

固有振動数を調整可能な反共振型 TMD の開発

中村 佳也 大塚 友理
佐々木 康人 近藤 貴士[※]
平松 剛[※]

概 要

事務所ビルや工場建屋などでは床振動に対する居住性および使用性の確保・改善についての要求は依然高い状況にある。対策としてはTMDやAMDがあるが、装置の大きさやコスト面の理由から適用容易な技術にはなっていない。そこで減衰のないTMDの反共振による高い振動低減性能を利用し、外乱振動の周波数の変化に対してTMD固有振動数を自動調整で変化させることで、周波数変化のある外乱に対しても振動低減効果のある小型のTMDの実現を目指した。本報は、反共振型TMDの特徴を整理し設計方法を提案した。また固有振動数を調整することで周波数変化のある外乱に対しても効果があることを確認した。最後に、提案する固有振動数自動調整機能付きTMDの性能を検証するため試作機を製作し、実際の床に設置して性能試験を実施した。

得られた結果は以下の通りである。

- (1) 減衰が最適値よりも小さいTMDであれば、TMDの質量比が小さくて大きな振動低減効果が発揮できる。
- (2) TMDの質量比と減衰定数の設計により、床の目標等価減衰定数を自由に実現できる。
- (3) 試作機により実際の床でも想定した性能を発揮することができた。

Development of anti-resonance type Tuned Mass Damper (TMD) with natural frequency auto-tuning function

Abstract

There remains a strong demand for ensuring and improving the habitability and usability of office and factory buildings with respect to floor vibrations. While TMDs and AMDs are available as countermeasures, their size and cost limit the applicability. This study aimed to develop a compact TMD capable of effectively reducing vibration, even under frequency-varying disturbances, by utilizing the high vibration-reduction performance of anti-resonance undamped TMDs and automatically adjusting the TMD's natural frequency in response to changes in the disturbance frequency. This paper summarizes the characteristics of anti-resonance TMDs and proposes a design method. The effectiveness of natural frequency adjustments under frequency-varying disturbances was also confirmed. Finally, to verify the performance of the proposed TMD with automatic natural frequency adjustment, a prototype built, installed on an actual floor, and subjected to performance testing.

The results obtained are as follows:

- (1) When the damping of a TMD is smaller than the optimal value, a small TMD mass ratio can still achieve significant vibration reduction.
- (2) The target equivalent damping constant of the floor can be freely achieved by appropriately designing the TMD's mass ratio and damping constant.
- (3) The prototype demonstrated the expected performance on an actual floor.

キーワード：床振動、TMD、固有振動数調整制御実験

※ 大和ハウス工業株式会社

§1. はじめに

事務所ビルでは開放的な空間を確保するためスパンが大きくなり、かつ鉄骨造のため床振動が大きくなりやすい構造が増加している。工場建屋では生産機械の大型化、嫌振機器の増加、居住・執務スペースの環境向上など床振動に関して評価・対策が必須となっている。また床振動を引き起こす振動源（建物内部、外部）も大きくなっている。このように床振動に対する居住性および使用性の確保・改善についての要求は依然高い状況にある。

対策としては、振動質量効果を利用したTMD¹⁾(=Tuned Mass Damper) やAMD²⁾(=Active Mass Damper) が適用されることが多い。TMDは効果を高めるためにはマス（振動する錘）を大きくする必要があり装置が大きくなり設置できないとか、AMDはマスが小さくコンパクトであるが装置費が高く、電源・メンテナンスも必要でありコスト的に合わないとか、の理由で適用容易な技術にはなっていない。一方、TMDの一種で反共振を利用して特定の周波数に対して高い振動低減性能を発揮できるTMDがある³⁾。しかしこの反共振を利用したTMDは効果が高いのでマスを小さくできるが、固有振動数と異なる周波数の外乱には振動低減できないという弱点がある。そこでこの反共振を利用したTMDの高い振動低減性能に着目し、外乱振動の周波数の変化に対してTMD固有振動数を自動調整で変化させることで、周波数変化のある外乱に対しても振動低減効果を発揮する小型のTMDが実現できないかと考えた。

