

屈曲板およびハニカムコアの内挿条件が複層板の低周波数における 遮音性能に及ぼす影響

THE EFFECT OF INSERTION OF A BENT BOARD AND A HONEYCOMB CORE ON SOUND INSULATION PERFORMANCE OF THE MULTILAYER PANEL AT LOW FREQUENCIES

小泉 穂高*¹, 松岡 明彦*²
Hodaka KOIZUMI and Akihiko MATSUOKA

Sound insulation performance of a single panel is lowest at the first natural frequency and increases at lower frequencies. Therefore, stiffening the panel to raise the first natural frequency enables improvement of insulation performance at low frequencies. In this investigation, utilizing bent boards and honeycomb cores as light weight stiff materials, we examined stiffness and sound insulation performance of the hollow multilayer panel into which these materials were inserted. As a result, flexure of the inserted board raised the first natural frequency and showed a tendency to improve insulation performance of the multilayer panel at low frequencies. Moreover, bonding condition between the honeycomb core and the multilayer panel affected stiffness and insulation performance.

Keywords : sound insulation performance, stiffness, first natural frequency, bent board, honeycomb core
遮音性能 剛性 1 次固有振動数 屈曲板 ハニカムコア

1. はじめに

一般に板状部材の音響透過損失は低周波数では小さくなる¹⁾。壁や扉の低周波数における遮音性能を十分に確保したい場合、相応に重厚な構造が必要である。一方で、単純な板の透過損失は 1 次固有振動数において最小となり、それ以下の周波数では増加することが知られる²⁾。従って、板の剛性を高めて 1 次固有振動数を上昇させることで、それ以下の周波数の透過損失を向上させることが可能である³⁾。

軽量かつ柔軟性を有する単板は、曲げ変形によって剛性を上昇させることが容易であり、これを他部材と併用し低周波数の遮音性能を補う使い方が考えられる。特に乾式二重壁や鋼製扉といった中空二重板構造に内挿した際に効果が得られれば実用的である。また、他の手法としてハニカムコアの利用が考えられる。鋼製扉等では、衝突時の損傷防止を主な目的としてハニカムによるコア材が挿入されていることが多い。ハニカムは軽量ながら剛性が高いという構造的特徴を有しており、低周波数の遮音性能への寄与が期待される。

そこで本報では、屈曲板やハニカムコアといった内挿材に着目し、それらが複層板の低周波数における遮音性能に及ぼす影響について実験的検討を行った結果を報告する。

2. 実験 1 単板における検討

はじめに、四周を固定した単板という基礎的な条件において、板材の剛性と低周波数の遮音性能の関係性について確認する。

2.1 測定内容

実験状況を図 1 に示す。残響室と無響室の界壁として施工されたコンクリートブロック壁 150 mm (以下 CB 壁) の開口部 1.2 m 角に同寸法の試験体を設置し、音圧レベルにおける挿入損失 (1/3 oct.) を測定した。低周波数帯域の SN 比を確保するため、音源は破膜による衝撃音とした^{4,5)}。SN 比が 10 dB 以上確保されない周波数帯域は挿入損失の算出対象から除外した。また試験体の固有振動数を確認するため、インパクトハンマーで試験体を加振し、加振力を入力、試験体上の加速度を出力とした伝達関数 (アクセラランス) を算出した。

2.2 試験体

試験体は表 1 に示す 4 条件である。設置状況の断面イメージを図 2 に示す。鋼板 1.6 mm または PVC 板 (ポリ塩化ビニル板) 5.0 mm は、実験室開口部に設けられた鋼製の板取付治具に対しボルト留めによる四周固定で設置した。条件 3, 4 では実験室躯体から支持された加力治具 (鋼棒 $\phi 30$ mm) を板中央に押し当て、7.5 mm 変位させ

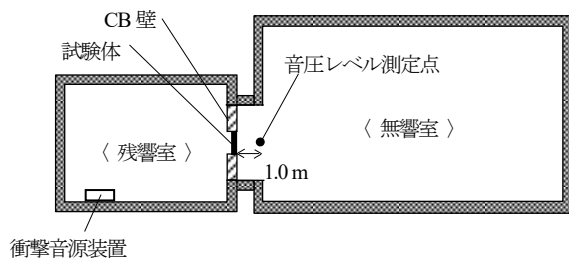


図 1 実験状況 (断面)

