

木質界壁の空気音遮断性能に関する研究

Study on Airborne Sound Insulation of Wooden Walls

兵藤 伸也^{※1}
Shinya Hyodo

山下 祐^{※1}
Yuu Yamashita

小林 真人^{※1}
Masahito Kobayashi

安田 洋介^{※2}
Yosuke Yasuda

【要旨】

木材利用の観点から木材を利用した中高層建築の提案や企画が多くなされている。これらの建築は耐火仕様とする必要があるが、耐火仕様とした木壁の遮音性能に関する知見は少ない。このことから、木下地壁および、Cross Laminated Timber を使用した壁（CLT 壁）を対象に、耐火仕様を含む試験体を対象とした空気音遮断性能の評価実験を行った。その結果、木下地壁の音響透過損失等級は受音室側と音源室側で異なる厚さの面材を使用すると1ランク向上し、下地材の柱を独立間柱にすることで2ランク向上することが分かった。また、板材の曲げ振動が起こる160 Hz から250 Hz 帯域付近で音響透過損失が低下することを確認した。CLT 壁ではCLT 素面に対して強化石膏ボードを貼り増しすると遮音性能が1ランク向上するが、コインシデンス効果により広域にわたり音響透過損失が質量則よりも低下することが分かった。

【キーワード】 空気音遮断性能 CLT 木質二重壁 音響透過損失 コインシデンス効果

1. はじめに

建築への木材利用が促進されるなかで、木質系建築を展開する方法の一つとしてRC造と木造の混構造建築（以下、混構造）のブランディング化を目指している。混構造においては、スケルトンインフィルとして建物価値を向上させているため床や壁は木構造としている。ここで、木構造には木下地壁やCross Laminated Timber（CLT）を採用するが、これらはRC部材に比べて軽量かつ低剛性であるので、床へ適用した場合には床衝撃音遮断性能が低下し、壁へ適用した場合には空気音遮断性能が低下することが懸念される。また、中高層建築では部材の耐火を考慮する必要があるため木構造部の耐火は必須である。以上のことを踏まえ、本研究では、混構造の設計に供することを目的として、まず壁構造に着目し、木下地壁およびCLTを対象に空気音遮断性能の評価実験を行った。

2. 試験体の概要

2.1 木下地壁の仕様

木下地壁の試験体は図-1に示す6タイプとした。試験体1は空気層の厚さ $t=120$ mmとした二重壁で、面材は強化石膏ボード $t=21$ mm（以下、GB-F21）の両面2重貼りとした。試験体3は試験体1に対してGB-F21の片面を石膏ボード $t=12.5$ mm（以下、GB-R12.5）の2重貼りに変更したものである。試験体5は試験体1に対して空気層 $t=180$ mmとした独立間柱に変更したものであり、片面の下地は全て間柱である。試験体2、4、6は試

験体1、3、5に対してグラスウール（50-24K）をそれぞれ充填したものである。図-2に試験体の下地構成を示す。試験体1と試験体3では柱の間に端部を除いて間柱を303 mm間隔で配置し、柱と間柱は垂木で繋げた。試験体5は独立間柱であることから柱と間柱の垂木は無い。

2.2 CLT 壁の仕様

CLT壁は図-3に示す5タイプとした。試験体7はCLT素面（スギ、厚さ $t=90$ mm、3層3プライ）で、(b)に示すようにCLTパネル（ $L=2,488$ mm、 $W=871$ mmおよび 872 mm）4枚からなり、CLTパネルの強軸を高さ方向に、弱軸を横方向に用いた。ここで、試験体7のCLTパネルに生じた隙間を粘土処理したものを試験体8とした。試験体9は試験体8に対してGB-F21を片面に1枚貼付けたものである。試験体10はGB-F21を両面に1枚貼付けし、試験体11はGB-F21を両面二重貼りしている。図-4にGB-F21の割り付けを示す。試験体9および10は(a)の割り付けとした。試験体11は1層目を(a)、2層目を(b)の割付として目違い貼りとした。

2.3 残響室への施工方法

写真-1に試験体の施工状況を示す。空気音遮断性能の評価実験は容積 350 m³の残響室（以下、音源室）と容積 210 m³の残響室（以下、受音室）間の開口に試験体を設置して行った（残響室の形状は図-6を参照）。ここで、試験体は試験用の鋼製枠へ木枠を介して施工した。また、

