

氏名	林 健太郎
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 1157 号
学位授与年月日	令和2年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	戸建て住宅及び小規模な集合住宅の水平振動に関する居住性能に対する心理的反応に基づく評価方法
論文審査委員	委員長 教授 松本 泰尚 委員 教授 奥井 義昭 委員 教授 齊藤 正人 委員 准教授 小嶋 文 委員 学 外 横島 潤紀

## 論文の内容の要旨

都市部では戸建て住宅の高層化が進み、3階建て以上の戸建て住宅の全国の新築棟数の約8割を占めている。道路や鉄道などの社会基盤が高密度に整備されている都市部では、住宅やオフィスなどの居住空間と道路や鉄道といった振動源となり得る社会基盤との距離が十分に確保できないことが多い。特に戸建て住宅や小規模の集合住宅は、大規模な建築物と比較して建物や敷地面積の規模が小さいため、大型車が前面道路を走行するといった日常的な外部振動と建物の共振現象による振動増幅によって振動問題が引き起こされる。本研究が対象とする戸建て住宅及び小規模な集合住宅は、とりわけ水平振動の共振現象による振動問題が多いことから環境振動に関する性能設計は重要であると考えられる。

国内の建物内の振動に関する性能設計や評価は、2018年に改定された「建築物の振動に関する居住性能評価規準・同解説」を参照することが多い。2018年の改定では、評価した振動が居住者にとってどの程度不快であるかなどの心理的な応答の程度を具体的に把握できる説明が付与されたが、外部振動による水平振動に関する知見が少ないことから、今後も評価方法の検討が必要である。

このような背景から、本研究は、道路交通、鉄道、建設作業などの外部振動による建物内における振動に関する居住性に対して、“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”の心理的反応に基づく評価方法を提示することを目的とした。

まず、加振台実験Ⅰでは、加振台を用いた主観評価実験によって心理的反応を測定し、様々な国内外の環境振動の分野の評価方法との対応関係を検討した。その結果、心理的反応と対応の良い評価方法として、振動の継続時間を1/4乗で考慮するVDVが適当な評価方法であることを明らかにした。一方、加振台実験Ⅰから以下の課題が得られた。1つ目は心理的反応の測定に用いた7段階の評定尺度は、各カテゴリーを適切に表す程度の表現語に関する知見が十分ではなかったことから、中間の2～6段階目のカテゴリーを空白としたが、実務的な利用の場面を想定するとすべてのカテゴリーの程度を適切に示す表現語を付し、振動刺激に対して絶対的な評価できる評定尺度が望ましいとした点。2つ目は、加振実験に用いた入力刺激は、実際の建物内の実測波形の入手が困難であったことから、屋外で計測した加速度波形に一般的な戸建て住宅を想定

した1自由度系モデルを利用したが、実際の建物内における実測波形による入力刺激を用いた加振台実験による検討が必要であるとした点であった。

評定尺度に関する課題では、騒音のうるささに関する国際的な評定尺度の構成方法を参考に、振動に対する心理的な程度の表現語 23 種類に関するアンケート調査を実施し、5 段階及び7 段階それぞれに相応しい程度の表現語を絞り込み、心理学的尺度の構成をした。ただし、厳密に言えばアンケート調査はいわば文字による概念的な方法であることから、アンケート調査によって構成された心理学的尺度と人が直接振動を感じた時の反応との関係は解明できない。入力刺激に関する課題では、実際の建物内で計測した振動波形を収集して、正弦振動を加えた 76 パターンの入力刺激を作成した。

これらの課題を解決した上で加振台実験Ⅱでは、構成した評定尺度と実測波形を中心とした 76 パターンの入力刺激を用いた加振台実験を実施した。構成した評定尺度が直接的な振動刺激に対しても等間隔性を有していることを確認するとともに、加振台実験Ⅰと同様に“振動の大きさ”、“気になり具合”、“不快感”を1つの評価値で評価すると考えた場合、1/4 乗で振動の継続時間を考慮する VDV が最も適切な評価値であることが明らかになった。

