

各種大型スラブにおける床衝撃音予測法

—第三報：断面形状の検討とFEM解析による詳細検討—

Prediction of Heavy-weight Floor Impact Sound on the Various Large-Span Slabs — Part III: Study on Void Slabs Including FEM Analysis —

古賀 貴士
山本 隆広
田野 正典¹⁾

要 約

筆者らは、大型スラブを採用した集合住宅における重量床衝撃音遮断性能の予測手法について検討してきている。本論文では、これまでに示してきた実務的な予測手法が、ボイドスラブにおいても若干の修正を施すことによって適用できることを示す。同時に、詳細な検討方法として、音響領域におけるスラブの振動に関する有限要素法解析結果から、モード合成法により求めたスラブ面上のインピーダンスから重量床衝撃音を予測する手法について検討した結果を示す。また、この詳細計算手法は、従来の1住戸1スラブといった従来型の大型スラブに限らず、さらに大きなスラブ面積を持つ場合にも有効であることを示す。

目 次

- I. はじめに
- II. ボイドスラブにおける実務的予測手法
- III. モード合成法を用いた予測手法の検討
- IV. まとめ

I. はじめに

実務的な重量床衝撃音の予測手法としては、25m²程度のスラブを対象として提案された文献1)の方法が広く用いられている。この方法を1住戸1スラブとなるような大型スラブに適用すると誤差が大きくなる。筆者らは、これまで、大型スラブの重量床衝撃音遮断性能の実務的な予測方法を確立するために、各種大型スラブ工法を採用した集合住宅現場において実測を行い、その傾向を把握するとともに、これらの結果から、文献1)の方法を修正し、大型スラブにおける実務的な予測計算手法を示した²⁾。ただし、前報における計算方法の検討に際しては、スラブ自体が均質な一枚もの(在来工法のほか、アンボン、ハーフPC工法など)のみを対象としたものであった。

今後、住宅の性能表示制度や、それに伴う設計の多様化から、ボイドスラブの場合についても、同様な手法による床衝撃音の予測が重要となってくると思われる。本論文では、ボイドスラブについて、断面形状による性質を考慮して予測法を作成し、予測値と実測値を比較することにより、精度の確認を行うことを第一の目的とする。

さらに、文献1)、2)に示した方法は、いずれも実測値の統計的な結果から工学的な判断に基づいて導出された計算手法であり、既存の類似事例のない新しい工法などについては、そのままでは適用が難しい場合が考えられる。近年では、構造技術の進歩から、1住戸1スラブを超える計画などもある。そこで、従来の予測計算手法では対応できない構造形態や、前報までに示した予測手法よりさらに詳細な検討を要する場合を想定し、有限要素法によるスラブの固有振動解析結果か

ら、モード合成法により住戸内のスラブのインピーダンスを求め、これを前報までに述べた予測手法に代入する手法について検討した。

II. ボイドスラブにおける実務的予測手法

1. 目 的

ボイドスラブを採用した集合住宅における測定結果から、前報までに示した大型スラブにおける実務的予測手法をボイドスラブに適用する方法について検討する。

2. 測定概要

重量床衝撃音測定結果として、7物件、計30個を対象として検討した。また、駆動点インピーダンスの測定結果については、1物件における4床についてそれぞれ、スラブの短辺、長辺方向のボイド部部分とリブ部分の測定データ、計16個のデータを用いて検討を行った。

駆動点インピーダンスの測定ポイントの概要をFig. 1に示す。梁の拘束による衝撃インピーダンスの端部上昇量を把握するため、測定ポイントを測線上に6点(スラブ端部からの距離 x とハンマーの加振周波数(250 Hz)の曲げ波長 λ_B の比が0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0となる点)設けている。

3. 測定結果と考察

(1) ボイド上とリブ上の駆動点インピーダンス

Fig. 3は、測線1~4の x/λ_B の値が1.0の点(すなわち端部の拘束による影響をあまり受けないスラブの中央部分)の駆動点インピーダンスレベルを示している。この駆動点インピーダンスの値から共振の影響を除いたものが、このスラブの無限大板を仮定した時の基本インピーダンスの値と考えられる。Fig. 3に示す通り、重量床衝撃音のレベルが決定される63 Hz付近において、スラブの短長辺方向とも、ボイド上とリブ上との間には駆動点インピーダンスの値に大きな違いがないことがわかる。ただし、500 Hzより高い振動数帯域においては、インピーダンスの落ち込みがあり、軽量床衝撃音の予測には考慮する