木枠の遮音欠損を防ぐため、図-5に示すように木毛セメント板と粘土を用いて鋼製枠との取り合いを処理した。

2.4 コインシデンス限界周波数の計算方法

コインシデンス効果により音響透過損失が低下することから面材のコインシデンス限界周波数 f_c [Hz]を把握する必要がある。 f_c は式(1)から求めた¹⁾。

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{D}} \quad (1)$$

ただし、 C ：空気中の音速 340 m/s、 m ：面密度 [kg/m²]、 D ：曲げ剛性 ($=Et^3/12$) [N・m]、 E ：ヤング率 [N/m²]、 t ：厚さ [m]である。板材1枚あたりの m はGB-F21 が 16.4

kg/m²、GB-R12.5 が 8.5 kg/m²、CLT 素面が 39.0 kg/m² である。

GB-F21 および GB-R12.5 のヤング率 E_p [N/m²]は式(2)から求めた¹⁾。

$$E_p = C_L^2 \rho \quad (2)$$

ただし、 C_L ：固体中の縦波の伝搬速度 [m/s]、 ρ ：板材の密度 [kg/m³]である。固体中の縦波の伝搬速度 C_L は実測から、GB-F21 は 2,500 m/s、GB-R12.5 は 2,300 m/s とした。このときの GB-F21 および GB-R12.5 の f_c はそれぞれ 1,223 Hz、2,234 Hz となる。

