根太と直交する部材を有するスチールハウス床の重量床衝撃音遮断性の評価

EVALUATION OF HEAVY-WEIGHT FLOOR IMPACT SOUND INSULATION PERFORMANCE OF COLD-FORMED STEEL FRAMED HOUSE WITH LATTICE-ARRAYED FLOOR JOISTS

中安 誠明^{*1}, 海原 広幸^{*1}, 半谷 公司^{*2}, 高橋 大弐^{*3}

*Nariaki NAKAYASU, Hiroyuki KAIBARA, Koji HANYA
and Daiji TAKAHASHI*

The number of cold-formed steel framed houses is increasing and they tend to be built as apartment houses rather than detached houses. Along with this trend, heavy-floor impact sound insulation performance of the houses is expected to be improved. In order to meet this expectation, experimental test and numerical analysis are carried out, using the really-constructed houses as specimens. The results indicate, 1) in order to improve the heavy-floor impact sound insulation performance of cold-formed steel framed houses, sound pressure in a frequency band of 63 Hz has to be reduced, 2) floors of cold-formed steel houses tend to vibrate in a perpendicular direction to floor joists axis in the low-ranged frequency band, which is caused by the anisotropy of floor bending stiffness, 3) considering the vibrating mode shape, to improve sound insulation performance, it seems one of the solutions to increase the floor bending stiffness of weak axis, and 4) the possibility of the suggested solution is confirmed through the on-site test.

Keywords: Cold-Formed Steel Framed House, Heavy-Weight Floor Impact Sound, Lattice-Arrayed Floor Joists, On-site Test, Numerical Analysis

スチールハウス, 重量床衝撃音, 直交根太, 実大実験, 数値解析

1. はじめに

スチールハウス^{1)や2)}など(図1)は、木造ツーバイフォーの木枠を厚さ2.3mm未満の冷間成形の溶融亜鉛めっき形鋼で置き換えた薄板軽量形鋼造の住宅であり、国内では2001年に同構造に関する技術基準が公布されて以降、戸建住宅や共同住宅としての実物件が建設されてきている。また、構造や環境といった各種技術分野での調査や研究開発が進められてきている。

スチールハウスの音環境分野の性能のうち、重量床衝撃音の遮断性は、前記基準の公布から、独立天井の採用や面材仕様の強化による改善がなされてきている^{3), 4)}など。現行の一般的な仕様で、JIS A 1419-2に準拠した評価でL-65の性能が達成されているが、近年、共同住宅として採用される機会が増えていることから、性能の更なる向上が求められている。

重量床衝撃音の遮断性を向上する方法として、例えば文献5)では、スチールハウスの床根太の中に水砕スラグや転炉スラグなどからなる粒状体^{6), 7)}などを設置して、粒状体の制振効果に期待して性能を向上する方法が検討されている。同文献内では、粒状体の種類や充填量を変数とした検討の結果が示されている。

また別の方法として、文献8)や9)では、スチールハウスのような1方向に根太が配される床構造において、床の面外の曲げ剛性が強軸方向と弱軸方向で異なる点を踏まえ、根太床の部材構成に注目して、根太スパン方向と直交する方向にころび止めやふれ止めを設置

し、弱軸方向の曲げ剛性を増加させて性能を向上する方法が検討されている。ころび止めやふれ止めの断面や配置を変数とした検討の結果として、検討対象の部材構成の範囲内では、弱軸方向の曲げ剛性を十分に向上することができず、重量床衝撃音の遮断性を向上することは困難であるため、面材の質量増加といった他の方法の検討が有効であるといった見解が示されている。

ここで文献8)や9)に注目すると、これら検討の当初の方針は、面材の質量増加だけでなく、床の面外曲げ剛性の向上とあわせて、遮音性を確保することであった。根太や他部材の断面や配置を工夫し

図1 薄板軽量形鋼造としてのスチールハウス

^{*1} 新日鐵住金(株) 工修

^{*2} 新日鐵住金(株) 工博

^{*3} 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, M.Eng.

Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.

て、床の曲げ剛性を向上する対策によってスチールハウスの重量床衝撃音の遮断性を向上することができれば、床の質量の増加を抑制しながら、粒状体といった新規の材料を追加することもなく、現行仕様の部材構成の比較的簡易な改良によって、経済効率の良い遮音対策が実現できる可能性がある。

そこで本報では、文献 8)や 9)を参考に、根太スパン方向と直交する方向に部材を追加することによる重量床衝撃音の遮断性の向上の可能性を探索すべく、同対策を施したスチールハウス床の性能の評価に取り組む。具体的には、まずは実物件を対象に、現行のスチールハウスの重量床衝撃音の遮断性と振動特性を実験と数値解析により調査し、重量床衝撃音の周波数特性、遮音性能の決定周波数、および同周波数における床の振動特性を把握する。次に、根太の構成と曲げ剛性の相関を数値解析により調査し、根太と直交する部材の追加による床の面外曲げ剛性の向上の程度を評価する。最後に、根太と直交する部材を追加して曲げ剛性を向上した床について、実物件での重量床衝撃音の遮断性を実験により評価して、根太と直交する部材により曲げ剛性を向上させて重量床衝撃音の遮断性を改善する可能性を探索する。以下にその内容を示す。

