

非定常的な水平振動に対する感覚特性の評価手法の検討

Trial Calculation for Design Based on Methods for the Sensation Evaluation of Random Horizontal Vibrations

平 間 ちひろ 石 川 孝 重
Chihiro HIRAMA Takashige ISHIKAWA

日本女子大学大学院紀要
家政学研究科・人間生活学研究科
第 24 号

非定常的な水平振動に対する感覚特性の評価手法の検討

Trial Calculation for Design Based on Methods for the Sensation Evaluation of Random Horizontal Vibrations

平 間 ちひろ* 石 川 孝 重**
Chihiro HIRAMA Takashige ISHIKAWA

Abstract Vibrations experienced by actual structures are random vibrations, and it is necessary to quantitatively evaluate the differences in feeling from sinusoidal vibrations. In this paper, we have focused attention on an evaluation method that reduces the influence of high frequencies using a filter for random horizontal vibrations, and have compared and examined the evaluation results by sensory characteristics using a subject experiment with measured vibration as an original waveform. As a result, there were differences in evaluation results between psychological quantity and perception. In the psychological quantity, although there were variations, we were able to confirm the results approximating from the line of sinusoidal vibration as the standard of evaluation.

Key words: Environmental vibration 環境振動, Random vibration ランダム振動, Horizontal vibration 水平振動, psychological evaluation 心理量, Fourier amplitude spectrum フーリエ振幅スペクトル

1. はじめに

振幅、振動数またはその両方が時間的に大きく変動し、間欠的な振動やパルスあるいは衝撃的な振動等のように、連続性を有さない振動を、非定常的な振動と定義する。

非定常的な振動の場合、環境振動として、定常的な振動のように最大加速度が連続的に現れる波と同様に評価すると安全側ではあるが、評価と体感に乖離が生じ、評価が厳しくなる。

実構造物で体感する振動は、定常的な振動ではなく、複数の振動数成分を含み、振動数や振幅が時々刻々と変化する非定常的な振動であることが多い。非定常的な振動について定常的な振動との感じ方の

違いを加味し定量的に評価する必要がある。これまで非定常的な波の成分を含んだ水平振動を対象に環境振動に対する評価を行ってきた¹⁻³⁾。結果として設計などへの適用では、非定常的な振動として、FFT分析による卓越振動数と時系列波形における加速度最大値で評価できる可能性を見いだすことができた。

一方、鉛直振動を対象とした研究では、1/3オクターブバンド分析によるもの⁴⁾の他に、長周期地震に対する気象庁震度階の考え方を応用した手法⁵⁾などが行われつつある。この手法では振動数特性を補正するフィルターを用いることで、非定常的な振動を低減し、振動数によらず定常的な振動とみなして評価できる可能性を見いだした。よって本稿ではこの手法を適用し、評価の基準を定常的な振動の、人間の感覚が最も敏感となる2.5 Hzのときの加速度相当とする、非定常的な水平振動の評価を試みる。

* 家政学研究科住居学専攻
Graduate School of Home Economics, Division of
Housing and Architecture

** 住居学科
Department of Housing and Architecture

2. 評価対象

2-1. 実験概要

評価手法の検討を行うにあたり、感覚特性の結果を得るために、先行研究¹⁻²⁾における実験 a, b, c

を参考として新たな実験 d を行った。いずれも戸建て住宅で発生した Fig. 1 の実測振動を元波形とした実験であるが、実験 a ~ d で実験条件が若干異なるため主な条件の違いを Table 1 に示す。

