RC床スラブの振動性状に関する実構造物加振実験と加振点の検討

VIBRATION CHARACTERISTICS OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS AND DETERMINATION OF THE OPTIMAL DRIVING POINT LOCATION

佐野 泰之*, 成瀬 治興**, 林 健太郎***

Yasuyuki SANO, Haruoki NARUSE and Kentaro HAYASHI

This paper presents some experimental results concerning with vibration characteristics of reinforced concrete floor slabs in the actual building construction. An experimental modal analysis is applied to analyse the problem. This research develops experimental equipments and a measuring method. Through experiment, some values of the reciprocity of FRF, coherence function and modal parameters are observed at several points on the slab. This research proposes how from an analysis of those values the optimal location of vibration driving point can be determined. Some results are summarized as follows: (1) The values of modal parameters obtained from this experiments are nearly equal to ones shown in past researches, (2) For the determination of floor slab vibration characteristics, modal participation of lower modes (e.g. 1st and 2nd mode) are relatively more significant than that of higher modes, (3) It is shown that both W-type and S-type mode shape clearly appear at the floor slab near the separation wall and (4) The optimal location of driving point determined is some point on the floor slab away from the beams.

Keywords: *Vibration Characteristics, Modal analysis, Mode shape, FRF, Coherence function, Driving point*

振動性状, モーダル解析, モードシェイプ, 周波数応答関数, コヒーレンス関数, 加振点

1. はじめに

建築学で扱う振動現象は、地震の様に構造物を破壊にまで導く様な長周期で大振幅のものを始めとして、住生活に多少の影響を及ぼす振動現象、即ち、屋外の風や交通機関による建物の揺れから、屋内に設置された設備機器などの振動まで多岐に亘っている。

本研究は、これら住生活を取りまく振動環境を研究対象とした環境振動の範疇のうち、建築内外の実振動源による建築構造体各部の振動伝搬性状を解明し、予測することを目的としている。

周辺支持長方形版の振動については、Rayleigh¹⁾やTimoshenko²⁾の理論解をはじめとして、周辺支持長方形版の振動についてのRitz³⁾の解法及び実験値との比較、周辺固定長方形版の振動についてはLeissa⁴⁾の研究などがある。建築の床構造の振動については、建築構造分野では多くの研究が行われており、理論的な解析が多いが、実構造物での実験結果も含まれている。環境工学の分野でも同様に理論による解析が多く、特に、近年では、有限要素法を利用した数値解析が多く行われており、最近では、Rayleigh-Ritz法を用いた数値解析も行われている^{5,6)}。

本論文では、屋内に振動源を想定したRC床構造の鉛直振動の伝搬性状を明らかにすることを目的として、実構造物加振実験を行い、実験的モーダル解析をRC床構造の振動性状について適用し検討し

た結果について報告する。

また、多点加振のモーダル解析を適用することにより、加振点の位置による結果の異なりは、少なく抑えられるものと考えられ、可能な限り多点加振が望ましいことはいうまでもない。しかしながら、実構造物の加振実験において、多点加振を行うのは容易ではないことから、1点加振でも精度良い解析ができる加振点の位置の検討も併せて報告する。

2. 実験・解析方法

実験対象構造物は、RC造3階建の多目的教室棟であり、その概要を図1に示す。なお、実験・解析を行った範囲は、図1、図2に示す2階端部2室の床面及びその側面の廊下の床面である。測定範囲の下部構造としての1階部分は、構造系実験室となっており、間仕切り壁のない構造となっている。図1～図3にX, Y, Z方向を示す。加振実験は、図2に示す床面上で梁上ではない部分（以下非梁上とする）にある加振点●印、床面上でかつ小梁上にある部分（以下小梁上とする）にある加振点■印及び床面上で梁が交差する部分（以下梁交差上とする）にある加振点▲印とした3通りの実験を行っており、図3に示す格子状の点453点を受振点としている。

実験・解析装置のブロックダイアグラムを図4に、実験装置を

* アクト音響振動調査事務所 工修

** 愛知工業大学工学部建築学科 教授・工博

*** 愛知工業大学大学院 大学院生

ACT Sound & Vibration Research Office Co., M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Aichi Institute of Technology,
Dr. Eng.
Graduate Student, Graduate School of Aichi Institute of Technology

