

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	鋼構造建築物における床振動環境改善技術の開発およびその設計手法の構築
Title(English)	
著者(和文)	松下仁士
Author(English)	Hitoshi Matsushita
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10485号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:横山 裕,時松 孝次,竹内 徹,三上 貴正,五十嵐 規矩夫
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10485号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

鋼構造建築物における床振動環境改善技術の開発
およびその設計手法の構築

平成 28 年度

東京工業大学 大学院理工学研究科 建築学専攻

松下仁士

目次

第1章 序論.....	P.1
1.1 研究の背景.....	P.3
1.2 研究の目的と範囲.....	P.5
1.3 既往の研究.....	P.6
1.3.1 振動制御技術の軽量化，省スペース化に関する研究.....	P.6
1.3.2 振動に対する感覚，評価に関する研究.....	P.7
1.4 本論文の構成.....	P.9
第2章 膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術の概要.....	P.13
2.1 はじめに.....	P.15
2.2 膜型圧電セラミックスの概要.....	P.16
2.3 膜型圧電セラミックスの基本特性.....	P.17
2.3.1 アクチュエータ特性.....	P.17
2.3.2 センサ特性.....	P.18
2.4 床振動制御技術のシステム構成および制御原理.....	P.22
2.5 まとめ.....	P.24
第3章 縮小架構模型を用いた床振動制御技術の有効性の確認.....	P.25
3.1 はじめに.....	P.27
3.2 梁架構模型を用いた鉛直振動制御実験.....	P.28
3.2.1 梁架構模型の概要.....	P.28
3.2.2 加力実験.....	P.28
3.2.2.1 静的加力実験.....	P.29
3.2.2.2 動的加力実験.....	P.29
3.2.3 鉛直振動検出実験.....	P.30
3.2.4 振動制御実験.....	P.30
3.2.4.1 制御系設計.....	P.31
3.2.4.2 実験結果および鉛直振動の制御効果の確認.....	P.32
3.3 柱梁架構模型を用いた鉛直，水平振動制御実験.....	P.38
3.3.1 柱梁架構模型の概要.....	P.38
3.3.2 加力実験.....	P.39
3.3.2.1 静的加力実験.....	P.39
3.3.2.2 動的加力実験.....	P.39
3.3.3 鉛直，水平振動検出実験.....	P.39
3.3.4 振動制御実験.....	P.41
3.3.4.1 制御系設計.....	P.41

3.3.4.2 実験結果および水平，鉛直振動の制御効果の確認.....	P.41
3.4 まとめ.....	P.50
第4章 実建築物床における振動制御効果の検証.....	P.51
4.1 はじめに.....	P.53
4.2 中規模スパン建築物床での検証.....	P.54
4.2.1 制御対象床の概要.....	P.54
4.2.2 制御対象床の振動特性.....	P.54
4.2.3 制振装置の設置および加力実験.....	P.54
4.2.4 制御系設計.....	P.55
4.2.5 振動制御実験と制御効果の検証.....	P.56
4.3 大規模スパン建築物床での検証.....	P.62
4.3.1 制御対象床の概要.....	P.62
4.3.2 制御対象床の振動特性.....	P.62
4.3.3 制振装置の設置および加力実験.....	P.63
4.3.4 制御系設計.....	P.64
4.3.5 振動制御実験と制御効果の検証.....	P.64
4.4 まとめ.....	P.71
第5章 床振動制御技術による制御効果の予測手法の構築.....	P.73
5.1 はじめに.....	P.75
5.2 振動制御効果の予測手法の概要.....	P.76
5.3 模擬床試験体を用いた予測手法の検証.....	P.78
5.3.1 模擬床試験体の概要.....	P.78
5.3.2 模擬床の振動特性.....	P.78
5.3.3 アクチュエータの配置方法の設定.....	P.78
5.3.4 アクチュエータの推力，変位量の予測解析.....	P.79
5.3.5 床剛性の予測解析と制御力の算定.....	P.80
5.3.6 アクチュエータによる床の加振特性の予測解析.....	P.80
5.3.7 振動制御効果の算出.....	P.81
5.3.8 振動制御実験と予測手法の検証.....	P.82
5.4 まとめ.....	P.90
第6章 種々の加振源により発生する床振動の居住性からみた評価方法の確立..	P.91
6.1 はじめに.....	P.93
6.2 検討方法.....	P.94
6.3 対象振動の選定.....	P.95
6.4 官能検査および心理学的尺度の構成.....	P.98

6.4.1	検査概要.....	P.98
6.4.1.1	構成する尺度および尺度構成手法.....	P.98
6.4.1.2	検査試料.....	P.98
6.4.1.3	検査員.....	P.98
6.4.1.4	姿勢.....	P.98
6.4.1.5	想定する床用途.....	P.98
6.4.2	検査経過，結果および心理学的尺度の構成.....	P.98
6.4.3	心理学的尺度相互の関係の検討.....	P.99
6.5	心理学的尺度と床振動の関係の検討.....	P.102
6.5.1	VAL と VL に関する検討.....	P.104
6.5.2	VL _{max} と VLI, VLT に関する検討.....	P.104
6.5.3	継続時間を求める際の参照値に関する検討.....	P.105
6.5.4	実効値処理時の T.C.に関する検討.....	P.105
6.6	評価方法の確立.....	P.109
6.7	まとめ.....	P.111
第7章	事後対策による振動環境の改善目標の提示.....	P.113
7.1	はじめに.....	P.115
7.2	検討方法.....	P.116
7.3	対象振動の選定.....	P.117
7.4	官能検査Ⅰ.....	P.118
7.4.1	検査概要.....	P.118
7.4.1.1	検査試料.....	P.118
7.4.1.2	検査員，姿勢，想定する床用途.....	P.118
7.4.2	検査経過.....	P.118
7.4.3	検査結果および考察.....	P.119
7.4.3.1	被暴露経験が無い場合の許容限度.....	P.119
7.4.3.2	被暴露経験が無い場合の許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の関係.....	P.119
7.5	官能検査Ⅱ.....	P.122
7.5.1	検査概要.....	P.122
7.5.1.1	対象振動.....	P.122
7.5.1.2	対策前の振動.....	P.122
7.5.1.3	検査試料.....	P.122
7.5.1.4	検査員，姿勢，想定する床用途.....	P.123
7.5.2	検査経過.....	P.123
7.5.3	検査結果および考察.....	P.123
7.5.3.1	対策前の振動暴露後の許容限度.....	P.123
7.5.3.2	対策前の振動 B 暴露後の許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量の関係.....	P.124

7.6	まとめ.....	P.128
第 8 章	振動制御技術および設計手法の実建築物への適用例.....	P.129
8.1	はじめに.....	P.131
8.2	対象建築物の概要.....	P.132
8.3	対象建築物の床振動環境.....	P.134
8.3.1	振動モード.....	P.134
8.3.2	歩行加振時の加速度振幅.....	P.134
8.4	振動制御技術を用いた振動環境の設計.....	P.138
8.4.1	改善目標の設定.....	P.138
8.4.2	振動制御効果の予測.....	P.138
8.5	制振装置の施工.....	P.147
8.6	振動制御効果の確認.....	P.152
8.7	まとめ.....	P.156
第 9 章	結論.....	P.157
参考文献		P.163
発表論文		P.167
謝辞		P.172

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究の背景

床振動は、住居の居室や事務所の執務室などにおける建築物使用者の不快感や作業効率の低下などに直結する重要な環境要因の一つである。特に近年では、建材や構法の発達による長大スパン建築物の増加や、都市の高密度化と建築物用途の多様化などを背景として、歩行などの人間の動作や設備機器の稼働、建築物周辺の交通など、建築物内外の様々な振動源により多様な性状を有した床振動が生じやすい傾向にある。

建築物の設計者は、計画する建築物においてこのような床振動による問題が発生しないよう、設計段階で適切な対策を講じる必要がある。しかし、建築物の長寿命化を背景として、供用期間中の用途変更や居住者の入れ替わりによる振動に対する許容値の変化、あるいは鉄道や道路交通、近隣における工事などの周辺環境の変化による加振源の変化など、設計時には予測困難な要因により、供用中の既存建築物において床振動問題が顕在化し、事後対策を必要とする事例が増えてきている。

従来の床振動対策には、柱の増設や梁の補強などにより床の剛性を向上させる構造補強や、動吸振器などの制振装置によるものがあるが、いずれも大がかりな工事や大きな設置スペース、大幅な積載荷重の増加が発生するため、既存建築物への適用は困難となる場合が多い。したがって、供用開始後の建築物においても容易に適用が可能な振動対策技術の開発が望まれている。

一方近年、薄膜状や繊維状といった小型で柔軟性を有し、さらにはセンサとしてもアクチュエータとしても用いることができる新しい機能性材料の開発が進んでいる。これらの機能性材料は、様々な形状の構造体に直接貼付あるいは埋め込むことができるため、構造体と高度に一体化させることが可能である。このような機能性材料を利用することにより、従来の制振装置と比較して極めて軽量かつ省スペースで、供用中の既存建築物にも比較的容易に適用できる振動対策技術が実現可能であると考えられる。

振動対策技術を床振動問題が発生した建築物に効率よく適用するためには、種々の加振源により生じる床振動に対して、事後対策時の設計目標を合理的に設定できる枠組みが必要となる。しかし現状では、様々な性状を有した振動に対する評価や、振動問題の事後対

策に関する指針などは示されておらず、事後における振動対策の定量的な評価ができないために、対策目標値の設定や適正なコストの見極めが困難となっており、発注者、請負者間のトラブルや、振動問題の長期化などの問題が生じる一因ともなっている。

1.2 研究の目的と範囲

本研究は、建築物床の振動問題に対する事後対策に有効な振動制御技術を開発するとともに、種々の加振源により発生する床振動の居住性からみた評価方法を確立し、これに基づいた床振動環境の改善目標の設定手法を提示することを目的とする。これにより、供用中の建築物において床振動問題が発生した際に、実情に即した改善目標の設定、これに応じた振動制御技術の設計、さらに対策後の振動評価と、一貫した対応が可能となり、これまで困難であった供用中の建築物における床振動問題の解決の一助になるものとする。

ここで、事後対策に有効な振動制御技術の開発については、鉄筋コンクリート造建築物の床と比較して剛性や減衰が小さく、振動問題が発生しやすい傾向にある鋼構造建築物の床振動を対象とする。

また、本研究で対象とする振動は、単一の加振源により生じる床の鉛直振動とし、複数の加振源による複合的な振動や、地震や風、高架橋における交通などによる水平振動や、鉛直と水平が複合された振動に関する検討は、本研究以降の課題とする。ただし、第3章で述べる架構模型を用いた基礎的検討においては、提案する振動制御手法の将来的な発展の可能性を踏まえ、鉛直方向に加え水平方向の振動制御実験も実施することとした。

1.3 既往の研究

1.3.1 振動制御技術の軽量化，省スペース化に関する研究

近年、薄膜状や繊維状といった形状面での特徴や、センサとしてもアクチュエータとしても用いることができるなどの機能面での特徴を有した“機能性材料”と呼ばれる材料の開発が進んでいる。

特に航空・宇宙工学、機械工学の分野において、このような機能性材料を応用した軽量、省スペースな制振技術に関する研究が多くなされている^{例えば 1), 2)}。欧州では、機能性材料と構造物を一体化させることにより実現する制御概念は“アダプトロニクス”と呼ばれ、近年盛んに研究が行われている³⁾。日本国内では、竹下ら⁴⁾や安達ら⁵⁾が、片持ち平板に薄板状の圧電セラミックスを貼付し、その圧電効果により機械的な振動エネルギーを電気エネルギーに変換し、これを熱エネルギーとして消費することで付加減衰を与える“圧電ダンパ”についてその有効性を示している。加えて、圧電セラミックスをアクチュエータとして用いて、別途平板の先端に取付けた加速度センサの信号をもとにしたアクティブ振動制御について解析，実験の両面から検討を行っている⁶⁾。熊谷ら⁷⁾は、アーチ構造物を模擬した薄板模型に薄膜状の圧電セラミックスを貼付し、模型外部に設置したレーザ変位計から得られる薄板の変位信号を基にアクティブ振動制御を行う実験を実施している。これらはいずれも制御対象である構造物に機能性材料を直接貼付することで構造物と制振装置を一体化し、アクティブ振動制御を実現しているものである。しかし、これらはいずれも、平板や膜型構造など、建築構造物と比較して極めて軽量かつ柔軟な構造物を対象とした研究である。

建築構造物と制振装置を一体化して振動を制御する技術については、“スマート構造”に関する研究として、これまで多くの検討がなされてきた。鎌田ら^{8), 9)}は、積層型ピエゾアクチュエータを実大の鉄骨ラーメン構造物の柱脚部に配置し駆動することで、柱に曲げモーメントあるいは軸力を導入し、構造物の曲げ変形やせん断変形による振動を制御する実験を行い、その効果を実証している。嶋崎ら^{10), 11)}、Hora ら¹²⁾は、積層型のピエゾアクチュエータを構造物の梁や柱に設置して、微振動をアクティブに制御することを試みている。安藤ら¹³⁾は、鉄骨梁の中央部に積層型のピエゾアクチュエータを組み込み、曲げモーメントを制御することにより梁の鉛直振動を制御する検討を行っている。これらは、建築物と制振装置の一体化による軽量、省スペースな制振技術の実現を検討した例であるが、い

ずれも既存の建築物に適用することを目的としたものではなく、供用開始後の建築物の床振動問題への事後対策として用いることができる技術とはなっていない。

既存の床振動の事後対策を目的とした技術には、従来技術を応用した小型の動吸振器（チューンド・マス・ダンパーやアクティブ・マスダンパー）が挙げられる。構造スラブと二重床の間に収納でき、設置工事も容易であるため、供用開始後の建築物の床振動問題の事後対策手法として実建築物に適用されている。しかし、建築物の床が二重床である必要があること、合計で数百 kg から 1 トン程度の積載荷重の増加を伴うことなどから、適用が困難となる場合がある。

本研究は、上述の研究や開発事例を踏まえ、近年開発された機能性材料を応用した軽量かつ省スペースで既存建築物への適用が容易な制振装置によるアクティブ床振動制御技術の開発を目的の一つとする。

1.3.2 振動に対する感覚，評価に関する研究

人間の振動に対する感覚，評価に関する研究は国内外で多数行われているが、その多くは主に正弦波を対象としたものとなっている。我が国においても、1991年に居住性能評価指針が制定され、その後性能設計の必要性の高まりを受けて2004年に改定¹⁴⁾が行われているが、この指針もまた、主に正弦波を対象とした複数の研究成果に基づいたものとなっている。しかし、実際の床で発生する振動の多くは、複数の振動数成分からなる振動や、振幅の時間変化を有する振動であり、これらの振動への上記指針の適用については検討の余地が残されている。

一方、筆者らの研究グループは、複数の振動数成分からなり、かつ振幅の時間変化を有する歩行振動を対象とした研究を行い、知見を蓄積してきた。その主要な成果として、小野，横山ら¹⁵⁾⁻²³⁾は、1歩の着地により発生する床振動に対する人間の感覚，評価には、着地時の振動の大きさと、発生した振動が一定振幅に減衰するまでの時間の2つの要因が大きく影響することを明らかにしている。また、横山ら²⁴⁾⁻²⁶⁾は、RC造，S造建築物の床や木造大スパン床における複数歩連続した歩行時に発生する振動の性能値について検討を行い、人間の感覚，評価には、変位振幅あるいは加速度のレベルといった振動の大きさに関わる要因と、歩数あるいはレベルの時間変化といった振動の継続時間に関わる要因の2つが大きく影響することを明らかにしている。さらに井上ら^{27),28)}は、RC造，S造，木造建築物における歩行振動を対象とした検討を行い、気になり具合と対応する性能値として、時

定数 10ms の振動レベルの最大値に振動の継続時間 T の影響を $1/4$ 乗して加算した

$VL_{max_{10ms}} + 20\log T^{1/4}$ を提案している。

次に、道路交通振動を対象とした研究として、横山ら²⁹⁾は、時定数 630ms の振動レベルが、振動数や振幅の時間変化に対する人間の感覚上の特性に基づいて補正された値とみなすことができると述べた上で、その最大値が道路交通振動の感覚上の大きさと良い対応を示すことを明らかにしている。また、松本ら^{30),31)}は、建築物外部の振動源による建築物振動を対象とした検討を行い、振動知覚には積分的なメカニズムが働いている可能性があることを指摘し、一定時間の振動量の積分量に着目した評価方法の例として、加速度の四乗平均四乗根値が振動知覚の傾向を比較的よく表すことを示している。

さらに井上、富田ら^{32),33)}は、ゴムボールの落下を利用した床の衝撃振動応答に対する気になる度合、不快度合が、等価振動レベルに積分時間項を加算した $VLeq_{(59dB)} + 20\log_{10}(T^{1/4})$ とよく対応することを示している。

以上のように、正弦波以外の振動については、これまでに加振源や振動の性状ごとに検討がなされ、人間の振動に対する感覚、評価には振幅の大きさに加え、振幅の時間変化の要因が影響を及ぼすことが示されている。本研究は、これらの研究成果を踏まえた上で、種々の加振源による様々な性状を有した床振動を対象とした検討を行い、これらを共通に評価できる手法を提示することを目的の一つとする。

また、床振動の許容可否に関する研究例としては、横山³⁴⁾の研究が挙げられる。横山は、多数の実在木造、軽量鉄骨造床を対象として、居住後の苦情発生の有無からみた歩行振動の評価方法について検討し、振動の測定条件や苦情発生の境界値を提示している。

以上の研究例を含め、既往の研究成果はいずれも初めて暴露された振動に対する感覚、評価を対象としている。これに対し、被暴露経験がある場合の感覚、評価に関する研究はほとんどなされていない。本研究は、先述した種々の加振源による振動の評価手法を基に、被暴露経験が許容可否判断に与える影響について検討し、事後対策による床振動環境の改善目標を提示することを目的の一つとする。

1.4 本論文の構成

本論文は、供用中の建築物の床振動問題に適用可能な床振動制御技術の開発について、新しく提案する機能性材料を用いた振動制御手法の原理、振動制御効果を確認した結果を述べるとともに、制御効果の予測手法を提示している。また、官能検査手法に基づいて検討した種々の加振源により発生する床振動の居住性からみた評価方法と、事後対策による床振動環境の改善目標の設定手法を提示している。さらに、開発、提示した床振動制御技術と床振動環境の改善目標の設定手法を、供用中の実建築物に適用した事例について述べる。図 1.4.1 に、本論文の構成を示すとともに、以下に本論文を構成する第 1 章から第 9 章の各章の概要を述べる。

第 1 章 序論

本章では、様々な性状を有する床振動による問題が供用中の建築物で発生する事例が増えている背景と、従来の床振動対策技術が供用中の建築物に適用困難である現状とその理由について述べるとともに、様々な性状を有する床振動および対策後の床振動の評価に関する指針が整備されていない現状について触れ、事後対策に有効な新しい床振動制御技術の開発と、種々の加振源により生じる床振動の評価手法の確立および床振動環境の改善目標の設定手法を提示する本研究の目的と意義を示す。また、関連する既往の研究について述べる。

第 2 章 膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術の概要

本章では、軽量、小型の機能性材料である膜型圧電セラミックスの概要を示すとともに、その基本特性を実験的に検証した結果について述べ、供用中の建築物に適用可能な振動対策技術として新しく提案する膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術のシステム構成およびその振動制御原理について述べる。

第 3 章 縮小架構模型を用いた床振動制御技術の有効性の確認

本章では、第 2 章で提案した床振動制御技術の有効性を確認することを目的として行った、2 種の縮小架構模型を用いた振動制御実験の結果を述べる。はじめに、梁架構模型を用いた梁の鉛直振動制御実験の結果を述べ、続いて柱梁架構模型を用いたラーメン構造の

水平振動制御実験の結果について述べる。

第4章 実建築物床における振動制御効果の検証

本章では、スパン長の異なる2種の実建築物を対象として実施した、本振動制御技術の効果検証実験の経緯、結果について述べる。膜型圧電セラミックスを用いたアクチュエータを駆動することにより、制御対象とする振動モードを励起可能であることを確認した上で、起振器や歩行などにより生じる実状に即した床振動を制御する実験を行い、加速度振幅の低減効果を確認する。また、実建築物への適用にあたり、アクチュエータの設置方法による制御力増大の可能性を検証する。

第5章 床振動制御技術による制御効果の予測手法の構築

本章では、開発した床振動制御技術を実建築物に対して設計にあたり必要となる、振動制御効果の予測手法について述べる。膜型圧電セラミックスを用いたアクチュエータが制御対象である建築物床に作用させることができる制御力の大きさを有限要素法解析を用いて算出し、フィードバック型の振動制御理論に基づいた振動制御効果を予測する手法を提示する。また、製作した模擬床試験体を例として、提示した手法による振動制御効果の予測結果と実験結果を照合し、その妥当性を検証する。

第6章 種々の加振源により発生する床振動の居住性からみた評価方法の確立

本章では、種々の加振源により発生する床振動の居住性からみた評価方法を確立すべく、歩行などの人間の動作や周辺交通、設備の稼働などによる様々な特徴を有した床振動を検査試料として官能検査を実施し、加速度振幅の大きさや時間変化の要因が居住者の床振動に対する認知大きさ度合、気になり具合に与える影響について考察し、これらの心理学的尺度と対応の良い物理量を検討した経緯、結果について述べる。

第7章 事後対策による振動環境の改善目標の提示

本章では、床振動問題に対する事後対策を実施する際の改善目標を提示することを目的として、官能検査により、予め大きな振動に暴露された経験が改善後の振動の許容可否判断に与える影響を考察した経緯、結果を述べる。また、振動の改善量と対策後の振動に対する許容率の関係について検討した結果を述べる。

第8章 実建築物を対象とした振動制御技術および設計手法の適用例

本章では、前章までに提示した振動制御技術およびその設計手法に基づき、供用中の実建築物を対象に、床振動の改善目標の設定、床振動制御技術による制御効果の予測を行い、実際に制振装置を施工することを通じて、事後対策による床振動環境改善技術としての実用性を検証した経緯、結果について述べる。

第9章 結論

本章では、本研究の結論を述べる。

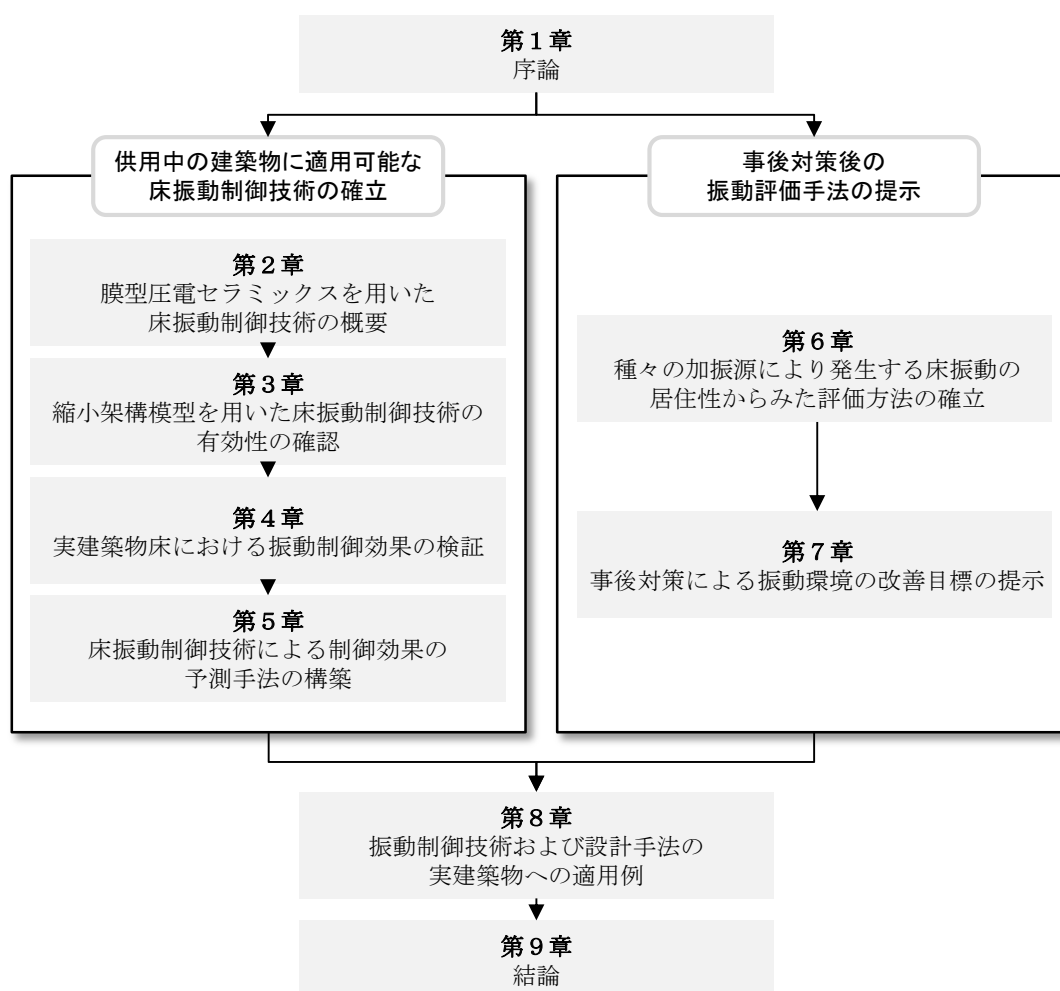


図 1.4.1 論文の構成

第 2 章

膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術の概要

第2章 膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術の概要

2.1 はじめに

第1章で述べた通り、従来の床振動対策として、柱の増設や梁の補強などにより床の剛性を向上させる構造補強や、動吸振器などの制振装置によるものが挙げられるが、いずれも大がかりな工事や大きな設置スペース，大幅な積載荷重の増加が発生するため、供用中の既存建築物への適用は困難となる場合が多い。したがって、供用開始後の建築物に対しても容易に適用が可能な振動対策技術の開発が望まれている。

一方近年，薄膜状や繊維状といったような小型で柔軟性を有し、さらにはセンサとしてもアクチュエータとしても用いることができる機能性材料と呼ばれる新しい材料の開発が進んでいる。これらの機能性材料は、様々な形状の構造体に直接貼付あるいは埋め込むことができるため、従来の制振装置と比較して構造体との一体化を飛躍的に向上させることが可能であり、これらを応用した制振装置の大幅な省スペース化，軽量化の実現が期待される。

本章では、軽量，小型の機能性材料の一つである膜型圧電セラミックスを取り上げ、その概要を示すとともに、アクチュエータの基本的な特性として推力や応答速度を実験的に検証した結果について述べ、供用中の建築物に適用可能な振動対策技術として膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術を提案し、そのシステム構成および振動制御原理について述べる。

2.2 膜型圧電セラミックスの概要

図 2.2.1 および表 2.2.1 に、本研究で用いた膜型圧電セラミックスの概要と主な物理特性を示す。本検討に用いた膜型圧電セラミックスは Smart Material 社製 M8557-P1 であり、直径数 100 μ m の繊維状に成形された圧電セラミックスを面的に並べた層、これらを結合するためのエポキシ接着剤の層、正極と負極を圧電セラミックスに対して垂直方向に交互に並べた電極をポリイミド樹脂にプリントした層で構成されている。図 2.2.2 に示す専用アンプから出力される電圧を電極に印加することで圧電セラミックスに圧電効果が生じ、図に示す矢印方向に伸縮する。また一方で、外力を加えて矢印方向に伸縮させることで電極間に電位差が生じる。すなわち、薄く柔らかい形状、材料で様々な制御対象との一体化が可能な、センサとアクチュエータの両方の機能を有する材料である。

また、面外変形に自由に湾曲させることができるという特徴から、従来の主要な圧電セラミックスの形態であった積層タイプのものと比較してせん断や曲げ応力と比較して耐久性が高いため、種々の外乱によって多様な応力が生じる建築物の構造体への適用も可能であると考えられる。

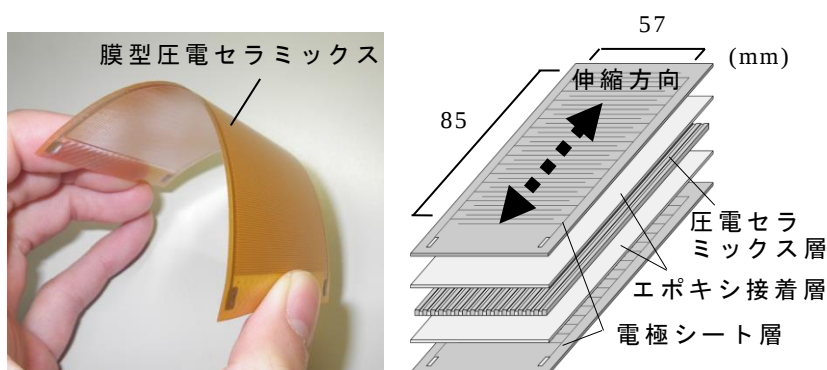


図 2.2.1 膜型圧電セラミックスの概要

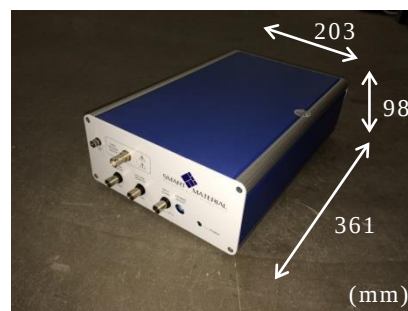


図 2.2.2 専用アンプの概要

表 2.2.1 膜型圧電セラミックスの物理的特性

全体サイズ	103×64mm
駆動部範囲	85×57mm
弾性係数（長さ, 幅方向）	3.03×10 ⁴ (N/mm ²)
弾性係数（厚さ方向）	1.59×10 ⁴ (N/mm ²)
圧電定数	1.20ppm/V
静電容量	9.30nF
許容印加電圧	-500～+1,500(V)

2.3 膜型圧電セラミックスの基本特性

膜型圧電セラミックスの基本特性として、アクチュエータ特性とセンサ特性を把握する試験を行った。以下に試験の概要および結果を示す。

2.3.1 アクチュエータ特性

アクチュエータ特性として、推力と振幅の振動数依存性および応答速度を確認する試験を行った。図 2.3.1 に試験装置の概要を示す。試験装置は、膜型圧電セラミックスを両面に貼付した鋼板とこれを固定する治具およびリニアガイドから構成される。膜型圧電セラミックスと鋼板との間にはあらかじめ歪ゲージを貼付し、リニアガイド側の固定部には加速度センサを設置している。膜型圧電セラミックスを駆動する際には発信器から出力される電圧信号を専用アンプにて 200 倍に増幅し、膜型圧電セラミックスへ印加する。膜型圧電セラミックスへ印加する電圧は 0V から徐々に変化させ、許容印加電圧の最大値である 1,500V を経て許容印加電圧の最小値である -500V に達したのちに再び 0V に戻すサイクルを 2 度繰り返した。使用したリニアガイドの動摩擦係数は 0.004～0.006 と極めて小さく、摩擦が試験に及ぼす影響は無視できるものと考えた。推力は、膜型圧電セラミックスに電圧を印加した際の鋼板の歪量と断面積(75mm^2)およびヤング係数($2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)から算出した。鋼板の歪量は、鋼板両面に貼付した 2 つの歪ゲージより得られた値の平均値とした。図 2.3.2 に、膜型圧電セラミックスへの印加電圧と算出された膜型圧電セラミックス一枚あたりの推力の関係を示す。図より、推力は印加電圧と概ね線形の関係にあり、最大圧縮力から最大引張力までの差は約 930N(P-P)であることがわかる。

続いて、発信器から出力される電圧信号に対する加速度センサにて得られる応答加速度の伝達関数を計測し、振幅倍率より推力の振動数依存性を、位相差より応答時間を確認した。電圧信号は振幅が一定で振動数が 1～100Hz のスイープ信号とした。図 2.3.3 に、得られた伝達関数の振幅倍率および位相差を示す。図中の破線は、得られた伝達関数を 2 階積分し、電圧信号に対する応答変位の伝達関数に換算したものである。図より、膜型圧電セラミックスの応答は電圧信号に対して変位振幅がほぼ一定となり、少なくとも 100Hz までは平坦な特性であることがわかる。また、振動数が大きくなるに従って位相が遅れ、100Hz において電圧信号に対する応答変位の位相遅れは約 45° となった。この結果より、用いた膜型圧電セラミックスと専用アンプによるアクチュエータの応答時間は

$1/100 \times 45/360 = 0.00125\text{s}$ であり、本検討で対象とする数十 Hz 程度までの梁や床の振動制御に十分適用可能であることが確認された。

2.3.2 センサ特性

図 2.3.1 に示す装置を用いて、膜型圧電セラミックスのセンサ特性を確認する実験を行った。鋼板の両面に貼付した膜型圧電セラミックスの一方に電圧を印加して駆動し、他方の膜型圧電セラミックスより得られる電圧信号を計測した。同時にリニアガイド側固定部に取り付けた加速度センサより得られる加速度信号も計測した。

図 2.2.1 に示す伸縮方向のみの変形を考えた場合、膜型圧電セラミックスの機械的、電気的特性は以下に示す圧電方程式で表される。

$$D = \varepsilon^T E + d_{31} T \quad \cdots (1.1)$$

$$\varepsilon = d_{31} E + s^E T \quad \cdots (1.2)$$

ここで、

D : 電束密度 (C/m^2)

E : 電場 (V/m)

T : 応力 (N/m^2)

ε : 歪

ε^T : 誘電率 (C/Vm) (ただし $T = \text{const.}$)

d_{31} : 圧電歪定数 (C/N)

s^E : 弾性コンプライアンス (m^2/N) (ただし $E = \text{const.}$)

(1.1)式の両辺に膜型圧電セラミックスの断面積を乗じることにより、膜型圧電セラミックスに外力を与えた際に発生する電荷量が得られる。ただし膜型圧電セラミックスには外部から電圧を印加しないものとして電場 $E = 0$ とおく。

$$D \cdot A = (\varepsilon^T E + d_{31} T) \cdot A$$

$$\Leftrightarrow Q = d_{31} T \cdot A = d_{31} F \quad \cdots (1.3)$$

ここで、

A : 膜型圧電セラミックスの断面積 (m^2)

Q : 電荷量 (C)

F : 膜型圧電セラミックスの伸縮方向に作用する外力 (N)

また膜型圧電セラミックスに外力を与えた際に発生する電荷量は、膜型圧電セラミックスに接続する計測器に流れる電流および計測器の入力インピーダンス、計測器にて計測される電圧を用いて、以下のように表わされる。

$$Q = \int_0^{\infty} I dt = \int_0^{\infty} \frac{V}{Z} dt \quad \cdots (1.4)$$

ここで、

I : 計測器に流れる電流(A)

Z : 計測器の入力インピーダンス(Ω)

V : 計測器にて計測される電圧(V)

(1.3)式と(1.4)式より、下式が得られる。

$$V = d_{31}Z \frac{dF}{dt} \quad \cdots (1.5)$$

(1.5)式より、計測される電圧信号は膜型圧電セラミックスに加えられる外力の時間微分、すなわち膜型圧電セラミックスの変形速度に比例することがわかる。

図 2.3.4 に、リニアガイド側固定部の加速度計にて得られる加速度信号に対する、センサ用膜型圧電セラミックスから得られる出力電圧信号の振幅倍率および位相差の関係を示す。図中の破線は、加速度信号を 1 階積分し速度としたものに対するセンサ用膜型圧電セラミックスの出力電圧信号の関係を示している。図より、上述の通り、膜型圧電セラミックスをセンサとして用いた場合の電圧信号は膜型圧電セラミックスの変形速度に依存しており、少なくとも 100Hz まではほぼ位相遅れなく応答することが確認された。

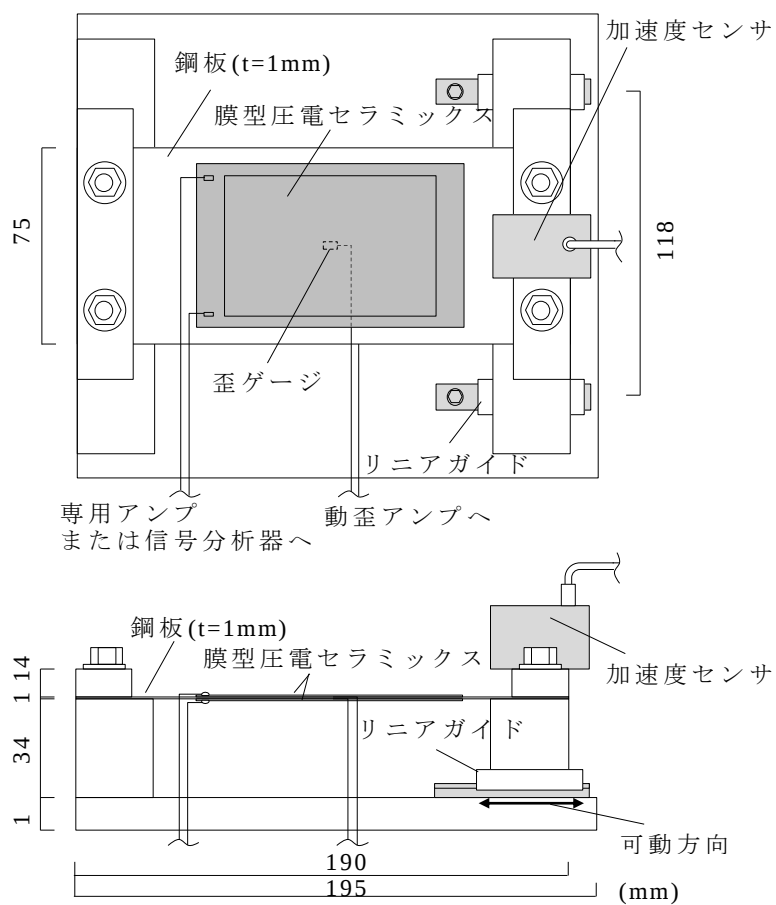


図 2.3.1 膜型圧電セラミックスの基本特性試験装置

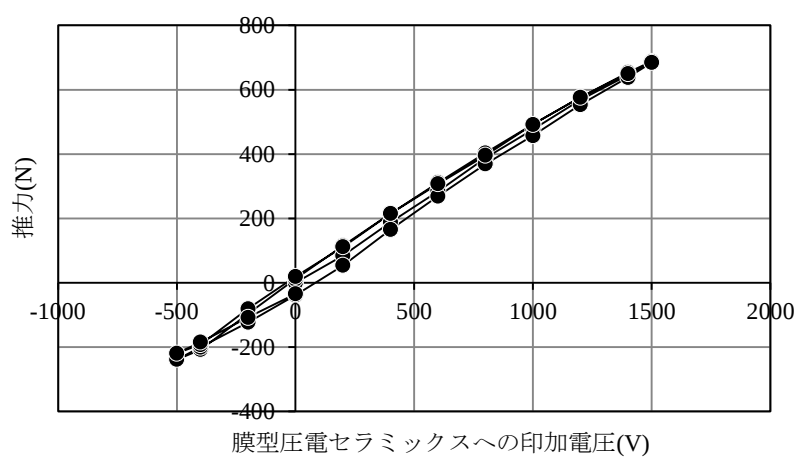


図 2.3.2 膜型圧電セラミックスの推力

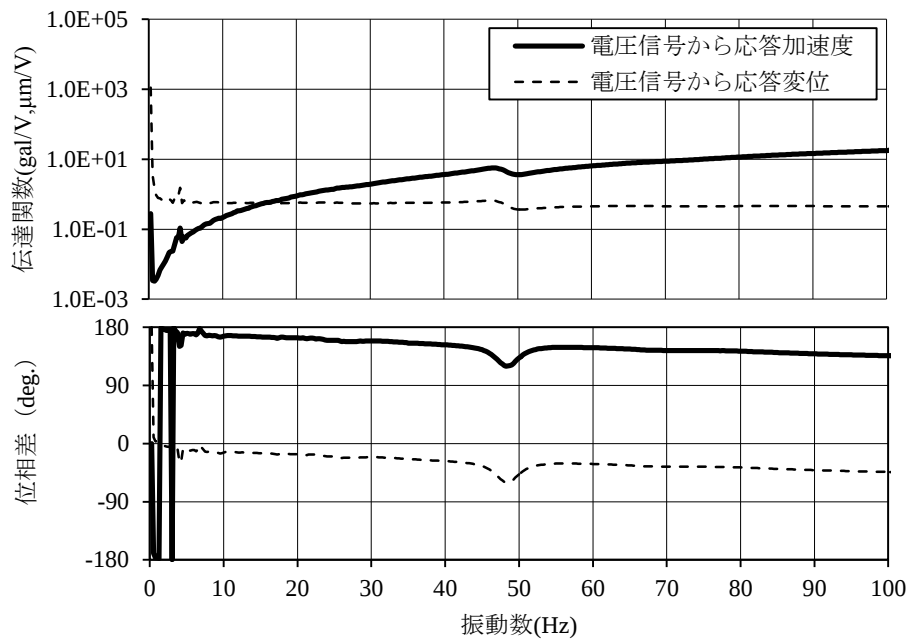


図 2.3.3 膜型圧電セラミックスへの入力信号に対する応答特性

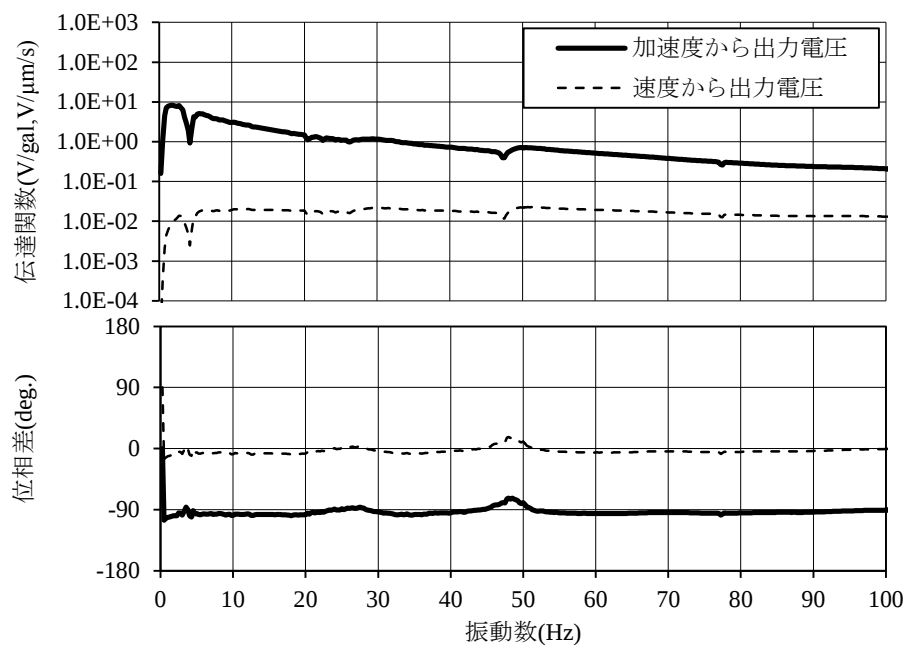


図 2.3.4 リニアガイド側固定部の加速度に対する膜型圧電セラミックスの電圧出力特性

2.4 床振動制御技術のシステム構成および制御原理

2.2 節および 2.3 節に述べた膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術として、以下に示す手法を提案する。図 2.4.1 に、本技術の概要を示す。膜型圧電セラミックスを鋼板の両面に貼付し、これを制御対象の床を支える鉄骨梁両端部の下フランジと、これらの梁を固定する大梁あるいは柱をまたぐように配置する。

膜型圧電セラミックスに電圧を印加すると、膜型圧電セラミックスの伸縮挙動により梁接合部を中心とした曲げモーメントが梁端部に作用する。梁両端部の膜型圧電セラミックスを同位相で伸縮させることで、梁端部に互いに逆方向周りの曲げモーメントが作用し、床および梁を鉛直方向に湾曲させる。この力を床の鉛直振動と逆位相で作用させることにより、床の鉛直振動を低減させることができる。また、図 2.4.2 に示すように、梁両端部の膜型圧電セラミックスを逆位相で伸縮させることで、梁端部に同方向周りの曲げモーメントが作用し、柱梁架構を水平方向に変形させる。この力を柱梁架構の水平振動と逆位相で作用させることにより、柱梁架構の水平振動を低減させることができる。

制御対象とする振動のセンシングについては、加速度センサを用いるのが最も一般的であるが、膜型圧電セラミックスを振動検出器として用いることができる。床や架構が鉛直あるいは水平方向に振動する際、梁端部に配置した膜型圧電セラミックスには伸縮方向のひずみが生じる。この時に膜型圧電セラミックスから発生する電圧信号を検出することにより、鉛直あるいは水平方向の振動をセンシングすることができる。あるいは、床の鉛直振動の場合は梁中央の下フランジ表面、架構の水平振動の場合は柱側面などの、各振動モードに応じて曲率が大きくなる箇所に膜型圧電セラミックスを直接貼付することでも、ひずみにより発生する電圧信号から振動をセンシングすることができる。

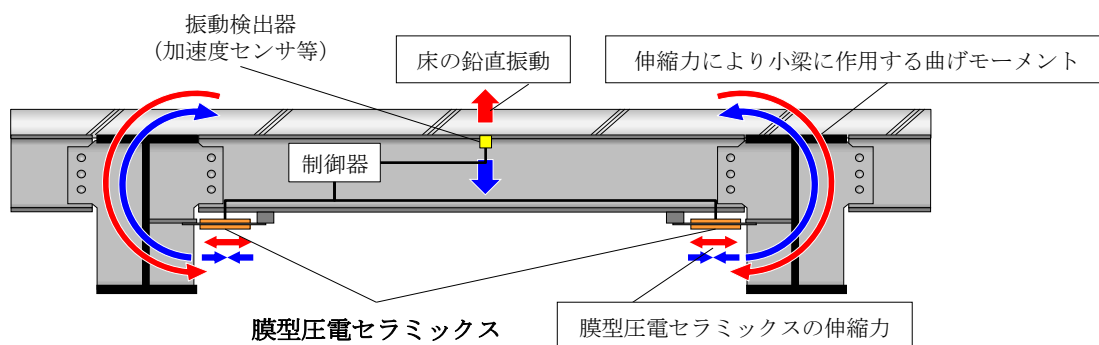


図 2.4.1 膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術の概要

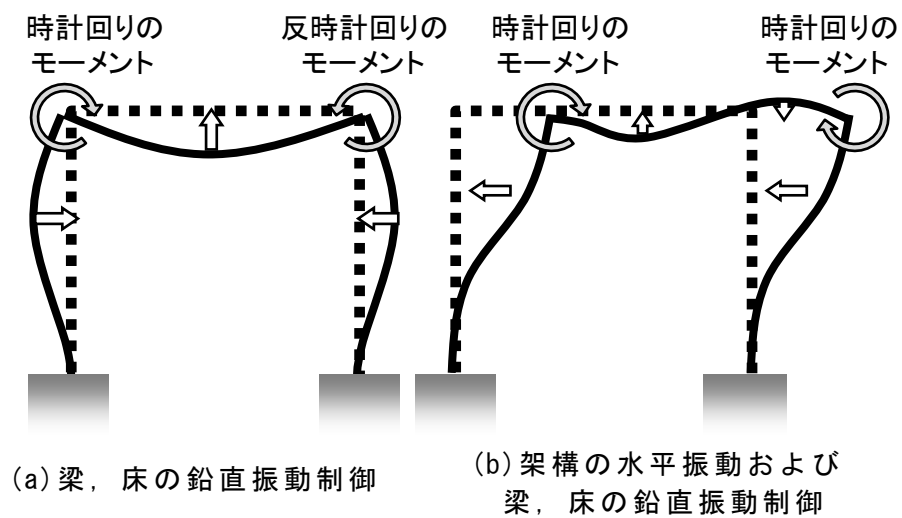


図 2.4.2 曲げモーメントの作用方向の違いによる柱梁架構の振動制御手法

2.5 まとめ

本章では、軽量、小型でアクチュエータおよびセンサとして用いることができる機能性材料である膜型圧電セラミックスの概要を示し、アクチュエータ特性およびセンサ特性を把握する試験を行った。また、膜型圧電セラミックスを用いた床の鉛直振動あるいは柱梁架構の水平振動の制御手法を提案し、その制御原理について述べた。本章での検討の結果得られた結論は、以下の通りである。

- ・ 実験的検討により、膜型圧電セラミックスのアクチュエータ特性の一つである推力は、膜型圧電セラミックス 1 枚あたり約 930N(P-P)であることを示した。
- ・ 膜型圧電セラミックスの応答変位は入力電圧に比例し、100Hz までは平坦な特性を有していることを示した。
- ・ 膜型圧電セラミックス専用アンプも含めたアクチュエータとしての応答時間は、約 0.00125sec であり、本検討で対象とする数十 Hz 程度までの梁や床の振動制御に十分適用可能であることを示した。
- ・ 膜型圧電セラミックスを振動センサとして用いた場合、計測される電圧信号は膜型圧電セラミックスの変形速度に比例することを理論的に導出し、実験にてこれを確認した。
- ・ 膜型圧電セラミックスを振動センサとして用いた場合、少なくとも 100Hz まではほぼ位相遅れなく応答することを示した。

以降、本章で得られた知見に基づき、提案した振動制御技術の有効性を検証する。

第 3 章

縮小架構模型を用いた床振動制御技術の有効性の確認

第3章 縮小架構模型を用いた床振動制御技術の有効性の確認

3.1 はじめに

第2章では、膜型圧電セラミックスの基本的なアクチュエータ特性，センサ特性を確認した上で、これ応用した梁，床および柱梁架構の振動制御手法を提案し、その制御原理について述べた。本章では、提案した振動制御手法が原理的な有効性を確認することを目的として行った、縮小架構模型を用いた振動制御実験の経緯，結果について述べる。縮小架構模型は、鉛直振動を制御対象とした梁架構模型と、鉛直に加え水平振動も制御対象とした柱梁架構模型の2種とした。いずれの架構模型を用いた制御実験についても、はじめに、膜型圧電セラミックスを用いたアクチュエータを駆動して架構を加振し、制御対象とする振動モードを励起可能であるか、また、膜型圧電セラミックスを振動センサとしてその振動モードを検出可能であるかを検証した。鉛直，水平振動の同時制御の際には、制御対象とする振動モードに対する、センサ用膜型圧電セラミックスの最適な配置方法についても検討した。以上の検討を行ったうえで、最後に、古典制御理論に基づいたフィードバック型の制御手法を用いて架構の振動制御実験を行い、提案手法による振動低減効果を確認した。

3.2 梁架構模型を用いた鉛直振動制御実験

3.2.1 梁架構模型の概要

図 3.2.1 に、鉛直振動制御実験を実施するにあたり製作した梁架構模型の概要を示す。梁部材は、長さ 3,000mm で断面形状は H-100×50×5×7 であり、梁両端部は鉄骨柱(□-250×250×4)に取り付けたガセットプレートとウェブ部分を、高力ボルト(F8T, M12×4)と添接鋼板(90×74mm, t=3.2)を用いた 2 面摩擦接合にて固定している。梁上には、スラブの重量を模擬するため約 200kg/m の重錘を載荷した。梁の中央部には外乱振動を発生させるための起振器を設置している。梁架構模型の規模は実際の建築物におけるスパンの 1/2～1/3 程度を想定し、これに合わせて梁の断面やスラブ重量を模擬した重錘の大きさを設定している。

