

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	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
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 序論	・・・ 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 木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
2.4.1 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
2.4.2 官能検査の経過, 結果および心理学的尺度の構成	・・・ P.26
2.4.3 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
2.5.1 性能値の概要	・・・ P.30
2.5.2 検査試料の性能値の測定	・・・ P.31
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
2.6.1 加速度と変形の関係の検討	・・・ P.38
2.6.2 既存の性能値の変形に基づく補正方法の検討	・・・ P.43
2.7 本章の結論	・・・ P.55

第3章 CLT 造床の歩行振動の予測方法	・・・ P.56
3.1 本章の目的	・・・ P.57
3.2 本章の研究方法	・・・ P.57
3.3 実在建築物の 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) 歩行試験	・・・ 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) 歩行応答解析	・・・ P.79
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	・・・ 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) 歩行試験	・・・ 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 CLT 造床のスペ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 造床のスペン表の例示	・・・ 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 本章の結論	・・・ P.98

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	・・・ P.99
4.1 本章の目的	・・・ P.100
4.2 本章の研究手法	・・・ 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) 歩行試験	・・・ 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) 歩行応答解析	・・・ 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 結論	・・・ 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	VL_{max} と DL_{max} 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 ($\alpha = 70$, $\beta = 0.7$)	・・・ 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	f_0 , 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	VLTの測定結果	・・・ P.33
表 2.6	D_{max} , DL_{max} 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	VL_{max} , DL_{max} 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	VL_{max} , DL_{max} と VLT * 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

写真 2.7	測定機器設置の様子(振動台)	・・・P.32
写真 3.1	対象建築物の外観	・・・P.59
写真 3.2	対象建築物の内観	・・・P.59
写真 3.3	L字金物	・・・P.59
写真 3.4	静的載荷試験の様子	・・・P.61
写真 3.5	動的加振試験の様子(振動モード測定)	・・・P.65
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)	・・・P.67
写真 3.7	歩行試験の様子	・・・P.68
写真 3.8	アンケート調査の様子	・・・P.71
写真 3.9	試験体の様子	・・・P.86
写真 3.10	床壁接合部の様子	・・・P.87
写真 3.11	測定機器設置の様子	・・・P.88
写真 3.12	静的載荷試験の様子	・・・P.88
写真 3.13	動的加振試験の様子(固有振動数測定)	・・・P.89
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)	・・・P.89
写真 3.15	歩行試験の様子	・・・P.90
写真 4.1	対象とした CLT 造建築物の外観	・・・P.103
写真 4.2	レーザー変位計設置の様子	・・・P.105
写真 4.3	静的載荷試験の様子	・・・P.105
写真 4.4	動的加振試験の様子(振動モード測定)	・・・P.109
写真 4.5	動的加振試験の様子(減衰測定)	・・・P.113
写真 4.6	歩行試験の様子	・・・P.115
写真 4.7	アンケート調査の様子	・・・P.118

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ます、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

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。

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思う。

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。

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。

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

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、 $VI(2) \leq -0.9$ 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 ―許容応力度・許容耐力設計法―」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

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。

$$D_{100} \leq 0.01f_0 \quad (1.2)$$

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)

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

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。

$$d \leq f^{1.43} / 39 \quad (1.3)$$

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、軽量鉄骨造の存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。

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 VL_{max} 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 $VL_{max} + 20\log(T^{1/4})$ 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。

$$VLT = VL_{max} + 20\log(T^{1/4}) \quad (1.4)$$

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)

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

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)

a_{0rms} : 基準の加速度実効値 ($1 \times 10^{-5} \text{m/s}^2(\text{rms})$)

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 $VL_{max} + 20\log(T^{1/4})$ (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、

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。

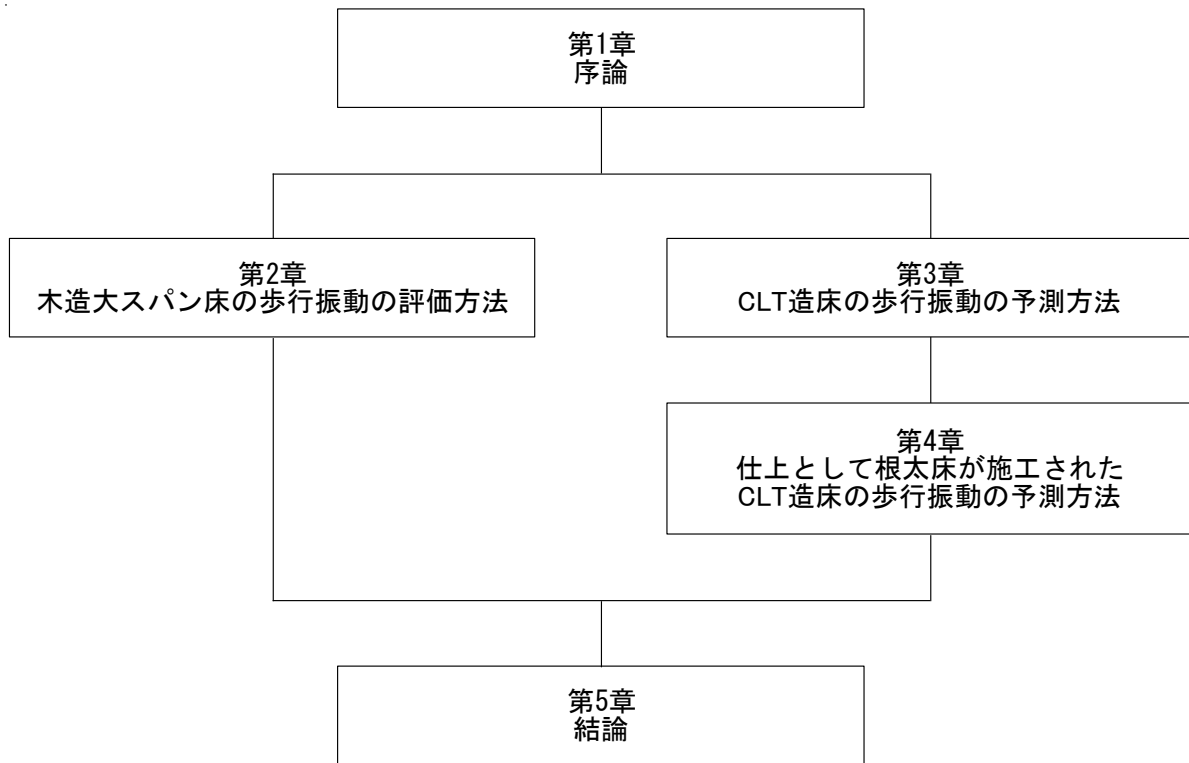


図 1.1 本研究のフローチャート

第 2 章

木造大スパン床の歩行振動の評価方法

2.1 本章の目的

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 本章の研究手法

本章は以下の手順を進める。

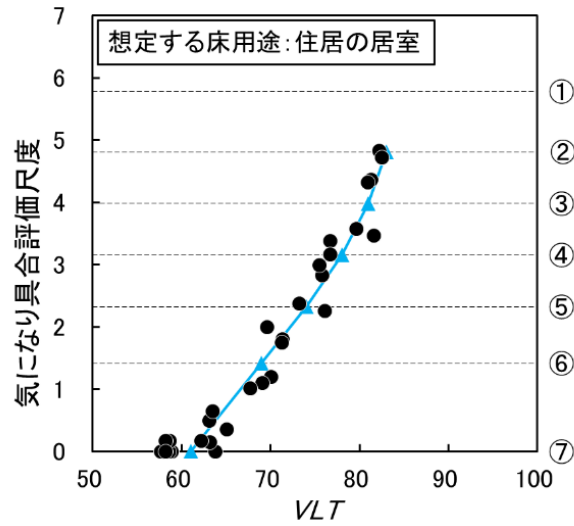
- 1) 既往の研究で木造大スパン床の歩行振動を対象に、床上を実際に人間が歩行し、受振位置で検査員に体感してもらう官能検査（以降“試料床検査”と記す）を実施した研究結果と、振動台による加振で振動台上の検査員に振動を体感してもらう官能検査（以降“振動台検査”と記す）を実施した研究結果を比較し、人間の振動感覚、評価と第1章で述べた性能値 *VLT* の関係の差を明らかにする。
- 2) 仕様の異なる複数の木造大スパン床を下地床として、複数の木質系乾式二重床を仕上げとして、それぞれ作製し、これらの組み合わせの中から試料床を選定して試料床検査を実施する。また、試料床検査と並行して、この試料床で発生する歩行振動を測定し、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

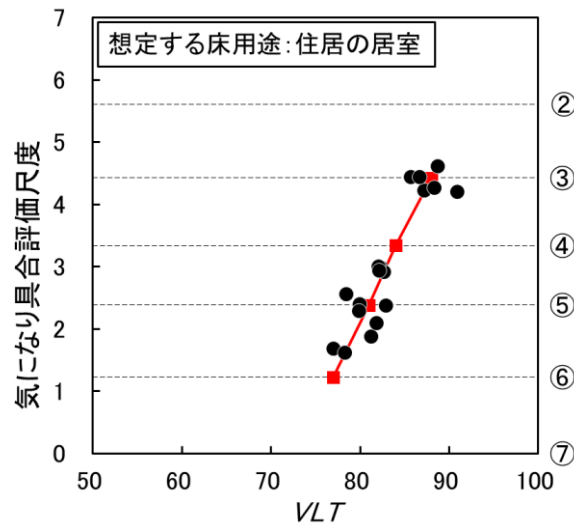
種々の木造大スパン床の歩行振動を対象に試料床検査を実施した横山，黒田ら^{5),6)}の検査結果と、木造大スパン床上に二重床を設置した床の歩行振動を対象に試料床検査を実施した横山ら³¹⁾の検査結果、および種々の加振源による振動を対象に振動台検査を実施した松下ら³⁰⁾の検査結果を比較した。ただし、松下らの振動台検査結果については、加振源が歩行によるものを比較対象とした。

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 $VL_{max} + 20\log(T^{1/4})$ を提示している。この VL_{max} 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。

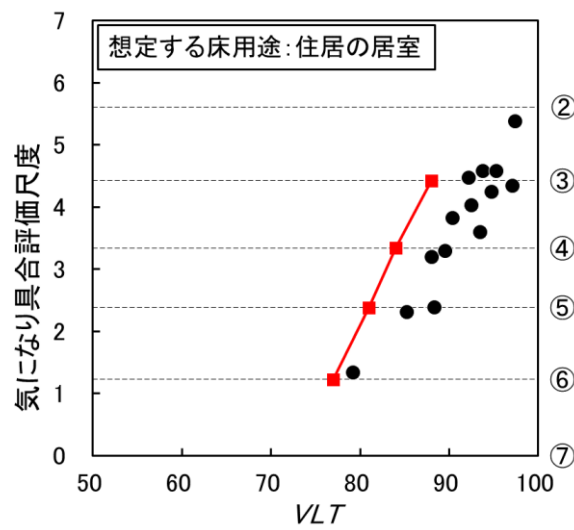
以上 3 つの官能検査結果を、松下ら³⁰⁾の検討結果を参考に、時定数 25ms の性能値 VLT を用いて比較する。以降、本研究では、単に “ VLT ” と記載する場合、時定数 25ms のものを指すこととする。図 2.1 に、3 つの検査結果と VLT の対応を示す。図の青線は松下ら³⁰⁾の対応の中心傾向、赤線は横山，黒田ら^{5),6)}の対応の中心傾向を表している。図より、それぞれの官能検査結果と VLT は良く対応しているものの、同じ判断範ちゅうに対する VLT には明確に差があり、小さい順に (a) 松下ら³⁰⁾の振動台検査，(b) 横山，黒田ら^{5),6)}の試料床検査，(c) 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。



(a) 松下ら³⁰⁾の振動台検査結果



(b) 横山, 黒田ら^{5), 6)}の試料床検査結果



(c) 横山ら³¹⁾の試料床検査結果

図 2.1 既往の官能検査結果の比較

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った床用途は、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。

表 2.1 官能検査の概要

	(1)試料床検査	(2)振動台検査[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、		
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	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	
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(年齢21~47歳, 体重40~74kg)		
受振姿勢	立位(リラックスした状態、履物はくつ下)		

(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。

表 2.2 下地床の基本的特性

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 2.3 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

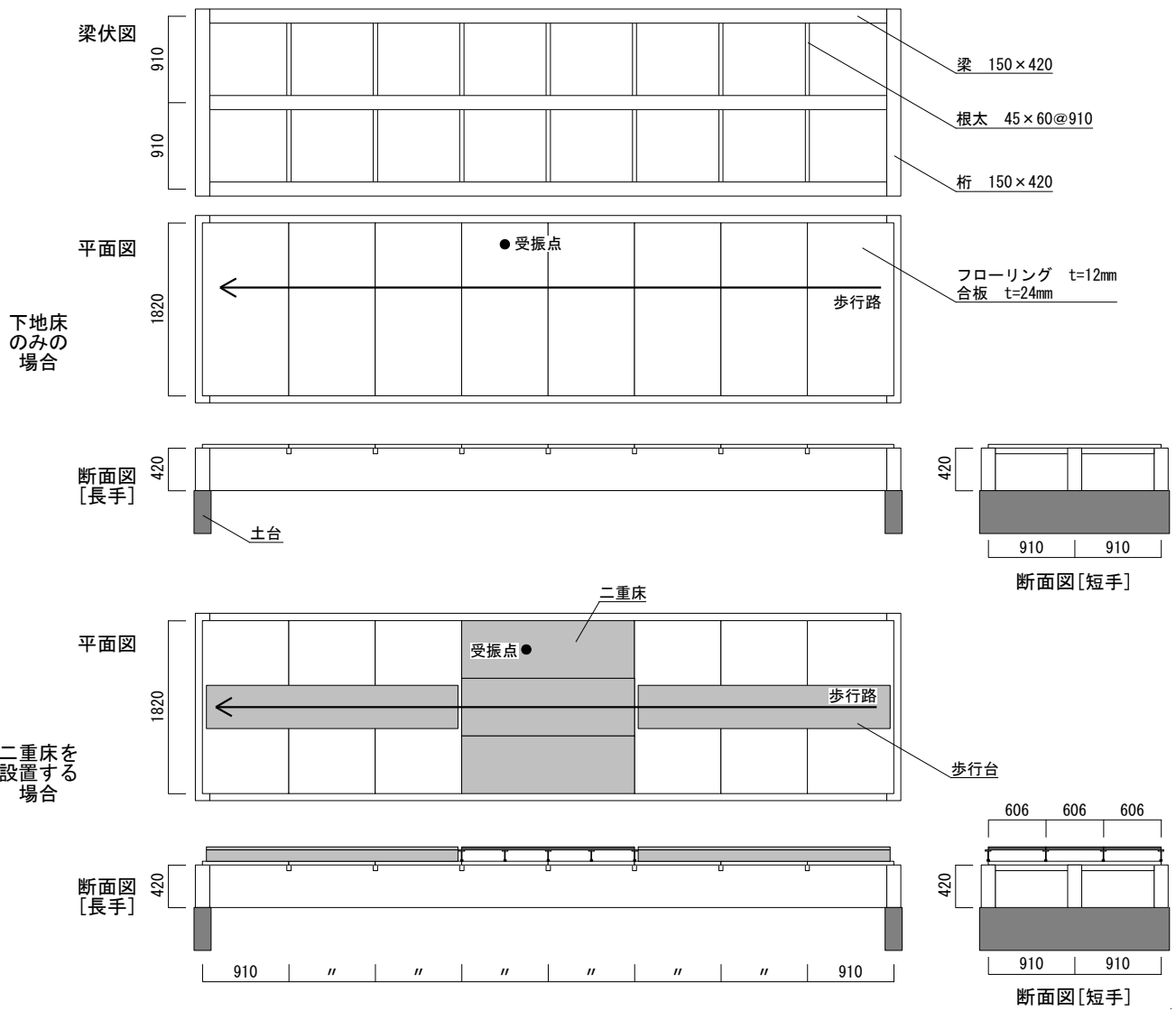


図 2.2(1) 試料床の概要(下地床 8P420)

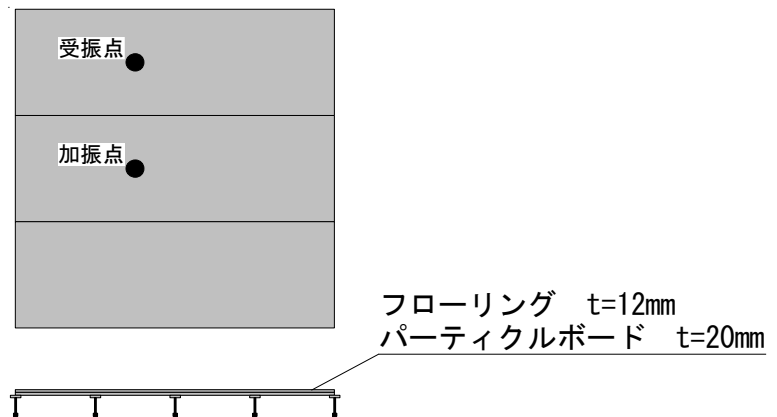


図 2.2(2) 試料床の概要(二重床の概要)



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 VL_{max} 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 $1/(2\sqrt{2})$ 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 $1/(2\sqrt{2})$ 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、 VL_{max} を元の振動から 3dB 低減 ($1/\sqrt{2}$ 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。

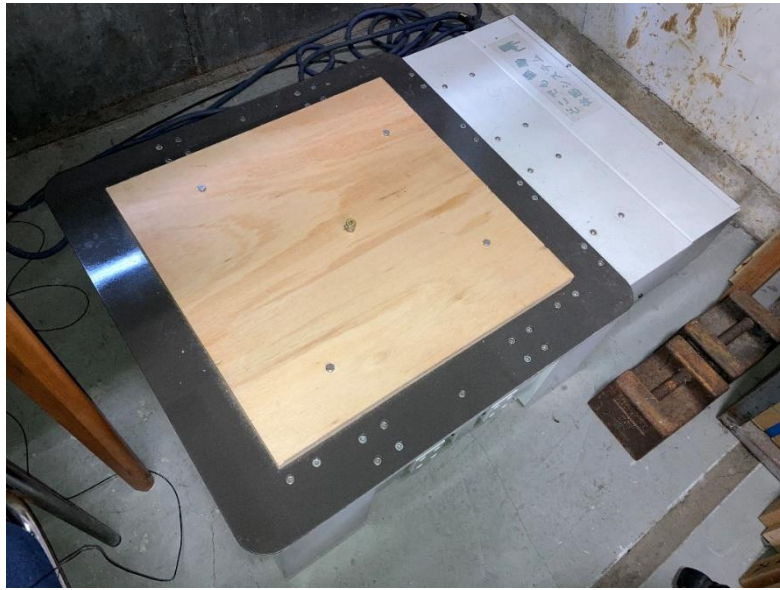


写真 2.3 振動台の様子

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。

表 2.4 分散分析結果

			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

* : 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。

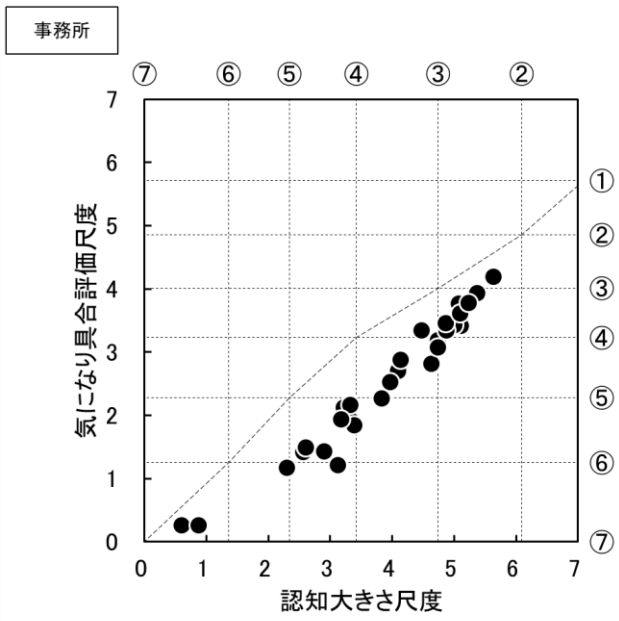
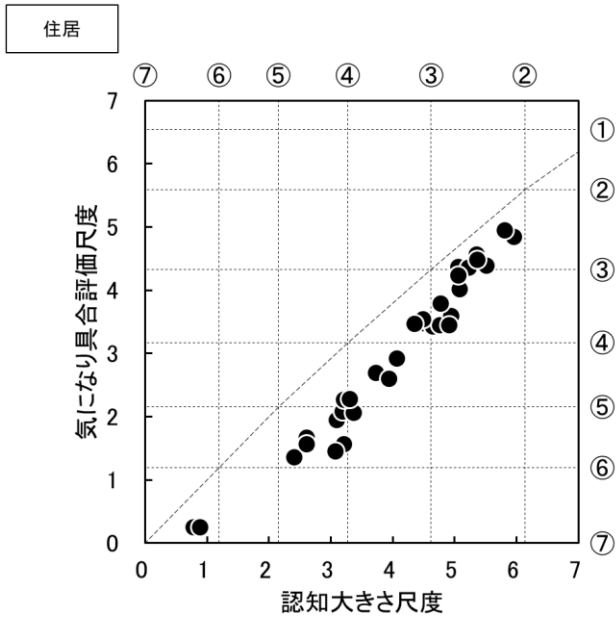


図 2.3 認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の関係

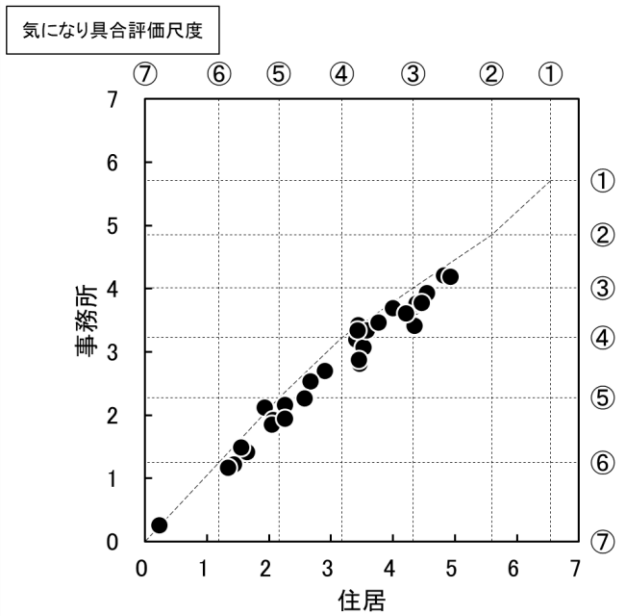
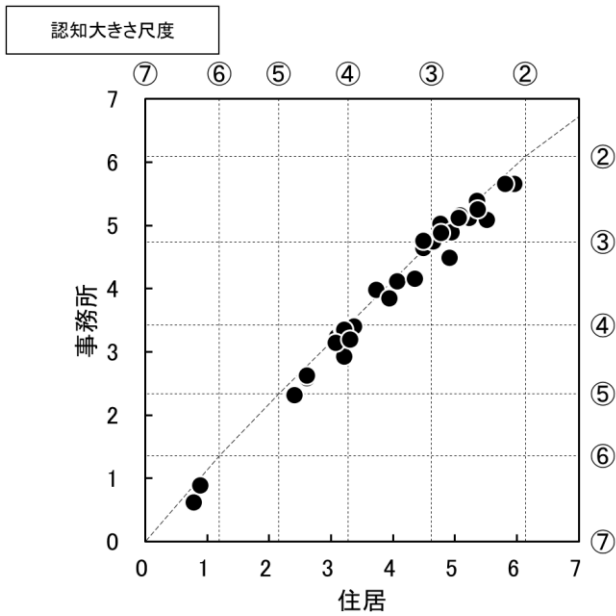


図 2.4 住居の居室と事務所の執務室の関係

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。

$$VLT = VL_{max} + 20\log(T^{1/4}) \quad (2.1)$$

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)

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

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)

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)

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。

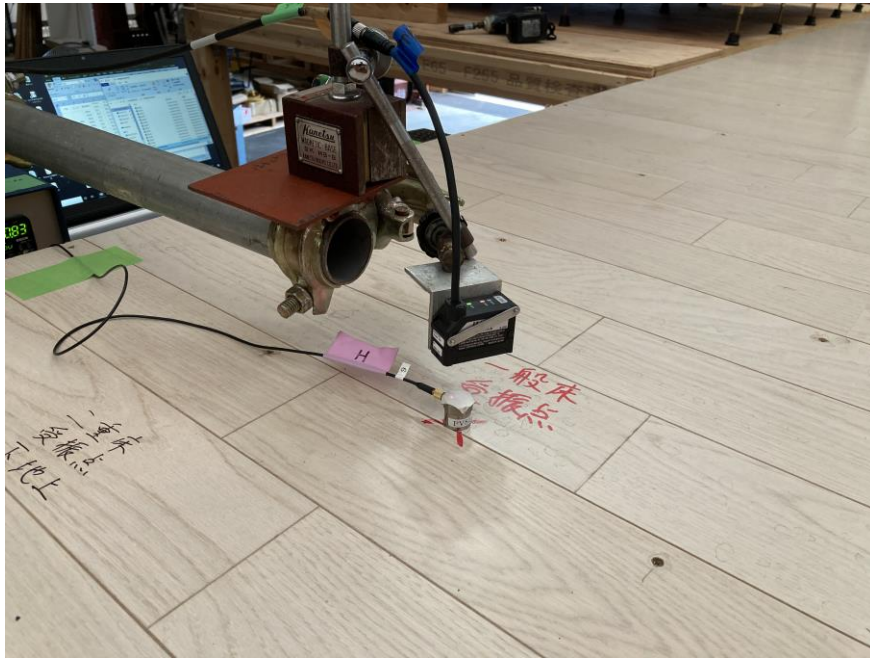


写真 2.6 測定機器設置の様子(試料床)