表 1 試験体の構成

条件	構成
1	鋼板 1.6 mm
2	PVC 板 5.0 mm
3	鋼板 1.6 mm + 加力治具 (中央変位 7.5 mm)
4	PVC 板 5.0 mm + 加力治具 (中央変位 7.5 mm)

*1 戸田建設(株) 技術開発センター 修士(工学)

*2 戸田建設(株) 技術開発センター

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M. Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION

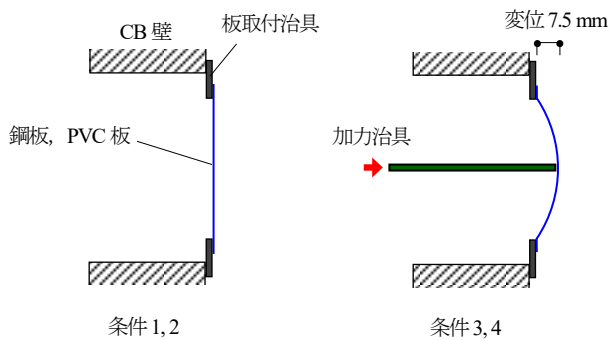


図2 試験体の設置状況（断面）

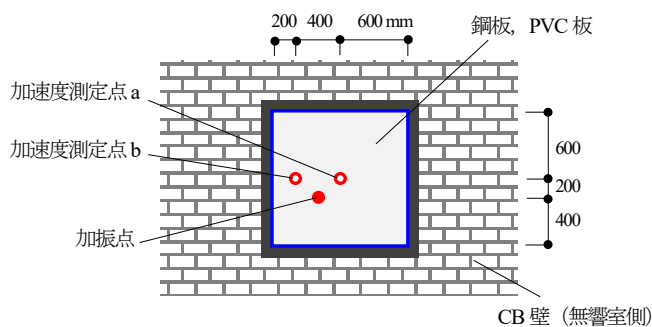


図3 加振点と加速度測定点

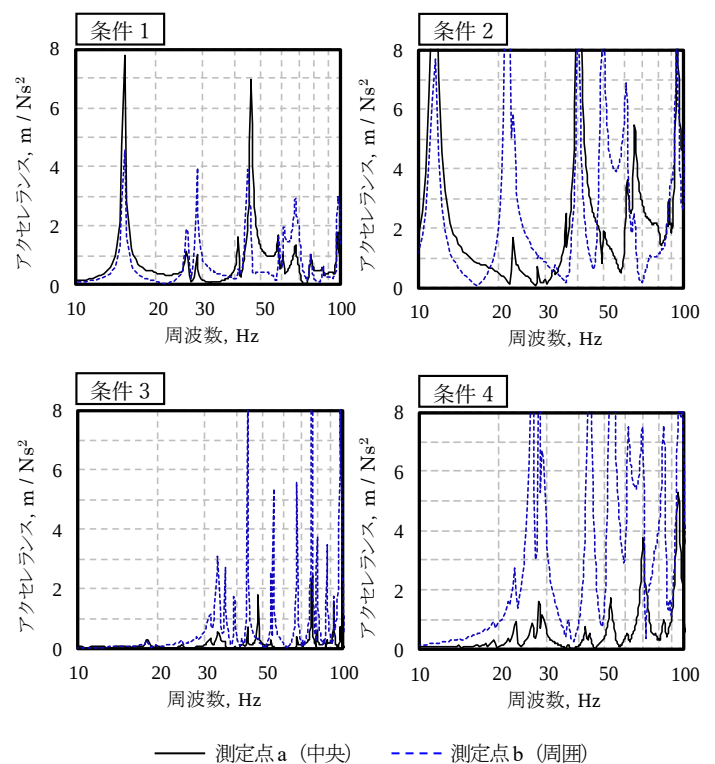


図4 単板におけるアクセラランス

た状態を保持した。インパクトハンマーによる加振点、加速度測定点は図3に示す位置で共通である。面密度は鋼板 1.6 mm が 12.6 kg/m²、PVC板 5.0 mm が 7.0 kg/m²である。

