

| | |
|-----------|--|
| 氏名 | すぎもと けんいち 杉本 健一 |
| 授与学位 | 博士（生物資源科学） |
| 学位授与年月日 | 平成29年 3月22日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第1項 |
| 研究科専攻 | 秋田県立大学大学院生物資源科学研究科 博士後期課程 生物資源科学専攻 |
| 学位論文題目 | 歩行振動の感覚評価を基にした木造大スパン床に関する構造設計の可能性 |
| 指導教員 | 教授 中村 昇 |
| 論文審査委員 | 主査 教授 中村 昇 副査 准教授 岡崎泰男 教授 佐々木貴信 特別 |

論文内容要旨

我が国の木材需要の約4割は建築用材である。建築物の木造率は住宅分野で高く、新設住宅着工戸数の約半分が木造である。しかしながら、非住宅分野での木造率は低く、住宅以外の中・大規模建築物を木造化することにより木材の需要を増やすことが求められている。まずは公共建築の木造化を推進するために「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」（平成22年法律第36号）が制定され、国土交通省大臣官房官庁営繕部から『木造計画・設計規準』が刊行されたが、まだ設計に十分なデータが蓄積されているとは言い難い。

中・大規模木造は一般の住宅と比べて、構造安全性や火災安全性に対してより厳しい性能が求められるのはもちろんのこと、建物内部で発生する振動や周辺の車・鉄道走行などにより生じる交通振動、風振動など、環境振動と呼ばれる振動に対しても建物使用者に不快を生じさせないよう配慮する必要がある。中・大規模木造の学校や事務所などの場合、大空間の部屋を設ける場合があるが、大スパン床では住宅規模の床とは振動性状が異なるものと予想され、住宅規模では問題にならなかった振動が大スパン床では問題になる可能性もある。現状では、大スパン床の振動障害を抑えるために具体的にどのように設計したらよいか参考となる資料が少なく、日本建築学会が編集している『建築物の振動に関する居住性能評価指針』が唯一の拠り所であるが、設計に関する資料はまだ不足している。構造設計者にとっては、振動の設計目標を達成するために、床のたわみ制限や固有振動数など構造の設計目標をどう設定したらよいかが示されると設計が容易になる。

本論文では、日常の動作として欠かせない歩行振動を取り上げた。まず、歩行振動で生じた床の応答加速度と知覚確率およびアンケート調査との関係、鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルとアンケート調査との関係を調べ、次に、床の応答加速度を介して、知覚確率、アンケート結果、人間の感覚補正を行った重み付き加速度レベル（JIS C 1510 に示される鉛直特性で重みづけした加速度レベル）と床のたわみ、固有振動数とを結びつけた。さらに、歩行振動の感覚評価に基づく設計目標を、構造設計の設計目標に落とし込むことを試みた。このことにより、歩行振動に対する大スパン床の設計目標を提案できる可能性を示すことを目的とした。

【実験方法】

表1に掲げる、木造校舎の教室床梁および木造事務室の床梁の梁上に人が載ったときの階下の天井のたわみを測定し、建物に組み込まれた状態における梁の曲げ剛性を

算出した。これらの床にインパクトボールを落下させたときの振動の実測を行い、固有振動数、減衰比を算定した。

人の歩行によって建築物の床に生ずる鉛直振動を評価するために、次のような解析を行った。1) 加速度計ごとに測定した片道の歩行に対する応答加速度について、時定数 10ms で 1/3 オクターブバンド分析を行い、各バンドの最大値を求め、2) 3 往復の場合は往復あわせて計 6 回の最大値の平均値を求め、3) 最大値の平均値を 1/3 オクターブバンド中心周波数に対してプロットした。図 1～図 3 に測定した 2 階床の伏図と歩行位置、アンケート回答者の位置の例を示した。建物 A～F の床の所定の位置で歩行したときの応答加速度の 1/3 オクターブバンド分析を行い、1/3 オクターブバンド中心周波数と、片道の歩行ごとの加速度の最大値を平均した値との関係の例を図 4 に示した。図 4 に示される V-10～V-90 は知覚確率を表している。例えば V-90 とは、評価する点にいる人の 90% が知覚することを表している。

次に、図 4 に示された各プロットに対して知覚確率を求め、さらに、いわゆる接線法によって、それらのうちの最大値を算出した。これらの知覚確率が人の歩行によって建築物の床に生ずる鉛直振動の評価値になる。

