

建築構造体の振動性状に関する実験的モーダル解析

Experimental Modal Analysis on Vibrations in the Building Construction

成瀬 治興*, 佐野 泰之**, 北島 弘基**

Haruoki NARUSE,

Yasuyuki SANO,

Hiroki KITABATAKE

Abstract This paper describes some results of vibration propagation characteristics of two rooms next door to each other in the actual building construction (including floor, walls, and upstairs floor) by experimental modal analysis.

In addition, we investigate about vibration response of measuring points by forced response and sensitivity analysis. The results are summarized as follows. The vibration of lower modes gives larger effect to vibration propagation characteristics of building construction than that of higher modes. It is considered that the vibration transmission of higher frequency may be caused by energy flow.

1. はじめに

建築内外の振動源により、建築物が起振され、共振し、建築構造体で振動が増幅されることがある。例えば、振動の発生源となる設備機械や振動を嫌う精密機器などを設置する場合には、問題となることが考えられる。このような場合を含め、建築構造体の振動伝搬性状を把握することは、重要なことである。そのような場合に、モード法^{1) 2)}を適用し、固有値問題を解明することにより、振動低減を図ることができる。

有限要素法などを適用し、振動性状及び振動応答性状を理論的に推定することは、多くの研究機関で行われているが、実験的に求めているものは、簡単なアクリル板³⁾などによる検討がなされている程度であり、壁面を含め構造物全般の振動伝搬性状についてまで検討するものは、既往の研究などにも例がないものと考えられる。実際の建築構造体の壁面や床面の周辺の固定条件は、施工方法により異なるものと考えられ、理論的解析以上に実験的な検討が必要であるものと考えられる。

既報^{4) 5)}では、実験的モーダル解析を適用し、実在の建築構造物及びその模型の床面についての振動

性状を考察している。本報では、この床面に加え、壁面及び上階床面の、振動性状及び振動伝搬性状を把握するための実構造物加振実験を行っている。また、強制振動応答解析及び感度解析を行い、防振対策の方針や考慮点についての検討も行っている。

2. 実験・解析方法

2.1 実験対象構造物

対象となる建築物は、鉄筋コンクリート造3階建である。詳細は、既報⁵⁾に示す。本報では、測定範囲を図1に示す床面及び壁面としている。なお、以下204教室はA室、203教室はB室としている。

2.2 定常加振実験

定常加振実験については、既報⁵⁾と同様な方法で実験を行っている。加振点は、図1に示す点を採用し、図2に示す格子状の点を受振点としている。

2.3 重量床衝撃源による加振実験

図3に示す実験装置を用い、重量床衝撃を床面に与えた場合の受振点での振動加速度応答を測定している。

なお、重量床衝撃源の加振力については、土間コンクリート上で、図4に示す装置を用い測定を行っている。

* 愛知工業大学建築学科 (豊田市)

