歩行により発生する周期的および連続的な床振動の評価指標 EVALUATION INDEX ON PERIODIC AND CONTINUOUS FLOOR VIBRATION CAUSED BY OCCUPANT WALKING

横山 裕^{*1}, 井上 竜太^{*2}, 池田 文乃^{*3}, 八木 豊^{*4}
Yutaka YOKOYAMA, Ryota INOUE, Ayano IKEDA
and Yutaka YAGI

The subject of this study is the periodic and continuous vibration on the reinforced concrete or steel structure floor system caused by occupant walking. The evaluation index from the viewpoint of habitability is presented based on the relationship between the psychological scale constructed by the sensory test and the frequency, amplitude and wave shape of the sample vibration. As the result, the human sensation and evaluation on the periodic vibration is related to the amplitude at the foot landing. And the human evaluation on the continuous vibration is influenced by not only the maximum amplitude but also the duration of the vibration.

Keywords : *Floor vibration, Habitability, Evaluation index, Walking, Amplitude at foot landing, Duration*
床振動, 居住性, 評価指標, 歩行, 着地時の振幅, 継続時間

1. はじめに

歩行など建築物内の人間の日常的な動作により発生する床振動は、居住性の観点から住宅やオフィスなどの床に要求される重要な性能の1つである。小野、横山ら^{1)~8)}は、これまでに、人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法を確立し、その妥当性を検証している。また、実在する種々の木造、軽量鉄骨造住宅の床や乾式二重床などに確立した評価方法を適用し、居住者からの苦情発生の観点からみた境界値などを提示している⁹⁾。ここで、小野、横山らが確立した評価方法は、基本的に床の材料、構法のいかんにかかわらず適用可能であるが、研究の第一段階であることから、1歩の動作による振動を対象としている。そのため、連続した数歩の動作時にも1歩1歩の動作による振動の独立性が高く、かつ通常受振点直近の加振点での1歩による振動がそれより離れた加振点での振動より卓越して大きい場合直近の1歩による振動が受振者の感覚、評価に支配的に影響する⁹⁾。木造、軽量鉄骨造の床に対しては、上述の通り確立した評価方法を直接適用することができた。

一方、木造、軽量鉄骨造と比較して一般に構造上より離れた点を加振した際の振動が伝搬しやすいRC造、S造建築物の床などでは、受振点直近の1歩と前後の数歩による振動の大きさが比較的近似した、歩調にあわせて同程度の大きさの振動が繰り返される周期的な振動が発生する。さらに、減衰が小さい床では、数歩分の振動が重なった連続的な振動が発生する。このような振動は、1歩のみではほとんど問題とはならない程度の大きさであっても、苦情などが

発生する場合がある¹⁰⁾。しかし、このような振動の評価方法は未だ確立されているとはいえず、正弦振動を対象とした研究成果に基づく評価指標を十分な検討なしに適用しているのが現状である。

本報は、RC造、S造建築物の床などにおいて歩行により発生する周期的な振動、あるいは連続的な振動を対象に、振動とそれに対する人間の感覚、評価との関係に基づいて、振動の感覚上の大きさを表す物理量や、居住性からみた評価指標について検討した経過、結果を述べるものである。

2. 目的、範囲

本研究は、人間の動作により発生する鉛直方向の床振動のうち、RC造、S造建築物の床などで発生する周期的な振動、あるいは連続的な振動の、居住性からみた評価指標について検討することを目的とする。

本研究で対象とする床用途は、苦情発生例が多くかつ居住性の観点からの評価が最も厳しい用途の1つと思われる、住居の居室とする。また、対象とする加振動作は、住居内で最も日常的でかつ避けられない動作である歩行とし、歩行により発生する床振動を同一室内にいる歩行者以外の居住者が感じる場合の評価指標について検討することとする。

本研究は、振動と人間の感覚、評価との関係を軸に議論を進めるものであり、床の具体的な仕様と振動の関係や、振動の観点から優れた床の開発、設計などは、議論の範囲外とする。

*1 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
准教授・工博

*2 ㈱竹中工務店技術研究所 研究員・博士(工学)

*3 当時、東京工業大学

*4 当時、東京工業大学大学院

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Graduate School of Science and Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Research and Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

Tokyo Institute of Technology

Graduate School, Tokyo Institute of Technology

3. 既往の研究

人間の動作により発生する床振動を対象に、人間の感覚、評価との関係を検討した最初の研究例として、小野ら^{11)~15)}の体育館の床の弾力性に関する研究があげられる。小野らは、床の弾力性に関する運動競技者の判断に影響する要因の1つとして振動の続き具合を抽出するとともに、跳躍着地時に発生した振動が所定の振幅まで減衰するのに要する振動減衰時間で、運動競技者が感じる振動の続き具合を表示できることを明らかにした。小野らの研究は、振幅の時間変化をとまなう振動に対する人間の感覚、評価を表示するのに、振動減衰時間、すなわち振動の継続時間の概念を初めて導入した研究と位置付けられる。その後、1. で述べた小野、横山ら^{1)~9)}の歩行など日常的な動作による振動を対象とした研究でも、居住者の感覚、評価を表示するための要因の1つとして振動減衰時間を用いている。