対象とする元波形は、実験 a がパターン A, B, D, E

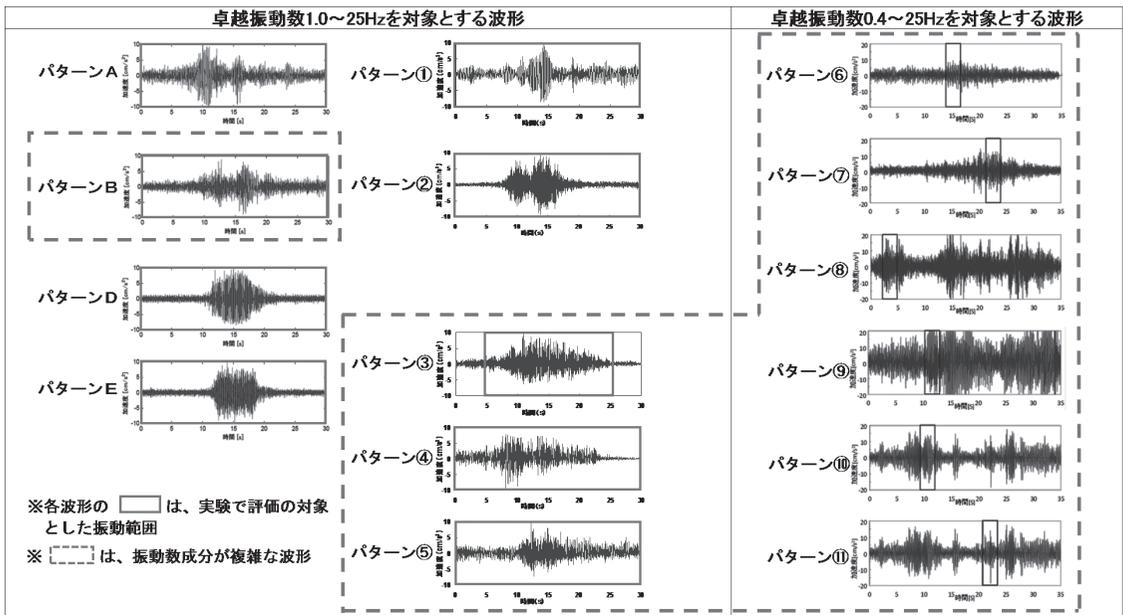


Fig. 1 Original waveforms used in the experiment

Table 1 Comparison of experimental conditions

	実験 a	実験 b	実験 c	実験 d
対象波形	パターン A, B, D, E 及び 定常的な振動	パターン①~⑤ 及び 定常的な振動	パターン⑥~⑪ 及び 定常的な振動	パターン⑥~⑪ 及び 定常的な振動
加振範囲				
	※○は、入力後アンケートを行わない条件。●は、入力後、アンケートを行う条件。			
評価に用いる 加速度最大値	入力目標値		各実験日の計測値	
被験者	18~45歳女性 1日計8人 合計40人	18~22歳女性 1日計8人 合計40人	18~22歳女性 1日計8人 合計41人 (1名被験者交代あり)	18~20歳女性 1日計8人 合計32人
アンケート 内容	<p>Q1 先の振動</p> <p>Q2 後の振動</p> <p>Q3 振動の大きさ</p> <p>Q4 振動の強さ</p> <p>Q5 振動の弱さ</p>			<p>Q1 先の振動</p> <p>Q2 後の振動</p> <p>Q3 振動の大きさ</p> <p>Q4 振動の強さ</p> <p>Q5 振動の弱さ</p>

E, 実験 b がパターン①～⑤, 実験 c, d がパターン⑥～⑪である。入力波の作成にあたっては, Fig. 1 の元波形の時間間隔を増減し卓越振動数を変化させる。実験 a, b ではいずれの入力波も 5～45 秒程度の継続時間となるようにした。実験 c, d では, より長周期の振動を実施するため, 適宜継続時間を設定した。さらに先行研究⁶⁾の加振範囲に基づきそれぞれの実験の加速度最大値を定めた。これらを非定期的な振動の目標波形として本学の振動制御装置を用いて忠実に再現した。実験では, Table 1 の加振範囲に示す振動数と加速度最大値をもつ定期的な振動の実験も並行して行った。

本実験で使用した元波形の FFT 分析結果による卓越振動数と加速度振幅比を Table 2 にまとめた。ここには各波形パターンでもっとも卓越した振動数の振幅に対して 8 割以上の振幅をもつ卓越振動数をすべて記した。元波形とした実測振動の FFT 分析では, それぞれ Table 2 に示す振動数が卓越している。実験ではこのうち, もっとも振幅が大きい卓越振動数が目標値となるように設定した。

Table 2 A list of amplitude ratios and predominant frequencies in FFT analysis of original waveforms

実験	波形パターン	振動源	卓越振動数(Hz)			振幅比		
			第1	第2	第3	第1	第2	第3
実験 a	パターンA	道路交通	4.883			1		
	パターンB	道路交通	4.883	14.65		1	0.811	
	パターンD	鉄道交通	7.813			1		
	パターンE	鉄道交通	18.56			1		
	パターン①	道路交通	3.906			1		
実験 b	パターン②	鉄道交通	10.74			1		
	パターン③	鉄道交通	6.348	17.58		1	0.828	
	パターン④	鉄道交通	4.883	9.766		0.972	1	
	パターン⑤	鉄道交通	13.18	20.51		1	0.927	
	パターン⑥	鉄道交通	7.813	5.469		1	0.841	
実験 c	パターン⑦	道路交通	11.33	8.594	6.641	1	0.999	0.990
	パターン⑧	道路交通	15.63	12.11		1	0.951	
	パターン⑨	建設工事	12.11	6.250		1	0.974	
実験 d	パターン⑩	建設工事	5.078	8.203		1	0.818	
	パターン⑪	建設工事	5.078	8.203		1	0.901	

最大加速度においては, Table 1 にも示した通り, 実験 a, b では, 実験実施日の計測により再現性が確認できたため入力目標値を用いて評価している。一方, 実験 c, d では入力目標値に対する実測によるばらつきが±10%を超える場合もあるため, 各実験日の加速度最大値の実測値を用いて評価するこ

ととした。

被験者は重複をゆるさず, 18～45歳の女性とし, 実験 a～d ごとに1つの波形パターンに対して計 32～41名ずつ実験を実施した。Fig. 2のように3m×3mの加振テーブルの上に天井高さ3mの鋼材製の居室を設置し, 床面はカーペット敷で, 壁, 窓などの内装は住宅に用いられるものと同様の建材を用いた。また, 体感による評価を対象とするため, 体感以外に振動を想起させる要因となる物の動きや音をできるだけ排除した状態で実験を行った。

