歩行振動からみた CLT 造床のスパン表の例示

PRESENTATION OF EXAMPLE OF SPAN TABLE OF CROSS LAMINATED TIMBER FLOOR
FROM THE VIEWPOINT OF WALKING VIBRATION小山 雄平^{*1}, 福田 眞太郎^{*2}, 横山 裕^{*3}

Yuhei KOYAMA, Shintaro FUKUDA and Yutaka YOKOYAMA

Walking vibration can cause complaints on building floor, especially on timber floor. However, its evaluation and estimation method are still not established.

In this study, as a first step toward establishing these methods, the vibration characteristics of a CLT floor subjected to walking vibrations was measured. Then, a finite element model was also created to investigate the influence of varying material properties and boundary conditions on the vibration performance of the floor. Then, the influence of CLT floor-wall connection upon vibration characteristics was investigated.

In conclusion, the span table of CLT floor from the viewpoint of walking vibration was presented.

Keywords : Walking Vibration, Cross Laminated Timber Floor, Span Table, Habitability, Finite Element Method

歩行振動, CLT 造床, スパン表, 居住性, 有限要素法

1. はじめに

建築物の床では、床上での人間の動作により発生する振動が、居住性の観点から問題となる場合がある。特に、日常避けられない動作である歩行により不快な振動が発生した場合、床に問題があると判断されるため、苦情などにつながる可能性が高くなる¹⁾。木造建築物の床(以降“木造床”と記す)は、RC 造や S 造建築物のコンクリートスラブと比較して軽量で剛性が低い²⁾ため、歩行により発生する振動(以降“歩行振動”と記す)に対するより一層の注意が必要である。

一般に、歩行振動問題は、建築物竣工後の対策は困難とされている。したがって、設計段階において、発生する歩行振動を的確に予測する必要がある。しかし、木造床の歩行振動の予測方法に関しては、床振動に影響する材料の物性値や接合部の固定度などに関する知見がほとんど蓄積されていないため、詳細な予測解析が実施された例は非常に少ない。また、部材の断面寸法やスパンなどを用いた簡便な予測方法についても、十分な成果が蓄積されているとはいえない。すなわち、木造床では、設計段階における歩行振動の予測方法が十分に整備されていないのが実状である。

つぎに、予測した歩行振動を居住性の観点から評価するための評価指標の現状について述べる。居住性からみた振動の評価には、これまで日本建築学会「建築物の振動に関する居住性能評価指針」³⁾

などが用いられてきたが、これらの評価指標はおもに正弦振動を用いた研究成果に基づいており、非定常的な振動である歩行振動に適用すると、厳しい評価となりすぎることが数多く指摘されている(例えば⁴⁾)。これに対し、横山、黒田ら^{5),6)}は、木造の試料床を用いた検討結果に基づいて、木造床の歩行振動の評価指標を提示している。この評価指標では、振動数、振幅に加え振動の継続時間の要因が盛り込まれており、その骨子は 2018 年に改定された日本建築学会「建築物の振動に関する居住性能評価規準」⁷⁾と一致している。

以上に述べた現状を踏まえ、本報では、木造床のうち、近年採用事例が増加しており、かつ軸材と面材からなる在来軸組構法や枠組壁構法の床などと比較して予測解析が容易と思われる CLT(Cross Laminated Timber)造床を対象に、歩行振動の測定と予測解析を実施し、両者の結果の比較から測定結果を再現できる解析方法を確立する。さらに、解析モデルのスパンを種々変化させて求まる歩行振動を上述の評価指標と照合することより、設計に有用な資料の 1 つであるスパン表を例示する。

なお、本報の一部は、日本建築学会大会にて発表している^{8),9)}。

2. 目的, 範囲

本報は、木造床における歩行振動の予測評価の枠組み構築を最終的な目的とした研究の第一段階として、CLT 造床を対象に、歩行

^{*1} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 修士(工学)

^{*2} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 助教・博士(工学)

^{*3} 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授・工博

Dept. of Architecture and Building Eng., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.
Assist. Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

振動の予測方法確立のための知見を蓄積するとともに、木造床の歩行振動の評価指標を適用してスパン表を例示することを目的としている。

本研究では、1 人の歩行により発生する鉛直方向の床振動を、歩行者と同一の床上にいる他の人間が感じた場合の評価を対象とすることとする。

3. 既往の研究

木造床の歩行振動の評価指標を提示した研究例としては、横山、黒田ら^{3),4)}が挙げられる。この研究では、振動性状が種々異なる木造の試料床を用い、官能検査手法を適用して、歩行振動に対する住居の居室を想定した場合の人間の評価を定量化している。また、人間の評価と検査時に検査員に入力した歩行振動との関係を検討し、加速度・時間曲線から下式にしたがって算出される VLT を、人間の評価と対応する物理的指標(以降“性能値”と記す)として提示している。

$$VLT = VL_{\max} + 20 \log_{10} T^{1/4}$$

ここで、 $VL_{\max}$: VL の最大値(dB)

VL : 下式で得られる a'_{rms} のレベル換算値(dB)

$$VL = 20 \log_{10}(a'_{rms} / a_{0rms})$$

a'_{rms} : 「JIS C 1510-1995 振動レベル計」に規定された鉛直振動感覚に基づく振動数補正を施した加速度を時定数 10ms で実効値処理して得られる加速度実効値(m/s²)

a_{0rms} : 基準の加速度実効値(1×10^{-5} m/s²(rms))

T : VL が 60dB 以上となっている時間の総和(s)

Fig. 1 に、官能検査結果に基づいて構成した振動の気になり具合に関する心理学的尺度(以降“気になり具合評価尺度”と記す)と、 VLT の関係を示す。ただし、 VLT を算出する際の時定数は、松下ら⁹⁾を参考に 25ms に変更している。図中②～⑦で示す破線は、官能検査で用いた判断範ちゅうの気になり具合評価尺度上の位置を表す。 VLT は、人間の振動感覚の振動数特性に応じて補正した振幅の最大値 $VL_{\max}$ と、振動の継続時間 T から算出される。すなわち、上記の結果は、歩行振動の評価には、人間が感じる振動の大きさと長さが大きく影響していることを示唆している。しかし、現行の設計規準や設計資料は、このような歩行振動から算出される性能値および評価指標を根拠として導出されたものではない。

Fig.1 Evaluation index of walking vibration on timber floor^{3),4)}

例えば、日本建築学会「木質構造設計規準・同解説」⁹⁾では、振動障害を発生させないための指標として、固定荷重や積載荷重が全て載った場合のたわみの制限値 1cm～0.5cm を例示している。しかし、これは等分布荷重に対するたわみであり、歩行時の集中荷重による変形量との関係は明確になっていない。一方、海外では、集中荷重載荷時の変形量を用いた規準が主流になっている。例えば、Eurocode 5¹⁰⁾では、1 次固有振動数 8Hz 以上の床を対象に、集中荷重載荷時の変形量の荷重に対する割合と、力積 1N・s の衝撃荷重に対する応答速度の推奨値を定めている。しかし、これらの変形量や応答速度と歩行振動の関係は、明確になっていない。

