

信州大学審査学位論文

集合住宅における居室の床仕上げ構造を含む
重量床衝撃音レベル予測法に関する研究

2013年3月

黒木 拓

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 関連する既往の研究	3
1.3 本論文の目的と論文構成	6
第2章 スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測計算法	8
2.1 はじめに	8
2.2 従来のインピーダンス法による重量床衝撃音レベル予測式	9
2.3 スラブのインピーダンス特性に関する検討	12
2.3.1 測定対象および測定・解析手法	13
2.3.2 インピーダンスレベル上昇量に関する検討	17
2.3.3 共振によるインピーダンスレベル低下量に関する検討	24
2.4 スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測法	27
2.5 重量床衝撃音レベルの実測値と予測値の対応	36
2.6 まとめ	44
第3章 乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測に関する検討	45
3.1 はじめに	45
3.2 乾式二重床の床衝撃音低減性能と床衝撃音レベルの関係	46
3.3 壁式構造実験室における重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスの関係	48
3.4 乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測式の提案	54
3.5 実建物における重量床衝撃音レベル低減量の実測値と予測値の対応	55
3.5.1 検討概要	55
3.5.2 加振点別の重量床衝撃音レベル低減量の予測値と実測値の関係	59
3.6 まとめ	61

第4章 居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法	62
4.1 はじめに	62
4.2 乾式二重床の重量床衝撃音レベル予測法の提案	63
4.3 居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベルの実測値と予測値の対応	67
4.4 まとめ	76
第5章 総括	77
本論文に関連する審査付公表論文	80
本論文に関連する審査なし公表論文	80
参考文献	82

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究の背景

住宅に要求される空間性能に関する項目の中で音環境に関する性能が重視されてきている。特に集合住宅においてこの傾向が顕著であり、上下階音、隣戸音、外部騒音について多くの人が重視している。これらの騒音は、心理的、生理的影響やプライバシーの侵害の大きな原因の一つになっている。今後も、住宅の音環境性能を向上させることが求められ、設計、施工時における対策技術、予測精度の向上・検討が必要と考えられる。

2000年に「住宅の品質確保の促進等に関する法律」が施行され、住宅の性能が保証されることになった。法律の施行に伴い、住宅紛争処理支援センターが設置され、住宅の設計、建設等に関するトラブルや不具合に関する相談を受け付けている。これらの相談の中で、集合住宅における遮音不良に関する相談は例年3位にランクインされる重要な項目となっている。集合住宅の遮音不良に関する相談を細かく見ると、床衝撃音遮断性能に関する相談が最も多くなっている。特に、子供の飛び跳ね、走り回り、大人が歩く音など重くやわらかい衝撃源による重量床衝撃音が問題となる場合が多い。

床衝撃音遮断性能の評価、予測は、設計、施工者、住宅購入者にとっていっそう重要となってきた。設計、施工者にとっては適切なコストで、性能を確保するために、精度の良い予測が必要となる。住宅購入者にとっては、入居前に遮音性能が示されることで、許容できる遮音性能の住宅を検討し、購入することができ、入居後のトラブルを回避することができ、快適な住環境を手に入れることができる。

集合住宅の設計時には、竣工時の床衝撃音遮断性能や床仕上げ構造の床衝撃音低減性能が設計目標値としてデベロッパーから提示されるケースが増えている。提示された目標値を満足させるために設計時に床衝撃音遮断性能の予測は必須項目となっている。提示される目標値は、設計時においてはスラブ素面時および竣工時の予測値が提示されている場合が多い。しかし、近年の集合住宅では、バリアフリー、セレクトプラン、SI(スケルトンインフィル)に対応するため、床仕上げ構造に乾式二重床を採用するケースが多く、竣工時の床衝撃音遮断性能を満足させるためにスラブ素面の予測値はL値で1ランク(5dB)程度余裕を持たせている。

集合住宅における床衝撃音遮断性能の予測計算は、スラブ厚や居室面積、建物構法等の躯体条件が床衝撃音遮断性能に与える影響が最も大きいためスラブ素面に対してのみ行われてきた。しかし、これら内装仕様の影響についても予測計算に考慮する必要がある。特に近年、床仕上げ構造に乾式二重床を採用するケースが増えてきており、重量床衝撃音において乾式二重床の特性がスラブの振動特性に与える影響が大きいため、スラブ素面の予測計算だけではなく、乾式二重床を含む重量床衝撃音遮断性能の予測計算が必要となる。し

かし、乾式二重床施工後の床衝撃音遮断性能を予測する手法は十分確立してないため、実務上はスラブ素面の予測計算結果に過去の現場実測データを基にした経験的な値を加える方法などで予測されている。

2008年に壁式構造実験室で乾式二重床の「標準型試験体」による試験方法が規定されている「床仕上げ材の床衝撃音低減性能の表記指針」が公表された。上記の指針には明確に試験条件が規定されており、試験データはカタログ表記に利用されている。この乾式二重床の床衝撃音低減性能は、同一条件によって試験されるため、部材の性能を横並びで評価することができる。しかし、実建物における乾式二重床の床衝撃音低減性能は、躯体条件、居室の配置、乾式二重床の施工条件などによって影響を受けるため、実験室における低減性能では実際の建物の値と必ずしも一致しない。カタログに表記されている試験データは実建物における施工状況とは異なるため、実建物にそのまま適用することは難しい状況となっている。

以上のことから、本研究は適切な集合住宅の遮音設計を行うため、床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測法の提案を目的とする。本論文では、実務的な予測法としてインピーダンス法を用いた予測計算法について、「スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測法」、「乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測に関する検討」、「居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測法」について検討を行う。

1.2 関連する既往の研究

集合住宅の床衝撃音遮断性能の予測に関する研究として、インピーダンス法^{1)~4)}や拡散度指数⁵⁾を用いた実務的な予測法の提案がある。これらの予測計算法は、計算の簡便さから、設計者や施工者など実務的に広く用いられている方法である。これに対し、より精度の高い予測手法として有限要素法⁶⁾や時間領域有限差分法⁷⁾などの数値解析手法を用いた方法がある。これら数値解析手法を用いれば、予測計算精度は向上するが、計算モデルの構築や実際の計算に時間がかかるため広く普及するに至っていない。

以下に、本論文の目的であるインピーダンス法を用いた床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測法の検討に関連する既往の研究について述べる。

スラブ素面の床衝撃音レベルの予測計算法として、インピーダンス法を用いた重量床衝撃音レベルの予測手法（スラブ面積 30m² 以下）がある。これは、井上、木村ら¹⁾により提案された方法で、簡単に計算できるため広く普及している計算方法である。インピーダンス法を用いた重量床衝撃音レベルの予測計算は、スラブの駆動点インピーダンスを「スラブの基本インピーダンスレベル」、「スラブの周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量」、「スラブの共振によるインピーダンスレベル低下量」の3つで表す。大脇、山下ら²⁾はスラブ面積が 50m² を超える大型スラブへの適用を目的に「スラブの周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量」、「スラブの共振によるインピーダンスレベル低下量」について検討を行い予測法として提案している。2009年11月に、建築学会「建物の遮音設計(床衝撃音)刊行小委員会(委員長井上)」から大型スラブにも対応し、2000年に改定された JIS A 1418 への対応などを考慮したインピーダンス法による床衝撃音予測手法が提案されている³⁾。

「スラブの周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量」については、井上、木村ら¹⁾は、周波数依存性は無視できるとし、面積積分エネルギーレベル及びスラブ中央点への伝達インピーダンスレベルによる検討を行っている。一方、古賀ら⁴⁾は、インピーダンスレベル上昇量に対応するスラブ周辺拘束による補正項には、周波数依存性があることを指摘し、加振点ごとの重量床衝撃音レベルは周波数帯域が高くなるほど、加振点ごとのばらつきが小さくなることを示し、端部拘束による補正項を定量化している。石丸ら^{8)~10)}は、バンダマシンを加振源とした面平均振動速度レベルの加振源変化をスラブ端部からの距離とオクターブバンドの中心周波数の曲げ波波長で基準化した場合において、インパルスハンマの衝撃周波数が含まれる帯域と衝撃時間内応答インピーダンスレベル（加振源:インパルスハンマ）を衝撃周波数で基準化した結果は良く対応し、衝撃時間内応答インピーダンスレベルを単一の正弦半波による結果と解釈することで、スラブ端周辺拘束に周波数依存性を考慮する場合においても、基準化している周波数の読み替えを行うことで適用できることを示した。

また、筆者ら¹¹⁾は、梁端部のインピーダンスレベル上昇量はスラブの厚さと梁せいの比

が大きくなるに従い 4~14dB まで変わること示し、より定量的な予測が可能になることを示した。

「スラブの共振によるインピーダンスレベル低下量」については、井上、木村ら¹⁾は、在来工法のスラブでは、3dB/oct.の傾きとなると報告している。大脇ら²⁾は大型スラブにおいて共振によるインピーダンスレベル低下量は従来の特性値に比べて小さくなると報告している。一方、古賀ら⁴⁾は実測結果から概ね 1.5~1.0dB/oct.程度の傾きとなることを報告している。

乾式二重床を含めた予測計算法として、2009年に提案された予測手法³⁾では、重量床衝撃音レベルの予測計算過程に、「床仕上げ構造による床衝撃音レベル低減量の補正」の項目が含まれている。しかし、「乾式二重床などは、実験室と現場における結果の対応が悪い場合があり、適用には注意が必要」と指摘している。

このような実験室と現場における結果の対応性を低下させる乾式二重床各部の影響は、これまでに多く報告（例えば高倉らの報告¹²⁾など）されている。これらの知見が実務に反映され、床端部の隙間を確保するなどの対策がとられるようになってきた。既往の研究で取り上げられている乾式二重床の重量床衝撃音レベルに影響を与える各種要因は、藤沢ら¹³⁾が整理している。乾式二重床施工後の重量床衝撃音レベルに影響を与える各種要因を乾式二重床の条件と躯体条件に分け、図1に示す。乾式二重床の重量床衝撃音レベルを予測するために、各研究機関で図1の各項目に関する検討がこれまでに行われている。

<p>【乾式二重床の条件】</p> <p>①床下空気層厚さ・床高¹⁴⁾</p> <p>②床面積¹⁵⁾</p> <p>③床板断面構成¹⁶⁾</p> <p>④支持脚ゴムの硬さ¹⁷⁾</p> <p>⑤床端部納まり^{18),19)} (根太・幅木・空気抜き)</p> <p>⑥床先行・壁先行²⁰⁾</p>	<p>【躯体条件】</p> <p>①スラブ厚さ²¹⁾</p> <p>②スラブスパン²²⁾ (固有振動数)</p> <p>③スラブ周辺拘束²³⁾</p>
--	--

図1-1 乾式二重床施工後の重量床衝撃音に影響を与える各種要因

【乾式二重床の条件】に関する検討では、「⑤床端部納まり」に関する報告が多く、【躯体条件】に関する検討では、「③スラブ周辺拘束」に関する報告が多い。「③スラブ周辺拘束」とは、乾式二重床施工後の重量床衝撃音レベルの加振点位置の違いによるレベル差がスラブ素面時に比べて小さく、平坦な特性になること²⁴⁾である。このことは、重量床衝撃音レベル低減量が加振点位置によって変化することを表している。

奥村, 井上ら²⁵⁾は, 乾式二重床からスラブへの支持脚からの伝達力と床下空気層からの伝達力を用いてスラブの振動速度の予測を試み, その可能性を示している。しかし, いくつかの加振点についての結果であり, 加振点位置の違いに対する予測までは示されていない。

乾式二重床は, 各種要因が相互に影響しあうとともに, 仕様の多さから定量的に扱うことが難しい。そこで, 筆者らは, 乾式二重床の仕様を 1 種類に限定して検討した²⁶⁾。その結果, それぞれの加振点においてスラブのインピーダンスレベル上昇量に応じて予測対象を分類し, 統計的に求めた補正值を与えることで, 重量床衝撃音レベルの予測精度が向上することを確認した。

しかし, 乾式二重床の振動特性については, 振動伝達の仕組みなど床スラブの駆動点インピーダンス特性比べて十分に明らかにされていない点が多く, 予測手法の確立までには至っていない。近年, 床仕上げ構造として乾式二重床は増加してきており, 乾式二重床を含めた床衝撃音遮断性能の予測計算法の確立が必要であると考えられる。

1.3 本論文の目的と論文構成

本論文の目的は、集合住宅における居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測法の提案である。そのため、本論文では①スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測計算法、②乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測、③居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法の検討を行っている。以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、本研究の社会的背景と研究の目的、関係する既往の研究および本論文の構成について述べる。

第 2 章では、床仕上げ構造の重量床衝撃音レベルを予測する際、スラブ素面の性能を精度良く予測する必要があると考え、従来の予測計算法の現状と検討課題について整理・検討し、スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測計算法の検討を行う。本論文では、スラブのインピーダンス特性に着目し、「スラブの基本インピーダンスレベル」、「スラブの周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量」、「スラブの共振によるインピーダンスレベル低下量」の 3 つの項目について実測による検討を行う。また、その他のインピーダンス法のパラメータについても検討し、スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測計算法の提案を行い、その予測精度について検証し、結果を示している。

第 3 章では、乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測法に関する検討を行う。乾式二重床の床衝撃音低減性能は、JIS A 1440-2 : 2007 に規定されている壁式構造実験室を用いて測定される。これまで、重量床衝撃音レベル低減量を床衝撃音レベルの予測計算に導入するとき、実験室や実建物における 5 点加振の平均値を用いることがほとんどであった。しかし、重量床衝撃音レベル低減量は加振点位置により値が変化するため、加振点ごとに与える必要がある。これらのことから、壁式構造実験室におけるデータを用いた床衝撃音レベル低減量予測式の検討を行い、予測式として利用できる可能性を実測結果と比較、検討し、床衝撃音レベル低減量予測式の導出方法を提案する。

第 4 章では、居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法の提案を行う。予測法は、第 2 章で検討を行ったインピーダンス法によるスラブ素面の重量床衝撃音レベル予測式と第 3 章で検討を行った乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測式から導出する。また、提案した予測法の予測精度について検証し、結果を示している。

第 5 章では、本論文のまとめとして当研究の成果および今後のへの課題を示す。

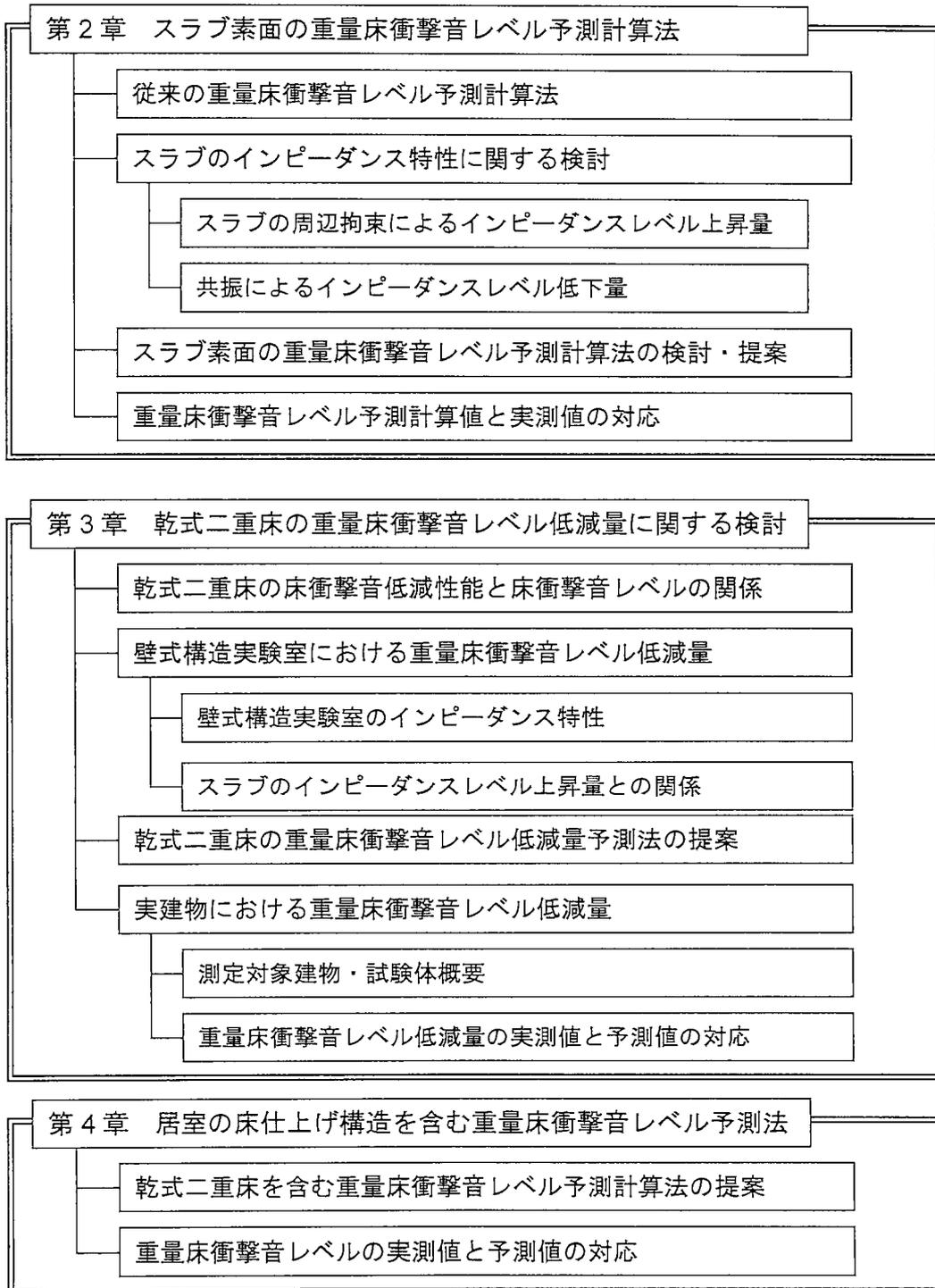


図 1-2 論文の構成

第 2 章

スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測法

第2章 スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測法

2.1 はじめに

集合住宅の設計において、竣工時の床衝撃音遮断性能や床仕上げ構造の床衝撃音低減性能が設計目標値としてデベロッパーから提示されるケースが増えている。集合住宅の居室の重量床衝撃音遮断性能はスラブ、梁、躯体壁などの躯体と床仕上げ構造などの居室の仕上げ材によって決定している。そのため、竣工時の居室の重量床衝撃音遮断性能を確保するために、設計時において重量床衝撃音遮断性能を予測することが必要となる。

重量床衝撃音遮断性能は躯体条件によるところが大きい。そこで、スラブ素面時の重量床衝撃音遮断性能を正確に予測することが重要となる。また、近年の集合住宅では、構造上必要となるスラブ厚さよりも、一定の重量床衝撃音遮断性能を確保するために必要なスラブ厚さの方が厚くなることが多く、重量床衝撃音遮断性能の予測計算によって設計スラブ厚が決定するケースが多い。そのため、正確な重量床衝撃音遮断性能の予測計算法が必要となる。

本章では、上記の観点から、スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測法の検討を行う。重量床衝撃音レベル予測法としては、インピーダンス法による方法が実務上最も用いられている方法である。そこで、この予測法の問題点を抽出し、各種パラメータの検討を行う。また、新たに提案する予測法の予測精度について検証を行う。

2.2 従来のインピーダンス法による重量床衝撃音レベル予測式

重量床衝撃音レベルの予測計算法として、インピーダンス法による予測計算法は計算容量が少なく、実務上広く用いられている方法である。近年のスラブの大型化に伴い、大脇・山下らにより提案された予測計算法²⁾が広く用いられるようになってきており、適用範囲内において高い精度で計算を行うことができることが確認されている。しかし、2000年に改定されたJISA 1418-2:2000と対応しておらず、各種パラメータの変更が必要である。本節では大脇・山下らによる予測計算法において変更の必要な項目について整理する。以下にインピーダンス法による重量床衝撃音レベルの予測計算式を示す。

$$L_{H,f} = 10 \log_{10} \left(\frac{F_{rms}^2}{Z_{bT}^2} \cdot \rho_0 c_0 \cdot S_{eff} \cdot k \frac{4}{A} \right) + 120 + \Delta L_C \quad \dots (2.1)$$

- $L_{H,f}$: オクターブバンドごとの標準重量衝撃源による床衝撃音レベル[dB]
- F_{rms} : 衝撃力実効値[N]
- Z_{bT} : スラブの基本インピーダンス値にスラブ周辺拘束の補正を行い、さらに共振の影響を考慮した加振点のインピーダンス値[kg/s]
- $\rho_0 c_0$: 空気固有音響抵抗[kg/s · m²]
- S_{eff} : スラブの有効放射面積[m²]
- k : 音響放射係数
- A : 受音室の吸音力[m²]
- ΔL_C : サウンドレベルメータの動特性補正值[dB]

式(2.1)を展開すると以下ようになる。

$$L_{H,f} = 20 \log_{10} F_{rms} - L_{ZT} + 10 \log_{10} S_{eff} + 10 \log_{10} k - 10 \log_{10} A + \Delta L_C + 152 \quad \dots (2.2)$$

- L_{ZT} : 加振点別インピーダンスレベル[dB] (= $L_Z + \Delta L_Z + Z_T$)
- L_Z : 基本インピーダンスレベル[dB]
- ΔL_Z : 周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量[dB]
- Z_T : 共振によるインピーダンスレベル低下量[dB]

インピーダンス法による重量床衝撃音レベルの予測計算の手順は、「衝撃源」、「スラブのインピーダンス特性の計算」、「スラブの振動から音への変換」、「受音室内の音響特性」の4段階に分けられる。図2-1にインピーダンス法による予測計算法のフローチャートを示す。

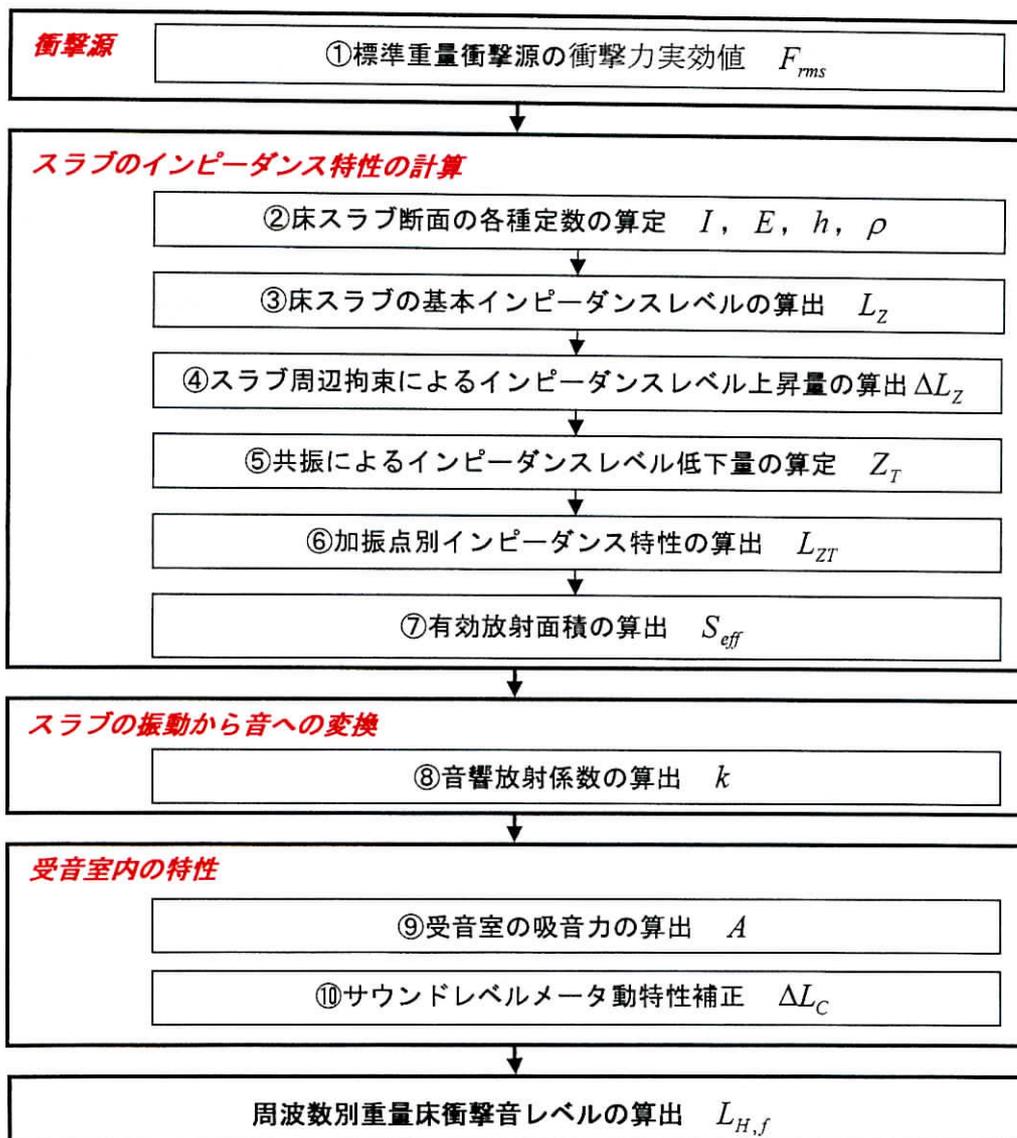


図 2-1 インピーダンス法による予測計算フローチャート

衝撃源の衝撃力特性は、衝撃力実効値を衝撃力レベルとして用いてきた。しかし、2000年に改訂された JIS A 1418-2 の衝撃力暴露レベルとは異なっており、JIS A 1418-2 の衝撃力暴露レベルに合わせる必要がある。

スラブのインピーダンス特性の計算では、スラブの拘束条件による影響や共振による影響についてさまざまな検討がなされている。インピーダンスレベル上昇量の算出においては、周波数依存性について石丸らにより指摘されている。また、筆者らはスラブ端部のインピーダンスレベル上昇量がスラブ厚と梁せいの比が大きくなるに伴い上昇することを示した。有効放射面積の算出過程でも同様にスラブ端部の拘束条件により影響を受けることが指摘されている。共振によるインピーダンスレベル低下量の計算においては、スラブの面積、スパンに関らず一定値を用いてきた。しかし、筆者らはスラブの1次固有振動数の

