

鉛直振動に対する感覚の特性をふまえた 性能説明資料の提示

Explanatory Material of Housing Performance based on Characteristics of Sense of Vertical Vibration

野田 千津子* 石川 孝重**
Chizuko NODA Takashige ISHIKAWA

Abstract This study investigated the characteristics of the perception threshold and sensory evaluation of vertical vibration. A questionnaire was prepared to determine a suitable category from 5 categories in a vibration test. Scatters in perception threshold and sensory response were evaluated based on the probability of a category being chosen for each experimental object vibration, and the relationship between them and physical elements of vertical vibration were investigated. A common characteristic of frequency to perception threshold and sensory response was found. Response probability was constant to acceleration under 7Hz and less responsive at frequencies above 7Hz. The acceleration range and scatters of response differed depending on the types of sensory evaluation. This study presents explanatory material of housing performance based on characteristics of sense of vertical vibration.

Key words: vertical vibration 鉛直振動, perception probability 知覚確率, sensory evaluation 感覚評価, performance indication 性能表示, habitability 居住性能

1. はじめに

住宅や建築に発生する鉛直振動の居住性能評価の規範となるのは、知覚閾や心理評価など、鉛直振動に対する人間の感覚である。従来、居住環境では振動を感じないことが前提とされてきた。一方、複雑化する現代の社会では、交通システムやライフスタイルなどの多様化により、24時間休みなく、様々な振動源が身近に存在する¹⁾ようになり、振動を感じないような居住環境を実現するには、過剰なコストがかかる場合も想定される。

このような現代社会の状況をとらえると、日常的に遭遇する機会の多い環境振動に対して、多様化する居住者の要求に即した居住性能を確保するためには、感じないことを前提とするだけでなく、振動

を感じても、居住者が生活に支障を感じない範囲におさえることが有効である。このような性能評価を実現するには、感じるか、感じないかを表現する知覚閾の特性だけではなく、不快感や振動を感じる強さなど、より心理的な要素を含む感覚評価の特性を把握し、個人差なども含めた評価のばらつきをふまえた指標が求められる。しかしながら、心理的な要素が強い表現に着目した研究は少ない上、知覚閾や感覚評価を平均値などで一義的に評価するものが多く、ばらつきに着目した知見はほとんどない。

鉛直振動に対する感覚評価に関連する既往研究には、人間の動作を加振源とした床振動などを想定し、加振外力の評価とともに、加振源によって異なる応答波形の特性と感覚評価との関係を検討してきた実験^{2,3)}が多い。その多くは減衰性の高い振動を対象とし、個々の加振条件に対する応答波形の評価を個別に検討するものである。一方、定常的な正弦振動を対象に、比較的広い振動数や加速度範囲における感覚評価の基礎的な特性を知ろうとした実験には、三輪ら⁴⁾、Meisterら⁵⁾の研究があるが、いずれ

* 住居学科学術研究員
Researcher, Department of Housing and Architecture
家政学研究科住居学専攻修了(1993)
Graduate School of Home Economics, Division of
Housing and Architecture

** 住居学科
Department of Housing and Architecture

も住宅や建物内の振動を対象としたものではなく、発表から長い年月が経過している。これらの研究は振動感覚に関する貴重な知見を述べているが、実験環境や装置、被験者数などの点から、鉛直振動に対する知覚閾や感覚評価におけるばらつきを評価する意味で、データの蓄積が十分とはいえないのが実状である。

そこで本論文では、鉛直振動に対する知覚閾と心理的な要素を含む感覚評価の特性を、振動の物理量との関係から明らかにするべく、基礎的な振動条件で被験者実験を行った。その結果について、回答確率を用いて評価し、知覚閾と感覚評価におけるばらつきをふまえた特性を把握することが目的である。

さらに実験の結果を、住宅や建築の設計時に求められる目標性能の設定に活用するべく、知覚閾や感覚評価のばらつきを用いた性能レベルの説明資料を検討する。各レベルに相当する振動をどのように感じるかという、より具体的に説明できる資料を提示することが本研究の目的である。

2. 被験者実験の概要

鉛直振動に対する知覚閾および感覚評価の特性を知るため、振動台を用いた被験者実験を行った。Fig. 1に実験の状況を示す。実験に使用した振動台は、動電型の加振装置を用いており、振動発生器からの機械音の影響はきわめて小さい。