2. 現行床（軽角形鋼仕様）の重量床衝撃音の遮断性と振動性状

本章では、実物件を対象に、現行のスチールハウスの重量床衝撃音の遮断性と振動性状を実験と数値解析により調査する。

2.1. 調査対象の床

図 2 に調査対象の物件の外観、図 3 に調査時の様子、図 4 と図 5 に調査対象の床の平面図、根太伏図、断面図、および表 1 に調査対象の床の仕様を示す。表 1 中の部材は、実物件で積層する順に上から下に記載している。調査対象の物件は 3 階建て、全 45 戸、独身者向けの共同住宅で、床根太が 1 方向に配置され、現行のスチールハウスの標準的な仕様の一つを有するものである。調査対象の床は 2 階の 1 室で、同床は根太スパンが 3,185mm、根太直交方向スパンが 3,640mm である。床根太は、断面が 235BW12（□-235x50x1.2）で、スパン直交方向に 455mm の間隔で配される。仕上材は、施工完了時の仕様として、床上に乾式二重床、床下に独立天井 140LCW10（C-140x50x12x1.0）が設置される。

なお、本報において、薄板軽量形鋼の断面は「断面形状・断面寸法や板厚」として表現することとする。例えば□-235x50x1.2 は、断面形状が軽角形鋼で、断面高さが 235mm、断面幅が 50mm、板厚が 1.2mm であり、C-140x50x12x1.0 は、断面形状がリップ溝形鋼で、断面高さが 140mm、断面幅が 50mm、リップ高さが 12mm、板厚が 1.2mm であることを示す。

2.2. 現行床（軽角形鋼仕様）の重量床衝撃音の遮断性の実験調査

2.2.1. 実験計画

調査は表 1 に記載の施工段階別に行い、床躯体のみが施工される第 1 段階、床躯体と天井が施工される第 2 段階、および前記に加えて乾式二重床が施工される第 3 段階で実施する。同表中、●の部材は、各段階において施工済みのものを示す。

加振と計測は JIS A 1418-2 に準拠して行う。加振源は標準重量衝撃源（タイヤ）とし、加振点と計測点の平面位置は、それぞれ 2 階と 1 階の室内において、床中央点と対角線の 4 等分点 4 点からなる 5 点とする（図 4 中の○部）。各計測点の結果をエネルギー平均し、

各加振点の結果を算術平均して重量床衝撃音の遮断性を評価する。重量床衝撃音の遮断性能の評価は、JIS A 1419-2 の附属書記載の等級曲線を用いて行うこととする。

2.2.2. 実験結果

図 6 に、施工段階別の現行のスチールハウス床の重量床衝撃音の遮断性の調査結果を示す。同図から、施工段階が進むにつれて衝撃音の遮断性が向上する傾向があることがわかる。JIS A 1419-2 の等級曲線を参照すると、各施工段階とも 63Hz 帯域が衝撃音の遮断性能の決定周波数となっており、同帯域の音圧レベルは、第 1 段階で 99.7dB、第 2 段階で 91.9dB、および第 3 段階で 88.0dB となっている。同図の各施工段階の差異から、独立天井の設置により 7.8dB、乾式二重床の設置により 3.9dB の性能の改善が得られることがわかる。一方、第 2 段階から第 3 段階への移行に際しては、乾式二重床の施工により、250 や 500Hz 帯域の性能が悪化する傾向が見られる。

図 2 調査対象の外観

図 3 調査時の様子

図 4 調査対象の床の平面図（左）と根太伏図（右）

図 5 調査対象の床の断面図

表 1 調査対象の床の仕様

	構成部材 仕様	重量 kg/m ²	施工段階			材料物性（数値解析用）		
			1	2	3	比重	ヤング係数 N/mm ²	α/γ 比
二重床	フローリング 12mm	6.0	-	-	●	-	-	-
	パネティクルボード 20mm	14.0	-	-	●	-	-	-
床躯体	捨て合板 12mm	6.0	●	●	●	0.60	6,000	0.30
	普通石膏ボード 15mm x2	21.0	●	●	●	0.75	1,800	0.20
	硬質木片セメント板 18mm	10.8	●	●	●	0.95	4,400	0.30
	床根太 235BW12@455	11.6	●	●	●	7.85	205,000	0.30
独立天井	天井根太 140LCW10@910	2.2	-	●	●	-	-	-
	ロックウール 40kg/m ³ 50mm	2.0	-	●	●	-	-	-
	強化石膏ボード 12.5mm x2	20.0	-	●	●	-	-	-

2.2.3. 実験結果の分析

(1) 独立天井の遮音効果

図 7 に、第 1 段階の音圧レベルの計測結果から第 2 段階の音圧レベルの計測結果を差し引いたものと、文献 10)記載の石膏ボード 12mm の 2 枚積層板の透過損失を比較して示す。図 7 の横軸が 1/3 オクターブバンドのグラフ中の透過損失の値は、文献に従い、100Hz 以上の範囲を示す。ここで図 7 の横軸がオクターブバンドのグラフ中の値は、同図の横軸が 1/3 オクターブバンドのグラフ中の値の dB 和として算出している。

同図から、強化石膏ボード 2 枚で構成される天井板の遮音効果は、160Hz 帯域以上の周波数範囲において、石膏ボード 12mm の 2 枚積層板の透過損失よりも小さくなる傾向があることがわかる。また、石膏ボードの透過損失の勾配が、125～500Hz 帯域の平均の 5.4dB/Oct 程度で代表可能と仮定すると、31.5～63Hz 帯域においては、天井板の遮音効果は石膏ボードの透過損失と比較して、160Hz 帯域以上の周波数範囲ほどには小さくはなっていないと推測される。

