畳上での水平振動に関する防振 ゴムを利用した環境振動測定方 法の検討

EXAMINATION OF ENVIRONMENTAL VIBRATION MEASUREMENT USING VIBRATION CONTROL RUBBER FOR HORIZONTAL VIBRATION ON TATAMI

富田隆太 ——— * 1 足立 大 ——— * 2

Ryuta TOMITA ——— * 1 Dai ADACHI ——— * 2

キーワード：

振動伝達率, 防振ゴム, 畳, 設置共振

Keywords:

Vibration transmission rate, Vibration control rubber, Tatami, Mounted resonance

We have proposed a method for estimating the vibration acceleration level of the floor structure with high accuracy by preventing the mounted resonance of the carpet floor. In this report, we conducted an experimental study using a vibration generator for the horizontal vibration of thick tatami floors, unlike carpets. As a result, good response was obtained by the estimation method of this study for the horizontal vibration of a tatami with polystyrene foam as the core material. In addition, the validity of the proposed method was suggested for at tatami with polystyrene foam as the core material with vertical vibration.

1. はじめに

建築物内の環境振動測定には、圧電型加速度ピックアップに振動計を組み合わせたものや振動レベル計等が用いられることが多い¹⁾。いずれも振動ピックアップを床に設置する際には、「設置共振」に留意する必要がある。既報^{2)~4)}で述べたように、環境振動測定に関するマニュアル等^{例えば5)}でも、「床上にタイルカーペットやじゅうたんなどの柔らかい表面仕上材が施工されている場合には、可能な限り仕上材を取り除き躯体上に設置する」と記載されている。

そこで、筆者らは、カーペット床を対象としてこれまで設置共振を防ぐ方法について実験的検討を行ってきた。設置共振を防ぐ場合には、一般的には、共振周波数を高い周波数にシフトするような検討がこれまでも行われてきている。例えば、最近の研究結果として、文献⁶⁾では、振動ピックアップと絨毯の間に、アルミ板を設置して、設置共振周波数を高くする方法が検討されている。 $\sqrt{2}$ 倍程度共振周波数が高周波数にシフトしているが、共振周波数が 50 Hz 程度の絨毯では、70 Hz 程度に共振周波数がシフトしており、80 Hz 程度までの測定を考慮すれば、まだ課題がある。

我々が提案している方法は、文献^{2)~4)}のように、柔らかい防振ゴムを利用して、逆に低い周波数で防振ゴムと振動ピックアップによる設置共振を発生させ、その振動伝達率を利用することで、カーペットや畳を剥がさずに、カーペットや畳下部の床構造の振動を正確に測定しようとする方法である。カーペットについては、既報^{2), 3)}の結果、本研究の提案方法は鉛直振動、水平振動共に、有用な1つの提案方法になると示唆された。

次に、既報⁴⁾では、これまでの研究で行ってきた知見を利用し、カーペットに比べて、厚さのある畳の鉛直振動を対象として実験的検討を行った。その結果、コンクリートスラブ上に、一般的によく使用されている建材畳を施工した場合には、設置共振をキャンセル

してコンクリートスラブの振動加速度が、精度よく求められること等が示唆された。

そこで、次の段階として、本報では、畳の水平振動について、本提案方法の妥当性を明らかにすることを目的に実験的検討を行った。水平振動を検討する場合には、実現場において、同一の振動波形を再現することが非常に難しい。そのため、本報では、既報³⁾と同様に、加振器から測定対象周波数の正弦波を出力し、設置共振を防ぐ方法について実験的検討を行った。なお、鉛直振動についても、既報⁴⁾の知見を確認する目的で実験を行った。

本報告の範囲は、畳の水平振動を対象に、設置共振を防ぐ方法についての検討を目的に、加振器によるサイン波を対象とした実験的検討であり、実現場への適用については、今後の課題とする。また、本研究のようなアプローチにより、設置共振を防ぐような研究は、筆者らが報告した既報^{2)~4)}以外には、見当たらない。

2. 実験方法

実験は、加振器を用いた。加振器から、測定周波数の正弦波を出力した。測定ブロック図を図1に示す。図に示すように、垂直加振器 VG-600 (VTS)、水平加振器 APS-129 (APS) に取り付けた基準の振動ピックアップ (RION, PV-03) で各周波数において加速度が 0.063m/s^2 に加振力を調整した。なお、振動加速度変化による考察を行うために、 0.5m/s^2 , 1m/s^2 の加速度でも実験を行った。

また、 0.063m/s^2 に調整した理由は、以下の理由による。建築分野の振動評価によく利用されてきた文献⁹⁾の知覚確率 10%~90%を考慮して決めた。

測定周波数は、1~100Hz とし、1/12 オクターブバンド間隔で測定した (ただし、鉛直振動の 0.5m/s^2 , 1m/s^2 のときは、加振器の性能により 5Hz 以上とした。)

本稿は 2020 年日本音響学会騒音・振動研究会⁷⁾, 2020 年日本音響学会建築音響研究会⁸⁾に加えて分析を行い、加筆及び再構成したものである。

¹⁾ 日本大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)
(〒101-8308 千代田区神田駿河台 1-8-14)

²⁾ リオン(株)

¹⁾ Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr.Eng.

