建設途中による加振点別駆動点インピーダンス測定値を用いた 重量床衝撃音の遮音等級の推定方法

STUDY ON ESTIMATION METHOD OF HEAVY FLOOR IMPACT SOUND INSULATION RANK WITH DRIVING-POINT IMPEDANCE IN MIDDLE OF CONSTRUCTION

鹿倉潤二^{*1}, 井上勝夫^{*2}, 大川平一郎^{*3}

Junji SHIKAKURA, Katsuo INOUE and Heiichiro OHKAWA

Floor impact sound insulation performance is evaluated by sound pressure level of receiving room when the floor of the upper surface was impacted by the standard impact source. Therefore, it is necessary to make the sound receiving room for a closed space.

We propose an estimation method of heavy floor impact sound insulation rank of concrete floor slab using driving-point impedance.

As a result, it was confirmed that by correcting driving-point impedance in response time with sound receiving room area etc., it is possible to grasp heavy floor impact sound insulation of concrete floor slab.

Keywords: Driving-point impedance, Heavy floor impact sound, Sound insulation rank

駆動点インピーダンス, 重量床衝撃音, 遮音等級

1. はじめに

床衝撃音遮断性能は、対象となる床の上面を標準衝撃源で加振した時に下室内に発生する音圧レベルで評価される。この標準衝撃源としては重量床衝撃源と軽量床衝撃源が用いられることになっており、さらに JIS A 1418-2:2000 によれば標準重量床衝撃源には、衝撃力特性(1) (以下、タイヤと表記) ¹⁾ と衝撃力特性(2) (以下、ボールと表記) ²⁾ が使用可能となっている。また、床衝撃音遮断性能の評価方法に関しては、JIS A 1419-2 では数種類の方法が示されているが、法的規制も含めて一般的に使われているのは重量床衝撃音、軽量床衝撃音共に同規格の附属書 1 の等級曲線による方法 (以下、L 等級評価と表記) であり ³⁾⁴⁾、この評価方法を基本とした遮音設計法も表されている。なお、タイヤを用いた L 等級評価は長期生活に亘る居住者反応がリニアな対応を示すことが筆者らによって示されており ⁵⁾⁶⁾、現状では妥当な測定、評価法であると考えられる。

この様なことから、現在の集合住宅の設計時におけるデベロッパ等からの要求性能にはタイヤを用いた L 等級評価による設計目標値が用いられており、特に重量床衝撃音遮断性能に関しては、施工途中のスラブ素面時を対象にした設計目標値も設定されているのが一般的である。これは、重量床衝撃音の様な継続時間の比較的長い衝撃系騒音に対する遮音性能は、床構造の振動特性が遮音性能を決める重要な要因になっているため、スラブ素面時の設計目標値を設定することによって、スラブの構造設計を行う設計の初期段階で重

量床衝撃音遮断性能に対しても十分な検討を行うことができるようにするためである。なお、現在の一般的な設計手法では、構造的な性能を満足するために必要なスラブ厚よりも、重量床衝撃音遮断性能の設計目標値を満足するために必要なスラブ厚の方が厚くなる傾向がある。その結果、スラブ厚は構造設計で決まるものより増加することになり、結果として建物全体の重量増や階高にも影響することになる。そのため、設計の初期段階でこれらを検討しておくことが非常に重要になっている。また、スラブ素面時の設計目標値が満足できているか建設途中の段階で確認 (以下、中間測定) を行う場合には、スラブ素面の状態で重量床衝撃音レベルの測定を行う必要があり、近年多くの集合住宅で実施されるようになってきている。

この様にスラブ素面時の設計目標値が定められ、さらに建設途中に性能検査が実施されているのは、スラブ素面時の重量床衝撃音遮断性能を決定する主要因がスラブ等の構造躯体に依存することが大きいことから、竣工時の設計目標値を確実に達成するためにスラブの厚さやコンクリート強度などが設計通りに施工されていることを確認するためである。その結果、重量床衝撃音遮断性能に関する不具合が躯体構造にあった場合には、早期に原因を特定し対策を講じることができるようにするため、建設途中に実施する重量床衝撃音レベルの測定は非常に重要な検査項目の一つであると言える。

一方、重量床衝撃音の測定に使われているタイヤに適合した標準重量衝撃源として現在市販されている製品は、重量が約 42kg とか

^{*1} (株)栗本鐵工所

^{*2} 日本大学理工学部 特任教授・工博

^{*3} (株)住環境総合研究所 工博

KURIMOTO, Ltd.

Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, NIHON Univ., Dr.Eng.
Housing Environment Research Institute Inc., Dr.Eng.

