

分散型TMDによる空間構造の振動制御

Vibration Control of Spatial Structures Using Spatially Dispersed Arranged TMDs

吉 中 進
川 口 健 一¹⁾

I. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を初めとして、宮城県北部地震や十勝沖地震においても体育館の天井材や照明など吊り物の落下被害が多数発生し、振動制御の必要性が広く認識されている。これら空間的に広がりを持つ構造物は、一般のビル構造などと比較して固有振動数が近接し、かなりの高次モードまでを含む様々なモードが励起される特徴がある。前述した大地震時における被害例を受けて、近年ドームやスタジアム屋根を代表的な構造物とする空間構造の分野において、粘弾性体（パッシブ減衰制御）をテンション構造に適用した「静岡サッカースタジアム・エコパ」や、免震支承を持つ「きらら元気ドーム」、「平賀ドーム」、「京都アクアアリーナ」など数多くの実施例が出てきた。本研究の目的は、TMD(Tuned Mass Damper)が橋梁や大スパン床スラブなど大スパン軽量構造における振動制御の実績が高いことを受けて、空間的な広がりを持つ空間構造（大スパン建築構造）の地震時や強風時における振動制御のためのTMD適用方法に関するものである。

II. 設計手法の整理

Fig.1に(A)モード空間及び(B)TMD空間配置で分類した適用法の整理を示す。灰色で囲った(A)分散型が本論文で提案する手法である。複数のモードをTMDの合計質量を増やすことなく、さらにできるだけ少ない個数のTMDで、言い換えればTMDの効率を上げて制御するために本手法を提案した。以下に内容の詳細を説明する。

1. 分散型TMD

空間構造は複数の振動モードが励起する特徴があり、モード形状も複雑なため、一つのTMDのみで構造物全体の振動制御を行うのは難しい。そこでFig.2に示すように小型の複数のTMDを空間的に分散配置させることによる手法を提案し、分散型TMDと定義した。小型のTMDを用いることにより、装置を構造骨組の中に埋め込んで使用するなどの応用可能性もある。Fig.1の分類では(B)分散配置に相当する。

2. MTMDに基づく分散型TMD

複数TMDのパラメータ設定法として、Fig.1の(C)設計法中に示す多重TMD¹⁾とMTMD(Multiple TMD)²⁾が提案されているが、本研究では主として複数モードの制御を対象とするため、設計パラメータがバンド幅を基準として定められているMTMDを用いることにする。空間構造の代表的なモデルとしてアーチモデルを取り上

げ、Fig.1の(A)集中型、(B)集中配置の場合における周波数応答解析を実施した結果、MTMDは通常のTMDと比較して以下に示す特徴があることが分かった。(a)制御対象モードの固有振動数の近傍で効果が高い。(b)制御対象固有振動数の両脇でピークが高くなる傾向がある。(c)MTMDはMTMDバンド幅内（MTMDの最大固有振動数から最小固有振動数の区間）におけるロバスト性に優れており、さらにバンド幅を拡大することで広い周波数に亘り平均的な応答を得ることができる。ここで(c)の点に着目し、複数モード制御のためにMTMDと分散型TMDを組み合わせた新しい設計法を提案する。以下に要点をまとめる。

(1) MTMDの配置について

制御対象とする複数のモードで共通に振幅の大きい点（モードを重ね合わせたときの最大振幅点）に分散的にMTMDを配置する。

(2) MTMDの同調比の調整について

単一モードの制御を目的とした最適バンド幅に対して、固有振動数の異なる複数のモードを制御するため、全制御対象モードの固有振動数がMTMDのバンド幅に含まれるようにバンド幅を拡大して用いる。

