

コンクリート打設に伴うスラブ振動特性の経時変化

正会員 森清 宣貴* 正会員 原田 雅俊* 正会員 山下 紘太郎*
同 伊藤 真二* 同 藤井 睦*

コンクリート 鉄筋コンクリート 連続振動計測
固有振動数 減衰定数

1. はじめに

鉄筋コンクリート造スラブを対象として、コンクリート打設から打設後の約 1 ヶ月半にわたる連続振動計測を実施し、コンクリート打設前後の振動特性の経時変化およびコンクリート硬化後の振動特性の日変動¹⁾²⁾について考察する。

2. 試験概要および計測概要

計測対象は、図 1 および写真 1 に示す施工実験を目的として作製した試験体である。実大の物流施設のスラブを模擬しており、スラブは 180mm 厚で、鉄骨造フレームに鉄筋組込デッキを敷設して、普通コンクリート（呼び方 27-15-20N）を打設した。なお、コンクリートの打設は 9 月 29 日 8:30 ~ 11:00 で行った。

図 1 に示すようにスラブ中央付近のデッキ下面に加速度計を設置し、上下方向の加速度を計測した。計測期間は 2017 年 9 月 29 日 8:30 のコンクリート打設直前から 11

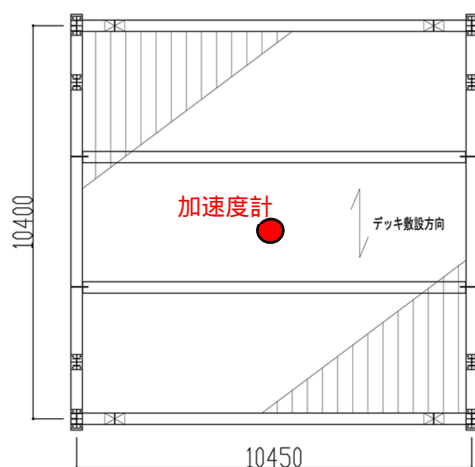


図 1 試験体伏図および計測位置



写真 1 試験体全景

月 12 日までの約 1 ヶ月半である。サンプリング周波数は 100Hz で連続的に計測した。

3. 振動特性の経時変化

3.1. 微振動応答のスペクトル特性

計測で得られた微振動データに高速フーリエ変換（FFT）を適用して、スラブの振動スペクトルを分析する。分析する微振動データは、打設前（2017 年 9 月 29 日 8 時台）、打設直後（2017 年 9 月 29 日 12 時台）、硬化後（2017 年 10 月 25 日 12 時台）とした。図 2 はスラブ上下方向加速度のフーリエ振幅スペクトルであり、打設前 - 約 12Hz、打設直後 - 約 5Hz、硬化後 - 約 9Hz のピーク振動数の変化が確認できる。各時点でのピーク振動数は、事前に実施したスラブの FEM 解析結果と概ね一致することを確認している。

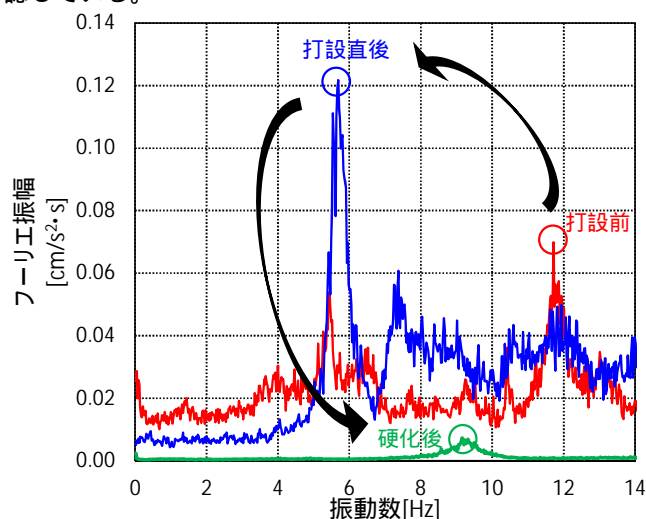


図 2 スラブ応答のフーリエ振幅スペクトル

3.2. 打設に伴う振動特性の変化

打設から 10 月 5 日までは 10 分毎、それ以降は 60 分毎のデータに対して ARMA モデルを適用してスラブの固有振動数および減衰定数を同定した。

スラブの 1 次固有振動数および 1 次減衰定数について、全計測期間の経時変化を図 3(a)に、打設後約 24 時間の経時変化を図 3(b)に示す。図 3(a)の 1 次固有振動数のグラフには強度試験から得られたコンクリート強度（現場封緘養生供試体 100mm）をあわせて示している。固有振動数は、打設直後のコンクリート自重が加わったのみの状

態（約 5Hz）を経て、打設後 10 日程度までは強度上昇とともに徐々に上昇し、その後、28 日強度に向かって強度は上昇するものの固有振動数は約 9Hz で概ね安定した。また、図 3(b)より、打設日の夕方までに固有振動数が大きく上昇することが確認できる。一方、減衰定数は、バラつきが大きいものの、固有振動数に比べると緩やかな変化で、打設後に強度上昇とともに減少し、固有振動数と同様、打設後 10 日程度で 3.0%前後に落ち着いた。

図 4 は、コンクリートの硬化が落ち着き、固有振動数および減衰定数が概ね安定した 10 月 30 日～11 月 8 日の 10 日間について、図 3(a)の時間軸を拡大したものである。図 4 には 1 次固有振動数と 1 次減衰定数のほか、応答振幅（rms 値）および近傍のアメダスポイント（茨城県つくば市）の気温および全天日射量をあわせて示す。なお、固有振動数と減衰定数はバラつきが大きいので、ウィン

ドウ幅 6 時間のメジアンウィンドウにより平滑化した結果をあわせて示す。固有振動数は、約 0.10Hz の変動幅で変化しているが、今回の試験体では応答振幅や気温・全天日射量との明瞭な相関関係は見られなかった。減衰定数は、2.0%～3.0%の中での明瞭な日変動が見られ、振動振幅の依存度が高い結果となっている。

4. まとめ

鉄筋コンクリート造スラブのコンクリート打設前後の振動特性の変動を測定し、振動特性とコンクリート強度の関係を確認した。また、コンクリート硬化後には、振動特性の日変動が確認できた。

【参考文献】

- 1) 金澤：SRC 造建築物の固有振動数の年間変動，日本建築学会大会講演梗概集 B-2，pp.75-76，2005.9.
- 2) 金澤：変動温度荷重を受けるコンクリート柱の固有振動数の経時変化，日本建築学会大会講演梗概集 B-2，pp.401-402，2006.9.

