

大型スラブ構法を用いた集合住宅の遮音設計法に関する研究

藤 橋 克 己

丸 山 勇 祐

要 旨

近年、設計の自由度や居住性を向上させるために、大型スラブ構法を用いた集合住宅が計画されることが多くなっているが、床衝撃音レベル予測法として一般的に用いられているインピーダンス法は本来25㎡程度までのスラブに用いるべき手法であり、大型スラブの重量床衝撃音レベルを5～10dB過大評価してしまうため、大型スラブの遮音設計法は確立されていないのが現状である。

そこで、本研究ではスパンの異なる3種類の実験施設を構築し、各種大型スラブの遮音性能を実験的に評価するとともに実物件との照査を行い、これらを基に大型スラブの遮音設計法を確立することを目指して、インピーダンス法の大型スラブへの拡張を試みた。その結果、大型スラブの躯体段階の重量床衝撃音レベルを±5dB程度の精度で予測することができるようになった。

キーワード 大型スラブ／床衝撃音／インピーダンス法／合成床版／中空合成床版

目 次

- | | |
|-------------|---------|
| 1. はじめに | 4. 実験結果 |
| 2. 実験概要 | 5. まとめ |
| 3. 実験施設の妥当性 | |

A STUDY FOR THE SOUND INSULATION DESIGN OF LONG SPAN SLAB IN MULTIPLE DWELLING HOUSE

Katsumi FUJHASHI Yusuke MARUYAMA

Synopsis:

In recent years, the multiple dwelling houses with a long span slab are constructed for the purpose of improving habitability. But the Floor Impact Sound insulation design method for long span slabs is not yet established. The conventional Impedance Method, a standard method to predict the floor impact sound, is not applicable to long span slabs.

To examine this problem, we constructed a facility, which is consisted of three kinds of room with three different long span slabs. This report describes the outline of experiment facilities and the comparison of the experimental results of Floor Impact Sound with those of the field measurement.

We improved the accuracy of the prediction of Heavy Weight Floor Impact Sound.

1. はじめに

近年、設計の自由度や居住性を向上させるために、大型スラブ構法を用いた集合住宅が計画されることが多くなっている。一方、床の遮音性能の確保は集合住宅では非常に重要な事項であるが、従来の予測手法（インピーダンス法^{1)~3)}は本来25㎡程度までのスラブに用いるべき手法であり、大型スラブの重量床衝撃音レベルを5~10dB 過大評価してしまう。そこで、インピーダンス法の大型スラブへの適用に関する研究^{4,5)}が行われているが、大型スラブの遮音設計法として確立されるまでには至っていない。さらに、今後床の遮音性について性能表示を義務づける動きもあり、大型スラブの遮音設計法の整備は急務となっている。そこで、本研究では各種大型スラブの遮音性能を実験的に評価するとともに実物件との照査を行い^{6,7)}、これらを基に大型スラブの遮音性能を正確に評価できる設計手法の確立を目指している。

本報では、大型スラブの振動特性に関する実験概要および実験結果に基づいたインピーダンス法の大型スラブへの拡張に関する試みについて報告する。

2. 実験概要

2.1 実験施設の仕様

集合住宅の代表的な大型スラブとして3種類の床面積を選定し3つの実験室（写真-1）を建設した。各実験室の平面図を図-1に示す。実験室Aのタイプは超高層集合住宅の標準スパン長(6m×6m)、実験室Bのタイプは1スパンに3台駐車でき、さらに南面3室が可能なスパン長(8.5m×8.5m)、実験室Cのタイプは現在最も普及しているスパン長(7.5m×12m)を有している。

試験体の取付は、試験体と実験室の大梁を貫通するP C鋼棒をナットで止め、トルクレンチにより締め付け固定する方法をとっており、実験室Cのタイプでは、P C鋼棒によりP C梁を実験室の大梁に抱き合わせることで短辺方向のスパン長を6.5mに変更可能である（図-2）。

各実験室の天井高さはすべて3mであり、実験室の壁はALC版を用いている（実験室Cの長辺方向のみ耐震壁）。室内仕上げや吸音力の調整は施しておらず、ほぼ簡易残響室仕様となっている。