なり重く、現場でのハンドリングが悪いため、建設途中の現場で使うのに適しているとは言い難い。また、受音室は空間性能を測定するため閉空間とする場合が多いことから、スラブ素面時の性能を把握するための中間測定では、現場の工程調整などが必要となり、中間測定が実施されたとしても多くの居室を測定するのが困難な場合が多い。そのため、一般的には対象建物の代表的な間取りを選定して測定を行い、全数検査を行うことはできない状況にある。

この様な背景があり、スラブ素面時の重量床衝撃音に関する性能設計が行われているにも関わらず、大半の居室で性能確認が行われていないというのが実態である。

また、重量床衝撃音に関する一般的な遮音設計では、スラブ素面の性能と床仕上げ構造の低減性能を分けて考えることができるため、スラブ素面時に中間測定を実施しておけば、スラブ素面の性能に合わせた床仕上げ構造を選定できると共に、竣工時の要求性能を満足できないと推定された場合に、原因の特定や追加対策を適切に行えるようになる。

そこで、本報では現場での性能測定の負担を軽減でき、測定時間の短縮にも繋がる方法として、スラブ上面のみで測定できる駆動点インピーダンスを用いてスラブ素面時の重量床衝撃音の遮音等級を推定する方法について検討した。

駆動点インピーダンスの測定は、測定装置が比較的単純な上、測定対象周波数を限定し、それに合わせた衝撃力特性を用いることによって、SN 比を大きくする事ができる測定である。また、測定データの収録は 1 秒程度と非常に短時間であるため、暗騒音や暗振動の大きい建設現場でも測定データを確認しながら測定することで比較的容易かつ正確に測定できる利点がある。さらに、通常の重量床衝撃音測定に使う機材に比べ小型で軽量の機材で測定でき、さらにスラブ上面のみで下室を使わずに測定できるため、短時間で多くの測定が可能となることから、測定コストの低減が可能である。

この様に、建設途中に駆動点インピーダンスを用いた測定で重量床衝撃音の遮音等級を推定することにより、測定に関する現場の負担を軽減できると共に、スラブ素面の重量床衝撃音遮断性能を把握でき、竣工時における要求性能の達成度向上に繋がることから有用な方法となる。

2. 床衝撃音の発生系に関する検討

2.1 インピーダンス法による予測計算方法について

駆動点インピーダンスと重量床衝撃音の関係に関して、重量床衝撃音レベルの実用的計算法として提案されている、インピーダンス法⁹⁾の考え方に従って検討することとした。

インピーダンス法はスラブの振動に対する抵抗値（インピーダンス）を用いて計算する方法であり、その計算式は式(1)の通りである。通常、式(1)で計算を行う場合は対象建物や受音室の条件を入力する必要があり、それぞれのパラメータに対応する入力条件は Table 1 の通りである。

Table 1 に示すように、計算に必要な入力条件は床スラブに属する要因と、受音室に属する要因に分けて考えることができる。また、式(2)に示すように、スラブに属する要因の中の L_{ZT} は無限版を想定した駆動点インピーダンス (L_{Zb}) に加振点別インピーダンス上昇量 (ΔL) とスラブの共振によるインピーダンス低下量 (ΔL_R) を

考慮したものであり、これは実床を対象とする場合では全時間応答インピーダンス測定値に含まれるものであり、重量床衝撃音遮断性能を左右する中心的なパラメータである。これに関しては、既往研究⁸⁾において全時間応答インピーダンスと重量床衝撃音レベルの相関が良いことが示されており、全時間応答インピーダンスを用いて重量床衝撃音レベルを推定することの妥当性が確認されている。

$$L_{H,F} = 20 \log_{10} F_{rms} - L_{ZT} + 10 \log_{10} Seff - 10 \log_{10} A + \Delta L_D + \Delta L_K + \Delta L_C - \Delta L_{fin} + 152 \quad \dots (1)$$

$$L_{ZT} = L_{Zb} + \Delta L + \Delta L_R \quad \dots (2)$$

ただし、

$L_{H,F}$: オクターブバンドごとの重量衝撃源による床衝撃音レベル (dB)

F_{rms} : 標準重量衝撃源の衝撃力実効値 (N)

L_{ZT} : スラブの基本インピーダンスレベルにスラブの周辺拘束の補正を行いさらに共振の影響を考慮した加振点のインピーダンスレベル (dB)

L_{Zb} : スラブの無限長版を想定した駆動点インピーダンスレベル (dB)

ΔL : 加振点別インピーダンス上昇量 (dB)

ΔL_R : 共振によるインピーダンス低下量 (dB)

$Seff$: 床スラブの有効放射面積 (㎡)

A : 受音室の等価吸音面積 (㎡)

ΔL_K : 音響放射効率による補正量 (dB)

ΔL_D : スラブ内振動減衰補正量 (dB)

ΔL_C : 騒音計の動特性補正量 (dB)

ΔL_{fin} : 床仕上げ構造の床衝撃音レベル低減量 (dB)

Table 1 Input conditions of the impedance method

Symbol	Classification	Input conditions of calculation	Affect floor impact sound
F_{rms}	Constant	A fixed number	A fixed number
L_{ZT}	Slab	$L_{ZT} = L_{Zb} + \Delta L + \Delta L_R$	It is an important factor affecting the performance in the low frequency range.
L_{Zb}	Slab	Slab thickness and concrete properties	As the slab thickness, Young's modulus and density increases, the floor impact sound level decreases.
ΔL	Slab	Edge fixing and position of impact point	As the impact point approaches the slab edge, the impedance level increases. (the floor impact sound level decreases)
ΔL_R	Slab	First natural frequency	Performance is greatly affected by resonance.
$Seff$	Receiving room	Edge fixing, sound receiving area and position of impact point	As the effective radiation area decreases, the impact sound level decreases.
A	Receiving room	Sound receiving area and sound absorption coefficient	As the sound receiving area increases, the impact sound level decreases.
ΔL_K	Slab	Slab thickness	As the slab thickness decreases, "fc" increases, so the floor impact sound level decreases. (Fc: coincidence frequency)
ΔL_D	Slab	Slab area	As the slab area increases, the vibration propagation attenuation increases and the floor impact sound level decreases.
ΔL_C	Constant	A fixed number	A fixed number
ΔL_{fin}	Others	Type of floor finish structure (Manufacturer's data)	Floor impact sound level increases or decreases as the vibration transmission system changes.