図1 実験対象構造物

図2 加振点及び測定範囲

写真1に示す。加振源としては動電式の加振機を用い、加振信号としてバーストランダム信号を採用し、図2に示す加振点を床面上方から面外方向に加振している。加振機に取り付けられた力ピックアップにより加振力を測定できるようになっている。この加振力と床面上に設置した受振点3点の面外方向の振動加速度応答を同時測定し、各受振点との周波数応答関数を求め、これを繰り返すことにより全受振点での周波数応答関数を測定している。これらの周波数応答関数の測定結果に、時間領域多自由度法 (Time domain multiple degrees of freedom method)¹¹⁾のうちの(単入力)最小2乗複素指数法 (Least Squares Complex Exponential)⁷⁾⁸⁾²²⁾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⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾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。

加振点の検討については、コヒーレンス関数の比較及び周波数応答関数の相反性の確認、実験的モーダル解析の結果から検討を行っている。なお、周波数応答関数の相反性の確認のため、図3に示す点について加振点と受振点を入れ替えた加振実験も行っている。

3. 実験・解析結果

3.1 モーダル解析の実験結果

3.1.1 固有振動数

表1に固有振動数の同定結果を示す。異なる加振点での固有振動数は2次モードで1.6 Hzの差が認められるが、殆どは1.0 Hz以内の差となっている。

周辺支持及び周辺固定長方形板の固有振動数の算定図表¹¹⁾を用い、

図3 受振点配置図及び加振点の検討点

図4 実験・解析装置のブロックダイアグラム

写真1 実験装置

大梁部分を固定であるとして床スラブ(梁含まず)の1次固有振動数を計算すると12 Hzになる。これに有限差法で求めた周辺固定正方形版に小梁が田型につく場合と小梁がない場合の固有振動数の比¹²⁾から梁を含めた1次固有振動数を計算すると17.7 Hzになる。大梁部分を固定とした1次モードは図6の2次モードの大梁で囲まれた部分のモードシェイプとほぼ同じ形になると考えられる。固有振動数の算定図表等から求めた固有振動数17.7 Hzと実測の2次モードの固有振動数18.0 Hz(加振点●印(非梁上)加振時)がほぼ一致している。

スパン長を変数として求めたRC床の固有振動数の回帰式¹³⁾を用いて計算すると、固有振動数は、16.5 Hzとなり1次の固有振動数とほぼ同じ値となっている。

表1 モーダルパラメータの同定結果及びその確認

モード No	加振点●印 (非梁上)				加振点■印 (小梁上)				加振点▲印 (梁交差上)			
	固有 振動数 [Hz]	減衰比 [%]	MOV [%]	MPD 指数 [deg]	固有 振動数 [Hz]	減衰比 [%]	MOV [%]	MPD 指数 [deg]	固有 振動数 [Hz]	減衰比 [%]	MOV [%]	MPD 指数 [deg]
1	16.0	1.98	81.2	22.3	16.2	2.86	91.3	16.9	16.7	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	2.69	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				

注) *印は3加振点でのMOVの最大値を示す

3. 1. 2 減衰比

表1に減衰比の同定結果を示す。減衰比については、何れの同定結果も1.50～3.50%の範囲に収まっており、加振点●印(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●印(非梁上)の解析では、これらモードを分離できていないためであると考えられる。表1に示される加振点●印の同定結果を全て平均すると2.78%となり、7次モードを除いて平均すると2.38%となる。加振点●印の減衰比は、低次の方が高次に比べ小さい値となっている。これは、波長の短くなる高次のモードは、モード振動状態から拡散振動状態⁽³⁾への移行する状態にあるためであると考えられる。

スパン長を変数として求めた減衰定数の回帰式⁽³⁾で減衰定数を計算すると2.4%になる。

3. 1. 3 モードモデルの確認

モード解析の同定結果は、加振機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、減衰比の同定結果に加振点による差が認められるため、MOV⁽⁴⁾、MPD⁽⁵⁾などにより同定したモードモデルの確認を行っている。