この他、簡便な設計資料を提示した研究例として、CLT 造床を対象とした Hu ら¹¹⁾、在来軸組構法の床を対象とした西谷ら¹²⁾が挙げられる。Hu らは、CLT 造試料床を用いて実施した歩行振動に関するアンケート結果と、試料床の 1 次固有振動数および集中荷重載荷時の変形量との関係に基づいて、“marginal”(「よくもなく悪くもない」の意)よりよい評価が得られる床の範囲を示す式を、以下のように提示している。

$$d \leq f^{1.43} / 39$$

ここで、 d : 1kN の集中荷重載荷時の変形量(mm)

f : 床の 1 次固有振動数(Hz)

西谷らは、上述の横山、黒田らの官能検査結果と、試料床の 1 次固有振動数および集中荷重載荷時の変形量との関係から、所定の評価水準を達成するのに必要な 1 次固有振動数と変形量の関係式を提示している。例えば、Fig. 1 に示した判断範ちゅう“⑤やや気になる”よりよい評価が得られる床の範囲を示す式を、以下のように提示している。

$$D_{100} \leq 0.01 f_0$$

ここで、 D_{100} : 980N の集中荷重載荷時の変形量(mm)

f_0 : 床の 1 次固有振動数(Hz)

これらの設計資料も、歩行振動から算出される性能値を根拠として導出されたものではないが、本報では、スパン表例示の段階で、Hu らおよび西谷らの研究成果との整合性を検討する。なお、杉本、中村ら^{13),14)}も、木造校舎および木造事務所の床を対象に、歩行振動を測定し人間の評価との関係を検討したうえで、床の 1 次固有振動数と集中荷重載荷時の変形量を用いた設計法を提示できる可能性を示している。

木造床の振動の予測方法に関する研究例としては、鈴木、藤野ら¹⁵⁾⁻²¹⁾が挙げられる。この研究では、種々の構法の木造床を対象に、床上にいる人間が固有振動数や減衰特性におよぼす影響を実験的に明らかにしたうえで、有限要素法による解析結果との比較から、床の振動特性や衝撃荷重に対する応答などの予測方法を検討している。しかし、歩行振動の予測方法には言及していない。

4. 研究方法

本研究の研究方法および手順は、以下の通りである。

1) 実在する CLT 造床を対象に、静的載荷試験を実施し、集中荷重載荷時の変形特性を把握する。また、動的加振試験を実施し、固有振動数、振動モード、減衰特性(以降、これらをあわせて“振動特性”と記す)を把握する。さらに、歩行試験を実施し、歩行振動を測定する。

Fig. 2 Outline of investigated CLT floor

- 2)1)で対象とした CLT 造実在床の有限要素法による解析モデルを作成し、材料の物性値や接合部の固定度、および入力する歩行加振力などを種々変化させながら、解析結果と 1)での測定結果を比較することにより、測定結果を再現できる解析方法を確立する。
- 3)実在床とは別に新たに作製した CLT 造試験体床を用いて、静的載荷試験、動的加振試験、歩行試験を実施し、床と壁の接合部(以降“床壁接合部”と記す)の接合方法の違いが変形特性、振動特性、歩行振動におよぼす影響を把握する。
- 4)1)～3)の検討結果に基づいて、一般的な仕様の CLT 造床の解析モデルを作成し、スパンをパラメータとして、歩行加振力に対する応答解析を行う。解析結果から算出される VLT を横山、黒田ら^{3),4)}が提示した評価指標と照合することにより、居住性からみた評価を求め、スパンとの関係を整理して、歩行振動からみた CLT 造床のスパン表を例示する。

5. CLT 造実在床の変形特性、振動特性、歩行振動の把握

5.1 実在 CLT 造建築物における対象床の概要

実在する 2 階建 CLT 造建築物の 2 階床を、対象床として選定した。対象床の概要を、Fig. 2 に示す。対象床は、北海道産カラマツ材製 7 層 7 プライ、厚さ 210mm の CLT 床版で構成されている。図の一点鎖線は、床版の割り付けを表す。床版のスパンは 4550mm(壁心間)であり、隣接する床版同士の接合部は、上面 2 プライを幅 150mm 切欠き、厚さ 28mm のカラマツ材製構造用合板 2 級を長さ 140mm のビスで固定し、さらに化粧材として厚さ 30mm のカラマツ材製ラミナを接着固定した、スプライン接合部となっている。また、床版と壁の接合部は、1 階の壁の上に床版が載り、その上に 2 階の壁が載った構造となっている。壁は、厚さ 150mm の CLT 造で、床版と壁は、床版の下端と 1 階の壁内側、および上端と 2 階の壁内側に、75×75mm、長さ 500mm の L 字金物を、床版 1 枚あたり 4 箇所、計 8 個取り付けて接合されている。

本研究では、この床のうち、図に破線で示す範囲を検討対象とした。この対象範囲は、下階の壁の位置に基づいて設定したものである。すなわち、下階では、破線の位置に壁があり、破線に囲まれた内部には壁がなく 1 つの部屋となっている。

対象範囲の 2 階床は、CLT 床版ほぼ 5 枚で構成されている。この

Fig. 3 Measured and analyzed result of Static Deflection (loading point: I5)

対象範囲について、試験実施にあたり、図に示すように 1～9 行、A～R 列のグリッドを 500mm 間隔で設定した。本報では以降、例えば 5 行と I 列の交点を I5 と記することとする。また、図中横方向を行方向、縦方向を列方向と記することとする。なお、5.2 で述べる静的載荷試験と 5.3 で述べる動的加振試験は、対象床が 5 行、I 列を軸に行方向、列方向ともおおむね線対称であることから、1～5 行、I～R 列の範囲を対象に実施した。

5.2 静的載荷試験

床上の 1 点に質量 100kg の重錘を載荷し、載荷点と、載荷点から行方向、列方向に並ぶ各点での変形を測定した。載荷点は、I5～P5 の 8 点とした。各点の変形は、変位計(KEYENCE 製 IL-S025, IL-030, IL-065, LK-G155)を床版の裏面に 1 階から設置して測定した。変位計は、1 階の床で支持した。なお、I1～P1 は、壁近傍であるため変形は微小とみなし、測定対象から除外した。

Fig. 3 に、結果の例として、I5 載荷時の変形を実線で示す。図の (a) は I 列(I2～I5)、(b) は 5 行(I5～Q5)の結果である。また、(a)には壁の位置、(b)にはスプライン接合部の位置も示した。図より、CLT 床版の変形が、載荷点を中心に、行方向にも列方向にも広がっていることがわかる。ここで、(a)の I 列の結果をみると、壁から 700mm の I2 でも比較的大きな変形が生じていることがわかる。この変形には、壁の面外変形も影響している可能性があるが、床版のみを解析モデル化する場合、壁の位置での床版の固定度をピン支持とすると、壁の面外変形の影響も加味された床の変形を再現できる可能性が高いことが推察される。一方、(b)の 5 行の結果をみると、変形がスプライン接合部を越えて広がっており、スプライン接合部でも応力が伝達されていることがわかる。

