

アスファルト系制振材を用いたダンパによる床衝撃音低減に関する実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON REDUCTION PERFORMANCE OF FLOOR IMPACT NOISE BY A DYNAMIC DAMPER USING ASPHALTIC DAMPING MATERIAL

細川晃平 — * 1 金泥秀紀 — * 2
吉谷公江 — * 3 清水貴史 — * 4

Kohei HOSOKAWA — * 1 Hideki KANEZAKO — * 2
Kimie YOSHITANI — * 3 Takafumi SHIMIZU — * 4

キーワード：
床衝撃音, 固有振動数, ダンパ, アスファルト系制振材,
2×4工法床

Considering the reduction measures for floor impact noise, it is widely known the increasing the thickness of floor slabs and a method of using a sound insulating material as a finishing material shown the improvement. In this study, a dynamic damper using asphalt damping material is proposed as another new floor impact noise reduction method. We report the change in characteristic vibration during damper adjustment and the floor impact noise reduction effect when installed on a floor in 2×4 structure as an example of damper installation.

Keywords:
Floor impact sound, Natural frequency, Damper, Asphaltic damping material, 2×4 method of construction floor

1. はじめに

床衝撃音は, 室内環境の中でも問題となることが多く, これまでに床衝撃音遮断性能は, 重要な研究テーマと位置付けられ, 多くの報告がなされている. 特に, 重量床衝撃音低減に関しては, 床スラブの剛性を高くするために厚くする手法や, 仕上げ材により遮音効果を高める手法が広く知られている. これらの手法はいずれも剛性の高さに応じた遮音性能を示すため, 床重量の増加, 床上高・天井高確保等が問題になる場合がある.

これらの手法に対して, ダイナミックダンパ(以下, ダンパとする)を用いた振動抑制による床衝撃音低減手法があり, 鉄筋コンクリート造建物の天井板にダンパを設置した研究¹⁾や, 乾式二重床へダンパを用いた研究²⁾が報告されている. これらの報告では, 比較的軽量のダンパを数多く設置することで, 重量床衝撃音が低減されたと報告されている. しかしながら, 拘束型ダンパを用いた事例や, 例えば2×4工法床などの床への設置効果に関してはほとんど報告例が見られない.

そこで本研究では, アスファルト系制振材が高い制振性能を持つことに着目し, 鋼板との組み合わせによる拘束型及び非拘束型制振ダンパを提案した. さらに, このダンパの寸法及び厚さを変えた際の固有振動数の変化を検証し, さらに2×4工法床に設置した場合の床衝撃音低減効果について報告する.

2. ダンパの基本性能

2.1 ダンパの概要

本研究では, 制振材としてアスファルト系制振材(比重:2.8, 厚み:4 or 8 mm), 基材として鋼板(比重:7.5, 厚み:1.2 or 0.8 or 0.5 mm)を

用い, 基材-制振材-基材サンドイッチ複合型(以下, 拘束型とする)または制振材-基材2層複合型(以下, 非拘束型とする)で構成される制振鋼板をダンパとして使用した. 制振材と鋼板は変成シリコーン樹脂系接着剤(塗布量:70 g/m²)を用いて貼りあわせた.

2.2 固有振動数及び減衰比の測定

拘束型ダンパの仕様を表1に, 非拘束型ダンパの仕様を表2に示す. また, 写真1に固有振動数及び減衰比の測定の概要を示す. 測定は, 振動発生機(G-5230NS, 振研製)上の鋼製テーブル(寸法:1000 mm×1000 mm, 質量:86 kg)に20 mm厚のパーティクルボードを