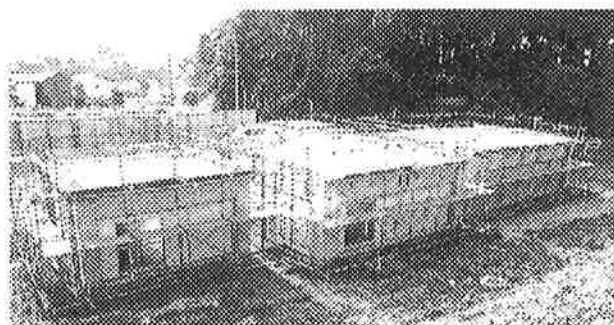


写真-1 実験施設の全景（左から実験室A, B, C）

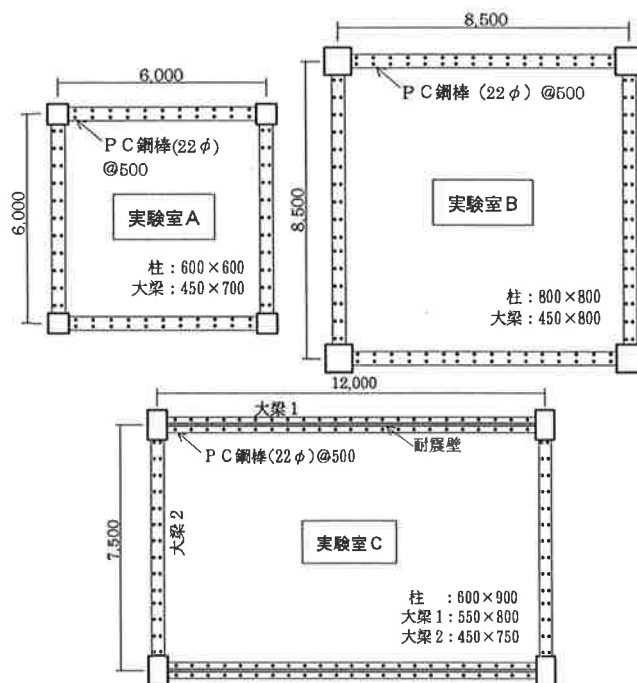


図-1 実験室の平面図

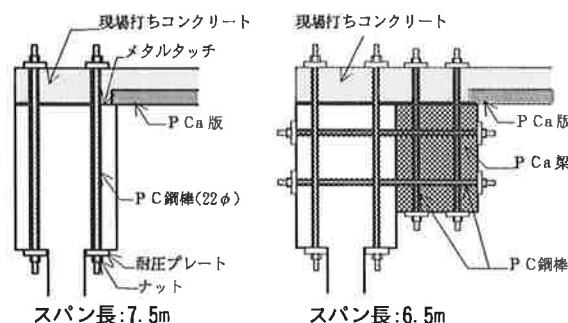


図-2 床試験体とP C a梁の取付詳細

2.2 スラブ試験体の仕様

実験は図-3および表-1に示す構造形式（中空部の有無）、スラブ面積、スラブ厚さ、補剛的な要素（小梁や段差の有無）の異なる8仕様について行った。

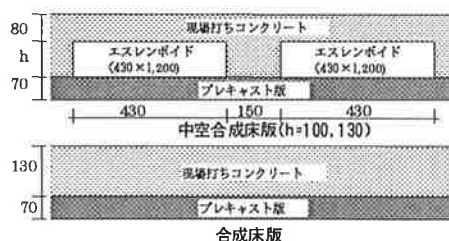


図-3 スラブ試験体の断面図

表-1 スラブ試験体の仕様

スラブの種類	実験室	スラブ厚さ(mm)	スパン長(m)	面積(㎡)	補剛要素
合成床版	A	200	6.0×6.0	36.0	
	C	200	6.5×12.0	78.0	
	C	200	6.5×12.0	78.0	小梁1
中空合成床版	A	250	6.0×6.0	36.0	
	B	250	8.5×8.5	72.3	小梁1
	C	250	7.5×12.0	90.0	
	C	280	7.5×12.0	90.0	
	C	280	7.5×12.0	90.0	段差

2.3 実験項目

インピーダンス法の計算フローを図-4に示す。同法は無限版を想定したスラブの基本インピーダンスレベルに梁の拘束力や共振による影響を相対レベルとして加えて加振点別インピーダンスを求めるところに特徴がある(図-4太枠部分)。

そこで、インピーダンス法の大型スラブへの拡張を図るために、同法で用いている振動特性(表-2)および重量床衝撃音レベルについて実験を行った。

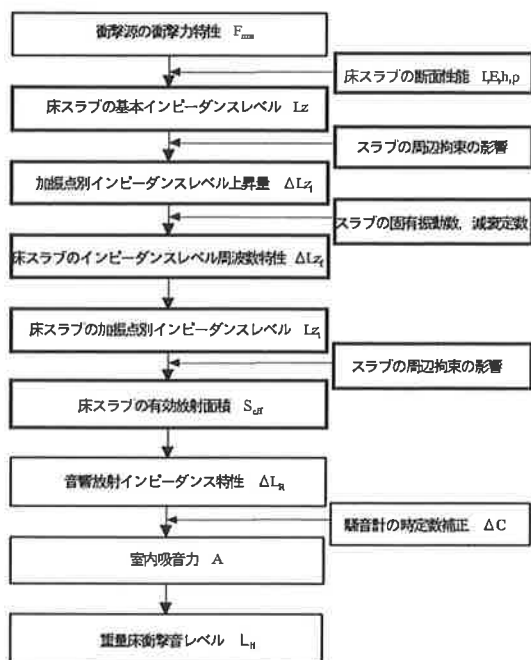


図-4 インピーダンス法の計算フロー

表-2 振動実験項目

項目	加振点	受振点	データ処理方法
固有振動数	スラブ上中央1点	スラブ上9点を均等配置	各受振点の振動速度時系列波形をフーリエ変換して1次固有振動数を読みとる
減衰定数	スラブ上中央1点	スラブ上9点を均等配置	各受振点の振動速度時系列波形をフーリエ変換して1次固有振動数を含む共振部分を切り出し、逆フーリエ変換した時系列波形から減衰定数を最小二乗法で算出
駆動点インピーダンス	スラブ上梁端からスラブ中央に向かう法線上、中空合成床版では中空部上と東上で比較(図-5)	スラブ上加振点から5cm離れた位置	衝撃力Fと振動速度Vをそれぞれバンド処理した波形を全時間積分して得られた値の比F _i /V _i を算出・衝撃力Fと衝撃時間内の振動速度Vについてそれぞれ積分して得られた値の比F _i /V _i (衝撃インピーダンス)も同時に算出・スラブ中央の衝撃インピーダンスをそのスラブの基本インピーダンスとする
有効放射面積	スラブ上中央1点	スラブ上メッシュ状に各メッシュ面積を乗じて得られた分割した値をさらにスラブ全体について積分して、それをスラブ中央の振動速度の全時間積分値で除して算出	

