

2 3号館（免震校舎）の強制振動実験

内山正次*¹、安達直人*¹、引田智樹*¹、大熊武司*²

(*¹: 鹿島建設(株)技術研究所、*²: 神奈川大学工学部建築学科)

1. 序

神奈川大学に新築された2 3号館（免震校舎）において、竣工直前の2000年12月に振動性状の基本的データの収集を目的に常時微動測定、起振機による定常加振・自由振動実験を実施した^{1)~3)}。本報では、これらの実験概要と実験結果について報告する。常時微動測定および起振機による定常加振・自由振動実験から、固有振動数、減衰定数に強い振幅依存性があることを明らかとした。この振幅依存性は免震層に起因するものと考え、免震層の復元力特性の検討から免震層の振幅および振動数依存性について述べる。

2. 実験概要

積層ゴムアイソレーター、鉛ダンパー、鋼棒ダンパーが全て配置された状態で、常時微動測定と起振機加振実験を実施した。起振機加振ケースの一覧を表1に示す。起振機加振実験では、定常加振実験と自由振動実験を実施した。加振実験ではスライドマス式の長周期型起振機⁴⁾2台を8階に設置して最大加振力19.6kN、最大加振モーメント617.8kN・mの加振を行った。加振は最小振動数刻みが0.025Hz、振動数によらず加振力が一定となるようにNS、EW方向及び振れ方向加振を行った。また、NS方向では加振力を表1に示す3段階の加振レベル(L1~L3)に変えて実験を行った。

振動計は速度計を用い、加振方向に合わせてNS成分とEW成分について独立に測定した。各方向の測定時の振動計と起振機の設置位置を合わせて図1に示す。振動計は各階中央部と、免震層・地下1階・3階・6階・屋上階の測定方向と直交する方向の両端部に水平成分を計22点配置し、免震層・地下1階・屋上階に上下成分を計14点配置して測定した。常時微動測定時と起振機加振実験時の測定点配置は同じである。なお常時微動測定時の風速は僅かであった。

表1 加振ケース一覧

	加振位置	加振方向	加振力	測定成分
起振機加振実験 (定常加振実験) (自由振動実験)	8F	NS	4.9kN (L1)	NS,UD
			9.8kN (L2)	
			19.6kN (L3)	
		EW	19.6kN (L3)	EW,UD
振れ	19.6kN (L3) [617.8kN・m]			

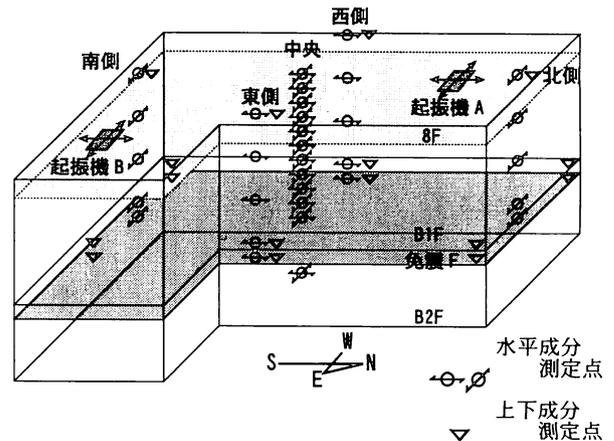


図1 測定点・起振機配置図

3. 常時微動測定

サンプリング振動数40.96Hzで測定した100秒間のデータ38回分から、地下2階と屋上階のクロススペクトルのアンサンプル平均を地下2階のパワースペクトルのアンサンプル平均で除した伝達関数の振幅比と