160Hz 帯域以上の範囲において天井板の遮音効果が小さくなる原因の 1 つとして、床根太の固体振動が端根太を介して独立天井根太に伝播する現象が生じていることが考えられる。同現象が生じている場合、端根太と独立天井根太や、独立天井根太と天井板の吊りボルトの絶縁対策により、遮音性が向上する可能性があるといえる。

(2) 空気層の共振の影響

天井や二重床を設置する場合、空気層をばねとする振動系の共振により遮音性能が低下することが懸念される。調査対象の床における共振の影響を調べるため、式(1)、および(2)～(5)を用いて共振周波数を算定する。式(1)は 2 枚の面材の間に挟まれる 1 つの空気層からなる 2 質点 1 自由度系を想定するもの、式(2)～(5)は 3 枚の面材の間に挟まれる 2 つの空気層からなる 3 質点 2 自由度系を想定するものである¹¹⁾。ここで、式(1)において、 c は空気中の音速、 ρ は空気の比重、 l_0 は空気層の厚さ、 m_1 、 m_2 は空気層の上下の部材の面密度を示す。また式(2)において、 m_3 、 m_4 、 m_5 は空気層の上下の部材の面密度、 l_1 は面密度が m_3 と m_4 の部材の間の空気層の厚さ、 l_2 は面密度が m_4 と m_5 の部材の間の空気層の厚さを示す。

$$f_{r1} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{l_0} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} \quad (1)$$

$$f_{r2,3} = \frac{\sqrt{2}}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_1 + \lambda_2 \mp \sqrt{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + 4 \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot m_3^2 \cdot m_5^2}}{m_3 \cdot m_4 \cdot m_5}} \quad (2)$$

$$\lambda_1 = \kappa_1 \cdot m_5 \cdot (m_3 + m_4) \quad (3)$$

$$\lambda_2 = \kappa_2 \cdot m_3 \cdot (m_4 + m_5) \quad (4)$$

$$\kappa_{1,2} = \frac{\rho \cdot c^2}{l_{1,2}} \quad (5)$$

空気層をばねとする振動系として、①床躯体・空気層（厚さ 390mm）・独立天井、②二重床・空気層（厚さ 63mm）・床躯体、および③二重床・空気層（厚さ 63mm）・床躯体・空気層（厚さ 390mm）・独立天井の 3 種類を想定する。各々の振動数は、式(1)より、振動系①で 23Hz、②で 63Hz、および式(2)～(5)より、振動系③で 21Hz と 63Hz と計算される。

図 6 施工段階別の現行床の重量床衝撃音遮断性の比較

図 7 独立天井の遮音効果と石膏ボードの透過損失の比較

図 6 の第 1 段階と第 2 段階の比較から、振動系①の振動数を含む 25Hz 帯域において、同帯域以上の範囲よりも両段階の差異が小さくなる傾向があることがわかる。前述の計算結果を踏まえると、差異が小さくなる原因の 1 つとして、天井懐の空気層をばねとする振動系①の共振の影響が考えられる。なお、この振動系は、その振動数が JIS A 1419-2 の等級曲線で重量床衝撃音の評価の対象となる周波数よりも低い範囲にあるため、同評価に及ぼす影響は小さいといえる。

一方、図 6 の第 2 段階と第 3 段階の比較から、振動系②や、振動系③のうちの二重床の空気層が主体となるモードの振動数を含む 63Hz 帯域において、同帯域と前後の帯域で明確な差異は確認できないことがわかる。今回調査対象の床において、二重床については、少なくとも空気層をばねとする振動系を上記の方法で想定する場合において、その共振の影響は確認できないといえる。

以上から、現行の独立天井や乾式二重床の設置により 4～8dB の重量床衝撃音レベルの改善が得られている一方、空気層をばねとする共振の影響は見られていないことがわかり、更なる性能の改善には、少なくとも空気層をばねとする振動系の共振回避によることは難しいといえ、例えば天井や二重床の防振化や本報で検討する床の高剛性化などの改良を検討する必要があるといえる。

2.3. 現行床（軽角形鋼仕様）の振動性状の実験調査

3 つの施工段階のいずれにおいても、JIS A 1419-2 の等級曲線を参照すると、重量床衝撃音の決定周波数が 63Hz 帯域となっているという前節の結果を踏まえ、本節では、同周波数帯域における床の振動性状を実験により調査する。

図8 加振と計測の系列

図9 加振と計測の様子（左：床上の加振、右：床下の計測）

図10 現行床の実験モード解析の結果

2.3.1. 実験計画

床躯体のみが施工される第1段階を対象に、実験モード解析¹²⁾による調査を行う。

図8に加振と計測の系列、図9に加振と計測の様子を示す。加振は、電磁式加振器を用いて行い、加振点は床上の1点とする（図4中の△部）。計測は、スキャン式のレーザードップラー振動計を用いて行い、計測点は、床面の対称性を考慮して、床面の1/4の範囲の約500点とする（図4中の縦線部）。計測対象は根太スパン方向1,500mm、同直交方向1,600mmの範囲の床面とする。床面の振動に注目するため、床根太や独立天井根太、野縁受け、野縁といった金物の下面は計測対象から除く。前記範囲に対し、根太スパン方向に最大で24点、根太直交方向に最大で21点を計測する。計測点の間隔は各方向で60mm～80mm程度としている。