1) 建築技術本部

キーワード：重量床衝撃音，大型スラブ，ボイドスラブ，有限要素法，インピーダンス

必要があると考えられる。

(2) 有効スラブ厚について

ボイドスラブの有効厚さの考え方としては、3通りの考え方ができる。まず、スラブとしての厚さ、これをここでは実体厚 (Fig. 2 の H) と定義する。次に、断面2次モーメントが等価となる厚さ、これを等価厚と定義する。さらに、単位面積当たりの重量が同じになるように換算した厚さ、これを実質厚と定義する。

これらの厚さから、それぞれ(1)式により無限大板を仮定した基本インピーダンスを求め、駆動点インピーダンスと比較した。

$$Z_b = \frac{4}{\sqrt{3}} \sqrt{\rho \cdot E \cdot h^4} = 2.31 \cdot \rho^{1/2} \cdot E^{1/2} \cdot h^2 \quad (1)$$

ここで、

ρ : 床スラブの等価密度

E : 床スラブのヤング係数

h : 床スラブの厚さ

ボイドスラブにおいても重量床衝撃音の決定周波数は63 Hz帯域とすることが多い。また、Fig. 3の結果では、鋭い反共振の影響がみられないことから、63 Hz帯域前後の三つの無限大板のインピーダンスの理論値を比較した。スラブの厚さが実質厚として計算した場合、誤差が大きすぎ、実体厚とした場合と、等価厚とした場合は、あまり差のないことが分かる。従って、ここでは、当該周波数帯域近辺でのインピーダンスレベルがほぼ等しくなる等価厚を無限大板のインピーダンスとして採用することとした。

(3) スラブ周辺拘束による端部上昇量

Fig. 4は、横軸に梁から加振点までの距離 x とハンマーの加振周波数(250 Hz)の曲げ波長 λ_B の比をとり、縦軸には測定位置における駆動点インピーダンスレベルと、等価厚と仮定した時の無限大板の基本インピーダンスレベルとの差を示したものである。これより、測線ごとの差は明確ではなく、むしろ各周波数帯域ごとに端部の拘束による傾向が異なっていることが伺える。そこで、各周波数帯域ごとの結果について、全測線における結果の算術平均値を求めプロットしたものがFig. 5(a)である。これに対し、Fig. 5(b)は、横軸に梁から加振点までの距離 x と各オクターブバンド中心周波数の曲げ波長 $\lambda_B(f)$ の比をとったもので、梁の端部拘束効果について周波数依存性を考慮した場合のインピーダンスの上昇量を示している。

また、Fig. 5に示した曲線は文献1)の大梁支持の場合、小梁支持の場合、文献2)による場合の計算値を示している。周波数依存性を考慮した場合の結果のほうが、端部の拘束によるインピーダンス上昇の傾向は各周波数について一致している。また、Fig. 6においては、大梁の計算値よりも、125 Hzまでの低い振動数では、梁からの距離 x/λ_B が0.1より小さい時には安全側となっているが、実測の加振点に近い。 x/λ_B が0.1~0.5の間では、文献2)に示した計算法による値に近い。

(4) 共振に伴うインピーダンス低下量

実際のスラブは有限であるため、それぞれ固有振動数を持つ。そのため、1次固有振動帯域および高次の固有振動帯域で、振動応答量が増幅し、インピーダンスの低下を起す。このインピーダンスの低下の補正量として、今回採用したものをTable 1に示す。ただし、連続性を考慮し、スラブの固有振動数に応じ、直線補間により求めるものとした。固有振動数が38 Hzの床における駆動点インピーダンスの実

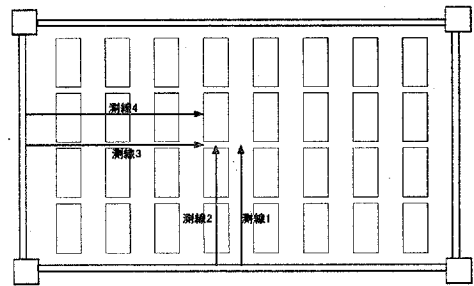


Fig. 1 Plan of Specimen: Measurement Line and Voids.

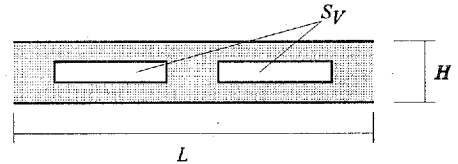


Fig. 2 Section of Void Slab.

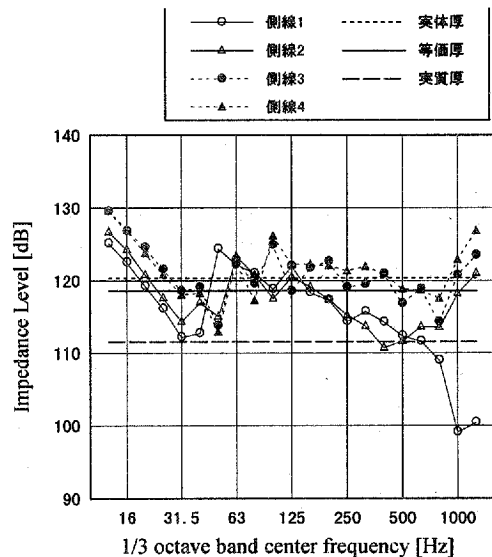


Fig. 3 Impedance Level versus Frequency, Measured at Center Portion of the Slab Compared to Three Kinds of Basical Impedance Level.