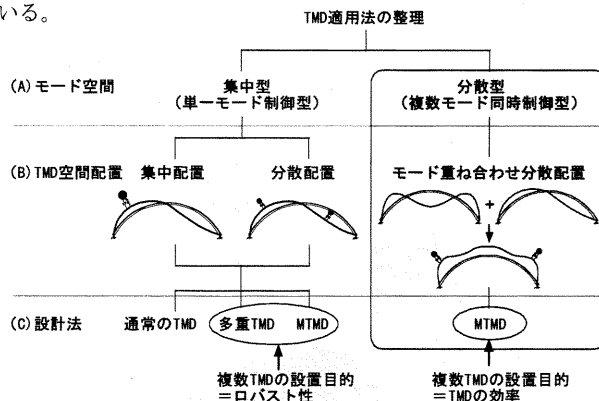


Fig.1 Application Methods of TMD

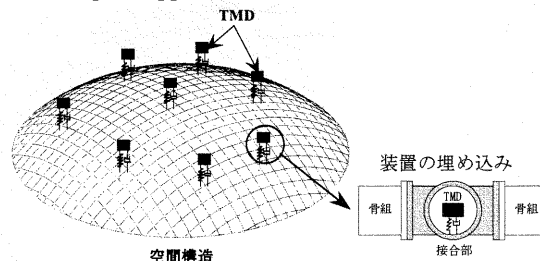


Fig.2 Concept of Spatially Dispersed Arranged TMDs

本報は、構造工学論文集 Vol.50B (2004.3) pp.627-634 掲載論文の要約である。

キーワード：振動制御，空間構造，TMD，MTMD

1) 東京大学生産技術研究所 助教授

Ⅲ. モデル解析による効果の検証

提案した手法の効果を確認するため、空間的な広がりを持つ簡易な形状の構造として矩形平板をモデルとして選び、周波数応答解析を実施した。

1. 解析条件

平面が $8\text{m} \times 8\text{m}$ 、厚さ 20cm の正方形 RC スラブを解析モデルとした。コンクリートの材質は FC240 を仮定し、質量密度は $2.4(\text{t/m}^3)$ で与え、境界条件は周辺単純支持とした。制振モードは Fig.3 に示す 4 次モード（固有振動数 10.9Hz ）と 5 次モード（固有振動数 13.8Hz ）とした。加力点は各次モードの腹とし、Fig.3 に示す方向に振幅 $P=9.80(\text{kN})$ の荷重を与えた。制振効果は通常 TMD と MTMD の比較で行い、両者で TMD の合計質量は $1.20(\text{t})$ で共通とした。

2. MTMD の設計

通常 TMD は、Fig.3 に示す 4 次と 5 次モードの腹に 1 個ずつ設置し（A 点及び B 点）、設計パラメータは Den Hartog の最適設計式により求め、4 次と 5 次モードに対して個別に設定した。MTMD に基づく分散型 TMD の設置位置は、4 次と 5 次モードの振幅の絶対値の重ね合わせが最大となる 4 点とした（Fig.4 の C1 点～C4 点）。設計パラメータは文献 2）の計算式を基に決定し、最終的な MTMD のバンド幅は 4 次と 5 次モードの固有振動数が共に含まれるように最適バンド幅を 2 倍に拡大した。

3. 周波数応答解析結果

Fig.5 に 4 次モード加力時の 4 次モードの腹（A 点）における鉛直方向応答に関する周波数応答を示す。MTMD は通常 TMD と比較して、MTMD バンド幅内では制振効果とロバスト性が高いが、バンド幅の外側では応答が大きくなっている。Fig.6 に板の 4 次モード固有振動数における通常 TMD と MTMD の鉛直方向振幅に関する周波数応答の平面分布を示す。通常 TMD は TMD を設置した A 点での振幅は良く抑えられているが、板全体では振幅のパラツキが

大きい。一方 MTMD は板全体で良く振幅が抑えられている。板全体のエネルギーとして制振効果を比較するため、板の 4 次と 5 次の固有振動数における全節点の鉛直方向振幅に関する周波数応答の 2 乗和を Fig.7 に示す。4 次と 5 次ともに MTMD の方が効果が高い。

