床振動に対する振動感覚, 不快度評価に関する実験的研究

その1 継続時間のもたらす影響

EXPERIMENTAL STUDY ON HUMAN SENSITIVITY AND DISCOMFORT TO
FLOOR VIBRATION (PART 1)高橋良典^{*1}, 吉岡宏和^{*1}, 井上竜太^{*2}, 田中利幸^{*3}

Yoshinori TAKAHASHI, Hirokazu YOSHIOKA, Ryuta INOUE

and Toshiyuki TANAKA

This paper discussed on human sensitivity and discomfort to floor vibrations with various duration times. Shaking table tests with vibrations of various combinations of the frequencies, amplitudes and duration times were performed. The sensitivity and the discomfort to the whole-body vibrations are evaluated by test subjects seated on the shaking table.

As the results, the duration times influence to the discomfort more than the sensitivity to the vibrations. The discomfort to the vibration with the duration time of 30sec. increases about from 1.2 to 1.3 times as large as one with the duration time of 3 sec. .

Keywords : Floor vibration, Sensitivity to vibration, Discomfort, Duration time of vibration

床振動, 振動感覚, 不快度, 床振動の継続時間

1. はじめに

床構造は、人、家具、機器等の荷重を支える役割を果たすと共に、それらの人為的、機械的加振を直接受け吸収する役割を果たしており、室内環境にとって重要な位置付けにある。

鉄骨造大スパン床構造の振動実験結果から得られる減衰定数は、1～2%程度の低い値を示すことが多く、減衰定数の低さは、正弦波加振では『著しい共振現象』を、周期的な衝撃加振に対しては『振動の重複・増幅（共振）現象』を引き起こし、これらが振動障害として現れる例は少なくない。筆者らは、床構造体の持つ減衰性能の差異が、床構造体の振動性状にどのような変化を与え、人間の感覚にどのような影響をもたらすかを実験結果に基づき定量的に示すと共に、歩行、小走り等の日常的な外乱に対する動吸振器による床振動制御法の有効性を既報において報告した。^{1)～3)}

こうした研究を進め実建物に適用する中で、継続時間 10～30 秒、最大振幅 3～5cm/sec.² 程度の床振動が不規則かつ断続的に繰り返し発生するクレーム事例に遭遇した。この事例では、クレームが発生した1993 年当時、事務所における床振動の許容レベルと考えられていた5cm/sec.² 程度の床振動が生じた場合に、事務所内で執務する人々の大半が、業務上不快と訴える状態であり、事務所における床振動の許容レベルを見直す必要が生じた。

クレームの主要因は床振動の継続時間と考えられたが、当時参照可能な既往の研究⁴⁾は、振動を感じる人の知覚、感覚的な大きさに注目

したものが大半で、振動を感じる人の不快感に注目したものがなかったことから、振動台を用いた振動感覚実験⁵⁾を実施した。

なお、石川⁶⁾らが振動を感じる人の不快感、不安感等に注目した研究を行なっているが、現在も、本論文が対象とした継続時間の振動を取り扱った研究事例は数少ない。

本振動感覚実験の概要、結果を要約し、以下に記述する。

2. 実験の概要

クレーム事例を参考に、図1、表1に示すようにモデル化した刺激振動を振動台上で再現し、評価実験を行なうことによって、振動の大きさ、継続時間、種類と振動感覚評価、不快度評価の関係を検討した。本実験に用いる振動波形（刺激）の特徴は、以下に記述する通りである。

図1 刺激振動例(5Hz, 5 cm/sec.²)

*1 竹中工務店 技術研究所 主任研究員・博士(工学)

*2 竹中工務店 技術研究所 研究員・博士(工学)

*3 竹中工務店 大阪本店 営業部 副部長・工博

Chief Researcher, R&D Institute, Takenaka Corp., Dr. Eng.

Researcher, R&D Institute, Takenaka Corp., Dr. Eng.

Senior Manager, Business Promotion Dept., Osaka Main Office, Takenaka Corp., Dr. Eng.