** 愛知工業大学大学院 (豊田市)

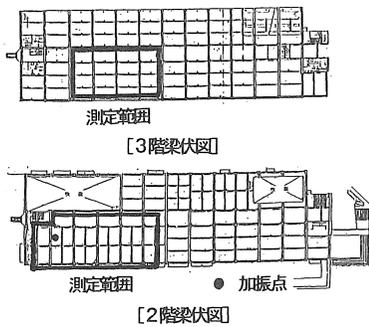


図1 測定範囲

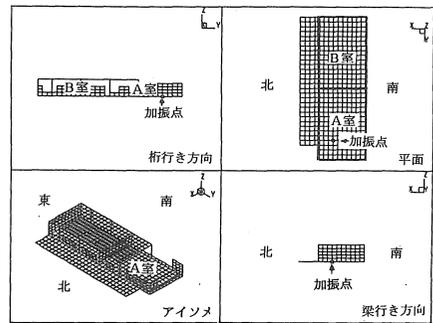


図2 受振点

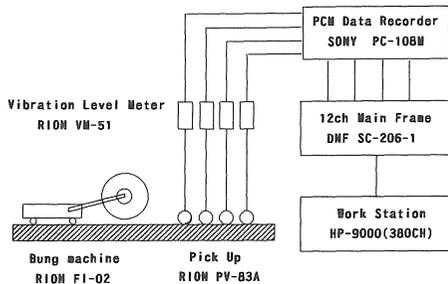


図3 衝撃加振実験装置

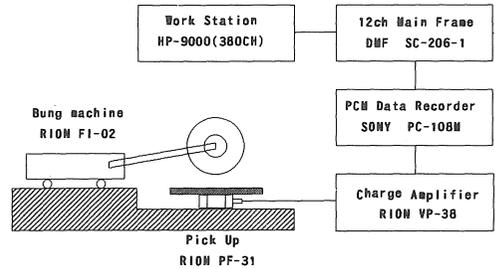


図4 重量床衝撃源衝撃力測定装置

3. 実験・解析結果

3.1 はじめに

構造物の振動伝搬性状を把握する場合、振動伝搬にあまり関与していない部分は除いて解析した方がより高精度な解析結果を得ることができると考えられる。

解析を繰り返して行い、検討した結果、次のような方法が最良であるものと考えられる。

① 構造物の振動性状・振動伝搬性状

A室西壁面、B室東壁面、北側壁面は独立した振動を示す傾向にある。解析対象を2階床面、A・B室界壁及び3階床面としている。

② 除外した部分も含めた振動性状・振動伝搬性状

独立した振動を示す構造物を含め、施工方法などの違いによる振動伝搬性状を把握することが必要な場合もあるので、解析対象を全測定点としている。

3.2 周波数応答関数

3.2.2 周波数応答関数の総和

測定点全点と各測定面毎の周波数応答関数の総和の比較を図5に示す。測定点全点、2階床面、3階床面の周波数応答関数の総和は、同様な振動数で卓越が見られ、形状も似ている。測定点全点、北壁面、

南壁面、及びA・B室界壁の周波数応答関数の総和も、同様な卓越振動数を有している。壁面は、小面積であるため27Hz以下の振動数において、他壁面に比べあまり卓越していない。B室東壁面及びA室西壁面の周波数応答関数の総和は、独自の固有周波数を持つような傾向を示している。この両面は、コンクリートブロック壁であることから、完全に、床面などに固定されておらず、一体化した振動性状を示していないものと考えられる。

各モードの固有周波数付近の各面の周波数応答関数の総和と、2階床面の周波数応答関数の総和の差を表1に示す。2階床面に加振機を設置しているので、2階床面の振動が一番大きい傾向にあるが、21Hzの振動数においては、3階床面の方が6dB大きい値になっている。

3.3.3 代表点による周波数応答関数総和

A室床面全測定点の周波数応答関数の総和と図6に示されるようなA室床面を代表するような点の周波数応答関数の総和を図7に示す。

ケース2とケース3がA室床面全測定点の周波数応答関数の総和と良い対応を示しており、このような代表点の周波数応答関数の総和をすることで、全測定点の周波数応答関数の総和を推測できることに

