居住性からみた床の横揺れの評価指標の提示および 評価方法の例示

静止状態の人間が横揺れを感じる場合

STUDY ON EVALUATION INDICES AND AN EVALUATION METHOD OF HORIZONTAL SHAKE OF FLOORS FROM VIEWPOINT OF COMFORT

In the case that a person who is standing or sitting on floors feels horizontal shake

小野 英 哲*, 堀 口 衛**

Hidenori ONO and Mamoru HORIGUCHI

This paper presents evaluation indices and an evaluation method of horizontal shake of floors from a viewpoint of comfort, in the case that a person who is standing or sitting on floors feels horizontal shake.

First, we presented evaluation indices based upon the relationship between $D_{\max}$ (maximum displacement of floors) and human responses to horizontal shake.

Next, we developed an apparatus for applying force to floors, and as an evaluation method we presented the method of applying force and the relationship between $\{D_{\max}\}$ (maximum displacement of floors generated by the apparatus) and human responses to horizontal shake.

Keywords : horizontal shake, evaluation index, evaluation method, comfort, maximum displacement
横揺れ, 評価指標, 評価方法, 居住性, 最大変位量

1. 序

近年, 床の鉛直方向の振動の防止, 床の面方向の伸縮によって生じる応力の緩和などの目的で随所に緩衝材を挿入した床, 床下空間利用の観点から束高を大きくした床, 小さな単位床を組み合わせ構成する床などが設置される例が多い。

これらの床では, 一般に水平方向の剛性が低くなることから, 人間が動作時に床に与える水平荷重などにより横揺れが生じ, 不快感を与えたり, テレビモニター等の画面が見にくくなるなどの障害が発生する可能性が大きく, 横揺れの評価方法の提案は重要な課題となっている。

本報告は, 居住性の観点からみた床の横揺れに関して, 静止している人間が感じる場合の床の横揺れの評価指標および評価方法について検討した結果をまとめたものである。

2. 研究の目的, 範囲

本研究では, 静止した人間が感じる床の横揺れの評価指標および評価方法を究明することを目的としており,

横揺れの観点からの個々の床の評価および開発などは研究の範囲外とする。

対象とする横揺れは人間の動作により生じるものに限定し, 地震や風などによる建物全体の水平振動によって生じる振動は対象外とする。

なお横揺れと表現するのは, 単発的な床の挙動であること, 振動数および減衰などを抽出できない挙動が多いことなどから, 振動として取り扱うのは不適当と判断したことによる。

3. 既往の研究

類似の研究として水平振動に対する人間の感覚に関する研究が国内外で数多く発表されているが, 単発的に発生し, かつ振動として把握することが困難な床の横揺れを対象とする本研究に直接参考となる研究は見当たらない。

4. 研究方法

研究方法の概要は以下に示すとおりである。

* 東京工業大学工学部建築学科 教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

** 大成建設株式会社・工修 (当時東京工業大学・大学院)

Taisei Corporation, M. Eng.

1) 設計, 試作した横揺れ性状の異なるいくつかの試料床上に人間を静止させ, 試料床に加力して横揺れを発生させたときの人間の反応と横揺れとの対応を検討し, 両者の対応を静止時の人間が感じる床の横揺れの評価指標の基本として提示する。

2) 外力として設計, 試作した荷重体による加力を設定し, 荷重体での加力による横揺れと1)で求めた静止時の人間の反応との対応を検討して, 両者の対応および荷重体による加力方法を静止時の人間が感じる床の横揺れの評価方法の一例として提示する。

なお評価方法の一例と限定したのは, おもに, 床の横揺れを発生させる外力がさまざまで, 一義的に決められないことによる。

5. 横揺れに関する感覚および評価尺度の構成

5.1 尺度構成のための官能検査

尺度構成のための官能検査の概要を表—1に一覧にした。以下に主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, 横揺れ感覚尺度と横揺れ評価尺度Aおよび横揺れ評価尺度Bとした。ここで横揺れ感覚尺度は, 横揺れを表す物理量の妥当性検証のための資料とするものである。また横揺れ評価尺度Aは単発に発生する横揺れがどの程度さしさわるかを, 横揺れ評価尺度Bは連続的に横揺れが発生したらどの程度さしさわると想定されるかを表す尺度である。