本報では、反共振型TMDの特徴と設計方法、固有振動数を調整することの効果、提案する固有振動数自動調整機能付き反共振型TMDの性能を検証するため

に製作した試作機の概要、試作機を実際の床に設置して性能検証した結果を報告する。

§2. 固有振動数自動調整機能付き反共振型 TMD

床にTMDが設置されている状態として図1に示す減衰2質点モデルを想定する。床に加振力が作用した時の床の応答変位は式(1)で与えられる。変数の説明は図1に示す。

$$\left| \frac{X_1}{F_0} \right| = \frac{1}{m_1} \cdot \sqrt{\frac{(\omega_d^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \cdot (2h_d \omega_d)^2}{a^2 + b^2}} \quad \cdots (1)$$

ここで、

$$a = \omega^4 - \omega^2 \{ \omega_1^2 + (1 + \mu) \omega_d^2 + 4h_1 h_d \omega_1 \omega_d \} + \omega_d^2 \omega_1^2 \quad \cdots (1b)$$

$$b = 2\omega \cdot [-\omega^2 \{ h_1 \omega_1 + (1 + \mu) h_d \omega_d \} + h_1 \omega_1 \omega_d^2 + h_d \omega_1^2 \omega_d] \quad \cdots (1c)$$

式(1)から、加振円周波数 ω がTMD固有円振動数 ω_d に一致する状態では、TMD減衰定数 h_d がゼロのとき床変位がゼロになり、この状態は“反共振”と呼ばれる。減衰定数1%の床に固有円振動数が一致する質量比 μ 0.1%のTMD($\omega_d = \omega_1$)を設置する場合を考える。TMD減衰定数 h_d が0.1%、2%および50%の時の加振力に対する床変位を式(1)、(1b)、(1c)を用いて求め図2に示す。図中にはTMDが無い状態の非制振の結果も併せて示す。この図から床およびTMDの固有円振動数に近い円周波数の加振力に対してはTMD減衰定数 h_d が小さくなるほど床変位が小さくなることが分かる。ただしTMD減衰定数 h_d が0.1%と小さいと床およびTMDの固有円振動数からズレた円周波数の加振力に対しては床変位が非制振の場合よりも大きくなってしまふ。

一般に適用されるTMDの減衰定数は、定点理論による質量比に応じた最適値を用いることが多い(以下、

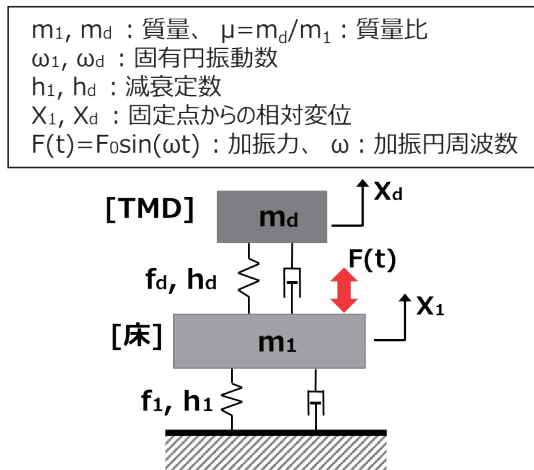


図1 減衰2質点モデル (床 + TMD)

