

1. はじめに

建物の振動特性は構造種別、建物階数、平面サイズ、平面形状、地盤条件、基礎条件などに大きく影響される。また一般に中低層建物の平面形状や、構造特性は高層のそれと比べて相当複雑であり、解析のみから振動性状を把握することは困難である。建物の耐震性能を正確に把握するには、沖積平野上の都市部に多く見られる中低層建物の振動特性を詳細に検討し、そこから得られる成果を設計に反映していくことが必要となる。中低層建物の振動性状を把握するためには、各影響要因に注目した実測から得られる研究成果の蓄積が有用と考えられる。

本論では、建物の形状に注目した詳細な振動性状の分析を行う。増築工事により非対称平面から対称平面へと変化した10階建てSRC造杭基礎建物を対象として、強震観測、常時微動計測、人力加振実験を行い、実際の振動特性を把握すると共に、増築前後の振動特性の変化を比較することにより、建物の平面形状が振動特性に及ぼす影響を検討する。さらに対象建物の構造解析を行い、実測と照らし合わせることによって検証するとともに、解析・設計におけるモデル化の検討を加える。

2. 建物・実験概要

対象建物は名古屋大学東山キャンパス内に立地しており、1995年に竣工したSRC造10階建ての杭基礎建物（杭長50m、杭径600mmのPHC杭で支持）である。1998～1999年の増築工事により、建物の平面形状が非対称なL字型からコ字型のほぼ対称形へと変化した。図1に建物の形状変化と強震観測点位置の概念図を示す（●：3成分、↑：上下動）。図中の南東側の張り出し部が増築部分である。増築部は基礎も含め既築部と同様な構造となっている。強震観測点は観測目的に合わせ、移動・増強をした。タイプB～タイプDで増築前後のねじれ挙動が観測でき、タイプFではねじれ、ロッキング振動を観測できるようにした。この他に建物近くの地表・地中に計3点ある。

増築前後について、立体振動モードや地盤・建物の相互作用を詳細に検討するために常時微動計測を多点多成分で行っている。増築前では31成分、増築後では46成分を地盤・建物に配置した。

図2に対象建物の増築前後の基準階における重心（●、○）と剛心（◆、◇）の関係を示す。図中に斜線部で示した増築部ができたことにより、基準階では平面形状がほぼ

対称形となり、偏心距離が短くなり、長辺方向において重心と剛心の位置関係が逆転していることが分かる。なお、この建物の耐震壁は比較的外周部に多く配置されており、増築後にはほぼ対称になっている。

3. 平面増築による振動特性変化

3.1 固有モード特性

図3に強震観測で得られた屋上(RF)と地表(GL)から求められた連成系の伝達関数の振幅比 (RF/GL)、及び屋上と1階(1F)から求められた固定した基礎固定系の伝達関数の振幅比 (RF/1F、ロッキング成分の影響を含む)を示す。本論ではスウェイは1Fの変位成分と定義し、RF/1Fをスウェイ拘束の伝達関数とする。各図で薄線は増築前、濃線は増築後である。また、図4にねじれ成分/GL（短辺方向）のスペクトル振幅比を示す。この図は屋上中央と南西端の短辺方向成分の差を観測点の距離で割りねじれ角を求め、増築後の長辺方向の半長をかけたうえで、地表短辺方向の記録との比をとったものである。これらの地震波は屋上の最大加速度が同程度で、かつ地表の加速度フーリエスペクトルの形が類似している地震を選択した。これらの図より、各方向の1次固有振動数（▼）は短辺方向で1.8Hz付近、長辺方向で1.9Hz付近であり、2次固有振動数は短辺方向で6Hz強、長辺方向で7Hz強である。増築前後を比べると各方向の1次固有振動数は若干上昇していることが分かる。2次固有振動数については変化がはっきりしない。図4からねじれの成分が卓越する振動数（▽）は2.2Hz付近であり、図3の短辺方向の2.2Hz付近のピークはねじれ成分であると判断できる。増築前後で比べるとねじれの卓越する振動数は若干低下し、ねじれ成分の振幅は減少している。図3の短辺方向の2.2Hz付近のピークも増築後は減少している。このことは図2から