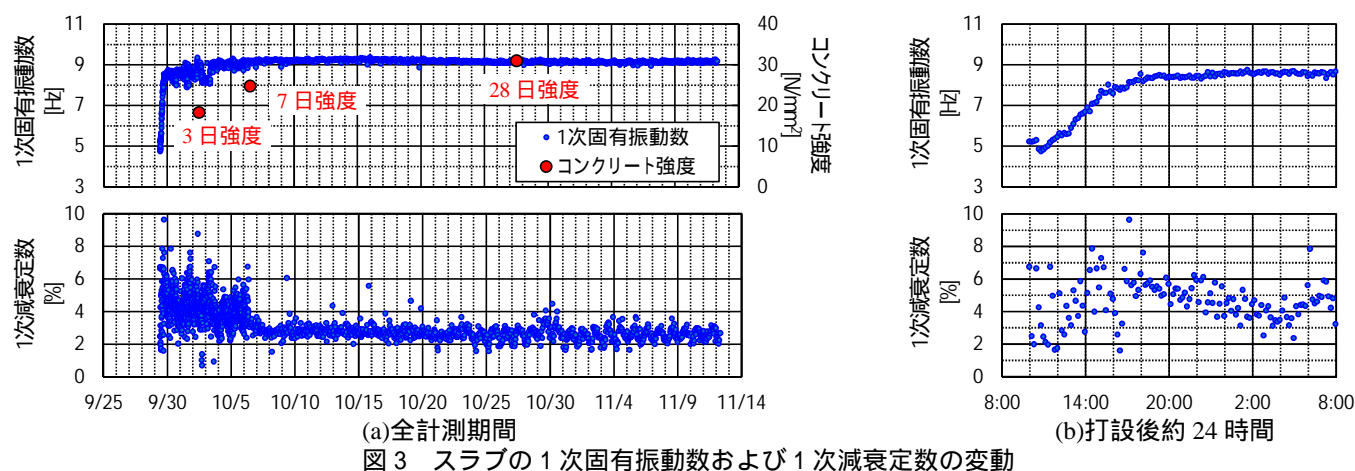
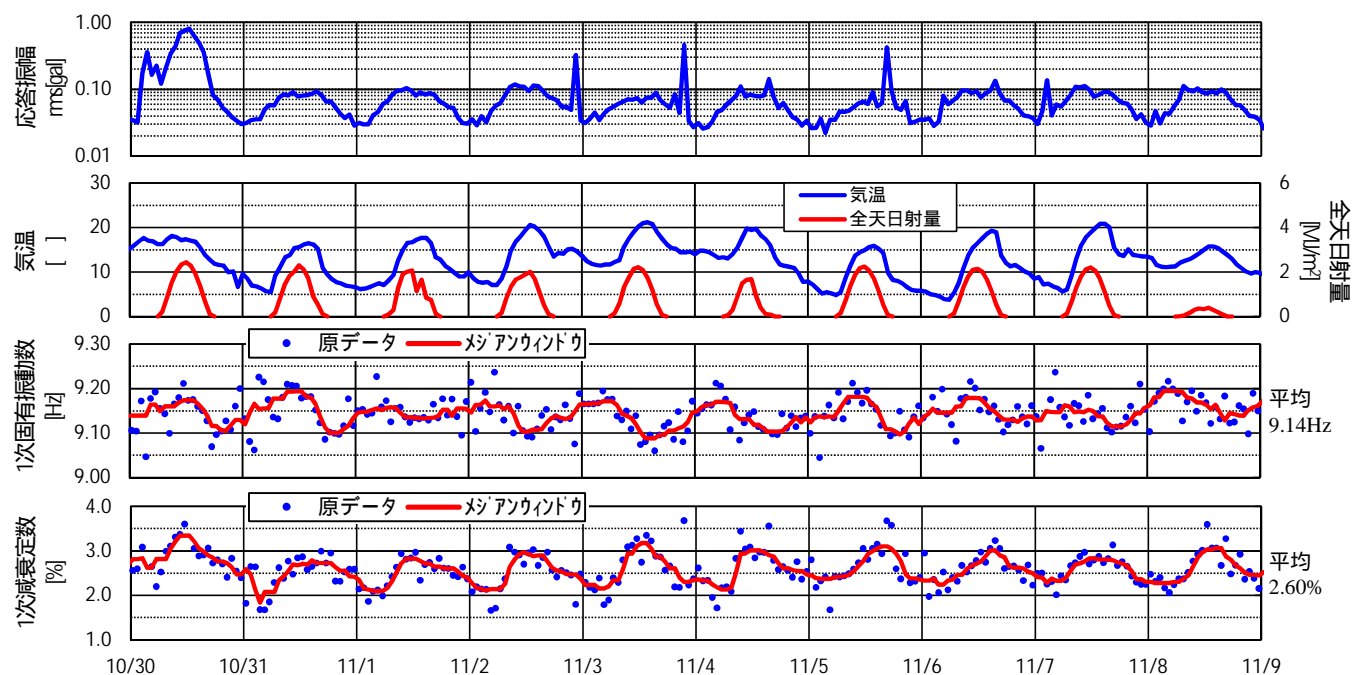


図 3 スラブの 1 次固有振動数および 1 次減衰定数の変動



（10/30～11/8、1 次固有振動数および 1 次減衰定数は図 3(a)の時間軸を拡大）

居住床を対象とした衝撃振動の周波数特性が 人の振動感覚に与える影響

EFFECT OF VIBRATION SENSE BY FREQUENCY CHARACTERISTICS OF IMPACT VIBRATION FOR RESIDENTIAL FLOOR

富田隆太*, 井上勝夫**
Ryuta TOMITA and Katsuo INOUE

In this research, we examined effect of vibration sense by frequency characteristics of impact vibration for residential floor. As the result, we got the followings: (1) We showed that the frequency of 30Hz or more also affect the vibration sense of human, (2) We showed that the broadband waveform, as compared to the narrow band waveform, the influence of the vibration sense of human is large, (3) We showed that when it comes to broadband, as compared to the narrow band, to perceive even a small vibration of about 4 ~ 5dB.

Keywords : *Floor vibration, The rubber ball, Frequency, Vibration sense, Impact vibration, Residential floor*

床振動, ゴムボール, 周波数特性, 振動感覚, 衝撃振動, 居住床

1. はじめに

都市の高密度化や建築物の床の大スパン化等により、建築物を取り巻く環境振動の問題が増加してきている。現在、居住床の床振動評価としては、日本建築学会から刊行されている「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」¹⁾が用いられることが多い。同書によると、「I. 人の動作・設備による鉛直振動」の項目では、「Fig. 1に示す性能評価曲線に、床応答波形から求まる1/3オクターブバンド分析結果を照合することにより行う」とされている。また、「床応答波形は、床用途上、日常的な振動発生源になると想定される加振条件下で求めることとする」とされており、衝撃源や衝撃方法については定められていない。この方法による評価は、床の振動に対する遮断性能(抵抗)に加えて、床に入力される衝撃力の変化が影響することから、人の動作等の場合には動作の種類や個人差等の変化、ばらつきを含むこととなる。

本研究の目的は、これまで環境振動分野では導入されていないが、振動に対する建築物の遮断性能(建築性能)そのものを評価していかうとするものである。また、本研究の対象は、人の動作等を想定した鉛直方向を対象とした床の衝撃振動とする。本研究の目的のように、床の遮断性能を求めようとするためには、衝撃入力を一定にすれば良い。若しくは、入力と出力を求め、インピーダンスやダ

イナミックマス(動的質量)等のような抵抗値による表現方法もある。

本研究では、衝撃入力を一定にする方法として、これまでJIS A 1418-2:2000²⁾の衝撃力特性(2)を有する標準重量床衝撃源(以下、ゴムボール)を用いた検討を行ってきた³⁾。これは、JIS A 1418-2:2000²⁾による重量床衝撃音の標準衝撃源として広く普及している状況があり、かつ衝撃力特性として低周波数域の成分が大きく、25Hz程度まで周波数特性が一定であることから、人の動作のような衝撃振動には特に適していると判断したためである。なお、既報³⁾では、鉛直方向の環境振動の周波数領域(3~80Hz)でも安定した再現性があることを確認した。

本研究で「振動に対する居住床の遮断性能」を評価するためには、まずは人の振動感覚と対応の良い評価物理量を検討する必要がある。

そこで、本論文では、基礎的検討として、床衝撃時の床の振動応答波形から得られる周波数特性に着目し、周波数範囲や決定周波数(接線法により評価した場合に評価値を決定する周波数と本論文では定義する)以外の周波数が振動感覚に与える影響を検討した。

本研究に関連する既往研究として、一定の衝撃力を加えて、「居住

* 日本大学理工学部建築学科 助教・博士(工学)

