

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

Possibility of structural design for large-span wooden floors
based on human sensory evaluations to walking vibration

2017年3月

杉本 健一

Ken-ichi Sugimoto

目次

第1章 序論	1
1. 1 背景と目的	1
1. 2 既往の研究	4
1. 2. 1 木造建築物の床の鉛直荷重に対する振動特性	4
1. 2. 2 床の動的性状と人間の知覚	8
1. 2. 3 人間の歩行振動などの外力に対する木造床の応答	9
第2章 木造大スパン床の静的および振動性状	10
2. 1 はじめに	10
2. 2 対象とした小学校および事務所の概要	12
2. 3 実験	25
2. 3. 1 静的載荷実験	25
2. 3. 2 振動特性の測定	28
2. 4 結果と考察	30
2. 4. 1 梁および平行弦トラスの曲げ剛性とたわみの算出	30
2. 4. 2 静的載荷実験の結果	32
2. 4. 3 振動特性の測定	33
2. 5 第2章のまとめ	43
第3章 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	44
3. 1 はじめに	44
3. 2 対象とした小学校および事務所の概要	46
3. 3 歩行実験およびアンケート調査	47
3. 4 解析の手順	56
3. 5 結果と考察	79
3. 5. 1 応答加速度と知覚確率およびアンケート調査との関係	79
3. 5. 2 鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルによる床の評価	81
3. 5. 3 鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルとたわみに対するスパンの比との関係	84
3. 5. 4 鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルと床の固有振動数との関係	87
3. 6 第3章のまとめ	89
第4章 総括	90

参考文献	92
謝辞	97

第1章 序論

1. 1 背景と目的

木材は樹木由来の植物材料である。樹木である間は光合成により二酸化炭素を吸収し、木材に加工された後は燃やしたり腐ったりしない限り二酸化炭素を放出しない。温室効果ガス¹⁾の一つである二酸化炭素を削減するために、持続可能な林業（木材生産）を行うこと、積極的かつ継続的に木材を利用すること、木材の新たな需要を開拓することへの関心が高まっている。

また、木材は鉄やコンクリートなどよりも少ないエネルギーで製造や加工ができることから、木材の利用は製造および加工時の二酸化炭素の排出削減になる²⁾。さらに、木造で建物を建てるより鉄骨造や鉄筋コンクリート造で建てるよりも二酸化炭素の排出量が少ない³⁾。

一方、日本では戦後植林されたスギ・ヒノキなどの人工林が主伐期を迎えており、現在の森林資源量は約49億m³に達している⁴⁾。資源に乏しい日本においては木材資源をいかに有効活用するかが重要な課題となっている。

日本における木材需要の約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は木造⁵⁾である。しかしながら、非住宅分野での木造率は低い。木材の需要を増やすには、住宅以外の中・大規模建築物の木造化をすすめることが鍵となる。公共建築物の木造化を推進するための施策として「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監修の『木造計画・設計規準』⁶⁾が刊行された。また、2011（平成23）年頃より木造公共建築物や中・大規模木造建築物を設計するための参考資料^{例えば7)-11)}などが刊行されており、情報が充実しつつある。

ただし、これらの情報は構造安全性や火災安全性に関するものが多く、居住性や使用性に関する情報は少ない。日常生活によって発生する鉛直振動を例にとると、中・大規模木造に設けられる大スパン床は、住宅規模の小スパン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。しなしながら、木造大スパン床を小スパン床と同様に設計してよいのか、振動障害を抑えるために具体的にどう設計したらよいか、などの情報は少ないのが現状である。

建築物において日常生活により発生する振動に対する評価や設計に関しては、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・同解説』¹²⁾や『環境振動性能設計ハンドブック』¹³⁾が参考になるが、これらには評価方法や設計の考え方が記載されており、具体的にどのように設計すればよいかについての記載はない。木造床を設計する場合には、横架材や面材料などのたわみをどの程度に抑えたらよいか（いわゆる、たわみ制限）を考慮するが、たわみ制限と床の鉛直振動に対する許容値との関係を明らかにしておけば、振動に対する設計が容易になると考えられる。

木造の床梁は固定荷重、積載荷重によって鉛直方向にたわみ、時には構造的な障害（仕上げ材のひび割れ、付属構造体の2次応力発生、建具類の運行不能）や使用上の障害（作業に与える障害、心理的不安定、載荷物の転移、美観など）¹⁴⁾を引き起こすので、そのような障害を生じないように設計することが求められる。使用上の障害に関しては、建築基準法施行令第82条第4号に「国土交通大臣が定める場合においては、構造耐力上主要な部分である構造部材の変形又は振動によって建築物の使用上の支障が起こらないことを国土交通大臣が定める方法によって確かめること。」とあり、国土交通大臣が定める方法が平成12年建設省告示第1459号で規定されている。すなわち、変形増大係数を加味したたわみ制限がスパンの1/250以下であることを確認することとしている¹⁵⁾。また、木質構造設計規準・同解説¹⁶⁾では、梁の類の所要剛性を、初期変形における最大たわみがスパンの1/300以下、かつ振動障害のないこと、およびクリープ変形後の最大たわみがスパンの1/300以下であることをとしている。文献¹⁶⁾では、従前の規準では梁のたわみ限度を「絶対変位量2cm」以下としていたが、梁のたわみ限度を「スパンの1/300以下、かつ2cm以下」とした場合、スパンが6mを超えた場合に初めて「2cm以下」で決まることになるので、絶対変位量の規定はスパンが6mを超える梁を有するような木造建築物を念頭においたものであったと指摘している。

しかしながら、普通規模の住宅床ではスパンの1/300以下というたわみ制限は大きすぎ、たわみをスパンの1/600以内、かつ7mm未満とするのが健全設計とする指摘もある^{17,18)}。

一方、ユーロコード5 (EC5)¹⁹⁾では、使用限界設計の中に振動に対する設計規準がある。「建築物としての床振動の挙動は、使用限界状態の荷重条件にさらされたとき、許容できる範囲内に入っていないなければならない」とされており、具体的には歩行を加振源とする振動に対する設計を想定している。歩行による荷重は床の中央に加えられた静的な1kNの荷重とほぼ同じと考えられ、このときの中央たわみ a は次式を満足しなければならない。

$$a \leq \begin{cases} 1.8 \text{ (mm)} & L \leq 4000 \text{ (mm)} \\ \frac{16500}{L^{1.1}} \text{ (mm)} & L \geq 4000 \text{ (mm)} \end{cases}$$

また、カナダの建築基準法²⁰⁾では、振動を抑制するため、床の中央に加えられた静的な1kNの荷重に対し、荷重点下のたわみ d_{1kN} は次式を満足しなければならない。

$$d_{1kN} \leq \begin{cases} 2 \text{ (mm)} & L \leq 3 \text{ (m)} \\ \frac{8}{L^{1.3}} \text{ (mm)} & 6 \geq L \geq 3 \text{ (m)} \end{cases}$$

このように、ヨーロッパやカナダでは、振動を抑制するために局所的な荷重を載荷したときのたわみが考慮されているが、我が国の建築基準法や木質構造設計規準では

たわみ制限以外考慮されていない。

そこで本研究では、木造大スパン床を対象とし、日常の動作として欠かせない歩行によって生じる振動（以下、歩行振動）の感覚評価に基づく構造設計が可能かどうか検討することを目的として、歩行振動の感覚評価に基づく目標性能を仮に設定し、それを達成するための梁のたわみ制限、床の固有振動数を提案することを試みた。

具体的には、木造の4つの小学校と2つの事務所の試験対象とした床（以下、試験対象床）について、試験対象床を構成する梁・平行弦トラスのたわみや曲げ剛性、床の固有振動数・減衰比を、実建物に組み込まれた状態で求めた。次に、試験対象床の上を1人の成人男性が歩行した時の振動の応答加速度を測定すると同時に、歩行者の周辺にいたアンケート回答者に、歩行振動をどう感じたかについて回答してもらった。そのアンケート結果を元に、歩行振動の観点から目標性能を仮に設定し、それを達成するための梁のたわみ制限、床の固有振動数を示すことによって、歩行振動の感覚評価に基づく構造設計が可能かどうかについて考察した。

1. 2 既往の研究

1. 2. 1 木造建築物の床の鉛直荷重に対する振動特性

安藤ら²¹⁾は、合板釘打ちストレスト・スキン・パネルによる床が衝撃荷重を受けたときの振動特性（固有振動数及び減衰定数）に及ぼす積載荷重の影響について検討した。その結果、(1)ストレスト・スキン・パネルの1次の固有振動数は単純支持された梁の1次振動数を求める式、または梁のスパン中央に積載荷重が付着した場合の梁の固有振動数を求める Timoshenko の式で求められること、(2)多質点置換法により固有振動数を求めた結果は実験値の傾向とよく一致すること、(3)スパン中央に対して対称位置に物品荷重が載荷される場合、その合計荷重が、片側の載荷位置にのみ加わった場合と大過ないこと、(4)パネル上の物品荷重が増加するにつれて、パネルの固有振動数は低下する傾向がみられ、スパン中央に載荷する場合に低下の割合が最も大きいこと、(5)人間荷重はパネルの固有振動数には影響を及ぼさないが、振動を吸収し減衰定数を大きくすること、人間荷重と物品荷重が同時に載荷される場合、物品荷重の増加につれて、減衰定数が漸減する傾向があることを明らかにした。

鈴木らを中心とする研究グループ²²⁾⁻²⁹⁾では、木造梁床とハイブリッド梁床、木造根太床について、各種鉛直荷重を受けた場合の振動性状に関する研究を精力的に行っている。

文献²²⁾では、木造床の鉛直振動に対する1次固有振動数および減衰定数に及ぼす人間荷重の影響と1次固有振動数の推定に用いる連続体の曲げ振動理論の適用性について検討している。その結果、(1)床の1次固有振動数10~18Hzの範囲では、人間荷重の固有振動数への影響は小さく、人間荷重が載荷されても固有振動数はほとんど変化しない、(2)1次固有振動数に対する減衰定数の値は、床の重量（固定荷重と物品荷重との和）に対する人間荷重の割合に比例して増加する傾向がある、(3)木造床の1次固有振動数は、曲げ剛性・支持条件・重量（固定荷重と物品荷重の和）に基づき、連続体の曲げ振動理論を適用して推定が可能であることが指摘された。

文献²¹⁾の結論(1)と文献²²⁾の結論(3)では、扱っている床がストレスト・スキン・パネルと梁床で異なるものの、ほぼ同様の結果が導かれており、文献²¹⁾の結論(5)と文献²²⁾の結論(2)でも、ほぼ同様の結果が導かれている。

文献²⁴⁾では、床と人間との間に生じる相互作用力の測定値に基づき、人間荷重の影響メカニズムについての考察を行い、一般的な床の卓越振動数の範囲を振動台により模擬的に再現して、床の振動特性に及ぼす人間荷重の影響度合いについて実験的に明らかにした。その結果、(1)一般的な木造床の振動数を10~30Hz程度とすれば、人間荷重が床に伝達する力は床の変位に対して位相が80~110°遅れ、人間は振動台と一体となって振動せず、床に対して主に減衰力として作用する、(2)人間荷重の伝達力は振動数により変化し、振動振幅0.2mmで振動数12~30Hzの範囲では、人間の質量と振動台の加速度との積により計算される値の20~70%の値を示す、(3)人間を積載し

た状態の木造床の鉛直振動においては、人間荷重と床との間には、伝達力の位相ずれと伝達力の低下が同時的に生じることより、床の1次固有振動数に及ぼす人間荷重の影響度合いは、非常に小さなものとなることがわかった、と結論づけている。床の1次固有振動数に及ぼす人間荷重の影響メカニズムを明らかにした研究として画期的な論文であると考えられる。

文献²⁶⁾では、スパン 3.64m、幅 4.55m の2辺支持された枠組壁工法による根太組床を用いた研究を行い、以下の結論を得ている。(1)適切な解析モデルを用いた有限要素法解析は、根太床のツーウェイ・アクション効果および固有振動数・モード形を評価する手法として有効である。(2)荷重が等分布的に載荷され2辺支持された根太床の1次固有振動数を概算的に予測する手法として、根太床全体をスパン方向に架け渡された梁として捉え、梁の振動理論により固有振動数を概算する方法の可能性が示された。(3)根太床の固有振動数を算定する上では、人間荷重の影響は少なく、人間荷重を無視しても大過ない。(4)人間の姿勢が1次固有振動数に対応する減衰定数に及ぼす影響は、中腰前傾姿勢、直立姿勢、体育座り姿勢、足伸ばし後ろ支え姿勢の順に大きく、人間が床と接触する面積が大きいほど大きくなる傾向があるが、高次固有振動数に対応する減衰定数に及ぼす影響はそれほど大きくない。

そのほか、文献²³⁾では木造床に複合材料としてコンクリートまたはALC版を用いた場合の木質ハイブリッド床の基本的な鉛直振動特性について報告し、文献²⁵⁾および²⁷⁾では衝撃加振力を受ける木造床の鉛直振動応答に関する研究を行っている。また、文献²⁸⁾では開口をもつ木造根太床の鉛直振動特性と衝撃加振特性係数、すなわち動的最大加振力が静的に作用したと仮定して計算される変位に衝撃力の特性を考慮した係数について検討し、文献²⁹⁾では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ついて検討している。

大スパン床の鉛直振動評価に関する研究についてみると、文献³⁰⁾には、1991年から1999年の間に日本建築学会大会で発表された36件の振動評価事例を構造条件の観点から分類し、鉛直振動に対する性能評価曲線³¹⁾と照合した結果が示されている。これによると、大スパン床に関しては鉄骨造大スパン(15m~25m、25m以上)、スパン長が10m程度以下の鉄筋コンクリート造、鉄骨鉄筋コンクリート造の事例しかなく、2000年以前には木造の評価事例はないに等しかった。最近は大規模木造が増えており、住宅とは異なる大スパン床に関する動的設計に注目されている。

西谷ら³²⁾は、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について検討し、一次固有振動数と床中央に0.98kN(100kgf)載荷した時のたわみ量がわかれば、歩行振動の評価を概略推定可能であることを示した。

横山ら^{33,34)}はモデル床を用いて複数歩連続した歩行時に発生する振動の性能値について検討を行い、剛性の比較的低い床では横山らの提唱する評価値であるSVI(2)が適用でき、剛性の比較的高い床ではSVI(2)が適用できず、鉛直振動に対する性能評価

曲線³¹⁾に基づいて振動数補正を施した補正振動加速度レベルおよび振動レベルの最大値が心理学的尺度とよい対応を示したことを明らかにした。

諸外国における研究については、Weckendorf が論文の中でまとめている³⁵⁾。

Ohlsson³⁶⁾は、木質床の動的性状を測定し、モーダル解析などを行ない、1 次の固有振動数は 12–28Hz の範囲に、減衰比は 0.5–1.3% の範囲にあり、5 次くらいの固有振動数では減衰比は 1.5% を越えることはほとんどないことを明らかにした。また、Chui³⁷⁾は、木質床に関する要因を様々に変えた床の動的性状について数式モデルを用いて解析し、動的性状を高めるための技術を提案した。このほかにも I 型梁を用いた床³⁸⁾、転び止めに LVL を用いた床³⁹⁾、集成材を用いた床⁴⁰⁾などについて検討がなされている。既往の文献では、減衰比に関する研究が多いが、その値は 3%⁴¹⁾や 2.9–7.8%⁴²⁾であり、試験体により範囲が異なっている。

また Ohlsson³⁶⁾は、人間の知覚評価を考慮した床の振動性状を評価するための設計規準を提案した。質量が付加すると減衰は減少するので、床の減衰比を 0.75% とすることを提案したが、広範な研究により 1% とした。この減衰比は、大スパンや質量が大きい (150kg/m² 以上) 場合、0.8% に減少すること、1 次の固有振動数を 8Hz 以上と限定している。また、単純支持された異方性を有するプレートに対する 1 次の固有振動数を算出する式を簡略化し、次式を提案した。

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D_x}{\rho L^4}} \sqrt{1 + \left[2n^2 \left(\frac{L}{B} \right)^2 + n^4 \left(\frac{L}{B} \right)^4 \right] \left(\frac{D_y}{D_x} \right)} \quad (\text{Hz})$$

ここで、 ρ は密度、 L 、 B は床面を平板とした場合の辺の長さ、 D はその曲げ剛性で、

$$D_x = \frac{E_x t^3}{12(1-\nu_x \nu_y)}, \quad D_y = \frac{E_y t^3}{12(1-\nu_x \nu_y)}$$

である。 E はヤング係数、 t は平板の厚さ、 ν はポアソン比である。Ohlsson はさらに、 D_x/D_y が 0.01 以下であるなら、次式で近似することが可能であることを示した。

$$f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D_x}{\rho L^4}} \quad (\text{Hz})$$

この計算式は、Eurocode 5 における振動に関する使用限界状態設計における基礎となっている。その後、Chui³⁷⁾、Smith と Chui⁴¹⁾により、設計者に使いやすい計算式が提案されている。

カナダでは、Onysko⁴³⁾により居住者の感覚に基づき、床の振動を制限するための設計基準が導かれた。これは、カナダの多数の市町村における 100 以上の建物の 600 以上の床に対する調査の結果を総合したものである。調査は、「まったく気にならない」(definitely acceptable)、「気にならない」(acceptable)、「分からない」(undecided)、「許容できない」(not acceptable)、「とても許容できない」(definitely not acceptable) の 5 段階評価で行なったが、最終的には、「まったく気にならない」と「気にならない」

を一つに、「許容できる」と「とても許容できない」を一つにまとめた。Onysko は、床振動を制限するには衝撃力に対する最大応答、減衰比、固有振動数、集中荷重に対する変形が重要な指標であると指摘し、以下の式を提案した。

$$w_d = \frac{7.217}{L^{1.724}} \leq 1.75 \text{ (mm)}$$

ここで、 w_d : 床中央に 1kN 載荷したときのたわみの制限値

L : スパン (m)

この式は、設計規準では次式に簡略化されている。

$$w_d = \frac{8}{L^{1.3}} \leq 2 \text{ (mm)}$$

その後の研究により、同式は、スパンが 5.5m 未満の場合に適用され、5.5m 以上 9.5m 以下の場合には、次式が適用されることになった。

$$w_d = \frac{2.55}{L^{0.63}} \text{ (mm)}$$

さらに、Forintek Canada Corp. など、様々な研究機関や研究者が研究を行っており、現在様々な基準が提案されている。

1. 2. 2 床の動的性状と人間の知覚

1930年の始めに、Reiher と Meister は、人間の振動に対する知覚と非減衰正弦波加振の振幅との直接的な関係を導いた。これはマイスター曲線⁴⁴⁾と呼ばれ、人間の振動感覚閾値と許容限界を示したもので、今日の人体感覚に対する基礎を築いたものといえる。これを契機に、人間の振動に対する反応と振動数や振幅、減衰などの振動のパラメータとの間の関係に関する多くの研究がなされている。

Reiher と Meister の試験は定常波を用いたものであり、建物における実際の振動は過渡振動である。Lenzen⁴⁵⁾は、鋼材の梁にコンクリートスラブの合成床の振動に対する人間の知覚の関係を調べ、過渡振動で人間の知覚に最も影響を及ぼす要因は、減衰であるということを示し、振動試験結果を元にマイスター曲線を修正した。これは、修正マイスター曲線、別名 Lenzen 曲線と呼ばれている。また、Wiss と Parmelee⁴⁶⁾は、過渡振動の試験結果に基づき、振動数、変位振幅、減衰定数をパラメータにした次式を導いている。

$$R = 5.08 \left(\frac{f \cdot A_0}{h^{0.217}} \right)^{0.265}$$

R は評価の指標を示し、 $R=1$ 無感、 $R=2$ ようやく感じる、 $R=3$ 明らかに感じる、 $R=4$ 強く感じる、 $R=5$ 激しく感じるで、 $R=2.5$ を許容限界値としている。 f は振動数(Hz)、 A_0 は変位振幅 (インチ)、 h は減衰定数である。その後、様々な全身暴露振動の感覚閾値の研究が行なわれた。日本でも三輪⁴⁷⁾が 1960 年代から推進し、ISO の評価基準設定に大いに寄与している。

木質床に関しては、Polensek^{48,49)}の研究や Ohlsson^{36),50)}の研究がある。Ohlsson は、木質床および鋼製床に対して、主観的な評価試験を行なった。木質床では、スパンが減少したり、天井が存在したりすると、評価が上がるが、床材を根太に接着しても評価にはほとんど影響しないことを示した。また、かかと落としの試験により、人間が不快に感じるのは、非対称モードが影響することを明らかにした。さらに、木造は Light Weight Construction と言われるが、床上にいる人間の身体が床構造のモード形状を劇的に変化させる場合、床が軽いと定義することができるとした。これらの研究により、床の動的な性能を高めるためには、連続的な動的荷重に対しては、主に剛性や減衰比を高めること、また、過渡的な衝撃荷重に対しては、質量や減衰係数を高めることと結論づけている。その後、Hu と Tardif³⁸⁾による、根太間に転び止めや補強材を入れた場合の感覚評価に及ぼす影響を調べた研究などがある。

1. 2. 3 人間の歩行振動などの外力に対する木造床の応答

安藤ら⁵¹⁾は釘打ちストレスト・スキン・パネルの衝撃荷重による動たわみと歩行振動について報告している。その中で、人間の歩行によって床に加わる衝撃力は、3kgの粘土塊の0.2~4.0cmからの自由落下に相当すること、歩行によるパネルの振動は、パネルの固有振動数によらず、むしろ1歩ごとにたわみが発生するとみなし得る、と結論づけている。

床振動で問題となるのは、人間の歩行で励起される振動である。歩行振動に関する研究は多いが、その中で東工大の小野・横山を中心とするグループは、人間の動作に起因する床振動に関する研究^{33,52)-57)}を30年以上にわたって行っており、その研究は注目に値する。以下、概要を紹介する。

文献³³⁾には、人間が歩行時に床に与える荷重の時間変化の代表例と足の接地状況との関係、及びその荷重により発生する歩行振動の例が示されている。また、文献⁵⁷⁾には、実際の床での複数歩連続した歩行により発生する振動について、一般的な木造住宅の8畳間程度の大きさの床における歩行振動の実測例を、すなわち(1)数歩歩行した場合と(2)1歩のみの場合を比較して示している。連続した歩行の場合、1歩1歩の間にわずかではあるが、両足が着地している時(両脚支持期、通常0.1s程度)がある。(1)と(2)の比較から、(2)の変形・時間曲線の振幅を、歩行者が測定点に接近したり遠ざかったりするのに合わせて1歩ごとに増減させながら両脚支持期を重ね合わせると、(1)の変形・時間曲線のようになった。また、加速度・時間曲線からは、着地衝撃により非常に大きな、床の固有振動数での振動が励起されているものの、木造、軽量鉄骨造床では減衰が大きいいため次の1歩までに十分減衰していることを指摘している。

木質床における歩行振動では、加速度振幅の最大値を床の固有振動数とともに日本建築学会の『建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説』の性能評価曲線^{31,58)}と照合すると、実際には何ら問題が発生していない床でも著しく悪い評価となってしまうことを、中村ら⁵⁹⁾が指摘している。

横山らは、歩行振動に対してVI(2)という評価指標を導入した^{54,56)}。具体的には、着地時の動的変形の大きさ及び速さは変形・時間曲線に示す変形の最大値Dmax及び変形速度Vm、床の固有振動数での振動の続き具合は加速度・時間曲線に示す振動の振幅が14.1cm/s²(振幅を加速度に換算)まで減衰するのに要する時間Thで、それぞれ表せることを明らかにした。さらに、これらを複合した次式で得られるVI(2)で、歩行振動に対する感覚評価を表示できることを示した。

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

単位は、Dmax:cm、Vm:cm/s、Th:sである。

第2章 木造大スパン床の静的および振動性状

2.1 はじめに

床梁は固定荷重、積載荷重によって鉛直方向にたわみ、時には構造的な障害（仕上げ材のひび割れ、付属構造体の2次応力発生、建具類の運行不能）や使用上の障害（作業に与える障害、心理的不安定、載荷物の転移、美観など）¹⁴⁾を引き起こすので、そのような障害を生じないように設計することが求められている。

使用上の障害に関しては、建築基準法施行令第82条第4号に「国土交通大臣が定める場合においては、構造耐力上主要な部分である構造部材の変形又は振動によって建築物の使用上の支障が起こらないことを国土交通大臣が定める方法によって確かめること。」とあり、国土交通大臣が定める方法が平成12年建設省告示第1459号で規定されている。すなわち、変形増大係数を加味したたわみ制限がスパンの1/250以下であることを確認することとしている¹⁵⁾。また、木質構造設計規準・同解説¹⁶⁾では、梁の類の所要剛性を、初期変形における最大たわみがスパンの1/300以下、かつ振動障害のないこと、およびクリープ変形後の最大たわみがスパンの1/300以下であることとしている。文献¹⁶⁾では、従前の規準では梁のたわみ限度を「絶対変位量2cm」以下としていたが、梁のたわみ限度を「スパンの1/300以下、かつ2cm以下」とした場合、スパンが6mを超えた場合に初めて「2cm以下」で決まることになるので、絶対変位量の規定はスパンが6mを超える梁を有するような木造建築物を念頭においたものであったと指摘している。

しかしながら、普通規模の住宅床ではスパンの1/300以下というたわみ制限は大きすぎ、たわみをスパンの1/600以内、かつ7mm未満とするのが健全設計とする指摘もある^{17,18)}。

一方、ユーロコード5 (EC5)¹⁹⁾では、使用限界設計の中に振動に対する設計規準があり、「建築物としての床振動の挙動は、使用限界状態の荷重条件にさらされたとき、許容できる範囲内に入っていないなければならない」とされており、具体的には、歩行を加振源とする振動に対する設計を想定している。歩行による荷重は床の中央に加えられた静的な1kNの荷重とほぼ同じと考えられ、このときの中央たわみ a は次式を満足しなければならない。

$$a \leq \begin{cases} 1.8 \text{ (mm)} & L \leq 4000 \text{ (mm)} \\ \frac{16500}{L^{1.1}} \text{ (mm)} & L \geq 4000 \text{ (mm)} \end{cases}$$

また、カナダの建築基準法²⁰⁾では、振動を抑制するため、床の中央に加えられた静的な1kNの荷重に対し、荷重点下のたわみ d_{1kN} は次式を満足しなければならない。

$$d_{1kN} \leq \begin{cases} 2 \text{ (mm)} & L \leq 3 \text{ (m)} \\ \frac{8}{L^{1.3}} \text{ (mm)} & 6 \geq L \geq 3 \text{ (m)} \end{cases}$$

このように、ヨーロッパやカナダでは、振動を抑制するために局所的な荷重を載荷したときのたわみが考慮されているが、我が国の建築基準法や木質構造設計規準ではたわみ制限以外考慮されていない。

本研究では、木造大スパン床を対象とし、歩行振動の感覚評価に基づく構造設計が可能かどうか検討することを目的として、歩行振動の観点から目標性能を仮に設定し、それを達成するためのたわみ制限、固有振動数を提案することを試みているが、本章ではその前段として、4つの小学校と2つの木造事務所の試験対象床について、試験対象床を構成する床梁・平行弦トラスのたわみや曲げ剛性、床の固有振動数・減衰比を、実建物に組み込まれた状態で求めた結果について述べる。

2. 2 対象とした小学校および事務所の概要

Table 1 に対象とした小学校および事務所の一覧を示す。A～D は秋田県能代市内に建つ小学校（Photo1～4）であり、能代市教育委員会から図面を借りて、部材の断面寸法や樹種等を調べたが、集成材の等級などは記入されていないものもあった。これらの校舎はすべて在来軸組工法による木造建物で、D 小学校のみ 2 階床梁に合わせ梁を用いている。また、E、F は事務所（Photo5、Photo 6）であり、建物の所有者から図面を借りて、部材等を確認した。これらは、枠組壁工法による木造建物で、平行弦トラス（以下、トラス）を 2 階床梁として用いている。なお、竣工年は 1990～2010 年であった。

Table 1 List of buildings

Building	Type	Construction	Span (mm)	Beam	Cross-section or depth of beam	Completion year
A	Elementary school	Post and beam	7280	Douglas fir glulam	150mm×500mm	2006
B			7280		150mm×420mm	1995
C			7272		135mm×510mm	1995
D			8181	Japanese cedar glulam	105mm×520mm	2010
E	Office	Light frame	9100	Parallel chord truss	800mm	2005
F			7210		600mm	1990



Photo 1. School A.



Photo 2. School B.



Photo 3. School C.



Photo 4. School D.



Photo 5. Office E.



Photo 6. Office F.

校舎の基本的な床構造は同じであり、A、B、C および D 小学校の測定対象とした試験対象床の2階床伏図をそれぞれ Fig.1.1~1.4 に示す。A、B、C および D 小学校の測定対象とした床の平面形状は、それぞれ 9.1×7.28 (m)、 9.1×7.28 (m)、 8.181×7.272 (m)、 9.09×8.181 (m) である。また、A 小学校では教室の床梁には 150×500 (mm) および 150×450 (mm) の断面のベイマツ (*Pseudotsuga menziesii*) 集成材 E120-F330 が 1820 mm 間隔で用いられ、梁と直交方向には 105×150 (mm) の振れ止めが 910 mm 間隔で入っている。B 小学校では断面 150×420 (mm) のベイマツ集成材(設計値 10 kN/mm^2) の梁が 1820 mm 間隔で用いられ、梁間には 120×120 (mm) のつなぎ材が 1820 mm 間隔で入っており、さらに 45×120 (mm) の根太が 303 mm ピッチで設けられている。C 小学校では断面 135×510 (mm) のベイマツ集成材(設計値 10 kN/mm^2) の梁が 1818 mm 間隔および 1363.5 mm 間隔で用いられ、梁間には 120×120 (mm) のつなぎ材が 1818 mm 間隔で入っており、さらに 45×120 (mm) の根太が 303 mm ピッチで設けられている。D 小学校では、教室の床梁には断面 105×520 (mm) のスギ (*Cryptomeria japonica*) 集成材(E75-F240) の梁2本が合わせ梁として用いられており 1818 mm 間隔で入っている。合わせ梁間には 105×105 (mm) の振れ止めが入っており、梁と直交方向には 105×120 (mm) の根太が 909 mm ピッチで入る仕様となっている。

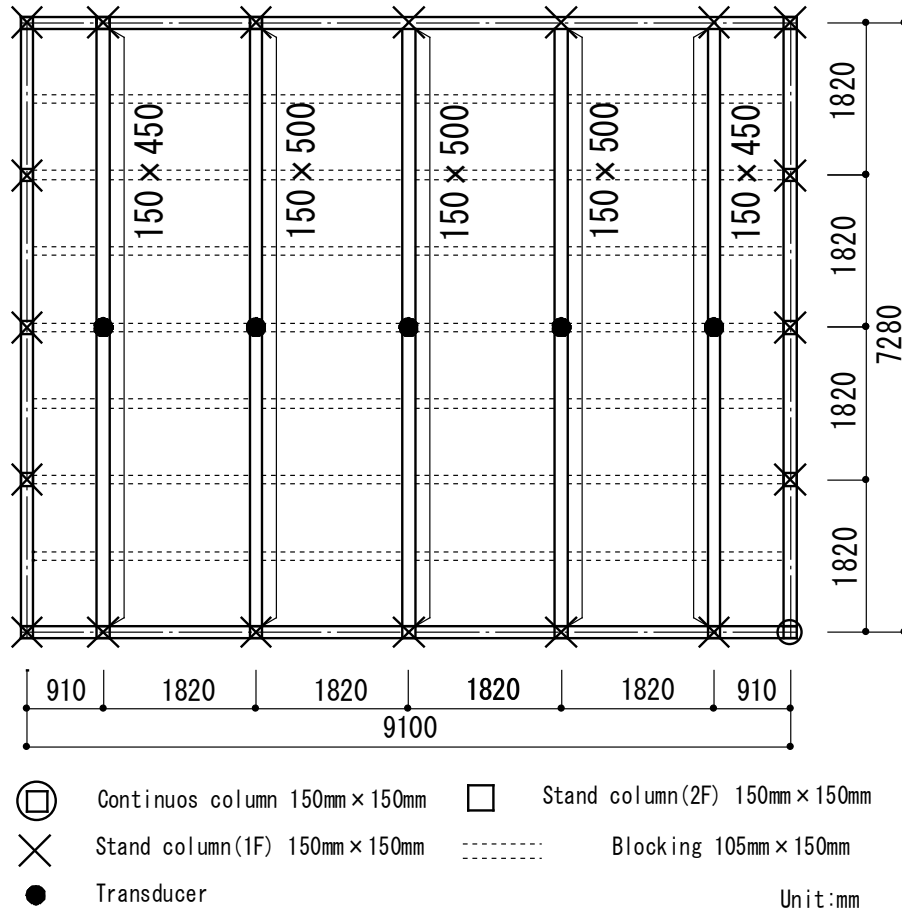


Fig.1.1. Upstairs floor framing plan of a measured room in elementary school A.

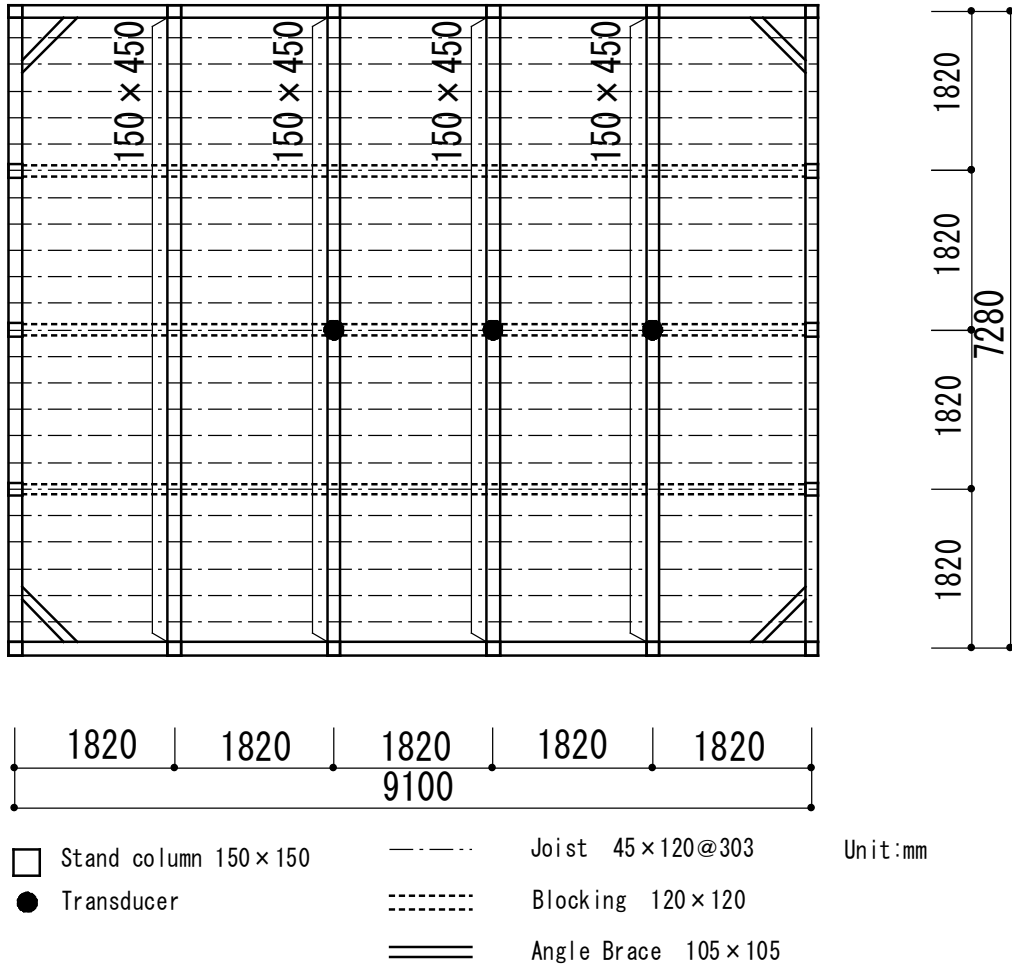


Fig.1.2. Upstairs floor framing plan of a measured room in elementary school B.