梁両端部の下フランジ部分を約 120mm に渡り切り欠き、図 2.2.1 に示す膜型圧電セラミックスを両面に貼付した厚さ 1mm の鋼板(以降、鋼板等の平板に膜型圧電セラミックスを貼付し伸縮機能を持たせたものを総じて“アクチュエータ”と記す)を、ボルト接合にて設置した(図 3.2.1 (b) (c) 参照)。ここで、鋼板と下フランジ部分とのボルト接合を行う際には、予めアクチュエータに+1,500V を印加し鋼板に伸長方向の歪を与え、鋼板と膜型圧電セラミックスが常に収縮方向すなわち梁の下フランジを引っ張る方向に力を伝達するように配慮した。これは、アクチュエータへの印加電圧が 0～1,500V の間では、アクチュエータが伸長するため、梁の下フランジと固定されている鋼板に面内方向の圧縮力が発生し、面外座屈により梁に有効に制御力を伝達できないことが懸念されたためである。

なお、制御力が不足した場合を想定して、アクチュエータは鋼板の両面に膜型圧電セラミックスを 1 層ずつ貼付したものの他に、2 層ずつ貼付したもの、3 層ずつ貼付したものも用意し、膜型圧電セラミックスの複層化による制御力の増強の検討も行うこととした。

以上の梁架構模型の一次固有振動数および減衰比を測定した結果、それぞれ 10.6Hz, 1.1%であった。

3.2.2 加力実験

本技術の振動制御原理は、制御対象の振動を相殺する逆位相の力を作用させて振動を低減させるものであることから、アクチュエータにより加力することで、制御対象をどの程度変形あるいは振動させることができるかは、制御力の大きさを把握する上で重要な検討

項目である。そこで、3.2.1 で述べた梁架構模型を用いて、アクチュエータを駆動して梁架構に加力した際の、梁架構の変形あるいは振動を測定する実験を行った。

3.2.2.1 静的加力実験

図 3.2.2 に、アクチュエータに DC 電圧を印加し、梁に静的加力を行った際の梁中央部における鉛直変位の実測値を示す。鉛直変位は、梁中央部の下方から下フランジ下面に非接触型レーザ変位計を照射することで計測した。正の電圧を印加しアクチュエータを伸長させることで梁中央部が鉛直上方向に変位し、負の電圧を印加し膜型圧電セラミックスを収縮させることで梁中央部が鉛直下方向に変位していることから、膜型圧電セラミックスの伸縮挙動により、梁が湾曲していることがわかる。

また、膜型圧電セラミックスを 1 層とした場合と比較して、2 層、3 層とした場合、鉛直変位の最大値が増加する傾向が見られる。最大許容電圧である +1,500V 印加時の変位を見ると、膜型圧電セラミックスを 2 層とした場合は、1 層の場合と比較して約 2.11 倍、3 層の場合は約 2.67 倍となっており、積層枚数を増やすに従い増幅効率は減少するものの、膜型圧電セラミックスを積層することによりある程度の制御力の増強が期待できる。

3.2.2.2 動的加力実験

続いて、アクチュエータに AC 電圧を印加し梁架構を加振する実験を行った。印加電圧は +500V を中心とした正弦波で、片振幅を 200V～1,000V の間で 5 段階設定した。実験中、加速度振幅によって共振振動数に変化する様子がうかがえたため、印加する AC 電圧の振動数を梁模型の一次固有振動数近傍において 0.05Hz 刻みで変化させ、梁中央部における加速度振幅が最も大きくなった時の値を記録した。図 3.2.3 に、アクチュエータを駆動させることにより得られた最大加速度の実測値を示す。図より、印加電圧の振幅が大きくなるにしたがって加速度振幅も増えていくものの、その増幅度合いは徐々に小さくなっていくことがわかる。この傾向は、アクチュエータにおける膜型圧電セラミックスの積層枚数によらず、いずれの場合も加速度振幅がおおよそ 50gal(0-P)より大きくなる場合に見られる。この要因として、減衰比が梁中央部の加速度振幅に依存している事が考えられる。

減衰比の振幅依存性を確認することを目的として、アクチュエータに +500V を中心とした正弦波で振幅の異なる数段階のスイープ電圧を印加し、それぞれ専用アンプへの入力信号に対する梁中央部の加速度センサ信号の伝達関数より $1/\sqrt{2}$ 法を用いて減衰比を算定した。図 3.2.4 に、アクチュエータによる加振時の伝達関数を示す。凡例は専用アンプへの入力電圧を表している。また、図 3.2.5 に、梁中央部に設置した起振器による加振時の加

振力に対する梁中央部の加速度応答の伝達関数を示す。凡例は梁中央部の最大応答加速度の片振幅を表している。図 3.2.4 より、アクチュエータへの印加電圧の振幅を大きくするに従って固有振動数が低くなり、伝達関数のピーク値が小さくなっている様子が見られるが、図 3.2.5 に示した通り、同様の現象は起振器による加振時にも認められる。従って、これらの非線形性状は、膜型圧電セラミックスを用いたアクチュエータに起因するものではなく、梁架構模型の構造上の特性によるものと考えられる。主な要因として、梁両端部のボルト接合部や柱部材を基礎に固定しているアンカーボルト接合部において微小な擦り変形や摩擦が生じている可能性などが挙げられる。このように応答特性に非線形性がある場合は、制御系設計時に意図した振幅と大きく異なる振幅の振動に対して、所定の振動制御効果が発揮されない可能性や制御不安定となり発振する可能性が考えられるため、制御対象とする振動振幅のレンジが大きい場合には注意が必要である。

3.2.3 鉛直振動検出実験

3.2.2 節で述べた加力実験に続いて、膜型圧電セラミックスを用いて梁架構の鉛直振動を検出する実験を行った。図 3.2.6 に示すように、梁模型の両端部に配置した膜型圧電セラミックスのうち一方の膜型圧電セラミックスをセンサとして、他方をアクチュエータとして用い、センサ用の膜型圧電セラミックスで検出された信号を基にアクチュエータより制御力を発生させる。

アクチュエータを駆動させ、センサ用膜型圧電セラミックスから出力される電圧信号を検出する実験を行った。図 3.2.7 に、専用アンプへ入力した 3~200Hz のスイープ電圧信号に対するセンサ用膜型圧電セラミックスから出力された電圧信号の伝達関数を示す。図より、梁模型の一次固有振動数の 10.6Hz が明確に検出されており、梁端部に配置した膜型圧電セラミックスを鉛直振動制御のための振動センサとして用いることができることを示唆している。

3.2.4 振動制御実験

センサ用膜型圧電セラミックスおよび膜型圧電セラミックスを鋼板に貼付したアクチュエータを用いて梁架構模型の鉛直振動を制御する実験を行った。アクチュエータに貼付する膜型圧電セラミックスの積層枚数は 2 層とし、制御対象とする振動数は梁架構の一次固有振動数である 10.6Hz とした。

3.2.4.1 制御系設計

本検討で用いる制御手法は、古典制御理論³⁵⁾に基づいたフィードバック型の制御系により制御対象とする振動モードに対して減衰を付加する手法とした。図 3.2.8 に、一般的なフィードバック型の制御系のブロックダイアグラムを示す。図中の各ブロックは、入力に対する出力特性すなわち伝達関数を、 X 、 Y はそれぞれ制御対象への入力と出力を表している。フィードバックを考慮した全体系の伝達関数 G' は、各伝達関数と入出力の関係から以下のように導出される。

$$\begin{aligned}(X + YH)G &= Y \\ \Leftrightarrow GX &= (1 - GH)Y \\ \Leftrightarrow G' = Y/X &= G/(1 - GH) \quad \dots (3.1)\end{aligned}$$

すなわち、フィードバック型の制御系設計では、(3.1)式で表される G' が、非制御時の制御対象の伝達関数 G よりも小さな値となるよう GH を設計する。ここで、 GH は、制御対象への入力に対するコントローラ H の出力であり、開ループ伝達関数と呼ばれる。コントローラ H は、一般に、積分（ローパス）、微分（ハイパス）、バンドパス等の各種フィルタとフィードバックゲインからなる伝達関数で、これを制御対象の伝達関数 G に乗ずることによって位相やゲインの調整、高振動数成分や直流成分の除去等の周波数成形を行い、安定かつ制御効果が得られる制御系を設計する。なお、図 3.2.8 に示したブロックダイアグラムを、本検討の場合について表現すると、図 3.2.9 となる。

3.2.3 節で得られた伝達関数（専用アンプへの入力信号 V_{in} に対するセンサ用膜型圧電セラミックスの出力信号 V_{out} ）に基づいて、以上に述べたフィードバック型の制御系を設計した。図 3.2.10 に、設計したコントローラの伝達関数の振幅比および位相差を、図 3.2.11 に、制御系の開ループ伝達関数（専用アンプへの入力信号 V_{in} に対する制御信号 V_{cont} ）の振幅比および位相差を示す。ここで、制御系が安定であるための必要十分条件は、開ループ伝達関数 GH について、以下を満たすことである³⁵⁾。

$$\text{Mag.} < 0 \text{ (dB)} \quad \text{at} \quad \text{Phs.} = 0 \text{ (deg.)} \quad \dots (3.2)$$

ここで、

Mag. : 伝達関数より求められる振幅比

Phs. : 伝達関数より求められる位相差

図 3.2.11 より、設計した制御系は(3.2)式を満たしていることから、安定であることがわかる。

図 3.2.12 に、設計した制御系を用いた場合の全体系の伝達関数 G' と、非制御時の制御対象の伝達関数 G を比較して示す。図より、約 11Hz から 20Hz において若干の増幅領域が見られるものの、ピークの最大値を約 1/3 に低減できる制御系になっていることがわかる。

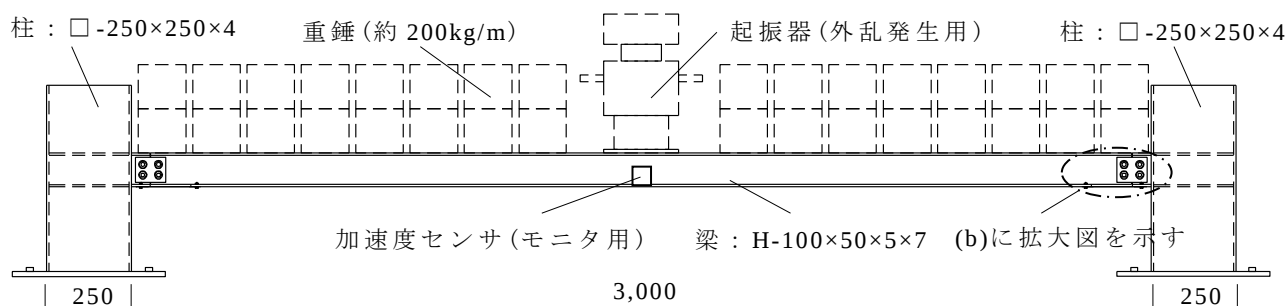
3.2.4.2 実験結果および鉛直振動の制御効果の確認

以上に述べた制御系を用いて、外乱振動に対する振動制御実験を行った。外乱振動の発生は梁架構の中央部に設置した起振器により行い、梁架構の一次固有振動数である 10.6Hz での正弦波加振と 3～100Hz のスイープ加振を行った。

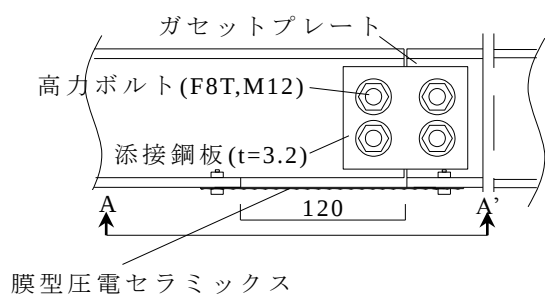
図 3.2.13 に、正弦波加振時における制御前後の梁架構中央部の鉛直加速度波形を示す。図より、制御状態とすることにより加速度振幅が急速に低減され、非制御時に対して 1/3 以下に制御されていることが分かる。

図 3.2.14 に、スイープ加振時の梁架構中央部における加速度スペクトルを示す。図より、非制御時と比較して制御時では、梁架構の鉛直方向の一次固有振動数である 10.6Hz における加速度振幅を約 1/4 程度に低減できていることがわかる。また、いずれの振動数においても加速度振幅は大きくは増幅していない。

以上の実験により、提案した膜型圧電セラミックスを用いた振動制御手法により、梁架構の鉛直振動を制御可能であることを確認した。

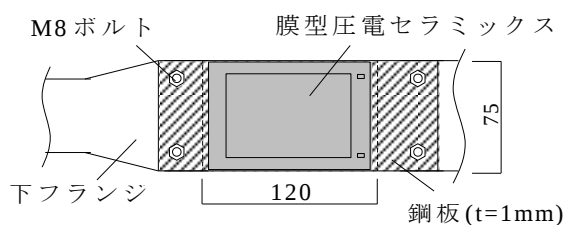


(a) 全体図



膜型圧電セラミックス

(b) 梁端部拡大図



(c) 下フランジと膜型圧電セラミックスの取合い
(A-A' 矢視)

図 3.2.1 梁架構模型の概要

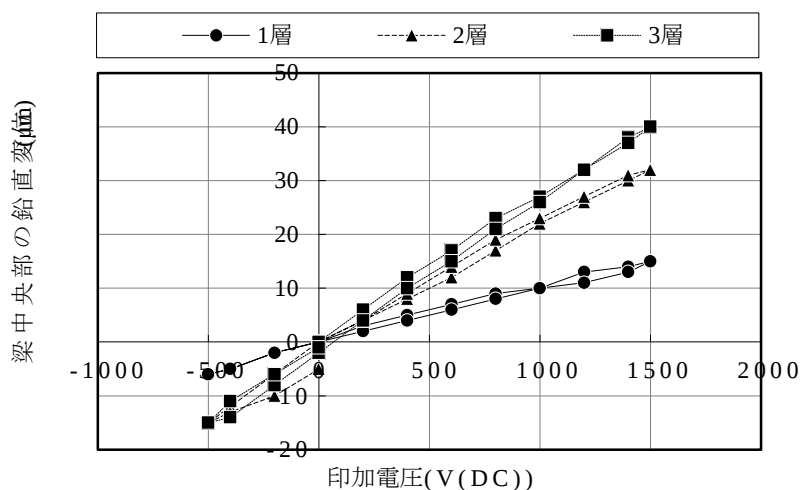


図 3.2.2 静的加力時の梁中央部における鉛直変位

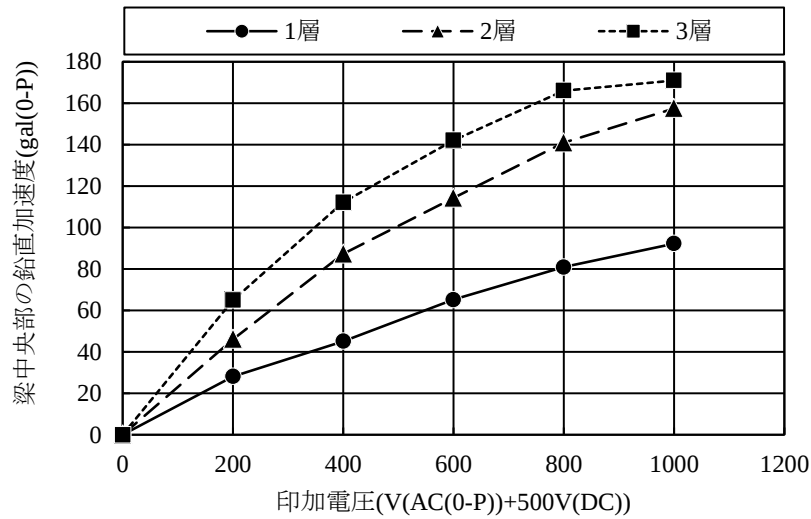


図 3.2.3 共振振動数での動的加力時の梁中央部における鉛直加速度

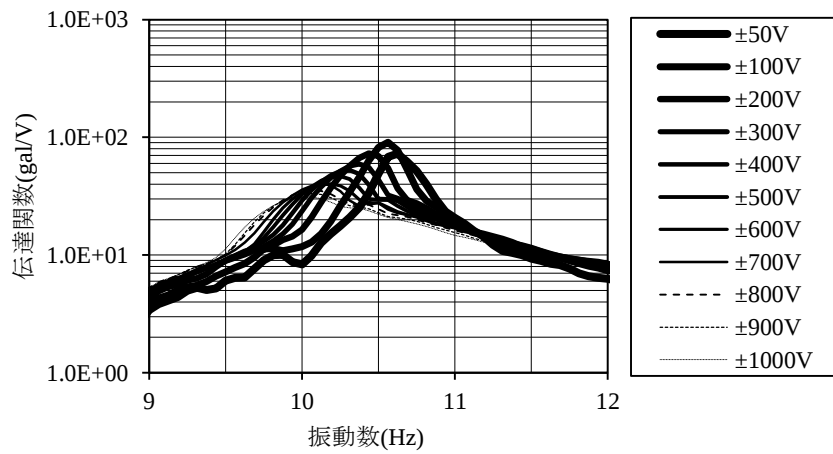


図 3.2.4 アクチュエータ用アンプへの入力電圧に対する梁中央部における鉛直加速度

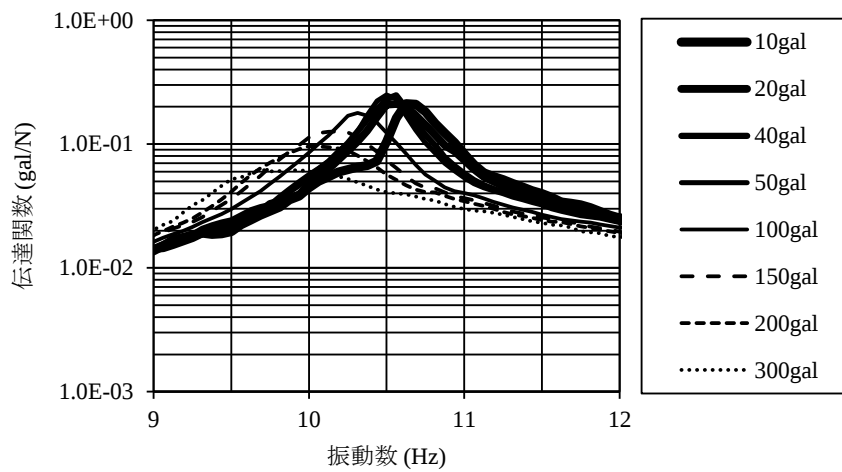


図 3.2.5 起振器による加振力に対する梁中央部における鉛直加速度

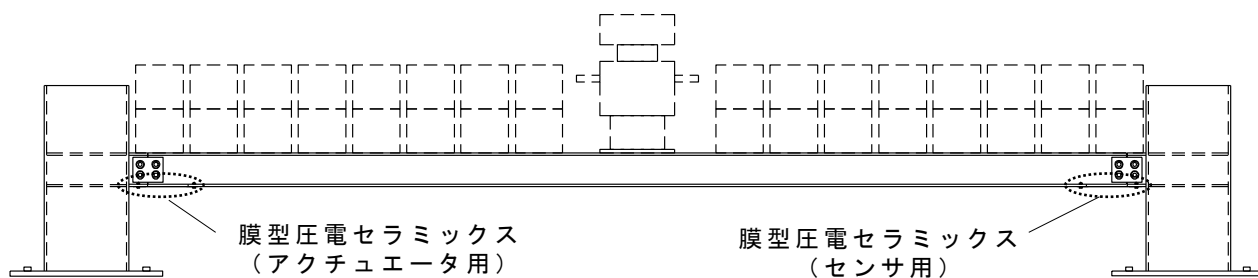


図 3.2.6 鉛直振動検出時のセンサ用膜型圧電セラミックスの配置方法

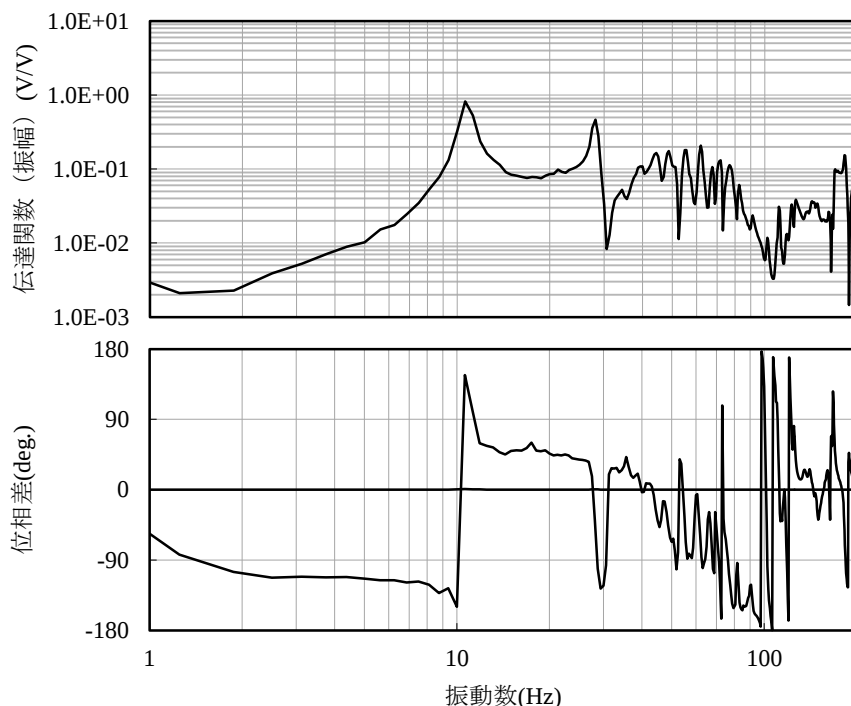


図 3.2.7 アクチュエータ用アンプへの入力信号に対するセンサ用膜型圧電セラミックスの出力信号

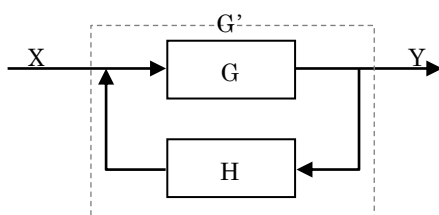


図 3.2.8 一般的なフィードバック型制御系のブロックダイアグラム

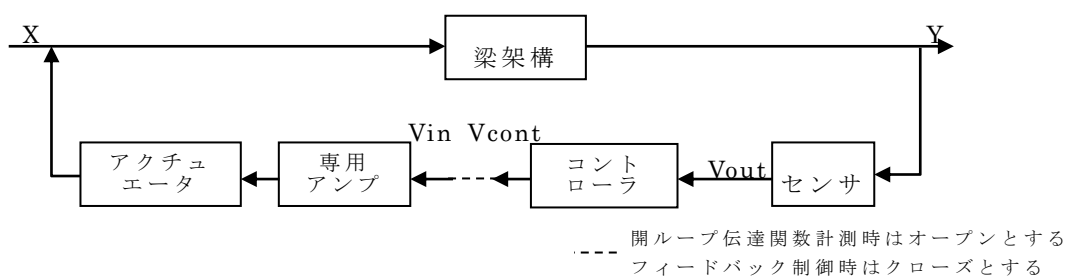


図 3.2.9 梁架構模型に対する制御系のブロック

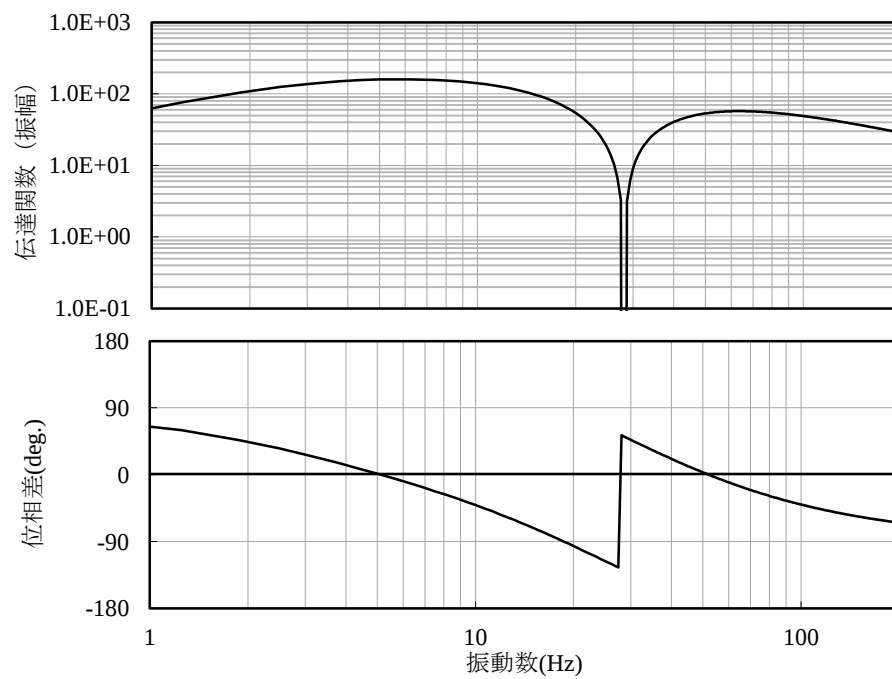


図 3.2.10 コントローラの伝達関数

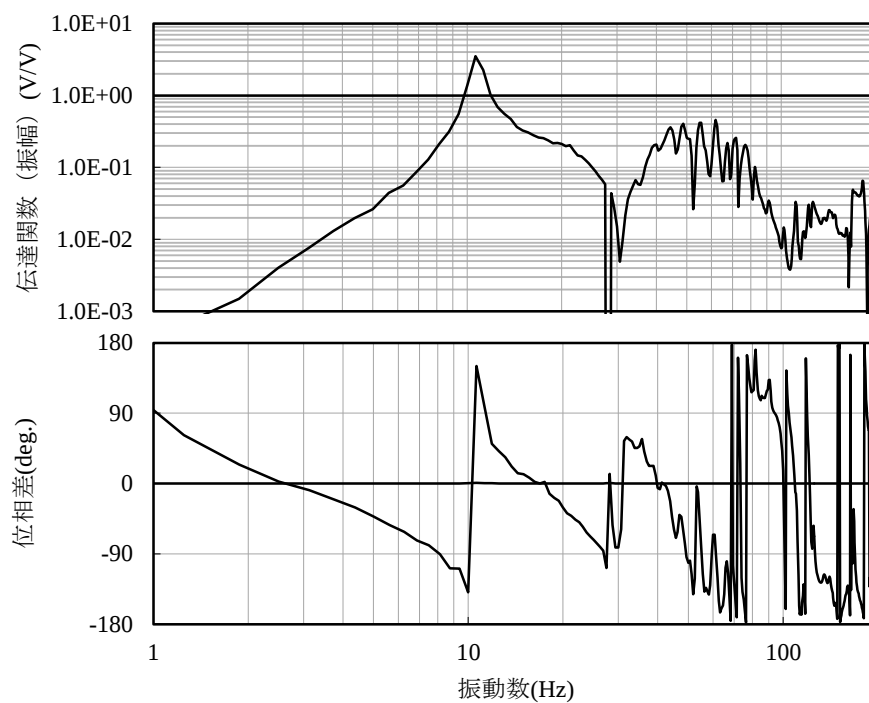


図 3.2.11 設計した制御系の開ループ伝達関数

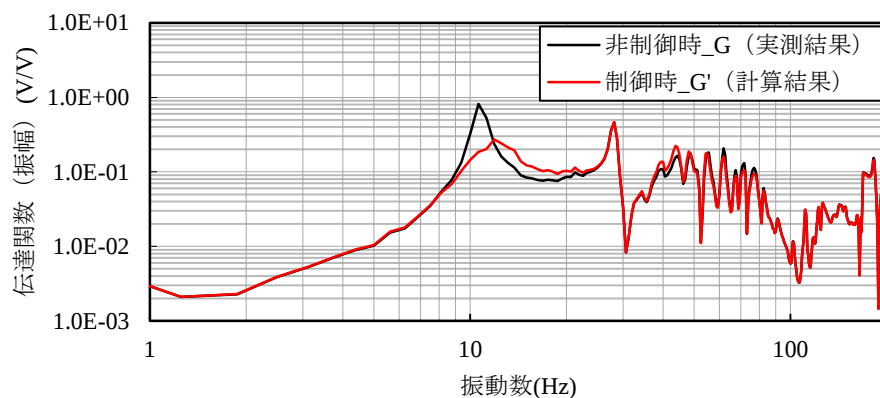


図 3.2.12 制御時および非制御時におけるアクチュエータ用アンプへの入力信号に対するセンサ用膜型圧電セラミックスの出力信号

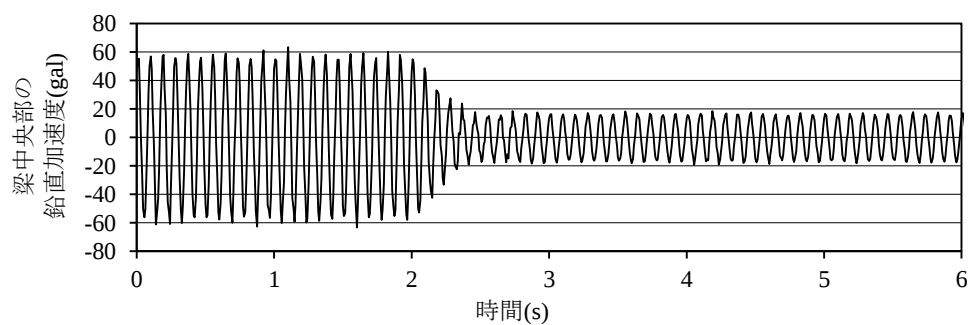


図 3.2.13 正弦波加振時 (10.6Hz) の梁中央部の鉛直加速度

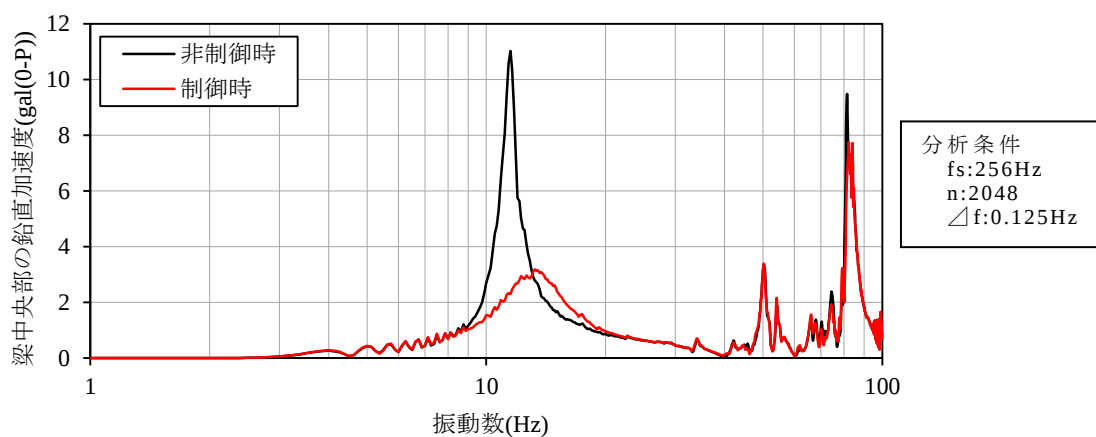


図 3.2.14 スイープ加振時 (1~100Hz) の梁中央部の鉛直加速度

3.3 柱梁架構模型を用いた鉛直，水平振動制御実験

続いて、柱と梁からなる架構を対象として、膜型圧電セラミックスを用いた鉛直および水平振動の制御実験を行った。初めに、柱梁架構模型を用いて静的および動的加力実験を行い、膜型圧電セラミックスが柱梁架構の鉛直，水平振動に対する制御力を作用させることが可能であるかを確認した。次に、柱梁架構の部材表面に複数の膜型圧電セラミックスを貼付し、これらの出力により鉛直，水平振動の検出が可能であるかを確認し、最適な取付け位置を検証した。続いて、起振器により試験体に鉛直および水平方向に外乱を与え、センサおよびアクチュエータとして用いる膜型圧電セラミックスにより、これら 2 方向の振動を制御する実験を行った。

3.3.1 柱梁架構模型の概要

振動制御実験を行うに当たり、柱梁架構模型を製作した。図 3.3.1 に、柱梁架構模型の概要を示す。柱梁架構の梁部材は長さが 3,100mm の H-100×50×5×7 であり、高さ 1,200mm において両端部を鉄骨柱(□-100×100×2.7)に溶接接合している。梁の溶接部分には、柱の内側にダイヤフラムを配置している。梁上にはスラブ重量を模擬するため約 200kg/m の重錘を載荷した。また、梁の中央部および直下の地盤面に外乱振動を発生させるための起振器を設置した。試験体の規模は実際の建築物におけるスパンの 1/2～1/3 程度を想定し、水平方向の一次固有振動数が数 Hz 程度となるよう梁や柱の断面および重錘の大きさを設定している。

梁部材両側の柱梁接合部に図 3.3.1 (b)に示すようなブラケットを配置し、鋼板に膜型圧電セラミックスを貼付したアクチュエータを、ボルト接合にて取り付けた。このアクチュエータが伸縮することにより、柱梁接合部に曲げモーメントを与える。なお、アクチュエータ用の膜型圧電セラミックスは鋼板の両面に 3 層ずつ貼付した。アクチュエータ用膜型圧電セラミックスは、3.2 節と同様に、図 2.2.1 に示すものを使用した。

また、図 3.3.1 (a)に示すように、柱梁接合部付近の柱側面，梁中央部の下フランジ面および柱梁接合部から梁全長の 1/4 の位置の下フランジ面に、振動を検出する目的としてセンサ用膜型圧電セラミックスをそれぞれ 1 枚ずつ貼付した。これらの取付け位置は、有限要素法解析により得られた鉛直，水平方向の固有振動数における振動モードの腹となる部分として設定した。図 3.3.2 に、有限要素法解析により求めた鉛直，水平方向の振動モー

ドと、センサ用膜型圧電セラミックスの取付け位置を示す。表 3.3.1 に、使用したセンサ用膜型圧電セラミックスの主な物性値を示す。また、これらセンサ用膜型圧電セラミックスに加え、柱梁架構の加速度を計測するため、サーボ型加速度センサを図 3.3.1 に示す各所に配置した。

3.3.2 加力実験

3.3.2.1 静的加力実験

初めに、梁両端部のアクチュエータに DC 電圧を印加し、柱梁架構の水平方向に静的加力した際の変位を測定した。DC 電圧は、両端部のアクチュエータの双方に+500V を印加した状態から、互いに正負が逆になるよう 200V ずつ増減させて、-500V から+1500V の範囲で変化させた。水平変位は、柱梁接合部における柱の外側面を非接触のレーザ変位計を用いて測定した。図 3.3.3 に測定結果を示す。図より、印加電圧に応じて柱梁架構の水平変位が生じており、提案した方法で水平方向の制御力を作用させられることがうかがえる。なお、両端部のアクチュエータへの印加電圧がそれぞれ+1500V、-500V の時に水平変位が最大となり約 0.019mm となった。

3.3.2.2 動的加力実験

アクチュエータに AC 電圧を印加して水平方向に動的加振し、柱梁架構の振動特性として水平加速度を測定した。水平加速度は、梁中央部の下フランジ面に取付けたサーボ型加速度センサを用いて測定した。アクチュエータに印加する AC 電圧は、+500V を中心として片振幅が 800V の正弦波とし、振動数を 1~100Hz の範囲でスイープさせた。図 3.3.4 に、測定結果を示す。共振時の振動数は 6.8Hz であり、柱梁架構の一次固有振動数と一致した。なお、得られた共振振動数において、アクチュエータに最大許容電圧である 500V±1,000V を印加し柱梁架構を加振したところ、水平方向の最大加速度振幅は 60.5gal(0-P)であった。

3.3.3 鉛直，水平振動検出実験

柱梁架構の鉛直および水平振動を制御するにあたり、柱梁架構に直接貼付した膜型圧電セラミックスを用いて振動を検出する実験を行った。

梁両端部に配置したアクチュエータに、同位相あるいは逆位相の AC 電圧を印加し、柱梁架構を鉛直方向あるいは水平方向に加振した際の、センサ用膜型圧電セラミックスの出力信号を測定した。また、比較対象として、梁中央部における鉛直方向の振動加速度およ

び水平方向の振動加速度をサーボ型加速度センサにて測定した。図 3.3.5(a)に、柱梁架構を鉛直方向に加振した際にそれぞれのセンサ用膜型圧電セラミックスおよびサーボ型加速度センサから得られた出力信号を、アクチュエータへの入力信号(Vin)に対する各センサの出力信号(Vout)の伝達関数として示す。同様に、柱梁架構を水平方向に加振した際に得られた結果を、図 3.3.5(b)に示す。

鉛直方向加振時については、いずれのセンサも柱梁架構の鉛直方向の一次固有振動数である 9.6Hz を検出できていることがわかる。特に梁中央部に貼付した膜型圧電セラミックスからの出力信号は、サーボ型加速度計とよく似た出力特性を示しており、鉛直方向の振動制御を目的としたセンサ信号として有効であることがうかがえる。

一方、柱梁接合部に貼付した膜型圧電セラミックスの出力信号は低振動数領域において、梁全長の 1/4 の位置に貼付した膜型圧電セラミックスの出力信号では高振動数領域において、それぞれサーボ型加速度計と異なる出力特性を示しているが、いずれも出力振幅は小さく、鉛直方向の一次固有振動数における振動制御に用いるセンサ信号としては支障ないものと思われる。

水平方向加振時についても、いずれのセンサも柱梁架構の水平方向の一次固有振動数である 6.8Hz を検出できている。しかしながら、梁中央部に貼付した膜型圧電セラミックスの出力信号は、鉛直方向の一次固有振動数である 9.6Hz が水平方向の一次固有振動数に近い領域で卓越しており、この信号を用いて水平方向の振動制御を行うことが比較的困難となることが懸念される。なお、柱梁接合部に貼付したものと梁全長の 1/4 の位置に貼付した膜型圧電セラミックスは、梁部材の鉛直方向の二次モードである 26.0Hz も明確に検出しており、柱梁架構の水平方向の振動に加え、梁部材の二次モードを同時に制御できるものと考えられる。

一方、柱梁接合部に貼付したものと梁全長の 1/4 の位置に貼付したものは出力特性がよく似ているが、30Hz 以上の振動数領域では、梁全長の 1/4 の位置に貼付した膜型圧電セラミックスの出力信号の振幅の方が比較的小さく、この領域でのスピルオーバーを防止するのに有利であることがうかがえる。

以上のことから、本検討では梁全長の 1/4 の位置に貼付した膜型圧電セラミックスの出力信号を用いて試験体の鉛直および水平方向の振動制御を行うこととした。

3.3.4 振動制御実験

3.2 節と同様に、古典制御理論に基づいたフィードバック型の制御系により制御対象とする振動モードに対して減衰を付加する実験を行った。

3.3.4.1 制御系設計

梁部材の両端部に配置したアクチュエータに同位相の電圧を印加し柱梁架構を鉛直方向に加振した際の印加電圧に対するセンサ用膜型圧電セラミックスの出力信号の伝達関数を $G(V)$ 、同じく逆位相の電圧を印加し柱梁架構を水平方向に加振した際の伝達関数を $G(H)$ 、それぞれの振動モードに対するコントローラを $H(V)$ 、 $H(H)$ とすると、制御系のブロックダイアグラムは図 3.3.6 のように表される。これを鉛直方向、水平方向それぞれについて考えるとブロックダイアグラムはそれぞれ図 3.3.6 (b), (c) のように分解され、鉛直振動モード制御系および水平振動モード制御系それぞれの開ループ伝達関数 $OL(V)$ 、 $OL(H)$ は、(3.2)式、(3.3)式で表される。

$$OL(V) = G(V)H(V)/(1 - G(H)H(H)) \quad \cdots (3.2)$$

$$OL(H) = G(H)H(H)/(1 - G(V)H(V)) \quad \cdots (3.2)$$

これらをもとに各ブロックダイアグラム中のローカルフィードバックの安定性と、制御系全体の安定性を保つよう鉛直および水平方向振動のフィードバック型制御系を設計した。図 3.3.7 に、設計した制御系の開ループ伝達関数を示す。

3.3.4.2 実験結果および水平、鉛直振動の制御効果の確認

以上に述べた制御系を用いて、鉛直および水平方向の外乱振動に対する振動制御実験を行った。図 3.3.1 に示すように、2 基の起振器を、鉛直方向の外乱振動発生用として柱梁架構模型が設置されている地盤上に、水平方向の外乱振動発生用として梁中央部にそれぞれ設置した。外乱振動は、各振動モードの固有振動数における正弦振動および 3～30Hz のスイープ振動とした。

はじめに、地盤上に設置した鉛直加振用起振器により梁の鉛直一次振動モードである 9.6Hz で加振し、これと同時に梁上に設置した水平加振用起振器により梁部材の鉛直二次振動モードである 26.0Hz で加振した。加振開始後、梁の加速度振幅が安定したことを確認した後、制御を開始した。図 3.3.8 および図 3.3.9 に、地盤上および梁上に設置した起振器により正弦波加振を行った際の、梁中央部および梁全長の 1/4 の位置における鉛直方向

の振動加速度波形を示す。鉛直方向の一次振動モードの腹である梁中央部、鉛直方向の二次振動モードの腹である梁全長の $1/4$ の位置ともに、制御時の加速度振幅が非制御時と比較して $1/4$ 以下に低減されていることがわかる。

図 3.3.10 に、梁上に設置した起振器により架構の水平方向の一次振動モードである 6.8Hz で正弦波加振した際の、梁中央部における水平方向の振動加速度波形を示す。図より、制御状態とすることで加速度振幅が低減され、非制御時の加速度振幅に対して $1/4$ 以下に制御されていることがわかる。

図 3.3.11 および図 3.3.12 に、地盤上に設置した起振器により鉛直方向のスイープ加振を行った際の、梁中央部および梁全長の $1/4$ の位置における鉛直方向の加速度スペクトルを示す。梁中央部では非制御時において梁の鉛直方向の一次振動モードである 9.6Hz が強く励起されているが、制御時では加速度振幅のピーク値を約 $1/4$ に低減していることが確認できる。一方、梁全長の $1/4$ の位置では梁の鉛直方向の一次振動モードである 9.6Hz に加え、二次振動モードである 26.0Hz が強く励起されているが、制御時ではそれぞれの加速度振幅のピーク値を $1/3$ 以下に低減している。また、いずれの場合も各モードの固有振動数以外の振動数における加速度の大きな増幅は見られない。

図 3.3.13 に、梁上に設置した起振器により水平方向にスイープ加振した際の梁中央部における水平方向の加速度スペクトルを示す。図より、非制御時と比較して制御時では、柱梁架構の水平方向の一次振動モードである 6.8Hz における加速度振幅のピーク値を $1/3$ 以下に低減していることが確認できる。

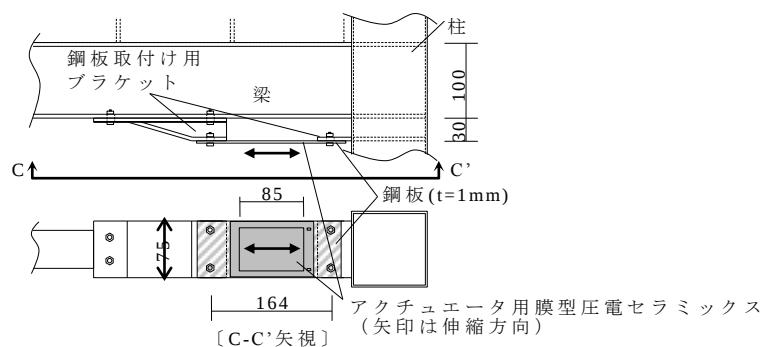
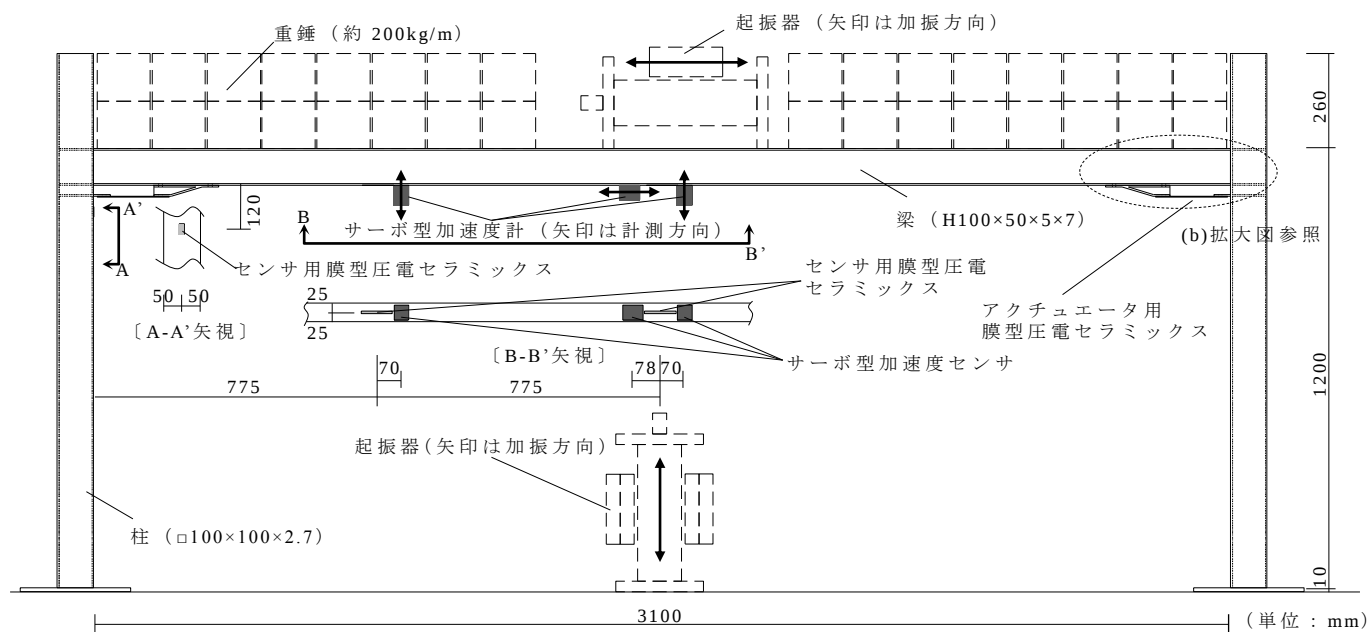
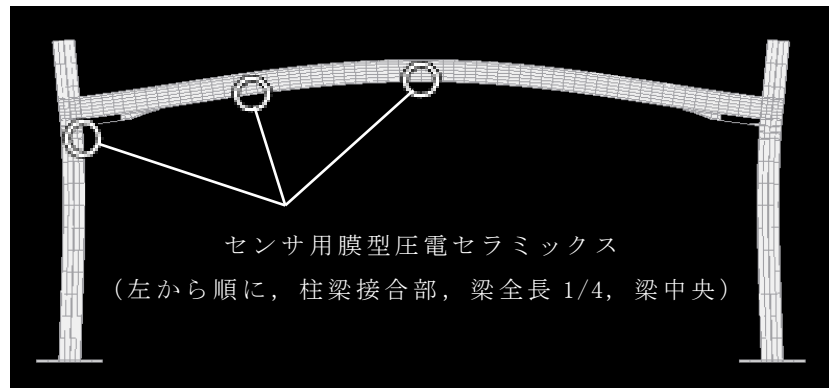


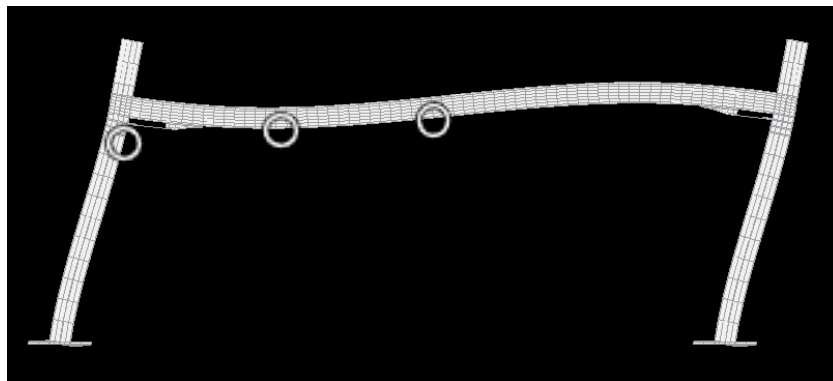
図 3.3.1 柱梁架構模型の概要

表 3.3.1 センサ用膜型圧電セラミックスの概要

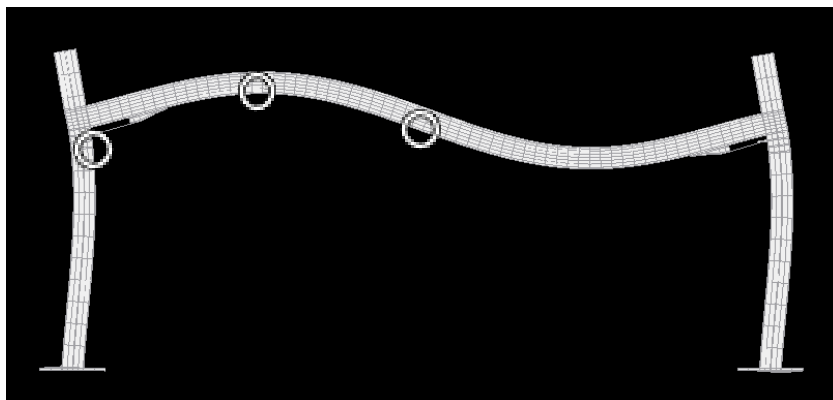
貼付位置	柱梁接合部付近の柱側面	梁部材の下フランジ面
全体サイズ	37×18(mm)	100×10(mm)
検出部範囲	28×14(mm)	85×7(mm)
弾性係数(長さ, 幅方向)	$3.03 \times 10^4 (\text{N/mm}^2)$	$3.03 \times 10^4 (\text{N/mm}^2)$
弾性係数(厚さ方向)	$1.59 \times 10^4 (\text{N/mm}^2)$	$1.59 \times 10^4 (\text{N/mm}^2)$
圧電定数	1.20(ppm/V)	1.20(ppm/V)
静電容量	30.78(nF)	49.84(nF)



(a) 梁部材の鉛直方向一次振動モード (9.6Hz)



(b) 柱梁架構の水平方向一次モード形状 (6.8Hz)



(c) 梁部材の鉛直方向二次モード形状 (26.0Hz)

