インパルスハンマーを用いた衝撃加振によるスラブの振動速度応答の考察

—住宅の品質確保の促進等に関する法律における床衝撃音対策に関わる測定方法の検討 その3—

石丸岳史 —*1 大脇雅直 —*2
高倉史洋 —*1 財満健史 —*3
久米智史 —*4 山下恭弘 —*5

キーワード:

住宅の品質確保の促進等に関する法律, 重量床衝撃音, インピーダンス, 集合住宅, 加振源

Keywords:

Housing secure law, Floor impact sound by heavy source, Impedance, multiple dwelling houses, Excitation source

CONSIDERATION OF VIBRATION VELOCITY RESPONSE OF SLAB BY IMPACT EXCITATION WITH IMPULSE HAMMER

—A study on measurement method of floor impact sound isolation performance of housing secure law (part3)—

Takeshi ISHIMARU —*1 Masanao OWAKI —*2
Fumihiko TAKAKURA —*1 Takefumi ZAIMA —*3
Satoshi KUME —*4 Yasuhiro YAMASHITA —*5

In this paper, the method of measuring the impedance within the impact time to have used the impulse hammer for the source was examined. The vibration velocity of the slab in the impact time was considered when driving point was near a restraint the slab. It is shown that the feature is due to the reflected wave from a restraint the slab of driving point. Moreover, a frequency characteristic the lower right when the influence of the reflected wave had been received was shown. It was shown that the presence of the object by which the reflected wave was given from the vibration velocity of the slab in the impact time was appreciable from the above-mentioned finding.

1. はじめに

2000年4月に施行された「住宅の品質確保の促進等に関する法律」には、重量床衝撃音に対する対策の程度を相当スラブ厚（重量床衝撃音）で表す規定がある。基本的には、計算により評価される。しかし、告示に示されている仕様以外のスラブ構造については、特別評価方法認定により、実測値による評価を行うことができる。特別評価方法認定の試験ガイドライン¹⁾には、相当スラブ厚（重量床衝撃音）の評価に用いるスラブのインピーダンスを、JIS A 1418-2:2000に規定される標準重量衝撃源を用いて取得する衝撃時間内応答インピーダンスの測定方法が規定されている。このため、衝撃時間内応答インピーダンスの測定も性能評価方法の一つとして用いられる機会が増加する可能性がある。しかし、標準重量衝撃源では、衝撃時間が長いことから、反射波の影響を受けやすいなどの問題²⁾がある。反射波の影響を受けることにより、衝撃時間内応答インピーダンスは、衝撃時間の短いインパルスハンマーよりも大きい値で算出されることになる。このことは、実際の性能よりも高く評価されることになり、住宅の購入者にとって危険側の評価となる。そのような問題に対して、筆者らは測定した衝撃力と振動速度波形に対する補正方法を提案した³⁾。

一方、衝撃時間の短いインパルスハンマーを用いた測定方法が可能であれば、波形に対して補正を加えない最も簡潔な解決策と考えられる。インパルスハンマーを用いた測定では、衝撃時間が短いことから、スラブ周辺部からの反射波の影響を受ける測定点が周辺部に限定されることから、無限大

に対応した結果を得られる測定点の範囲は、標準重量衝撃源を用いる場合に比べ、広くなると考えられる。しかし、水まわり部の段差の影響やボイドスラブの中空部の局所的な特性を測定してしまうなどの問題がある。インパルスハンマーを用いた実験をガイドラインの規定に含めるためには、インパルスハンマーを用いた測定方法の長所・短所などの特徴や結果の解釈について明らかにしておく必要がある。

衝撃時間内応答インピーダンス測定の目的は、無限大の単板に相当する駆動点インピーダンスを求めることである。そのためには、梁で囲まれたスラブ（有限板）において無限大板の測定に対応した振動速度応答を取得する必要がある。無限大板に対応した測定については、2章において述べる理論に対応した振動速度を得られればよく、木村、井上⁴⁾らによって実験的にも示されている。本論文では、水まわりの段差など反射物が測定点近傍に存在する場合のスラブの振動速度応答とその周波数特性を検討対象とし、その特徴について考察する。測定点近傍に反射物がある場合のスラブの振動速度応答の特徴を整理した結果は、今後の駆動点インピーダンス測定における反射物の有無の評価に反映できる。その結果、より無限大に対応した測定点を選定することが可能となり、測定精度の向上につながると考える。

2. 理論及び計算概要

2.1 無限大板の駆動点インピーダンス理論

機械インピーダンスは、加振力とそれにより生じる速度の比で表され、その系の伝達特性を表しているため複素数と

*1 ㈲泰成電機工業 博士(工学)
(〒399-4102 長野県駒ヶ根市飯坂2-8-34)

*2 ㈲熊谷組技術研究所 博士(工学)

*3 ㈲熊谷組技術研究所 修士(工学)

*4 信州大学大学院工学系研究科博士前期課程

*5 信州大学工学部社会開発工学科 教授・工博

*1 Taisei Electronic Industries Co., Ltd., Dr. Eng.