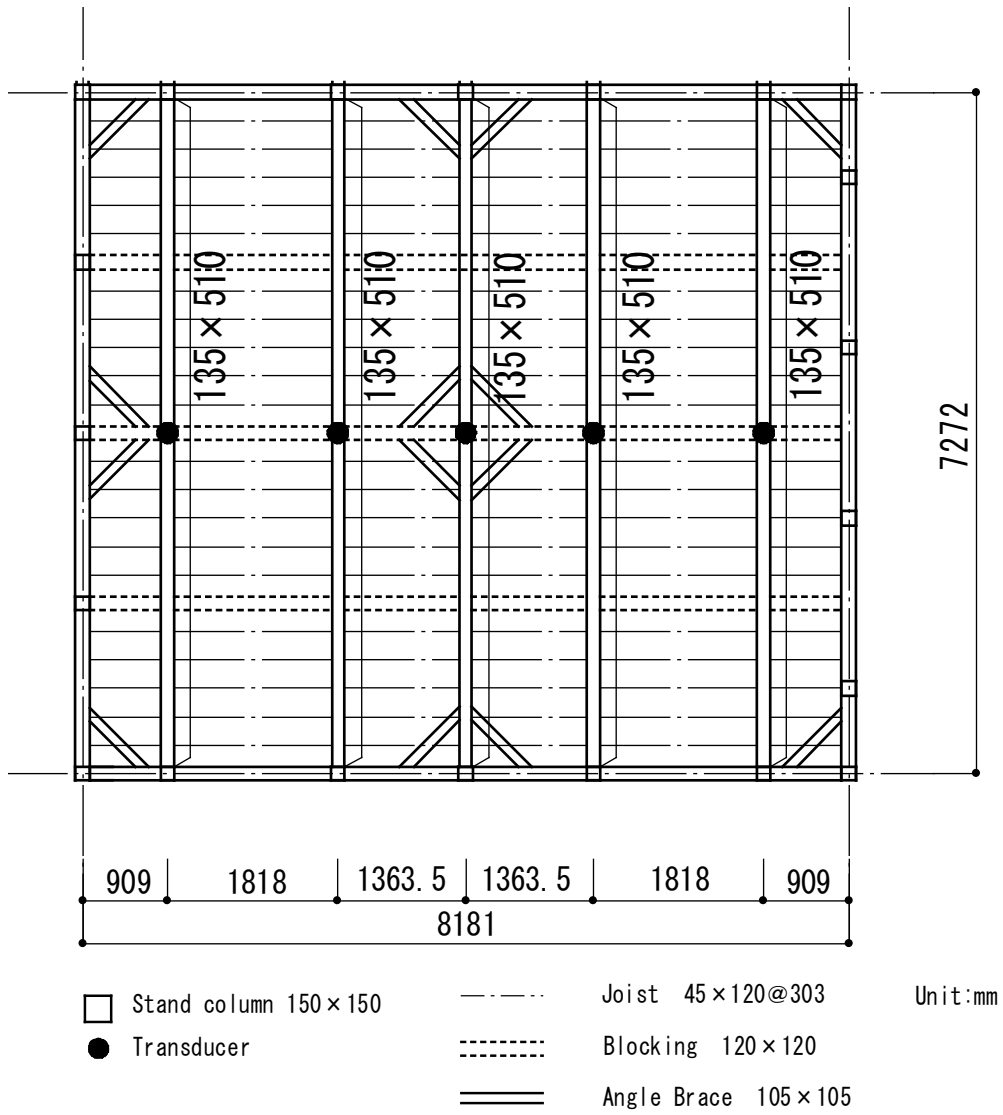


Fig.1.3. Upstairs floor framing plan of a measured room in elementary school C.

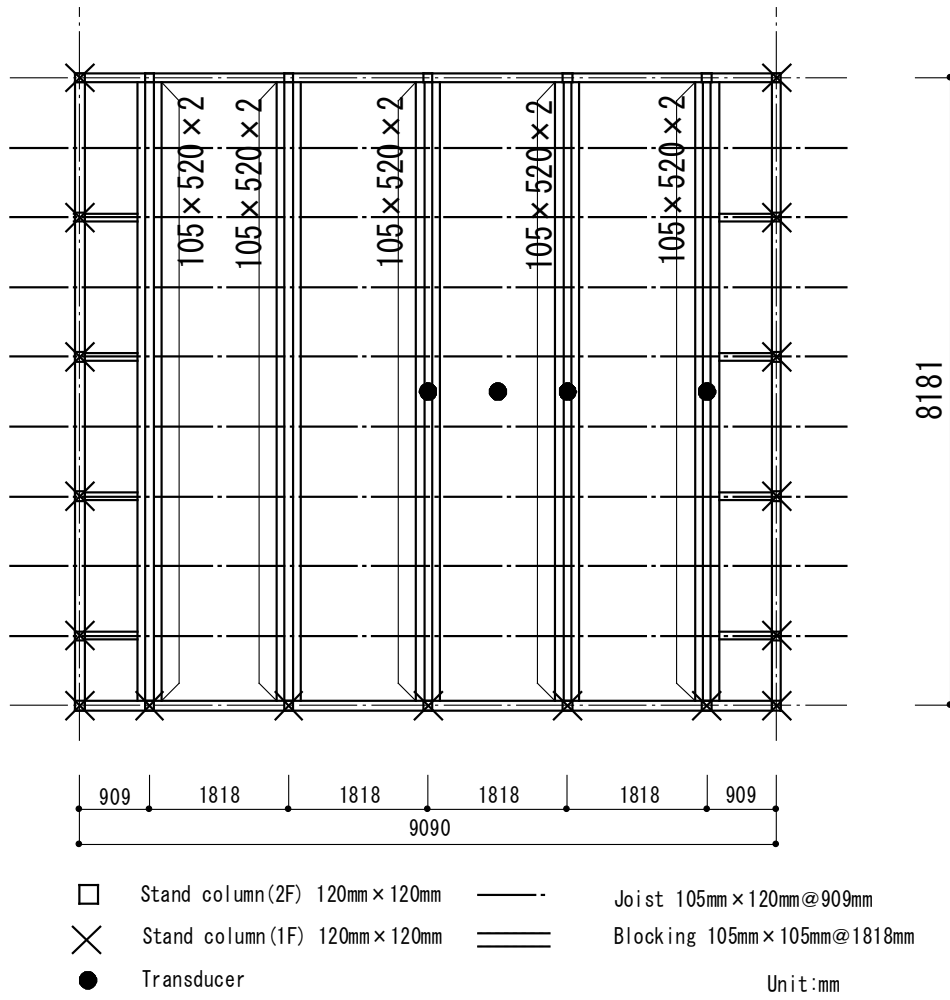


Fig.1.4. Upstairs floor framing plan of a measured room in elementary school D.

A、B、C、D 小学校の 2 階床組の構成図をそれぞれ Fig.2.1～2.4 に示す。いずれの小学校も、床の仕上げ材にはフローリングを用いている。

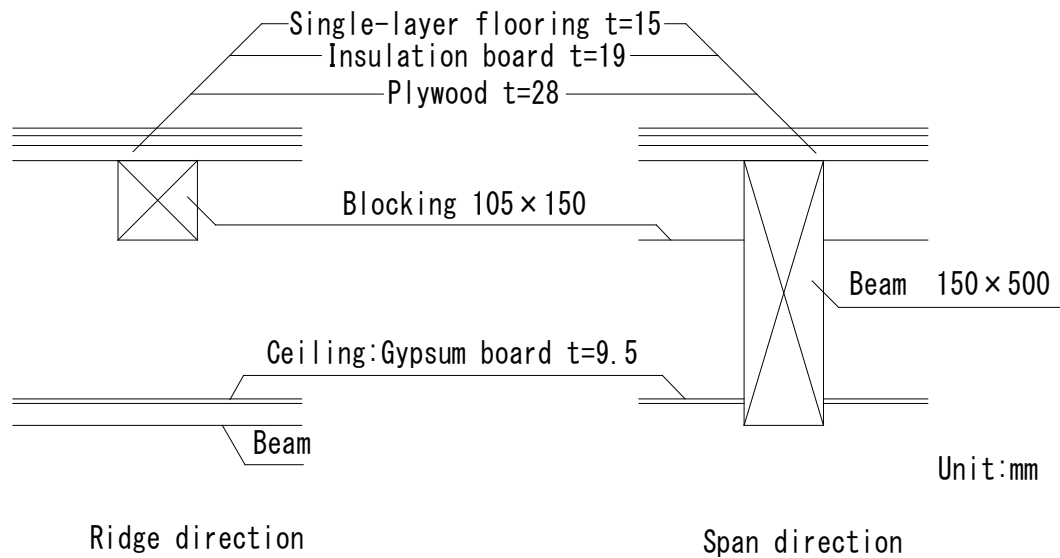


Fig.2.1. Upstairs floor cross-sectional diagram of elementary school A.

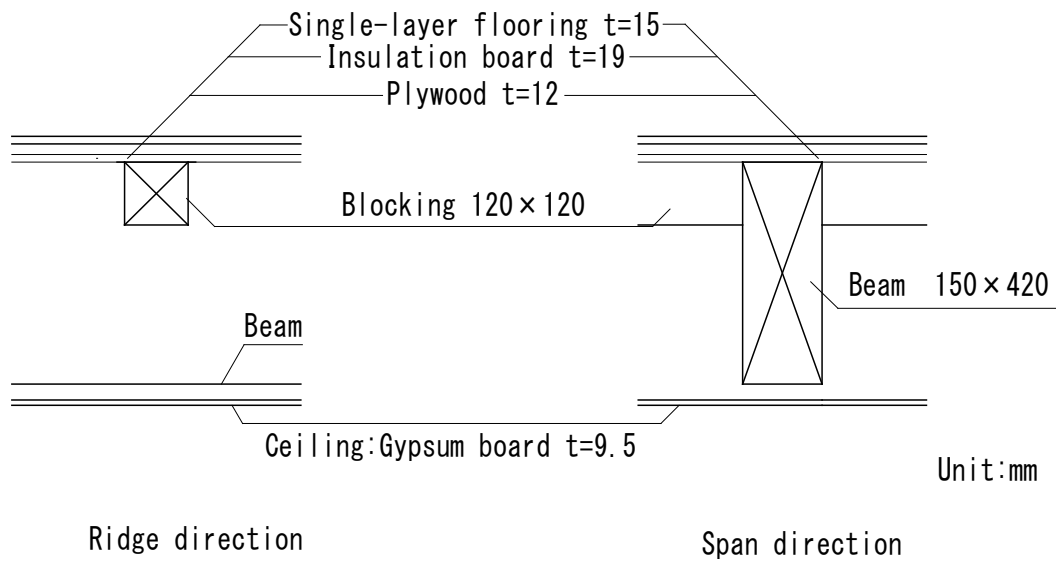


Fig.2.2. Upstairs floor cross-sectional diagram of elementary school B.

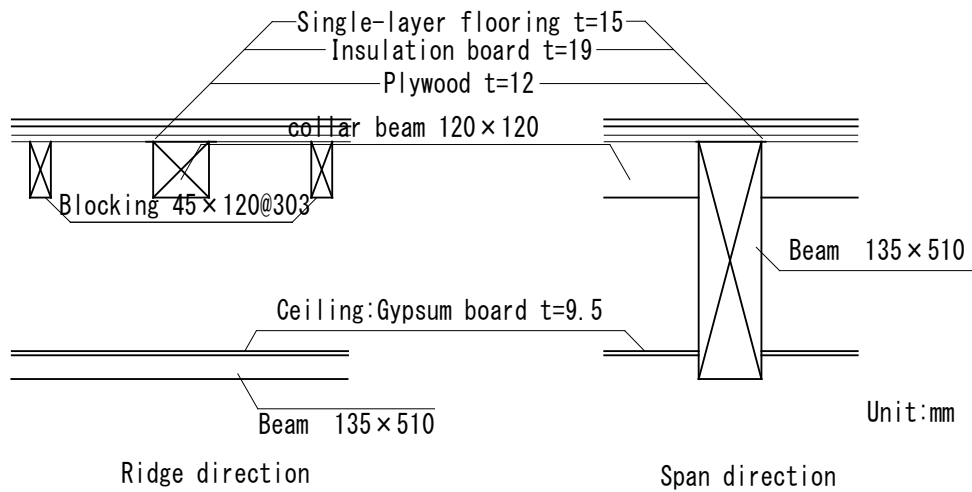


Fig.2.3. Upstairs floor cross-sectional diagram of elementary school C.

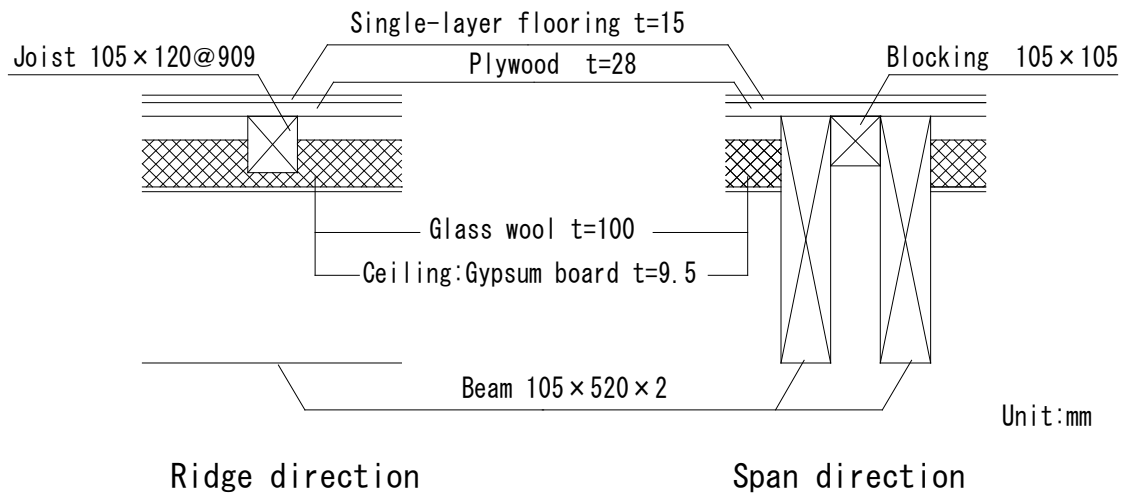


Fig.2.4. Upstairs floor cross-sectional diagram of elementary school D.

E および F 事務所の測定対象とした床の平面形状は、それぞれ 12.74×9.1 (m)、19.88×7.21(m)である。E 事務所の平行弦トラス（樹種、等級不明）はピッチ 455mm でせいは 800mm、床は OA フロアであり、仕上げ材にはタイルカーペットが使われている。一方、F 事務所の平行弦トラス（樹種、等級不明）は 455mm ピッチでせいは 600mm、床はシンダーコンクリート（厚さ 38mm）が打設してあり、仕上げ材にはビニールタイルが使われている。いずれも、204 材を通しトラスつなぎとして用いている。E、F 事務所の測定対象とした試験対象床の 2 階床伏図を Fig.3.1、Fig.3.2 に示す。

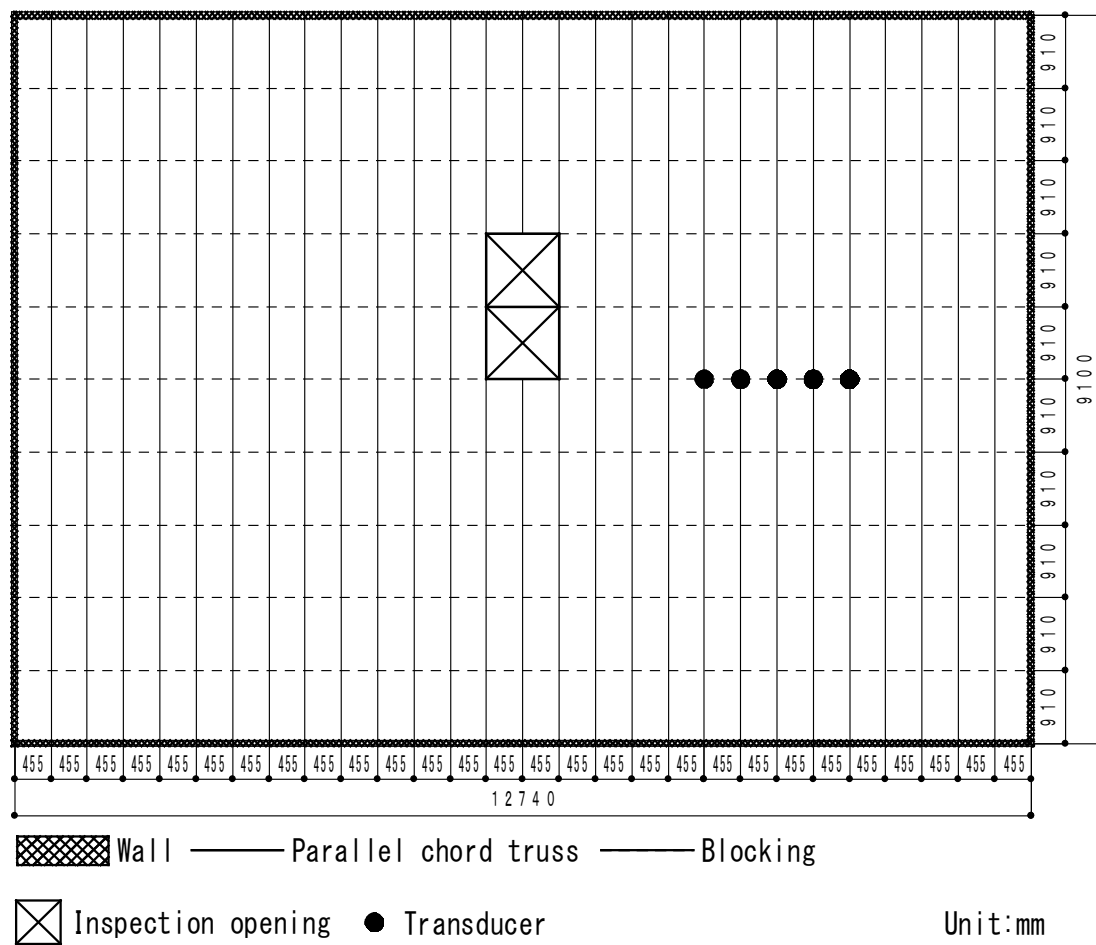


Fig.3.1. Upstairs floor framing plan of a measured room in office E.

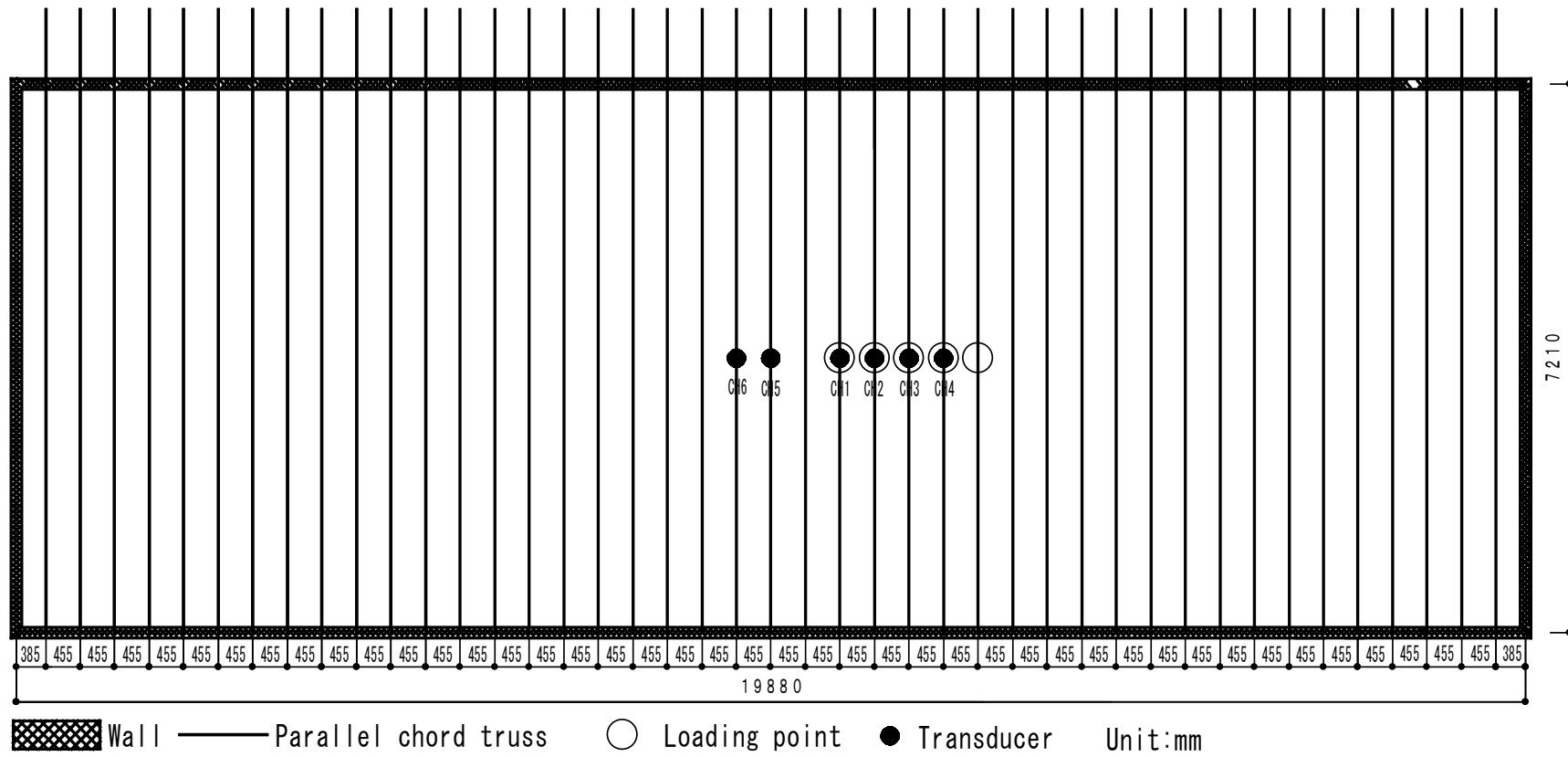


Fig.3.2. Upstairs floor framing plan of a measured room in office F.

2. 3 実験

2. 3. 1 静的載荷実験

小学校については、試験対象床の中央の梁を中心に3～5本の梁下の天井（Fig.1.1～1.4に示した位置）に変位計の先端を当て、それぞれの梁上部のスパン中央に当たる床上に体重の範囲が612～706Nである人が1人ずつ立ったときの変位を計測し、試験対象床中央の梁に立った人の体重とその直下のたわみを元に梁の静的曲げ剛性を算出した。

E事務所については、Fig.3.1に示すように、床中央付近のトラスは点検口のため切断されていたので、中央から少し離れた5本のトラス直下の天井に変位計の先端を当て、それぞれのトラスのスパン中央に当たる床上に、体重の範囲が727～815Nの人間が1人ずつ立ったときの変位を計測し、中央のトラス上に立った人の体重とその直下のたわみを元にトラスの静的曲げ剛性を算出した。F事務所については、Fig.3.2のように荷重点と変位測定位置を設定し、E事務所と同様にトラスの静的曲げ剛性を算出した。E、F事務所のいずれの場合においても、仕上げ材（E事務所はOAフロア、F事務所はシンダーコンクリート）には何も手を加えずに載荷した。Photo 7にE事務所の2階床においてトラスの位置に人が立つことにより載荷している様子を、Photo 8にE事務所の1階において天井の変位を計測している様子を示す。



Photo 7. Picture of loading on the parallel chord trusses.



Photo 8. Picture of measuring the deflections of parallel chord trusses.

上記のような測定手法を採用した理由は、以下の通りである。

多数本の梁に面材が張られた床の場合、そのうちの1本の梁に荷重が作用すると、スパン直交方向にも荷重が伝達されるツーウェイ効果が知られている。ツーウェイ効果については、寸法型式208の床根太が455mm間隔で配置された床の場合、集中荷重を受ける根太に加えて隣接する片側2本ずつ、計5本の根太によって、全荷重の98%を負担しているとの報告がある²⁷⁾。本研究で検討の対象とした小学校の床梁の間隔は1363.5~1820mmであり、文献²⁷⁾よりは集中荷重を受ける梁の負担が増えることが予想されるが、片側2本ずつ、合計5本の梁で負担する荷重の割合は文献²⁷⁾とほぼ同じと見なした。また、事務所のトラスの間隔は455mmであり、片側2本ずつ、合計5本のトラスで負担する荷重の割合は文献²⁷⁾と同じと考えた。

試験対象床を構成する梁の、床中央にあるものについて曲げ剛性を求める場合、この梁だけに載荷すると、その両隣の梁にも荷重が伝達されてしまうため、載荷された荷重を直下の梁だけが負担する時のたわみを測定することができない。そこで、隣接する片側の梁の少なくとも1本ずつ、3本以上の梁に同程度の大きさの荷重が作用すれば、隣接する梁に作用した荷重がツーウェイ効果により剛性を求めようとする中央の梁にも伝達されると考え、中央の梁に作用する荷重とその直下のたわみにより、中央の梁の静的曲げ剛性を求めた。

2. 3. 2 振動特性の測定

床の振動特性の測定は、ボール加振による自由振動実験により行った。加振にはインパクトボール（JIS A 1418-2:建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法-第2部：標準重量衝撃源による方法⁶⁰⁾）を用いた。Photo 9 に示すように、仕上げ材には何も手を加えずにロードセル（容量：10kN）を床上に置き、加振力を測定した。加振位置は、梁またはトラス（以下、単に梁と略）が測定する試験対象床の中央にある場合はそのスパン中央、試験対象床の中央にない場合は試験対象床中央に最も近い梁のスパン中央とした。加振位置を梁上としたのは、床の1次振動モードをできるだけ励起しやすくするためと、1次固有振動数の振動数領域において入力に加振力と出力の応答加速度の線形性をできるだけ高めるための経験的な措置である。本試験の前に予備実験を行い、インパクトボールの落下高さを変えて加速度応答を測定し、加速度計の容量をオーバーしない落下高さを調べた。その結果、落下高さを200～300mm程度にすると伝達関数に影響を及ぼさないこと、このときの加振力は0.72～0.91kN程度であることを確認している。



Photo 9. Picture of impact ball falling.

床の応答加速度の測定には、4～5 台のサーボ型加速度計（容量： 49m/s^2 ）を用いた。応答加速度の測定位置は、加振点の近傍および加振点の両隣の梁またはトラスのスパン中央とした。自由振動実験より得られた加振力及び応答加速度より、入力を加振力、出力を応答加速度とする伝達関数を算出した。伝達関数の算出に際しては、3 回の平均化処理を施すとともに、1 次固有振動数の振動数領域においてコヒーレンス関数の値が概ね 1.0 であり、加振力と応答加速度との間の線形性が成り立っていることを確認した。応答加速度の測定位置が変わっても加振力は弾性範囲にあること、加振力と応答加速度との間には線形性が成り立っていることから、固有振動数と減衰比には影響を及ぼさないと考えられる。得られた伝達関数をもとに実験モード解析を行い、周波数領域のカーブフィットにより固有振動数と減衰比を求めるとともに、振動モードの確認を行った。なお、これらの解析は汎用モード解析ソフト ME'scopeVES を用いて行った。

2. 4 結果と考察

2. 4. 1 梁および平行弦トラスの曲げ剛性とたわみの算出

小学校については、設計上の梁の剛性(EI_{dgn})は、設計図書に記されている梁のヤング係数および断面寸法から求めた。梁の初期たわみ(δ_0)を計算するための荷重は、固定荷重については設計図書を参照して建物ごとに算出し、積載荷重については建築基準法施行令第 85 条¹⁵⁾より 2100N/m^2 とした。また、クリープを考慮した床のたわみ計算用積載荷重については 1100N/m^2 とし、変形増大係数を 2 としてたわみ(δ_1)を計算した。これは、「一定の荷重が長期間連続して作用する場合、変形は気乾状態では最終的に初期変形の約 2 倍になるといわれている。」⁶¹⁾ことに基づいているが、「長期間」とは「長期」を指していると考えられる。一方、木質構造設計規準では「長期」は 50 年とされており⁶²⁾、その期間に対するクリープ変形係数が 2.42 ¹⁶⁾であるので、これを用いてたわみ(δ_2)を計算した。事務所については、トラスの EI_{dgn} はマトリックス法による汎用ソフトを用いて算出した。また、固定荷重は小学校と同様に設計図書から算出し、 δ_0 を計算するための積載荷重は建築基準法施行令第 85 条より 1800N/m^2 、 δ_1 および δ_2 を計算するための積載荷重は 800N/m^2 とし、変形増大係数およびクリープ変形係数は 2.0 および 2.42 とした。以上のように算出した EI_{dgn} および荷重（固定荷重と積載荷重の和）より設計上の梁のたわみを求め、Table 2 に示した。なお、A 小学校の梁の断面は 2 種類あるが、中央の梁についての結果である。同表から次のようなことがわかる。

δ_0 、 δ_1 および δ_2 は、それぞれスパンの約 $1/470 \sim 1/1100$ 、約 $1/380 \sim 1/800$ および約 $1/310 \sim 1/660$ であった。告示によるたわみ制限 δ_1 はスパンの $1/250$ 、木質構造設計規準によるたわみ制限 δ_0 、 δ_2 はスパンの $1/300$ であるが、B 小学校では δ_2 はスパンの $1/311$ であり、木質構造設計規準のたわみ制限とほとんど同じであった。一方、E、F 事務所では、すべてのたわみが建築基準法および木質構造設計規準のたわみ制限の 28～48% であり、たわみ制限よりかなり小さかった。

Table 2. Deflection calculated by National Building Law and AIJ[#] Standard.

Building	Cross-section or height	Young's modulus (kN/mm ²)	Bending stiffness (kN·mm ²)	Dead load (N/m ²)	Initial deflection (δ_0) (mm)	L/ δ_0	Deflection including creep ^{*1} (δ_1) (mm)	L/ δ_1	Deflection including creep ^{*2} (δ_2) (mm)	L/ δ_2
A	150mm×500mm	12	1.88×10^{13}	704	9.94	732	12.80	569	15.49	470
B	150mm×420mm	10	0.93×10^{13}	517	15.66	465	19.35	376	23.41	311
C	135mm×510mm	10	1.49×10^{13}	563	9.84	739	12.29	591	14.88	489
D	105mm×520mm	7.5	1.85×10^{13}	620	15.63	523	19.76	414	23.91	342
E	800mm	—	1.59×10^{13}	1430	8.26	1102	11.40	798	13.79	660
F	600mm	—	8.53×10^{12}	1670	6.77	1076	9.63	756	11.66	625

(Notes) #:Architectural Institute of Japan, L:span (mm), *1:Based on National Building Law, *2:Based on AIJ Standard.

2. 4. 2 静的載荷実験の結果

Fig.1.1～1.4、Fig.3.1、Fig.3.2 に示す 2 階床中央の梁上部の人間の体重(P)とその直下のたわみ(δ)を用いて、次式より単純支持を仮定した梁の静的曲げ剛性(EI_{exp})を算出した。ただし、 L は梁のスパンである。単純支持を仮定したのは、梁の設計が単純支持で行なわれているからである。

$$EI_{\text{exp}} = \frac{PL^3}{48\delta} \quad (\text{kN}\cdot\text{mm}^2) \quad (1)$$

また、Table 3 には、 EI_{exp} および EI_{dgn} を示した。同表より、実験値の方が設計値より 1.1～3.9 倍大きくなっていることがわかる。F 事務所は設計値より実験値の方が約 4 倍大きい、この要因としてはシンダーコンクリート仕上げで床が一体化していることが影響しているものと思われる。また、E 事務所についても、設計値より実験値の方が約 2 倍大きく、OA フロアが影響しているものと思われる。

Table 3. Bending stiffness.

Building	Bending stiffness (kN·mm ²)		Ratio
	Experimental value (X)	Design value (Y)	X/Y
A	2.10×10 ¹³	1.88×10 ¹³	1.12
B	1.35×10 ¹³	0.93×10 ¹³	1.45
C	1.69×10 ¹³	1.49×10 ¹³	1.13
D	2.61×10 ¹³	1.85×10 ¹³	1.41
E	2.90×10 ¹³	1.59×10 ¹³	1.82
F	3.31×10 ¹³	0.85×10 ¹³	3.89

(Note) Building A-F: See Table 1.

2. 4. 3 振動特性の測定

A~D 小学校の床の伝達関数およびモード形を Fig.4.1a~Fig.4.4d に示した。

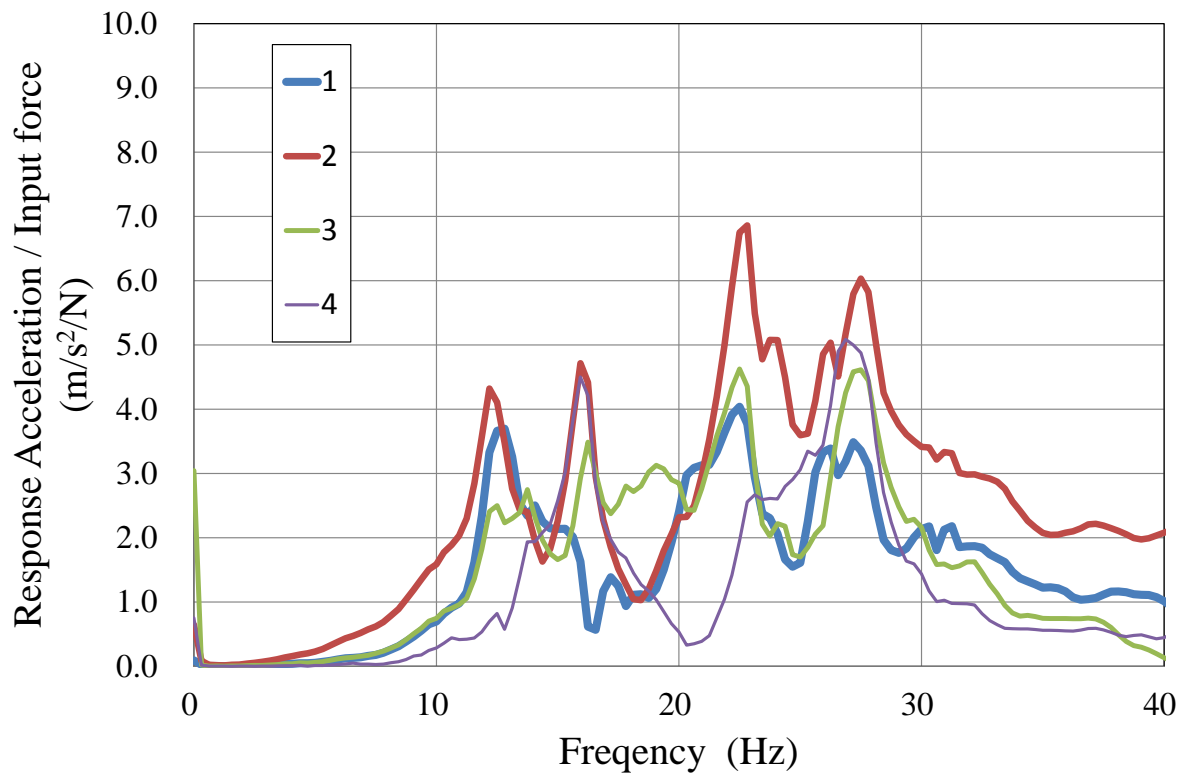


Fig.4.1a. Transfer function at the excitation point in a teaching room floor of elementary school A.