含まれる周波数帯域によってスラブの共振によるインピーダンスレベル低下量が変化すること示した。

受音室内の特性の計算では、サウンドレベルメータの動特性補正值は従来の予測計算法では衝撃力実効値に合わせた値を用いてきた。しかし、衝撃力特性を JIS A 1418-2 の衝撃力暴露レベルに合わせるに伴い、動特性補正值の変更も必要となる。

これらのことから、その他のパラメータについても再検討を行い、変更する必要がある。

2.3 スラブのインピーダンス特性に関する検討

前節において従来の予測計算法について整理し、その問題点の抽出を行った。ここでは、インピーダンス法の計算過程において最も重要な計算課程であるスラブのインピーダンス特性について検討する。

スラブのインピーダンス特性はスラブの基本インピーダンスレベル、インピーダンスレベル上昇量、共振によるインピーダンスレベル低下量の 3 つの要素で構成される。スラブの基本インピーダンスレベルはスラブ構造やスラブ厚、インピーダンスレベル上昇量はスラブ端部の拘束の条件（梁の大きさ、種類など）、共振によるインピーダンスレベル低下量はスラブ寸法やスラブ厚により影響を受ける。本節では、実建物においてスラブの駆動点インピーダンスを測定し、全時間応答インピーダンスレベルおよび衝撃時間内応答インピーダンスレベルを算出する。これらの結果から、スラブの拘束条件や面積の違いによる影響について整理し、インピーダンスレベル上昇量と共振によるインピーダンスレベル低下量について検討する。

2.3.1 測定対象および測定・解析手法

スラブの駆動点インピーダンスの測定は 2003 年～2010 年に竣工したスラブの種類，スパン，スラブ厚の異なる RC 造集合住宅 13 棟について行った。対象としたスラブは均質単板スラブ 4 床，波型中空スラブ 4 床，波型中空合成スラブ 23 床，円形中空スラブ 2 床，矩形中空スラブ 1 床とした。図 2-2 に測定対象としたスラブの断面，表 2-1 に測定対象としたスラブの概要を示す。

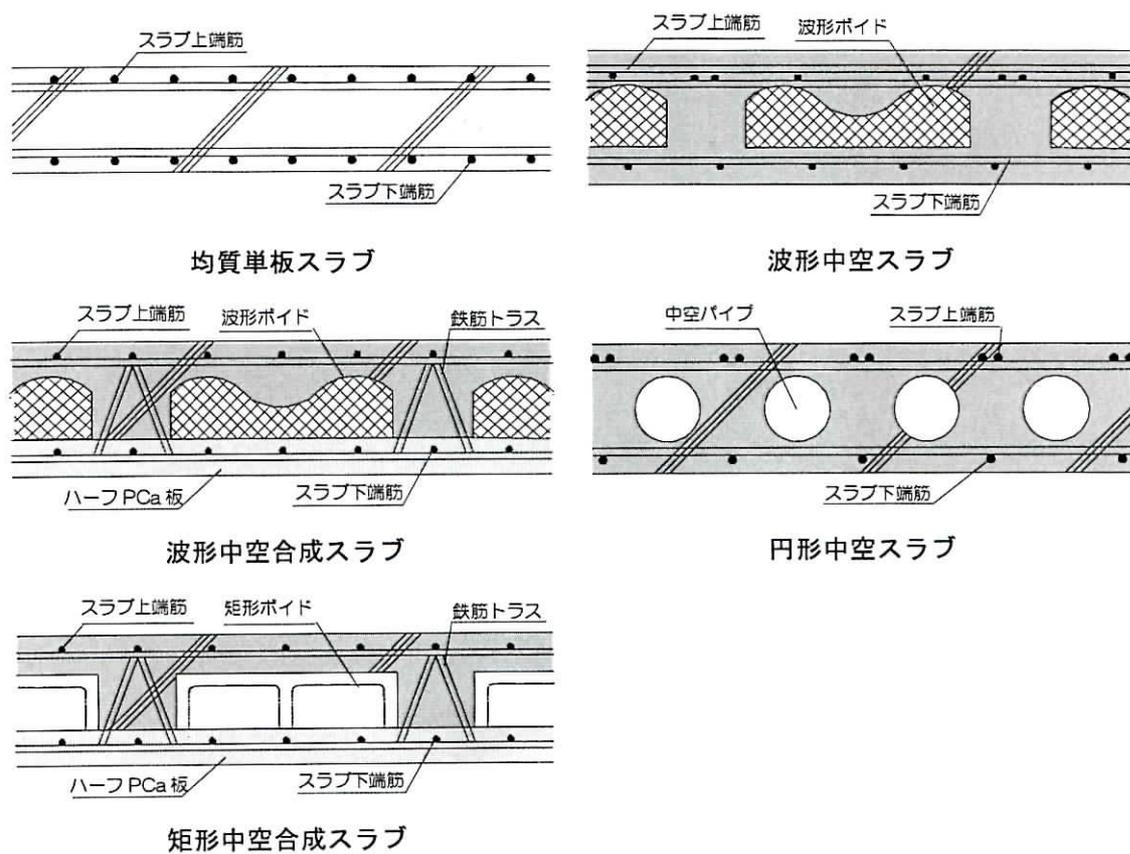


図 2-2 測定対象スラブ断面

表 2-1 測定対象スラブ概要

建物	スパン(m)	面積(m ²)	スラブの種類	スラブ厚(mm)	固有振動数計算値 (Hz)
A	6.2×7.2	44.6	波型中空合成	260	25.7
	6.3×7.2	45.0	波型中空合成	260	25.5
	5.5×7.2	39.2	波型中空合成	260	30.9
	6.2×6.5	40.3	波型中空合成	260	27.6
	6.3×6.5	40.6	波型中空合成	260	27.3
B	6.7×7.0	47.1	均質単板	200	18.3
	6.7×7.0	47.1	波型中空合成	280	25.3
C	8.0×8.1	64.8	波型中空合成	310	20.2
	4.5×8.1	36.5	波型中空合成	310	47.3
D	6.0×6.0	36.0	波型中空合成	270	31.5
	6.0×7.0	42.0	波型中空合成	270	28.3
	6.0×6.4	38.4	波型中空合成	270	30.0
E	11.8×11.8	139.2	波型中空合成	290	8.8
	7.8×11.8	92.0	波型中空合成	290	15.8
F	6.1×8.0	48.7	波型中空合成	280	27.8
	8.5×14.6	123.8	波型中空合成	280	12.6
	7.5×8.0	60.2	波型中空合成	280	22.7
G	6.0×6.1	36.3	均質単板	220	26.0
	4.0×6.0	24.0	均質単板	220	46.3
H	6.6×13.0	85.8	均質単板	190	13.3
	6.6×13.0	85.8	波型中空	250	17.2
	6.6×13.0	85.8	波型中空	280	19.4
I	6.0×8.6	51.6	波型中空合成	280	26.2
	6.0×8.6	51.6	波型中空合成	300	28.0
	6.2×8.6	53.3	波型中空合成	300	26.7
	7.8×8.6	67.1	波型中空合成	300	19.3
	8.6×8.6	67.1	波型中空合成	300	17.0
J	5.0×8.3	41.2	波型中空	270	34.5
	5.5×8.3	41.2	波型中空	270	30.0
K	5.4×12.1	65.3	矩形中空合成	250	25.0
L	7.0×8.7	60.9	円形中空	300	22.1
	9.0×9.2	82.8	円形中空	300	15.2
M	5.9×11.4	67.3	波型中空合成	280	24.3

測定は、梁と垂直なライン上およびスラブ中央点を測定点とし、振動ピックアップの近傍（50mm 以内）の点をインパルスハンマー（衝撃周波数 208Hz）で加振したときの衝撃力と振動速度応答をデータレコーダに収録した。図 2-2 に駆動点インピーダンスの測定系統、図 2-3 に測定点の取り方の例、図 2-4 に測定ラインのとり方を示す。

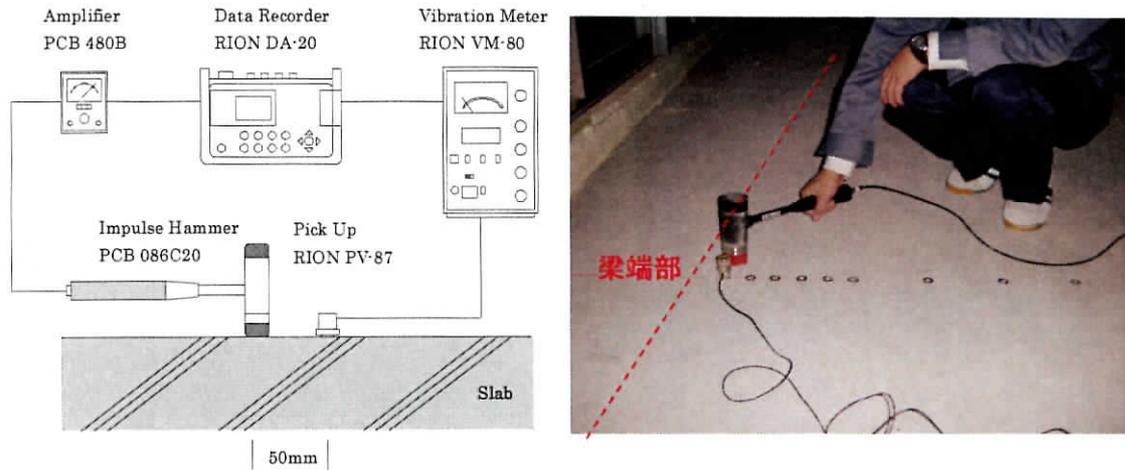


図 2-2 駆動点インピーダンス測定系統および測定状況

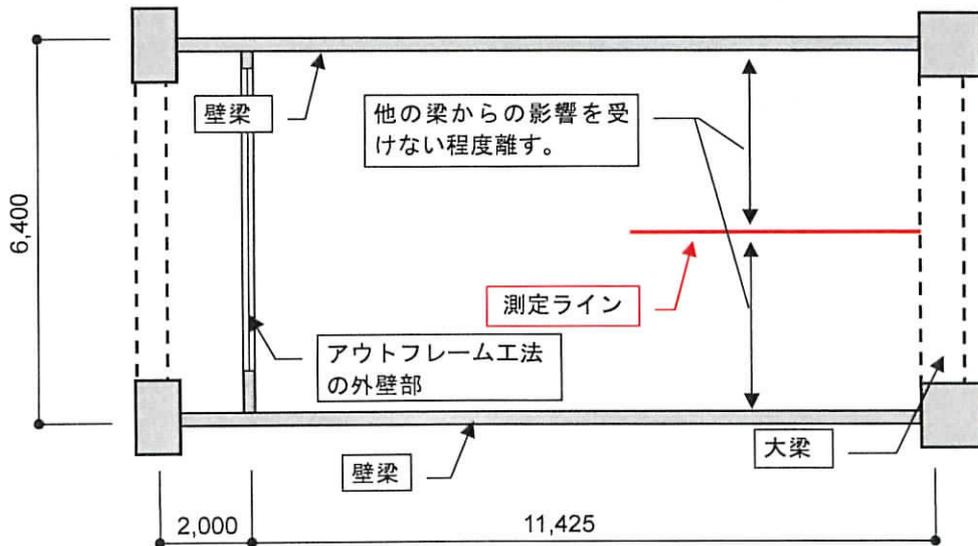


図 2-3 測定点の取り方の例

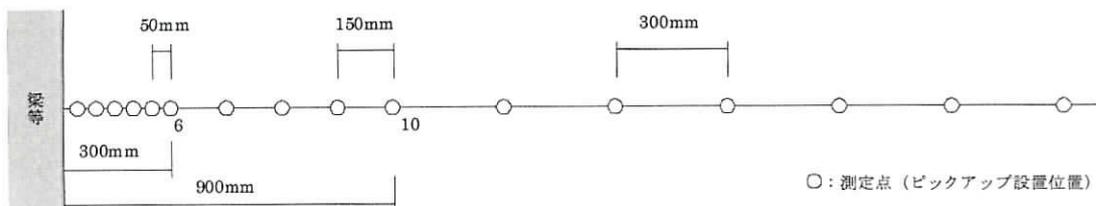


図 2-4 測定ライン上の測定点の取り方

スラブ端部の拘束の影響などスラブの強度・固定度などを表す衝撃時間内応答インピーダンスレベルとスラブの共振などの影響を見る全時間応答インピーダンスレベルの 2 種類について解析を行った。解析は、測定したデータをサンプリング周波数 4096Hz, サンプリング時間 1 秒間で A/D 変換してコンピュータへ取り込み、計算により求めた。なお、衝撃時間内応答インピーダンスレベルはインパルスハンマーの加振時間内の振動応答から、全時間応答インピーダンスレベルは加振後 1 秒間のデータから算出した。

2.3.2 インピーダンスレベル上昇量に関する検討

インピーダンス法による重量床衝撃音レベル予測計算では、梁等によるスラブ周辺拘束の影響をインピーダンスレベル上昇量として計算に導入している。従来のインピーダンス法ではインピーダンスレベル上昇量の予測式は実測結果に基づいて求められているが、大まかな分類となっているため、様々な工法や拘束条件に対応していないなどの問題点があった。これらのことから、スラブ周辺拘束の条件について検討する必要がある。

図 2-5 にインピーダンスレベル上昇量の測定結果の例を示す。なお、インピーダンスレベル上昇量の基準値はスラブの周辺拘束の影響のないスラブ中央付近の値とした。

図 2-5 に示すインピーダンスレベル上昇量の測定ラインは表 2-2 に示す拘束条件となっている。なお、インピーダンス法による予測計算法では中空スラブのスラブ厚はスラブの等価厚さとして均質端板スラブの厚さに換算して用いるため、表においても等価厚さとしてあらわしている。line1 は大梁で梁下に開口なし、line2, line3 は大梁で開口部あり、line4 は小梁で開口部ありとなっている。開口部ありの場合の梁の寸法はそれぞれ異なる寸法となっている。スラブ端部のインピーダンスレベル上昇量は line1 で 15dB 程度、line2 で 7dB 程度、line3 で 9dB 程度、line4 で 13dB 程度であった。

表 2-2 インピーダンスレベル上昇量の拘束条件

	スラブ		梁		スラブ厚と梁 せいの比
	種類	等価厚さ (mm)	種類	寸法(mm)	
line1	波型中空スラブ	245 (250)	大梁 (開口なし)	—	—
line2	波型中空スラブ	284 (294)	大梁 (開口あり)	750×600	2.1
line3	波型中空合成 スラブ	275 (280)	大梁 (開口あり)	550×850	3.0
line4	波型中空合成 スラブ	275 (280)	小梁 (開口あり)	450×1100	3.9

※等価厚さの項目の括弧内の数字はスラブ厚を示す。

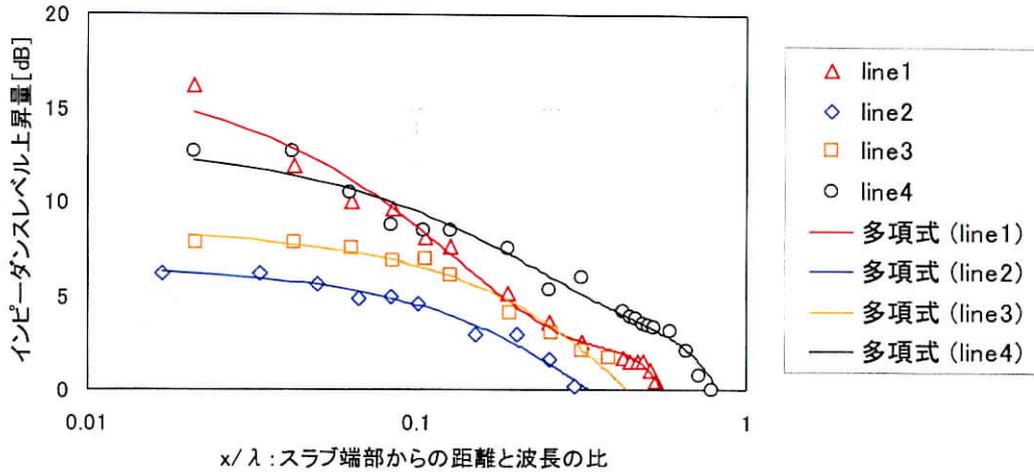


図 2-5 インピーダンスレベル上昇量測定結果

従来のインピーダンス法では、梁の拘束条件としては、大梁開口部なし、大梁開口部あり、小梁というように梁の寸法ではなく梁の種類によって分類していた。しかし、図 2-4 に示すように梁の寸法が大きくなるほどインピーダンスレベル上昇量が大きくなっている。また、開口がない場合とある場合の梁せいが大きい場合とでインピーダンスレベル上昇量の値が近い値になっている。これらのことから、梁の種類に因らず、梁の寸法によってインピーダンスレベル上昇量の大きさが決まってくるものと考えられる。表 2-2 に示す line2~4 の梁の寸法では、梁幅は line2 が最も大きく、梁せいは line4 が最も大きい。インピーダンスレベル上昇量は梁せいが最も小さい line2 が最も小さく、梁せいが最も大きい line4 が最も大きくなる傾向を示した。その他の測定結果も同様の結果を示していることから、梁はばではなく梁せいの寸法によって分類することができる。

インピーダンスレベル上昇量はスラブ中央付近の値で基準化しており、この基準値はスラブの基本インピーダンスレベルと対応していることから、梁せいの寸法をスラブの等価厚さで基準化することを考えた。したがって、等価スラブ厚と梁せいの比で梁のインピーダンスレベル上昇量を分類する。なお、中空スラブの等価厚さは、中空床板の断面 2 次モーメントと等しい値となる単板の厚さであり、式 (2.3) を用いて算出した。

$$h_e = \sqrt[3]{12I_x} \quad \dots (2.3)$$

I_x : 中空床板の断面 2 次モーメント [m⁴]

h_e : 中空床板を単板に換算したときの等価厚さ [mm]

図 2-6 に梁のインピーダンスレベル上昇量の測定結果を示す。梁の分類は、

- a) 梁下開口なし
- b) 梁下開口あり スラブ厚と梁せいの比 2.0 以上 2.5 未満
- c) 梁下開口あり スラブ厚と梁せいの比 2.5 以上 3.0 未満
- d) 梁下開口あり スラブ厚と梁せいの比 3.5 以上

とした。

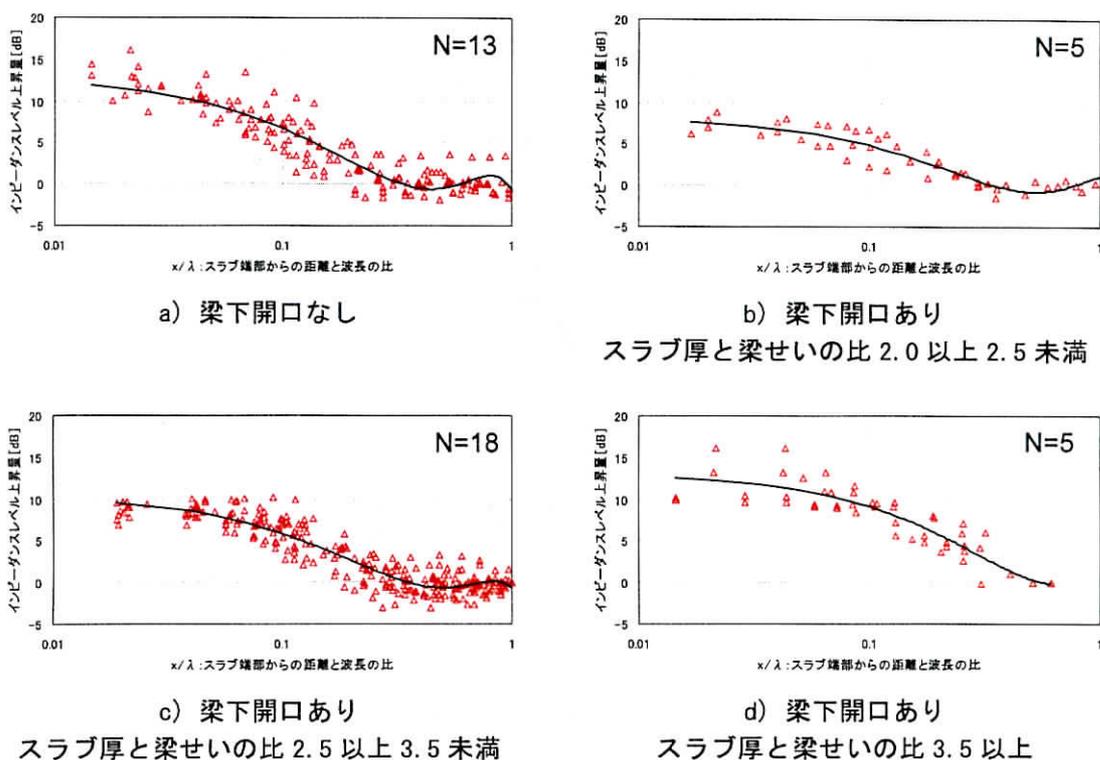


図 2-6 梁のインピーダンスレベル上昇量測定結果

スラブ端部のインピーダンスレベル上昇量は開口なしの場合には 13.0dB であった。開口ありの場合、スラブ厚と梁せいの比が 2.0 以上 2.5 未満の場合には 8.4dB, 2.5 以上 3.5 未満の場合には 10.6dB, 3.5 以上の場合には 13.2dB であった。インピーダンスレベル上昇量がスラブ中央のインピーダンスレベルに収束するスラブ端部からの距離と波長の比は開口なしの場合には 0.34 であった。開口ありの場合スラブ厚と梁せいの比が 2.0 以上 2.5 未満の場合には 0.35, 2.5 以上 3.5 未満の場合には 0.36, 3.5 以上の場合には 0.57 であった。

スラブ厚と梁せいの比が大きくなることで、スラブ端部のインピーダンスレベル上昇量が上昇している。このように梁を分類することで、スラブ端部の拘束条件をより正確に把握できることから、この分類により求められたインピーダンスレベル上昇量を用いることとする。

次に梁以外のスラブの拘束条件について検討を行った。梁以外の拘束条件として以下に示す4つの条件が考えられる。

e) アウトフレーム工法の外壁部

バルコニーの外周に柱や梁が配置され、居住空間内に柱型や梁型がなくなり、居住空間が有効に活用でき、開口部が広く取れることから近年増加している工法である。この工法では、外壁部に躯体構造と一体となっている垂壁や袖壁が施工される場合が多い。このような場合に梁から加振点までの距離が離れてしまい、梁からの拘束が小さくなってしまう。しかし、アウトフレーム工法の外壁部が躯体構造と一体となっている場合には、垂壁や袖壁の拘束力を考慮することができる。

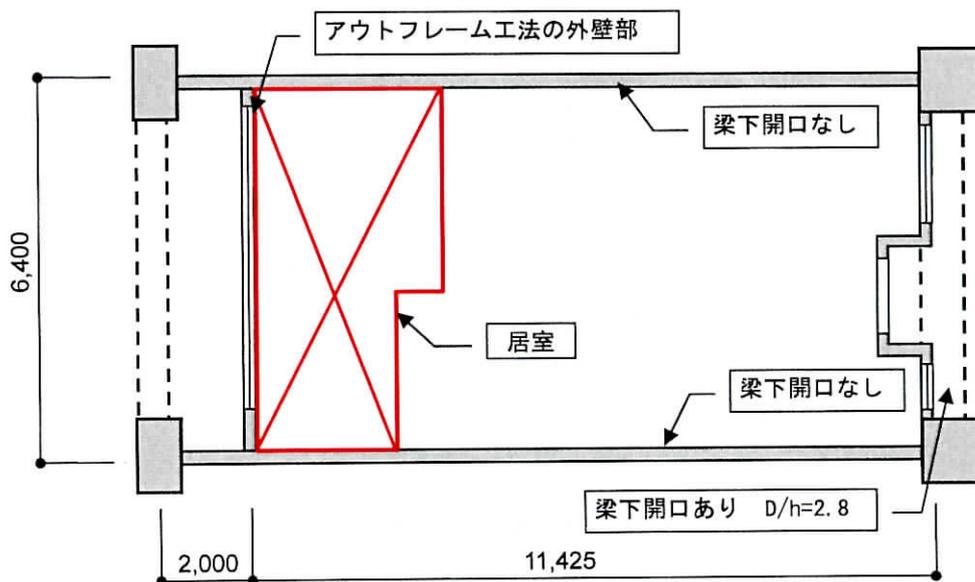


図 2-7 アウトフレーム工法の外壁部の平面模式図

f) スラブ段差

住戸内の水廻り部のスラブ天端は、居住空間に比べて落とし込んで施工するケースが多い。このとき、水廻り部のスラブ厚は一般的に 200mm 以上確保する必要がある。図 2-8 にスラブ段差の模式図を示す。A の場合、一般部のスラブ厚が厚いため、スラブ下面に段差を設ける必要がない。B の場合、一般部のスラブ厚が十分に確保できない場合、スラブ下面に段差ができる。このとき、段差補強部がスラブより厚くなるため、インピーダンスレベルが上昇する。なお、スラブ厚とスラブ段差部の比が 1.5 以上の場合のみを対象とした。

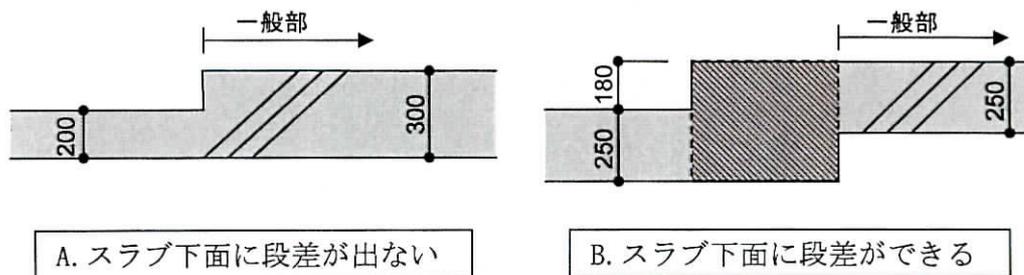


図 2-8 スラブ段差の模式図

g) 柱

スラブの大型化に伴い、連続したスラブの中に位置する梁をなくして、複数のスパンのスラブを一枚のスラブとする場合がある。このような場合に、柱が居室に接していることがある。梁のみで重量床衝撃音レベルの計算を行う場合、梁による 1 辺拘束となってしまうため、拘束力が小さく床衝撃音レベルが大きくなり、スラブが厚くなってしまう。柱の拘束力は梁よりも大きいため、柱の拘束力を考慮することで、スラブ圧を抑えることができる。