1次モードについては、モードの腹に一番近い加振点▲印(梁交差上)の同定結果が他に比べ、MOVは大きく、MPDは小さく、とも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●印(非梁上)が比較的良好な結果を示している。表1中の*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●印(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●印(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は大きい値となる傾向が認められる。これは、波長の短くなる高次のモードは、モード振動状態から拡散振動状態⁽³⁾への移行する状態にあるため、低次に比べてモード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 Mode Participation

モード No	固有振動数 [Hz]	Mode Participation [%]
1	16.0	29.5
2	18.0	24.7
3	21.3	4.9
4	27.9	8.5
5	30.7	8.8
6	—	—
7	37.4	7.5
8	—	—
9	47.6	3.7
10	54.6	4.8
11	56.2	7.6

3. 1. 4 Mode Participation

加振点●印(非梁上)の解析結果の、Mode Participation⁽⁶⁾を表2に示す。1次モードのMode Participationがいちばん大きく、次に2次モードが大きいことが示されている。この二つのモードでMode Participationを合わせた値は50%以上となっていることから、低次のモードである1次モードと2次モードの重要性が大きいことが示されている。

3. 1. 5 モードシェイプ

加振点●印(非梁上)の解析結果のモードシェイプの代表例を図5～図8に示す。

1次モードは、壁面のある部分が節に、A室中央付近が腹となるモードであり、モードシェイプには、A室中央のX軸方向の大梁の拘束の影響が認められる。B室は、A室よりも位相が遅れて振動しており、MPD指数は22.3度となっている。なお、図5に示す1次モードのモードシェイプは、A室の振動が最大になる時点で示し、B室の最大時点とは異なる。

2次モード、3次モードについては、壁のある部分とA室とB室の中央のX軸方向の大梁の部分で節としたモードである。2次モードのMPDは9.3度であり、モードシェイプの位相のずれは、視覚的にはあまり認められていない程度である。

1～3次モードのYZ平面のモードシェイプを見ると、1次と2次モードは、床面とA室とB室の界壁の接線で回転対称としたS形のモードシェイプを示しており、3次モードについては、A室とB室の界壁に対し面対称としたW形のモードシェイプになっている。

9次モードのような高次のモードは、波長が短いため、低次に比

図5 モードシェイプ[1次モード]

図6 モードシェイプ[2次モード]

図7 モードシェイプ[3次モード]

図8 モードシェイプ[9次モード]

ベカーブフィットエラーが生じやすく、特に加振点から離れた測定点では、低次に比べ解析精度が悪くなっているものと考えられる。

3. 2 加振点の検討

3. 2. 1 コヒーレンス関数による加振点の検討

コヒーレンス 関数を3つの加振点 (○印、□印及び△印) で比較したものを図9及び図10に示す。

図9は、受振点○印 (非梁上) で コヒーレンス 関数を比較したものである。1次モードの固有振動数 (16 Hz) では、大きな差はないが、加振点△印 (梁交差上) を加振した場合が一番関連のある結果となっている。しかし、1次モードの固有振動数より高い振動数では、全般的に○印 (非梁上) を加振した場合が他の加振点に比べ関連のある結果が得られており、次に加振点□印 (小梁上)、加振点△印 (梁交差上) の順となっている。

図10は、受振点△印 (梁交差上) で コヒーレンス 関数を比較したものである。この場合も全般的に加振点○印 (非梁上) を加振した場合が、他の加振点を加振した場合に比べ関連のある結果が得られている。また、受振点□ (小梁上) についても、加振点○印 (非梁上) を加振した場合が、他の加振点を加振した場合に比べ関連のある結果が得られている。

3. 2. 2 周波数応答関数の相反性の確認による加振点の検討

図3に示す受振点○印 (非梁上)、□印 (小梁上)、△印 (梁交差上) と加振点○印 (非梁上)、□印 (小梁上)、△印 (梁交差上) の9通りの組み合わせで、加振と受振を入れ替えて、周波数応