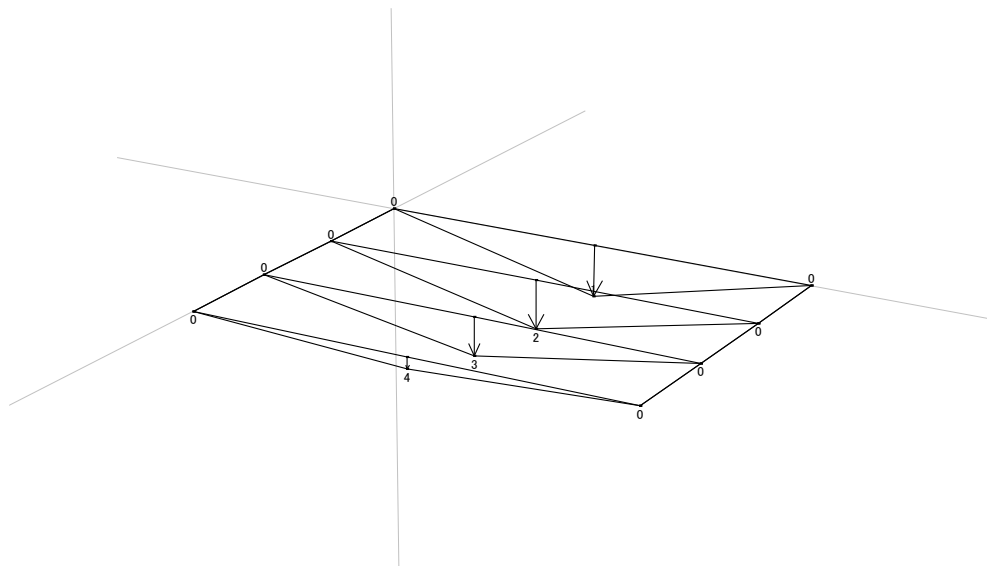


Fig.4.1b. Mode shape in primary natural frequency (12.4Hz) in a teaching room floor of elementary school A.

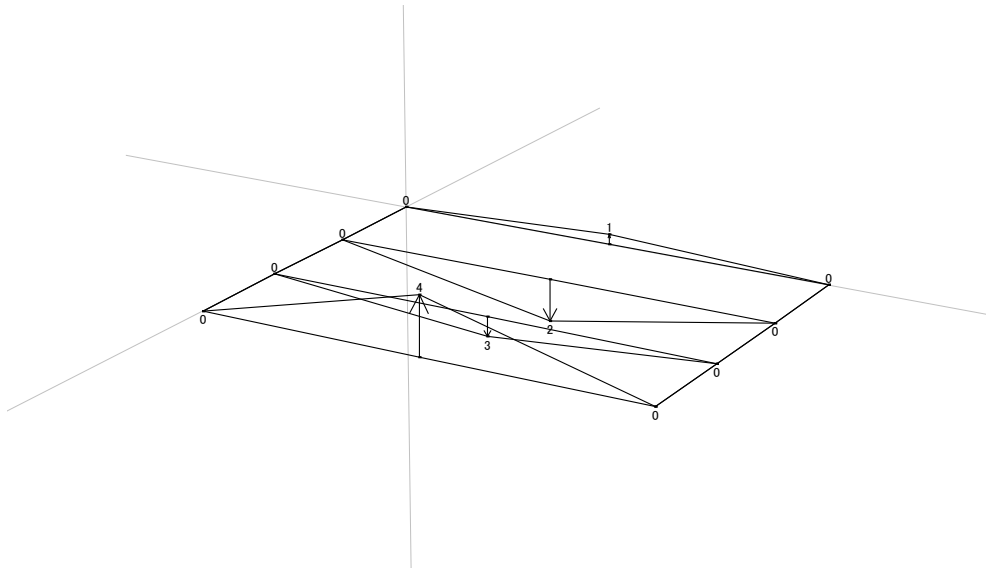


Fig.4.1c. Mode shape in secondary natural frequency (16.1Hz)
in a teaching room floor of elementary school A.

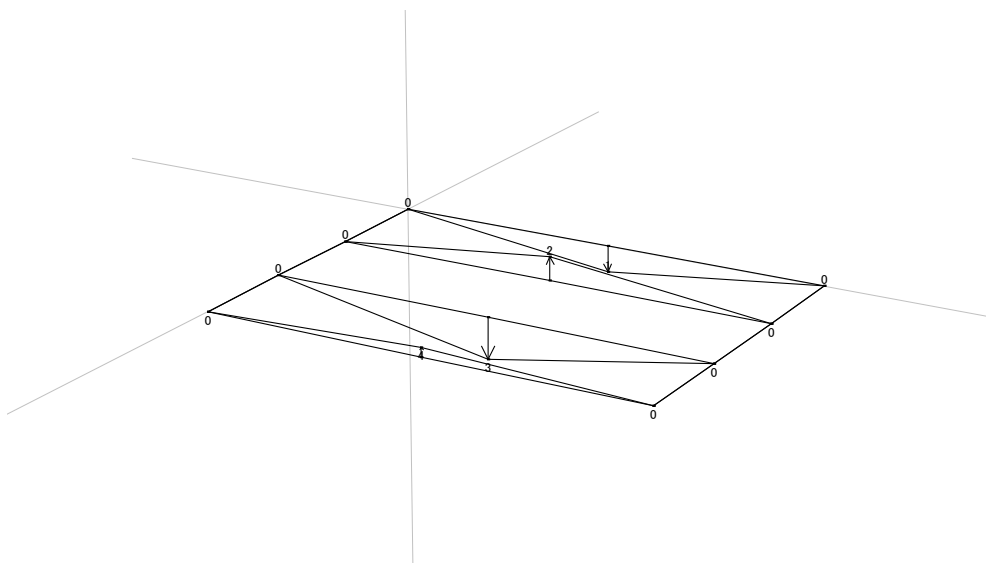


Fig.4.1d. Mode shape in tertiary natural frequency (20Hz)
in a teaching room floor of elementary school A.

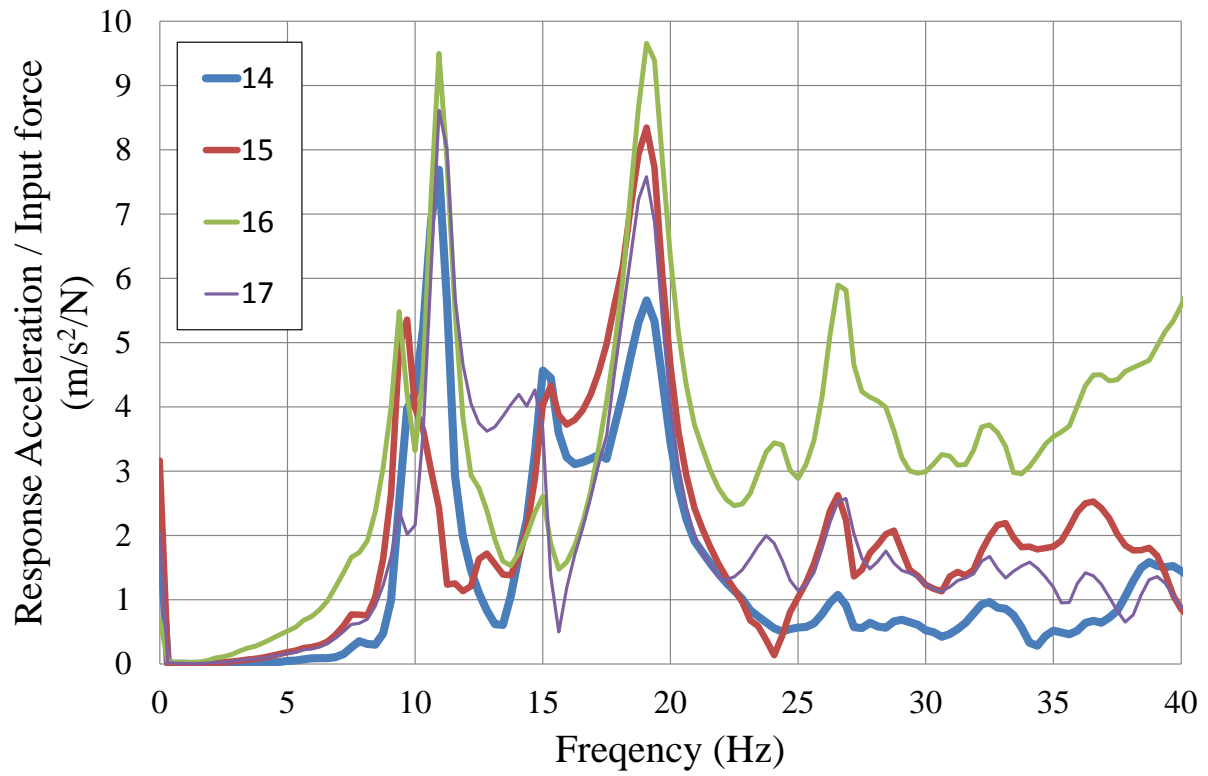


Fig.4.2a. Transfer function at the excitation point in a teaching room floor of elementary school B.

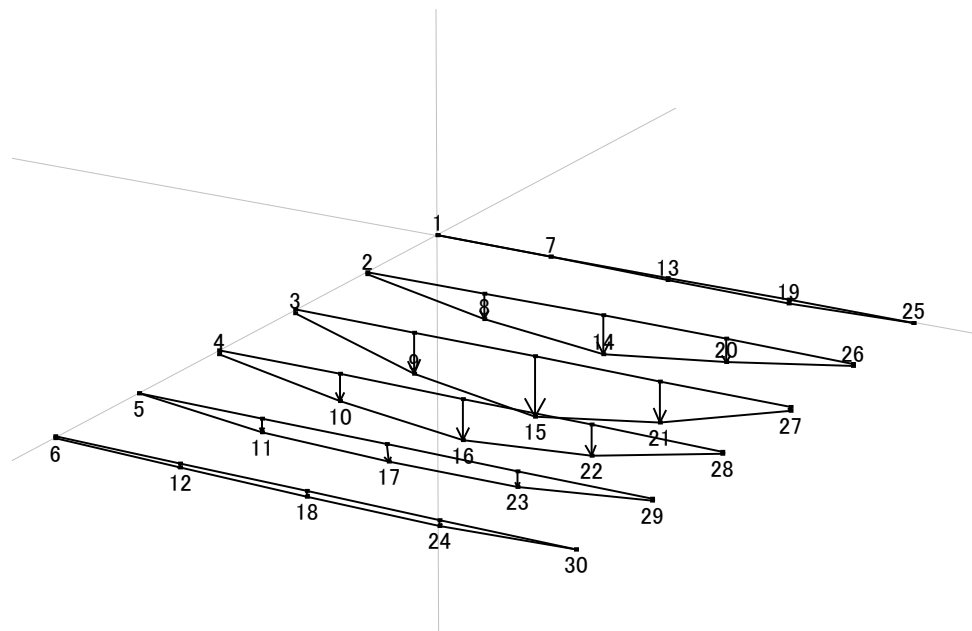


Fig.4.2b. Mode shape in primary natural frequency (9.48Hz) in a teaching room floor of elementary school B.

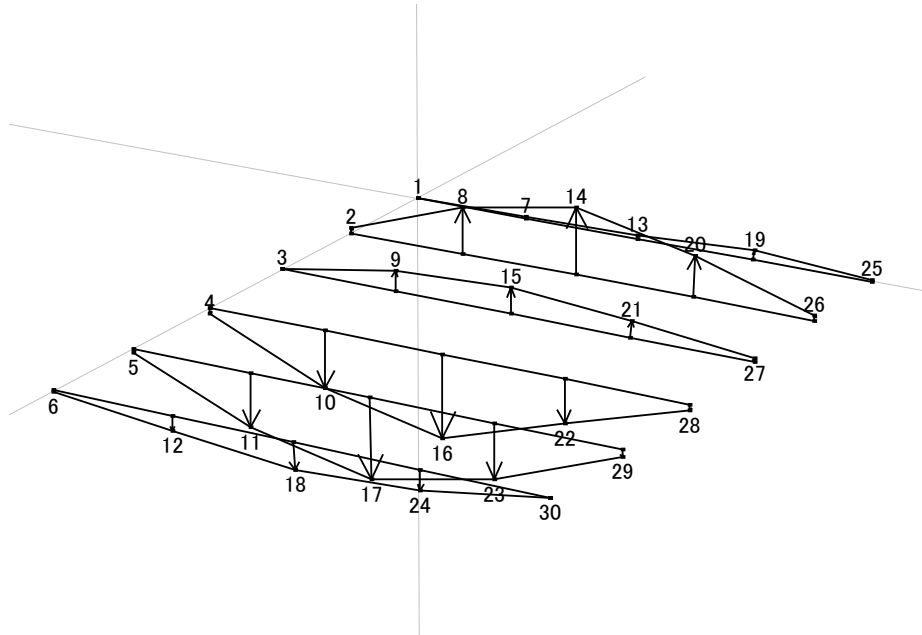


Fig.4.2c. Mode shape in secondary natural frequency (11.1Hz)
in a teaching room floor of elementary school B.

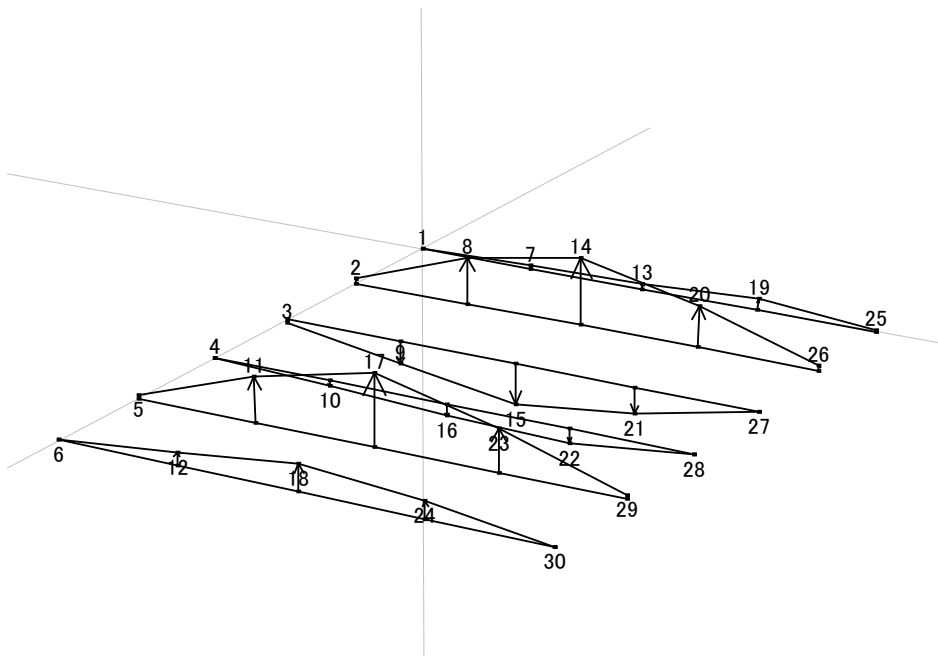


Fig.4.2d. Mode shape in tertiary natural frequency (15.1Hz)
in a teaching room floor of elementary school B.

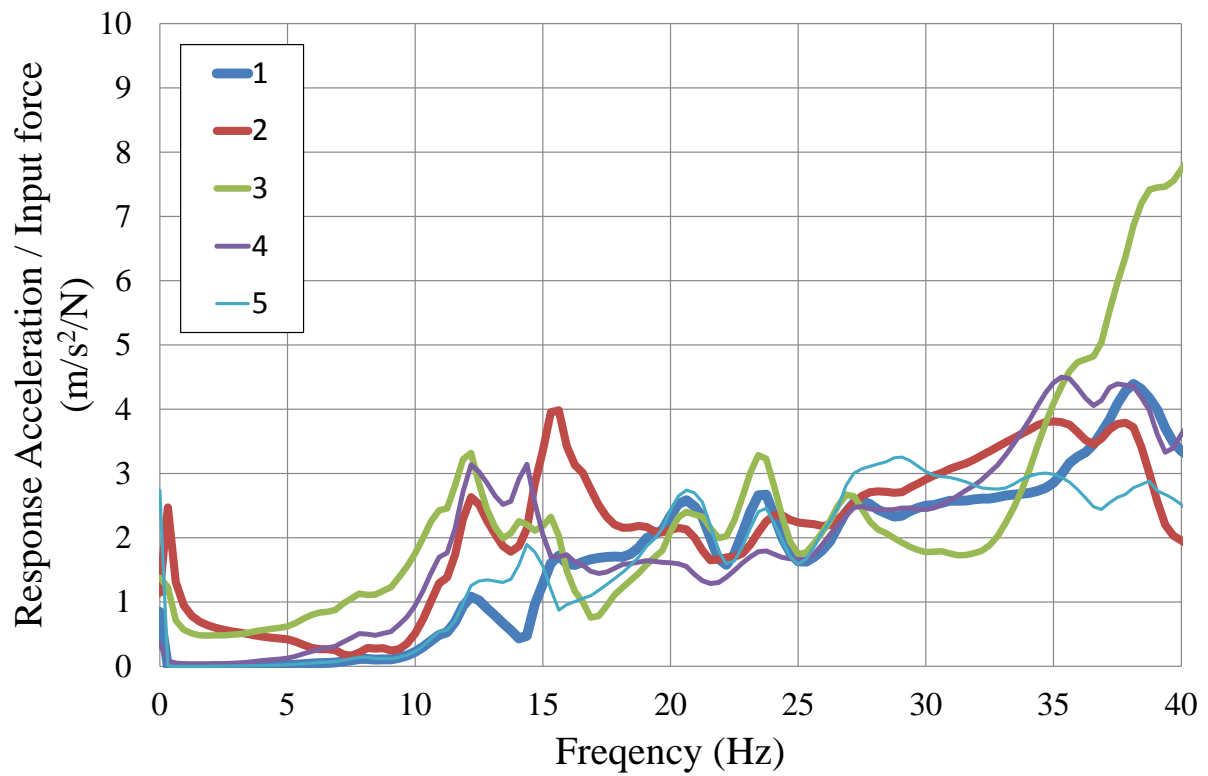


Fig.4.3a. Transfer function at the excitation point in a teaching room floor of elementary school C.

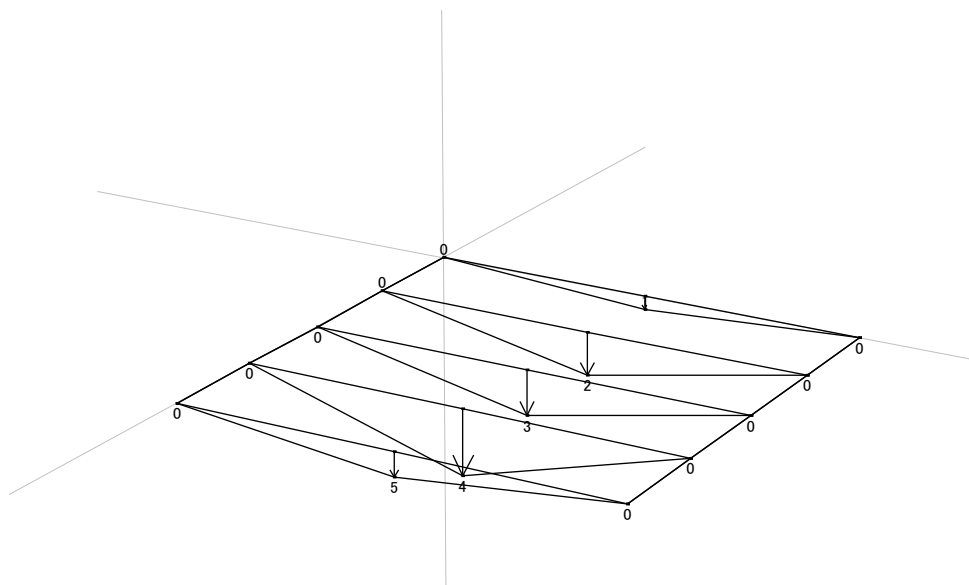


Fig.4.3b. Mode shape in primary natural frequency (12.1Hz) in a teaching room floor of elementary school C.

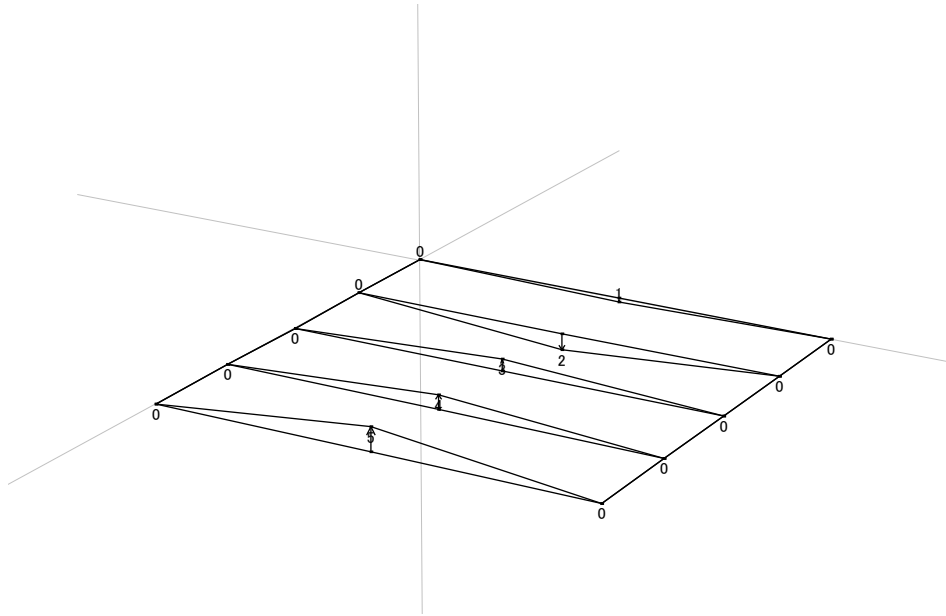


Fig.4.3c. Mode shape in secondary natural frequency (15.2 Hz)
in a teaching room floor of elementary school C.

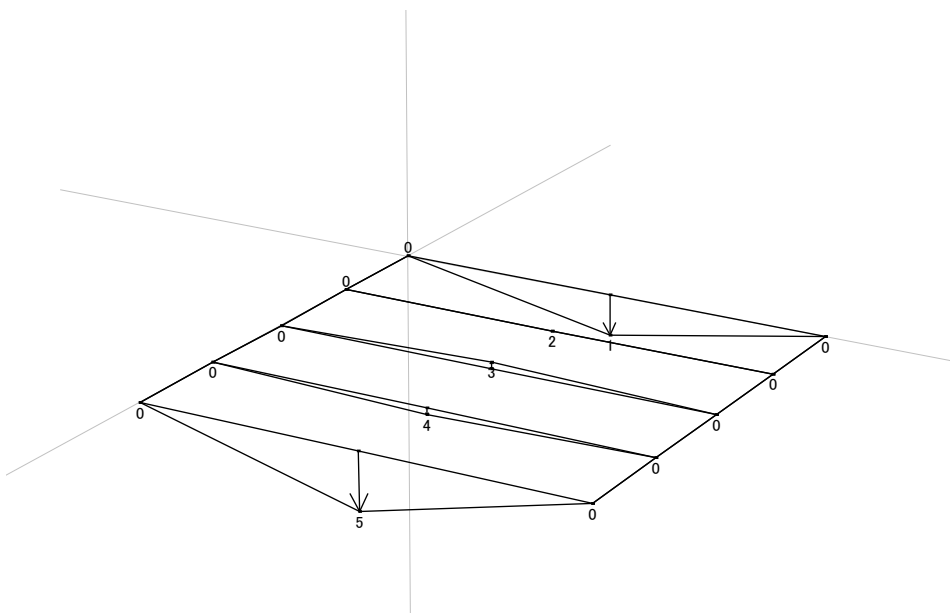


Fig.4.3d. Mode shape in tertiary natural frequency (21Hz)
in a teaching room floor of elementary school C.

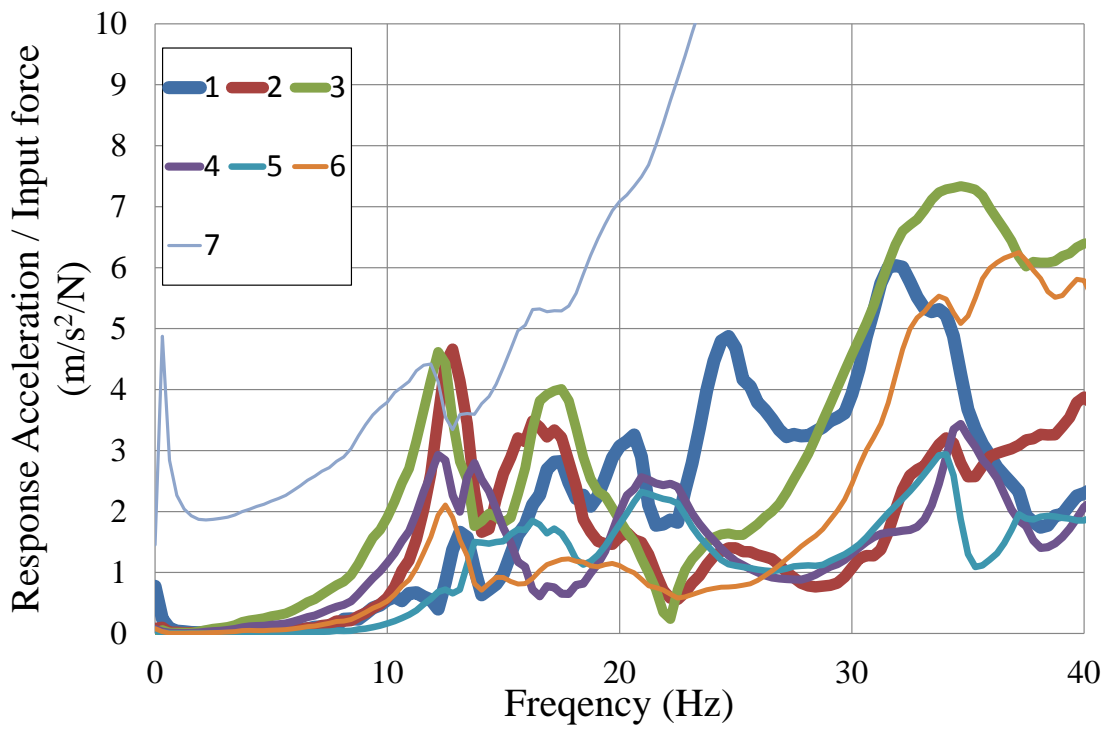


Fig.4.4a. Transfer function at the excitation point in a teaching room floor of elementary school D.

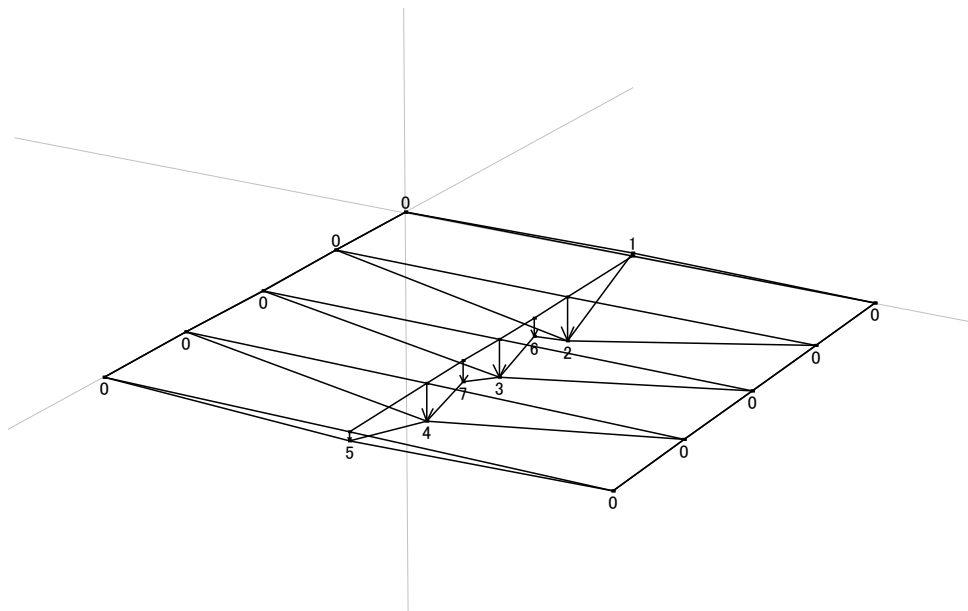


Fig.4.4b. Mode shape in primary natural frequency (12.5Hz) in a teaching room floor of elementary school D.

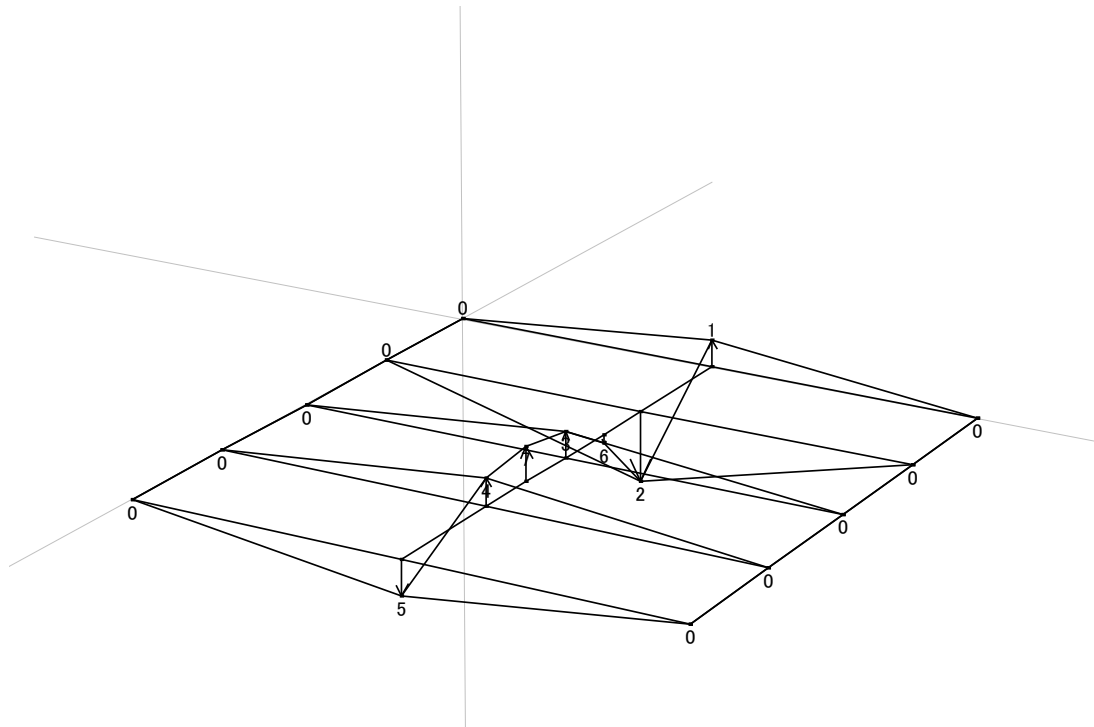


Fig.4.4c. Mode shape in secondary natural frequency (17.1Hz)
in a teaching room floor of elementary school D.

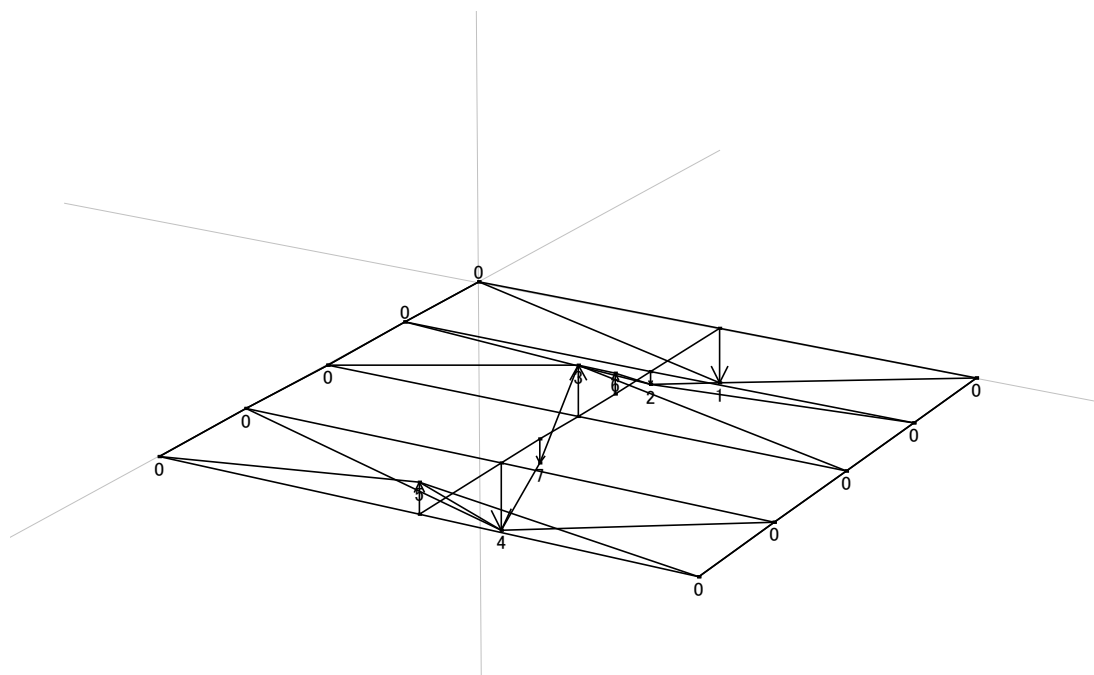


Fig.4.4d. Mode shape in tertiary natural frequency (24.5Hz)
in a teaching room floor of elementary school D.