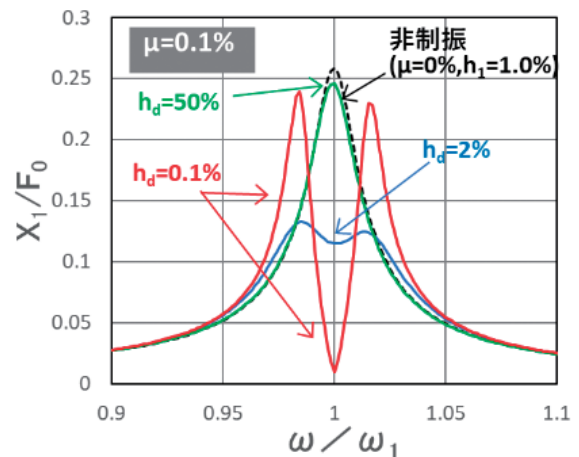


図2 加振力に対する床変位応答

減衰定数がこの最適値であるTMDを『最適減衰TMD』と呼ぶ。最適値は式(2)で求めるのが一般的である⁴⁾。

$$h_{d,opt} = \sqrt{\frac{3 \cdot \mu}{8 \cdot (1 + \mu)}} \quad \cdots (2)$$

質量比0.1%の時の減衰定数最適値を求めると2%となり、図2の $h_d = 2\%$ の曲線がTMD減衰定数最適値の場合の応答である。円周波数がTMDの固有円振動数に近い周波数だけでなく、ズレた周波数の加振力に対しても床変位がほぼ同じになっている。『最適減衰TMD』は、任意の円周波数の加振力に対して安定的に振動低減できるという利点がある。

一方、TMD減衰定数が最適値よりも小さいと、TMD固有振動数に近い周波数範囲の加振力に対しては床変位が最適減衰時よりも小さくなる。このような減衰定数が最適値よりも小さいTMDを『反共振型TMD』と呼ぶこととする。

次に減衰定数1%の床に対してTMDの質量比と減衰定数を変えて、 $\omega = \omega_1 = \omega_d$ の時の床変位を求め、その変位から床の等価減衰定数 $h_{1,eq}$ を評価した結果を図3に示す。なお図中■印は各質量比の定点理論による最適値の状態を示す。

質量比2%の場合でみる。『最適減衰TMD』ではTMD減衰定数は8.6%となり、このとき床の等価減衰定数は約7%になる(図中■印)。ここで質量比を変えずにTMD減衰定数を3%に小さくすると、床の等価減衰定数は約20%に増大する(図中○印)。一方質量比0.1%でもTMD減衰定数を0.4%にすれば床の等価減衰定数は約7%になり(図中●印)、質量比が小さくても『最適減衰TMD』と同等の等価減衰定数になる。つまり減衰定数を最適値以下で使用する『反共振型TMD』であれば、TMDの質量比と減衰定数の選

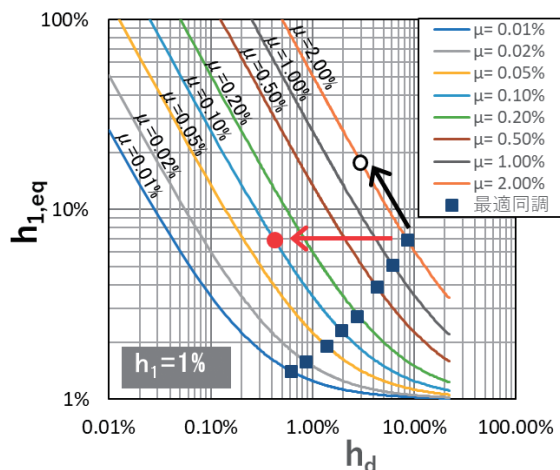


図3 TMD減衰定数と床の等価減衰定数の関係

択により床の等価減衰定数を自由に希望値に設定できる。『反共振型TMD』の減衰定数 h_d は、床の減衰定数 h_1 、床の等価減衰定数目標値 $h_{1,tgt}$ 、TMD質量比 μ を与えれば、式(3)から求めることができる。なお、この式は $\omega = \omega_1 = \omega_d$ の状態での非制振(質量比0%)の床変位の比較から得られる。

$$4\{\mu^2 - 4(h_{1,tgt}^2 - h_1^2)\} \cdot h_d^2 + 8\mu h_1 \cdot h_d + \mu^2 = 0 \quad \cdots (3)$$

しかし『反共振型TMD』で固有振動数が固定の場合、図2のようにTMD固有振動数と一致しない周波数での加振力に対しては床変位が大きくなってしまふ。そこで、TMD固有振動数を可変にできる構造とし、かつ加振周波数に一致するように自動調整可能とするTMD(『固有振動数自動調整機能付き反共振型TMD』)を考案した。