2.4 実験方法

スラブを衝撃加振(衝撃周波数約120Hz)し、固有振動数、減衰定数、駆動点インピーダンス、有効放射面積の測定を行った。その測定系統図を図-5に、駆動点インピーダンスの加振点位置を中空合成床版の場合を例にとって図-6に示す。

床衝撃音レベルの測定は基本的にはJIS A 1418に準拠し、加振点はスラブ上5点、受音点は9点設けた。

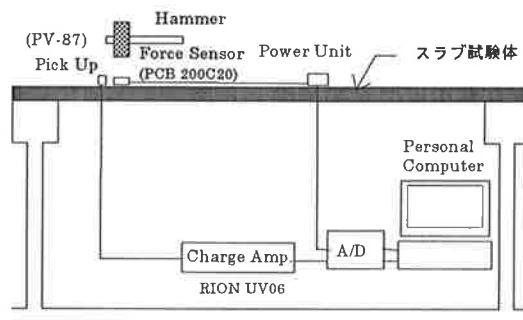


図-5 測定系統図

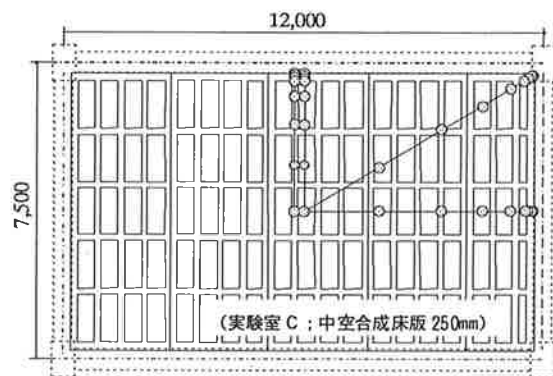


図-6 駆動点インピーダンスの加振点位置の例

2.5 実験施設の振動・音響特性

本実験室ではP C 鋼棒で梁に締め付けてスラブを固定しているため、締め付けトルクとスラブの振動特性や重量床衝撃音レベルとの関係を予備実験により検討した。

図-7～図-9にトルク値を変えた時の一次固有振動数、F 値(固有振動数の実測値と完全固定を境界条件とした計算値との比)、減衰定数の変化の様子を示す。トルク値の増加とともに、試験体の一次固有振動数は高くなるが、あるトルク以上になると変化が少なくなる傾向を示している。この傾向はF 値、減衰定数も同様である。

図-10にトルク値を変えた時の駆動点インピーダンスレベル周波数特性の変化の様子を示す(衝撃インピーダンスレベルを0dBとしている)。実験室Aではトルク値による変化が少ないが、実験室Cではトルク値により8Hz 帯域で5dB 程度の差異が見られる。

図-11にトルク値を変えた時の衝撃インピーダンスレベルの変化を(x/λ_0)の関数として示す(x はスラブ端からの距離、 λ_0 は衝撃周波数の曲げ波長)。この図に示すように、スラブ端部に近い測定点でトルク値によって2dB 程度の違いが見られる。