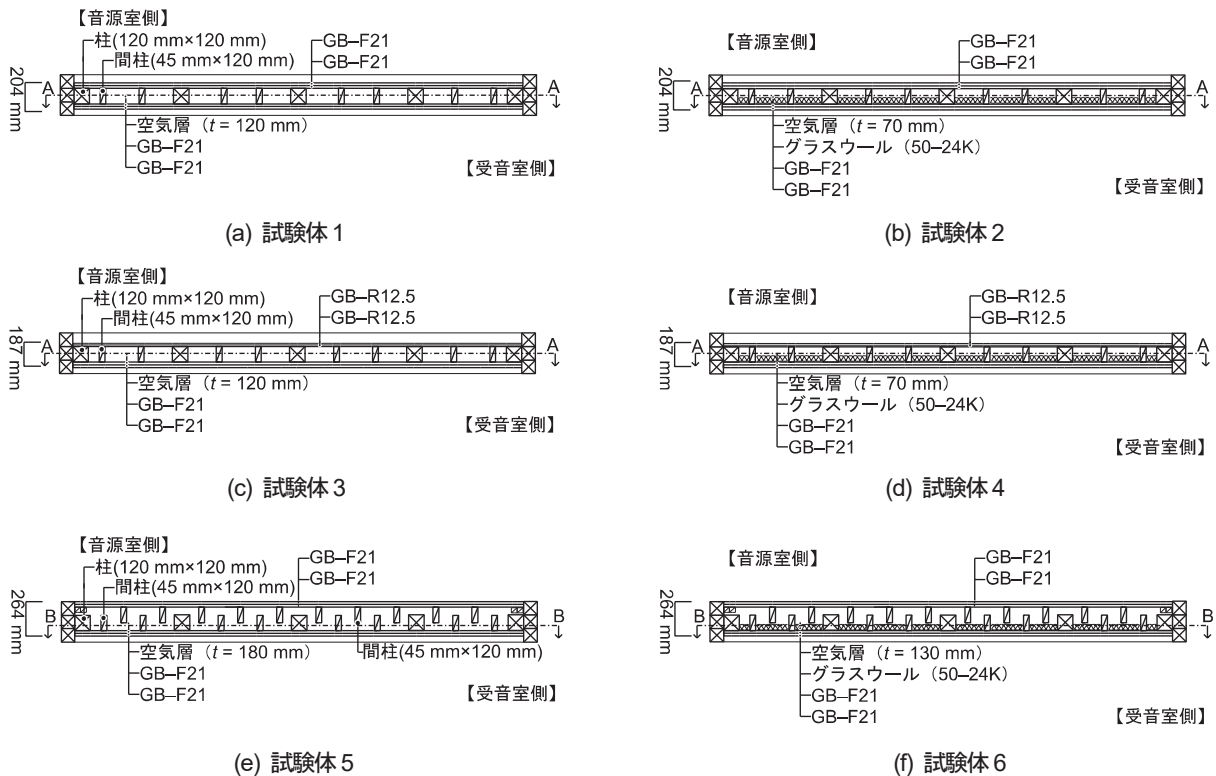


図-1 木下地壁の仕様

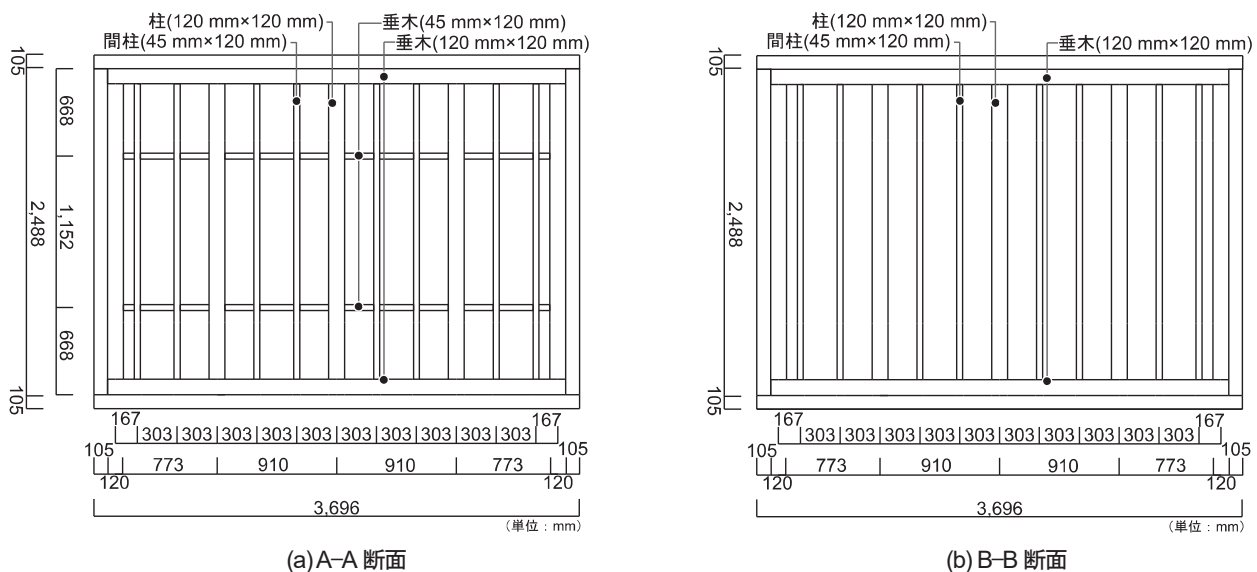


図-2 木下地壁の地下構成

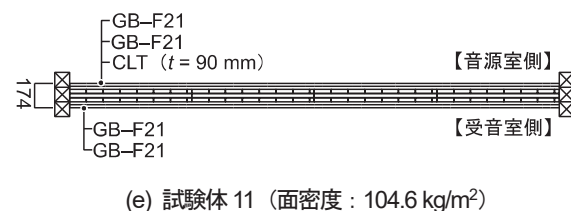
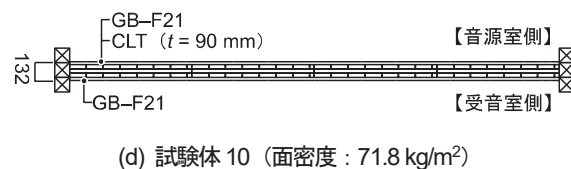
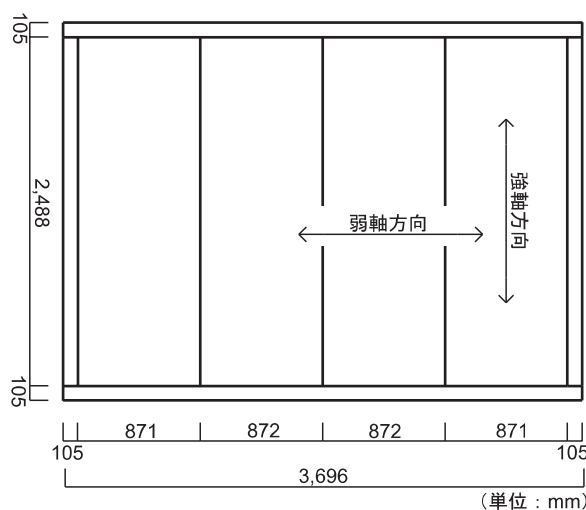
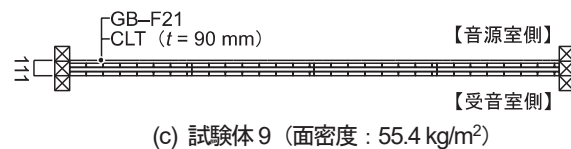