2.3 測定結果

条件1～4のアクセラランスを図4、挿入損失を図5に示す。アクセラランスを見ると、測定点a,bともに、条件1の鋼板では16 Hz、条件2のPVC板では12 Hzにおいて明確な1次ピークが発生しており、これらの周波数が1次固有振動数であると言える。条件1,2の挿入損失を見ると、1次固有振動数と対応する周波数において落ち込み、それより低い周波数では増加することを確認できる。条件1の方が1次固有振動数は高いため、16 Hz以下の挿入損失は条件1の方が大きくなっている。加力治具により板を変位させた条件3,4の場合、アクセラランスを見ると1次固有振動数は条件3で35 Hz付近、条件4で28 Hz付近に上昇しており、曲げ変形や加力治具の接触による剛性上昇が確認できる。条件3,4では測定点aのアクセラランスが小さくなっているが、加力治具が板中央の動きを拘束している影響と考えられる。1次固有振動数の上昇に伴い挿入損失が落ち込む周波数も変化し、条件3は40 Hz、条件4は25 Hzである。それ以下の周波数では加力前に比べて挿入損失が大きく増加している。なお条件3の挿入損失は16 Hzにも鋭い落ち込みが見られるが、他の周波数に比べ測定上限値が低いためである。試験体を設置するCB壁の1次固有振動数が16 Hz付近にあり、CB壁透過音の影響が大きくなるため測定上限値が低くなっている。本来は12.5～20 Hzにかけて直線状の挿入損失であると考えられる。

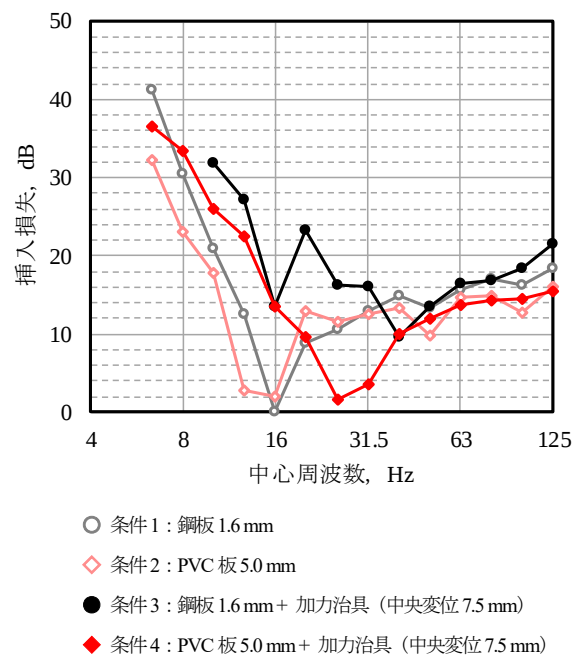


図5 単板における挿入損失

以上の結果から、四周を固定された単板においては、剛性の向上すなわち1次固有振動数の上昇により、低周波数の遮音性能向上が確認された。軽量の板であっても曲げ変形等を利用した剛性向上によって、それより重い板の遮音性能を上回ることが可能である。

3. 実験2 屈曲板を内挿した複層板における検討

中空二重板に軽量の屈曲板を内挿し、低周波数の遮音性能を補う方法について有効性を検討する。

3.1 測定内容

実験1と同様に挿入損失、アクセラランスを測定した。

3.2 試験体

試験体は表2に示す4条件である。構成イメージを図6、設置状況の断面を図7に示す。2枚の鋼板はそれぞれCB壁開口部の板取付治具に固定した。PVC板はラッシングベルト5本を巻き付けて立てかけ、条件6ではこれを締め付けずに平板状態とした。条件7,8ではラッシングベルトを均等に締め付け、PVC板に曲げ変形を生じさせた。条件8では山形鋼(3×30×30mm)による縦棧を追加し、PVC板の屈曲形状を波型とした。PVC板は曲げ変形に伴い両側の治具に接触し、突っ張る力が働くことで部分的に固定支持される。鋼製の接触防止治具は、曲げ変形したPVC板がはらみ鋼板と接することを防ぐ目的で設置した。

