

TMDによる重量床衝撃音の低減効果に関する検討

Study on Reduction Effect of Heavy Weight Floor Impact Sound Using TMD

技術研究所 小林 秀彰 KOBAYASHI HIDEAKI

技術研究所 岩本 毅 IWAMOTO TAKESHI

集合住宅で問題視される生活音の重量床衝撃音の対策の1つとして、同調質量ダンパー(TMD)を用いた対策が挙げられる。TMDにより重量床衝撃音を効果的に低減させるには、最適な配置条件を把握することが重要である。本研究では、まず実大スラブの上にTMDを設置した場合の低減効果を確認した。その後、1/3縮尺模型でTMDの種々の配置条件で低減効果に関する検討を行った。その結果、TMDの重量床衝撃音の測定室スラブ対質量比が5%以上であれば、低減効果は5dB以上得られることがわかった。また低減効果は、TMDを振動モードの腹の部分に設置した方が得られやすいことがわかった。

キーワード：TMD、重量床衝撃音、実大スラブ、縮尺模型実験、インピーダンス、振動モード

TMD (Tuned mass damper, which is known as another name; dynamic absorber) set on slabs is thought to be one of the hopeful countermeasures for the heavy weight floor impact sound which is a major problem in the housing complex. However effectiveness of TMD have rarely been verified in full scale experiments, and especially there are few studies on optimal location of TMD. This paper firstly shows the results of full scale slab experiments using TMD, then shows the difference of heavy weight floor impact sound level for various arrangement of TMD in 1/3 scale model experiments. These results show that the reduction effects of sound level is more than 5dB when the ratio of TMD's mass to the slab mass of sound receiving room is more than 5%, and that effects is further increased when TMD are installed on the antinodes of slab vibration mode.

Key Words: Tuned Mass Damper, Heavy Weight Floor Impact Sound, Full Scale Slab, 1/3 Scale Model Experiment, Driving-point Impedance, Vibration Mode

1. はじめに

集合住宅における音環境の中で特に問題視される生活音の1つに、上下階における人の飛び跳ねや歩行により生じる重量床衝撃音があり、居住者からの指摘率も多く、居住者間のトラブルになりやすい音の1つである。重量床衝撃音を低減させるにはスラブを厚くして重量と剛性を増加させることが有効である。しかし、この場合には躯体重量が増加するため、長期応力や地震力の増加により躯体寸法の増加に繋がるのが考えられる。その他の対策として同調質量ダンパー(以下、TMD: Tuned Mass Damper)を用いる方法が近年研究されている(例えば1), 2), 3)。TMDは振動体にバネを介した重錘を設置することで振動を減衰させる装置であり、これをスラブや内装材に設置することで重量床衝撃音が低減されることが報告

されている。しかしTMDによる重量床衝撃音の低減を効果的に得る最適な配置条件に関する研究事例はほとんどない。

そこで本研究では、まず重量床衝撃音に対するTMDの有効性を確認するため、集合住宅を想定した実物大の大スパンスラブの上にTMDを設置した場合の重量床衝撃音の低減効果について述べる。次に、一般的な集合住宅の構造形式を模擬したコンクリート製の1/3縮尺模型を用いて実施したTMDの種々の配置条件による重量床衝撃音の低減効果について述べる。

2. 実大スラブを用いたTMDの効果確認

(1) 実験概要

図-1に、実験対象スラブを示す。スラブは張間方向

に大梁のないスパン約 11m、厚さ 300mm のボイドスラブである。重量床衝撃音を測定するための加振室と直下室の受音室は、LGS と石膏ボードの乾式壁で仕切られた 4,800×4,200mm の居室である。加振室は床が RC 素面、受音室は天井が仕上げなし、床が二重床である。

図-2 に、実験住戸範囲(図-1 赤点線枠)における重量床衝撃音の一般的な決定周波数帯域内のスラブのモード振動数である 50Hz 帯域のインピーダンスレベルの分布を示す。50Hz 帯域では、住戸中央付近とその両側でインピーダンスレベルが低下していることが分かる。そこで本実験では、重量床衝撃音レベルの 50Hz 帯域を低減させることを目標として、TMD の固有振動数を 50Hz 帯域内に設定した。TMD の配置はインピーダンスレベルが低い領域に着目し、実験住戸の中央付近に TMD を集中的に配置した場合を Case1、測定する居室の中央付近に TMD を集中的に配置した場合を Case2、TMD を設置していない場合を Case0 として、3 ケースの重量床衝撃音実験を実施した。

図-3 に、設置した TMD の概要を示す。スラブ上にエポキシ樹脂で接着した鋼製台座の上に防振ゴムを固定し、その上に約 22kg の鋼製重錘を載せて TMD を構成した。TMD の固有振動数は、25 個平均で約 47Hz(標準偏差 0.82Hz)であり、50Hz 帯域内(45~56Hz)に調整した。

表-1 に、各実験 Case における TMD の設置条件を示す。Case1, 2 で設置する TMD25 個の重錘の質量の合計は 560kg であり、実験住戸のスラブ全質量に対する質量比 1.2%、測定室のスラブ全質量に対する質量比は 5.8%である。

図-4 に、測定ブロックダイアグラムを示す。測定方法は、JIS A 1418-2:2000⁴⁾に準拠した。重量床衝撃音の加振源は、衝撃力特性(1)のバングマシンと衝撃力特性(2)のゴムボール(落下高さ 100cm)を用いた。加振点は測定室の対角線上の 5 点(①~⑤)とし、直下の受音室の受音点は加振点と平面的に同一位置とし、高さは H=800~1,600mm(@200mm)で空間的に均等に分布させるためにばらつきを与えた。また、①~⑤全てに振動加速度ピックアップを設置して、各点を加振した際の振動加速度を 5 点同時に測定した。