図-3 CLT 壁の仕様

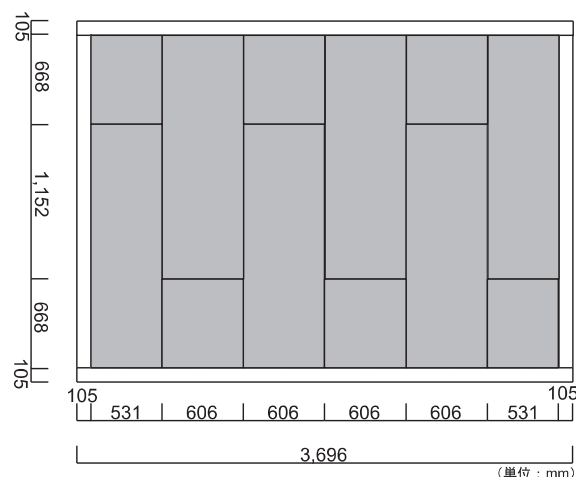
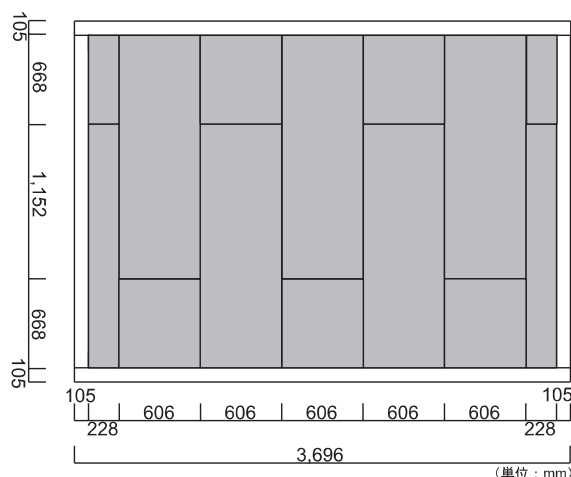


図-4 強化石膏ボードの割り付け

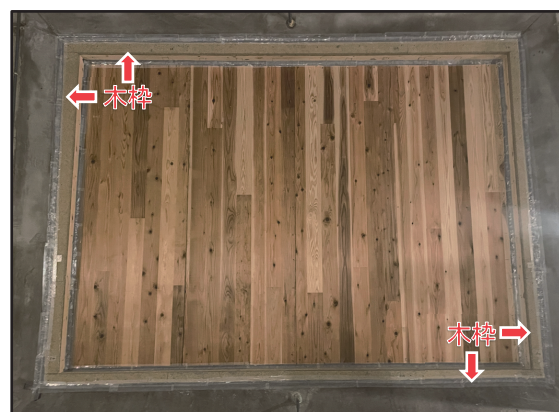


写真-1 試験体の施工状況

異方性材料である CLT 壁のコインシデンス限界周波数は強軸と弱軸の両方向の等価ヤング率を考慮することが妥当であるとの報告がある²⁾。そのため、CLT 壁の曲げ剛性 D [N・m] を式(3)から強軸と弱軸方向で求めた³⁾。

$$D = \sum_{i=1}^n E_i \left(\frac{t_i^3}{12} + t_i \cdot y_i^2 \right) \quad (3)$$

ただし、 E_i : i 層目のヤング率 [N/m²]、 t_i : i 層目の厚さ [m]、 y_i : i 層目の中立軸からの距離 [m] である。以降、CLT の強軸および弱軸方向の曲げ剛性をそれぞれ D_s [N・m]、 D_w [N・m]、強軸および弱軸方向のコインシデンス限界周波数をそれぞれ f_{cs} [Hz]、 f_{cw} [Hz] と表す。CLT を構成する強軸方向におけるラミナ材のヤング率を E_{si} とすると、弱軸方向では $E_{si}/30$ 、ラミナの間層では強軸と弱軸方向のヤング率をそれぞれ 1/2 倍した。なお、 E_{si} は $7.0E+9$ N/m² を用いた⁴⁾。

