

建築技術者のための 床衝撃音計算法講座

— 拡散度法とインピーダンス法、
どちらを使うべきか徹底比較検証！ —



代表・工博 橋本典久
(八戸工業大学名誉教授)

騒音問題総合研究所

はじめに

建築技術者から「音の問題は難しい！」という話をよく聞きます。確かに、デシベルの定義など何度聞いてもよく分からないかも知れません。そんな音の分野の中でも特に難しいのが床衝撃音です。それは単なる音の問題ではなく、そこに床の振動と音響放射が関係してくるためです。このような現象を通常の音と区別して固体音と呼んでいますが、床衝撃音はこの固体音問題の代表選手といえる存在です。

この床衝撃音問題は、建築技術者にとって大変重要な技術課題です。なぜかと言えば、現在の集合住宅等の床構造は、構造的な強度で決定されるのではなく、必要な重量床衝撃音遮断性能を満足するかどうかで決定されるからです。すなわち、構造的にはスラブ厚が12cmで大丈夫なものでも、重量床衝撃音に関しては20cmのスラブ厚が必要になるというように、床衝撃音面から見た要求条件の方が構造条件より厳しくなっているということです。したがって、重量床衝撃音の性能評価を含めた構造設計が必要となり、建築技術者が音の問題、それも最も複雑な重量床衝撃音の予測検討を行わなくてはならないことになるのです。

建築技術者によっては、床衝撃音の問題は床スラブメーカーが専門なので、そちらに丸投げするという人もいるかも知れません。しかし、自分で計算を行わなくても、床スラブメーカーが提示してきた床衝撃音計算が妥当かどうかを判断できることは技術者として最低限必要なことであり、そのためには建築技術者もある程度は床衝撃音計算法の中身を理解する必要があるといえます。

しかし、解説書を頼りに床衝撃音の計算法を理解しようとしても、実際には、やはり音の基礎知識が不足していればなかなか困難であり、まして、インピーダンス法や拡散度法など複数の予測計算法が存在すれば、それらの内容を一から理解して比較検討するなどということは殆ど不可能に近いと言えます。

そこで本書では、これら複数の床衝撃音予測計算法に関して、建築技術者が納得できる形で徹底的に比較検証を行い、少なくともどの計算法を用いて計算すればよ

いかを自信を持って判断できるように情報提供をしたいと考えたものです。具体的には、インピーダンス法と拡散度法のどちらを用いるべきかを実証的に示してゆきたいと考えています。

筆者は、拡散度法の開発者です。したがって、本書は拡散度法を推奨し、インピーダンス法をこき下ろす内容ではないかと思われるかも知れません。しかし、本書では、その評価検証は極力、理論的かつ物理的事実に則って実施しているつもりです。したがって、決して恣意的な評価ではなく、床衝撃音計算の理解に役立つような客観的な内容と記述に配慮したつもりです。本当にそうなっているかどうかは、読み手の建築技術者の方々の判断にお任せしたいと思います。

ところで、「インピーダンス法と拡散度法の徹底比較検証!」、こんな本を書こうと思ったのには幾つかの切っ掛けと理由がありました。一つは、ある建築技術者から、「床衝撃音の予測計算をやろうとすると、デベロッパーがインピーダンス法で計算するように指示してくることが多くなった」という話を聞いたことでした。インピーダンス法は建築学会の図書に掲載されている方法であるため、無条件に信頼されていても仕方のないことと思いますが、果たして計算内容を十分に理解した上での指示かどうか疑問に思えたことです。

もう一つは、純ラーメン構造に対する拡散度法の適用に係わる研究論文を建築学会の技術報告集に投稿した折、一人の査読者が、拡散度法は良く知らないからという理由で不採用の判定を行っていたことです。査読者にあるまじき理由ですが、実際には研究者の世代交代が進み、拡散度法の内容を理解する研究者が少なくなっているのではと考えさせられました。

これまでは、床衝撃音予測計算に関する様々な手法が混在することは、この分野の研究促進に資することであり、望ましいことだと考えていました。したがって、他の手法に関して色々気が付くことはあっても、敢えて他の方法の問題点を指摘することには気が進まませんでした。しかし、床衝撃音予測計算法の研究が一段落した

と感じられる今日、現在利用されている方法を比較検証し、その内容を社会的に提示することは意義のあることではないかと考えるようになりました。

当然ですが、筆者は拡散度法の内容は熟知していますから、仮に、それが劣っていると感じていれば本書のような内容の書籍は書きません。拡散度法の内容には自信を持っていますが、もし、その内容が難しいというだけで捨てられて行くのでは問題だと思っています。玉石混交、いろんな手法が混ざっていることは問題ないと思いますが、その区別がつかず、玉の方が捨てられるようでは社会的な損失が大きいと感じています。

本書の内容は、読んで頂ければ分かるようにインピーダンス法にとって大変厳しい内容となっています。しかし、集合住宅における床衝撃音の問題は、殺傷事件や騒音訴訟にも繋がりがねない社会的に大変に重要な問題であり、その性能を適確に予測計算することは、建築経済からみても大きな影響を持つものであり、公益に係わる問題です。その性能予測法を社会的に公表している限りは、その方法（数値ではない）に責任を持つのは当然のことだと考えています。

それでは、本書での内容が少しでも床衝撃音問題に関する今後の技術進展に資することを願って、「建築技術者のための床衝撃音計算法講座」を、いざ開講したいと思います。

（注）本文中の図表では、各解説書から引用したものについては黒枠で囲っており、本書のオリジナルの図表と区別しています。

目 次

1. 床衝撃音予測計算法の種類と変遷	1
1.1 床衝撃音予測計算法の変遷	
1.2 インピーダンス法による予測計算の概要	
1.3 拡散度法による予測計算の概要	
2. 共振によるインピーダンス低下量に関する検証	8
2.1 インピーダンス法での共振のインピーダンス低下量について	
2.2 無限大板かどうかは曲げ波の波長によって変わる	
2.3 無限大板と見なせる板の大きさはどれくらいか？	
2.4 拡散度法での共振のインピーダンス低下量について	
2.5 インピーダンス法における共振の評価法について	
3. 周辺拘束によるインピーダンス上昇量に関する検証	28
3.1 両方法でインピーダンス上昇量はどれくらい差があるか？	
3.2 インピーダンス法での周辺拘束の評価方法	
3.3 拡散度法での周辺拘束の評価方法	
3.4 共振および周辺拘束に関する検証結果のまとめ	
4. 板振動に関するその他の検証	38
4.1 インピーダンス法での床スラブ寸法の取り方（小梁の扱い） について	
4.2 拡散度法での床スラブ寸法の取り方（小梁の扱い）について	
4.3 ボイドスラブの換算についての検証	
4.4 2方向ボイドスラブの扱いについて	
5. 音響放射に関する検証	51
5.1 インピーダンス法の有効放射面積って一体何だ？	
5.2 拡散度法での音響放射の計算法	

5.3	音場補正の有無による影響	
5.4	その他の音響放射関連項目の比較	
6.	床衝撃音予測計算法の精度検証	65
6.1	各計算法の予測精度	
6.2	純ラーメン構造に関する予測計算精度の例	
7.	検証結果のまとめ	74
	おわりに	78
	著者略歴	80

1. 床衝撃音予測計算法の種類と変遷

床衝撃音予測法には、大きく分けて数値解析法と簡易計算法の 2 種があります。数値解析法というのは、FEM（有限要素法）などにより床スラブの振動応答解析を行い、その結果をもとに境界要素法や波動関数法などの音響解析により床衝撃音を算出する方法です。これは数値解析法に専門的な知識を持った研究者レベルの計算法であり、一般建築技術者が業務のために簡易に利用できる方法とは言えません。

一般の建築技術者が利用できる床衝撃音の予測計算法は、いわゆる簡易計算法と呼ばれるものであり、これには大きく分けてインピーダンス法と拡散度法の 2 つがあります。本書では、この 2 つの計算法に関して徹底比較検証を行い、それぞれの特徴や長所、あるいは問題点を明らかにしてゆきます。一般の建築技術者は計算法を利用することは可能であっても、その計算法に内在する問題点等を理解することは困難であることから、その点を分かりやすく解説し、今後の床衝撃音計算法の利用に役立ててもらおうというのが本書の主旨です。

1.1 床衝撃音予測計算法の変遷

まず最初に、これらの簡易計算法の現在までの変遷を示し、その特徴を解説します。図 1-1 は、簡易計算法の始まりから現在までの変化をチャートで示したもので

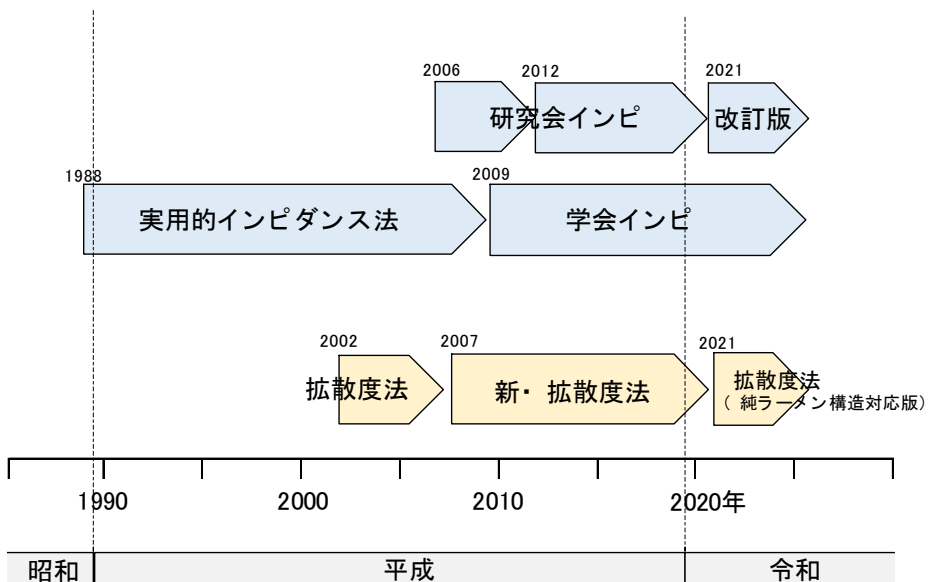


図 1-1 床衝撃音簡易計算法の変遷と流れ

す。床衝撃音簡易計算法の整備は建築学会を中心に精力的に行われ、現在では既に30年以上が経過しています。各計算法の詳細は後述しますが、変遷の概要は以下の通りです。

最初の計算法は1988年に発表された実用的インピーダンス法（以後、**実用的インピ**と呼称）であり、その後、建築学会主導で計算法の改訂がなされ、2009年から新しい計算法が提示されています。本書では、これを便宜上「**学会インピ**」と呼ぶことにします。

また、インピーダンス法と同じ計算法であるものの、細部に検討を加えた上で表計算ソフトで簡易に計算できるようにしたものを民間研究団体・床衝撃音研究会が2006年に発表しましたが、これを区別上「**研究会インピ**」と呼ぶことにします。

拡散度法は、インピーダンス法とは全く異なる方法により床衝撃音の計算を行うロジックであり、2002年に八戸工業大学より発表されました（その後、騒音問題総合研究所に移管）。表計算ソフトで簡単に計算できる手法であり、この計算ソフトは一般に無料で公開されました。その後、計算精度向上のための改訂が2度にわたって行われ、現在に至っています。

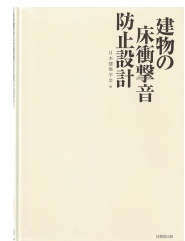
これらの計算手法の発表年についてですが、正確に年月を特定するのは困難であるため、その方法の最初の解説書が公表された年としています。また以降の各計算法の比較検証においては、それらの解説書（改訂のあったものは最新版）を参照していますので、最初に、これらの解説書に関して、書名と発表者、発表年等を紹介しておきます。

- ・ 実用的インピ解説書 （書籍写真略）

「建物の遮音設計資料」、(社)日本建築学会編、B5版 198頁、
1988年

- ・ 学会インピ解説書

「建物の床衝撃音防止設計」、(社)日本建築学会編、B5版 120頁、
2009年



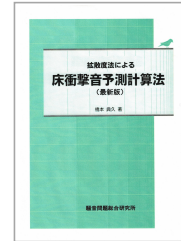
・ 研究会インピ解説書

「インピーダンス法による重量床衝撃音レベル予測計算法
(改訂 3 版)」、床衝撃音研究会、A4 版 196 頁、2021 年



・ 拡散度法解説書

「拡散度法による床衝撃音予測計算法 (最新版)」、騒音問題
総合研究所、A5 版 253 頁 (Kindle 版)、2021 年



1.2 インピーダンス法による予測計算の概要

それでは、それぞれの計算法に関して少し詳細に内容を紹介します。まず、実用的インピですが、これは床衝撃音研究および予測計算法開発の先鞭をつけた画期的な研究であり、その功績は大変に大きなものであると言えます。その後の学会インピや研究会インピにおいても、基本的な考え方は踏襲されており、これらは実用的インピの改善を図る形で進んでゆきました。

ただ、実用的インピは基本的に床衝撃音の実測値をベースに、その傾向に合うように作られた方法であるため、大きな問題点を抱えていました。それに関連するのが図 1-2 の床スラブの変遷です。日本に団地が登場した昭和 30 年代から床スラブの厚みは徐々に厚くなってゆきますが、最初の頃の集合住宅では、小梁が 2 本ついた、いわゆる目型のスラブが一般的でした。実用的インピーダンス法は小梁で区切られた部分を計算対象にしていたので、この時には、小面積に対する計算法として

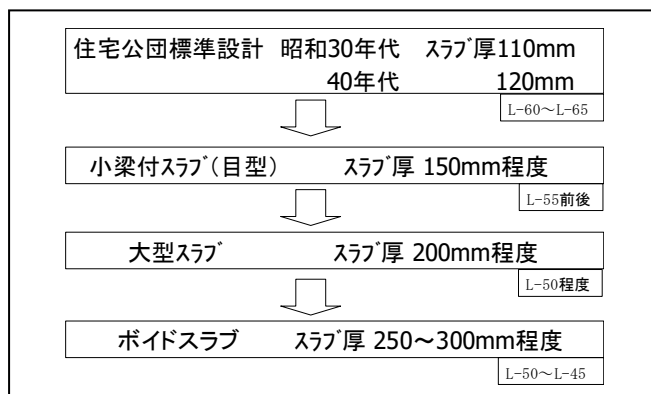


図 1-2 床スラブの変遷 (拡散度法解説書より)

実測値とそれなりに対応していました。

しかし、1990年代に入った頃から、集合住宅に小梁のない大型スラブが多用されるようになると、実用的インピの問題点が浮き彫りになってきます。それを端的に表しているのが表 1-1 です。この表では、スラブ面積が大きくなると床衝撃音性能は単調に悪くなり、例えば、スラブ厚 200mm でもスラブ面積が 60m²だと L-60 になることを示しています。これは明らかに間違いであり、スラブ面積が大きくなっても床衝撃音性能が悪くなることはなく、寧ろ良くなる方向なのです。これは図

表 1-1 スラブ面積と重量床衝撃音性能の関係（実用的インピ解説書より）

スラブ厚 (mm)	スラブ面積 (m ²)									
	12	15	20	25	30	35	40	45	50	60
120	L-55	L-60	L-60	L-65	L-65	L-65	—	—	—	—
130	L-55	L-55	L-60	L-60	L-65	L-65	L-65	—	—	—
140	L-50	L-55	L-55	L-60	L-60	L-65	L-65	L-65	—	—
150	L-50	L-55	L-55	L-60	L-60	L-60	L-60	L-65	L-65	L-65
160	L-50	L-50	L-55	L-55	L-60	L-60	L-60	L-60	L-65	L-65
180	L-45	L-50	L-50	L-55	L-55	L-60	L-60	L-60	L-60	L-60
200	L-45	L-45	L-50	L-50	L-55	L-55	L-55	L-60	L-60	L-60
230	—	L-45	L-45	L-50	L-50	L-55	L-55	L-55	L-60	L-60
250	—	—	L-45	L-50	L-50	L-50	L-55	L-55	L-55	L-60

(注) 普通コンクリートスラブ, 4 周大梁支持
スパン比 1.0~1.5 程度

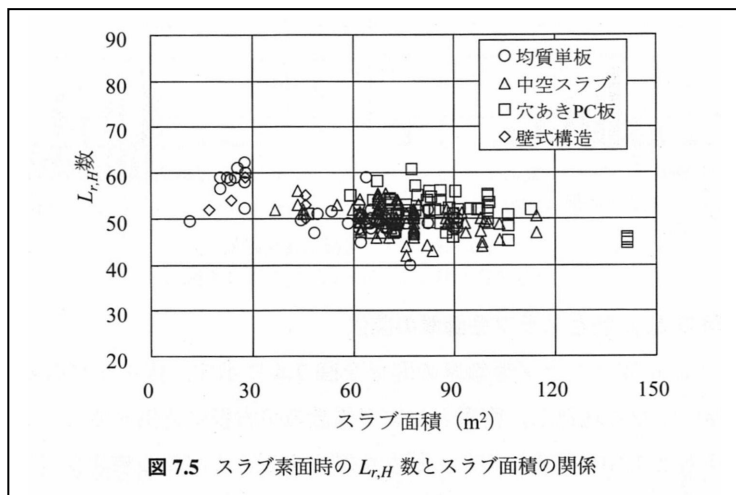
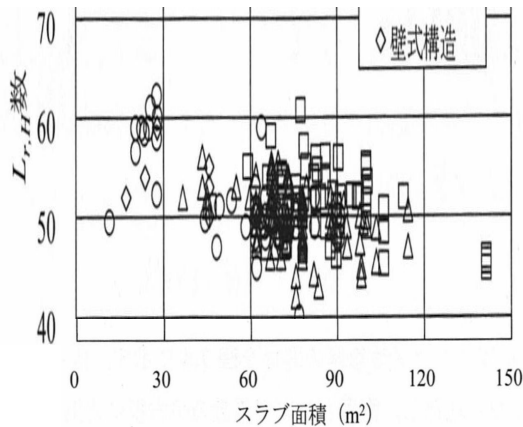


図 1-3 床スラブ面積と床衝撃音性能の関係（学会インピ解説書より）

1-3 に示すように多くの実測結果で示されており、今では常識になっています。この図は少し注意が必要で、一見するとスラブ面積が大きくなっても性能はあまり変化しないように見えます。しかし、実際の重量床衝撃音の性能というのは LH-40 から LH-70 ぐらいまでのせいぜい 30 dB の範囲です。図 1-3 は縦軸の範囲を大きくとりすぎているので変化が見えにくいのです。ちなみに、縦軸の範囲を狭めたものが下の<参考図>ですが、これを見れば、バラツキはあるものの床面積が大きくなれば性能が良くなっていることが直感的にも分かるでしょう。



<参考図> スラブ素面時の $L_{r,H}$ 数とスラブ面積の関係

表 1-1 のような間違いは、静的な現象（撓み）と動的な現象（振動応答）の違いの理解不足によるものと考えられますが、大型スラブ出現前の計算法であるため仕方ない部分もあります。その後、実用的インピは小面積用の計算法であると注釈されましたが、基本的な評価（共振の評価）が間違っていたことは否めません。

インピーダンス法のこの問題を解消して、大型スラブにも適用できる計算法としたものが学会インピ、および研究会インピです。スラブ面積に係わる共振の影響評価部分を修正し、かつ加振力の値や有効放射面積の算出方法などを微調整して、新たな計算法として提示したものです。研究会インピでは更に、スラブと梁の曲げ剛性比をパラメータとして導入し、端部拘束の評価や有効放射面積の算出に適用するなどの調整もしています。これらの詳細は、以降の各計算法の評価検証の中で随時示していきます。

1.3 拡散度法による予測計算の概要

拡散度法の計算法の特徴は、拡散度指数という新しいパラメーターを導入して床衝撃音性能の予測評価に用いた点です。拡散度指数というのは、板（床スラブ）の振動性状がどれくらい拡散性のあるものかを表す指標であり、単一モード振動時が0、完全拡散状態を1として数値化したものです。この拡散度指数が実は、板の振動応答を一義的に決定する指標であり、図1-4に示すように、周波数をパラメーターとした場合には大きくばらつく振動応答値（図では相対レベル差）が、拡散度指数で整理すると一直線に並ぶということが確認されたのです。この拡散度指数をパラメータとすれば、板の種々の条件（板の大きさ、辺長比、板厚、境界条件、減衰定数、周波数領域、ヤング係数などの物理定数、その他）の全てを吸収して、振動応答を単一のシンプルな特性として表せるのですから、これは板の振動応答評価、床衝撃音の予測評価に関して大変に便利な結果であることは歴然です。このように板の振動、および音響放射を拡散度指数で評価し、床衝撃音予測計算法を構成したものが拡散度法であり、それまでのインピーダンス法とは全く異なる手法であるといえます。

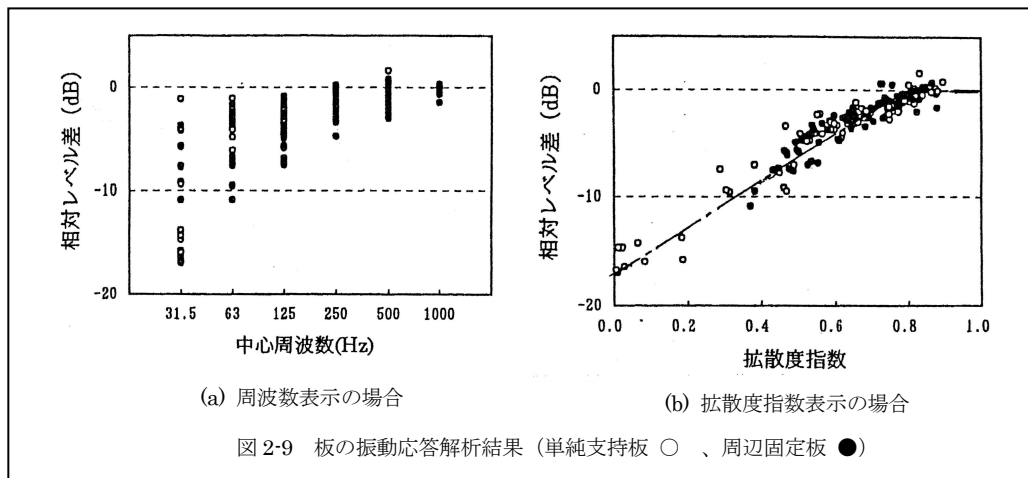


図 1-4 拡散度指数と振動応答の関係（拡散度法解説書より）

拡散度法は振動応答および音響放射を物理的に評価したものであるため、小面積の床スラブをはじめ、大型スラブにも特に修正なしでそのまま適用できています。なお、この新しい床衝撃音予測計算法の開発に関しては、2008年度の日本建築学会賞が授与されています（受賞名：拡散度法による床衝撃音遮断性能の予測に関する研究）。

拡散度法による予測計算法は、その後、予測精度を向上させるための研究結果を反映させた新・拡散度法が発表され、さらに 2021 年度には、純ラーメン構造の床衝撃音計算に対応できる計算ソフトが最新版として発表され、これも一般に無料公開されています。

以上、床衝撃音の予測計算法であるインピーダンス法（実用的インピ、学会インピ、研究会インピ）と拡散度法に関する概要を紹介しましたが、これらの計算法の各部の詳細について、次頁以後で徹底検証比較を行ってゆきたいと思います。