*2 Technical Research & Development Institute Kumagaigumi Co. Ltd., Dr. Eng.

*3 Technical Research & Development Institute Kumagaigumi Co. Ltd., M. Eng.

*4 Graduate Student, Graduate School, Faculty of Engineering, Shinshu Univ.

*5 Prof., Dept. of Arch. and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu Univ., Dr. Eng.

る。無限大板における曲げ波に対する駆動点インピーダンスは、式(1)で表される⁵⁾。式(1)における加振力及び振動速度は複素数で表されるが、最終的な無限大板の駆動点インピーダンスは、実数で表される。これは、板を加振する衝撃力と加振で生じる振動速度が同位相であることを示している。仮に無限大板の駆動点インピーダンスを衝撃加振で測定する場合には、衝撃力が半波であるから、振動速度応答が衝撃時間内に振動方向の向きを逆転させることはない。よって、有限板における駆動点インピーダンスの測定において観察される逆向きの振動方向を表すマイナス側の振動速度応答は、スラブ周辺部からの反射波や周辺部の梁を含めたスラブの特性と考えることができる。

2.2 見かけの反射波の計算方法

観測されるスラブの振動速度応答は、スラブ端部に到達する以前の直接波とスラブ端部からの反射波の重ね合わせによって式(2)として表せる。直接波は無限大板の応答と対応するものである。式(2)を変形し、式(3)より反射波を算出する。スラブ中央点における駆動点のスラブの振動速度応答(実測)は、衝撃時間内にマイナス側(衝撃力がプラスとなるスラブ下面方向をプラスとする。以下、同じものとする)の振幅が生じないことから、この実測波形の衝撃時間内の応答を無限大板のスラブの振動速度応答とみなして直接波として用いる。なお、測定ごとのばらつきは、測定した衝撃力の比によって、振動速度応答を補正する。本論文では、3.1節において述べるボイドスラブを試験体としている。ボイドスラブを単板に換算し、式(1)より無限大板の振動速度応答を求めることができるが、単板に換算する計算式は、等価的なものであり、誤差を含む可能性があることから実測した振動速度応答を用いた。なお、梁近傍においてスラブと梁が一体振動するような場合には、梁による曲げ剛性増加及び質量増加によるインピーダンス上昇の効果が含まれるため、本論文では、式(3)より算出する反射波のことをみかけの反射波と呼ぶこととする。

2.3 反射波の到達時間の計算

振動速度応答実測値から求めたみかけ上の反射波の到達時間と、衝撃周波数の位相速度及び群速度から求めた反射波の到達時間とを比較することにより、反射波が衝撃時間内に到達していることを確認する。

振動速度応答実測値から求めたみかけ上の反射波の到達時間を算出する際に、波形の立ち上りを開始点とすると、曲げ波の位相速度が周波数に依存する分散性から波形の立ち上がりがなだらかになり、反射波の到達時間を読み取ることができない。そこで、仮定した直接波とみかけの反射波のピーク位置の時間差を反射波の到達時間(図-1参照)とし、グラフより読み取った。

曲げ波の位相速度及び群速度から反射波の到達時間を求める場合は、加振点とスラブ端部との往復距離と伝搬速度の関係(式(4))から求めた。曲げ波の位相速度は、式(5)で表される。インパルスハンマーで加えられたパルス波は多くの周波数成分を含む波群である。そこで衝撃周波数が中心となる波群の伝搬速度である群速度についてもあわせて求めることにした。群速度と位相速度の関係⁶⁾は、式(6)で表され

$$Z = \frac{F}{v} = 8\sqrt{mB} \quad (1)$$

Z : 無限大板の駆動点インピーダンス[kg/s]

F : 加振力[N]

v : 板の振動速度[m/s]

m : 面密度[kg/m²]

B : 曲げ剛性[N・m²]

$$v_m(t) = v_f(t) + v_r(t) \quad (2)$$

$$v_r(t) = v_m(t) - v_f(t) \quad (3)$$

$v_m(t)$: 駆動点で観測される振動速度応答[m/s]

$v_f(t)$: 駆動点での直接波の振動速度応答[m/s](=無限大板の応答に対応)