図4にTMD固有振動数を加振力の加振周波数に調整した場合の床変位応答を示す。床の減衰定数目標値 $h_{1,tgt}$ は3.5%、10%および30%とした。図から明らかなようにTMD固有振動数を調整することができれば、たとえ加振周波数が変化しても床変位を小さく抑えることができる。

§3. 試作機による振動実験結果

3.1 試作機

固有振動数自動調整機能付き反共振型TMDの動作および効果を検証するため試作機を製作した。写真1に外観、図5にシステム構成を示す。試作機はキャンチレバー構造で、架台上に水平方向に±150mm移動可能な錘(重量50kg)を取り付け、錘位置でTMD固有振動数を調整できるようにした。錘の位置決めはステッピングモータ+ボールねじで行った。加速度計を

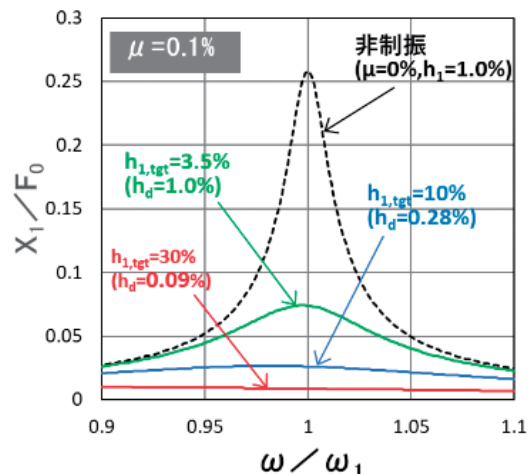


図4 TMD固有振動数を調整した時の床応答変位

ベース上に設置し床振動を常時計測する。任意の時間間隔ごとに蓄積された床振動データから卓越周波数を評価し、TMD固有振動数を床振動卓越周波数に一致させる調整を逐次行う。床振動の測定、周波数分析および錘の位置決め制御はPLC (Programmable Logic Controller) ですべて行う。本装置はTMD固有振動数と床振動の卓越周波数の一致精度および追従性が重要である。精度については周波数分解能0.005Hz、追従性としては調整時間間隔2秒に設定した。周波数分解能0.005Hzを得るためには200秒間のデータが必要なので、2秒間に収録・蓄積したデータにゼロを追加し200秒間のデータとし、周波数分析を行った。

減衰装置を取り外した状態で、錘の位置を可動範囲($\pm 150\text{mm}$)内で変化させ、その都度架台を自由振動させてTMD固有振動数と減衰定数を調べた。結果を図6に示す。固有振動数は5.6~8.8Hzで変化(錘位置

中央位置で7.2Hz、調整幅 $\pm 1.6\text{Hz}$)、減衰定数は位置に係わらず0.06%程度であった。装置自体小さな減衰定数を実現できたため、所定の減衰定数には設置している減衰装置で調節した。

3.2 振動実験結果

実際の建物の会議室床に試作機を設置し振動実験を行った。写真2に実験風景を示す。会議室は18m×18mの広さで固有振動数7.45Hz、減衰定数2.1%、有効質量50tonである。試作機を会議室ほぼ中央位置に設置し、近傍に起振機(振動錘重量50kg)を設置した。TMDマス質量(錘+架台)は70kgで床質量に対する質量比は0.14%となり一般的なTMDの約1/10程度である。TMD減衰定数は、0.1%、1.2%および2.5%の3種類の状態とした。それぞれ“錘位置固定”と“錘位置調整”の2ケースとした。起振機は定常加振とした