そのため、設計時に計算した L_{ZT} が同等性能になっているか判定するだけでも中間測定で実施する性能検査として利用することができるが、判断はあくまでも空間性能である床衝撃音レベルであるため、Table 1 の受音室に関する要因も考慮する方が目的に即していると考えられる。

そこで、式(1)中の L_{ZT} と床衝撃音レベルとの相関関係を検討することによって L_{ZT} 実測値（本報では全時間応答インピーダンスレベル）で重量床衝撃音遮音等級を推定することの有用性を検証することとし、受音室に属する条件も考慮する方法についても検討した。

2.2 実測値による検討

前章ではインピーダンス法の計算式を用いて重量床衝撃音遮断性能に影響する要因を整理し、全時間応答インピーダンスの測定値を使うことの有用性と受音室に関連する要因を考慮する必要性を考察した。本章では、実現象として、要因を検討することが必要と考え、重量床衝撃音レベル実測値（ここでは、タイヤを用いた L 等級評価を 1dB 間隔で表した値を用いることとし、以下 L_{rH} 数と表記する）を用いて重回帰分析を行った。分析に用いた重量床衝撃音レベル実測データの条件を Table 2 および 3 に、重回帰分析した結果を Table

Table 2 Data of multiple regression analysis

Slab Type	Samples	Remarks
Single plate slab	198	Normal slab: 98 Unbond slab: 100
Void slab	135	Circle and Oval void: 62 Rectangle void: 73
Total	333	Construction sites: 33

Table 3 Slab using multiple regression analysis

	Single plate slab	Void slab
Slab thickness	200~300mm	200~350mm
Slab area	13.1~94.2㎡	22.3~111.6㎡
Sound receiving area	6.7~31.4㎡	5.7~36.8㎡

Table 4 Results of multiple regression analysis

	Experimental result	
	Coefficient	P value
Constant term	54.32	0.00
Construction method (0: Single plate, 1: Void)	0.56	0.20
Slab thickness(Equivalent thickness) [mm]	-0.04	0.00
Slab short side dimension [m]	-0.03	0.73
Aspect ratio	-0.71	0.39
Slab area [㎡]	0.00	0.89
First natural frequency [Hz]	0.10	0.02
Sound receiving area [㎡]	0.36	0.00
Number of edge fixing (0,1,2,3,4)	-1.21	0.00

Table 5 Corresponding multiple regression analysis and impedance method parameters

Parameters of the multiple regression analysis	Parameters of impedance method
Slab thickness (Equivalent thickness)	<ul style="list-style-type: none"> Basic impedance level Acoustic emission coefficient
First natural frequency	<ul style="list-style-type: none"> impedance reduction by resonance
Sound receiving area	<ul style="list-style-type: none"> Equivalent absorption area Effective radiation area
Number of edge fixing	<ul style="list-style-type: none"> Effective radiation area Impedance level rising amount

4 に示す⁹⁾。なお、重回帰分析に用いた項目は、インピーダンス法の計算で用いている 2.1 で示した入力条件を参考に設定した。なお、ここで示す拘束辺とは、測定室の四周にある拘束性の高い端部の数を示すものであるため、重回帰分析における変数は 0~4 の整数で与えられるものである。

Table 4 の結果をみると、スラブ厚（等価厚）、スラブの 1 次固有振動数、受音室面積、拘束辺数の影響が大きい結果となった。ここで、重回帰分析で影響の大きかった項目とインピーダンス法のパラメータの対応関係を Table 5 に示す。ただし、重回帰分析の結果でスラブ面積の影響が小さかったことから、式(1)および Table 1 に示すパラメータのスラブ内振動減衰補正量は Table 5 から除外した。なお、スラブ面積はアスペクト比やスラブ短辺寸法と多重共線性がある可能性があるが、説明変数を減らして分析を行った場合でも同等の結果になることが確認できているため⁹⁾、本報では Table 5 の条件を用いることとした。

一方、重回帰分析による結果でも、スラブに属する要因と受音室に属する要因の両方が必要である事が示されているため、Table 1 に示されているインピーダンス法のパラメータで、性能変化を十分に検討できることが改めて確認できた。また、重回帰分析の結果でスラブの 1 次固有振動数の影響が大きいことから、駆動点インピーダンスとしては全時間応答インピーダンスを用いる事が適切である事が分る。

また、Table 1 に示す受音室に属する要因である有効放射面積は、受音室面積だけではなく拘束辺数の影響も受けるため、受音室に属する要因を考慮する場合には、受音室面積だけではなく拘束辺数による影響も考慮する必要がある。これは、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」（以下、品確法）の等級換算スラブ厚¹⁰⁾とほぼ同じ考えである。

以上の様に、駆動点インピーダンスから重量床衝撃音遮音等級を精度よく推定するには、全時間応答インピーダンスの実測値に、受音室面積および拘束辺数をパラメータとして等価吸音面積と有効放射面積を算出し、スラブ厚（等価厚）を変数として算出した音響放射係数を考慮（以下、これらを併せて「受音室関連の補正量」と表記する）する必要があると言える。