尺度構成手法は表—1に示す判断範ちゅうにより試料床の横揺れを絶対判断した結果から尺度を構成する系列範ちゅう法とした。

5.1.2 試料の設定

本検査では, 横揺れ性状を変化させることができる試料床上に検査員を静止させ, 所定の動的外力を試料床に加えることによりさまざまな横揺れを発生させることと

した。

図—1に試料床の概要を示す。試料床は水平で平滑な基盤上を4つの車輪で加力方向になめらかに動く形式の床で, スプリングの剛性, 減衰特性ならびに床質量の組合せを変化させることにより横揺れ性状を種々変化させることができるものである。なお参考として, 各試料

No.	床質量 (kg)	スプリングの剛性 (kgf/mm [N/mm])	固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
1	30	2.00 [19.60]	5.00	6.67
2	30	10.24 [100.35]	10.50	5.22
3	30	40.00 [392.00]	19.00	3.73
4	30	166.66 [1632.68]	32.00	3.06
5	70	2.00 [19.60]	4.50	16.16
6	70	4.00 [39.20]	6.00	15.12
7	70	80.00 [784.00]	16.50	5.56
8	150	2.00 [19.60]	5.00	23.99
9	150	4.00 [39.20]	5.50	20.95
10	150	21.60 [211.68]	8.50	14.16
11	270	4.00 [39.20]	5.50	31.51
12	270	10.24 [100.35]	7.00	18.25
13	270	21.60 [211.68]	8.00	14.40
14	270	166.66 [1632.68]	13.00	6.62

図—1 試料床の概要

表—1 官能検査概要

	横揺れ感覚に関する検査	横揺れ評価に関する検査
構成する尺度	横揺れ感覚尺度	横揺れ評価尺度A, B
尺度構成手法	絶対判断に基づく系列範ちゅう法	
判断範ちゅう	この床に作用する横揺れは ①非常に感じる ② ----- ③かなり感じる ④ ----- ⑤やや感じる ⑥ ----- ⑦全く感じない	この床に〔A. 単発の, B. 連続的な〕横揺れが作用したら, 仕事や学習をするうえで ①非常にさしさわりのある ② ----- ③かなりさしさわりのある ④ ----- ⑤ややさしさわりのある ⑥ ----- ⑦全くさしさわりのない
試料床	図—1に示す14体と剛床	図—1に示す14体
検査員	成人男子9名(21~31歳)	
姿勢	立位, 椅子腰掛位	
履物	紳士硬底靴	

床の固有振動数、減衰定数などの振動工学上一般的な物理量を図—1に合わせて示す。ここで固有振動数、減衰定数はともに、試料床を無載荷の状態ではンマーにより加力した結果得られたものである。

また、横揺れを発生させる加力はつねに一定の加力であればいずれの方法でもよいが、本検査では実際に横揺れを発生させる代表的加力のひとつを再現できる図—2に示す加力装置を用いて行うこととした。本装置は筆者らが設計、試作したもので、荷重体は落下重錘とゴムばねからなり、重錘を斜めに落下させることにより水平方向の動的荷重を床に作用させるものである。なお本装置による加力は、一人の人間が歩行時に床に与える代表的外力を近似したものである。

なお本検査では、図—1に示す方向に加力し、いずれの試料でも1回の加力により発生する単発の横揺れを刺激として与えることとした。

試料の設定にあたっては、以下の点に留意した。

- ・実在する、もしくは今後開発される可能性があると思われる床の横揺れ性状の範囲を十分包含する試料群とする
- ・検査機関中横揺れ性状が変化しない試料とする。
- ・検査員が所定の姿勢を維持するのに十分な大きさをもつ試料床とする。
- ・検査員に疲労、倦怠を感じさせない試料数とする。

以上から、図—1に示す横揺れ性状の異なる14種の試料を設定した。なお横揺れ感覚に関する検査では、比較検討する目的で剛床に加力した場合の判断も求めることとした。

図—2 加力装置の概要

5.1.3 検査員の選定

検査員として横揺れに鋭敏とみなせる層から選定することを主眼とし、健常な成人男子9名（21～31歳）を検査員として選定した。なお、層の差異による判断の相違に関する詳細な検討は今後の課題とした。

