

# 免震建物のねじれ応答特性に関する研究 (その3)

—— 1 軸質量偏心免震建物モデルの振動実験 ——

中 村 嶽 武 田 寿 一  
岡 田 宏 鈴 木 哲 夫

## Torsional Response Characteristics of Building with Base Isolation System (Part 3)

—— Dynamic Tests of Base-isolated Building with Eccentricity of Mass in One Direction ——

Takashi Nakamura Toshikazu Takeda  
Hiroshi Okada Tetsuo Suzuki

### Abstract

The purpose of this study is to examine the effectiveness of a base isolation system in reducing torsional effects and increasing safety against earthquake of a building which has asymmetry in mass. Model tests employing a shaking table and dynamic analyses are performed. The models are single-story, two meters square in plane, supported by four steel columns, and with asymmetries in mass distribution. One isolated model is supported at the base of the building by four rubber bearings. Another model has addition further of two cantilever dampers of prestressing steel bars. Sine wave and earthquake motion inputs are applied to both base-fixed and base-isolated models in order to study the difference in torsional response characteristics between the two. The following results are obtained. 1) The base isolation system provides effects in reducing structural torques and response shear forces of a building with eccentricity of mass. 2) Torsional deformation of a building can be minimized when the center of stiffness of the isolation system coincides with the center of mass of the superstructure.

### 概 要

前報(その2)の剛性偏心に続いて、質量偏心を有する建物を免震化することにより、そのねじれ振動の影響を低減し、かつ耐震安全性を高めることを振動実験および解析により検討した。試験体は前報と同じく上層と基礎の平面が2m×2mで、加振方向に関して1軸質量偏心を有する上層を4本の鉄骨柱で支持した建物モデルである。免震装置は積層ゴムおよび片持梁PC鋼棒ダンパーを用いている。非免震の建物モデルおよび建物の基礎と振動台の間に免震装置を取付けた免震モデルについて、正弦波共振実験および地震波入力実験を行ない、両者の振動特性および地震応答特性を比較した。これより次の結果を確認した。(1)質量偏心があり、ねじれの影響が大きな建物でも、免震化によりせん断力とねじれ変形を低減し得る。(2)質量偏心建物の重心と免震装置部の剛心の位置が異なる場合は、両者を一致させることによりねじれ振動を抑制し得る。

### 1. 序

本報告は、前報(その2)の剛性偏心に続いて、質量分布に関し1軸偏心を有する建物を免震化することにより、そのねじれ振動の影響を低減し、かつ耐震安全性を高め得ることを振動実験および解析により検討したものである。

試験体は基本的に前報の剛性偏心モデルと同じ部材で構成され、上層と基礎の平面は2m×2mで、上層は4本

の同じ断面の鉄骨の柱で支持されている。今回は上層に付加質量を取り付けて、加振方向に関して1軸質量偏心を与えている。免震装置は前報と同じ積層ゴムおよび片持梁PC鋼棒ダンパーを用いている。

1軸質量偏心の建物(非免震モデル)およびその建物の基礎と振動台の間に免震装置を取付けた免震建物(免震モデル)について、正弦波共振実験および地震波入力実験を行ない、両者の振動特性および地震応答特性を比較した。

## 2. 実験の概要

### 2.1. 試験体

振動実験に用いた試験体を写真-1および図-1に示す。また、試験体の構成部材(おもり, 柱材, 積層ゴム)の諸元および静的特性試験により求めた柱と積層ゴムの水平剛性を表-1に示す。

試験体は、付加質量を取り付けた1軸質量偏心の上層を同じ断面の鉄骨の柱材(M柱)4本で支持した非免震モデルと、それに免震装置を取付けた免震モデルを用いている。なお、1軸質量偏心とは、試験体中央の加振方向軸(X軸)に関して質量分布が異なり、かつ加振方向の直交軸(Y軸)に関しては質量偏心がない状態を言う。

表-2に質量偏心の免震ねじれ試験体の一覧を示す。図-2および表-3に1軸質量偏心試験体の諸元を示す。

(1) 非免震モデル 非免震モデルは、1軸質量偏心建物の試験体を振動台上の架台に直接固定支持したものである。

(2) 免震モデル 免震モデルは、非免震モデルに、積層ゴム(3M:水平剛性の大きい積層ゴム, 2M:水平剛性の小さい積層ゴム)や片持梁 PC 鋼棒ダンパーより構成される免震装置部を取付けた試験体である。今回は、免震装置の配置により免震装置部の剛心の位置も変化させている。