加振台実験による心理的反応と振動の評価方法との対応関係や相関係数の比較から最も適切な評価値を明らかにしたが、心理的反応の評価に対して加速度の最大値や振動の継続時間がどの程度の影響を与えているかは不明である。そこで、二項ロジスティック回帰分析を採用して、目的変数を心理的反応の期待値としたときの説明変数群の影響を把握することとした。説明変数群を「加速度の最大値」、「振動の継続時間」、「クレストファクタ」の3つで検討した結果、「加速度の最大値」、「振動の継続時間」が有意な変数であり、“振動の大きさ”と比べて“気になり具合”と“不快感”では、「振動の継続時間」の影響が相対的に大きいことが明らかになった。また、「振動の継続時間」は、1/2 乗よりも 1/4 乗の方が大きな影響を示す傾向を確認することができた。「クレストファクタ」は変数としての有意性を確認することができなかった。すなわち、波形の形は心理的反応への影響が小さいことが示唆された。二項ロジスティック回帰分析の結果からも、心理的反応との対応の良い評価方法は振動の継続時間を考慮することが重要であることを確認することができた。

以上の検討結果から、外部振動源による建物水平振動に関する居住性能に対する心理的反応に基づく評価には、振動の継続時間を 1/4 乗で考慮する VDV が本研究で検討した評価方法の中で最も適していることを示した。さらに学術的な検討に基づき 57 段階及び 75 段階の評定尺度を構成した。本研究で提示した評価方法及び評定尺度は、道路交通や鉄道などの外部振動源による建物内における振動に関する居住性能の評価に用いることができると考える。また、環境振動に対する性能設計に資するデータの収集に貢献できるものとする。

## 論文の審査結果の要旨

学位論文審査委員会が2020年2月14日に実施した論文発表会、およびそれに先立って行われた学位論文審査委員会各委員による個別の論文審査における、当該学位論文の審査結果を以下に要約する。

当該学位論文は、戸建て住宅をはじめとする小規模建物において道路交通や鉄道などの外部振動源により生じる環境振動の適切な評価方法の提案をテーマとしている。社会基盤が高密度に整備されている都市部では、居住用の建物と振動源となる道路や鉄道などとの距離が十分に確保できない。近年、都市部では戸建て住宅の高層化が進み、3階建て以上の戸建て住宅の全国の新築棟数の約8割を占めている。特に高層化した戸建て住宅や小規模の集合住宅は、大規模な建築物と比較して軽量かつ剛性も低いため、大型車が前面道路を走行するといった日常的な加振源により、建物の共振による水平振動が居住性を低下させる要因となることがある。一方、このような居住環境における日常的な振動を規制する振動規制法は、1976年の制定当時に主な問題であった鉛直振動のみを対象としており、水平振動を規制対象外である。建物内の水平振動を評価する方法としては、日本建築学会による建築物の振動に関する居住性能評価規準があるが、その評価方法は連続的な正弦振動に対する人の知覚閾に基づくものであり、実環境における振動の居住性に基づく評価への適用性には問題がある。これらの課題に対し、当該論文では、実際の小規模建物で測定した振動記録を用いた振動実験を実施し、それらの振動に対して測定した実験参加者の心理的反応を適切に評価できる方法を提案している。

当該学位論文は、以下の6章で構成されている。

第1章「序論」では、都市部の戸建て住宅における環境振動問題とその発生メカニズム、そして現在の建物振動の評価方法に関する課題点などの研究背景、既往の研究、研究の目的を述べ、本論文の構成を示している。