3. 測定方法

音響透過損失は図-6に示すシステムにより JIS A 1416:2000「実験室における建築部材の空気音遮断性能の測定方法」に基づいて測定した。

木下地壁では 160 Hz から 250 Hz 付近における面材の固有振動が音響透過損失へ影響を及ぼすことが懸念されたため、試験体 1, 3, 5 を対象に図-7に示すシステムにより伝達インピーダンスを測定した。ここで、加振点は音源室側の試験体壁面、受振点は受音室側の試験体壁面とした。振動加速度から振動速度を求め、加振力および振動速度を周波数分析器 (B&K PULUSE) を用いて FFT 分析 (サンプリング周波数: 2,048 Hz, 分析ライン数: 3,200, 窓関数: 加振力の分析はフォース, 振動加速度の分析はハニング, 周波数分解能: 0.25 Hz, 平均回数: 8 回) し、伝達インピーダンスを求めた。

4. 結果と考察

4.1 木下地壁

図-8に木下地壁における音響透過損失の測定結果を二重壁の音響透過損失 $TL_{double-walls}$ [dB] および質量則による音響透過損失 TL [dB] とともに示す。 $TL_{double-walls}$ は式(4)から求め、 TL は式(5)から求めた⁵⁾。

$$TL_{double-walls} = 10 \log_{10} \left[1 + 4 \left(\frac{\omega m}{2 \rho_{air} c} \right)^2 \left(\cos kd - \frac{\omega m}{2 \rho_{air} c} \sin kd \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$TL = TL_0 - 10 \log_{10} (0.23 TL_0) \quad (5)$$

$$TL_0 = 20 \log_{10} (fm) - 42.5 \quad (6)$$

ただし、 ω : 角速度 [rad/s]、 d : 空気層の厚さ [m]、 ρ_{air} : 空気密度 [kg/m³]、 k : 波数、 f : 周波数 [Hz] である。また、JISA 1419-1 に規定される音響透過損失等級 R_r-45 、 R_r-40 、

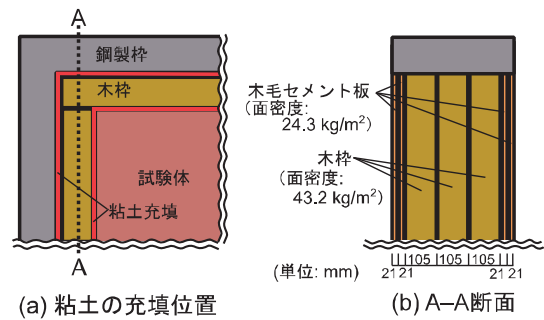


図-5 枠の仕様

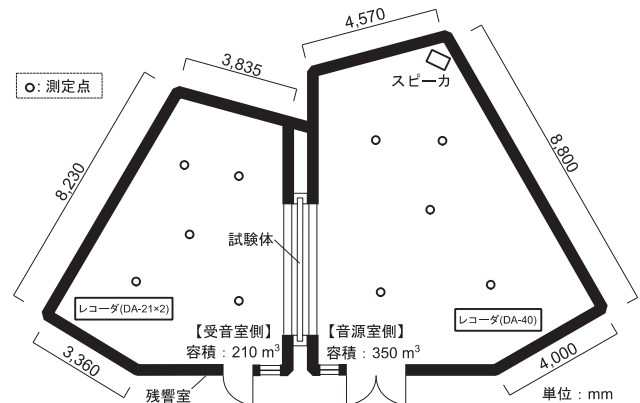


図-6 音響透過損失の測定システム (残響室平面図)