位相遅れを図 2 に示す。NS 方向はほぼ並進挙動を示し RF 中央を示す。EW 方向では屋上階 3 点の結果を示す。NS、EW 方向の 1 次と 2 次モード及び振れ方向の 1 次モードは位相遅れと振動モードより確認した。1.9Hz 付近のピーク周波数において北、南の位相はほぼ 180° ずれており振れの性状を示している。EW 方向の屋上階 3 点における 1 次振動数の振幅の大小関係は、南<中央<北となっており、位置により異なる。この伝達関数と屋上階のパワースペクトルに対して 1 質点系の応答を近似⁴⁾して求めた固有振動数と減衰定数を表 2 に示す。評価位置は NS、EW 方向では中央、振れでは南とした。また、表中には常時微動測定波形から RD 法⁵⁾により 15 秒間の小サンプルを 6000 個重ね合わせて求めた減衰波形の最初の 4 周期から評価した結果も併記している。伝達関数、パワースペクトル及び RD 法により得られた固有振動数と減衰定数は概ね一致しており、推定手法による差はほとんどない。

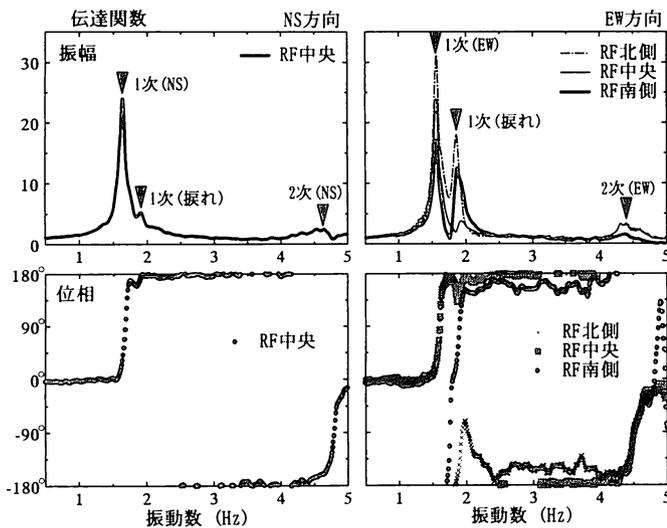


図 2 常時微動測定結果による伝達関数

表 2 実験から求められた固有振動数(f)と減衰定数(h)

		常時微動測定			起振機加振実験					
		伝達関数	パワースペクトル	RD 法	定常加振実験			自由振動実験 [振幅大→小]		
					L1	L2	L3			
NS	1 次	f_1 (Hz)	1.65	1.64	1.63	1.58	1.56	1.54	1.56→1.62	
		h_1 (%)	1.6	1.9	1.6	3.4	6.0	10.5	4.0→2.1	
	2 次	f_2 (Hz)	4.63	4.69	4.72	4.73	4.69	4.64	4.70	
		h_2 (%)	(2.1)	(3.2)	(6.6)	3.3	3.9	3.6	(3.4)	
EW	1 次	f_1 (Hz)	1.56	1.56	1.57	/			1.38	1.41→1.55
		h_1 (%)	1.7	1.6	1.3				13.1	5.4→1.5
	2 次	f_2 (Hz)	4.39	4.40	4.43				4.38	4.49
		h_2 (%)	(1.9)	(3.8)	(3.5)				4.8	(3.4)
振れ	1 次	f_1 (Hz)	1.88	1.88	1.89	1.75	1.76→1.87			
		h_1 (%)	1.2	1.3	1.3	13.7	5.5→1.4			

() は参考値

4. 定常加振実験

定常加振実験における屋上階の NS、EW 方向加振時の共振曲線を図 3 に示す。NS 方向加振では加振レベルが異なる 3 ケースの結果を重ねて示す。L1 加振に対して、L2 加振、L3 加振は加振力が 2 倍、4 倍であるのに対し、1 次固有振動数での応答変位の比率は 1.3 倍、1.7 倍程度の変化である。EW 方向の 1 次振動数付近では、常時微動時と同様の振幅関係があり、また、位置により振動数が異なり複雑な振動性状を呈している。この共振曲線の各ピークに対して 1 質点系の応答を近似して求めた固有振動数と減衰定数を表 2 に示す。