なお条件6~8では鋼板(残響室側)を取り外した状態において、加振点、加速度測定点をPVC板上とした場合のアクセラランスについても測定した。

3.3 測定結果

加振点、加速度測定点をPVC板上とした場合のアクセラランスを図8に示す。PVC板が平板状態である条件6の場合、測定点aでは13Hzに小さな1次ピークが見られるが、測定点bでは11Hz, 18Hz付近にも緩やかなピークが見られ1次固有振動数が不明確であ

る。これはPVC板の四周が固定支持されていないことに起因すると考えられる。PVC板に曲げ変形を与えた条件7の場合、測定点a, b共通の1次ピークが22Hzに見られた。変形に伴い端部が部分的に固定支持され、板の1次固有振動数が明確に表れるようになったと考えられる。接触防止治具に縦棧を加え屈曲形状を波型とした条件8の場合、1次固有振動数はさらに上昇し28Hzである。

測定点を鋼板上(無響室側)とした場合のアクセラランスを図9に示す。PVC板を挿入しない条件5の場合、1次固有振動数は13Hzであり測定点a, bともに一致している。なお実験1の条件1に比べると1次固有振動数はやや低く、ピークも小さくなっている。これは中間空気層による空気ばねを介した連結が鋼板2枚の間に発生し、質量付加に伴う固有振動数の低下、および減衰の増加が生じたものと考えられる。PVC板を挿入した条件6の1次固有振動数は条件5よりわずかに低下し12Hzである。PVC板は両側の鋼板に接触しておらず、空気ばねを介してPVC板が付加質量として連結された影響と考えられる。PVC板に曲げ変形を与えた条件7,8を見ると、PVC板の質量には変化がないため、条件6とほぼ同様の1次固有振動数である。

条件5~8の挿入損失を図10に示す。条件5は12.5~16Hzにかけて挿入損失が最小となり、図9で確認した1次固有振動数に対応する。これに比べ条件6の挿入損失は12.5~16Hzがやや向上した。条件6は挿入したPVC板を曲げておらず、1次固有振動数の上昇も確認されていないが、図9において鋼板の1次固有振動数のピークが小さくなったことに対応していると考えられる。条件7,8では

表2 試験体の構成

条件	構成
5	鋼板 1.6 mm + 空気層 100 mm + 鋼板 1.6 mm
6	鋼板 1.6 mm + PVC 板 5.0 mm (平板) + 鋼板 1.6 mm
7	鋼板 1.6 mm + PVC 板 5.0 mm (屈曲板) + 鋼板 1.6 mm
8	鋼板 1.6 mm + PVC 板 5.0 mm (波型屈曲板) + 鋼板 1.6 mm

