

## 第3章 住環境性能等のデータ収集Ⅱ（歩行振動性能）

### 3.1 はじめに

CLT床の歩行振動に関しては、昨年度に実施した「平成27年度林野庁委託事業 CLT等新たな製品・技術の開発・普及事業/CLTの住性能向上のための開発研究」((特非)建築技術支援協会)において、図3.1-1に示す検討フローを作成し、北見CLTセミナーハウス(北海道北見市)のCLT床の歩行振動測定とデータ集積、及び同建物の床歩行振動解析モデル作成とその検証、森林総研でのCLT床歩行振動再現試験体の製作とその振動測定を行い、測定結果の特性を得て比較評価を行った。

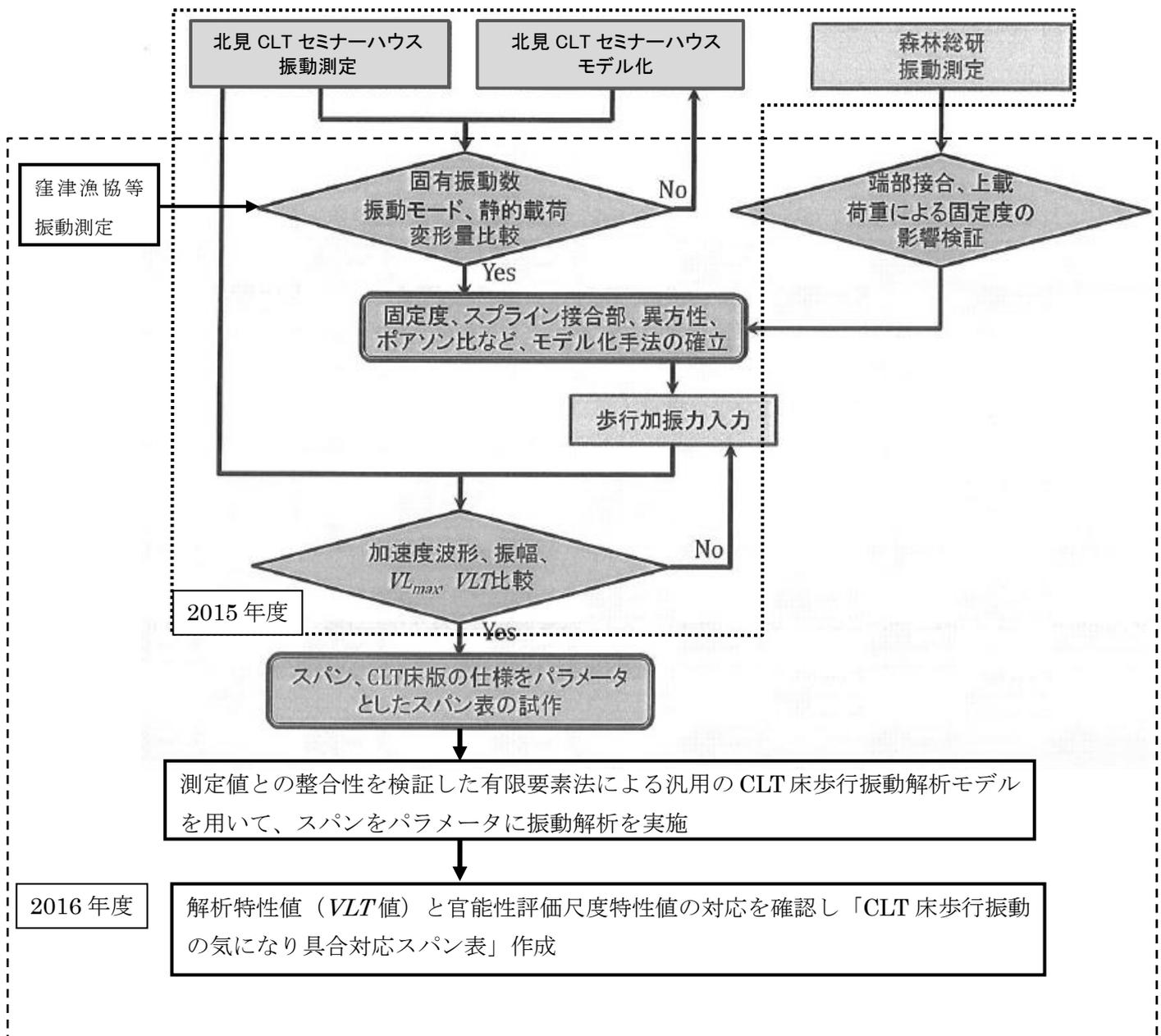


図 3.1-1 歩行振動に関する検討フロー（2016年度 ver.）

今年度の取組として、本事業では歩行振動性能のスパン表を作成に向けて下記の手順で検討を進めた。

- ① 前年度行った森林総研での測定結果からパラメトリックスタディ用接合部、端部固定度などのデータの取りまとめ
- ② CLT パネル工法以外の構造物件を含めて、実物件に搭載された CLT 床の振動計測の調査および、今後の構造別評価に向けた知見の収集
- ③ 構築した CLT パネル工法における CLT 床の振動モデルを使い、特定の条件下におけるスパン別の振動の解析
- ④ ③の結果で得られた解析値  $VLT$ (dB)と、建築学会で新基準化が進められている振動に関する官能性評価尺度の  $VLT$  特性値(dB)を突き合わせ、官能性評価対応した CLT 床歩行振動スパン表の作成
- ⑤ 得られたスパン表をもとにした「歩行振動マニュアル(案)」の作成(次節)

## 3.2 歩行振動マニュアル（案）

### 歩行振動マニュアル（案）

#### 1. 歩行振動とは

##### 1.1 居住環境下の振動

建築物の床は、様々な外力により絶えず振動している。しかし、この振動は元来、通常の方法・構法を採用し、通常の設計をした床では、居住者に感じられるレベルとなることは稀であり、振動環境が問題となることはほとんどなかったが、ここ数十年來、

- ・建築材料の軽量化
- ・長スパン構造の採用などによる床の剛性の低下
- ・機器類の大型化、高機能化による加振力の増加
- ・道路、鉄道あるいはライブハウス、エアロビクススタジオなどの加振源と居住空間の近接
- ・居住者の価値観や生活リズムの多様化

など、様々な要因の影響で、居住空間が供用されている時間に有感振動がしばしば発生し、苦情などの対象となる事例が散見されるようになってきた。

##### 1.2 何故、歩行振動か

環境振動で取り扱う主要な振動の1つに、居住者の歩行により発生する床の鉛直振動（以降“歩行振動”と記す）が挙げられる。歩行は、人間が様々な日常行為を行う上で欠かせない動作であることから、歩行により不快な振動が発生した場合、床の問題として捉えられる場合が大半である。図 1.1-1 に、一般的な木造在来軸組構法の 8 畳間程度の床で発生する歩行振動の例を示す。図に示すように、軽量で剛性が低い木造床では、歩行者が床に与える荷重（着地時と蹴り出し時の二峰形）に応じた変形と、かかと着地時の衝撃により励起される比較的高い固有振動数（通常 15Hz 程度以上）での減衰振動が複合された、複雑な振動が発生する。

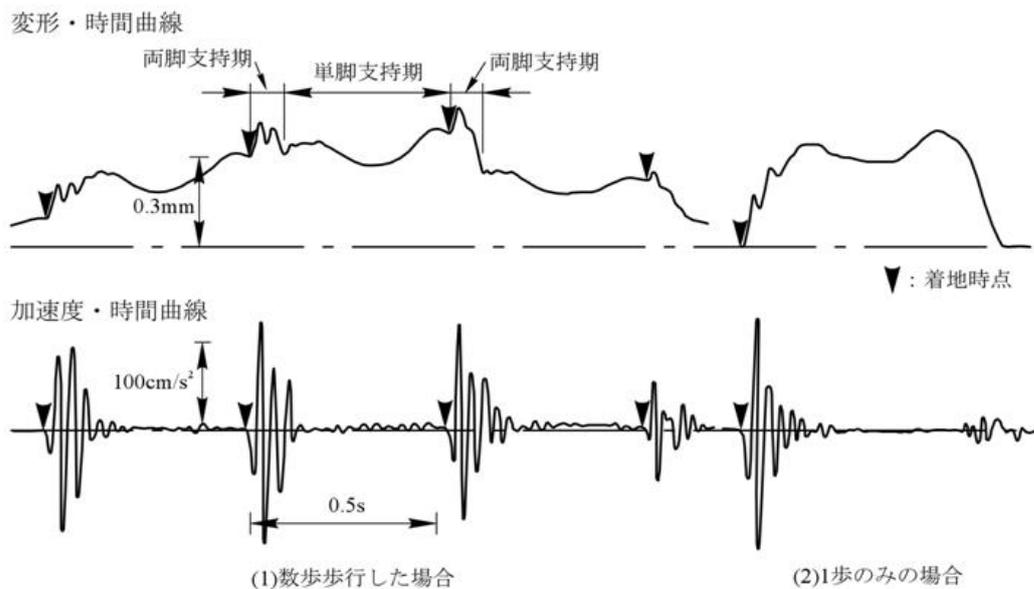


図 1.1-1 木造床で発生する歩行振動の例

### 1.3 倍調波共振の危険性

一方、RC造やS造建築物のコンクリートスラブでは、比較的重量がありかつ剛性が高いことから、大きな変形は生じないものの、かかと衝撃により比較的低い固有振動数での振動が発生する。この固有振動数での振動と、かかと衝撃の間隔、すなわち歩調が合うと、共振現象が発生し、大きな振幅の振動に発展する。この現象を“倍調波共振”という。図1.3-1はその例を示す。倍調波共振は、歩調の4倍調波まで発生する可能性があることが知られている。通常の歩調の範囲はおおむね1.6～2.3Hzであるから、4倍調波成分は6.4～9.2Hz程度となる。したがって、床の固有振動数を10Hz以上とすれば、倍調波共振は避けられる。上述の通り、従来からある一般的な木造床であれば固有振動数が10Hzを下回することはほとんどないが、近年採用例が増えている大スパン床やCLT床などでは、注意が必要である。

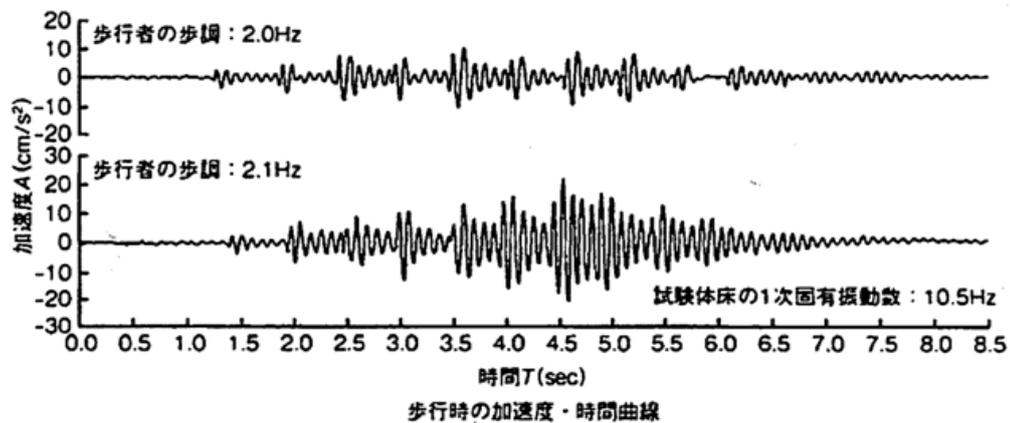


図 1.3-1 ステージ上の試験体床（振動台試験）における倍超は共振の例

### 1.4 減衰の重要性

床歩行振動を評価する際の拠り所として、日本建築学会より「建築物の振動に関する居住性能評価指針」が制定されている。しかし、この指針は主に正弦振動を用いた実験結果に基づいており、正弦振動のパラメータである振動数と振幅を用いて評価する体系となっている。この指針に、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どのようにして照合するのか、経験的に様々な方法が考案されているが、いまだ根本的な解決には至っていない。

この問題を解決するためには、重要なパラメータである減衰の要因を加味する必要がある。例えば、図1.1-1に示した木造床における歩行振動の加速度振幅の最大値と床の固有振動数をそのまま指針と照合すると著しく不快な振動となるが、実際にはこの床では何の問題も発生していない。これは、瞬間的な加速度振幅は大きいものの素早く減衰しており、振動の継続時間が短いためである。また、上述の倍調波共振時の振幅も、減衰が大きい床ほど小さくなる。このように重要な減衰であるが、設計時に精度よく予測するのは現在の技術では困難であり、データの蓄積に基づいて経験的に判断するしかないのが現状である。一般に、非構造部材や仕上げ材は減衰を大きくする方向に働く。また、接合部でのエネルギー吸収が期待できる木造床はRC造、S造と比較して減衰が大きい傾向があるが、構造が単純なCLT床では注意が必要である。

## 1.5 構造設計との比較に観る床歩行振動設計の特徴

床歩行振動設計は、遮音、断熱などと比較して、構造設計と密接な関わりを持っている点が特筆される。仕上げ材を付加することによる大幅な向上が可能な性能と異なり、構造体そのもので決まってしまう部分が多い。そのため、構造設計の段階で建築物ごとに個別に検討するしかなく、遮音、断熱のように付加材料を用いた体系化された対策方法などは基本的に成立しない。

このように、構造設計と同時進行する必要がある床歩行振動設計であるが、両者は本質的な部分で大きく異なっている。表 1.5-1 に、両者の相違点をまとめて示す。いずれも重要な事項ばかりであるが、木造床の振動設計で特に大きな問題となるのが、弾性係数やポアソン比などの材料物性値の不明確である。構造設計では、不確定な要因やばらつきが大きい物性値に関しては安全側に設定することで一応の目的は達成されるが、床歩行振動設計では、使用開始後の環境を正確に予測することが要求されるので、実状に則した値を採用する必要がある。しかし、CLTをはじめ、木質系材料ではそれらが明らかにされていない場合が多い。

表 1.5-1 構造設計と環境振動設計の相違点

	構造設計	環境振動設計
目的	人命および財産の確保	居住性の確保
目標	1水準	居住者の要求に応じて数水準
結果の検証	数年～数百年に1度	毎日
条件設定	安全側の条件	実状に則した条件
対象部位、部材	構造部材のみ	構造部材、非構造部材、仕上げ材
対象オーダー	荷重: tf 変形: mm	荷重: kgf 変形: $\mu$ m

## 2. 歩行振動評価

### 2.1 日本建築学会 居住性能評価指針の変遷

前述の日本建築学会「建築物の振動に関する居住性能評価指針」は、1991年に初版、2004年に改定版が制定されている。図2.1-1に初版、図2.1-2に改定版における鉛直振動の評価曲線を示す。初版では、図に示すように、横軸振動数、縦軸振幅の平面上に6本の評価曲線(V-1.5～V-30)が規定された。これらの評価曲線は、当時既に発表されていた複数の研究成果や規準類を同一の振動数・振幅平面上に重ね書きしたものである。このうち、V-1.5、V-3、V-5の各曲線は、それぞれ以下のように位置付けられている。

V-1.5: 知覚閾にほぼ対応

V-3 : 感覚評価から性能評価としての「健全性」へ変換できる下限領域

V-5 : 感覚評価から性能評価としての「健全性」へ変換できる上限領域

ここで、注目すべきは、居住性からみた性能評価は知覚閾などの感覚評価とは必ずしも一致しないことを明確に唱えている点である。

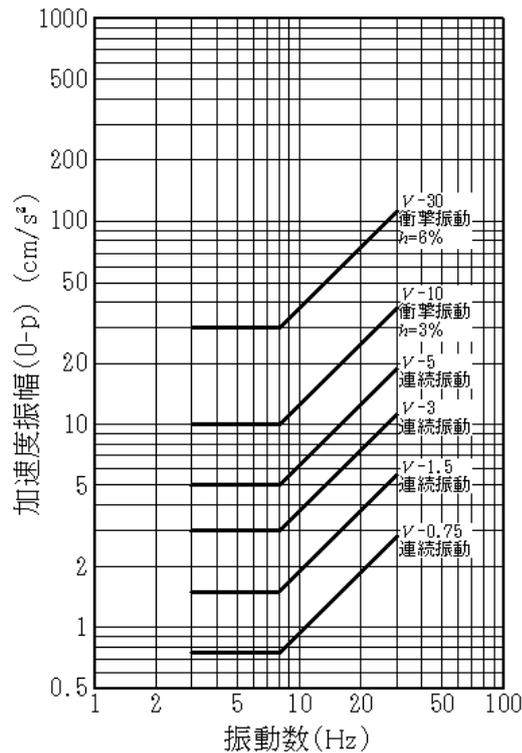


図 2.1-1 建築物の振動に関する居住性能評価指針（初版）

また初版では、表 2.1-1 に示すように、代表的な建築物、室用途ごとに 3 水準のランク(ランクⅠ～Ⅲ)を設定し、それぞれに適用する評価曲線を規定しており、設計者に設計目標を設定する際の具体的な拠り所を提示しているが、歩行振動などの複雑な振動の照合方法については、1 つの方法を規定することはせず、経験的に考案された複数の方法を例示するに留まっている。

建築物, 室用途		ランク		
		ランクⅠ	ランクⅡ	ランクⅢ
住居	居室, 寝室	V-0.75	V-1.5	V-3
事務所	会議・応接室	V-1.5	V-3	V-5
	一般事務室	V-3	V-5	V-5程度