(2) 実験結果

a) 重量床衝撃音レベル

図-5 に、重量床衝撃音レベルの測定結果を示す。加振源がバングマシンの場合の Case0 と比較して、低減目標周波数の 50Hz 帯域における Case1 は低減効果が約 1dB であったが、Case2 は約 5dB であった。また、その他の帯域においても、Case2 は低減効果が数 dB あるこ

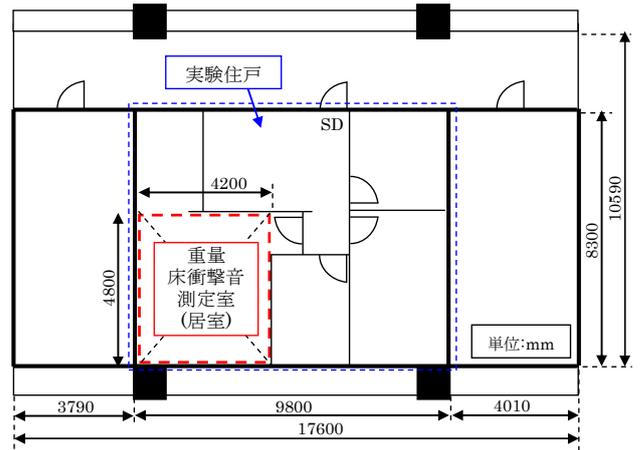


図-1 実験対象スラブ

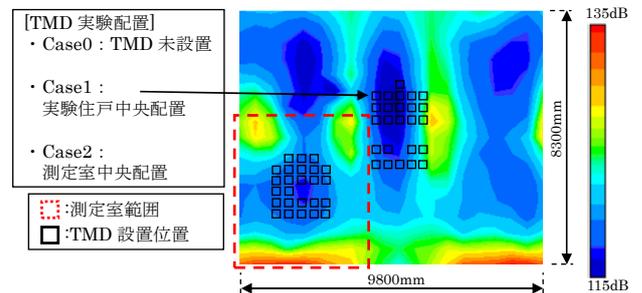


図-2 実験住戸範囲の 50Hz 帯域のインピーダンスレベル分布と TMD 配置条件

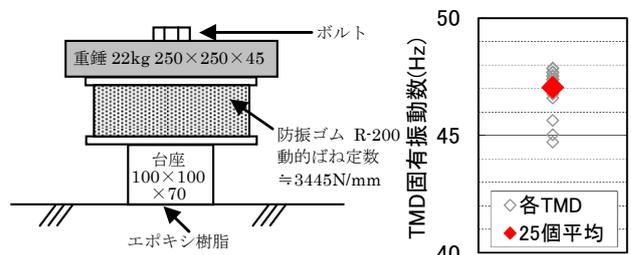


図-3 TMD 装置の概要

表-1 各実験 Case における TMD 設置条件

実験 Case	TMD 設置条件			
	配置条件	個数	全質量(kg)	スラブ対質量比(%)
Case0	TMD未設置	0	0	0
Case1	実験住戸中央	25	560	(対実験住戸スラブ) 1.2
Case2	測定室中央	25	560	(対測定室スラブ) 5.8

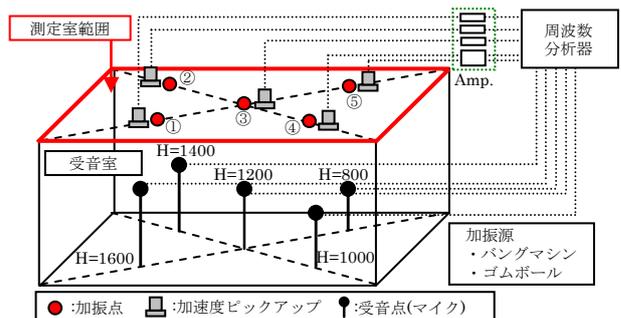


図-4 測定ブロックダイアグラム

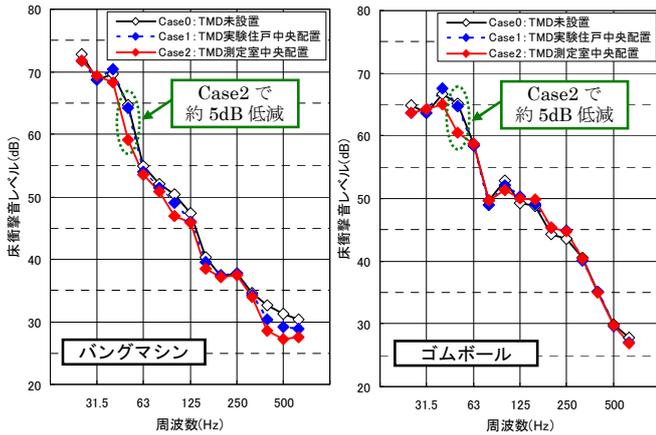


図-5 重量床衝撃音レベル測定結果(5点平均)

とが分かった。一方、ゴムボールの場合は 50Hz 帯域では Case2 で約 5dB 程度の低減効果が見られたが、他の帯域や Case1 では顕著な効果が見られなかった。

b) 振動加速度

図-6 に、バングマシンによる加振時の Case0 に対する Case2 の振動加速度のエネルギースペクトル比を、各加振点毎に算出した結果を示す。振動加速度が TMD の固有振動数 47Hz 付近で低減していることが分かる。その低減量はどの加振点でも同様であり、エネルギー比で約 1/10 程度であった。一方、30~40Hz および 50Hz 付近で比が増加している部分も見られる。この傾向は加振源をゴムボールに変えても同様であった。一方、Case0 に対する Case1 のエネルギースペクトル比では、重量床衝撃音レベルと同様に振動の低減は確認されなかった。