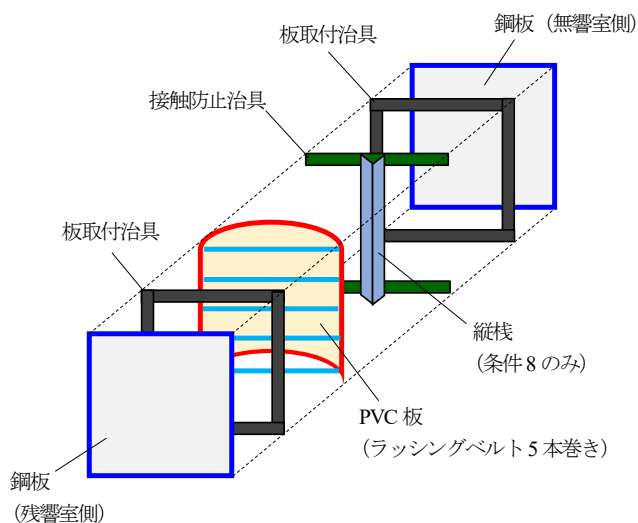


図6 構成イメージ

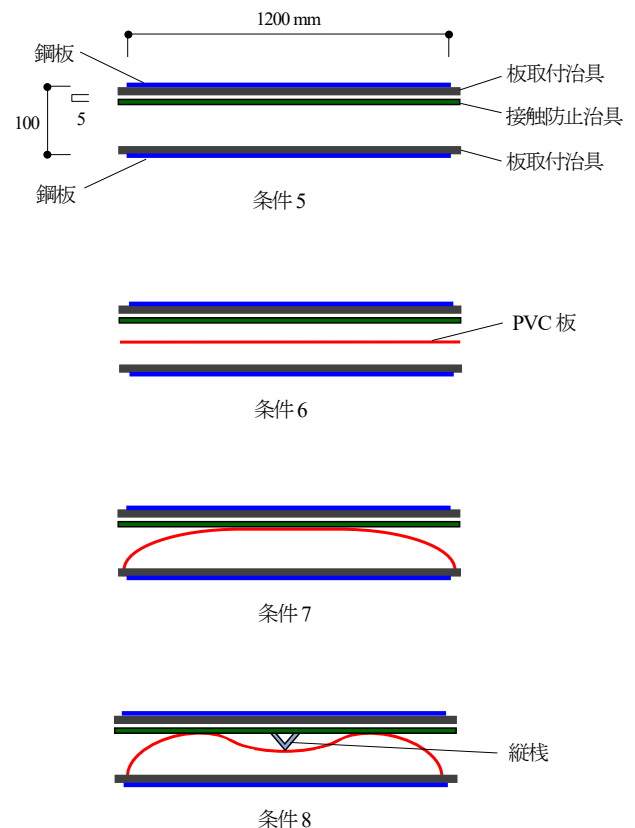


図7 試験体の設置状況(断面)