** 日本大学理工学部建築学科 教授・工博

Assistant Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

床の振動に対する遮断性能」を評価することを目的とした報告はほとんどない。建築音響の床衝撃音の分野では、この考え方を基本としており、重量床衝撃音に対して、JIS A 1418-2:2000³⁾, JIS A 1419-2:2000⁴⁾で測定方法、評価方法が決まっている。

一方で、人の鉛直方向を対象とした振動感覚に関する研究は、古くから様々な分野で行われており、代表的なものとして三輪らの一連の研究^{5)~7)}がある。三輪らは、文献5), 6)で、定常振動を対象に、正弦振動やランダム振動の評価法として、振動の大きさのレベル(VGL)を提案している。また、文献7)では、衝撃振動を対象として評価法を提案している。これらの研究は、建築分野ではないが、振動感覚に関する評価法として有用であり、多くの研究や規準等で引用されている。また、松本らは文献8)で文献5)も含めた国内外の様々な分野で報告されている11の文献による連続正弦振動の知覚閾をまとめ、平均的な知覚閾の周波数依存特性を表示した。有用な試みで、人の振動感覚の閾値について大いに参考になる報告である。しかし、文献5), 8)は正弦振動を用いた研究結果に基づいており、文献7)は基本周波数が著しく変化しない場合にのみ利用できることとされている。一方、文献6)は定常振動を対象としている。本研究で対象とする人の動作により生じる床振動の場合には、当然複雑な時間及び周波数特性を持ち、応答量も床の減衰により変化することからそのまま適用することはできない。

建築分野においては、石川らは文献9)で、振動台上に居室を設置して、定常的な鉛直方向の正弦振動による被験者実験結果から、知覚確率及び感覚評価における回答確率を提示している。横山らは、文献10), 11)で人の動作により発生する床振動を対象とした研究を行っており、人が感じる感覚上の序列を表示する物理量としてV I (2)を提示し、床振動の評価指標に照合し、床の振動を評価する方法を提案している。適用範囲としては、検査試料の範囲から床の固有振動数が5~25Hzを対象としている。また、横山らは文献12)で、正弦波と共に歩行により発生する床振動を模擬した応答波を振動台上で再現し、周期的あるいは連続的な振動の評価と対応の良い物理量を提案しており、振動数としては、5~16Hzの範囲の振動数成分が高度に卓越した振動波形を対象とした検討を行っている。高橋らは、文献13)で、10Hz以下の固有振動数を持つ歩道橋や大スパン床を対象に、最大振動レベルの平均値から求まる換算加速度と感じる度合の対応がよいことを示し、振動台上でも基準正弦波と固有振動数、減衰定数の異なる16種類の刺激振動(固有振動数は、5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hzの4種類)を対象として感覚的な等価な振動量を求め、振動レベルと換算加速度が有効であることを示している。

以上のように、それぞれの目的に応じて有用な成果を挙げており、特に人の動作により発生する床振動を対象とした文献10)~13)は本研究を行う上でも参考になる部分があるが、いずれの研究も主に30Hz以下を主成分とした振動による検討結果であると言える。

本論文では、「振動に対する居住床の遮断性能」を評価するための基礎的検討として、実際の床スラブに発生する床振動応答と人の振動感覚に関する検討を行った。既往研究では、人の動作を対象とした床振動(ランダム振動かつ衝撃減衰振動)を対象として30Hzを超える周波数領域に対する報告が少ないことから、本研究では1/3オクターブバンド分析で80Hz帯域までの範囲で実験的検討を行った。実験方法としては、振動台を用いずに、実際の床スラブに衝撃を加え、加

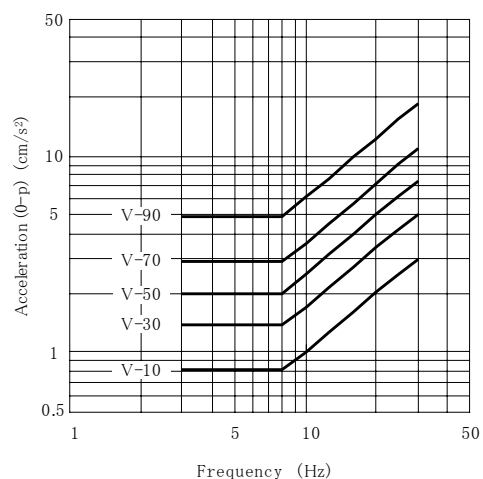


Fig.1 The curve of Performance Evaluation for the vertical vibration

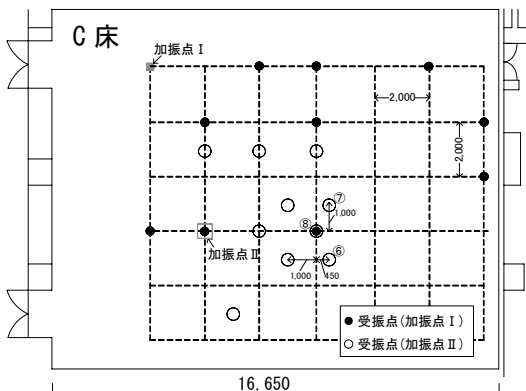
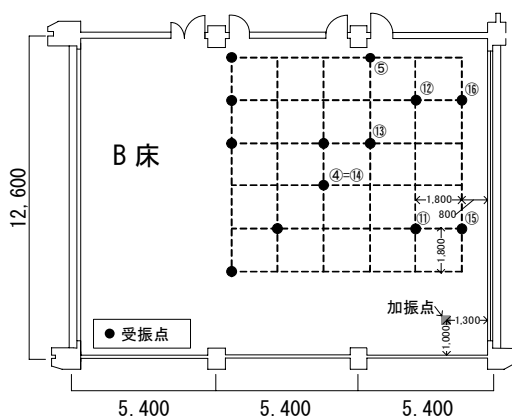
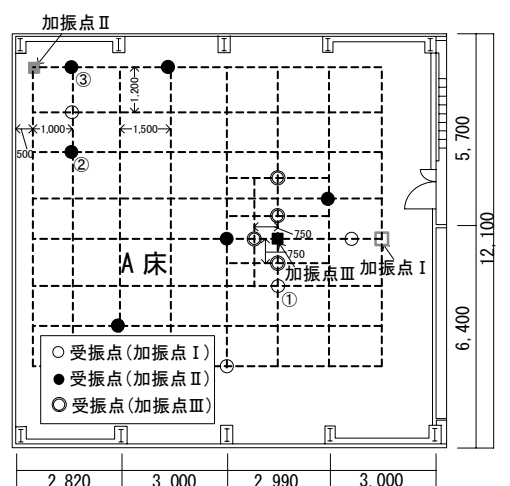
Table1 Overview of the floor structure

	構造	床構造(単位mm)	スラブ寸法 (単位m)	1次固有振動数 減衰比h
A床	S造	デッキPL-1.2+普通コンクリート80 +モルタル20+長尺塩ビシート	3×12	10Hz,5.4%
B床	RC造	普通コンクリート120+モルタル30+Pタイル2mm	5.4×12.6	13Hz,3.1%
C床	RC造	普通コンクリート150+モルタル	4×6	35Hz,2.1%

振点と受振点の組み合わせから、様々なランダム振動を発生させた。次に、文献1)では接線法により評価を行っているが、人が振動を感じる場合、その卓越した周波数だけの振動を感じているのではなく、他の周波数における振動も感じ、それが「振動の大きさ感」に影響すると予想される。1/3オクターブバンド分析結果の波形形状において、決定周波数だけが卓越している場合に比べて、他の周波数成分も同程度の振幅をもつ場合では、その影響は大きいと予想される。そこで、卓越する決定周波数以外の周波数特性が振動感覚に及ぼす影響について実験的検討を行った。