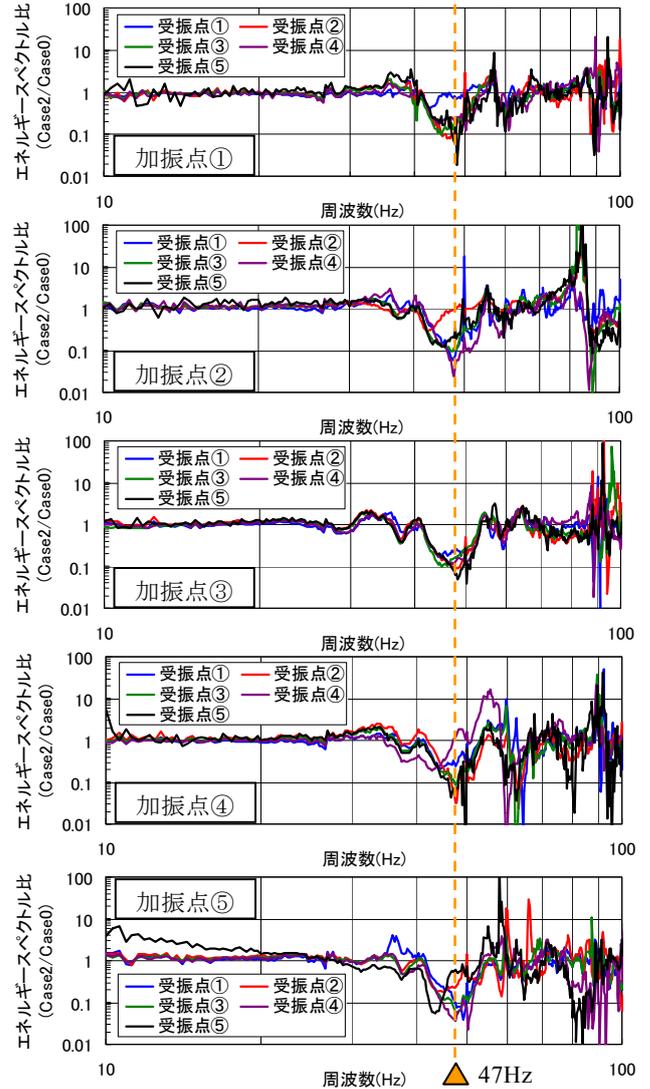


図-6 バングマシンによる加振時の振動加速度のエネルギースペクトル比(Case2/Case0)

(3) まとめ

実大スラブを用いて TMD による重量床衝撃音の低減効果を測定した。その結果、TMD の固有振動数を重量床衝撃音の決定周波数帯域内のスラブのモード振動数付近に調整し、TMD の対スラブ全質量比を 5.8% として測定室中央付近に集中して配置した場合、重量床衝撃音レベルで 5dB 程度、振動加速度のエネルギーで 1/10 程度の低減効果が得られた。

3. 1/3 縮尺模型を用いた TMD の配置条件による低減効果の検討

(1) 実験概要

a) 縮尺模型概要

図-7 に、実験を行った縮尺模型概要を示す。スケールは 1/3 縮尺とし、一般的な集合住宅のスラブを想定して、厚さ 80mm(実大換算 240mm)のスラブを壁構造で支

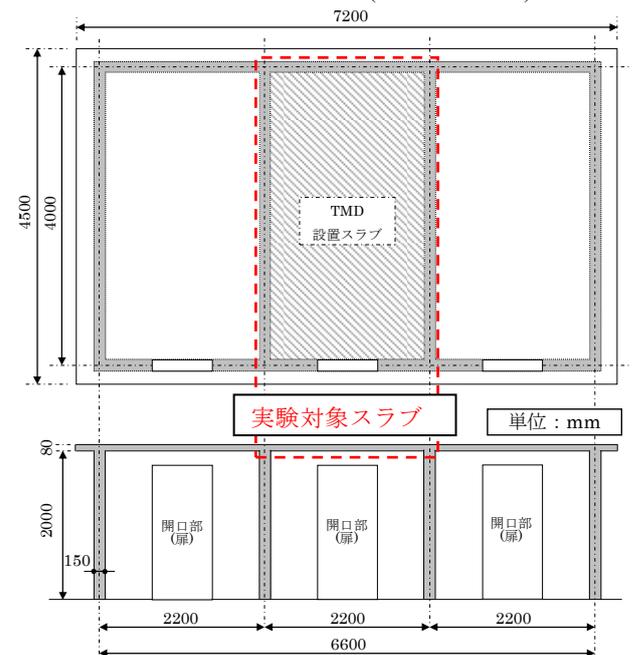


図-7 1/3 縮尺模型概要

える形状とした。スパンは、梁間方向を 4,000mm(実大換算 12,000mm)とし、桁行方向については隣接スラブへの振動減衰やスラブの境界条件を考慮して、1 スパンあたり 2,200mm(実大換算 6,600mm)の 3 スパンとした。重量床衝撃音の実験対象としたスラブは、3 連スラブの中央スパンのスラブとし、そのスパン内のみ TMD を設置した際の低減効果を測定した。また 1 階の天井高さは実験の作業性を考慮して 2,000mm としたが、重量床衝撃音を測定するには一般的な集合住宅を想定して、受音室の天井高さが 800mm(実大換算 2,400mm)となるように製作した受音箱を使用した。

