

RC 建築構造体における振動伝搬性状に  
モーダル解析を適用した実験的研究  
－ 模型実験による構造部材  
追加の検討とその検証 －

2008 年 7 月

佐野泰之



## 概要

RC 建築構造体内における振動問題の大半は、床などの部材が共振することにより生じている。共振問題に対しては、実験的モーダル解析の利用により検討する方法と、有限要素法（以下 FEM とする）により検討する方法があげられる。本論文では、実験的モーダル解析を適用し、RC 建築構造体内の振動伝搬性状について検討を行うものとする。

振動伝搬性状のメカニズムを解明するためには、実構造体での振動測定の結果について検討することが最も望ましいものと考えられる。しかし、柱、梁、壁面などの構造部材追加により振動伝搬性状を検討するためには、実構造体で実験を行うことは膨大な労力と費用が必要となる。本論文では模型実験により、構造部材追加による検討を行っている。模型実験による検討は、その結果を検証する必要があるため、本論文では、模型と実構造体との実験結果の比較や、FEM による解析結果との比較などにより検証している。

1 章「序論」では、環境振動の現状を概観すると共に、建築構造体内の振動伝搬性状に関する既往の研究をレビューしている。

2 章「実構造体実験」では、実構造体に対して実験的モーダル解析を適用するための検討を行っている。実構造体に対する加振実験は、構造体を起振する加振力が限られていることから、まず加振点を選定する必要がある。加振点の位置は、梁が主に振動伝搬に関係すると考え、梁上を採用する場合と、振動しやすい床版が主に関係すると考え、非梁上を採用する場合があげられる。これらの位置において、実際に加振実験を行い、加振点として望ましい位置を検討している。また、実験装置や解析方法についても検討し、モーダル解析により、振動伝搬性状を把握することが可能であることを示している。さらに、モーダル解析により得られた結果について検討し、モードシェイプと振動伝搬の関係など、種々考察している。

3 章「実構造体実験と模型実験の対応」では、アクリル材により 1/50 縮尺の模型を作製し、実験的モーダル解析を行い、模型と実構造体との対応について検討している。その結果、模型実験により、実構造体の振動伝搬性状を再現することが可能であることを示している。また、理論上、固有振動数に対する相似比は約 30 倍 となり、FRF(周波数応答関数 (Accelerance: 加速度/力)) については、 $2.5 \times 10^5$  倍程度となることを示し、実験結果も同様であることを確認している。

アクリル模型の実験では、重力と減衰による相似比については相似則を緩和することになる。重力については、構造体内の振動伝搬に関係しないこと、減衰については、実験結果を補正することが可能であることを示している。また、基礎地盤構造についても簡略化を行っているため、その影響についても考察している。

4章「プロトタイプ模型による構造部材追加と振動伝搬性状」では、実構造体の構造を単純化した1/50縮尺の模型（以下プロトタイプ模型とする）を作製している。プロトタイプ模型は完成型が4層3スパンの模型であり、その作製の過程において実験が行われ、梁や壁面などの構造部材追加の影響を把握できるようにしている。構造部材追加による振動低減量を定量的に明らかにした結果、壁面追加による効果が最も大きいことなどを示している。また、構造部材追加による振動低減量は加振点（加振室）と受振点の位置関係により異なり、加振室（加振点を含む床面）ではあまり認められず、加振室から離れるほど大きくなる傾向が認められている。これは、振動低減量が評価する位置により異なることを示しており、振動低減量を定量的に把握する上で、評価方法を統一する必要があることを示すものである。

構造部材追加による振動低減を考察すると、振動低減量は、モードシェイプと構造部材を追加する位置とに関係があり、振動の節の位置に構造部材を追加してもあまり低減しない傾向が認められている。感度解析の結果、質量付加による対策については、モードの腹となる場所に、剛性付加（バネ付加）については、モードシェイプの傾きが大きくなる場所に対しての効果が大きくなっている。また、振動を低減させたい位置の近傍を対策するよりも、モードシェイプに着目した対策が有効である結果も得られている。このように振動モードが振動伝搬性状に関わることが明らかになっている。この他にも、構造部材追加によるモードシェイプの変化と、固有振動数、減衰比などについての関係を明らかにし、振動伝搬性状について考察している。

5章「FEMによる構造変更と振動性状の検証」では、まずFEMの解析モデルについて考察している。次に、模型実験の結果を検証するために、FEMによる解析結果と模型実験の結果を比較している。その結果、構造部材追加による振動低減などの傾向については、両者同様となることが確認できている。しかしながら、FEMと模型実験で異なる点も認められている。この原因については、FEM解析では材質が均質である理想条件による計算結果であるのに対し、模型実験では、材厚や物性値が必ずしも均一ではないことなどがあげられる。このように、FEMを適用する際に生じる差の原因についても考察している。

最後の6章「結論」では、本論文を総括し、建築構造体内の振動伝搬性状についての考察や、研究課題、今後の展望について述べている。

キーワード 環境振動, 振動性状, モーダル解析, 振動伝搬, 模型実験, 有限要素法

## 本論文で使用する記号

$a$	:	加速度 [m/s <sup>2</sup> ]
$c$	:	減衰係数 [N · s/m]
$c_c$	:	臨界減衰係数 [N · s/m]
$D$	:	曲げ剛性 (= $EI$ ) [N · m]
$1/d_\kappa$	:	複素スケール定数
$E$	:	弾性係数 (ヤング率) [N/m <sup>2</sup> ]
$F$	:	力 [N]
$f$	:	振動数 (周波数) [Hz]
$f_s$	:	サンプリング振動数 [Hz]
$G$	:	せん断弾性係数 [N/m <sup>2</sup> ]
$g$	:	重力加速度 [m/s <sup>2</sup> ]
$H_c(\omega)$	:	Compliance(FRF) [m/N]
$H_a(\omega)$	:	Accelerance(FRF) [m/(N · s <sup>2</sup> )]
$I$	:	断面 2 次モーメント [m <sup>3</sup> ]
$k$	:	バネ定数 [N/m]
$l$	:	長さ [m]
$m$	:	質量 [kg]
$R_{ij\kappa}$	:	留数
$r$	:	距離 [m]
$S$	:	面積 [m <sup>2</sup> ]
$T$	:	周期 [s]
$t$	:	時間 [s]
$V$	:	体積 [m <sup>3</sup> ]
$V_{MOV}$	:	MOV(Mode overcomplexity value)
$V_{MPC}$	:	MPC(Modal phase collinearity) 指数
$V_{MPD}$	:	MPD(Mean phase deviation)
$V_p$	:	重要度 (Mode participation)[%]
$v$	:	速度 (位相速度) [m/s]
$\varepsilon$	:	歪み
$\eta$	:	損失係数
$\theta$	:	角度 [rad]
$\lambda$	:	波長 [m]
$\lambda_\kappa$	:	極 (Pole)
$\kappa$	:	モード次数
$\nu$	:	ポアソン比
$\zeta$	:	減衰比 (減衰定数) [%]
$\rho$	:	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_s$	:	応力 [N/m <sup>2</sup> ]
$\omega$	:	角振動数 (角周波数) [rad/s]
$\phi$	:	位相差 [rad]
$\psi_{j\kappa}$	:	モードシェイプ係数



# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	既往の研究	2
1.2.1	建築構造体内部の振動伝搬に関する研究	2
1.2.2	模型実験に関する研究	3
1.2.3	モーダル解析に関する研究	4
1.3	本研究の目的と論文の構成	5
第 2 章	実構造体実験	7
2.1	実験対象構造体	7
2.2	実験・解析方法の検討	13
2.2.1	実験・解析方法	13
2.2.2	実験的モーダル解析の適用	13
2.2.3	加振装置と加振方法の検討	16
2.2.4	加振点の検討	17
2.3	実験結果（振動伝搬性状）	25
2.3.1	FRF（周波数応答関数）	25
2.3.2	固有振動数・減衰比	26
2.3.3	モードシェイプ	27
2.3.4	モーダルパラメータの確認指標	30
2.3.5	感度解析	30
2.4	第 2 章のまとめ	38
第 3 章	実構造体実験と模型実験の対応	41
3.1	模型	41
3.1.1	模型の相似則	42
3.1.2	FEM 解析による相似則緩和の影響の検討	46
3.1.3	材料の物性値	47
3.2	実験方法	48
3.3	模型検討のための実験	50

3.3.1	接着の影響 . . . . .	50
3.3.2	基礎構造の検討 . . . . .	51
3.4	実構造体との実験結果の比較 . . . . .	53
3.4.1	固有振動数・減衰比 . . . . .	53
3.4.2	モードシェイプ . . . . .	54
3.4.3	FRF (周波数応答関数) . . . . .	55
3.4.4	減衰比の補正 . . . . .	56
3.4.5	振動伝搬性状 . . . . .	56
3.5	第3章のまとめ . . . . .	58
第4章	プロトタイプ模型による構造部材追加と振動伝搬性状	59
4.1	模型 . . . . .	59
4.2	実験方法 . . . . .	63
4.2.1	モーダル解析 . . . . .	63
4.2.2	1/3 Oct. バンドレベル . . . . .	63
4.3	実験結果 (各モデルの振動性状) . . . . .	64
4.3.1	FRF (周波数応答関数) . . . . .	64
4.3.2	固有振動数・減衰比 . . . . .	64
4.3.3	モードシェイプ . . . . .	67
4.3.4	1/3 Oct. バンドレベル . . . . .	80
4.4	構造部材の追加と振動伝搬性状 . . . . .	82
4.4.1	構造部材追加と振動性状 . . . . .	82
4.4.2	下部構造部材追加と振動伝搬性状 . . . . .	85
4.4.3	上部構造部材追加と振動伝搬性状 . . . . .	88
4.5	感度解析による考察 . . . . .	90
4.5.1	各種感度の比較 . . . . .	91
4.5.2	各層の完成型 M7, M11, M12 の感度 . . . . .	94
4.5.3	モードの形状 (Type) と感度 . . . . .	97
4.6	第4章のまとめ . . . . .	105
第5章	FEM による構造変更と振動性状の検証	109
5.1	FEM の予条件 . . . . .	109
5.1.1	FEM 解析方法 . . . . .	109
5.1.2	物性値 . . . . .	110
5.2	1層1スパン模型実験との対応 . . . . .	110
5.2.1	1層1スパン模型 . . . . .	110
5.2.2	要素分割数の検討 . . . . .	110
5.2.3	模型実験との対応 . . . . .	113



5.3	プロトタイプ模型実験の検証 . . . . .	113
5.3.1	模型の支持条件の検証 . . . . .	113
5.3.2	FRF (周波数応答関数) の比較 . . . . .	114
5.3.3	1/3 Oct. バンドレベル . . . . .	115
5.3.4	O.A. レベル . . . . .	117
5.4	第 5 章のまとめ . . . . .	118
第 6 章	結論	119
	謝辞	121
付録 A	モーダル解析	133
A.1	モーダル解析に関わる方程式 . . . . .	133
A.2	解析結果の確認指標 . . . . .	134
A.2.1	FRF の総和 . . . . .	134
A.2.2	MOV . . . . .	134
A.2.3	MPC 指数と MPD . . . . .	135
A.2.4	重要度 . . . . .	136
付録 B	構造体図面	137
B.1	実構造体 . . . . .	137
B.2	実構造体模型 . . . . .	155
B.3	プロトタイプ模型 . . . . .	158
付録 C	模型材料	159
付録 D	プロトタイプ模型	163



# 第1章

## 序論

### 1.1 はじめに

我が国では、昭和30～40年代の高度経済成長に伴い、大気・水質汚染などの公害が発生し、社会問題となった。1967年(昭和42年)に公害対策基本法が制定され、振動についても典型7公害の1つとなった。そして、1976年(昭和51年)には、振動規制法が制定され、法的な整備が整った。環境省によせられた苦情件数<sup>1)</sup>は、1978年に4,000件程度のピークのあと1991年までは減少傾向となった。1991年から2000年の間は2,000件から3,000件の間で推移し、それ以降また増加しており、2005年には3,500件程度となっている。苦情を申し立てるまでには至らないが、不快と感ずる人が存在することを考えると、振動を低減すべき案件は相当な数に上っており、振動に対する対策・検討が現在でも重要な課題であると考えられる。

受振側の建築構造体に注目すると、近年、建築の高層化がさらに進んでいること、構造の軽量化がなされていること、大スパンの平面計画がなされることがあること、精密機器製造に関わる建築が建設されることがあることなどから、振動問題を考慮して設計しなければならないケースが増えてきている。また、振動問題が発生した場合、その対策を行うために、大がかりな工事を伴うことが多い。このため、建築設計時に予め振動についても考慮しておく必要がある。

環境振動の評価方法としては、敷地境界(発生源側)において、評価する「振動規制法」(法的規制)と、受振点において振動をどのように感ずるかに着目した日本建築学会の推奨する「建築物の振動に関する居住性能指針・同解説<sup>2)</sup>(以下、居住性能指針とする)」があげられる。前者については、敷地境界において、施設から放射される振動を規制するものである(排出規制 emission)。敷地境界の評価であるため、規制基準を満足していても、苦情が発生することがある。このようなケースでは、居住者が深刻な状況におかれていても、法的な対応をとることができなく、問題の処理に悩まされることもある<sup>3)</sup>。

一方、建築の分野においては、後者により評価されることが多い。この指針では、振動の大きさに対する知覚確率(振動を感じる人の割合、不快と感ずる人の割合など)が示されており、建物の用途などを考慮し、振動に対する要求性能を種々ある指標から設定できるようになっている。

前者の発生源側での評価と、後者の受振点側での評価の何れを採用するかにもよるが、後者のように、建築物の振動に対する性能を詳細に決めることが可能となっている。しかしながら、環境振動の予測に関しては、現状ではこの性能の指定に耐えられる精度を得ることは難しく、その方法について、さらなる検討が必要である。

環境振動の予測に関しては、

- 振動発生源
- 地盤伝搬
- 建物への入力損失
- 各部の共振による増幅
- 建物内伝搬

などについて検討されている。本研究では、そのうちの建築構造体内の振動伝搬性状に着目し、そのメカニズムを解明することを目的としている。

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 建築構造体内部の振動伝搬に関する研究

建築構造体内を伝搬する振動については、地震動の分野、環境振動の分野、固体音の分野の研究があげられる。

地震動の分野においては、主に低振動数の横揺れが優勢であり、波長が長いことから、比較的単純なモデルで予測することが可能である。固体音の分野においては、可聴音である 20 Hz 以上の振動数域に着目した検討が行われている。軽量床衝撃音のような高い振動数帯域の振動は、波長は短く、固有モードの影響はあまり大きくないことから、統計的エネルギー解析法 (SEA 法) などが適用できるケースもある。重量床衝撃音のような低い振動数帯域の振動に対しては、1 次、2 次の低次の固有振動が問題となることがある。この振動については、環境振動でも問題となることが多く、両分野に差が無いことから、研究の成果が相互活用されている。

環境振動の分野においては、水平振動と鉛直振動の双方が問題となることがある。水平振動は、主に高層の建物において、風などの外力により問題が生じるケースがあげられる。鉛直振動は、交通振動や建物内の歩行により生じる外力により問題が生じるケースがあげられ、床の共振により、数 Hz ~ 数十 Hz の帯域が問題となることが多い。

鉛直振動の建物内伝搬の研究に着目する。この振動は、床面の共振問題であると考え、長方形板の面外振動として近似する場合がある。周辺支持長方形板の問題としては、Rayleigh<sup>4)</sup> や Timoshenko<sup>5)</sup> の理論解や Ritz<sup>6)</sup> の解法が知られている。周辺固定長方形板については Lissa<sup>7)</sup> の研究があげられる。

これらの理論解を Rayleigh-Ritz 法として汎用的に適用する方法を小嶋<sup>8)</sup> や加藤・本間ら<sup>9)</sup> が示しており、予測計算システムとして利用されている。

理論解による予測は、適用できるケースが限られている。任意形状の床面の振動を予測する方法としては、有限要素法 (以下 FEM とする) などによる数値解析があげられる。井野智

は有限差法<sup>10)</sup>による床振動の予測方法を提案しており、小梁の影響についても考慮することが可能になっている。1980年代から1990年代にかけコンピュータの普及に伴い、建築の床振動の分野でもFEMが用いられるようになった。1989年には、「コンクリート構造の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン」<sup>11)</sup>により、FEMを適用する際の考え方や適用例が示された。しかしながら、予測パラメータによっては設定方法が複数紹介されており、一義的に予測結果を求めることができない問題が生じている。

田中らは、構造躯体の十時交差部において、縦波、横波などの伝搬や、反射などのメカニズムを明らかにしており<sup>12)</sup>、算定図表を用いた振動伝搬の計算方法<sup>13)</sup>についても提案している。

橋本は、低い振動数の固体音を対象とし、FEMによる小梁付床版の計算方法<sup>14)</sup>や間仕切壁の影響<sup>15)</sup>を示している。しかしながら、この他に、FEMを適用する際のパラメータの検討事例は多く報告されていないことから、これらの点を体系的に把握する必要がある。

また、FEMを適用し、実測と一致する報告がなされることがあるが、適用条件が明確ではなく、評価点が代表点1点だけであったりすることから、正しい予測がなされているか不明な場合がある。FEMが適用できる範囲は広いが、その適用方法や物理現象を数値化する方法の違いにより、得られる結果に差が生じることがある。従って、実測に基づく検討が必要である。

FEM解析により、振動の予測は可能であるが、全ての建築を設計する際に、FEMが適用されるわけではない。櫛田により床の固有振動数 $f$ 、減衰定数(減衰比 $\zeta$ )をスパン長を変数に回帰式による統計的な予測方法<sup>16)</sup>が提案された。この提案により、一般的な建築設計の際にも、振動を考慮した設計が行えるようになった。しかしながら、梁の追加や壁の追加等による振動低減量までは明らかにされていないことから、これらを定量的に把握することが必要である。模型実験は、これらを把握するために有効な方法としてあげられる。

### 1.2.2 模型実験に関する研究

模型実験は、様々な分野において行われており、模型実験の理論<sup>17)</sup>が明らかになっている。模型実験を行う際は、模型の相似則が重要となる。しかしながら、全ての物性値が相似となるような、模型を作成することは困難であることから、相似則の緩和<sup>17)</sup>が必要となる。

環境振動に関する模型実験による研究をあげる。地盤面での振動伝搬性状については、寺田らの寒天を用いたもの<sup>18)</sup>、森地らのゼラチンゲルを用いたもの<sup>19)</sup>、志村らのアクリルアミド系のグラウト剤を用いたもの<sup>20)</sup>、二井らのシリコンゴムを用いたもの<sup>21)</sup>、成瀬ら<sup>22)</sup>や、伊藤ら<sup>23)</sup>の実際の地盤面を用いたものがあげられる。伊藤らの研究においては、遠心力により重力場も相似とするような実験が適用されている。

建築内部の振動伝搬については、松田らによるアクリル模型を用いたもの<sup>24)</sup>と橋本らによるコンクリート模型を用いたもの<sup>25)</sup>などがあげられる。これはいずれも、床面が物の落下などにより加振された場合に、下階へ放射される音に着目した固体音に関する研究であり、主に衝撃を受ける床の振動性状に着目したものである。振動伝搬については十分な検討がなされていない。また、建築構造体内の振動を面的に把握した研究、構造部材追加による振動伝搬性状の

変化について検討した研究は殆ど無い。

### 1.2.3 モーダル解析に関する研究

FEM (有限要素法) は、1950 年頃に開発され、航空機の翼の自励振動問題を解決することなどに利用され普及した。FEM は正確にパラメータを設定すれば、精度良く予測することが可能である。さらに、様々な形状のものに適用することが可能であることや、コンピュータとの相性が良いことから、今も幅広い分野で利用されている。しかしながら、動的問題に対しては、減衰や境界条件など検討課題のある予測条件も多く、この手法のみでは解決し難い部分もある<sup>26)</sup>。

理論モーダル解析は、FEM の物理特性(質量, 剛性など)を表す特性モデル (Spatial model) を振動現象に直結するモードモデル (Mode model : 固有振動数, 振動モードなど) で表すものである。モーダル解析の特徴は次に示すとおりである<sup>26, 27)</sup>。

- 固有モードの直交性を利用し、多自由度系の運動方程式を非連成化する。複数の 1 自由度微分方程式を互いに独立に解いただけで、多自由度連立微分方程式を解くのと同等の解を得ることができる。
- 運動方程式を固有モード毎に互いに独立な 1 自由度運動方程式に分解するので、簡単に高次モードを省略できる。
- コンピュータによる計算との相性が良い。

1960 年代後半に、機械や構造体の動的特性を実験・同定する方法が考案された。これに、FFT 等の信号処理の技術が合わさり、実験的モーダル解析が誕生した。その後、機械の分野を中心として発達し、様々な同定方法が提案<sup>27, 26, 28, 29)</sup>され、製品開発の分野で幅広く用いられている。

建築構造体の振動は、1 次固有振動など低次のモードが問題となることが多い。建築の分野においても、これらの手法を利用することができるものと考えられる。

実験的モーダル解析は、機械などの金属製品を中心にその適用方法が数多く検討されている<sup>27, 26, 28, 29)</sup>。これらによると、実験的モーダル解析を行う際には、精度の良い周波数応答関数 (以下 FRF とする) を求めることが重要であるとされている。実験的モーダル解析を建築構造体に適用する場合、構造体の規模が、機械の分野のものと比較すると大きく、地盤面から入力する暗振動などの外乱の影響を考える必要がある。このため、実験方法や精度について検討をする必要があるものと考えられる。

実験的モーダル解析により、固有振動数や減衰比などの共振の特性や、モードシェイプ (自由振動の形状) を求めることが可能である。また、Time Domain MDOF (Multipl Degree of freedom) や PolyMax などの多自由度法を用いた同定手法を採用することで、感度解析 (対策に効果的な場所の検討) や構造変更が可能であり、効果的な低減対策の検討が行えるようになっている<sup>30)</sup>。本論文では、これらの技術も利用し、振動伝搬性状について検討を行うものとする。

### 1.3 本研究の目的と論文の構成

本研究は、環境振動伝搬性状のメカニズムを解明することを目的としており、本論文では、RC 建築構造体内の振動伝搬性状について面外方向の共振に着目し検討する。このメカニズムの把握には、FEM (有限要素法) などの数値解析による方法があげられる。しかしながら、機械系の分野においても、動的問題に対しては、FEM による数値解析だけでは解決し難い点があると指摘<sup>26)</sup> されている。従って、実験的な検討を中心に振動伝搬性状について検討していくものとする。

振動の対策を考える場合、梁や壁などの構造部材の追加と振動伝搬性状の関係について把握しておく必要がある。この点を明らかにする方法には、実構造体による実験と、模型による実験の二通りの方法があげられる。実構造体による実験を行うためには、実際に施工している現場の協力が必要である。大学機関やコンサルタントの研究者だけでは、実現することは困難であるため、模型実験を利用した検討を行うものとする。

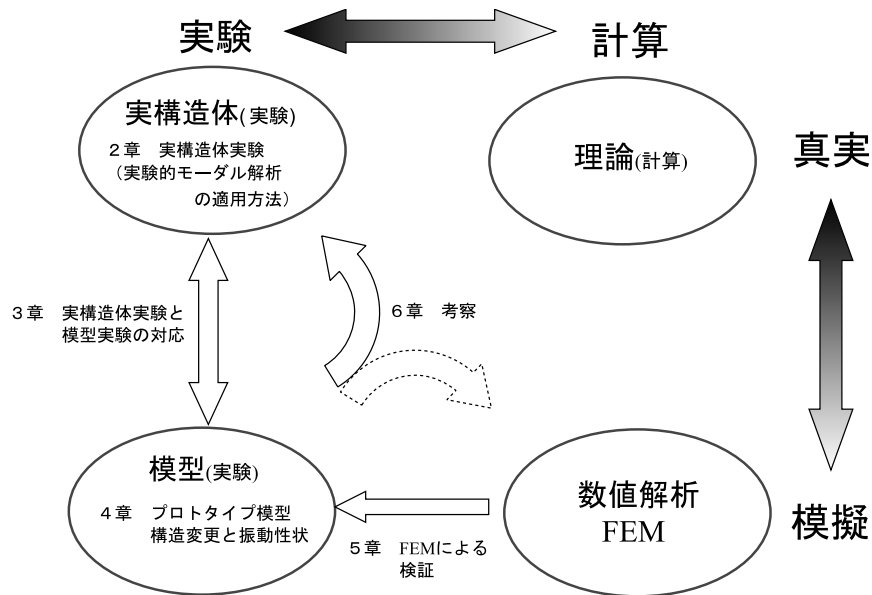


図 1.1 論文の構成の概要

本論文の構成は、次に示すとおりであり、図 1.1 に示す関連を持っている。

第 1 章「序論」では、背景及び既往の研究、研究の目的について述べる。

第 2 章「実構造体実験」では、実構造体に対して実験的モーダル解析を適用するための検討をする。実構造体に対する加振実験は、構造体を起振する加振力が限られていることから、まず加振点を選定する必要がある。加振点の位置は、梁が主に振動伝搬に関係すると考え、梁上を採用する場合と、振動しやすい床版が主に関係すると考え、非梁上を採用する場合があげられる。これらの位置において、実際に加振実験を行い、加振点として望ましい位置を検討する。また、実験装置や解析方法についても検討し、モーダル解析により、振動伝搬性状を把握

することが可能であるかを考察する。さらに、モーダル解析により得られた結果について検討し、モードシェイプと振動伝搬の関係などについて考察する。

第3章「実構造体実験と模型実験の対応」では、模型実験の適用性についての検討する。まずはじめに、模型の相似側を検討する。次に、第2章で実験対象としている実構造体の模型を作製する。そして、この模型に対して加振実験を行い、実構造体の実験結果との比較を行う。模型実験においては、全ての物性値について相似となる模型を作成することは困難であることから、相似則が緩和される。また、地盤など全ての構造体を模型化することは困難であることから、振動伝搬に大きく関わらないと考えられる部分については簡略(省略)している。このように、相似則の緩和や構造を簡略しているため、模型実験の再現性を確認する。この確認の結果、振動伝搬に対して影響を及ぼすパラメータについては、得られた結果を補正することが可能であるかを検討する。

第4章「プロトタイプ模型による構造変更と振動伝搬性状」では、プロトタイプ模型(実構造体の構造を単純化した1/50縮尺の模型)により、構造部材追加と振動伝搬性状の関連について明らかにする。プロトタイプ模型は、第3章の実構造体模型を基に、構造を単純化している。この模型は、作成の過程で実験されており、梁追加、壁面追加など、構造部材追加の影響を把握できるようにしている。これらの実験結果から、固有振動数の変化、FRFの変化などに着目し、構造部材追加と振動低減量の関係などについて考察する。また、感度解析を行うことにより、有効な振動低減対策の方法について検討する。

第5章「FEMによる構造変更と振動性状の検証」では、FEMによる数値解析により、プロトタイプ模型の実験結果を検証する。FEMによる数値解析は、使用する要素や分割方法により、解析精度が異なるものと考えられる。まずはじめに、FEMを適用する際の予測条件や、解析に用いる要素の種類、分割方法について検討する。次にFEMによる数値解析の再現性を把握するために、単純な構造の模型の実験結果と比較する。そして、プロトタイプ模型の実験により得られた振動伝搬性状の傾向をFEMにより検証し、考察する。

第6章「結論」では、得られた実験・解析結果について、種々検討を行った点について総括し、今後の展望と共に、振動伝搬性状のメカニズムについての考察を行うものとする。



## 第 2 章

# 実構造体実験

建築構造体内を伝搬する振動は、床版など各部の共振の影響を受けているため、距離減衰などの幾何的な方法のみでは精度良く振動を予測することが困難である。振動の伝搬性状を把握するためには、共振のメカニズムを把握する必要がある。共振のメカニズムを把握する方法には、モーダル解析を利用する方法があげられる。

モーダル解析は、航空機のフラッター振動問題の対策など、主に機械の分野で発達してきた技術である。本章では、まずはじめに、この手法を建築構造体に対し適用するための検討を行う。そして、建築構造体において実際にモーダル解析を適用し、得られる結果について考察する。

### 2.1 実験対象構造体

実験対象構造体を図 2.1 に示す。この構造体は、愛知工業大学内の鉄筋コンクリート造 (以下 RC 造とする) 3 階建の建築である (7 号館, 建築系講義棟)。この建築の平面図を図 2.2 に、断面図を図 2.3 に、梁伏図を図 2.4 に示す (詳細:付録 B.1 (図 B.1 ~ 図 B.18))。平面計画は、1 階が構造実験室、2 階が教室 (講義室)、3 階が製図室であり、1 階と 3 階には間仕切壁が少ない構造となっている。

実験対象室を図 2.5 に示す。2 階外壁は、腰壁の上に窓サッシが取り付けられている構造となっている。2 階の A 室と B 室の間の間仕切壁は、コンクリートブロック造となっている。教室と廊下の間の間仕切壁は、天井との間と柱との間にはガラス面がはめ込まれており、構造的に独立している。構造部材の寸法を表 2.1 に示す。6 m × 10 m スパンが採用されており、床版厚は 150 mm となっている。教室の床面と天井面に着目すると (図 2.4)、床面 (2 階床面) については小梁が田型に入っており、天井面 (3 階床面) については目型に入っている。

表 2.1 構造部材寸法

部 材	寸 法 [mm]
スパン長	6,000 × 10,000
床版厚	150
壁厚	120
大梁 (桁行)	400 × 850
大梁 (梁間)	450 × 950
小梁 (2 階桁行)	320 × 550
小梁 (2 階梁間)	300 × 500
小梁 (3 階)	300 × 500
柱 (2 階)	650 × 700

注) 梁, 柱については代表的な値を示す。  
詳細を付録 B.1 に示す。

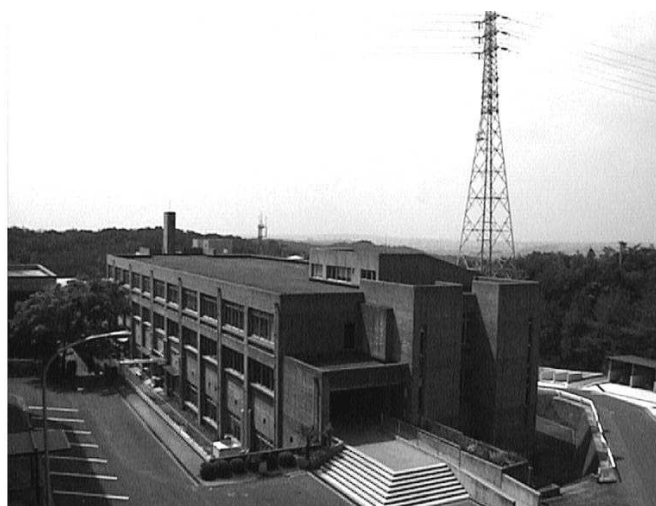


図 2.1 実験対象構造体 (写真)

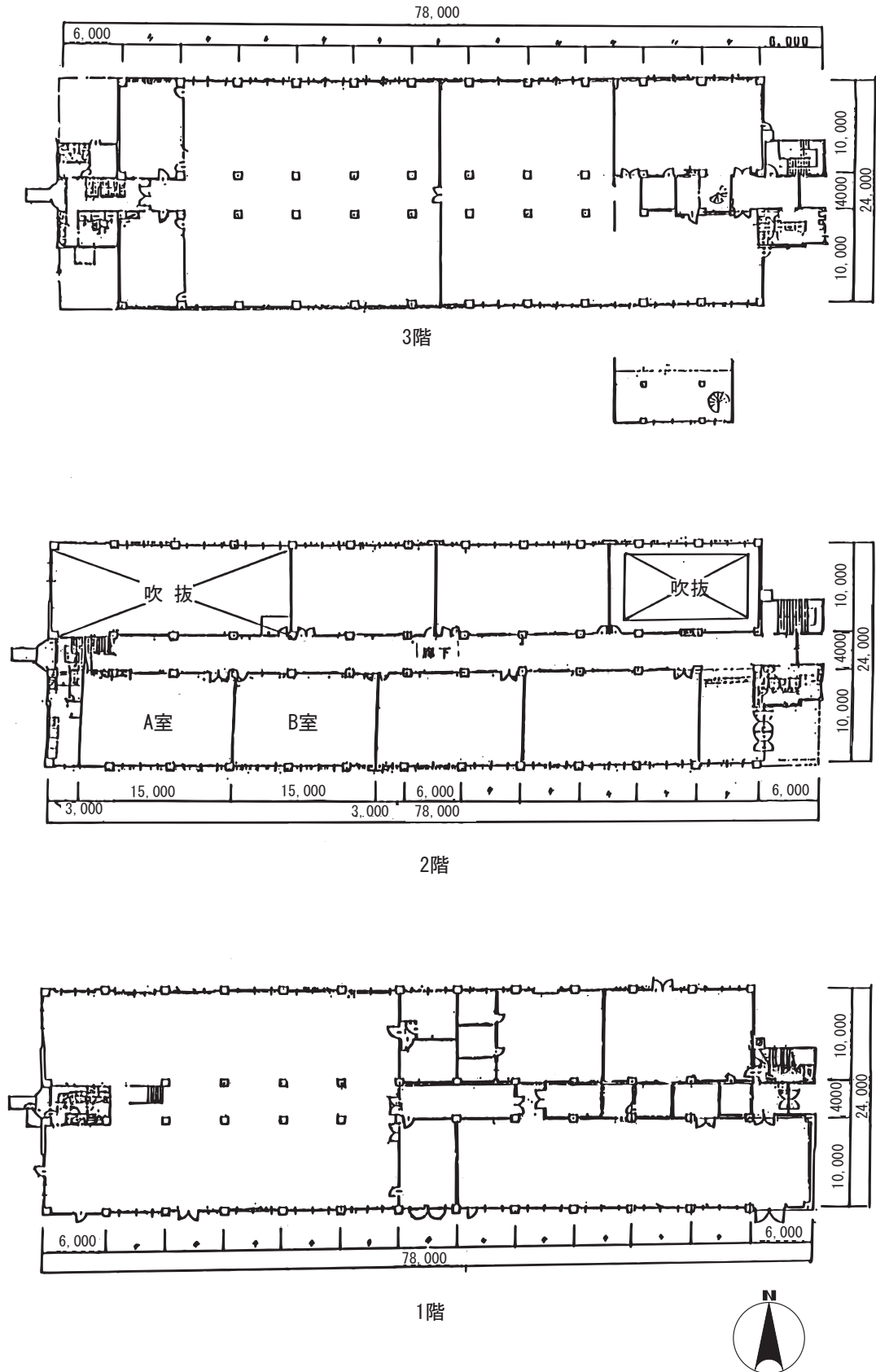


図 2.2 平面図

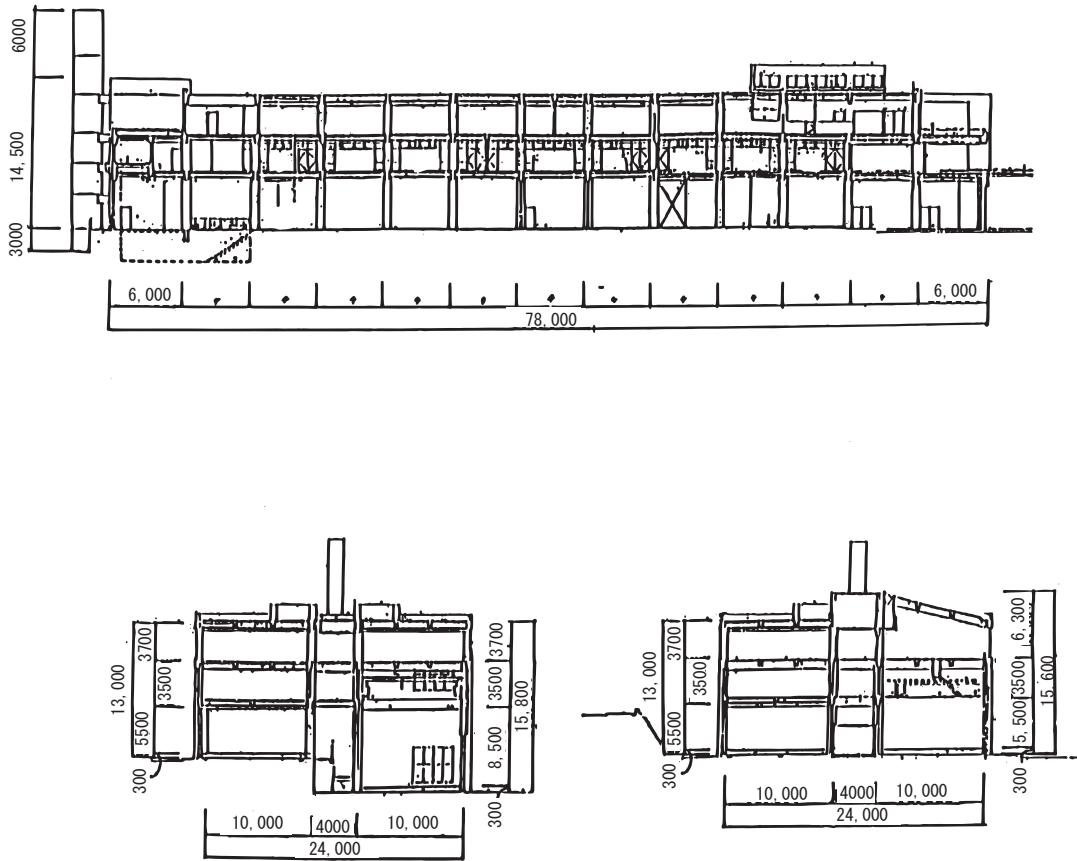


图 2.3 断面图

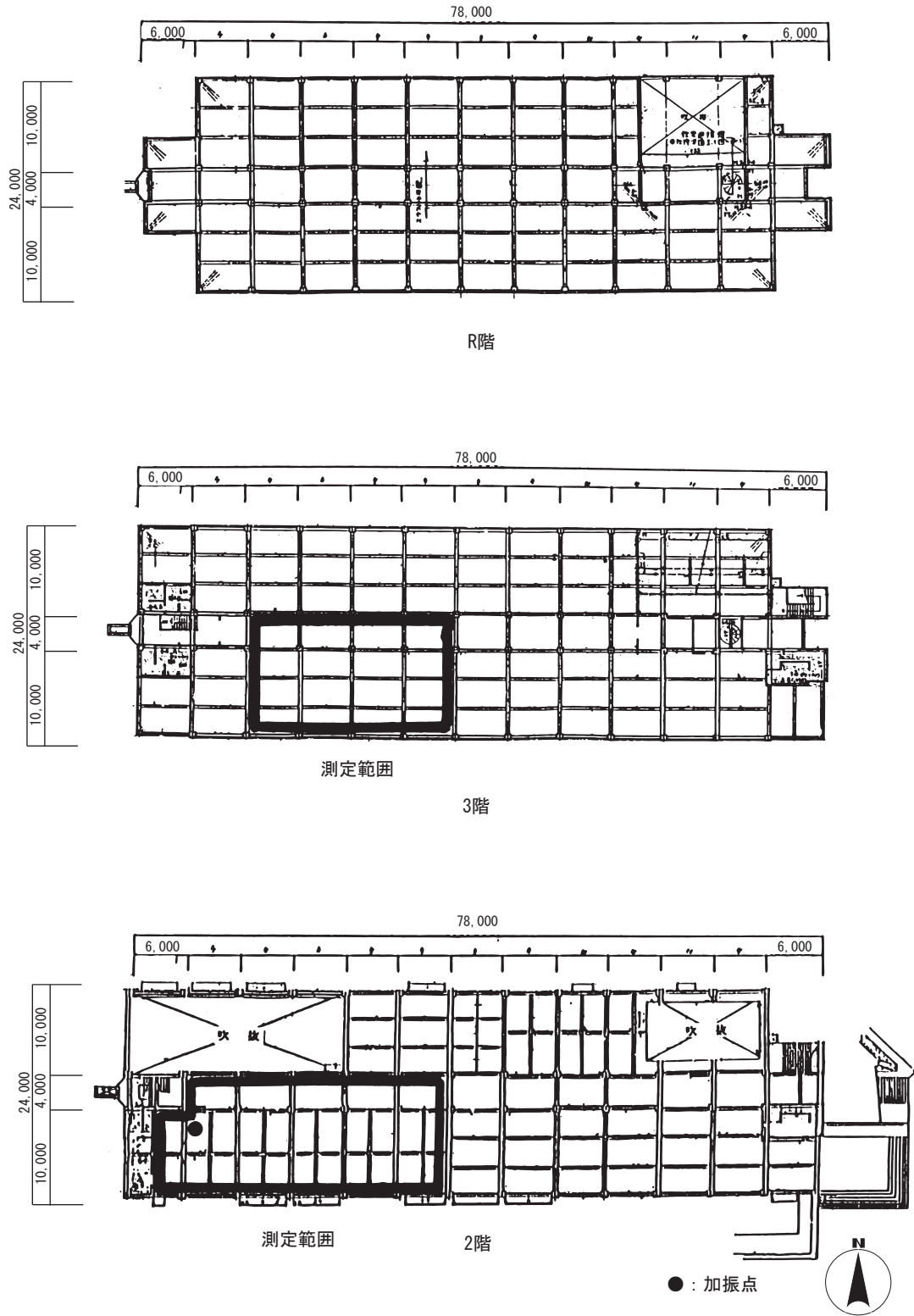
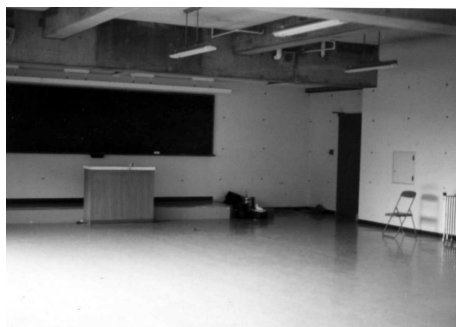
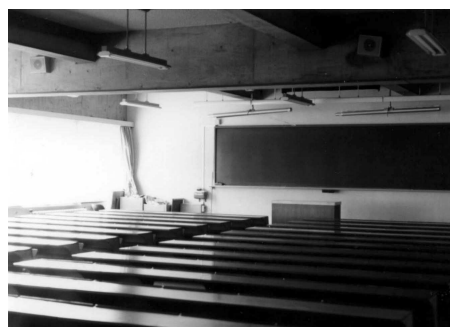


图 2.4 梁伏图



2階教室 (A室)



2階教室 (B室)



2階教室開口 (外壁)



廊下



2階教室間仕切壁 (A室-B室)



2階教室-廊下間仕切壁



3階製図室, 開口



3階製図室, 間仕切

図 2.5 実験対象室及びその周辺 (写真)

## 2.2 実験・解析方法の検討

モーダル解析は主に機械系の分野で発達してきた技術である。モーダル解析を橋梁や建築構造体に対し適用した事例はあるが、その数は少ない。建築構造体は、機械系の分野で行われる実験と比較し構造体が大きいく、地盤面と切り離すことができないことなどから、暗振動などの外乱を除外することが困難であることが多い。また、コンクリート系の材料を使用していることなどから、建築構造体に対しモーダル解析を適用するにあたり、その適用方法を検討する必要がある。

まずはじめに、採用した実験・解析方法を示す。次に、実験・解析方法について、既往の文献や予備実験により、種々検討を行った点について示すものとする。

### 2.2.1 実験・解析方法

実験装置を図 2.6 に示す。加振点は図 2.7 に示す梁の無い床面（非梁上）としている（2.2.4 項参照）。加振は質量約 300kg の動電型の加振器を用い、加振源にはバーストランダム信号を採用し、面外方向に加振している。加振器の加振面には、力センサーが設置されており、加振力が測定できるようになっている。

受振には振動レベル計 3 台を使用している。FRF（周波数応答関数）は加振器の加振力と、受振点 3 点の面外方向の振動加速度応答を同時測定して求めている。受振点を図 2.8 に示す。受振点は全体で 1,054 点あり、3 点ずつの測定を 352 回繰り返し測定することにより全点での FRF を測定している。FRF は、Accelerance（加速度/力）を求めている。

解析は、測定した FRF を用い、時間領域多自由度法（Time domain multiple degrees of freedom method）のうちの（単入力）最小 2 乗複素指数法（Least squares complex exponential）<sup>30)</sup> を適用し、固有振動数，減衰比，モードシェイプ等のモーダルパラメータを同定している。解析については、LMS 社のモーダル解析ソフトウェア Cada-X を使用している。

表 2.2 測定点数

測定場所	測定点数
2 階床面	453
3 階床面	242
2 階壁面	359
合計	1,054

### 2.2.2 実験的モーダル解析の適用

実験的モーダル解析の手法は文献<sup>27, 26, 28, 29)</sup>で紹介されているとおりである。建築構造体に対し、実験的モーダル解析を適用する場合、

- 測定誤差を少なくする（精度の良い FRF を測定する）。

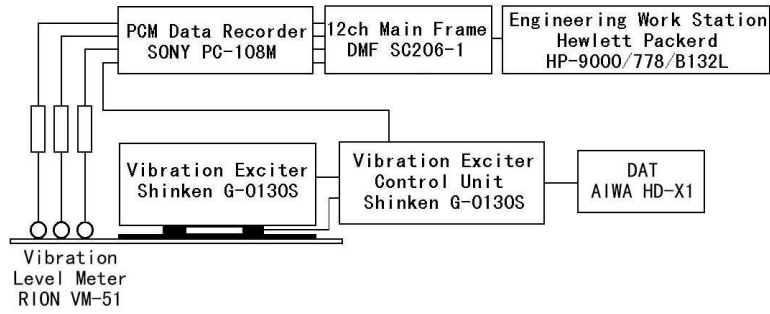


図 2.6 測定系ブロックダイアグラム (実構造体)

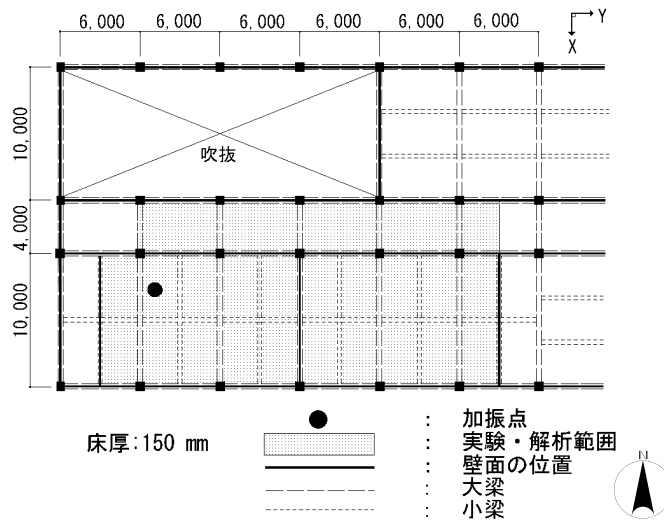


図 2.7 実験範囲と加振点 (実構造体)

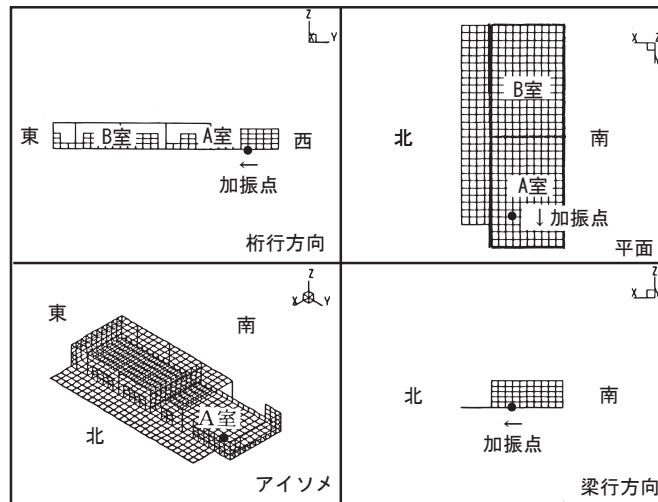


図 2.8 加振点と受振点 (実構造体)



- 解析誤差を少なくする (カーブフィットエラーを少なくする)。
- 適切な同定方法を採用する。

を考慮しなければ、信頼性のある解析結果を得ることはできない。

モーダル解析は、機械系の分野で広く用いられており、その適用方法も紹介されている (27, 26, 28, 29)。建築構造体での加振実験は、機械系で一般的に行われている加振実験 (自動車など) と比較し、

- 構造体の規模が大きい。
- 高減衰の材料が使用されている (減衰比 3% 程度)。
- 地盤と接している (地盤との相互作用の影響)。
- 暗振動の影響を除外することが困難である。
- 繰り返し実験を行うことは困難である。

を特徴としてあげることができる。

また、

- 線形系成分。
- 非比例粘性減衰系の近似誤差。

が影響を及ぼすことが考えられる。モーダル解析では、線形変形、比例粘性減衰などが仮定されている。よって、一般粘性減衰を比例粘性減衰で近似することや、非線形変形などが解析誤差となる。これらは、一般的には無視できることが多いが、建築構造体にモーダル解析を適用する際に、その影響を確認しておく必要があるものと考えられる。

モーダル解析に関わる方程式<sup>27, 26, 28, 29)</sup>を付録 A.1 に示す。実験的モーダル解析は、実測した Accelerance  $H_{a,ij}(\omega)$  などの FRF を元に、モードモデルを同定するものである。

モード同定方法を表 2.3 に示す。本論文では、減衰比が 3% 程度の構造物を解析対象としていること、感度解析、構造変更まで行うことができることから、時間領域多自由度複素指数法 (Time domain MDOF (Multiple degree of freedom)) を採用している。

実験的モーダル解析の実験は、ある基準点 (1 点若しくは複数点) と全測定点間の FRF の測定をする。FRF の測定方法は、固定加振点法と、移動加振点法があげられる。本論文では、後述するように重量 300 kg の加振器 1 台を用い、構造物を起振する固定加振点法を採用している。加振点の数については、複数とした方が多くのモードを同定することが可能であるが、モーダル解析の基本である 1 加振点による実験を行うものとする。

表 2.3 モード同定方法の分類 (概要)

1 加振点	多加振点
1 自由度	多自由度
時間領域	周波数領域

### 2.2.3 加振装置と加振方法の検討

モーダル解析の実験において用いられる加振方法は<sup>27, 26, 28, 29)</sup>、

**機械式加振器** 不釣り合いのあるホイールを回転させ、遠心力により、加振力を発生させる。大きな加振力が得られやすいが、正弦波加振しか行うことができない。加振力と周波数の制御が比較的困難である。

**油圧式加振器** 油圧弁の開閉と油圧シリンダーにより加振を行う。比較的大きな加振力が得られる。入力信号に対し、ゆがみが生じることが多く、高い振動数の加振はできない。

**動電型加振器** 電磁誘導 (スピーカーと同じ原理) により加振力を発生させる。ダイナミックレンジが大きく、任意の波形による加振が可能である。

**圧電式加振器** 圧電素子により加振を行う。大きい加振力を得ることは困難である。

**インパクトハンマー** 打撃部に力センサーが埋め込まれた加振ハンマーである。加振は打撃加振のみである。打撃部に取り付けられたチップにより、加振周波数の上限を変えることができる。インパルス的な加振になるため、波高率が大きくなる。

があげられる。また、加振信号については

**周波数固定正弦波加振 (TFS:Tuned frequency sine excitation)** 単一周波数の正弦波で加振を行う。モード解析が始まった初期には用いられたが、現在はあまり用いられていない。

**低速掃引正弦波加振 (SSS:Slowly swept sin excitation)** S/N 比が最も大きい。非線形の有無や発生原因、性質を把握することができる。実験に時間がかかる。

**高速掃引正弦波加振 (FSS:Fast swept sin excitation)** FFT の 1 回の標準化時間  $T$  内に掃引が終了するようにしたものである。ガタや非線形の影響が丸められることから、これらの影響がある場合の同定がしやすくなる。

**ランダム信号 (Random excitation)** ランダム信号を FFT 分析する際には、ウィンドウをかける必要がある。ウィンドウの処理により、誤差が生じる。

**疑似ランダム信号 (Pseudo random signal)** FFT の 1 回の標準化時間  $T$  で FFT 分析をかけた場合に、リンケージエラーが生じないようにした波形である (ウィンドウをかける必要がない)。

**バーストランダム信号 (Burst random excitation)** ランダム信号をバースト (有限に切り出す) させることにより、リンケージエラーが生じないようにした波形である。断続的な信号となるため、S/N の確認が可能である。波高率はランダム信号よりも劣る (高い)。

**打撃加振 (Impact excitation)** インパクトハンマーを用いた加振であり、加振器の設置の必要がないため、比較的簡易に実験が可能である。非線形特性を有する対象物には不適切である。波高率が高く、S/N が得られにくい。低振動数の加振力が得られにくい。精度の良い測定を行うためには熟練が必要である。

が代表例としてあげられる。

建築構造体における加振実験においては、構造物を十分に起振させる必要がある。また、暗振動の影響の確認が行えることも必要であり、機器のメンテナンス、測定に要する時間も考慮する必要がある。ランダム信号系は、適用事例が多く、波高率・測定時間の面で有利である。

本研究では、任意の波形を作りやすく、保守が比較的容易な図 2.9 に示す重量 300 kg の電動型の加振器を採用し、加振源には、暗振動の有無の確認に有利な断続振動であるバーストランダム信号を採用するものとする。

床面を面外方向に加振することを考えると、加振棒を用いた方が加振点に生じるねじり荷重が加わりにくくなるとされている。しかしながら、300 kg の加振器を振動的に独立させて支持することは困難であるため、加振棒は使用せず、振動面を直に床面に設置する方法を採用している。加振器の設置は、機器が垂直となるように、本体と加振面の間の 4 本の脚に設置している加振力センサーにかかる荷重と、水準器の指示を参照し調整している。

FRF を測定する場合、加振振動数範囲はサンプリング周波数  $f_s$  に対し、 $0 \text{ Hz} \sim f_s$  とするのが一般的である。今回の実験装置を実験対象床に設置し、加振すると、加振振動数を  $0 \text{ Hz} \sim f_s$  とした場合、低振動数成分の変位振幅により、加振器の可動変位の許容値を超えるようになる。これを避けるため、実際の加振実験の際には、5 Hz の LPF(ローパスフィルタ)によりモードとは関わりのない低振動数を弱めた信号を用いるようにしている。



図 2.9 加振器

#### 2.2.4 加振点の検討

本論では、1 加振点法を採用していることから、加振点の位置により得られる解析精度が異なってくるものと考えられる。実験的モード解析を適用する場合に、加振点をどの位置にするかを考慮する必要がある。モードの腹の位置を加振点とすると、構造体を効率よく起振できるものと考えられる。しかしながら、図 2.10 に示すとおり、1 次モードの腹の位置は、他のモードでは節となることが多い。さらに、モードの腹の位置は、加振器設置による拘束の影響も受けやすいとされている<sup>27)29)</sup>。また、モードの節を加振しても、構造体を起振することが

できない。このような点は、加振点として避けるべきである。

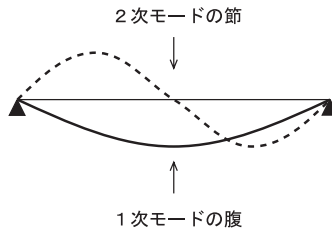


図 2.10 モードの腹と節

加振点の位置は仮実験を行い、その結果を検証し選定することが良いとされている。建築構造体の床は、床版と梁から構成されている。床面の振動の主な伝搬経路が梁であるのか、床版であるのかで、加振点を設置すべき位置が変わるものと考えられる。よって、加振点を梁上とした場合と、非梁上とした場合について実験し、どちらが望ましいのか検討を行うものとする。

加振点の位置の検討は、図 2.11 に示す、非梁上、梁上(大梁上)、梁公差上(大梁と小梁の交差点) について行う。検討方法は、

- FRF の相反性
- コヒーレンス関数
- モード解析による仮解析

としている。この実験は、2階床面のみを対象に行っている。これらの結果を次に示す。

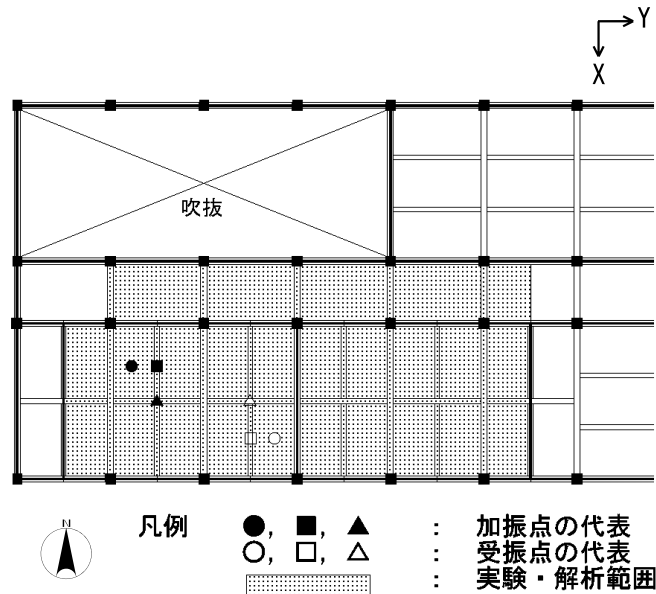


図 2.11 相反性の測定点

### FRF の相反性とコヒーレンスによる検討

FRF を測定する場合、コヒーレンスも同時に求め、FRF の信頼性の評価に用いることが多い。コヒーレンス (関連度) が低くなる原因としては、

- 材料が非線形変形の特徴を持つ。
- 接合部のガタ等の非線形変形成分がある。
- 暗振動などのノイズの影響がある。
- 加振点において、計測される加振力以外の力が作用している (加振方向以外に加わる力など)。
- 加振点と受振点間の伝達系に変化がある (加振点の移動など)。
- 信号処理上生ずる誤差 (ウインドウ処理等により生じる誤差)。

などがあげられる。建築構造体を伝搬する環境振動は、材料が線形変形する範囲内である。このような、線形変形をする系においては、マックスウェルの相反性 (Reciprocity) が成立し、加振点と受振点を入れ替えても FRF は一致する<sup>27)</sup>。FRF が一致しないのは、いずれかが正確に測定できていないためであると考えられる<sup>29)</sup>。

相反性による確認を行うための測定点を図 2.11 に示す。実験は、黒塗りの  $\text{A}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{C}$  のいずれかを加振し、白抜きの  $\text{D}$ ,  $\text{E}$ ,  $\text{F}$  を受振点とした場合と、加振点と受振点を入れ替えた場合について行っている。

FRF の相反性とコヒーレンスの測定結果を図 2.12 ~ 図 2.14 に示す。図 2.12 は受振点を (非梁上) に対する加振点  $\text{A}$ ,  $\text{B}$  の比較であり、図 2.13 は受振点を (小梁上) に対する比較であり、図 2.14 は受振点を (梁交差上) に対する比較である。

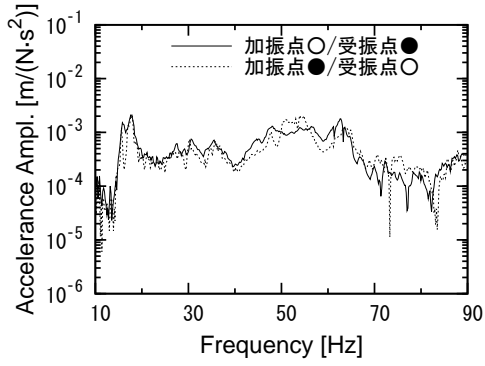
図 2.12 (受振点  $\text{D}$ ) に着目すると、加振点を (非梁上) を採用した場合が、FRF の相反性が一般的に成立しているが、加振点 (小梁上) や (梁交差上) については、35Hz 以上については、差が認められている。図 2.13 (受振点  $\text{E}$ ) に着目すると、加振点  $\text{A}$  は FRF の相反性が成立しているが、加振点  $\text{B}$  については 50Hz 以上、 $\text{C}$  は 30Hz 以上について相違が認められる。図 2.14 (受振点  $\text{F}$ ) に着目すると、加振点  $\text{A}$  にも差が認められている。しかしながら加振点  $\text{B}$  と比較して差が小さい傾向が認められている。加振点  $\text{C}$  については、コヒーレンスが他よりも小さいことから判断すると、FRF の信頼性が他よりも低くなっているものと考えられる。

受振点  $\text{D}$  のコヒーレンス (図 2.12 ~ 図 2.14) に着目すると、受振点がどの点である場合でも、加振点 (非梁上) の結果が最も相関が高く、次に (小梁上)、(梁交差上) の順であった。他のケース (受振点  $\text{E}$ ,  $\text{F}$ ) でも同様な傾向が認められている。

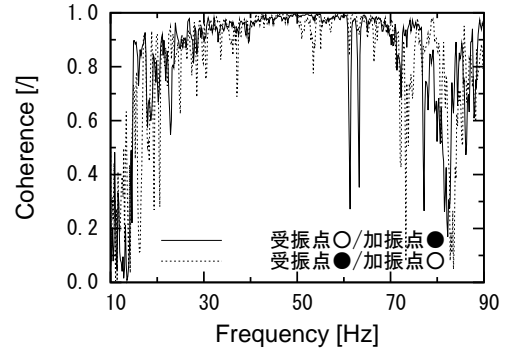
梁交差上の加振点 (  $\text{C}$  ) については、FRF の相反性やコヒーレンスの結果が低い値となっているが、1 次モードの 16Hz, 2 次モードの 18Hz 付近に着目すると、他の振動数と比較して、FRF の相反性が成立し、コヒーレンスの値が高い傾向が認められる。低次のモードについては、梁上を加振してもある程度の精度が得られると考えられるが、非梁上の加振点 (  $\text{A}$  ) の結果と比較すると、大きな差は認められていない。