- ・図1に見られるように、2.5Hzの周期的な衝撃加振によって、5Hz、7.5Hzの固有振動数を持つ床が共振し、一定振幅の正弦波、または6秒周期でうなり波を生じる状態を想定している。
- ・最大振幅は、クレーム発生時に活用されていた日本建築学会『建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説（制定1991）』⁷⁾（以下学会旧指針(1991)と記す。）の連続振動に対する性能評価区分、ランクを参考に、5cm/sec.²(V-5：事務所の一般的なよりどころ)、3cm/sec.²(V-3：事務所のより望ましいレベル)、1.5cm/sec.²(V-1.5：会議・応接室のより望ましいレベル)の3段階に、2cm/sec.²、2.5cm/sec.²を加えた5段階の目標振幅を設定している。
- ・継続時間については、日常的に体感する振動としては、比較的継続時間の長い10～30秒の振動と、歩行振動などの継続時間の短い床振動との相違が検討できるように、3秒、5秒、10秒と30秒の4つの継続時間を設定した。

表1 刺激振動の一覧 (5Hz, 7.5Hz)

波の種類	継続時間 (秒)	目標最大加速度 (cm/sec. ²)				
		1.5	2.0	2.5	3.0	5.0
正弦波	3	—	○	—	○	○
	5	—	○	—	○	○
	10	○	○	○	○	○
	30	○	○	○	○	○
うなり波	30	○	○	○	○	○

○：実験を実施した刺激 —：実験を実施しなかった刺激

図2に、振動感覚実験のブロックダイアグラムを示す。図に示すように計算機内部に記憶させた波形データは、D/Aコンバーターを介して振動台に入力される。また、振動台テーブル中央位置にセットした振動センサから得られた加速度波形を分析し、加振時間内の最大振動レベル⁹⁾をコンピューターに転送し記録する。

図2 実験計測のブロックダイアグラム

振動レベルは、JISC 1510に定められた人間の振動感覚特性を考慮した加速度のパワー（実効値）を対数表現したものである。

$$VL(\text{振動レベル dB}) = 10 \log(A/A_0)^2 \dots\dots (1)$$

A：加速度振幅(cm/sec.² 実効値)

A₀：基準加速度振幅=10⁻³(cm/sec.² 実効値)

本実験のように非常に微小な振動を対象とする場合、振動台稼動時の微動(ノイズ)の影響を含めた振幅を正當に評価する必要がある。

このため、図3に示す既報実験結果^{2)~3)}で振動感覚評価との相関が明らかとなった(2)式を介して算出される換算加速度A_{eq}を各刺激振動の最大加速度とした。(以下A_{eq}を最大加速度と記する。)

$$A_{eq} = 10^{(L-60)/20} \times \alpha \dots\dots\dots (2)$$

A_{eq}：換算加速度 (cm/sec.² 0-P 値)，L：振動レベル(dB)

α：=√2(実効値から0-P値への変換係数)

図3 振動レベルから算出される換算加速度と振動感覚評価の関係³⁾

写真1に示すように、被験者は振動台中央部に1人ずつ座り、各振動数に分けランダムに配置された21種類の刺激振動を各々2回ずつ与えられ、評価シートに振動感覚評価、不快度評価を記入する。

写真1 振動感覚実験の状況

実験に使用した振動台は動電型のもので、最大加振力12,000kN、振動台テーブル寸法1,000×1,000mm、可動部重量500kgが主な仕様である。振動台のもつ常時微動は、主に油圧ユニットから発生するもので加速度振幅0.5cm/sec.²以下（振動レベル40dB以下）であった。

また、椅子と振動台は固定していないが、予備試験によって振動台上から椅子座面（底板）への振動増幅、振動台および椅子座面の水平振動量をチェックしており、振動台上から椅子座面への振動増幅は、水平・上下共に振動レベル差で+0.5dB(+5%)以下、振動台および椅子座面の水平方向の振動レベルは、振動台上下加振成分の-16.5dB以下(15%以下)であった。この予備試験結果をもとにクレームが起きた環境の再現を重視して、床振動を評価する対象として振動台上の加速度を採用した。

表2に示すように、健康な成人(男子24名、女子9名、年齢20～50才)合計33名を被験者とした。実験時における被験者の姿勢は事務用イスに座る姿勢であり、クッションに類するものは用いていない。

なお、実験は長時間にわたるために、振動数毎に実施しており、1つの振動数、1人当りの実験時間は20～25分程度である。

なお、振動感覚評価については、感覚的な大きさに注目した“感じない”、“少し感じる”、“よく感じる”と“強く感じる”の4段階の評価区分を用いた。

また、不快度評価としては、被験者が事務スペース内で業務中に受ける振動としての不快度に注目し、“不快である”、“どちらとも言えない”と“不快でない”の3段階の評価区分を用いた。