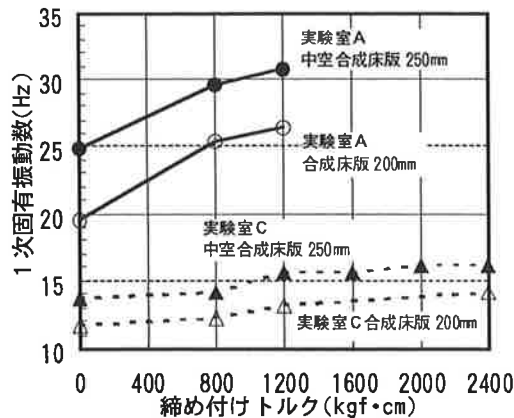


図-7 トルク値と1次固有振動数の関係

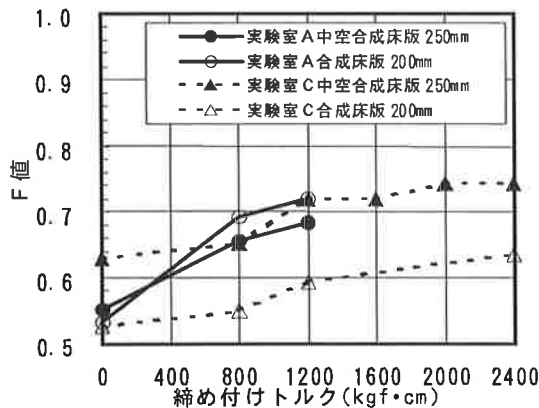


図-8 トルク値とF値の関係

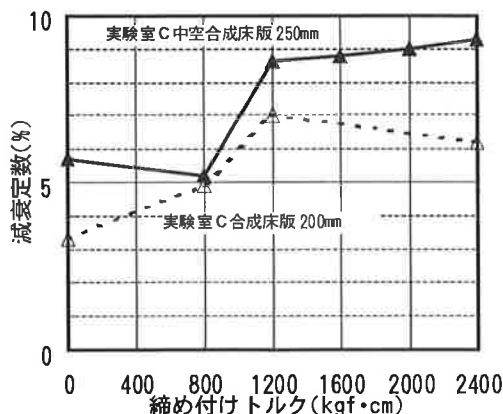


図-9 トルク値と減衰定数の関係

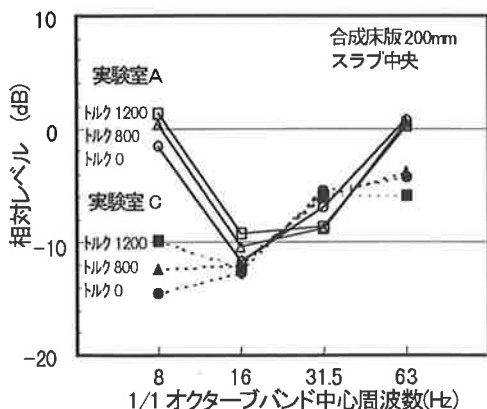


図-10 トルク値と駆動点インピーダンスレベル周波数特性

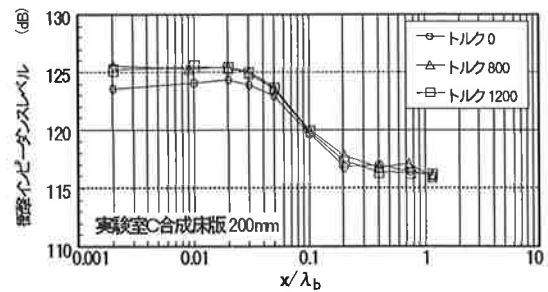


図-11 トルク値と衝撃インピーダンスレベル

図-12 に重量衝撃の場合について、トルク値 0 の床衝撃音の各バンドレベルを 0dB としトルク値を変えた時の周波数特性の変化を示す。この図に示されたように実験室AとCではほぼ同様な傾向を示している。トルク値を変えても 63Hz～250Hz 帯域ではあまり変化が見られず、500Hz 以上の帯域については最大 3dB 程度変化している。

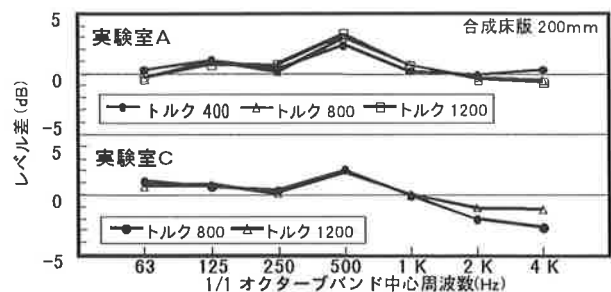


図-12 トルク値と重量床衝撃音レベル周波数特性

以上の結果から、本実験室ではスラブの締め付けトルクがある程度以上になると振動特性、重量床衝撃音レベルともに変化が小さくなることが示された。

本実験室で振動実験を行うためには、実物件の振動特性を再現できるようにトルク値を決定する必要があるが、その管理特性には別途行った合成床版や中空合成床版の実物件における振動測定で比較的安定した値が得られたF値(0.65～0.75程度)を用いることにした。今回実験したスラブ試験体(表-1)の場合、実験室Cの合成床版200mmでは1200 kgf·cm、その他のスラブでは800 kgf·cmをトルク値として採用している。

3. 実験施設の妥当性

実験施設の妥当性を検証するために、250mm厚の中空合成床版について実験室Cと実物件で平面寸法が似た例の振動・床衝撃音特性の比較を行った。以後、実験室での測定結果を実験値、実物件での測定結果を実測値として両者の対応を示す。

スラブ中央の駆動点インピーダンスレベル(全時間応答)の測定結果を図-13に示すが、実験を行った試験体の1次固有振動数は15Hzで、オクターブバンドでは16Hzの帯域にのみ1次固有振動の影響が現われている。これに対し、実物件で測定したスラブは短辺寸法が試験体より

やや短いために1次固有振動数が22Hzとなり、16Hzと31.5Hzの2つのバンドにこの影響が現れている。ただし、重量床衝撃音レベルの評価周波数帯域である63Hz以上の帯域については両者はほぼ一致している。

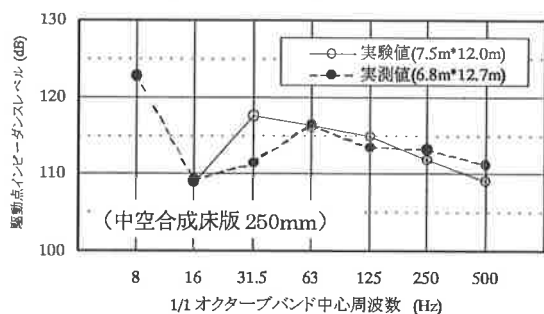


図-13 駆動点インピーダンスレベル
周波数特性の比較（スラブ中央）

次に、衝撃インピーダンスレベルの測定結果を図-14に、1/1オクターブバンド中心周波数の曲げ波長 $\lambda_{b,f}$ で x を基準化し駆動点インピーダンスのバンドレベル $L_{z,f}$ との対応を調べたものを16Hz、63Hz帯域についてそれぞれ図-15、図-16に示すが、どの項目についても実験値と実測値はほぼ一致している。

