剛性の高い床に適用する性能値に関する基礎的検討

木造大スパン床の歩行振動の居住性からみた評価方法 (その2)

A FUNDAMENTAL STUDY OF PERFORMANCE VALUES IN HIGH STIFFNESS FLOORS

A method to evaluate the habitability of walking-induced vibration on long-span timber floors Part 2

横山 裕*, 黒田 瑛一**, 福田 眞太郎***

Yutaka YOKOYAMA, Eiichi KURODA and Shintaro FUKUDA

Vibrations induced by multiple consecutive human footfalls on high stiffness long-span timber floor were measured and examine several performance values, the relationship between the measurements and human sensory evaluation. An experimental floor was built, on which the sensory tests were performed. It was revealed that walking vibrations induced by relatively high stiffness floors are different from relatively low stiffness floors from the point of view of strength and property. On the relatively high stiffness floors, it was inferred that walking vibration is felt as rather a consecutive long vibration at the natural frequency than stack of footfalls of each step.

Keywords : Long-span Timber Floor, Vibration, Walking, Performance Value, Habitability, Evaluation Method
木造大スパン床, 振動, 歩行, 性能値, 居住性, 評価方法

1. はじめに

歩行などの人間の動作により床振動が発生し、居住性の観点から問題となる場合がある。この問題に関し、横山ら^{1)~7)}は、周囲から縁の切れた床上に歩行者が1歩着地して歩き抜けた場合の床振動を対象に、振動とそれに対する人間の感覚、評価との関係を定量的に検討し、振動感覚、評価と対応する物理的指標である性能値を提示した。また、この性能値の再現性の高い測定方法ならびに測定装置を開発した。さらに、横山⁸⁾は、8畳間程度の大きさまでの木造および軽量鉄骨造実在住宅床を対象に、歩行により発生する振動(以降“歩行振動”と記す)に対する居住者からの苦情発生の有無と、上記装置で測定される性能値との関係を検討した。その結果、当該床で発生する振動を代表する値として、床中央近傍の最も大きい振動が発生する位置に1歩分の加振力を入力した場合の性能値を用いることにより、苦情発生の有無を予測できることを明らかにした。

一方、近年、日本の林業の復興や環境問題対策として、学校や官公庁の事務所など公共の中、低層大規模建築物に木造を採用しようとする方向性が、国によって示された⁹⁾。これらの建築物では、大スパン床が採用される例が多くなると考えられる。ここで、歩行振動の観点から大スパン床を評価する場合、多くても5歩程度しか歩行できない8畳間程度の大きさまでの床と異なり、歩数や歩行方向などの影響が無視できず、上述の床中央近傍に1歩分の加振力を入力した場合の性能値を代表として用いるのは困難と予想される。

そこで、前報(その1)¹⁰⁾では、木造大スパンの中でも比較的剛性が低いと思われる床を試料床として用い、歩行振動と振動感覚、評価との関係を検討した。その結果、複数歩連続した歩行振動に対する感覚、評価には1歩ごとの振動が加算的に影響していることを明らかにし、1歩ごとの振動に対する性能値を全歩数分加算することにより、複数歩連続した歩行振動の性能値を提示できる可能性が高いことを明らかにした。しかし、前報では対象とした床が限られており、種々の仕様の木造大スパン床に対する適用性の検討は今後の課題としていた。

本報(その2)は、比較的剛性の高い床を対象に、前報で提示した性能値の適用性を検討したうえで、新たな性能値について検討した経過、結果を述べるものである。なお、本報は、日本建築学会大会での発表^{11),12)}に、さらに検討を加えたものである。

2. 目的, 範囲

本研究は、木造大スパン床の歩行振動の居住性からみた評価方法の確立を最終的な目的としている。本報は、比較的剛性の高い床を対象に、前報で提示した性能値の適用性を検討するとともに、適用が困難であった場合、新たな性能値について基礎的知見を集積することを目的とする。

本研究で対象とする加振動作は、前報で述べた理由から歩行とし、歩行により発生する鉛直方向の床振動を歩行者と同一の床上にいる

* 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
教授・工博

** 当時、東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
修士(工学)

*** 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
修士(工学)

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

Graduate School, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

Graduate School, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

他の居住者が感じる場合を対象とする。また、対象とする床用途は、今後公共の中、低層大規模建築物以外にも木造大スパン床が普及する可能性があることを考慮し、居住性の観点から最も高い水準が要求される用途の1つである、住居の居室とする。

なお、代表的な加振力やその入力位置の設定を含む苦情発生の有無などからみた床の総合的な評価方法の確立は、歩行振動に対する性能値が求められた以降の課題とする。また、歩行振動の観点からの個々の床の具体的評価や、よりよい床の開発、設計などは、本研究の範囲外とする。

