重量床衝撃音レベルの測定結果の温度依存性に関する要因検討

STUDY ON FACTORS ABOUT TEMPERATURE DEPENDENCY OF IMPACT SOUND PRESSURE LEVEL WITH STANDARD HEAVY IMPACT SOURCES

中森俊介 — * 1 吉村純一 — * 2

Shunsuke NAKAMORI — * 1 Junichi YOSHIMURA — * 2

キーワード:
標準重量衝撃源, 温度依存性, 固有周波数, 干渉効果

Keywords:
Standard heavy impact source, Temperature dependency, Natural frequency, Interference effect

It is not desirable that impact noise changes by temperature environment, because absolute value is measured. There are main three factors by change of aging or temperature, e.g. impact source, vibration characteristics of slab and natural frequencies in receiving room. It is not so negligible their influence in the region of low-modal density that impact noise with heavy impact source is evaluated in particularly low frequency range. Then, systematic comparable samples were used, i.e. impact noises in bare slab of laboratory. Measures to reduce influence by three factors mentioned above were taken step by step and shown the results.

1. はじめに

現場における床衝撃音レベルの測定では、標準重量衝撃源で加振した際の発生音の絶対値を評価することから、マイクロホンの点検、校正はもとより衝撃源の絶対値校正も重要である。一方、実験室における床衝撃音レベル低減量（以下、低減量）の測定では相対値を扱うため、短期間の検討であれば、校正値との多少の誤差があっても結果への影響は小さいと考えられる。ただし、調査が長期化したり、期間がしばらく空いたりした場合には、室温及び経年変化といった変動要因は相互比較を行う上での支障となる。

通常、衝撃力特性（1）をもつ標準重量衝撃源（以下、タイヤ）の衝撃力の調整は気温 20℃で JIS¹⁾に定められた許容範囲に収まるようメーカー指定の空気圧に合わせるが、周囲の温度により空気圧及びゴム弾性は変化すると考えられる。床衝撃音レベルの偏差要因の検討については、空気圧計の違い²⁾や計測器等による違い³⁾を対象とした報告がある。また、温度依存性の少ないゴムボール（衝撃力特性（2））が開発された際の検討例^{4), 5)}もあるが、スラブ等の放射面及び受音室の固有モードの変動について検討された例⁶⁾は少ない。

精度の高い測定、評価を行うためには、室温及び経年変化による影響を定量的に把握しておく必要がある。ただし、現場ではその他の様々な要因が複雑に関係するため、ひとつのパラメータについて検討することは難しい。筆者らは、壁式コンクリート構造の実験室において低減量の測定を十数年にわたって実施してきており、基準となるスラブ素面（床仕上げ材施工前）の床衝撃音レベルの変化を観測してきた。本稿では、この系統的に比較可能な測定結果を用いて、室温及び経年変化による床衝撃音の変動要因と成り得るタイヤ衝撃源、スラブの固有周波数及び、受音室の固有モードの影響について調査し、室温変化に対する床衝撃音レベルの変動幅を小さくす

る対策を段階的に行った結果について報告する。なお、低減量の測定法規格⁷⁾による望ましい試料の表面温度範囲は 18～25℃であるが、実験室での測定環境（室温 5～30℃程度）で検討した。

2. 要因ごとの検討方法

2.1 衝撃力の測定

衝撃力の測定系列を図 1 に示す。アルミ製の円盤 2 枚の間にカビックアップを 3 個並列に挟み込んだ“カセンサー”を剛床の上に設置し、周波数分析器によりオクターブバンドごとの単発衝撃力暴露レベル（dB, 基準値；1 N）を求めた。測定周波数範囲はオクターブバンドの中心周波数 31.5、63、125、250 Hz とした。なお、500 Hz はカセンサーの設置状況により、ノイズの影響が大きかったため、検討対象からは除いた。温度依存性の調査では、恒温槽内にてタイヤを高温（40℃）または低温（0℃）で養生し、取り出した後、表面温度が室温（約 20℃）になるまで、測定を約 2℃おきに繰り返した。このときのタイヤの空気圧は表面温度にかかわらず一定（240 kPa）とした。また、測定時の気温に応じた空気圧（ここでは最適空気圧と呼ぶ）の検討では、2006 年 2 月から 9 月に計 6 回、63 Hz の衝撃力暴露レベルが JIS¹⁾の規定値（40 dB）となるように空気圧を 5 kPa 刻みで調整した。

図 1 衝撃力の測定系列

^{*1} (一財) 小林理学研究所建築音響研究室 研究員
(〒185-0022 国分寺市東元町 3-20-41)

^{*2} (一財) 小林理学研究所建築音響研究室 室長

^{*1} Engineer, Kobayasi Institute of Physical Research, Architectural Acoustic Div.