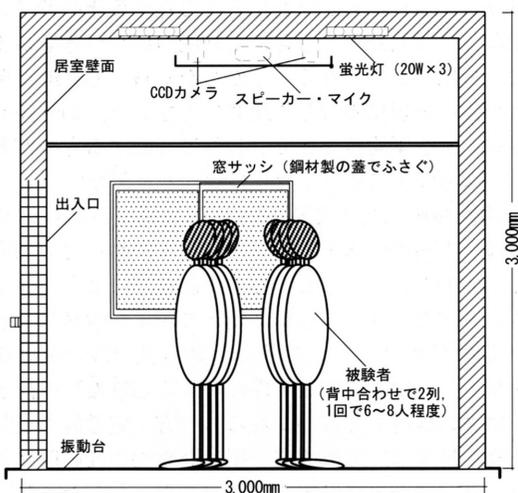


Fig. 1 Condition of vibration experiment

3 m × 3 m のアルミ製の加振テーブルの上に、高さ 3 m の鋼材製の居室を設置する。居室自体の剛性はきわめて高く、振動台と一体となって振動する。19 Hz 程度より高振動数では、約 160 cm/s² 以上になるとサッシ等の共振音が発生するが、高加速度であるため知覚閾に対する影響はほとんどなく、心理的な影響も小さいと考えている。

また、壁には鋼板の間に 10 cm 程度のグラスウールを吸音材として充填しており、この壁体は外部の音を約 15 dB 低減する効果をもつ。さらに実験中は一定の音量で音楽を流し、振動を察知させるような機械音の影響はほとんど生じないように配慮した。

居室の内装は一般の住宅等に用いられる材料を使っている。二方の壁に一般的なサッシを用いた窓があるが、この実験では、窓に鋼材製の蓋をして外部を見通せないようにしている。その他にも、振動を視覚から察知できるようなものは、居室内に置いていない。

入力振動は正弦振動を基本とした波形とし、既往の規準類や実際に住宅の床に生じる振動をふまえて入力範囲を設定した。具体的には、振動数 2.7 ~ 31 Hz、加速度最大値 0.6 ~ 200 cm/s² の範囲で、各物理量とも対数軸で等間隔となるように、評価対象とする振動の目標値 38 種類を設定した。

実験では、振動数を一定にして加速度最大値を徐々に大きくしながら鉛直方向の振動を入力した。振動の目標値に加速度が達した時点で 70 秒間、振幅を定常にし、この間の振動をサーボ型加速度計を用いて収録する。振動はパソコンを用いて常に同じ入力値で制御し、再現性を確認している。

合計 56 名の被験者（女性・18 ~ 25 歳）は居室内で加振テーブルの上に自然な両足立ちの姿勢をとる。今回の実験では、感覚のばらつきを定量的に評価する上で、被験者の条件をある程度限定し、性別や年齢などによるばらつきの要因が少なくなるようにした。既報⁹⁾を中心とした、これまでの実験結果から、平均値で評価する場合に、鉛直振動感覚に対する性別や姿勢の影響が小さいことを確認している。

実験者は実験の開始を伝えて振動を入力し、振動が定常振幅になった 30 秒後に、被験者にアンケートの回答開始を指示する。被験者はその時の振動を感じながら 40 秒程度で、アンケート用紙の各設問に回答する。振動数の入力順序は全被験者で共通で

あるが、大小の順番はランダムに設定した。

本論文では、実験で用いたアンケートから、Table 1に示すカテゴリ尺度法⁷⁾を用いた5種類の評価尺度をとりあげる。被験者は各振動を感じながら、あてはまると思った表現をそれぞれ1つずつ選択する。このような絶対評価による方法を用いたのは、実環境における表現にできるかぎり近づけ、居住者らにわかりやすい表現を知るためである。

Table 1 Categories of questionnaire

尺度名	カテゴリ				
	まったく感じない	あまり感じない	感じる	強く感じる	耐えられない
大きさ	とても小さい	小さい	どちらでもない	大きい	とても大きい
強さ	とても弱い	弱い	どちらでもない	強い	とても強い
不快感	まったく不快でない	あまり不快でない	不快である	かなり不快である	非常に不快である
不安感	まったく不安を感じない	あまり不安を感じない	不安を感じる	かなり不安を感じる	非常に強く不安を感じる

