木質 3 層構造材の遮音性能 (第 2 報)[†]3 層床の床衝撃音レベル^{*1}

中村哲男^{*2}, 矢野 隆^{*2}, 村上 聖^{*2}, 長谷川麻子^{*2},
江藤留寿^{*3}, 高橋優樹^{*3}, 北原良誠^{*4}

Sound Insulation of Wooden Three-layered Material II.[†]Floor-impact sound level of wooden three-layered floors^{*1}

Tetsuo NAKAMURA^{*2}, Takashi YANO^{*2}, Kiyoshi MURAKAMI^{*2},
Asako HASEGAWA^{*2}, Tomehisa ETOH^{*3}, Yuki TAKAHASHI^{*3}
and Ryosei KITAHARA^{*4}

In the present study the floor impact sound insulations of three-layered floors composed of cedar timber and plywood was measured and evaluated in accordance with JIS A 1418-1, JIS A 1418-2, and JIS A 1419-2, and compared with that of conventionally constructed floors. The results were summarized as follows: (1) The light and heavy floor impact sound insulations of the three-layered floors was better than that of conventionally constructed floor; (2) The light floor impact sound insulation of the three-layered floors with rubber supporting the upper air layer was much better than of the others; (3) When the joist interval is changed from 433.5 mm to 289 mm, the heavy floor impact sound insulation was improved by the increase of the stiffness; (4) When the CFRP plate was bonded to the floor with the joist interval of 433.5 mm, the heavy floor impact sound insulation was improved. However, the CFRP plate had no effect in the case of the floor with the joist interval of 289 mm, because bonding the CFRP plate to the wooden floor was not enough to increase the stiffness.

Keywords: floor sound insulation, three-layered floors, cedar plywood, reclaimed rubber, CFRP plate.

本研究では、スギ角材およびスギ合板等を用い、フローリングと270 mmのサンドイッチパネルで構成される3層床構造の床衝撃音レベルをJIS A 1418-1, JIS A 1418-2, およびJIS A 1419-2により計測・評価し、在来工法で作られた床構造と比較した。結果を纏めると以下のとおりである。(1) 3層床構造の軽量および重量床衝撃音遮断性能は在来工法床構造よりも優れていた。(2) 上部空気層をゴムで支持した3層床構造はさらに軽量床衝撃音遮断性能が高かった。(3) 桁材間隔を433.5 mmから289 mmに狭くした場合、曲げ剛性が増加し重量床衝撃音遮断性能は向上した。(4) 桁材間隔が433.5 mmの床構造にCFRPプレートを貼り付けると、重量床衝撃音遮断性能は向上したが、桁材間隔が289 mmに狭くした場合ではCFRPプレートを貼り付けても曲げ剛性が増加しないため、重量床衝撃音遮断性能は向上しなかった。

[†] Report I: This journal 56, 84-92 (2010).

^{*1} Received February 4, 2009; accepted June 22, 2009. 本研究の一部は第58回日本木材学会大会(2008年3月, つくば)で発表した。

^{*2} 熊本大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kumamoto 860-8555, Japan

^{*3} (株)伸巧 Shinko Co Ltd., Kumamoto 862-0920, Japan

^{*4} (株)フォレスト Forest Co Ltd., Kumamoto 861-0698, Japan

1. 緒 言

過密化した居住環境において、生活様式が多様化する中で、生活の質的向上を図りたいという欲求が高まってきたこと、あるいはプライバシーを尊重する考え方が日常生活の中に定着したことによって居住環境における遮音への関心が高まっている^{1,2)}。そのため、床衝撃音を低減させるための住宅工法や建築材料の開発の研究³⁻⁹⁾のほか、タイヤの落下やタッピングマシンによる床衝撃音に対する生理的、心理的応答に関する研究も行われている¹⁰⁻¹³⁾。一方、建築活動にかかる温暖化ガスの実質的な削減を検討するためにも、設計段階で建築物のライフサイクルを考慮した、資源循環型社会に相応しい建築材料の開発が求められてきている¹⁴⁾。

木質系建築材料はそれに合致する材料であるが、建築物の部材構成が複雑であり、各部材の物性値のばらつきも大きい。また、力学的連続性も曖昧であるため、壁材の音響透過損失や床材の軽量床衝撃音、重量床衝撃音の低減効果を検討する上で、理論的取り扱いには非常に難しい。したがって、対策方法や予測方法を検討する上では、実大モデルによる実験に依存するところが大きい。

筆者ら¹⁵⁾は、生活環境の質を向上させることを目的として、上述のような循環系素材を用いた建築用壁材を開発し、材料の組み合わせから考えられる3層床構造の遮音特性について検討した。本研究では前報と同様に、循環系素材である木材と再生ゴムを用いた建築用床材および床の剛性を高めるために

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) プレーートを貼り付けた床構造を試作した。ここではこれらの材料の組み合わせから考えられる3層床構造の軽量床衝撃音及び重量床衝撃音遮断性能を測定した結果について報告し、実用的資料として供する。

2. 実 験

2.1 材料

床材は Table 1 に示す在来工法床構造と3層床構造である。在来工法床構造は住宅金融公庫の「木造住宅工事共通仕様書」に示されている仕様¹⁶⁾から火打ち貼りを省略したものである。重量床衝撃音は、建築物の構造体の剛性と質量によって、その伝搬特性が決定されるといわれている¹⁷⁾。そのため、特に重量床衝撃音レベルの改善手法は枠組壁工法住宅や工業化住宅を中心に、床及び下階壁面などの高剛性化^{5,6,18)}や、質量付加⁸⁾、制振板を用いた方法¹⁹⁾等が検討されている。

本試験体は構造用パネルを3層構造にすることにより剛性の向上と、通気性を持たせた再生ゴムタイヤチップによる緩衝効果を付与した構造としている。3層床構造は、上部空間の支持3条件(角材60 mm×60 mm、空隙率37%と33%の多孔質ゴム)、下部空間の支持2条件(構造Ⅰ:43 mm×240 mmの桁間隔が433.5 mm、構造Ⅱ:桁間隔が289 mm)、炭素繊維(CFRP)プレート補強の有無2条件の合計12条件である。多孔質ゴムは自動車用タイヤを粉砕し篩い分けてチップ化した粒子を選別し、空隙率を37%と33%で台形状に整形したものである。CFRP

Table 1. Condition of floor materials.