2. 実験方法

実験は、Table1に示すS造、RC造の3床を用いて行った。Fig.2にA, B, C床の平面図及び測定点を示す。図に示す加振点にてゴムボールを1mから落下させ、各受振点で振動レベル計(VM-53A)を用いて、振動応答加速度を測定し、1/3オクターブバンド分析した。また、各受振点位置では、被験者による感覚評価実験を行った。被験者には、受振点で振動を「感じない・かすかに感じる・明らかに感じる・強く感じる」の4段階で評価してもらった。さらに、感じないと回答した被験者を除いて、感じた振動を「不快ではない・どちらでもない・不快・かなり不快」の4パターンで評価してもらった。本論文における知覚率は、各受振点ごとに「明らかに感じる+強く感じる」の票数÷全票数×100(%)で算出した。また、知覚度合及び不快度合については、カテゴリー尺度法を用いて尺度化した。なお、ゴムボール落下時の視聴覚の影響を除くために、耳栓を装着させ、ボール落下による加振行為がみえないように加振位置に背をむけて、床に直に体育座り(平座位、立膝)の姿勢で座ってもらった。なお、予備実験にて、ゴムボール加振時の衝撃音が振動評価に影響がないことを確



* 図中の○中の数字は、Fig. 3～5, Fig. 9～11 と対応している。

Fig.2 Plan view and measurement point of floors

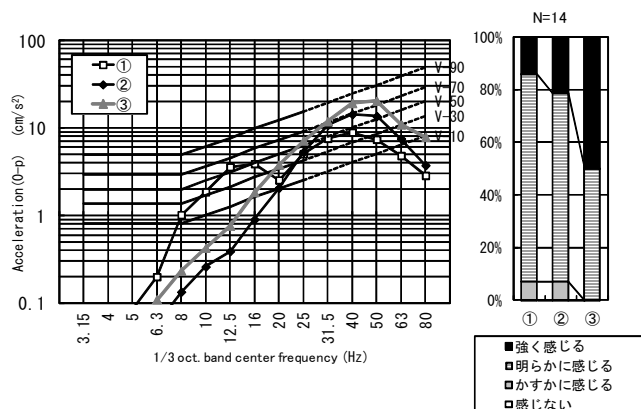


Fig.3 Example of sense evaluation and frequency characteristics (the A-floor)

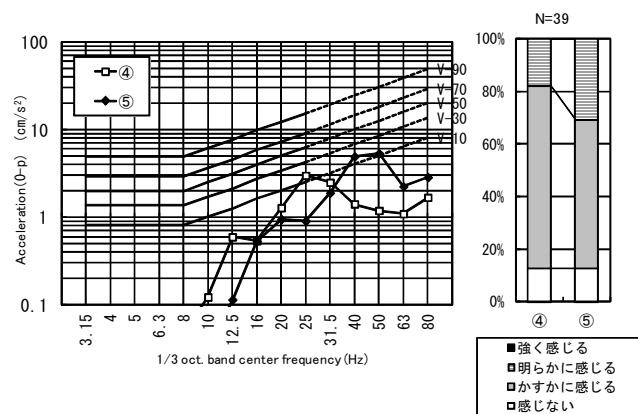


Fig.4 Example of sense evaluation and frequency characteristics (the B-floor)

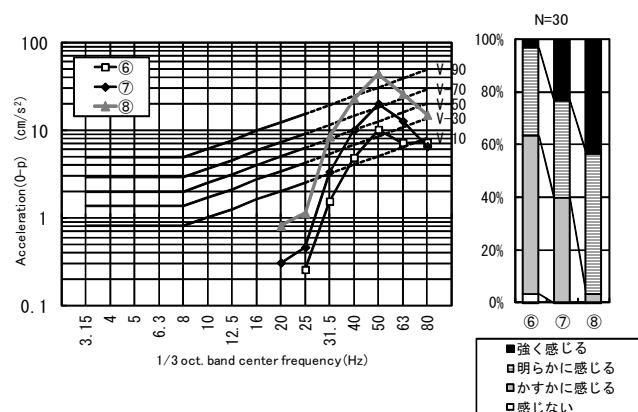
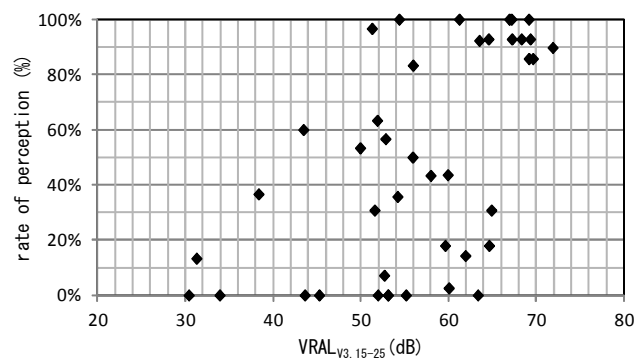


Fig.5 Example of sense evaluation and frequency characteristics (the C-floor)

(1) VRAL_{V3, 15-25} と知覚率



(2) VRAL_{V3, 15-80} と知覚率

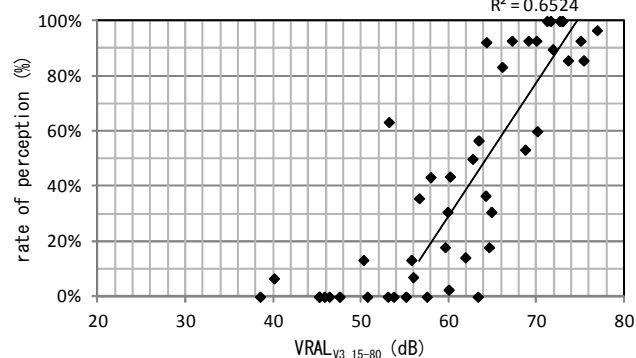


Fig.6 Corresponding rate of perception and VRAL

認した。また、実験の際には、机及び椅子を実験対象とは別のスパンの床の上に移動し、実験対象範囲の床には、何も積載しないこととした。

被験者は20代成人とした。A床は7名の被験者で14受振点を各2回評価し、B床は13名の被験者で13受振点を各3回評価し、C床は10名の被験者で20受振点を各3回評価した。ゆえに、対象とした感覚評価実験の票数は1303票であった。

3. 30Hz から80Hzの周波数が振動感覚に与える影響

3-1. 各点の知覚度合と加速度応答波形の検討

Fig. 3～Fig. 5に、各床の知覚度合と応答加速度波形の1/3オクターブバンド分析結果の例を示す。Fig. 3の感覚評価結果をみると、①→②→③の順に「強く感じる」割合が多くなるが、応答加速度をみると居住性能評価指針¹⁾の評価範囲である25Hz帯域までで接線法により評価すると②<①≒③のようになり、感覚評価と対応が良くない。そこで、性能評価曲線を+6dB/octave(以降、oct.)の勾配で80Hz帯域まで延長して評価すると、②、③では40Hz帯域が決定周波数となり、①<②<③と順位の対応が良い。次に、Fig. 4の感覚評価結果をみると、ほぼ同程度の知覚度合である。応答加速度をみると、⑤は25Hz帯域以下では④に比べてかなり小さい加速度振幅であるが、31.5Hz帯域以降を考慮すれば、40Hzが決定周波数となり、応答加速度による評価も同程度となる。また、Fig. 5の感覚評価結果をみると、31.5Hz帯域以上の振動が明らかに知覚に影響している。これらの振動は、50Hz帯域がピークとなり、⑥<⑦<⑧と応答加速度による評価と感覚評価結果で順位の対応が良い。以上のように、実際の建物で被験者による感覚評価実験を行った結果、30Hz以上の周波数成分も振動感覚に大きく影響することがわかった。しかし、30Hz以上の感覚を+6dB/oct.で評価して良いかについては、さらなる検証実験を必要とする。