$v_r(t)$: 駆動点でのスラブ端部から到達する反射波の振動速度応答[m/s](=見かけの反射波)

図-1 実測したスラブ振動速度応答から求めた反射波が駆動点に到達するまでの時間算出の概念図

$$v = \frac{x}{t} \quad (4)$$

v : 波の伝搬速度[m/s](=位相速度又は群速度)

x : 伝搬距離[m]

t : 伝搬時間[sec]

$$c_b = \sqrt{\frac{\pi \cdot c_l \cdot h \cdot f}{\sqrt{3}}} \quad (5)$$

$$C_b = 2c_b \quad (6)$$

$$h = (2m \cdot EI \cdot 10^{-13})^{1/4} \quad (7)$$

C_b : 群速度[m/s]

c_b : 位相速度[m/s]

C_l : 縦波伝搬速度 [m/s]

E : ヤング率[N/m²](=2.4 × 10¹⁰)

I : 床の断面の断面2次モーメント[m⁴](図3に示す断面について計算)

ρ : 密度[kg/m³](=2400)

h : 等価厚さ[m]

f : 周波数[Hz]

m : 面密度[kg/m²]

る。このときの等価厚さ(h)は、式(7)より算出した。

3. 測定概要

3.1 駆動点インピーダンスレベル

衝撃時間約2.4msのインパルスハンマーを用いて、スラブの駆動点インピーダンスレベルの測定を行なった。測定及び解析系統を図-2に示す。サンプリング周波数4096Hz、アンチエイリアジング用ローパスフィルタ切断周波数2kHzでA/D変換を行った。なお、ローパスフィルタは、直線位相特性に近似されたものを用いている。測定対象は、3棟の集合住宅

図-2 駆動点インピーダンス測定系統

図-3 スラブ断面

である。各集合住宅のスラブ断面構造、スラブ厚、スラブ寸法などの条件を表1に示し、スラブ断面を図-3に示す。スラブ断面は、スラブ長辺方向に対して平行に切った断面である。表-1における基本インピーダンスレベルの計算におけるスラブのヤング率は $2.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、密度は 2400 kg/m^3 を用いた。表-2に示す端部境界に対して直交する測定線をスラブ中央付近に設定した。なお、本論文で対象としている測定対象の端部境界（梁）の影響を測定できるように、水まわりの落としこみ部からの反射波が衝撃時間内に到達しないようにそれらから距離をとって測定を行った。

3.2 衝撃時間内に到達する反射波を含んだ周波数分析

衝撃時間内の振動速度応答を衝撃時間で無条件に切り出すと、マイナス側の応答が生じている状態で切り出すことになる。この場合、周期性の信号として解析するFFT解析では、不連続部分によって本来含まれない成分を生じ、解析誤差となる。そこで、衝撃時間内にマイナス側の応答が生じるものについては、衝撃時間を過ぎ、初期の1周期の応答が終了した時点で切り出すこととした。また、衝撃時間内にプラス側の応答しか生じないものについては、半周期で切り出した。切り出した時刻以降の応答は、すべて0とし、データ個数4096個で、FFT（矩形窓関数を使用）を行った。FFT解析結果は、基準値を 1 kg/s として、駆動点インピーダンスレベルを算出した。

4. 結果及び考察

4.1 衝撃時間内のスラブの振動速度応答波形の考察

衝撃時間内のスラブの振動速度応答の特徴を把握するために、衝撃時間内の応答におけるマイナス側振幅とプラス側振幅の比を求めた（図-4参照）。振幅比が、0であればマイナ

表-1 測定対象諸元

	スラブ構造	総厚[mm]
集合住宅 A	円形中空スラブ	300
集合住宅 B1,B2	円形中空合成スラブ	230
集合住宅 C	波形中空合成スラブ	280

	スラブ面積[m ²]	スラブ寸法[mm]
集合住宅 A	109.7	9600×11425
集合住宅 B1,B2	77.6	6600×11750
集合住宅 C	67.3	5900×11400

表-2 測定対象の端部境界条件

	端部境界条件
集合住宅 A	戸境壁, 大梁
集合住宅 B1	戸境壁, 大梁
集合住宅 B2	開口部, 大梁
集合住宅 C	戸境壁, 大梁

図-4 振幅比概念図

図-5 振幅比の加振点位置による変化

ス側の振幅は生じていないことを表し、1であればマイナス側の振幅がプラス側振幅と等しいことを表す。2.1節で述べたようにマイナス側の振幅は、有限板であるために生じる反射波の影響を受けていることを示すものである。