No	Surface material (mm)	Upper air-layer thickness (mm)	Center material (mm)	Lower air-layer thickness (mm)	Back material (mm)	Reinforcement	Absorbing sound material	Joist interval (mm)	Specific density (kg/m ³)
1	15+24				28	—	Usual style		15.9
2	15+24	60 (No rubber)	12	240	28	—	GW32K50t***	433.5	52.2
3	15+24	60 (No rubber)	12	240	28	CFRP Plate	GW32K50t	433.5	54.3
4	15+24	60 (Rubber1*)	12	240	28	—	GW32K50t	433.5	52.9
5	15+24	60 (Rubber1)	12	240	28	CFRP Plate	GW32K50t	433.5	54.5
6	15+24	60 (Rubber2**)	12	240	28	—	GW32K50t	433.5	53.8
7	15+24	60 (Rubber2)	12	240	28	CFRP Plate	GW32K50t	433.5	55.4
8	15+24	60 (No rubber)	12	240	28	—	GW32K50t	289	58.2
9	15+24	60 (No rubber)	12	240	28	CFRP Plate	GW32K50t	289	59.8
10	15+24	60 (Rubber1)	12	240	28	—	GW32K50t	289	58.9
11	15+24	60 (Rubber1)	12	240	28	CFRP Plate	GW32K50t	289	60.5
12	15+24	60 (Rubber2)	12	240	28	—	GW32K50t	289	59.8
13	15+24	60 (Rubber2)	12	240	28	CFRP Plate	GW32K50t	289	61.4

Note: *: air space factor 37%

**: air space factor 33%

***: Glass wool 32 Kg/m³, 50 mm thickness

プレートは厚さ2 mm、面積 100×1400 mmであり、床の剛性を上げるために、Fig. 1に示す試験体下面に貼り付けた。曲げ引張り側の床パネル合板表面をサンドペーパーで研磨後、床パネル表面及びCFRPプレート面に 150 g/m^2 のエポキシ樹脂を塗布して圧着して貼り合わせた後、20日間養生した。なお、CFRPプレートの引張強度は 1200 N/mm^2 、引張弾性率は 450 kN/mm^2 である。本来、CFRPプレートは、RC梁などで引張側などの曲げ補強の際に用いるものである。木材は引張よりも圧縮耐力が低い、施工性などの兼ね合いより引張り側に用いた。

2.2 床衝撃音遮断性能試験

測定に使用した熊本大学の残響試験室は、上下一体構造で、24 cm 厚のコンクリートスラブに $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ の開口部を持ち、上部第1残響室(179 m^3)と下部第2残響室(98 m^3)の2室で構成されている。その開口部に測定用床構造(幅 $910 \text{ mm} \times$ 長さ $1820 \text{ mm} \times 3$ 枚)を設置した。

供試床構造は、Table 1に記載する条件でFig. 1に示す構造に組み立てて、3層床構造としたものである。これらの隣り合う試料どうし及び開口部との間に隙間が生じないように油粘土で目張りをして、タッピングマシン(軽量床衝撃音源: リオン(株)製 FI-01型)及びバンダマシン(重量床衝撃音源: リオン

(株)製 FI-02型)によって衝撃を与えた。衝撃を与えた場所は、桁材上と桁材間では床衝撃音レベルに差が生じるために、3枚並べた試料の対角線を通る桁材間の中央部とした。すなわち、桁材間隔 433.5 mm の場合、3枚並べた試料の対角線の midpoint では桁上が加振点となるため、中央の桁と片側の桁との中間とし、桁材間隔 289 mm の場合では3枚並べた資料の対角線の midpoint とした。ここで発生した衝撃音を第2残響室に床面より高さ 1.2 m に設置した5個のマイクロホンで受音し、多チャンネル分析処理器(リオン(株)製 SIGNAL ANALYZER SA-01)を用いて $1/3$ オクターブ周波数分析を行った。この場合の試験用床板、マイクロホンによる受音位置および衝撃音発生装置の位置をFig. 2に示す。

なお、軽量床衝撃音遮断性能の測定方法はJIS A 1418-1に、重量床衝撃音遮断性能の測定方法はJIS A 1418-2に準拠して行った。供試床構造の床衝撃音遮断性能はJIS A 1419-2により、 $1/3$ オクターブバンドごとの測定値を基に、重みつき床衝撃音レベル、床衝撃音等級、および逆A特性重みつき床衝撃音レベルを求めて評価した。

2.3 曲げ性能試験

3層床構造の曲げ剛性を評価するため、中空層を支える素材を $60 \times 60 \text{ mm}$ 角材とした構造材No. 2と

Fig. 1. Cross-section of three-layered floor.

No. 8 ならびにそれらに炭素繊維プレート補強を施した床構造 (No. 3 と No. 9) の 4 種類の床構造について試験を行った。載荷方法は、スパン長1600 mm の 3 点曲げ載荷とした。なお、緩衝ゴムは曲げ剛性、曲げ耐力に関係しないと考え、緩衝ゴムを用いた床構造の曲げ性能試験は実施していない。この結果を Table 2 に示す。

(a) Layout of impact-point in reverberation room 1

(b) Layout of microphones in reverberation room 2

Fig. 2. Layout of impact-point and microphones.