表1 拘束型ダンパの仕様

No.	構成			寸法(mm) 全長×幅×厚み	質量 (kg)
	上層	中層	下層		
①	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	鋼板 t0.8	910×210×9.6	6.4
②	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	鋼板 t0.8	710×210×9.6	5.1
③	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	鋼板 t0.8	510×210×9.6	3.6
④	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	鋼板 t0.8	710×110×9.6	2.6
⑤	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	鋼板 t0.8	510×110×9.6	1.8
⑥	鋼板 t0.5	制振材 t8.0	鋼板 t0.5	710×210×9.0	4.2
⑦	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	鋼板 t0.5	710×210×9.3	4.6
⑧	鋼板 t0.8	制振材 t4.0	鋼板 t0.8	710×210×5.6	3.5
⑨	鋼板 t0.5	制振材 t4.0	鋼板 t0.5	710×210×5.0	2.7
⑩	鋼板 t0.8	制振材 t4.0	鋼板 t0.5	710×210×5.3	3.1

本稿は文献3)～5)において発表した内容の一部を再構成し, 新たな考察を加えたものである.

¹⁾ 七王工業(株)技術部研究開発課 主任・修士(工学)
(〒765-0031 香川県善通寺市金蔵寺町180)

²⁾ 七王工業(株)技術部 部長

³⁾ 近畿大学工学部建築学科 助教・博士(工学)

⁴⁾ 鳥根大学学術研究院環境システム科学系建築デザイン学コース
准教授・博士(工学)

¹⁾ Chief, Engineering Dept., R&D Division, Nanao Industry, M.Eng.

²⁾ Head, Engineering Dept., Nanao Industry

³⁾ Assist. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kindai Univ., Ph.D.

⁴⁾ Assoc. Prof., Architectural Design Course, Academic Assembly, Institute of Environmental Systems Science, Shimane Univ., Ph.D.

表 2 非拘束型ダンパの仕様

No.	構成		寸法(mm) 全長×幅×厚み	質量 (kg)
	上層	下層		
⑪	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	910×210×8.8	5.1
⑫	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	710×210×8.8	4.0
⑬	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	510×210×8.8	2.9
⑭	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	710×110×8.8	2.1
⑮	鋼板 t0.5	制振材 t8.0	710×110×8.5	2.0
⑯	鋼板 t1.2	制振材 t8.0	710×110×9.2	2.4

ボルトで固定し、ダンパ両端を角材(寸法:38 mm×450 mm×厚 19 mm)で挟み込み、パーティクルボード上にビスで固定した。加振条件は、鉛直方向に加速度 4.9 m/s²、周波数範囲 5~200 Hz の掃引サイン波、1 分間にオクターブの掃引速度とし、FFT アナライザ及び 3 個の振動ピックアップ(Ch.1, Ch.3, Ch.4)を用いて、加速度を計測した。3 個の振動ピックアップは、鋼製テーブル裏側(Ch.1)、ダンパ長さ方向中央・幅方向中央位置(Ch.3)及びダンパ長さ方向 1/6 位置・幅方向中央位置(Ch.4)に取り付けた。最大加速度における周波数を固有振動数とし、半値幅法を用いて減衰比を算出した。

2. 3 固有振動数及び減衰比測定結果

拘束型ダンパの固有振動数及び減衰比の測定結果を表 3 に、非拘束型ダンパの測定結果を表 4 に示す。Ch.3(中央位置)と Ch.4(1/6 位置)で固有振動数に大きな差は認められなかったため、Ch.3 の結果のみを示した。

測定結果より、鋼板とアスファルト制振材で構成される本ダンパは、寸法や重量を変えることで固有振動数及び減衰比を容易に変化させることが可能であるといえる。拘束ダンパは、ダンパ全長が長いほど固有振動数は小さくなる傾向であった。ダンパ全長を 700 mm に限定した場合、ダンパ幅が長いほど固有振動数は小さくなる傾向であった。ダンパ全長 700 mm、幅 210 mm に限定した場合、制振材厚み及び重量が大きいほど固有振動数は大きくなる傾向であった。ダンパ全長 700 mm、幅 210 mm、制振材厚み 8 mm に限定した場合、鋼板の厚みによる固有振動数の大きな違いは確認できなかった。

非拘束ダンパは、ダンパ全長が長いほど固有振動数は小さくなる傾向であった。ダンパ全長を 700 mm に限定した場合、ダンパ幅が長いほど固有振動数は大きくなる傾向であった。非拘束ダンパの場合、幅の寸法変化よりも重量増加が大きく寄与したためと思われる。ダンパ全長 700 mm、幅 110 mm、制振材厚み 8 mm に限定した場合、鋼板の厚み 1.2 mm では固有振動数が大きくなった。