図 3.3.2 振動モード解析結果とセンサ用膜型圧電セラミックスの取付け位置

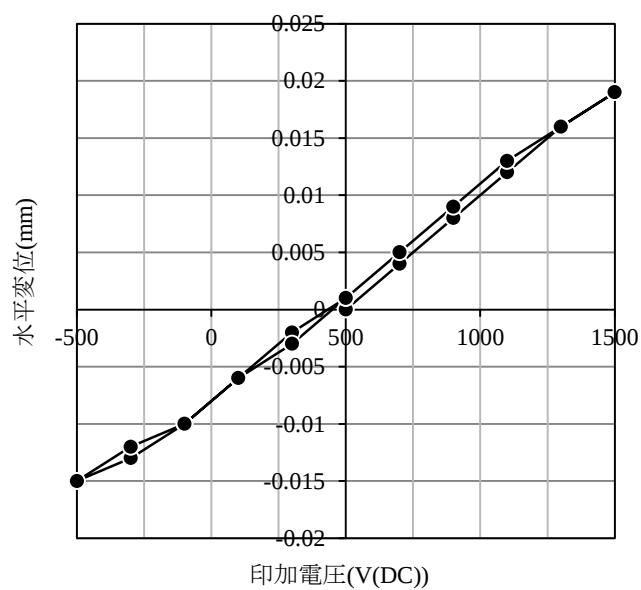


図 3.3.3 静的加力時の柱梁架構の水平変位

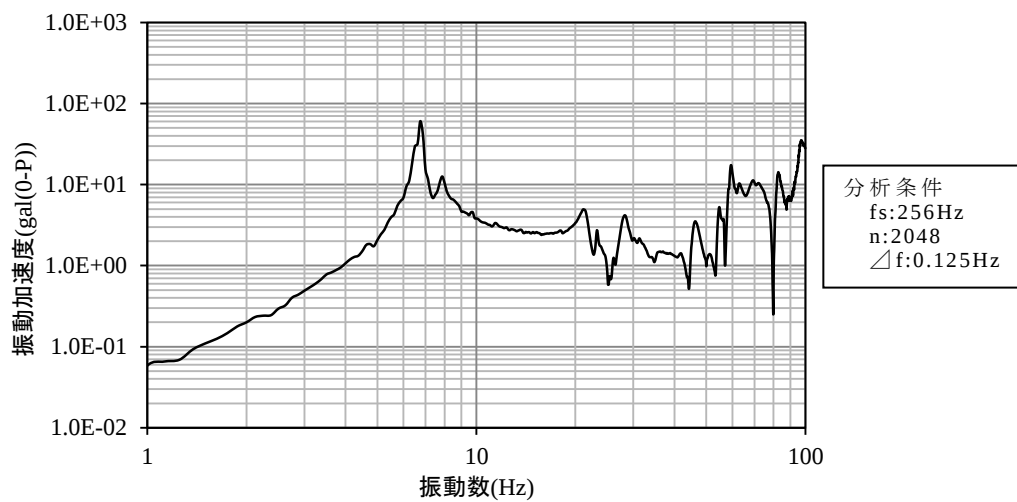
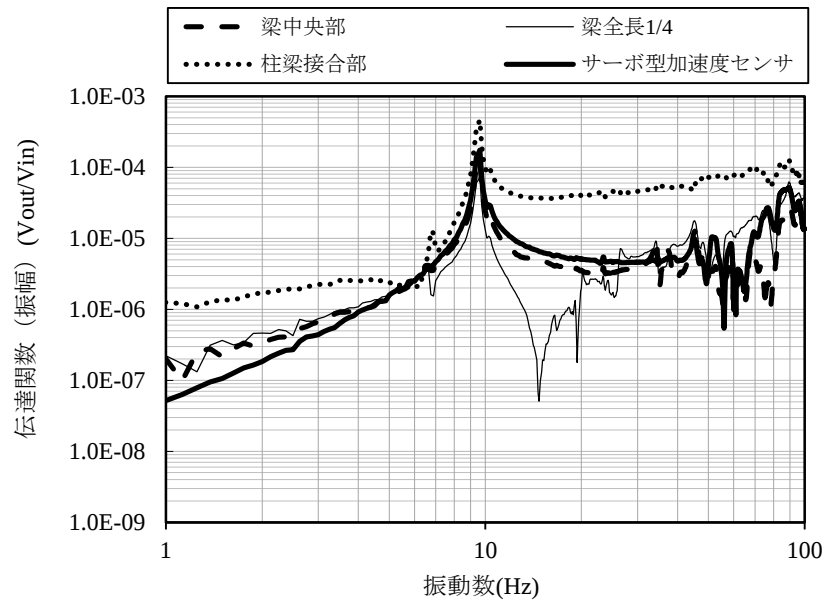
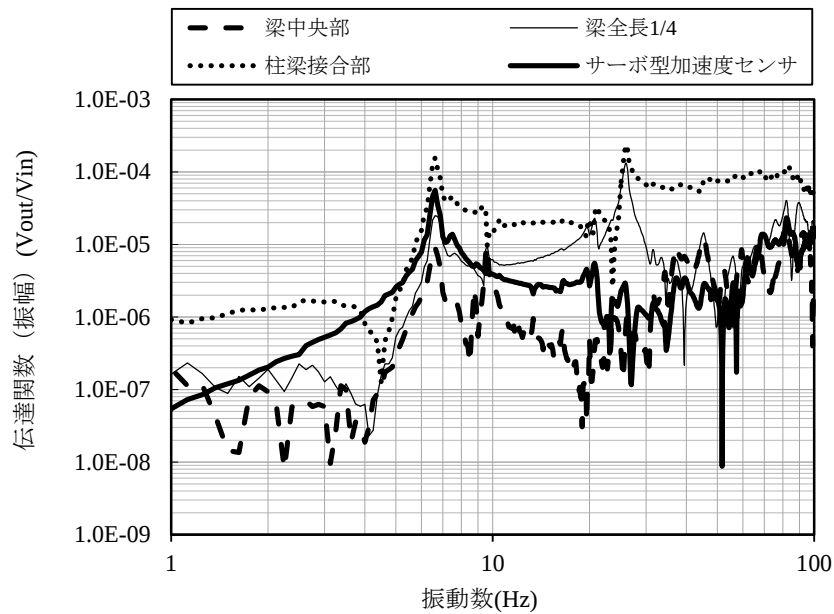


図 3.3.4 動的加力時の柱梁架構の水平加速度

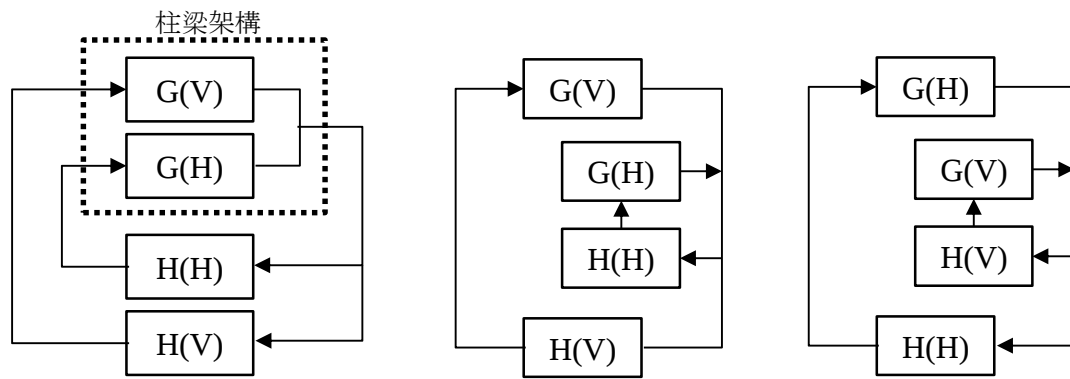


(a) 鉛直加振時のアクチュエータへの入力信号に対する各センサの出力信号



(b) 水平加振時のアクチュエータへの入力信号に対する各センサの出力信号

図 3.3.5 柱梁架構加振時のアクチュエータへの入力信号に対する各センサの出力信号

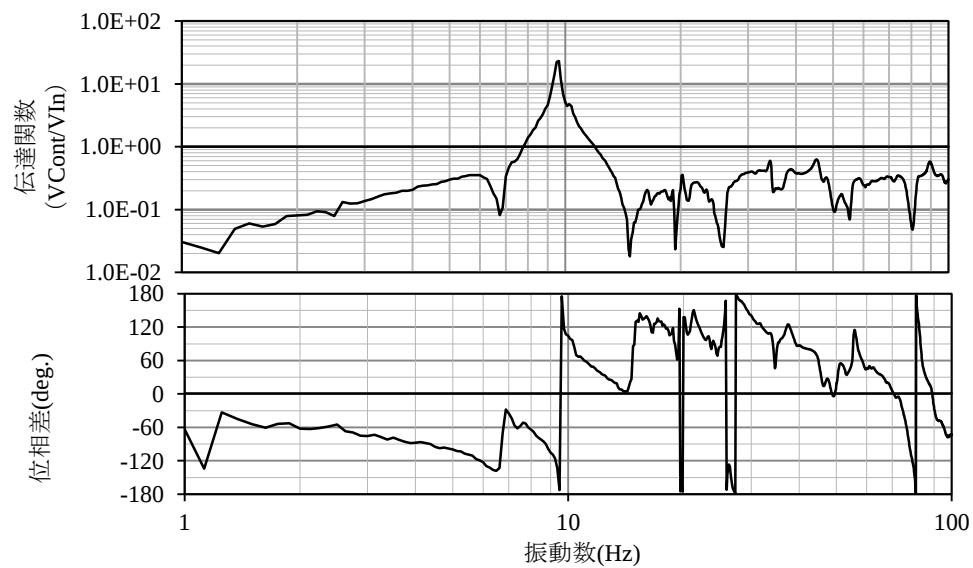


(a) 鉛直, 水平方向

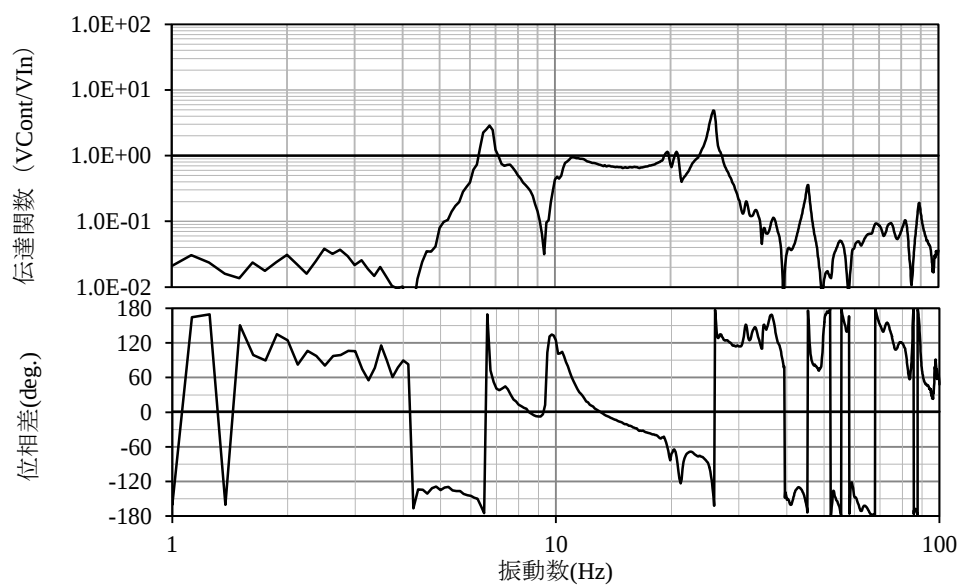
(b) 鉛直方向

(c) 水平方向

図 3.3.6 柱梁架構模型に対する制御系のブロックダイアグラム



(a) 鉛直振動モード制御系の開ループ伝達関数



(b) 水平振動モード制御系の開ループ伝達関数

図 3.3.7 設計した制御系の開ループ伝達関数

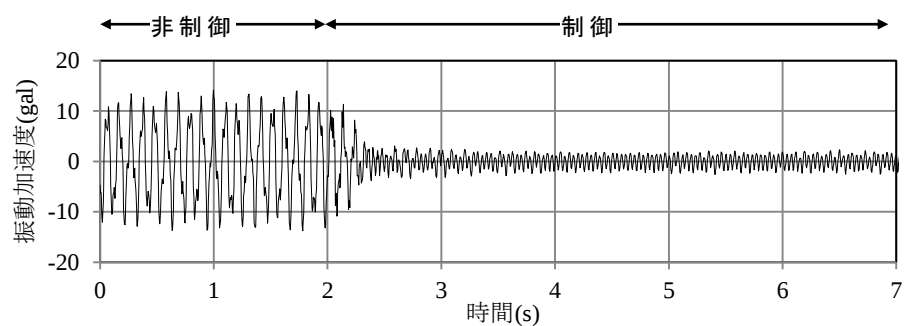


図 3.3.8 9.6Hz, 26.0Hz 同時加振時の梁中央部における鉛直方向加速度

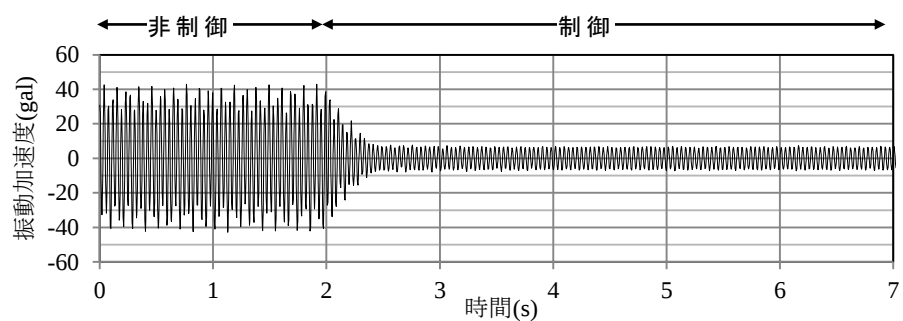


図 3.3.9 9.6Hz, 26.0Hz 同時加振時の梁全長 1/4 における鉛直方向加速度

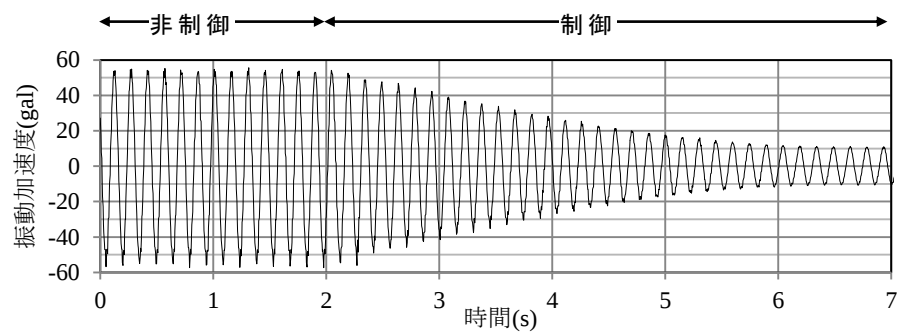


図 3.3.10 6.8Hz 加振時の梁中央部における水平方向加速度

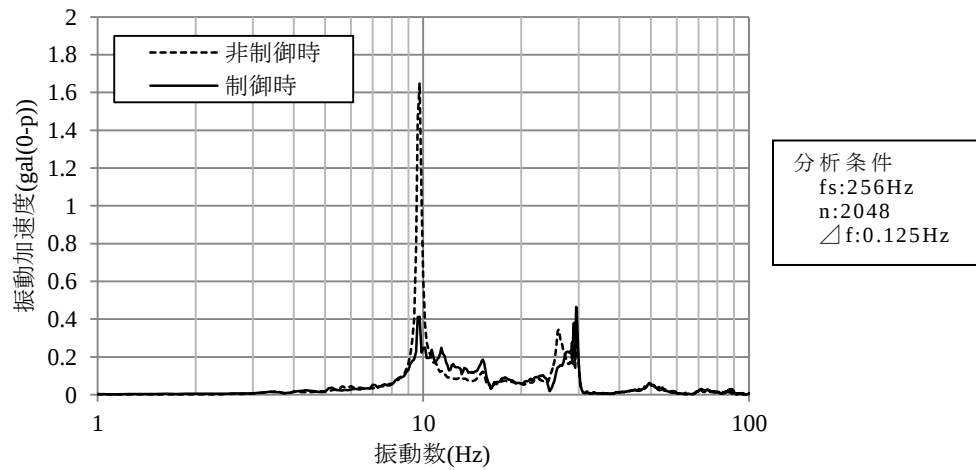


図 3.3.11 鉛直方向スイープ加振加振時の梁中央部における鉛直方向加速度

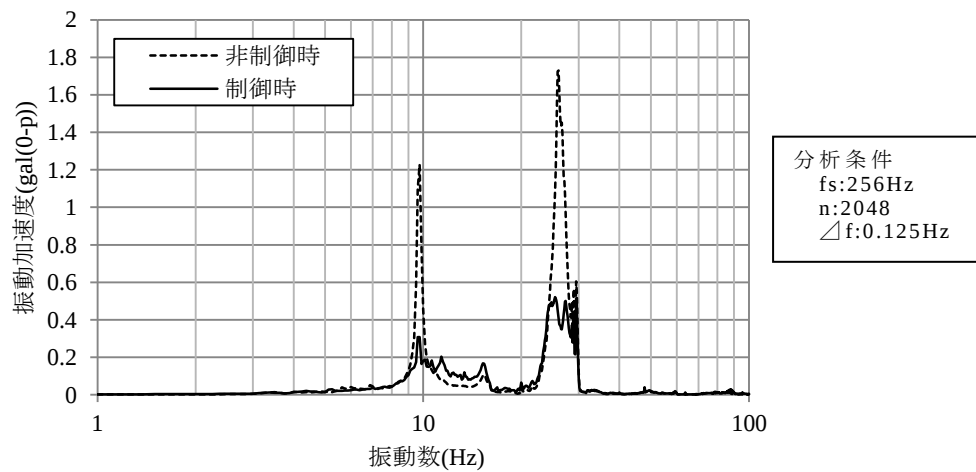


図 3.3.12 鉛直方向スイープ加振加振時の梁全長 1/4 における鉛直方向加速度

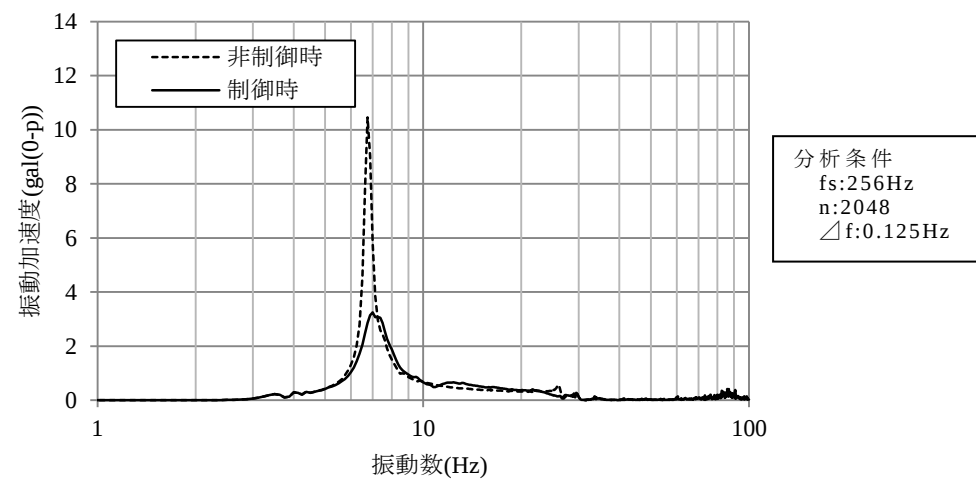


図 3.3.13 水平方向スイープ加振加振時の梁中央部における水平方向加速度

3.5 まとめ

本章では、第2章で提案した振動制御手法の原理的な有効性を確認することを目的として行った、梁架構模型の鉛直振動制御実験および柱梁架構模型の鉛直、水平振動制御実験の経緯、結果について述べた。また、膜型圧電セラミックスを振動制御用の振動センサとして用いるための最適な配置方法に関する検討結果を述べた。本章における検討の結果得られた結論は、以下の通りである。

- ・膜型圧電セラミックスを用いたアクチュエータを梁両端部に配置し、両アクチュエータを同位相で伸縮させることで、梁架構の鉛直方向の一次振動モードを励起させることができる。また、両アクチュエータを逆位相で伸縮させることで、柱梁架構の水平方向の一次振動モードおよび鉛直方向の二次振動モードを励起させることができる。
- ・梁両端部に配置したアクチュエータのうちの片方に貼付された膜型圧電セラミックスを振動センサとして用い、梁架構の鉛直方向の一次振動モードを検出することができる。また、梁全長 1/4 の位置の下フランジ表面に膜型圧電セラミックスを貼付することで、柱梁架構の水平方向の一次振動モードおよび梁架構の鉛直方向の二次振動モードを検出することができる。
- ・センサ用膜型圧電セラミックスの出力信号に基づいた制御系を設計し、梁架構および柱梁架構の鉛直および水平方向の振動を制御可能である。また、鉛直、水平双方向の影響を考慮した制御系を設計することで、梁両端部にアクチュエータを配置する唯一の構成で、鉛直、水平いずれの方向の振動モードも制御可能である。

第 4 章

実建築物床における振動制御効果の検証

第4章 実建築物床における振動制御効果の検証

4.1 はじめに

第3章では、基礎的段階として鉄骨造の縮小柱梁架構を用いて、提案する振動制御手法が原理的に有効であることを確認した。本章では、実建築物の鉛直床振動に対する有効性を確認するために実施した、振動制御実験の結果を述べる。

実建築物の床振動は、床の剛性および振動モードの有効質量等によって、その振幅や振動数、振動モードの形状等の特性が変化する。本検討では、これらの特性が異なる事例として、大小2種のスパン長の実建築物床を対象として実験を行った。一つ目は、スパン長約9mの鉄骨造の床（以降‘中規模スパン建築物床’と記す）であり、床の鉛直方向の一次振動モードが小梁が大きく振動する形状となる事例、二つ目は、スパン長約19mの鉄骨造の床（以降‘大規模スパン建築物床’と記す）であり、床の鉛直方向の一次振動モードが大梁が大きく振動する形状となる事例である。

本検討では、これらの床それぞれについて、はじめに床の振動特性を実測により把握したのち、膜型圧電セラミックスを用いたアクチュエータによる制御対象床への加力実験を行い制御力の過不足を確認した上で、数種の外乱に対する床振動制御実験を行った。

なお、実建築物の水平振動は、振動モードの有効質量や変位振幅が床の鉛直振動と比較して極めて大きく、本研究で用いている膜型圧電セラミックスをそのまま用いることは困難であると考えられることから、本提案手法による水平振動の制御は今後の課題と位置づけ、検討の対象外とした。

4.2 中規模スパン建築物床での検証

4.2.1 制御対象床の概要

図 4.2.1 および写真 4.2.1 に、制御対象とした中規模スパン建築物床の概要を示す。建築物の構造形式は鉄骨造 2 階建てで、制御対象は 2 階の床である。基本スパン長は桁行方向 9.15m、梁間方向 8.5m であり、梁間方向に 1 スパンあたり 2 本の小梁が配置されている。

表 4.2.1 に、各梁部材の断面寸法を示す。床は最大厚さ 140mm、最小厚さ 90mm の波型形状のデッキプレートを用いたコンクリートスラブで構成されている。大梁を含めた 1 スパン分の躯体重量は約 25.9ton である。

4.2.2 制御対象床の振動特性

はじめに、慣性質量を用いた起振器により制御対象床を加振することで、単位加振力あたりの加速度振幅（アクセラランス）を実測し、振動特性を把握した。図 4.2.1 に、起振器の設置位置および加速度の測定点を示す。起振器は、振幅が一定で振動数が 2～30Hz の範囲で変化するスイープ信号を入力して駆動することとし、床に作用した加振力は、慣性質量に取り付けた加速度センサにて測定された加速度と慣性質量の積より算出した。

図 4.2.2 に、実測の結果得られた、制御対象床中央（X4b-Y3a）の測定点におけるアクセラランスを示す。図より、一次固有振動数は 8.5Hz であることがわかる。鉛直振動を体感しやすい 3～8Hz の振動数範囲に他の大きなピークが現れていないことから、本実験では、この一次固有振動を制御対象とすることとした。

続いて、8.5Hz におけるアクセラランスと、加振力と応答加速度の位相差を各測定点について算出し、一次固有振動数の振動モード形状を把握した。図 4.2.3 に、X4b-Y3a の測定点におけるアクセラランスを基準として各測定点のアクセラランスを正規化した振動モード形状を示す。図より、一次固有振動数の振動モードは、大梁(X4,X5,Y3,Y4)と比較して小梁(X4a,X4c)の振動モードの影響が強く、スパン中央(X4b-Y3a)が腹となり各大梁付近が節となる形状であることがわかる。

4.2.3 制振装置の設置および加力実験

4.2.2 節で把握した制御対象とする振動モード形状より、アクチュエータを小梁の両端部である大梁との接合部に設置し、小梁に制御力を伝達して床の鉛直振動を制御すること

とした。

図 4.2.4 に、アクチュエータの設置方法を示す。アクチュエータを取り付けるための治具は、小梁端部の下フランジに厚さ 32mm のプレートをボルト接合にて、大梁側には厚さ 6mm のブラケットを溶接合にて設置し、これらの取り付け用治具の間にアクチュエータを並列して 2 基ずつボルト接合にて取付けることとした。アクチュエータは、第 3 章で述べたものと同様に、厚さ 1mm の鋼板の両面に、膜型圧電セラミックスを 3 層ずつ 2 液性のエポキシ系接着剤で貼合したものとした。接着剤の塗布量は、接着層に気泡が入らず、かつできる限り薄くなるよう種々検討した結果、1 面あたり 2g とした。

以上の要領にて設置したアクチュエータを駆動することにより加力実験を行った。アクチュエータ用アンプに、許容印加電圧の 80%レンジである $2.5 \pm 4.0\text{V}$ (0-P) の振幅で振動数を 1~100Hz の範囲で変化させるスイープ信号を入力し、2 本の小梁端部計 4 か所に設置した全てのアクチュエータを同位相で駆動した。アクチュエータの駆動中、アクチュエータ用アンプに入力する電圧信号と、床上の各測定点における振動加速度を同時に記録した。

図 4.2.5 に、制御対象床の中央 (X4b-Y3a) における測定結果を示す。図の縦軸は、アクチュエータ用アンプへ入力した信号の単位振幅に対する床振動の加速度振幅およびこれらの位相差を表している。図より、アクチュエータを駆動した場合でも、床の鉛直方向の一次固有振動数である 8.5Hz が卓越することがわかる。また、単位振幅の入力信号に対する床振動の加速度振幅は約 0.89(gal/V)であることから、許容印加電圧である $2.5 \pm 5.0\text{V}$ (0-P) の信号を入力した場合は 8.5Hz において約 4.4(gal(0-P))となる。これは歩行等により生じる床振動と同等以上の加速度振幅であることから、このアクチュエータが歩行等により生じる床振動を制御するために必要な制御力を有していることがうかがえる。

図 4.2.6 に、一次固有振動数である 8.5Hz について、アクチュエータを駆動した際の各測定点の振幅を制御対象床中央(X4b-Y3a)の振幅で除した正規化モード形状を、起振器で加振した際の正規化モード形状と比較して示す。この図からも明らかなように両者は同様のモード形状となっており、AMD 等の慣性質量を用いた制振装置を制御対象床の中央に配置した場合と同様に、図 4.2.6 に示す形状の振動モードを提案する手法で制御可能であることがうかがえる。

4.2.4 制御系設計

制御対象床の鉛直方向の一次固有振動数である 8.5Hz の振動モードを対象として、振動

制御実験を行った。制御対象点は制御対象床の中央（X4b-Y3a）とし、デッキスラブの下面に感度係数 0.01(V/gal)の加速度センサを設置した。図 4.2.1 に、用いた加速度センサの詳細を示す。

制御系は、第 3 章で述べたものと同様に、古典制御理論に基づいたフィードバック型とし、制御対象の振動モードに対して減衰を付加する方法とした。

図 4.2.5 に示したアクチュエータ用アンプへの入力信号に対する制御対象点の応答加速度の伝達関数を基に、8.5Hz の振動モードを制御対象としたコントローラを設計した。図 4.2.7 に、設計したコントローラの伝達特性を、図 4.2.8 に、設計したコントローラを用いた制御系の開ループ伝達関数を示す。開ループ伝達関数において位相遅れが 0° となる振動数での振幅倍率が 0.5 以下であり、振幅倍率が 1 以上となる振動数で位相遅れが 45° 以上あるいは -90° 以下であることから、ゲイン余裕、位相余裕が十分保たれており、安定な制御系となっていると判断できる。また、制御対象とする 8.5Hz において振幅倍率が 1 以上かつ位相遅れが 180° 付近であることから有効な制御系となっていることがわかる。

図 4.2.9 に、以上により設計したコントローラを用いた場合のアクチュエータ用アンプへの入力信号に対する制御対象点の応答加速度の計算値を、制御時と非制御時について比較して示す。図より、構成した制御システムで 8.5Hz において加速度振幅を約 1/5 に低減する効果が得られることが見込まれる。

4.2.5 振動制御実験と制御効果の検証

4.2.2 節で用いた起振器を外乱発生装置として、図 4.2.1 に示す制御対象床中央近傍に設置した。外乱振動は、振動数が 8.5Hz の正弦波加振による振動とし、制御を行わない場合に制御対象点における鉛直方向の加速度が約 4gal(0-P)となるよう起振器の加振力を調整した。この外乱振動の加速度振幅は、同程度のスパン長の床上を人が歩行し共振現象が生じた際の加速度振幅を想定して設定した。

この外乱振動に対して 4.2.4 節で述べたコントローラを用いて振動制御実験を行った。図 4.2.10 に、正弦波加振時の制御対象点における鉛直方向の加速度波形を示す。非制御時に 4gal(0-P)程度生じていた床振動が制御時には 1gal(0-P)未満となっており、加速度振幅を約 1/4 程度に低減する効果が得られていることがわかる。概ね期待した制御効果が得られており、9m 程度の中規模のスパン長を有する床の鉛直振動に対して本制御手法が有効であることが確認された。

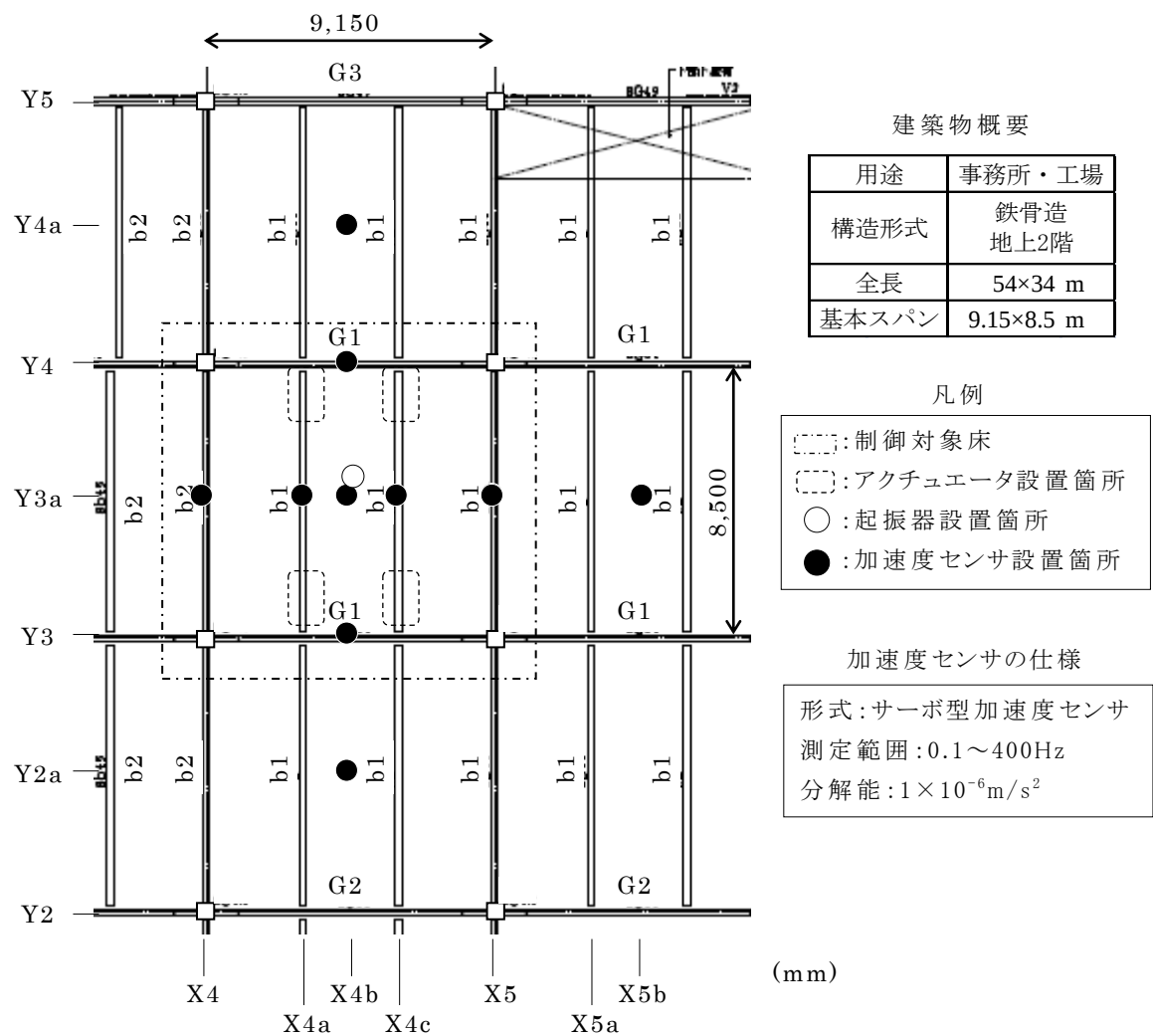


図 4. 2. 1 中規模スパン建築物床および測定点の概要

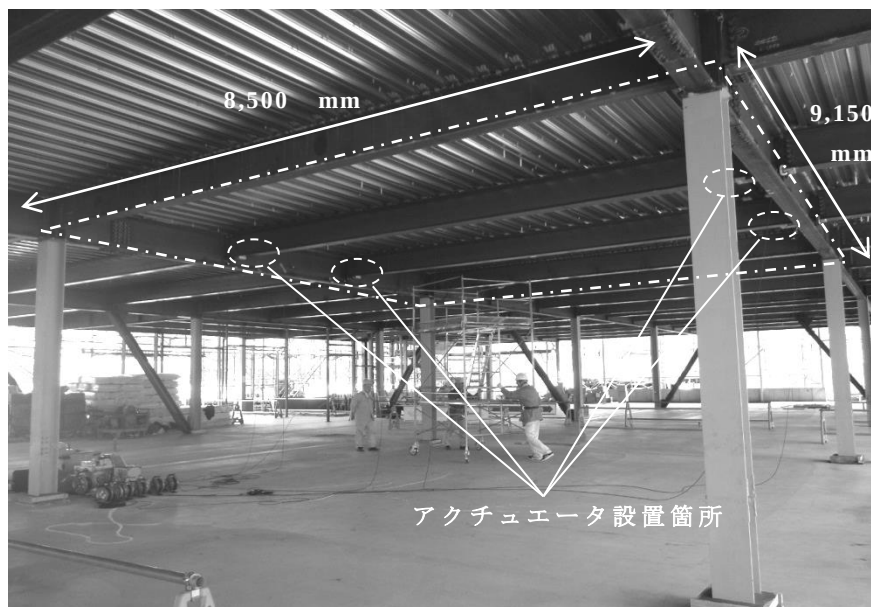


写真 4. 2. 1 中規模スパン建築物床の概観

表 4.2.1 各梁部材の断面寸法

G1	H-606×201×12×20
G2	H-600×200×11×17
G3	H-496×199×9×14
b1	H-446×199×8×12
b2	H-450×200×9×14

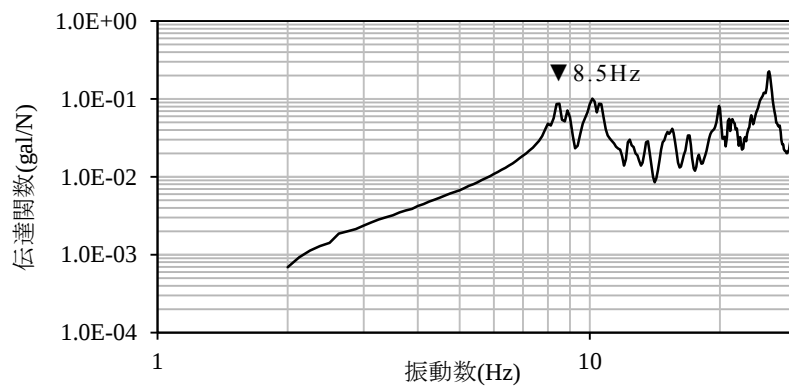


図 4.2.2 起振器設置位置におけるアクセラランス

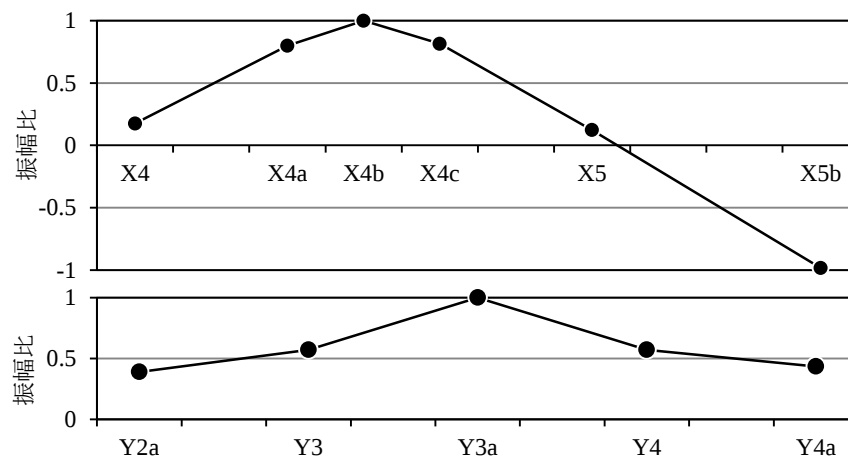
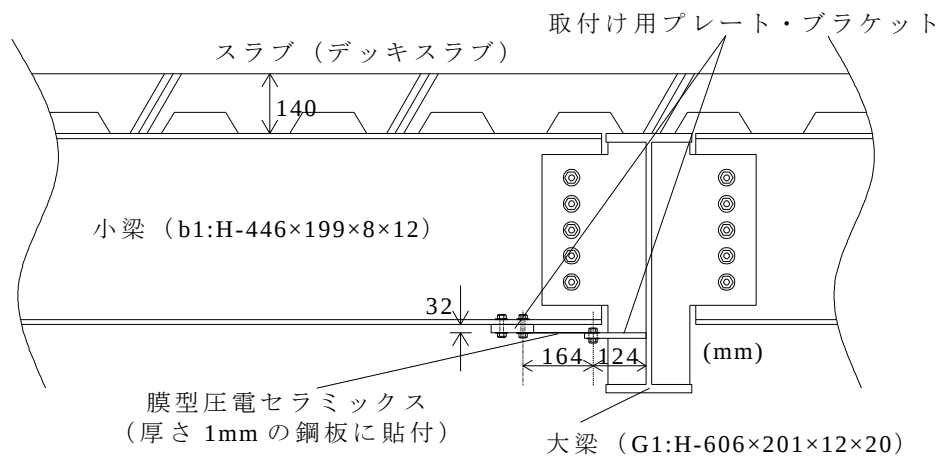
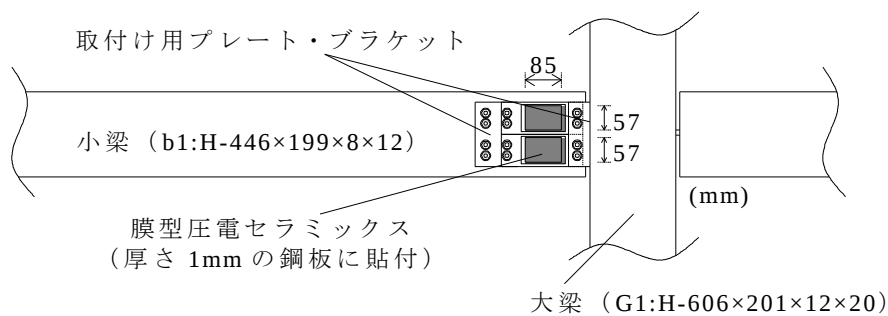


図 4.2.3 起振器加振時の一次固有振動数 (8.5Hz) における振動モード形状



(a) 断面図



(b) 見上げ図

図 4.2.4 膜型圧電セラミックスを用いたアクチュエータ設置部の概要

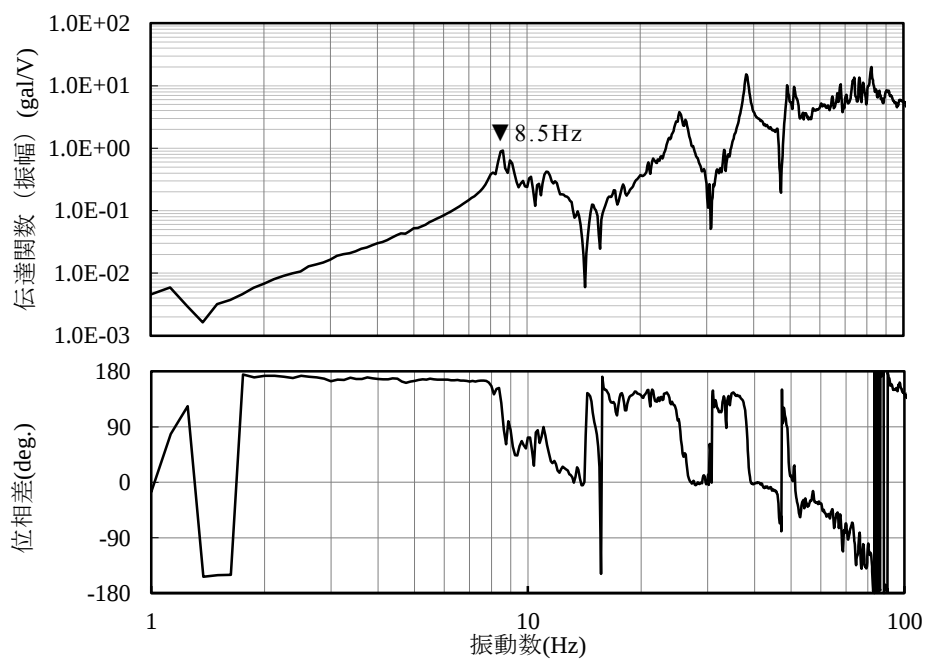


図 4.2.5 アクチュエータ用アンプへの入力信号に対する制御対象床中央部の応答
(中規模スパン建築物床)

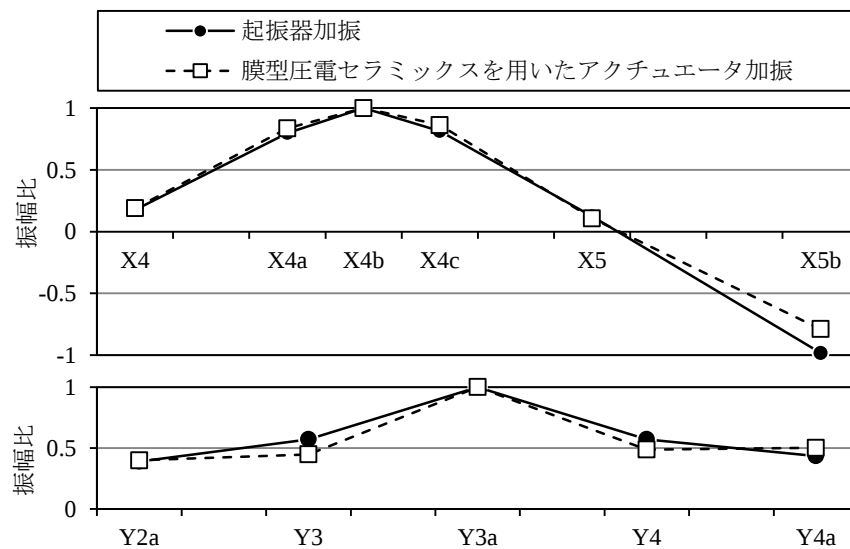


図 4.2.6 一次固有振動数 (8.5Hz) における振動モード形状

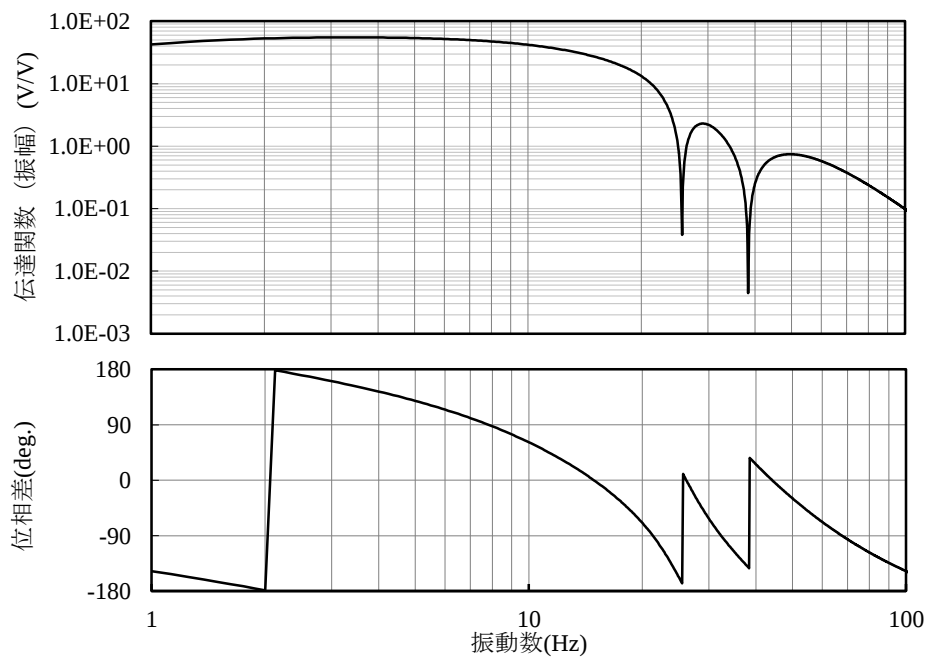


図 4.2.7 設計したコントローラの伝達関数
(中規模スパン建築物床)

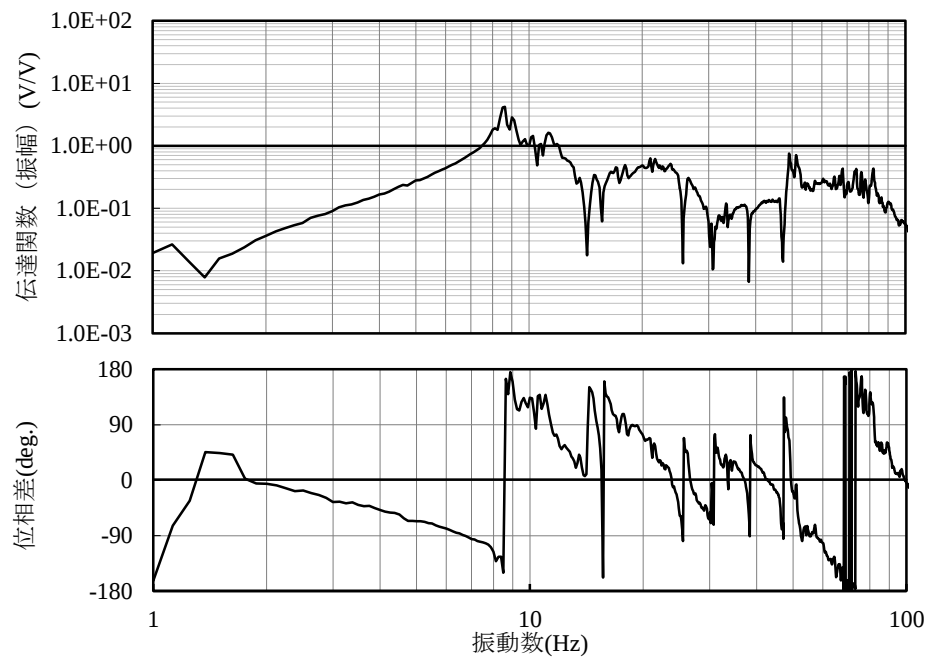


図 4.2.8 設計したコントローラを用いた制御系の開ループ伝達関数
(中規模スパン建築物床)

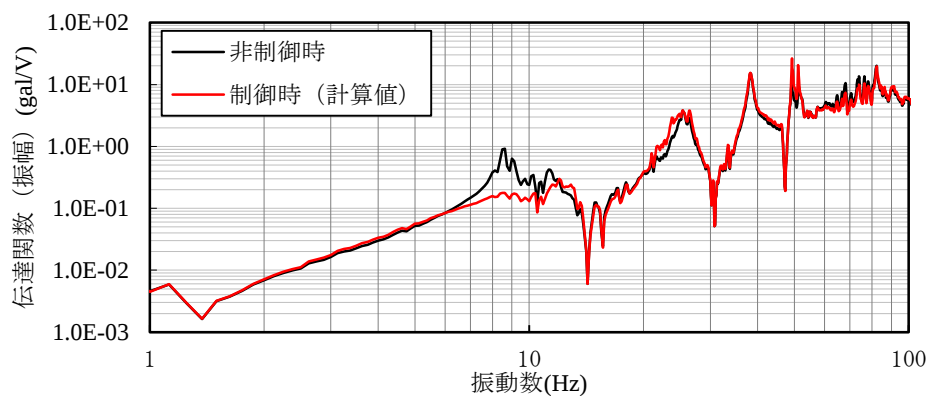


図 4.2.9 制御時におけるアクチュエータ用アンプへの入力信号に対する
制御対象点の応答加速度の計算値 (中規模スパン建築物床)

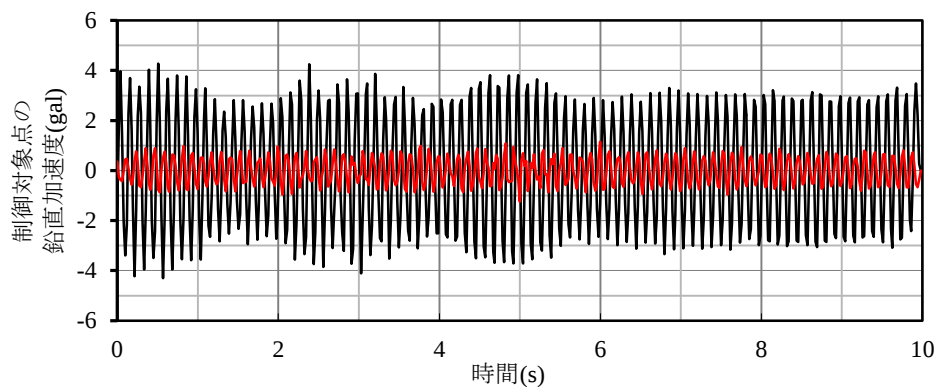


図 4.2.10 正弦波加振時 (8.5Hz) の制御対象点の鉛直加速度

4.3 大規模スパン建築物床での検証

4.3.1 制御対象床の概要

図 4.3.1 および写真 4.3.1 に、対象とした建築物床の概要を示す。建築物の構造形式は鉄骨造 7 階建てで、制御対象は 4 階の床である。基本スパン長は桁行方向 7.2m、梁間方向 19.2m であり、桁行方向に 1 スパンあたり 6 本の小梁が配置されている。表 4.3.1 に、各梁部材の断面寸法を示す。床は厚さ 150mm のフラットデッキを用いたコンクリートスラブで構成されている。大梁を含めた 1 スパン分の躯体重量は約 65.7ton であり、4.2 節で制御対象とした中規模スパン建築物床の躯体重量の約 2.5 倍である。