3. 実測に基づく推定方法の検討

3. 1 遮音等級推定方法および評価対象周波数

ここでは、インピーダンス法のパラメータを用いて、全時間応答インピーダンスから重量床衝撃音の遮音等級を推定する際の計算式を検討する。

2.2 の重回帰分析の結果より、Table 5 に示すパラメータのみでも重量床衝撃音遮音等級をある程度の精度で推定できることが示された。また、既報¹¹⁾¹²⁾において、タイヤを用いた床衝撃音の L 等級評価の殆どが 63Hz 帯域で決定することから、63Hz 帯域のタイヤを用いた L 等級評価を 1dB 間隔で表す場合（以下、 L_{rH} 数（63Hz）と表記）の推定式を整理すると、式(3)および(4)のようになる。

そこで、本項での検討は 63Hz 帯域の全時間応答インピーダンス値から推定した L_{rH} 数（63Hz）と、 L_{rH} 数（63Hz）の実測値との対応性を求め、63Hz 帯域の全時間応答インピーダンスから L_{rH} 数（63Hz）を推定する方法について検討した。

$$\begin{aligned}
L_{H,63\text{Hz}} &= 20 \log_{10} F_{rms,63\text{Hz}} - L_{ZT,63\text{Hz}} + 10 \log_{10} Seff_{63\text{Hz}} \\
&\quad - 10 \log_{10} A_{63\text{Hz}} + \Delta L_{k,63\text{Hz}} + \Delta L_{C,63\text{Hz}} + 152 \\
&= 40 - L_{ZT,63\text{Hz}} + 10 \log_{10} \frac{Seff_{63\text{Hz}}}{A_{63\text{Hz}}} + \Delta L_{k,63\text{Hz}} + 5.2 + 152 \\
&\doteq 197 - L_{ZT,63\text{Hz}} + 10 \log_{10} \frac{Seff_{63\text{Hz}}}{A_{63\text{Hz}}} + \Delta L_{k,63\text{Hz}} \quad \dots (3)
\end{aligned}$$

$$L_r \text{ 数}(63\text{Hz}) = L_{H,63\text{Hz}} - 23$$

$$\begin{aligned}
&= 197 - L_{ZT,63\text{Hz}} + 10 \log_{10} \frac{Seff_{63\text{Hz}}}{A_{63\text{Hz}}} + \Delta L_{k,63\text{Hz}} - 23 \\
&= -L_{ZT,63\text{Hz}} + 10 \log_{10} \frac{Seff_{63\text{Hz}}}{A_{63\text{Hz}}} + \Delta L_{k,63\text{Hz}} + 174 \quad \dots (4)
\end{aligned}$$

ただし、

- $L_{H,63\text{Hz}}$: 63Hz帯域の重量床衝撃音レベル(dB)
- $F_{rms,63\text{Hz}}$: 63Hz帯域の重量衝撃源の衝撃力実効値(N)
- $L_{ZT,63\text{Hz}}$: 63Hz帯域の全時間応答インピーダンスレベル実測値(dB)
- $Seff_{63\text{Hz}}$: 63Hz帯域の床スラブの有効放射面積(m^2)
- $A_{63\text{Hz}}$: 63Hz帯域の受音室の等価吸音面積(m^2)
- $\Delta L_{k,63\text{Hz}}$: 63Hz帯域の音響放射効率による補正量(dB)
- $\Delta L_{C,63\text{Hz}}$: 63Hz帯域の騒音計の動特性補正量(dB)
- $L_r \text{ 数}(63\text{Hz})$: 63Hz帯域の重量衝撃音のLrH数

3. 2 測定対象床構造および測定方法

本研究の目的が中間測定で実施する性能検査であるため、検討に用いた重量床衝撃音の測定値は施工途中の居室で実施したものを用いており、音源側のスラブはコンクリートスラブ素面の状態で、受音室は間仕切壁まで施工が完了した状態とした。直下室(受音室)の天井は設置されていない場合が殆どであり、受音室の開口部は石こうボード等の仮設部材で塞いだ状態とした。

床衝撃音の実測は、JISA 1418-2 に準拠して行う事とし、衝撃源にはタイヤ、測定点は5点打撃、5点受音を基本とした。

Fig. 1 Impedance measurement block diagram

Fig. 2 Coherence

測定対象床構造は 61 仕様で RC および SRC 造のスラブとし、厚さ 200mm~350mm、面積は概ね 18~91 m^2 である。

また、駆動点インピーダンスの測定は、重量床衝撃音レベルの測定で用いた点とし、打撃点をインパルスハンマ(衝撃周波数 200Hz)で加振したときの衝撃力と加振点近傍における振動速度応答から、衝撃時間内応答を対象とした衝撃インピーダンスおよび応答波形が暗振動以下に減衰するまでの時間内応答(通常 1~2 秒)を対象とした全時間応答インピーダンスを算出した。インピーダンス測定用ブロックダイアグラムを Fig.1 に示す。