ランクⅠ：この範囲を下回ることがより望ましいレベル

ランクⅡ：一般的なレベル

ランクⅢ：この範囲を上回らないようにするべきレベル

表 2.1-1 建築物の振動に関する居住性能評価指針（初版）における用途別性能評価区分

図 2.1-2 は、改定版における鉛直振動の評価曲線を示す。改定版では、「人の動作・設備による振動」と「交通による振動」に分けられたが、評価曲線は同一である。図に示すように、10～90%の知覚確率を表す 5 本の評価曲線 (V-10～V-90) が規定された。初版との大きな相違点は、以下の 2 点である。第 1 点は、初版ではいくつかの方法を例示するに留めていた複雑な振動の照合方法が、1/3 オクターブバンド分析結果を照合する方法に規定された点である。ただし、この方法の妥当性に関する学術的検討は、十分にはなされていない。もう 1 点は、初版では明

示されていたランクⅠ～Ⅲなどの性能評価区分が削除され、知覚確率を表す曲線のみとなった点である。この結果、設計者は、具体的な抛り所を失うこととなったため、改定版制定後も、初版を活用している設計者も多い。

現在、居住性能評価指針は二度目の改定作業が始まっており、今回改定の要点は、振幅の時間変化をとまなう振動の評価に、振動の継続時間の要因を加えることである。具体的には、初版、改定版のように振動数・振幅平面上に規定された評価曲線を、振動の継続時間に応じてシフトさせることとなる。この結果、最大振幅が同じでも、減衰が大きく継続時間が短い振動ほど良い評価が得られる。そこで本マニュアルでは、その根拠となった研究成果を適用して歩行振動を評価した。

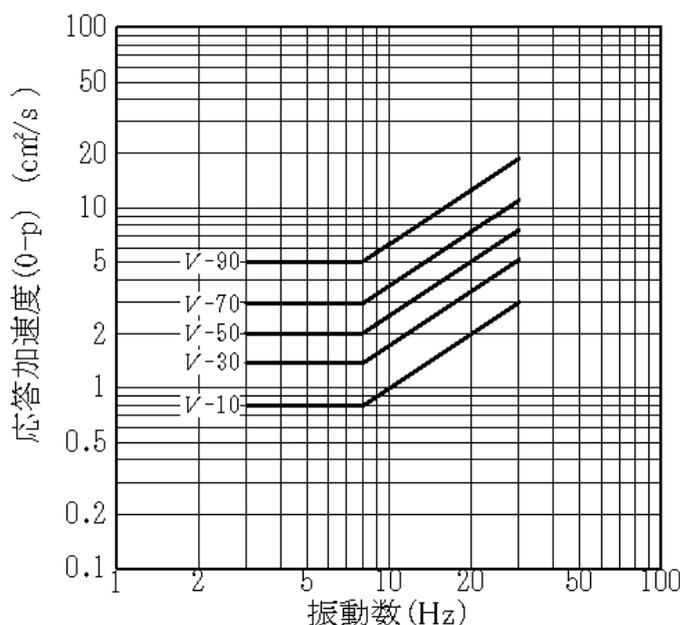


図 2.1-2 建築物の振動に関する居住性能評価指針（改定版）

## 2.2 振動継続時間を考慮した歩行振動評価方法

近年建築学会では、振動台を用いて歩行振動などの複雑な振動を入力し、感覚の大きさや気になり具合に関する官能検査を実施した報告がなされており<sup>1)</sup>、検査結果に基づき、振動感覚・評価を定量的に表す心理学的尺度に対応し、受振者が受けた振動の振動数、振幅、継続時間などとの関係を表した物理的指標（以降“振動評価値”と記す）が示されている。本マニュアルはこの振動評価値を用い、その概要を以下に示す。

$$VLT_{(25ms, 60dB)} = VL_{max(25ms)} + 20 \cdot \log(T^{1/4})$$

ここで、 $VLT_{(25ms, 60dB)}$ (dB): 振動評価値

$VL_{max(25ms)}$ (dB):  $VL_{(25ms)}$ の最大値

$VL_{(25ms)}$ (dB): JIS C 1510-1995 で定められている鉛直特性で重み付けられた振動加速度の実効値を、基準の振動加速度 ( $10^{-5} \text{m/s}^2$ ) で除した値の常用対数を 20 倍した値。ただし、振動加速度の実効値は、時定数 25ms (ミリセカンド) の指数移動平均により求める

$T$ (s):  $VL_{(25ms)}$ が 60dB を超えている時間の総和

$VLT_{(25ms, 60dB)}$ の構成要素の1つである $VL_{max(25ms)}$ は、人間の振動感覚の周波数特性に応じて重み付けした振幅 $VL_{(25ms)}$ の最大値を表す。また時定数とは、振幅の変動に対する人間の感覚の応答の速さを表し、歩行振動に関しては10～25ms程度が適当であることが実験的に明らかとなっている。

一方、 $T(s)$ は、 $VL_{(25ms)}$ が人間の感覚上の閾値に近い60dB以上となっている時間、すなわち人間が振動を感じている時間を表す。この値を振動の継続時間として最大振幅に加味したものが、振動評価値となっている。なお、 $T$ を1/4乗している点は、振幅に対する時間の要因の影響度合いについて検討した研究成果<sup>2)</sup>などに基づいており、さらに $VL_{(25ms)}$ の整合性を図り公式化している。

図 2.2-1 に、官能検査結果に基づいて構成した心理学的尺度と、上記の振動評価値 $VLT_{(25ms, 60dB)}$ の関係を示す。図中、横軸に平行な①～⑦の破線は、官能検査(系列範ちゅう法)で用いた判断範ちゅうの心理学的尺度上の位置を表す。図より、両者はよい対応を示しており、 $VLT_{(25ms, 60dB)}$ で振動の認知大きさ度合い、気になり具合を十分に評価できることがわかる。

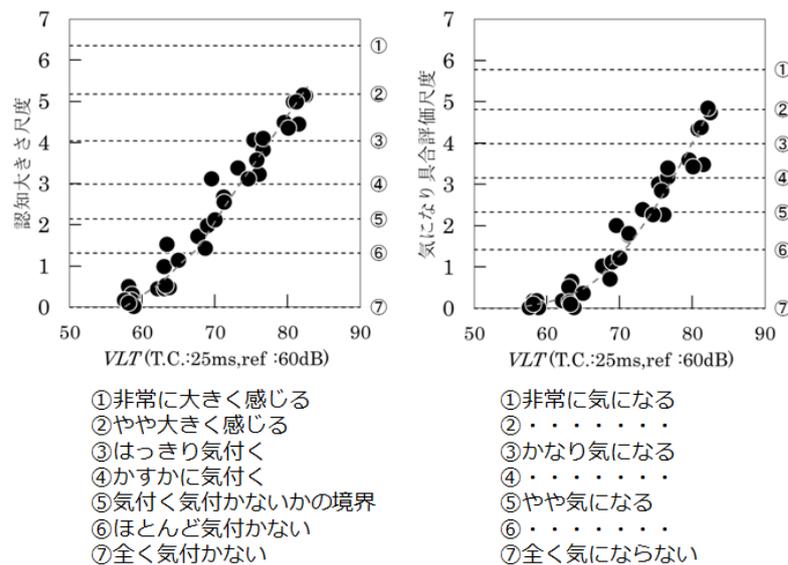


図 2.2-2 心理的尺度と  $VLT_{(25ms, 60dB)}$  の関係

### 3. 実物件の床 CLT スパンと歩行振動評価

#### 3.1 実物件概要と評価一覧

これまでに実測と評価を行った調査物件の結果を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 これまでに測定した物件及び試験体概要および調査結果

物件名	森林総合試験所 床試験体Ⅰ	森林総合試験所 床試験体Ⅱ	勝関フーダーズ スタジオ	(協)オホーツク ウッドピア 北見CLTセミナー ハウス	『鋼構造オフィスビル床のCLT 化』試験体	建津漁業(協) 事務所
実施地域	茨城県つくば市	茨城県つくば市	東京都中央区	北海道北見市	鹿児島県肝属郡	高知県土佐清水市
測定年	2014.10	2014.10	2015.3	2015.9	2016.2	2016.9
状況	試験体床	試験体床	仮設建築	事務所	試験体床	事務所
構造名	CLTパネル工法	CLTパネル工法	CLTパネル工法	CLTパネル工法	重量鉄骨造	在来軸組構法
スパン	4.0m	5.5m	4.6m	4.55m	3.6m	3.6m
構成/CLT厚	5層5ブライ /150mm	5層7ブライ /210mm	5層7ブライ /210mm	7層7ブライ /210mm	7層7ブライ /210mm	5層6ブライ /180mm
接合法 (パネル相互)	表層1層 合板スプライン	表層1層 合板スプライン	中層に合板 雇いざねのみ	表層2層 スプライン (合板+製材)	表層1層 合板スプライン	集成小梁+長ビス +合板スプライン
接合法(パネル端部)	枠組壁上で 長ビス斜め打	枠組壁上で 長ビス斜め打	CLT壁上の集成梁 に長釘止め	L型専用金物止め	鉄骨梁上で スタッドボルト	集成梁上で 長ビス斜め打
心理学的尺度による判断範疇: 認知大きさ評価結果	②~③	③~④	③~④	②~③	③~④	③~④
心理学的尺度による判断範疇: 気になり具合評価結果	③~④	③~④	④~⑤	③~④	④~⑤	④~⑤

表 3.1-2 心理学的尺度による範ちゅう評価一覧

	認知大きさ尺度	気になり具合評価尺度
判断範ちゅう	①非常に大きく感じる	①非常に気になる
	②やや大きく感じる	②.....
	③はっきり気付く	③かなり気になる
	④かすかに気付く	④.....
	⑤気付くか気付かないかの境界	⑤やや気になる
	⑥ほとんど気付かない	⑥.....
	⑦全く気付かない	⑦全く気にならない

### 3.2 CLT 床における歩行振動の特徴

これまでの調査物件のうち「北見 CLT セミナーハウス」は、建物の構造や仕上げ、床版の配置が比較的単純で、歩行振動の基礎的検討をする上で適していたため、その実測値を用いて解析モデルを構築した。

図 3.2-1 は「北見 CLT セミナーハウス」の測定対象となった 2 階平面図を示す。床版は、道産カラマツ 7 層 7 プライの CLT、厚さ 210mm、スパン 4.55m、隣接床版とは合板スプライン接合、床壁は L 字金物接合であった。振動試験および官能検査の結果は以下のようであった。

- ・ 静的荷重による床のたわみ量の調査で、強軸(スパン)方向のパネル端部はピン状態で支えられているとみられた。
- ・ 弱軸方向の静的荷重試験では、パネルどうしの継ぎ目でたわみ量の変位の連続性は低下した一方で、動的加振での変位は連続的であったため、振動上はツーウェイ(二方向)スラブに類似していた。
- ・ 動的加振により、在来軸組構法など従来の木造床と異なり、床版のみからなる単純構造のため、異方性の強いコンクリートスラブの振動に似て、長辺方向に 1~3 次モードが明確に現れることがわかった。
- ・ 床上に乗る人が多くなるほど、人体による減衰の影響で減衰定数は大きく、減衰時間は短くなることが明らかになった。なお減衰時間そのものは、通常の木造床と比較し長く、揺れを感知し易い傾向にあった。
- ・ 歩行振動測定に伴う官能検査結果は、図 3.2-2 のようであり「揺れを大きく感じやすく」、「かなり気になる」結果であった。

また、上記の試験結果を用いて有限要素解析モデル構築のための振動解析を試行した。試行により、複数の条件付けで得られた固有振動数、振動モードの解析結果は図 3.2-4 であり、実物件の測定結果(図 3.2-3)と良く類似しており測定結果がおおむね再現できていることが判った。詳細は次項に示す。