4.3.2 制御対象床の振動特性

4.2 節と同様に、はじめに、慣性質量を用いた起振器により対象床を加振することで、単位加振力あたりの加速度振幅（アクセランス）を実測し、制御対象とする振動の特性を把握した。図 4.3.1 に、起振器の設置位置および鉛直方向の加速度の測定点を示す。起振器は、振幅が一定で 2～30Hz の範囲で振動数が変化するスイープ信号を入力して駆動することとし、床に作用した加振力は、慣性質量に取り付けた加速度計にて測定された加速度と慣性質量の積より算出した。写真 4.3.2 に、起振器によるアクセランス測定状況を示す。

図 4.3.2 に、実測の結果得られた制御対象床中央（X1b-Y4a）の測定点におけるアクセランスを示す。図より、一次固有振動数は 7.0Hz であることがわかる。続いて、7.0Hz におけるアクセランスと、加振力と応答加速度の位相差を各測定点について算出し、一次固有振動数の振動モード形状を把握した。図 4.3.3 に、X1b-Y4a の測定点におけるアクセランスを基準として各測定点のアクセランスを正規化した振動モード形状を示す。図より、一次固有振動数の振動モードは大梁の振動モードが支配的であり、梁間方向のスパン中央が腹で大梁の両端部が節となるモード形状であることがわかる。また、小梁はほとんど変形せず、制御対象床と隣接するスパンの床が同位相で振動するモード形状となっていることがわかる。

なお、鉛直方向の振動感覚が敏感である 3～8Hz の振動数範囲には、7.0Hz の他に特に大きなピークが見られないことから、本検討では 7.0Hz の振動モードを制御対象とすることとした。

4.3.3 制振装置の設置および加力実験

4.3.2 節で把握した制御対象とする振動モード形状より、アクチュエータを大梁の両端部の柱との接合部に設置し、大梁に制御力を伝達して床の鉛直振動を制御することとした。

本制御対象床は、4.2 節で対象とした床と比較して剛性やモード質量が大きいことから、制御力が不足することが懸念されたため、アクチュエータの制御力の増大効果を検討することを目的として、アクチュエータ設置方法を以下に述べる“A-type”と“B-type”の 2 種とし、それぞれについてアクチュエータを 1 基のみ設置する場合と 2 基を並列に設置する場合を設定し、合計 4 ケースについて検討を行った。

図 4.3.4 および写真 4.3.3 に、それぞれのアクチュエータ設置方法の概要および取付け状況を示す。A-type は 4.2 節での設置方法と概ね同等であり、大梁端部の下フランジと柱側面にアクチュエータ取り付け用治具を設置し、これらの治具の間にアクチュエータをボルト接合にて取り付ける方法である。下フランジの底面とアクチュエータとの離隔は 66mm となっている。一方 B-type は、大梁端部の下フランジに取り付ける治具を A-type と比較して長くし、下フランジの底面とアクチュエータとの離隔を 145mm と大きくとった上で頬杖様の治具を配置し、アクチュエータの制御力が比較的大梁の中央部寄りに作用するように取り付ける方法である。

図 4.3.5 に、本検討に用いたアクチュエータの詳細を示す。アクチュエータは、4.2.3 節で述べたものに対して、より大きな制御力を大梁に作用させるため、膜型圧電セラミックスを貼合するための芯材を、より剛性の小さい厚さ 0.5mm のポリ塩化ビニル板とした。膜型圧電セラミックスの積層数は 2 層とし、4.2.3 節で述べたものと同じ 2 液性エポキシ接着剤にて貼合した。また、大梁および柱とボルト接合するポリ塩化ビニル板の両端部には、補強用に厚さ 3mm の鋼板を前述の 2 液性エポキシ接着剤を用いて取付けている。

以上の要領にて設置したアクチュエータを駆動することにより加力実験を行った。アクチュエータ用アンプに、許容印加電圧の 80%レンジである $2.5 \pm 4.0\text{V}$ (0-P) で制御対象とした床の一次固有振動数である 7.0Hz の信号を入力し、2 本の大梁端部計 4 か所に設置した全てのアクチュエータを同位相で駆動した。アクチュエータの駆動中、制御対象床中央 (X1b-Y4a) の振動加速度を記録した。表 4.3.2 に、各ケースにて得られた、測定点における加速度振幅を示す。表より、アクチュエータの設置方法は A-type よりも B-type の方が、さらにアクチュエータは 1 基よりも 2 基並列に設置した方が、制御対象床中央におい

て大きな加速度が生じており、より大きな制御力が作用させられることがうかがえる。

4.3.4 制御系設計

7.0Hz の振動モードを対象として振動制御実験を行った。制御対象点は制御対象床の中央（X1b-Y4a）とし、下階よりスラブの下面に加速度センサを設置した。制御手法は、第3章および第4章と同様に、古典制御理論に基づくフィードバック制御とした。

はじめに、すべての膜型圧電セラミックスを同位相で駆動し、アンプへの入力信号に対する制御対象点の鉛直加速度応答の伝達関数を実測し、得られた伝達関数をもとにコントローラを作成した。膜型圧電セラミックスを駆動する際のアンプへの入力信号は、振幅 $2.5 \pm 4V(0-P)$ 、振動数 2～100Hz のスイープ信号とした。図 4.3.6 に、実測した伝達関数にコントローラを考慮した開ループ伝達関数を示す。開ループ伝達関数において、位相遅れが 0° となる振動数での振幅倍率が 0.3 以下であり、振幅倍率が 1 以上となる振動数で位相遅れが 90° 以上あるいは -60° 以下であることから、ゲイン余裕、位相余裕が十分保たれており、安定な制御系となっていると判断できる。また制御対象とする 7.0Hz において振幅倍率が 1 以上かつ位相遅れが 180° 付近であることから有効な制御系となっていることがわかる。なお、9.1Hz については本検討では制御対象としていないが、この振動数においても振幅倍率が 1 以上かつ位相遅れが 180° 付近であることから、振動低減効果が期待される。

図 4.3.7 に、計算上求められる制御状態、非制御状態のアクチュエータ用アンプへの入力信号に対する制御対象点の応答加速度を比較して示す。図より 7.0Hz において加速度振幅を約 1/4 に低減する効果が期待される。また、本検討では制御対象外としている 9.1Hz のピークについても加速度振幅を約 1/2 に低減する効果が見込まれる。

4.3.5 振動制御実験と制御効果の検証

制御対象とする外乱振動は、制御対象点（X1b-Y4a）付近に設置した起振器によるスイープ加振による振動および X1 通りと X2 通りのスパン中央を桁行方向に歩行する歩行加振による振動の 2 種とした。スイープ加振では、2～20Hz の範囲で約 100N の加振力を制御対象床に作用させた。また、歩行加振は、成人男性による二人歩行とし、歩行テンポは、制御対象とした床の一次固有振動 7.0Hz に 4 倍調で共振する 1.75Hz とした。

図 4.3.8 に、起振器のスイープ加振により測定した制御対象点（X1b-Y4a）におけるアクセラランスを示す。図より、制御対象とした 7.0Hz のアクセラランスを約 1/3 に低減し

ていることがわかる。また、制御系設計の際にも制御効果が期待されていた 9.1Hz についても、同時に約 1/2 の低減効果が得られていることがわかる。

図 4.3.9 に、歩行加振を行った際の制御対象点 (X1b-Y4a) における振動加速度の 1/3 オクターブバンド分析結果を示す。図には、日本建築学会編「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説 2004 年版」による知覚確率を併せて示した。6.3Hz および 8Hz 帯域において振動制御効果が見られ、V-50 程度の振動が V-10 程度に低減されていることがわかる。加速度振幅としては約 1/3 に低減されており、制御系設計時の予測値と概ね同等の制御効果が得られていることがわかる。

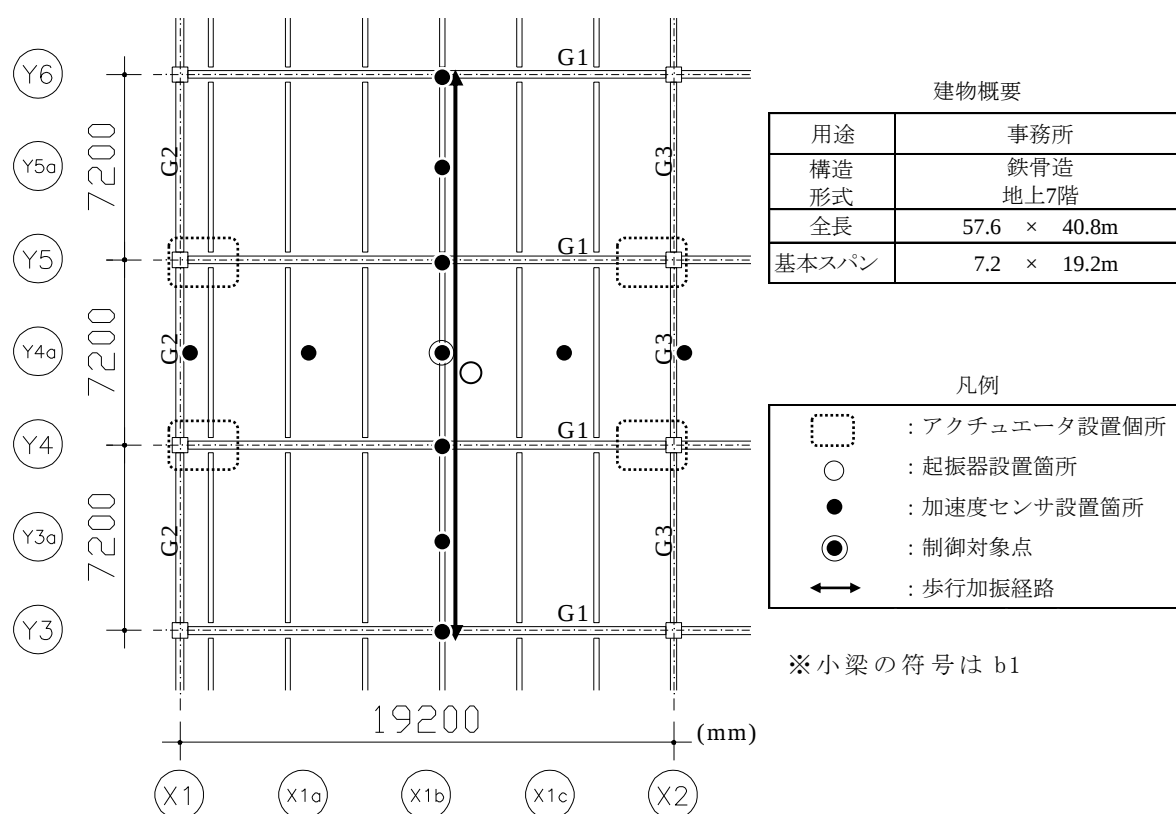


図 4.3.1 大規模スパン建築物床および測定点の概要

表 4.3.1 各梁部材の断面寸法

G1	H-950×300×19×32
G2	H-700×300×14×25
G3	H-700×250×14×22
b1	H-396×199×7×11



写真 4.3.1 大規模スパン建築物床の概要（大梁）



写真 4.3.2 起振器によるアクセラランス測定状況

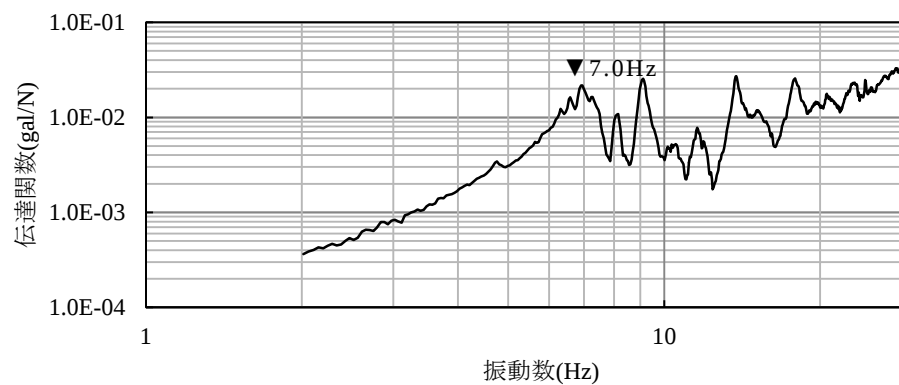


図 4.3.2 起振器設置位置におけるアクセラランス

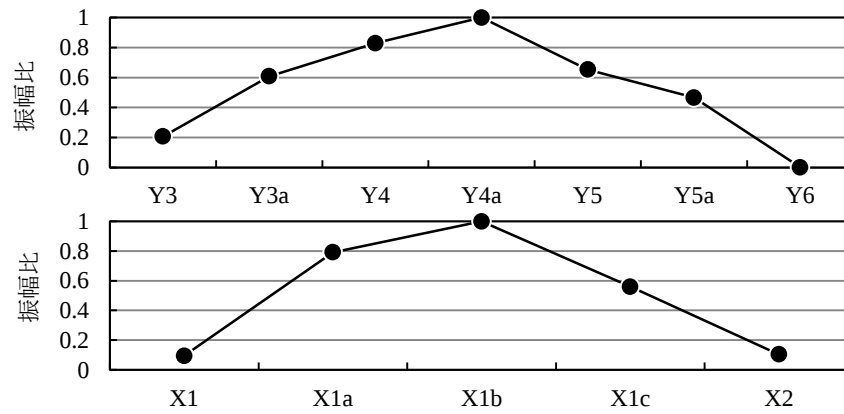
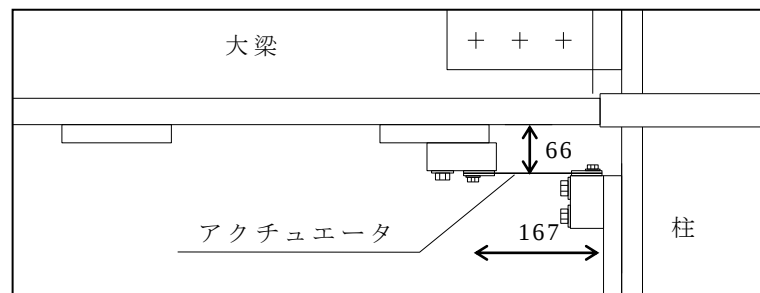
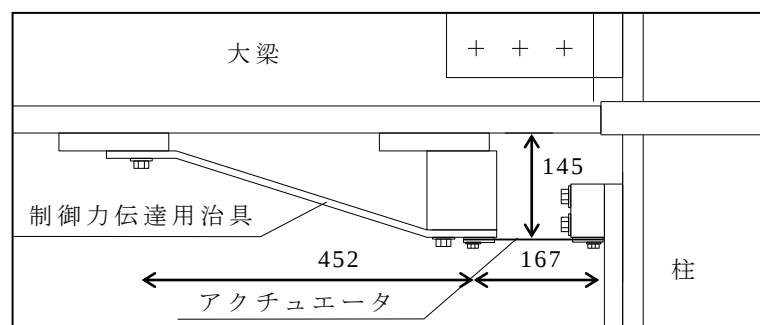


図 4.3.3 起振器加振時の一次固有振動数 (7.0Hz) における振動モード形状



(a) A-type



(b) B-type

図 4.3.4 アクチュエータの取付け方法



(a) A-type



(b) B-type

写真 4.3.3 アクチュエータの取付け状況

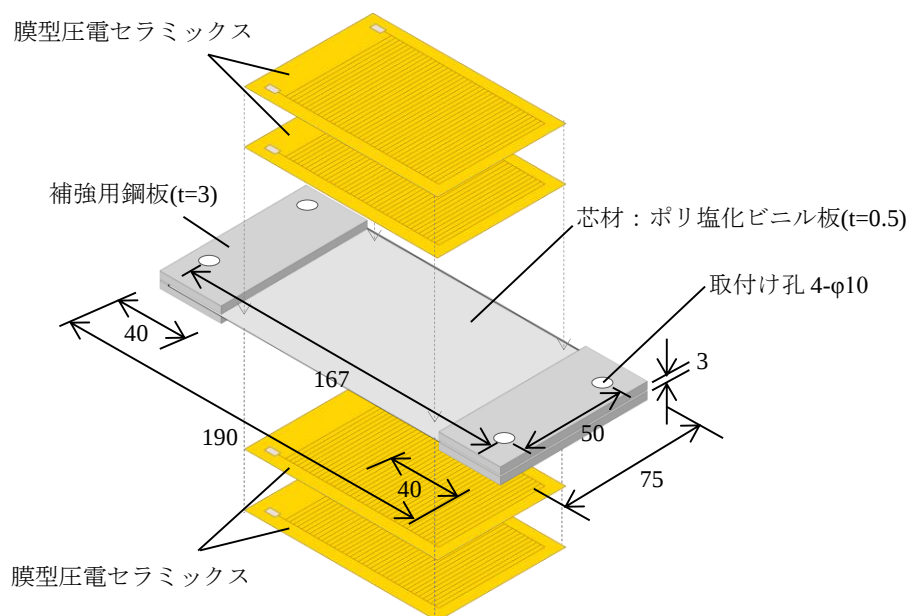


図 4.3.5 大規模スパン建築物床制御実験用アクチュエータ

表 4.3.1 正弦波 (7.0Hz) 加振時の制御対象床中央における加速度振幅

		アクチュエータの 配置数	
		1 基	2 基
取付け 方法	A-type	0.35	0.79
	B-type	0.71	2.0

(gal(0-P))

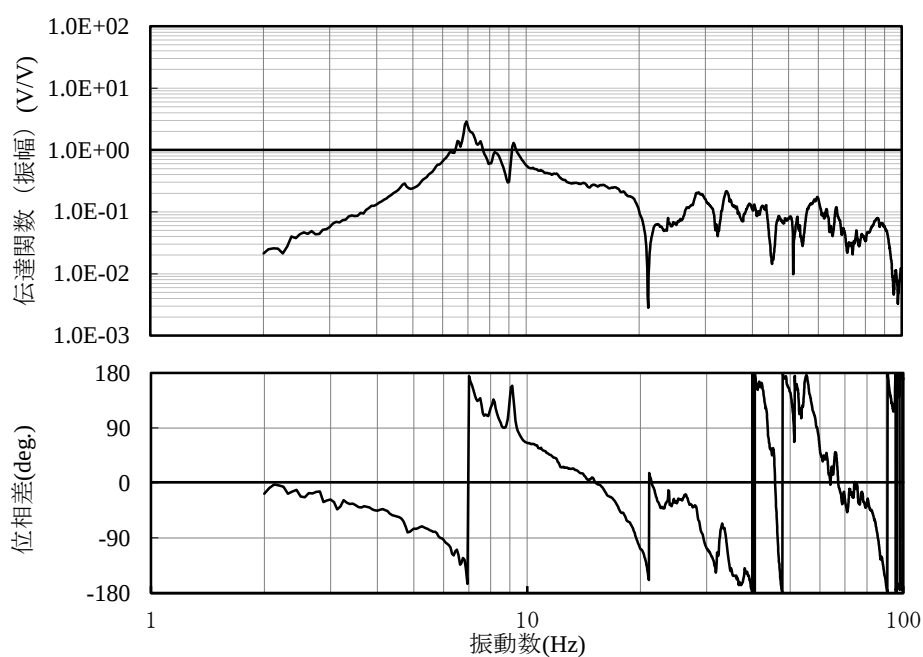


図 4.3.6 設計したコントローラを用いた制御系の開ループ伝達関数
(大規模スパン建築物床)

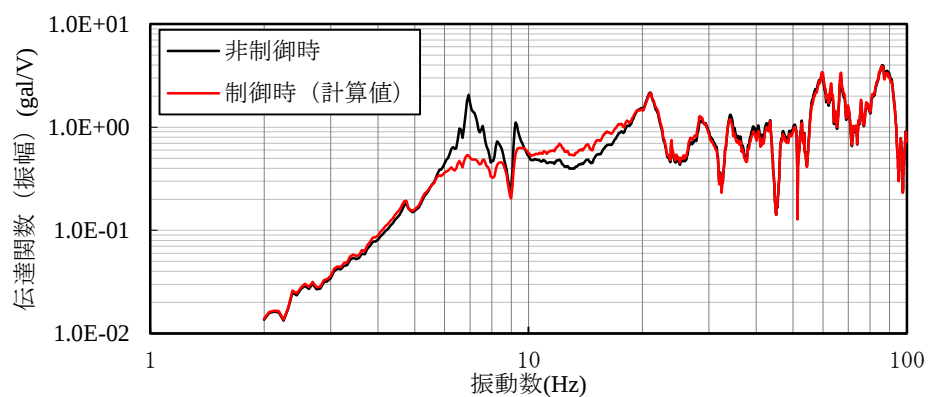


図 4.3.7 制御時におけるアクチュエータ用アンプへの入力信号に対する
制御対象点の応答加速度の計算値 (大規模スパン建築物床)



図 4.3.8 スイープ加振時 (2~20Hz) の制御対象床中央のアクセラランス

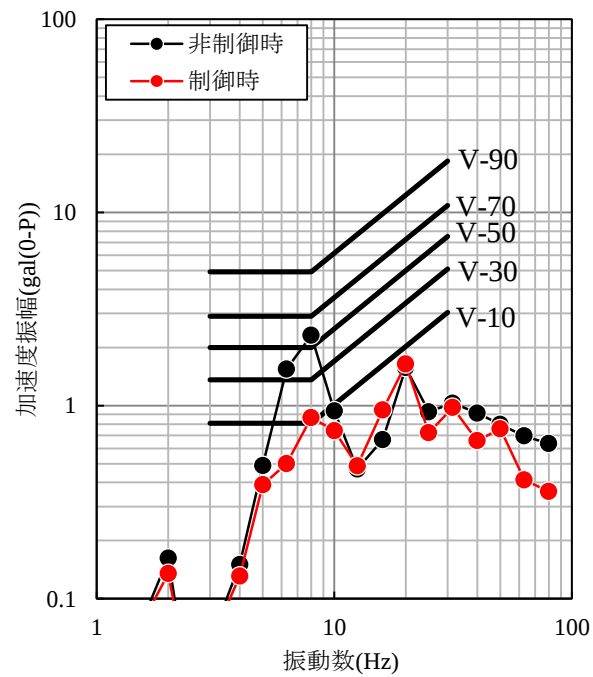


図 4.3.9 二人歩行加振時 (歩行テンポ 1.7Hz) の制御対象点の鉛直加速度

4.4 まとめ

本章では、スパン長と床の振動モードの特徴が異なる 2 種の実建築物を対象として、本研究で提案する膜型圧電セラミックスを用いた振動制御手法の、鉛直方向の床振動に対する有効性を確認する実験を行った。一連の実験の中で、起振器を用いた正弦波加振や振動数スイープ加振、あるいは歩行加振といった、様々な特徴をもった加振による外乱振動に対する振動制御の有効性を確認した。また、アクチュエータの設置方法等により制御力を増大する検討を行い、比較的質量や剛性が大きい大規模スパンを有する建築物床に対する適用可能性を検討した。本章での検討の結果得られた結論は、以下の通りである。

- ・膜型圧電セラミックスを用いたアクチュエータを実建築物の小梁あるいは大梁の両端部に配置し同位相で駆動することで、対象とする床の鉛直方向の一次振動モードを励起することができる。
- ・アクチュエータ 2 基を並列に配置することや、梁部材の下フランジ面からの離隔を大きくすることなどにより、制御力を増大させることができる。
- ・アクチュエータの取付け方法を適切に設定することで、実建築物床における歩行振動等と同等以上の振動を励起させる加振力を得ることができる。
- ・実建築物の梁両端部に取付けたアクチュエータおよび制御対象点における加速度センサ信号を用いて、古典制御理論に基づいたフィードバック型の制御系を設計することが可能であり、制御対象とした振動モードの減衰を付加することができる。

以上であるが、供用中の実建築物を対象とした振動対策では、本章で実施したようなアクチュエータの取付け方法の検討や加振力の確認を、現地で実施することは困難であると考えられる。次章では、アクチュエータの構成や設置方法を事前に設定するために必要となる、振動低減効果の予測手法の検討結果について述べる。

第 5 章

床振動制御技術による制御効果の予測手法の構築

第5章 床振動制御技術による制御効果の予測手法の構築

5.1 はじめに

第4章では、提案する振動制御技術が実建築物床の鉛直振動の制御に有効であることを実験的に確認した。一方、実際に床振動問題が発生した建築物床に対して本制御技術を適用しようとした場合、アクチュエータが床に作用させることができる制御力の大きさを供用中の建築物にて実験的に把握した上でその設置方法等を検討することは、工期や費用、建築物の運用面などの実用上の観点から困難であると考えられる。そこで本章では、制御対象床にアクチュエータを取付けた実験的な事前検討を行わずに、本制御技術による床振動低減効果を予測する手法を検討する。また、模擬床試験体を用いてその予測手法の有効性を検証する。

5.2 振動制御効果の予測手法の概要

提案する床振動制御技術による振動低減効果の予測フローを下記および図 5.2.1 に示す。

①床の振動特性把握

床振動問題発生後、制御対象とする振動のモード形状と床の動剛性を解析あるいは計測により把握する。

②アクチュエータの配置方法の設定

制御対象とする振動のモード形状に応じてアクチュエータの配置方法を設定する。

③アクチュエータ単体の推力，変位量の予測解析

アクチュエータの有限要素法解析モデルを作成し、アクチュエータ単体が有する最大推力，最大変位量を算出する。

④床剛性の予測解析

床の有限要素法解析モデルを作成し、アクチュエータ配置位置に静的加力した際のアクチュエータ固定部の変位量を算出する。

⑤アクチュエータの制御力算出

③で算出したアクチュエータの最大推力および最大変位量と④で算出した床剛性から、アクチュエータが床に作用させることができる最大制御力を算出する。

⑥アクチュエータによる床の加振特性の予測解析

床の解析モデルのアクチュエータ固定部に単位加振力を入力しアクチュエータを動的に駆動することで制御対象点に生じる応答加速度を算出する。

⑦床振動低減量の算出

①で把握した床の動剛性と⑥で算出したアクチュエータによる床の加振特性を用いて、制御を行った場合の床の応答特性を算出し、非制御時の特性と比較する。

以降、模擬床試験体を用いて行った予測手法の有効性検証結果とともに、具体的な手順について述べる

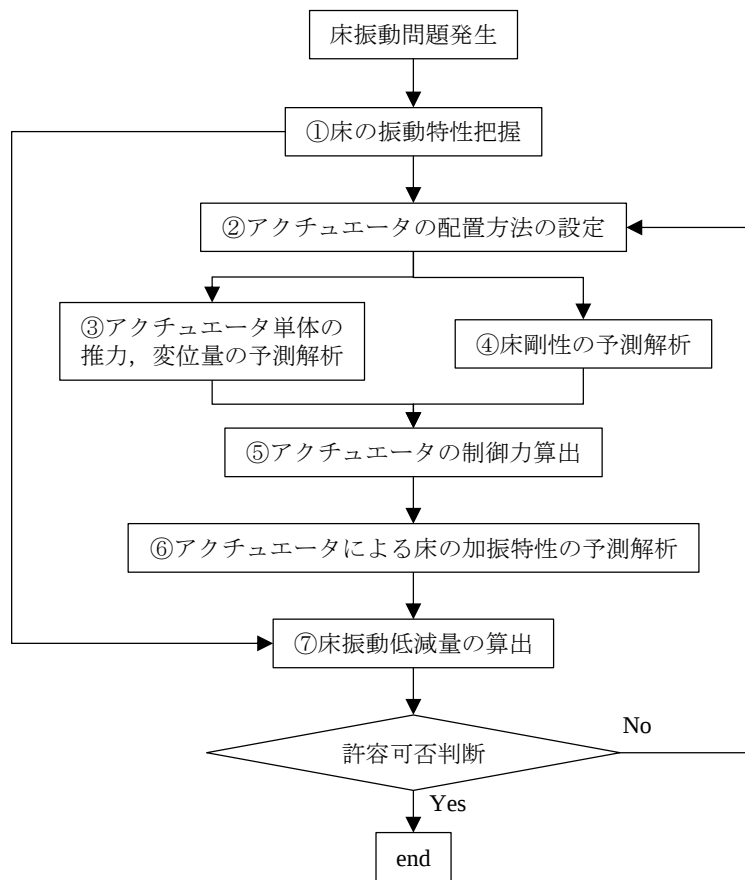


図 5.2.1 振動低減効果の予測フロー

5.3 模擬床試験体を用いた予測手法の検証

5.3.1 模擬床試験体の概要

図 5.3.1 に、製作した模擬床試験体の概要を示す。4 本の鋼管柱の梁間、桁行方向それぞれに大梁が架けられ、桁行方向の大梁間に 3 本の小梁が、これらの小梁間にそれぞれ 3 本の孫梁が架けられている。鋼管柱と大梁は上下フランジとウェブにおいて隅肉溶接にて接合され、梁同士はウェブにおいて高力ボルトで接合されている。また、鉛直方向の 1 次固有振動数が一般的な鉄骨造建築物の床の固有振動数と同程度になるよう、3 本の小梁間に合計 1.2ton の重錘を均等配置している。床面は、厚さ 25mm の木質系合板を各梁にビス留めして構成した。

5.3.2 模擬床の振動特性

図 5.3.2 に、模擬床の中央を起振器にて鉛直方向に加振した際の、加振点におけるアクセルランスを示す。図より、一次固有振動数は 10.0Hz であり、一般的な鉄骨造建築物の床の固有振動数と同程度であることが分かる。図 5.3.3 に、模擬床の有限要素法解析モデルを示す。柱梁をソリッド要素で構成し、重錘配置部分に接点質量を入力している。解析より得られた一次固有振動数は 10.0Hz であり、実測値と同様の結果であった。また振動モードは、主に桁行方向の梁がモードの腹を形成している。

本章では、他の卓越振動数と比較して最も体感振動として感じられやすいと考えられる、10.0Hz の振動モードを制御対象として検討を進めることとした。

5.3.3 アクチュエータの配置方法の設定

制御対象とした振動モードが主に桁行方向の梁のモードによることから、この梁の振動を低減することで床全体の振動を低減可能であると考えられるため、アクチュエータは桁行方向の大梁の両端部に配置することとした。制御対象点は模擬床の中央とし、小梁の下フランジ面に加速度センサ（感度係数：0.01V/gal）を設置することとした。

なお、高次の固有振動数を制御対象とする場合は、主にその振動モードの腹に加速度センサを設置し、振動モードの腹を形成する梁の両端部にアクチュエータを配置する。

5.3.4 アクチュエータの推力，変位量の予測解析

提案する制御手法に用いるような変位量が微小なアクチュエータにおいては、制御対象に制御力を十分に伝達させるために、推力と変位量の関係を把握することが重要である。アクチュエータの駆動範囲において推力 F と変位量 δ の関係が線形であるとする、これらの関係はアクチュエータの最大推力 ($f_{\max}$) と最大変位量 ($\delta_{\max}$) を用いて次式で表される。

$$F = -(f_{\max}/\delta_{\max}) \cdot \delta + f_{\max} \quad \dots(5.1)$$

すなわち、アクチュエータは、周囲から拘束を受けずに自由に伸縮できる場合 ($F=0$ の場合) に変位量が最大となり、伸縮方向の変位が完全に拘束されている場合 ($\delta=0$ の場合) に推力が最大となる。提案する制御手法で用いるアクチュエータの推力，変位量には、これを構成する膜型圧電セラミックスの積層枚数や芯材の剛性，制御対象への取付け部のディテール等が大きな影響を与える。本予測手法ではこれらの構成要素を詳細にモデル化し、アクチュエータの出力特性を把握する。

図 5.3.4 に、アクチュエータの有限要素法解析モデルを示す。解析検討の対象とするアクチュエータは、厚さ 0.3mm の SUS 鋼板を芯材として、両面に膜型圧電セラミックスを 2 層ずつ、エポキシ系接着剤で貼付している（以降、“SUS0.3mm テーパー-type”と記す）。また、アクチュエータの固定部は極力剛性を高くし、かつ膜型圧電セラミックスを無理なく貼付できるようテーパー部を設けている。

有限要素法解析モデルは、ソリッド要素を用いて芯材や接着層，端部補強などを詳細に再現したものとなっている。接着層の厚さは、接着剤の塗布量と塗布面積から算出した。膜型圧電セラミックスの圧電特性は熱膨張特性として置き換え、圧電定数を線膨張係数として設定し、熱負荷を与えることで膜型圧電セラミックスの伸縮作用を再現した。図 5.3.4 中の固定部 A および B の境界条件を完全固定として膜型圧電セラミックスに熱負荷を与えた際に固定部に生じる反力をアクチュエータの最大推力として、固定部 A を完全固定，B を自由とした場合に生じる変位をアクチュエータの最大変位量として算出した。

また、解析結果の妥当性を検証するために、図 5.3.5 に示す試験器を用いてアクチュエータの推力を、図 2.3.1 に示す試験器を用いてリニアガイド側固定部の変位を測定することでアクチュエータの最大変位量を把握した。推力の測定の際には、アクチュエータ取付け部を完全固定とすることは困難であるため、試験器両端部の相対変位を同時に測定し、

ロードセルで測定された荷重と変位の関係を記録した。

図 5.3.6 に、解析値と実験値を比較して示す。両者は近似しており、本手法でアクチュエータの最大推力と最大変位量を予測できることがわかる。

5.3.5 床剛性の予測解析と制御力の算定

アクチュエータが制御対象の床に作用させることができる制御力は、5.3.3 節で求めたアクチュエータの出力特性と制御対象の床剛性との関係から算出される。ここで床剛性とは、制御力の作用点すなわちアクチュエータの固定部に単位力を加えた際の、その点における変位量を指すものとする。

図 5.3.7 に示すように、模擬床の有限要素法解析モデルの柱梁接合部におけるアクチュエータ固定部に 1N の静的荷重を入力し、その点の変位量を算出した。図 5.3.6 に、解析により得られた床剛性を表す直線を併記する。図中の膜型圧電セラミックスの出力特性と床剛性を表す直線との交点が、アクチュエータが駆動した際に固定部に作用させることができる最大の制御力と変位量を表している。

以上の結果より、SUS0.3mm テーパー-type の最大推力と最大変位量は、それぞれ 2034N(P-P), 8.6 μ m(P-P)と算定される。参考として、第 3 章および第 4 章で用いたアクチュエータ 2 種（以降それぞれ、“鋼板 1mm-type”, “塩ビ 0.5mm-type”と記す）について、最大推力と最大変位量の解析結果を、図 5.3.6 に併せて示す。図より、模擬床試験体に最も大きな制御力を作用させることができるアクチュエータは、SUS0.3mm テーパー-type であることが確認できる。

5.3.6 アクチュエータによる床の加振特性の予測解析

単位力を制御対象床に作用させた際の、制御対象点での応答加速度を算出する。具体的には、床解析モデルのアクチュエータ固定部に、図 5.3.8 に示すようなパルス荷重を入力する。このパルス荷重のスペクトル振幅は全ての振動数に対して 1N となるため、応答加速度のスペクトル振幅が単位力あたりの加速度振幅となり、アクチュエータ固定部に力が作用した場合のアクセラランスに相当する。図 5.3.9 に、解析の結果得られた制御対象点における時刻歴応答加速度を示す。また、図 5.3.10 に、時刻歴応答加速度を周波数分析して得られたアクチュエータ固定部に力が作用した場合のアクセラランスと、実際に模擬床でアクチュエータを駆動して得られたアクセラランスの実測結果を併せて示す。図より、

実測結果と比べて解析結果がやや大きな値を取っているものの、制御対象とした 10.0Hz 付近において両者は概ね一致しており、本手法を用いて制御対象床でアクチュエータを駆動した際のアクセラランスが算出可能であることがわかる。

5.3.7 振動制御効果の算出

5.3.6 節の解析結果に基づき、フィードバック型の制御系による床振動の低減量を算出する。前章までの制御低減効果の検討では、外乱が作用する点を考慮せず、アクチュエータ用アンプへの入力信号に対する制御対象点の応答加速の低減量を評価していた。この方法でおおよその低減効果は予測できるものの、アクチュエータの制御力が作用する点と外乱が作用する点が異なる場合には、この方法では厳密な振動低減量を評価することができない。本章では、より正確に振動低減量を予測するため、アクチュエータの制御力が作用する点と外乱が作用する点が異なることを考慮に入れた制御効果の算出方法を検討する。

制御対象点に外乱が作用し、アクチュエータ固定部にその制御力が作用した場合の応答を、伝達関数を用いたブロックダイアグラムで表すと、図 5.3.11 のように表される。図より、非制御時および制御時における外乱 X 作用時の応答 Y は、次のように表される。

$$\begin{aligned} \text{〔非制御時〕} \quad X \cdot \alpha \cdot G &= Y \\ \Leftrightarrow Y/X &= \alpha \cdot G \quad \dots(5.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{〔制御時〕} \quad (X \cdot \alpha + Y \cdot k_1 \cdot H \cdot k_2 \cdot \beta) \cdot G &= Y \\ \Leftrightarrow Y/X &= \alpha \cdot G / (1 - k_1 \cdot k_2 \cdot \beta \cdot G \cdot H) \quad \dots(5.3) \end{aligned}$$

ここで、

X : 外乱

Y : 応答

G : 床の振動特性

H : 周波数成形フィルタ (コントローラ)

α : 制御対象点に作用する外乱のモードに対する刺激

β : アクチュエータ加振力のモードに対する刺激

$\alpha \cdot G$: 制御対象点における床のアクセラランス

$\beta \cdot G$: アクチュエータによる床のアクセラランス

k_1 : 加速度センサの感度係数

k_2 : アクチュエータへ印加する単位信号あたりの推力

図 5.3.12 に、検討対象とした模擬床試験体に対して設計したコントローラ H を、図 5.3.13 に、制御系の開ループ伝達関数 $k_1k_2\beta GH$ （アクチュエータへの入力信号から制御信号までの伝達関数）を示す。図 5.3.12 より、制御対象とする 10Hz において位相が 180° でありゲインが大きくなっていることから、有効な制御系になっていることがわかる。また、位相が 0° となっている周波数においてゲインが 0dB 未満となっていることから、制御系の安定性が確保されていることがわかる。

ここで、制御対象とする振動の最大加速度振幅 A に対してアクチュエータへ入力する制御信号の最大値 V_{max} が許容印加電圧 V_a を超えないための条件は次式で表される。

$$V_{max} = A \cdot k_1 \cdot H_{max} \leq V_a \quad \dots(5.4)$$

ここで、

H_{max} : フィルタゲインの最大値

仮に、制御対象とする振動の最大加速度振幅を実際の床で生じ得る範囲で比較的大きな 20gal(p-p)と設定すると、(5.4)式は以下となる。

$$A=20 \text{ (gal(P-P))}$$

$$k_1=0.01 \text{ (V/gal)}$$

$$H_{max}=44.7 \quad (\text{図 5.3.12 より})$$

$$V_{max} = A \cdot k_1 \cdot H_{max} = 8.9 \text{ (V(P-P))}$$

以上より、アクチュエータへ入力する制御信号が、本制御システムで用いたアクチュエータへの許容印加電圧の最大値 10V(P-P)を下回っていることから、設定したアクチュエータで制御対象の振動を制御可能であることが確認できる。

図 5.3.14 に、(5.2)式および(5.3)式より算出した外乱作用時の床の応答加速度を示す。図より、非制御時と比較して制御時では一次固有振動数における加速度振幅が約 1/5 に低減されることがわかる。

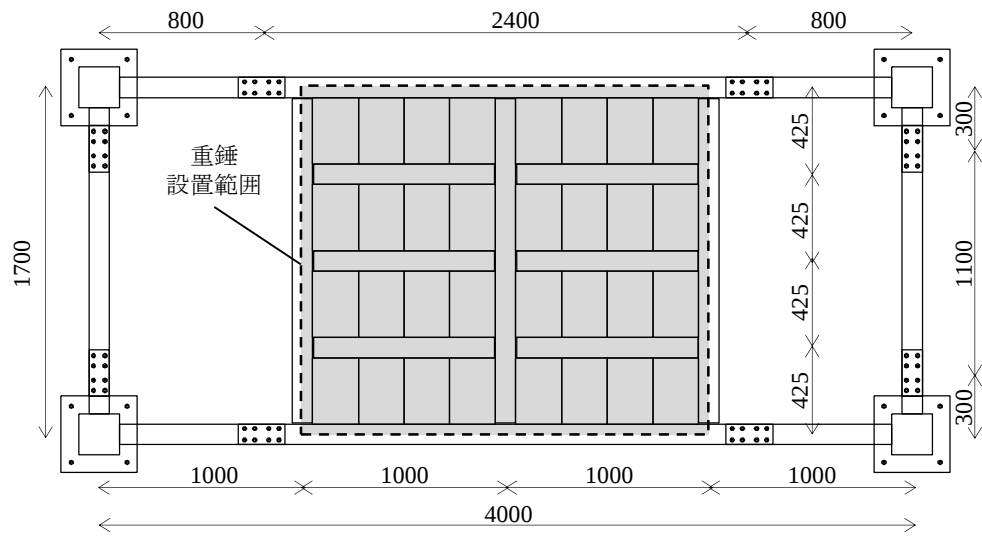
5.3.8 振動制御実験と予測手法の検証

以上に述べた振動低減効果の予測手法の妥当性を検証するため、模擬床試験体実際に外乱を与え、設計した制御系による振動低減効果を確認する実験を行った。加振方法は、

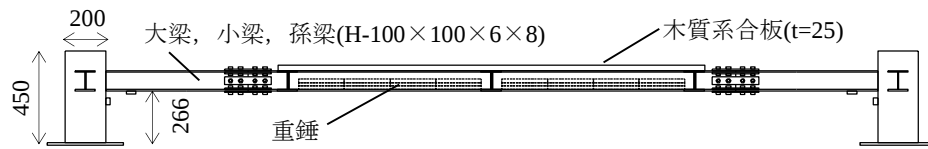
模擬床の規模による制約から、起振器による歩行の模擬加振とヒールインパクトとした。

図 5.3.15 に、非制御時と制御時における模擬床中央での加速度波形の 1/3 オクターブ周波数分析結果を日本建築学会編「建築物における振動に関する居住性能評価指針・同解説 2004 版」の知覚確率と併せて示す。図より、一次固有振動数が含まれる 10Hz 帯域の応答加速度が約 1/4 に低減されており、概ね設計値と同等の制御効果が得られていることがわかる。

図 5.3.16 に、ヒールインパクト時の模擬床中央での自由減衰波形を示す。図より、非制御時と比較して、制御時の波形は加振後の振動が急速に収束しており、制御により減衰が付加されていることがわかる。自由減衰波形から両者の減衰比を算出すると、非制御状態では $h=4.7\%$ 、制御状態では $h=22.1\%$ であった。制御を行うことで減衰比が約 4.7 倍に増加しており、設計値とほぼ同等の制御効果が得られていることがわかる。



(a) 伏図



(b) 断面図

図 5.3.1 模擬床試験体の概要

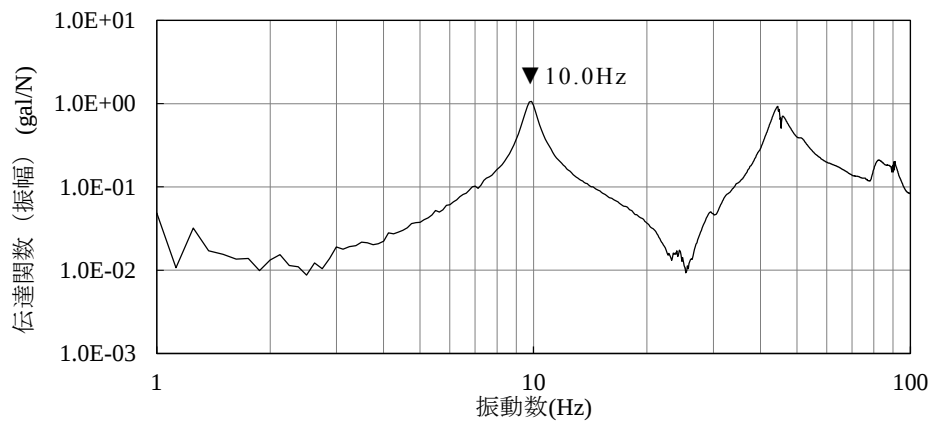
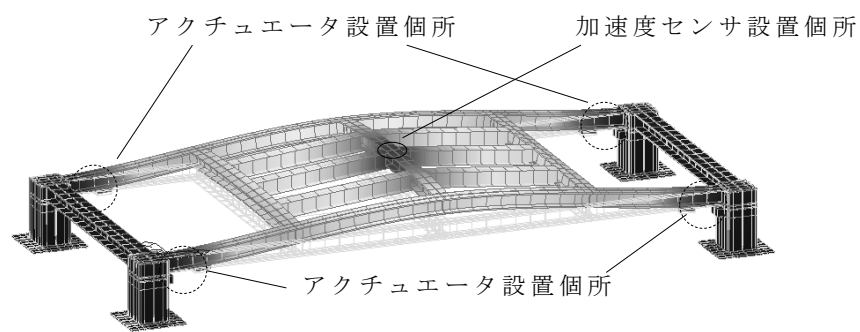
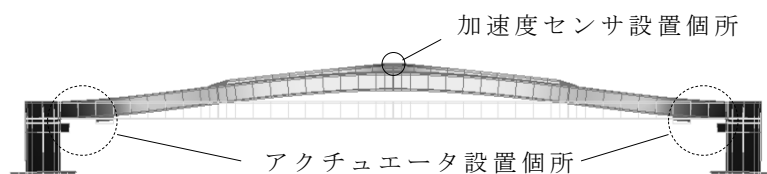


図 5.3.2 模擬床試験体中央におけるアクセラランス



(a) 鳥瞰図



(b) 長辺立面図

図 5.3.3 模擬床試験体の有限要素法解析モデルと一次固有振動数におけるモード形状

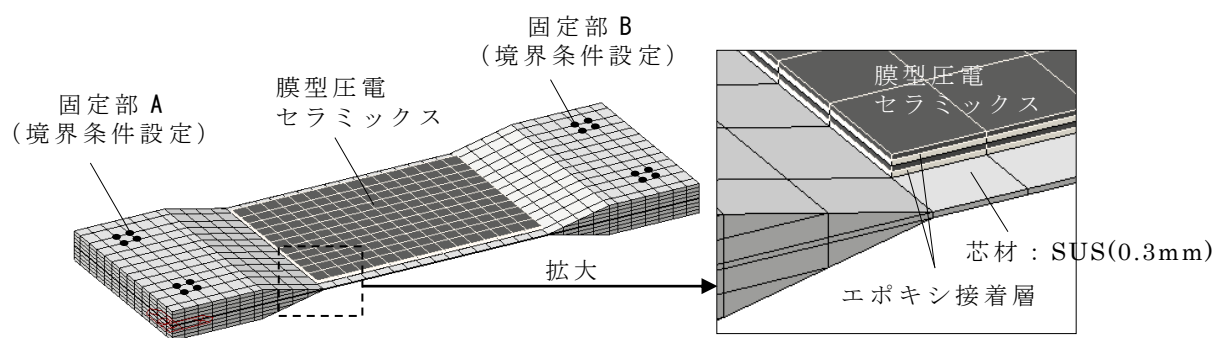


図 5.3.4 アクチュエータ (SUS 0.3mm テーパー-type) の有限要素解析モデル

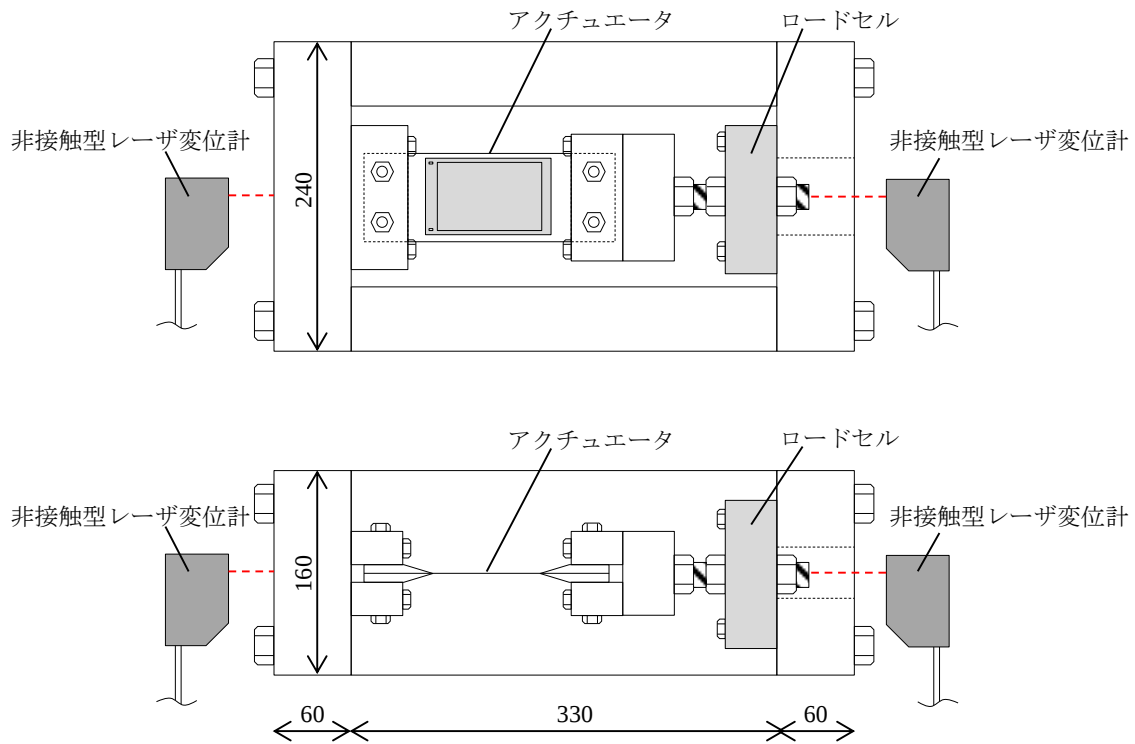


図 5.3.5 推力測定用試験器

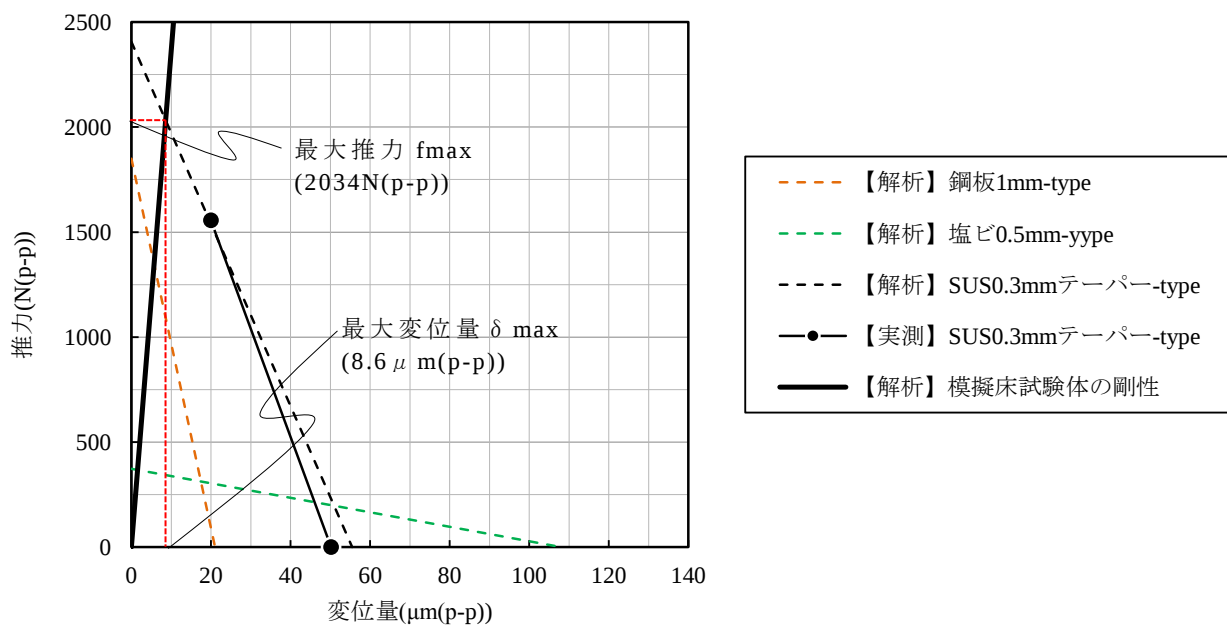
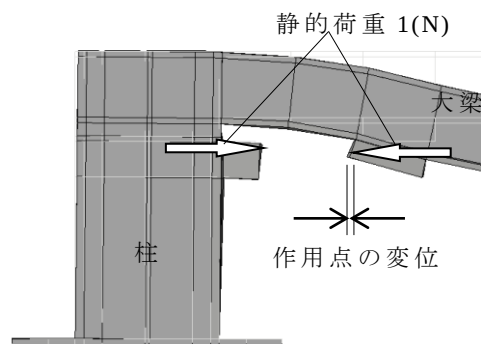


