

居住性能評価に向けた建物床振動の予測・制御手法に関する研究

A Study on Prediction and Control Techniques of Building Floor
Vibration for the Evaluation of Habitability

田中靖彦 Yasuhiko TANAKA*

要 旨

建築物における居住性能向上への要求がますます高まっている。快適性と大きく関係する温熱環境、空気質環境、光・視環境、音環境は勿論のこと、環境振動に対する要求も例外ではない。建築基準法には環境振動に関する具体的な記述はないが、日常生活においては構造安全性と同様に重視されると思われる。

日本建築学会環境基準の一つとして2004年に改定された「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」では、設計者には建築主や居住者の要求に応じた設計条件を個別に設定し、それを実現することが求められている。同指針は、建物床上の受振点における居住者や執務者に対する居住性能評価を行うためのものであるが、加振源の特性、受振点までの振動伝搬特性、受振時間の条件やこれらの検討方法までは触れておらず、最近の研究成果を付すにとどまっている。

したがって、居住性能評価を行うには、加振源や受振点の条件が類似した事例のデータを用いるか、振動測定または振動予測を行う必要がある。特に設計段階で居住性能評価を行うには、何らかの方法で受振点の振動を予測せざるを得ない。建物の主要部位における振動応答を予測することは、建物の設計上必要かつ重要なことであるが、これまでは成果の蓄積が少なく、予測法として纏めるまでには至っていないのが現状である。しかし、環境振動の制御は建物の設計時点で行うことが多く、有効な対策の基本は精度の良い予測法の確立にある。

このような背景の下、本研究では、構造断面を仮定して床振動を予測し、居住性能の確認と改善を試みる構造設計の視点に立って、建物内外の様々な振動源から発生する床振動の予測と制御に関する新たな手法の実用性を検討し、実務における性能設計の一助となることを目的としている。

本論文は、本研究の背景と目的、既往の研究との位置付けなどを述べた序論（第1章）と本研究の成果を個々に述べた第2、3、4、5章、本研究における成果を結論としてまとめた第6章から構成されている。各章の研究概要と成果は以下の通りである。

第2章ではまず、建物内の代表的振動源である人の動作による加振力特性を、動的荷重係数に着目して調査し、既往の研究成果と比較した。また、加振力や床構造のモデル化を変えた場合の床振動の予測値について測定値を交えて検討し、人為加振力に対する床応答スペクトルを例示した。

次に、同じような構造にも関わらず、片方においてのみ居住性能上の問題が生じた2つの建物を対象に、エアロビクスに伴う床振動の調査を行った。問題の原因は、片方の建物で床の固有振動数とエアロビクス加振力の倍振動数が近接し、共振に近い状態で床振動が増幅したことである。調査結果および複数の対策案による対策効果の予測値に基づいて、斜材を追加する対策が講じられ、居住性能上の問題は解決した。

床の固有振動数を10Hz程度以上にすれば、人の動作による床振動の問題は防止できると思われるが、建物のレイアウトやコストの制約からこれを実現できない場合も多い。本章ではこのような建物において、特に加振源となる人が数十人以上と多い場合に、床振動を精度良く予測するための検討を行った。

各人の動作タイミングのずれにより、多人数によるエアロビクス加振力が、1人の加振力の人数倍にはならないことは容易に想像できる。各人の加振の位相がランダムであれば、エネルギー和に基づいて人数の平方根倍で全体の加振力を定めることができる。しかし、エアロビクスでは音楽やインストラクターに合わせて動作するため、全体の加振力は1人の加振力を人数の平方根倍したものより大きい。

本章の成果として、エアロビクススタジオを構成する床の各スパンが全体的な振動モードを持つ場合、10～300人程度のエアロビクスに伴う床振動は、ジャンプの動的荷重係数を用いた8人程度の同位相加振時の応答を、同位相加振人数に対する実加振人数の平方根倍することで、精度良く予測できることを示した。

第3章では建物外の振動源である道路交通を対象に、まず計画建物の基礎コンクリート上の各柱位置で交通振動測定を行い、主なデータを多点強制変位として上階の床振動を有限要素法で予測する手順により、鉄骨造建物に適用できる決定論的な床振動予測手法を示した。しかし、実際には基礎施工以前に建物の床振動を予測し、設計に反映させることが望ましい。そのためには、建物への交通振動入力への把握が不可欠であるが、振動源や地盤などの伝搬経路を