b) TMD 装置概要

図-8 に、TMD 装置の概要を示す。TMD は、1kg の鋼製の錘プレートを厚さ 38mm、外径 40φ の防振ゴムで上下に挟み込み、長ボルトでこれらを貫通させ、スラブ下面に仕込んだめねじアンカーで固定する仕様とした。長ボルトに与えるトルクで防振ゴムに圧縮力をかけてバネ定数を変化させることで、TMD の固有振動数を調整することが可能である。TMD の目標固有振動数は、今回の 1/3 縮尺模型における音圧の周波数が模型実験の相似則^{5),6)}により実物の 3 倍となるため、重量床衝撃音の一般的な決定周波数帯域である 63Hz 帯域(45~90Hz)の 3 倍の 189Hz 帯域幅(135~270Hz)内として 189±10Hz とした。TMD の固有振動数の調整は、図-9 に示すように錘プレート上に加速度ピックアップを設置し、スラブ下面をハンマーで加振した際の TMD の固有振動数を小型 FFT 分析器で読み取り、卓越周波数が目標固有振動数の範囲内となるように長ボルトを締め付けて行った。

c) 重量床衝撃音の測定概要

図-10 に、TMD の配置と重量床衝撃音測定のための受音箱の位置をそれぞれ示す。S1~9 の枠が受音箱の位置を示している。また、表-2 に実験 Case の一覧を示す。TMD の配置は、実験対象スラブ内に単位面積当たりの TMD の個数を変化させてほぼ均等に配置する「分散配置」を 3 パターン(D038, D075, D150:数字は TMD の個数を表す。以下同じ。)、スラブ中央に集中的に配置する「集中配置」を 1 パターン(C075)、一般的な集合住宅のプランを想定して、人の歩行や飛び跳ねが想定される LD, BR, 廊下に集中的に配置する「プラン配置」を 1 パターン(P076)、および TMD を設置しない「TMD 未設置」を 1 パターン(N000)とした。実験対象スラブの全質量に対する TMD の質量比(以下、実験対象スラブ対質量比)は、D038 は約 2.5%、D075 は約 5%、D150 は約 10%、C075 と P076 は共に約 5%である。重量床衝撃音

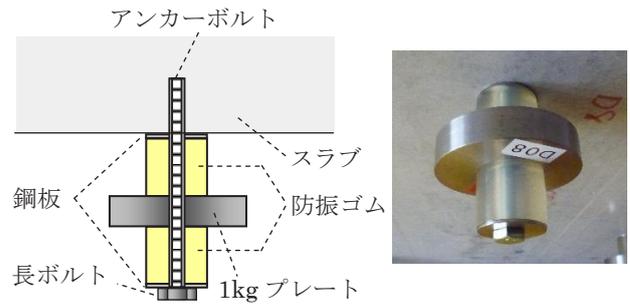


図-8 TMD 装置の概要

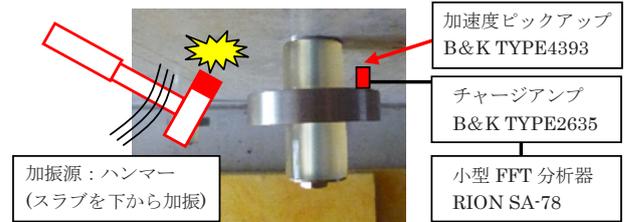


図-9 TMD の固有振動数の確認測定

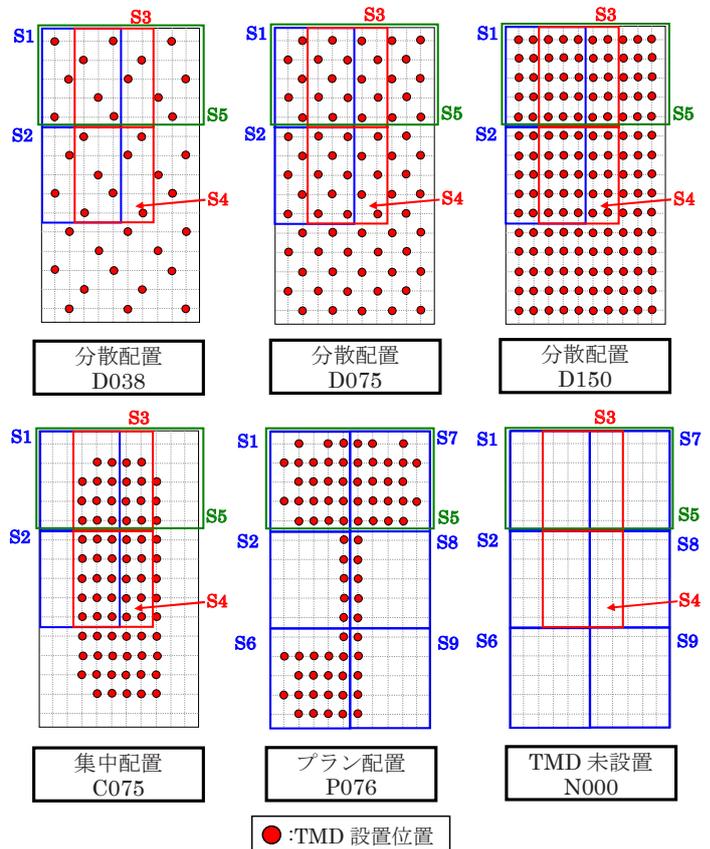


図-10 TMD の配置と重量床衝撃音測定の受音箱位置

表-2 各実験 Case 一覧

配置パターン	TMD 個数	TMDの実験対象スラブ対質量比(%)	重量床衝撃音測定受音箱位置	室数	
分散	D038	38	2.5	S1・S2・S3・S4・S5	5室
	D075	75	5	S1・S2・S3・S4・S5	5室
	D150	150	10	S1・S2・S3・S4・S5	5室
集中	C075	75	5	S1・S2・S3・S4・S5	5室
プラン	P076	76	5	S1・S2・S5・S6・S7・S8・S9	7室
TMD未設置	N000	0	0	上記の全位置	9室