図 5.3.6 各アクチュエータの推力と変位量の関係



解析モデルのアクチュエータ固定部詳細

図 5.3.7 床剛性解析時の入力荷重と変位

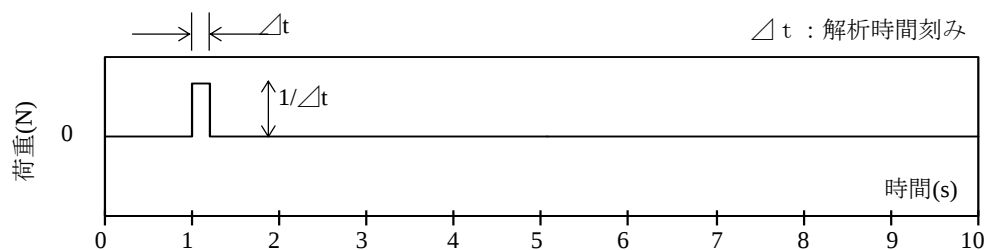


図 5.3.8 単位パルス荷重

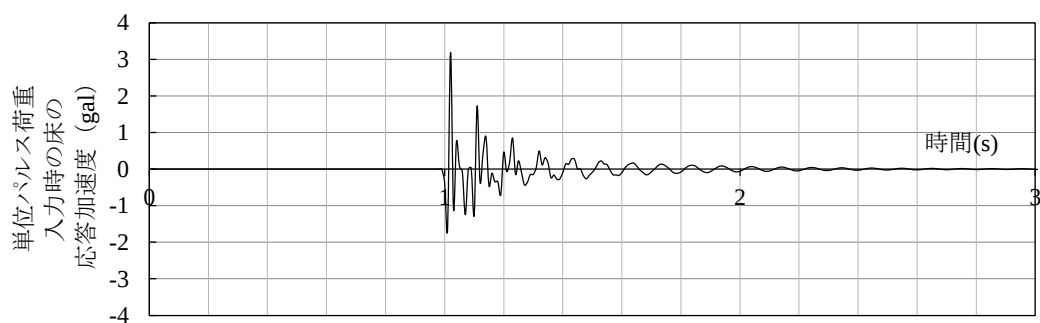


図 5.3.9 単位パルス荷重入力時の制御対象点における応答加速度

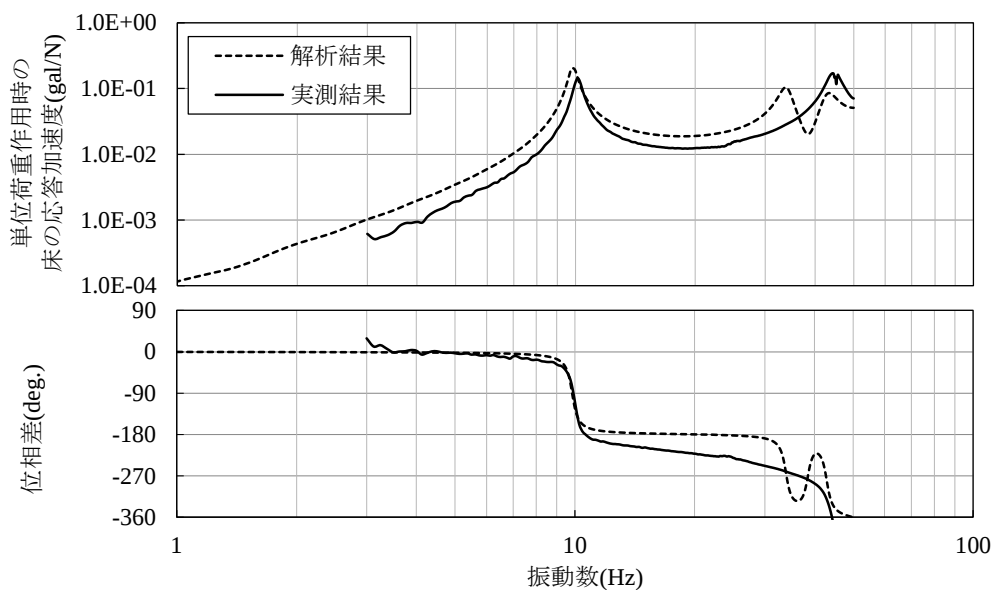


図 5.3.10 アクチュエータ固定部に対する制御対象点のアクセラランス

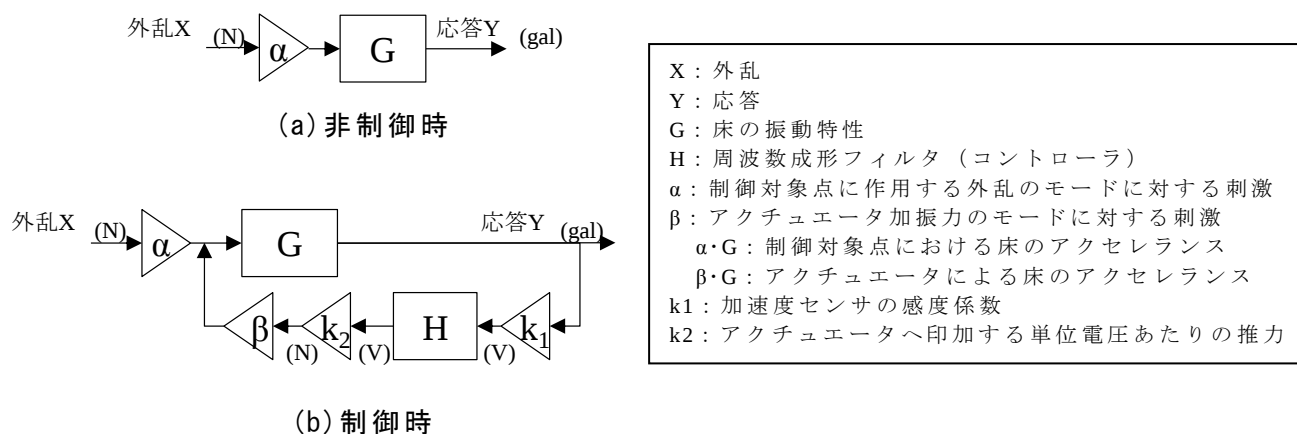


図 5.3.11 制御力と外乱の作用点異なる場合の床応答に関するブロックダイアグラム

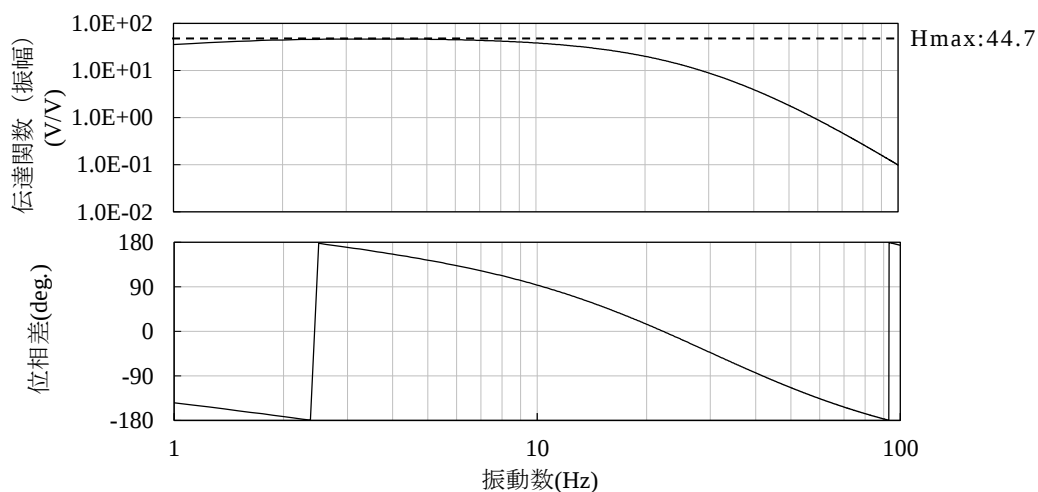


図 5.3.12 設計したコントローラの伝達関数 (模擬床試験体)

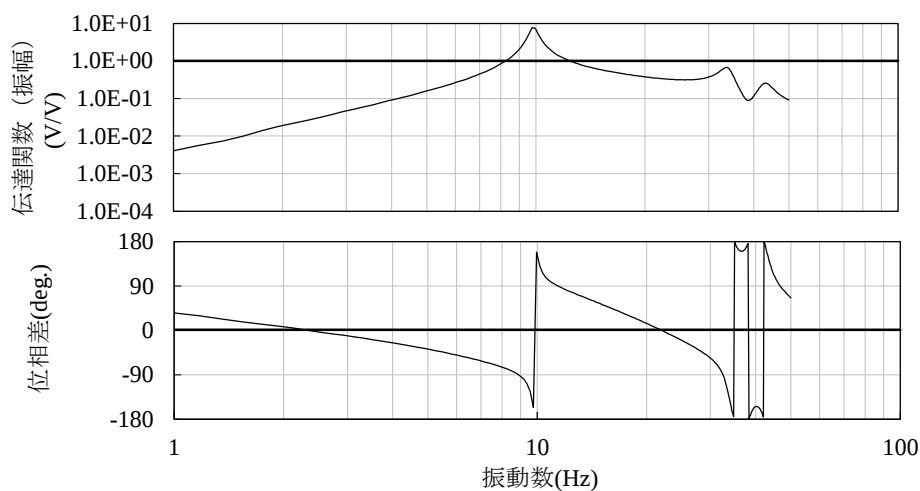


図 5.3.13 設計したコントローラを用いた制御系の開ループ伝達関数 (模擬床試験体)

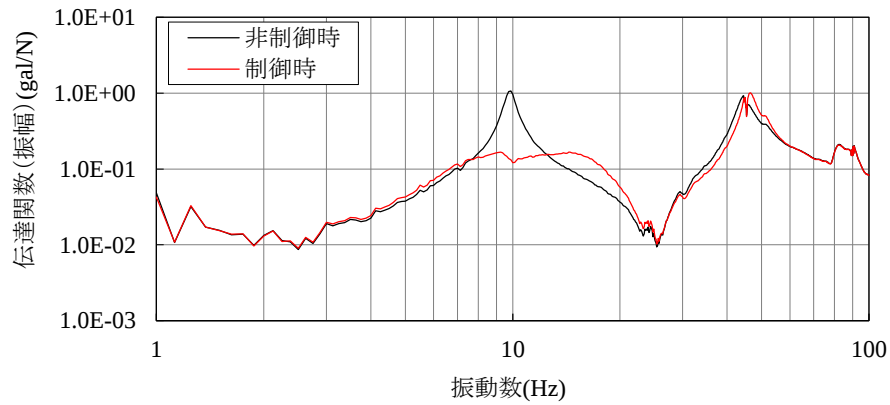


図 5.3.14 制御対象点に作用する外乱に対する模擬床試験体の応答加速度

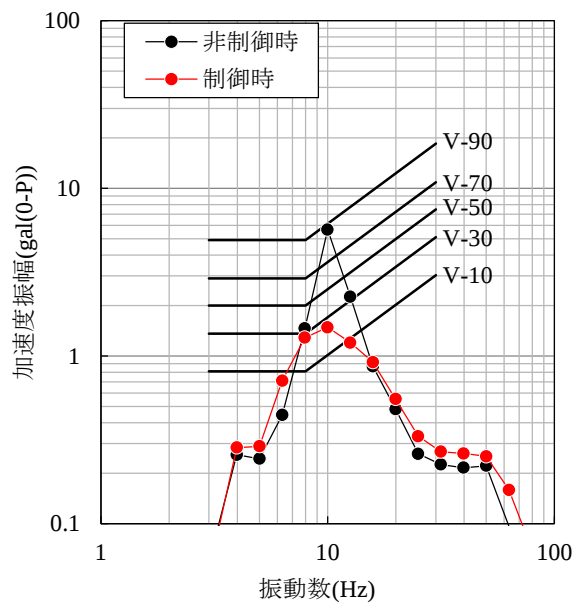


図 5.3.14 模擬歩行加振時の制御対象点における応答加速度

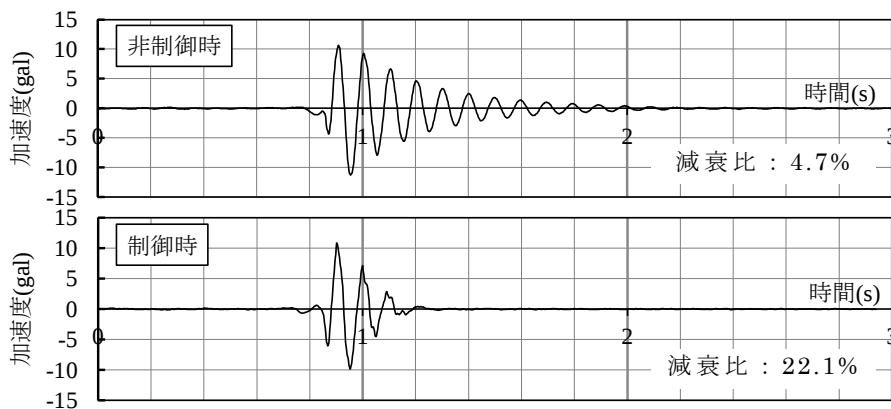


図 5.3.15 ヒールインパクト時の制御対象点における応答加速度

5.4 まとめ

本章では、膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御システムについて、アクチュエータおよび制御対象床の詳細な解析モデルに基づいた振動低減効果の予測手法を提案した。また、本予測手法を用いて模擬床試験体に対する振動制御システムを設計し、振動制御実験の結果から本予測手法の有効性を検討した。本章での検討の結果得られた結論は、以下の通りである。

- ・制御対象床の振動モードを把握した上で、有限要素法解析を用いてアクチュエータの推力・変形特性，アクチュエータ取付け部の剛性を算定することにより、最適なアクチュエータの仕様や取付け位置，取付け方法を設計することができる。
- ・有限要素法解析モデルのアクチュエータ取付け部に単位パルス力を入力し制御対象点の応答加速度を解析することで、アクチュエータ取付け部に対する制御対象点のアクセラランスを算出することができる。また、算出したアクセラランスに基づき、フィードバック型の制御系を設計することができる。
- ・想定される外乱振動の加速度振幅とコントローラのフィルタゲインより制御信号の最大値を算出し、アクチュエータへの許容印加電圧と比較することで、アクチュエータの制御力の過不足を評価することができる。

以上に述べた手法により、提案する振動制御手法の振動低減効果を精度よく予測することが可能であり、制御対象床にアクチュエータを取付けた実験的な事前検討を行わずに、制御系の設計が可能となる。

第 6 章

種々の加振源により発生する床振動の居住性からみた評価方法の確立

第6章 種々の加振源により発生する床振動の居住性からみた評価方法の確立

6.1 はじめに

居住性に関わる床振動問題に対して効果的な対策を講じるためには、床振動のどのような性状が居住者の振動感覚に影響を及ぼしているかを把握し、これを定量的に評価できることが不可欠であると考えられる。ここで、床振動の性状は、加振源の種類や建築物の振動特性、伝搬経路などにより様々となるが、そのうち加振源の種類は床振動の性状に直接的に影響を与える重要な要因となっている。近年、建材や構法の発達による長大スパン建築物の増加や、都市の高密度化と建築物用途の多様化などを背景として、歩行などの人間の動作や設備機器の稼働、建築物周辺の交通など、建築物内外の様々な振動源により有感振動が発生している。建築物使用者は、これらの床振動を区別することなく感じ取り、評価していると考えられる。一方、床振動の評価方法については、これまでの研究で多くの知見が蓄積されているが、これらはいずれも加振源あるいは床振動の性状ごとに検討されたものであり、異なる加振源による床振動に共通に適用できる評価方法は提示されていない。

本章は、歩行などの人間の動作や設備機器の稼働、建築物周辺の交通など様々な加振源により生じる床の鉛直振動を、居住性の観点から共通に評価することができる性能値を提示することを目的とする。ここで性能値とは、床上の人間に入力される床振動の測定結果から抽出される、人間の感覚、評価と対応する指標を指す。

6.2 検討方法

本章の検討方法および手順を、以下に示す。

- 1) 種々の加振源により生じる鉛直振動の測定結果などから、波形の異なる数種の振動を、検査の対象とする振動（以降“対象振動”と記す）として選定する。
- 2) 1) で選定した対象振動を検査試料として振動台を用いた官能検査を実施し、検査結果に基づいて心理学的尺度を構成する。この時、振動台上面に加速度計を設置しておき、検査員に提示した振動を測定する。
- 3) 2) で構成した心理学的尺度と、検査員に提示した振動との関係を種々検討し、振動感覚，評価と対応する性能値を提示する。

6.3 対象振動の選定

日常的に生じる床振動のうち代表的なものとして、設備機器の稼働等による定常的な振動（以降“定常振動”と記す）と、歩行、小走りによる振動（以降“歩行振動”と記す）、および鉄道や道路の周辺交通による振動（以降“交通振動”と記す）の3種を選定し、各種別から様々な特徴を有する振動を対象振動として選定した。対象振動は、実際の建築物あるいは地盤上で測定された実測波を基本とし、一部 FEM 解析により導出された解析波や、人工的に作成した正弦波などを加えた。表 6.3.1 に、選定した対象振動の概要を示す。

定常振動では、エアロビック等の人間の連続的な動作や設備機器の稼働により生じる床振動の実測波と、人工的に作成した正弦波やうなり波から7種を選定した。ここで、正弦波は継続時間の影響を考察する目的で対象振動に加えたもので、継続時間を2～16秒の範囲で段階的に変化させた。

歩行振動では、卓越振動数や共振の有無、振動の始めから終わりまでの長さ（以降、単に“長さ”と記す）が様々となるよう、S造および木造建築物での床振動の実測波から7種を選定した。

交通振動では、列車走行時2種（貨物列車、近郊列車）と自動車走行時2種（自動車・連続、自動車・間欠）の地盤振動実測波4種と、これらがS造5階建て建築物の基礎から入力した場合の4階床上での応答を有限要素法解析により導出した解析波4種をあわせた、計8種を選定した。列車走行時の振動における貨物列車と近郊列車では主に卓越振動数帯域が、また自動車走行時の振動における自動車・連続と自動車・間欠では主に大きな振幅が生じる時間間隔が異なる。なお地盤振動実測波は、鉄道あるいは道路近傍の舗装された地盤上で実測された振動であり、土間床や比較的剛性の高い構造床などにおいて地盤振動が建築物の振動特性の影響を受けずに人間に入力した場合を想定して設定したものである。

一方、解析波は、地盤振動が建築物の振動特性の影響を受けて人間に入力した場合の代表例として設定したものである。解析モデルは、床の1次固有振動数が、実際の交通振動で問題となることが多い7Hz前後となるよう留意して作成した。図 6.3.1 に、床振動の導出に用いた解析モデルの概要を示す。

以上に述べた合計22種の振動を対象振動として選定した。なお、これらの選定に際しては、筆者らが対象振動の候補を予備的に体感し、継続性が感じられ一つの事象とみなすことができる範囲を選定するよう留意した。表 6.3.2 に、選定した対象振動の例を示す。

表 6.3.1 対象振動の概要

No.	種別	特徴	主な卓越振動数 (Hz)	長さ (s)
1	定常振動	正弦波	10.0	4 (2) [※]
2		正弦波	10.0	6 (4) [※]
3		正弦波	10.0	10 (8) [※]
4		正弦波	10.0	18 (16) [※]
5		うなり波	10.0	18
6		エアロビック時の振動	7.6	20
7		設備稼働時の振動	16.0	16
8	歩行振動	共振（小走り）・S造	6.6	8
9		共振・S造	6.6	8
10		非共振・S造	10.0	8
11		共振・S造	7.7	10
12		共振・S造	14.0	12
13		非共振・S造	15.0	7
14		非共振・木造	12.0	6
15	交通振動	貨物列車（地盤上）	3.4	30
16		貨物列車（床上）	7.6	30
17		近郊列車（地盤上）	10.7	15
18		近郊列車（床上）	7.5, 8.3	15
19		自動車・連続（地盤上）	11.8	20
20		自動車・連続（床上）	7.6	20
21		自動車・間欠（地盤上）	12.3	26
22		自動車・間欠（床上）	7.6	26

※ ()内の数値は、所定の振幅の正弦波の継続時間を表す

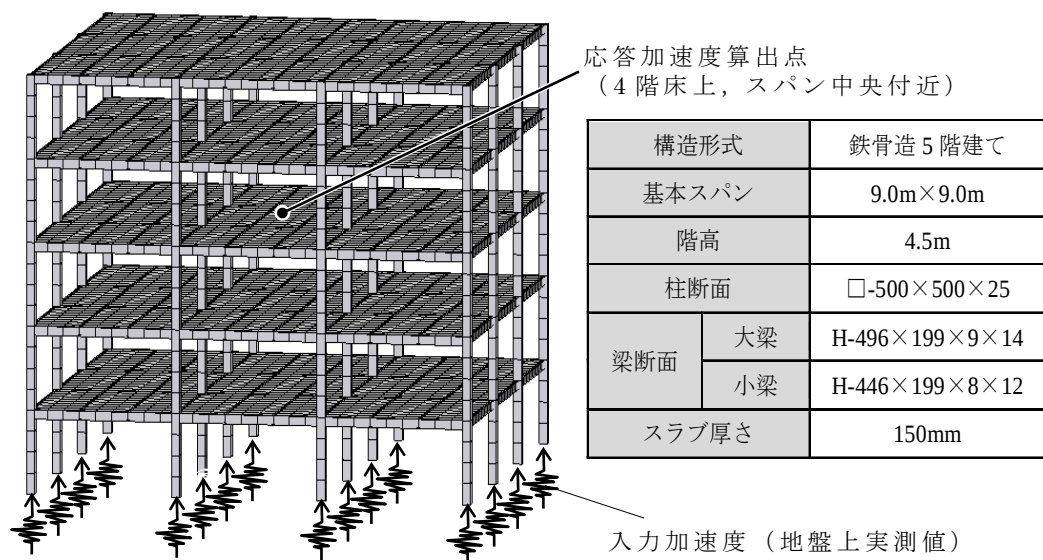
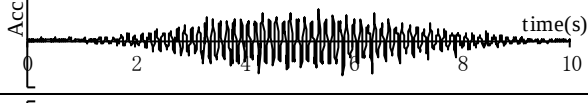
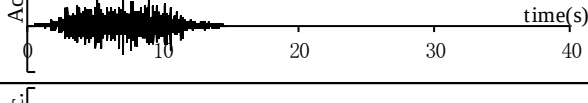
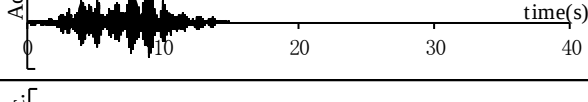
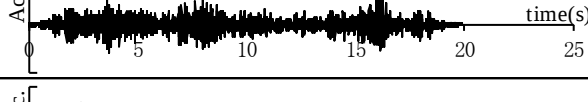
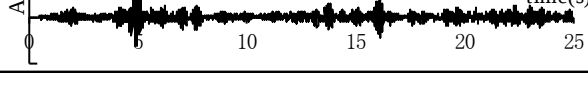


図 6.3.1 交通振動における床振動の導出に用いた解析モデル

表 6.3.2 対象振動の例

種別	No.	波形
	特徴	
定常振動	4	Acc. 
	正弦波	
	5	Acc. 
	うなり波	
歩行振動	11	Acc. 
	共振・S造	
	14	Acc. 
	非共振・木造	
交通振動	15	Acc. 
	貨物列車 (地盤)	
	16	Acc. 
	貨物列車 (床上)	
	17	Acc. 
	近郊列車 (地盤)	
	18	Acc. 
	近郊列車 (床上)	
	19	Acc. 
	自動車・連続 (地盤)	
	20	Acc. 
	自動車・連続 (床上)	
	21	Acc. 
	自動車・間欠 (地盤)	
	22	Acc. 
	自動車・間欠 (床上)	

6.4 官能検査および心理学的尺度の構成

6.4.1 検査概要

官能検査の概要を、表 6.4.1 に示す。検査は、実験室に設置した振動台を用いて行った。振動台の平面的な大きさは 800mm×800mm であり、検査員の体重の違いによって振動の大きさが変化しない機構となっている。また、駆動系にはリニアモータを用いており、検査員が認知可能な動作音は発生しない。

以下に官能検査に関する主な事項について説明を記す。

6.4.1.1 構成する尺度および尺度構成手法

構成する心理学的尺度は、振動に気付くかあるいはどの程度大きく感じるかを表す“認知大きさ尺度”と、振動がどの程度気になるかを表す“気になり具合評価尺度”の 2 種とした。尺度構成手法は系列範ちゅう法³⁶⁾とし、判断範ちゅうは表 6.4.1 に示す 7 段階とした。

6.4.1.2 検査試料

検査試料は、6.3 節で述べた対象振動 22 種について、時定数を 10ms とした場合の振動レベルの最大値 VL_{max} が 60dB, 65dB, 70dB, 75dB, 80dB の 5 段階となるよう倍率をかけて振幅を調整した、合計 110 種の振動とした。

6.4.1.3 検査員

検査員は、年齢 22～52 歳、体重 54～98kg の成人男性 16 名とした。

6.4.1.4 姿勢

検査中の検査員の姿勢は椅子腰掛け位とした。具体的には、クッションやサスペンション等の緩衝材が取り付けられていない木製の椅子を振動台に強固に固定したうえで、検査員に、背中を背もたれに付け、両足裏を床に付け、リラックスして腰掛けるよう指示した。

6.4.1.5 想定する床用途

振動に対する判断の際に想定する床用途は、苦情発生例が多くかつ居住性の観点からの評価が最も厳しい用途の 1 つと思われる住居の居室と、日常で床振動を体感する事例が比較的多いと考えられる事務所の執務室の 2 種とした。

6.4.2 検査経過、結果および心理学的尺度の構成

6.4.1 節で述べた条件で、官能検査を実施した。検査の際、検査員には、床振動以外の要因は判断に入れないよう教示した。写真 6.4.1 に、検査状況を示す。

検査は、定常振動，歩行振動，交通振動の種別ごとに各検査試料をランダムに提示する方法で実施した。いずれの検査員でも 110 試料連続して実施し、1 試料ごとに質問に対する回答を得た。検査員 1 名あたりの検査時間は 2.5～3 時間であった。また、全ての検査において振動台上の加速度を測定し、最終的に検査員間で提示した振動レベルの最大値の差が概ね 1dB 以内であることを確認した。

表 6.4.2 に、検査の結果得られたデータの分散分析結果を示す。尺度の種類や想定する床用途によらず、いずれも主効果の分散比が高度に有意となっており、かつ寄与率も高いことから、検査試料による刺激に十分な差異があったことがわかる。一方、個人差の分散比も有意となっているが、寄与率が主効果と比較して十分小さいことから、構成される尺度は、検査員間に内在する個人差を内包するものの、各検査試料に対する平均的な判断を表す尺度として、十分有効とみなすことができる。

以上より、尺度構成理論³⁴⁾にしたがって、尺度の種類 2 種×想定する床用途 2 種、計 4 種の心理学的尺度を構成した。

6.4.3 心理学的尺度相互の関係の検討

図 6.4.1 に、6.4.2 で構成した認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度との関係を、想定する床用途ごとに示す。図の縦軸と横軸の心理学的尺度は、検査員の回答の標準偏差の幅を 1 とした数直線上に、検査に用いた①～⑦の判断範ちゅうや各検査試料を位置付けたものである。ここで、心理学的尺度は間隔尺度なので 0 点は任意に設定できるが、本報では“①全く気付かない”および“①全く気にならない”の位置を 0 としている。図より、いずれの床用途についても両者は良い対応を示しており、大きく感じられる振動ほど、気になると評価されていることがわかる。

図 6.4.2 に、想定する床用途による心理学的尺度の関係を示す。図より、尺度の種類によらず両者は良い対応を示しており、想定する床用途により認知大きさ度合，気になり具合の序列は変化しないことがわかる。また、図中の点が、縦軸と横軸で同じ範ちゅうを結んだ直線より上側に分布していることから、同じ振動でも、住居の居室を想定した場合の方が事務所の執務室を想定した場合よりわずかに大きく感じられ、気になると評価されていることがわかる。

以上より、以降の検討では、はじめに住居の居室を想定した場合の気になり具合評価尺度を用いてもっともよく対応する性能値を抽出し、次に他の心理学的尺度と抽出した性能

値との対応を確認することとした。

表 6.4.1 官能検査の概要

構成する尺度	認知大きさ尺度		気になり具合評価尺度	
尺度構成手法	系列範ちゅう法			
質問事項	この床振動は、 ・住居の居室でくつろいでいる際に ・事務所の執務室で執務している際に 感じたとしたら			
判断範ちゅう	⑦非常に大きく感じる ⑥やや大きく感じる ⑤はっきり気付く ④かすかに気付く ③気づくか気付かないかの境界 ②ほとんど気付かない ①全く気付かない		⑦非常に気になる ⑥・・・・・・・・ ⑤かなり気になる ④・・・・・・・・ ③やや気になる ②・・・・・・・・ ①全く気にならない	
検査試料	表6.3.1に示す対象振動22種×振幅5段階の計110種			
検査員	成人男性16名（年齢：22～52歳、体重：54～98kg）			
姿勢	椅子腰掛け位（振動台に固定された椅子に座り 足裏を床に付けた姿勢）			
想定する床用途	住居の居室，事務所の執務室の2種			



写真 6.4.1 官能検査状況

表 6.4.2 分散分析結果

	認知大きさ尺度				気になり具合評価尺度			
	住居の居室		事務所の執務室		住居の居室		事務所の執務室	
	分散比	寄与率	分散比	寄与率	分散比	寄与率	分散比	寄与率
主効果	90.6055**	81.0%	91.8643**	81.1%	86.6306**	81.1%	81.2012**	80.6%
個人差	36.5100**	4.4%	37.9146**	4.5%	28.8386**	3.6%	23.5933**	3.1%

**危険率 1% 以下で有意

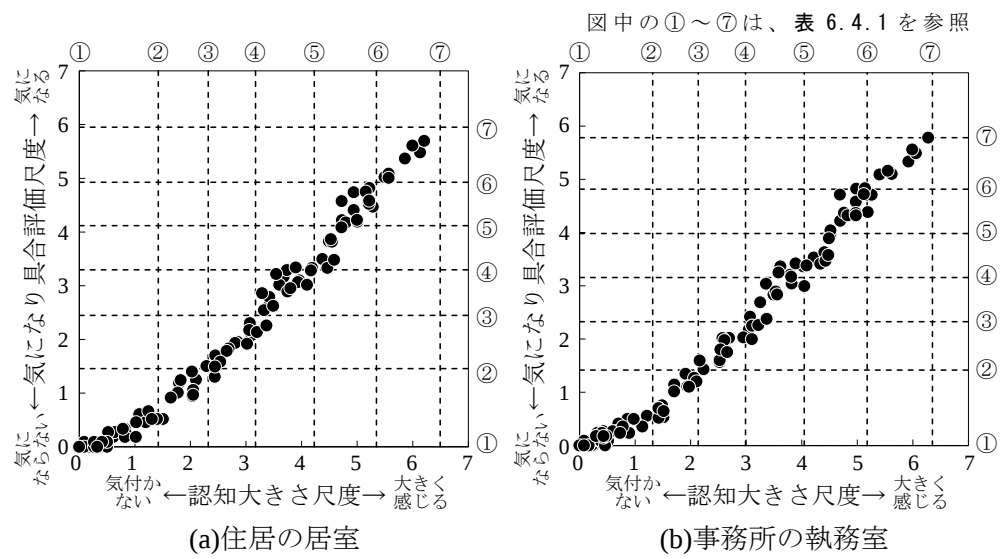


図 6.4.1 認知大きさ尺度と気になり具合評価尺度の関係

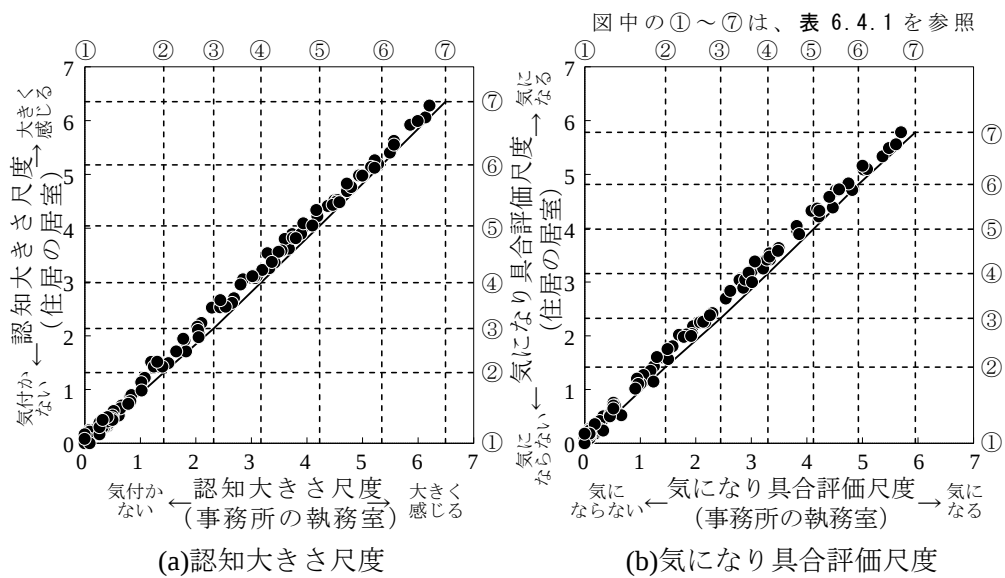


図 6.4.2 想定する床用途による心理学的尺度の関係

6.5 心理学的尺度と床振動の関係の検討

官能検査時に検査員に提示した振動の測定結果から、性能値の候補となる数種の性能候補値を算出することとした。具体的には、測定した加速度・時間曲線に実効値処理を施した上で、以下に示す2種のレベルを求め、それぞれのレベル・時間曲線から各性能候補値を算出した。ここで、加速度・時間曲線に実効値処理を施したのは、高振動数成分によるばらつきを排除するためである。

・ VAL：振動加速度レベル(dB)

$$VAL = 20\log_{10} \frac{a_{rms}}{a_{0rms}} \quad \dots(6.1)$$

a_{rms} ：加速度実効値

a_{0rms} ：基準の加速度実効値 ($1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2(\text{rms})$)

・ VL：振動レベル(dB)

$$VL = 20\log_{10} \frac{a'_{rms}}{a_{0rms}} \quad \dots(6.2)$$

a'_{rms} ：鉛直振動感覚の振動数特性に応じた補正³⁷⁾を施した加速度実効値

a_{0rms} ：基準の加速度実効値 ($1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2(\text{rms})$)

実効値処理時の時定数（以降、“T.C.”と記す）は、10ms, 25ms, 125ms, 630msの4種とした。このうち、10ms, 125ms, 630msは、一般に普及している振動分析器に通常装備されているT.C.として選定したものである。一方、25msは、小野、横山ら¹⁵⁾⁻¹⁸⁾が1歩の歩行振動に対する感覚、評価を表示できる物理的指標を算出する際に、最もよい対応が得られるT.C.として設定したものである。

以上に述べた、レベルの種類2種×T.C.4種、計8種のレベル・時間曲線から、以下に示す性能候補値をそれぞれ算出することとした。

(1) VAL_{max}, VL_{max}：レベルの最大値

振動の始めから終わりまでの間のVALあるいはVLの最大値

(2) VAL_I, VL_I：レベルの積分値

VALあるいはVLが、所定の参照値以上となっている範囲を対象に、VALあるいはVLを時間積分したもの

$$VAL_I = \int (VAL - VAL_{ref}) dt \quad (VAL - VAL_{ref} \geq 0 \text{ の場合のみ}) \quad \dots(6.3)$$

$$VL_I = \int (VL - VL_{ref}) dt \quad (VL - VL_{ref} \geq 0 \text{ の場合のみ}) \quad \dots(6.4)$$

VAL_{ref} , VL_{ref} : 参照値(dB)

(3) $VALT$, VLT : レベルの最大値 + 継続時間

VAL あるいは VL が、所定の参照値以上となっている時間を継続時間 T として求め、(1) に $20\log_{10}(T^{1/4})$ を加算したもの

$$VALT = VAL_{max} + 20\log_{10}(T^{1/4}) \quad \dots(6.5)$$

$$VLT = VL_{max} + 20\log_{10}(T^{1/4}) \quad \dots(6.6)$$

T : 継続時間(s) (VAL , VL が参照値以上となっている時間の総和。ただし、 $T < 1s$ の場合は $T=1s$ とする)

ここで、(2) および (3) には、振幅の時間変化の要因が加味されている。このうち (2) は、人間に暴露された振動の総和量と位置づけられるものである。一方、(3) は、振幅の時間変化の要因を、継続時間を用いることにより比較的簡便に加味した性能値として、井上ら²⁶⁾が提案したものである。

なお、積分対象範囲や継続時間を求める際の基準となる参照値は、振動感覚、評価に影響しないほど小さな振動を考慮の対象から除外するために設定した VAL , VL の閾値と位置づけられるものであり、本報では 60dB, 63dB, 67dB の 3 水準について検討することとした。これらは、3~8Hz の正弦波の場合、居住性能評価指針の V-30, V-50, V-70 曲線に概ね相当している。

表 6.5.1 に、各性能候補値の概要を概念図と併せて示す。本報では以降、各性能候補値の T.C. および参照値を、以下に例示するように、添え字で表すこととする。なお、添え字を記さない場合は、全ての T.C. あるいは参照値の性能候補値を指すこととする。

(例 1) $VL_{max(10ms)}$: T.C. を 10ms とした場合の振動レベルの最大値

(例 2) $VLI_{(25ms, 60dB)}$: T.C. を 25ms、参照値を 60dB とした場合の振動レベルの積分値

(例 3) $VLT_{(630ms)}$: T.C. を 630ms とした場合の振動レベルの最大値 + 継続時間 (参照値を 60dB, 63dB, 67dB とした場合の全てが該当)

以上に述べた VAL_{max} および VL_{max} 各 4 種, $VALI$ および VLI 各 12 種, $VALT$ および VLT 各 12 種の計 56 種の性能候補値を、検査中に測定した加速度・時間曲線のうち、振幅が中庸であった 1 名の検査員の測定結果から算出した。

図 6.5.1 に、住居の居室を想定した場合の気になり具合評価尺度と VAL に基づいた性能

候補値との関係の例を示す。また、図 6.5.2 に、住居の居室を想定した場合の気になり具合評価尺度と VL に基づいた性能候補値との関係の例を示す。図には、T.C.を 10ms, 25ms, 630ms、参照値を 60dB, 67dB とした場合の結果を示している。なお、T.C.を 125ms とした場合は、25ms の場合と 630ms の場合の中間的な結果が得られ、参照値を 63dB とした場合は、60dB の場合と 67dB の場合の中間的な結果が得られた。

6.5.1 VAL と VL に関する検討

はじめに、VAL に基づいた性能候補値と VL に基づいた性能候補値について、気になり具合評価尺度との対応を比較した。図 6.5.1 および図 6.5.2 を全体的に見ると、図 6.5.1 に示した VAL に基づいた性能候補値では、定常振動の No.7(△)や、歩行振動の No.10(▲), No.12 (○), No.13 (□), No.14 (△) など、特定の対象振動の点が右側に外れていることがわかる。これらはいずれも、卓越振動数が 8Hz 以上にある対象振動である点が共通している。すなわち、VAL では、8Hz 以上の振動では人間の感覚が鈍ることが考慮されていないために、気になり具合と比較して性能候補値が過大となっていることがわかる。

一方、図 6.5.2 に示す VL に基づいた性能候補値では、このような傾向はみられない。すなわち、VL 算出時に、8Hz 以上の振動数成分に対して施される補正が適切であることがわかる。

よって本章では、以降、VL に基づいた性能候補値について検討することとした。

6.5.2 VLmax, VLI, VLTに関する検討

図 6.5.2 の上段に示した VLmax では、いくつかの点が縦につながり、対応が連続的になっていない部分が数か所みられる。これは、VLmax が同程度の振動では横軸の値が同程度となるが、気になり具合は波形の違いの影響で異なっていることによるものと思われる。

一方、中段および下段に示した VLI および VLT では、このような傾向は見られない。すなわち、振幅の時間変化の要因を加味することの重要性を示唆する結果となっている。

中段の VLI では、参照値が 67dB の場合、気になり具合評価尺度と比較的よい対応が得られているが、歩行振動や、振幅の小さい定常振動、交通振動では、参照値を超える時間が短く横軸の値が 0 近傍に集中してしまい、気になり具合の違いを表せない結果となっている。これに対し参照値が 60dB の場合、良い対応は得られていない。60dB の場合の図を詳細に見ると、定常振動の No.4 (▼), No.5 (○), No.7 (△)、交通振動の No.15 (●),

No.16 (■) など、継続時間の長い対象振動による点は右側に外れ、性能候補値が過大となっているのに対し、定常振動の No.1 (●), No.2 (■)、交通振動の No.17 (▲), No.18 (▼) など、継続時間の短い対象振動による点は左側に外れ、過小となっていることから、継続時間の影響が過大に加味されていることが推察される。

これに対し、下段に示した VLT では、上述のような傾向は見られず、継続時間の影響が適度に加味されていることが推察される。

以上より、 VL_{max} , VLI , VLT の中では VLT が最も適当であると考え、以降、 VLT を対象に検討を進めることとした。

6.5.3 継続時間を求める際の参照値に関する検討

図 6.5.2 の下段左側に示した $VLT_{(60dB)}$ と右側に示した $VLT_{(67dB)}$ を比較すると、 $VLT_{(67dB)}$ では横軸が 67dB 程度より小さい領域で、いくつかの点が縦につながり、対応が連続的になっていない部分がみられる。これは、 VL_{max} が 67dB 以下の振動では、 T は一律に 1s となり $VLT_{(67dB)}$ に反映されないが、気になり具合には 67dB 以下の振動の継続時間が影響しているためと思われる。図に示さなかった $VLT_{(63dB)}$ についても、横軸が 63dB 程度より小さい領域で同様の傾向が見られた。これに対し、 $VLT_{(60dB)}$ では、このような傾向は見られない。

以上より、継続時間を求める際の参照値は、検討した 3 種の中では 60dB が最も適当と考え、 $VLT_{(60dB)}$ についてさらに検討を進めることとした。

6.5.4 実効値処理時の T.C. に関する検討

図 6.5.2 の下段左側に示した気になり具合評価尺度と $VLT_{(60dB)}$ との関係を T.C. ごとに比較すると、定常振動、歩行振動では中段の T.C. が 25ms の場合が最も対応がよいことがわかる。このうち歩行振動に関する結果は、第 1 章で述べた小野、横山ら¹⁵⁾⁻¹⁸⁾の検討結果と整合している。

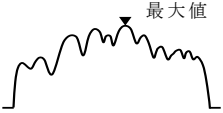
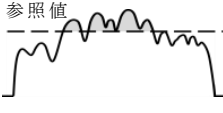
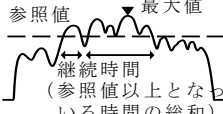
一方、交通振動では、No.15 (●) の対象振動による点が右側に外れる傾向がみられる。この理由として、No.15 の主な卓越振動数が 3.4Hz であり、全対象振動の中でも極端に低いことが考えられる。すなわち、 VL を求める際の振動数補正では、5Hz をピークとしてそれより低い振動数成分に対しても振幅を低減する補正が施されているが、実際の振動感覚はこれよりさらに鈍いことが考えられる。なお、この点については、横山、井上ら²⁴⁾をは

じめいくつかの研究でも同様の結果が示されている。ちなみに、5Hz 程度以下の鉛直振動では感覚，評価の個人差が比較的大きいのに対し、VL の補正は安全側となっていることが推察される³⁷⁾。

No.15 の対象振動による点を除くと、交通振動では気になり具合評価尺度と $VLT_{(60dB)}$ の関係に、T.C.による大きな差は見られない。

以上より、検討の対象とした 56 種の性能候補値の中では、 $VLT_{(25ms,60dB)}$ が性能値として最も適当と考えられる。なお、歩行振動を対象とした井上ら^{27),28)}の研究では、同様の性能値において T.C.を 10ms とすることが提案されているが、この研究では T.C.を 25ms とした場合の検討はなされていないことを付記する。

表 6.5.1 性能候補値の概要

算出値	記号	レベルの種類	レベル・時間曲線における性能候補値の概念	算出式	時定数	参照値
レベルの 最大値	VAL_{max}	振動加速度 レベル		—	10ms, 25ms, 125ms, 630ms	—
	VL_{max}	振動 レベル		—		
レベルの 積分値	$VALI$	振動加速度 レベル		$\int (VAL - VAL_{ref}) dt$ VAL_{ref} : 参照値		60dB, 63dB, 67dB
	VLI	振動 レベル		$\int (VL - VL_{ref}) dt$ VL_{ref} : 参照値		
レベルの 最大値 + 継続時間	$VALT$	振動加速度 レベル		$VAL_{max} + 20 \log_{10}(T^{1/4})$ T : 継続時間(s) [※]		
	VLT	振動 レベル		$VL_{max} + 20 \log_{10}(T^{1/4})$ T : 継続時間(s) [※]		

