

第7章 総括

本研究では、建築物床版に関する固体音問題の予測評価法を確立することを目的として、床版の音響域振動およびそれより励起される音響放射の解析手法を開発し、これらを総合したシミュレーション手法を提示した。また、床版の固体音問題の代表的項目である重量床衝撃音に関してこの手法を適用し、解析手法の検証および重量床衝撃音の性状究明・特性評価を行った。解析手法はコンピューターによる数値解析法を用いており、この種の予測評価法が具備すべき重要な2つの課題、すなわち評価結果の確度の高さと適用性の広さを実現するため、実際の物理現象を出来る限り忠実に再現すること、関連要因の効果を物理的指標として定量化し出来る限り解析手法の中に組み込むこと、に重点をおいて計算手法を構成した。

本研究の内容および研究により得られた知見をまとめると以下の通りである。

第1章では、緒論として当研究の目的と意義、背景、既往の研究、および当論文の構成について述べた。また、固体音予測評価手法構成の困難さが、建築物のもつ構造的・形態的な多様性によることを示し、これに対応する実用的予測評価手法として数値解析法が有利であることを述べた。

第2章では、固体音発生のもっとも基本的なプロセスである建築物床版の振動応答に関して、解析理論の構成と精度検証結果について述べた。音響域振動解析では、次段のプロセスである音響放射の精度を確保するため、振動応答振幅と振動モードの2つを正確に求めることが必要であり、前者は音圧の振幅を決定し、後者は音響放射率に関係する。これら2つの量を精度良く求めるために、当研究では有限要素法を採用した。

これまで床版の振動解析に用いられてきた有限要素法の殆どは、薄（平）板を対象とした微少変位理論に基づくものであるが、実際の床構造では平板スラブは稀であり、むしろ小梁付床版などの変断面のほうが一般的である。ここではまず、小梁付床版の音響域振動の基本的性状を示し、従来の解析手法の問題点を明確にした。すなわち小梁付床版の振動では、平板の場合とは異なり板曲げの断面中立軸が断面中央面から偏心し、それが板面全体に分布する形となる。構造振動の分野では、1次モードのみを対象とすることが多いため、この影響を断面2次モーメントの増加率（ ϕ ）として梁のみに寄与させて解析しているが、音響域振動では、周波数帯域が広く高次のモードが対象に含まれてくるため、このような取扱いでは十分でない。 ϕ の値は小梁方向の振動モードによって変化するため、この値を一つに固定して解析することは適当ではなく、また中立軸の偏心の影響を梁のみに寄与させる方法は、実際とはかなり異なった剛性分布となるため、振動モードに誤差を生じる原因となる。さらに、この振動モードの誤差も、振動モードの次数によって変化することになる。このような複雑な応力変位状態を呈す板の解析を精度良く行うためには、上記の中立軸の偏心状態が解析過程の中に自動的に考慮される解析方法が不可欠であり、これを実現するため本研究では、曲げ（面外）ひずみと面内のひずみが連成する形の有限要素法〔面内面外変位連成型有限要素法〕を独自に定式化し、この

手法に基づく振動解析プログラム（固有値解析と振動応答解析の2種）を作成した。振動応答解析プログラムでは、シミュレーション手法としての機能を持たせるため、各種パターンの加振力が入力できるように考慮し、また板要素と棒要素の組み合わせにより、変断面板はもとより種々の合成床版にも対応が可能なように作成した。

解析理論の検証と解析プログラムの精度検討のため、数値解と理論解の比較検討、実在床版に関する実測結果と固有値解析結果の比較検討を行い、平板スラブおよび小梁付床版の何れの場合にも良い一致が得られること、解析手法が十分な精度を有していることを示した。また、床衝撃音の対策工法として知られている浮床構造などを対象とした2重床版の定式化と振動解析プログラムのも作成を行い、数値計算による精度検討により、その妥当性を確認した。