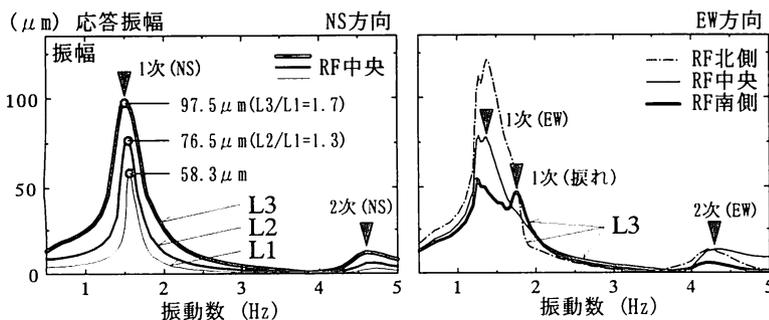


図 3 定常加振実験結果による共振曲線

評価位置は常時微動時と同様である。

定常加振実験結果から求められた固有振動数と減衰定数は、常時微動測定結果から求められた値よりも固有振動数は低く、減衰定数は大きい値を示している。NS 方向の加振力を 3 ケース変化させて行った実験では、加振力が大きくなり応答レベルが増大するに従い、固有振動数が低く、減衰定数が大きくなる傾向が見られる。

5. 自由振動実験

L3 加振において、起振機の急停止による NS 方向 1 次の自由振動波形を図 4 に示す。自由振動波形からゼロクロス法により固有振動数を求め、波形の包絡線に対数減衰率を最小二乗法により近似して減衰定数を評価した。加振レベルを変えた共振曲線では、応答振幅により固有振動数・減衰定数に違いが見られ、また、自由振動波形の 3~5 秒付近では破線で示す包絡線と一致していないことから、振幅により固有振動数と減衰定数が変化していることが考えられる。そこで、各方向 1 次モードに対して、評価範囲を図に示すような任意の小区間に分けて評価を行った。得られた固有振動数と減衰定数について、図 4 には任意の小区間における値を、表 2 には最初と最後の区間における値を示す。求めた固有振動数と減衰定数は応答振幅が小さくなるに従い固有振動数が高く、減衰定数が小さくなる傾向が見られる。また、これらの値は常時微動測定結果と定常加振実験結果で得られた値の間を変化している。

常時微動測定と定常加振及び自由振動実験から推定された 1 次振動数・減衰定数と屋上階の変位振幅値との関係を図 5 に示す。振幅値は、常時微動では 1 次固有振動数を含む狭帯域のバンドパスフィルターをかけた波形の最大値を、自由振動では評価した区間内での平均振幅値を用いた。また、定常加振では応答の最大値を用いた。結果は振幅が大きくなるに従い、固有振動数は低下、減衰定数は増大する傾向が見られる。また、NS 方向における定常加振と自由振動実験の結果は概ね整合している。

6. 免震層の復元力特性

6.1 免震層に作用するせん断力と相対変位の関係

免震層の復元力特性を評価するために、免震層に作用するせん断力と相対変位の関係を求めた。免震層に作用するせん断力は、免震層から上層の各階に配置された速度計の記録を微分した加速度記録に各階の設計質量を乗じた総和から求め、相対変位は免震層の上下階の積分した変位記録の差から求めた。1 次振動数における定常加振実験および自由振動実験から得られた免震層のせん断力と相対変位の関係を図 6 に示す。NS 方向の定常加振実験による復元力特性は、加振レベル (L1~L3) が大きくなり免震層の上下階の相対変位が増大するに従いループの傾きが小さくなり、ループの面積が大きくなる傾向が見られる。また、レベル 3 加振の NS と EW 方向では、EW 方向の方がループの傾きが小さい。自由振動実験による復元力特性では、