※ $T < 1s$ の場合は、 $T=1s$ とする

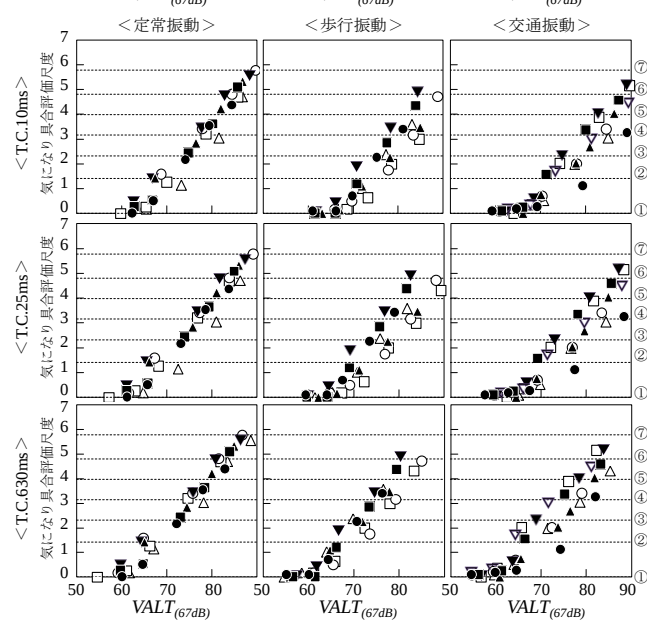
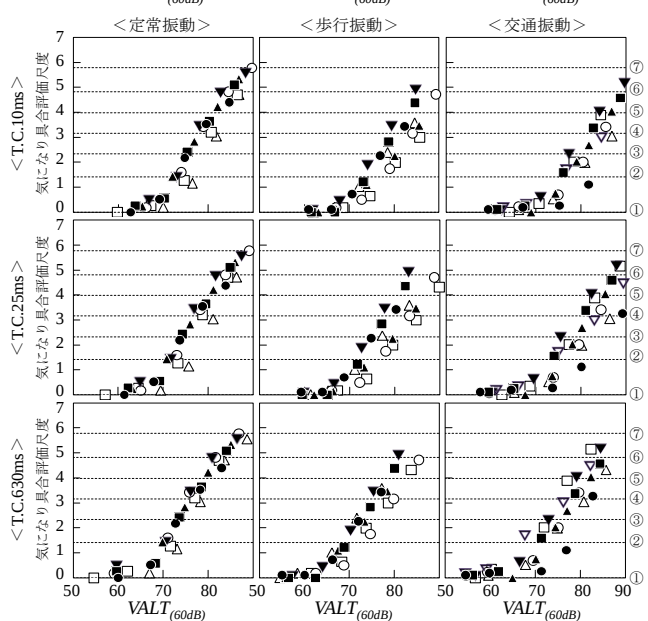
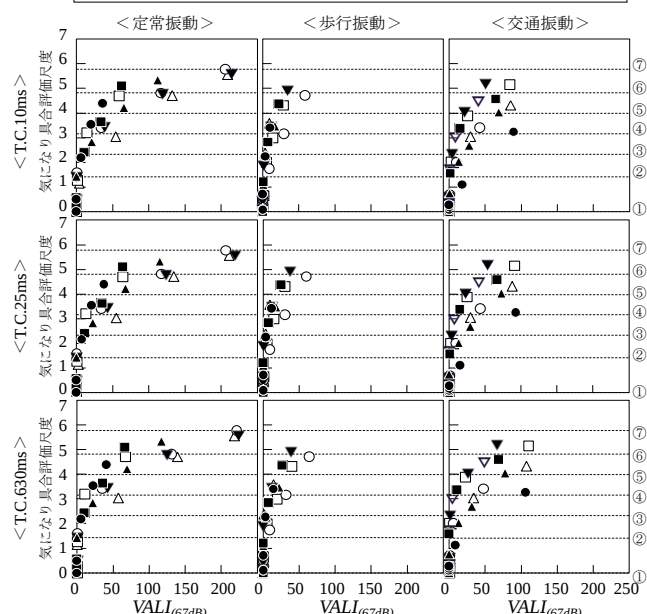
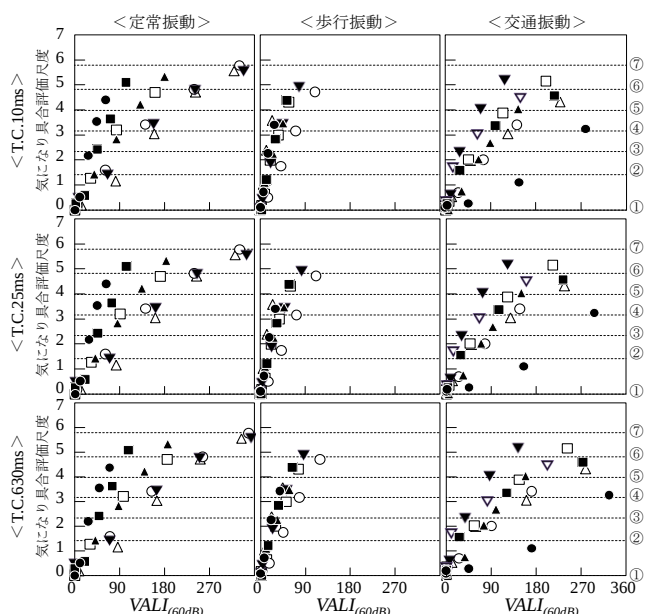
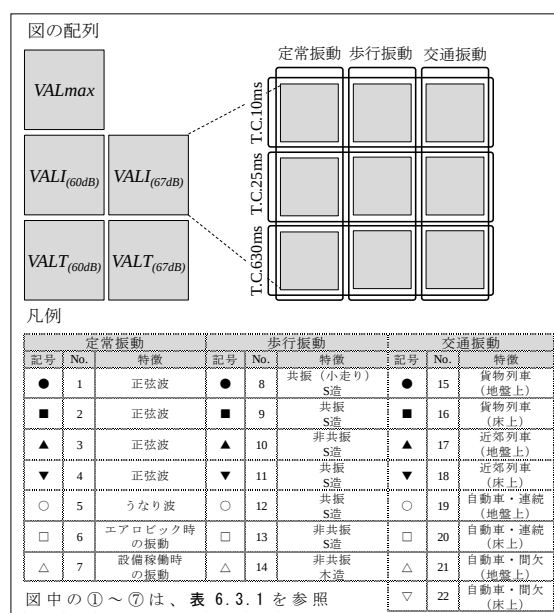
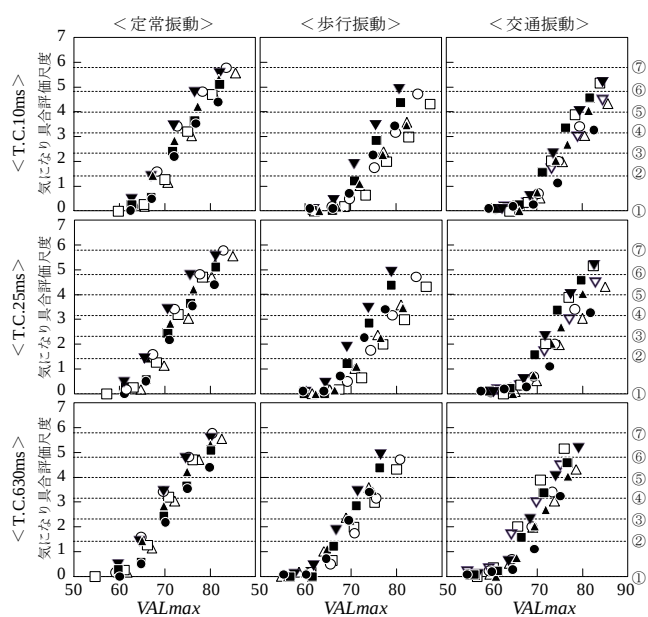


図 6.5.1 住居の居室を想定した場合の気になり具合評価尺度と VAL に基づいた性能候補値の関係の例

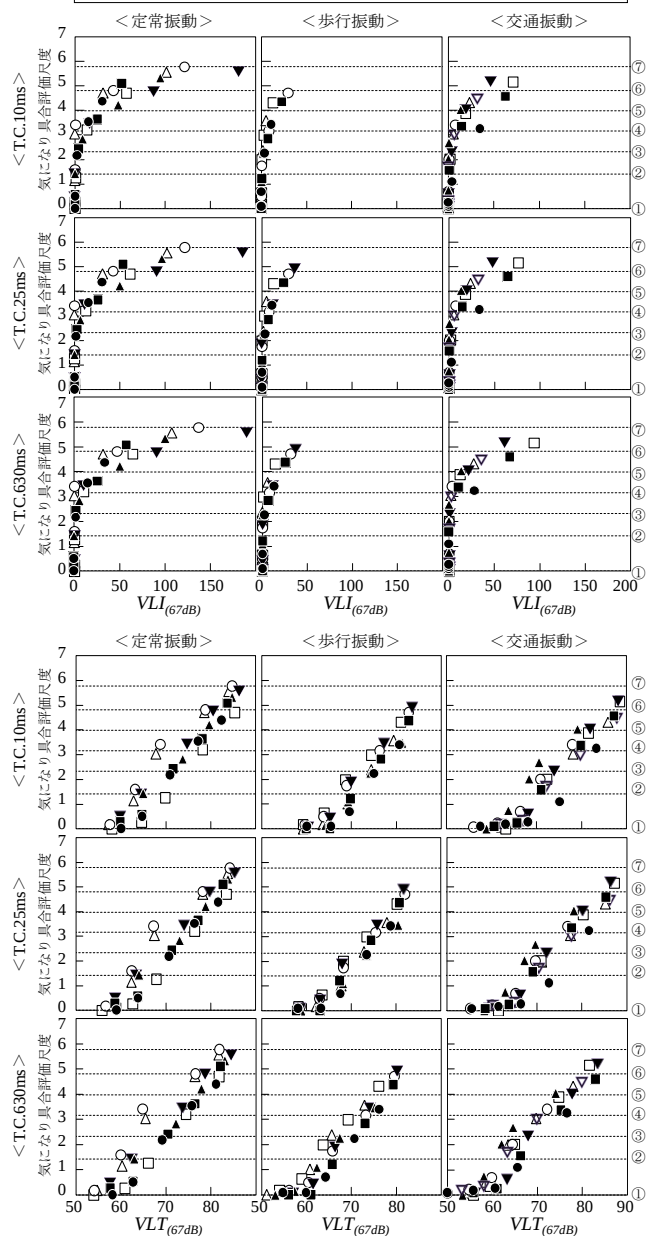
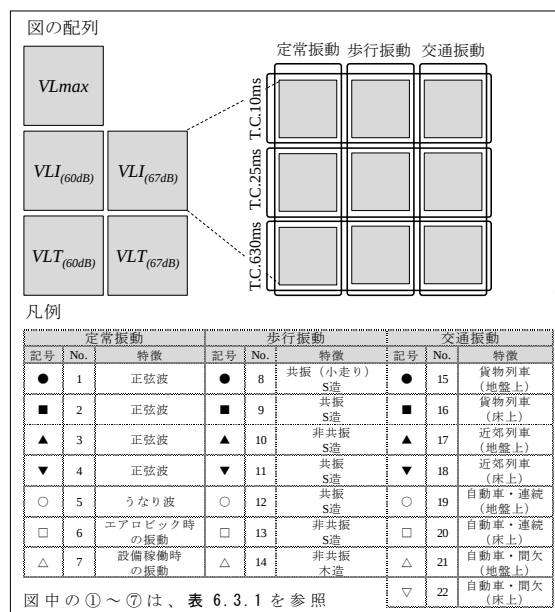
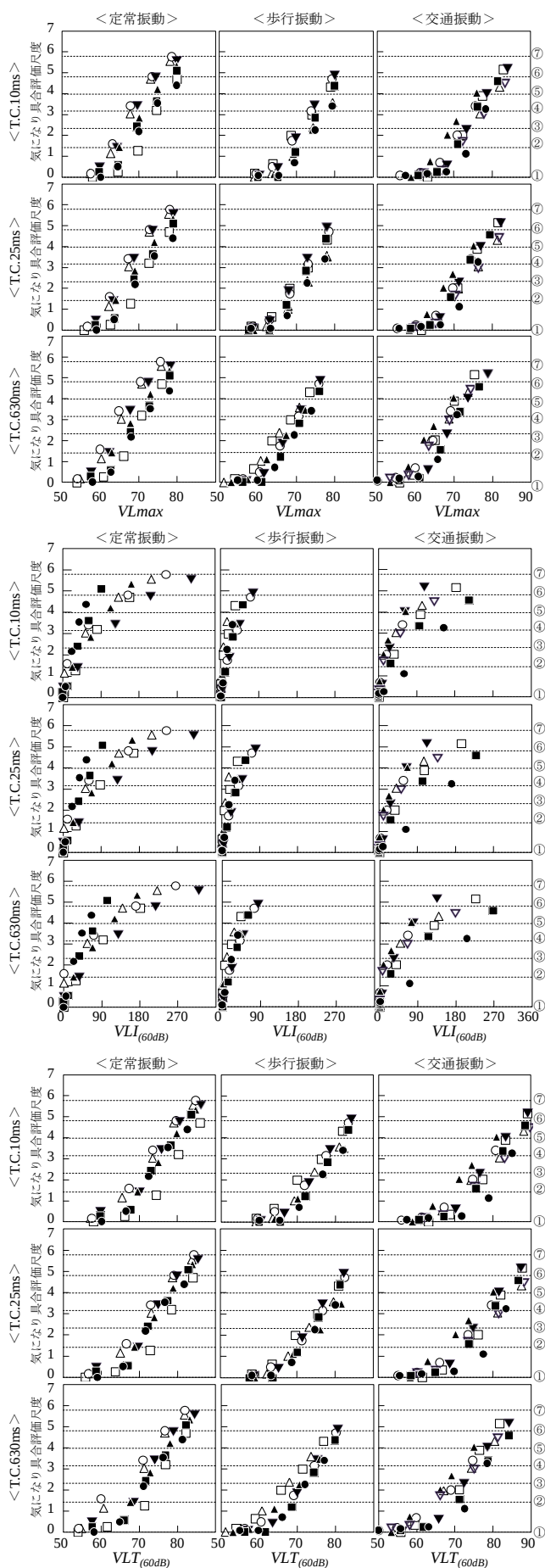


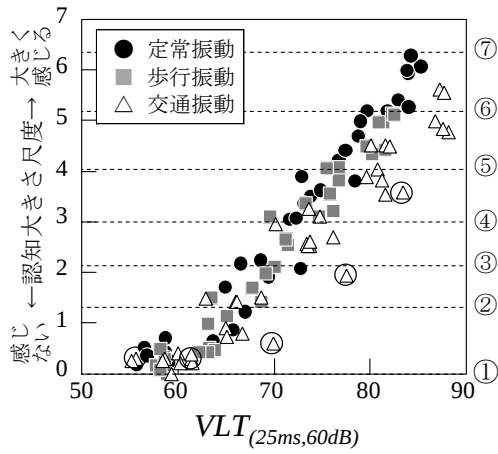
図 6.5.2 住居の居室を想定した場合の気になり具合評価尺度とVLに基づいた性能候補値の関係の例

6.6 評価方法の確立

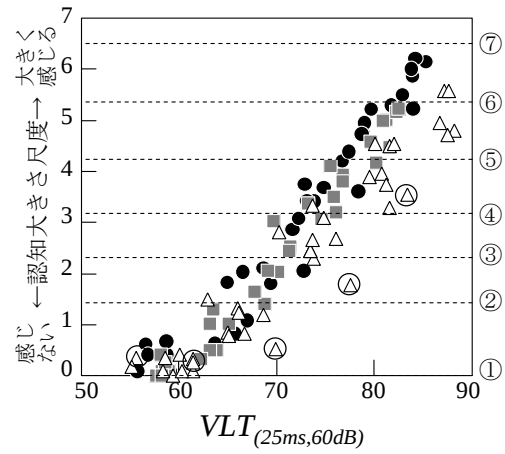
図 6.6.1 に、6.4 節で構成した 4 種の心理学的尺度と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の関係を示す。図では、これまで定常振動、歩行振動、交通振動に分けて示していた両者の関係を重ねて示した。いずれの図においても、“○”で囲んだ No.15 の対象振動による点（○△）を除くと、全体的により対応を示しており、特に“●”で示した定常振動と“■”で示した歩行振動の対応はほぼ一致していることがわかる。一方、詳細を見ると、“△”で示した交通振動による点は、性能値が大きくなるにしたがって右側に外れる傾向があることがわかる。この理由の一つとして、振幅の変動が少ない定常振動や、周期的で比較的予想しやすい歩行振動と比較して、不規則な交通振動では、振幅の変動に感覚が追従できない場合があり、同じ振幅でも小さく感じられる傾向があることが考えられる。ただし、居住性の観点から検討対象となる場合が多いと考えられる判断範ちゅう①～④（認知大きさ尺度）、①～③（気になり具合評価尺度）程度の振動では、交通振動も他の振動種別とほぼ同様の対応を示している。

以上より、本研究では、 $VLT_{(25ms,60dB)} = VL_{max(25ms)} + 20\log_{10}(T^{1/4})$ を、種々の加振源による振動の認知大きさ度合、気になり具合を表す性能値として提示する。

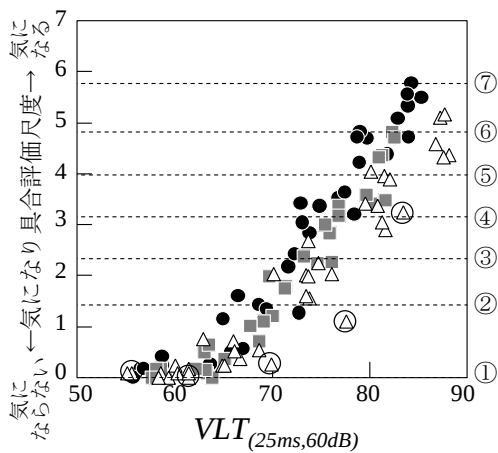
図中の①～⑦は、表 6.3.1 を参照
○は、No.15 の対象振動による点を表す



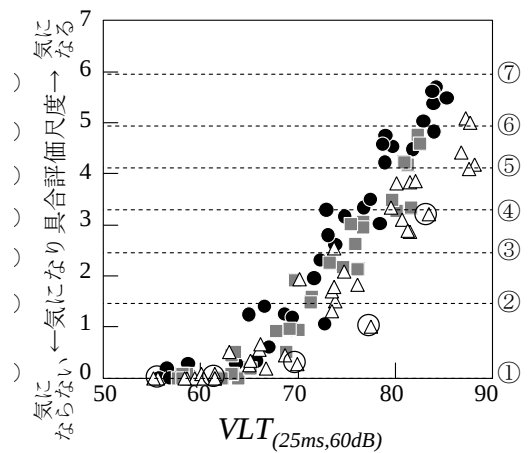
(a) 認知大きさ尺度（住居の居室を想定した場合）との関係



(b) 認知大きさ尺度（事務所の執務室を想定した場合）との関係



(c) 気になり具合評価尺度（住居の居室を想定した場合）との関係



(d) 気になり具合評価尺度（事務所の執務室を想定した場合）との関係

図 7 心理学的尺度と $VLT_{(25ms, 60dB)}$ の関係

6.7 まとめ

種々の加振源による鉛直振動に共通に適用できる性能値を提示することを目的とした本章の結論をまとめると、以下の通りである。

- ・種々の加振源による振動を、定常振動，歩行振動，交通振動の3種に分類したうえで、各種別から波形の異なる対象振動を計22種選定した。次に、これらの対象振動を検査試料として官能検査を実施し、振動の認知大きさ度合および気になり具合を表す心理学的尺度を構成した。
- ・官能検査時に検査員に提示した振動の測定結果と心理学的尺度との関係を検討した。その結果、適切な性能値を提示するためには、人間の感覚特性に応じた振動数補正を施す必要があること、振幅の最大値のみでなく時間変化の要因を取り込む必要があること、時間変化の要因に関する簡便な指標として知覚限界に近い60dB以上の振動の継続時間が適当であること、実効値処理時の時定数は25msが適当であることを明らかにした。
- ・種々の加振源による振動の認知大きさ度合，気になり具合を表す性能値として、時定数25msの振動レベルの最大値に振動レベルが60dB以上となっている継続時間 T の要因を加味した、 $VL T_{(25ms, 60dB)} = VL_{max(25ms)} + 20 \log_{10}(T^{1/4})$ を提示した。ただし、本性能値の適用範囲は、椅子に腰かけた居住者に暴露される、長さが30秒程度までの振動であり、他の姿勢の場合やより長く続く振動に対する感覚，評価に関する検討は今後の課題とする。また、卓越振動数が5Hz程度以下の振動に対しては、振動数補正を中心に更なる検討が必要である。

第 7 章

事後対策による振動環境の改善目標の提示

第7章 事後対策による振動環境の改善目標の提示

7.1 はじめに

本論文で提案する振動制御技術を床振動問題が発生した建築物に効率よく適用するためには、事後対策時の設計目標を合理的に設定できる枠組みが必要となる。ここで、一度不快な床振動に暴露された経験（以降、“被暴露経験”と記す）は、その後の床振動の評価に何らかの影響を及ぼすものと考えられる。したがって、被暴露経験が床振動評価に及ぼす影響を把握することは、事後対策目標の設定を容易にし、床振動問題の長期化や過剰な対策の防止に有効な知見となり得ると考えられる。しかし、被暴露経験がある場合の床振動の評価に関する研究はほとんどなされていない。

本章は、第6章で提示した $VLT_{(25ms,60dB)}$ を用いて床振動の被暴露経験が事後対策後の床振動の許容可否判断に与える影響について検討し、事後対策時の設計に資する基礎的知見を得ることを目的としている。

ここで、本研究における被暴露経験とは、本研究で実施する実験において、対策後の床振動を評価する前に、その比較対象として対策前の床振動に暴露された経験を指すこととする。なお、実際の居住空間において、不快な床振動に日常的に暴露されている居住者の対策後の床振動に対する評価は、暴露の頻度や暴露後の時間の経過などにより変化すると考えられるが、これらの要因を含めた検討は、基礎的段階である本研究では範囲外とする。

7.2 検討方法

本研究の方法および手順を以下に示す。

- 1)種々の加振源による床振動から、検討対象とする振動（以降、“対象振動”と記す）を選定する。
- 2)振幅を段階的に変化させた対象振動を検査試料とし、検査員ごとに許容できるかどうかの判断を求める官能検査を実施する（官能検査Ⅰ）。検査結果から、対象振動，検査員ごとに、許容できると判断されたうち振幅が最も大きい試料の $VLT_{(25ms,60dB)}$ を“許容限度”として求める。
- 3)官能検査Ⅰで求めた許容限度よりも $VLT_{(25ms,60dB)}$ の大きな振動を“対策前の振動”として検査員に暴露する。次に、対策前の振動の $VLT_{(25ms,60dB)}$ を低減した“対策後の振動”を検査試料として検査員に提示し、許容できるかどうかの判断を求める（官能検査Ⅱ）。
- 4)官能検査Ⅰ，Ⅱの結果より、対策前の振動の被暴露経験が対策後の振動の許容可否判断に与える影響について検討する。

7.3 対象振動の選定

対象振動として、前章にて $VLT_{(25ms,60dB)}$ を提案する際に用いた振動の中から、官能検査Ⅱも踏まえ検査試料数が多くなりすぎないように考慮し、図 7.3.1 に示す 8 種を選定した。具体的には、鉄骨造建築物での歩行による床振動や、周辺の列車や自動車の走行による地盤振動が建築物に入力した際の床振動、エアロビック動作による床振動などから、特に床振動問題につながりやすい共振現象が生じているものを中心に選定した。

対象振動 No.	特徴	加速度・時間曲線 (— 対策前の振動 — 対策後の振動 (低減倍率: 15dB))	主な卓越振動数 (Hz)	長さ (s)
1	鉄骨造建築物での歩行による床振動		6.6	8
2	鉄骨造建築物での歩行による床振動		7.7	10
3	鉄骨造建築物での歩行による床振動		14	12
4	列車の走行による地盤振動が鉄骨造建築物に入力した際の床振動		7.6	35
5	列車の走行による地盤振動が鉄骨造建築物に入力した際の床振動		7.5, 8.3	15
6	自動車の走行による地盤振動が鉄骨造建築物に入力した際の床振動		7.6	20
7	自動車の走行による地盤振動が鉄骨造建築物に入力した際の床振動		7.6	26
8	鉄骨造建築物でのエアロビック動作による床の振動		7.6	20

図 7.3.1 対象振動の概要

7.4 官能検査 I

7.4.1 検査概要

検査は、実験室に設置した第6章で使用したものと同一の振動台を用いて行った。

表 7.4.1 に検査の概要を示すとともに、以下に主な事項について説明を記す。

7.4.1.1 検査試料

選定した対象振動それぞれについて、 $VL_{max(25ms)}$ が 55～60dB のものを最も振幅の小さい検査試料とし、その振幅に係数を乗じることにより、約 5dB 間隔で 80～85dB まで 6 段階の振幅の検査試料を設定した。すなわち、対象振動 8 種×振幅 6 段階＝48 種の試料を設定した。

7.4.1.2 検査員，姿勢，想定する床用途

検査員は、成人男性 16 名（年齢 22～52 歳，体重 54～98kg）とした。

検査員の姿勢は、椅子腰掛け位とした。具体的には、クッションやサスペンションなどの緩衝材が取り付けられていない木製の椅子を振動台に強固に固定したうえで、検査員に、背中を背もたれに付け、両足裏を床に付け、リラックスして腰掛けるよう指示した。

判断の際に想定する床用途は、居住性の観点からの評価が最も厳しい用途の 1 つと思われる住居の居室と、日常で床振動を体感する事例が比較的多いと考えられる事務所の執務室の 2 種とした。

これらの条件は、いずれも第6章で $VLT_{(25ms,60dB)}$ を提案する際に実施した官能検査と同様である。

7.4.2 検査経過

7.4.1 節で述べた条件で官能検査を実施した。検査の際、検査員には、床振動以外の要因は判断に入れないよう教示した。

検査は、各検査試料をランダムに提示する方法で実施し、1 試料ごとに回答を得た。なお、全ての検査において振動台上の加速度を測定し、最終的に検査員間で提示した試料の $VL_{max(25ms)}$ の差が概ね 1dB 以内であることを確認した。

7.4.3 検査結果および考察

7.4.3.1 被暴露経験が無い場合の許容限度

官能検査時に検査員に提示した振動の加速度・時間曲線から、検査試料ごとに $VLT_{(25ms,60dB)}$ を算出した。改めて、図 7.4.1 に $VLT_{(25ms,60dB)}$ の算出方法を示す。次に、算出した $VLT_{(25ms,60dB)}$ と許容可否に関する検査結果から、対象振動、検査員ごとに、7.2 節で述べた許容限度を求めた。

表 7.4.2 および図 7.4.2 に、対象振動ごとに求めた全検査員の許容限度の最小，最大，平均，標準偏差を示す。これらの図，表に示す通り、許容限度の最大と最小の差は、住居の居室，事務所の執務室ともに 11～23dB となっている。また、標準偏差は、住居の居室では 3.4～5.8dB、事務所の執務室では 3.4～5.7dB となっている。すなわち、対象振動によっては、許容限度が比較的広い範囲に分布していることがわかる。これに対し、許容限度の平均の対象振動による差は比較的小さく、住居の居室の場合 74～80dB、事務所の執務室の場合 76～80dB となっている。さらに、住居の居室と事務所の執務室の平均を対象振動ごとに比較すると、事務所の執務室の方が 0～3dB 大きくなっており、わずかに許容されやすい傾向があることがわかる。

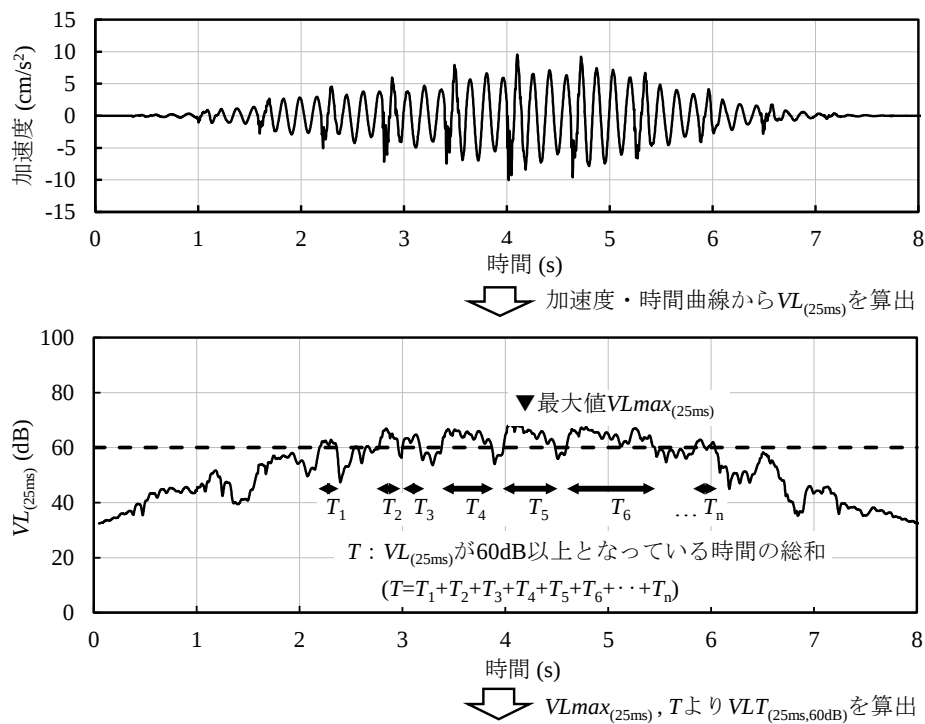
7.4.3.2 被暴露経験が無い場合の許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の関係

検査試料ごとに、許容できると回答した検査員数の全検査員数に対する割合を“許容率”として算出した。図 7.4.3 に、許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の関係を示す。図には、参考として、許容率が 0%および 100%の検査試料を除いた点に対する回帰直線を併せて示した。

いずれの床用途でも、許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ は概ね良い対応を示しており、 $VLT_{(25ms,60dB)}$ を用いることで被暴露経験が無い場合の許容率を概ね推定できることがわかる。また、回帰式より許容率が 90%，50%および 10%となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ を求め、表 7.4.3 に一覧にして示す。表より、同じ許容率となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ は、事務所の執務室の方が 1～3dB 大きくなっていることがわかる。この結果は、前節で述べた考察内容と整合する。

表 7.4.1 官能検査 I の概要

質問事項	この振動は、 ・住居の居室でくつろいでいる ・事務所の執務室で執務している 際に感じたとしたら
回答肢	①許容できる ②許容できない
対象振動	図7.3.1に示す8種
検査員	成人男性16名
	年齢22～53歳，体重54～98kg
姿勢	椅子腰掛け位 (振動台に固定された椅子に座り 足裏を床に付けた姿勢)
想定する床用途	住居の居室，事務所の執務室



$$VLT_{(25ms, 60dB)} = VL_{max(25ms)} + 20 \log T^{1/4}$$

図 7.4.1 $VLT_{(25ms, 60dB)}$ の算出方法

表 7.4.2 被暴露経験が無い場合の許容限度

対象振動 No.	住居の居室				事務所の執務室			
	最小	最大	平均	標準偏差	最小	最大	平均	標準偏差
1	70	81	75	4.2	70	81	76	4.1
2	71	82	74	3.4	71	82	76	3.9
3	63	83	74	4.9	63	83	76	4.9
4	74	87	77	4.8	65	87	77	5.7
5	69	82	75	4.4	69	87	77	5.2
6	67	82	76	4.3	67	88	78	4.6
7	65	88	80	5.8	65	88	80	5.6
8	64	84	74	5.4	73	84	77	3.4

数値は $VLT_{(25ms, 60dB)}$ (単位: dB)

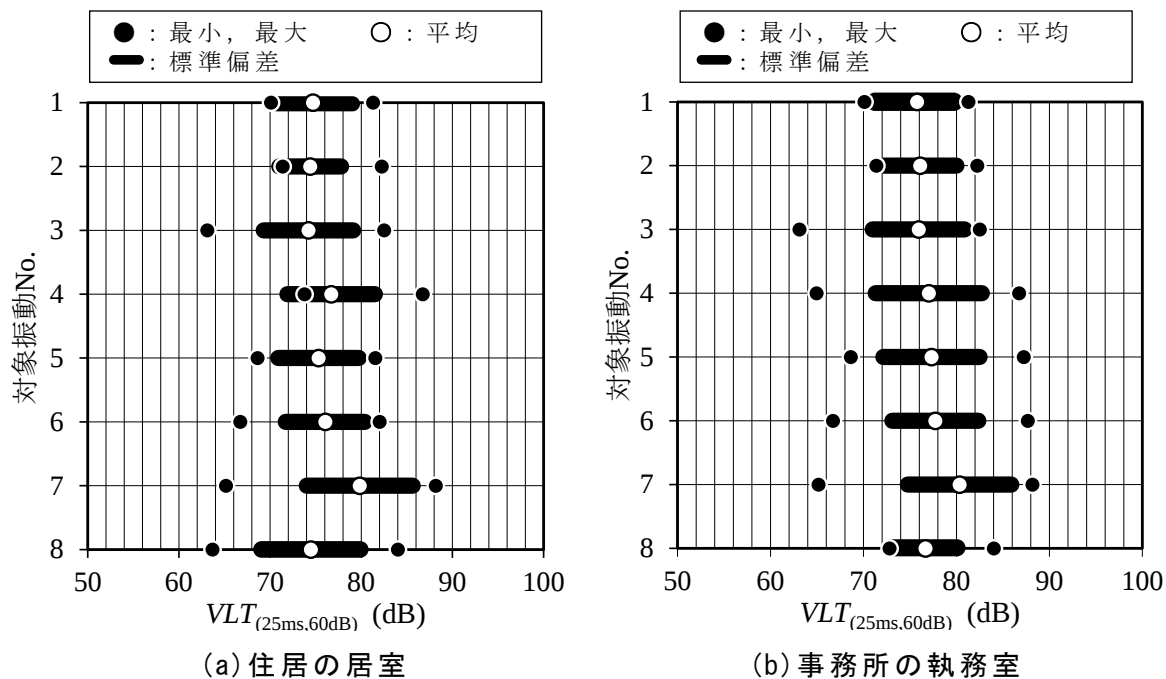


図 7.4.2 被暴露経験が無い場合の許容限度

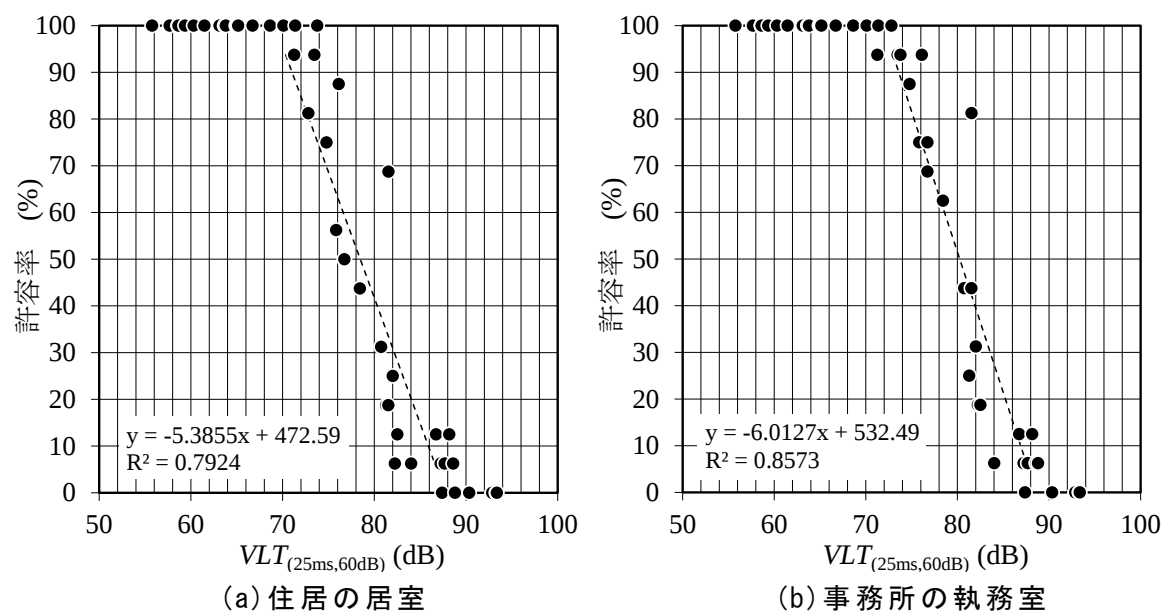


図 7.4.3 被暴露経験が無い場合の許容率と $VLT_{(25ms, 60dB)}$ の関係

表 7.4.3 許容率 90%, 50%および 10%となる $VLT_{(25ms, 60dB)}$

許容率	$VLT_{(25ms, 60dB)}$	
	住居の居室	事務所の執務室
90%	71.0	73.5
50%	78.4	80.2
10%	85.8	86.8

(単位: dB)

7.5 官能検査Ⅱ

7.5.1 検査概要

検査は、官能検査Ⅰと同一の振動台を用いて行った。表 7.5.1 に検査の概要を示すとともに、以下に主な事項について説明を記す。

7.5.1.1 対象振動

対象振動は、官能検査Ⅰと同一の 8 種とした。

7.5.1.2 対策前の振動

官能検査Ⅰの結果を受けて、あらかじめ検査員に暴露する対策前の振動を設定した。対策前の振動は、その大きさの違いが対策後の振動の許容可否判断に与える影響を把握するため、以下に述べる 2 種を設定した。

対策前の振動 A：（許容限度をやや上回る振動）

官能検査Ⅱを実施する検査員（9 名）それぞれについて、官能検査Ⅰにて把握した許容限度より、 $VLT_{(25ms,60dB)}$ が約 6dB 大きい振動（検査員ごとに異なる）

対策前の振動 B：（許容限度を大きく上回る振動）

官能検査Ⅰにて把握した全検査員（16 名）を通しての許容限度の最大値より、 $VLT_{(25ms,60dB)}$ が約 6dB 大きい振動（全検査員で同一）

表 7.5.2 に、設定した対策前の振動 A の $VLT_{(25ms,60dB)}$ の範囲、および対策前の振動 B の $VLT_{(25ms,60dB)}$ を示す。

7.5.1.3 検査試料

検査試料は、本論文で提案する開発技術による振動低減効果を再現するものとして、対策前の振動に対して開発した制振装置による減衰を段階的に付加したものとした。具体的には、構造スラブを 1 質点の振動系とみなし、制振装置を用いたフィードバックによるアクティブ振動制御を行った場合の振幅の低減倍率を周波数領域にて対策前の振動に乘じ、逆フーリエ変換により時刻歴波形を算出した。低減倍率は、図 7.3.1 に示す主な卓越振動数における振幅が 3dB から 24dB の間で 3dB 間隔となるよう 8 段階設定した。図 7.3.1 に、検査試料の例として、低減倍率を 15dB とした場合の加速度・時間曲線を、対策前の振動

の加速度・時間曲線と比較して示す。

7.5.1.4 検査員，姿勢，想定する床用途

検査員は、成人男性 9 名（年齢 22～52 歳，体重 54～98kg）とした。選定した 9 名は、いずれも官能検査 I の検査員に含まれる。

検査員の姿勢は、官能検査 I と同様に椅子腰掛け位とした。

想定する床用途は、検査試料数が多くなることによる検査員の負担を考慮して、本論文で提案する開発技術の適用事例が最も多くなると考えられる事務所の執務室のみとした。

7.5.2 検査経過

7.5.1 節で述べた条件で官能検査を実施した。具体的には、対策前の振動を暴露した上で、対策後の振動として初めに低減倍率を 3dB とした検査試料を体感させ、許容可否を判断させた。対策後の振動が許容できないと判断された場合は、低減倍率を一段階増加させ、再び対策前の振動を暴露した上で対策後の振動を提示した。この所作を、対策後の振動が許容できると判断されるまで繰り返した。

提示する対象振動の順序はランダムとし、対策前の振動 A での検査と対策前の振動 B での検査は、検査員ごとに 24 時間以上の間隔を空けて実施した。検査員 1 名あたりの検査時間は、対策前の振動 A，B のいずれの場合でも約 2 時間程度であった。なお、振動台上の加速度の測定結果から、最終的に検査員間で提示した試料の $VL_{max(25ms)}$ の差が概ね 1dB 以内であることを確認した。

7.5.3 検査結果および考察

7.5.3.1 対策前の振動暴露後の許容限度

図 7.5.1 に、対策前の振動 A での官能検査結果を示す。左側の図は、横軸に $VLT_{(25ms,60dB)}$ をとり、対象振動ごとに、官能検査 I にて把握した許容限度（以降、“被暴露前の許容限度”と記す）と対策前の振動 A の範囲、および対策前の振動 A を暴露した後の対策後の振動の許容限度（以降、“被暴露後の許容限度”と記す）を示したものである。図中、許容限度は、全検査員の平均および標準偏差で示している。また、右側の図は、横軸に対策前の振動 A の $VLT_{(25ms,60dB)}$ から被暴露後の許容限度の $VLT_{(25ms,60dB)}$ を引いた $VL_{T(25ms,60dB)}$ の“低減量”をとり、対象振動ごとに、全検査員の平均および標準偏差を示したものである。

左側の図に示す通り、いずれの対象振動でも、被暴露前の許容限度と被暴露後の許容限

度の平均、標準偏差が近似していることから、被暴露経験の有無により振動に対する許容可否判断の基準が変化していないことがわかる。このことは、右側の図に示した $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量の平均がいずれの対象振動でも約 6dB となっており、7.5.1.2 節で設定した被暴露前の許容限度と対策前の振動 A の $VLT_{(25ms,60dB)}$ の差とほぼ等しいことから確認できる。以上より、一度不快な振動に暴露された後でも、対策後の振動が概ね被暴露経験がない場合の許容限度まで低減されれば、許容できると判断されることがわかる。

次に、図 7.5.2 に、対策前の振動 B での官能検査結果を、図 7.5.1 と同様の方法で示す。ただし、対策前の振動 B の $VLT_{(25ms,60dB)}$ は、検査員によらず同一となっている。

左側の図に示す通り、いずれの対象振動でも、被暴露後の許容限度の平均が、被暴露前の許容限度の平均より大きくなっていることから、許容限度を大きく上回る振動の被暴露経験が有る場合、被暴露前の許容限度まで低減されなくても許容できると判断されていることがわかる。また、右側の図に示した $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量の平均は、対象振動ごとに大きくは異なっていない。このことは、対策後の振動の許容可否判断には、対策前の振動からの低減量が大きく影響していることを示唆している。さらに、左側の図に示した被暴露後の許容限度の標準偏差は、被暴露前の許容限度の標準偏差と比較して小さくなっており、被暴露経験が無い場合の振動の絶対量を対象とした許容可否判断と比較して、被暴露経験が有る場合の低減量を対象とした許容可否判断の方が、個人差が小さくなっていることがわかる。

以上より、事後対策時の設計目標は、対策後の振動の $VLT_{(25ms,60dB)}$ の絶対量よりも、対策前の振動からの $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量に基づいて設定することで、居住者が効果を実感できる振動対策を効率よく実現できるものと考えられる。

7.5.3.2 対策前の振動 B 暴露後の許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量の関係

対策前の振動 B での検査結果を対象に、検査試料ごとに、許容できると回答した検査員数の全検査員数に対する割合を“許容率”として算出した。

図 7.5.3 に、許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量の関係を示す。図には、参考として、許容率が 0% および 100% の検査試料を除いた点に対する回帰直線を併せて示した。図に示すように、両者は概ね良い対応を示しており、 $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量を用いることで対策後の振動に対する許容率を概ね推定できることがわかる。また、回帰式より許容率が 90%、50% および 10% となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量を求め、表 7.5.3 に一覧にして示す。

表 7.5.1 官能検査Ⅱの概要

質問事項	対策前の振動が、 対策後の振動になったとしたら、 この対策後の振動は
回答肢	①許容できる ②許容できない
対象振動	図7.3.1に示す8種
検査員	成人男性9名
	年齢22～53歳，体重54～98kg
姿勢	椅子腰掛け位 (振動台に固定された椅子に座り 足裏を床に付けた姿勢)
想定する床用途	事務所の執務室

表 7.5.2 対策前の振動の $VL T_{(25ms, 60dB)}$

対象 振動 No.	対策前の振動A		対策前の 振動B
	最小	最大	
1	75	85	85
2	76	88	88
3	70	87	87
4	72	92	92
5	74	91	91
6	75	93	93
7	72	92	92
8	77	83	89

(単位：dB)

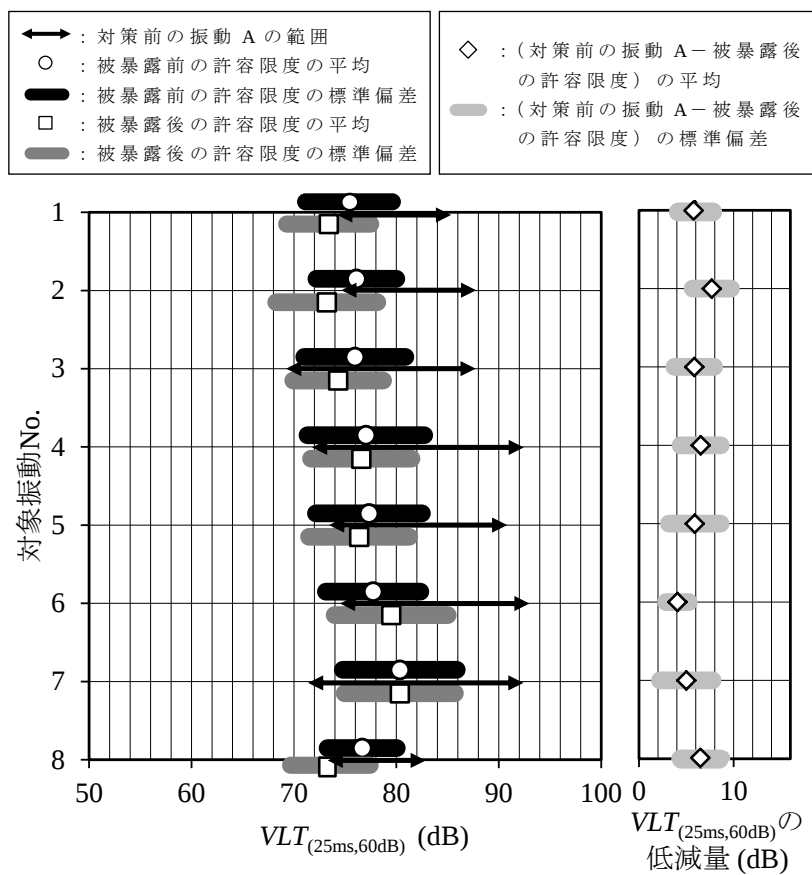


図 7.5.1 対策前の振動 A 暴露後の許容限度

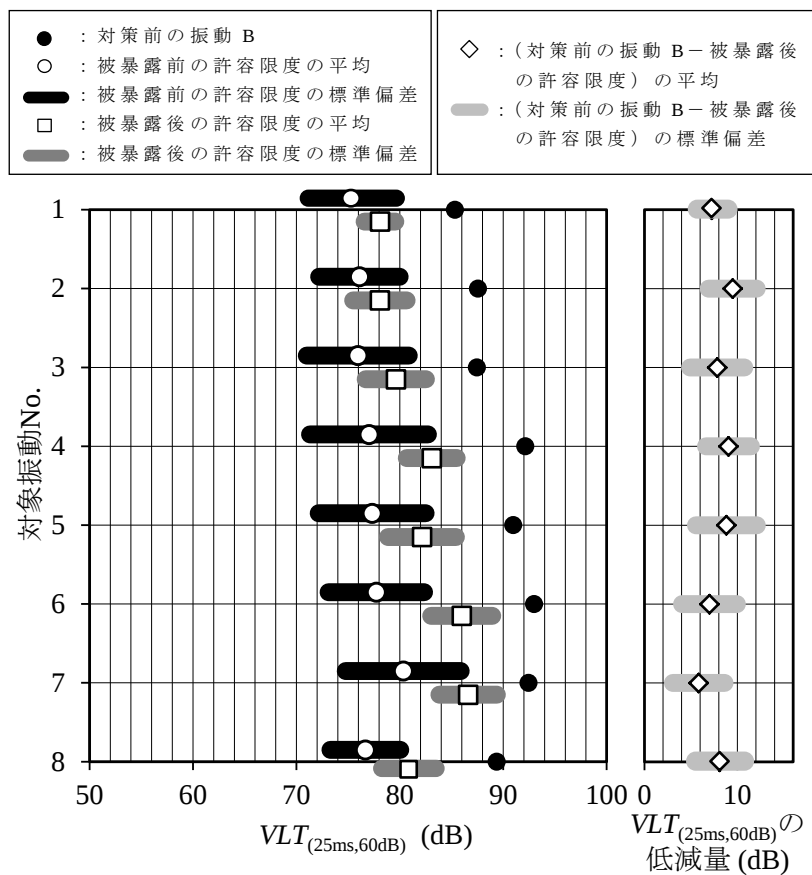


図 7.5.2 対策前の振動 B 暴露後の許容限度

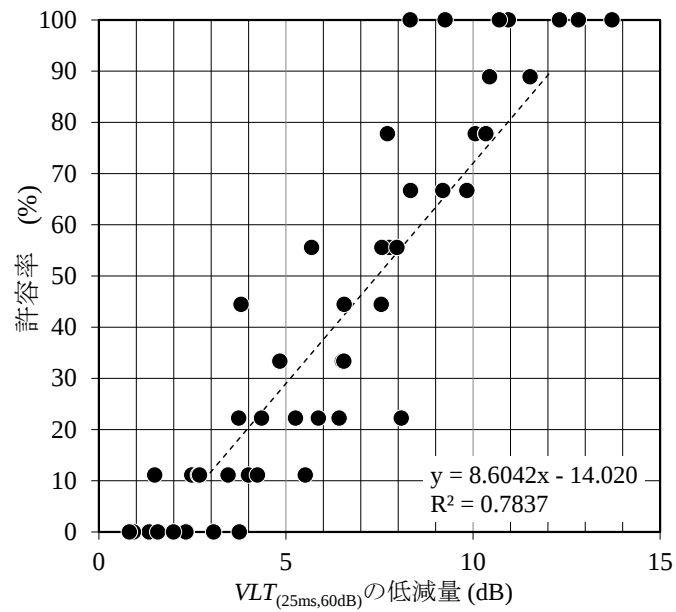


図 7.5.3 対策前の振動 B 暴露後の許容率と $VLT_{(25ms, 60dB)}$ の低減量の関係

表 7.5.3 許容率 90%, 50%および 10%となる $VLT_{(25ms, 60dB)}$ の低減量

許容率	$VLT_{(25ms, 60dB)}$ の 低減量
90%	12.0
50%	7.4
10%	2.7

(単位 : dB)

7.6 まとめ

本章の結論をまとめると以下の通りである。

- ・被暴露経験が無い場合の床振動に対する許容率は、 $VLT_{(25ms,60dB)}$ と概ね良い対応を示す。住居の居室の場合、許容率 90%となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ は約 71dB、50%となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ は約 78dB である。一方、事務所の執務室の場合、許容率 90%となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ は約 74dB、50%となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ は約 80dB である。
- ・床振動問題に対する事後対策のように、被暴露経験が有る場合の対策後の振動は、少なくとも被暴露前の許容限度まで $VLT_{(25ms,60dB)}$ を低減すれば、許容できると判断される。
- ・対策前の振動が被暴露前の許容限度を大きく上回る場合、一定量 $VLT_{(25ms,60dB)}$ を低減すれば、対策後の振動が被暴露前の許容限度より大きい場合でも、許容できると判断される。この場合、許容可否判断には、対策後の振動の絶対量よりも、対策前の振動からの低減量が大きく影響する。また、被暴露経験が無い場合の振動の絶対量を対象とした許容可否判断と比較して、被暴露経験が有る場合の低減量を対象とした許容可否判断の方が、個人差が小さくなる。
- ・対策前の振動が被暴露前の許容限度を大きく上回る場合、対策後の振動の許容率は $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量と概ね良い対応を示す。事務所の執務室の場合、許容率 90%となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量は約 12dB、50%となる $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量は約 7dB である。

以上の結果は、 $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量を用いることで床振動の対策効果を評価できることを示しており、既存建築物において発生した床振動問題に対する事後対策の設計目標を、居住者の対策効果に対する実感に即して効率よく設定するための有効な知見となり得るものとする。ただし、本章で得られた成果は、条件を単純化した実験室実験の結果に基づくものであり、実際の建築物における居住者の対策後の床振動に対する評価は、不快な床振動に暴露される頻度や暴露後の時間の経過などの影響により変化する可能性があると考えられる。これらの要因の影響を把握するためには、実際の建築物におけるデータの蓄積が有効であり、より実状に即した設計目標の設定手法を確立するためには、蓄積したデータに基づき、本研究成果を適宜修正していく必要があると考える。

第 8 章

振動制御技術および設計手法の実建築物への適用例

第8章 振動制御技術および設計手法の実建築物への適用例

8.1 はじめに

前章までに、居住者の対策後の振動に対する評価に基づいた床振動環境の改善目標の設定手法および床振動制御装置を適用した際に期待される振動低減効果の予測手法を提案し、床振動の事後対策に有効な制振装置の設計手法を提示した。供用中の実建築物に本振動制御技術を適用するためには、以上に述べた制振装置の設計手法に加え、天井や耐火被覆など制振装置を取付ける鉄骨梁を覆う仕上げ材等が存在する状況において、良好な施工性を有する必要がある。

本章では、供用中の実建築物への適用を通じて、これまでに提示した振動制御技術および設計手法の有効性を確認するとともに、制振装置の施工性を検証した経緯，結果について述べる。

8.2 対象建築物の概要

図 8.2.1 に、適用対象とした建築物の概要として、平面図の一部を示す。構造形式は、鉄骨造 7 階建てで南北方向が長辺となる約 118.8m×34.8m の平面形状となっている。建築物の用途は事務所であり、各フロアの中央部が階段やエレベータ、水回り、吹抜の中庭等のコア部分が配置され、コア部分の南北に打合せスペース、東西の長辺に沿って執務スペースが計画されている。