E、F 事務所の床の加振源近傍に設置した加速度計による伝達関数を、伝達関数の例として Fig.5.1～Fig.5.2 に示した。

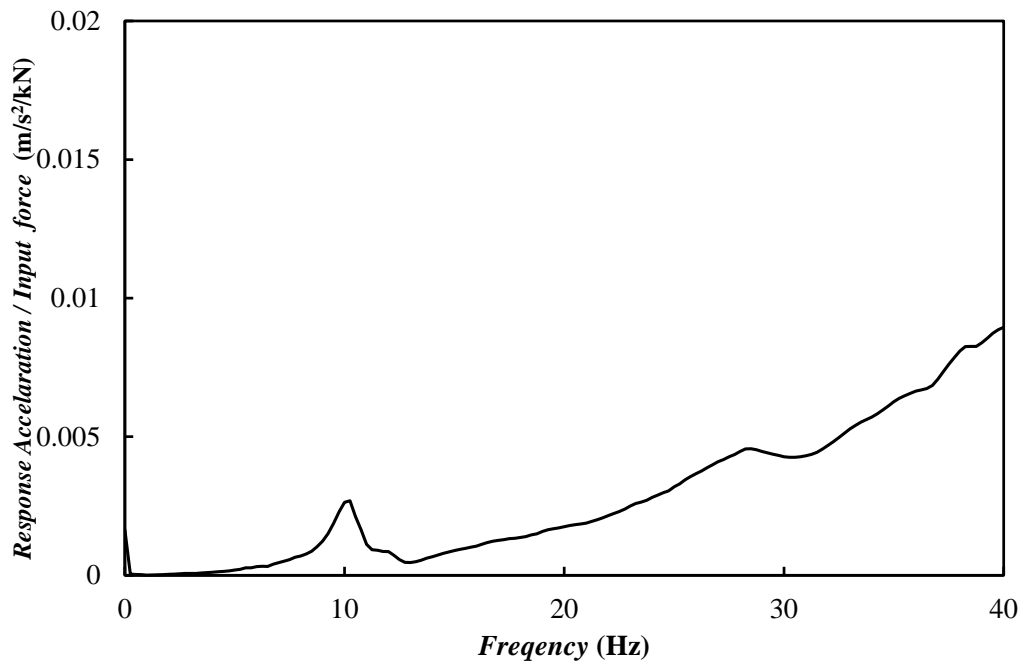


Fig.5.1. Transfer function at the excitation point in a teaching room floor of office E.

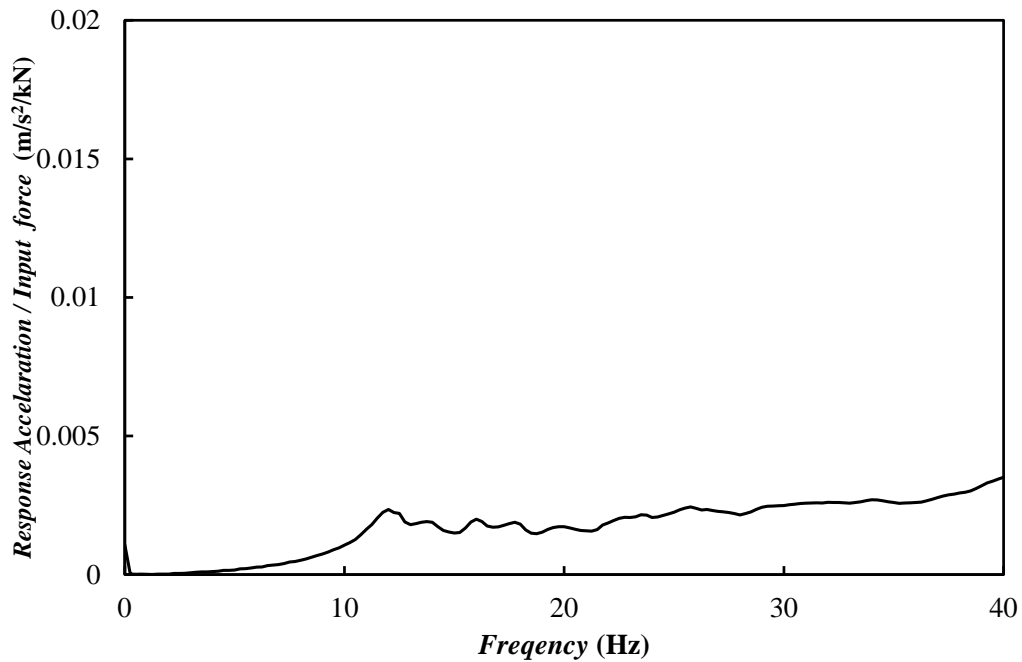


Fig.5.2. Transfer function at the excitation point in a teaching room floor of office F.

モーダル解析により求められる1次の固有振動数および減衰比を Table 4 に示した。

Table 4. Natural frequencies and damping ratios.

Building		A	B	C	D	E	F
Natural frequency	Experiment (f_{exp}) (Hz)	12.4	9.48	12.1	12.5	10.1	11.9
	Simply supported beam (f_{dgn}) (Hz)	11.2	8.7	10.7	9.4	9.3	9.8
	$f_{\text{exp}}/f_{\text{dgn}}$	1.10	1.10	1.13	1.32	1.09	1.21
Damping ratio (%)		3.76	3.14	5.46	4.37	4.59	6.45

(Note) Building A-F: See Table 1.

B 小学校の1次の固有振動数は9.48Hzと小さいが、他の小学校では概ね12~12.5Hzとなっており、事務所については10~12Hzである。既往の研究³⁴⁾によれば、モデル床ではあるがスパン4550~8190mmの範囲で1次の固有振動数は10.5~27.0Hzであり、本研究における値と同程度かそれよりも大きかった。文献³⁴⁾には、スパンと固有振動数との対応が記載されておらず、大きい固有振動数の床がどのような形状であるかはわからないが、この理由としては、モデル床であることや、床の仕上げや天井がないことが考えられる。

次に、梁の1次固有振動数に基づいた、床の1次固有振動数の推定について可能性を探った。境界条件を単純支持とした場合、梁の1次固有振動数は次式で計算できる。ただし、 w は単位長さ当たりの固定荷重(単位:N/mm)、 L は梁のスパン(単位:mm)、 EI は梁の剛性(単位:N・mm²)である。

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{w/9800}} \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

(2)式から算出した固有振動数についても Table 4 に示した。これを見ると、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固有振動数は実験値よりも10~30%小さいが、比較的精度よく推定できることがわかる。また、Table 4 には減衰比の値が3.1~6.5%と示してあるが、既往の研究では2.9~7.8%との報告⁴²⁾があり、同じような値となっていることがわかる。

2. 5 第2章のまとめ

4つの小学校と2つの木造事務所の試験対象床について、試験対象床を構成する床梁・平行弦トラスのたわみや曲げ剛性、床の固有振動数・減衰比を、実建物に組み込まれた状態で求めた結果、次の結論を得た。

- 1) 設計上の梁の初期たわみはスパンの約 $1/470 \sim 1/1100$ であり、木質構造設計規準のたわみ制限であるスパンの $1/300$ を下回っていた。建築基準法に基づいてクリープを考慮した床のたわみはスパンの約 $1/380 \sim 1/800$ 、木質構造設計規準に基づいてクリープを考慮したたわみはスパンの約 $1/310 \sim 1/660$ であり、いずれもたわみ制限（建築基準法ではスパンの $1/250$ 、木質構造設計規準ではスパンの $1/300$ ）を下回っていた。特に、事務所では設計値がたわみ制限の $28 \sim 48\%$ とかなり小さかった。
- 2) 梁の曲げ剛性の実験値は、設計値より $1.1 \sim 3.9$ 倍大きかった。特に、シンダーコンクリート仕上げをした事務所で大きく、床が一体化していることが影響しているものと思われる。
- 3) 実際の建築物における床の1次固有振動数の実測値は $9.5 \sim 12.5\text{Hz}$ であった。
- 4) 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固有振動数の実験値よりも $10 \sim 30\%$ 小さかったが、床の固有振動数を比較的精度よく推定できることがわかった。
- 5) 減衰比は $3.1 \sim 6.5\%$ で、既往の研究で示されている値と大きな違いはなかった。

第3章 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

3.1 はじめに

本研究では、木造大スパン床を対象とし、歩行振動の感覚評価に基づく構造設計が可能かどうかについて検討することを目的としているが、第2章ではその前段として、4つの小学校と2つの木造事務所の試験対象床について、試験対象床を構成する梁のたわみや曲げ剛性、床の固有振動数・減衰比を、実建物に組み込まれた状態で求めた結果について述べた。

本章では、4つの小学校と2つの木造事務所の試験対象床上を人が歩いたときの歩行振動に対する感覚評価と、試験対象床を構成する梁のたわみ制限や曲げ剛性、床の固有振動数との関係について検討を加える。具体的には、試験対象床の上を1人の成人男性が歩行した時の振動の応答加速度を測定し、それらの1/3オクターブバンド分析^{63,64)}を行い、日本建築学会の『建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説』に示される知覚確率³¹⁾を求めるとともに、歩行者の周辺にいた人に歩行振動をどう感じたかについてのアンケートに回答してもらった。アンケート結果を元に、歩行振動の観点からの目標性能を仮に設定し、それを達成するためのたわみ制限、固有振動数を示すことによって、歩行振動の感覚評価に基づく構造設計の可能性について考察する。

目標性能を「仮に」設定している理由は、歩行振動など環境振動を対象とした設計が性能設計¹³⁾であることによる。目標性能は、建築主や居住者の意向、設計者の裁量などによって建物ごとに異なる。ある一つの目標性能を設定したとしても、その目標性能はすべての建物について当てはまるわけではなく、あくまでも本研究で提案する限りにおいて有効であることから、「仮に」という用語を用いている。

これまで、歩行により発生する振動と人間の感覚評価との関係に関する研究は数多くなされている^{53-56,65}など)が、振動レベルや振動加速度レベル、変位振幅、応答加速度などの物理量と、心理学的尺度あるいは知覚率などの評価との関係について検討しているものが大半である。木造に着目すると住宅規模の研究は多い^{57,66}など)が、大スパン床に関する研究はそれほど多くない。大スパン床に関する研究には横山らの研究³²⁾⁻³⁴⁾がある。文献^{33,34)}では、モデル床を用いて複数歩連続した歩行時に発生する振動の性能値について検討を行い、剛性の比較的低い床では横山らの提唱する評価値であるSVI(2)が適用でき、剛性の比較的高い床ではSVI(2)が適用できず、日本建築学会の『建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説』に示される、鉛直荷重に対する性能評価曲線³¹⁾に基づいて振動数補正を施した補正振動加速度レベルおよび振動レベルの最大値が心理学的尺度とよい対応を示したことを明らかにした。西谷ら³²⁾は、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について検討し、一次固有振動数と床中央に0.98kN(100kgf)載荷した時のたわみ量がわかれば、歩行振動の評価を概略推定可能であることを示した。西谷らの研究³²⁾では、一次

固有振動数および床中央に 0.98kN 载荷した時のたわみと歩行振動の評価を結びつけてはいるものの、固有振動数およびたわみ制限と歩行振動の評価を結びつけた例はなく、本研究で取り組んだ所以である。

3. 2 対象とした小学校および事務所の概要

対象とした小学校および事務所の概要は第2章で述べたとおりである。A～Dは小学校であり、E、Fは事務所である。小学校はすべて軸組工法による木造建物で、D小学校のみ2階床梁に合わせ梁を用いている。また、事務所は枠組壁工法による木造建物で、トラスを2階床梁として用いている。校舎の基本的な床構造は同じであり、A、B、CおよびD小学校の測定対象とした床の平面形状は、それぞれ9100mm×7280mm、9100mm×7280mm、8181mm×7272mm、9090mm×8181mmである。床梁の間隔はA、Bでは1820mm、C、Dでは1818mmであり、床断面は構造用合板を下地に用い、単層フローリングを仕上げに用いている。EおよびF事務所の測定対象とした床の平面形状は、それぞれ12740mm×9100mm、19880mm×7280mmである。E事務所のトラスはピッチ455mmで、床はOAフロアであり、仕上げ材にはタイルカーペットが使われている。一方、F事務所のトラスは455mmピッチで、床にはシンダーコンクリート（厚さ38mm）が打設してあり、仕上げ材にはビニールタイルが使われている。

3. 3 歩行実験およびアンケート調査

小学校の床については、体重 617N の成人男性 1 名が歩行 (Photo 10) し、床の応答加速度をサンプリング周波数 1200Hz で測定した (Photo 11)。Fig.6.1、Fig.6.3、Fig.6.4 には A、C、D 小学校の床における歩行および加速度計の位置を示した。これらの図に示すように、A、C、D 小学校では試験対象床中央の梁上 (W1)、梁と梁との間 (W2) を梁間方向に歩いた。Fig.6.2 には B 小学校の床における歩行および加速度計の位置を示した。B 小学校では試験対象床中央に梁が存在しないため、試験対象床中央の梁と梁との間 (W3) のみ梁間方向に歩行した。

事務所の床については、体重 647N の成人男性 1 名が歩行し、床の応答加速度を小学校と同じサンプリング周波数で測定した。Fig.6.5 および Fig.6.6 には E および F 事務所の床における歩行および加速度計の位置を示した。これらの図に示すように、E および F 事務所では梁上 (W4)、梁と梁との間 (W5) および桁行方向 (W6) に歩いた。

測定に使用した加速度計はリオン株式会社製の PV-83C および PV-83A、振動レベル計は同社製の VM-51 および VM-53 である。

小学校ではいずれの歩行も 3 往復し、事務所では片道だけの歩行とした。加速度計ごとに歩行に対する応答加速度を測定するとともに、その歩行に対するアンケート調査を行った。アンケート回答者は 7~10 名の成人男子 (22~57 歳) で、Fig.6.1~6.6 の△印の位置 (歩行の動線から比較的離れた任意の位置) において回答した。

アンケート調査では、回答者に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てもらった。一つは、1) 感じない (unnoticed)、2) 全く気にならない (not disturbed at all)、3) それほど気にならない (not so disturbed)、4) 多少気になる (moderately disturbed)、5) だいぶ気になる (very disturbed)、6) 非常に気になる (extremely disturbed)、の 6 段階であり、本報では「気になり尺度」(disturbed criterion) と呼ぶ。もう一つは、1) 感じない (unnoticed)、2) 我慢できる (definitely tolerable)、3) どちらかといえば我慢できる (tolerable)、4) どちらともいえない (undecided)、5) どちらかといえば我慢できない (little tolerable)、6) 我慢できない (intolerable)、の 6 段階であり、「我慢尺度」(tolerable criterion) と呼ぶ。使用したアンケート回答用紙を Table 5 に示す。



Photo 10. Picture of walking.



Photo 11. Picture of acceleration meters.

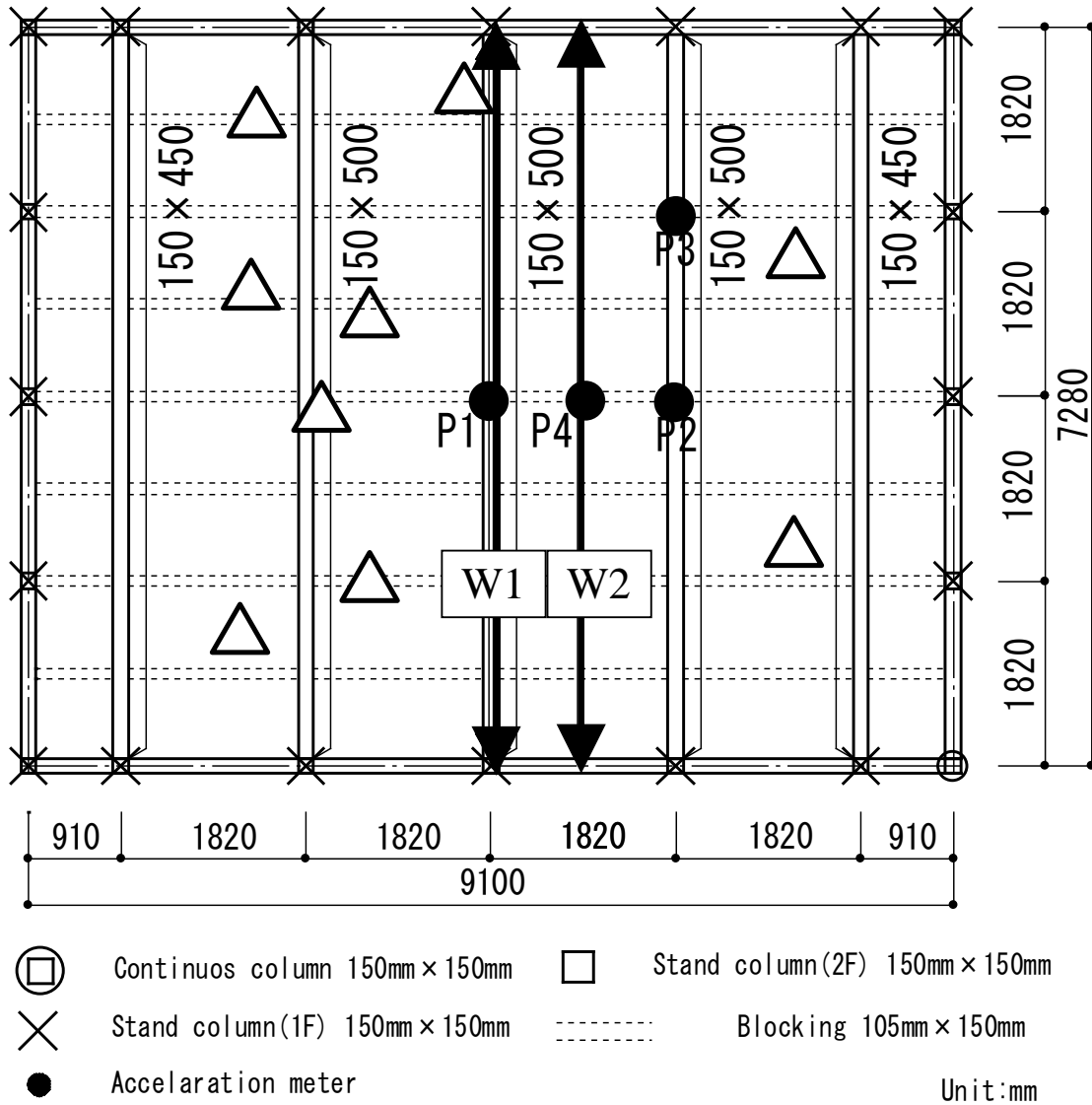


Fig.6.1. Walking direction, location of acceleration meters and respondents in a measured room of elementary school A.

Notes: W1, W2: walking direction, ●: acceleration meter, Δ: respondent for questionnaires

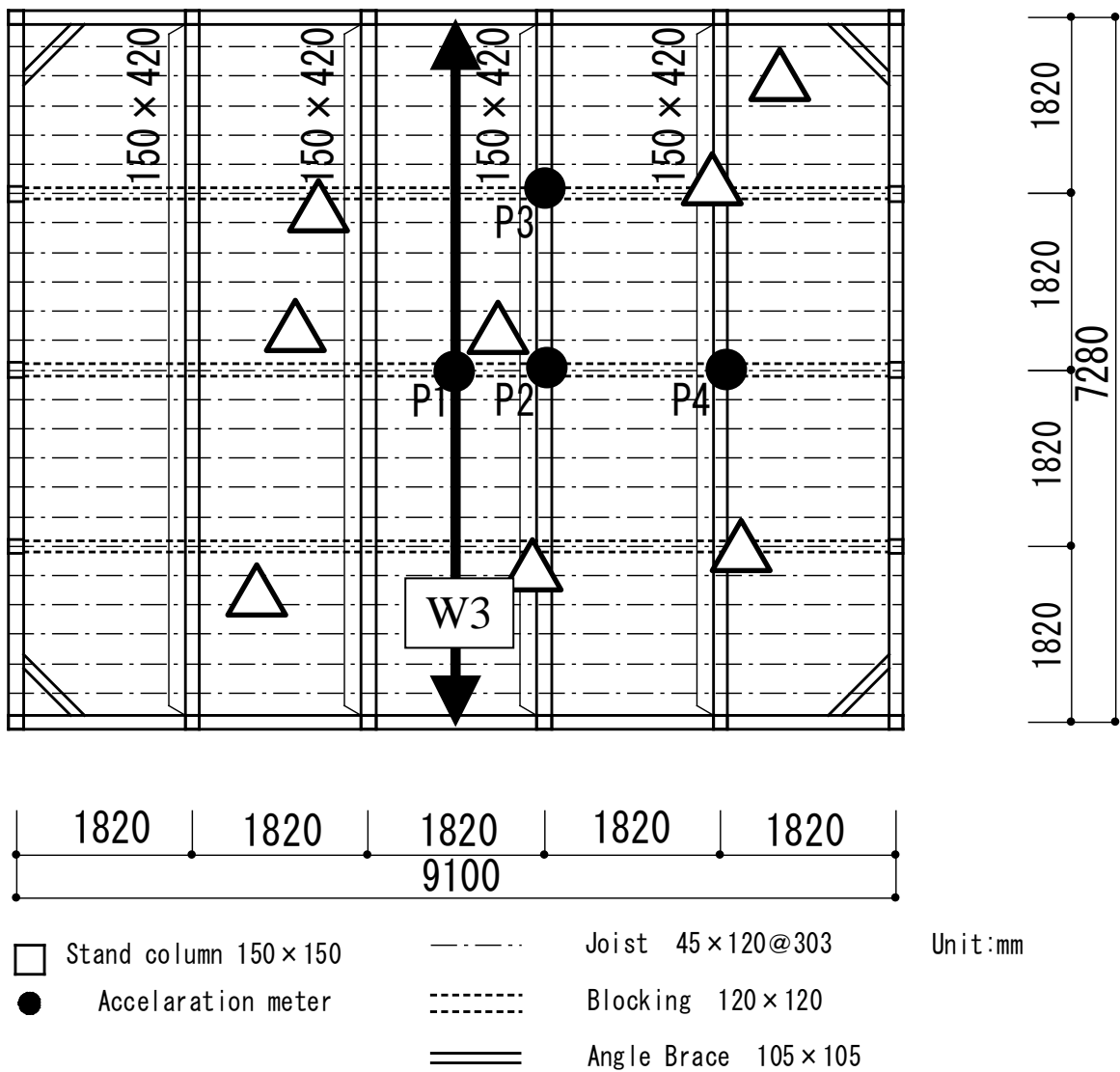


Fig.6.2. Walking direction, location of acceleration meters and respondents in a measured room of elementary school B.

Notes: W3: walking direction, ●: acceleration meter, Δ: respondent for questionnaires

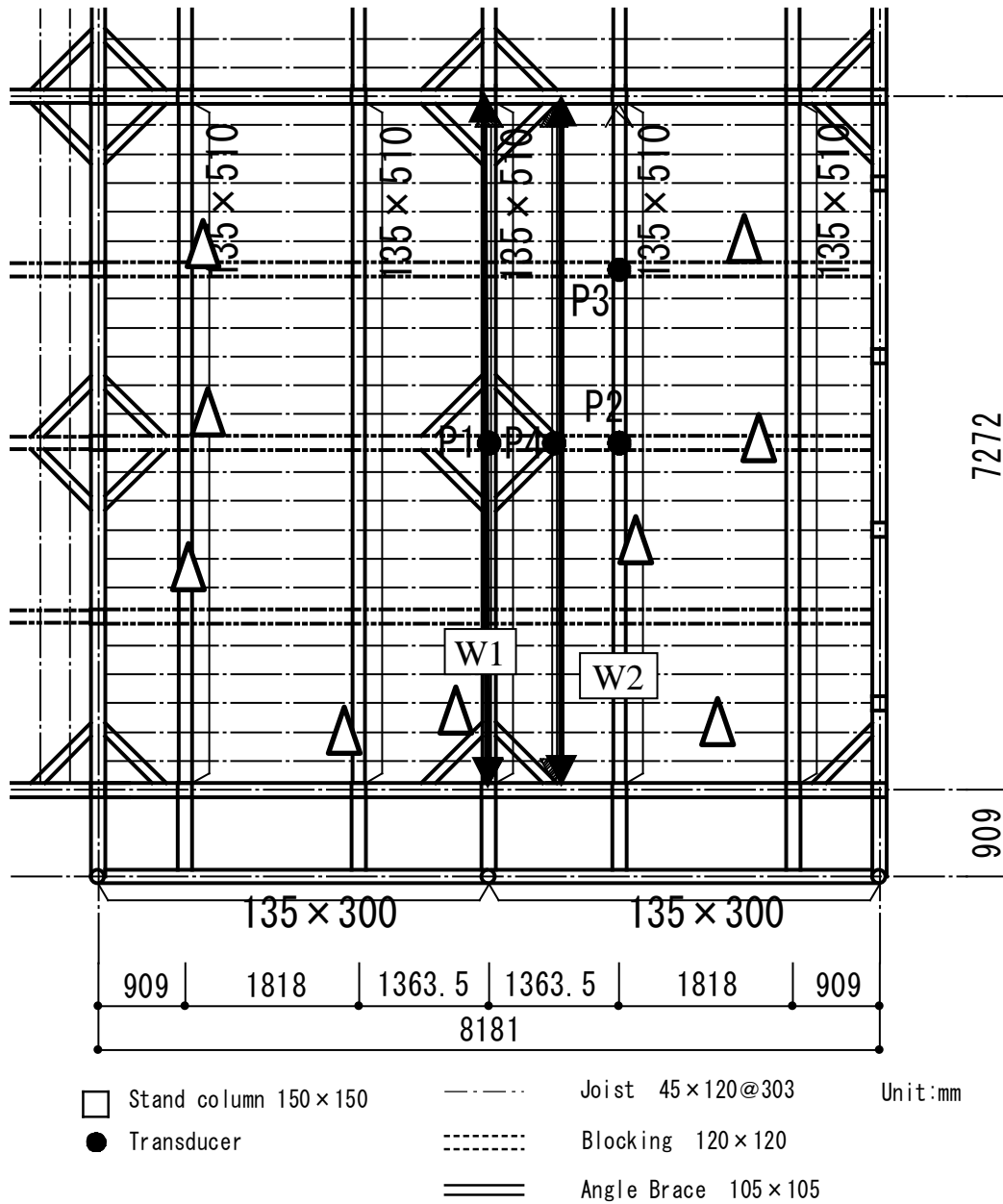


Fig.6.3. Walking direction, location of acceleration meters and respondents in a measured room of elementary school C.

Notes: W1,W2: walking direction, ●: acceleration meter, Δ: respondent for questionnaires

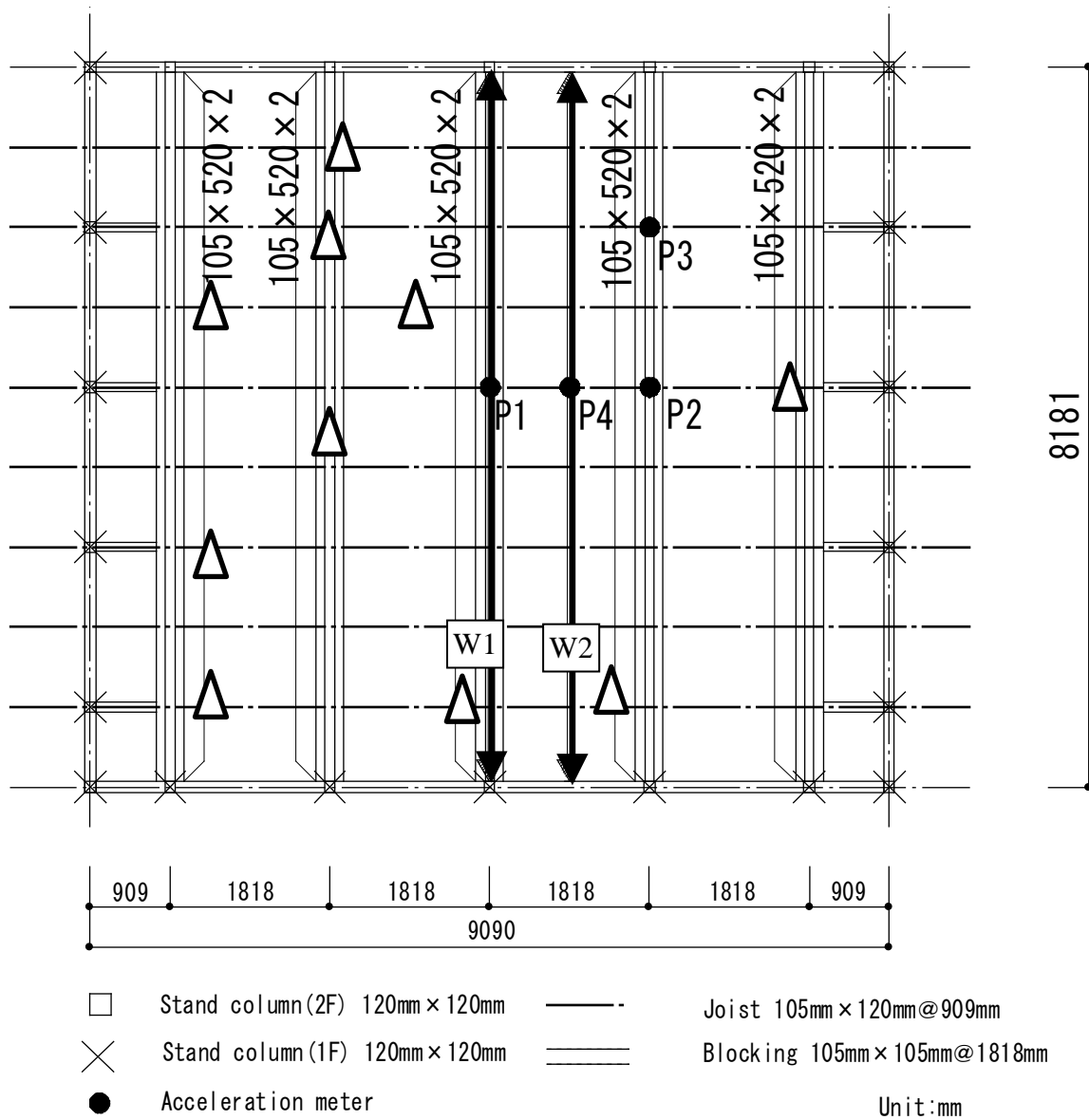


Fig.6.4. Walking direction, location of acceleration meters and respondents in a measured room of elementary school D.

Notes: W1,W2: walking direction, ●: acceleration meter, Δ: respondent for questionnaires

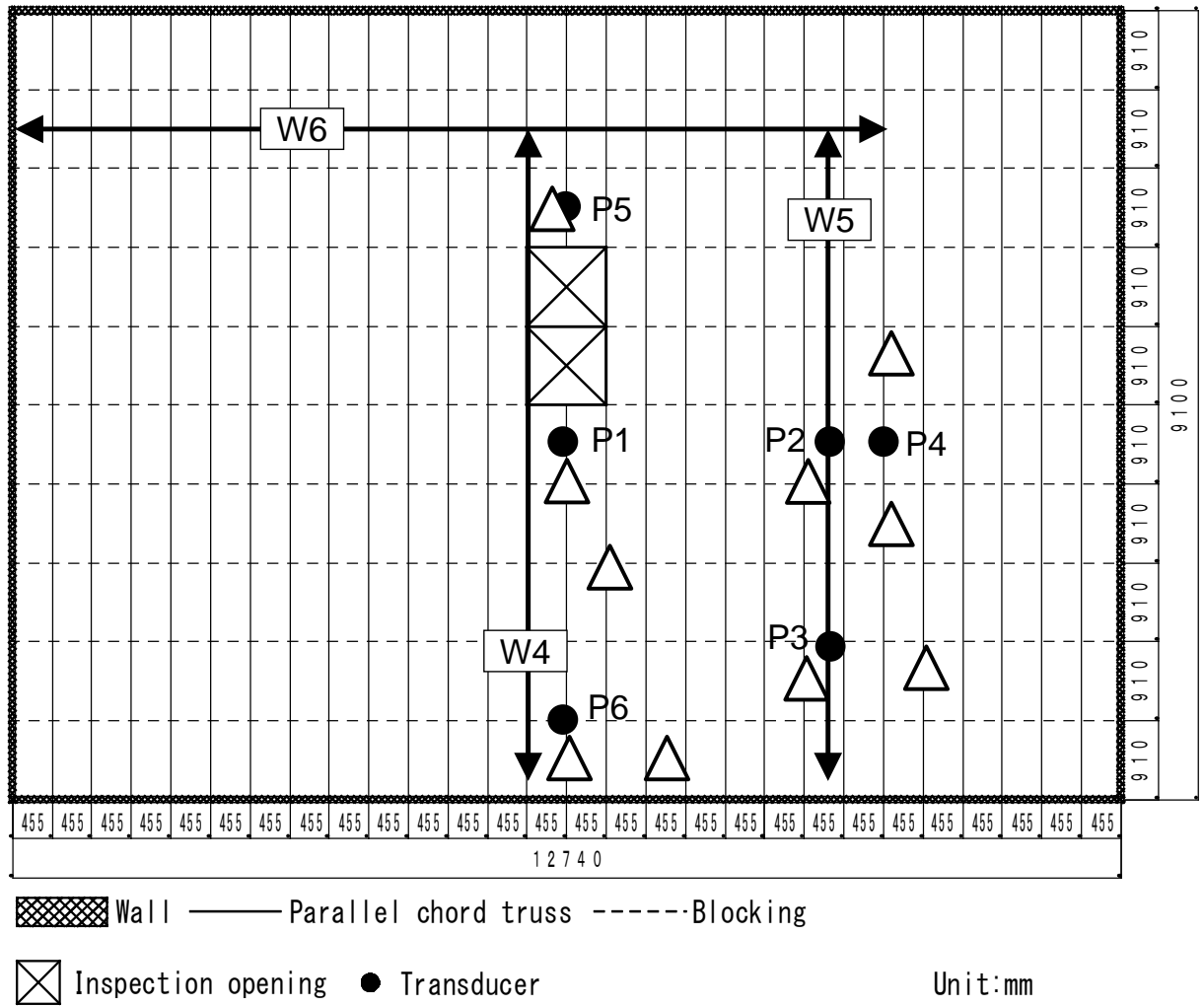


Fig.6.5. Walking direction, location of acceleration meters and respondents in a measured room of office E.