Table 2. Stiffness of the three-layered floors.

	No. 2	No. 3	No. 8	No. 9
Stiffness (N·m ²)	7.29×10^5	6.18×10^5	1.06×10^6	8.83×10^5

3. 結果と考察

3.1 軽量床衝撃音特性

3.1.1 構造 I (下部空気層の桁材間隔が433.5 mm の場合)

在来工法で施工した床構造 No. 1, 上部の中空層を支える素材を60×60 mm 角材とした No. 2, 緩衝ゴムに変えた No. 4 と No. 6, およびこれらの素材で構成される床構造の下部空気層下面に CFRP プレート貼り付けた各床構造 No. 3, No. 5, No. 7 について、軽量衝撃音源 (タッピングマシン) による重みつき床衝撃音レベル (以下, $L_{n,w}$), 床衝撃音レベル等級 (以下, L_r), 逆 A 特性重みつき床衝撃音レベル (以下, $L_{i,Aw}$) を Table 3 に示す。Fig. 3 には床衝撃音レベルの周波数特性と床衝撃音レベル等級 (以下, L_r) の関係を示す。

(a) 上部の中空層を支える素材の影響

Table 3 および Fig. 3 から在来工法床構造 No. 1 の床衝撃音レベルは全周波数域で高い値を示していることが分かる。特に125 Hz 以上の周波数帯では、今回試作した床構造と比べ著しく高く、 $L_{n,w}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はそれぞれ93 dB, 85, 90 dBである。なお、 L_r -85は、前述の住宅金融公庫「木造住宅工事共通仕様書」に火打ち貼りを省略する施工方法に記載された数値と一致している¹⁶⁾。このことは指定工法により施工された床では、軽量床衝撃音に対して問題があることを示している。すなわち、上階で発生する高い周波数帯域での音圧レベル、例えば、机・椅子を移動するとき発生する音など軽量衝撃音が床板を伝わって下階に響き易いことを示している。これに対し、上部中空層を支える素材を角材とした3層床構造 No. 2 にすることで、125 Hz 以上の周波数での床衝撃音レベルが顕著に低下した。なお、No. 2 の $L_{n,w}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は、在来工法 No. 1 の $L_{n,w}$, L_r ,

Table 3. Weighted normalized impact sound pressure level, impact sound level grade, and the floor impact sound level weighted with the inverse A weighting by lightweight floor impact source (Joist interval 433.5 mm).

Sample No.	$L_{n,w}$	L_r	$L_{i,Aw}$
No. 1	93	85	90
No. 2	79	80	76
No. 3	81	80	77
No. 4	69	70	66
No. 5	72	70	68
No. 6	71	70	67
No. 7	72	70	68

Fig. 3. Light floor impact sound level for floors with joist interval of 433.5 mm.

$L_{i, Aw}$ よりそれぞれ, 14 dB, 1 ランク, 14 dB と性能を向上させることが出来た。

次に, 上部中空層を支える素材をゴム素材とした 3 層床構造 No. 4, No. 6 について検討する。No. 4 には緩衝ゴム 1 (空隙率 37%) を, No. 6 には緩衝ゴム 2 (空隙率 33%) を利用している。

Fig. 3 から明らかなように, ゴムを用いた試験体は在来工法床構造 No. 1 はもとより, 木材を用いた No. 2 に比べ, 全ての周波数帯域で軽量床衝撃音レベルを下げている。例えば, No. 4 の $L_{n, W}$, L_r , $L_{i, Aw}$ は, No. 2 より 10 dB, 2 ランク, 10 dB 向上し, No. 1 の $L_{n, W}$, L_r , $L_{i, Aw}$ より 24 dB, 3 ランク, 24 dB 向上している。

空隙率の影響について No. 4 と No. 6 を比べると, 空隙率の高い No. 4 の低減効果が優れていた。タッピングマシンのように堅くて軽い衝撃源では柔らかい床仕上げになればなるほど床衝撃音レベルのピークを示す周波数が低音域に移動することを示している¹⁷⁾。

(b) CFRP プレートの影響

上部中空層を支える素材を角材とした 3 層床構造 No. 2 と, この床構造に CFRP プレートを貼り付け

た No. 3 の, $L_{n, W}$, L_r , $L_{i, Aw}$ を比較すると, CFRP プレートの貼り付けによる軽量床衝撃音の低減効果は見られなかった。本研究では, CFRP プレート貼り付けは, 床構造の高剛性化による重量床衝撃音レベルの改善を狙ったものであり, 軽量床衝撃音低減効果については, 緩衝ゴムの併用による効果を期待している。これらは, 上部空気層を支える素材をゴム素材とした 3 層床構造 No. 4, No. 6 ならびに, それぞれに CFRP プレートを貼り付けた 3 層床構造 No. 5, No. 7 についても同様で, CFRP プレートの効果は見られなかった。

3.1.2 構造 II (下部空気層桁材間隔が 289 mm の場合)

床構造の剛性の変化に伴う軽量床衝撃音特性を見るため, 下部空気層桁材間隔を 433.5 mm (3 本桁構造) から 289 mm (4 本桁構造) へ変化させた場合の $L_{n, W}$, L_r , $L_{i, Aw}$ を Table 4 に, Fig. 4 にこれら軽量床衝撃音レベルの周波数特性と L_r の関係を示す。