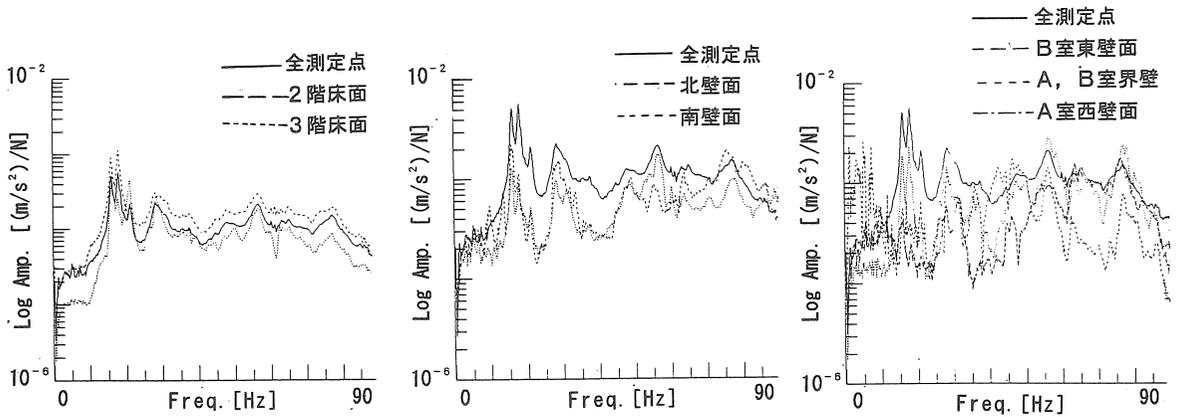


図5 周波数応答関数の総和

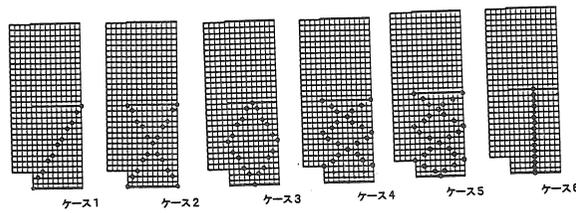


図6 代表点

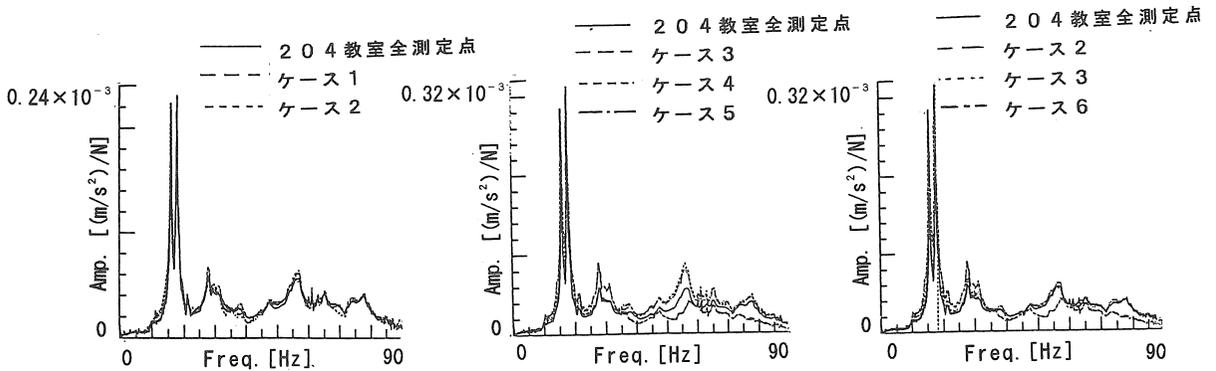


図7 代表点の周波数応答関数の総和

なる。代表点とする点は、モードの腹の部分を選んだ方が良く、梁や壁面に平行ではなく、斜め部分に対して総和をとることで、全測定点の周波数応答関数の総和と、対応の良い結果を得ることができる。

3.3 モーダルパラメータ

解析①及び解析②のモーダル・パラメータ、MPC指数 (Modal Phase Collinearity: 複素モードであるかを表す指数) 及びMOV (Weighted Mode Overcomplexity Value: モードの信頼性を表す指数) を表1及び表2に示す。

16.0, 18.0 Hz及び37.3 Hzのモードの重要度が大きいことが顕著に示されている。こ

表1 周波数応答関数総和の比較

| | 16 [Hz] | 18 [Hz] | 21 [Hz] | 28 [Hz] | 31 [Hz] | 36 [Hz] | 37 [Hz] | 48 [Hz] | 54 [Hz] | 56 [Hz] |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 2階床面 (dB) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3階床面 (dB) | -5 | -13 | 6 | -2 | -7 | -5 | -4 | -7 | -5 | -3 |
| A・B室界壁 (dB) | -13 | -17 | -15 | -7 | -12 | -7 | -8 | -5 | -8 | 0 |
| 北側壁面 (dB) | -11 | -23 | -15 | -8 | -9 | -15 | -14 | -7 | -11 | -12 |
| 全測定点 (dB) | -4 | -6 | -1 | -3 | -4 | -4 | -4 | -3 | -4 | -2 |

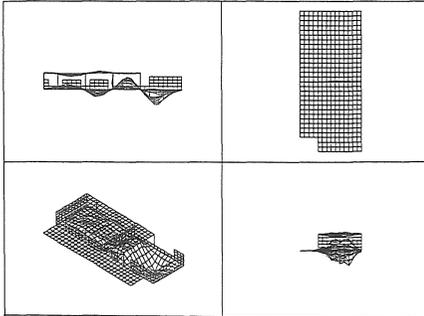
れについては、低次のモードはモードシェイプが安定しており、解析誤差も少ないが、高次のモードでは、モードシェイプや、2つの解析結果に誤差が認められることなどから、モードが立ちにくくなっているものと考えられる。2階床面と3階床面では、低次のモードについて、見かけ上逆位相で振動しているが、高次のモードでは、同位相のモードシェイプを示している。

表2 モーダルパラメータ [解析①]

