T2R2東京工業大学リサーチリポジトリ Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

題目(和文)	本造大スパン床の歩行振動の評価方法とCLT造床における予測方法
Title(English)	
著者(和文)	小山雄平
Author(English)	Yuuhei Koyama
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11970号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:横山 裕,坂田 弘安,三上 貴正,田村 修次,鍵 直樹
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11970号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
 学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

木造大スパン床の歩行振動の評価方法と CLT 造床における予測方法

令和 2 年 12 月

東京工業大学 環境・社会理工学院 建築学系

小山 雄平

目次

第1章	章 序	多論	•	•	• P.1
1.1	研	究の背景	•	•	• P.2
1.2	研	究の目的	•	•	• P.4
1.3	既	往の研究	•	•	• P.5
1.4	研	究の方法	• •	•	• P.10
第2章	章オ	<造大スパン床の歩行振動の評価方法	•		• P.12
2.1	本	章の目的	•		• P.13
2.2	本	章の研究方法	•		• P.14
2.3	既	往の研究における振動台検査結果と試料床検査結果の比較	•		• P.15
2.4	心	理学的尺度の構成	•		• P.17
2	2.4.1	官能検査の概要	•		• P.17
	(1)	構成する尺度および尺度構成手法	•		• P.17
	(2)	想定する床用途	•		• P.17
	(3)	検査試料	•		• P.19
	(4)	検査員の姿勢,履物	•		• P.24
2	2.4.2	官能検査の経過,結果および心理学的尺度の構成	•		• P.26
2	2.4.3	心理学的尺度相互の関係の検討	•		• P.28
2.5	既	存の性能値の適用性の検討	•		• P.30
2	2.5.1	性能値の概要	•		• P.30
2	2.5.2	検査試料の性能値の測定	•		• P.31
2	2.5.3	心理学的尺度と性能値の関係の検討	•		• P.34
2.6	木	造大スパン床の歩行振動の性能値の検討	•		• P.38
2	2.6.1	加速度と変形の関係の検討	• 6		• P.38
2	2.6.2	既存の性能値の変形に基づく補正方法の検討	• 6		• P.43
2.7	本	章の結論	•	•	• P.55

第3章 C	LT 造床の歩行振動の予測方法	••• P.56
3.1 本重	章の目的	•••P.57
3.2 本重	章の研究方法	••• P.57
3.3 実在	E建築物の CLT 造床を用いた予測方法の検討	•••P.58
3.3.1	対象床の概要	•••P.58
3.3.2	変形特性,振動特性,歩行振動の把握	••• P.60
(1)	静的載荷試験	••• P.60
(2)	動的加振試験	••• P.64
(3)	步行試験	••• P.68
(4)	歩行振動に関するアンケート調査	••• P.70
3.3.3	歩行振動の予測方法の検討	•••P.73
(1)	解析モデルの作成	•••P.73
(2)	固有値解析および静的集中荷重に対する応答解析	••• P.75
(3)	步行応答解析	••• P.79
3.4 CL	T 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	••• P.85
3.4.1	対象床の概要	••• P.85
3.4.2	変形特性,振動特性,歩行振動の把握	•••P.88
(1)	静的載荷試験	•••P.88
(2)	動的加振試験	••• P.89
(3)	步行試験	••• P.90
3.4.3	床壁接合部の接合方法の影響の検討	••• P.91
3.5 CL	T 造床のスパンと歩行振動の関係に関する解析的検討	••• P.92
3.5.1	解析の概要	••• P.92
3.5.2	解析結果	••• P.94
3.5.3	歩行振動からみた CLT 造床のスパン表の例示	••• P.95
3.5.4	固有振動数と静的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	•••P.96
3.6 本重	章の結論	•••P.98

第4章 台	と上げとして根太床が施工された CLT 造床の歩行振動の予測方法	•••P.99
4.1 本:	章の目的	••• P.100
4.2 本:	章の研究方法	••• P.100
4.3 根:	太床施工前後の CLT 造床を用いた予測方法の検討	•••P.101
4.3.1	対象床の概要	•••P.101
4.3.2	変形特性,振動特性,歩行振動の把握	•••P.104
(1)	静的載荷試験	•••P.104
(2)	動的加振試験	•••P.108
(3)	步行試験	•••P.114
(4)	歩行振動に関するアンケート調査	•••P.117
4.3.3	歩行振動の予測方法の検討	•••P.120
(1)	解析モデルの作成	••• P.120
(2)	固有値解析および静的集中荷重に対する応答解析	•••P.126
(3)	步行応答解析	•••P.131
(4)	根太床施工後の CLT 造床に対する木造床の歩行振動の評価	
	方法の適用性の確認	•••P.134
4.4 本:	章の結論	•••P.136
第5章 新	き論 しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しん	•••P.137
参考文献		••• P.140

図目次

図 1.1	本研究のフローチャート	•••P.11
図 2.1	既往の官能検査結果の比較	•••P.16
図 2.2	試料床の概要	•••P.21
図 2.3	認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の関係	•••P.29
図 2.4	住居の居室と事務所の執務室の関係	•••P.29
図 2.5	VLTと心理学的尺度の関係	•••P.35
図 2.6	歩行振動の時刻歴波形の比較の例	•••P.39
図 2.7	VLmax と DLmax の関係	•••P.42
図 2.8	変形に基づく加速度の補正の概要	•••P.44
図 2.9	補正 VLTと気になり具合評価尺度の関係	•••P.46
図 2.10	補正 VLTと心理学的尺度の関係 (α =70, β =0.7)	•••P.49
図 2.11	変形に基づく加速度の補正の概要(補正追加後)	•••P.51
図 2.12	VLT*と気になり具合評価尺度の関係	•••P.53
図 2.13	VLT *と心理学的尺度の関係	•••P.54
図 3.1	対象床の概要	•••P.59
図 3.2	静的載荷試験結果	•••P.62
図 3.3	固有振動数と振動モードの測定結果	•••P.65
図 3.4	歩行振動の測定結果の例	•••P.69
図 3.5	木造床の評価指標の適用結果	•••P.72
図 3.6	解析モデルの概要	•••P.74
図 3.7	固有振動数と振動モードの測定結果と解析結果の比較	•••P.75
図 3.8	静的載荷試験結果および解析結果の比較	•••P.77
図 3.9	建築物荷重指針および設計資料に示された歩行荷重	•••P.79
図 3.10	歩行振動の解析結果	•••P.80
図 3.11	解析に用いた歩行加振力の 1/3 オクターブバンド分析結果	•••P.82
図 3.12	ランダムな歩行加振力による歩行振動の解析結果	•••P.84
図 3.13	試験体床の概要	•••P.86
図 3.14	スパン表作成に用いた解析モデルの概要	•••P.93
図 3.15	_紀 , D ₁₀₀ および歩行振動評価の関係	•••P.97
図 4.1	CLT 造床の概要	•••P.103
図 4.2	静的載荷時の変形の測定結果	•••P.106
図 4.3	振動モードの測定結果	•••P.110
図 4.4	歩行振動の測定結果の例	•••P.116
図 4.5	木造床の評価指標の適用結果(根太床施工前)	•••P.119
図 4.6	解析モデルの概要	•••P.123
図 4.7	ハーフラップジョイントの解析モデル	•••P.125
図 4.8	振動モードの解析結果	•••P.127

図 4.9	静的載荷時の変形の測定結果と解析結果の比較	•	•	• P.:	129
図 4.10	歩行振動解析結果の一例	•	•	• P.:	132
図 4.11	木造床の評価指標の適用結果(根太床施工後)	•	•	• P.:	135

表目次

表 2.1	官能検査の概要	•••P.18
表 2. 2	下地床の基本的特性	•••P.20
表 2.3	二重床の静的載荷時変形量	•••P.20
表 2.4	分散分析結果	•••P.26
表 2.5	<i>VLT</i> の測定結果	•••P.33
表 2.6	Dmax, DLmaxの測定結果	•••P.41
表 2.7	各判断範ちゅうに対応する VLT *	•••P.54
表 3.1	減衰定数の算出結果	•••P.67
表 3.2	VLmax, DLmaxと VLT *の測定結果	•••P.69
表 3.3	アンケート調査の概要	•••P.70
表 3.4	<i>VLmax, DLmax と VLT</i> *の測定結果と解析結果の比較	•••P.83
表 3.5	CLT 造試験体床の各試験結果	•••P.91
表 3.6	スパンをパラメータとした解析の結果	•••P.94
表 3.7	歩行振動からみた CLT 造床のスパン表	•••P.95
表 3.8	構造安全性からみた CLT 造床のスパン表	•••P.95
表 4.1	載荷点と測定点の組み合わせ	•••P.105
表 4. 2	固有振動数の測定結果	•••P.109
表 4.3	減衰定数の測定結果	•••P.113
表 4. 4	歩行振動の測定結果	•••P.115
表 4.5	アンケート調査の概要	•••P.117
表 4.6	固有振動数の測定結果と解析結果の比較	•••P.127
表 4.7	歩行振動の測定結果と解析結果の比較	•••P.132

写真目次

写真 2.1	試料床の様子	•••P.22
写真 2.2	二重床の脚の様子	•••P.23
写真 2.3	振動台の様子	•••P.25
写真 2.4	試料床検査の様子	•••P.27
写真 2.5	振動台検査の様子	•••P.27
写真 2.6	測定機器設置の様子(試料床)	•••P.32

測定機器設置の様子(振動台)	•••P.32
対象建築物の外観	•••P.59
対象建築物の内観	•••P.59
L字金物	•••P.59
静的載荷試験の様子	•••P.61
動的加振試験の様子(振動モード測定)	•••P.65
動的加振試験の様子(減衰測定,床上2人の受振者の場合)	•••P.67
歩行試験の様子	•••P.68
アンケート調査の様子	•••P.71
試験体の様子	•••P.86
床壁接合部の様子	•••P.87
測定機器設置の様子	•••P.88
静的載荷試験の様子	•••P.88
動的加振試験の様子(固有振動数測定)	•••P.89
動的加振試験の様子(減衰測定,床上2人の受振者の場合)	•••P.89
歩行試験の様子	•••P.90
対象とした CLT 造建築物の外観	•••P.103
レーザー変位計設置の様子	•••P.105
静的載荷試験の様子	•••P.105
動的加振試験の様子(振動モード測定)	•••P.109
動的加振試験の様子(減衰測定)	•••P.113
歩行試験の様子	•••P.115
アンケート調査の様子	•••P.118
	 測定機器設置の様子(振動台) 対象建築物の内観 上字金物 静的載荷試験の様子 動的加振試験の様子(振動モード測定) 動的加振試験の様子(減衰測定,床上2人の受振者の場合) 歩行試験の様子 アンケート調査の様子 謝(本) 軟健装合部の様子 動的加振試験の様子(固有振動数測定) 動的加振試験の様子(減衰測定,床上2人の受振者の場合) 歩行試験の様子 動的加振試験の様子(減衰測定,床上2人の受振者の場合) 歩行試験の様子 対象とした CLT 造建築物の外観 レーザー変位計設置の様子 静的載荷試験の様子(振動モード測定) 動的加振試験の様子(減衰測定) 動的加振試験の様子(減衰測定) 動的加振試験の様子(振動モード測定) 動的加振試験の様子(減衰測定) 動的加振試験の様子(減衰測定) 歩行試験の様子 歩行試験の様子 アンケート調査の様子

第1章

序論

1.1 研究の背景

建築物の床上で発生する振動(以降"床振動"と記す)は、建築物の居住性を決定す る要因の一つである。床振動は、近隣を通る鉄道や建築物近傍の道路を通過するトラック などの大型車両、工事現場で動作する重機などの外部加振源によって発生する場合や、空 調設備などの建築物の設備機器や、床上で動き回る人間などの内部加振源によって発生す る場合があり、これらの加振源によって床振動は常に発生している。通常、これらの床振 動を人間は体感できないか、体感しても気にならない程度でしかないが、発生する床振動 が大きくなると、利用者に不快感,不安感を与える原因となる。このような大きな床振動 が日常的に発生する状態になると、建築物利用者から苦情が発生し、設計者,施工者の責 任が問われる事態になりかねない。

これらの床振動のうち、床上を人間が歩行することにより発生する振動(以降"歩行 振動"と記す)は、日常的に生じる床振動であり、苦情発生の原因となる可能性が高い。 特に、RC 造やS 造建築物のコンクリートスラブと比較して、軽量で低剛性な木造建築物 の床(以降"木造床"と記す)では、より一層の注意が必要である。また、近年、公共施 設や商業施設などの中,大規模建築物を木造で建築する事例が増加しており、それにとも なって8畳間より大きなスパンの木造床(以降"木造大スパン床"と記す)が増加してい る。これらの木造大スパン床で発生する歩行振動は、一回の歩行における歩数が多くなる 傾向にあり、問題となる可能性が高い。

このような歩行振動に対する人間の感覚,評価を明らかにするための規準として、現 在、日本建築学会が発行している「建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説」 (2018年改訂)¹⁾(以降"居住性能評価規準"と記す)が広く普及している。しかしなが らこの規準は、前身の「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」(2004年改 訂)²⁾が、もともと振動台から出力される正弦振動を人間に体感させる官能検査結果を基 に作成されており、複数の振動数成分が複合されかつ振幅の時間変化をともなう歩行振動 をこの指針で評価するには、工学的判断が求められてきた。RC 造や S 造建築物床では、 データの蓄積が進みいくつかの実用的な方法が考案されてきたが、これらの方法を木造床 に適用すると、実状以上に悪い評価となることが指摘されていた。また、改定後の居住性 能評価規準では、歩行振動などの非定常的な振動に対し振動の継続時間の要因を加味する 方法が規定されたが、この方法は RC 造や S 造建築物でのデータに基づいて規定されたも

- 2 -

のであり、木造床については適用範囲外としている。

また、この規準では、木造床の歩行振動の評価方法については、同じく日本建築学会 が発行している「床性能評価指針」³⁾に記載されているとしているが、床性能評価指針は 木造,軽量鉄骨造建築物の8畳間程度の大きさまでの空間の床を対象としており、木造大 スパン床の歩行振動は対象外となっている。この現状に対し、横山ら^{4)~6)}は、木造大スパ ン床の歩行振動の評価方法について、比較的剛性の低い床を対象とした評価方法と高い床 を対象とした評価方法を提示しているが、それぞれの評価方法を適用できる床の棲み分け が必要であると述べており、木造大スパン床の歩行振動を一律に評価できる方法の確立に は至っていない。

一方で、歩行振動問題への対策としては、苦情が発生してから事後対策することは非 常に困難である。よって、建築物の設計段階で、竣工後に発生しうる歩行振動を予測し評 価することで、歩行振動問題を事前に回避することが求められている。現在、構造設計者 は計算によって床の固有振動数を求め、歩行振動が問題となりやすい床の固有振動数を避 ける手法で事前に対策するのが一般的となっているが、発生しうる歩行振動を正確に予測 しているとは言い難い。あるいは、専門知識を有する一部の技術者は、RC 造や S 造建築 物の床を、汎用解析プログラムを用いて解析モデル化し、歩行加振力に対する応答解析を 行うことで、発生しうる歩行振動を予測する手法を用いるケースも見受けられる。しかし ながら、木造床の歩行振動予測においては、木材が有する異方性,部材同士の接合部に見 られる木造特有の微小な隙間の設定方法,応答解析に用いる歩行加振力の設定方法など の、解析に必要な知見がほとんど無く、正確な歩行振動予測が実施された例は見受けられ ない。

- 3 -

1.2 研究の目的,範囲

本研究では、木造大スパン床の歩行振動を対象に、振動とそれに対する人間の振動感 覚,評価との関係を検討し、木造床とRC造やS造建築物床に一律に適用できる評価方法 を確立することを目的とする。それとともに、木造大スパン床の一種である CLT (Cross Laminated Timber: 直交集成板)を用いた床(以降"CLT造床"と記す)に有限要素法 を適用して解析モデル化し、歩行加振力を入力して応答解析を実施して、CLT造床の振 動特性を再現できる解析方法を検討することで、CLT造床の歩行振動の予測方法を確立 することも目的とする。これらの評価方法と予測方法を合わせることにより、歩行振動か らみた木造床の設計が合理的かつ効率的に行えるようになると考える。