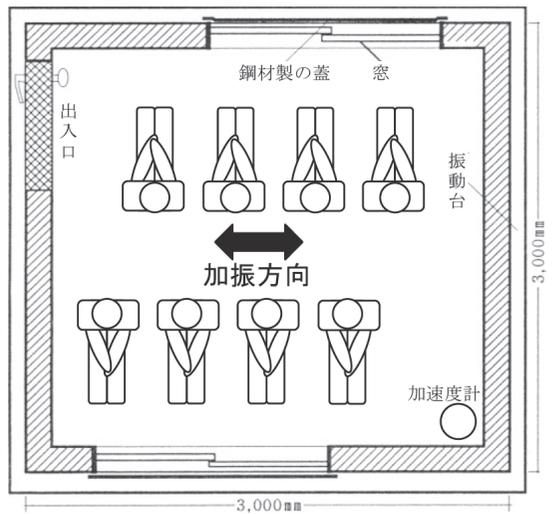


Fig. 2 In-house situation during the experiment

実験者は, 居室の外で CCD カメラを通して被験者の状況を観察しながら, 被験者に対して左右水平方向に振動を入力し, この間の振動をサーボ型加速度計で計測する。振動の実測データは, 各被験者のボタンによる知覚応答の電圧とともにデジタルデータレコーダで収録し, 結果の評価に用いた。

居室内では 8名の被験者が脚をくの字に曲げた状態で床に座り, はじめに基準とする $0.63 \text{ Hz} \cdot 25 \text{ cm/sec}^2$ の定期的な振動を 15秒または 30秒間感じた後, これに対するアンケートに回答する。アンケート回答後, 知覚の応答に用いるボタンを手に握るよう指示した。振動を 10秒間停止した後, 任意のパターンで卓越振動数を 1種類に固定し, 加速度最大値が段階的に大きくなるよう, 各 10～23秒の間をあけてランダム振動を連続して入力する。被験者に対して

実験者が実験の開始を伝えた後、振動を感じている間ボタンを押し続けるよう事前に指示した。Table 1の加振範囲に●で示した振動を入力した後のみ、感じた各振動に対するアンケートに回答するよう指示し、被験者は各振動の入力に対して1回ずつアンケートに回答した。アンケートの心理評価に関しては、一概に定義を与えず、被験者自身の考えで各心理評価を区別して評価するよう指示した。

2-2. 感覚特性の評価

本稿では、実験で得られた感覚特性の結果より、被験者の回答確率に着目し、心理量および知覚の特性を評価することとした。

まずTable 1のアンケート内容の、実験a, b, cではQ3、実験dではQ4で示す不安感は、「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」の5段階の表現を用いて各振動につき1つずつ回答を得た。そのうち中央にあたる「不安を感じる」以上の3つの回答（「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」）の回答数を累積した累積回答確率を評価に用いる。

同様に、「感じる」を中央とした限界評価については、「感じる」以上の3つの回答の回答数の累積回答確率を評価に用いる。「気になる」を中央とした気になり度合いでは、「気になる」以上の3つの回答の回答数の累積回答確率を評価に用いる。

不快においては、被験者には $0.63 \text{ Hz} \cdot 25 \text{ cm/sec}^2$ の基準とする定常的な振動について「まったく不快でない」から「非常に不快である」までを5段階としたアンケートに回答したあと、対象となる各振動について先の基準との相対的な不快の度合いを基準

評価の前後を含めた9段階で評価するよう伝えた。本稿では、9段階評価の中央にあたる回答以上の5つの回答数を累積し、その確率で評価した。

知覚は被験者のボタンの応答より判断した。各振動に対する知覚した人の割合を知覚確率(%)として用いる。

本実験において感覚特性は、実験a, b, cでは不快・大きさ度合い・限界評価・知覚の結果が得られ、実験dでは加えて気になり度合いの評価を含めた。以上6種類の感覚特性のうち、不安感・不快・気になり度合い・限界評価・知覚の5種類を本稿の評価の対象とする。

3. 評価手法

本稿では気象庁震度階の考え方⁷⁾を参考とした、先行研究⁵⁾と同様の手法にのっとり、以下の手順で評価する。Fig. 3 a)に示す波形を例として説明する。

- ①対象加速度波形のフーリエ(振幅)スペクトルを作成する。
- ②フーリエ(振幅)スペクトルにフィルター処理(振動数領域に応じた補正)を施す。
- ③フィルター処理後、逆フーリエ変換をして得た加速度波形の最大加速度値(絶対値)を評価加速度値a値とする。元波形をフィルター処理したことで、Fig. 3 b)のように加速度が低減される。
- ④絶対値に変換した加速度がbを超える時間の合計を計算したとき、これがちょうど t_e (秒)となるb値を算出する。Fig. 3 c)のようにさらに波形の位相特性を反映した低減効果がみられる。
- ⑤非定常的な振動を振動数によらず定常的な振動として評価するため、算出した評価加速度値b値に

