

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560725

研究課題名(和文) ゴムボールを用いた鉛直振動の測定及び評価方法に関する研究

研究課題名(英文) Study on measurement and evaluation method for vertical vibration using the rubber ball

研究代表者

富田 隆太 (TOMITA, Ryuta)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：40339255

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、住宅等で発生する人の日常動作によって床に発生する体感振動(鉛直振動)を対象とした測定・評価方法に関する検討を行ったものである。具体的には、JIS A 1418-2に規定されているゴムボールを環境振動の分野にも応用し、衝撃振動を対象とした。

その結果、衝撃振動に対する人の振動感覚に影響を与えるパラメータの抽出を行い、評価尺度を提案することができた。また、RC造の床スラブを中心として、測定方法や評価方法に関する検討も行った。本研究の成果は、人の動作等によって生じる体感振動分野に大きく貢献できるものと考えられ、提案した評価尺度が有効に利用されることを望むものである。

研究成果の概要(英文)：This research considered the measurement and the evaluation method of habitability to floor vibration (environmental vibration) which occurs by daily life's movement of the person. Specifically, it has the rubber ball that is defined in JIS A 1418-2 applied to the field of environmental vibration. Characteristics of the vibration was the impact vibration.

As a result, it was extracted parameters that affect the vibration sense of the human against impact vibrations, it was possible to propose the evaluation scale. In addition, around the floor slab of RC structure, it was also carried out examination on measurement methods and evaluation methods. The results of this research, it is considered that can contribute significantly to environmental vibration field caused by daily life's movement of the person. It is wishing that proposed the evaluation scale is used effectively.

研究分野：建築環境工学

キーワード：環境振動 鉛直振動 ゴムボール 振動感覚 評価尺度

### 1. 研究開始当初の背景

日本建築学会から 1991 年に刊行された「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」は、2004 年に大幅に改正された。それによると、「人の動作・設備による鉛直振動」の項目では、「性能評価曲線に、床応答波形から求まる 1/3 オクターブバンド分析結果を照合することにより行う」とされている。また、「床応答波形は、床用途上、日常的な振動発生源になると想定される加振条件下で求めることとする」とされており、衝撃源や衝撃方法については定められていない。この方法による評価結果は、床の振動性能に加えて、床に入力される衝撃力特性も含まれており、人の動作などの場合には個人差や実験回数によるばらつきなども含んだ実現象そのものを示している。これは、実感としては具体性もあり、実現象そのものを表すことができる。しかし、この方法では評価される受振点において、床スラブの厚さなどによって影響される建築の部位性能だけではなく、加振する人の個人差や動作の違い全てが含まれることとなる。つまり、床の性能に入力条件を加えた評価となり、統一した形で建築物の性能を表現することはできない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、住宅やオフィス内で発生する人の日常動作(歩行、小走り、飛び跳ね等)によって床に発生する体感振動(鉛直振動)を対象とした測定・評価方法を提案することである。具体的には、建築音響の分野で広く用いられている JIS A 1418-2 に規定されているゴムボールを環境振動の分野にも利用し、床に一定した衝撃入力を行い、床相互の相対的な評価が可能となる評価尺度を提案し、測定・評価方法を提案することである。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究を行う上で重要な人の振動感覚を説明できる評価尺度の提案を行うことを重点的に実施した。そこで、本研究では JIS A 1418-2 に規定されているゴムボールを用いて、実際の建築物の床に衝撃する方法により、測定値から得られる各種物理量と感覚評価結果の対応を基本に研究を実施した。なお、衝撃源としては、ゴムボール以外に、歩行、足踏み、小走り、ジャンプなどの人の動作でも行った。

感覚評価実験項目としては、日本建築学会から刊行されている居住性能評価指針では、知覚のみを対象としているが、本研究では振動を知覚することと、振動が気になることや不快に思うことは必ずしも同じ判断基準であるとは言えないと考え、今後振動性能をランク付けしていくことを想定し、気になり度合や不快度合などを評価項目に入れた。また、物理量測定では、感覚評価を行う受振点を中心に、振動レベル計を用いて、振動加速度の