本研究の対象範囲に関して、まず、木造大スパン床の歩行振動の評価方法について は、床上を1人の人間が歩行した際に生じる鉛直方向の歩行振動を、床上の別の人間が体 感する場合とし、水平方向に生じる振動や複数人の同時歩行による歩行振動、歩行者自身 が歩行振動を体感する場合は対象外とする。また、本研究はあくまで歩行振動とそれに対 する人間の振動感覚,評価との関係を明らかにすることを目的とするものであり、建築物 供用後の実際の居住後評価は対象外とする。なお、実際の居住後評価と本研究結果の関係 は、今後別途検討する予定である。つぎに、木造大スパン床の歩行振動の予測方法の検討 については、今後、木造の中,大規模建築物で主流となると思われる CLT 造床を対象と する。ここで、CLT 造床は、板状材料であることから、梁,根太などの複数の部材で構 成されている木造在来軸組構法床よりも比較的容易に解析モデル化できると考えられる。 ただし、CLT 造床で得られる予測方法に関する知見の一部は、他の構法の木造大スパン 床の歩行振動の予測方法にも適用できると推察される。

- 4 -

1.3 既往の研究

歩行振動の評価指標は、2018 年 11 月に改訂された居住性能評価規準 1)に提示されてい るものが、国内において一般的となっている。この規準は、歩行振動とそれに対する人間 の評価との関係を提示しており、歩行振動の 1/3 オクターブバンド分析結果から得られ る、各バンドの中心周波数と加速度振幅の最大値を照合する方法で評価を行うものであ る。なお、この規準では、歩行振動を「振幅,振動数またはその両方が時間的に大きく変 動する振動」である"非定常的な振動"と分類しており、このような振動は、人間が振動 を体感している"継続時間"が人間の評価に大きく影響するとして、振動の継続時間が短 いほど評価が緩和される補正を設定している。しかしながらこの規準は、木造住宅の居室 の床や、乾式二重床,フリーアクセスフロアといった二重床など、比較的軽量で剛性が低 い床は、適用対象外としている。

さらに、居住性能評価規準には、木造床の歩行振動の評価方法として、床性能評価指 針 ³⁾に記載されている評価方法を参照するよう記されている。この指針では、床振動の発 生しにくさ、すなわち"不振動性"を表す性能値として、横山らが開発した、歩行振動を 再現できる床振動測定装置 ^{7)~14)}を使用することで測定される変形の最大値および変形速 度と、振動の加速度振幅がピークから 14.1cm/s²まで減衰するのに要する時間から下式に したがって算出される *VI(2)* を挙げている。

 $VI(2) = 0.2\log(D_{max}) + 0.5\log(V_m) + \log(T_h)$ (1.1)

ここで、*D_{max}*:変形の最大値(cm)

V_m: 変形速度(cm/s)

T_h:加速度が14.1cm/s²まで減衰するのに要する時間(s)

また、この指針では、居住者から苦情が発生しない目安として、*VI(2)* ≦ -0.9 を推奨値 として提示している¹⁵⁾。しかしながら、この指針は 8 畳間程度の大きさまでの木造,軽 量鉄骨造建築物の床を対象としており、本研究で対象とする木造大スパン床は対象範囲外 となっている。

木造床の歩行振動について記述している他の規準として、日本建築学会が発行する 「木質構造設計規準・同解説 一許容応力度・許容耐力設計法一」¹⁶⁾(以降"木質構造設 計規準"と記す)が挙げられる。木質構造設計規準では、歩行振動障害が発生しないこと を目的として、固定荷重や積載荷重が全て載った場合の梁や根太のたわみを、スパンの

- 5 -

1/300以下かつ 2cm 以下とすることを推奨している。しかし、この指標は等分布荷重に対 するたわみを制限するものであり、人の歩行のような集中荷重を想定する場合、設計指標 を 1.0~0.5cm とすることが多いとも記述している。さらに、この指標にこだわることな く、建物の用途や利用者の要求に配慮して設計を行う必要があるとも述べている。

歩行振動からみた木造床の簡便な設計指標を提示している研究として、西谷ら ¹⁷が挙 げられる。西谷らは、横山,黒田 ^{5),6)}らの木造大スパン床の歩行振動に関する官能検査結 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、 "やや気になる"という評価より良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。

 $D_{100} \leq 0.01 f_0$

(1.2)

ここで、D₁₀₀:980Nの集中荷重載荷時の変形量(mm)

fo:床の1次固有振動数(Hz)

また、杉本、中村ら^{18),19)}も、木造校舎および木造事務所の大スパン床を対象に、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。

一方、海外では、集中荷重載荷時の変形量や固有振動数を用いた規準や設計指標が主 流になっている。National Building Code of Canada²⁰⁾は、1kNの静的な集中荷重を床中 央に載荷した場合のたわみの制限値を提示している。この制限値は、カナダの600以上の 実在する住宅の床を対象に行われたアンケート調査結果を基に作成されたものである。 Eurocode 5²¹⁾では、床の1次固有振動数は8Hz以上を確保することを前提としたうえで、 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。また、この照合に用いる卓越振動数と単位インパルス荷重あたり の応答速度を求めるための概算式も提示している。

また、設計指標を提示している研究として、Dolan ら²²⁾は、実験室内での試料床や供用されている実在床計 86 個を対象としたアンケート調査結果を基に、居住者のいる床の 固有振動数を 14Hz 以上とする指標を提示している。Hamm ら²³⁾は、95 種の木造床を対 象に"高い性能の床"と"低い性能の床"の2種の指標を提示しており、高い性能の床で は固有振動数 8Hz 以上,2kN の静的集中荷重載荷時のたわみ 0.5mm 以下,最大加速度

- 6 -

0.05m/s²、低い性能の床では固有振動数 6Hz 以上, 2kN の静的集中荷重載荷時のたわみ 1.0mm 以下,最大加速度 0.1m/s² としている。また、近年普及しつつある CLT について も同様の研究がなされており、Hu ら²⁴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。

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

(1.3)

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)

しかし、上記に示した海外の設計指標に用いられるたわみや応答速度などのパラメー タと歩行振動は直接的に結び付けられておらず、歩行振動に対する人間の評価との関係性 は明確にされていない。

これらの設計指標に対して、ISO2631-2²⁵⁾では、応答加速度に振動数補正を掛け、その 二乗平均平方根を用いて求められる RF (Response Factor) 値という指標を提示してい る。また、この RF 値の規準値として、オープンオフィスでは 2, 一般的なオフィスでは 4 以下を提示している。この指標は、歩行振動から抽出されるパラメータを用いているも のの、最大値のみを参照しているため、例えば一度の歩行で最大値と同程度の振動が複数 回発生するような振動の評価は、実際の評価より良くなる恐れがあることが容易に推察で きる。

木造床の歩行振動に関する規準,指針および設計指標の現状については上述の通りで あるが、筆者らの研究グループは、木造床だけでなく RC 造,S 造建築物の床の歩行振動 の評価方法についても長年研究を行い、数多くの知見を蓄積している。一部はこれまでの 記述と重複するが、それらを順を追って整理する。

まず、小野,横山ら ^{7)~14)}は、歩行時の 1 歩にともなって発生する床振動に対し、発生 する変形の最大値および変形速度と、振動がある一定の大きさにまで減衰する時間の要因 を抽出し、人間の振動感覚,評価と対応する性能値 *VI(2)*を提示した。また、横山 ¹⁵⁾は、 複数の木造,軽量鉄骨造の実在する住宅の床を対象に、床振動による苦情発生の有無と *VI(2)*の関係を検討し、苦情発生の境界値として *VI(2) = -*0.9を提示している。この研究 結果は、先述の床性能評価指針の根拠となっている。

- 7 -

また、横山ら²⁶⁾は、RC造床,S造床での歩行時に発生する周期的または連続的な振動 に対し官能検査を行い、人間の振動感覚,評価には振動数と振動の継続時間の影響が大き いことを明らかにした。次いで井上,横山ら^{27),28)}は、RC造床,S造床での歩行振動の評 価に、振動の最大加速度と振動の継続時間が影響していることを明らかにし、人間の振動 感覚,評価と対応する性能値として、振動レベル²⁹⁾の最大値VLmaxと振動レベルが参照 値 70dB以上となっている継続時間Tから算出されるVLmax+20log(T¹⁴)を提示してい る。さらに松下,長沼ら³⁰⁾は、交通振動や歩行振動など、種々の加振源による鉛直振動 を一律に評価できる性能値について検討し、振動台を用いた官能検査の結果と、振動レベ ルから抽出する物理量,レベル処理時の時定数,振動の継続時間の参照値を組み合わせた 計56種の性能値の対応を検討した結果、下式で算出される性能値VLTが最も良く対応す ると結論付けている。

 $VLT = VLmax + 20\log(T^{1/4})$

ここで、*VLmax*: *VL*の最大値(dB)

VL:下式で得られる *a'rms*のレベル換算値(dB)

 $VL = 20\log(a'_{rms} / a_{0rms}) \tag{1.5}$

a'rms:「JIS C 1510-1995 振動レベル計」²⁹⁾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 25ms で実効値処理して得られる加速度実効値(m/s²)

(1.4)

*a*_{0rms}: 基準の加速度実効値(1×10⁻⁵m/s²(rms))

T: VL が 60dB 以上となっている時間の総和(s)

ここで、時定数は25ms,振動の継続時間の参照値は60dBである。

これらの研究と並行して、横山ら 4は、8 畳間以上の広さの木造大スパン床の歩行振動 を対象に官能検査を実施して歩行振動の評価方法について検討を行い、複数歩連続する歩 行振動の 1 歩ごとに性能値 VI(2)を算出し、それらの総和である SVI(2)を人間の振動感 覚,評価と対応する性能値として提示している。また、横山,黒田ら 5).6)は、比較的剛性 の高い木造大スパン床についても同様に検討を行い、変形が比較的小さいため SVI(2)で は評価できないことを明らかにしたうえで、これらの歩行振動を評価できる性能値とし て、振動レベルの最大値と、振動レベルが 60dB 以上の大きさとなっている継続時間を合 成した VLmax + 20Log(T^{1/4}) (すなわち VLT) を提示している。この文献にて横山ら は、文献 4)との関係について、SVI(2)を適用すべき床と VLT を適用すべき床について、

- 8 -

剛性の違いによる線引きが必要であることを述べて結んでいる。さらに、横山ら³¹⁾は、 比較的剛性が高い木造大スパン床上に仕上げとして剛性が低い乾式二重床が施工されてい る床を対象に官能検査を実施し、VLT を振動感覚上等価な SVI(2)に換算する式を導出し たうえで、大きな変形をともなう二重床上の直近の1歩から VI(2)、大きな変形をともな わない遠方の数歩から VLT を算出し両者を複合することで、これらの床での歩行振動も 評価できることを明らかにしている。この研究は基礎的段階ではあるが、木造床の歩行振 動の評価には、遠方からも伝搬してくる連続的な振動に加え、直近の1歩による変形が影 響することを示唆している。

木造床の歩行振動の予測方法に関連する研究として、鈴木,藤野ら^{32)~38)}が挙げられ る。鈴木,藤野らは、構法,仕様が多岐にわたる種々の木造試料床を作成し、固有振動 数,静的荷重に対する変形量を測定するとともに、梁の振動理論などを用いて計算によっ て算定した固有振動数および変形量と比較することで、木造床の振動特性の予測方法を検 討している。しかし、歩行振動そのものの予測については言及していない。

なお、有限要素法などの解析手法を用いて、歩行振動を予測した研究例は、RC 造や S 造建築物床に関しては多々あるものの、木造床を対象とした研究例は見当たらない。 1.4 研究の方法

本研究の手順は、以下の通りである。図1.1に、本研究のフローチャートを示す。

第2章では、まず、木造床を対象とした既往の研究結果と、RC 造やS 造建築物床を対 象とした既往の研究結果について、振動とそれに対する人間の感覚,評価との関係を比較 し、両者の差を考察する。次に、木造大スパン床および木造大スパン床上に二重床を載せ た床からなる試験体床を検査試料とした官能検査と、振動台で再現される振動を検査試料 とした官能検査を、同一の検査員を用いて実施し、両者の結果の差を既往の研究結果と比 較したうえで、検査員に提示した歩行振動の測定結果から、両方の検査結果に共通に適用 できる人間の振動感覚,評価と対応する物理的指標(以降"性能値"と記す)を設定す る。また、歩行振動測定結果からこの性能値を算出し、官能検査結果との関係図と照合す る方法を、木造床とRC造やS造建築物床に一律に適用できる歩行振動の評価方法として 提示する。

第3章では、今後木造中,大規模建築物の床として主流となると思われる CLT 造の床 を対象に、歩行振動の予測方法について検討を行う。具体的には、実在する CLT 造床の 特性を把握したうえで、有限要素法を用いた解析モデルを作成し、歩行加振力に対する応 答解析を行う。この過程で、材料の物性値、CLT 床版相互の接合部における応力伝達、 減衰特性,入力する歩行加振力のばらつきの影響など、木造床特有の課題についてそれぞ れ検討を行い、実際の測定結果の再現を試みる。また、歩行振動に影響をおよぼすと思わ れる床版と壁の接合方法の影響について、仕様の異なる複数の実大床試験体を用いて検討 を行う。以上の検討結果に基づいて、予測方法を確立したうえで、一般的と思われる仕様 を想定した CLT 造床の解析モデルを作成し、このモデルのスパンをパラメータとして歩 行振動解析を実施することで、歩行振動からみた CLT 造床のスパン表を例示する。

第4章では、CLT造床で今後一般的となると思われる、床版上に架構式の仕上げを施す 床の一例として、仕上げとして根太床を CLT 造床上に施工する仕様となっている実在建 築物床を対象に、第3章と同様に歩行振動の予測方法について検討を行う。この過程で、 第3章で得られたモデル化手法の適用性を確認ならびに適宜修正するとともに、根太床の モデル化手法について検討を行い、実際の測定結果の再現を試みる。

第5章では、本研究の結論を述べる。



図 1.1 本研究のフローチャート

第2章

木造大スパン床の歩行振動の評価方法

既往の研究の結果、歩行振動に対する人間の感覚,評価と対応する性能値として、人間の振動感覚の振動数特性に応じた補正を施した加速度振幅の最大値に、振動の継続時間の要因を加味した性能値が提示されており、振動台で再現された RC 造や S 造建築物床の振動、および試料床で再現された木造床の振動にそれぞれ適用可能であることが、別個に実施された研究により明らかになっている ^{5),6),30)}。しかし、これらの研究成果を比較すると、人間の振動感覚,評価と性能値の関係は、振動台で再現された振動と試料床で再現された振動で異なっている。本章では、両者の違いの原因となっている新たな要因について検討したうえで、RC 造や S 造建築物床にも木造床にも共通に適用できる歩行振動の評価方法を確立することを目的とする。

2.2 本章の研究方法

本章は以下の手順で進める。

- 1)既往の研究で木造大スパン床の歩行振動を対象に、床上を実際に人間が歩行し、受振位置で検査員に体感してもらう官能検査(以降"試料床検査"と記す)を実施した研究結果と、振動台による加振で振動台上の検査員に振動を体感してもらう官能検査(以降"振動台検査"と記す)を実施した研究結果を比較し、人間の振動感覚,評価と第1 章で述べた性能値 VLTの関係の差を明らかにする。
- 2)仕様の異なる複数の木造大スパン床を下地床として、複数の木質系乾式二重床を仕上げとして、それぞれ作製し、これらの組み合わせの中から試料床を選定して試料床検査を実施する。また、試料床検査と並行して、この試料床で発生する歩行振動を測定し、この振動を基に振動台で出力する波形を複数作成する。この波形を用いて、試料床検査と同一の検査員により、振動台検査を実施する。これらの官能検査結果が、既往の研究結果と整合しているかを確認した上で、両者の評価の差を明らかにする。
- 3)試料床検査、および振動台検査において検査員に提示した振動の比較に基づいて、検査結果の違いに影響する新たな要因を抽出する。さらに、この要因を盛り込んだ性能値の補正方法を検討し、補正性能値を用いた RC 造やS 造建築物床にも木造床にも共通に適用できる歩行振動の評価方法を確立する。