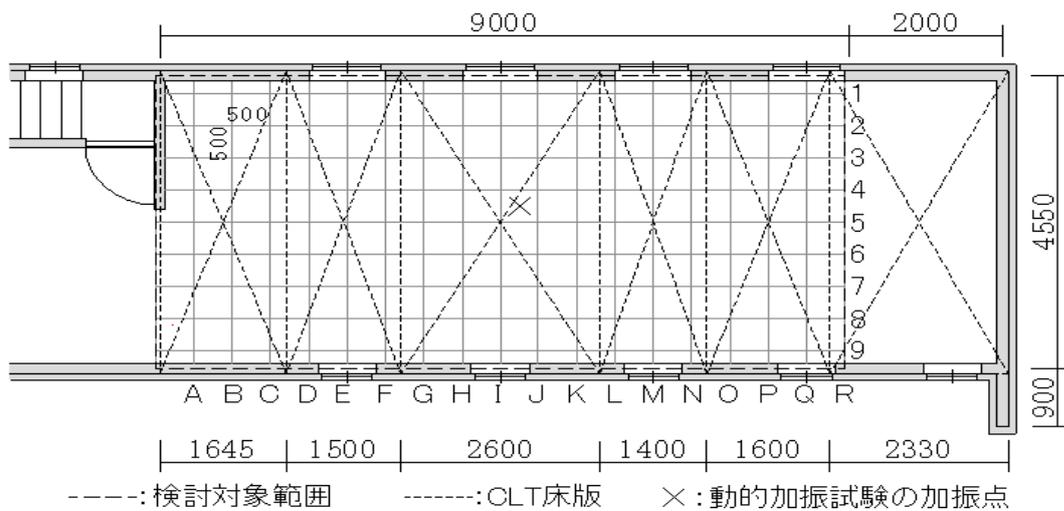


図 3.2-1 心理的尺度による範ちゅう評価一覧

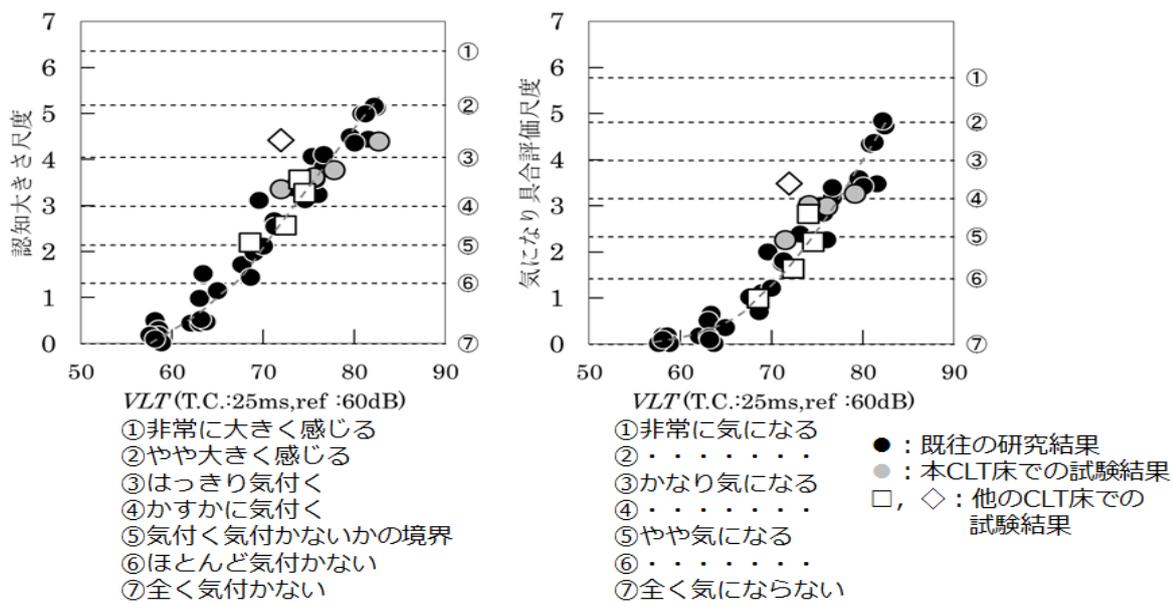


図 3.2-2 官能検査結果と  $VLT_{(25ms, 60dB)}$  の関係

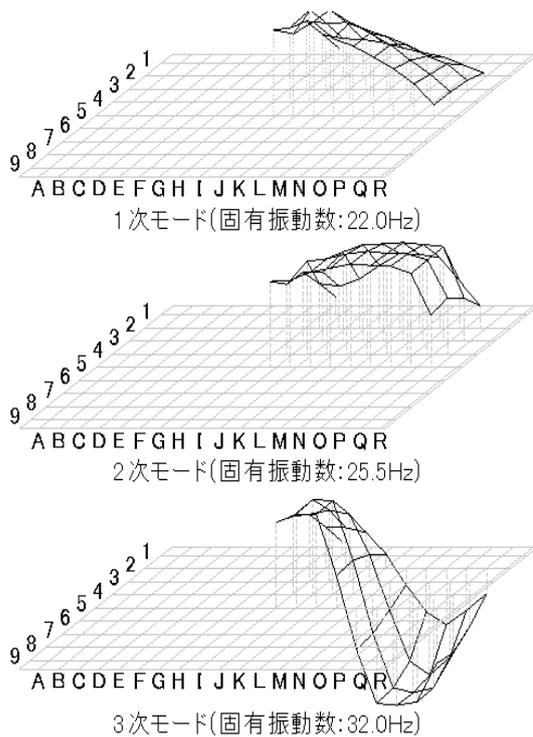


図 3.2-3 測定結果の固有振動数、振動モード

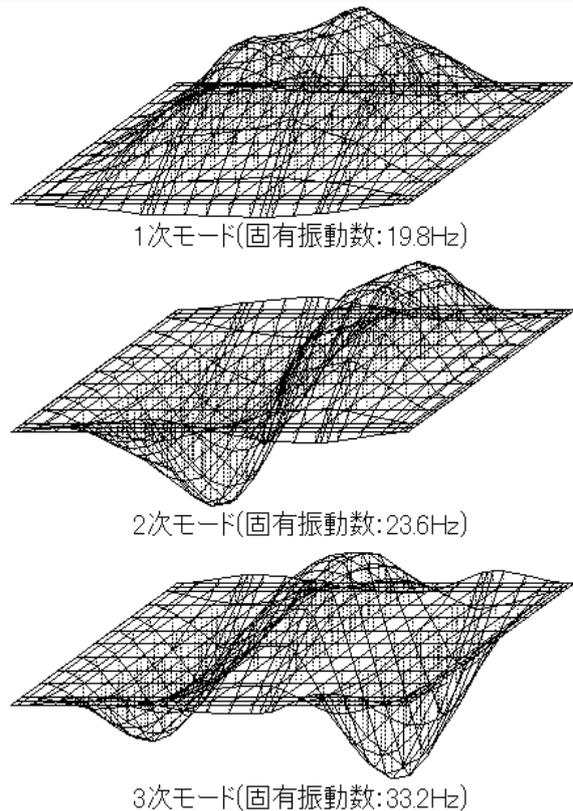


図 3.2-4 解析結果の固有振動数、振動モード

### 3.3 CLT 床歩行振動の汎用解析モデルの概要

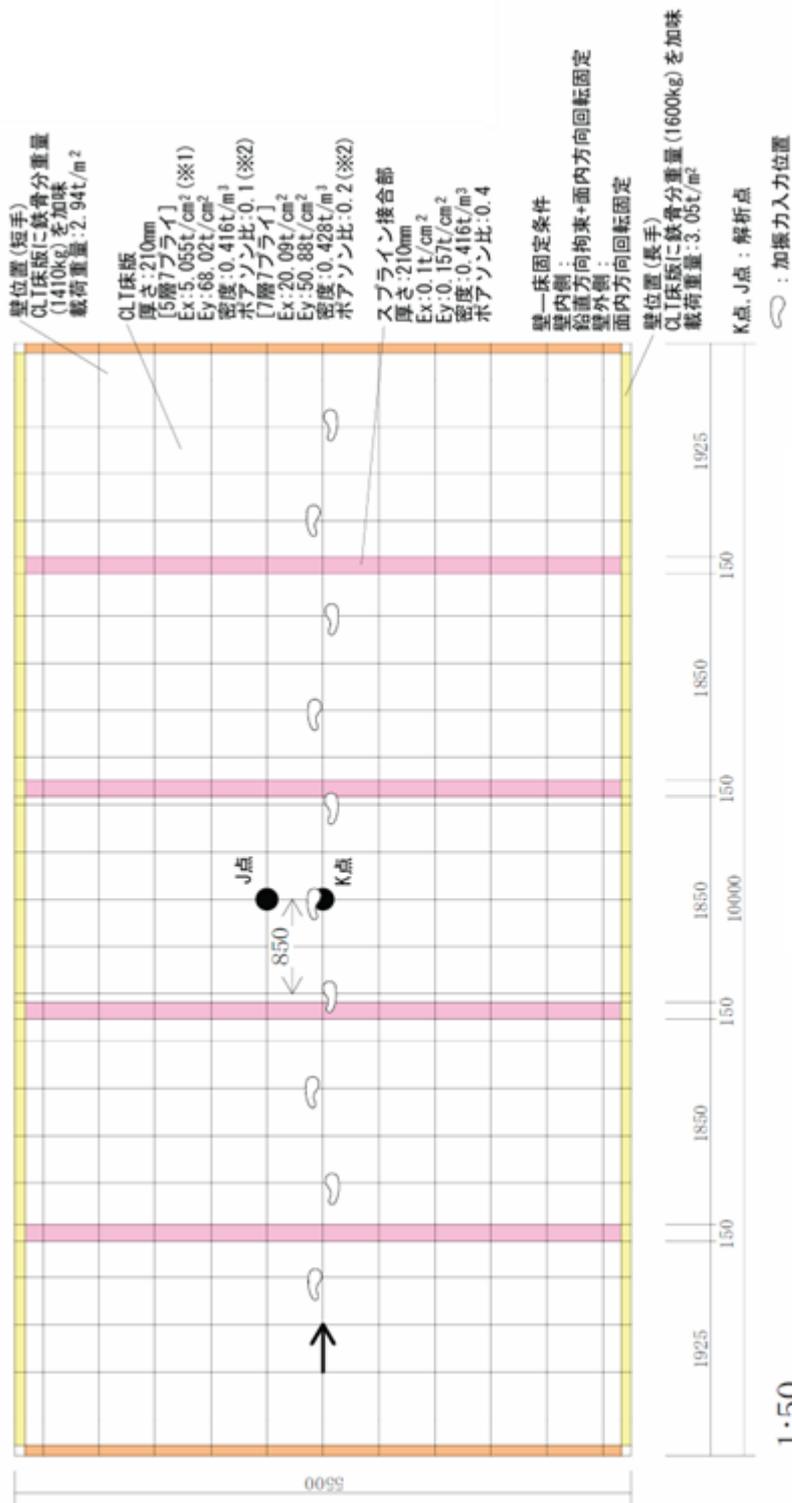
CLT 床歩行の有限要素解析モデル(以下 FEM 解析モデルとする)の構築には、以下に記す各種パラメータによる実測値を用いた(ただしポアソン比を除く。詳細は章末資料を参照)。

- ・CLT 床版単体の条件: 厚さ、層構成、曲げ弾性係数設定、材料密度、ポアソン比
- ・CLT 相互の接合条件: パネル相互の接合方法により異なる  
(例. スプライン接合の場合・・・厚さ、曲げ弾性係数設定、材料密度、ポアソン比)
- ・部位接合部の固定条件: 床・壁の固定条件設定、床端部の壁による固定度設定

解析モデルの大きさは、これまで実測を行った物件の状況から、居室として有効な大きさを想定して、図 3.3-1 に示すような、スパン 5.5m×奥行き 10.0m(パネル幅 2.0m×5 枚構成)の床を解析モデルに設定した。歩行振動はこの床版モデル上を 2Hz 毎の移動加振として設定した。

解析モデルの条件設定後、スパン長を変数化し 2.0m から 0.5m 刻みで伸長させ、一次固有振動数が 8Hz 以下となるまで解析を実施した。なお減衰定数は官能性に影響を及ぼすが、一般性を考慮しすべて 5% で設定した。

解析結果は表 3.3-1 になり、スパン毎に固有振動数、微小変形量、性能特性値(dB)がリスト化された。



- (※1) 5層7プライ(スギ)の強軸の曲げ剛性(実験値:68.02[t/cm<sup>2</sup>])に、5層7プライ曲げ剛性の規格値の比(4.201[t/cm<sup>2</sup>]/56.53[t/cm<sup>2</sup>])を掛けて算出した値。
- (※2) ポアソン比はパラメータステディによって同定した値。
- ・梁方向のスパンを2.0mから0.5mずつ伸ばしていき、解析を行った。
  - ・1次固有振動数が8Hzを下回るまで解析を行った。
  - ・減衰定数は5%とした。

図 3.3-1 FEM 解析モデルの概要図 (スパン 5.5m の場合)

表 3.3-1 FEM 解析モデルを用いた CLT 床スパン毎の解析結果

TITLE 7-1	CLT床版枚数	CLT床版種類	スパン(m)	固有振動数 (Hz)		100kg静的荷重変形量 (mm)				性能値 (dB)							
				1次	3次	K点載荷		J点載荷		時定数	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	平均	
						K点変形	J点変形	K点変形	J点変形								
7-1-1	5枚	5層アブライ(スキ)	2.0	108.90	111.03	0.020	0.012	0.012	0.011	VZmax	10ms	67.72	63.45	65.04	63.68	65.93	65.17
											25ms	64.44	60.55	62.40	60.50	63.32	62.24
										VLT	10ms	67.72	63.45	65.04	63.68	65.93	65.17
7-1-2	5枚	5層アブライ(スキ)	2.5	68.94	72.10	0.033	0.024	0.024	0.023	VZmax	10ms	73.43	68.09	69.45	69.82	70.20	70.20
											25ms	70.32	65.05	66.92	66.85	67.86	67.40
										VLT	10ms	73.43	68.09	69.45	69.82	70.20	70.20
7-1-3	5枚	5層アブライ(スキ)	3.0	47.16	50.83	0.048	0.039	0.039	0.039	VZmax	10ms	76.42	72.35	73.53	76.00	74.14	74.49
											25ms	73.21	69.35	71.36	73.41	71.98	71.86
										VLT	10ms	76.42	72.35	73.53	76.00	74.14	74.49
7-1-4	5枚	5層アブライ(スキ)	3.5	34.32	38.26	0.067	0.058	0.058	0.057	VZmax	10ms	77.71	75.86	77.04	78.62	77.55	77.36
											25ms	75.26	73.84	75.28	77.17	75.69	75.45
										VLT	10ms	77.71	75.86	77.04	78.62	77.82	77.41
7-1-5	5枚	5層アブライ(スキ)	4.0	26.09	30.17	0.089	0.080	0.080	0.079	VZmax	10ms	78.64	78.63	79.54	79.46	79.90	79.23
											25ms	77.16	76.80	77.34	77.89	77.40	77.32
										VLT	10ms	78.64	78.63	79.54	79.46	79.90	79.23
7-1-6	5枚	5層アブライ(スキ)	4.5	20.54	24.71	0.116	0.106	0.106	0.106	VZmax	10ms	80.45	79.53	80.44	80.22	80.64	80.26
											25ms	78.00	78.06	78.19	77.31	78.63	78.04
										VLT	10ms	81.97	81.32	82.10	81.72	82.39	81.90
7-1-7	5枚	5層アブライ(スキ)	5.0	16.60	20.83	0.147	0.136	0.136	0.136	VZmax	10ms	82.12	80.87	81.66	81.17	81.90	81.54
											25ms	81.27	79.18	79.69	79.10	80.40	79.93
										VLT	10ms	84.67	83.06	83.78	83.45	84.11	83.82
7-1-8	5枚	5層アブライ(スキ)	5.5	13.73	17.99	0.182	0.171	0.171	0.171	VZmax	10ms	84.01	81.76	82.87	82.31	82.54	82.70
											25ms	82.60	80.05	81.26	80.01	81.30	81.04
										VLT	10ms	87.13	84.86	86.07	85.44	85.46	85.79
7-1-9	5枚	5層アブライ(スキ)	6.0	11.56	15.84	0.222	0.211	0.211	0.210	VZmax	10ms	85.09	85.35	84.53	83.13	83.74	84.37
											25ms	83.59	83.57	83.70	81.68	82.79	83.07
										VLT	10ms	88.52	88.79	87.93	86.51	87.12	87.77
7-1-10	5枚	5層アブライ(スキ)	6.5	9.88	14.18	0.267	0.256	0.256	0.255	VZmax	10ms	87.09	87.04	87.15	85.10	86.24	86.52
											25ms	86.42	88.77	88.47	86.36	87.08	87.42
										VLT	10ms	90.06	92.43	91.96	90.01	90.63	91.02
7-1-11	5枚	5層アブライ(スキ)	7.0	8.56	12.86	0.318	0.306	0.306	0.306	VZmax	10ms	88.89	90.99	90.75	88.54	88.95	89.59
											25ms	87.50	88.81	88.36	87.49	88.75	88.24
										VLT	10ms	91.43	92.46	92.08	91.13	92.48	91.92
TITLE 7-2	CLT床版枚数	CLT床版種類	スパン(m)	固有振動数 (Hz)		100kg静的荷重変形量 (mm)				性能値 (dB)							
				1次	3次	K点載荷		J点載荷		時定数	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	平均	
						K点変形	J点変形	K点変形	J点変形								
7-2-1	5枚	7層アブライ(スキ)	2.0	92.02	95.41	0.020	0.012	0.012	0.011	VZmax	10ms	67.19	62.51	63.92	64.32	64.80	64.55
											25ms	63.97	59.47	61.33	61.28	62.25	61.86
										VLT	10ms	67.19	62.51	63.92	64.32	64.80	64.55
7-2-2	5枚	7層アブライ(スキ)	2.5	58.06	62.20	0.031	0.023	0.023	0.022	VZmax	10ms	72.36	68.66	69.20	73.79	69.88	70.78
											25ms	69.10	66.29	66.70	70.67	67.42	68.04
										VLT	10ms	72.36	68.66	69.20	73.79	69.88	70.78
7-2-3	5枚	7層アブライ(スキ)	3.0	39.69	44.14	0.047	0.039	0.039	0.038	VZmax	10ms	74.45	73.32	73.83	77.41	74.49	74.70
											25ms	72.98	71.47	72.40	75.83	73.13	73.16
										VLT	10ms	74.45	73.32	73.83	77.41	74.49	74.70
7-2-4	5枚	7層アブライ(スキ)	3.5	28.91	33.51	0.068	0.059	0.059	0.058	VZmax	10ms	78.32	76.73	77.95	78.87	78.36	78.05
											25ms	77.01	76.03	76.95	77.87	77.20	77.01
										VLT	10ms	79.30	77.65	79.04	80.00	79.55	79.11
7-2-5	5枚	7層アブライ(スキ)	4.0	22.00	26.67	0.094	0.083	0.083	0.083	VZmax	10ms	78.18	77.12	78.19	79.18	78.60	78.25
											25ms	79.09	79.33	79.74	79.93	80.17	79.65
										VLT	10ms	77.15	77.43	77.54	77.72	78.11	77.59
7-2-6	5枚	7層アブライ(スキ)	4.5	17.34	22.06	0.126	0.115	0.115	0.114	VZmax	10ms	80.58	81.26	81.67	81.72	81.93	81.43
											25ms	78.81	79.57	79.57	79.71	80.03	79.54
										VLT	10ms	81.63	81.41	82.01	80.58	82.48	81.62
7-2-7	5枚	7層アブライ(スキ)	5.0	14.05	18.77	0.164	0.152	0.152	0.151	VZmax	10ms	83.94	83.39	83.75	82.62	84.61	83.66
											25ms	83.46	81.55	81.47	80.74	82.76	82.00
										VLT	10ms	84.36	82.42	83.35	82.08	83.18	83.08
7-2-8	5枚	7層アブライ(スキ)	5.5	11.64	16.37	0.208	0.196	0.196	0.195	VZmax	10ms	83.05	80.81	81.85	80.31	81.88	81.58
											25ms	87.50	85.53	86.58	85.20	86.07	86.17
										VLT	10ms	86.28	83.99	85.17	83.55	84.85	84.77
7-2-9	5枚	7層アブライ(スキ)	6.0	9.81	14.54	0.259	0.246	0.246	0.245	VZmax	10ms	85.30	85.78	85.02	83.43	83.93	84.69
											25ms	83.83	84.03	83.93	82.00	83.12	83.38
										VLT	10ms	88.73	89.25	88.43	86.81	87.28	86.10
7-2-10	5枚	7層アブライ(スキ)	6.5	8.41	13.14	0.316	0.303	0.303	0.302	VZmax	10ms	87.33	87.53	87.37	85.45	86.55	86.85
											25ms	86.33	88.72	87.82	86.53	86.44	87.17
										VLT	10ms	89.98	92.37	91.34	90.17	90.01	90.78
7-2-11	5枚	7層アブライ(スキ)	7.0	8.41	13.14	0.316	0.303	0.303	0.302	VZmax	10ms	88.58	90.95	90.27	88.74	88.80	89.47
											25ms	88.74	90.04	89.27	88.59	89.73	89.28
										VLT	10ms	92.30	93.77	93.03	92.33	93.51	93.01
7-2-12	5枚	7層アブライ(スキ)	7.5	8.41	13.14	0.316	0.303	0.303	0.302	VZmax	10ms	92.44	93.77	93.03	92.33	93.51	93.01
											25ms	91.05	91.95	91.36	90.37	91.52	91.25
										VLT	10ms	92.44	93.77	93.03	92.33	93.51	93.01

次に歩行振動の気になり具合評価は、前表で解析した各 VLT 値に対すると、表 3.3-2 のように示された。

表 3.3-2 FEM 解析モデルを用いた CLT 床スパン毎の解析結果

桁方向の CLT床版枚数	CLT床版の 構成 (樹種)	スパン (m)	固有振動数 (Hz)	100kg静的載荷 変形量 (mm)	VLT (ref: 60dB, T.C. 25ms)	達成される 気になり具合評価	
						住居	事務所
5枚	5層7プライ (スギ)	2.0	108.90	0.020	62.24	⑥	⑥
		2.5	68.94	0.033	67.40	⑥	⑥
		3.0	47.16	0.048	71.86	⑥	⑥
		3.5	34.32	0.067	75.60	⑥	⑥
		4.0	26.09	0.089	78.85	⑥	⑥
		4.5	20.54	0.116	79.86	⑤	⑥
		5.0	16.60	0.147	82.37	④	⑤
		5.5	13.73	0.182	84.23	④	④
		6.0	11.56	0.222	86.52	④未達成	④
	6.5	9.88	0.267	89.59	④未達成	④未達成	
	7.0	8.56	0.318	90.12	④未達成	④未達成	
	7層7プライ (スギ)	2.0	92.02	0.020	61.66	⑥	⑥
		2.5	58.06	0.031	68.04	⑥	⑥
		3.0	39.69	0.047	73.16	⑥	⑥
		3.5	28.91	0.068	78.25	⑥	⑥
		4.0	22.00	0.094	79.54	⑤	⑥
		4.5	17.34	0.126	82.00	④と⑤の境界	⑤
		5.0	14.05	0.164	84.77	④	④
		5.5	11.64	0.208	86.85	④未達成	④
6.0		9.81	0.259	89.47	④未達成	④未達成	
6.5	8.41	0.316	91.25	④未達成	④未達成		

	気になり具合評価尺度	VLT <sub>(25ms,60dB)</sub>	
		住居	事務所
判断範ちゅう	① 非常に気になる	-	-
	② . . . . .	-	-
	③ かなり気になる	-	-
	④ . . . . .	85dB	87dB
	⑤ やや気になる	82dB	84dB
	⑥ . . . . .	79dB	81dB
	⑦ 全く気にならない	-	-