これらの感覚評価や知覚閾には個人差を含めたばらつきが存在し、一様に収束するものではない。このばらつきをふまえた特性を把握するため、各カテゴリの回答確率に着目した。各振動に対するそれぞれのカテゴリの回答確率を直線補間して振動数ごとの知覚確率、回答確率を求める。それらの評価曲線に基づいて、鉛直振動に対する知覚閾・感覚評価と物理量との関係を考察する。

3. 鉛直振動に対する知覚閾の特性

実施したアンケートから、限界評価の「まったく感じない」の回答に着目し、環境振動に関する評価で従来から基盤とされてきた知覚閾の特性を知る。すなわち「まったく感じない」と回答した被験者の割合を、その振動を感じなかった人の割合とし、それ以外を各振動の知覚確率として評価した。

それをもとに、知覚確率を振動数ごとに算出した結果、10%以下、90%以上の範囲、あるいは10%より小さい間隔きざみで算出した結果は、該当する被験者数がきわめて少なくなるなどから、安定した傾向をよみとることができなかった。そこで、10～90%の範囲で10%ごとに知覚確率を算出した。

それらを振動数-加速度の両対数軸上にプロットしたものがFig. 2である。図中には、各振動におけるばらつきを平滑化する試みとして、3次式を用いた回帰曲線を示した。回帰曲線の決定係数はい

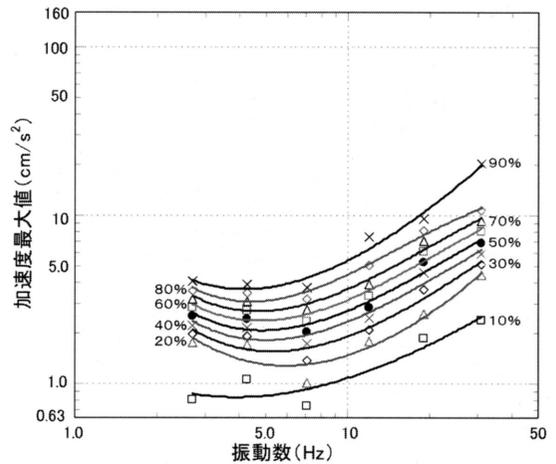


Fig. 2 Probability of perception of vertical vibration

れも0.9前後と高い。知覚確率が低いほど、振動数によるばらつきが若干大きい傾向にある。

知覚確率10～90%の範囲では曲線の傾向は類似しており、鉛直振動の知覚確率は、7 Hz程度以下の低振動数範囲では加速度、それ以上の高振動数範囲では速度に対してほぼ一定となる特性を示す。

また、19 Hz以上でばらつきが若干大きくなるものの、知覚確率20%以上の曲線はほぼ等間隔に位置し、対数で加速度をとらえた場合、その変動に対して知覚確率はほぼ一定の割合で変動する。

4. 鉛直振動に対する感覚評価の特性

知覚閾は振動を感じるか否かという比較的単純な評価であるが、感覚の程度の違いとして、より段階的な表現を含んだ感覚評価は、性能のグレードを評価する指標として有効と考える。実験では、先に知覚確率の評価に用いた限界評価に加え、Table 1のような4種類の尺度を用いて、いくつかの側面から鉛直振動に対する感覚評価を知ろうとした。感じ方の程度、振動の大きさ、強さ、不快感、不安感に着目し、振動の物理量との関係や感覚評価の種類による違いを述べる。

以降、結果の図に示す回答確率の回帰曲線は、感覚評価の特性を表すのに適した曲線を検討した結果、加速度が小さい範囲では3次式、大きい範囲では2次式で表現することとした。回帰曲線の決定係数はいずれも0.9前後と高い。