表2 被験者の構成

性別	年齢				小計
	20代	30代	40代	50代	
男性	7	3	11	3	24
女性	8	1	—	—	9
小計	15	4	11	3	33

—：該当する被験者がいないことを表す。

3. 実験結果

3.1 刺激振動の再現性

図4は、“継続時間10秒、目標振幅2.5cm/sec²正弦波”の振動台上で再現された最大加速度の分布を表し、図5は、継続時間10秒正弦波の振動台上で再現された最大加速度と目標最大加速度の関係を表している。また、図6は、5Hz刺激振動各々の振動台上で再現された最大加速度の分布を表している。

なお、図5、図6中の丸印は、各刺激振動の最大加速度の平均値をあらわしており、実線で示した範囲は標準偏差(±σ)を表わしている。

これらの図に見られるように、振動台上で再現された上下振動の最大加速度と目標最大加速度の差は、平均値で±5%(±0.1～0.2cm/sec²)以内であり、また、標準偏差も0.1～0.2cm/sec²程度とばらつきも少ない。

これらの実験結果から、有意な振幅の差を持って、ほぼ目標通りの刺激振動を被験者に与えることができたものと判断される。

図4 継続時間10秒、目標振幅2.5cm/sec²正弦波の振動台上で再現された最大加速度の分布

図5 振動台上で再現された最大加速度と目標最大加速度の関係(継続時間10秒正弦波)

図6 振動台上で再現された最大加速度の分布例(5Hz)

3.2 振動感覚、不快度評価に関する実験結果と考察

実験データ処理においては、感覚評価、不快度(居住性能)評価の傾向を統計的に分析するために表3に示す数量化を行ない、最大加速度、継続時間との関係を分析・考察する。

表3 感覚評価、不快度評価の数量化表現

スコア	感覚評価	不快度評価
1	感じない	不快でない
2	少し感じる	どちらとも言えない
3	よく感じる	不快である
4	強く感じる	

3.2.1 継続時間と振動感覚評価との関係

図7.8に、刺激振動数毎の最大加速度と振動感覚評価の関係を示す。図中の縦軸は数量化表現した振動感覚評価、横軸は各刺激振動の平均最大加速度を表している。また、図中●印に、各刺激振動に対する振動感覚評価の平均を示し、参考として縦棒の幅に母平均の95%信頼区間(推定結果)を示した。

これらの図に見られるように、振動感覚評価は最大加速度との相関が高い。また、継続時間の異なる正弦波を比較すると、継続時間が長くなるに従い、振動感覚評価は大きくなる。継続時間30秒正弦波の振動感覚評価は、継続時間3秒正弦波の振動感覚評価に対して、数量的表現すれば10～20%程度大きくなることが解かる。

また、継続時間30秒のうなり波と他の刺激振動を比較すると、振動数によって若干傾向が異なるが、うなり波に対する振動感覚評価は、同レベルの最大加速度を持つ継続時間30秒正弦波の振動感覚評価に比べ、10～20%程度小さくなる傾向にある。

また、図1(b)中の破線に示すように、うなり波の振幅が最大加速度の7割以上を示す継続時間が約3秒となるため、うなり波の振動感覚評価は継続時間3秒正弦波の振動感覚評価と同程度となっている。

図7 各刺激振動に対する振動感覚評価結果(5Hz)

図8 各刺激振動に対する振動感覚評価結果(7.5Hz)

表4は、学会旧指針(1991)に整理されたマイスターの振動感覚実験結果と本実験における継続時間10秒正弦波に対する平均感覚評価の対応を示したものである。

本実験結果における振動感覚評価結果は、5Hzに比べ7.5Hzの方がやや大きな感覚評価となっているが、マイスターの振動感覚曲線にほぼ対応した実験結果が得られているものと判断される。

表4 感覚評価に関する本実験結果と既往の実験結果⁷⁾の対応

最大加速度		1.5cm/sec. ²	3cm/sec. ²	5cm/sec. ²
マイスターの振動感覚曲線		「ようやく感じる」の下限領域	「ようやく感じる」の中間領域	「よく感じる」の下限領域
実験結果	5Hz	「感じない」領域	「少し感じる」の中間領域	「よく感じる」の中間領域
	7.5Hz	「感じない」と「少し感じる」の境界領域	「少し感じる」と「よく感じる」の境界領域	「よく感じる」と「強く感じる」の境界領域

