

リニューアル工事騒音 建物内伝搬予測システムの開発

Development of Noise Prediction and Assessment System for Building Renovation Work

坂崎 友美^{*1} 小林 真人^{*1}
Tomomi Sakazaki Masahito Kobayashi
池田 隆明^{*1} 櫻井 臣央^{*2}
Takaaki Ikeda Tamio Sakurai

【要旨】

建物を使用した状態での施工が要求されるリニューアル工事では、建物利用者に対する騒音対策が重要な課題となる。騒音対策を立案する際には、工事騒音による影響を予測し評価する必要がある。そこで、著者らは工事環境下の居住環境を保全するための対策立案に使用する“リニューアル工事騒音 建物内伝搬予測システム”を開発した。本システムでは、騒音が建物内を伝搬する過程を再現するとともに、騒音発生源の音響特性、振動の伝搬特性、室内への音響放射特性を実験から評価し、予測精度の向上を図った。予測結果については、実建物を対象とした検証結果とともに、予測結果を簡潔に示す報告書の自動作成機能も付与させ、現場での適用性を向上させている。

【キーワード】 リニューアル工事 騒音 振動 固体伝搬音 空気伝搬音

1. はじめに

建築物を長期利用するためには、定期的な修繕工事はもちろんのこと、耐震性能が不足していれば、さらに耐震補強工事が必須である。集合住宅やオフィスにおいてはそれ以外にも、入居率を保つための改修工事が求められる場合がある（これらの工事を総称してリニューアル工事と呼ぶ）。しかしながら、リニューアル工事の実施には、工事騒音や、工事期間中の退避のため費用など直接の工事費以外の費用の発生といった課題が妨げとなる場合がある。

特に建物を使用しながらの工事では、オフィスでの仕事効率や、集合住宅での居住者の精神的苦痛など、大きな影響を与えるため、低騒音となる施工手順や工具の使用、短期間に集中した施工、防音シートや防音設備の使用、および建物利用者が静けさを必要とする部屋（例えば：会議室）の位置を工事場所から遠い位置へ変更することなどが挙げられる。これらの騒音対策を効果的に立案するためには、施工計画時に建物内へ伝搬する騒音を事前に精度よく把握する必要がある。そこで筆者らは“リニューアル工事騒音 建物内伝搬予測システム”（以下、システムとする）を開発した。

建物内を伝搬する騒音の予測は、“発生”⇒“伝搬”⇒“室内への音響放射”の過程で考える必要がある。それぞれの過程ごとに騒音、場合によっては振動の特性を求

める必要がある。システムでは、それぞれの過程ごとの予測に既往の式¹⁾³⁾を適用した。しかしながら、形状の異なる様々な建物を対象に、それらの式で建物内を伝搬する騒音を予測するには、実験施設と複数の実建物を用いた実験からデータを蓄積し、予測精度を向上させる必要がある。そのため、システム開発の過程において、騒音発生源の音響特性、振動の伝搬特性、室内への音響放射特性を実験から明らかにした。

最後にシステムの予測精度を2つの実建物を対象として行い、適切な予測・評価ができることを明らかにした。

本稿では、システムの概要、予測過程に必要な騒音発生源の音響特性、振動の伝搬特性、室内への音響放射特性に関する実験、およびそこから得られた知見を述べる。さらに、システムの予測精度を検証した結果について述べる。

2. 開発したシステムの概要

開発したシステムは、リニューアル工事の施工計画時に騒音対策を効果的に立案するために、建物内へ伝搬する騒音を精度よく予測することができる。

2.1 システム利用の流れ

図-1にシステムの流れを示す。入力項目は工具の種類、建物の寸法、内装の種類、建物規模、建物の構造である。これらを入力することで、対象となる建物の変化

に柔軟に対応できる。入力最後に工具作業を行う場所を設定し、計算実行ボタンを押すと報告書が出力される。報告書には建物の断面もしくは平面を模擬した騒音レベルコンター図、および特定の室での室内騒音の適用等級による騒音の評価結果が示される。ここで、室内騒音の適用等級とは、日本建築学会が建物遮音性能を適切に保持することを目的に、遮音性能・減音性能の判断基準として定めた室内騒音に関する建物、室用途別の適用等級である⁴⁾。