### 2.2. 実験方法

2.2.1. 測定項目 測点は図-1に示すような振動台の加速度, 試験体各層の加速度および変位, 柱の歪などである。

2.2.2. 実験項目 各試験体について、以下の実験を行なった。各実験においては、試験体の上部建物の柱の歪が弾性内に収まるように、免震モデルについては更に

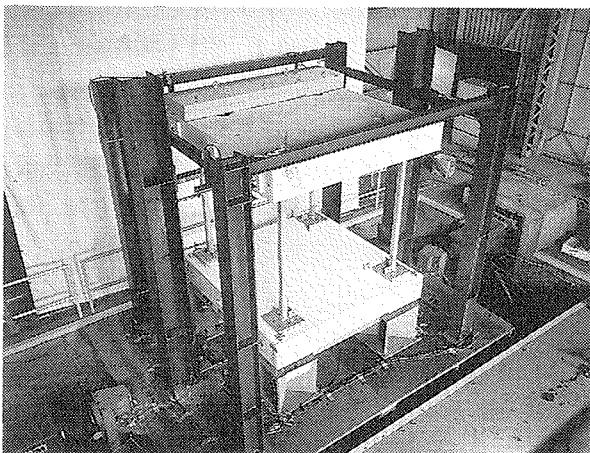


写真-1 試験体 (質量偏心免震モデル)

免震装置部の積層ゴムの変形が3cm以下に収まるように、入力を制御している(但し、免震装置部の片持梁 PC 鋼棒ダンパーは、約6mmで降伏して塑性域が生じる)。

(1) 試験体の構成部材の特性実験 試験体の構成部材である柱および免震装置(積層ゴム, 片持梁 PC 鋼棒ダンパー)の特性を静的および動的に把握する特性実験を行

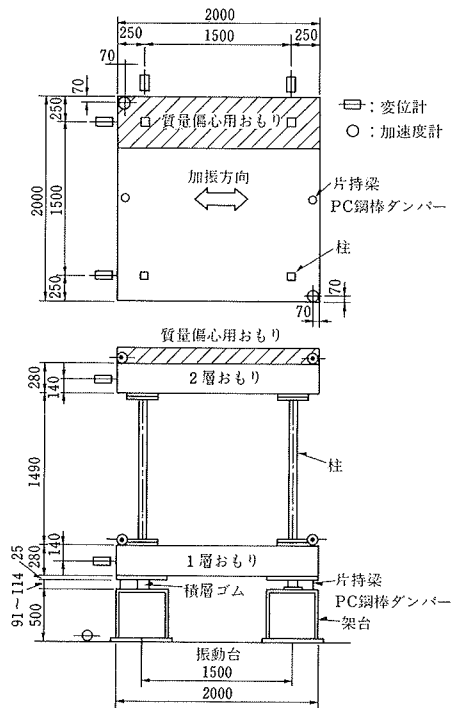


図-1 試験体 (質量偏心免震モデル) および測点

部材	形状寸法	水平剛性
おもり	下層(1層) □2000×2000×280mm, 重量: W1=3.12t	
	上層(2層) □2000×2000×280mm, 重量: W2=2.89t	
	偏心用(2層) □2000×500×150mm, 重量: W3=1.18t	
柱材	M柱 □60×60×3.2mm, 長さ: H=1390mm	0.292t/cm
積層ゴム	剛ゴム(3M) 積層部の直径100mm, 高さ89.4mm (ゴム2.4mm×30層, 鉄板0.6mm×29層)	* 約61.6kg/cm
	軟ゴム(2M) 積層部の直径80mm, 高さ75mm (ゴム2.1mm×28層, 鉄板0.6mm×27層)	* 約34.4kg/cm

\*: 軸力により剛性は若干変化する。

表-1 試験体の部材の諸元

質量偏心	免震装置	積層ゴムの種類	ダンパー	試験体名
有り	無し	—	—	FH3-0
		3Mゴム2個	無し	MH3-0
	有り	2Mゴム2個	有り	MH3-0EW
		3Mゴム4個	無し	MH33-0
			有り	MH33-0EW