2.3.2. 実験結果

図10に、実験モード解析の結果として、1次と2次の振動モードの振動数とモード形状を示す。計測は床下から行っているが、同図中のモード形状の表示は床上から見下ろすアングルとしている。

同図から、1次モードは43Hzであり、重量床衝撃音の評価範囲の下限値の近傍であるとともに、2次モードは65Hzであり、同範囲内であることがわかる。また、1次モードは床中央部に腹を1つ有するモードであり、2次モードは根太スパン方向と直交する方向に腹が増えて高次化するモードであることがわかる。このような振動性状を有する理由は、1方向に根太を有するスチールハウス床が面外の曲げ剛性に関して異方性を有し、図10中に記載の軸に関して、x軸回りの曲げに対しては剛性が高いが、y軸回りの曲げに対

しては剛性が低いことによると考える。なお、このスチールハウス床の振動性状は、同じように1方向に根太を有する木造床¹³⁾などと同等といえる。

本節の結果から、現行のスチールハウスでは、重量床衝撃音の遮断性の決定周波数となる63Hz帯域において、根太スパン方向と直交する方向に腹が増えて振動する傾向があるため、根太スパン方向と直交する方向に部材を配置し、床の弱軸方向の曲げ剛性を向上してこの振動を抑制できれば、重量床衝撃音の遮断性を向上できる可能性があるといえる。

2.4. 現行床（軽角形鋼仕様）の振動性状の数値解析調査

前節の結果を踏まえ、本節では、実験で確認された振動性状の数値解析による再現に取り組む。

2.4.1. 解析計画

図11(a)に、解析モデルの概要を示す。前出の表1中に、解析に用いる材料物性を示している。解析手法は有限要素法とし、汎用解析プログラムのMSC.Marcを用いる。解析種別は、振動固有値解析とする。解析の対象は、床面の対称性を考慮し、床面の1/2の範囲とする（図4中の網掛部）。床面材と形鋼の要素は双1次厚肉シェルとする。要素サイズは100mm程度とし、要素数は8,000程度となっている。

床面材は、表1記載の4枚について、積層する順番と各面材の板厚を考慮し、各面材が実施工時において形鋼から離間する距離を解析においてもオフセットさせてモデル化する（図11(b)）。面材と面材の結合には前記解析プログラムのCompositeオプションを用い、また面材と形鋼、形鋼と形鋼の接触部にはGlueオプション¹⁴⁾を用いて、接触している範囲の変位を共有させるモデルとしている。

床の境界条件は、図11(a)中において、実線部は壁で支持されることを想定して、形鋼の上下フランジとウェブの交線において鉛直方向の変位を拘束する。点線部には対称条件を付与する。また、無線部は室内の通路部分で壁に支持されていない範囲であるため、形鋼、面材ともに拘束条件を付与しない。結果として床パネルは、無線部を除き、単純支持（鉛直方向の変位のみを拘束、水平方向の変位とモーメントは非拘束）されている。図11(c)に、同図(a)中のA

図11 現行床（軽角形鋼仕様）の解析モデル

図 12 現行床（軽角形鋼仕様）の振動固有値解析の結果

部における形鋼への拘束の様子を示す。なお、床パネルの端部には、リップのない軽溝形鋼が設置されており、モデル化の対象範囲は、隣接するパネルの軽溝形鋼までとしている。

2.4.2. 解析結果

図 12(a)に、振動固有値解析の結果として、1 次と 2 次モードの振動数と形状を示す。また同図(b)に、モード形状について、本節の解析と 2.3.の実験の結果を比較して示す。同図には、根太スパン方向の中央部の断面の振幅として、同図(a)中の B-B' 断面における面材の振幅を示している。図の縦軸は、実験結果と解析結果のそれぞれにおいて床中央部の振幅を 1 として基準化した値を、横軸は床端部を 0 とする場合の B-B' 断面の各計測点の x 方向の座標を示す。

同図と図 10 から、振動数とモード形状という 2 つの視点から、本節の解析結果は 2.3.の実験結果と整合する傾向があると考えている。本節で示した以外のモデル化の方法として、例えば、面材のうち、構造部材である硬質木片セメント板についてはその曲げ剛性と質量を評価し、非構造部材である捨て合板や普通石膏ボードについては剛性を評価せずに質量のみを評価することなどが考えられる。しかしながら、この場合には、1 次モードの振動数は 35Hz、2 次モードは 39Hz となり、実験結果とは整合しない。

以上から、本節で示したモデル化の方法により、適切なモデルを構築できれば、実物件のスチールハウス床の振動性状を数値解析で再現できると考えている。

3. 根太と直交する部材を有する床の面外曲げ剛性

本章では、前章の結果を踏まえ、床の弱軸方向の曲げ剛性の向上を目指し、根太と直交する部材の追加による床の面外曲げ剛性の向上の程度について数値解析により評価する。

3.1. 評価対象の床

図 13 に、評価対象の床の平面図と根太伏図を示す。評価対象の物件は、3 階建、全 18 戸、ファミリー向けの共同住宅である。評価対象の床は 2 階の 1 室で、同床は根太スパンが 3,640mm、根太直交方向スパンが 5,460mm である。根太と直交する部材を追加する

前の床は、2.1.の床と比較して、床根太が 1 方向に配置され、現行のスチールハウスの標準的な仕様の一つを有するものである点と同じであるが、二重床は有さず、捨て合板の厚さは 9mm で、床根太の断面が 2-235LCW12 (2C-235x50x20x1.2) である点異なる。以下、根太と直交する部材を追加する前のこの仕様の床を「現行床（リップ溝形鋼仕様）」と表記する。