2. 4 固有振動数測定結果と算出値の比較

測定したダンパの固有振動数 f_c [Hz]より、非拘束型における制振材のヤング率 E_2 [N/m²]は、RKU (Ross, Kerwin, Unger)方程式^{6),7)}に基づく式(1)で表される。

$$E_2 = \frac{\{(\alpha - \beta) + \sqrt{(\alpha - \beta)^2 - 4T^2(1 - \alpha)}\}}{2T^3} \times E_1 \dots \dots (1)$$

ただし、 $\alpha = (f_c/f_1)^2 \times (1 + DT)$ 、 $\beta = 4 + 6T + 4T^2$ 、 $T = T_2/T_1$ 、 T_2 は制振材の厚さ[m]、 T_1 は基材の厚さ[m]、 E_1 は基材のヤング率

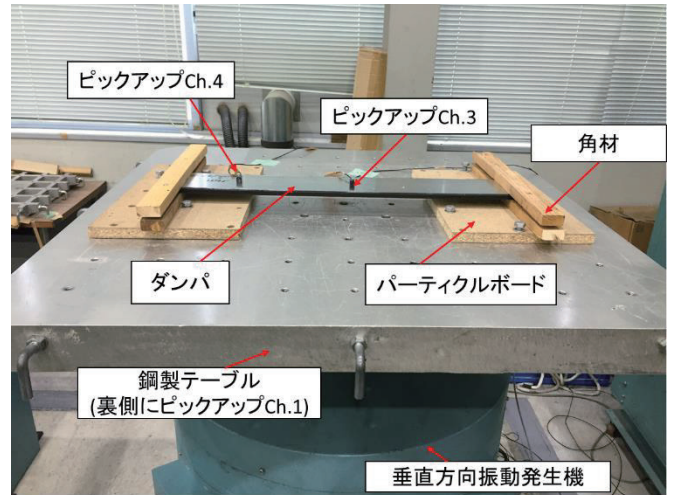


写真 1 固有振動数及び減衰比の測定の概要

表 3 拘束ダンパの固有振動数及び減衰比測定結果

No.	固有振動数 (Hz)	減衰比 (-)	No.	固有振動数 (Hz)	減衰比 (-)
①	24.1	0.06	⑥	35.1	0.05
②	37.5	0.08	⑦	37.7	0.05
③	58.2	0.07	⑧	21.7	0.09
④	41.8	0.06	⑨	24.5	0.06
⑤	61.7	0.08	⑩	24.0	0.08

表 4 非拘束ダンパの固有振動数及び減衰比測定結果

No.	測定した 固有振動数(Hz)	減衰比 (-)	式(6)で算出した 固有振動数(Hz)
⑪	10.8	0.11	10.5
⑫	17.2	0.10	16.2
⑬	33.1	0.11	29.8
⑭	15.9	0.12	14.9
⑮	16.3	0.16	15.2
⑯	17.9	0.14	16.4

[N/m²]、 f_1 は基材の固有振動数[Hz]、 $D = D_2/D_1$ 、 D_2 制振材の密度[kg/m³]、 D_1 は基材の密度[kg/m³]である。なお、 E_2 は一般構造用圧延鋼板(SS400)のヤング率 2.06×10^{11} を用いた。また、 f_1 は基材を両端固定した場合の 1 次固有振動数とし式(2)で表される。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \times \left(\frac{4.730}{L_1}\right)^2 \times \sqrt{\frac{E_1 I_1}{M_1/L_1}} \dots \dots (2)$$

