

# CLT 造の建築物における遮音性能向上のための開発 —CLT 造の箱型モデル構築と床スラブに着目した 重量床衝撃音に関する実験的検討—

Development of Technology to Improve Sound Insulation on CLT Structure.  
(Experimental Study on Heavy-Weight Floor Impact Sound with CLT Structure Box-Type  
Model Focusing on Floor Slabs)

兵藤 伸也<sup>\*1</sup>      佐藤 考浩<sup>\*1</sup>      Dinh Diep Duy<sup>\*1</sup>  
Shinya Hyodo      Takahiro Sato

小林 真人<sup>\*1</sup>      森 長 誠<sup>\*2</sup>      安 田 洋 介<sup>\*2</sup>  
Masahito Kobayashi      Makoto Morinaga      Yosuke Yasuda

## 【要旨】

2010年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行され、SDGsの一環として建築分野では木材の利用促進が図られている。木材を利用するうえで木質部材であるCLT（Cross Laminated Timber）は強度が高く、大規模木造建築の材料に使用できるなど様々なメリットがあるため、注目が集まっている。一方で、遮音性能の観点ではCLTはRCに比べて曲げ剛性が低く、面密度も小さいため床衝撃音遮断性能が低下することが建築へ供するうえでの課題となっている。筆者らは床衝撃音遮断性能の把握のため天井開口部にCLTスラブを設置できるRC造の実験室を用いてCLTの床構造の違いによる重量床衝撃音への影響を検討してきた。しかしながら、CLT建築物は床スラブ以外にも木材で構成されていることから壁面等からの音響放射を考慮する必要があり、RC造の実験室を用いた実験ではCLT造の床衝撃音遮断性能を正確に把握することは困難であった。そこで、CLT造の箱型モデルを構築して床構造の違いによる床衝撃音遮断性能への影響、および床スラブと壁面の振動特性を確認した。また、受音室を構成する天井や壁面からの放射音についても検討した。その結果、CLT床のインピーダンスはRC造でみられる端部上昇量が得られないこと、CLT部材の継ぎ目でインピーダンスが低下すること、一方で、床構造に天井仕上げと乾式二重床を設置することで床衝撃音遮断性能が向上することを明らかにした。また、受音室壁面からの音響放射が床衝撃音レベルに寄与することを明らかにした。

【キーワード】 CLT   重量床衝撃音   インピーダンス   乾式二重床   天井空気層

## 1. はじめに

2010年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」（2021年の改正時に「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」と改名）が施行されて以降、建築分野ではSDGsの一環として木材の利用促進が図られており、木質部材であるCLT（Cross Laminated Timber）に注目が集まっている。CLTは強度が高いため構造躯体として高層の建築物に使用が可能で、大規模木造建築物の材料として期待されている。また、CLTはRCと比べて施工が早く、断熱性が期待できるなどの様々なメリットがある。CLTは厚みがあり、燃えしろが確保できることで耐火性が期待できるため、木材を生かしたデザイン性にも優れている。

遮音性能の観点では、CLTはRCに比べて曲げ剛性が低く、面密度も小さいため重量床衝撃音遮断性能が低下することが建築へ供するうえでの課題となっている。そこで、筆者らは天井開口部にCLTスラブを設置できるRC造の実験室を用いてCLTの床構造の違いによる重量床衝撃音への影響を検討してきた[1]。しかし、実際のCLT建築物は床スラブ以外にも木材で構成されるため、壁面等からの音響放射が無視できないと考えられた。そこで、床スラブと壁面をCLTとした箱型モデル（以下、箱型モデルとする）を構築して、CLT造の床衝撃音の検討に着手した。