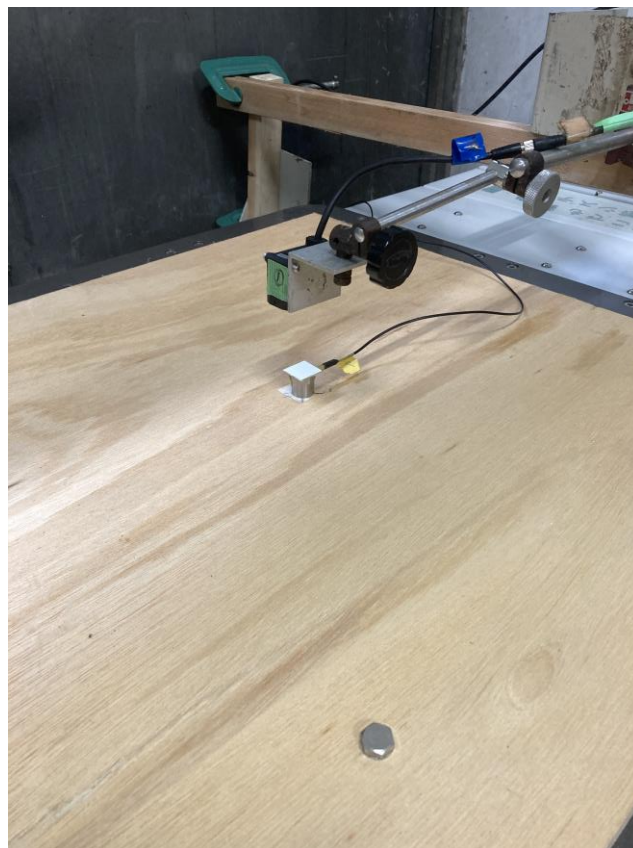


写真 2.7 測定機器設置の様子(振動台)

表 2.5 VLTの測定結果

試料名		VLT (dB)	VLTの最大値と最小値の差(dB)	
試料床 検査	12P1000	一般床	90.0	5.2
		二重床①	89.8	3.2
		二重床②	92.6	1.3
		二重床③	87.7	2.2
	10P720	一般床	84.5	1.4
		二重床①	88.8	1.9
		二重床②	90.9	2.1
		二重床③	87.2	3.0
	8P600束	一般床	80.0	2.6
		二重床①	86.6	2.2
		二重床②	87.3	3.3
		二重床③	78.8	5.8
	8P420	一般床	89.2	2.4
		二重床①	92.4	1.5
		二重床②	93.9	1.8
		二重床③	90.2	1.6
6P450	一般床	83.3	1.4	
	二重床①	91.5	2.4	
	二重床②	91.7	2.1	
	二重床③	86.7	1.4	
振動台 検査 (同じ振動)	12P1000	一般床	75.3	
		二重床③	73.5	
	10P720	一般床	72.2	
		二重床③	73.9	
	8P600束	一般床	66.6	
		二重床③	61.6	
	8P420	一般床(3dB低減)	83.6	
		一般床(6dB低減)	80.9	
		一般床	77.6	
		二重床③	79.7	
6P450	一般床	71.9		
	二重床③	74.2		
振動台 検査 (異なる振動)	12P1000	一般床	75.3	4.3
		二重床③	73.5	2.9
	10P720	一般床	72.4	1.6
		二重床③	74.3	4.4
	8P600束	一般床	66.6	2.8
		二重床③	61.8	1.5
	8P420	一般床(3dB低減)	84.2	2.3
		一般床(6dB低減)	81.0	1.4
		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	

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。

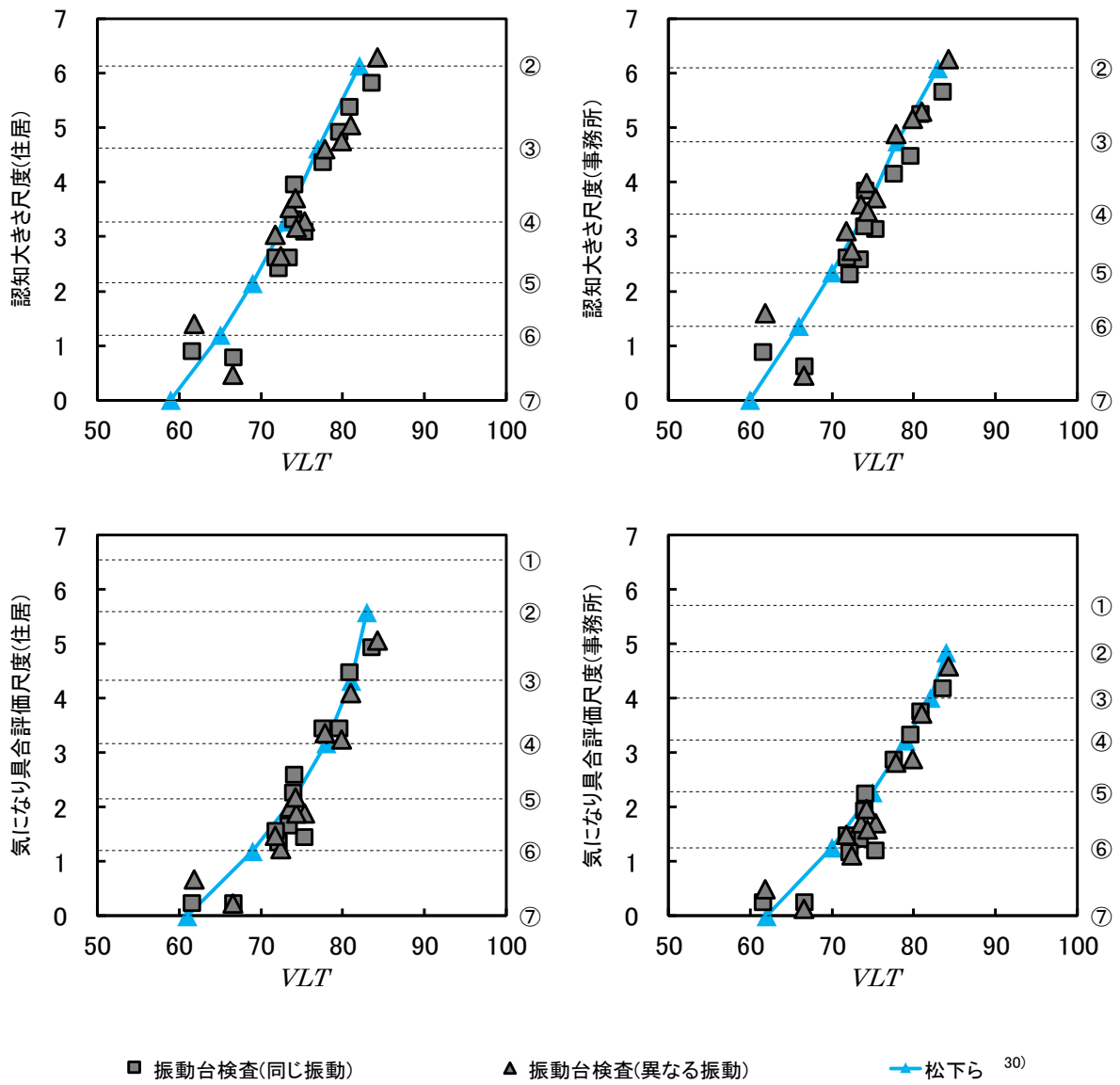


図 2.5(1) VLTと心理学的尺度の関係 (振動台検査)

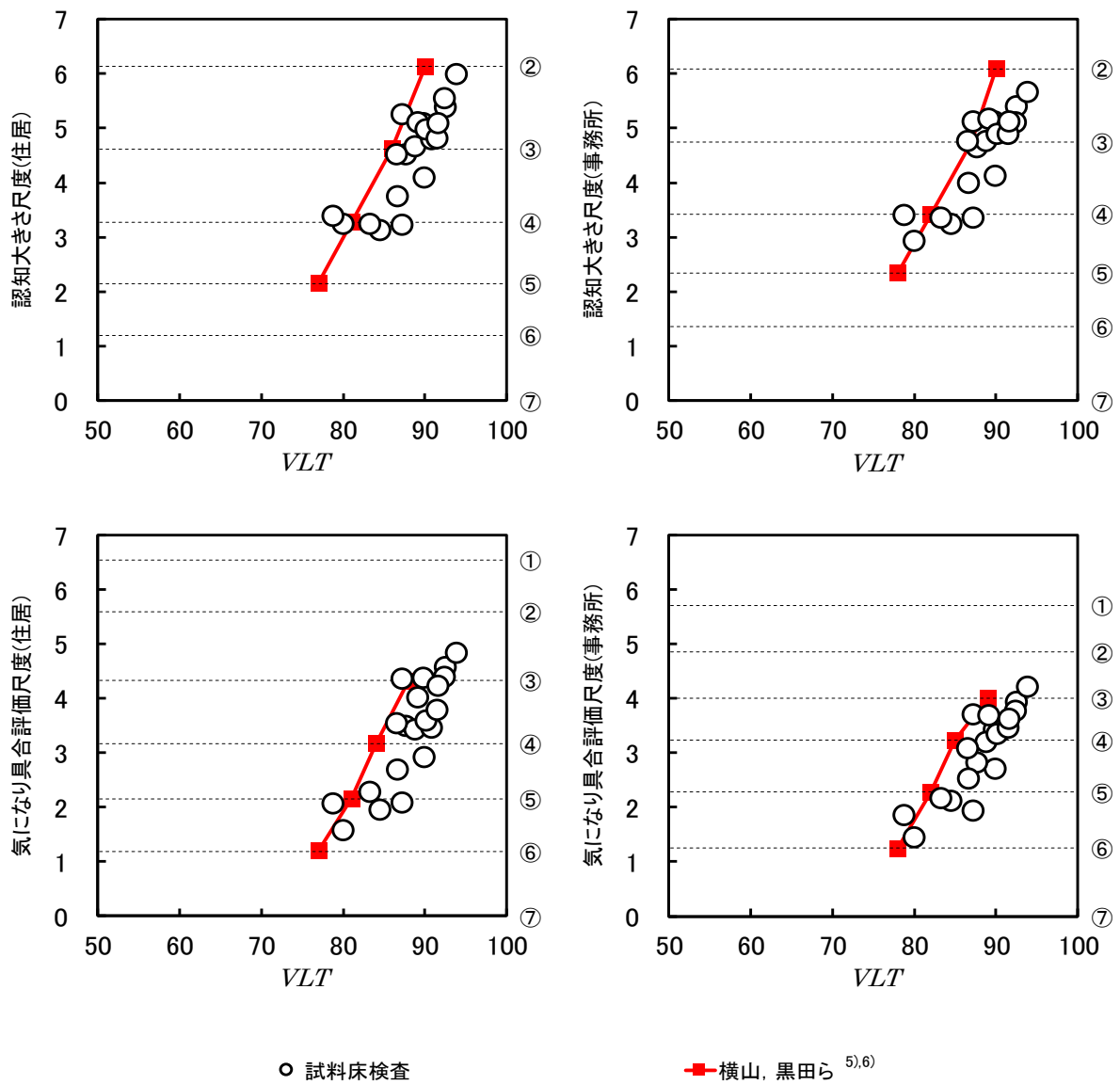


図 2.5(2) VLTと心理学的尺度の関係 (試料床検査)

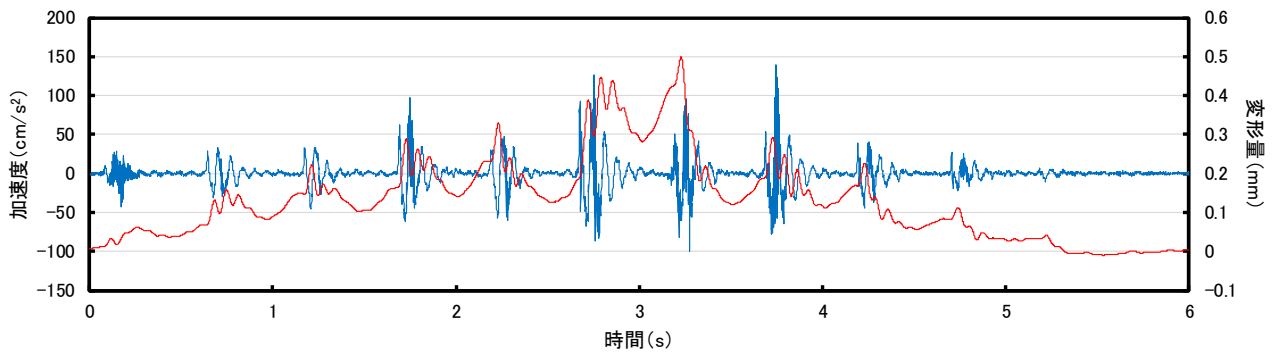
2.6 木造大スパン床の歩行振動の性能値の検討

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う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。

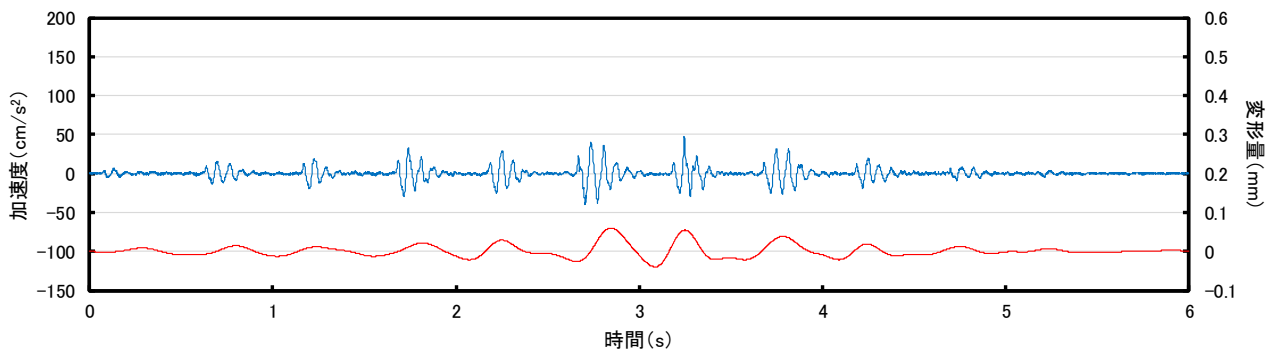
2.6.1 加速度と変形の関係の検討

先述のとおり、試料床検査と振動台検査には差が出るという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、局所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所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所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、着地点近傍の局所的な変形は、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。



(1) 試料床検査試料 8P420 一般床



(2) 振動台検査試料 8P420 一般床 (3dB 低減)

図 2.6 歩行振動の時刻歴波形の比較の例

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 D_{max} 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 D_{max} を抽出したのに対し、本研究の D_{max} は受振者の直近の 1 歩のみを対象として抽出した。この D_{max} 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 VL_{max} と同様、 D_{max} をレベル換算することとし、下式で得られる DL_{max} を算出した。

$$DL_{max} = 20 \log(D_{max} / D_0) \quad (2.2)$$

ここで、 D_{max} : 変形の最大値(m)

D_0 : 基準の変形量(1×10^{-5} m)

表 2.6 に、 D_{max} の測定結果と DL_{max} を示す。また、図 2.7(1) に、 DL_{max} と VL_{max} の関係を示す。図より、 VL_{max} は 75~90dB に分布しており、 DL_{max} 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、 DL_{max} 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。

表 2.6 D_{max} , DL_{max} の測定結果

試料名		D_{max} (cm)	DL_{max} (dB)	
試料床 検査	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
		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	

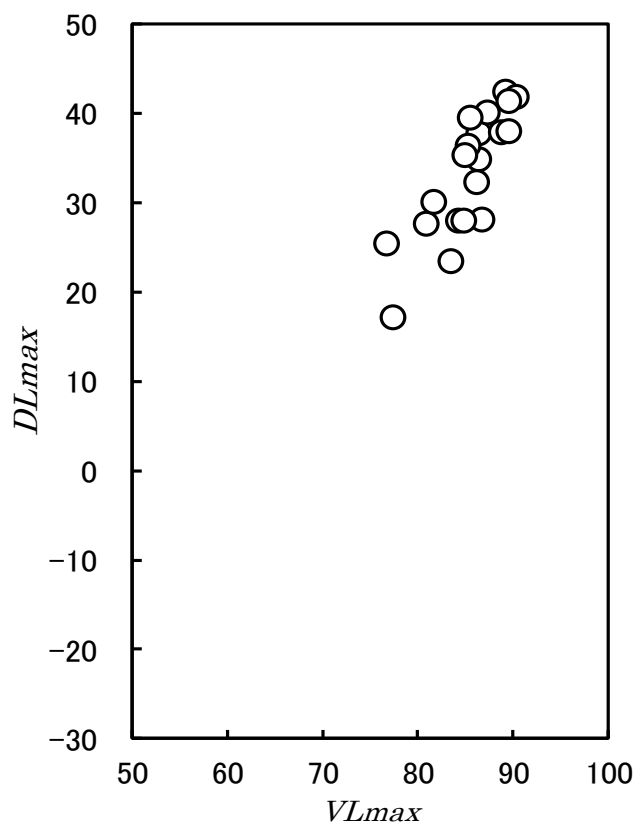


図 2.7(1) VL_{max} と DL_{max} の関係

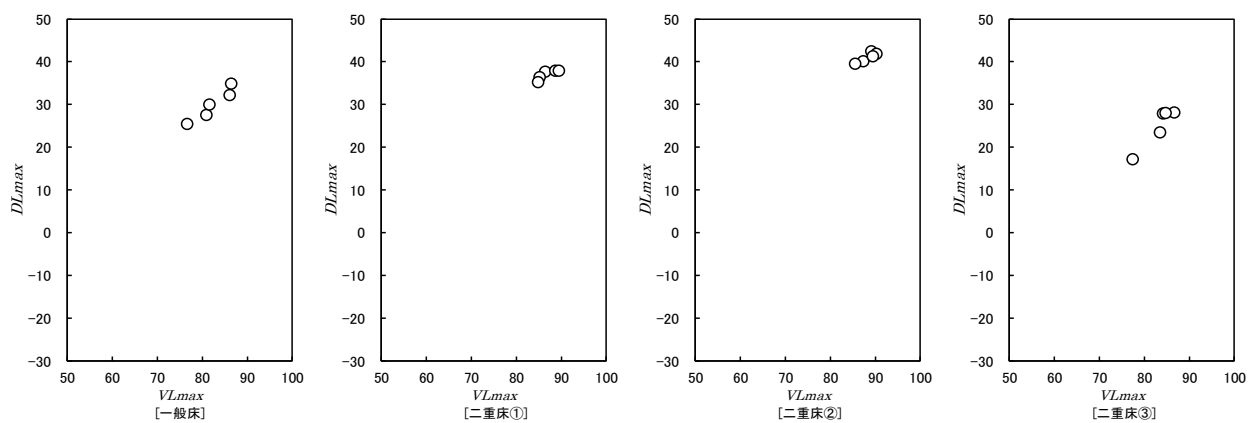


図 2.7(2) VL_{max} と DL_{max} の関係[仕上げ別]

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 VL_{max} を低減する補正を検討した。具体的には、

- ・ DL_{max} が $VL_{max} - \alpha$ 以上の場合に VL_{max} を低減する
- ・ VL_{max} の低減量は、 $VL_{max} - \alpha$ に対する DL_{max} の超過量 $DL_{max} - (VL_{max} - \alpha)$ に β を乗じた値とする

こととし、低減後の VL_{max} (以降“補正 VL_{max} ”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 $\alpha = 80\text{dB}$ 、 $\beta = 0.5$ 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。

$$DL_{max} = VL_{max} - \alpha \quad (2.3)$$

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、 DL_{max} により VL_{max} がマスクされ始める割合は、 VL_{max} の大きさにより変化しないと仮定したためである。

一方、図の灰色の直線は、 DL_{max} でマスクされた結果 VL_{max} 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 (DL_{max} によらず VL_{max} は一定) であるのに対し、上側では、 DL_{max} が 1 dB 増加すると VL_{max} が β dB 増加する (β dB 加えた VL_{max} 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 VL_{max} は、以下の式で表される。

$$\text{補正 } VL_{max} = VL_{max} - \beta \{ DL_{max} - (VL_{max} - \alpha) \} \quad (2.4)$$

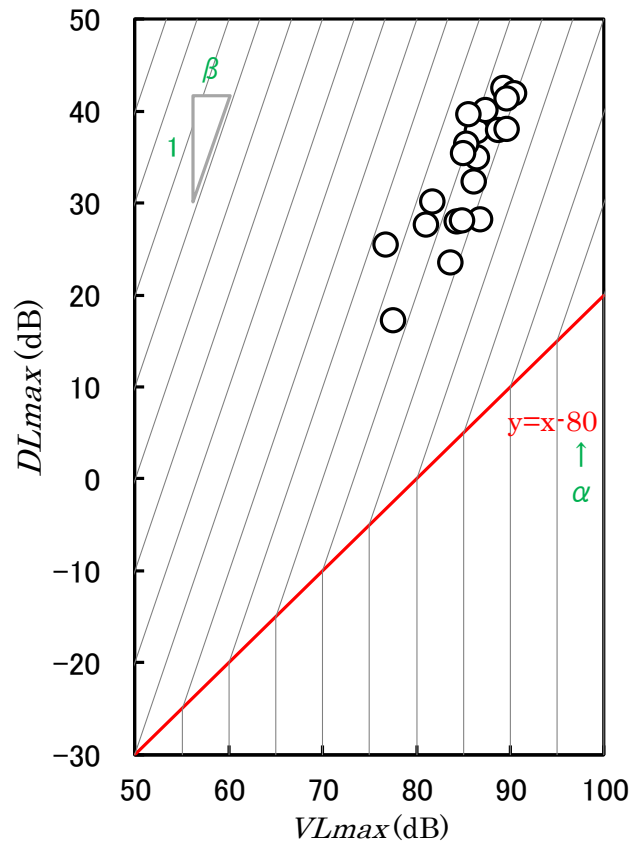


図 2.8 変形に基づく加速度の補正の概要

この α と β を種々変化させながら、心理学的尺度と補正 VL_{max} 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³⁰⁾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、 $\alpha = 70\text{dB}$ 、 $\beta = 0.7$ 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、 $\alpha = 70\text{dB}$ 、 $\beta = 0.7$ 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。

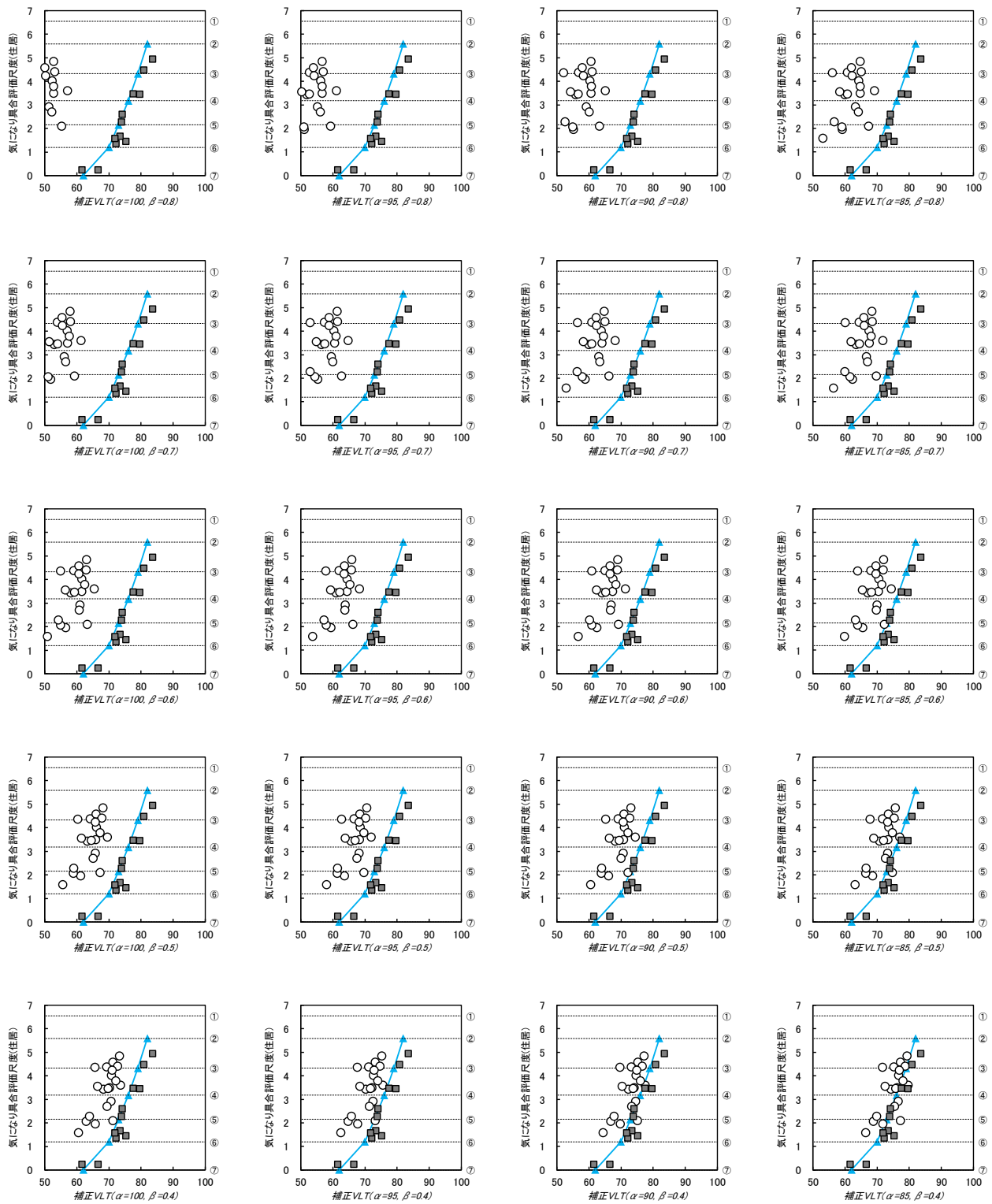


図 2.9(1) 補正 VLT と気になり具合評価尺度の関係 ($\alpha = 100 \sim 85\text{dB}$)