3. 既往の研究

本研究と関連する既往の研究については、前報で述べている。

4. 研究方法

本報の研究方法および手順を、以下に示す。

- 1) 比較的剛性の高い種々の木造大スパン床を試料床として製作し、検査員を用いて、試料床で発生する歩行振動に対する判断を求める官能検査を実施する。検査結果に基づいて、歩行振動に対する感覚、評価を定量的に表す心理学的尺度を構成する。
- 2) 1) で検査員に提示した、試料床の歩行振動を測定する。
- 3) 2) で測定した歩行振動から前報で提示した性能値を算出し、1) で構成した心理学的尺度との関係に基づいてその適用性を検討する。仮に、両者がよい対応を示さなかった場合、心理学的尺度と歩行振動の関係を再度検討し、新たな性能値について基礎的知見を集積する。

5. 前報で提示した性能値の概要

図1に、横山ら¹⁾が測定した、人間が歩行時に床に与える荷重と、歩行振動の典型例を示す。図は、周囲から縁の切れた床上に1歩着地して歩き抜けた場合のものである。図に示すように、歩行振動は、着地→体重の移動→踏み出しの一連の動作にともなう二峰形の荷重に応じた変形（変形・時間曲線参照）と、着地開始時のかかと先端と床との衝突により励起される床の固有振動数での減衰振動（加速度・時間曲線参照）が複合された、複雑な性状を示す。横山ら¹⁾⁻⁴⁾は、

このように複雑な歩行振動に対する感覚、評価には、着地時に感じられる振動の大きさと、その後の振動の続き具合が影響することを明らかにしている。また、前者と対応する物理的指標として変形・時間曲線から求まる D_{max} 、 V_m 、後者に対応する物理的指標として加速度・時間曲線から求まる Th を抽出し、これらを(1)式に代入して算出される $VI(2)$ で、1歩の振動に対する感覚、評価を表示できることを明らかにしている。ここで、 $VI(2)$ は、大きいほど、その振動は大きく感じられることを表す。

$$VI(2)=0.2 \cdot \log(D_{max})+0.5 \cdot \log(V_m)+\log(Th) \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 $D_{max}(cm)$: 最大変形量 (図1参照)

$V_m(cm/s)$: D_{max} を T_m で除した変形速度 (図1参照)

$Th(s)$: 着地開始から加速度振幅が $14.1cm/s^2$ まで減衰する時点までの時間 (図1参照)

また、前報では、スパン 5460mm、梁幅 105×梁成 240mm、梁間隔 910mm の架構からなる比較的剛性の低い木造大スパン床と、スパン 3640mm、梁幅 105×梁成 240mm、梁間隔 910mm の架構

図1 人間が歩行時に与える荷重と歩行振動の例¹⁾

図2 比較的剛性の低い床における複数歩連続した歩行振動の測定結果の例¹⁰⁾

からなる8畳間として一般的な木造床を用いて、歩行振動と振動感覚、評価との関係を検討している。図2に、前報で測定した比較的剛性の低い木造大スパン床での歩行振動の典型例を示す。前報では、図に示す要領で1歩ごとに D_{max} 、 V_m 、 Th を求め、これらを(1)式に代入して1歩ごとの $VI(2)$ を算出し、さらに1歩ごとの $VI(2)$ を(2)式にしたがって全歩数分加算した $SVI(2)$ で、複数歩連続した歩行振動に対する感覚、評価を表示できることを明らかにしている。ここで、 $VI(2)_{ref}$ は、振動感覚、評価に影響しないほど小さい $VI(2)$ を加算対象から除外するために設定した、 $VI(2)$ の下限値である。

$$SVI(2) = \sum_{n=1}^{歩数} (VI(2)_n - VI(2)_{ref}) \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $VI(2)_n$: n歩目の $VI(2)$

ただし、 $VI(2)_{ref} = -1.2$ とし、 $VI(2)_n < VI(2)_{ref}$ の場合
 $VI(2)_n = VI(2)_{ref}$ とする

図3に、前報で構成した振動感覚、評価に関する心理学的尺度と、 $SVI(2)$ の関係を示す。両者はよい対応を示しており、比較的剛性の低い床を対象とした場合、複数歩連続した歩行振動に対する性能値として、 $SVI(2)$ が妥当であることがわかる。

6. 歩行振動に関する官能検査および心理学的尺度の構成

6.1 官能検査要領

歩行振動に関する官能検査を、表1に示す要領で実施した。以下におもな事項について説明を記す。

6.1.1 構成する尺度および尺度構成手法

構成する尺度は、前報と同様、歩行振動に気付くか、あるいはどの程度大きく感じるかを表す“認知大きさ尺度”と、住居の居室を想定した場合どの程度気になるかを表す“気になり具合評価尺度”