一方、本研究と同様の振動を対象とした研究例として、高橋ら^{16)~18)}の研究があげられる。高橋らは、おもに大スパン構造の床を対象に、床構造の減衰性能と歩行により発生する振動、および居住者の感覚、評価との関係に関する検討を行い、以下の事項などを明らかにしている。

- ・床構造の減衰定数の小ささは、歩行のような周期的な衝撃加振に対して、振動の重複・増幅現象を引き起こす。また、歩行時の共振現象は、衝撃振動が重複するモデルにより説明できる。
- ・床構造の減衰定数が小さいほど、振幅がより小さい振動でも知覚できるようになる。この原因として、振動の継続時間が長いことが考えられる。
- ・JIS C 1510 に定められた振動レベルは、振動数、エネルギー、継続時間などが感覚、評価に与える影響を考慮しており、感覚、評価と相関の高い物理量である。

さらに、高橋ら¹⁹⁾は、正弦波、うなり波を対象に振動の継続時間が感覚、評価に与える影響について検討し、継続時間が感じる、感じないといった感覚に与える影響よりも、不快度合などの評価に与える影響の方が相対的に大きいことなどを明らかにしている。

このほか、継続時間が十分に長い正弦振動の振動数、振幅と感覚、評価との関係に関する研究は古くから比較的多くなされているが、このうち最新の成果として石川ら²⁰⁾の研究があげられる。

本研究では、これら既往の研究結果との整合を適宜検討しつつ、研究を進めることとする。ただし、本研究では、基礎的段階として、振動の時系列波形から直接求められる振幅や継続時間などを中心に検討を進めることとし、積分を要する振動レベルなどの適用性^{16)~18)}の検討は、本研究で振動と感覚、評価との関係に関する基本的な事項が解明された後の課題とする。

4. 研究方法

本研究の研究方法および手順は、以下の通りである。

- 1) 任意の振動数、振幅、波形の鉛直振動を再現できる振動台を用い、歩行によりRC造、S造建築物などで発生する床振動と同様の振動を再現する。この振動を検査員に提示して、振動の感覚上の大きさや居住性の観点からの評価に関する判断を求める官能検査を実施し、心理学的尺度を構成する。
- 2) 1) で構成した振動の感覚上の大きさに関する心理学的尺度と、検査員に提示した振動の振動数、振幅およびその時間変化などとの関係から、床振動の感覚上の大きさを表す物理量について検討する。

- 3) 1) で構成した振動の評価に関する心理学的尺度と、2) でよい対応が得られた物理量との関係から、床振動の評価指標について検討する。

5. 床振動に関する官能検査および心理学的尺度の構成

5.1 官能検査概要

官能検査の概要を、表1に示す。以下に、おもな事項について説明を加える。

5.1.1 構成する尺度および尺度構成手法

構成する尺度は、振動の感覚上の大きさ（認知の度合いやどの程度大きく感じるか）を表す“認知大きさ尺度”と、住居の居室としてどの程度気になるかを表す“気になり具合評価尺度”とした。このうち、気になり具合に関する検査では、検査員に、住居の居室で食事、読書などをしているときを想定して判断するよう教示した。ここで、評価の観点を気になり具合のみとしたのは、気になり具合と他の観点からの評価（差し障り具合、不安感の感じ具合）に関する判断を求めた小野、横山³⁾の研究で、これらはいずれも同程度と判断されることが明らかとなっていることによる。

尺度構成手法は、同様の刺激を対象とした小野、横山^{2)~4)}の研究で適用の妥当性が確認されている、系列範ちゅう法²¹⁾とした。判断範ちゅうは、表1に示す通りである。

5.1.2 検査員に提示する振動

所定の固有振動数、減衰定数を有する床モデルに、人間が歩行時に床に与える典型的な荷重^{5)~8), 22)}を入力して応答を解析的に求め、この応答を振幅が所定の値となるよう調整し検査員に提示することとした。以降、これら歩行により発生する床振動を模擬した振動を“歩行波”と記す。また、歩行波との比較の目的で、いくつかの正弦波も検査員に提示する振動に加えた。以下に、具体的事項を記す。

- ・通常のRC造、S造建築物床の範囲をおおむね包含するよう、歩行波設定の際の床の固有振動数は5, 7.4, 10, 12.5, 16Hzの5種、減衰定数は1.5, 5, 10%の3種とした。一方、正弦波の振動数は、歩行波の範囲と一致するよう5, 10, 16Hzの3種とし、検査員に疲労、倦怠を感じさせないよう提示する振動の数を制限する必要上、7.4, 12.5Hzは省略した。
- ・振幅は、歩行波、正弦波ともに、気付かない程度から大きく感じられる程度までをできる限り包含するよう、振動数、減衰定数ごとに数段階設定した。