5.1.4 姿勢、履物の選定

本検査では、静止時に横揺れを判断する観点から代表的かつ一般的な姿勢として、立位と椅子腰掛位を選定した。なお椅子は、ばねやクッション材などが取り付けられていないものを用いた。

また揺れに対する身体の向きは、前後方向でも左右方向でも感覚上明確な差はないことが知られていることから^{1)~3)}、本検査では図—1に示すように加力方向と同じ方向に身体を向けたときの判断を求めることとした。

履物に関しては、種類や形状により横揺れの感じ方が異なることは少ないと想定されたため、より一般的な履物である紳士硬底靴を選定した。

5.2 官能検査経過、結果

5.1で述べた条件のほかに、横揺れ以外の要因は判断にいけないこと、疲れたらいつでも自由に休めることなどを条件に加え、官能検査を実施した。

また検査中、加力装置により試料床を加力したときの試料床の動的挙動をそのつど同時に測定した。

官能検査状況を写真—1に示す。

表—2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。いずれの結果においても主効果の分散比が高度に有意でありかつ寄与率も高いことから、刺激に十分な差があること、本検査自体が有効であることが

表—2 分散分析結果

横揺れ感覚

立位	分散比	寄与率
主効果	51.5535 [*]	77.54%
個人差	9.8688 [*]	7.77%
椅子腰掛位	分散比	寄与率
主効果	60.2680 [*]	81.20%
個人差	8.2586 [*]	5.68%

横揺れ評価A

立位	分散比	寄与率
主効果	44.8211 [*]	71.53%
個人差	13.7208 [*]	12.78%
椅子腰掛位	分散比	寄与率
主効果	46.8393 [*]	74.99%
個人差	10.2114 [*]	9.27%

横揺れ評価B

立位	分散比	寄与率
主効果	40.6789 [*]	68.00%
個人差	15.7179 [*]	15.52%
椅子腰掛位	分散比	寄与率
主効果	35.0474 [*]	69.46%
個人差	9.6955 [*]	10.92%

注) 分散比の欄の^{*}印は、危険率1%で有意であることを示す。

写真—1 官能検査状況

図—3 横揺れ感覚尺度相互の関係

わかる。また個人差の分散比がいずれも有意となっているが、個人差の分散比、寄与率がともに主効果に比較して十分低いことから、構成される尺度は個人差が内包されるものの十分有効といえる。

5.3 尺度の構成および考察

官能検査の結果得られた基礎データを用い、尺度構成理論⁴⁾に従って各々の尺度を構成した。

図—3に立位と椅子腰掛位での横揺れ感覚尺度相互の関係を示す。

両者には高い正の相関があることから、横揺れに対する感覚上の相対的序列は、姿勢によりほとんど異ならないことがわかる。

また図—4に横揺れ評価尺度Aと横揺れ評価尺度Bとの関係を示す。

いずれの姿勢でも両者の相関は非常に高いことから、横揺れに対する評価の相対的序列は、横揺れの生じる頻度によってほとんど差異はなく、単発に発生する横揺れがさしさわりの試料ほど連続的に発生する横揺れもさしさわると想定されていることがわかる。

さらに図—5に立位と椅子腰掛位での横揺れ評価尺度相互の関係を示す。

両者には高い正の相関があることから、各試料の横揺れに対する評価の相対的序列も、姿勢によりほとんど異ならないことがわかる。

図—4 横揺れ評価尺度Aと横揺れ評価尺度Bの関係

図—5 立位と椅子腰掛位における横揺れ評価尺度相互の関係

6. 横揺れの基本的評価指標の提示

6.1 試料床の静的水平剛性と尺度との関係

図—6に横揺れ感覚尺度と試料床の静的水平剛性（静的に加力した場合の試料床の動きにくさ）との関係を示す（(●)は剛床で、静的水平剛性は無限大である）。

図から両者には明確な対応関係はみられないこと、す

図-6 横揺れ感覚尺度と静的水平剛性の関係

なわち同一静的水平剛性の床でも、動的に加力させたときには質量などの影響により動的変位挙動が異なることから、静的水平剛性だけでは尺度を説明できないことがわかる。つまり静的水平剛性で安易に横揺れを評価してはならないことが明らかで、床の横揺れの評価の際に留意すべき非常に有効な知見と考える。