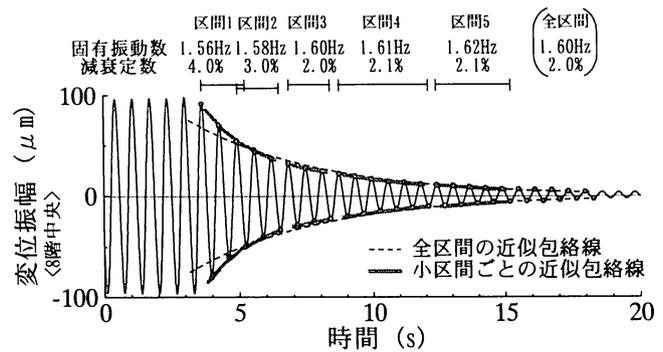


図 4 自由振動波形と対数減衰率 (NS 方向 1 次)

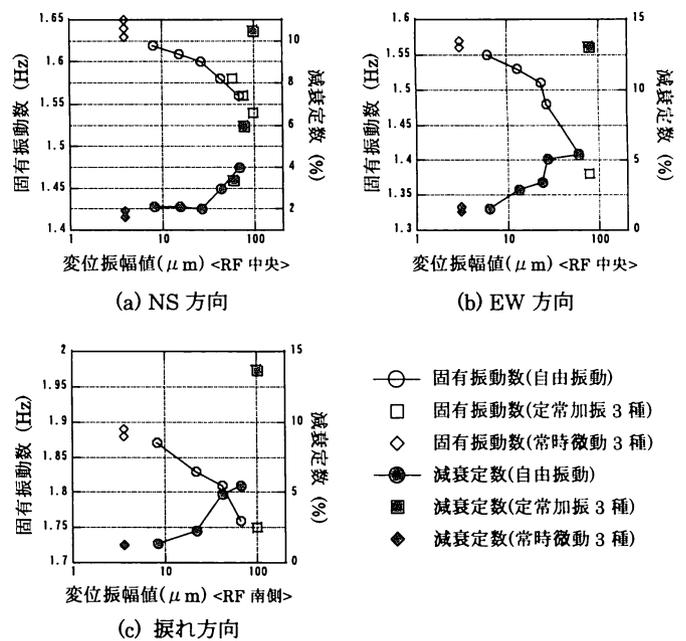


図 5 各実験により推定した固有振動数、減衰定数と変位振幅値の関係

より相対変位の小さい部分においても定常加振実験と同様の傾向が見られ、ループ形状は定常加振実験と概ね整合している。

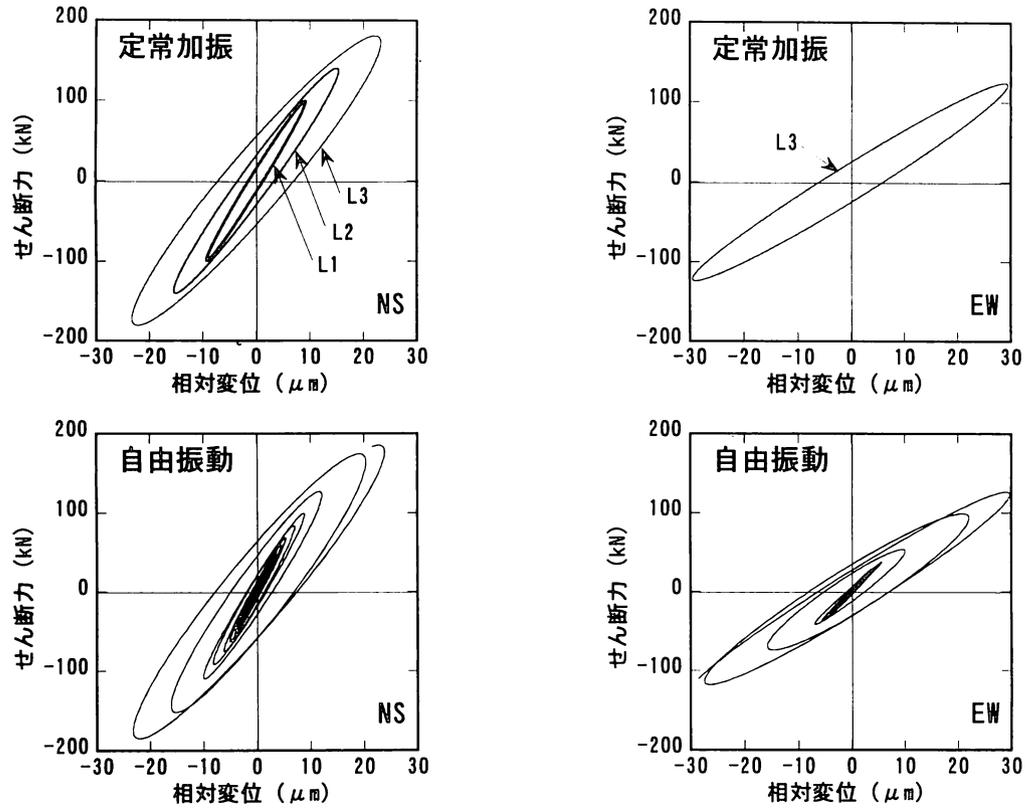


図6 定常加振・自由振動実験から得られた免震層のせん断力—相対変位の関係

6.2 免震層の等価せん断剛性と等価減衰定数

NS方向の定常加振実験による共振曲線データから免震層の複素ばねを求め、その実部と虚部から各振動数における等価せん断剛性（以後、せん断剛性と呼ぶ）と等価減衰定数（以後、減衰定数と呼ぶ）を評価した。