(a) 上部の中空層を支える素材の影響

Table 4 および Fig. 4 から, 在来工法床構造 No. 1 は全周波数帯域で音圧レベルが高く, 特に, 125-500 Hz 帯域での床衝撃音レベルが高くなっていることが分かる。木質系床構造の場合, 床躯体構造となる部分の曲げバネ定数が低くなり, タッピングマシンでの加振時における共振周波数が 500 Hz 帯域に存在するケースが多いとされ¹⁾, 既報でも 125-500 Hz 帯域での床衝撃音遮断性能の低下を示したものが多³⁻⁸⁾。たとえば, 高橋ら⁶⁾によれば, 剛性 $2.4 \times 10^5 \text{ Nm}^2$, $2.9 \times 10^5 \text{ Nm}^2$ の床パネルの衝撃実験でも軽量床衝撃音試験では 125-500 Hz 帯域での床衝撃音遮断性能の低下を示している。上部中空層を支える素材を角材とした 3 層床構造 No. 8 の曲げ剛性は $1.05 \times 10^6 \text{ Nm}^2$ を示しており, 同様の理由で 125-500 Hz 帯域で床衝撃音レベルが高くなったといえる。ただ,

Table 4. Weighted normalized impact sound pressure level, impact sound level grade, and the floor impact sound level weighted with the inverse A weighting by lightweight floor impact source (Joist interval 289 mm).

Sample No.	$L_{n, W}$	L_r	$L_{i, Aw}$
No. 1	93	85	90
No. 8	82	85	79
No. 9	79	80	76
No. 10	76	75	70
No. 11	75	70	69
No. 12	74	75	71
No. 13	75	70	70

Fig. 4. Light floor impact sound level for floors with joist interval of 289 mm.

500 Hz 以上の周波数帯域における音圧の低減効果は明らかで、全周波数帯域で高い音圧レベルを示す在来工法床構造 No. 1 に比べ、No. 8 では $L_{n,w}$ で 11 dB, $L_{i,Aw}$ で 11 dB 改善されている。同様の傾向は桁材間隔が 433.5 mm の場合の Fig. 3 でも見ることができる。

次に、上部中空層を支える素材をゴム素材とした 3 層床構造 No. 10, No. 12 について検討する。No. 10 には緩衝ゴム 1 (空隙率 37%) を、No. 12 には緩衝ゴム 2 (空隙率 33%) を利用している。

Fig. 4 から明らかなように、ゴムを用いた試験体では在来工法床構造 No. 1 はもとより、木材を用いた No. 8 に比べ、250 Hz 以上の全ての周波数帯域で軽量床衝撃音レベルは低下している。じゅうたんや畳などの柔らかい床仕上げ材を用いると、その緩衝効果で軽量床衝撃音レベルは低下する。この低減効果は、仕上げ床材の弾性によって衝突時間が長くなり、衝撃力のピーク値が下がることにより得られる²⁰⁾。本結果は、表面に近い上部中空層を支える素材が弾性を有するゴムであるため、衝撃力のピーク値が下がったためである。

No. 10 の $L_{n,w}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は在来工法床 No. 1 よりも、それぞれ 17 dB, 3 ランク以上, 20 dB の低減効果を

示している。この結果は、軽量床衝撃音の改善には上部中空層を支える素材をゴム素材とした 3 層床構造が有利であることを示している。

(b) CFRP プレートの影響

Table 4 および Fig. 4 から、上部中空層を支える素材を角材とした 3 層床構造 No. 8 に CFRP プレートを貼り付けた No. 9 の $L_{n,w}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は No. 8 よりもそれぞれ 3 dB, 1 ランク, 3 dB と全て向上したことが分かる。本来、軽量床衝撃音遮断性能を高くするには床の曲げ剛性を低くする方が効果が期待できる。そのため、CFRP プレートを貼り付け、剛性の向上が期待された No. 9 では若干の低下が予想される。しかしながら、床衝撃音試験終了後実施した曲げ試験結果では、No. 8 の曲げ剛性は $1.05 \times 10^6 \text{ Nm}^2$, No. 9 の曲げ剛性は $8.83 \times 10^5 \text{ Nm}^2$ となり、CFRP プレートを貼り付けても剛性は向上せず、むしろ若干低下している。このことが、軽量床衝撃音遮断性能の向上に影響したものと思われる。

上部中空層を支える素材をゴムとした 3 層床構造 No. 10 と No. 12, それぞれに CFRP プレートを貼り付けた 3 層床構造 No. 11 と No. 13 について検討する。ただし、これら 4 種類の床構造については、いずれも曲げ試験を実施していない。

No. 10 と比べて、これに CFRP プレートを貼り付けた No. 11 は 500 Hz 以上の周波数帯域で床衝撃音遮断性能は向上しており、 $L_{n,w}$, L_r , $L_{i,Aw}$ それぞれ 1 dB, 1 ランク, 1 dB 改善できることが分かった。同様に、No. 12 に比べて、これに CFRP プレートを貼り付けた No. 13 の $L_{n,w}$ は 1 dB だけ性能が低下したが、No. 10 の場合と同様に 500 Hz 以上の周波数帯域で音圧レベルの低減効果が見られ、 L_r で 1 ランク, $L_{i,Aw}$ で 1 dB 低減し、63 Hz では 12 dB の低減効果が見られた。