^{*2} Head Manager, Kobayasi Institute of Physical Research, Architectural Acoustic Div.

2.2 駆動点インピーダンスの測定

検討の対象とした試験室は、JIS⁷⁾の附属書に規定されるスラブ面積 20 m²、スラブ厚 200 mm、受音室容積 60 m³の壁式コンクリート構造である。スラブの振動特性について、インパクトハンマ (PCB 086D20、衝撃周波数約 200 Hz) 及び振動加速度ピックアップ (RION PV-86) を用いて、スラブ中央 (図 2 の□C 点) の駆動点インピーダンス (dB、基準値; 1 kg/s) を測定した。試験室完成時から 2012 年まで十数回の測定結果より、スラブの固有周波数及びオクターブバンドのインピーダンスの経時変化を比較した。

図2 試験室の平面図及び測定点配置

2.3 床衝撃音レベル及び受音室の固有モードの測定

床衝撃音レベルの測定は、図2に示すスラブ上の加振点（○S1～S5）及び、受音室内の測定点（図中●W1～W5、または■P1～P5）で行なった。JIS⁷⁾の制定に伴い、2007年より受音室床面全体から試料の投影面積の範囲内（W1～W5からP1～P5）に受音点の配置を変更した。その際、受音室内の平均音圧レベルが変更前後で変化しないような受音点配置とした。

受音室の固有モードの温度依存性については、図中に示す12面体スピーカを用いた。入力をジェネレータから出力される電圧 (Swept-Sine 信号)、出力を受音点 (P1、P3、及び P5) の音圧応答とし、伝達関数 (音圧/電圧) を求めた。空調機 (ルームエアコン) を利用し、冬季に室温を 10℃から 26℃まで変化させたときの測定結果を比較した。ただし湿度の調整は行っていない。

受音室は壁面及び床面に設置した吸音体⁸⁾により、125 Hz 以上の

残響時間を 1～2 秒程度に調整していたが、低周波数域の室の固有モードによる音圧増幅の影響を緩和するため、2011 年 1 月に 63 Hz 及び 125 Hz の吸音を付加した。図3に受音点変更前後（◆◇→●○）及び、吸音付加後（▲△）の残響時間の測定結果（広帯域ノイズ断続法）を示す。室温変化による影響を比較するため、凡例の日付の括弧内に室温を示し、高めを黒塗り、低めを白抜き記号とした。63～125 Hz においては吸音付加前後で、残響時間は 0.6～0.7 倍となった。受音点の変更及び、室温の違いによる残響時間への影響は小さいと考えられる。

図3 受音室の残響時間

3. 床衝撃音レベルの測定結果の推移と各要因の検討

2003 年から 2014 年までのオクターブバンドの中心周波数 31.5、63、125、250 Hz におけるタイヤによる床衝撃音レベルの測定結果の推移を図4に示す。測定結果の偏差を少なくするために対策を講じた時期で3つに区切った。凡例には各期間での床衝撃音レベルの最大値と最小値の差 (レベル変動幅) 及び、室温の範囲を示した。

- ・ 期間 A…2003 年から 2006 年 11 月まで、タイヤの空気圧は室温に関わらず一定とした。
- ・ 期間 B…衝撃源の温度依存性を考慮し、63 Hz の衝撃力を一定に保つために、2006 年 11 月より最適空気圧の採用を開始した。また、2007 年に受音点位置を変更した。
- ・ 期間 C…室の固有モードとスラブ振動モードの干渉効果を緩和させるため、2011 年 1 月に低い周波数の吸音付加を行った。

3.1 衝撃源の温度依存性

期間 A での床衝撃音レベルの変動幅は 63 Hz で 5.9 dB と大きく、初めの 4 回の測定結果より、季節的な変動がみられた。当時は室温に関わらず空気圧を 240 kPa に調整していたため、タイヤのゴム弾性の変化と考え、タイヤの温度依存性について検討した。タイヤの表面温度と衝撃力の関係を図5左に示す。衝撃力暴露レベルは JIS

図4 タイヤを用いた床衝撃音レベルの推移

の許容範囲内ではあるが、タイヤの表面温度が 6℃～34℃に対し、63 Hz で 2 dB、125 Hz で 3 dB、250 Hz で 1 dB 程度の変動がみられた。そこで、床衝撃音レベルの変動幅が大きく、実際の建物においても等級曲線 (Lr 曲線) による評価⁹⁾の決定周波数となり易い 63 Hz について、衝撃力暴露レベルが JIS¹⁾の規定値 (40 dB) となるよう、室温に応じて空気圧を 5 kPa 単位で調整した。その結果を図 5 右に示す。依然として 125 Hz で 2 dB、250 Hz で 1 dB (室温範囲：8℃～28℃) の変動があり、125 Hz では最適空気圧採用前と同程度の温度依存性が残っている。期間 B からは図 6 の室温 t と最適空気圧 P の関係より校正を行った。5～30℃の範囲では、最小二乗法による線形近似 (一点鎖線) 及び、2 次関数 (実線) のどちらを用いても大差はない。ちなみに、温度変化によるタイヤゴムの弾性変化及び、タイヤの膨張収縮を無視 (体積一定) したボイル・シャルルの法則により求めた空気圧 (20℃で指定の空気圧に調整して、測定時には調整しない場合) は点線ようになるため、より精度を高めるには、最適空気圧を用いた方が望ましいと考えられる。