2.3 既往の研究における振動台検査結果と試料床検査結果の比較

種々の木造大スパン床の歩行振動を対象に試料床検査を実施した横山,黒田ら ^{5),6)}の検 査結果と、木造大スパン床上に二重床を設置した床の歩行振動を対象に試料床検査を実施 した横山ら ³¹⁾の検査結果、および種々の加振源による振動を対象に振動台検査を実施し た松下ら ³⁰⁾の検査結果を比較した。ただし、松下らの振動台検査結果については、加振 源が歩行によるものを比較対象とした。

横山,黒田ら^{5),6)}は、18種の木造大スパン床の歩行振動を対象に試料床検査を実施し、 人間の振動感覚,評価と対応する性能値として VLmax + 20log(T^{1/4})を提示している。こ の VLmax 算出時の時定数は 10ms としている。また、横山ら³¹⁾は、木造大スパン床上に 乾式二重床が施工されている計 14種の歩行振動を対象に試料床検査を実施し、性能値 VLT(時定数は 10ms) との対応を検討している。その結果、VLTを用いると、横山,黒 田ら^{5),6)}の検査試料の VLTが同程度の試料と比較して、評価が良くなることを明らかにし ている。一方で、松下ら³⁰⁾の振動台検査では、歩行振動を基に作成した 35 個の検査試料 を用いており、人間の振動感覚,評価と対応する性能値として VLT(時定数は 25ms)を 提示している。

以上3つの官能検査結果を、松下ら300の検討結果を参考に、時定数25msの性能値VLT を用いて比較する。以降、本研究では、単に"VLT"と記載する場合、時定数25msの ものを指すこととする。図2.1に、3つの検査結果とVLTの対応を示す。図の青線は松下 ら300の対応の中心傾向,赤線は横山,黒田ら^{5),6)}の対応の中心傾向を表している。図よ り、それぞれの官能検査結果とVLT は良く対応しているものの、同じ判断範ちゅうに対 するVLT には明確に差があり、小さい順に(a)松下ら³⁰⁾の振動台検査,(b)横山,黒田 ら^{5),6)}の試料床検査,(c)横山ら³¹⁾の試料床検査となっている。このことは、試料床検査 が振動台検査に比べて、同程度の振動に対する人間の評価が良いことを表している。ま た、図に示されている青線と赤線の比較より、(a)と(b)では同じ判断範ちゅうに対する VLTの差が9dB程度あることがわかる。さらに、(c)に示した赤線とそれぞれのプロット との比較より、(b)と(c)では同じ判断範ちゅうに対するVLTの差は最大で10dB程度あ ることがわかる。

- 15 -



2.4 心理学的尺度の構成

本節では、2.3 の比較において含まれていた検査員の違いを除くため、同一の検査員を 用いて試料床検査と振動台検査を実施し、心理学的尺度を構成したうえで結果を比較す る。

2.4.1 官能検査の概要

以下に、試料床検査と振動台検査の概要について述べる。表 2.1 に、官能検査の概要を 示す。

(1) 構成する尺度および尺度構成手法

試料床検査,振動台検査のいずれの検査でも、構成する尺度は「認知大きさ尺度」, 「気になり具合評価尺度」の2種とした。また、尺度構成手法は系列範ちゅう法³⁹⁾とした。

(2) 想定する床用途

官能検査時に検査員に想定してもらう床用途は、木造大スパン床に多いと考えられる 「住居の居室」および「事務所の執務室」の2種とした。ただし、検査員には「住居の居 室」と「事務所の執務室」という言葉がどのような空間を指すかは具体的に説明すること はせず、検査員の経験に基づく想定に委ねることとした。

	(1)試料床検査	(2)振動台検査	査[同じ振動]	(3)振動台検査[異なる振動]
構成する尺度	認知大きさ尺度,気になり具合評価尺度の2種			
尺度構成手法	系列範ちゅう法			
想定する床用途	住居の居室,事務所の執務室の2種			
質問事項	この床振動は、住居の居室でくつろいでいる際に/事務所で執務している際に感じたとしたら、			
	認知大きさ尺度		気になり	0具合評価尺度
	①非常に大きく感じる		①非常	こ気になる
	②やや大きく感じる		2 · · · · · · ·	
shull blar from L	③はっきり気付く		③かなり気になる	
判断 転ちゆう	④かすかに気付く		(4) · · · · · · ·	
	⑤気付くか気付かないかの境界		⑤やや気になる	
	⑥ほとんど気付かない		$(6) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot$	
	⑦全く気付かない		⑦全く多	気にならない
検査試料	木造大スパン床と二重床の 組み合わせ20種の歩行振動	試料床検査試料を基に作成した12種の歩行振動		F成した12種の歩行振動
加振方法	試料床上の歩行路を歩行者 (成人男性,身長175cm, 体重80kg)が2Hzで5回歩行	試料床で5回測定した歩行振動の VLTが平均値に近いものを 調整し振動台で5回入力 試料床で5回測定した歩行打 調整し振動台で5回入力		試料床で5回測定した歩行振動を 調整し振動台で各1回入力
検査員	成人	.男女10名(年齡21~	47歳, 体重40~74	kg)
受振姿勢	立位(リラックスした状態、履物はくつ下)			

表 2.1 官能検査の概要

(3) 検査試料

試料床検査の検査試料は、下地として5種の木造大スパン床と、仕上げのない場合およ び仕上げとして設置する乾式二重床3種の組み合わせの、計20種に歩行路と受振点をそ れぞれ設定し、歩行路上を歩行者が実際に歩いた際に受振点で体感される歩行振動とし た。下地床は、「12P1000(梁成 1000mm, スパン 10920mm)」「10P720(梁成 720mm, スパン 9100mm)」「8P600 束 (梁成 600mm, スパン 7280mm)」「8P420 (梁成 420mm, スパン 7280mm)」「6P450 (梁成 450mm, スパン 5460mm)」の 5 種である。なお、8P600束は、スパン中央の梁下端をジャッキで支持したものである。こ れは、発生する歩行振動に多様性を持たせることを目的とした措置である。これらの下地 床の基本的特性を把握する目的で、固有振動数,床上に2人乗った状態での減衰定数,床 中央に 100kgf の静的集中荷重を載荷した時の変形量を測定した。その結果を、表 2.2 に 示す。表より、固有振動数は 12.5~24.2Hz, 減衰定数は 2.3~7.0%, 変形量は 0.08~ 0.37mmの範囲であった。また、二重床は、「二重床①」「二重床②」「二重床③」の3 種で、脚に使用されるゴムを変化させており、二重床②が最もやわらかいもの、二重床③ が最もかたいもの、二重床①は一般的なかたさのものを採用した。これらの二重床の剛性 を把握する目的で、剛床上に二重床を置き、図 2.2(2)に示す受振点の位置および加振点 の位置に 100kgf の静的集中荷重を載荷した時の、受振点の変形量を測定した。その結果 を、表2.3に示す。表より、最も剛性が高いのは二重床③、最も剛性が低いのは二重床② であることがわかる。なお、二重床を設置せず、下地床のみの場合は、「一般床」と呼称 することとした。図 2.2(1)に、下地床の例として 8P420 を示す。図 2.2(2)に、二重床を 示す。また、写真2.1に下地床を,写真2.2に二重床の脚を、それぞれ示す。歩行者は身 長 175cm,体重 80kgの成人男性、歩調は 2Hz とし、メトロノームを用いて制御した。ま た、歩行者の履物は、踵が床に接地した際の衝撃が安定して発生するよう、靴を履かずに くつ下の状態とした¹²⁾。検査員には、各試料について5回体感してもらい、5回の振動を 総合的に判断してもらい回答を得た。

下地床	固有振動数 (Hz)	床上2名乗った 状態の減衰定数 ^(%)	100kgf静的 集中荷重 載荷時の 変形量(mm)
12P1000	16.7	7.0	0.08
10P720	12.5	4.1	0.13
8P600束	15.8	2.3	0.18
8P420	14.5	5.4	0.37
6P450	24.2	3.8	0.24

表 2.2 下地床の基本的特性

表 2.3 二重床の静的載荷時変形量

二重床	受振点載荷, 受振点測定 (mm)	加振点載荷, 受振点測定 (mm)
二重床①	2.43	0.84
二重床②	4.15	1.74
二重床③	1.43	0.09



図 2.2(1) 試料床の概要(下地床 8P420)



図 2.2(2) 試料床の概要(二重床の概要)



左: 6P450 右上: 8P420 右中: 8P600 右下: 10P720



12P1000

写真2.1 試料床の様子



上:二重床③ 中:二重床② 下:二重床①

写真2.2 二重床の脚の様子

振動台検査については、試料床検査試料と同じ条件で歩行振動を測定し、そこから選 択した 10 種を、2.3 での検討結果に基づき、振動レベルの最大値 VLmax を 9dB 低減し た振動が振動台上面で出力されるように調整して検査試料とした。この操作は、加速度を 1/(2√2)倍することに等しい。また、調整は、木造床の歩行振動評価において重要となる 5~20Hzの振動数成分が 1/(2√2)倍されていることを確認しながら行った。ただし、検査 試料の振動の大きさに多様性を持たせる目的で、VLmax を元の振動から 3dB 低減 (1/√2 倍) したものと、6dB 低減 (1/2 倍) したものも含めている。また、検査員に入力される 振動に関して、試料床検査では歩行者が毎回歩行するため生じる歩行振動に若干ばらつき があるのに対し、振動台検査では毎回同じ振動が出力されることから、振動のばらつきが 評価に影響している可能性が考えられる。そこで、振動台検査では、振動のばらつきの要 因を検討する目的で、同じ振動を 5 回体感してもらう場合と、実際の歩行で発生しうる 5 種の異なる振動を 1 回ずつ体感してもらう場合の 2 種実施することとし、計 24 試料と した。写真 2.3 に、検査に用いた振動台を示す。なお、振動台上面には、足触りの差の要 因を除くため、合板を強固に固定している。

(4) 検査員の姿勢, 履物

検査員の姿勢は立位とし、余計な力を入れることなくリラックスした状態で、試料床の 受振点あるいは振動台上中央に立ってもらった。また、検査員の履物は、既往の研究¹⁰で 検査員の履物は歩行振動評価に大きく影響しないことが明らかになっていることを考慮し たうえで、足裏の温冷感などの歩行振動以外の要因を除き、かつ素足の状態に近いくつ下 とした。



写真 2.3 振動台の様子

2.4.2 官能検査の経過,結果および心理学的尺度の構成

2.4.1 に示した条件で、官能検査を実施した。また、検査試料を体感する順番が官能検 査におよぼす影響を除くため、各検査員の検査試料の提示順はランダムとした。また、検 査員の健康状態,心理状態に過度な負荷をかけることを避けるため、検査員が要求する時 にいつでも休憩を取ることができることを検査員に伝えて検査を実施した。試料床検査の 様子を写真 2.4 に、振動台検査の様子を写真 2.5 に、それぞれ示す。

表 2.4 に、分散分析結果を示す。表より、いずれの尺度でも主効果の分散比が危険率 1%以下で有意となっており、かつ寄与率も大きいことから、検査試料による刺激に十分 な差異があり、本検査が有効であることがわかる。一方、個人差の分散比も有意となって いるが、寄与率が主効果と比較して十分に小さいことがわかる。よって、構成される尺度 は、検査員間の個人差を含みながらも、各検査試料に対する平均的な評価を表す尺度とし て十分有効であるといえる。

以上の官能検査結果より、尺度構成理論³⁹⁾にしたがって、認知大きさ尺度と気になり 具合評価尺度を構成した。

			分散比	寄与率(%)
住居の 居室	認知大きさ 尺度	主効果	23.95*	65.90
		個人差	6.45*	4.54
	気になり具合 評価尺度	主効果	19.47*	62.15
		個人差	4.3*	3.22
事務所の 執務室	認知大きさ 尺度	主効果	23.61*	62.83
		個人差	11.61*	8.57
	気になり具合 評価尺度	主効果	18.68*	53.14
		個人差	19.27*	15.94

表 2.4 分散分析結果

*∶危険率 1%以下で有意



写真2.4 試料床検査の様子



写真2.5 振動台検査の様子

2.4.3 心理学的尺度相互の関係の検討

2.4.2 で構成した心理学的尺度について、心理学的尺度相互の関係を検討した。図 2.3 に、認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の対応を示す。図中①~⑦で示す点線は、官能検査に用いた判断範ちゅうの尺度上の位置をそれぞれ表す。図より、両者は比較的よい対応を示しており、大きく感じられる振動ほど、気になると評価されていることがわかる。また、住居,事務所のいずれの想定でも、認知大きさ尺度の範ちゅう「⑤気付くか気付かないかの境界」に対して気になり具合評価尺度の範ちゅう「⑥・・・・・・(「やや気になる」と「全く気にならない」の間)」,認知大きさ尺度「④かすかに気付く」に対して気になり具合評価尺度「⑤やや気になる」,認知大きさ尺度「③はっきり気付く」に対して気になり具合評価尺度「④・・・・・・(「かなり気になる」と「やや気になる」の間)」が、それぞれ対応する関係となっている。

次に、住居を想定した場合と事務所を想定した場合の関係を検討した。図2.4に、その 対応を示す。図より、両者は比較的よい対応を示しているが、住居を想定した場合の方 が、事務所を想定した場合よりわずかに認知されやすく、厳しい評価となることがわか る。この傾向は、既往の研究³⁰⁾とも一致している。


図 2.3 認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の関係



図 2.4 住居の居室と事務所の執務室の関係

2.5 既存の性能値の適用性の検討

本節では、2.4 で構成した心理学的尺度に対して、検査員に提示した振動から歩行振動の評価指標に用いられる性能値 VLTを算出して両者の対応関係を検討し、2.3 で明らかにした既往の研究結果の関係との整合性を確認する。

2.5.1 性能値の概要

既往の研究 ^{5),6),30)}で、歩行振動を評価できることが明らかとなっている性能値 *VLT* の 概要は、以下の通りである。

 $VLT = VLmax + 20\log(T^{1/4})$

(2.1)

ここで、*VLmax*: *VL*の最大値(dB)

VL:下式で得られる *a'rms*のレベル換算値(dB)

 $VL = 20\log_{10}(a'_{rms} \mid a_{0rms})$ (2.2)

a'rms:「JIS C 1510-1995 振動レベル計」²⁹⁾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 25ms

で実効値処理して得られる加速度実効値(m/s²)

aorms: 基準の加速度実効値(1×10⁻⁵m/s²(rms))

T: VL が 60dB 以上となっている時間の総和(s)

ここで、既往の研究 ^{5),6)}では、時定数を 10ms としているが、2.3 の検討で時定数を 25ms としても、良い対応を示すことは変わらないことを確認している。

2.5.2 検査試料の性能値の測定

この性能値 VLTの適用性を確認する目的で、2.4 で実施した試料床検査および振動台検 査の検査試料について、歩行振動を測定した。試料床検査試料の測定は、図2.2 に例示し たように測定点で実施した。測定には、加速度計 PV-85(RION 社製)を用いて、床上に 薄い両面テープで接着してから測定した。また、変形の影響を検討するために、加速度計 の上面に白い紙を添付し、そこに実験室の床で支持しているレーザー変位計 IL-030

(KEYENCE 社製)を当て、変形も測定した。測定機器を設置した様子を、写真 2.6 に 示す。2.4.1 の試料床検査と同様の条件とするため、測定点には受振者が乗った状態で測 定した。歩行者は2.4.1と同じ歩行者とし、メトロノームを用いて歩調 2Hz で歩行した。 測定は、試料床検査と同様、5 回実施した。

振動台検査試料についても、振動台上面の合板中央に加速度計、その上面にレーザー 変位計を当てて、同様に測定した。測定機器を設置した様子を、写真 2.7 に示す。2.4.1 の振動台検査と同様の条件とするため、測定点には受振者が乗った状態で測定した。振動 台検査試料は、5種の振動を入力した際の応答を各1回測定し、同じ振動を5回体感して もらう場合はその振動の VLT、異なる振動を1回ずつ体感してもらう場合は5種の VLT の平均を算出した。