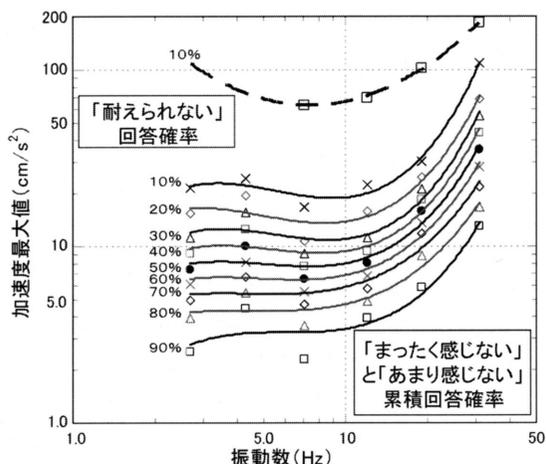


Fig. 3 Probability of response to marginal valuation

例えば、振動を感じるという側面をとりあげても、感じ方の程度による違いがある。Fig. 3に限界評価のカテゴリーに対する回答確率を示す。

知覚閾より感じ方が若干強い表現として、「あまり感じない」あるいは「まったく感じない」と回答した被験者の割合を「あまり感じない」までの累積回答確率として評価してみた。3次式による回帰曲線は知覚確率と同じような形状であるが、振動数によるばらつきが全体的に大きい傾向にある。また振動数が高いほど同じ加速度に対する回答確率がより高く、加速度が大きい範囲にも「あまり感じない」あるいは「まったく感じない」という回答がみられる。そのため、回答確率は10 Hz程度以下の低振動数範囲では加速度、それ以上の高振動数範囲では変位に影響を受ける傾向が強い。また、振動数が比較的低い範囲では10～90%に回答がばらつく範囲が知覚閾より広い。知覚閾では、加速度の増加にともなって振動を感じる人が急激に増える一方、あまり感じない範囲は人によって違いがあり、回答がより広い範囲にばらつくことがわかる。

一方、「耐えられない」と表現される振動の範囲はきわめて狭く、評価がもっとも厳しい7.1 Hzでも、回答確率10%の曲線は60 cm/s²程度に位置する。これは後述する他のカテゴリーと比較して特徴的である。7.1 Hzより振動数が低い場合には、実験で対象とした範囲で加速度がもっとも大きい74 cm/s²の振動でも、「耐えられない」と感じる人は10%未満である。一方、10 Hz程度より振動数が高くなるほど、

同じ加速度で「耐えられない」と感じる人は少くなる傾向にあり、速度に対して回答確率がほぼ一定となる傾向を示す。

このような感じ方の程度という側面だけでなく、他の心理的な要素を含んだ感覚評価によって特徴があり、種類によって傾向が分かれる。例えば、Fig. 4に示す振動の大きさにかかわる表現とFig. 5に示す強さにかかわる表現は、ほぼ類似した特性を示す。

「とても小さい」「とても弱い」の回答確率は「まったく感じない」と「あまり感じない」の累積回答確率と類似した振動数特性を示し、ばらつきも同程度である。10～90%に回答がばらつく加速度の範囲は、

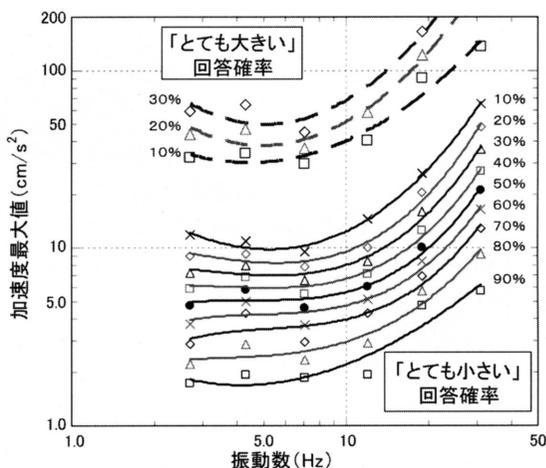


Fig. 4 Probability of response to magnitude valuation

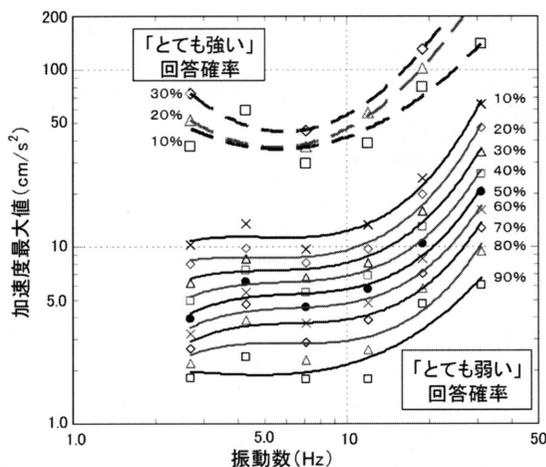


Fig. 5 Probability of response to intensity valuation

知覚確率と「あまり感じない」までの回答があてはまる範囲の中間に位置する。

一方「とても大きい」「とても強い」の回答確率は、実験で対象とした加速度が大きい範囲の振動に対して、多くても30%程度が「とても強い」「とても大きい」と回答する一方、回答確率10%は最低でも40 cm/s^2 程度に位置し、居住性能評価の対象となる振動より大きい加速度範囲にあてはまる。7.1 Hzで評価がもっとも厳しく、振動数がより高くなるほど、同じ加速度の振動に対して「とても大きい」「とても強い」と感じる人が、大きく減少する傾向にある。