コヒーレンスについては梁上を加振すると、波長の短い（振動数の高い）モードが起振されにくく、加振器の加振力により、暗振動よりも十分大きな振動応答が得られないものと考えられる。また、低次のモードについても、非梁上を加振した方が、1次と2次のモードが分離できている傾向が認められている。

これらの結果から、非梁上の加振点 のような加振点が望ましいと考えられる。

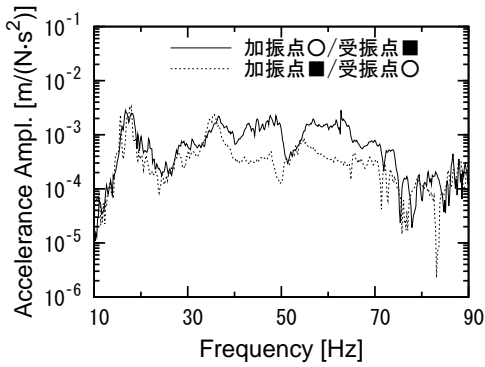


FRF

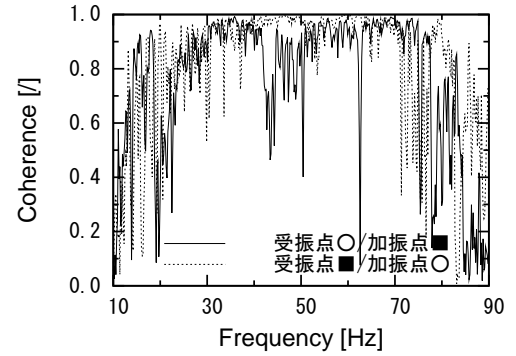


Coherence

:非梁上, :非梁上

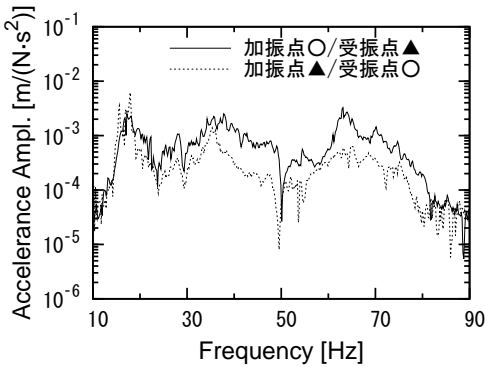


FRF

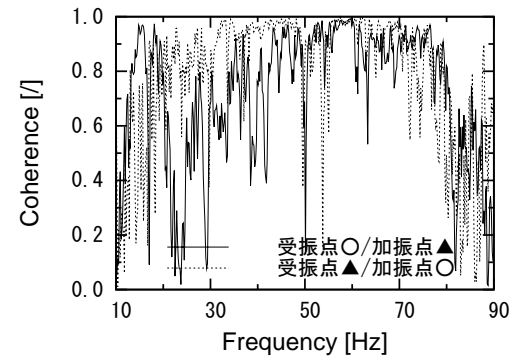


Coherence

:非梁上, :小梁上



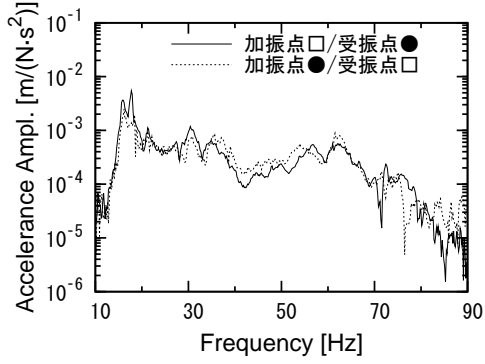
FRF



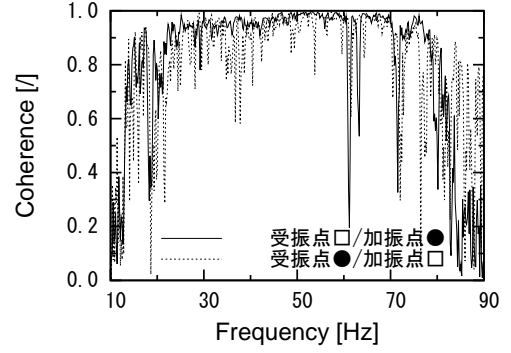
Coherence

:非梁上, :梁交差上

図 2.12 FRF の相反性による加振点の検討

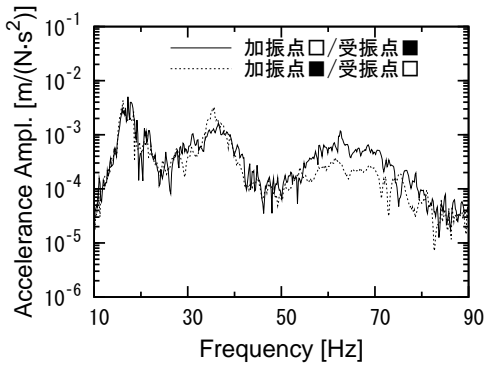


FRF

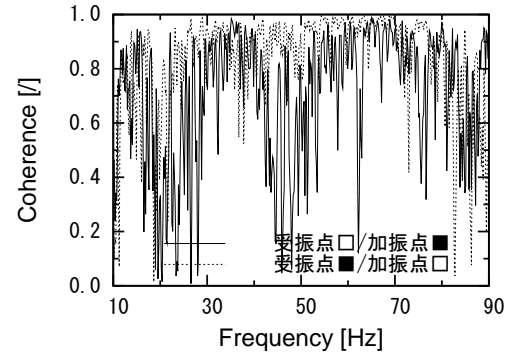


Coherence

:小梁上, :非梁上

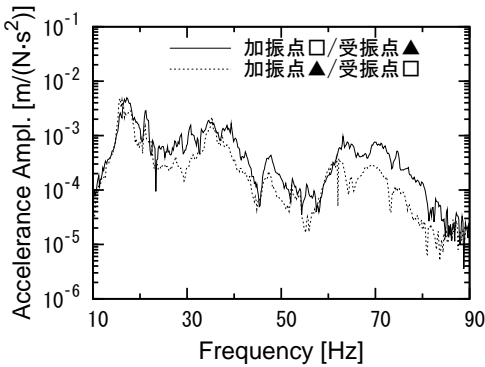


FRF

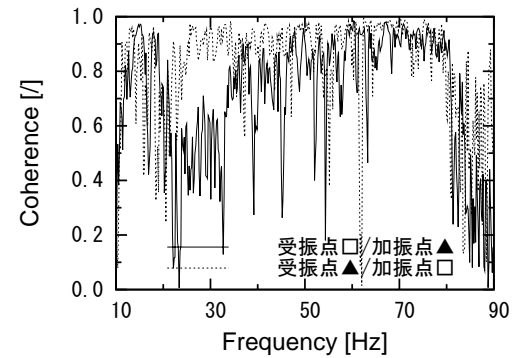


Coherence

:小梁上, :小梁上



FRF

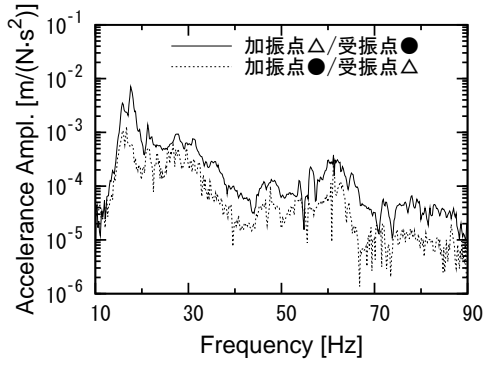


Coherence

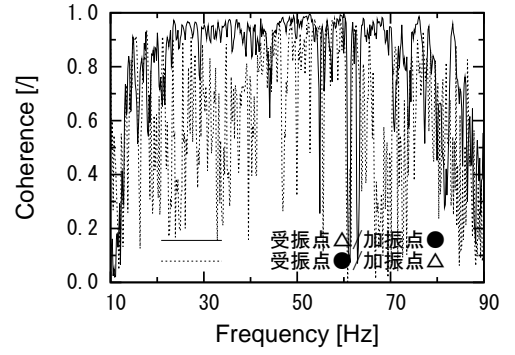
:小梁上, :梁交差上

図 2.13 FRF の相反性による加振点の検討



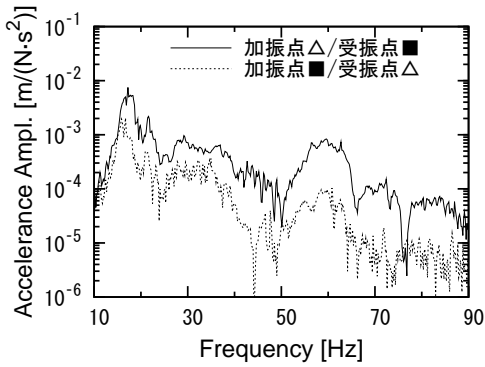


FRF

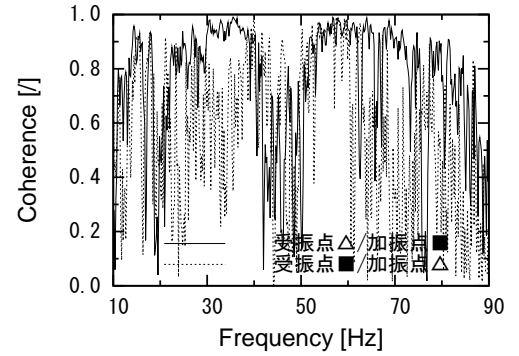


Coherence

:梁交差上, :非梁上

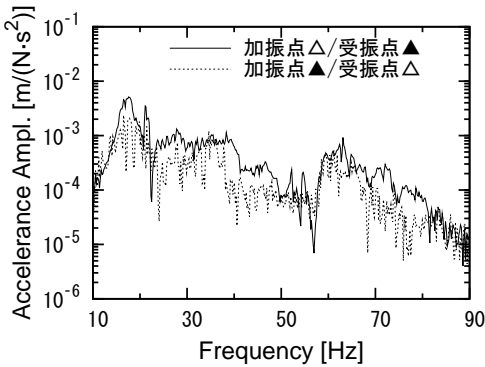


FRF

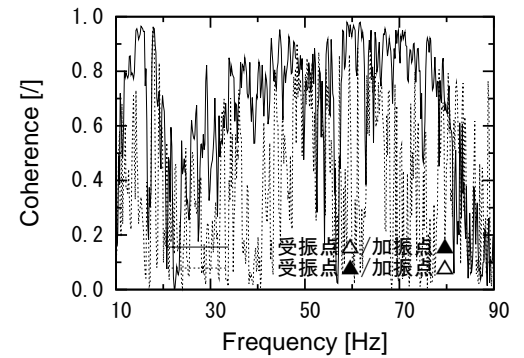


Coherence

:梁交差上, :小梁上



FRF



Coherence

:梁交差上, :梁交差上

図 2.14 FRF の相反性による加振点の検討

## モーダル解析結果による検討

モーダル解析の結果を表 2.4 に示す。

固有振動数に着目すると、2 次モードで 1.6 Hz の差が認められるが、殆どは 1.0 Hz 以内の差となっており、概ね同じ値を示している。

減衰比に着目すると、いずれの同定結果も 1.50 % ~ 3.50 % の範囲に収まっており、加振点（非梁上）の 7 次モードの同定結果のみが大きく離れた 5.3 % を示している。7 次モードの減衰比が離れているのは、6 次モードと 7 次モードの固有振動数が近接しており、加振点（非梁上）の解析では、これらのモードを分離できていないためであると考えられる。表 2.4 に示される加振点 の同定結果を全て平均すると 2.7 % となり、7 次モードを除いて平均すると 2.4 % となる。加振点 の減衰比は、低次の方が高次に比べ小さい値となっている。これは、波長の短くなる高振動数域では、モード振動から拡散振動へ移行する状態であるためと考えられる。

モーダル解析の同定結果は、加振器設置による支持拘束条件の変化などの影響を除けば、加振点によらず同じ結果が得られると考えられる。しかしながら、解析結果には差が生じている。このため、モーダル解析の結果を確認する指標を比較する。

モーダル解析の結果を確認する指標として、MOV と MPD があげられる（付録 A.2.2, 付録 A.2.3 参照）。MOV は、同定した運動方程式に矛盾が無いかを示す指標である。この値は 100 % に近いほど矛盾が少なく、信頼できる結果であり、値が小さくなると矛盾が多い結果であることを示す。また、MPD はモードベクトルの位相偏差を示すものであり、線形系であり比例粘性減衰系である場合、この値は 0 に近い値となるとされている<sup>30)</sup>。

1 次モードについては、モードの腹に一番近い加振点（梁交差上）の同定結果が他に比べ、MOV は大きく、MPD は小さく、共に他の加振点に比べ良い結果が得られており、2 次モードについては、加振点（非梁上）が比較的良い結果を示している。表 2.4 の\*印は、3 つの加振点で MOV を比較し、最大であるものを示している。\*印が最も多いのは、加振点（非梁上）の同定結果であり、解析されたモードの数も一番多くなっている。また、MPD も小さい傾向を示している。これは、加振点（非梁上）が幾何的にモードの節になりにくいことによるものと考えられる。

モード別に MOV と MPD を比較すると、MOV は、低次のモードに比べ高次のモードの方が小さい値となり、MPD は大きい値となっている。これは、波長の短くなる高振動数域では、モード振動から拡散振動へ移行しているためであり、低次に比べてモーダル解析の同定精度が低くなるためであると考えられる。

表 2.4 モーダルパラメータの同定結果

Mode No.	加振点（非梁上）				加振点（小梁上）				加振点（梁交差上）			
	固有振動数	減衰比	MOV	MPD	固有振動数	減衰比	MOV	MPD	固有振動数	減衰比	MOV	MPD
	[Hz]	[%]	[%]	[deg]	[Hz]	[%]	[%]	[deg]	[Hz]	[%]	[%]	[deg]
1	16.0	1.98	81.2	22.3	16.2	2.86	91.3	16.9	13.7	2.05	*97.5	15.8
2	18.0	1.50	*99.2	9.3	19.6	2.14	84.2	15.5	19.3	3.49	90.2	19.3
3	21.3	1.78	69.3	16.5	21.7	1.88	*79.5	13.8	21.3	2.31	76.6	26.7
4	27.9	2.49	*86.1	21.4	28.5	2.49	51.1	37.7	27.5	2.69	61.6	39.0
5	30.7	3.29	*83.3	22.9	—	—	—	—	29.7	3.42	60.0	37.9
6	—	—	—	—	—	—	—	—	36.1	2.79	75.8	31.5
7	37.4	5.30	*68.7	31.3	37.5	3.11	62.1	29.3	37.6	3.17	64.8	33.7
8	—	—	—	—	42.6	2.36	86.0	11.1	—	—	—	—
9	47.6	2.96	56.1	21.1	47.7	2.39	*67.6	34.2	46.9	3.18	65.4	38.3
10	54.6	2.31	41.8	30.5	—	—	—	—	—	—	—	—
11	56.2	2.76	*65.7	44.1	56.1	3.07	64.8	40.5	—	—	—	—

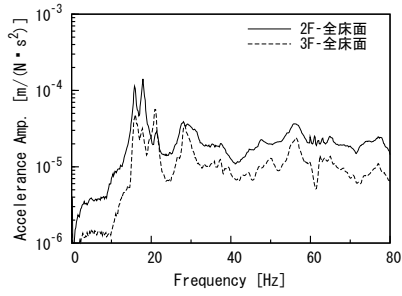
## 2.3 実験結果（振動伝搬性状）

### 2.3.1 FRF（周波数応答関数）

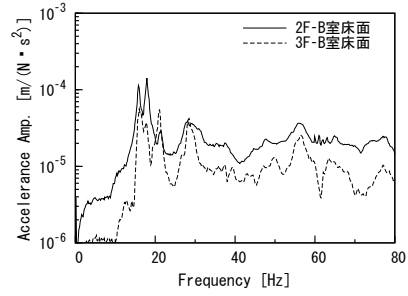
FRF の測定結果を図 2.15 に示す。床面の FRF に着目すると、共振ピークの位置については、どれも同じ振動数に表れている。2 階と 3 階の全床面の FRF に着目すると、共振の振動数により異なるが、全体的には、3 階の振幅は 2 階の  $1/2$ (6 dB の減少) 程度となっている。22 Hz 付近では、加振点から遠い 3 階の方が振幅が大きくなっている。3 階の全床面は図 2.4、図 2.8 に示すとおり、A 室上部で測定が不可能である範囲がある。同じ範囲となる B 室の 2 階床面とその上部の床面 (3 階床面) について着目すると、床面全体の結果と同様な傾向が認められている。

次に、2 階の各室の FRF に着目する。加振室である A 室 (図 2.8) と隣室の B 室の 2 階床面を比較すると、振幅は  $2/3 \sim 1/2$ (3 dB ~ 6 dB の減少) 程度となっている。廊下については 30 Hz 以下の低次モードの振動数では  $1/10$ (20 dB 減少) 程度となっており、それよりも高い振動数域では  $1/4$ (12 dB の減少) 程度となっている。床面のスパンは  $6\text{ m} \times 10\text{ m}$ 、廊下は  $6\text{ m} \times 4\text{ m}$  であり、面積が異なっている。30 Hz 以下では廊下は共振せず、A 室及び B 室の共振が伝搬し、振動しているため差が大きいが、波長が短くなる 30 Hz 以上の振動数では、低次に比べ差が小さくなっている。

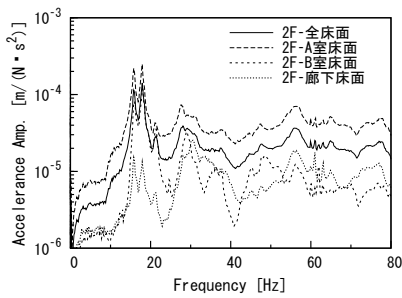
壁面の FRF に着目すると、床面が卓越する振動数にも卓越が認められている。壁面は、床面よりも多くの卓越が認められている。A 室、B 室東西の壁面は  $10\text{ m} \times 2.3\text{ m}$  の寸法であり、床面よりもアスペクト比が大きくなっている。



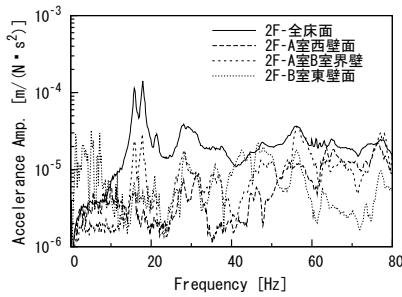
2階と3階全床面の比較



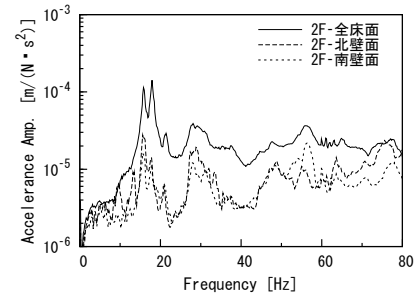
2階と3階床面(B室)比較



2階床面の室毎の比較



壁面(東西)



壁面(南北)

図 2.15 FRF (実構造体)

### 2.3.2 固有振動数・減衰比

表 2.5 に固有振動数及び減衰比を示す。1次モードは 16.0 Hz となっている。RC 実構造体の減衰比(減衰定数)は 1.6%~3.8% となっており、RC 建築構造体の一般的な値である 3% よりも小さめの値となっている。減衰比は、高次モードになると大きくなる傾向が認められている。これは、低次モードの方が、安定しているためであると考えられる。

表 2.5 固有振動数, 減衰比及びモードの確認指数

固有振動数 [Hz]	減衰比 [%]	重要度 [%]	MOV [%]	MPD [°]
16.0	1.8	23.3	73.6	27.0
18.0	1.6	20.3	97.5	10.3
21.2	1.8	6.7	83.0	15.7
27.9	2.5	9.6	72.6	34.9
29.5	3.8	13.6	52.8	50.0
33.5	2.5	4.9	47.1	49.0
35.4	3.2	6.4	69.9	33.7
37.8	2.8	4.7	75.5	38.1
42.5	2.2	2.3	76.3	34.4
47.2	3.0	4.4	52.6	50.0
56.5	1.9	4.0	58.4	36.8

### 2.3.3 モードシェイプ

モードシェイプを図 2.16, 図 2.17 に示す。16.0Hz のモードは、各室 (A 室, B 室) の床面全体の 1 次モードとなっている。18.0Hz のモードは、大梁で囲まれる範囲が一山となるモードとなっている。図 2.15 に示すとおり、2 次モードである 18.0Hz のモードの方が 1 次の 16.0Hz の振幅よりも大きくなっている。21.2Hz のモードは、各室の (1,2) モードとなっている。図 2.15 の FRF に着目すると、2 階床面よりも 3 階床面の振幅の方が大きくなっており、モードシェイプも 3 階床面の方がやや大きい振幅を示している。

27.9Hz 以上になると、波長が短くなることから、壁面についてもモードの影響が現れるようになっていく。30Hz を超えると、モードの形状が不明確になりはじめている。これは、モード振動から、拡散振動の状態に移行しているためであると考えられる。FRF に着目すると、低次の共振ピークは鋭尖であり明確であるが、30Hz を超えると、徐々に不明確になっていく傾向が認められる。

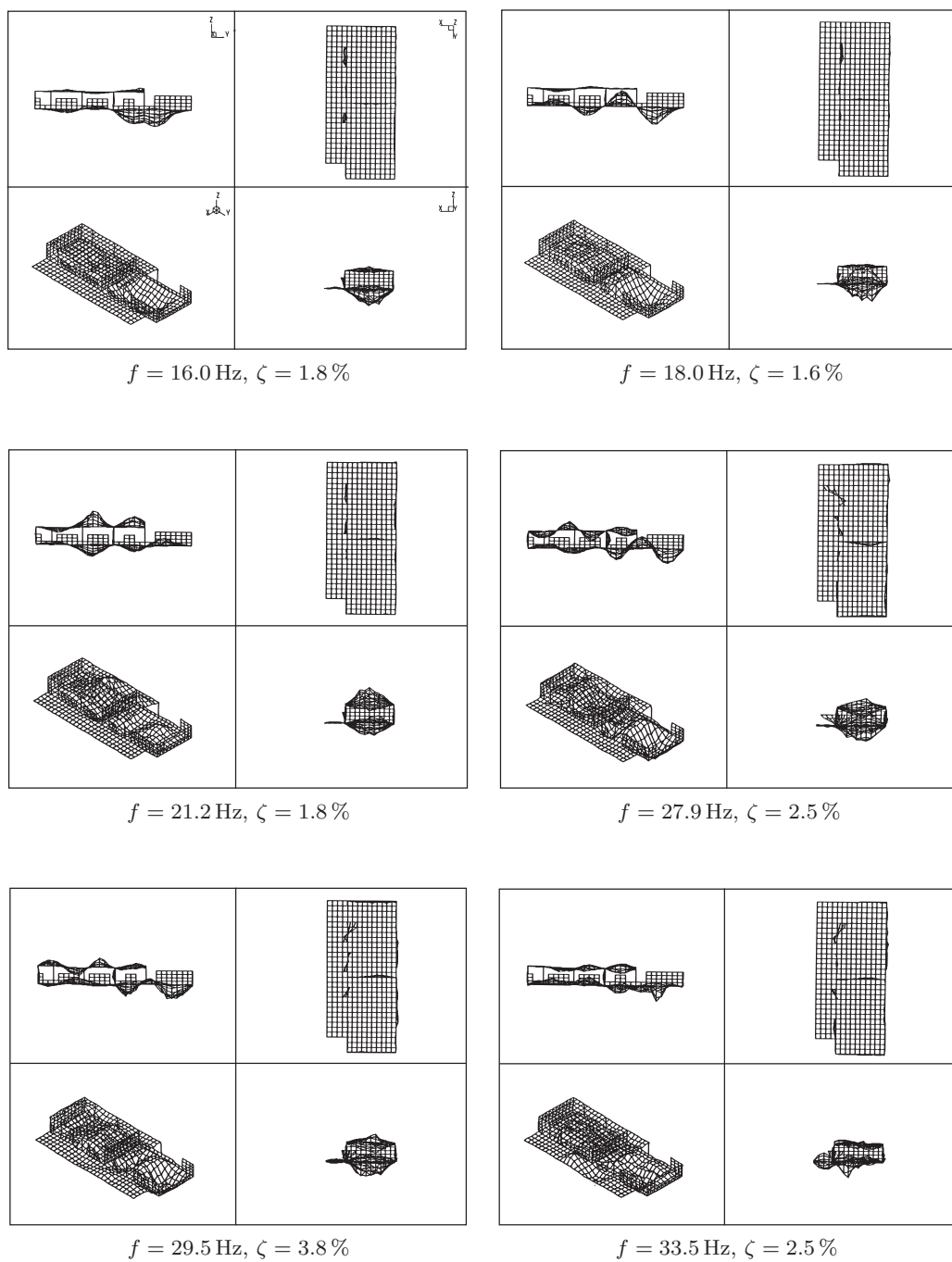


図 2.16 モードシェイプ(実構造体)

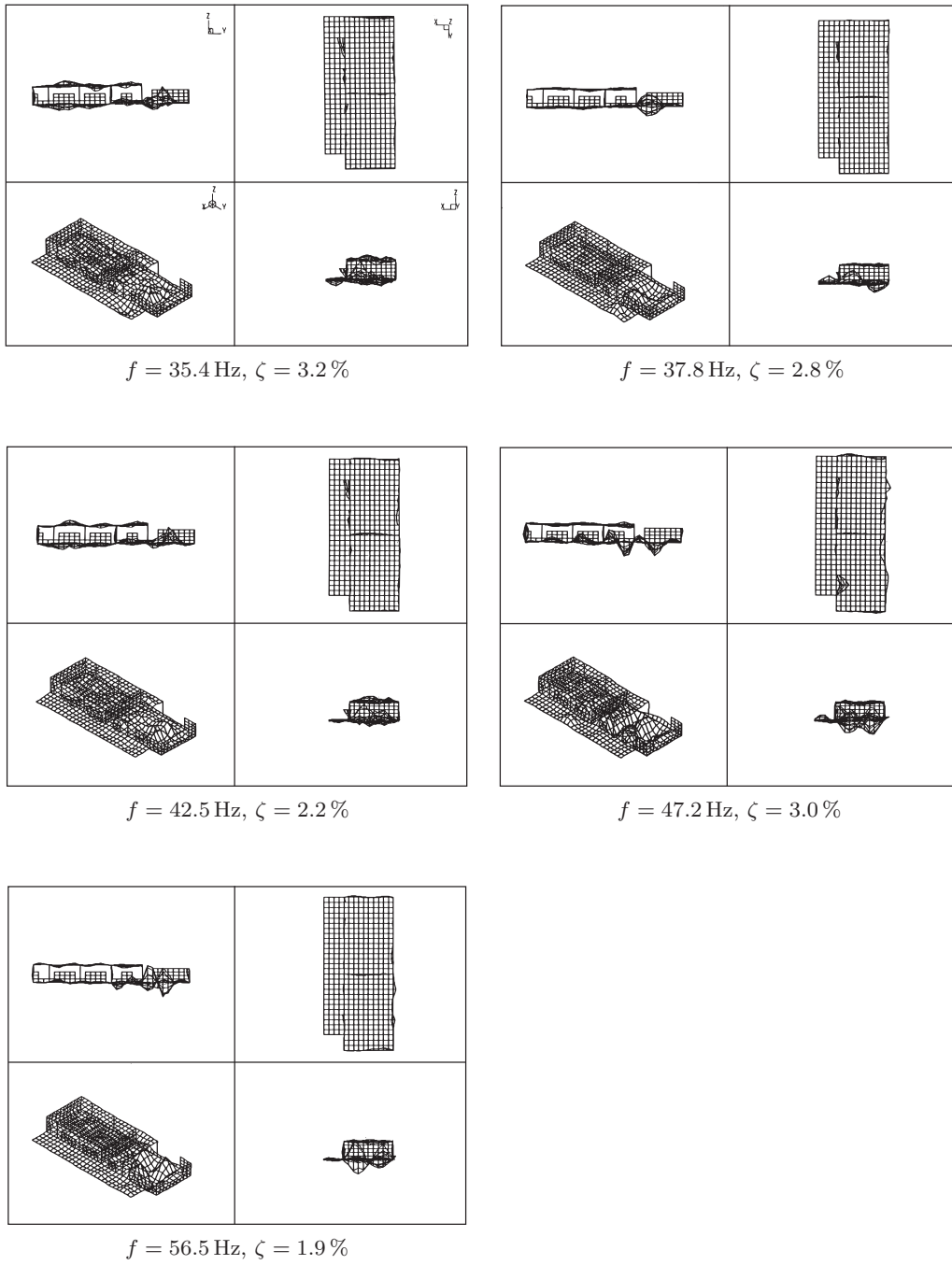


図 2.17 モードシェイプ (実構造体)

### 2.3.4 モーダルパラメータの確認指標

モーダルパラメータの確認指標を表 2.5 に示す (付録 A.2 参照)。

重要度に着目すると、16.0 Hz のモードが最も高く、18.0 Hz、29.5 Hz のモードの順であり、この 3 つのモードを合計すると 50% を超える値となる。重要度が高いモードは 図 2.15 の FRF の振幅も大きい傾向が認められている。16.0 Hz (1 次) と 18.0 Hz (2 次) のモードに着目すると、FRF は、18.0 Hz の方が振幅が大きい、重要度については 16.0 Hz の方が高い値となっている。

MOV に着目すると、低次の 16.0 Hz ~ 27.9 Hz については 70% を超えているが、高次のモードについては値が低く、信頼性の低い値となっている。MPD (位相偏差) についても同様に低次モードは値が小さく実数モードに近いが、振動数が高くなると位相がばらつく傾向が認められている。

このことから判断すると、高次モードについては、低次と比較し、信頼性が低い解析結果となっている。ただし、重要度も低くなっているため、その影響は大きくないと考えることができる。

低次モードのうち、18.0 Hz のモードが最も信頼できる値となっている。このモードのモードシェイプは、大梁の位置が振動の節となっており、規則的な変形となっている。

### 2.3.5 感度解析

実験的モーダル解析では、実測の FRF から、モードモデル (共振系のモデル) を同定している。Time Domain MDOF や PloyMax などの多自由度の同定方法を採用した場合、図 2.18 に示すよう、同定したモードモデルに、質量  $m$ 、減衰  $c$ 、剛性  $k$  を付加した際の固有振動数やモードシェイプ係数の変化を把握することが可能である<sup>30)</sup>。質量感度は、単位質量を接点に付加した場合の変化量であり、減衰感度、剛性感度は 2 つの接点間に単位減衰、単位剛性を加えた場合の変化量である。この感度解析の結果は、効果的な振動対策をするために用いられる。モードシェイプ係数は振動の振幅に関わるパラメータであるため、振動の大きさを小さくしたい場合は、この感度に着目すればよい。

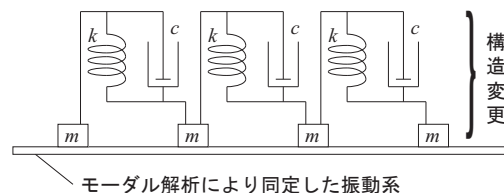


図 2.18 感度解析の概念図



## モードシェイプ係数に対する感度

図 2.19, 図 2.20 に示す評価点（2階, 2階, 3階）におけるモードシェイプ係数 ( $\psi_{ik}$ ) に対する感度を図 2.21 ~ 図 2.25 に示す。

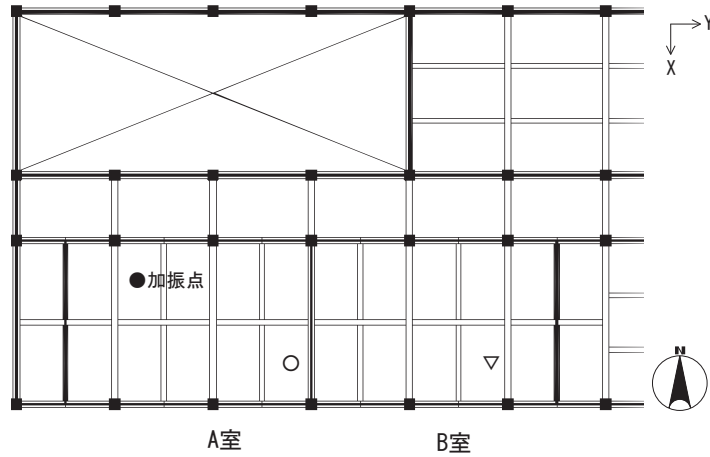


図 2.19 感度解析の評価点（モードシェイプ係数感度）

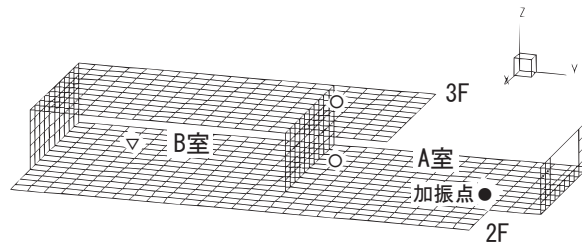


図 2.20 感度解析の評価点（モードシェイプ係数感度）

モードシェイプ係数に対する質量感度 モードシェイプ係数は、振動の振幅に関わる係数である。18.0 Hz のモードに対する感度を図 2.21 に示す。モードシェイプ係数に対する質量感度（同図左下）に着目すると、感度が高くなるのは、同図に示すモードシェイプの振幅が大きくなる場所になる傾向を示している。他のモードについても同様、図 2.22, 図 2.23 に示すとおり、感度が高い値を示すのは、図 2.16 に示すモードシェイプの振幅が大きくなる場所になる傾向を示している。ただし、21.2 Hz のモードは、3階床面の方が振幅が大きくなっているが、2階床面の感度の方が高くなっている。

測定点 2階, 2階, 3階 の感度を比較すると、感度に相違はあるが、振動対策に有効である感度が高い場所は、どれも同様となっている。16.0 Hz, 18.0 Hz のモードに着目すると、2階 は B 室内の床面であり、3階 は 3階の床面であるが、モードシェイプの振幅（図 2.16）が大きい A 室（加振室）の方が感度が高い値を示している。これらは、評価点に近い位置を振動対策するよりも、モードの振幅が大きい場所を対策した方が、モードシェイプ係数を小さくするのには有効であることを示している。

16.0 Hz のモードの感度の最大値に着目すると、2階 に対する感度が最も大きく、 $4.5 \times 10^{-8} \text{ s/kg}^2$  程度であり、次に2階 , 3階 が同程度であり、 $4.5 \times 10^{-9} \text{ s/kg}^2$  程度となっている。18.0 Hz のモードの感度の最大値に着目すると、2階 に対する感度が最も大きく、 $3.8 \times 10^{-8} \text{ s/kg}^2$  程度であり、次に2階 であり、 $4.0 \times 10^{-8} \text{ s/kg}^2$  程度、次に3階 であり、 $6.7 \times 10^{-9} \text{ s/kg}^2$  程度となっている。21.2 Hz のモードの感度の最大値に着目すると、2階 に対する感度が最も大きく、 $1.6 \times 10^{-8} \text{ s/kg}^2$  程度であり、次に2階 であり、 $1.5 \times 10^{-8} \text{ s/kg}^2$  程度、次に3階 であり、 $2.0 \times 10^{-9} \text{ s/kg}^2$  程度となっている。27.9 Hz のモードの感度の最大値に着目すると、2階 に対する感度が最も大きく、 $2.4 \times 10^{-8} \text{ s/kg}^2$  程度であり、次に2階 であり、 $9.5 \times 10^{-9} \text{ s/kg}^2$  程度、次に3階 であり、 $6.0 \times 10^{-9} \text{ s/kg}^2$  程度となっている。

感度の大きさと、各評価点におけるモードシェイプの振幅の順番を比較すると、18.0 Hz, 27.9 Hz は、これらの順番が一致しているが、16.0 Hz, 21.2 Hz は、順番が一致していない。

モードシェイプ係数に関する剛性感度 図 2.21, 図 2.24, 図 2.25 は、剛性感度を示す。剛性感度は、測定点が  $N$  個あった場合  ${}_N C_2$  の組み合わせが考えられるが、図に示すように隣り合う格子状の組み合わせの結果のみ表示している。剛性感度が大きくなる場所は、図 2.21 の左上に示すとおり、モードシェイプの傾きが大きくなる場所となる傾向が認められている。測定点 2階 , 2階 , 3階 の感度を比較すると(図 2.24, 図 2.25 参照) 質量感度同様、感度に相違はあるが、振動対策に有効である感度が高い場所はどれも同じ位置となっている。

減衰感度については、剛性感度と同様な傾向を示している。

振動数に対する感度

図 2.21, 図 2.26 に振動数に対する感度を示す。モードシェイプ係数に対する感度同様、質量感度についてはモードシェイプの振幅が大きい場所の感度が高く、剛性感度については、モードシェイプの傾きが大きい場所の感度が高くなる傾向が認められている。

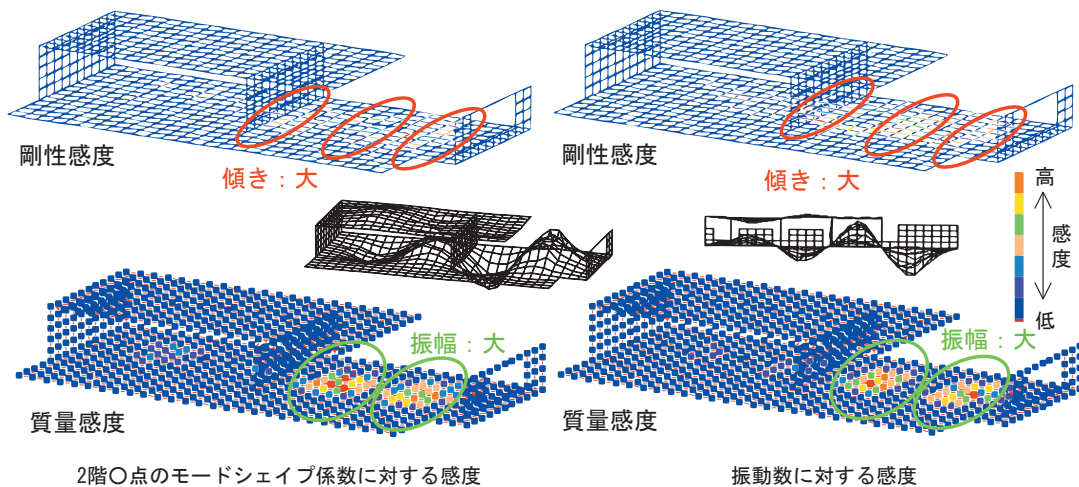
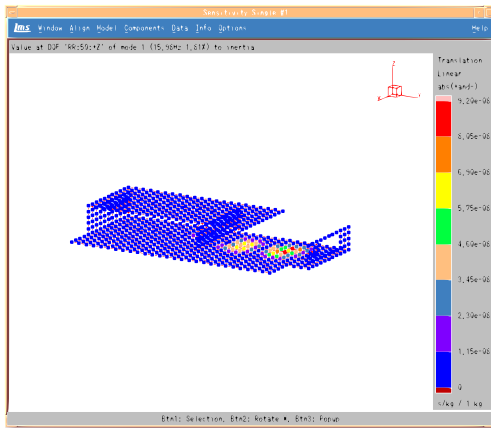
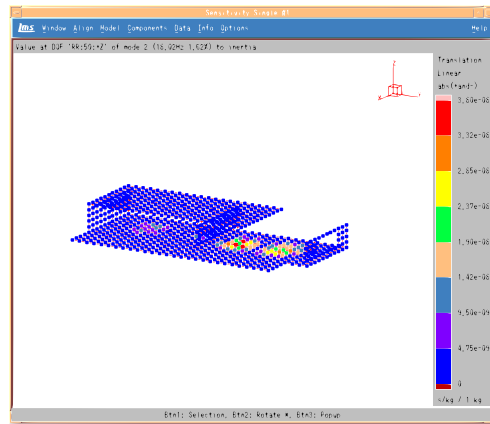


図 2.21 モードシェイプと感度 (18.0 Hz のモードに対する感度)

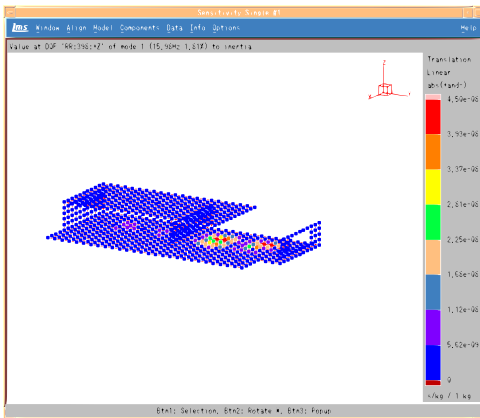


16.0 Hz のモードに対する感度

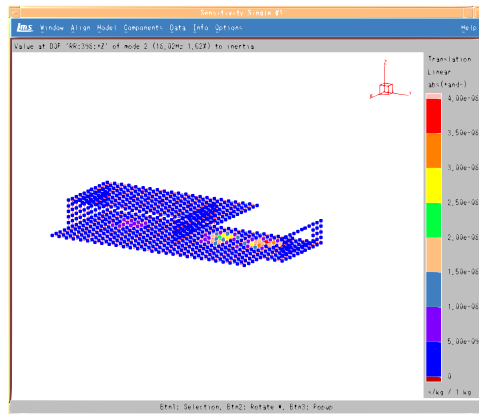


18.0 Hz のモードに対する感度

2階 点のモードシェイブ係数に対する感度

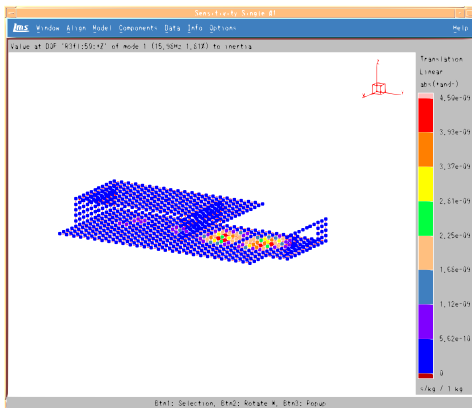


16.0 Hz のモードに対する感度

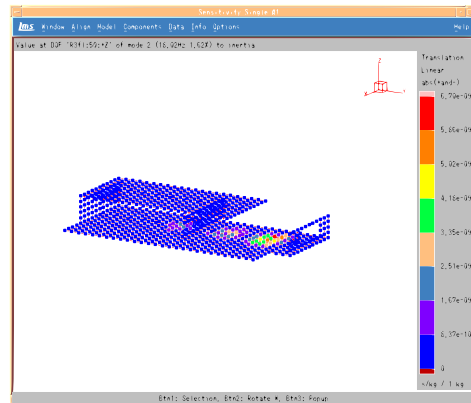


18.0 Hz のモードに対する感度

2階 点のモードシェイブ係数に対する感度



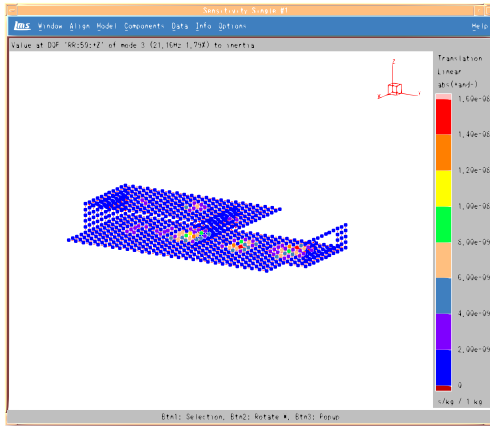
16.0 Hz のモードに対する感度



18.0 Hz のモードに対する感度

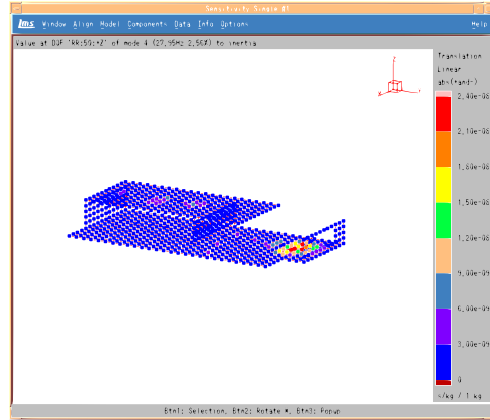
3階 点のモードシェイブ係数に対する感度

図 2.22 モードシェイブ係数に対する質量感度

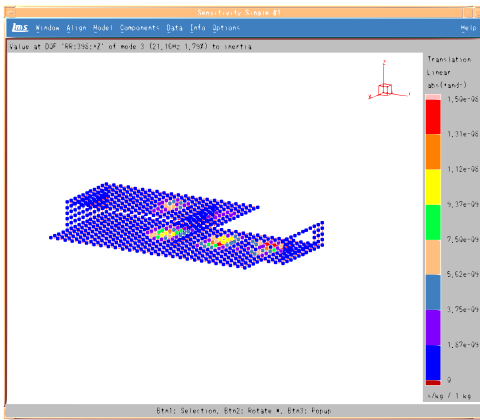


21.2 Hz のモードに対する感度

2階 点のモードシェイブ係数に対する感度

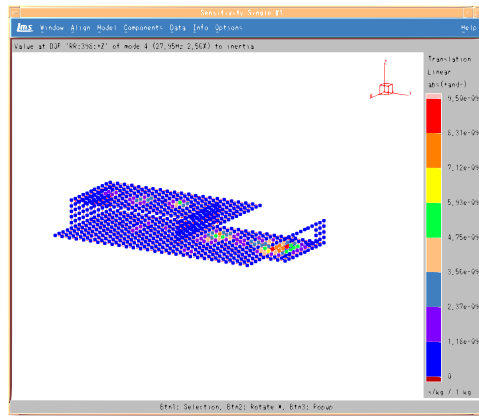


27.9 Hz のモードに対する感度

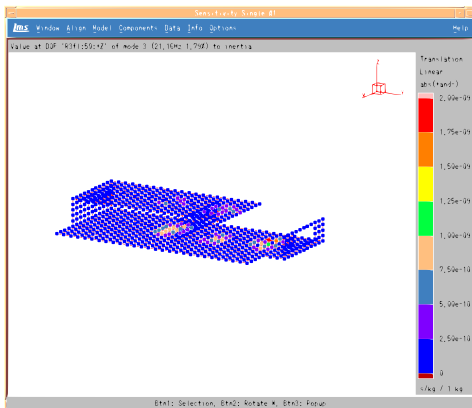


21.2 Hz のモードに対する感度

2階 点のモードシェイブ係数に対する感度

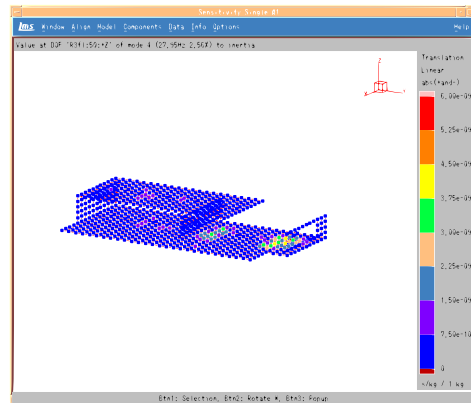


27.9 Hz のモードに対する感度



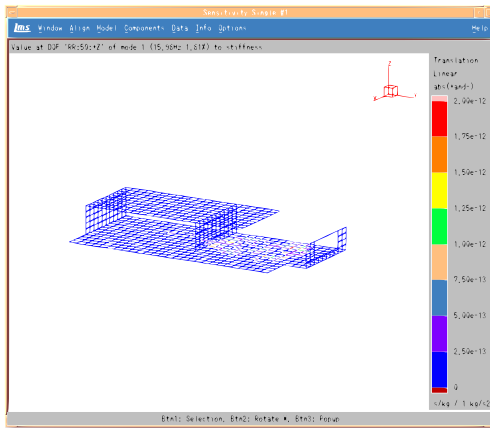
21.2 Hz のモードに対する感度

3階 点のモードシェイブ係数に対する感度



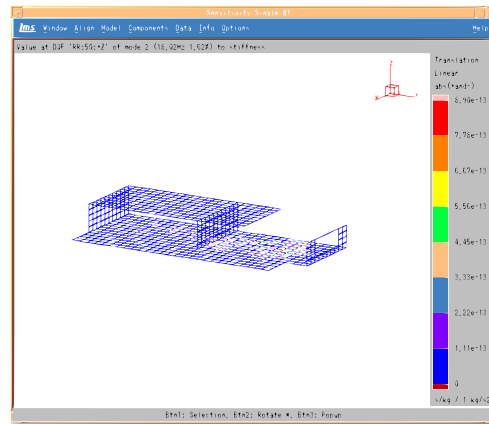
27.9 Hz のモードに対する感度

図 2.23 モードシェイブ係数に対する質量感度

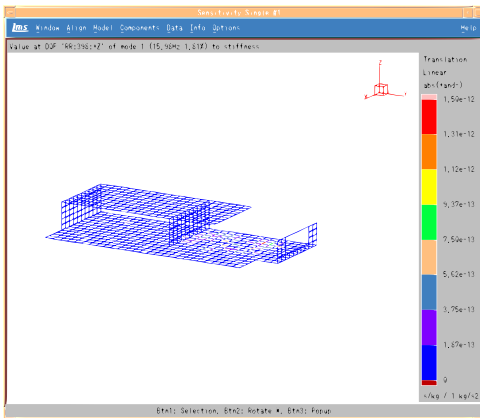


16.0 Hz のモードに対する感度

2階 点のモードシェイブ係数に対する感度

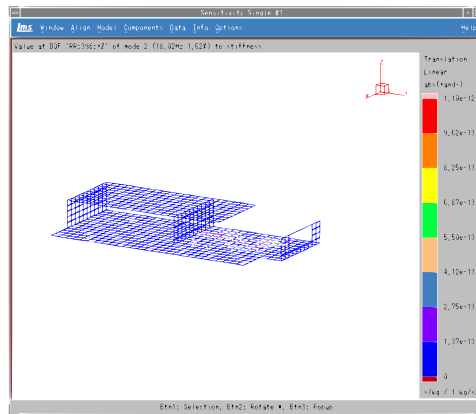


18.0 Hz のモードに対する感度

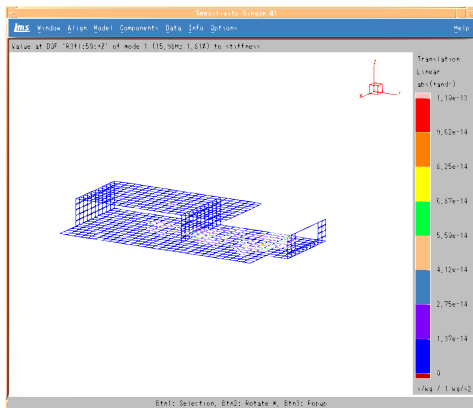


16.0 Hz のモードに対する感度

2階 点のモードシェイブ係数に対する感度

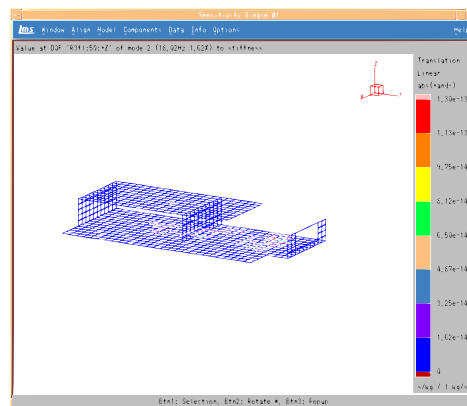


18.0 Hz のモードに対する感度



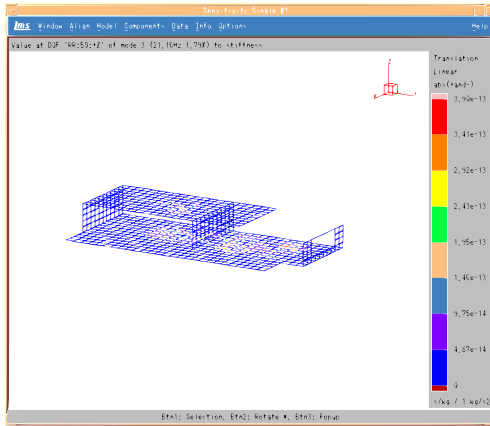
16.0 Hz のモードに対する感度

3階 点のモードシェイブ係数に対する感度

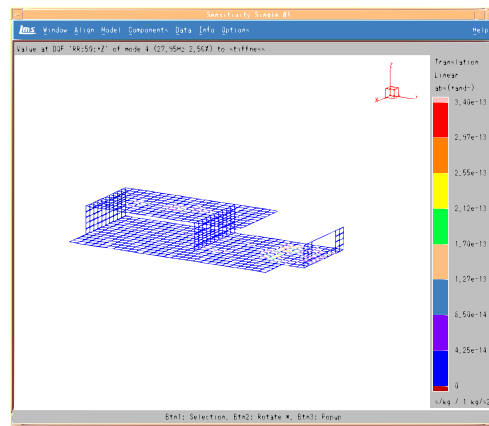


18.0 Hz のモードに対する感度

図 2.24 モードシェイブ係数に対する剛性感度

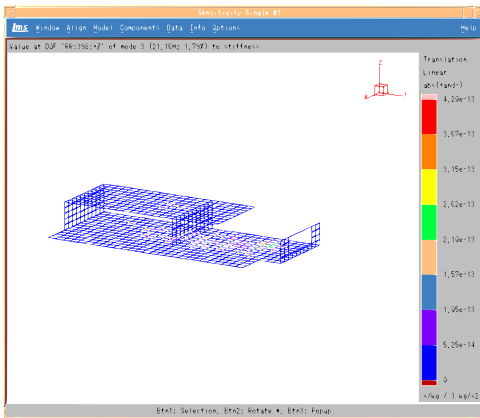


21.2 Hz のモードに対する感度

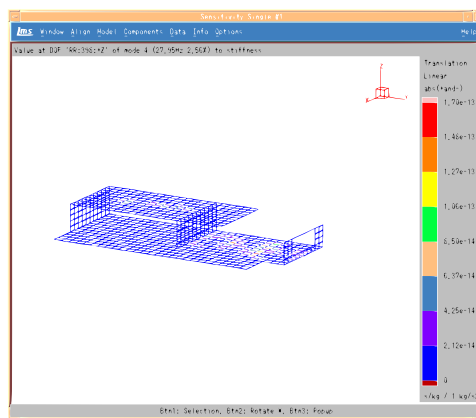


27.9 Hz のモードに対する感度

2階 点のモードシェイブ係数に対する感度

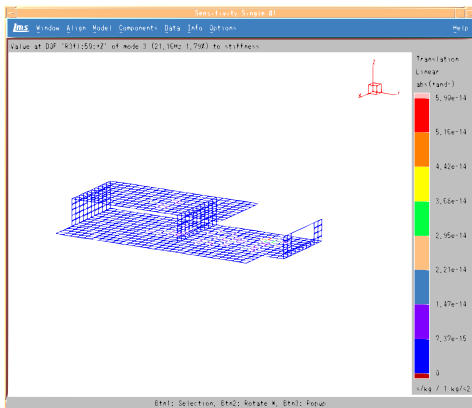


21.2 Hz のモードに対する感度

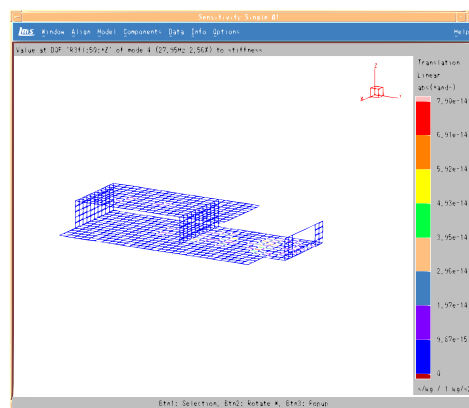


27.9 Hz のモードに対する感度

2階 点のモードシェイブ係数に対する感度



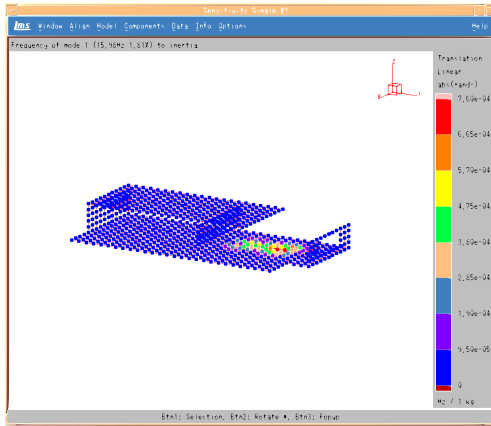
21.2 Hz のモードに対する感度



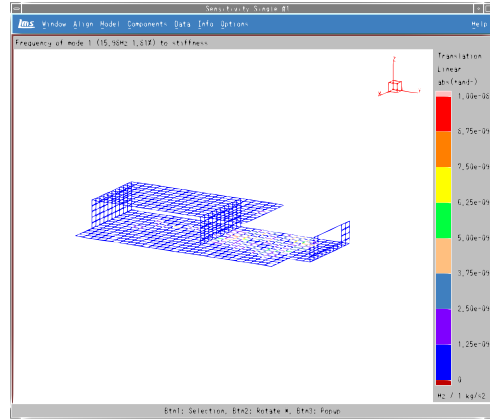
27.9 Hz のモードに対する感度

3階 点のモードシェイブ係数に対する感度

図 2.25 モードシェイブ係数に対する剛性感度

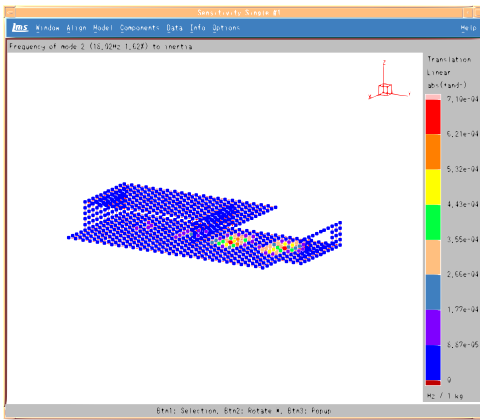


質量感度

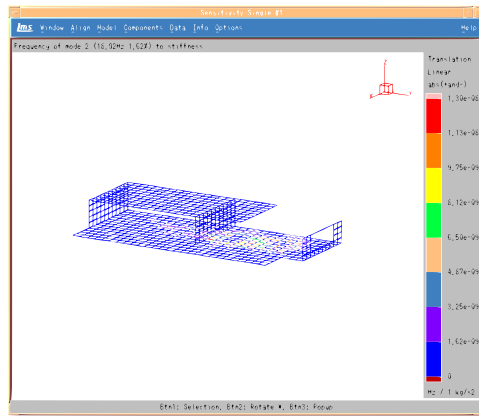


剛性感度

16.0 Hz モードに対する感度

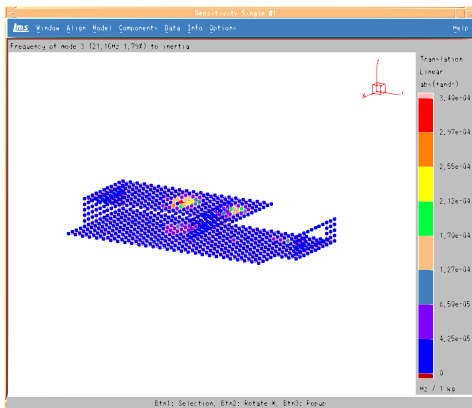


質量感度

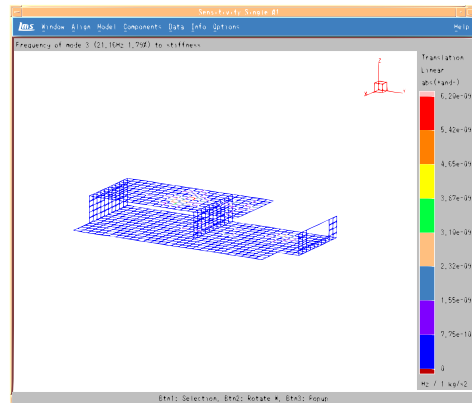


剛性感度

18.0 Hz モードに対する感度



質量感度



剛性感度

21.2 Hz モードに対する感度

図 2.26 振動数に対する感度

## 2.4 第2章のまとめ

RC 建築構造体に対し、モーダル解析を適用するために、種々検討を行った結果、

- 加振点を梁上とする場合と、非梁上とする場合の結果を比較すると、非梁上を採用する方が、FRF の相反性が成立し、コヒーレンスも良く、モーダル解析の結果を評価する確認指標も矛盾が少ない値を示している。
- 加振点としては、あるモードの腹は、他のモードの節になりやすいことから、加振点には、あらゆるモードで節とならない点が望ましい。
- 荷重 300 kg の動電型の加振器を用いることで、RC 建築構造体に対し、モーダル解析を行うことができる程度の起振力を得ることができる。
- モーダル解析の結果を評価する確認指標から判断すると、本実験方法を採用することで、ある程度信頼性のある結果が得られている。