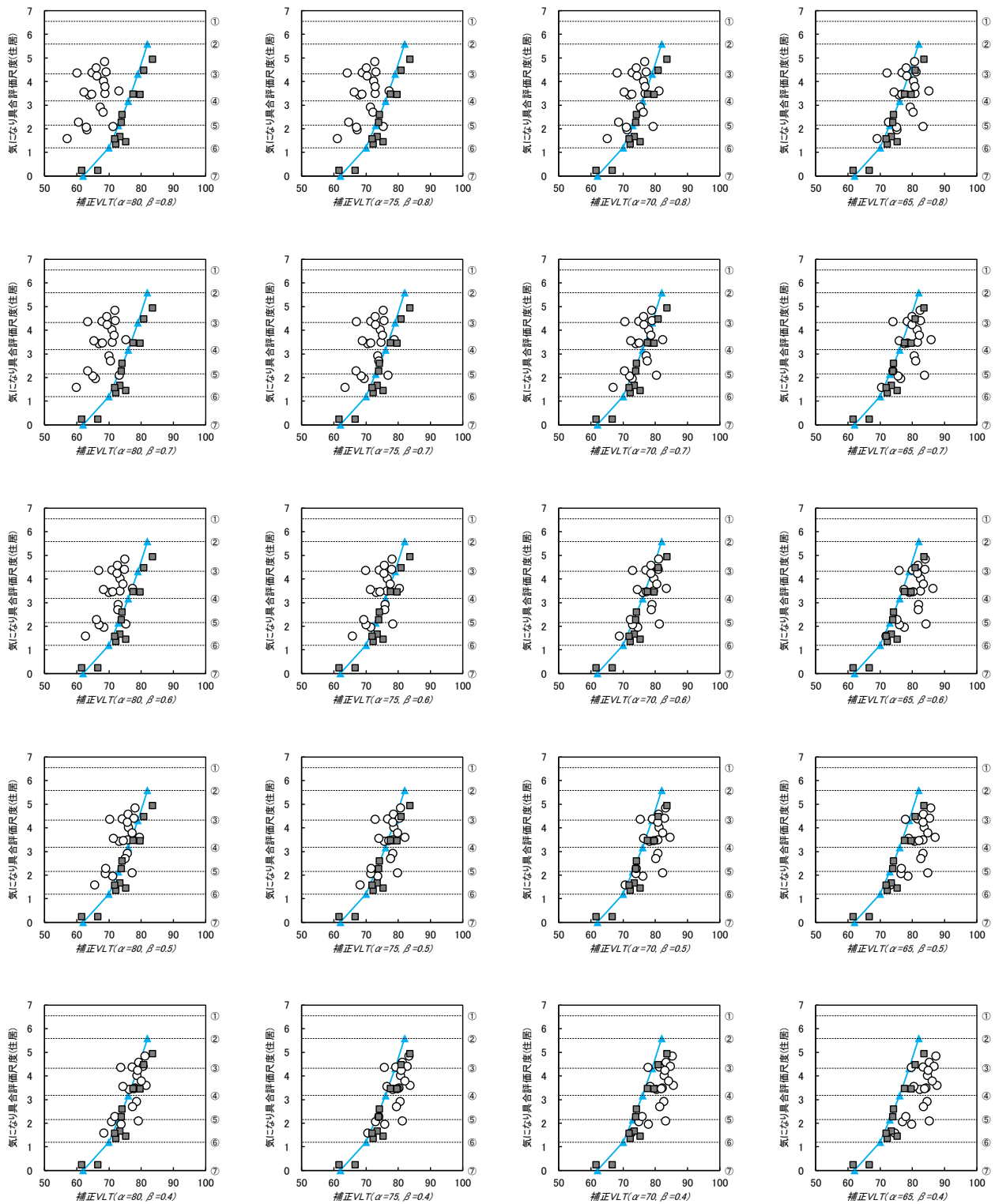


図 2.9(2) 補正 VLT と気になり具合評価尺度の関係 ($\alpha = 80 \sim 65$ dB)

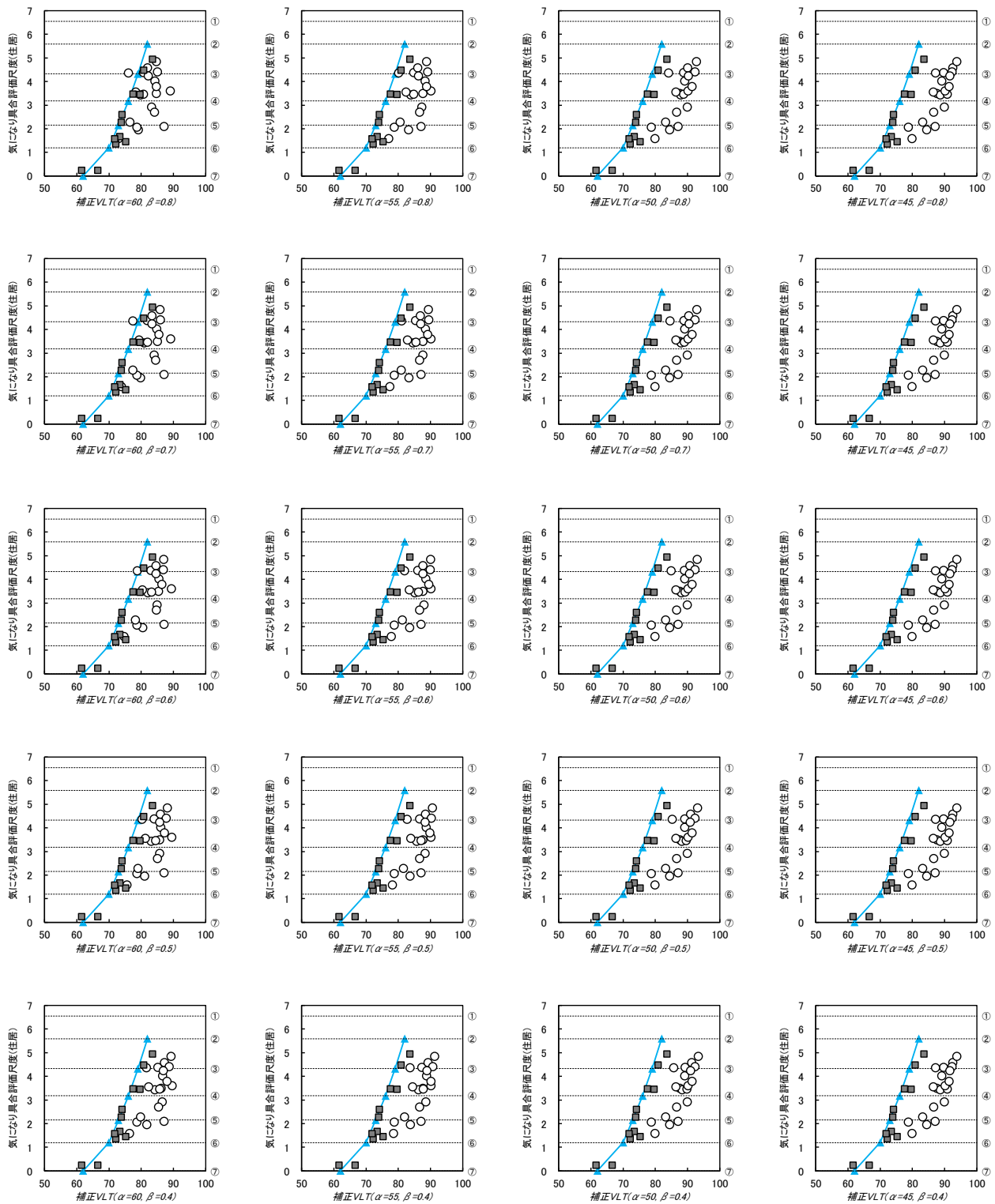
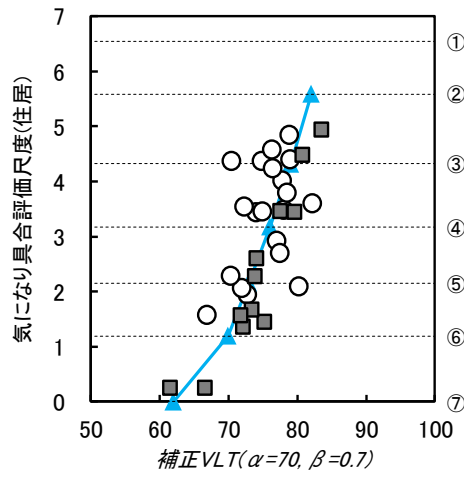
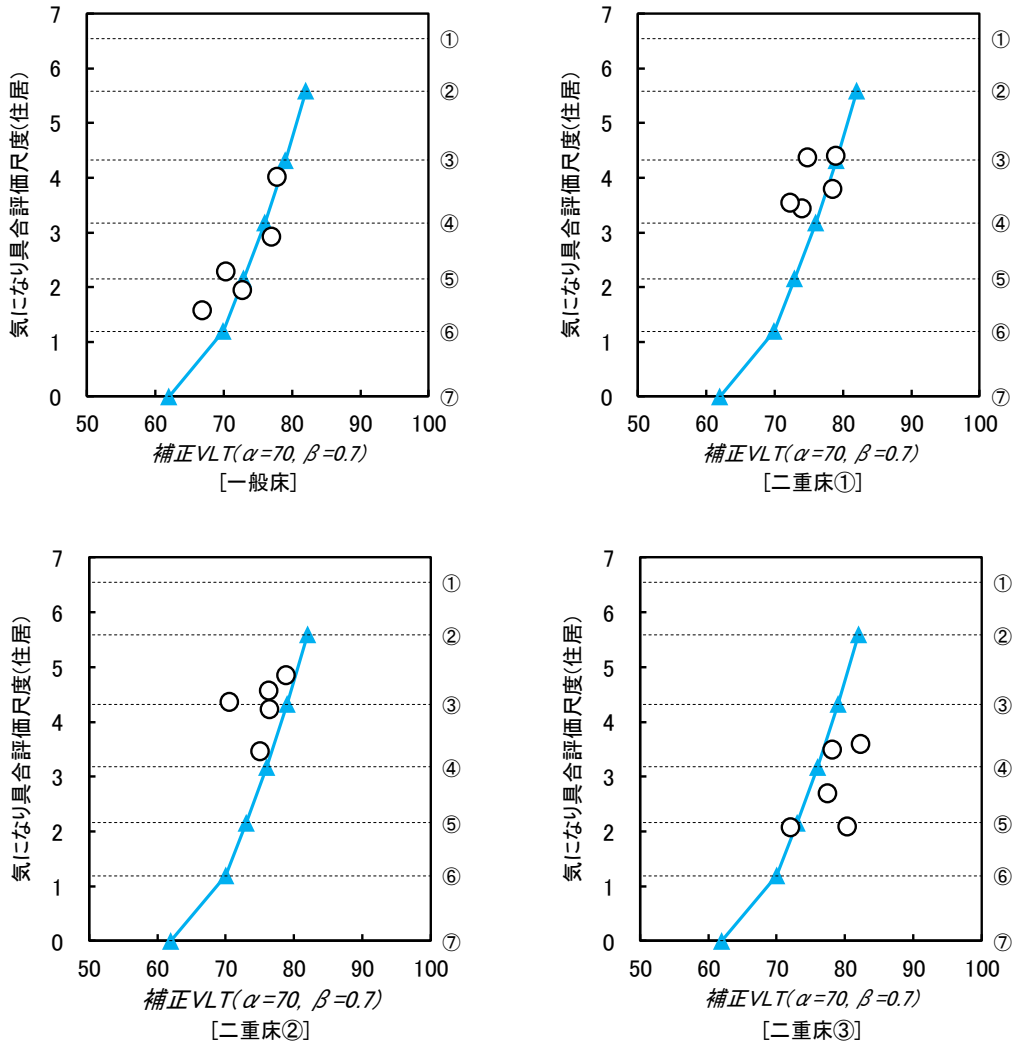


図 2.9(3) 補正 VLT と気になり具合評価尺度の関係 (α = 60~45dB)



(a) 全試料



(b) 仕上げ別

図 2.10 補正 VLT と心理学的尺度の関係 ($\alpha = 70\text{dB}$, $\beta = 0.7$)

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、 D_{max} 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、 DL_{max} が γ 以上の場合、その超過量を補正 VL_{max} 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 VL_{max} を、 VL_{max}^* と記すこととする。 VL_{max}^* は、以下の式で表される。

$$VL_{max}^* = VL_{max} - \beta \{ DL_{max} - (VL_{max} - \alpha) \} + \{ DL_{max} - \gamma \} \quad (2.5)$$

図 2.11 に、 α 、 β と γ による補正の概要を示す。図には、例として $\alpha = 80\text{dB}$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $\gamma = 34\text{dB}$ 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 VL_{max} に対して VL_{max}^* が等しくなる位置、すなわち等感度曲線を表している。

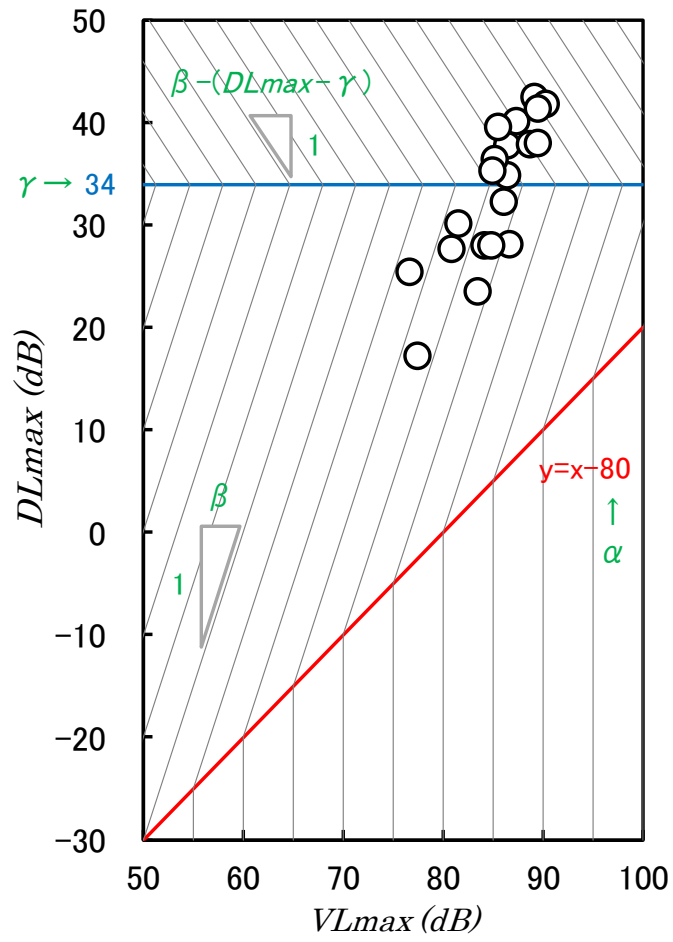
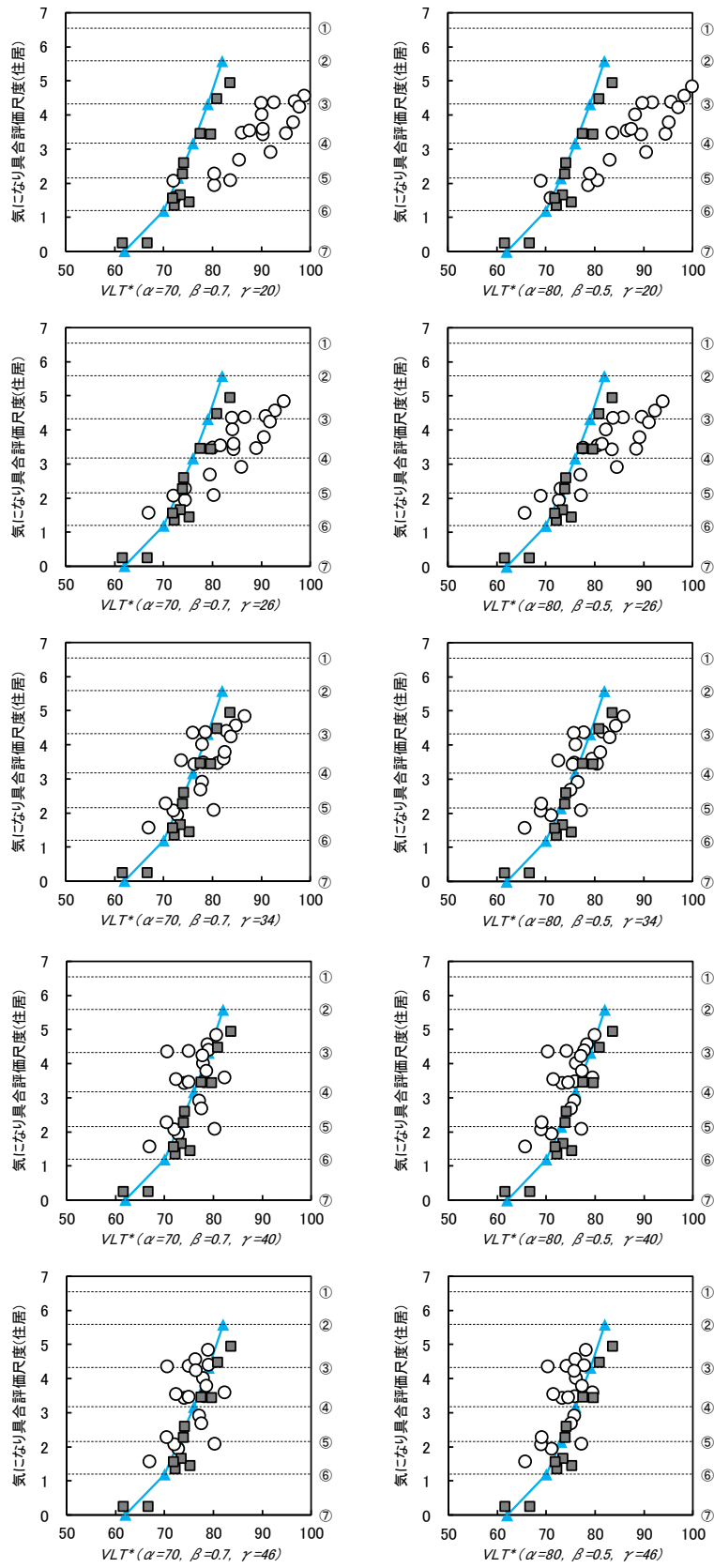


図 2.11 変形に基づく加速度の補正の概要（補正追加後）

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、 $\alpha = 70\text{dB}$ 、 $\beta = 0.7$ 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、 $\alpha = 70\text{dB}$ 、 $\beta = 0.7$ の場合と同様の傾向を示し、かつ $\gamma = 30 \sim 40\text{dB}$ 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、 $\gamma = 30 \sim 40\text{dB}$ 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、 $\alpha = 80\text{dB}$ 、 $\beta = 0.5$ 、 $\gamma = 34\text{dB}$ 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○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。



(a) $\alpha=70\text{dB}$, $\beta=0.7$

(b) $\alpha=80\text{dB}$, $\beta=0.5$

図 2.12 VLT*と気になり具合評価尺度の関係

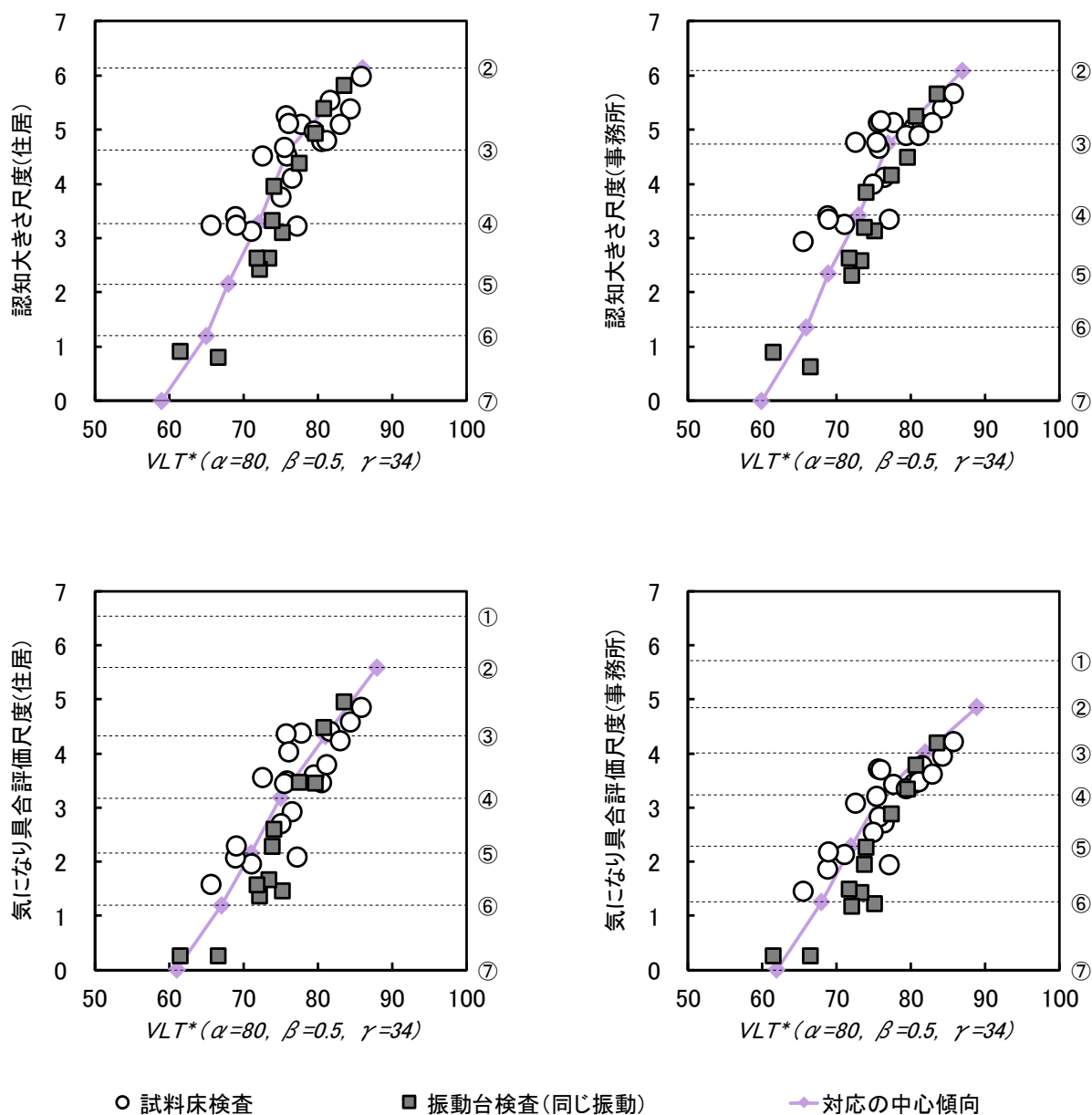


図 2.13 VLT* と心理学的尺度の関係

表 2.7 各判断範ちゅうに対応する VLT*

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
⑦	0	59	0	61	0	60	0	62

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 VL_{max} を、受振者直近の1歩の変形から抽出される DL_{max} で補正して得られる VL_{max}^* 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