5.3 動的加振試験

はじめに、Fig. 2 に示す I1～I5, J2～Q5 の計 37 点の床上に加速度計(RION 製 PV-84, PV-85)を設置したうえで、×で示す点をハンマーで加振し、各点における加速度を同時測定した。加速度計は、薄手の両面テープで床に固定した。ここで、加振点を対象範囲中央近傍の I5 から行方向、列方向に半グリッドずらしたのは、I5 とすると中央近傍に節が発生するモードの振動が励起されにくくなるためである。測定結果より I5 から各点への伝達関数を算出し、固有振動数を求めるとともに、振幅比と位相差から振動モードを導出した。

Fig. 4 Measured and analyzed result of natural frequency and vibration mode

Fig. 4 の (a) に、測定の結果得られた 1～3 次の固有振動数および振動モードを示す。図に示すように、1～3 次の固有振動数はそれぞれ 22.0、25.5、32.0Hz であった。また、1 次モードは対象床全体が同位相で振動するモード、2 次モードは対象床中央近傍に列方向に振動の節が発生しこの節を堺に逆位相となるモード、3 次モードは対象床を 3 等分する位置近傍に列方向に 2 つの節が発生しそれぞれの節を堺に逆位相となるモードであることが推察された。

つぎに、対象床の減衰特性を把握する目的で、Fig. 2 に×で示す点をハンマーで加振した際の I5 における加速度を、以下の 3 条件で測定した。

条件 1：床上に人間が乗っていない状態

条件 2：I5 に 1 名の人間(以降“受振者”と記す)が乗った状態

条件 3：I5 に 1 名、I4 に 1 名、計 2 名の受振者が乗った状態

受振者の体重は、83kg(I5)および 74kg(I4)であった。また、受振者の姿勢は立位とし、リラックスした状態で立つよう指示した。測定は条件ごとに 5 回実施し、加速度・時間曲線の測定結果から減衰定数を算出し平均を求めた。結果を Table 1 に示す。表に示すように、減衰定数は受振者数が増えるにしたがって大きくなっている。この結果は、木造床の振動特性におよぼす人体の影響について検討した既往の研究結果(例えば 22),15),16)と一致する。

5.4 歩行試験

床上に設定した歩行路を歩行者が歩行した際の振動を、所定の測定点の床上に加速度計を設置して測定した。歩行路と測定点の組み合わせは、Table 2 に示す 4 種とした。歩行者は 1 名(体重 70kg)とし、履物はくつ下とした。また、歩調は 2Hz とし、メトロノームを用いて制御した。測定は、歩行者の他に受振者 1 名(体重 83kg)が測定点に乗った状態で実施した。

Table 1 Measured result of damping ratio

Conditions	Damping ratio(%)
No.1: with no person	2.7
No.2: with one person	4.1
No.3: with two people	5.1

Fig. 5 Measured and analyzed result of walking vibration (Walking path: Line5, Measured point: I4)

Fig. 5 の上段に、測定結果の例として、5 行を A 列側から R 列側に向けて歩行した際に I4 で測定された加速度・時間曲線を示す。図より、0.5s ごと、すなわち 1 歩ごとに着地時の衝撃により振動が励起されては減衰する現象が繰り返されていること、またこの振動は歩行者が測定点に近づくにつれて大きくなり、遠ざかるにつれて小さくなっていることがわかる。測定は歩行路、測定点の組み合わせごとに 5 回実施し、各測定結果から 3. で述べた VL_{max} および VLT を算出し平均を求めた。結果を Table 2 の「測定結果」の欄に示す。

なお、横山、黒田ら^{3),4)}の評価指標の CLT 造床に対する適用性を確認する目的で、上記歩行試験と同一の歩行者が同一の条件で 5 行を歩行した際に I4 で感じられる振動の気になり具合について、Fig. 1 に示した①～⑦の判断範ちゅうにしたがって判断を求めるアンケート調査を実施した。アンケートは、14 名の成人男女(年齢 22～61 歳、体重 45～92kg)を対象に実施した。アンケートで得られた回答の範ちゅう番号①～⑦をそのまま数値 1～7 に置き換え、14 名の回答の平均を求めたところ、4.2 となった。すなわち、判断範ちゅう④と⑤の間の評価となった。一方、歩行路 5 行、測定点 I4 での VLT の測定結果は Table 2 に示す通り 83dB であり、この値を Fig. 1 と照合すると判断範ちゅう④と⑤の間の評価となる。すなわち、アンケート結果とおおむね一致した評価となる。このことから、横山、黒田らの評価指標の CLT 造床に対する適用性が確認できたと考えられる。

6. CLT 造実在床の歩行振動の解析方法の検討

6.1 固有値解析および静荷重に対する応答解析

5.1 で述べた対象床の有限要素法による解析モデルを作成した。

Fig. 6 に、解析モデルの概要を示す。当モデルでは、図に示すように、I5 を中心に 500mm 間隔で要素を設定するとともに、スプライン接合部および壁の位置に適宜要素を追加した。このモデルを用い、材料の物性値や接合部の固定度などを種々変化させながら固有振動数、振動モードおよび静的荷重載荷時の変形を求め、測定結果

Table 2 Measured and analyzed result of VL_{max} and VLT

Walking path [歩行路]	Measured point [測定点]	VL_{max}			VLT		
		Measured result (dB) [測定結果]	Analyzed result (dB) [解析結果]	Measured - Analyzed (dB)	Measured result (dB) [測定結果]	Analyzed result (dB) [解析結果]	Measured - Analyzed (dB)
Line 5 →	I4	79	76	3	83	78	5
Column I →	J5	76	76	0	78	76	2
Column M →	I5	74	73	1	76	73	3
Column P →	I5	72	68	4	72	68	4

Fig. 6 Outline of finite element model of investigated CLT floor

と比較する検討を繰り返した結果、最終的に、以下に述べるモデルで、測定結果をおおむね再現できることが明らかとなった。

①CLT 床版の曲げ剛性および密度

曲げ剛性については、CLT 床版の異方性を考慮しなければ測定結果を再現できないこと、および構造設計用の規格値では低すぎることを確認したうえで、当該 CLT を対象とした材料試験の結果得られた値である 7.11kN/mm²(強軸方向)および 2.54kN/mm²(弱軸方向)とした。また、密度も、材料試験の結果得られた値である 496kg/m³とした。

②CLT 床版のポアソン比

CLT 床版のポアソン比の測定例は見当たらないことから、一般的な木材のポアソン比とされる 0.4 を中心に種々変化させ、測定結果を再現できる値を同定した結果、0.2 とした。