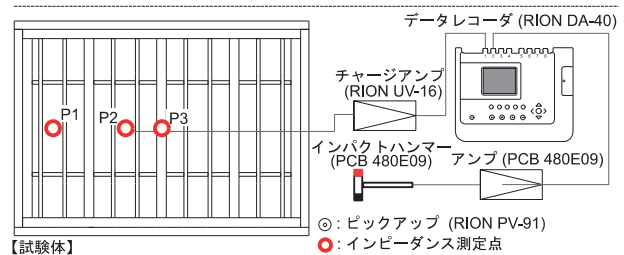


図-7 伝達インピーダンスの測定システム

R_r-35 を併記した。音響透過損失等級は試験体 1 と 2 では R_r-35 、試験体 3 と 4 では R_r-40 、試験体 5 と 6 では R_r-45 である。このことから、音響透過損失は受音室側と音源室側で異なる厚さの面材を使用すると 1 ランク向上し、下地を独立間柱にすることで 2 ランク向上することが分かる。また、グラスウールによる効果は 250 Hz 帯域以上の周波数において、試験体 2 では 1~3 dB 程度、試験体 4 では 1 dB 程度見られるが、試験体 6 では試験体 5 と同程度である。試験体 1, 2, 5, 6 の 1.2 kHz から 2 kHz 帯域で見られるディップは GB-F21 のコインシデンス限界周波数と一致することからコインシデンス効果によるものと考えられる。試験体 3, 4 では異なる厚さの面材を組み合わせたことにより、コインシデンス効果によるディップが無くなっている。一方で、試験体 1, 2 では 250 Hz 帯域、試験体 3, 4, 5, 6 では 160 Hz 帯域にディップが確認できる。式(4)で求めた音響透過損失では 40 Hz 付近

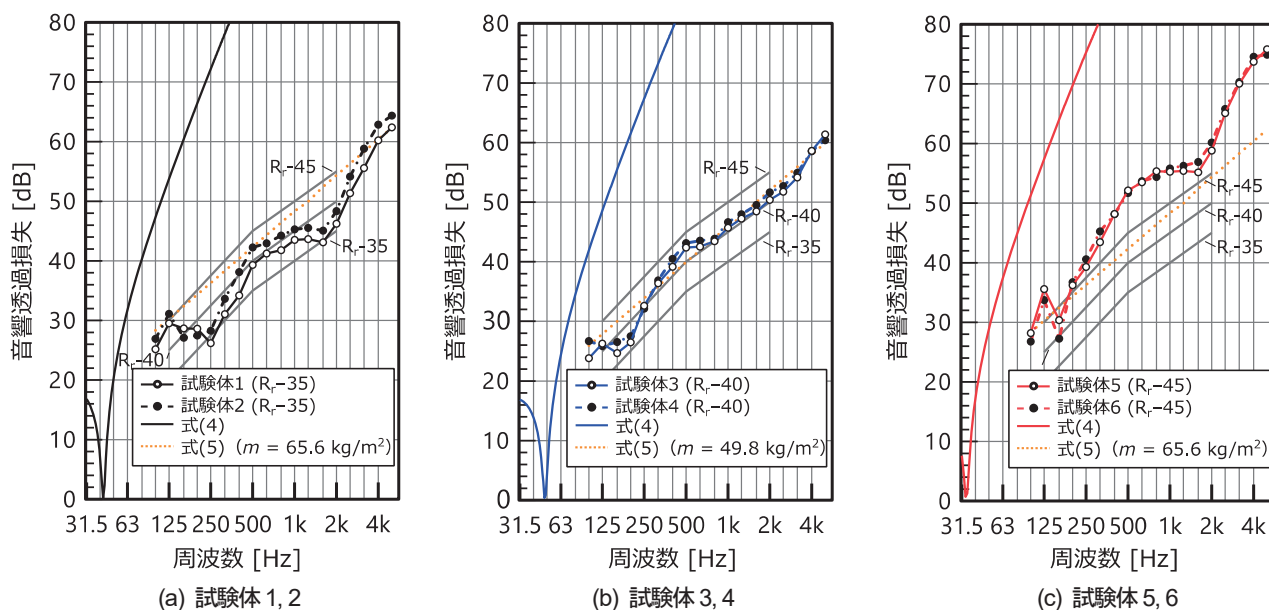
に低音域の共鳴透過によるディップが確認できるので、250 Hz 帯域または 160 Hz 帯域のディップは中空層を設けたことに起因するもので無いことが分かる。このことについて、板材の固有振動に着目して要因を検討する。