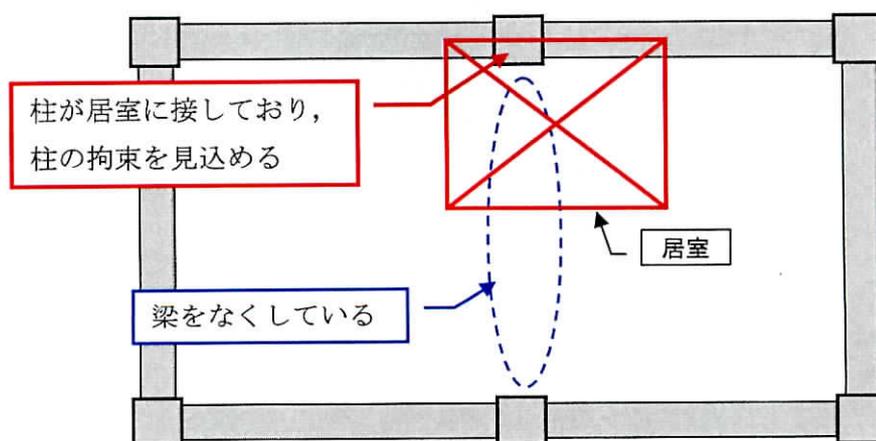


図 2-9 居室に柱が接している場合の平面模式図

h) 垂壁

スラブの大型化に伴い、スラブ中央付近に居室が配置される場合が増えてきている。スラブ中央付近に居室が配置されると、一辺拘束となる場合が多く、梁からの拘束の影響が小さくなる。このような場合に、非構造部材である垂壁を配置し、床衝撃音遮断性能を向上させる工法が用いられることがある。

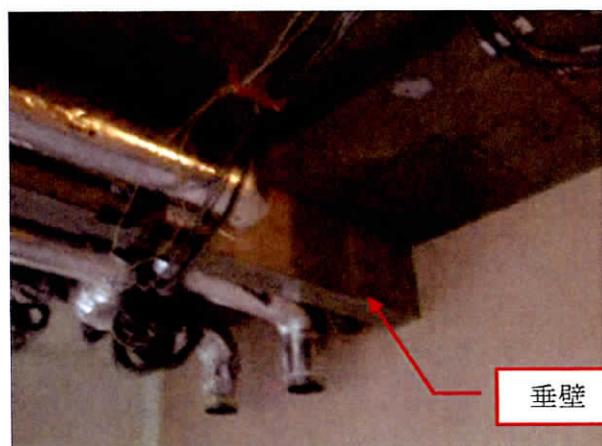
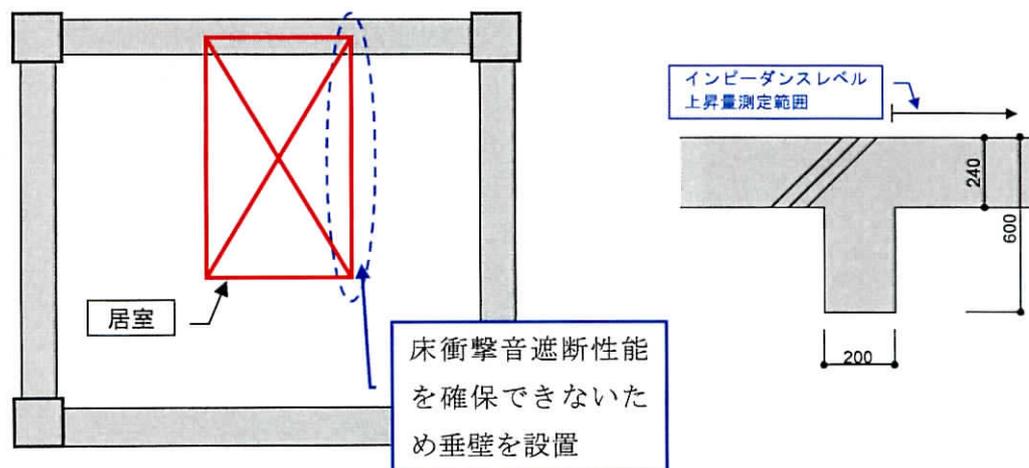


図 2-10 垂壁を設置する場合の平面模式図，断面図および垂壁設置状況の例

これらの拘束条件においてインピーダンスレベル上昇量の測定を行った。図 2-11 にインピーダンスレベル上昇量の測定結果を示す。

アウトフレーム工法の外壁部のスラブ端部のインピーダンスレベル上昇量は 8.6dB, スラブ中央のインピーダンスレベルに収束するスラブ端部からの距離と波長の比は 0.26 であった。スラブ段差のスラブ端部のインピーダンスレベル上昇量は 4.3dB, スラブ中央のインピーダンスレベルに収束するスラブ端部からの距離と波長の比は 0.42 となった。柱のスラブ端部のインピーダンスレベル上昇量は 14.8dB, スラブ中央のインピーダンスレベルに収束するスラブ端部からの距離と波長の比は 0.46 であった。

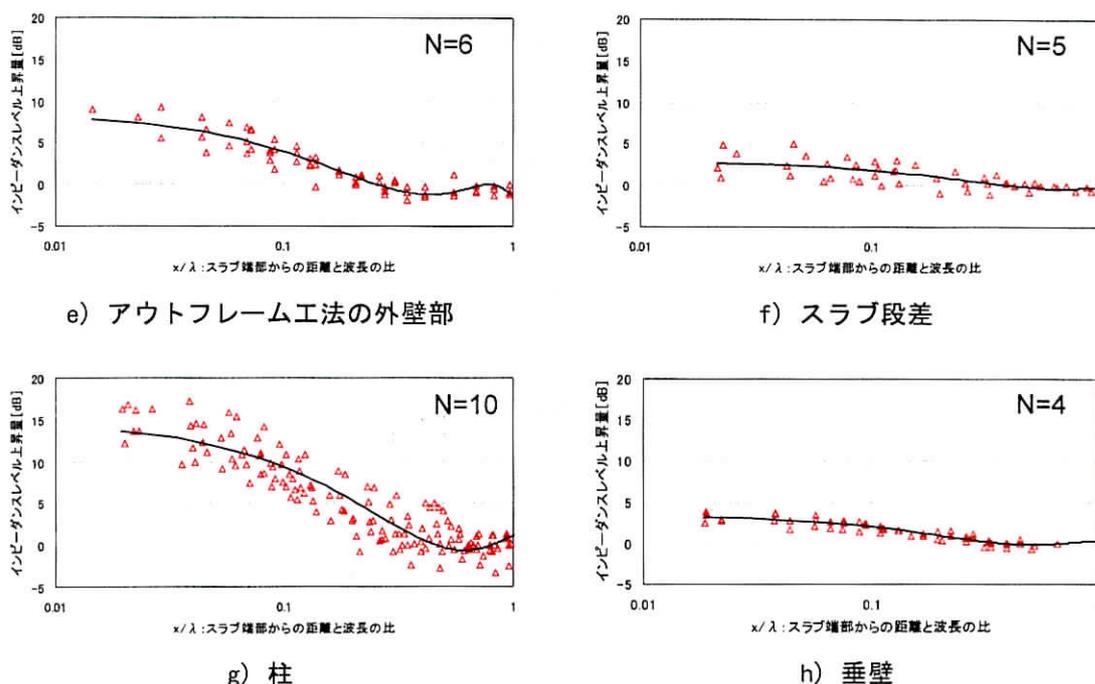


図 2-11 梁以外の拘束条件によるインピーダンスレベル上昇量測定結果

従来の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とは異なり、梁の寸法や壁、段差、柱などの拘束条件によってインピーダンスレベル上昇量の分類を行った。梁のインピーダンスレベル上昇量は梁の寸法によって分類を確認することができた。また、その他の拘束条件についても端部のインピーダンスが上昇することが確認できた。これらのインピーダンスレベル上昇量の回帰式を用いることでより適切に床衝撃音レベルを予測することができると考えられる。

2.3.3 共振によるインピーダンスレベル低下量に関する検討

インピーダンス法による予測計算法では、スラブの共振による影響を共振によるインピーダンスレベル低下量として計算に導入している。従来のインピーダンス法では共振によるインピーダンスレベル上昇量は一定値として扱われていた。大型スラブにおいては、スラブの一次固有振動数は31.5Hz帯域以下に含まれるため、問題とされていなかった。しかし、特に中型のスラブにおいて、スラブのスパンや面積によってスラブの一次固有振動数が63Hz帯域に含まれる場合もあり、予測計算結果が乖離する原因となっていた。これらのことからスラブの共振の影響について検討する必要がある。

表 2-1 に示すスラブにおいてスラブの全時間応答インピーダンスレベルの測定を行った。全時間応答インピーダンスレベルの測定点は梁などからの拘束の影響を受けないスラブ中央付近において行った。図 2-12 に全時間応答インピーダンスレベルの測定点の例、図 2-13 に測定結果の例を示す。

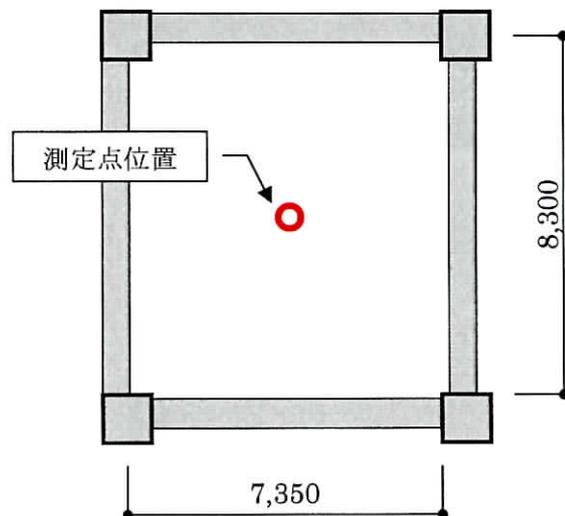


図 2-12 全時間応答インピーダンスレベル測定点の例

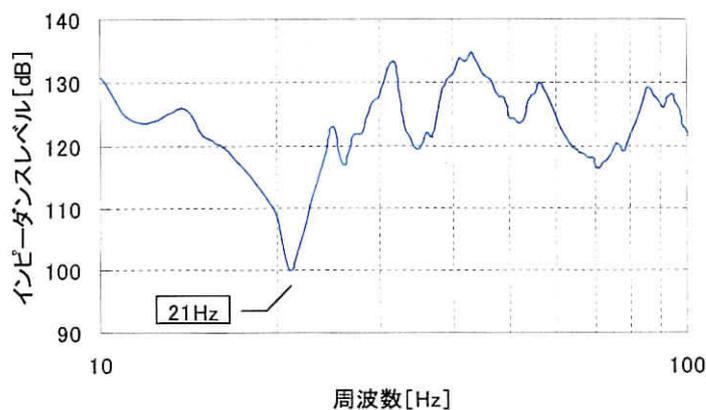


図 2-13 全時間応答インピーダンスレベル測定結果の例

図 2-12 に示すスラブは、波型中空合成スラブ 300mm であり、スラブスパンは 7,350×8,300mm (内寸) でスラブ面積は 61.0m²であった。測定結果から全時間応答インピーダンスレベルはスラブの共振の影響により 21Hz で大きく落ち込んでいる。スラブの 1 次固有振動数は、式 (2.4) の 4 辺固定支持における 1 次固有振動数を 0.8 倍した式 (2.5) をスラブの 1 次固有振動数の推定値としている。

$$f_{fx} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \left(\frac{2.25}{a^2} + \frac{1.4}{b^2} \right) \cdot c_l \cdot h \quad \dots (2.4)$$

$$f_0 = 0.8f_{fx} \quad \dots (2.5)$$

f_{fx} : 4 辺固定支持板の 1 次固有振動数 [Hz]

f_0 : スラブの 1 次固有振動数推定値 [Hz]

a : スラブ短辺長 [m] b : スラブ長辺長 [m]

c_l : 縦波伝搬速度 [m/s] $c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

h : スラブ厚 (等価厚さ) [m]

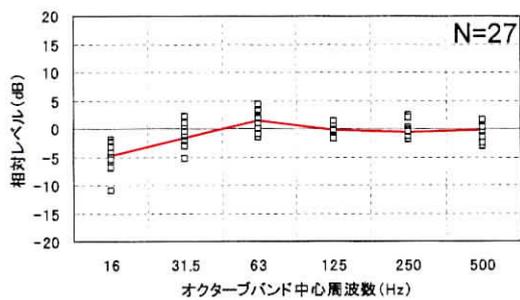
E : ヤング率 [N/m²]

ρ : 密度 [kg/m³]

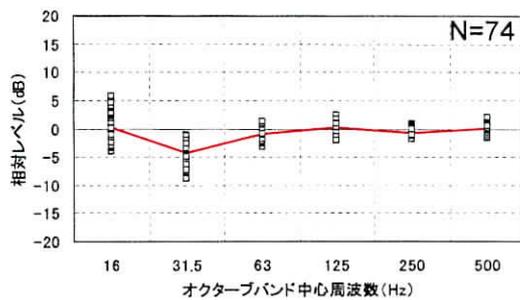
測定例のスラブの 1 次固有振動数の推定値は式 (2.3), (2.4) によって求めると、21.3Hz となる。1 次固有振動数の推定値と全時間応答インピーダンスレベルの落ち込みの周波数はよく対応している。その他の測定結果においても同様であり、全時間応答インピーダンスレベルはスラブの 1 次固有振動数付近で共振の影響により大きく低下する傾向にあると考えられる。

図 2-14 に全時間応答インピーダンスレベルの測定結果を 1/1 オクターブバンドごとに示す。なお、図 2-12 の a)~c) はスラブの一次固有周波数計算値の含まれる周波数帯域である。ここに示す測定結果は、壁からの距離と波長の比が 0.6 以上あり、スラブ端部の拘束による影響を受けないと考えられる点における測定結果である。なお、測定結果は同じ測定点において測定した衝撃時間内応答インピーダンスレベルの値を基準とした場合の相対レベルである。

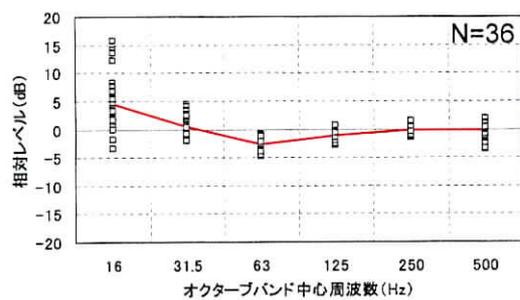
全時間応答インピーダンスレベルは、16Hz, 31.5Hz 帯域にスラブの一次固有振動数が含まれる場合に、その帯域で 5dB 程度低下している。63Hz 帯域に一次固有振動数が含まれる場合には、63Hz 帯域で 3dB 程度低下している。このように、スラブの一次固有振動数の含まれる周波数帯域において全時間応答インピーダンスレベルが低下しており、それぞれの周波数帯域ごとに共振によるインピーダンスレベル低下量を与えることで予測計算を行うことができると考える。



a) 16Hz 帯域



b) 31.5Hz 帯域



c) 63Hz 帯域

図 2-14 全時間応答インピーダンスレベル測定結果

2.4 インピーダンス法によるスラブ素面の重量床衝撃音レベル予測法の提案

近年の集合住宅のスラブ厚は、構造上必要なスラブ厚よりも音響設計上必要なスラブ厚の方が厚くなる場合が増えてきている。従来のインピーダンス法では、スラブの拘束条件などが大まかな分類となっており、予測計算の結果、過剰なスラブ厚となる場合があった。

前節までにスラブのインピーダンス特性について、躯体構造に合わせて具体的に分類することにより詳細な予測計算が可能となることを示した。ここでは、各パラメータについて整理・検討し、以下の項目について検討を行った。

- 1) 衝撃源の衝撃力特性 (①)
- 2) スラブ周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量 (④)
- 3) 共振によるインピーダンスレベル低下量 (⑤)
- 4) 床スラブ内の振動減衰補正量³⁾の算定 (⑦)
- 5) 有効放射面積の算出方法 (⑧)
- 6) サウンドレベルメータの動特性補正值 (⑩)

本節では上記の項目について検討し、JIS A 1418-2:2000 に対応した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の提案を行う。図 2-15 に提案する予測計算法のフローチャートを示す。

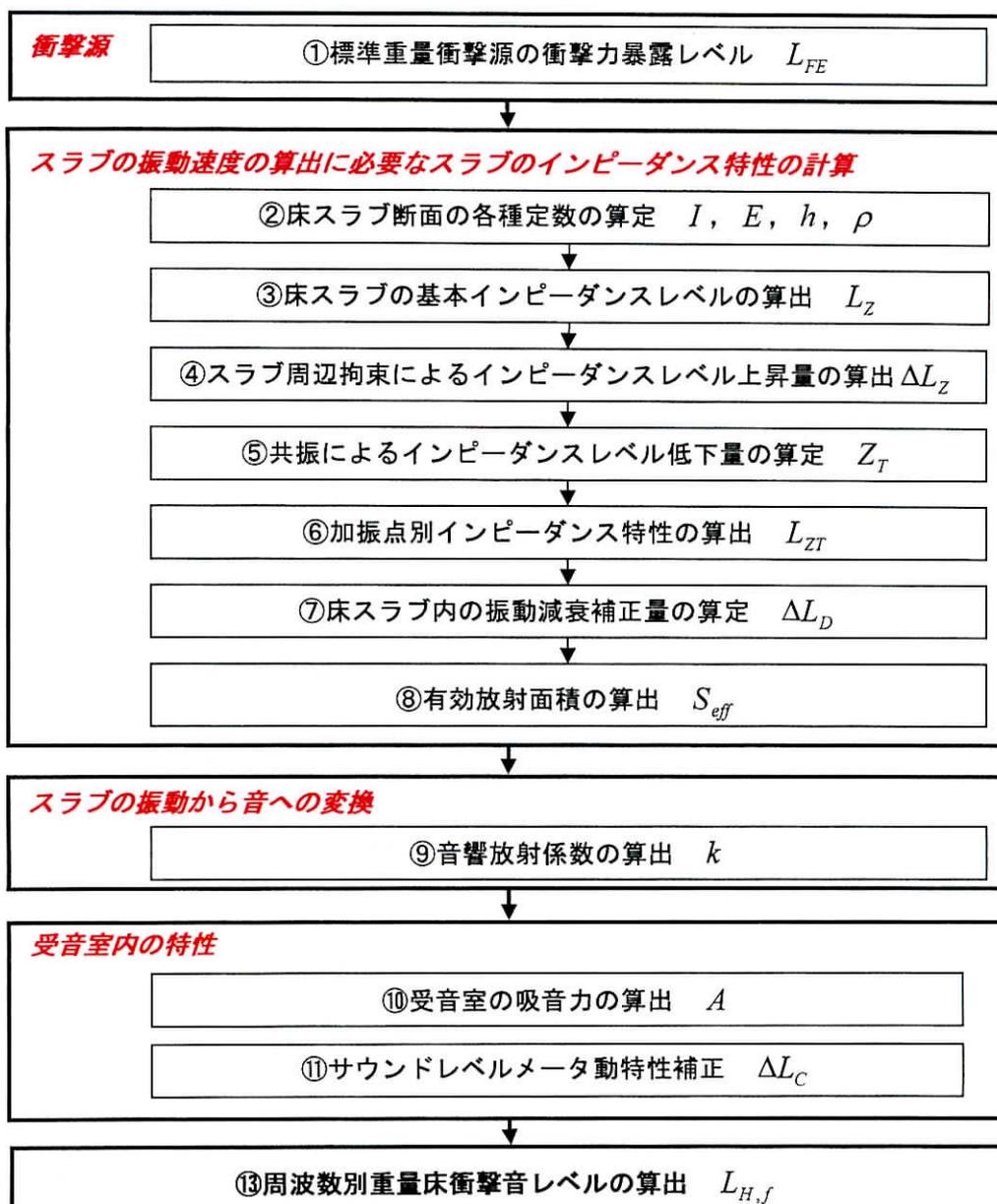


図 2-15 インピーダンス法による予測計算フローチャート

1) 衝撃源の衝撃力特性 (①)

2000年に改定された JIS A 1418-2:2000「建物の床衝撃音遮断性能の測定方法」で規定されている衝撃力特性 (1) を持つ標準重量衝撃源であるタイヤの衝撃力暴露レベルを予測計算で用いる衝撃力特性とする。表 2-3, 図 2-16 に衝撃力特性 (1) を持つ標準重量衝撃源の衝撃力暴露レベルを示す。

表 2-3 衝撃力特性 (1) を持つ標準重量衝撃源の衝撃力暴露レベル (単位: dB)

	オクターブバンド中心周波数 (Hz)				
	31.5	63	125	250	500
衝撃力暴露レベル	47.0	40.0	22.0	11.5	5.5

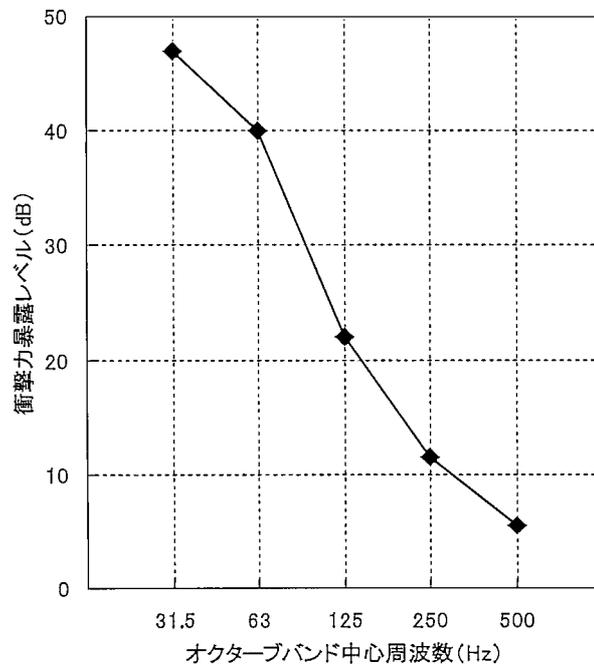


図 2-16 衝撃力特性 (1) を持つ標準重量衝撃源の衝撃力暴露レベル

2) スラブ周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量 (④)

スラブ端部の周辺拘束の影響はインピーダンスレベル上昇量で表される。インピーダンスレベル上昇量は梁をスラブ厚と梁せいの比によって分類することができ、梁以外の躯体構成要素についても考慮することができることを2.3.2項で示した。これらの分類の実測結果の回帰曲線からインピーダンスレベル上昇量の計算式を求め、その計算式を用いることで予測計算を行うことが可能となる。図2-17、2-18にインピーダンスレベル上昇量のグラフ、式(2.6)～(2.13)に計算式を示す。

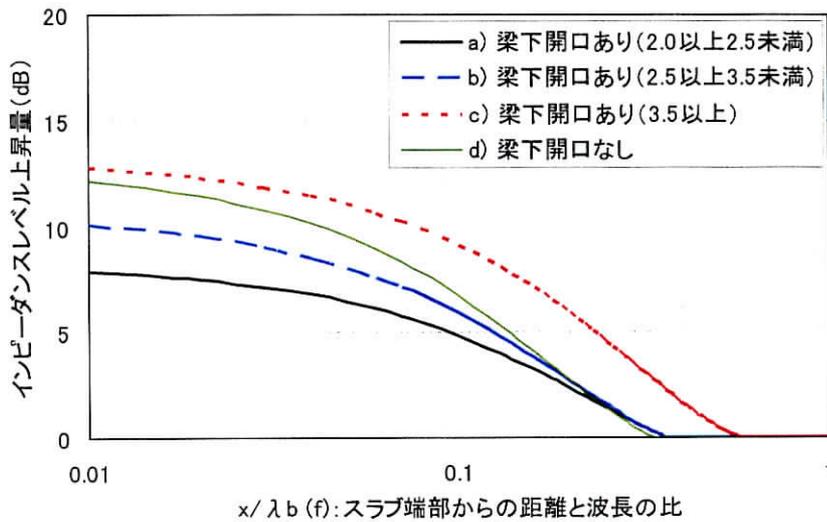


図 2-17 インピーダンスレベル上昇量 (梁)

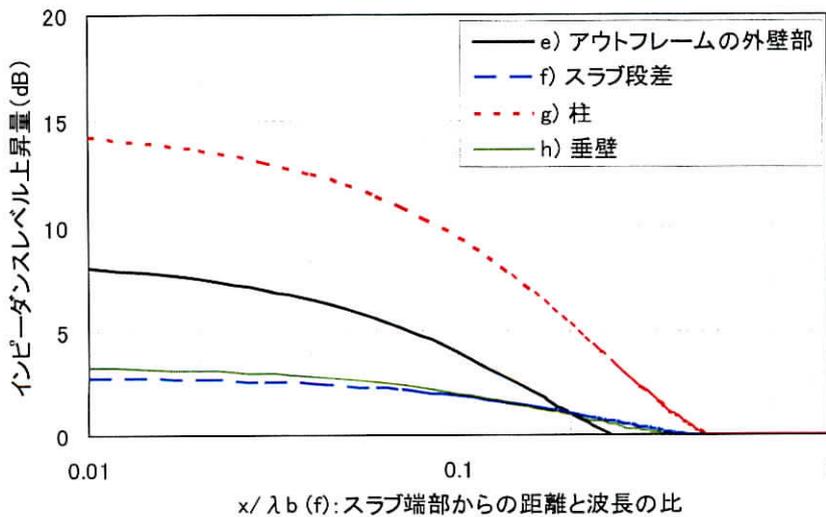


図 2-18 インピーダンスレベル上昇量 (その他の構成要素)

a) 梁下開口あり（スラブ厚と梁せいの比 2.0 以上 2.5 未満）

$$\Delta L_z = 8.33 - 39.98 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 55.15 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 22.56 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (2.6)$$

b) 梁下開口あり（スラブ厚と梁せいの比 2.5 以上 3.5 未満）

$$\Delta L_z = 10.63 - 55.50 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 87.89 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 43.68 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (2.7)$$

c) 梁下開口あり（スラブ厚と梁せいの比 3.5 以上）

$$\Delta L_z = 13.20 - 44.61 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 42.78 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 8.87 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (2.8)$$

d) 梁下開口なし

$$\Delta L_z = 12.93 - 73.74 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 127.51 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 67.35 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (2.9)$$

e) アウトフレーム工法の外壁部

$$\Delta L_z = 8.59 - 55.10 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 98.10 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 53.26 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (2.10)$$

f) スラブ段差

$$\Delta L_z = 2.97 - 12.25 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 14.48 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 5.36 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (2.11)$$

g) 柱

$$\Delta L_z = 14.81 - 61.40 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 77.12 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 29.37 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (2.12)$$

h) 垂壁

$$\Delta L_z = 3.53 - 17.73 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 26.86 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 12.51 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (2.13)$$