各加振レベルにおける1次振動数を含む0.5Hz～3.2Hzでの免震層のせん断剛性・減衰定数と相対変位の関係を図7に示す。図中では、加振レベル毎に1次振動数を境に、低振動数側（ $0.5\text{Hz} \leq f < 1$ 次振動数）を白抜きで、高振動数側（ $1 \leq f \leq 3.2\text{Hz}$ ）を灰色塗りで示している。各加振レベルにおいて、1次

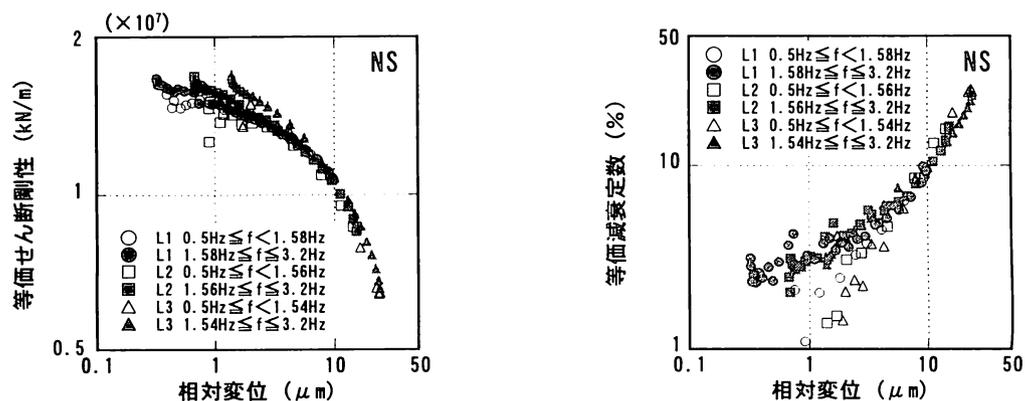


図7 定常加振実験から得られた免震層の等価せん断剛性・等価減衰定数—相対変位の関係

振動数よりも低振動数側では免震層の相対変位の増大に従い、せん断剛性が小さくなり減衰定数が大きくなる傾向が見られ、高振動数側でも同様の傾向が見られる。また、同じ相対変位に対して、白抜きの点と灰色塗りの点で若干のせん断剛性、減衰定数の差が見られ加振振動数によって異なることがわかる。