表1 官能検査の概要

構成する尺度	認知大きさ尺度	気になり具合評価尺度
尺度構成手法	系列範ちゅう法	
判断範ちゅう	この床振動は、住居の居室で感じたとしたら、 ⑦非常に大きく感じる ⑥やや大きく感じる ⑤はっきり気付く ④かすかに気付く ③気付くか気付かないかの境界 ②ほとんど気付かない ①全く気付かない	この床振動は、住居の居室で感じたとしたら、 ⑦非常に気になる ⑥・・・・・・・・ ⑤かなり気になる ④・・・・・・・・ ③やや気になる ②・・・・・・・・ ①全く気にならない
検査員に提示する振動	表2に示す113種	
検査員	成人男女21名(性: 男19名・女2名, 年齢: 22~46歳, 体重: 46~94kg)	
姿勢	椅子腰掛位(振動台に固定された椅子に座り足裏を床につけた姿勢)	
履物	くつ下	

表2 検査員に提示する振動の概要

No.	振動の種類	振動数	目標振幅	減衰定数	No.	振動の種類	振動数	目標振幅	減衰定数	No.	振動の種類	振動数	目標振幅
1	共振			1.5	41	7歩			1.5	84	12s		
2			5.0	5.0	42					85	6s		
3	7歩			10.0	43	5歩				86	3s		
4			3.0	5.0	44	3歩				87	うなり		
5	共振			1.5	45	1歩				88	12s		
6			2.0	5.0	46	増減 ^{※1}				89	6s		
7	7歩			10.0	47	増減 ^{※2}				90	3s		
8			1.5	5.0	48					91	うなり		
9	共振			1.5	49					92	12s		
10			10.0	5.0	50					93	12s		
11	7歩			10.0	51					94	6s		
12			7.0	5.0	52					95	3s		
13	共振			1.5	53					96	うなり		
14			5.0	5.0	54					97	12s		
15	7歩			10.0	55					98	6s		
16			3.0	5.0	56					99	3s		
17	共振			1.5	57					100	うなり		
18			2.0	5.0	58					101	12s		
19				10.0	59					102	12s		
20			1.5	5.0	60					103	6s		
21				1.5	61					104	3s		
22			20.0	5.0	62					105	うなり		
23				10.0	63					106	12s		
24			15.0	5.0	64	5歩				107	6s		
25				1.5	65	3歩				108	3s		
26			10.0	5.0	66	1歩				109	うなり		
27				10.0	67	増減 ^{※1}				110	12s		
28			7.0	5.0	68	増減 ^{※2}				111	6s		
29				1.5	69					112	3s		
30			5.0	5.0	70					113	うなり		
31				10.0	71	7歩				振動数：歩行波の場合 床の固有振動数 (Hz) 目標振幅：目標とする最大振幅 (cm/s ²) 減衰定数：床の減衰定数 (%) ※1：図1に示す増減係数 0.15 ※2：図1に示す増減係数 0.30			
32			3.0	5.0	72								
33				1.5	73	5歩							
34			2.0	5.0	74	3歩							
35				10.0	75	1歩							
36				1.5	76	増減 ^{※1}							
37			30.0	5.0	77	増減 ^{※2}							
38				10.0	78								
39				10.0	79								
40			20.0	5.0	80								
振動の種類：左2段は歩行波 右1段は正弦波					81	7歩							
					82								
					83								

- 歩行波の歩数は7歩を基本としたが、一部に5, 3, 1歩のものも設定した。また、7歩中4歩目まで振幅が増加し、以降減少するものも設定した。以降、これらを“歩行波(7歩)”, “歩行波(5歩)”, “歩行波(3歩)”, “歩行波(1歩)”, “歩行波(増減)”と記す。
- 歩行波の歩調は0.5s(2Hz)を基本としたが、固有振動数5Hzおよび7.4Hzの床では、歩調の倍調波による床の固有振動数での共振現象を再現する目的で、0.6s(1.67Hz = 5Hz ÷ 3) および0.54s(1.85Hz = 7.4Hz ÷ 4)とした。

- 正弦波の継続時間は12, 6, 3sの3種とした。また、5sを1周期として振幅が増減する継続時間15s(3周期)のうなり波も設定した。以降、これらを“正弦波(12s)”, “正弦波(6s)”, “正弦波(3s)”, “正弦波(うなり)”と記す。

以上の結果、表2に示す通り、歩行波83種、正弦波30種を検査員に提示する振動として設定した。

図1に、設定した振動の例を示す。図の1)～4)は歩行波、5), 6)は正弦波の例である。正弦波の場合、図に示すように、所定の継続時間の振動の前後に、1sの間に振幅が0から所定の値まで増幅(所定の値から0まで減衰)する前置波(後置波)をつなげた。また、4)は、7歩の歩行波ではあるが、歩調の倍調波による床の固有振動数