制御対象は、事前の調査により、周囲で執務者が歩行している時間帯が比較的多く、振動を感じる頻度が多いことが確認された 4 階南側の打合せスペースの一部の床とした。図 8.2.2 に、制御対象とした床周辺の梁伏せ図を示す。基本スパン長は 10.5m×10.5m であり、梁間方向の大梁に 3 本の小梁が配置されている。また、大梁と小梁の梁成は同一となっている。鉄骨梁は湿式の耐火被覆で覆われている。4FL-1,100mm の位置に石膏ボードと岩綿吸音板から成る天井が配置されており、天井面と大梁および小梁の下端から天井までの離隔は 835mm となっている。床は、最大厚さ 165mm、最小厚さ 90mm の波型形状のデッキプレートを用いたコンクリートスラブで構成されており、大梁を含めた 1 スパン分の躯体重量は約 40.1ton である。

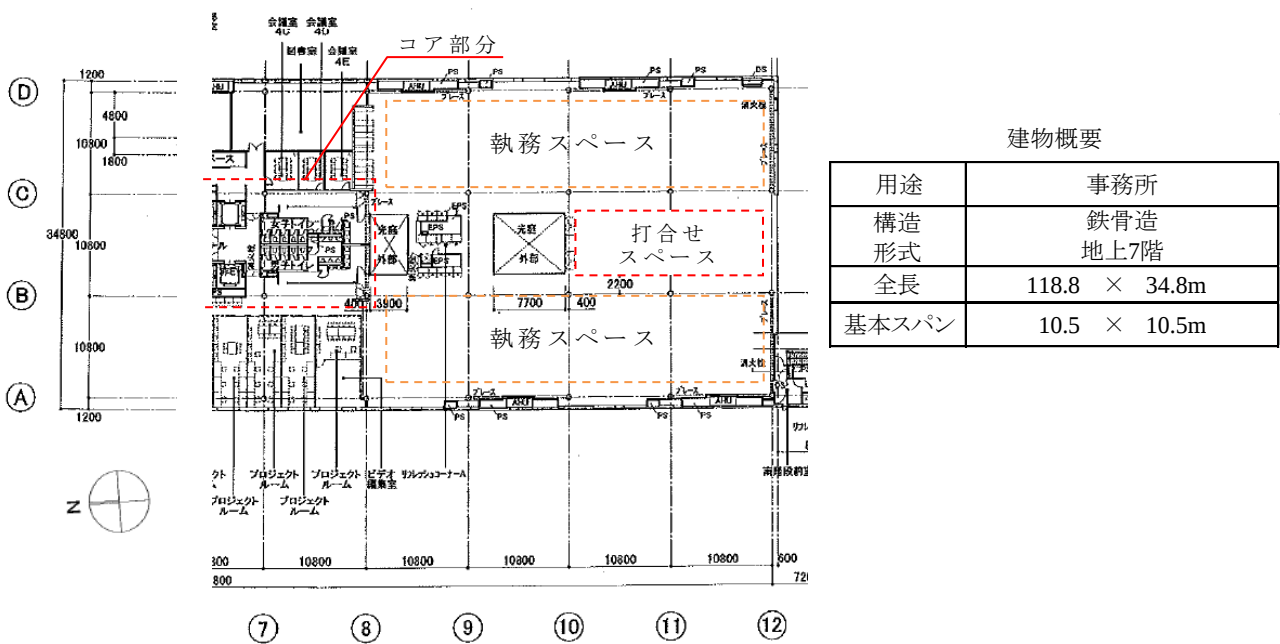


図 8.2.1 対象建築物の概要（4階平面図）

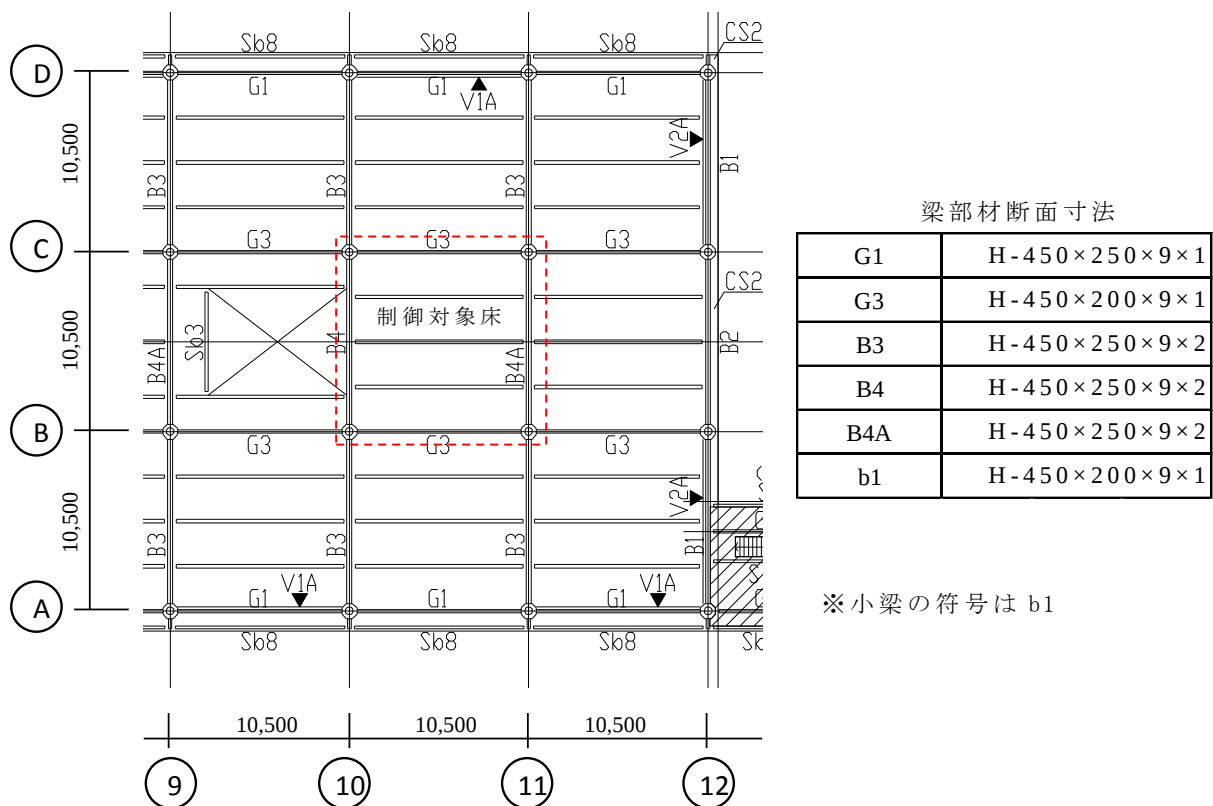


図 8.2.2 制御対象床周辺の梁伏せ図（4階梁伏せ図）

8.3 対象建築物の床振動環境

はじめに、対象建築物の床振動環境を把握するため振動計測を実施した。把握する項目は以下の2項目である。

- (1) 歩行ピッチと共振する可能性のある主な振動モード
- (2) 歩行加振時の加速度振幅

8.3.1 振動モード

図 8.3.1 に示す位置に加速度センサを設置し、加振点 P にてヒールインパクトを行った際の各測定点の振動加速度を計測した。図 8.3.2 に、加振点 P 近傍の基準測定点 P0 における応答加速度の周波数分析結果を示す。図には、主な卓越振動数を併記した。以上により抽出された振動数について、P0 に対する各測定点の加速度振幅比および位相差を算出し、振動モードの形状を把握した。図 8.3.3 に、各振動モードの形状を示す。図の縦軸は、基準点とした P0 の加速度振幅を 1 とした加速度振幅の比を表している。5.0Hz の振動モードは隣接するスパンと一体となって振動する形状、6.6Hz の振動モードは小梁の振動モードが支配的で 10-11 通り間のスパン中央が腹となり各大梁が節となる形状、9.9Hz の振動モードは 1 スパン内に複数の腹が逆位相で生じる形状となっている。

8.3.2 歩行加振時の加速度振幅

検討対象床において歩行加振を行い、各所の応答加速度振幅を計測した。歩行路は 8.3.1 節にて抽出した各振動モードの腹を通過する3種を設定し、歩行テンポは対象とする振動モードと倍調波で共振が生じるよう設定した。歩行者は、体重約 60kg の成人男性 1 名とした。図 8.3.1 に、各振動モードに対する歩行路、加速度測定点および歩行テンポを示す。

図 8.3.5 に、測定で得られた応答加速度波形の 1/3 オクターブ分析結果を、日本建築学会による居住性能評価指針の知覚確率と併せて示す。図より、多くの加振ケースで V-50 程度以下となっているが、歩行テンポ 2.2Hz、歩行路 B の場合に測定点 P2 で V-70 程度となっている。これは、6.6Hz の振動モードが 2.2Hz の歩行テンポと共振し、振動モードの腹である測定点 P2 で大きく振動した事象である。一方、大きな振動が生じなかった 5.0Hz の振動モードについては、隣接スパンと一体となって振動するモードであるため質量が大きく振動しにくかったものと考えられる。また、9.9Hz の振動モードは、歩行テンポの 5

倍調との共振であり、9.9Hz の加振力成分が小さいため大きく振動しなかったものと考えられる。

以上の結果より、歩行により最も大きく振動した 6.6Hz の振動モードが比較的有感振動となりやすいと考え、本検討では、6.6Hz の振動モードを制御対象とすることとした。

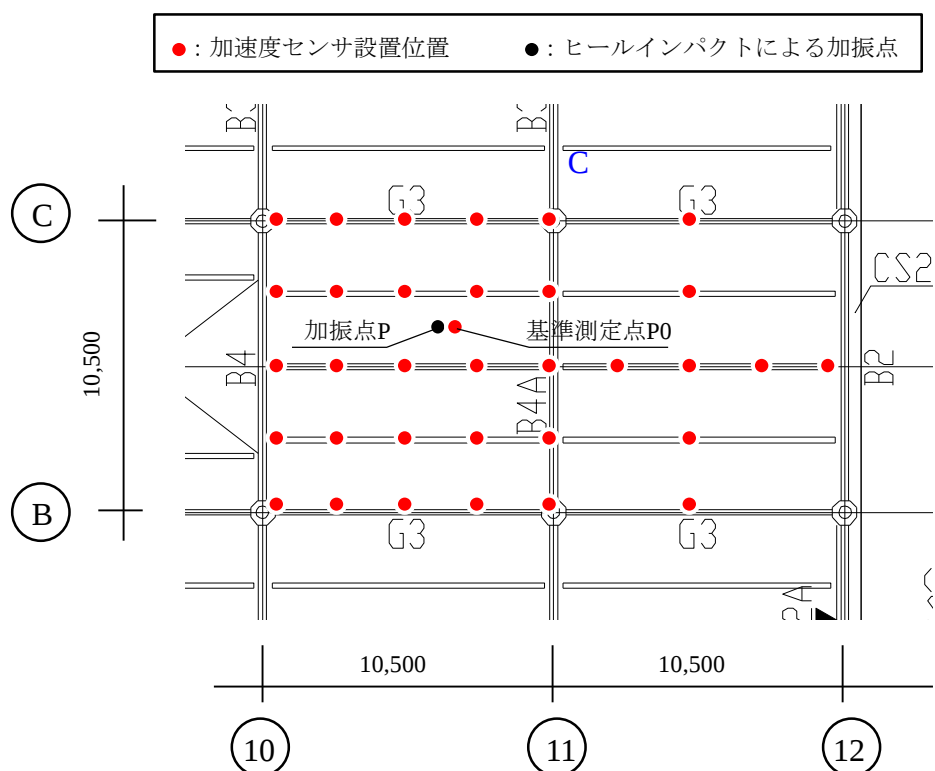


図 8.3.1 振動モード測定時の加振点および応答加速度測定点

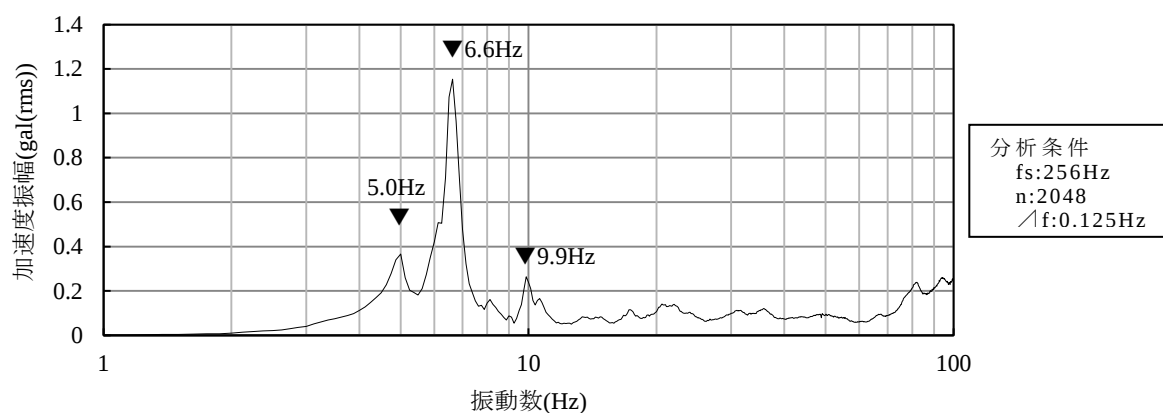


図 8.3.2 ヒールインパクト時の基準測定点 P0 における応答加速度

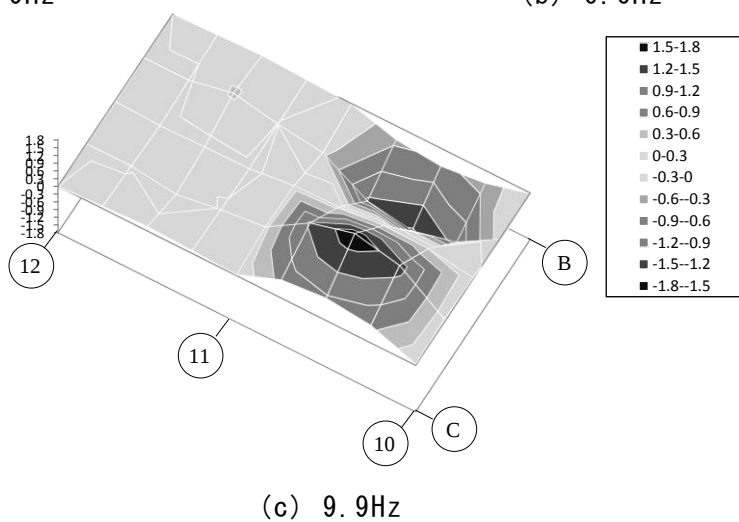
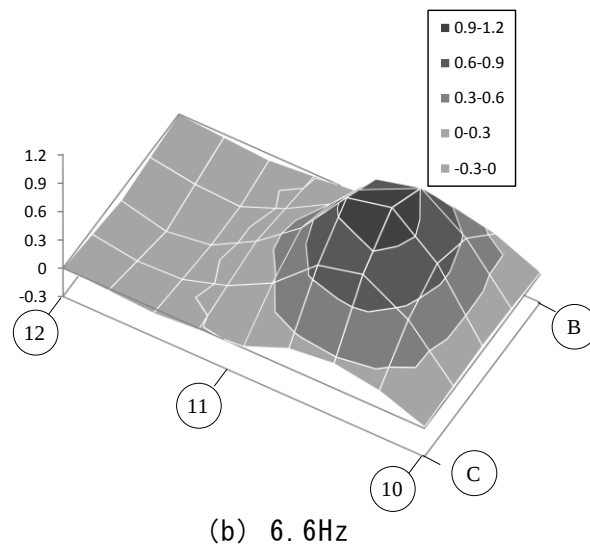
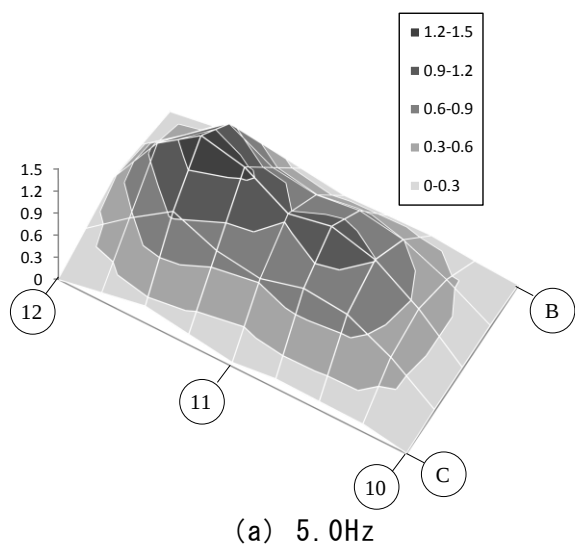


図 8.3.3 主な卓越振動数の振動モード

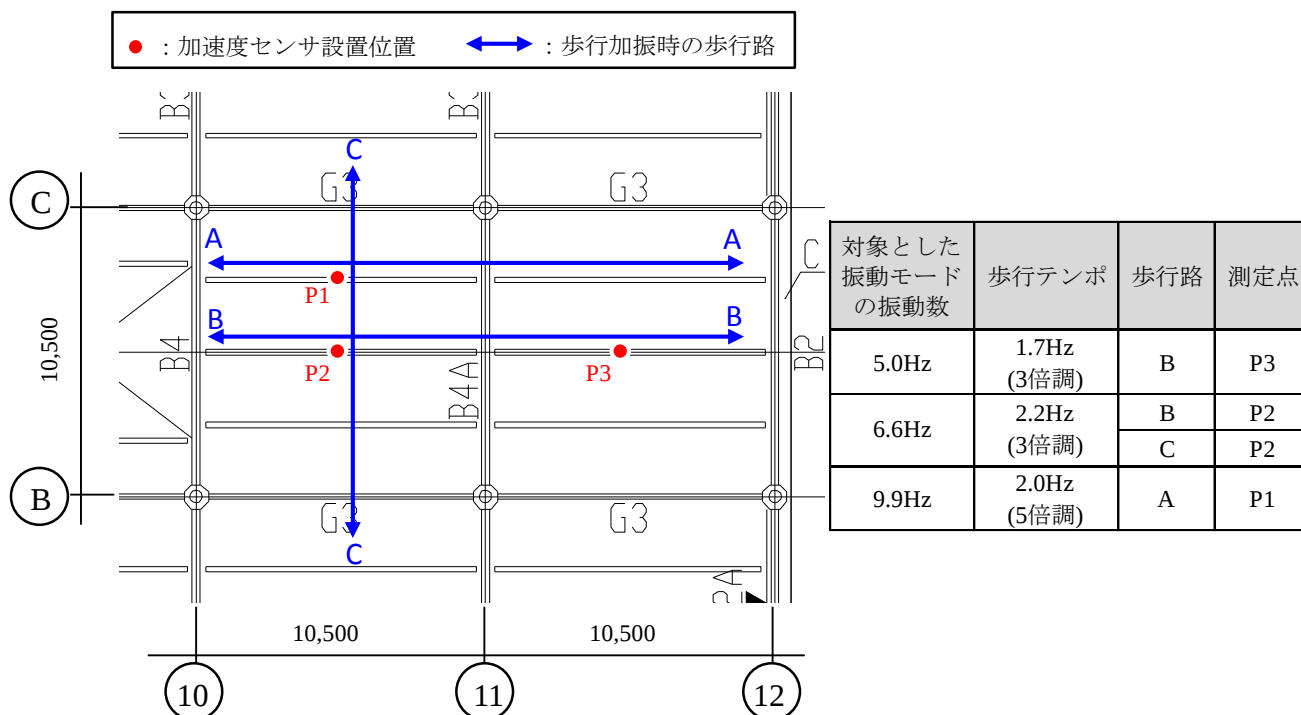
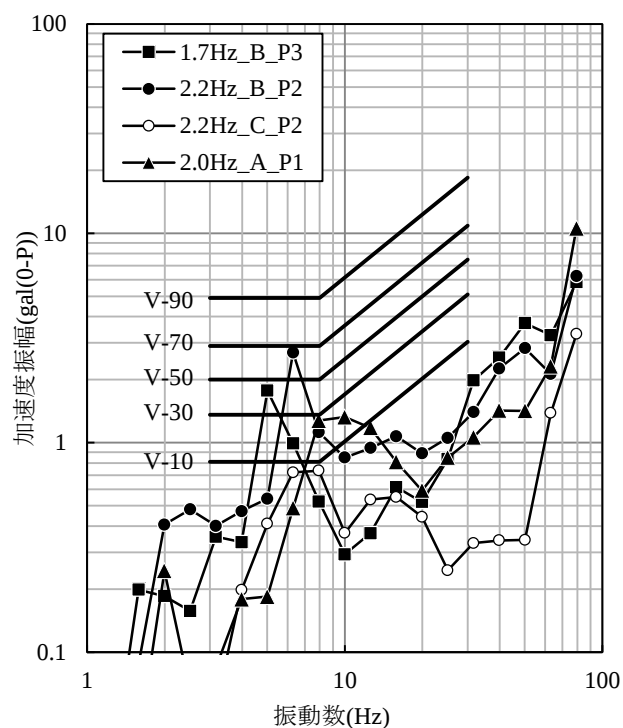


図 8.3.4 歩行加振時の歩行路および加速度測定点



※凡例の意味
“歩行テンポ”_“歩行路”_“測定点”

図 8.3.5 歩行加振時の応答加速度

8.4 振動制御技術を用いた振動環境の設計

第7章で提示した振動環境の改善目標の設定手法および第5章で提示した振動制御効果の予測手法を用いて対策後の振動環境の設計を行い、制振装置の仕様を決定する。

8.4.1 改善目標の設定

8.3.2 節で述べた測定後、改めて歩行加振時の床振動測定を行った。歩行者は、体重約80kgの成人男性1とした。図8.4.1に、図8.3.4に示した歩行路Bを2.2Hzで歩行した際の、測定点P2における応答加速度波形を示す。図には、 $VL_{(25ms)}$ の時刻歴波形も併せて示した。 $VL_{(25ms)}$ の最大値は72.2dB、 $VL_{(25ms)}$ が60dBを超える時間帯は3.4secであった。本測定結果より $VLT_{(25ms,60dB)}$ は、第6章(6.6)式を用いて74.8dBと算出される。

この結果を図7.4.3に示した被暴露経験がない場合の許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の関係と照合すると、 $VLT_{(25ms,60dB)}=74.8dB$ に対する許容率は82.7%と求められる。すなわち、本計測結果は大多数の居住者が許容できると判断する程度の大きさの振動であるが、本事例ではさらに振動環境を改善し、対策前の振動を許容できると判断すると考えられる居住者と合わせて、居住者全体の90%以上が許容できると判断される振動環境の実現を目標とした。すなわち、対策前の振動を許容できないと判断すると考えられる約17%の居住者について、対策後の振動に対して50%の許容率が得られるよう振動環境の改善目標を設定することとした。ここで、被暴露経験が無い場合、90%以上が許容できると判断する $VLT_{(25ms,60dB)}$ は、図7.4.3、表7.4.3より73.5dBであり、本測定結果との差は1.3dBと僅かであるが、第7章で述べた通り、振動の絶対量に対する許容可否判断は比較的個人差が大きいことから、許容できないと回答する約17%の居住者の中には現状の振動環境が許容限度を大きく上回っている居住者が存在する可能性がある。したがって、 $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量の目標値は、図7.5.3に示した対策前の振動B暴露後の許容率と $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量の関係より、7.4dBと設定した。

8.4.2 振動制御効果の予測

第5章で提示した振動制御効果の予測手法を用いて、8.4.1節にて設定した $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量の目標値を実現できる制振装置の仕様を検討した。以下に、5.2節に示した手順に従って、振動制御効果の予測を行った経緯、結果を示す。

①床の振動特性把握

制御対象とする振動のモード形状は、8.3 節で示した通りである。歩行による振動が最も大きく発生すると考えられる 6.6Hz の振動モードを制御対象とし、振動モードの腹となるスパン中央を制御対象点とした。

制御対象点に設置した起振器を用いて 3～20Hz の範囲で振度数が変化するスイープ加振を行い、床のアクセラランスを計測した。図 8.4.2 に、計測された床のアクセラランスを示す。ヒールインパクトによる応答加速度の測定結果と同様に、6.6Hz に卓越が見られる。

②アクチュエータの配置方法の設定

制御対象とする振動モードが小梁の振動が大きく寄与し大梁を節とする形状であることから、アクチュエータは小梁と大梁の各接合部に配置することとした。アクチュエータの取付け治具は、施工性を考慮し、治具の設置の際に一人で手運びができる重量、寸法とした。また、検討対象が供用中の実建築物であることから、構造体である鉄骨には溶接やボルト孔の削孔等を行わないこととし、治具の取付けには 2 液性エポキシ接着剤を用いることとした。図 8.4.3 に、設定したアクチュエータの配置方法の概要を示す。

③アクチュエータ単体の推力，変位量の予測解析

アクチュエータは、5.3.5 節と同様のアクチュエータ SUS0.3mm テーパー-type を、2 基並列で用いることとした。図 8.4.4 に、SUS0.3mm テーパー-type のアクチュエータを 2 基並列で用いた場合の最大推力および変位量の解析結果を示す。

④床剛性の予測解析

図 8.4.5 に、制御対象床の有限要素法解析モデルを示す。図中の拡大図に示すアクチュエータ固定部に静的加力し、加力点の変位量を算出した。図 8.4.4 に、算出した床剛性を表す直線を併せて示す。

⑤アクチュエータの制御力算出

図 8.4.4 に示したアクチュエータの推力と変位量の関係および床剛性を表す直線の交点座標より、②で設定したアクチュエータが床に作用させることができる最大制御力は、2618N(P-P)と算出される。

⑥アクチュエータによる床の加振特性の予測解析

床の解析モデルのアクチュエータ固定部に単位パルス荷重を入力しアクチュエータを動的に駆動することで制御対象点に生じる応答加速度を算出した。図 8.4.6 に、解析

の結果得られた制御対象点における時刻歴応答加速度を示す。また、図 8.4.7 に、図 8.4.6 を周波数分析して得られたアクチュエータを駆動した際のアクセラランスを示す。

⑦床振動低減量の算出

古典制御理論に基づくフィードバック型の制御系による床振動低減量を算出する。

図 8.4.8 に設計したコントローラ H を、図 8.4.9 に制御対象床に対して設計した制御系の開ループ伝達関数を示す。図 8.4.9 より、制御対象とする 6.6Hz において位相が 180°でありゲインが大きくなっていることから、有効な制御系になっていることがわかる。また、位相が 0°となっている周波数においてゲインが 0dB 未満となっていることから、制御系の安定性が確保されていることがわかる。

図 8.3.5 より、制御対象とする振動の最大加速度振幅は約 3.0gal(0-P)、すなわち約 6.0gal(P-P)であり、第 5 章の(5.4)式は以下となる。

$$A=6.0 \text{ (gal(P-P))}$$

$$k1=0.1 \text{ (V/gal)}$$

$$H_{\max}=14.1 \quad (\text{図 8.4.8 より})$$

$$V_{\max} = A \cdot k1 \cdot H_{\max} = 8.5 \text{ (V(P-P))}$$

以上より、アクチュエータへ入力する制御信号が、本制御システムで用いたアクチュエータの許容印加電圧の最大値 10V(P-P)を下回っていることから、設定したアクチュエータで制御対象の振動を制御可能であることが確認できる。

図 8.4.10 に、(5.2)式および(5.3)式より算出した制御対象床のспан中央に外乱が作用した際の床の応答加速度を示す。図より、非制御時と比較して制御時では一次固有振動数における加速度振幅が約 1/3 に低減されることが見込まれる。

実測された歩行時の応答加速度波形の周波数分析結果に、図 8.4.10 より求められる周波数ごとの応答加速度の低減率を乗じて、対策後の応答加速度波形を算出した。また、この応答加速度波形より $VL_{(25\text{ms})}$ の時刻歴波形を算出した。図 8.4.11 に、対策前後における応答加速度波形および $VL_{(25\text{ms})}$ の時刻歴波形を示す。図より、 $VL_{(25\text{ms})}$ の最大値が低減され 66.9dB となり、60dB を超えている時間は 1.4sec へと短縮していることがわかる。以上の結果から、 $VLT_{(25\text{ms},60\text{dB})}$ は(6.6)式を用いて 67.6dB と求められる。非制御時の $VLT_{(25\text{ms},60\text{dB})} = 74.8\text{dB}$ からの低減量は 7.2dB であり、改善目標値の 7.4dB を概ね満足する結果となっている。

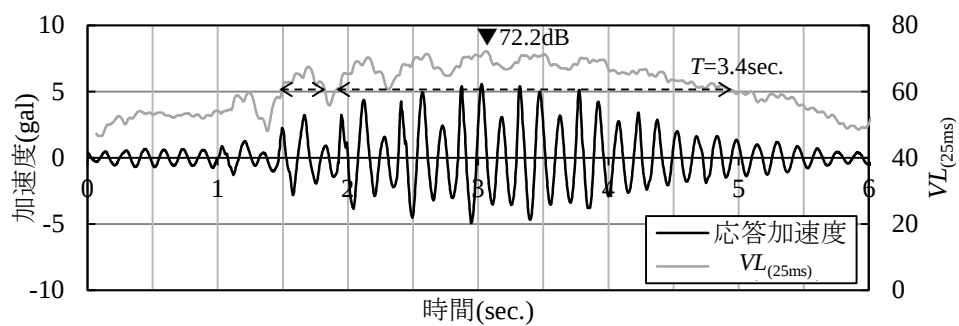


図 8.4.1 歩行加振時の応答加速度波形

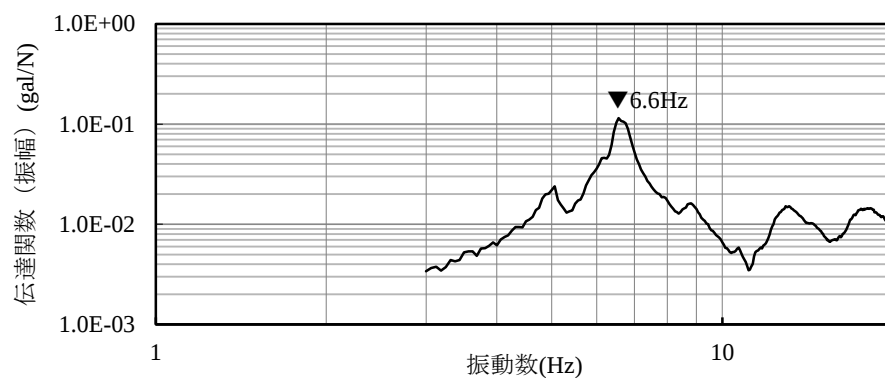
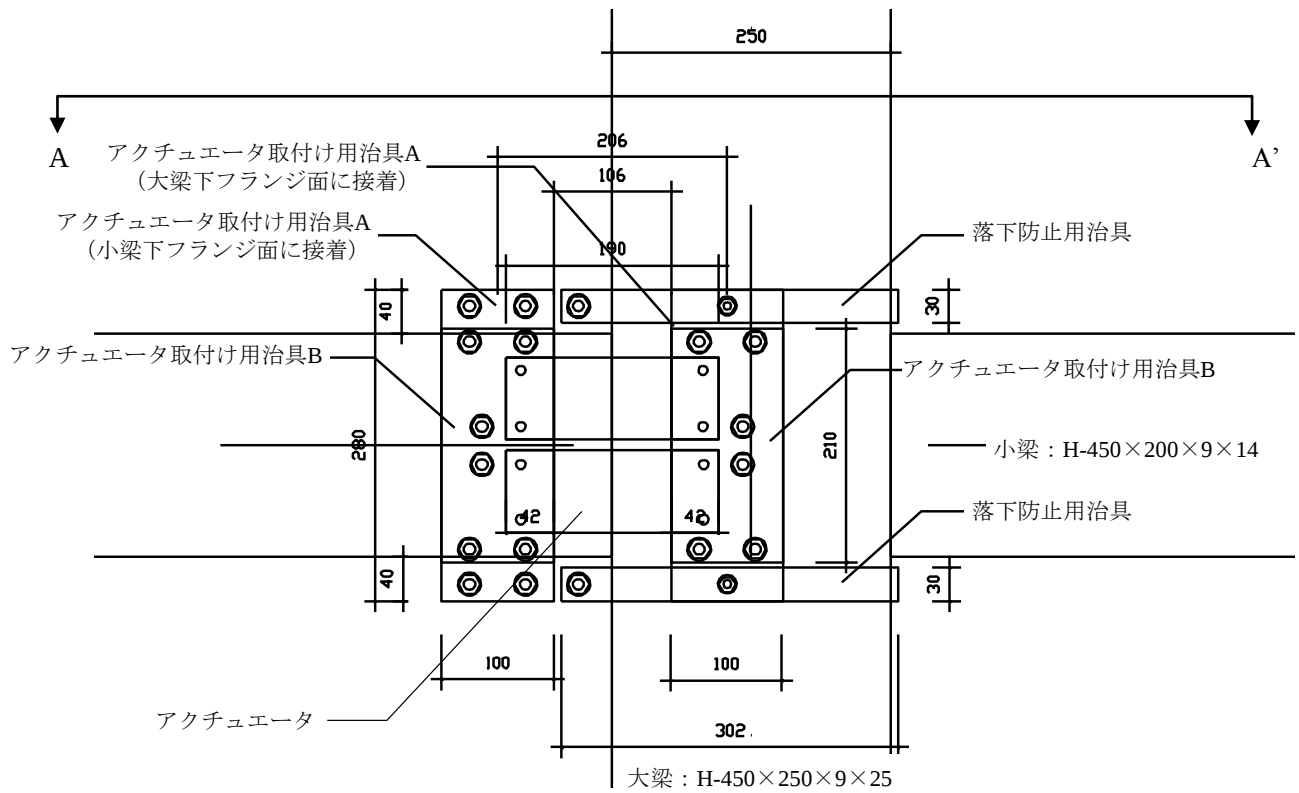
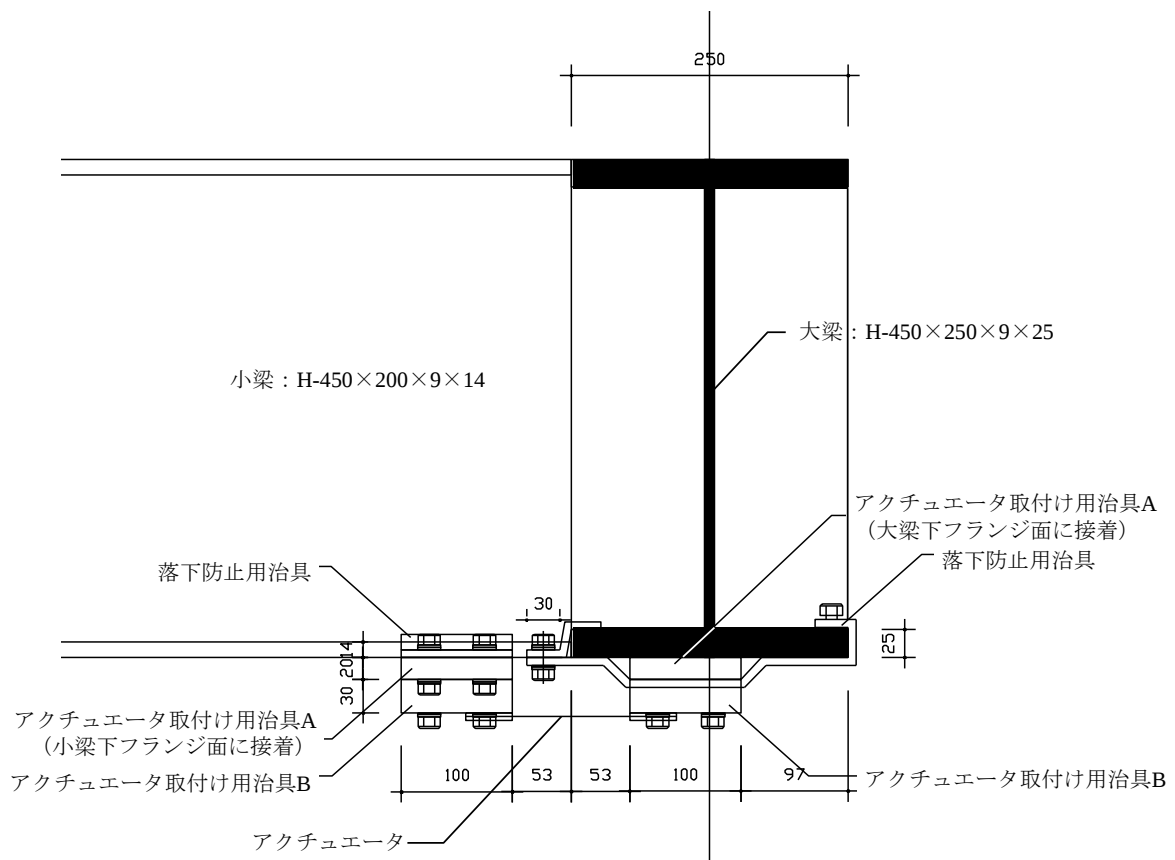


図 8.4.2 制御対象点におけるアクセラランス



(a) 見上げ図



(b) 断面図 (A-A' 矢視)

図 8.4.3 アクチュエータの取付け方法

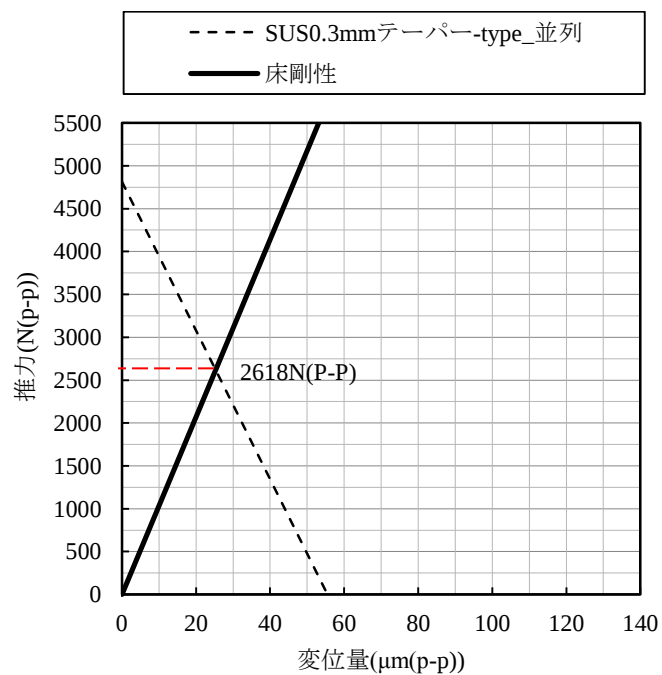


図 8.4.4 アクチュエータの推力と変位量の関係および床剛性

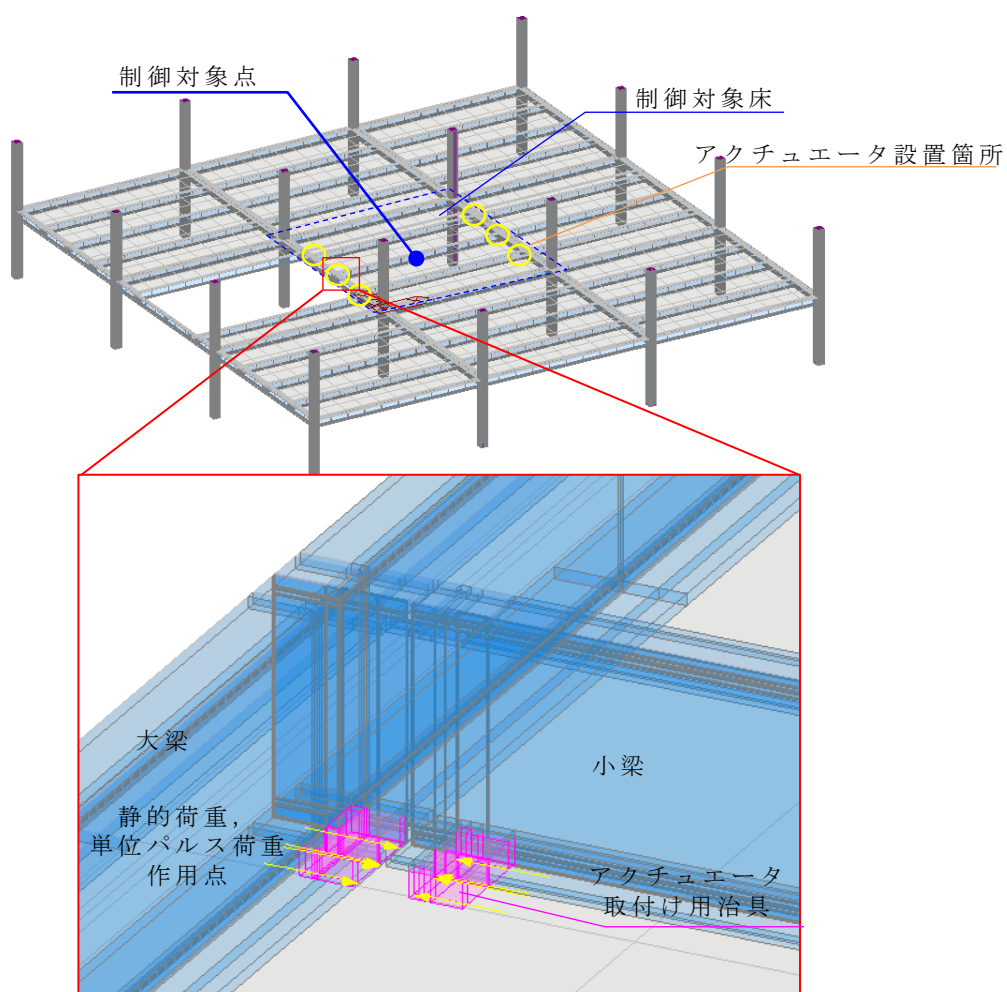


図 8.4.5 制御対象床の有限要素法解析モデル

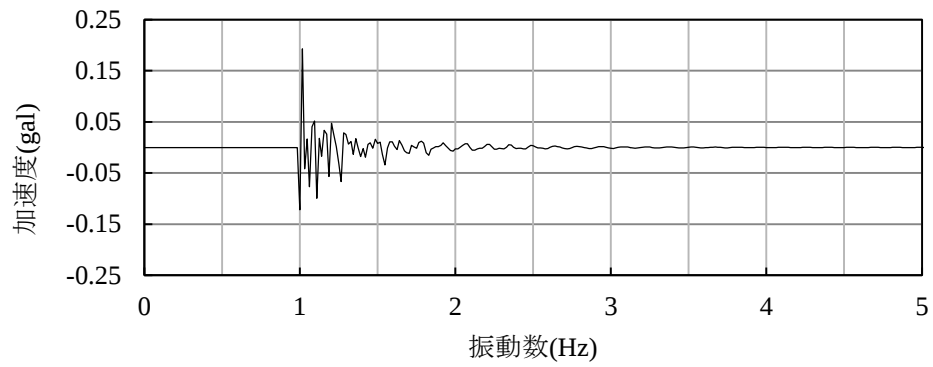


図 8.4.6 アクチュエータ固定部に単位パルス荷重を与えた際の制御対象点における応答加速度【解析】

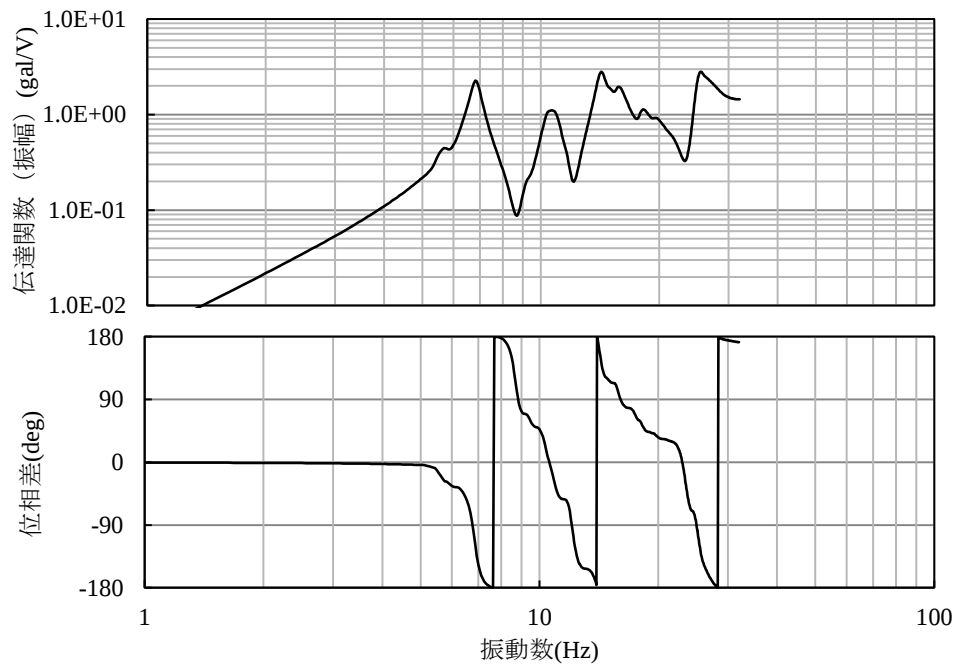


図 8.4.7 アクチュエータへの入力信号に対する制御対象点の加速度センサ出力【解析】

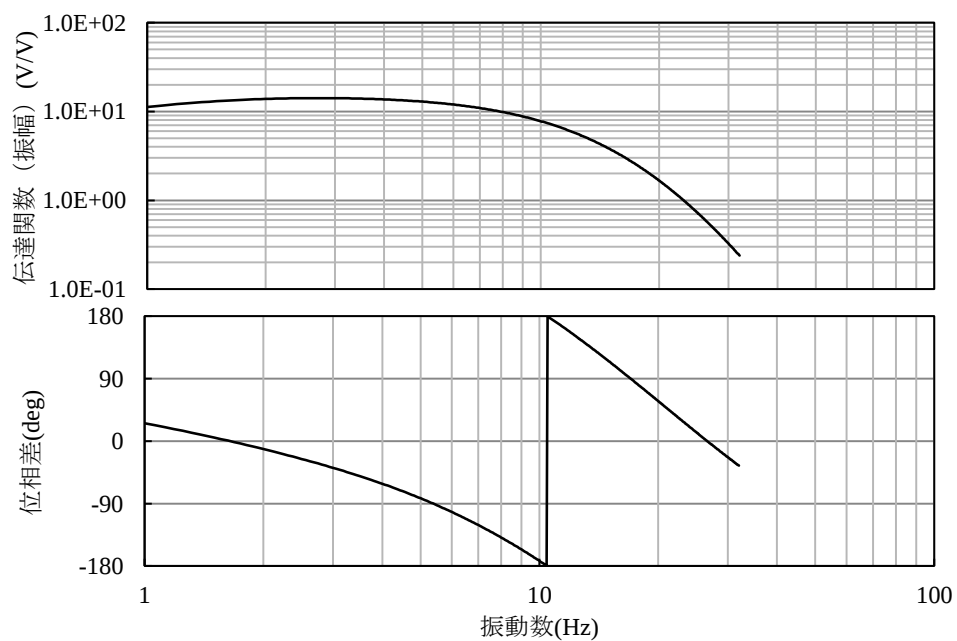


図 8.4.8 設計したコントローラの伝達関数【解析】

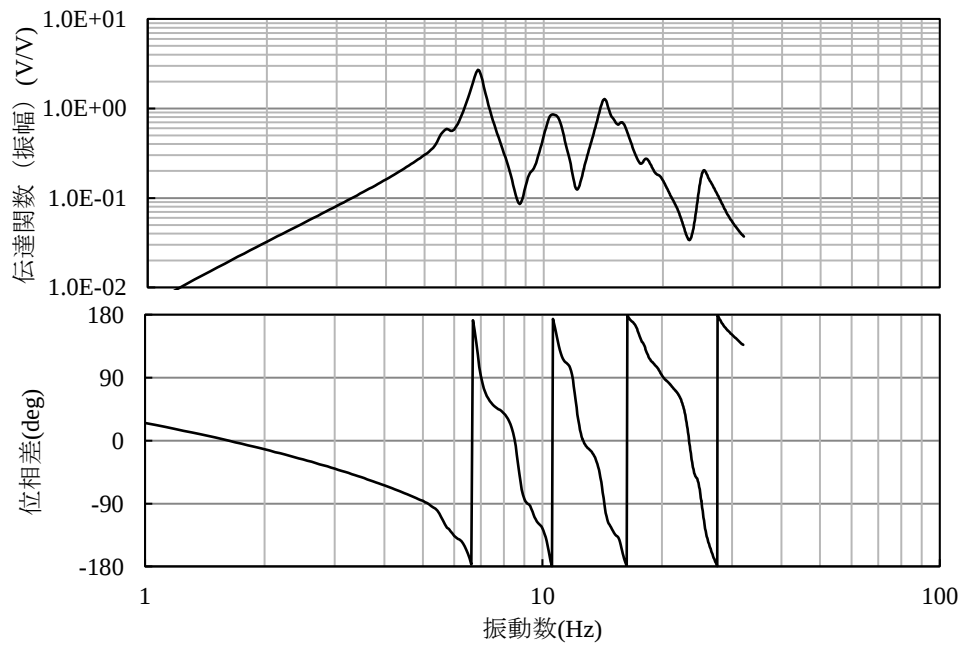


図 8.4.9 設計した制御系の開ループ伝達関数【解析】

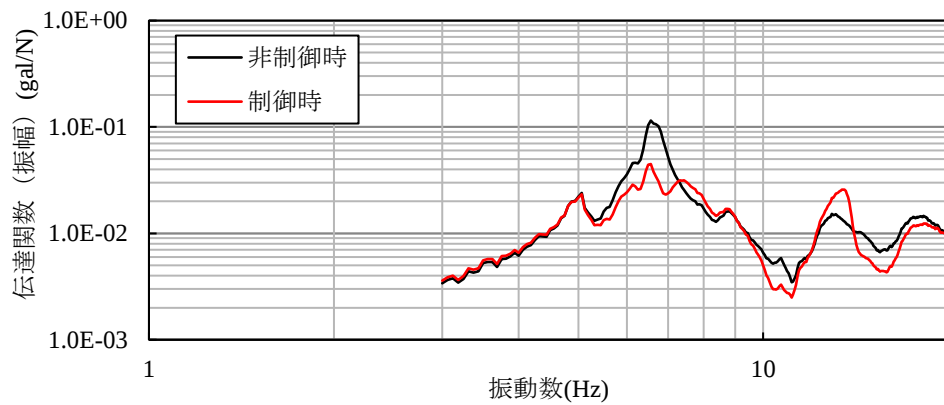
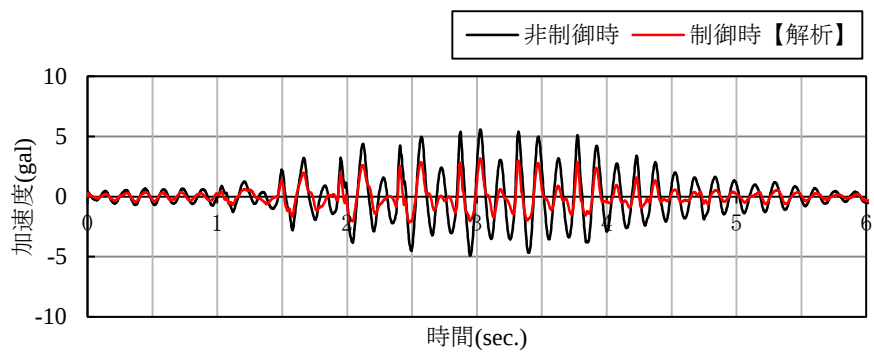
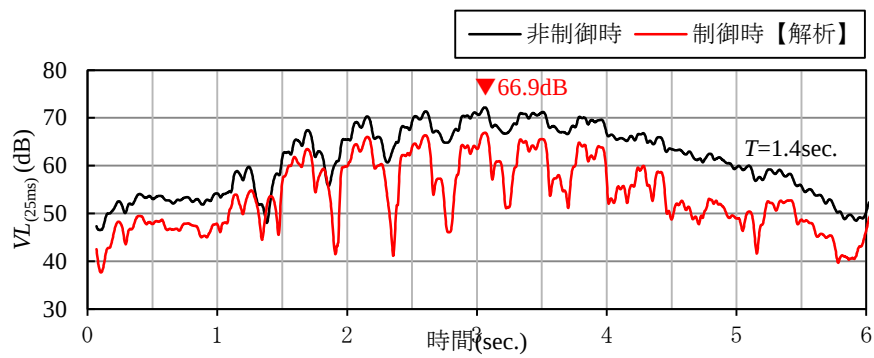