ただし、 I_1 は基材断面 2 次モーメント[m⁴]、 L_1 は基材全長(自由長)[m]、 M_1 は基材質量[kg]である。 I_1 は式(3)で表される。

$$I_1 = \frac{W_1 \cdot T_1^3}{12} \dots \dots (3)$$

ただし、 W_1 は基材幅[m]である。

ダンパの曲げ剛性 EI [N・m²]は、各層の曲げ剛性の総和と仮定すると式(4)で表される。

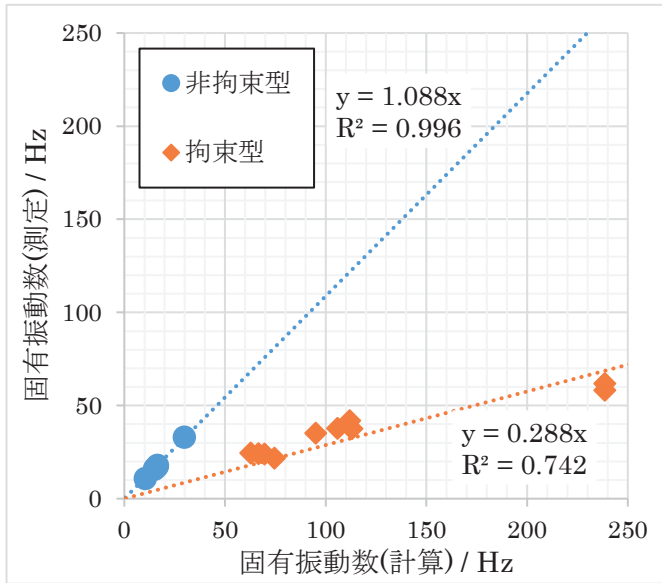


図1 固有振動数の計算値・測定値プロット

$$EI = \sum_i E_i I_i = E_1 I_1 + E_2 \times (I_2 + A_2 d^2) \dots \dots (4)$$

ただし、 A_2 は制振材断面積[m²], d は曲げ中心(基材中心)からの距離[m]であり、 I_2 は式(5)で表される。

$$I_2 = \frac{W_2 \cdot T_2^3}{12} \dots \dots (5)$$

I_2 は制振材の断面2次モーメント[m⁴], W_2 は制振材幅[m]である。

両端固定ダンパを、両端固定の梁とみなすと、1次固有振動数 f_n は式(6)で表される。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \times \left(\frac{4.730}{L} \right)^2 \times \sqrt{\frac{EI}{M/L}} \dots \dots (6)$$

ただし、 L はダンパ全長(自由長)[m], M はダンパ質量[kg]である。

式(6)で算出した固有振動数を表4に、固有振動数の測定値・計算値プロットを図1に示す。ここで、 R^2 は決定係数であり、1に近いほど相関が高いことを意味する。傾き=1.088、 $R^2=0.996$ であり非常に高い相関があることが確認でき、式(6)を用いることで非拘束型ダンパの固有振動数を予測できるといえる。制振材のせん断変形や接着剤の影響を無視して計算しているにも関わらず、高い相関が得られたことから、非拘束ダンパに関してはこれらの要素が固有振動数に与える影響はほぼないと推測される。

拘束型ダンパにおける曲げ剛性 EI は、曲げ中心を制振材中央とすることで式(7)で表される。

$$EI = E_2 I_2 + 2 \times E_1 \times (I_1 + A_1 d^2) \dots \dots (7)$$

ただし、 $E_2 = 4.3 \times 10^8$, A_1 は基材断面積[m²]である。

式(6), (7)から拘束型ダンパの固有振動数を算出した。計算値・測定値プロットを図1に示す。傾き=0.288、 $R^2=0.742$ であり、非拘束型と比べると精度が低い。拘束型の場合、一般的に制振材のずり変形により制振性能を発揮していると考えられおり、ずり変形を考慮していないため上手くフィッティングしなかったと推測される。

3. ダンパ付加による2×4工法の床構造の床衝撃音レベル低減効果

表5 床衝撃音レベルの測定に用いたダンパの仕様

(⑰: 拘束型, ⑱: 非拘束型)

No.	構成			寸法(mm) 全長×幅×厚み	質量 (kg)
	上層	中層	下層		
⑰	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	鋼板 t0.8	820×190×9.6	5.2
⑱	鋼板 t0.8	制振材 t8.0	-	870×210×8.8	5.1

