

床振動抑制システム「T-Silent® TMD Floor」の開発

廣澤 邦一^{*1}・田口 典生^{*1}・荒木 陽三^{*2}

Keywords : Floor vibration, TMD (Tuned Mass Damper), Evolutionary computation, Mathematical optimization
床振動, TMD (動吸振器), 進化計算, 数理最適化

1. はじめに

オフィス等の鉄骨造建物では、歩行などに起因する床振動が執務空間の快適性を損なったり作業効率を低下させたりする要因となる場合がある。このような振動の対策として OA フロアと床スラブの間に振動を抑制する TMD (Tuned Mass Damper) と呼ばれる振動抑制装置を複数台設置する方法があり、面積 200~300 m² の床に対して 10~20 台の TMD を設置することが一般的である。しかし従来の TMD は 1 台当たりのコストが高く、導入費用の負担が大きくなるという課題があった。また、建物の供用後に床振動対策として TMD を設置する際には、OA フロアを一旦外すため家具や什器を移動する必要があり、TMD の寸法が大きいと工事が広範囲となってしまう課題もあった。さらに OA フロアと床スラブとの間の空間の高さが低いと TMD が入らないという制約もあった。

そこで、これらの課題を解決するため、低コストで薄型かつコンパクトな新型 TMD を開発した。また、これに TMD の設計を AI を用いて最適化できる技術 (T-Optimus® TMD¹⁾) を組み合わせた、床振動抑制システム T-Silent TMD Floor (図-1 参照) を開発した。本報告では、T-Silent TMD Floor の概要と、本システムを用いることによって、TMD の必要台数を削減しつつトータルコスト (以降、設置費用を除いたものを意味する) を削減した例を紹介する。

2. 薄型コンパクト TMD の開発

前章で述べたように、従来の TMD は単価が高く導入



図-1 床振動抑制システム T-Silent TMD Floor

Fig. 1 Floor vibration damping system "T-Silent TMD Floor"

の妨げとなることから、構造をできるだけ単純化し、従来品と比べて約 20% のコストダウンとなる新型 TMD を開発した。

2.1 板バネの採用

TMD は 1 台あたり 30~40 kg の錘 (マス) とバネおよび減衰材から構成され、バネの固さを変えて共振周波数 (同調周波数) を調整し、床スラブの上下の振動とは逆向きに錘が動くことで振動によるエネルギーを吸収し、制振する装置である。ここで、従来型の TMD では、そのバネにコイルバネを採用することが非常に多い。

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 音響研究室

* 2 成蹊大学

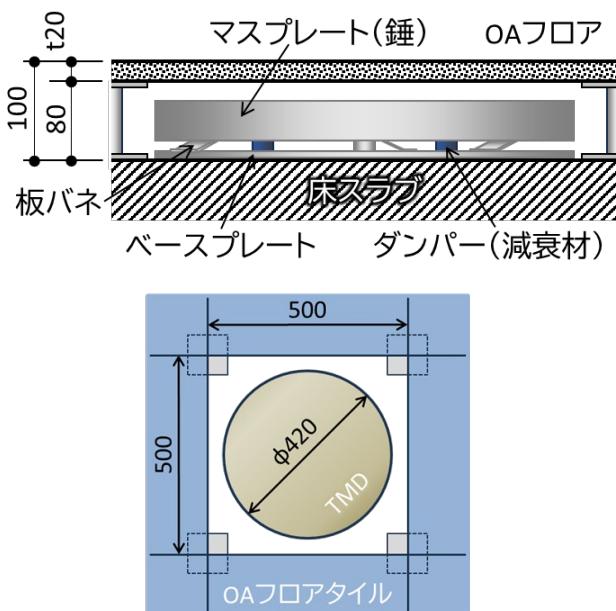


図-2 新型TMDの構造とOAフロア内収まりイメージ
Fig. 2 The new TMD structure and installation image within the OA floor

一般的な OA フロア内の空間に TMD を収めることを考えると、その高さをできる限り抑える必要があるが、コイルバネはそれ自体の厚さが薄くはないため、マスプレートの厚さを犠牲にせざるを得ない場合がある。しかし、TMD の機能上、必要となるマスの質量は決まるため、平面的に錐を大きくせざるを得ず、1 台の TMD が一枚の OA パネルの面積よりも大きくなってしまうことがある。そこで筆者らはコイルバネよりも薄くすることができる板バネを採用することとした。