3.1 本章の目的

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 本章の研究手法

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。

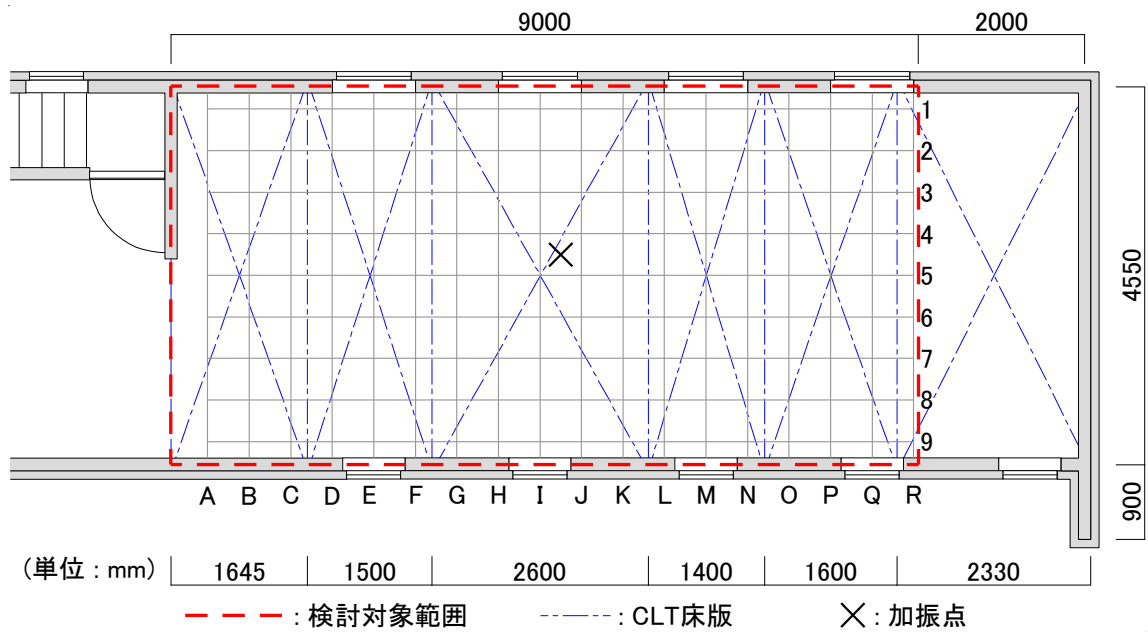


図 3.1 対象床の概要



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。



(a) 変位計設置の様子



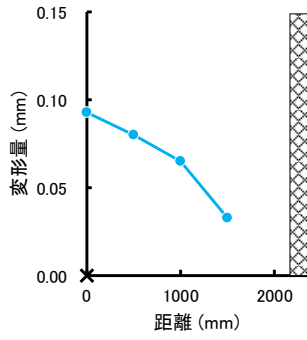
(b) 変位計設置の様子[拡大]



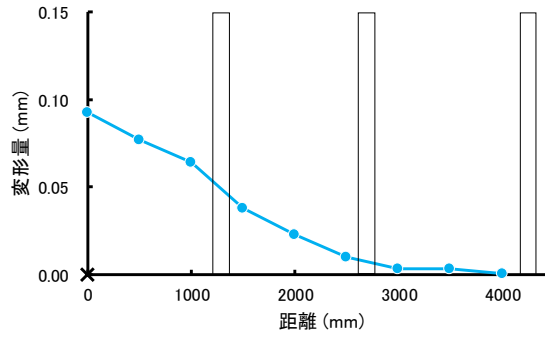
(c) 重錘設置の様子

写真 3.4 静的載荷試験の様子

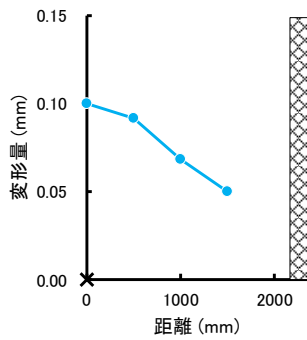
●—測定結果 × 載荷位置 □ スプライン接合部位置 ⊞ 壁位置



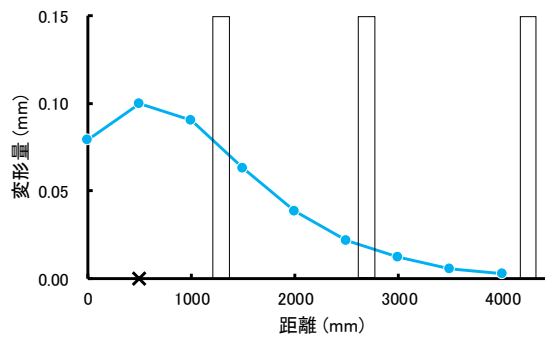
I5 載荷・列方向



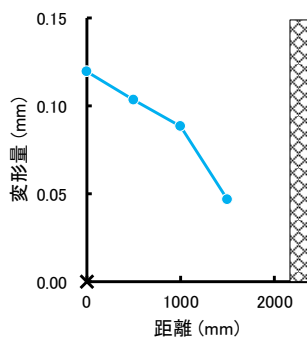
I5 載荷・行方向



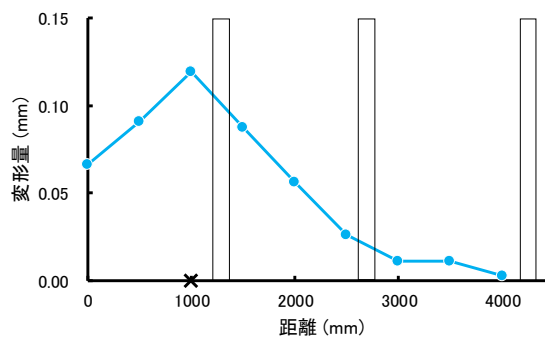
J5 載荷・列方向



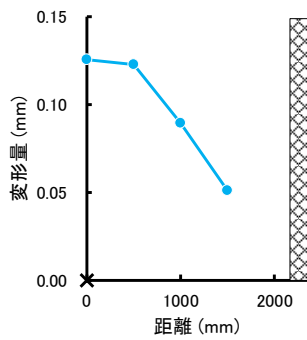
J5 載荷・行方向



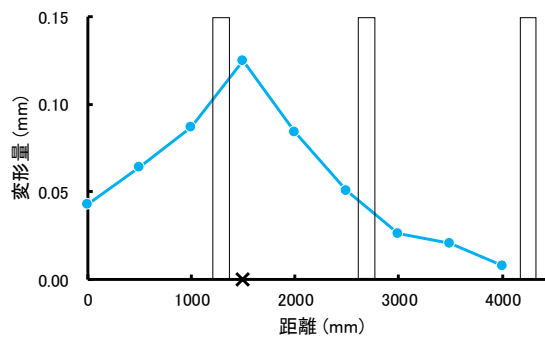
K5 載荷・列方向



K5 載荷・行方向



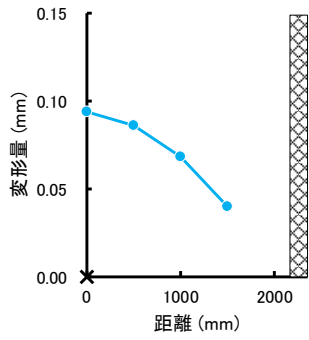
L5 載荷・列方向



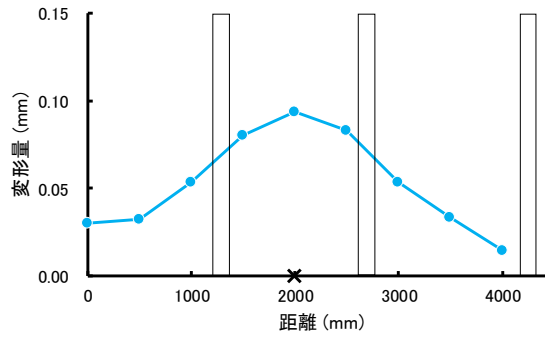
L5 載荷・行方向

図 3.2(1) 静的載荷試験結果 (I5~L5 載荷)

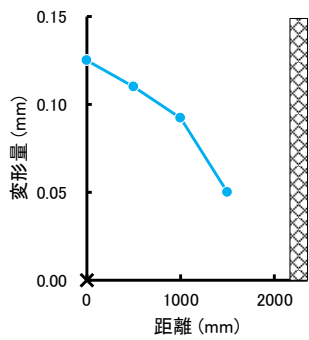
●—測定結果 × 載荷位置 □ スプライン接合部位置 ⊞ 壁位置



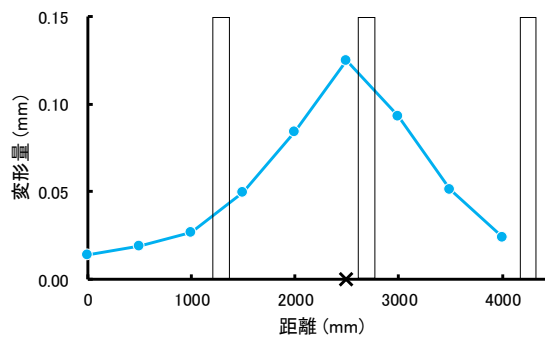
M5 載荷・列方向



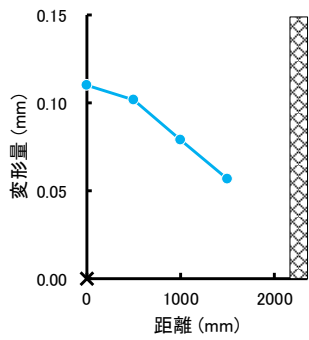
M5 載荷・行方向



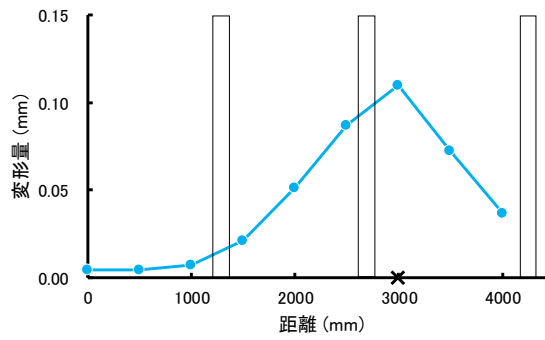
N5 載荷・列方向



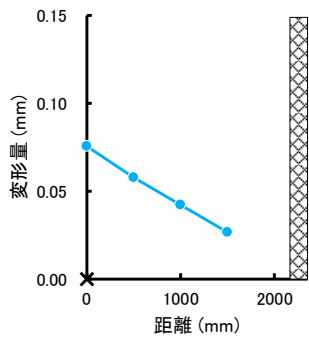
N5 載荷・行方向



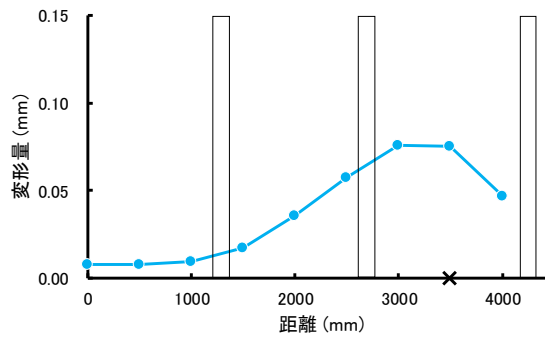
O5 載荷・列方向



O5 載荷・行方向



P5 載荷・列方向



P5 載荷・行方向

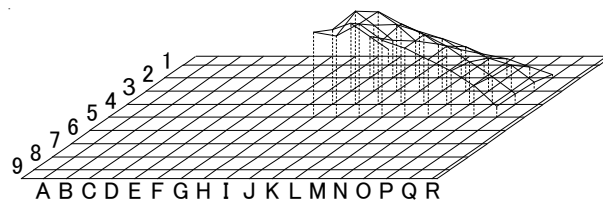
図 3.2 (2) 静的載荷試験結果 (M5~P5 載荷)

(2) 動的加振試験

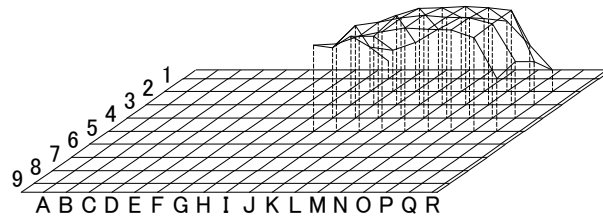
まず、対象床の固有振動数および振動モードを確認する目的で、**図 3.1**に示す I1～I5, J2～Q5 の計 37 点の床上に加速度計 (RION 社製 PV-84, PV-85) を設置したうえで、×で示す点をハンマーで加振し、各点における加速度を測定した。加速度計は、薄手の両面テープで床上に固定した。ここで、加振点を対象範囲中央近傍の I5 から行方向、列方向に半グリッドずらしたのは、I5 を加振点とすると中央近傍に節が発生するモードの振動が励起されにくくなるのを避けるためである。**写真 3.5**に、測定の様子を示す。測定結果より、I5 から各点への伝達関数を算出し、固有振動数を求めるとともに、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。



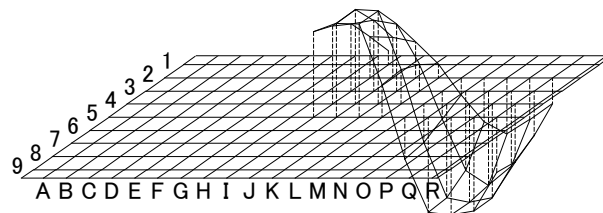
写真 3.5 動的加振試験の様子(振動モード測定)



1次モード(固有振動数: 22.0Hz)



2次モード(固有振動数: 25.5Hz)



3次モード(固有振動数: 32.0Hz)

図 3.3 固有振動数と振動モードの測定結果

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 [15(83kg)]	4.1
条件3: 床上2人 [15(83kg), 14(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 VL_{max} 、 DL_{max} 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

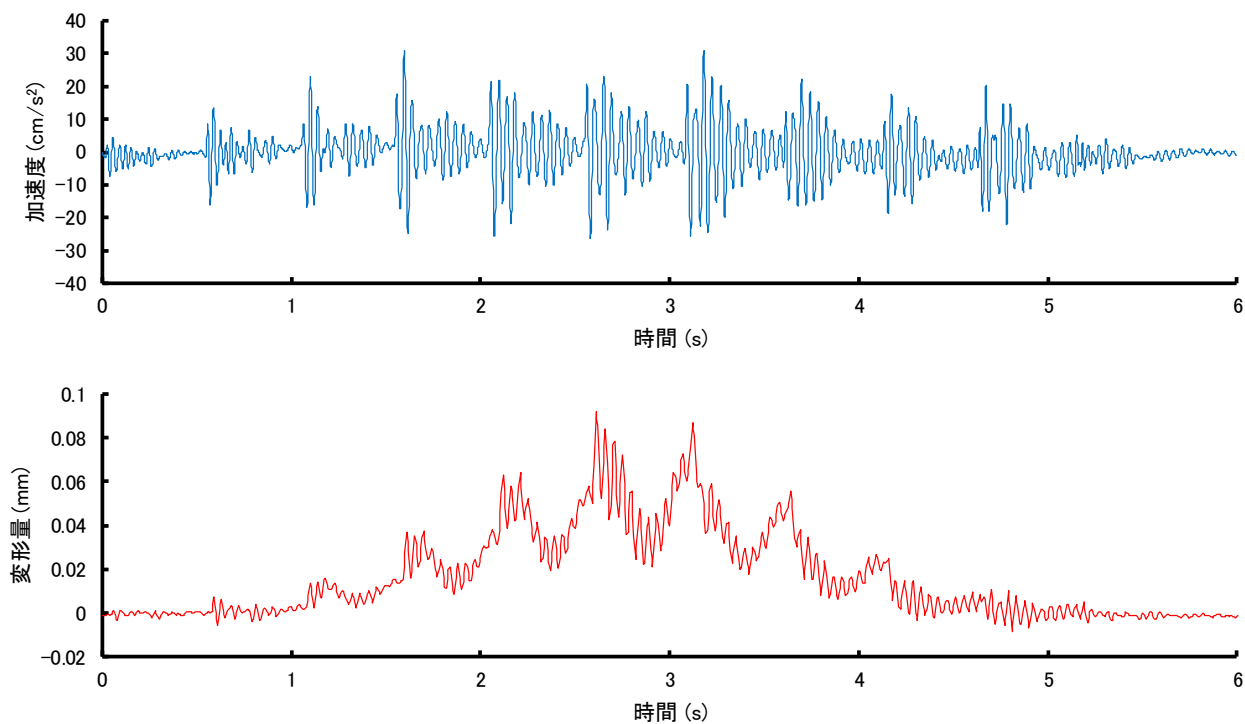


図 3.4 歩行振動の測定結果の例

表 3.2 VL_{max} , DL_{max} と VLT^* の測定結果

	VL_{max} (dB)	DL_{max} (dB)	VLT^* (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。

表 3.3 アンケート調査の概要

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、	
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	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	
加振方法	試料床上の歩行路を歩行者 (成人男性，身長181cm，体重70kg)が2Hzで歩行	
検査員	成人男女14名（年齢22～61歳，体重45～92kg）	
受振姿勢	立位（リラックスした状態、履物はくつ下）	

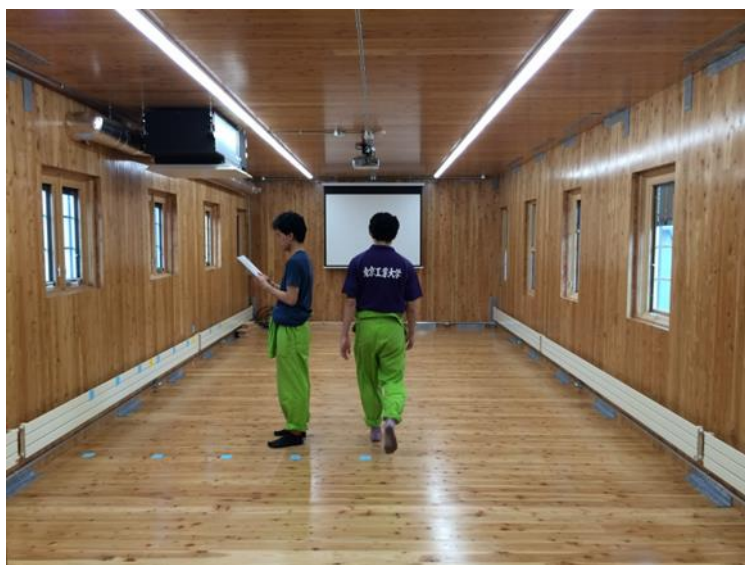


写真 3.8 アンケート調査の様子

(再掲)表 2.7 各判断範ちゅうに対応する VLT^*

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
⑦	0	59	0	61	0	60	0	62

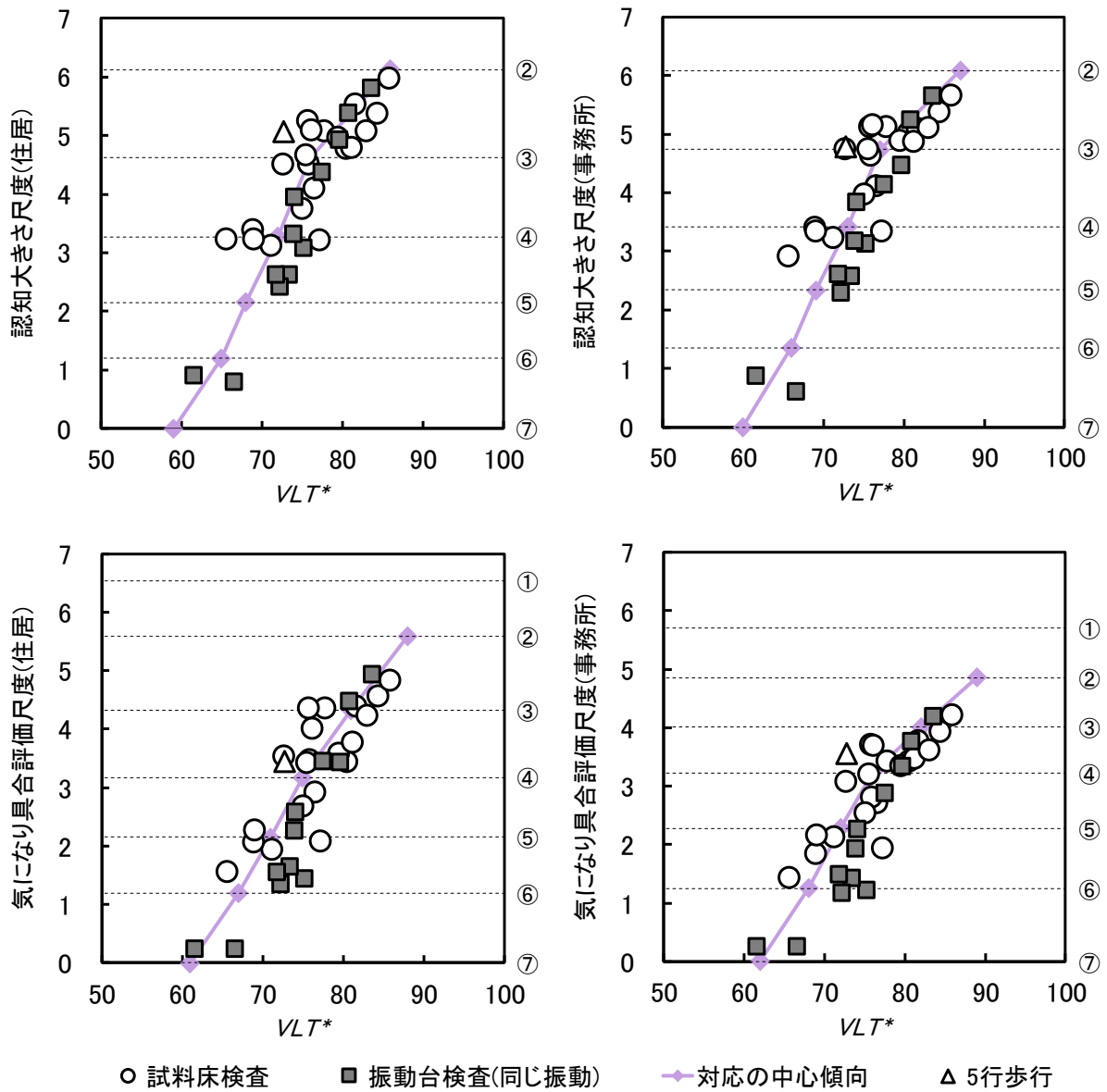


図 3.5 木造床の評価指標の適用結果

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/mm^2 (強軸方向) および 2.54kN/mm^2 (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/m^3 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。

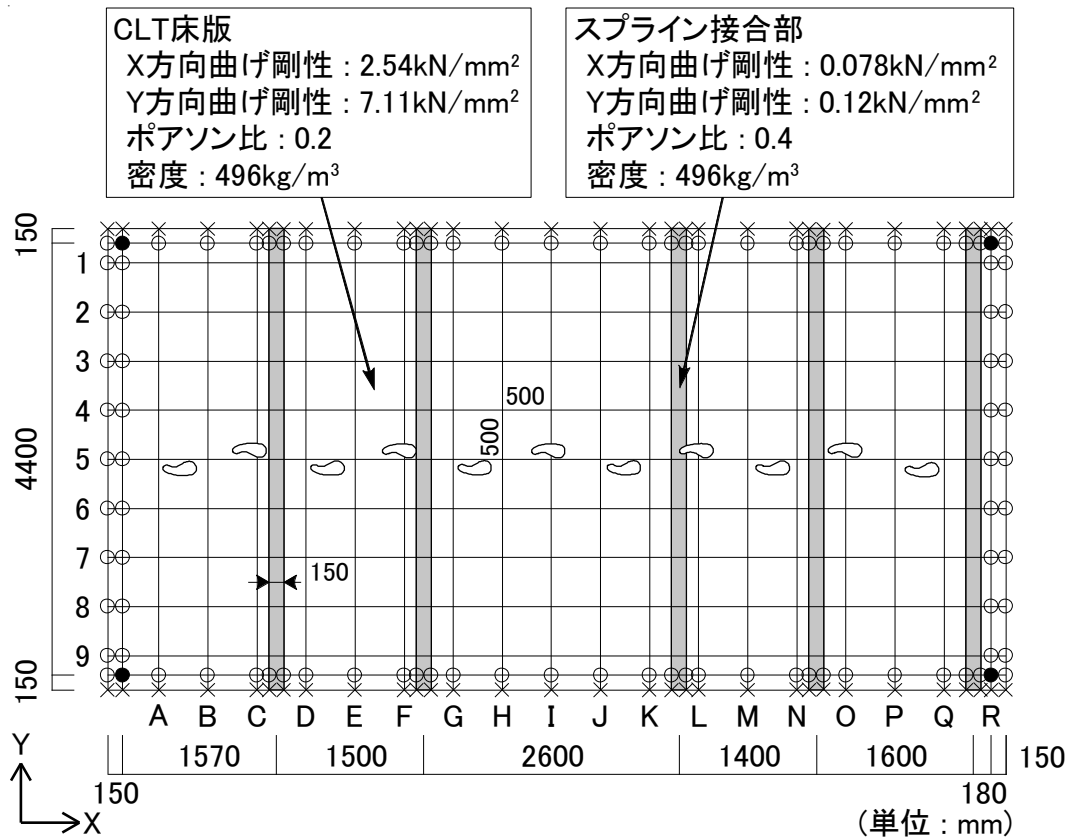


図 3.6 解析モデルの概要

(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。

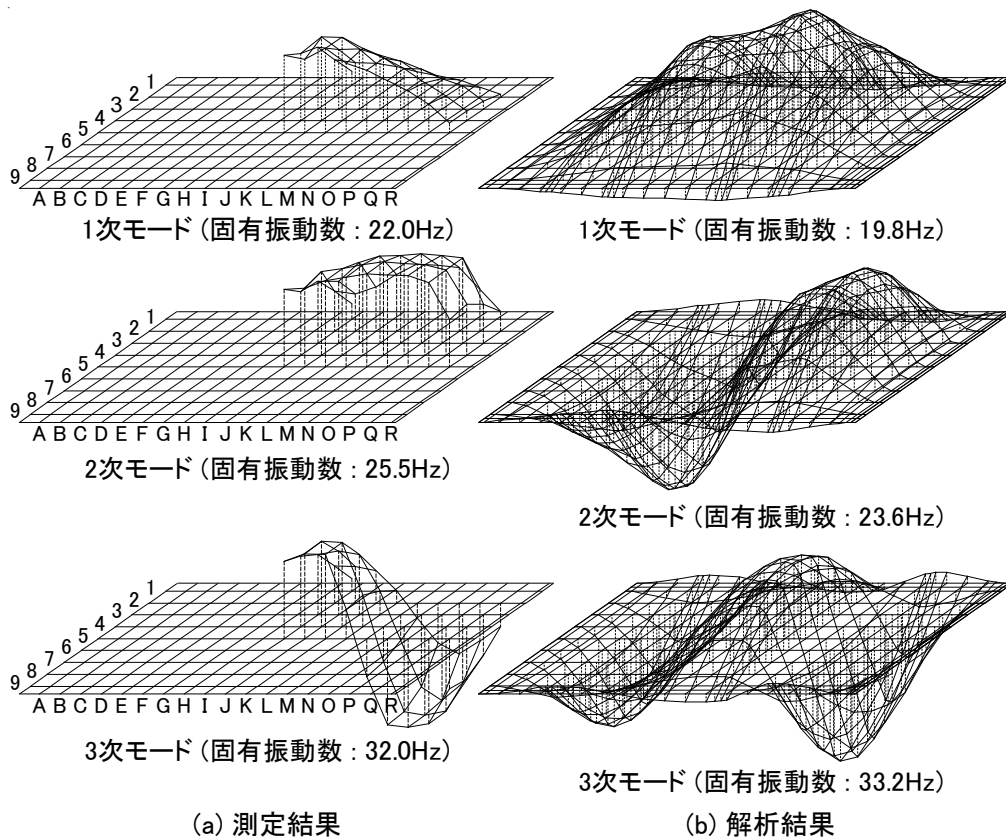


図 3.7 固有振動数と振動モードの測定結果と解析結果の比較

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、下階の壁に近い 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。