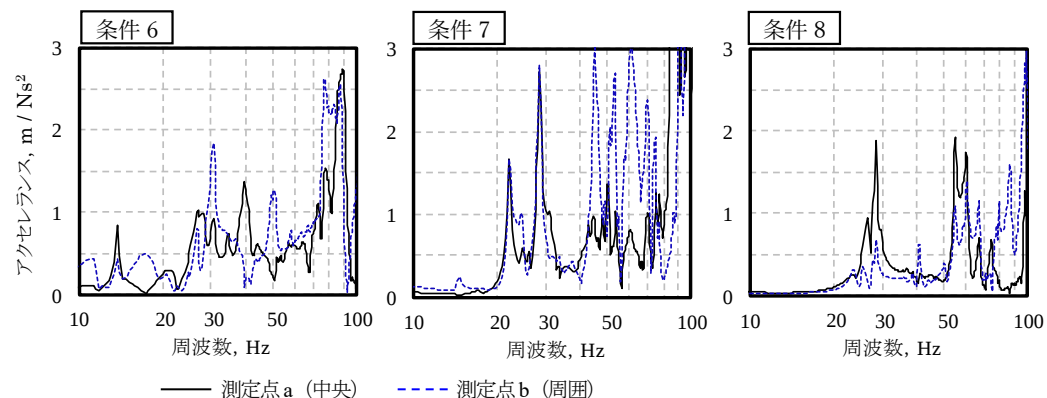


図8 PVC板におけるアクセラランス

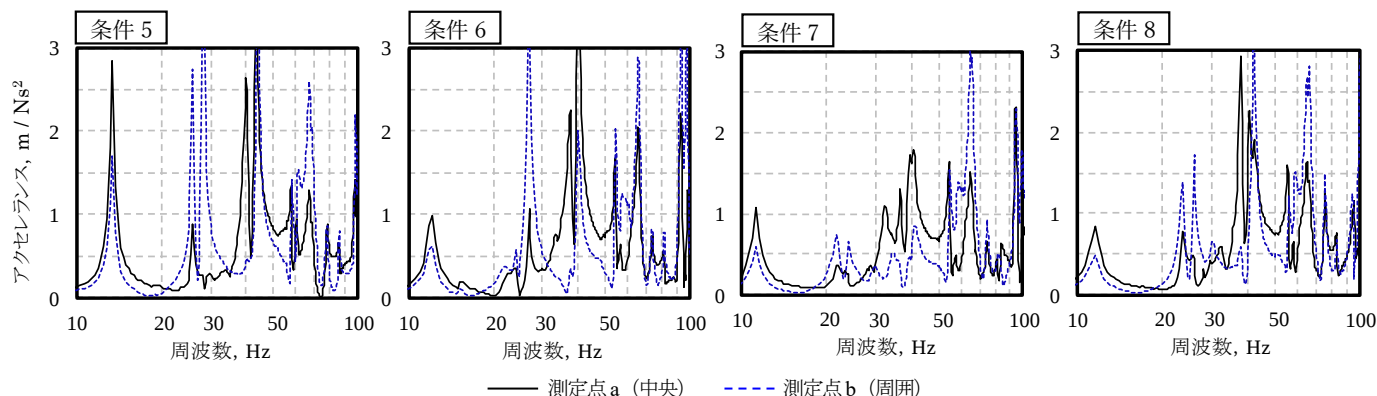


図9 鋼板におけるアクセラランス

12.5 Hz の挿入損失が増加する傾向が見られた。図8のPVC板における1次固有振動数は条件7で22 Hz、条件8で28 Hzに上昇したことを考えると、挿入損失の増加した周波数範囲が限定的である。ただし、条件8の挿入損失は6.3~16 Hzにかけて直線状となっており、これを高周波数側に延長すると、PVC板の1次固有振動数が含まれる25~31.5 Hz付近で0となる。従って、PVC板の1次固有振動数と複層板の挿入損失には対応があり、条件5,6の挿入損失を広範囲で上回るためには、PVC板の1次固有振動数をより高い周波数にする必要があると考えられる。

以上の結果から、内挿板の剛性向上による低周波数の遮音性能改善は可能であると考えられるが、内挿板の1次固有振動数を十分に高める必要があり、屈曲形状や固定方法についてさらなる検討が求められる。

4. 実験3 ハニカムコアを内挿した複層板における検討

中空二重板にハニカムコアを内挿し、低周波数の遮音性能を補う方法について有効性を検討する。

4.1 測定内容

実験1,2と同様に挿入損失、アクセラランスを測定した。

4.2 試験体

試験体は表3に示す5条件である。構成イメージを図11、ハニカムコアの断面形状および面密度を図12に示す。条件10,12では低剛性なコアとしてペーパーコアを用いた。条件11,13では高剛性なコアとしてボイドスリーブφ50 mmによって構成されたボイドコ

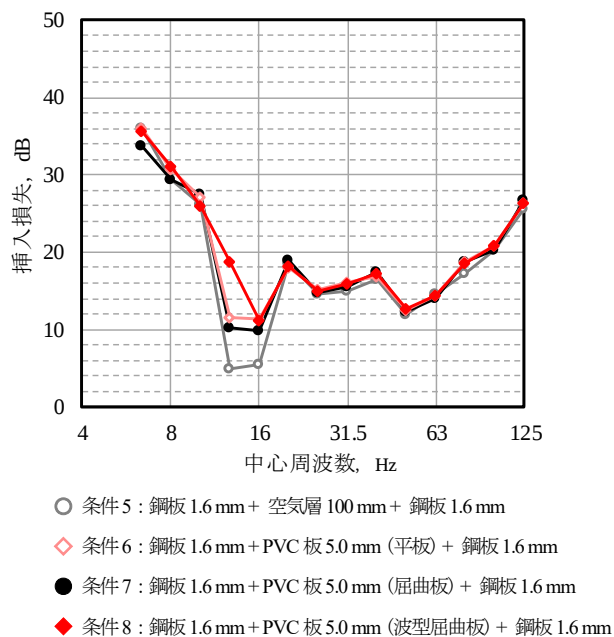


図10 屈曲板を内挿した複層板の挿入損失

アを用いた。コアの厚さはいずれも50 mmである。条件9ではハニカムコアに代わり厚さ50 mmの木枠をスペーサーとして挿入した。全ての条件において一方の鋼板は板取付治具に固定し、もう一方は木枠を用いてコア材に押し当てた。条件10,11ではハニカムコアを

表 3 試験体の構成

条件	構成
9	鋼板 1.6 mm + 空気層 50 mm + 鋼板 1.6 mm
10	鋼板 1.6 mm + ペーパーコア 50 mm (片面接着) + 鋼板 1.6 mm
11	鋼板 1.6 mm + ボイドコア 50 mm (片面接着) + 鋼板 1.6 mm
12	鋼板 1.6 mm + ペーパーコア 50 mm (両面接着) + 鋼板 1.6 mm
13	鋼板 1.6 mm + ボイドコア 50 mm (両面接着) + 鋼板 1.6 mm