3.1.3 桁材間隔の影響

Table 3, 4 および Fig. 3, 4 から、上部の中空層を支える素材を $60 \times 60 \text{ mm}$ の角材としたときに、下部空気層の桁材間隔が 433.5 mm と 289 mm の場合を比較する。下部空気層の桁材間隔を 289 mm に狭くした No. 8 の $L_{n,w}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は下部空気層の桁材間隔を 433.5 mm とした No. 2 よりもそれぞれ、3 dB, 1 ランク, 3 dB 軽量床衝撃音遮断性能が低下した。一般に桁材間隔が広いほど、床の曲げ剛性が低くなり、軽量床衝撃音遮断性能は高くなる。本試験に用いた No. 2 の曲げ剛性は $7.29 \times 10^5 \text{ Nm}^2$, No. 8 の曲げ剛性は $1.05 \times 10^6 \text{ Nm}^2$ と桁数を増やすことでの剛性は向上しており、軽量床衝撃音遮断性能の傾向と一致している。

これに対し, CFRP プレートを貼り付けた場合, 下部空気層の桁材間隔が433.5 mm である No. 3 の曲げ剛性は $6.18 \times 10^5 \text{ Nm}^2$, $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は81 dB, 80, 77 dB であり, 下部空気層の桁材間隔を289 mm に狭くした No. 9 の曲げ剛性は $8.83 \times 10^5 \text{ Nm}^2$, $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は No. 3 よりも2 dB, 同ランク, 1 dB 軽量床衝撃音遮断性能は向上した。No. 9 は No. 3 よりも曲げ剛性が向上したのにもかかわらず, $L_{n,W}$, $L_{i,Aw}$ は僅かではあるが改善している。これについては, さらに検討が必要である。

空隙率37%の緩衝ゴム1を用いた場合の桁材間隔の影響について検討する。下部空気層の桁材間隔を289 mm に狭くした No. 10 の場合, $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は, 下部空気層の桁材間隔を433.5 mm とした No. 4 よりもそれぞれ6 dB, 1 ランク, 4 dB 性能が向上した。さらに, 空隙率37%の緩衝ゴムを用いた床にCFRP プレートを貼り付けた場合, 下部空気層の桁材間隔を289 mm に狭くした No. 11 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は下部空気層の桁材間隔が433.5 mm である No. 5 よりもそれぞれ3 dB, 同ランク, 1 dB 性能が低下した。

同様に, 空隙率33%の緩衝ゴム2を用いた場合, 下部空気層の桁材間隔を433.5 mm とした No. 6 と下部空気層の桁材間隔を289 mm に狭くした No. 12 の場合でも $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はそれぞれ3 dB, 1 ランク, 4 dB 性能が低下した。さらに, 空隙率33%の緩衝ゴムにCFRP プレートを貼り付けた場合, 下部空気層の桁材間隔を433.5 mm とした No. 7 と下部空気層の桁材間隔を289 mm に狭くした No. 13 の場合でも $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はそれぞれ3 dB, 同ランク, 2 dB 桁材間隔が短い方が, 軽量床衝撃音低減性能が低下した。

ゴムを利用した場合での動的曲げ強さについては測定していないが, 桁材間隔を短くしたことによる剛性の上昇が軽量床衝撃音低減性能を低下させたことが推察される。

3.2 重量床衝撃音特性

3.2.1 構造 I (下部空気層の桁材間隔が433.5 mm の場合)

在来工法で施工した床構造 No. 1 をコントロール材として, 下部空気層へ桁材を3本用いて桁材間隔を433.5 mm とし, 上部の中空層を支える素材として $60 \times 60 \text{ mm}$ の角材を用いた No. 2, 空隙率37%の緩衝ゴム1を利用した No. 4, 空隙率33%の緩衝ゴム2を利用した No. 6, およびこれらの素材にCFRP プレートを貼り付けた各床構造 No. 3, No. 5, No. 7 についての重量衝撃音源 (バングマシン) による $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ を Table 5 に, Fig. 5 にこれらの周波

Table 5. Weighted normalized impact sound pressure level, impact sound level grade, and the floor impact sound level weighted with the inverse A weighting by heavyweight floor impact source (Joist interval 433.5 mm).

Sample No.	$L_{n,W}$	L_r	$L_{i,Aw}$
No. 1	83	75	76
No. 2	81	80	74
No. 3	79	75	71
No. 4	81	75	74
No. 5	79	75	73
No. 6	80	75	74
No. 7	77	75	72

Fig. 5. Heavy floor impact sound level for floors with joist interval of 433.5 mm.

数特性と L_r の関係を示す。

(a) 上部の中空層を支える素材の影響

Table 5 から在来工法床構造 No. 1 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はそれぞれ, 83 dB, 75, 76 である。このうち L_r 75 は, 一般的な在来木造住宅の等級 (L_r -75- L_r -80) と同等である。

上部中空層を支える素材に $60 \times 60 \text{ mm}$ の角材を使用した場合, 在来工法床構造の No. 1 より質量や剛性が向上することあつて, 衝撃音の低減効果は見られるが, Fig. 5 から明らかなように125 Hz 帯において音圧レベルが95 dB を示し, このため L_r は80と

在来工法床構造 No. 1 より 1 ランク低下した。しかしながら 250 Hz 帯域以上での音圧レベルは小さくなる傾向を示した。

上部中空層を支える素材をゴムとした No. 4 と No. 6 について検討する。空隙率 37% の緩衝ゴム 1 を用いた No. 4 と空隙率 33% の緩衝ゴム 2 を用いた No. 6 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はほとんど同じである。しかし, Fig. 5 で示されるように, 周波数特性はかなり異なっている。すなわち, 空隙率の高い緩衝ゴム 1 を用いた No. 4 の重量床衝撃音レベルは緩衝ゴム 2 を用いた No. 6 よりも 63 Hz ~ 125 Hz 帯域および 1000 Hz 以上の周波数帯域ではやや高く, 125 Hz ~ 1000 Hz までの周波数帯域では低かった。このことから, 中音域の周波数に対する音圧レベルの低減には空隙率の高いゴムが有利であると言えよう。前述のように今回はゴム素材を利用した床材の曲げ試験を実施していない。今後は曲げ試験を含め, さらに面密度やバネ定数の影響などを検討する必要がある。