計測を行い、加速度最大値や振動レベル、振動暴露レベルなど感覚評価と対応する可能性のある物理量を算出した。

### 4. 研究成果

(1) 平成 24 年度は、まず人の振動感覚に対応する振動応答物理量を明らかにすることを主な目的とし、実験的検討を行った。具体的な内容としては、RC 造の床スラブを対象に、感覚評価実験と物理量測定を行った。感覚評価実験の項目としては、知覚、大きさ度合、気になる度合、不快度合とした。

図 1 は、ゴムボール衝撃を対象として、回数別の物理量と不快度合の結果である。図 1 の結果をみると、単発の  $L_{VE}$  (単発振動暴露レベル) では、衝撃回数の増加に伴い、同じ物理量の値でも、不快度合が大きくなり対応していない。一方、衝撃回数  $N$  を単発の  $L_{VE}$  に「 $+5\log_{10}N$ 」として加算すると、対応が良い。ここで、「 $+k \times 10\log_{10}N$ 」として  $k$  を 0.1 から 1 の間で検討したが、 $k=0.4 \sim 0.5$  が最も良い対応を示したことから、不快度合には積分効果が関係するものの「 $+10\log_{10}N$ 」までは大きくならず、「 $+5\log_{10}N$ 」を加算することで対応が良いことがわかった。ただし、この結果は、短期間の実験室実験で求められたものであり、本来長期的な生活の中で求められる不快度合とは異なる可能性があることから、今後長期的に生活の中で暴露された居住者の反応を検討する必要がある。

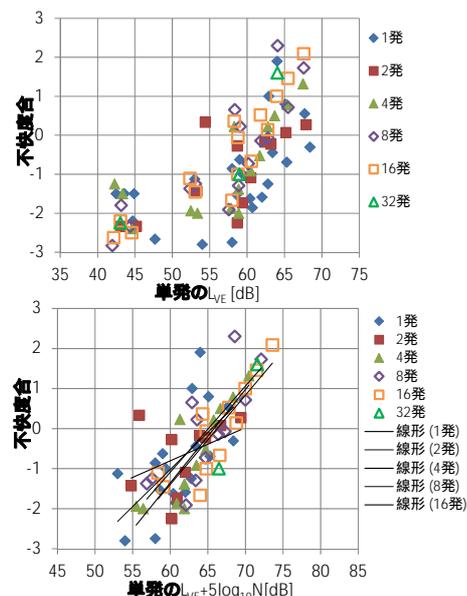


図 1 複数回衝撃による物理量と不快度

次に、 $L_{VE}$  を算出する際の応答波形の積分範囲は、振動が知覚できる範囲のみとすることが妥当と考えられる。すなわち、振動を知覚できない振幅の振動には積分効果は当てはまらないと考えられる。そこで、 $L_{Vmax(10ms)}$  (10ms の時定数で分析した振動レベル最大値) を対象に振動知覚範囲を算出するための検討を行った。 $L_{Va, VW}$  と知覚率の関係を図 2 に示す。 $L_{Va, VW}$  は、文献の「鉛直振動に

関する性能評価曲線」を対象に、決定周波数の応答加速度を評価曲線に沿ってスライドさせ、3~8Hzの応答加速度を求め、振動加速度レベルにした値である。なお、対象とする周波数範囲は3.15~80Hz帯域とし、30Hz以上は評価曲線を8~30Hzと同一勾配で延長した。また、狭帯域振動の定義は、決定周波数の $L_{Va, Vh}$ が、他の帯域に比べて3dB以上大きい場合と定義した。図をみると、狭帯域振動に比べて広帯域振動の場合には、同じ $L_{Va, Vh}$ でも、他の周波数帯域成分が影響し、知覚率が高くなっていることがわかる。そこで、 $L_{Va, Vh}$ の振動知覚閾を算出すると、狭帯域振動の場合、56dB程度であり、本研究では $L_{Va, Vh}$ の56dB以上を振動知覚域として検討することとした。次に、図3に $L_{Va, Vh}$ と $L_{Va, Vh(10ms)}$ の関係、 $L_{Va, Vh(10ms)}$ と $L_{Vmax(10ms)}$ の関係を示す。 $L_{Va, Vh}$ と $L_{Va, Vh(10ms)}$ の関係をみると、両者の対応は非常に良く、 $L_{Va, Vh}$ の56dBは、時定数10msで処理した