加振レベル3の定常加振と自由振動実験から得られたせん断剛性と相対変位の関係を図8に示す。定常加振の凡例は図2と同様である。また、自由振動実験におけるせん断剛性は、免震層に作用するせん断力と相対変位の減衰波形から半サイクル毎に評価して求めた。なお、自由振動実験における免震棟の振動数は、図4で示したように1.56Hz~1.62Hzの間で変化している。自由振動実験から得られたせん断剛性は、定常加振実験結果の1次振動数よりも低振動数側と高振動数側の間にあり、同じ相対変位に対して振動数に依存して若干変化している。この振動数依存性は、加振振動数の違いにより、特に高振動数側で大きい傾向を示している。

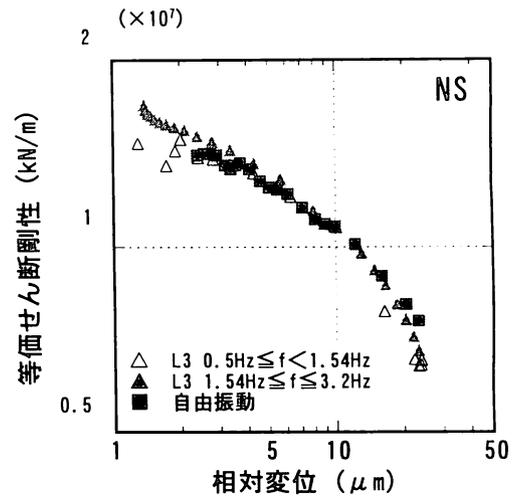


図8 定常加振・自由振動実験の等価せん断剛性—相対変位関係

7. 実験結果のシミュレーション

定常加振実験結果のうち加振レベルを3段階に変えて行ったNS方向加振についてシミュレーション解析を行った。NS方向では加振時にほぼ並進挙動を示しており、建物を1本棒に集約した等価せん断質点系モデルに置換した。図9に解析モデルを示す。質点質量は設計値を用い、各層のせん断剛性ならびに地盤ばねは各加振レベルの1次ピーク振動数の振動モードから逆算して算定した。図10に屋上階における実験値と解析結果を比較して示した。非線形性の強い免震層を剛性低下の最も大きい1ピークで評価しており、共振曲線の裾野で若干差が見られるもののL1~L3加振を良くシュミレートしている。