以上より、人間が感じる床の横揺れは、床の静的変位性状では表示できず、実際に生じる動的挙動から検討しなければならないことがわかる。

6.2 試料床の動的変位挙動の測定

5.1の官能検査において、加力装置により試料床を加力したときのすべての試料床の水平方向の動的挙動を図-1に示す変位変換器で測定した。

図-7に各姿勢における変位・時間曲線の一例を示すが、いずれの試料床でもほぼ同様の性状をもつ変位・時間曲線が得られることから、試料床の変位は主に床に加

図-7 各姿勢における変位・時間曲線の一例

えられる水平荷重に相応して生じるものであり、生じた初期変位の減衰は自由振動時と比較して非常に早く、減衰性状や振動数を把握できる挙動は示さないことがわかる。

以上から、すべての床の動的変位挙動を振動数や減衰性状を取り入れた振動として扱うのは困難であることがわかる。

6.3 横揺れを表示する物理量の設定および基本的評価指標の提示

試料床の動的変位挙動から静止時の人間が感じる床の横揺れに対応する物理量を試行錯誤的に抽出検討し、図-7に示す試料床の変位の最大値 (D_{max}) を抽出した。

図-8に横揺れ感覚尺度と D_{max} との関係を示す。

ここで各試料床において構成されたひとつの尺度値に対して D_{max} に幅があるのは、検査員の体重などの影響により同一加力でも D_{max} が異なる現象をそのまま表現したことによる。なお D_{max} が小さい場合、標準偏差 (σ) は非常に小さく、図には明示されないことを付記する。

図から、いずれの姿勢においても両者はなめらかに対応しており、図中点線で示した対応の中心傾向を示す曲線(以降、対応曲線と示す)が容易に得られることから、静止時の人間が感じる床の横揺れの感覚上の序列を人間が試料床上に静止している状態で求めた D_{max} で表せることがわかる。これより、 D_{max} を静止時の人間が感じる床の横揺れを表示する物理量として設定する。

また姿勢ごとに比較すると、立位に比べて椅子腰掛位

①～⑦は判断範ちゅう(表-1参照)

図-8 横揺れ感覚尺度と D_{max} の関係

図—9 横揺れ評価尺度と $D_{\max}$ の関係

の方が敏感に横揺れを感じていることがわかる。

つぎに横揺れ評価尺度 A, 横揺れ評価尺度 B と $D_{\max}$ との関係を図—9 に示す。

いずれの場合においても両者はなめらかに対応しており対応曲線が容易に得られることから、静止時の人間が感じる床の横揺れを $D_{\max}$ で十分評価できることがわかる。

また $D_{\max}$ と横揺れ評価尺度 A, 横揺れ評価尺度 B との対応を比較すると、いずれの姿勢においても横揺れ評価尺度 B の方が同じ $D_{\max}$ に対して評価が低くなっていることから、連続的に発生する横揺れを想定した場合の評価は単発に発生する横揺れを実際に感じた場合の評価よりも低いことがわかる。

さらに、いずれの尺度においても立位に比べて椅子腰掛位の方が同一横揺れに対する評価が低いことがわかる。

以上から本研究では、図—9 を静止時の人間が感じる床の横揺れの評価指標の基本として提示する。

提示した評価指標は、床に静止する人数や横揺れを発生させる外力のいかにかわらず、発生する $D_{\max}$ と人間の評価の関係を示すものであり、人間の層の多様さを除けばきわめて一般性をもつ指標といえる。

7. 横揺れの評価方法の例示

床の横揺れは、床上に静止している人間の数、横揺れを発生させる外力の大きさなどの条件により大きく変化

図—10 試料床の変位・時間曲線の一例

する。それゆえ、対象とする床の横揺れの程度を一義的に絶対評価することは不可能で、そのつどの条件下で $D_{\max}$ を求め図—9 を利用して評価するという無限の課題とならざるを得ない。

しかし、一人の人間が床上に静止し、他の一人の人間が歩行する条件下での床の横揺れの絶対的評価であれば、つぎに示す方法を評価方法の一例として提示することができると考える。

図—10 に例示する試料床の変位・時間曲線は図—2 に示した加力装置により試料床を無載荷の状態で加力したときに得られたものである。

図に示す変位・時間曲線から変位の最大値 $[D_{\max}]$ を抽出し、6.2 で求めた $D_{\max}$ と $[D_{\max}]$ の関係を示したものが図—11 である。