1)歩行波(7歩) 床の固有振動数：16Hz, 床の減衰定数：5%

2)歩行波(3歩) 床の固有振動数：16Hz, 床の減衰定数：5%

3)歩行波(増減) 床の固有振動数：16Hz, 床の減衰定数：5%
増減係数：0.3

4)歩行波(共振) 床の固有振動数：5Hz, 床の減衰定数：1.5%

5)正弦波(6s) 振動数：5Hz

6)正弦波(うなり) 振動数：5Hz 18sまで続く

図1 検査員に提示する振動の例

図2 振動台の概要

での共振が発生し、他の歩行波とは明らかに異なる、正弦波(うなり)に近似した波形となった例である^{10), 16)~18)}。以降、このような振動を“歩行波(共振)”と記す。表2に示すように、固有振動数5, 7.4Hz、減衰定数1.5%の床では、応答が歩行波(共振)となった。

なお、設定した振動のうち歩行波(7歩), (5歩), (3歩), (1歩), (増減)は周期的な振動、歩行波(共振)と正弦波(12s), (6s), (3s), (うなり)は連続的な振動に分類できるものである。また、各振動の振動数分析を行ったところ、歩行波の場合床の固有振動数成分、正弦波の場合その振動数成分が、いずれも高度に卓越していた。

5.1.3 振動台

検査に用いた振動台の概要を図2に示す。本振動台は動電型で、駆動部にリニアモータを使用しており、動作音はほとんど発生しな

い。動作方向は鉛直方向と水平1方向の2方向であるが、本検査では水平方向を固定して使用した。再現可能な振動の範囲は、振動数5〜20Hz、最大変位振幅50 μ m、最大加速度振幅5cm/s²(5Hz)〜80cm/s²(20Hz)である。また、検査時に検査員が乗るテーブルの大きさは、800×800mmである。なお、動作は、パーソナルコンピュータで制御する。

5.1.4 検査員

住居の居室における一般的な判断を求めることを目的としていることから、一般的な成人男女21名(性:男19名・女2名、年齢:22〜46歳、体重:46〜94kg)とした。なお、男女の検査員数に大きな差があるが、小野、横山^{1)~4)}の研究で振動の感覚上の大きさや気になり具合に関する判断に男女による大きな差はないことが明らかとなっていることから、大きな問題はないとみなすことができる。

5.1.5 姿勢、履物

検査員の姿勢は、小野、横山^{2),4)}の研究および予備検査の結果、立位と振動台に固定された椅子に座り足裏を床につけた“椅子腰掛位”とで判断に大きな差はみられないことが明らかとなったことから、椅子腰掛位とした。ここで、使用する椅子は、脚が振動台テーブルに固定され、かつ座面などにクッション材などが施されていないものとした。なお、テーブル上と座面上の振動を測定、比較し、増幅、減衰はないことを確認した。

一方、履物は、住居の居室で一般的で、素足と近似した装着感を有し、かつ床のすべりや表面温度などの要因をできるだけ一定に保つことができる、くつ下とした。

5.2 官能検査経過、結果および心理学的尺度の構成

5.1で述べた条件に加え、振動以外の要因は判断に入れないこと、住居の居室を想定して判断すること、疲れたら休憩をとるのでいつでも申し出ることを検査員に教示したうえで、官能検査を実施した。振動の提示順序は、検査員ごとにランダムに変化させた。検査員が1つの振動に対する判断に要した時間は、5〜30s程度であった。また、検査中、振動台制御用パーソナルコンピュータに表示されるテーブル上の振動レベルの最大値を記録、比較することにより、いずれの振動でも検査員による差が1dB以内であることを確認した。

表3に、官能検査の結果得られた基礎データの分散分析結果を示す。振動の感覚上の大きさ、および気になり具合のいずれの検査でも、判断対象による差を表す主効果の分散比が高度に有意であり、かつ寄与率も非常に大きいことから、設定した振動群が検査員に十分差異のある刺激を与えていたこと、本検査自体が有効であることがわかる。一方、個人差もいずれも有意となっているが、寄与率が主効果と比較してきわめて小さいことから、構成される尺度には検査員間に本来内在している個人差が内包されるものの、各振動に対する判断の中心傾向の差異が明瞭に反映されるといえる。

以上より、尺度構成理論²¹⁾にしたがって、2つの心理学的尺度(認知大きさ尺度、気になり具合評価尺度)を構成した。

表3 分散分析結果

振動の感覚上の大きさに関する 官能検査結果			振動の気になり具合に関する 官能検査結果		
	分散比	寄与率		分散比	寄与率
主効果	131.4690***	81.14%	主効果	96.8262***	77.03%
個人差	52.2321***	5.69%	個人差	42.4109***	5.94%

※※: 危険率1%以下で有意

図3 認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の関係

5.3 心理学的尺度相互の関係の検討

図3に、認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度との関係を示す。図中の記号は、振動の種類で分類したものである。また、①〜⑦の破線は、尺度上の判断範ちゅうの位置を表す。

図中、白抜き記号で示した周期的な振動では、振動数、減衰定数、振幅、歩数にかかわらず両者はほぼ一律に対応しており、感覚上大きい振動ほど気になり具合も大きくなっていることがわかる。一方、中黒の記号で示した連続的な振動は、周期的な振動と比較して、感覚上の大きさが同程度でも気になり具合が大きくなっている。また、この大きくなる度合いは継続時間により異なっており、継続時間が長いほど気になり具合が大きくなる傾向がみられる。さらに、この傾向は、認知大きさ尺度値が大きいほど顕著に現れている。