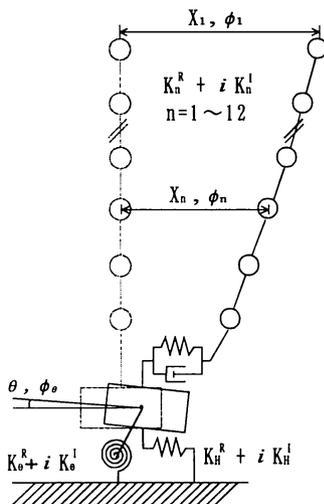


図9 解析モデル

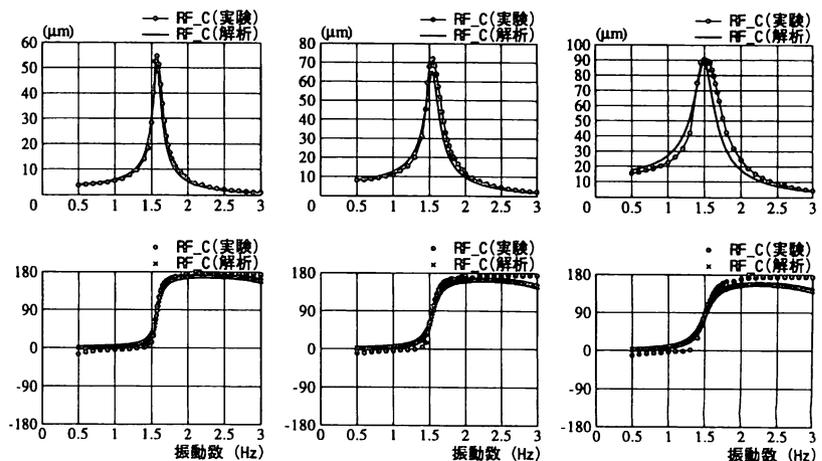


図10 実験値とシミュレーション解析値の比較

8. 実験値と設計値の対応

設計における小変形から大変形時の免震層のせん断剛性と実験値との対応を図 11 に示す。定常加振の結果は、各加振レベルの 1 次振動数における値を表示している。定常加振と自由振動実験の結果は整合している。また、NS 方向と EW 方向では微小振幅時から免震層のせん断剛性が異なる。各方向の 1 次モードにおける屋上階に対する免震層直上階のスウェイ・ロッキング比率を表 3 に示す。両実験における免震層直上階のスウェイ・ロッキング率は、EW 方向の方が NS 方向よりも大きく、図 2・図 3 の伝達関数・共振曲線から EW 方向では南北方向に複雑な振動モードを呈している。これらの影響により、両方向のせん断剛性が異なっているものと考えられる。本実験では、設計のクライテリアに比較して小さい範囲での結果であるため設計値とは直接比較できないが、実験値は相対変位の増加に従い減少し、設計値に近づく方向になっている。

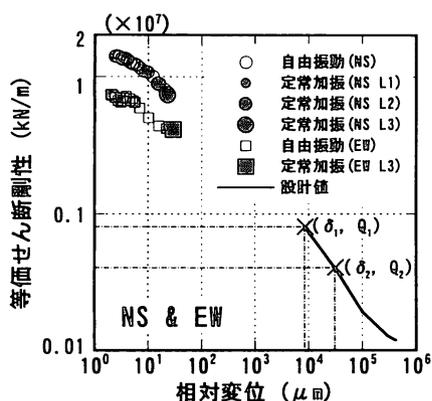


図 11 等価せん断剛性—相対変位関係の実験値と設計値の比較

表 3 屋上階に対する免震層直上階のスウェイ・ロッキング比率

	NS 方向			EW 方向		
	ロッキング*	スウェイ	弾性	ロッキング*	スウェイ	弾性
常時微動	3.4%	11.3%	85.3%	12.7%	22.5%	64.8%
定常加振(L3)	3.1%	18.9%	78.0%	11.0%	36.7%	52.3%

9. 結

常時微動測定、起震機による定常加振・自由振動実験結果ならびに解析検討より以下の知見を得た。

- 常時微動測定から求めた 1 次の固有振動数と減衰定数は各種推定手法によらず概ね同じ値を示した。
- 常時微動測定、起振機加振実験より得られた固有振動数及び減衰定数は、免震校舎の応答振幅の増加に従い、固有振動数は低下し、減衰定数は増加する傾向が見られた。
- 起振機加振・自由振動実験から免震層の復元力特性を評価した結果、免震層の等価せん断剛性・等価減衰定数は、微小な相対変位から強い非線形性を有し、相対変位の増加に伴って等価せん断剛性は減少し、等価減衰定数は増加することが明らかとなった。また、若干の振動数依存性も確認された。
- 起振機加振・自由振動の両実験から免震層の復元力特性を評価し、同様の特性が得られた。

参考文献

- 吉田和彦、大熊武司、常木康弘：神奈川大学 2 3 号館（免震棟）および新 1 号館の振動実験（その 1）2 3 号館（免震棟）の構造設計概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.807-808、2001.9
- 引田智樹、安達直人、内山正次、大熊武司：神奈川大学 2 3 号館（免震棟）および新 1 号館の振動実験（その 2）2 3 号館（免震棟）の振動実験結果、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.809-810、2001.9
- 安達直人、引田智樹、内山正次、大熊武司：神奈川大学 2 3 号館（免震棟）および新 1 号館の振動実験（その 3）2 3 号館（免震棟）免震層の復元力特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.811-812、2001.9
- 石橋敏久、内藤幸雄、川上敏男、田中清貴、常木康弘：長周期型起振機を用いた超高層ビルの振動試験、鹿島技術研究所年報、第 45 号、1997.12
- 田村幸雄、佐々木淳、佐藤民夫、高坂隆一：RD 法による強風時の構造物の減衰評価、第 12 回風工学シンポジウム論文集、1992