図3 比較的剛性の低い床における心理学的尺度と $SVI(2)$ の関係¹⁰⁾

(1) 試験棟床の例

の2種とした。

また、尺度構成手法は、系列範ちゅう法¹³⁾とした。判断範ちゅうは、表に示す通りである。

6.1.2 検査試料

図4に、本検査で用いた試料床の例を示す。図の(1)は、実建築物を模した在来軸組構法2階建て試験棟の2階の床(以降“試験棟床”と記す)の例、(2)は、桁、梁、床板などのみからなるステージ状の床(以降“ステージ床”と記す)の例である。ステージ床は、試験棟床のみではスパン7000mm以上の試料床が不足するため加えたもので、桁行方向の幅が短く、かつ周囲に壁などは設けられていない。これらの試料床のスパン、梁断面、小梁もしくはパネル受材の種類および間隔、床板の質量および剛性を種々変化させ、様々な大きさ、性状の歩行振動が発生する31種の試料床を設定した。このうち、試験棟床は15種、ステージ床は16種である。試料床のスパンの範囲は4550～8190mm、梁成の範囲は330～600mm、1次固有振動数の範囲は10.5～27.0Hzである。また、梁上のスパン中央に980Nの集中荷重を静的に載荷した場合の剛性の範囲は、1521～13032N/mmである。なお、前報で対象とした木造大スパン床の剛性は、653N/mmである。

これらの試料床上に歩行路と受振点を設定し、歩行路上を所定の歩行者が歩行した際に発生する振動を受振点上の検査員に体感させ、判断を求めることとした。具体的には、図に示すように、(1)の試験棟床では梁間方向と桁行方向の2方向に歩行路を設定し、(2)のステージ床では梁間方向に歩行路を設定した。また、受振点は、発生する歩行振動が比較的大きいと考えられる、床中央近傍の歩行路から455mmの位置に設定した。

表1 官能検査要領

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	
質問事項	住居内で、周りを人が歩行した際に、このような床振動を感じたら、この床振動は、	
判断範ちゅう	①非常に大きく感じる ②やや大きく感じる ③はっきり気付く ④かすかに気付く ⑤気付くか気付かないの境界 ⑥ほとんど気付かない ⑦全く気付かない	①非常に気になる ②..... ③かなり気になる ④..... ⑤やや気になる ⑥..... ⑦全く気にならない
検査試料	31種の試料床上に設定した歩行路を歩行者(成人男性、身長175cm、体重78kg)が歩行した際に発生する歩行振動46種	
検査員	成人男女12名(年齢21～58歳、体重46～108kg)	
受振姿勢	立位	
履物	くつ下

(2) ステージ床の例

図4 試料床の例

歩行者は、前報と同様、安定した歩行ができるように十分な練習を積んだ成人男性1名（身長175cm、体重78kg）とした。また、歩調は2Hzとし、メトロノーム（イヤフォン使用）を用いて制御した。歩行者の履物は、前報で述べた理由から、くつ下とした。

以上、試験床15種×歩行路2種＝30種と、ステージ床16種×歩行路1種＝16種をあわせた、計46種の試料床と歩行路の組み合わせで発生する歩行振動を、検査試料として設定した。

6.1.3 検査員

検査員は、成人男女12名（年齢21～58歳、体重46～108kg）とした。

6.1.4 受振姿勢、履物

検査員の姿勢は、前報と同様立位とし、所定の受振点に歩行路を背にする向きに立たせることとした。また、履物は、前報で述べた理由から、くつ下とした。

6.2 官能検査経過、結果および心理学的尺度の構成

6.1で述べた条件で、官能検査を実施した。検査の際、検査員には、床振動以外の要因は判断に入れないよう教示した。また、歩行者には、検査前に十分な練習を行わせるとともに、横山⁹⁾が製作した荷重測定装置を用いて、検査直前と直後に歩行時に床に与える荷重を測定し、動作が安定していることを確認した。

なお、本検査では、多数の木造大スパン床を試料床として用いることから、試料床を設置するスペースの制約上、長期間にまたがって実施せざるを得なかった。検査を実施した期間は、2011年4月～2014年6月である。

表2に、検査員の回答の分散分析結果を示す。主効果の分散比が高度に有意となっており、かつ寄与率も大きいことから、検査試料による刺激に十分な差異があったこと、長期間にわたる検査であったが検査員は期間中同一の基準で判断しており本検査自体が有効であることがわかる。一方、個人差の分散比も有意となっているが、寄与率が主効果と比較して十分小さいことから、構成される尺度は、検査員間に内在する個人差を内包するものの、各検査試料に対する平均的な判断を表す尺度として、十分有効とみなすことができる。

表2 分散分析結果

	認知大きさ尺度		気になり具合評価尺度	
	分散比	寄与率	分散比	寄与率
主効果	13.79**	43.77%	15.02**	46.99%
個人差	16.92**	14.27%	14.59**	11.93%

