

論文の内容の要旨

論文題目 FDTD 法による音響振動連成解析を用いた 遮音のシミュレーションに関する研究

朝倉 巧

建築の住居内において快適な生活環境を保つためには、空気、熱、光、音に関する環境要因を適切な状態に制御する必要がある。これらの諸要因の中で、居住空間における音環境を快適に保つためには、以下の2つの要素が必要となる。(1) 室内の音の響き(室内音響)を適切に保つための音響設計および、(2) 外部から伝搬する環境騒音を遮断するための適切な遮音設計である。前者(1)についていえば、建築空間の目的に応じた適切な音響設計を行うことによって、スピーチのための高い音声伝達性能や音楽のための豊かな響きを伴った高い音響性能が得られる。これに対して、後者(2)の遮音設計においては、外部環境もしくは隣接家屋等において生じる様々な騒音源(自動車、鉄道、航空機、建設工事、建築設備騒音など)から居室内へ伝搬する騒音・振動をできるだけ遮断し、居室内における音環境を静穏に保つことが目的となる。建築の遮音設計は、対象とする騒音源から放射される音響パワーレベルおよび、居室内で実現させたい音圧レベルの両者から、建築壁体に必要な遮音性能を逆算し、そのような性能を有する壁体の選定が行われる。この際、様々な機関によって測定された各種壁体構造の遮音性能データベースを用いて遮音設計が行われるが、既往の遮音性能データベースでは対応できない場合も生じる。建築的な制約条件の中で、適切な遮音性能が発揮されるような壁体構造を探るために、実際に壁体を作製して測定を行うことが必要となり、試行錯誤の繰り返しにより適切な壁体構造を模索する場合もありうる。このような場合、近年コンピュータの著しい進歩と相まって利用頻度の増加している数値シミュレーション技術の利用が考えられる。試行錯誤による設計過程に数値シミュレーションを援用することによって遮音設計の効率をさらに向上できる可能性がある。

建築における壁体構造は、室間を遮る界壁のように建築に固定された壁体と窓サッシのように可動性が重視される建具に大別される。前者は、建築の躯体に隙間なく施工された場合、その遮音性能は主に壁体の振動による音響伝搬により決まる。これに対して後者は、建具の可動性能を保つために、可動部位に微小な隙間を有している。従って、その遮音性能に関する数値解析を行うためには、①壁体の振動を介した音響伝搬と②隙間を介した音響伝搬の両方を考慮する必要がある。前者について、遮音性能を精度よく解析するためには、板振動に付随して生じる振動エネルギーの損失を正確にモデル化し、解析に導入する必要がある。そのため、本研究では壁体の遮音性能に対して影響の大きい内部損失および、端部損失に関するモデル化を行い、各種壁体の遮音解析を行った。

また、後者については、従来のように等間隔メッシュを用いた FDTD 解析では微小な寸法を有する隙間のモデル化は難しいため、不等間隔メッシュを用いた解析方法を導入して各種隙間モデルの遮音解析を行った。

本論文では、第 1 章で音響振動伝搬に関する基礎理論を述べた後、第 2 章では壁体の振動を介した音響伝搬について、第 3 章では隙間を介した音響伝搬について述べた。第 4 章では、第 2 章および第 3 章で用いた解析手法を利用して、建築空間に用いられる遮音構造物の評価を可能とする可聴化シミュレーションシステムを提案した。居室内へ透過する騒音の特性は、壁体の遮音性能の影響を受けて変化し、これに伴って聴感的な印象、さらには居住空間におけるさまざまな活動に対する心理的な影響も変化すると考えられる。第 4 章では、これらの影響を調べることができる可聴化システムを目標とした。

以下に各章の概要と得られた知見を述べる。

序論では、研究の背景と概要を示した。また、建築音響学における遮音の位置づけについて述べた。

第 1 章では、音響および振動の基礎となる支配方程式、FDTD 解析における初期条件、境界条件について述べた。また、振動解析において重要となるエネルギー損失の解析および、微小な隙間のモデル化のために必要な不等間隔メッシュを用いた解析手法について述べた。