3.2.2 継続時間と不快度評価との関係

図9,10に、刺激振動毎の平均最大加速度と不快度評価の関係を示す。図中の縦軸は数値化表現した不快度評価、横軸は各刺激振動の平均最大加速度を表している。また、図中●印に各刺激振動に対する不快度評価の平均を示し、参考として縦棒の幅に母平均の95%信頼区間(推定結果)を示した。

不快度評価は振動感覚評価と同様に、最大加速度の増加とともに高くなる。また、継続時間の異なる正弦波を比較すると、継続時間が長くなるに従い、不快度評価は高くなる。継続時間30秒正弦波の不快度評価は、継続時間3秒正弦波の不快度評価に対して、数値的表現すれば20~30%程度高くなること解る。

また、継続時間30秒のうなり波と他の刺激振動を比較すると、振動数によって若干傾向が異なるが、うなり波に対する不快度評価は、同レベルの最大加速度を持つ継続時間30秒正弦波の不快度評価に比べ小さく、振動感覚評価がほぼ等しい継続時間3秒正弦波、あるいは、継続時間5秒正弦波よりも不快度評価が高くなっている。

3.3 継続時間が振動感覚, 不快度評価に与える影響

図11,12は、最大加速度5cm/sec.²の各刺激振動に対する振動感覚評価、不快度評価の割合を示したものである。各図中の横軸は、被験者が答えた振動感覚評価,不快度評価を表し、縦軸は各評価を下した回答数の割合(各評価を下した回答数/全被験者の回答数)を百分率で表したものである。

これらの図から、正弦波の継続時間が振動感覚評価に与える影響よりも、不快度評価に与える影響の方が相対的に大きいことが良く解る。継続時間3秒の場合は「不快である」と答える割合が50%程度に留まるが、継続時間が長くなるに従い「不快である」と答える割合が急激に増加し、継続時間30秒では80~90%に達する。また、うなり波の振動感覚評価は、継続時間3秒正弦波のそれとほぼ等しいが、不快度評価は、継続時間10秒正弦波のそれとほぼ等しい結果となっている。

図13,14は、最大加速度2cm/sec.²および3cm/sec.²の7.5Hz各刺激振動に対する振動感覚評価、不快度評価の割合を示したものである。

正弦波の継続時間が、振動感覚評価に与える影響よりも、不快度評価に与える影響の方が相対的に大きくなることは、最大加速度5cm/sec.²と同様な結果である。

図9 各刺激振動に対する不快度評価結果(5Hz)

図10 各刺激振動に対する不快度評価結果(7.5Hz)

図11 5Hz 最大加速度 5cm/sec.²の振動感覚,不快度評価

図12 7.5Hz 最大加速度 5cm/sec.²の振動感覚,不快度評価

図 13 7.5Hz 最大加速度 2cm/sec.² の振動感覚, 不快度評価 図 14 7.5Hz 最大加速度 3cm/sec.² の振動感覚, 不快度評価

また、うなり波の振動感覚評価は、継続時間 3 秒正弦波の振動感覚評価とほぼ等しいことは、最大加速度 5cm/sec.² と同様な結果であるが、不快度評価の結果は異なる。

最大加速度 2cm/sec.² では、うなり波の不快度評価は継続時間 3 秒正弦波の不快度評価とほぼ等しいが、最大加速度 3cm/sec.² では、うなり波の不快度評価は、継続時間 5 秒正弦波の不快度評価に似通っている。

この不快度評価の差については、うなり波の場合、最大加速度が小さくなるに従い振動を感じている継続時間も徐々に短くなることが、不快度評価に影響を与えているものと考えられる。

以上の実験結果から、床振動を感じる人の不快度を居住性能評価の尺度と考えると、これまで居住性能評価の主軸として考えられてきた知覚あるいは振動感覚評価に、振動の継続時間を評価軸に加えるとともに、うなりの影響を考慮することが必要である。

以下においては、限られた実験データであるが、歩行振動に比べ、継続時間の長い 10～30 秒の振動を取り扱う場合に、継続時間、うなりの影響を考慮して、設計目標となる最大加速度をどの程度低減し、再設定する必要があるかについての検討・試算を行なう。

こうした検討・試算を行なう主旨は、以下の 2 点である。

- ・学会旧指針 (1991) 制定後 15 年以上が経過しているが、本指針が活用されてきた主な設計問題は、大スパン床構造体の歩行振動である。構造設計者は自身が設計した建物を介して、歩行振動のような数秒間の振動の大きさ、不快度を経験的に判断できる。しかし、本実験が取り扱ったような継続時間 10～30 秒の振動を構造設計者は体感した経験がなく、判断できないのが実情である。この点が、筆者らが遭遇したクレーム事例の設計上の問題点であった。