アンケート結果を集計した例を図 5 に示す。アンケート調査は、7～10 名の男性 (22～57 歳) が、歩行者の歩行による振動をどう受け止めたかを、2 種類の尺度で評価した。一つは、1) 感じない、2) 全く気にならない、3) それほど気にならない、4) 多少気になる、5) だいぶ気になる、6) 非常に気になる、の 6 段階であり、本報では「気になり尺度」と呼ぶ。もう一つは、1) 感じない、2) 我慢できる、3) どちらかといえば我慢できる、4) どちらともいえない、5) どちらかといえば我慢できない、6) 我慢できない、の 6 段階であり、「我慢尺度」と呼ぶ。アンケートの分析では、知覚確率との対応をみるため「気になり尺度」および「我慢尺度」における 1) 感じない、以外の割合を、また歩行による振動を許容できる割合として「気になり尺度」における 1) 感じない+2) 全く気にならない+3) それほど気にならない、の割合および「我慢尺度」における 1) 感じない+2) 我慢できる+3) どちらかといえば我慢できる、の割合を求めて、これらを考察の対象とした。

【結果および考察】

表 2 に示すように、設計図書から拾った梁のヤング係数 E および断面寸法から求めた I より EI を求めて計算した床の初期たわみはスパンの 1/465～1/1102、クリープを考慮した床のたわみは基準法でスパンの 1/376～1/798、木質構造設計規準でスパンの 1/311～1/660 で、いずれもたわみ制限値を下回っていた。表 3 に示すように、床の 1 次固有振動数の実測値は 9.5～12.5Hz であった。荷重を固定荷重とし、単純支持を境界条件として計算した梁の固有振動数は床の実測値よりも 10～30% 小さかったが、比較的精度よく推定できることがわかった。減衰比は 3.1～6.5% で、既往の研究と同じような値となっていた。

解析対象とした加速度計ごとに、上述した解析手順にしたがい知覚確率の最大値 Pp_{maxi} を求め、 Pp_{maxi} に対応する応答加速度 Ar_i を求めた。さらに加速度計ごとの Pp_{maxi} の平均値 Pp_{av} 、および加速度計ごとの Ar_i の平均値 Ar_{av} を算出した。図 6 に Ar_{av} と Pp_{av} との関係について▲で示し、 Ar_{av} と「1) 感じない」と答えた人以外の割合、換言すれば「感じる」と考えられる人の割合との関係について●で示した。これより、同じ加速度に対し、知覚確率よりもアンケート調査による「感じる」と応えた人の割合の方が多ことが分かった。また、図 7 より応答加速度が 3～4cm/s² を境として「感じない」と答えた人以外の割合は 100% に達していることがわかる。これより、今回のアンケート調査の結果からは、歩行振動に対する床の設計目標 (仮) として、応答加速度の値 3～4cm/s² を目安とした。ただし、床の 1 次固有振動数の範囲を 9.5～12.5Hz とする。人間の感覚には周波数依存性が存在するので、以降は、JIS C 1510 に示される鉛直特性で重みづけした加速度レベル (鉛直方向の周波数重み付け加速度レベル、と称す) を

用いて考察を行う。本報では片道の歩行について、加速度計ごとに時定数 10ms で 1/3 オクターブバンド分析を行い、1/3 オクターブバンド中心周波数ごとの補正值を加味し、その最大値を VL_{max} とした。 VL_{max} は 1/3 オクターブバンド中心周波数が 10Hz もしくは 12.5Hz で生じていた。すべての片道歩行の VL_{max} の平均値を VL_{av} とする。まず、 VL_{av} と「気になり尺度」および「我慢尺度」の 1)+2)+3)の割合との関係について、図 7 に示した。

応答加速度が同じ場合、「我慢尺度」の 1)+2)+3)の割合は、「気になり尺度」の 1)+2)+3)の割合よりも大きく、「我慢尺度」の方が振動を許容する人の割合が多いことがわかる。また、 VL_{av} が 65dB を下回ると、「気になり尺度」および「我慢尺度」の 1)+2)+3)の割合が、65%以上となることがわかる。