測定結果を、表 2.5 に示す。表より、試料床検査の検査試料は、VLT が 78.8~ 93.9dB、振動台検査の検査試料は 61.6~83.6dB だった。また、表の「VLTの最大値と最 小値の差」の欄には、5 回の VLT の測定値の最大値と最小値の差も示している。これに より、同じ振動を5回体感してもらう場合は毎回同じ振動が出力されるのに対して、異な る振動を1回ずつ体感してもらう場合は 4.4~1.0dB のばらつきがあることがあり、試料 床検査試料の 5.8~1.3dB のばらつきとほぼ同程度であることがわかる。



写真2.6 測定機器設置の様子(試料床)



写真2.7 測定機器設置の様子(振動台)

	<i>VLT</i> (dB)	VLT の 最大値と 最小値の 差(dB)		
		一般床	90.0	5.2
	1201000	二重床①	89.8	3.2
	1201000	二重床②	92.6	1.3
		二重床③	87.7	2.2
		一般床	84.5	1.4
	10P720	二重床①	88.8	1.9
		二重床②	90.9	2.1
		二重床③	87.2	3.0
		一般床	80.0	2.6
試料床	20600市	二重床①	86.6	2.2
検査	00000米	二重床②	87.3	3.3
		二重床③	78.8	5.8
		一般床	89.2	2.4
	00400	二重床①	92.4	1.5
	8P420	二重床②	93.9	1.8
		二重床③	90.2	1.6
		一般床	83.3	1.4
	07 (50	二重床①	91.5	2.4
	6P450	二重床②	91.7	2.1
		二重床③	86.7	1.4
		一般床	75.3	
	12P1000	二重床③	73.5	
		一般床	72.2	\sim
	10P720	二重床③	73.9	
		一般床	66.6	
振動台	8P600束	二重床③	61.6	
(同じ振動)		一般床(3dB低減)	83.6	
		一般床(6dB低減)	80.9	\sim
	8P420	一般床	77.6	\sim
		二重床③	79.7	
		一般床	71.9	
	6P450	二重床③	74.2	
		一般床	75.3	4.3
	12P1000	二重床③	73.5	2.9
振動台 検査 (異なる振動)		一般床	72.4	1.6
	10P720	二重床③	74.3	4.4
		一般床	66.6	2.8
	8P600束	二重床③	61.8	1.5
		一般床(3dB低減)	84.2	2.3
		一般床(6dB低減)	81.0	1.4
	8P420	一般床	77.8	4.1
		二重床③	79.8	1.4
	6P450	一般床	71.7	2.3
		二重床③	74.2	1.0

表 2.5 VLTの測定結果

2.5.3 心理学的尺度と性能値の関係の検討

2.5.2 の VLTと、2.4.2 で構成した心理学的尺度との対応を、試料床検査試料と振動台 検査試料に分けて、図2.5(1)および図2.5(2)に示す。図には横山,黒田^{5),6)}らの試料床検 査結果の中心傾向を赤線で、松下ら³⁰⁾の振動台検査結果の中心傾向を青線で、それぞれ 示している。まず、(1)より、振動台検査結果について、同じ振動を 5 回体感させた場合 と、異なる5種の振動を1回ずつ体感させた場合では、対応の傾向にほぼ差が無いことが わかる。このことは、振動のばらつきの要因は、人間の歩行振動評価に影響しないことを 表している。よって、以降の検討では、同じ振動を5回体感させた場合の振動台検査結果 を用いることとする。図に示すように、試料床検査の結果は赤線近傍ないしは赤線より右 側に、振動台検査の結果は青線近傍にプロットされており、既往の研究結果と整合してい ることがわかり、2.3 の検討結果と一致していることが確認できる。また、試料床検査試 料を仕上げごとに分類したものを、図 2.5(3)に示す。(3)より、下地床によって赤線との 位置関係に若干の差はあるものの、仕上げの種類によって赤線から右側にプロットがずれ ている傾向があり、最もやわらかい二重床②が最も右に、最もかたい二重床③と二重床の ない一般床が赤線近傍に、それぞれプロットされている。このことから、近傍に歩行者が 着地した際の変形が振動感覚,評価に影響していることを示唆している。



図 2.5(1) VLTと心理学的尺度の関係(振動台検査)



図 2.5(2) VLTと心理学的尺度の関係(試料床検査)



図 2.5(3) VLTと心理学的尺度の関係 (試料床検査[仕上げ別])

2.6 木造大スパン床の歩行振動の性能値の検討

前節で、試料床検査と振動台検査では、同程度の評価となる歩行振動の VLT に 9dB 以上の差があることを確認し、その要因として歩行にともなって生じる変形が考えられた。本節では、試料床検査と振動台検査における変形の要因を検討し、木造床の歩行振動をRC 造や S 造建築物の歩行振動と一律に評価できる評価方法を確立する。

2.6.1 加速度と変形の関係の検討

先述のとおり、試料床検査と振動台検査には差が出ることが明らかとなっている。そ こで、その要因について、実際に試料床検査と振動台検査の歩行振動を繰り返し体感する など、種々検討した。その結果、実際に歩行者が歩行する試料床検査では、歩行者が受振 者近傍に着地した際、局部的な変形による傾きが感じられ、この影響での着地時の振動が マスクされることが推察された。そこで、2.5.2 で実施した測定で得られた変形がどの程 度であったかを確認することとした。

図 2.6 に、試料床検査試料の歩行振動と振動台検査試料の歩行振動の比較の一例とし て、「8P420 一般床」の歩行振動の1つを示す。なお、振動台検査試料は、3dB 低減した ものを示している。図の青線が加速度・時間曲線,赤線が変形・時間曲線である。ただ し、振動台検査試料の変形には、歩行加振力の主要な振動数成分による変形を抽出するた め、5Hz のローパスフィルタを掛けている。図より、試料床検査試料では最大 0.5mm 程 度の変形が、1 歩 1 歩着地するごとに発生しているのに対し、振動台検査試料では 0.05mm 以下の変形しか発生しておらず、かつ波形も試料床検査試料とは大きく異なり、 着地のタイミングとの関係も明確になっていないことがわかる。このことから、試料床検 査では、着地点近傍の表面の合板やフローリングが鉛直方向にたわみ、受振者近傍着地時 には受振者の足裏を通して傾きをともなう局部的な変形が感じられ、この変形にマスクさ れ振動が感じにくくなること、一方で、振動台表面の鉄板に合板を固定した振動台検査で は、変形そのものが小さいことに加え、このような傾きをともなう局部的な変形は生じな いため、振動はマスクされないことが推察された。この、着地点近傍の局部的な変形は、 コンクリートスラブでは見られない、木造床特有の現象と考えられる。



以上の考察から、試料床検査試料を対象に、歩行時の変形の測定結果に基づいて VLT を補正することとした。

まず始めに、試料床検査試料における加速度と変形の関係を検討した。2.5.2 で実施し た測定で得られた変形・時間曲線のうち、歩行者が受振者の直近に着地した際の波形から 横山ら⁴⁾が用いた方法に基づいて、変形の最大値 *Dmax*を抽出した。ただし、横山らが一 連の歩行に含まれる 1 歩ごとに *Dmax*を抽出したのに対し、本研究の *Dmax* は受振者の 直近の 1 歩のみを対象として抽出した。この *Dmax*を加速度振幅と比較する目的で、 2.5.1 で述べた振動数補正した加速度レベルの最大値 *VLmax* と同様、*Dmax*をレベル換 算することとし、下式で得られる *DLmax*を算出した。

 $DLmax = 20\log(Dmax / D_0)$

(2.2)

ここで、*Dmax*:変形の最大値(m)

D₀:基準の変形量(1×10⁻⁵m)

表 2.6 に、Dmaxの測定結果と DLmaxを示す。また、図 2.7(1)に、DLmaxと VLmaxの 関係を示す。図より、VLmaxは 75~90dB に分布しており、DLmaxは 15~45dB の範囲 に分布していることがわかる。また、仕上げ別に関係を示した結果を、図 2.7(2)に示 す。図より、DLmax の傾向は二重床②,二重床①,一般床,二重床③の順に大きくなっ ていることがわかる。この傾向は、2.4.1(3)で示した二重床の剛性の傾向と一致してい る。

	<i>Dmax</i> (cm)	<i>DLmax</i> (dB)		
	12P1000	一般床	0.055	34.8
		二重床①	0.076	37.6
		二重床②	0.132	42.4
		二重床③	0.025	27.9
	10P720	一般床	0.024	27.5
		二重床①	0.065	36.3
		二重床2	0.100	40.0
		二重床③	0.015	23.3
	8P600束	一般床	0.019	25.4
試料床 検査		二重床①	0.058	35.2
		二重床2	0.094	39.5
		二重床③	0.007	17.1
	8P420	一般床	0.041	32.2
		二重床①	0.078	37.8
		二重床2	0.122	41.7
		二重床③	0.025	28.0
	6P450	一般床	0.032	30.0
		二重床①	0.078	37.9
		二重床②	0.116	41.3
		二重床③	0.025	27.9

表 2.6 Dmax, DLmaxの測定結果







図 2.7(2) VLmax と DLmax の関係[仕上げ別]

2.6.2 既存の性能値の変形に基づく補正方法の検討

変形の要因を用いて加速度を補正する方法として、まず、2.6.1 で述べた体感に基づき、加速度に対する変形の割合が一定以上だと、その超過量に応じて VLmax を低減する 補正を検討した。具体的には、

・DLmaxが VLmax - α以上の場合に VLmax を低減する

・VLmaxの低減量は、 $VLmax - \alpha$ に対する DLmaxの超過量 $DLmax - (VLmax - \alpha)$ に βを乗じた値とする

こととし、低減後の *VLmax*(以降"補正 *VLmax*"と記す)から算出される性能値 *VLT* (以降"補正 *VLT*"と記す)と心理学的尺度の関係が良くなる α と β の組み合わせを検 討した。

図 2.8 に、 α と β による補正の概要を示す。図は、例として α = 80dB, β = 0.5 の場合の補正の概要を示したものである。図の赤線は、変形により加速度がマスクされ始める境界線であり、以下の式で表される。

 $DLmax = VLmax - \alpha$

(2.3)

すなわち、赤線と縦軸の交点は、 $-\alpha$ となる。ここで、赤線の傾きを 1 で固定したのは、 DLmaxにより VLmax がマスクされ始める割合は、VLmax の大きさにより変化しないと 仮定したためである。

ー方、図の灰色の直線は、DLmax でマスクされた結果 VLmax がどの程度に感じられ るかを表す等感度曲線である。すなわち、赤線の下側では、灰色の線は縦軸に平行 (DLmaxによらず VLmaxは一定)であるのに対し、上側では、DLmaxが1dB 増加す ると VLmaxが β dB 増加する(β dB 加えた VLmaxが感覚上等価となる)割合の傾きと なっている。このようにして得られる補正 VLmaxは、以下の式で表される。

補正 $VLmax = VLmax - \beta \{ DLmax - (VLmax - \alpha) \}$ (2.4)



図 2.8 変形に基づく加速度の補正の概要

この α と β を種々変化させながら、心理学的尺度と補正 VLmax から算出される補正 VLTがよい対応となる組み合わせを検討した。検討の経過を、図2.9に示す。図には、例 として、住居を想定した場合の気になり具合評価尺度との対応の検討経過を示した。なお、図に示す青線は、松下ら 300の振動台検査結果の中心傾向である。図に示すように、 α が大きくなるほどプロットが左に移動し、逆に α が小さくなるほどプロットが右に移動 することがわかる。一方で β が大きくなるほどプロットが左に移動し、逆に β が小さくなる るほどプロットが右に移動し、かつプロットのばらつきが小さくなることがわかる。他の 心理学的尺度との対応も検討した結果、 α = 70dB, β = 0.7 の場合の補正 VLT が、この 段階で最もよい対応を示すと総合的に判断した。図 2.10 に、 α = 70dB, β = 0.7 の場合 の、補正 VLT と心理学的尺度の対応を示す。図には、図 2.9 と同様に松下らの振動台検 査結果の中心傾向を青線で示している。図より、試料床検査の中心傾向はおおむね青線に 一致しているものの、仕上げごとに分けた図 2.10(b)より、二重床③のプロットが右に、二重床②のプロットが左にずれていることがわかる。このことは、比較的かたい二重床の 補正が小さく、比較的やわらかい二重床の補正が大きすぎることを示唆している。



図 2.9(1) 補正 VLTと気になり具合評価尺度の関係 (α=100~85dB)



図 2.9(2) 補正 VLTと気になり具合評価尺度の関係 (α = 80~65dB)



図 2.9(3) 補正 VLTと気になり具合評価尺度の関係 (α=60~45dB)



図 2.10 補正 VLTと心理学的尺度の関係(α=70dB, β=0.7)

以上より、試料床検査の歩行振動を再度体感し直したところ、着地時に大きな変形を ともなう試料床では、変形で着地時の振動が低減される一方、これらの中でも比較的変形 が大きい試料床では、この変形が直接感じられ、振動を大きく感じさせる方向に作用して いることが推察された。これと同様の知見は、8 畳間程度以下の大きさの木造住宅床や、 成の小さい梁を用いた木造大スパン床など、Dmaxが1mm程度の床を対象とした横山ら⁴⁾ の研究でも得られている。よって、変形の大きさそのものの影響を反映させるために、 DLmax がy以上の場合、その超過量を補正 VLmax に加算する補正を追加することとし た。以降、この補正を追加した補正 VLmax を、VLmax*と記すこととする。VLmax* は、以下の式で表される。

 $VLmax^* = VLmax - \beta \{ DLmax - (VLmax - \alpha) \} + \{ DLmax - \gamma \}$ (2.5)

 図 2.11 に、 α , $\beta \ge \gamma$ による補正の概要を示す。図には、例として $\alpha = 80$ dB, $\beta = 0.5$,
 $\gamma = 34$ dB の場合を示している。(1)の図中の灰色の曲線は、図 2.8 と同様、元の VLmax

 に対して VLmax*が等しくなる位置、すなわち等感度曲線を表している。



図 2.11 変形に基づく加速度の補正の概要(補正追加後)

この α , β と γ を種々変化させながら、心理学的尺度と VLmax*から算出される VLT* がよい対応となる組み合わせを検討した。検討の経過を、図 2.12 に示す。図には、例と して、住居を想定した場合の気になり具合評価尺度との対応の検討経過の一部を示した。 図に示すように、 $\alpha = 70$ dB, $\beta = 0.7$ の場合は、 γ が小さいほどプロットが右に移動する 傾向があり、 $\gamma = 46 \text{dB}$ 以上だと全てのプロットの DLmaxが γ 以下となり、前述の α と βのみによる補正と等しくなる。しかしながら、γが小さいほど振動台検査試料とは対応 が悪くなり、また、γが大きい場合は依然として対応の中心傾向から外れているプロット が見受けられるなど、よい対応を示す組み合わせは無かった。一方、 $\alpha = 80 \text{dB}, \beta = 0.5$ とすると、 $\alpha = 70$ dB, $\beta = 0.7$ の場合と同様の傾向を示し、かつ $\gamma = 30 \sim 40$ dBの範囲だ と、振動台検査試料との対応が良く、対応の中心傾向から外れるプロットも少なくなるこ とがわかった。よって、γ=30~40dB の範囲において、他の心理学的尺度との対応も検 討した結果、 $\alpha = 80 \text{dB}$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 34 \text{dB}$ の場合の VLT * が、最もよい対応を示すと 総合的に判断した。図2.13に、α=80dB, β=0.5, γ=34dBの場合の VLT*と心理学 的尺度の関係を示す。図より、図 2.10 に示した補正 VLTと比較して、VLT*の方がいず れの心理学的尺度とも対応がよくなっていることがわかる。また、■で示した振動台検査 結果と〇で示した試料床検査結果が一律に対応していることから、木造床の場合、受振者 近傍着地時の Dmax を測定し(2.5)式に基づいて VLT を補正した VLT *を用いることによ り、RC 造床やS 造床と共通の指標で評価できることが明らかとなった。なお、この対応 の中心傾向を図中に紫線で示すとともに、各判断範ちゅうと対応する VLT*の値を表 2.7 にまとめて示す。

なお、本検討で設定したα,β,γの各係数は、あくまで限られた検査試料を用いた 検査結果を基に、実用性も考慮して設定したものであり、最適値とは限らない。今後デー タの蓄積が進み、必要があれば、各係数を変更することも考えられることを付記してお く。