● 測定結果 ■ 解析結果 × 載荷位置 □ スプライン接合部位置 ▨ 壁位置

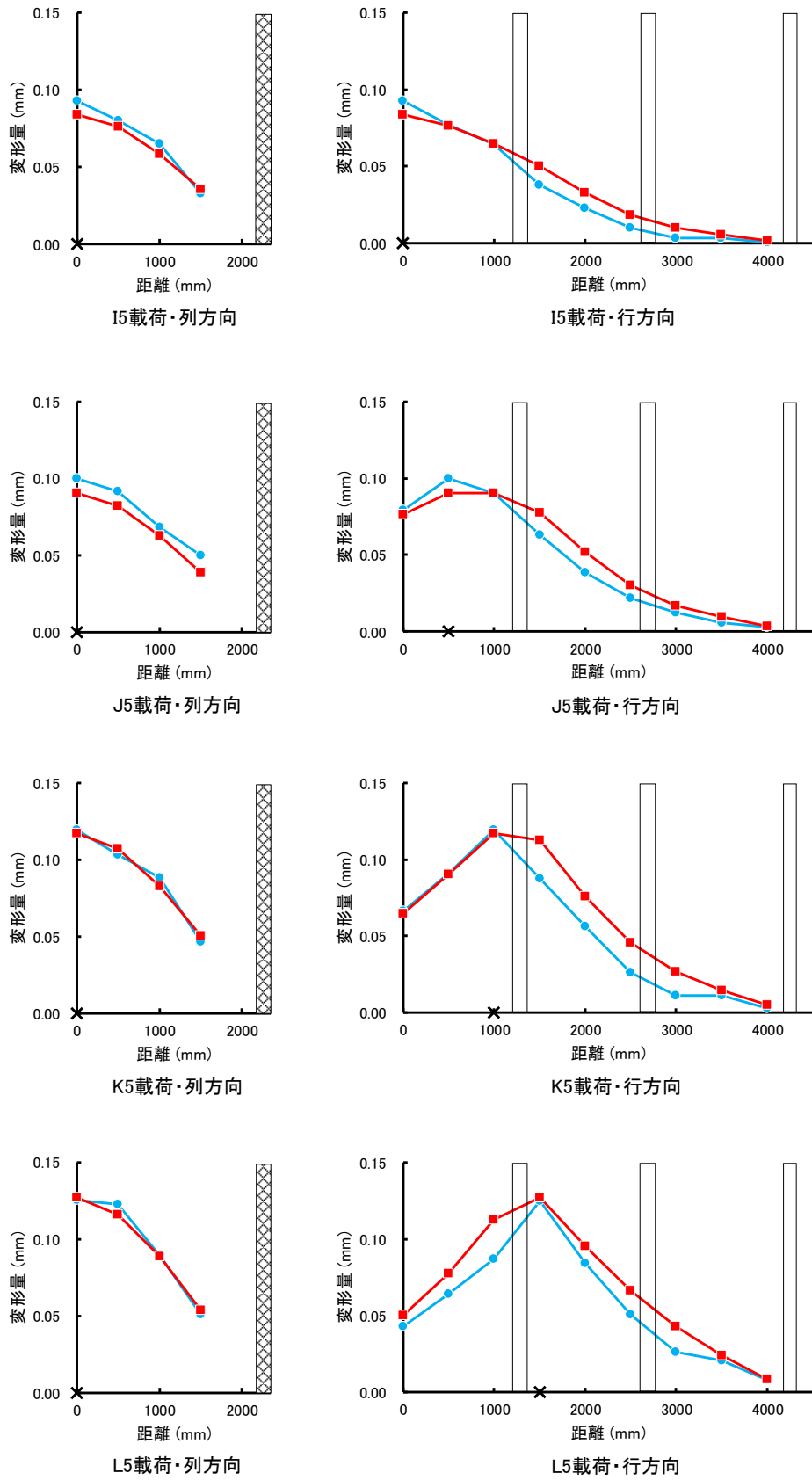
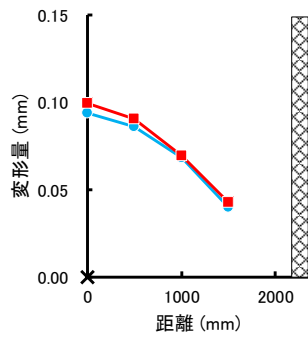
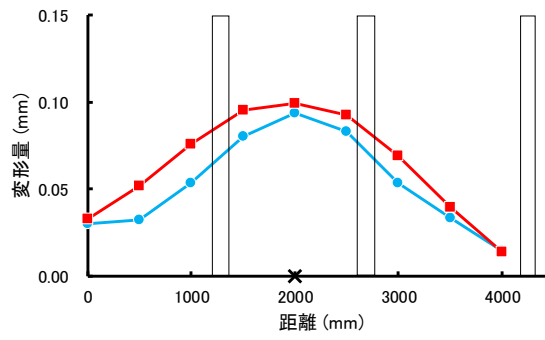


図 3.8(1) 静的載荷試験結果および解析結果の比較 (I5~L5 載荷)

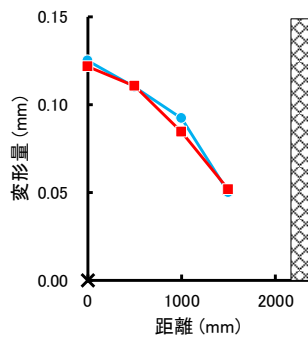
● 測定結果 ■ 解析結果 × 載荷位置 □ スプライン接合部位置 ▨ 壁位置



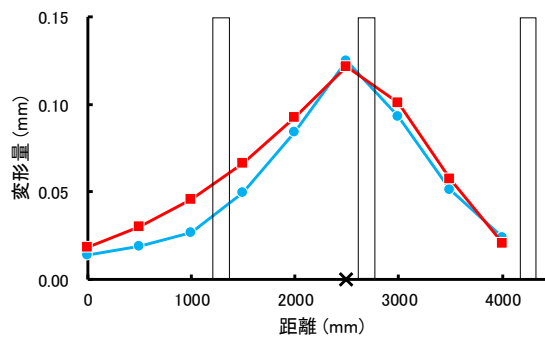
M5載荷・列方向



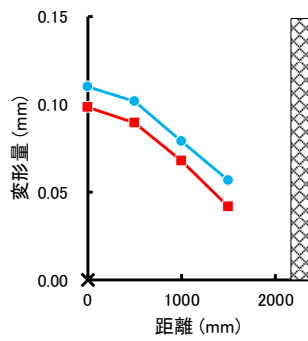
M5載荷・行方向



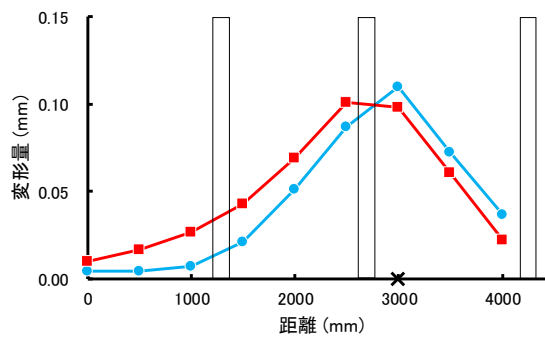
N5載荷・列方向



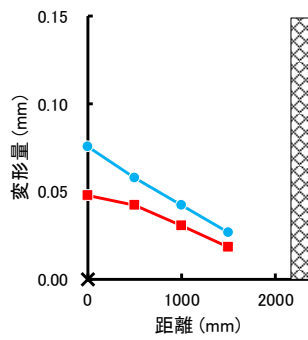
N5載荷・行方向



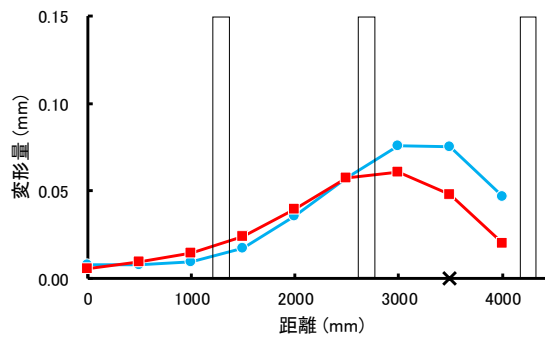
O5載荷・列方向



O5載荷・行方向



P5載荷・列方向



P5載荷・行方向

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) 歩行応答解析

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。

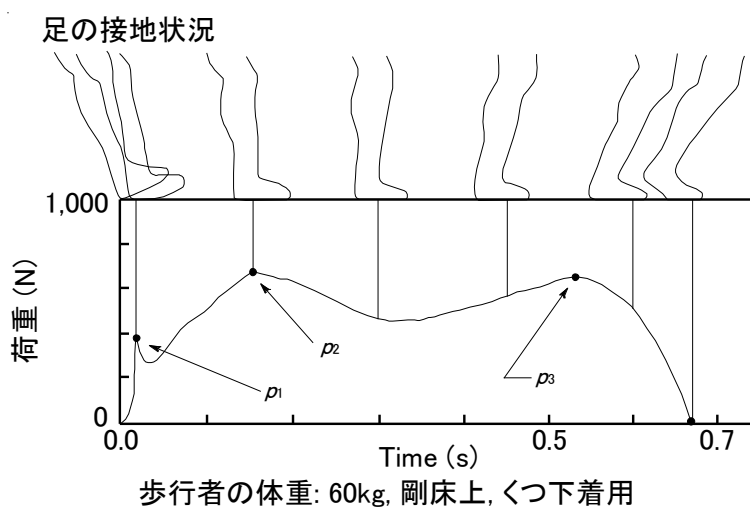


図 3.9 建築物荷重指針および設計資料に示された歩行荷重

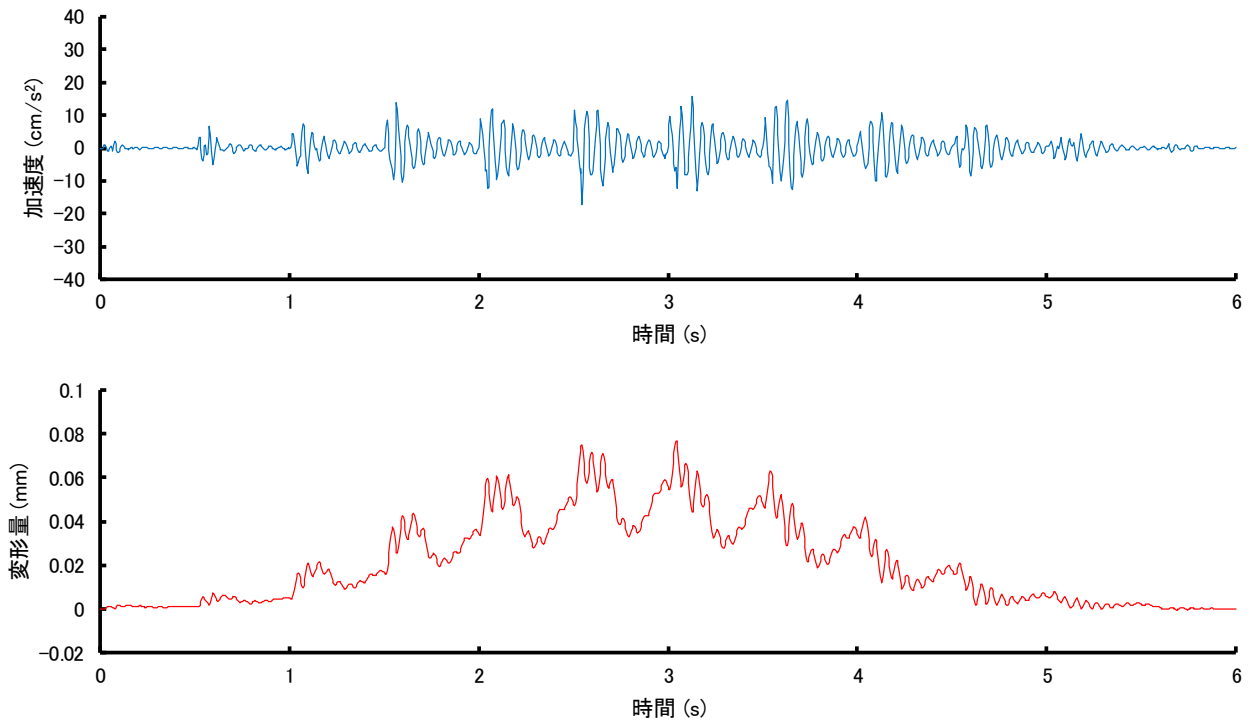
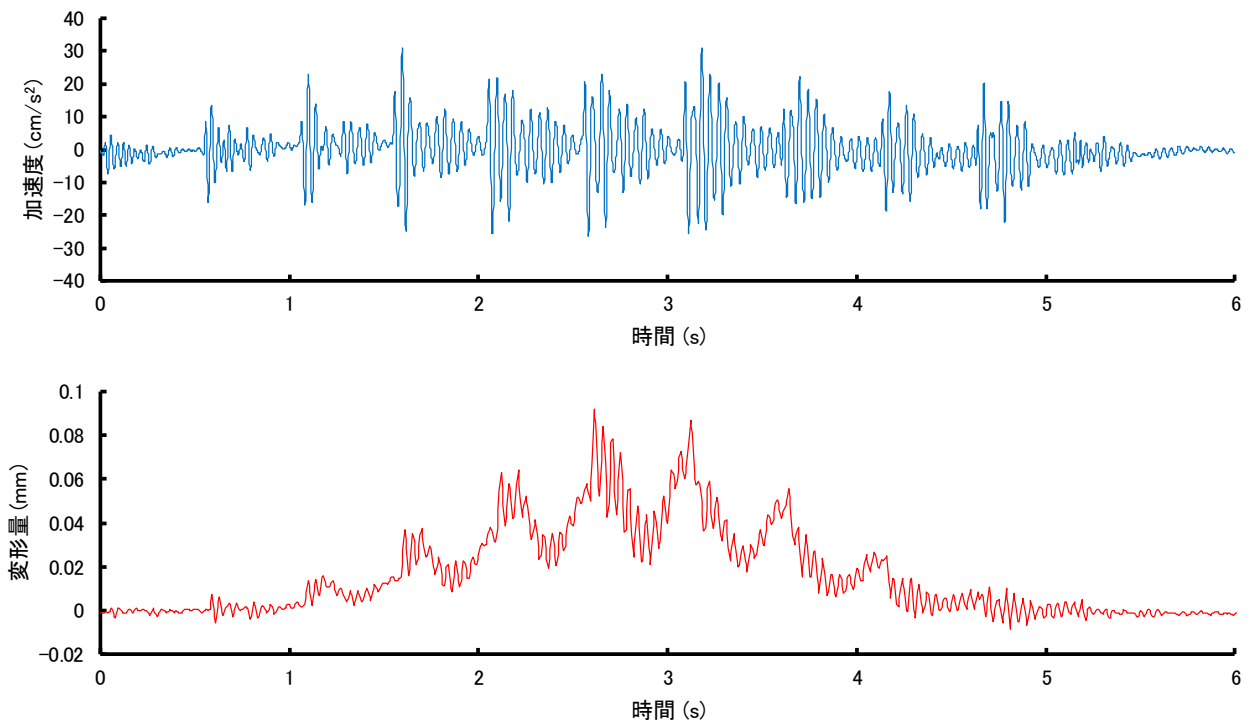
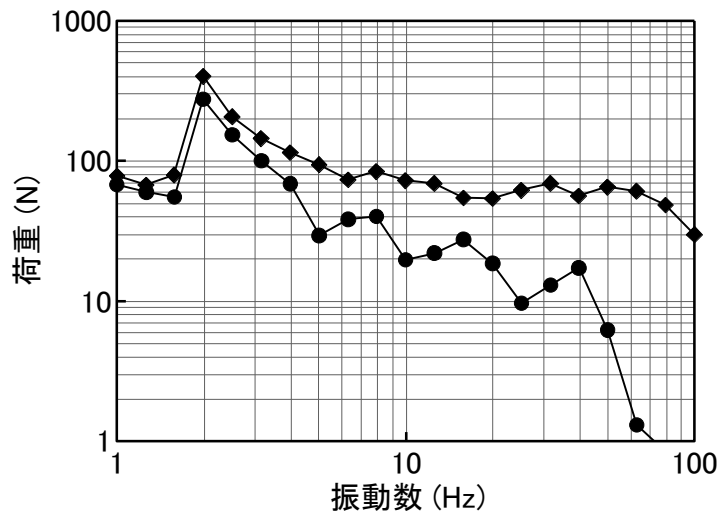


図 3.10 歩行振動の解析結果

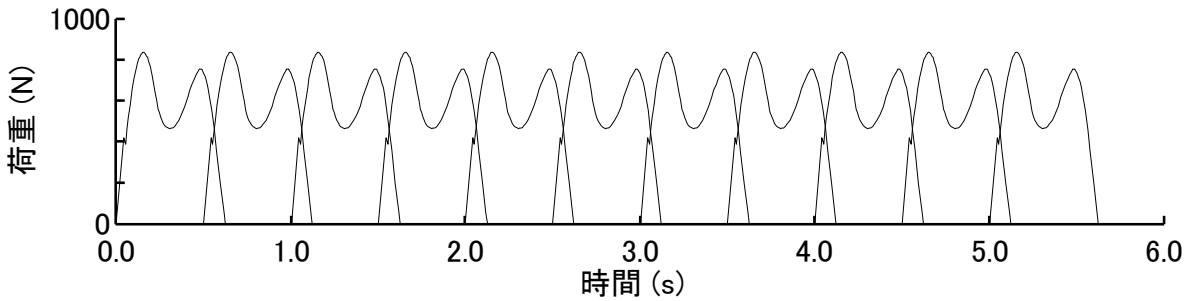


(再掲) 図 3.4 歩行振動の測定結果の例

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 p_1 における荷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。



●:同じ歩行荷重を用いた歩行加振力



◆:異なる歩行荷重を無作為に選定し用いた歩行加振力

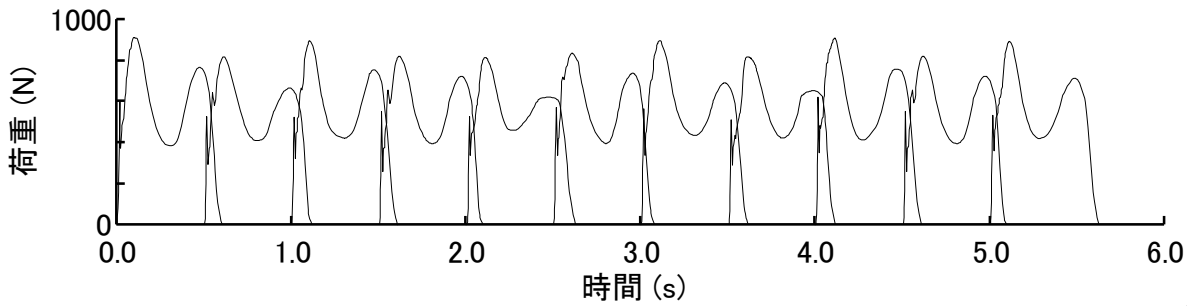


図 3.11 解析に用いた歩行加振力の 1/3 オクターブバンド分析結果

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 VL_{max} 、 DL_{max} 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、 VL_{max} は3.1dB、 DL_{max} 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 VL_{max} 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。

表 3.4 VL_{max} 、 DL_{max} と VLT^* の測定結果と解析結果の比較

	VL_{max} (dB)	DL_{max} (dB)	VLT^* (dB)
測定結果	79.2	19.2	72.7
解析結果	76.1	16.6	68.0

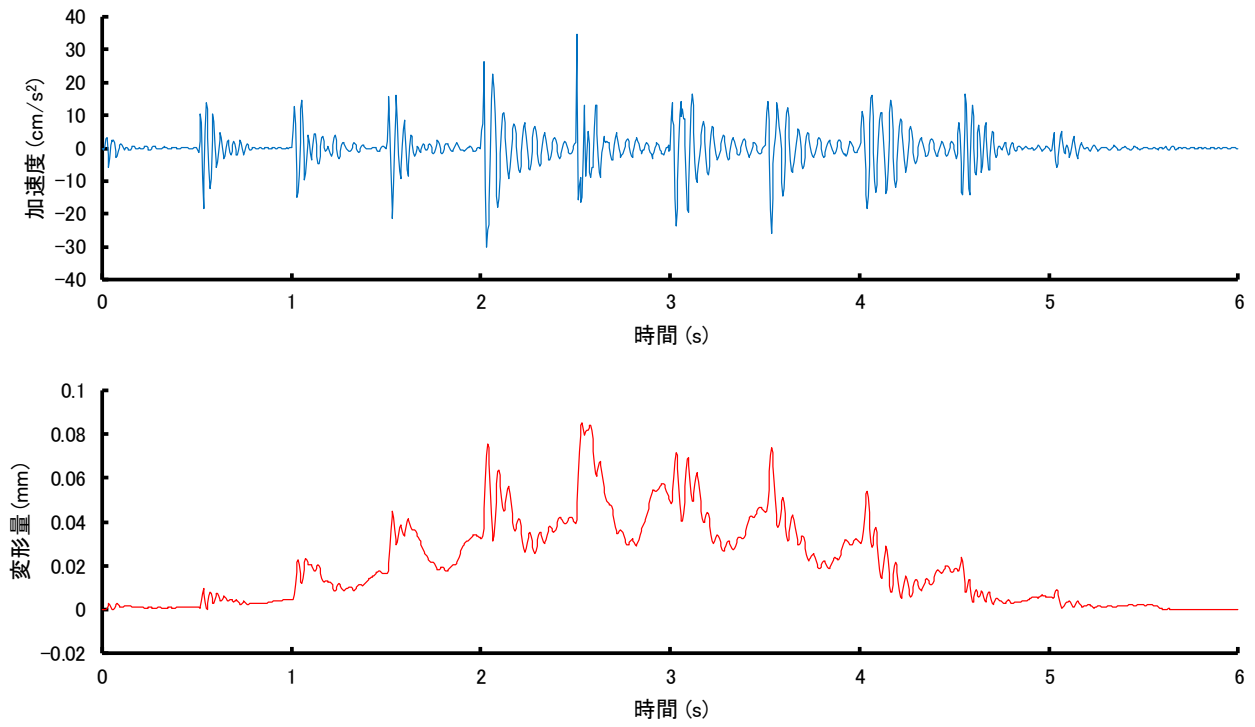
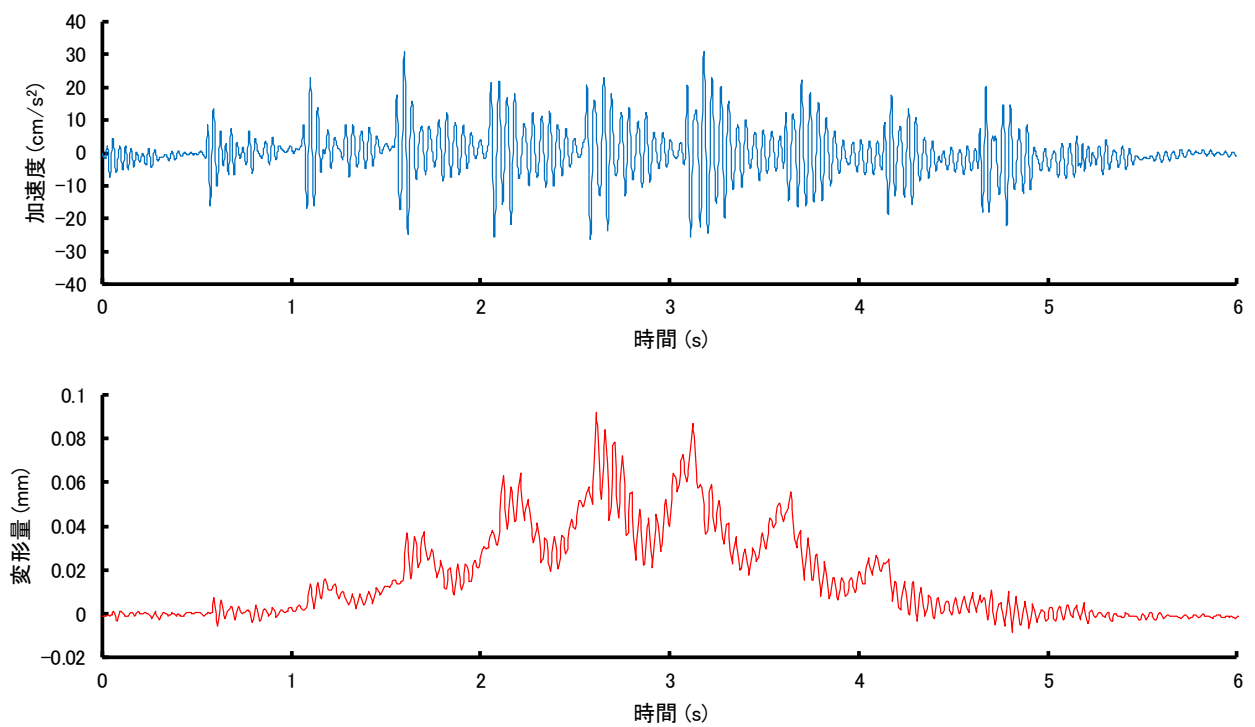