本研究では上述の箱型モデルを用い重量床衝撃音の測定を行い、床構造の違いによる床衝撃音への影響および

床衝撃音測定時の床スラブと壁面の振動特性を確認した。また、床スラブ加振時の天井面や壁面からの放射寄与について検討した。

## 2. 箱型モデルの構築

構築した箱型モデルを図-1に示す。箱型モデルの基礎と壁、壁と床スラブをそれぞれ引きボルトを用いて70 N・mの締付トルクで接合した。ここで、壁に使用したCLTの材厚は90 mmで、室内の床は21 mmの構造用合板である。なお、実験施設内に箱型モデルを設置したため、箱型モデルの基礎は施設内の床に固定せずに置いた。床スラブはCLT部材をスラブの長辺に対して平行に用いたもの(図-1(b))、CLT部材をスラブ長辺に対して直行に用いたもの(図-1(c))を準備した。ここで平行に用いた場合のスラブ厚さは150 mm、210 mmの2種であり、直行の場合は150 mmの1種とした。また、箱型モデルの床スラブは実験の条件に合わせて交換できるようにした。

実験に使用した床構造の詳細を表-1及び図-2に示す。試験体No.1は箱型モデルに厚さ150 mmの床スラブを設置し、床スラブの端部に木枠を設置した。試験体No.2は試験体No.1を基に、箱型モデルと150 mmの床スラブの間に90 mmのCLTの天井スラブを入れ、床スラブと天井スラブの間に300 mmの天井空気層を設けた。試験体No.3は試験体No.1の床スラブ上に乾式二重床を設置した。試験体No.4は床スラブの厚さを150 mmとし、CLT部材を短手方向に使用した。試験体No.5は床スラブの厚さを210 mmとした。試験体No.6は試験体No.1の条件に加え、床スラブと壁を固定するためのL金物を取り付けた。図-3に箱型モデルの展開面を示す。室内の広さは2,290×3,190×2,600 mm<sup>3</sup>で、床面積は7.3 m<sup>2</sup>、図-3(f)の壁面にサッシ(T-1等級のサッシ、ペアガラス、厚さ10 mm)を、図-3(g)の壁面に木製のドアを取り付けた。

## 3. 測定方法

図-4に床衝撃音測定のための加振位置(P1~P5)、駆動点インピーダンス測定位置(P1~P5、測線R1、測線R2)を示す。重量床衝撃音の測定はJISA 1418-2に基づいて行った。衝撃源は衝撃力特性(1)のバングマシンとした。衝撃源による加振点位置は図-4に示すP1~P5の5点とし、受音点は受音室に対して空間的に概ね均等に分布した5点に設置した。測定は普通騒音計(時間重み特性Z)を用いて、その出力はPCを用いた測定システム(51.2 kHz, 16 bit)で収録した。分析は周波数分析プログラムにより時間重み特性125 ms, 100 ms 間隔の音圧レベルの最大値を63~4 kHzの1/1オクターブバンド中心周波数で求めた。

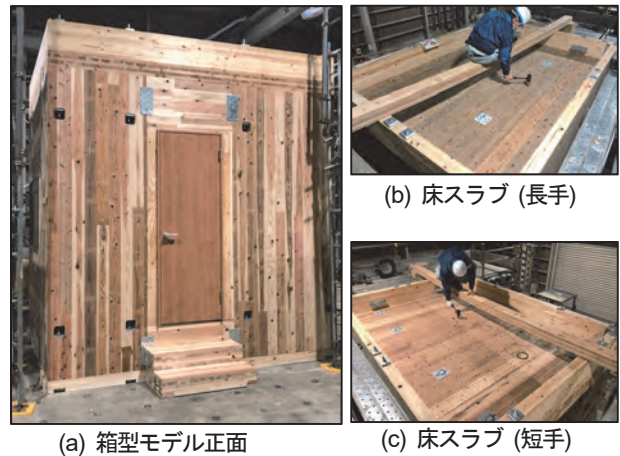


図-1 箱型モデル外観

表-1 実験時の床構造

No.	床スラブ		備考
	厚さ (mm)	部材方向	
1	150	長手	
2	150	長手	300 mmの天井空気層を導入 乾式二重床を設置
3	150	長手	
4	150	短手	
5	210	長手	
6	150	長手	L金物で壁と床スラブを固定