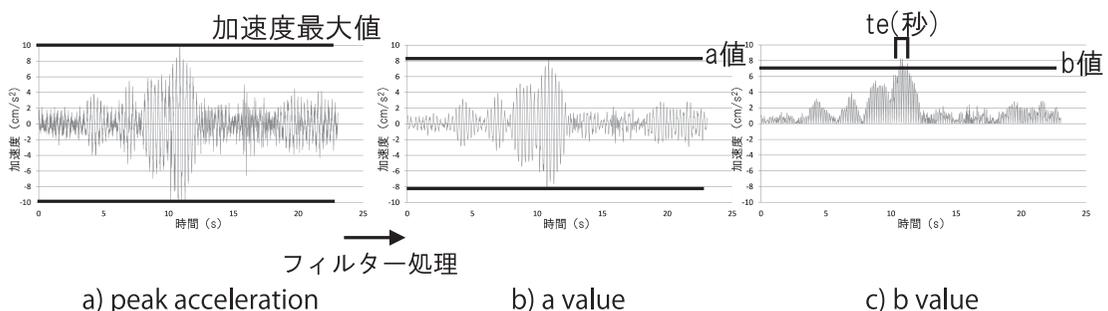


Fig. 3 Example of evaluation methods

対して、定常的な振動の人間の感覚が振動に対して最も敏感となる 2.5 Hz の場合の加速度を評価の基準とする。

4. 評価結果

4-1. 不安感に対する評価方法の検討

まず実験 d の「不安を感じる」以上の回答確率について評価する。評価手法の②におけるフィルターは、Fig. 4 で示す実験 d で行った定常的な振動の結果より得た「不安を感じる」以上の評価曲線を用いる。この評価曲線の比率の逆数を掛け合わせることで、逆特性を与え、主に高振動数領域が低減される。高振動数領域になるほど感覚評価が下がる特性を補正するためのものである。なお、水平振動の場合は、低振動数領域も感覚評価が多少下がる特性がある。フィルターはこれらの特性も加味したものとなっている。

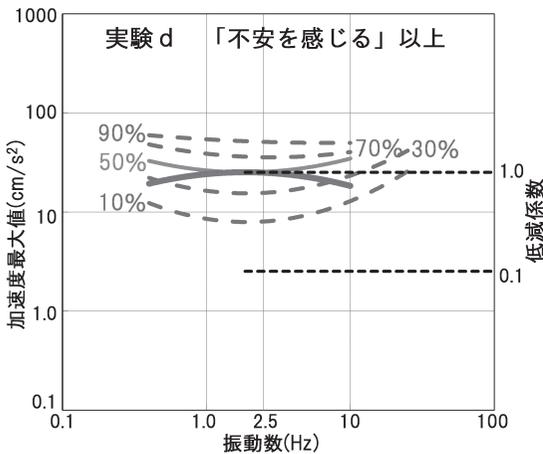


Fig. 4 Using a filter for anxiety in experiment d

評価手法の④における、 b 値を超える時間の合計 t_e (秒) の値を検査する。まず Fig. 4 に示す定常的な振動の「不安を感じる」以上の 10%、30%、50%、70%、90% の評価曲線のうち、最も人間の感覚が敏感となる 2.5 Hz のときの加速度を、加速度 - 回答確率で Fig. 5 にプロットし、直線回帰した。その回帰線と一致する b 値を超える時間の合計 t_e の値を実験 d すべての波に対して算出した。回帰線は 10% ~ 90% の範囲であるが、ここでは 0% ~ 100% まで回帰線を外挿して算出している。各振動

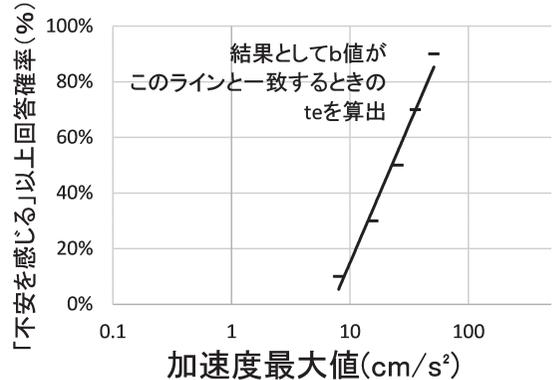


Fig. 5 2.5 Hz line of sinusoidal vibrations (anxiety)

に対して算出して得た t_e の値を 0.1 秒刻みで、振動数ごとの頻度分布をとった (Fig. 6)。

Fig. 6 より、この実験の不安感の結果では、0.4 Hz ~ 2.5 Hz の低振動数の波の中には、 t_e を長くとり b 値における低減効果を大きくした方が、定常的な振動の 2.5 Hz のラインに近似する結果が得られるものがいくつかあった。なお、同図の最頻値は、0.2 ~ 0.3 秒である。

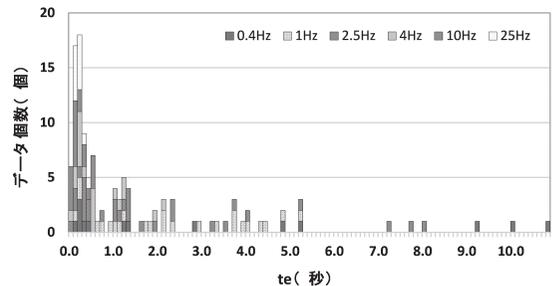


Fig. 6 Calculated frequency of t_e (anxiety)