²⁾ RION Co., Ltd.

実験対象とした畳は、加振器で測定可能な大きさを考慮して、200×170mm のサイズとした。T1（本畳：880×1760×55mm，27.5kg），T2（建材質：880×1760×55mm，13.0kg）を製作し、それぞれの畳について、4 隅と中央部分を 200×170mm のサイズで切り出した。表 1 に 4 試験体の概要を示す。また、図 2 に 4 試験体の写真（左から、T1-corner，T1-center，T2-corner，T2-center）を示す。

実験パターンを図 3 に示す。パターン A は、プレートに振動ピックアップ（RION，PV-83C，約 335g）を直置きした。パターン B は、畳上に振動ピックアップを置いた。パターン B とパターン A の振動加速度レベル差が設置共振となる。本研究で提案している方法により、パターン C は、畳上に防振ゴム（サイズ 100×100mm，厚さ 25mm）を置き、その上に振動ピックアップを置いた。なお、防振ゴムに、エーテル系の発泡ポリウレタン・エラストマー（0.16 g/cm³）を用いた。既報³⁾では、共振周波数（ $f/f_n=1$ ）を求め、 $f/f_n=\sqrt{2}$ より高い周波数帯域に、防振ゴムの基本特性を補正することで、カーペットを対象として、水平振動の場合にも、設置共振を防ぐことができることを明らかにした。パターン D は、防振ゴムの基本特性を求め、防振ゴムの上に振動ピックアップを置いた。

3. 本研究の提案方法と測定及び推定手順

本研究の提案する振動測定及び推定方法は、設置共振している周波数範囲について、単振動系の振動伝達率を利用して、床構造そのものの振動加速度レベルを推定する方法である。

図 4 に、文献¹⁰⁾等を参考に、損失係数一定型の振動伝達率 τ の特性と周波数比（ f/f_n ）の関係を示す。図を見ると、周波数比が $\sqrt{2}$ 以上になると振動伝達率が 1（振動伝達レベルが 0dB）以下となり、損失係数による変化は小さく、振動伝達率は小さくなる。本研究の提案方法は、周波数比が $\sqrt{2}$ 以上の大きい周波数範囲について、設置共振させたときの振動伝達レベルを減算して推定する方法である。従来の研究と大きく異なる点は、畳のような柔らかい床仕上げ材の上

図 1 測定ブロック図

表 1 試験体の概要

Specimen	Thickness(mm)	Cross-sectional structure	Mass(kg)	Remarks
T1-corner	55	Tatami table 5mm + straw 50mm	0.58	Corner
T1-center	55	Tatami table 5mm + straw 50mm	0.58	Center
T2-corner	55	Tatami mat 5mm + Tatami board 15mm + Extruded polystyrene foam 25mm + Tatami board 10mm	0.28	Corner
T2-center	55	Tatami mat 5mm + Tatami board 15mm + Extruded polystyrene foam 25mm + Tatami board 10mm	0.28	Center

図 2 試験体の写真（左から T1-corner，T1-center，T2-corner，T2-center）

図 3 実験パターン

に、治具として更にばね定数の小さい防振ゴムを設置し、強制的に設置共振を低域で発生させ、図4の $f/f_n \geq \sqrt{2}$ の周波数領域と振動伝達レベルを利用し、畳下の振動応答を推定することである。

既報²⁾で提案した通り、本研究の測定及び推定手順は、以下の通りである。

- ① 図3のパターンB（畳上）で測定を行う。
- ② 図3のパターンC（畳+防振ゴム上）で測定を行う。
- ③ ②-①（パターンC-パターンB）を行い、共振周波数($f/f_n=1$)と $f/f_n=\sqrt{2}$ より高い周波数帯域を求める。
- ④ 事前に測定したパターンD（防振ゴムの基本特性）を用い、 $f/f_n=\sqrt{2}$ より高い周波数帯域以降の相対振動加速度レベルを②から減算する。③と共振周波数が違うときは、シフトする。
- ⑤ ③で、 $f/f_n=\sqrt{2}$ より低い周波数帯域については、パターンBの結果をそのまま用いる。

4. 実験結果及び考察

4.1 鉛直振動の検討

本報での加振器による結果は、パターンAを基準(0dB)として相対振動加速度レベルとして示す。すなわち、0dBであれば加振器のプレートと同様な結果であり、設置共振の影響はないと言える。