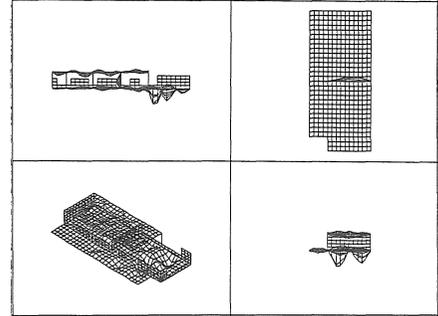
| モード | 固有周波数 [Hz] | 減衰比 [%] | 重要度 [%] | MPC [%] | MOV [%] |
|-----|------------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 16.0 | 1.8 | 23.4 | 87.5 | 75.5 |
| 2 | 18.0 | 1.7 | 20.8 | 97.3 | 97.8 |
| 3 | 21.2 | 1.8 | 6.6 | 94.1 | 86.3 |
| 4 | 28.1 | 2.5 | 8.3 | 86.0 | 82.7 |
| 5 | 30.8 | 3.6 | 9.3 | 79.0 | 69.4 |
| 6 | 35.5 | 3.3 | 6.7 | 76.7 | 25.8 |
| 7 | 37.3 | 5.1 | 10.5 | 77.2 | 75.5 |
| 8 | 47.7 | 3.0 | 3.9 | 81.6 | 49.4 |
| 9 | 54.5 | 2.8 | 5.3 | 84.0 | 71.3 |
| 10 | 56.4 | 2.2 | 5.3 | 55.1 | 56.6 |

表3 モーダルパラメータ [解析②]

| モード | 固有周波数 [Hz] | 減衰比 [%] | 重要度 [%] | MPC [%] | MOV [%] |
|-----|------------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 15.9 | 1.8 | 23.4 | 87.4 | 74.9 |
| 2 | 18.0 | 1.6 | 20.1 | 97.1 | 97.4 |
| 3 | 21.2 | 1.8 | 6.8 | 93.6 | 83.5 |
| 4 | 27.9 | 2.6 | 9.4 | 76.9 | 73.1 |
| 5 | 39.5 | 3.8 | 13.2 | 38.9 | 53.0 |
| 6 | 33.5 | 2.6 | 5.1 | 61.9 | 46.0 |
| 7 | 35.5 | 3.4 | 7.0 | 75.4 | 70.9 |
| 8 | 37.8 | 2.8 | 4.5 | 70.7 | 74.7 |
| 9 | 42.4 | 2.5 | 2.6 | 77.2 | 74.6 |
| 10 | 47.5 | 3.0 | 4.4 | 41.4 | 52.4 |
| 11 | 56.5 | 1.8 | 3.7 | 75.4 | 57.2 |



[18.0 Hz モードシェイプ]



[56.4 Hz モードシェイプ]

図8 モードシェイプの一例

3.4 強制振動応答

3.4.1 定常加振による強制振動応答

測定点のうち、1点に定常加振（正弦波加振及びランダム加振）を与え、他の測定点での振動応答を求め、その傾向について考察する。

図9に強制振動応答性状の一例を示す。このように、加振源の周波数成分が変わってもあまり受振点の振動応答性状は変わらない傾向がある。これは、低次数のモードが高い重要度を持ち、これらのモードの寄与が大きいためであると考えられる。

A・B室界壁と2階床面及び3階床面の振動応答性状は、図10に示すような3タイプの振動性状に分類できる。タイプ1は、2階と3階の床面が見かけ上逆位相の振動応答性状を示すものであり、低い振動数領域でよく認められる。タイプ2は、3階床面がA・B室界壁を対称とする(W形)振動応答性状であり、2階床面はA・B室界壁のところで回転対称となるような振動応答性状である。振動加速度振幅は加振点側の室の床面の方が他室床面より大きい。このタイプは、2つのモードが重ね合わされ、図10に示すような形状になると考えられる。タイプ3は、2階床面と3階床面が見かけ上同位相で振動しており、A・B室界壁のところで、2階床面及び3階床面の振動を打ち消しあう、もしくは、伝達

するような形となっており、一体化した振動を示している。この3タイプの中で、タイプ1とタイプ2が大半を占め、タイプ3はあまり認められない。

また、図11に示すように、床面に対し壁面が逆位相の振動応答性状を示す場合がある。コンクリートブロック壁のA室西壁面及びB室東壁面は、高い振動数になると逆位相を示すようになる。壁面の下端が固定、3方自由の支持状態の北側壁面は、全ての解析の振動数域で逆位相を示している。この原因として、共振周波数を境にして、位相が逆転する現象²⁾などが考えられる。