第 2 章では、壁体の遮音性能に関する音響振動連成解析を行い、実測結果と比較して、妥当性の検証を行った。はじめに、壁体の遮音性能を精度よく予測するために必要となる板のエネルギー損失を把握するために、本章で解析対象とする板部材の端部損失および内部損失の実測を行った。遮音性能は音の入射条件に大きく依存するので、斜入射および乱入射条件に対する検討を行った。斜入射条件については、端部損失を考慮したアルミニウム板による単板および複層板構造を想定して、部材に対する音の入射角度を変化させた場合の遮音性能を解析し、スピーカ音源を用いた縮尺模型実験結果と比較した。入射角度が大きい場合に両者の傾向は若干異なったが、角度別の遮音性能の変化については両者の間で概ね一致した結果が得られた。また、乱入射条件については、ガラス板と石膏ボードによる壁体構造を対象として残響室-残響室法を模擬した解析を行った。石膏ボードは内部損失が比較的大きい材料である一方、ガラス板はその非常に小さな内部損失に比べて端部損失の影響が相対的に大きい。このような材料による特徴を反映させるために、石膏ボードについては内部損失を、ガラス板については端部損失を考慮した解析を行った。以上の解析結果における遮音性能の傾向は、残響室-残響室法を用いた実測結果の傾向とよく一致しており、板のエネルギー損失のメカニズムを組み込んだ音響振動連成解析の有効性が確認された。

第 3 章では、建築壁体に生じる微小な隙間を介した音響伝搬について検討した。微小な隙間は、窓サッシやドアパネルの周辺に生じる場合が多く、遮音欠損の大きな要因となる。そのため、残響室-無響室法によって、典型的な形状をもつ隙間の音響透過損失

に関する実物大模型実験を行った。また、隙間を介した音響伝搬を軽減する目的で隙間内部に多孔質吸音材を配した条件についても検討した。これと並行して、残響室-残響室法による隙間の音響透過損失の解析を行った。この結果、隙間形状の違いによる遮音性能の変化および、隙間内部において吸音処理したことによる遮音性能の向上について、解析結果は実測結果にみられる傾向をよく捉えていた。次に、実験室および現場に設置された実物大の建築建具（窓サッシおよびドアパネル）の周辺に生じる隙間を介した透過音に関する実測と解析を行った。この解析では、微小な隙間形状を正確にモデル化するために、不等間隔メッシュを用いた。以上の検討で得られた解析結果は、隙間からの透過音の周波数特性と音響パワーレベルの点において、実測結果の傾向をよく捉えており、不等間隔メッシュによって微小な隙間形状をモデル化した FDTD 解析が有効であることがわかった。

第4章では、第2章、第3章で得られた壁体および隙間を介した音響振動連成解析に関する知見を応用し、建築の遮音性能評価のための可聴化シミュレーションシステムを提案し、ケーススタディを行った。このシステムは、実測により取得した道路交通騒音の音圧波形データと音響振動連成解析によって取得した建築ファサードの遮音特性を併せて用いて居室内に伝搬する騒音を可聴化するものである。また、隣室から伝搬する家屋内騒音については、界壁をモデル化した遮音解析の結果から得られる室間の伝搬特性を用いて可聴化する。単板および複層ガラスの厚みと空気層厚を変化させた場合や石膏ボードによる界壁構造を変化させた場合についてそれぞれ可聴化した結果、壁体の遮音性能の変化に伴って、透過音の大きさ、周波数特性、時間変動特性の変化を確認することができた。

最後に、第5章において本論文を総括した。

建築に用いられる壁体構造は多様であり、本研究で検討した壁体構造はその一部であるため、今後さらに複雑な構造を有する壁体の遮音解析についても検討を行い、解析手法の有効性について確認するとともに、それらの結果を用いた可聴化シミュレーションの適用性を詳細に調べることが今後の課題である。