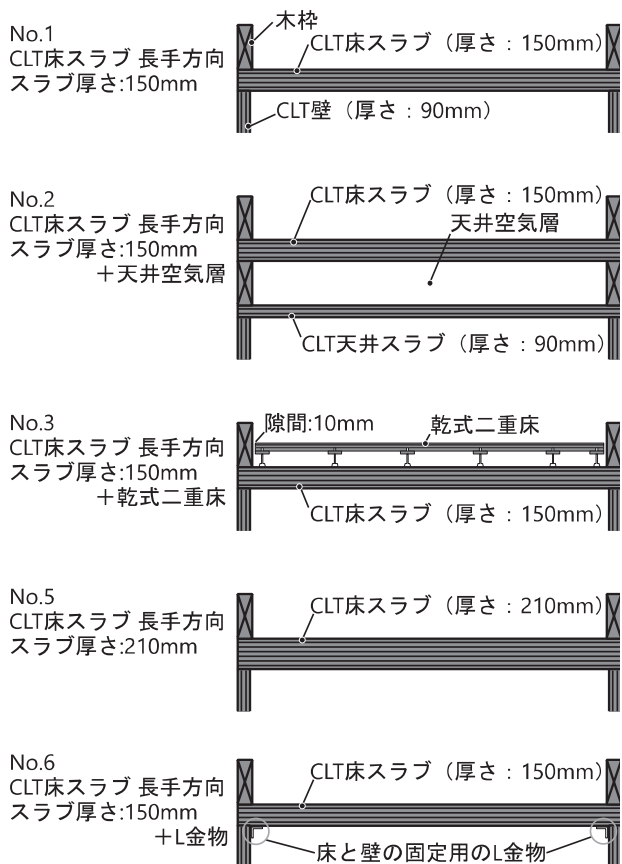


図-2 箱型モデルの床構造別断面

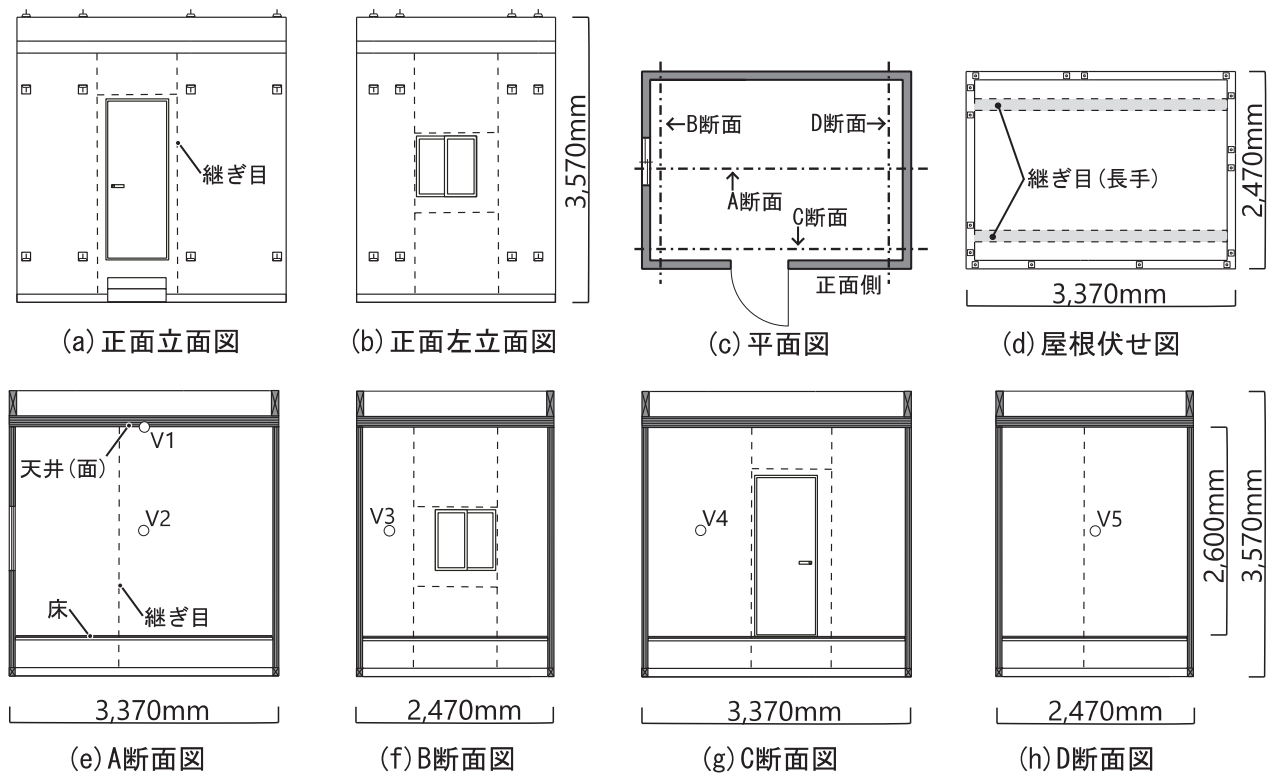


図-3 箱型モデルの図面 (○: 振動加速度レベル測定点)