第3章では、床版振動に係わる周辺条件の影響評価と、それらの解析手法への組み込み方法について示した。2章での方法により床版の音響域振動解析は可能であるが、実際には板のみを対象とした解析では十分ではなく、間仕切壁や天井の床振動への影響、解析対象床版周辺の床・壁の影響（境界条件の問題）、床版の振動減衰定数の影響などを考慮することが必要であり、これらの実測的・解析的評価を行った。

まず間仕切壁の床振動への影響については、実在建物に関する実測調査結果から、この影響が周波数帯域により異なることを明らかにした。すなわち、31.5Hz～125Hzのモード振動領域では、間仕切壁の有無は床版振動（固有振動数、衝撃時の応答加速度レベルおよび減衰定数）に有意な影響を与えるが、250Hz以上の拡散振動領域においては、間仕切壁の影響は殆どないことを示した。間仕切壁の影響を解析に組み込むため、その物理量化を検討した結果、これを床版に付加した並進バネ列として扱えることを確認し、集合住宅等でよく見られる木軸下地のボード壁の場合、このバネ定数を単位長さ当たり 2×10^6 (kg/m) 程度に設定すれば、実測の傾向と良く一致することを示した。

天井の影響に関しては、実測結果より125Hz以下の帯域に関しては殆ど影響のないこと、隣接する周辺の床・壁の影響に関しては、模型実験の結果により、通常の解析的取扱いで殆ど問題のないことを明らかにした。またRC床版の振動減衰定数は、音響域周波数帯域では周波数によらず2～3%の値でほぼ一定となることから、文献検討の結果から推定できることを示した。

第4章では、固体音発生の第2のプロセスである床版からの音響放射の解析手法と、その精度検討結果について示した。方法は、Morse が理論的に解明した直方体空間の波動関数を用いた数値計算法を採用した。この計算法を適用するためには明確化すべき幾つかの問題点があり、これを数値計算により検討した。まず第一点は、この波動関数法の解はもともと空気音に関して導かれたものであるため、これが固体音の場合にも適用できるかどうかの問題であり、これに関しては、理論解の求まる1次元の音場を対象とした理論解と波動関数解の比較検討を行い、極めて特殊な音響条件でない限り一般的には適用可能であることを確認した。第二点は、一般に用いられている式が、周辺の壁が剛またはかなり硬い場合の解であり、これが通常の居室での計算に適用可能かどうかの問題である。検討

の結果、剛壁または硬壁の式を用いた場合には誤差が大きくなる可能性が高いことが判明したため、波動関数の空間固有値を逐次近似法により直接数値計算する方法を新たに開発し、任意の吸音状態にも適用が可能なものとした。これら解析手法の検証のため、定常振動と衝撃振動に関して固体音放射の模型実験を行い、何れの場合にも良好な一致が得られることを示した。その他、計算に必要な共鳴モード数の算定や、離散化誤差の評価、壁面比音響アドミッタンスの分布の影響および吸音率計算との差異など、実際の適用計算に必要な細目に関して数値計算検討を行い、解析のための情報として結果を提示した。

第5章では、第2～4章で構成した解析評価手法の具体的な適用例として、重量床衝撃音の解析を行った結果について示した。まず基本的検討として、重量床衝撃時の裸スラブの振動応答に関して実測と解析の比較を行い、振動解析手法の精度を検証した。重量床衝撃音の解析では、JIS測定法に完全に則った解析を行い、これに用いる加振力の設定、振動減衰定数の設定、下室の比音響アドミッタンスの設定、r.m.s.値とFast-peak値の対応などについて示した。解析例として、壁式構造の平板スラブ、小梁のない大型床版（アンボンド床版）、小梁付き床版、浮床構造など各種の床構造について実測値との比較を行い、何れの場合にも当方法が十分な実用性を有することを検証した。