図 14 に、図 13 の床の弱軸方向の曲げ剛性の向上を目指して設置するものとして、根太と直交する追加部材の立面図と断面図を示す。同部材は 3 種類の金物からなり、それらは金物 A、同 B、および下弦材である。金物 A と同 B は、高さが現行の床根太と同じ 235mm であり、厚さ 1.2mm の冷間成形材の組合せで構成される。金物 B は、同 A とは異なり、910 mm ピッチで配置されている独立天井根太 184LCW10 (C-184x50x20x1.0) との干渉を回避するため、ウェブ部に開口を有している。下弦材は、金物 B の開口に伴って生じると推測される曲げ剛性の部分的な低下を補うために設置し、断面は 89LCN16 (C-89x40x12x1.6) とする。なお、これらの金物 A、B、および下弦材は、金物と直交する部材を追加することの効果の確認のために考案しており、やや特殊な仕様を有するものである。汎用化にあたっては、製造性や施工性の向上の視点から仕様の改良を検討してゆく必要があると考えている。

3.2. 解析計画

表 2 に、面外曲げ剛性の解析対象のケース一覧を示す。解析対象

図 13 評価対象の床の平面図（左）と根太伏図（右）

図 14 根太と直交する追加部材の立面図（上）と断面図（下）

は、3種類の金物の組合せと設置のピッチを変数として、現行仕様（リップ溝形鋼仕様）を含む全7ケースとする。また図15に、現行仕様、および根太と直交する金物を追加する仕様の解析モデルを示す。同図中、面材は非表示としている。解析対象は、床面の対称性を考慮し、床面の1/4の範囲とする（図13中の網掛部）。材料物性や使用要素、積層面材の評価方法、面材と形鋼の接合部の評価方法などは2.4と同様とする。解析モデルの要素数は8,000～20,000程度としている。また床の境界条件は、図15(a)中において、実線部は上下を壁で支持されることを想定して、形鋼の上下フランジとウェブの交線において鉛直方向の変位を拘束する。点線部には対称条件を付与する。2.4と同様に、床パネルは4周を単純支持されている。

本解析モデルは、解析負荷軽減のため、前述の通り床面の1/4の範囲を対象として構築している。本モデルは、各種仕様のスチールハウス床の強軸方向と弱軸方向の曲げ剛性の評価を主目的としており、この評価において、本モデルは活用可能であると考えている。一方、モデル内に対称条件を設定していることから、振動モードの評価にあたっては、対称条件を付与している面を境界として位相が反転するようなモードは評価できないといえ、この点には留意する必要があると考えている。

図16に、面外曲げ剛性の評価方法を示す。同図には床全面のイメージを示しているが、解析は前述のとおり床面の1/4の範囲を対象とする（図16中の網掛部）。根太スパン方向、および同方向と直交する方向のそれぞれについて、中央線荷重と2辺単純支持の条件における3点曲げを行い、荷重と変形の関係から各方向の曲げ剛性 D_x 、 D_y を算出する。図16中の△印は、鉛直方向の変位を拘束していることを示す。3点曲げの際には、図16中に示す鉛直方向の変位を拘束している部材のうち、支持辺ではない方の辺上の部材については、同部材が曲げ剛性に影響を及ぼすことを避けるため、解析モデルから同部材を除去して評価を行うこととする。以上の検討を材料物性と幾何学変形ともに線形の条件下で実施する。なお、各ケースについて、2.4と同様に、振動固有値解析を行い、振動性状も調査する。

3.3. 解析結果

表3に、解析結果として、強軸方向である根太スパン方向の曲げ剛性 D_x 、弱軸方向である根太スパンと直交する方向の曲げ剛性 D_y 、面密度 m と強軸のみ、弱軸のみ、または強軸と弱軸の両方の曲げ剛性から算定する基本インピーダンス Z_x 、 Z_y 、 Z_{xy} 、および1～3次のモードの振動数を示す。図17に、各ケースについて、3点曲げ時の床の根太スパン直交方向の変形として、図16(b)中のF-F'断面の変形を示す。同図中、ケース3は、ケース4と同様であったため省略している。また図18に、各ケースの面密度当りの弱軸方向の曲げ剛性を示す。同図における縦軸の値はケース1の値で基準化して示す。図19に、各ケースの1～3次モードの形状を示す。

ここで、強軸と弱軸の曲げ剛性を評価する基本インピーダンスは、文献15)～17)などを参考に、下記の式(6)を用いて算出する。基本インピーダンスのレベルは基準値を1 kg/sとして算出する。

$$Z_{xy} = 8 \sqrt{m \cdot \sqrt{D_x \cdot D_y}} \quad (6)$$

表3から、根太と直交する部材を設置することにより、弱軸方向

表2 面外曲げ剛性の解析対称のケース一覧

ケース	名称	金物の種類			金物のピッチ mm		
		A	B	下弦材	455	910	1,810
1	現行	—	—	—	—	—	—
2	直交-A・B・下@455	●	●	●	●	—	—
3	直交-A・B・下@910	●	●	●	—	●	—
4	直交-A・B・下@1,810	●	●	●	—	—	●
5	直交-A・下@455	●	—	●	●	—	—
6	直交-A・B@455	●	●	—	●	—	—
7	直交-下@455	—	—	●	●	—	—