床衝撃時の壁面等における振動加速度の測定は図-3 (e) ~ (h)で行った。測定は重量床衝撃音の測定と同時にを行い、測点をV1~V5として、加速度計 (HPFを10 Hzに設定) からの出力をデータレコーダ (25.6 kHz, 16 bit)により収録した。分析は周波数分析プログラムを用いて時間重み特性125 ms, 100 ms間隔の振動加速度レベルの最大値を63~500 Hzの1/1オクターブバンド中心周波数で $L_{va,max}$ として求めた。床スラブにおける駆動点インピーダンスの測定を図-4のP1~P5で、試験体No.4 (CLT部材を短手方向に使用)とNo.5 (CLTスラブ厚さ210 mm)のみ測線R1~R2でスラブ端部から100 mm間隔で行った。駆動点インピーダンスレベル $L_z$ は測点に振動ピックアップを設置し、インパクトハンマーで打撃した際の衝撃力 $F$  (N)と加速度ピックアップの振動速度 $v$  (m/s)を用いて式(1)より求めた。

$$L_z = 10 \log_{10} \left( \frac{Z^2}{Z_0^2} \right) \quad (1)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\int_0^T F(t)^2 dt}{\int_0^T v(t)^2 dt}} \quad (2)$$

ただし、 $Z$ は駆動点インピーダンス (式(2))、 $Z_0$ はインピーダンスレベルの基準値 (1 kg/s)である。なお、駆動点インピーダンスについて、解析時に振動速度応答波形を時系列上で操作し、ハンマーの衝撃時間に対応した強制

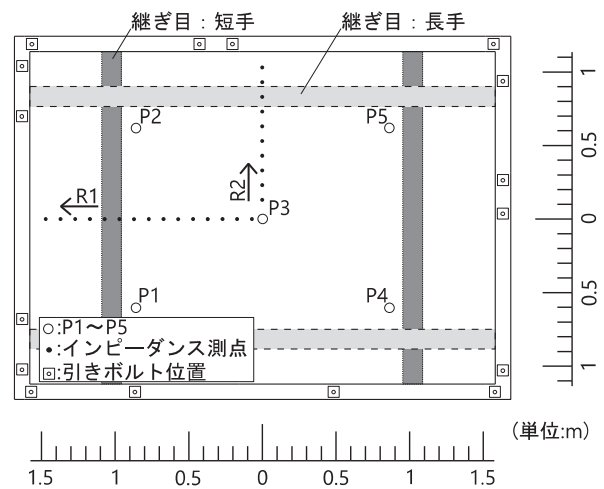


図-4 床スラブの加振点と測点 (継ぎ目“長手”と“短手”を同時に記載)

表-2 箱型モデル室内の残響時間から求めた平均吸音率 $\alpha$

項目	周波数 (Hz)			
	63	125	250	500
吸音率 $\alpha$	0.05*	0.05	0.05	0.04

\*125Hzの吸音率と同様の値を用いた。

応答部から求めた衝撃時間内応答インピーダンスレベル $L_{z0}$ と、振動速度応答波形が減衰して暗振動に埋もれるまでの時間から求めた全時間応答インピーダンスレベル $L_{zT}$ を算出した。

#### 4. 振動面からの寄与による室内音圧レベルの算出

床衝撃時の天井や壁面からの寄与による室内音圧レベル  $L_{SPL}$  は式(3)から求めた[2].

$$L_{SPL} = L_{va} - 20\log_{10}(f) + 10\log_{10}(K) + 10\log_{10}(S'/A) + 36 \quad (3)$$