また、上記のインピーダンス測定時における衝撃力と振動速度応答の関係性を示すコヒーレンスの測定例を Fig.2 に示す。なお、参考として衝撃周波数 300Hz で測定した結果も併せて示した。衝撃周波数によって信頼性の高い周波数範囲は異なるが、本報で評価対象としている 63Hz 帯域に関してはどちらの衝撃源でも信頼性の高い測定ができていると言える。なお、本報で用いた測定値はローパスフィルタやハイパスフィルタを介さずに測定したものであり、窓関数は矩形窓を用いている。

3. 3 実測結果の検討

3. 3. 1 打撃点別全時間応答インピーダンスに下室空間の要因を考慮した場合

2 章において駆動点インピーダンスと LrH 数の対応性について検討し、インピーダンス法と実測値の重回帰分析結果を参考に 63Hz 帯域を対象とした場合の推定方法を式(4)に示した。そこで、本章では式(4)の適用性を検証するため、63Hz 帯域の全時間応答インピーダンスレベル実測値に受音室関連の補正量を考慮して打撃点別の LrH 数(63Hz)を算出し、打撃点別の LrH 数(63Hz)実測値と比

Fig. 3 Driving-point impedance in response time
(Correction by sound receiving area and edge fixing)

較した。その結果を Fig.3 に示す。なお、受音室関連の補正は文献 7) に示されているインピーダンス法の計算に準じて算出することとした。

Fig.3 の結果を見ると、多少のばらつきはあるが、決定係数は 0.54 であり比較的相関が良く、全時間応答インピーダンスレベルに受音室関連の補正量を考慮して LrH 数 (63Hz) を推定する方法は有効であると言える。なお、受音室関連のパラメータは品確法の等級換算スラブ厚の算定で用いているパラメータとほぼ同様である。

3. 3. 2 打撃点別全時間応答インピーダンスのみを用いた場合

現場測定においては現地で性能を確認する必要があるため、全時間応答インピーダンスレベルのみで推定できるようにしておいた方が実用に適した測定方法であると言える。そこで、全時間応答インピーダンスのみとの対応性を検討してみることにした。この場合は式(4)の有効放射面積 ($Seff$)、等価吸音面積 (A) および音響放射係数 (ΔL_R) を用いずに打撃点別の LrH 数 (63Hz) が推定されることになる。その結果を Fig.4 に示す。

Fig.3 に比べ相関は多少悪くなるが、性能変化は全時間応答インピーダンスのみでもある程度表現できるものと考えられる。傾向としては、全体的に全時間応答インピーダンスから推定した LrH 数 (63Hz) の方が大きくなる (安全側になる) 傾向はあるが、中間測定時に現場で性能を確認する場合は、Fig.4 の傾向を考慮して運用すれば、十分に利用可能な方法と考えられる。

また、Fig.3 および 4 の近似直線の傾きを見ると、いずれも 1 以下となっており、全時間応答インピーダンスから推定した LrH 数 (63Hz) の変化量に比べ実測値の LrH 数 (63Hz) の変化量の方が

小さくなるということになる。そのため、性能判断として用いる場合であれば、全時間応答インピーダンスから推定した LrH 数 (63Hz) の性能分解能の方が高いとすることができるため、実用上は適用可能な方法と考えられる。

3. 3. 3 打撃点別衝撃インピーダンスのみを用いた場合

次に一つの試みとして、駆動点インピーダンス実測値として打撃点別衝撃インピーダンスから推定した打撃点別の LrH 数 (63Hz) (式(4)の L_{ZT} に衝撃インピーダンスレベル測定値を用いることとし、受音室関連補正量は考慮しない) と 63Hz 帯域の重量床衝撃音レベル実測値の対応性を比較してみることにした。

Fig.5 に示すように、重量床衝撃音レベル実測値の変化幅に比べ、衝撃インピーダンスから推定した LrH 数 (63Hz) の変化幅は非常に小さくなっており、性能変化を衝撃インピーダンスレベルで表すことはできないと言える。

このことは、品確法の「相当スラブ厚」評価で同対策等級を推定することが難しいことを証明するものであり、空間性能には 2 章で示した周辺拘束や固有振動による影響を加味した各種パラメータが大きく関与することを示すものである。この結果は、品確法において、空間性能を表示する指標として用いられている重量床衝撃音対策等級の必要性や仕様規定の妥当性を証明するものである。

4 実測インピーダンスから遮音等級の推定に関する検討

前章までは打撃点別のインピーダンスを用いて打撃点別の床衝撃音遮音等級を推定する方法を検討したが、本章では居室の遮音等級を推定する方法として、打撃点 5 点のインピーダンス平均値を用い

Fig. 4 Driving-point impedance
in response time
(No correction)

Fig. 5 Driving-point impedance
in impact time
(No correction)

Fig. 6 Average of 5 impact point
(Correction by sound receiving area
and edge fixing)

Fig. 7 Average of 5 impact point
(Driving-point impedance
in response time)

Fig. 8 Comparison of 5 point average
and 3 point average

Fig. 9 Average of 3 impact point
(Driving-point impedance
in response time)

て LrH 数 (63Hz) を推定する場合について検討することとした。なお、JIS A 1418-2 : 2000 に示されている重量床衝撃音レベルは、打撃点別に測定した室内平均音圧レベルを算術平均して求める事より、全時間応答インピーダンスに関しても、打撃点別の測定値を算術平均することとした。