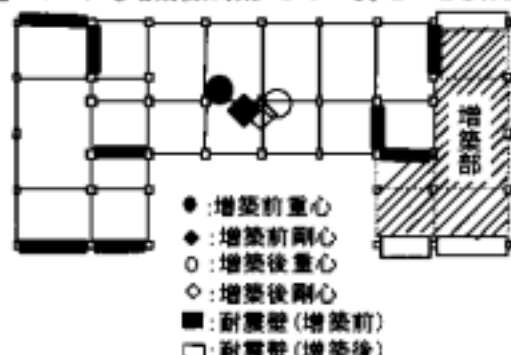


図2 基準階における増築前後の重心と剛心の関係

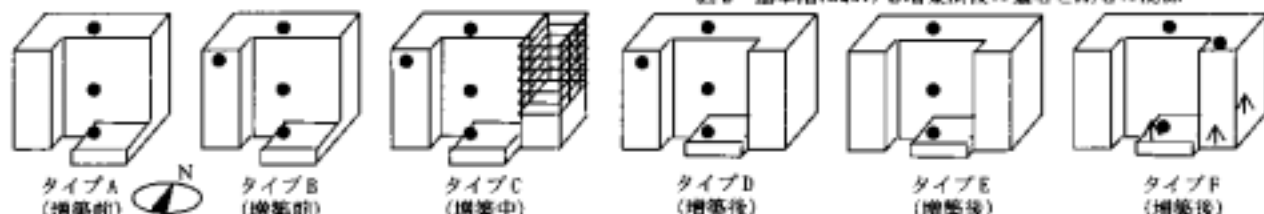


図1 対象建物の形状と強震観測点の変化の概要（●：3成分、↑：上下動）

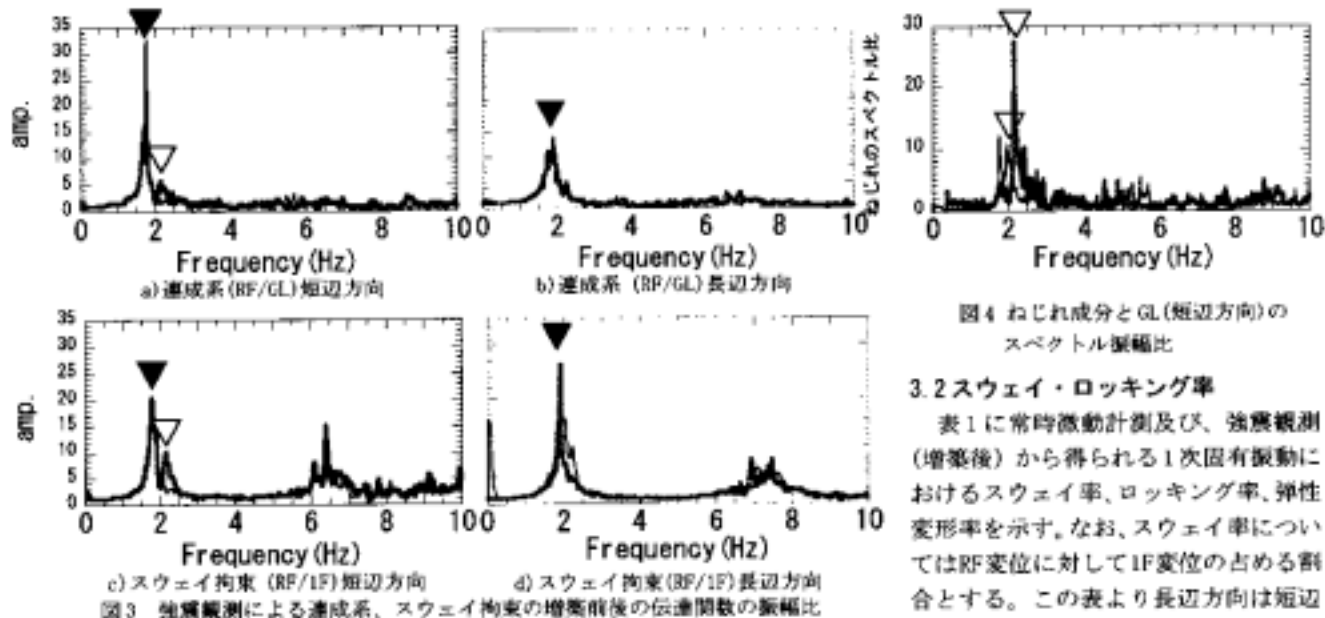


図4 おじれ成分とGL(短辺方向)のスペクトル振幅比

3.2 スウェイ・ロッキング率

表1に常時微動計測及び、強震観測(増築後)から得られる1次固有振動におけるスウェイ率、ロッキング率、弾性変形率を示す。なお、スウェイ率についてはRF変位に対して1F変位の占める割合とする。この表より長辺方向は短辺