ただし,  $L_{va}$ は板面の振動加速度レベル (dB),  $f$ は周波数 (Hz),  $K$ は音響放射係数,  $S'$ は板面の有効放射面積 ( $m^2$ ),  $A$ は室内の平均吸音力 ( $m^2$ ) である.  $L_{va}$ は 1/1 オクターブバンドの  $L_{va,max}$  を用いた. 有効放射面積  $S'$  は波長の 0.18 倍の長さを板面の各辺から引いて求めた面積とした[3]. また,  $A$  は箱型モデルの残響時間測定値から式(4)によって求めた表-2の平均吸音率に室表面積を乗じた値とした.

$$A = \frac{0.161V}{ST} \quad (4)$$

ただし,  $V$ は室内の体積 ( $m^3$ ),  $S$ は室内の表面積 ( $m^2$ ),  $T$ は残響時間 (s) である. 音響放射係数は Beranek のモデルを用いて設定した[4]. 表-3に振動面別の音響放射係数を示す. なお, 表-3の V1 の ( ) 内には表-1の番号を表記しており, V1 は床スラブ別に求めた.

#### 5. 測定結果

##### 5.1 駆動点インピーダンスの測定結果

図-5に床スラブ上の P1~P5 で測定した衝撃時間内応答インピーダンス  $L_{Zb,S}$  を示す.  $L_{Zb,S}$  は床スラブの厚さ 210 mm (試験体 No.5) の場合, スラブ中央の測点 P3 が 100dB, それ以外の測点では  $95 \pm 1$  dB 程度であった. P3 以外の地点における  $L_{Zb,S}$  が相対的に小さくなっているが, これは図-4に示したように CLT 部材の継ぎ目による影響である. 図-6に P3 における全時間応答インピーダンス  $L_{ZI}$  を示す.  $L_{ZI}$  から床スラブの一次固有振動数が 40 Hz 付近であることを確認できる. 図-7に図-4で示した測点における衝撃時間内応答インピーダンス  $L_{Zb,R}$  を示す.  $L_{Zb,R}$  はスラブの継ぎ目で低下し, 文献[5]と同様にスラブ端部の拘束による  $L_{Zb,R}$  の上昇はみられなかった.

##### 5.2 重量床衝撃音レベルの測定結果

図-8に L 数とともに重量床衝撃音レベルの測定結果を示す. L 数は全ての実験パターンにおいて 63 Hz 帯域で決定した. 試験体 No.2 (試験体 No.1+天井空気層有) または試験体 No.3 (試験体 No.1+乾式二重床有) を設けた場合は試験体 No.1 (CLT スラブ 厚さ 150mm) と比較して 63 Hz 帯域で約 7dB 低下し, 今回の実験条件の中で最も床衝撃音遮断性能が高かった. 試験体 No.4 (CLT 部

材を短手方向に使用) は試験体 No.1 と比較して 63 Hz 帯域で 3 dB 増加した. これは図-6の全時間応答インピーダンス  $L_{ZI}$  をみると試験体 No.2 の床スラブの固有振動数が 50 Hz 帯域で試験体 No.1 より高くなり, 1/1 オクターブバンドで 63 Hz 帯域に近づいていることが原因であ

表-3 振動面別の放射係数レベル  $10\log_{10}(K)$

地点 (表1の番号)	$10\log_{10}(K)$ (dB)			
	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
V2, V4	-11.3	-9.6	-5.2	3.2
V3, V5	-10.3	-8.6	-4.7	3.0
V1(No.2)	-10.9	-9.1	-5.0	3.2
V1(No.1,3,4,6)	-6.5	-4.1	0.6	0
V1(No.5)	-3.6	-1.2	2.7	0