図15 現行仕様（リップ溝形鋼仕様）、および根太と直交する金物を追加する仕様の解析モデル

図16 面外曲げ剛性の評価方法

表3 現行仕様および根太と直交する金物を追加する仕様の解析結果の一覧

No.	ケース 名称	面密度 m kg/m ²	曲げ剛性 (1,000mm幅当り)				基本インピーダンス						振動数		
			強軸		弱軸		強軸の剛性 のみを評価		弱軸の剛性 のみを評価		強軸と弱軸の 剛性を評価		1次 f_1 Hz	2次 f_2 Hz	3次 f_3 Hz
			D_x N・mm ²	D_y N・mm ²	弱/強 D_y/D_x -	Z_x kg/s	L_{Zx} dB	Z_y kg/s	L_{Zy} dB	Z_{xy} kg/s	L_{Zxy} dB				
1	現行	51.5	8.8E+09	3.1E+08	1/ 27.8	5.4E+03	74.6	1.0E+03	60.2	2.3E+03	67.4	48	57	79	
2	直交・A・B・下@455	70.4	同上	5.8E+09	1/ 1.5	6.3E+03	76.0	5.1E+03	74.2	5.7E+03	75.1	46	120	237	
3	直交・A・B・下@910	59.6	同上	3.2E+09	1/ 2.7	5.8E+03	75.2	3.5E+03	70.9	4.5E+03	73.1	47	102	192	
4	直交・A・B・下@1,810	54.2	同上	1.4E+09	1/ 6.2	5.5E+03	74.8	2.2E+03	66.9	3.5E+03	70.9	48	84	134	
5	直交・A・下@455	63.5	同上	4.1E+09	1/ 2.1	6.0E+03	75.5	4.1E+03	72.2	4.9E+03	73.9	48	84	153	
6	直交・A・B@455	66.4	同上	4.6E+08	1/ 18.9	6.1E+03	75.7	1.4E+03	62.9	2.9E+03	69.3	43	56	87	
7	直交・A・下@455	55.5	同上	3.7E+08	1/ 23.7	5.6E+03	74.9	1.1E+03	61.2	2.5E+03	68.1	47	56	83

図18 弱軸剛性の比較

図17 3点曲げ時の床の根太スパン直交方向の変形の様子

図19 現行仕様、および根太と直交する金物を追加する仕様の振動固有値解析の結果

の曲げ剛性が向上しており、例えば3種類の金物を根太と同様の455mmピッチで密に設置するケース2では、現行床（リップ溝形鋼仕様）のケース1と比較して、弱軸方向の曲げ剛性が18倍程度となり、強軸方向に対する弱軸方向の曲げ剛性の比率も1/1.5程度まで向上していることがわかる。一方、金物Aと金物Bのみを追加設置するケース6や、下弦材のみを追加設置するケース7では、弱軸方向の曲げ剛性の向上の程度は小さいことがわかる。

これは、金物Aとウェブに開口のある金物Bだけ、あるいは下弦材を設置するだけのケースでは、部材に作用する曲げモーメントとせん断力に対して各部材が分担して抵抗するような構成となっていないため、軽量で高剛性といった特徴を有する例えばサンドイッチパネルやH形鋼などとは異なり、追加部材の重量ほどには剛性が向

上されないものと推察する。図17から、下弦材のみを追加設置するケース7では、ケース2などとは異なり、床面材と下弦材の曲率中心が芯材のそれとは一致しない傾向があることがわかる。同ケースでは、一見、サンドイッチパネル状に部材が存在するものの、床面材と下弦材がそれぞれ独立した部材として作用力に抵抗しているため、剛性向上の視点では効果の得られにくい部材構成になっていると考えられる。

なお、図18から、面密度当りの弱軸方向の曲げ剛性という視点では、ケース2が最も効率良く、ついでケース5となっている。ケース2の効率が良いのは、当初想定した通り、金物A、B、および下弦材により、面材や下弦材、および金物A、Bといった芯材が、サンドイッチパネル状に、効率良く作用力に抵抗できているためと

推察する。また、次いでケース 5 が高効率となったのは、金物 B は下弦材とあわせて設置すれば比較的効率の良い剛性向上の手段となるが、独立天井を回避する開口を有していることにより、同金物を設置しなくてもある程度の効率が確保されたためと考えている。

また図 19 から、根太と直交する部材の追加設置により、1 次モードの振動数にはあまり変化がないものの、2 次モード以降の振動数は向上する傾向があることがわかる。これは、2.3.や 2.4.で確認しているが、1 方向の根太を有する現行のスチールハウス床では、根太スパン方向と直交する方向に腹が増えてモードが高次化する傾向があることから、根太と直交する部材の追加によりこのモードの剛性が高まって、振動数が向上していると推察する。3 種類の金物を根太と同様の 455mm ピッチで密に設置するケース 2 では、3 次モードにおいて、根太スパン方向と直交する方向ではなく、根太スパン方向に腹が増えてモードが高次化しており、根太スパン方向と直交する方向の曲げ剛性が十分に大きいため、モード形状の高次化の傾向が他のケースと異なっているといえる。

以上から、独立天井根太を有する現行のスチールハウス床において、床根太を 2 方向化して床全体の曲げ剛性を向上するには、例えば金物 A、B、および下弦材といった部材を適切に配置する必要があると考えている。また、前記のような金物を選定すれば、根太スパン方向の曲げ剛性と近い程度まで、同方向と直交する方向の曲げ剛性を向上できる可能性があるといえる。