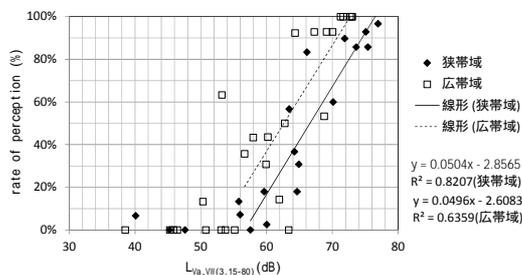


図2  $L_{Va, Vh}$ と知覚率

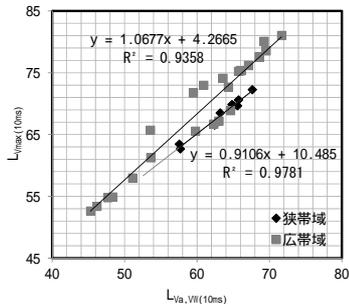
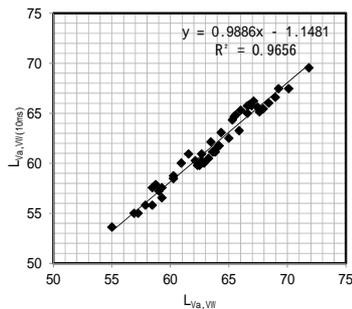


図3 物理量の関係

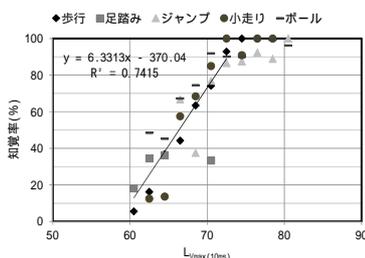


図4  $L_{Vmax(10ms)}$ と知覚率

$L_{Va, Vh(10ms)}$ の54dBに対応することがわかる。 $L_{Va, Vh(10ms)}$ と $L_{Vmax(10ms)}$ の関係をみると、 $L_{Va, Vh(10ms)}$ の54dBは、狭帯域振動の場合、 $L_{Vmax(10ms)}$ の59dBに対応する。さらに、人の動作時やゴムボール衝撃時を対象とした実験を行い、 $L_{Vmax(10ms)}$ と知覚率の関係を示すと図4のようになる。図をみると、衝撃源によらず、 $L_{Vmax(10ms)}$ が60dB程度で知覚し始めていることがわかる。以上から、本研究では $L_{Vmax(10ms)}$ が59dB以上を振動知覚域と定義した。

(2) 平成25年度は、ゴムボール衝撃による床スラブの鉛直振動(体感振動)性能の評価方法の提案を行うための評価量について検討を行った。具体的な内容としては、平成24年度に引き続き、RC造の床スラブを対象として、振動感覚評価実験とそれに対応する振動応答物理量の測定・分析を行った。

図5は $L_{Vmax(10ms)}$ と感覚度合、図6は $L_{Veq, h, Th} + 20 \log_{10} T_h^{1/4}$ と感覚度合の結果である。なお、 $L_{Veq, h, Th}$ は、(1)の結果から $L_V(10ms)$ が59dB以上の値のみを積分し、その対象時間で除した等価振動レベルである。また、 $T_h$ は59dB以上となる時間の総和であり、振動知覚時間と定義した。図5,6をみると、大きさ度合は