### 3.4 CLT 床歩行振動のスパン表

前項解析に基づき、CLT 床歩行振動のスパン表を、表 3.4-1 に示す。

表 3.4-1 目標とする気になり具合評価を達成する梁方向最大スパン

単位:m

使用する CLT床版 (樹種)	床用途	目標とする気になり具合評価		
		⑥	⑤	④
5層7プライ (スギ)	住居	4.0	4.5	5.5
	事務所	4.5	5.0	6.0
7層7プライ (スギ)	住居	3.5	4.0	5.0
	事務所	4.0	4.5	5.5

※CLT床版幅2.0m, 桁方向のCLT床版枚数5枚として解析

	気になり具合評価尺度	$VLT_{(25ms, 60dB)}$	
		住居	事務所
判断範ちゅう	① 非常に気になる	-	-
	② . . . . .	-	-
	③ かなり気になる	-	-
	④ . . . . .	85dB	87dB
	⑤ やや気になる	82dB	84dB
	⑥ . . . . .	79dB	81dB
	⑦ 全く気にならない	-	-

スパン表は気になり具合評価尺度の判断範ちゅう表に見られる  $VLT_{(25ms, 60dB)}$  値を設定値とした。評価尺度の設定値については参考資料に示す。

設計者はスパン表を用いることで「気になり具合の評価」から設計上の床スパンを選択することができる。歩行振動の面でより良い日常環境を望む場合には、本表を参照して気になり具合を念頭に環境設計を進めていただければ幸甚である。

## 4. 歩行振動が懸念される場合の予防対応策

CLT の床歩行振動が設計上懸念される場合に、ここでは予防策として、一般的に床歩行振動に有効なソフト・ハード両面の対応策を示す。

### 4.1 構造計画面での対策

- ① 床 CLT の固有振動数が※10Hz 以上となるように剛性を高くすると、歩行振動設計スパン表に近似するようであるので、この方法によりスパン設計を行う。

(日本建築学会環境基準「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」より引用)

$$f = \frac{\pi}{2\ell^2} \sqrt{\frac{EIg}{w}} \geq 1.0 \text{ Hz}$$

(f : 固有振動数, EI : 曲げ剛性, W : 自重, g : 重力加速度, ℓ : スパン)

※歩調振動数(1.6~2.3Hz)及びその2・3・4倍の振動数(倍調波)が床の固有振動数と共振しないようにする、10Hz 近辺でも留意が必要。

- ② CLT 床は、減衰時間が長くなる特徴がみられ、歩行振動の感覚評価にマイナス要因となっているため、床 CLT の減衰時間が短くなる対策を講じる。特に、部材どうしの接合方法などによってその効果は異なると考えられる。

### 4.2 意匠計画面での対策

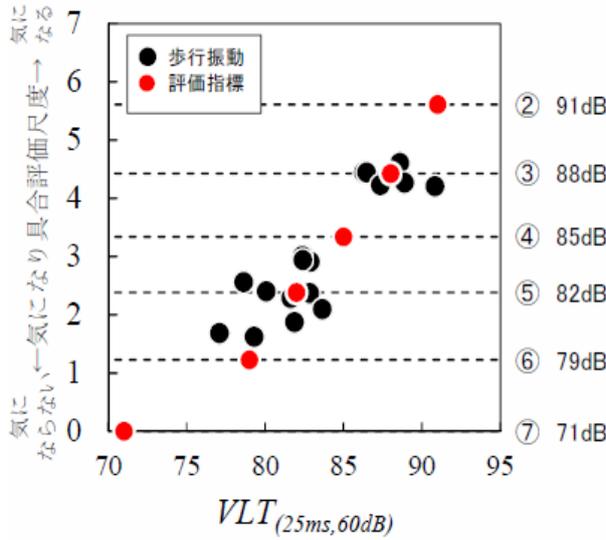
- ① 頻繁に歩行する部屋と静寂を要する部屋とを近接させない  
= 加振源と受振体の距離をできるだけ多く取ることで、距離による減衰を図る(環境振動配慮設計の基本)
- ② 間仕切り壁を設け、床版の固有振動数を変える工夫をする  
= 間取り計画は使用時動線の位置や長さが歩行振動に影響する
- ③ スパンの中央を通る歩行の動線や、重複する長い動線を設けると、大きな振動の要因となるため避ける
- ④ 食器棚等微振動でガタつく什器・備品を壁際に設置すると、床の動変形に伴う微小傾斜による接触音が発生し、体感では感じられないレベルの歩行振動でも、聴覚を介し振動を認知し、苦情につながる事例があるので注意が必要である。

## 参考資料

### ○『気になり具合評価尺度』の設定値について

日本建築学会で現在検討されている居住性能評価指針は、実験室で行われる振動台試験での官能評価を基準として議論されている。また振動台試験においては、気になり具合の評価尺度表現と  $VLT_{(25ms, 60dB)}$  値の対応が参考資料 1 の右図のように建築学会で報告されている<sup>1)</sup>。このように、 $VLT_{(25ms, 60dB)}$  値を基準数値として見た場合に、官能性が数値化されて整理できるため、本マニュアルにおいても、同様の方法によりスパン表を取りまとめることとした。

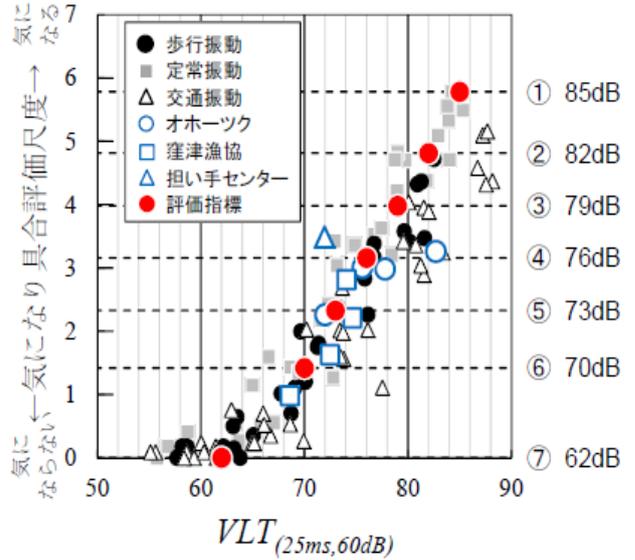
### [実大床試験体での官能検査]



気になり具合評価尺度（住居の居室を想定）と  $VLT_{(25ms, 60dB)}$  の関係

気になり具合評価尺度	$VLT_{(25ms, 60dB)}$
① 非常に気になる	-
② . . . . .	91dB
③ かなり気になる	88dB
④ . . . . .	85dB
⑤ やや気になる	82dB
⑥ . . . . .	79dB
⑦ 全く気にならない	71dB

### [振動台での官能検査]



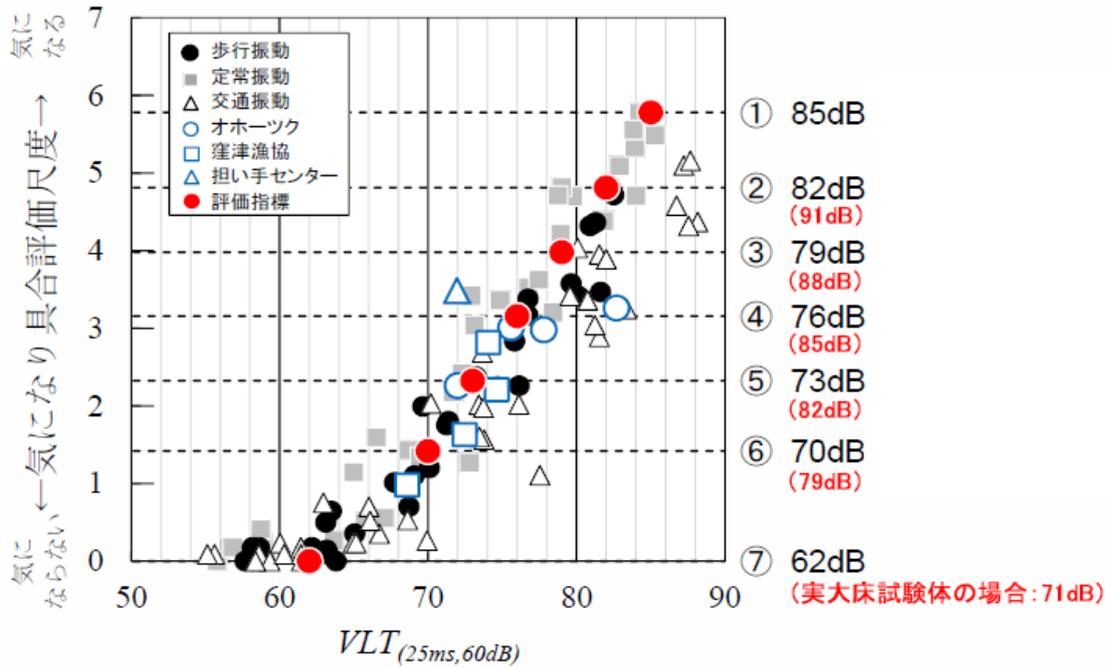
気になり具合評価尺度（住居の居室を想定した場合）との関係

$VLT_{(25ms, 60dB)}$	気になり具合評価尺度
85dB	① 非常に気になる
82dB	② . . . . .
79dB	③ かなり気になる
76dB	④ . . . . .
73dB	⑤ やや気になる
70dB	⑥ . . . . .
62dB	⑦ 全く気にならない

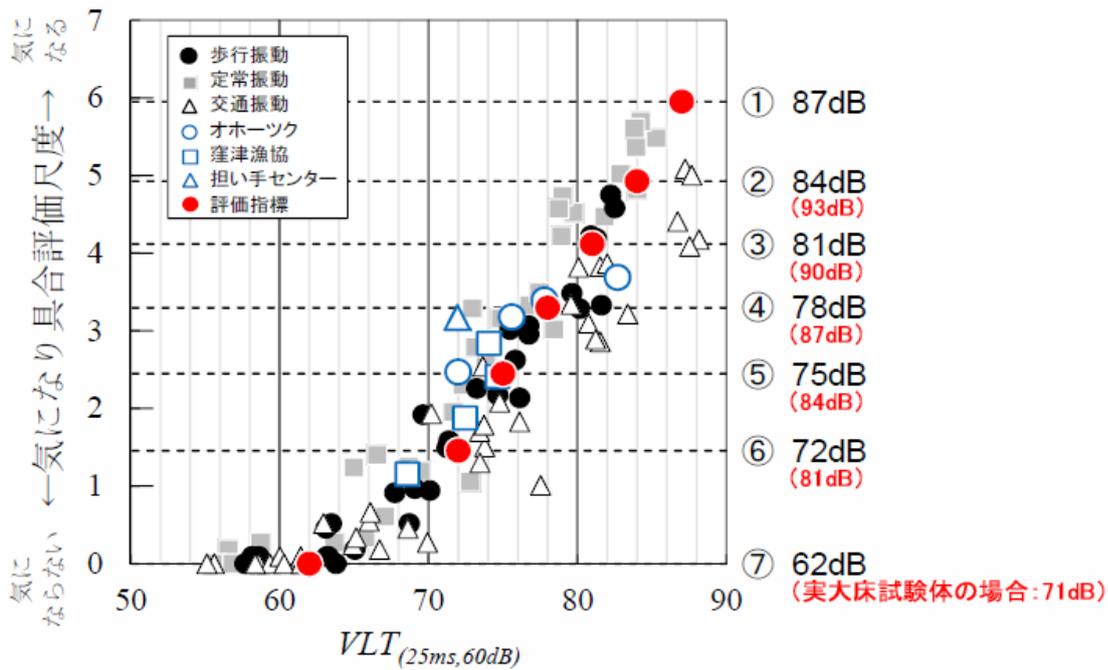
#### 参考資料 1 実大床試験体試験と振動台試験の官能検査の対比

しかし、小スケールで行う振動台試験での評価は、実物件での測定値と比較して、その構造に関わらず厳しくなる傾向がある。参考資料 1 の左図は建築学会で報告された実大試験体（実物件を再現した試験体）による試験での床歩行振動の気になり具合評価尺度と、実験室での振動台試験の同尺度の違いを示したもので<sup>13)</sup>、実大床試験体と振動台の  $VLT_{(25ms, 60dB)}$  と気になり具合評価尺度の違いを明確にしている。

そのため、本マニュアルでは、より実物件の評価に近い値を求めるため、振動台試験での官能検査で得られた気になり具合評価尺度を実大床試験体による試験の評価尺度に置き換えて評価した（参考資料 2）。つまり、 $VLT_{(25ms, 60dB)}$  値が 82dB の場合、振動台試験での気になり具合尺度は②（①「非常に気になる」と③「かなり気になる」の間）であるが、本マニュアルでは実大床試験体での評価尺度に置き換えた場合の⑤「やや気になる」で示すこととした。評価尺度は、今後の実物件でのデータの蓄積や、日本建築学会で今後発表される居住性能評価指針を踏まえて、見直し、改定される可能性がある。



気になり具合評価尺度（住居の居室を想定した場合）との関係



気になり具合評価尺度（事務所の執務室を想定した場合）との関係

参考資料 2 振動台試験および実物件での歩行振動の官能試験結果

## 参考文献

- 1) 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 年 2 月
- 2) Griffin, M. J.: 3.4 Vibration Duration and 3.5 Complex Vibration、3. Vibration Discomfort、In Handbook of Human Vibration、Academic Press、1990
- 3) 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 年 9 月

## 2.3 まとめ

以上、H28 年度に実施した CLT 床の歩行振動に関する検討内容を纏めると以下の通りとなる。

H27 年度に実施した実大 CLT 床の振動測定結果からパラメトリックスタディ用の接合部仕様や端部固定度などを特定し、新たな実物件の床歩行振動測定結果も加味しながら、CLT 工法の床歩行振動解析モデルを作成した。この振動解析モデルに対し、解析条件(材料定数や CLT 間接合条件など)を絞り込んだ上で CLT の層構成やスパン長をパラメータとした振動解析を行い、得られた解析値と建築学会指針を比較することで CLT 床歩行振動スパン表を作成した。

解析で設定した CLT は、床での利用が想定される 5 層 7 プライと 7 層 7 プライ(全層スギ、Mx60)を検討対象としたが、樹種の違いや他の層構成については、ヤング係数などの材料試験データが整っておらず解析ができなかった。また、CLT 間接合の違いや端部固定条件等も一条件しか解析しておらず、様々な仕様に対し網羅的に適用可能な結果が得られたとは考えていない。今回の解析結果およびスパン表は限られた条件のもとに検討されたものであり、解析に必要な数値であるヤング係数やポアソン比などは今後の研究の進展により異なる値になる可能性がある。従って、今後の試験データの蓄積や解析技術の進展により、適宜見直し・修正を行っていくことが必要である。

一方で、そもそも床歩行振動は構造安全性とは全く異なる尺度で評価されるものであり、居住者(施主)の意向や建物の用途、間取りなどによっても求められる性能は異なってくる。ここではあくまでも、学会指針を比較対照とした一般的評価に基づく結果を纏めており、本 WG として絶対的な結論を導き出しているわけではない点には注意が必要である。

歩行などによる振動励起は人間にとって決して心地よいものではないが、全く揺れを感じない床を作ることは木造では困難であり、過度に剛性を高めたり高強度部材を組みこんだりといったことをすると、かえって木造の良さを失うことにもなりかねない。従って、木造の良さを失わない程度に、適度に揺れを感じるレベルに納まるようにうまく設計するのが肝心である。

## 章末資料

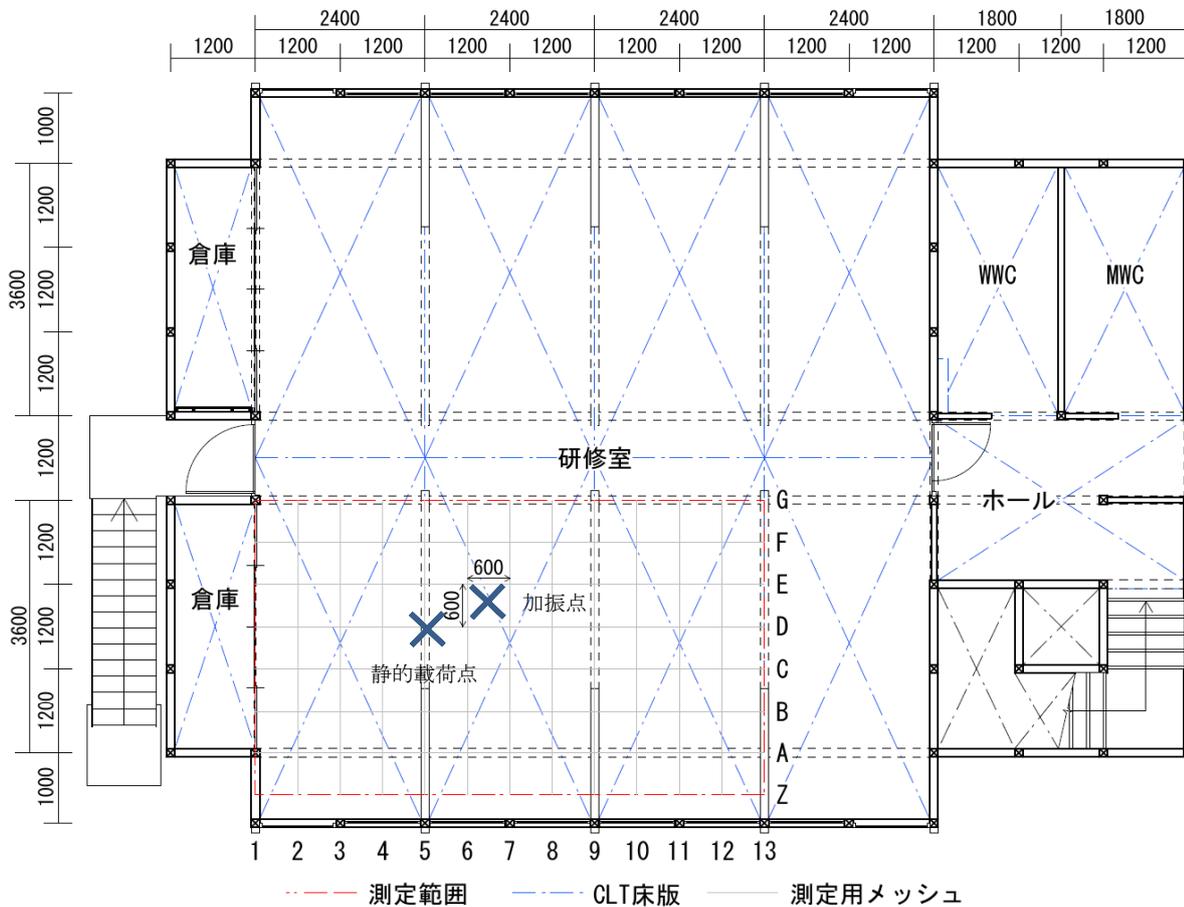
### a. 高知県内の CLT を床板に用いた建築物の歩行振動測定

CLT を床板に用いた実物件の歩行振動性能に関するデータの収集のため、CLT を用いた建築物のある高知県にて各種測定を行った。測定は 2016 年 9 月 9 日～11 日に窪津漁業(協)を中心として歩行振動 WG および東京工業大学の横山裕研究室で実施した。測定した物件及び測定項目、試験結果を以下に示す。なお物件の情報は表 3.1-1 を参照されたい。