2.2 適用範囲

リニューアル工事で建物内に最も影響を与える作業は穿孔、解体、目荒し作業である。システムでは、これらの作業で用いられる15種類の工具を騒音予測の対象とした。

建物構造は、集合住宅や事務所等のなかでRC構造、SRC構造に適用可能である。

作業を行う場所は、室内と外壁部の2種類から選択することが可能である。

2.3 システムで用いた予測の流れ

システムの予測フローとリニューアル工事騒音の伝搬イメージを図-2に示す。リニューアル工事騒音の伝搬経路は、躯体を伝搬する騒音（固体伝搬音）と、壁や窓を透過する騒音（空気伝搬音）に分けて考える必要がある。固体伝搬音の発生源は、工具作業により躯体で発生した振動である。その振動が躯体を伝搬し、対象となる受音室の壁面、床面、天井面から室内へ音響放射される。空気伝搬音の発生源は工具作業により空气中に放射された騒音である。この騒音が窓や壁、床を透過し、建物の外部を伝搬することで室内に伝わる。受音室に伝搬した空気伝搬音と固体伝搬音を合成し、室内の吸音力、および、聴感覚の補正を行うことで室内騒音レベルを求める。ここで用いる発生源、伝搬性状、室内への音響放射は、複数の現場計測結果を予測手法に反映させることで予測精度を保持している。

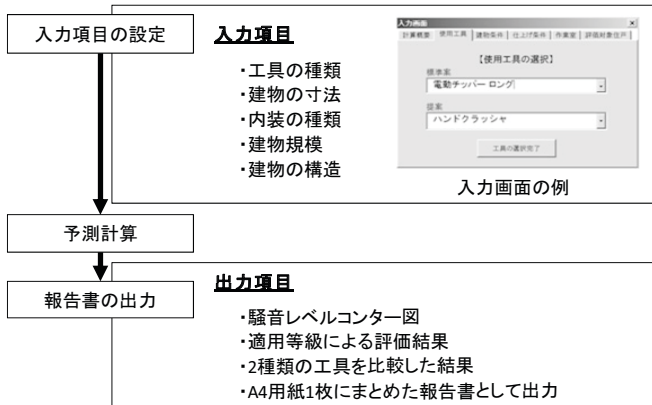
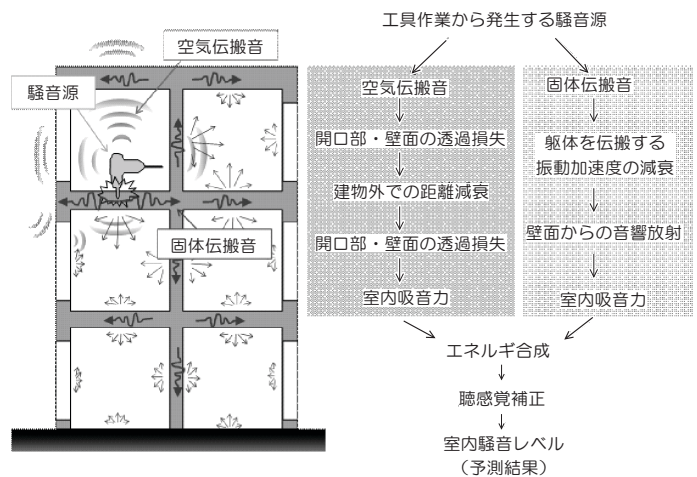