図5、6には、パターンCとDの比較として、T1、T2の結果を示す。図を見ると、パターンCのように畳を施工すると、共振周波数は防振ゴムのみのパターンDに比べて、若干低域にシフトしているものの、全体的な傾向は、防振ゴムに依存した結果と言え、畳に比べて十分に防振ゴムのバネ定数が小さいことがわかる。ただし、T1の本畳については、70~80Hz程度での共振が見られる。

次に、T1、T2について、パターンC-パターンBを行った結果を、図7、8に示す。4試験体について、共振周波数を見ると、15~17Hzであった。 $\sqrt{2}$ 倍の周波数が、21~24Hzであり、本研究の提案方法はそれ以上の周波数で補正を行うこととした。

図9、10に、T1、T2について補正した推定値と、パターンB（畳上）の結果を比較して示す。パターンB（設置共振）の結果を見ると、既報⁴⁾の結果と同様に、T2では50Hzで設置共振が確認できる。一方、T1については、既報⁴⁾ではコンクリートスラブ上で20~25Hz帯域であったが、加振器では25~30Hz程度で設置共振が確認された。設置共振の程度としては、80Hzまでの範囲で、T1、T2で18dB、21dBと大きい。

本研究での提案方法による推定値を見ると、建材畳であるT2は設置共振がキャンセルされ、80Hzまでの範囲で5dB以下の結果であった。既報⁴⁾では、実現場で行ったコンクリートスラブ上において、最大3dBの差であったことから、建材畳について、本研究の方法で、ある程度推定可能と考えられる。T1の本畳については、図5で示したように、70~80HzでパターンDとの乖離が大きく、図9を見ると、70~80Hzで17dB程度、共振が生じている。

4.2 水平振動の検討

次に、水平振動に関する検討を行った。図11、12には、パターンCとDの比較として、T1、T2の結果を示す。図を見ると、パターンCのように畳を施工すると、共振周波数は防振ゴムのみのパターンDに比べて、若干低域にシフトしているものの、全体的な傾向は、防振ゴムに依存した結果と言え、畳に比べて十分に防振ゴムのバネ定

図4 損失係数一定の振動伝達率

図5 パターンCとDの比較（T1、鉛直振動）

図6 パターンCとDの比較（T2、鉛直振動）

図7 パターンC-D (T1, 鉛直振動)

図8 パターンC-D (T2, 鉛直振動)

図9 推定値とパターンBの結果 (T1, 鉛直振動)

図10 推定値とパターンBの結果 (T2, 鉛直振動)

数が小さいことがわかる。ただし、T1の本量については、4隅の方が中央部分に対して、2Hz低域にシフトしている。また、50Hz以降で共振が見られる。

次に、T1, T2について、パターンC-パターンBを行った結果を、図13, 14に示す。4試験体について、共振周波数を見ると、9~12Hzであった。 $\sqrt{2}$ 倍の周波数が、13~17Hzであり、本研究の提案方法はそれ以上の周波数で補正を行うこととした。

図15, 16に、T1, T2について補正した推定値と、パターンB（畳上）の結果を比較して示す。パターンB（設置共振）の結果を見ると、T1では30Hz、T2では40Hzで設置共振が確認できる。水平振動の場合には、4.1の鉛直振動と異なり、共振だけではなく、反共振も見られる。また、共振の程度は、T1, T2で10~15dB程度と、鉛直振動に比べてやや小さい。一方で、反共振については、T1で50~60Hz、T2で60~70Hzで見られ、反共振の程度は、T1, T2で-25~-20dB程度と大きい。以上のように、畳上で水平振動の測定を行う場合に、設置共振により正確に測定できないことが確認された。

本研究での提案方法による推定値を見ると、図16に示す建材量であるT2は設置共振がキャンセルされ、80Hzまでの範囲で4dB以下

の結果であった。また、反共振についても、2dB以下と小さい。よって、建材量については、本研究の方法で水平振動についても推定可能と考えられる。T1の本量については、図11のT1-centerで示したように、70~80HzでパターンDとの乖離が大きく、図15の70~80Hzで11dB程度、反共振が生じている。

本研究での推定値については、3章で示したように、パターンDと図13, 14のパターンC-Bで共振周波数が異なる場合は、パターンCからパターンDを減算するときに、パターンDの周波数特性をシフトしているが、水平振動の場合には、共振点と反共振点があるので、さらに検討を行った。図11と図13を見ても、T1の場合には共振点はかなり違うことがわかる。そこで、パターンDの周波数特性をシフトする際に、パターンDと図13, 14のパターンC-Bについて、共振点だけではなく反共振点を考慮して、シフトすることにした。具体的には、共振と反共振点について、それぞれでシフトする周波数を求め、その平均の値をシフトした。T1の推定した結果を図17に示す。なお、T2については図16と同様な値であった。図15と図17を比較すると、10~30Hz程度での推定値が改善され、この範囲の設置共振がキャンセルされていることがわかる。今後の課題