③スプライン接合部の曲げ剛性および密度

曲げ剛性は、CLT 床版の上面 2 プライの切り欠き部に固定された構造用合板およびラミナの値とした。一方、密度は、CLT 床版と同じ値とした。これは、使用した構造用合板の材料試験値が取得できなかったことと、床版全体の厚さに占める構造用合板の厚さの割合は 1/7 であるため全体を CLT として解析しても結果に大きな差は生じないとみなしたことによる。

④床版と壁の接合部

5.1 で述べた通り CLT 床版が壁の上に載っていることと、5.2 で述べた通り床版のみをモデル化する場合壁の位置での床版の固定度はピン支持とみなすのが適当と推察されたことから、床版の支持方法は、外壁の場合、壁内側の位置にある節点にてピン支持とし、内壁の場合、壁内側および外側の位置にある節点にてピン支持とした。また、外壁、内壁ともに、壁の両側の位置にある節点にて、壁面内方向の回転を拘束した。

以上のモデルによる解析の結果得られた 1~3 次の固有振動数および振動モードを、Fig. 4 の (b) に示す。図に示した振動モードは、測定結果同様、I5 を基準として描いたものである。この図と (a) の測定結果を比較すると、固有振動数は 4~10% の差となっていること、また振動モードの形状も測定結果から推察された対象床全体の振動モードの形状と一致していることがわかる。

つぎに、I5 に質量 100kg の重錘に相当する 980N の荷重を静的に載荷したときの I2~I5、I5~Q5 の変形の解析結果を、Fig. 3 に

破線で示す。図の破線と実線で示した測定結果を比較すると、I5 の変形量は 9% の差となっており、かつ変形の広がりも列方向、行方向ともに近似していることから、対象床の変形をその広がりも含めて再現できていることがわかる。

以上より、作成した解析モデルで、対象床の変形特性および振動特性をおおむね再現できていることがわかる。

6.2 歩行応答解析

6.1 で作成した解析モデルを用い、歩行加振力を入力したときの応答を求めた。歩行路と測定点の組み合わせは、5.4 で述べた 4 種とした。具体的には、例えば歩行路 5 行、測定点 I4 の場合、Fig. 6 に足形で示す歩行者の着地位置(歩幅 750mm)に新たに節点を追加したうえで、各点に 1 歩分の歩行荷重を 0.5 秒(2Hz)ずつずらしながら入力し、I4 での加速度・時間曲線を求めた。節点の追加にあたっては、固有値解析結果にほとんど影響しないことをあらかじめ確認した。減衰定数は、5.3 の結果を参考に、床上に 2 名の受振者が乗った状態での値である 5.1% を、高次まで一律に採用した。

はじめに、日本建築学会「建築物荷重指針」²³⁾および設計資料²⁴⁾に示された Fig. 7 に示す 1 歩分の歩行荷重を各着地位置に入力したところ、着地時に励起される 1 歩ごとの加速度の最大値は、測定結果の 1/2~2/3 となった。この原因について検討したところ、以下の事項が考察された。

Fig. 8 に、入力した歩行加振力の 1/3 オクターブバンド分析結果の例(歩行路 5 行の場合)を●で示す。歩行加振力の振動数特性のうち、10Hz 程度以上の成分には、Fig. 7 に示すピーク p_1 における荷

Condition of foot contact

Walker's weight: 600N, On a rigid floor, Wearing socks

Fig. 7 Footfall force shown in Recommendations for Loads on Buildings²²⁾ and Guidebook²³⁾

Fig. 8 Result of 1/3 oct. band analysis of walking force

重の大きさおよび作用時間に加え、ピーク p_1 から p_2 に至る部分の荷重・時間曲線の形状が大きく影響する。しかし、荷重指針に示された歩行荷重は、この部分の細かな荷重の増減を単純化し滑らかにつないだ波形となっているため、結果的に 10Hz 程度以上の成分が大きく低下している。また、同一の 1 歩分の荷重が単純に繰り返された歩行加振力であるため、優勢な振動数成分と劣勢な振動数成分が明確に出現しており、振動数特性に偏りが生じている。このような歩行加振力を固有振動数 10Hz 程度以上の床の歩行振動の予測に用いると、応答を全体的に小さく見積もってしまううえに、固有振動数のわずかな違いにより共振、反共振現象が発生し、応答が大きく変動する不安定な結果を招くこととなる。

以上より、上記のような単純化を行わない、より現実に近い歩行加振力を設定する必要があると考え、5.4 で述べた歩行試験に用いた歩行者の 1 歩分の荷重を 50 サンプル測定し、これらの中から所定の歩数分のサンプルをランダムに選定した歩行加振力を、歩行路ごとに 5 パターン作成した。歩行者の履物、歩調は、5.4 で述べたと同様かつ下、2Hz とした。このようにして作成した歩行加振力の 1/3 オクターブバンド分析結果の例を、Fig. 8 に◆で示す。図には、歩行路が 5 行の場合の 11 歩分の歩行加振力 5 パターンの平均を示した。図より、10Hz 程度以上の成分は●より大きくなっており、かつ偏りもなくなっていることがわかる。よって、これらの歩行加振力を上述の解析モデルに入力したところ、Fig. 5 の下段に例示するように、1 歩ごとの加速度の最大値は、上段の測定結果と比較的近似した値となった。また、これらの解析結果からパターンごとに V_{Lmax} および V_{LT} を算出しその平均を測定結果と比較したところ、Table 2 に示す通り、 V_{Lmax} は 0~4dB、 V_{LT} は 2~5dB の差で予測できていることが明らかとなった。 V_{LT} の差が V_{Lmax} より大きいのは、Fig. 5 に示す通り、解析結果では測定結果でみられる一度振動が減衰した後の増幅(以降“揺れ戻し”と記す)が再現できていないことによるものと思われる。この揺れ戻しは、おもに壁からの反射波によるものと思われるが、反射波の影響を再現できる解析モデルの確立は、今後の課題とする。

以上より、作成した解析モデルと歩行加振力で、対象床の歩行振動を、振幅の最大値を中心におおむね再現できることが明らかとなった。

Fig. 9 Outline of CLT specimen floor

7. CLT 造試験体床を用いた床壁接合部の接合方法の影響の検討

7.1 CLT 造試験体床の概要

床壁接合部の接合方法の違いが変形特性、振動特性、歩行振動におよぼす影響を把握するために、接合方法が異なる 3 種の CLT 造試験体床を作製した。試験体床の概要を Fig. 9 に示す。試験体床は、いずれも幅 2m、厚さ 210mm、スパン 5500mm(壁外側間)のスギ材製 5 層 7 プライの CLT 床版 3 枚で構成されている。隣接する床版同士の接合部は、上面 1 プライを幅 150mm 切欠き、厚さ 28mm のカラマツ材製構造用合板 2 級を長さ 140mm のビスで固定した、スプライン接合となっている。床版は、周囲に設けられた高さ 880mm、厚さ 90mm の CLT 造壁の上に載っている。なお、壁位置の床上には、上部構造物を模した質量約 270kg/m を載荷した。床壁接合部の接合方法は、以下の 3 種とした。