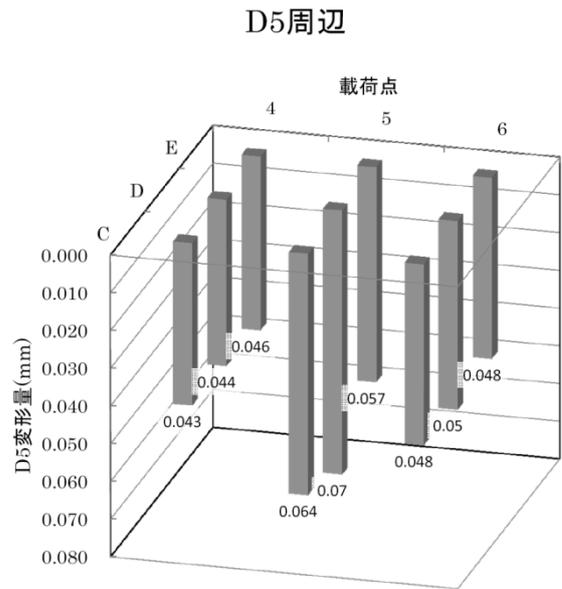
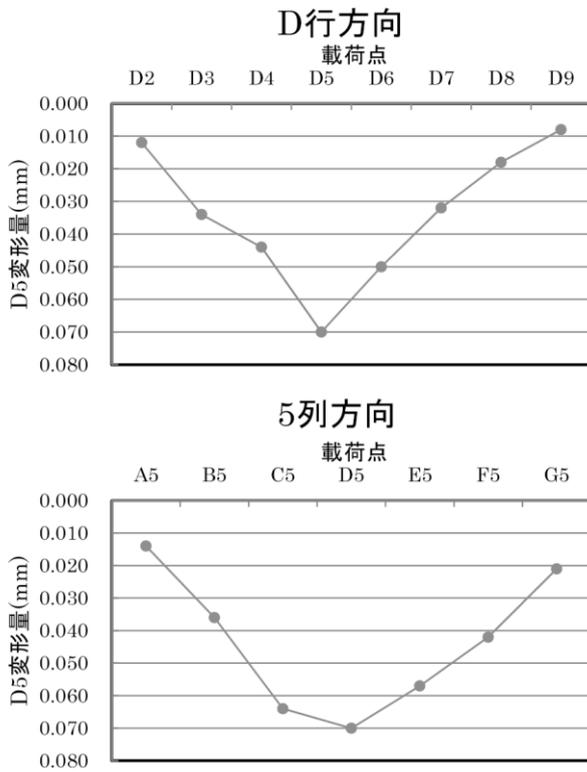
章末資料 表 3-1 高知県内にて歩行振動試験実施した物件の測定項目

測定項目	窪津漁業(協)事務所	高知県森林組合連合会事務所ビル	高知県立農業担い手育成センター宿泊施設
90kgf 静的載荷	○		
固有振動数	○		
減衰時間	○	○	○
減衰定数	○		
歩行振動官能検査	○		○

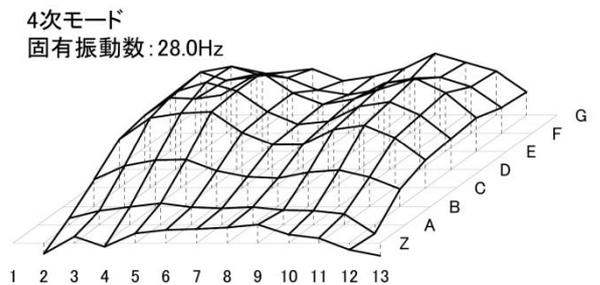
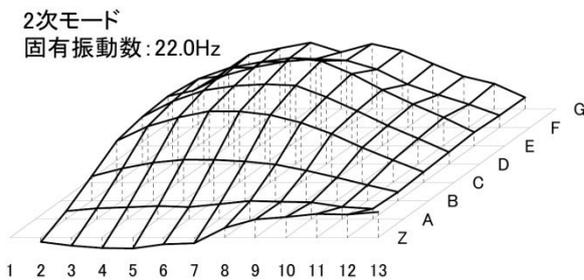
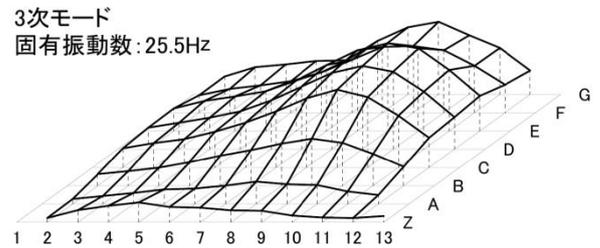
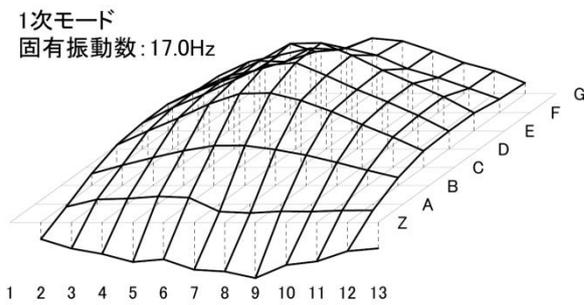
\*測定した項目は○で表記



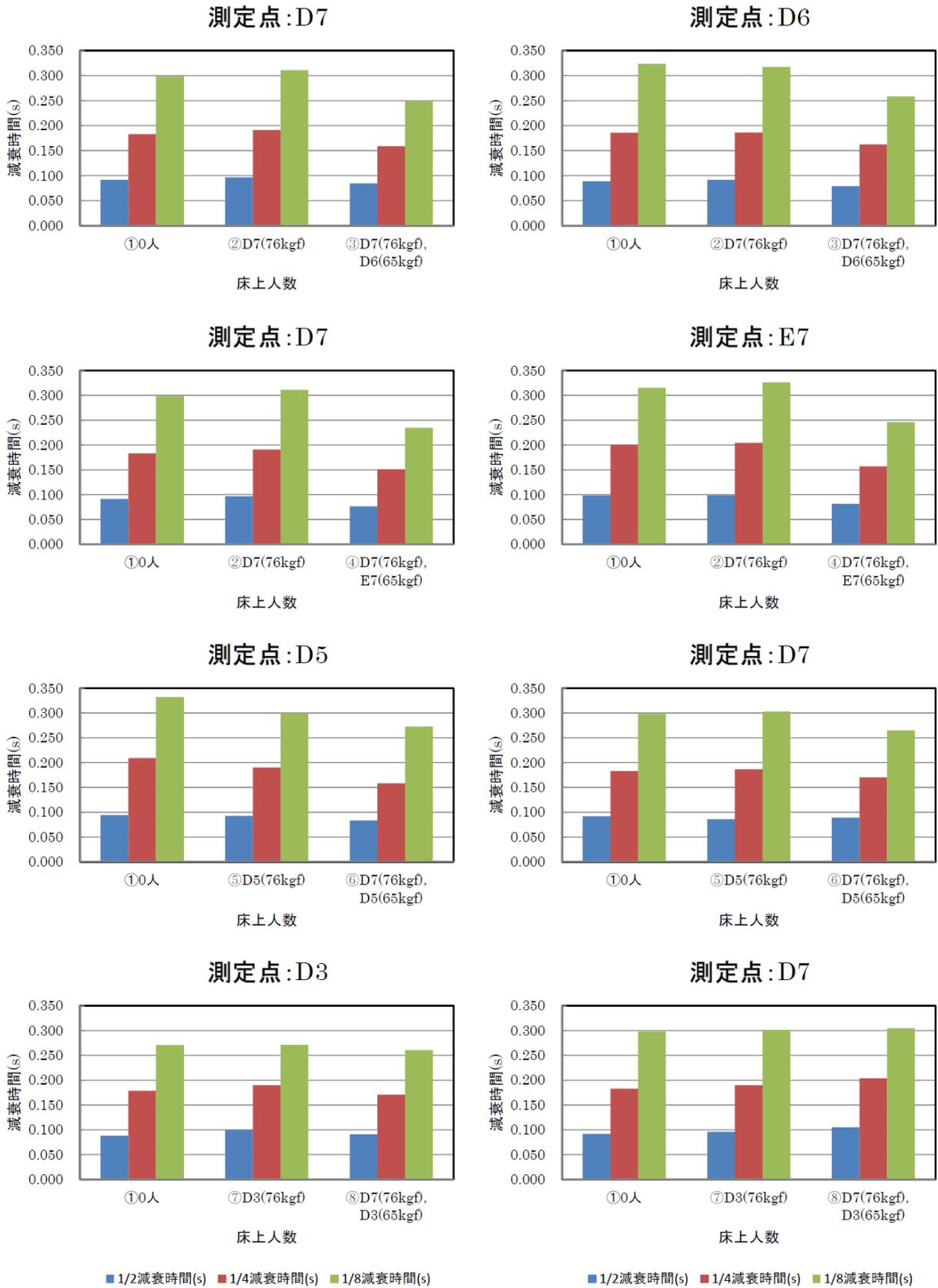
章末資料 図 3-1 窪津漁業(協)事務所 2階平面図



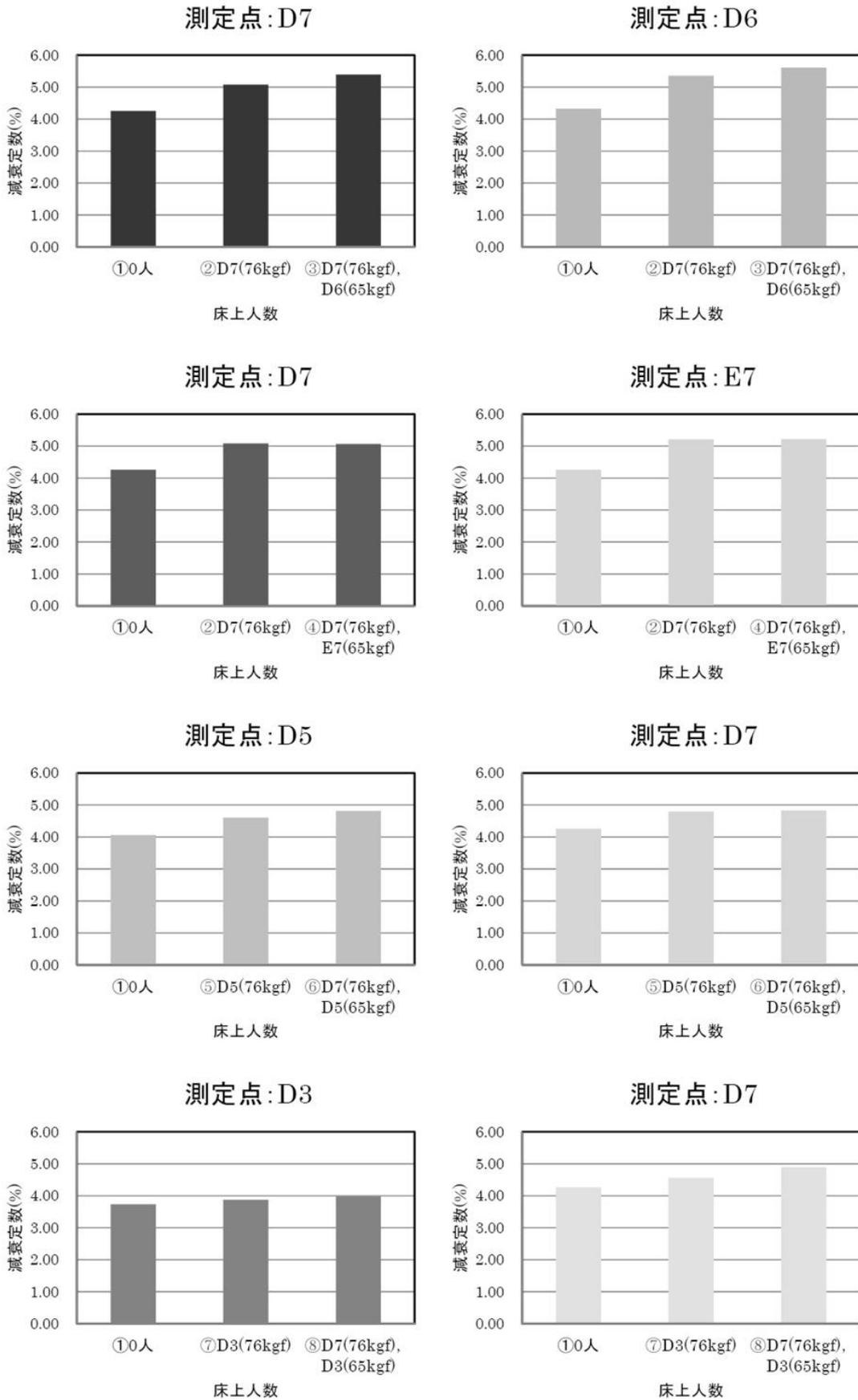
章末資料 図 3-2 窪津漁業(協)事務所における 90kgf 静的載荷時の変形量 (D5 に載荷)



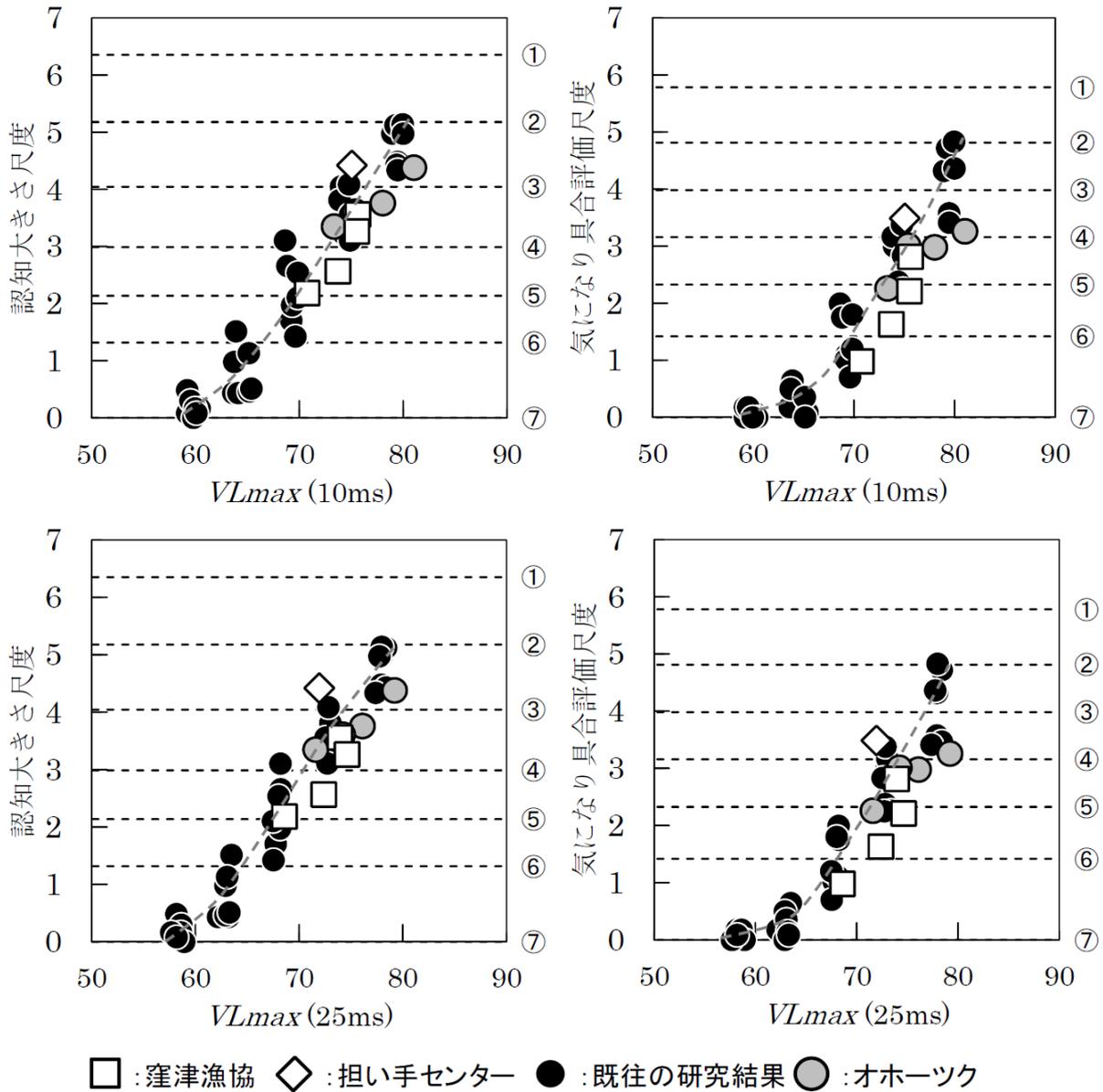
章末資料 図 3-3 窪津漁業(協)事務所における加振点 (DE67) からの固有振動モード