一方、気象庁震度階の考え方⁷⁾ や先行研究⁵⁾ の結果としても、 t_e を 0.3 秒として評価している。これらを参考に、本稿では t_e を 0.3 秒として評価することとした。

Fig. 7 で、 t_e を 0.3 秒として実験 d の不安感の結果を評価した。縦軸に回答確率、横軸に実験時の加速度最大値・フィルター低減をした a 値・ t_e を 0.3 秒としたときの b 値をあらわした。その際、Fig. 5 で示す定常的な振動の評価曲線より得た 2.5 Hz の

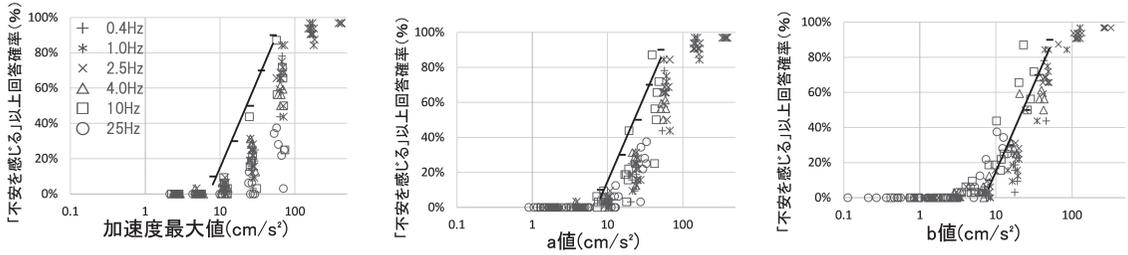


Fig. 7 “Feel uneasy” or more evaluation results in experiment d

不安感の回答確率の回帰線を評価の基準とした。

Fig. 7より、a 値よりも、 t_e を 0.3 秒とした b 値の方が定常的な振動の 2.5 Hz のラインに沿ってばらつく傾向がみられた。よって、フィルター低減のみの評価の低減効果は限定的であり、加速度値 b を超える時間の合計を考慮した方が評価の基準に沿った結果が得られることを確認した。また、0%に近い結果は定常的な振動の 2.5 Hz のラインよりも小さい方へ、100%に近い結果は定常的な振動の 2.5 Hz のラインよりも大きい方へ、緩やかに推移する。

振動数ごとの比較では、低振動数は t_e を 0.3 秒とした b 値では低減効果が小さく定常的な振動の 2.5 Hz のラインに達していないものがみられる。高振動数になるほど同じ t_e の値でも低減効果は大きくなっていき、10 Hz あたりで定常的な振動の 2.5 Hz のラインに全体的に近似している。さらに高振動数となる 25 Hz では全体的に回答確率が低いため、定常的な振動の 2.5 Hz のラインよりも小さい方へ推移する結果となった。

実験 d で扱った波形は Table 2 より振動数成分が複雑な波形である。そこで、振動数が単一で卓越している波形も含まれる実験 a・b・c の結果を総合して評価し比較する。不安感について、実験 d と同様に、Fig. 8 に示す実験 a・b・c の定常的な振動の評

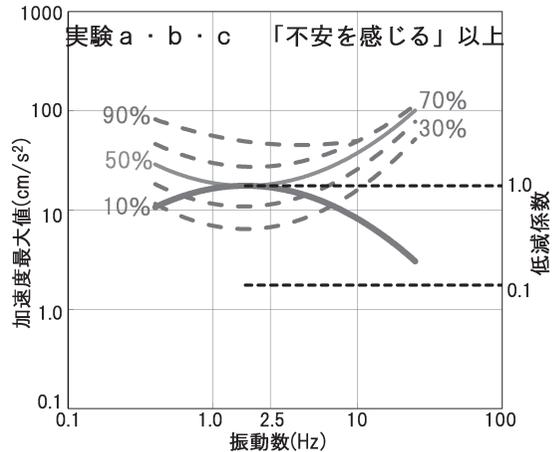


Fig. 8 Using a filter for anxiety in experiments a, b and c

価曲線より求めたフィルターで低減した a 値と、 t_e を 0.3 秒とした b 値について、評価結果を Fig. 9 に示す。付記している定常的な振動の 2.5 Hz のラインも実験 a・b・c の評価曲線より求めた。

Table 1 でも示した通り、実験 a・b・c では知覚の検出に重きをおいていたため、心理量のアンケートを加速度の小さい部分では行っていない。そのた

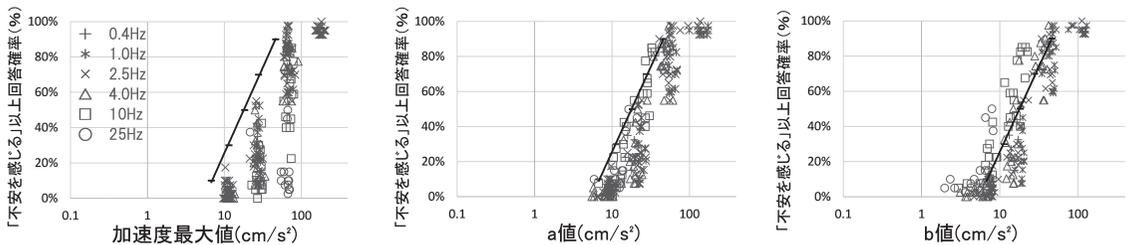


Fig. 9 “Feel uneasy” or more evaluation results in experiments a, b and c

め実験 d の結果よりも、特に加速度が小さい方の結果が少なくなっている。さらに 3 実験の結果の統合であるため、その分ばらつきも多くなっているが、 t_e を 0.3 秒とした b 値は、全体的におおよそ定常的な振動の 2.5 Hz のラインに沿う結果となり、実験 d と同様の結果が得られた。