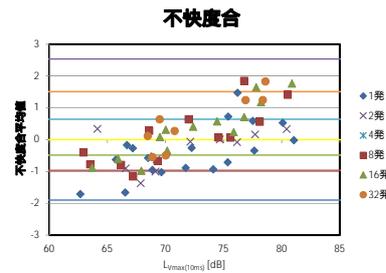
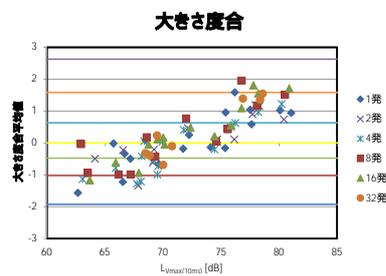


図5  $L_{Vmax(10ms)}$ と感覚度合

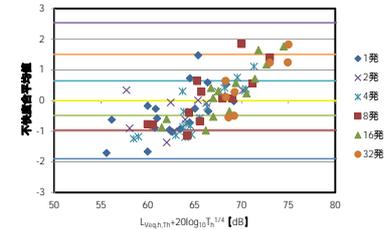
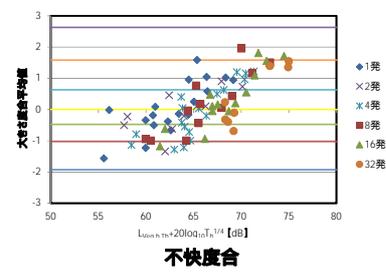


図6  $L_{Veq, h, Th} + 20 \log_{10} T_h^{1/4}$ と感覚度合

$L_{Vmax(10ms)}$ のような振動応答物理量の最大値と対応が良いことがわかる。知覚率も同様な結果であった。一方、不快度合は、(1)と同様に、振動暴露量に対応することを示し、ゴムボールの衝撃回数が 30 回程度までの短い継続時間の場合には、「 $+20\log_{10}T^{1/4}$ 」を加算した  $L_{Veq,h,Th}+20\log_{10}T^{1/4}$  と対応が良いことがわかる。気になり度合も同様な結果であった。なお、「 $+20\log_{10}T^{1/4}$ 」は「 $+5\log_{10}N$ 」と対応しており、(1)と同様な傾向が得られた。

さらに、衝撃回数が 30 回程度を超えた衝撃振動の継続時間の検討として、実験時間を最大 10 分まで延長し、実験的検討を行った。図 7 に実験時間及び振動知覚時間と不快度合相対値の関係を示す。振動知覚時間は前述したように、 $L_{V(10ms)}$  が 59dB 以上の時間の総和である。図 7 の上図をみると、衝撃振動の実験時間に対して感覚度合が指数的に増加し、衝撃振動の継続時間 5 分程度から感覚量相対値が飽和し始めている傾向が窺われる。また、図 7 の下図をみると、同様な傾向を示しており、振動知覚時間の違いによって感覚増加量

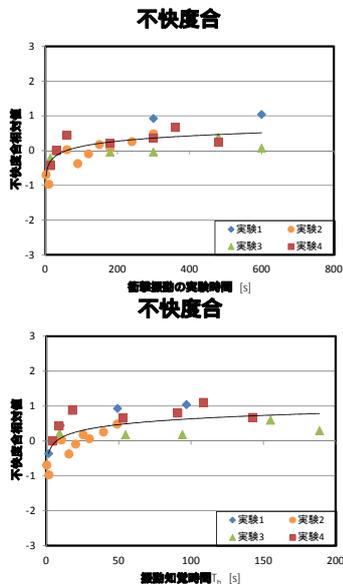


図 7 実験時間及び振動知覚時間と不快度合

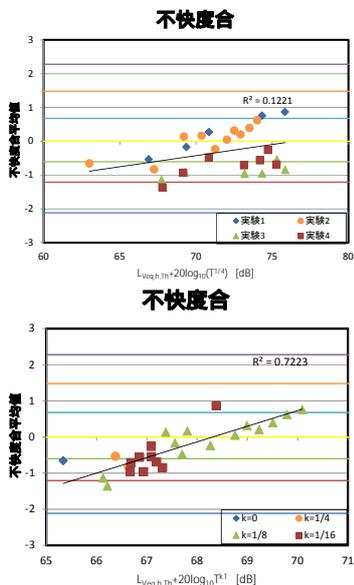


図 8 実験時間の延長に伴う物理量と不快度合

が変化していることがわかる。そこで、本報では評価物理量を「 $L_{Veq,h,Th}+20\log_{10}T_h^{k1}$ 」として、振動知覚時間によって  $k1$  を「A:  $T_h < 1s$   $k1=0$ ; B:  $1 T_h < 4$   $k1=1/4$ ; C:  $4 T_h < 50$   $k1=1/8$ ; D:  $T_h > 50$   $k1=1/16$ 」のように変化させた。