ことが、明らかになっている。

また、実構造体のモーダル解析の結果、

- 低次のモードは、重要度、FRF の振幅共に大きい値となる。
- 2 次モードは、大梁の位置で節となる規則的な変形であることから、1 次モードよりも振幅が大きい。
- 振動の振幅と、モードシェイプには相関が認められる。
- 30Hz 以下の振動数のモードは、床面が共振するモードである。
- 壁面の FRF にも 1 次モード (16.0 Hz) の共振ピークが認められる。これは、床面の共振が、伝搬したものであると考えられる。
- 2 階床面を加振しているが、3 階の方の FRF が大きくなる帯域も認められている。これは、モードシェイプの形状が関係しているものと考えられる。
- 2 階から 3 階に振動伝搬する際に、6dB 程度振動が減衰している。
- 加振室 (A 室) から隣室 (B 室) への振動伝搬の際に 3~6 dB 減衰している。

ことなどが明らかとなっている。このように、建築構造体の環境振動の伝搬については、低次モードと深く関わっているものと考えられる。よって、振動伝搬性状の解明のためには、これらを考慮する必要がある。

さらに、感度解析の結果

- モードシェイプ係数に対する感度と、振動数に対する感度から、質量付加による対策は、モードシェイプの振幅が大きくなる点を対策することが有効である。
- 同じく、剛性付加 (バネ追加) や減衰付加 (ダンパー追加) による対策は、モードシェイプの傾きが大きくなる点を対策することが有効である。
- モードシェイプ係数に対する感度から、モードシェイプの振幅を小さくするためには、小さくしたい点の近傍を対策するよりも、質量付加時は、モードシェイプの振幅が、剛



性付加, 減衰付加に対しては、モードシェイプの傾きが大きくなる場所を対策することが有効である。

これらの結果を考慮し、第4章ではさらに実際に構造変更（構造部材を追加）する場合について検討する。



## 第3章

# 実構造体実験と模型実験の対応

模型実験は、実構造体実験と比較し、

- 構造部材の追加、変更が容易である。
- 構造を単純化することで、振動伝搬に影響を及ぼす要因を絞り込むことができる。
- 繰り返し実験することが容易である。
- 暗振動の影響の無い、良好な環境で実験することができる。
- 計画段階で振動の予測に用いることができる。

という利点を有している。この模型実験の利点を活用するために、模型実験の適用性について検討する。

模型実験を適用する際には、相似則の緩和<sup>17)</sup>や省略を行うことが多い。まずはじめに RC 実構造体の模型作製のための検討を行う。次に、模型実験と実構造体実験の結果を比較し、相似則の緩和の影響や、構造を省略した影響について検討する。そして、模型実験の適用性について考察する。

### 3.1 模型

模型対象とする構造体は、前章で検討を行っている RC 造 3 階建ての構造体である。模型化は図 3.1 に示す範囲であり、図 3.2 に示す、1 階～2 階の部分について行っている。2 階天井については、ピックアップを 2 階床面に取り付けることを可能とするため、省略をしている。模型の概要を図 3.3 に示す。

模型材料には、アクリル樹脂を採用している。材料の物性値を表 3.1 に示す(詳細:3.1.3 項)。模型は 1/50 の縮尺で作成している(詳細:付録 B.2)。

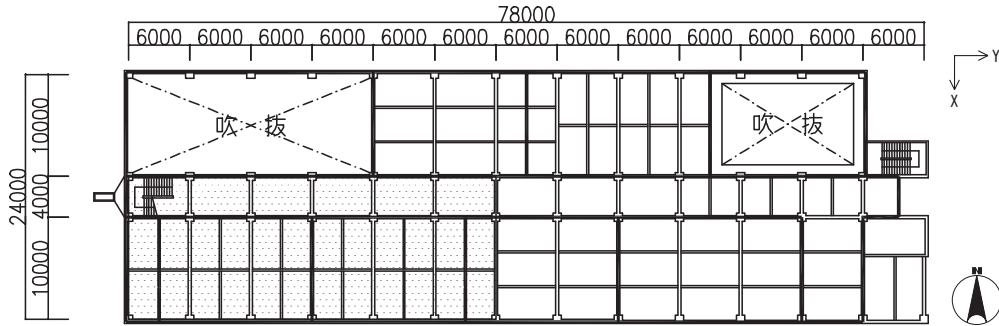
地盤面については、模型化すると規模が大きくなること、相似則を満たす材料を得ることが困難であることなどから、基礎の部分を含めて簡略化している。模型の基礎・地盤は、図 3.2、図 3.3 に示すとおり、ALC 板 20mm の下に 100mm のコンクリート板をモルタルで接着する方法を採用している。

模型の相似比を表 3.3 に示す。模型と実物では、重力加速度、ポアソン比、材料内部での振

動の減衰については相似となる条件が得られていないため、相似則を緩和<sup>17)</sup>している。模型の相似則を3.1.1項に、FEMによる相似則緩和の影響を3.1.2項に、材料の物性値を3.1.3項に示す。

表 3.1 模型材料の物理定数

材料	弾性係数 $E$ [N/m <sup>2</sup> ]	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	ポアソン比 $\nu$ [-]	備考
コンクリート	$2.06 \times 10^{10} \sim 2.25 \times 10^{10}$	2,300 ~ 2,400	1/6	静弾性係数
アクリル樹脂	$4.3 \times 10^9$	1,170	0.35	動弾性係数
ALC	$1.98 \times 10^9$	550		静弾性係数



注) ハッチング部分を模型化

図 3.1 模型化の範囲

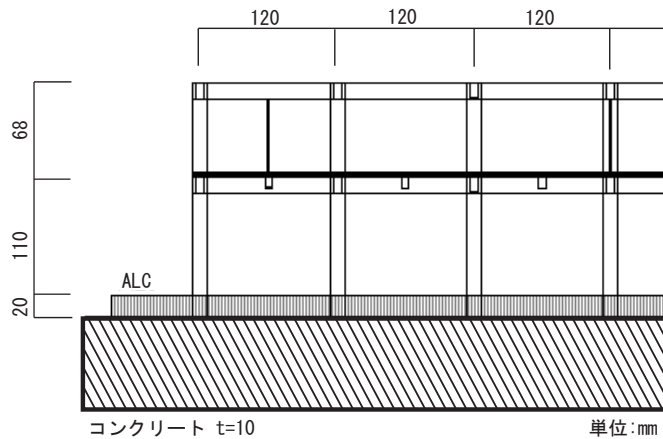


図 3.2 模型化断面図

### 3.1.1 模型の相似則

#### 基本相似則

環境振動の評価に関わる物理量には、加速度  $a$ [m/s<sup>2</sup>], 振動数  $f$ [Hz] があげられる。材料の物性値に関わる物理量には、密度  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>], 弾性係数  $E$ [N/m<sup>2</sup>], せん断弾性係数  $G$ [N/m<sup>2</sup>],

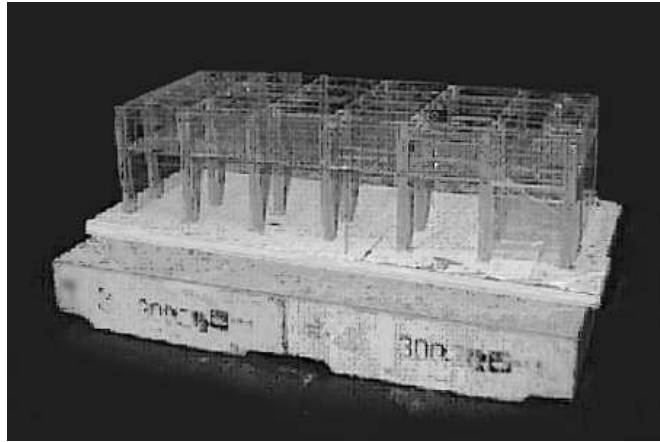


図 3.3 模型全景

ポアソン比  $\nu[\cdot]$  があげられる。振動伝搬系の運動力学に関わる物理量には、外力  $F[\text{N}]$ , 質量  $m[\text{kg}]$ , 減衰係数  $c[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}]$ , パネ常数  $k[\text{N}/\text{m}]$ , 歪み  $\varepsilon[\cdot]$ , 応力  $\sigma_s[\text{N}/\text{m}^2]$  などがあげられる。これらの基本単位は、長さ  $\ell[\text{m}]$ , 質量  $m[\text{kg}]$ , 時間  $t[\text{s}]$  となっている。よって、環境振動に着目した模型の基本相似比についても、これらの3項目となる。

ここで、1/50 縮尺の亚克力模型の基本相似比を考える。まず長さ  $\ell[\text{m}]$  の相似比は縮尺から 1/50 となる。

体積を  $V$  とすると、密度  $\rho$  は、 $\rho = m/V$  により求められる。この式を変形すると  $m = \rho V \propto \rho \ell^3$  となる。添字  $m$  は模型の、添字  $r$  は実構造体の物理定数とする。

質量  $m$  の相似比は

$$\frac{m_m}{m_r} = \frac{\rho_m \ell_m^3}{\rho_r \ell_r^3} \quad (3.1)$$

となる。よって表 3.1 に示す密度から表 3.2 に示す値が求まる。

弾性係数  $E$  は応力  $\sigma_s$  と歪み  $\varepsilon$  により  $\sigma_s = E\varepsilon$  なる関係である。また、応力  $\sigma_s$  は力  $F$ , 断面積  $S$  を用い  $\sigma_s = F/S$  と、力  $F$  は質量  $m$  と加速度  $a$  を用い  $F = ma$  と表される。加速度  $a$  は  $\ell/t^2$  に比例する。よって、

$$E \propto \frac{m}{\ell t^2} \quad (3.2)$$

なる関係があることから、時間  $t$  の相似比は

$$\frac{t_m}{t_r} = \sqrt{\frac{m_m E_r \ell_r}{m_r E_m \ell_m}} \quad (3.3)$$

となる。よって表 3.2 に示す値が求まる。

代表的な物性値の相似則

これらの基本相似比<sup>17)</sup>から、表 3.3 に示す力(加振力  $F[\text{N}]$ ), 周波数  $f[\text{Hz}]$ , FRF  $H_a[\text{m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)]$  を求めることができる。また、相似則を満たすためには、この基本相似比を満たす物性値となる材料を採用する必要がある。しかしながら、全ての物理定数について

相似とすることは、現実的には困難である。模型材料にアクリル材を用いた場合、重力加速度  $g[\text{m/s}^2]$ 、材料内部で生ずる減衰、ポアソン比  $\nu[\cdot]$  については、相似則を緩和する必要がある。

表 3.2 模型の相似比 (基本相似比)

物理量	相似比 (模型/実物)
長さ $\ell$	1/50
質量 $m$	$3.9 \times 10^{-6} \sim 4.1 \times 10^{-6}$
時間 $t$	$2.9 \times 10^{-2} \sim 3.1 \times 10^{-2}$

表 3.3 模型の相似比 (代表相似比)

物理量	相似比	備考
長さ $\ell$	1/50	
力 $F$	$7.6 \times 10^{-5} \sim 8.4 \times 10^{-5}$	
振動数 $f$	32 ~ 35	
FRF $H_a(\omega)$	$2.6 \times 10^5 \sim 2.9 \times 10^5$	Accelerance( $a/F$ )

#### 相似則緩和による影響

単純支持長方形板の固有振動数  $f_b[\text{Hz}]$  の計算式<sup>31)</sup> を次に示す。

$$f_b = \frac{\pi}{2\ell_x^2} \left( 1 + \frac{\ell_x^2}{\ell_y^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\rho\ell_t}} \quad (3.4)$$

ここに、 $\ell_x$  は短辺の長さ [m]、 $\ell_y$  は長辺の長さ [m]、 $\ell_t$  は板厚 [m]、 $D$  は曲げ剛性 [N · m] である。 $D = E\ell_t^3/12(1 - \nu^2)$  であることから、

$$f_b = \frac{\pi}{2\ell_x^2} \left( 1 + \frac{\ell_x^2}{\ell_y^2} \right) \sqrt{\frac{E\ell_t^2}{12\rho(1 - \nu^2)}} \quad (3.5)$$

となり、固有振動数は、重力加速度  $g$  とは無関係である。ポアソン比については、 $\sqrt{1/(1 - \nu^2)}$  に比例しており、アクリル材を模型材料に採用すると固有振動数が約 5% 高くなる。

単純支持長方形板の中央に加振力  $F$  が作用する場合の 1 次モードに着目すると、換算バネ定数  $k_e$  は、辺長比  $\ell_x/\ell_y$  に依存する係数  $C_1$  により<sup>5)</sup>、

$$k_e = \frac{D}{C_1\ell_x^2} = \frac{E\ell_t^3}{12C_1\ell_x^2(1 - \nu^2)} \quad (3.6)$$

と表される。

また、有効質量  $m_e$  については、板全体の質量  $m$  に比例し

$$m_e = \frac{\ell_y^3/\ell_x^3}{\pi^4 C_1 (1 + \ell_y^2/\ell_x^2)^2} m \quad (3.7)$$

と表される。この比例係数を  $\alpha$  とおけば、

$$m_e = \alpha m \quad (3.8)$$

となる。従って固有振動モードの運動方程式は、

$$m_e \ddot{x} + c \dot{x} + k_e x = F \quad (3.9)$$

と書かれ、Compliance  $H_c(\omega)$ <sup>26)</sup> は次式で与えられる。

$$H_c(\omega) = \frac{1}{m_e \omega + j c \omega + k_e} \quad (3.10)$$

$$= \frac{1/k_e}{(1 - \omega^2/\omega_n^2) + 2j\zeta\omega/\omega_n} \quad (3.11)$$

ここに  $\omega = 2\pi f$ ,  $\omega_n = \sqrt{m_e/k_e}$  である。

以上を整理すれば、式 (3.10) は

$$H_c(\omega) = \frac{1}{-\alpha m \omega + j c \omega + \frac{E \ell_t^3}{12 C_1 \ell_x^2 (1 - \nu^2)}} \quad (3.12)$$

と表される、Compliance  $H_c(\omega)$  は、寸法  $\ell_x$ ,  $\ell_t$  の他に、質量  $m$ , 減衰係数  $c$ , 弾性係数  $E$ , ポアソン比  $\nu$  に関係することがわかる。

また、式 (3.11) は、

$$H_c(\omega) = \frac{(12 C_1 \ell_x^2 (1 - \nu^2))/E \ell_t^3}{(1 - \omega^2/\omega_n^2) + 2j\zeta\omega/\omega_n} \quad (3.13)$$

となり、 $\omega \simeq \omega_n$  と見なせる振動に対しては、

$$H_c(\omega) = \frac{12 C_1 \ell_x^2 (1 - \nu^2)}{2j\zeta E \ell_t^3} \quad (3.14)$$

となる。この式及び表 3.1 から、アクリル材を模型材料に採用した場合、ポアソン比の相似則の緩和により、Compliance  $H_c(\omega)$  並びに Accelerance  $H_a(\omega) = -\omega^2 H_c(\omega)$  の FRF は、1 次共振時において約 10% 小さいことがわかる。従って、ポアソン比  $\nu$  の相似則の緩和による FRF への影響はあまり大きくない。

無限弾性体を伝搬する縦波と、横波の振動速度が異なっていることが知られている。縦波の伝搬速度  $v_p$  は、

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (3.15)$$

である。ここに、弾性係数  $E$ , 密度  $\rho$ , ポアソン比  $\nu$  である。

また、横波の伝搬速度  $v_s$  は、

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} \quad (3.16)$$

である。また、縦波と横波の伝搬速度の比  $v_p/v_s$  は、

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu}} \quad (3.17)$$

となる。この式と表 3.1 から、模型材料にアクリル材を用いた場合、ポアソン比の相似則の緩和により、 $v_p/v_s$  には、30% の差が見積もられる。

減衰の相似則については、減衰比  $\zeta$  のみの評価ではなく、材料内部の減衰のメカニズム<sup>27, 26, 32)</sup> も考慮する必要がある。しかしながら、構造体の材料内に生ずる減衰については、そのメカニズムが明らかになっていない<sup>27, 26)</sup>。また、減衰について相似則を満たす材料を得ることは困難である。減衰についても相似則を緩和し、実験後に補正することを考える。

### 3.1.2 FEM 解析による相似則緩和の影響の検討

FEM 解析を利用し、ポアソン比が振動伝搬性状に及ぼす影響について検討する。FEM により解析を行うのは、4章のプロトタイプ模型とする。FEM の解析方法は5章に示す条件と同じとし、ポアソン比  $\nu$  を RC の 1/6 とする場合と、アクリル材の 0.35 とする場合との比較を行うものとする。

加振点を図 4.2 に示す 2 階床面とした場合の各室の FRF のパワー平均値について比較する。図 4.3 の M7 についての結果を図 3.4 に示す。このように、ポアソン比を 1/6 の結果と 0.35 の結果はほぼ一致している。さらに、上階への伝搬について着目するため、M11 についての結果を図 3.5 に示す。このケースについても、ほぼ一致する結果が得られている。

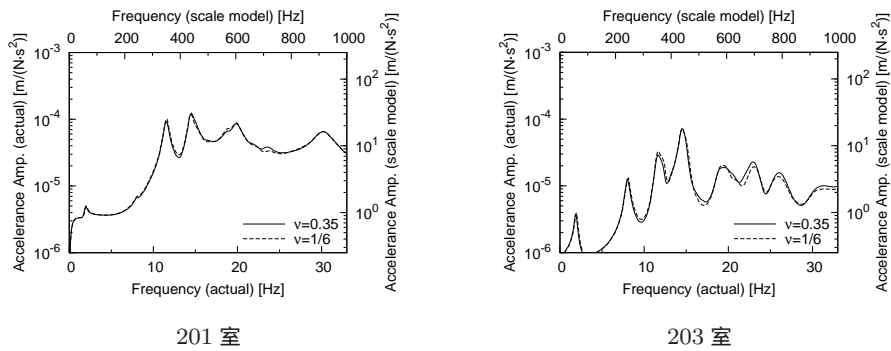


図 3.4 FRF に対するポアソン比の影響 (プロトタイプ模型:M7)

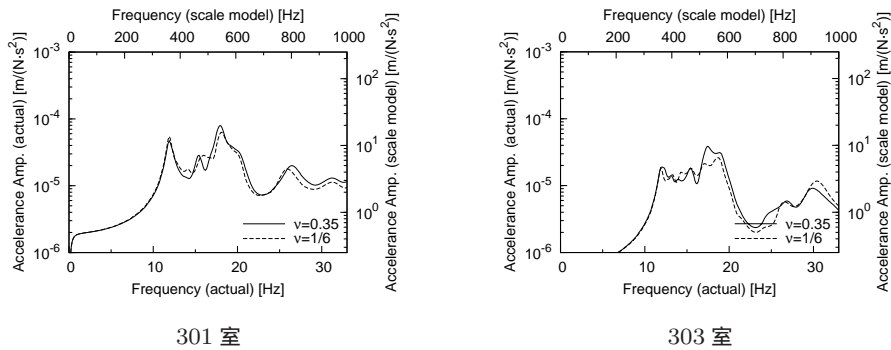


図 3.5 FRF に対するポアソン比の影響 (プロトタイプ模型:M11)



### 3.1.3 材料の物性値

材料の物性値を付録 C に示す。模型材料としては、松田らの研究<sup>24)</sup> に準じ、アクリル材を用いることにする。アクリル材の弾性係数  $E$  と密度  $\rho$  については、実測により求めている。

#### 弾性係数

弾性係数の測定には、断面寸法  $l_w \times l_t = 10 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  のアクリル部材を用いている。測定は、表 3.4 に示す測定装置を用いる。部材の支持は、図 3.6 に示す、支間長が 270 mm である支持治具 (B&K 3930) を用い、両端支持<sup>35)</sup> の条件としている。加振はインパクトハンマーにより行い、アクリル部材に取り付けた、重さ 1g のピックアップ (Rion PV-90B) により部材の振動加速度を測定している。固有振動数と減衰比は、モーダル解析ソフト (LMS 社 Cada-X) のうちの多自由度最小 2 乗複素指数法 (Time domain MDOF (Multiple degree of freedom)) により求めている。固有振動数  $f_n$  と減衰比  $\zeta$  の測定結果を表 3.5 に示す。

弾性係数は、 $\kappa$  次モードの固有振動数  $f_{n,\kappa}$  と係数  $\alpha_{\kappa,\kappa}$  (1 次:  $\alpha_{\kappa,1} \simeq 22.4$ ) により、

$$E' = 4.8\pi^2 \left( \frac{\ell^2}{\ell_t} \times \frac{f_{n,\kappa}}{\alpha_{\kappa,\kappa}} \right)^2 \quad [\text{N/m}^2] \quad (3.18)$$

なる関係がある<sup>35)</sup>。この式を用い弾性係数  $E$  を求めている。

表 3.4 弾性係数測定装置

装置名	製造	形式
Complex Modules Apparatus	B&K	Type3930
Pickup	Rion	PV-90B
Impact Hammer	Rion	PH-51
Charge Amplifier	B&K	ME-3286S
Main Frame	DMF	SC206-1
EWS	HP	B132L
Modal Analysis Software	LMS	Cada-X

表 3.5 アクリル棒の固有振動数と減衰比

次数	固有周波数 $f_n$ [Hz]	減衰比 $\zeta$ [%]
1	161	3.8
2	449	3.6
3	869	3.8

#### 内部減衰係数

内部減衰のメカニズムは、複雑であり、FEM (有限要素法) などの解析を行う場合、その特性を近似し、取り扱うことが多い<sup>27, 26)</sup>。

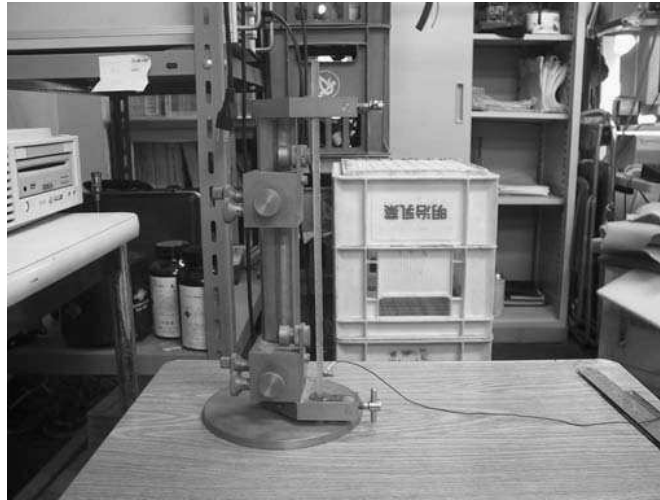


図 3.6 動弾性係数測定用支持治具 (B&amp;K Type3930)

この取り扱い方法は、種々提案<sup>27, 26, 32)</sup>されており、本論文では、レイリー減衰の仮定を採用するものとする。この仮定は、次式に示すとおりである。モードが比較的安定している1次と3次の実験値(表 3.5)から係数 $\alpha, \beta$ を求めている。後述するFEMの予測には、この $\alpha, \beta$ を条件として与えている。

$$\zeta_{\kappa} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{2\pi f_{\kappa}} + 2\pi\beta f_{\kappa} \right)^2 \quad (3.19)$$

## 3.2 実験方法

模型構造体加振実験(以下模型実験とする)は、2.2.1項に示す実構造体実験の実験方法と同じ方法を採用する。図 3.7 に実験装置を示す。模型の寸法が小さくなるため、加振器とピックアップについては、実構造体実験よりも小型のものを採用する。受振ピックアップ(PV-90B)は質量約1gであり、取り付け箇所の動的有効質量(動力的質量)の1/10未満である<sup>36)</sup>。また、取り付けにはビーズワックスを用いている。この取り付けにより10kHz付近まで測定可能である<sup>36)</sup>。加振源には、実構造体実験と同じバーストランダム信号を採用し、加振振動数は、0 Hz ~ 1 kHzとしている。

加振器に取り付ける加振力センサーは加振棒を含め質量38gである。加振力センサーについては、接着剤を用い、図 3.8 に示すとおり取り付けを行う。

加振点は2.2.4項で検討したとおり、どのようなモードでも振動の節となりやすく、FRF(周波数応答関数)の相反性が成立する点である非梁上の印(図 3.9)としており、受振点は図 3.9 に示すA室及びB室内の格子状の点(346点)としている。

なお、解析はLMS社のモーダル解析ソフトウェアCada-Xにより行っている。

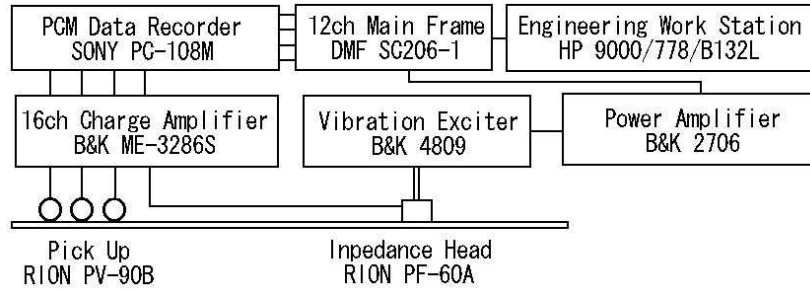


図 3.7 測定系ブロックダイアグラム (模型)

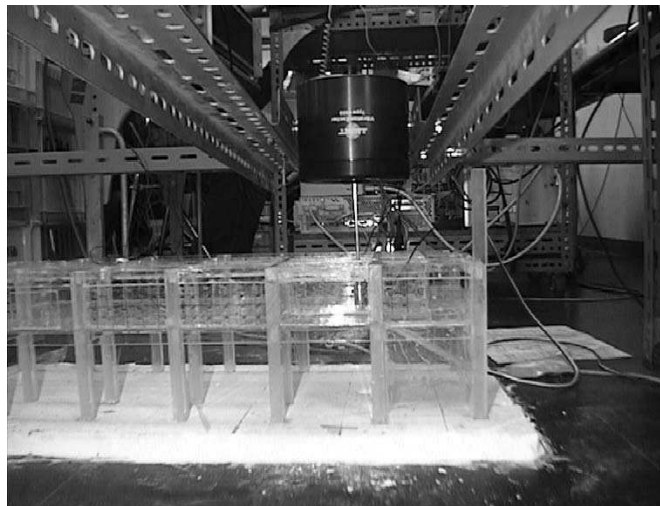


図 3.8 加振装置 (模型)

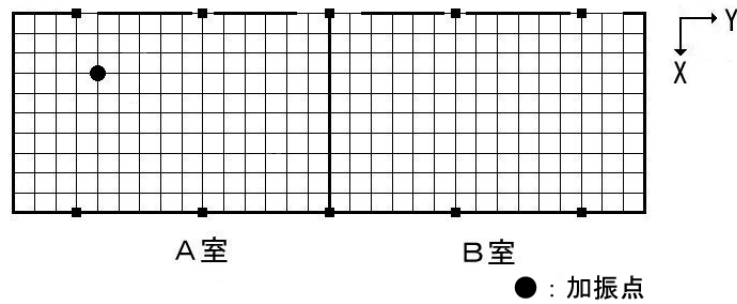


図 3.9 加振点と受振点 (模型)

### 3.3 模型検討のための実験

#### 3.3.1 接着の影響

アクリル材を使用した模型は、切り出したアクリル部材を接着し、組み立てている。アクリルボンド（接着剤）は、アクリル材を溶かして接着するタイプのものが多く、注意深く模型を作成すれば、隙間が生じるなどの接着不良は起こりにくいものと考えられる。しかしながら、アクリルボンドを使用することで、材料の物性値が変化し、振動伝搬に影響を及ぼす可能性がある。

アクリル材の接着による振動伝搬性状に及ぼす影響を確認するために、図 3.10 に示す厚さ 3 mm のアクリル板を、同図に示す割り込みを入れる前と（以下、接着接合なしとする）、割り込みを入れて接着した後（以下、接着接合ありとする）の振動伝搬性状を比較する。本実験では、アクリルボンドにアクリルダイン A を採用している。加振点は、同図に示す位置としている。受振点 95 は図 3.10 の右上の、受振点 19 は右下の位置となっている。

FRF の測定結果を図 3.11 に示す。いずれの受振点の結果も、接着接合ありの場合となしの場合が概ね一致しており、振動伝搬に対する接着の影響はあまり認められない。

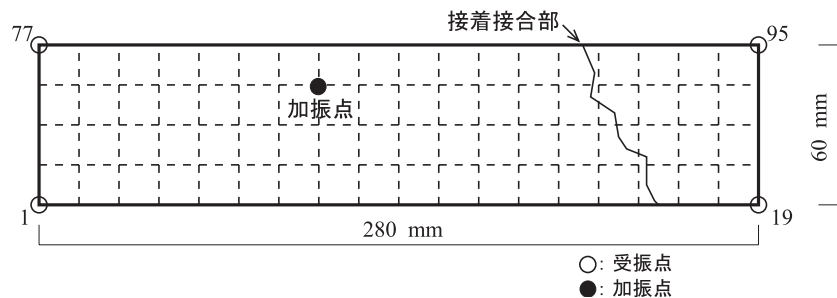


図 3.10 接着の影響の確認

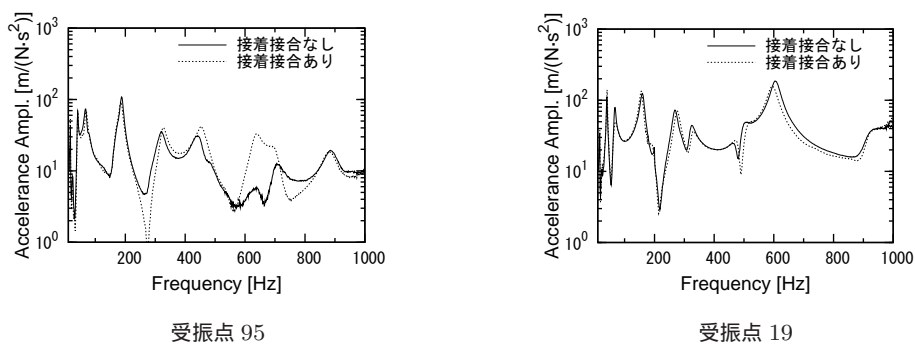


図 3.11 接着剤の影響の確認（実験結果）

### 3.3.2 基礎構造の検討

建築構造体内の振動伝搬に、基礎や地盤面が影響を及ぼすことが考えられる。模型を作製する際に、地盤面も模型化することが望ましいが、模型の規模が大きくなること、地盤面を含める場合、重力加速度の相似も考慮する必要があるなど、相似模型の作製が難しくなる。よって、本論文では、基礎や地盤面については簡略化を行うことにする。

地盤面の簡略化の影響を検討するため、表 3.6 に示すケースについて実験する。模型と基礎・地盤構造の概略は図 3.12、図 3.13 に示すとおりである。

模型名	基礎・地盤構造
ALC	ALC $\ell_t = 20\text{ mm}$ を基礎とする
ALC+ 木板	ALC 基礎の下に木板を接着
ALC+ コンクリート	ALC 基礎の下にコンクリート $\ell_t = 100\text{ mm}$ をモルタルで接着
ALC+ 床	ALC 基礎を RC 実構造体床に紙粘土で接着

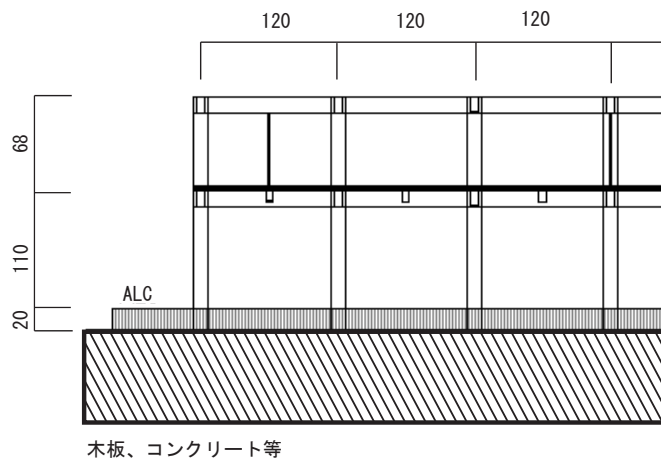
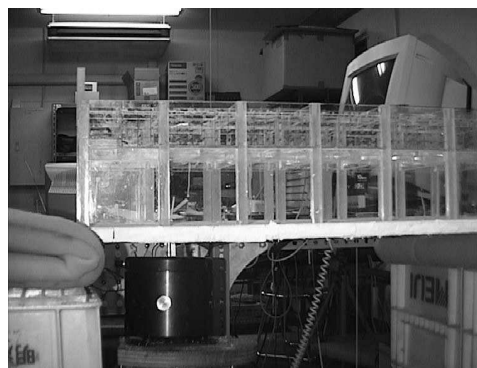


図 3.12 模型と基礎・地盤構造

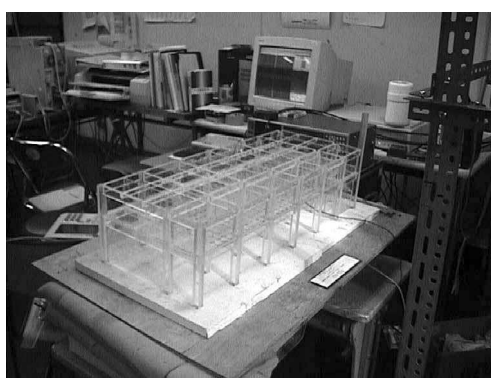
FRF の総和 (付録 A.2.1 参照) の実測値を図 3.14 に示す。表 3.6 に示す基礎・地盤構造についての実験値を比較する。「ALC+ 木板」を除けば、基礎・地盤構造によらず同様な傾向を示す結果が得られている。特に、模型の 620Hz (実構造体の 18Hz) 付近は、振動数、振幅 (Acceleration amplitude) 共に差が少ない傾向が認められる。

基礎・地盤構造の剛性が最も小さいのは「ALC のみ」、最も大きいのは「ALC+ 床」である。「ALC+ 木板」はその中間であると考えられるが、「ALC+ 木板」のみが他と異なる傾向となっている。このことから「ALC+ 木板」とした場合は、基礎・地盤構造の拘束や固有振動などが上部構造に影響を及ぼしているものと考えられる。

3.4 節で後述するよう、固有振動数の模型の相似比が 33 倍、Acceleration の振幅の相似比が  $2.5 \times 10^5$  倍とし、実構造体の実験結果と併せて比較したものを図 3.15 に示す。「ALC+ コンクリート」が最も実構造体の実験結果に近い値となる結果が得られている。



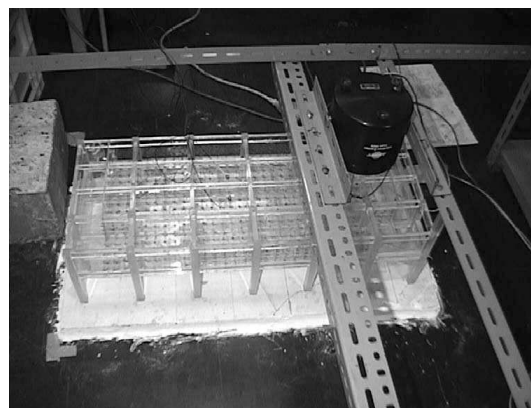
ALC



ALC+ 木板



ALC + コンクリート



ALC+ 床

図 3.13 模型の基礎構造

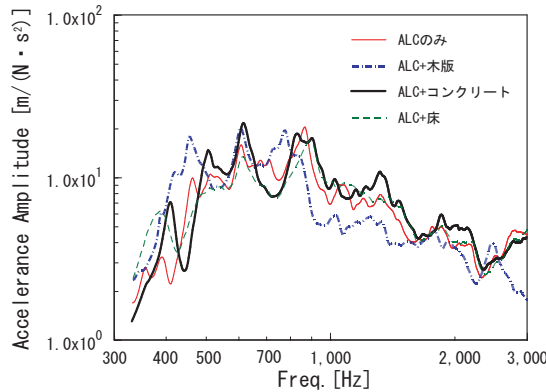


図 3.14 模型地盤・基礎構造の比較 (模型)

表 3.6 に示す基礎構造のうち、基礎構造を「ALC+ コンクリート」とした模型は、基礎構造の重量、剛性共に大きいことから、基礎構造の固有振動の影響を受けにくいと考えることができるため、以降このケースを模型の実験結果として取り扱う。

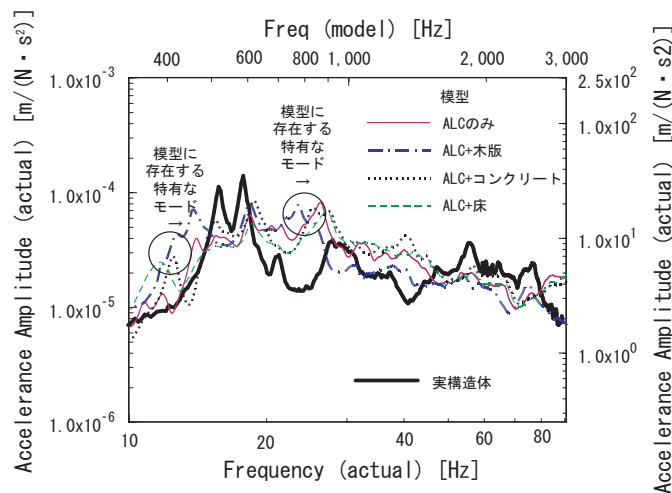


図 3.15 模型地盤・基礎構造の比較 (模型 + 実構造体)

### 3.4 実構造体との実験結果の比較

#### 3.4.1 固有振動数・減衰比

実構造体と模型のモーダルパラメータを比較し表 3.7 に示す。実構造体と模型の固有振動数実測値の倍率は 31 ~ 36 倍であり、相似則から求められる倍率である 32 ~ 35 倍と同程度の値である。

減衰比は、実構造体の 1 次、2 次の低次のモードについては、模型は実構造体のほぼ 2 倍である。より高次のモードについては、同程度の値である。

表 3.7 モーダルパラメータの比較

実構造体 の Mode 次数	実 構 造 体		模 型 (ALC+ コンクリート)		固有 振動 数の 倍率
	固有振動数 [Hz]	減衰比 [%]	固有振動数 [Hz]	減衰比 [%]	
-	-	-	412	3.3	-
1	16.0	2.0	499	4.7	31
2	18.0	1.5	618	2.8	34
3	21.3	1.8	-	-	-
-	-	-	830	3.3	-
-	-	-	909	4.3	-
4	27.9	2.5	-	-	-
5	30.7	3.3	1021	4.6	33
-	-	-	1150	4.2	-
6	37.4	5.3	1330	4.3	36

### 3.4.2 モードシェイプ

実構造体と模型のモードシェイプを図 3.16 に示す。実構造体、模型共に壁面と接する位置は振動の節となる傾向が認められる。また、モードシェイプの形状も同様である。

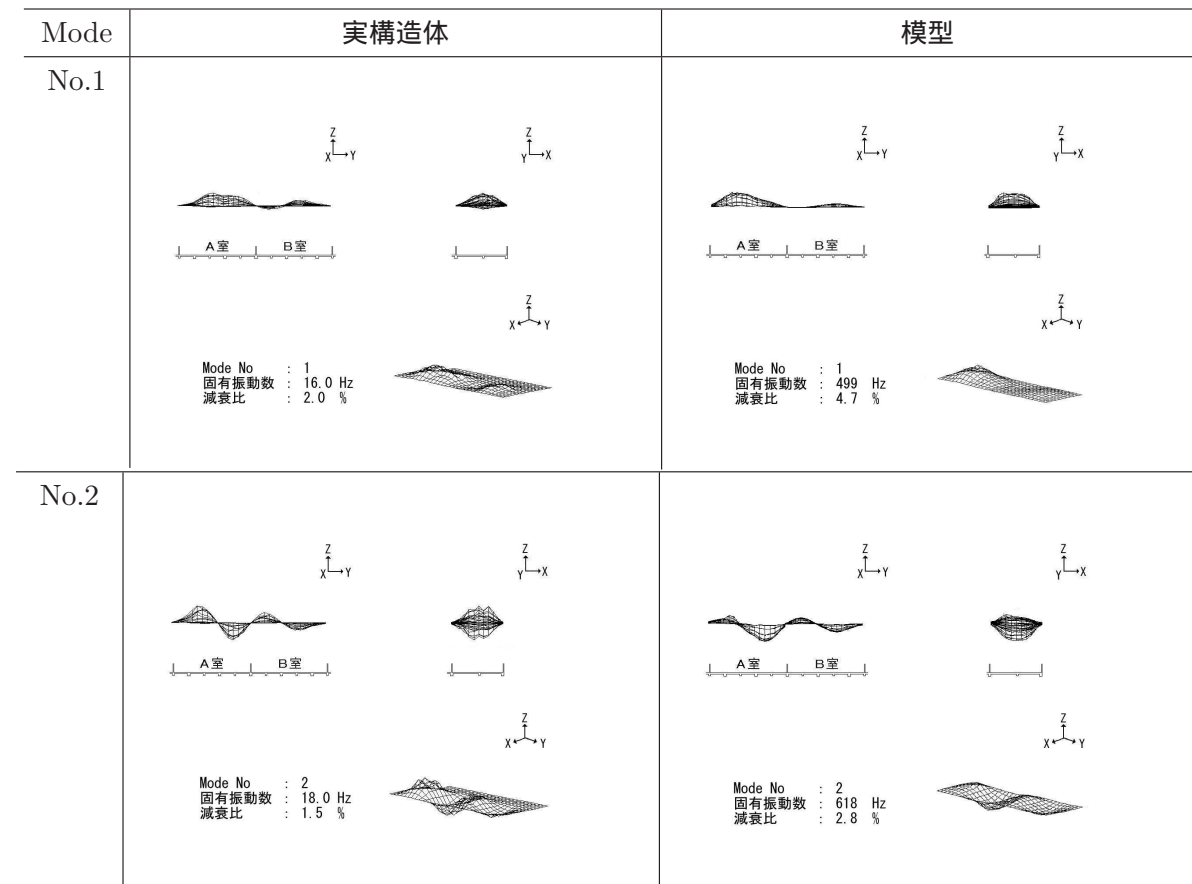


図 3.16 モードシェイプの比較



### 3.4.3 FRF (周波数応答関数)

実構造体と模型の相似則を確認するため、表 3.7 に示す相似比の値となるように、振動数を 33 倍、振幅を  $2.5 \times 10^5$  倍とした FRF を図 3.17 に示す。同図の減衰比補正前が、模型実験の結果である。

実物と模型の FRF を比較すると、振動数、振幅共に相似則が成立しており、概ね一致する結果が得られている。

実物の 16.0 Hz と 18.0 Hz (模型の 500 Hz と 620 Hz 付近) の低次のモードについて着目すると、模型の方が減衰比が大きい形状 (共振ピークが小さく、半値幅が広い) となっている。これは、内部減衰の相似が成立していないことが原因として考えられる。

実物の 13 Hz (模型の 410 Hz) , 27 Hz (模型の 890 Hz) 付近においては、模型に存在する特有なモードが認められる。実物の 13 Hz (模型の 410 Hz) 付近については、基礎構造の固有振動数の影響が現れているものと考えられる。また、27.9 Hz (模型の 890 Hz) については、建物の一部を模型化していることや、模型では開口部等を省略していることなどの影響が原因としてあげられる。

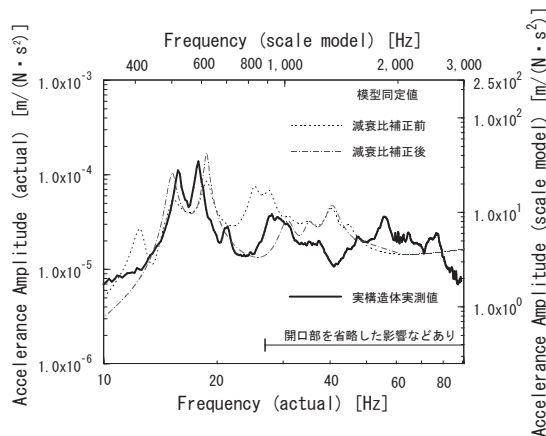


図 3.17 FRF の比較

### 3.4.4 減衰比の補正

内部減衰まで相似となる模型材料を採用することは容易ではないことから、相似則を緩和している。この相似則の緩和による影響が、実験結果に認められることから、これらを補正する方法を考える。

モーダル解析の概要については 2.2.2 項や付録 A.1 に示すとおりである。入力  $i$  点と応答  $j$  点の間の FRF (Accelerance) は式 (A.3) に示すとおり、

$$H_{a,ij}(\omega) = -\omega^2 \sum_{k=1}^N \left( \frac{R_{ij\kappa}}{(j\omega - \lambda_{\kappa})} + \frac{R_{ij\kappa}^*}{(j\omega - \lambda_{\kappa}^*)} \right)$$

と表される。 $\lambda_{\kappa}$  はモード  $\kappa$  の極 (Pole) であり、不減衰角振動数  $\omega_{n,\kappa}$ , 減衰比  $\zeta_{\kappa}$  を用い、

$$\lambda_{\kappa} = -\zeta_{\kappa}\omega_{n,\kappa} + j\omega_{n,\kappa}\sqrt{1 - \zeta_{\kappa}^2} \quad (3.20)$$

と表される。 $R_{ij\kappa}$  は、留数 (Residue) であり、モードシェイプ係数  $\psi$  と複素スケール係数  $d_{\kappa}$  を用い、

$$R_{ij\kappa} = \psi_{i\kappa}\psi_{j\kappa}/d_{\kappa} \quad (3.21)$$

と表される。また、複素スケール係数  $d_{\kappa}$  は、質量  $m$ , 減衰角振動数  $\omega_{d,\kappa}$  を用い、

$$1/d_{\kappa} = \frac{1}{2jm_{\kappa}\omega_{d,\kappa}} \quad (3.22)$$

となる。減衰角振動数  $\omega_{d,\kappa}$  と不減衰角振動数  $\omega_{n,\kappa}$  は

$$\omega_{d,\kappa} = \omega_{n,\kappa}\sqrt{1 - \zeta_{\kappa}^2} \quad (3.23)$$

なる関係がある。これらの式の減衰比  $\zeta_{\kappa}$  を補正することにより、FRF を求めることとする。

実構造体と模型の減衰比を比較すると、表 3.7 に示すように、低次のモード (1 次、2 次) については実構造体の 2 倍となっている。よって、これらの減衰比を 1/2 に補正する。また、412 Hz, 830 Hz, 909 Hz のモードは模型のみに認められるモードであるため省略する。このようにして補正した結果を図 3.17 に示す。

低次のモードについては、模型の減衰比を補正することで、固有振動数付近の振幅の値が補正前より実構造体の実験結果に近づいている。

### 3.4.5 振動伝搬性状

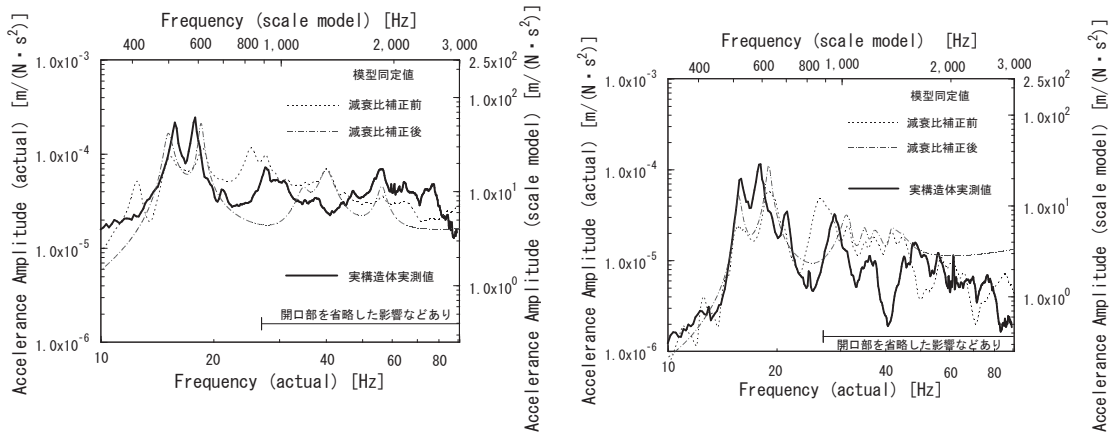
振動伝搬性状について検討するため、図 3.9 に示す A 室 (加振室) と B 室とに分けて FRF を総和したものを図 3.18 に示す。

模型実験のモーダルパラメータの同定結果は、模型実験においてローカルモードの影響が認められるなどの理由から、部屋毎に求めた同定値を用いている。

A 室と B 室の FRF の振幅比を表 3.8 に示す。減衰比補正前と補正後共に、実構造体と同様な傾向を示している。特に減衰比補正後の振幅比は実構造体と 1dB 以内の相違となっている。

実構造体と模型との FRF の振幅比を表 3.9 に示す。低次のモードについては、減衰比補正前は実構造体よりも 1dB~6dB 小さい値を示しているが、減衰比を補正することで、A 室、B 室共に 3dB 以内の差となっている。

従って、減衰比を補正した後のモデルは、実構造体における振動伝搬性状についてもほぼ再現できているものと考えられる。



A 室 (加振室)

B 室 (隣室)

図 3.18 FRF の総和

表 3.8 A 室 (加振室) と B 室 (隣室) の FRF の振幅比

Mode No.	振動数 [Hz]		A 室と B 室の振幅比 [dB]		
	実構造体	模型	実構造体	模型 減衰比補正前	模型 減衰比補正後
1	16.0	499	9	12	10
2	18.0	618	7	6	6
3	30.7	1021	4	7	3

表 3.9 実構造体との FRF の振幅比

Mode No.	振動数 [Hz]		実構造体との振幅比 [dB]			
	実構	模型	減衰比補正前		減衰比補正後	
			A 室	B 室	A 室	B 室
1	16.0	499	-7	-10	-2	-3
2	18.0	618	-6	-6	-1	0
3	30.7	1021	-1	-2	-1	0

### 3.5 第3章のまとめ

RC 実構造体の 1/50 縮尺アクリル模型による実験結果を実構造体と比較すると、

- 1/50 縮尺アクリル模型は振動数の相似比が 30 倍程度である。
- FRF の倍率は  $2.5 \times 10^5$  程度である。
- 重力加速度・ポアソン比の相似は成立していないがその影響は無視できる。
- 減衰の相似比は成立していないが、補正が可能である。
- 減衰比を補正することで、実構造体の FRF と一致した結果を得ることができる。
- 開口部などを省略している影響は、高次のモードに現れる。低次モードにはあまり影響を及ぼさない。
- 建物内の振動伝搬性状は、基礎地盤構造に影響されるが、適切な模型化がなされれば、実構造体内の振動伝搬性状を再現することが可能である。

これらの結果は、アクリル模型により、RC 実構造体の振動伝搬性状が再現できることを示すものである。

RC 実構造体と、実構造体模型の減衰比は異なる。一般的な RC 建築構造体の減衰比は 3% 程度であるとされている。模型実験の減衰比は、概ね 3% 程度であるため、一般的な建築構造体を想定する場合は、減衰比の補正が不要になる。

## 第4章

# プロトタイプ模型による構造部材追加と振動伝搬性状

前章では、模型実験により、RC 建築構造体の振動伝搬性状が再現できることを確認している。模型実験では、構造部材の追加が、実構造体と比較し容易に行うことができる。本章では、梁、柱、壁面などの構造部材追加による振動伝搬性状の変化に着目する。

建築構造体の振動伝搬には、間仕切壁のような耐震上有効ではない部材も関わっており、問題が複雑となっている。振動伝搬性状のメカニズムを解明するためには、まず、振動伝搬に関わる要因を減らし、検討する必要があると考える。そのために、構造を単純化した模型による実験を行うものとする。本論文では、この構造を単純化した模型を「プロトタイプ模型」と呼ぶことにする。

### 4.1 模型

プロトタイプ模型は、前章で検討を行った模型を単純化したものとし、寸法は表 4.1 に示す値を採用している。この寸法を実物換算すると、7m × 10m スパン相当であり、一般的な建物よりも長めの寸法となっている。表の数値は縮尺 1/50 と考える場合であるが、縮尺が 1/40 と考える場合は、5.6m × 8m スパンに相当する。長めのスパンとしていることから、面外振動が若干強調されているものと考えられる（詳細:付録 B.3, 付録 D）。

基礎・地盤構造については、それらを模型化することが望ましい。前章では、基礎地盤構造を簡略化し模型化している。しかしながら、基礎・地盤構造と上部構造体の接合には時間と労力が必要であり、どのモデルも同じ条件とすることは困難である。そのため、プロトタイプ模型では、どのモデルも同じ条件が容易に得られるように、模型の地盤・基礎構造を省略し、自由端の支持条件を採用し実験を行うものとする。

プロトタイプ模型を図 4.1 に示す。図 4.2, 図 4.3 に示す作製過程において実験を行っている。加振点を図 4.2 に示し、2 階の室名を図 4.4 に示す。

加振は 2 階床面である。図 4.4 に示すとおり、加振室を 201 室、隣室を 202 室、その隣の部

表 4.1 プロトタイプ模型の寸法

項目	実構造体		プロトタイプ 模型
	模型	実物換算 (1/50)	
スパン長	120 × 200	6,000 × 10,000	140 × 200
階高	*70	3,500	68
床厚	3	150	3
梁	*80 × *180	400 × 900	80 × 130
柱	150 × 150	750 × 750	120 × 130

注)\* は代表値を示す。

単位: mm

屋を 203 室とする。201 室の上階の部屋を、301 室とし、その隣室を 302 室、さらに隣の部屋を 303 室とする。1 階、4 階も同様に 101 室～103 室、401 室～403 室とする。

M1 は、2 階床面のみの場合である。M2 は、M1 に 1 階の柱と 2 階床面の周辺の梁を追加する場合である（室間の梁無）。M3 は、2 階床面の周辺の壁面を追加する場合である（室間の壁面無）。M4 は、201 室（加振室）と 202 室間の 2 階の梁を設置する場合である。M5 は、202 室と 203 室間の 2 階の梁を設置する場合である。M6 は、201 室（加振室）と 202 室間の 1 階の壁面を追加する場合である。M7 は、さらに 202 室と 203 室間の 1 階の壁面を追加する場合であり、1 層の完成型である。

M8 は、M7 に 2 階の柱と 3 階の床面と周辺の梁を追加する場合である（室間の梁無）。M9 は、202 室の短辺方向の壁面 1 面を除く周辺の壁面を追加する場合である。202 室の短辺方向 1 面については、測定用にピックアップを設置するための開口としている。M10 は、202 室と 203 室間の壁面と梁（3 階）を設置する場合である。M11 は、さらに、201 室と 203 室間の壁面と梁（3 階）を設置する場合であり、1 層～2 層の完成型である。M12 は、M11 に 3 層目と 4 層目を追加する場合であり、ピックアップ設置用の開口部である、301 室、303 室、402 室の短辺方向の 1 面を除く全ての壁面、床面、梁、柱を追加する場合であり、4 層 3 スパンのプロトタイプ模型の完成型である。完成型を図 4.1(写真) に示す。

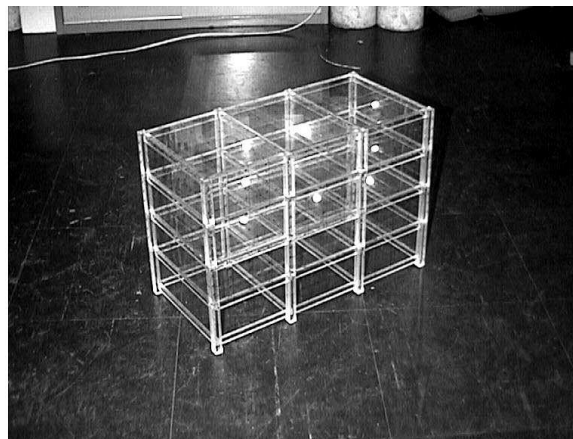


図 4.1 プロトタイプ模型 (写真)

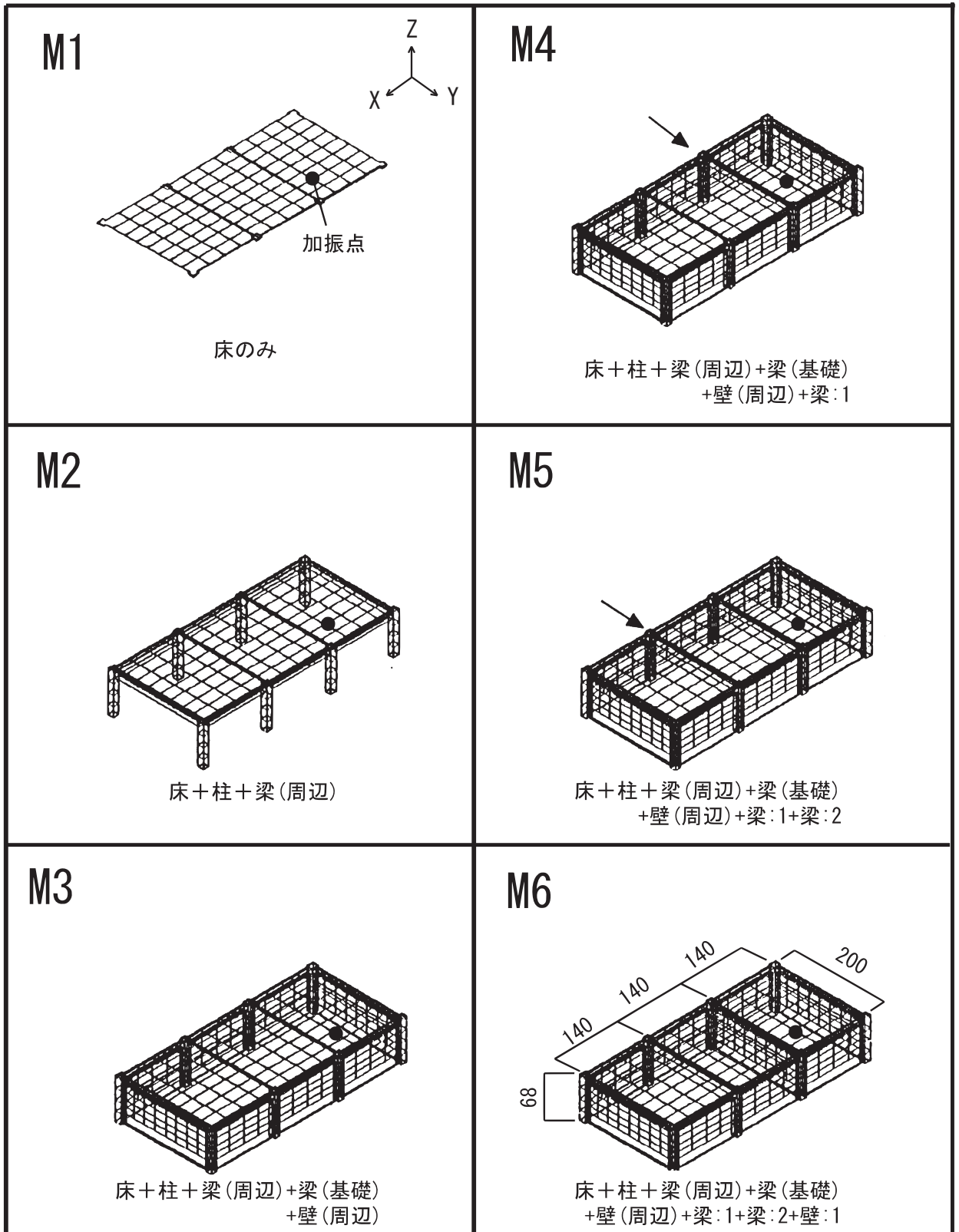


図 4.2 プロトタイプ模型

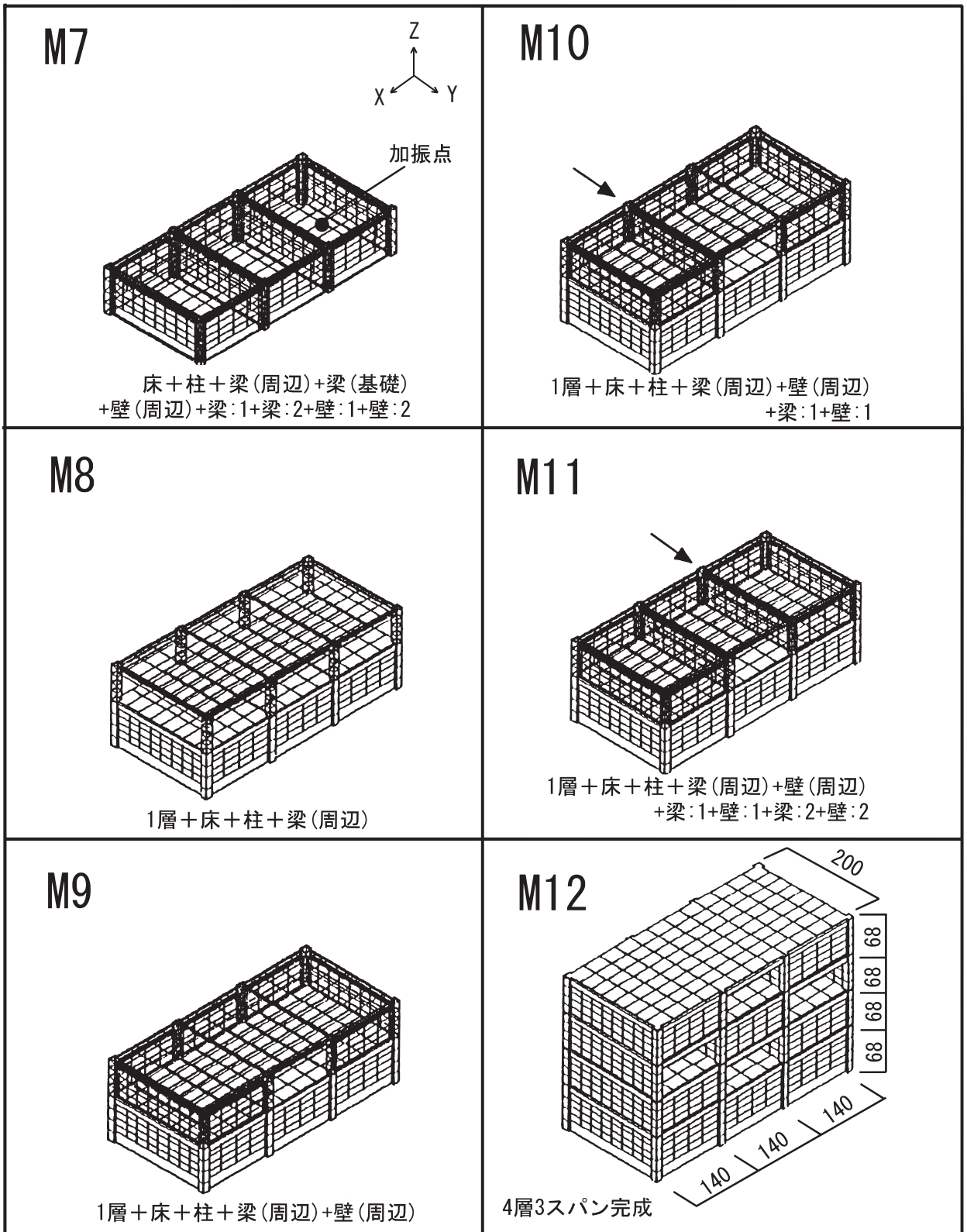


図 4.3 プロトタイプ模型



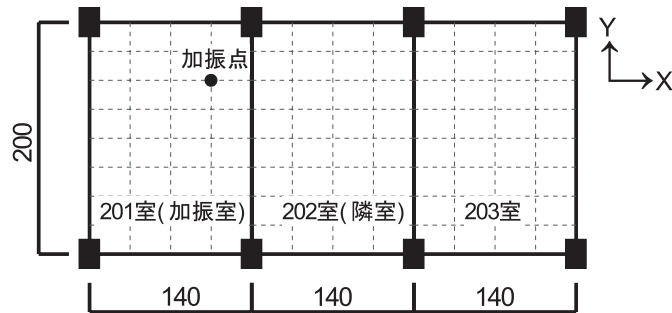


図 4.4 プロトタイプ模型(室名)