これまでアンケート調査の集計結果と床の応答加速度の関係を見るために、解析する加速度としては、歩行時の動線から少し離れた加速度の値を取り上げてきた。しかし、床の応答加速度としては、歩行時の動線上に近い加速度の方が大きく、その値から算出した VL_{ind} を床の居住性能の評価の指標とした。先述した木造大スパン床の設計目標（仮）である VL_{av} が 65dB の場合、床の指標 VL_{ind} は約 70dB となり、図 7 より「気になり尺度」の 1)+2)+3)の割合は 40%を下回ることになる。これより、本論文での木造大スパン床の設計目標（仮）を、床の 1 次固有振動数 9.5~12.5Hz の範囲で床の VL_{ind} の最大値として 65dB とする。

建物の梁または平行弦トラスの剛性の実測値から、変形増大係数あるいはクリープ変形係数を考慮してたわみを算出し、そのたわみに対するスパンの比と VL_{ind} の関係を図 8 に示した。ただし、同図には E および F 事務所の値については OA フロアやシンダーコンクリート打設が影響していると考えられるのでプロットしていない。図 9 にたわみに対するスパンの比と固有振動数との関係を示す。これよりスパンに対するたわみの比を、建築基準法の変形増大係数 2.0 を用いた場合で約 1/500、木質構造設計規準のクリープ変形係数 2.42 を用いた場合で約 1/600 とすると、固有振動数が 12Hz となることがわかった。

【まとめ】

人間が生活するうえで必要不可欠な動作である歩行を加振源とし、床の応答加速度と知覚確率、鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルとアンケート調査結果および床のたわみ、固有振動数との関係を調べた。本研究では、歩行による振動を許容できる床として、周波数重み付け加速度レベルの設計目標（仮）を 65dB とした。それを達成するためには、スパンに対するたわみの比を、建築基準法の変形増大係数 2.0 を用いた場合で約 1/500、木質構造設計規準のクリープ変形係数 2.42 を用いた場合で約 1/600 とすればよい。ただし、床の 1 次固有振動数 9.5~12.5Hz の範囲とする。以上のように、本研究により歩行振動に対する大スパン床の設計目標を提案できる可能性が示された。

表 1 調査した建物一覧

| 建物 | 種類 | 構法 | スパン (mm) | 梁・トラス | 断面または高さ | 竣工 年 |
|----|-----------|-----------|-------------|------------|-------------|---------|
| A | 小学校 教室 | 軸組 構法 | 7280 | ベイマツ梁 | 150mm×500mm | 2006 |
| B | | | 7280 | | 150mm×420mm | 1995 |
| C | | | 7272 | | 135mm×510mm | 1995 |
| D | | | 8181 | スギ合わせ 梁 | 105mm×520mm | 2010 |
| E | 事務所 | 枠組 壁工法 | 9100 | 平行弦 トラス | 800mm | 2005 |
| F | | | 7210 | | 600mm | 1990 |