ところで, No. 4 と No. 6 は在来工法床構造 No. 1 に比べ L_r は 75 で同じであるが, $L_{n,W}$, や $L_{i,Aw}$ はいずれも質量や剛性の増加もあって, 改善されている。また, 素材に 60 × 60 mm の角材を使用した No. 2 と緩衝ゴム 2 を用いた No. 6 を比較すると, No. 6 では L_r は 1 ランク向上したが, それ以外については明確な差は現れなかった。Table 1 に見られるように質量に大きな違いがないので, 詳細な検討については今後, 重量床衝撃の加振点近傍の床のインピーダンスの測定等詳細な検討が必要である。

(b) CFRP プレートの影響

上部中空層を支える素材に 60 × 60 mm の角材を使用した No. 2 および CFRP プレートを貼り付けた床構造 No. 3 について検討する。No. 3 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は No. 2 よりそれぞれ 2 dB, 1 ランク, 3 dB 重量床衝撃音遮断性能が向上していることがわかる。さらに Fig. 5 に見られるように, 250 Hz 帯域以上での音圧レベルは No. 2 が若干高い数値を示したものの, はほぼ同じ数値を示しており, さらに 125 Hz 以下の周波数帯域では音圧レベルの軽減効果が見られる。しかしながら, No. 3 の曲げ剛性は 6.18×10^5 Nmm² であり, No. 2 の曲げ剛性 7.29×10^5 Nmm², よりも低下している。

上部中空層を支える素材に空隙率 37% の緩衝ゴム 1 を用いた No. 4 と空隙率 33% の緩衝ゴム 2 を用いた No. 6, これらにそれぞれに CFRP プレートを貼り付けた No. 5 と No. 7 について検討する。

No. 5 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は No. 4 よりもそれぞれ 2 dB, 同ランク, 1 dB と若干ではあるが重量床衝撃

音遮断性能は向上し, CFRP プレートの貼り付けによる剛性の増加によると思われる低減効果が見られた。同様に, No. 7 の $L_{n,W}$ と $L_{i,Aw}$ は No. 6 よりもそれぞれ 3 dB, 2 dB の低減効果が見られた。さらに図から分かるように, ここでも重量床衝撃音の評価に大きな意味を持つ 63 Hz ~ 125 Hz 帯での音圧レベル低減効果は見られたが, 250 Hz 帯域以上の音圧レベル差は小さかった。

CFRP プレートを貼り付けた No. 5 と No. 7 について見ると, 63 Hz ~ 250 Hz 帯域までの低周波数域は充填率の高い No. 7 の音圧レベルが低く, 重量床衝撃音レベルが低減することが分かる。しかしながら, 250 Hz 帯域以上ではその差は小さく高音域における床衝撃音低減効果は小さいことを表している。なお, 桁材間隔を 433.5 mm とした場合に最も床衝撃音低減効果が高かったのは CFRP プレートを貼り付けた No. 7 であり, 在来工法床構造 No. 1 に比べて, L_r は同じであったが, $L_{n,W}$, と $L_{i,Aw}$ はそれぞれ 6 dB と 4 dB の低減効果が得られた。

3.2.2 構造 II (下部空間層桁材間隔が 289 mm の場合)

床構造の剛性の変化に伴う重量床衝撃音特性を見るため, 下部空気層桁材間隔を 289 mm とした場合の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ を Table 6 に, Fig. 6 にこれらの重量床衝撃音レベルの周波数特性と等級 (等級曲線) の関係を示す。

(a) 上部中空層を支える素材の影響

Table 6 および Fig. 6 から上部中空層を支える 60 × 60 mm の角材を使用した No. 8 について検討する。在来工法床構造 No. 1 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ に対し, No. 8 では L_r は 75 で同一であるが, 剛性や質量が大きいことなどから $L_{n,W}$ で 6 dB, $L_{i,Aw}$ で 4 dB 改善されていることがわかる。

上部中空層を支えるのに空隙率 37% の緩衝ゴム 1

Table 6. Weighted normalized impact sound pressure level, impact sound level grade, and the floor impact sound level weighted with the inverse A weighting by heavyweight floor impact source (Joist interval 289 mm).

Sample No.	$L_{n,W}$	L_r	$L_{i,Aw}$
No. 1	83	75	76
No. 8	77	75	72
No. 9	80	80	75
No. 10	75	70	70
No. 11	76	70	72
No. 12	79	75	75
No. 13	79	75	75

Fig. 6. Heavy floor impact sound level for floors with joist interval of 289 mm.

を用いた No. 10 と空隙率 33% の緩衝ゴム 2 を用いた No. 12 について検討する。空隙率が高く、CFRP プレート を貼らない No. 10 は、下部空気層の桁材間隔が 289 mm である No. 8～No. 13 のうちで、最も優れた床衝撃音遮断性能を示した。No. 10 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ が、在来工法床構造 No. 1 よりも 8 dB, 1 ランク, 6 dB 向上したことを示す。また、空隙率の大きい No. 10 はほぼ全周波数帯域において、とくに 125 Hz 帯域以上の高音域においては 5 dB 以上の音圧レベルの低減効果があることが判明した。これに対し、空隙率の低い No. 12, の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はそれぞれ, 79 dB, 75, 75 dB で、角材を用いた No. 9 より性能が低下した。本来なら空隙率の低い No. 12 は No. 10 より剛性が高く、性能が向上することが予測される。この点についてはさらに詳細な検討が必要であろう。