図12に示すような加振力を図13の加振点に与えた場合の、受振点での振動加速度応答の推定値を図14に示す。このように、振動の伝達は、距離のみに関係するものではない傾向がある。強制振動応答は、加振点を決め、その加振が他点へ及ぼす影響を示したものである。周波数応答関数の相反性が保たれるとすれば、逆にこの点（強制振動応答の加振点）が、どの点から、どの程度影響を及ぼされるかを知ることができる。また、振動応答性状は、共振周波数付近での振動の伝達は距離によらず、モードシェイプに関係すると考えることができる。

モードの腹となる部分は、構造物が起振されやすい場所であり、他の場所からの影響が大きく、か

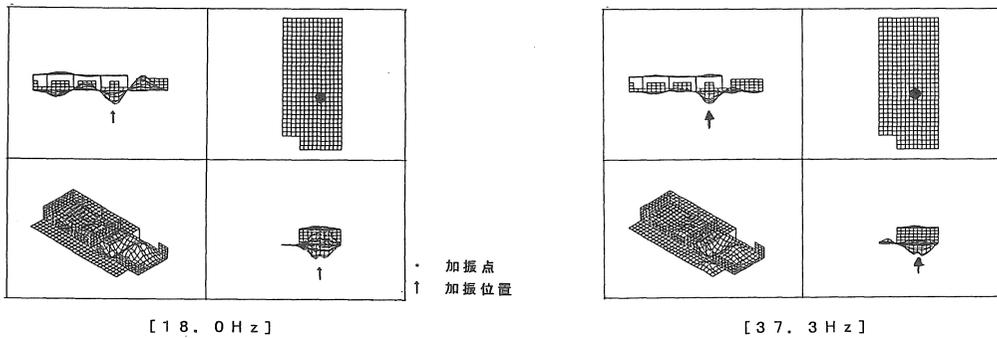


図9 強制振動応答性状の一例 [定常加振]

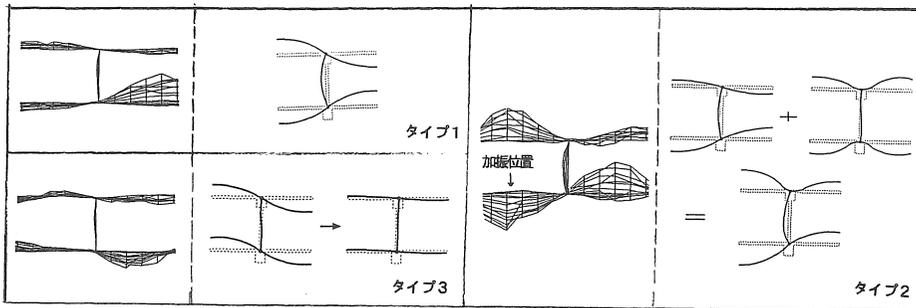


図10 床面と壁面の振動応答性状の関係

つ、他へ影響を与えやすい。従って、振動発生源となる機械は、振動の節となるような壁面の近くに設置することが望ましく、また振動を嫌う機械も、このような場所に設置することが望ましいものと考えられる。

3. 4. 2 重量床衝撃源による振動応答

解析①の結果に、図15に示すような重量床衝撃源の測定結果から得られた加振力を、図16に示す位置に加えた場合の強制振動応答の推定を行っている。受振点での振動加速度応答の実測値と推定値の比較を図17に示す。このように、測定精度が十分であり、周波数応答関数の相反性が保たれており、カーブフィットが良好に行われていると考えられるような点では、振動応答を推定することが可能であると考えられる。

図18に、衝撃直後から1秒までの振動応答波形及び振動応答性状を示す。このように強制振動解析を用いることにより、過渡的な振動応答の変化を把握することができる。

3. 5 感度解析

解析①の解析結果を用い、構造物に重量、減衰比及び剛性を付加した場合の、感度解析を行っている。このように感度解析を行うことにより、構造体のどの部分を構造変更することが効果的であるかを推定することが可能である。

3. 6 まとめ

RC造建築構造体の実験的モーダル解析を適用し、得られた振動伝搬性状の結果についてまとめると以下ようになる。

- ・周波数応答関数の総和は、周辺に対し斜め線上のモードの腹を通らない代表点により近似できる。
- ・低次モードの重要度が大きい。
- ・周辺の支持状態壁面は、高い周波数域で床面に対し逆位相になる。
- ・強制振動応答解析で重量床衝撃時の過渡振動性状が推定できる。
- ・振動の伝達は、モードシェイプに関係すると思われる。