3-2. 感覚評価と評価物理量の検討

Fig. 6にVRALと知覚率の対応を示す。VRALは、Fig. 1の鉛直振動の性能評価曲線(本論文では31.5Hz帯域以上は+6dB/oct.とした)をもとに、決定周波数の振動応答加速度を評価曲線に沿って平行にスライドさせ、3～8Hzの加速度一定の部分での値(a' < m/s^2)を求め、 $20\log_{10}(a'/10^{-5})$ < dBにより算出した値であり、本研究ではVRALと定義した。すなわち、VRALは人の鉛直振動の感覚を考慮したFig. 1の振動評価曲線からみて最も卓越した周波数の加速度を評価している。Fig. 6の(1)は、居住性能評価指針¹⁾の評価範囲である3.15Hz帯域から25Hz帯域までの決定周波数の振動応答加速度から求めたVRAL_{V3.15-25}と知覚率の関係を示したものである。これをみると、前述のように31.5Hz帯域以上の周波数成分が影響していることから、相関が見られないことがわかる。一方、(2)の3.15Hz帯域から80Hz帯域までの間で評価してみると、VRAL_{V3.15-80} = 56dB程度から知覚し始め、VRALの増加に伴い、知覚率が大きくなり、72dB程度で90%の人が知覚している。居住性能評価指針¹⁾のFig. 1ではV-10(10%の人が感じるレベル)が58dB、V-90が74dBであるということから、概ね本実験結果の(2)と対応が良いことがわかる。現在の居住性能評価指針¹⁾は(1)のように30Hz以下のみを対象としているが、本実験結果から30Hz以上の周波数領域を延長していくことが必要であると言える。

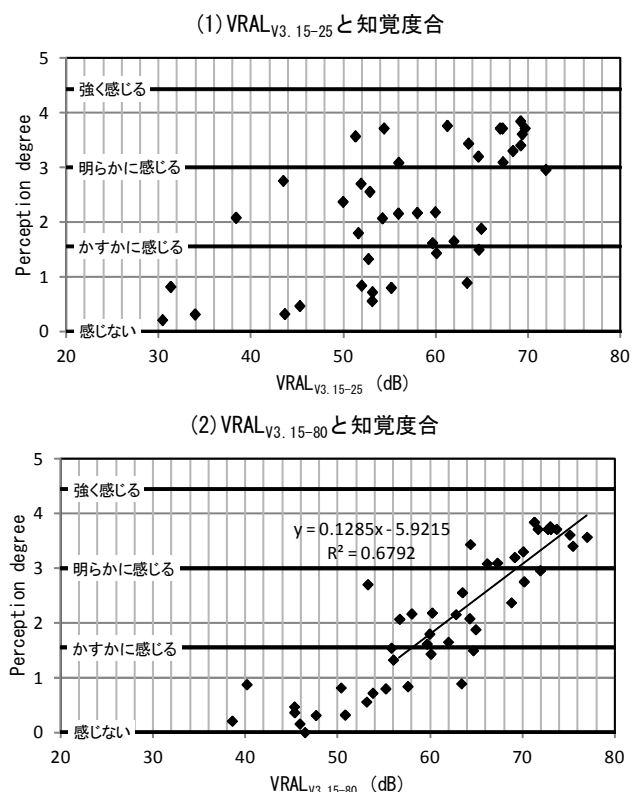


Fig. 7 Corresponding perception degree and VRAL

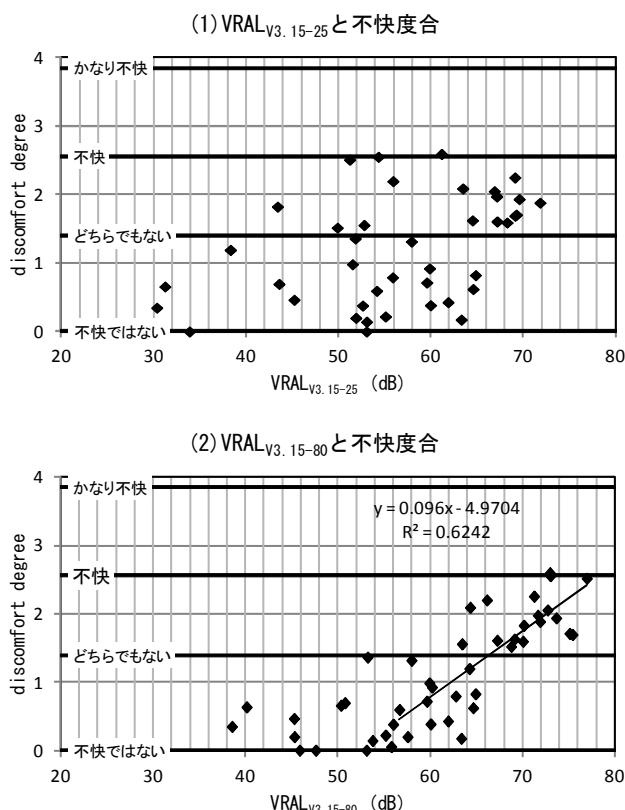


Fig. 8 Corresponding discomfort degree and VRAL

Fig. 7, 8にVRALと知覚度合、不快度合の結果を示す。Fig. 7(1)を見ると、Fig. 6の知覚率と同様に、25Hz帯域以下の応答加速度で算出したVRALと知覚度合の対応が悪く関係性が見られない。しかし、

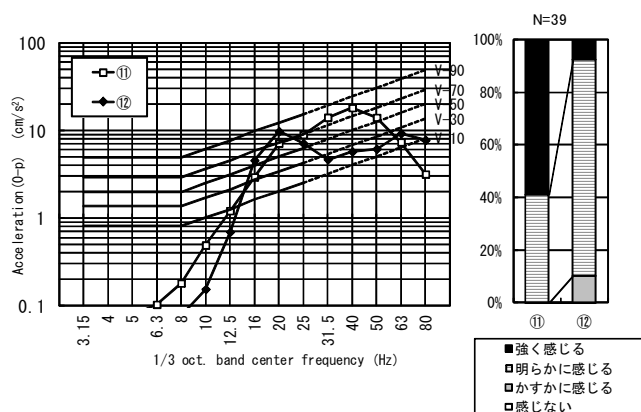


Fig.9 Example of sense evaluation and frequency characteristics (the B-floor, ⑪⑫)

(2)のように、横軸を80Hzまでの応答加速度を考慮したVRALにすると、VRAL=56dBで「かすかに感じる」、70dBで「明らかに感じる」評価となり、回帰直線と良い対応が見られる。また、Fig. 8(1)を見ると、知覚率、知覚度合と同様に、25Hz以下の応答加速度で算出したVRALと不快度合の対応は悪い。一方、横軸を80Hzまでの応答加速度を考慮したVRALとし、56dB以上のデータに対する回帰直線でみるとVRAL=66dBを超えると、「どちらでもない」～「不快」の範囲となり、回帰直線と良い対応が見られる。以上のように、知覚度合や不快度合についても、30Hz以上の周波数成分を考慮することで評価物理量と感覚量が良く対応するようになることから、30Hz以上の周波数成分を考慮していく必要があると言える。