方向に比べてロッキングの占める割合が少ないことが分かる。これは長辺方向は短辺方向に比べ基礎幅(建物幅)が大きいためと考えられる。短辺方向でも東側の方が中央に比べてロッキング成分が小さくなっている。これは有効な基礎の幅が中央より東側の方が大きいためであり、1F床の面外の変形があることを示唆している。増築前後を比べると増築後では中央短辺方向、長辺方向でロッキングの割合が減少している。図2から分かるように長辺方向は基礎幅の増加が原因であり、中央短辺方向は東側の増築部が増築前の西側と同様にロッキングしにくい部分となり中央部分のロッキングが拘束されたことによると考えられる。

3.3 立体振動モード

増築前後の短辺方向の1次固有振動、および図4の増築後のみに見られた5Hz付近のモードについて、立体振動モード形状をそれぞれ図5,6に示す。これらの図は対象と

表1 増築前後のスウェイ率、ロッキング率、弾性変形率

		方向				
		中央短辺方向	西側短辺方向	東側短辺方向	長辺方向	
常時微動	増築前	スウェイ率	7	8	—	12
	ロッキング率	52	25	—	29	
	弾性変形率	41	67	—	68	
	増築後	スウェイ率	3	8	10	19
	ロッキング率	35	25	30	7	
	弾性変形率	60	69	60	83	
強震観測	増築後	スウェイ率	6	—	8	3
	ロッキング率	30	—	26	3	
	弾性変形率	64	—	86	88	

分かるように増築前後で偏心距離が短くなったためである。

図4の5Hz強に増築前後で変化が見られる。振り出し部分の観測点がある記録(図1のタイプBやタイプD・タイプF)で見ると、増築後の5Hz強で、屋上中央部分と振り出し部分の間に短辺方向で位相に差があり、長辺方向で振幅の差が見られた。このことから増築により新たに振動モードが発生したことが予想される。

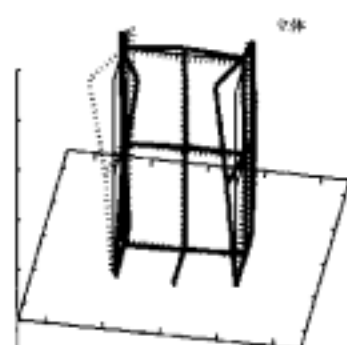
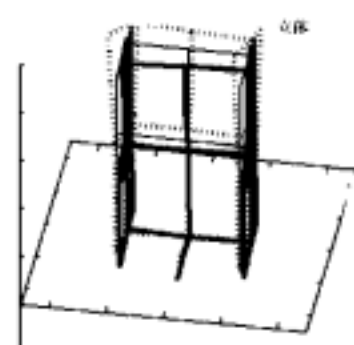
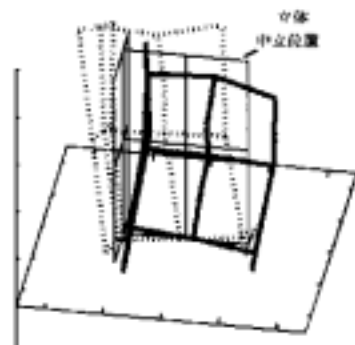
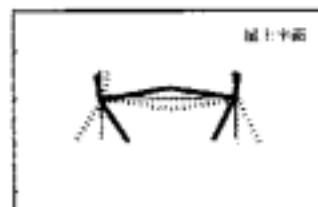


図5 増築前後の短辺方向1次固有振動の立体振動モード

図6 床の面内変形が卓越する振動モード

なる固有振動数に0.1Hz幅のバンドパスフィルターをかけ、1周期の1/4毎の変位モード形の変化を立体図、屋上平面図に表したものである。なお立体図については、中立位置と正負両側の最大変位のみを示している。図5の短辺方向並進モードは、増築前は並進と連成したねじれ成分が多く、短辺方向にのみ並進するのではなく、ねじれつつ屋上が右回り楕円軌道を描いている。また中央部分と張り出し部分との角度は直角を保っておらず、床が平面内で変形していることが分かる。増築後はねじれ及び屋上の楕円軌道も小さくなり、楕円軌道の回転方向が逆の左回りになっている。