両者を比較すると、強さにかかわる表現より、大きさにかわる表現の方が振動数による回答確率のばらつきが少なく、対数でとらえた加速度の値に対して、知覚確率がほぼ一定の割合で変動する。

これらは振動の様子に着目した表現であり、振動の物理量との関係が比較的安定しているが、Fig. 6に示す不快感、Fig. 7に示す不安感のように、心理的な要素のより強い表現は、回答のばらつきが全体的に大きい傾向にある。不安感に関しては、各被験者が実験環境における評価の観点を定めることが難しいことも一因となって、回答のばらつきが特に大きい。高振動数になるほど「まったく不安を感じない」と「非常に強く不安を感じる」の回答がみられる範囲が近接しており、同じ振動に対して、人によって不安感が様々な程度に評価されていることが推察できる。

両者の違いとして、「まったく不快でない」の回答確率の回帰曲線は、低振動数を中心に加速度軸に沿う範囲が広く、加速度の影響を受けやすい。これは水平振動の場合と同じ傾向⁸⁾である。一方、「まったく不安を感じない」の回答には振動数による影響が強い。また、不快感にかかわる表現は振動数による回答確率のばらつきが小さく、回答確率の回帰曲線がほぼ等間隔に位置する。

一方、加速度が大きい範囲にみられる「非常に強く不安を感じる」の場合は、10%程度の人が回答する加速度範囲は他の感覚評価とさほど変わらないが、加速度がより増加しても「非常に強く不安を感じる」と回答する人が少ない。比較して、加速度が大きい範囲における不快感は不安感より厳しい傾向にある。

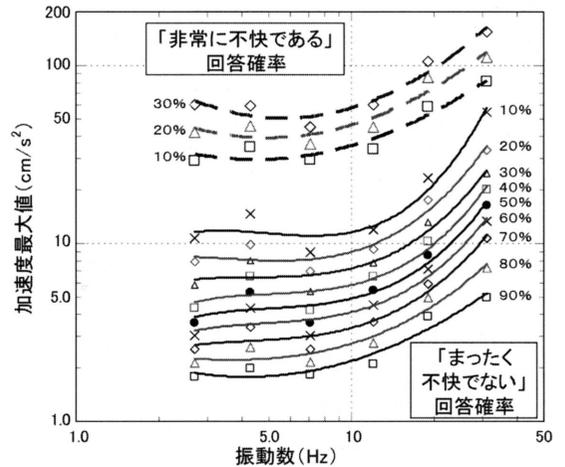


Fig. 6 Probability of response to discomfort valuation

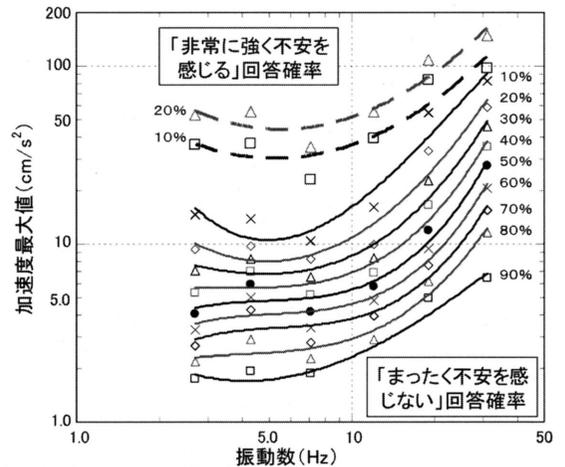


Fig. 7 Probability of response to uneasy feeling

5. 感覚評価を用いた性能説明

上記のような知覚閾および感覚評価の特性をふまえて、鉛直振動にかかわる居住性能をより具体的に説明できる資料を検討する。床振動の居住性能などを評価する上では、その振動を受けた際に居住者がどのような状況になるのかをできるかぎり把握することが望ましい。そこで、居住性能の評価指標となる知覚確率・感覚評価の回答確率と、設計指標となる加速度最大値との関係を、振動数ごとに例示したものがFig. 8である。