- (1) L 字金物接合：5.1 で述べた CLT 造実在床と同一の L 字金物を床版下端、壁内側に 850mm 間隔で取り付け付けた接合
- (2) ビス鉛直打ち接合：長さ 290mm のビスを床版上の壁心の位置から鉛直方向に 300mm 間隔で打ち込んだ接合
- (3) ビス斜め打ち接合：長さ 140mm のビスを床版側面の下から 2 プライ目と 3 プライ目の境界の位置から斜め下 45° の方向に 200mm 間隔で打ち込んだ接合

7.2 静的載荷試験

図の K 点に質量 100kg の重錘を載荷し、K 点での変形を測定した。変形は、変位計を床版の裏面に設置して測定した。

Table 3 Results of experiments of CLT specimen floor

	L-shaped angle connection	Vertical screw connection	Diagonal screw connection
Deflection by static loading (mm)	0.185	0.202	0.212
First natural frequency (Hz)	17.0	16.5	16.0
Damping ratio (%)			
with no person	3.2	3.0	2.6
with one person	4.1	5.2	5.4
with two people	5.4	4.8	5.4
VLT (dB)	85	83	83

7.3 動的加振試験

図の K 点をハンマーで加振した際の振動を、K 点と J 点の床の上に加速度計を設置して測定した。測定結果を周波数分析し、固有振動数を求めた。つぎに、減衰特性を把握する目的で、K 点をハンマーで加振した際の K 点における加速度を、床上に人間が乗っていない状態、J 点に 1 名の受振者が乗った状態、J 点と J' 点に計 2 名の受振者が乗った状態の 3 条件で測定した。受振者の体重、姿勢および測定回数は 5.3 と同一とし、加速度・時間曲線の測定結果から減衰定数を算出した。

7.4 歩行試験

図に矢印で示す歩行路を歩行者が 2Hz で歩行した際の振動を、J 点の床の上に加速度計を設置して測定した。測定は、J 点に受振者 1 名が乗った状態で実施した。歩行者の履物、歩調、歩行者、受振者の体重および測定回数は 5.4 と同一とし、測定の結果得られた加速度・時間曲線から VLT を算出した。

7.5 試験結果および接合方法の影響の検討

Table 3 に、試験結果を示す。表に示すように、静的載荷時の変形は L 字金物接合が最も小さく、ビス鉛直打ち接合、ビス斜め打ち接合の順に大きくなっており、1 次固有振動数は同じ順で小さくなっている。このことから、接合部の固定度は L 字金物接合が最も高く、ビス鉛直打ち接合、ビス斜め打ち接合の順に低いことがわかる。ここで、静的載荷時の変形量の差は 13% 程度、固有振動数の

差は 6% となっている。

また、減衰定数は、5.3 で述べた CLT 造実在床と同様、いずれの試験体床でも床上の受振者数が増えるにしたがって大きくなっている。ここで、床上に 2 名の受振者が乗った状態での減衰定数は 4.8~5.4% であった。なお、5.3 で述べた CLT 造実在床の減衰定数も、この範囲内となっている。

さらに、歩行試験結果から算出された VLT の 3 種の試験体床間での差は、2dB となっている。

このように、3 種の試験体床での測定結果には、床壁接合部の接合方法の違いによる差がみられるが、その差は解析の精度と比較して小さいことから、固定度の違いを解析モデルに反映させて上記の差を再現するのは困難と考えられる。この結果は、歩行振動のような微細な振幅領域では、構造設計で扱う荷重、変形の領域と比較して、床壁接合部の接合方法の影響は小さいことを示唆している。

以上より、本研究では、6.1 で述べた解析モデルにおける床壁接合部での床版の支持方法を踏襲し、減衰定数は高次まで一律に 5% としたうえで、スパン表例示のための解析を実施することとした。

8. CLT 造床のスパンと歩行振動の関係に関する解析的検討

8.1 解析の概要

5. ~7. で得られた知見に基づいて、一般的な仕様と考えられる CLT 造床の解析モデルを作成した。Fig. 10 に、作成したモデルの概要を示す。当モデルは、幅 2m、厚さ 210mm、スパン L の CLT 床版 5 枚で構成されている。図には、例として、 $L=5.5\text{m}$ の場合のモデルを示した。なお、床版の枚数については、幅 2m の床版 3 枚とした場合の検討も行ったが、結果は 5 枚とした場合とほとんど異ならなかった。

CLT 床版については、スギ材製 5 層 7 プライと 7 層 7 プライの 2 種について検討することとした。それぞれの曲げ剛性、密度は、図に示す通りである。これらは、当該 CLT を対象とした材料試験の結果から得られた値である。また、ポアソン比は、7 層 7 プライの床版では 6.1 で同定した 0.2 とし、5 層 7 プライの床版では別途 7.1 の

Fig.10 Outline of finite element model for span table

Table 4 Analyzed results for span table

CLT floor panel	Span L (m)	First natural frequency f_0 (Hz)	Deformation by 980N static loading D_{100} (mm)	VLT (dB)	Evaluation level of annoyance* [達成される気になり具合の評価水準]
5 layers 7 ply	2.0	108.9	0.020	62.2	⑥
	2.5	68.9	0.033	67.4	⑥
	3.0	47.2	0.048	71.9	⑥
	3.5	34.3	0.067	75.6	⑥
	4.0	26.1	0.089	78.9	⑥
	4.5	20.5	0.116	79.9	⑤
	5.0	16.6	0.147	82.4	④
	5.5	13.7	0.182	84.2	④
	6.0	11.6	0.222	86.5	less than ④
7 layers 7 ply	2.0	92.0	0.020	61.7	⑥
	2.5	58.1	0.031	68.0	⑥
	3.0	39.7	0.047	73.2	⑥
	3.5	28.9	0.068	78.3	⑥
	4.0	22.0	0.094	79.5	⑤
	4.5	17.3	0.126	82.0	④
	5.0	14.1	0.164	84.8	④
	5.5	11.6	0.208	86.9	less than ④
	6.0	9.8	0.259	89.5	less than ④

*In the residential room [住居の居室]

Table 5 Span table of CLT floor from the viewpoint of walking vibration

(unit : m)

CLT floor panel	Evaluation level of annoyance* [達成される気になり具合の評価水準]		
	⑥Between not annoyed and slightly annoyed [全く気にならないとやや気になるの間]	⑤Slightly annoyed [やや気になる]	④Between slightly annoyed and fairly annoyed [やや気になるかなり気になるの間]
5 layers 7 ply	4.0	4.5	5.5
7 layers 7 ply	3.5	4.0	5.0

*In the residential room [住居の居室]

Table 6 Span table of CLT floor from the viewpoint of structural safety^{26), 27)}

(unit : m)