**：危険率1%以下で有意

以上より、尺度構成理論¹³⁾にしたがって、認知大きさ尺度および気になり具合評価尺度を構成した。

6.3 心理学的尺度相互の関係の検討

図5に、6.2で構成した認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の関係を示す。図中の①～⑦の破線は、官能検査に用いた判断範ちゅう（表1参照）の心理学的尺度上の位置を表す。図より、両者はよい対応を示しており、大きく感じられる振動ほど、気になると評価されていることがわかる。この結果は、前報と一致する。

7. 試料床の歩行振動の測定

6.1.2で検査試料とした試料床と歩行路の組み合わせを対象に、官能検査時と同一の歩行者が同一の条件で歩行路上を歩行した際に発生する振動を測定した。測定は、官能検査時と同様、受振点に受振者が立位の姿勢で乗った状態で実施した。歩行振動は受振点で測定することとし、床下から受振点の床板の裏面に加速度計（RION社製PV-84）と変位計（KEYENCE社製LK-500）を取り付けて行った。歩行者の動作の安定性は、6.2で述べたと同様、測定前後に荷重を測定することにより確認した。測定回数は、検査試料ごとに5回とした。なお、全検査試料を対象に、測定された変形および加速度の最大値の変動係数を求めた結果、変形の最大値の変動係数は最も大きい検査試料で0.077、加速度の最大値の変動係数は最も大きい検査試料で0.094であった。

図6の(1)に、測定の結果得られた変形・時間曲線、加速度・時間曲線の例を示す。図は、スパン8190mmの試料床での測定結果であり、歩数は11歩である。また、図の(2)には、前報で対象とした比較的剛性の低い床での測定結果の例を、(1)と同一のスケールで示し

図5 認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の関係

(1) 本報で対象とした試料床における測定結果の例

(2) 前報で対象とした試料床における測定結果の例

図6 歩行振動の測定結果の例

た。図から、本報で対象とした比較的剛性の高い床で発生する歩行振動は、大きさ、性状ともに前報とは大きく異なることがわかる。

8. 心理学的尺度と歩行振動の関係の検討

8.1 前報で提示した性能値の適用性の検討

7. で述べた歩行振動の測定結果から、5. で述べた要領で $SVI(2)$ を算出した。その結果、本報で対象とした検査試料では、変形、加速度が小さいため、受振点直近の1歩でも $VI(2)$ が-1.2を上回らない場合がほとんどであり、46種中43種の検査試料で $SVI(2)$ が0となった。この値を、図3に示した心理学的尺度と $SVI(2)$ の関係図と照合すると、“⑥ほとんど気付かない”程度、および“⑦全く気にならない”程度となる。しかし、6.2で構成した心理学的尺度上の各検査試料の尺度値は、図5から“②やや大きく感じる”～“⑤気付くか気付かないかの境界”の範囲、および“③かなり気になる”～“⑥・・・・・・・・”の範囲に分布していることがわかる。すなわち、本報で構成した心理学的尺度と $SVI(2)$ は対応しておらず、比較的剛性の高い床に対して $SVI(2)$ は適用できないことが明らかといえる。

この理由として、以下の事項が考察できる。図6に示したように、(2)の比較的剛性の低い床では、(1)と比較して、変形が大きく、かつ1歩ごとの変形の変化も大きくなっている。また、加速度も大きく、かつ1歩ごとに床の固有振動数での振動の励起→減衰が繰り返されている。このような歩行振動に対する感覚、評価は、前報で述べたように、1歩ごとの振動に対する感覚、評価の積み重ねとして記述できる。一方、(1)に示した比較的剛性の高い床で発生する歩行振動は、(2)と比較して、変形や加速度が小さくかつ1歩ごとの変化も小さいため、1歩ごとの振動はほとんど認知できないものと思われる。しかし、変形が小さいため、(2)では着地時の変形にマスクされて1歩ごとに分断されていた床の固有振動数での振動が、連続的に感じられるようになるものと思われる。このため、歩き始めから終わりまでの床の固有振動数での振動を、振幅は小さいものの、継続時間の長い1つの連続した振動として認知する可能性が考えられる。このように、(1)では、(2)とは異なる感じ方で振動を認知しているため、 $SVI(2)$ は適用できないものと推察される。

8.2 比較的剛性の高い床に適用する性能値の検討

8.1より、本報で対象とした歩行振動に適用する性能値について、新たに検討することとした。8.1で考察した通り、比較的剛性の高い床では、着地時の変形はほとんど感じられないものの、床の固有振動数での振動が感覚、評価に支配的に影響するものと思われる。よって、心理学的尺度との関係を検討する性能値は、加速度の測定結果から導出することとした。ここで、加速度・時間曲線から直接性能値を導出すると、瞬時値への依存性が高いためばらつきが大きくなる。このことと、解析の簡便性の観点から、時定数処理しレベル換算した波形から性能値を導出することとした。