* 技術研究所

「法政大学審査学位論文 2005.3」の要旨を掲載。

建物と同様に有限要素モデルとすることは困難な場合が多い。

そこで本章では次に、地盤の振動伝搬に確率モデルのフィードバックシステムを仮定し、それを多変数の自己回帰モデルに当てはめて同定するという手順で、2地点の測定データのみから振動源と伝搬経路の特性を把握することを試みた。さらに、同定されたシステム特性を利用し、敷地周辺の1地点の振動測定データから敷地上での振動応答、つまり建物への交通振動入力への推定を試みた。結局は、本手法による推定入力と鉄骨造建物上部構造の有限要素モデルから床振動予測を行う技術の実用可能性を示し、本手法の環境振動予測を実用化する次の手順を提案した。

- ① 道路交通による床振動が懸念される建物の敷地周辺（歩道上など）および敷地内（既存建物基礎上、更地上、計画建物基礎上など）で同時振動測定を行う。振動が大きくなる際の車両種別、通行速度、振動発生地点の路面状況、地盤種別、地表面粗度、基礎種別、測定点間の距離など加振力特性や伝搬経路特性に影響を与える条件を分類しておく。
- ② 大型車両通過時の定常的な振動データを用いて、多変数ARモデルのシステム同定を行う。同定されるAR係数や残差時系列の特性を加振源や伝搬経路の条件毎に整理する。また、基礎上多点の振動の位相差特性についても整理しておく。
- ③ 以上の作業を多数の物件について実施し、結果の統計処理を行えば、新たな計画敷地周辺1地点の振動観測データおよび加振源と伝搬経路の条件に沿ったAR係数と残差時系列を用いて建物への入力振動が推定できる。この推定入力と鉄骨造上部構造の有限要素モデルから床振動予測を行うことができる。

第4章では、床振動対策のうち適用範囲や制振性能に優れるアクティブ制振を取り上げ、微振動・体感振動・固体伝搬音の原因となる建物床の多自由度振動を、床1スパンに1台のセンサと1台のアクチュエータで低減させる自動制御設計機能付き制振装置の実現について述べた。

最初に制御方法と単純支持平板モデルによる制御効果を示した。次に制御設計を省略して装置を設置するための制御対象のシステム同定手法を示し、単純支持平板モデルを用いてその同定精度を検証した。

分布質量系制御対象をロバスト制御理論でフィードバック制御する点は従来の研究と同様であるが、センサとアクチュエータがともに1台のシステムで済む点、制御対象を金属製の板やダクトよりも均質性・柔軟性が低く、減衰の大きい鉄筋コンクリート造の実大床とする点、短時間で制御対象モデルを作成できるシステム同定機能を組み込む点が従来の研究と異なる。

実際の床構造では振動制御に必要な有効質量やモードベクトルの把握が困難であり、モードの特定も高次になると多数点の測定結果から検討しない限り困難である。しかし実用上、装置の設計・設置が容易であることを重視し、本章では操作点と観測点はともに1点として、有効質量とモードベクトルは概算で設定した。実大床における実験では、100Hz以下の3つのモードに対し、本制御手法によって床振動と固体伝搬音が1次モードで10dB、2次と3次モードで5dB程度低減されることを確認した。

本装置の実用化において、制御対象のシステム同定で推定される固有値から、工学的に有意な固有振動モードを選定する手法が改良されれば、自動的な制御系設計が可能となる。これにより、アクチュエータで制御対象を加振した際の加振力と床上速度のデータから制御対象を同定して制御器を設計し、床振動とそれに伴う固体伝搬音をアクティブ制御する一連のシステムが実現する。

システム同定の精度向上と自動化、対象振動数範囲や振動低減量の拡大、衝撃外乱や強制外乱に対する制御性能と安全性の向上などについての進展が今後の課題である。

第5章では、有限要素法などの詳細検討によらず、構造設計者が振動発生機器に伴う床振動を簡易に検討する手法を提案し、その検討事例をあげている。振動ふるいなどの機器が設置される建物において床振動を検討するには、振動源の加振力と伝搬経路や受振点の振動特性の把握が欠かせない。しかし、これらの機械メーカーから建物へ与えられる加振力のデータが提示されることは少なく、機側1m地点等の床上振動レベルが提示される方が多い。また、振動源から受振点までの距離が大きい場合、詳細な振動予測は技術的・経済的に困難である。

そこで本章では、振動源の加振力データまたは機側1m地点等の床上振動データが与えられた場合に、床構造のアクセルランス、振動の距離減衰式、独立基礎や床構造の振動増幅率などに検討を加え、手計算・表計算レベルで対象居室の床振動をおおまかに予測する手法を示した。また、この手法を振動問題の生じた建物における振動測定データにより検証している。

本章や第2、3章で示した環境振動の予測手法は、検討事例や測定事例が蓄積することにより、その有効性や実用性が高まるものと思われる。

第6章では、本研究における以上の成果を結論としてまとめている。

キーワード：環境振動，居住性能，床振動，振動予測，アクティブ制御

Summary

The demand for the higher habitability in a building is increasing. It is true for environmental vibration as well as heat, air, light and sound environments that have much to do with amenity. Although there is no concrete description about environmental vibration in the Building Standard Law, it may have greater importance than structural safety in daily life.