Fig. 6 に式(4)に準じて全時間応答インピーダンスに受音室関連の補正量を考慮して推定した LrH 数 (63Hz) と実測した LrH 数 (63Hz) を比較したものを、また、Fig. 7 には全時間応答インピーダンスのみで推定したものを示した。

前章の結果と同様に Fig. 6 の結果から受音室関連の補正量を考慮することによって相関が良くなる事から、駆動点インピーダンスで重量床衝撃音遮音等級を推定する場合、全時間応答インピーダンスを用いて、受音室面積と拘束辺数を考慮して、有効放射面積と等価吸音面積を算出し、スラブ厚から算出できる音響放射係数を考慮する方法の有用性が示された。ただし、全時間応答インピーダンスのみで推定する場合は Fig. 6 に比べ多少安全側になる傾向ではあるが、その傾向を踏まえて運用する場合であれば全時間応答インピーダンスのみでも利用可能であると考えられる。

また、近似直線の傾きを比較した場合、Fig. 6 に示す受音室関連の補正量を考慮した場合に比べ、Fig. 7 の全時間応答インピーダンスのみで推定した場合のほうが小さくなっており、これは Fig. 3 および Fig. 4 に示す打撃点別に比較した場合よりも差が大きくなっている。この傾きの変化は、受音室関連の補正量を考慮しない場合に LrH 数 (63Hz) の推定値が大きくなる傾向が顕著に表れているため

であり、安全側の推定を行うということであれば適用できる方法と考えられる。

次に、一つの試みとして現場での測定時間の短縮を考え、打撃点 3 点のインピーダンス平均値を用いて推定した LrH 数 (63Hz) と 5 点打撃の LrH 数 (63Hz) がどの程度対応するか検討してみることにした。なお、3 点打撃の測定点は拘束が最も高くなる点、最も拘束が低くなる点および居室中央点を通る対角線上の 3 点をインピーダンス測定点とした。

まず、5 点打撃と 3 点打撃で床衝撃音や全時間応答インピーダンスがどの程度変るか確認したところ、Fig. 8 に示す様にどちらも 1~2dB の変化であり、3 点打撃でも結果に大きな差は出ないことが確認できた。

そこで全時間応答インピーダンスの 3 点平均値から推定した LrH 数 (63Hz) (受音室関連補正量は考慮しない) と LrH 数 (63Hz) 実測値を比較した。Fig. 9 に示す結果を見ると、決定係数が 0.15 であることより、相関係数は 0.39 となり、Fig. 6 や Fig. 7 に比べ相関が弱くなっていることが分る。一般的には相関係数が 0.4 を下回る場合には相関が弱いという判断になるため、3 点の全時間応答インピーダンスから LrH 数 (63Hz) を推定する方法は利用すべきでは無いと考えられる。しかし、相関係数が 0.2 以上であればある程度の相関があると言えるため、全数検査の様に多くの居室で測定を行う必要がある場合に、全体的な傾向を確認する程度であれば適用可能な方法であると考えられる。

ここで参考として、重量床衝撃音レベル実測値が測定精度による

誤差（測定器、測定者、測定点等の変化の影響）や施工精度による誤差（スラブの厚さやコンクリート強度の変化の影響、受音室の壁などの施工誤差）によってどの程度のばらつきになるかを確認するため、Table 2 の重回帰分析で用いたデータの中から重量床衝撃音遮断性能が同等になると考えられる条件の実測値を抽出して比較を行ってみた。なお、抽出に用いた条件は下記の通りである。結果をFig.10に示す。

- ・スラブタイプ : 均質単板スラブ
- ・スラブ厚 : 200mm
- ・スラブ面積 : 65.3～79.4 m²
- ・受音室面積 : 9.7～11.9 m²
- ・拘束辺 : 2 辺

Fig.10を見ると、ほぼ同一の条件で実施した測定であっても、最大値と最小値の間に LrH 数で 7 の差が生じており、さらに $\pm 2 \cdot \sigma$ は ± 3.3 となっていることから、最大値と最小値で 1 ランク以上の差が生じる場合がある。そのため、重量床衝撃音レベルの実測値は、スラブおよび下室の条件が同じであっても現場の測定環境や施工状況の影響によって、1 ランク程度のばらつきが生じることを認識しておく必要がある。

このような影響も、全時間応答インピーダンスから推定した LrH 数（63Hz）と実測値の LrH 数（63Hz）の対応性を低下させる原因の一つになっていると考えられ、Fig.3～7 および Fig.9 の相関性の低下に繋がっていると考えられる。ただし、スラブに関連する施工精度による影響は全時間応答インピーダンスと重量床衝撃音に等しく影響するため、Fig.3～7 および Fig.9 における相関性の低下は全時間応答インピーダンスと重量床衝撃音それぞれの測定精度による誤差と受音室の壁などの施工誤差が合算されている事が主たる要因になっていると考えられる。

Fig.10 Experimental results
(Heavy floor impact sound insulation)

次に、Fig.6 および 7 の結果を用いて、全時間応答インピーダンスから推定した LrH 数（63Hz）で実測値の LrH 数（63Hz）が 50% の確率で推定できる場合と、95% の確率で推定できる場合の LrH 数（63Hz）上限値を Table 7 および 8 に示す。ここで、L 等級の算定は JIS A 1419-2 の附属書 1 に準じて行うこととしたため、全時間応答インピーダンスから推定した結果を用いる場合も、等級曲線よ