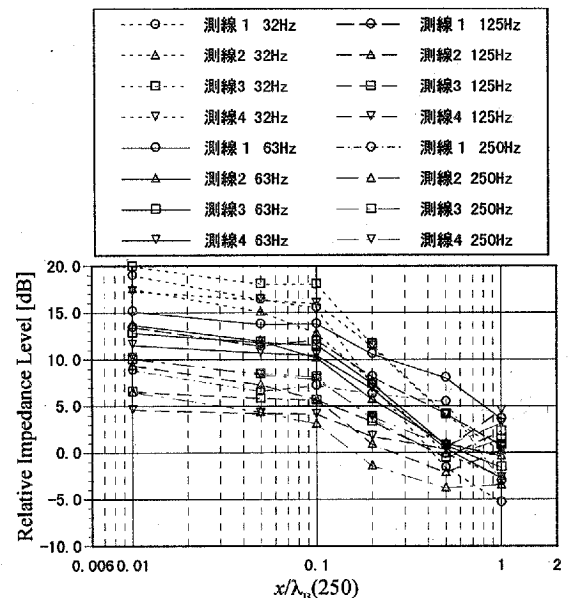
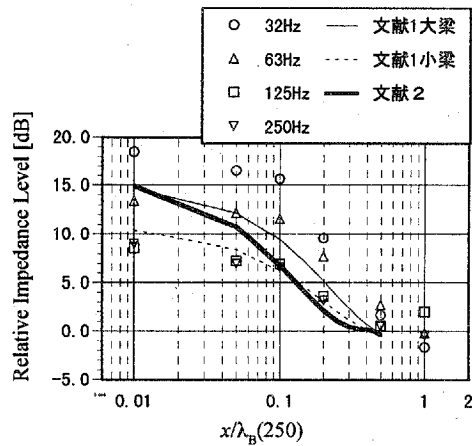
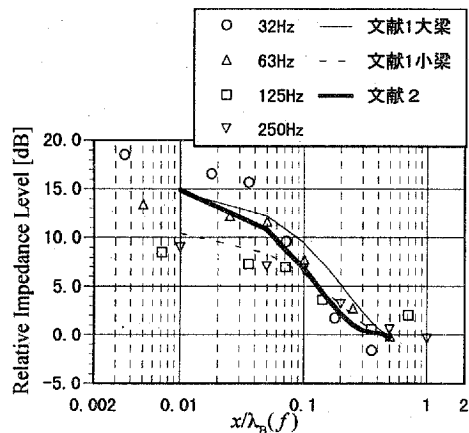


Fig. 4 Increment of Impedance Level versus Distance from Beams; referred to the calculated impedance level from the geometrical moment of inertia.



(a) generalized distance by wavelength of impact frequency (250 Hz).



(b) generalized distance by wavelength of each octave band center frequency.

Fig. 5 Comparison of the Generalized Distance versus the Average of Impedance Level Increment of all Measurement Lines for Each Octave Band.

Table 1 Proposed Impedance Level Decrements due to Resonance
repond to Eigen Frequency²⁾.

一次固有振動数	8 Hz 16 Hz 32 Hz 63 Hz	オクターブバンド中心周波数				
		31.5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
	8 Hz	-3	-1.5	0	0	0
	16 Hz	-6	-3	-1.5	0	0
	32 Hz	-9	-6	-3	-1.5	0
	63 Hz	0	-9	-6	-3	-1.5

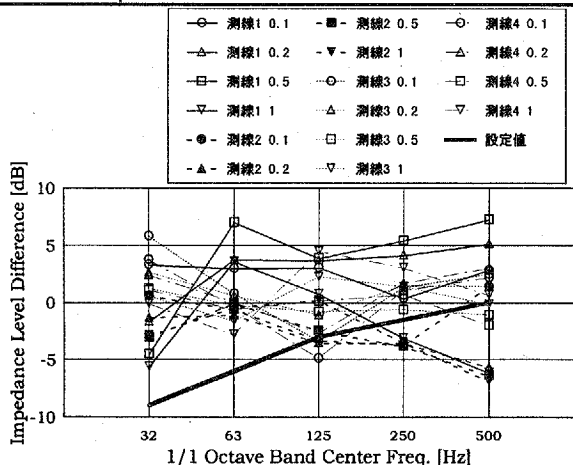


Fig. 6 Relative Impedance Level Decrement caused by Resonance: calculated from each measured values eliminating the increment due to fixing beams.