4. 決定周波数以外の周波数が振動感覚に与える影響

4-1. 各床の知覚度合と加速度応答波形の検討

Fig. 9～Fig. 11に、各床の知覚度合と応答加速度波形の分析結果の例を示す。なお、3.の結果から、評価周波数範囲を80Hzまでの範囲で検討した。Fig. 9の⑪、⑫ともに決定周波数の応答加速度をみると、居住性能評価指針¹⁾のFig. 1の評価では、V-80程度を示しているが、⑪の方が広帯域に渡って寄与の大きい周波数特性を示しており、感覚評価結果も⑪の方が知覚度合が大きい。Fig. 10の⑬、⑭を見ると、25Hz帯域は同程度の振幅であるものの、⑬の方が16～63Hz帯域の成分が大きく、知覚度合も大きい。Fig. 11の⑮と⑯は16, 20, 50Hz帯域ではほぼ同程度の応答加速度を示しているが、それ以外の周波数帯域では⑮の方が応答加速度が大きく、広帯域に渡って寄与の大きい周波数特性である。同様に、知覚度合をみても⑮の方が大きい。これらの例のように、広帯域にわたって応答加速度が大きく、なだらかな山形の周波数特性を示す振動の場合、決定周波数だけが卓越している振動に比べて、知覚率や知覚度合が高くなる傾向がある。よって、広帯域成分を含む振動を評価する場合には、決定周波数の振動応答加速度だけではなく、他の周波数帯域も考慮した方が振動感覚との対応が良いと考えられる。

4-2. 感覚評価と評価物理量の検討

ここでは、応答加速度から得られたVRAL (3.15～80Hz帯域)を対象に、決定周波数以外の周波数成分が振動感覚に与える影響について検討した。Fig. 12にVRALと知覚率の対応を、狭帯域(決定周波数

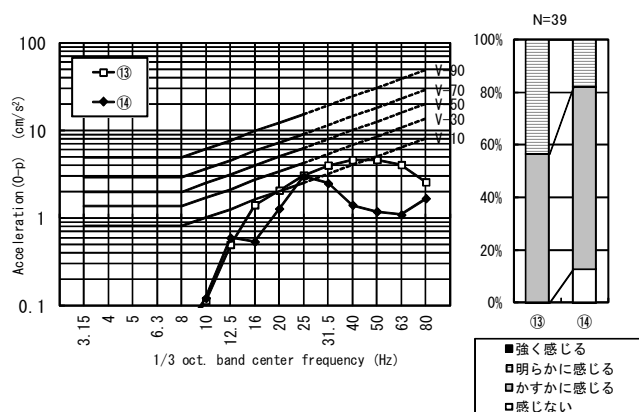


Fig.10 Example of sense evaluation and frequency characteristics (the B-floor, ⑬⑭)

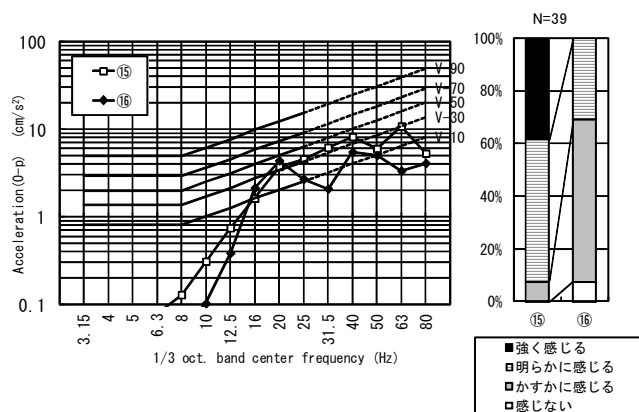


Fig.11 Example of sense evaluation and frequency characteristics (the B-floor, ⑮⑯)

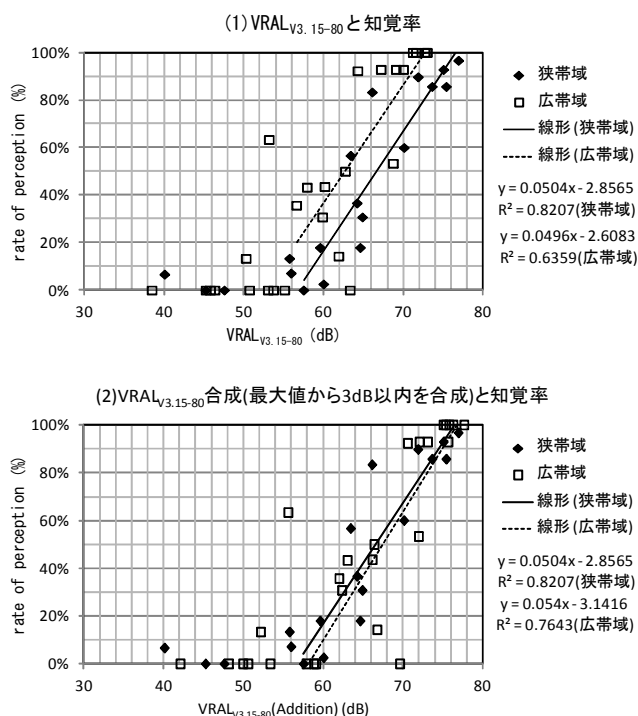


Fig.12 Corresponding rate of perception and VRAL by addition within 3dB

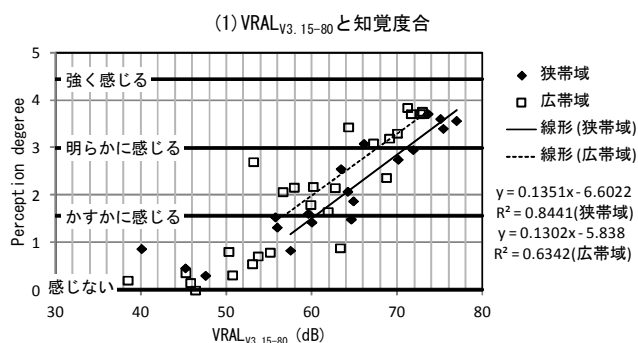


Fig.13 Corresponding perception degree and VRAL by addition within 3dB

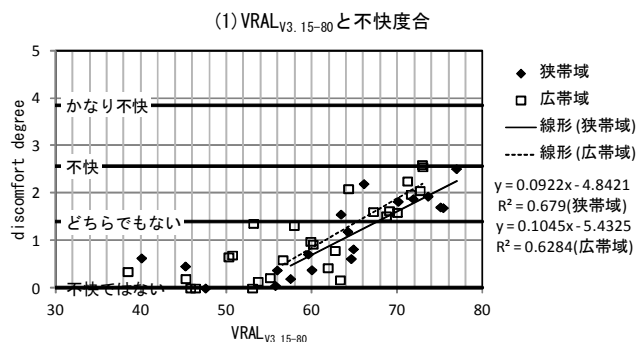
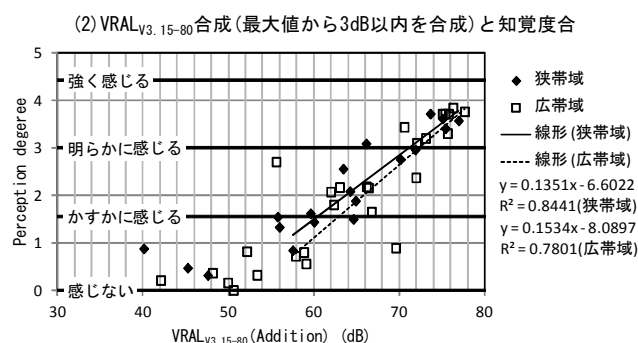
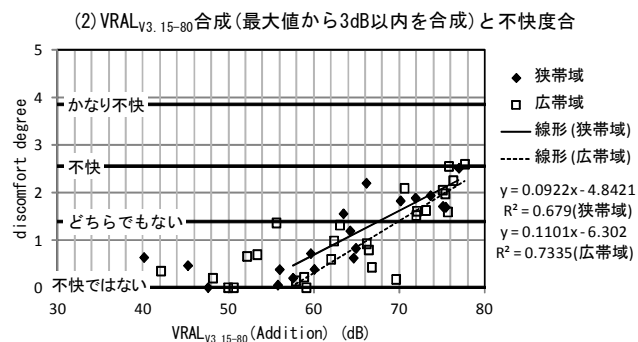