以上より、以下の事項が明らかとなったといえる。

- ・振動の感覚上の大きさと評価の関係は、周期的な振動と連続的な振動で基本的に異なる。
- ・周期的な振動では評価は感覚上の大きさでほぼ決定するのに対し、連続的な振動では感覚上の大きさに加え継続時間が影響する。

なお、正弦波において継続時間が感覚より評価により大きく影響する点は、高橋ら¹⁹⁾の結果と一致する。

6. 床振動の感覚上の大きさを表す物理量の検討

6.1 検査員に提示した振動の測定

予備実験の結果、振動台の性能上、入力信号が同じでも、テーブル上に検査員が乗っている場合と乗っていない場合とで発生する振動がわずかながら異なる場合があることが判明した。したがって、検査員に提示した振動を測定する際にはテーブル上に検査員を乗せる必要があるが、実際に検査員を用いた場合、個人差や再現性に関する検討が必要となる。一方、小野、横山^{1)~5)}は、人体と近似した振動特性を有し代替負荷としての妥当性が証明された“受振器”を開発し、この受振器を用いれば人間が乗った状態での床の平均的な振動応答を安定して再現できることを明らかにしている。よって、本研究では、受振器を検査員の人体の代替としてテーブル上に設置したうえで、所定の信号を入力した際に発生する振動を測定することとした。

図4 受振器の概要^{1)~5)}と測定時の設置状況

図4に、受振器の概要を示す。この受振器は、質量40kgの重錘を減衰性の大きいゴムばねを介して床上に載荷するもので、重錘とゴムばねにより人体と近似した有効質量40kg、固有振動数約4Hz、減衰定数約20%の1自由度振動系を構成している。この振動系が付加された床の振動を、荷重板内部に取り付けた加速度計で測定するものである。測定の際は、図に示す通り受振器の振動系をテーブル上に載荷し、振動系が倒れないよう水平方向の動きを拘束している架台は、振動台の動作に影響のないほぼ剛とみなせる床上に設置した。

測定は、各振動とも3回ずつ行い、得られる加速度・時間曲線が安定していることを確認した。また、測定中、振動台制御用パーソナルコンピュータに表示されるテーブル上の振動レベルの最大値を記録し、5.2で測定した官能検査時の値と比較することにより、いずれの振動でも検査時との差が1dB以内であることを確認した。なお、以降、振幅はすべて加速度で表示する。

6.2 床振動の感覚上の大きさを表す物理量の検討

6.2.1 振動数の影響に関する検討

はじめに、正弦波(12s)、(6s)、(3s)を対象に、振動数の影響について検討した。図5に、5.3で構成した認知大きさ尺度と、6.1で測定した加速度・時間曲線から求めた前置波、後置波を除いた部分の振幅の関係を示す。図の記号は、振動数および継続時間により分類したものである。

図より、両者は振動数ごとにより対応を示しており、振幅が大きいほど感覚上の大きさも大きくなっていることがわかる。また、両者の関係に継続時間による明確な傾向はみられず、少なくとも3〜12sの範囲では、感覚上の大きさに継続時間は大きくは影響しないことがわかる。さらに、振動数で比較すると、振幅が同程度でも10Hzと比較して5、16Hzでは感覚上の大きさが小さくなっていることがわかる。ここで、本研究では、何らかの方法で振動数の影響を除去し、種々の振動数での結果を一律に検討するのが望ましいことから、例として、振幅に振動数に応じた補正係数(以降、“振動数補正係数”と記す)を乗じることにより振動数の影響を除去する方法を試みることにした。仮に、10Hzを基準とすると、5Hzの場合振幅に0.85、16Hzの場合も0.85を乗じると、図6に示すように尺度と振幅は振動数によらずほぼ一律に対応するようになる。ここで、図に示した曲線は、目視で描いた対応の中心傾向を示す“対応曲線”

図5 認知大きさ尺度と振幅の関係

図6 認知大きさ尺度と振動数補正振幅の関係

である。この係数の値は、石川ら²⁰⁾の結果と比較すると、5Hzは若干小さめ、16Hzは若干大きめとなっているが、振動数と係数の関係に関する全体的な傾向は比較的共通している。

一方、正弦波の振動数、振幅と感覚との関係に関する多くの既往の研究結果を総合すると、同一の加速度振幅に対する感覚上の大きさが最も大きくなる振動数は6〜8Hz程度とみなすことができる。また、少なくとも本研究で対象としている5〜16Hzの範囲では、感覚上の大きさが同等な振幅と振動数の対数軸上での関係は、6〜8Hz程度で傾きが変わる2つの直線で近似して大きな問題はないとみなすことができる。本研究では、これらの知見と図5、6より、表4に示すように振動数補正係数を設定した。なお、以降、振動数補正係数を乗じた振幅を“振動数補正振幅”と記す。