図 5 温度－衝撃力の関係 (左：空気圧一定、右：空気圧を調整)

図 6 室温と最適空気圧の関係

3.2 スラブの固有周波数の推移

コンクリートスラブ中央の駆動点インピーダンスの測定結果を図 7 に示す。凡例の測定日の括弧内は 1 次固有周波数である。また、試験室が完成した 2001 年 10 月から 2012 年 12 月までの 1 次固有周波数の測定結果を抜粋し、凡例の下に示した。1 次固有周波数は 2002 年 6 月に 46 Hz で最大となり、その後徐々に下がり始め、2006 年以後は 42 Hz で安定している。地震などの履歴があると建物の固有周波数 (この報告では水平方向) が低下するという報告¹⁰⁾があるが、これと同様に経年に伴う劣化であると考えられる。一方、温度依存

性については 42 Hz に安定してからの数回の測定結果より、1 Hz 以上の 1 次固有周波数の変化は無いものと推測される。

試験室で床衝撃音の測定を始めた 2003 年から 2012 年現在までの 1 次固有周波数の変化は 2 Hz であるが、オクターブバンドの 63 Hz の下限から 31.5 Hz に移行したため、63 Hz のインピーダンスが 7 dB (104→111 dB) 上昇している。ただし、これはスラブ上の中央 1 点の応答であり、床衝撃音レベルの測定値を考慮した場合、放射面はスラブ全体 (あるいは壁面)、加振位置もスラブ上の 5 点に分散されるため、スラブ中央のインピーダンスの変化量が床衝撃音レベルの測定値に直接影響するわけではない。スラブの温度変化による振動特性への影響はほとんどないが、打設後数年間における固有周波数の低下は、重量床衝撃音遮断性能の変化に影響する要因であることがわかった。

図 7 固有周波数とインピーダンスの推移 (FFT 及びオクターブ)

3.3 室の固有モードの温度依存性

図 4 の凡例より、期間 B で最適空気圧を採用しても、8～31℃の室温範囲で 5.3 dB と 63 Hz の床衝撃音レベルの変動幅の減少は小さかった。その要因が、室温変化による室の固有モードの周波数シフトと考え、スピーカを音源とした受音室のマイク位置での伝達関数により検証した。図 8 に受音点の代表点 P3 における室温 10℃及び 26℃の測定結果を示す。受音室の寸法 (3 m×4 m×5 m) から計算した固有周波数も図中に記入した。全てのモードは観測出来ないが、固有周波数の計算値と実測値は低周波数域で概ね一致している。また、室温が変化し、固有周波数がシフトしても応答 (音圧レベルの振幅) はほぼ同様である。この場合、音源スピーカからの放射音スペクトルはほぼフラットであるが、スラブその他からの放射音スペクトルは共振系を有する。室温変化による固有周波数のシフトによりスラブからの放射音との干渉作用により床衝撃音レベルに変動が生じ、特に両者のモード密度が粗い、低い周波数帯域では影響が大きいと考えられる。

図 9 に 2003 年と 2009 年におけるスラブ中央点のインピーダンスのスペクトル波形のピーク、ディップ (中央点でのインピーダンスのピークはモードの節) より 1 Hz 単位で読み取った固有周波数、5℃及び 30℃における室の固有周波数の計算値を 20～120 Hz の範囲 (63 Hz 帯域外を網掛け) について示す。63 Hz 帯域でのモードの個数は両者とも 10 弱であり、決して少なくはないが、図 7 及び図 8 の 70 Hz 以下の波形をみると、共振が鋭いため、数 Hz のシフトが数 dB の床衝撃音レベルの変動を引き起こしていると考えられる。