章末資料 図 3-4 窪津漁業(協)事務所における減衰時間算出結果 (加振点: DE67)



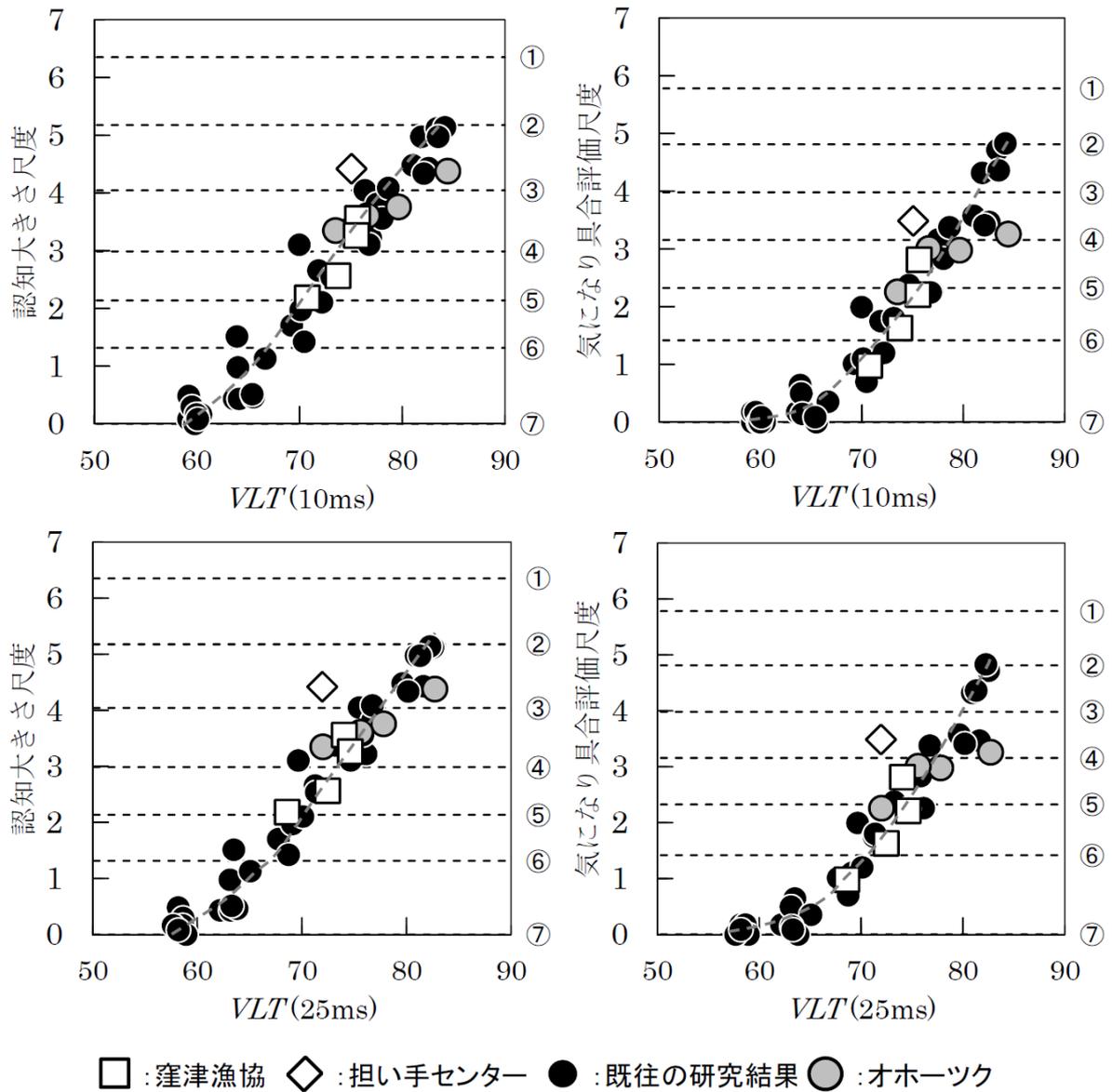
章末資料 図 3-5 窪津漁業(協)事務所における減衰定数算出結果  
(加振点: DE67、対象振動数: 17.00Hz)



□ : 窪津漁協    ◇ : 担い手センター    ● : 既往の研究結果    ○ : オホーツク

	認知大きさ尺度	気になり具合評価尺度
判断範ちゅう	①非常に大きく感じる	①非常に気になる
	②やや大きく感じる	②・・・・・・・・
	③はっきり気付く	③かなり気になる
	④かすかに気付く	④・・・・・・・・
	⑤気付くか気付かないかの境界	⑤やや気になる
	⑥ほとんど気付かない	⑥・・・・・・・・
	⑦全く気付かない	⑦全く気にならない

章末資料 図 3-6 住居を想定した場合の心理的尺度と性能値 VLmax の対応  
(窪津漁業(協)事務所および農業担い手センター宿泊施設他)



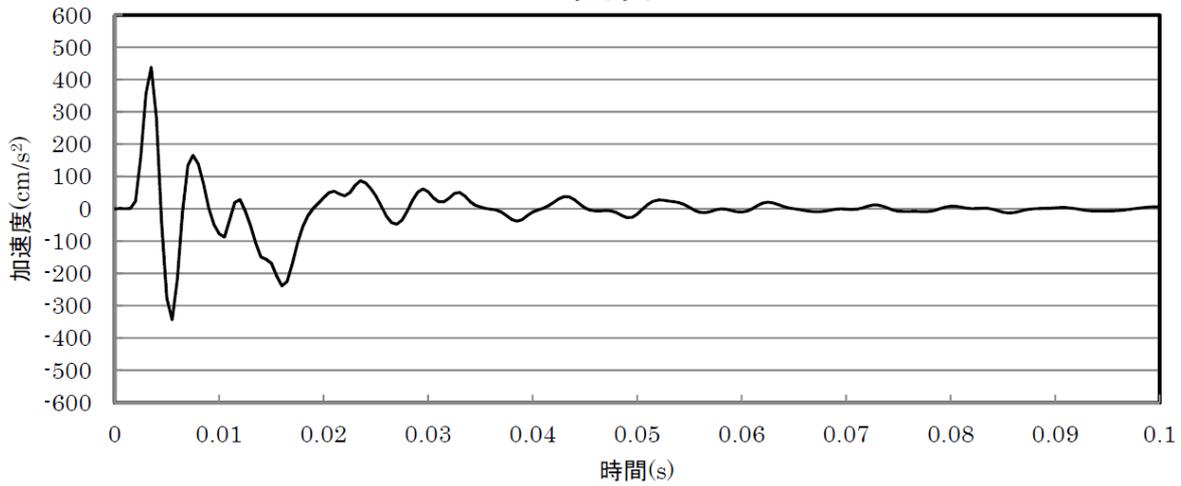
□ : 窪津漁協    ◇ : 担い手センター    ● : 既往の研究結果    ○ : オホーツク

	認知大きさ尺度	気になり具合評価尺度
判断範ちゅう	①非常に大きく感じる	①非常に気になる
	②やや大きく感じる	②・・・・・・・・
	③はっきり気付く	③かなり気になる
	④かすかに気付く	④・・・・・・・・
	⑤気付くか気付かないかの境界	⑤やや気になる
	⑥ほとんど気付かない	⑥・・・・・・・・
	⑦全く気付かない	⑦全く気にならない

章末資料 図 3-7 住居を想定した場合の心理的尺度と性能値 VLT の対応  
(窪津漁業(協)事務所および農業担い手センター宿泊施設他)

回数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
ピーク(gal)	508.25	393.69	582.48	449.93	418.68	470.61
1/2減衰時間(s)	0.013	0.009	0.009	0.010	0.009	0.010
1/4減衰時間(s)	0.023	0.019	0.019	0.021	0.017	0.020
1/8減衰時間(s)	0.033	0.032	0.029	0.028	0.028	0.030

## 2回目

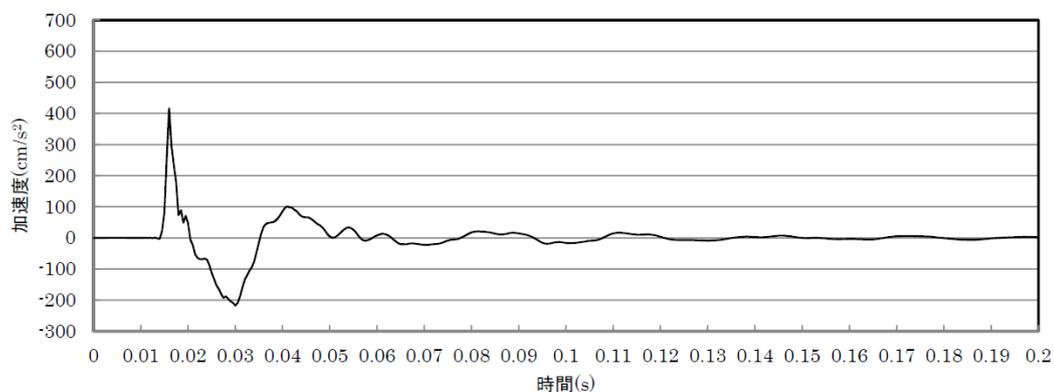


章末資料 図 3-8 高知県森林組合連合会事務所ビルにおける減衰時間算出結果

中央加振, 床上0人

回数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目	平均
ピーク(gal)	-	-	368.18	590.36	349.14	431.66	357.08	411.03	417.38	452.30	422.14
1/2減衰時間(s)	-	-	0.018	0.016	0.018	0.016	0.014	0.013	0.018	0.018	0.016
1/4減衰時間(s)	-	-	0.039	0.031	0.033	0.030	0.030	0.026	0.034	0.036	0.032
1/8減衰時間(s)	-	-	0.059	0.046	0.050	0.046	0.047	0.041	0.049	0.054	0.049

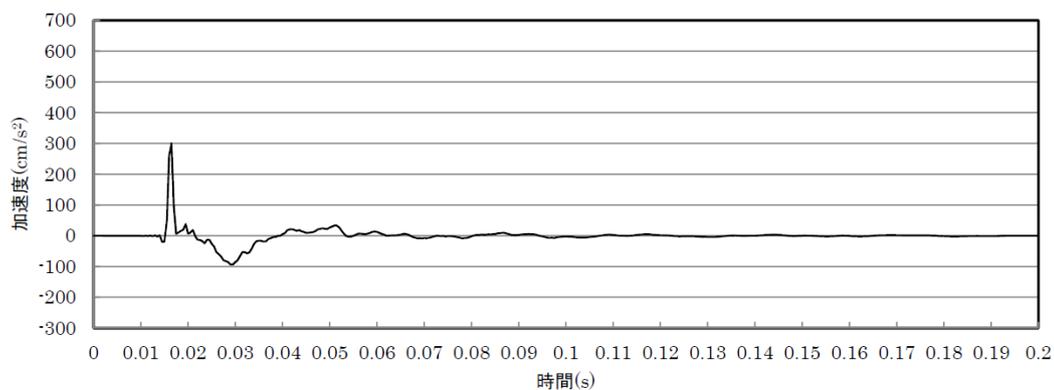
3回目



中央加振, 床上1人(90kgf)

回数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目	平均
ピーク(gal)	245.99	222.18	174.57	150.77	198.38	177.74	171.40	214.25	176.16	295.18	194.80
1/2減衰時間(s)	0.015	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.016	0.013	0.018	0.018	0.015
1/4減衰時間(s)	0.028	0.023	0.024	0.029	0.027	0.030	0.030	0.026	0.036	0.037	0.030
1/8減衰時間(s)	0.044	0.035	0.036	0.052	0.042	0.042	0.045	0.043	0.050	0.057	0.046

2回目



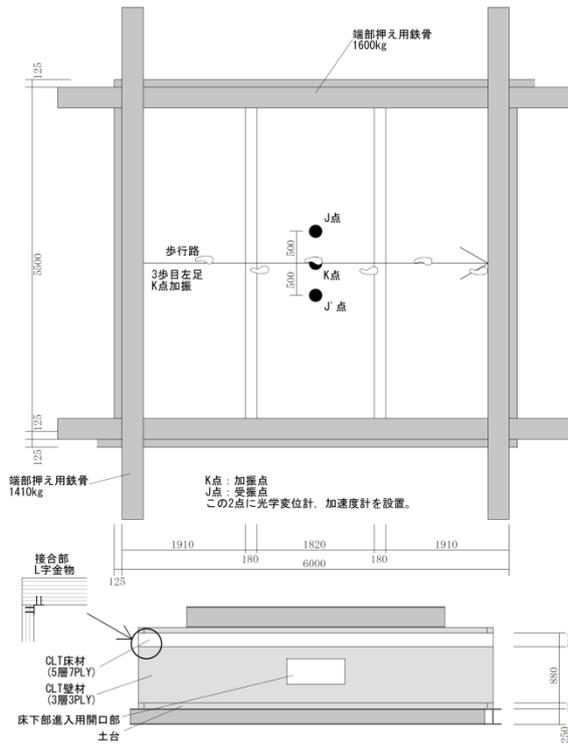
章末資料 図 3-9 農業担い手育成センター宿泊施設における減衰時間算出結果

## b. スパン表に用いた FEM 解析モデルの検討

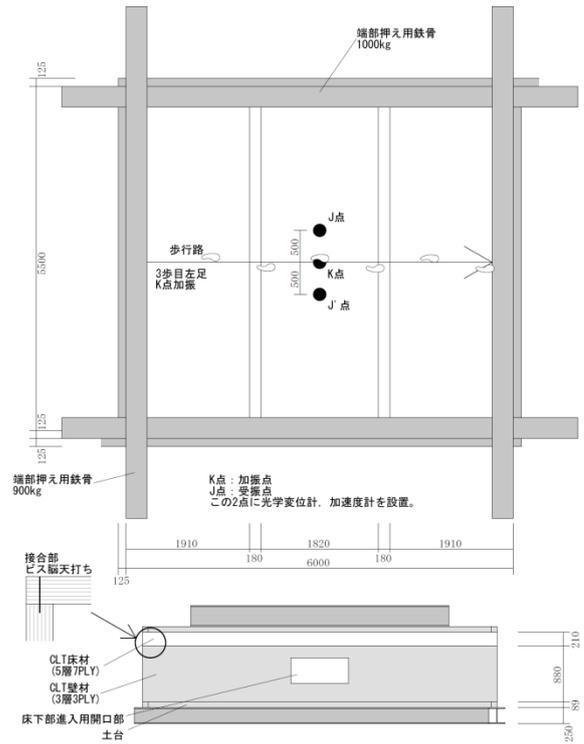
歩行振動の官能評価を基準としたスパン表の作成に当たり、諸条件下における歩行時の振動のモデル化を、昨年度に実施した(国研)森林総合試験所での試験結果を用いて実施した。本試験体は実大規模であり、床や天井の仕上げは行っておらず、CLT 床そのものの振動の把握・解析に適していた。昨年度実施した試験の内容は「平成 27 年度林野庁委託事業 CLT 等新たな製品・技術の開発・普及事業／CLT の住性能向上のための開発研究」((特非)建築技術支援協会)を参照されたい。

昨年度実施した試験結果を以下に記す。試験は、①北見モデル、②勝どきモデル、③勝どき+ $\alpha$ モデル、④森林総研+ $\alpha$ モデルの 4 仕様で実施し、壁と床の接合方法およびパネル端部を押える鉄骨の重量を変更している。4 仕様の概略図及び測定結果を以下に記す。

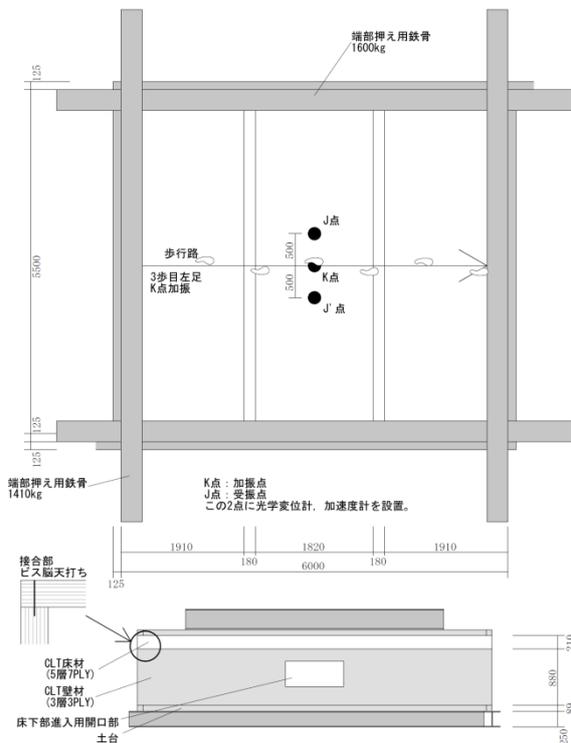
森林総研再現実験(北見モデル)