図-1 システムの流れ

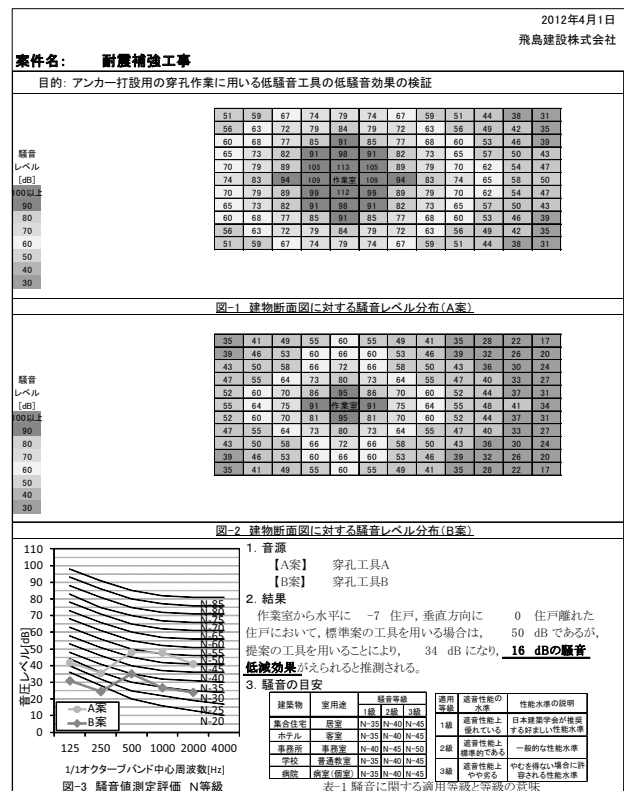
2.4 評価結果の出力

報告書には、予測結果として建物の断面もしくは平面を模擬した騒音レベルコンター図と室内騒音適用等級が示される。また、騒音レベルコンター図を上下に二つ示すことで、工具の違いによる騒音の伝搬状況を容易に比較することができる。さらに、任意の室における室内騒音の適用等級を示すことで、建物利用者の生活環境に与える影響を明確に判断することが可能である。図-3に報告書の例を示す。



a) リニューアル工事騒音の伝搬イメージ
b) 予測フロー

図-2 予測フローとリニューアル工事騒音の伝搬イメージ



3. 予測手法の構築

本章では、予測に必要な騒音発生源の音響特性、振動の伝搬特性、室内への音響放射特性を明らかにするために、行った実験について示す。さらに、そこから得られた知見について述べる。

3.1 騒音発生源の音響特性

発生源の実験では、空気伝搬音の発生源として音響パワーレベル、固体伝搬音の発生源として工具作業近傍での振動加速度レベルを測定した。また、作業種ごとに現れる音響パワーレベルと振動加速度レベルの発生傾向について考察した。

(1) 実験方法

発生源の実験では、工具で躯体を模擬したコンクリートブロックに対し作業を行い、そこで発生する音響パワーレベルとコンクリートブロック表面の振動加速度レベルを測定した。

音響パワーレベルは、「JIS Z 8732 音圧法による騒音源の音響パワーレベルの測定方法」に従い測定し、振動加速度レベルはコンクリートブロックの工具作業面上で測定した。図-4に実験概略図、写真-1に測定状況を示す。表-1に測定対象工具の一覧を示す。

(2) 作業ごとの騒音発生源の評価

図-5に音響パワーレベルの測定結果、図-6に振動加速度レベルの測定結果を示す。システムでは、これらの測定結果を発生源のデータとして用いた。以下に作業種ごとに騒音発生源の発生傾向について述べる。

穿孔作業に用いる工具は打撃型（穿孔工具A, B, C）とコアビットの回転型（穿孔工具D, E, F, G, H）を対象とした。図-5に示した音響パワーレベルでは、打撃型がコアビットの回転型に比べ、最大で20dB大きく、図-6の振動加速度レベルでは、最大で21dB大きい結果となった。打撃型はコアビットの回転型に比べ、コンクリートブロックに大きく振動を発生させる。それに伴い、コンクリートブロックから放射される騒音が大きくなることで、音響パワーレベルも大きくなる。



写真-1 実験状況

表-1 対象工具

| 作業 | 名称 | 種類 |
|-----|--------|-----------|
| 穿孔 | 穿孔工具A | 打撃型 |
| | 穿孔工具B | 打撃型 |
| | 穿孔工具C | 打撃型 |
| | 穿孔工具D | コアビットの回転型 |
| | 穿孔工具E | コアビットの回転型 |
| | 穿孔工具F | コアビットの回転型 |
| | 穿孔工具G | コアビットの回転型 |
| | 穿孔工具H | コアビットの回転型 |
| | 穿孔工具I | コアビットの回転型 |
| 目荒し | 目荒し工具A | 打撃型 |
| | 目荒し工具B | 砂吹き付け型 |
| 解体 | 解体工具A | 切断型 |
| | 解体工具B | 切断型 |
| | 解体工具C | 打撃型 |
| | 解体工具D | 加圧型 |