このような資料を提示するにあたり、設計上で

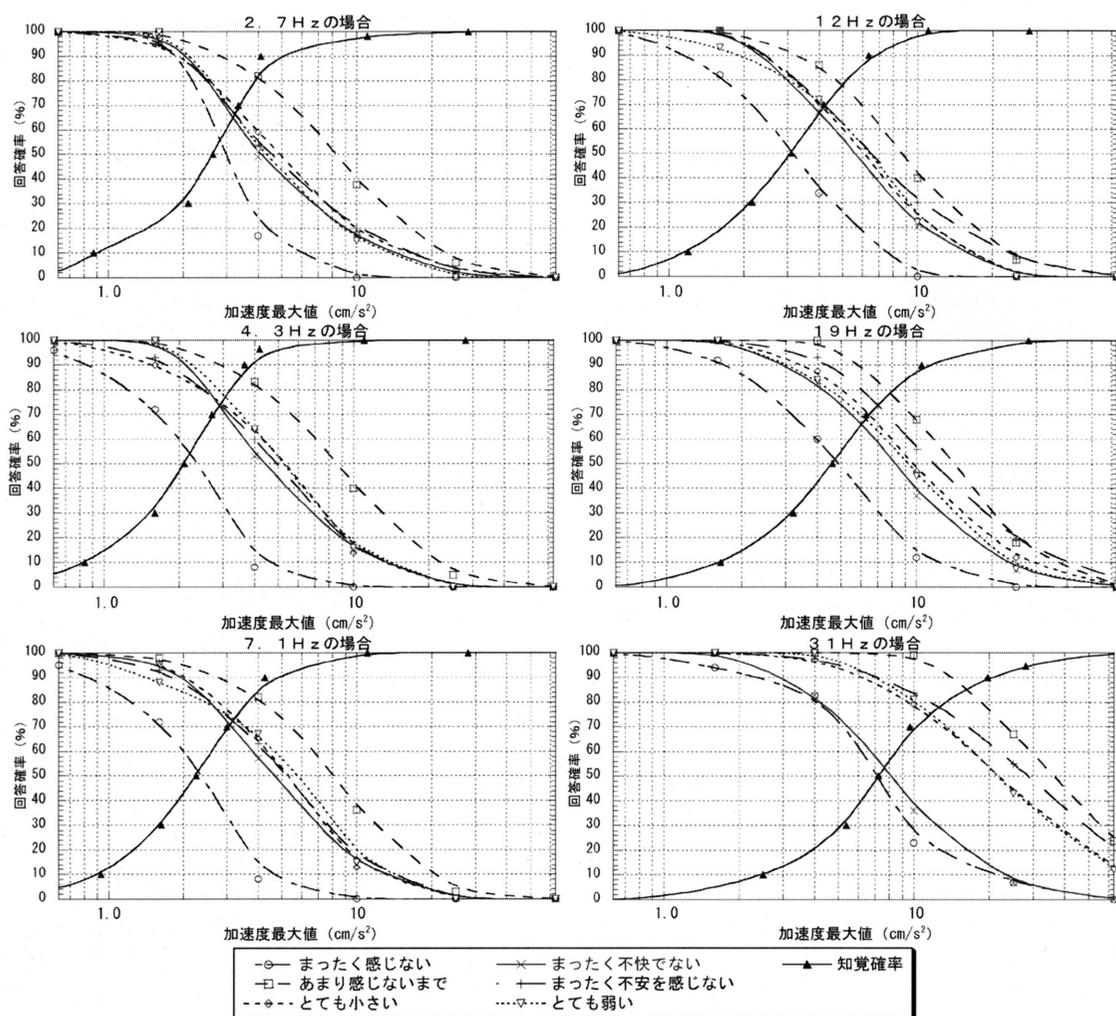


Fig. 8 Explanatory material of housing performance based on characteristics of sense of vertical vibration

有効なものや居住者が実感しやすいと考えられる項目を選択するため、専門家や居住者に対するヒアリング⁹⁾を行った。ヒアリングでは、専門家から項目数はあまり多くても使いづらいことなどが指摘された。また居住者からは、日常的には振動を小さい、強い、弱いなどで表現することが多く、不快感や不安を感じる振動というのはイメージしづらい、実際に居住性能評価の対象となる範囲に限って資料を提示された方が誤解がない、などの意見が聞かれた。