第6章においては、検証された上記の重量床衝撃音解析シミュレーション手法を用いて、重量床衝撃音の各種規定要因の影響評価を行った結果について示した。版厚やスパン、床面積の検討の他、これまでは評価の困難であった小梁付床版を対象とした振動性状評価や小梁の補剛効果の評価、浮床構造を対象とした振動伝達低減効果の評価を行った。床面積の例では、これまで面積が大きくなると床衝撃音性能が低下すると考えられていたが、個々の条件でのバラツキ要因を除けば、一般的には床面積の増大とともに床衝撃音性能は向上するものであること、また小梁の補剛効果は低音域のみに限られ、そのため梁せいが一定の値以上になるとL等級が変化しなくなることなど、解析的検討により得られた新しい知見を示した。

以上、本研究で提示した数値解析手法により、建築物床版からの固体音放射問題の予測評価が現実的に可能になったと言える。床版の構造条件や仕様が、振動や床衝撃音などの動的性能によって決定されることの多い現況においては、信頼性の高い固体音予測評価手法が存在するかどうかは極めて大きな問題である。すなわち、これらの評価が的確に行われるか否かの波及効果は、マクロな観点から見れば、日本全体での長年に亘る建築経済の効率に少なからぬ影響を及ぼすことにもなるし、ミクロな観点からは、個人の生活環境の快・不快を直接左右することにもなる。この固体音の性能評価に関して、実用的な精度と現実的な適用性を備えたシミュレーション手法を実際に提示できた意義は大きいと考える。ただし、建築物に関する固体音問題の評価体系の構築という命題からみると、本研究は未だその一部に過ぎないという点は否めず、各種の加振力評価の問題、振動伝搬系の評価、内装材の比音響アドミッタンスの現場測定法の開発などの壁面の吸音評価とそのデータ蓄積、など様々な重要

な課題が残されている。

建築物床版の固体音、例えば重量床衝撃音のみに限定した場合でも、その定量的評価はかなり複雑である。その複雑さの主因は、ひとえに建築物床版の多様性にあり、これに柔軟に対応してゆける可能性を持った方法を見つけだし、それを実証することが当研究の主眼であった。本論文では、固体音発生のプロセスを一貫して数値解析する方法をとっているが、数値解析手法にも各々得手不得手があるため、ここでは種々の関連条件を柔軟に取り込める、いはば懐の深い方法が必要との観点から採用手法を決定した。言い換えれば、固体音に関しては切れ味の鋭さより、使い勝手の良さの方がより重要であるとも言える。本研究では、床版の振動解析には独自に定式化した面外面内変位連成型の有限要素法を、音響放射に関しては波動関数法を基礎にした数値計算手法を用いることにより、これに対応している。また、関連要因の評価として、床版振動の境界条件の影響評価や間仕切壁の影響評価を行い、必要に応じて解析への組み込み方法を提示した。しかし、これらはあらゆる条件を網羅したものではなく、境界条件、間仕切壁ともに典型的な一部の条件を扱ったに過ぎない。例えば、間仕切壁は集合住宅等で一般的な木軸壁を対象としたが、これより床振動への影響が大きいと考えられる耐火間仕切壁やオフィスの間仕切壁等は検討に含まれていない。これらを一例として、その他残された課題は膨大なものであり、固体音評価問題の全体像がいかに大きく複雑であるか象徴している。

技術の進歩は、規定の方向に向かって徐々に進む場合もあり、突然の場面転換のように全く新しい姿が出現してくる場合もある。建築物床版についての技術開発に関しても、今後斬新な発想に基づいた新規の形態が現れてくることも考えられ、既存の床版に関するデータや方法ではこれに対応が困難になる場合もあるであろう。そのような際には、シミュレーション手法としての性格を有する当研究手法が、とくにその特質を発揮することになると考えられる。DNAという超微細な世界へ向かって進むことが、結局人間の全情報を解明することにつながるように、現象を緻密に追求し、それを忠実に解析表現することが、評価手法としての汎用性につながることになる。本研究が、これをどの程度実現できたかは余人の評価を待たざるを得ないが、この方法が固体音評価のシミュレーション手法として広く活用され、居住環境の向上や新技術の開発・進展に些かでも貢献できるならば、本研究および筆者の大いに幸いとすところである。