4. 根太と直交する部材を有する床の重量床衝撃音の遮断性

本章では、前章までの結果を踏まえ、実物件を対象に、根太と直交する部材を追加して曲げ剛性を向上した床の重量床衝撃音の遮断性を実験により評価する。

4.1. 評価対象の床

図 20 に評価対象の物件の外観、図 21 に調査時の様子、および図 22 に評価対象の床の施工時の様子を示す。本章で評価する物件や床の平面寸法などは 3.と同じものとする。評価対象の床の仕様は、表 4 のケース 1（現行仕様）とケース 2（根太と直交する方向に 3 種類の金物を 455mm ピッチで配置）の 2 種類とする。

4.2. 実験計画

評価は施工が完了した時点で実施する。加振と計測は JIS A 1418-2 に準拠して行う。加振源は標準重量衝撃源（タイヤ）とし、加振点と計測点は、床中央点と対角線の 4 等分点 4 点からなる 5 点とする（図 13 中の○部）。各計測点の結果をエネルギー平均し、各加振点の結果を算術平均して重量床衝撃音の遮断性を評価する。

4.3. 実験結果

図 23 に、現行仕様の床、および根太と直交する部材を有する床の重量床衝撃音の遮断性の評価結果を示す。

同図から、根太と直交する部材を有する床は、現行仕様の 1 方向根太床と比較して、重量床衝撃音の遮断性が向上していることがわかる。JIS A 1419-2 の等級曲線を参照すると、両者ともににおいて 63Hz 帯域が衝撃音の遮断性能の決定周波数となっており、同帯域の音圧レベルは、前者は 88.6dB であるのに対し、後者は 83.3dB であり、5.3dB の改善が見られることがわかる。

また同図と表 3 から、音圧レベルの差異が 5.3dB であるのに対し、強軸の曲げ剛性のみを評価する場合の基本インピーダンスレベルの

図 20 評価対象の外観

図 21 調査時の様子

(a) 表 3 ケース 1

(b) 表 3 ケース 2（下弦材設置前）

図 22 評価対象床の施工状況

図 23 対策前後の床の

重量床衝撃音遮断性の比較

差異は 1.4dB、弱軸のみを評価する場合は 14.0B、強軸と弱軸の曲げ剛性を評価する場合の差異は 7.7dB となっており、仕様変更前後の床の強軸や弱軸の曲げ剛性の差異をそれぞれ単独で評価するよりは、式(6)に従って強軸と弱軸の両方の曲げ剛性の差異を評価する方が、基本インピーダンスレベルの差異が音圧レベルの差異に近いことがわかる。

以上から、スチールハウス床において、適切な金物を選定し、根太スパン方向と直交方向の曲げ剛性を向上すれば、重量床衝撃音の遮断性を向上できる場合がある。また、本報で検討したケースにおいては、基本インピーダンスレベルの向上の程度の評価において、仕様変更前後の床の強軸や弱軸の曲げ剛性の差異をそれぞれ単独で評価するよりは、式(6)に従って床の強軸と弱軸の両方の曲げ剛性の差異を評価する方が、重量床衝撃音の遮断性の向上の程度に近い値を得ることができるといえる。

5. まとめ

スチールハウスのような 1 方向に根太が配される床構造において、重量床衝撃音の遮断性を向上するため、文献 8)や 9)では、床の面外の曲げ剛性が強軸方向と弱軸方向で異なる点を踏まえ、根太床の部材構成に注目して、根太スパン方向と直交する方向にころび止めやふれ止めを設置する方法が検討されている。しかしながら、これらの文献においては、検討対象の部材構成の範囲内では、重量床衝撃音の遮断性を向上する程度まで弱軸方向の曲げ剛性を向上することは困難であることが定性的に示されるにとどまっていた。

そこで本報では、これらの知見を活用しつつ、根太と直交する部材を追加することによる重量床衝撃音の遮断性の向上の可能性を探索すべく、現行床（軽角形鋼仕様、リップ溝形鋼仕様）の性能の調査結果を踏まえ、根太と直交する部材と床の弱軸方向の面外曲げ剛性の関係を定量的に調査し、対策を施した床の性能の評価を行って、

衝撃音の遮断性の向上に必要な部材構成の検討に取組んだ。得られた知見を以下に示す。

- 1) 現行仕様のスチールハウス床の重量床衝撃音の遮断性の向上には、63Hz 帯域の性能の向上が必要である。現行の独立天井や乾式二重床の設置により 4~8dB の重量床衝撃音レベルの改善が得られている一方、空気層をばねとする共振の影響は見られていないことから、前記帯域の性能向上には、少なくとも空気層をばねとする振動系の共振回避によることは難しいといえ、例えば天井や二重床の防振化や本報で検討する床の高剛性化などの改良を検討する必要があるといえる。
- 2) 現行仕様のスチールハウス床は、実験の結果として、重量床衝撃音の遮断性の決定周波数となる 63Hz 帯域において、根太スパン方向と直交する方向に腹が増えて振動する傾向がある。この振動は、スチールハウス床が曲げ剛性について異方性を有するため生じると考えられる。またこの実験結果の傾向は、適切なモデルを設定すれば、数値解析によっても再現できる。
- 3) スチールハウス床において、弱軸である根太スパンと直交する方向の曲げ剛性は、適切な部材を選定することで、強軸である根太スパン方向の曲げ剛性と同程度まで向上することができる。
- 4) スチールハウス床において、適切な部材を選定して、根太スパン方向と直交する方向の曲げ剛性を向上できれば、重量床衝撃音の遮断性を向上できる場合がある。
- 5) 本報で示した実験結果 1 例では、根太と直交する部材を設置する前後のスチールハウス床の重量床衝撃音の遮断性の差異を評価する場合、基本インピーダンスレベルの向上の程度の評価において、仕様変更前後の床の強軸や弱軸の曲げ剛性の差異をそれぞれ単独で評価するよりは、式(6)に従って強軸と弱軸の両方の曲げ剛性の差異を評価する方が、衝撃音の実験値の差異に近い値を得ることができた。この傾向の一般性の確認は、実験例を増やして調査してゆく必要があり、今後の課題である。