Ⅳ. まとめ

本論文では、空間構造における複数モード制御のために MTMD に基づく分散型 TMD を提案した。提案した手法が空間領域で振幅のパラツキが小さいのは、MTMD 設置前後でモード形状の変化が小さく、集中配置の場合に比較して MTMD 設置後のモード形状が滑らかであることによるものである。さらに、制振効果の高さは、複数のモード形状の重ね合わせから MTMD の配置を決定したため、ほかのモード形状とは無関係に TMD 配置を決定する通常の TMD の設計手法に比較して、TMD の合計質量が同じという条件下での TMD の効率が高くなっているためであると考えられる。

参考文献

- 1) 背戸一登, 松本幸人: パソコンで解く振動制御, 丸善株式会社, 1999.
- 2) 阿部雅人, 藤野陽三: マルティプル同調質量ダンパー (MTMD) の基本的特性, 土木学会論文集, No.465, (1993), pp.87-96.

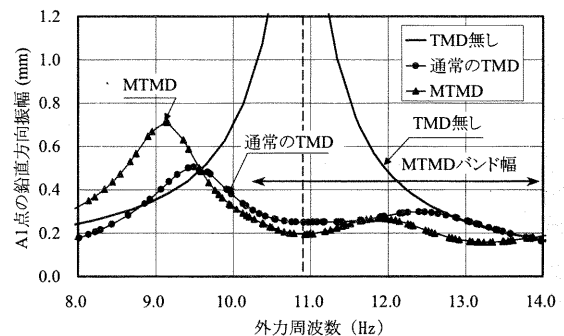


Fig.5 Frequency Response Curves of Point A (4th Mode Loading)

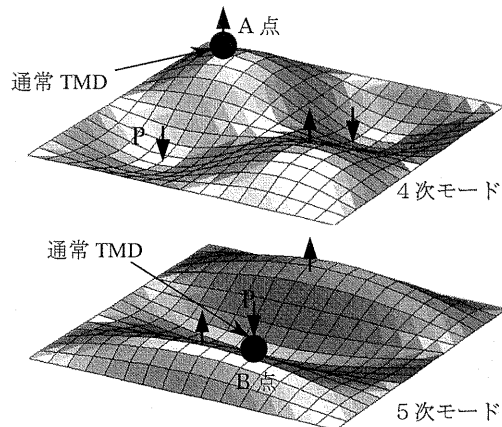


Fig.3 Target Modes of Vibration Control

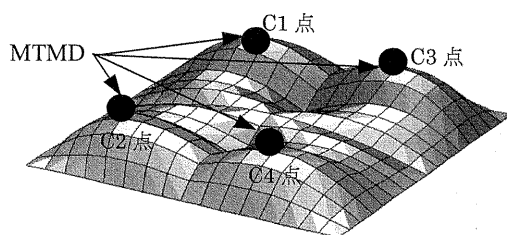


Fig.4 Superposed Shape of 4th and 5th Modes

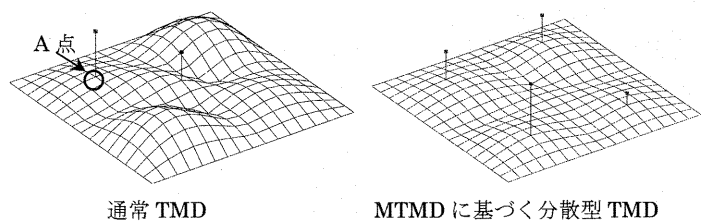


Fig.6 Response Distribution over Whole Structure (4th Mode Loading)

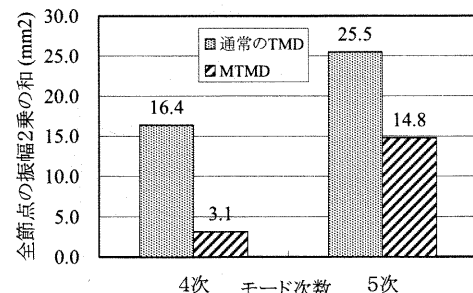


Fig.7 Sum of Square of Responses over All Nodes