の受音箱は、分散配置と集中配置は S1～S5 の 5 ヶ所、プラン配置では S1～2 と S5～S9 の 7 ヶ所、また TMD 未設置では TMD の低減効果を確認するために上記の全ての場所に設置した。

写真-1 に、本実験で使用した重量床衝撃源のインパクトハンマーを示す。通常、重量床衝撃音測定用の衝撃源はバングマシンとするが、実験対象が 1/3 縮尺模型であることから、模型則⁵⁾によりバングマシンに対して衝撃時間が 1/3、衝撃力が 1/9 となる衝撃源が必要であることから、これを満たすインパクトハンマーを製作した。なお、ハンマーヘッドの仕様は、35φのゴム硬度が 65° である。図-11 に、写真-1 のインパクトハンマーの衝撃力時間波形を示す。衝撃時間は 7ms 程度であり、バングマシンの衝撃時間 20±2ms の 1/3 である 6.7ms±0.67ms 程度である。またバングマシンの加振力最大値が約 4,300N であることから、衝撃力が 1/9 の 480N 程度となるようにインパクトハンマーの落下高さを調整した。

図-12 に、重量床衝撃音の測定用受音箱を示す。重量床衝撃音を測定するための居室を模した受音箱であり、高さは一般的な集合住宅の天井高さの 1/3 の 800mm(実物換算 2,400mm)、奥行は 1,300mm、幅は 1,020mm である。床面と壁 3 面はベニヤ合板、壁 1 面は受音箱内の状況を視認できるように無色透明なアクリル板を使用し、全て反射性が高い材料で統一した。受音箱の壁 4 面は上下にスライドする機構とし、所定の位置に設置した後、壁をスライドさせてスラブ下面までせり上げている。なお、受音箱から外部への音漏れを防止するために、壁とスラブの取合い部分の隙間は粘土、ガムテープ、および木材を用いて隙間処理を施し、受音箱内の測定マイクのケーブルの貫通孔も同様の処理を行った。一方、測定室が大きい S5 の場合は、壁 1 面を押し下げた受音箱 2 個を並列で連結させて、気積が 2 倍になるようにした。

図-13 に、測定ブロックダイアグラムを示す。測定方法は、JIS A 1418-2:2000⁴⁾に準拠した。受音箱内に設置した 5 個のマイクロホンで音圧を測定し、FFT 分析器を用いて重量床衝撃音レベルを測定した。マイクロホンの設置位置は、平面的には受音箱の平面の対角線の交点、および対角線の 4 分位点に、立面的には高さ H=266～533mm(@66.5mm)で空間的に均等になるようにばらつきを与えた。スラブを加振する際は、1/3 縮尺模型の壁位置を支点とするブリッジを架け、その上に人が載って加振源を操作することにより、実験対象スラブ内に人が立ち入らないようにした。