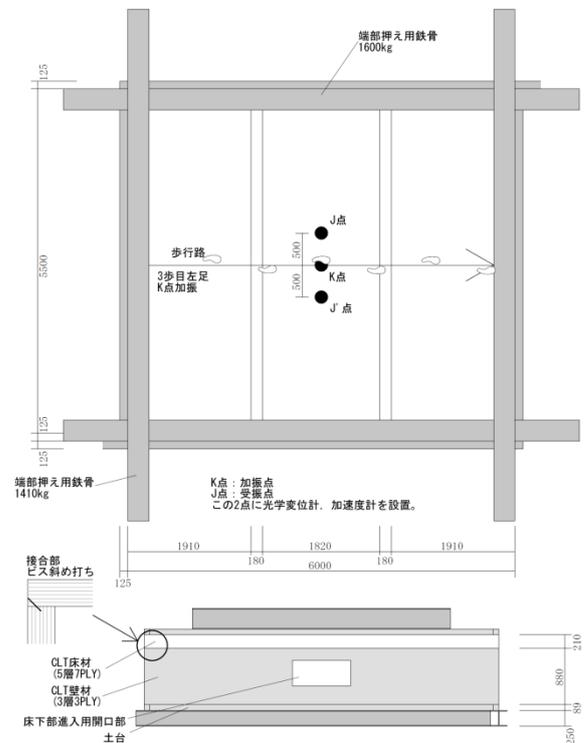
森林総研再現実験(勝どきモデル)



森林総研再現実験(勝どき+αモデル)



森林総研再現実験(森林総研+αモデル)

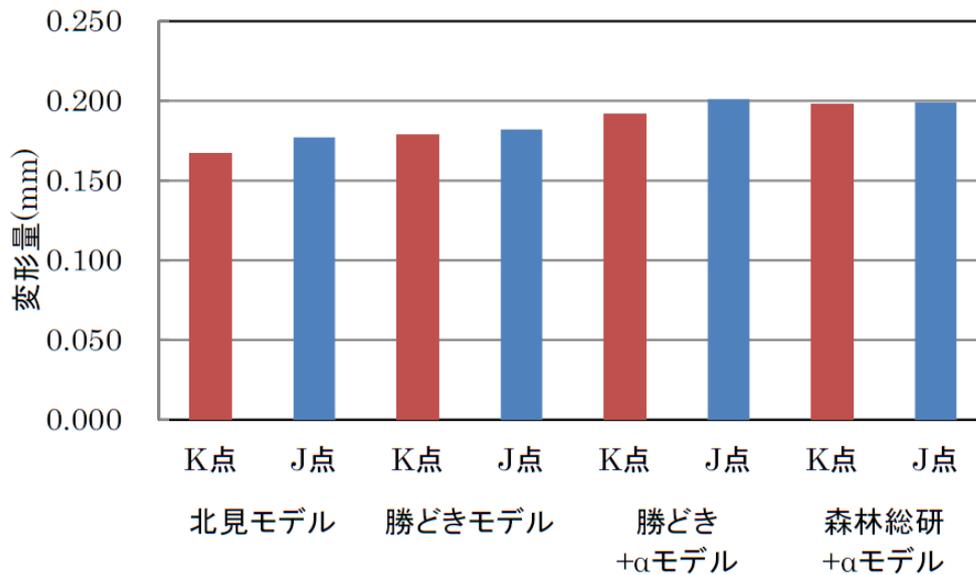


章末資料 図 3-10 森林総合研究所にて実施した歩行振動試験体概要図

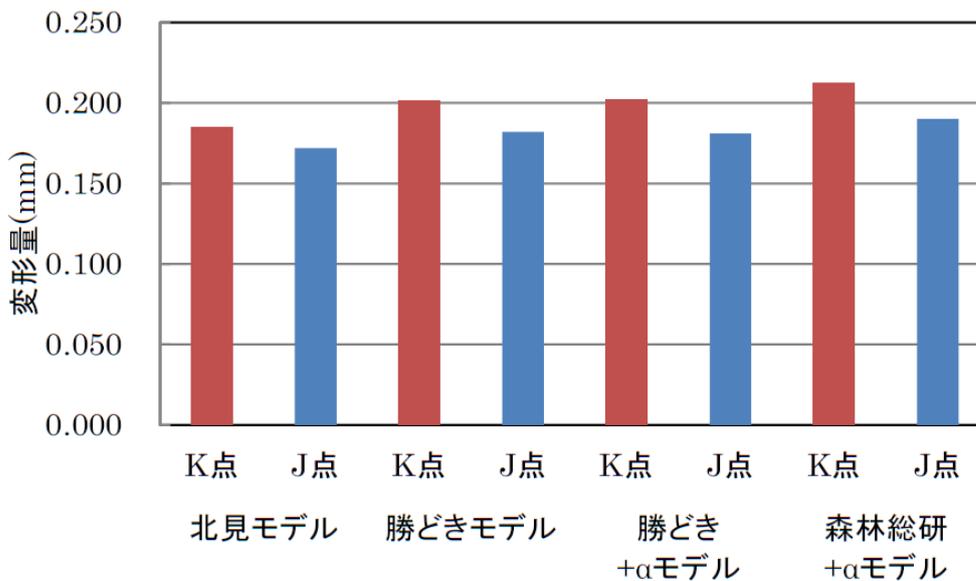
章末資料 表 3-2 K点・J点における 100kgf 静的載荷時の変形量

変位(mm)	北見モデル		勝どきモデル		勝どき + $\alpha$ モデル		森林総研 + $\alpha$ モデル	
	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
K点載荷	0.185	0.172	0.201	0.182	0.202	0.181	0.212	0.190
J点載荷	0.167	0.177	0.179	0.182	0.192	0.201	0.198	0.199

### J点載荷



### K点載荷



章末資料 図 3-11 K点・J点における 100kgf 静的載荷時の変形量

章末資料 表 3-3 ハンマー加振による固有振動数測定結果

北見モデル 勝どきモデル 勝どき+ $\alpha$ モデル 森林総研+ $\alpha$ モデル

北見モデル	勝どきモデル	勝どき+ $\alpha$ モデル	森林総研+ $\alpha$ モデル
K点	K点	K点	K点
J点	J点	J点	J点
K点加振	K点加振	K点加振	K点加振
1次固有振動数(Hz) 17.00	1次固有振動数(Hz) 16.00	1次固有振動数(Hz) 16.50	1次固有振動数(Hz) 16.00
3次固有振動数(Hz) 37.50	3次固有振動数(Hz) 38.00	3次固有振動数(Hz) 37.00	3次固有振動数(Hz) 38.50
K点加振 J点	K点加振 J点	K点加振 J点	K点加振 J点
K点	K点	K点	K点
1次固有振動数(Hz) 17.00	1次固有振動数(Hz) 16.00	1次固有振動数(Hz) 16.50	1次固有振動数(Hz) 16.00
3次固有振動数(Hz) 39.00	3次固有振動数(Hz) 38.00	3次固有振動数(Hz) 37.00	3次固有振動数(Hz) 38.00
K点加振 J点	K点加振 J点	K点加振 J点	K点加振 J点
K点	K点	K点	K点
1次固有振動数(Hz) 17.00	1次固有振動数(Hz) 16.50	1次固有振動数(Hz) 16.50	1次固有振動数(Hz) 16.00
3次固有振動数(Hz) 39.00	3次固有振動数(Hz) 38.00	3次固有振動数(Hz) 37.00	3次固有振動数(Hz) 38.50
J点加振	J点加振	J点加振	J点加振
K点	K点	K点	K点
1次固有振動数(Hz) 17.00	1次固有振動数(Hz) 16.00	1次固有振動数(Hz) 16.50	1次固有振動数(Hz) 16.00
3次固有振動数(Hz) 39.00	3次固有振動数(Hz) 38.00	3次固有振動数(Hz) 37.00	3次固有振動数(Hz) 38.50

章末資料 表 3-4 減衰定数算出結果

北見モデル					勝どきモデル						
減衰定数(%)		1回目	2回目	3回目	平均	減衰定数(%)		1回目	2回目	3回目	平均
K点加振	K点	2.79	3.47	3.35	3.20	K点加振	K点	3.30	4.02	4.23	3.85
	J点	3.10	3.37	3.68	3.38		J点	3.43	4.62	4.01	4.02
K点加振 J点を受振者1名	K点	4.59	3.89	3.86	4.11	K点加振 J点を受振者1名	K点	3.59	5.91	4.75	4.75
	J点	3.23	3.18	3.64	3.35		J点	3.99	5.49	4.57	4.68
K点加振 J点を受振者1名 J点を受振者1名	K点	4.75	5.43	6.13	5.44	K点加振 J点を受振者1名 J点を受振者1名	K点	4.93	4.74	4.72	4.80
	J点	4.15	5.38	5.46	5.00		J点	4.66	4.68	4.82	4.72
J点加振	K点	3.67	3.44	3.44	3.52	J点加振	K点	4.24	4.43	3.62	4.10
	J点	3.17	3.31	3.11	3.20		J点	4.50	3.28	4.31	4.03

勝どき+ $\alpha$ モデル					森林総研+ $\alpha$ モデル						
減衰定数(%)		1回目	2回目	3回目	平均	減衰定数(%)		1回目	2回目	3回目	平均
K点加振	K点	2.90	3.07	3.00	2.99	K点加振	K点	2.27	3.00	2.63	2.63
	J点	2.95	3.21	3.17	3.11		J点	2.59	3.47	2.99	3.02
K点加振 J点を受振者1名	K点	4.83	5.41	5.39	5.21	K点加振 J点を受振者1名	K点	5.55	5.25	5.46	5.42
	J点	4.85	5.06	5.48	5.13		J点	5.67	5.28	5.61	5.52
K点加振 J点を受振者1名 J点を受振者1名	K点	4.66	4.68	4.96	4.77	K点加振 J点を受振者1名 J点を受振者1名	K点	5.83	5.41	5.04	5.43
	J点	4.97	4.82	5.59	5.13		J点	5.66	5.61	5.02	5.43
J点加振	K点	3.67	2.34	2.95	2.98	J点加振	K点	5.91	5.66	5.60	5.72
	J点	3.78	3.47	2.95	3.40		J点	5.97	5.68	5.34	5.66

章末資料 表 3-5 減衰時間算出結果

北見モデル

K点加振	1回目		2回目		3回目		平均	
	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	68.80	61.20	63.60	48.40	69.60	52.00	67.33	53.87
1/2減衰時間(s)	0.318	0.250	0.323	0.285	0.292	0.331	0.311	0.289
1/4減衰時間(s)	0.587	0.551	0.678	0.668	0.653	0.553	0.639	0.591
1/8減衰時間(s)	0.849	0.900	0.978	1.036	0.962	0.715	0.930	0.884
K点加振 J点1名に受振者1名	1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	54.00	40.80	60.00	52.40	64.80	49.60	59.60	47.60
1/2減衰時間(s)	0.208	0.216	0.212	0.182	0.233	0.229	0.218	0.209
1/4減衰時間(s)	0.354	0.378	0.402	0.364	0.438	0.436	0.398	0.393
1/8減衰時間(s)	0.538	0.528	0.677	0.576	0.618	0.650	0.611	0.585
K点加振 J点1名に受振者1名 J点1名に受振者1名	1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	52.00	42.40	47.60	34.80	50.40	39.60	50.00	38.93
1/2減衰時間(s)	0.191	0.169	0.173	0.181	0.216	0.182	0.193	0.177
1/4減衰時間(s)	0.338	0.341	0.301	0.300	0.372	0.326	0.337	0.322
1/8減衰時間(s)	0.511	0.470	0.403	0.403	0.483	0.414	0.466	0.429
J点加振	1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	77.60	55.60	71.60	54.00	67.20	52.80	72.13	54.13
1/2減衰時間(s)	0.286	0.299	0.319	0.326	0.306	0.313	0.304	0.313
1/4減衰時間(s)	0.568	0.598	0.579	0.618	0.588	0.583	0.578	0.600
1/8減衰時間(s)	0.792	0.828	0.977	1.006	0.916	0.924	0.895	0.919

勝どきモデル

K点加振	1回目		2回目		3回目		平均	
	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	72.00	53.20	88.80	62.40	80.00	61.20	80.27	58.93
1/2減衰時間(s)	0.232	0.287	0.218	0.224	0.240	0.206	0.230	0.239
1/4減衰時間(s)	0.462	0.498	0.428	0.402	0.490	0.391	0.460	0.430
1/8減衰時間(s)	0.707	0.672	0.805	0.586	0.700	0.602	0.737	0.620
K点加振 J点1名に受振者1名	1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	80.00	59.20	75.60	62.40	67.20	68.40	74.27	63.33
1/2減衰時間(s)	0.168	0.150	0.162	0.172	0.175	0.151	0.168	0.158
1/4減衰時間(s)	0.292	0.311	0.306	0.301	0.343	0.267	0.314	0.293
1/8減衰時間(s)	0.429	0.413	0.447	0.447	0.519	0.368	0.465	0.409
K点加振 J点1名に受振者1名 J点1名に受振者1名	1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	48.00	42.00	58.40	45.60	48.00	46.00	51.47	44.53
1/2減衰時間(s)	0.182	0.160	0.181	0.163	0.195	0.120	0.186	0.148
1/4減衰時間(s)	0.332	0.273	0.365	0.323	0.329	0.256	0.342	0.284
1/8減衰時間(s)	0.436	0.395	0.522	0.490	0.442	0.333	0.467	0.406
J点加振	1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	96.00	66.00	98.00	69.60	92.00	68.00	95.33	67.87
1/2減衰時間(s)	0.178	0.225	0.184	0.176	0.187	0.200	0.183	0.200
1/4減衰時間(s)	0.404	0.460	0.344	0.431	0.376	0.401	0.375	0.431
1/8減衰時間(s)	0.635	0.618	0.560	0.602	0.639	0.640	0.611	0.620

章末資料 表 3-5 減衰時間算出結果 (つづき)

勝どき+ $\alpha$ モデル

K点加振	1回目		2回目		3回目		平均		
	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	66.00	64.00	77.60	56.00	77.20	61.60	73.60	60.53	
1/2減衰時間(s)	0.292	0.242	0.208	0.231	0.250	0.228	0.250	0.234	
1/4減衰時間(s)	0.552	0.497	0.536	0.476	0.502	0.550	0.530	0.508	
1/8減衰時間(s)	0.753	0.790	0.751	0.794	0.779	0.796	0.761	0.816	
K点加振 J点を受振者1名		1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	48.80	42.40	54.40	47.20	58.40	49.60	53.87	46.40	
1/2減衰時間(s)	0.210	0.185	0.209	0.196	0.212	0.200	0.210	0.194	
1/4減衰時間(s)	0.416	0.361	0.378	0.379	0.381	0.382	0.392	0.374	
1/8減衰時間(s)	0.602	0.579	0.481	0.606	0.552	0.533	0.545	0.573	
K点加振 J点を受振者1名 J点を受振者1名		1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	46.00	34.00	50.80	36.80	51.20	40.80	49.33	37.20	
1/2減衰時間(s)	0.182	0.200	0.182	0.201	0.192	0.200	0.185	0.200	
1/4減衰時間(s)	0.336	0.360	0.341	0.346	0.358	0.360	0.345	0.355	
1/8減衰時間(s)	0.511	0.489	0.466	0.465	0.514	0.492	0.497	0.482	
J点加振		1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	70.00	59.20	66.40	53.20	72.00	57.20	69.47	56.53	
1/2減衰時間(s)	0.288	0.253	0.320	0.288	0.348	0.309	0.319	0.283	
1/4減衰時間(s)	0.520	0.467	0.605	0.559	0.607	0.551	0.577	0.526	
1/8減衰時間(s)	0.766	0.732	0.807	0.791	0.827	0.782	0.800	0.768	

森林総研+ $\alpha$ モデル

K点加振	1回目		2回目		3回目		平均		
	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	72.40	60.80	82.40	67.20	77.20	57.60	77.33	61.87	
1/2減衰時間(s)	0.227	0.202	0.200	0.223	0.229	0.233	0.219	0.219	
1/4減衰時間(s)	0.445	0.425	0.395	0.428	0.450	0.491	0.430	0.448	
1/8減衰時間(s)	0.583	0.614	0.588	0.615	0.662	0.677	0.611	0.635	
K点加振 J点を受振者1名		1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	71.60	48.40	82.40	53.20	75.20	59.20	76.40	53.60	
1/2減衰時間(s)	0.137	0.190	0.158	0.212	0.177	0.166	0.157	0.189	
1/4減衰時間(s)	0.284	0.332	0.331	0.357	0.336	0.317	0.317	0.335	
1/8減衰時間(s)	0.403	0.449	0.460	0.466	0.506	0.507	0.456	0.474	
K点加振 J点を受振者1名 J点を受振者1名		1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	55.60	43.60	60.80	45.20	57.60	44.80	58.00	44.53	
1/2減衰時間(s)	0.182	0.161	0.166	0.165	0.179	0.187	0.176	0.171	
1/4減衰時間(s)	0.318	0.316	0.297	0.287	0.300	0.331	0.305	0.311	
1/8減衰時間(s)	0.432	0.405	0.389	0.395	0.390	0.502	0.404	0.434	
J点加振		1回目		2回目		3回目		平均	
K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点	K点	J点
ピーク値(cm/s <sup>2</sup> )	92.80	63.60	96.80	70.00	62.40	49.20	84.00	60.93	
1/2減衰時間(s)	0.194	0.254	0.220	0.222	0.258	0.244	0.224	0.240	
1/4減衰時間(s)	0.395	0.448	0.429	0.441	0.458	0.443	0.427	0.444	
1/8減衰時間(s)	0.668	0.684	0.672	0.733	0.797	0.853	0.712	0.757	