第2章「心理的反応に対する評価方法に関する実験的検討（加振台実験Ⅰ）」では、加振台を用いた主観評価実験によって心理的反応を測定し、様々な国内外の環境振動の分野の評価方法との対応関係を検討し、心理的反応と対応の良い評価方法を明らかにしている。一方、心理的反応の測定に、評定尺度としてその両端のカテゴリのみに表現語を付した尺度を用いたものの、実務的な利用の場面を想定すると、各カテゴリにその程度を適切に示す表現語を付した評定尺度を用いることが望ましいことを課題として挙げている。また、加振台実験において、一般的な戸建て住宅を想定してパラメータを定めた1自由度系モデルを利用し、実測された屋外での環境振動に対するモデルの応答を入力刺激として用いたが、最終的な評価方法を提示するためには、実際の建物内における振動に対する心理的反応の知見が必要であることも課題としている。

第3章「環境振動に関する評定尺度の構成」では、第2章で挙げた評定尺度に関する課題を解決するために、すべてのカテゴリに適切な程度の表現語が付された評定尺度の構成について検討している。環境振動の分野では、心理的反応の測定に対して、カテゴリ数や各カテゴリに用いる程度の表現語に関する検討に基づき評定尺度の構成を試みた研究が行われていなかった。そこで、振動に対する心理的な程度の表現語23種類に関するウェブアンケート調査を実施し、5段階及び7段階のそれぞれに相応しい程度の表現語を絞り込み、心理学的尺度を構成している。さらに、調整法を用いた加振台実験を行って、アンケート調査による概念的な尺度と、人が実際に振動刺激から受ける感覚が対応していることを確認している。

第4章「家屋内の実測波形を用いた加振台実験による評価方法の検討（加振台実験Ⅱ）」では、第2章で課題とした実際の建物内で測定した振動波形に正弦振動を加えた76パターンを入力刺激を用いて、加振台実験を行い、心理的反応に基づく環境振動の評価方法について検討している。加振台実験では、第3章で構

成した心理学的尺度を用いている。まず、5段階と7段階のカテゴリー数が心理的反応の測定結果に及ぼす影響を検討し、より測定分解能の高いものの参加者の判断が困難となり得る7段階の評定尺度の適用性を確認している。その後、7段階の尺度を用いて加振台実験を行い、建物の居住性に関連する心理的反応と対応の良い振動の評価方法を明らかにしている。

第5章「心理的反応の評価に対する説明変数の影響に関する検討」では、第4章で明らかにした心理的反応と対応の良い振動評価方法に関して、評価方法で考慮されている加速度の最大値、振動の継続時間、クレストファクタといった振動の物理的特性の心理的反応への影響度について、ロジスティック回帰分析により検討している。その結果、心理的反応の評価に対して、加速度の最大値と振動の継続時間が有意なパラメータであり、さらに振動の継続時間はその1/4乗で評価することで心理的反応に対する説明性が高くなることを明らかにしている。

第6章は、当該論文の結論と今後の課題について述べている。本研究により、人の振動感覚の周波数依存性を考慮した周波数補正加速度を4乗し全継続時間で積分した評価方法が、道路交通や鉄道などの外部振動源による小規模建物の水平振動に関する居住性評価に適していることが明らかになった。この評価方法は、上述の評定尺度とあわせ、環境振動に対する建物の性能評価および性能設計に資するデータ収集に活用されることが期待できる。一方で、実際の居住環境と実験環境との心理的反応の差異の解明、複数方向の振動に対する評価などを今後の課題として挙げている。

以上のように、当該論文は、小規模建物内の居住環境における水平振動の評価に関して、実務的に有用で、学術的にも有意義な知見を示している。よって、学位論文審査委員会は、本論文が博士（工学）の学位を授与するに十分値するものと認め、合格と判定した。なお、本論文の内容に基づく2編の論文が当該分野で評価の高い学術誌である日本建築学会環境系論文集に掲載済みであり、また2編が査読付き論文として国際会議 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering および International Congress on Acoustics のプロシーディングスにそれぞれ掲載されている。