参考文献

- 1) Steel Framing Alliance: Cold-Formed Steel Design Manual, 2013
- 2) 日本鉄鋼連盟: 薄板軽量形鋼造建築物設計の手引き (第 2 版), 技報堂出版, 2014
- 3) 金子昇, 二宮淳, 関根秀生, 井上勝夫, 木村翔: KC 型スチールハウスの重量床衝撃音遮断性能の課題抽出 -スチールハウスの諸性能に関する研究 その 18-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 環境工学 I, pp.221-222, 1998.9
- 4) 関根秀生, 金子昇, 二宮淳, 井上勝夫, 木村翔: KC 型スチールハウスの重量床衝撃音遮断性能の向上 -スチールハウスの諸性能に関する研究 その 19-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 環境工学 I, pp.223-224, 1998.9
- 5) 杉本明男: 粒状体衝撃ダンパによるスチールハウス重量床衝撃音の低減, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 環境工学 I, pp.225-226, 2002.8
- 6) 荒木嘉昭, 横道勲, 井上順吉: 粉粒体衝撃ダンパ・垂直振動, 片側衝突時の特性-, 日本機械学会論文集(C 編), 49 巻, 442 号, pp.945-951, 1983.6
- 7) L. Salvino, P. Dupont, J.G. McDaniel, Evaluation of Granular-fill Damping in Shock Loaded Box Beams, Proceedings of 69th Shock and Vibration Symposium, 1998.10
- 8) 太田克也, 関根英生, 二宮淳, 藤本隆裕, 杉本明男, 吉村純一, 井上勝夫: スチールハウスの重量床衝撃音遮断性能 (1) 実験方法と供試床の仕様 -KC 型スチールハウスの諸性能に関する研究 その 20-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 環境工学 I, pp.187-188, 1999.9
- 9) 関根秀生, 太田克也, 二宮淳, 藤本隆裕, 杉本明男, 吉村純一, 井上勝夫: スチールハウスの重量床衝撃音遮断性能 実験結果と検討 -スチールハウ

- スの諸性能に関する研究 その 21-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 環境工学 I, pp.189-190, 1999.9
- 10) 日本建築学会: 実務的騒音対策指針 (第二版), 技報堂出版, 2000
- 11) F. X. Xin, T. J. Lu, Analytical modeling of sound transmission through clamped triple-panel partition separated by enclosed air cavities, European Journal of Mechanics, A/Solids 30 (6), pp.770-782, 2011
- 12) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 1993
- 13) 鈴木秀三, 井原行孝, 藤野栄一: 木造根太床の鉛直振動特性に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 556 号, pp.9-15, 2002.6
- 14) MSC.Software: Marc Manual -Vol. A Theory and User Information-
- 15) 渡辺大助, 井上勝夫, 鈴木俊男: 異方性スラブの振動特性に関する基礎的検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 77 巻, 680 号, pp.761-769, 2012.10
- 16) 鈴木俊男, 井上勝夫: 異方性スラブの振動特性に関する検討 その 3 基本インピーダンスの算定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 環境工学 I, pp.161-162, 2010.7
- 17) 日本建築学会: 建物の床衝撃音防止設計, 2009.11

EVALUATION OF HEAVY-WEIGHT FLOOR IMPACT SOUND INSULATION PERFORMANCE OF COLD-FORMED STEEL FRAMED HOUSE WITH LATTICE-ARRAYED FLOOR JOISTS

*Nariaki NAKAYASU^{*1}, Hiroyuki KAIBARA^{*1}, Koji HANYA^{*2}
and Daiji TAKAHASHI^{*3}*

^{*1} Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, M.Eng.

^{*2} Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, Dr.Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Dr.Eng.

The number of cold-formed steel framed houses is increasing and they tend to be built as apartment houses rather than detached houses. Along with this trend, heavy-floor impact sound insulation performance of the houses is expected to be improved. In order to meet this expectation, experimental test and numerical analysis are carried out, using the really-constructed houses as specimens. The results indicate, 1) in order to improve the heavy-floor impact sound insulation performance of cold-formed steel framed houses, sound pressure in a frequency band of 63 Hz has to be reduced, 2) floors of cold-formed steel houses tend to vibrate in a perpendicular direction to floor joists axis in the low-ranged frequency band, which is caused by the anisotropy of floor bending stiffness, 3) considering the vibrating mode shape, to improve sound insulation performance, it seems one of the solutions to increase the floor bending stiffness of weak axis, and 4) the possibility of the suggested solution is confirmed through the on-site test.

(2015年9月10日原稿受理, 2016年2月15日採用決定)