ヒアリングにおけるこれらの指摘と先に述べた感覚評価および知覚閾の特性をふまえて、知覚確率がほぼ0~100%に変動する加速度範囲を対象とし

て、回答確率が大きく変動し、性能のグレードが表現できるFig. 8に示す7項目を選択した。「あまり感じないまで」は、「まったく感じない」と「あまり感じない」の累積回答確率を示す。図中の曲線は、直線補間して加速度に対応させてプロットした回答確率に、±10%のデータ範囲をもつStineman関数を適用して求めている。

振動数によって分布は若干異なるものの、Fig. 8からも「とても小さい」、「とても弱い」、「まったく不快でない」、「まったく不安を感じない」の回答確率がほぼ同じように推移していることがわかる。これらの項目を統括した評価指標とすることも可能で

あるが、そのなかで、不快感や不安感などの、心理的な要素をより強く含む表現は個人差が特に大きいため、より具体的に性能レベルの説明を補う項目として用いるのが適切であろう。

設計者に対するアンケート¹⁰⁾でも、〇%の人が振動を感じるという表現は居住者らの理解を得られる可能性のあることが指摘されている。居住性能評価においては、主体が居住者などの感覚評価にあることから、評価指標である感覚評価にも個人差として大きなばらつきが存在する。このばらつきを、平均値などの一義的なレベルで評価することは難しく、回答確率を軸として性能のグレードを設定できることは有効と考えられる。

これらのグラフに、住宅や建築内で発生している振動の振動数と加速度最大値をあてはめることで、〇%の人が振動を感じ、〇%の人がとても小さい、とても弱いと感じたり、不快感や不安感を感じない人が〇%いるかを把握することができる。床振動の性能レベルを居住者らの視点にたって具体的に説明することで、彼らの実感をともなった理解を得られる可能性がある。

これをさらに進めることで、居住者や建築主の要求によって、設計時に性能レベルを決定することも考えられる。すなわち、対象とする住宅や建築に発生が予測される振動数のグラフを用いながら、性能に関する要求を、〇%の人が感じないように、不快感を感じる人はいないようにして欲しいなどの表現で引き出していく。それを回答確率としてグラフに照合することで、要求レベルを加速度の大きさに変換し、設計条件として用いることができる。すなわち、設計時点で目標性能が設定できることとなる。

図に示したような複数の表現を用いる場合、各項目として語られる要求には整合性がみえにくい場合も少なくない。そのため、全体として安全側となるレベルを採用するなどの、総合的な判断も必要になる。あるいは、個別の表現に対する要求を、相互に矛盾しないようすりあわせる必要も生じる。その際にも、それぞれの表現に対応した要求レベルの違いをビジュアルに提示しながら、居住者や建築主と合意を得た上で、設計条件を決定するための資料として役立つものと考えている。

6. おわりに

本論文では、定常的な鉛直方向の正弦振動を対象とした被験者実験の結果に基づいて、鉛直振動の知覚確率および感覚評価における回答確率を提示した。加えて、性能説明の資料とするべく、振動数・加速度最大値と知覚・感覚評価の確率とを対応させた資料作成を試みた。

本論文を通して、得られた結果を以下にまとめる。

1) 鉛直振動に対する知覚閾は7 Hz前後を境に振動数範囲で特性が異なる。低振動数範囲では振動数によらず加速度に対してほぼ一定の知覚確率となる。高振動数範囲では、振動数が高くなるほど同じ加速度の振動に対する知覚確率が低くなり、速度に対してほぼ一定となる。いずれも、加速度の対数値の変動に対してほぼ一定の割合で知覚確率が変動する傾向がみられる。

2) 鉛直振動に対する感覚評価の回答確率は、10 Hz前後を境に振動数範囲によって異なる特性を示す。10 Hz程度以下では振動数によらず加速度の影響が強く、それより振動数が高くなるほど、同じ加速度に対する評価が緩やかになる傾向がある。このような振動数範囲による特性は知覚閾とほぼ同様である。