答関数の相反性 (以下相反性とする) の確認の実験を行い、その結果の代表例を図11及び図12に示す。

図11の(a)~(c)は、3つの加振点 (○印、□印、△印) を比較するため、相反性の確認の相手を、測定点○印 (非梁上部分) とした場合である。図11の(a)は、測定点○印 (非梁上) と測定点○印 (非梁上) の結果であり、測定した周波数全体的に他の相反性の確認の結果に比べ相反性が成立していると考えられる。図11の(b)は、測定点□印 (小梁上) と測定点○印 (非梁上) の結果であり、図11の(c)は、測定点△印 (梁交差上) と測定点○印 (非梁上) の結果である。図11 (b)、図11 (c) いずれの場合も、35 Hz以上の振動数域で周波数応答関数に差が認められる。1次モードと2次モード (16.0 Hz, 18.0 Hz) 付近をみると、測定点○印 (非梁上) を加振した場合はモードが分離できているのに対し、測定点□印 (小梁上) と測定点△印 (梁交差上) を加振した場合は、モードがはっきりと分離されていない。

図12は、加振点及び受振点双方を小梁上の測定点□印、測定点□印とした場合であり、1次モード (16.0 Hz) と2次モード (18.0 Hz) がはっきり分離されておらず、45 Hz以上の振動数にも差が認められる。

相反性の確認の結果から、相反性が最も成立していると考えられるのは、非梁上~非梁上の結果である。また、非梁上~小梁上及び非梁上~梁交差上の結果を含めても、非梁上を加振する方が、1次モードと2次モードを分離しやすいことから、今回の3つの加振点の中では加振点○印 (非梁上) が最も望ましい加振位置であるものと考えられる。

図9 コヒーレンス関数 [受振点○印]

図10 コヒーレンス関数 [受振点△印]

3. 3. 3 考察

コヒーレンス関数の比較、周波数応答関数の相反性の確認及びモードモデルの確認から、加振点●印 (非梁上)、加振点■印 (小梁上) 及び加振点▲印を比較すると、1次モードについては、加振点▲印 (梁交差上) のMOVが他の加振点よりも大きく、MPDも他の加振点よりも小さい値となっている。これは、加振点▲印 (梁交差上) が加振効率の良い振動の腹に一番近いためであると考えられる。しかし、加振点▲印 (梁交差上) で加振した場合の周波数応答関数の総和は、1次モードと2次モードがはっきりと分離されていないような形となっている。

2次以上のモードでは、加振点●印 (非梁上) のMOVが他の加振点よりも大きくなることが多く、コヒーレンス関数についても全般的に一番関連がある結果となっており、周波数応答関数の相反性についても全般的に成立している。

このように、加振点●印 (非梁上) で加振を行うと、多くのモード (特に2次以上) を精度良く同定できる傾向が認められるが、これは、加振点●印 (非梁上) はあらゆるモードで振動の節になりにくいためであると考えられ、機械振動などを対象とした既往の研究結果⁷⁾¹⁰⁾と同じ傾向が認められている。

(a) [周波数応答関数の相反性 測定点○印—●印]

(b) [周波数応答関数の相反性 測定点○印—■印]

(c) [周波数応答関数の相反性 測定点○印—▲印]

図11 周波数応答関数の相反性の確認 [○印関係]

図12 周波数応答関数の相反性の確認 [□印—■印]

4. まとめ

建築物内外の振動源による建築構造体各部の振動伝搬性状を解明し、予測するために、実構造物の加振実験を行い、実験のモーダル解析を適用し、固有振動数、減衰比、モードシェイプなどを同定した結果、以下に示すことが明らかになった。

(1) 大梁周辺を固定と考え、田型に小梁が入るとして固有振動数を計算した結果が、実測の2次モードの同定結果とほぼ一致している。

(2) 加振位置によるモーダル解析の同定結果の差は、固有振動数は、ほぼ1 Hz以内におさまっている。

(3) 解析した全モードの減衰比の平均値は、加振点○印（非梁上）を加振した場合2.78%であった。

(4) 1次、2次のMode Participationが大きくこの2つを合わせた値は50%以上であり、このことから低次のモードの重要性が大きいと考えられる。

(5) A室とB室の界壁の部分で1次、2次のモードのように回転対称となるS形と、3次モードのように面对称となるW形のモードシェイプが認められた。

(6) 壁のある部分は拘束力が強く、解析したモードの全て振動の節となっており、梁のある部分は、壁のある部分に次いでモードの節となりやすい傾向が認められた。このことから1次固有振動数の予測を行う場合、壁面のある位置が重要なパラメータの1つになるものと考えられる。