Notes: W4, W5, W6: walking direction, ●: acceleration meter, Δ: respondent for questionnaires

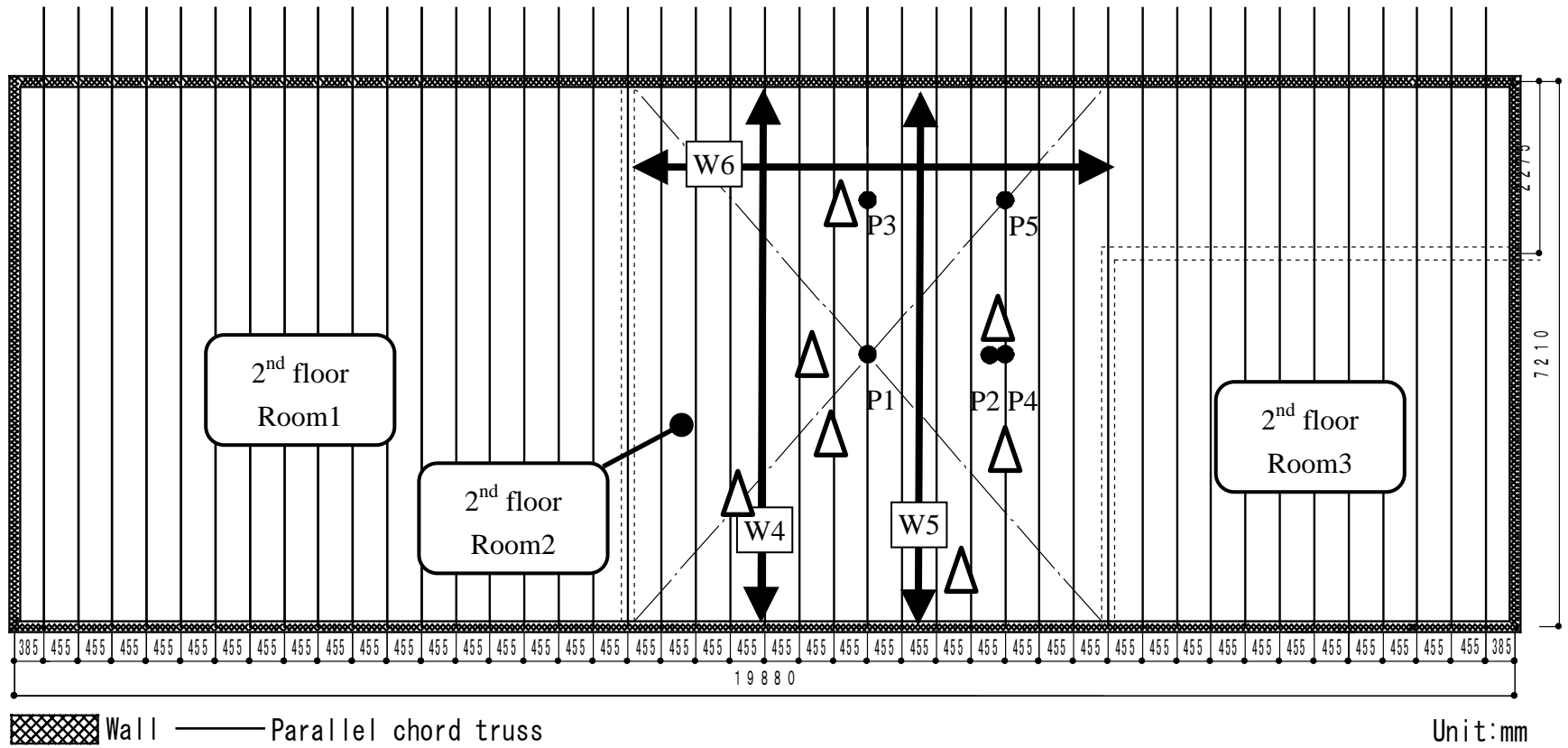


Fig.6.6. Walking direction, location of acceleration meters and respondents in a measured room of office F.

Notes: W4, W5, W6: walking direction, ●: acceleration meter, Δ: respondent for questionnaires

Table 5. Questionnaire

氏名:							
ケース	振動をどのように感じるか						備考
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		
～	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	
	2)がまんできる	3)どちらかといえぼがまんできる	4)どちらともいえない	5)どちらかといえぼがまんできない	6)がまんできない		

3. 4 解析の手順

Fig.9 に例として、D 小学校の床における W1 歩行時の片道の加速度計 P1 および P3 の応答加速度波形を示した。歩行の位置から離れると、応答加速度が小さくなっていることがわかる。

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。文献³¹⁾に示されているように、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。

1/3 オクターブバンド分析は音響や騒音の分野で用いられる分析方法であるが、元々振動は騒音とともに公害問題として取り上げられてきた経緯から、振動の分野でもよく用いられる分析方法である⁶³⁾。オクターブとは 2 倍の周波数間隔を示す。1/3 オクターブの場合は $2^{\frac{1}{3}}$ 倍が周波数間隔になる。1/3 オクターブバンドの中心周波数を f_m 、下限周波数を f_1 、上限周波数を f_2 、バンド幅を B とすると、次の関係がある⁶⁴⁾。

$$f_2 = \sqrt[3]{2} \cdot f_1 = 1.2599 f_1 \quad (\text{Hz})$$

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \sqrt[6]{2} \cdot f_1 = 1.1225 f_1 = \frac{f_2}{1.1225} \quad (\text{Hz})$$

$$B = (f_2 - f_1) \approx 0.23 f_m \quad (\text{Hz})$$

1/3 オクターブバンド中心周波数 2.5~31.5Hz における下限周波数と上限周波数を Table 6 に示す。人の動作・設備による鉛直振動を扱う場合、対象とする周波数範囲は 3~30Hz³¹⁾ とされているので、Table 6 に示すように 1/3 オクターブバンド中心周波数が 3.15~31.5Hz の範囲を分析に用いた。

1/3 オクターブバンド分析は、1/3 オクターブごとに並ぶバンドパスフィルタを用いて、その出力信号の 2 乗平均値（実効値）を求め、その結果を周波数ごとに出力するものである⁶³⁾。

f_m (Hz)	2.5	3.15	4	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5
f_1 (Hz)	2.24	2.8	3.55	4.5	5.6	7.1	9	11.2	14	18	22.4	28
f_2 (Hz)	2.8	3.55	4.5	5.6	7.1	9	11.2	14	18	22.4	28	35.5

Notes: f_m : 1/3 octave band mean frequency, f_1 : lower frequency, f_2 : upper frequency

Table 6. 1/3 octave band mean frequency

Fig.8.1a～Fig.8.6c に、A～F の建物を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を示した。これらの図には V-10～V-90 の曲線が示されているが、これは性能評価曲線と呼ばれ、知覚確率を表している³¹⁾。

知覚確率 50% の評価曲線の加速度値は 3～8Hz で 2cm/s^2 、8～30Hz で $0.25f\text{cm/s}^2$ (f : 周波数) と設定されている。知覚確率の分布は対数正規分布に従うと仮定し、変動係数を 80% として何% の知覚確率になるかを設定している⁶⁷⁾。

例えば周波数 10Hz のとき、応答加速度が 6cm/s^2 であるならば、このプロットは V-90 の性能評価曲線上にあり、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、Fig.8.1a～Fig.8.6c 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、それらの中の最大値 Pp_{max} を算出した。例えば Fig.8.4b の P1 の場合には 1/3 オクターブバンド中心周波数 12.5Hz の知覚確率が最大となり Pp_{max} は 93.4% と算出され、P3 の場合も 1/3 オクターブバンド中心周波数 12.5Hz の知覚確率が最大となり Pp_{max} は 66.5% と算出される。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。

Fig.9.1a～Fig.9.6c に、A～F の建物の歩行時のアンケート結果を示す。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 (unnoticed) 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」および「我慢尺度」における 1)+2)+3) の割合を求めた。

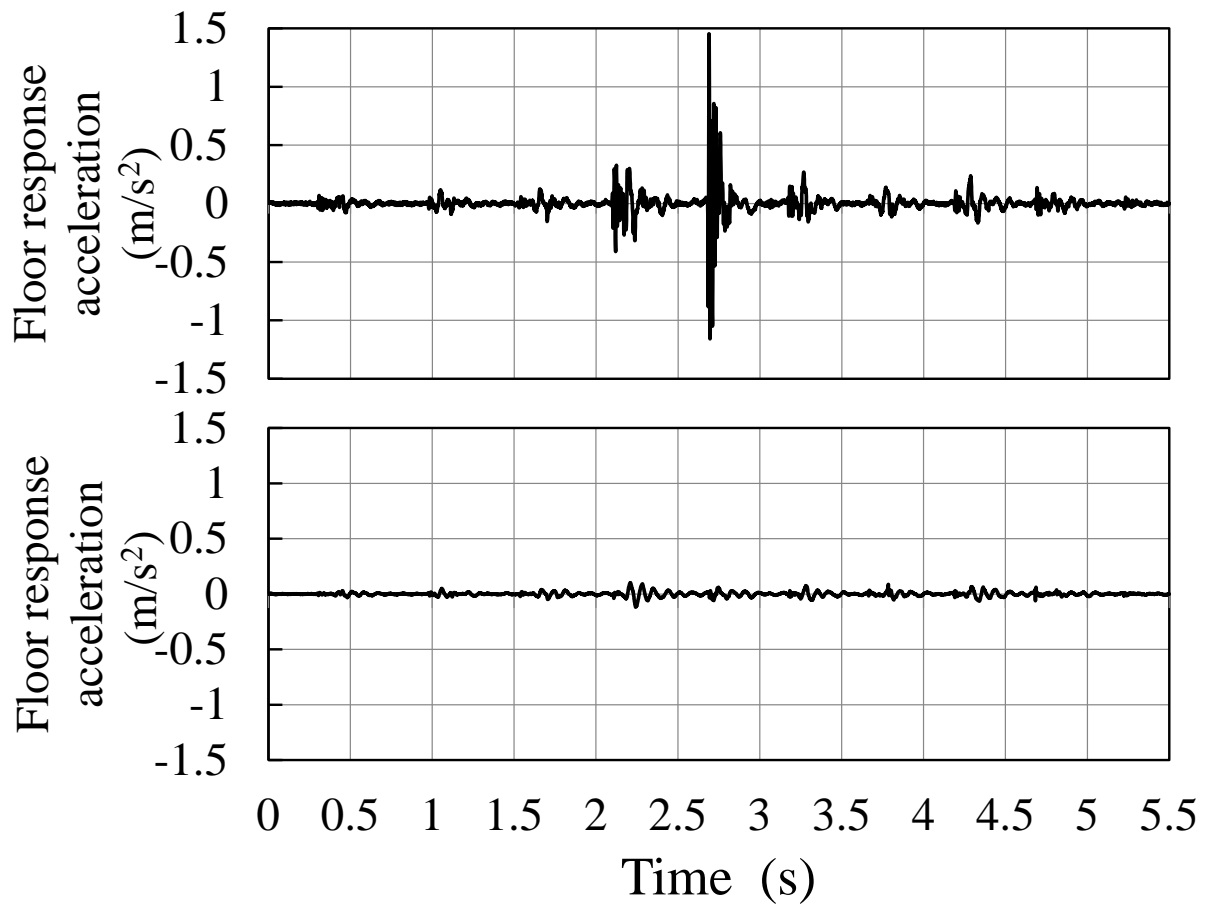


Fig.7. Examples of response acceleration waves induced by W1 walking on the floor in elementary school D.

Notes: the upper graph: wave at P1 point, the lower graph: wave at P3 point

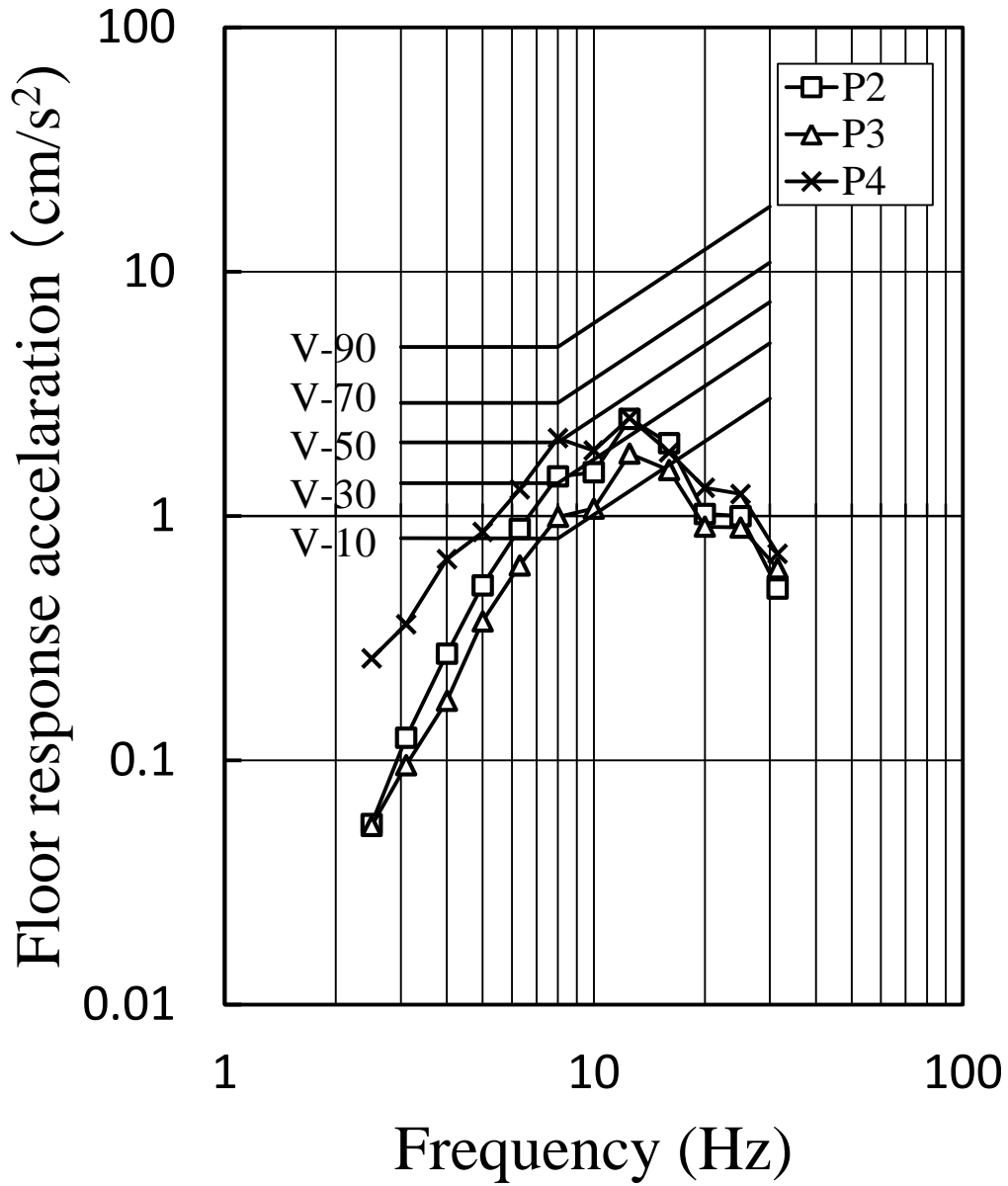


Fig.8.1a. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W1 walking on the floor in elementary school A.

Notes: P2-P4:see Fig.6.1, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

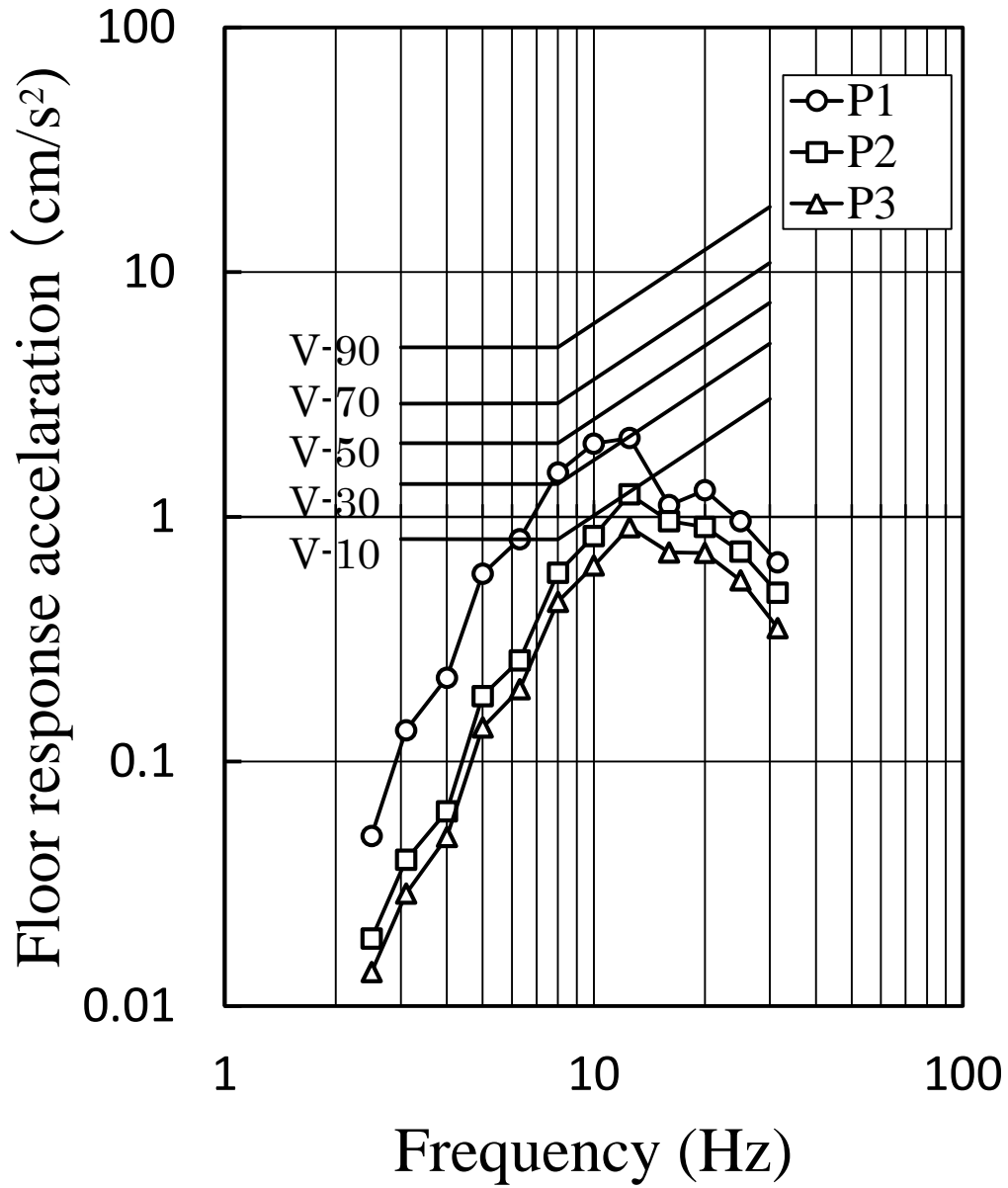


Fig.8.1b. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W2 walking on the floor in elementary school A.

Notes: P1-P3:see Fig.6.1, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

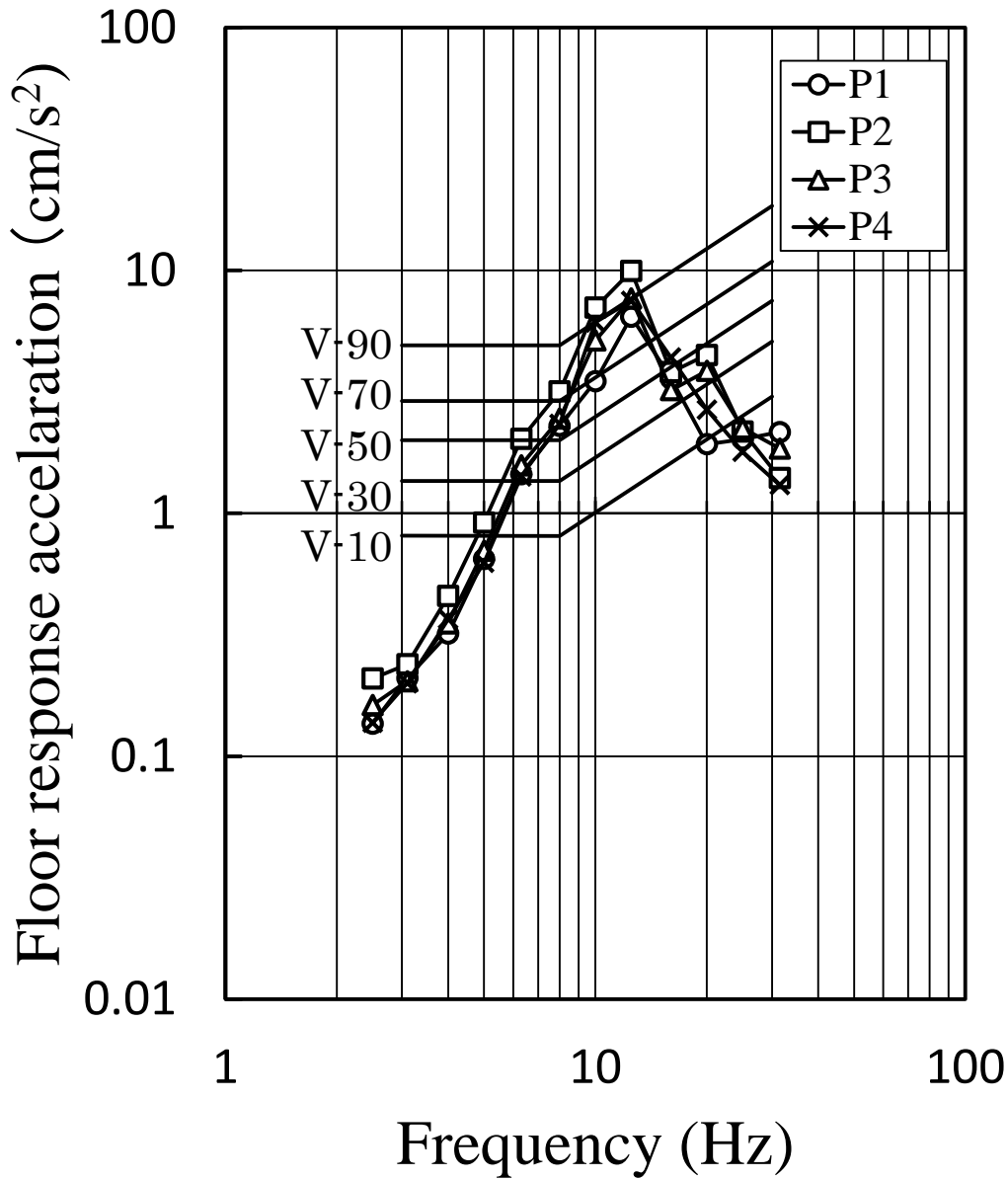


Fig.8.2. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W3 walking on the floor in elementary school B.

Notes: P1-P4:see Fig.6.2, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

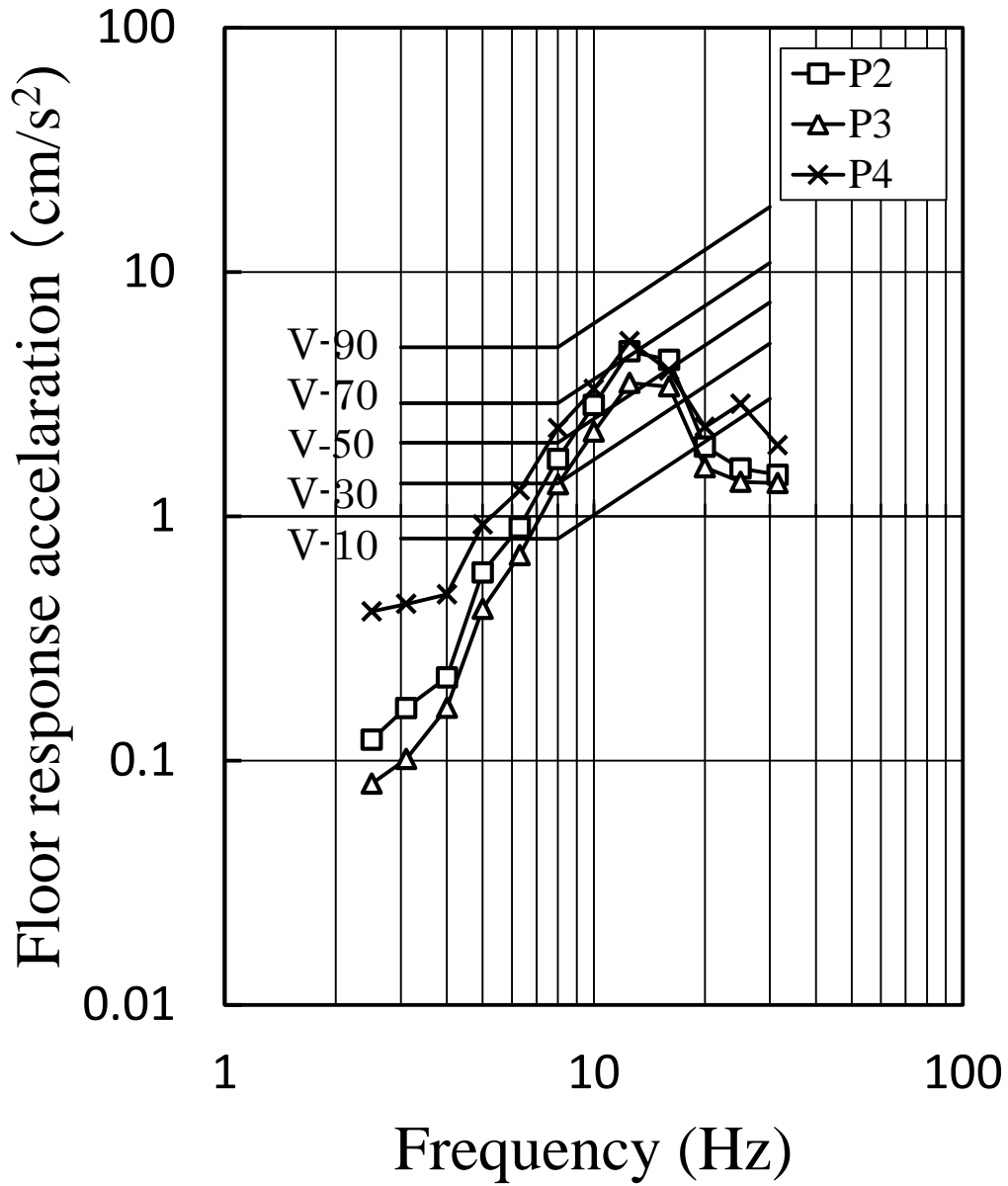


Fig.8.3a. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W1 walking on the floor in elementary school C.

Notes: P2-P4:see Fig.6.3, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

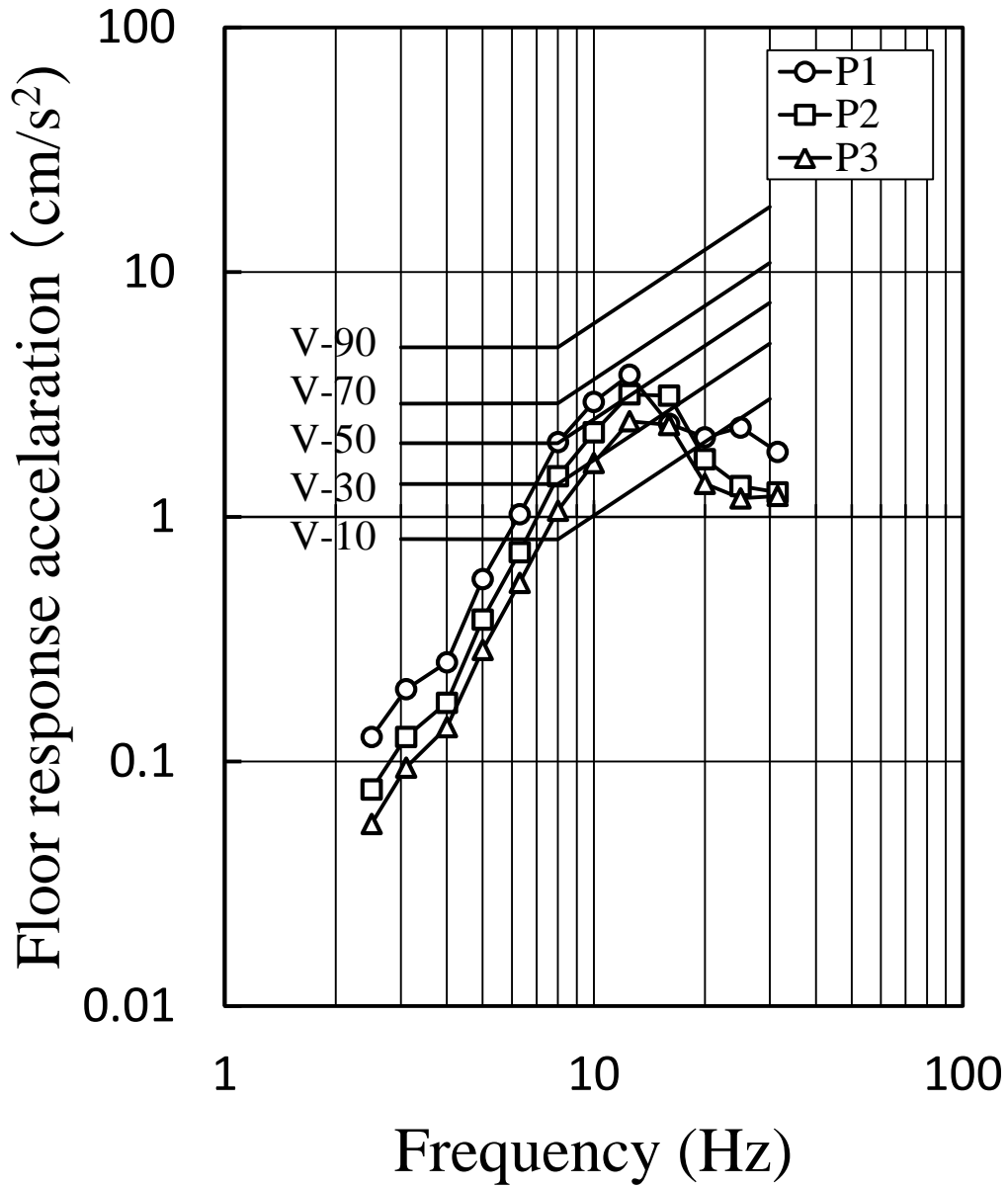


Fig.8.3b. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W2 walking on the floor in elementary school C.

Notes: P1-P3:see Fig.6.3, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

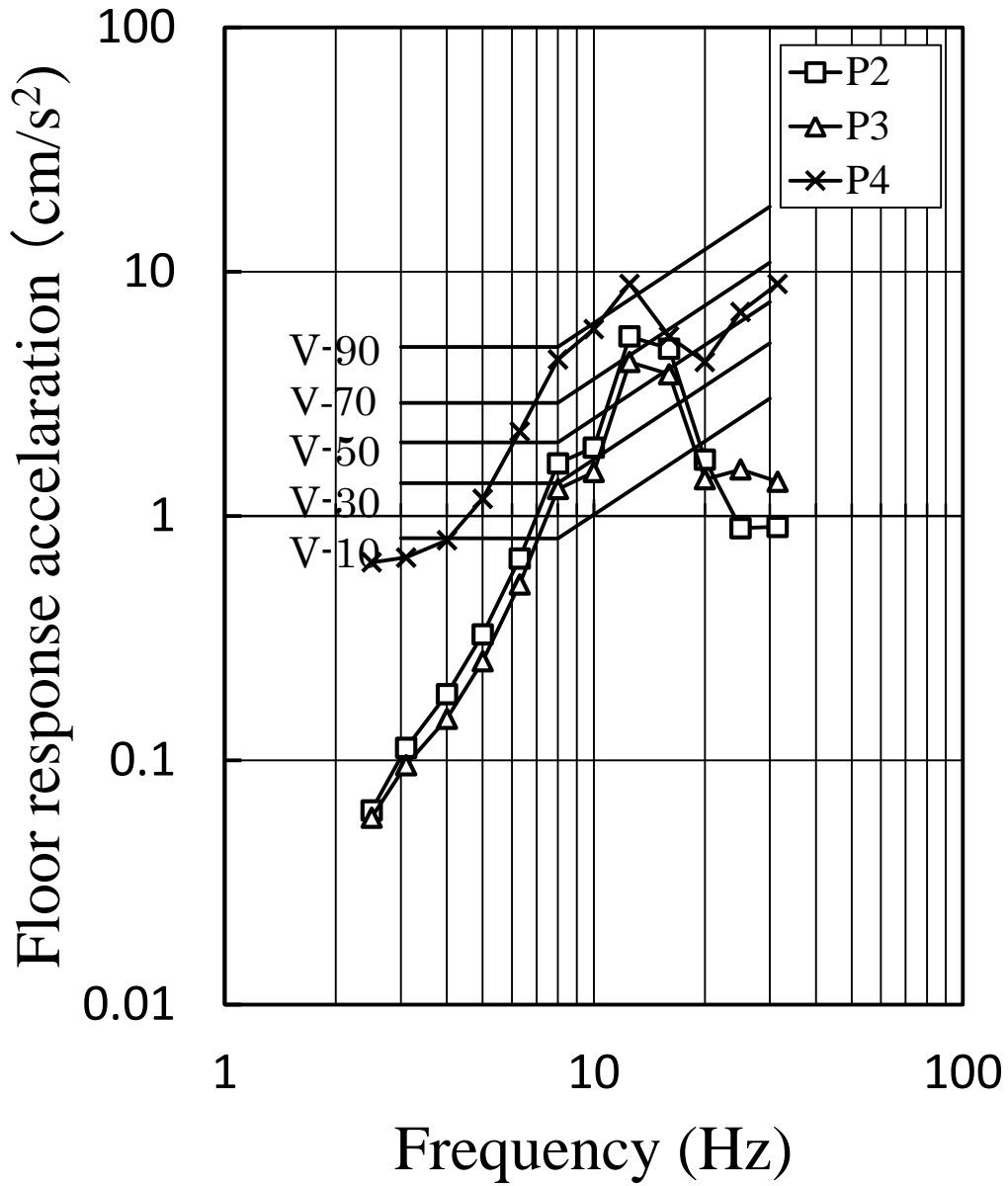


Fig.8.4a. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W1 walking on the floor in elementary school D.