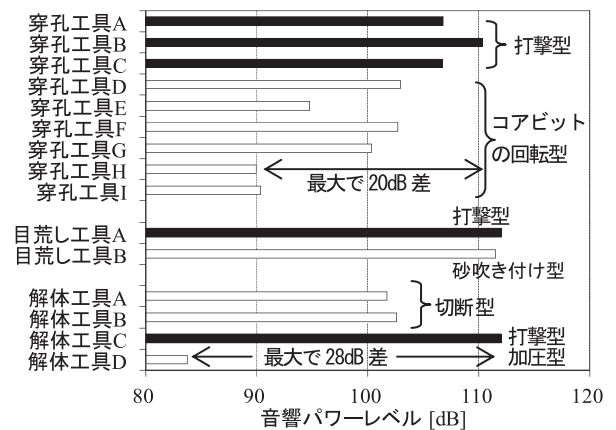


図-5 音響パワーレベルの比較

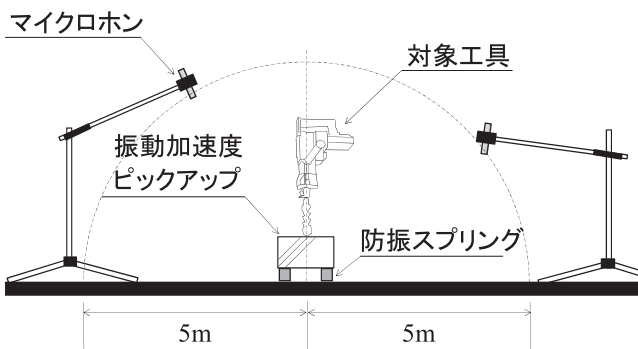


図-4 実験概略図

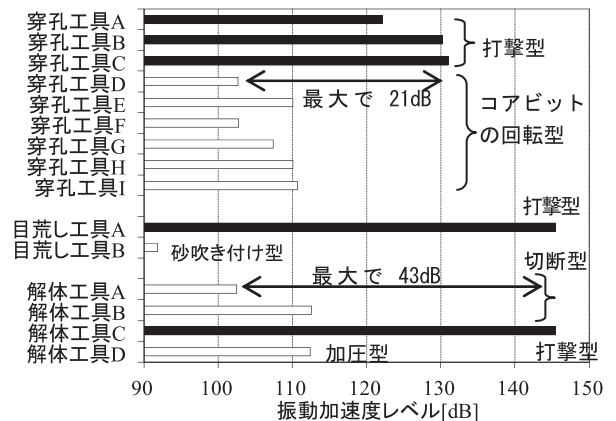


図-6 振動加速度レベルの比較

目荒し作業の工具では、打撃型（目荒し工具A）と砂吹き付け型（目荒し工具B）を対象とした。図-5の音響パワーレベルでは両工具の差が1dBである。しかしながら、図-6の振動加速度レベルは打撃型が砂吹き付け型に比べて54dB大きい。打撃型は穿孔工具の打撃型と同様に、コンクリートブロックに大きく振動を発生させ、コンクリートブロックから放射される騒音を大きくする。それに比べ砂吹き付け型は、砂の吹き出し口から放射される空気音の影響で音響パワーレベルが大きくなるが、砂がコンクリートブロックに加える力が打撃型と比べて小さいため、振動加速度レベルが小さくなったと考えられる。

解体作業の工具では、切断型（解体工具A,B）と打撃型（解体工具C）、加圧型（解体工具D）を対象とした。打撃型は穿孔作業と目荒し作業と同様に、コンクリートブロックに大きく振動を発生させ、コンクリートブロックから放射される騒音を大きくする。そのため、他の工具に比べ、音響パワーレベルは最大28dB大きく、振動加速度レベルは、最大43dB大きい結果となった。加圧型は音響パワーレベルが他の工具に比べ最も小さいが、振動加速度レベルが切断型の解体工具Bとほぼ同等である。これは、コンクリートブロックに力を加えるスピードが遅いため、コンクリートが圧力で破壊される瞬間のみに振動が発生することから、作業時間に対して発生する騒音が小さいためである。切断型の解体工具Aと解体工具Bで振動加速度レベルに約10dBの差が現れたのは、刃がコンクリートに接する面積や回転速度の違いが影響していると考えられる。

3.2 伝搬過程

騒音の伝搬過程のうち、固体伝搬音の場合、振動が躯体を伝搬する。その振動は建物形状や距離、およびコンクリートの内部減衰などに影響されて減衰する。そのため、多様な建物に対応可能な予測手法を構築するには、躯体の振動伝搬特性を複数の建物で実測する必要がある。そこで、複数の建物で振動伝搬特性のデータを蓄積する実験を実施した。さらに、それらのデータを基に建物振動伝搬特性について考察した。