また、 t_e を 0.3 秒とすると、低振動数の方が低減効果が小さく、高振動数の方が低減効果は大きくなる傾向も実験 d と同様である。

4-2. 「不快」「気になる」「感じる」などの心理量評価

他の心理量の結果である不快中央値以上の回答確率・「気になる」以上の回答確率・「感じる」以上の回答確率も先の不安感に倣って、同様に Fig. 10 に示す定常的な振動の評価曲線よりフィルターと、基準となる 2.5 Hz のラインを求め、 t_e を 0.3 秒とした。実験 d の結果を Fig. 11-13 に示す。

いずれの感覚特性も、不安感と同様に、フィルター低減のみの a 値では低減効果が小さく、 t_e を 0.3 秒とした b 値になるにつれ、定常的な振動の 2.5 Hz のラインに沿っていく傾向がみられた。また、 b 値

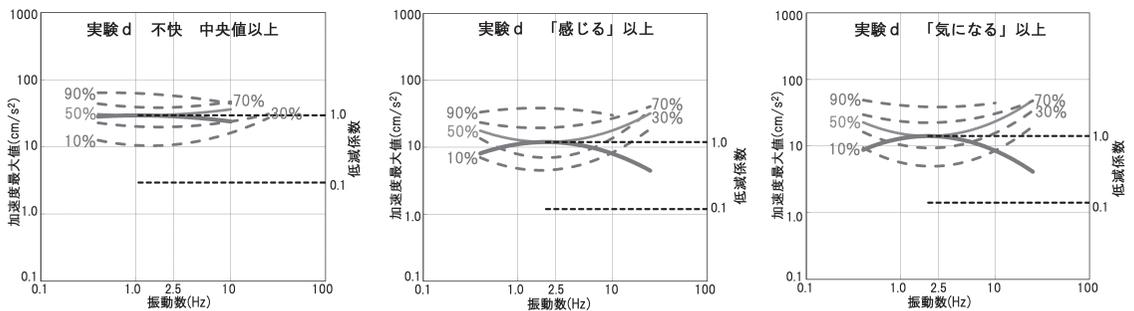


Fig. 10 Using a filter for psychological quantity in experiment d

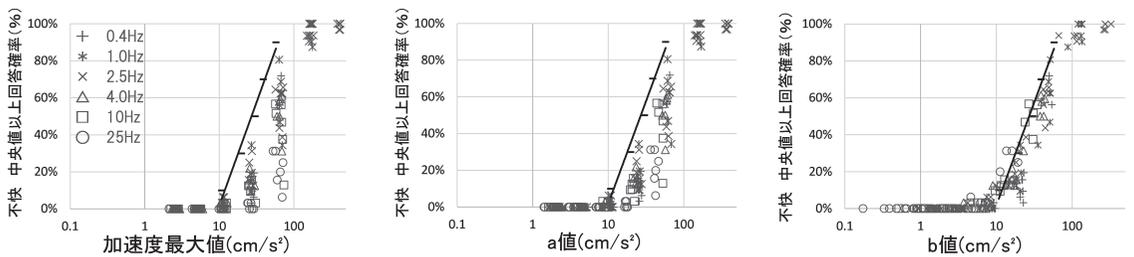


Fig. 11 Unpleasant median values or more evaluation results in experiment d

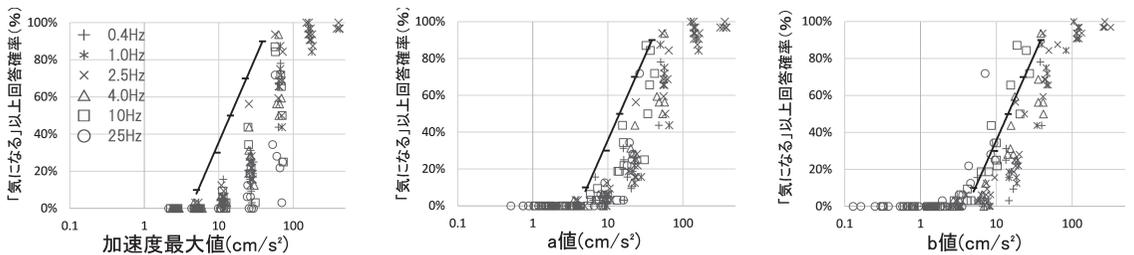


Fig. 12 “Curious” or more evaluation results in experiment d

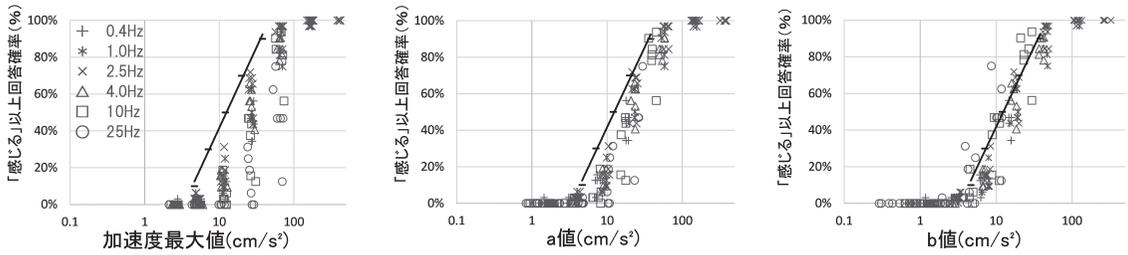


Fig. 13 “Feel” or more evaluation results in experiment d

で、低振動数になるほど低減効果が小さく、高振動数になるほど低減効果が大きい特性も、不安感と同様である。

感覚特性ごとに比較すると、不快中央値以上の回答確率が最もばらつきが小さく、「気になる」以上の回答確率が最もばらつきが大きいことがみてとれる。この実験 d においては、ばらつき具合には多少の差異がみられるが、感覚特性によっておよその傾向は同様である。

4-3. 知覚