2. 共振によるインピーダンス低下量に関する検証

最初に床衝撃音の計算法の全体構成について示し、その後、各計算の要素である共振によるインピーダンスの低下量と、周辺拘束によるインピーダンス増加量の2つの評価について検証を進めます。

2.1 床衝撃音予測計算法の全体構成について

床衝撃音の予測計算は、図 2-1 に示すように大きく 3 つの評価内容から構成されています。まず床振動の評価ですが、これは無限大板の駆動点インピーダンスが基準となります。無限大板には共振の影響も周辺拘束の影響もありませんから、これに加振力が加わった時（無限大板の 1 点をつまんで上下に揺る場合を考えて下さい）の応答は理論的に求めることができ、ここではその時の抵抗、すなわちインピーダンスを用いて評価を進めます。

実際の床スラブは有限な大きさですから、特定の周波数（固有振動数）に対して共振現象が発生します。1 質点系の共振曲線に代表されるように、周波数が共振領域にある時は、加振力に対する振動応答は無限大板の場合より大きくなりますが、これはインピーダンスが低下した状態であり、床衝撃音の評価ではこの低下量を定量的に評価することが重要な項目となります。

同様に、有限な板では周辺の拘束が板振動に影響を与えますから、これによるイ

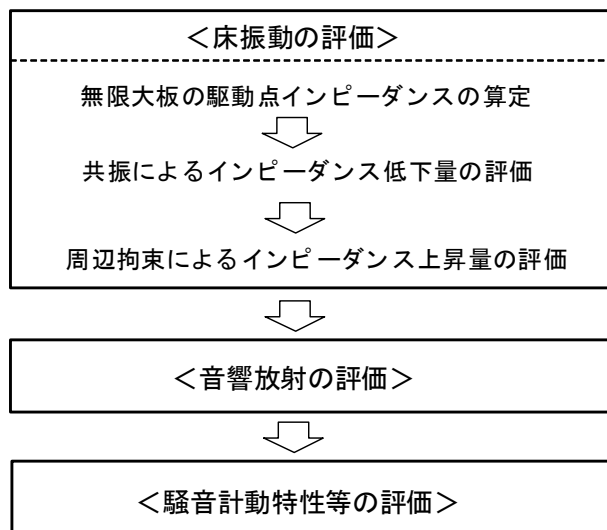


図 2-1 床衝撃音予測計算の全体構成

ンピーダンスの上昇量を評価します。これら2つの評価により、床衝撃力が加わった時の床スラブの振動応答を算出します。

床振動が求めれば、その振動により下室に放射される音のエネルギーを算定します。これを音響放射と呼び、床スラブの振動状態や下室の条件等により室内での床衝撃音の大きさが決定されます。最後の項目は、床衝撃音の実際の測定結果と計算結果を対応させる項目であり、測定に用いる騒音計の指示値の動特性に関する補正などが行われます。

床衝撃音予測計算の全体構成は以上の通りですが、この内容はインピーダンス法の拡散度法も同じです。ただ、それぞれの項目に対する評価方法が異なり、その違いにより最終的な予測結果も違ってきます。それでは、まず共振によるインピーダンスの低下について検証を進めましょう。

2.2 インピーダンス法での共振によるインピーダンス低下量について

インピーダンス法には学会インピと研究会インピがありますが、これらは基本的には同じ手法ですから、ここではインピーダンス法で最も新しい研究会インピを取り上げます。その解説本には、具体的な事例に関して計算法の詳細な説明が示され

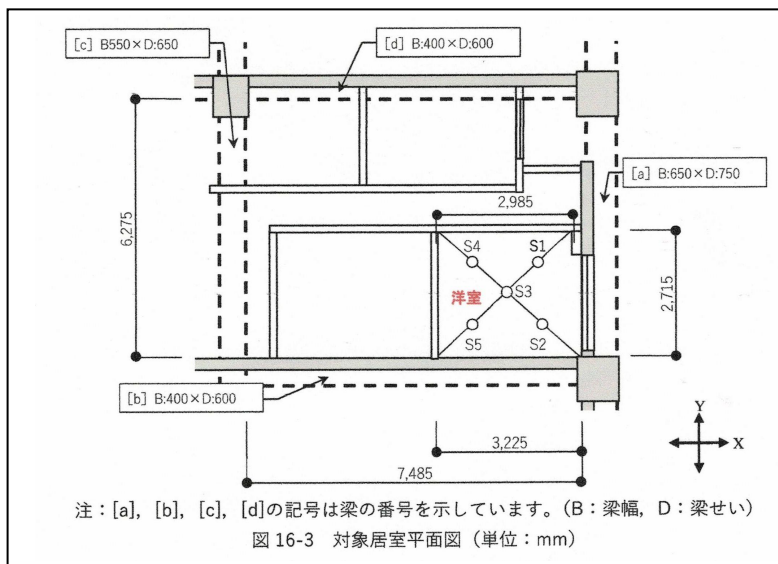


図 2-2 計算対象の床構造 (研究会インピ解説書より)

ているので、比較検証に適しているためです。計算対象は、図 2-2 の通りであり、床スラブの物理条件は、以下のように設定されています。

- スラブ : 均質単板スラブ 厚さ 230 mm
 密度 $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率 $E = 2.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
 寸法 (大梁内々) 7.485 m (長辺) \times 6.275 m (短辺) = 46.97 m²
 辺長比 6.275 m / 7.485 m = 0.838
- 居室 : 3.225 m \times 2.715 m = 8.76 m²、天井高 2.55 m

この計算対象に関する予測結果は図 2-3 の通りであり、実測結果と計算結果のどちらも LH-46 であり、大変によく一致しています。でも、これは当然であり、わざわざ合わないものを本で紹介するはずはないからです。ということで、本当によく合っているのか、この中身について少し詳細に検証をしてゆきたいと思います。

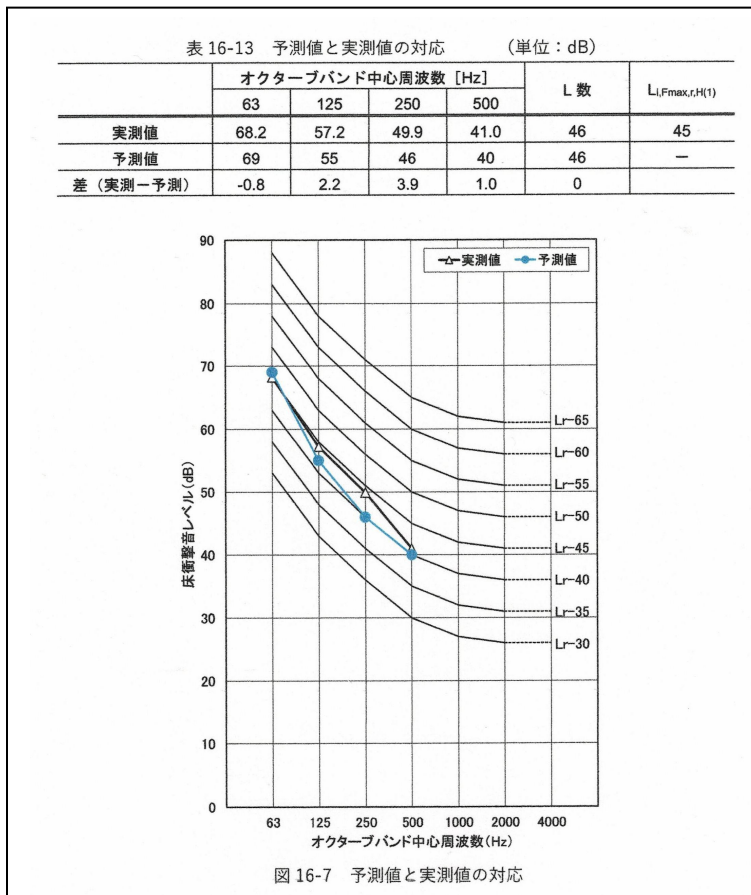


図 2-3 計算結果と実測結果の比較 (研究会インピ解説書より)

研究会インピの解説書には、図 2-3 の最終計算結果に関して、その途中の各部の計算値が表 2-1 のように示されています。

この計算表の中に示されている「共振によるインピーダンスレベル低下量[dB]」について着目すると、63 Hz～500 Hz まで何れの値も 0.0 dB となっています。既に述べたように、板の振動において共振の影響を適切に評価することは大変に重要であり、この結果は直接的に最終的な予測結果の精度に影響してくることになります。

共振によるインピーダンスの低下量が 0.0 dB ということは、この床を重量衝撃した時のインピーダンスが基本インピーダンスの値と同じということです。インピーダンス法では基本インピーダンスという名称を用いていますが、これは一般で言う「無限大板の駆動点インピーダンス」のことです。ですから、低下量が 0.0 dB ということは、この床スラブが無限大板と同じインピーダンスになると言うことです。図 2-2 の床スラブの寸法を見れば、短辺側のスパンは 6 m ほどしかありません。これで本当に無限大と言えるのかどうか疑問です。

表 2-1 インピーダンス法の計算表（研究会インピ解説書より）

表 16-12 予測計算結果

		オクターブバンド中心周波数 [Hz]				
		63	125	250	500	
①	標準衝撃源の衝撃力暴露レベル [dB]	40.0	22.0	11.5	5.5	
③	基本インピーダンスレベル [dB]	119.1				
④	インピーダンスレベル 上昇量 [dB]	S1	4.1	2.0	0.4	0.0
		S2	8.9	5.7	2.5	0.2
		S3	2.6	0.3	0.0	0.0
		S4	0.2	0.0	0.0	0.0
		S5	3.9	2.6	1.2	0.2
⑤	共振によるインピーダンスレベル 低下量 [dB]	0.0	0.0	0.0	0.0	
⑥	加振点別インピーダンス レベル [dB]	S1	128.2	121.2	119.6	119.2
		S2	128.0	124.9	121.6	119.3
		S3	121.8	119.4	119.2	119.2
		S4	119.3	119.2	119.2	119.2
		S5	123.0	121.7	120.4	119.3
⑦	床スラブ内の振動減衰補正量 (ΔL_D) [dB]	-1.7	-2.9	-4.8	-6.8	
⑧	有効放射面積 (S_{eff}) [m ²]	3.6	4.9	5.9	6.7	
	$10 \log_{10} S_{eff}$ [dB]	5.5	6.9	7.7	8.2	
⑨	音響放射係数 (k)	0.5	0.6	1.0	1.0	
	音響放射係数レベル [dB]	-2.9	-2.0	0.0	0.0	
⑩	受音室の吸音力 (A) [m ²]	4.2	4.2	3.8	3.3	
	$10 \log_{10} A$ [dB]	6.3	6.3	5.7	5.2	
⑪	サウンドレベルメータの 動特性補正値 (ΔL_C) [dB]	5.2	5.2	5.2	5.2	
	室内最大音圧レベル [dB]	S1	68.6	55.3	46.3	39.7
		S2	63.8	51.6	44.3	39.6
		S3	70.0	57.1	46.7	39.7
		S4	72.5	57.3	46.7	39.7
		S5	68.8	54.8	45.5	39.6
	床衝撃音レベル [dB]	69	55	46	40	

2.2 無限大板かどうかは曲げ波の波長によって変わる

板が重量床衝撃を受けて振動する場合は、板が屈曲する曲げ振動になります。この曲げ振動は周波数（振動数） f によって波長が変わり、低い周波数の場合には波長は長く、周波数が高くなると曲げ波の波長は短くなります。この曲げ波の波長は計算することができます。まず、曲げ波の伝搬速度 c_B は、

$$c_B = \sqrt[4]{\omega^2 \frac{B}{\rho h}} \quad (2.1)$$

ω : 各速度 ($= 2\pi f$)、 ρ : 密度(kg/m³)、 h : 板厚(m)

B : 板の曲げ剛性(N・m)

$$\text{ただし、} B = \frac{Eh^3}{12(1-\nu)^2}、\nu : \text{ポアソン比 (コンクリートは 1/6)}$$

E : ヤング率(N/m²)

ですから、これを周波数 f で割れば、曲げ波の波長 λ_B が求まります。整理すると、

$$\lambda_B = \sqrt[4]{\frac{\pi^2 E h^2}{3(1-\nu^2)\rho f^2}} \quad (2.2)$$

となります。研究会インピの解説書では、縦波の伝搬速度 $c_l = \sqrt{E/\rho}$ を先に計算し、

$$\lambda_B = \sqrt{\frac{\pi \cdot c_l \cdot h}{\sqrt{3} f}} \quad (2.3)$$

としていますが、これはポアソン比の部分が省略されていますが、ほぼ式(2.2)と同じです。

図 2-2 の床スラブに関して、重量床衝撃音の評価で重要な 63 Hz の曲げ波の波長を実際に計算すると、 $\lambda_B = 4.66 \text{ m}$ となります（研究会インピ解説書では 4.62 m となっており、殆ど差はありません）。

図 2-2 の床スラブの短辺は 6.275 m です。この寸法を、63 Hz の曲げ波の波長 4.66 m と較べると、図 2-4 の通りであり、曲げ波長の 1.35 倍でしかありません。果たして、このような振動が無限大板と見なせる振動なのでしょうか。有限板としての共振の影響が作用しそうですから、とても無限大板には見えません。

しかし、これだけでは決定的な判断は出来ませんので、更に、検証を進めたいと

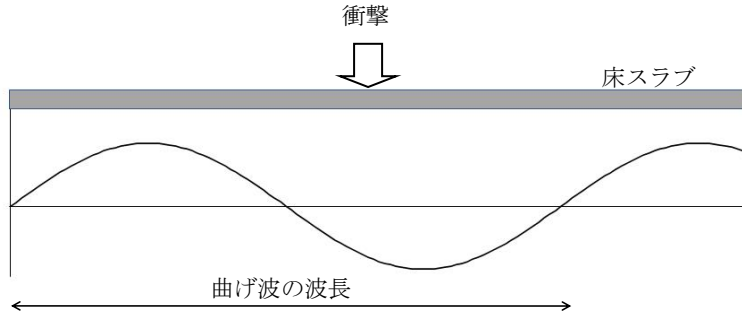


図 2-4 床スラブ寸法（短辺）と 63 Hz の曲げ波長との関係
 思います。

2.3 無限大板と見なせる板の大きさはどれくらいか？

板の曲げ振動に関して、床スラブがどれくらいの大きさなら無限大板として扱えるかを調べてみました。検討の方法としては、著者が開発した有限要素法（FEM）による数値解析法を用いることにしました。この数値解析法は、様々な断面に関する音響振動を精度良く解析できる手法であり、床衝撃音解析にも実用的に用いられている手法です。

解析対象は研究会インピの解説書にのっている図 2-2 の床スラブとしました。この床スラブの寸法を少しずつ大きくしてゆき、重量床衝撃時の振動応答がどのように変化するかを調べ、その結果から無限大板と見なせる板の大きさを見つけようというものです。

解析モデルを図 2-5 に示しました。床スラブの条件は図 2-2 と同じであり、均質単板スラブ 厚み 230 mm、密度 $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率 $E = 2.4 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ とし、床スラブの辺長比も同じく 0.838 としました。

減衰定数はインピーダンス法では設定がなされていませんが、数値解析では設定が必要になるため、標準的な床スラブの値である 2.5% としました。

境界条件は、端部拘束の影響が極力働かないようにするため周辺単純支持とし（ただし、隅角部の 4 点は固定となるため厳密には完全に端部拘束の影響がないわけではありません）、加振点は板の中央点としました。加振力は、63Hz のオクターブバンド・ランダムノイズ（実効値 40 dB）とし、加振点での加速度応答振幅（実効値）を算出しました。

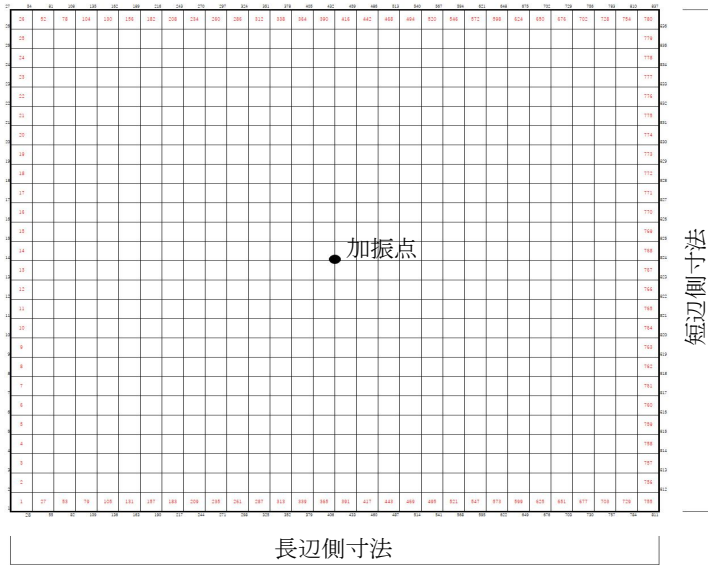


図 2-5 解析モデル

板の大きさの条件としては、短辺寸法を 2.21 m～26.0 m まで変化させ（辺長比は一定）、寸法が大きくなると加速度応答振幅がどのように変化するかを調べました。

それらの解析結果が図 2-6、図 2-7 です。まず、図 2-6 は解析結果の振動応答加速度レベルを床スラブの短辺寸法で表示したものです。短辺寸法が 3.25 m の時に大きな山が発生し、その後、短辺寸法が大きくなると振動応答加速度レベルは山谷を作

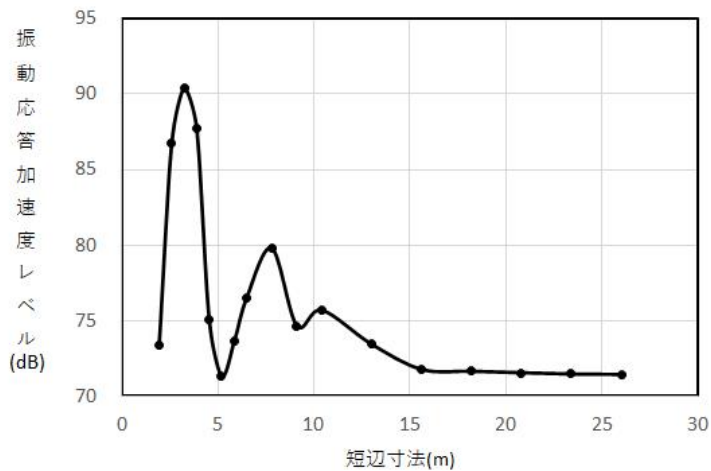


図 2-6 短辺寸法の変化による振動応答加速度レベルの変化

りながら値が小さくなり、その後一定の値に収束します。短辺寸法が 3.25 m の山は、板の 1 次の固有振動数によるものであり、確認のため、床スラブの条件を入れて式 (2.4) の単純支持板の固有振動数の計算式で計算を行うと 60.9 Hz となり、63 Hz のオクターブ帯域内の値であることが確認できます。

$$f_s = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{B}{\rho h} \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} \right)} \quad (2.4)$$

図 2-6 の振動応答加速度レベルが一定になった値が無限大板の場合であり、確認のため、無限大板の駆動点インピーダンスを計算して数値を比較してみましょう。無限大板の駆動点インピーダンス z_0 は以下の式で与えられます。

$$z_0 = \frac{F}{v} = 8\sqrt{mB} \quad (2.5)$$

ここで、 m : 板の面密度(kg/m²)、 B : 板の曲げ剛性(N・m)

この式に図 2-2 の物理定数を入れて計算すると、 $z_0 = 9.20 \times 10^5$ kg/s となります。これより 63 Hz の加振力を 40 dB=100 N として振動速度求めると $v = 1.09 \times 10^{-4}$ m/s となり、更に振動速度に角速度 ($2\pi f$) を掛けて加速度を求め、基準値 1×10^5 m/s² として加速度レベルを求めると、

$$VAL = 20 \log \left(\frac{2\pi \times 63 \times v}{10^{-5}} \right) = 72.7 \text{ (dB)} \quad (2.6)$$

となります。数値計算結果の一定値となっている値は 71.4 dB ですが、数値計算では減衰定数が 2.5% 入っているため、減衰を含まない無限大板の駆動点インピーダンス 72.7 dB よりは若干小さくなっています。確認のため、減衰定数を 10% として計算すると、一定値の値は 70.5 dB となり、これらを考えれば数値解析結果と理論式の式(2.5)は極めてよく対応しているのが分かります。

この結果から、振動応答加速度レベルが一定値になった値（無限大板の駆動点インピーダンス）を基準値として、インピーダンスの低下量を表したものが図 2-7 です。これが、インピーダンス法で「共振によるインピーダンス低下量」として示されている図（後述の図 2-13 や図 2-14 など）に対応するものです。

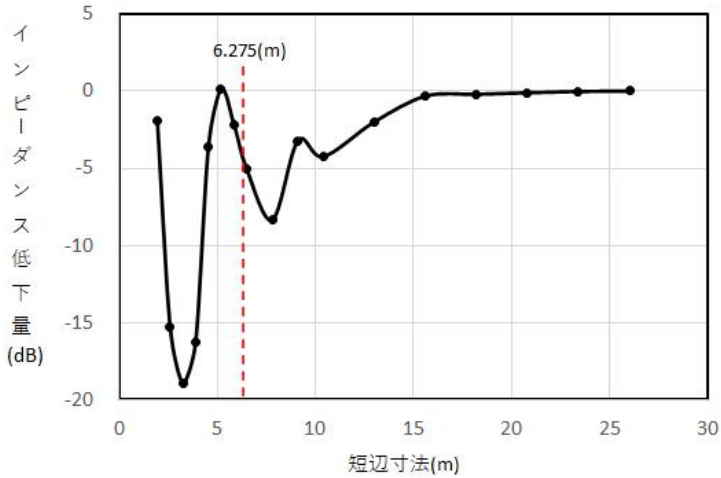


図 2-7 短辺寸法の変化によるインピーダンス低下量の変化

まず、図 2-7 より無限大板と見なせる寸法は、この床スラブ厚の場合には短辺寸法が 16 m 程度以上であることが分かります。このスラブ 63 Hz の曲げ波の波長は、既に表示したように 4.6 m 程ですから、曲げ波の波長の 3.4 倍程度の大きさでないと無限大板とは見なせないこととなります。これは、境界条件が単純支持の場合ですが、実際の床スラブの境界条件はむしろ周辺固定に近いと考えられます。その場合には、無限大板とみなせる寸法は更に大きくなりますから、大まかな値として、**曲げ波の波長の 4~5 倍程度の寸法の板であれば無限大板と見なせる**と言えると思います。図 2-8 はその様子を図化したものですが、図 2-4 と較べて、これなら無限大板として扱ってもよさそうだと思うでしょう。無限大板と見なせるのは、床の大きさが 16 m 以上の場合 (63 Hz、床厚 230 mm の場合) だということは、**殆どの床スラブは無限大板とは見なせず、63Hz 帯域では共振の影響が無視できない**ということなのです。