図 3.12 ランダムな歩行加振力による歩行振動の解析結果



(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）の杉材製 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じの 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。

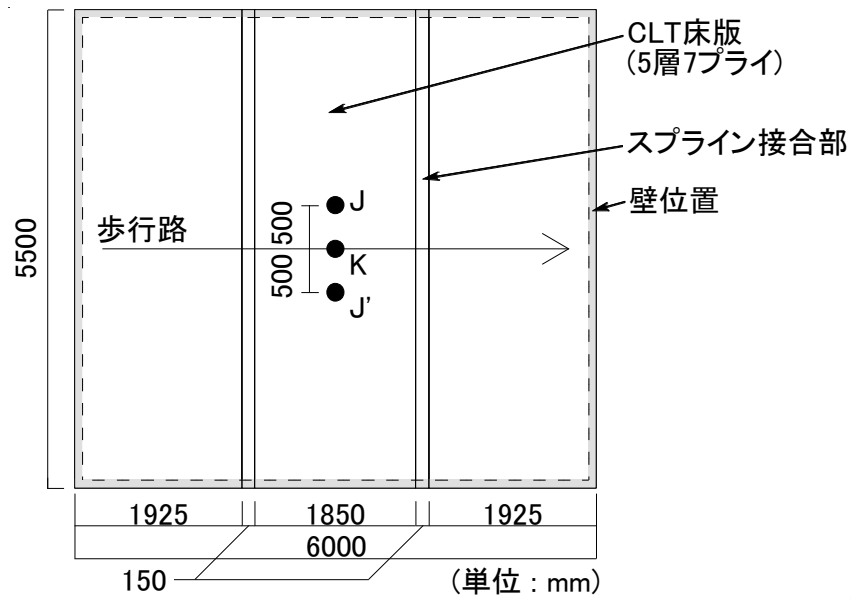


図 3.13 試験体床の概要



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。

表 3.5 CLT 造試験体床の各試験結果

		(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
減衰定数 (%)	床上0人	3.2	3.0	2.6
	床上1人	4.1	5.2	5.4
	床上2人	5.4	4.8	5.4
VLT^*		69.4	66.8	66.4

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、 $L=5.5\text{m}$ 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、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、 $L=2.0\text{m}$ 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 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、 f_0 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。

CLT床版

厚さ：210mm

[5層7プライ]

X方向曲げ剛性：0.496kN/mm²

Y方向曲げ剛性：6.67kN/mm²

密度：416kg/m³

ポアソン比：0.1

[7層7プライ]

X方向曲げ剛性：1.970kN/mm²

Y方向曲げ剛性：4.99kN/mm²

密度：428kg/m³

ポアソン比：0.2

スプライン接合部

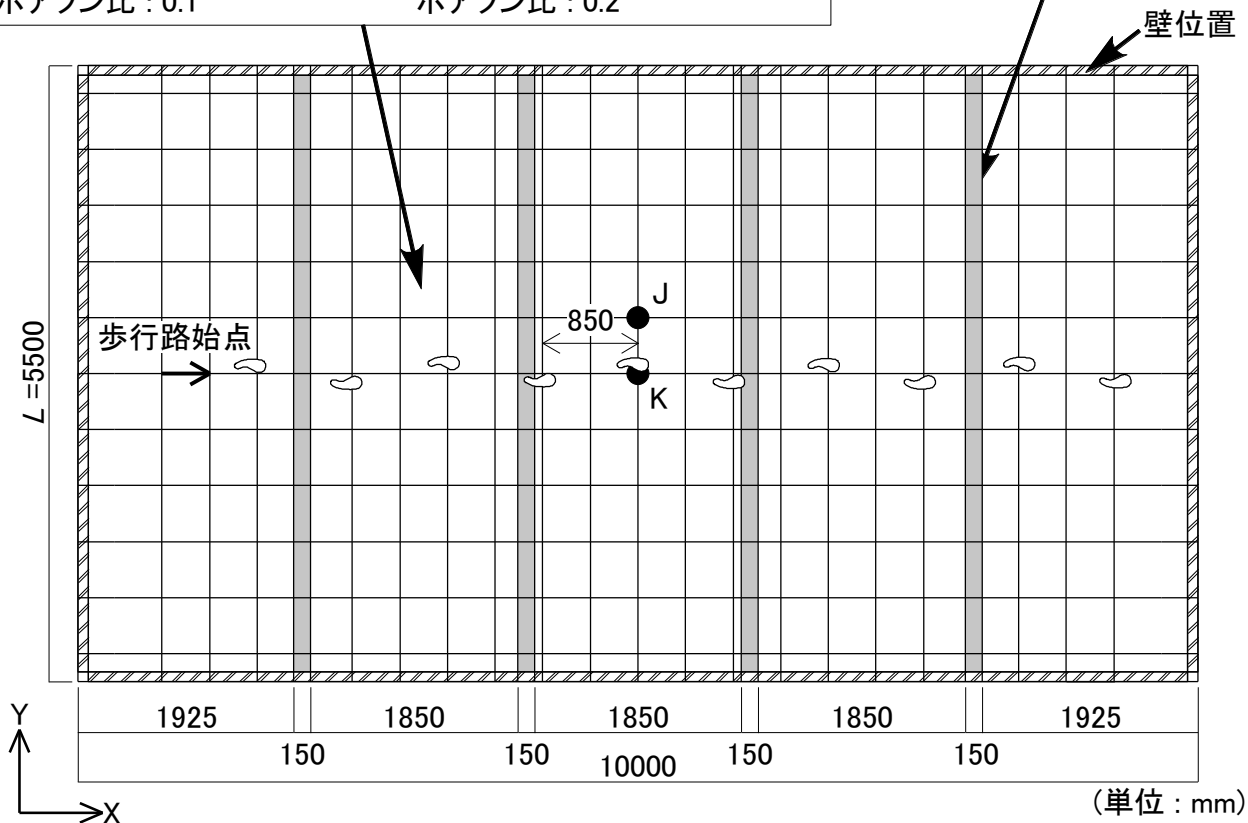
厚さ：210mm

X方向曲げ剛性：0.010kN/mm²

Y方向曲げ剛性：0.015kN/mm²

密度：416kg/m³

ポアソン比：0.4



壁位置における境界条件

内側：鉛直変位拘束および壁面内方向回転拘束

外側：壁面内方向回転拘束

K：静的集中荷重載荷点

J：歩行振動解析点

☞：歩行荷重入力位置

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、 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、第 2 章図 2.13 に示す住居の居室想定 of 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。

表 3.6 スパンをパラメータとした解析の結果

CLT 床版	スパン (m)	f_0 (Hz)	D_{100} (mm)	VLT^* (dB)	達成される気になり具合の評価水準
5層 7プライ	2.0	108.90	0.020	53.1	⑦
	2.5	68.94	0.033	57.8	⑦
	3.0	47.16	0.048	62.3	⑥
	3.5	34.32	0.067	66.1	⑥
	4.0	26.09	0.089	68.8	⑤
	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
7層 7プライ	2.0	92.02	0.020	52.4	⑦
	2.5	58.06	0.031	58.7	⑦
	3.0	39.69	0.047	64.4	⑥
	3.5	28.91	0.068	69.4	⑤
	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

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。

表 3.7 歩行振動からみた CLT 造床のスパン表

使用する CLT 床版	床用途	達成される気になり具合の評価水準		
		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 3.8 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 f_0 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。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。

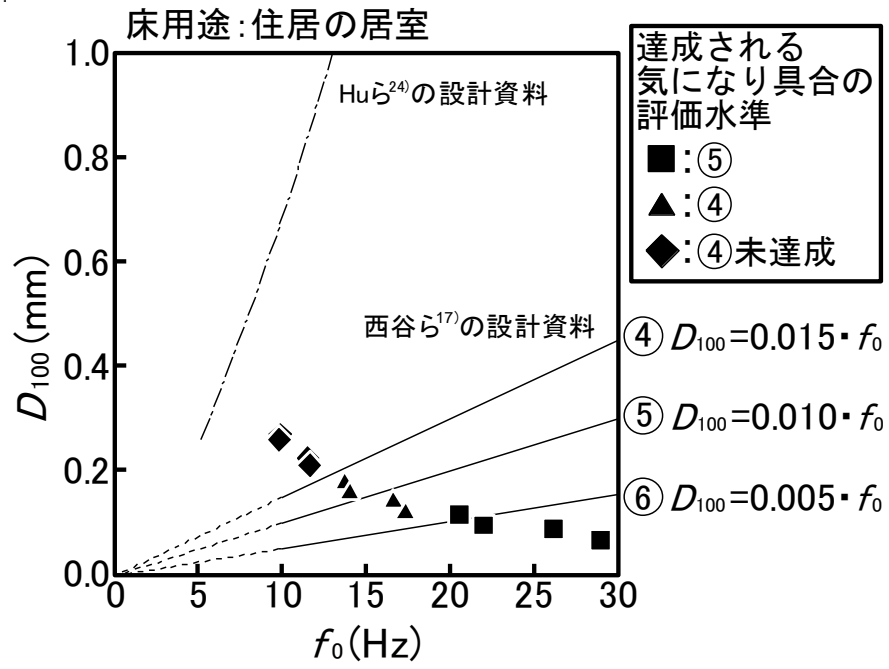


図 3.15 f_0 , D_{100} および歩行振動評価の関係

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 本章の研究手法

本章は以下の手順を進める。

- 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。床版のスペンは、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

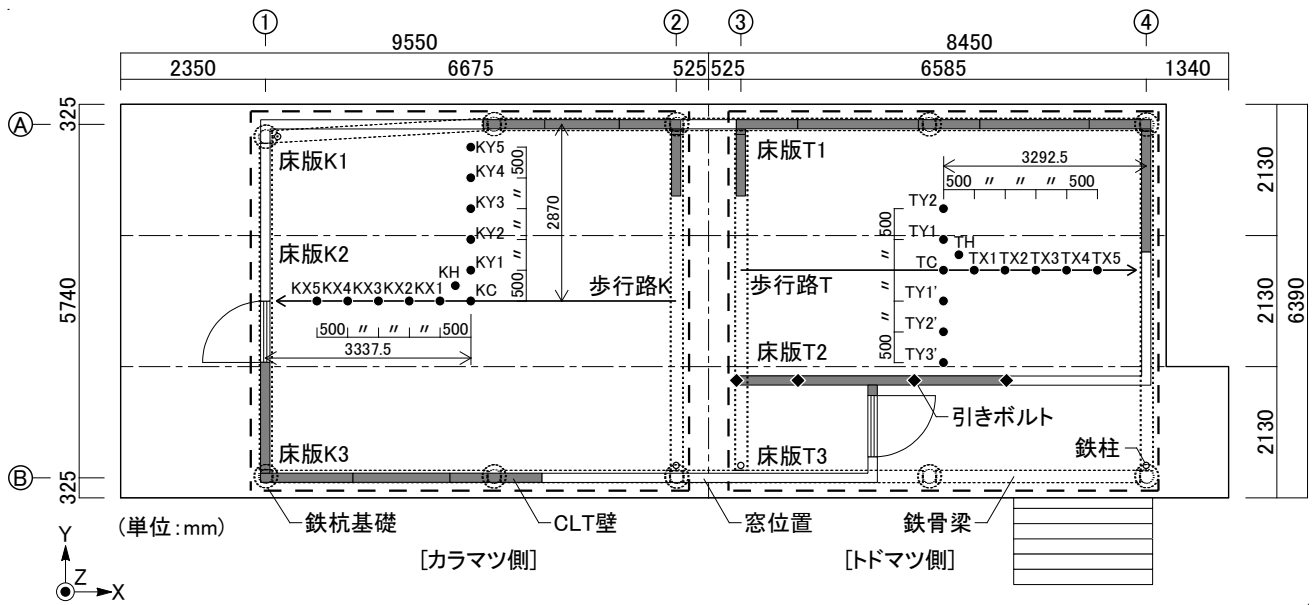


図 4.1 CLT 造床の概要

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。

表 4.1 載荷点と測定点の組み合わせ

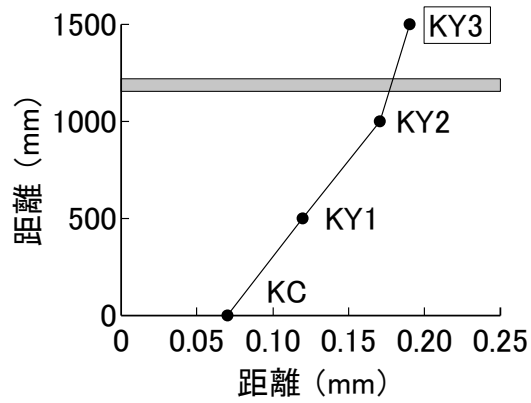
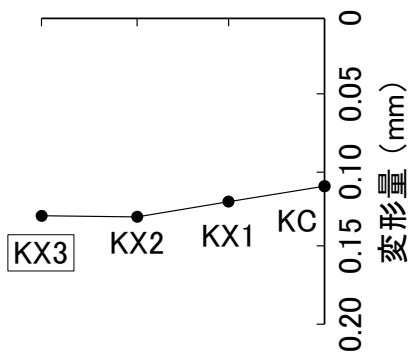
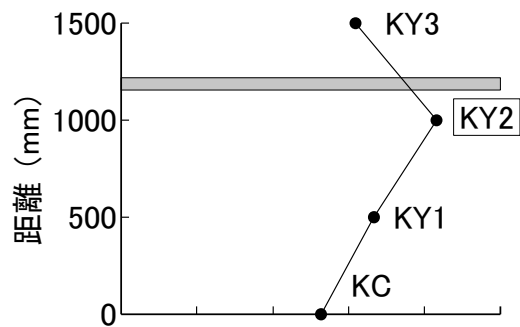
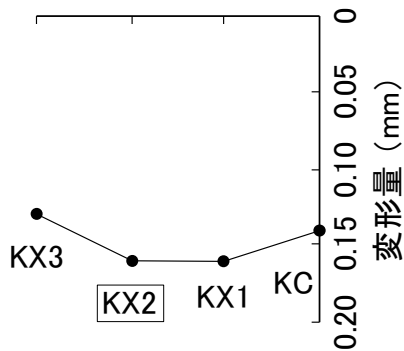
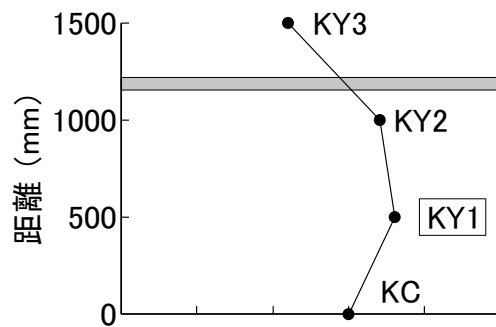
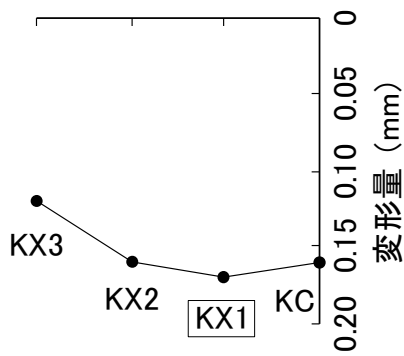
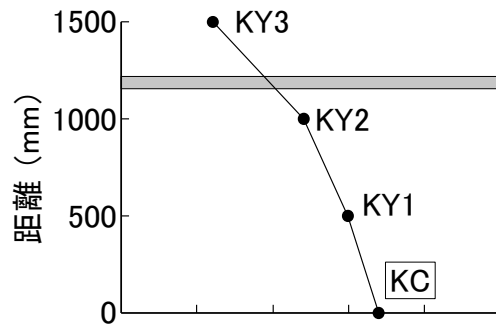
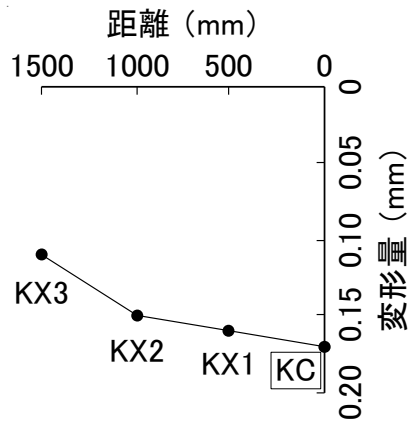
		載荷点	変形測定点
カラマツ側	パターン KX	KC	KC,KX1, KX2,KX3
		KX1	
		KX2	
	パターン KY	KX3	KC,KY1, KY2,KY3
		KC	
		KY1	
トドマツ側	パターン TX	KY2	TC,TX2,TX4
		KY3	
		TC	
	パターン TY	TX2	TC,TY2
		TX4	
	パターン TY'	TC	TC,TY1',TY2'
TY2			
TY1'			
		TY2'	



写真 4.2 レーザー変位計設置の様子



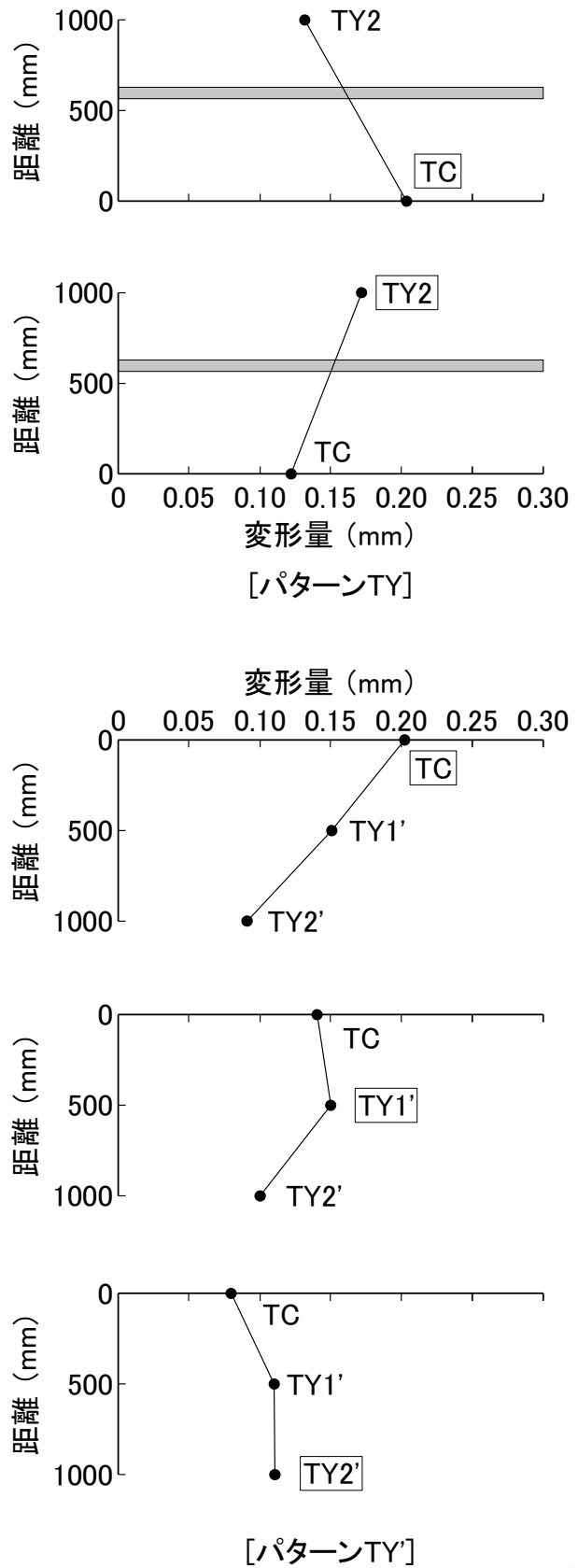
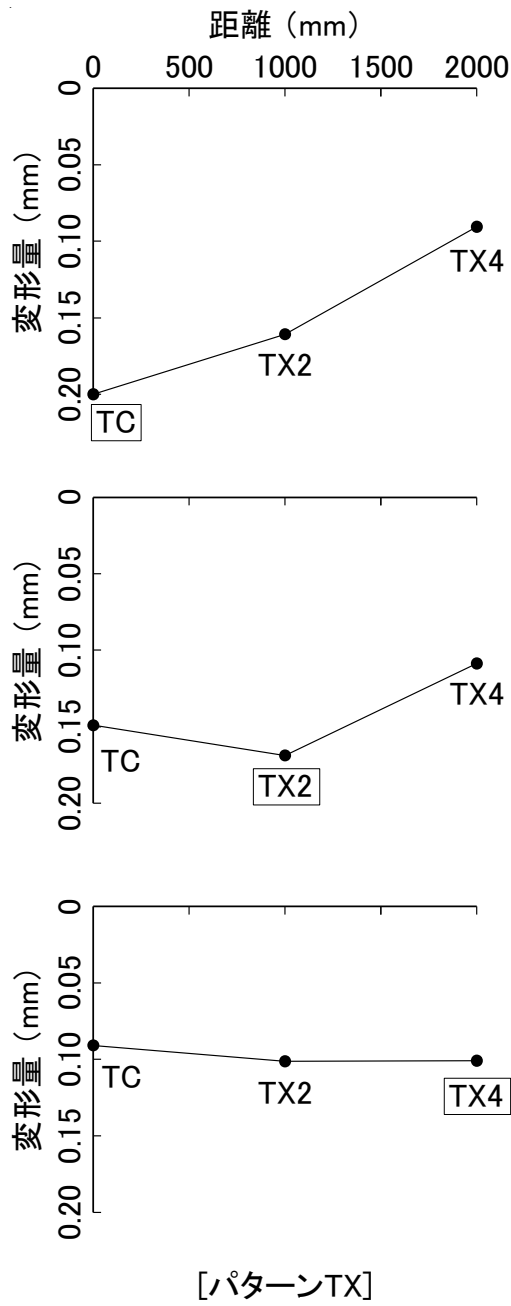
写真 4.3 静的載荷試験の様子



[パターンKX]

[パターンKY]

図 4.2(1) 静的載荷時の変形の測定結果 [パターン KX, KY]