Notes: P2-P4:see Fig.6.4, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

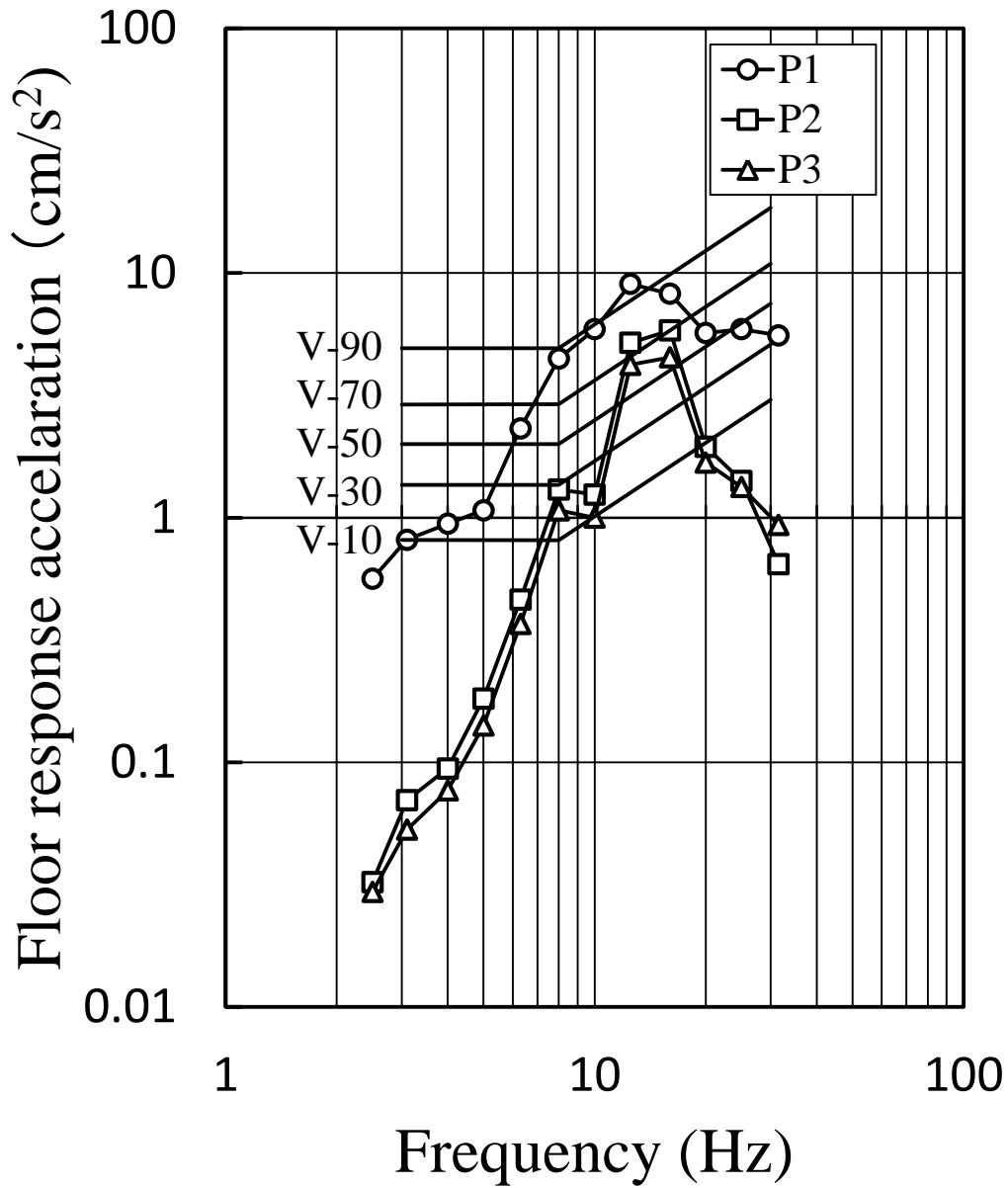


Fig.8.4b. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W2 walking on the floor in elementary school D.

Notes: P1-P3:see Fig.6.4, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

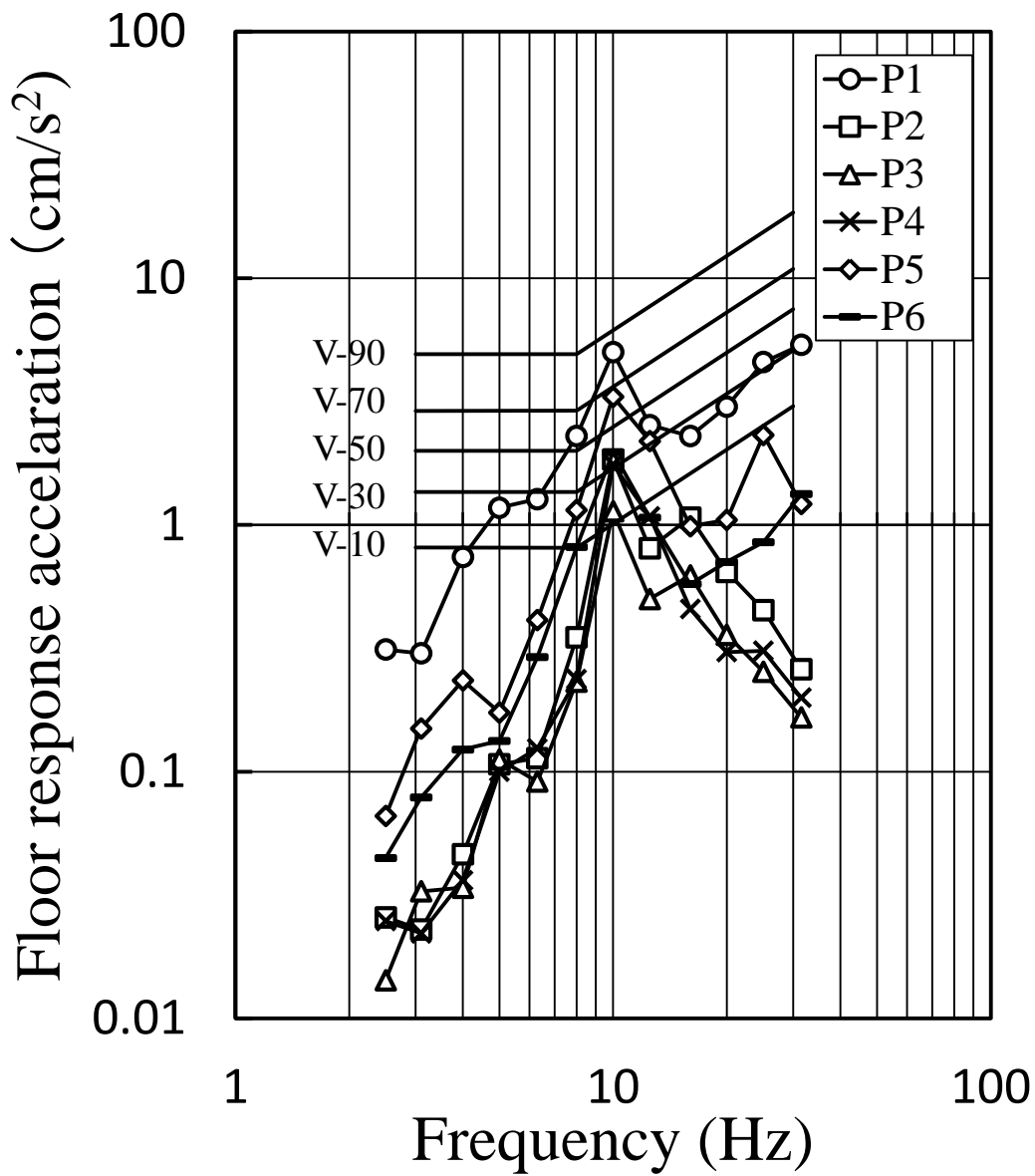


Fig.8.5a. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W4 walking on the floor in office E.

Notes: P1-P6:see Fig.6.5, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

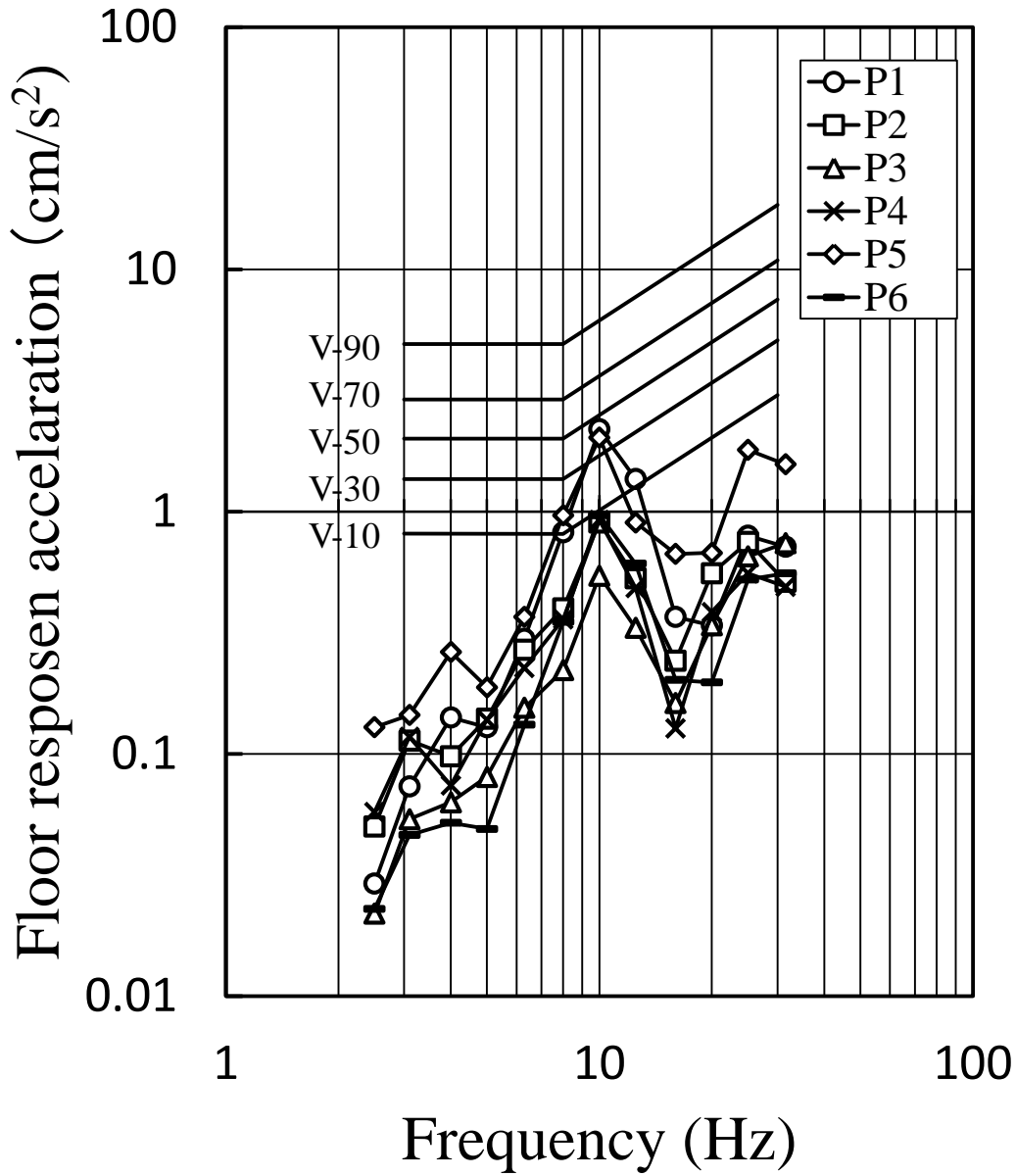


Fig.8.5b. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W5 walking on the floor in office E.

Notes: P1-P6:see Fig.6.5, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

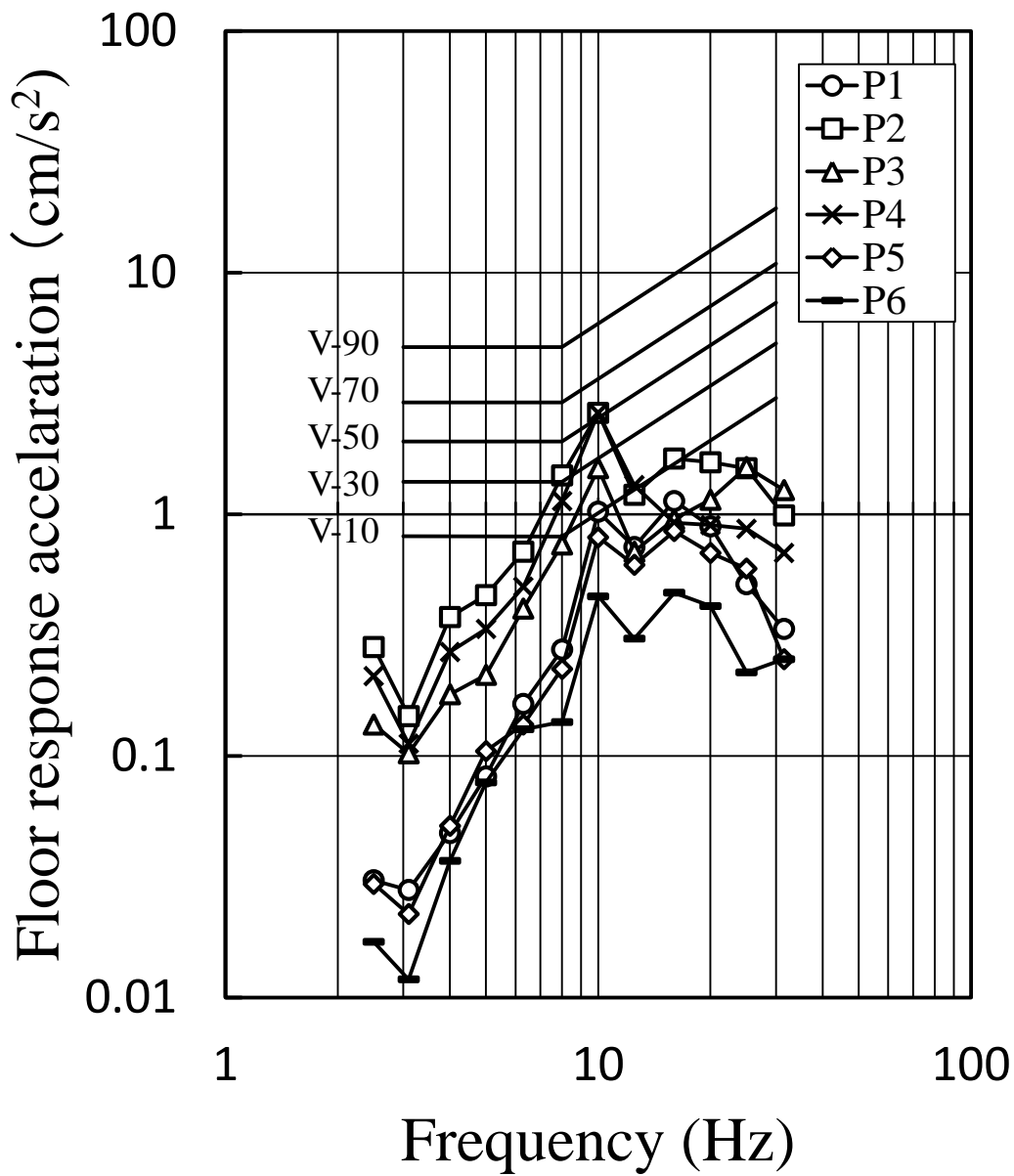


Fig.8.5c. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W6 walking on the floor in office E.

Notes: P1-P6:see Fig.6.5, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

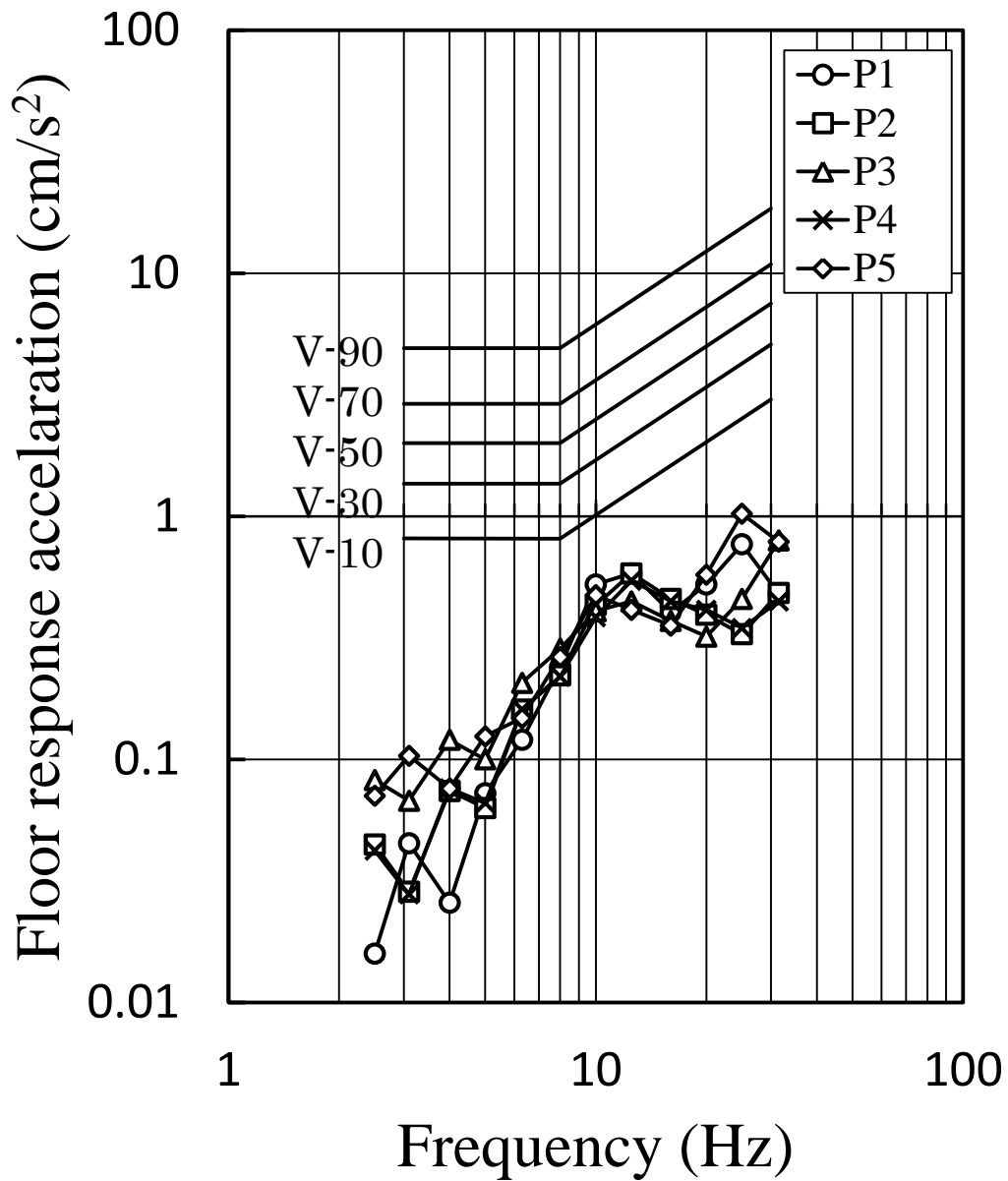


Fig.8.6a. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W4 walking on the floor in office F.

Notes: P1-P5:see Fig.6.6, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

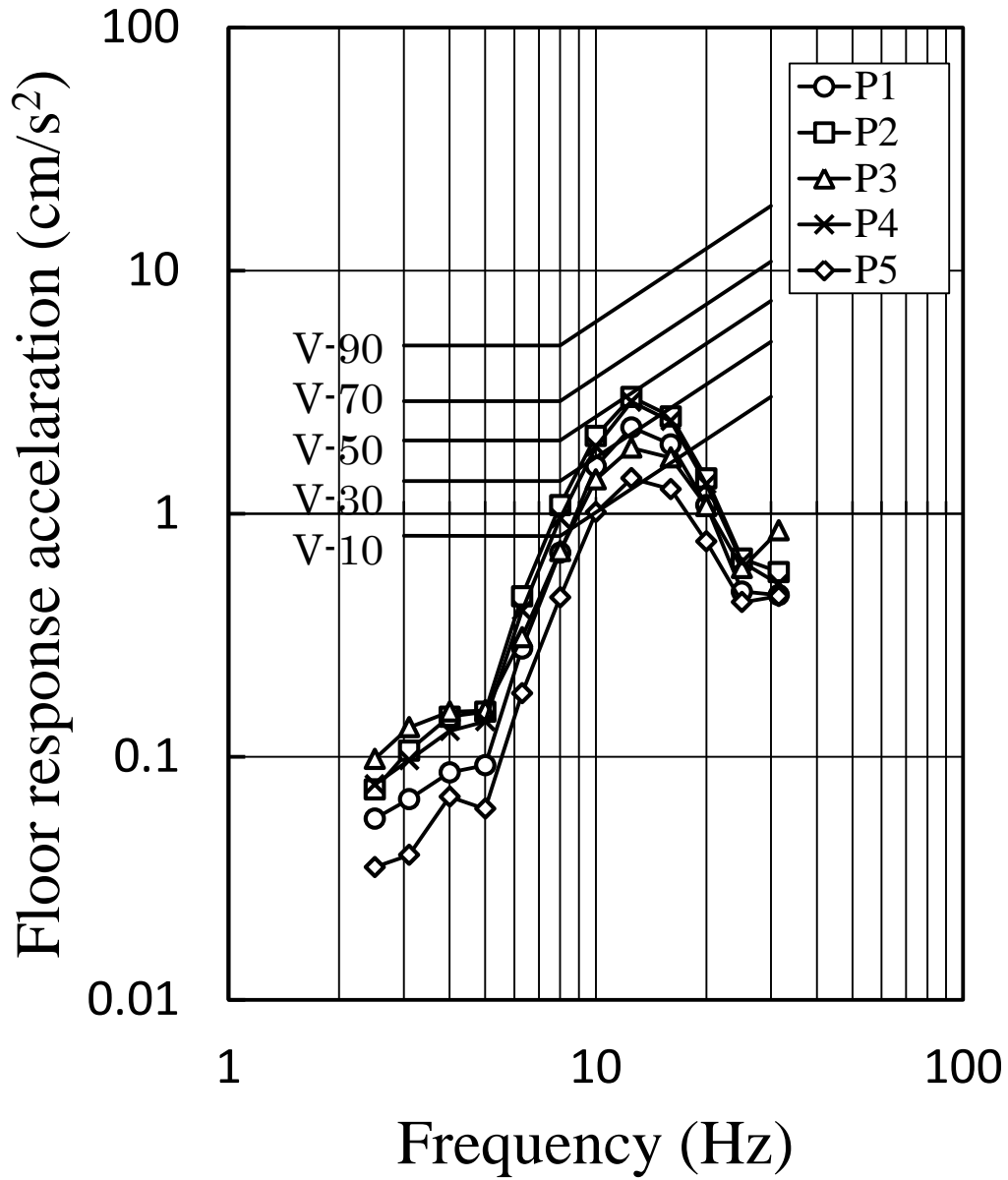


Fig.8.6b. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W5 walking on the floor in office F.

Notes: P1-P5:see Fig.6.6, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

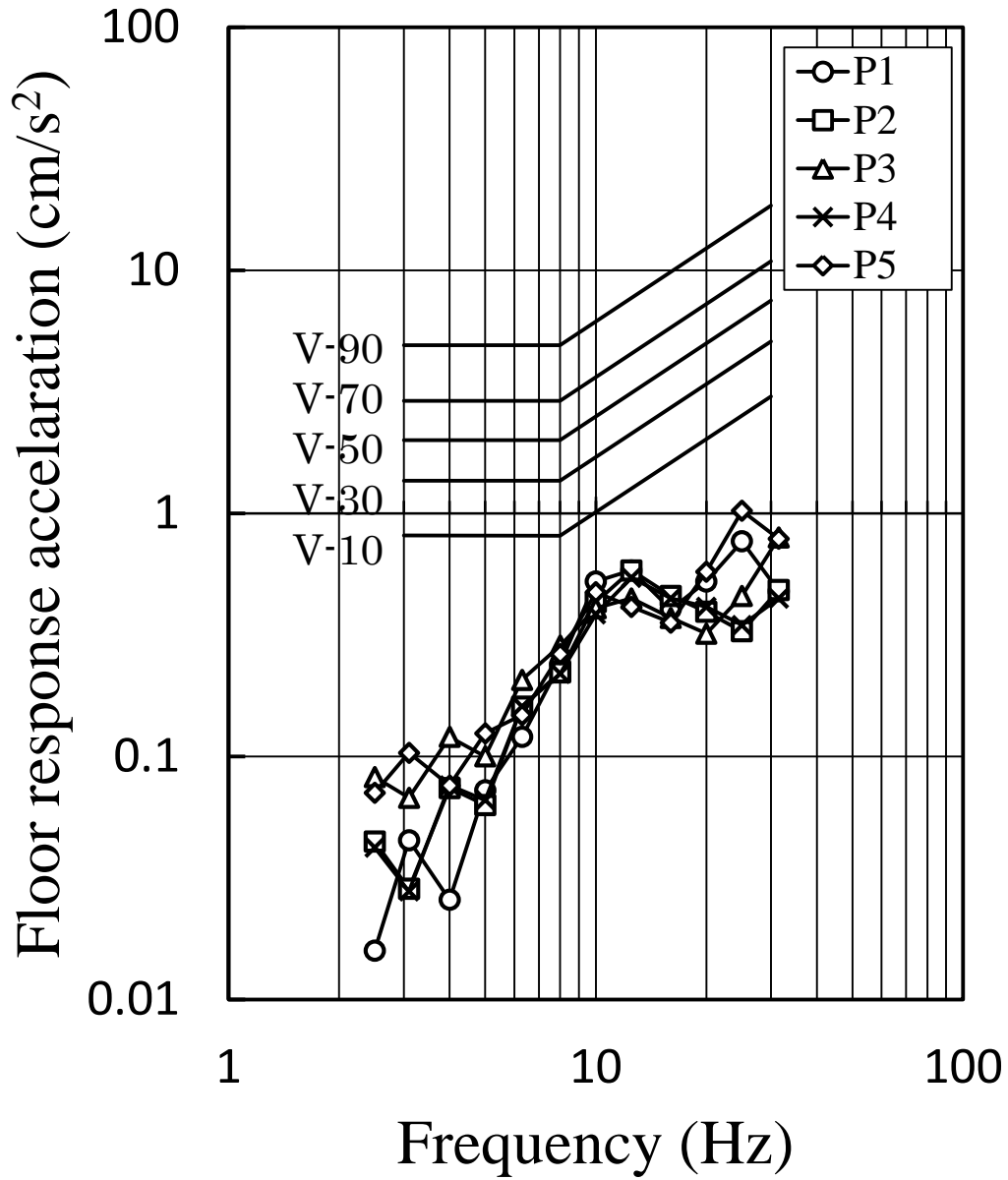


Fig.8.6c. Maximum response acceleration by 1/3 octave band analysis induced W6 walking on the floor in office F.

Notes: P1-P5:see Fig.6.6, V-10~V-90:perception probability³¹⁾

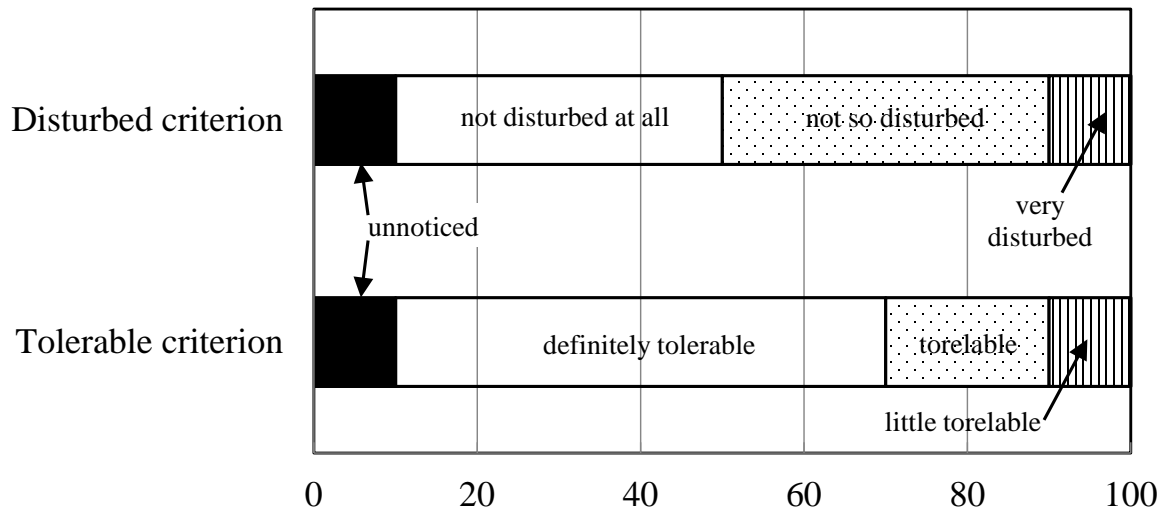


Fig.9.1a. Questionnaire results on human sensory evaluations of W1 walking vibration in elementary school A.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

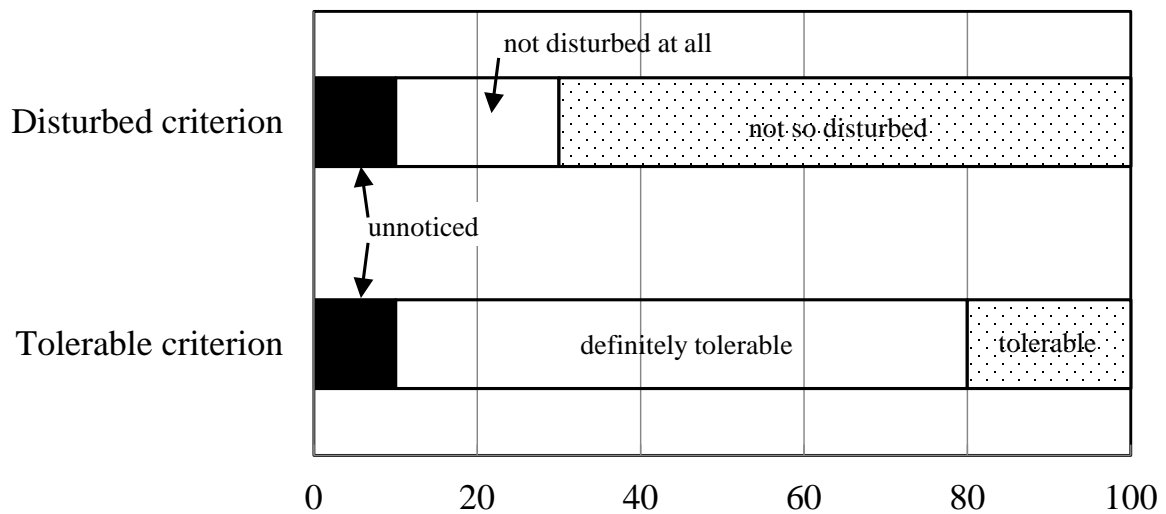


Fig.9.1b. Questionnaire results on human sensory evaluations of W2 walking vibration in elementary school A.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

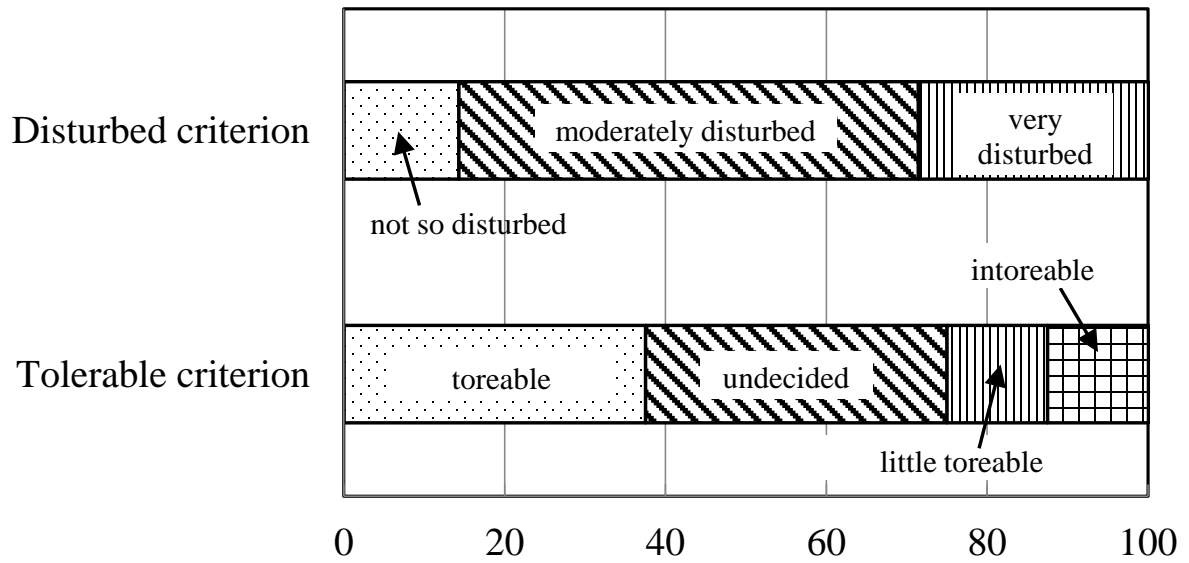


Fig.9.2. Questionnaire results on human sensory evaluations of W3 walking vibration in elementary school B.