(1) 実験方法

振動伝搬性状のデータを蓄積する実験では、RC構造およびSRC構造の幾つかの現場で躯体に振動を加え、一定距離間隔ごとに躯体の振動加速度を測定した。ここで、測定した距離間隔や加振位置は現場の状況により異なる。写真-2に測定状況の一例を、図-7に測定位置の一例を示す。

(2) 躯体を伝搬する振動加速度レベルの予測計算手法

測定結果の一例として、RC構造7階建て集合住宅での振動加速度レベルを図-8に250Hz帯域、図-9に1000Hz帯域を示す。



写真-2 測定状況の一例

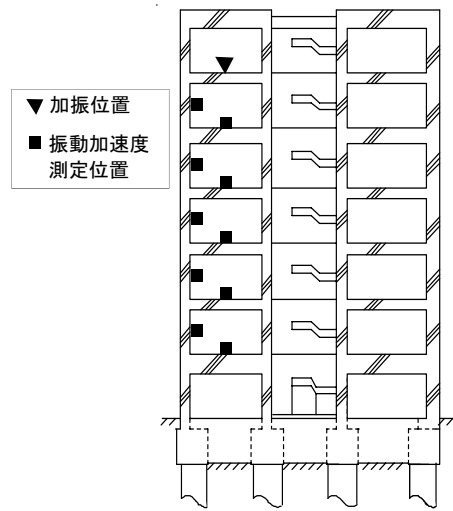


図-7 測定位置の一例

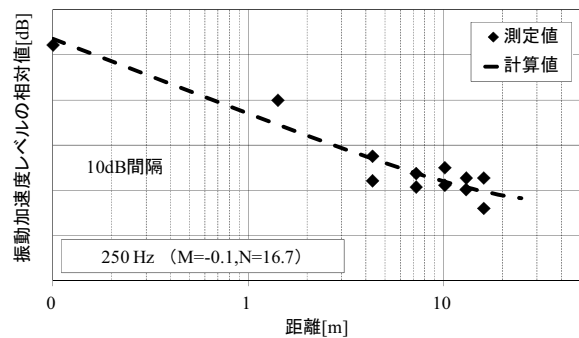


図-8 躯体の振動加速度レベル測定結果
(250Hz帯域)

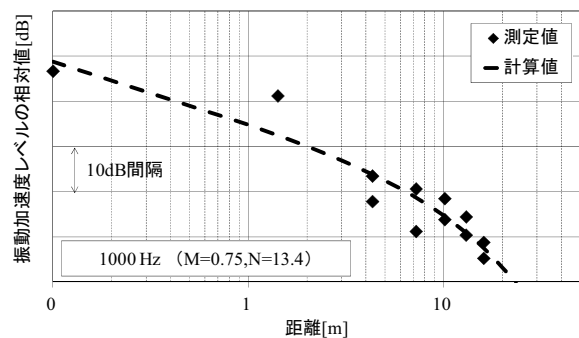


図-9 躯体の振動加速度レベル測定結果
(1000Hz帯域)