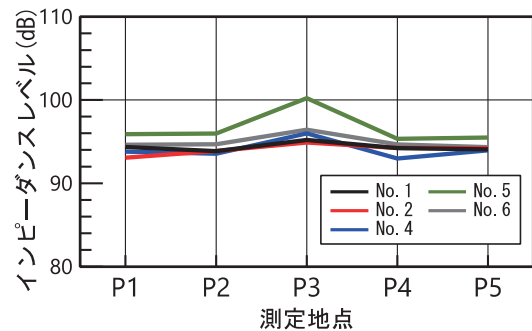


図-5 床スラブ上の代表5地点における衝撃時間内応答インピーダンス  $L_{Zb,S}$

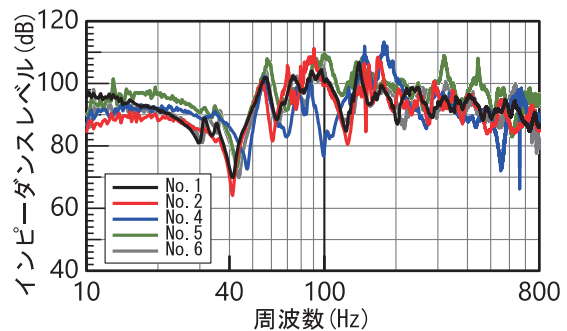


図-6 床スラブ上の測点 P3 における全時間応答インピーダンス  $L_{ZI}$

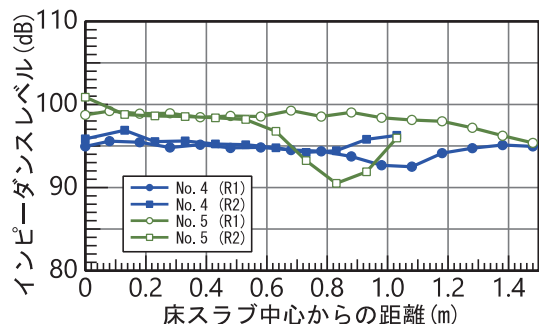


図-7 床スラブ上の測路 R1 および R2 の衝撃時間内応答インピーダンス  $L_{Zb,R}$

と考えられる。そのため、床スラブにCLT部材を用いた場合、部材の使い方によって重量床衝撃音に対する遮音性能が変化することが分かった。また、試験体No.6(床スラブに構造用のL金物を付けた場合)は試験体No.1と比べて差はほとんどみられず、構造用金物の有無で重量床衝撃音の遮音性能に対して影響はみられなかった。

## 6. 振動面からの音響放射の検討

図-9に試験体No.1~No.6の天井面(V1)と壁面(V2~V5)で測定した1/3オクターブバンドの振動加速度レベル $L_{va,max}$ を示す。試験体No.1, No.5においては全ての面で40Hz帯域に卓越周波数が確認できた。試験体No.2, No.4, No.6では卓越周波数は40Hz帯域と31.5Hz帯域の場合がみられた。試験体ごとに卓越周波数が異なるが、これは試験体を交換する際に床スラブと壁面を固定するボルトを外しており、スラブ交換後のボルトの締め具合の違いにより壁面と床スラブの固定条件が変化したことが考えられる。

表-4に床スラブと壁面における1/1オクターブバンドの振動加速度レベル $L_{va,max}$ のエネルギー合成値を示す。 $L_{va,max}$ はV1~V5では天井面のV1が最も大きく、壁面は

床構造が床スラブ1枚の場合(試験体No.1, 4, 5, 6)でV2とV5が他の壁面よりも大きくなる傾向があった。これはV3とV4は壁面にサッシとドアが有り、かつ、測点

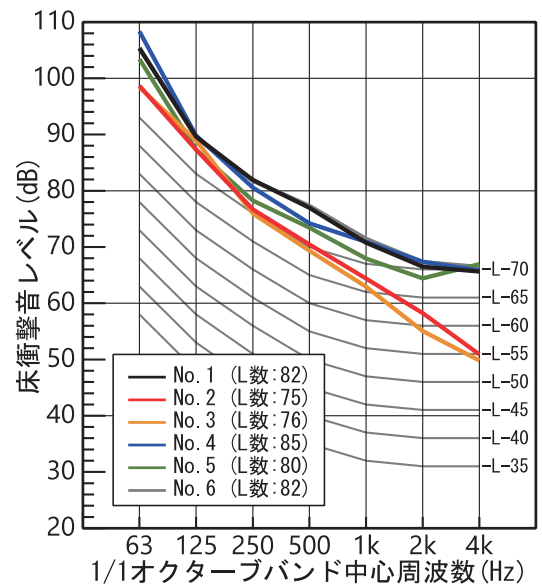


図-8 重量床衝撃音の測定結果  
(加振源：バングマシン)