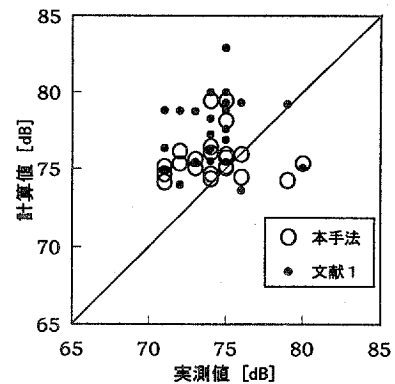


Fig. 7 Comparison between Results of Two Calculation Methods versus Measured Floor Impact Sound Pressure Level, 63 Hz.

測値から前述の周波数依存性を仮定した端部拘束による上昇量および無限大板のインピーダンスを引いたものと、Table 1による設定値の比較をFig. 6に示す。実測値と比較すると計算値の低下量がやや大きいものの、文献1)による場合よりも実測値に近いことが確認できた。ただし、特に測線2においては、500 Hz前後において実測値にインピーダンスの低下が見られる。これは、スラブ断面内の何らかの連成系により生じたものと考えられるが、今回の検討範囲である重量床衝撃音の予測においては問題ないものとする。

4. 実測値と計算値の比較

Fig. 7に実測値と計算値の比較を示す。文献1)の方法では、計算値が実測値に比べ、5 dB以上大きくなる場合がある。一方、今回示した方法では、計算値が実測値に対して±5 dBに納まっており、予測精度が改善されていることが確認できた。

Ⅲ. モード合成法を用いた予測手法の検討

1. 目的

前章までに述べた予測手法は、計算が簡略であることから、実務的な観点からは非常に有用である。しかし、スラブ面積が1住戸以上にわたる場合や、矩形平面とならない場合についての予測手法としては、十分でない。そこで、有限要素法による数値解析結果から、スラブのインピーダンスを算出し、その結果を文献2)の手法に代入する方法について検討する。検討対象としては、従来の1住戸1スラブとなるものだけでなく、チューブコア形式による集合住宅現場における検討結果についても示す。

2. 理論

有限要素法による固有値解析から、スラブ内の伝達インピーダンスは、以下に述べる方法によって与えられる。

固有値解析によって得られた固有値のうち、対象とする周波数範囲の n 個の固有値に対するモード行列を $[\phi]$ とする。すなわち、

$$[\phi] = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\} \quad (2)$$

とおく。固有モードの直交性から、 r 次のモードについては

$$\omega_r^2 \{\phi_r\}^T [\mathbf{M}] \{\phi_r\} = \{\phi_r\}^T [\mathbf{K}] \{\phi_r\} \quad (3)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} \{\phi_r\}^T [\mathbf{M}] \{\phi_r\} &= m_r \\ \{\phi_r\}^T [\mathbf{K}] \{\phi_r\} &= k_r \end{aligned} \quad (4)$$

とおくと、伝達モビリティ $H_i(\omega)$ は以下の式より与えられる。

$$H_i(\omega) = \sum_{r=1}^n \frac{j\phi_r^2 \beta_r \omega / k_r}{1 - \beta_r^2 + 2j\zeta_r \beta_r} \quad (5)$$

ここで、 $\beta_r = \omega / \omega_r$ 、 ζ_r : r 次の減衰比、

ϕ_r : 加振点 j における r 次の固有ベクトル

なお、伝達インピーダンスは、その定義から $H_i(\omega)$ の逆数として与えられる。

3. 境界条件の検討

(1) 減衰比

施工中の集合住宅現場において、躯体のみが完了した段階において、対称性を考慮してスラブ全体の1/4を対象として実験的モード解析を行った。各現場において求められた固有振動数とモードダンピングの値をFig. 8に示す。減衰比は概ね0.01~0.04程度となっており、過去の大規模床板における解析例とほぼ同様の傾向となっている。対象住戸の位置に着目し、(a)隣接する住戸が存在する住戸と(b)妻部の住戸とを区別して示している。これらを比較すると、妻部の住戸の方が若干減衰比が小さい傾向にあると見ることもできるが、各データのばらつきも大きいことから、これらのデータだけでは明確な違いがあるとは言えない。また、(c)は、30 m²前後のスラブにおける測定結果を示しているが、大型スラブ構法における減衰比との間には明確な差は認められなかった。なお、構法ごとの差は認められなかった。