ΔL_z : インピーダンスレベル上昇量[dB]
 x : スラブ端部からの距離[m]
 $\lambda_b(f)$: 計算周波数帯域中心周波数の曲げ波波長[m]

$$\lambda_b(f) = \sqrt{\frac{\pi \cdot c_l \cdot h}{\sqrt{3} \cdot f}} \quad \dots (2.14)$$

c_l : 縦波の伝搬速度[m/s] $c_l = \sqrt{E/\rho}$

h : スラブ厚[m]

表 2-4 にインピーダンスレベル上昇量が 0 となるスラブ端部からの距離と波長の比を示す。なお、インピーダンスレベル上昇量が 0 となる点よりも梁などの拘束条件から距離が離れている点のインピーダンスレベル上昇量は 0 として予測計算を行う。

表 2-4 $\Delta L=0$ となるときの $x/\lambda_b(f)$ の値

スラブ端部の条件	$x/\lambda_b(f)$ の値 ($\Delta L=0$)
a) 梁下開口あり (スラブ厚と梁せいの比 2.0 以上 2.5 未満)	0.363
b) 梁下開口あり (スラブ厚と梁せいの比 2.5 以上 3.5 未満)	0.360
c) 梁下開口あり (スラブ厚と梁せいの比 3.5 以上)	0.576
d) 梁下開口なし	0.335
e) アウトフレーム工法の外壁部	0.257
f) スラブ段差	0.413
g) 柱	0.462
h) 垂壁	0.374

スラブ周辺拘束の周波数依存性について石丸ら²⁴⁾により報告されている。従来の予測計算では周波数依存性はないものとされてきた。従来の予測計算法では、衝撃源であるタイヤの衝撃周波数の曲げ波波長を用いていたが、提案する予測計算式では周波数依存性を考慮した。

3) 共振によるインピーダンスレベル低下量 (⑤)

従来のインピーダンス法²⁾では共振の影響によるインピーダンスの低下量はスラブ寸法、面積に関わらず一定の値を用いて計算を行っていた。スラブの全時間応答インピーダンスレベルは一次固有振動数の含まれる周波数帯域によって低下する帯域が変化することを2.3.3項で示した。したがって、スラブの一次固有振動数によって、共振によるインピーダンスレベル低下量の値を変えて計算する必要がある。

共振によるインピーダンスレベル低下量は、実測値の平均値に近似した+3dB/oct, +1.5dB/octの勾配とした。表2-5, 図2-19に計算に使用する共振によるインピーダンスレベル低下量の特性格を示す。

表 2-5 共振によるインピーダンスレベル低下量 (単位: dB)

	オクターブバンド中心周波数 (Hz)					
	16	31.5	63	125	250	500
16Hz 帯域	-4.5	-1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
31.5Hz 帯域	0.0	-4.0	-1.0	0.0	0.0	0.0
63Hz 帯域	0.0	0.0	-2.5	-1.0	0.0	0.0

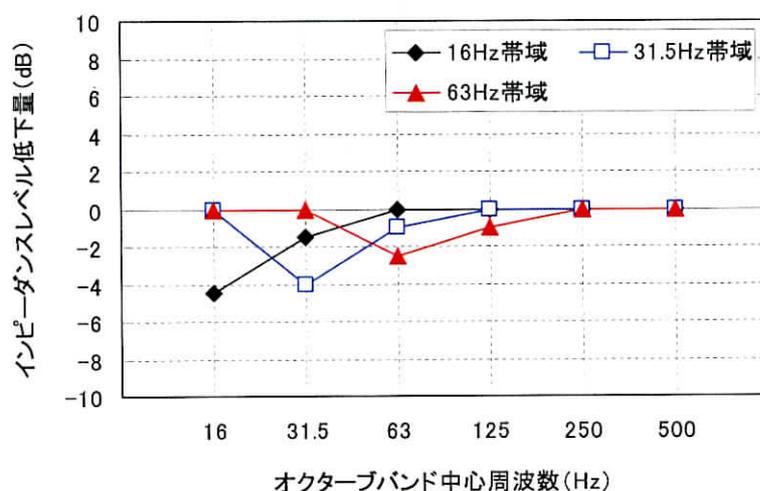


図 2-19 スラブの共振によるインピーダンスレベル低下量特性曲線

4) 床スラブ内の振動減衰補正量³⁾の算定 (⑦)

スラブ上の任意の点を衝撃加振した場合、スラブ内の振動状態は必ずしも均一ではなく伝搬によって減衰する。また、伝搬による減衰は周波数依存性を示すことが知られている。提案する予測計算法では表 2-6 に示すスラブ内の振動減衰補正量を用いて計算を行う。

表 2-6 スラブ内の振動減衰補正量 (単位: dB)

スラブ面積	オクターブバンド中心周波数[Hz]			
	63	125	250	500
25m ² 以上 40m ² 未満	-1.2	-2.3	-4.0	-6.0
40m ² 以上 70m ² 未満	-1.7	-2.9	-4.8	-6.8
70m ² 以上	-2.2	-3.6	-5.6	-7.6

5) 有効放射面積の算出方法 (⑧)

受音室の有効放射面積は、梁等によりスラブが拘束され音響放射に有効に作用していない範囲を受音室の放射面(天井)から除いた面積である。従来の予測計算法²⁾では、有効放射面積に作用しないスラブ端部から除外される距離はスラブの拘束条件に因らず一定の値を用いてきた。しかし、スラブの拘束条件によって拘束の度合いが大きく変わることから、有効放射面積に作用しないスラブ端部から除外される距離も拘束条件によって変わると考えられる。インピーダンスレベル上昇量の計算式を振動速度比 $(V/V_0)^2$ として求め、端部の $x/\lambda b=0.01$ のとき $(V/V_0)^2$ が0となるようにして図 2-20 に表す。また、振動速度比より算出したスラブ端部から除外する長さを表 2-7 に示す。

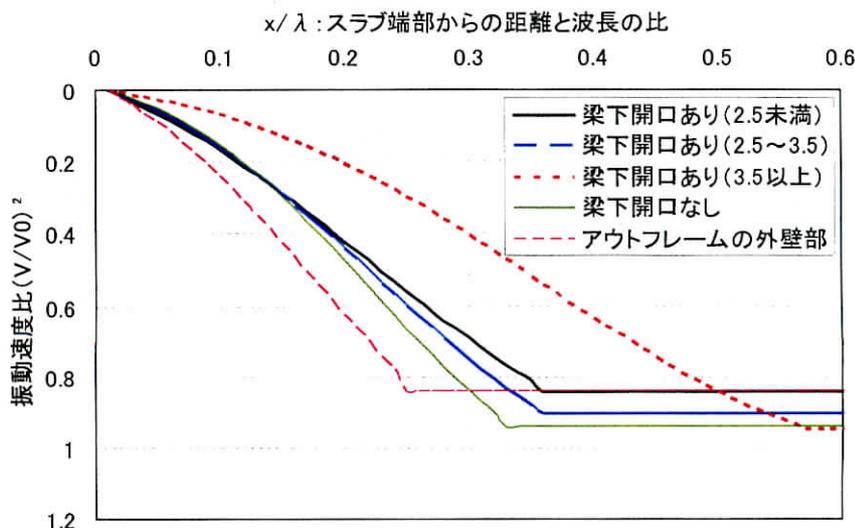


図 2-20 スラブ面における振動速度比の二乗を基準化

表 2-7 有効放射面積算出のためスラブ端部から除外される長さ

周辺拘束状況 (スラブ厚と梁せいの比)	スラブ端部から除外される長さ[m]
梁下開口あり 2.0 以上 2.5 未満	$0.19\lambda_b$
梁下開口あり 2.5 以上 3.5 未満	$0.20\lambda_b$
梁下開口あり 3.5 以上	$0.32\lambda_b$
梁下開口なし	$0.19\lambda_b$
アウトフレーム工法の外壁部	$0.14\lambda_b$
垂壁 (梁と接合している場合)	$0.16\lambda_b$

6) サウンドレベルメータの動特性補正值 (⑩)

インピーダンス法では、定常状態でのエネルギー平衡を計算している。しかし、JIS A 1418-2:2000 では重量床衝撃音レベルの測定をサウンドレベルメータの時間重み特性 F の最大値で行うことを規定しているため、その差が動特性補正として必要となる。

動特性補正值は、1 秒間で基準化した重量床衝撃音の単発音圧暴露レベルの時間重み特性 F の最大音圧レベルとの差として実測値から求めた値を用いる²⁴⁾。表 2-8 にサウンドレベルメータの動特性補正值 (ΔL_c) を示す。

表 2-8 サウンドレベルメータの動特性補正值 (単位: dB)

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz
インピーダンス法	5.2	5.2	5.2	5.2

2.5 重量床衝撃音レベルの実測値と予測値の対応

提案した予測計算法の妥当性を検証することを目的に、予測値と実測値の比較を行う。

測定は JIS A 1418-2:2000 に準拠して行い、衝撃源は衝撃力特性 (1) を持つ標準重量衝撃源とした。音源位置及び、受音点は、各々 5 点とし、受音点の高さは、空間的に均等になるように、0.8~1.6m の 0.2m ピッチとする。図 2-21 に床衝撃音遮断性能の測定系統図、図 2-22 に測定状況の写真を示す。

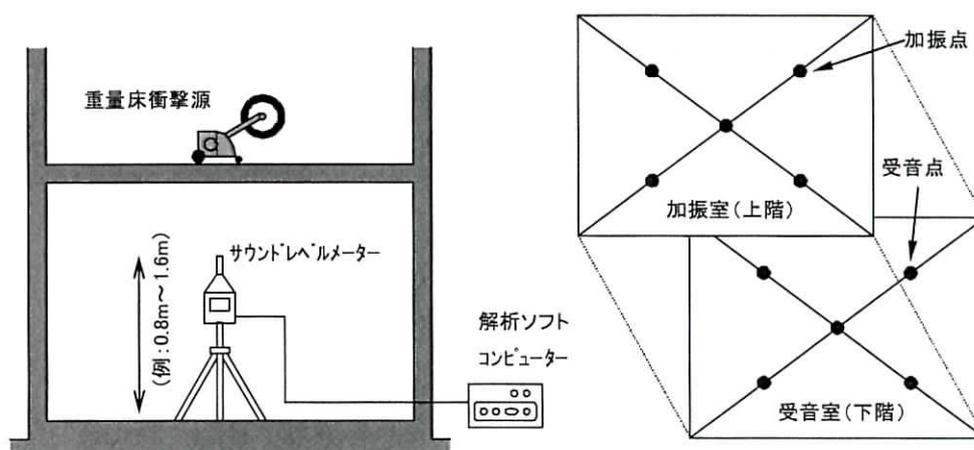


図 2-21 床衝撃音遮断性能測定系統図



図 2-22 床衝撃音遮断性能測定状況写真 (左：音源室，右：受音室)

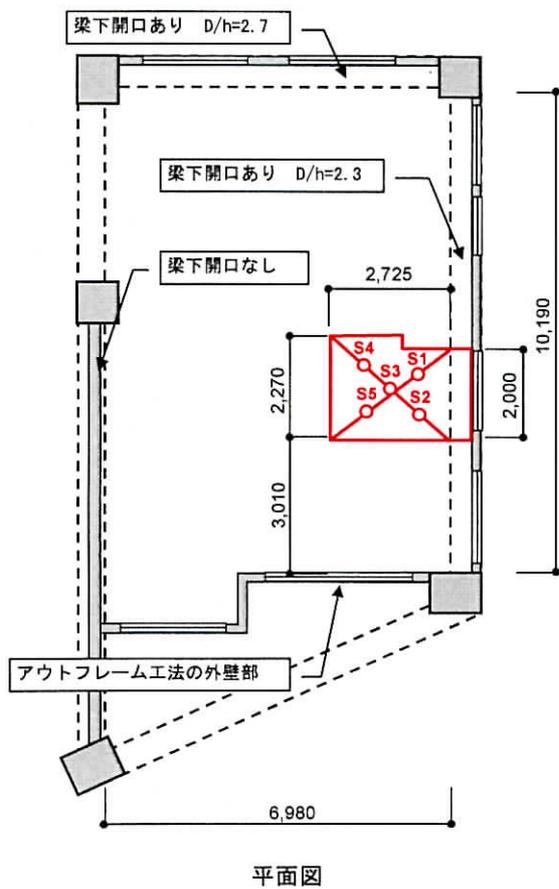
対象とする建物は、2005～2012年に竣工した集合住宅16棟、70室（LD 34室、洋室35室、和室1室）で、すべてRC造である。スラブの支配面積は30.3～90.2m²の範囲であり、波型中空スラブ（スラブ厚250～300mm）が51室、均質単板スラブ（スラブ厚200～240mm）が19室であった。スラブの一次固有振動数の計算値は14.0～52.4Hzの範囲であり、16Hz帯域～63Hz帯域に分布していた。天井仕上げは二重天井が57室（天井懐は90～315mm）、天井仕上げなしが13室であった。室面積は、7.3～29.2m²であった。なお、音源室の加振面はスラブ素面が15室、直張りフローリングが55室であった。

表2-9に測定および予測を行った建物の仕様を示す。

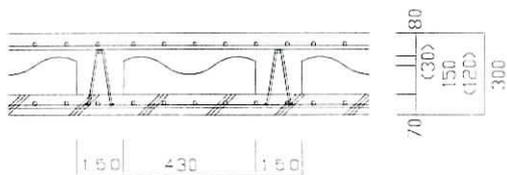
表2-9 建物の仕様

	室数		スラブ			天井懐(mm)
	LD	洋室	支配面積(m ²)	種類	厚さ(mm)	
①	2	1	34~45	均質端板	200,220	280
②	1	2	32~50	均質端板	200,230	170
③	1	1	47	均質端板	230	180
④	2	1	85	波型中空	280	90
⑤	1	2	32~48	波型中空	280	110
⑥	3	4	56~86	波型中空	250,280	315
⑦	4	4	76~85	波型中空	270	205,280
⑧	1	0	36	均質端板	220	—
⑨	0	1	71	波型中空	280	—
⑩	2	1	30~36	均質端板	200~240	125~165
⑪	7	8	65~86	波型中空	300	125
⑫	2	1	58~83.5	波型中空	280	120
⑬	3	0	44~69	均質端板	200,240	120
⑭	0	1	59	均質端板	230	120
⑮	1	1	90	波型中空	300	—
⑯	3	2	83~88	波型中空	260	—

図2-23～2-26に表2-9に示した居室の平面模式図および実測値と予測値の対応の事例を示す。グラフに示すようにすべての事例でよく対応している。

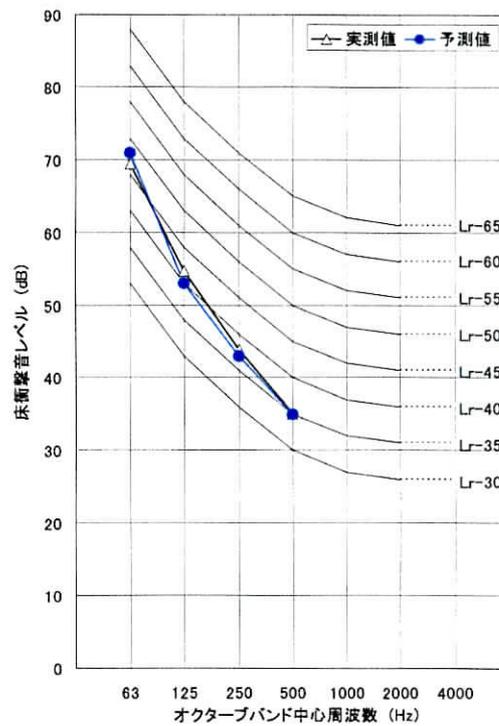


平面図



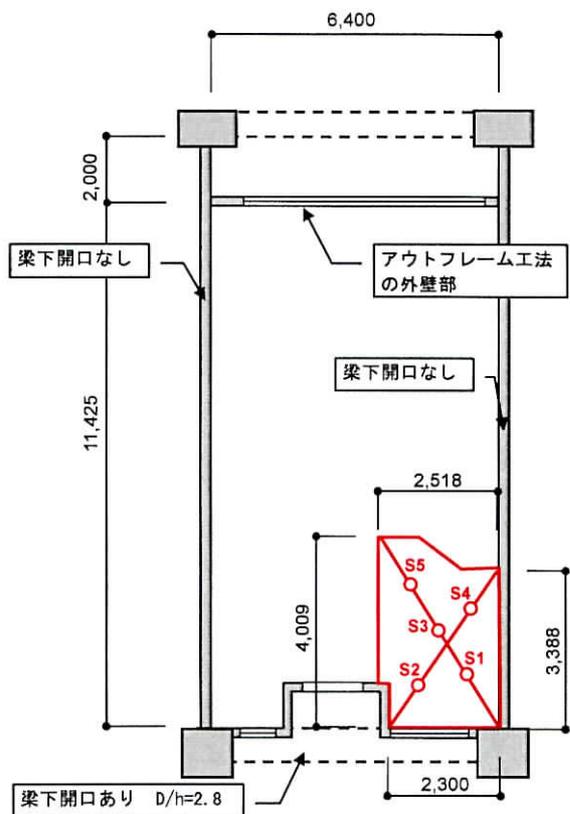
スラブ断面図

		実測値	予測値
オクターブバンド 中心周波数[Hz]	63	69.5	70
	125	54.8	53
	250	43.9	42
	500	35.1	35
L 数		47	47
$L_{i,Fmax,r,H(1)}$		45	—

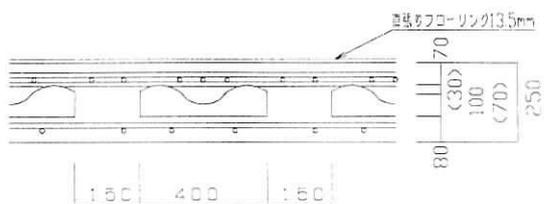


実測値と予測値の対応

図 2-23 対象建物平面図および実測値と予測値の対応 事例 1

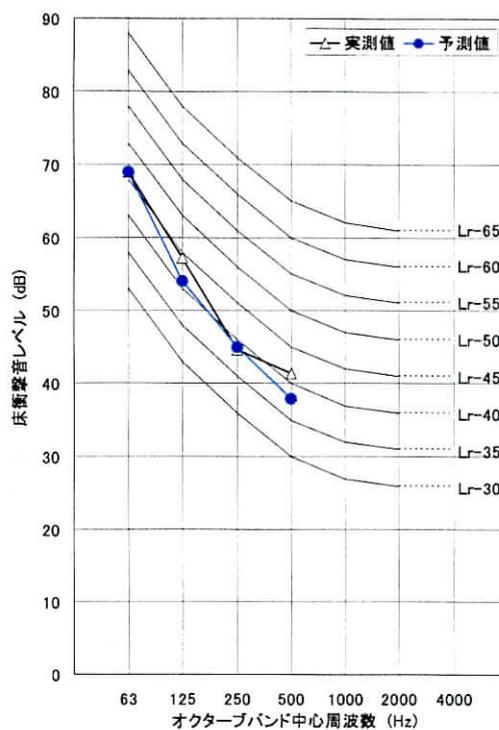


平面図



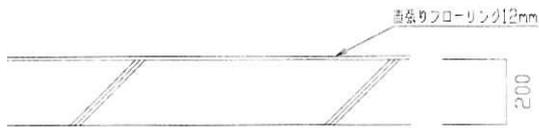
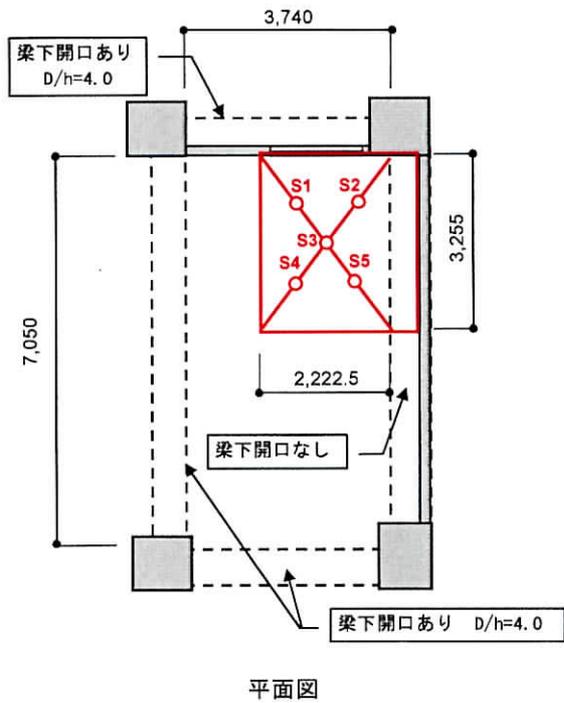
スラブ断面図

		実測値	予測値
オクターブバンド 中心周波数[Hz]	63	69.0	69
	125	57.3	54
	250	44.6	44
	500	41.4	38
L 数		47	46
$L_{i,Fmax,r,H(1)}$		45	—

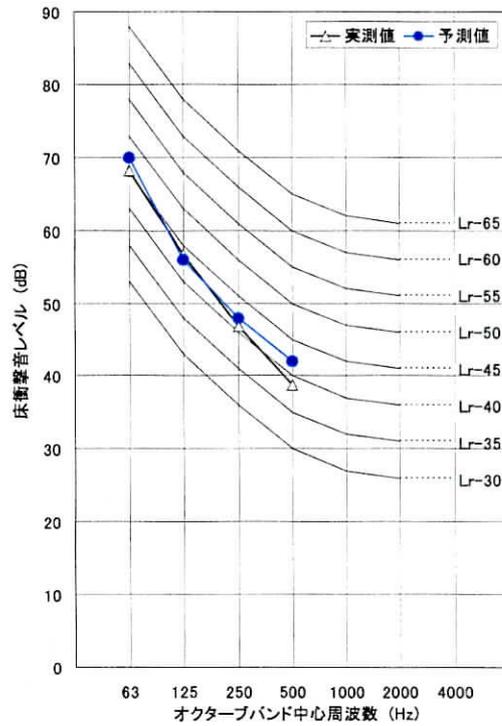


実測値と予測値の対応

図 2-24 対象建物平面図および実測値と予測値の対応 事例 2

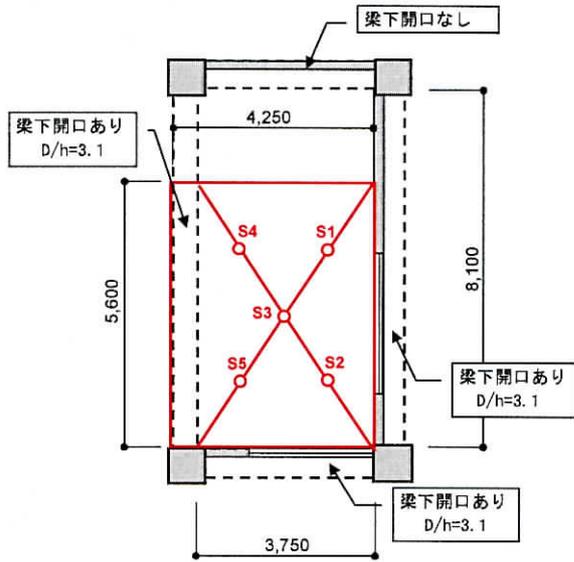


		実測値	予測値
オクターブバンド 中心周波数[Hz]	63	68.3	70
	125	56.8	56
	250	46.8	48
	500	38.8	42
L 数		46	47
$L_{i,Fmax,r,H(1)}$		45	—



実測値と予測値の対応

図 2-25 対象建物平面図および実測値と予測値の対応 事例 3

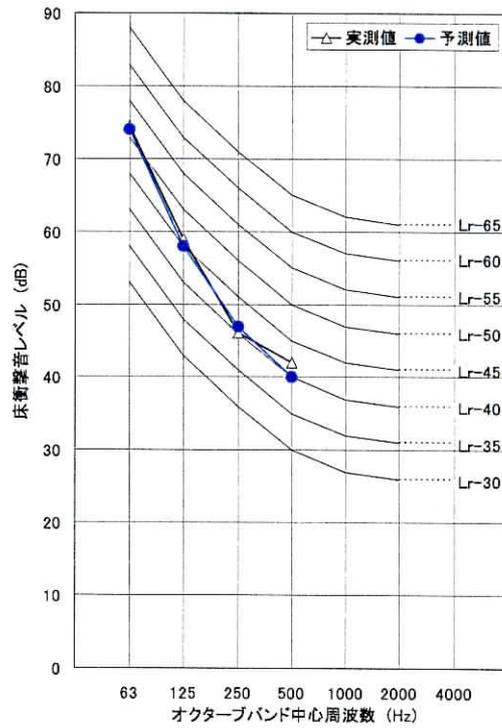


平面図



スラブ断面図

		実測値	予測値
オクターブバンド 中心周波数[Hz]	63	74.6	74
	125	59.0	58
	250	46.1	47
	500	42.0	40
L 数		52	51
$L_{i,Fmax,r,H(1)}$		50	—



実測値と予測値の対応

図 2-26 対象建物平面図および実測値と予測値の対応 事例 4

図 2-27 に実測値と予測値の周波数帯域ごとの分布を示す。L 数決定周波数帯域となることの多い 63Hz 帯域においては、64 室 (91%) で予測値と実測値との差が ± 5 dB (1 ランク) 以内に含まれる。125Hz 帯域では 65 室 (93%), 250Hz 帯域では 54 室 (77%), 500Hz 帯域では 45 室 (64%) となっており、63Hz 帯域、125Hz 帯域では 90%以上が ± 5 dB 以内に含まれている。本研究で提案する予測計算法は特に高い周波数帯域で安全側の予測計算となる傾向にある。