図 8 に  $L_{Veq,h,Th}+20\log_{10}T_h^{1/4}$  及び  $L_{Veq,h,Th}+20\log_{10}T_h^{k1}$  と不快度合の関係を示す。図 8 の上図の  $L_{Veq,h,Th}+20\log_{10}T_h^{1/4}$  では、衝撃振動が長時間暴露された場合、感覚度合との対応が悪くなっている。一方、振動知覚時間  $T_h$  によって  $k1$  を変化させた図 8 の下図の  $L_{Veq,h,Th}+20\log_{10}T_h^{k1}$  では良い対応を示していることがわかる。

(3) 平成 26 年度は、ゴムボール衝撃による床スラブの鉛直振動(体感振動)性能の評価方法の提案を行うための評価量について、H25 年度で提案した評価量について、さらに実験的検討を行い、10 分程度までの継続時間を有する衝撃振動を対象に人の振動感覚と対応の良い評価尺度の提案を行った。

(2)で提案した  $20\log_{10}T_h^{k1}$  は  $k1$  の値が図 9、図 10 に示すように不連続であったため、連続関数として  $k$  の式を様々なパターンで検討した。その結果、感覚評価結果と対応の良い

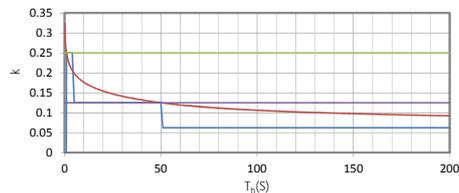


図 9 k と  $T_h$  (振動知覚時間) の関係

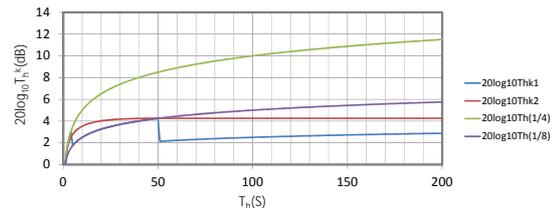


図 10  $20\log_{10}T_h^k$  と  $T_h$  (振動知覚時間)

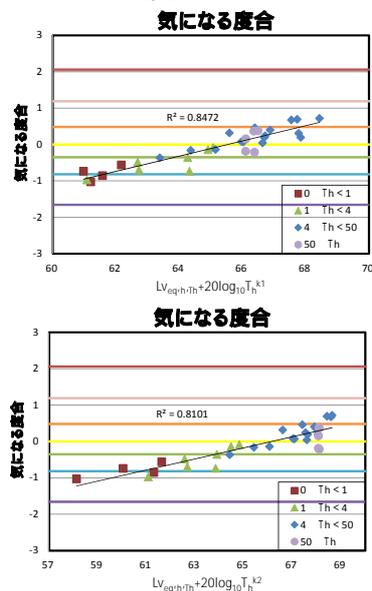


図 11  $L_{Veq,h,Th}+20\log_{10}T_h^{k1}$  及び  $L_{Veq,h,Th}+20\log_{10}T_h^{k2}$  と不快度合

式として、 $k_2 = -(1/136) \times 10 \log_{10} T_h + (1/4)$  を提案した。なお、 $20 \log_{10} T_h^{k_2}$  は  $T_h$  が 50 秒以上では一定とした。