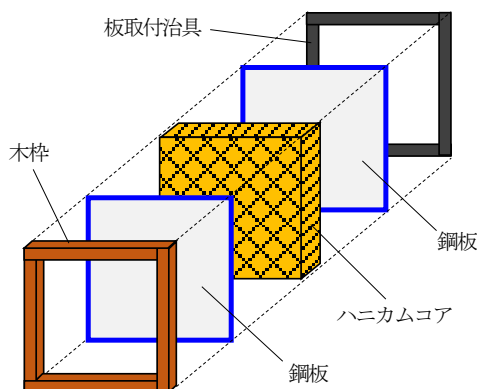


図 11 構成イメージ

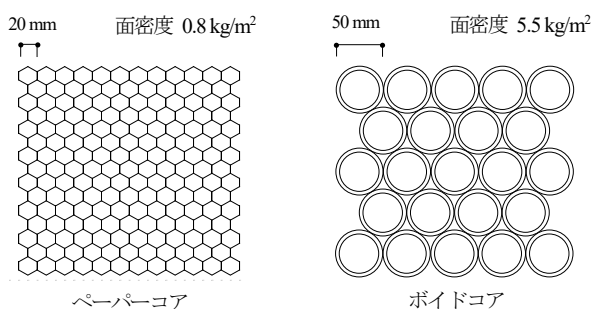


図 12 ハニカムコアの断面形状

板取付治具側の鋼板に全面接着し、条件 12, 13 では両側の鋼板に全面接着した。

なおアクセラランスの測定において、加振点は実験 1 と同様であるが、加速度測定点は a (中央) のみとした。また条件 9 については測定を実施していない。

4.3 測定結果

条件 10～13 のアクセラランスを図 13 に示す。1 次固有振動数はペーパーコアを内挿した条件 10 が 14 Hz、ボイドコアを内挿した条件 11 が 18 Hz であり、条件 11 の方がやや高い。これは接着されたコアの剛性が、ペーパーコアに比べてボイドコアの方が高いためと考えられる。しかし、実験 1, 2 において確認した鋼板の 1 次固有振動数は条件 1 (鋼板単板) が 16 Hz、条件 5 (中空二重鋼板) が 13 Hz であることを考慮すると、ハニカムコアの挿入により剛性が大きく向上しているとは言い難い。一方、条件 12, 13 の 1 次固有振動数はほぼ同様であり約 33 Hz に上昇した。このことから、ハニカム

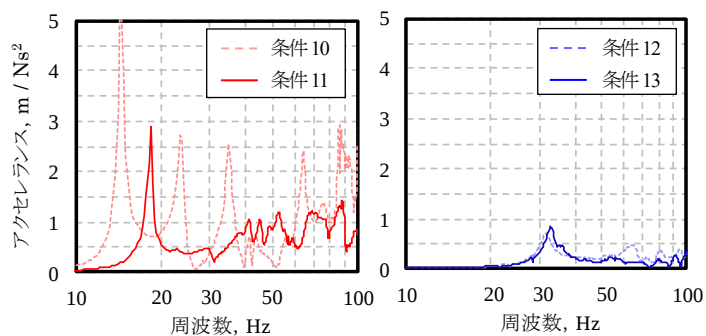
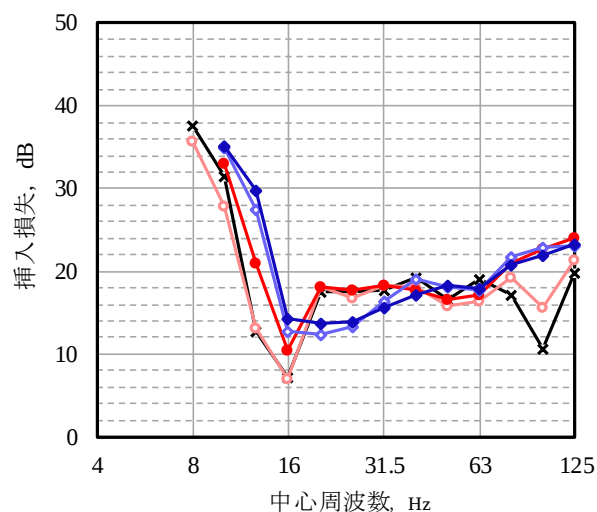