図 2.12 VLT *と気になり具合評価尺度の関係



図 2.13 VLT *と心理学的尺度の関係

判断 範ちゆ う	住居			事務所				
	認知		気になり		認知		気になり	
	尺度値	VLT*	尺度値	VLT*	尺度値	VLT*	尺度値	VLT*
2	6.13	86	5.59	88	6.09	87	4.86	89
3	4.62	76	4.33	81	4.74	77	4.01	82
4	3.27	72	3.17	75	3.42	73	3.23	76
(5)	2.15	68	2.16	71	2.34	69	2.28	72
6	1.19	$\overline{65}$	1.19	67	1.36	66	1.25	68
$\overline{\mathcal{O}}$	0	$\overline{59}$	0	61	0	60	0	62

表 2.7 各判断範ちゅうに対応する VLT*

2.7 本章の結論

試料床検査による人間の振動感覚,評価と振動台検査による人間の振動感覚,評価の 差の要因を明らかにし、RC 造やS 造建築物床にも木造床にも共通に適用できる歩行振動 の評価方法を確立することを目的とした本章の結論をまとめると、以下のとおりである。

- ・既往の研究で行われた試料床検査^{5),6),31)}と振動台検査³⁰⁾の結果を比較することにより、
 試料床検査と振動台検査には同程度の歩行振動の評価に差があることを明らかにした。また、同一の検査員を用いた試料床検査と振動台検査を実施することで、評価の
 差があることを再確認した。
- ・同じ振動を5回体感してもらう振動台検査と実際の歩行で発生しうるばらつきを考慮した5種の振動を1回ずつ体感してもらう振動台検査を実施し、結果を比較することで、 歩行振動のばらつきの要因は人間の歩行振動評価に影響しないことを明らかにした。
- ・試料床検査試料と振動台検査試料の加速度・時間曲線および変形・時間曲線を比較した 結果、試料床検査試料では1歩ごとに大きな変形が発生しているのに対し、振動台検査 試料では1歩ごとの明確な変形は無く、歩行全体の最大変形も試料床検査試料と比較し て著しく小さいことがわかった。
- ・木造床上を実際に人間が歩行することによって発生する歩行振動では、歩行者が受振者 近傍に着地した際、局部的な変形による傾きが感じられ、この影響での着地時の振動 がマスクされることが明らかとなった。また、受振者近傍着地時により大きな変形を ともなう歩行振動では、変形で着地時の振動が低減される一方で、変形が直接感じら れ、振動を大きく感じさせる方向に作用していることが明らかとなった。
- ・加速度から抽出される VLmax を、受振者直近の1歩の変形から抽出される DLmax で 補正して得られる VLmax*に、継続時間の要因を加味した性能値 VLT*を、木造床特 有の大きな変形をともなう歩行振動を評価できる性能値として提示した。また、この VLT*によって、試料床検査結果と振動台検査結果との対応関係を検討した結果、両者 の対応の中心傾向が一致することが明らかとなった。このことは、性能値 VLT*を用 いた評価方法が、RC 造やS 造建築物床にも木造建築物床にも共通に適用できる歩行振 動の評価方法であることを示している。

第3章

CLT 造床の歩行振動の予測方法

本章の目的は、中,大規模木造建築物で採用されることが多くなると考えられる CLT 造床を対象に、有限要素法を用いた歩行振動の解析方法を検討することで、木造床におけ る歩行振動の予測方法確立のための知見を得ることである。また、その結果の一例とし て、スパンをパラメータとして歩行振動の予測解析を行い、第2章で提示した木造床の歩 行振動の評価方法を適用することで、歩行振動からみた CLT 造床のスパン表を例示する ことを目的としている。

3.2 本章の研究方法

本章は以下の手順で進める。

- 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。
- 2)CLT造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、解析結果と前述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) CLT 造床の歩行振動に影響をおよぼすと思われる床と壁の接合部(以降"床壁接合部" と記す)の接合方法について検討する目的で、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、床壁接合部の 影響を把握する。
- 4)以上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。解析結果に第2章で提示し た木造床の歩行振動の評価方法を適用することにより、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。

3.3 実在建築物の CLT 造床を用いた予測方法の検討

本節では、実在建築物の CLT 造床を対象に各種試験を実施して変形特性,振動特性および歩行振動を把握し、それらを再現できる解析方法を検討することで、CLT 造床の歩 行振動の予測方法に関する基礎的知見を集積する。

3.3.1 対象床の概要

対象床の概要を図 3.1 に示す。対象床は、写真 3.1 に示す実在する 2 階建 CLT 造建築 物の写真 3.2 に示す 2 階床とした。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。CLT 床版の強度等級は Mx90 で、幅はぎ接着は されていない。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、スプライン接合となっている。ま た、床壁接合部は、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、写真 3.3 に示す 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。

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。以降、例えば5行とI列の交点をI5と記すこととする。また、図中横方向を行方向、 縦方向を列方向と記すこととする。なお、3.3.2(1)で述べる静的載荷試験と 3.3.2(2)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。





写真 3.1 対象建築物の外観



写真3.2 対象建築物の内観



写真 3.3 L字金物

3.3.2 変形特性,振動特性,歩行振動の把握

以下に、静的載荷試験,動的加振試験,歩行試験および歩行振動に関するアンケート 調査の概要を述べる。

(1) 静的載荷試験

静的な集中荷重に対する応答を確認する目的で、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、床版の裏面すなわち1階の天井に白い紙を貼付し、 レーザー変位計(KEYENCE 社製 IL-S025, IL-030, IL-065, LK-G155)を当てて測定 した。レーザー変位計は、1階の床から、がたつくことの無いように注意して支持した。 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。写 真3.4に、測定の様子を示す。

図3.2に、測定の結果得られた変形を青線で示す。また、列方向の結果には壁の位置、 行方向の結果にはスプライン接合部の位置も示した。例えば、I5 載荷の結果に着目する と、載荷点の変形が最も大きく、CLT 床版の変形が載荷点から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、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、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。これらの傾向は、J5~P5 に載 荷した場合の結果からもうかがえることがわかる。

- 60 -



(a) 変位計設置の様子



(b) 変位計設置の様子[拡大]



(c) 重錘設置の様子写真 3.4 静的載荷試験の様子





- 63 -

(2) 動的加振試験

まず、対象床の固有振動数および振動モードを確認する目的で、図3.1に示すI1~I5, J2~Q5の計 37点の床上に加速度計(RION 社製 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測定した。加速度計は、薄手の両面 テープで床上に固定した。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 を加振点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のを避けるためである。写真3.5に、測定の様子を示す。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。図3.3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。


写真3.5 動的加振試験の様子(振動モード測定)



つぎに、対象床の減衰特性を把握する目的で、図 3.1 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人の人間(以降"受振者"と記す)が乗った状態

条件3:I5に1人,I4に1人、計2人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。写真3.6に、測定の様子を示す。 減衰定数の算出結果を、表3.1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7),32),33)}と一致する。



写真3.6 動的加振試験の様子(減衰測定,床上2人の受振者の場合)

表 3.1 減衰定数の算出結果

床上人数	減衰定数(%)
条件1: 床上0人	2.7
条件2: 床上1人[I5(83kg)]	4.1
条件3: 床上2人[I5(83kg),I4(74kg)]	5.1

(3) 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(RION 社製 PV-84)を設置して測定した。歩行路は 5 行,測定点は I4 とした。歩行 者は 1 名(身長 181cm,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。写真 3.7 に、測定の様子を示す。図 3.4 に、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・時間曲線および変形・時間 曲線の例を示す。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 5 回実施 し、各測定結果から VLmax, DLmax および VLT *を算出し平均を求めた。結果を表 3.2 に示す。



写真3.7 歩行試験の様子



表 3.2 VLmax, DLmax と VLT *の測定結果

	<i>VLmax</i>	<i>DLmax</i>	<i>VLT</i> *
	(dB)	(dB)	(dB)
測定結果	79.2	19.2	72.7

(4) 歩行振動に関するアンケート調査

第2章で提示した木造床の歩行振動の評価方法の CLT 造床に対する適用性を確認する 目的で、3.3.2(3)の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、アンケート調査を実施した。表3.3に、アンケー ト調査の概要を示す。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。写真3.8に、アンケート調査の様子を示す。アンケートで得 られた回答を、第2章表2.7で示した範ちゅうの尺度値で置き換え平均することで、尺度 値を算出した。一方、歩行路5行,測定点I4でのVLT*の測定結果は表3.2に示す通り 72.7dBだった。この結果を第2章図2.9に△でプロットしたものを、図3.5で示す。図 より、対象床は、認知大きさ尺度では③程度,気になり具合評価尺度で④程度の評価とな り、紫線で示す対応の中心傾向から大きくは外れていないことから、第2章の評価方法の CLT造床に対する適用性が確認できたと考えられる。

	·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
用いる尺度	認知大きさ尺度,気になり具合評価尺度の2種		
想定する床用途	住居の居室,事務所の執務室の2種		
質問事項	この床振動は、住居の居室でくつろいでいる際に /事務所で執務している際に感じたとしたら、		
	認知大きさ尺度	気になり具合評価尺度	
	①非常に大きく感じる	①非常に気になる	
	②やや大きく感じる	②·····	
NUMBER ARE	③はっきり気付く	③かなり気になる	
判断配らゆつ	④かすかに気付く	④ •••••	
	⑤気付くか気付かないかの境界	⑤やや気になる	
	⑥ほとんど気付かない	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	⑦全く気付かない	⑦全く気にならない	
検査試料	5行をA列側からR列側に向けて歩行した際にI4で体感される歩行振動		
試料床上の歩行路を歩行者			
加振力法	(成人男性, 身長181cm, 体重70kg) が2Hzで歩行		
検査員	成人男女14名(年齡22~61歳,体重45~92kg)		
受振姿勢	立位(リラックスした	こ 状態、履物はくつ下)	

表 3.3 アンケート調査の概要



写真3.8 アンケート調査の様子

	住居			事務所					
判断 新ちゅう	認	認知気になり		気になり		認知		気になり	
¥0.219 2	尺度値	VLT*	尺度値	VLT*	尺度値	VLT*	尺度値	VLT*	
2	6.13	86	5.59	88	6.09	87	4.86	89	
3	4.62	76	4.33	81	4.74	77	4.01	82	
4	3.27	72	3.17	75	3.42	73	3.23	76	
5	2.15	68	2.16	71	2.34	69	2.28	72	
6	1.19	$\overline{65}$	1.19	67	1.36	66	1.25	68	
\bigcirc	0	59	0	61	0	60	0	62	

(再掲)表 2.7 各判断範ちゅうに対応する VLT*



図 3.5 木造床の評価指標の適用結果

3.3.3 歩行振動の予測方法の検討

(1) 解析モデルの作成

つぎに、対象床の有限要素法による解析モデルを作成した。

図 3.6 に、解析モデルの概要を示す。このモデルでは、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、測定結果と比較する検討を 繰り返した。その結果、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

3.3.1 で述べた通り CLT 床版が壁の上に載っていることと、3.3.2(1) 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。



(2) 固有値解析および静的集中荷重に対する応答解析

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、 図 3.7 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。



図 3.7 固有振動数と振動モードの測定結果と解析結果の比較

つぎに、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解析結果 を、図 3.8 に赤線で示す。図の赤線と青線で示した測定結果を比較すると、例えば I5 載 荷時の 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 近似していることがわかる。また、他の載荷点の場合についても、下階の壁が近い P5 載 荷の場合を除き、載荷点の変形量の差はいずれも小さく、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。



図 3.8(1) 静的載荷試験結果および解析結果の比較(I5~L5 載荷)



図 3.8(2) 静的載荷試験結果および解析結果の比較(M5~P5 載荷)

(3) 步行応答解析

3.3.3(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。 歩行路と測定点は、3.3.2(3)と同様に5行,I4とした。具体的には、図3.6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・時間曲線および変形・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、3.3.2(2)の結果を参考に、床上に2人の受振者が乗っ 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」⁴⁰⁾および設計資料⁴¹⁾に示された図3.9に示 す1歩分の歩行荷重を各着地位置に入力した。その結果、図3.10に示す加速度・時間曲 線および変形・時間曲線が得られた。この結果と図3.4の比較により、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程度となっていることがわかる。また、 解析結果より算出される VLT*は 61.9dB となり、測定結果より10.8dB 小さい結果とな 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。図 3.11 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、図 3.9 に示すピーク p1 における荷重の大きさおよび作用時間 に加え、ピーク p1 から p2 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。



図 3.11 解析に用いた歩行加振力の 1/3 オクターブバンド分析結果

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、3.3.2(3)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 5 パターン作成した。歩行者の履物,歩調は、3.3.2(3)と同様くつ下,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を、図 3.11 に◆で示す。 図には、5 パターンの歩行加振力の平均を示した。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、図 3.12 に例示するように、1 歩ごとの加速 度の最大値は、図3.4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 VLmax, DLmax および VLT*を算出しその平均を測定結果と比較 したところ、**表 3.2**に示す通り、*VLmax*は 3.1dB、*DLmax*は 2.6dB、*VLT**は 4.7dBの 差で予測できていることが明らかとなった。この差は、第 2 章の図 2.13 と照合すると、 認知大きさ尺度,気になり具合評価尺度ともにおおむね 1 範ちゅう程度の差となる。*VLT** の差が VLmax より大きいのは、図 3.4 および図 3.12 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。

	<i>VLmax</i> (dB)	<i>DLmax</i> (dB)	<i>VLT</i> * (dB)
測定結果	79.2	19.2	72.7
解析結果	76.1	16.6	68.0

表 3.4 VLmax, DLmax と VLT*の測定結果と解析結果の比較



(再掲)図3.4 歩行振動の測定結果の例

3.4 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

本節では、CLT 造床の床壁接合部を対象に各種試験を行い、床壁接合部の仕様の違い が歩行振動におよぼす影響を把握する。

3.4.1 対象床の概要

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 図 3.13 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。CLT 床版の強度等級は Mx60 で、幅はぎ接着はされていない。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:3.3 で述べた CLT 造実在床に使用されているものと同一の 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

写真 3.9 に、試験体の様子を示す。また、写真 3.10 に、3 種の床壁接合部の様子を示す。



図 3.13 試験体床の概要



写真3.9 試験体の様子



(1)L字金物接合



(2)ビス鉛直打ち接合



(3)ビス斜め打ち接合写真 3.10 床壁接合部の様子

3.4.2 変形特性,振動特性,歩行振動の把握

以下に、静的載荷試験、動的加振試験および歩行試験の概要を述べる。

(1) 静的載荷試験

図 3.13 に示す 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、 写真 3.10 に示すように、床版の裏面にホットメルト接着剤を用いて接着した加速度計に 白い紙を貼付し、レーザー変位計(KEYENCE 社製 IL-030, IL-065)を当てて測定し た。写真 3.11 に、測定の様子を示す。



写真3.11 測定機器設置の様子



写真 3.12 静的載荷試験の様子

(2) 動的加振試験

図3.13 に示す K 点をハンマーで加振した際の振動を、3.4.2(1)に示した通りに K 点と J 点に加速度計(RION 社製 PV-84)を設置して測定した。写真3.13 に、測定の様子を示 す。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、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: J 点に 1 人の受振者が乗った状態

条件3:J点に1人,J'に1人、計2人の受振者が乗った状態

受振者の体重,姿勢および測定回数は 3.3.2(2)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。写真 3.14 に、測定の様子を示す。



写真 3.13 動的加振試験の様子(固有振動数測定)



写真3.14 動的加振試験の様子(減衰測定,床上2人の受振者の場合)

(3) 歩行試験

図 3.13 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 点に加速度計 (RION 社製 PV-84)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 3.3.2(3)と同一 とし、測定の結果得られた加速度・時間曲線と変形・時間曲線から VLT*を算出した。 写真 3.15 に、測定の様子を示す。



写真3.15 歩行試験の様子

3.4.3 床壁接合部の接合方法の影響の検討

表3.5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、3.3 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、3.3 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、3dB 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、3.3.3 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。