この差は増築により偏心距離が短くなり、かつ重心と剛心の長辺方向における位置関係が逆転したことが原因である。床の面内変形についても増築後で小さくなっているが、やはり張り出し部に面内変形が見られる。一方、建物の立体的な変形により1階床が面外へねじれる変形も現れており、3.3節で述べた場所によるロッキング成分の差に対応している。

図6は増築後のみに見られる床の面内変形の卓越する振動モードである。東西の張り出し部分が逆位相で動いて、コ字平面が開閉しており、その動きに合わせて中央部分が弓形に変形している。モード形状が東西対称であることから、増築により対称平面になったために生じたモードと考えられる。東西の張り出し部分ではこのモード成分が東西方向成分全体の振幅の約2割をしめており、無視できない大きさとなっている。これら立体振動モードに関しては、参考として下記のURLに動画を示している。

<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp>

4. 実振動特性と解析・設計モデルの乖離

4.1 構造解析

対象建物の増築前後の柱、梁、耐震壁を線材置換したモデルを作成し、静的な外力を与え解析をした。解析にあたって①水平剛床仮定、②1Fで基礎固定、③梁に及ぼすスラブの曲げ効果を考慮、④構造部材のみ剛性考慮、の各条件を用いた。表2に常時微動計測から得られた基礎固定系の固有振動数と解析から得られた固有振動数(1)を示す。表中の解析値(2)は解析モデルに条件を加えた解析であり後述する。図7に短辺方向の並進モード図を示す。この図の実線は基準位置、破線は各階のモード形を示している。この表から、増築により各方向の並進モードの振動数が上昇し、ねじれの振動数が低下する傾向が、実測・解析共に対応していることが分かる。短辺方向より長辺方向の振動数の上昇が大きい。図2

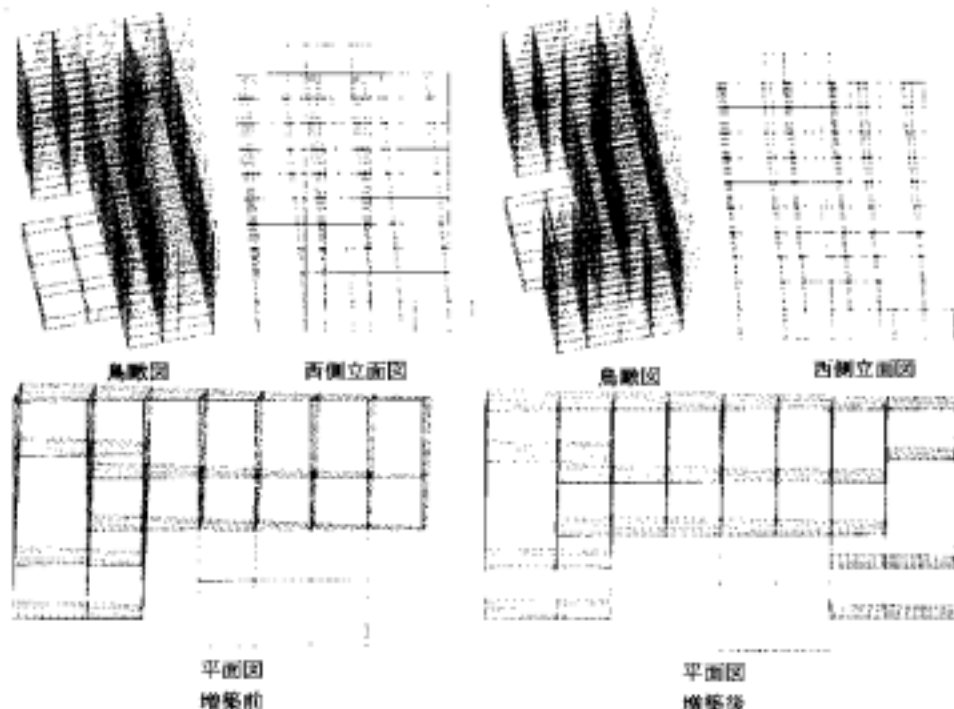


図7 構造解析から得られる増築前後の短辺方向並進モード図

から分かるように増築部の長辺方向には耐震壁があり増築後の床面積に対する耐震壁量が増えるためである。並進モードに連成するねじれの成分が増築によって減少していることは図5の実現象と対応している。以上のように実測と解析の振動数の傾向は対応しているが、値は実測の方がかなり大きくなっている。