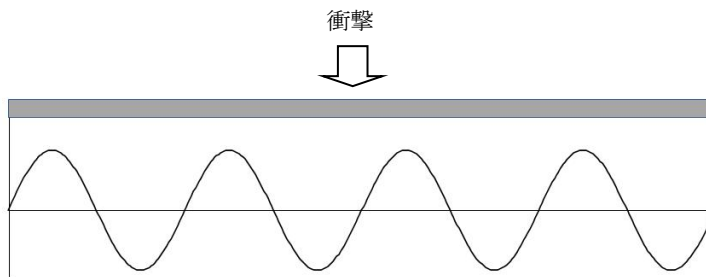


図 2-8 曲げ波の波長と無限大板と見なせる寸法の関係

図 2-7 の中に示されているように、研究会インピの解説書にある床スラブの短辺寸法は 6.275 m ですから、この床スラブはとても無限大板とは見なせず、したがって共振によるインピーダンスの低下量は 0.0 dB にはなりません。図 2-7 では約-5dB 程度の値となっていますが、これらの特性は周辺の固定度や加振点の位置、減衰定数などによっても変化するため、全体的な変化の特性を眺めれば、この床スラブの実際の共振によるインピーダンス低下量は-5～-10 dB 程度になっていると考えられます。

研究会インピの計算法では、これを 0.0 dB として計算していますので、共振の影響評価の段階で、5～10dB 程度の大きな誤差を含んでしまっていることになり、
では、

- ① なぜ共振に関してこのような間違っただけの評価をしてしまったのか、また、
- ② 共振の評価は大幅に間違っているのに、なぜ最終の計算結果では実測値と良く一致しているのか、

この2つの疑問に関しては後で検証することにして、今度は、拡散度法における共振によるインピーダンス低下量の評価はどうなっているかを検証してみましょう。

2.4 拡散度法での共振のインピーダンス低下量について

研究会インピの解説書に示されている図 2-2 の床スラブに関して、拡散度法で計算した結果を示し、その内容について検証したいと思います。

まず、拡散度法における共振によるインピーダンスの低下量の算出方法について示します。後で解説をしますが、インピーダンス法の場合には実測データをもとに共振の評価を行っています。一方、拡散度法の場合には理論的に導出された評価式によって共振の影響評価を行っています。その評価式と、それを図化したものを図 2-9 に示します。

図 2-9 の縦軸は相対レベル差(dB)となっていますが、これが共振による無限大板からのインピーダンスの低下量になります。横軸は周波数ではなく、拡散度指数になっていますが、これが拡散度法の名前の由来になっています。すなわち、板の振動を周波数をパラメーターとして評価するのではなく、拡散度指数をパラメーターとして評価する手法なのです。

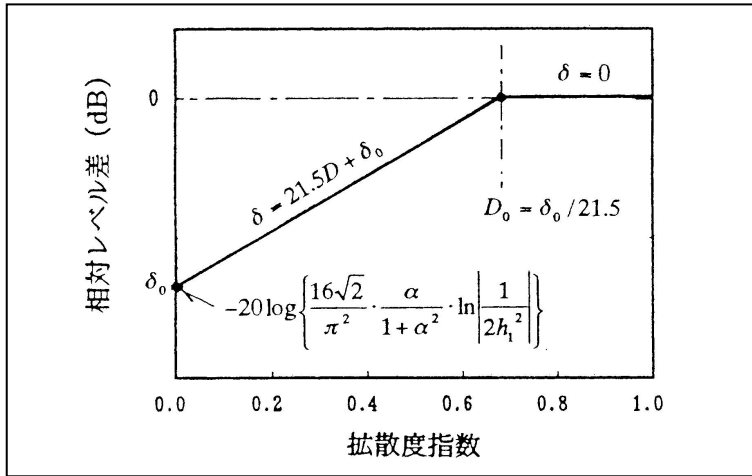


図 2-9 理論的に求められた拡散度法における共振の影響評価法（拡散度法解説書より）

図 2-9 に示されている特性は、拡散度指数が 0.0 の時に相対レベル差（共振によるインピーダンスレベル低下量） δ_0 が最も大きくなり、拡散度指数が大きくなるにしたがって相対レベル差が小さくなり、ある一定の値以上では 0 dB になっています。

ここで、拡散度指数が 0.0 というのは、振動が全く拡散的ではない場合であり、1 次の固有振動をしている状態を示しています。また、相対レベル差が 0 dB というのは無限大板の時の値を示しています。

それでは、図 2-9 と図 2-7 を較べてみましょう。まず、図 2-7 において、インピーダンス低下量が最も大きい短辺寸法が 3.25 m についてですが、既に述べたように、これは 1 次の固有振動数の時の結果です。図 2-9 の拡散度指数が 0.0 の場合が、1 次の固有振動数に相当しますから、この時の共振によるインピーダンスの低下量 δ_0 は、図 2-9 に示すように式(2.7)になります。

$$\delta_0 = -20 \log \left\{ \frac{16\sqrt{2}}{\pi^2} \cdot \frac{\alpha}{1+\alpha^2} \cdot \ln \left| \frac{1}{2h_1^2} \right| \right\} \quad (2.7)$$

ここで、 α : 辺長比、 h_1 : 減衰定数

この式の理論的な導出過程は拡散度法解説書の p44～p47 に詳述されていますが、複雑ですからここでは省略します。

式(2.7)は、無限大板を基準とした共振によるインピーダンスの低下量は、辺長比

と減衰定数の2つだけで決まるということを表しています。それはおかしいと思われる人もいるかも知れません。板厚やヤング率などが変化すれば、共振の影響も変化するのではないかと思われるかも知れませんが、それらは無限大板のインピーダンスの計算の中に含まれており、式(2.7)は、その無限大インピーダンスからの低下量を表しているのです。

図 2-2 の床スラブに関して、実際に式(2.7)の値を計算してみましょう。辺長比 α は 0.838、減衰定数は 2.5% ですから $h_1=0.025$ とし、これを代入して計算すると、

$$\delta_0 = -17.6 \text{ dB}$$

となります。この値を図 2-7 にプロットしたものが、図 2-10 ですが、理論値と数値計算の値がよく一致していることが分かります。

この共振によるインピーダンス低下量の値が分かれば、他の周波数については図 2-9 に示されている特性に併せて計算すれば良いことになります。

ちなみに、図 2-10 の各計算点は大きな山谷を示していますが、これらの各点の拡散度指数を求めて、拡散度指数をパラメーターとして図 2-10 を整理すると、図 2-9 に示すように 1 直線のデータ分布になるということです。

それでは、拡散度法で計算した共振によるインピーダンス低下量がどのような値か見てみます。拡散度法の計算ソフトにある計算表は膨大なものであるため、ここ

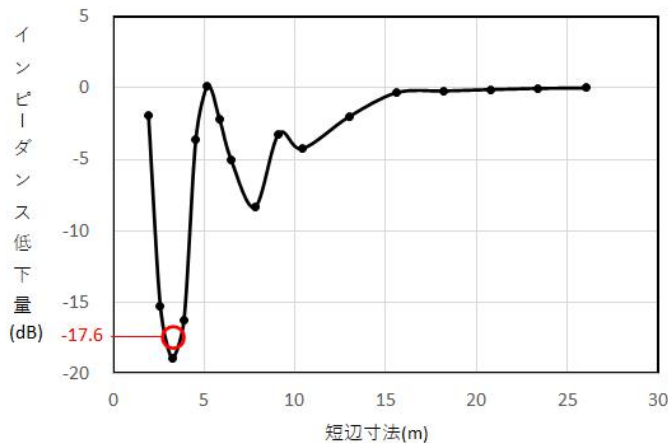


図 2-10 式(2.7)の値と数値解析結果の比較

では共振に関する結果の数値を表 2-2 に纏めました。表には加振点ごとに単純支持(s)と周辺固定(c)の 2 つの計算結果が示されていますが、実際に使用する値は、床スラブの拘束条件（通常は 0.8）に応じて内分した値を用います。なお、加振点は図 2-2 に記載されている加振点位置になります。

表 2-2 拡散度法における共振によるインピーダンス低下量

加振点	境界条件	オクターブ中心周波数(Hz)			
		63	125	250	500
1	s	-7.3	-1.9	0.0	0.0
	c	-9.1	-3.0	0.0	0.0
2	s	-10.2	-1.8	0.0	0.0
	c	-16.6	-3.5	0.0	0.0
3	s	-4.3	-2.6	-0.1	0.0
	c	-6.4	-2.4	-0.7	0.0
4	s	-9.6	-2.5	0.0	0.0
	c	-7.0	-3.9	0.0	0.0
5	s	-8.8	-2.1	0.0	0.0
	c	-12.2	-3.3	0.0	0.0

境界条件：s 単純支持、c 周辺固定

表 2-3 拡散度法での共振によるインピーダンス低下量（拘束条件 0.8 の場合）

	加振点	オクターブ中心周波数(Hz)			
		63	125	250	500
共振によるインピーダンス低下量[dB]	1	-8.7	-2.8	0.0	0.0
	2	-15.3	-3.2	0.0	0.0
	3	-6.0	-2.4	-0.6	0.0
	4	-7.5	-3.6	0.0	0.0
	5	-11.5	-3.1	0.0	0.0

表 2-4 インピーダンス法における共振によるインピーダンス低下量

	オクターブ中心周波数(Hz)			
	63	125	250	500
共振によるインピーダンス低下量[dB]	0.0	0.0	0.0	0.0

拘束条件を 0.8 として内分した値は表 2-3 に示した通りであり、比較として表 2-4 にインピーダンス法での共振によるインピーダンス低下量を再掲しました。

拡散度法の場合の 63 Hz の共振によるインピーダンス低下量は-6.0~-15.3 dB になっており、図 2-10 と良く対応しています。また、125Hz に関しても共振による影響が見られ、約-2~-4 (dB)の値となっています。

片や、表 2-4 のインピーダンス法による共振によるインピーダンス低下量は全ての周波数で 0.0 dB になっています。

この 2 つの表の結果に関して、相違点や問題点を少し詳細に整理してみたいと思います。

・ 両方法で、インピーダンス低下量の値が、63Hz および 125Hz で全く異なる。

63 Hz に関しては既に述べましたので詳細は省略しますが、共振によるインピーダンスの低下量が 0.0 dB というのはあり得ません。そして拡散度法の値と比較すると 5~15 dB の差があります。

125 Hz に関しては、曲げ波の波長を計算すると 3.3 m となりますが、床スラブの短辺寸法は 6.675 m ですから倍率は 2.0 倍となり、無限大板とは見なせず共振の影響は出てくると考えられます。拡散度法では共振の影響が-2~-4 dB となっていますが、インピーダンス法では 125 Hz も 0.0 dB となっています。

250Hz の曲げ波の波長は 2.3m ですから倍率は 2.9 倍、500Hz では曲げ波の波長が 1.6m ですから倍率 4.2 倍となり、これらの周波数では概ね無限大板と見なせ、共振の影響は無くなってくると言えます。

これらより、インピーダンス法での共振の影響評価は、無限大板との比較から考えても全く不適切だと言えるでしょう。

・ インピーダンス法では加振点による差は考慮されていない。

インピーダンス法では、共振によるインピーダンス低下量は一つの値しか示されていません。拡散度法では、加振点位置によって値が異なっています。これらはどちらが適正なのでしょう。

まず、共振というのはどのようにして起こるかを説明します。板には無数の固有

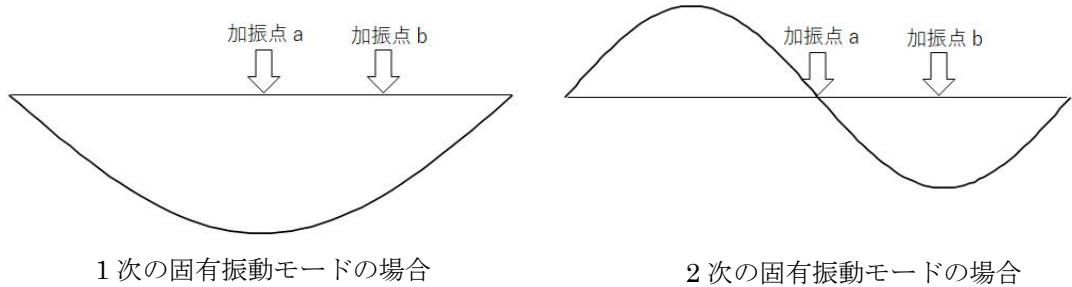


図 2-11 固有振動モードと加振点位置の関係

振動数があり、その振動数に応じた振動の姿態（固有振動モード）があります。その固有振動数と同じ振動数の加振力が加わると振動応答が大きくなり共振します。重量床衝撃音の加振力は広帯域の振動数から構成された加振力であるため、床の多くの固有振動数で共振が起こります。ただし、その共振には固有振動モード形と加振点の位置が関係します。具体的に図で説明します。

図 2-11 の左図は、1 次固有振動モードの場合ですが、この場合には加振点 a でも加振点 b でも共振が発生します。しかし、2 次の固有振動モードの場合には、加振点 b の場合には共振が発生しますが、加振点 a の場合には振動は励起されません。すなわち、共振の影響というのは、固有モードの分布形と加振点位置の関係によって大きく変化することになります。

また、加振点の位置によっては、1 次固有振動モードより高次の固有振動モードの方が強く励起される場合もあり、床スラブの共振現象は 1 次固有振動だけで決まるものではありません。特に、通常の床スラブの 1 次の固有振動数は 20Hz～30Hz 程度が多いため、床衝撃音性能で重要な 63Hz 帯域の振動は、高次の固有振動によって決定されると言えます。インピーダンス法では、1 次の固有振動数しか考慮されていませんが、高次の固有振動数による共振の影響も考慮が必要です。ちなみに拡散度法では、周辺固定時の高次固有振動数を計算できる方法を開発し、表計算ソフトのマクロ機能を使って 400 次までの固有振動数が考慮されていますし、加振点位置の影響も考慮されています。

以上の結果から、共振の影響に関しては、高次の固有振動数の評価を含め、かつ加振点位置を考慮しないと適正な評価は出来ないとと言えるでしょう。

・ 床スラブの辺長比や減衰定数を考慮しないと、どれくらいの誤差が生じるか？

表 2-5 辺長比と減衰定数の変化による式(2.7)の値の変化

		辺長比									
		1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
減衰定数 (%)	2.0	-18.3	-18.2	-18.0	-17.7	-17.2	-16.3	-15.0	-13.1	-10.0	-4.2
	2.5	-17.7	-17.6	-17.5	-17.2	-16.6	-15.8	-14.5	-12.5	-9.4	-3.6
	3.0	-17.2	-17.2	-17.0	-16.7	-16.1	-15.3	-14.0	-12.0	-8.9	-3.1
	3.5	-16.8	-16.7	-16.6	-16.2	-15.7	-14.8	-13.5	-11.6	-8.5	-2.7
	4.0	-16.4	-16.3	-16.2	-15.8	-15.3	-14.4	-13.2	-11.2	-8.1	-2.3

式(2.7)は、1次固有振動数の振動応答値を表す式であり、辺長比と減衰定数で変化します。この式の、辺長比と減衰定数を変化させて、応答値がどれくらい変化するか調べてみました。表 2-5 がその結果です。

表 2-5 によれば、減衰定数については、値が 2 倍になると約 2 dB の差になると言えます。また、辺長比については、例えば減衰定数 2.5 %の時の辺長比 1.0 では式の値は-17.7 dB ですが、辺長比が 0.5 になると-15.8 dB となり 2dB ほどの差になり、辺長比が 0.3 の場合には-12.5 dB となり 5 dB ほどの差が出ます。これは 1次固有振動数での結果ですが、他の周波数に関しては、図 2-9 に示すように、この値を基準として上下に平行移動する形になりますので、他の周波数でも同様の誤差が生じると考えられます。

これらの結果を考えれば、インピーダンス法のように減衰定数や辺長比を全く考慮しない場合、最大で 4~7(dB)程度の誤差を含むことにもなります。なお、表 2-5 に示すように、床スラブに関しては正方形が共振の影響が最も大きくなりますが、これは感覚的にも納得できるでしょう。

これらの 3 点の内容から、インピーダンス法の共振の影響評価、すなわち、インピーダンスの低下量の値は全く適正ではありませんが、では、なぜこのような評価になっているのでしょうか。既に示した、インピーダンス法に関する 2 つの疑問、① なぜ共振に関してこのような間違った評価をしてしまったのか、

② 共振の評価では大幅に誤差を含んでいるのに、なぜ最終の計算結果では実測値と良く一致しているのか、
について解説してゆきたいと思います。

2.5 インピーダンス法における共振の影響評価法について

インピーダンス法には、学会インピと研究会インピの2つがありますが、細部が異なるものの、内容は殆ど同じなので研究会インピについて説明を進めます。

インピーダンス法における共振によるインピーダンス低下量は図 2-12 のようになっています。学会インピでは、これをもう少し細かく設定していますが、全体的には、同じ内容です。

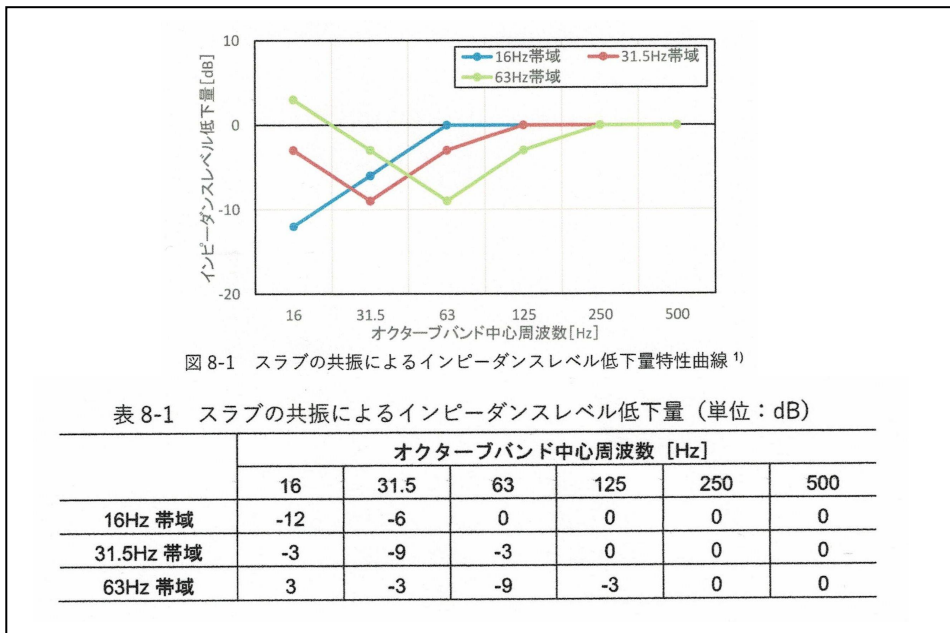


図 2-12 研究会インピにおける共振によるインピーダンス低下量の設定

これらの設定は実測データをもとに行われました。そのデータが学会インピの解説書 (p-26)に示されていますが、図 2-13 になります。

これらは、様々な床スラブの中央点をインパルスハンマー (加振力が測定できる加振装置) で加振して、その床スラブの応答を周波数分析し、基本インピーダンス

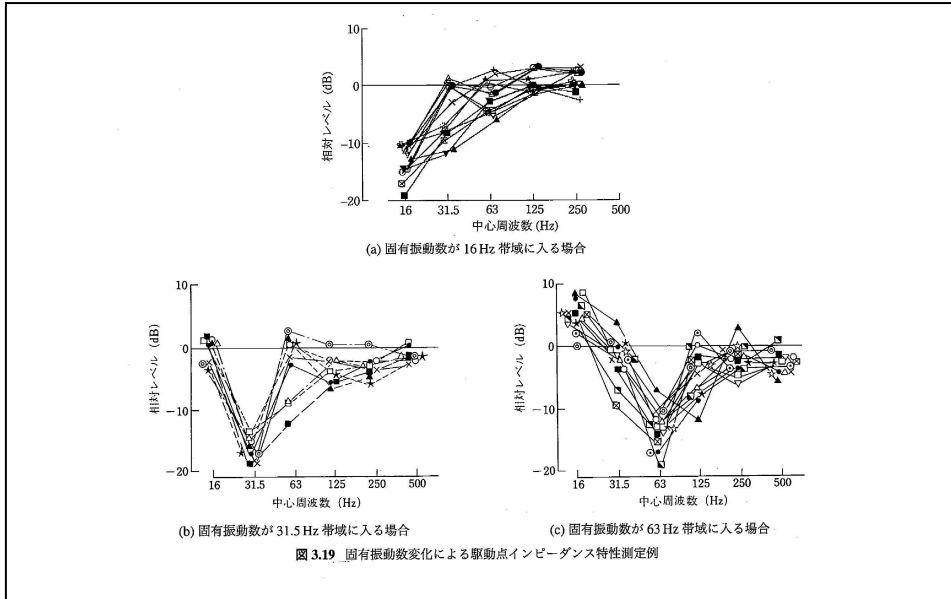


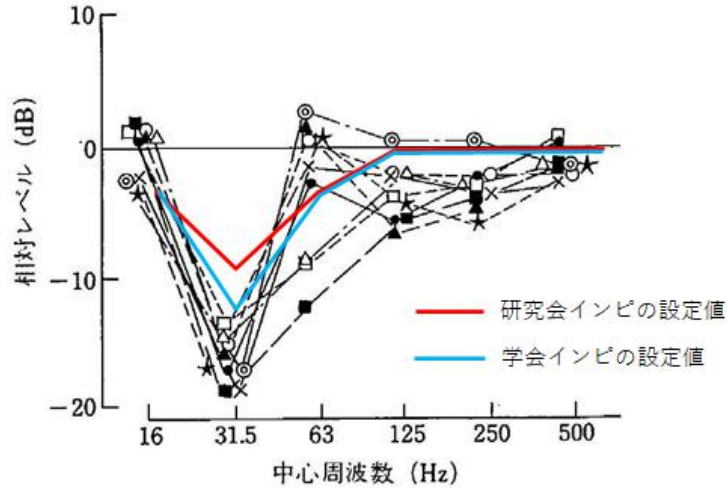
図 2-13 学会インピ解説書に示されているインピーダンス特性の測定例

を基準として集計したものです。測定結果を、1 次の固有振動数を基準として 3 つのパターンを設定しています。では、図 2-13 の中で一番一般的と考えられる固有振動数が 31.5 Hz 帯域に入る場合について、少し詳細に検証しましょう。

学会インピと研究会インピが設定している共振によるインピーダンス低下量を、固有振動数が 31.5 Hz 帯域の図に追加して示したのが図 2-14 です。学会インピの解説書には、「図 3.19 で示すようになりに安定した値を示す傾向にあることから、本計算法では、それらの平均的低下量を用いることとして、(中略) 共振によるインピーダンス低下量を推定する方法を採用した」と書かれています。

しかし、図 2-14 を見る限り、とても安定した傾向とは言えませんし、平均的低下量は 63 Hz だけで、他の周波数は実測値から全く外れています。63 Hz の場合でも、変化の幅が何と 15 dB もある中の真ん中ぐらいであり、これで正確に共振による低下量を評価できるとはとても思えません。やはり、条件によっては 0~7 dB の誤差になる可能性があると言えます。

この設定の主旨は、インピーダンス低下量の実測値のバラツキが大きいため、ど



(b) 固有振動数が 31.5 Hz 帯域に入る場合

図 2-14 インピーダンス低下量の設定値と実測結果の比較

ちらかと言え、安全側の計算結果になるように設定しておこうということだと推定されます。

ちなみに、拡散度法での 1 次固有振動数の共振によるインピーダンス低下量は、表 2-5 から分かるように -15～-18 dB 程度ですから、図 2-14 の 31.5 Hz の実測結果とよく一致しています。インピーダンス法も素直に実測結果を参考にしておけば、ある程度正確なものとなったと思いますが、それでは最終的な計算結果の誤差が大きくなってしまうため、このような設定にしたものと考えられます。