表6 2×4工法床の仕様

部位	構成
床	さね付合板: 15 mm 厚 床根太: 210材 [@455 mm]
独立天井	天井根太: 206材 石膏ボード: 12.5 mm 厚 グラスウール: 50 mm [密度 24 kg/m ³]

3. 1 実験方法

測定に用いたダンパの仕様を表5に示す。実験は、北方建築総合研究所の音響実験室(容積:61.6 m³, 床スラブ厚:250 mm)の開口部(寸法:2740 mm×3650 mm)に表6に示す構成の2×4工法床を施工して行った。ダンパは、施工された2×4工法床の床合板または床根太に固定した。まず初めに実験Ⅰとして、表5に示すダンパ⑱12体を、鉄製Z型アングル(図2)を用いて床合板に両端固定して実験を行った(図3)。次に実験Ⅱとしてダンパ⑰12体、実験Ⅲとしてダンパ⑱12体を、鉄製L型アングル(図4)を用いて床根太に両端固定して実験を行った(図5)。実験ⅠとⅡを比較することでダンパ固定箇所の影響を、実験Ⅱと実験Ⅲを比較することでダンパ形状の影響を検討した。

さらに、実験Ⅳとして鉄製L型アングルのみを床根太に固定し実験Ⅲの測定結果と比較することで、固定金具取り付けによる影響を確認した。衝撃源は、JIS A 1418-2:2000⁹⁾に規定されている標準重量衝撃特性を有するタイヤ及びゴムボールを用い、衝撃点5点、受音点5点で床衝撃音を測定した。

3. 2 結果

実験Ⅱにおけるダンパ固定時の状況を写真2に、実験Ⅰ～Ⅳの床衝撃音レベル測定結果を図6に、素面の床衝撃音レベルからダンパあり衝撃音レベルを差し引いたダンパによる改善量を図7に、各実験の質量条件および固有振動数を表7に示す。

実験Ⅰ(床合板固定)と実験Ⅱ(床根太固定)を比較すると、衝撃源がタイヤの場合は実験Ⅱの方が、各周波数帯とも改善量が大きかったことが確認できた。一方、衝撃源がボールの場合は、改善量がほぼ同等であった。このことから、ダンパ⑰は床根太に固定した方が効果的であり、衝撃源の加振力が大きいほど顕著になると判断できる。

実験Ⅲでは、衝撃源に関わらず63 Hz帯域で5 dB以上の床衝撃音レベルの改善が確認でき、実験Ⅱと比較しても4 dB以上改善している。実験Ⅱ, Ⅲにおけるダンパの床に対する質量割合はそれぞれ30.0%, 29.2%とほぼ同等であることから、改善量の差は、質量の影響ではないと考えられ、ダンパの制振効果が大きく影響していると推測される。実験Ⅲ(非拘束型)の改善量が大きかったことは伸縮