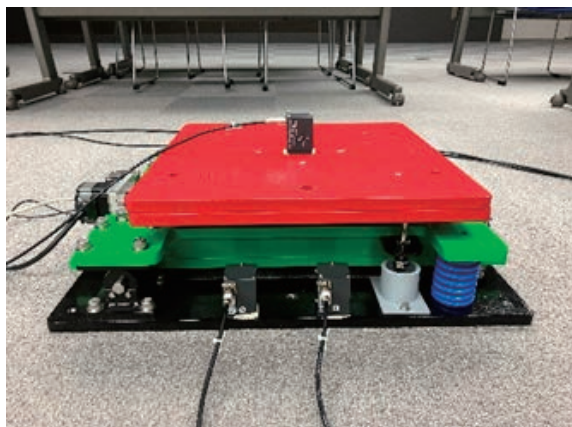


写真1 固有振動数自動調整機能付き反共振型TMD試作機

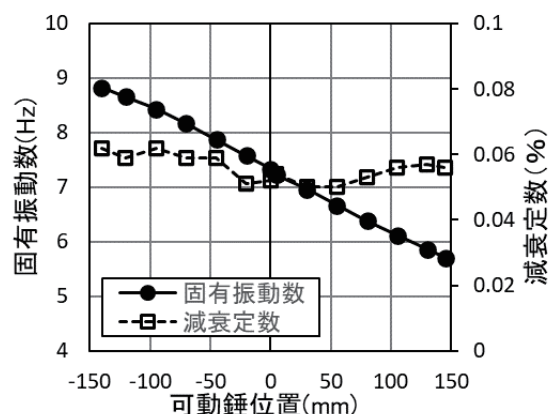


図6 錘位置と固有振動数および減衰定数の関係

PLC：データサンプリング周波数40Hz、サンプリング数64個
FFT分析個数 8192個（周波数分解能0.005Hz）
モータ位置決め時間間隔：約2sec、精度：0.005mm
減衰装置：粘性体にボルト挿入、ボルトを上下して浸す長さ調整

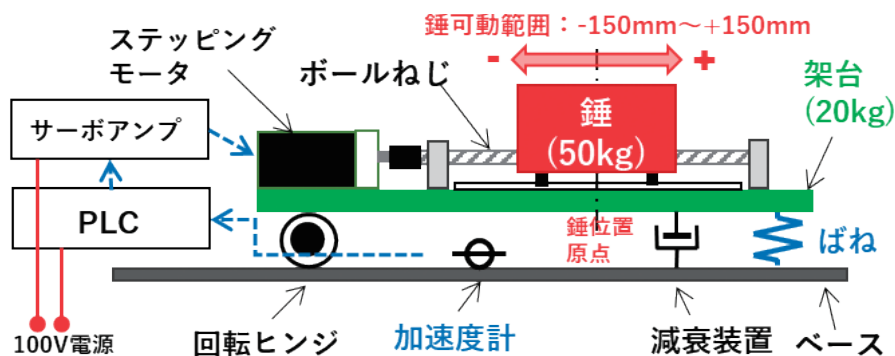


図5 システム構成

(加振周波数：7～8Hz [0.01Hzピッチで変化])。データの計測は、床、架台および起振機錘の加速度と、PLCからの出力である錘の位置、評価卓越周波数および卓越周波数でのスペクトル値をサンプリング周波数200Hzで収録した。床応答が定常状態に落ち着いた状態での加振周波数成分の床加速度振幅値と加振力（起振機錘加速度に錘重量50kgに乗じて求める）振幅値の比を求めた。

図7に振動実験結果を示す。図7(a)は加振周波数－床加速度／加振力の実験結果を示す。錘位置固定の場合、床加速度がTMDなしの時よりも大きくなる周波数範囲が存在するが、錘位置調整の場合、全周波数範囲で床加速度をTMDなしの時よりも小さく抑えることができている。またTMD減衰定数が小さいほど床加速度が小さくなっている。



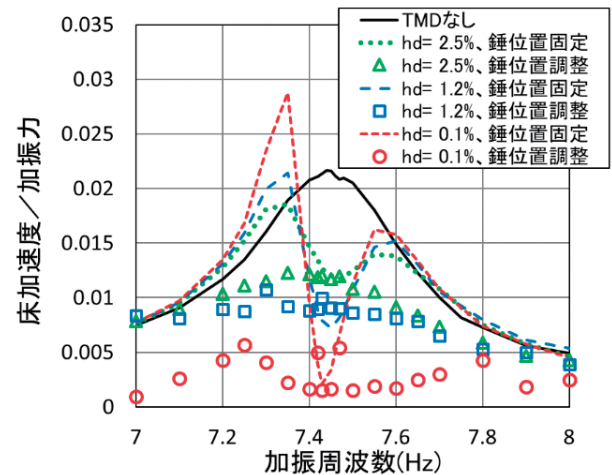
写真2 検証試験状況

図7(b)は実験結果と解析モデルと比較したもので、TMD減衰定数0.1%で一部差がみられるが、ほぼ解析モデルどおりの結果が得られている。差が生じた原因は、床振動が或る値以下に収まった状態では錘位置調整は行わないように設定しているため、錘が止まった状態のTMD固有振動数が加振周波数と差が生じたためである。