章末資料 表 3-6 VLmax、VLT 解析結果

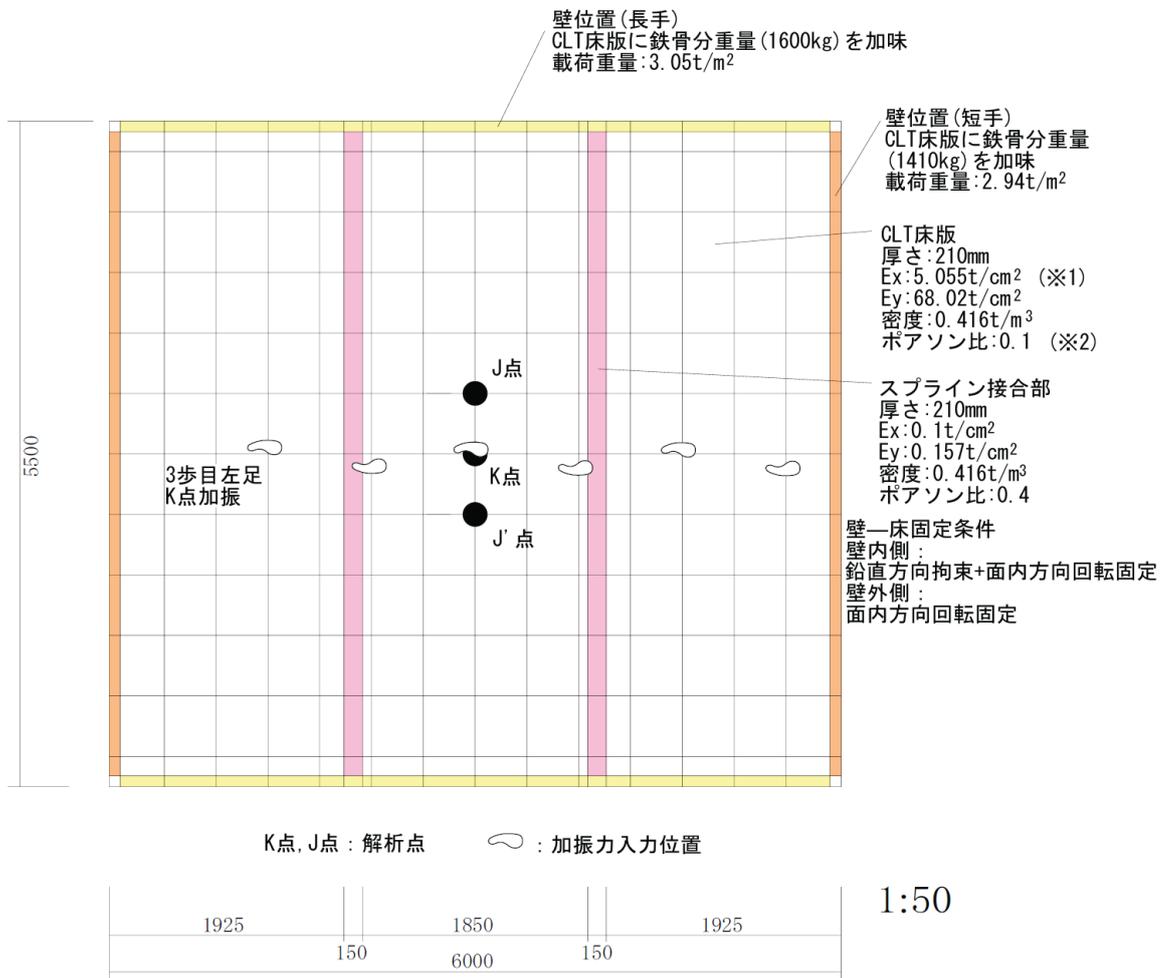
単位:(dB)

試験体	性能値	時定数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
北見モデル	VLmax	10ms	84.24	82.38	85.41	81.01	83.44	83.30
		25ms	83.21	80.86	84.72	79.85	82.36	82.20
	VLT (ref60)	10ms	86.51	84.58	87.49	83.25	85.69	85.51
		25ms	85.51	83.14	87.01	82.17	84.67	84.50
勝どきモデル	VLmax	10ms	83.31	82.27	81.78	82.56	82.64	82.51
		25ms	81.42	80.72	80.12	79.55	80.20	80.40
	VLT (ref60)	10ms	85.35	84.74	84.05	84.74	84.75	84.73
		25ms	83.52	83.35	82.49	81.87	82.35	82.72
勝どき + $\alpha$ モデル	VLmax	10ms	81.07	81.94	81.47	82.34	81.20	81.60
		25ms	79.50	80.52	80.40	80.88	79.93	80.25
	VLT (ref60)	10ms	83.28	84.19	83.58	84.60	83.38	83.81
		25ms	81.77	82.96	82.69	83.16	82.21	82.56
森林総研 + $\alpha$ モデル	VLmax	10ms	81.38	82.50	82.85	82.01	81.62	82.07
		25ms	79.08	81.41	81.31	79.88	79.87	80.31
	VLT (ref60)	10ms	83.28	84.63	84.90	84.11	83.68	84.12
		25ms	81.15	83.69	83.43	82.09	82.07	82.49

次に、試験を実施した4仕様について、歩行振動性能に影響すると思われる要素を、床-床を接合しているスプライン接合部、CLT 床、壁-床間固定度の3つに絞り込み、さらに各要素の値を入力し、FEM 解析モデルの試行を行った。要素の絞り込みは、これまでに測定した実物件や本事業で測定した実物件のデータから経験的に導いたものである。要素に用いた CLT 床板の剛性や密度などは、規格値ではなく、過去に強度試験によって得られた実測値（「平成 24 年度林野庁補助事業 木材利用技術整備等支援事業／CLT (Cross Laminated Timber) の木材利用技術整理」(一社)日本 CLT 協会)および「平成 25 年度林野庁補助事業 木材利用技術整備等支援事業／CLT の普及のための総合的データの収集・蓄積及び検討」(同左)参照)を用いることで、より実際に近い解析モデルの構築を目指した。また CLT のポアソン比は、製材のポアソン比を基に類推した。

測定結果及び FEM 解析モデルの検討を以下に記す。FEM 解析で構築したモデルを用いた解析結果では、森林総合研究所にて実施した測定値と類似する解析結果が得られたため、本モデルを用いて歩行振動を CLT のスパン毎に解析モデルを作成し、スパン表へまとめるに至った。スパン表の詳細は第 3 章 3.2 「歩行振動マニュアル(案)」に記載する。





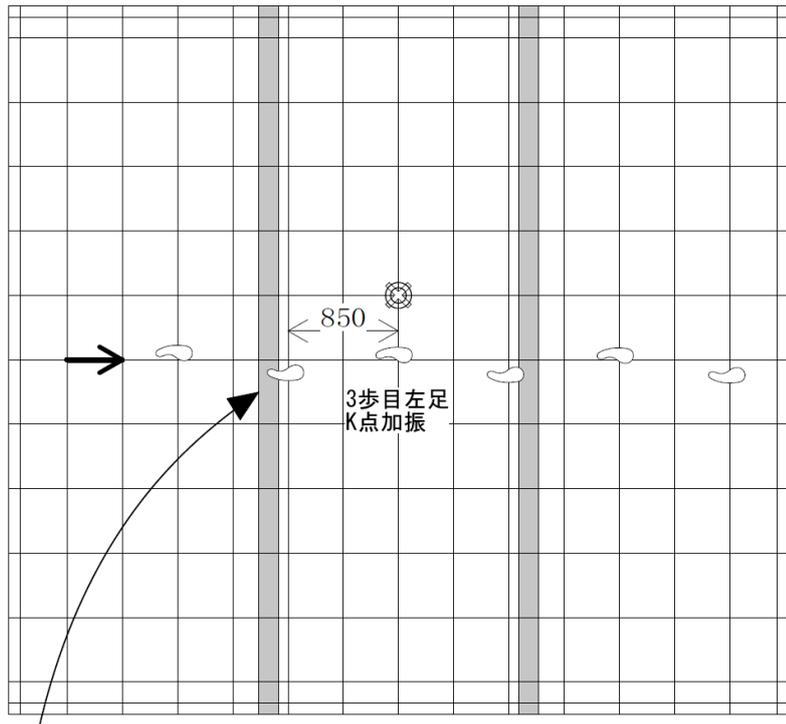
(※1)

5層7プライ(スギ)の強軸の曲げ剛性(頂いた実験値:68.02[t/cm<sup>2</sup>])に、5層7プライ曲げ剛性の規格値の比(4.201[t/cm<sup>2</sup>]/56.53[t/cm<sup>2</sup>])を掛けて算出した値。

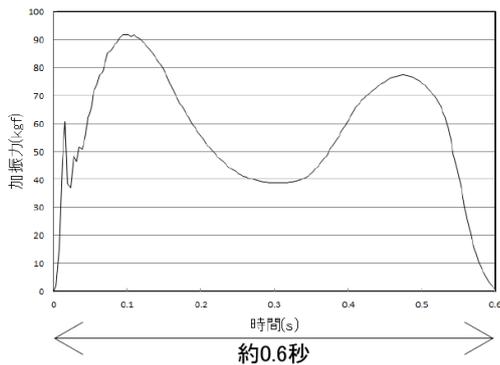
(※2)

ポアソン比はパラメータスタディによって同定した値。

章末資料 図 3-12 森林総研での試験を模した FEM 解析モデル概要図



1歩分の歩行波(例)



#### 現場測定時の条件

- ・歩行者の体重約70kgf
- ・歩調2Hz
- ・履物くつ下
- ・歩行路を右方向へ6歩で歩行
- ・3歩目(左足)で中央加振
- ・受振者位置に受振者(約80kgf)
- ・北見、勝どき、勝どき+ $\alpha$ 、森林総研+ $\alpha$ の各モデルで測定

#### 加振力の設定

- ・歩行者の一步分の加振力を50歩分(左右25歩ずつ)測定
- ・1歩目に、左足25歩の中からランダムに選択した1歩分の歩行波の加振力を入力
- ・0.5秒後に2歩目に、右足25歩の中からランダムに選択した1歩分の歩行波の加振力を入力
- ・同様に0.5秒間隔(2Hz)で6歩目まで入力
- ・床の減衰定数は、4つのモデルの減衰定数測定結果を基に、5%とした
- ・受振者位置の応答加速度を解析、性能値を算出した

章末資料 図 3-13 FEM 解析モデルへの歩行振動の入力

章末資料 表 3-8 歩行振動試験の測定値と FEM 解析モデルの  
固有振動数および静的荷変形量の比較

	固有振動数(Hz)		100kgf静的荷(mm)			
			K点荷		J点荷	
	1次	3次	K点変位	J点変位	K点変位	J点変位
北見モデル	17.00	37.50	0.185	0.172	0.167	0.177
勝どきモデル	16.00	38.00	0.201	0.182	0.179	0.182
勝どき+ $\alpha$ モデル	16.50	37.00	0.202	0.181	0.192	0.201
森林総研+ $\alpha$ モデル	16.00	38.50	0.212	0.190	0.198	0.199
FEMモデル	14.75	40.44	0.183	0.171	0.171	0.172

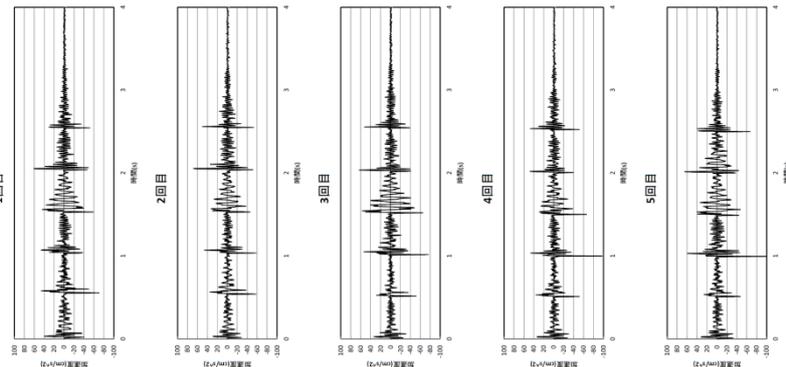
章末資料 表 3-9 歩行振動試験の測定値と FEM 解析モデルの  
 $VL_{max}$ 、 $VLT$  解析結果の比較

単位:(dB)

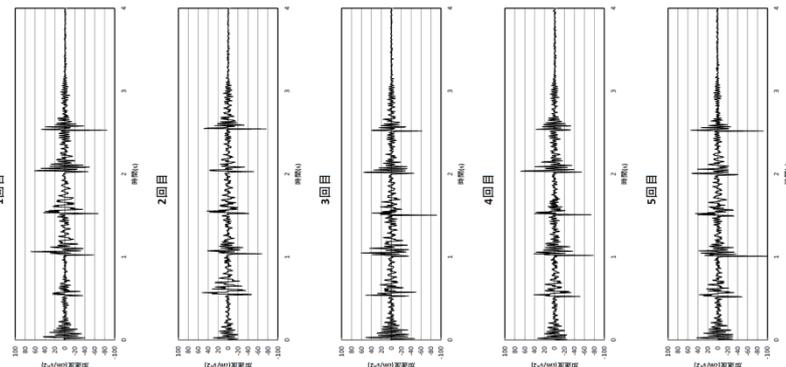
試験体	性能値	時定数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	平均
北見モデル	$VL_{max}$	10ms	84.24	82.38	85.41	81.01	83.44	83.30
		25ms	83.21	80.86	84.72	79.85	82.36	82.20
	$VLT$ (ref60)	10ms	86.51	84.58	87.49	83.25	85.69	85.51
		25ms	85.51	83.14	87.01	82.17	84.67	84.50
勝どきモデル	$VL_{max}$	10ms	83.31	82.27	81.78	82.56	82.64	82.51
		25ms	81.42	80.72	80.12	79.55	80.20	80.40
	$VLT$ (ref60)	10ms	85.35	84.74	84.05	84.74	84.75	84.73
		25ms	83.52	83.35	82.49	81.87	82.35	82.72
勝どき+ $\alpha$ モデル	$VL_{max}$	10ms	81.07	81.94	81.47	82.34	81.20	81.60
		25ms	79.50	80.52	80.40	80.88	79.93	80.25
	$VLT$ (ref60)	10ms	83.28	84.19	83.58	84.60	83.38	83.81
		25ms	81.77	82.96	82.69	83.16	82.21	82.56
森林総研+ $\alpha$ モデル	$VL_{max}$	10ms	81.38	82.50	82.85	82.01	81.62	82.07
		25ms	79.08	81.41	81.31	79.88	79.87	80.31
	$VLT$ (ref60)	10ms	83.28	84.63	84.90	84.11	83.68	84.12
		25ms	81.15	83.69	83.43	82.09	82.07	82.49
FEMモデル	$VL_{max}$	10ms	85.31	83.66	84.73	83.44	84.68	84.36
		25ms	84.24	82.53	83.50	81.35	84.11	83.15
	$VLT$ (ref60)	10ms	87.25	85.98	87.01	85.55	86.60	86.48
		25ms	86.23	84.89	85.81	83.55	86.08	85.31

# 実測値

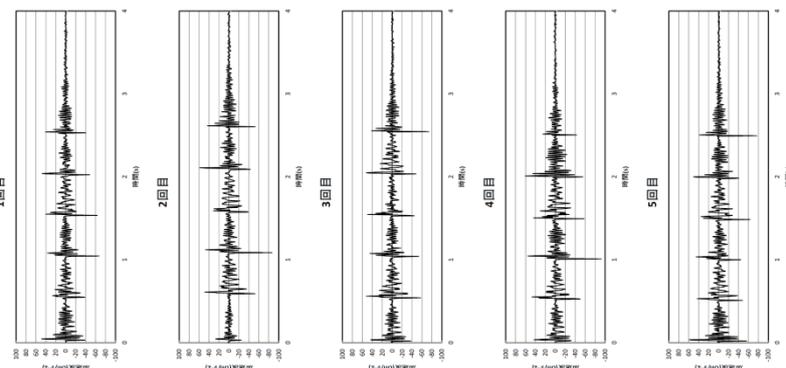
北見モデル



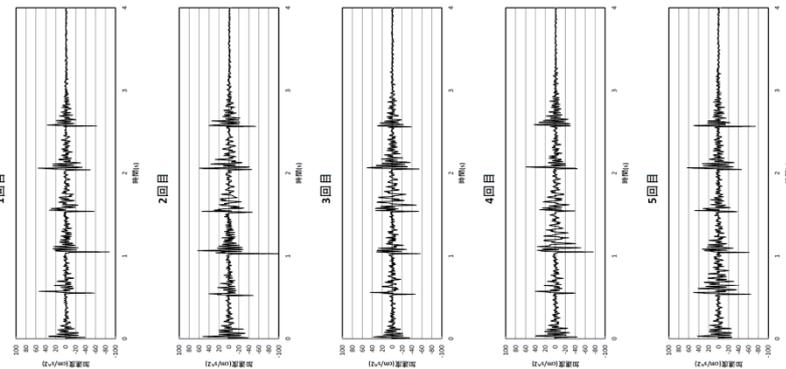
勝どきモデル



勝どき+ $\alpha$ モデル

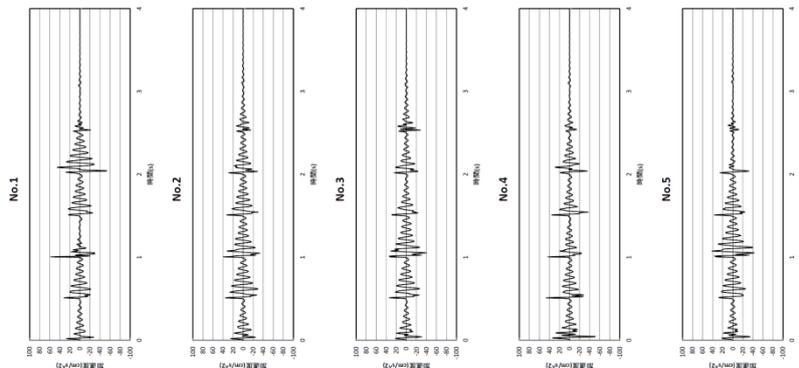


森林総研+ $\alpha$ モデル



# 解析値

歩行振動 FEM 解析結果



章末資料 表 3-14 歩行振動試験の歩行振動測定結果と FEM 解析モデルの解析結果の比較