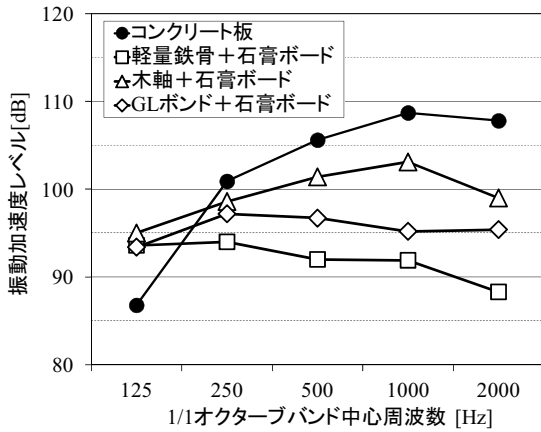


図-12 内装仕上げごとの振動加速度レベル

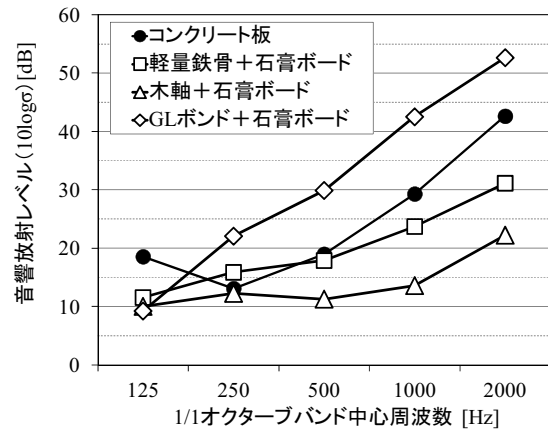


図-14 内装仕上げごとの音響放射レベル

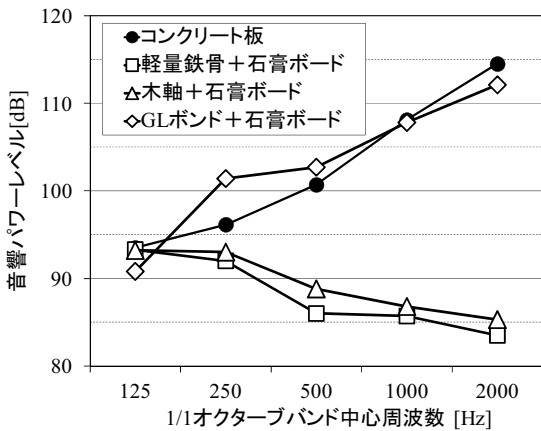


図-13 内装仕上げごとの音響インテンシティレベル

仕上げ表面は石膏ボード (t=12.5mm) とした。下地の配置は、LGS工法と木軸工法は、スタッドと木軸を455mm × 786mm間隔で設置し、GL工法はボンドを455mm間隔で設置した。加振源にはタッピングマシンを用いた。振動加速度レベルと音響インテンシティレベルは、30秒間の平均値を求めて評価した。

(2) 内装仕上げの違いが室内騒音へ与える影響

図-12に内装仕上げごとの振動加速度レベルを示す。内装仕上げを施工することで、250Hz帯域から2000Hz帯域では内装仕上げ表面の振動加速度がコンクリート板表面の振動加速度に比べ低減する傾向が見られた。

図-13に内装仕上げごとの音響インテンシティレベルを示す。GL工法は他の工法に比べ250Hz帯域から2000Hz帯域の間で8dBから18dB大きい。GL工法は、既往の研究²⁾において、他の工法に比べ室内へ音響放射される騒音が大きくなることが知られている。そのため、GL工法が使用されている建物でリニューアル工事を行う時には、特に低騒音な工具の使用が必要である。

(3) 室内へ音響放射される騒音の予測計算手法

壁面などの振動からの音響放射による室内音圧レベルは、式(2)²⁾で求められる。

$$SPL_f = VAL_f - 10 \log(S/A) + 10 \log(\sigma_f) - 20 \log(f) - 36 \quad (2)$$

ここで、 SPL_f は室内の音圧レベル[dB]、 VAL_f は壁面の振動加速度レベル[dB]、 S は音響放射する面積[m²]、 A は室内の吸音力[m²]、 σ_f は音響放射効率、 f は周波数[Hz]、 $10 \log(\sigma_f)$ は音響放射効率レベル[dB]を示す。

音響放射レベル $10 \log(\sigma_f)$ は、前項で測定した内装仕上げごとの振動加速度レベルと音響インテンシティを用いて式(3)³⁾で求めた。

$$10 \log(\sigma_f) = PWL_f - VAL_f - 10 \log(S) + 20 \log(f) - 30 \quad (3)$$

ここで、 PWL_f は本来、音響パワーレベル[dB]であるが、本研究では音響インテンシティレベルを使用した。

図-14に3種の内装仕上げとコンクリート板の音響放射効率レベルを合わせて示す。

GL工法は250Hzから2000Hzで他の工法に比べ6dBから13dB大きく、木軸工法は他の工法に比べ全周波数帯域で最も小さいことがわかる。全ての内装仕上げともに石膏ボードの厚みと面積は同じであることから、内装下地の違いは室内騒音に影響を与えることがわかった。

4. 予測精度の検証

システムの予測精度を確認するために、2つの集合住宅で検証実験を行った。実験では、加振器で躯体を振動させ、建物内の騒音を測定し、その測定値と予測計算値を比較することで予測精度の検証を行った。