## 4.2 実験方法

### 4.2.1 モーダル解析

実験方法は、3.2 節に示す方法と同じ方法としている。加振点は、図 4.2, 図 4.4 に示す点としている。模型の支持方法は、模型をウレタン材の上に載せる方法を採用している。模型の支持系による固有振動数が、模型の 1 次固有振動数と比較して十分低くなるようにウレタン材の厚さ等を調整している。これにより、自由端の支持条件になっているものと考えられる。

支持系による振動の逸散減衰が考えられるが、模型の固有振動数と支持系の固有振動数が異なることから、この影響は無視できるものとする。

前章では、減衰比を補正することで、実構造体の振動伝搬性状を再現できることを示している。前々章で実験対象としている RC 実構造体は、減衰比が一般的なものと比較すると小さめの値となっている。実構造体模型の実験結果に着目すると、概ね 3% 程度であり、一般的な RC 構造体の値となっているため、減衰比の補正は行わないものとする。

### 4.2.2 1/3 Oct. バンドレベル

FRF により、構造部材追加による振動伝搬性状の把握が可能である。FRF では、固有振動数の変化や、振幅の変化を把握することができる。しかしながら、振動低減量を定量的に評価することは難しいため、1/3 オクターブバンド(以下 1/3 Oct. バンドとする)毎の評価も併せて行うことにする。

前項に示すモーダル解析の実験では FRF を測定している。この結果を用いて、1/3 Oct. バンドレベルを求めることにする。まず、各室の FRF のパワー平均を計算する。FRF のパワー平均を実物換算し、各バンドに 1kN のピンクノイズを加えた場合の振動応答を求め、これを 1/3 Oct. バンドレベルとしている。これにより、加振点に 1/3 Oct. バンド毎に 1kN のピンクノイズが加わった場合の加速度応答のパワー平均値を求めていることになる。

また、1/3 Oct. バンドレベルの 3Hz ~ 31.5Hz の帯域を合成したオーバーオールレベル(以下 O.A. レベルとする)についても求めている。

### 4.3 実験結果（各モデルの振動性状）

本節では、構造部材追加と振動伝搬性状について考察する前に、各モデルの振動性状について考察する。

#### 4.3.1 FRF（周波数応答関数）

2階床面全体のFRFのパワー平均値を図4.5に示す。2階下部の構造部材が追加されるM7までは、FRFが変化するが、それ以降はあまり変化しない傾向が認められている。M7以降は1次固有振動数が10Hz付近となっている。

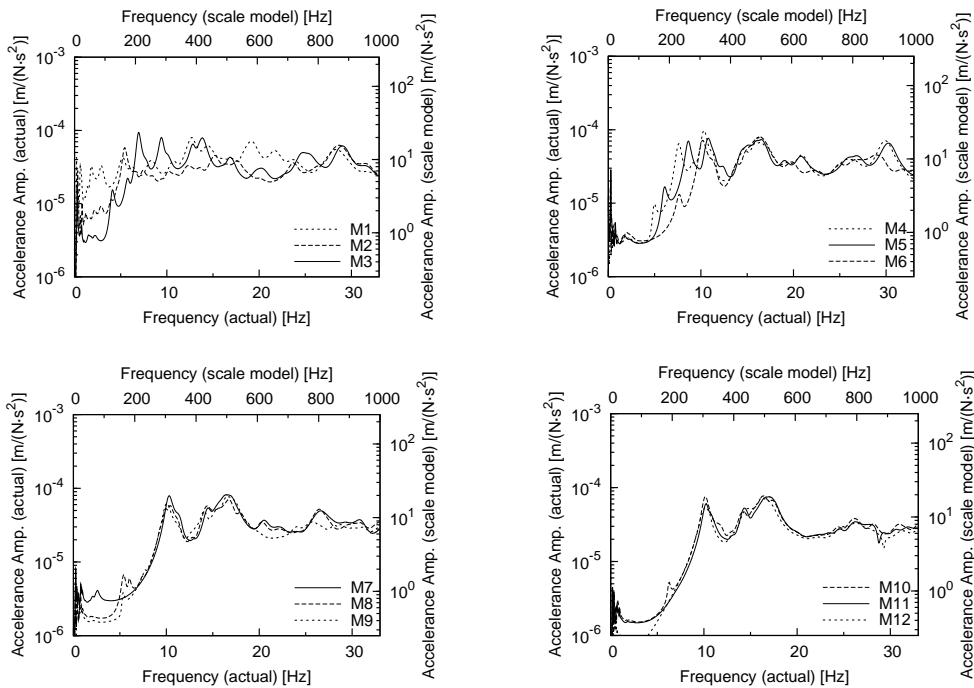


図 4.5 プロトタイプ模型 FRF(2階全床面)

#### 4.3.2 固有振動数・減衰比

固有振動数及び減衰比を表4.2～表4.13に示す。

減衰比に着目すると、M1, M2については5%を超える値も認められている。M3～M12については概ね2～3%前後の値であるが4%程度の値も認められている。この値は、一般的なRC建築構造体の減衰比と同程度の値である。

モードの確認指標である重要度（付録A.2.4参照）を同表に示す。重要度は、モードの振幅に関わる指標であり、各モデルのモードの重要度を合計すると100%となるような相対値で

ある。M1 は 1 次モード（実物換算 2.9 Hz）が最も大きく、M2～M5 は 2 次モードが、M6～M10 までは 300 Hz（実物換算 10 Hz）付近の値が最も大きくなっている。M11, M12 ついては 430 Hz～550 Hz（実物換算 14 Hz～18 Hz）付近の値が最も大きい。M11 と M12 については 300 Hz（実物換算 10 Hz）付近に 2 つのモードが近接して存在している。M10 から M11 への 2 階の壁面追加により、300 Hz（実物換算 10 Hz）のモードが 2 つに分離されていると考えられる。M11 ではこの 2 つのモードの和が 29.7% に、M12 では 27.2% となり、大きい数値となる。よって、M6 と、2 階床面下部構造が完成した M7 以降は 300 Hz（実物換算 10 Hz）付近の重要度が最も大きくなっている。

表 4.2 固有振動数・減衰比 (M1)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
88	2.9	7.6	27.4
155	5.2	7.6	19.1
188	6.3	8.1	13.6
250	8.3	5.9	8.3
320	10.7	4.5	4.9
380	12.7	3.7	6.8
580	19.3	3.4	4.4
653	21.8	3.3	3.6
710	23.7	3.3	3.1
858	28.6	3.5	3.3
1021	34.0	2.7	2.4
1139	38.0	2.6	3.1

表 4.3 固有振動数・減衰比 (M2)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
86	2.9	8.3	12.5
161	5.4	5.8	31.6
228	7.6	10.1	22.0
305	10.2	5.5	9.1
370	12.3	4.9	7.7
454	15.1	3.3	5.1
528	17.6	3.6	4.5
713	23.8	2.9	2.5
874	29.1	2.8	3.4
1053	35.1	2.6	1.7

表 4.4 固有振動数・減衰比 (M3)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
122	4.1	4.9	14.3
207	6.9	2.9	31.2
282	9.4	2.9	19.1
415	13.8	2.9	14.7
508	16.9	2.7	5.8
616	20.5	3.2	4.4
737	24.6	2.6	4.3
878	29.3	2.4	4.2
1044	34.8	2.3	2.0

表 4.5 固有振動数・減衰比 (M4)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
148	4.9	4.2	7.8
227	7.6	3.4	30.7
309	10.3	3.2	30.2
509	17.0	3.3	15.0
627	20.9	3.3	9.7
895	29.8	2.6	6.6

表 4.6 固有振動数・減衰比 (M5)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
181	6.0	4.2	11.4
258	8.6	3.5	27.7
324	10.8	3.3	21.5
497	16.6	3.7	14.9
570	19.0	2.8	6.9
621	20.7	3.4	8.4
810	27.0	2.6	4.7
914	30.5	2.2	4.5

表 4.7 固有振動数・減衰比 (M6)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
231	7.7	3.9	9.1
303	10.1	3.4	32.9
503	16.8	4.6	30.0
594	19.8	3.1	10.9
749	25.0	2.5	6.0
881	29.4	2.5	6.6
1016	33.9	2.7	4.4

表 4.8 固有振動数・減衰比 (M7)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
307	10.2	3.5	27.0
432	14.4	3.5	11.5
470	15.7	3.3	12.9
500	16.7	3.6	15.8
518	17.3	4.1	16.9
614	20.5	2.8	6.8
928	30.9	2.5	4.1
1026	34.2	3.3	3.3
1172	39.1	2.5	1.7

表 4.9 固有振動数・減衰比 (M8)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
176	5.9	3.2	9.6
219	7.3	3.0	4.9
279	9.3	3.0	11.1
306	10.2	4.3	21.4
428	14.3	3.2	12.2
505	16.8	3.6	15.9
531	17.7	3.0	10.8
603	20.1	2.9	5.3
820	27.3	2.5	3.7
929	31.0	2.5	2.8
1022	34.1	2.7	2.4

表 4.10 固有振動数・減衰比 (M9)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
159	5.3	2.5	6.8
229	7.6	2.5	5.7
302	10.1	4.1	26.7
422	14.1	2.6	19.2
456	15.2	3.5	20.9
545	18.2	2.3	11.0
1005	33.5	2.1	5.0
1109	37.0	3.1	4.8

表 4.11 固有振動数・減衰比 (M10)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
184	6.1	2.7	8.4
307	10.2	3.3	30.6
534	17.8	2.6	17.2
734	24.5	3.1	7.1
846	28.2	2.7	9.0
935	31.2	2.6	6.2
1011	33.7	2.7	7.7
1101	36.7	2.7	7.4
1181	39.4	3.0	6.4

表 4.12 固有振動数・減衰比 (M11)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
307	10.2	3.2	15.4
321	10.7	3.8	14.3
434	14.5	4.2	20.6
486	16.2	4.8	18.5
526	17.5	3.3	11.6
836	27.9	2.7	6.6
920	30.7	3.4	6.1
988	32.9	3.7	6.9

表 4.13 固有振動数・減衰比 (M12)

固有振動数 [Hz]		減衰比 [%]	重要度 [%]
模型	実物換算		
304	10.1	4.0	19.4
322	10.7	2.3	7.8
483	16.1	4.5	24.1
518	17.3	4.3	16.0
687	22.9	3.2	4.6
747	24.9	3.4	6.2
823	27.4	3.0	9.3
945	31.5	2.9	6.7
1002	33.4	2.7	5.8

### 4.3.3 モードシェイプ

プロトタイプモデルのモードシェイプを図 4.6～図 4.17 に示す。

M1(図 4.6) は、自由端の支持による、長方形板の固有振動であり、M2(図 4.7) は、柱・梁を追加する場合である。実際の構造体は、柱位置が固定されているが、モデルは自由支持であるため、実際の建築構造体の挙動を示すものではない。M3 以降は、柱位置の変位が小さくなっており、実際の構造体の振動性状を示すものであると考えられる。

M3(図 4.8) は、2 階床面周辺には梁があるが、室間の梁（201 室と 202 室の間の梁など）が無い場合であり、1 次モード（実物換算 4.1 Hz）はフロア全体が半波長となるモードとなっている。3 次モードまでは、形状が整っている。

M4(図 4.9) は、201 室と 202 室間の梁を追加する場合であり、1 次モード（実物換算 4.9 Hz）は、梁の拘束の影響を受けた形状になっている。一方 3 次（実物換算 10.3 Hz）については、室の境界が振動の節となっているため、梁の拘束の影響はあまり認められていない。

M5(図 4.10) は、さらに 202 室と 203 室間の梁を追加する場合である。3 次（実物換算 10.8 Hz）以下のモードシェイプは、室間の梁が無い M3 と同様となっている。

M6(図 4.11) は、101 室と 102 室間の壁面を追加する場合である。壁面を追加した位置に着目すると、この位置は必ず振動の節となっている。壁面による拘束は大きく、フロア全体が半波長となるモード（M3 の 1 次モード）が認められなくなっている。

M7(図 4.12) は、さらに 102 室と 103 室間の壁面を追加する場合である。M6 同様に、壁面の位置は振動の節となる結果となっている。壁面の拘束の影響により、M3 の 1 次（実物換算 4.1 Hz）や 2 次（実物換算 6.9 Hz）のようなモードは認められなくなっている。

M8(図 4.13) は 2 階の柱、3 階の床とその周辺の梁を追加する場合である。1 次（実物換算 5.9 Hz）～ 3 次（実物換算 9.3 Hz）については、3 階床面のモードとなっている。この振動数においては、2 階床面はあまり振動しない結果となっている。4 次（実物換算 10.2 Hz）については、2 階床面の振動が、M7 の 1 次（実物換算 10.2 Hz）と同様であり、固有振動数も概ね同じ値となっている。

M9(図 4.14) は 2 階の周辺に壁面を追加する場合である。M8 のモードシェイプと比較すると、両者同様な傾向を示しているが、3 階床面の周辺の拘束が強くなり、この位置が完全に振動の節となる傾向が認められている。

M10(図 4.15)、M11(図 4.16) については、3 階床面の振動性状の変化は、2 階の下部構造部材を追加するケース（M3～M7）と同様な傾向が認められている。

M12(図 4.17) は、4 層 3 スパンプロトタイプモデルの完成型であり、床振動は、304 Hz（実物換算 10.1 Hz）が基本モードとなっている。823 Hz（実物換算 27.4 Hz）以上になると壁面にもモードが認められるようになっている。

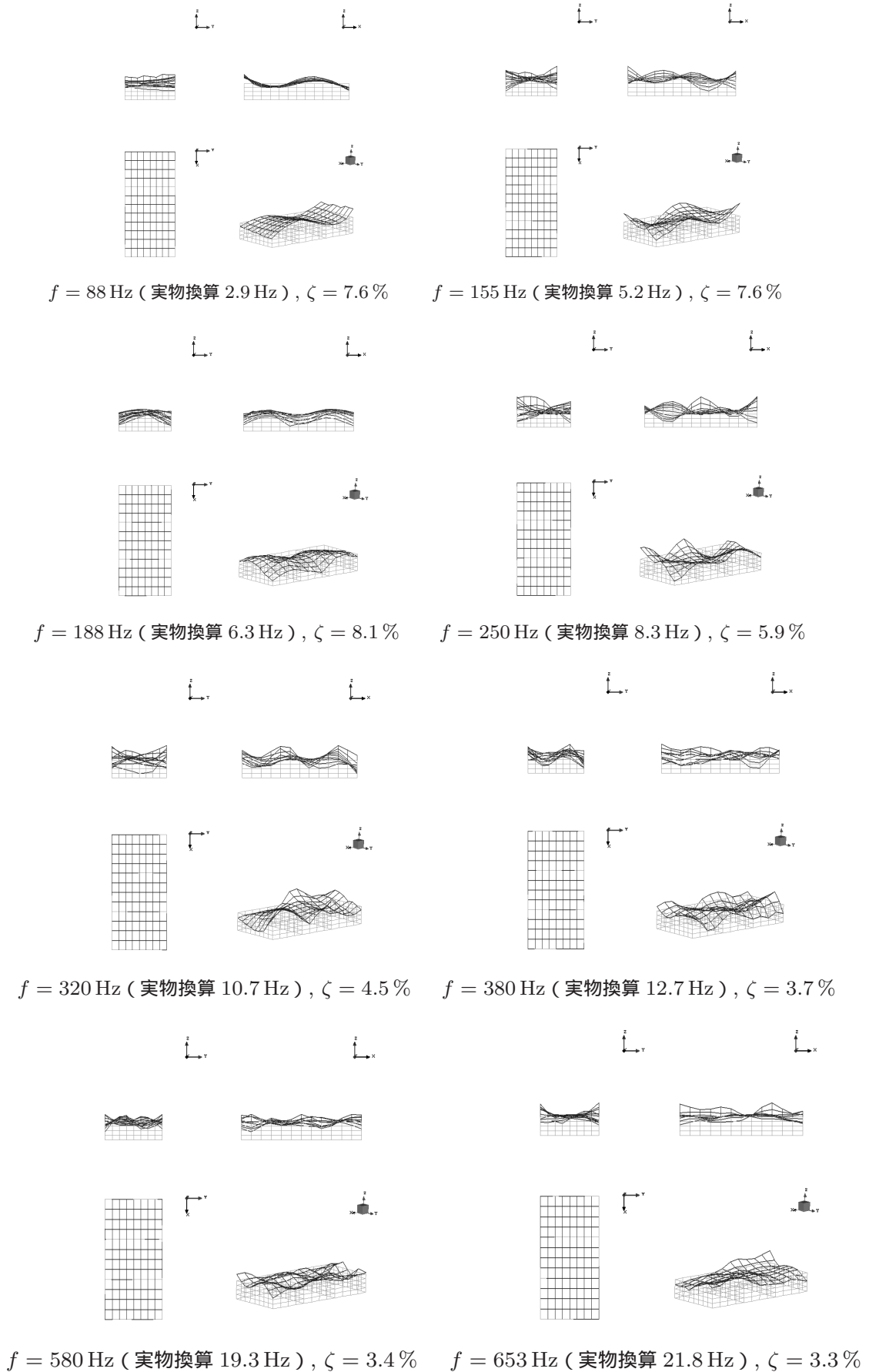


図 4.6 プロトタイプ模型 M1

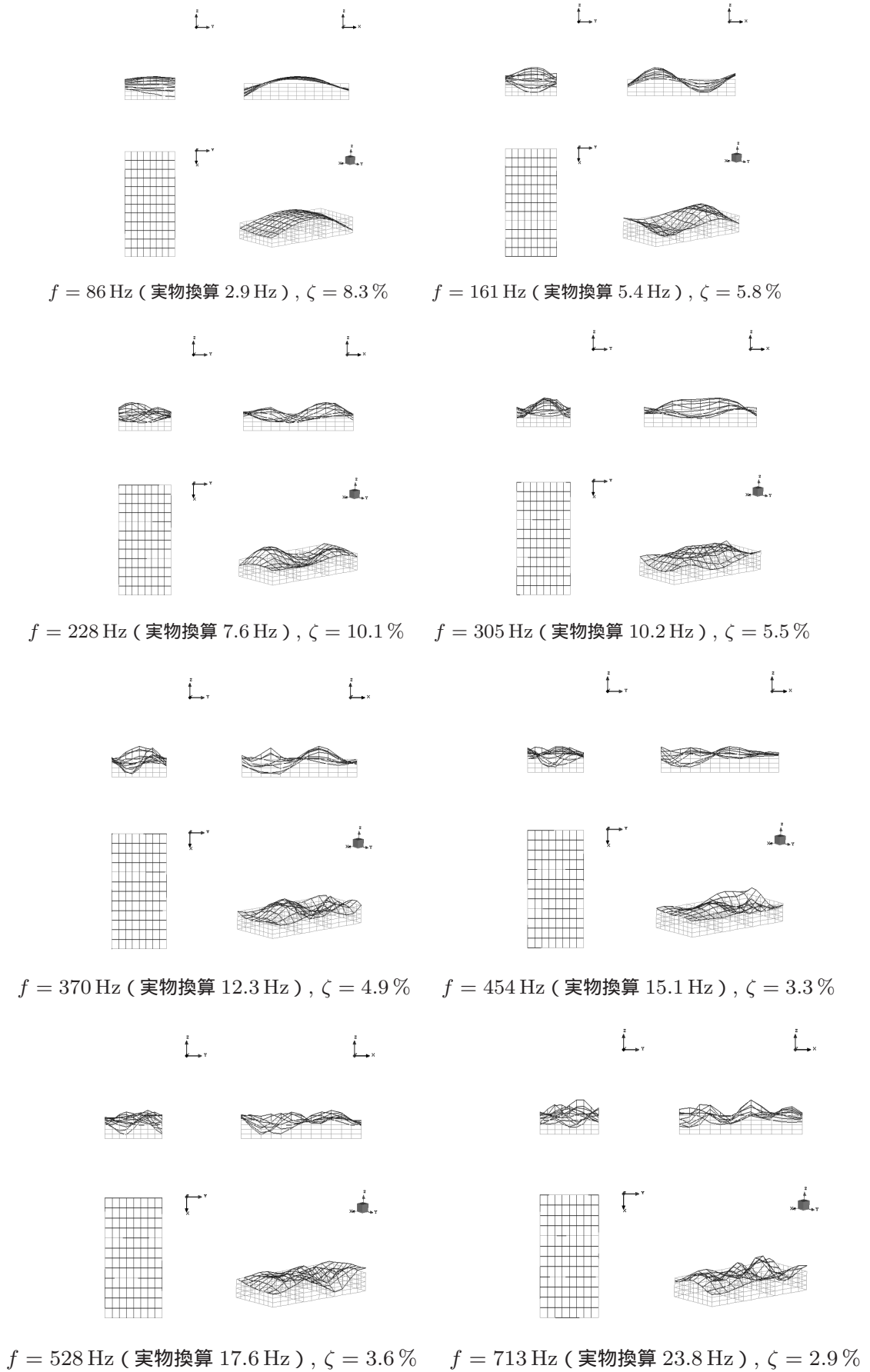


図 4.7 プロトタイプ模型 M2

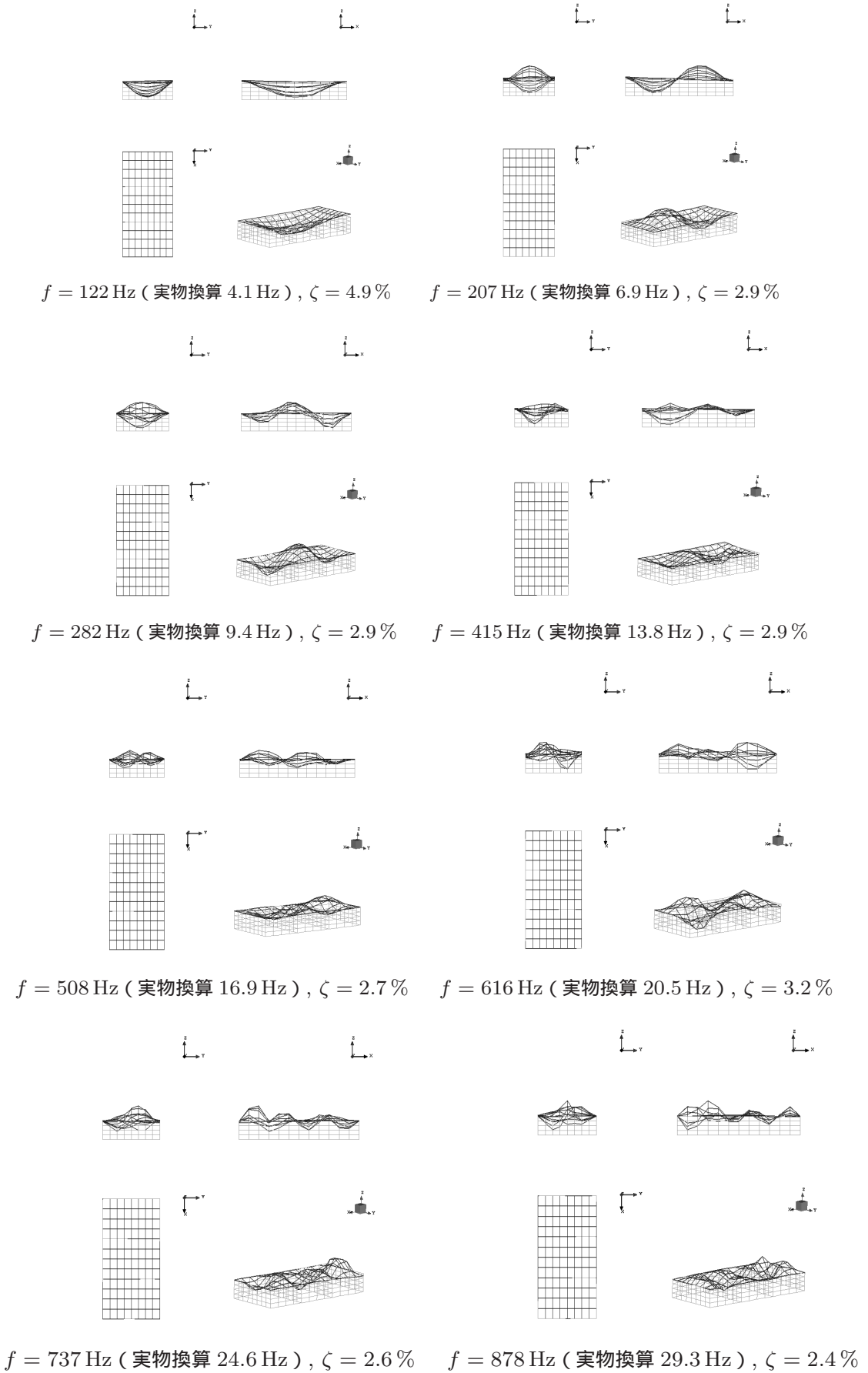


図 4.8 プロトタイプ模型 M3



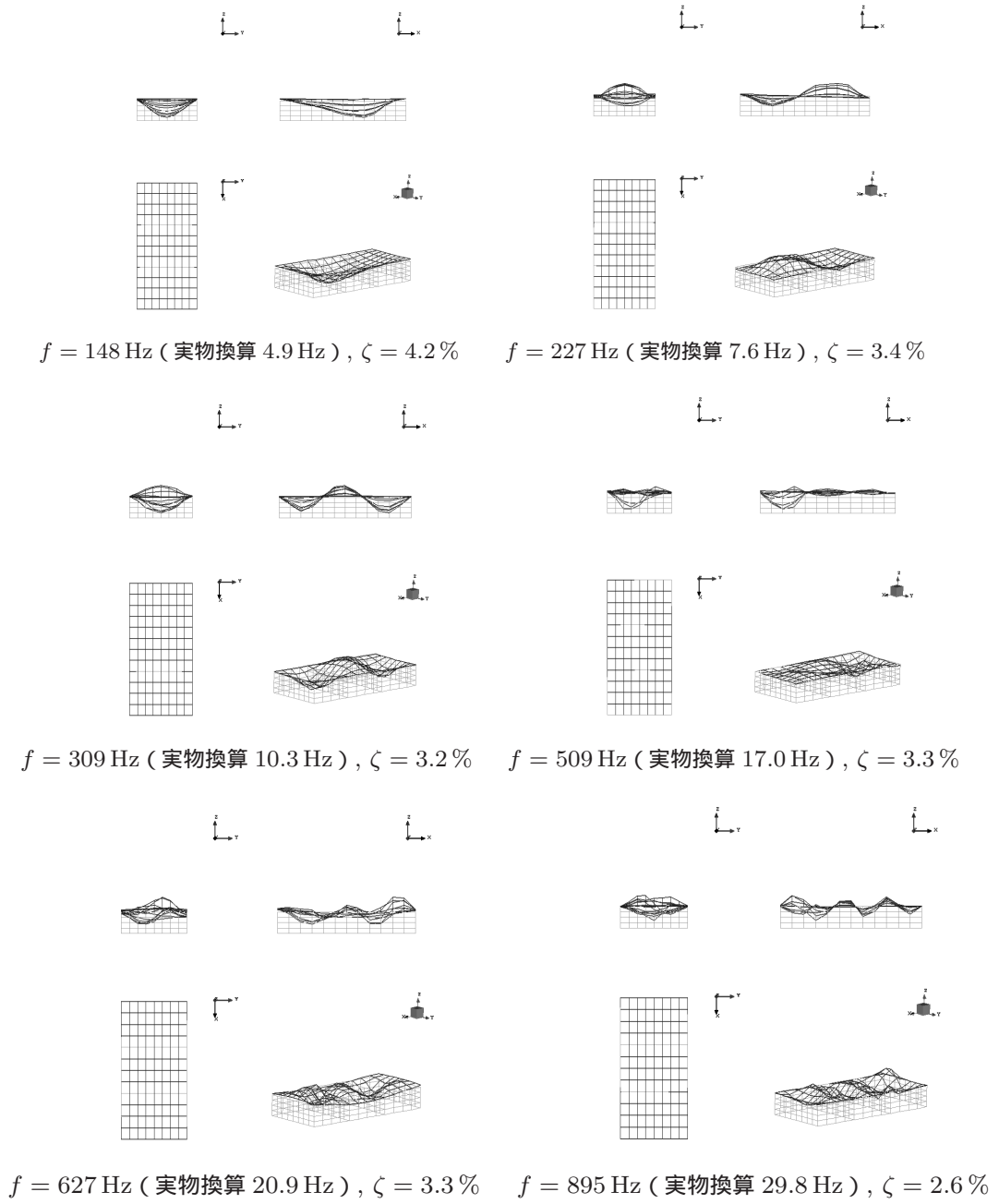


図 4.9 プロトタイプ模型 M4

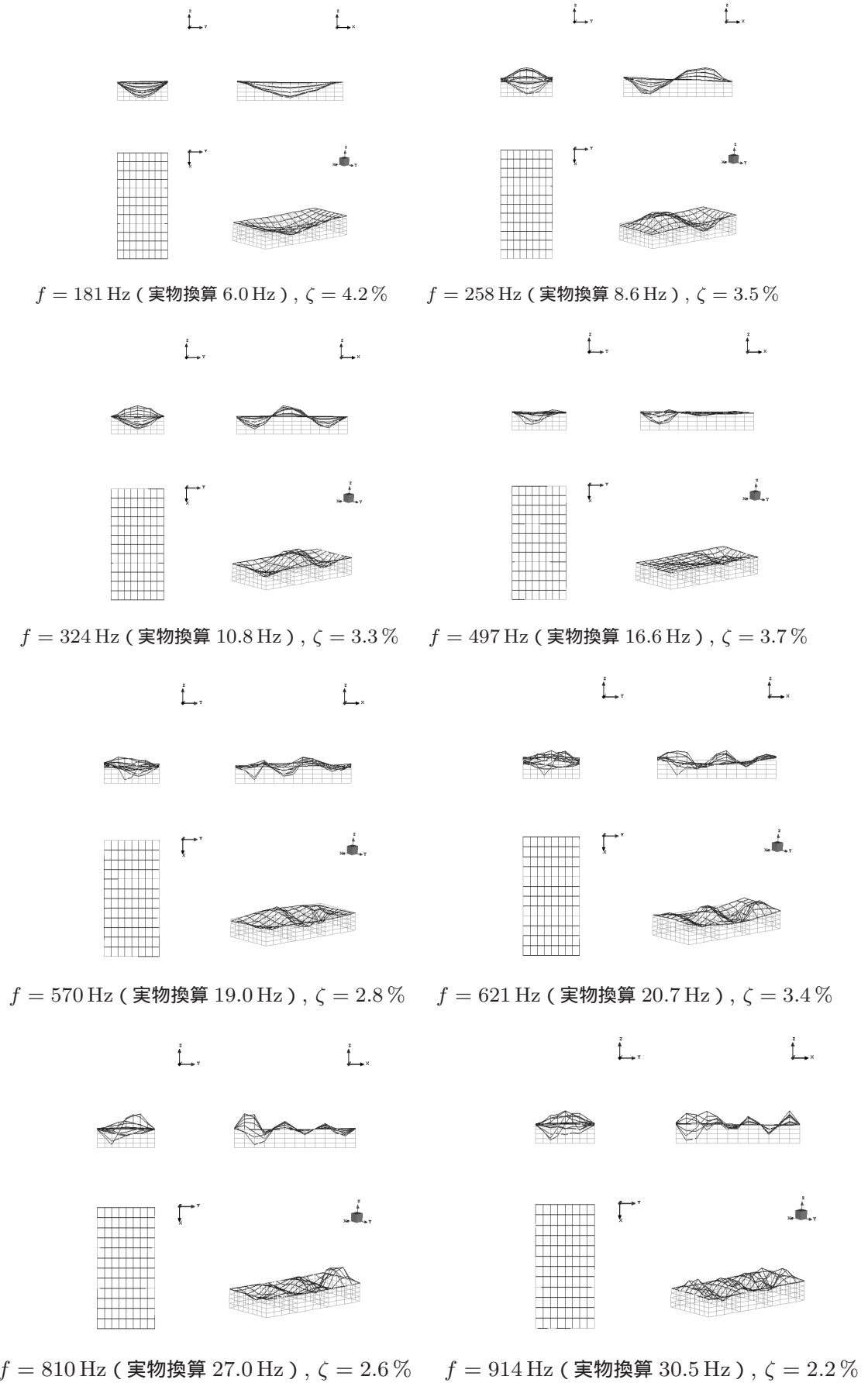


図 4.10 プロトタイプ模型 M5

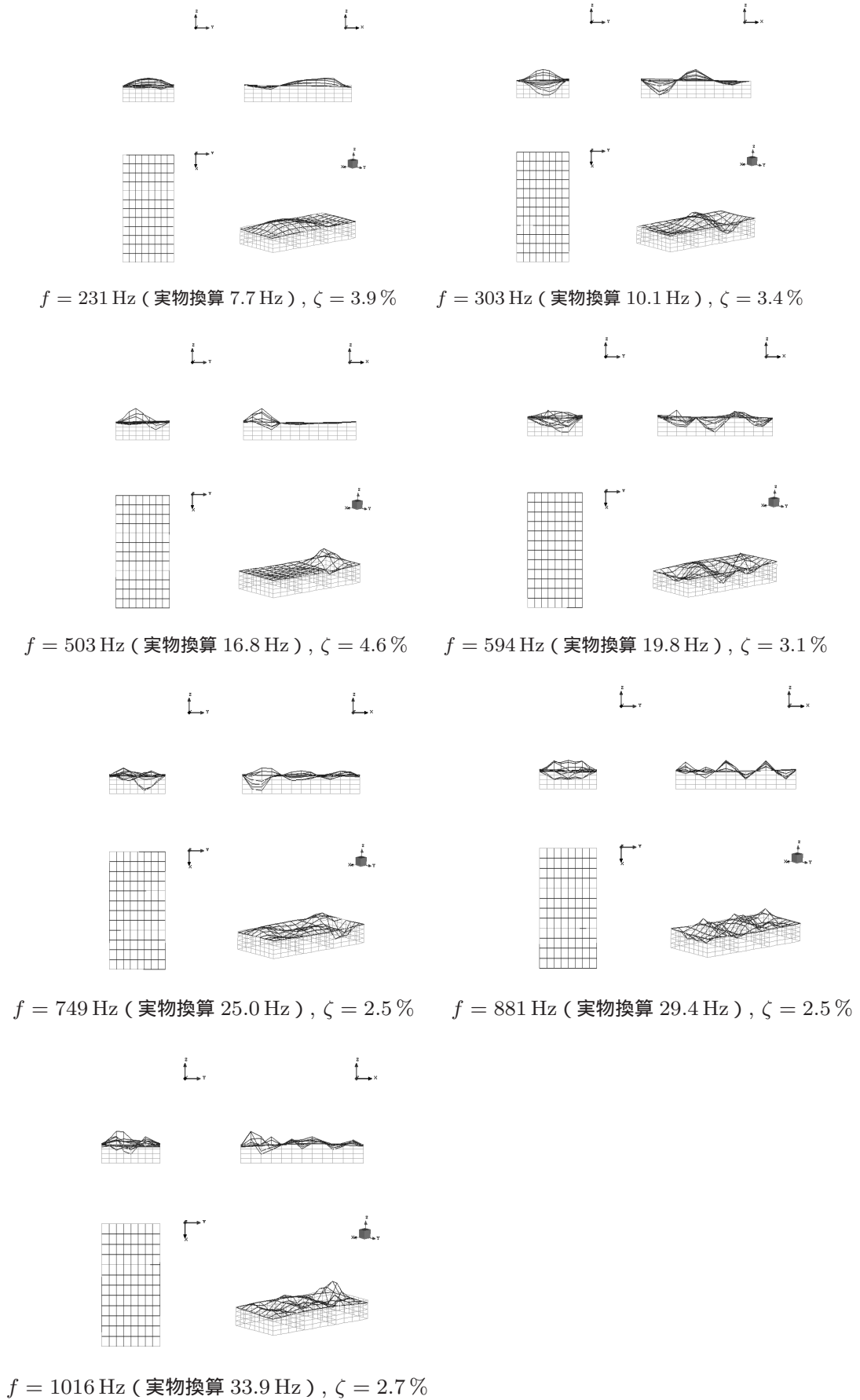


図 4.11 プロトタイプ模型 M6

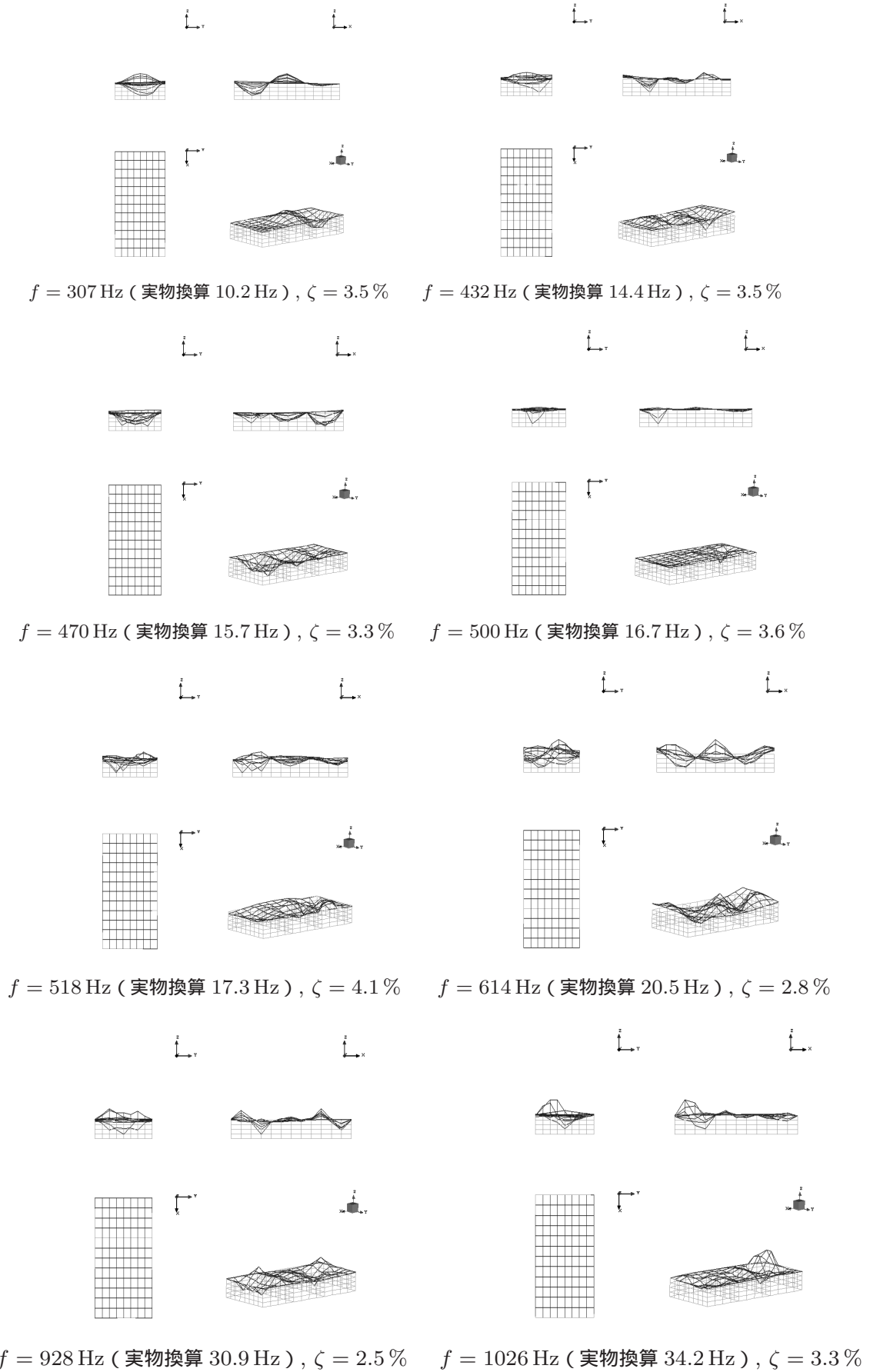


図 4.12 プロトタイプ模型 M7

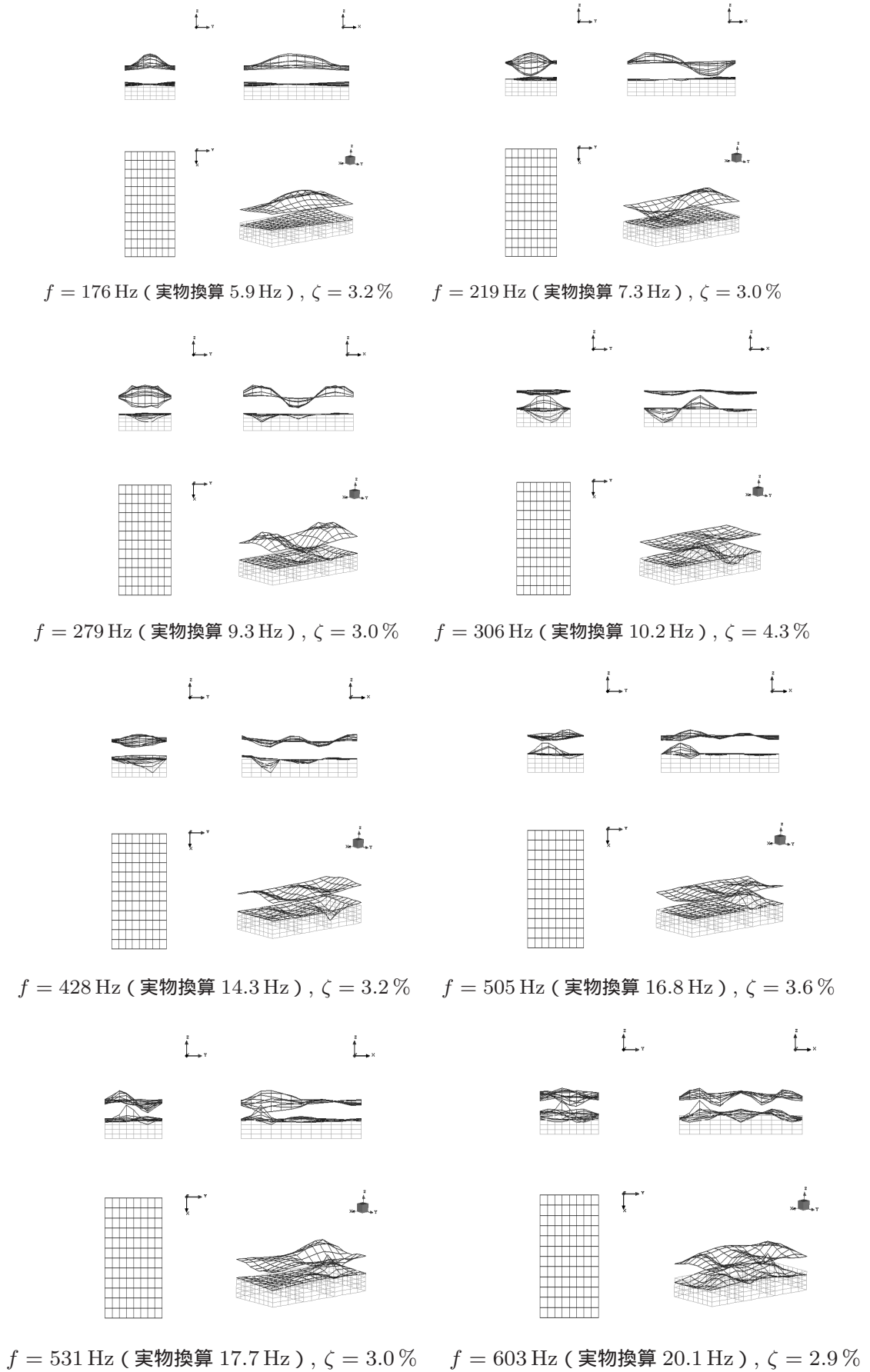


図 4.13 プロトタイプ模型 M8

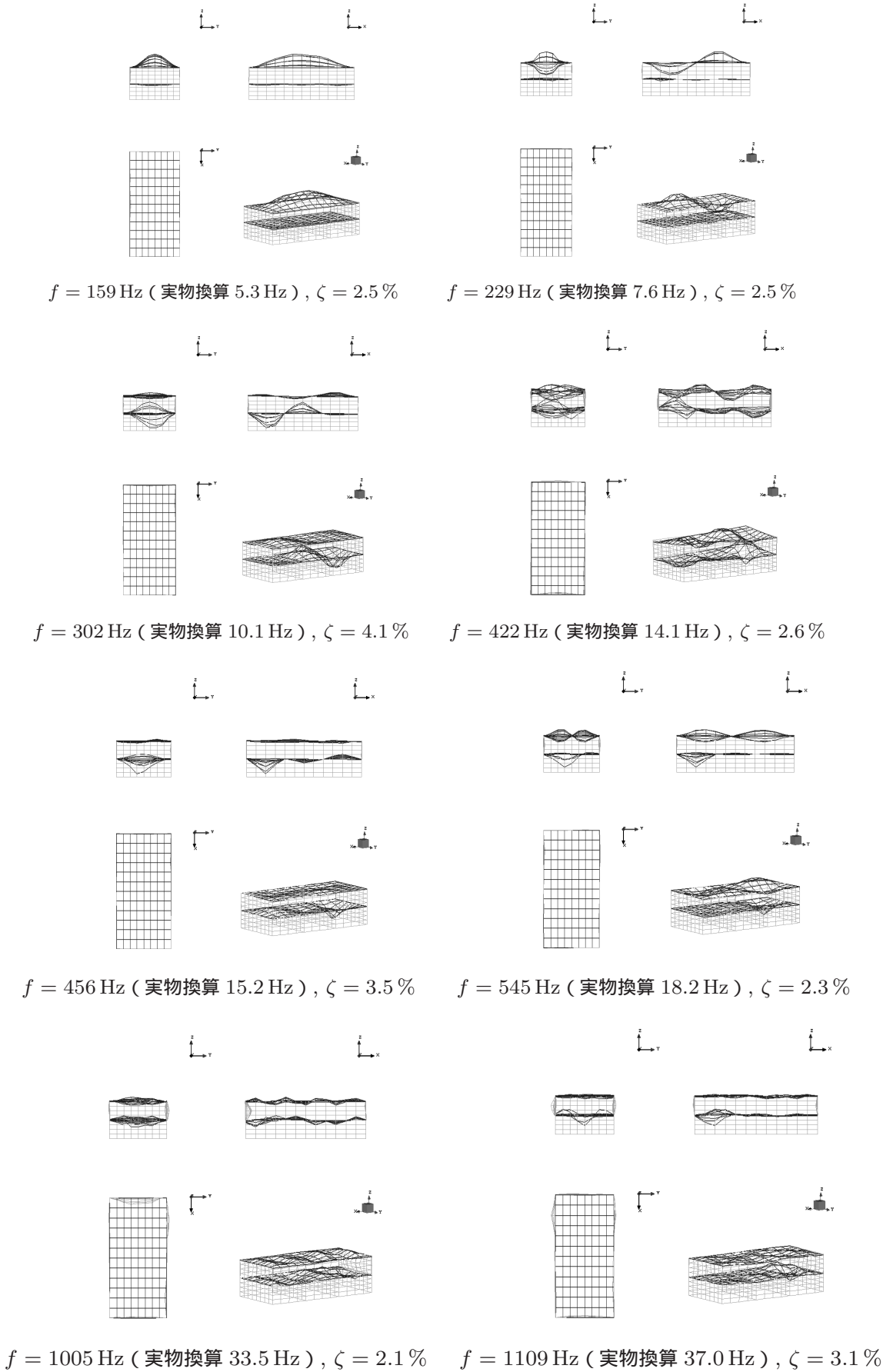


図 4.14 プロトタイプ模型 M9

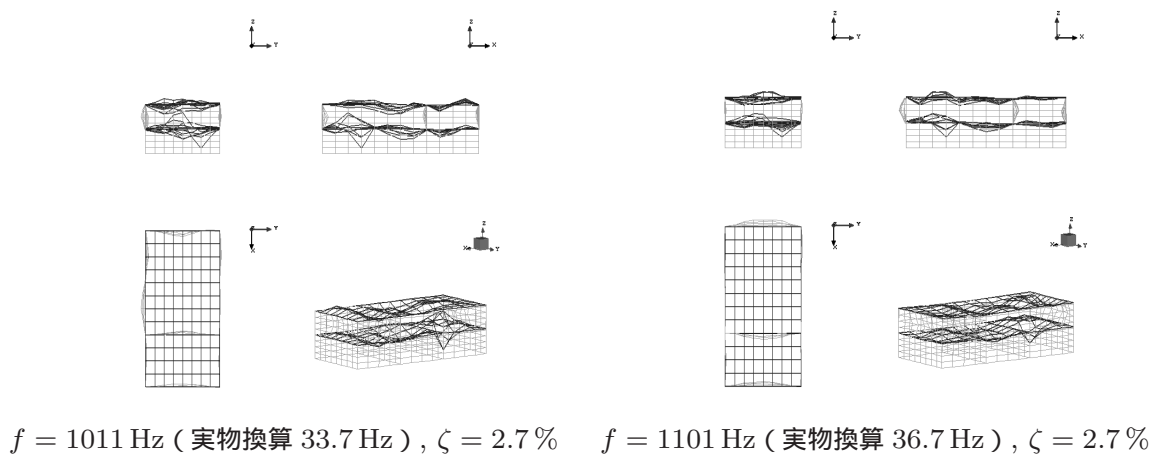
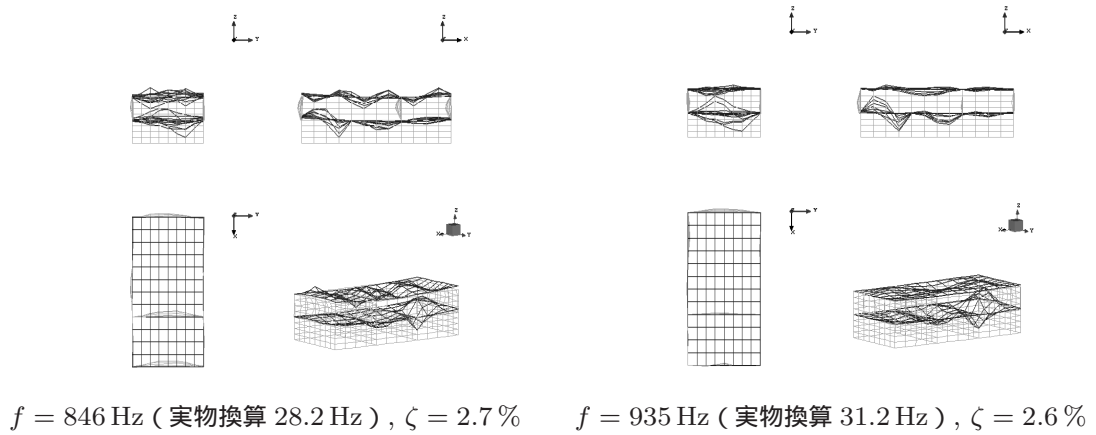
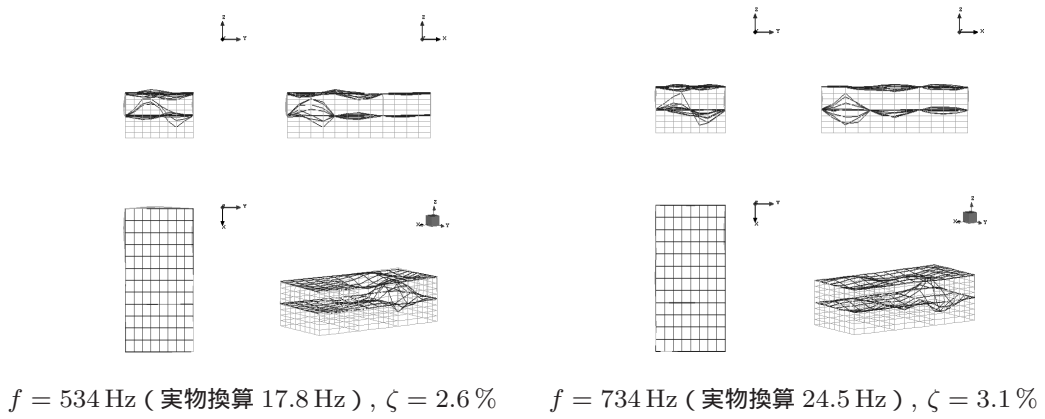
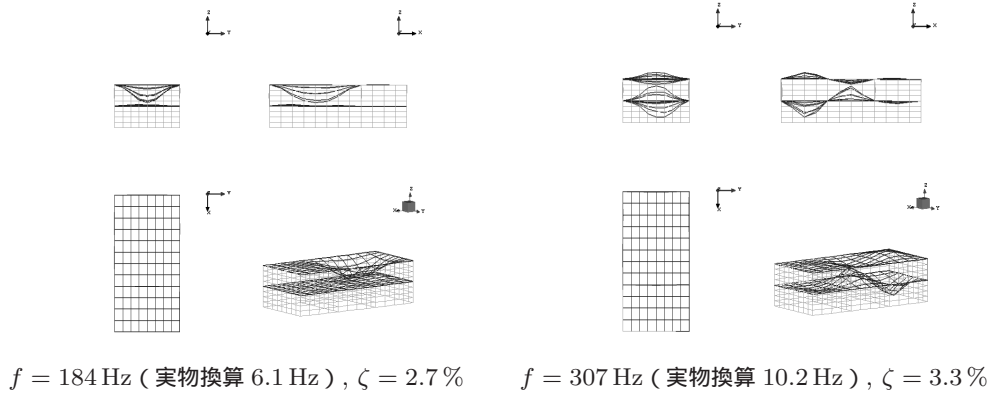


図 4.15 プロトタイプ模型 M10

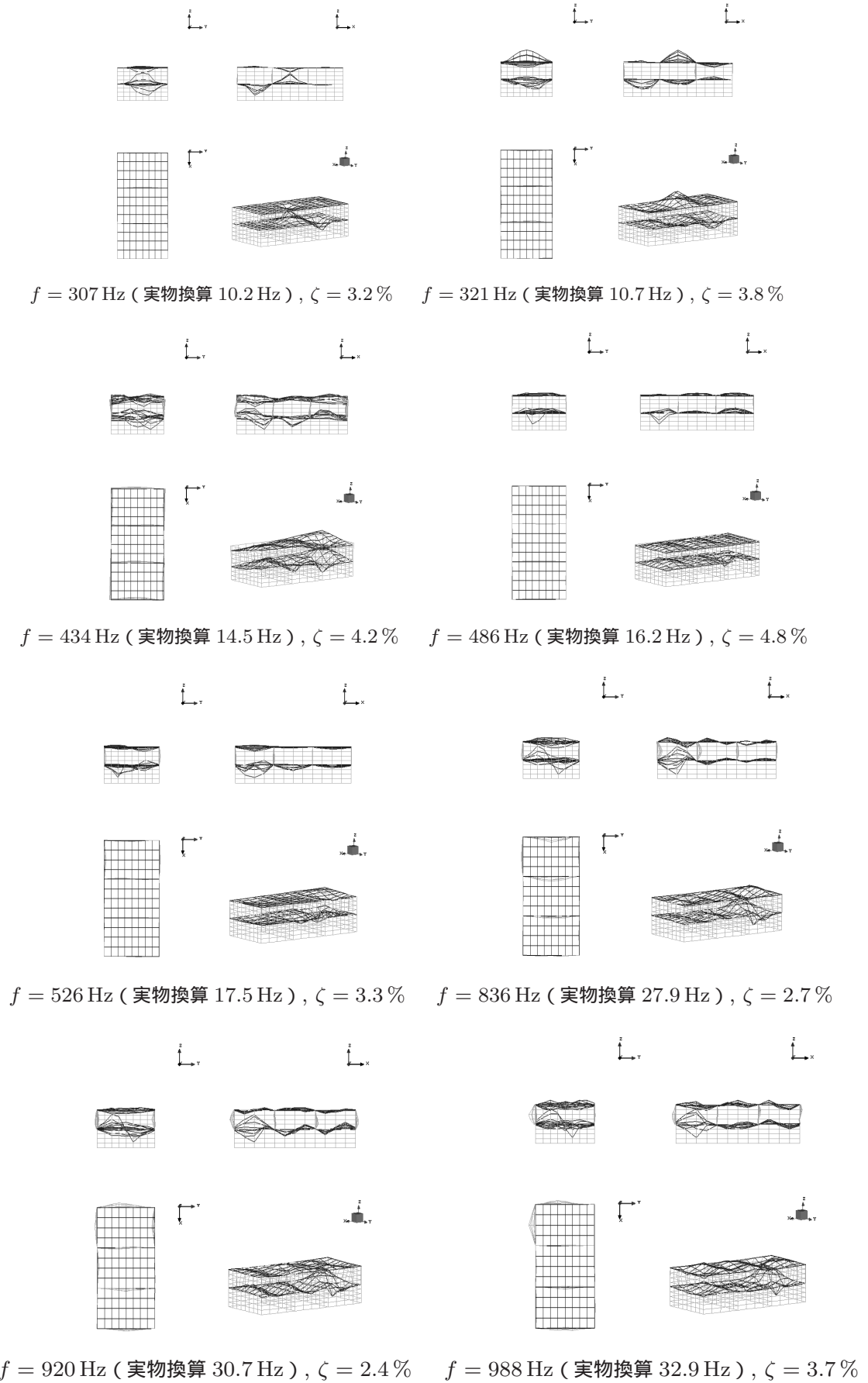
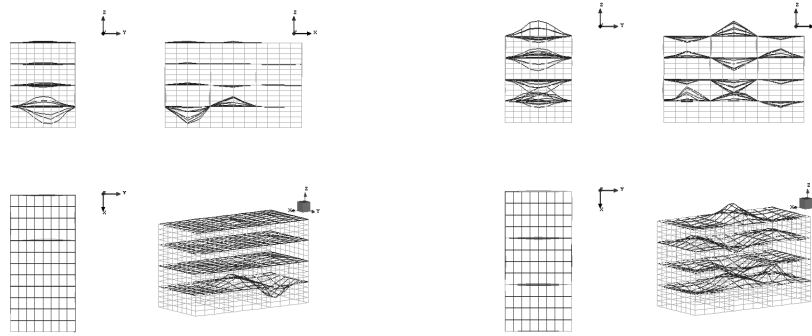
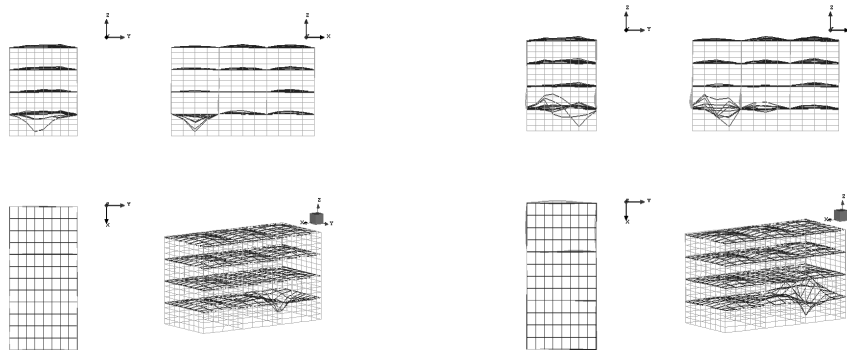