(b) CFRP プレートの影響

Table 6 および Fig. 6 から上部空気層に角材を用いた床構造に CFRP プレート貼り付けた効果について、No. 8 と No. 9 を比較検討する。CFRP プレート を貼り付けると、 $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はそれぞれ, 3 dB, 1 ランク, 3 dB すべての性能が低下した。こ

のことは、曲げ剛性が No. 8 の $1.05 \times 10^6 \text{ Nm}^2$ から No. 9 の $8.83 \times 10^5 \text{ Nm}^2$ に低下したことが 1 つの原因と言えよう。この点については Fig. 6 から明らかに読み取ることができ、角材へ CFRP プレート を貼り付けると 125 Hz 帯域以上の高周波数帯域で床衝撃音レベルが上がるなど、CFRP プレートの貼り付け効果は見られなかった。

CFRP プレート素材は床材底面に貼り付け、床構造上面から曲げ荷重を加えた場合、床構造下方で発生する引っ張りへの抵抗力が増大し、結果として床構造の剛性の向上が期待される。しかしながら、床構造下面に CFRP プレート を貼り付けると、その剛性の向上は床構造下面に限定される。今回の試験に用いた構造用合板と角材との組み立ては全て釘接合によるものである。そのため、構造としては完全に一体化しておらず、曲げ試験では桁材と合板の間に剥離が発生し、一体性が不十分であることも判明している。釘打ちと接着剤併用により剛性を向上させるデータもある^{5,9,14)}。本結果は床の組み立てに接着剤を併用すると性能等級が向上することを示唆している。

次に緩衝ゴム 1 (空隙率 37%) を用いた No. 10 と緩衝ゴム 2 (空隙率 33%) を用いた No. 12 およびこれらに CFRP プレート を貼り付けた No. 11, No. 13 の重量床衝撃音遮断性能を比較する。No. 11 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は No. 10 よりもそれぞれ, 1 dB, 同一ランク, 2 dB 性能が低下した。なお、Fig. 6 において No. 11 の特性を詳しく見ると、63 Hz 帯域でわずかに床衝撃音レベルは低減しているが、125 Hz 帯域以上の高周波数帯域では音圧レベルが上がった。また、No. 11 は L_r-70 を維持できたものの、 $L_{n,W}$, $L_{i,Aw}$ の音圧がそれぞれ上昇したため、CFRP プレート貼り付けによって性能は低下した。

No. 13 の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はいずれも No. 12 と同じ値を示した。Fig. 6 から、No. 12 に CFRP プレート を貼り付けた No. 13 は 250 Hz 帯域以下では音圧レベルが低下し、剛性の向上によると思われる効果が見られたが、250 Hz 帯域以上では音圧レベルが上がるなど、いずれのゴム素材についても、CFRP プレートの貼り付けによる床衝撃音低減効果は確認できなかった。

3.2.3 桁材間隔の影響

Table 5, 6 および Fig. 5, 6 から上部中空層を支える素材を木材として、下部空気層の桁材間隔を 433.5 mm と 289 mm とした場合について検討する。前述のように、No. 2 の曲げ剛性は $7.29 \times 10^5 \text{ Nm}^2$, No. 8 の曲げ剛性は $1.05 \times 10^6 \text{ Nm}^2$ であり、桁材間隔を短

くすることによって剛性が増加している。桁材間隔が289 mmのNo. 8の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は桁材間隔が433.5 mmのNo. 2よりもそれぞれ, 4 dB, 1 ランク, 2 dB 向上し, 剛性の増加による重量床衝撃音低減効果が見られた。

上部中空層を支える素材に緩衝ゴム1 (空隙率37%)を用いた場合について検討する。桁材間隔が433.5 mmであるNo. 4と桁材間隔が289 mmであるNo. 10の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ を比較すると, それぞれ6 dB, 1 ランク, 4 dB, 桁材間隔を短くすることによって重量床衝撃音遮断性能は向上した。緩衝ゴムを使った床構造の曲げ試験は実施していないが, 桁材に角材を使った場合と同様, 桁材間隔を短くしたことによる剛性の増加のためと推定できる。また, 桁材間隔を289 mmとしたNo. 10にCFRPプレートを貼り付けたNo. 11の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は桁材間隔が433.5 mmのNo. 4にCFRPプレートを貼り付けたNo. 5よりもそれぞれ, 3 dB, 1 ランク, 1 dB性能が向上し, 桁材間隔を短くすることによる重量床衝撃音低減効果が見られ, 桁材間隔を短くしたことによる剛性の増加が確認された。

最後に上部中空層を支える素材に緩衝ゴム2 (空隙率33%)を用いた場合について検討する。桁材間隔が433.5 mmであるNo. 6と, 桁材間隔が289 mmであるNo. 12の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ はほぼ同じ値を示し, 桁材間隔を短くしても重量床衝撃音は低減しなかった。また, 桁材間隔を289 mmとしたNo. 12にCFRPプレートを貼り付けたNo. 13の $L_{n,W}$, L_r , $L_{i,Aw}$ は桁材間隔が433.5 mmのNo. 6にCFRPプレートを貼り付けたNo. 7よりもそれぞれ, 2 dB, 同一ランク, 3 dBと性能が低下し, 桁材間隔を短くすることによる重量床衝撃音遮断性能の向上は見られなかった。このことについても今後, 曲げ試験による剛性の比較が必要であろう。

4. 結 論

厚さの異なるスギ構造用合板を表面材, 中心材, 裏面材に用いて, 上部空気層の支持材を変えた3層床構造を試作し, 在来工法床構造と遮音効果を比較した。結果を要約すると, 次のとおりである。