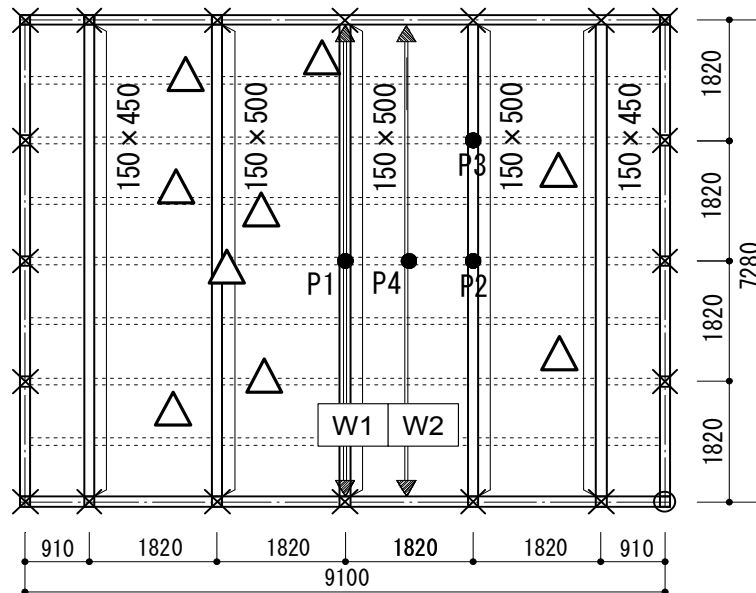


図 1 A 小学校の 2 階床伏図

W1、W2：歩行位置、P1～P4：加速度計の位置、
△：アンケート回答者の位置

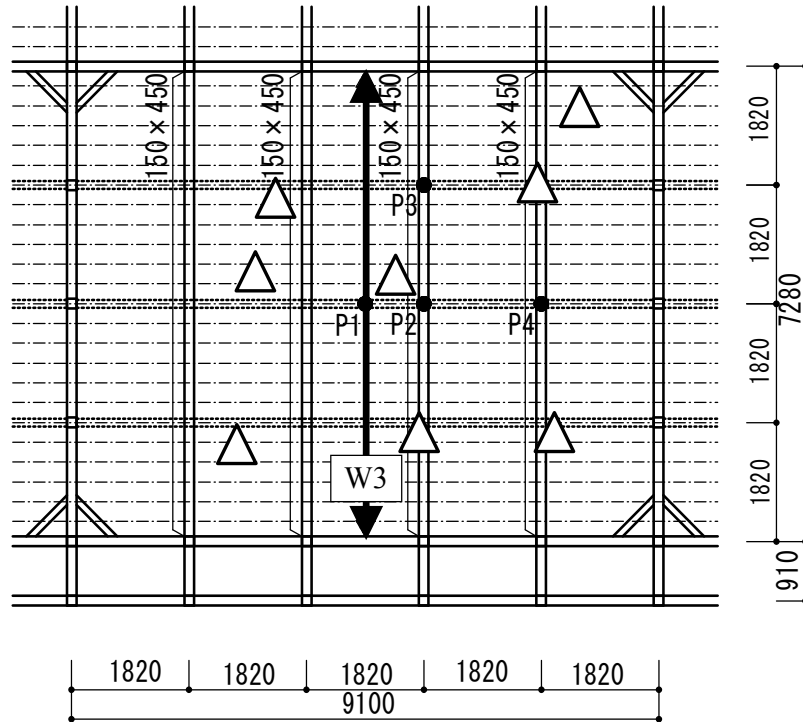


図 2 B 小学校の 2 階床伏図

W3 : 歩行位置、P1~P4 : 加速度計の位置、△ : アンケート回答者の位置

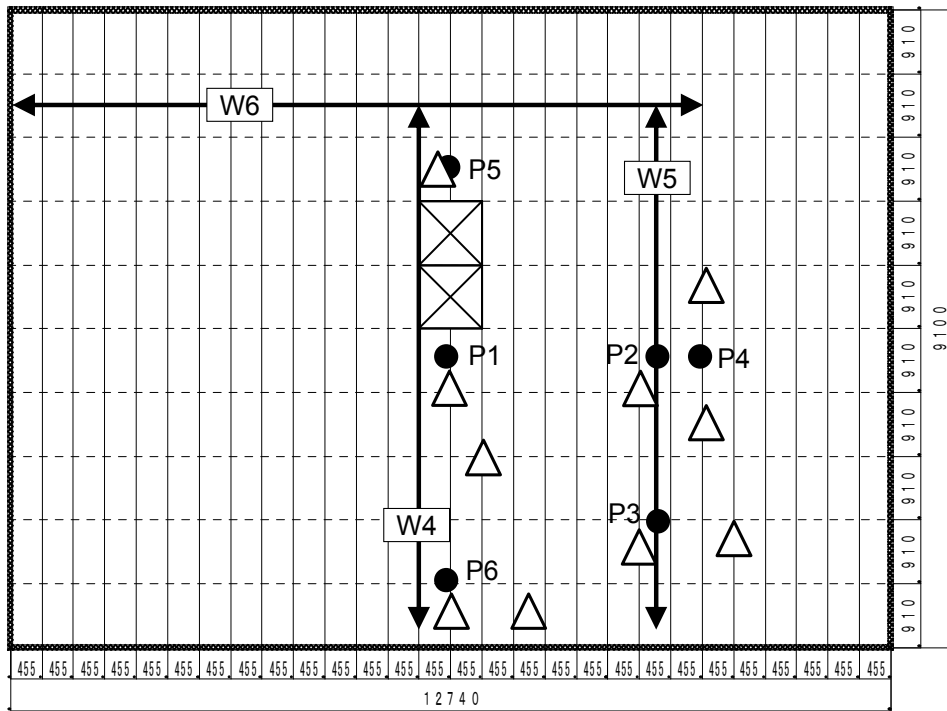


図 3 E 事務所の 2 階床伏図

W4、W5、W6 : 歩行位置、P1~P6 : 加速度計の位置、
△ : アンケート回答者の位置

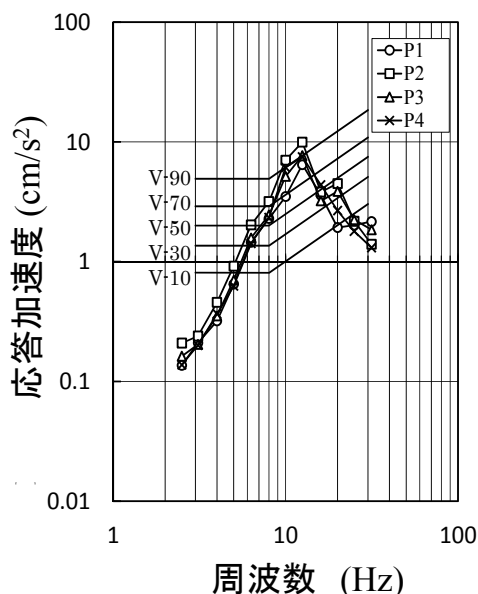
表2 固定荷重・積載荷重によるたわみおよびスパンに対するたわみの比

| 建物 | ヤング係数 (kN/mm ²) | 固定荷重 (N/m ²) | 初期たわみ (δ_0) (mm) | δ_0/L | クリープを考慮したたわみ (δ_1) (mm) | δ_1/L | クリープを考慮したたわみ (δ_2) (mm) | δ_2/L |
|----|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
| A | 12 | 704 | 9.94 | 1/732 | 12.80 | 1/569 | 15.49 | 1/470 |
| B | 10 | 517 | 15.66 | 1/465 | 19.35 | 1/376 | 23.41 | 1/311 |
| C | 10 | 563 | 9.84 | 1/739 | 12.29 | 1/591 | 14.88 | 1/489 |