ただし、振動数補正係数は、あくまでも本研究の範囲内で振動数の影響を除去する方法の例として用いたものであり、今後この方法や係数の値を標準的なものとして普及させることを意図したものではないことを付け加える。

表4 振動数補正係数

振動数 f	5.0Hz	7.0Hz	7.4Hz	10.0Hz	12.5Hz	16.0Hz
振動数補正係数 C_f	0.85	1.13	1.11	1.00	0.93	0.85
	$C_f=0.216f^{0.852}$		$C_f=2.22f^{-0.346}$

図7 認知大きさ尺度と振動数補正最大振幅の関係

図9 認知大きさ尺度と振動数補正着地振幅の関係

6.2.2 連続的な振動に関する物理量の検討

図7に、検査員に提示した全ての振動を対象に、認知大きさ尺度と振動数補正振幅の最大値との関係を示す。図に示すいずれの点も、振幅に6.2.1で述べた係数を乗じて振動数補正を施している。ここで、正弦波(12s)、(6s)、(3s)では、6.2.1で用いた前置波、後置波を除いた部分の振幅が最大振幅に該当する。

図に示すように、中黒の記号で示した連続的な振動による点は、いずれも同一の曲線に対応しているとみなすことができる。すなわち、比較的ゆるやかな振幅の時間変化をとまなう歩行波(共振)や正弦波(うなり)の感覚上の大きさは、振幅が最大振幅と同一で時間変化をとまなわない正弦波とほぼ同等であることがわかる。

以上より、連続的な振動の感覚上の大きさは、振動数補正を施した最大振幅で表せることが明らかとなったといえる。

6.2.3 周期的な振動に関する物理量の検討

図7において、白抜きの記号で示した周期的な振動は、連続的な振動と比較して、最大振幅が同程度でも感覚上の大きさが小さくなっている。特に、歩行波(3歩)、(1歩)、(増減)では、この傾向が顕著である。すなわち、比較的急な振幅の時間変化をとまなう歩行波では、一瞬しか表れない最大振幅は、正弦波と同等の大きさには感じられないことがうかがえる。よって、これら周期的な振動に関しては、新たな物理量を検討することとした。

図8に、検査員に提示した歩行波の例を示す。図に示した3種の

No. : 検査試料ナンバー, f : 床の固有振動数, h : 床の減衰定数

図8 歩行波における物理量の検討例

歩行波は、いずれも振動数補正最大振幅は近似しているが、認知大きさ尺度値は1)と2)が同程度であり、3)は1)、2)より小さかったものである。ここで、1)と2)を比較すると、図中網掛けで示した歩行者が1歩1歩着地した瞬間を含む部分での振幅や波形が比較的近似しているのに対し、他の部分は大きく異なっていることがわかる。一方、3)では、1)、2)と比較して、網掛けの部分内でも振幅が大きく減衰している。すなわち、着地した瞬間を含むある一定の時間内の振幅およびその時間変化が、歩行波の感覚上の大きさに大きく影響していることがうかがえる。これは、周期的な振動を何歩分か感じると、人間は無意識のうちに次の加振の瞬間を想定し、その瞬間の振動の大きさを全体としての振動の大きさを判断しているためと想定できる。また、図7で歩数が少ない歩行波(3歩)、(1歩)の感覚上の大きさが振幅が同程度の歩行波(7歩)、(5歩)より小さくなっていることも、この想定を裏付ける結果といえる。

このような考え方に基いて、図8に示すように、着地時に該当する時間 t を0.10～0.25sの範囲で0.05sおきに4段階設定し、その間の振動数補正振幅の平均を求め認知大きさ尺度との関係を検討した。具体的には、1歩1歩の着地ごとに、着地開始時点から t の範囲を対象範囲として設定し、その範囲内に含まれるすべてのピークにおける振幅の絶対値の平均を求めた。また、解析対象とする歩数も、7歩(1～7歩目)、5歩(2～6歩目)、3歩(3～5歩目)、1歩(4歩目)の4種を設定した。ただし、検査員に提示した振動の歩数が解析対象歩数より少ない場合は、その振動の歩数を解析対象歩数とすることとし、例えば歩行波(3歩)では、解析対象歩数が5歩の場合でも3歩の平均を求めることとした。

以上、4段階の t と4種の解析対象歩数の組み合わせ16条件で振動数補正振幅の平均を求め、認知大きさ尺度との関係を検討した結果、本研究の範囲では、 t を0.15s、解析対象歩数を5歩とした場合が最もよい対応を示すことが明らかとなった。図9に、両者の関係を示す。ここで、図に示すように歩行波(3歩)はやや、歩行波(1歩)は大きく対応から外れているが、これは、上述の通り歩数が少ないため、検査員が着地の瞬間を想定できなかったことによるものと推察できる。すなわち、人間が着地の瞬間を想定し振動の大きさを把握するためには、少なくとも5歩分程度の振動が必要であることが