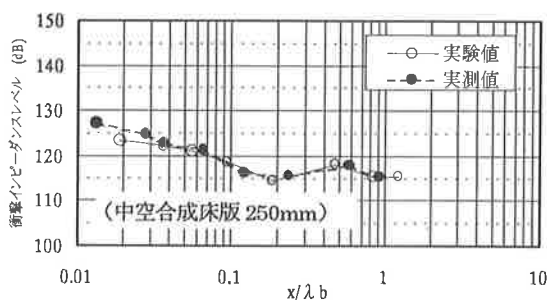


図-14 衝撃インピーダンスレベルの比較

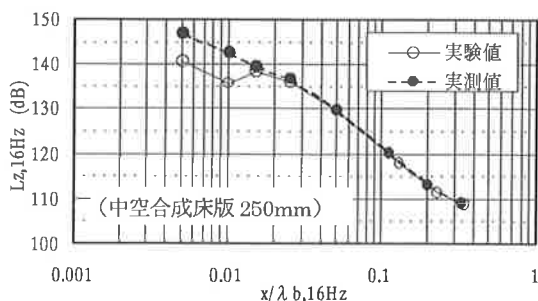


図-15 駆動点インピーダンスレベル(16Hz帯域)の比較

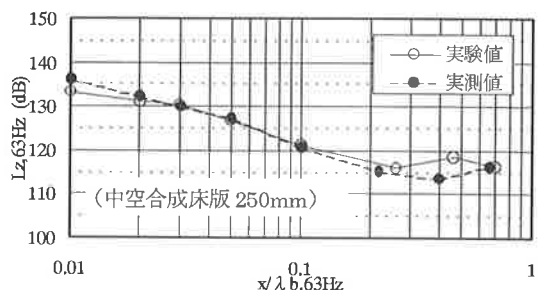


図-16 駆動点インピーダンスレベル(63Hz帯域)の比較

床衝撃音レベルについては、250mm厚の中空合成床版に加えて200mm厚の合成床版についても実験室Cと実物件の比較を行った。それらを図-17、図-18に示すが実験値と実測値は概ね一致している。なお、図-17の実測値が1KHz帯域で500Hz帯域より大きくなっているのは中空部の共振であり、加振点と中空部との位置関係により共振の程度は異なる。

以上、実験施設と実物件ではほぼ同様の振動・床衝撃音特性が得られ、実験施設の妥当性が示された。

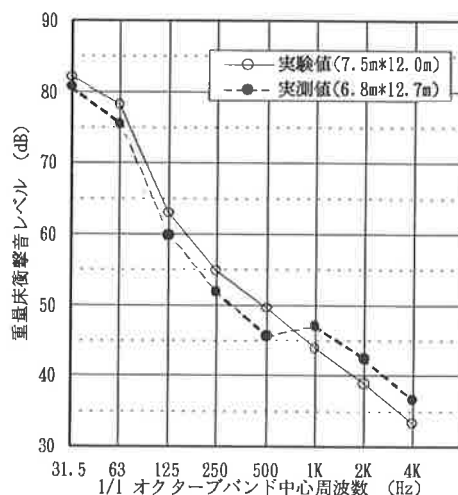


図-17 重量床衝撃音レベルの比較
(中空合成床版 250mm)

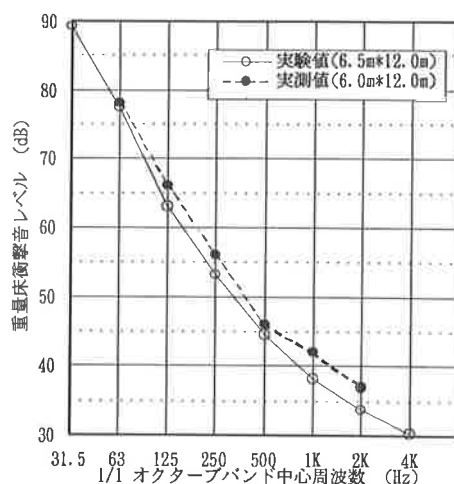


図-18 重量床衝撃音レベルの比較
(合成床版 200mm)

4. 実験結果

前章で実験施設の妥当性が示されたので、これ以降は表-1に示したスラブ試験体の振動実験結果とインピーダンス法との相違点について、実測値を交えながら検証する。なお、実験値には実験室A、Cの振動実験結果を、実測値にはラーメン構造または壁式ラーメン構造の中空合成床版、合成床版、アンボンドスラブ、RC在来スラブの振動測定結果を用いている。

4.1 基本インピーダンスレベル

基本インピーダンスレベル L_z は無限版を想定したときのインピーダンスレベルに相当し、従来のインピーダンス法ではスラブの密度 ρ (kg/m³)、ヤング係数 E (N/m²)、厚さ h (m)を用いて〔1〕式により算出している。実験的にはスラブ中央（中空合成床版の場合は中空部を避ける）の衝撃インピーダンスレベルを用いた（表-2 参照）。

$$L_z = 20 \log(2.31 \rho^{1/2} E^{1/2} h^2) \quad (\text{dB}) \quad [1]$$

中空合成床版（段差がないもの）の基本インピーダンスレベルは〔1〕式との差が5dB以上生じるものがあったが、その差は実験値、実測値ともに図-19に示すようにスラブの厚さ h と短辺長 l の積 hl との間により相関がみられる。これは中空部が高くかつ短辺長が長くなると中空部間の束が梁として機能するためと思われる。ただし、段差がスラブの中央付近にある場合には、段差部分に拘束力があるためか同図の傾向はみられなかった。