一方、知覚について、同様に評価結果を示す。まず実験 a・b・c の結果を心理量の評価と同様に Fig. 14 の実験 a・b・c の定常的な振動の知覚の評価曲線によるフィルターを用いて、統合すると Fig. 15 となった。te は 0.3 秒としている。

どの実験でも、実験の方法として心理量は各振動を入力した後にアンケートに回答しているが、知覚は各振動の入力中に揺れを知覚したらボタンで応答している。よって、心理量は各振動を包括的に評価していると考えられるのに対して、知覚は各振動の加速度のピーク部分で評価されていると考えられる。

実験 a・b・c の知覚においては、フィルター低減のみの a 値では低減効果が足りないが、te を 0.3 秒

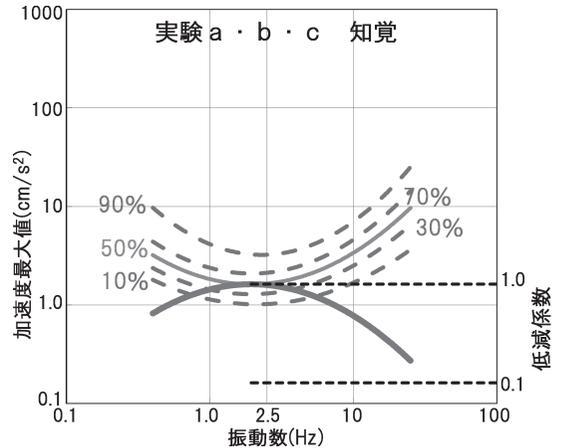


Fig. 14 Using a filter for perception in experiments a, b and c

とした b 値では、特に高振動数の 25 Hz で低減効果が大きくなる傾向がみられた。しかし、他の振動数では te を 0.3 秒とした b 値で、およそ定常的な振動の 2.5 Hz のラインに沿っている。

一方、振動数成分が複雑な実験 d の知覚について、同様に Fig. 16 の実験 d の定常的な振動の評価曲線より求めたフィルターを用いた結果、Fig. 17 となっ

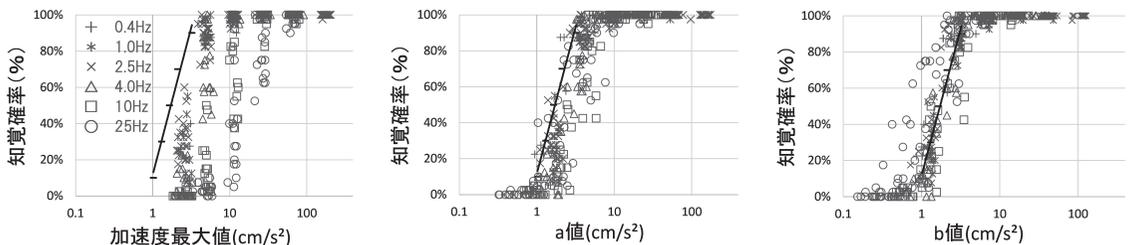


Fig. 15 Evaluation results of perception probability in experiments a, b and c

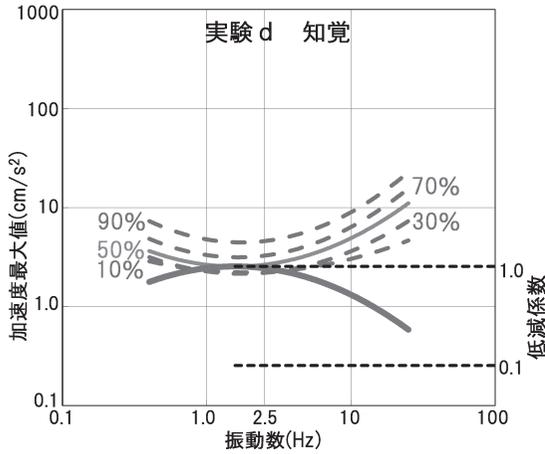


Fig. 16 Using a filter for perception in experiment d

た。te は先と同様に 0.3 秒としたものである。

実験 d では実験 a・b・c とは異なり、どの振動数も全体的に te を 0.3 秒とすると低減効果大きい。フィルター低減のみの a 値の方が定常的な振動の 2.5 Hz のラインに近似している。心理量の不安感の場合は、実験回（実験条件）による結果の違いはほとんどみられなかったが、知覚においてはその傾向に違いがみられる。