4.1 加振器を用いた検証

(1) 検証方法

検証の対象とした建物はRC構造7階建て集合住宅である。図-15に基準階の平面図を示す。内装仕上げは壁にGL工法とLGS工法が用いられ、床はフローリング直貼

工法、天井はLGS工法である。加振器にはタッピングマシンを用いた。加振は7階のベランダの梁で行った。室内騒音の測定は、加振室直下の3階から6階で行った。その結果とシステムで求めた計算結果を比較することで予測精度の検証を行った。

(2) 測定値と計算値の比較

図-16に測定階ごとの室内騒音レベルの測定値と計算値を比較して示す。3階から6階の測定値と計算値の差は±3dBであった。室内騒音を適用等級により評価する

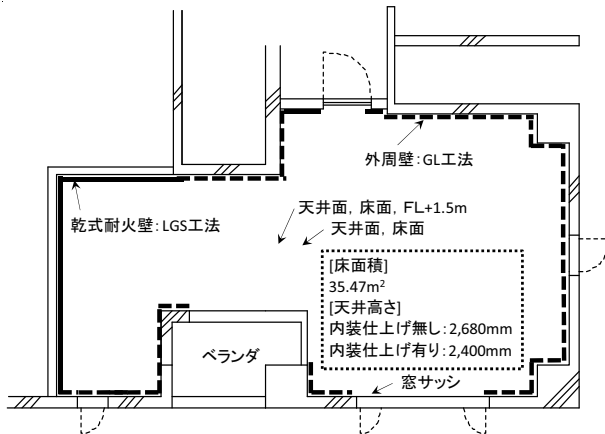


図-15 検証対象建物の室内平面図

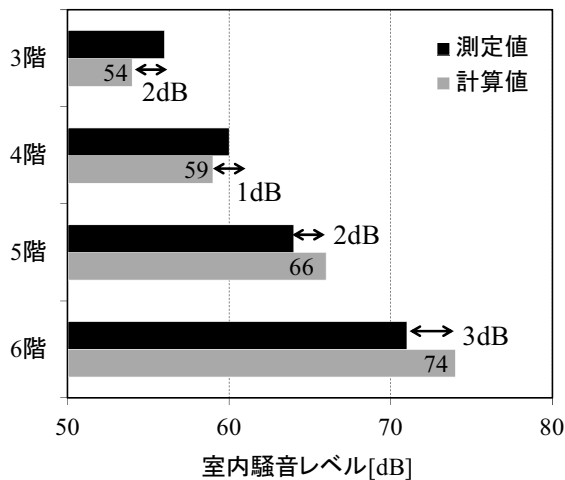


図-16 測定階ごとの測定値と計算値の比較

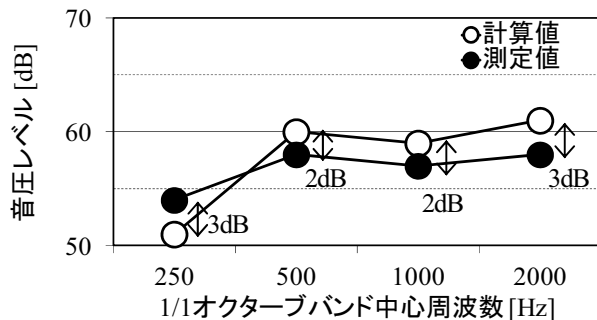


図-17 5階測定室の周波数特性の比較

ためには、室内音圧レベルの周波数特性の予測精度も検証する必要がある。そこで、図-17に5階の室内音圧レベルの周波数特性の測定値と計算値を比較して示す。

全ての周波数帯域で測定値と計算値が±3dBであり、予測システムとして、十分な精度を有していることが確認できた。

4.2 穿孔工具を用いた検証

(1) 検討方法

検証の対象とした建物はRC壁式構造の3階建て集合住宅である。図-18に穿孔作業位置と測定室の位置を示す。写真-4に作業状況、写真-5に測定状況を示す。



図-18 穿孔作業位置と測定室の位置



写真-4 穿孔作業の状況



写真-5 測定状況

穿孔作業は、図-18に示す1階の室内で行った。作業室内はコンクリート打放しであり、測定室の内装仕上げは壁が全面GL工法、床はフローリングもしくはカーペットの直貼り工法である。穿孔作業は、作業場所の床にアンカーボルトとグラウトでコンクリートブロックを設置し、そのコンクリートブロックに対して穿孔作業を行った。騒音の測定室は2階と3階の9室であり、測定位置は室内中央(H=1.5m)で測定した。