中空部のないスラブについては実験値、実測値ともにインピーダンス法計算値と概ね一致した（図-20）。なお、図の横軸には hl を基準化（基準長は厚さ h_0 が0.2m、短辺長 l_0 が5m、ともにインピーダンス法の適用上限を想定した寸法）した値の対数を用いている。

4.2 衝撃インピーダンスレベル端部上昇量

スラブ端が大梁支持の中空合成床版の衝撃インピーダンスレベル端部上昇量について、実験値とその3次近似式を実測値、インピーダンス法の特性和ともに図-21に示す。実験値はインピーダンス法に比べて端部上昇量が小さくなっており、実測値も同様の傾向がみられる。ただし、同じ x/λ_b に対するばらつきは5dB程度生じている。

次にスラブ端が大梁支持、小梁支持の合成床版の衝撃インピーダンスレベル端部上昇量について、実験値とその3次近似式をインピーダンス法の特性和ともに図-22に示す。合成床版は中空合成床版の端部上昇量の最小値と似た特性を示しており、スラブ端が大梁支持か小梁支持による差は特にみられない。試験体の厚さがすべて同じためか、同じ x/λ_b に対するばらつきは中空合成床版に比べて小さい。

今回実験したスラブ試験体の曲げ剛性はインピーダンス法の適用範囲である厚さ150mm程度のスラブに比べて高くなっているため、中空部の有無に関わらず衝撃インピーダンスレベル端部上昇量が小さくなっていると考えられる。ただし、中空合成床版ではスラブの厚さや短辺長による基本インピーダンスレベルの違い、加振点中空部上か束上かの違い、実物件の場合にはさらに梁下の壁の開口率なども影響して衝撃インピーダンスレベル端部上昇量にばらつきが生じやすくなると思われる。

なお、今回の実験では、同じスラブの短辺方向と長辺方向で衝撃インピーダンスレベル端部上昇量に顕著な差は生じなかった。

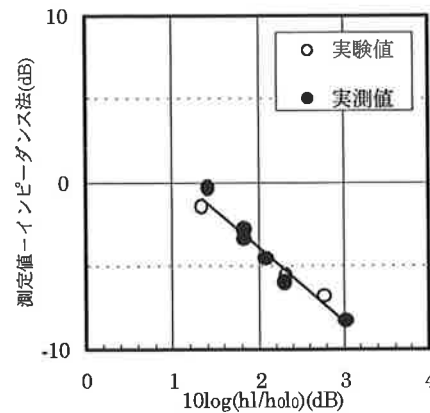


図-19 基本インピーダンスレベル実験値とインピーダンス法との差(中空合成床版)

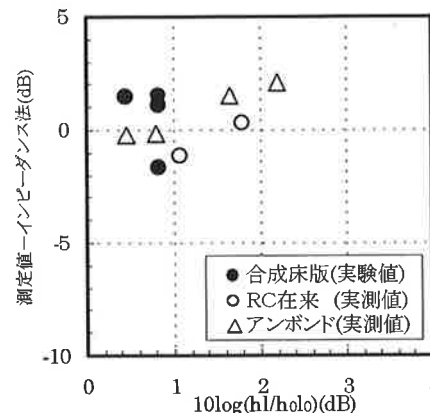


図-20 基本インピーダンスレベル実験値とインピーダンス法との差(中空部なし)

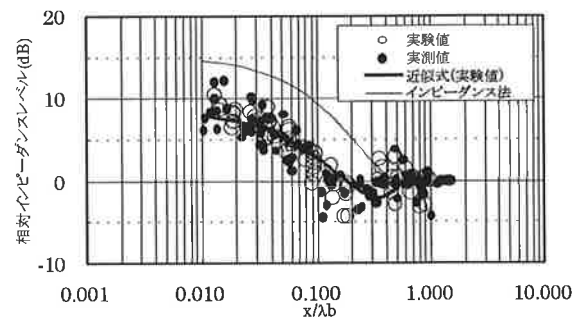


図-21 衝撃インピーダンスレベルの比較(中空合成床版)

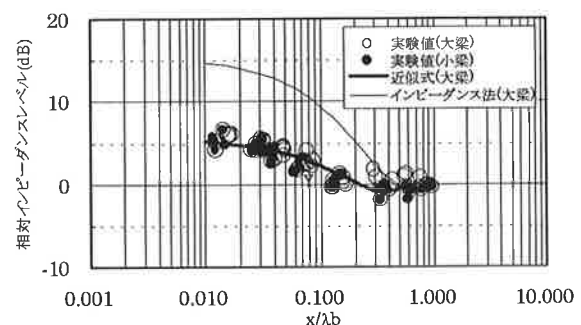


図-22 衝撃インピーダンスレベルの比較(合成床版)

4.3 駆動点インピーダンスレベル周波数特性

中空合成床版で小梁や段差がないスラブの中央を加振したときの駆動点インピーダンスについて、実験値を実測値、インピーダンス法の特長とともに衝撃インピーダンスとのレベル差（相対インピーダンスレベル）として図-23に示す。重量床衝撃音レベルの評価上重要な63Hz帯域で実験値の平均はインピーダンス法に比べて10dB程度大きい。周波数特性については実験値はインピーダンス法と異なり右下がりの傾向にある。これは中空部の共振などの影響によるものと思われる。実測値もほぼ同様の傾向がみられる。