表-2 試験体 (質量偏心モデル) 一覧表

なった。柱材の剛性は、振動台に設置した非免震モデルの上層部(2F)の重心位置をX方向にジャッキで加力した両振り静的試験, X, Y方向の自由振動実験およびX方向一方向の正弦波共振実験より求めた。また、積層ゴムの剛性は、免震モデルの下層部(1F)の剛心位置をX方向にジャッキで加力した両振り静的加力試験およびX, Y方向の自由振動実験より求めた。

試験体		水平剛性 Kh(t/cm)	剛心廻りの ねじれ剛性 Kr(t·cm)	重量 W(t)	回転慣性 I (t·cm·rad)	回転半径 i(cm)	偏心距離 e(cm)	偏心比 é	弾力半径 j(cm)	弾力半径比 j'	偏心率 Re
上部構造 (非免震)	FH3-0	1.168	13140.	4.07	28.73	81.65	21.74	0.266	106.1	1.299	0.205
免震部 (積層ゴム)	MH33-0	0.261	2971.	3.12	21.71	81.65	19.44	0.238	106.7	1.307	0.182
	MH3-0	0.212	2353.	3.12	21.71	81.65	0.08	0.00098	105.4	1.290	0.00076

表-3 1軸質量偏心試験体の諸元

(2) 動的基本特性実験 振動台に各種試験体を設置し, X, Y方向の自由振動実験およびX方向一方向の正弦波共振実験により, 動的基本特性を調べた。

(3) 地震応答実験 免震モデルおよび非免震モデルとも, 入力地震波は使用した積層ゴムの周期を考慮して再現時間を1/2に短縮した El-Centro 40NS, Taft 52EW および十勝沖地震八戸港湾 68EW の3波を用いた。入力はずべてX方向の一方向入力で, 積層ゴムの変形が3cm以下および試験体の柱の歪が弾性内に収まるように入力している。

地震応答実験においては, 以下に示す免震装置部が積層ゴム4個のみで構成されるモデルの弾性応答実験と, 更にA種11mmφPC鋼棒片持梁弾塑性ダンパー(以後ダンパーと言う)を2個取付けたモデルの弾塑性応答実験を行なった。なおここで, 弾塑性挙動を示すのは免震部のダンパーのみである。

① 弾性応答実験 免震装置部が2種類の積層ゴム(3M:水平剛性の大きい積層ゴムまたは2M:水平剛性の小さい積層ゴム)の組み合わせで構成された免震モデルを使用。

② 弾塑性応答実験 ①の弾性応答実験用の免震装置部に, 試験体の加振方向(X方向)にダンパーを2個取付けた免震モデルを使用。

### 3. 実験および解析結果

#### 3.1. 動的基本特性実験

X方向一方向の正弦波共振実験により, 動的基本特性を調べた結果について述べる。

各種試験体内で, ここでは次の3種のモデル, 即ち, 1軸質量偏心試験体の非免震モデル(試験体名: FH3-0)およびそれを3Mゴム4個で支持した免震モデル(試験体名: MH33-0)と, 2Mゴムと3Mゴムの組み合わせにより免震装置部の剛心を上部質量偏心試験体の重心位置に合わせた免震モデル(試験体名: MH3-0)を主に取り上げ

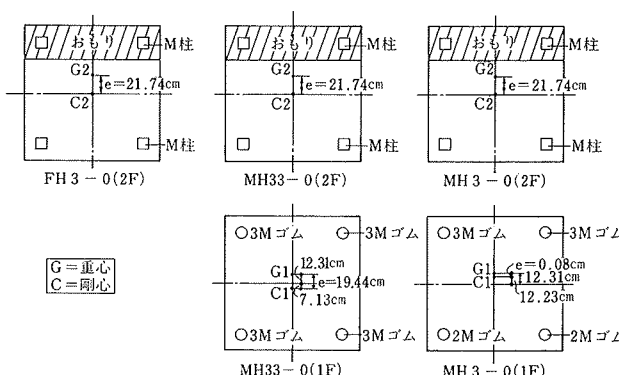


図-2 試験体(質量偏心モデル)の諸元

る。

3.1.1. 固有振動数 図-3に非免震モデルおよび免震モデルの正弦波共振実験で得た上下各層の共振曲線を示す。免震モデルの応答倍率は, 非免震モデルに比べ, 積層ゴムの免震効果によって小さな値となっている。また免震装置部の剛心を上部質量偏心試験体の重心位置に合わせた免震モデルの応答倍率は, さらに小さな値となっている。表-4に実験の各モデルの固有振動数の結果をまとめて示す。