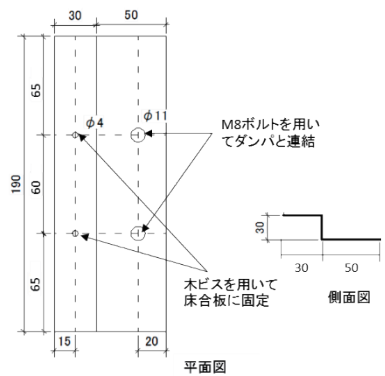


図2 Z型アングルの概略図

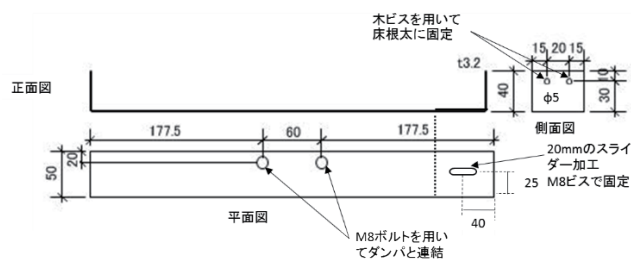


図4 L型アングルの概略図

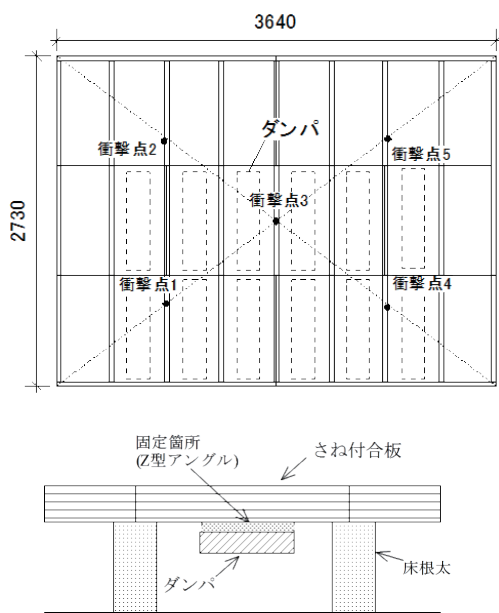


図3 実験Ⅰの実験概要及びダンパの取付け状況

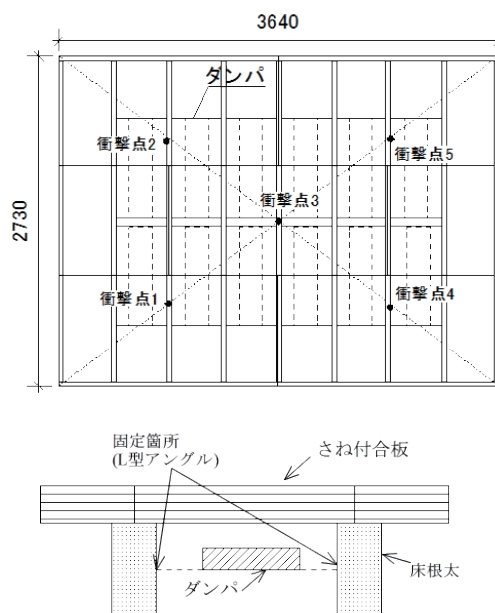


図5 実験Ⅱ及び実験Ⅲの実験概要及びダンパの取付け状況

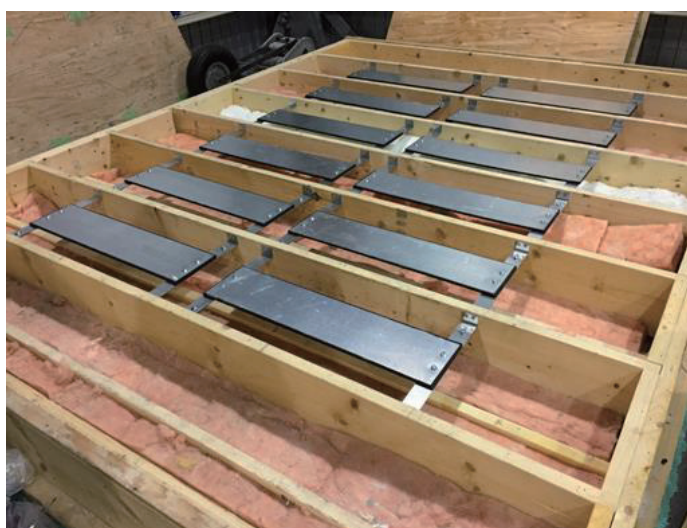


写真2 実験Ⅱにおけるダンパ固定の状況

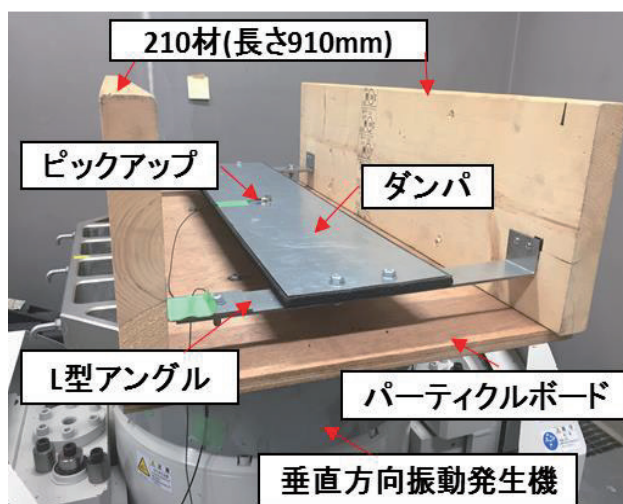