次に中空合成床版で小梁や段差があるスラブについて同様の比較を行った結果を図-24に示す。ここで、小梁があるスラブでは小梁と大梁で囲まれた範囲の中央を加振している。実験値は段差スラブの結果のみであるが、63Hz以上の帯域でほぼ平坦な周波数特性を示している。実測値は段差スラブと小梁があるスラブを含めた結果であるが、実験値と概ね似た特性を示している。

次にスパン長およびスラブ厚さが同じで小梁の有無のみが異なる合成床版について同様の比較を行った結果（実験値のみ）を図-25に示す。両者の差は63Hz帯域にみられ、小梁がある方が3dB程度大きく、ほぼ平坦な周波数特性を示している。

今回実験した範囲では小梁や段差があると63Hz帯域以上で周波数特性が平坦になる傾向がみられたが、特に低次の固有振動の場合には帯域幅が狭く10Hz程度の振動数の変化でバンドレベルが5dB程度変化することもあるため、さらに検討が必要と思われる。また、中空合成床版では加振点位置によって中空部の共振の影響度が異なる可能性もあり、さらにデータを蓄積する必要がある。

4.4 有効放射面積

インピーダンス法では衝撃加振に対してあえて拡散曲げ振動場を仮定することにより、有効放射面積をスラブ端から $\lambda_{0,t}/4$ ずつ離れた範囲で仮定している。

同じスラブ厚さでスラブ面積が異なる合成床版の実験値をインピーダンス法計算値とのレベル差で図-26に示す。スラブ面積が大きくなるほど両者の差は大きくなるが、その差は周波数が高くなるほど小さくなる傾向にある。これは周波数が低くなるほど拡散曲げ振動場が形成されにくくなるためと考えられる。

図-26から有効放射面積はスラブ面積と周波数の関数である程度説明できることが示唆されたのでスラブ短辺、長辺との対応性を調べたところ、両者を含んだパラメータである1次固有振動数との間により相関がみられた。ここでは縦軸にスラブ端からの除外距離に関する実験値とインピーダンス法計算値との比を用いて各帯域ごとの近似直線とともに図-27に示す。インピーダンス法の除外距離は周波数の平方根に反比例し63Hzと500Hzでは約3倍異なるため、図-26では把握しにくかった250、500Hz帯域の周波数特性も図-27ではよく現れている。

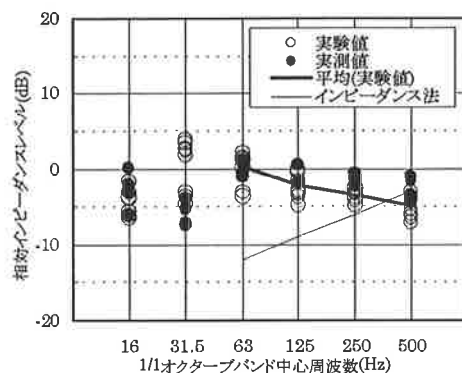


図-23 駆動点インピーダンスレベル周波数特性
(中空合成床版、小梁なし)

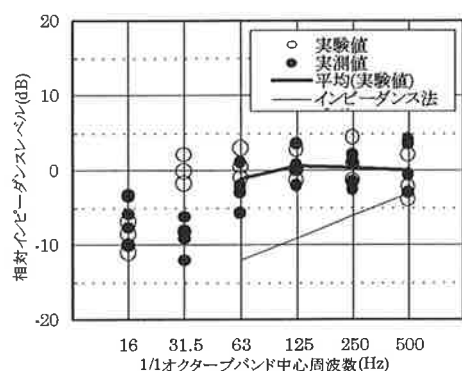


図-24 駆動点インピーダンスレベル周波数特性
(中空合成床版、小梁・段差あり)

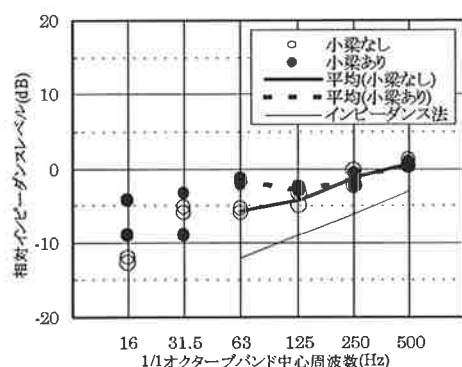


図-25 駆動点インピーダンスレベル周波数特性
(合成床版、小梁の有無による違い)

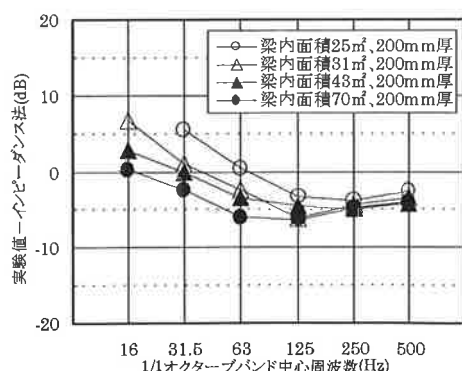


図-26 有効放射面積の実験値とインピーダンス法のレベル差（スラブ面積による違い）

5. まとめ

大型スラブの重量床衝撃音レベルを予測するために必要なインピーダンス法の構成パラメータの修正式を実大実験により得ることができた。その結果を整理して以下に示す。

5.1 基本インピーダンスレベル (L_z)

