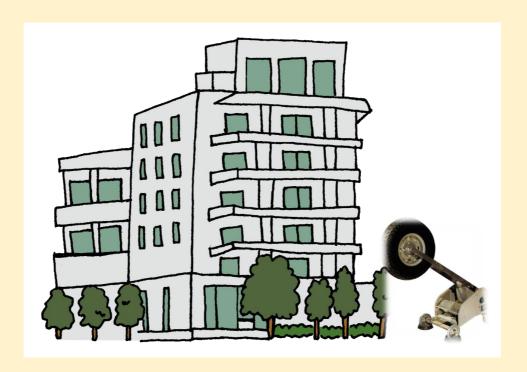
建築技術者のための 床衝撃音計算法講座

一 インピーダンス法と拡散度法、どちらを使うべきか徹底検証!



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が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き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か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るため、公益に係わる重大な問題といえます。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1)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。
- (注2) 本書の内容は、インピーダンス法の社会的評価の低下につながる可能性もありますが、それに関して念のため追記しておきます。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、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。

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. 周記	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ぐらい差があるか?	
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. 床征	衝撃音予測計算法の精度検証	35
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	٠	78
著者	格歴	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

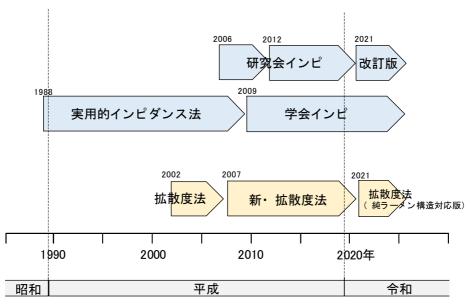


図 1-1 床衝撃音簡易計算法の変遷と流れ

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 「建物の遮音設計資料」、他日本建築学会編、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」、他日本建築学会編、B5 版 120 頁、 2009 年



(書籍写真略)

・ 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、ペーパーバック版)、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

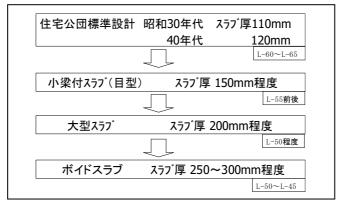


図 1-2 床スラブの変遷(拡散度法解説書より)

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 $200\,\mathrm{mm}$ でもスラブ面積が $60\,\mathrm{m}^2$ 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

ス	スラブ厚	スラブ面積(m²)									
(mm)	12	15	20	25	30	35	40	45	50	60	
	120	L-55	L-60	L-60	L-65	L-65	L-65	A 90 240			_
	130	L-55	L-55	L-60	L-60	L-65	L-65	L-65	2 <u>-</u> 11	FAR BELLE	
	140	L-50	L-55	L-55	L-60	L-60	L-65	L-65	L-65	8-6	i di di sa di
	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
<u> </u>	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

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)

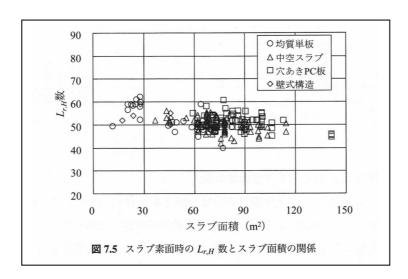
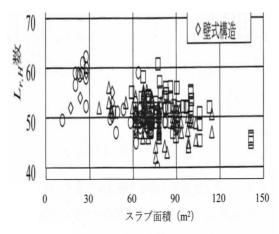


図 1-3 床スラブ面積と床衝撃音性能の関係 (学会インピ解説書より)

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 Lr.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。スラブ面積が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。

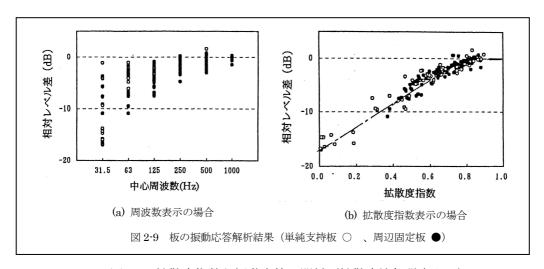


図 1-4 拡散度指数と振動応答の関係(拡散度法解説書より)

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す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

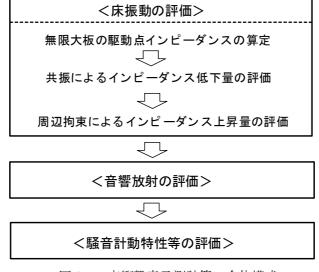


図 2-1 床衝撃音予測計算の全体構成

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。

床振動が求まれば、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っており、 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'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'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知