以上の結果から、数値解析において用いる減衰比としては、0.02前後(損失係数としては0.04前後)を採用するのが妥当である。

(2) 支持条件

板の振動性状を解析する上で、支持条件の設定は非常に重要な要素である。支持条件の設定方法については、これまでも多くの報告がある。拘束条件は、固有振動数だけでなく、モードシェイプにも反映されるが、ここでは、ひとまず、Fig. 9に示す大型スラブ集合住宅(スラブ厚180 mm、ハーフPC工法)のスラブ全体について、実験的モード解析を実施した結果と汎用のFEMプログラムによる固有値解析結果の比較を行った。

橋本らは、耐震壁となる戸境壁は固定、それよりも拘束の弱い間口方向はピン支持とするモデルを提案しているが、Table 2に示す今回の結果を見る限りでは、むしろ全周を固定支持とした方が実測値と一致している。

4. 計算結果と考察

(1) 大型スラブ住戸における計算例

Fig. 9のスラブ全体についての固有値解析結果から、モード合成法により、駆動点インピーダンスを算出した。ヤング率は設計基準強度から算出した動ヤング率 3.36×10^{10} N/m² を用いた。

四周固定支持としたときの固有値から求めた駆動点インピーダンスと実測値を比較してFig. 10に示す。対象とした点は、図中のスラブ全体の対角5点である。低次の共振・反共振はほぼ実測値と一致した傾向が得られているものの、周波数が高くなるにつれて、計算値が高くなる傾向が確認された。

Fig. 11は、LD室について同様に計算した結果を1/1オクターブバンドに変換し、実測値と比較したものである。全般的に125 Hz、250 Hz帯域については、実測値よりも低い値が算出されているものの、各点の大小関係について着目すると傾向はよく一致している。また、梁

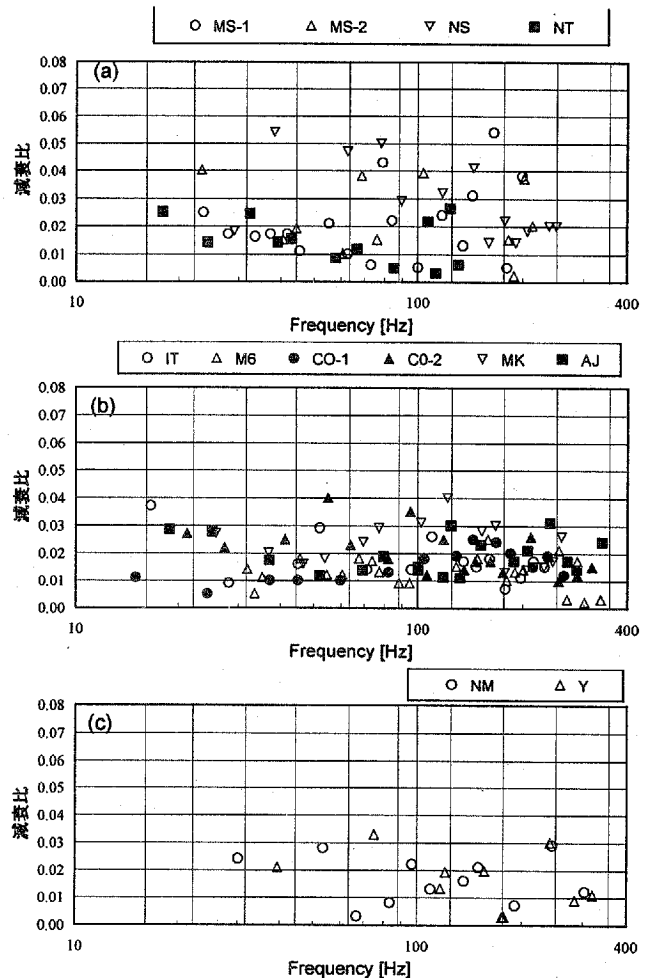


Fig. 8 Relationship between Natural Frequencies and Damping Factors obtained by Modal Analysis; measured at (a) mid unit residential area of Large Span Slab, (b) end of Large Span Slab, (c) usual small slab.

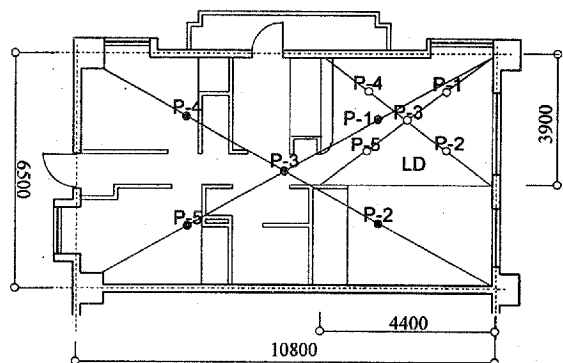


Fig. 9 Plan of a Unit Residential Area of the Flat using Large Span Slab.

Table 2 Comparison of Natural Frequencies.