1. 軽量床衝撃音遮断性能は, 下部空気層の桁材間隔が433.5 mmの場合, 在来工法床構造よりも60 × 60 mmの角材で上部空気層を支持した3層床構造がよく, 上部空気層をゴムで支持した3層構造床はゴムの持つ衝撃緩衝効果が加わりさらに向上する。
2. 軽量床衝撃音遮断性能は, 下部空気層の桁材間

隔が289 mmの場合, 上部空気層の支持材料によって桁材間隔433.5 mmの場合ほど明瞭な違いは見られなかったが, 角材で支持するよりもゴムで支持した方がゴムの弾性によって軽量衝撃時の衝突時間が長くなり, 衝撃時のピーク値が下がることから一貫して遮音性能はよい。

3. 軽量床衝撃音遮断性能は, 下部空気層の桁材間隔が289 mmの場合, 上部空気層を角材で支持する3層床構造にCFRPプレートを貼り付けると, 曲げ剛性が低下したためか向上した。その他の場合においては明確に改善されなかったが, 低下することはなかった。
4. 軽量床衝撃音遮断性能は, 下部空気層桁材間隔を433.5 mmから289 mmに狭くすると, 上部空気層を角材で支持し, CFRPプレートを貼り付けた床構造だけに改善が見られたが, その他の場合には低下した。これらについては桁材間隔を短くしたことで曲げ剛性が向上し, 軽量床衝撃緩衝効果が低下したためと考えられる。
5. 重量床衝撃音遮断性能は, 下部空気層の桁材間隔が433.5 mmの場合, 上部空気層の支持材料に角材, 緩衝ゴム1, 緩衝ゴム2いずれの素材を用いても在来工法床構造より質量, 剛性が増加することなどから, 向上した。
6. 重量床衝撃音遮断性能は, 下部空気層の桁材間隔が433.5 mmの場合, 上部空気層の支持材料として角材, 緩衝ゴム1, 緩衝ゴム2いずれの素材においても, CFRPプレートを貼り付けると向上した。ただし, 角材にCFRPプレートを貼り付けたものは曲げ剛性が低下しているにもかかわらず, 重量床衝撃音遮断性能が改善していることから, その原因をさらに検討する必要がある。
7. 重量床衝撃音遮断性能は, 下部空気層の桁材間隔が289 mmの場合, 上部空気層の各支持材料として角材と緩衝ゴム1のいずれもCFRPプレートを貼り付けると低下し, 緩衝ゴム2では変化しないなど, CFRPプレート貼り付けによる効果は見られなかった。
8. 重量床衝撃音遮断性能は, 上部空気層の支持材料として角材, 緩衝ゴム1, 緩衝ゴム2いずれの場合も, 桁材間隔を433.5 mmから289 mmに短くすると, 空隙率33%の緩衝ゴムを用いた場合を除いて床構造の曲げ剛性の増加により改善が見られた。

文 献

- 1) 井上勝夫: 音響技術 No. 140, 1-8 (2007).

- 2) 末吉修三：木材学会誌 **50**, 285-293 (2004).
- 3) 高橋 徹, 田中千秋, 中尾哲也, 岩重博文, 南澤明子, アルノ P. シュニービンド：木材学会誌 **33**, 941-949 (1987).
- 4) 高橋 徹, 難波三男, 中尾哲也, 田中千秋：木材学会誌 **33**, 950-956 (1987).
- 5) 中尾哲也, 高橋 徹, 難波三男, 伊藤博仁, 田中千秋：木材学会誌 **35**, 85-89 (1989).
- 6) 高橋 徹, 井上 稔, 伊藤博仁, 中尾哲也, 田中千秋, 福田克伸：木材学会誌 **36**, 609-614 (1990).
- 7) 高橋 徹, 中尾哲也, 井上 稔, 田中千秋, 西野吉彦：木材学会誌 **38**, 228-232 (1992).
- 8) 外崎真理雄, 末吉修三, 織部雄一郎：木材学会誌 **44**, 103-108 (1998).
- 9) 井上勝夫, 木村 翔, 宮崎浩二：日本建築学会計画系論文集 No. 382, 1-9 (1987).
- 10) Sueyoshi, S., Miyazaki, Y. : *Mokuzai Gakkaishi* **41**, 293-300 (1995).
- 11) Sueyoshi, S., Miyazaki, Y., Morikawa, T. : *J. Wood Science* **50**, 490-493 (2004).
- 12) Sueyoshi, S., Miyazaki, Y., Morikawa, T. : *J. Wood Science* **50**, 494-497 (2004).
- 13) Sueyoshi, S. : *J. Wood Science* **54**, 285-288 (2008).
- 14) 高橋 徹：“木材の科学と利用技術 (3. 居住性)”, 日本木材学会編, 東京, 1985, pp. 267-281.
- 15) 中村哲男, 矢野 隆, 村上 聖, 長谷川麻子, 江藤留寿, 高橋優樹, 北原良誠：第58回日本木材学大会研究発表要旨集, つくば, 2008, p. 34.
- 16) 東京合板工業組合：“ネダノンマニュアル Ver4”, 東北合板工業組合編著, 東京, 2006, pp. 16-23.
- 17) 木村 翔：“建築音響と騒音防止計画”, 彰国社, 東京, 1977, pp. 116-117.
- 18) 井上勝夫, 木村 翔, 土屋順二, 前原暁洋：日本建築学会計画系論文集 No. 467, 23-30 (1995).
- 19) 渡辺秀夫, 木村 翔, 井上勝夫, 石井健太郎：日本建築学会計画系論文集 No. 511, 31-38 (1998).
- 20) 木村 翔：“建築音響と騒音防止計画”, 彰国社, 東京, 1977, p. 122.