り最大 2dB 上回ることを許容することとした。

結果、いずれの場合も、95%推定の場合の上限値は等しくなっており、どちらの推定方法でも 95%推定であれば同じ上限値で評価できることになる。一方、50%推定の場合は受音室関連の補正を無くした場合に安全側の推定値になる傾向があったため、上限値も LrH 数（63Hz）で 1 の差が生じた。

そこで、本報ではどちらの推定方法でも同一の上限値で評価できることが望ましいと考え、小さい方の上限値になった Table 6 を用いて評価する方法を提案する。また、この上限値に対する全時間応答インピーダンスを逆算した結果（受音室関連の補正量を考慮しない場合）を Table 8 に示す。実務上は、現地で測定した全時間応答インピーダンスを Table 8 の値（下限値）と照らし合わせて評価すれば良いことになる。その際、より精度を高める場合には、必要に応じて受音室関連の補正量を考慮して評価すれば良い。

Table 6 Higher limit of L-Number (63Hz)
(Correction by sound receiving area and edge fixing)

Evaluation results		Calculation results of L-Number with driving point impedance (63Hz)	
Sound insulation rank	L-Number	50% Estimated (Average)	95% Estimated ($-2 \cdot \sigma$)
Lr-55	57 or less	62	57
Lr-50	52 or less	57	52
Lr-45	47 or less	52	47

Table 7 Higher limit of L-Number (63Hz)
(Driving-point impedance in response time)

Evaluation results		Calculation results of L-Number with driving point impedance (63Hz)	
Sound insulation rank	L-Number	50% Estimated (Average)	95% Estimated ($-2 \cdot \sigma$)
Lr-55	57 or less	63	57
Lr-50	52 or less	58	52
Lr-45	47 or less	53	47

Table 8 Lower limit of Driving-point impedance (63Hz)
(Driving-point impedance in response time)

Evaluation results		Experimental results of driving point impedance (63Hz)	
Sound insulation rank	L-Number	50% Estimated (Average)	95% Estimated ($-2 \cdot \sigma$)
Lr-55	57 or less	112dB	117dB
Lr-50	52 or less	117dB	122dB
Lr-45	47 or less	122dB	127dB

5. まとめ

スラブ素面を対象として実スラブの駆動点インピーダンス測定値から LrH 数（63Hz）を推定する方法について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 全時間応答インピーダンスに有効放射面積、等価吸音面積および音響放射係数を考慮すればかなり精度良く床衝撃音遮音等級を推定することができる。
- (2) 全時間応答インピーダンスのみでも、安全側になる傾向はあるが、この傾向を考慮して適用すれば重量床衝撃音遮音等級の推定に利用することができる。

- (3) 3点打撃の全時間応答インピーダンスで5点打撃の重量床衝撃音レベルを推定する方法は、相関が悪く利用すべきではないが、傾向を見る程度なら利用できる可能性がある。
- (4) 衝撃時間内応答を対象とした衝撃インピーダンスでは重量床衝撃音遮音等級を推定することは難しい。

今回検討した全時間応答インピーダンスを用いた遮音等級の推定法では、下室空間への有効放射面積、等価吸音面積および音響放射係数を考慮した補正を行ったとしても、実測値の床衝撃音遮音等級に1ランク以上のばらつきが生じる場合がある。そのため、全時間応答インピーダンスに補正を加えた結果を用いて遮音等級を推定する方法を床衝撃音レベル測定に代わりに用いることは難しい。

しかし、Table 8に示すそれぞれの遮音等級に対応する全時間応答インピーダンスの下限値を、必要とされる推定精度によって使い分ければ実用レベルでの遮音等級の推定には利用可能と考えられる。