具体的には、以下の2種のレベルについて検討することとした。

- ・ $wVAL$ (dB) : 補正振動加速度レベル
- ・ VL (dB) : 振動レベル

ここで、 $wVAL$ は、全振動数成分を含む振動加速度レベル VAL (基準値: $10^{-5}m/s^2$) を(3)式にしたがって補正したものである。この補正式は、日本建築学会居住性能評価指針のV曲線に基づいて、卓越振動数 f の振動の VAL を、卓越振動数 8Hz の場合の VAL に換算する

ものである。

$$\left. \begin{array}{l} \text{卓越振動数 } f \leq 8\text{Hz の場合 : } wVAL = VAL \\ \text{卓越振動数 } f > 8\text{Hz の場合 : } wVAL = VAL + 20 \cdot \log(8/f) \end{array} \right\} (3)$$

なお、本報で検査試料とした歩行振動では、卓越振動数 f はいずれも試料床の1次固有振動数とほぼ一致していた。

また、レベル算出時の時定数(T.C.)の影響についても検討することとし、以下の1)～3)の3種のレベルを算出することとした。

1) $wVAL$ (T.C. : 25ms)

2) $wVAL$ (T.C. : 10ms)

3) VL (T.C. : 10ms)

ここで、1)の時定数は、横山ら^{13,14)}が $VI(2)$ を提示した際、歩行振動に対する感覚、評価と最もよい対応が得られる時定数として設定したものである。また、2)、3)の時定数は、井上、横山ら¹⁴⁾の検討結果に基づいて、一般的に普及している分析器に装備されている時定数のうち、歩行振動に対する感覚、評価と比較的よい対応を示す時定数として設定したものである。時定数処理の方法について、 $wVAL$ は、加速度・時間曲線を直接時定数処理して算出することとした。一方、 VL は、加速度・時間曲線を1/3オクターブバンドごとに分離したうえで時定数処理し、その後各バンドのレベルを合成する方法で算出することとした。なお、 $wVAL$ に関しては、横山ら^{13,14)}の検討結果に基づいて、時定数処理前の加速度・時間曲線に50Hzのローパスフィルタをかけることとした。これは、ノイズなどの影響を除去しないと振動感覚、評価とよい対応が得られないことが、基礎的検討^{11), 12)}の結果明らかとなっていることによる。一方、 VL を求める際の振動数範囲の上限は、JIS C 1510にしたがって80Hzとした。

図7に、7. で述べた歩行振動の測定結果から算出したレベル波形の例を示す。図は、図6の(1)に示した加速度・時間曲線から算出した2) $wVAL$ (T.C. : 10ms)と3) VL (T.C. : 10ms)の波形を、比較して示したものである。図より、 $wVAL$ ではかかと先端と床との衝突により励起される床の固有振動数での減衰振動のピークが波形に明瞭に現れているのに対し、 VL では不明瞭になっていることがわかる。これは、上述のレベル算出の際の時定数処理方法の違いによるものと思われる。

さらに、1)～3)の3種のレベル波形から、算出の簡便さや既往の研究との整合性などを考慮し、以下のA)～D)の4種の値を、性能値の候補としてそれぞれ算出することとした。

A) レベルの最大値

歩き始めから終わりまでの間の $wVAL$, VL の最大値

B) 1歩ごとのレベルの最大値の和

1歩ごとの $wVAL$, VL の最大値 $wVAL_n$, VL_n のうち、所定の参

図7 レベル波形の例

表 3 性能候補値一覧

	性能候補値の概念	補正振動加速度レベル		振動レベル
		1)wVAL(T.C.:25ms)	2)wVAL(T.C.:10ms)	3)VL(T.C.:10ms)
A)レベルの最大値		wVALmax	wVALmax	VLmax
B)1歩ごとのレベル の最大値の和		$\sum_{n=1}^{\text{全歩数}}(wVALn - wVALref)$ wVALn: n歩目のwVALの最大値 ただし、wVALref=67dBとし wVALn<wVALrefの場合 wVALn=wVALrefとする	$\sum_{n=1}^{\text{全歩数}}(wVALn - wVALref)$ wVALn: n歩目のwVALの最大値 ただし、wVALref=67dBとし wVALn<wVALrefの場合 wVALn=wVALrefとする	$\sum_{n=1}^{\text{全歩数}}(VLn - VLref)$ VLn: n歩目のVLの最大値 ただし、VLref=67dBとし VLn<VLrefの場合 VLn=VLrefとする
C)レベルの積分値		$\int (wVAL - wVALref)dt$ ただし、wVALref=67dBとし wVAL<wVALrefの場合 wVAL=wVALrefとする	$\int (wVAL - wVALref)dt$ ただし、wVALref=67dBとし wVAL<wVALrefの場合 wVAL=wVALrefとする	$\int (VL - VLref)dt$ ただし、VLref=67dBとし VL<VLrefの場合 VL=VLrefとする
D)レベルの最大値 +継続時間		$wVALmax + 20 \cdot \log(T^{1/4})$ T: wVALがwVALref以上となっている時間 ただし、wVALref=67dB、Tcr=1sとし T<Tcrの場合T=Tcrとする	$wVALmax + 20 \cdot \log(T^{1/4})$ T: wVALがwVALref以上となっている時間 ただし、wVALref=67dB、Tcr=1sとし T<Tcrの場合T=Tcrとする	$VLmax + 20 \cdot \log(T^{1/4})$ T: VLがVLref以上となっている時間 ただし、VLref=67dB、Tcr=1sとし T<Tcrの場合T=Tcrとする