(2) 測定値と計算値の比較

図-19 a) に室内騒音レベルの測定値を示し、図-19 b) に室内騒音レベルの計算値を示す。測定値と計算値の差は最大で3dBであり、システムで建物内における工事騒音の伝搬状況を±3dB以内で再現できることがわかった。

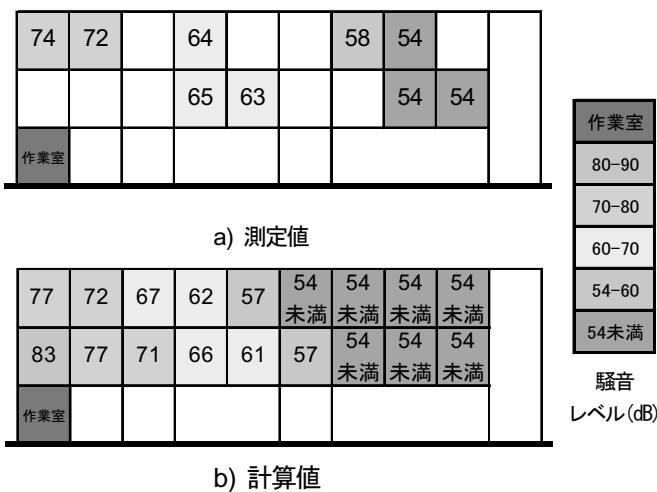


図-19 騒音レベルの測定値と計算値の比較
(暗騒音[=54dB]未満はまとめて表示)

5. 結論

本研究ではシステムの開発について、予測精度に影響を与える発生源、伝搬、音響放射、それぞれの特性を明らかにし、予測手法への適用方法について検討した。さらに、システムの予測精度について2つの集合住宅で検証し、リニューアル工事の施工計画時に建物内へ伝搬する騒音を事前に精度よく把握できることを示した。以下

に、本研究により得られた知見を示す。

- 1) 工具作業から発生する騒音を小さくするには、躯体で発生する振動が小さい工具を選定する。
- 2) 躯体を伝搬する振動は、躯体の形状や材料の内部粘性等が影響する。
- 3) 内装下地の違いは室内騒音に影響を与え、特にGL工法は室内騒音に与える影響が大きいため、低騒音な工具の選定が必要である。
- 4) 建物を使用しながらの施工が要求されるリニューアル工事の騒音対策を、効率的かつ高精度に行うために、固体伝搬音と空気伝搬音に対して影響する要因を考慮し、発生源、伝搬、音響放射の特性を実測データに基づいた建物内の騒音予測システムを開発した。
- 5) 様々な実証実験から得られたシステムの予測精度は±3dBであり、工事における騒音の建物内の伝搬を、適切に予測・評価することが可能と考えられる。

今後、より実際の施工状況に合った騒音予測を行うために、複数音源への対応や鉄骨造への適用範囲の拡大などを行い、工事環境下の居住環境を保全するために必要な対策立案に役立てていく。

謝辞：システム開発にあたり、現場での測定にご協力頂いた作業所の皆様、工具メーカーおよび協力業者の皆様に、本紙面をお借りして深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 松田由利, 橋秀樹, 石井聖光: 建物構造体中における固体音の伝搬性状, 日本音響学会誌, 35 (6), pp.609-615, 1979.
- 2) 橋本典久: RC壁ボード内装工法の振動・音響放射特性に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集, No.545, pp.9-16, 2001.
- 3) 橋本典久: 騒音防止者のための音響放射の理論と実際, 工文社, 2002.
- 4) 日本建築学会: 建築物の遮音性能基準と設計指針 第二版, 技報堂出版, 1997.

Summary In the renewal work in which construction needs to be carried out while the building is in service, controlling noise for building users is an important issue. When developing noise control plans, predicting and estimating the impact of construction noise is required. The authors developed a system for “predicting the propagation through the building of renewal construction noise” for use when developing measures to protect the living environment during construction.

The system reproduces the process of propagation of noise through the building and evaluates the acoustic properties at the source of noise, characteristics of vibration propagation and characteristics of indoor acoustic radiation based on the results of testing to obtain higher precision of prediction. The system is also equipped with the feature of automatically preparing reports that show the results of prediction with the results of verification using actual buildings for greater applicability at the site.

Key Words : Renovation work, Noise, Vibration, Structure-bone sound, Air-bone sound