Fig.14 Corresponding discomfort degree and VRAL by addition within 3dB



のVRAL がそれ以外の周波数のVRAL より3dB より大きい場合と仮定)、広帯域(同3dB 以下)に分けて示す。Fig. 12 の(1)は決定周波数のVRAL と知覚率を示し、(2)は決定周波数最大値から3dB 以内の帯域を全てエネルギー合成した合成VRAL と知覚率の関係を示す。Fig. 6 (2)の知覚し始めるVRAL_{V3.15-80} = 56dB 以上を対象に、回帰直線を引くと、Fig. 12 の(2)のように、広帯域の場合には、決定周波数以外のVRAL も合成して評価する方法であれば、狭帯域と広帯域の区別なく評価できそうである。なお、本報では、狭帯域と広帯域の区別の判断のための値について、いくつかのパターンで検討し、良い対応を示した3dB を用いたが、実際にはスペクトルの形状により、振動感覚への影響は変化することが予想されるため、この点についてはさらに検討を行う必要がある。

Fig. 13 の(1)の決定周波数のVRAL と知覚度合の対応を見ると、知覚率と同様に、同じVRAL の値では狭帯域に比べて広帯域の知覚度合が大きい。56dB 以上のデータを対象とした回帰直線をみると、「明らかに感じる」の評価で4dB 程度の差がある。(2)の決定周波数以外にも含めて、決定周波数のVRAL から3dB 以内の他の周波数のVRAL を合成したVRAL (合成)と知覚度合をみると、対応がよく「明らかに感じる」の評価で1dB 程度の差と小さい。

Fig. 14 の(1)の決定周波数のVRAL と不快度合の対応を見ると、知覚率や知覚度合のように、狭帯域と広帯域であまり差がみられない。これは、本論文のデータが単発振動でもあるため、実験条件としてそれほど不快にまではならなかった、すなわち不快では判断基準が知覚とは異なることが原因と考えられる。不快度合は、時間特性、周波数特性に基本的に依存すると考えられ、今後は時間特性を考慮した検討を行う必要がある。ここで、Fig. 14 の比較的大きな振動の場合(VRAL で66dB ~ 76dB)、不快度合は「どちらでもない」から「不快」の範囲に分布するが、(1)の決定周波数のVRAL では広帯域の方

が不快度合が大きい傾向が見られるが、(2)のVRAL (合成)ではほぼ同じ不快度合に分布していることから、知覚度合と同様に、不快度合の場合にもVRAL (合成)の方が対応が良いと考えられる。しかし、不快度合や気になり度合等は、基本的には暴露時間も影響されると予想されるため、単発でないデータで再検討していく必要がある。

以上のように、決定周波数のみ卓越する狭帯域成分が卓越する振動に比べて、広帯域成分を含む振動は、決定周波数以外の周波数成分も考慮して評価した方が振動感覚との対応が良いと言える。但し、各周波数帯域成分の合成方法についてはさらに検討を進めて行く必要がある。

5. 帯域数が振動感覚に与える影響

4. の検討結果より、狭帯域成分の波形よりも広帯域成分を含む波形の方が、感覚的に振動をより強く感じるということがわかった。よって、床の固有周波数や固有周波数領域における共振増幅の量、高次共振の程度等の影響を考慮する必要性から、周波数特性を把握し、総合的に評価していくことが重要である。但し、前述したように、居住性能評価指針¹⁾では、決定周波数以外の周波数成分については特に考慮されていないため、本論文では1つの試みとして、4. の結果を参考に決定周波数を含め、それと3dB 以内のVRAL を持つ1/3オクターブ帯域数に着目し、帯域数によりどの程度、振動感覚に影響を与えるのかについて検討した。

Table1 の全実験データの中で、3. の検討結果よりVRAL_{V3.15-80} = 56dB 以上の実験パターンを抽出し、狭帯域から5帯域までのデータを対象に帯域数と振動感覚の検討を行った。なお、帯域数は、決定周波数及び決定周波数のVRAL に対して「-3dB」以上の値を示す帯域数とした。本実験データでは、狭帯域(1帯域)14データ、2帯域4データ、3帯域5データ、4帯域4データ、5帯域3データの30データと

なった。本報ではデータ数の関係から、狭帯域(1 帯域) 14 データ、2, 3 帯域9 データ、4, 5 帯域7 データと区分して検討した。

Fig. 15 は「感覚評価実験で得られた知覚率」-「実験で決定周波数のみのVRAL を求め居住性能評価指針に当てはめ算出した知覚率 (VRAL の範囲は56.6 ~ 76.9dB)」を求め、帯域数別に表したものである。分散分析の結果、P 値が0.0033 なので、有意水準1%で帯域数による知覚率の差に有意差があると言える。また、多重比較検定の結果、有意水準5%で狭帯域(1 帯域)と2, 3 帯域、有意水準1%で狭帯域(1 帯域)と4, 5 帯域で母平均は等しくない結果であった。すなわち、2, 3 帯域で18%、4, 5 帯域で22%、居住性能評価指針で求める知覚率に比べて、実際の知覚率は大きいことがわかった。なお、狭帯域(1 帯域)の平均値をみると、-2%とほぼ居住性能評価指針と対応がとれていることがわかった。

Fig. 16 は「実験で求めた決定周波数のみのVRAL」-「感覚評価実験で知覚率を求め居住性能評価指針に当てはめ算出したVRAL (知覚率の範囲は0 ~ 100%)」を求め、帯域数別に表したものである。分散分析の結果、P 値が0.0013 なので、有意水準1%で帯域数によるVRAL の差に有意差があると言える。また、多重比較検定の結果、有意水準1%で狭帯域(1 帯域)と2, 3 帯域、狭帯域(1 帯域)と4, 5 帯域で母平均は等しくない結果であった。狭帯域(1 帯域)の結果は、平均値で0.5dB と居住性能評価指針との良い対応が得られているが、2, 3 帯域で-3.8dB、4, 5 帯域で-4.6dB と小さい。すなわち実際の知覚としては、2, 3 帯域で-4dB 程度、4, 5 帯域で-5dB 程度小さいVRAL から感じていることになる。

以上から、卓越周波数が広帯域になる場合には、狭帯域(1 帯域)だけ卓越する振動に比べて、あらかじめ4 ~ 5dB 程度振動が小さくても知覚することを見込んでおく必要がある。なお、評価物理量として、決定周波数のVRAL から3dB 以内の他の周波数のVRAL を含めて合成したVRAL (合成)の物理量で見ると、狭帯域、2, 3 帯域、4, 5 帯域の区分に有意差はなく、-0.5dB から+0.8dB の範囲に収まっていた。なお、帯域成分の加算方法については、連続スペクトルを有する場合には、スペクトルレベルの変化の程度に依存することが大きいと考えられるが、本論文のような3dB 以内に入る帯域数のエネルギー加算でも有意な差が生じることがわかった。

6. まとめ

本論文では、今後、「振動に対する居住床の遮断能力」を評価するための評価物理量と振動感覚に関する基礎的検討として、実際の床スラブに発生する衝撃振動を対象に、周波数特性に着目した実験的検討を行った結果、以下の研究成果を得た。

- (1) 3.15Hz 帯域以降80Hz 帯域までの周波数特性の影響について検討した結果、振動感覚評価と物理量の対応から明らかに30Hz 以上の周波数成分も知覚していることがわかった。
- (2) 30Hz 以上の周波数成分を考慮し、狭帯域の周波数特性を持つ波形の場合には、VRAL が56dB 程度から知覚し始め、72dB 程度で9割が知覚することがわかり、本実験の狭帯域に関する結果は、衝撃振動の場合でも正弦振動をもとにした居住性能評価指針とほぼ対応する。
- (3) 知覚度合、不快度合についても、30Hz 以上の成分を考慮すると、対応がよくなることがわかった。但し、不快度合については基本