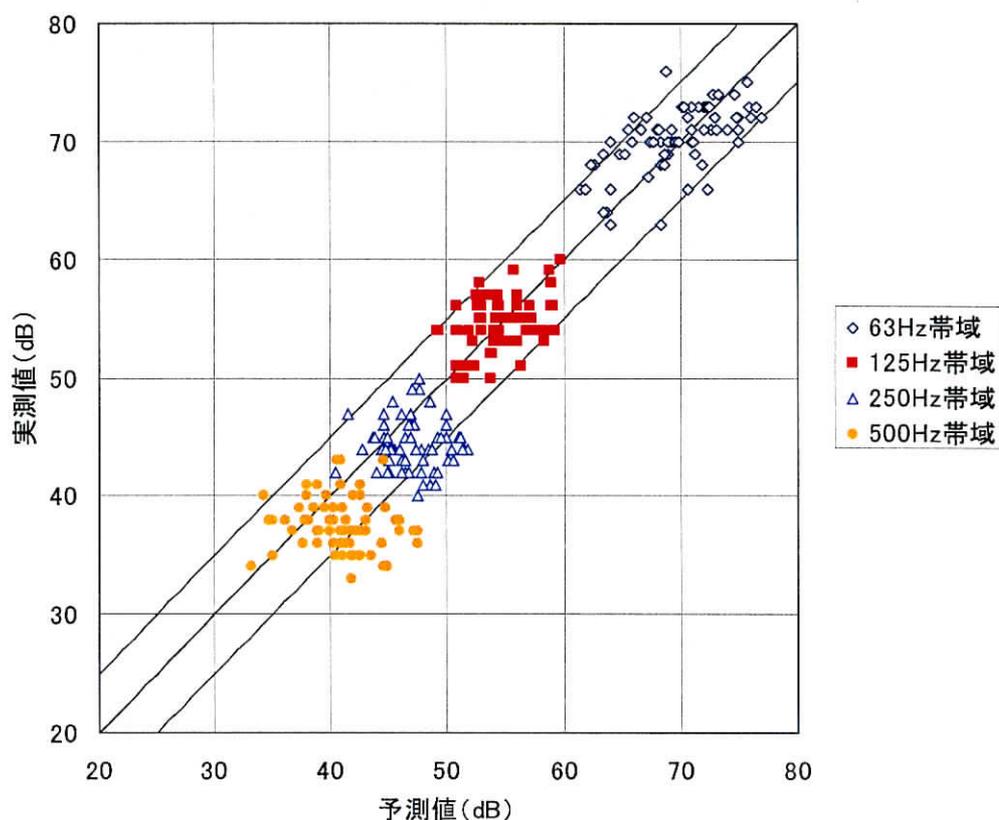


図 2-27 予測値と実測値の分布

提案する予測計算法と従来の予測計算法²⁾について重量床衝撃音遮断性能の決定周波数となることの多い 63Hz 帯域と 125Hz 帯域について比較を行う。提案する予測計算法の 63Hz 帯域の実測値と予測値の差の平均値は -0.5 dB、標準偏差は 3.2、125Hz 帯域の差の平均値は 0.3dB、標準偏差は 2.6 であった。従来の予測計算法の 63Hz 帯域の実測値と予測値の差の平均値は -0.7 dB、標準偏差は 3.4、125Hz 帯域の差の平均値は 0.9dB、標準偏差は 3.3 であった。図 2-28 に 63Hz 帯域、図 2-29 に 125Hz 帯域の確率密度分布を示す。グラフからわかるように 63Hz 帯域、125Hz 帯域ともに従来の予測計算法に比べ予測精度が向上している。

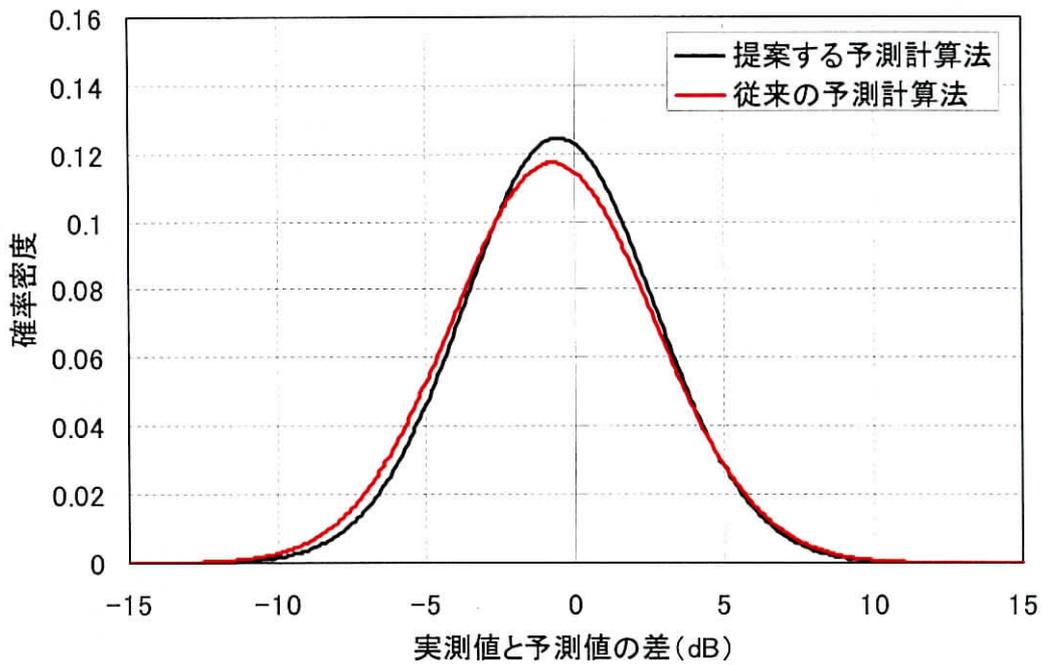


図 2-28 予測値と実測値の差の確率密度分布 (63Hz 帯域)

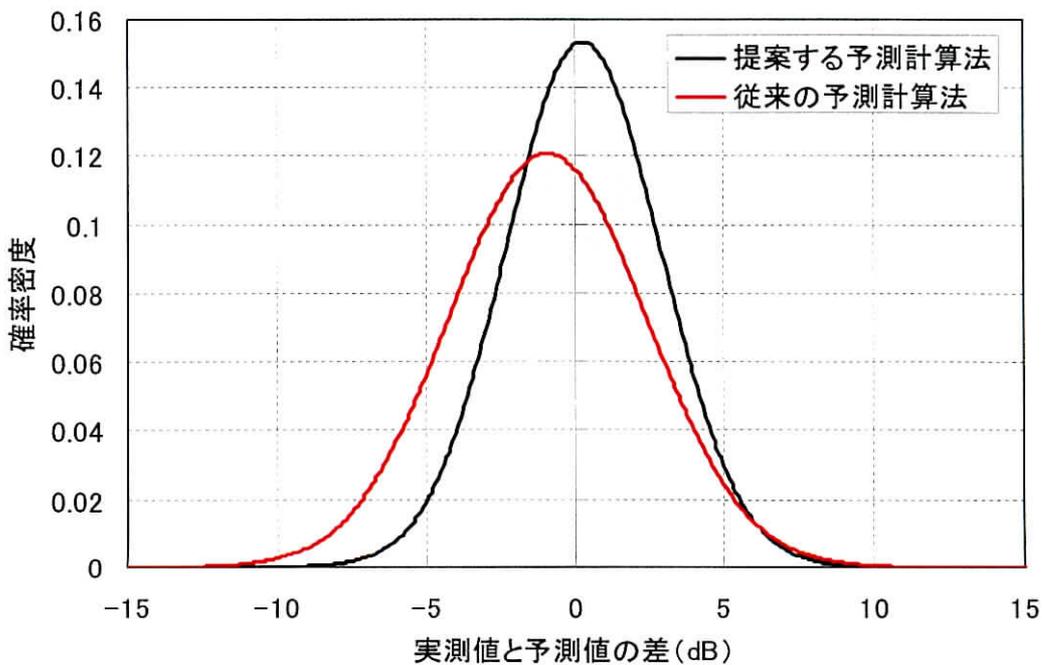


図 2-29 予測値と実測値の差の確率密度分布 (125Hz 帯域)

2.6 まとめ

本章では、インピーダンス法によるスラブ素面の重量床衝撃音レベル予測計算法について、2000年に改定されたJIS A 1418-2への対応や近年の躯体構造の変化への対応が必要と考え、スラブのインピーダンス特性の検討やその他のパラメータの検討を行い、検討結果から得られた予測計算法の提案を行った。以下に本章で得られた知見を示す。

- 1) スラブを拘束する梁によるインピーダンスレベル上昇量は、梁の種類などには因らず、梁の大きさによって拘束の大きさが変化する。拘束の度合いは、スラブ厚と梁せいの比によって分類することができ、比が大きくなるとスラブ端部のインピーダンスレベル上昇量は大きくなることを示した。
- 2) インピーダンスレベル上昇量は梁のみではなく、柱や垂壁などの躯体構造においてもインピーダンスが上昇することを確認した。この結果、これらの躯体構造の上昇量を考慮することができ、詳細な検討が可能となる。
- 3) 全時間応答インピーダンスレベルの計算値は、スラブの一次固有振動数の計算値の含まれる帯域ごとに分類すると、一次固有振動数の含まれる帯域においてインピーダンスレベルの低下が見られる。この結果、従来の予測計算式²⁾のように共振によるインピーダンスレベル低下量を一定として扱うのではなく、一次固有振動数の含まれる帯域で分類して扱う必要がある。
- 4) 2000年に改定されたJIS A 1418の衝撃力特性に合わせて、インピーダンス法の各種パラメータを再検討し、予測計算式を提案した。提案した予測計算式の予測精度の検証を行い、L数決定周波数帯域となることの多い63Hz, 125Hz帯域で±5% (1ランク) 以内に90%以上含まれていることを確認した。また、従来の予測計算式に比べ予測精度が向上していることを確認した。

第 3 章

乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測
に関する検討

第3章 乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測に関する検討

3.1 はじめに

2008年に壁式構造実験室で乾式二重床の「標準型試験体」による試験方法が規定されている「床仕上げ材の床衝撃音低減性能の表記指針」³⁰⁾が公表された。上記の指針には明確に試験条件が規定されており、試験データはカタログ表記に利用されている。この乾式二重床の床衝撃音低減性能は、同一条件によって試験されるため、部材の性能を横並びで評価することができる。

実建物における乾式二重床の床衝撃音低減性能は、躯体条件、居室の配置、乾式二重床の施工条件などによって影響を受けるため、実験室における低減性能では実際の建物の値と必ずしも一致しない。カタログに表記されている試験データは実建物における施工状況とは異なるため、実建物にそのまま適用することは難しい状況となっている。

本章では、上記の観点から、実建物に適用することができる乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量の予測式の提案を行う。重量床衝撃音レベル低減量の予測式の検討は、同一の躯体条件で求める必要があると考えられるため、壁式構造実験室の詳細データに着目し、検討を行った。また、提案する予測式の予測精度について実建物において検証を行う。

3.2 乾式二重床の床衝撃音低減性能と床衝撃音レベルの関係

乾式二重床施工後の重量床衝撃音レベルは、加振点位置によらずほぼ一定値となる²²⁾。高倉ら²¹⁾は、重量床衝撃音遮断性能の決定周波数となることが多い63Hz帯域において加振点によって重量床衝撃音レベル低減量が変化することを確認している。

図3-1に加振点の配置、図3-2にL数決定周波数帯域となる63Hz帯域の測定結果の一例を示す。スラブ素面の場合、スラブ中央付近の加振点S4を加振した場合に比べ、梁などに近い加振点S2を加振したとき受音室における床衝撃音レベルが小さくなる。これは、スラブ端部では梁などによる拘束の影響でインピーダンスレベルが上昇することが要因である。一方で乾式二重床を施工すると、スラブ端部を加振した場合とスラブ中央付近を加振した場合の重量床衝撃音レベルは、ほぼ同じ値に分布する。乾式二重床を施工することによって、二重床上をエネルギーが分散して伝わり、各支持脚から躯体へ伝搬するため、梁による拘束の影響が小さく、打振点による差が小さくなると考えられる。図3-2の結果から、床衝撃音レベル低減量はすべての加振点で同じではなく、加振点ごとに異なっていることがわかる。

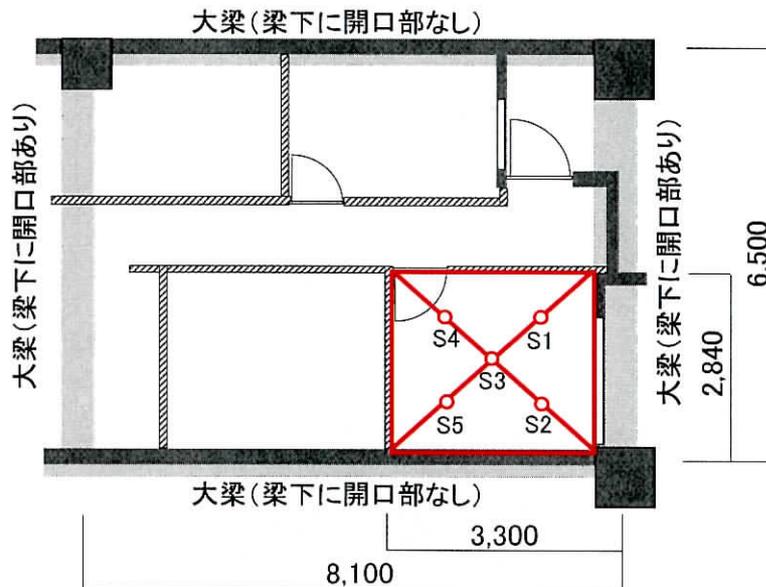


図3-1 測定対象居室・加振点配置 (単位: mm)

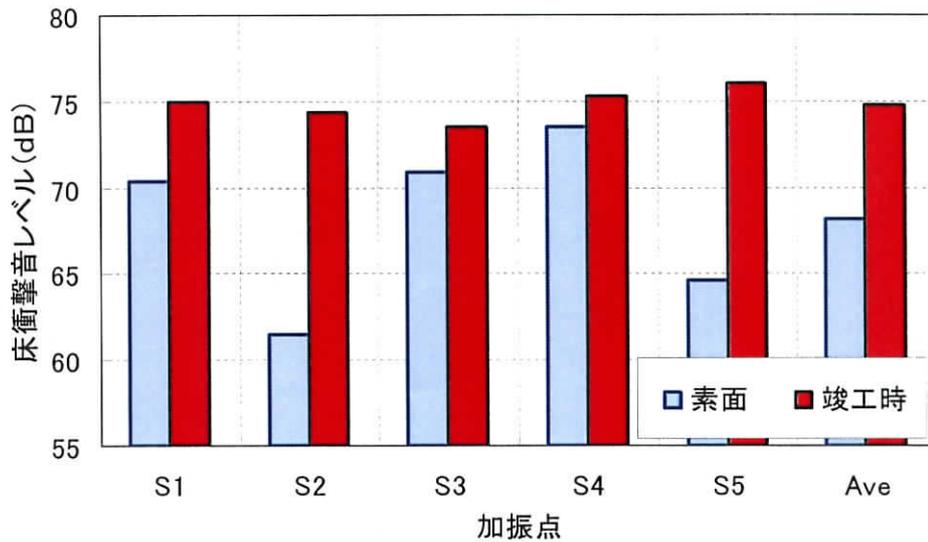


図 3-2 スラブ素面時と乾式二重床施工後の 63Hz 帯域の床衝撃音レベルの加振点ごとの分布の例

このことから、63Hz 帯域の重量床衝撃音レベル低減量の特性は、以下のように表すことができる。

- ① スラブ周辺拘束の影響を受けない加振点の重量床衝撃音レベル低減量は、ほぼ一定値。
- ② スラブ周辺拘束の影響を受ける加振点の重量床衝撃音レベル低減量は、加振点によって変化し、特に、スラブのインピーダンスレベル上昇量の変化に応じて変わる。

これまでは重量床衝撃音レベル低減量を重量床衝撃音レベルの予測計算に用いるときは一般的には 5 点平均値を用いていた。この時の重量床衝撃音レベル低減量は一定値のため、加振点ごとに变化する重量床衝撃音レベル低減量に対応することができない。

そこで、インピーダンスレベル上昇量 ΔL_z を変数とし、①、②の特性を表すことを考える。重量床衝撃音レベル低減量は、インピーダンスレベル上昇量が 0 の範囲（①の特性）で一定値、それ以外の範囲（②の特性）で、インピーダンスレベル上昇量をパラメーターとする関数となる。この関数を壁式構造実験室で測定した加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いて求める。

ただし、インピーダンスレベル上昇量に対応した床衝撃音レベル低減量の変化は 63Hz 帯域のみで確認されたものであり、本論文では 63Hz 帯域に限定する。

3.3 壁式構造実験室における重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量の関係

壁式構造実験室において実験を行い、重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量の関係について検討を行った。重量床衝撃音レベル低減量の測定は、JIS A 1440-2:2007 および「床材の床衝撃音低減性能の等級表記指針」³⁰⁾に従って行った。測定を行った壁式構造実験室はスラブ厚 200mm, スラブスパン(内寸)は 3600mm×5400mm である。衝撃源には、JIS A 1418-2:2000 に規定されている衝撃力特性(1)を持つ標準重量衝撃源を用いた。

実験室平面及び加振点位置を図 3-3、実験室における試験体の施工状況を図 3-4 に示す。

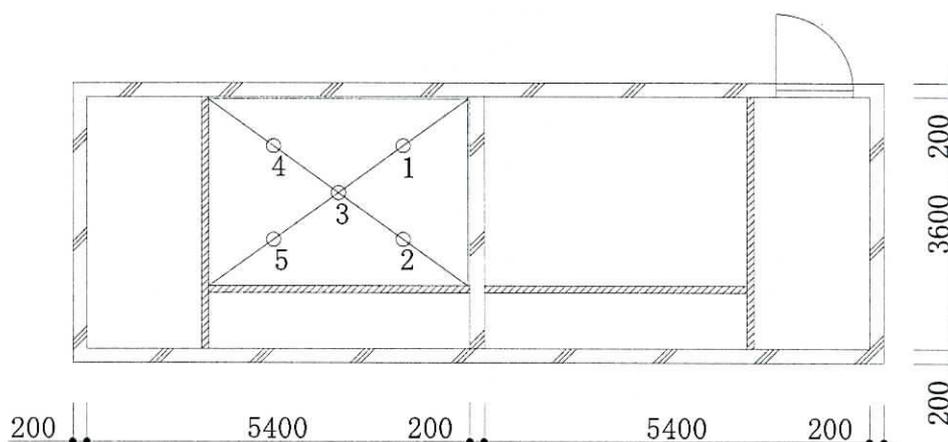


図 3-3 実験室平面及び加振点位置
(○は加振点位置, 数字は加振点番号を示す)



図 3-4 実験室における試験体の施工状況

各加振点のスラブのインピーダンスレベル上昇量とスラブ素面の重量床衝撃音レベルの関係を相対的に比較した結果を図3-5に示す。それぞれの値は、5点の平均値で基準化した。なお、インピーダンスレベル上昇量は、床衝撃音レベルと対応させるため、正負逆に表した。なお、各加振点のスラブのインピーダンスレベル上昇量は、スラブ素面の重量床衝撃音レベル（実測値）の加振点ごとの変化に対応していることを確認し、式（3.1）を用いて算出した。

$$\Delta L_z = 15.37 - 68.86 \frac{x}{\lambda_b(f)} + 98.65 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^2 - 45.36 \left(\frac{x}{\lambda_b(f)} \right)^3 \quad \dots (3.1)$$

ΔL_z : インピーダンスレベル上昇量[dB]

x : スラブ端部からの距離[m]

$\lambda_b(f)$: 計算周波数帯域中心周波数の曲げ波波長[m]

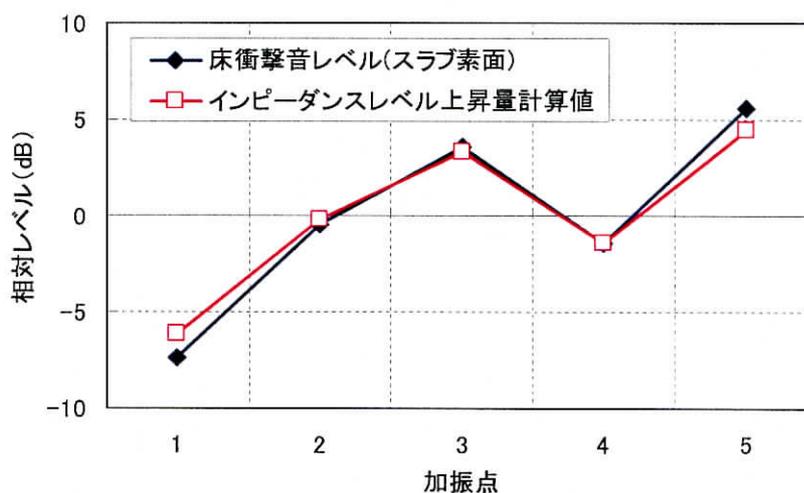


図 3-5 加振点ごとのスラブ素面の床衝撃音レベルとインピーダンスレベルの関係

実験対象とした乾式二重床には、仕様の異なる8タイプの試験体を用いた。試験体 1-1～1-4 は幅木の仕様・施工条件・二重床端部支持方法を変化させた試験体とした。図 3-6 に試験体の断面図を示す。試験体の寸法は、3670mm×2700mm である。

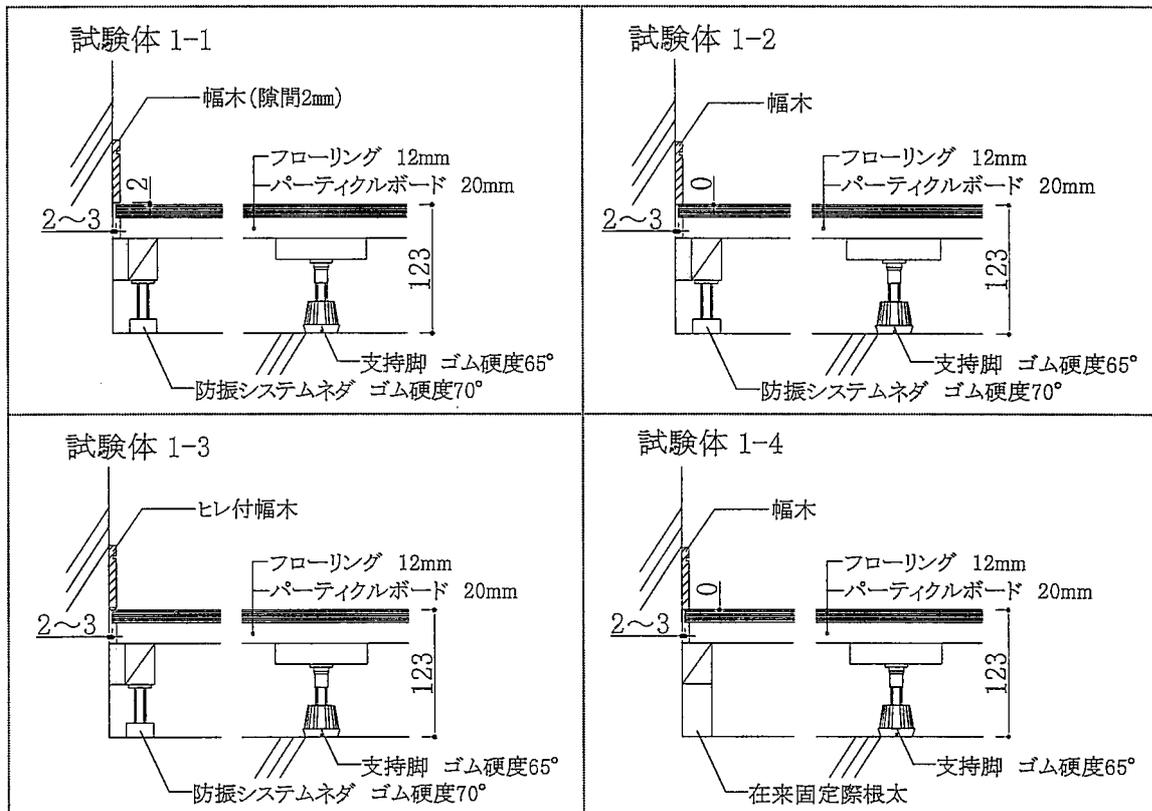


図 3-6 試験体断面図 (単位: mm)

試験体 1-1～1-4 の断面は、パーティクルボード 20mm+フローリング 12mm で構成されている。

支持脚はいずれの試験体も同様であり、ゴム硬度 65° である。試験体端部の支持方法は、試験体 1-1～1-3 は防振システムネダ (ゴム硬度 70°)、試験体 1-4 では在来固定際根太である。

乾式二重床端部の納まりは、試験体 1-1 では幅木とフローリングの隙間を 2mm 設け、空気抜きの隙間を確保している。試験体 1-2 では、幅木とフローリングを接触させ隙間をなくしている。試験体 1-3 では、幅木をヒレ付幅木としており、フローリングと接触しているため、フローリングとの間に隙間がない状態である。試験体 1-4 では、幅木とフローリングを接触させ隙間をなくしている。