いずれの場合においても両者は比例関係にあることから、 $[D_{\max}]$ を横揺れ感覚尺度および横揺れ評価尺度を定量的に表示する代替物理量として設定できることが推察できる。

図—12 に横揺れ感覚尺度と $[D_{\max}]$ との関係を示す。

いずれの姿勢においても両者はなめらかに対応し、対応曲線が容易に得られることから、 $[D_{\max}]$ で一人の人間が静止しているときに他の一人の人間の歩行により発生する床の横揺れの感覚上の相対的序列を定量的に表せることがわかる。

つぎに横揺れ評価尺度 A, B と $[D_{\max}]$ との関係を

図—11 $D_{\max}$ と $[D_{\max}]$ の関係

①～⑦は判断範ちゅう(表-1 参照)

図-12 横揺れ感覚尺度と $[D_{\max}]$ の関係

①～⑦は判断範ちゅう(表-1 参照)

図-13 横揺れ評価尺度と $[D_{\max}]$ の関係

図-13 に示す。

いずれの場合においても両者はなめらかに対応し、対応曲線が容易に得られることから、 $[D_{\max}]$ で一人の人間が静止しているときに他の一人の人間の歩行により発生する床の横揺れを定量的に評価できることがわかる。

以上から、加力装置による加力方法および図-13 に示す評価指標を合わせて一人の静止時の人間が他の一人の人間の歩行によって生じる横揺れを感じる場合の定量的評価方法として例示する。

また加力の大きさと $D_{\max}$ の大きさは互いに比例関係にあるとみなせること、さらに床上に静止する人間の数と $D_{\max}$ は反比例することが明確であることから、無載荷の状態での一定の動的荷重の加力により得られる $[D_{\max}]$ の大小で床の横揺れの相対的序列を表示することが明らかといえる。

以上から、床の横揺れの評価方法をつぎのようにまとめることができる。

1) 横揺れを厳密に絶対評価する場合

所定の人間が床上に静止する状態で実際の動的外力が作用したときの最大変位量 $D_{\max}$ を求め、図-9 を用いて絶対的に評価する。なお、一人の人間が床上に静止し、他の一人の人間が歩行する条件下での床の横揺れの絶対的評価は、図-2 に示す加力装置で加力したときの $[D_{\max}]$ を求め図-13 を用いて行うことができる。この際、人間の層による評価の差異は今後の課題となる。

2) 横揺れを相対的に評価する場合

一定の動的荷重を加力したときの最大変位量 $[D_{\max}]$ を求め、 $[D_{\max}]$ の大小により相対的に評価する。こ

で一定の動的荷重として、図-2 に示す加力装置による加力を用いることができる。

8. 結

居住性の観点からみた床の横揺れに関して、静止している人が感じる場合の評価指標および評価方法を究明した結果を述べた。本報告で提示した評価指標および例示した評価方法は、横揺れの観点からよりよい床の開発、設計、選択のための有効な資料となると考える。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、官能検査などに協力いただいた皆様、ならびに装置の製作にあたり協力いただいた高橋宏樹氏(東京工業大学助手)に謝意を表します。なお検査、実験の一部は杉浦規夫君(日本工業大学卒論生)が行ったことを付記します。

参考文献

- 1) 三輪俊輔, 米川善晴: 振動の評価法 1, 正弦振動の評価法, 日本音響学会誌 27 巻 1 号, 1971 年
- 2) 佐野行雄, 神田 順, 田村幸雄, 藤井邦雄, 大築民夫, 草加俊資: 長期水平振動の知覚閾に関する基礎的研究—一方向正弦波による座位と臥位の場合—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp. 225~226, 1989 年 10 月
- 3) 西村修一, 神田 順, 田村幸雄, 藤井邦雄, 大築民夫: 長期水平振動の知覚閾に関する基礎的研究—立位を対象とした実験結果—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, pp. 323~324, 1990 年 10 月
- 4) J. P. Guilford 著, 秋重義治監訳: 精神測定法, 培風館, 1969 年

(1993 年 1 月 8 日原稿受理, 1993 年 6 月 28 日採用決定)