- : 測定結果
- : ハーフラップジョイント
- : 载荷点

図 4.2(2) 静的载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

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。

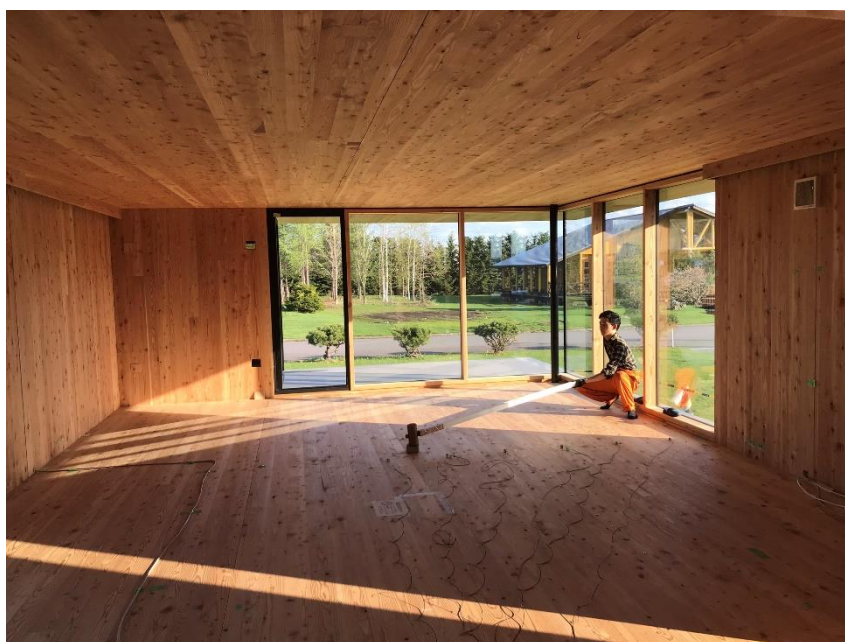
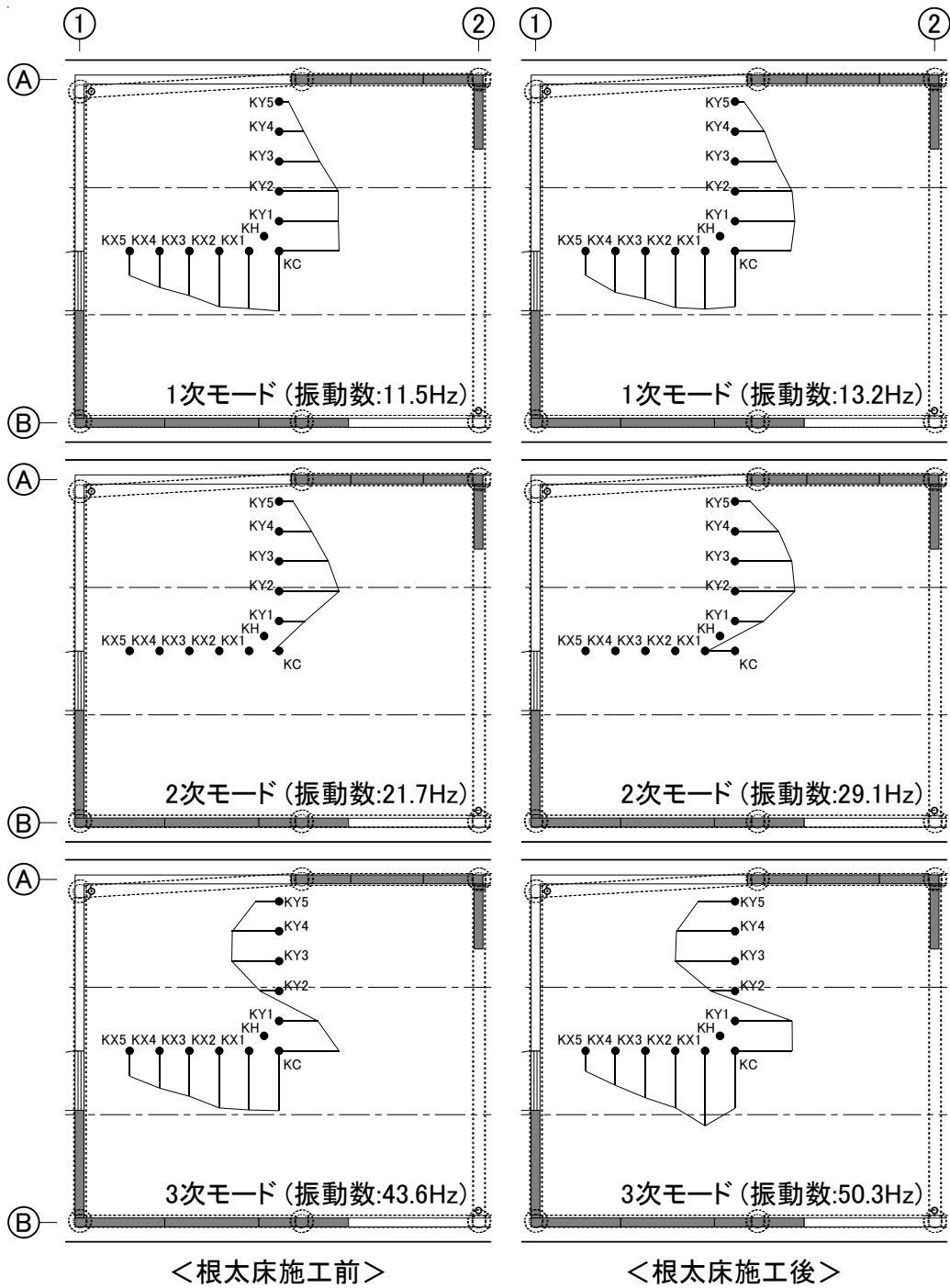


写真 4.4 動的加振試験の様子(振動モード測定)

表 4.2 固有振動数の測定結果

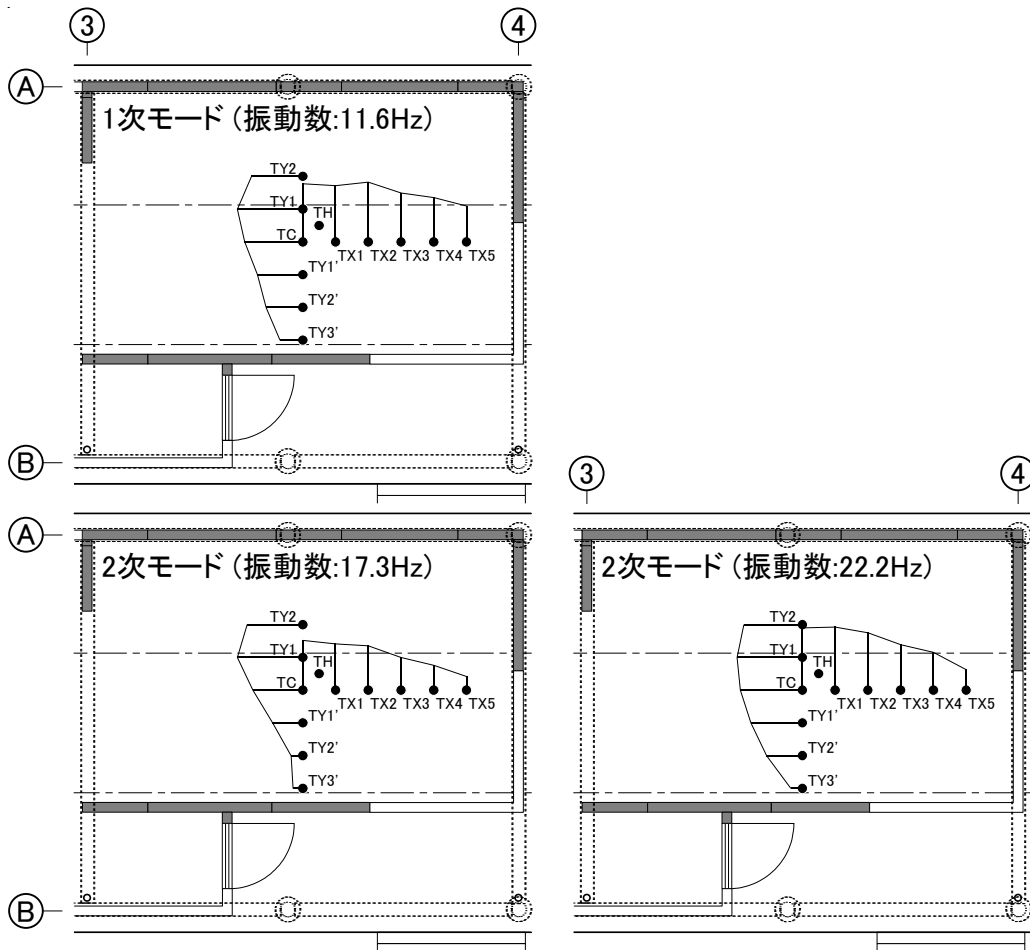
		カラマツ側		トドマツ側	
		根太床施工前	根太床施工後	根太床施工前	根太床施工後
		測定結果	測定結果	測定結果	測定結果
固有振動数 (Hz)	1次	11.5	13.2	11.6	
	2次	21.7	29.1	17.3	22.2
	3次	43.6	50.3		



<根太床施工前>

<根太床施工後>

図 4.3(1) 振動モードの測定結果[カラマツ側]



<根太床施工前>

<根太床施工後>

図 4.3(2) 振動モードの測定結果 [トドマツ側]

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 定数 (%)	床上0人	3.8	3.4	2.1	4.3
	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) 歩行試験

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。

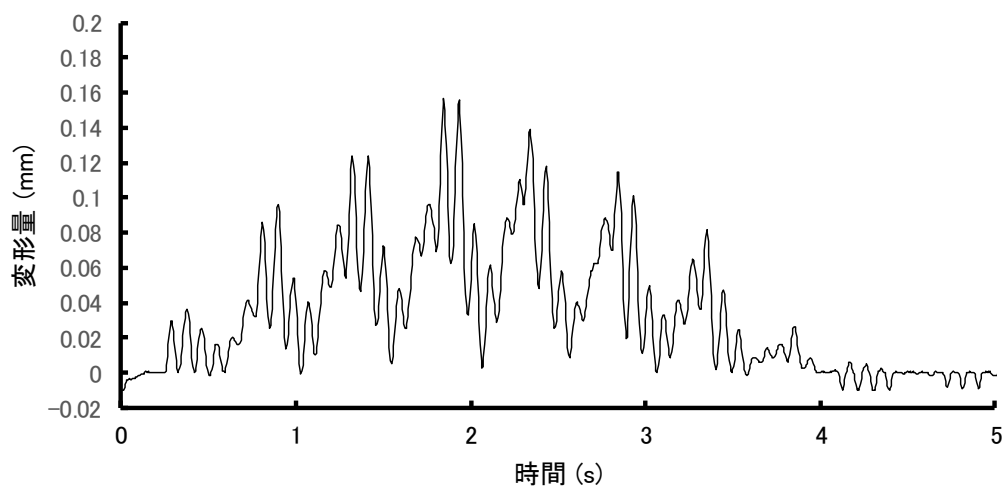
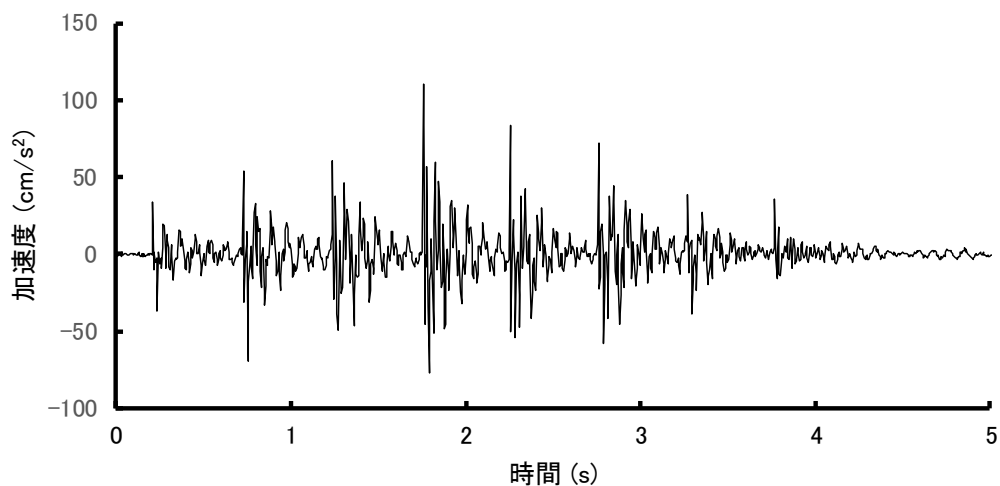
根太床施工前の各測定結果から VL_{max} , DL_{max} , VLT および VLT^* を算出し、その平均を求めた。なお、5 回測定した VLT^* の最大値と最小値の差は、1.0~3.1dB であった。一方、根太床施工後の各測定結果から VL_{max} , VLT を算出し、その平均を求めた。図 4.4 に、歩行振動の波形の例を示す。加速度・時間曲線の比較から、根太床施工後の歩行振動は根太床施工前と比較して、1 歩ごとに励起された振動が大きく減衰していることがわかる。このことは、4.3.2(2) の減衰定数の測定結果と整合している。また、表 4.4 の欄に、 VL_{max} , DL_{max} , 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。



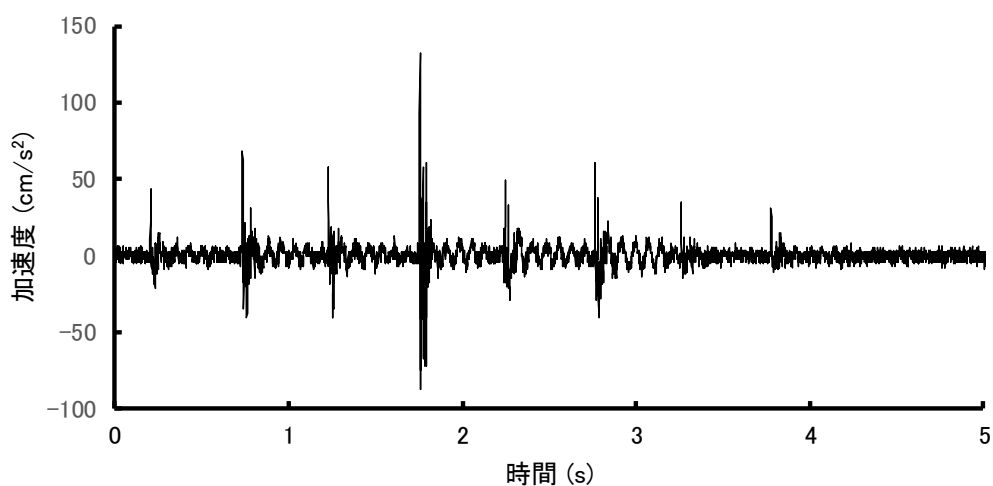
写真 4.6 歩行試験の様子

表 4.4 歩行振動の測定結果

	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
VL_{max}	83.7	76.7	83.3	75.9
DL_{max}	24.8		26.6	
VL_T	86.9	79.3	86.1	77.8
VL_T^*	76.4		74.4	



(a) 根太床施工前[加速度・時間曲線, 変形・時間曲線]



(b) 根太床施工後[加速度・時間曲線]

図 4.4 歩行振動の測定結果の例[カラマツ側]

(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。

表 4.5 アンケート調査の概要

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、	
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23～61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）	

(再掲)表 2.7 各判断範ちゅうに対応する VLT *

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
⑦	0	59	0	61	0	60	0	62



写真 4.7 アンケート調査の様子

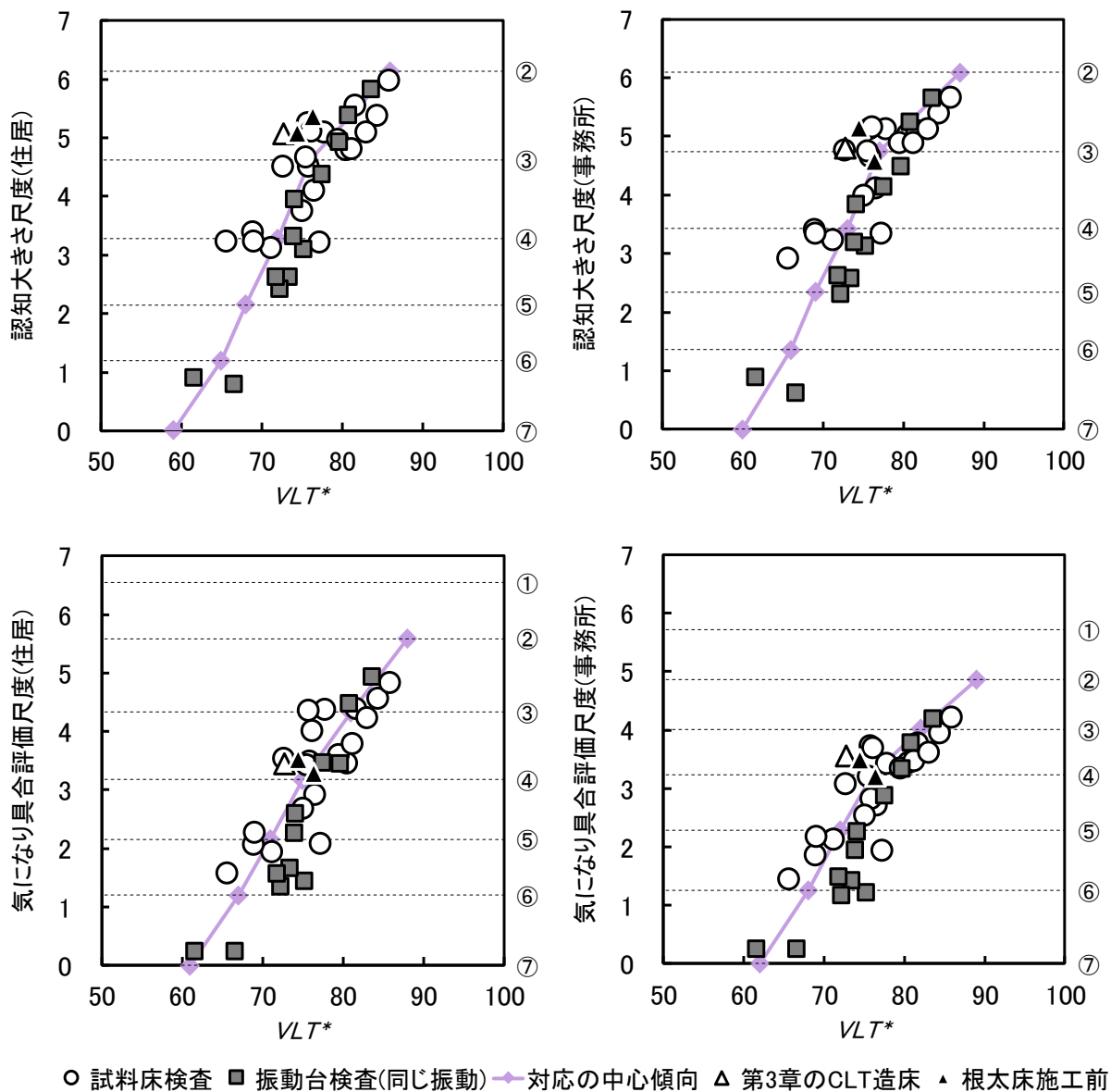


図 4.5 木造床の評価指標の適用結果(根太床施工前)

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。

② CLT 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

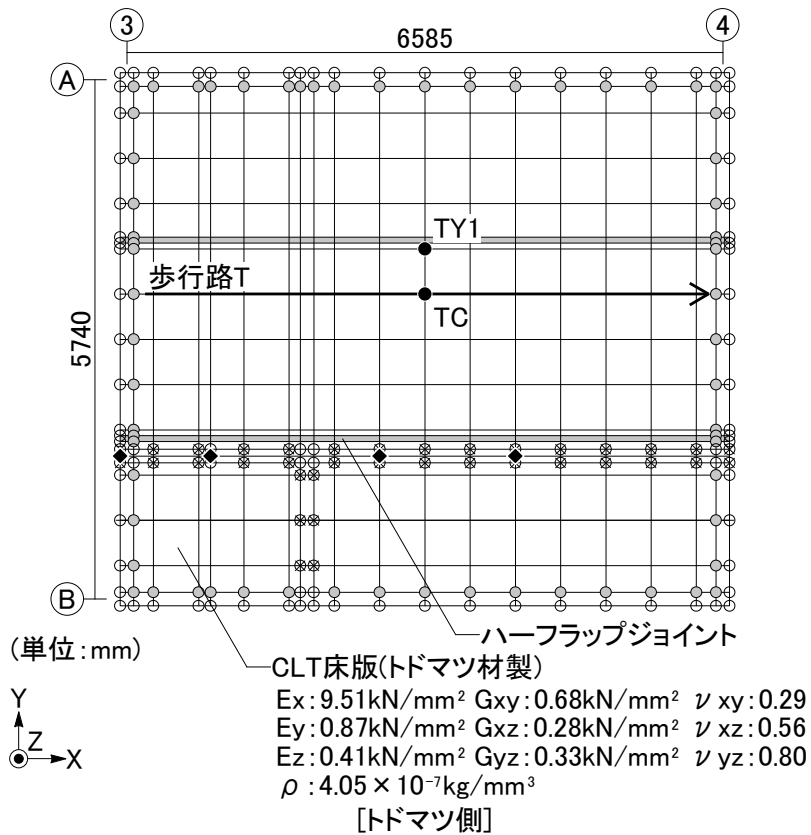
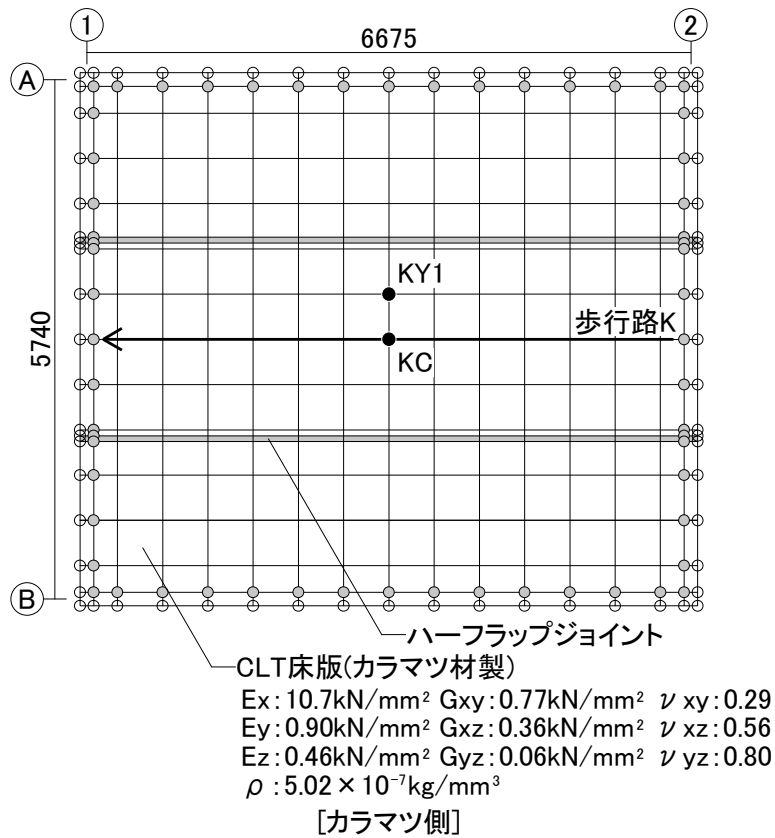
トドマツ側の床版 T3 上の壁や窓などは、床版の下に梁や壁などが無い位置に載っている。このような壁や窓などが存在する場合、その重量により床版の振動が拘束されることが想定される。よって、トドマツ側の解析モデルでは、壁や窓などが載っている位置の各節点に、壁や窓などの自重を分配して載荷した。また、壁が載っている位置の各節点には、壁が負担している屋根の重量も分配して載荷した。さらに、壁や窓の室内側および室外側の位置にある節点にて、壁や窓の面内方向の回転を拘束した。

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。

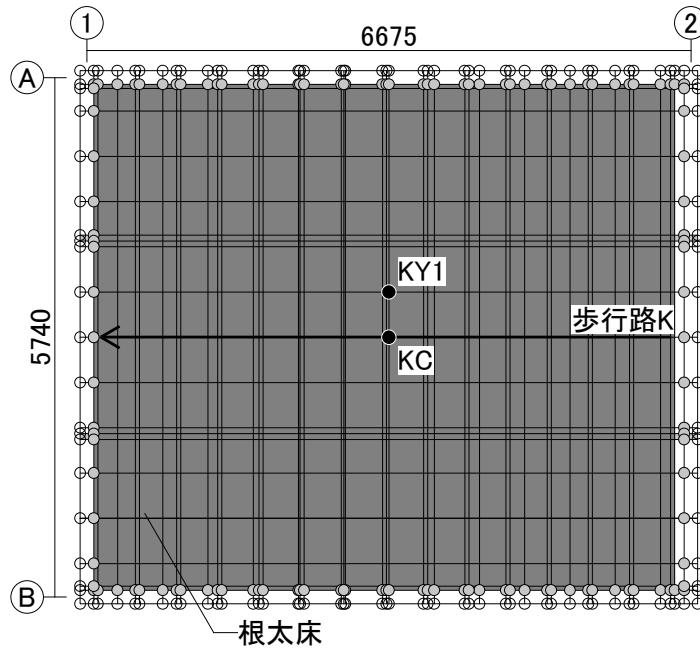
⑥根太床

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]



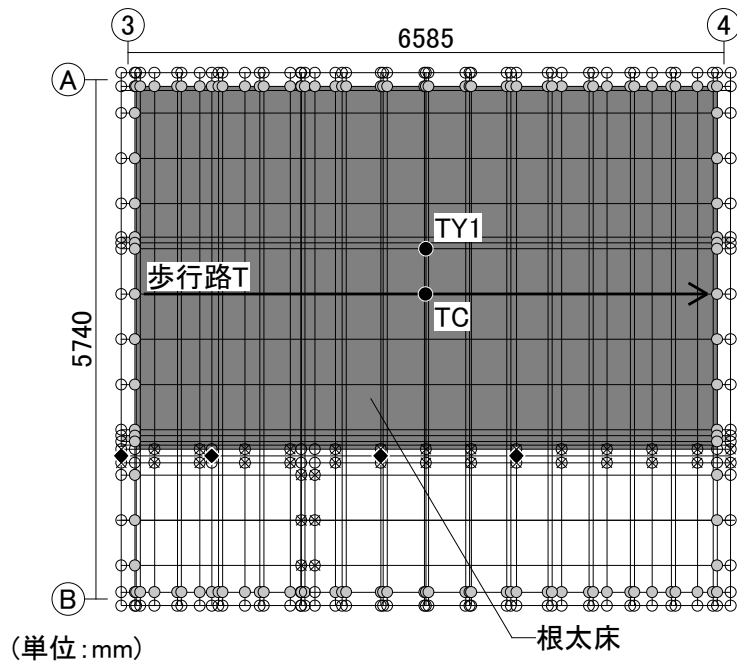
[フローリングおよび合板]

$E_x: 3.50\text{kN/mm}^2$ $G_{xy}: 0.40\text{kN/mm}^2$ $\nu_{xy}: 0.4$
 $E_y: 1.40\text{kN/mm}^2$ $G_{xz}: 0.04\text{kN/mm}^2$ $\nu_{xz}: 0.4$
 $E_z: 0.23\text{kN/mm}^2$ $G_{yz}: 0.04\text{kN/mm}^2$ $\nu_{yz}: 0.96$
 $\rho: 3.80 \times 10^{-7}\text{kg/mm}^3$

[根太]