図一 9 に試験体 1, 3, 5 を対象に音源室側の点 P1, P2, P3 を加振した時の受音室側の同位置における伝達インピーダンスを示す。試験体 1 の 250 Hz 帯域と試験体 3 の 160 Hz 帯域で音響透過損失の低下が確認できるので、この周波数帯域の伝達インピーダンスに着目する。試験体 1 では 160 Hz から 250 Hz にかけて伝達インピーダンスの低下が顕著であり、試験体 3 では 120 Hz から 200 Hz での低下が確認できる。ここで、測定点の違いに着目すると、試験体 1 のインピーダンスは背後に柱のない P1 において、背後に柱のある P3 より大きく低下している。P2 についても P1 と同様の地下条件であるが、P1 ほどのインピーダンスの低下とはなっていない。試験体 3 のインピーダンスは背後に柱のない P1 と P2 において、背後に柱のある P3 よりも低下している。試験体 5 では、音響透過損失が 160 Hz 帯域で低下しているの、この周波数帯

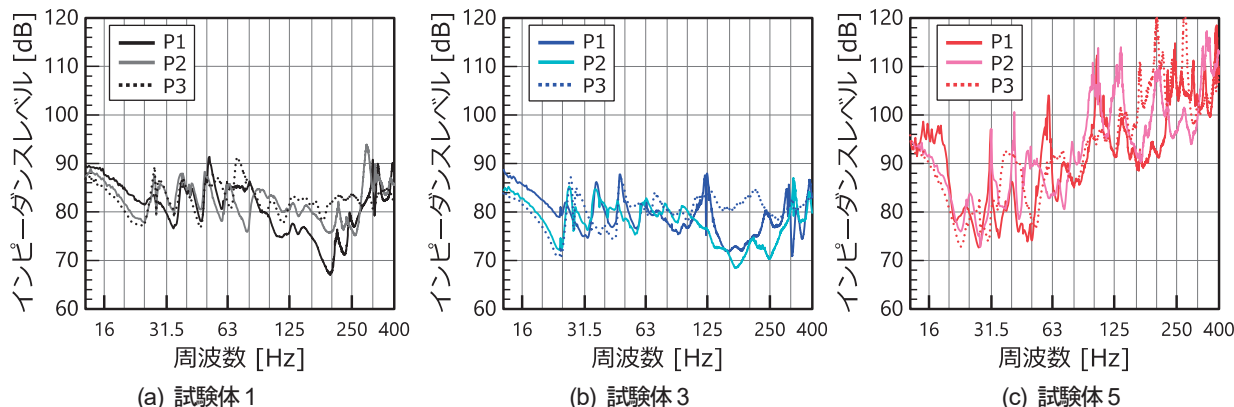
域に着目すると、P1 と P2 のインピーダンスが柱上の P3 に比べて低下しており、背後に柱のない面材の振動が音響透過損失へ影響していることが分かる。これらのことから、柱や間柱の無い箇所からの音響放射によって音響透過損失が低下するものと考えられる。

4.2 CLT 壁

図一 10 に CLT 壁における音響透過損失の測定結果を TL (式(5)) とともに示す。また、JISA1419-1 に規定される音響透過損失等級 R_T-35 , R_T-30 を併記した。試験体 7 は試験体 8 と比較して 1 kHz 帯域より高い周波数で音響透過損失が低下している。これは CLT パネルの突合せ部に隙間が生じていたためであり、実施工においては隙間の確認と処理が重要である。音響透過損失等級は試験体 7, 8 では R_T-25 , 試験体 9, 10, 11 では R_T-30 であることが確認できる。試験体 9 から 11 は試験体 8 に対して GB-F21 の増張りにより遮音性能は 1 ランク向上したものの、いずれの試験体も 200 Hz から 2 kHz 帯域にかけて音響透過損失が質量則を下回っている。



図一 8 木下地壁の音響透過損失測定結果



図一 9 木下地壁における伝達インピーダンスの測定結果

表一に式(1)および式(3)から求めた試験体7から試験体11の D_s , D_w , $f_{c,s}$, $f_{c,w}$ を示す。試験体8のコインシデンス限界周波数は強軸方向が177 Hz, 弱軸方向が773 Hzであり, コインシデンス効果により音響透過損失が低下していることが分かる。また, 試験体9から11でも試験体8と同様に $f_{c,s}$ が160 Hz帯域にあり, コインシデンス効果により音響透過損失が低下していることが分かる。