図 8.4.10 制御対象床のスパン中央に外乱が作用した際の床の応答加速度【解析】



(a) 応答加速度波形



(b) $VL_{(25ms)}$ の時刻歴波形

図 8.4.11 制御時における歩行加振時の応答【解析】

8.5 制振装置の施工

以上の検討により決定した仕様で制振装置を実際に制御対象床に取付ける工事を行い、作業の可否や工期等の観点から施工性の検証を行った。

アクチュエータの取付け工事および配線工事は、制御対象床の下階である3階床上より作業用の足場台を使用して行った。また作業時間は、事務所内の執務に支障のないよう、土曜日の午前0時に開始し、月曜日の午前6時には完了することを目標とした。

なお、制振装置の主な構成要素であるアクチュエータ用アンプ、制御コンピュータ、加速度センサは、それぞれ表 8.5.1 に示すものを用いた。アクチュエータ用アンプは 2.2 節で述べた専用の機器、制御コンピュータおよび加速度センサは、市販されている汎用機器とし、4 階の制御対象床に近接した電気配線スペース (EPS) 内に収納した。図 8.5.1 に、制振装置のシステム構成の模式図を示す。また、図 8.5.2 に、作業範囲を示すとともに、以下に主な施工手順の具体的な説明を記す。

① 什器の移動

3 階床上の作業範囲に配置されている什器を必要に応じて移動する。

② 飛散養生

天井ボードおよび耐火被覆撤去時に発生する微粉の飛散を防止するため、作業範囲を囲うようにビニルシートで養生を行う。

③ 天井の一部撤去

制振装置を取付ける各小梁の両端部計 6 か所について、約 1m×1m の範囲で天井を撤去する。

④ 耐火被覆の一部撤去

アクチュエータ取付け治具を設置する範囲の耐火被覆を撤去し、鉄骨の素地を露出させる。

⑤ アクチュエータ取付け治具の設置

アクチュエータ取付け治具を、2 液性エポキシ接着剤を用いて鉄骨素地に接着する。接着と同時にしゃこ万力等のクランプで鉄骨と取付け治具を固定し、接着剤が硬化するまで養生する。

⑥ 耐火被覆の一部復旧

アクチュエータ固定部を残して耐火被覆を復旧する。

⑦アクチュエータ配線，取付け

アクチュエータとアクチュエータ用アンプを配線し、アクチュエータの最大印加電圧である 7.5V を印加しアクチュエータを最大限に伸長させた状態で、取付け治具にボルト接合する。

⑧耐火被覆復旧

アクチュエータ固定部の耐火被覆を復旧する。

⑨点検口取付け，天井復旧

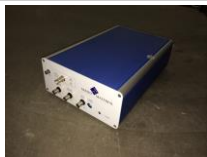
アクチュエータ取付け箇所に点検口を取付け、撤去した天井を復旧する。

⑩片付け，清掃

飛散養生を撤去し、周囲を清掃する。

図 8.5.3 に、実際に施工した際の状況を作業手順に従って示す。また図 8.5.4 に、施工に要した工期の実績を示す。アクチュエータやアクチュエータ取付け治具が小型，軽量で作業範囲も局所的であることから、軽微な養生，作業台，工具等で作業が可能であり、事務所の休業日 2 日間で全ての工事を完了することができた。構造補強を目的とした間柱や、従来の TMD 等に代表される制振装置など、大型な重量物の重機等を用いての運搬，設置が必要となる工事では、1 週間から長い場合には 1 か月程度の工期を要するのと比較して、提案する振動制御技術の施工性が極めて優れていることが確認された。

表 8.5.1 制御装置を構成する主な機器の概要

構成機器	外観	型番	メーカ	寸法 (W×D×H (mm))	重量 (kg)	数量
アクチュエータ用 アンプ		PA05039	SmartMaterial GmbH	203×98.3×361	2.3	6
制御コンピュータ		S-BOX	mtt株式会社	本体： 280×170×60 端子台： 220×113.5×60	2.0	1
加速度センサ		本体： VM-52 ピックアップ： PV-83B	リオン株式会社	本体： 200×180×70 ピックアップ： φ67×40.7	1.0	1

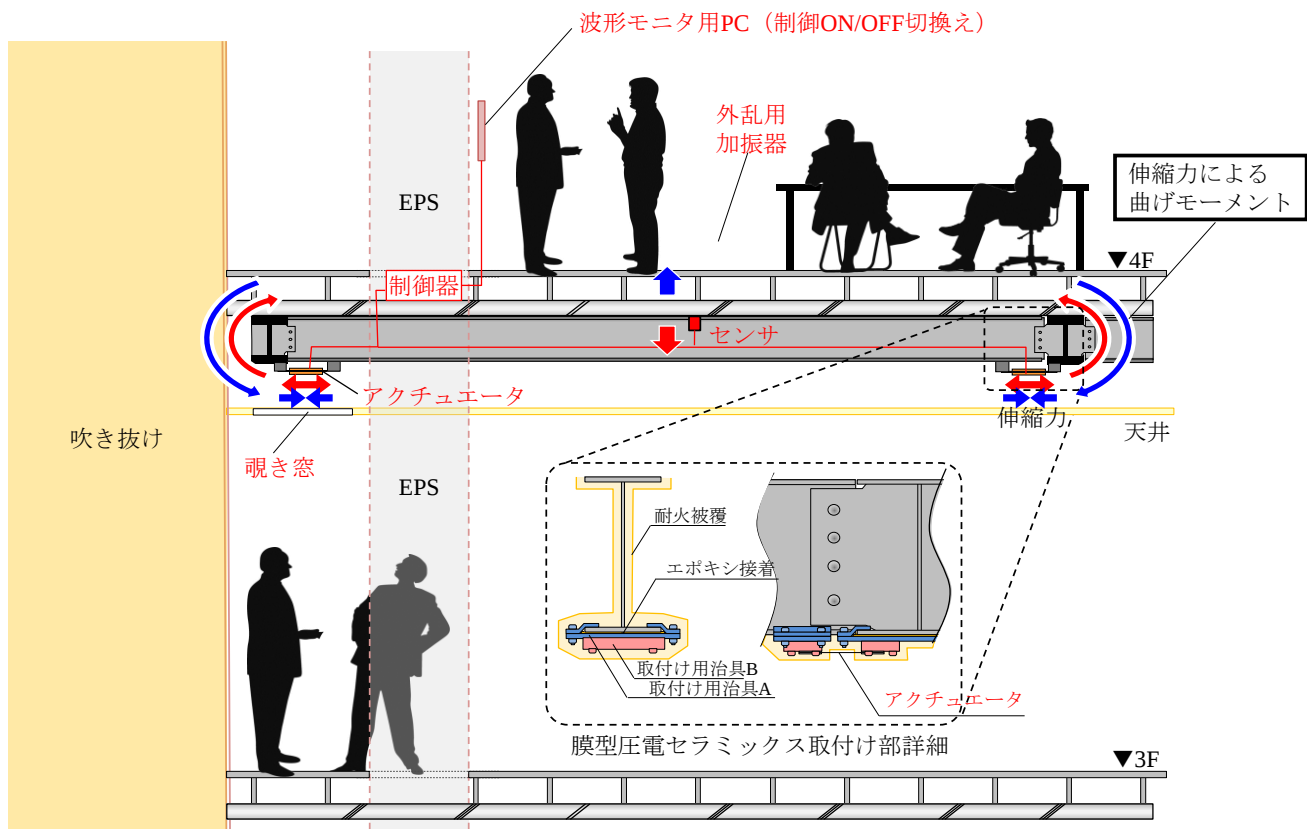


図 8.5.1 床振動制御技術のシステム構成

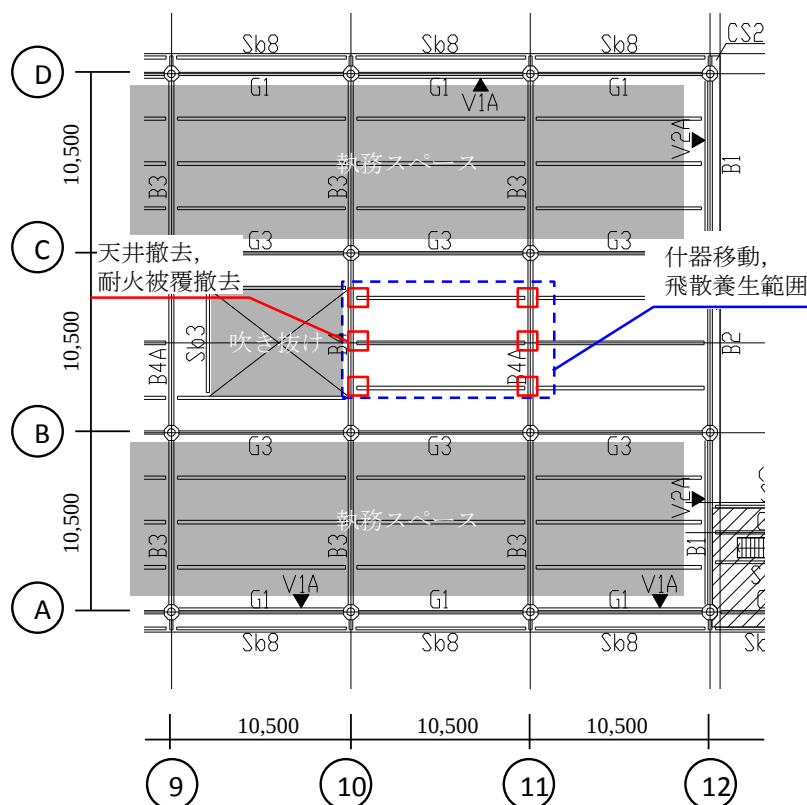
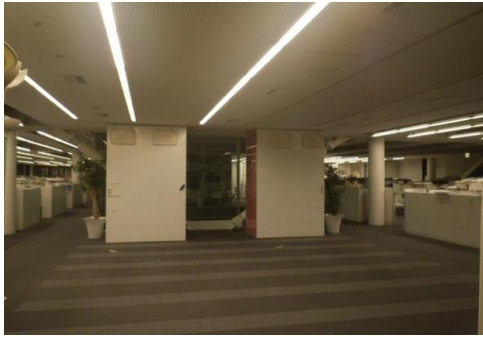


図 8.5.2 制振装置設置時作業範囲



①什器の移動



⑥耐火被覆の一部復旧



②飛散養生



⑦アクチュエータ配線, 取付け



③天井一部撤去



⑧耐火被覆復旧



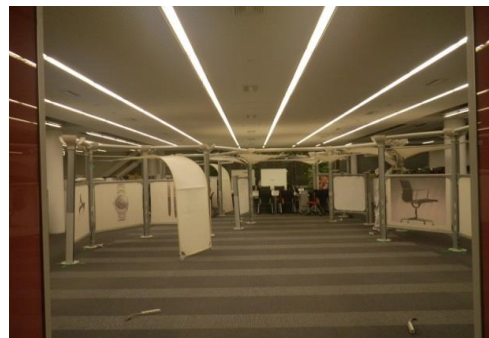
④耐火被覆一部撤去



⑨天井復旧, 点検口取付け



⑤アクチュエータ取付け治具の設置



⑩片付け・清掃

図 8.5.3 制振装置の施工状況の例

	1日目(土曜日)			2日目(日曜日)		
	夜 0:00~8:00	昼 8:00~17:00	夜 20:00~5:00	昼 8:00~17:00	夜 20:00~5:00	
建築工事	什器移動	片付・清掃		什器復旧		
	養生	耐火被覆撤去	耐火被覆復旧	養生撤去・片付・清掃		
		天井解体・補強		天井復旧、点検口取付		
制振装置 設置工事		治具取付け	制振装置設置	制振装置チューニング	稼働	
電気工事	機器撤去・盛替			機器復旧		
		電源配線	圧電素子用配線			

図 8.5.4 制振装置設置時の作業工程実績の例

8.6 振動制御効果の確認

実際に施工した制振装置による振動制御効果を確認する実験を行った。

はじめに、アクチュエータが制御対象点に作用させることができる制御力を把握することを目的として、アクチュエータを駆動して床を加振した際の制御対象点における応答加速度を計測した。アクチュエータ用アンプに、許容印加電圧の 80%レンジである $2.5 \pm 4.0\text{V}$ (0-P) の振幅の振動数スイープ信号 (2.5~12.5Hz) を入力し、3 本の小梁両端部 (計 6 か所) に設置した全てのアクチュエータを同位相で駆動した。アクチュエータの駆動中、アクチュエータ用アンプに入力する電圧信号と、床上の各測定点における振動加速度を同時に記録した。図 8.6.1 に、制御対象点における測定結果を、8.4.2 節で算出した解析結果と併せて示す。図の縦軸は、アクチュエータ用アンプへ入力した信号の単位振幅に対する床振動の加速度振幅およびこれらの位相差を表している。図より、高振動数領域ではやや卓越振動数が一致していないものの、制御対象とした振動モードなどの低い振動数領域では、実測結果と解析結果は概ね一致している。

続いて、8.4.2 節で設計したコントローラ H を適用した際の、制御安定性を確認した。図 8.6.2 に、アクチュエータ用アンプへの入力信号から制御信号までの、開ループ伝達関数を示す。開ループ伝達関数において位相差が 0° となる振動数での振幅倍率が 0.5 以下であり、振幅倍率が 1 以上となる振動数で位相遅れが 45° 以上あるいは -90° 以下であることから、ゲイン余裕、位相余裕が十分保たれており、安定な制御系となっていると判断できる。また、制御対象とする 8.5Hz において振幅倍率が 1 以上かつ位相遅れが 180° 付近であることから有効な制御系となっていることがわかる。図 8.6.3 に、本コントローラを適用した際の振動制御効果を、制御対象床のスパン中央におけるアクセラランスを用いて示す。図より、制御対象とした 6.6Hz において振動低減効果が見られるものの、7Hz 付近での卓越が大きいことがわかる。これは、アクチュエータを駆動した際のアクセラランスに関する解析結果の実測結果との誤差によるものと考えられる。なお、図 8.6.2 に示した制御系の開ループ伝達関数を見ると、位相差が 0° となる振動数での振幅倍率に余裕が見られるため、本検討ではコントローラ H をやや調整し、より制御効果の高い制御系にて実験を行うこととした。図 8.6.3 に、コントローラ調整後の外乱に対する床の応答加速度の伝達関数を示す。図より、7Hz 付近での卓越が低減され、非制御時の振動を約 1/3 に低減する効果が得られることがわかる。

以上に述べた制振装置，制御用フィルタを用いて振動制御を行い、歩行加振時の制御対象点における応答加速度を計測した。歩行テンポ，歩行路および歩行者は、8.4.1 節で述べた条件と同一とした。図 8.6.4 に、計測された応答加速度波形および $VL_{(25ms)}$ の時刻歴波形を、非制御時の波形と併せて示す。非制御時の応答加速度波形では、着地後の自由減衰部分の収束が遅く、共振現象により振動が徐々に増幅している様子が見られるが、制御時については、着地後の収束が速く、振動の増幅が見られない。このことは、 $VL_{(25ms)}$ の時刻歴波形が、非制御時ではグラフ中央付近で最大となっているのに対し、制御時には着地のタイミングごとの極大値がいずれも同程度の大きさとなっていることから確認できる。

制御時の $VL_{(25ms)}$ の最大値は 65.1dB、 $VL_{(25ms)}$ が 60dB を超える時間帯は 0.7sec であった。本結果より $VLT_{(25ms,60dB)}$ は、第 6 章の(6.6)式を用いて 65.1dB と算出される。表 8.6.1 に、対策前後における $VLT_{(25ms,60dB)}$ を比較して示す。設定した制振装置による $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量は 9.7dB であり、設計時の改善目標と概ね同等の振動制御効果が得られた。

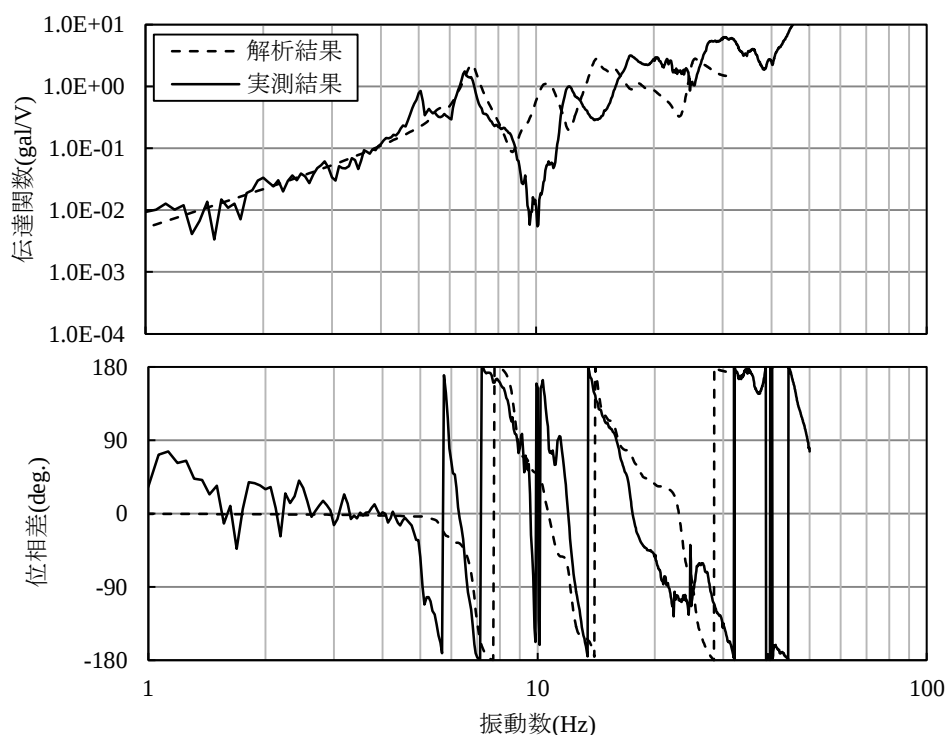


図 8.6.1 アクチュエータへの入力電圧信号に対する制御対象点の応答加速度の伝達関数

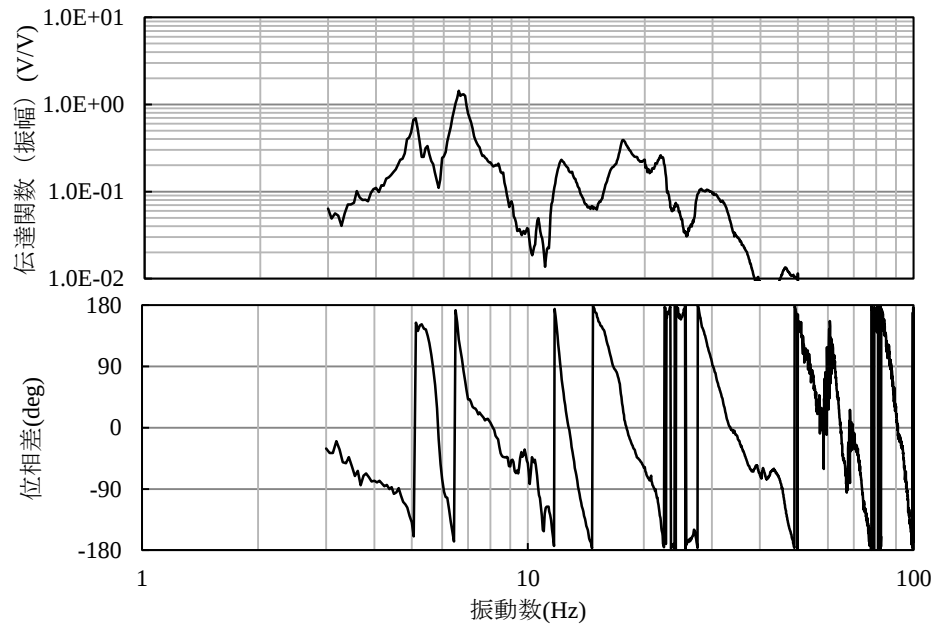


図 8.6.2 解析結果に基づいて設計したコントローラを用いた場合の制御系の開ループ伝達関数

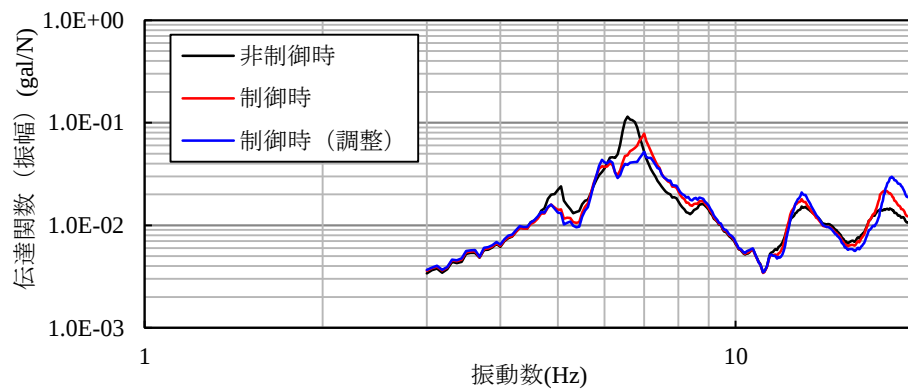
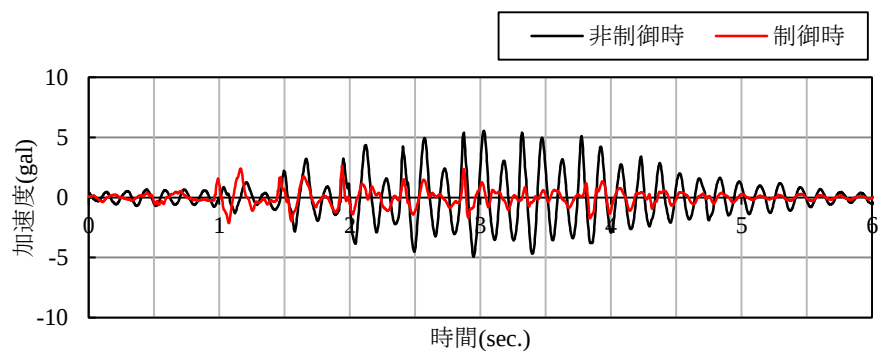
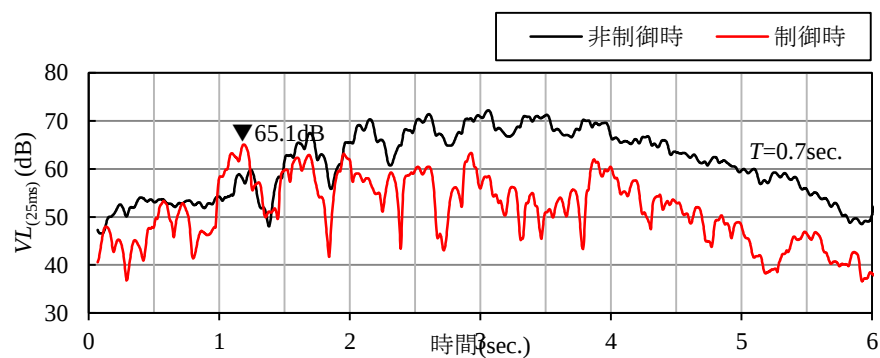


図 8.6.3 制御対象床のスパン中央に外乱が作用した際の床の応答加速度



(a) 応答加速度波形



(b) $VL_{(25ms)}$ の時刻歴波形

図 8.6.4 制御時における歩行加振時の応答

表 8.6.1 制御時における歩行加振時の応答

		対策前 (非制御時)	対策後 (制御時)	$VL_{(25ms,60dB)}$ の低減量	対策後の振動に 対する許容率
$VL_{(25ms,60dB)}$	実測結果	74.8dB	65.1dB	9.7dB	69.4%
	設計値	-	67.6dB	7.2dB	47.9%

8.7 まとめ

本章では、供用中の実建築物への適用を通じて、第7章までに提示した振動制御技術および設計手法の有効性を確認するとともに、制振装置の施工性を検証した経緯，結果について述べた。本章の結論を以下に述べる。

- ・ 供用中の建築物を対象として、振動環境の改善目標の設定手法の適用事例を示した。本事例では、対象建築物の振動環境の実状に即した振動環境の改善目標を立案し、これを実現可能な制振装置の仕様を、振動制御効果の予測手法に基づき設定した。
- ・ 本研究で提案する床振動制御技術の施工性が、従来の振動対策技術と比較して極めて施工性が高く、供用中の建築物に対しても2日間程度の短工期で施工可能であることを確認した。
- ・ 実際に供用中の建築物に適用した床振動制御技術により、概ね設計通りの振動環境の改善が実現された。

以上により、本研究で提案した膜型圧電セラミックスを用いた床振動制御技術およびその設計手法が、供用中の実建築物において発生した振動問題に対する事後対策手法としての実用性を有することを確認した。

第 9 章

結論

第9章 結論

本研究では、近年の長大スパン建築物の増加や都市の高密度化と建築物用途の多様化、長寿命化等を背景として増加している供用中の既存建築物における床振動問題に対する解決策として、小型、軽量で供用中の建築物に容易に適用可能なアクティブ振動制御技術を提案し、その有効性を実験的、理論的に検討するとともに、様々な性状を有した床振動の対策後の振動の評価方法および改善目標の設定手法を併せて提示することで、鋼構造建築物における床振動環境改善技術の設計手法構築を目指した。

本研究の結論は、以下の通りである。

- ・ 供用開始後に建築物において床振動問題が発生する事例が増加している背景を述べるとともに、建築物と制振装置の一体化による軽量、省スペースな振動制御技術に関する既往の研究例を挙げながら、供用開始後の建築物の床振動問題への事後対策として用いることができる振動制御技術は未だ実現されていないことを示し、本研究において新しい床振動制御技術を開発することの意義を明確にした。
- ・ 居住性からみた床振動の評価方法は、既往の研究により数多くの知見が蓄積されてきているが、それらの研究は正弦波を対象にしたもの、あるいは加振源や振動の性状ごとに検討されたものであることを示し、種々の加振源による様々な性状を有した床振動を共通に評価できる手法を提示することの意義を明確にした。また、予め振動に暴露された経験がある場合の感覚、評価に関する研究はほとんどなされていないことを述べ、被暴露経験が許容可否判断に与える影響について検討し、事後対策による床振動環境の改善目標を提示することの必要性を示した。
- ・ 近年開発が進められている機能性材料である膜型圧電セラミックスをアクチュエータとして梁部材の両端部に設置し、その伸縮挙動により梁や床の鉛直振動を制御する技術を提案した。また、膜型圧電セラミックスの基本特性を実験的に把握し、縮小架構模型を用いた原理実験を行うことにより、提案する振動制御技術の有効性を示した。加えて、鉄骨梁部材に貼付した膜型圧電セラミックスを振動センサとして用い、その出力信号に基づき振動制御が可能であることを確認した。

- ・実建築物を対象とした実験を行い、提案する床振動制御技術が、起振器を用いた正弦波加振や振動数スイープ加振，あるいは歩行加振といった様々な特徴をもった加振による外乱振動に対して有効であることを確認した。また、アクチュエータの設置方法等により制御力を増大させることができ、提案する技術が比較的質量や剛性が大きい大規模スパンを有する建築物床にも適用可能であることを示した。
- ・有限要素法解析を用いて最適なアクチュエータの仕様や取付け位置，取付け方法を設計可能であることを示した。また、アクチュエータの取付け部に単位パルス力を入力し制御対象点の応答加速度を解析することで、アクチュエータ取付け部に対する制御対象点のアクセラランスを算出することができ、これに基づいてフィードバック型の制御系を設計することができる。以上により、制御対象床にアクチュエータを取付けた実験的な事前検討を行わずに制御系を設計し、振動低減効果を予測する手法を構築した。
- ・種々の加振源による振動の認知大きさ度合，気になり具合を表す適切な性能値を提示するためには、人間の感覚特性に応じた振動数補正を施す必要があること、振幅の最大値のみでなく時間変化の要因を取り込む必要があること、時間変化の要因に関する簡便な指標として知覚限界に近い 60dB 以上の振動の継続時間が適当であること、実効値処理時の時定数は 25ms が適当であることを明らかにし、その性能値として時定数 25ms の振動レベルの最大値に振動レベルが 60dB 以上となっている継続時間 T の要因を加味した、 $VLT_{(25ms,60dB)} = VL_{max(25ms)} + 20\log_{10}(T^{1/4})$ を提示した。
- ・床振動問題に対する事後対策のように、被暴露経験が有る場合の対策後の振動は、少なくとも被暴露前の許容限度まで $VLT_{(25ms,60dB)}$ を低減すれば、許容できると判断されることを示した。一方、対策前の振動が被暴露前の許容限度を大きく上回る場合、一定量 $VLT_{(25ms,60dB)}$ を低減すれば、対策後の振動が被暴露前の許容限度より大きい場合でも、許容できると判断され、対策後の振動の許容率は $VLT_{(25ms,60dB)}$ の低減量と概ね良い対応を示すことを明らかにした。以上により、事後対策時の振動の改善目標値の設定手法を提示した。

- ・ 供用中の実建築物への適用を通じて、以上に述べた新しい床振動制御技術およびその設計手法の実用性を確認した。提案する振動制御技術は、従来の振動対策技術と比較して極めて良好な施工性を有しており、供用中の実建築物に比較的容易に適用可能であることを示した。

以上を要するに、本研究では、建築物床の振動問題に対する事後対策に有効な振動制御技術を開発するとともに、種々の加振源により発生する床振動の居住性からみた評価方法を確立し、これに基づいた事後対策による床振動環境の改善目標の設定手法を提示した。また、供用中の実建築物を対象として、開発した振動制御技術を床振動環境の改善目標の設定手法に基づき設計し適用することにより、それらの実用性を示した。

これらの成果により、鋼構造建築物における床振動環境改善技術およびその設計手法が構築されたことは、これまで困難であった供用中の建築物における床振動問題の解決の一助になるものと考ええる。

参考文献

- 1) 西垣勉ほか 2 名：圧電フィルムによるはり振動の検出と制御，日本機械学会論文集（C 編），Vol.63, No.615, pp.32-38, 1997.11
- 2) Eric Ruggiero et al. : Multi-input Multi-output Modal Testing Techniques for A Gossamer Structure, Proceedings of IMECE 2002, pp.167-175, 2002.11
- 3) Hartmut Janocha : Adaptronics and smart structure Basics, Materials, Design, and Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999
- 4) 竹下昌樹ほか 3 名：圧電ダンパーの基本的特性と建築構造物への適用に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 564 号，pp.47-54, 2003.2
- 5) 安達ほか 2 名：圧電素子を用いた構造物の受動／能動混成型制振システムの設計に関する研究，日本機械学会論文集（C 編），Vol.66, No.652, pp.3867-3873, 2000.12
- 6) 竹下昌樹ほか 4 名：建築構造物のスマート構造化に関する基礎的研究，（その 4）圧電素子を用いた能動的制御の可能性（実験結果とその考察），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp.839-840, 1999.9
- 7) 熊谷知彦ほか 4 名：圧電フィルムを用いたアーチ構造物のアクティブ制振実験-その 1-, -その 2-, 日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅰ，pp.675-678, 2011.8
- 8) 鎌田ほか 6 名：ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造による骨組構造のアクティブ制振に関する研究（第 1 報，柱の曲げモーメント制御による場合），日本機械学会論文集（C 編），Vol.62, No.599, pp.61-68, 1996.7
- 9) 鎌田ほか 6 名：ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造による骨組構造のアクティブ制振に関する研究（第 2 報，柱の曲げモーメント制御と軸力制御の併用による場合），日本機械学会論文集（C 編），Vol.63, No.615, pp.47-54, 1997.11
- 10) 嶋崎ほか 6 名：大形ピエゾアクチュエータを用いたスマート構造による建築構造物のアクティブ制振，日本機械学会論文集（C 編），Vol.67, No.656, pp.985-991, 2001.4
- 11) M. Shimazaki, et al. : "Active Microvibration Control in Base-isolated Precision Manufacturing Facilities with Smart Structure using Piezoelectric Actuators," 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004.

- 12)H. Hora, et al., Feasibility Study of Active Micro-vibration Control System using Piezoelectric Actuators for Floor Structure of Precision Manufacturing Facilities, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008.
- 13)安藤ほか 4 名：ピエゾアクチュエータによる鉄骨造建物の上下振動の制御，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 I，pp.301-303, 2002.6
- 14)日本建築学会：建築物の振動に関する強雨性能評価指針・同解説，2004.5
- 15)小野英哲，横山 裕：人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究 -振動発生者と受振者が同じ場合-，日本建築学会構造系論文報告集，第 381 号，pp.1-9，1987.11
- 16)横山 裕，小野英哲：人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究 -振動発生者と受振者が異なる場合-，日本建築学会構造系論文報告集，第 390 号，pp.1-9，1988.8
- 17)小野英哲，横山 裕：人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究 -振動発生者と受振者が同じ場合（動作した人間自身が床振動を感じる場合），日本建築学会構造系論文報告集，第 394 号，pp.8-16，1988.12
- 18)横山 裕，小野英哲：振動発生者と受振者が異なる場合の床振動の評価方法の提示 人間の動作により発生する床振動の居住性からみた評価方法に関する研究（第 2 報），日本建築学会構造系論文報告集，第 418 号，pp.1-8，1990.12
- 19)横山 裕：歩行時に発生する床振動評価のための加振，受振装置に関する研究 動的加振器，受振器の設定および妥当性の検討，日本建築学会構造系論文集，第 466 号，pp.21-29，1994.12
- 20)横山 裕，佐藤正幸：歩行時に発生する床振動評価のための加振，受振装置に関する研究 衝撃的加振器の開発および振動減衰時間算出方法の妥当性の確認，日本建築学会構造系論文集，第 476 号，pp.21-30，1995.10
- 21)横山 裕，佐藤正幸：歩行時に発生する床振動評価のための加振，受振装置に関する研究 仕上げ材が施された床に対する加振，受振装置の適用方法の設定，日本建築学会構造系論文集，第 490 号，pp.17-26，1996.12

- 22)横山 裕, 松長健一郎: 小走り時の床振動測定用加振装置および振動減衰時間算出方法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 519 号, pp.13-20, 1999.5
- 23)横山 裕: 苦情発生の有無からみた実在住宅床振動の測定条件, 境界値の提示, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, pp.17-24, 2001.8
- 24)横山 裕, 井上竜太, 池田文乃, 八木 豊: 歩行により発生する周期的および連続的な床振動の評価指標, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp.125-132, 2009.2
- 25)横山 裕: 複数歩連続した歩行振動の性能値に関する基礎的検討, 木造大スパン床の歩行振動の居住性からみた評価方法 (その 1), 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻, 第 691 号, pp.689-695, 2013.9
- 26)横山 裕, 黒田瑛一, 福田眞太郎: 剛性の高い床に適用する性能値に関する基礎的検討, 木造大スパン床の歩行振動の居住性からみた評価方法 (その 2), 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 712 号, pp.509-517, 2015.6
- 27)井上竜太, 横山 裕, 八木 豊, 池田文乃: RC 造, S 造建築物の床振動の評価方法 その 2 振動レベルに継続時間を考慮した評価方法の提示, 日本建築学会大会学術講演梗概集.D-1, pp.465-466, 2008.7
- 28)井上竜太, 横山 裕, 松下仁士: 振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集.環境工学 I, pp.377-378, 2014.9
- 29)横山 裕, 天野豊章: 道路交通振動の感覚上の大きさを表示する物理量の設定, 日本建築学会構造系論文集, 第 563 号, pp.37-44, 2003.1
- 30)松本泰尚, 国松 直: 過渡的振動の知覚閾評価に関する一検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集.環境工学 I, pp.357-358, 2012.9
- 31)松本泰尚, 国松 直: 外部振動源による建物振動の知覚閾評価に関する実験的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集.環境工学 I, pp.401-402, 2013.8
- 32)坂元美沙希, 井上勝夫, 富田隆太, 玉置祐人: 衝撃回数の変化に対する振動応答物理量と感覚度合に関する検討, 床振動測定用の標準衝撃源としてのボールの有用性に関する研究その 14, 日本建築学会大会学術講演梗概集.環境工学 I, pp.373-374, 2014.9
- 33)玉置祐人, 井上勝夫, 富田隆太, 坂元美沙希: 振動暴露時間の延長による振動感覚の飽

和時間と振動応答物理量に関する検討，床振動測定用の標準衝撃源としてのボールの有用性に関する研究その 15，日本建築学会大会学術講演梗概集.環境工学 I，pp.375-376，2014.9

34)横山 裕：苦情発生の有無からみた実在住宅床振動の測定条件，境界値の提示，日本建築学会構造系論文集，第 546 号，pp.17-24，2001.8

35)柏木 潤：自動制御，朝倉書店，1983.4

36) J.P.Guilford 著，秋重義治監訳：精神測定法，培風館，1969

37)日本規格協会：JIS C 1510 振動レベル計，1995

発表論文

I 本論文の内容に関する発表論文

(i) 審査論文

- 1) 松下仁士, 吉岡宏和, 高橋良典: 膜型圧電セラミックスを用いた縮小梁架構の鉛直微振動制御に関する研究, 新機能性材料を用いた自己適応制御建築に関する研究 (その1), 日本建築学会構造系論文集, 第 684 号, pp.281-287, 2013.2
- 2) 松下仁士, 吉岡宏和, 高橋良典: 膜型圧電セラミックスを用いた縮小柱梁架構の鉛直・水平微振動制御に関する研究, 新機能性材料を用いた自己適応制御建築に関する研究 (その2), 日本建築学会構造系論文集, 第 692 号, pp.1725-1731, 2013.10
- 3) 松下仁士, 松永裕樹, 吉岡宏和, 高橋良典: 膜型圧電セラミックスを用いた実建物の床振動制御実験, 新機能性材料を用いた自己適応制御建築に関する研究 (その3), 日本建築学会構造系論文集, 第 699 号, pp.575-581, 2014.5
- 4) 松下仁士, 長沼俊介, 井上竜太, 横山 裕: 種々の加振源による鉛直振動に適用できる性能値, 日本建築学会環境系論文集, 第 720 号, pp.153-162, 2016.2
- 5) 松下仁士, 横山 裕: 床振動の被暴露経験が許容可否判断に与える影響に関する基礎的検討, 日本建築学会環境系論文集, 第 732 号, pp.105-111, 2017.2

(ii) 審査報文

- 1) 松下仁士, 吉岡宏和: 膜型圧電セラミックスを用いた床制振システムによる振動低減効果の予測手法, 日本建築学会技術報告集, 第 53 号, pp.181-184, 2017.2

(iii) 国際会議

- 1) Hitoshi MATSUSHITA, Hirokazu YOSHIOKA, Yoshinori TAKAHASHI, “A study on vibration control method of building structures using Macro Fiber Composites”, SPIE Smart Structures/NDE 2014 in San Diego, CA, USA, 2014.3
- 2) Hitoshi MATSUSHITA, Shunsuke NAGANUMA, Eiichi KURODA, Yutaka YOKOYAMA, “Evaluation of human sensitivity to building vibration”, Inter-Noise 2015 in San Francisco, CA, USA, 2015.8
- 3) Hitoshi MATSUSHITA, Shunsuke NAGANUMA, Yutaka YOKOYAMA, “Evaluation of Floor Vibrations under Influence of Exposure of Large Vibration”, Inter-Noise 2016 in Hamburg,

Germany, 2016.8

(iv) 口頭発表論文

- 1) 松下仁士, 吉岡宏和, 高橋良典: 膜型圧電セラミックスを用いた縮小梁架構の鉛直微振動制御に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.623-624, 2012.9
- 2) 松下仁士, 松永裕樹, 吉岡宏和, 高橋良典: 膜型圧電セラミックスを用いた微振動制御に関する研究 (その1. 縮小梁架構の水平微振動制御), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.955-956, 2013.8
- 3) 松永裕樹, 松下仁士, 吉岡宏和, 高橋良典: 膜型圧電セラミックスを用いた微振動制御に関する研究 (その2. 実大構造床の鉛直微振動制御), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.957-958, 2013.8
- 4) 松下仁士, 松永裕樹, 吉岡宏和, 高橋良典: 膜型圧電セラミックスを用いた微振動制御に関する研究 (その3. 大スパン構造床の鉛直微振動制御), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅰ, pp.371-372, 2014.9
- 5) 松下仁士, 長沼俊介, 黒田瑛一, 井上竜太, 吉岡宏和, 横山 裕: 種々の加振源による振動に適用できる性能値に関する検討 (その1. 鉛直振動対象とした検討概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅰ, pp.375-376, 2015.9
- 6) 長沼俊介, 松下仁士, 黒田瑛一, 井上竜太, 吉岡宏和, 横山 裕: 種々の加振源による振動に適用できる性能値に関する検討 (その2. 鉛直振動対象とした検討結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅰ, pp.377-378, 2015.9
- 7) 松下仁士, 長沼俊介, 横山 裕: 被暴露経験が床振動の評価に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅰ, pp.467-468, 2016.8

Ⅱ 本論文と関連の深い分野での発表論文

(i) 審査論文

- 1) 吉岡宏和, 松下仁土, 高橋良典: 最適化アルゴリズムを用いた多自由度振動制御系の設計手法に関する研究, その1 突然変異則を用いた PSO による最適化効率の改良, 日本建築学会構造系論文集, 第 671 号, pp.11-16, 2012.1

(ii) 審査報文

- 1) 横山 裕, 井上竜太, 西谷伸介, 松下仁土, 柴田昭彦, 塚田幸一, 小林裕明: 共振を考慮した人間の動作による床振動の測定, 評価ならびに対策に関する一考察, 日本建築学会技術報告集, 第 24 号, 2006.12
- 2) 吉岡宏和, 井上竜太, 高橋良典, 阿部隆之, 松下仁土: くさび型接着接合を用いた精密装置用高剛性基礎の開発, 日本建築学会技術報告集, 第 29 号, 2009.2

(iii) 口頭発表論文

- 1) 横山 裕, 井上竜太, 西谷伸介, 松下仁土, 柴田昭彦, 小林裕明, 倉内信幸: ハーバープレミアムビルの振動性状測定とその解析, その2 床振動の測定とその評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 構造Ⅱ, pp.181-182, 2006.7
- 2) 塚田幸一, 井上竜太, 横山 裕, 柴田昭彦, 西谷伸介, 松下仁土: エアロビック時に発生する床振動の測定, 評価ならびに対策に関する一考察, その1 測定対象床の概要および固有振動数, 振動モードの測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, 環境工学Ⅰ, pp.181-182, 2006.7
- 3) 井上竜太, 塚田幸一, 横山 裕, 柴田昭彦, 西谷伸介, 松下仁土: エアロビック時に発生する床振動の測定, 評価ならびに対策に関する一考察, その2 振動応答の測定, 評価および新しい振動低減対策技術の適用性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1, 環境工学Ⅰ, pp.181-182, 2006.7
- 4) 吉岡宏和, 松下仁土, 高橋良典: 突然変異則を含む粒子群最適化(PSO)を用いた多自由度振動制御系の設計(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 構造Ⅱ, pp.469-470, 2009.7
- 5) 松下仁土, 吉岡宏和, 高橋良典: 突然変異則を含む粒子群最適化(PSO)を用いた多自由度振動制御系の設計(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 構造Ⅱ, pp.471-472, 2009.7

- 6) 松下仁土, 吉岡宏和, 高橋良典: 遺伝的アルゴリズムを用いたアクティブ除振システムの制御系設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 構造Ⅱ, pp.511-512, 2010.7
- 7) 吉岡宏和, 松下仁土, 高橋良典: アクティブ除振システムの高性能化に関する研究, その1 制御系の定式化と解析モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 構造Ⅱ, pp.675-676, 2011.7
- 8) 松下仁土, 吉岡宏和, 高橋良典: アクティブ除振システムの高性能化に関する研究, その2 位置決め制御を考慮したフィードバック振動制御系の設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, 構造Ⅱ, pp.677-678, 2011.7
- 9) 松永裕樹, 井上竜太, 吉岡宏和, 松下仁土: 歩行加振力波形に基づく床振動評価に関する研究, その1 実測歩行波形の倍調波成分に関する基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅰ, pp.345-346, 2012.9
- 10) 吉岡宏和, 松下仁土, 高橋良典: アクティブ除振システムの高性能化に関する研究, その3 位置決め性能と除振性能の両立, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.959-960, 2013.8
- 11) 高橋良典, 吉岡宏和, 松下仁土: 制御振動数を自己調整するハイブリッドマスダンパーに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.1027-1028, 2013.8
- 12) 井上竜太, 横山 裕, 松下仁土: 振動の継続時間が居住性能評価に及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅰ, pp.377-378, 2014.9

Ⅲ その他の発表論文

(i) 審査論文

- 1) 横山 裕, 西谷伸介, 松下仁土, 横井 健: 張り床, 塗り床を対象としたローリングロード試験および熱衝撃試験に基づく検討: コンクリート床下地の施工労力と床の品質および保全労力に関する実験的研究 (その2), 日本建築学会構造系論文集, 第 624 号, pp.203-209, 2008.2
- 2) 横山 裕, 松下仁土, 横井 健: 塗り床のキャスター走行および熱衝撃に対する耐久性とコンクリート床下地の表面強度に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 627 号, pp.41-47, 2010.1

(ii) 国際会議

- 1) Yutaka YOKOYAMA, Kou TOMITA, Doo Ho KIM, Takeshi YOKOI, Hitoshi MATSUSHITA, “Effect of Concrete Characteristics on Surface Strength”, 6th International Colloquium Industrial Floors '07 in Stuttgart, Germany, pp.235-240, 2007.1
- 2) Yutaka YOKOYAMA, Hitoshi MATSUSHITA, Takeshi YOKOI, “Effect of Execution Effort on Floor Quality and Labor of Maintenance Activity”, 6th International Colloquium Industrial Floors '07 in Stuttgart, Germany, pp.245-251, 2007.1

(iii) 口頭発表論文

- 1) 横山 裕, 松下仁土, 横井 健: 新築時のコンクリート床下地の施工労力と床の品質および保全労力に関する実験的研究, 塗り床を対象とした検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, 材料施工, pp.1059-1062, 2005.7
- 2) 横山 裕, 富田 洸, 金 兜鎬, 横井 健, 松下仁土: コンクリート床下地の表面強度に関する指標の提示, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, 材料施工, pp.1053-1054, 2006.7
- 3) 横山 裕, 横井 健, 金 兜鎬, 松下仁土, 富田 洸, 小川 慧: 塗り床の付着性とコンクリート床下地の表面強度の関係を表す指標の例示, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, 材料施工, pp.1057-1058, 2006.7
- 4) 横山 裕, 松下仁土, 横井 健, 富田 洸: コンクリート床下地の表層部品質と塗り床の耐久性および保全労力に関する実験的研究, その2 実験結果および考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, 材料施工, pp.735-736, 2007.7

謝辞

本論文は、筆者が東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻、および株式会社竹中工務店技術研究所において行った研究、開発を取りまとめたものです。本論文をまとめるに当たり、恩師である東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 横山裕教授には、多大な御指導を賜りました。理論や研究プロセスを構築する際の考え方のみならず、研究者としてのあるべき姿や社会に対して負っている責務などを、お言葉や先生ご自身の日頃の取り組み、立ち居振る舞いから学ばせて頂きました。私が今後、研究者として生きていく上で大きな糧になるものと思います。心より感謝を申し上げます。

本論文の審査を通じて、東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 時松孝次教授、竹内徹教授、三上貴正准教授、五十嵐規矩夫准教授には、貴重な御助言を頂きました。ここに心より感謝を申し上げます。頂戴した御助言を基に、更なる研究内容の深耕と開発技術の発展を目指したいと思います。

本論文の大きな構成要素である床制振技術の研究、開発については、株式会社竹中工務店 高橋良典博士（元技術研究所高度空間制御部長）、吉岡宏和博士（前技術研究所高度空間制御部長）に、多大な御指導を賜りました。本技術の根幹となる圧電デバイスをご紹介頂き、アクティブ振動制御理論を一から御教授頂きました。また、技術開発に当たって数々の困難に直面した際には、厳しくも温かい叱咤激励を頂きました。ご両名のお導きが無ければ本研究は始まらず、こうして形となることもなかったと考えています。心より御礼申し上げます。

本論文のもう一つの構成要素である振動感覚、評価に関する研究においては、当時東京工業大学横山研究室所属の長沼俊介氏をはじめ多くの学生諸氏にご助力を頂きました。官能検査の実施や、膨大なデータの分析、整理を効率よく正確に遂行して頂いたことに、深く感謝申し上げます。

本研究の着想や動機を得たきっかけや、課題や疑問に対して専門的な知見から考察ができたことは、竹中工務店 橋本嘉之博士、阿部隆之氏、井上竜太博士、松永裕樹博士、松井政樹氏、福田優輝氏をはじめ多くの方々に、環境振動に関する専門的な御指導を頂き、議論をさせていただいたことによるものと考えております。私に振動環境分野への道を開いてくださり、この分野の意義深さを御教授下さいましたことに、深く感謝申し上げます。

建築材料系・生産ゼミでは、横山先生、三上先生に加え、ものづくり大学 高橋弘樹教授、東海大学 横井健准教授、千葉工業大学 石原沙織准教授、学生諸氏より、忌憚のないご意見を頂き、有効な議論をさせて頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

最後に、本研究、開発の遂行、論文執筆に対してご支援下さった、この場には書き尽くすことのできない多くの皆様に、そしていつも陰ながら私を支え続けてくれた家族に、深い感謝の意を表して謝辞とさせて頂きます。

2017年3月

松下 仁士