また、図 2-14 の 63 Hz 帯域の実測値は 15 dB もの大きなバラツキを示していますが、これらのデータも拡散度指数で整理すれば図 1-4 に示すようにバラツキが解消されて単一の特性になります。

これらのことから、実測値のバラツキを評価せずにそのまま使っているのがインピーダンス法であり、バラツキを解消して共振の影響を評価しているのが拡散度法であると言えます。

以上のように、インピーダンス法では共振の評価に大きな誤差を含んでいます。仮にインピーダンス法で適正な共振によるインピーダンス低下量の評価を行えば、それに応じて最終計算結果での誤差が大きくなるはずですが、図 2-3 に示すように

最終的な計算結果は実測値とよく一致しています。これが先に示した疑問の②、「共振の評価では大幅に誤差を含んでいるのに、なぜ最終の計算結果では実測値と良く一致しているのか」という問題です。

その答えは、周辺拘束によるインピーダンスの増加量の評価も適正ではないからです。既に述べた通り、板の振動の評価には、共振によるインピーダンスの低下量と周辺拘束によるインピーダンスの上昇量の2つが必要ですが、この2つの評価のどちらも適正ではなく、結果として、**誤差を誤差で打ち消す結果**となっているのがインピーダンス法です。本当にそうなのでしょうか。では次に、周辺拘束の影響評価について詳細に検証してみたいと思います。

3. 周辺拘束によるインピーダンス上昇量に関する検証

床衝撃において、加振点が端部に近くなると床スラブの振動応答は一般的に小さくなります。一般的にと付け加えた理由は、固有振動モードと加振点との関係で、高次振動モードが励振されるような場合などには、単純には端部に近いほど振動応答が小さくなると言えない場合もあるからです。しかし、一般的には端部に近い加振ほど振動応答が小さくなります。表現を変えれば、床衝撃時のインピーダンスが上昇すると言えます。この上昇量に関してインピーダンス法と拡散度法の違いについて検証してゆきましょう。

3.1 両方法でインピーダンス上昇量はどれぐらい差があるか？

このインピーダンスの上昇に関して、図 2-2 の床スラブに関するインピーダンス法と拡散度法の数値を比較してみます。まず、表 2-1 に示されている研究会インピーダンスの上昇量を再掲すると表 3-1 となります。また、参考までに学会インピーダンスの上昇量の計算結果を示すと表 3-2 となります。

表 3-1 研究会インピーによるインピーダンス上昇量 (表 2-1 より抜粋)

		オクターブバンド 中心周波数[dB]			
		63	125	250	500
インピーダンスレベル 上昇量[dB]	S1	4.1	2.0	0.4	0.0
	S2	8.9	5.7	2.5	0.2
	S3	2.6	0.3	0.0	0.0
	S4	0.2	0.0	0.0	0.0
	S5	3.9	2.6	1.2	0.2

表 3-2 学会インピーによるインピーダンス上昇量 (2 辺とも大梁支持の式)

		オクターブバンド 中心周波数[dB]			
		63	125	250	500
インピーダンスレベル 上昇量[dB]	S1	6.3	3.6	1.7	0.0
	S2	10.5	7.3	3.7	0.6
	S3	3.7	0.6	0.0	0.0
	S4	0.2	0.0	0.0	0.0
	S5	7.2	5.0	2.2	0.0

2つの結果を比較すれば、3 dB程度の差があるものもありますが、概ね、値および傾向は一致しています。これは当然であり、研究会インピは学会インピを若干修正したものであり、基本的に両者とも同じ考え方で構成されているためです。

一方、拡散度法での周辺拘束によるインピーダンス増加量は表 3-3 となります。単純支持(s)と周辺固定の(c)の2つの値が示されていますが、単純支持の場合には、当然ながら増加量は小さな値となっています。この両者から、周辺の拘束度を0.8として内分により上昇量を求めたものが表 3-4 です。この値と表 3-2 の学会インピの値を比較するとある程度一致しています。一方、表 3-1 の研究会インピの値を較べると、最大で5 dB程度の差が出ていることが分かります。また、インピーダンス法では、250 Hz および 500 Hz でも上昇が見られる形となっていますが、拡散度法では上昇は見られません。これらの差がどのようにして生じ、どちらが適切な評価なのかを詳細に見てゆくことにしましょう。

表 3-3 拡散度法によるインピーダンス上昇量計算結果

			オクターブバンド 中心周波数[dB]			
			63	125	250	500
インピーダンスレベル 上昇量[dB]	S1	S	0.2	0.0	0.0	0.0
		C	7.2	1.2	0.0	0.0
	S2	S	2.5	0.0	0.0	0.0
		C	12.4	4.4	0.0	0.0
	S3	S	0.0	0.0	0.0	0.0
		C	0.0	0.0	0.0	0.0
	S4	S	0.0	0.0	0.0	0.0
		C	0.0	0.0	0.0	0.0
	S5	S	2.5	0.0	0.0	0.0
		C	10.2	4.2	0.0	0.0

表 3-4 周辺拘束度 0.8 の場合のインピーダンス上昇量 (拡散度法)

		オクターブバンド 中心周波数[dB]			
		63	125	250	500
インピーダンスレベル 上昇量[dB]	S1	5.8	1.0	0.0	0.0
	S2	10.4	3.5	0.0	0.0
	S3	0.0	0.0	0.0	0.0
	S4	0.0	0.0	0.0	0.0
	S5	8.7	0.0	0.0	0.0

3.2 インピーダンス法での周辺拘束の評価方法

インピーダンス法での周辺拘束の影響評価は、基本的に実測結果に関して回帰式を求めるという方法で行われています。図 3-1 がその代表的な説明例ですが、スラブ中央から端部に向かってインピーダンスの測定を行い、その結果を曲げ波の波長を基準として表示（横軸）したものです。端部では 15(dB)程度のインピーダンスの上昇量となりますが、中央に行くにしたがって上昇量は小さくなり、一定の値（基本インピーダンスとの差が 0 dB）となるという説明図です。

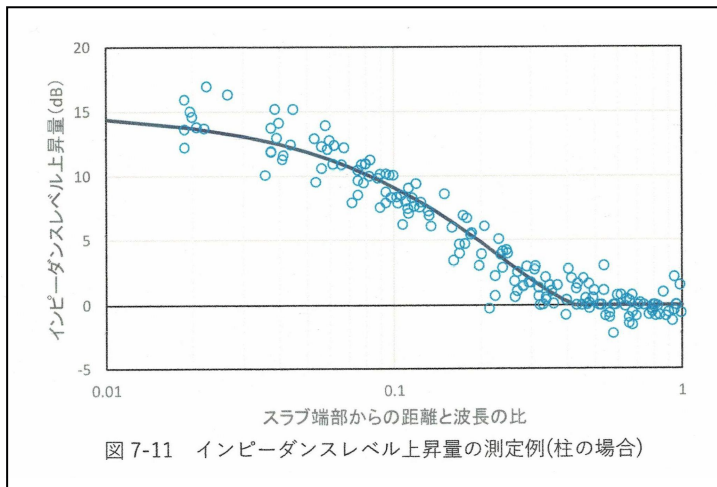


図 3-1 研究会インピ解説書に示されているインピーダンスレベル上昇量の測定例（柱の場合）

実は、この図には大きな問題点があります。それは、この実測例はインピーダンス上昇量とされていますが、実際には共振によるインピーダンス低下量も含んでいるという点です。表 2-1 の研究会インピの計算表にあるように、共振によるインピーダンス低下量が 0.0 dB なら、図 3-1 に示されている値は周辺拘束によるインピーダンス上昇量を表していることとなりますが、実際には、共振によるインピーダンスの低下量が -5～-10 dB 程度の値になっていますから、その分の誤差を含んでいることとなります。

既に示したように、床スラブの大きさが 16 m 程度以上（63 Hz の場合）でないと無限大板とは見なせませんから、殆どすべての床スラブの振動に共振の影響が含まれています。更には、共振の影響は固有振動モードと加振点の関係により変化し

ますから、加振点の位置（図 3-1 の横軸）によっても共振の影響が変わります。したがって、図 3-1 の回帰曲線を上下に平行移動するという訳にも行きません。すなわち、この回帰曲線の形状自体が怪しくなってくるのです。

その端的な例が、端部付近の回帰曲線の形です。図 3-1 では、端部に近づくともインピーダンス上昇量は 15 dB 程度に収束するような形になっていますが、このようなことは全くありません。インピーダンスとは既に示したように $z = F/v$ ですから、振動速度に関して対数で示せば、 $20 \log v = 20 \log F - 20 \log z$ となります。

仮に、基本インピーダンスが 70 dB で、端部でのインピーダンス上昇量が 15 dB だとすると、70 dB の加振力では柱は上下に動かなくても（注：計算上は 1.0 以下の速度が発生）、加振力が 15 dB 以上増えて 85 dB 以上にになれば柱が上下に動き出すということになってしまう。端部のインピーダンス上昇量は固定端では無限大に近い値にならなくてはならず、15 dB に収束するというのは明らかに論外です。

このような結果は、インピーダンス法では共振による影響と端部拘束の影響を分離して評価していないことから表れてくるものなのです。インピーダンス法は実測結果に基づいた手法だと謳われています。図 3-1 も実測結果には間違いありませんが、その実測値の解釈が適正に行われていないところに問題があるのです。

では、拡散度法では端部のインピーダンス上昇量はどのように扱われているのでしょうか、検証してみたいと思います。

3.3 拡散度法での周辺拘束の評価方法

拡散度法では、端部拘束の影響評価は、実測値ではなく数値解析手法を用いて行われています。数値解析法は、条件を統一して種々の要因を効率的に検討でき、誤差の少ない結果が得られるメリットがあるからです。

解析の内容を示したものが図 3-2 です。黒丸は加振点であり、中央から端部までに 6 点を配置して順次解析を行っています。加振力は、63Hz～1000Hz までのオクターブバンド・ランダムノイズを用いています。加振による駆動点インピーダンスレベルを求めると同時に、白丸の 49 点での応答波形と加振力の相関係数を計算し、その値から拡散度指数を算出しています。このような解析を、板の寸法板厚、辺長

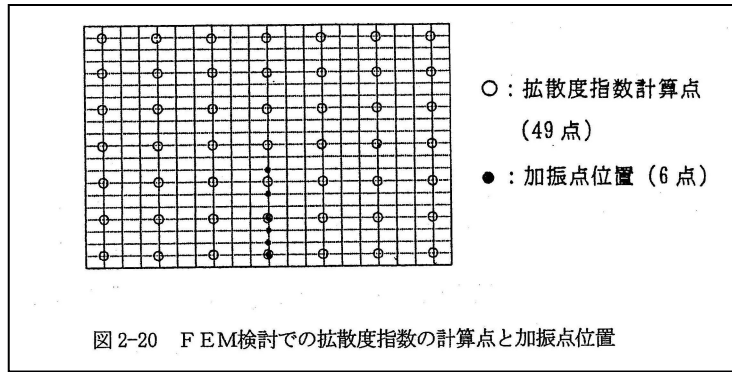


図 3-2 拡散度法でのインピーダンス上昇量の検討モデル

比、境界条件を様々に変化させて行ったものです。その結果の例が図 3-3 です。

図 3-3 には 3 つのグラフが示されています。左側の(a)図は、応答解析結果の加振点でのインピーダンスレベルを無限大板のインピーダンスレベルと比較する形で示したものです。横軸はオクターブバンドの周波数になっていますが、板の条件が様々であるため結果は大幅にバラツキ、63 Hz 帯域でも 40 dB 以上の差が出ています。

これらの結果を、端部からの距離 x と曲げ波の波長 λ_b の比 (x/λ_b) をパラメータとして整理し直したものが(b)図です。その結果、周波数をパラメータとしている(a)図では大きなバラツキがあったものが、(b)図では、周波数に関係なく一定の特性に収束していることが分かります。端部に近くなると直線的にインピーダンスレベルが上昇し、端部から離れると、インピーダンスレベルが 0.0 dB に収束していま

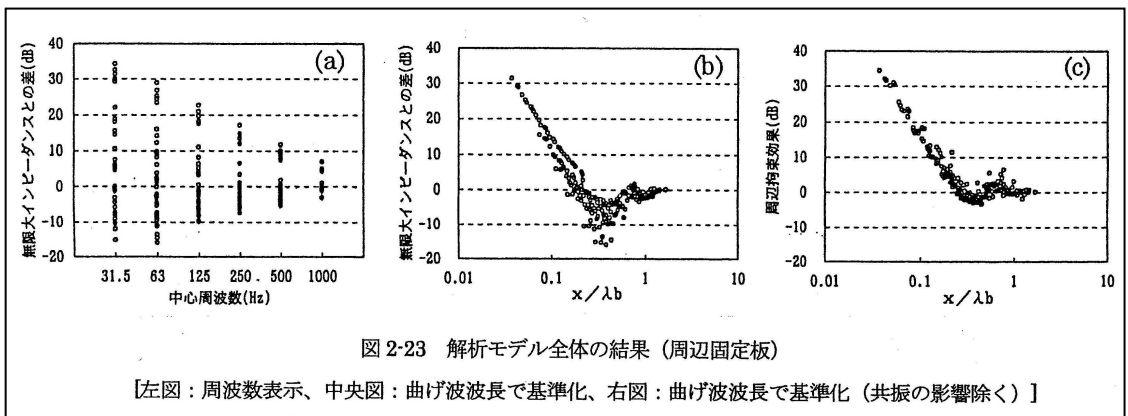


図 3-3 拡散度法によるインピーダンス上昇量の評価の例

す。しかし、その中間部分 (x/λ_b が 0.1~1 の間) ではインピーダンスレベルが 0 ~15 dB 程度の範囲で大きくばらついています。この理由は、(b)図の結果には共振によるインピーダンスの低下量が含まれているためであり、正確な端部拘束によるインピーダンスの上昇量を評価するためには、この共振の影響を除外しなければなりません。

拡散度法の場合には、共振によるインピーダンスの低下量は、拡散度指数をパラメータにして具体的な値を算出することができます。計算方法は、既を示した図 2-9 の方法です。これにより各加振点について、板の拡散度指数から求めた共振の影響分を算出し、それを(b)図から引いたものが(c)図です。

この場合には、0.0~15 dB の範囲でバラついた部分がなくなり、おおよそ、 x/λ_b が 0.3 以上でインピーダンスレベルの上昇量が 0.0 dB となり、0.3 以下では端部に近づくにしたがって直線的にインピーダンスが上昇する明確な特性となります。周辺拘束によるインピーダンスの上昇が、板の様々な条件に拘わらず、このような明確で簡単な単一の特性として評価できることは、床衝撃音性能の評価において大変に有利な点となります。

では、周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量の評価は、インピーダンス法と拡散度法でどのように違いがあるのかを図で比較してみます。図 3-1 と図 3-3 の(c)図を重ねたものが図 3-4 となります。赤線が拡散度法での評価ですが、端部に近づくに従って、直線的に値が大きくなっています。

端部に近づくに従ってインピーダンスが直線的に上昇するという事は、図の横軸の単位が対数軸で表現されているため、線形な軸に直せば、端部に近づくに従ってインピーダンスの上昇量が無限大になってゆくことを示しています。これを考えれば、インピーダンスの上昇量の回帰式は、端部に近い所では直線にならなくてはならず、インピーダンス法のような特性にはならないということになります。インピーダンス法では、共振の影響と周辺拘束の影響を分離せずに（分離できずに、の方が正しいかもしれませんが）、実測結果をそのまま利用しているため、このような特性になっているのです。

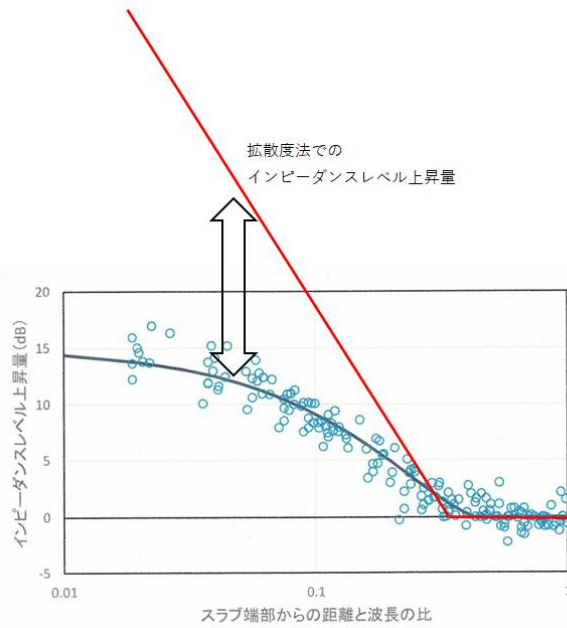


図 3-4 インピーダンス上昇量に関するインピーダンス法拡散度法の比較

図 3-5 は、参考までに図 3-4 の横軸を線形表示したものであり、拡散度法の場合には、柱の近傍ではインピーダンスが指数的に上昇し、無限大に近づく様子が確認できます。

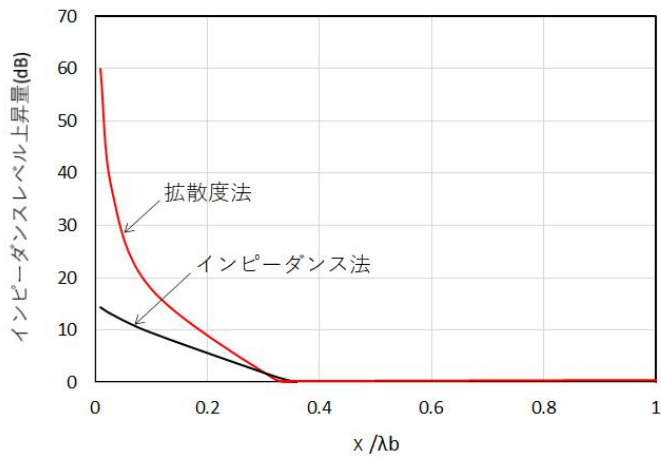


図 3-5 図-3-4 の横軸を線形表示した場合の比較

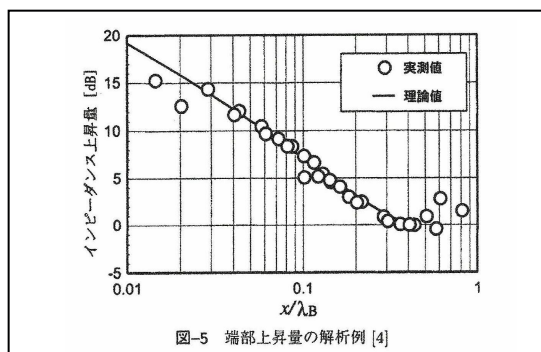


図 3-6 下記(注) の文献に示されているインピーダンス上昇量の特性

ちなみに、インピーダンス法に関連する論文（下記(注)）では図 3-6 のような結果も示されています。この図では、インピーダンス上昇量の理論値としてちゃんと直線が示されています。しかし、最終的な学会インピの解説書では、図 3-1 に示されるような端部に行くとき湾曲するような特性が採用されてしまっています。経緯は分かりませんが残念な結果です。

<追補>

図 3-1 に示されているインピーダンスレベル上昇量の実測例に関してですが、この考え方のもとになっているのは実用的インピでの方法です。実測によりインピーダンスレベルを求めているのですが、実は、実用的インピでの曲げ波の波長は重量衝撃源の衝撃周波数（25 Hz）の波長としていました。そのため、インピーダンスレベルの上昇量は周波数に関係なく一定としていたのです。これは明らかに間違いです。表 3-1 から表 3-4 を見るまでもなく、曲げ波の波長の長い 63 Hz と波長の短い 500 Hz で同一点のインピーダンスレベル上昇量が同じであるはずはありませんが、それを同じとして扱っていたのです。実用的インピでは、こんな初歩的な間違いを犯していたのですが、幸いなことに、拡散度法の図 3-3 の結果を見れば分かる通り、インピーダンスレベルの上昇量は、端部までの距離を曲げ波の波長で割った値をパラメーターにすれば、周波数に関係なく成立する性格のものだったのです。そこで、「衝撃周波数（25Hz）の曲げ波の波長」の部分で「対象周波数の曲げ波の波長」と文言を書き換えるだけで、インピーダンスレベルの上昇量の図が使えることになっ

(注) 古賀貴士：重量床衝撃音の実用的予測手法（解説）、日本音響学会誌、60 巻 12 号、pp741-746、2004

たのです。正に、瓢箪から駒の世界です。

そこで、学会インピや研究会インピでは、この結果を少しアレンジしてインピーダンスレベル上昇量の評価法として採用しているのですが、ここで紹介したように、それでも大きな問題を抱えていたということです。

3.4 共振および周辺拘束に関する検証結果のまとめ

ここまで共振によるインピーダンスレベルの低下量と周辺拘束によるインピーダンス上昇量の評価の2つについて、インピーダンス法と拡散度法を比較しながら詳細に検証してきました。その結果を以下にまとめます。

これまでの結果を見れば、先に示したインピーダンス法に関する②の疑問、
② 共振の評価では大幅に誤差を含んでいるのに、なぜ最終の計算結果では実測値と良く一致しているのか、
の答えも自ずと理解できることと思います。

図 2-2 の床スラブに関するインピーダンス法の計算例においては、図 2-3 に示されているように計算値と実測値はよく一致しています。しかし、インピーダンス法では、共振の影響評価において実際より 5~10 dB 程度の大きな誤差が生じます。一方、周辺拘束の評価においては逆に-5~-10 dB の誤差が発生します。これらの各々の誤差がそれなりに相殺されて、最終的な結果ではある程度、実測値と一致した結果が得られているのです。

誤差が相殺されるならそれで良いのではないかと思われる方はいないと思いますが、念のために説明しておきます。共振の影響や周辺拘束の影響が適正に評価されていないということは、それぞれの影響にもバラツキや変化がありますから、誤差が小さくなる場合もあれば大きくなる場合もあり、必ずしも必要な精度の打ち消し合いが生じるとは言えません。また、それらの傾向に関して計算方法として正確な評価が出来ないことは、性能予測に関して大変に危険です。すなわち、パラメーターが変化した場合に最終計算結果でどれくらいの差が出るかといった評価が出来ず、間違った方向の結果を示してしまう可能性があるからです。簡単な例で言えば、性能をもう少し良くするために、床スラブ厚をどれくらい増やせば良いかというような検討の根拠が無くなってしまいます。例えば、計算値と実測値がよく一致して

いるとして示されている上記の図 2-2 の床スラブに関して、他の条件を変えずに床スラブ厚だけを 230 mm から 300 mm に変化させて計算してみると、床衝撃音レベルは 63 Hz で 69 dB、等級は LH-46 となり、数値が全く変わりません。これは現実を考えると不自然な結果であり、これでは検討になりません。

誤差が相殺されるなら良いということなら、最初から両方とも評価を行わずに無視することと同じになってしまうのです。床スラブの振動評価に係わる共振や周辺拘束の影響を出来る限り正確に評価し、個々の誤差を最小にしながらそれらの結果を積み重ねてゆくことが、予測計算の精度を確保するために重要になるのです。

共振や周辺拘束だけでなく、インピーダンス法と拡散度法には他にも様々な違いがあります。それらについても次頁以後で説明をしたいと思います。

4. 板振動に関するその他の検証

床の振動評価に関連する幾つかの内容について検証したいと思います。

4.1 インピーダンス法での床スラブ寸法の取り方(小梁の扱い)について

図 4-1 は、学会インピの解説書に載っている計算例の説明図です。これを見ると、解析対象となっている床スラブは端部④の小梁部分までとなっています。小梁の先にも床スラブは続いています、小梁部分で区切って計算をしています。インピーダンス法の計算では、床スラブについて共振によるインピーダンス低下量と周辺拘束によるインピーダンス増加量を計算しますが、これらの評価に関して、小梁で区切られた部分だけを対象とするのは適正なのでしょうか。