5. まとめ

木下地壁およびCLT壁を対象に耐火仕様を含む複数の試験体を用いて空気音遮断性能を評価し, 面密度や断面構成が音響透過損失へ及ぼす影響を検討した。

木下地壁では, 柱や間柱の有無およびコインシデンス効果が音響透過損失の低下に影響していることを確認した。異なる厚さの面材を用いてコインシデンス効果による音響透過損失の低下を抑制することで, 音響透過損失等級が1ランク向上することが分かった。また, 柱を独立間柱とすることで共通間柱の場合よりも音響透過損失等級が2ランク向上し R_w-45 になることを確認した。

CLT壁では, 素面においてコインシデンス効果により200 Hz帯域から2 kHz帯域にかけて音響透過損失が低下した。また, 強化石膏ボードを増貼りしてもコインシデンス効果による音響透過損失の改善には寄与しないことが分かった。

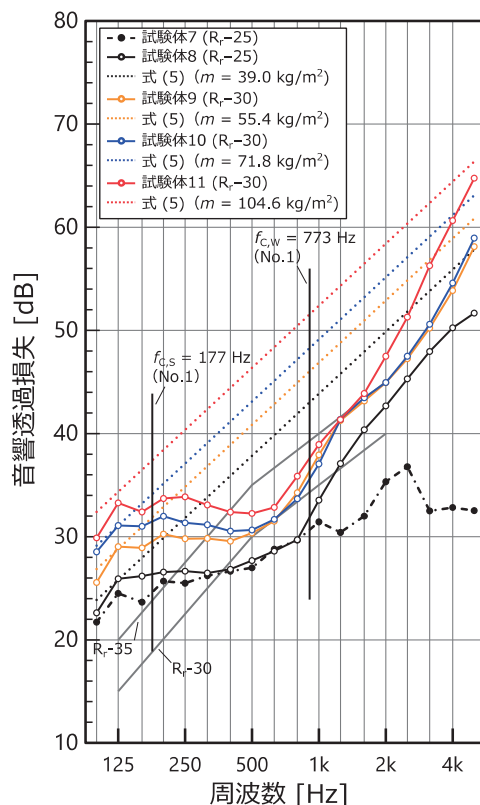
本報は実験室における要素実験の結果を示した。実建物においては側路伝搬や建築構造に起因する影響によって遮音性能が変化するので, 今後は実大規模の試験体を作成して遮音性能の評価を行う。

【参考文献】

- 1) 日本音響材料協会編：騒音・振動対策ハンドブック, pp.312-313, p.343, 技報堂, 1982.
- 2) 平光厚雄：“CLT (直交集成板) の普及の背景とその音響性能”, 日本音響学会誌, 77巻12号, pp.775-781, 2021.

Summary From the perspective of utilizing wood, many proposals and plans for mid-rise buildings using wood have been made. These buildings are required to meet the fireproof structure, but there is little knowledge about the sound insulation performance of fire-resistant wooden walls. Therefore, the airborne sound insulation performance evaluation experiments were conducted on wood-based walls and walls using Cross Laminated Timber (CLT), including the fireproof structure. As a result, it was found that the sound transmission loss rating of wood-based walls improved by one grade when using panels of different thicknesses on the source and receiver room sides, and by two grades when the pillars were changed to independent columns. Furthermore, it was confirmed that the sound transmission loss decreased in the 160 Hz to 250 Hz frequency range, which is the region of bending vibrations of the panels. In CLT walls, applying reinforced gypsum boards to the surface of the CLT improved sound insulation performance by one grade, but due to the coincidence effect, the sound transmission loss over a wide frequency range was found to be lower than the mass law would predict.

Key Words: Sound Isolation Performance, Cross Laminated Timber, Wooden Double-Walls, Sound Transmission Loss, Coincidence Effect



図一〇 CLT 壁の音響透過損失測定結果

表一 CLT 壁の曲げ剛性およびコインシデンス限界周波数

試験体名	D_s [N・m]	$f_{c,s}$ [Hz]	D_w [N・m]	$f_{c,w}$ [Hz]
試験体 7	409,763	177	21,525	773
試験体 8				
試験体 9	629,640	173	207,831	301
試験体 10	691,498	188	303,261	283
試験体 11	1,134,640	177	746,403	218

- 3) 日本 CLT 協会：床版として CLT を使用する枠組壁工法建築物の開発, 2017.
- 4) 農林水産省：直交性板の日本農林規格, 2013.
- 5) 木村翔：建築音響と騒音防止計画, pp.95-96, pp.104-107, 彰国社, 1981.