図 11 パターン C と D の比較 (T1, 水平振動)

図 12 パターン C と D の比較 (T2, 水平振動)

図 13 パターン C-D (T1, 水平振動)

図 14 パターン C-D (T2, 水平振動)

図 15 推定値とパターン B の結果 (T1, 水平振動)

図 16 推定値とパターン B の結果 (T2, 水平振動)

になるが、T1 の本量については、安定した、かつさらに精度の高い推定結果が得られるように検討を行っていきたい。

5. 振動加速度変化による実験的検討

図 18, 19 に鉛直、水平振動の加速度変化時の推定方法の結果を示す。なお、凡例の先頭の数字は加速度 (m/s^2) を表している (以下、

同様)。また、図 19 の水平振動については、パターン D とパターン C-B の共振点のシフトについては、図 17 と同様に、共振点と反共振点の 2 点を考慮した。図 9, 10 の推定値に比べて、図 18 の鉛直振動の加速度を大きくした場合でも、周波数変化も小さく、かつ T2 の建材量は、80Hz までの範囲で最大でも 4dB 程度の差と、比較的よく推定できていると考えられる。また、図 17, 16 の推定値に比べて、図 19 の水平振動の加速度を大きくした場合でも、周波数変化も小さく、かつ T2 の建材量は、80Hz までの範囲で最大でも 4dB 程度の差と、比較的よく推定できていると考えられる。

6. まとめ

本報では、畳の水平振動を対象に、設置共振を防ぐ方法について、加振器を利用した実験的検討を行った。その結果、建材量については、本研究の推定方法で比較的良好な結果が得られた。一方、本量については、推定方法に関する更なるアプローチが必要と考えられる。なお、鉛直振動についても、既報⁴⁾のコンクリートスラブの結果と同様に、建材量について、本研究の妥当性が確認された。

参考文献

- 1) 富田隆太：環境振動の測定方法，騒音制御，Vol.35，No.2，pp. 166-170，2011.4
- 2) Tomita R., Goto Y.: Proposal for Environmental Vibration Measurement Method on Carpet using Vibration Control Rubber, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.84, No.761, pp. 635-641, 2019.7 (in Japanese)
富田隆太，後藤佑太：防振ゴムを利用したカーペット上での環境振動測定方法の提案，日本建築学会環境系論文集，84 巻，761 号，pp.635-641，2019.7
- 3) Tomita R., Goto Y.: Examination of Environmental Vibration Measurement using Vibration Control Rubber for Horizontal Vibration on Carpet, Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ), Vol.85, No.769, pp. 205-213, 2020.3 (in Japanese)
富田隆太，後藤佑太，足立大：カーペット上での水平振動に関する防振ゴムを利用した環境振動測定方法の検討，日本建築学会環境系論文集，85 巻，769 号，pp.205-213，2020.3
- 4) Tomita R., Goto Y., Aoki R.: Examination of Environmental Vibration Measurement using Vibration Control Rubber on Tatami, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.27, No.65, pp.283-287, 2021.2 (in Japanese)
富田隆太，後藤佑太，青木怜依奈：畳上での防振ゴムを利用した環境振動測定方法の検討，日本建築学会技術報告集，27 巻，第 65 号，pp.283-287，2021.2
- 5) 日本建築学会編：環境振動・固体音の測定技術マニュアル，オーム社，1999.3
- 6) 足立大，小谷朋央貴：環境振動測定における振動ピックアップの設置共振その 1 正弦波加振の場合，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学-I，pp.415-416，2017.7
- 7) 富田隆太，足立大：加振器を利用した鉛直振動の振動加速度変化による考察 -防振ゴムを利用した畳床の環境振動測定方法に関する研究-，日本音響学会騒音・振動研究会資料，N-2020-38，pp.1-8，2020.11
- 8) 富田隆太，足立大：加振器を利用した水平振動の実験的検討 -防振ゴムを利用した畳床の環境振動測定方法に関する研究-，日本音響学会建築音響研究会資料，AA2020-38，pp.1-8，2020.11
- 9) 日本建築学会編：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説，丸善，2004.5.
- 10) 日本建築学会編：実務的騒音対策指針，第 2 版，技報堂出版，1997.4

図 17 推定値とパターン B の結果 (T1，水平振動，2 点で補正)

図 18 振動加速度変化による比較 (鉛直振動)

図 19 振動加速度変化による比較 (水平振動，2 点で補正)

[2021 年 1 月 20 日原稿受理 2021 年 4 月 5 日採用決定]