5. おわりに

本稿では、非定常的な水平振動に対して、主に振動数による人間の感覚特性の差異を補正するフィルターを使用し、振動数によらず定常的な振動として評価することを試みた。非定常的な実測振動を元波形とした被験者実験を用いて、その評価結果を感覚特性によって比較・検討した。得られた結果をまとめる。
 (1) 心理量の結果である「不安を感じる」以上の回

答確率・不快中央値以上の回答確率・「気になる」以上の回答確率・「感じる」以上の回答確率では、本稿での評価手法における、フィルターによる低減のみでは低減効果が小さい。フィルター低減後、さらに合計 0.3 秒継続している加速度を求め低減した場合、感覚特性によってばらつきはあるものの、おおよそ、人間の感覚が最も敏感になる、定常的な振動の 2.5 Hz の加速度に相当する傾向がみられた。

- (2) 知覚においても、フィルター低減後さらに合計 0.3 秒を超える加速度によって低減することにより低減効果が大きくなる傾向は心理量と同様である。しかしながら、低減効果の評価結果に差異がみられた。

本稿では特定の被験者実験から非定常的な振動に対する感覚評価結果を検討した。しかし、感覚特性の評価方法や、評価手法の中のある加速度を超える合計時間 (te) について、さらに精査な検証が必要である。その結果から非定常的な振動の、感覚評価の精度向上が期待できる。

〔要約〕

実構造物で体感する振動は非定常的な振動であり、定常的な振動との感じ方の違いを定量的に評価する必要がある。本稿では、非定常的な水平振動に対して、高振動数領域の影響を減らすフィルターを使用する評価手法に着目し、実測振動を元波形とした被験者実験を用いて、その評価結果を感覚特性によって比較・検討した。その結果、心理量では、ばらつきはあるものの、おおよそ評価の基準とした定常的な振動のラインに近似する。この傾向は知覚評価では明確でない。心理量においては、本稿における手法でおおよそ評価できる可能性を確認した。

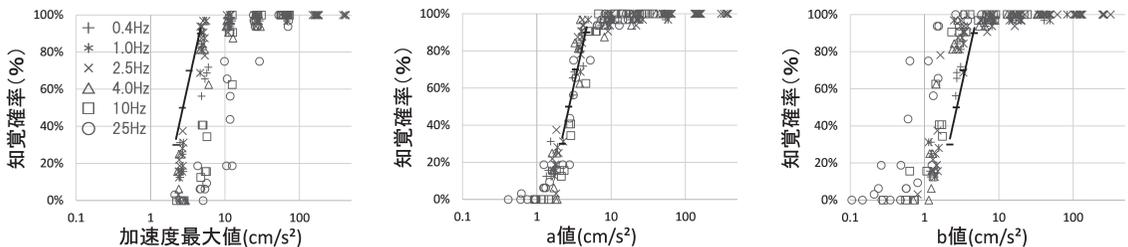


Fig. 17 Evaluation results of perception probability in experiment d

謝 辞

本実験では多くの被験者の協力を得た。記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 石川孝重, 国松直: 交通による戸建て住宅の水平方向の実測波形を用いたランダム振動に対する環境振動評価, 日本建築学会環境系論文集, 第667号, pp.761-766, 2011年9月.
- 2) 石川孝重, 久木章江: 複数の振動数成分が同程度に卓越するランダム水平振動に対する知覚特性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第699号, pp.411-417, 2014年5月.
- 3) 鈴木千尋, 石川孝重: 不安感・不快感からみたランダム水平振動に対する心理評価に関する検討, 日本建築学会環境系論文集, 第704号, pp.841-848, 2014年10月.
- 4) 井上竜太: 評価軸の概要(歩行振動), 第35回環境振動シンポジウム 性能マトリクスを用いた環境振動設計, pp.21-26, 2017年1月27日.
- 5) 今銚淳史, 石川孝重, 片岡達也, 遠山解: 歩行振動に対する床居住性能評価手法の提案(その1: 提案手法の概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.463-464, 2016年8月.
- 6) 野田千津子, 石川孝重: 水平振動を受ける被験者の状況が知覚閾に及ぼす影響, 日本建築学会計画系論文集, 第524号, pp.9-14, 1999年10月.
- 7) 気象庁: 震度を知るー基礎知識とその活用ー, ぎょうせい, pp.46-55, 1996年9月30日.

(指導教員 石川孝重 教授)