図 4.16 プロトタイプ模型 M11

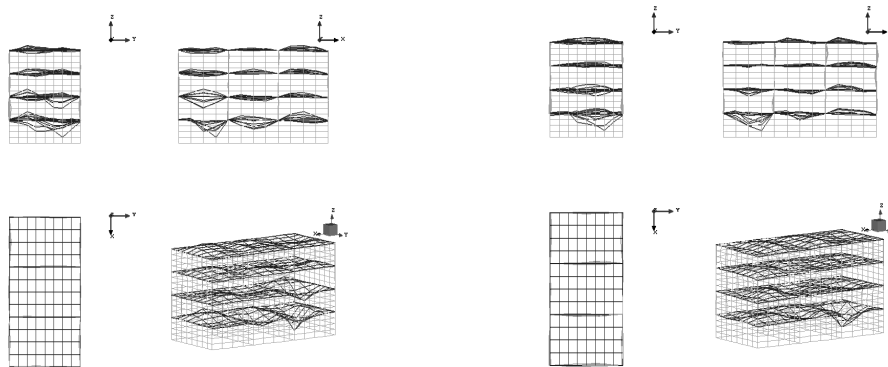




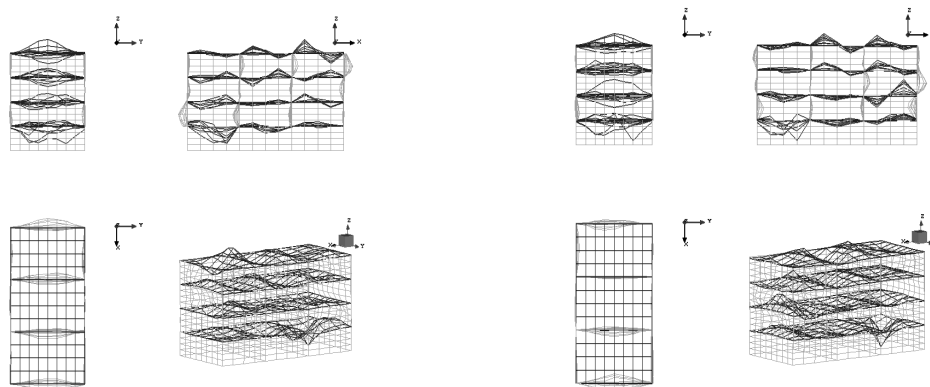
$f = 304 \text{ Hz}$  (実物換算  $10.1 \text{ Hz}$ ),  $\zeta = 4.0\%$        $f = 322 \text{ Hz}$  (実物換算  $10.7 \text{ Hz}$ ),  $\zeta = 2.3\%$



$f = 483 \text{ Hz}$  (実物換算  $16.1 \text{ Hz}$ ),  $\zeta = 4.5\%$        $f = 518 \text{ Hz}$  (実物換算  $17.3 \text{ Hz}$ ),  $\zeta = 4.3\%$



$f = 687 \text{ Hz}$  (実物換算  $22.9 \text{ Hz}$ ),  $\zeta = 3.2\%$        $f = 747 \text{ Hz}$  (実物換算  $24.9 \text{ Hz}$ ),  $\zeta = 3.4\%$



$f = 823 \text{ Hz}$  (実物換算  $27.4 \text{ Hz}$ ),  $\zeta = 3.0\%$        $f = 945 \text{ Hz}$  (実物換算  $31.5 \text{ Hz}$ ),  $\zeta = 2.9\%$

図 4.17 プロトタイプ模型 M12

## 4.3.4 1/3 Oct. バンドレベル

1/3 Oct. バンドレベルを図 4.18, 図 4.19 に示す。振動数は、実物換算した振動数を示している。

2 階の 1/3 Oct. バンドレベルに着目すると、2 階の下部の構造部材追加に伴い、8Hz 以下の振動数域の振動が小さくなっていく傾向が認められている。201 室（加振室）については、構造部材追加に伴う振動の大きさの変化があまり認められない傾向を示している。203 室については、構造部材追加に伴い、振動の大きさが小さくなる傾向が認められている。

3 階の 1/3 Oct. バンドレベルに着目すると、2 階同様、3 階についても、下部の構造部材追加に伴い 8Hz 以下の振動数域の振動が小さくなる傾向が認められている。

構造部材の追加による振動の大きさを評価するために、最大バンドレベルを表 4.14 に示す。表 4.2～表 4.13 に示すとおり、構造部材の追加により固有振動数が変化する。1/3 Oct. バンド分析を行うと、1 つの帯域に入る共振の数がモデルにより異なるため、定量的な評価が難しい点がある。よって、3 Hz～31.5 Hz の帯域を合成した O.A. レベル（オーバーオールレベル）も表 4.14 に併せて示す。

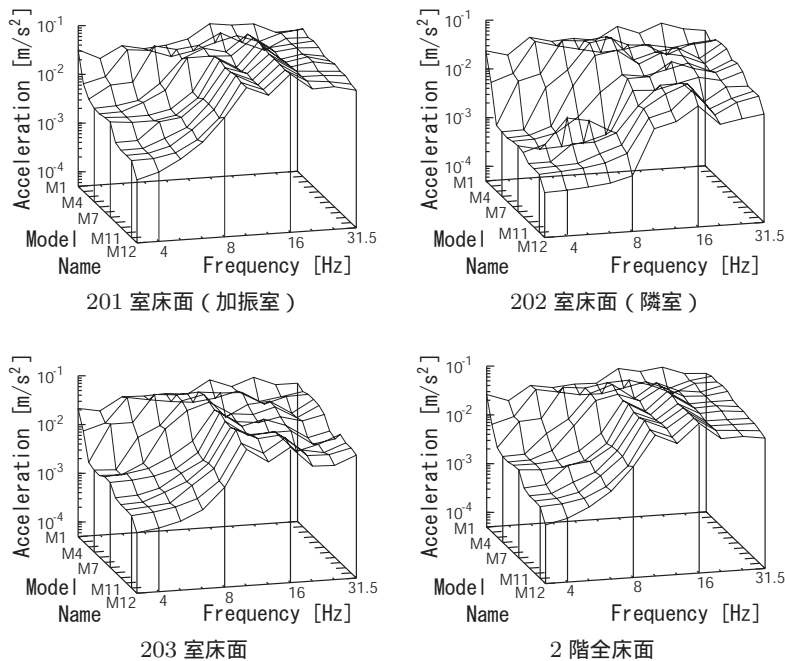


図 4.18 1/3 Oct. バンドレベル

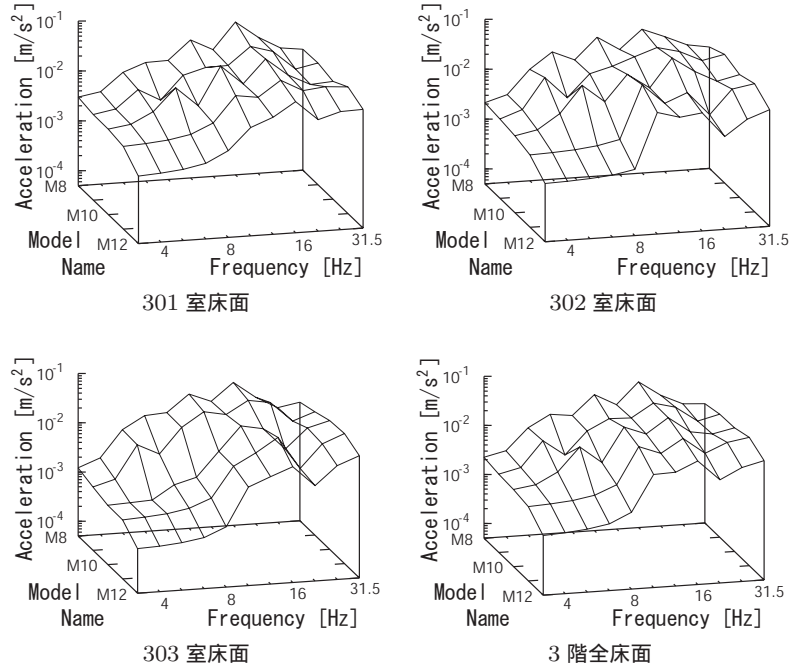


図 4.19 1/3 Oct. バンドレベル

表 4.14 床振動の O.A. レベル等

単位：dB

	O.A.(3~31.5Hz) レベル				最大バンドレベル			
	2F-All	201	202	203	2F-All	201	202	203
M1	83.4	84.6	82.7	82.5	75.3	77.1	74.6	73.8
M2	80.9	82.6	80.6	79.1	71.7	74.6	72.0	72.2
M3	82.5	83.5	82.5	81.4	74.7	77.6	74.7	74.3
M4	82.1	83.5	80.6	80.7	75.7	78.5	75.5	75.9
M5	81.7	83.8	79.9	79.0	75.6	79.0	74.5	73.0
M6	80.7	83.5	77.7	74.5	75.8	79.6	73.5	68.0
M7	81.0	83.7	77.9	76.0	76.2	79.3	74.6	71.3
M8	80.4	83.5	76.3	73.1	75.0	78.7	73.0	67.4
M9	80.3	83.3	76.8	72.3	75.4	78.9	72.6	66.6
M10	80.5	83.4	77.4	72.1	75.5	78.8	73.7	68.5
M11	79.8	82.9	76.0	71.4	75.4	78.5	71.3	68.4
M12	79.5	83.0	74.7	67.3	75.4	79.0	69.9	63.7
<hr/>								
	3F-All	301	302	303	3F-All	301	302	303
M8	76.9	77.9	76.6	75.7	73.4	75.2	71.7	72.0
M9	75.2	75.4	75.5	75.5	70.5	71.3	70.1	70.6
M10	75.0	76.2	75.3	72.1	70.4	72.1	71.7	66.6
M11	73.6	74.4	72.4	71.8	67.7	69.3	68.0	67.1
M12	69.9	71.1	68.4	67.8	64.3	66.6	62.7	63.6

注)1/3Oct. バンド毎, 1kN のピンクノイズ加振の結果を示す。

2F-All は 2 階床面全体の, 3F-All は 3 階床面全体のパワー平均を示す。

## 4.4 構造部材の追加と振動伝搬性状

前節に示すプロトタイプ模型（図 4.2, 図 4.3）の実験結果から、構造部材の追加と振動伝搬性状の関係について考察する。

### 4.4.1 構造部材追加と振動性状

構造部材の追加と振動伝搬性状について考察する前に、振動性状（モードシェイプ）との関わり合いについて考察する。

4.3.3 項に示す床面のモードシェイプの形状別に、固有振動数  $f$  と減衰比  $\zeta$  を取りまとめたものを表 4.15 に示す。モード形状 (Mode Type) は短辺方向と長辺方向のモードの腹の数を示しており、(1,1) モード, (1,2) モード, (1,3) モードは図 4.20 に示す形状である。

2 階床面の (1,1) モードに着目すると、2 階床面周辺の壁面の追加や梁の追加により、固有振動数が上昇し、減衰比は小さくなる傾向が認められる。M6 は 101 室と 102 室間の壁面が追加されており、この位置がモードの節となることから、これ以降 (1,1) モードは認められなくなっている。3 階床面に着目すると、2 階の外周の壁面追加により (M7 - M8)、固有振動数が下がる傾向が認められている。これは、壁面の追加により、3 階床面と 2 階の壁面の振動が連成し、モード形状の波長が長くなったことが原因として考えられる。

2 階床面の (1,2) モードに着目する。このモードも、構造部材追加により振動数が高くなる傾向が認められる。M2 ~ M5 は、図 4.7 ~ 図 4.10 に示すとおり、モードの節が 202 室中央にある。M6 は 101 室と 102 室間の壁面が設置されるケースであり、図 4.11 に示すようにこの位置がモードの節となる。モードの位置がずれることにより、他よりも振動数が若干低くなっている。M7 は 102 室と 103 室間の壁面が追加されるため、これ以降のモデルでは (1,2) モードが認められなくなっている。3 階についても、壁面が追加されることにより (M8 - M9) 振動数が高くなり、202 室と 203 室間の壁面の追加 (M9 - M10) により、モードの節の位置がずれ、振動数が低くなっている。壁面が非対称に追加される場合、モードの位置がずれ、片方の面の波長は長くなるが、もう一方は短くなる。振動数が低くなるのは、波長が長くなる面の方が、振動面の面積、振幅共に大きく、この面が支配的であるためと考えられる。

2 階床面の (1,3) モードに着目すると、固有振動数は概ね 307 Hz 前後となっている。M3, M6, M9, M12 が若干振動数が低く、M5 は若干高くなっている。3 階についても固有振動数は概ね同じであり、M8, M9, M12 が若干低い傾向が認められている。

#### 振動性状と重要度の関係

(1,1) モード, (1,2) モード, (1,3) モードの重要度に着目する（表 4.2 ~ 表 4.13 参照）。M2 ~ M5 については (1,2) モードが最も高い値を示している。M6 ~ M10 については (1,3) モードが最も高い値を示している。M11, M12 は (1,3) モードよりも高次のモードの方が高い値を示している。しかしながら、このモデルにおいては、10 Hz のモードが二つに分かれている。よっ

表 4.15 構造部材追加と固有振動（モードシェイプ別）

Model Name	Floor Mode Type	2 F (加振階)			3 F		
		(1,1)	(1,2)	(1,3)	(1,1)	(1,2)	(1,3)
M2	固有振動数 $f$ [Hz]	86	161	(370)	-	-	-
	減衰比 $\zeta$ [%]	8.3	5.8	(4.9)	-	-	-
M3	固有振動数 $f$ [Hz]	122	207	282	-	-	-
	減衰比 $\zeta$ [%]	4.9	2.9	2.9	-	-	-
M4	固有振動数 $f$ [Hz]	148	227	309	-	-	-
	減衰比 $\zeta$ [%]	4.2	3.4	3.2	-	-	-
M5	固有振動数 $f$ [Hz]	181	258	324	-	-	-
	減衰比 $\zeta$ [%]	4.2	3.5	3.3	-	-	-
M6	固有振動数 $f$ [Hz]	-	(231)	303	-	-	-
	減衰比 $\zeta$ [%]	-	(3.9)	3.4	-	-	-
M7	固有振動数 $f$ [Hz]	-	-	307	-	-	-
	減衰比 $\zeta$ [%]	-	-	3.5	-	-	-
M8	固有振動数 $f$ [Hz]	-	-	306	176	219	279
	減衰比 $\zeta$ [%]	-	-	4.3	3.2	3.0	3.0
M9	固有振動数 $f$ [Hz]	-	-	302	159	229	302
	減衰比 $\zeta$ [%]	-	-	4.1	2.5	2.5	4.1
M10	固有振動数 $f$ [Hz]	-	-	307	-	(184)	307
	減衰比 $\zeta$ [%]	-	-	3.3	-	(2.7)	3.3
M11	固有振動数 $f$ [Hz]	-	-	307	-	-	307
	減衰比 $\zeta$ [%]	-	-	3.2	-	-	3.2
M12	固有振動数 $f$ [Hz]	-	-	304	-	-	304
	減衰比 $\zeta$ [%]	-	-	4.0	-	-	4.0

注) 括弧内の数値は、他のモードとは節の位置が異なることを示す。

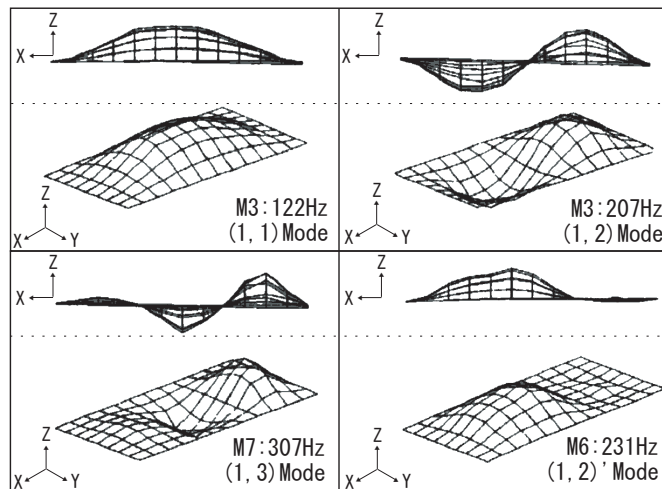


図 4.20 モードシェイプの形状の分類

て、この二つを足すと30%弱となり、他のモードよりも高い値となっている。

#### 振動性状とFRFの関係

図4.5に示すFRFの振幅に着目する。M2は、(1,2)モードの卓越が最も大きく、他の卓越と比較しても大きい値を示している。M3は、(1,2)モード、(1,3)モードの卓越の順となっている。M4, M5は、重要度については(1,2)モードの方が高いが、FRFの振幅は(1,3)モード、(1,2)モードの卓越の順となっている。M6は、(1,3)モードの卓越が最も大きく、(1,2)モードの卓越も認められている。M7以降は、(1,3)モードの卓越が最も大きく(1,1)モード、(1,2)モードの卓越は認められないが、(1,3)モードの振幅の1/10以下となっている。

重要度(付録A.2.4参照)は系全体のResidueベクトルを用いた評価であり、図4.5は2階床面全体のFRFのパワー平均である。これらは双方振幅に関わる指標であるため、ある程度の相関が認められている。

#### 構造部材追加と1次モード

2階の床面の1次モード(最低次モード)に着目する。各モデルと固有振動数と減衰比の関係を図4.21に示す。2階床面の下部構造部材追加によるM7までは、構造部材の追加に伴い、固有振動数が徐々に高くなり、減衰比は小さくなる傾向が認められている。下部構造が完成するM7以降については、構造部材追加による変化はあまり認められなくなっている。これは、構造部材が、振動の節に追加されるためであると考えられる。

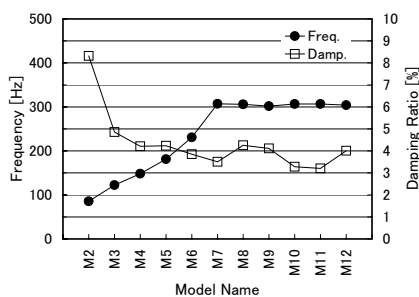


図 4.21 構造部材追加と2階床面の1次固有振動

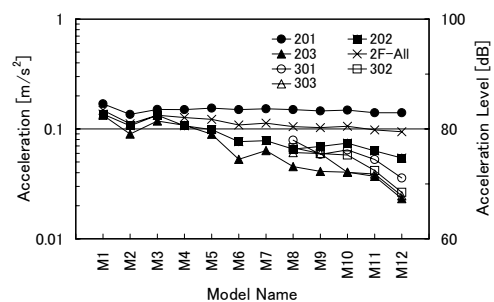


図 4.22 構造部材追加とO.A.レベルの関係

1/3 Oct. バンドレベルに着目する。2階床面については、図4.18に示すとおりである。M7までの2階床面の下部に構造部材を追加することにより、8Hz以下の帯域の振動が小さくなるが、それ以降は、あまり変化しない傾向が認められている。

表4.14に示す床面のO.A.レベル(実物換算3Hz~31.5Hz)を図4.22に示す。2階床面の結果に着目すると、2階全体(2F-All)は構造部材の追加による影響をあまり受けない傾向が認められる。部屋毎の値に着目すると、201室(加振室)の結果は、2階全体(2F-All)同様、構造部材追加による影響をあまり受けない傾向が認められている。しかしながら、202室(隣

室)や203室では、構造部材追加により振動が小さくなっている。また、加振点から離れた部屋の方が、効果が大きくなっている。下部構造部材追加の変化量に着目すると、M7までの変化が大きく、それ以降はやや小さくなる傾向が認められている。

#### 4.4.2 下部構造部材追加と振動伝搬性状

梁・壁面追加時のFRFの比較を図4.23に示す。

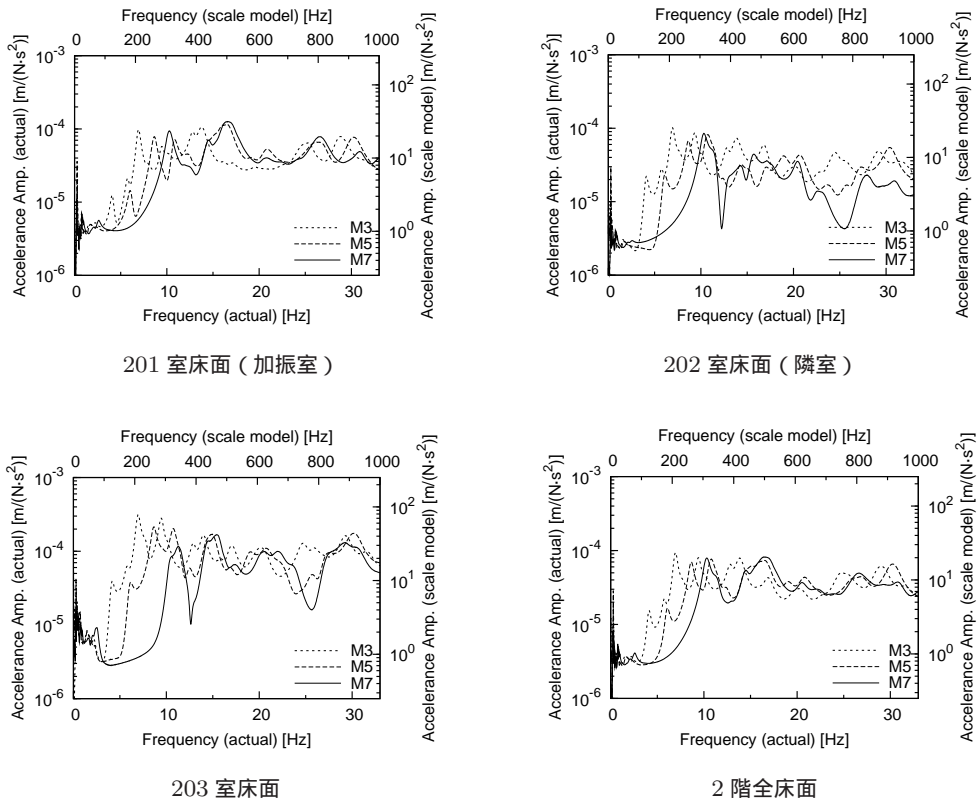


図 4.23 下部構造部材追加時のFRFの比較

(1,2) モードの振動数については、低い方から M3(207 Hz(実物換算 6.9 Hz)), M5(258 Hz(実物換算 8.6 Hz)) であり、M7 については存在していない。(1,3) モードの振動数については、低い方から M3(282 Hz(実物換算 9.4 Hz)), M7(307 Hz(実物換算 10.2 Hz)), M5(324 Hz(実物換算 10.8 Hz)) の順となっており、拘束の大きい順番にはなっていない。これは、壁面の追加により、床面と壁面の振動が連成し、モードの波長が長くなっているためであると考えられる。

201 室の振幅に着目すると、最大振幅の大きさはどれも同程度となっている。(1,2) モードの卓越に着目すると、拘束の弱い M3 の方が M5 よりも若干大きい値となっている。(1,3) モードの卓越に着目すると、M7 が最も大きく、M5, M3 の順となっている。15 Hz 付近のモードに着目すると、M5, M7 は共に 17 Hz 付近が卓越しているが、M3 は 14 Hz 付近の卓越となっている。

203 室の振幅に着目すると 201 室(加振室)よりも差が大きくなっている。(1,2) モードの

卓越に着目すると、201室よりも大きな値となっている。

202室のFRFは201室と203室の中間くらいの傾向となっている。2階全体のFRFは201室(加振室)と同様な傾向を示している。

表4.14のO.A.レベルに着目すると、201室では1dB以内の差であるが、203室では梁の追加(M3 M5)で2.4dB、壁面の追加(M5 M7)で3.0dB、梁と壁面の追加(M3 M7)で5.4dBの減少となっている。202室では梁の追加で2.6dB、壁面の追加で2.0dBとなっており、201室と203室の中間の値となっている。

## 2階床面下部の梁追加

梁追加時のFRFの比較を図4.24に示す。

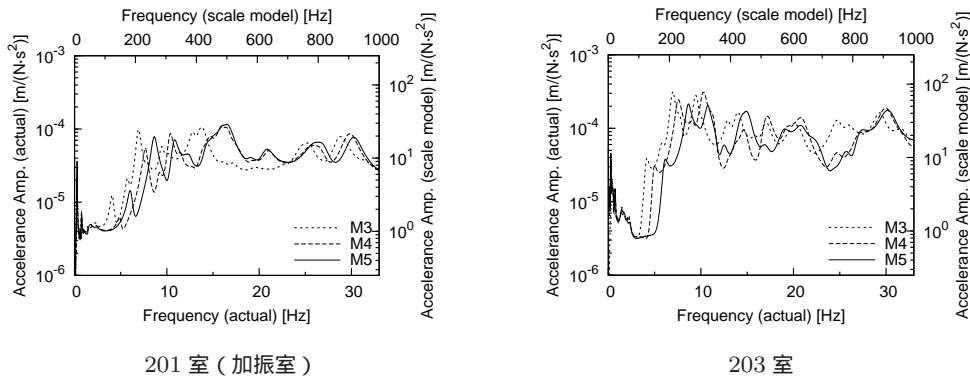


図4.24 下部構造部材追加時のFRFの比較

(1,2)モードの卓越振動数については、低い方からM3(207 Hz(実物換算 6.9 Hz)), M4(227 Hz(実物換算 7.6 Hz)), M5(258 Hz(実物換算 8.6 Hz))の順であり、梁追加と共に高くなる傾向が認められる。(1,3)モードの卓越振動数については、低い方からM3(282 Hz(実物換算 9.4 Hz)), M4(309 Hz(実物換算 10.3 Hz)), M5(324 Hz(実物換算 10.8 Hz))の順であり、(1,2)モードと同様、梁追加と共に高くなる傾向が認められる。

201室の振幅に着目すると、(1,2)モードの卓越では、M3, M5, M4の順となっており、梁の配置が対称ではないM4が最も小さい値となっている。(1,3)モードの卓越に着目すると、M4, M5, M3の順となっており、(1,2)モードの順番とは逆になっている。さらに高次のモードの卓越に着目すると、M3は(415 Hz(実物換算 14 Hz))付近に卓越を持っているが、他のM4, M5は(500 Hz(実物換算 17 Hz))付近の卓越となっている。このように、高次の卓越については、梁を1本入れるだけで固有振動数に差が生じ、2本目は、あまり差が生じない傾向を示している。

203室の振幅に着目すると、(1,2)モードの卓越については、M3が最も大きく、M4, M5の順である。(1,3)モードの卓越については、M3とM4が同程度であり、M5よりも大きい値を示している。203室の振幅に着目すると、低次のモードについては、梁の追加に伴い、振幅が小さくなる傾向が認められている。

表4.14のO.A.レベルに着目すると、201室では1dB以内の差であるが、203室では梁の1



本追加 (M3 M4) で 0.7 dB、もう一本の追加で (M4 M5) で 1.7 dB となっている。

### 2 階床面下部の壁面追加

2 階床面の下部壁面追加時の FRF の比較を図 4.25 に示す。

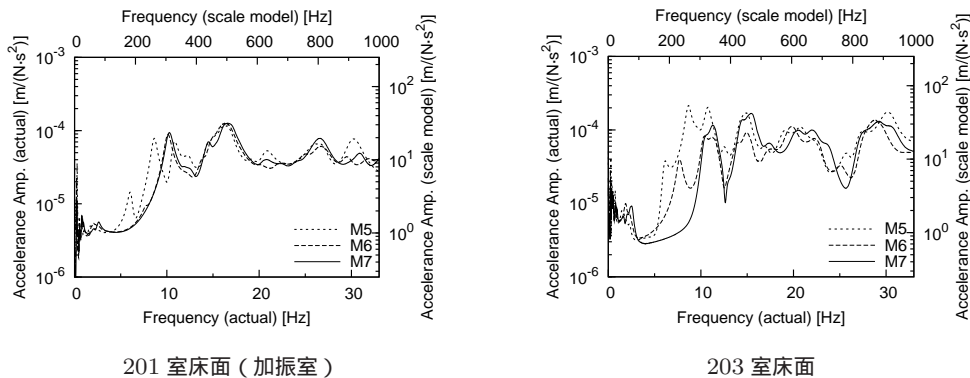


図 4.25 下部構造部材追加時の FRF の比較

(1,2) モードの振動数については、低い方から M6(231 Hz(実物換算 7.7 Hz)), M5(258 Hz(実物換算 8.6 Hz)), であり、M7 については存在していない。(1,3) モードの振動数については、低い方から M6(303 Hz(実物換算 10.1 Hz)), M7(307 Hz(実物換算 10.2 Hz)), M5(324 Hz(実物換算 10.8 Hz)) の順となっており、拘束の大きい順番にはなっていない。

201 室の振幅に着目すると、M6 と M7 がほぼ一致しており、M5 については (1,1) モード、(1,2) モード、(1,3) モードの卓越が若干異なっている。(1,2) モードの卓越に着目すると、M5 については、卓越が認められているが、M6 は卓越が隠れてしまっている。(1,3) モードの卓越に着目すると、M5 がやや小さく、M6, M7 は同程度の値となっている。15 Hz 以上の高い振動数ではどれも同程度の値となっている。

203 室の振幅に着目すると、低次のモードに差が生じている。(1,2) モードの卓越に着目すると、M5 については 201 室よりも大きな値となっている。(1,2) モードと (1,3) モードの卓越をまとめて評価すると、M5 が最も大きく、M7, M6 の順である。

表 4.14 の O.A. レベルに着目すると、201 室では 1dB 以内の差であるが、203 室では壁面 1 枚の追加で (M5 M6) で 4.5 dB の減少に、もう 1 枚の壁面の追加 (M6 M7) で逆に 1.5 dB の増加となり、壁面 2 枚の追加で (M5 M7) で 3.0 dB の減少となっている。

M6 は壁面の配置が非対称であり、系が共振しにくく、振動の振幅が小さくなっているものと考えられる。

### 3 階床面の下部壁面の追加

3 階床面の下部の梁と壁面追加時の FRF の比較を図 4.26 に示す。

301 室は加振室 (201 室) の上階であり、加振床ではないことから、FRF に差が認められている。(1,2) モードの振動数については、低い方から M10(184 Hz(実物換算 6.1 Hz)), M8(219 Hz(実物換算 7.3 Hz)), M9(229 Hz(実物換算 7.6 Hz)) であり、M11 については存在

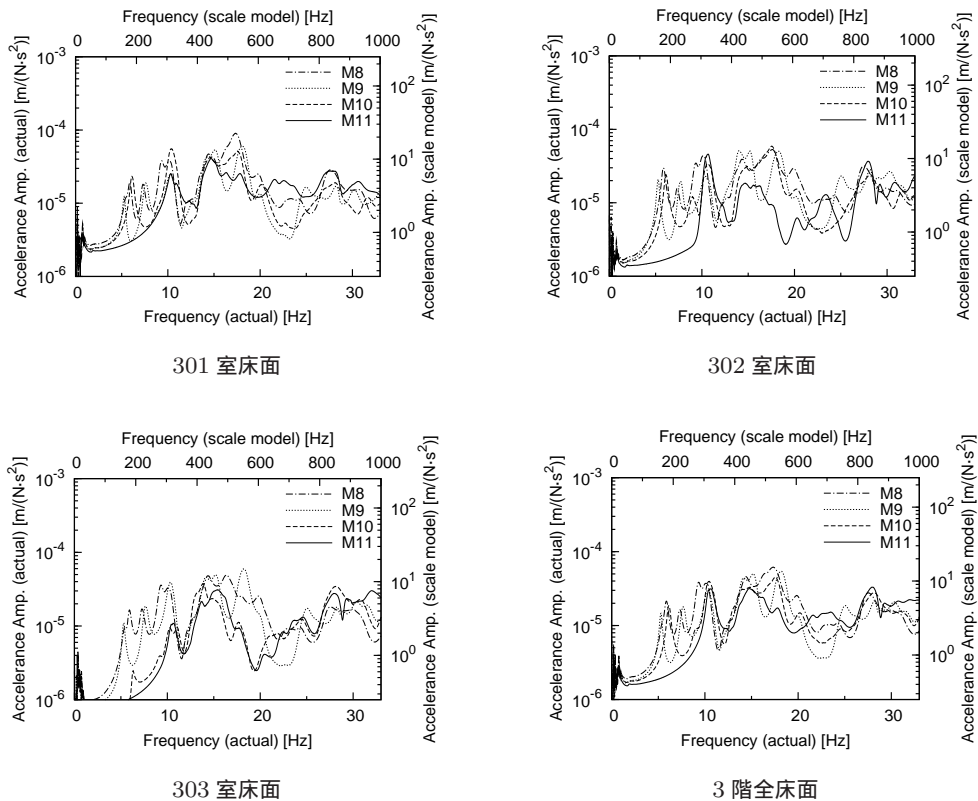


図 4.26 下部構造部材追加時の FRF の比較

していない。前項で示した、2階床面の下部壁面を追加した際も片側のみの追加で対称とならない場合は、振動数が低くなっているが、この3階の結果についても同じ傾向を示している。(1,3)モードの振動数については、低い方から M8(279 Hz(実物換算 9.3 Hz)), M9(302 Hz(実物換算 10.1 Hz)), M10(307 Hz(実物換算 10.2 Hz)), M11(307 Hz(実物換算 10.2 Hz)) の順となっており、拘束の大きさに伴い高くなっている。

FRFの振幅に着目すると、どの室においても、(1,2)モードの卓越の影響はあまり小さくなく、(1,3)モードやさらに高次のモードの影響が大きくなっている。これは、2階床面が下部構造部材に拘束され、(1,2)モードの振動数で共振できなくなっているためであると考えられる。

(1,2)モードに着目すると、どの室においても M8 と M9 が同様な傾向を示している。M9 は M8 の 2 階周辺(外周)の壁面を追加するケースであり、振動の節の位置に変化が無い 2 階下部の梁と間仕切壁を追加するケースである M3 と M7 の差は、201 室(加振室)では 1 dB 未満、202 室では 4.6 dB、203 室では 5.4 dB であり、202 室、203 室よりも 3 階の方が減衰量が少なくなっている。

#### 4.4.3 上部構造部材追加と振動伝搬性状

2階床面の上部壁面追加時の FRF の比較を図 4.27 に示す。

(1,3)モードの固有振動数は、M7以降概ね同じであり約 300 Hz(実物換算 10 Hz)である。

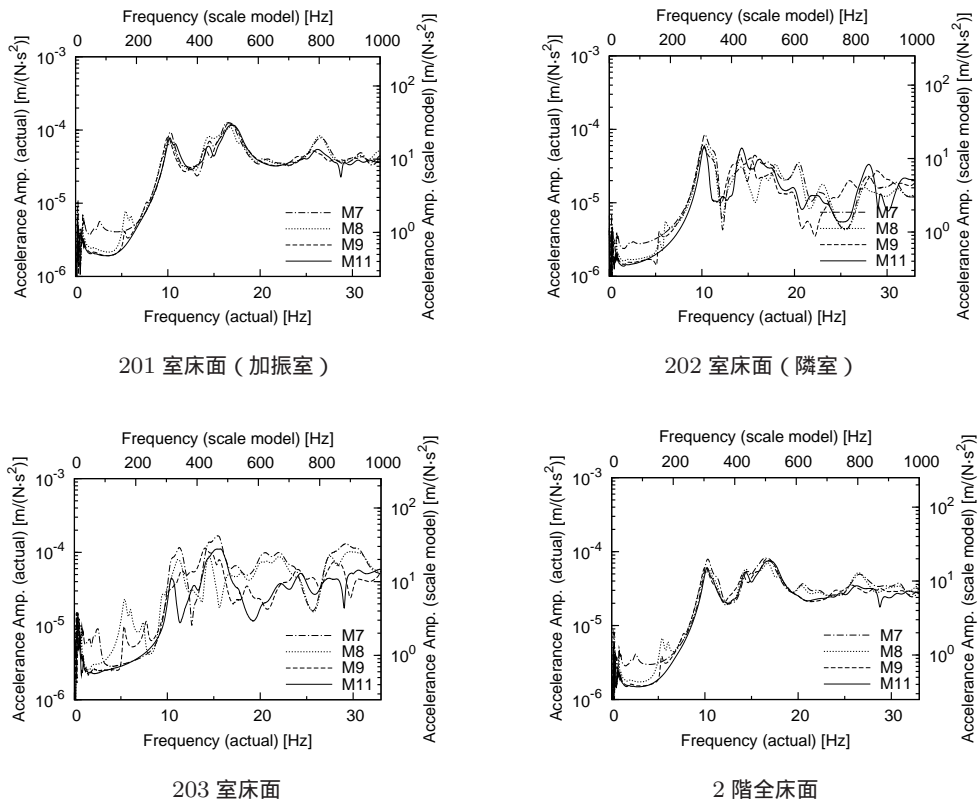


図 4.27 上部構造部材追加時の FRF の比較

201 室に着目すると、構造部材追加によらず一致する傾向を示している。203 室に着目すると、(3,1) モードの卓越の振幅については M7 が最も大きく、M8, M9, M11 の順であり、構造部材追加に伴い減少する傾向が認められている。470 Hz (実物換算 15 Hz) 付近の卓越に着目すると、M7 が最も大きく、次に M9, M11 が同程度であり、次に M8 の順となっている。600 Hz (実物換算 20 Hz) 以上の振動数では、M7 と M8 が同様な、M9 と M11 が同様な傾向を示している。202 室は、201 室と 203 室の中間の傾向であり、2 階全床面は 201 室と同様な傾向を示している。

表 4.14 と図 4.22 の O.A. レベルに着目すると、201 室では 1 dB 未満の差であり、203 室は M7 と M8 の差が 2.9 dB、M8 と M9 の差が 0.8 dB、M9 と M11 の差が 0.9 dB となっている。

#### 4 層までの追加

2 階床面の上部壁面追加時の FRF の比較を図 4.28 に示す。

(1,3) モードの固有振動数は、M7 以降概ね同じであり約 300 Hz (実物換算 10 Hz) である。201 室に着目すると、構造部材追加によらず一致する傾向を示している。203 室に着目すると、(3,1) モードの卓越の振幅については M7 が最も大きく、M11, M12 の順であり、各層 (各階) の追加に伴い減少する傾向が認められている。15 Hz 付近の卓越に着目すると、(1,3) モードの順番と同じとなっている。20 Hz 以下の振動数では、各モデル相関のある形状となっている。

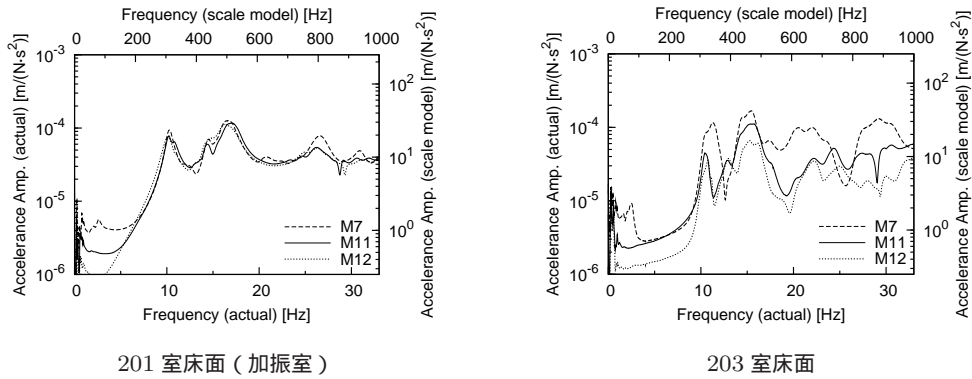


図 4.28 上部構造部材追加時の FRF の比較

が、それ以上の振動数では、特に M7 が異なる傾向を示している。振幅の大きさについては概ね (1,3) モードと同じ順番となっている。

表 4.14 と図 4.22 の O.A. レベルに着目すると、201 室では 1dB 未満の差であり、203 室は M7 と M11 の差 (1 層の追加) が 4.6 dB、M11 と M12 の差が 4.1 dB、M7 と M12 の差 (3 層の追加) が 8.7 dB となっている。

### 4.5 感度解析による考察

振動系に、単位質量  $m$ 、減衰  $c$ 、剛性  $k$  を追加する場合の、振動数やモードシェイプ係数の変化量を示す感度解析の結果について考察する (2.3.5 項参照)。モードシェイプ係数に対する感度は、図 4.29 に示す 2 階と 3 階の評価点、(計 4 点) について解析している。

ここでは、低次モードに対する感度を解析の対象とする。これらのモードに対しては、2.3.5 項で示すとおり、壁面の感度は低いため、壁面は解析の対象外としている。また、剛性感度、減衰感度については、 $N$  個の接点がある場合、 ${}_N C_2$  通りの組み合わせの感度が計算されるが、ここでは 2.3.5 項同様、格子状の隣り合う組み合わせの感度を求めるものとする。

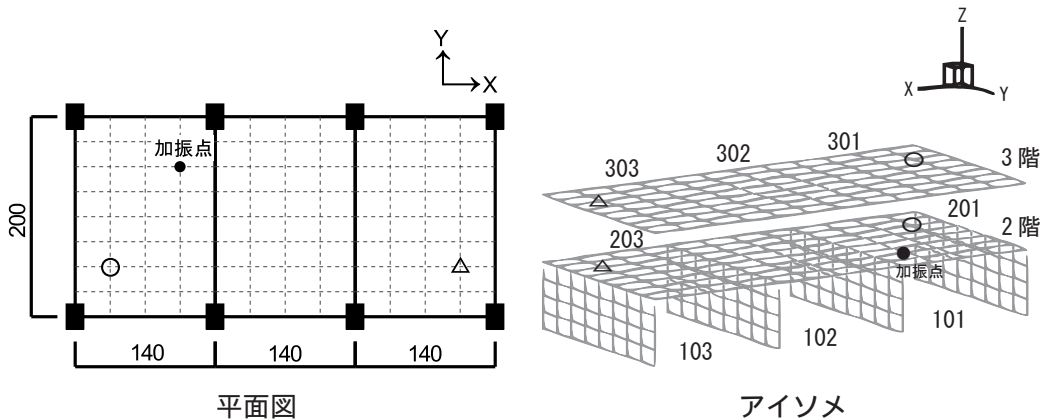


図 4.29 モードシェイプ係数に対する感度の評価点 (評価点、)

### 4.5.1 各種感度の比較

感度解析の一例を図 4.30～図 4.32 に示す。質量感度に着目すると、図 4.30, 図 4.31 に示すとおり、振動数に対する感度、モードシェイプ係数に対する感度共に、モードシェイプの振幅が大きい場所の感度が高くなる傾向が認められている。剛性感度と減衰感度を比較すると、図 4.32 に示すとおり、剛性感度が高い場所は、減衰感度も高い傾向が認められている。また、剛性感度、減衰感度共に、モードシェイプの傾きが大きい場所の感度が高くなる傾向 (図 4.30) が認められている。これらの傾向は、2.3.5 項の実構造体に対する感度解析の結果と一致している。

モードシェイプ係数に対する感度に着目すると、図 4.31 の質量感度, 図 4.32 の剛性感度, 減衰感度共に、評価点の場所に関わらず、感度が高くなる位置は同じとなっている。これらの結果は、振動低減対策を考える場合、振動低減する評価点 (受振点) までの距離など、位置関係に着目するよりも、振動モードの形状 (モードシェイプ) に着目する方が効果的な対策を行うことができることを示している。

モードシェイプ係数に対する感度は、感度の高くなる場所が、評価点 (受振点) の位置にあまり依存しないことから、以降、2 階 における感度を代表とする。減衰感度については、感度の高い位置が剛性感度の結果と概ね一致するため、以降省略する。

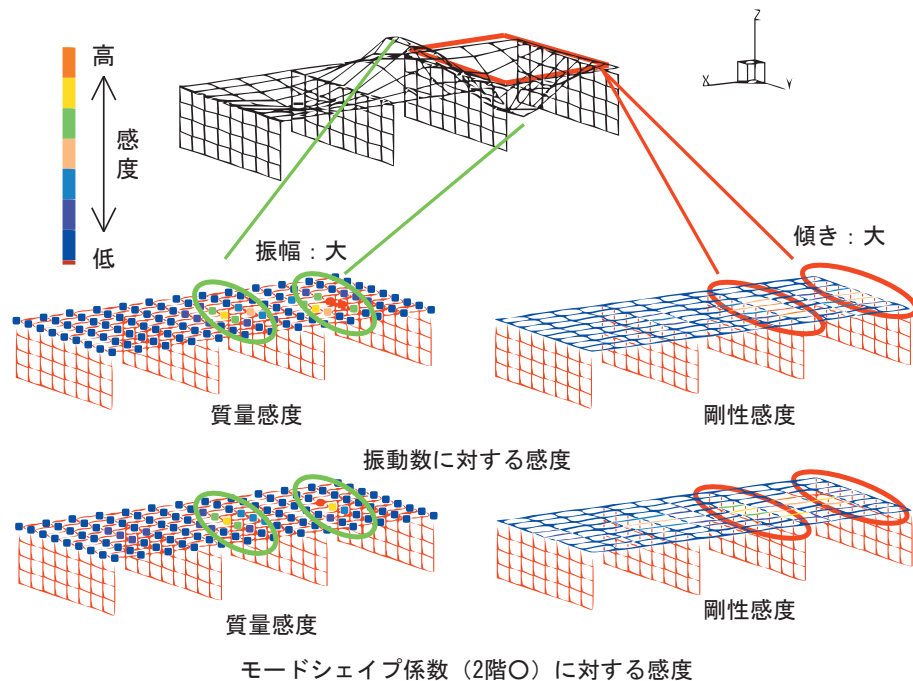
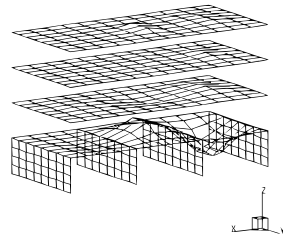
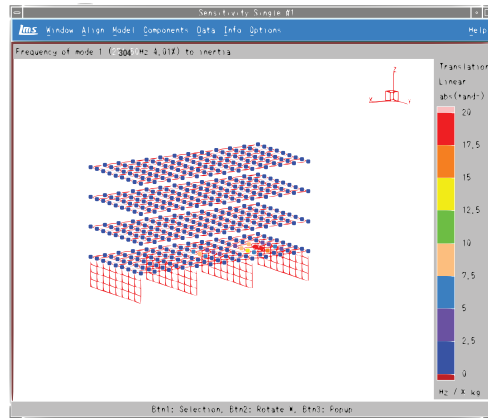


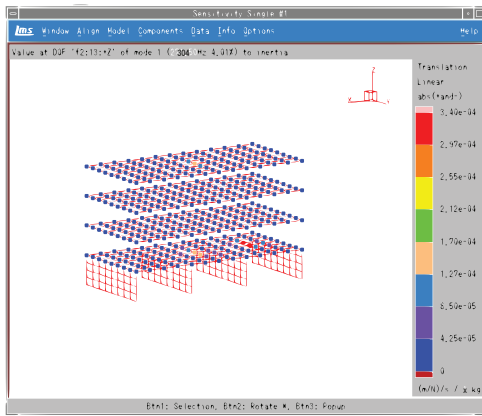
図 4.30 モードシェイプと感度 [M7:307 Hz(実物換算 10.2 Hz)]



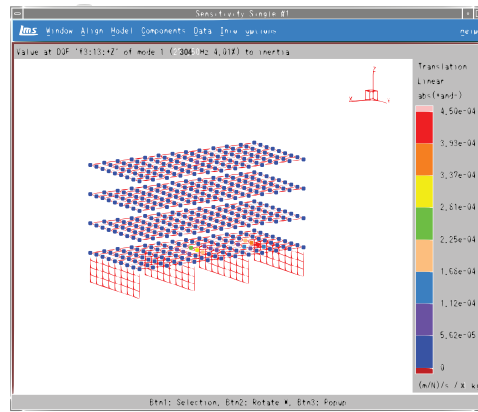
モードシェイプ



振動数に対する感度

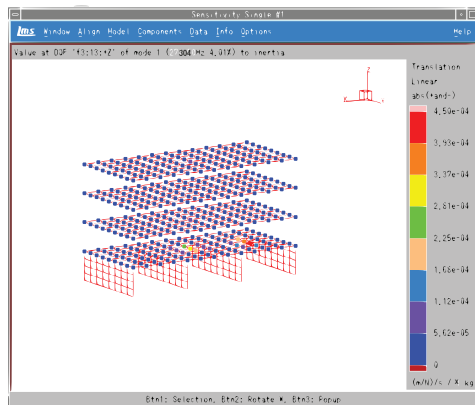


点

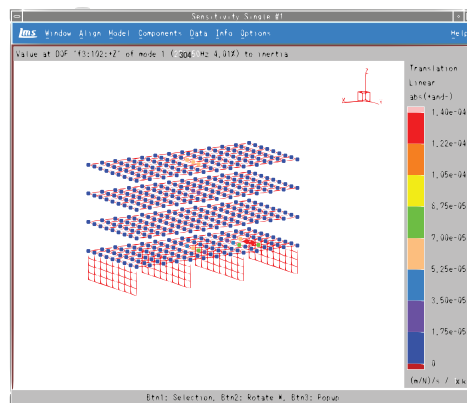


点

2階のモードシェイプ係数に対する感度



点

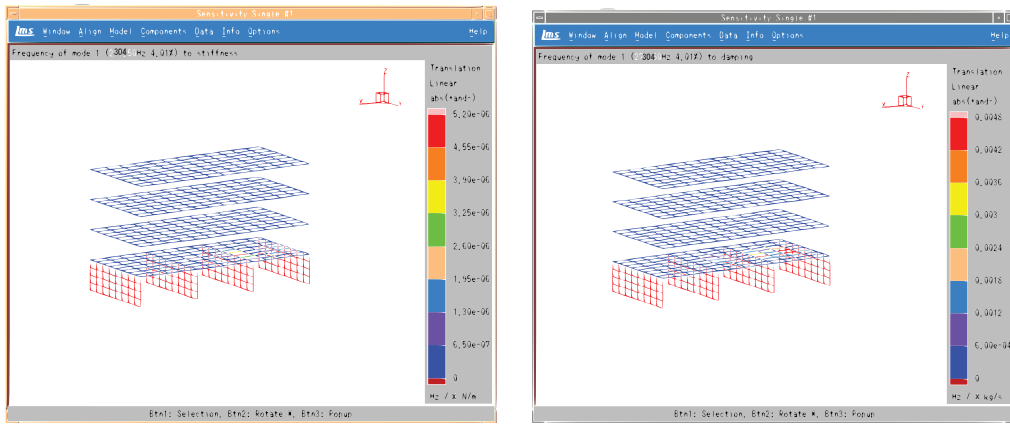


点

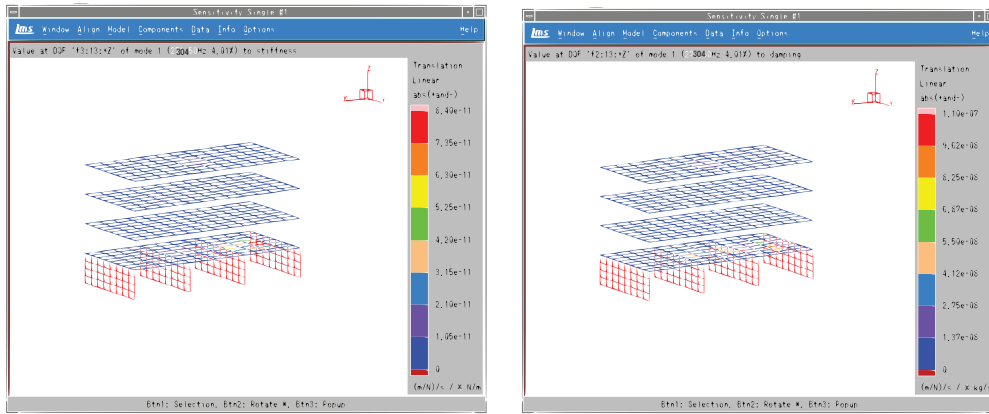
3階のモードシェイプ係数に対する感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

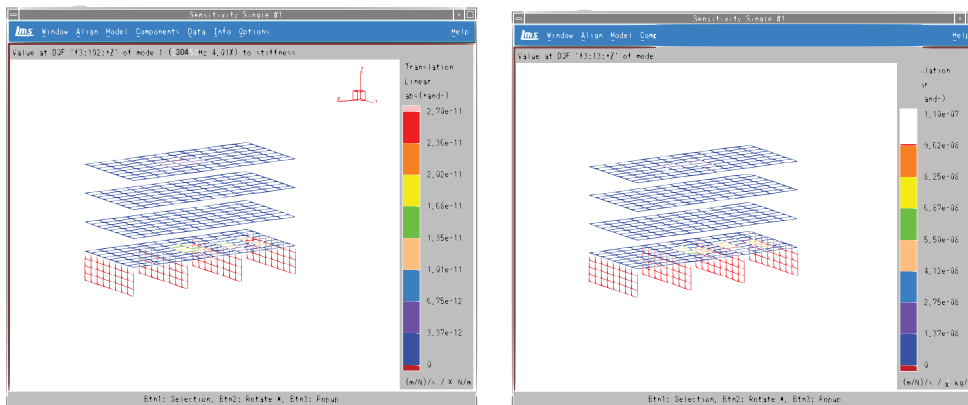
図 4.31 M12 の 304 Hz(実物換算 10.1 Hz) のモードに対する質量感度



振動数に対する感度



2階 点のモードシェイブ係数に対する感度



3階 点のモードシェイブ係数に対する感度

剛性感度

減衰感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

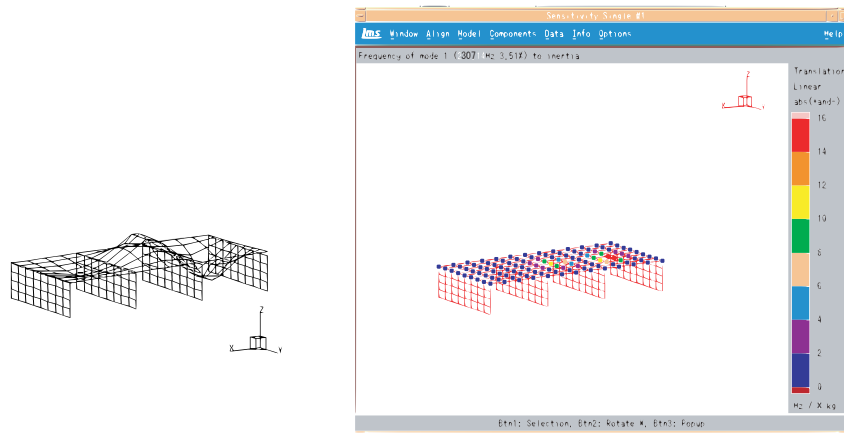
図 4.32 M12 の 304 Hz(実物換算 10.1 Hz) のモードに対する感度

#### 4.5.2 各層の完成型 M7, M11, M12 の感度

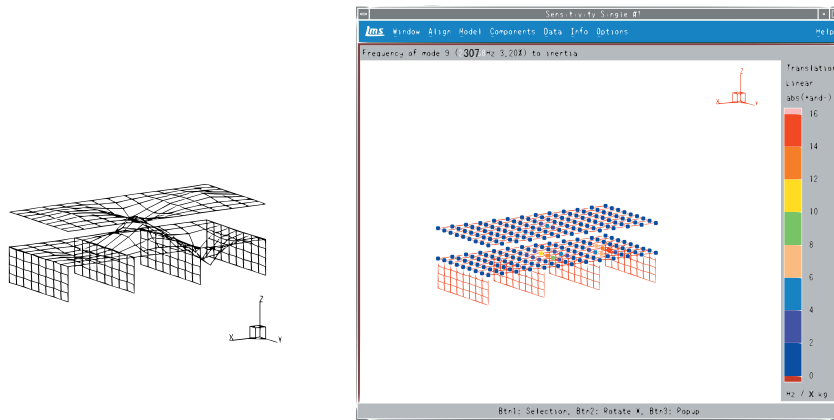
1層の完成型である M7 と 2層の完成型である M11 と 4層の完成型である M12 の感度をモードシェイプと合わせ、図 4.33, 図 4.34 に示す。

2階床面の感度に着目すると、振動数に対する感度、モードシェイプ係数に対する感度共に、質量感度、剛性感度とも、M7 については 201 室が、M11 については 202 室が高くなっており、感度の高い場所は概ね同じとなる。振動数に対する質量感度 (図 4.33) は、どのモデルも概ね同じ値であるが、4層である M12 の感度が最も高く、次に M7, M11 が同程度となっている。モードシェイプに対する感度 (図 4.34) も、質量感度、剛性感度共に同程度の値であるが、順番は、M11, M12, M7 の順となっている。これらの順番は、部材量の順にはなっていない。この原因には、M11, M12 について 4.3.2 項に示すとおり、近接する重根解を持つようなモードが存在しており、(1,3) モードが二つのモードに分かれてしまっていることがあげられる。

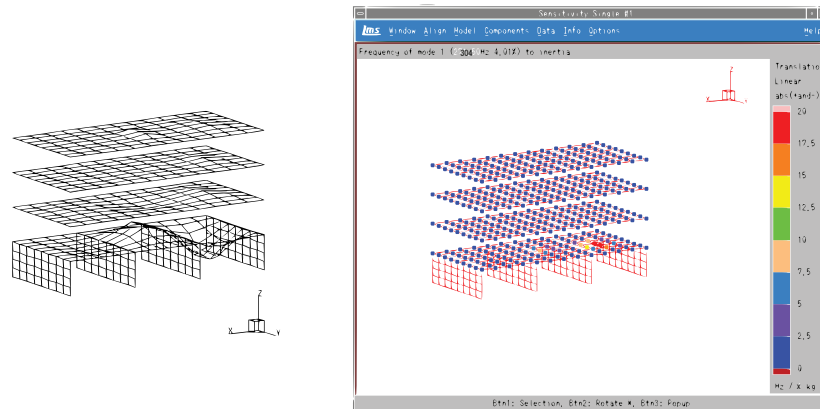




M7 307 Hz (実物換算 10.2 Hz)



M11 307 Hz (実物換算 10.2 Hz)



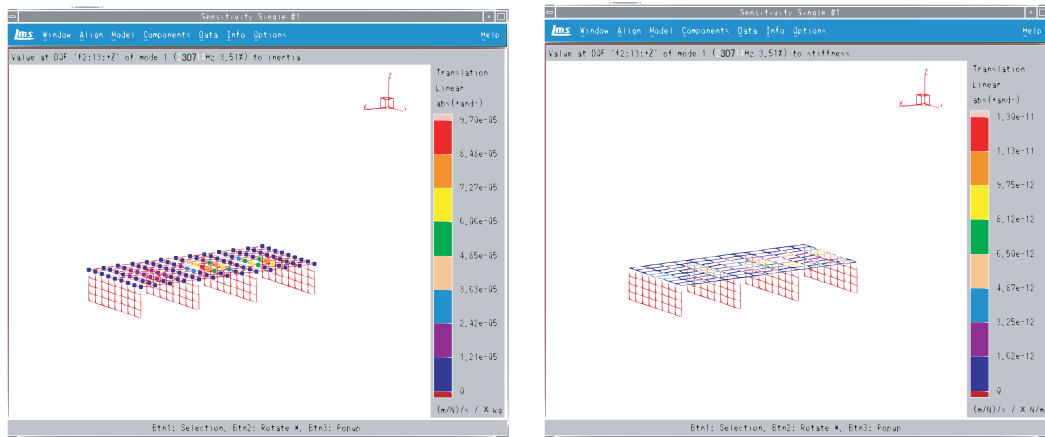
M12 304 Hz (実物換算 10.1 Hz)

モードシェイプ

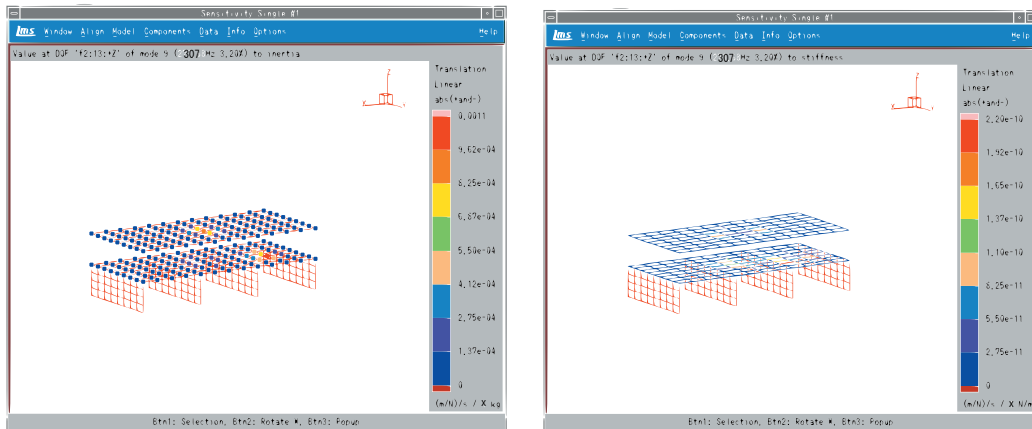
質量感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