図 8 認知大きさ尺度と性能候補値の関係

図9 気になり具合評価尺度と性能候補値の関係

照値 $wVAL_{ref}$, VL_{ref} 以上の $wVAL_n$, VL_n を対象に、 $wVAL_n - wVAL_{ref}$, $VL_n - VL_{ref}$ を加算したもの

C) レベルの積分値

$wVAL$, VL が所定の参照値 $wVAL_{ref}$, VL_{ref} 以上の範囲を対象に、 $wVAL - wVAL_{ref}$, $VL - VL_{ref}$ を時間で積分したもの

D) レベルの最大値+継続時間

$wVAL$, VL が所定の参照値 $wVAL_{ref}$, VL_{ref} 以上となっている時間を継続時間 T として求め、A) に $20 \cdot \log(T^{1/4})$ を加算したもの
上記 A) ~ D) の各性能候補値の概念を表3の当該欄に示す。このうち、B) ~ D) には、レベルの最大値のみでなく時間変化の要因が加味されている。ここで、B) は、横山ら¹⁵⁾が提示したS造、RC造建築物床で発生する歩行振動の性能値との整合性を考慮して設定したものである。また、C) は、受振者に暴露された振動の総和量と位置付けられるものである。さらに、D) は、井上、横山ら¹⁶⁾が提示し

た、レベルの時間変化の要因を比較的簡便な方法で加味した性能値との整合性を考慮して設定したものである。なお、参照値 $wVAL_{ref}$, VL_{ref} は、振動感覚、評価に影響しないほど小さい $wVAL$, VL を考慮対象から除外するために設定した、 $wVAL$, VL の下限値である。

表3に、性能候補値を一覧にして示す。7. で述べた歩行振動の測定結果から、これらの性能候補値を算出し、6.2で構成した心理学的尺度との関係を検討した。具体的には、検査試料ごとに、5回ずつ測定した加速度・時間曲線から各性能候補値をそれぞれ算出し、平均を求めた。なお、算出した性能候補値の変動係数は、最も大きい性能候補値と検査試料の組合せで0.050であった。

ここで、参照値 $wVAL_{ref}$, VL_{ref} については、1dB 間隔で値を変化させながら各性能候補値を算出し、心理学的尺度との関係を検討した。その結果、最もよい対応が得られる値として、表3に示す通り、 $wVAL_{ref} = 67\text{dB}$, $VL_{ref} = 67\text{dB}$ が得られた。このうち、 $wVAL_{ref}$

= 67dB を日本建築学会居住性能評価指針と照合すると、V-70 曲線とほぼ一致する。ちなみに、1991 年版の居住性能評価指針と照合すると、V-3 曲線とほぼ一致する。なお、いずれの性能候補値でも結果的に参照値が同じ値となった理由については、このこと自体に意味があるかどうかの検討も含めて、今後の課題とした。

また、D) レベルの最大値+継続時間を算出する際の T についても、ある程度以上小さい場合は振動感覚、評価に影響しなくなることが予想されたことから、 T の下限値 T_{cr} を設定し、 $T < T_{cr}$ の場合は $T = T_{cr}$ とすることとして心理学的尺度との関係を検討した。その結果、最もよい対応が得られる値として、 $T_{cr} = 1s$ が得られた。

図 8 に、認知大きさ尺度と性能候補値の関係を示す。また、図 9 に、気になり具合評価尺度と性能候補値の関係を示す。図の配置は、表 3 と同じである。なお、試験棟床とステージ床で、結果に明確な傾向はみられなかった。