| D | 7.5 | 620 | 15.63 | 1/523 | 19.76 | 1/414 | 23.91 | 1/342 |
| E | — | 1430 | 8.26 | 1/1102 | 11.40 | 1/798 | 13.79 | 1/660 |
| F | — | 1670 | 6.77 | 1/1076 | 9.63 | 1/756 | 11.66 | 1/625 |

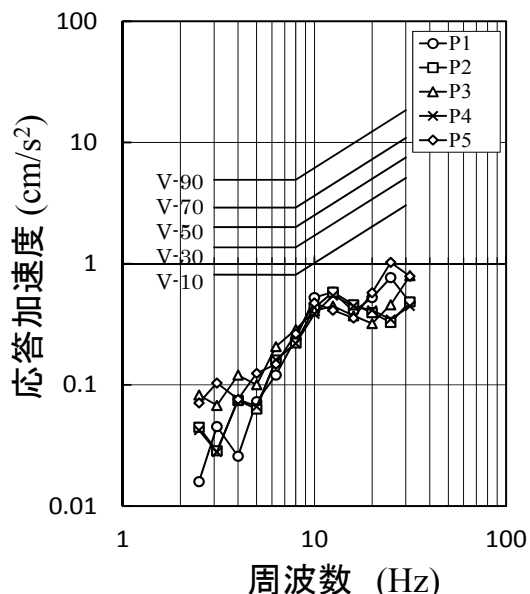
注: δ_1 : 建築基準法により求めたクリープを考慮したたわみ(変形増大係数2.0)、
 δ_2 : 木質構造設計規準により求めたクリープを考慮したたわみ(クリープ変形係数2.42)、
 たわみを求めるときの EI には設計値を使用

表3 固有振動数および減衰比

| 建物 | | A | B | C | D | E | F |
|--------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 固有振動数 | 実験値 (f_{exp}) (Hz) | 12.4 | 9.48 | 12.1 | 12.5 | 10.1 | 11.9 |
| | 計算値 (単純支持) (f_{dgn}) (Hz) | 11.2 | 8.7 | 10.7 | 9.4 | 9.3 | 9.8 |
| | f_{exp}/f_{dgn} | 1.10 | 1.10 | 1.13 | 1.32 | 1.09 | 1.21 |
| 減衰比(%) | | 3.76 | 3.14 | 5.46 | 4.37 | 4.59 | 6.45 |