In "Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration" revised as one of the Architectural Institute of Japan Environmental Standard in 2004, designers are requested to set a specific design condition according to the demand of a client or resident and realize it. The guidelines give evaluation curves for floor vibration to some vibration sources and their backgrounds. They do not include the characteristics of oscillation source, propagation, duration and so on, though the latest research results are attached.

Therefore, in order to evaluate habitability, it is necessary to refer to data of an example whose conditions of vibration source and observation point are similar. Or you have to perform vibration measurement or prediction. Especially some prediction of vibration is indispensable for the evaluation in a design phase. It is required and important on the design of a building to predict the oscillating response in the main parts of the building. But the systematization of prediction methods has not been reached, as there is not enough accumulation of fruits of work. However, control of environmental vibration is performed in many cases at the design phase and accurate prediction methods are requested for an effective measure.

In these circumstances, new methods to predict or control floor vibration are examined in this research, aiming at being some help for structural design.

This paper consists of Chapter 1 to 6. Chapter 1 describes the background, purpose and positioning of this research. In Chapter 2 to 5, respective research results are presented. Chapter 6 summarizes the results in this research as a conclusion. The outline and result of each chapter are as follows.

In Chapter 2, firstly dynamic load factors for human activities are examined to compare with the past research results. They are considered characteristics of human forces that are common in a building. Secondly the floor response spectrum to an artificial force is illustrated after examination of prediction precision by both single degree of freedom models and finite element models comparing with measured data.

Thirdly a prediction method for floor vibrations from aerobics is proposed. Contrasting two similar buildings one of which had a vibration problem at the lounge adjoining to an aerobics studio, the cause of the problem was explained by the result of measurements and evaluation of habitability. A countermeasure based on simulation result settled the problem.

A study of how force is employed to the floor demonstrates that the floor vibration from aerobics with dozens of participants can be predicted accurately by the response to the force of around eight people in phase and multiplying it by the root of the number of participants divided by the number of people in phase. It is true on condition that the spans of floor consisting the aerobics studio are affected by global modes.

In Chapter 3, procedures for predicting the response of a steel-frame building subjected to traffic oscillation at the planning phase are investigated. Prior to this investigation the practicability of a prediction method with finite element models of a building and vibration input data at locations where columns will be set on the concrete base is verified. All the procedures can be digested as follows:

- 1) Simultaneous vibration measurement should be performed in (on the ground surface or the basement etc.) and out of (on the sidewalk etc.) a building site where traffic oscillation is likely to affect the habitability of the building. Each time the response becomes remarkably large during the measurement, the conditions (types and speeds of the vehicles, type of the ground, distance between the measurement points etc.) that may characterize the oscillation source and the propagation path are classified.
- 2) System identification is performed with the largest data that are considered as pseudo-stationary. Identified AR parameters and residual variances are categorized referring to the conditions classified in 1).
- 3) Operations of 1) and 2) are carried out at various sites in order to acquire statistically determined AR

parameters and residual variances. And also phase lags of traffic oscillation within the basement are investigated as well. As a result, the enforced motion input of a building under planning can be estimated from the data measured at out of the site plus the statistical AR parameters, residual variances and phase lags. Then the response of the building will be predicted with the finite element modeling and the estimated input.

In Chapter 4, in order to realize a system that reduces multi-modes of floor vibration and accompanying structure-borne sound by a single sensor and an actuator per unit span area, a method of active vibration control and a procedure to identify the control object are described. Then the good performance of the method and procedure is demonstrated with numerical simulations about a simply supported plate. Their usefulness has also been shown through experiments with a life-size floor structure. It is verified that the first three modes of vibration and structure-borne sound are reduced as designed by about 10 dB at the first mode and some 5 dB at the second and third modes. The method and procedure will lead to the active control system with automatic control design function for floor vibration and structure-borne sound if how to select the physically significant modes from the identified eigenvalues is improved.

In Chapter 5, a simple prediction procedure for floor vibration from oscillating equipment such as vibrating sieve is proposed. It is based on the examination of accelerance of the ground or floor structure, distance decay of oscillation through the ground or structure, amplification by the floor structure and so forth. In the case of vibration force from the equipment or vibration level nearby the equipment is known, this procedure can be applied to approximate estimation of vibration level at points of concern without a detailed analysis.

An example of the procedure applied to a building subjected to vibration problem is illustrated showing good agreement with measured data. Though the procedure needs more improvement, simple prediction of floor vibration by the procedure is expected in such a case that detailed analysis is difficult technically or economically.

In Chapter 6, conclusions of this research are presented summarizing the results mentioned above.