Notes: disturbed criterion:1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

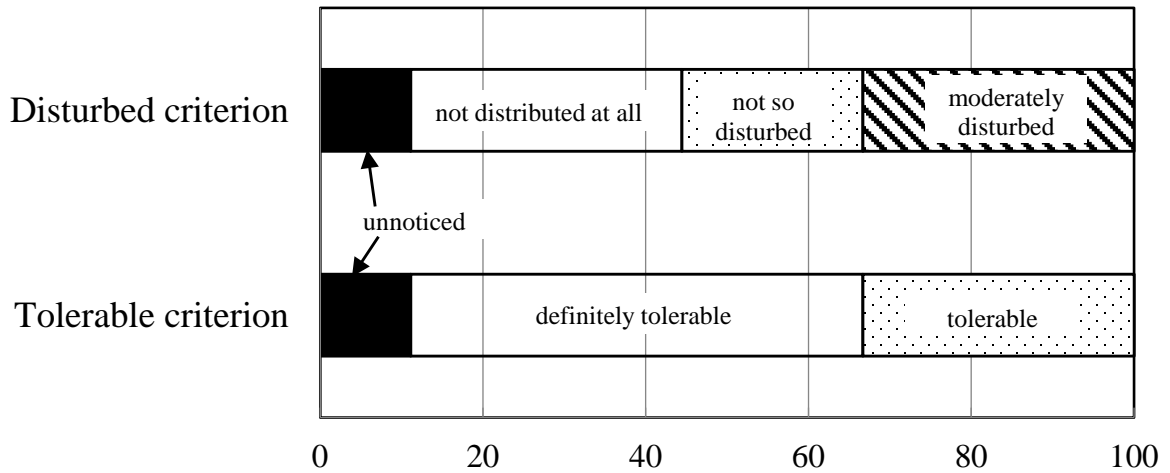


Fig.9.3a. Questionnaire results on human sensory evaluations of W1 walking vibration in elementary school C.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

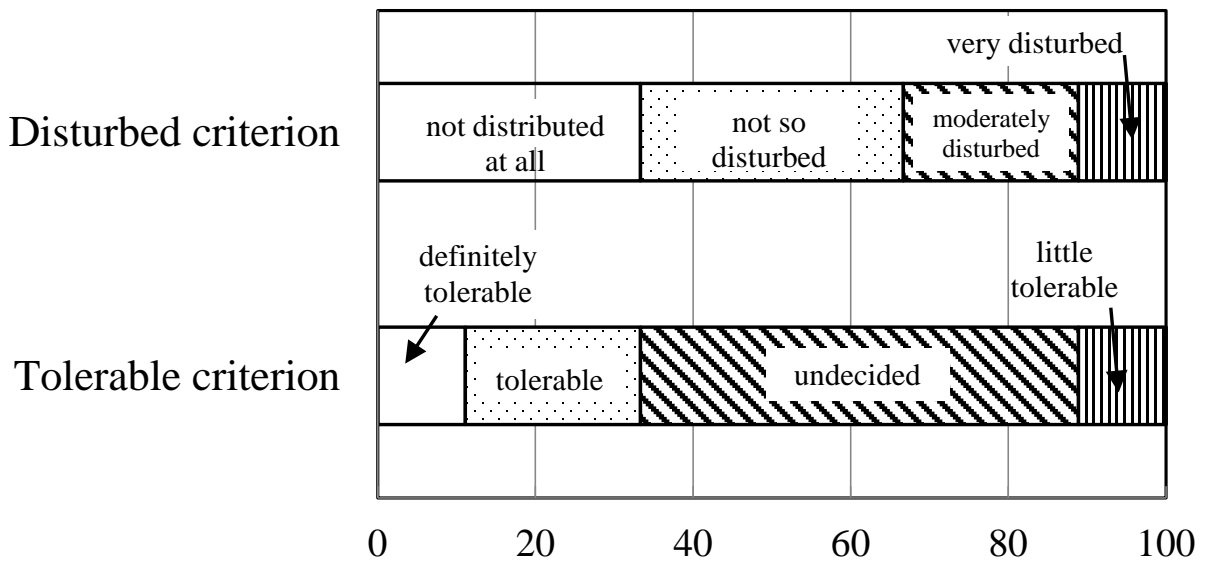


Fig.9.3b. Questionnaire results on human sensory evaluations of W2 walking vibration in elementary school C.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

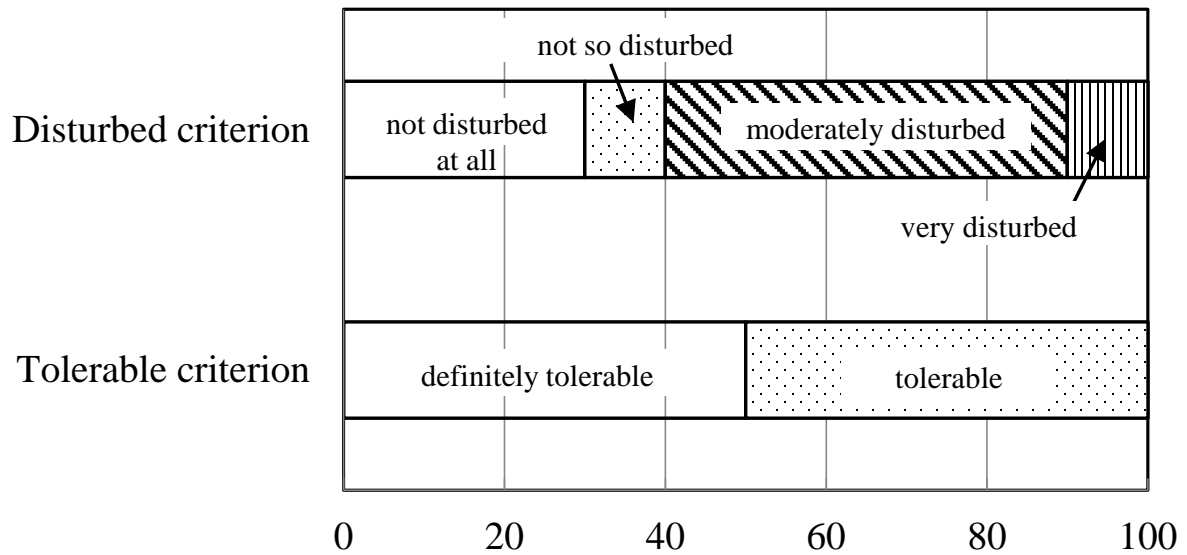


Fig.9.4a. Questionnaire results on human sensory evaluations of W1 walking vibration in elementary school D.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

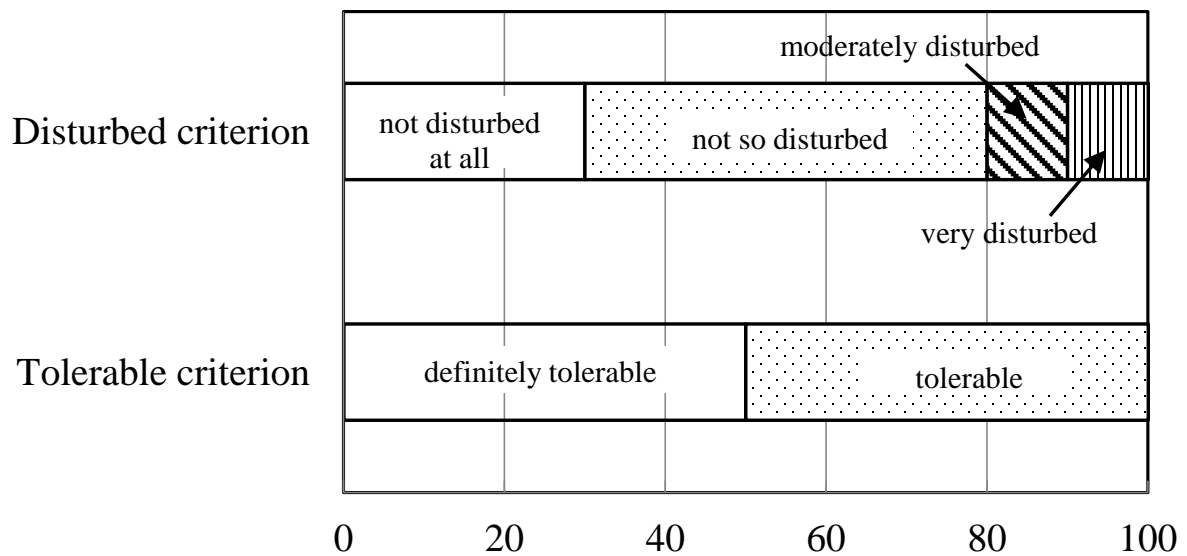


Fig.9.4b. Questionnaire results on human sensory evaluations of W2 walking vibration in elementary school D.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

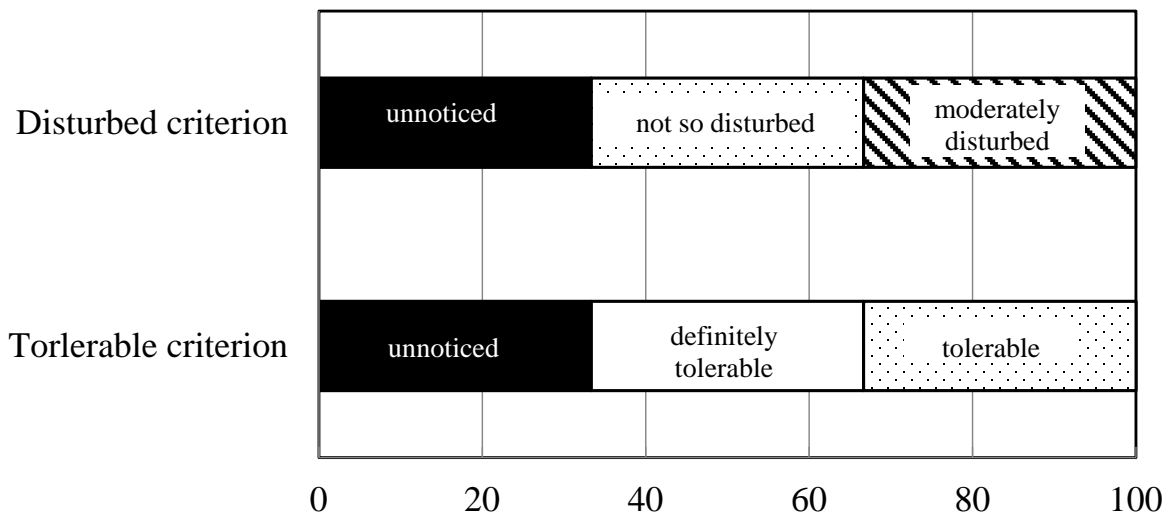


Fig.9.5a. Questionnaire results on human sensory evaluations of W4 walking vibration in office E.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

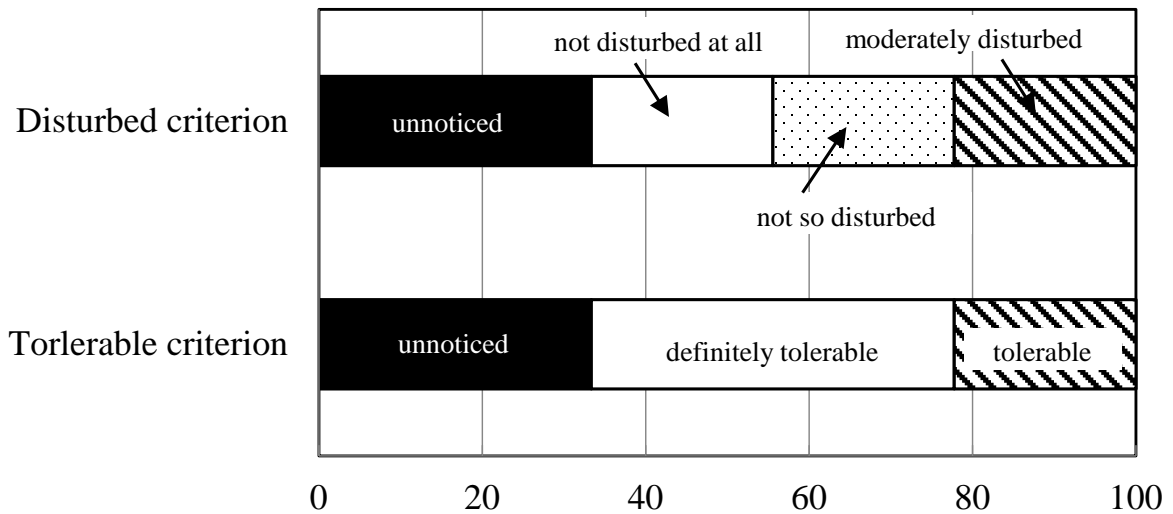


Fig.9.5b. Questionnaire results on human sensory evaluations of W5 walking vibration in office E.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

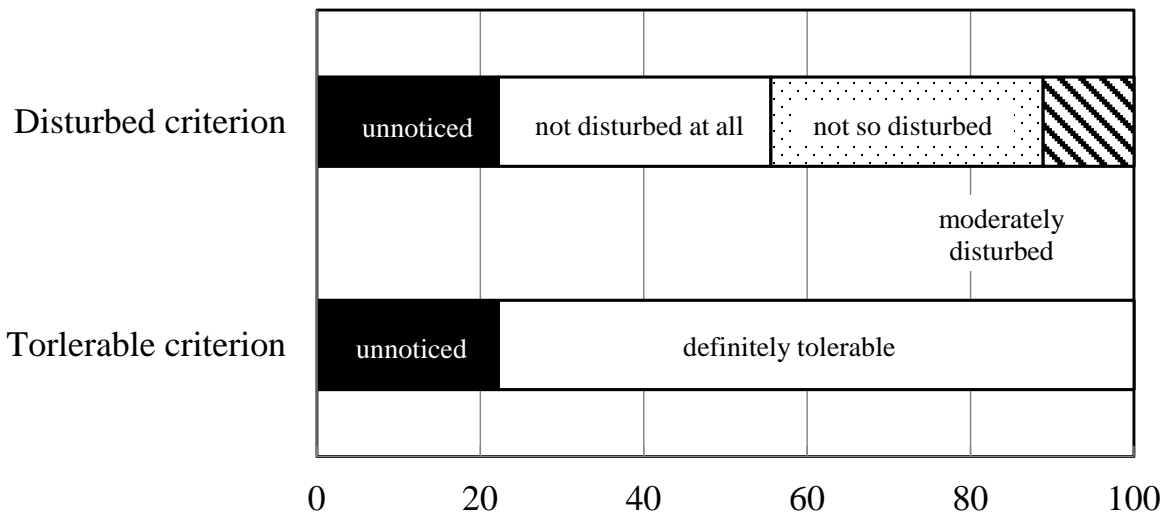


Fig.9.5c. Questionnaire results on human sensory evaluations of W6 walking vibration in office E.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

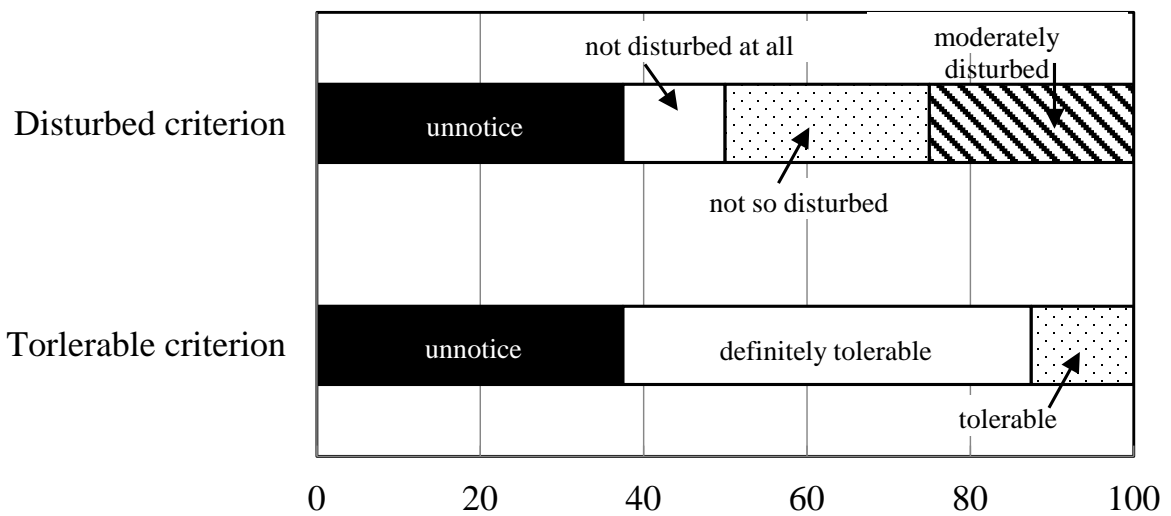


Fig.9.6a. Questionnaire results on human sensory evaluations of W4 walking vibration in office F.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

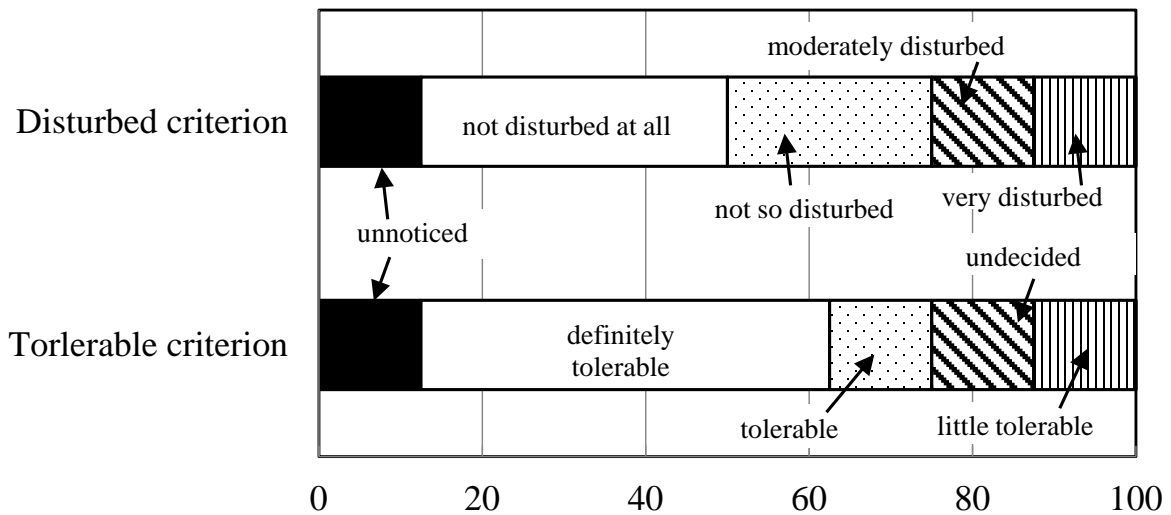


Fig.9.6b. Questionnaire results on human sensory evaluations of W5 walking vibration in office F.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

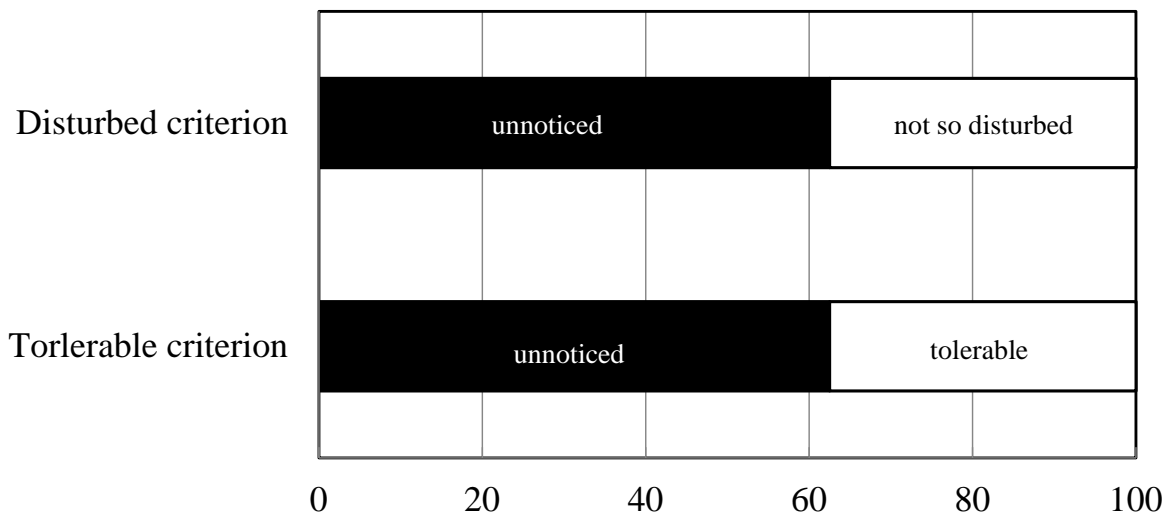


Fig.9.6c. Questionnaire results on human sensory evaluations of W6 walking vibration in office F.

Notes: disturbed criterion: 1) unnoticed, 2) not disturbed at all, 3) not so disturbed, 4) moderately disturbed, 5) very disturbed, 6) extremely disturbed, tolerable criterion: 1) unnoticed, 2) definitely tolerable, 3) tolerable, 4) undecided, 5) little tolerable, 6) intolerable

3. 5 結果と考察

本論文では、歩行振動を加振源とした床の鉛直方向の性能を示す指標を応答加速度とした。その理由として、人間は平衡感覚器官で加速度を受容し、神経回路によって脳に伝達され、脳で振動に対する判断が下されること⁶⁸⁾、文献³¹⁾にあるように、居住性能の評価指標として加速度を用いて、鉛直振動に対する評価を行っているからである。

A、C、D 小学校では、アンケート回答者は歩行の位置 (W1、W2) から少し離れた位置にいる。これらの小学校では、アンケート調査結果と床の応答加速度の関係をみるために、アンケート回答者に近い P2 および P3 で得られた加速度を解析に使用した。一方、B 小学校では、Fig.6.2 に示すように W3 に近いアンケート回答者もいるため、P1～P4 で得られた加速度を解析の対象とした。E および F 事務所では、加速度計の位置とアンケート回答者の位置を考慮して、解析する加速度をすべての加速度計の値とした。

3. 5. 1 応答加速度と知覚確率およびアンケート調査との関係

まず、今回計測した木造建物の床では、応答加速度は 10cm/s^2 以下の範囲に分布しており、文献³⁰⁾に示される RC 造や S 造、SRC 造の床の応答加速度とそれほど変わりがなく、特に木造床の応答加度が高いということではなかったことを断っておく。

解析対象とした加速度計ごとに、3. 4 で示した解析手順、いわゆる接線法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。例えば Fig.10.4b の P1 の場合には $1/3$ オクターブバンド中心周波数 12.5Hz のときの知覚確率が Pp_{maxi} となり、これに対応する応答加速度 Ar_i は 9.02cm/s^2 、P3 の場合も $1/3$ オクターブバンド中心周波数 12.5Hz のときの知覚確率が Pp_{maxi} となり、これに対応する応答加速度 Ar_i は 4.22cm/s^2 となる。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。Fig.10 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いたことがわかる。知覚確率は、ある周波数において加速度を大きくしていき、揺れを感じた時点での割合であること⁶⁹⁾、一方、アンケート回答者は全周波数成分の応答加速度を感じていることが考えられる。また、6 段階評価の中から一つを選ぶという、手法の違いに起因していることも理由として考えられる。

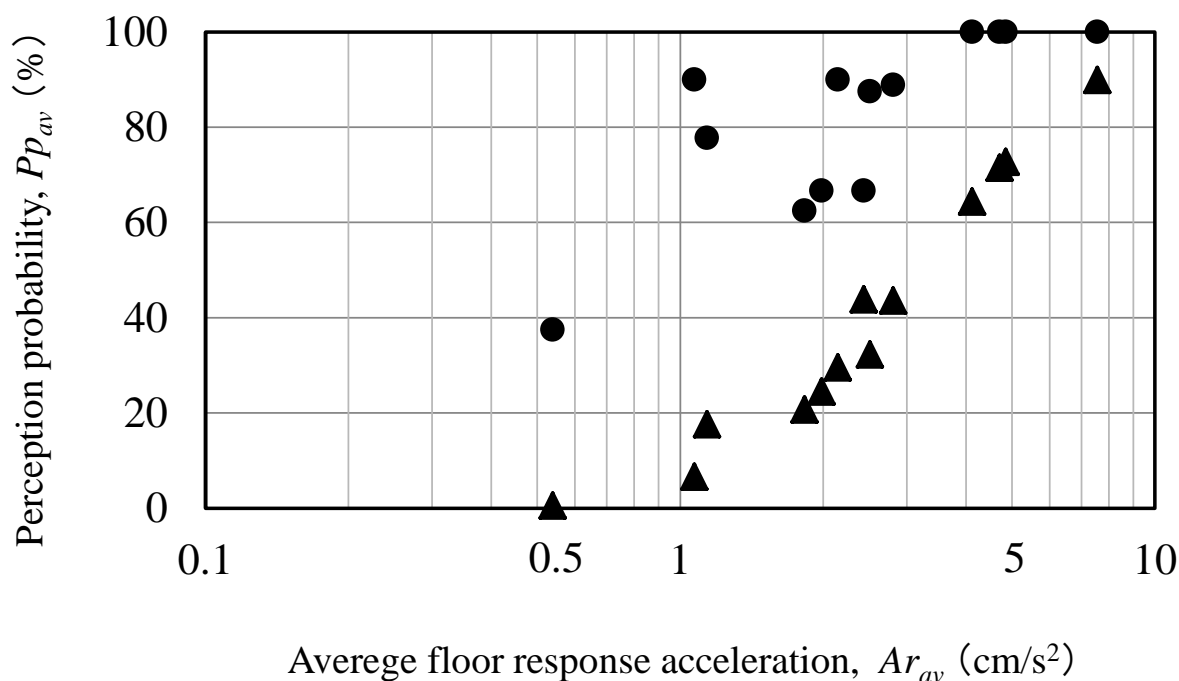


Fig.10. Relationship between average floor response accelerations and perception probability.

Legends: ●:calculated by human sensory evaluations, ▲:calculated by floor response accelerations³⁶⁾

また Fig.10 より、応答加速度が $3\sim 4\text{cm/s}^2$ 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目標性能（仮）として、応答加速度の値 $3\sim 4\text{cm/s}^2$ が一つの目安になると考えられる。文献⁷⁰⁾によれば、「標準ランク」として住宅の場合 V-50～V-80（知覚確率で 50～80%）程度、学校の場合 V-60～V-85（知覚確率で 60～85%）程度が提案されている。第 2 章で述べたように、床の 1 次固有振動数の実測値は $9.5\sim 12.5\text{Hz}$ であることから、1/3 オクターブバンド分析における中心周波数が 10Hz あるいは 12.5Hz で V-50～V-85 に相当する応答加速度を求めると、 $2.5\sim 6.5\text{cm/s}^2$ となる。また、文献^{71,72)}によれば、構造設計者の観点からとらえた「標準ランク」は V-60～V-80（知覚確率で 60～80%）であり、上記と同様に応答加速度を算出すれば $3.0\sim 5.6\text{cm/s}^2$ となる。これらの応答加速度の値は、前述した $3\sim 4\text{cm/s}^2$ に近いことがわかる。以上より、本報での歩行振動に対する床の目標性能（仮）は、床の 1 次固有振動数 $9.5\sim 12.5\text{Hz}$ の範囲で応答加速度 $3\sim 4\text{cm/s}^2$ とした。

3. 5. 2 鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルによる床の評価

3. 5. 1 では床の目標性能（仮）を、床の 1 次固有振動数 9.5~12.5Hz の範囲で応答加速度 $3\sim 4\text{cm/s}^2$ としたが、人間の感覚には周波数依存性が存在する⁷³⁾ことが知られているので、人間の感覚に基づいて補正した加速度を目標性能（仮）とすべきであろう。そこで以降は、JIS C1510⁷⁴⁾に示される鉛直特性で重みづけした加速度レベル（本論文では、鉛直方向の周波数重み付け加速度レベル、と称している）を用いて考察を行う。1/3 オクターブバンド中心周波数に対する鉛直方向の振動感覚補正值（Weighting value of vibration sensation）を Table 7 および Fig11.に示す。

Table 7. Weighting value of vibration sensation (vertical direction)

1/3 octave band mean frequency (Hz)	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	6.3	8
Weighting value of vibration sensation (dB)	-5.9	-5.2	-4.3	-3.2	-2	-0.8	0.1	0.5	0.2	-0.9
1/3 octave band mean frequency (Hz)	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80
Weighting value of vibration sensation (dB)	-2.4	-4.2	-6.1	-8	-10	-12	-14	-16	-18	-20

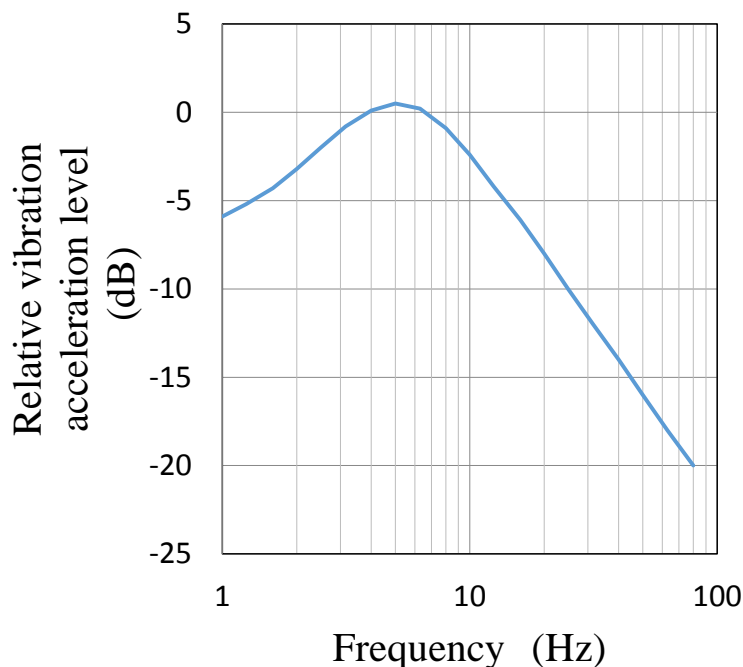


Fig.11. Weighting of vibration sensation

本報では3.4で示したように、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値を加味し、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)または2)または3)と答えた人の和の割合（以降、1)+2)+3)の割合と略）の関係について、Fig.12に示した。

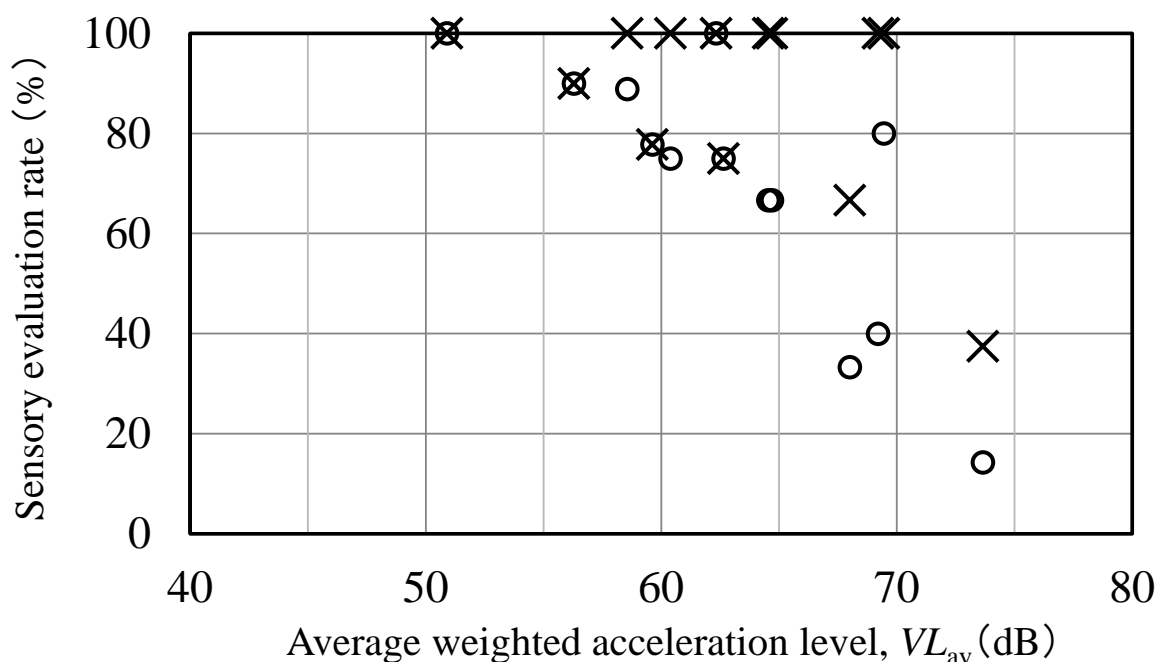


Fig.12. Relationship between average weighted acceleration level and sensory evaluation rate.

Legends: ○: disturbed criterion, ×: tolerable criterion

Note: sensory evaluation rate: sum of from 1) to 3) related to disturbed criterion or tolerable criterion, see Fig.11.1a~Fig.11.6c.

鉛直方向の周波数重み付け加速度レベル VL_{av} 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。ここで、周波数を勘案して VL_{av} の値65dBを Ar_{av} に換算すると2.3~3.6 cm/s²となることから、上述した床の応答加速度の仮の目標性能である3~4cm/s²に近いこともわかる。

これまで、床の応答加速度とアンケート調査結果との関係を見るために、A、C、D 小学校では、アンケート回答者がいる、歩行時の動線から少し離れた位置における加速度を解析してきた。しかしながら、床の応答加速度はアンケート回答者の位置よりも歩行時の動線に近い位置の方が大きい。よって、歩行時の VL_{av} の最大値を VL_{ind} とし、 VL_{ind} をその床の指標値として評価することにする。 VL_{av} と VL_{ind} との関係を Fig.13 に示した。

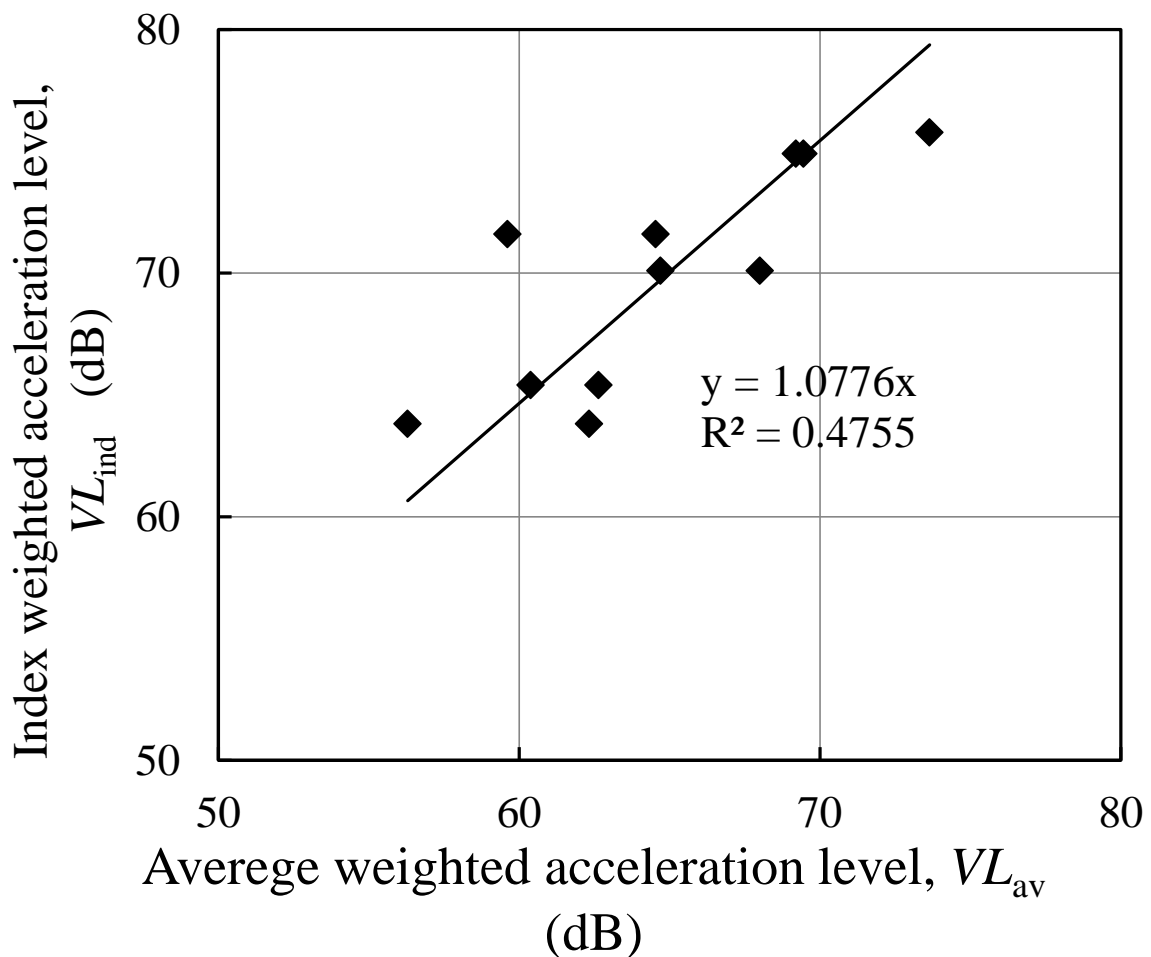


Fig.13. Relationship between average weighted acceleration level and index weighted acceleration level.