CLT floor panel	Application [用途]	
	General house [一般住宅]	Apartment [共同住宅]
5 layers 7 ply	5.297	5.138
7 layers 7 ply	3.986	3.827

Fig. 11 Relationship among f_0 , D_{100} , and evaluation of walking vibration

試験体床を解析モデル化して同定した結果に基づいて 0.1 とした。隣接する床版同士の接合は、7.1 で述べた仕様のスプライン接合とした。減衰定数および床壁接合部における床版の支持方法は 7.5 で述べた通りとし、壁位置の床上には 7.1 と同様上部構造物を模した質量を載荷した。なお、積載荷重は、通常の歩行振動の予測評価の場合と同様 0 とした。

解析は、 $L=2.0\text{m}$ から開始し、 0.5m ずつ増大させながら、1 次固有振動数 f_0 、および K 点に 980N の荷重を静的に載荷した時の変形量 D_{100} を求めるとともに、図に足形で示す位置に 6.2 で述べた方法で作成した 10 歩分の歩行加振力を 5 パターン入力した際の J 点での加速度・時間曲線を求め、VLT の平均を算出した。解析は、 f_0 が倍調波共振が発生する可能性が高くなる $^{25)}10\text{Hz}$ を下回った段階で終了した。

8.2 解析結果

解析結果を Table 4 に示す。表に示す通り、 f_0 が 10Hz を下回らないスパンの最大値は、5 層 7 プライでは 6.0m、7 層 7 プライでは 5.5m であった。また、各スパンで算出された VLT を Fig. 1 に示す木造床の歩行振動の評価指標と照合した結果を、表の「達成される気になり具合の評価水準」の欄に示す。例えば、5 層 7 プライでスパンが 5.5m の場合、VLT は 84.2dB であり、この値を Fig. 1 と照合すると、気になり具合は“⑤やや気になる”と“④・・・・・・”の間となるため、達成される評価水準は④となる。

8.3 歩行振動からみた CLT 造床のスパン表の例示

Table 4 より、住居の居室における要求水準として一般的な範囲内と思われる④～⑥の各評価水準が達成される最も大きい L を求め、Table 5 に示す。本研究では、Table 5 を、歩行振動の気になり具合からみた CLT 造床のスパン表として例示する。表に示す通り、居住性からみたスパン表は、構造安全性からみたスパン表と異なり、使用者の要求水準に応じた数段階のスパンが提示される点に特徴がある。ちなみに、構造安全性の観点から可能なスパンの最大値を文献^{26), 27)}にしたがって算出し、Table 6 に示す。Table 5 および Table 6 より、例えば 5 層 7 プライの場合、歩行振動に対する要求水準が“⑤やや気になる”以上だと、可能なスパンの最大値は歩行振動の観点から定まることがわかる。

なお、例示したスパン表は、限られた仕様の CLT 造床を対象とした検討により求めたものであり、あくまでも一例であることに留意する必要がある。

8.4 固有振動数と集中荷重載荷時の変形量を用いた設計資料の適用性の検討

3. で述べた通り、Hu ら¹¹⁾および西谷ら¹²⁾は、所定の評価水準よりよい評価が得られる床の範囲を、床の固有振動数と集中荷重載荷時の変形量を用いた式で提示している。これらの式を、変形量と固有振動数からなる平面上に表したものが、Fig. 11 である。図の縦軸は床中央に 980N の集中荷重を載荷したときの床中央の変形量、横軸は床の 1 次固有振動数であり、一点鎖線は Hu らが提示した“marginal”よりよい評価が得られる床の範囲の上限、④～⑥の実線は西谷らが提示した各評価水準よりよい評価が得られる床の範囲の上限を表す。ここで、Hu らの設計資料では 1kN 載荷時の変形量を用いているが、980N 載荷時とほぼ同値とみなしてそのまま表示している。

この図に、Table 4 に示した CLT 造床の δ および D_{100} の解析結果をプロットして示す。図の記号は、当該床で達成される評価水準により分類したものである。図より、評価水準⑤が達成されない▲で示す点の一部が⑤の実線より下側にあるものの、④が達成されない◆と達成される▲は④の実線で分類できているなど、全体的にみて、各プロットの記号と④～⑥の実線はおおむね整合していることがわかる。すなわち、CLT 造床に対しても、西谷らの設計資料がおおむね適用できることがわかる。一方、Hu らの“marginal”の上限を表す一点鎖線は、評価水準④が達成されない◆よりも上側にあり、この線を許容基準とすると、④が達成されない床も許容されることがわかる。ただし、床振動に対する人間の評価はそれを定量化する際のアンケートや検査などの条件により変化することから、許容基準の妥当性については、実在建築物における居住後評価などに関するデータの蓄積を待つ必要があると考えられる。

9. おわりに

木造床における歩行振動の予測評価の枠組み構築を最終的な目的とした研究の第一段階として、CLT 造床を対象に、歩行振動の予測方法確立のための知見を蓄積するとともに、木造床の歩行振動の評価指標を適用してスパン表を例示することを目的とした本研究の結論をまとめると、以下の通りである。

- CLT 造床の歩行振動の予測解析では、床版の異方性を考慮するとともに、床版の曲げ剛性、密度については、構造設計用の規格値ではなく、当該 CLT を対象とした材料試験の結果得られた値を用いると、測定結果とよい対応が得られる。
- 下階の壁の上に床版が載る形式の床壁接合部を有する CLT 造床では、接合部での床版の固定度は、外壁の場合、壁内側の位置にある節点にてピン支持、内壁の場合、壁内側および外側の位置にある節点にてピン支持とすることで、測定結果とよい対応が得られる。また、接合方法の違いは、歩行振動のような微細な振幅領域では、大きくは影響しない。
- CLT 造床の減衰は、一般的な木造床と同様、床上に乗っている人体の影響を受け、乗っている人数が増えるにしたがって大きくなる。床上に2名が乗った場合の CLT 造床の減衰定数は、5%程度である。
- 木造床の歩行振動の予測解析では、歩行加振力については、同一かつ単純化された1歩分の荷重が繰り返される人工的な加振力ではなく、より現実に近い1歩ごとのばらつきや細かな荷重の増減を考慮した加振力を用いると、測定結果とよい対応が得られる。
- スパンを変数とした解析的検討により、CLT 造床で発生する歩行振動を予測し、横山、黒田ら^{3),4)}が提示した評価指標と照合することにより、歩行振動からみた CLT 造床のスパン表を、数段階の要求水準ごとに例示した。
- 上記の解析的検討結果と、Hu ら¹¹⁾および西谷ら¹²⁾が提示した床の固有振動数と集中荷重載荷時の変形量を用いた設計資料との整合性を検討した。その結果、後者とは整合する一方、前者とは整合せず、後者と比較してより大きな振動でも許容される設計資料となっていることを明らかにした。