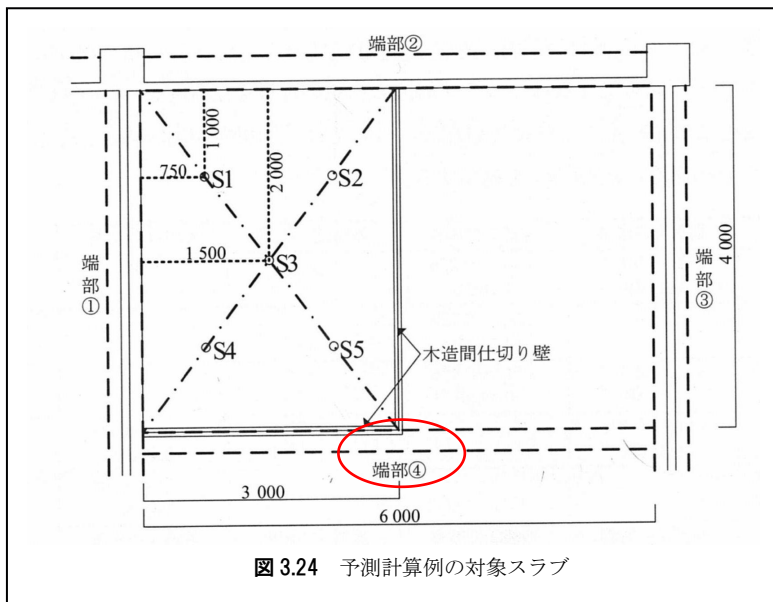


図 4-1 学会インピでの小梁の取り扱い (学会インピ解説書より)

また、図 4-2 は研究会インピの解説書に示されている床スラブの大きさの取り方、すなわち小梁の扱いに関する説明書です。図 4-3 は、その計算表の一部を抜粋して示したのですが、ここでも床スラブの大きさは小梁で区切られた部分として計算していることが分かります。図 4-3 では、この寸法で計算された床スラブの 1 次固有振動数 (周辺固定の 1 次固有振動数計算値を 0.8 倍したもの) が 76.5 Hz であるとしています。

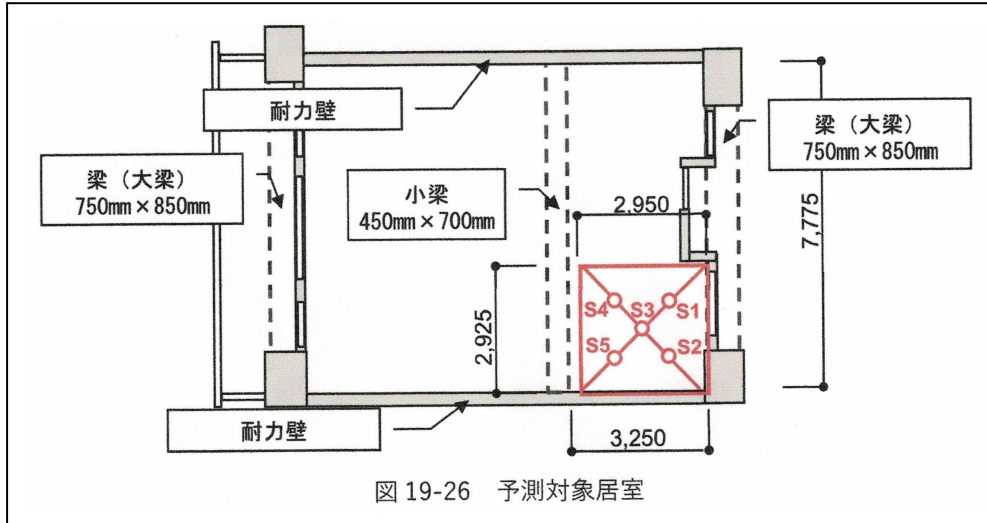


図 4-2 研究会インピでの小梁の取り扱い（研究会インピ解説書より）

③スラブ寸法の入力				
x方向寸法	3,250	mm	スラブ面積	計算方式: 大脇・山下式2021
y方向寸法	7,775	mm	25.3 m ²	1次固有振動数: 76.5 Hz (63Hz帯域)
④加振点位置の入力(梁からの距離)				

図 4-3 研究会インピでの床スラブ寸法と1次固有振動数（研究会インピ解説書より）

このように学会インピでも研究会インピでも、床スラブの大きさは小梁で区切られた部分までとしています。

では、本当に床スラブは小梁で振動的に区切られるのかどうか、実測例を参考までに見てみましょう。図 4-4 は小梁が 2 本ついた床スラブ（いわゆる目型スラブ）であり、この床スラブの固有振動数、および固有振動モードを実測した結果が図 4-5 です。まず、1 次の固有振動数は 27.0 Hz であり、この時の固有振動モードを見れば、RC 壁付の大梁部は固定端となっていますが、小梁部には変位が見られ、小梁と床スラブが一体となって振動している様子が確認できます。インピーダンス法で想定しているような小梁で囲まれた部分が振動している状態ではありません。固有振動数に関しても、仮に小梁で囲まれた部分(3,350×6,000)を床スラブとすれば、周辺固定時の固有振動数の計算値は 52.3 Hz、その 0.8 倍とすれば 41.8 Hz となり、実測結果とは大きく異なってしまいます。

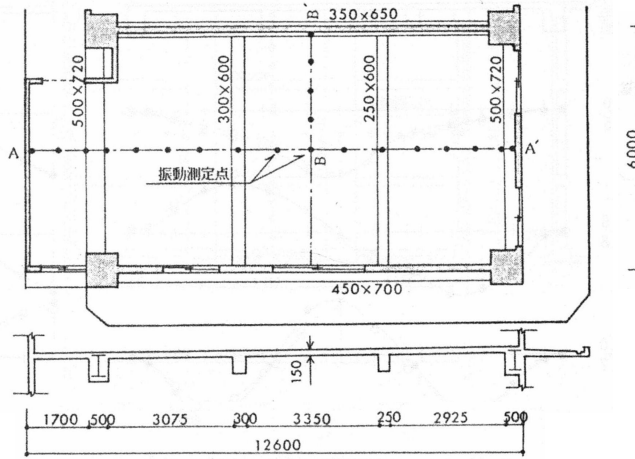


図 4-4 実測対象の小梁付床スラブ（下記（注）より）

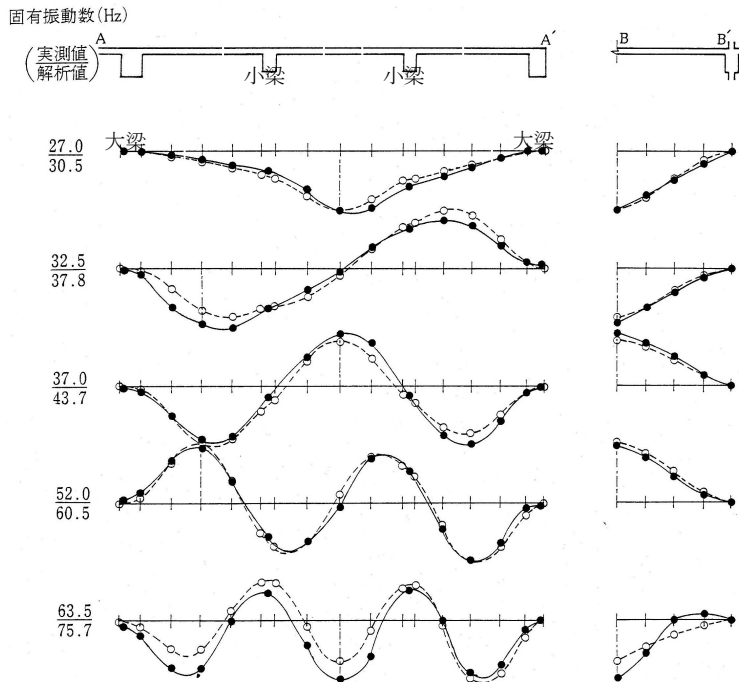


図 4-5 小梁付床スラブの固有振動数、固有振動モードの実測例（下記（注）より）

小梁で挟まれた部分が大きく振動している 3 次の固有振動モードを見ても、その部分が単独で振動しているわけではなく、床スラブ全体が 3 次のモードを呈している波動的な状態であり、当然ながら、小梁部にも回転が生じており、周辺固定時と

（注） 橋本典久： 建築物床板の振動と音響放射に関する研究、東京大学学位論文、1994 年

は異なる振動状態であると言えます。これらの結果から分かるように、小梁付きの床スラブに関しては、小梁で区切られた部分を床スラブとして扱うのではなく、小梁を含めた床スラブ全体の振動性状を評価し、その上で小梁の影響を考慮することが必要になります。なお、図 4-4 の床スラブは厚みが 150 mm とかなり薄い場合ですが、現在のように 250~300 mm のボイドスラブなどでは、床スラブと小梁の剛性差が更に小さくなるため、ますます小梁で区切られることはなくなります。

次に、研究会インピの図 4-2 についても検討してみましょう。この床スラブを FEM で数値解析した結果を示します。FEM 解析の精度の良さは、図 4-5 の実測値と解析値の比較から十分に示されていると思います。

FEM による解析モデルは図 4-6 であり、固有値解析を行い 10 次までの固有振動数と固有振動モードを解析した結果が図 4-7 です。図 4-7 の固有振動モードは、床スラブの長辺方向中央部（図 4-6 参照）のモード形を示しています。ここでは 1 次固有モードから 8 次の固有モードまで示しました。

まず、1 次の固有振動モードですが、この場合にもやはり小梁は固定端とはなっておらず変位が生じており、床スラブ全体が振動する形となっています。この時の 1 次の固有振動数は 24.3(Hz) となっており、図 4-3 に記載されている値の 76.5(Hz) とは全く異なります。

2 次のモードでは、小梁と大梁で挟まれた当該部分の振動が大きくなっていますが、この場合も固有振動数は 34.0(Hz) です。また、重量床衝撃音予測計算で重要な

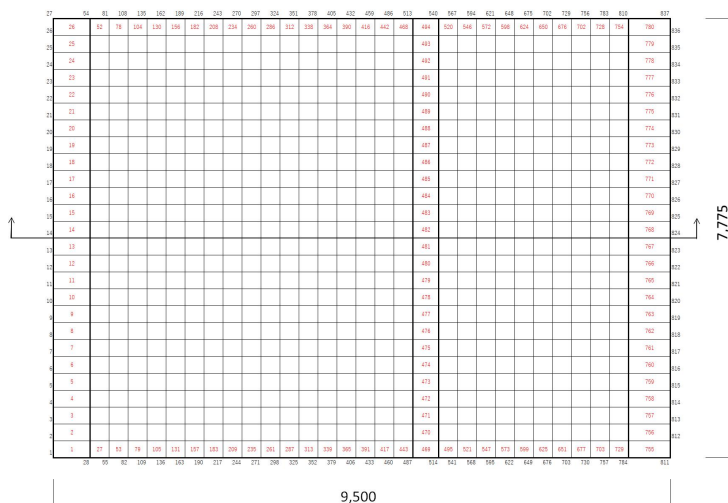


図 4-6 小梁付床スラブ（図 4-2）の解析モデル

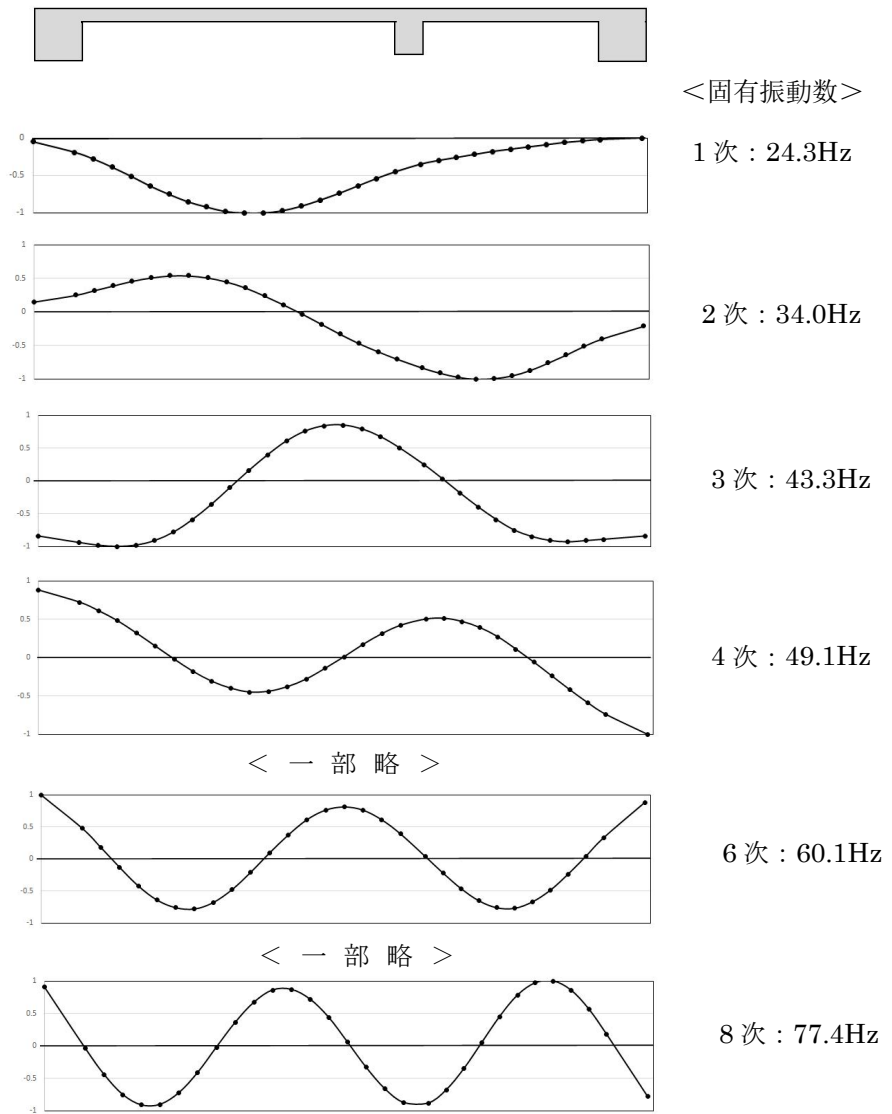


図 4-7 小梁付床スラブ（図 4-2）に関する固有振動数および固有振動モードの解析結果

63Hz 帯域に関して、固有振動数が 60~70(Hz)となる高次の固有振動モード（6次、8次など）を見ても、何れも波動的なモード形となっており、小梁が固定端となるような固有モードは全く見られません。これらの結果を見れば、図 4-2 のような小梁付き床スラブを、小梁で区切られた部分を切り出して計算することは、現実の振動性状と全く異なることは明らかです。

4.2 拡散度法での床スラブ寸法の取り方(小梁の扱い)について

では、拡散度法では小梁をどのように扱っているのでしょうか、検証してみます。拡散度法では、床スラブの大きさは大梁で囲まれた床スラブ部分としています。したがって、小梁で区切られた部分を計算対象とするのではなく、床スラブ全体を対象として、その上で小梁による共振への影響と小梁による拘束の影響について評価しています。

まず、小梁が付くことで共振によるインピーダンスの低下量にどの程度の影響があるかを調べています。図 4-8 は拡散度法解説書に示されている固有振動数の解析結果ですが、床スラブの中央に小梁が 1 本付いた時と小梁のない場合の固有振動数分布を求めたものです。これによれば、小梁が付くことによって当然、固有振動数は変化（例えば 1 次固有振動数が 13.2Hz→22.2Hz）しますが、各周波数帯域での固有モードの数は大きくは変化しません。拡散度法では、固有モードの数から拡散度指数を求め、拡散度指数によって共振の程度が変化するとしていますから、固有モード数が大きく変化しないということは、共振の程度が変化しないこととなります。これらの結果から、拡散度法では小梁による共振への影響は無視できるとしています。

一方、小梁による拘束の影響、すなわちインピーダンスレベル上昇量に関しては、

表 2-6 小梁の有無による帯域内固有モード数の比較 (FEM 解析結果)

		<31.5Hz>			<63Hz>			
平板スラブ	固有振動数(Hz)	13.2	22.5	38.2	43.5	52.7	60.4	68.2
	帯域内モード数	3			4			
小梁付床版	固有振動数(Hz)	22.2	22.5	42.4	52.7	55.0	60.4	85.9
	帯域内モード数	3			4			

<125Hz>										
89.3	90.2	94.4	103.3	118.5	119.2	122.0	126.2	141.0	162.9	172.5
11										
90.2	93.6	103.3	105.2	121.8	125.5	140.1	141.4	151.8	163.9	182.1
10										

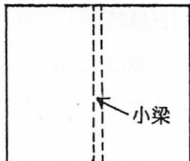


図 4-8 小梁による床スラブの固有振動数および固有振動モードの変化 (拡散度法解説書より)

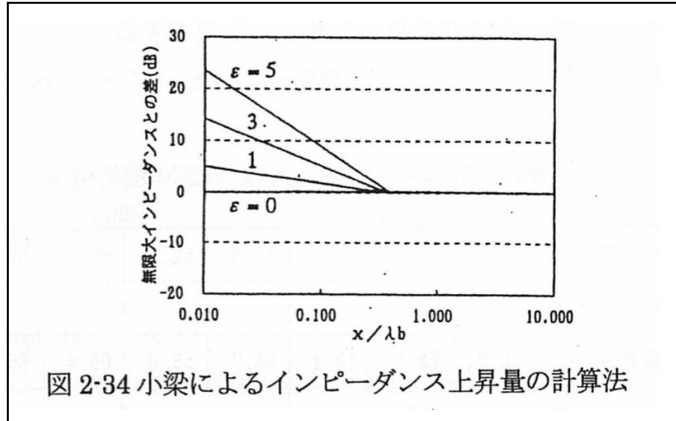


図 4-9 拡散度法における小梁によるインピーダンス上昇量の評価（拡散度法解説書より）

図 4-9 に示すように、端部の周辺拘束の場合と同様な形で評価が行われています。図中の ε はスラブ厚に対する小梁の梁せいの倍率、

$$\varepsilon = (d - h) / h \quad (4.1)$$

ただし、 d : 小梁の梁せい(m)、 h : スラブ厚(m)

であり、図 4-9 を式で表せば、小梁によるインピーダンス上昇量 $\Delta\delta$ は

$$\Delta\delta = -3.0\varepsilon \cdot \log\left(\frac{x}{\lambda_b}\right) - 1.2\varepsilon \quad (\text{ただし } \Delta\delta > 0) \quad (4.2)$$

となります。

以上のように、拡散度法では小梁で区切られた部分ではなく、床スラブ全体を対象として計算がなされ、その上で小梁の影響が評価されていることが分かります。どちらが適正かは既に示した通りです。

4.3 ボイドスラブの換算についての検証

現在の床スラブの殆どはボイドスラブです。したがって、ボイドスラブに対する床衝撃音計算を適正に行うことは大変に重要です。

FEM などの数値計算法では、ボイドの断面構成をそのまま解析に持ち込むことも可能ですが、インピーダンス法や拡散度法のような簡易計算法では、ボイドスラブを均質な床スラブに換算して計算する必要があります。ここでは、このボイドスラブの均質板への換算について検証してみたいと思います。

図 4-10 は、学会インピの解説書に載っているボイドスラブの扱いに関する記述です。図のような矩形ボイドに関して、曲げ剛性が等価になる均質板としてのスラブ厚を算出して固有振動数を計算しています。ボイドスラブのスラブ厚は図の通り 270 mm ですが、均質な板に換算すると 226 mm になるとして計算しています。

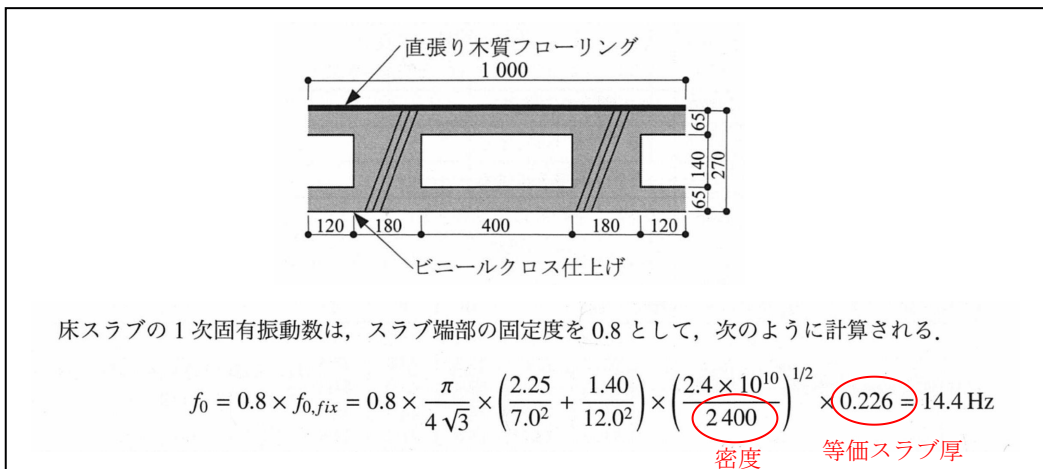


図 4-10 学会インピにおけるボイドスラブ換算の例（学会インピ解説書より）

ここで問題なのは密度です。図 4-10 では、密度はそのまま 2400 kg/m^3 の値が使われています。しかし、これでは板の条件が変化してしまい、ボイドスラブと等価な均質板にはなりません。

板の曲げ振動は、振動変位による歪みエネルギーと運動エネルギーの関係によって決定されます。例えば、板の固有振動数は歪みエネルギーと運動エネルギーの最大値が等しいという関係から算出されます。すなわち、歪みエネルギー（剛性）が

等しいとして等価スラブ厚を求めた場合、それに併せて運動エネルギー（質量）も等価にしなければならないのです。

具体的には、床スラブの実際の重量を求め、等価スラブ厚とした時と同じ重量になるように密度を修正しなければなりません。すなわち、等価密度を求めなければならないのです。

仮に、図 4-10 のボイドが 1 方向のボイドだとして、図の断面だけについて計算してみます。図の断面の面積は

$$s = (0.4 + 0.12 + 0.12) \times (0.065 + 0.065) + 2 \times 0.18 \times 0.27 = 0.1804 m^2$$

等価密度 γ は、床スラブの重量が同じになるとして、

$$0.226 \times \gamma = 0.1804 \times 2400$$

となり、これより $\gamma = 1924 \text{ kg/m}^3$ でなくてはならないのです。 γ が 2400 と 1924 では値が大きく異なります。図 4-10 に記載されている固有振動数も 14.4 Hz ではなく、2400 を 1924 に置き換えて 16.1 Hz が正しい値となります。

等価な密度を用いないと適正な評価を行えないというのは、固有振動数だけの問題ではありません。動的現象である板の振動応答では、質量は剛性と同様に大きな要因であり、本来は、これを適正に評価しなければ床衝撃音の予測計算でも大きな誤差を生じることになります。インピーダンス法では、質量の違いによる振動応答への影響を無視してしまっていることになり、これは研究会インピでも同じです。