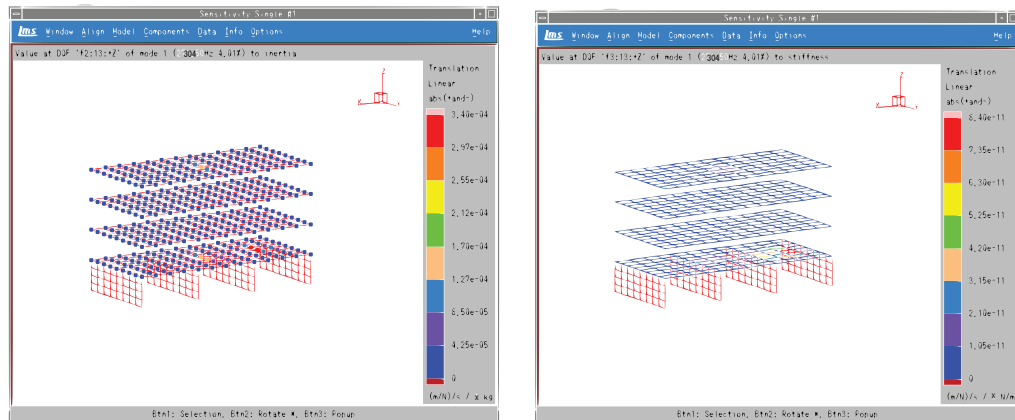
図 4.33 振動数に対する感度



M7 307 Hz (実物換算 10.2 Hz)



M11 307 Hz (実物換算 10.2 Hz)



M12 304 Hz (実物換算 10.1 Hz)

質量感度

剛性感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

図 4.34 2階 点のモードシェイブ係数に対する感度

### 4.5.3 モードの形状 (Type) と感度

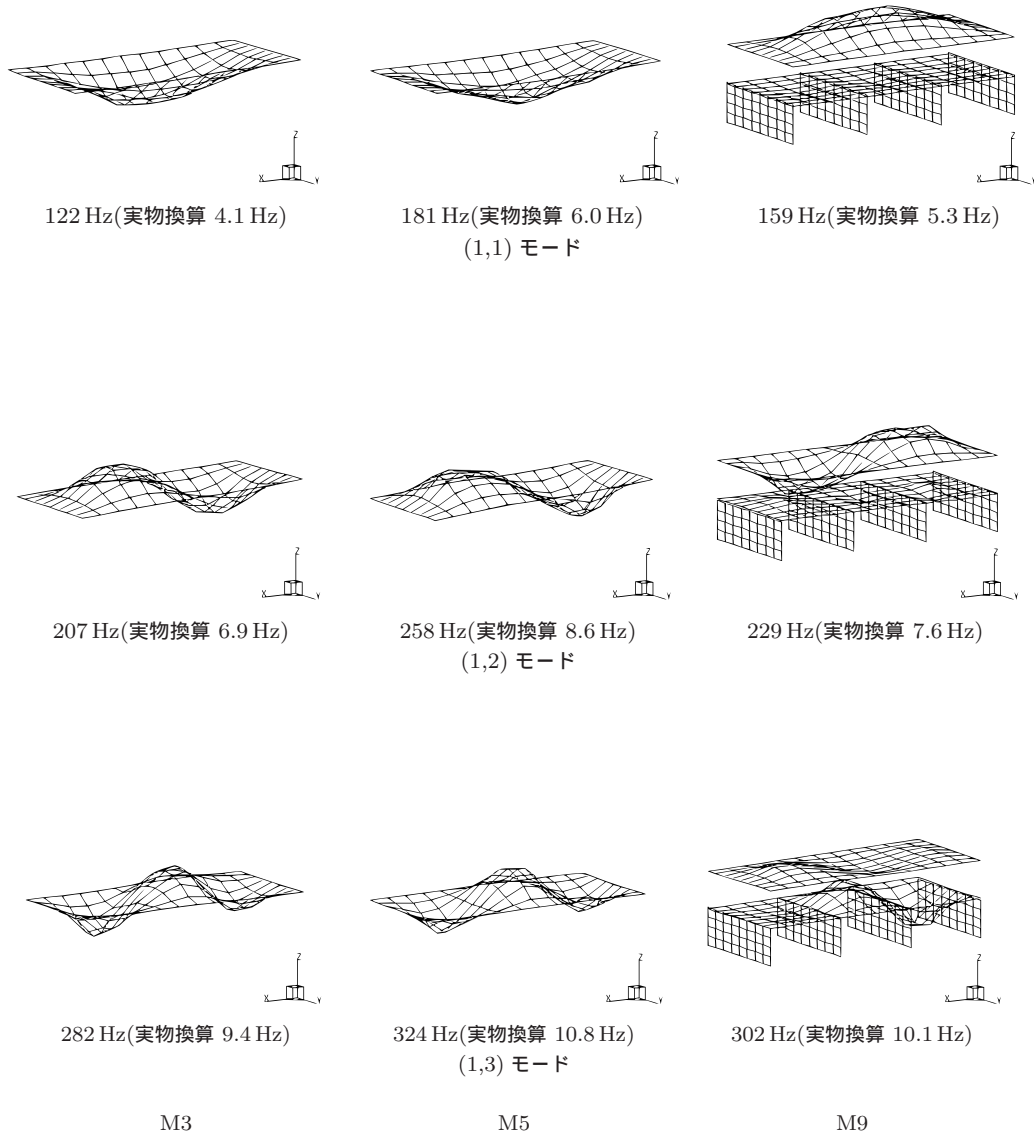
下部構造部材追加による振動伝搬性状の変化について考察するために、2階床面の下部構造部材が追加される前のM3と室間の梁追加であるM5、3階床面の下部構造部材が追加される前のM9の感度に着目する。

着目するモードは、図4.35に示す(1,1)モード、(1,2)モード、(1,3)モードである。(詳細は、4.3.2項、4.3.3項に示す。)このモードに対応する感度を図4.36～図4.41に示す。

4.5.1項と同様、感度が高くなっているのは、質量感度ではモードシェイプの振幅が大きい場所であり、剛性感度では傾きが大きい場所となっている。図4.35に示すM3、M5の2階床面と、M9の3階床面のモードシェイプは、同様な形状となるため、感度が高い場所と低い場所は概ね一致している。

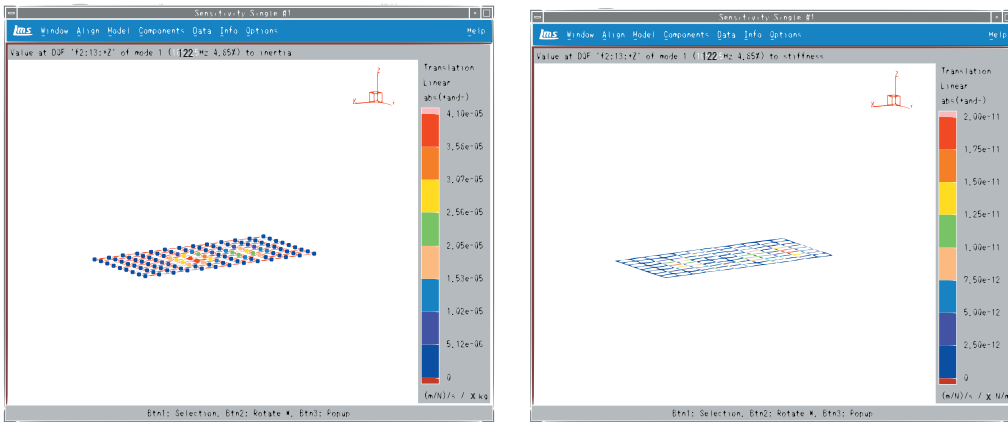
本論文で示すプロトタイプ模型実験では、図4.2、図4.3に示すとおり、室間の梁、壁面について追加している。この位置の感度に着目すると、いずれのモデルでも、質量感度、剛性感度共に、(1,1)モード、(1,2)モードに対しては、ある程度の感度があるが、(1,3)モードについては低い値となっている。これは、室間に梁追加、壁面追加などの構造部材を追加すると、(1,1)モード、(1,2)モードに対しては、振動性状が変化するが、(1,3)モードに対しては、あまり変化が無いことを示すものである。この結果は、4.4.2項に示す実験結果と一致している。

モード形状別に、それぞれの感度を比較する。図4.36、図4.38、図4.40に示す2階点のモードシェイプ係数に対する感度に着目すると、(1,1)モードに対する剛性感度以外は、質量感度、剛性感度共に、M5の感度が最も高く、次にM3の順でありM9が最も小さくなっている。振動数に対する感度に着目すると、質量感度、剛性感度共に同程度の値を示している。

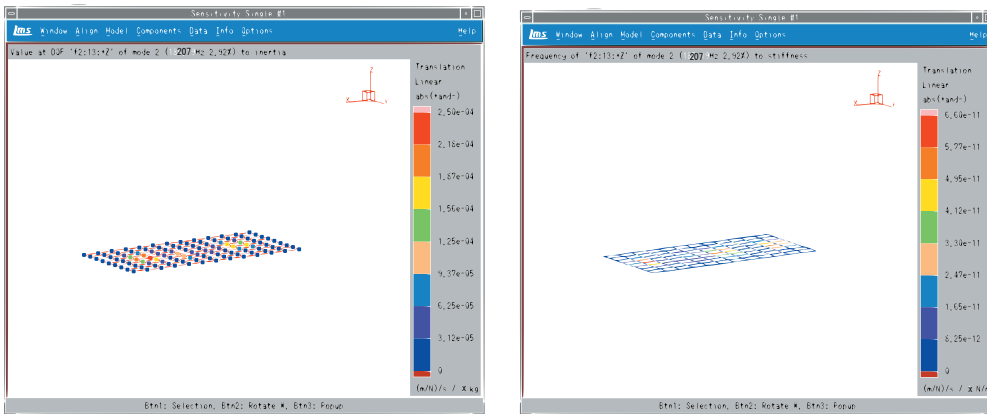


注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

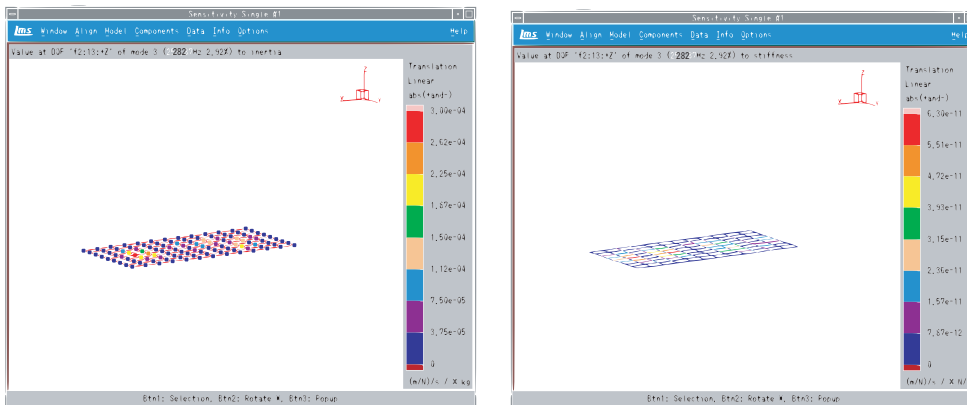
図 4.35 モードシェイプ



(1,1) モード 122 Hz (実物換算 4.1 Hz)



(1,2) モード 207 Hz (実物換算 6.9 Hz)



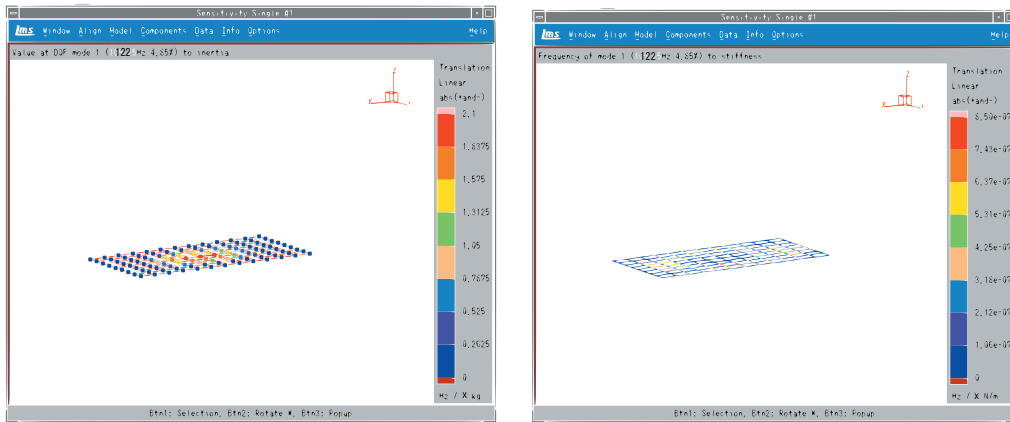
(1,3) モード 282 Hz (実物換算 9.4 Hz)

質量感度

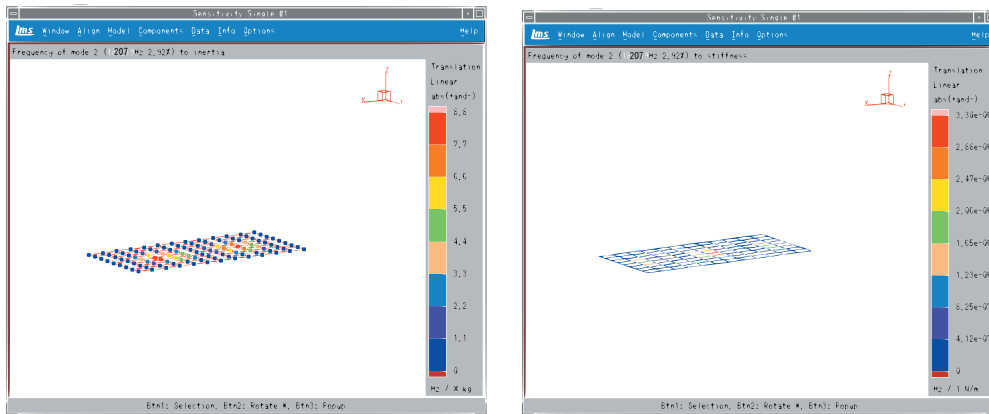
剛性感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

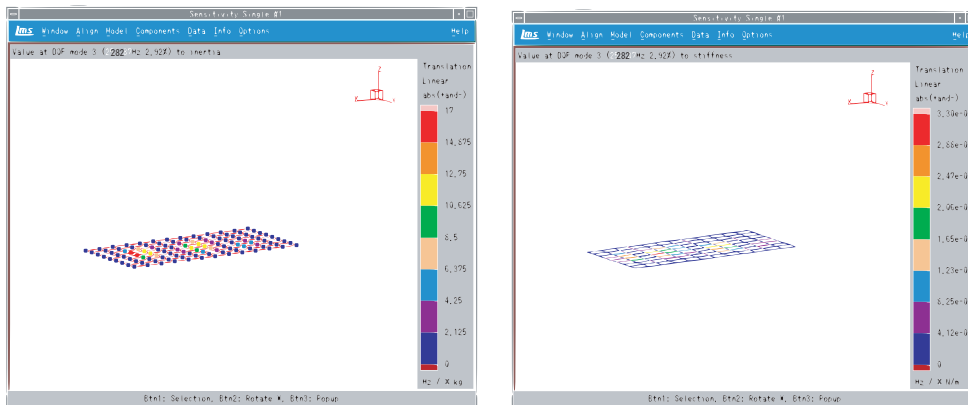
図 4.36 M3 の 点のモードシェイブ係数に対する感度



(1,1) モード 122 Hz (実物換算 4.1 Hz)



(1,2) モード 207 Hz (実物換算 6.9 Hz)



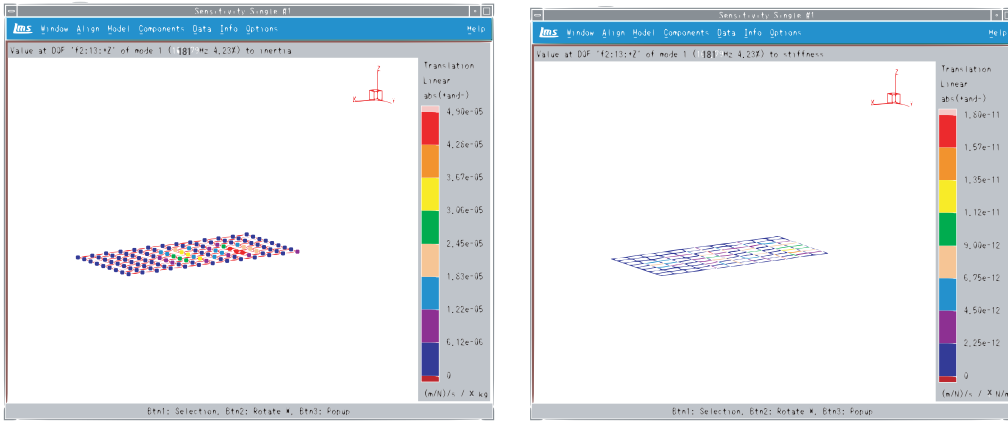
(1,3) モード 282 Hz (実物換算 9.4 Hz)

質量感度

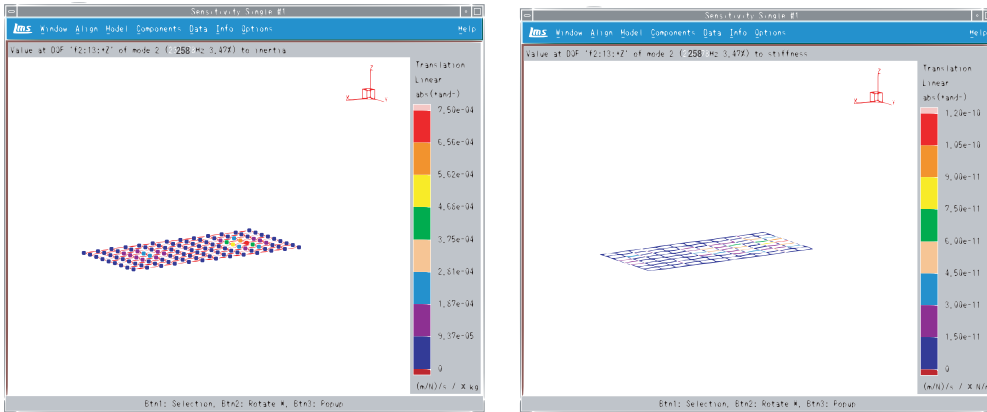
剛性感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

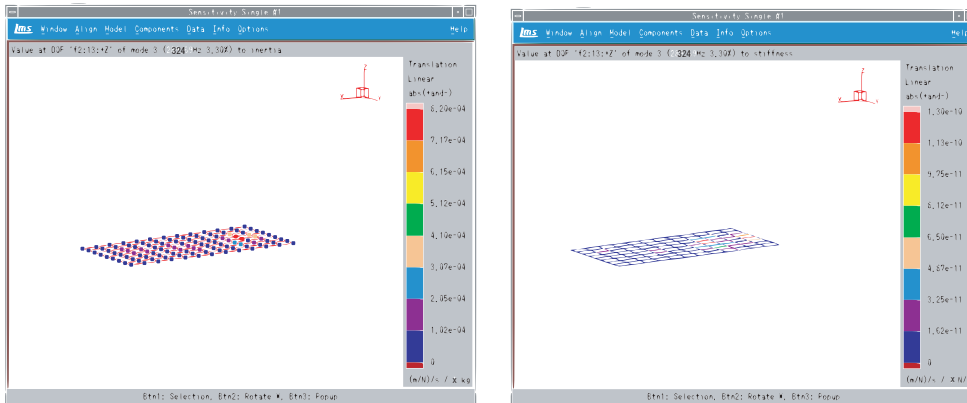
図 4.37 M3 の振動数に対する感度



(1,1) モード 181 Hz (実物換算 6.0 Hz)



(1,2) モード 258 Hz (実物換算 8.6 Hz)



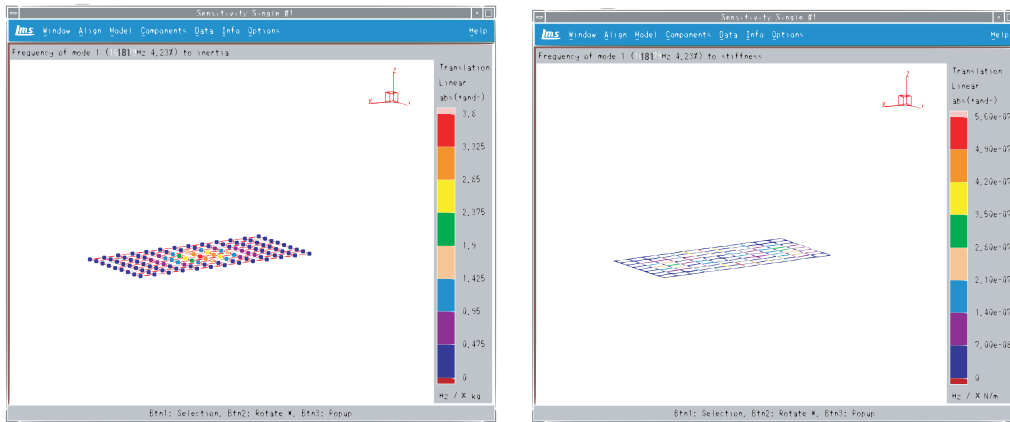
(1,3) モード 324 Hz (実物換算 10.8 Hz)

質量感度

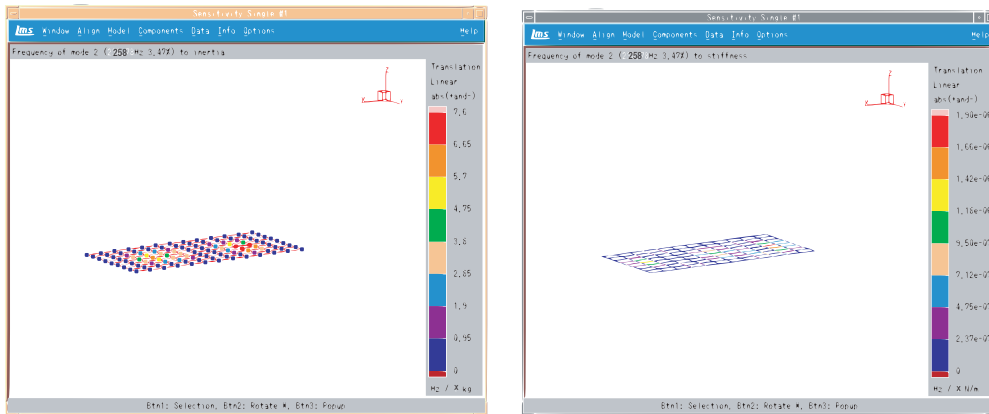
剛性感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

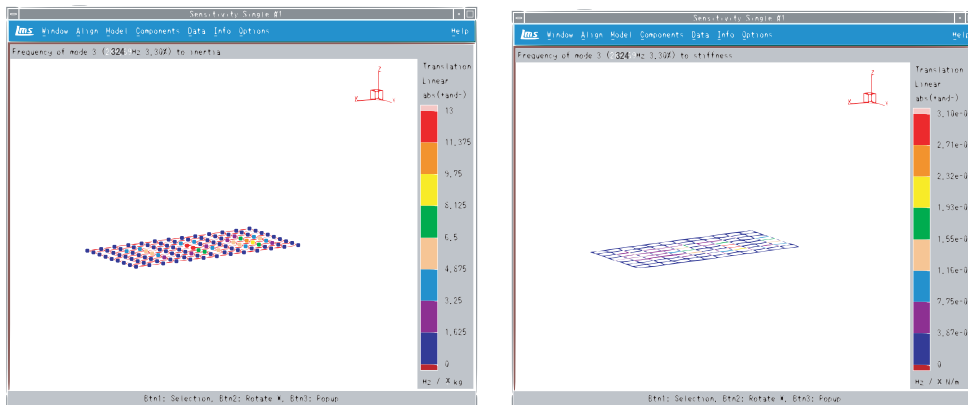
図 4.38 M5 の 点のモードシェイブ係数に対する感度



(1,1) モード 181 Hz (実物換算 6.0 Hz)



(1,2) モード 258 Hz (実物換算 8.6 Hz)



(1,3) モード 324 Hz (実物換算 10.8 Hz)

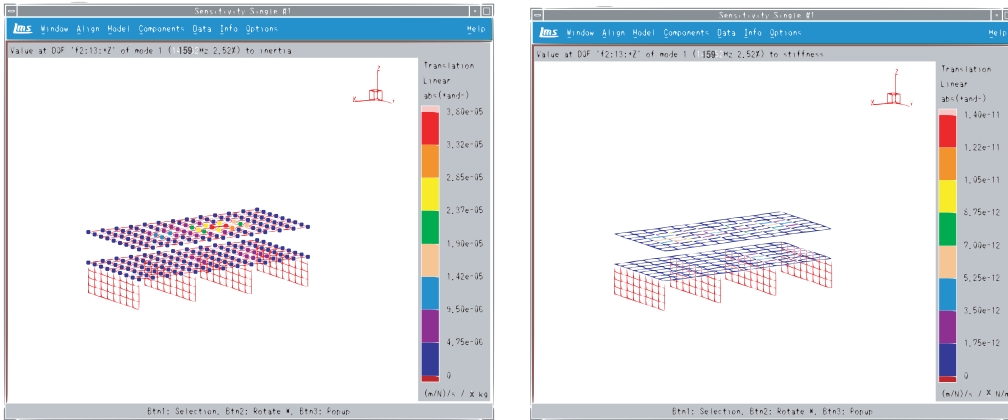
質量感度

剛性感度

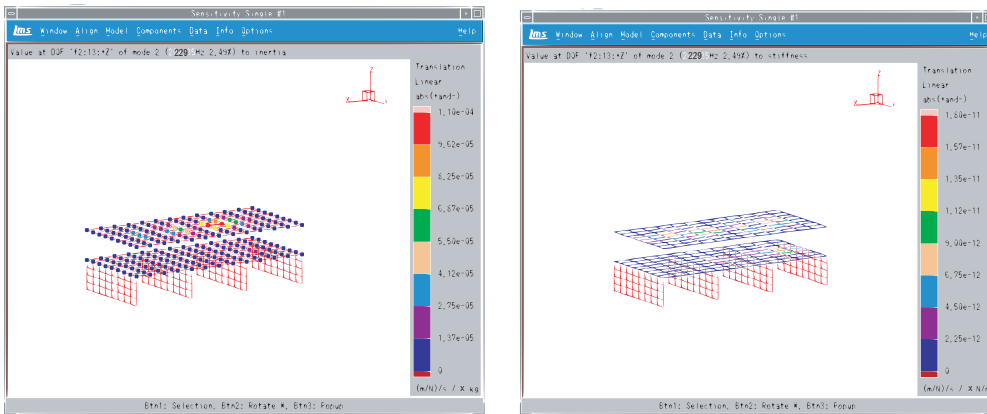
注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

図 4.39 M5 の振動数に対する感度

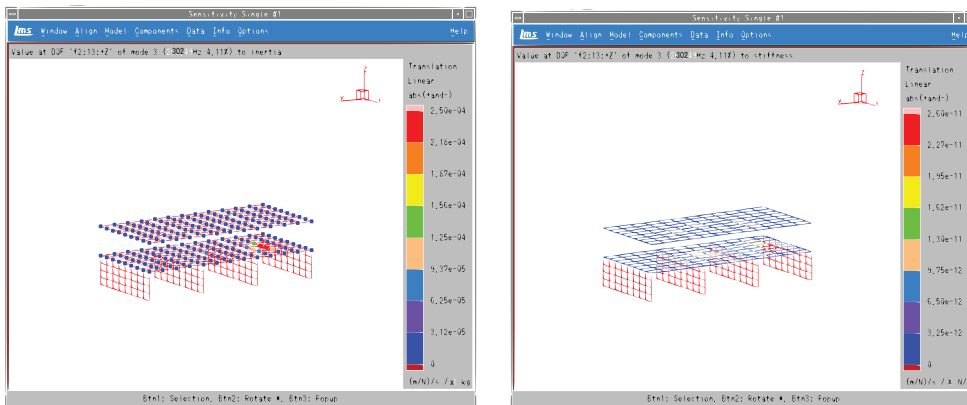




(1,1) モード 159 Hz (実物換算 5.3 Hz)



(1,2) モード 229 Hz (実物換算 7.6 Hz)



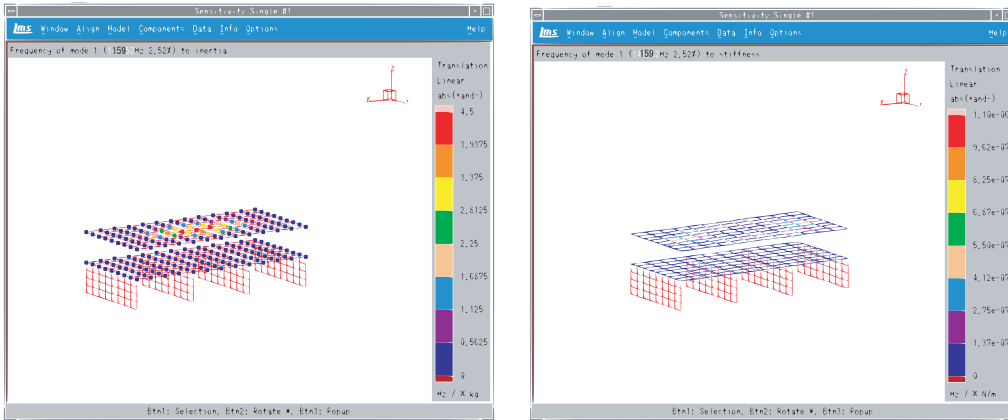
(1,3) モード 302 Hz (実物換算 10.1 Hz)

質量感度

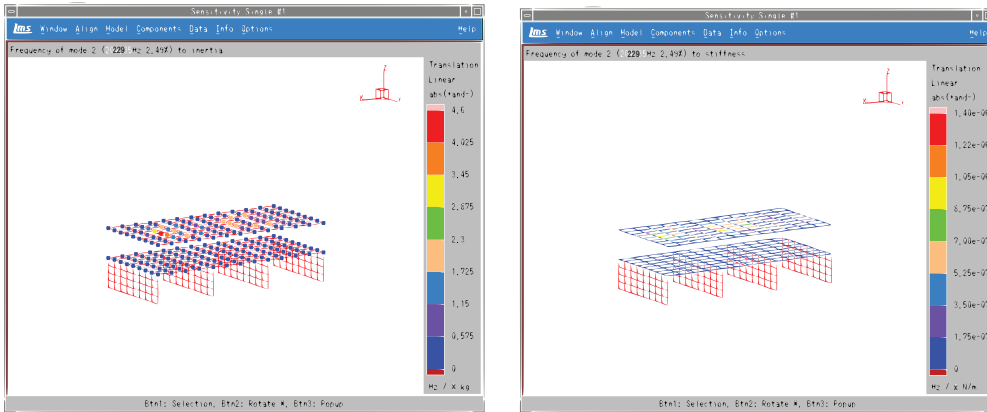
剛性感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

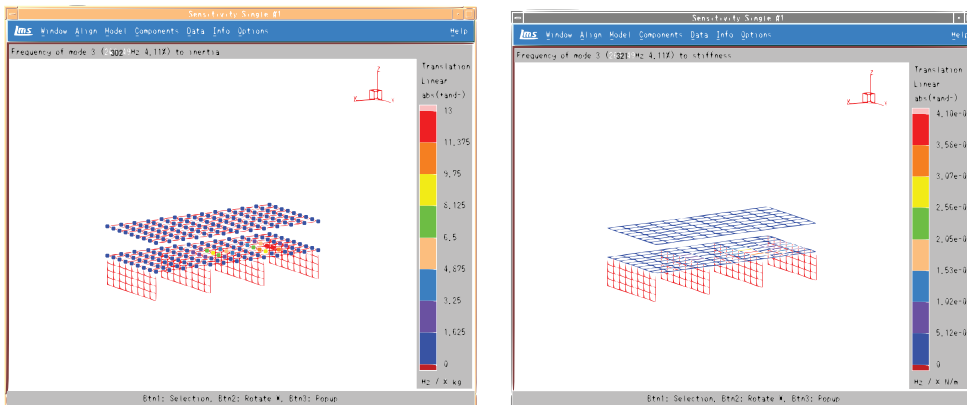
図 4.40 M9 の 2 階 点のモードシェイブ係数に対する感度



(1,1) モード 159 Hz (実物換算 5.3 Hz)



(1,2) モード 229 Hz (実物換算 7.6 Hz)



(1,3) モード 302 Hz (実物換算 10.1 Hz)

質量感度

剛性感度

注) 壁面は解析の対象外としている。  
感度の値は相対値を示す。

図 4.41 M9の振動数に対する感度

## 4.6 第4章のまとめ

建築構造体を単純化したプロトタイプ模型の実験結果から、構造部材追加と、振動伝搬性状の関係について考察している。

構造部材追加とモードシェイプの関係については、

- 梁は、モードシェイプの形状を変える。
- 壁面の位置は必ずモードの節となる。
- 振動の節に梁や壁面を追加しても、モードシェイプの形状はあまり変わらない。

なる傾向が認められている。床面のモードシェイプの形状は、低次モードについては (1,1) モード, (1,2) モード, (1,3) モードに分類できる。

壁面が追加されるケースに着目すると、

- M6 で壁面追加すると、この位置が振動の節となるため、(1,1) モードが認められなくなる。また、(1,2) モードについても振動の節の位置が、202 室中央から壁面の位置に移動する。
- (1,2) モードの節の位置が、壁面の位置にずれることにより、このモードの固有振動数が低くなり、振幅も小さくなる。
- さらに壁面を追加し、界壁 2 面設置する M7 とすると、(1,2) モードが認められなくなる。
- 下部構造が完成すると、2 階床面の振動の節となる位置が変化しなくなるため、2 階の壁面などを追加しても、固有振動数はあまり変わらない。
- (1,3) モードについては、構造部材追加により振動の節の位置が変化しないことから、概ね 300 Hz (実物換算 10 Hz) であり、振動数はあまり変化しない。

なる傾向が認められる。これらの傾向は、3 階の下部構造部材の追加となる M9 ~ M11 についても同様である。

梁追加の場合も含め、構造部材追加による振動性状の変化に着目すると、2 階床面の 1 次固有振動数については、下部構造が追加される M7 までは徐々に高くなる傾向が認められ、M7 以降は、あまり変化が認められない。1/3 Oct. バンドレベルについては、下部構造が追加される M7 までは、8Hz 以下の振動数域が構造部材追加に伴い減少する。また、それ以降の変化量は小さくなる。

各モデルで重要度 (レジデューベクトルに関わる指標, 付録 A.2.4 参照) が最も大きくなるモードは、M2 ~ M5 については (1,2) モードが、M6 ~ M10 については (1,3) モードが、M11, M12 については、近接する重根モードの合計で考えると (1,3) モードとなっている。

2 階全床面の FRF に着目すると、下部構造部材が追加される M7 までは、特に 10 Hz より小さい振動数域の固有振動数が変化する傾向が認められるが、上部構造部材の追加による、変化はあまり認められない。3 ~ 31.5 Hz の O.A. レベルについては、どのケースもあまり変化が認められていない。

室毎の結果に着目すると、

- 構造部材追加に伴う O.A. レベル (実物換算 3 Hz ~ 31.5 Hz) の変化は、2 階床面全体及び 201 室 (加振室) については、あまり認められない。202 室, 203 室には変化が認められ、加振室から離れるほど大きくなる。
- 202 室, 203 室においては、構造部材追加に伴い、O.A. レベルが概ね減少する。ただし、壁面の追加が非対称である M6 から対称となる M7 への構造部材追加のケースなどにおいては、共振しやすくなることから、振動が増加することもある。
- M6 のように壁面の追加が非対称となる方が、M7 のように対称となる場合よりも振動が減衰している。
- 201 室 (加振室) の FRF は、下部構造部材が追加される M3 ~ M7 については、(1,1) モードと (1,2) モードの変化に伴う卓越振動数の変化が認められる。上部構造の追加となる M8 ~ M12 については、FRF はあまり変化しない。
- FRF の変化について、201 室 (加振室) では変化が認められない場合でも、202 室, 203 室では認められており、加振室から遠い 203 室の方が変化量が大きい。
- 室毎の FRF に着目すると (1,2) モードなどでは、201 室 (加振室) よりも 203 室の振幅の方が大きくなるケースがある。
- 下部構造部材の追加の方が、上部構造部材の追加よりも変化量が大きい。

なる傾向が認められている。

構造部材追加による振動減衰量は表 4.16 に示す値となっている。

表 4.16 構造部材追加による O.A. レベル減衰量

追加構造部材	モデル	減衰量 [dB]			
		2 階全室	201 室 (加振室)	202 室 (隣室)	203 室
2 階下部 梁 (2 本)	M3-M5	0.8	-0.2	2.6	2.4
2 階下部 梁 (1 本)	M3-M4	0.4	0.0	1.9	0.8
2 階下部 壁 (2 枚)	M5-M7	0.7	0.1	2.0	3.0
2 階下部 壁 (1 枚)	M5-M6	1.0	0.3	2.2	4.6
2 階下部 梁 + 壁面 (2 枚)	M7-M3	1.5	-0.1	4.6	5.4
2 階上部 梁 + 壁面 (2 枚)	M9-M11	0.4	0.3	0.8	0.9
2 階上部 梁 + 壁面 (1 枚)	M9-M10	-0.2	-0.2	-0.6	0.2
2 階上部 梁 + 壁面 (周辺)	M8-M9	0.2	0.3	-0.5	0.9
2 階上部 1 層	M7-M11	1.2	0.7	1.9	4.7
2 階上部 3 層	M7-M12	1.5	0.7	3.1	8.8
2 階上部 柱 + 床面 + 周辺梁	M7-M8	0.6	0.1	1.5	2.9
2 階上部 上記 + 周辺壁面	M7-M9	0.8	0.4	1.0	3.8
2 階上部 上記 + 壁面, 梁 (1 枚)	M7-M10	0.6	0.2	0.5	3.9
追加構造部材	モデル	減衰量 [dB]			
		3 階全室	301 室 (加振室)	302 室 (隣室)	303 室
3 階下部 梁 + 壁面 (2 枚)	M9-M11	1.7	0.9	3.1	3.7
3 階下部 梁 + 壁面 (1 枚)	M9-M10	0.3	-0.8	0.3	3.4
3 階下部 梁 + 壁面 (周辺)	M8-M9	1.6	2.6	1.1	0.2

2 階床面に対する下部構造の追加 (M3 ~ M7) は、振動伝搬が概ね 1 方向と見なせるが、3 階床面に対する下部構造の追加 (M8 ~ M11) については、振動の伝搬経路が複数考えられる。異

なる振動伝搬経路の振動が干渉し、モード解が重根となるようなモードも存在していることから、M8～M9の構造部材の追加は、M3～M7ほど単純ではなく、複雑な挙動を示している。

モーダル解析による同定結果を利用して求められる感度解析の結果、

- 質量付加による対策は、モードシェイプの振幅が大きい場所に対しての効果が大きい。
- 剛性付加による対策は、モードシェイプの傾きが大きい場所に対しての効果が大きい。
- 減衰感度は、剛性感度と同様な傾向を示す。
- モードシェイプベクトルに対する感度解析の結果、対策効果の大きくなる場所は、評価点の位置に依存しない。
- 評価点の近くを対策するよりも、モードシェイプの振幅や傾きが大きい場所に対する対策の方が効果が大きい。

なる傾向が明らかになっている。

全般的に重要度が高くなる(1,3)モードに着目すると、このモードでは、室間の位置が振動の節となっている。構造部材追加の位置は、(1,3)モードの節の位置であり、質量感度、剛性感度共に低い場所となっている。

O.A. レベルに大きな変化が認められないが、これは、重要度の高い(1,3)モードに対し感度の低くなる場所への構造部材追加となっているためであると考えられる。



## 第 5 章

# FEM による構造変更と振動性状の 検証

前章では、プロトタイプ模型実験の結果から、構造部材の追加と振動伝搬性状の関係について考察を行っている。その結果、201 室（加振室）においては、構造部材追加による振動の減衰があまり認められない結果が得られている。本章では、この結果を確認するために、FEM（有限要素法）による数値解析を用いた検証を行う。また、FEM による数値解析を適用するための予測条件についても検討する。

### 5.1 FEM の予条件

#### 5.1.1 FEM 解析方法

FEM 解析には、愛知工業大学計算センターに導入されている汎用 FEM 解析ソフト MSC 社 Mark/Mentat を使用することにする。プロトタイプ模型を数値解析する際には、

1. 系全体を Solid 要素とする。（以下 Solid 要素とする。）
2. 床面・壁面を Shell 要素とし、柱・梁を Beam 要素とする。（以下 Shell-Beam 要素とする。）
3. 床面・壁面を Shell 要素とし、柱・梁を Solid 要素とする。（以下 Shell-Solid 要素とする。）

方法があげられる。

系全体を Solid 要素とする場合、要素の結合など、解析上の問題点はあまり無いが、要素数が大きくなるため、計算機の使用メモリーと解析時間が必要となる。

Shell-Beam 要素を採用する場合、梁と床面の中立軸が一致していないことから、この点をどう扱うか検討する必要がある。この部分の取り扱いについては、文献<sup>11)</sup>に示されるように、様々な考え方がある。この他に、柱・梁の中立軸の位置に、それぞれの要素を配置し、剛体で結合する方法があげられる。しかしながら、この方法では、せん断遅れが考慮されていないなど、動的問題を的確に把握できるか不明である。また、解析上、壁面の高さを階高とするか、

梁下までの内寸とするかなど、近似方法の相違により解が変わる不確定な部分を持っている。

Shell-Solid 要素は、Shell-Beam 要素の不確定な部分を無くすることができる方法であるが、接点の自由度が異なることから、単純に結合することができない。これらの要素を結合する方法として、h 法<sup>37)</sup>等が提案されている。

本論文では、不確定要素が少なく、どのような汎用 FEM 解析ソフトでも解析が可能である Solid 要素を採用する。また、8 接点 6 面体要素を用い、要素分割することにする。

模型実験の際、模型の固定方法はウレタン材で支持している。FEM 解析の際には、柱底部が柔らかい材料により支持されている条件としている。

### 5.1.2 物性値

FEM 解析に用いる弾性係数  $E$ 、密度  $\rho$ 、ポアソン比  $\nu$  は表 3.1 に示す値を採用する。弾性係数  $E$  は 3.1.3 項に示す方法により求めている。内部減衰係数については、レイリー減衰を採用する。表 3.5 に示す 1 次と 3 次の実験値から、式 (3.19) の係数  $\alpha, \beta$  を求め、解析条件として与えている。

## 5.2 1 層 1 スパン模型実験との対応

FEM 解析で用いる、解析条件を検証するために、1 層 1 スパン模型による実験値と、FEM による解析値を比較する。

### 5.2.1 1 層 1 スパン模型

1 層 1 スパン模型を図 5.1 に示す。4 層 3 スパン模型の加振室部分 (1 層 1 スパン分) を切り出した形状であり、基礎梁は省略している。

実験は、4.2 節と同じ方法で行っている。

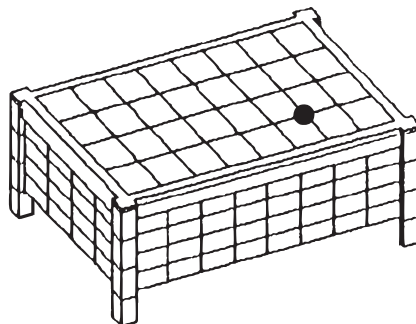


図 5.1 1 層 1 スパン模型

### 5.2.2 要素分割数の検討

有限要素法を適用する場合の要素分割の目安<sup>38)39)</sup>は、



- 計算の桁数を十分とれば、細かく分割の方が高精度な計算結果が得られる。
- アスペクト比は1に近い方が望ましく、15を超える要素は避ける。
- メッシュのパターンは規則的にすること。
- 厚み方向を少なくとも2分割(3層に分割)すること(Solid要素)。
- 半波長を数分割すること。

とされている

要素分割を検討するために、図5.1に示す床面と梁を取り出し解析する。要素分割の条件は、アスペクト比が1/5以内、柱の位置で固定の条件とする。図5.2, 図5.3に示すとおり、床厚方向を1層に分割する場合をb1, 2層に分割する場合をb2, 3層に分割する場合をb3, 4層に分割する場合をb4とする。

この分割による解析結果を図5.4, 表5.1に示す。節点数が多くなると、1次共振振動数は徐々に低くなり176 Hz程度に収束する傾向が認められる。b4の共振振動数を基準とする場合の振動数比を同表に示す。床を床厚方向に1層とする分割であるb1は、他と比べ、振動数比が大きくなっている。2層以上としたb2~b4は、振動数の誤差は7%以内となっている。3層とした場合(b3)、使用メモリの最大値は約2GBとなり、計算時間も7時間近く必要となっている。

b1~b4は、床と梁の要素の大きさが同程度となるように分割しているが、梁の部分は粗く分割しても良いと考えられる。b2の要素分割で、床版の部分のみ3層の分割とする結果(モデルb3')を同表に示す。振動数比は、b2と同程度の値であり、大幅に精度の向上が認められていない。この原因には、床版を3層に分割したことにより、アスペクト比が大きくなっていることが考えられる。

表5.1に示しているのは、1スパン分の床面と梁のモデルであり、建築構造体全体をFEMで予測する場合、要素数はさらに数倍~数十倍となる。要素数が多くなると、計算容量も大きくなることから、建築構造体をSolid要素によりモデル化する場合、床を2層~3層程度の分割とし、他の部材は、アスペクト比が大きくならないように要素分割することが目安になるものと考えられる。本論文では、b3'の分割方法を採用し、解析を行う。

表 5.1 要素分割と計算結果

モデル名	床厚方向の分割 [層]	要素数	節点数	最大使 メモリ [MB]	CPU 時間 [h]	1次共振 振動数 [Hz]	振動 数比 [/]
b1	1	1,458	2,978	102	0.2	204	1.16
b2	2	12,384	17,885	491	2.0	188	1.07
b3	3	41,796	54,220	1,913	6.7	188	1.03
b4	4	99,042	121,061	5,246	26.8	176	1.00
b3'	3	18,254	24,363	788	2.2	188	1.07

CPU:Itanium2 1.5GHz ,SPEC fp base2000:2130

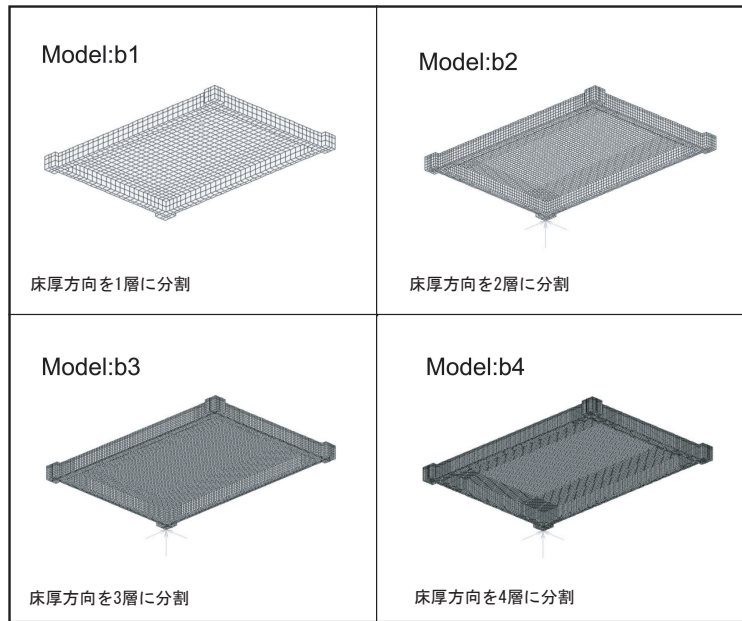


図 5.2 要素分割 (斜め下方からのアイソメ)

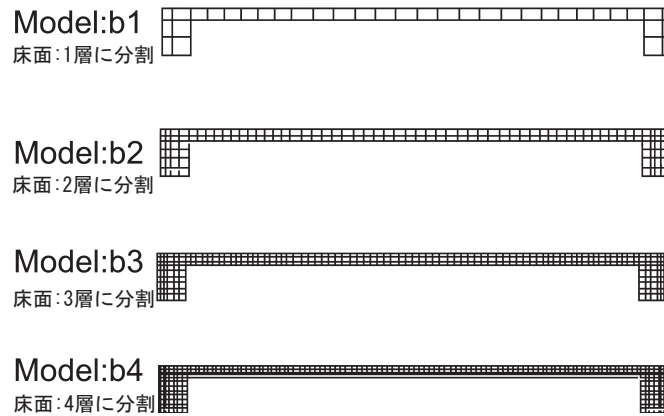


図 5.3 要素分割 (断面図)

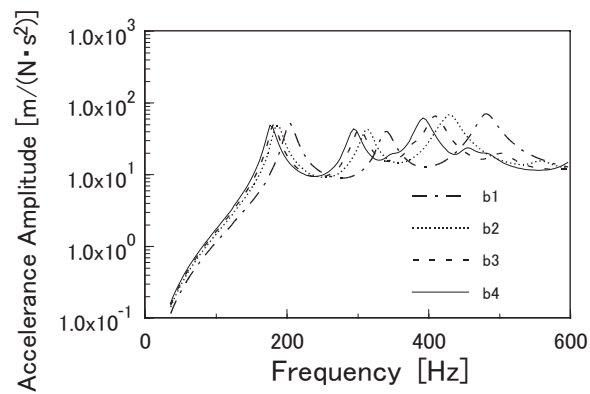


図 5.4 要素分割と FRF の関係

### 5.2.3 模型実験との対応

模型実験と FEM 解析による FRF のパワー平均値を図 5.5 に示す。図の FEM-N が FEM 解析結果である。FEM 解析の結果の方が、1 次、2 次共に固有振動数が高く、振幅が小さい傾向が認められている。振幅がやや小さいため、5.1.2 項の減衰係数  $\alpha, \beta$  を小さくすると、振幅は大きくなる。しかしながら減衰が小さくなると、固有振動数が高くなることから、両者の不一致は減衰以外の要因である。

模型実験において、加振点には質量 38 g の力ピックアップが設置され、加振棒を介し加振器に取り付けられている。加振点には、ピックアップの質量と、加振棒による拘束が生じていると考えられる。加振点に質量と、水平方向の拘束条件を加えて解析すると、同図の FEM-P の結果が得られる。

質量と、水平方向の拘束を加えることにより、模型実験と同様な結果が得られるようになる。次節でのプロトタイプ模型の検証には、加振ピックアップの質量等を考慮するモデルを用いることにする。

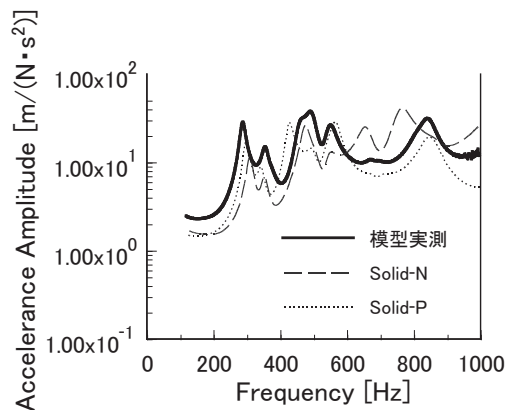


図 5.5 模型実験と FEM 解析結果の比較

## 5.3 プロトタイプ模型実験の検証

第 4 章のプロトタイプ模型による実験結果を FEM による解析結果と比較し、検証する。

### 5.3.1 模型の支持条件の検証

プロトタイプ模型実験では、柔らかいウレタン剤により支持していることから、柱底部は自由端の支持条件となっている。しかしながら、実際の建築構造体では、固定端に近い支持条件になっているものと考えられる。

自由端（ウレタン剤による支持）の支持条件と固定端の支持条件での解析結果を図 5.6 に示す。この結果を比較すると、同程度の値であるが、支持条件により差が生じている点もあるこ

とから、今後、基礎を含めたモデルについて検討する必要があるものとする。

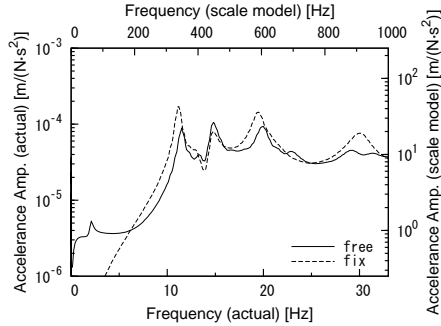


図 5.6 支持条件の比較

### 5.3.2 FRF (周波数応答関数) の比較

プロトタイプ模型実験の結果と FEM 解析の結果を比較する。M3, M5, M7 の FRF の比較を図 5.7 に示す。201 室, 203 室共に、5 Hz ~ 10 Hz 付近の固有振動数と振幅の変化は同様な傾向を示している。15 Hz 付近のモードについては、模型実験では卓越の帯域が広いピークとなっているが、FEM 解析の結果は、帯域が狭い形状となっている。

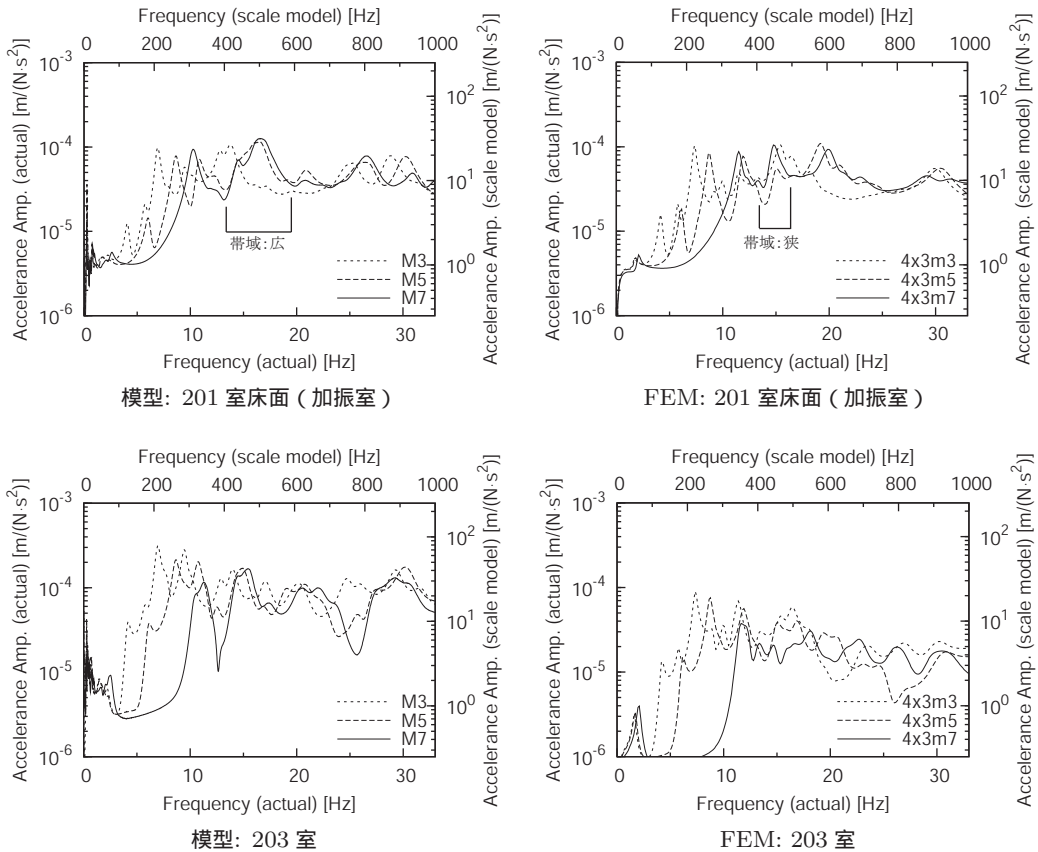


図 5.7 プロトタイプ模型実験と FEM の対応

M8, M9, M11 の FRF の比較を図 5.8 に示す。201 室（加振室）の結果に着目すると、模型実験, FEM 共に、構造部材追加に伴う差はあまり認められていない。FEM 解析の結果は、14 Hz 付近に反共振の谷が明確に現れている。301 室（3 階）の結果に着目すると、10 Hz 付近の (1,3) モードの共振ピークの大小関係は同様な傾向を示しているが、15 Hz 付近の卓越は、模型実験の方が、卓越の帯域が広い形状となっている。

このように、低次モードの変化などの傾向については、一致しているが、高い振動数域については、模型実験の方が、卓越の帯域が広がる点や、FEM では反共振による谷が認められているが、模型実験では、認められていない点が相違している。これは、模型実験では、図 4.6 ~ 図 4.17 のモードシェイプに不規則なゆがみが生じていることからわかるように、材厚や接着状況の僅かな変化等により、共振ピークにずれが生じるが、FEM は材料が均質である理想的条件の下での計算結果であることが原因としてあげられる。

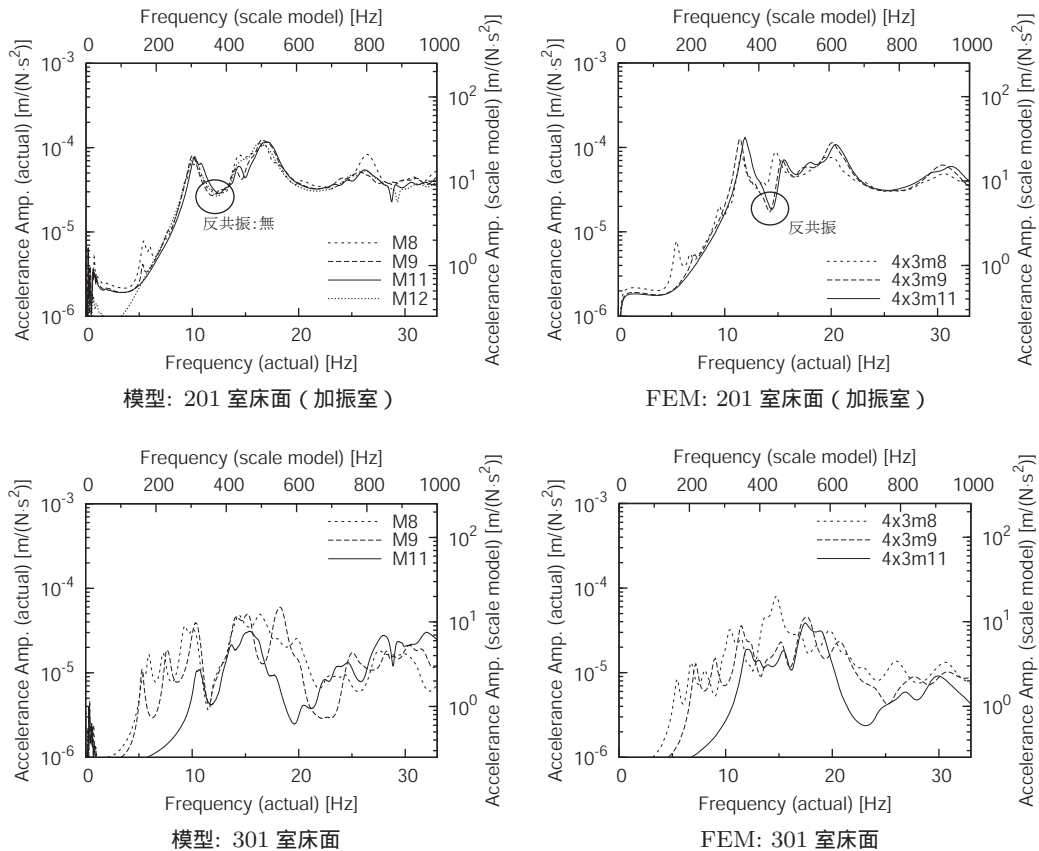


図 5.8 プロトタイプ模型実験と FEM の対応

### 5.3.3 1/3 Oct. バンドレベル

FEM により求めた 1/3 Oct. バンドレベルを図 5.9, 図 5.10 に示す。これらの結果は 4.3.4 項の模型実験の結果 (図 4.18, 図 4.19) と同じ傾向を示している。

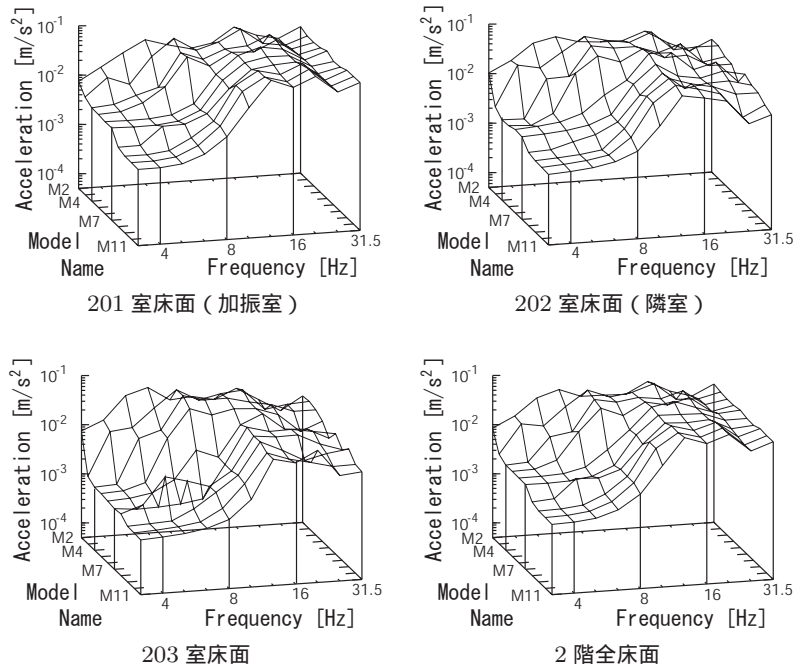


図 5.9 1/3 Oct. バンドレベル (FEM)