4.2 解析・設計モデルと実現象の差

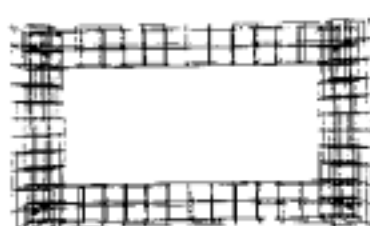
構造解析で用いたモデルと実測では次の点で差が見られた。(1) 固有振動に面内変形が見られ、対称形平面となった増築後では床の面内変形が卓越する特別なモードが見られた。(2) 基礎幅の違いによるロッキングの差があり、1F床の面外変形が特に非対称形平面であった増築前に表れていた。(3) 固有振動数の実測値は解析値に比べて大きい。

この節では(3)の振動数の差に注目する。躯体重量は密度と体積から、積載荷重は使用目的と面積から算出しているため、解析における重量の評価は実際と大きく離れていないと判断できる。よって解析における剛性評価に実際との大きな差があることになる。解析では構造部材の剛性しか考慮しておらず、2次部材の剛性の影響と考えられる。対象建物では外周部のフレーム内に袖壁と腰壁を有している。しかし、これらは開口サイズから耐震壁とみなせず、柱梁のサイズに比べ幅が薄いので一般的に無視される。

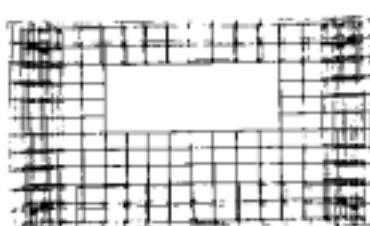
本節ではこのフレーム内に取り付く壁の剛性評価をFEM解析を用いて検討する。図8に示すように純フレームのモ

表2 対象建物の固有振動数の解析値と実測値(Hz)

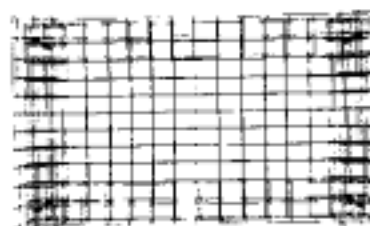
		短辺方向並進	長辺方向並進	ねじれ
増築前	解析値(1)	1.32	1.66	2.05
	解析値(2)	1.61	2.21	2.39
	実測値	1.9	2.1	2.2
増築後	解析値(1)	1.39	2.10	1.52
	解析値(2)	1.71	2.41	2.28
	実測値	1.9	2.2	2.1



フレームモデル

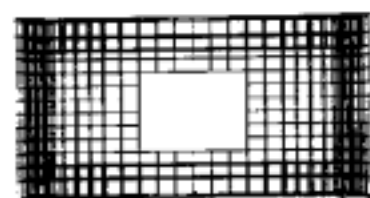


腰壁・袖壁モデル

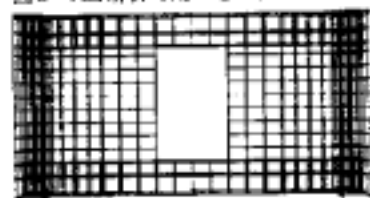


耐震壁モデル

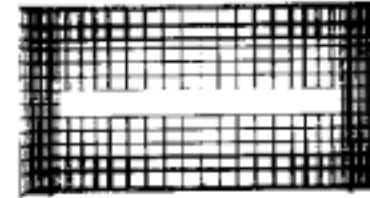
図8 FEM解析で用いるモデル（立面図）



中央開口モデル



縦開口モデル



横開口モデル

図9 耐震壁の開口の開け方（立面図）

表3 各モデルの変形量と剛性倍率

	モデル名	フレーム	腰壁・袖壁	耐震壁	壁スリット	袖壁	袖壁スリット	腰壁	腰壁スリット
壁厚15cm	変形(cm)	0.754	0.196	0.071	0.730	0.398	0.748	0.381	0.745
	剛性倍率	1.000	3.847	10.620	1.033	1.894	1.008	1.877	1.012
壁厚35cm	変形(cm)	0.754	0.133	0.041	0.722	0.324	0.742	0.299	0.741
	剛性倍率	1.000	5.669	18.390	1.044	2.327	1.016	2.522	1.018