B小学校のW3歩行



F事務所のW6歩行

図4 1/3 オクターブバンド中心周波数ごとの応答加速度と知覚確率の例

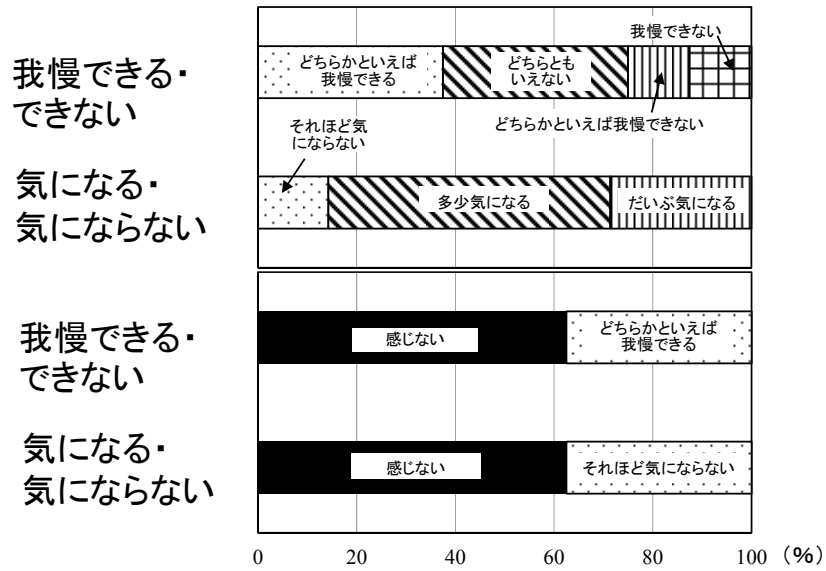


図5 アンケート調査結果の例 (上段: B 小学校、下段: F 事務所)

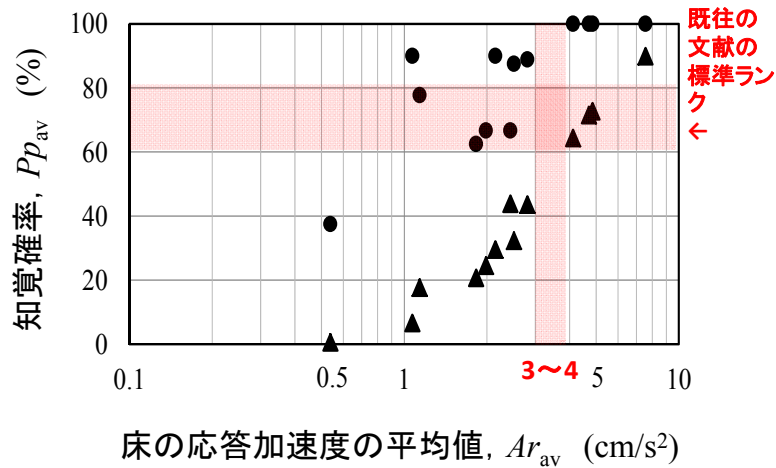


図6 応答加速度と、「感じない」以外の割合および知覚確率との関係
●: 「感じない」以外の割合、▲: 知覚確率

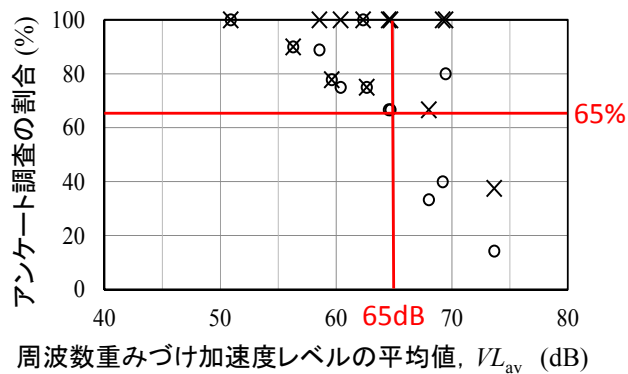


図7 鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルとアンケート調査との関係
○: 1)感じない+2)全く気にならない+3)それほど気にならないの和
×: 1)感じない+2)我慢できる+3)どちらかといえば我慢できるの和