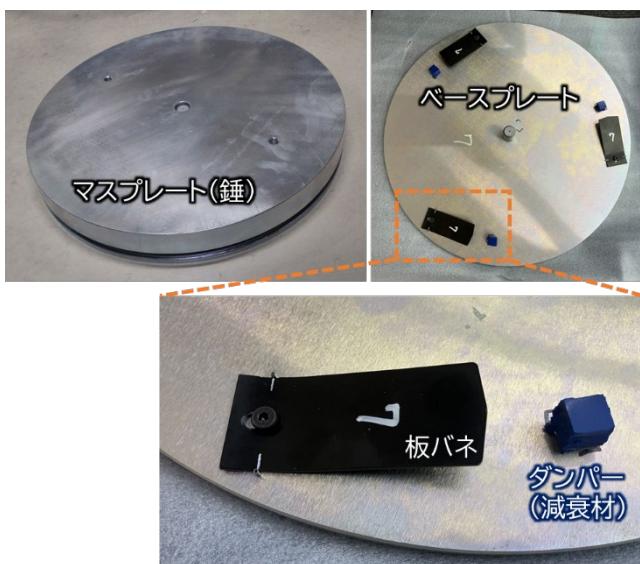


写真-1 新型TMDの詳細構造
Photo. 1 Detailed structure of the new TMD

板バネを使うことによって、低い OA フロアと床スラブ間の空間であっても TMD で抑制すべき床振動の振幅は微小であるため、マスを支え、床振動に同調する振動を生み出すことができる。図-2に新型 TMD の構造概要図と OA フロア内の収まりイメージを示す。また、写真-1に新型 TMD の詳細構造を写真で示す。写真の右上に示すベースプレートに板バネをビスで固定し、さらにダンパー設置して、それらの上にマスプレートを乗せた構造である。

2.2 円形マスの採用

一般的な OA フロアパネルのサイズは 500 mm × 500 mm である。したがって、新型 TMD は、パネルを 1 枚だけ取り外せば設置可能な大きさとし、また、設置しやすいよう、四隅に余裕ができる円形を採用した。

もしマスが四角形ならば、4 点で支持しないと不安定であるが、円形であることにより、支持点数、すなわち板バネの枚数が 3 枚でマスを安定的に支えることができるという副次的な効果も得られる。

2.3 ダンパーについて

ダンパーの材質には軟質ウレタンを用いた。ダンパーの減衰比の調整は、両プレートに接する面積を変化させることで行うようにしている。

3. AI による TMD の最適設計

3.1 従来の TMD 設計方法

従来の TMD の設計では、問題となる床スラブの質量に対して必要とされる TMD の質量は経験的に 2~3% 程度とされていた。まず、大きな一つの塊としての TMD を考え、そのバネと減衰比を求める。そして、この大きな TMD を OA フロアの内部に収まる大きさに均等割りにした、等しい性質の TMD を複数設けるというのが、従来の TMD の設計方法である。この設計手法を図-3 に示す。

ここで、より効率的に TMD を設計し、運用できるよう一台一台の TMD を最適化することを考える。この最適化が実現できれば、必要となる TMD の台数を減らせる可能性がある。しかし、バネの強さや、床振動に同調させるバネの周波数、さらにはダンパーの減衰比との組合せが膨大な数となってしまい、人の手でこの最適化を行うことは現実的には不可能である。そこで、この最適化に AI の一種である進化計算を適用することとした。