試験体 1-1, 試験体 2~4 は床板の断面構成が異なり, 試験体 4, 5 は支持脚の仕様が異なる。試験体断面を図 3-7 に示す。

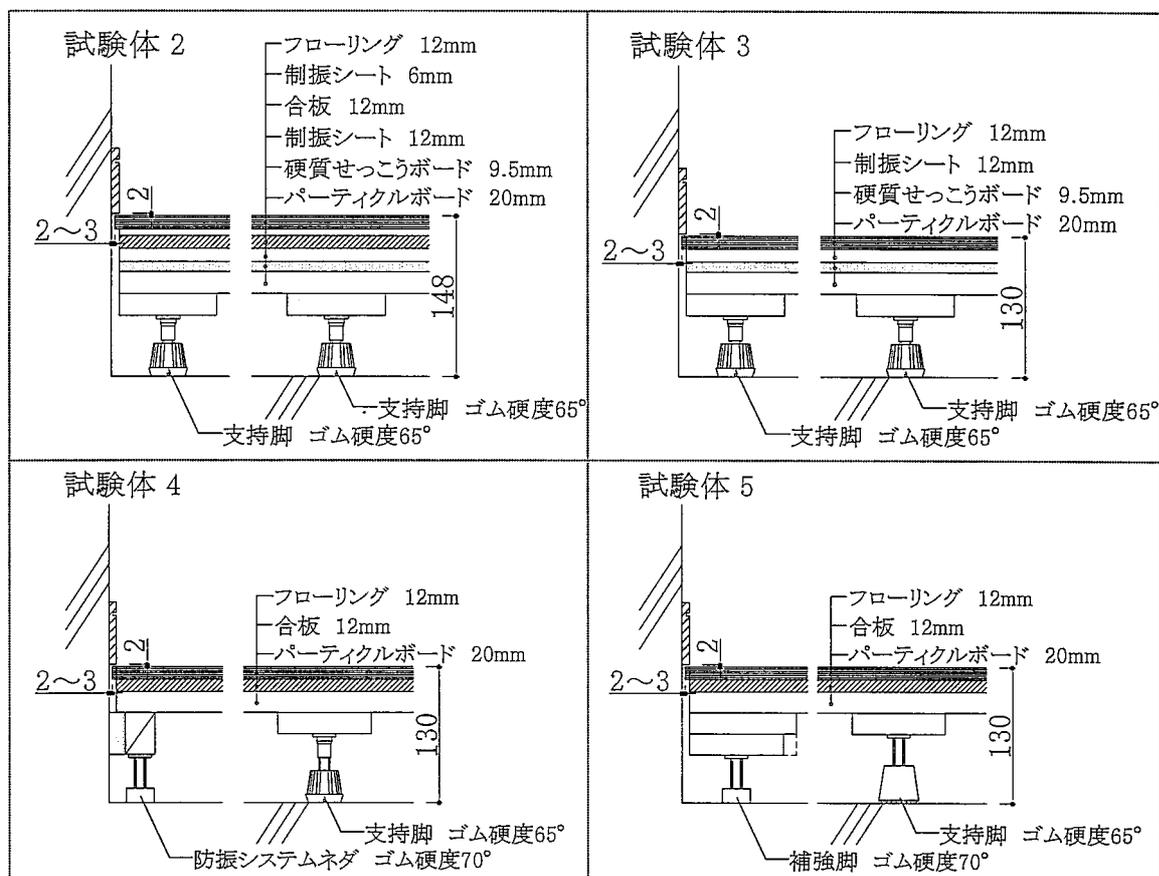


図 3-7 試験体断面図 (単位: mm)

試験体 2 の断面構成は, パーティクルボード 12mm+硬質せっこうボード 9mm+制振シート 6mm+合板 12mm+制振シート 6mm+フロアリング 12mm であり, 曲げ合成を高めた試験体である。試験体 3 の断面構成は, パーティクルボード 12mm+硬質せっこうボード 9mm+制振シート 12mm +フロアリング 12mm であり, 試験体 2 と同様に曲げ合成を高めた試験体である。試験体 4, 5 の断面構成は, パーティクルボード 20mm+合板 12mm+フロアリング 12mm であり, 一般的な乾式二重床の断面構成の試験体である。

支持脚は試験体 2~4 は同様の支持脚であり, ゴム硬度は 65° である。試験体 5 の支持脚はほかの試験体と同様にゴム硬度は 65° であるが, 形状の異なるゴムを使用している。乾式二重床端部の支持方法は, 試験体 2, 3 は支持脚 (ゴム硬度 65), 試験体 4 は防振システムネダ (ゴム硬度 70°), 試験体 5 は補強脚 (ゴム硬度 70°) である。

乾式二重床端部の納まりは, すべての試験体で幅木とフロアリングの隙間を 2mm 設け, 空気抜きの隙間を確保している。

図 3-8 に床板の断面構成，支持脚の仕様の異なる乾式二重床（試験体 1-1，試験体 2～5）の重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量の関係を示す。試験体 1-1 と試験体 4 は，下地材の合板の有無の違いであり，著しい曲げ剛性の差がないことから，両者の回帰直線はほぼ一致している。床板の断面構成が同じ試験体 4 と試験体 5 は，防振支持脚と乾式二重床端部の支持方法の違いにより，傾きに若干の違いが見られた。制振シート及び合板・硬質せっこうボードにより，曲げ剛性を高めた試験体 2, 3 の仕様では，試験体 1-1, 4 の直線の傾きが-0.9 であったものが-1.6（試験体 2），-1.4（試験体 3）と急峻になっている。また，試験体 2, 3 の切片は 19.4 と 16.6 となり，床板の曲げ剛性が大きくなることで，傾きだけでなく切片においても差がみられた。

図 3-9 に一般部は同一仕様で乾式二重床端部の納まりが異なる乾式二重床における重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量の関係を示す。試験体 1-2～1-4 は，幅木の隙間がない条件や在来固定際根太を用いた場合であり，床下空気層による共振の影響が試験体 1-1 よりも大きく，試験体 1-1 の回帰直線とは一致しない。

以上のように床衝撃音レベル低減量とインピーダンスレベル上昇量の関係を表す回帰直線の相関係数は 0.9 以上であり，高い相関を示していた。したがって，回帰直線の傾き及び切片でその乾式二重床仕様の特徴が表され，5 加振点の平均値で表す場合よりも詳細に把握することができる。

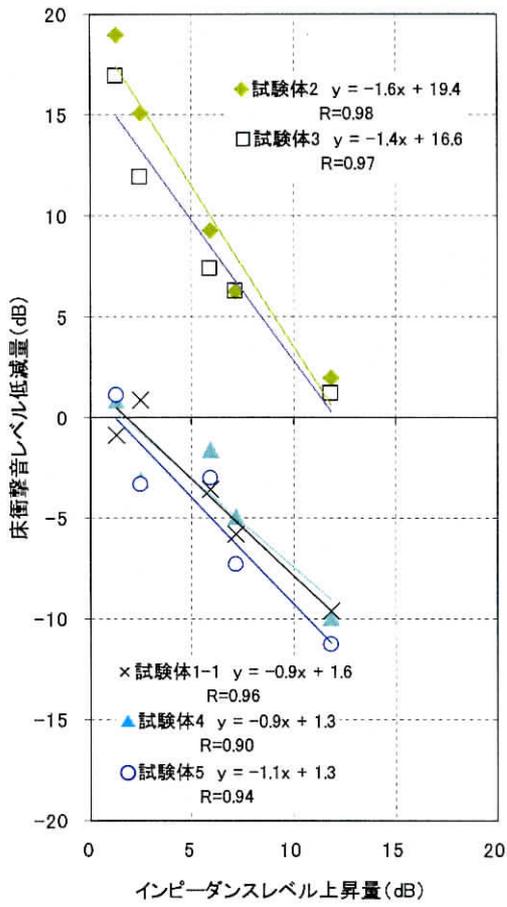


図 3-8 重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量の関係 (床板の断面構成, 支持脚の仕様が異なる)

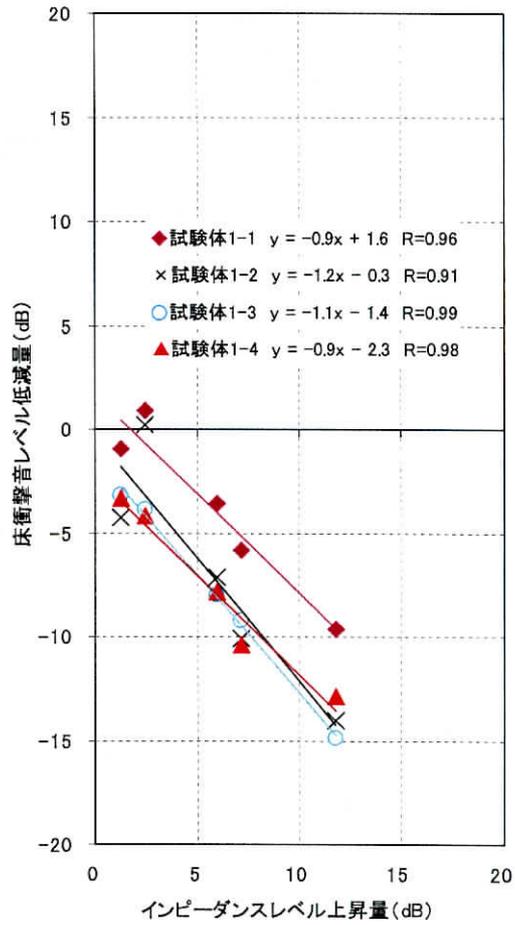


図 3-9 重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量の関係 (一般部が同じで端部の納まりが異なる)

3.4 乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測法の提案

63Hz 帯域の重量床衝撃音レベル低減量とインピーダンスレベル上昇量の関係から求めた回帰直線の相関係数（図 3-7, 図 3-8）は、すべての試験体で 0.9 以上であり、高い相関を示していた。この結果から、加振点別の重量床衝撃音レベル低減量を予測する式は、スラブのインピーダンスレベル上昇量を変数とした 1 次回帰式で表すことができる。また、乾式二重床施工後の重量床衝撃音レベルが平坦になる特性から、回帰式の切片の値がこの場合の重量床衝撃音レベル低減量になると考えられるため、式 (3.2) のように一つの式で表すことができる。式 (3.2) の傾き a と切片 b を実験条件が明確な壁式構造実験室の実測データから求め、加振点別の予測式として適用するというのが本論文で提案する手法である。

$$\Delta LH_i = a \cdot \Delta L_{z,i} + b \quad \dots (3.2)$$

ΔLH_i : 加振点別重量床衝撃音レベル低減量 (dB)

$\Delta L_{z,i}$: 加振点別のスラブの周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量 (dB)

よって、傾き a と切片 b を求める際の条件は、躯体構造は JIS A 1440 : 2007 に規定される壁式構造実験室を用い、スラブのインピーダンスレベル上昇量には式 (3.2) を用いることである。

3.5 実建物における重量床衝撃音レベル低減量の実測値と予測値の対応

壁式構造実験室で求めた加振点別の重量床衝撃音レベル低減量予測式を用いて実建物の加振点別の重量床衝撃音レベル低減量を予測できるか検証するために、予測値と実測値を比較した。

3.5.1 検討概要

試験体 4, 5 の壁式構造実験室で求めた重量床衝撃音レベル低減量予測式（図 3-8 中の回帰式）を用いて実建物における重量床衝撃音レベル低減量を予測し、実測値と比較する。試験体 4, 5 の 63Hz 帯域の重量床衝撃音レベル低減量予測式は式 (3.3), (3.4) で表される。

試験体 4

$$\Delta LH_i = -0.9 \cdot \Delta L_{Z,i} + 1.3 \quad \dots (3.3)$$

試験体 5

$$\Delta LH_i = -1.1 \cdot \Delta L_{Z,i} + 1.3 \quad \dots (3.4)$$

試験体 4, 5 の床衝撃音低減性能はいずれも $\Delta LH(\text{II}) - 2$, $\Delta LL(\text{II}) - 3$, 等分布積載荷重 5mm (200kg/m²) 以下, 局部集中荷重 4mm(100kg)以下である。図 3-10 に各試験体の床衝撃音レベル低減量を示す。なお床衝撃音低減性能の測定を行った壁式構造実験室のスラブ厚さは 200mm であった。

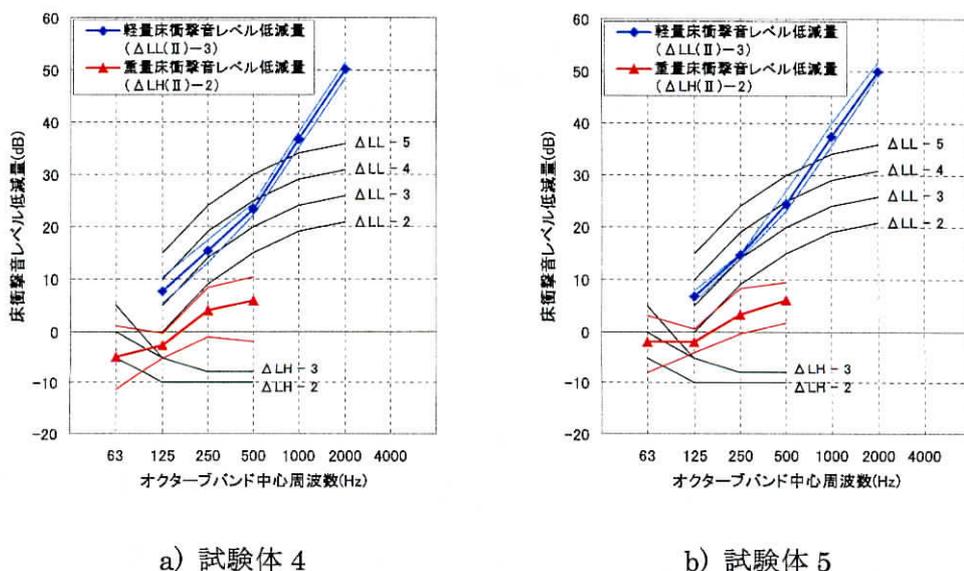


図 3-10 床衝撃音レベル低減量

図 3-11 に試験体 4, 図 3-12 に試験体 5 の断面図の例を示す。試験体 4 の乾式二重床はパーティクルボード 20mm+下地合板 12mm+フローリング 12mm で構成されており、一般部の支持脚のゴム硬度は 65° である。端部は補強脚であり、ゴム硬度は 70° である。実建物における施工法は、住戸内の乾式二重床を先に施工し、その後に室内の間仕切壁を施工する床先行工法である。試験体 5 の乾式二重床はパーティクルボード 20mm+下地合板 12mm+フローリング 12mm で構成されており、一般部の支持脚のゴム硬度は 65° である。端部は防振ネダであり、ゴム硬度は 70° である。実建物における施工法は、住戸内の間仕切壁を先に施工し、その後に乾式二重床を施工する壁先行工法である。今回検討に用いた実建物の乾式二重床は壁式構造実験室と同じ納まりで施工した。したがって、固定際根太や防振性能がない脚を用いたものは検討対象からは除いている。

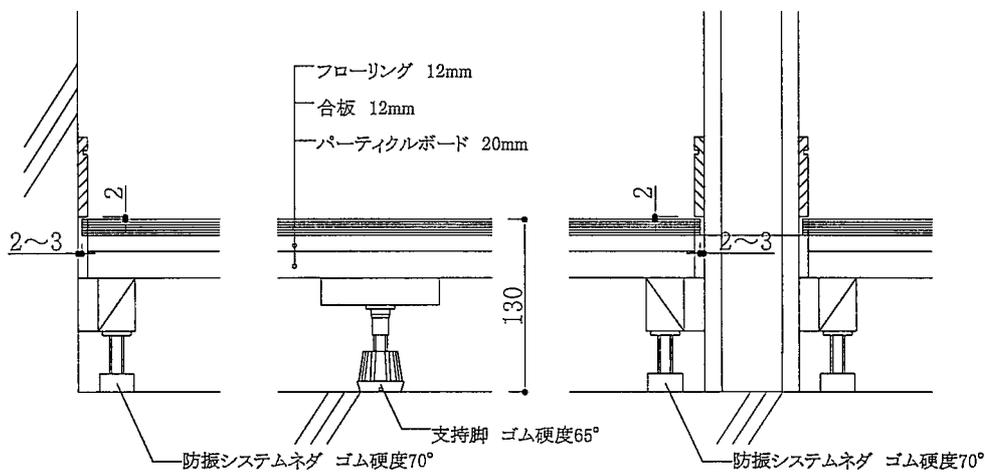


図 3-11 乾式二重床断面図の例 試験体 4

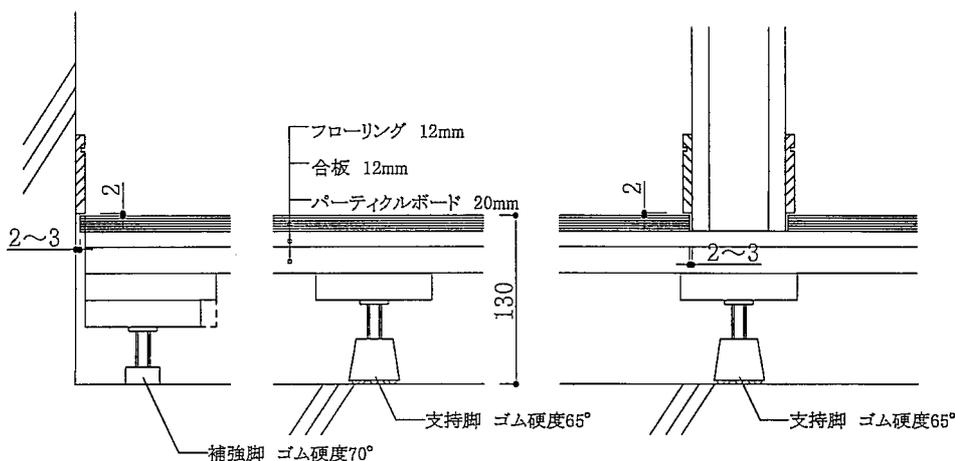


図 3-12 乾式二重床断面図の例 試験体 5

検討に用いた実建物のスラブ A~E の 5 室の概要を表 3-1 に示す。なお、実建物における乾式二重床の端部納まりは壁式構造実験室の試験体と同じとした。

表 3-1 実建物の概要

	スラブ A	スラブ B	スラブ C	スラブ D	スラブ E
スラブ構造	RC 単板 200mm	矩形ボイド 250mm	RC 単板 240mm	RC 単板 230mm	RC 単板 230mm
スパン	8,000mm× 11,000mm	8,000mm× 11,000mm	7,400mm× 9,300mm	4,300mm× 6,500mm	6,500mm× 8,100mm
梁	3 周大梁+小梁	4 周大梁	4 周大梁	3 周大梁+小梁	3 周大梁+小梁
試験体	試験体 4	試験体 4	試験体 5	試験体 5	試験体 5
乾式二重床 の工法	壁先行工法	壁先行工法	床先行工法	床先行工法	床先行工法
乾式二重床 の寸法	3,600mm× 2,700mm	3,600mm× 3,600mm	7,400mm× 9,300mm	12,400mm× 6,500mm	12,400mm× 6,500mm

実建物での加振点別の重量床衝撃音レベルを算出するとき、予測対象居室の躯体条件に応じたスラブのインピーダンスレベル上昇量回帰式を用いることで、予測計算の精度が向上することが報告されている²⁶⁾。したがって、より精度良く予測するため、インピーダンスレベル上昇量の算出には、筆者らの提案した梁下の開口の有無とスラブ厚と梁せいの比よりで分類した式(3.5)～(3.7)を用いた²⁷⁾。

梁下開口あり (スラブ厚と梁せいの比 2.5 以上 3.5 未満)

$$\Delta L_z = 10.63 - 55.50 \frac{x}{\lambda_b} + 87.89 \left(\frac{x}{\lambda_b} \right)^2 - 43.68 \left(\frac{x}{\lambda_b} \right)^3 \quad \dots (3.5)$$

梁下開口あり (スラブ厚と梁せいの比 3.5 以上)

$$\Delta L_z = 13.20 - 44.61 \frac{x}{\lambda_b} + 42.78 \left(\frac{x}{\lambda_b} \right)^2 - 8.87 \left(\frac{x}{\lambda_b} \right)^3 \quad \dots (3.6)$$

梁下開口なし

$$\Delta L_z = 12.93 - 73.74 \frac{x}{\lambda_b} + 127.51 \left(\frac{x}{\lambda_b} \right)^2 - 67.35 \left(\frac{x}{\lambda_b} \right)^3 \quad \dots (3.7)$$

ΔL_z : インピーダンスレベル上昇量[dB]

x : スラブ端部からの距離[m]

$\lambda_b(f)$: 計算周波数帯域中心周波数の曲げ波波長[m]

3.5.2 加振点別の重量床衝撃音レベル低減量の予測値と実測値の関係

図 3-13 に試験体 4 (スラブ A・B) の重量床衝撃音レベル低減量の予測値と実測値の関係を示す。予測値と実測値はレベル差 ± 4 dB の範囲に 9 割 (データ数 9/10) 含まれている。

図 3-14 に試験体 5 (スラブ C・D・E) の重量床衝撃音レベル低減量の予測値と実測値の関係を示す。試験体 5 は床先行工法であるが、試験体 4 (壁先行工法) と同様に予測値と実測値はレベル差 ± 4 dB の範囲にすべて (データ数 15/15) 含まれている。これは、床先行工法であっても二重床端部の納まりが壁先行工法と同じとなるため、乾式二重床の工法が異なっても、壁式構造実験室で求めた予測式で良い対応が得られたと考えられる。

実建物では、スラブ厚やスラブの共振周波数、乾式二重床の面積などが異なるが、壁式構造実験室で求めた予測式を用いると、予測値と実測値は良く対応していた。加振点別の重量床衝撃音レベル低減量を予測できる可能性が示唆された。

試験体 4 (図 3-13) では、壁式構造実験室の重量床衝撃音レベル低減量の 5 点平均値は -3.7 dB であり、重量床衝撃音レベル低減量の加振点ごとの実測値は壁式構造実験室の 5 点平均値に対し $-7.4\sim 5.3$ dB の範囲に分布している。試験体 5 (図 3-14) では、壁式構造実験室の重量床衝撃音レベル低減量の 5 点平均値は -4.8 dB であり、重量床衝撃音レベル低減量の加振点ごとの実測値は壁式構造実験室の 5 点平均値に対し $-7.7\sim 8.8$ dB の範囲に分布している。

重量床衝撃音レベル低減量の実測値は、壁式構造実験室の 5 点平均値に対して危険側、安全側ともに大きな差を生じる加振点が存在している。したがって、重量床衝撃音レベル低減量は壁式構造実験室の 5 点平均値ではなく、加振点ごとの重量床衝撃音レベル低減量として扱う必要があることがわかる。

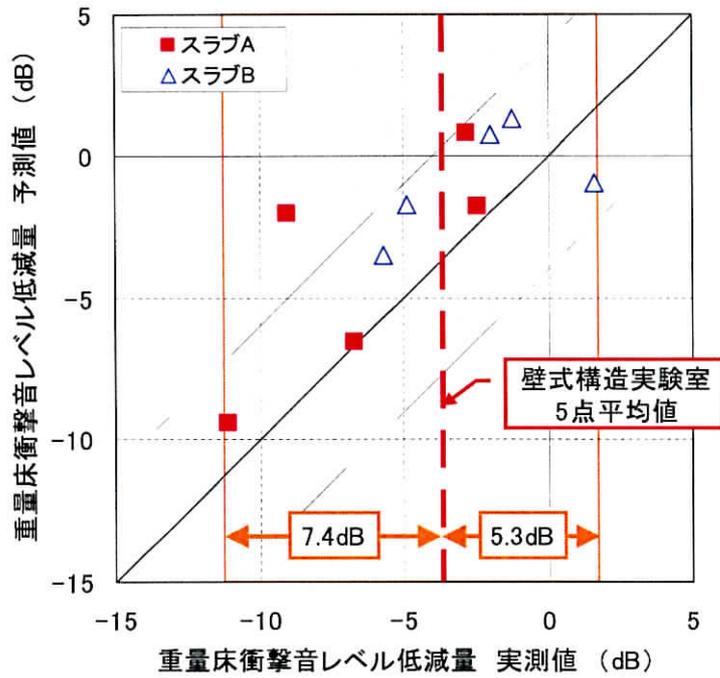


図 3-13 加振点別の重量床衝撃音レベル低減量の予測値と実測値の関係 (試験体 4)

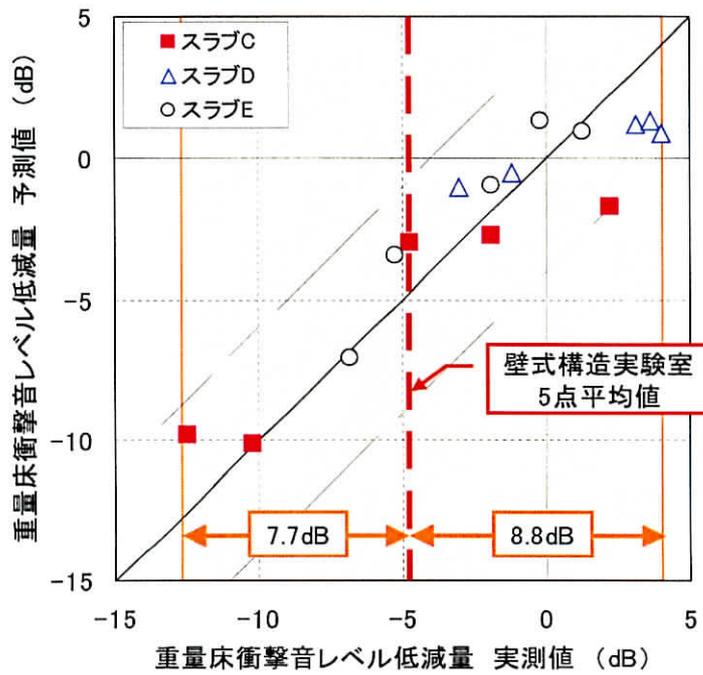


図 3-14 加振点別の重量床衝撃音レベル低減量の予測値と実測値の関係 (試験体 5)

3.6 まとめ

本章では、壁式構造実験室における測定データに基づく乾式二重床の床衝撃音レベル低減量の予測式の提案を行い、実建物における床衝撃音レベル低減量の実測値との対応について検討し、予測式の妥当性について検証した。以下に本章で得られた知見について示す。

- 1) 乾式二重床の重量床衝撃音レベルはL数決定周波数帯域となる63Hz帯域においてほぼ一定の値となることに着目し、乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量が加振点ごとに異なることを示した。このことから、63Hz帯域の重量床衝撃音レベル低減量の特性は、
 - ①スラブ周辺拘束の影響を受けない加振点の重量床衝撃音レベル低減量は、ほぼ一定値
 - ②スラブ周辺拘束の影響を受ける加振点の重量床衝撃音レベル低減量は、加振点によって変化し、特に、スラブのインピーダンスレベル上昇量の変化に応じて変わるとなることを示した。
- 2) 重量床衝撃音レベル低減量は、インピーダンスレベル上昇量が0の範囲で一定値、それ以外の範囲で、インピーダンスレベル上昇量をパラメーターとする関数となると考えた。この関数を壁式構造実験室で測定した加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いて求めた。加振点別の重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量が直線的な関係にあることを示した。
- 3) 加振点別の重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量の関係を表す直線は、加振点位置の特性が変数で含まれるため、床板の曲げ剛性や床下空気層の共振の影響などにより傾きや切片が変化し、5点加振の平均値で表す場合よりも詳細に乾式二重床の特徴が把握できることを実験的に確認した。
- 4) 壁式構造実験室の詳細データに基づいた予測式で求めた加振点別の重量床衝撃音レベル低減量予測値は、躯体条件が異なっても実建物における重量床衝撃音レベル低減量実測値とよく対応しており、予測式として利用できることを示した。