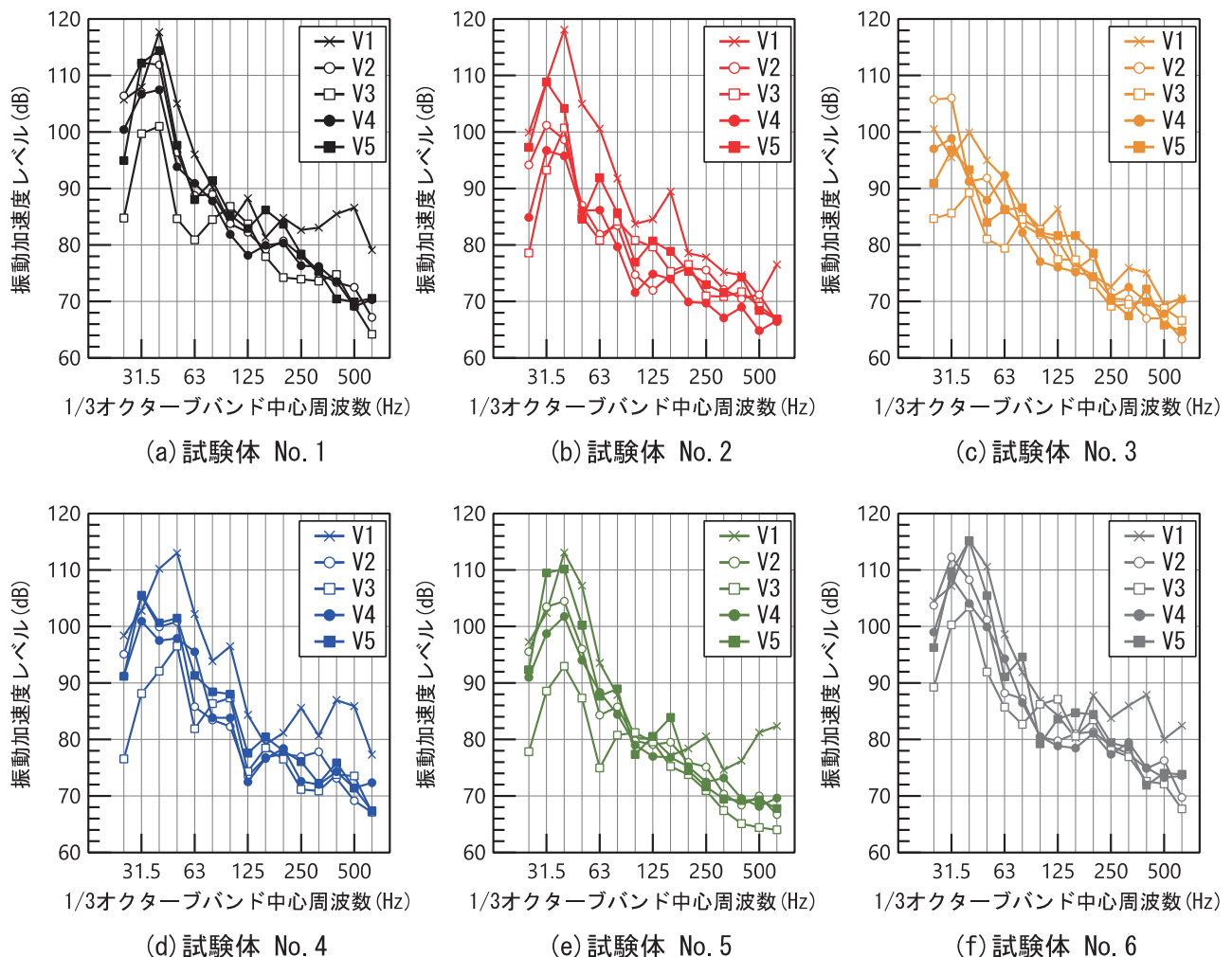


図-9 振動面の振動加速度レベル

が端部に近く、V2とV5と比べ測点の条件が違うことからこのような傾向になったと考えられる。

表-5に $L_{va,max}$ を用いて室内の各振動面から放射される室内音圧レベル $L_{SPL}$ を式(3)より求めた結果を示す。天井面V1と壁面V2~V5の $L_{SPL}$ の差は試験体No.1, No.3, No.6の一部で10 dB以内であった。すなわち、床スラブ加振時に発生した振動が壁面を伝搬し、固体音として室内へ放射されることが床衝撃音レベルの上昇に寄与しているものと考えられる。したがって、CLTの床衝撃音レベルを低減させるためには壁面の振動を抑制させ、衝撃時のスラブや壁面の応答を削減する必要がある。