(7) モーダル解析を適用する場合、特に、1点加振で実験を行う場合、精度の良い結果が得られるような加振点を選定する必要があると考えられる。加振位置を加振点○印（非梁上）、加振点□印（小梁上）、加振点△印（梁交差上）の3点を比較検討した結果、加振点○印（非梁上）の加振実験の結果が多くのモードを精度良く同定できており、加振点として望ましい傾向が認められた。

5. おわりに

本論文では、モーダル解析を適用し、建築構造物の振動性状を把握するための実験方法とRC床構造の鉛直振動の振動性状を明らかにした。しかし、建築構造体を伝搬する振動は、壁面なども伝搬経路となっておりと考えられるため、今後これらを含めて建築構造物の振動伝搬性状を把握する必要があり、上階への振動伝搬を含めて検討を行う予定である。

謝辞

本実験・解析等の実施にあたっては、工学修士鈴木裕久氏にご協力を頂いた。ここに深謝の意を表する。

注

- 注1) 時間領域多自由度法 (Time domain multiple degrees of freedom method) : 複数のモードを同時に時間領域で同定する方法。多自由度法を用いると近接したモードや比較的減衰の大きなモードを同定するのに有効であるとされている。
- 注2) (単入力) 最小2乗複素指数法 (Least Squares Complex Exponential) : モードモデルを複素指数の重ね合わせとし、最小2乗法を用いて同定する方法。本論文では単入力 (1点加振) による方法を用いている。
- 注3) 拡散振動状態 : ①加振源の近傍を除いた (板の) あらゆる場所で振動エネルギー密度が一樣に分布すること。② (板の) 全ての方向へのエネルギー移動が、統計的に均等であることと提案¹⁴⁾されている。
- 注4) MOV (Mode Overcomplexity Value) : モーダル解析で同定したモードモデルの測定点に質点を加えた場合、固有振動数が低くなる測定点の割合である。理論的に構造物に質点が加えられた場合、固有振動数は下がることから、MOVの値は100%に近いほど、このような理論的矛盾が少ない解析結果であると考えられる。
- 注5) MPD (Mean Phase Deviation) : モードシェイプ係数の (平均) 位相偏差値。比例減衰系の構造体では、MPDが0°に近い値になると考えられる。MPDが0°とならないのは、一般減衰系の構造体であるか、測定や解析時に誤差を生じている事が考えられる。
- 注6) Mode Participation : 比較したい条件別にResidueを加算し比較するものである。本文のMode Participationは、i番目のモードの全測定点間のResidueを総和したもの、全モードの全測定点間のResidueを総和したものに対する比率であり、i番目のモードが全モードに対するどの程度の寄与があるかの相対的な重要度と関係すると考えられる値である。重要度と呼ばれることもある。

参考文献

- 1) Rayleigh, Lord : The Theory of Sound, pp.371, Vol.1
- 2) Timoshenko, S. (竹下市松, 渡辺茂共訳) : 工業振動学, 東京図書, pp.404, 1966
- 3) Ritz, W. : Ann. Physik, Vol28, pp737, 1909
- 4) Leissa, A.W. : Vibration of Plates, NASA SP-160, NASA, Washington, D.C.
- 5) 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
- 6) 加藤泰正, 本間俊雄他 : 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
- 7) 長松昭男 : モード解析入門, コロナ社
- 8) LMS International 編 : LMS CADA-X Modal Analysis Manual, LMS International
- 9) 加川幸夫, 石川正臣 : モーダル解析入門, オーム社
- 10) 倉部誠 : 図説モード解析入門, 大河出版
- 11) 日本建築学会編 : 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 1991, 付11 P489, 丸善
- 12) 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, 昭和53年11月
- 13) 櫛田裕 : 環境振動工学入門, 理工図書
- 14) 橋本典久, 桂充宏, 西川嘉雄 : 拡散度指数形成のための基礎的検討, 日本建築学会論文計画系論文報告集, No492, pp9-14, 1997

(1998年8月10日原稿受理, 1999年1月28日採用決定)