	実測値	全周固定	長辺固定 短辺ピン
(1,1)	21.2	19.8	18.7
(1,2)	27.3	28.4	24.7
(1,3)	41.2	43.3	36.4
(2,1)	N/A	49.5	49.0
(2,2)	54.9	57.4	55.1
(1,4)	63.8	64.1	54.2
(1,5)		70.8	77.6
(2,3)		90.0	66.1
(2,4)		90.3	82.5

に近いP-1の計算結果は、低い周波数ほど梁の拘束の影響を過大にうける結果となっている。また、P3およびP5におけるこれらの結果と、文献1)および文献2)に示された実務的な計算手法における計算値と比較してFig.12に示す。文献2)の結果は、ほぼ実測値に近い傾向を示しているが、各点ごとのばらつきが小さい。また、参考のために文献1)による結果を示しているが、重量床衝撃音遮断性能を決定することの多い63 Hz帯域に着目すると、実測値および他の計算値と比べ差が大きいことが確認できる。

FEMによる駆動点インピーダンスの計算結果が特に実測値よりも小さくなった原因としては、スラブの周囲への逸散や摩擦による内部損失などが考慮されていないことや、実際には、周囲の拘束条件が実際には辺ごとに異なるために計算では一致する高次のモードが、複数に分かれ、見かけの損失が増えていることなどが考えられる。

これらの結果をもとに、文献2)に示

された方法により、各加振点ごとの重量床衝撃音レベルを求めた(ただし、文献1)による結果については、文献1)に示された方法とした)。結果をFig. 13に示すが、文献2)による方法の結果は、測定点間のばらつきは少ないものの実測値とほぼ一致している。一方、モード合成法による結果は、絶対値については十分な精度が得られていないものの、測定点間の相対的な差については実測値とほぼ一致している。特に、重量床衝撃音の性能を決定することの多い63 Hzについて着目すると、実測値と同様にスラブ中央に近いP3のほうがP5よりも床衝撃音レベルが大きくなる点で一致している。これは、床板の高次のモードによる影響によるものと考えられる。

今回の解析例によって、モード合成法による結果は、重量床衝撃音を決定することの多い63 Hz帯域の傾向について文献2)の方法では導くことのできない高次のモードの影響について検討することのできる見通しが得られた。

(2) チューブコア形式における計算例

いわゆる1住戸1スラブを超えた大型スラブの解析例として、Fig. 14に示すようなチューブコア形式による集合住宅の検討結果を示す。FEM解析における拘束条件は、柱部固定、他の周辺部については、梁を棒状要素として扱った上に、断面周囲の対象性を考慮し、スラブ面内の縁辺に垂直方向は回転拘束、他の二軸は変位拘束とした⁹⁾。

(a) 駆動点インピーダンス計算結果

Fig. 15に代表的な点の駆動点インピーダンスの計算値と実測値を比較して示す。固有振動数については、各条件ともほぼ一致した結果が得られている。しかし、Slab Dの妻部(D-1)では、実測値では、40～60 Hzにかけて、なだらかな反共振があるのに対し、計算値は高次のモードの影響を受けた結果となっている。また、Slab Dの内側(D-2)

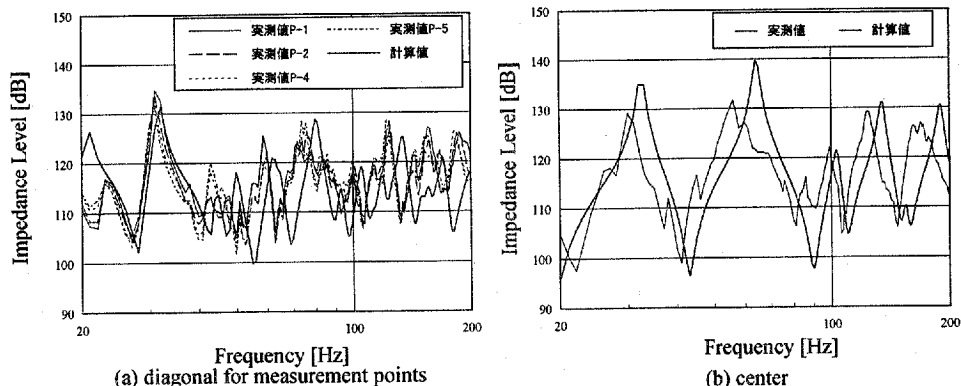


Fig. 10 Measured and Calculated Impedance Level versus Frequency; Entire Slab.

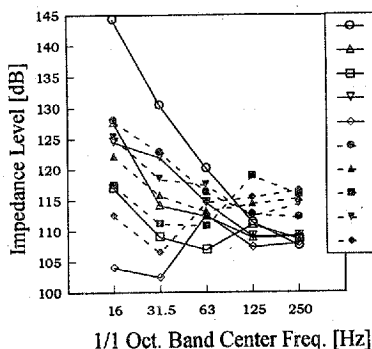


Fig. 11 Measured and Calculated Impedance Level; LD.