		(1) L字金物 接合	⁽²⁾ ビス鉛直打ち 接合	⁽³⁾ ビス斜め打ち 接合
静的載荷時変形量(mm)		0.185	0.202	0.212
1次固有振動数(Hz)		17.0	16.5	16.0
	床上0人	3.2	3.0	2.6
減衰定数 (%)	床上1人	4.1	5.2	5.4
(/07	床上2人	5.4	4.8	5.4
VL	<i>Τ</i> *	69.4	66.8	66.4

表 3.5 CLT 造試験体床の各試験結果

3.5 CLT 造床のスパンと歩行振動の関係に関する解析的検討

本節では、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、スパンをパラ メータとして歩行振動の解析を実施し、その結果に木造床の歩行振動の評価方法を適用す ることで、歩行振動からみた CLT 造床のスパン表を、成果の一つとして例示する。

3.5.1 解析の概要

3.3 および 3.4 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。図 3.14 に、作成した解析モデルの概要を示す。この解析モデルは、 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=5.5m 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、最終的な結果は 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 3.3.3(1)で同定した 0.2 とし、5 層 7 プライの床版では、同じ層構成の 3.4 の 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、3.4.1 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 3.4.3 で述べた通りとし、壁位置の床上には 3.4.1 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=2.0mから開始し、0.5m ずつ増大させながら、1次固有振動数 6、および K点に980Nの荷重を静的に載荷した時の変形量 D100を求めるとともに、図に足形で示す 位置に3.3.3(3)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・時間曲線と変形・時間曲線を求め、第2章にて述べた VLT*の平均を算 出した。解析は、f6が、倍調波共振が発生する可能性が高くなる4²⁾10Hzを下回った段階 で終了した。



外側:壁面内方向回転拘束

J: 步行振動解析点 (二): 步行荷重入力位置

図 3.14 スパン表作成に用いた解析モデルの概要

3.5.2 解析結果

解析結果を表 3.6 に示す。表に示す通り、f6 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、第 2 章図 2.13 に示す住居の居室想定の気になり具合評価尺度を対象とした木 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 72.7dB であ り、この値を図 2.13 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。

CLT 床版	スパン (m)	f ₀ (Hz)	D ₁₀₀ (mm)	<i>VLT</i> * (dB)	達成される 気になり 具合の 評価水準
	2.0	108.90	0.020	53.1	$\overline{\mathcal{O}}$
	2.5	68.94	0.033	57.8	$\overline{\mathcal{O}}$
	3.0	47.16	0.048	62.3	6
	3.5	34.32	0.067	66.1	6
5層	4.0	26.09	0.089	68.8	5
7プライ	4.5	20.54	0.116	68.9	5
	5.0	16.60	0.147	71.3	4
	5.5	13.73	0.182	72.7	4
	6.0	11.56	0.222	75.0	④未達成
	6.5	9.88	0.267	78.7	④未達成
	2.0	92.02	0.020	52.4	$\overline{\mathcal{O}}$
	2.5	58.06	0.031	58.7	$\overline{\mathcal{O}}$
	3.0	39.69	0.047	64.4	6
_ —	3.5	28.91	0.068	69.4	5
7層 7プライ	4.0	22.00	0.094	69.5	5
	4.5	17.34	0.126	72.1	4
	5.0	14.05	0.164	73.9	4
	5.5	11.64	0.208	75.7	④未達成
	6.0	9.81	0.259	78.6	④未達成

表 3.6 スパンをパラメータとした解析の結果

3.5.3 歩行振動からみた CLT 造床のスパン表の例示

表3.6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、表3.7に示す。本研究では、表3.7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 43),44)にしたがって算出し、表3.8 に示す。表3.7 および表3.8 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。

使用する	亡田冷	達成され	る気になり具合の	評価水準
CLT床版	休用述	6	5	4
5層7プライ	住居	3.5	4.5	5.5
7層7プライ	住居	3.0	4.0	5.0

表 3.7 歩行振動からみた CLT 造床のスパン表

表 3.8 構造安全性からみた CLT 造床のスパン表

使用する CLT床版	一般住宅	共同住宅
5層7プライ	5.3	5.1
7層7プライ	4.0	3.8

3.5.4 固有振動数と静的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

1.3 で述べた通り、Hu ら²⁴⁾および西谷ら¹⁷⁾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、図 3.15 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、表 3.6 に示した CLT 造床の fo および D100 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。まず、西谷らの設 計資料について、図より、評価水準⑤と⑥の実線と本研究のプロットは一部整合しないも 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、各プロット の記号と④~⑥の実線の関係は整合している点も見受けられる。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。



図 3.15 f₀, D₁₀₀および歩行振動評価の関係

3.6 本章の結論

中,大規模木造建築物で採用されることが多くなると考えられる CLT 造床を対象に、 実在建築物床における変形特性,振動特性および歩行振動の測定結果を再現できる解析方 法について検討し、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 歩行振動の評価方法を適用してスパン表を例示することを目的とした本章の結論をまとめ 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 人が乗った場合の 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、測定結果と比較的よい対応が得ら 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、第2章 で提示した評価方法を適用することにより、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²⁴⁾および西谷ら¹⁷⁾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指標との整合性を検討した。その結果、後者とは整合 する点もある一方、前者とは整合せず、評価水準④を達成できない振動でも許容され る設計指標となっていることを明らかにした。

第4章

仕上げとして根太床が施工された CLT 造床の

歩行振動の予測方法

4.1 本章の目的

本章は、設備の納まりや断熱性など居住性に影響する他の性能確保の観点から採用さ れることが増えると予想される、根太床や乾式二重床などの架構式床を施工する仕様の木 造大スパン床の一例として、仕上げとして根太床が施工される仕様の CLT 造床を対象 に、根太床が歩行振動におよぼす影響を把握するとともに、解析方法の検討を通して、歩 行振動の予測方法確立のための知見を蓄積することを目的とする。

4.2 本章の研究方法

本章は以下の手順で進める。

- 1)仕上げとして根太床を施工する予定の、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、振動 特性を把握する。さらに、歩行試験を実施し、歩行振動を測定する。その後、CLT 造 床上に根太床を施工し、同様に各試験を実施して振動特性を把握するとともに、根太 床が歩行振動に与える影響を明らかにする。
- 2)根太床施工前の CLT 造実在床の有限要素法による解析モデルを、第3章で得られた知見を基に、さらに床版相互の接合部の固定度など新たな要因に関する検討を加えながら作成し、解析結果で測定結果を再現できていることを確認する。また、この解析モデルに根太床の要因を付加した解析モデルを作成し、根太床施工後の測定結果を再現できる解析方法を確立する。
4.3 根太床施工前後の CLT 造床を用いた予測方法の検討

本節では、仕上げとして根太床を施工する予定の、実在する CLT 造床を対象に各種試 験を実施して変形特性,振動特性および歩行振動を把握し、それらを再現できる解析方法 を検討することで、第3章で得られた知見との整合性を確認するとともに、新たな知見を 集積する。また、根太床を施工した後にも同様の検討を行い、根太床施工による歩行振動 への影響を把握するとともに、仕上げを施工された CLT 造床の歩行振動の予測方法に関 する知見を集積する。

4.3.1 対象床の概要

写真 4.1 に、当該 CLT 造建築物を示す。また、図 4.1 に、対象床の平面図を示す。本研究では、以降、図の左右方向を X 方向、上下方向を Y 方向、図と直交する方向を Z 方向と記す。

対象床は、10本の鋼管杭基礎に支持された鉄骨梁(H-194×150×6×9または H-200×200×8×12)上に6枚のCLT床版を敷き並べたものである。鉄骨梁の位置を図に点線で、また床版の割り付けを図に一点鎖線で示す。床版うち、図中左側の3枚(床版 K1~K3)はカラマツ材、右側の3枚(床版 T1~T3)はトドマツ材を使用している。以降、図中左側を"カラマツ側"、右側を"トドマツ側"と記す。床版のスパンは、カラマツ側が6675mm、トドマツ側が6585mm(いずれも梁心間)である。鉄骨梁と床版は、梁の上フランジの室内側の位置にて、ボルト(M16, 600mm 間隔)で接合されている。

CLT 床版は、カラマツ材,トドマツ材ともに 5 層 7 プライ,厚さ 210mm である。CLT 床版の強度等級はいずれも Mx90 で、幅はぎ接着はされていない。カラマツ材の密度は 502kg/m³、強軸方向(X 方向)の弾性係数は 10.7kN/mm²、トドマツ材の密度は 405kg/m³、強軸方向(X 方向)の弾性係数は 9.51kN/mm²である。これらの物性値は、 当該建築物施工時に実施された材料試験により得られた値である。床版同士の接合部は、 長辺については、カラマツ側,トドマツ側ともに 3 枚のうち中央の床版 K2,T2 の上半分 と、両側の床版 K1,K3,T1,T3 の下半分をそれぞれ幅 64mm 切り欠いて重ね、上端よ り長さ 200mm のビスで固定した"ハーフラップジョイント"となっている。また、短辺 については、トドマツ側の床版 T1~3 が上側となるハーフラップジョイントとなってい る。 トドマツ側の 3 枚の床版のうち、床版 T3 には、図に示すように、CLT 造壁(5 層 5 プ ライ,厚さ 150mm)や窓などが載っている。また、この壁の内部には、床版と CLT 造屋 根(5 層 5 プライ,厚さ 150mm)を緊結するための引きボルト(M22)が4本、図に◆ で示す位置に通されている。

仕上げの根太床は、カラマツ側,トドマツ側とも、床版の弱軸方向(Y 方向)に幅 45mm×高さ51mmの根太(トドマツ材)を455mm間隔で設置し、その上に厚さ15mm の構造用合板を捨て板として張り、さらに厚さ15mmのフローリング(シラカバ材)を 張る仕様となっている。なお、壁や窓にそった位置には端根太および側根太を設置する。

本研究では、カラマツ側、トドマツ側とも、図中太い破線で示す鉄骨梁で囲まれた範囲を検討対象とした。試験実施にあたり、図に●と矢印で示すように、カラマツ側についてはKC, KX1~5, KY1~5, KHの各点と歩行路Kを、トドマツ側についてはTC, TX1~5, TY1~2およびTY1'~3', THの各点と歩行路Tを設定した。ここで、KCはカラマツ側の対象範囲の中心に位置し、TCはトドマツ側の対象範囲のうち壁や窓で仕切られた室の中心近傍に位置する。



写真 4.1 対象とした CLT 造建築物の外観



図 4.1 CLT 造床の概要

4.3.2 変形特性,振動特性,歩行振動の把握

(1) 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X方向もしくはY方 向に並ぶ各点での変形を測定した。表4.1に、測定を実施した載荷点と変位測定点の組み 合わせを示す。表に示すように、カラマツ側ではパターンKX,KYの2種、トドマツ側 ではパターンTX,TY,TY'の3種の組み合わせで試験を実施した。各点の変形は、床 版の裏面に白い紙を貼付し、床下からレーザー変位計(KEYENCE 社製 IL-030, IL-065)を当てて測定した。写真4.2に、レーザー変位計設置の様子を示す。なお、静的載 荷試験は、根太床施工前のみ実施した。写真4.3に、測定の様子を示す。

図4.2に、静的載荷試験結果を●と実線で示す。(a)はカラマツ側、(b)はトドマツ側の 結果である。パターン KY, TY の結果には、ハーフラップジョイントの位置も示した。 図より、床版の変形が、載荷点を中心に、強軸方向である X 方向だけでなく弱軸方向であ る Y 方向にも広がっており、異方性を有する CLT 床版ではあるが、応力が弱軸方向にも 伝達されていることがわかる。また、パターン KY, TY の結果をみると、変形がハーフ ラップジョイントを越えて広がっており、ハーフラップジョイントでも応力が伝達されて いることがわかる。さらに、パターン TY'の結果のうち、TC 載荷時の TC での変形と、 TY2'載荷時の TY2' での変形を比較すると、両者は床版 T2 の X 方向の中心線から対称 の位置にある点でありながら、TY2'の変形の方が小さくなっている。このことから、ト ドマツ側では、床版 T3 上の壁や窓による拘束が、変形特性に大きく影響していることが わかる。

		載荷点	変形測定点
カラマツ側	パターン KX	KC KX1 KX2 KX3	KC,KX1, KX2,KX3
	パターン KY	KC KY1 KY2 KY3	KC,KY1, KY2,KY3
	パターン TX	TC TX2 TX4	TC,TX2,TX4
トドマツ側	パターン TY	TC TY2	TC,TY2
	パターン TY'	TC TY1' TY2'	TC,TY1',TY2'

表 4.1 載荷点と測定点の組み合わせ



写真 4.2 レーザー変位計設置の様子



写真4.3 静的載荷試験の様子



図 4.2(1) 静的載荷時の変形の測定結果[パターン KX, KY]



図 4.2(2) 静的載荷時の変形の測定結果[パターン TX, TY, TY']

(2) 動的加振試験

動的加振試験は、固有振動数および振動モードの測定と、減衰定数の測定とを分けて 実施した。所定の加振点をハンマーで加振した際の振動を床上の各点で同時測定し、伝達 関数を算出することにより、固有振動数と振動モードを導出した。具体的には、カラマツ 側では、KH を加振した際に発生する振動を、KC, KX1~5, KY1~5 の各点で測定し た。一方、トドマツ側では、TH を加振した際に発生する振動を、TC, TX1~5, TY1~2 および TY1'~3'の各点で測定した。測定は、加速度計(RION 社製 PV-84 または PV-85) を薄手の両面テープで床に固定して実施した。測定結果より KC および TC 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。写真 4.4 に、測定の様子を示す。

表 4.2 の「測定結果」の欄に、固有振動数の測定結果を示す。また、図 4.3 に、振動 モードの測定結果を示す。カラマツ側については、根太床施工前の固有振動数は、1 次が 11.5Hz、2 次が 21.7Hz、3 次が 43.6Hz であった。このうち、最も卓越していたのは 1 次 で、2 次の成分は 1 次の 1/2 程度、3 次の成分は 1 次の 2/3 程度であった。また、1 次の モードは、対象範囲全体が同位相で振動するモード、2 次のモードは、対象範囲の中央近 傍に X 方向に振動の節が発生しこの節を境に逆位相となるモード、3 次のモードは、対象 範囲を 3 等分する位置近傍に X 方向に 2 つの節が発生しそれぞれの節を境に逆位相とな るモードであることが推察された。これに対し、根太床施工後の固有振動数は、1 次が 13.2Hz、2 次が 29.1Hz、3 次が 50.3Hz であった。このうち、最も卓越していたのは 1 次 で、2 次の成分は 1 次の 1/3 程度、3 次の成分は 1 次の 1/3 程度であった。また、1~3 次 の各モードの形状は、根太床施工前の 1~3 次のモードとおおむね一致していた。このこ とから、根太床の施工により固有振動数が増加したことが明らかとなった。

一方、トドマツ側については、根太床施工前の固有振動数は、1 次が 11.6Hz、2 次が 17.3Hz であった。このうち、卓越していたのは 2 次で、1 次の成分は 2 次の 1/5 程度であ った。1 次のモードは、対象範囲全体が同位相で振動するものの、床版 T3 上の壁や窓な どにより拘束を受けているモード、2 次のモードは、対象範囲の中央近傍に X 方向に振動 の節が発生しこの節を境に逆位相で振動するものの、やはり床版 T3 上の壁や窓などによ り拘束を受けているモードであることが推察された。これに対し、根太床施工後は、施工 前の 1 次と対応する固有振動数および振動モードは表れず、施工前に卓越していた 2 次と 対応する固有振動数および振動モードのみ導出された。ここで、2 次と対応する固有振動

- 108 -

数は 22.2Hz であることから、カラマツ側と同様、根太床の施工により固有振動数が増加 したことが明らかとなった。

このように根太床の施工により固有振動数が増加するのは、根太床による剛性の増加の影響が、質量の増加の影響を上回ったことによるものと考えられる。



写真4.4 動的加振試験の様子(振動モード測定)

		カラマ	7ツ側	トドマツ側			
		根太床施工前	根太床施工後	根太床施工前	根太床施工後		
		測定結果	測定結果	測定結果	測定結果		
固有	1次	11.5	13.2	11.6			
振動数 2	2次	21.7	29.1	17.3	22.2		

50.3

(Hz)

3次

43.6

表 4.2 固有振動数の測定結果



図 4.3(1) 振動モードの測定結果[カラマツ側]