では、拡散度法では密度（単位体積質量）（注：拡散度法では単位体積重量となっており用語を間違っている）はどのように扱われているのでしょうか。拡散度法には、図 4-11 に示すように「ボイド換算シート」というページがあり、そこにボイドの条件を入力すると、自動的に換算後の等価板厚、等価単位体積質量が表示されます。図 4-11 の例では、板厚は 250 mm から 244 mm となり、単位体積質量では 2400 kg/m^3 から 1684 kg/m^3 (0.7 倍) へと大きく変化しています。無限大板の駆動点インピーダンスの式(2.5)をみれば分かるように、単位体積質量は振動応答に平方根で利きますから、この差だけで 1.5 dB の差に繋がります。有限な板ではこれより差が大きくなりますから、おおよそ 2~3 dB の差になることが考えられます。このように、単位体積質量を等価な値に換算していない計算では、大きな誤差を含むことに

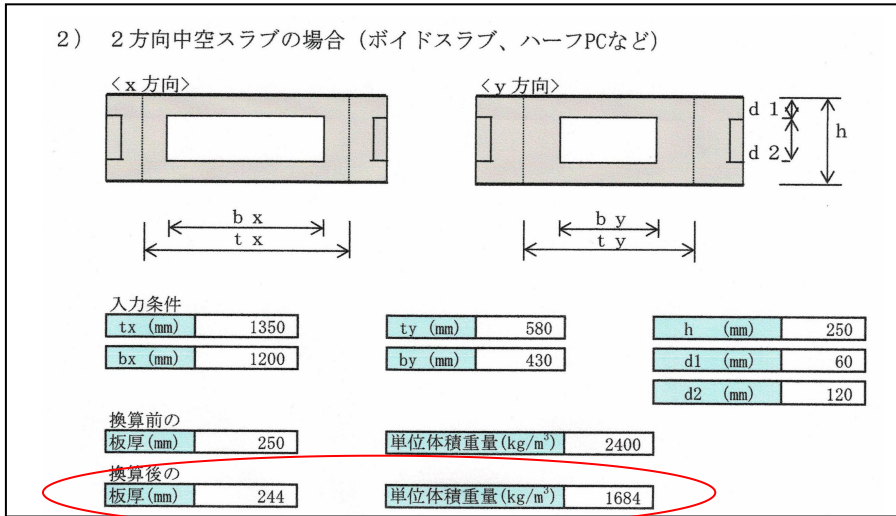


図 4-11 拡散度法におけるポイド換算シート (拡散度法解説書より)

なります。

4.4 2方向ポイドスラブの扱いについて

インピーダンス法では、学会インピでも研究会インピでもポイドスラブは1方向のポイドしか想定していません。学会インピの解説書では、「スラブ全体をみて、強軸・弱軸が明確である場合には、弱軸断面を対象にする必要がある。」と書いていますが、もともと2次元のポイド (図 4-12 のように1方向に連続したポイドではないもの。図 4-11 のように x 軸と y 軸で断面構成が異なる場合も含む) は2次元である事を考慮して均質板に換算すべきですが、これを1次元ポイド (1方向に連続したポイド) として計算しているのです。これでは明らかに現実の条件とは異なり、誤差の要因となってしまいます。単位体積質量を換算しないことと併せ2重の誤差になりますが、なぜ2次元として扱わないかは不明です。

2次元ポイドの換算はそんなに難しくはありません。方法は、図 4-12 に示されているポイドスラブの1ユニットに関し、断面2次モーメントを1方向に積分してゆき平均を求めればよいだけです。当然ですが、これは x、y のどちらの方向に行っても同じ結果になります。これは結局、断面2次モーメントを図 4-12 の各部の面積で平均したものになりますから、換算後の等価板厚の算出式は式 (4.3) となります。

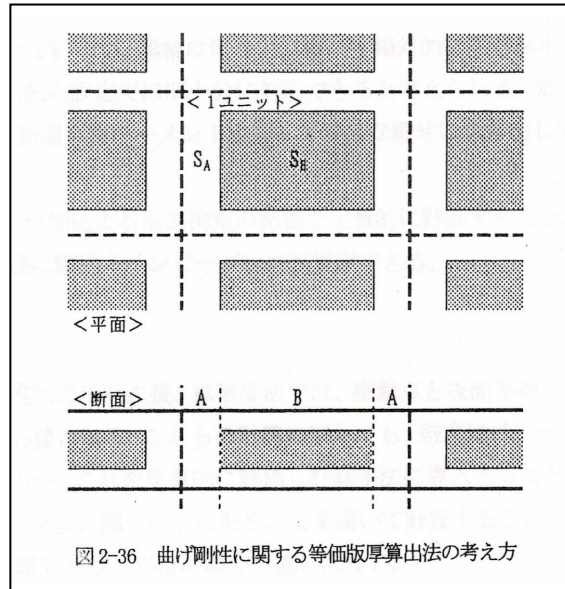


図 4-12 2次元ボイドの等価板厚算出法の考え方（拡散度法解説書より）

$$t_e = \sqrt[3]{12 \cdot \frac{S_A I_{0,A} + S_B I_{0,B}}{S_A + S_B}} \quad (4.3)$$

S_A, S_B : 密実部、ボイド部の面積(m²)

$I_{0,A}, I_{0,B}$: 密実部、ボイド部の単位幅の断面 2 次モーメント

式 (4.3) は、ボイド位置が断面中央にある場合には、厚みだけのもっと簡単な式になります。また逆に、ボイドが球状の場合などには、実際に断面 2 次モーメントを積分しなければなりません、これも表計算ソフトを使って数十分割の計算をすれば簡単に求まります。

上記のような考えで等価板厚、等価単位体積質量を求めることの適否を数値計算法で検証した結果を紹介します。解析モデルは図 4-13 に示すように矩形のボイドをもつ床スラブです。この時の、等価均質板に換算した時の値は表 4-1 になります。

この 2 つの条件に関して、数値計算法 FEM で解析した結果を示します。1 つは、ボイドによる断面方向の変化をそのままに解析モデルとして解析した結果（ボイド

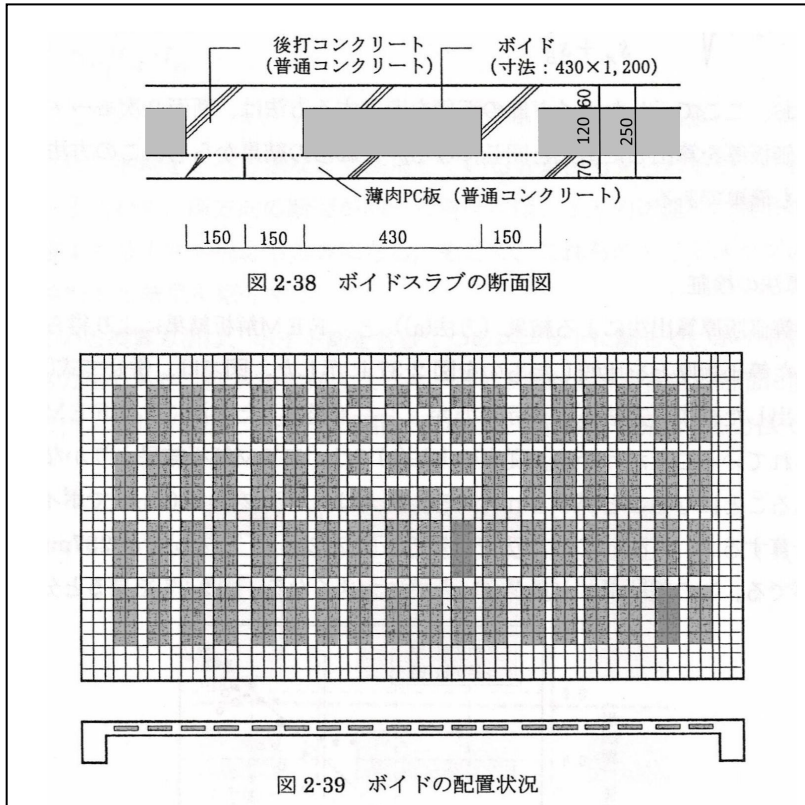


図 4-13 2次元ボイドスラブの解析モデル (拡散度法解説書より)

表 4-1 2次元ボイドスラブの等価均質板への換算値 (拡散度法解説書より)

表 2-7 等価均質板への換算結果

種別	板厚 (mm)	単位体積重量 (kg/m ³)
ボイドスラブ	250 (ボイド厚120)	2400
等価均質板	244	1684

表 4-2 等価均質板への換算値による床衝撃音解析結果の比較 (拡散度法解説書)

表 2-8 換算値による計算結果の比較

内 容		中心周波数 (Hz)				
		31.5	63	125	250	500
床衝撃音レベル 解析値 (dB)	ボイドスラブ	81.1	73.8	59.1	45.5	31.8
	等価均質板	81.1	73.4	59.2	45.7	32.0
レベル差 (dB)		0.0	0.4	-0.1	0.2	0.2

スラブ)、もう一つは換算した等価均質板に関する計算結果です。FEMによる重量床衝撃音解析結果は表 4-2 の通りであり、低い周波数から高い周波数まで大変によく一致しており、等価均質板への換算方法が妥当であることが示されています。

以上に示してきたように、ボイドスラブの均質板への換算を適切に行えば、十分にボイドスラブの簡易計算が可能であることが分かりますが、インピーダンス法では、① 単位体積質量を換算していないこと、② 2方向のボイドを考慮していないこと、の2つの問題点があり、これらによる計算誤差を内在していると言えます。

5. 音響放射に関する検証

床の振動評価と並んで重要なのが、振動する板からの音の放射、すなわち音響放射の評価です。音響放射の取り扱いに関してもインピーダンス法と拡散度法では大きな違いがあります。それらについて検証してゆきましょう。

5.1 インピーダンス法の有効放射面積って一体何だ？

音響放射に関して、インピーダンス法に有って、拡散度法には無いものがあります。それは有効放射面積というパラメーターです。これは一体何なのでしょうか。

先に示した表 2-1 を下記に再掲しましたが、その値は 63 Hz で 5.5 dB、125 Hz で 6.9 dB などと大変に大きな値であり、けっして無視できるものではありません。したがって、この有効放射面積というものがどういうものなのかを検証します。

表 5-1 研究会インピの計算表の例（表 2-1 の再掲）

		オクターブバンド中心周波数 [Hz]				
		63	125	250	500	
①	標準衝撃源の衝撃力暴露レベル [dB]	40.0	22.0	11.5	5.5	
③	基本インピーダンスレベル [dB]	119.1				
④	インピーダンスレベル 上昇量 [dB]	S1	4.1	2.0	0.4	0.0
		S2	8.9	5.7	2.5	0.2
		S3	2.6	0.3	0.0	0.0
		S4	0.2	0.0	0.0	0.0
		S5	3.9	2.6	1.2	0.2
⑤	共振によるインピーダンスレベル 低下量 [dB]	0.0	0.0	0.0	0.0	
⑥	加振点別インピーダンス レベル [dB]	S1	123.2	121.2	119.6	119.2
		S2	128.0	124.9	121.6	119.3
		S3	121.8	119.4	119.2	119.2
		S4	119.3	119.2	119.2	119.2
		S5	123.0	121.7	120.4	119.3
⑦	床スラブ内の振動減衰補正量 (ΔL_D) [dB]	-1.7	-2.9	-4.8	-6.8	
⑧	有効放射面積 (S_{eff}) [m ²]	3.6	4.9	5.9	6.7	
	$10 \log_{10} S_{eff}$ [dB]	5.5	6.9	7.7	8.2	
⑨	音響放射係数 (k)	0.5	0.6	1.0	1.0	
	音響放射係数レベル [dB]	-2.9	-2.0	0.0	0.0	
⑩	受音室の吸音力 (A) [m ²]	4.2	4.2	3.8	3.3	
	$10 \log_{10} A$ [dB]	6.3	6.3	5.7	5.2	
⑪	サウンドレベルメータの 動特性補正值 (ΔL_C) [dB]	5.2	5.2	5.2	5.2	
	室内最大音圧レベル [dB]	S1	68.6	55.3	46.3	39.7
		S2	63.8	51.6	44.3	39.6
		S3	70.0	57.1	46.7	39.7
		S4	72.5	57.3	46.7	39.7
		S5	68.8	54.8	45.5	39.6
	床衝撃音レベル [dB]	69	55	46	40	

床衝撃音は固体音であり、加振により発生した板の振動から音が放射されて生じます。このように振動する物体から放射される音のパワー (W) は、理論的に式(5.1)によって表されます。

$$W = \sigma \rho c \langle v^2 \rangle S \quad (5.1)$$

ここで、 σ : 音響放射率、

ρc : 空気特性インピーダンス

(ρ : 空気の密度(kg/m³)、 c : 音速(m/sec))

$\langle v^2 \rangle$: 板振動速度の実効値 (板面 2 乗平均値)

S : 板面積(m²)

まず、音響放射率 σ というのは、振動している板全面からどれだけ効率的に音が放射されるかを表す指標であり、0.0~1.0 の数値で表されます。細い管の中にピストン振動板があり、そこから平面波が放射されているような状態では、振動の変位がそのまま音圧に変換されるため効率は 1.0 になりますが、曲げ振動をしているような板では、振動の状態や放射される音の打ち消し合いなどにより効率は 1.0 より小さくなります。これら音響放射の理論はピストン板、モード振動板、拡散振動板など種々の条件に関して理論的に解明されていますが、それらは複雑なので省略します。お知りになりたい方は、弊著「騒音防止のための音響放射の理論と実際 (工文社)」をご参照ください。

また、板振動の実効値 $\langle v^2 \rangle$ は、振動している板全面の振動速度を、時間および空間に関して 2 乗平均した値であり、この値と音響放射率で音響放射パワーが決定されます。

この式 (5.1) を見れば分かるように、この式の中には、有効放射面積というパラメータはありません。面積はありますが、それは板の面積そのもの (辺長 $a \times$ 辺長 b) であり、面積を増減するという特記はありません。では、有効放射面積とは一体何なのでしょう。

有効放射面積という考え方が最初に出てきたのは実用的インピーダンスの計算法の中でした。図 5-1 がその説明図です。その説明文では、「大梁、小梁または梁+壁で支持

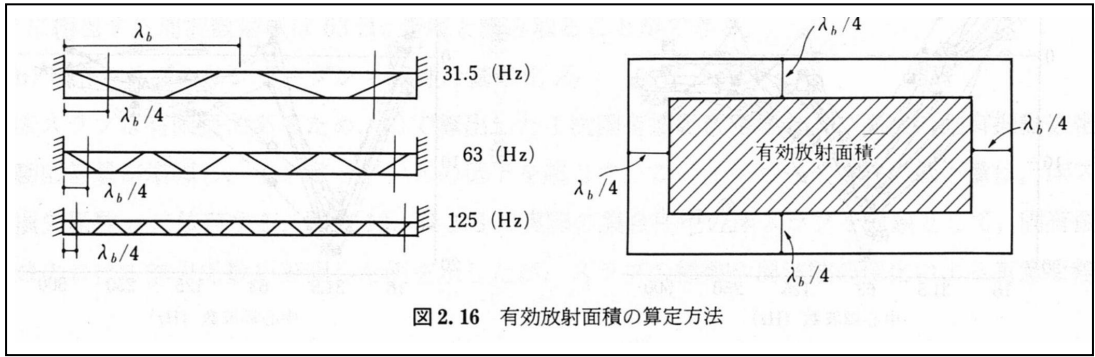


図 2.16 有効放射面積の算定方法

図 5-1 有効放射面積の説明図（実用的インピ解説書より）

された床スラブは周辺部の拘束性が大きく、床スラブの振動振幅が端部において減少してゆくため、図 2.16 のように等価振幅を有する範囲を考え、スラブ周辺から対象周波数の曲げ波の波長 λ_b の 1/4 の部分を除いた範囲を有効放射面積として扱う」となっています。

この考え方は、学会インピや研究会インピでも受け継がれ、それぞれ除外する範

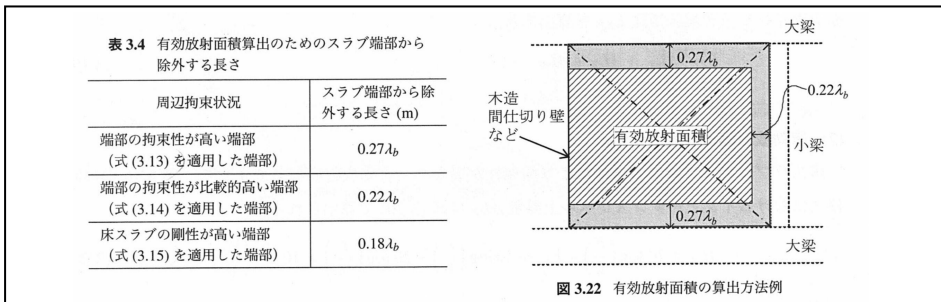


図 3.22 有効放射面積の算出方法例

図 5-2 学会インピでの有効放射面積の説明図（学会インピ解説書より）

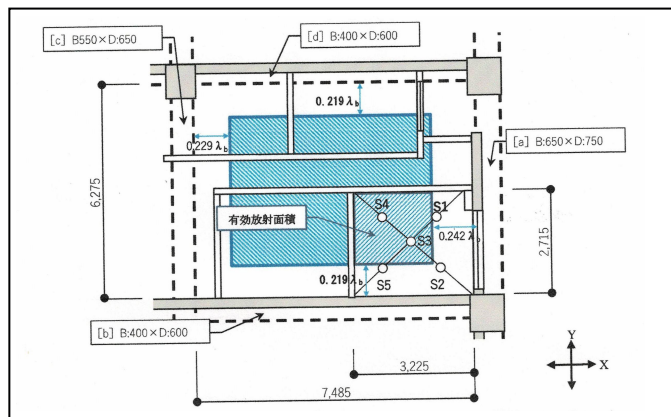


図 5-3 研究会インピでの有効放射面積の説明図（研究会インピ解説書より）

囲の設定は微妙に違いますが、図 5-2、図 5-3 に示すように基本的には同じ計算を行っています。

端部は振動振幅が小さいため、等価振幅の範囲から除外するということが、式 (5.1) で示したように、音響放射では、端部の小さい振幅の部分も含めて音響放射率と振動速度実効値を計算することになっています。インピーダンス法でも音響放射率は考慮されており、式(5.1)に則ったものになっていますので、周辺部分を除外する必要はないはずです。

有効放射面積の考え方の問題点を端的な例で示したいと思います。仮に、下記のような条件の床スラブでは有効放射面積はどうか計算してみます。

床の大きさ：4.0 m×3.5 m、床スラブ厚 300 mm、（ヤング率： 2.40×10^{10} N/m²、単位体積質量：2400 kg/m³）の場合、63 Hz の場合の曲げ波の波長は 5.26 m ですから、両側の $\lambda_b/4$ を除外すると図 5-4 となります。この場合の有効放射面積は僅か 1.2 m² しかありません。床全体の 1/12 しか音が放射されないことになってしまいます。こんなことが現実的ではないことは説明の必要もないでしょう。

また、31.5 Hz の場合は、曲げ波の波長は 7.44 m になりますが、この場合には $7.44/4 \times 2 = 3.72$ m ですから、辺長 3.50 m より除外部分が大きくなり、有効放射面積が 0 となり、音は全く放射されないこととなります。しかし、31.5 Hz の音が出ないなどということは現実的に全くありえません。

もっと分かりやすく説明すれば、図 5-5 のように室 A では 63 Hz の床衝撃音が発生しますが、室 B では床衝撃音レベルは発生せず 0 dB であるということにもなり

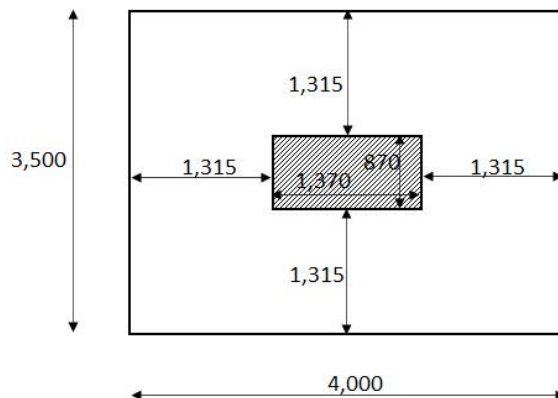


図 5-4 有効放射面積の計算例 (63Hz)

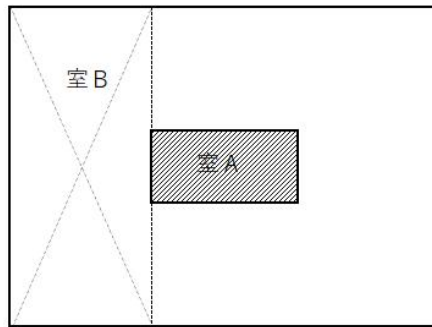


図 5-5 有効放射面積の説明図

ます。こんな奇妙な計算法が、有効放射面積というパラメーターなのです。

このような結果は、床スラブの条件設定がおかしいからだという反論があるかもしれませんが、上記の条件は、小梁などで区切られた床スラブを対象とするインピーダンス法では普通に存在する条件であり、また、純ラーメン構造の場合には四周が大梁の条件でも成立するものです。

有効放射面積というパラメーターは、床スラブの厚さが 150 mm 程度と、現在と較べてかなり薄い時代に考えられたものです。このような条件の時には、曲げ波の波長も短くなるため有効放射面積の奇妙な面はあまり目立つことはありませんでした。そこで、その数値を用いて計算結果を調整するということを考えたのだと思います。しかし、現在の床スラブの厚みは 350 mm というものも普通に用いられます。図 5-4 を床スラブ 350 mm や 400 mm で考えればますます不合理になってきます。

式(5.1)のところで説明したように、振動板から音がどれくらい有効に放射されているかは音響放射率によって表されていますので、面積的に調整をする必要などないのです。ちなみに、インピーダンス法では音響放射率も計算のパラメーターに含まれていますので、これでは 2 重になってしまいます。

インピーダンス法の最初は、床面積が 20 m² 程度の小スラブでの実測結果に合うように作られたものでしたが、大型スラブが出現してくると計算法としての不整合性があらわになり、そこで大型スラブ用の計算法を新たに作り直しました。しかし、そこにはやはり有効放射面積というパラメーターは残っていました。

有効放射面積というパラメーターが不要で、室全体の面積で計算するということになれば、表 5-1 の計算表に示されているように、現在はよく合っているという計算結果が、条件にもよりますが大きな誤差が生じることになってしまいます。

図 5-3 の研究会インピの計算例に関して、具体的な数値を調べてみましょう。表 5-2 は研究会インピの解説書に記されている有効放射面積です。これを室全体を放射面積とした場合と比較したものが表 5-3 となり、63 Hz で約 4 dB の差となっています。設定条件にあるように、これは床スラブが 230 mm の時の結果です。仮に床スラブ厚が 300 mm や 350 mm になれば、この差は更に大きくなり 5 dB 以上にもなります。有効放射面積はインピーダンス法の精度に大きく係わる問題なのです。

表 5-2 有効放射面積の計算値（研究会インピ解説書より）

表 16-9 有効放射面積 S_{eff} (単位: m^2)				
	オクターブバンド中心周波数 [Hz]			
	63	125	250	500
有効放射面積 S_{eff}	3.59	4.85	5.88	6.66

表 5-3 有効放射面積と全面積との計算誤差

計算法	中心周波数 (Hz)			
	63	125	250	500
有効放射面積 S_{eff} (m^2)	3.59	4.85	5.88	6.66
室の全面積 S (m^2)	8.76			
差(= $10\log(S/S_{eff})$) (dB)	+3.9	+2.6	+1.8	+1.2