写真3 L型アングルを用いた固有振動数測定の概要

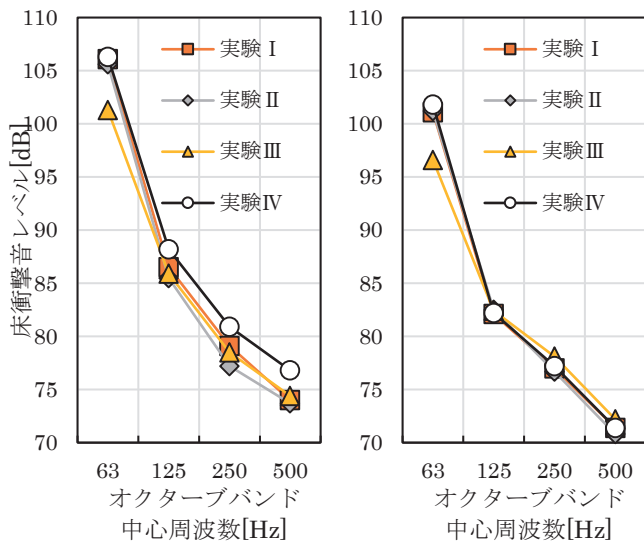


図6 重量床衝撃音レベル (左)タイヤ(右)ボール

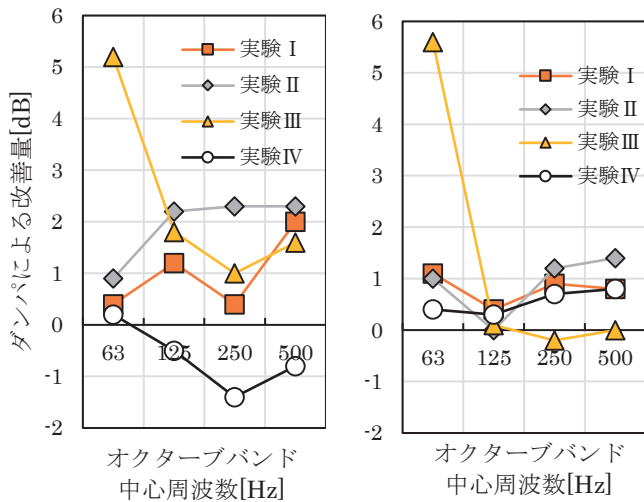


図7 重量床衝撃音レベル改善量 (左)タイヤ(右)ボール

表7. 各実験の質量条件および固有振動数

	実験Ⅱ (拘束型)	実験Ⅲ (非拘束型)
ダンパ(アングル含む)総質量 [kg]	86.3	84.7
床部位(合板+根太)総質量 [kg]	174	
床部位に対するダンパ質量割合 [%]	30.0	29.2
ダンパ(アングル含む) 固有振動数 [Hz]	1次	15.4
	2次	48.0
	3次	72.2