d) 駆動点インピーダンスの測定概要

重量床衝撃音の測定の他に、TMD によるスラブ振動へ



写真-1 重量床衝撃源

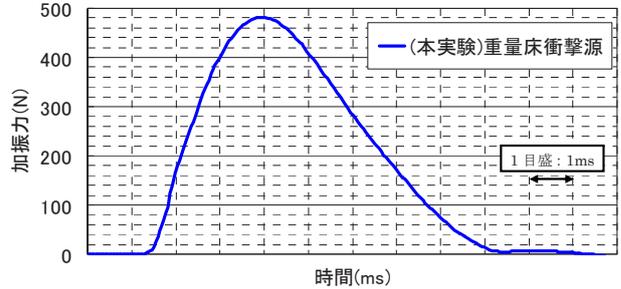


図-11 重量床衝撃源の衝撃力時間波形

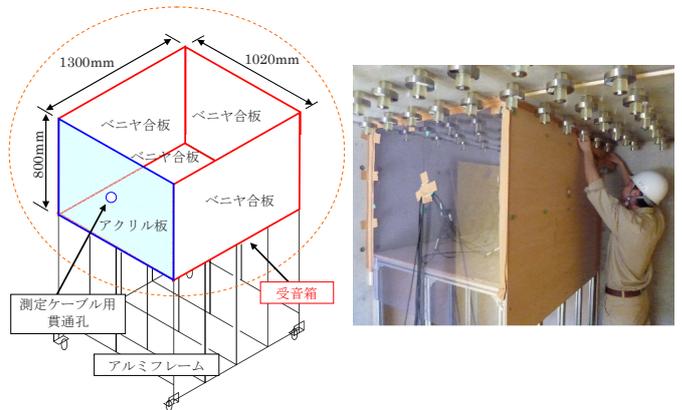


図-12 重量床衝撃音の測定用受音箱

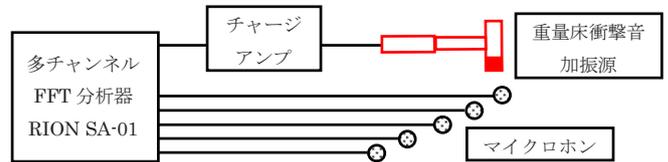


図-13 (重量床衝撃音)測定ブロックダイアグラム

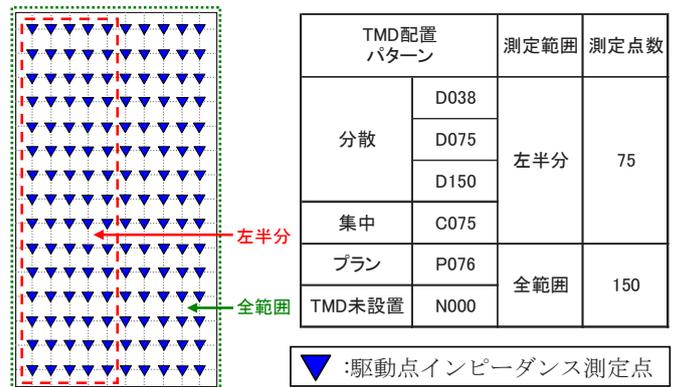


図-14 駆動点インピーダンスの測定点

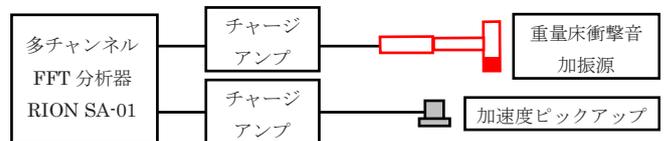


図-15 (駆動点)測定ブロックダイアグラム

の影響を確認するために、実験対象スラブにおいて駆動点インピーダンスを測定した。図-14 に駆動点インピーダンスの測定点を示す。測定点は TMD の設置位置と平面的に同一位置のスラブ上面とし、分散・集中配置は一部を除きスラブの左右で TMD の設置位置が対称であることからスラブの左半分のみを、プラン配置はスラブ左右で TMD の設置位置が非対称であることから全範囲の 150 点を、TMD 未設置ではスラブ全体の傾向を確認するために全範囲の 150 点を測定した。

図-15 に、測定ブロックダイアグラムを示す。重量床衝撃音の加振源で衝撃加振した際の加振力 $F(N)$ と、その衝撃により得られる振動速度 $V(m/s)$ を測定し、駆動点インピーダンス $Z(=F/V)$ を算出した。重量床衝撃音測定と同様に、衝撃加振はブリッジ上の人が操作した。

(2) 実験結果

a) TMD の固有振動数

図-16 に、TMD 配置別の TMD の固有振動数の平均値(実大換算)を示す。各 TMD 配置における TMD の固有振動数は平均 53~54Hz(標準偏差 3.6~4.3Hz)程度であり、目標振動数帯域の範囲内となっている。それらの平均値は 1/3 オクターブバンドの 50Hz 帯域内である。

図-17 に、各 TMD 配置における固有振動数のピーク周波数のヒストグラムを示す。本実験における各 TMD の固有振動数(実大換算)は 45~65Hz であり、1/3 オクターブバンドでは 50Hz~63Hz 帯域内である。また各 TMD 配置の TMD の固有振動数の多くは 53~56.5Hz である。

b) 重量床衝撃音の測定結果

図-18 に、各 TMD 配置における重量床衝撃音レベルの低減量の測定結果を示す。横軸の周波数は実大換算値、縦軸の低減量は、TMD 未設置の測定結果から各 TMD 配置の測定結果を差し引いた相対レベル差である。すなわち、正の値は効果があることを意味する。全体的に見ると、TMD の固有振動数である 50~63Hz 帯域を中心に低減量が大きくなる傾向であり、ほぼ全ての配置パターンで低減効果が確認された。分散配置の D038, D075, D150 における全測定室の平均値を見ると、TMD の実験対象スラブ対質量比が大きくなるにつれて 50, 63, 80Hz 帯域における低減効果は大きくなる傾向が見られる。ただし、D150 は D075 より 2 倍の TMD が設置されているが、これらの帯域における低減量は 2 倍になることはない。また、測定室ごとに低減量は異なり、効果が 10dB を超えている測定室もあるが、63Hz 帯域において効果が表れていない測定室もある。また、実験対象スラブ対

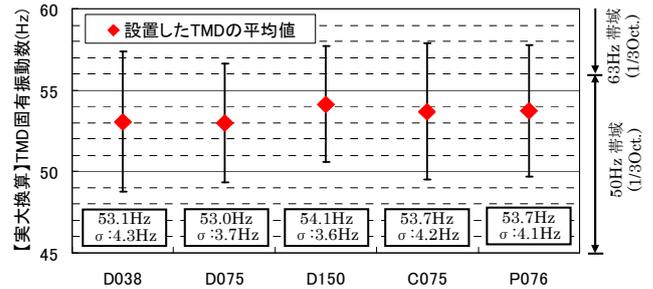


図-16 TMD 固有振動数の平均値(実大換算)