図10 気になり具合評価尺度と振動数補正着地振幅の関係

うかがえる。一方、歩行波（増減）が歩行波（7歩）,（5歩）と同一の曲線上に対応していることから、振動の感覚上の大きさには、振幅が最も大きい1歩を含む5歩分程度の着地時の振動の大きさの平均が影響していることが推察できる。

以上より、周期的な振動の感覚上の大きさは、 t を0.15s、解析対象歩数を5歩とした場合の振動数補正を施した着地時の振幅の平均で表せることが明らかとなったといえる。以降、この物理量を“振動数補正着地振幅”と記す。ただし、 t や解析対象歩数の値は、あくまでも本研究の結果のみから設定したものであり、今後同様の研究結果の蓄積に応じて適宜修正される可能性があると考えられる。なお、4歩以下の歩行波に関する検討は、今後の課題とする。

7. 床振動の評価指標の検討

7.1 周期的な振動の評価指標の検討

はじめに、周期的な振動（歩行波（3歩）,（1歩）を除く）を対象に、5.3で構成した気になり具合評価尺度と6.2.3で設定した振動数補正着地振幅の関係を検討した。図10に、両者の関係を示す。図より、両者はよい対応を示しており、振動数補正を施した着地振幅で周期的な振動を評価できることがわかる。

7.2 連続的な振動の評価指標の検討

連続的な振動の評価指標については、歩行波（共振）のみでなく、正弦波との共通性も考慮することとした。図11に、気になり具合評価尺度と6.2.2で設定した振動数補正最大振幅の関係を示す。

図中、正弦波（12s）,（6s）,（3s）の比較から、5.3で考察した通り、振幅が同程度でも継続時間が長いほど気になり具合が大きくなっていることが確認できる。そこで、本研究では、例として、振幅に継続時間に応じた補正係数（以降、“継続時間補正係数”と記す）を乗じることにより継続時間の影響を定量化する方法を試みることにした。また、歩行波（共振）と正弦波（うなり）については、人間が最大振幅と同程度の大きさの振動を感じている時間を継続時間とするのが合理的と考え、具体的な方法として最大振幅のRa%以上の振幅が維持されている時間の合計を継続時間として求めることにした。

以上の方針にしたがって種々検討した結果、本研究の範囲では、継続時間補正係数を仮に継続時間1sを基準として表5に示す通り設定し、かつRaを90%とした場合に、得られる継続時間補正係数を

図11 気になり具合評価尺度と振動数補正最大振幅の関係

振動数補正最大振幅に乗じた“振動数・継続時間補正最大振幅”が、気になり具合評価尺度とよい対応を示すことが明らかとなった。図12に、両者の関係を示す。図に示すように、歩行波（共振）と正弦波が同一の曲線上に対応しており、振動数および継続時間補正を施した最大振幅で連続的な振動を一律に評価できることがわかる。ここで、表5に示した係数の値は、5, 7.5Hzを対象とした高橋ら¹⁹⁾の結果とおおむね一致しており、かつ継続時間と係数の関係に関する全体的な傾向もほぼ共通している。

ただし、継続時間補正係数は、あくまでも本研究の範囲内で継続時間の影響を定量化する方法の例として用いたものであり、今後この方法や係数の値を標準的なものとして普及させることを意図したものではないことを付け加える。また、Raの値は、あくまでも本研究の結果のみから設定したものであり、今後同様の研究結果の蓄積に応じて適宜修正される可能性があると考えられる。

表5 継続時間補正係数

継続時間 t	1s	3s	6s	12s
継続時間補正係数 C_t	1.00	1.16	1.28	1.41
$C_t = t^{0.138}$

図12 気になり具合評価尺度と振動数・継続時間補正最大振幅の関係

8. おわりに

歩行により RC 造, S 造建築物の床などで発生する周期的な振動、あるいは歩調の倍長波との共振により発生する連続的な振動の、居住性からみた評価指標について検討することを目的とした本研究の結論をまとめると、以下の通りである。

- ・振動の感覚上の大きさと評価の関係は、周期的な振動と正弦波を含む連続的な振動で基本的に異なる。周期的な振動では評価は感覚上の大きさとほぼ決定するのに対し、連続的な振動では感覚上の大きさに加え継続時間が影響する。
- ・人間は、周期的な振動を何歩分か感じると、無意識のうちに次の加振の瞬間を想定し、その瞬間の振動の大きさと全体としての振動の大きさを判断する。本研究の範囲では、着地時に該当する時間を 0.15s、解析対象歩数を 5 歩として求められる着地時の平均振幅に振動数に応じた補正を施した“振動数補正着地振幅”が、周期的な振動の感覚上の大きさとよい対応を示した。一方、連続的な振動に関しては、最大振幅に振動数に応じた補正を施した“振動数補正最大振幅”が、感覚上の大きさとよい対応を示した。
- ・周期的な振動に関しては、振動数補正着地振幅が、振動の評価に関する心理学的尺度とよい対応を示した。一方、連続的な振動に関しては、振動数補正最大振幅に継続時間に応じた補正を施した“振動数・継続時間補正最大振幅”が、評価に関する心理学的尺度とよい対応を示した。ここで、比較的ゆるやかな振幅の時間変化をとまなう歩行波（共振）や正弦波（うなり）の場合、本研究の範囲では、継続時間を最大振幅の 90%以上の振幅が維持されている時間とすると、心理学的尺度とよい対応が得られた。