図 13 ハニカムコアを内挿した複層板のアクセラランス



- × 条件 9 : 鋼板 1.6 mm + 空気層 50 mm + 鋼板 1.6 mm
- 条件 10 : 鋼板 1.6 mm + ペーパーコア 50 mm (片面接着) + 鋼板 1.6 mm
- 条件 11 : 鋼板 1.6 mm + ボイドコア 50 mm (片面接着) + 鋼板 1.6 mm
- ◇ 条件 12 : 鋼板 1.6 mm + ペーパーコア 50 mm (両面接着) + 鋼板 1.6 mm
- ◆ 条件 13 : 鋼板 1.6 mm + ボイドコア 50 mm (両面接着) + 鋼板 1.6 mm

図 14 ハニカムコアを内挿した複層板の挿入損失

コアを内挿した複層板の剛性は、両側板材がコアを介して連結状態となる構造的要因によって大きく上昇し、コア自体の剛性による影響は小さいことが考えられる。

条件 9～13 の挿入損失を図 14 に示す。条件 9, 10 の低周波数における挿入損失はほとんど同様であり、ペーパーコアの内挿による影響は見られない。これに比べ条件 11 は 16 Hz 以下の挿入損失がやや増加しており、1 次固有振動数が 18 Hz に上昇していたことと対応する。条件 12, 13 はともに 1 次固有振動数が上昇していたが、挿入損失においても同様に 16 Hz 以下が大きく向上した。しかし 20～31.5 Hz では条件 9～11 に比べ低下が見られた。これは両側鋼板との構造的な連結により、板性状が複層板から厚い単板へと変化するため、その 1 次固有振動数付近では挿入損失が低下したものと考えられる。

なお、条件 9 の挿入損失は 100 Hz において顕著な落ち込みが見られるが、鋼板 2 枚の共鳴周波数に該当する。他の条件では 100 Hz

付近の挿入損失が大きく向上しており、ハニカムコアの内挿により共鳴透過現象が緩和されることを確認できる。

以上の結果から、中空二重板にハニカムコアを内挿する際の低周波数の遮音性能に関しては、コアと両側板材の接着条件が大きく影響し、コア自体の剛性による影響は小さいことが明らかとなった。ただし、コアを両側板材と接着する際は、1次固有振動数付近の周波数では遮音性能が低下する恐れがあることに注意を要する。また本報では検討対象としていないが、質量則領域において両側板材の連結により懸念されるサウンドブリッジの影響についても本来は検討が必要と考えられる。

5. まとめ

四周を固定された単板において、剛性向上に伴う1次固有振動数の上昇と対応し、低周波数の遮音性能が向上することを確認した。また中空層を有する複層板において、屈曲板またはハニカムコアの内挿条件が低周波数の遮音性能に及ぼす影響について検討し、以下の知見を得た。

i) 屈曲板の内挿による影響

内挿した板の曲げ変形に伴う1次固有振動数の上昇により、低周波数における遮音性能が向上する傾向が見られた。ただし、内挿した板の1次固有振動数は十分に高くする必要があり、屈曲形状や固定方法に関する配慮が求められる。

ii) ハニカムコアの内挿による影響

ハニカムコア自体の剛性が複層板の低周波数における遮音性能に及ぼす影響は小さく、コアを介して両側板材が構造的に連結されることにより1次固有振動数が大きく上昇し、低周波数の遮音性能も向上する傾向が得られた。ただし、連結の影響により一部周波数においては遮音性能が低下する恐れがあることに注意を要する。

参考文献

- 1) 前川純一, 森本政之, 阪上公博, “建築・環境音響学,” 共立出版, 2000
- 2) 白木万博 監著, “騒音防止設計とシミュレーション,” 応用技術出版, 1987
- 3) 小泉穂高 他, 膜加圧を利用した遮音構造に関する基礎的研究, 戸田建設技術研究報告集 vol. 43, 2017
- 4) 小林正明 他, 膜加圧を利用した遮音構造に関する基礎的研究 その1 膜加圧による単層壁の遮音性能向上について, 日本音響学会講演論文集(秋), 2017, 971-974
- 5) 土肥哲也, 可搬型低周波音発生装置の開発, 騒音制御 vol. 37, No. 2, 84-89, 2013