以上であるが、本研究は限られた仕様の CLT 造床を対象に歩行振動の予測評価の枠組み構築を試行したものであり、例示したス

パン表はあくまでも一例であることに留意する必要がある。

謝辞

本研究は、「平成 27 年度林野庁委託事業 CLT 等新たな製品・技術の開発・普及事業(CLT 住性能向上開発研究)」の歩行振動性能検討 WG、および「平成 27 年度補正林野庁補助事業 地域材利用拡大緊急対策事業(木材の新規用途の導入促進)のうち地域の特性に応じた木質部材・工法の開発・普及等支援事業」の歩行振動 WG の活動の一環として実施されたものである。研究を進めるにあたり種々御助言、御協力いただきました各 WG 委員ならびに日本 CLT 協会の関係各位、CLT 造実在床および試験体床での測定に種々御協力いただきました協同組合オホーツクウッドピアおよび国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所の関係各位に、謝意を表します。

参考文献

- 1)Yutaka Yokoyama: The Measurement Method of Actual House Floor Vibration and the Criterion to Prevent Complaint from Occupants, Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.546, pp.17-24, 2001.8
横山裕: 苦情発生の有無からみた実在住宅床振動の測定条件、境界値の提示、日本建築学会構造系論文集、第 546 号, pp.17-24, 2001.8
- 2)Architectural Institute of Japan: Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration, 2004.5
日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 2004.5
- 3)Yutaka Yokoyama, Eiichi Kuroda, Shintaro Fukuda: A Fundamental Study of Performance Values in High Stiffness Floors, A Method to Evaluate the Habitability of Walking-induced Vibration on Long-span Timber Floors Part 2, Journal of Environment Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.712, pp.509-518, 2015.6
横山裕, 黒田瑛一, 福田眞太郎: 剛性の高い床に適用する性能値に関する基礎的検討, 木造大スパン床の歩行振動の居住性からみた評価方法(その 2), 日本建築学会環境系論文集、第 80 巻, 第 712 号, pp.509-518, 2015.6
- 4)Eiichi Kuroda, Shintaro Fukuda, Yutaka Yokoyama: Fundamental Study on Method to Evaluate the Habitability of Walking-induced Vibration on Long-span Timber Floors, Part 6 Reinvestigation of Performance Values based on Vibration Level, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, D-1, pp.373-374, 2015.9
黒田瑛一, 福田眞太郎, 横山裕: 居住性からみた木造大スパン床の歩行振動の評価方法に関する基礎的研究, その 6 振動レベルに基づいた性能値に関する再検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.373-374, 2015.9
- 5)Architectural Institute of Japan: Standard for the Evaluation of Habitability to Building Vibration, 2018.11
日本建築学会: 建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説, 2018.11
- 6)Yuhei Koyama, Shunsuke Naganuma, Hitoshi Matsushita, Shintaro Fukuda, Yutaka Yokoyama: Fundamental Study on Walking Vibration of Cross Laminated Timber Floor, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, D-1, pp.411-412, 2016.8
小山雄平, 長沼俊介, 松下仁士, 福田眞太郎, 横山裕: CLT 造建築物床の歩行振動性状に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.411-412, 2016.8
- 7)Kazuma Matsuo, Yuhei Koyama, Shintaro Fukuda, Yutaka Yokoyama: Presentation of Example of Span Table of Cross Laminated Timber Floor from the Viewpoint of Walking Vibration, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, pp.595-596, 2017.8
松尾和午, 小山雄平, 福田眞太郎, 横山裕: 歩行振動からみた CLT 造建築物床のスパン表の例示, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.595-596, 2017.8
- 8)Hitoshi Matsushita, Shunsuke Naganuma, Ryota Inoue, Yutaka