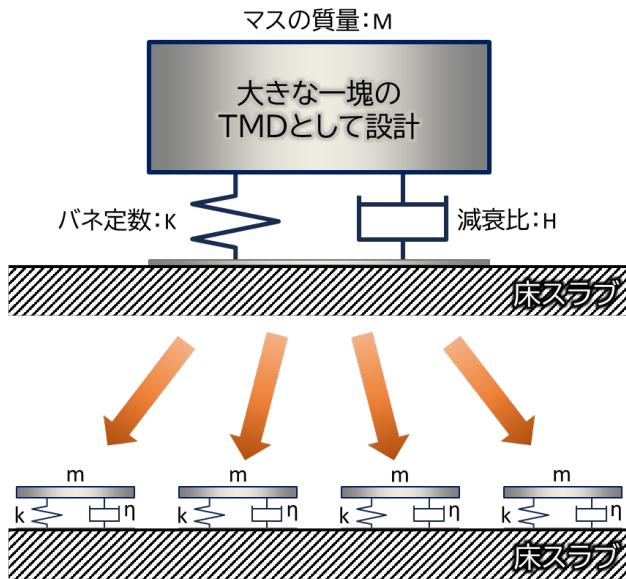


図-3 従来の TMD 設計方法

Fig. 3 Traditional design method for TMD

3.2 TMD の最適設計

進化計算とは、生物が何世代にもわたって突然変異や淘汰を繰り返して進化を遂げ、周りの環境や生物の種としての優位性を確立するために最適化していく様を数学的に模擬したものである。この進化計算を TMD の設計に取り入れた T-Optimus TMD によって、人の力では到達できないような TMD の設計に対する最適解を得ることができる。

4. T-Silent TMD Floor の適用事例

本章では T-Silent TMD Floor を用いて設計した TMD と、従来手法で設計した TMD とを用いて、実際の建物の床振動対策に適用した実験の例を示す。実験は図-4 に示すオフィスのフロアにて行った。

4.1 実験用 TMD の設計

対象のフロアに対して、TMD を設計するため、事前に床の振動測定を行ったところ、床の一次固有周波数は 8.17 Hz であった。

次に、この床の振動を低減させる TMD を従来手法と T-Optimus TMD を用いた二つの方法で設計した。床は一次固有周波数で大きく振動するため、この周波数附近に TMD の同調周波数を調整する。従来手法では床の質量と TMD の総質量との関係から、TMD の台数を 10 台として、すべて同じ同調周波数および減衰比で設計した。それに対し、T-Optimus TMD による設計では、6 台を 2 種類の同調周波数と減衰比の組み合わせに分け

表-1 TMD の設計

Table 1 Design of TMD

設計方法	同調周波数 (Hz)	減衰比
従来の方法	8.12	0.076
T-Optimus TMD	7.55	0.042
	8.14	0.043

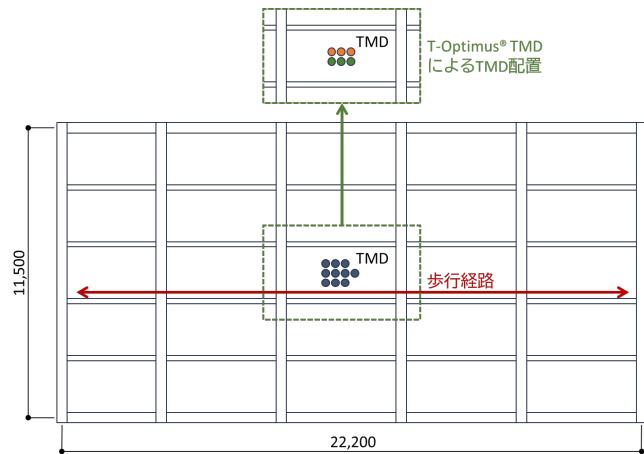


図-4 実験に使用した床と TMD 設置時の状況、および歩行経路図

Fig. 4 The floor used in the experience, installation of TMDs, and the walking route

るという最適解が得られた。この二つの設計手法のそれぞれの TMD の同調周波数と減衰比を表-1 に示す。

この設計にしたがってそれぞれ TMD を製作し、図-4 に示すように、床の一次固有周波数において最も大きく振動する中央部に TMD を集約して設置した。

4.2 TMD による制振効果の確認

4.2.1 歩行振動測定方法

前項で設計した TMD の振動低減効果を確認するため、フロアを一人で歩行したときの振動測定を、TMD あり／なしの条件でそれぞれ実施した。

歩行の条件は、図-4 に示す歩行経路を、床の一次固有周波数 8.17 Hz で共振しやすいように、一次固有周波数の 1/4 のピッチ 2.04 Hz で歩いた。この歩行経路を 1 往復するごとに 1/3 オクターブバンドフィルタ処理後の振動加速度時刻歴波形の最大値を測定し、3 往復の平均値を測定値とした。

4.2.2 TMD 設置前後の歩行振動測定結果

前項の歩行振動の測定結果を図-5 に示す。図中には日本建築学会から示されている建築物の振動に関する居住性能評価指針（2004 年）²⁾における評価曲線も記す。また表-2 に評価結果の一覧を示す。