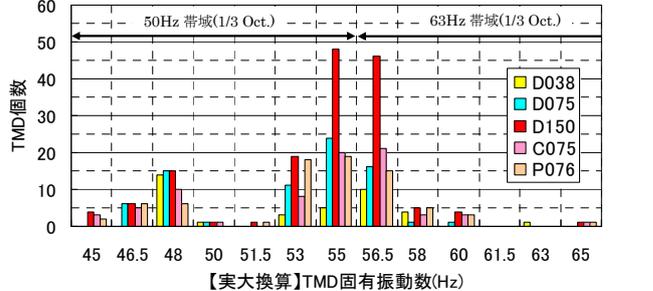


図-17 各 TMD 配置における固有振動数ヒストグラム

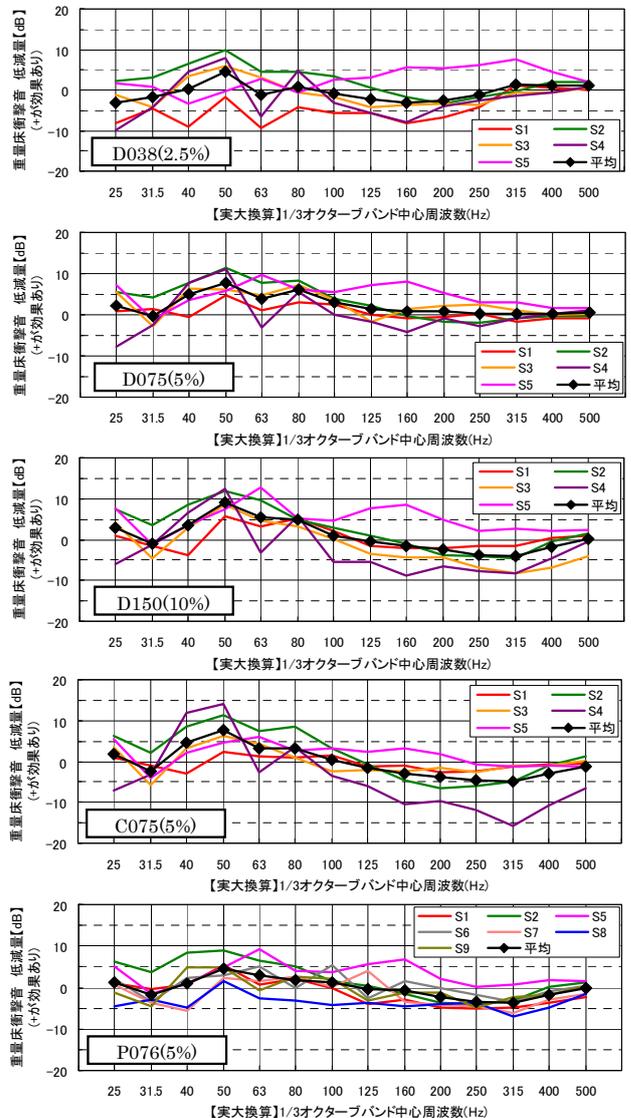


図-18 各 TMD 配置における重量床衝撃音レベルの低減量の測定結果(実大換算)

質量比がほぼ同じである集中配置 C075, プラン配置 P076, 分散配置 D075 を比較すると, 50, 63, 80Hz 帯域における低減量は D075 が最も大きく, C075, P076 の順に小さくなる。D075 と C075 の傾向は似ているが測定室ごとの低減量のばらつきは C075 の方がやや大きい。一方, P076 は低減量の小さい測定室が多いが, S5 のように 63Hz 帯域で低減量が 9dB となる測定室もある。

このように TMD の配置や数量によって測定室ごとの低減量が変化することが分かる。

図-19 に, 測定室ごとの重量床衝撃音レベルの低減量の測定結果を示す。凡例には TMD の測定室スラブ対質量比を合わせて記す。各測定室では測定室スラブ対質量比が 2~10%程度であるが, それぞれの測定室では TMD の低減効果は異なり, S1 のような 2 辺を壁で拘束される角の測定室では低減量が小さく, S4 のようなスラブ中央付近の測定室では TMD の質量比が小さい場合

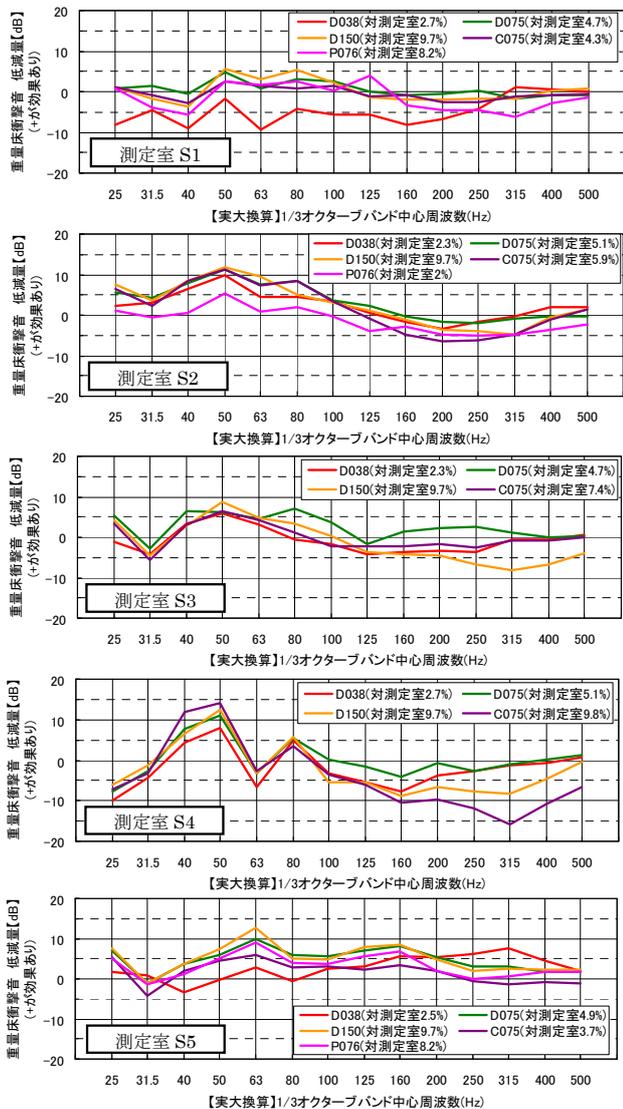


図-19 測定室ごとの重量床衝撃音レベルの低減量の測定結果(実大換算)

であっても低減量が大きくなることが分かった。また TMD の測定室スラブ対質量比をある程度まで大きくしても低減効果は頭打ちになる傾向が見受けられ, どの測定室範囲でも質量比を 5%以上に上げて低減効果は大きくは変化せず, 平均的に見れば質量比 5%で約 5dB 程度以上の低減効果が得られる傾向が確認された。

c) 駆動点インピーダンスの測定結果

図-20 に, 実大換算 50Hz 帯域の駆動点インピーダンスレベル分布を示す。TMD 未設置(N000)では振動モードの腹と推定されるインピーダンスレベルが低くなる場所が 3ヶ所存在する。一方, TMD を設置することにより, 低かった3ヶ所のインピーダンスレベルが増加している。これは, TMD による重量床衝撃音レベルの低減効果が, スラブ端部よりもスラブ中央付近の測定室の方が大きかった傾向と一致する。また, 分散配置の結果を比較すると, TMD の設置個数を多くすることによりインピーダンスレベルは向上しているが, D150はD075