図-5に振幅比の算出結果を示す。横軸は、スラブ端部からの距離と衝撃周波数の曲げ波波長との比である。スラブ端部に戸境壁があり拘束力が大きい集合住宅A, B1, Cは、スラブ端部の測定開始点から振幅比が1に近い値となり、スラブ中央に向かうに従い振幅比は、0に近づく。振幅比が0になるのは、スラブ端部から1/4波長($x/\lambda_b = 0.3$)程度である。この結果は、スラブ端部の測定開始点からプラス側の振幅とほぼ等しいマイナス側の振幅の応答が生じ、スラブ中央側へ向かうに従い、マイナス側の振幅の応答が小さくなっていき、

衝撃時間内の応答はプラス側のみとなることを表している。

スラブ端部の梁部に開口部がある集合住宅B2は、スラブ端部から約1/8波長 ($x/\lambda_b=0.125$) 離れた地点で振幅比が最大値となり、若干異なる特性を示す。これらの場合、梁の拘束力が小さいため、加振点がスラブ端部の拘束端(梁)に近いとスラブと拘束端(梁)が一体となって振動しているためと考えられる。

以上の結果から、スラブ端部を加振した場合、加振点における衝撃時間内のスラブの振動速度応答にマイナス側の応答が生じることを確認し、マイナス側の振幅が生じる範囲が既報⁷⁾に示したように $x/\lambda_b=0.3$ と対応することを確認した。

4.2 衝撃時間内に到達する反射波の影響を含んだ駆動点インピーダンスの周波数特性

ここでは、衝撃時間内に到達する反射波がスラブの駆動点

図-6 1周期で切り出しと全時間応答インピーダンスレベルの周波数特性の比較(集合住宅A)

集合住宅A

集合住宅B2

集合住宅B1

集合住宅C

図-7 初期応答1周期切り出しによる駆動点インピーダンスレベルの加振点変化(基準化している曲げ波の波長の周波数は衝撃周波数)

インピーダンスの周波数特性に与える影響について考察する。

図-6に振動速度応答を最初の1周期で切り出したものと全時間応答で算出した駆動点インピーダンスレベルの周波数特性を比較した結果を示す。1周期で切り出した場合の周波数特性は、共振・反共振周波数におけるインピーダンスの変化量がなくなり、全体的な傾向としては全時間応答インピーダンスレベルと対応する。このことから、1周期で切り出した解析結果は、衝撃時間以降に作用する共振・反共振の影響を除いたものであると考えられる。

図-7に振動速度応答を1周期で切り出して求めた駆動点インピーダンスレベルの加振点位置の違いによる変化を示す。スラブ端部に近い測定点ほど広い周波数範囲にわたって右肩下がりの周波数特性を示している。加振点がスラブ端部から離れるに従い、高い周波数から無限大仮定の駆動点インピーダンスレベルに収束していく。

4.3 衝撃時間内に到達する反射波の確認

ここでは、反射波の到達を確認するために、実測波形より反射波を求める。

集合住宅Aにおける直接波とみかけの反射波を図-8に示す。見かけの反射波は、マイナス側の応答となり、実測した振動速度におけるマイナス側の応答の原因になっている。測定点がスラブ端部から離れるに従い、みかけの反射波のピークが到達する時間は徐々に遅れていくことから実際に反射波として伝搬しているものと考ええる。また、スラブ端部近傍 ($x/\lambda_b=0.01$) におけるみかけの反射波は、直接波のパルスのような振幅の最大点で鋭角となる三角形に近い形状であるが、

図-8 集合住宅Aにおける直接波及びみかけの反射波の加振点位置による応答の変化 (λ_b : 衝撃周波数の曲げ波波長)

反射波を生じさせるスラブ端部から離れるに従い、曲げ波における波動の分散性により、振幅の最大点で鈍角となるなどなかな三角形に近い形 ($x/\lambda_b=0.15$) となっており、反射波の伝搬の様子が分かる。衝撃時間内に衝撃周波数の半波長分の波動が進むわけであるから、端部までの往復距離で半波長を超える $x/\lambda_b=0.29$ の地点では、伝搬速度から計算した場合、衝撃時間内に反射波は到達しない。これと同様に、衝撃時間内に算出したみかけの反射波は到達していない(図-8参照)。またこのことは、文献7)におけるインピーダンスの上昇範囲とも対応しており、みかけの反射波の影響によってインピーダンスの上昇が生じていることを示している。