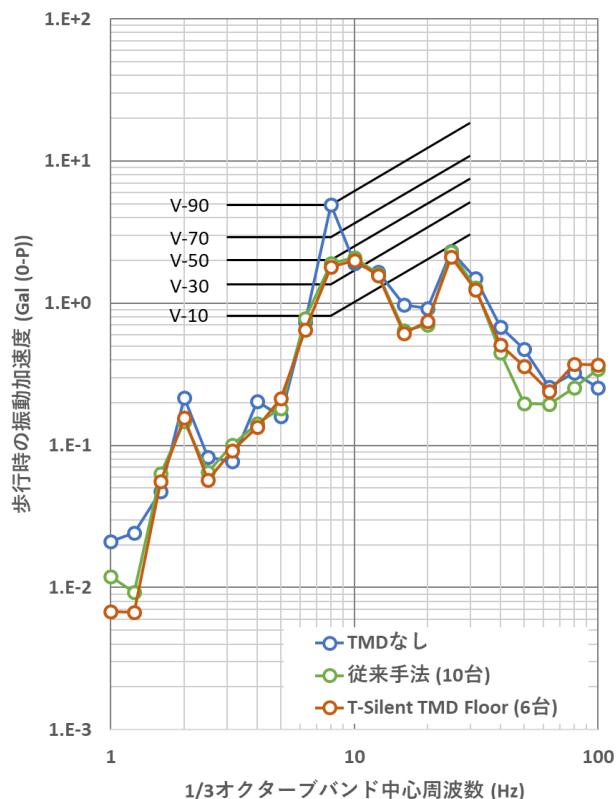


図-5 歩行振動測定結果

Fig. 5 Walking vibration measurement result

表-2 フロアの居住性能評価一覧

Table 2 Evaluation of habitability to building vibration

TMD（設計方法）	居住性能評価指針による評価
なし	V-90
10台（従来の方法）	V-50以下
6台（T-Optimus TMD）	V-50以下

図-5および表-2からTMDを設置していない条件では、床の一次固有周波数が存在する8 Hz帯域に振動加速度のピークが存在し、居住性能評価はV-90を示している。次に、従来手法で設計した10台のTMDを設置した場合の振動加速度を見ると、ピークのあった8 Hz帯域で大きく低減し、居住性能評価がV-50を下回ったことから、TMDの振動低減効果があったことが分かる。これに対して、T-Optimus TMDで最適設計した条件ではTMDが6台にもかかわらず、従来手法で設計した10台のTMDを設置した場合とほぼ同等の値を示しており、居住性能評価もV-50を下回ることができた。

表-3 T-Silent TMD Floorによるコスト削減効果

Table 3 Cost reduction effect by using T-Silent TMD Floor

TMD	設計手法	台数	TMD単価	トータルコスト
従来品	従来手法	10台	40万円 (100%)	400万円
新型	T-Optimus TMD	6台	30~35万円	180~210万円 (45~53%)

4.3 T-Silent TMD Floorによるコスト削減

前節の実験に用いたTMDにかかるトータルコストを算出し表-3に示す。従来手法で設計した従来型のTMDの製品単価を40万円とする、10台必要であるためトータルで400万円かかる。一方、T-Optimus TMDで設計した新型TMDを用いると台数を6台に削減でき、かつ1台当たりの製品単価を30~35万円に抑えることができるので、トータルでは180~210万円までコストを削減できる。よって従来手法でTMDを設計するのに對し、T-Silent TMD Floorではその約50%のコストで同等の床振動抑制効果を得ることが分かった。

5. まとめ

本報告では、薄型でコンパクトな新型TMDを、TMDの最適設計ツールであるT-Optimus TMDに併用して開発した床振動抑制システムT-Silent TMD Floorについて紹介した。TMDの構造の簡易化と、最適設計による台数の削減が可能となり、従来、コストの面で導入が難しかった建物へ本システムが適用しやすくなることが期待される。

今後、新築・既存を問わず床振動が問題となっている建物に対して本システムの導入を提案し、解決の一助として展開していく予定である。また、これまでのTMDの適用事例や本報告では、コンクリート構造の建物を対象としていたが、近年、カーボンニュートラルの観点から注目されている木造建築物への適用も視野に入れた検討を予定している。

参考文献

- 荒木陽三、田口典生、増田潔：進化計算を用いた床振動制御用TMDの最適設計、大成建設技術センター報、第55号、49、2022.
- 日本建築学会環境基準 AJES-V001-2004：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説