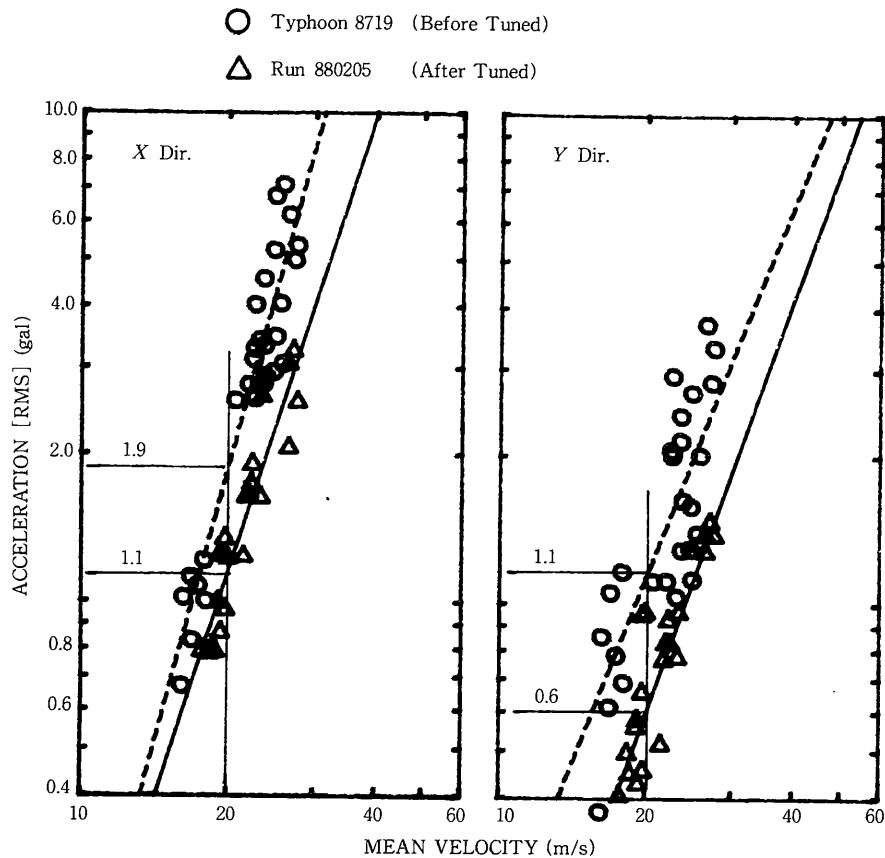


図11 マスダンパによる風応答加速度 (RMS値) の低減効果

して、その居住性がますます重要なファクターになるものと思われる。したがって、マスダンパは、将来、高層建物の重要設備として位置付けされる可能性も有している。
(1990年2月26日受理)

参考文献

- 1) 寺本, 木原, 北村, 木村, ダイナミックダンパーを設置した塔状構造物の設計と振動実験 (その1), 第7回日本地震工学シンポジウム, 1986. 12.
- 2) Kitamura, H., Fujita, T., Teramoto, T. and Kihara, H., Design and Analysis of a Tower Structure with a Tuned Mass Damper, 9WCEE, 1988. 8.
- 3) たとえば, Chowdhury, A.H., Iwuchukwu, M.D. and Garske, J.J., The Past and Future of Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers, Structural Control (Proc. 2nd Int. Symp. on Struc. Con.), 1985. 7.
- 4) 寺本, 又木, 大熊, 神田, 北村, 川端, 千葉ポートタワーの風観測 (その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1988. 10.