4.4 反射波の伝搬時間の比較

ここでは、見かけの反射波が実際の反射波であるかを確認するために、波の伝搬速度から求めた伝搬時間とみかけの反射波と直接波のピークの時間差とを比較する。

図-9に直接波とみかけの反射波のピークとの時間差から反射波の伝搬時間を求めた結果(集合住宅A, B1, B2, C)を示す。また、図中には伝搬速度(位相速度及び群速度)と伝搬距離の関係から反射波の到達時間を算出した結果も合わせて示す。

直接波とみかけの反射波のピーク間の時間差は、どの集合住宅においても群速度よりも位相速度から求めた到達時間とよく対応している。衝撃周波数という単一の周波数で計算した位相速度に対応することから、インパルスハンマーを用いた測定における時間領域における衝撃時間内の解析は、衝撃周波数の正弦半波による測定に近似されると考えられる。

以上の結果、位相速度から求めた反射波の到達時間とみかけの反射波の到達時間がほぼ一致することを示し、みかけの反射波が実際の反射波として衝撃時間内の応答に寄与していることを確認した。

5. まとめ

本論文では、駆動点近傍に反射波を生じさせる物体が存在する場合の基礎的な検討としてスラブ周辺部の端部拘束(梁)を対象としてスラブの振動速度応答について考察し、以下の知見を得た。

図-9 実測値から求めたみかけの反射波の到達時間と伝搬速度から求めた反射波の到達時間の比較

1) スラブ端部を加振したときの駆動点における衝撃時間内のスラブの振動速度応答には、衝撃力と逆向きのマイナス側の応答が生じることを確認した。

2) 衝撃力と逆向きのマイナス側の応答を含んだ周波数分析を行った結果、周波数が高くなるに従い、インピーダンスレベルが無限大版のインピーダンスに収束していく、右肩下がり特性となることを確認した。

3) 直接波を仮定し、実測した振動速度応答からみかけの反射波を求めると衝撃力と逆向きのマイナス側の応答となり、みかけの反射波が実測した振動速度の衝撃時間内におけるマイナス側応答の原因となることを示した。

4) みかけの反射波は、位相速度から求めた伝搬時間とほぼ一致し、実際に反射波として伝搬していることを示した。

以上の知見から、駆動点における測定で衝撃時間内の振動速度応答に衝撃力と逆向きのマイナス側の応答が観測される場合、水まわりの段差など反射物からの影響を含んでいるといえる。

標準重量衝撃源による衝撃時間内応答インピーダンス測定については、試験ガイドライン¹⁾で、振動速度応答の波形を示すことが規定されている。しかし、測定された振動速度応答の波形を判断する詳細な規定はない。今回示したように、駆動点近傍に反射物がある場合には、衝撃時間内に衝撃力と逆向きのマイナス側の応答を示すことから、それらに対する許容範囲を設けるなどの規定が必要であろう。許容範囲を設けることにより、反射物の影響が少なく、より無限大に対応した測定が可能となり、測定精度を高めることができると考えられる。

今後は、スラブの振動速度応答に生じる衝撃力と逆向きのマイナス側の応答の許容範囲の定量化及びインパルスハンマーを用いた場合の測定で問題とされるボイドスラブの局部的な影響について、インパルスハンマーの衝撃時間をパラメーターとした測定条件について検討を行う予定である。

謝辞

学会において御議論いただいた皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 住宅性能評価機関等連絡協議会：遮音測定の結果による音環境に関する試験ガイドライン，2003.9.18
- 2) 石丸岳史，大脇雅直，財満健史，高倉史洋，山下恭弘：加振源の違いによる衝撃時間内応答インピーダンスレベルの差—住宅の品質確保促進等に関する法律の床衝撃音対策に関わる測定方法の検討 その2—，日本建築学会技術報告集，第17号，pp.217-222，2003.6
- 3) 石丸岳史，大脇雅直，財満健史，高倉史洋，山下恭弘：衝撃時間内応答インピーダンスからスラブ等価厚さを算出する手法の提案—ローパスフィルタ処理導入の提案—，日本騒音制御工学会誌，第27巻6号，pp.446-455，2003.12
- 4) 木村翔，井上勝夫：床衝撃音と床スラブの振動特性に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，第332号，pp.83-93，1983.10
- 5) Cremer, L., Heckl, M.: Structure-borne sound, p.227, Springer Verlag, 1973
- 6) 橋本典久：騒音防止のための音響放射の理論と実際，工文社，p.91，2002
- 7) 大脇雅直，高倉史洋，財満健史，宮崎浩司，山下恭弘：大型スラブにおけるインピーダンス法による重量床衝撃音レベル予測手法に関する実験的研究，日本建築学会計画系論文集，No.511，pp.23-29，1998.9

[2005年4月20日原稿受理 2005年7月22日採用決定]