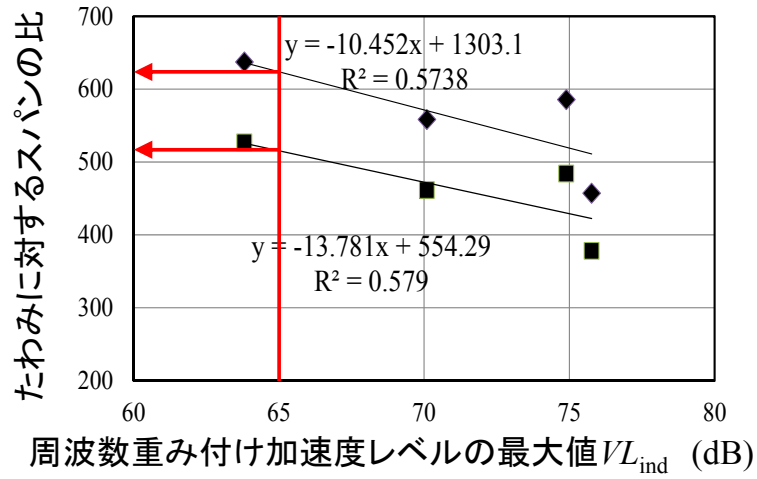


図 8 重み付け加速度レベルの最大値 $V_{L_{ind}}$ とたわみに対するスパンの比との関係
 ■ : 建築基準法、◆ : 木質構造設計規準

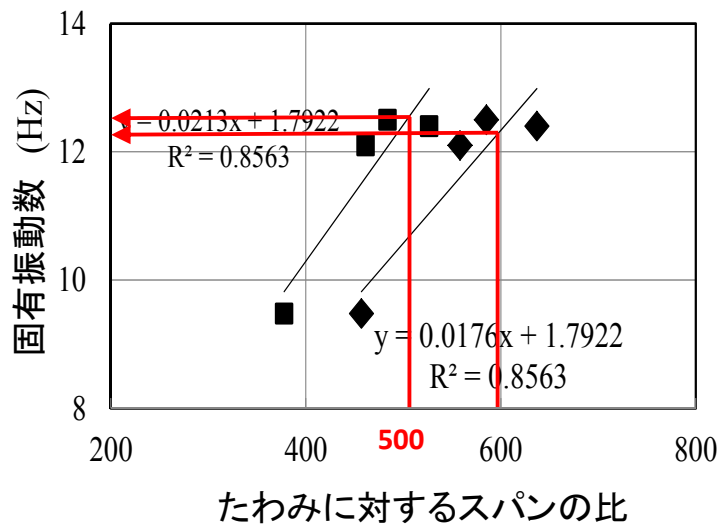


図 9 たわみに対するスパンの比と固有振動数との関係
 ■ : 建築基準法、◆ : 木質構造設計規準

論文審査結果要旨

本研究の最終的な目的は、歩行を加振源とする振動の感覚評価を基にした木造大スパン床に関する設計クライテリアの提案である。そのために、次のような試験を行った。4つの木造校舎および2つの木造事務所の床を対象として、静的たわみおよびボール落下による振動の実測を行い、曲げ剛性ならびに固有振動数、減衰比の算定を行った。さらに、これら6つ建物の床に関し、歩行を加振源とする床の鉛直振動と感覚評価との関係について考察し、床の応答加速度と知覚確率、鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルとアンケート調査結果および床のたわみ、固有振動数との関係を調べた。その結果、床の応答加速度の値 $3\sim 4\text{cm/s}^2$ を上回ると、アンケートで振動を「感じない」と答えた人以外の割合が100%、また、鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルが65dBを下回ると、歩行振動を許容できる人の割合が65%以上となった。これらの結果と床に使用されている梁の曲げ剛性との関係から、床の設計目標を65dBとすれば、スパンに対するたわみの比を、建築基準法に用いられている変形増大係数(2.0)を用いた場合1/500、日本建築学会『木質構造設計規準・同解説』で用いられるクリープ変形係数(50年で2.42)を用いた場合1/600とし、1次の固有振動数を12Hzとすればよいことがわかった。ただし、床の1次固有振動数は9.5~12.5Hzの範囲とする。

博士学位論文公開審査会は、2017年2月20日に行なわれ、その後、審査員3名による判定を行なった。その結果、論文の内容は博士学位論文として十分であり、公開審査会における発表、その後の質疑応答についても十分に満足ゆく内容であるものと判断した。

以上により、審査員は申請者が博士の学位を授与される資格があるものと判断した。