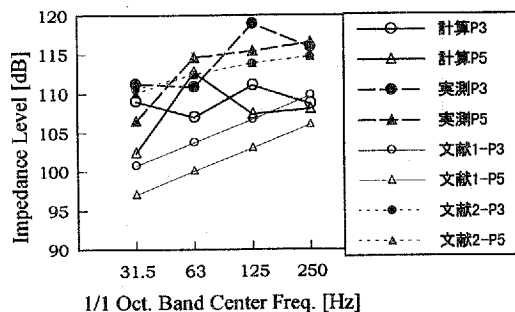


Fig. 12 Measured Impedance Level and Calculated Values by Experimental Methods and FEM; LD.

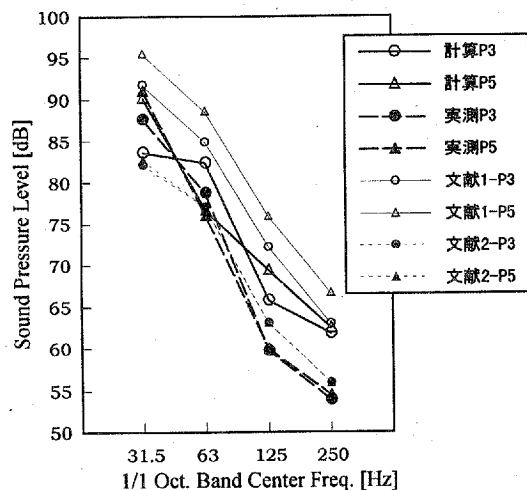


Fig. 13 Comparison of Measured Floor Impact Sound Pressure Level and Calculated Values by Experimental Methods and FEM; LD.

では、実測値では30 Hz前後にある低次の固有振動数の影響が少なく、40 Hz前後の固有振動数の影響が大きくなる結果となっているが、計算値では、低次のモードの影響が支配的である。また、D-1と同様、40～60 Hz前後に実測値にはないピーク/ディップが算出された。

(b) 重量床衝撃音レベル計算結果

Slab B,Dについて、隣接する柱で囲まれた領域の重量床衝撃音レベルとして、FEMによるインピーダンスの計算値を文献2)に示した式に代入し算出した。なお、スラブ形状の影響を比較するために、同一断面の無限大板の駆動点インピーダンスをもとに同様に算出した値との差を示している。Fig. 16(a)は各加振点の駆動点インピーダンスを基に算出したもの、Fig. 16(b)は各加振点から対象範囲の全節点に対

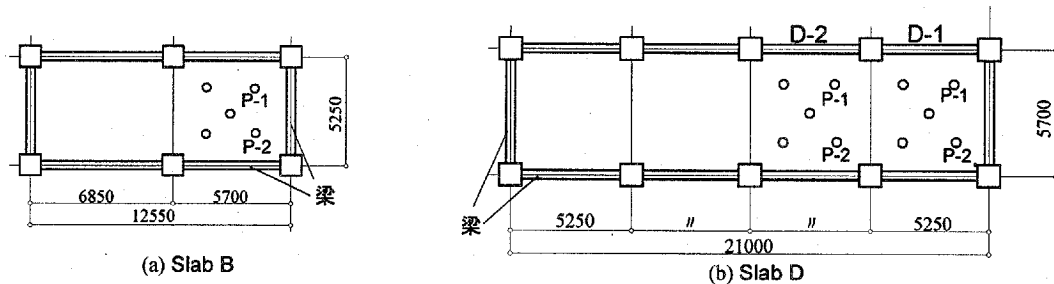


Fig.14 Plan of Tube-cored Structure.