以上、有効放射面積の問題点について説明してきましたが、一番大きな問題点は、有効放射面積というパラメーターの存在が、物理的にも理論的にも全く証明が出来ていないことです。インピーダンス法という計算の中で便宜的に用いられていますが、仮に、この有効放射面積が物理的に意味があるものとして実際に存在するなら、そのことを研究成果や論文として明確に立証する必要があるのですが、そのような正規の研究論文は見当たりません。

5.2 拡散度法での音響放射の計算法

では、拡散度法における音響放射の扱いも見てみましょう。詳細は、拡散度法の解説本を参照して頂くことにして、ここでは、その概要をインピーダンス法との比較を中心として説明します。

まず、拡散度法においては有効放射面積というものは存在しません。その理由は既に述べた通りです。拡散度法での音響放射の計算においては、基本的に式(5.1)に則って行われています。その上で床衝撃音を計算するための以下の2つの項目が考慮されています。

- ① 室音響放射率の算出
- ② 音場補正の考慮

です。これらの内容について紹介しますが、既に示したインピーダンス法の音響放射の扱いと比較しながら読んで頂ければ、その違いが明確になると思います。

まず、室音響放射率についてですが、床衝撃音は室単位の計算になりますから、音響放射率の評価も室を対象に算出する必要があります。音響放射率の既往計算法の殆どは、振動板全体（この場合には床スラブ全体）を対象としたものですから、床衝撃音に関しては、床スラブの一部となる室部分に関する部分音響放射率を評価する必要があります。

また周波数領域に関しては、単一モード振動時のモード振動音響放射率から拡散振動音響放射率へと、周波数とともに変化することになりますから、それぞれに対する室音響放射率を算出しなければなりません。

まず、1次モード振動時の部分音響放射率ですが、基本となる板全体に関する1次モード振動の音響放射率は理論的に、

$$\sigma = \lambda_c^2 / s_p \quad (5.2)$$

λ_c : コインシデンス周波数での曲げ波の波長 (m)

s_p : 床スラブ全体の面積 (m²)

となります。音響放射率は一般的に面積に対応するため、この時の部分音響放射率のレベル値 (σ_L) は、板全体の面積に対する室部分の床面積の比を用いて次のように推定されます。

$$\sigma_L = 10 \log \left(\frac{\lambda_c^2}{s_p} \cdot \frac{s_R}{s_p} \right) \quad (5.3)$$

s_R : 室部分の床面積(m²)

この式はあくまで推定であるため、その精度を確認するため、単一モード振動分布をもとに、音響放射率の数値計算法（離散的数値計算法）を用いて結果を比較検討しています。

図 5.6 がその結果であり、式(5.3)は数値計算結果の値と大変よく一致することが示されており、式(5.3) の簡単な式で、1次モード振動時の部分音響放射率を十分に表されることが示されています。

次に拡散振動の場合ですが、この場合には部分放射率も板全体の放射率も基本的に同じであり、コインシデンス周波数 (f_c) 以上で音響放射率が1となります。また、1次固有振動数以下の周波数では、モード振動の音響放射率は周波数の2乗に

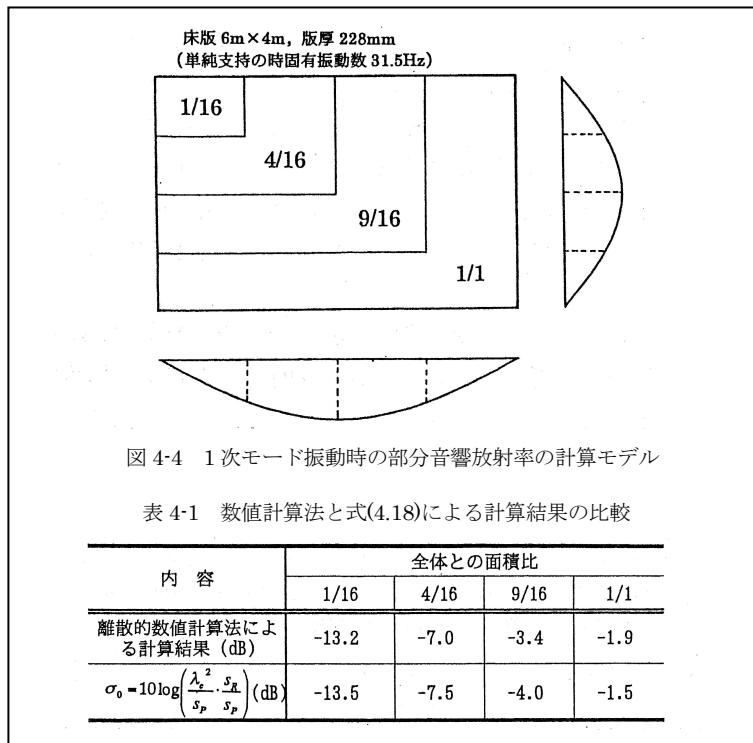


図 5-6 モード振動時の部分音響放射率の計算精度（拡散度法解説書より）

$$f < f_{1,S} \quad 10 \log \sigma = \sigma_L + 20 \log(f / f_{1,S}) \quad (\text{dB}) \quad (4.19)$$

$$f_{1,S} < f < f_c \quad 10 \log \sigma = \sigma_L \cdot \frac{\log(f_c / f)}{\log(f_c / f_{1,S})} \quad (\text{dB}) \quad (4.20)$$

$$f_c < f \quad 10 \log \sigma = 0 \quad (\text{dB}) \quad (4.21)$$

ここで、 $f_{1,S}$: 単純支持板の1次固有振動数 (Hz)

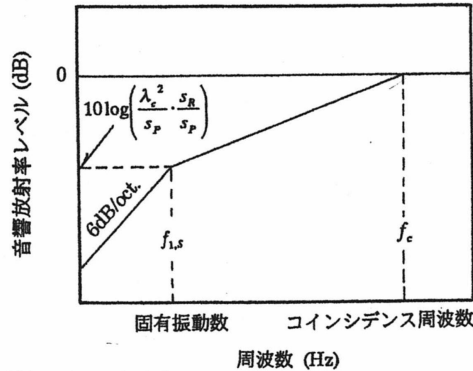


図 4-5 室音響放射率の周波数特性

図 5-7 室音響放射率の計算法 (拡散度法解説書より)

比例することから、拡散度法での室を対象とした音響放射率は図 5-7 のように設定しています。

拡散度法では、このように周波数変化によりモード振動から拡散振動に至るまでの室単位の音響放射率を算出しています。また、説明は省略しましたが、式(5.1)に出てくる振動速度の2乗平均値も室毎に算出しています。従ってこれらを用いれば式(5.1)により、室内に放射される音響パワーが計算できるのです。

インピーダンス法の場合には、学会インピでも研究会インピでも、室の音響放射率は採用しておらず、床スラブに関する音響放射率をそのまま用いています。これによる誤差はどれくらいになるか確認します。

表 5-1 に示した研究会インピの計算例に関して、研究会インピの計算結果 (音響放射係数レベル) と拡散度法の音響放射率をレベル化したものでは、表 5-4 に示すようにそれほど大きな差にはなっていません。したがって、本来は物理的に厳密に

表 5-4 音響放射率に関する計算結果の比較 (単位: dB)

計算法	中心周波数(Hz)			
	63	125	250	500
研究会インピ	-2.9	-2.0	0.0	0.0
拡散度法	-1.6	0.0	0.0	0.0

取り扱うべきですが、結果的に数値的には大きな差はないので、これは大目に見て良しとしておきましょう。

音響放射率では、インピーダンス法でも拡散度法でも差が小さいものでしたが、もう一つの問題、②音場補正の考慮、では大きな差が生じるため、物理的に厳密に取り扱う必要があります。

5.3 音場補正の有無による影響

式(5.1)で床スラブからの放射パワー W が求まりますが、床衝撃音レベルを算出するためには、その放射パワーから式(5.4)で室内平均の音の強さ I を求めます。

$$I = \frac{4W}{A} \quad (5.4)$$

ここで、 A : 下室の吸音力(m²)

音の強さのレベルと音圧レベルは近似的に等しくなることから、これより室内平均音圧レベルを求めることができます。この計算の流れは、インピーダンス法でも拡散度法でも同じであり、違いがありません。

ただし、ここには重要な留意点があります。それは、式(5.4)は拡散音場でのみ成立する関係式であることです。重量床衝撃音は音の波長の長い低音域現象(波動音場)ですから、厳密には式(5.4)は成立せず、音の波動性を考慮しなければなりません。このための補正が「音場補正」です。

拡散度法では、この音場の違いを数値解析により検討しています。図 5-8 に示すように、2つの大きさの床スラブと大きさの異なる室を対象として、同じ床スラブの振動速度分布に関して波動計算と拡散音場計算の差を検討しています。

同じ床スラブの振動速度分布に対して、波動音場の計算では波動関数法という方法により計算し、拡散音場の計算では、同じ床スラブの振動速度分布に関して離散的数値計算法という方法により音響放射率を算出し、式(5.4)で平均音圧レベルを計算しています。

これらの波動音場計算結果から拡散音場計算結果を差し引いたレベル差をまとめ

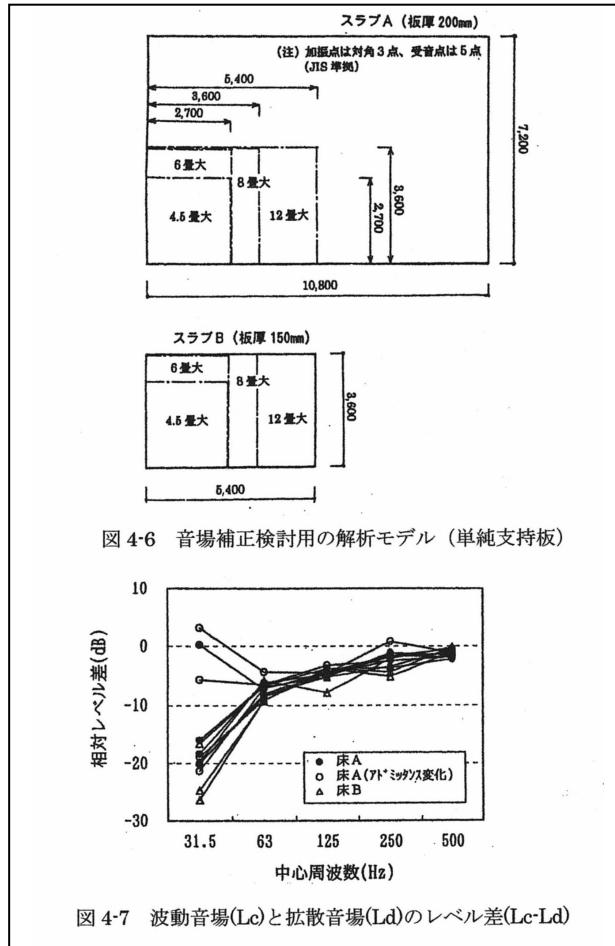


図 5-8 音場補正の検討結果 (拡散度法解説書より)

表 5-5 音場補正の設定値

内容	中心周波数 (Hz)			
	63	125	250	500
音場補正值 (dB)	-7.0	-5.0	-3.0	0.0

たものが表 5-5 です。31.5 Hz の結果は省略しましたが、63 Hz では-7 dB、125 Hz では-5 dB と大変に大きな差になっています。500 Hz になると波長も短くなり、ほぼ拡散音場と見なせるため、音場補正值は 0 dB となっています。

この音場補正值に対する検討ですが、有効放射面積のように根拠のないものではありません。この検討に関する研究は、下記（注）に示したように日本建築学会の論文集に掲載されているものです。一般的に研究成果は学会の大会などに発表しますが、これは専門研究者の審査を受けたものではないため、あくまで一つの資料でしかありません。しかし、建築学会の論文集に掲載された論文は、複数の専門研究者による厳しい審査（査読）を通過して認められたものであり、オーソライズされた内容であると言えます。音場補正の値は、このような性質のものなのです。

さて、ここまで読まれた方はもう気が付かれたのではないのでしょうか。インピーダンス法の音響放射の計算では、有効放射面積というものを導入して室の面積を削減しています。条件にもよりますが、これにより削減しない面積の場合より 5 dB 前後（63 Hz の場合）、値が小さくなります。

一方、本来は考慮しなければならない音場補正を無視していますので、この分の値が 63 Hz で 7 dB 程度大きくなるという誤差が生じます。つまり、有効放射面積の誤差を音場補正の誤差で打ち消しているだけというのがインピーダンス法の音響放射に関する計算なのです。これは、床振動評価のところ、共振の影響の誤差を周辺拘束の誤差で打ち消しているという構図と全く同様なのです。

有効放射面積による誤差は条件により値が大きくなったり小さくなったりします。音場補正の誤差はほぼ一定です。これらのことを考えても、打ち消しているんだからいいじゃないかと言うことにはならないのは、既に述べた通りです。

（注） 橋本典久： 拡散音場計算と波動音場計算の差に関する検討、一拡散度法による重量床衝撃音の予測計算法に関する研究 その 2 -、日本建築学会環境系論文集、第 578 号、pp1-8、2004 年 4 月

5.4 その他の音響放射関連項目の比較

音響放射に関連する項目で、床衝撃音計算に組み込まれているものの一つに騒音計の動特性の補正というものがあります。これは、建築技術者の人には分かりづらいので、説明を加えたうえで各算出法について比較をします。

床衝撃音の測定は騒音計を使って行いますが、騒音計のメーターの針の動きには、人間の耳の感覚に近い **Fast** という特性と、針の動きを読みやすくするための **slow** という特性の2つがあります（今は、これらの特性もデジタルに変わっています）。

床衝撃音の測定ではもちろん **Fast** の特性で測定しますが、これまでの床衝撃音の計算で対象となっているのは音の波形の実効値、すなわち2乗平均値です。これらの値は差が生じるため、計算結果の実効値を **Fast** に換算するための補正が必要になるのです。

各計算法の騒音計の動特性補正の値と、その算出方法を纏めたものを表5-6に示しました。実用的インピの値は他と大きく異なっていますが、それ以外の計算法では大きな違いがなく4 dB～6 dBとなっています。

算出法を確認すると、実用的インピは論外です。補正すべきは床衝撃音なのに、タイヤの衝撃力波形を分析しています。衝撃力波形と床衝撃音の波形では全く異なりますから、このようにした意味さえ分かりません。学会インピでは、スラブの減衰定数を1～4%（損失係数0.02～0.08）、下室の吸音率を0.05～0.2の範囲で変化させて求めた指数減衰波形の計算値から平均的な値を提案していますが、実際の床

表 5-6 騒音計の動特性補正の値と算出法の比較

内容	中心周波数(Hz)				算出法
	63	125	250	500	
実用的インピ	9.8	8.3	6.5	5.6	タイヤの衝撃力波形に対応したパルス音に関して、FAST指示値と1秒間のFFTによりデジタル処理した時の値の差。
学会インピ	5.2	5.8	6.0	6.1	スラブの損失係数を0.04、居室の平均吸音率を0.1とした場合の指数減衰波形から求めた計算値。
研究会インピ	5.2	5.2	5.2	5.2	1秒間で基準化した値である単発音圧暴露レベルと時間重み付け特性Fの最大音圧レベルの差として実測値から求めた値。
拡散度法	4.0	4.0	4.0	4.0	実測した重量床衝撃音波形に関して、騒音計の動特性Fastの指示値と波形の1秒間の2乗平均値(実効値)の差として算出。

衝撃音波形を対象として分析した方が確実だと考えられます。

研究会インピと拡散度法の算出方法は、文章は異なっても同じ分析方法です。ただし、研究会インピの方は、大会発表論文を確認すると、LD および洋室の各 1 ケースについて分析しているだけであり、数値も 31.5 Hz～500 Hz で 4 dB～6 dB だったものを平均して同じ値 5.2 dB としています。多くの分析は行われていないようです。

拡散度法は、洋室、居間、和室の部屋ごとに、加振点を 3 点変化させ、それぞれのケースに関して床衝撃音測定点 5 点とし、それぞれの波形に関して分析し結果を算出しています。その結果、補正値は 3～5 dB の範囲となっていますが、多くの値が 4 dB であることから、周波数に関係なく 4 dB として十分であるとしています。

研究会インピの結果と拡散度法の結果を併せれば、4 dB または 5 dB という値で十分と考えられます。

なお、音響放射に関連する項目としては、受音室の吸音力の問題もありますが、これは数値の設定だけの問題ですから、ここでは特に説明は行いません。

6. 床衝撃音予測計算法の精度検証

床衝撃音予測計算法で求められる最も重要な要点は、言うまでもなく予測精度が優れていることです。各計算法に関して、実測値との対応を検証してみたいと思います。ただし、これはあくまで各計算法の開発者が提示しているデータであり、いわば自己申告の資料です。実測値と大幅なずれがある場合など、それをどこまで含めているかは必ずしも明確ではないため、あくまで参考として見て頂いた方がよいと考えます。計算法が物理的、理論的に妥当なものなら、自ずと予測精度は良くなるはずですから、最終的にはその面から判断して頂いた方がよいと思います。

6.1 各計算法の予測精度

インピーダンス法には、3つの方法があり、それぞれ細部が違っているため予測精度も変わってきます。まず、実用的インピですが、これは既に述べたように小面積のスラブにしか適用できないので、計算精度を議論しても意味はありません。ただ、実用的インピの具体的な精度に関するデータは、拡散度法の旧版解説書（騒音問題総合研究所にて入手可）に掲載されていますので、興味のある方は参考にしてください。

学会インピの解説書では、最初に、「現場実測値と本書による予測計算値との間には、遮音等級で±1 ランク程度の差が生じることを承知置きいただき、概略の性能計算法として利用すべきと考える」と記述されています。また、具体的に実測値と

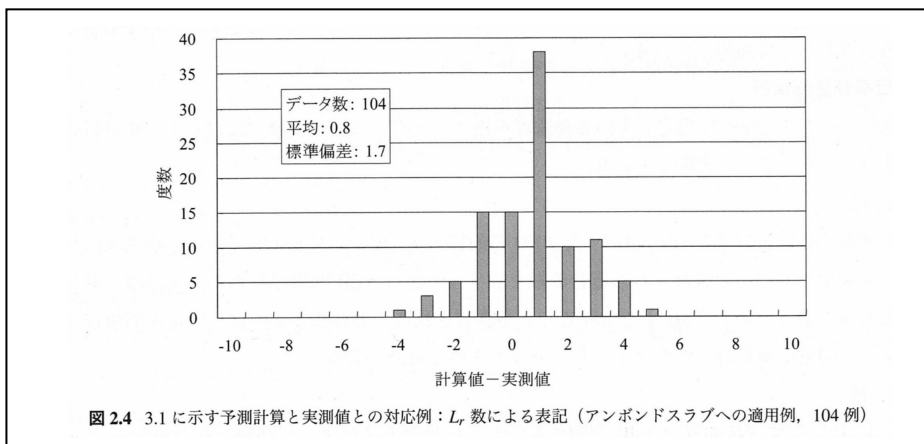


図 6-1 学会インピの予測計算精度（学会インピ解説書より）

計算値の比較を行ったデータとして、図 6-1 が示されています。これはアンボンドスラブだけの結果ですが、計算値が実測値よりやや大きめに出る傾向を示しているものの、全体的には最初の記述にあるように、 ± 5 dB 以内に収まっています。ただ、「小面積スラブの場合では、計算値が実測値を上回る傾向にあり、1~2 ランクの差を示す場合もある」とも書かれており、条件によっては大きな差が生じる場合もあることを認めています。

研究会インピの解説書では、全体的な予測精度の比較事例は示されていませんが、解説書のもとになっている下記（注）日本騒音制御工学会での発表講演論文集では、以下の図 6-2 が示されています。何件のデータであるかは明確ではありませんが、予測計算法の精度は、誤差の平均値が 0.0 dB、標準偏差は 2.1 dB であると記述されています。

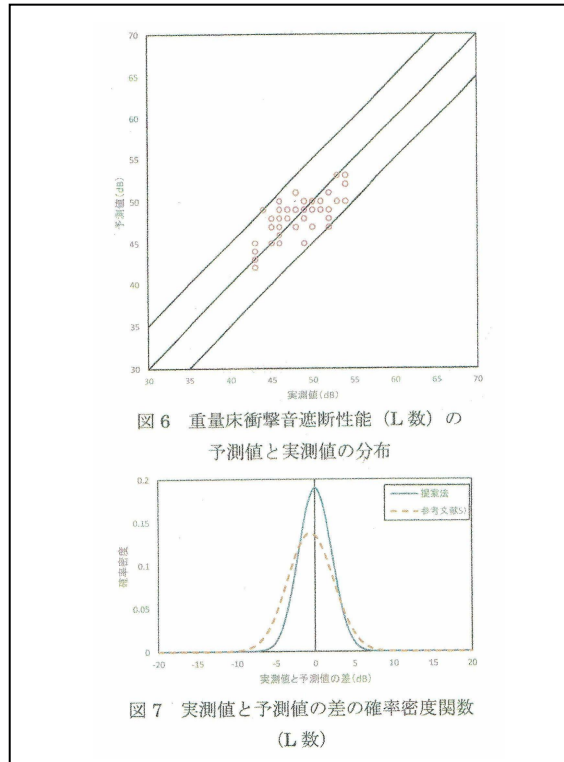


図 6-2 研究会インピの予測計算精度（下記(注)の発表論文より）

（注）黒木拓、他：共同住宅における重量床衝撃音レベル予測計算法に関する検討、一インピーダンス法における各種パラメーターに関する検討一、日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集、2020年11月、pp229-232

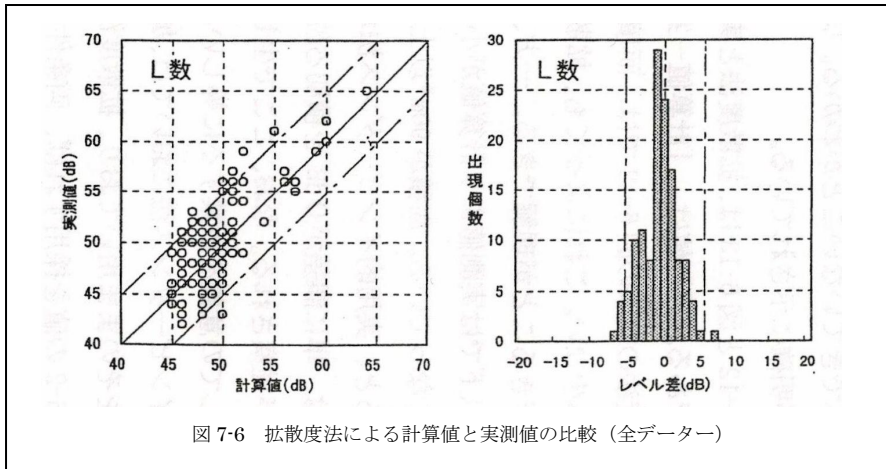


図 7-6 拡散度法による計算値と実測値の比較 (全データ)

図 6-3 拡散度法の予測計算精度 (拡散度法解説書より)

拡散度法に関しては、平板スラブや小梁付スラブ、大型スラブなどに関する予測精度の検討結果として図 6-3 が示されています。件数は全体で 123 件であり、 ± 2 dB 以内が 92/123 件で 75 %、 ± 5 dB 以内が 117/123 件で 95%となっています。床スラブの面積は 20 m²以下から 100 m²以上までが含まれていて、面積による差は見られないとしています。