- ・また、継続時間 10～30 秒の振動も建物内で発生頻度の高い歩行振動とのバランスを考え、設計目標値を設定するのが合理的である。こうした観点から、学会旧指針 (1991) 現在活用されている学会居住性能評価指針⁸⁾の性能評価曲線上に現れない継続時間の影響を円滑に取り込む方法として、設計目標値を低減する方法を検討する。

図 15 に「不快である」と答える確率分布と最大加速度、継続時間の関係例を示した。図中横軸は、各刺激振動を最大加速度でさらに層別した小データ群の平均最大加速度を表し、縦軸は各小データ群内で「不快である」と評価を下した回答数の割合を表している。

また、図中●印は実験結果を表し、実線は、確率分布は最大加速度に対して正規分布すると仮定して、最小 2 乗法によって求めた回帰曲線を表している。これらの図に見られるように、回帰分析結果は、70～80%までの確率分布をよく表現している。

図 16 は、刺激振動毎に求めた回帰曲線から 10%、30%、50%の人が振動を受けた際「不快である」と答える最大加速度を推定した結果を表している。「不快である」と答える確率が 50%となる最大加速度の推定値は、歩行、小走りによる床振動を想定した継続時間 3 秒程度の振動については、各々 5.5cm/sec.² (5Hz)、4.5cm/sec.² (7.5Hz) 程度であり、学会旧指針 (1991) V-5⁷⁾ (事務所の一般的なよりどころ) にほぼ相当している。これに対して、継続時間 30 秒については 5Hz では 4cm/sec.² 程度、7.5Hz では、2.5cm/sec.² 程度となり、30～50%程度小さな値となっている。

上記の試算結果から、継続時間 10～30 秒の振動を取り扱う場合には、歩行振動等に適用してきた設計目標値に、30～50%程度の低減率を乗じて再設定する必要があるものと考えられる。

図 15 正弦波振動に対して「不快である」と答えた割合と回帰曲線例 (7.5Hz)

4. まとめ

上記の実験、考察結果の要旨は、以下の通りである。

- 1) 床振動の継続時間が振動感覚評価に与える影響よりも、床振動の継続時間が不快度評価に与える影響の方が、相対的に大きいことを示した。また、床振動を感じる人の不快度を居住性能評価の尺度と考えると、これまで居住性能評価の主軸として考えられてきた知覚あるいは振動感覚評価に加え、振動の継続時間、うなりの影響を考慮することが必要である事を明らかにした。
- 2) 「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」^{7),8)}の居住性能評価曲線上に現れない床振動の継続時間の影響を円滑に取り込む方法として、設計目標値を低減する方法を検討した。また、限られた実験データであるが、実験結果から振動の継続時間、うなりの影響を考慮した低減率を試算した。

なお、実験を実施したうなり波のパターンは1ケースのみであり、その影響評価については(その2)において報告する予定である。

図 16 「不快である」と答える最大加速度の推定結果

参考文献

- 1) 高橋良典, 村井信義, “床構造の減衰性能に関する実験的研究”, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 387 号, pp.89-96, 1988.5
- 2) 高橋良典, 片山和喜, 吉岡宏和, 今沢民雄, “床構造体の減衰性能に関する実験的研究(その 2)”, 日本建築学会構造系論文集, 第 507 号, pp.61-67, 1998.5
- 3) 高橋良典, 片山和喜, 吉岡宏和, 今沢民雄, 村井信義, “床構造体の減衰性能に関する実験的研究(その 3)”, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, pp.81-88, 2000.3
- 4) 三輪俊輔, “振動の感覚と評価”, 音響技術 no.2, pp.23-31, 1972.7
- 5) 高橋良典, 吉岡宏和, 田中利幸, 瀬川輝夫他, “床振動の継続時間と振動感覚評価に関する実験(その 1)実験概要(その 2)実験結果”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1 分冊, pp.291-294, 1997.9
- 6) 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報告集, 第 588 号, pp.9-14, 2005.2
- 7) 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 (1991 制定), 丸善, 1991
- 8) 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 (2004 改定), 丸善, 2004
- 9) (社)日本音響材料協会, “騒音振動対策ハンドブック”, 技報堂出版, 1982 年 1 月

(2007年2月6日原稿受理, 2007年7月10日採用決定)