以上、本研究では、振動の時系列波形から直接求められる物理量で人間の感覚、評価を表示することにより、両者の関係に関する基本的な事項を明らかにした。今後は、3. で述べた通り振動レベルなどの実用的な物理量の適用性について検討するとともに、本研究で検討した評価指標と小野、横山ら¹⁾⁻⁹⁾が確立した 1 歩による振動の評価方法との整合性について検討する予定である。

謝辞

振動台の使用や官能検査、実験の実施にあたり種々御協力いただいた榊竹中工務店技術研究所の関係各位に、謝意を表します。

参考文献

- 1) 小野英哲, 横山 裕: 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同じ場合―, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 381 号, pp. 1-9, 1987. 11
- 2) 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
- 3) 小野英哲, 横山 裕: 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究 ―振動発生者と受振者が同じ場合（動作した人間自

身が床振動を感じる場合）―, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 394 号, pp. 8-16, 1988. 12

- 4) 横山 裕, 小野英哲: 振動発生者と受振者が異なる場合の床振動の評価方法の提示 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究（第 2 報）, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 418 号, pp. 1-8, 1990. 12
- 5) 横山 裕: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究 動的加振器, 受振器の設定および妥当性の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 466 号, pp. 21-29, 1994. 12
- 6) 横山 裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究 衝撃的加振器の開発および振動減衰時間算出方法の妥当性の確認, 日本建築学会構造系論文集, 第 476 号, pp. 21-30, 1995. 10
- 7) 横山 裕, 佐藤正幸: 歩行時に発生する床振動評価のための加振, 受振装置に関する研究 仕上げ材が施された床に対する加振, 受振装置の適用方法の設定, 日本建築学会構造系論文集, 第 490 号, pp. 17-26, 1996. 12
- 8) 横山 裕, 松長健一郎: 小走り時の床振動測定用加振装置および振動減衰時間算出方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 519 号, pp. 13-20, 1999. 5
- 9) 横山 裕: 苦情発生の有無からみた実在住宅床振動の測定条件, 境界値の提示, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, pp. 17-24, 2001. 8
- 10) 横山 裕, 井上竜太, 西谷伸介, 松下仁士, 柴田昭彦, 塚田幸一, 小林裕明: 共振を考慮した人間の動作による床振動の測定, 評価ならびに対策に関する一考察, 日本建築学会技術報告集, 第 24 号, pp. 197-202, 2006. 12
- 11) 小野英哲: 体育館の床の弾力性に関する研究（その 1）運動競技者が体育館の床にあたる荷重の解析, 日本建築学会論文報告集, 第 181 号, pp. 7-14, 1971. 3
- 12) 小野英哲, 吉岡 丹: 体育館の床の弾力性に関する研究（その 2）体育館の床の弾力性測定装置の設計・試作, 日本建築学会論文報告集, 第 187 号, pp. 27-34, 1971. 9
- 13) 小野英哲, 吉岡 丹: 体育館の床の弾力性に関する研究（その 3）体育館の床の使用感および弾力性測定実験, 日本建築学会論文報告集, 第 188 号, pp. 1-10, 1971. 10
- 14) 小野英哲, 吉岡 丹: 体育館の床の弾力性に関する研究（その 4）弾力性使用感に関する心理学的尺度の構成, 日本建築学会論文報告集, 第 226 号, pp. 9-19, 1974. 12
- 15) 小野英哲, 吉岡 丹: 体育館の床の弾力性に関する研究（その 5）弾力性使用感に関する心理学的尺度と床の物理量との対応および弾力性の評価式, 最適値の提示, 日本建築学会論文報告集, 第 227 号, pp. 1-11, 1975. 1
- 16) 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. 89-97, 1988. 5
- 17) 高橋良典, 片山和喜, 吉岡宏和, 今沢民雄: 床構造の減衰性能に関する実験的研究（その 2）動制振器を適用した実構造体における振動実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 507 号, pp. 61-67, 1998. 5
- 18) 高橋良典, 片山和喜, 吉岡宏和, 今沢民雄, 村井信義: 床構造の減衰性能に関する実験的研究（その 3）歩行振動の最大振幅と振動感覚評価に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, pp. 81-88, 2000. 3
- 19) 高橋良典, 吉岡宏和, 井上竜太, 田中利幸: 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, 日本建築学会環境系論文集, 第 620 号, pp. 1-7, 2007. 10
- 20) 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集, 第 588 号, pp. 9-14, 2005. 2
- 21) J. P. Guilford 著, 秋重義治監訳: 精神測定法, 培風館, 1969
- 22) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 2004. 9

(2008年6月6日原稿受理, 2008年10月31日採用決定)