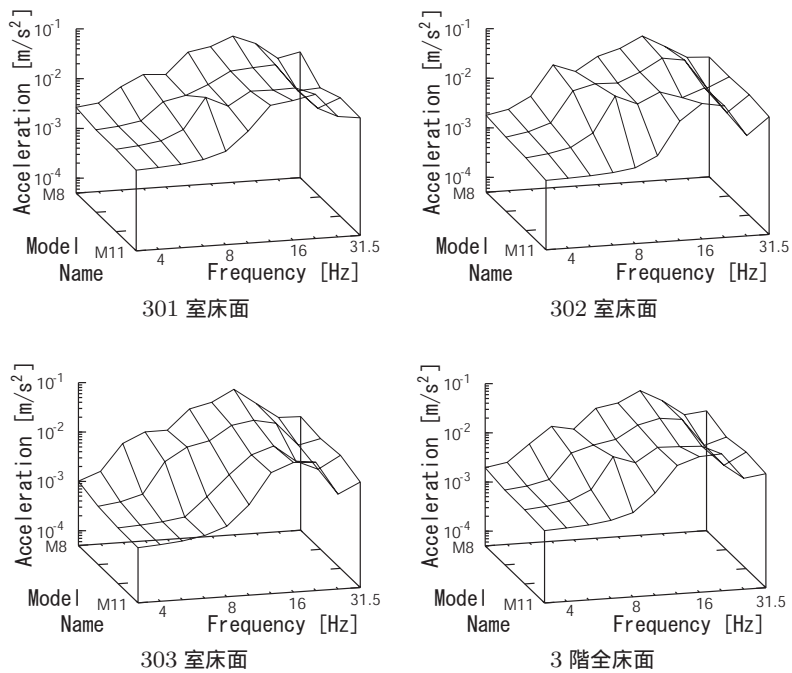


図 5.10 1/3 Oct. バンドレベル (FEM)

### 5.3.4 O.A. レベル

3 Hz ~ 31.5 Hz の帯域を合成した O.A. レベルを、表 5.2 に示す (模型の実験値は表 4.14)。構造部材追加と、O.A. レベルの変化を図 5.11 に示す。

O.A. レベルの絶対値は、FEMの方が若干小さい値となっている。構造部材追加に伴う変化については、201 室 (加振室) においては、増減があまり認められないが、その他の部屋では増減が認められている。また、加振室から離れるほど、構造部材追加による減衰が大きくなる傾向が認められている。

構造部材追加と、減衰量の関係は、異なる点も認められているが、全体的には、模型実験と同じ傾向を示している。

表 5.2 床振動の O.A. レベル (FEM)

	2 F				3 F			
	2F-All	201	202	203	3F-All	301	302	303
M3	80.6	81.8	81.1	79.3	-	-	-	-
M5	79.9	81.6	79.2	77.2	-	-	-	-
M7	78.8	81.5	76.5	72.9	-	-	-	-
M8	78.4	81.2	75.3	72.2	76.4	76.8	76.3	75.9
M9	74.0	73.5	75.6	72.8	74.0	73.5	75.6	72.8
M11	73.9	75.7	72.1	70.5	73.9	75.7	72.1	70.5

単位: dB

注)1/3Oct. バンド毎, 1kN のピンクノイズ加振の結果を示す。

2F-All は 2 階床面の, 3F-All は 3 階床面のパワー平均を示す。

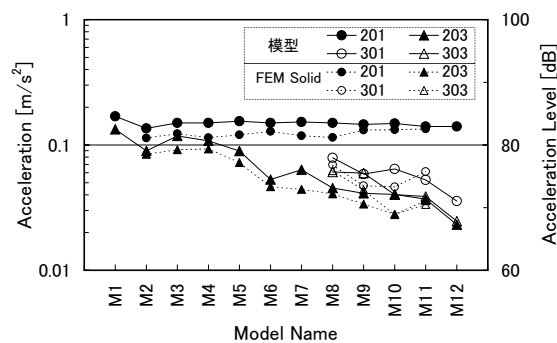


図 5.11 構造部材追加と O.A. レベル (模型実験と FEM 解析の比較)

## 5.4 第5章のまとめ

プロトタイプ模型実験の結果を検証するためにFEMによる数値解析を行っている。FEMの予測パラメータなどについて検討した結果、物性値については実測値を用いることや、Solid要素で床面を3層に分割することにより、実測値をある程度再現できる結果が得られている。

FEMによりプロトタイプ模型実験を検証した結果、

- 構造部材追加と、O.A.レベルの増減については、加振室(201室)ではあまり認められないが、その他の部屋では認められている。
- 加振室から離れるほど、構造部材追加による振動減衰量が大きくなる。
- 模型実験とFEMによる数値解析の結果を比較すると、O.A.レベル、1/3 Oct.バンドレベル、FRFの低次モードによる卓越の変化について、同様な傾向が認められている。

が得られており、模型実験と同じ傾向を示すことが明らかになっている。模型実験と、FEMによる数値解析の結果との相違点として、FRFに着目すると、模型実験の方が、15Hz以上の高次モードの振動数域において、共振の帯域幅が広い傾向が認められることや、FEMでは反共振が認められるが、模型実験では認められない点があげられる。模型実験においては、モードシェイプに不規則なゆがみが認められることなどから、材厚や、接着状況の僅かな変化などにより、共振ピークにずれなどが生じているものと考えられる。一方、FEMでは、条件が全て同じである理想的な条件の下の結果であるため、このようなゆがみが生じないものと考えられる。実構造体実験のモードシェイプにも不規則なゆがみが認められているため、FEM解析を利用する際は、このような誤差が生ずる可能性があることに注意する必要がある。



## 第6章

# 結論

本論文では、RC 建築構造体内の振動伝搬性状を明らかにするために、模型実験を中心に検討を行ってきた。

第1章では、本研究に関わる背景、研究の意義、既往の研究、本論文の構成について述べた。

第2章では、実構造体に対してのモーダル解析適用方法についての検討と、振動伝搬性状について考察した。実構造体においては、常時微動などの暗振動があり、加振点によっては、正しいFRFが測定できない場合があった。加振点選択のための実験を行った結果、構造体を十分に起振し、かつ正しいFRFを測定するためには、梁上よりも非梁上が望ましいこと等が明らかとなった。実験的モーダル解析の適用方法については、このように正しいFRFを測定すれば機械の分野で用いられている同定方法（Time Domain MDOF）により解析することが可能であった。

次に、モーダル解析の適用により、得られた解析結果からそれぞれの固有振動数における振動性状などを明らかにした。モードの確認指標である重要度を求めた結果、低次のモードの重要度が高くなった。また、感度解析の結果から、質量付加による対策は、モードシェイプの振幅が大きい場所に、剛性や減衰付加に対する対策は、モードシェイプの傾きが大きくなる場所が有効であること等を示した。

第3章では、第2章で実験を行った実構造体を対象とした1/50縮尺の亚克力ル模型を作製し、検討した。模型の作製には、相似則の緩和や、地盤構造等の単純化が必要であった。これらが及ぼす影響を考察したところ、減衰の相違により差が生ずるが、モーダルパラメータを補正することで、実構造体の結果に近い値を得ることができた。このように、亚克力ル模型により建築構造体内の振動伝搬性状についての検討が可能であることを示した。また、模型実験により得られる減衰比は、一般的なRC建築構造体と同程度の値を示していることから、一般的な減衰を有する構造体を対象とした場合、減衰の補正は必要なく、亚克力ル模型実験の結果をそのまま用いることができることを示している。

第4章では、構造を単純化したプロトタイプ模型により、構造部材の追加と振動伝搬性状の関係について考察した。構造部材追加と、振動低減量の関係に着目すると、加振室の床面では、構造部材を追加しても振動低減があまり生じない傾向を示した。一方、その隣室などにおいては、振動低減が生じ、加振室から離れるほど、その量は大きくなる傾向が認められた。

プロトタイプ模型実験の下部構造部材追加のように、構造部材が無いところに、部材を追加する時の方が上部構造部材追加のように、既に部材が追加されているところに部材を追加するよりも効果が大きいことを示した。また、壁面を非対称に配置した方が、対象に配置するよりも振動が小さくなることがあることなども示した。さらに、感度解析の結果から、振動の低減のためには、評価点の付近の対策よりも、モードシェイプの振幅や傾きが大きい箇所の対策の方が有効であることを示した。

第5章では、第4章のプロトタイプ模型実験の結果についてFEMによる数値解析を用いて検証した。この検証には、まずFEMの予測条件の検討が必要であるため、これらを考察した。FEMによる検証の結果、低次モードについては、プロトタイプ模型実験とFEMで同様な傾向が認められた。模型実験の高次モードについては、材厚の僅かな変化などにより、共振の卓越帯域幅が広がることや、反共振の谷が認められなくなる結果が得られた。FEMでは材厚等の条件が一定である理想条件の下での解析結果であり、これらの影響は認められなかった。実構造体では、模型同様、材厚の僅かな変化などによる影響が認められることから、FEM解析を行う際は、このような差が生じる可能性があることに注意する必要がある。

振動対策を実施する場合、その対策効果を把握するための測定を行うことになる。今回の実験結果から判断すると、加振室のように加振点を含む部屋では、効果が現れにくいことや評価する場所により、低減量が変化するものと考えられる。振動低減量を評価するためには、評価される位置にも着目する必要がある。

本論文では、プロトタイプ模型により、構造部材追加と、その低減量を明らかにした。今後は、小梁の影響、材厚、スパン長の変更などの検討に加え、非構造部材である、間仕切壁の影響についても明らかにする必要があると考える。FEM解析により、模型実験の振動伝搬性状がある程度再現できることが明らかになった。今後は、FEM解析と模型実験、実構造体実験を併用し検討を進めるつもりである。

基礎や地盤面については、模型実験、FEMの結果共に、建築構造体内の振動伝搬に影響する結果が得られた。今後、地盤基礎構造のモデル化についても明らかにしていく必要がある。FEM解析については、条件設定の根拠が明確ではないパラメータも数多い。従って、単純な構造体の実験結果や模型実験の結果などを用い、これらを明らかにしていく必要があるものと考えられる。

本論文では、建築構造体内の振動伝搬性状に及ぼす要因や振動伝搬の傾向を明らかにすることができた。床振動の伝搬には、面外振動の影響が大きく、モードシェイプの形状と密接に関わる結果が得られた。今後、これらの結果を踏まえ、振動伝搬性状のメカニズムをさらに明らかにすると共に、振動伝搬の予測方法や、振動低減対策の方法についても検討する所存である。

## 謝辞

本論文は、筆者が愛知工業大学大学院を卒業後、アクト音響振動調査事務所に在籍し、騒音・振動のコンサルタント業務を遂行する傍ら、同大学成瀬研究室において研究を続け、得られた成果を取りまとめたものであります。

愛知工業大学工学部 教授 成瀬治興 先生には、音響・振動学の第一歩から応用まで、現在に至る 15 年もの間御指導いただきました。学問としての音響の他、音を楽しむことや楽しませること、環境影響評価や環境保全など多岐にわたり御指導を頂きました。卒業後は、職場の業務遂行に関連した御指導も頂き、施設・機器の提供を含め、多大なる御協力を頂きました。深く御礼申し上げますと共に、これからも御指導・御鞭撻いただけますよう、お願い申し上げます。

愛知工業大学工学部 教授 比嘉俊太郎 先生には、研究の初期の段階から、研究者としての姿勢、研究の考え方など御指導頂きました。心から御礼申し上げます。

愛知工業大学工学部 教授 久野和宏 先生には、三重大学に御在籍の時から、勉強会、共同研究を通じ、振動-音響系の物理現象の数式化や、都市音環境に関する予知・診断・保全技術を中心に、音響学について御指導いただきました。また、研究について多数御助言を頂きました。心から御礼申し上げます。

愛知工業大学工学部の建築系の先生方には、在学中も含め、多岐にわたり御指導頂きました。特に、教授 小池幸男 先生には、鉄筋コンクリート材料学について御指導いただきました。教授 石田和人 先生には、構造力学のついて御指導頂き、週末の実験・解析する際になどに激励を頂きました。教授 岡田久志 先生には、耐震の方面からの建築振動について御指導いただきました。心から御礼申し上げます。

愛知工業大学工学部音響・振動系の先生方には、主に大学院卒業後に御指導いただきました。機械学科 教授 安田仁彦 先生には、モーダル解析の理論について御指導いただきました。電気学科 教授 井研治 先生には、信号処理について御指導いただきました。機械学科 教授 堀康郎 先生には 振動学について御指導いただきました。心から御礼申し上げます。

工学院大学 教授 塩田正純 先生には、環境振動の研究の意義や、動向をお教えいただくと共に、公害振動の歴史についても御指導頂きました。心から御礼申し上げます。

リオン 横田明則 氏、産業技術総合研究所 国松直 氏、飛鳥建設 内田季延 氏、神奈川県 横島潤紀 氏、鉄道総合技術研究所 伊積康彦 氏をはじめとする騒音制御工学会の環境振動系分科会や日本建築学会の環境振動測定手法小委員会の委員の方々には、環境振動について御指導頂きました。心から御礼申し上げます。

アクト音響振動調査事務所山本和寛 社長、はじめ幹部の方々から、騒音・振動に係わる業務を通じ、コンサルタントとしての在り方、技術を応用し実用する方法などについて御指導頂きました。特に、厚井 弘志 顧問（前大阪府）からは騒音・振動問題に対する評価方法や保全方法などを御指導いただきました。野田賢次 部長からは、入社当初から環境影響評価に関連する業務を通じ、御指導いただきました。赤松展年 所長からは、信号処理、予測方法などを中心に御指導いただきました。また、社員の皆様からは、研究に対する御理解、御協力頂きました。心から御礼申し上げます。

アクト音響振動調査事務所 林健太郎 氏とは、毎週末、愛知工業大学成瀬研究室において、共に研究に励み、数多くの議論を重ねて参りました。また、研究を進めるにあたり、惜しみない協力を頂きました。心から御礼申し上げます。

愛知工業大学 成瀬研究室 に在籍中に研究を共にした鈴木裕久 氏、北畠弘基 氏、服部憲明 氏、神谷俊行 氏、水野俊介 氏からは実験・解析の他、数々の協力を頂きました。また、卒研生諸君にも協力を頂きました。心から御礼申し上げます。

最後に、研究活動を支援してくれた両親と、データとりまとめや図表作成などの他、多方面で支え、励ましてくれた妻陽子に感謝します。

## 文献

- 1) 内藤克彦, 田中里佳: 振動防止行政の現状と課題, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp59-62, 2007.4.
- 2) 建築物の振動に関する居住性能指針・同解説, 日本建築学会, 2004.5.
- 3) 鹿島教昭, 国松直, 藤本正典, 田中里佳: 振動規制法施行状況調査からみた振動苦情への対応実態, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp83-86, 2007.4.
- 4) Rayleigh, Lord : The theory of sound
- 5) Timoshenko, S.(竹下市松, 渡辺茂共訳) : 工業振動学, 東京図書, 1966
- 6) Ritz, W. : Ann. Physik, Vol28, 1909
- 7) Leissa, A.W : Vibration of Plates, NASA SP-160, NASA, Washington, D.C.
- 8) 小嶋英治 : 長方形床の固定度と振動数の算定式に関する研究, 東急建設技術研究所報, No23, pp.239-224, 1997
- 9) 加藤泰正, 中間俊雄他 : 床スラブの振動の算定に関する設計支援システム (その1~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.299-308, 1997
- 10) 井野智: 鉄筋コンクリート床スラブの振動性状について, 日本建築学会論文報告集, No273, pp13-pp24, 1978.11
- 11) 鉄筋コンクリート構造の有限要素法解析と設計法研究委員会: コンクリート構造の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン, 日本コンクリート工学協会, 1989.3
- 12) 田中治, 久我新一: 3次元直交交差部における曲げ波、縦波およびねじれ波の伝搬解析建築躯体における固体音伝搬性状の研究-第3報日本建築学会計画系論文報告集, No.389, pp10-19, 1987.7
- 13) 田中治, 久我新一: 柱・梁材の3次元直交交差部における固体伝搬率計算図表の作成と伝搬性状の二三の考察曲げ波、縦波およびねじれ波の伝搬解析建築躯体における固体音伝搬性状の研究-第4報日本建築学会計画系論文報告集, No.417, pp1-10, 1990.11
- 14) 橋本典久: 小梁付床版の音響域振動への FEM の適用とその振動性状について建築物床版の振動と音響放射に関する研究・その1, 日本建築学会計画系論文集, No372, pp1-8, 1987.2
- 15) 橋本典久, 桂充宏: 建築物床版の振動と音響放射に関する研究 その4 床版振動解析における間仕切壁の定量的評価について
- 16) 櫛田裕: 環境振動工学入門, 理工図書, 1997
- 17) 江守一郎: 模型実験の理論と応用 (第二版), 技報堂出版, 1988
- 18) Terada, T. and Tsuboi, C. : Experimental Studies on Elastic Waves Part1 , Bull. Earthg. Res. Inst.,Tokyo Univ.,Vol.3 , 1927
- 19) 森地重輝, 田村重郎: ゲル材料を用いた動力的模型実験解析の一方法について, 土木学会論文報告集, No.310, 1981.6
- 20) 志村正幸, 菅広見, 義江龍一郎: 環境振動に関する模型実験, その2, 均質地盤モデルにおける振動伝搬
- 21) 二井義則: 半無限体モデルを用いた定常振動の伝搬特性の測定 (1), 日本音響学会講演論文集, 1979.10
- 22) 成瀬治興: 道路交通機関による環境振動の実体調査結果とその予測の一方法, 日本建築学会論文報告集, 第344号, 1984
- 23) 伊藤和也, 村田治, 日下部治: 地盤環境振動の物理モデル化と振動遮断壁の振動低減効果について, 日本騒音制御工学会春期研究発表会講演論文集, pp75-78, 2007
- 24) 松田由利, 橋秀樹, 石田聖光: 建築構造物中における個体音の伝搬性状, 日本音響学会誌, Vol.35, No.11, 1979
- 25) 橋本典久, 桂充宏: 建築物床版の振動と音響放射に関する研究 床版振動の境界条件に関する RC

- 縮尺模型実験による基礎的検討日本音響学会講演論文集, pp623-624, 1987.10
- 26) 安田仁彦: モード解析と動的設計, コロナ社, 1993
  - 27) 長松昭男: モード解析入門第2刷, コロナ社, 1994
  - 28) 大久保伸行: 機械のモーダル・アナリシス(第5刷), 中央大学出版, 1995.5
  - 29) 倉部誠: 図説モード解析入門, 大河出版
  - 30) LMS International: LMS Cada-X modal analysis manual, LMS International
  - 31) 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解析(第4刷), 日本建築学会, 1990
  - 32) 矢田部浩, 運上茂樹: 非線形動的解析に用いる粘性減衰のモデル化と非減衰振動系の復元力モデルに関する一考察, 土木学会第8回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2005
  - 33) 塩田正純: 公害振動の予測手法, 井上書院, 1986.6
  - 34) 西岡隆: 構造振動解析, 培風館, 1996.4
  - 35) Instructions and application. Complex modules apparatus Type 3930, B&K
  - 36) 振動測定入門, B&K
  - 37) 松山英人, 田辺誠: シェル、ソリッド結合構造のh法FEM解析の自動化について, 日本計算工学会論文集, 1999.5.
  - 38) 戸川隼人: 有限要素法へのガイド, サイエンス社, 1979
  - 39) 東町高雄: 有限要素法のノウハウ, 森北出版, 1993
  - 40) 大野隆司: 東京工芸大学建築構法研究室ホームページ, <http://minerva.ohnolab.arch.t-kougei.ac.jp/Material/Cemical.htm>
  - 41) フィンテック社: フィンテック社ホームページ(物性一覧), <http://www.fintech.co.jp/etc-data/kinzoku-data.htm>
  - 42) UMG ABS(株): UMG ABS(株)ホームページ, [http://www.umgabs.co.jp/jp/qanda/q08\\_table.htm](http://www.umgabs.co.jp/jp/qanda/q08_table.htm)
  - 43) 小野田 ALC(株): ALC 建築の設計.2 試験データ編, 1987.4

## 論文・発表

### 関連する査読論文

1. 佐野泰之, 成瀬治興, 林健太郎 : RC 床スラブの振動性状に関する実構造部加振実験と加振点の検討, 日本建築学会計画系論文集, 第 521 号, pp.41-46, 1999.7
2. 佐野泰之, 成瀬治興, 林健太郎 : RC 建築構造物における振動伝搬性状に関する模型実験 実構造物加振実験と模型構造物加振実験との対応について, 日本建築学会計画系論文集, 第 561 号, pp.1-6, 2002.11
3. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興 : RC 建築構造体における振動伝搬性状に関する模型実験 プロトタイプ模型による構造部材の追加と振動伝搬性状との関係について, 日本建築学会環境系論文集, 第 73 巻 第 624 号, pp.153-160, 2008.2

### 国際学会での発表

1. Yasuyuki SANO, Kenji NODA, Toshiharu SUEHIRO, Kazuhiro YAMAMOTO : Automatic Device Which Discriminates Aircraft Noise By Using Frequency Characteristics, The Seventh Western Pacific Regional Acoustic Conference, 409, pp.409-1-409-2, 2000.10
2. Shigenori YOKOSHIMA, Kazutugu HIRAMATSU, Yasuyuki SANO, Yoshihiro HIRAO, Yoshiki NAGASEKI, Takeshi GOTO : Measurements of vibrations in a wooden apartment house due to running trains, International Symposium on Environmental Vibrations, 2005.9
3. Hidenobu UCHIDA, Akinori Yokota, Yasuyuki SANO, Haruoki NARUSE : Prediction model "INCE/J RTV-Model 2003" for ground vibration caused by road traffic. Part1:Outline of the prediction model, Inter Noise, 2006.12
4. Yasuyuki SANO, Tatsuo MIYAKE, Hidenobu UCHIDA, Haruoki NARUSE : Prediction model "INCE/J RTV-Model 2003" for ground vibration caused by road traffic. Part2 : Procedure for calculation., Inter Noise, 2006.12

## 著書

1. 久野和宏, 野呂雄一, 成瀬治興, 佐野泰之 他 : 建築音響 反射音の世界, 技報堂出版, 2005.6
2. 久野和宏, 野呂雄一, 成瀬治興, 佐野泰之 他 : 音を診る 騒音の計測と評価/dB と  $L_{Aeq}$ , 技報堂出版, 2006.8

## 学会誌掲載

1. 佐野泰之, 野田賢次, 末広利治, 山本和宏 : 音源識別機能を有する騒音・振動自動測定装置 ASA, 騒音制御, Vol26, No.4, pp.274-277, 2002.8
2. 佐野泰之, 野田賢次 : 周波数情報を利用した音源識別と騒音監視の実施例, 騒音制御, Vol29, No.5, 2005.10

## 関連する発表

1. 鈴木裕久, 成瀬治興, 佐野泰之 : RC 建築床構造の実験的モーダル解析 加振点の検討と隣室も含めた解析結果について, 日本音響学会騒音振動研究会資料, EA94-12, pp.7-12, 1994.5
2. 鈴木裕久, 成瀬治興, 佐野泰之 : RC 建築床構造の実験的モーダル解析 加振点の検討と隣室も含めた解析結果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1843-1844, 1994.9
3. 鈴木裕久, 成瀬治興, 佐野泰之 : RC 床構造の実験的モーダル解析 加振点の検討と2次元振動モードモデルによる検討結果について, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.269-272, 1995.2
4. 成瀬治興, 鈴木裕久, 佐野泰之 : 建築床振動の実験的モーダル解析 その1 梁・壁追加による床振動性状の推移に関する模型実験, 愛知工業大学研究報告, pp.71-74, 1995.4
5. 成瀬治興, 鈴木裕久, 佐野泰之 : 建築床振動の実験的モーダル解析 その2 実構造物とその模型の実験結果の比較, 愛知工業大学研究報告, pp.75-80, 1995.4
6. 佐野泰之, 成瀬治興, 鈴木裕久 : RC 床構造の振動性状に関する実験的モーダル解析 実構造物とその模型の加振実験結果の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.297-298, 1995.8
7. 成瀬治興, 佐野泰之, 北畠弘基 : 建築構造体の振動性状に関する実験的モーダル解析, 愛知工業大学研究報告, pp.131-136, 1996.4
8. 佐野泰之, 成瀬治興, 北畠弘基 : RC 建築構造体の振動性状に関する実験的モーダル解析 壁体を含めた2室間の振動伝搬性状及び強制振動応答解析, 日本音響学会騒音振動研究会資料, EA96-8, pp.25-30, 1996.5



9. 北畠弘基, 成瀬治興, 佐野泰之: 建築構造体の振動性状に関する実験的モーダル解析 その1 壁体を含めた2室間の振動伝搬性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.257-258, 1996.9
10. 佐野泰之, 北畠弘基, 成瀬治興: 建築構造体の振動性状に関する実験的モーダル解析 その2 強制振動応答解析及び感度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.259-260, 1996.9
11. 北畠弘基, 成瀬治興, 佐野泰之: RC 建築構造物の2室における環境振動の伝搬性状, 日本音響学会騒音振動研究会資料, EA97-9, pp.31-38, 1997.5
12. 佐野泰之, 成瀬治興, 北畠弘基: RC 建築構造体の振動性状に関する実験的モーダル解析 周波数応答関数の測定結果からの加振点の検討, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.244-244, 1997.9
13. 佐野泰之, 成瀬治興, 北畠弘基: RC 建築構造体の振動伝搬性状に関する実験的モーダル解析 周波数応答関数の相反性などによる加振点の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.267-268, 1997.9
14. 北畠弘基, 成瀬治興, 佐野泰之: RC 構造物の2室における環境振動の伝搬性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.269-270, 1997.9
15. 成瀬治興, 北畠弘基, 林健太郎, 佐野泰之: 建築構造体における環境振動の伝搬性状に関する研究 4層3スパンRC構造物模型における振動伝搬性状, 愛知工業大学研究報告, pp.161-166, 1998.4
16. 林健太郎, 成瀬治興, 北畠弘基, 佐野泰之: RC 建築構造体における振動性状に関する研究 4層3スパン構造物模型実験, 日本音響学会騒音振動研究会資料, EA98-7, pp.15-22, 1998.5
17. 林健太郎, 成瀬治興, 佐野泰之: RC 建築構造体の振動性状に関する実験的モーダル解析 4層3スパンRC構造物模型による振動伝搬性状実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.229-300, 1998.9
18. 林健太郎, 成瀬治興, 佐野泰之: RC 建築構造体における振動伝搬性状に関する研究 周波数応答関数から求めたエネルギー比率の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.327-328, 1998.9
19. 林健太郎, 成瀬治興, 佐野泰之: 4層3スパンRC建築構造体模型実験による振動伝搬性状について 床面、壁面ごとの周波数応答関数の検討, 音響学建築音響研究会資料, AA99-5, pp.1-6, 1999.1
20. 佐野泰之, 成瀬治興, 林健太郎: 建築構造体の振動性状に関する実験的モーダル解析 模型構造体での壁面追加などによる振動性状の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.329-330, 1999.9
21. 佐野泰之, 成瀬治興, 林健太郎: 建築構造体における振動伝搬性状に関する模型実験 基礎構造の影響の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.305-306, 2000.9
22. 林健太郎, 成瀬治興, 佐野泰之: 建築構造体における振動伝搬性状に関する研究 応答エネルギーによる振動伝搬の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.307-308, 2000.9

23. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興: 有限要素法による建築構造体の振動性状の予測に関する基礎的検討, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.237-240, 2006.9
24. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興: 建築構造体の振動性状の予測に関する検討 有限要素法の適用に関する基礎的検討, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2006-55, 2006.11
25. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興: 有限要素法を適用した環境振動の予測に関する検討 要素モデルの検討, 日本建築東海支部研究報告集, pp.313-316, 2007.2
26. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興: 建築構造体の振動伝搬性状に関する模型実験と有限要素法 Solid 要素モデルの適用方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.355-356, 2007.8
27. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興: 建築構造物における実験的モーダル解析の適用事例, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.209-212, 2007.9
28. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興: RC 建築構造体における構造部材追加による振動伝搬性状に関する実験的研究 4層3スパン模型利用による検討, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2008-27, 2008.5

## その他の発表

1. 佐野泰之, 成瀬治興, 鈴木裕久: 衝撃加振による振動及び音響放射に関する実験的研究 周辺固定長方形板に点加振した場合, 日本音響学会騒音振動研究会資料, EA94-11, pp.1-6, 1994.5
2. 佐野泰之, 成瀬治興, 鈴木裕久: 衝撃加振による板材料の振動伝搬及び音響放射に関する実験的研究 周辺固定長方形板に点を与えた場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1845-1846, 1994.9
3. 佐野泰之, 鈴木裕久, 成瀬治興, 福富善貞, 浅井透: 軽量気泡コンクリート床構造のモーダル解析 実構造物と模型実験との対応について, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.273-276, 1995.2
4. 佐野泰之, 成瀬治興, 福富善貞, 浅井透: 軽量気泡コンクリート実構造物の振動性状に関するモーダル解析, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.397-400, 1996.2
5. 佐野泰之, 野田賢次, 末広利治, 山本和宏: 周波数特性を利用した航空機騒音の自動識別, 日本音響学会講演論文集, pp.675-676, 2000.3
6. 佐野泰之, 野田賢次, 末広利治, 山本和宏: 周波数特性を利用した航空機騒音の自動識別装置, 日本音響学会講演論文集, pp.11-12, 2000.3
7. 佐野泰之, 野田賢次, 末広利治, 山本和宏: 周波数特性を利用した道路交通騒音の自動測定装置, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.117-120, 2000.9
8. 佐野泰之, 松下泰衛, 野田賢次, 末広利治, 山本和宏: デジタルフィルターを用いた騒音監視システム, 大阪環境測定分析事業者協会講演要旨集, pp.42-46, 2000.10

9. 林健太郎, 成瀬治興, 佐野泰之: 地盤 - 建物系の振動伝搬性状 その1 実験方法と周波数応答関数, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.327-328, 2001.9
10. 佐野泰之, 成瀬治興, 林健太郎: 地盤 - 建物系の振動伝搬性状 その2 固有振動数, 減衰比及びモードシェイプ, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.329-330, 2001.9
11. 佐野泰之, 成瀬治興, 林健太郎: 地盤と建築構造体の振動伝搬性状に関する実験的モード解析, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.101-104, 2001.9
12. 佐野泰之, 久野和宏, 成瀬治興: 高架構造物音の発生メカニズムに関する考察, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N2002-12, 2002.2
13. 佐野泰之, 久野和宏, 成瀬治興: 車両走行に伴う高架橋の低周波音発生機構について, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N2002-28, 2002.5
14. 林健太郎, 成瀬治興, 佐野泰之: 住宅建築構造物の振動伝搬性状に関する加振実験 その1 実験方法と周波数応答関数, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.265-266, 2002.8
15. 佐野泰之, 成瀬治興, 林健太郎: 住宅建築構造物の振動伝搬性状に関する加振実験 その2 振動レベル分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.267-268, 2002.8
16. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興, 久野和宏: 道路交通による高架構造物音の発生メカニズム, 日本建築学会東海支部研究報告集, 41号 306, pp.429-432, 2003.2
17. 林健太郎, 佐野泰之, 成瀬治興: 住宅建築構造物の振動伝搬性状に関する加振実験, 日本建築学会東海支部研究報告集, 41号 307, pp.433-436, 2003.2
18. 佐野泰之, 成瀬治興, 林健太郎: 地盤から建築構造物への振動伝搬に関する加振実験, 研究発表会講演論文集, pp.105-108, 2003.4
19. 佐野泰之, 林健太郎, 服部憲明, 神谷俊行, 成瀬治興: 地盤から建築構造物への環境振動伝搬に関する加振実験, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2003-25, 2003.5
20. 服部憲明, 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興, 久野和宏: 道路交通騒音の建物群による減衰の実測例, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2003-27, 2003.5
21. 佐野泰之, 林健太郎, 服部憲明, 神谷俊行, 成瀬治興: 地盤 - 建物系の振動伝搬性状 その3 振動加速度レベル分布, 日本建築学会大会, pp.263-264, 2003.9
22. 神谷俊行, 成瀬治興, 服部憲明, 佐野泰之, 林健太郎: 建築構造体の振動性状に関する基礎実験, 日本音響学会講演論文集, pp.711-712, 2003.9
23. 佐野泰之, 林健太郎, 神谷俊行, 服部憲明, 成瀬治興: 地盤から建築構造物への環境振動伝搬に関する加振実験 振動増幅・減衰量の検討, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2003-66, pp.1-8, 2003.11
24. 神谷俊行, 服部憲明, 水野俊介, 成瀬治興, 佐野泰之, 林健太郎: 建築構造体における振動伝搬性状の基礎実験 周波数応答関数から求めた応答エネルギーの相対レベルの比較, 日本建築学会東海支部研究報告集, 42号 320, pp.421-424, 2004.2
25. 服部憲明, 神谷俊行, 水野俊介, 成瀬治興, 佐野泰之, 林健太郎: 道路交通振動予測に関する実験的研究 自動車の加振力測定方法の検討, 日本建築学会東海支部研究報告集, 42号 322, pp.429-432, 2004.2

26. 服部憲明, 神谷俊行, 水野俊介, 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興 : 道路交通振動の発生と伝搬に関する実験的研究 加振力の測定方法の検討と実験結果, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2004-27, 2004.5
27. 神谷俊行, 服部憲明, 水野俊介, 林健太郎, 佐野泰之, 成瀬治興 : 建築構造体模型による振動伝搬性状基礎実験 面外振動のエネルギー伝搬について, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2004-28, 2004.5
28. 佐野泰之, 服部憲明, 神谷俊行, 水野俊介, 林健太郎, 成瀬治興 : 自動車の加振力の測定方法の検討 その1 測定方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.239-240, 2004.8
29. 服部憲明, 佐野泰之, 神谷俊行, 水野俊介, 林健太郎, 成瀬治興 : 自動車の加振力の測定方法の検討 その2 測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.241-242, 2004.8
30. 林健太郎, 神谷俊行, 水野俊介, 服部憲明, 佐野泰之, 成瀬治興 : 建築構造体における振動伝搬性状の基礎実験 その1 実験方法とモーダル解析結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.721-722, 2004.8
31. 水野俊介, 林健太郎, 神谷俊行, 服部憲明, 佐野泰之, 成瀬治興 : 建築構造体における振動伝搬性状の基礎実験 その2 L、T、X字型模型におけるエネルギー伝搬について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.723-724, 2004.8
32. 神谷俊行, 林健太郎, 水野俊介, 服部憲明, 佐野泰之, 成瀬治興 : 建築構造体における振動伝搬性状の基礎実験 その3 柱梁あり6面体におけるエネルギー伝搬について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.725-726, 2004.8
33. 水野俊介, 神谷俊行, 服部憲明, 成瀬治興, 佐野泰之, 林健太郎 : 畳上の振動測定に関する2, 3の実験例, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2004-52, 2004.11
34. 水野俊介, 神谷俊行, 服部憲明, 成瀬治興, 佐野泰之, 林健太郎 : 畳上の振動測定に関する実験と検討, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.365-368, 2005.2
35. 神谷俊行, 服部憲明, 水野俊介, 成瀬治興, 佐野泰之, 林健太郎 : 建築構造体における振動伝搬性状の基礎実験 梁有り正六面体における面外振動のエネルギー伝搬について, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.369-372, 2005.2
36. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興, 久野和宏 : 車両走行に伴う高架橋の低周波音発生機構について タイヤと路面間の凹凸、段差及び車両の加重による発生機構についての検討, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2005-16, 2005.3
37. 水野俊介, 成瀬治興, 佐野泰之, 林健太郎 : 畳上の振動測定に関する実験と検討 荒板上と畳上における振動の感じ方の比較について, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2005-27, 2005.5
38. 佐野泰之, 伊積康彦, 永関慶樹, 平松和嗣, 横島潤紀, 後藤剛史, 成瀬治興 : 鉄道走行時の家屋内振動実測結果について その3 床振動のモーダル解析結果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.219-220, 2005.8
39. 林健太郎, 神谷俊行, 水野俊介, 成瀬治興, 佐野泰之 : 建築構造体の接合部における振動伝搬性状に関する模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.221-222, 2005.8

40. 水野俊介, 成瀬治興, 佐野泰之, 林健太郎: 畳上の振動測定に関する実験と検討 畳上の振動測定に関する実験と検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.201-202, 2005.8
41. 林健太郎, 水野俊介, 佐野泰之, 成瀬治興: 畳上の振動測定に関する実験と検討 ピックアップの設置条件と設置共振に関する検討, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2006-28, 2006.5
42. 久野和宏, 成瀬治興, 柴田伸幸, 田中進, 渡辺祐三, 佐野泰之: 都市の音環境 社会調査データの声, 愛知工業大学 総合技術研究所 研究報告 8号, pp.49-52, 2006.6
43. 林健太郎, 佐野泰之, 成瀬治興: 畳上の振動測定に関する実験と検討 実荷重による応答特性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.187-188, 2006.9
44. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興: 畳上の振動測定に関する実験と検討 錘荷重による応答特性の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.189-190, 2006.9
45. 林健太郎, 佐野泰之, 成瀬治興: 畳上の振動測定に関する実験と検討 実荷重による畳床組構造におけるピックアップの応答特性の検討, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.245-248, 2006.9
46. 林健太郎, 佐野泰之, 成瀬治興: 畳上の振動測定に関する実験と検討 木造住宅の和室での測定事例, 日本建築東海支部研究報告集, pp.317-320, 2007.2
47. 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興: 交通振動の住宅への振動伝搬性状の測定例 道路交通振動と地下鉄振動の振動伝搬性状の比較, 日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集, pp.71-74, 2007.4
48. 服部憲明, 佐野泰之, 林健太郎, 成瀬治興, 久野和宏: 新幹線鉄道沿線住民を対象とした生活環境調査 騒音・振動に対する住民反応と実測値の対応, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2007-21, 2007.5
49. 久野和宏, 成瀬治興, 佐野泰之, 林健太郎, 服部憲明: 名古屋市域における新幹線鉄道騒音振動に対する住民反応, 愛知工業大学 総合技術研究所 研究報告 9号, 2007.6
50. 久野和宏, 成瀬治興, 柴田伸幸, 田中進, 渡辺祐三, 佐野泰之: 都市の音環境に関する診断、予知、保全技術の開発, 愛知工業大学 総合技術研究所 研究報告 9号, 2007.6
51. 林健太郎, 佐野泰之, 成瀬治興: 交通振動の住宅への振動伝搬性状の測定例 地盤から木造住宅 2階への振動増幅の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.323-324, 2007.8
52. 林健太郎, 佐野泰之, 成瀬治興: 畳上の振動測定に関する実験と検討 木造住宅 1階和室と実験室における応答特性の検討, 日本音響学会騒音振動研究会資料, N-2008-28, 2008.5



## 付録 A

# モーダル解析

### A.1 モーダル解析に関わる方程式

モーダル解析の理論については、文献<sup>27, 26, 28, 29)</sup>で紹介されている。ここでは、本論文に関わる方程式を以下にあげる。

構造物の運動方程式は、質量  $[M]$ 、減衰  $[C]$ 、バネ定数  $[K]$  の振動系に外力  $F$  が加わるとすると、

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F \quad (\text{A.1})$$

とおくことができる。

入力(加振点)  $i$  から受振点  $j$  への Compliance  $H_{c,ij}(\omega)$  は留数 (Residue)  $R_{ij\kappa}$ 、極 (Pole)  $\lambda_\kappa$  を用い

$$H_{c,ij}(\omega) = \sum_{\kappa=1}^N \left( \frac{R_{ij\kappa}}{(j\omega - \lambda_\kappa)} + \frac{R_{ij\kappa}^*}{(j\omega - \lambda_\kappa^*)} \right) \quad (\text{A.2})$$

と表される。Accelerance  $H_{a,ij}(\omega) = -\omega^2 H_{c,ij}(\omega)$  は

$$H_{a,ij}(\omega) = -\omega^2 \sum_{\kappa=1}^N \left( \frac{R_{ij\kappa}}{(j\omega - \lambda_\kappa)} + \frac{R_{ij\kappa}^*}{(j\omega - \lambda_\kappa^*)} \right) \quad (\text{A.3})$$

と表される。

モード  $\kappa$  に対する極 (Pole)  $\lambda_\kappa$  は、不減衰角振動数  $\omega_{n,\kappa}$ 、減衰比  $\zeta_\kappa$  を用いると

$$\lambda_\kappa = -\zeta_\kappa \omega_{n,\kappa} + j\omega_{n,\kappa} \sqrt{1 - \zeta_\kappa^2} \quad (\text{A.4})$$

となる。

留数 (Residu)  $R_{ij\kappa}$  は、モードシェイプ係数  $\psi$  と複素スケール係数  $d_\kappa$  を用いて、

$$R_{ij\kappa} = \psi_{i\kappa} \psi_{j\kappa} / d_\kappa \quad (\text{A.5})$$

と表される。また、複素スケール係数  $d_\kappa$  は、質量  $m$ 、減衰角振動数  $\omega_{d,\kappa}$  を用い、

$$1/d_\kappa = \frac{1}{2jm_\kappa \omega_{d,\kappa}} \quad (\text{A.6})$$

の関係がある。

減衰角振動数  $\omega_{d,\kappa}$  と不減衰角振動数  $\omega_{n,\kappa}$  は

$$\omega_{d,\kappa} = \omega_{n,\kappa} \sqrt{1 - \zeta_{\kappa}^2} \quad (\text{A.7})$$

なる関係がある。

## A.2 解析結果の確認指標

実験的モーダル解析は、FRF の実測値から振動系の運動方程式を同定している。この同定結果には、測定誤差と解析誤差が生ずるものと考えられる。これらを評価するために、モードの確認指標が種々提案されている。しかし、これらは広く知られていないため、ここで計算方法を紹介しておく<sup>30)</sup>。

### A.2.1 FRF の総和

FRF の総和  $H_{\text{sum}}$  は、次式で定義される。FRF  $H(\omega)$  の実数部を  $Re(H(\omega))$ 、虚数部を  $Im(H(\omega))$  とおくと  $H_{\text{sum}}$  の実数部は、FRF の実数部  $Re(H(\omega))$  の絶対値の平均値であり虚数部は、FRF の虚数部  $Im(H(\omega))$  の絶対値の平均値である。

$$H_{\text{sum}}(\omega) = \sum_{n=0}^N (|Re(H(\omega))|) / N + j \sum_{n=0}^N (|Im(H(\omega))|) / N \quad (\text{A.8})$$

比例粘性減衰系の場合、共振モードにおける各測定点の位相は、 $0 \text{ rad}$  か  $\pi \text{ rad}$  ( $0^\circ$  か  $180^\circ$ ) となるため、このような平均を行うと、モードが強調される。

モード解析の初期には、上式の分母  $N$  は無かったため、総和と呼ばれた。最近では上式に示す平均が採用されているが、名前はそのまま残り FRF の総和と呼ばれている。

### A.2.2 MOV

自然界に存在する振動系では、質量を付加した場合、振動数が低くなることが知られている。Mode Overcomplexity Value (以下 MOV とする)  $V_{\text{MOV}}$  は、モーダル解析で求めた振動系の接点 (各測定点) において、質量を付加した際に、振動数が下がる接点 (測定点) の割合を示すものである。MOV は次式により定義される。この値は、100% に近くなるほど信頼性のあると考えることができる。

$$V_{\text{MOV}} = \left( \left( \sum_{\kappa=0}^N w_{\kappa} V_{\text{sens},\kappa r} \right) / \left( \sum_{\kappa=0}^N w_{\kappa} \right) \right) \times 100 \quad (\text{A.9})$$

ここに、 $w_{\kappa}$  : 重み付け係数 (1 若しくは  $|\psi_{j\kappa}|^2$ )、 $V_{\text{sens},\kappa r}$  : =1 質量付加した場合振動数が下がる場合、=0 それ以外、 $\psi_{j\kappa}$  : モードシェイプ係数



### A.2.3 MPC 指数と MPD

比例粘性減衰系においては、モードシェイプ係数  $\psi_{ir}$  の位相が  $0\text{rad}$  若しくは  $\pi\text{rad}$  (ノーマルモード) となる。モードシェイプの位相特性の評価方法として、Modal phase collinearity(MPC) 指数及び Mead phase deviation(MPD) があげられる。

#### MPC 指数

MPC 指数はモードシェイプベクトルの位相の直線性と示す指数である。まず

$$\tilde{\psi}_{ir} = \psi_{ir} - \left( \sum_{\kappa=1}^N \psi_{\kappa r} \right) / N \quad i = 1, 2, 3 \cdots N \quad (\text{A.10})$$

とおき、さらに

$$\epsilon = \frac{|Im(\tilde{\psi})_r|^2 + |Re(\tilde{\psi})_r|^2}{2 \left( Re(\tilde{\psi})_r Im(\tilde{\psi})_r \right)} \quad (\text{A.11})$$

$$\theta = \arctan \left( |\epsilon| + \sin(\epsilon) \sqrt{(1 + \epsilon^2)} \right) \quad (\text{A.12})$$

とすれば、MPC 指数は、

$$V_{\text{MPC}} = \frac{|Re(\tilde{\psi})_r|^2 + \left( Re(\tilde{\psi})_r Im(\tilde{\psi})_r \right) (2(\epsilon^2 + 1) \sin^2 \theta - 1)}{|Re(\tilde{\psi})|^2 + |Im(\tilde{\psi})|^2} / \epsilon \quad (\text{A.13})$$

と表される。

#### MPD

MPD は、モードベクトルの位相偏差を示すものである。

$\varphi$  はモードシェイプ係数  $\psi[\text{rad}]$  を  $0 \sim \pi$  の位相となるように回転されたものであり、 $\arctan(Re(\psi_{\kappa r})/Im(\psi_{\kappa r})) \geq 0$  の場合は  $\varphi_{\kappa r} = \arctan(Re(\psi_{\kappa r})/Im(\psi_{\kappa r}))$  であり、 $\arctan(Re(\psi_{\kappa r})/Im(\psi_{\kappa r})) < 0$  の場合は  $\varphi_{\kappa r} = \arctan(Re(\psi_{\kappa r})/Im(\psi_{\kappa r})) + \pi$  である。位相の重み付け平均  $V_{\text{MP},r}$  は

$$V_{\text{MP},r} = \left( \sum_{\kappa=1}^N w_{\kappa} \varphi_{\kappa r} \right) / \left( \sum_{\kappa=1}^N w_{\kappa} \right) \quad (\text{A.14})$$

ここに、 $w_{\kappa}$ :重み付け係数 (1 若しくは  $amp(\psi_{j\kappa})$ ),  $amp(\psi_{j\kappa})$ : $\psi_{j\kappa}$  の振幅

MPD  $V_{\text{MPD}}$  はこれらを使い

$$V_{\text{MPD}} = \sqrt{\left( \sum_{\kappa=1}^N w_{\kappa} (\varphi_{\kappa r} - V_{\text{MP},r})^2 \right) / \left( \sum_{\kappa=1}^N w_{\kappa} \right)} \quad (\text{A.15})$$

と表される。

## A.2.4 重要度

重要度 (Modal participation)  $V_p$  は、ある参照点 (加振点) に対する評価対象とするモードのレジデュースと全モードのレジデュースの和との比率であり、次式により計算される。 ( $N_1$ :受振点数,  $N_2$ :モード数) この値により、モードの影響度 (重要度) を把握することができる。

$$V_p(\kappa) = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^{N_1} R_{ji\kappa}}{\sum_{i_\kappa=1}^{N_2} \sum_{i=1}^{N_1} R_{ji\kappa}} \quad (\text{A.16})$$

## 付録 B

# 構造体図面

B1 に実構造体の、B2 に実構造体模型の、B3 にプロトタイプ模型の詳細図面を示す。

### B.1 実構造体

平面図を図 B.1～図 B.3 に示し、梁伏図を図 B.4～図 B.7 に示す。杭基礎図を図 B.8, 図 B.9 に示す。断面図を図 B.10, 図 B.11 に示し、部材断面図を図 B.12～図 B.16 示す。基礎を図 B.17 に示し矩形図を図 B.18 に示す。