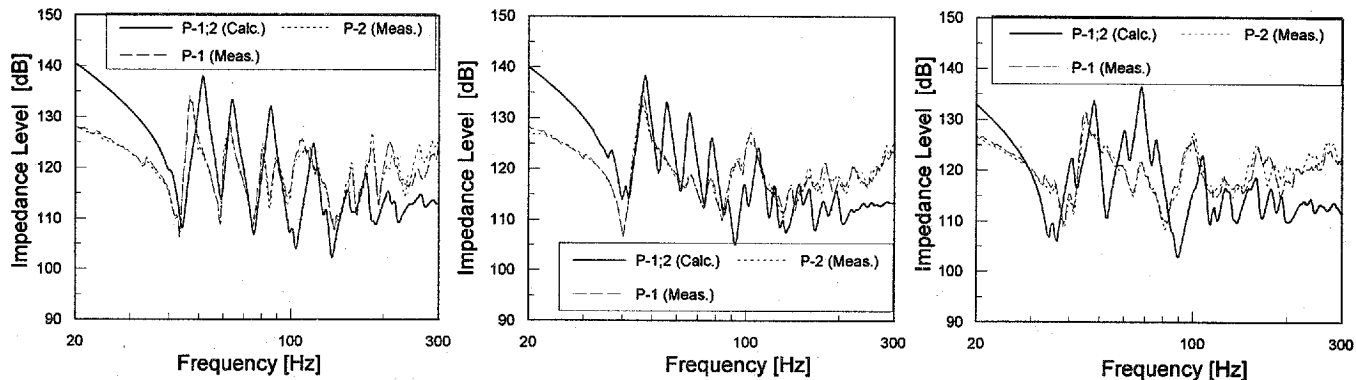


Fig. 15 Comparison between Measured and Calculated Impedance Levels; left: Slab B, center: end portion of Slab D, right: mid portion of Slab D

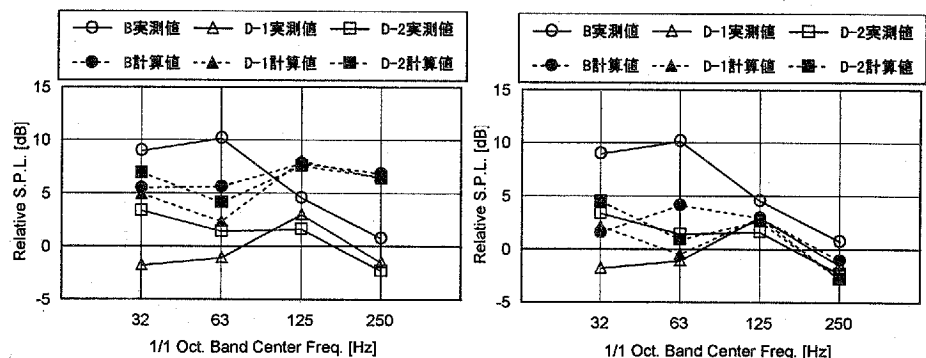
する伝達インピーダンスのエネルギー平均値を基に算出した結果である。63 Hz 帯の結果について比較すると、Slab Dについては後者の結果がよく一致している。Slab Bの結果についても6 dBの誤差はあるものの、Slab Dの二つの結果に比べて大きくなる傾向は、後者の方がよく表している。また、125 Hz、250 Hzの結果について比較すると、後者は±2 dBの誤差に収まっている。

比較的面積の大きいチューブコア形式の重量床衝撃音遮断性能の予測においては、モード合成法によって求めた伝達インピーダンスの平均値を代入する方法が駆動点インピーダンスを代入した場合よりも実測の傾向をよく表すことを示した。しかし、文献2)に示した方法は、駆動点インピーダンスを代表値として重量床衝撃音レベルを算出する手法であり、論理的な矛盾を抱えていることも否めない。

IV. まとめ

文献2)で示した手法について、断面がボイドの床スラブの場合においては、スラブ厚さを断面2次モーメントが等価となるような厚さ、スラブの密度を重量が等価となる等価密度を採用することで、大型スラブに適用できることが確認できた。

また、FEMによる振動性状の計算結果から、重量床衝撃音遮断性能の予測を行い、実測値と比較した。1住戸1スラブ程度の場合には、63 Hz帯域に着目した場合、モード合成法によって求めた駆動点インピーダンスを文献2)に示された式に代入することで、実測値に近い重量床衝撃音遮断性能の傾向が示されることが確認できた。また、1住戸1スラブ程度を超える大型スラブ場合、駆動点インピーダ



(a) calculated from driving point impedance

(b) calculated from average of transfer impedance

Fig. 16 Calculated Floor Impact Sound Pressure Level: referred to the value at the slab that area is infinite.

ンスよりも伝達インピーダンスの平均値を代入した方が傾向をよく示すことが分かった。今後は、下室の音場の性状も含めた形での解析方法について検討する。

参考文献

- 1) 建物の遮音設計指針, 日本建築学会編.
- 2) 古賀, 田野; 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, 1999. 6.
- 3) 安藤, 麦倉; 固体音まで考慮した各種の床構造におけるモビリティ予測手法・鉄筋コンクリート構造床について, 日本建築学会計画系論文集, 第 391 号, 1988. 9.
- 4) 橋本, 西川; 佐藤, 桂: パソコンを用いた数値計算法による重量床衝撃音予測計算, 建築音響研究会資料 1998. 12.
- 5) 古賀, 田野, 安藤; 重量床衝撃音予測のための床板のFEM解析における境界条件の検討, 建築音響研究会資料 1998. 12.
- 6) 井上, 木村, 豊田; ボイドスラブを対象とした重量床衝撃音レベルの計算法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 1998. 9.