第 4 章

居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル 予測計算法

第4章 居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法

4.1 はじめに

集合住宅の設計において、重量床衝撃音レベルの予測計算はスラブ厚や居室面積、建物工法等の躯体条件が床衝撃音遮断性能に与える影響が大きいため、スラブ素面に対して行われてきた。しかし、各種内装仕様の影響についても予測計算に考慮する必要がでてきている。特に近年、床仕上げ構造に乾式二重床を採用するケースが増えてきており、重量床衝撃音において乾式二重床の特性がスラブの振動特性に与える影響が大きいため、スラブ素面の予測計算だけではなく、乾式二重床を含む重量床衝撃音遮断性能の予測計算の提案が必要となってきた。

2009年11月に日本建築学会の「建物の遮音設計(床衝撃音)刊行小委員会」から提案された予測手法³⁾では、重量床衝撃音レベルの予測計算過程に、「床仕上げ構造による床衝撃音レベル低減量の補正」の項目が含まれている。しかし、「乾式二重床などは、実験室と現場における結果の対応が悪い場合があり、適用には注意が必要」と指摘しており、壁式構造実験室で求めた床衝撃音レベル低減量のカタログ値を予測計算に適用することはできない状況となっている。このように、乾式二重床施工後の床衝撃音遮断性能を予測する手法は十分確立してないため、実務ではスラブ素面の予測計算結果に過去の現場実測データを基にした経験的な値を加える方法などで予測してきている。

本章では、上記の観点から、居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法の提案を行う。予測計算法は、第2章で検討を行ったインピーダンス法によるスラブ素面の重量床衝撃音レベル予測式と第3章で検討を行った乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測式から導出する。また、提案した予測計算法の予測精度について検証する。

4.2 乾式二重床の重量床衝撃音レベル予測法の提案

3章において、L数決定周波数帯域となることの多い63Hz帯域において、乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量は、インピーダンスレベル上昇量が0の範囲で一定値、それ以外の範囲で、インピーダンスレベル上昇量をパラメーターとする関数となる。乾式二重床施工後の重量床衝撃音レベルが平坦になる特性から、回帰式の切片の値が $\Delta L_Z = 0$ の場合の重量床衝撃音レベル低減量になると考えられるため、式(4.1)のように一つの式で表すことができることを示した。実験条件が明確な壁式構造実験室の実測データから式(4.1)の傾きaと切片bを求めることで、実建物における重量床衝撃音レベル低減量を予測することが可能となる。

$$\Delta LH_i = a \cdot \Delta L_{Z,i} + b \quad \dots (4.1)$$

ΔLH_i : 加振点別重量床衝撃音レベル低減量 [dB]

$\Delta L_{Z,i}$: 加振点別のスラブの周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量 [dB]

63Hz帯域の乾式二重床を含めた加振点別重量床衝撃音レベルの予測計算式は、式(4.1)の加振点別重量床衝撃音レベル低減量を適用して表すと、

$$L_{H,i} = L_{FE} - (L_{Z_b} + \Delta L_{Z,i} + \Delta L_R) + \Delta L_D + 10 \log_{10} S_{eff} + 10 \log_{10} k - 10 \log_{10} A + \Delta L_C - (a \cdot \Delta L_{Z,i} + b) + 152 \quad \dots (4.2)$$

$L_{H,f}$: 63Hz帯域の乾式二重床を含めた加振点別重量床衝撃音レベル [dB]

L_{FE} : 標準重量衝撃源の衝撃力暴露レベル [dB]

L_Z : 基本インピーダンスレベル [dB]

ΔL_Z : 周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量 [dB]

Z_T : 共振によるインピーダンスレベル低下量 [dB]

ΔL_D : 床スラブ内の振動減衰補正量 [dB]

S_{eff} : スラブの有効放射面積 [m²]

k : 音響放射係数

A : 受音室の吸音力 [m²]

ΔL_C : サウンドレベルメータの動特性補正值 [dB]

となる。

乾式二重床が施工されている居室の床衝撃音は、加振室において乾式二重床を衝撃源で加振し、乾式二重床に入力された振動が乾式二重床内を伝搬し、支持脚からスラブへ入力される。入力された振動はスラブへ伝搬し、下階の受音室で固体音として放射される。予測計算においても同様に、「加振源」「床構造の特性」「スラブ内の振動伝搬」「固体音の放射」「受音」の5つの段階に分けて考える。図4-1に63Hz帯域の乾式二重床を含む加振点別重量床衝撃音レベルの予測計算のフローチャートを示す。

1) 加振源

本予測計算法では、加振源はJIS A 1418-2:2000に規定されている衝撃力特性(1)を持つ標準重量床衝撃源(タイヤ)の衝撃力暴露レベルを設定する。

2) 床の構造の特性(乾式二重床の特性, スラブのインピーダンス特性)

乾式二重床に衝撃力が入力され、乾式二重床内を振動が伝搬し、スラブへ振動が入力されるまでの過程の計算を行う。

はじめに乾式二重床を選定し、壁式構造実験室で測定した重量床衝撃音レベル低減量の加振点ごとのデータを取得する。加振点ごとのデータと壁式構造実験室の各加振点のインピーダンスレベル上昇量から対象とする乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測式を導出する。乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測式は、スラブの加振点位置のインピーダンスレベル上昇量の関数である。したがって加振点位置のスラブのインピーダンス特性の計算が必要となる。スラブのインピーダンス特性(基本インピーダンスレベル, インピーダンスレベル上昇量, 共振によるインピーダンスレベル低下量)は、スラブ断面の各種定数から算出する。

導出した乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測式と加振点位置におけるインピーダンスレベル上昇量から加振点位置における重量床衝撃音レベル低減量予測値を算出する。

3) スラブ内の振動伝搬特性

乾式二重床の支持脚からスラブに入力された振動は、スラブの構造、面積、躯体条件によって減衰し、放射される。ここでは、スラブの振動減衰補正量、有効放射面積を算定する。

4) スラブの振動特性から音への変換

スラブの振動が固体音として放射される過程の計算で、音響放射係数の算出を行う。

5) 受音室の特性

スラブから放射された音が空気中を伝搬し、サウンドレベルメータで測定するまでの

過程の計算を行う。ここでは、受音室の等価吸音面積の計算とサウンドレベルメータの動特性補正値の算定を行う。インピーダンス法では、定常状態でのエネルギー平衡を計算しているが、実測ではサウンドレベルメータの時間重み付き特性 F を用いるため、サウンドレベルメータの動特性補正が必要となる。

これら 5 つの過程で乾式二重床を含む加振点別重量床衝撃音レベルを算出し、5 点の算術平均値から重量床衝撃音レベルを求める。

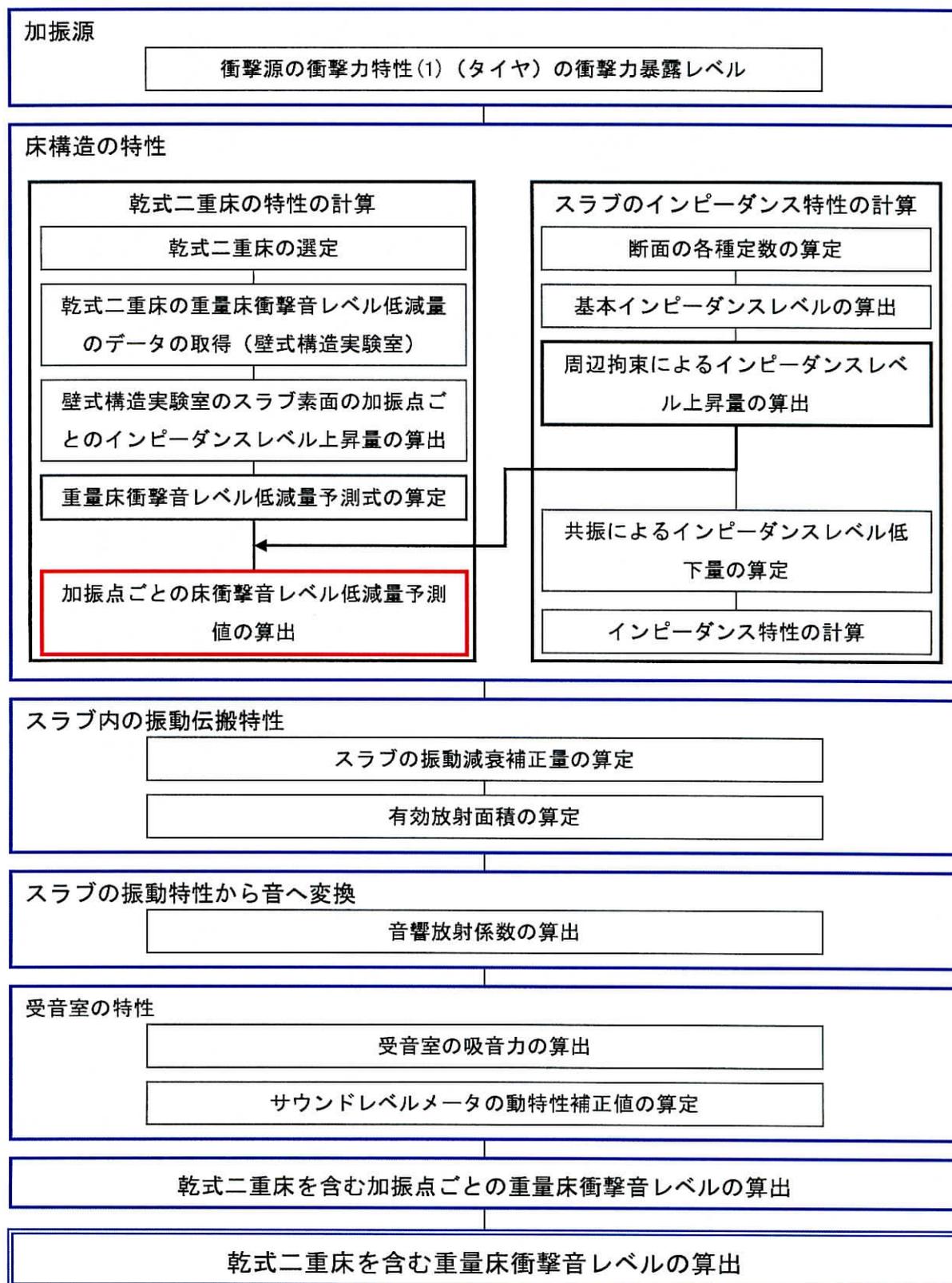


図 4-1 乾式二重床を含む重量床衝撃音レベル予測計算フローチャート

4.3 居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベルの実測値と予測値の対応

4.2 節で乾式二重床を含む重量床衝撃音レベル予測計算方法を提案した。実建物の居室に提案した予測計算方法を適用する。

以下に具体的な事例を基に実測値と予測値の対応について示す。

図 4-2 に対象居室および加振点の配置を示す。対象建物のスラブは均質単板スラブ、厚さ 230mm であり、支配面積は 45.4m² である。対象とする居室は洋室であり、居室の 2 辺が大梁から拘束を受けている。居室の仕上げは 3 章の試験体 5 と同じ仕様の乾式二重床であり、乾式二重床端部は試験体 5 と同じ納まりである。なお、乾式二重床の工法は床先行工法である。

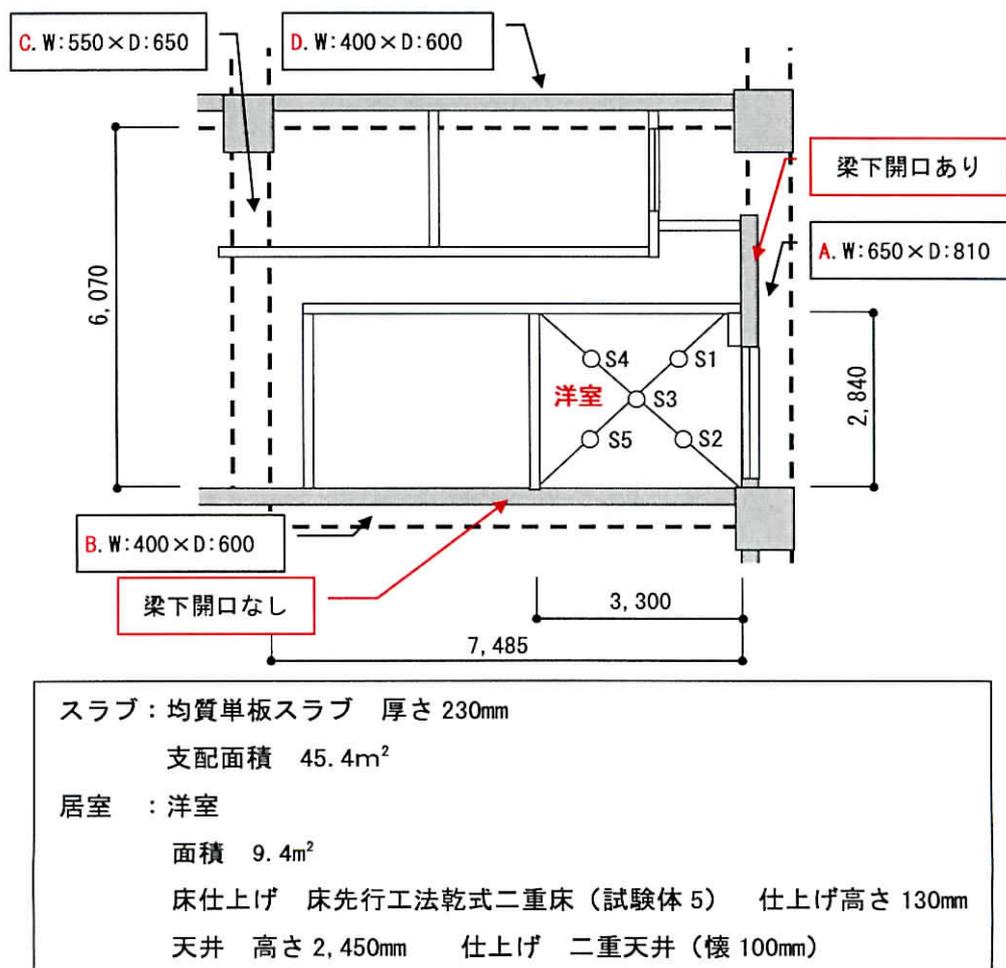


図 4-2 測定対象居室・加振点配置 (単位: mm)

図 4-3 に実測値と予測値の対応を示す。なお、参考として重量床衝撃音レベル低減量の 5 点平均値（カタログ値）を用いて予測した場合の結果も合わせて示す。

63Hz 帯域の重量床衝撃音レベルの実測値と予測値は良く対応している。加振点別に見ると、重量床衝撃音レベルの実測値は加振点に因らず一定の値となっている。重量床衝撃音レベル低減量予測式から求めた予測値は実測値と良く対応しており、重量床衝撃音レベル予測式をもちいることで、加振点によるばらつきをとらえることができている。

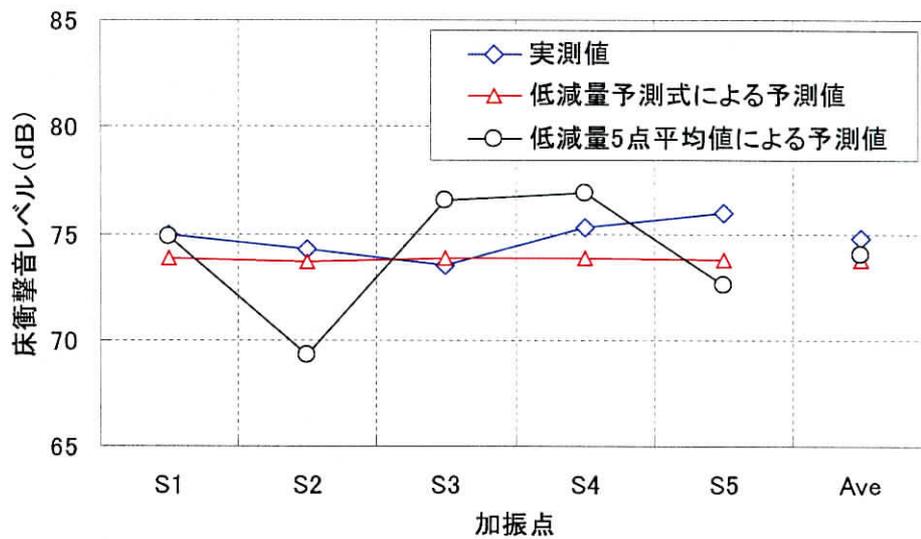


図 4-3 実測値と予測値の対応 (63Hz 帯域)

提案した予測法の妥当性を検証することを目的に、予測値と実測値の比較を行う。

検討を行った住戸居室は、2009～2011年に竣工した集合住宅18棟、82室(LD42室、洋室40室)で、すべてRC造である。スラブの支配面積は32.7～92.2m²の範囲であり、ボイドスラブ(スラブ厚250～300mm)が61室、均質単板スラブ(210～250mm)が21室であった。居室面積は7～36m²であった。室の拘束条件は、一辺拘束が4室、二辺拘束が64室、三辺拘束が14室であった。天井仕上げはすべて二重天井であり、天井懐は100～220mmであった。ただし、本検討では二重天井の効果は考慮していない。

床仕上げは乾式二重床工法であり、3章で示した試験体4(9室)と試験体5(73室)と同じ仕様の乾式二重床であった。工法は、試験体4が壁先行工法、試験体5が床先行工法であった。なお、今回検討に用いた実建物の乾式二重床は壁式構造実験室で試験を行ったものと同じ納まりで施工した。

重量床衝撃音レベルの測定はJIS A 1418-2:2000に準拠して行い、衝撃源は衝撃力特性(1)を持つ衝撃源とした。表4-1に測定・予測を行った建物の仕様を示す。

表 4-1 対象建物の仕様

	居室				スラブ			乾式二重床		天井懐 (mm)
	LD		洋室		面積 (㎡)	種類	厚さ (mm)	種類	仕上げ 高さ (mm)	
	室数	面積 (㎡)	室数	面積 (㎡)						
①	1	16	0	—	37	RC	220	試験体 5	180	200
②	4	14~16	4	10~11	32~68	VS	250	試験体 5	130	110
③	2	24,25	2	11	81~85	VS	260	試験体 5	130	120
④	2	26,36	2	10,12	80~90	VS	260	試験体 5	150	160
⑤	2	16,20	3	9~10	46~77	VS	270	試験体 5	130	110
⑥	3	16~21	3	10~11	79~83	VS	260	試験体 5	130	110
⑦	2	19,23	2	12	41~50	VS	250	試験体 5	150	210
⑧	6	17~21	6	10~12	79~93	VS	250	試験体 5	150	110
⑨	3	17~19	5	10~11	33~68	VS	250 270	試験体 5	150	150
⑩	3	14~18	2	9	44~69	RC	220 240	試験体 5	180 200	220
⑪	0	—	1	9	53	RC	230	試験体 5	130	100
⑫	0	—	3	9~11	35~39	VS	250	試験体 4	150	160
⑬	2	13,16	1	10	48~74	RC	230	試験体 4	150	130
⑭	2	9,12	2	8,9	39~52	RC	220	試験体 5	150	190
⑮	3	14~21	0	—	36~52	RC	230 ~250	試験体 5	150	160 ~180
⑯	3	16~18	1	9	68~73	VS	280 300	試験体 5	130	100 120
⑰	2	9,11	2	7	33~40	RC	210, 300	試験体 5	150	120 140
⑱	2	16,21	1	11	38~59	VS	285 300	試験体 4	150	190 205

※RC は均質単板スラブ， VS は波型中空スラブを示す。

乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量として加振点 5 点の平均値（カタログ値）を用いた場合と本論文で提案した予測法を用いた場合について比較した。乾式二重床を含む 63Hz 帯域の重量床衝撃音レベルの予測値と実測値の関係を図 4-4, 図 4-5, 加振点ごとの予測値と実測値の関係を図 4-6, 図 4-7 に示す。図 4-4, 図 4-6 は床衝撃音レベル低減量の平均値, 図 4-5, 図 4-7 は本論文で提案した予測計算法を用いて予測計算した結果である。

重量床衝撃音レベルは, 床衝撃音レベル低減量の平均値を用いた予測値と実測値はレベル差 ± 5 dB の範囲に 85%程度含まれている。加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いた予測値と実測値はレベル差 ± 5 dB の範囲に 90%以上含まれており, 全体のばらつきが小さくなっている。

加振点別に見ると, 重量床衝撃音レベルは, 床衝撃音レベル低減量の平均値を用いた予測値と実測値はレベル差 ± 5 dB の範囲に 70%程度含まれている。加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いた予測値と実測値はレベル差 ± 5 dB の範囲に 85%以上含まれており, 全体のばらつきが小さくなっている。

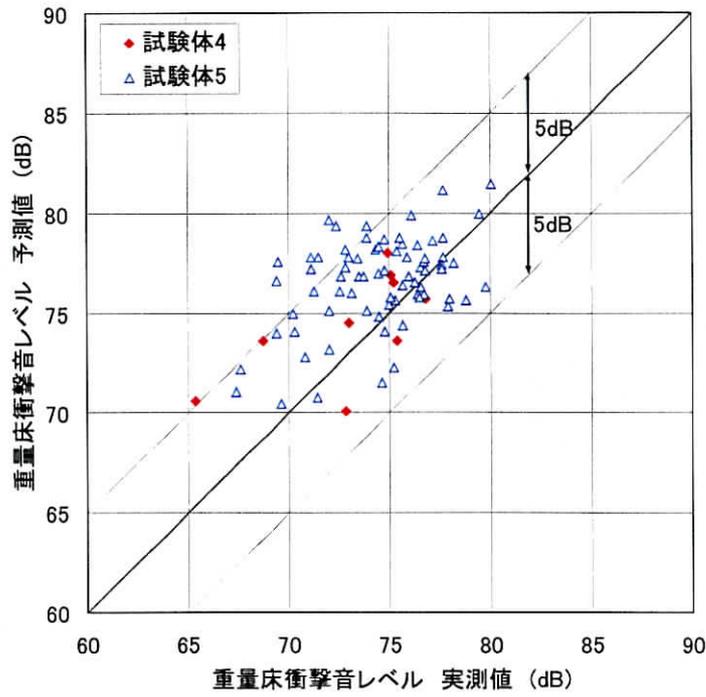


図 4-4 乾式二重床を含めた 63Hz 帯域の重量床衝撃音レベルの予測値と実測値の関係
(床衝撃音レベル低減量平均値)

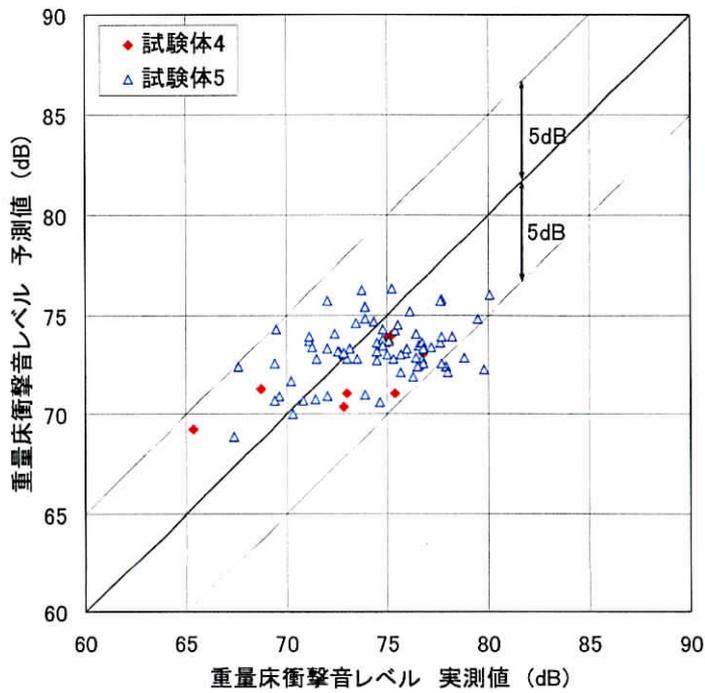


図 4-5 乾式二重床を含めた 63Hz 帯域の重量床衝撃音レベルの予測値と実測値の関係
(加振点別床衝撃音レベル低減量予測式)