表-4 天井面と壁面の振動加速度レベル

天井面		壁面			
No.	V1	V2	V3	V4	V5
1	113	105	95	102	106
2	111	92	94	93	98
3	100	96	91	96	94
4	114	101	97	100	102
5	111	100	92	98	105
6	115	105	98	103	109

表-5 振動面から放射される室内音圧レベル計算結果

天井面		壁面			
No.	V1	V2	V3	V4	V5
1	105	97	87	94	97
2	103	85	85	86	89
3	96	89	83	89	86
4	109	94	89	93	93
5	112	92	83	91	95
6	108	98	90	96	100

## 7. まとめ

構築した箱型モデルを用いて重量床衝撃音を測定し、CLTの床スラブ及び壁面の振動特性に関する検討を行った結果、以下のことがわかった。

- (1) 床スラブでは駆動点インピーダンスの端部上昇はみられず、部材の継ぎ目部分では低下した。
- (2) 重量床衝撃音レベルは床構造によって変化し、天井空気層や乾式二重床を設置することで床衝撃音遮断性能が向上することがわかった。
- (3) 床スラブ加振時の振動が壁面を伝搬し、固体音として室内へ音響放射することで、床衝撃音レベルに寄与する可能性が示唆された。

本研究から、床衝撃音レベルを低減させるために壁面からの音響放射を考慮する必要があることがわかった。その対策方法として、床加振時の床スラブの応答そのものを低減させる工法が有効である可能性がある。今後は本報で示した結果に基づいてCLTの重量床衝撃音対策を検討する。

### 【参考文献】

- [1]佐藤他, AIJ 梗概集 (環境工学 I), pp.317-318 (2021).
- [2]日本音響材料協会編, 騒音・振動対策ハンドブック, p.352 (1982.1)
- [3]日本建築学会編, 建築物の床衝撃音防止設計, 技法堂出版, pp.27-28 (2009.11).
- [4][2]同書, pp.312-313 (1982.1).
- [5]廣田他, AIJ 梗概集 (環境工学 I), pp.287-288 (2016).

**Summary** In 2010, “The Act for Promotion of Use of Wood in Public Buildings etc.” was enforced, and as a part of the SDGs, the use of timber being made to promote in the field of architecture. CLT (Cross Laminated Timber), which is wood, is attracting attention because it has many advantages such as being high strength and being able to be used as a material for large-scale wooden building. On the other hand, it’s a problem that CLT has low-quality against floor impact sound, because CLT has lower flexural rigidity and smaller areal density than RC. To understand the floor impact sound insulation performance of CLT buildings, we examined the effect of the structural differences on heavy-weight floor impact sound using RC laboratory that allows CLT slabs to be installed in its ceiling opening. However, because it is necessary to consider sound radiation from the walls since CLT structure are made of wood, it was difficult to evaluate the floor impact sound in the experiment using the RC laboratory. Therefore, we constructed a CLT structure box-type model and measured heavy-weight floor impact sound and the vibration characteristics of the floor slab and walls in order to confirm the influence of difference in the floor structure of CLT. We also examined sound pressure level in the room radiated from the ceiling surface and wall surfaces. As a result, we revealed that increases in the driving-point impedance near the slab edges didn’t be observed, that the impedance decreased at the joints of the floor slab, and that dry double floor structure or air layer of double ceiling structure improves the insulation performance. We also revealed that the sound radiation from the walls in the room may raise the floor impact sound level.

**Key Words :** Cross Laminated Timber, Heavy-weight floor impact sound, Impedance, Dry double floor, Air layer of double ceiling structure