$E_x: 0.28\text{kN/mm}^2$ $G_{xy}: 0.47\text{kN/mm}^2$ $\nu_{xy}: 0.02$
 $E_y: 7.00\text{kN/mm}^2$ $G_{xz}: 0.05\text{kN/mm}^2$ $\nu_{xz}: 0.96$
 $E_z: 0.28\text{kN/mm}^2$ $G_{yz}: 0.47\text{kN/mm}^2$ $\nu_{yz}: 0.4$
 $\rho: 3.80 \times 10^{-7}\text{kg/mm}^3$

[カラマツ側]



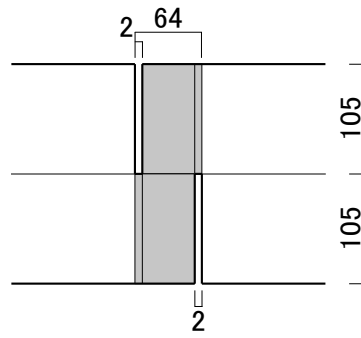
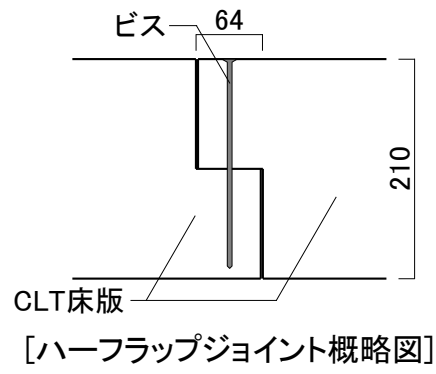
(単位: mm)



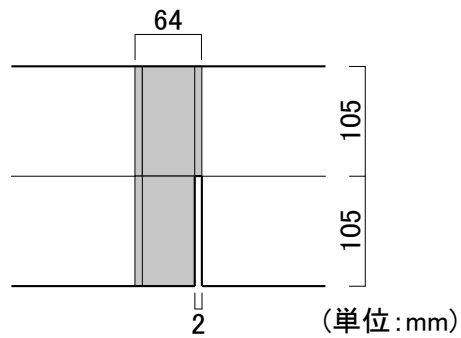
[トドマツ側]

- : 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(2) 解析モデルの概要 [根太床施工後]



(a) 上側と下側の鉛直面に隙間があるモデル



(b) 下側の鉛直面にのみ隙間があるモデル

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一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一致している。なお、床版上の下に梁や壁などが無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。

表 4.6 固有振動数の測定結果と解析結果の比較

		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
固有振動数 (Hz)	1次	11.5	12.6	13.2	14.4	11.6	13.5	14.0	
	2次	21.7	20.6	29.1	27.4	17.3	19.6	22.2	23.5
	3次	43.6	40.2	50.3	54.6				

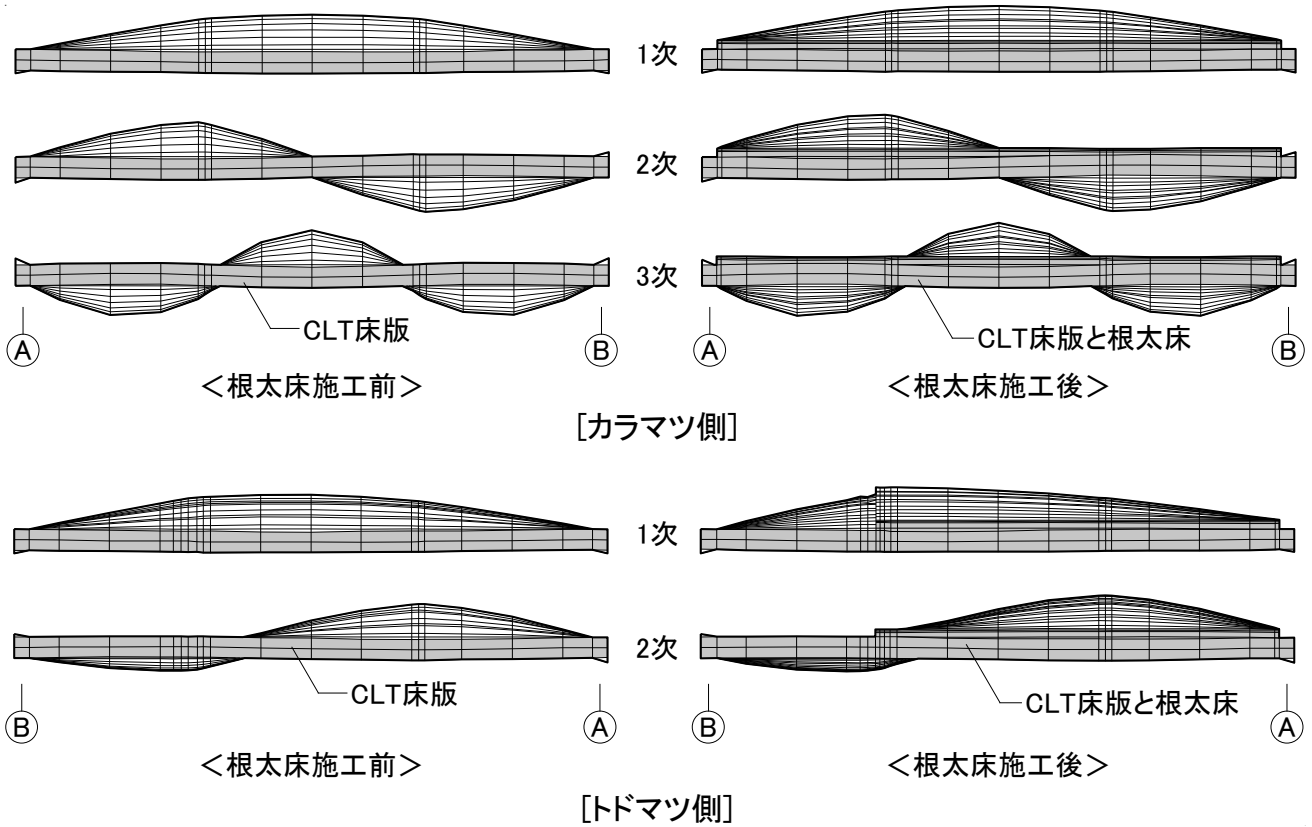


図 4.8 振動モードの解析結果

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。

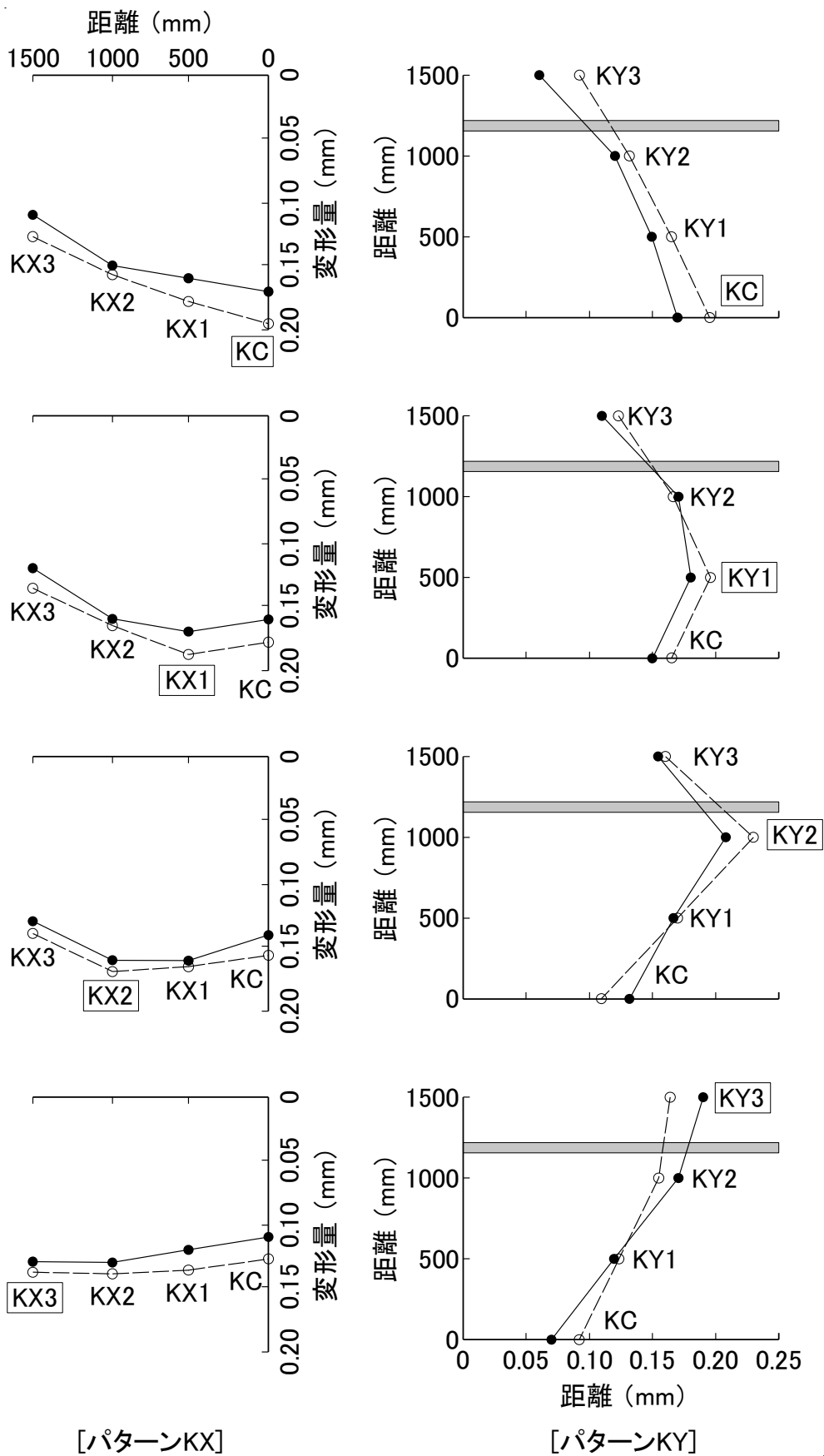
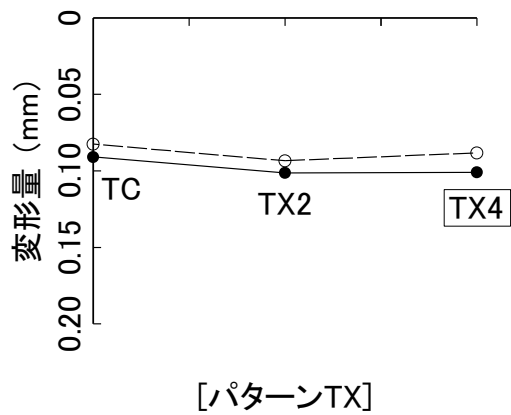
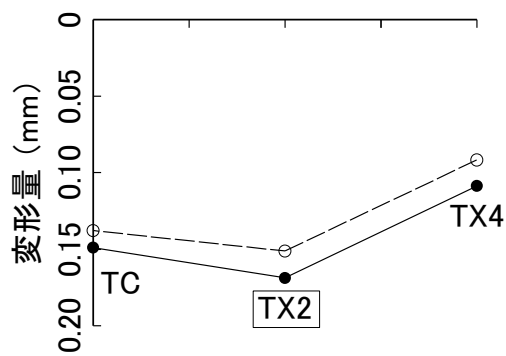
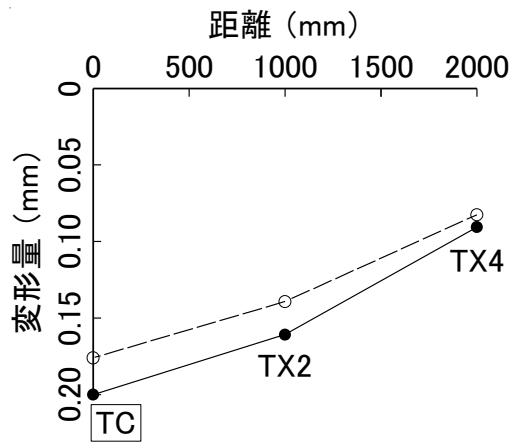
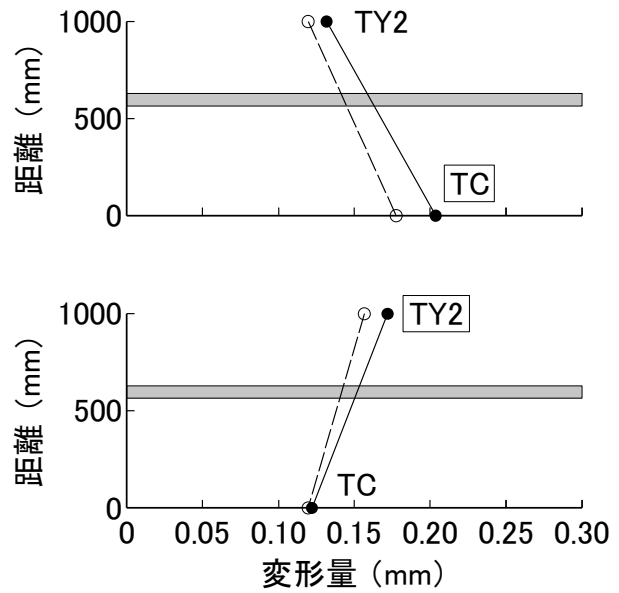


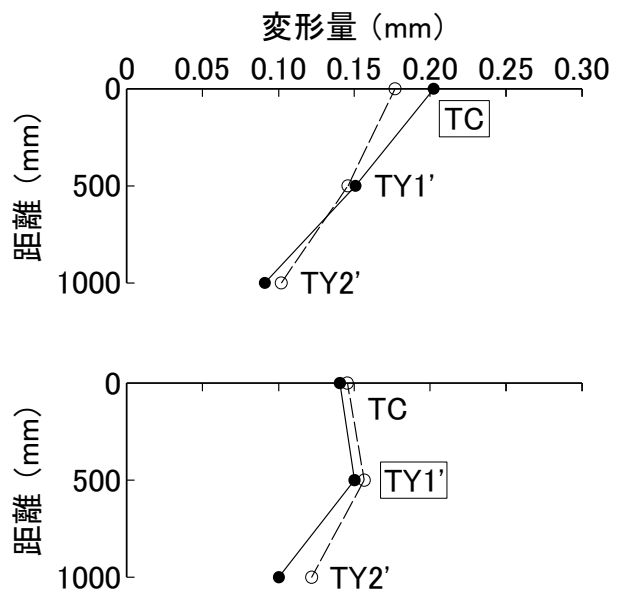
図 4.9(1) 静的載荷時の変形の測定結果と解析結果の比較[パターン KX, KY]



- : 測定結果
- : 解析結果
- : ハーフラップジョイント
- : 载荷点



[パターンTY]



[パターンTY']

図 4.9(2) 静的载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) 歩行応答解析

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。

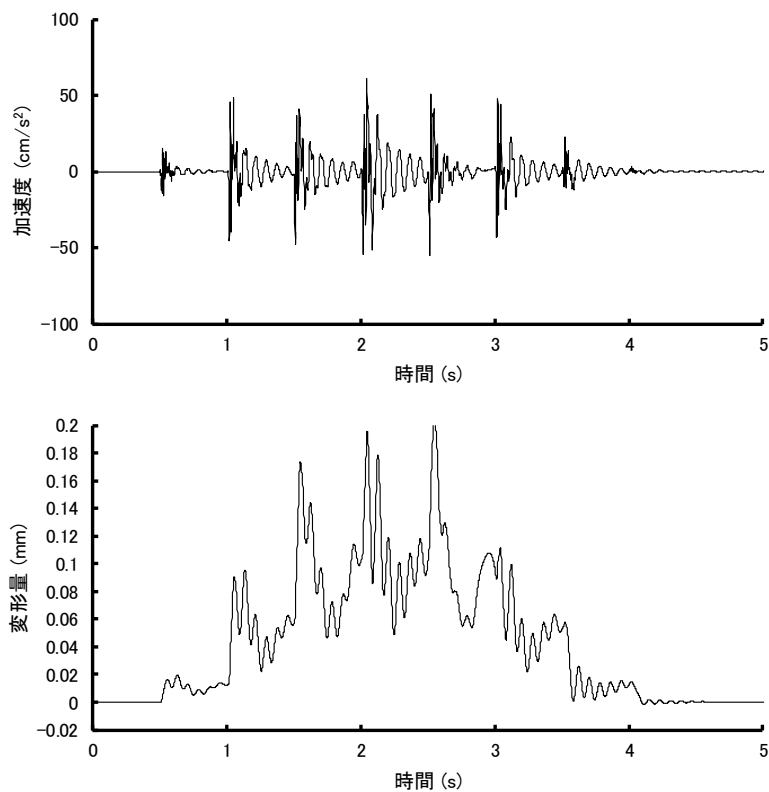
以上の条件で歩行応答解析を行った。具体的には、1 歩分の荷重の組み合わせが異なる歩行加振力を 5 パターン作成したうえで、これらを解析モデルに入力して得られた 5 種の加速度・時間曲線および変形・時間曲線から VL_{max} 、 DL_{max} 、 VLT および VLT^* を算出し、平均を求めた。図 4.10 に、カラマツ側の解析の結果得られた加速度・時間曲線および変形・時間曲線の一例を示す。なお、5 パターンの歩行加振力で得られた VLT^* の最大値と最小値の差は、2.2～5.2dB であった。

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は、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。

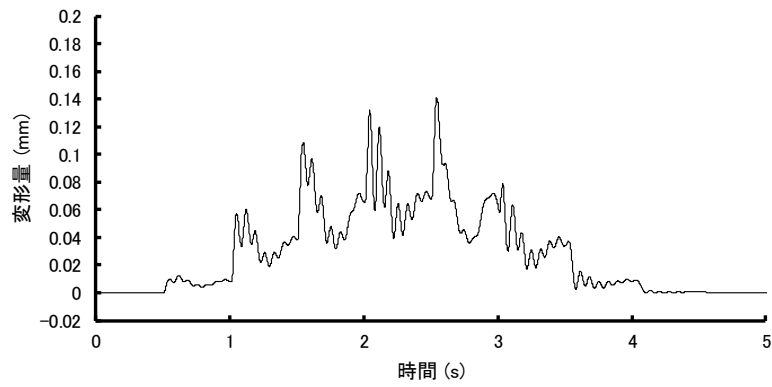
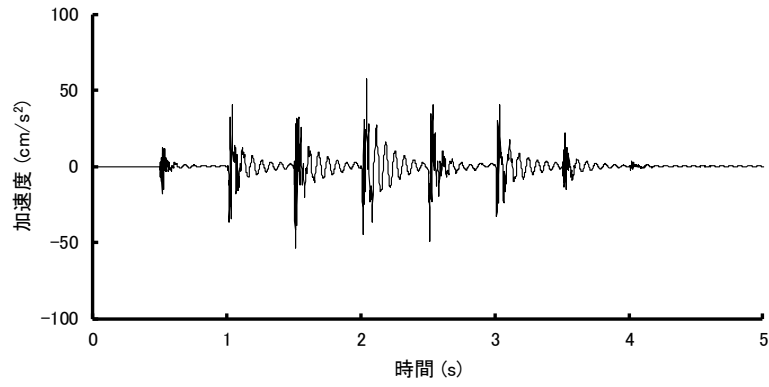
表 4.7 歩行振動の測定結果と解析結果の比較

	カラムツ側					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 ($h:7\%$)
VL_{max}	83.7	84.5	76.7	81.1	80.7	83.3	83.0	75.9	80.2	79.8
DL_{max}	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

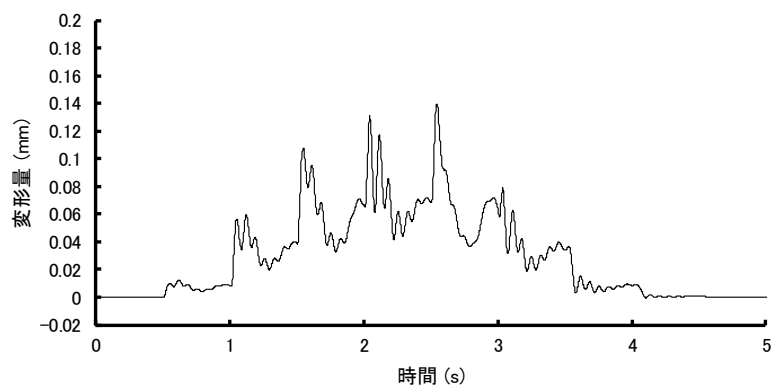
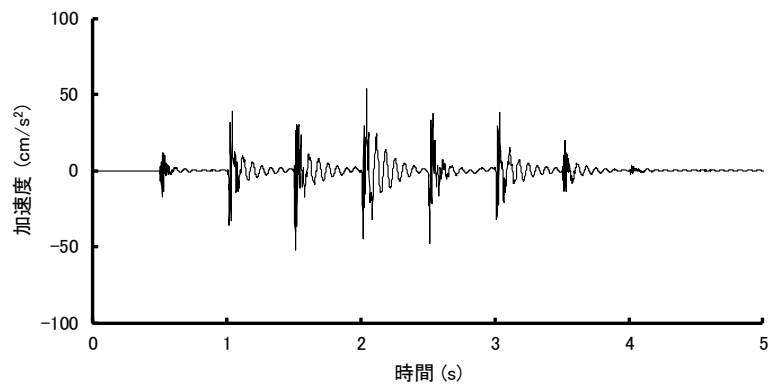


(a) 根太床施工前

図 4.10(1) 歩行振動解析結果の一例



(b) 根太床施工後[減衰定数 h : 6%]



(c) 根太床施工後[減衰定数 h : 7%]

図 4.10(2) 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)で述べたとおりを実施している。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。

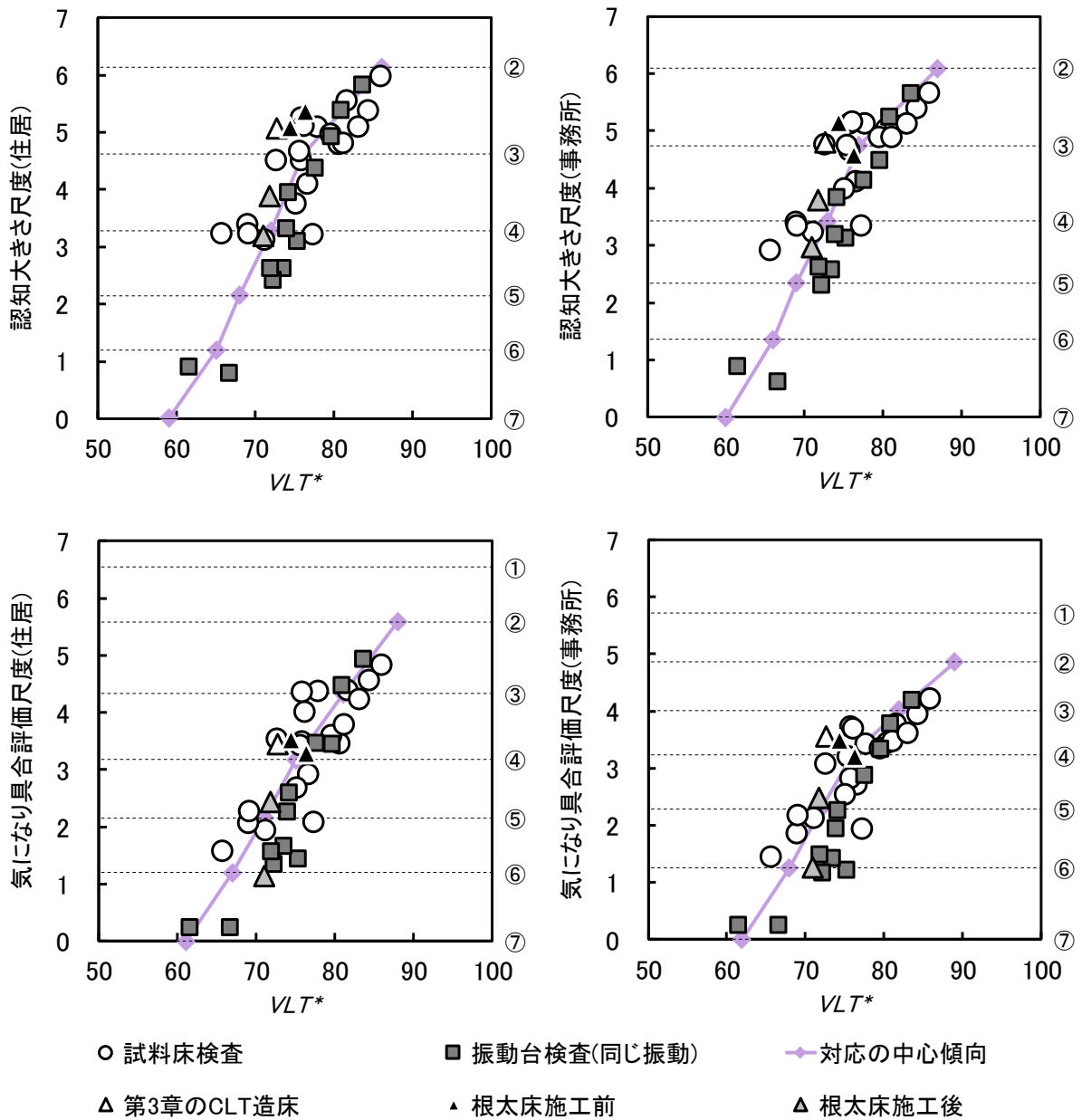


図 4.11 木造床の評価指標の適用結果(根太床施工後)

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う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、大きな変形をとま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 ー許容応力度・許容耐力設計法ー，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

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工マニュアル, 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