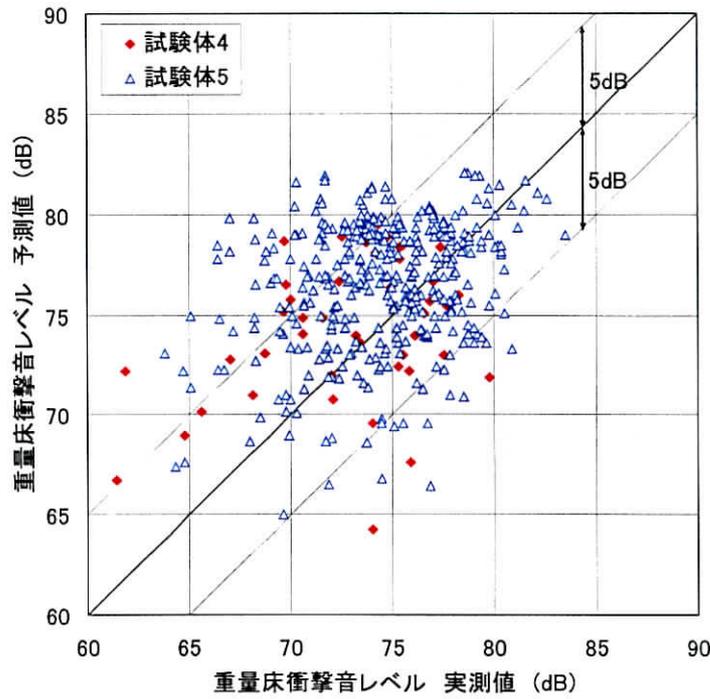


図 4-6 乾式二重床を含めた 63Hz 帯域の加振点別重量床衝撃音レベルの予測値と実測値の関係（床衝撃音レベル低減量平均値）

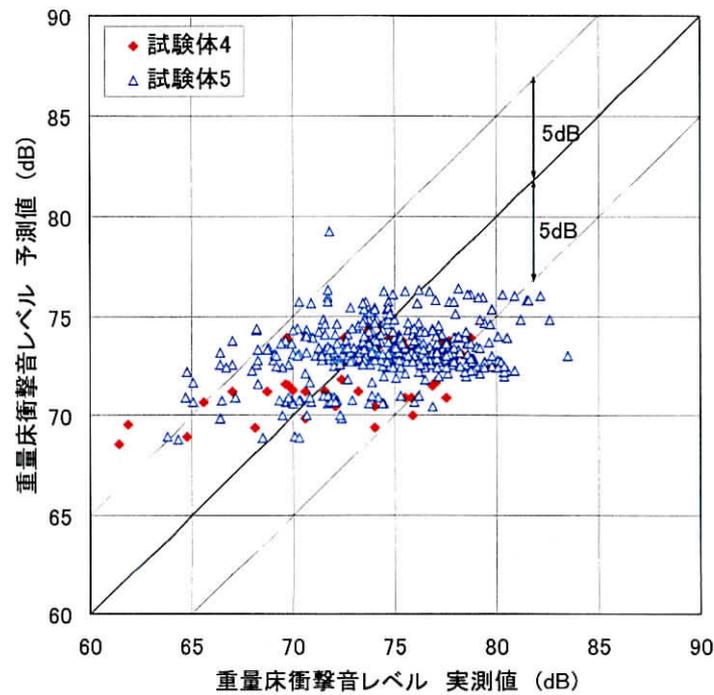


図 4-7 乾式二重床を含めた 63Hz 帯域の加振点別重量床衝撃音レベルの予測値と実測値の関係（加振点別床衝撃音レベル低減量予測式）

図 4-8 に重量床衝撃音レベル, 図 4-9 に加振点別重量床衝撃音レベルの確率密度分布を示す。重量床衝撃音レベルの場合, 実測値と重量床衝撃音レベル低減量平均値を用いて計算した予測値の差の平均値は-2.0, 標準偏差は 2.8, 実測値と重量床衝撃音レベル低減量予測式を用いて計算した予測値の差の平均値は 1.2, 標準偏差は 2.7 であった。実測値と予測値の差は 0dB に近づいており, 予測精度が向上している。

加振点別重量床衝撃音レベルの場合, 実測値と重量床衝撃音レベル低減量平均値を用いて計算した予測値の差の平均値は-2.0, 標準偏差は 4.1, 実測値と重量床衝撃音レベル低減量予測式を用いて計算した予測値の差の平均値は 1.2, 標準偏差は 3.4 であった。平均値は重量床衝撃音の場合と同様に 0dB に近づいており, 予測精度が大幅に向上している。

加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いることで, 重量床衝撃音レベル, 加振点別重量床衝撃音レベルともに若干実測値に比べ予測値が小さな値を示しているものの, 予測精度が大幅に向上していることを示した。今回は代表的な仕様 (2 タイプ) の乾式二重床における結果であるが, 重量床衝撃音レベルの予測値と実測値は良く対応しており, 提案した予測法の妥当性を示すことができた。

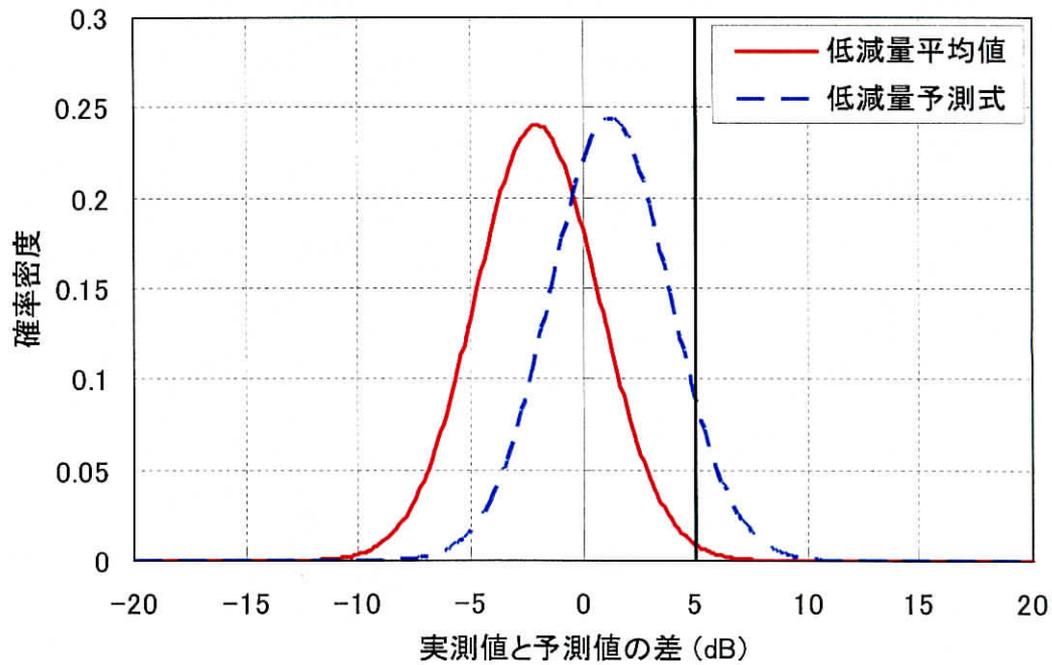


図 4-8 乾式二重床を含めた 63Hz 帯域の重量床衝撃音レベルの
実測値と予測値の差の確率密度分布

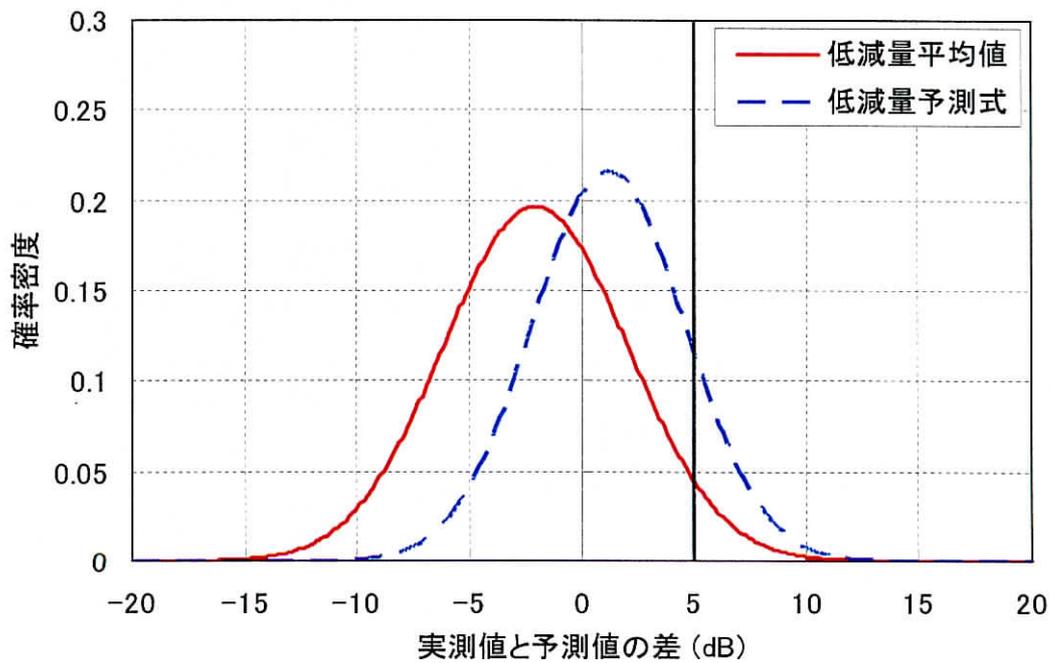


図 4-9 乾式二重床を含めた 63Hz 帯域の加振点別重量床衝撃音レベルの
実測値と予測値の差の確率密度分布

4.4 まとめ

本章では、L数決定周波数帯域となることの多い63Hz帯域における乾式二重床を含む重量床衝撃音レベル予測計算法の提案を行った。提案した予測計算法は、2章、3章で提案したスラブ素面の予測計算法と乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量から導出した。以下に本章で得られた知見を示す。

- 1) 乾式二重床を含めた重量床衝撃音レベル予測計算法を提案し、壁式構造実験室で測定したデータを用いて予測計算を行うことができることを示した。
- 2) 加振点別重量床衝撃音レベルの実測値と予測値が良く対応しており、実建物による重量床衝撃音レベル低減量の変化を適切に表すことができていると考えられる。
- 3) 代表的な仕様の乾式二重床における結果であるが、63Hz帯域の乾式二重床を含む重量床衝撃音レベルの予測値と実測値は $\pm 5\text{dB}$ の範囲に床衝撃音レベル低減量の平均値(カタログ値)を用いた場合85%程度、加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いた場合90%以上含まれていた。また、加振点別重量床衝撃音レベルは、床衝撃音レベル低減量の平均値を用いた予測値と実測値はレベル差 $\pm 5\text{dB}$ の範囲に70%程度含まれている。加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いた予測値と実測値はレベル差 $\pm 5\text{dB}$ の範囲に85%以上含まれていた。重量床衝撃音レベル予測式を用いることの妥当性を確認した。
- 4) 実測値と予測値の差は、加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いることで、重量床衝撃音レベル、加振点別重量床衝撃音レベルともに若干実測値に比べ予測値が小さな値を示しているものの、ばらつきが小さくなり、予測精度が大幅に向上していることを示した。今回は代表的な仕様(2タイプ)の乾式二重床における結果であるが、重量床衝撃音レベルの予測値と実測値は良く対応しており、提案した予測法の妥当性を示すことができた。

第 5 章

総括

第5章 総括

本研究では、集合住宅における居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法の提案を目的とし、スラブ素面の重量床衝撃音レベル予測計算法、乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測式、居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測法について検討した。以下に本研究で得られた知見および今後の課題を示す。

第1章では、集合住宅における床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法の必要性について研究の背景で述べ、本研究の必要性を示した。次に研究の目的、関連する既往の研究、本論文の構成について示した。

第2章では、インピーダンス法によるスラブ素面の重量床衝撃音レベル予測計算法について、従来のインピーダンス法による予測計算法²⁾の現状と検討課題について整理・検討を行い、2000年に改定されたJIS A 1418-2への対応や近年の躯体構造の変化への対応が必要と考え、スラブのインピーダンス特性の検討やその他のパラメータの検討を行った。

スラブのインピーダンス特性の検討では、スラブを拘束する梁によるインピーダンスレベル上昇量は、梁の種類などには因らず、梁の大きさによって拘束の大きさが変化する。拘束の度合いは、スラブ厚と梁せいの比によって分類することができ、比が大きくなるとスラブ端部のインピーダンスレベル上昇量は大きくなることを示した。また、インピーダンスレベル上昇量は梁のみではなく、柱や垂壁などの躯体構造においてもインピーダンスが上昇することを確認した。この結果、これらの躯体構造の上昇量を考慮することができ、詳細な検討が可能となる。さらに、全時間応答インピーダンスレベルの計算値は、スラブの一次固有振動数の計算値の含まれる帯域ごとに分類すると、一次固有振動数の含まれる帯域においてインピーダンスレベルの低下が見られることから、従来の予測計算式²⁾のように共振によるインピーダンスレベル低下量を一定として扱うのではなく、一次固有振動数の含まれる帯域で分類して扱う必要があることを示した。

これらの検討結果を基に2000年に改定されたJIS A 1418の衝撃力特性に合わせて、インピーダンス法の各種パラメータを再検討し、予測計算式を提案した。提案した予測計算式の予測精度の検証を行い、L数決定周波数帯域となることの多い63Hz、125Hz帯域で±5%（1ランク）以内に90%以上含まれていることを確認し、従来の予測計算式に比べ予測精度が向上していることを示した。

3章では、乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測法に関する検討を行った。乾式二重床の重量床衝撃音レベルはL数決定周波数帯域となる63Hz帯域においてほぼ一定の値となることに着目し、乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量が加振点ごとに異なること

を示した。このことから、63Hz 帯域の重量床衝撃音レベル低減量の特性は、

- ① スラブ周辺拘束の影響を受けない加振点の重量床衝撃音レベル低減量は、ほぼ一定値
- ② スラブ周辺拘束の影響を受ける加振点の重量床衝撃音レベル低減量は、加振点によって変化し、特に、スラブのインピーダンスレベル上昇量の変化に応じて変わる

となることを示した。これらの関係から、インピーダンスレベル上昇量をパラメーターとする関数となると考えた。この関数を壁式構造実験室で測定した加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いて求め、加振点別の重量床衝撃音レベル低減量とスラブのインピーダンスレベル上昇量が直線的な関係にあることを示した。これらの関係を表す直線は、加振点位置の特性が変数で含まれるため、床板の曲げ剛性や床下空気層の共振の影響などにより傾きや切片が変化し、5点加振の平均値で表す場合よりも詳細に乾式二重床の特徴が把握できることを実験的に確認した。

実建物において壁式構造実験室の詳細データに基づいた予測式で求めた加振点別の重量床衝撃音レベル低減量予測値の妥当性について検証を行った。躯体条件が異なっても実建物における重量床衝撃音レベル低減量実測値とよく対応しており、予測式として利用できることを示した。

第4章では、居室の床仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法の提案を行った。予測計算法は、第2章で検討を行ったインピーダンス法によるスラブ素面の重量床衝撃音レベル予測式と第3章で検討を行った乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量予測式から導出した。

具体的な事例を基に検討を行い、加振点別重量床衝撃音レベルの実測値と予測値が良く対応しており、実建物による重量床衝撃音レベル低減量の変化を適切に表すことができていた。

代表的な仕様の乾式二重床における結果であるが、63Hz 帯域の乾式二重床を含む重量床衝撃音レベルの予測値と実測値は $\pm 5\text{dB}$ の範囲に床衝撃音レベル低減量の平均値（カタログ値）を用いた場合 85%程度、加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いた場合 90%以上含まれていた。また、加振点別重量床衝撃音レベルは、床衝撃音レベル低減量の平均値を用いた予測値と実測値はレベル差 $\pm 5\text{dB}$ の範囲に 70%程度含まれている。加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いた予測値と実測値はレベル差 $\pm 5\text{dB}$ の範囲に 85%以上含まれていた。重量床衝撃音レベル予測式を用いることの妥当性を確認した。

また、実測値と予測値の差は、加振点別重量床衝撃音レベル低減量を用いることで、重量床衝撃音レベル、加振点別重量床衝撃音レベルともに若干実測値に比べ予測値が小さな値を示しているものの、ばらつきが小さくなり、予測精度が大幅に向上していることを示した。今回は代表的な仕様（2タイプ）の乾式二重床における結果であるが、重量床衝撃音レベルの予測値と実測値は良く対応しており、提案した予測法の妥当性を示すことができた。

本論文では、居室の仕上げ構造を含む重量床衝撃音レベル予測計算法の提案を行い、予測計算法の妥当性について示した。提案した予測計算法は、実務的に有用であり、居室の床仕上げ構造を含めた予測計算を可能とすることで、適切な遮音設計を行うことが可能となると考えられる。しかし、提案した予測計算法は L 数決定周波数帯域となることが多い 63Hz 帯域のみに対応した予測計算法であり、その他の周波数帯域については対応していない。今後、その他の周波数帯域の予測計算についての検討も必要となると考えられる。また、予測精度の検証は代表的な 2 つの仕様の乾式二重床における結果であり、今後他の仕様の乾式二重床における検証が必要となると考えられ、研究の継続が必要である。

本論文に関連する審査付公表論文

- 1) 黒木 拓, 大脇雅直, 石丸岳史, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: 実建物における乾式二重床構造の加振点別重量床衝撃音レベル低減量予測に関する検討—乾式二重床の重量床衝撃音レベル予測に関する研究 その1—, 日本建築学会環境系論文集 第 681号, pp.847~pp.853
- 2) Taku Kuroki, Masanao Owaki, Takefumi Zaima, Naoki Takagi and Yasuhiro Yamashita : Studies on prediction method of heavy weight floor impact sound insulation for dry double-layered floor coverings in multi-family housings, inter-noise2011, 2011.9

本論文に関連する審査なし公表論文

- 1) 黒木拓, 大脇雅直, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: ゴムボールによる重量床衝撃音レベルの予測値と実測値の対応に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.179-180, 20010.9
- 2) 石丸岳史, 久米智史, 高倉史洋, 山下恭弘, 大脇雅直, 黒木拓: 実建物における乾式二重床の打振点別床衝撃音レベル低減量, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.165-166, 20010.9
- 3) 黒木拓, 大脇雅直, 財満健史, 石丸岳史, 高木直樹, 山下恭弘: 乾式二重床を含む重量床衝撃音レベル予測計算法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.193-194, 20011.8
- 4) 黒木拓, 大脇雅直, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: リブを付加したスラブの床衝撃音レベル低減効果に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.291-292, 20012.9
- 5) 大脇雅直, 黒木 拓, 財満健史, 山下恭弘: 乾式二重床の床衝撃音低減性能と集合住宅における床衝撃音遮断性能に関する検討, 日本音響学会講演論文集, pp.1097-1098, 2009.9
- 6) 黒木 拓, 大脇雅直, 財満健史, 山下恭弘: 重量床衝撃音レベルの予測値と実測値の対応に関する検討, 日本音響学会講演論文集, pp.1187-1190, 2010.3
- 7) 黒木 拓, 大脇雅直, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: 乾式二重床を含めた床衝撃音予測法に関する研究, 日本音響学会講演論文集, pp.1235-1236, 2011.3
- 8) 黒木 拓, 大脇雅直, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: インピーダンス法による軽量床衝撃音レベル予測計算に関する検討, 日本音響学会講演論文集, pp.1085-1088, 2011.9
- 9) 大脇雅直, 黒木 拓, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: 乾式二重床端部納まりに関する検討—乾式二重床上に外壁廻りの内装壁が施工された場合の事例について—, 日本音

響学会講演論文集, pp.1213-1214, 2012.9

- 10) 黒木拓, 大脇雅直, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: 重量床衝撃音レベル予測手法に関する検討—駆動点インピーダンスに関する検討—, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.201-204, 2010.9
- 11) 黒木拓, 大脇雅直, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: 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に関する実験的検討—駆動点インピーダンスに関する検討—, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.21-24, 2011.9

参考文献

- 1) 木村翔, 井上勝夫, 中澤真司: インピーダンス法による床衝撃音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, No.407, pp.1-9, 1990.1
- 2) 大脇雅直, 高倉史洋, 財満健史, 宮崎浩司, 山下恭弘: 大型スラブにおけるインピーダンス法による重量床衝撃音レベル予測手法に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, No.511, pp.23-29, 1998.9
- 3) 日本建築学会編: 建物の床衝撃音防止設計, 技報堂出版, 2009.11
- 4) 古賀貴士, 田野正典: 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, No.520, pp.25-32, 1999.6
- 5) 橋本典久: 拡散度法による重量床衝撃音の予測—板振動の拡散度評価指数の構成とその利用に関する研究—その 4—, 日本建築学会計画系論文集, No.537, 21-27, 2000.11
- 6) 久米智史, 石丸岳史, 高倉史洋, 大脇雅直, 山下恭弘: 壁面の音響放射を含めた重量床衝撃音レベル予測に関する研究—振動場・音場の比連成モデルを用いた解析例—, 日本建築学会環境系論文集, No.602, 9-15, 2006.4
- 7) 朝倉巧, 石塚崇, 宮島徹, 豊田政弘, 坂本慎一: 固体伝搬音を対象とした梁・板モデルによる FTDT 解析—複層モデルへの適用事例—, 日本音響学会講演論文集, 2012.9, 1109-1110
- 8) 石丸岳史, 大脇雅直, 高倉史洋, 財満健史, 相川聡, 久米智史, 山下恭弘: 大型スラブの周辺拘束によるインピーダンスレベル上昇量の周波数依存性, 日本建築学会環境系論文集, No.520, pp.1-7, 2005.3
- 9) 石丸岳史, 大脇雅直, 高倉史洋, 財満健史, 相川聡, 山下恭弘: インピーダンス法を用いた重量床衝撃音レベル予測法に関する研究—その 1— インピーダンスレベル上昇量に周波数依存性が生じる要因の検討, 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.817-818, 2004.3
- 10) 大脇雅直, 石丸岳史, 高倉史洋, 財満健史, 相川聡, 山下恭弘: インピーダンス法を用いた重量床衝撃音レベル予測法に関する研究—その 2— インピーダンスレベル上昇量予測式に周波数依存性を考慮した場合の予測精度に関する検討, 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.819-20, 2004.3
- 11) 黒木 拓, 大脇雅直, 山下恭弘: 重量床衝撃音レベルの実測値と予測値の対応に関する検討, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.1187-1190, 2010.3
- 12) 高倉史洋, 大脇雅直, 財満健史, 宮崎浩司, 山下恭弘: 集合住宅における乾式二重床の重量床衝撃音レベル低減量に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第 524 号, pp.1-8, 1999.10
- 13) 藤沢康仁, 大脇雅直, 漆戸幸雄, 河原塚透: 乾式二重床の床衝撃音遮断性能への影響要因に関する検討, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.51-54, 2006.4

- 14) 小林哲, 川上福司, 長谷伸茂: 重量床衝撃音の対策に関する研究 (二重床の空気層と空気抜きの効果), 日本音響学会講演論文集, pp.675-676, 1992.3
- 15) 大脇雅直, 財満健史, 高倉史洋, 石丸岳史, 山下恭弘: 集合住宅の重量床衝撃音遮断性能のばらつきに関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-I, pp.205-206, 2001.9
- 16) 中澤真司, 井上勝夫, 木村翔, 中森俊介: 乾式二重床の床衝撃音発生系の検討 その2: 脚間隔及び上部木板層厚の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-I, pp.261-262, 2000.9
- 17) 高倉史洋, 石丸岳史, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直: 支持脚付二重床の床衝撃音低減量に関する実験的検討-その2- 防振ゴムの変化による床衝撃音低減量の変化-, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.911-912, 1998.9
- 18) 高倉史洋, 石丸岳史, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直: 乾式二重床の床衝撃音遮断性能に関する研究-その1 床端部の支持方法, 隙間開口方法の検討-, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.747-748, 2000.3
- 19) 高倉史洋, 石丸岳史, 大脇雅直, 財満健史, 山下恭弘: 幅木による乾式二重床の重量床衝撃音遮断性能の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-I, pp.47-48, 2005.9
- 20) 石丸岳史, 高倉史洋, 山下恭弘, 財満健史, 大脇雅直: 支持脚付二重床の床衝撃音低減量に関する実験的検討-その1 床先行方式と壁先行方式による床衝撃音レベル低減量の変化-, 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp.909-910, 1998.9
- 21) 増田潔, 平松友孝, 田端淳, 奥平有三, 梅岡一哲: 置き床の重量床衝撃音レベル予測における床衝撃音改善量の取り扱いについて, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.749-750, 1999.3
- 22) 田端淳, 平松友孝, 増田潔: 置き床の振動伝達に関する理論的検討, 日本音響学会春季研究発表会講演論文集, pp.747-748, 1999.3
- 23) 高倉史洋, 石丸岳史, 大脇雅直, 山下恭弘: 乾式二重床とスラブ周辺拘束が重量床衝撃音遮断性能に及ぼす影響: 実験室における検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-I, pp.229-230, 2001.9
- 24) 古賀貴士, 田野正典, 安藤啓: コンクリートスラブ上に設置された木質系二重床の重量床衝撃音改善量に対する空気ばねの影響に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集 第546号, pp.9-14, 2001.8
- 25) 奥村晃史, 井上勝夫, 冨田隆太, 狩野桂佑: 空気弾性による伝達加振力を考慮したスラブ振動の予測方法に関する検討-乾式二重床における床衝撃音発生系の検討 その4-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-I, pp.169-170, 2009.8
- 26) 石丸岳史, 大脇雅直, 高倉史洋, 財満健史, 相川聡, 久米智史, 山下恭弘: インピーダンス法による重量床衝撃音レベル予測における衝撃力暴露レベル及び動特性補正值について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 203-204, 2004.7

- 27) 大脇雅直, 黒木 拓, 財満健史, 山下恭弘: 乾式二重床の床衝撃音低減性能と集合住宅における床衝撃音遮断性能に関する検討, 日本音響学会講演論文集, pp.1097-1098, 2009.9
- 28) 鹿倉潤二, 井上勝夫: 円形および楕円形中空スラブの重量床衝撃音予測計算について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-I, pp.153-154, 2010.9
- 29) 黒木拓, 大脇雅直, 財満健史, 高木直樹, 山下恭弘: 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に関する実験的検討ー駆動点インピーダンスに関する検討ー, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.21-24, 2011.9
- 30) 財団法人日本総合建築試験所: 床材の床衝撃音低減性能の表現方法に関する検討委員会報告書, 2008.3

謝辞

本論文を纏めるにあたり、信州大学工学部 教授 高木直樹先生には研究室配属以来、現在に至るまで常に懇切なるご指導とご鞭撻をいただき、心よりお礼申し上げます。今後の研究に対しても厳しいご指導を頂くようお願い申し上げます。

信州大学名誉教授 山下恭弘先生には研究室配属以来、現在に至るまで常に懇切なるご指導とご鞭撻をいただき、心よりお礼申し上げます。今後の研究に対しても厳しいご指導を頂くようお願い申し上げます。

(株)熊谷組技術研究所 副所長 大脇雅直氏には筆者の研究遂行に対し、様々な御意見、御指導を頂き、心よりお礼申し上げます。今後の研究に対しても厳しいご指導を頂くようお願い申し上げます。

(株)熊谷組技術研究所 近藤誠一氏、財満健史氏には筆者の研究遂行に対し、研究当初から様々な御意見、御指導を頂くとともに、実験・現場測定に際し、多大なご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。

また、筆者の研究では現場測定が必要不可欠であり、限られた施工期間において、ご便宜を計って頂いた、(株)熊谷組首都圏支店、関西支店、九州支店の関係諸氏に比較感謝いたします。

(有)泰成電機工業 高倉史洋氏、石丸岳史氏には筆者の研究遂行に対し、様々な御意見、御指導を頂くとともに、実験に際し、多大なご協力を頂きました。心よりお礼申し上げます。

現場での測定・実験に際しては、(有)音研 杉木陽次氏にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

音・熱環境研究会の皆様には、筆者の研究遂行に対し、様々な御意見、御指導を頂くとともに、現場での測定・実験に際し、多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

(株)熊谷組技術研究所の皆様には、様々な面でご援助いただき、研究に専念できる環境を与えて頂きました。ここに感謝の意を表します。