つぎに、KH もしくは TH をハンマーで加振した際の振動を、KC もしくは TC に設置 した加速度計(RION 社製 PV-85)で測定し、減衰定数を算出した。測定は、以下の 3 条 件で実施した。

条件1:床上に人間が乗ってない状態

条件 2: KC もしくは TC に 1 人の受振者が乗った状態

条件 3: KC もしくは TC に 1 人, KY1 もしくは TY1 に 1 人、計 2 人の受振者が乗った 状態

受振者の体重は 68kg(KC もしくは TC) および 90kg(KY1 もしくは TY1)で、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・時間曲線から最も卓越した振動モードの振動数成分を抽出したうえで、減衰定数を算 出し平均を求めた。具体的には、カラマツ側は1次、トドマツ側は2次のモードの減衰定 数を求めた。写真4.5に、測定の様子を示す。

表4.3に、減衰定数の測定結果を示す。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、第3章および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7),32),33)}と一致する。また、根太床施工前 後で比較すると、一部例外はあるものの、全体的傾向として、根太床の施工により減衰が 大きくなっていることがわかる。例えば、歩行振動で重要な床上に2人の受振者が乗った 条件3 での減衰定数は、カラマツ側では施工前が6.2%であるのに対し施工後は6.8%、 トドマツ側では施工前が5.7%であるのに対し施工後は6.1%となっている。



写真4.5 動的加振試験の様子(減衰測定)

表4.3 減衰定数の測定結果

		カラマ	7ツ側	トドマツ側			
		根太床施工前	根太床施工後	根太床施工前	根太床施工後		
減衰	床上0人	3.8	3.4	2.1	4.3		
定数	床上1人	4.6	5.3	3.5	5.1		
(%)	床上2人	6.2	6.8	5.7	6.1		

(3) 步行試験

図 4.1 に矢印で示す歩行路 K もしくは T を歩行者が歩行した際に床に発生する振動を、 KY1 もしくは TY1 上に薄い両面テープで接着した加速度計(RION 社製 PV-85)で測定 した。また、根太床施工前の歩行振動にともなって発生する変形を、地面で支持し床裏に 向けて設置したレーザー変位計(KEYENCE 社製 IL-030)を用いて測定した。なお、根 太床施工後の変形の測定は、室内において不動点が確保できなかったため実施していな い。歩行者は 1 人(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 68kg)が KY1 も しくは TY1 に乗った状態で実施した。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。測定はそれぞれ 5 回実施した。写真 4.6 に、測定の様子を示す。

根太床施工前の各測定結果から VLmax, DLmax, VLTおよび VLT*を算出し、その平 均を求めた。なお、5回測定した VLT*の最大値と最小値の差は、1.0~3.1dBであった。 一方、根太床施工後の各測定結果から VLmax, VLT を算出し、その平均を求めた。 図 4.4に、歩行振動の波形の例を示す。加速度・時間曲線の比較から、根太床施工後の歩 行振動は根太床施工前と比較して、1歩ごとに励起された振動が大きく減衰していること がわかる。このことは、4.3.2(2)の減衰定数の測定結果と整合している。また、表4.4の 欄に、VLmax, DLmax, VLTおよび VLT*の測定結果を示す。表より、根太床施工前後 を VLTで比較すると、カラマツ側は施工前が 86.9dB であるのに対し施工後は 79.3dB、 トドマツ側は施工前が 86.1dB であるのに対し施工後は 77.8dB と、根太床の施工により VLTが 8dB 程度小さくなっていることがわかる。



写真4.6 歩行試験の様子

	カラマ	マツ側	トドマツ側			
	根太床 施工前	根太床 施工後	根太床 施工前	根太床 施工後		
VLmax	83.7	76.7	83.3	75.9		
DLmax	24.8		26.6			
VL T	86.9	79.3	86.1	77.8		
VLT*	76.4		74.4			

表 4.4 歩行振動の測定結果



(4) 歩行振動に関するアンケート調査

第3章と同様、第2章で提示した木造床の歩行振動の評価方法の CLT 造床に対する適 用性を確認する目的で、4.3.2(3)で述べた根太床施工前の歩行振動の測定と同一の歩行者 が同一の条件で歩行路を歩行した際に KY1 もしくは TY1 で感じられる振動の気になり具 合について、アンケートを実施した。表 4.5 に、アンケートの概要を示す。アンケート は、「①非常に気になる」~「⑦全く気にならない」の7段階の判断範ちゅうを用いて実 施した。回答者は、11~12名の成人男女(年齢 23~61歳,体重 40~90kg)とした。回 答者には、KY1もしくは TY1 に、歩行路を背にしてリラックスした状態で立つよう指示 した。各回答者の回答を、第2章表 2.7 で示した範ちゅうの尺度値で置き換えたうえで、 平均を求めた。写真 4.7 に、アンケート調査の様子を示す。

根太床施工前のアンケート結果と VLT*の関係を、図4.5に▲でプロットして示す。図には、第3章でのアンケート結果と VLT*の関係も、△で示した。図に示すように、△と同様、▲の各点はいずれも対応の中心傾向を示す曲線近傍にプロットされていることから、CLT造床に対する当該評価方法の適用性が再確認できる。

なお、根太床施工後の CLT 造床に対する当該評価方法の適用性の確認は、後述の歩行 振動解析により根太床施工後の歩行振動の VLT*を求めることで、根太床施工後の CLT 造床に対する当該評価方法の適用性を検討することとする。

用いる尺度	認知大きさ尺度,気に	なり具合評価尺度の2種						
想定する床用途	住居の居室,事務所の執務室の2種							
質問事項	この床振動は、住居の居 /事務所で執務してい	室でくつろいでいる際に る際に感じたとしたら、						
判断範ちゅう	 認知大きさ尺度 ①非常に大きく感じる ②やや大きく感じる ③はっきり気付く ④かすかに気付く ⑤気付くか気付かないかの境界 ⑥ほとんど気付かない ⑦全く気付かない 	 気になり具合評価尺度 ①非常に気になる ②・・・・・・ ③かなり気になる ④・・・・・・ ⑤やや気になる ⑥・・・・・・ ⑦全く気にならない 						
検査試料	歩行路KあるいはTを歩行した際にKY1あるいは TY1で体感される歩行振動							
加振方法	根太床施工前および根太床施工後の歩行路KあるいはTを 歩行者(成人男性,身長181cm,体重70kg)が2Hzで歩行							
検査員	成人男女11~12名(年齢2	3~61歳, 体重40~90kg)						
受振姿勢	立位(リラックスした	:状態、履物はくつ下)						

表 4.5 アンケート調査の概要

判断 範ちゅう		住	居		事務所				
	認知		気になり		認	知	気になり		
	尺度値	VLT*	尺度値	VLT*	尺度値	VLT*	尺度値	VLT *	
2	6.13	86	5.59	88	6.09	87	4.86	89	
3	4.62	76	4.33	81	4.74	77	4.01	82	
4	3.27	72	3.17	75	3.42	73	3.23	76	
5	2.15	68	2.16	71	2.34	69	2.28	72	
6	1.19	65	1.19	67	1.36	66	1.25	68	
$\overline{\mathcal{O}}$	0	59	0	61	0	60	0	62	

(再掲)表 2.7 各判断範ちゅうに対応する VLT*



写真 4.7 アンケート調査の様子



○ 試料床検査 ■ 振動台検査(同じ振動) → 対応の中心傾向 △ 第3章のCLT造床 ▲ 根太床施工前
 図 4.5 木造床の評価指標の適用結果(根太床施工前)

4.3.3 歩行振動の予測方法の検討

(1) 解析モデルの作成

4.3.1 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。具体的には、カラマ ツ側の根太床施工前および施工後、トドマツ側の根太床施工前および施工後の、4 種の解 析モデルを作成した。図4.6に、各解析モデルの概要を示す。根太床施工前の解析モデル では、KCもしくはTCを中心にX方向,Y方向とも500mm間隔で要素を設定するとと もに、鉄骨梁やハーフラップジョイントの位置では、それぞれの幅に応じて要素を分割し た。また、トドマツ側の解析モデルでは、床版T3上の壁や窓などの位置でも、要素を分 割した。さらに、根太床施工後の解析モデルでは、根太の位置でも要素を分割した。一 方、Z方向については、後述するハーフラップジョイントのモデル化の関係上、床版を厚 さ105mmの2つの要素に分割した。また、根太床施工後の解析モデルでは、床版上に根 太の高さ51mm、捨て板の厚さ15mm、およびフローリングの厚さ15mmの要素を追加 した。

以下に、解析モデルの作成にあたって検討した事項を述べる。

①CLT 床版の物性値

床版の密度および X 方向(強軸方向)の弾性係数は、4.3.1 で述べた材料試験の結果を 用いた。その他の材料試験結果のない物性値は、類似した材料の試験結果や物性値を用い て、以下のように類推した。

- ・Y 方向(弱軸方向)の弾性係数、XZ 面内方向のせん断弾性係数および YZ 面内方向の せん断弾性係数は、X 方向の弾性係数と、高梨,大橋ら ^{45),46)}に示された強軸方向の弾 性係数に対する各弾性係数の比を用いて算出した。
- ・Z方向(厚さ方向)の弾性係数および XY 面内方向のせん断弾性係数は、具体的な資料 が見当たらなかった。よって、床版の強軸方向の弾性係数から「CLT Handbook」⁴⁷⁾に 記載されている"Shear Analogy Method"にしたがってラミナの繊維方向の弾性係数 を逆算し、さらに日本建築学会「木質構造設計規準」¹⁶⁾を参考にラミナの繊維直交方向 の弾性係数を繊維方向の 1/25、繊維に平行な面内方向のせん断弾性係数を 1/15 とした うえで、Z 方向の弾性係数はラミナの繊維直交方向の弾性係数と等しく、XY 面内方向 のせん断弾性係数はラミナの繊維に平行な面内方向のせん断弾性係数に等しいと仮定 して設定した。
- ・ポアソン比については、参考となる資料が見当たらなかった。よって、はじめに、ラミ

ナの繊維方向加力時のポアソン比を、一般的な木材のポアソン比とされている 0.4 と仮 定し、他の方向加力時のポアソン比を、弾性係数およびせん断弾性係数との関係に基 づいて算出した。つぎに、算出した各方向加力時のラミナのポアソン比を、床版の層 構成にしたがって加算し、積層されている全ラミナ数で除すことにより、平均的なポ アソン比を求めた。

②CLT 床版と鉄骨梁の接合部

壁に支持された2階床を対象とした前報では、床壁接合部における床版の支持方法を、 壁の室内側の位置にある節点にてピン支持とし、さらに壁の室内側および室外側の位置に ある節点にて壁面内方向の回転を拘束することにより、試験結果とよい対応を示す解析モ デルを作成することができた。また、前報では、接合部に使用する接合金物やビスなどの 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ことが明らかとなっ た。よって、本研究では、鉄骨梁が前報の壁に該当するものとみなし、鉄骨梁の室内側の 位置にある節点にてピン支持とし、さらに鉄骨梁の室内側および室外側の位置にある節点 にて鉄骨梁の方向の回転を拘束することとした。

③ハーフラップジョイント

ハーフラップジョイントは、2 枚の床版のうち、片方の上半分ともう片方の下半分を同 じ幅だけ切り欠いたうえで重ね、上側の床版の上端から下側の床版までビスを打ち込んで 固定するものである。このため、応力は、2 枚の床版が重なっている水平面を介して伝達 されると考えられる。よって、当初、図 4.7 の(a)に示す解析モデルを設定した。このモ デルでは、2 枚の床版が隣接する鉛直面に隙間が設けられているため、鉛直面を介した応 力伝達はなされない。しかし、このモデルで解析を実施したところ、測定結果と比較し て、ハーフラップジョイントでの応力伝達が不十分な結果が得られた。

ここで、実際の床では、床版は自重などにより弱軸方向にもたわんでいることから、 ハーフラップジョイントでは、2枚の床版が隣接する鉛直面のうち、上側は密着し、応力 が伝達されている可能性が考えられる。また、歩行振動の変位振幅は、床版の自重による たわみと比較して小さいことから、上側の鉛直面は、振動中も密着していると考えられ る。よって、図の(b)に示すように、上側の鉛直面には隙間を設けず、下側のみに隙間を 設けた解析モデルを作成し解析を実施したところ、測定結果とよい対応が得られた。以上 より、ハーフラップジョイントについては、下側の鉛直面にのみ隙間を設けることとし た。なお、上側の鉛直面と水平面は、他の要素間の境界面と同様の設定とした。 ④床版 T3 上の壁や窓など

トドマツ側の床版 T3 上の壁や窓などは、床版の下に梁や壁などがない位置に載ってい る。このような壁や窓などが存在する場合、その重量により床版の振動が拘束されること が想定される。よって、トドマツ側の解析モデルでは、壁や窓などが載っている位置の各 節点に、壁や窓などの自重を分配して載荷した。また、壁が載っている位置の各節点に は、壁が負担している屋根の重量も分配して載荷した。さらに、壁や窓の室内側および室 外側の位置にある節点にて、壁や窓の面内方向の回転を拘束した。 ⑤床版 T3 上の壁内部の引きボルト

トドマツ側の床版 T3 上の壁内部にある引きボルトについては、ボルトの位置の節点を 鉛直ばねで支持することでボルトによる拘束を再現することとし、ばね定数を種々変化さ せながら解析結果と測定結果との関係を検討したところ、4000N/mm とした場合に測定 結果とよい対応が得られた。よって、引きボルトは、ばね定数 4000N/mm のばねに置き 換えることとした。

⑥根太床

根太床施工前の解析モデル上に、根太,捨て板,フローリングの各要素からなる実際 に施工された根太床と同じ形状のモデルを付加し、根太床施工後の解析モデルとした。そ の際、根太の位置も、実際に施工された位置と同じとした。根太,捨て板の物性値は、

「木質構造設計規準」¹⁶⁾に記載されている規準値などを参考に設定した。また、フローリ ングの物性値は、参考となる資料が見当たらなかったため、捨て板に用いられている構造 用合板と同一とした。なお、根太床と床版の接触面、および根太床を構成する各部材間の 接触面は、他の要素間の境界面と同様の設定とした。



○:ピン支持+梁方向回転拘束
 ○:梁方向回転拘束
 ×:重量載荷点 ◆:鉛直ばね支持
 または壁面内方向回転拘束
 または壁面内方向回転拘束

図 4.6(1) 解析モデルの概要[根太床施工前]



[フローリングおよび合板]

Ex: 3.50kN/mm² Gxy: 0.40kN/mm² ν xy: 0.4Ey: 1.40kN/mm² Gxz: 0.04kN/mm² ν xz: 0.4 $\rho: 3.80 \times 10^{-7} \text{kg/mm}^3$

[根太] Ex: 0.28kN/mm² Gxy: 0.47kN/mm² ν xy: 0.02Ey: 7.00kN/mm² Gxz: 0.05kN/mm² ν xz: 0.96 Ez: 0.23kN/mm² Gyz: 0.04kN/mm² V yz: 0.96 Ez: 0.28kN/mm² Gyz: 0.47kN/mm² V yz: 0.4 $\rho: 3.80 \times 10^{-7} \text{kg/mm}^3$



[トドマツ側]

×:重量載荷点 ◆:鉛直ばね支持 ●:ピン支持+梁方向回転拘束 ○:梁方向回転拘束 または壁面内方向回転拘束 または壁面内方向回転拘束

図 4.6(2) 解析モデルの概要[根太床施工後]





図 4.7 ハーフラップジョイントの解析モデル

(2) 固有値解析および静的集中荷重に対する応答解析

4.3.3(1)で作成したモデルによる解析の結果得られた固有振動数を、表4.6の「解析結 果」の欄に示す。また、解析の結果得られた振動モードを、図4.8に示す。図は、振動 モードのY方向の形状を示したものである。トドマツ側の根太床施工後の解析モデルで は、測定では表れなかった1次の固有振動数および振動モードも得られた。表4.6の「測 定結果」と「解析結果」の比較から、固有振動数の解析結果の測定結果に対する差は、根 太床施工前についてはカラマツ側で5~10%、トドマツ側で13~16%、根太床施工後に ついてはカラマツ側で6~9%、トドマツ側で6%となっていることがわかる。また、 図4.3と図4.8の比較から、解析の結果得られた振動モードの形状は、根太床施工前およ び施工後ともに、カラマツ側に関しては、測定結果から推察された対象床全体の振動モー ドの形状とおおむねー致していることがわかる。一方、トドマツ側に関しては、1次の モードについては、床版T3上の壁の位置での振幅が大きく、壁による拘束が不足してい ることがうかがえるが、卓越していた2次のモードについてはおおむねー致している。な お、床版上の下に梁や壁などがない位置に載っている壁や窓などの影響は、振動モードに より異なる場合があり、このような場合、1つの解析モデルで全モードを再現するのは困 難であることを付け加える。