図 8, 9 より、以下の事項の考察ができる。

- ・図 8 の認知大きさ尺度と図 9 の気になり具合評価尺度とで、性能候補値との対応の傾向に大きな違いはみられない。
- ・1 列目の 1)wVAL(T.C.: 25ms) と 2 列目の 2)wVAL(T.C.: 10ms) を比較すると、1 段目の A) から 4 段目の D) まで、いずれの図でも、対応に大きな違いはみられない。すなわち、この範囲内では、時定数はレベル波形から算出される性能候補値にほとんど影響しないことがわかる。
- ・いずれの図でも、心理学的尺度と性能候補値は比較的良好な対応を示しているが、段ごとに詳細に比較すると、図 8 では、1 段目の A) では wVAL_{max}(T.C.: 25ms) = 82dB 付近、wVAL_{max}(T.C.: 10ms) = 84dB 付近、および VL_{max}(T.C.: 10ms) = 80dB 付近に上側(振動を感じる側)に突出した点があるのに対し、2~4 段目の B)~D) ではこのように危険側に突出した点はないことがわかる。また、図 9 では、実際の評価の際重要となる判断範ちゅう⑤~⑥程度の点のばらつきが、A) と比較して B)~D) の方が小さいことがわかる。すなわち、レベルの最大値でもよい対応が得られるが、レベルの時間変化の要因を加味した方がより精度の高い評価が可能であることがわかる。
- ・2 段目の B) の各図を比較すると、1, 2 列目の wVAL の方が、3 列目の VL より全体的にばらつきが小さくなっている。この一因として、図 7 に示したレベルの波形の特徴の影響が考えられる。すなわち、1 歩ごとのレベルの最大値の和の算出には、波形にピークが明瞭に表れる wVAL の方が適しているものと推察できる。

以上より、表 3 に示した性能候補値の中では、レベルの最大値が心理学的尺度とよい対応を示し、さらにレベルの時間変化の要因を加味した性能候補値がよりよい対応を示すことが、明らかになったといえる。今後、これらの性能候補値の中から性能値を設定することとなるが、その際考慮すべき各性能候補値の長所、短所として、以下の事項が挙げられる。

- ・時定数については、25ms とすると VI(2) や SVI(2) と整合するが、一般的に普及している分析器で簡便に算出することはできない。
- ・wVAL と VL では、VL の方が解析が簡便である一方、振動数情報が欠落しがちという問題点を含んでいる。
- ・レベルの最大値のみでなく、その時間変化の要因を加味した方が性能値としての精度は高くなるが、解析は煩雑になる。

以上の事項に加え、今後、S 造、RC 造建築物床で発生する歩行振動や、歩行以外の振動(設備や交通による振動など)に対する性能値との整合性なども考慮しながら、どの性能候補値を採用するか検討する必要があると考える。

9. おわりに

比較的剛性の高い木造大スパン床を対象に、歩行振動に対する感覚、評価と対応する性能値について基礎的知見を集積することを目的とした本報の結論をまとめると、以下の通りである。

- ・比較的剛性の高い床で発生する歩行振動は、前報で対象とした剛性の低い床で発生する歩行振動と、大きさ、性状が大きく異なる。剛性の低い床での歩行振動に対する感覚、評価は、1 歩ごとの振動に対する感覚、評価の積み重ねとして記述できる。これに対し、剛性の高い床での歩行振動は、歩き始めから終わりまでの床の固有振動数での振動が継続時間の長い 1 つの連続した振動として感じられる。したがって、剛性の高い床に対して、剛性の低い床の性能値 SVI(2) は適用できない。
- ・比較的剛性の高い床で発生する歩行振動の加速度・時間曲線から、日本建築学会居住性能評価指針の V 曲線に基づいて振動数補正を施した補正振動加速度レベル wVAL、および振動レベル VL を算出した。つぎに、wVAL, VL の波形から、レベルの最大値や、最大値にレベルの時間変化の要因を加味した数種の性能候補値を算出した。これらの性能候補値と、振動感覚、評価を定量的に表す心理学的尺度との関係を検討した結果、wVAL (T.C.: 25ms), wVAL (T.C.: 10ms) および VL(T.C.: 10ms) の最大値が心理学的尺度とよい対応を示し、さらにレベルの時間変化の要因を加味した性能候補値がよりよい対応を示すことが、明らかとなった。今後、これらの性能候補値の長所、短所に加え、S 造、RC 造建築物床で発生する歩行振動や、歩行以外の振動に対する性能値との整合性なども考慮しながら、どの性能候補値を採用するか検討する必要がある。