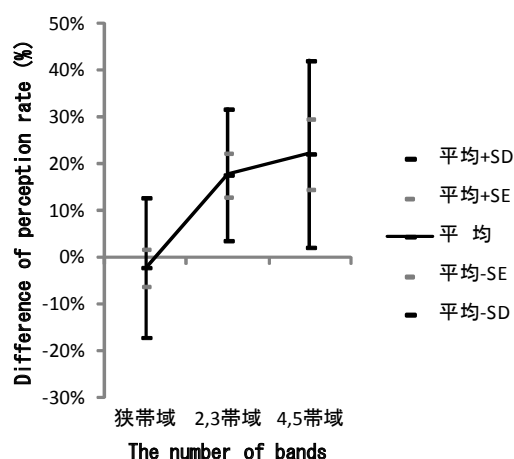


Fig. 15 Difference of perception rate due to a change in the number of bands

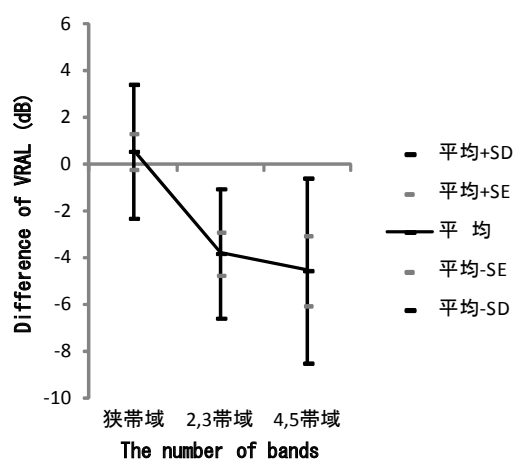


Fig. 16 Difference of VRAL due to a change in the number of bands

的には暴露時間が影響されると予想されるため、時間軸を考慮した更なる検討が必要である。

- (4) 狭帯域成分を持つ波形と広帯域成分を有する波形では、決定周波数のVRAL が同一でも、感覚評価結果をみると、明らかに広帯域成分を有する方が知覚率、知覚度合が大きい。不快度合については、知覚率、知覚度合ほどの差はみられないが、70dB 以上の大きな振動については、広帯域成分を有する波形の方が対応が良い。
- (5) 狭帯域成分のみの波形と広帯域成分を有する波形について、振動感覚に対応する評価量の検討のための1つの試みとして、決定周波数のVRAL 及びそれから-3dB 以上の値をエネルギー加算する比較的単純な方法でも、実用的には良い対応を示すことがわかった。
- (6) 「感覚評価実験で得られた知覚率」-「実験で決定周波数のみのVRAL を求め居住性能評価指針で算出した知覚率」を、決定周波数及びそれから-3dB 以上の値を持つ帯域数として整理すると、狭帯域(決定周波数のみ、1 帯域)に比べて、帯域数が2, 3 帯域の場合には18%、4, 5 帯域場合には22%、知覚率が大きくなる傾向が見られた。
- (7) 「実験で求めた決定周波数のみのVRAL」-「感覚評価実験で知覚率

を求め居住性能評価指針から算出したVRAL」を帯域数で整理すると、狭帯域(決定周波数のみ、1 帯域)に比べて、2, 3 帯域の場合には- 3. 8dB、4, 5 帯域の場合には- 4. 6dB となり、広帯域になると4 ～5 dB 小さい振動から知覚することがわかった。

今後は、振動の暴露時間の影響も含め、振動感覚に対応の良い評価物理量をさらに検討し、振動に対する建築物の遮断性能(建築性能) そのものを評価していく方法について検討を進めて行きたい。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費24560725 の助成を受けたものである。また、本研究の実験実施・分析にご協力いただいた、日本大学井上研究室平成20 年度修士論文生の伊東和君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説，2004. 5
- 2) JIS A 1418-2:2000，建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法 一第2 部：標準重量衝撃源による方法
- 3) 富田隆太、井上勝夫、伊東和：人の動作とゴムボール衝突時の床振動応答加速度に関する実験的検討、日本建築学会技術報告集，第27 号，pp179 ～182, 2008. 6
- 4) JIS A 1419-2:2000，建築物及び建築部材の遮断性能の評価方法 一第2 部：床衝撃音遮断性能
- 5) 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. 1
- 6) 三輪俊輔、米川善晴：複合正弦振動とランダム振動の評価法(振動の評価法2)、日本音響学会誌、27 巻1 号，pp. 21 ～32, 1971. 1
- 7) 三輪俊輔、米川善晴：衝撃振動の評価法(振動の評価法3)、日本音響学会誌、27 巻1 号，pp. 33 ～39, 1971. 1
- 8) 松本泰尚、国松 直：人の振動知覚閾に基づく環境振動評価量の検討、日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集，pp. 111 ～114, 2012. 4
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 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636 号，pp. 125 ～132, 2009. 2
- 13) 高橋良典、片山和喜、吉岡宏和、今沢民雄、村井信義：床構造体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

EFFECT OF VIBRATION SENSE BY FREQUENCY CHARACTERISTICS OF IMPACT VIBRATION FOR RESIDENTIAL FLOOR

Ryuta TOMITA and Katsuo INOUE***

* Assistant Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

** Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

The purpose of this study is to evaluate the isolation performance of buildings against vibration. This concept is not introduced much in the field of environmental vibration for building so far. The subject of this study, the impact vibration generated on the floor in the behavior of the people. In addition, it was intended for vibration in the vertical direction. In this study, we have been examined using the standard heavy impact source (the rubber ball) having impact force characteristics (2) of JIS A 1418-2:2000²⁾ for floor impact sound so far. This is because the impact force characteristics of the rubber ball is due to components in the low frequency range is large, the frequency characteristic is constant up to about 25Hz. That is, it is considered to be suitable particularly for impact vibration, such as human movements. In addition, there is a background that has been widely used as the standard heavy impact source for floor impact sound by JIS A 1418-2:2000.

In order to evaluate the "vibration isolation performance of residential floor" in this study, it is necessary first to consider the evaluation amount of good corresponds to the vibration sense of human. In this paper, as a basic study for evaluating the "vibration isolation performance of residential floor", we conducted the vibration sense of human and floor vibration response that occurs on the floor slab.

We obtained the results of the experimental examinations, as follows below.

(1) We examined influence of the frequency characteristics from 3.15Hz band to 80Hz band. As a result, We found that the frequency component of 30Hz or more is also perceived clearly from the correspondence of the physical quantity and the vibration sense.

(2) In the case of a waveform to take into account the frequency component of 30Hz or more, with the frequency characteristics of the narrow band, the subject began to perceive from VRAL = 56dB or so, that 90% of the subjects perceived in VRAL = 72dB about was found. Also, results for the narrow band of this experiment, was found to correspond almost to "Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration"¹⁾ based on sinusoidal vibration, even if the impact vibration.

(3) In the waveform having a wideband component and waveform having a narrow band component, against vibration with a wideband component, perceived rate of the subject clearly higher. In addition, perceived degree is also high.

(4) As a method for evaluating a waveform having a wideband component, even in a relatively simple way to the energy added to the value of the above-3dB from VRAL decision frequency, it was found to show a relatively good response to vibration sense.

(5) Considering the number of the band, the case of wide band as compared with the narrow band (1 band), the subjects were found to be perceived by the vibration small 4 ~ 5dB.

For addition method of band components, it is shown that performs as one attempt a simple summing of energy in the present report, a significant difference occurs. However, the increase in vibration sense having a continuous spectrum, since that depends on the degree of change in the spectral level is expected, it is necessary to proceed to a more detailed consideration.

(2014年 3 月24日原稿受理, 2014年 7 月30日採用決定)