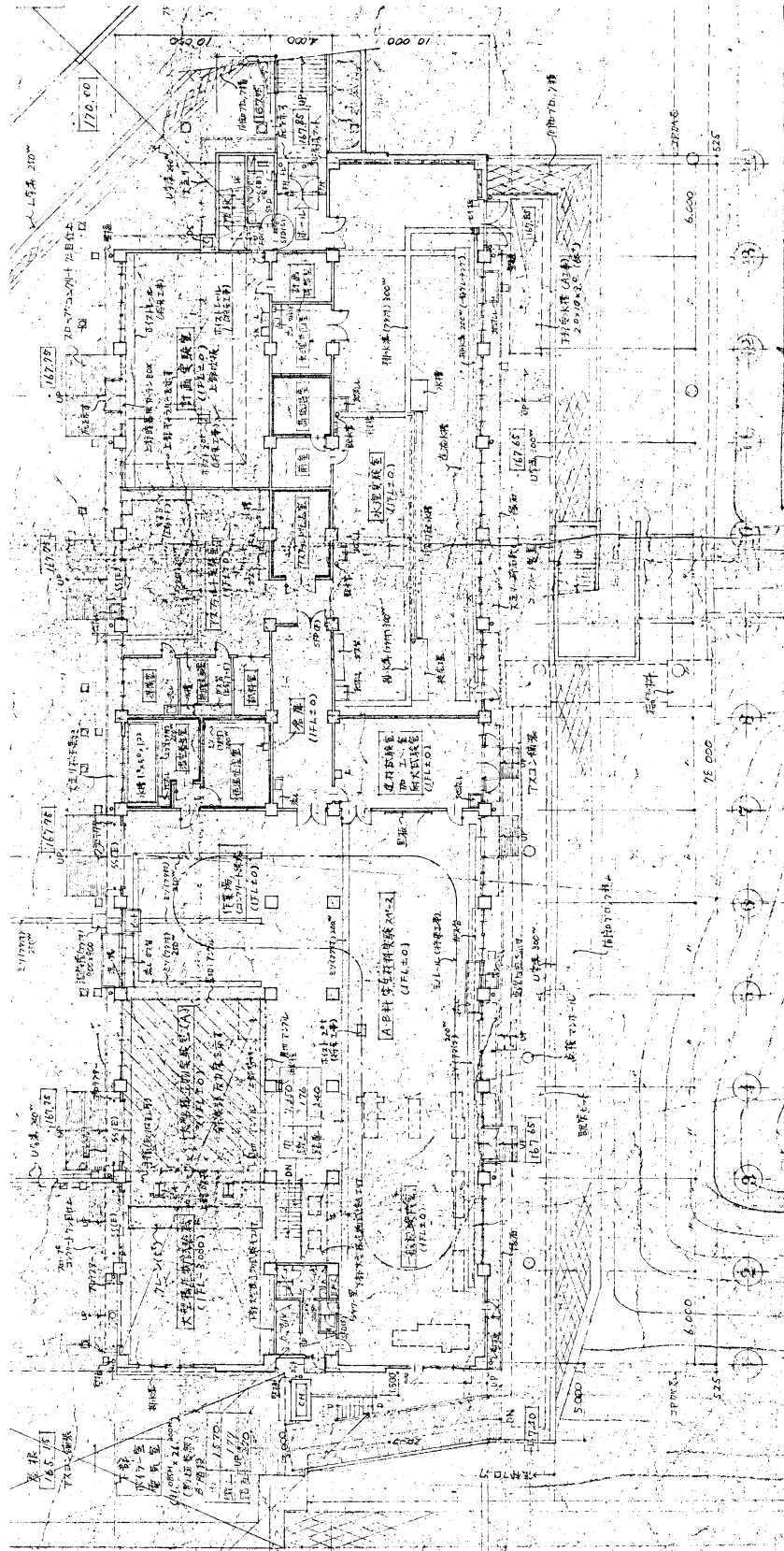


図 B.1 1 階平面図

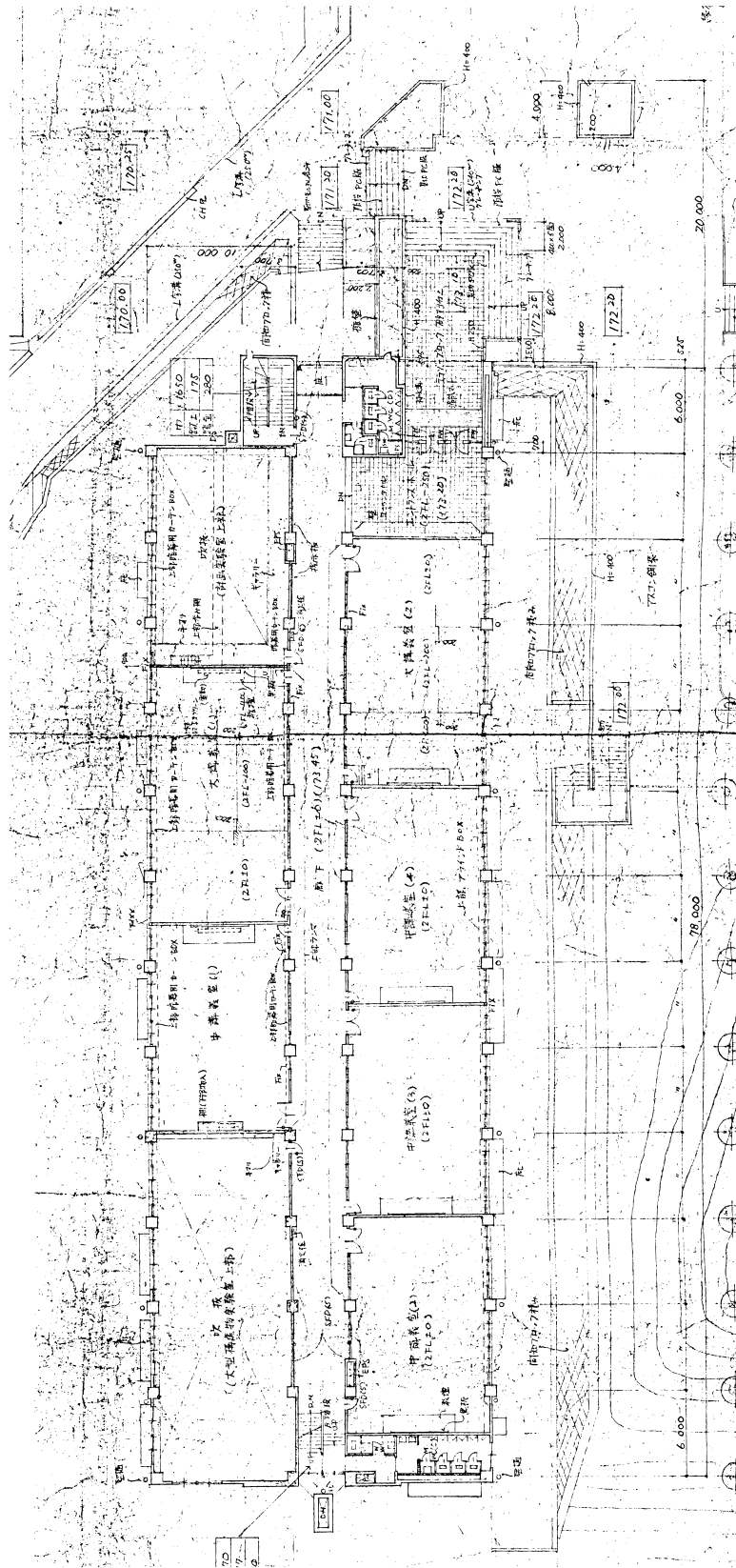


図 B.2 2階平面図

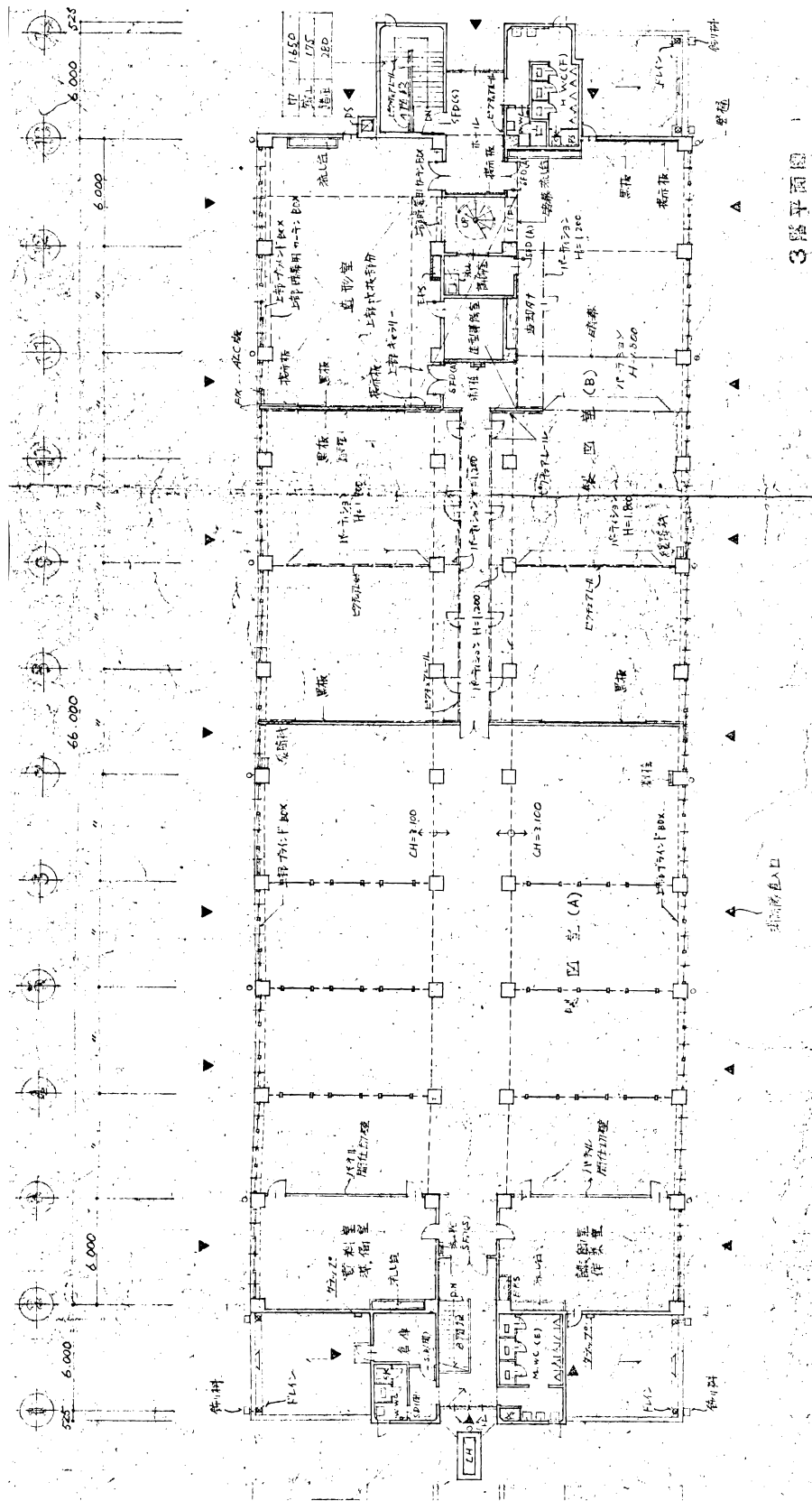


図 B.3 3階平面図

3階平面図

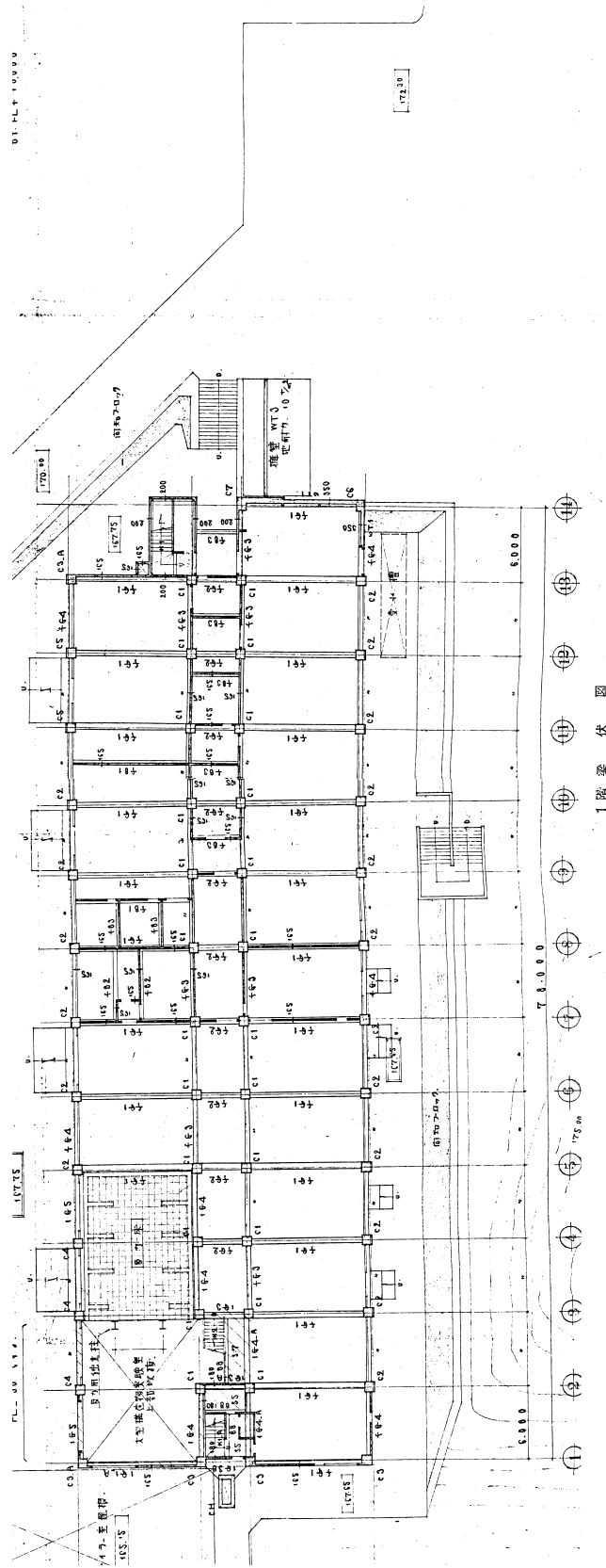


図 B.4 1階梁伏図

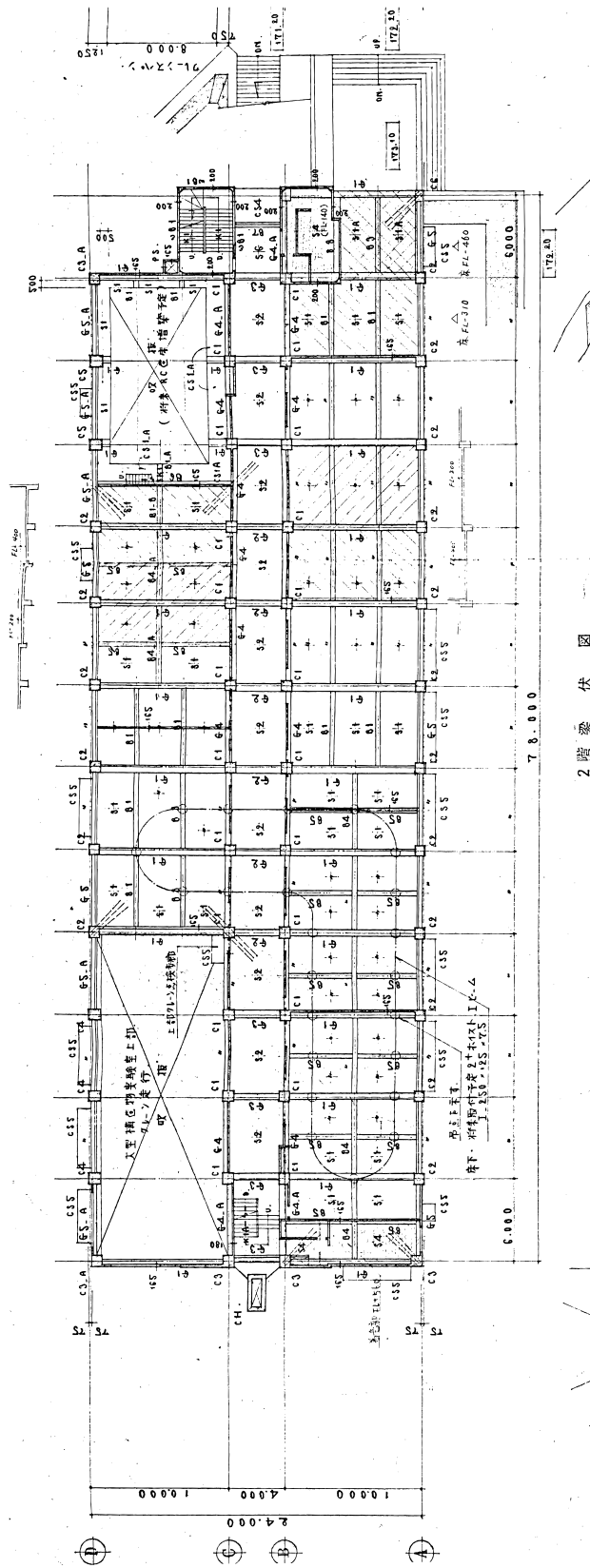


図 B.5 2階梁伏図



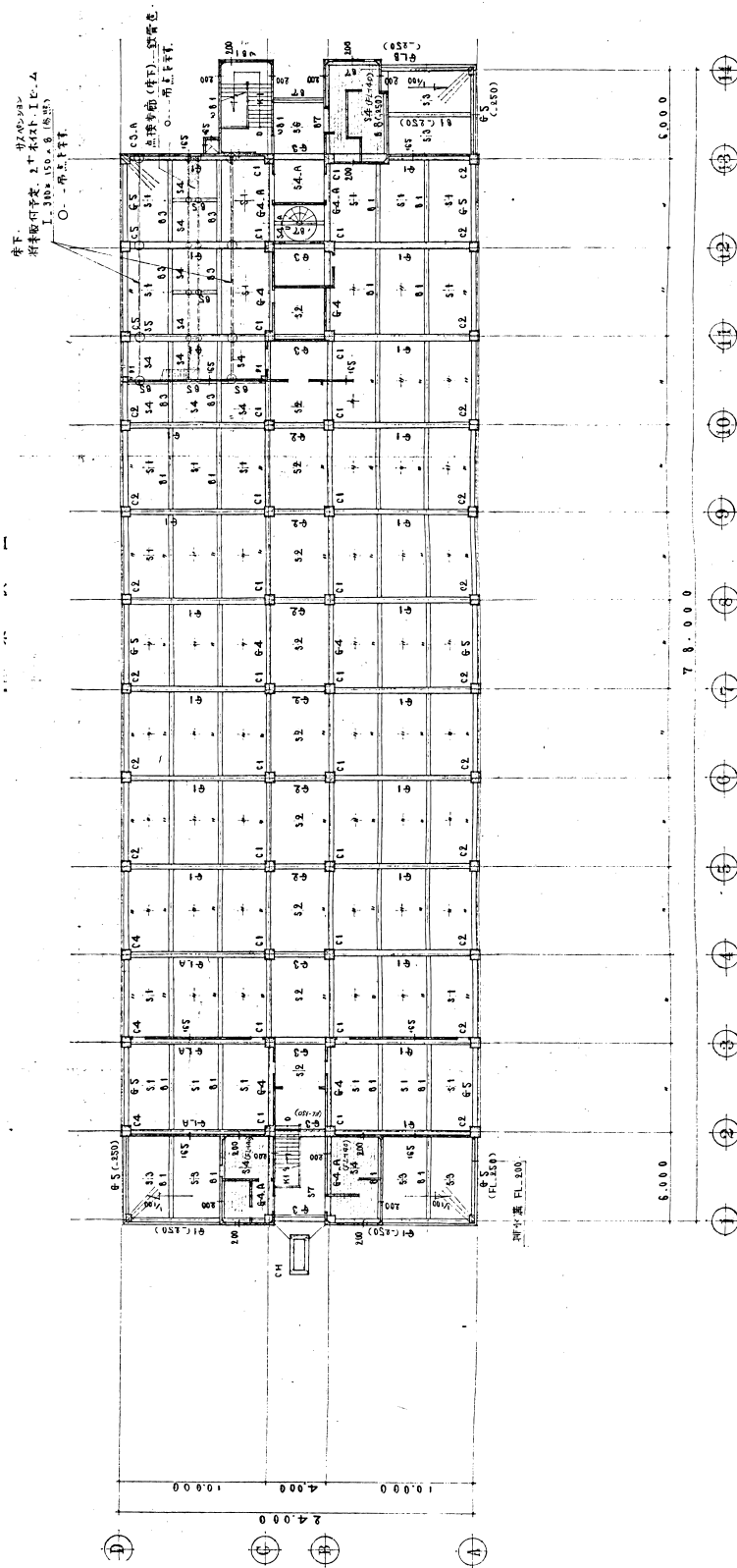
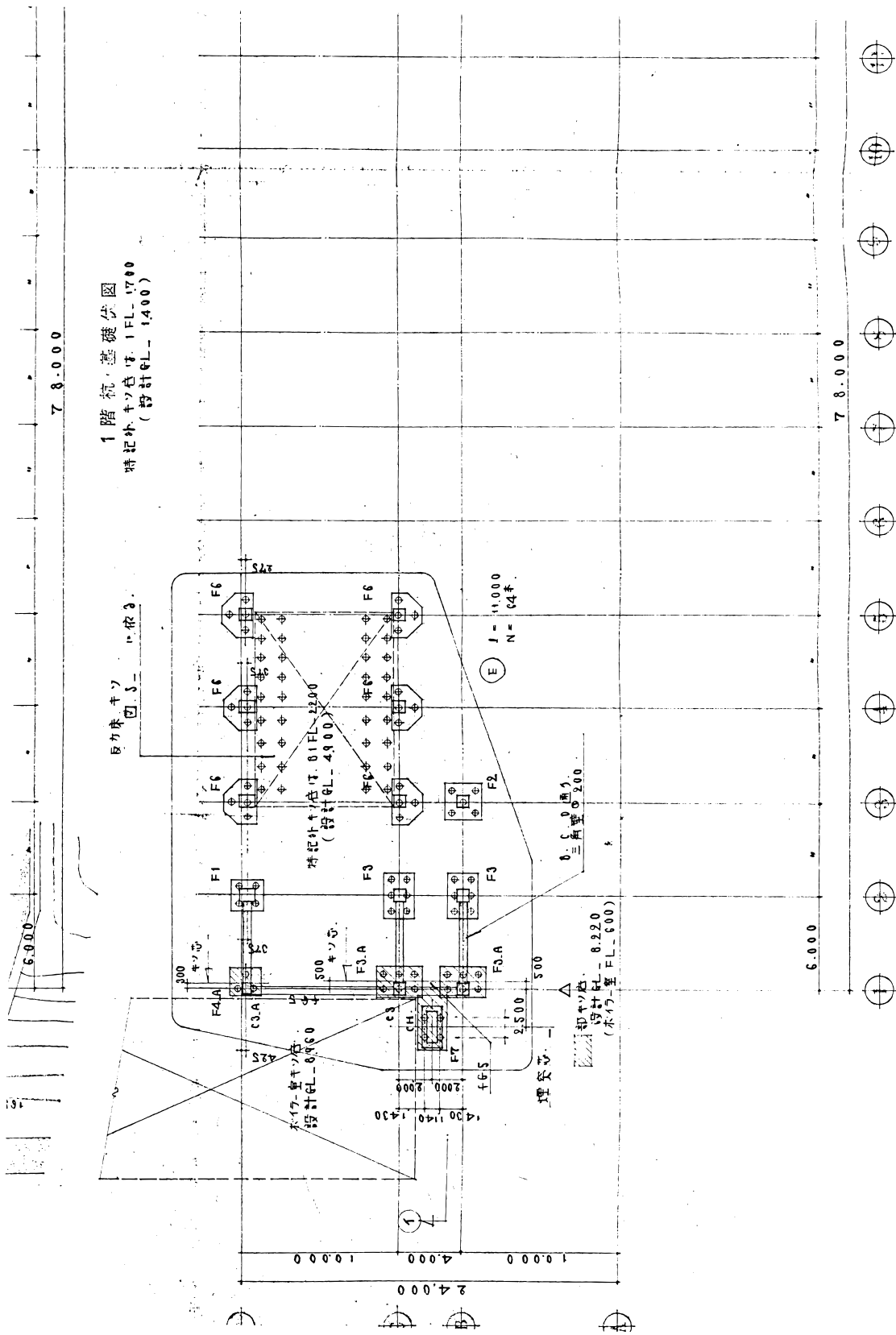


図 B.6 3階梁伏図







1階杭基礎伏図

図 B.9 地階杭基礎伏図

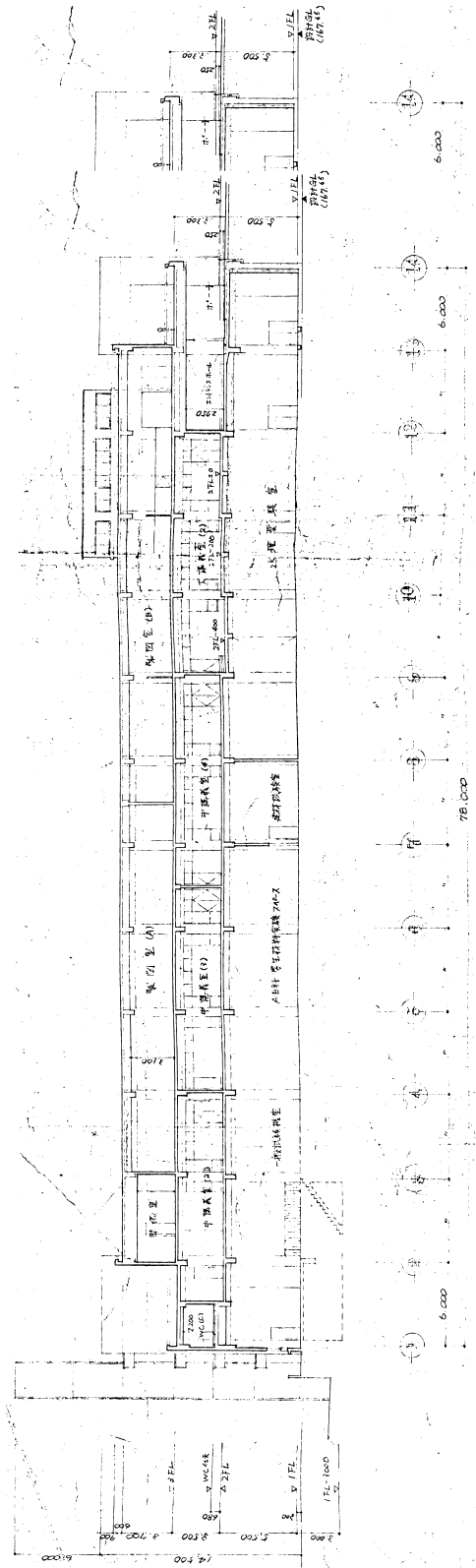


図 B.10 縦断面図

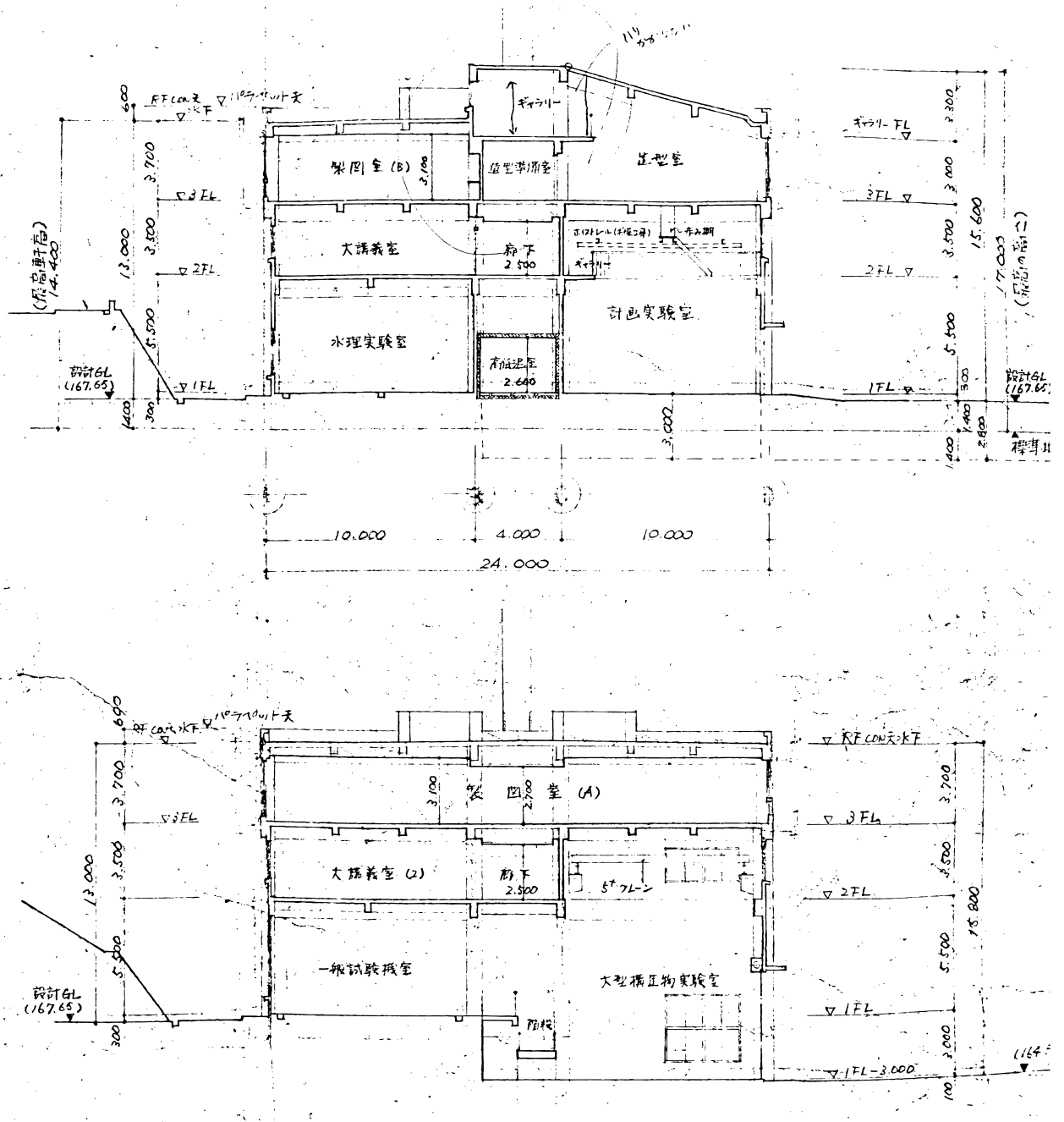


図 B.11 縦断面図

柱リスト 特記外、HOOP.  $\phi 10-100^{\circ}$ 、SUB. HOOP.  $\phi 10-300^{\circ}$

	①	② ③	③ ③A	④	⑤
3	<p>600 600 10-φ22</p>	同. 3C1	同. 3C1	同. 3C1	同. 3C1
2	<p>650 650 10-φ22</p>	同. 2C1	<p>650 (700) 650 12-φ22 (内径. ③. A ↑ 示す)</p>	<p>900 650 16-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>	<p>750 650 16-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>
柱頭 柱脚	<p>700 700 18-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>	<p>700 650 18-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>	<p>700 650 18-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>	同上	同上
	<p>700 700 24-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>	<p>700 650 24-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>	<p>700 650 18-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>	同上	同上
		81階断面図		全テ. 1階柱脚	
	<p>300 300 4-φ13 HOOP. <math>\phi 10-200^{\circ}</math></p>	<p>475 650 10-φ22</p>	<p>525 650 10-φ25</p>	<p>700 950 16-φ25 HOOP. <math>\phi 13-100^{\circ}</math></p>	<p>400 350 4-φ13 HOOP. <math>\phi 10-200^{\circ}</math></p>

図 B.12 柱断面図

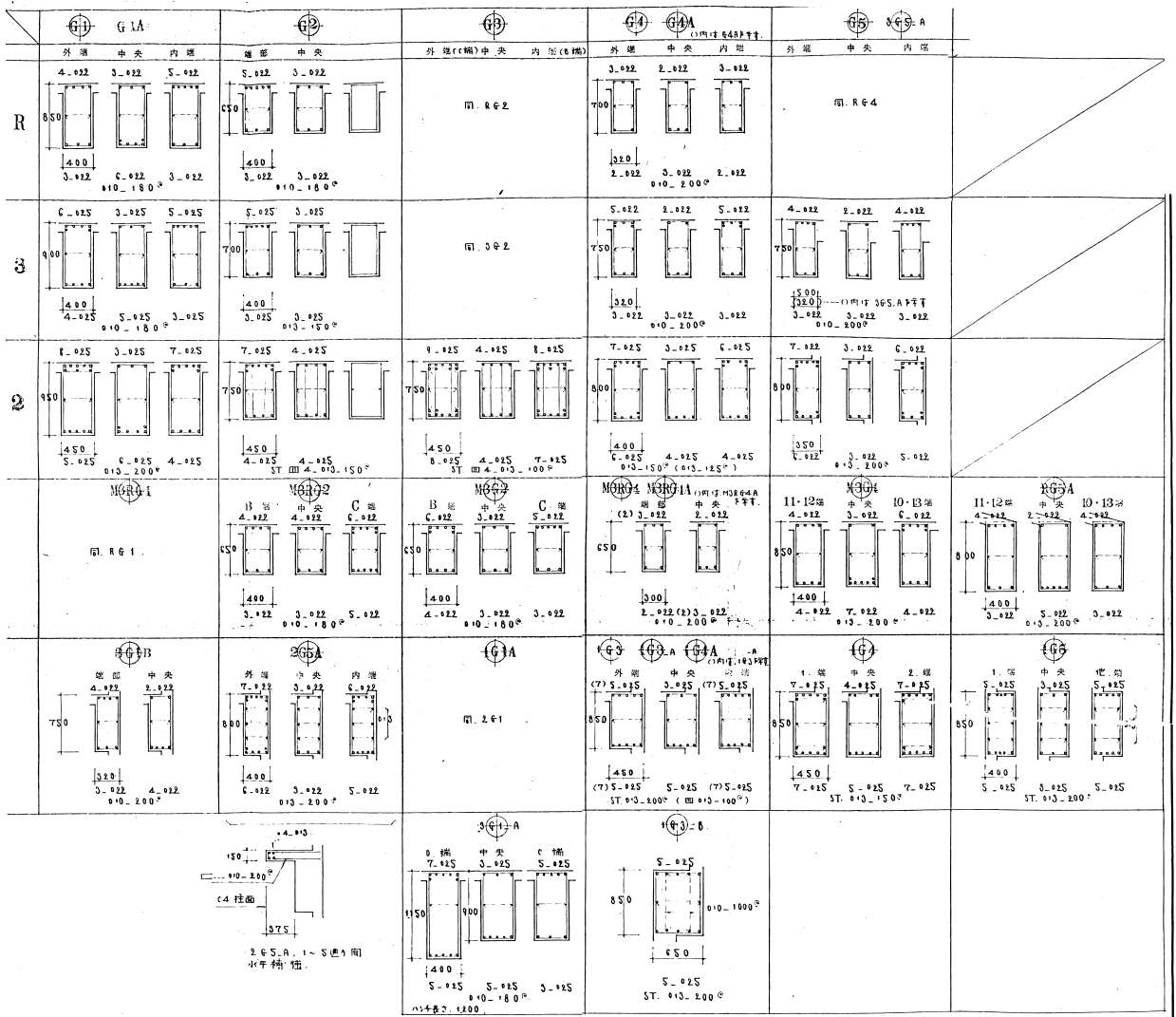


図 B.13 大梁断面図





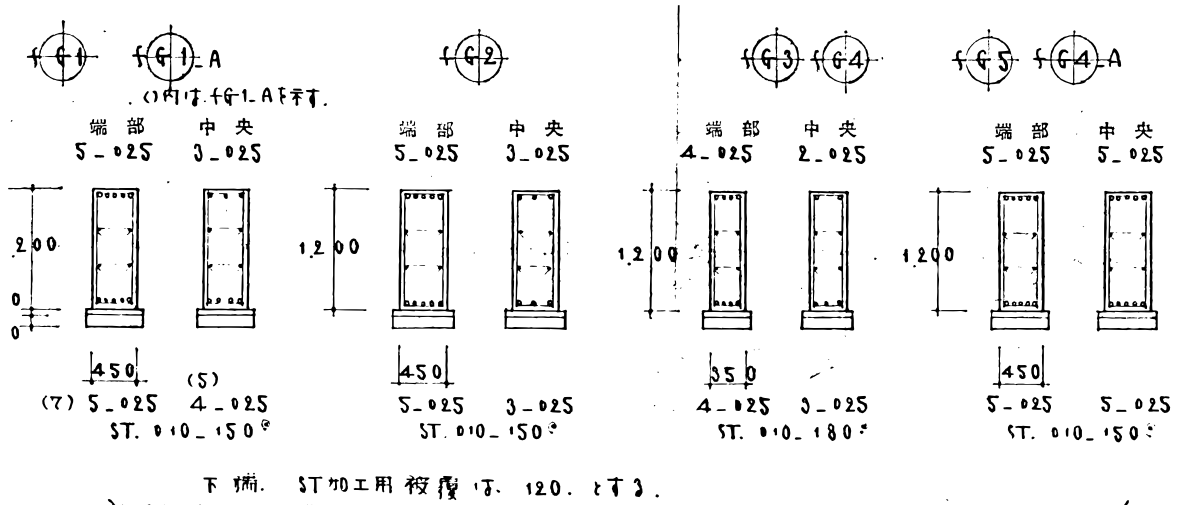
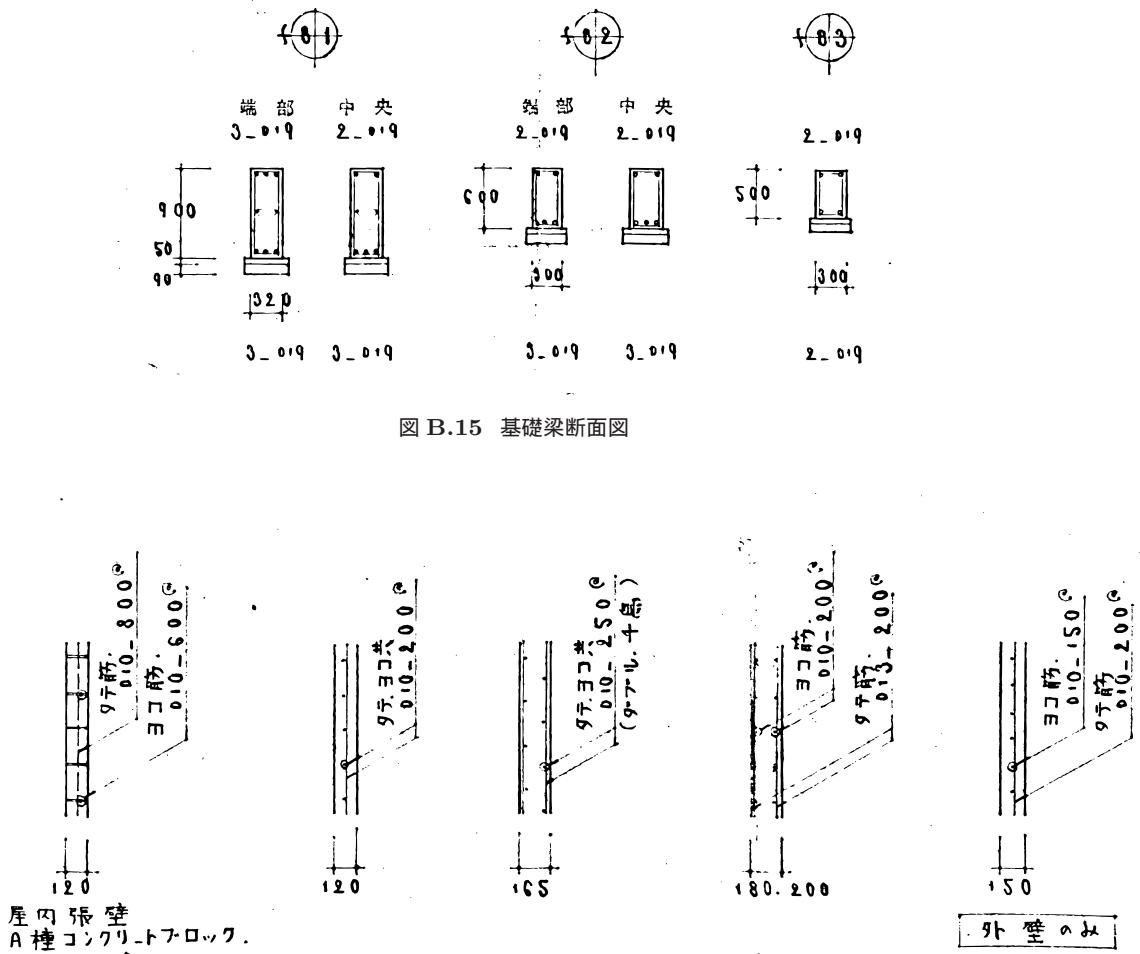


図 B.15 基礎梁断面図



壁 リ ス ト

図 B.16 壁断面図

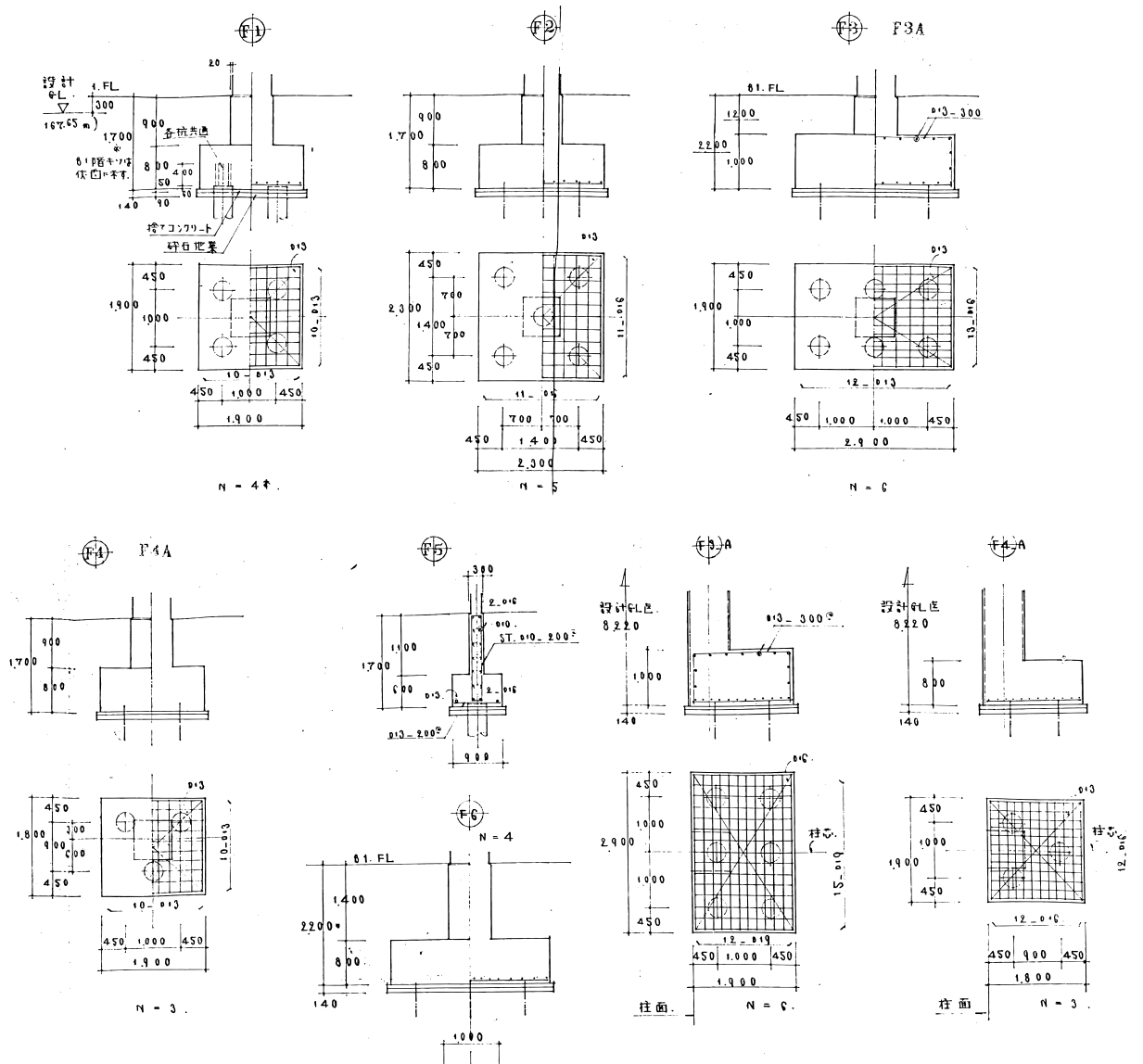


図 B.17 基礎

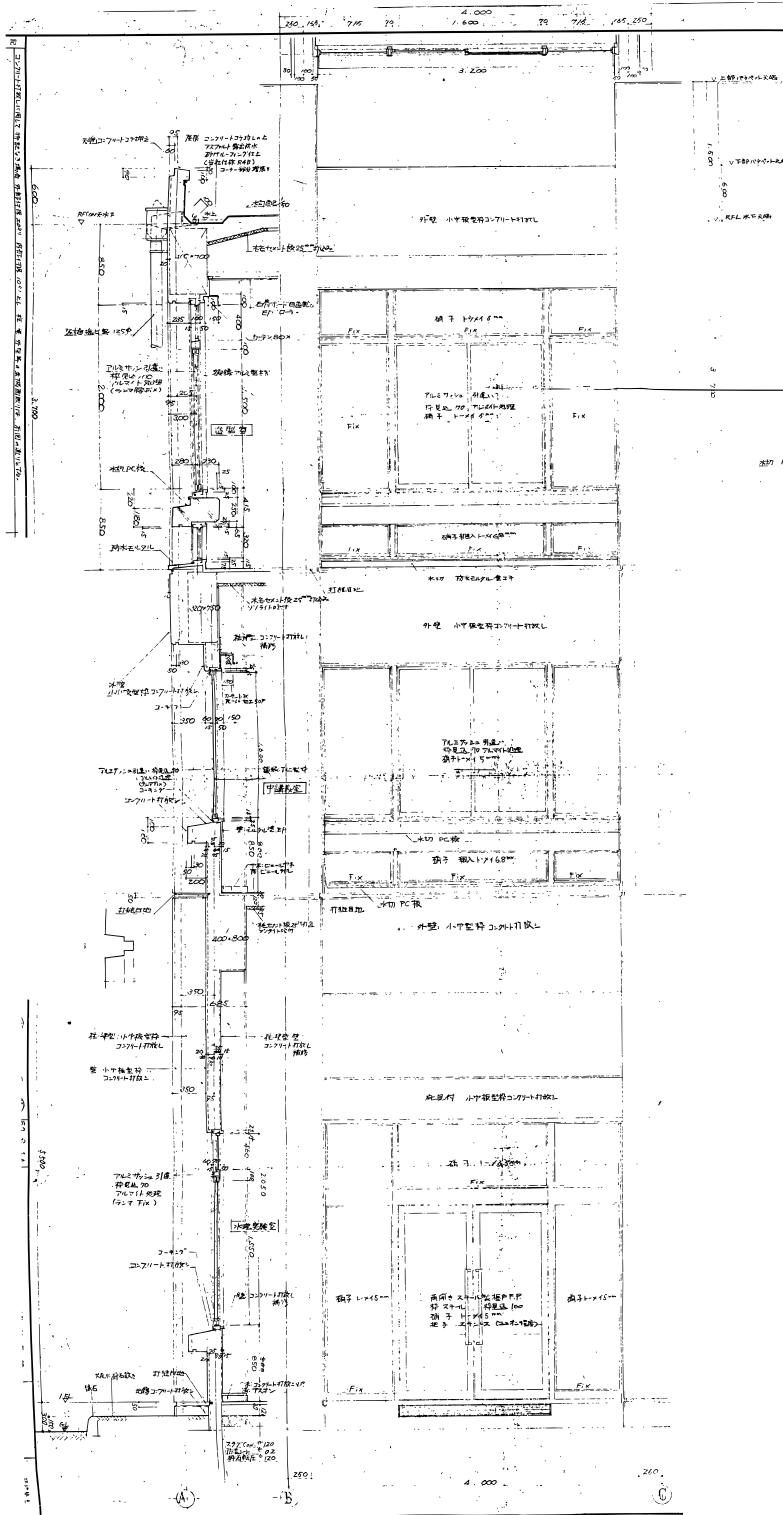


図 B.18 矩計図



(厚さ: 3)

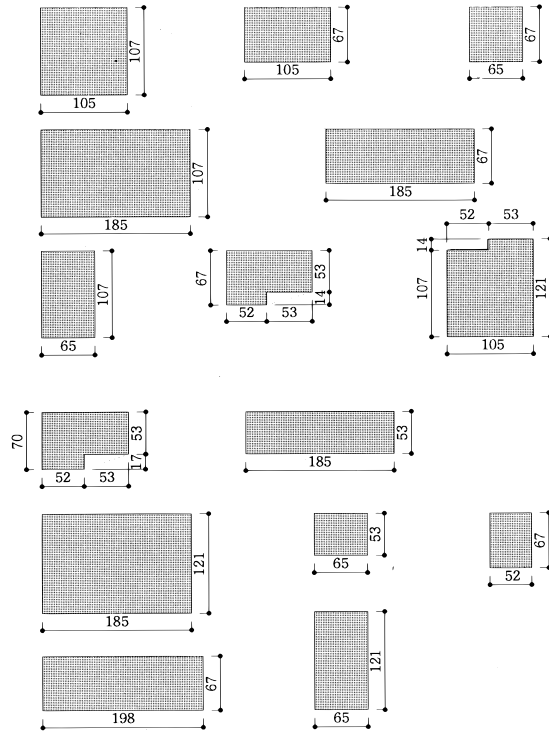


図 B.22 2 階床下部構造部材 (1 階壁)

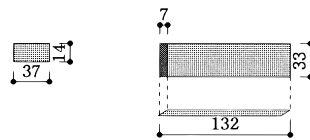


図 B.23 階段

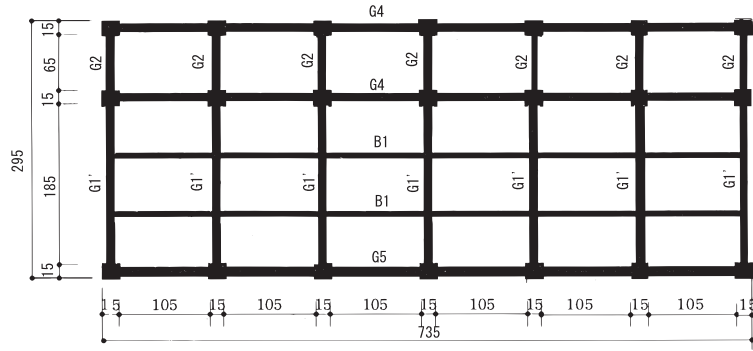


図 B.24 3 階床下部構造部材 (3 階梁伏図)

柱 梁

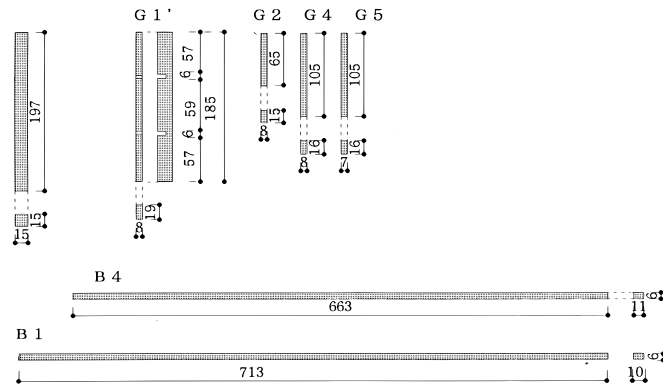


図 B.25 3 階床下部構造部材 (2 階柱, 3 階梁)

壁 (厚さ: 3)

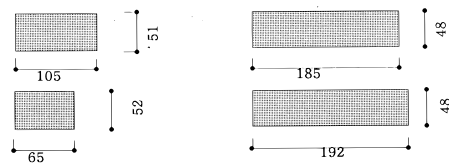


図 B.26 3 階床下部構造部材 (2 階壁)

### B.3 プロトタイプ模型

4層3スパン模型の部材寸法を次に示す。

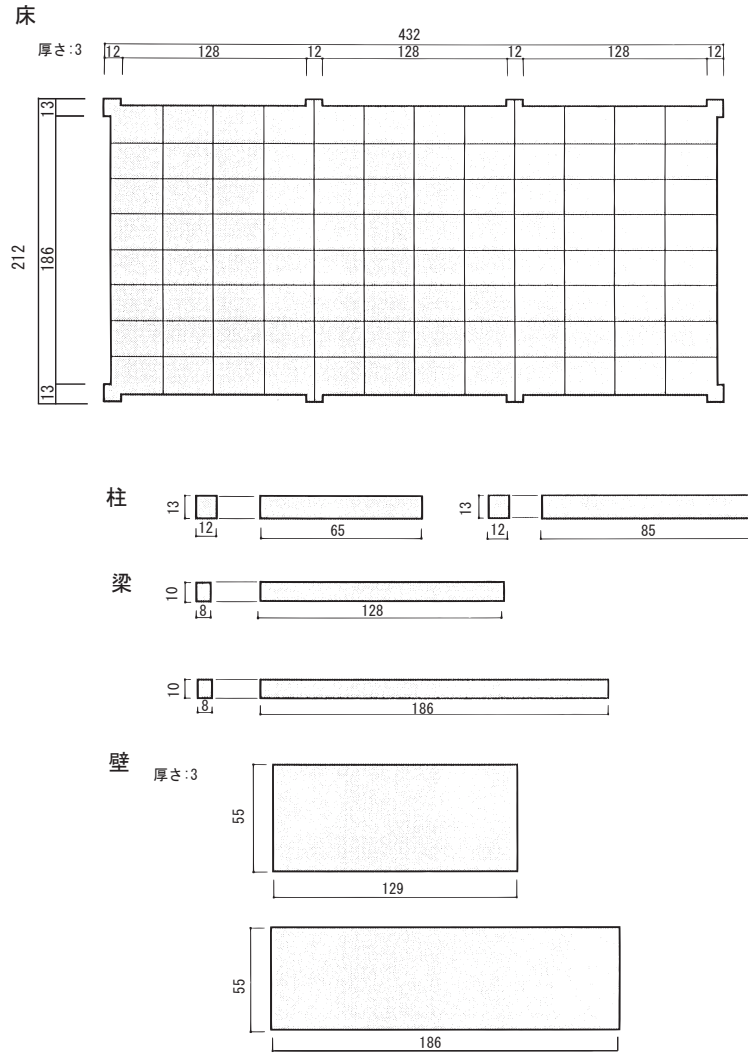


図 B.27 4層1スパン模型部材寸法



## 付録 C

# 模型材料

模型材料の選定のための物性値<sup>40, 41, 42, 43)</sup>を表 C.1 ~ 表 C.1 に示す。

表 C.1 材料の物性値 (建設材料系)<sup>40, 41, 42, 43)</sup>

材料名称	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	弾性係数 [MPa]	ポアソン比 [/]
コンクリート	2,300 -2,400	20,600 - 22,500	1/6
ALC	550	1,980	
木材 (チーク)		13,000	
ゴム (弾性ゴム)		$5 \times 10^{-10}$	0.46 - 0.49
ガラス (クラウン)		71,300	0.22
ガラス (フリント)		80,100	0.27

表 C.2 材料の物性値 (プラスチック材料)<sup>40, 41, 42, 43)</sup>

材 料 名 称	密 度 [kg/m <sup>3</sup> ]	弾 性 係 数 [MPa]	ポアソン比 [/]
ABS 樹脂	1,010 - 1,050	110 - 2,400	
アクリル樹脂	1,400	3,550	
シリコン樹脂	1,840	10,200	
スチレン樹脂	1,050	3,600	
ナイロン	1,120	2,200	
フェノール樹脂	1,620	6,900	
フラン樹脂	1,800	21,500	
ポリアセタール	1,420	2,100 - 3,600	
ポリアミド樹脂	1,120 - 1,140	2,600 - 2,740	
ポリウレタン	1,200	1,300 - 2,100	
ポリエステル	1,300 - 1,380	1,900 - 3,000	
ポリエチレン樹脂	920-970	850 - 1,090	0.46
ポリカーボネイト	1,200	2,200 - 2,400	
ポリスチレン樹脂 (一般用)	1,040 - 1,050	2,300 - 3,300	0.34
ポリスチレン樹脂 (耐衝撃)	1,030 - 1,060	1,100 - 2,600	
ポリフェニレンエーテル	1,040 - 1,090	2,500 - 2,600	
ポリプロピレン	900 - 910	1,100 - 1,600	
メタアクリル樹脂	1,170 - 1,200	2,200 - 3,200	
メチルメタアクリル樹脂	1,180	3,000	
メラミン樹脂	1,450	9,500	
塩化ビニル樹脂	1,300 - 1,580	2,400-4,100	
四フッ化エチレン樹脂	2,100	420	
硝酸繊維系	1,350	1,450	
酢酸繊維系	1,280	1,750	
天然ゴム	920	325	0.48
尿素樹脂	1,450	10,800	

表 C.3 材料の物性値 (金属系材料) <sup>40, 41, 42, 43)</sup>

材 料 名 称	密 度 [kg/m <sup>3</sup> ]	弾 性 係 数 [MPa]	ポアソン比 [/]
亜鉛	7,130	108,400	0.25
アルミニウム	2,700	70,300	0.35
カドミウム	8,650	49,900	0.30
金	19,320	78,000	0.44
銀	19,300	82,700	0.37
スズ	5,800 - 7,280	49,900	0.36
チタン	4,500	115,700	0.32
銅	8,960	129,800	0.34
鉛	11,350	16,100	0.44
白金	21,450	168,000	0.38
パラジウム (鑄)	12,020	113,000	0.39
ビスマス	9,750	31,900	0.33
マンガン	7,440	124,000	0.33
工業用純鉄	7,900	205,000	0.27-0.30
一般構造用圧延鋼材 (SS400)	7,900	206,000	
機械構造用中炭素鋼 (S45C)	7,800	205,000	
ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM439)	7,800	204,000	
熱間金型用工具鋼 (SKD6)	7,800	206,000	
マルエージング鋼 (350 級)	8,000	186,000	
析出硬化型ステンレス鋼 (SUS631)	7,800	204,000	
マルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS410)	7,800	200,000	
フェライト系ステンレス鋼 (SUS430)	7,800	200,000	
オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304)	8,000	197,000	
インコロイ 800(NCF800)	8,020	196,000	
ねずみ鑄鉄	7,200	200,000	
球状黒鉛鑄鉄 (FCD370)	7,100	161,000	
黒心可鍛鑄鉄 (FCMB360)	7,400	172,000	
ニッケル	8,900	204,000	
ニクロム (GNC108)	8,400	214,000	
無酸素銅 (C1020)	8,900	117,000	
7/3 黄銅 (C2600)	8,500	110,000	
6/4 黄銅 (C2801)	8,400	103,000	
ネーパル黄銅 (C4640P)	8,400	103,000	
りん青銅 (C5212P)	8,800	110,000	
洋白 (C7521P)	8,700	120,000	
ベリリウム銅 (C1720)	8,200	130,000	
黄銅鑄物 (YBsC2)	8,500	78,000	
青銅鑄物 (BC2C)	8,700	96,000	
マンガン (CMW)	8,200	123,000	
工業用アルミニウム (A1085P)	2,700	69,000	
耐食アルミニウム (A5083P)	2,700	72,000	
ジュラルミン (A2017P)	2,800	69,000	
超ジュラルミン (A2024P)	2,800	74,000	
超々ジュラルミン (A7075P)	2,800	72,000	
シルミン (AC3A)	2,700	71,000	
マグネシウム合金 (板)(MP5)	1,800	40,000	
マグネシウム合金 (棒)(MB1)	1,800	40,000	
マグネシウム合金鑄物 (MC1)	1,800	45,000	
工業用純チタン (C.P.Ti)	4,600	106,000	
チタン 6Al-4V 合金 (60 種)	4,400	106,000	
亜鉛ダイカスト用合金 (ZDC1)	6,600	89,000	



## 付録 D

# プロトタイプ模型

プロトタイプ模型の部材寸法は、付録 B.3 に示すとおりである。代表的なプロトタイプ模型の寸法と相似則により実物換算した寸法を表 D.1 に示す。

プロトタイプ模型が縮尺 1/50 の場合、一般的なスパンよりも長めとなっている。縮尺が 1/40 の場合は概ね一般的な縮尺であるが、床版厚と階高が若干小さめの値となる。第 3 章示す実構造体模型の実験の結果、模型を加振する際に加振器のセッティングによっては、うまく面外加振できない場合もあったため、面外加振されやすいよう、若干長めのスパンを採用している。

表 D.1 プロトタイプ模型の寸法

項目	実構造体模型		プロトタイプ模型		
	模型	実物換算 (1/50)	模型	実物換算 (1/50)	実物換算 (1/40)
スパン長	120 × 200	6,000 × 10,000	140 × 200	7,000 × 10,000	5,600 × 8,000
階高	*70	3,500	68	3,400	2,700
床厚	3	150	3	150	120
壁厚	3	150	3	150	120
梁	*80 × *180	400 × 900	80 × 130	400 × 650	320 × 520
柱	150 × 150	750 × 750	120 × 130	600 × 650	480 × 520

注)\* は代表値を示す。

単位: mm

プロトタイプ模型の縮尺が 1/50 である場合の相似比については、表 3.1 ~ 表 3.3 と同じとなる。3.4 節の実構造体とその模型の実験結果の比較の結果、固有振動数が 33 倍 (時間は 1/33 倍)、Accelerance の振幅が  $2.5 \times 10^5$  倍となる。

表 3.1 に示す、RC 実構造体の物性値は、一般的な値であり、実測値ではないため、これらの結果から物性値を計算する。

Accelerance  $H_a$  は、応答の加速度  $a$  と系に加わる外力  $F$  を用い、 $H_a = a/F$  と定義される。また  $F = ma$  なる関係がある。これらを整理すると

$$m = \frac{F}{a} = \frac{1}{H_a} \quad (D.1)$$

となる。よって質量の相似比は表 D.2 に示す相似比となる。密度は、 $m/\ell^3$  に比例することから、密度の相似比が計算される。

力  $F$  は、 $F = a/H_a$  なる関係がある。加速度  $a$  は、 $\ell/t^2$  に比例することから、力  $F$  は、 $\ell/(H_a \cdot t^2)$  に比例する。よって、力の相似比は表 D.2 に示す値となる。弾性係数  $E$  は  $F/\ell^2$  に比例することから、相似比は同表に示す値となる。

このように、実測の固有振動数  $f$ (時間  $t$ )、Accelerance  $H_a$  の相似比から密度  $\rho$ 、弾性係数  $E$  の相似比を求めることができる。この相似比から、実構造体の RC 材物性値を計算すると表 D.3 に示す値となる。

この値を用い、縮尺が 1/40 である場合の相似比を計算すると、表 D.4 に示す相似比となる。

表 D.2 模型の相似比 (実験結果から逆算)

物理量	相似比
質量 $m$	$4.00 \times 10^{-6}$
密度 $\rho$	$5.00 \times 10^{-1}$
力 $F$	$8.71 \times 10^{-5}$
弾性係数 $E$	$2.18 \times 10^{-1}$

表 D.3 実構造体の物性値 (実験結果から逆算)

物理量	物性値
弾性係数 $E[\text{N/m}^2]$	$1.9 \times 10^{10}$
密度 $\rho[\text{kg/m}^3]$	2340

表 D.4 模型の相似比

物理量	相似比 (模型/実物)	
	縮尺 1/50	縮尺 1/40
質量 $m$	$4.00 \times 10^{-6}$	$7.81 \times 10^{-6}$
時間 $t$	$3.03 \times 10^{-2}$	$3.78 \times 10^{-2}$
固有振動数 $f$	33.0	26.4
FRF $H_a(\omega)$	$2.50 \times 10^5$	$1.28 \times 10^5$
力 $F$	$8.71 \times 10^{-5}$	$1.36 \times 10^{-4}$

模型の相似則の詳細な数値は、表 D.4 となる。プロトタイプ模型は、概ねの傾向を把握することが目的であることから、周波数の相似比は 33 倍を四捨五入し 30 倍として論ずるものとする。

# 表目次

2.1	構造部材寸法 . . . . .	8
2.2	測定点数 . . . . .	13
2.3	モード同定方法の分類 (概要) . . . . .	15
2.4	モーダルパラメータの同定結果 . . . . .	25
2.5	固有振動数, 減衰比及びモードの確認指数 . . . . .	27
3.1	模型材料の物理定数 . . . . .	42
3.2	模型の相似比 (基本相似比) . . . . .	44
3.3	模型の相似比 (代表相似比) . . . . .	44
3.4	弾性係数測定装置 . . . . .	47
3.5	アクリル棒の固有振動数と減衰比 . . . . .	47
3.6	基礎・地盤構造 . . . . .	51
3.7	モーダルパラメータの比較 . . . . .	54
3.8	A 室 (加振室) と B 室 (隣室) の FRF の振幅比 . . . . .	57
3.9	実構造体との FRF の振幅比 . . . . .	57
4.1	プロトタイプ模型の寸法 . . . . .	60
4.2	固有振動数・減衰比 (M1) . . . . .	65
4.3	固有振動数・減衰比 (M2) . . . . .	65
4.4	固有振動数・減衰比 (M3) . . . . .	65
4.5	固有振動数・減衰比 (M4) . . . . .	65
4.6	固有振動数・減衰比 (M5) . . . . .	66
4.7	固有振動数・減衰比 (M6) . . . . .	66
4.8	固有振動数・減衰比 (M7) . . . . .	66
4.9	固有振動数・減衰比 (M8) . . . . .	66
4.10	固有振動数・減衰比 (M9) . . . . .	66
4.11	固有振動数・減衰比 (M10) . . . . .	66
4.12	固有振動数・減衰比 (M11) . . . . .	66
4.13	固有振動数・減衰比 (M12) . . . . .	66
4.14	床振動の O.A. レベル等 . . . . .	81

4.15	構造部材追加と固有振動（モードシェイプ別）	83
4.16	構造部材追加による O.A. レベル減衰量	106
5.1	要素分割と計算結果	111
5.2	床振動の O.A. レベル (FEM)	117
C.1	材料の物性値（建設材料系） <sup>40, 41, 42, 43)</sup>	159
C.2	材料の物性値（プラスチック材料） <sup>40, 41, 42, 43)</sup>	160
C.3	材料の物性値（金属系材料） <sup>40, 41, 42, 43)</sup>	161
D.1	プロトタイプ模型の寸法	163
D.2	模型の相似比（実験結果から逆算）	164
D.3	実構造体の物性値（実験結果から逆算）	164
D.4	模型の相似比	164



# 目次

1.1	論文の構成の概要	5
2.1	実験対象構造体 (写真)	8
2.2	平面図	9
2.3	断面図	10
2.4	梁伏図	11
2.5	実験対象室及びその周辺 (写真)	12
2.6	測定系ブロックダイアグラム (実構造体)	14
2.7	実験範囲と加振点 (実構造体)	14
2.8	加振点と受振点 (実構造体)	14
2.9	加振器	17
2.10	モードの腹と節	18
2.11	相反性の測定点	18
2.12	FRF の相反性による加振点の検討	21
2.13	FRF の相反性による加振点の検討	22
2.14	FRF の相反性による加振点の検討	23
2.15	FRF (実構造体)	26
2.16	モードシェイプ (実構造体)	28
2.17	モードシェイプ (実構造体)	29
2.18	感度解析の概念図	30
2.19	感度解析の評価点 (モードシェイプ係数感度)	31
2.20	感度解析の評価点 (モードシェイプ係数感度)	31
2.21	モードシェイプと感度 (18.0 Hz のモードに対する感度)	32
2.22	モードシェイプ係数に対する質量感度	33
2.23	モードシェイプ係数に対する質量感度	34
2.24	モードシェイプ係数に対する剛性感度	35
2.25	モードシェイプ係数に対する剛性感度	36
2.26	振動数に対する感度	37
3.1	モデル化の範囲	42

3.2	モデル化断面図 . . . . .	42
3.3	モデル全景 . . . . .	43
3.4	FRF に対するポアソン比の影響 (プロトタイプモデル:M7) . . . . .	46
3.5	FRF に対するポアソン比の影響 (プロトタイプモデル:M11) . . . . .	46
3.6	動弾性係数測定用支持治具 (B&K Type3930) . . . . .	48
3.7	測定系ブロックダイアグラム (モデル) . . . . .	49
3.8	加振装置 (モデル) . . . . .	49
3.9	加振点と受振点 (モデル) . . . . .	49
3.10	接着の影響の確認 . . . . .	50
3.11	接着剤の影響の確認 (実験結果) . . . . .	50
3.12	モデルと基礎・地盤構造 . . . . .	51
3.13	モデルの基礎構造 . . . . .	52
3.14	モデル地盤・基礎構造の比較 (モデル) . . . . .	53
3.15	モデル地盤・基礎構造の比較 (モデル + 実構造体) . . . . .	53
3.16	モードシェイプの比較 . . . . .	54
3.17	FRF の比較 . . . . .	55
3.18	FRF の総和 . . . . .	57
4.1	プロトタイプモデル (写真) . . . . .	60
4.2	プロトタイプモデル . . . . .	61
4.3	プロトタイプモデル . . . . .	62
4.4	プロトタイプモデル (室名) . . . . .	63
4.5	プロトタイプモデル FRF(2 階全床面) . . . . .	64
4.6	プロトタイプモデル M1 . . . . .	68
4.7	プロトタイプモデル M2 . . . . .	69
4.8	プロトタイプモデル M3 . . . . .	70
4.9	プロトタイプモデル M4 . . . . .	71
4.10	プロトタイプモデル M5 . . . . .	72
4.11	プロトタイプモデル M6 . . . . .	73
4.12	プロトタイプモデル M7 . . . . .	74
4.13	プロトタイプモデル M8 . . . . .	75
4.14	プロトタイプモデル M9 . . . . .	76
4.15	プロトタイプモデル M10 . . . . .	77
4.16	プロトタイプモデル M11 . . . . .	78
4.17	プロトタイプモデル M12 . . . . .	79
4.18	1/3 Oct. バンドレベル . . . . .	80
4.19	1/3 Oct. バンドレベル . . . . .	81
4.20	モードシェイプの形状の分類 . . . . .	83

4.21	構造部材追加と 2 階床面の 1 次固有振動	84
4.22	構造部材追加と O.A. レベルの関係	84
4.23	下部構造部材追加時の FRF の比較	85
4.24	下部構造部材追加時の FRF の比較	86
4.25	下部構造部材追加時の FRF の比較	87
4.26	下部構造部材追加時の FRF の比較	88
4.27	上部構造部材追加時の FRF の比較	89
4.28	上部構造部材追加時の FRF の比較	90
4.29	モードシェイプ係数に対する感度の評価点 (評価点 , )	90
4.30	モードシェイプと感度 [M7:307 Hz(実物換算 10.2 Hz)]	91
4.31	M12 の 304 Hz(実物換算 10.1 Hz) のモードに対する質量感度	92
4.32	M12 の 304 Hz(実物換算 10.1 Hz) のモードに対する感度	93
4.33	振動数に対する感度	95
4.34	2 階 点のモードシェイプ係数に対する感度	96
4.35	モードシェイプ	98
4.36	M3 の 点のモードシェイプ係数に対する感度	99
4.37	M3 の振動数に対する感度	100
4.38	M5 の 点のモードシェイプ係数に対する感度	101
4.39	M5 の振動数に対する感度	102
4.40	M9 の 2 階 点のモードシェイプ係数に対する感度	103
4.41	M9 の振動数に対する感度	104
5.1	1 層 1 スパン模型	110
5.2	要素分割 (斜め下方からのアイソメ)	112
5.3	要素分割 (断面図)	112
5.4	要素分割と FRF の関係	112
5.5	模型実験と FEM 解析結果の比較	113
5.6	支持条件の比較	114
5.7	プロトタイプ模型実験と FEM の対応	114
5.8	プロトタイプ模型実験と FEM の対応	115
5.9	1/3 Oct. バンドレベル (FEM)	116
5.10	1/3 Oct. バンドレベル (FEM)	116
5.11	構造部材追加と O.A. レベル (模型実験と FEM 解析の比較)	117
B.1	1 階平面図	138
B.2	2 階平面図	139
B.3	3 階平面図	140
B.4	1 階梁伏図	141

B.5	2 階梁伏図	142
B.6	3 階梁伏図	143
B.7	R 階梁伏図	144
B.8	1 階杭基礎伏図	145
B.9	地階杭基礎伏図	146
B.10	縦断面図	147
B.11	縦断面図	148
B.12	柱断面図	149
B.13	大梁断面図	150
B.14	小梁断面図	151
B.15	基礎梁断面図	152
B.16	壁断面図	152
B.17	基礎	153
B.18	矩計図	154
B.19	2 階床部材	155
B.20	2 階床下部構造部材 (2 階梁伏図)	155
B.21	2 階床下部構造部材 (1 階柱,2 階梁)	155
B.22	2 階床下部構造部材 (1 階壁)	156
B.23	階段	156
B.24	3 階床下部構造部材 (3 階梁伏図)	157
B.25	3 階床下部構造部材 (2 階柱,3 階梁)	157
B.26	3 階床下部構造部材 (2 階壁)	157
B.27	4 層 1 スパン模型部材寸法	158