図 11 に  $L_{\text{Veq},h,Th} + 20 \log_{10} T_h^{k_1}$  及び  $L_{\text{Veq},h,Th} + 20 \log_{10} T_h^{k_2}$  と不快度合の関係を示す。図をみるとどちらの図もかなり対応が良いことがわかり、本報で連続関数として提案した  $k_2$  の妥当性が示された。ただし、ここで求めた気になる度合や不快度合は実験室で 10 分程度実施したものであり、本来の居住空間を対象として居住者が生活実感として長期に暴露された気になる度合や不快度合とは異なることが予想される。今後は、居住者の生活実感として得られる気になる度合や不快度合と物理量の妥当性の検討を行い、基準値の提案を含めて検討していく必要がある。

(4) 3 年間の研究期間で、ゴムボール衝撃を対象に、衝撃振動に対する人の振動感覚に影響を与えるパラメータの抽出を行い、評価方法の提案を行うための評価尺度を提案することができた。また、RC 造の床スラブを中心として、測定方法や評価方法に関する検討も行った。測定方法では、RC 造や S 造のスラブの振動測定を加振点別に 1m メッシュで行い、 $L_{\text{Vmax}}(10\text{ms})$ 、 $L_{\text{Va, VII}}(10\text{ms})$ 、 $L_{\text{VE}}$  などの分布特性を把握した。また、分析方法では時定数変化による物理量の変化の定量的検討を実施した。

以上のように、本研究の成果は、人の動作等によって生じる体感振動分野に大きく貢献できるものと考えられ、提案した評価尺度が有効に利用されることを望むものである。今後は、居住者を対象に、不快度合などの調査を行っていくことで、評価基準の提案を行いたい。

#### <引用文献>

日本建築学会編：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説、2004.5

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

富田隆太、井上勝夫、居住床を対象とした衝撃振動の周波数特性が人の振動感覚に与える影響、日本建築学会環境系論文集、査読有、第 79 巻、2014、pp.927-935

[学会発表](計 7 件)

玉置祐人、井上勝夫、富田隆太、坂元美沙希、振動暴露時間の延長による振動感覚の飽和時間と振動応答物理量に関する検討(床振動測定用標準衝撃源としてのボールの有用性に関する研究:その 15)、日本建築学会大会学術講演会、2014.9.12、神戸大学(兵庫県・神戸市)

坂元美沙希、井上勝夫、富田隆太、玉置祐人、衝撃回数の変化に対する振動応答

物理量と感覚度合に関する検討(床振動測定用標準衝撃源としてのボールの有用性に関する研究:その 14)、日本建築学会大会学術講演会、2014.9.12、神戸大学(兵庫県・神戸市)

富田隆太、井上勝夫、鉛直振動の時間影響を考慮した評価例、日本建築学会第 32 回環境振動シンポジウム、2014.1.31、日本建築学会 建築会館ホール(東京都・港区)

富田隆太、井上勝夫、玉置祐人、人の動作及びゴムボール衝撃時を対象とした振動応答物理量と感覚度合に関する検討、日本騒音制御工学会秋季研究発表会、2013.9.6、熊本大学(熊本県・熊本市)

富田隆太、井上勝夫、玉置祐人、衝撃振動の回数を考慮した振動応答物理量と感覚度合の対応性に関する検討(床振動測定用標準衝撃源としてのボールの有用性に関する研究:その 13)、日本建築学会大会学術講演会、2013.8.31、北海道大学(北海道・札幌市)

玉置祐人、井上勝夫、富田隆太、衝撃力の立ち上がり特性の変化が振動感覚に与える影響(床振動測定用標準衝撃源としてのボールの有用性に関する研究:その 12)、日本建築学会大会学術講演会、2013.8.31、北海道大学(北海道・札幌市)

富田隆太、井上勝夫、衝撃振動を対象とした衝撃回数及び間隔と振動感覚に関する検討、日本騒音制御工学会秋季研究発表会、2012.9.6、日本大学理工学部(東京都・千代田区)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

富田隆太 (TOMITA, Ryuta)  
日本大学・理工学部・准教授  
研究者番号：4 0 3 3 9 2 5 5

##### (2) 研究分担者

井上勝夫 (INOUE, Katsuo)  
日本大学・理工学部・教授  
研究者番号：3 0 1 0 2 4 2 9