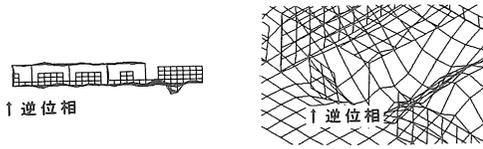


図 1 1 床面, 壁面逆位相振動応答性状の一例

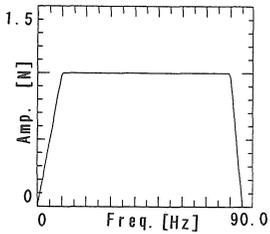


図 1 2 加振力 [定常加振]

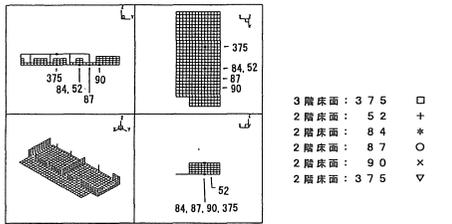


図 1 3 強制振動応答解析加振点 [定常加振]

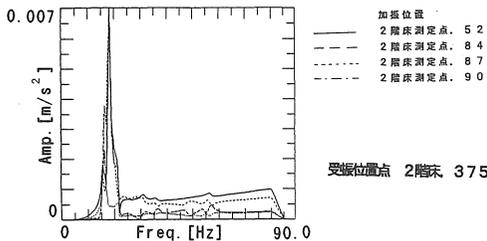


図 1 4 振動加速度応答 [定常加振]

4. おわりに

本研究は、RC建築構造体の隣り合う2室の振動性状及び振動伝搬性状の解明に取り組んだものである。低次のモードの重要度が大きいことから、低次のモードを把握し、そのモードに対し対策をすることが重要であると考えられる。一方、床衝撃音などの対策に関係すると考えられる高い振動数のモードは、重要度が低くなることなどから、振動伝搬性状をとらえるのに、エネルギーの流れとしてとらえることなども必要になると考えられる。また、施工方法の相異により、振動が一体化する場合と、独立した振動を示そうとする場合が認められた。有限要素法を適用する際の与条件を検討するためにも、周辺条件や各面相互の振動の関係を解明する必要があるものと考えられる。

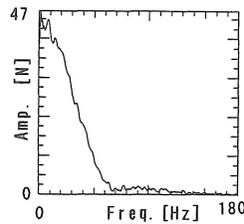


図 1 5 加振力

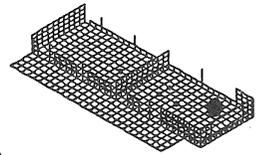


図 1 6 加振点

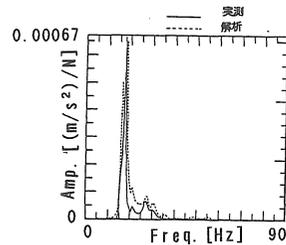


図 1 7 振動加速度応答 [重量床衝撃源]

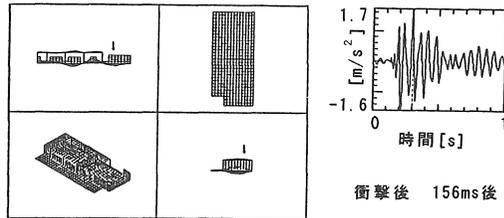
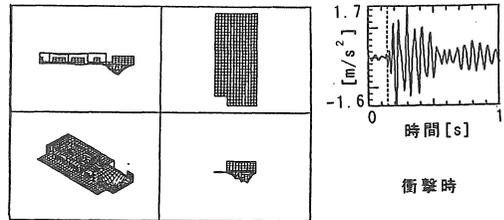


図 1 8 振動応答及び振動応答性状 [重量床衝撃源]

終わりにあたり、論文をまとめる際に御協力いただいた、本研究室の卒研生の荒川真紀子、松岡祐司諸君に深く感謝する。

参考文献

- 倉部 誠：図説モード解析入門, 大河出版
- 加川幸雄, 石川正臣：モーダル解析入門, オーム社
- 松田由利, 橋 秀樹：固体音に関する模型実験の手法, 騒音制御, Vol.16, No.5, 1982, 10
- 成瀬治典, 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・柱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No.30, 1995
- 成瀬治典, 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比較, 愛知工業大学研究報告No.30, 1995

(受理 平成8年3月19日)