これらの結果を利用することで中間測定を効率的に実施し、より確実に竣工時要求性能を満足することができるようになると考えている。

参考文献

- 1) Sho Kimura, Heiichiro Ohkawa, Katsuo Inoue: Significance of Heavy Weight Floor Impact Source and Its Desirable Impact Force Characteristics, AIJ Journal of Technology and Design, No.1, pp.199-202, 1995.12(in Japanese)
木村翔、大川平一郎、井上勝夫：重量床衝撃源の意義と望ましい衝撃力特性について、日本建築学会技術報告集、第1号、pp199-202、1995.12
- 2) Katsuo Inoue, Masahito Yasuoka, Hideki Tachibana: Development of Standard Heavy Impact Source for Measurement of Floor Impact Sound, AIJ Journal of Technology and Design, No.14, pp.143-148, 2001.12(in Japanese)
井上勝夫、安岡正人、橘秀樹：床衝撃音測定用標準重量衝撃源の開発、日本建築学会技術報告集、第14号、pp143-148、2001.12
- 3) Architectural Institute of Japan: Sound Insulation Performance Standards and Design Guidelines for Buildings (2nd Edition), Gihodoshuppan, 1997.12
日本建築学会編：建築物の遮音性能基準と設計指針（第二版）、技報堂出版、1997.12
- 4) JIS A 1419-2:2000: Acoustics-Rating of sound insulation in buildings and building elements-Part 2: Floor impact sound insulation
JIS A 1419-2:2000：建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、附属書1
- 5) INOUE Katsuo, YASUOKA Masahito: Study on Residents' Demand and Criteria for Floor Impact Sound Insulation Performance of Multiple Dwelling House, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp 259-262, 2013.8(in Japanese)
井上勝夫、安岡正人：床衝撃音に関わる居住者要求と遮音性能基準のあり方、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学-I、pp.259-262、2013.8
- 6) Katsuo INOUE, Kyoko ABE: Expression of Resident Awareness for Floor Impact Sound by Heavy-Impact Source in Multi-Family Housing: Journal of Environmental Engineering(Transactions of AIJ), Vol.79 No.701, pp.589-596,2014.7(in Japanese)
井上勝夫、阿部今日子：集合住宅の居住者反応からみた重量床衝撃音遮断性能の生活実感による表現方法の検討、日本建築学会環境系論文集、第79巻 第701号、pp589-596、2014.7
- 7) Architectural Institute of Japan: Floor Impact Sound Insulation Design of Buildings, Gihodoshuppan, 2009.11
日本建築学会編：建築物の床衝撃音防止設計、技報堂出版、2009.11
- 8) Takashi Koga, Masanori Tano: Experimental Method for Calculating The Floor Impact Sound of Large-Span Slabs, Journal of Planning and Environmental Engineering (Transactions of AIJ), No.520, pp.25-32,1999.6(in Japanese)
古賀貴士、田野正典：大型スラブにおける実務的な重量床衝撃音予測手法、日本建築学会計画系論文集、第520号、pp25-32、1999.6
- 9) SHIKAKURA Junji, INOUE Katsuo, AMAKAWA Kyouichi, OHKAWA Shyuichirou, OHKAWA Heiichiro: Study on Calculation Precision and Error Reduction of Predictive Calculation by Impedance Method 2009 - Part2- Correlation about Parameter, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Environmental Engineering-I, pp 165-166, 2015.9(in Japanese)
鹿倉潤二、井上勝夫、天川恭一、大川周一郎、大川平一郎：インピーダンス法2009の計算精度と誤差低減に関する検討 -その2-パラメータの相関分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、環境工学-I、40083 pp165-166、2015.9
- 10) Katsuo INOUE, Shinji NAKAZAWA, Ryuta TOMITA, Atsuo HIRAMITSU, Junji SHIKAKURA: Study on Simple Estimated Method of Heavy Floor Impact Sound Control Grade, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.22 No.52, pp.1011-1015, 2016.10(in Japanese)
井上勝夫、中澤真司、富田隆太、平光厚雄、鹿倉潤二：重量床衝撃音対策等級の簡易推定法の検討、日本建築学会技術報告集、第22巻 第52号、pp1011-1015、2016.10
- 11) Junji SHIKAKURA, Katsuo INOUE, Kyouichi AMAKAWA, Shyuichirou OHKAWA, Heiichiro OHKAWA: Actual Situation of Correlation about Floor Impact Sound Insulation Rating, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.21 No.48, pp.677-682, 2015.6(in Japanese)
鹿倉潤二、井上勝夫、天川恭一、大川周一郎、大川平一郎：床衝撃音遮断性能評価量の相関関係に関する実態把握、日本建築学会技術報告集、第21巻 第48号、pp677-682、2015.6
- 12) Junji SHIKAKURA, Katsuo INOUE, Kyouichi AMAKAWA, Shyuichirou OHKAWA, Heiichiro OHKAWA: Compatibility of Floor Impact Sound Level by Change of Heavy Impact Source, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.23 No.53, pp.171-176, 2017.2(in Japanese)
鹿倉潤二、井上勝夫、天川恭一、大川周一郎、大川平一郎：重量衝撃源の変化による床衝撃音レベルの互換性に関する検討、日本建築学会技術報告集、第23巻 第53号、pp171-176、2017.2

STUDY ON ESTIMATION METHOD OF HEAVY FLOOR IMPACT SOUND INSULATION RANK WITH DRIVING-POINT IMPEDANCE IN MIDDLE OF CONSTRUCTION

Junji SHIKAKURA^{*1}, *Katsuo INOUE*^{*2} and *Heiichiro OHKAWA*^{*3}

^{*1} KURIMOTO, Ltd.

^{*2} Prof., Dept. of Architecture, College of Science and Technology, NIHON Univ., Dr.Eng.

^{*3} Housing Environment Research Institute Inc., Dr.Eng.

Floor impact sound insulation performance is evaluated by sound pressure level of receiving room when the floor of the upper surface was impacted by the standard impact source. Therefore, it is necessary to make the sound receiving room for a closed space.

We propose an estimation method of heavy floor impact sound insulation rank of concrete floor slab using measurable driving-point impedance only at the slab upper surface.

First, we compared driving-point impedance in impact time or driving-point impedance in response time with heavy floor impact sound level. As a result, driving-point impedance in response time was better corresponded to heavy floor impact sound level.

Next, in order to improve the correspondence, multiple regression analysis was performed to estimate factors affecting the floor impact sound level. We investigated a method of correcting by using parameters using this factor in predictive calculation by impedance method 2009.

As a result, it was confirmed that by correcting driving-point impedance in response time with sound receiving room area and number of edge fixing, it is possible to grasp heavy floor impact sound insulation of concrete floor slab.

By using this result, it becomes possible to satisfy the required performance at completion more reliably.

(2018 年 11 月 10 日原稿受理, 2019 年 4 月 17 日採用決定)