VL_{av} が 65dB の場合、 VL_{ind} は Fig.13 から約 70dB となるが、歩行時の動線、すなわち床中央に近い場所にアンケート回答者がいる場合も想定して、 VL_{ind} についても 65dB を仮の目標性能とした。

3. 5. 3 鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルとたわみに対するスパンの比との関係

床の設計は、現状ではたわみ制限に基づいて行われ、建築基準法では変形増大係数を加味したたわみ制限がスパンの 1/250 以下であることを確認することとしている¹⁵⁾。また、木質構造設計規準・同解説¹⁶⁾では、梁の類の所要剛性を、初期変形における最大たわみがスパンの 1/300 以下、かつ振動障害のないこと、およびクリープ変形後の最大たわみがスパンの 1/300 以下であることをとしている。そこで、第 2 章で求めた建物の梁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 Fig.14 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プロットしていない。その理由を次に示す。

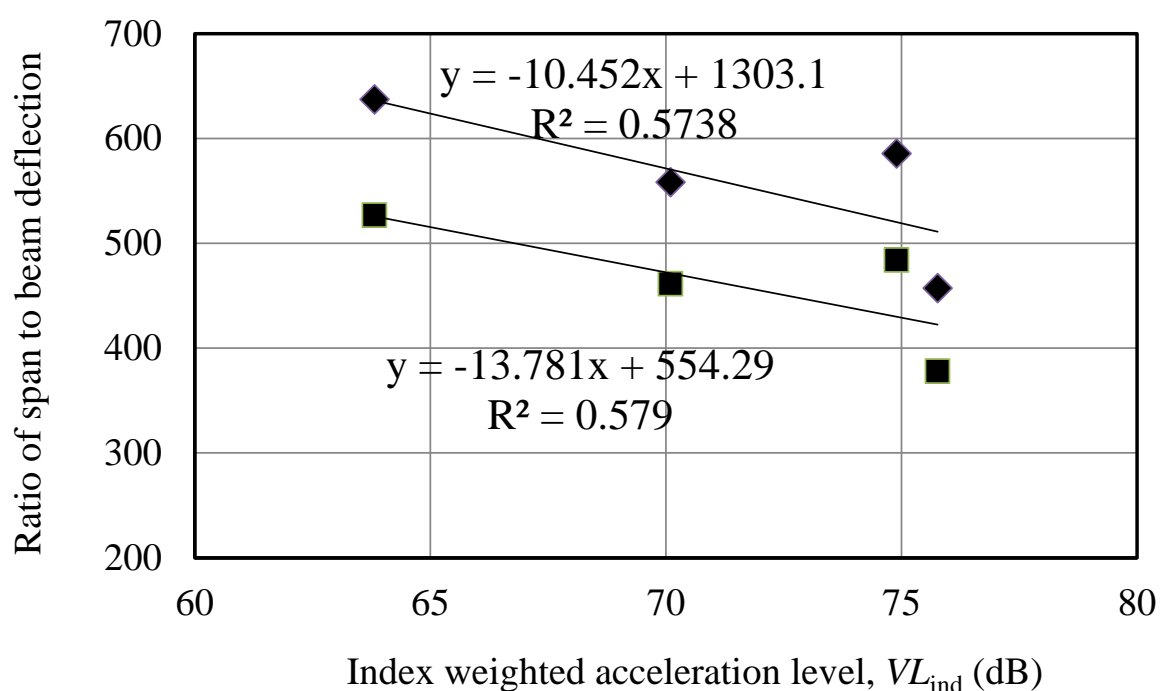


Fig.14. Relationship between index weighted acceleration level and ratio of span to beam deflection.

Legends: ◆: Based on Architectural Institute of Japan Standard¹⁶⁾, ■: Based on National Building Law¹⁵⁾

E 事務所の場合、上述したとおり OA フロアが施工されていたことにより減衰定数が求められなかったことから、OA フロアは局所的に振動していることが考えられた。それを確かめるために次のような解析を行った。Fig.15 に E 事務所を W4 歩行したときの、加速度計 P1 の加速度波形を示す。

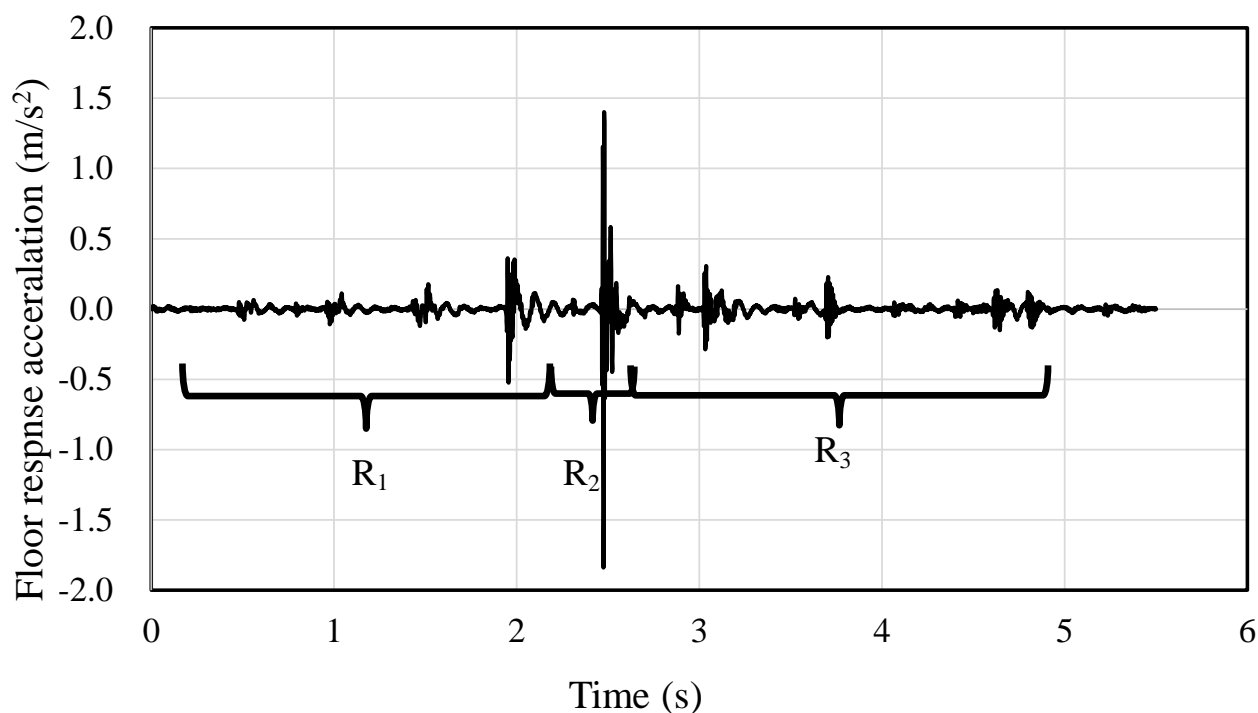


Fig.15. Floor response acceleration wave of P1 in case of walking along W4 at office E floor and regions.

この加速度波形を、加速度計 P1 の近接箇所を歩行した部分 (R₂) と、その前を歩行した部分 (R₁)、その後を歩行した部分 (R₃) の 3 つに分け、1/3 オクターブバンド分析を行い、バンドごとの応答加速度を算出し、その中の最大値 $MA(R_i)(i=1,2,3)$ を求めた。A、C および D 小学校では梁上を歩行した W1 歩行、B 小学校では梁間を歩行した W3 歩行、F 事務所では E 事務所と同様 W4 歩行した場合の加速度計 P1 の波形について解析を行った。さらに、 $MA(R_1)$ に対する $MA(R_i)(i=1,2,3)$ の比の値 $MA(R_1)/MA(R_1)=r_1=1$ 、 $MA(R_2)/MA(R_1)=r_2$ および $MA(R_3)/MA(R_1)=r_3$ を、例えば 3 往復の場合は往復あわせて計 6 回の平均値を求め、R₁、R₂、R₃ に対してプロットした。その結果を Fig.16 に示す。

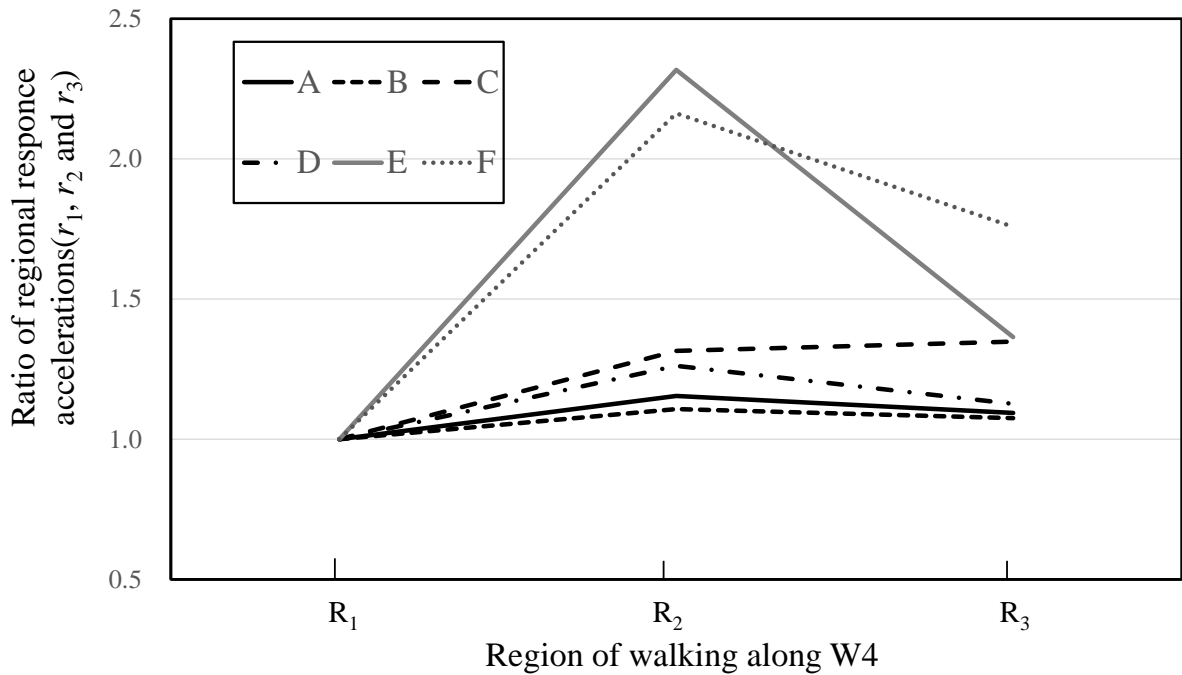


Fig.16. Relationship between region of walking along W4 and ratio of regional response accelerations. Notes: $r_1: MA(R_1)/MA(R_1)=1$, $r_2: MA(R_2)/MA(R_1)$, $r_3: MA(R_3)/MA(R_1)$, $MA(R_i)(i=1,2,3)$: the maximum acceleration for the region R_i by 1/3 octave band analysis. R_i : see Fig. 15.

この図をみると、A、C、D 小学校と E、F 事務所の傾向が異なっていることがわかる。小学校の場合、梁上を歩行しており、振動が梁を通じて P1 に伝播しているのではないかと考えられる。B 小学校では梁間を歩行しているが、梁上を歩行した他の小学校と同様の傾向がうかがえる。一方、E 事務所では OA フロアが局所的に振動しているため、 R_1 や R_3 における振動が R_2 に伝播しにくかったこと、 R_1 や R_3 では逆にその部分の OA フロアが主として振動していると考えられる。また、F 事務所では、シンダーコンクリートを打設しているため、床が版として一体的に振動しており、第 2 章で示したように剛性がかなり高く、E 事務所と同様に R_1 や R_3 における振動が R_2 に伝播しにくかったこと、 R_1 や R_3 ではその部分のみが主として振動していると考えられる。本研究では、固定荷重や積載荷重は梁に加わるとして梁の設計を行うことを考えているため、E 事務所のように局所的に振動する床や、F 事務所のように版として一体的に振動する床は除くことにした。

Fig.14 に戻って考察すると、床の VL_{ind} が目標性能（仮）である 65dB 以下となるためには、スパンに対するたわみの比を建築基準法で約 1/500 以下、木質構造設計規準で約 1/600 以下とすればよいことがわかる。したがって、小学校 4 棟の試験対象床に基づく提案ではあるが、本研究では、変形増大係数あるいはクリープ変形係数を考慮した梁のスパンに対するたわみの比の設計目標（仮）を、建築基準法で 1/500 以下、

木質構造設計規準で 1/600 以下とする。ただし、床の 1 次固有振動数は 9.5~12.5Hz の範囲とする。

3. 5. 4 鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルと床の固有振動数との関係
 VL_{ind} と床の 1 次固有振動数との関係を Fig.17 に示した。

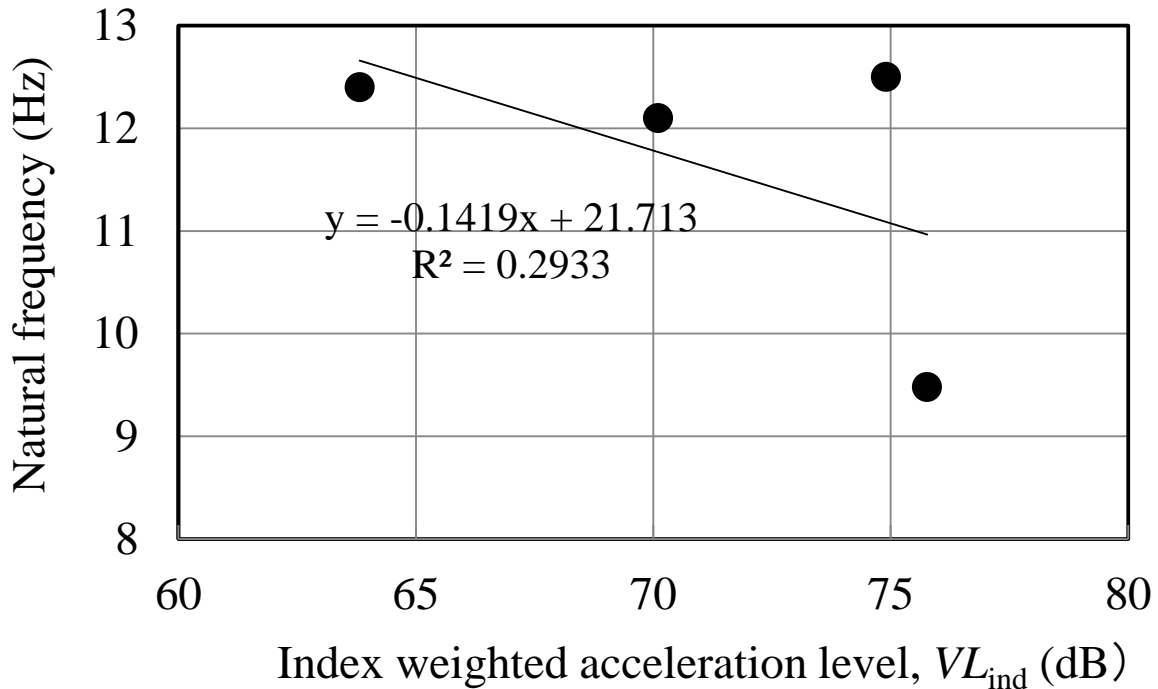


Fig.17. Relationship between index weighted acceleration level and natural frequency.

Fig.14 と同様に、事務所 2 棟についてはプロットしておらず、小学校 4 棟のみのプロットである。同図を見ると、C 小学校および D 小学校における 12.1Hz および 12.5Hz の割に VL_{ind} の値が大きい。それを除くと設計目標 (仮) である 65dB を下回るには、1 次の固有振動数が 9.5~12.5Hz という狭い範囲内であるものの、12Hz 以上であることが必要と考えられる。

Fig.18 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。

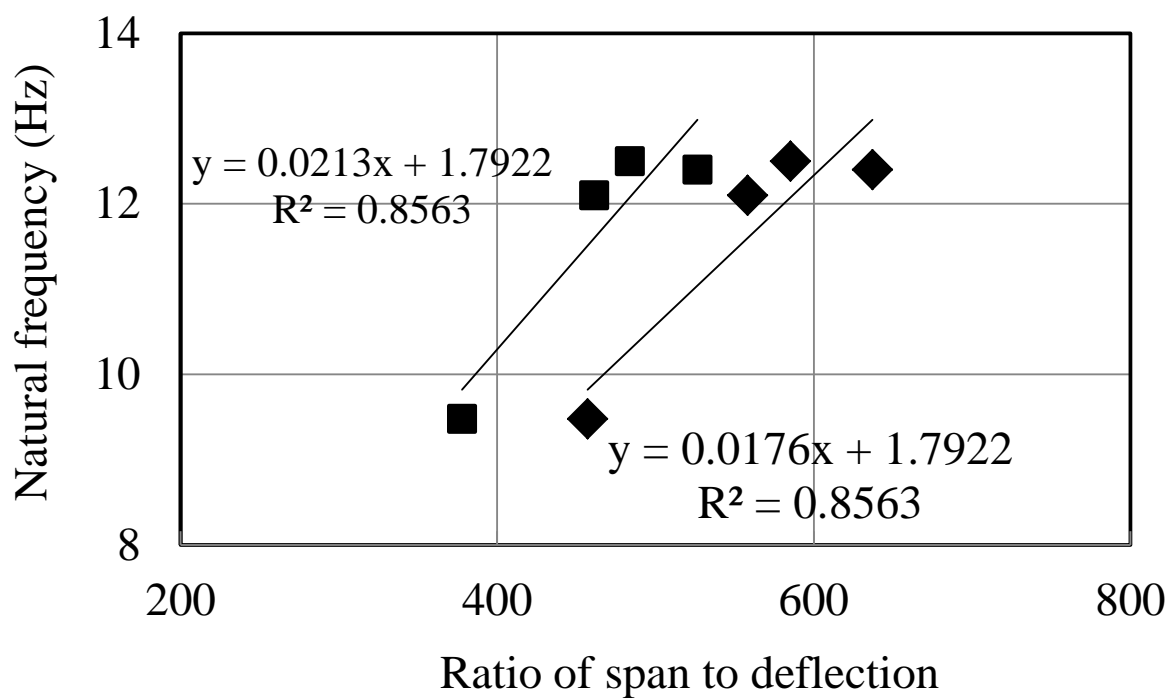


Fig.18. Relationship between ratio of span to deflection and natural frequency.

Legends: See Fig.10.

この図からも、スパンに対するたわみの比を建築基準法で約 1/500 以下、木質構造設計規準で約 1/600 以下とすると、固有振動数が 12Hz 以上となることがわかる。

3. 6 第3章のまとめ

本章では、4つの小学校と2つの木造事務所の試験対象床上を人が歩いたときの歩行振動と感覚評価との関係について検討を行い、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結果および第2章で算出した梁のたわみ、床の固有振動数との関係を調べた。床の1次固有振動数が9.5~12.5Hzの範囲で、次のことがわかった。

- 1) 同じ応答加速度に対し、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かった。
- 2) 床の応答加速度の値が $3\sim 4\text{cm/s}^2$ 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。
- 3) 鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルが65dBを下回るには、建築基準法に準拠するとたわみをスパンの1/500以上、木質構造設計規準に準拠するとたわみを1/600以上にすること、および、1次の固有振動数を12Hz以上とすればよいことがわかった。ただし、木造事務所の試験対象床については、仕上げ材のシンダーコンクリートやOAフロアが歩行振動の伝達に影響を及ぼしていると考えられたため、考察の対象から除外した。

第4章 総括

第1章では、研究の背景と目的について述べた。中・大規模木造建築物を設計するための情報として、構造安全性や火災安全性に関するものは多いが、居住性や使用性に関するものは少ない。日常生活によって発生する鉛直振動を例にとると、中・大規模木造に設けられる大スパン床は、住宅規模の小スパン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。しなしながら、木造大スパン床を小スパン床と同様に設計してよいのか、振動障害を抑えるために具体的にどう設計したらよいか、などの情報は少ないのが現状である。また、日本の建築基準法や木質構造設計規準に基づく梁の設計ではたわみ制限以外考慮されていない。そこで本研究では、木造大スパン床を対象とし、日常の動作として欠かせない歩行によって生じる振動の感覚評価に基づく構造設計が可能かどうか検討することを目的として、歩行振動の感覚評価に基づく仮の目標性能を設定し、それを達成するためのたわみ制限、固有振動数を提案することを試みた。具体的には、木造の4つの小学校と2つの事務所の試験対象とした床について、試験対象床を構成する梁・平行弦トラスのたわみや曲げ剛性、床の固有振動数・減衰比を、実建物に組み込まれた状態で求めた。次に、試験対象床の上を1人の成人男性が歩行した時の振動の応答加速度を測定すると同時に、歩行者の周辺にいたアンケート回答者に、歩行振動をどう感じたかについて回答してもらった。そのアンケート結果を元に、歩行振動の観点から目標性能を仮に設定し、それを達成するためのたわみ制限、固有振動数を示すことによって、歩行振動の感覚評価に基づく構造設計の可能性について考察した。

第2章では、4つの小学校と2つの木造事務所の試験対象床について、試験対象床を構成する床梁・平行弦トラスのたわみや曲げ剛性、床の固有振動数・減衰比を、実建物に組み込まれた状態で求めた。設計上の梁の初期たわみはスパンの約 $1/470 \sim 1/1100$ であり、木質構造設計規準のたわみ制限であるスパンの $1/300$ を下回っていた。建築基準法に基づいてクリープを考慮した床のたわみはスパンの約 $1/380 \sim 1/800$ 、木質構造設計規準に基づいてクリープを考慮したたわみはスパンの約 $1/310 \sim 1/660$ であり、いずれもたわみ制限（建築基準法ではスパンの $1/250$ 、木質構造設計規準ではスパンの $1/300$ ）を下回っていた。特に、事務所では設計値がたわみ制限の $28 \sim 48\%$ とかなり小さかった。また、梁の曲げ剛性の実験値は、設計値より $1.1 \sim 3.9$ 倍大きかった。実際の建築物における床の1次固有振動数の実測値は $9.5 \sim 12.5\text{Hz}$ であった。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固有振動数の実験値よりも $10 \sim 30\%$ 小さかったが、床の固有振動数を比較的精度よく推定できることがわかった。なお、減衰比は $3.1 \sim 6.5\%$ で、既往の研究で示されている値と大きな違いはなかった。

第3章では、4つの小学校と2つの木造事務所の試験対象床上を人が歩いたときの歩行振動と感覚評価との関係について検討を行い、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について調べた。その結果、同じ応答加速度に対し、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かった。また、床の応答加速度の値が $3\sim 4\text{cm/s}^2$ を下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%、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。そこで本研究では、鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルが65dB以下、歩行振動を許容できる人の割合が65%以上を仮の目標性能とした。

次に4つの小学校の試験対象床について、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第2章で算出した梁のたわみ、床の固有振動数との関係を調べた。その結果、鉛直方向の周波数重み付け加速度レベルが65dBを下回するには、建築基準法に準拠するとたわみをスパンの1/500以下、木質構造設計規準に準拠するとたわみを1/600以下にすればよく、1次の固有振動数を12Hz以上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。

以上の考察により、歩行振動の感覚評価に基づく構造設計の可能性を示した。

本研究で扱った試験対象床の数は6つと少なく、それ以外の木造校舎や木造事務所の床に対しても同様の結果が得られるのか検討することが今後の課題である。また目標性能は、本研究で仮に設定した性能以外にも設定可能なので、それらの目標性能に対する構造設計のための目標の提案も必要であろう。

参考文献

- 1) 気象庁：温室効果ガスの種類，
http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p04.html/2016年11月30日参照.
- 2) 林野庁：平成28年度版森林・林業白書，全国林業改良普及協会，東京，2016，p.149.
- 3) 岡崎泰男，大熊幹章：炭素ストック、CO₂放出の観点から見た木造住宅建設の評価，木材工業，161-165(1998).
- 4) 林野庁：平成28年度版森林・林業白書，全国林業改良普及協会，東京，2016，p.10.
- 5) 林野庁：平成28年度版森林・林業白書，全国林業改良普及協会，東京，2016，p.154.
- 6) 公共建築協会：木造計画・設計規準平成23年版，建設出版センター，東京，2011.
- 7) 大橋好光監修：特集 木造公共建築物の建築・構造設計マニュアル，建築技術，pp.81-168(2011).
- 8) 大橋好光監修：特集 中大規模木造建築物設計の悩み解消法，建築技術，pp.175-187(2013).
- 9) 大橋好光監修：特集 中大規模木造建築物の建築設計を実務から学ぶ，建築技術，pp.175-183(2014).
- 10) 大橋好光監修：特集 中大規模木造建築物を建てるための木質系材料 Q&A・決定版，建築技術，pp.67-166(2015).
- 11) 大橋好光監修：特集 スラスラできる中大規模木造建築物の構造設計，建築技術，pp.185-185(2016).
- 12) 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 第2版，丸善出版，東京，2004.
- 13) 日本建築学会：環境振動性能設計ハンドブック，丸善，東京，2010.
- 14) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－，丸善，東京，2006，p.180.
- 15) 建築行政情報センター、日本建築防災協会編集：2015年版建築物の構造関係技術基準解説書，全国官報販売協同組合，東京，2015，pp.315-317，pp.325-326.
- 16) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説－許容応力度・許容耐力設計法－，丸善，東京，2006，pp.180-188.
- 17) 飯塚五郎蔵：住宅デザインと木構造，丸善，東京，1982，p.204.
- 18) 飯塚五郎蔵，本間学：木造住宅の床たわみ制限，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州） 構造系，2239-2240(1981).
- 19) Porteous, J., Kermani, A.: Structural Timber Design to Eurocode 5 2nd Edition, WILEY-BLACKWELL A John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 2013, pp.140-141.
- 20) Hu, L. J., Mohammad, M., Gagnon, S.: Noise and vibration control of light frame wood joist floors topped with concrete. Proceedings of World Conference on Timber Engineering

2014, Quebec, Canada, 2014.

- 21) 安藤直人, 杉山英男: 木質床の振動性状 (第2報) ストレスト・スキン・パネルの振動性状, 木材学会誌, 31(2), 89-96(1985).
- 22) 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, 585, 123-129 (2004)
- 23) 鈴木秀三, 藤野栄一, 野口弘行, 五十田博: 木質ハイブリッド梁床モデル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, 596, 65-70 (2005)
- 24) 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, 589, 137-142 (2005)
- 25) 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, 591, 107-112 (2005)
- 26) 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, 77(676), 905-910 (2012)
- 27) 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, 77(677), 1099-1104 (2012)
- 28) 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, 77(678), 1265-1271 (2012)
- 29) 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, 77(682), 1897-1903 (2012)
- 30) 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 第2版, 丸善出版, 東京, 2004, pp.23-24.
- 31) 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 第2版, 丸善出版, 東京, 2004, pp.5-11.
- 32) 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 (関東) 環境工学 I, 359-400(2015).
- 33) 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 78(691), 689-695(2013).
- 34) 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 80(712), 509-517(2015).
- 35) Weckendorf, J.: Dynamic response of structural timber flooring system, A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of Edinburgh Napier University, for the award of Doctor of Philosophy (2009) ,
<http://www.napier.ac.uk/research-and-innovation/research-search/outputs/dynamic-response-o>

f-structural-timber-flooring-systems/2016年12月1日参照

- 36) Ohlsson, S. V.: Floor vibration and human discomfort, Doctoral Thesis, Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures. Chalmers University of Technology, Goeteborg, Sweden (1982)
- 37) Chui, Y. H.: Vibrational performance of wooden floors in domestic dwellings, PhD Thesis, Brighton Polytechnic, Brighton, UK. (1987)
- 38) Hu, L. J, Tardif, Y.: Effectiveness of strong-back/wood I-blocking for improving vibration performance of engineered wood floors, Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering, Canada (2000)
- 39) Khokhar, A., Chui, Y. H., Hu, L. J.: Influence of between-joist bracing elements on static deflection and frequency response of a joiste wood floor, Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering, Lahti, Finland (2004)
- 40) Bernard, E. S.: Dynamic serviceability in lightweight engineered timber floors, ASCE Journal of Structural Engineering, 134(2), 258-268 (2008)
- 41) Smith, I., Chui, Y. H.: Design of lightweight floors to avoid human discomfort, Canadian Journal of Civil Engineering, 15, 254-262 (1988)
- 42) Hu, L.J.: Prediction of vibration responses of ribbed plates by modal synthesis, PhD Thesis, The University of New Brunswick, Canada (1992)
- 43) Onysko, D.M.: Performance criteria for residential floors based on consumer responses, Proceedings of the International Conference on Timber Engineering, Seattle, USA, 1, 736-745 (1988)
- 44) 櫛田裕 : 振動環境工学入門, 理工図書, 東京, 1997, p.13. (原典 H. Reiher and F. J. Meister: Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 2(11), 381-386 (1931))
- 45) Lenzen, K. H.: Vibration of steel joist-concrete slab floors, AISC Engineering Journal, 3(3), 133-136 (1966)
- 46) Wiss, J.F., Parmelee, R.A.: Human perception of transient vibration, ASCE Journal of the Structural Division, 100, 773-787 (1974)
- 47) 三輪俊輔、米川善晴 : 正弦振動の評価法 (振動の評価法 1), 日本音響学会誌, 27(1), 11-20 (1971)
- 48) Polensek, A.: Human response to Vibration of wood-joist floor systems, Wood Science, 3(2), 111-119 (1970)
- 49) Atherton, G.H., Polensek, A., Corder, S.E.: Human response to walking and impact vibration of wood floors, Forest Product Journal 26(10), 40-47 (1976)
- 50) Ohlsson, S.V.: Serviceability criteria – especially floor vibration criteria, Proceedings of the International Timber Engineering Conference, London, UK, 158-165 (1991)
- 51) 安藤直人, 杉山英男 : 木質床の振動性状 (第3報) ストレスト・スキン・パネル

- の衝撃荷重による動たわみと歩行振動, 木材学会誌, 31(2), 97-102 (1985)
- 52) 吉岡丹, 小野英哲, 川村清志, 茗ヶ原泰広: 建築物の床のかたさおよびその評価方法に関する研究 その2. 床のかたさに関する心理学的尺度と物理量の対応および床のかたさの評価式・最適値の提示, 日本建築学会論文報告集, 246, 17-24 (1976)
- 53) 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—振動発生者と受振者が同じ場合—, 日本建築学会構造系論文報告集, 381, 1-9 (1987)
- 54) 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: 振動発生者と受振者が異なる場合, 日本建築学会構造系論文報告集, 390, 1-9 (1988)
- 55) 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: 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), 日本建築学会構造系論文報告集, 394, 8-16 (1988)
- 56) 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, 418, 1-8 (1990)
- 57) 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, 546, 17-24 (2001)
- 58) 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 第1版, 丸善, 東京, 1991.
- 59) 中村昇, 野地清美, 西内豊, 伊野部健吉, 安藤直人: 木質床の振動性状と感覚評価, 木材学会誌, 49(2), 78-83 (2003)
- 60) JISA1418-2:建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法-第2部:標準重量衝撃源による方法. 日本規格協会(2000).
- 61) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, 丸善, 東京, 2006, p.165.
- 62) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説—許容応力度・許容耐力設計法—, 丸善, 東京, 2006, p.159.
- 63) 日本電気計測器工業会環境計測器ガイドブック編集委員会: 環境計測器ガイドブック第7版, 3 騒音・振動計測器, 日本電気計測器工業会, 東京, pp.226-239.
- 64) 小野測器: 計測コラム emm139 号用,
https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/eMM_back/emm139.pdf/2017年1月18日参照.
- 65) 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 74(636), 125-132(2009).
- 66) 富田隆太, 井上勝夫: 人の動作時を対象とした居住床の振動性能評価に関する基礎的検討. 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 環境工学 I, 215-216(2009).

- 67) 後藤剛史, 濱本卓司: わかりやすい環境振動の知識, 鹿島出版会, 東京, 2013, p.125
- 68) 後藤剛史, 濱本卓司: わかりやすい環境振動の知識, 鹿島出版会, 東京, 2013, pp.43-44
- 69) 石川孝重, 野田千津子: 鉛直振動に対する知覚閾および感覚評価に関する実験的研究. 日本建築学会環境系論文集 588, 9-14(2005).
- 70) 野田千津子, 石川孝重: 床振動に対する居住者意識に基づいた性能ランクの設定に関する研究. 日本建築学会環境系論文集 638, 435-441(2009).
- 71) 片岡達也, 石川孝重: 環境振動の目標性能設定に関する構造設計者のデルファイ法による評価—その1 設計時を想定した設計者の事前アンケート調査—. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 環境工学 I, 361-362(2010).
- 72) 小泉達也, 石川孝重: 環境振動の目標性能設定に関する構造設計者のデルファイ法による評価—その2 意見集約によって得られた設計者のグレード視点—. 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 環境工学 I, 363-364(2010).
- 73) 後藤剛史, 濱本卓司: わかりやすい環境振動の知識, 鹿島出版会, 東京, 2013, pp.59-62
- 74) JIS C 1510:振動レベル計. 日本規格協会(1995).

謝辞

本研究の実施ならびに本論文の執筆にあたり、終始ご指導とご鞭撻を賜りました秋田県立大学木材高度加工研究所の中村昇教授に厚く御礼申し上げます。また、秋田県立大学木材高度加工研究所の岡崎泰男准教授、佐々木貴信教授、林知行所長にはひとかたならぬお世話になり、感謝申し上げます。

実験データの取得でお世話になりました愛知工業大学の佐野泰之先生、職業能力開発総合大学校の藤野栄一先生、法政大学の藤智先生、日本大学の鎌田貴久先生、森林総合研究所の宇京斉一郎氏、三井ホーム株式会社の権田将也氏を始め、日本建築学会構造本委員会木質構造運営委員会傘下の「木質構造の振動障害に関する小委員会」の委員の諸氏、実験の実施にご協力いただきました能代市教育委員会、能代市内の小学校、三井ホームコンポーネント株式会社千葉工場、埼玉工場、アンケート調査等にご協力いただいた皆様に厚く御礼申し上げます。また、図面の作成に関しご教示いただいた三井ホームコンポーネント株式会社の松尾和午氏に感謝の意を表します。

また、森林総合研究所の交付金プロジェクト「国産材を多用した大面積床システムの開発」で共に研究に励んだ原田真樹主査を始めとする研究参画者の皆様、日本 CLT 協会の CLT 歩行振動 WG でご一緒した東京工業大学の横山裕先生、東京大学の青木謙治先生を始めとする委員の皆様、事務局の皆様には、本論文の執筆にあたり温かい励ましと歩行振動について学ぶ機会をいただきました。心より御礼申し上げます。

さらに、森林総合研究所で研究者生活を始めた時の上司である神谷文夫博士を始めとする諸先輩方、同僚、事務の皆様。東京農工大学での学生時代にご指導を賜った喜多山繁先生、服部順昭先生、川口正夫先生、職業能力開発大学校（当時）の古澤富志雄先生。ほかにも、ここに記し尽くせない方々から叱咤激励をいただき、この論文を執筆することができました。

執筆にあたり、お力添えをいただきました皆様に、衷心より感謝の意を表します。