- Yokoyama: Performance Values Applicable to Vertical Vibrations Occurring from Various Excitation Sources, Journal of Environment Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.720, pp.153-162, 2016.2
- 松下仁士, 長沼俊介, 井上竜太, 横山裕: 種々の加振源による鉛直振動に適用できる性能値, 日本建築学会環境系論文集, 第 81 巻, 第 720 号, pp.153-162, 2016.2
- 9) Architectural Institute of Japan: Standard for Structural Design of Timber Structures, p.120, 2006.12
- 日本建築学会: 木質構造設計標準・同解説, 一許容応力度・許容耐力設計法一, p.120, 2006.12
- 10) European Committee for Standardization: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, EN 1995-1-1:2004+A1, 2008.6
- 11) Lin Hu, Sylvain Gagnon: Controlling Cross-Laminated Timber (CLT) Floor Vibrations: Fundamentals and Method, World Conference on Timber Engineering Auckland 2012, 269-275, 2012.7
- 12) Shinsuke Nishitani, Hideaki Moritoki, Eiichi Kuroda, Yutaka Yokoyama: Study on Design Method for Long-span Timber Floors to Prevent Vibration Hazard, Relationship between Assessment of Walking Vibration and Vibration Characteristics of Long-span Timber Floors, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, D-1, pp.359-360, 2015.9
- 西谷伸介, 守時秀明, 黒田瑛一, 横山裕: 振動障害のない木造大スパン床の設計方法の検討, 在来軸組構法大スパン床の歩行振動の評価と固有振動数および剛性の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.359-360, 2015.9
- 13) Ken-ichi Sugimoto, Noboru Nakamura et al.: Relationship between Vertical Load Properties of Floors and Human Sensory Evaluation of Walking Vibration in Wooden Schools and Offices I., Static and Dynamic Properties of Large-span Wooden Floors, Mokuzai Gakkaishi, Vol.62, No.4, pp.101-107, 2016.7
- 杉本健一, 中村昇ら: 木造校舎および事務所の床の鉛直荷重に対する性能と歩行振動に対する感覚評価との関係(第 1 報) 木造大スパン床の静的および振動性状, 木材学会誌, Vol.62, No.4, pp.101-107, 2016.7
- 14) Ken-ichi Sugimoto, Noboru Nakamura et al.: Relationship between the Vertical Load Properties of Floors and Human Sensory Evaluations of Walking Vibration in Wooden Schools and Offices II., Possibility of a Tentative Design Target for Large-span Wooden Floors according to Human Sensory Evaluations of Walking Vibration, Mokuzai Gakkaishi, Vol.63, No.2, pp.98-107, 2017.3
- 杉本健一, 中村昇ら: 木造校舎および事務所の床の鉛直荷重に対する性能と歩行振動に対する感覚評価との関係(第 2 報) 歩行振動の感覚評価による木造大スパン床の設計目標提案の可能性, 木材学会誌, Vol.63, No.2, pp.98-107, 2017.3
- 15) Shuzo Suzuki, Eiichi Fujino, Hiroyuki Noguchi: Experimental Study on Effect of Human-load on Vertical Dynamic Characteristics of Wooden Floors (Part 1), Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.585, pp.123-129, 2004.11
- 鈴木秀三, 藤野栄一, 野口弘行: 木造床の鉛直振動特性に及ぼす人間荷重の影響に関する実験的研究(第 1 報), 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, pp.123-129, 2004.11
- 16) Eiichi Fujino, Shuzo Suzuki, Hiroyuki Noguchi: Experimental Study on Effect of Human-load on Vertical Dynamic Characteristics of Wooden Floors (Part 2), Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.589, pp.137-142, 2005.3
- 藤野栄一, 鈴木秀三, 野口弘行: 木造床の鉛直振動特性に及ぼす人間荷重の影響に関する実験的研究(第 2 報), 日本建築学会構造系論文集, 第 589 号, pp.137-142, 2005.3
- 17) Eiichi Fujino, Shuzo Suzuki, Hiroyuki Noguchi: Dynamic Response of Wooden Model Floor Subjected to Impact Force, Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.591, pp.107-112, 2005.5
- 藤野栄一, 鈴木秀三, 野口弘行: 衝撃加振力を受ける木造梁床モデルの鉛直振動応答に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 591 号, pp.107-112, 2005.5
- 18) Shuzo Suzuki, Yukitaka Ihara, Eiichi Fujino: Experimental Study on Vertical Dynamic Characteristics of Light Frame Joist Floor, Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.676, pp.905-910, 2012.6
- 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, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 676 号, pp.905-910, 2012.6
- 19) Shuzo Suzuki, Yukitaka Ihara, Eiichi Fujino: Dynamic Response of Light Frame Joist Floor Subjected to Impact Force, Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.677, pp.1099-1104, 2012.7
- 鈴木秀三, 井原行孝, 藤野栄一: 衝撃加振力を受ける木造根太床の鉛直振動変位応答に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 677 号, pp.1099-1104, 2012.7
- 20) Shuzo Suzuki, Yukitaka Ihara, Eiichi Fujino: Vertical Dynamic Characteristics and Impact Coefficient of Light Frame Joist Floors with Opening, Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.678, pp.1265-1271, 2012.8
- 鈴木秀三, 井原行孝, 藤野栄一: 有開口木造根太床の鉛直振動特性と衝撃加振特性係数に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 678 号, pp.1265-1271, 2012.8
- 21) Shuzo Suzuki, Yukitaka Ihara: Effects of Condition and Uneven Distributed Load on Vertical Dynamic Characteristics of Light Frame Joist Floors, Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.682, pp.1897-1903, 2012.12
- 鈴木秀三, 井原行孝: 木造根太床の鉛直振動特性に及ぼす支持条件と偏在荷重の影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 682 号, pp.1897-1903, 2012.12
- 22) Hidenori Ono, Yutaka Yokoyama: Study on Vertical Vibration of Building Floors Occurred by Human Actions and Its Indicating Method from a Viewpoint of Human Sense, In the Case that the Vibration Source and Receiver are the Same, Journal of Structure and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.381, pp.1-9, 1987.11
- 小野英哲, 横山裕: 人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究 一振動発生者と受振者が同じ場合一, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 381 号, pp.1-9, 1987.11
- 23) Architectural Institute of Japan: Recommendations for Loads on Buildings, 2015.2
- 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015.2
- 24) Architectural Institute of Japan: Guidebook of Recommendations for Loads on Buildings, 2016.2
- 日本建築学会: 建築物荷重指針を活かす設計資料 1, 2016.2
- 25) Yutaka Yokoyama: Characteristics of Walking Vibration of Woody Floor and Design for Habitability, Panel Discussion Document of Structure Division (Timber Structure) of AIJ Convention, 2017.8
- 横山裕: 歩行振動に対する木質系床の振動性状と知覚および設計, 2017 年度日本建築学会大会(中国)構造部門(木質構造)パネルディスカッション資料, 2017.8
- 26) Editing Committee of Design and Construction Manual for CLT Building: Design and Construction Manual for Building Using CLT, 2016.10
- CLT 設計施工マニュアル編集委員会編: 2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, 2016.10
- 27) Japan Cross Laminated Timber Association: Development of Wood Frame Construction Building Using CLT as Floor Panel, Subcontracting Business Technical Data of 2013 by Forestry Agency 2014, 2017.11
- 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, 2014 年度林野庁 平成 25 年度補正委託補助事業技術データ, 2017.11

PRESENTATION OF EXAMPLE OF SPAN TABLE OF CROSS LAMINATED TIMBER FLOOR FROM THE VIEWPOINT OF WALKING VIBRATION

Yuhei KOYAMA^{*1}, *Shintaro FUKUDA*^{*2} and *Yutaka YOKOYAMA*^{*3}

^{*1} Dept. of Architecture and Building Eng., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

^{*2} Assist. Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

^{*3} Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

Walking vibration can cause complaints on building floor, especially on timber floor which has less weight and stiffness than concrete slab of reinforced concrete structure or steel structure. However, an evaluation index of AIJ “Guidelines for the evaluation of habitability of building vibration” developed based on studies which investigated human perception to sinusoidal vibration, and has been pointed out that this index shows stricter evaluations to walking vibrations on timber floor. On the other hand, an estimation method of walking vibration on timber floor is not established because of lack of knowledge about material parameters, setting connections and so on.

In this study, as a first step toward establishing the evaluation method and the estimation method, the vibration characteristics of a CLT floor subjected to walking vibrations was measured. Using these result, a finite element model was also created to investigate the influence of varying material properties and boundary conditions on the vibration performance of the floor. Then, via measurement three specimens of CLT floor, the influence of CLT floor-wall connection upon vibration characteristics was investigated. In conclusion, through analytical modeling based on these results, the span table of CLT floor from the viewpoint of walking vibration was presented.

The investigation procedure and result are described as follows;

- 1) Vibration characteristics of a CLT floor was measured through static loading test, dynamic impact test and walking vibration test. It was found that the CLT floor-wall connection is similar to pin support, and the damping ratio with two people on the CLT floor was 5.1%. And it was also found that the *VLT* index which was presented as an evaluation index of walking vibration on timber floor is applicable to walking vibration on CLT floor.
- 2) The finite element model was created based on the investigated results, and the estimation method of walking vibration on CLT floor was considered. As a result, it was found that the walking force using for analysis should not be consisted with same footstep forces which causes bias of frequency characteristics, but be consisted with different footstep forces which has realistic frequency characteristics.
- 3) The vibration characteristics of three types specimens which have different CLT floor-wall connection, using L-shaped angle, using screw vertically, and using screw diagonally, were investigated. As a result, each measured result indicated that there is little difference between these specimens. In particular, the damping ratio in condition of two people on the floor were about 5% on each specimen.
- 4) Based on the results obtained these investigations, the CLT finite element model was created as a general CLT floor, and the analysis about the relationship between the vibration characteristics and the floor span was conducted. As a result, through collating the analyzed *VLT* results with the evaluation index of previous study, the span table of CLT floor from the viewpoint of walking vibration was presented. This span table is different from the span table from the viewpoint of structural safety and can be used to suit the various requirements of the building user. Then, through comparing the analyzed results with two criteria, it corresponds to the criterion developed in Japan, but it doesn't correspond to the criterion developed in foreign country.

(2018年11月9日原稿受理, 2019年3月27日採用決定)