以上、3つの計算法について予測計算の精度を比較しましたが、どれも良好な精度を有していることを謳っており、これを見る限りではどれを用いても良いように思えますが、本当にそうなのでしょうか。参考までに次の事例をご覧ください。

6.2 純ラーメン構造に関する予測計算精度の例

本書の最初に示した図 1-1 の予測計算法の変遷にあるように、拡散度法の最新版は拡散度法 (純ラーメン構造対応版) となっています。インピーダンス法では、特に純ラーメン構造に関する言及はなく、通常通りの扱いとなっています。この純ラーメン構造に関して検証をしてみたいと思います。

検討対象は図 6-4 に示す実測物件であり、床スラブに関する条件は図 6-4 に記載の通りです。この住戸の居間に関する予測計算をインピーダンス法 (研究会インピ) と拡散度法 (純ラーメン構造対応版) の 2 つで計算し、結果を比較します。

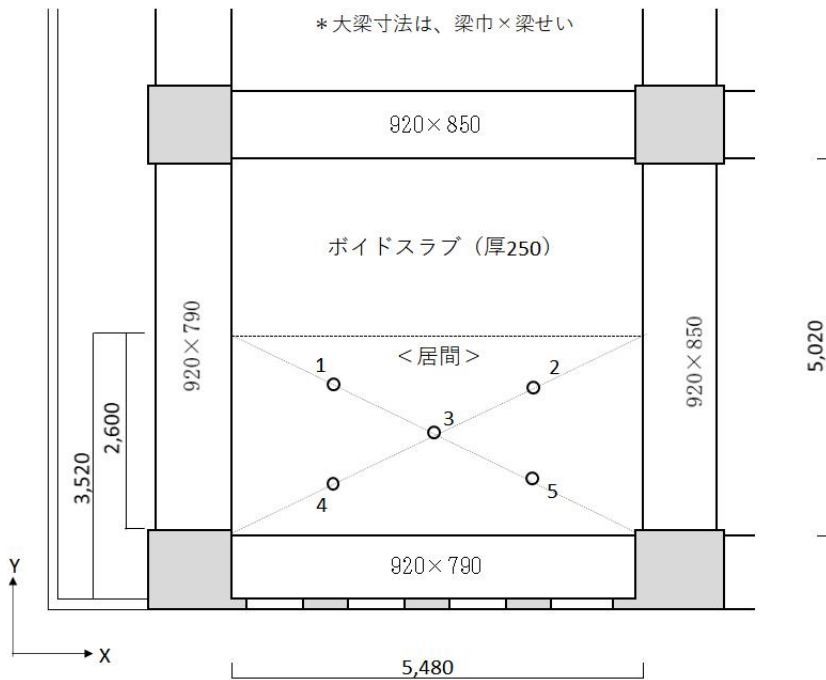


図 6-4 純ラーメン構造の検討対象床スラブ

まず、研究会インピでの計算です。床スラブは厚み 250 mm のポイドスラブですが、研究会インピの計算シートにはこのポイドスラブを均質板へ換算するための入力欄が用意されていないので、ここでは別途換算後の等価板厚 246mm を用いて、均質単板スラブとして計算します。既に述べたように、本来は、ポイドスラブを均質板に換算して等価スラブ厚を求めた場合、密度も等価な値を算出して（この場合には 1840 kg/m^3 ）計算に用いなければなりません。研究会インピの計算シートでは換算後の密度の入力が出来ませんので、そのまま 2300 kg/m^3 の値を用いています。

この検討対象床スラブに関する研究会インピでの入力条件を整理したものを次頁の表 6-1 に示しました。また、その計算結果を表 6-2 に示しました。

表 6-1 研究会インピでの入力条件整理表 (①~④)

<① 床スラブ厚、スラブ寸法等の入力>

予測計算対象		図6-4、居間部分
床スラブ厚		ポイドスラブを等価な均質単板スラブとして計算(種別1) 等価スラブ厚246 mm
スラブ寸法	x方向寸法	5,480 mm
	y方向寸法	5,020 mm
1次固有振動数計算値		39.2 Hz(31.5Hz帯域)

<② 加振点位置の入力>

加振点	x方向				y方向			
	距離(mm)	端部種別	梁幅	梁せい	距離(mm)	端部種別	梁幅	梁せい
S1	1,370	1(大梁)	920	790	1,950	1(大梁)	920	790
S2	1,370	1(大梁)	920	850	1,950	1(大梁)	920	790
S3	2,740	1(大梁)	920	790	1,300	1(大梁)	920	790
S4	1,370	1(大梁)	920	790	650	1(大梁)	920	790
S5	1,370	1(大梁)	920	850	650	1(大梁)	920	790

<③ 有効放射面積の入力>

	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
有効放射面積(m ²)	4.42	6.70	8.62	10.12

<④ 受音室条件の入力>

	受音室の種類	受音室		
		床面積	周長	天井高
受音室条件	1 (フローリング仕上げ)	19.50 m ²	18.10 m	2,500 mm

表 6-2 研究会インピでの計算結果

	オクターブバンド 中心周波数			
	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz
床衝撃音レベル(dB)	69	53	44	38
L 数	46			

計算結果はL数でLH-46、63 Hzのレベルは69 dBであり、大変良好な性能であるという結果になっています。ところが、実はこのスラブの実測結果は、LH-61、63 Hzの実測値は84 dBなのです。実測値と計算値の比較図を図6-7に示しましたが、その差は大変に大きく、L数で15、3ランクもの誤差となっています。

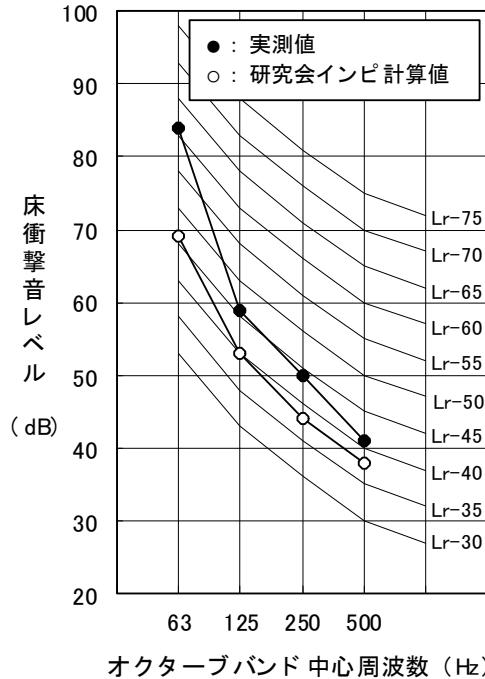


図 6-7 研究会インピでの計算値と実測値の比較

この実測値は、床スラブ厚が250mmであるのに性能が極端に悪くなっています。これは測定が間違っているわけでも、床スラブに異常があるわけでもありません。純ラーメン構造の床スラブでは、この検討対象床スラブ以外にも同様に性能が悪くなる事例は見られ、その原因の究明は既に行われ、拡散度法の解説書の中にその詳細が述べられていますので、そちらも参考にして下さい。

純ラーメン構造ではこのように性能が極端に悪くなる事例があり注意が必要ですが、予測計算法では、そのような床構造をしっかりと事前に抽出できることが求められるのです。

では、拡散度法（純ラーメン構造対応版）での計算結果はどうでしょうか、実測値と計算値の比較を図 6-8 に示しましたが、大変によく一致しています。図 6-7 の結果と併せて比較すれば、その違いは歴然です。

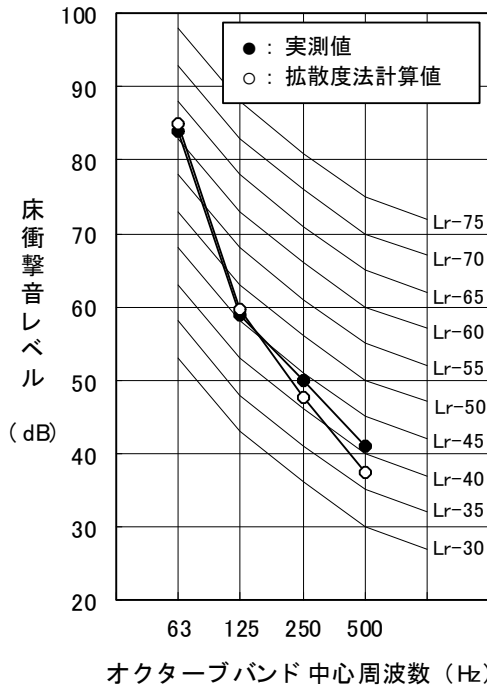


図 6-8 拡散度法での計算値と実測値の比較

図 6-9 に参考までに、拡散度法（純ラーメン対応版）での計算シートを示しました。入力方法の詳細は解説本を参照して頂くことにして、この中の<参考値>に固有振動数の欄があります。この純ラーメン構造の固有振動数は 44.9 Hz であり、46 Hz 共振現象（詳細は拡散度法解説書を参照）の範囲に入っています。ちなみに、図 6-4 の床スラブを数値解析法（FEM）で固有値解析を行った結果は 45.8 Hz であり、計算シートの値とよく一致しています。このように、純ラーメン構造では床スラブの固有振動数を正確に推定することが求められ、それを可能にしているのが拡散度法の純ラーメン構造対応版なのです。

<新・拡散度法（純ラーメン構造対応版）>

物件名		図6-4	
<入力データ：純ラーメン=1、他=0 純ラーメン構造指定 1 >			
動的ヤング率 (N/m ²)	2.90E+10	単位体積重量 (kg/m ³)	1840
(x方向)		(y方向)	
スラブ寸法 (m)	6.400 ×	5.940	
* 純ラーメン構造の場合は大梁芯々寸法、それ以外は壁芯寸法を入力			
拘束条件	0.3	(単純支持0、周辺固定1)	
* 純ラーメン構造の場合は0.3、それ以外は0.8を推奨			
室寸法 (m)	5.54 ×	3.52	
大梁・梁巾 (m)	0.920	大梁・梁せい (mm)	850
* 純ラーメン構造以外の場合はこの行の大梁関連データは入力不要			
加振点数	5		
(x方向)		(y方向)	
加振点位置 1 (m)	1.39	1.95	小梁・梁せい (m) 0
(x方向)		(y方向)	
加振点位置 2 (m)	1.39	1.95	小梁・梁せい (m) 0
(x方向)		(y方向)	
加振点位置 3 (m)	2.77	1.30	小梁・梁せい (m) 0
(x方向)		(y方向)	
加振点位置 4 (m)	1.39	0.65	小梁・梁せい (m) 0
(x方向)		(y方向)	
加振点位置 5 (m)	1.39	0.65	小梁・梁せい (m) 0
<参考値：固有振動数、等価寸法倍率は純ラーメン構造の時のみ表示。固有振動数 (s), (c) は参考表示。			
固有振動数 (Hz)	44.9	固有振動数 (s) (Hz)	*
* 固有振動数の (s) は単純支持、(c) は周辺固定			
固有振動数 (c) (Hz)	*	固有振動数 (s) (Hz)	*
等価寸法倍率	1.00	曲げ波長 (m/s)	5.34
* 周波数63Hzの場合			
コインシデンス周波数 (Hz)	64		
<計算結果>			
中心周波数 (Hz)	床衝撃音レベル (dB)		
31.5	79.6		
63	85.0		
125	59.7		
250	47.5		
500	37.3		
1K	30.4		
2K	21.8		
4K	14.6		
騒音レベル (dB)	59.2		
L数	62	L等級	60
決定周波数 (Hz)	63		

作成：八戸工業大学・橋本研究室（騒音問題総合研究所改訂）

図 6-9 拡散度法の計算シート（検討対象床スラブ）

各計算法の予測計算精度について検証を行いました。表面に出ている結果ばかりをみるのではなく、予測計算法の理論的、物理的構成の妥当性を見極めることが予測計算法の選定において大事であることがお分かりいただけると思います。

7. 検証結果のまとめ

ここまで、床衝撃音予測計算の内容に関して、インピーダンス法と拡散度法の比較検証を行ってきました。それらの結果を、各項目ごとに整理してみたいと思います。

1) 共振によるインピーダンス低下量の評価について

■ **インピーダンス法**は、駆動点インピーダンスの実測値をもとに共振による低下量を算出しています。しかし当然ですが、実測値は床スラブの条件によって変化し、大きくバラつきます。インピーダンス法はこのバラツキを解消することなく、床スラブの1次の固有振動数の計算値をもとに、バラツキの中の平均的な数値を決めているだけですから、最初からバラツキの誤差を含んでいます。バラツキは63 Hzで最大で15 dB程度ありますから、その誤差は0~7 dB程度になると考えられます。

拡散度法は、共振によるインピーダンス低下量のバラツキを、新たに導入した拡散度指数というもので評価して、バラツキを吸収した単一の特性で表しています。そのため、拡散度指数を評価するための誤差は含むこととなりますが、実測結果のバラツキより精度は大幅に改善していると言えます。

■ 共振の影響には、固有振動数と固有振動モードが関係しますが、**インピーダンス法**は共振評価のパラメーターとして1次の固有振動数しか用いていません。床衝撃音性能には、1次固有振動数以外の高次の固有振動数も関係しますし、各固有振動モードに対する加振点位置によっても共振の影響は変化します。インピーダンス法ではこれらの考慮がなされていないため、計算誤差を大きくする原因になっています。

拡散度法では、周辺固定時の床スラブの高次固有振動数を計算できる方法を開発し、表計算ソフトのマクロ機能を使って400次までの固有振動数を検討の対象としており、各固有振動モードに対する加振点位置の影響についても考慮された方法となっています。

■ 床スラブの辺長比や減衰定数の値も共振の影響評価に関連しますが、**インピー**

ダンス法ではこの両方とも考慮されていません。

拡散度法では、1次固有振動数での振動応答値を理論的に解析した式を基本として用いているため、床スラブの辺長比や減衰定数も計算の中で考慮されています。

2) 周辺拘束によるインピーダンス上昇量の評価について

■ インピーダンス法では、周辺拘束によるインピーダンス上昇量を実測結果をもとに推定していますが、その実測結果は共振によるインピーダンスの低下量を含んだ形となっています。共振の影響と周辺拘束の影響を分離せずに、実測結果をそのまま用いて回帰式を算出しているため、周辺拘束によるインピーダンス上昇量を正確に評価できていません。そのため、回帰式の特長も現実とは異なったものとなっています。

拡散度法では、数値解析結果をもとに周辺拘束によるインピーダンス上昇量を算出していますが、共振によるインピーダンスの低下量を理論的に算出することができるため、この影響を分離して周辺拘束の影響だけを評価することが可能となっています。そのためバラツキの少ない明確な特性が得られています。

■ 床スラブの振動評価に関して、インピーダンス法は、共振の影響評価で生じる誤差を、周辺拘束の影響評価で発生する誤差で、打ち消し合って計算している手法であると言えます。したがって、床スラブの各種条件（パラメーター）が変化した時の影響が、最終計算結果に適正に反映されるという保証はありません。

拡散度法は、共振の影響評価および周辺拘束の影響評価を個別に分離して評価している手法であり、床スラブの条件変化による共振への影響、周辺拘束への影響が適正に評価され、その結果が最終計算結果にも反映されています。

3) 板振動に関するその他の影響評価について

■ インピーダンス法では、床スラブの計算対象範囲を小梁で区切られた部分としていますが、床の固有振動モードや振動加速度レベルの実測値をみると、小梁は振動的な区切りとはなってはいません。したがって、小梁で区切られた部分だけを計算対象とすると、共振評価のパラメータである固有振動数を正確に評価できないと

もに、床面積の算定などでも誤差の原因となります。

拡散度法では、大梁や壁で囲まれた部分を床スラブの計算対象としており、その中の小梁は別途評価を行っています。共振の影響に関しては軽微であるとして無視し、拘束の影響に関しては小梁の梁せいに応じたインピーダンスの上昇量を評価しています。

■ ボイドスラブに関する計算では、インピーダンス法および拡散度法ともに均質スラブに換算して計算を行っています。ただし、**インピーダンス法**では、換算しているのはスラブ厚のみで単位体積質量（密度）の換算は行われておらず、そのままの値が用いられています。そのため、固有振動数の算出や共振の影響評価において誤差を生じることになります。また、インピーダンス法では1方向のボイドスラブしか扱っていませんから、2次元のボイドスラブ（2方向でボイドの条件が変わるもの）では誤差が生じます。

拡散度法では、スラブ厚、単位体積質量（密度）（拡散度法では単位体積重量と間違った用語が用いられています）ともに換算が行われており、これにより固有振動数の計算、振動応答の計算が適正に行われていることが数値解析結果により明示されています。また、1方向のボイドも2次元のボイドも、条件に応じた換算が行われています。

3) 音響放射に関する評価について

■ **インピーダンス法**では、音響放射に関して有効放射面積というものをしていますが、これは物理的に根拠のないパラメーターであり、必要のないものです。これにより-5dB程度の誤差が生じます。また、重量床衝撃音は低音域現象であるため、下室は拡散音場ではありませんが、これを拡散音場として計算するための音場補正が必要となります。インピーダンス法ではこれを考慮しておらず。これによる誤差は63Hzで+7 dB程度です。すなわち、インピーダンス法では、必要のない有効放射面積の導入による誤差を、本来必要な音場補正をしていない誤差により打ち消し合っている手法であるといえます。

拡散度法では、有効放射面積というパラメーターに類するものは用いられておら

ず、音場補正に関しては、数値解析結果により導出した補正値を考慮しています。

以上、床衝撃音計算の主な内容について、インピーダンス法と拡散度法を比較整理しましたが、インピーダンス法の特徴は、床スラブの振動評価においても、下室への音響放射の評価においても、誤差を誤差で打ち消し合う形の計算方法となっていることです。そのため、床衝撃音に係わるパラメーターの変化が、最終計算結果に適正に反映されない可能性が高く、床衝撃音予測計算法としては問題が多いと言わざるを得ません。

では、拡散度法は全く問題がないのかと問われれば、一概にそうは断言できません。多くの物件の計算を行ってきましたが、実測値と計算値がよく合うものや誤差の大きなものなど様々です。純ラーメン構造などは、従来の計算では実測値との乖離が大きかったため、その原因を究明して修正を加え、純ラーメン構造対応版として改訂しました。その他にも、まだ修正の余地があるかも知れませんが、現時点では、床衝撃音という物理現象に対する技術的検討が十分に尽くされた有用な計算法になっていると言えます。

床衝撃音計算においては、床スラブの振動評価に係わる共振や周辺拘束の影響、低音域現象である床スラブからの音響放射など、床衝撃音に係わる個々の物理現象を出来る限り正確に評価し、それらを一つ一つ積み重ねてゆくことが、予測計算の精度を確保するために重要であり、それにより床衝撃音の設計検討手段としての価値が生れてくると言えるのです。

おわりに

「インピーダンス法と拡散度法、どちらを使うべきか」というテーマで、床衝撃音の予測計算法の比較検証を行ってきましたが、ここまで読み着いて頂いた方は、既に答えが出ているものと思います。これからは、その答えに則って建築構造設計の業務を進めて頂けるようお願い致します。

インピーダンス法のある資料をみると、「インピーダンス法は実測値に基づいてパラメーターを設定しているが、拡散度法はFEMによる計算値に基づいてパラメーターを設定している」と書かれていました。一見すれば、計算値に基づくより実測値に基づいた方が正しい結果が得られると思ってしまうのですが、実測値に基づいていても、その解釈が間違っていたのでは元も子もありません。大事なものは、床スラブの振動と音響放射という物理現象を正確に理解し、出来るだけ物理理論に則った形で手法を構成することなのです。

なお、念のため申し添えますが、拡散度法は理論解析と数値解析法を併用しており、理論解析には厳密性というメリットが、数値解析法には実測値では不可能な条件設定も可能というメリットがあります。単なる計算値ではありません。

本書の第1章で述べたように、床構造も時代とともに様々に変化してゆきます。小梁の付いた床スラブが主流の時に、実測値に基づいて考えられた実用的インピーダンス法は、大型スラブが出現すると使えなくなり、計算方法の修正を余儀なくされました。音環境への意識の高まりから、床スラブに300~350mmの厚みのあるボイドスラブが使われるようになってくると、床スラブと大梁の曲げ剛性の差が小さくなり、純ラーメン構造では従来の認識と異なる事例が見られるようになりました。しかし、これらは床スラブの振動と音響放射の物理現象自体が変化したわけではありません。いわば数値が変化しただけの話です。これらの変化に対しても、理論に則って適確に物理現象を表現できていれば、根本的な修正は必要ないはずであり、変化のたびに対応できなくなるようでは適確な表現ではないということになります。

今後とも新たな床構造が出現してくると思いますが、そのような変化にも修正なしで対応し続けられる手法こそ、本当に優れた予測計算法であると言えます。その意味では、どの予測計算法を選ぶかは、人が決めるのではなく時代が決めるものであるとも言え、本書は少し出しゃばった存在かもしれません。しかし、床衝撃音問題の社会的な重要性を考えると、あまり悠長に構えているわけにも行きません。適確な情報提供により、技術の進展が少しでも確実に進むなら、それを躊躇すべきではないと考えています。

「はじめに」で書いた通り、性能予測法を社会的に公表している限りは、その方法に責任を持つのは当然のことであり、仮に、その内容に疑問を呈された場合には、それにも真摯に答えてゆく社会的義務があると考えています。本書の内容についても、疑問がある場合は遠慮なく提示して頂きたいと思います。それが、音環境分野の技術の進展に繋がるものと確信しています。

(注) 本稿の内容は、インピーダンス法にとって厳しい内容であり、社会的評価の低下につながるかもしれませんが、これに関して念のため記述しておきます。偽計業務妨害罪は内容が真実である場合には成立しませんし、また名誉棄損罪についても、事実摘示の行為が、公共の利害に関する事実に係わり、専ら公益を図る目的の場合で、摘示された事実の重要な部分が真実であれば、違法性阻却事由により成立しません。したがって、本書の内容は法的に何ら問題はありませんが、蛇足とは思いますが、注記しておきます。

< 著者略歴 >

橋本典久(はしもと のりひさ)



- ・ 福井県生まれ。東京工業大学・建築学科卒業。東京大学より博士(工学)。建設会社技術研究所勤務の後、八戸工業大学大学院教授を経て、八戸工業大学名誉教授。現在は、騒音問題総合研究所代表。1級建築士、環境計量士の資格を有す。元簡易裁判所民事調停委員、Yahoo ニュース個人オナーサーも務める。
- ・ 専門は音環境工学、特に騒音トラブル、建築音響、騒音・振動、環境心理。日本建築学会等の会員。
- ・ 研究関連受賞として「付加質量のついた有限膜の遮音特性」で日本建築学会奨励賞(1992年)、「錘つき遮音膜/遮音板の開発」で日本音響学会技術開発賞(1997年)、「拡散度法による床衝撃音遮断性能の予測に関する研究」で日本建築学会賞(論文)(2008年)、著書「苦情社会の騒音トラブル学」(新曜社)で日本建築学会著作賞受賞(2016)、他。
- ・ その他の著書、「近所がうるさい! 騒音トラブルの恐怖」(ベスト新書、2006)、「2階で子どもを走らせるな!」(光文社新書、2008)、「騒音トラブルの逆説的社会論」(Kindle版、2020)、「騒音トラブル防止のための近隣騒音訴訟および騒音事件の事例分析」(Amazon、2022)他、研究論文多数。