モデルと腰壁・袖壁を有すモデルを用いて、静的な外力を加える。これらのモデルは対象建物を念頭にモデル化しており、柱サイズは85×90cmである。支持条件は柱脚がピン支持で柱頭がローラ支持であり、連層フレームを想定し柱頭・柱脚にばねを付ける。このモデルの外力と変形から等価な剛性を算出し比較する。表3に変形量と純フレームを基準とする剛性倍率を示す。耐震壁を付けた場合、腰壁や腰壁のみ付けた場合、それぞれにスリットを入れたモデル（壁厚15、35cm）についての変形量と剛性倍率も併せて示す。袖壁・腰壁を有すモデルはフレームモデルの約4倍の剛性を持ち、実測と解析の振動数の差の大きな原因であると考えられる。これらの壁は柱梁のサイズから十分に薄ければその剛性は無視されるが、壁厚15cmで腰壁、袖壁のみ有す場合でも純フレームの約2倍の剛性があり、さらに壁厚35cmと比べても無視できるほどの剛性ではない。つまり剛性評価の点で、壁厚による判定は必ずしも適切ではない。各スリットを有するモデルでは、スリットを適切に施せば剛性はフレームと同程度になり、剛性評価という点では壁の効果は無視できる。

FEM解析から得られた腰壁・袖壁モデルと等価な剛性を持つ薄壁を構造解析モデルの建物外周部に加え、解析を行っ

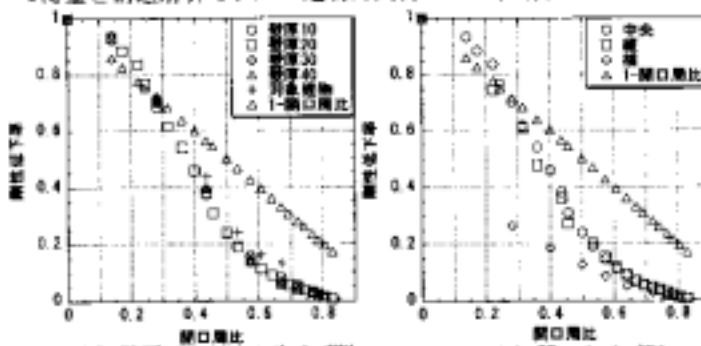


図10 耐震壁の開口による剛性低下率

た。固有振動数を表2の解析値(2)に示す。解析値(1)より実測値に近くなり、袖壁や腰壁の剛性評価が重要であることが分かる。ねじれの振動数の低下の傾向も実測と同程度になっている。

構造解析等で耐震壁の開口による剛性低下の取り扱いには開口のサイズより開口周比を算出し、 $1 - (\text{開口周比})$ を剛性低下率とする方法が用いられる。そこで、図9のモデルを用いて開口による剛性低下の検討を行なった。これらのモデルサイズは一般的な低層事務所等に用いられるものである。壁厚の影響を検討するために、中央開口モデルの壁厚を10、20、30、40cmで解析し、フレームサイズの影響を検討するために対象建物のモデル(図8の耐震壁モデル)も解析した。また開口タイプによる違いを検討するために、図9の3タイプの開口の開け方で解析を行なった。図10に開口周比と剛性の低下率の関係を示す。解析に用いられる $1 - (\text{開口周比})$ の式は解析値と差があり、開口周比0.3程度まで剛性を低く評価している。壁厚やフレームサイズによる差は少ないが、開口タイプによる傾向の差は大きい、特に横開口モデルの剛性が低い。これは壁の応力状態がせん断型ではなく曲げ型をしているためであり、開口タイプによって異なる剛性評価方法が必要となることが分かる。

5. まとめ

平面増築によって非対称形平面から対称形平面へ変化したSRC造10層建物を対象として振動実測を行い、増築前後の振動特性を比較することにより、平面形状が振動性状に及ぼす影響について検討した。増築前後で固有振動やねじれ振動に変化が見られ、対称形平面になったことによって床の面内変形が卓越する新モードが見られた。

増築前後について構造解析を行い比較すると、モード形状など実測と対応していたが、水平剛床仮定や1Fの固定条件や固有振動数に乖離が見られた。固有振動数の差については対象建物の外周部にあるフレームの壁(腰壁・袖壁)の剛性評価が大きな原因であった。