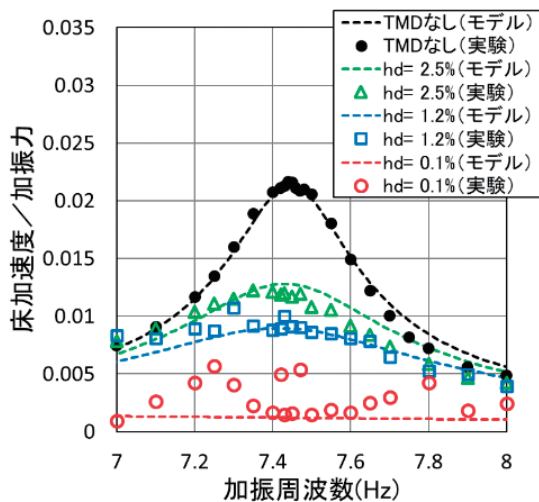
図7(c)は錘位置調整後のTMD固有振動数と加振周波数の誤差を示す。調整誤差は $\pm 1.5\%$ 以内に収まっている。但しTMD減衰定数が小さいと誤差が大きくなるときがあり（図中赤色○印）、性能低下につながっていると思われる。

§4. まとめ

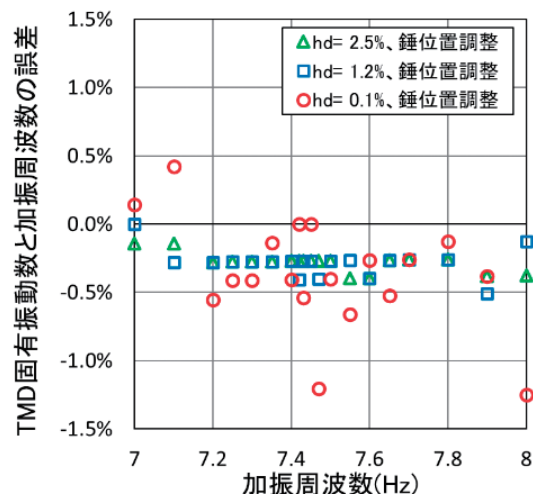
固有振動数自動調整機能付き反共振型TMDの有効



(a) 実験結果



(b) 解析結果との比較



(c) 調整後TMD固有振動数と加振周波数の誤差

図7 実際の床に試作機を設置し起振機加振をしたときの実験結果

性および設計法を示した。また試作機を製作し実際の床に設置し振動実験を行った結果、設計通りの振動低減性能を発揮できた。一般的なTMDに比べ、高性能あるいはコンパクトなTMDの実現が可能であることが分かった。

参 考 文 献

- 1) 宮城大輔、二木秀也、西村章：TMD装置を有する大スパン架構の鉛直振動抑制効果、日本建築学会学術講演梗概集（北陸）、pp.895-896、2019年9月
- 2) 中村佳也、中山昌尚：上下振動用アクティブ制御装置に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集（北陸）、pp.509-510、2010年9月
- 3) 阿部隆之、福田優輝、井上竜太：反共振型TMDを用いた設備振動の低減に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集（関東）、pp.435-436、2020年9月
- 4) J.P.Den Hartog : Mechanical Vibrations, 4th ed., McGraw-Hill, 1956.

ひとこと

何事にも長所、短所がある。非常に優れた長所を持つものでも短所があるために活かされていないことがあるように思う。短所を改良・改善し、長所を目立たせ活かした技術開発を心がけたい。



中村 佳也