3) 感覚評価の種類によって、高振動数範囲における回答確率の増減、回答がばらつく程度、回答があてはまる加速度範囲の違いが顕著である。心理的な要素が強い不快感や不安感などは、個人差としての回答のばらつきが大きく、特に高振動数範囲では、同じ振動に対する不快感や不安感の程度が、人によって様々である。

4) 鉛直振動に対する知覚閾と感覚評価は、物理量に対して類似した特性をもつが、感覚の程度によって表現される加速度範囲が変動する。互いの回答確率を比較することで、振動を感じることを不快感や不安感に直結するわけではなく、振動を感じても、多くの人にとって感覚的な評価は低い範囲があることがわかる。

5) 居住性能の評価に際しては、日常的に発生する振動範囲で表現され、そのなかで回答確率が変動する指標を用いることで、性能のグレードを表現できる。そこで知覚確率を基盤とし、感覚評価の段階的な表現を組み合わせることで、鉛直振動に関する

居住性能レベルをより具体的に説明する資料を提示した。

住宅や建築で第一に確保すべき地震に対する安全性は再現期間が長く、居住者の実感からは遠い。一方、日々生じる可能性がある振動などの身近な性能は居住者にとって実感しやすく、具体的な要求をまとめやすい。このような意識的な側面を考えると、日常的な感覚に近い性能をターゲットに要求レベルを設定することは、居住者らとの合意を形成する意味では有効であり、その結果、社会的基盤に根ざした建築が実現することにつながる。

その際に居住者らが求めるのは個々の振動環境に対する満足である。その要求に応えるためには、個々の居住者が受ける振動を彼ら自身の状況として理解できるような性能評価の方法と説明資料が必要になる。本論文で提示した資料は、床の鉛直振動に対する居住性能に関して、設計者をはじめとする専門家が居住者や建築主の要求を設計指標としてくみ取るための基礎資料になるものと考えている。

〔要約〕

本研究は、鉛直振動の知覚閾および感覚評価の特性に着目し、被験者に対する振動実験を行った。実験では、5つのカテゴリーからあてはまるものを選ぶ形式のアンケートを実施し、知覚閾と感覚評価のばらつきをふまえた特性を、入力したそれぞれの振動に対する回答確率に基づいて評価した。

結果より、鉛直振動に対する知覚閾および感覚評価には、顕著な振動数特性が認められた。約7Hzより低い振動数範囲では加速度に対してほぼ一定の特性を示す傾向にあり、より高い振動数になるほど、振動数を感じにくくなり、不快感などもより小さくなる傾向にある。また、感覚評価の種類によって、表現される加速度範囲や回答のばらつきは異なる。

さらに、このような鉛直振動に対する知覚閾や感覚評価の特性をふまえ、居住者らが住宅などで生じる振動をどのように感じるかを具体的に説明できる資料を提示した。

被験者として実験に協力いただいた多くの方々に、心から感謝の意を表する。

引用文献

- 1) 石川孝重：新しい環境振動の領域とそれにかかわる課題－環境工学の未来を拓く研究と技術開発－，第7回 環境工学シンポジウム 環境工学の未来を拓く研究と技術開発 資料，日本建築学会環境工学委員会，11-14，2004.1
- 2) 高橋良典，村井信義，前田節雄：床構造の減衰性能と歩行振動感覚，日本建築学会学術講演梗概集，77-78，1987.10
- 3) 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，第390号，pp.1-9，1988.8
- 4) 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巻1号，pp.11-20，1971
- 5) H. REIHER, F.J. MEISTER: Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Band 6, No.3, 116-120, 1935
- 6) 石川孝重，野田千津子，隈澤文俊，岡田恒男：鉛直振動に対する感覚評価とその表現に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，第437号，1-10，1992.7
- 7) 田中良久：心理学的測定法〔第2版〕，東京大学出版会，第5刷，1985.5
- 8) 石川孝重，野田千津子：広振動数範囲を対象とした水平振動感覚の評価に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第506号，9-16，1999.4
- 9) 石川孝重，野田千津子：水平振動に対する居住性能評価曲線とその説明資料の提示－その2 ユーザーに対するわかりやすい説明資料の必要性－，日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学），301-302，2003.9
- 10) 鈴木健司，塩谷清人，田野正典，石川孝重：「建築物の振動に関する居住性能評価指針」に関するアンケート調査結果（その1：鉛直振動について），日本建築学会大会学術講演梗概集（環境工学I），315-316，1999.9