		カラマツ側				トドマツ側				
		根太床施工前		根太床施工後		根太床施工前		根太床施工後		
		測定結果	解析結果	測定結果	解析結果	測定結果	解析結果	測定結果	解析結果	
固有	1次	11.5	12.6	13.2	14.4	11.6	13.5		14.0	
振動数	2次	21.7	20.6	29.1	27.4	17.3	19.6	22.2	23.5	
(Hz)	3次	43.6	40.2	50.3	54.6					

表 4.6 固有振動数の測定結果と解析結果の比較





つぎに、根太床施工前の解析モデルを用い、4.3.2(1)で述べた静的載荷試験の載荷点 と同じ位置に質量 100kg の重錘による荷重を載荷した際の変形を求めた。図4.9 に、解 析結果を○と破線で示す。解析結果と図に●と実線で示した測定結果を比較すると、変形 の大きさや X 方向, Y 方向への広がりが近似していることがわかる。

以上より、4.3.3(1)で作成した解析モデルで、対象床の固有振動数,振動モードおよび変形特性をおおむね再現できることが明らかとなった。



図 4.9(1) 静的載荷時の変形の測定結果と解析結果の比較[パターン KX, KY]



図 4.9(2) 静的載荷時の変形の測定結果と解析結果の比較[パターン TX, TY, TY']

(3) 步行応答解析

4.3.3(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。 具体的には、歩行路 K もしくは T 上の歩行者の着地位置(歩幅 1000mm)に1歩分の荷 重を 0.5 秒(2Hz)ずつずらしながら入力し、KY1 もしくは TY1 での応答加速度を求め た。入力する歩行加振力は、第3章と同様とした。具体的には、4.3.2(3)で述べた歩行試 験の歩行者の1歩分の荷重を 50 回測定し、50 個の測定結果の中から歩数と同じ数の1歩 分の荷重をランダムに選定したうえで、各着地位置に入力した。すなわち、入力した荷重 は、1歩ごとに異なっている。

一方、減衰定数は、設計段階で予測するのは困難なことから、仮に対象床の減衰定数 が測定により得られている場合でも、材料,構法が類似した他の床での測定結果とあわせ て一般的な値を策定し、この値を用いた解析結果について妥当性を検討するのが肝要と考 えられる。よって、根太床施工前については、表4.3に示した床上に受振者が2人乗った 状態での減衰定数の測定結果(5.7~6.2%)に加え、第3章で対象とした CLT 造実在床お よび試験体床での測定結果(4.8~5.4%)を参考に、高次まで一律に5%とした。また、 根太床施工後については、表4.3に示した測定結果(6.1~6.8%)を参考に、高次まで一 律に6%とした場合と7%とした場合について、解析することとした。

以上の条件で歩行応答解析を行った。具体的には、1 歩分の荷重の組み合わせが異なる 歩行加振力を5パターン作成したうえで、これらを解析モデルに入力して得られた5種の 加速度・時間曲線および変形・時間曲線から VLmax, DLmax, VLT および VLT *を算 出し、平均を求めた。図 4.10 に、カラマツ側の解析の結果得られた加速度・時間曲線お よび変形・時間曲線の一例を示す。なお、5パターンの歩行加振力で得られた VLT *の最 大値と最小値の差は、2.2~5.2dB であった。

結果を、表 4.7 の「解析結果」の欄に示す。表より、解析結果の測定結果に対する VLT* の差は、根太床施工前についてはカラマツ側で 0.1dB、トドマツ側で 0.2dB となっている ことがわかる。また、根太床施工後について、解析結果の測定結果に対する VLT の差 は、減衰定数を 6%とした場合、カラマツ側で 3.6dB、トドマツ側で 3.9dB、7%とした場 合、カラマツ側で 2.9dB、トドマツ側で 3.1dB となっていることがわかる。減衰定数を 6%とした場合と 7%とした場合の VLT の差はカラマツ側で 0.7dB、トドマツ側で 0.8dB とわずかであり、いずれも 7%とした場合の方が測定結果により近い解析結果が得られ た。 以上より、4.3.3(1)で作成した解析モデルに、第3章で提案した方法にしたがって歩行加振力を入力することにより、対象床の歩行振動をおおむね再現できることが明らかとなった。

	カラマツ側				トドマツ側					
	根太床施工前		根太床施工後			根太床施工前		根太床施工後		
	測定結果	解析結果 (h:5%)	測定結果	解析結果 (h:6%)	解析結果 (h:7%)	測定結果	解析結果 (h:5%)	測定結果	解析結果 (h :6%)	解析結果 (h:7%)
VLmax	83.7	84.5	76.7	81.1	80.7	83.3	83.0	75.9	80.2	79.8
DLmax	24.8	25.4		21.6	21.5	26.6	24.3		20.4	19.7
VLT	86.9	86.9	79.3	82.9	82.2	86.1	85.2	77.8	81.7	80.9
VLT*	76.4	76.5		72.6	71.8	74.4	74.6		71.5	71.0

表 4.7 歩行振動の測定結果と解析結果の比較



図 4.10(1) 歩行振動解析結果の一例



(4) 根太床施工後の CLT 造床に対する木造床の歩行振動の評価方法の適用性の確認

4.3.2(4)で述べたとおり、根太床施工後の歩行振動に対して、第2章で提示した木造床 の歩行振動の評価方法の適用性を検討した。アンケート調査は、4.3.2(4)で述べたとおり に実施している。根太床施工後のアンケート結果と VLT*の関係を、図4.11 に▲でプロ ットして示す。図に示すように、第3章の△,4.3.2(4)の▲と同様、▲の各点はいずれも 対応の中心傾向を示す曲線近傍にプロットされていることから、根太床施工後の CLT 造 床に対する当該評価方法の適用性が確認できる。また、振動の気になり具合を根太床施工 前後で比較すると、カラマツ側は施工前が「③かなり気になる」程度であるのに対し施工 後は「⑤やや気になる」程度、トドマツ側は施工前が「④・・・・」(「③かなり気に なる」と「⑤やや気になる」の間)程度であるのに対し施工後は「⑥・・・・」(「⑤ やや気になる」と「⑦全く気にならない」の間)程度と、いずれも根太床の施工により評 価が1~2範ちゅう程度向上していることがわかる。

4.4 本章の結論

実在建築物の CLT 造床を対象に、仕上げとして施工される根太床が歩行振動におよぼ す影響を把握するとともに、歩行振動の予測方法を確立することを目的とした本章の結論 をまとめると、以下の通りである。

- ・第3章と同様、本章で対象とした CLT 造床でも、応力は床版の弱軸方向にも伝達されている。また、本章で対象とした床で床版同士の接合部に採用されているハーフラップジョイントでも、応力は伝達されている。
- ・仕上げとして根太床を施工することにより、床の固有振動数は大きくなる。これは、根 太床による剛性の増加の影響が、質量の増加の影響を上回ったことによるものと考え られる。また、減衰定数は、根太床を施工することにより大きくなる傾向がある。こ の結果、歩行振動は、根太床を施工することにより低減される。本章で対象とした床 では、VLT*は9dB程度小さくなり、気になり具合からみた評価は1~2範ちゅう程度 改善された。
- ・ハーフラップジョイントの影響は、2枚の床版が重なっている水平面と、隣接している 鉛直面のうち上半分が連続している解析モデルで、おおむね再現できる。すなわち、 ハーフラップジョイントでは、水平面と鉛直面の上半分を介して応力が伝達されてい ると想定できる。
- ・根太床の影響は、根太,捨て板,フローリングの各要素からなる実際に施工された根太 床と同じ形状のモデルを床版の解析モデル上に付加することにより、おおむね再現で きる。
- 第3章で提案した歩行加振力の入力方法により、本章で対象とした床でも、歩行振動を おおむね再現できる。
第5章

結論

本研究では、近年公共施設や商業施設などの中,大規模建築物で普及しつつある木造 大スパン床で発生しうる歩行振動問題の設計段階での対策として、RC 造や S 造建築物の 床の歩行振動と木造床の歩行振動を一律に評価できる評価方法を提示するとともに、木造 大スパン床で今後主流になると思われる CLT 造床と CLT 造床上に架構式床を施工した床 に有限要素法を適用して解析モデル化して振動特性の再現方法を検討し、木造大スパン床 の歩行振動の予測方法を提示することで、歩行振動からみた木造床の設計の枠組みの構築 を目指した。

本研究の結論を、以下の通り示す。

- ・第2章では、既往の研究で実施された木造大スパン床の試料床検査結果と振動台検査結果の比較,および同一の検査員を用いて試料床検査と振動台検査を実施することで、 試料床検査と振動台検査では同程度の歩行振動に対する評価に差があることを明らか にした。また、試料床検査試料では歩行にともなって大きな変形が発生する一方で、 振動台検査試料ではほとんど変形が発生しないことを明らかにした。この変形により 加速度がマスクされ着地時の振動が感じにくくなる現象と、変形そのものが感じられ 振動が大きく感じられる現象とを反映させた補正を既存の性能値 VLT に施すことで、 大きな変形をともなう木造大スパン床の歩行振動を RC 造や S 造建築物の床と一律に評 価できる性能値 VLT *を提示した。
- ・第3章では、木造大スパン床の1種である CLT 造床を対象に、各種試験を実施して CLT 造床の変形特性,振動特性および歩行振動を把握するとともに、有限要素法によ る歩行振動の予測方法を検討した。その結果、CLT 造床の振動特性を再現可能な解析 方法として、床版の曲げ剛性,密度などの物性値は構造設計用の規格値ではなく、材 料試験結果などの実測値を用いること、床壁接合部での床版の固定度は、接合方法の 仕様によらず、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、歩行振動の応答解析に用 いる減衰定数は5%とすること、入力する歩行加振力は、実際の歩行に近い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ことなど、有用な知見を得 た。また、この知見を基に一般的な仕様の CLT 造床の解析モデルを作成し、スパンを 変数として歩行振動を解析し、結果に第2章で確立した木造大スパン床の歩行振動の評

価方法を適用することで、歩行振動からみた CLT 造床のスパン表を設計資料の一例と して提示した。さらに、この解析結果を Hu ら²⁴⁾および西谷ら¹⁷⁾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照合したところ、後者とは整合 する点もある一方、前者とは整合せず、評価水準④を達成できない床でも許容される 設計資料となっていることを明らかにした。

・第4章では、仕上げとして根太床が施工される仕様の CLT 造床を対象に、有限要素法による歩行振動の予測方法を検討した。その結果、第3章で得られた知見が適用できることを確認するとともに、根太床は、根太,捨て板,フローリングの各要素からなる実際に施工された根太床と同じ形状のモデルを床版の解析モデル上に付加することにより、おおむね再現できることを明らかにした。また、仕上げとして根太床を施工することにより、床の固有振動数と減衰定数は大きくなる傾向があり、歩行振動が 1~2 範ちゅう程度改善されたことが明らかとなった。

以上であるが、木造大スパン床の歩行振動の予測方法に関して得られた知見は、本研 究で対象とした CLT 造以外の構法の床にも、ある程度有用であると思われるものの、今 後、他の構法の床についても検討を行い、適用性を確認する予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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) 日本建築学会:床性能評価指針,2015.11
- 4) 横山裕:複数歩連続した歩行振動の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1),日本建築学会環境系論文集,第78
 巻,第691号,pp.689-695,2013.9
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 横山裕,小野英哲: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異なる場合一,日本建築学会構造系論文報 告集,第 390 号, pp.1-9, 1988.8
- 9) 小野英哲,横山裕:人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法 に関する研究 一振動発生者と受振者が同じ場合(動作した人間自身が床振動を感 じる場合)一,日本建築学会構造系論文報告集,第 394 号, pp.8-16, 1988.12
- 10) 横山裕,小野英哲:振動発生者と受振者が異なる場合の床振動の評価方法の提示人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究(第 2報),日本建築学会構造系論文報告集,第 418 号, pp.1-8, 1990.12
- 11) 横山裕:歩行時に発生する床振動評価のための加振,受振装置に関する研究 動 的加振器,受振器の設定および妥当性の検討,日本建築学会構造系論文集,第 466号,pp.21-29,1994.12
- 12) 横山裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関す る研究 衝撃的加振器の開発および振動減衰時間算出方法の妥当性の確認, 日本

建築学会構造系論文集,第476号, pp.21-30, 1995.10

- 13) 横山裕,佐藤正幸:歩行時に発生する床振動評価のための加振,受振装置に関する研究 仕上げ材が施された床に対する加振,受振装置の適用方法の設定,日本 建築学会構造系論文集,第490号,pp.17-26,1996.12
- 14) 横山裕,松長健一郎:小走り時の床振動測定用加振装置および振動減衰時間算出 方法に関する研究,日本建築学会構造系論文集,第 519 号,pp.13-20, 1999.5
- 15) 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
- 16) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説 -許容応力度・許容耐力設計法-,
 2015.11
- 17) 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
- 18) 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
- 19) 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
- 20) National Research Council Canada: National Building Code of Canada 2015,
 2015.1
- 21) 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
- 22) DOLAN J.D., MURRAY T.M., JOHNSON J.R., RUNTE D., SHUE B.C.: Preventing annoying wood floor vibrations, J. of Struct. Eng. 1999, 125(1) pp.19-24
- 23) HAMM P., RICHTER A., WINTER S.: Floor vibration New results, World Conference on Timber Engineering Auckland 2012, 269-275, 2012.7
- 24) Lin Hu, Sylvain Gagnon: Controlling Cross-Laminated Timber (CLT) Floor - 142 -

Vibrations: Fundamentals and Method, World Conference on Timber Engineering Riva del Garda 2010, 2010.6

- 25) International Standards Organization: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz). ISO 2631-2: 1989, 1989
- 26) 横山裕,井上竜太,池田文乃,八木豊:歩行により発生する周期的および連続的な床振動の評価指標,日本建築学会環境系論文集,第74巻,第636号,pp.125-132,2009.2
- 27) 井上竜太,横山裕,八木豊,池田文乃:RC造,S造建築物の床振動の評価方法 その2 振動レベルに継続時間を考慮した評価方法の提示,日本建築学会大会学 術講演梗概集,D-1,pp.465-466,2008.7
- 28) 井上竜太,横山裕,松下仁士:振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関 する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,環境工学 I,pp.377-378,2014.9
- 29) 日本規格協会: JIS C 1510 振動 レベル計, 1995
- 30) 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
- 31) 横山裕,長沼俊介,福田眞太郎:木造大スパン上に二重床が設置された床の歩行振動の評価方法に関する基礎的検討,日本建築学会大会学術講演梗概集,D-1, pp.413-414,2016.8
- 32) 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
- 33) 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
- 34) 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
- 35) 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

- 36) 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
- 37) 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
- 38) 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
- 39) J.P.Guilford, 秋重義治訳: 精神測定法, 培風館, 1969
- 40) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2015.2
- 41) 日本建築学会: 建築物荷重指針を活かす設計資料 1,2016.2
- 42) 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
- 43) 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 エマニュアル, 2016.10
- 44) 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
- 45) 高梨隆也,大橋義徳,松本和茂,宮武敦,孕石剛志: CLT の面外方向の曲げ及びせん断に及ぼす樹種の影響 その 1 カラマツの場合,日本建築学会大会学術講演 梗概集,pp.13-14,2015.9
- 46) 高梨隆也,大橋義徳,松本和茂,石原亘:北海道産木材を用いた CLT の材料性能 その1 面外曲げ性能,日本木材学会大会研究発表要旨集,D18-P1-13,2017
- 47) FPInnovations: CLT Handbook U.S. EDITION, 2013