このような干渉作用による影響を小さくするために、期間 C では低周波数域の吸音を付加し、固有周波数での Q 値（共振の鋭さを示す量）を小さくして音圧レベルの増幅を抑える対策を取った。図 10 は図 4 のデータを期間ごとに分け、室温と床衝撃音レベルの関係をみたものである。期間 A ではスラブの固有周波数の低下の要因が含まれることと、各期間で室温範囲が異なるため正確には比較できないが、期間 A→B→C の順に室温との相関（ピアソンの積率相関係数 r の 2 乗値）は低くなっている。衝撃源、受音室の固有モードそれぞれの温度依存性が緩和したことが床衝撃音レベルの変動を減少させたものと考えられる。ただし、室の固有モードのシフトによる床衝撃音レベルの変動は室温と線形な関係にはならない。期間 A と期間 B の 63 Hz について、床衝撃音レベルが全体的に小さくなったのは、経年によるスラブの固有周波数の低下、勾配が緩やかになったのは最適空気圧により、衝撃力の温度依存性が無くなったことによる。125 Hz は最適空気圧の採用前後で温度依存性に変化はほとんど無い。期間 C では、吸音を付加したことにより 63、125 Hz の床衝撃音レベルが小さくなった。250 Hz については、衝撃力の温度依存性も少なく、スラブ振動及び室内音圧のモード密度も密になるため、床衝撃音レベルと室温の相関は低い。

図 8 室温変化による室の固有周波数のシフト

図 9 スラブの固有モードと室の固有モードの関係 (63 Hz)

図 10 床衝撃音レベルと室温の相関 (測定期間ごと)

4. まとめ

実験室で測定される重量床衝撃音レベルの経時変化に着目し、衝撃源の温度依存性、スラブ及び下室の固有モードの影響を長期間観測し、これらの要因を探索した結果、以下のような知見を得た。

①空気圧を一定として計測されるタイヤの衝撃力は、JIS の許容範囲内ではあるが、温度依存性がみられた。そのため 63 Hz の衝撃力を一定に保つため、気温に応じて最適な空気圧に調整する方法を採用したが、125 Hz の温度依存性は解消されなかった (図 5 参照)。20°C で指定の空気圧に調整して、測定時には調整しない方法は、最適空気圧に調整する方法ほど精度が得られないものと考えられる (図 6 参照)。

②スラブの固有周波数はコンクリート打設後約 1 年で最大になり、徐々に低下した。約 5 年後に収束し、10 年以上経った現在も 1 Hz を超える変化はみられていない。この間の 1 次固有周波数の最大変動幅は 4 Hz であったが、室温に依存した変化はみられなかった。63 Hz 帯域のモード密度が粗い場合は、竣工時と築年数後とで重量床衝撃音遮断性能の経年による変化が生じる可能性がある。

③室温変化による受音室の固有モードの周波数シフトにより、壁・スラブ等からの放射音スペクトルとの干渉で、受音点位置における床衝撃音レベルが変動する。モード密度が粗い低周波数域では、影響が顕著なため、実験室では低域を吸音することにより、モードカップリングによる重量を緩和させる方法をとった。現場の内装材 (せっこうボードの壁、フローリング床、二重天井など) は、実験室ほど反射性でないことなどから、影響は小さいと考えられるが、吸音性能が低く、モード密度の粗い、狭い空間のより低い周波数を測定する場合は、注意が必要である。

なお、温度依存性がごく少なくなるように設計されたゴムボール衝撃源においても、スラブ及び下室の固有モードの影響については同様である。

参考文献

- 1) JIS A 1418-2, 建築物の床衝撃音遮断性能の測定方法-第 2 部, 標準重量衝撃源による方法, 2000.1
- 2) 赤尾伸一: 空気圧計による重量床衝撃音レベル測定値のばらつき調査結果, 騒音制御, Vol. 25, No. 4, pp.224~227, 2001.8
- 3) 井上勝夫, 小田聡: 床衝撃音の機別測定結果について, 日本音響学会講演論文集 II, pp.853~854, 1999.9
- 4) 井上勝夫, ほか 2 名: 標準重量衝撃源の衝撃力特性に関する温度依存性 その 1~その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, pp.141~146, 1999.9
- 5) 井上勝夫, ほか 6 名: 新標準重量衝撃源の開発 その 1~その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, pp.229~234, 2000.9
- 6) 安岡博人, ほか 3 名: 新箱型床衝撃音実験室について その 4 材料の特性, 日本音響学会講演論文集 II, pp.877~878, 2002.9
- 7) JIS A 1440-2, 実験室におけるコンクリート床上の床仕上げ構造の床衝撃音レベル低減量の測定方法-第 2 部, 標準重量衝撃源による方法, 2007.10
- 8) 杉江聡, ほか 4 名: タイプ II 試験室の室内吸音調整について, 日本音響学会講演論文集 II, pp.871~872, 2002.9
- 9) JIS A 1419-2, 建築物及び建築部材の遮音性能の評価方法-第 2 部, 床衝撃音遮断性能, 2000.1
- 10) 守研二, 阿部良洋: 常時微動の観測から捉えた RC 造建物の経年変化 (その 2. 6 階建物の 25 年間の事例), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.641~642, 2005.9

[2015 年 6 月 3 日原稿受理 2015 年 11 月 16 日採用決定]