中空部のないスラブではインピーダンス法を踏襲。

$$L_z = 20 \log(2.31 \rho^{1/2} E^{1/2} h^2) \quad (\text{dB}) \quad [1]$$

中空合成床板は補正值 ΔL_{z_k} を加算。

$$\Delta L_{z_k} = -45 \log(hl) + 5.1 \quad (\text{dB}) \quad [2]$$

5.2 衝撃インピーダンスレベル端部上昇量 (ΔL_{z_i})

合成床板は〔3〕式，中空合成床板は〔4〕式を使用し，大梁支持と小梁支持の区別はしない。

$$\Delta L_{z_i} = -50(x/\lambda_b)^3 + 84(x/\lambda_b)^2 - 42x/\lambda_b + 5.6 \quad (\text{dB}) \quad [3]$$

$$\Delta L_{z_i} = -97(x/\lambda_b)^3 + 158(x/\lambda_b)^2 - 74x/\lambda_b + 8.7 \quad (\text{dB}) \quad [4]$$

5.3 駆動点インピーダンスレベル周波数特性 (ΔL_{z_f})

実験値を平均（一部実測値を考慮）した表-3 に示す値を用いる。

表-3 実験式に用いる ΔL_{z_f}

スラブの種類	小梁・段差の有無	1/1 オクターブバンド 中心周波数(Hz)			
		63	125	250	500
合成床版	なし	-5.8	-4.2	-1.2	0.7
	あり	-1.7	-2.8	-1.4	0.6
中空合成床版	なし	0.2	-2.3	-3.5	-4.9
	あり	-1.1	0.5	0.4	0.0

5.4 有効放射面積の除外距離比 ($l_{s_{eff,f}}$)

一次固有振動数 f_0 を用いて 63Hz から 500Hz 帯域の順に〔5〕～〔8〕式で求めた補正係数を乗じてインピーダンス法で算出したスラブ端からの除外距離を補正する。

$$l_{s_{eff,63\text{Hz}}} = -1.3 \ln(f_0) + 5.6 \quad [5]$$

$$l_{s_{eff,125\text{Hz}}} = -1.3 \ln(f_0) + 6.4 \quad [6]$$

$$l_{s_{eff,250\text{Hz}}} = -1.3 \ln(f_0) + 6.7 \quad [7]$$

$$l_{s_{eff,500\text{Hz}}} = -2.0 \ln(f_0) + 9.4 \quad [8]$$

以上の修正をインピーダンス法に加えることで，大型スラブの躯体段階の重量床衝撃音レベル予測精度は ± 5 dB 程度となり(図-28)，従来法より 1～2 ランク予測精度を向上させることができるようになった。今後は床仕上げの影響について検討していく予定である。

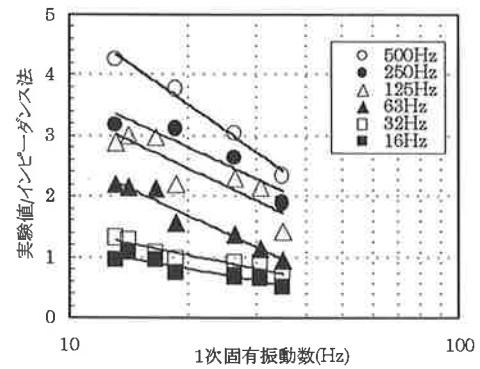


図-27 有効放射面積の実験値とインピーダンス法の除外距離比（周波数帯域による違い）

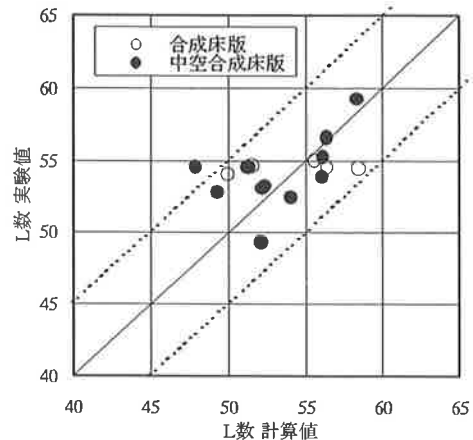


図-28 重量床衝撃音レベルのL数比較（測定値と修正式による計算値）

参考文献

- 1) 日本建築学会編：建物の遮音設計資料，技報堂出版，pp.120-pp.140，1988
- 2) 木村，井上，新井：床衝撃時における床スラブインピーダンスレベル予測手法に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，第363号，pp.1-pp.8，1986
- 3) 木村，井上，中澤：インピーダンス法による床衝撃音レベル予測手法検証のための実験的研究，日本建築学会計画系論文報告集，第407号，pp.1-pp.9，1990
- 4) 大脇，高倉，財満，宮崎，山下：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報告集，第511号，pp.23-pp.29，1998
- 5) 田野，古賀：各種大型スラブにおける床衝撃音予測法，鹿島技術研究所年報，第44号，pp.245-pp.250，1996
- 6) 濱野，松野，菅，藤橋：大型スラブの床衝撃音に関する実験的検討 その1 試作実験施設の概要と基本特性，日本建築学会大会学術講演論文集，1998
- 7) 菅，藤橋，濱野，松野：大型スラブの床衝撃音に関する実験的検討 その2 床振動特性と床衝撃音に関する実測結果との比較，日本建築学会大会学術講演論文集，1998