変形による制振効果であると推測される。一般的に、伸縮変形は制振層が厚いほど効果的であるので、制振材を厚くすることでより効果的な作用が期待できる。

実験Ⅳの結果では、ほとんど改善効果が得られていないことから、床根太間の鉄製 L 型アングルの床衝撃音レベル改善への寄与は小さ

いと判断できる。すなわち、ダンパにより床衝撃音レベルが改善したと考えられる。

次に、本ダンパの固有振動数による床衝撃音レベル改善量への影響を検討するため、L 型アングルによる固定時のダンパ⑰(拘束型)およびダンパ⑱(非拘束型)の固有振動数を、実験 2 同様に振動台上で測定した。写真 3 に示すように試験体を組み、実験 2 同様の振動条件で加振し、最大加速時(1次ピーク)における周波数を 1 次固有振動数、2 次ピークを 2 次固有振動数、3 次ピークを 3 次固有振動数とした。ダンパ⑰(拘束型)の固有振動数は 15.4 Hz(1 次)、48.0 Hz(2 次)、72.0 Hz(3 次)、ダンパ⑱(非拘束型)の固有振動数は 11.3 Hz(1 次)、35.0 Hz(2 次)、62.0 Hz(3 次)であった。63 Hz 帯域において、ダンパ⑰(拘束型)を用いた実験Ⅱでは十分な改善が見られなかったが、ダンパ⑱(非拘束型)を用いた実験Ⅲでは大きな改善が確認できたことから、2×4 工法床に本ダンパを L 型アングルを用いて床根太間に取付ける場合、63 Hz 帯域の下限である 45 Hz に近い 2 次固有振動数を持つ拘束型ダンパを用いるよりも、固有振動数を 62.0 Hz に調整した非拘束型ダンパを用いることが効果的であるといえる。

4. まとめ

本研究では以下の知見を得た。

- ・鋼板とアスファルトシートで構成される本ダンパは、寸法(ダンパ全長、ダンパ幅、アスファルト厚み、鉄板厚み)や重量を変えることで固有振動数、減衰比を変化させることが可能である。
 - ・非拘束型ダンパの固有振動は式(6)から推測することが可能である。
 - ・本ダンパ及びアングルを用いて 2×4 工法床取付ける場合、床面材である合板に固定するよりも床根太間に固定した方が効果的に機能する。
 - ・ダンパ⑱を床根太間に固定した場合、本稿で検討した衝撃源においては 63 Hz 帯域で 5 dB 以上の床衝撃音レベル改善が確認できる。
- 今後は、非拘束型ダンパの固有振動数を床根太の固有振動数に合わせた場合の床衝撃音レベルの測定や 2×4 工法床以外の工法床に関しての検証を進めていく予定である。

5. 謝辞

本研究における 2×4 工法床の床衝撃音レベル測定に当たり、北方建築総合研究所の廣田誠氏、宮内淳一氏の両名に多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1)Inoue, R. and Okano, T. :REDUCTION OF HEAVY-WEIGHT FLOOR IMPACT SOUNDS BY TUNED MASS DAMPERS SET AT CEILING, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.19, No.42, pp. 611- 614, 2013.6 (in Japanese)
井上竜太, 岡野利行:天井板に設置した動吸振器による重量床衝撃音の低減, 日本建築学会技術報告集, 第19巻, 第42号, pp.611-614, 2013.6
- 2)高倉史洋, 石丸岳史, 高根裕貴, 山下恭弘: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, 日本建築学会大会学術講演便覧集, 環境工学, pp.143-144, 2015.9
- 3)細川晃平, 金泥秀紀, 清水貴史, 松田貫, 吉谷公江:アスファルト系制振材を用いたダンパによる床衝撃音低減手法に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演便覧集, 環境工学, pp.255-256, 2016.8
- 4)細川晃平, 金泥秀紀, 清水貴史, 吉谷公江:アスファルト系制振材を用いたダンパによる床衝撃音低減手法に関する実験的検討 その2, 日本建築

学会大会学術講演便覧集，環境工学， pp.207-208， 2017.8

- 5) 細川晃平， 金泥秀紀， 杉原正俊， 清水貴史， 吉谷公江:アスファルト系制振材を用いたダンパによる床衝撃音低減手法に関する実験的検討 その 3， 日本建築学会大会学術講演便覧集， 環境工学， pp.309-310， 2018.9
- 6) Nashif, A. D., : VIBRATION DAMPING, John Wiley & Sons, Inc, 259, 1985.
- 7) 小野測器：制振材とその性能測定について，小野測器技術レポート， 2014.11.14
- 8) 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：標準重量衝撃源による方法」， 2000.1.7

[2021年3月22日原稿受理 2021年7月26日採用決定]