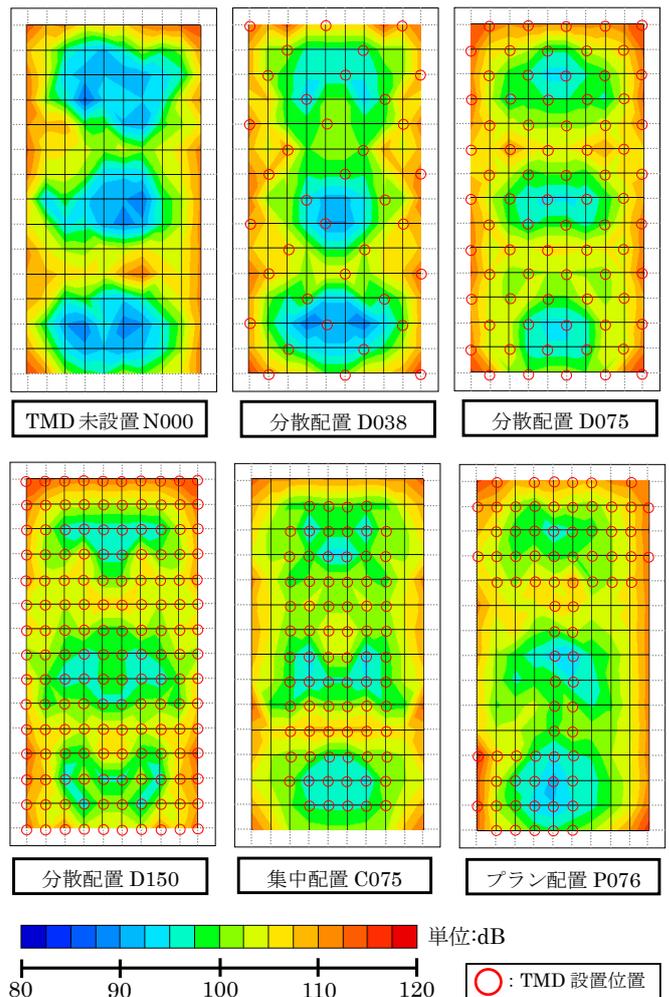


図-20 50Hz 帯域の駆動点インピーダンスレベル分布 (実大換算 : 1/3 オクターブバンド)

と比べて若干向上する程度であり、この傾向も重量床衝撃音レベルの測定結果と同様であった。集中配置 C075 については、分散配置の D150 の結果と同様の分布となっており、スラブ中央部に集中して TMD を設置することにより、効果的にインピーダンスレベルを向上させることができることが分かる。また、プラン配置では、TMD を集中的に設置した場所においてインピーダンスレベルの向上に差異が見られた。プラン上部ではインピーダンスレベルの増加が認められるが、プラン下部では顕著な増加が見られない。この理由について、TMD の相互作用の影響が考えられるが、重量床衝撃音が問題となる振動数範囲はスラブの低次振動モードの影響が大きいため、モード特性を考慮した解明が必要になる。

d) まとめ

集合住宅の一般的な構造形式を想定した鉄筋コンクリート製の 1/3 縮尺スラブ模型を用いて、様々な TMD の配置条件に対する重量床衝撃音の低減効果を測定した。その結果、TMD のスラブ対質量比を大きくすることにより低減量は大きくなるが、スラブ対質量比と低減量は比例関係にないことが分かった。また、TMD の低減効果は測定室の位置によって異なるが、例外はあるもののスラブの振動モードの腹付近の測定室では大きな低減効果が見られた。全測定室を平均すれば、TMD の低減効果は測定室スラブ対質量比が 5%以上で約 5dB 程度の効果が得られると考えられる。

4. おわりに

本論文では、TMD による重量床衝撃音の低減効果を、実大スラブとコンクリート製 1/3 縮尺模型を用いて測定した。その結果、TMD が重量床衝撃音の低減に有効であること、および TMD の測定室スラブ対質量比が約 5

%以上であれば約 5dB 以上の低減効果が得られることがわかった。また、その低減効果はスラブの振動モードの腹の部分に対して大きくあらわれる傾向があり、TMD を配置する際にはその部分に集中的に設置することが有効であると考えられる。

謝辞：本研究は金沢工業大学との共同研究として実施したものである。本研究に際して金沢工業大学 山岸邦彰教授にご指導、ご助言を賜りました。その他、当時金沢工業大学学部生で現中部支店の荒木雄貴氏をはじめ、測定にご協力いただいた全ての方々にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 福田優輝ほか：板状集合住宅における重量床衝撃音遮音性能の向上手法に関する研究-その 2 TMD の効果確認試験-、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1 分冊、pp.249-250、2016.8
- 2) 田中ひかり、増田潔：粒状体による床衝撃音の低減に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1 分冊、pp.261-262、2016.8
- 3) 高根裕貴ほか：ダンパ付乾式二重床の床衝撃音遮断性能に関する基礎的検討 その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-1 分冊、pp.259-260、2016.8
- 4) JIS A 1418-2:2000、建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法-第 2 部：標準重量床衝撃源による方法-
- 5) 松田由利、橘秀樹、石井聖光：模型実験による床衝撃音の検討、音響技術、Vol.6、pp.351-356、1977.10
- 6) 福島寛和、安岡正人：波動性を考慮した低音域の床衝撃音に関する検討-床版振動モードと下室音場モードの連成作用に関する模型実験解析-、日本建築学会計画系論文報告集、第 405 号、pp.1-9、1989.11