以上であるが、前報で提示した比較的剛性の低い床の性能値 SVI(2) を適用する床と、本報で提示した比較的剛性の高い床の性能候補値を適用する床の棲み分け方法については、今後の重要な検討課題とする。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究の意義、重要性についての共通の認識を持ち、官能検査の実施、歩行振動の測定ならびに結果の考察など、様々な場面で種々御議論、御協力いただいた、守時秀明氏、西谷伸介氏をはじめとする住友林業株式会社筑波研究所の関係各位、および種々御協力いただいた(一社)全国 LVL 協会の関係各位に、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, 一振動発生者と受振者が同じ場合一, 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, 一振動発生者と受振者が異なる場合一, 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, 一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)一, 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: 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
- 9) 公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律, 2010.10
- 10) 横山 裕: 複数歩連続した歩行振動の性能値に関する基礎的検討, 木造大スパン床の歩行振動の居住性からみた評価方法(その1), 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻, 第 691 号, pp.689-695, 2013.9
- 11) 黒田瑛一, 横山 裕: 居住性からみた木造大スパン床の歩行振動の評価方法に関する基礎的研究, その4 心理学的尺度との関係を検討する物理量の導出, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.379-380, 2014.9
- 12) 横山 裕, 黒田瑛一: 居住性からみた木造大スパン床の歩行振動の評価方法に関する基礎的研究, その5 心理学的尺度と物理量の関係の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.381-382, 2014.9
- 13) J.P.Guilford, 秋重義治訳: 精神測定法, 培風館, 1969
- 14) 井上竜太, 横山 裕, 八木 豊, 池田文乃: RC 造, S 造建築物の床振動の評価方法 その2, 一振動レベルに継続時間を考慮した評価方法の提示一, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.465-466, 2008.9
- 15) 横山 裕, 井上竜太, 池田文乃, 八木 豊: 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, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp.125-132, 2009.2
- 16) 井上竜太, 横山 裕, 松下仁士: 振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.377-378, 2014.9

A FUNDAMENTAL STUDY OF PERFORMANCE VALUES IN HIGH STIFFNESS FLOORS

A method to evaluate the habitability of walking-induced vibration on long-span timber floors Part 2

Yutaka YOKOYAMA *, *Eiichi KURODA* ** and *Shintaro FUKUDA* ***

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

** Graduate School, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

*** Graduate School, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

In 2010, Japanese Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries executed the promotion of the use of timber for public building such as public school, town hall and town office, due to regeneration of forest industry and environmental countermeasure. In accordance with the promotion, public buildings go on increasing the construction of the long-span Timber Floors. The popular problem caused by the long-span Timber Floors is strength of vibration induced by human footfalls compared with the current 3.6m x 3.6m Timber Floors. This problem makes bad effect of habitability. To prevent bad habitability, it is need to define performance values that shows relationships of walking vibration strength and human sensory against vibration.

In case of the long-span Timber Floors, we have published A fundamental study in 2013.9 as the first paper.

The summary of these relationships are;

“It appears that adding up the performance value of each footfall is likely to represent the cumulative performance value of multiple consecutive footfalls”.

In this paper we explain an investigated procedure and result of suggested the additional performance values in high stiffness long-span Timber Floors based on all the information obtained from the first paper in 2013.9.

At the first, an investigated procedure is described as follows;

- 1) Define and develop 31 types of long-span timber floors as sample that have capability of various strength and properties.
- 2) Execute sensory test to reply judgments against the walking vibrations and analyze result of sensory test to create suitable psychological scale for relatively high stiffness floors.
- 3) Measure strength of walking vibration.
- 4) Verify relationship between the psychological scale and performance value suggested in the previous paper. Then, examine to detect the new performance values.

At the second, result is described as follows;

- 1) It was revealed that walking vibrations induced by relatively high stiffness floors are different from relatively low stiffness floors from the point of view of strength and property.
- 2) On the relatively high stiffness floors, it was inferred that walking vibration is felt as rather a consecutive long vibration at the natural frequency than stack of footfalls of each step.
- 3) Performance value suggested in the previous paper dose not have enough for relatively high stiffness floors. We should declare the new method and additional performance values in high stiffness floors.

At the third, the additional performance values and derivation methods are described as follows;

- 1) Calculate $wVAL$ (weighted Vibration Acceleration Level) and VL (Vibration Level) measured from acceleration-time curves of walking vibration.

Note) $wVAL$ is VAL obtained by applying a frequency correction based on V-curve of “Architectural Institute of Japan, Guidelines for the evaluation of habitability”.

- 2) Calculate nominated performance values as maximum level and several values. Maximum level is from the curve both of $wVAL$ and VL . Several values are from the curve both of $wVAL$ and VL and factors related of time series.
- 3) From the results of 1) and 2), verify the relationship between these performance values and psychological scale.

Summary of this paper results are;

- 1) Maximum levels of $wVAL$ and VL show good correspondence with psychological scale.
- 2) Several values related to time series were improve reliability of performance value. Specifically, several values are defined as “Sum value of the maximum levels of each footfall”, “Integral value of the level” and “Maximum of level + duration time”.

Our future plan is to decide the best performance value within nominated performance values in this paper. To attain this purpose, reveal properties of each nominated performance values, verify the consistency of the W, S, RC structures from the point of view of walking vibration and verify the consistency of performance values of walking vibration and other vibrations.

(2014 年 10 月 10 日原稿受理, 2015 年 2 月 20 日採用決定)