3.1.2. 固有振動モード 表-5に共振実験で得られた各モデルの振動モードを示す。免震モデルにおいても, 4次, 6次でねじれモードが生じるが回転角の絶対値は小さく, また応答値の大きな1次モードでのねじれは小さくなっており, 免震の効果が表れている。特に免震装置部の剛心を上部質量偏心試験体の重心位置に合わせた免震モデル(試験体名: MH3-0)では1次モードでのねじれは非常に小さくなっている。

以上より, 上層部質量偏心を有する建物の全体のねじれ変形は, 免震化により抑制し得ること, また質量偏心建物の重心と免震装置部の剛心が異なる場合には, 両者を一致させることが必要であることが確認された。

#### 3.2. 地震応答実験

本報告では, 主に非免震の1軸質量偏心建物モデル(FH3-0), 免震モデル(MH33-0, MH3-0), およびゴム+ダンパー付き免震モデル(MH3-0EW)について, El-Centro波の入力の大きさをパラメータとした実験結果について述べる。

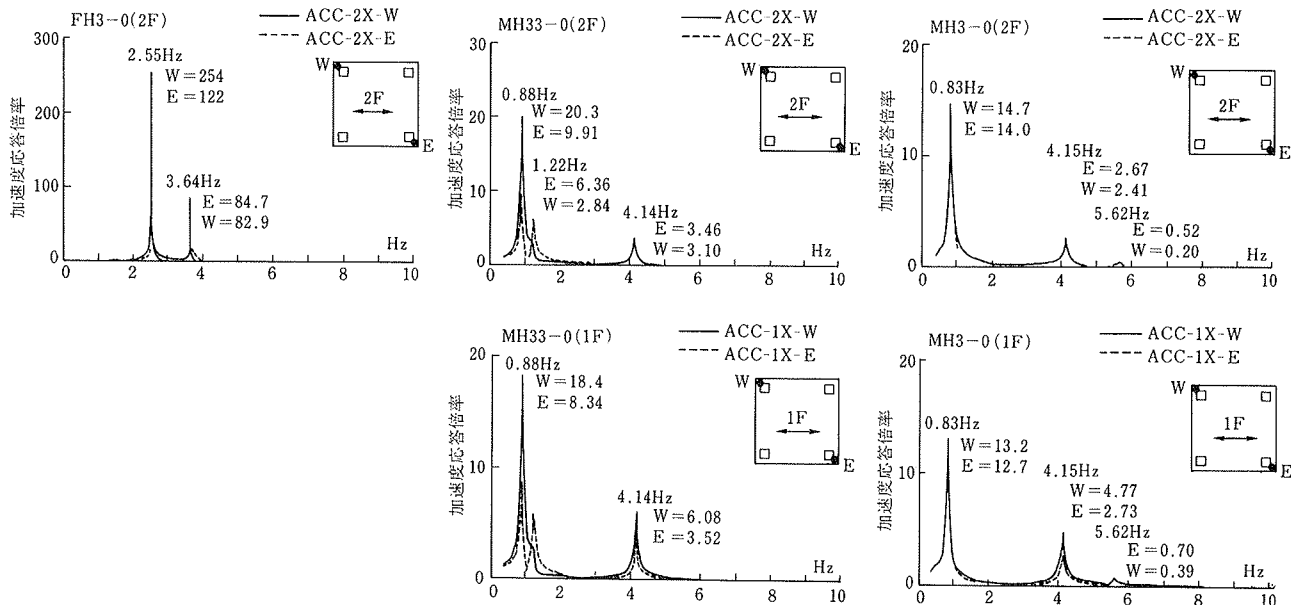


図-3 共振曲線

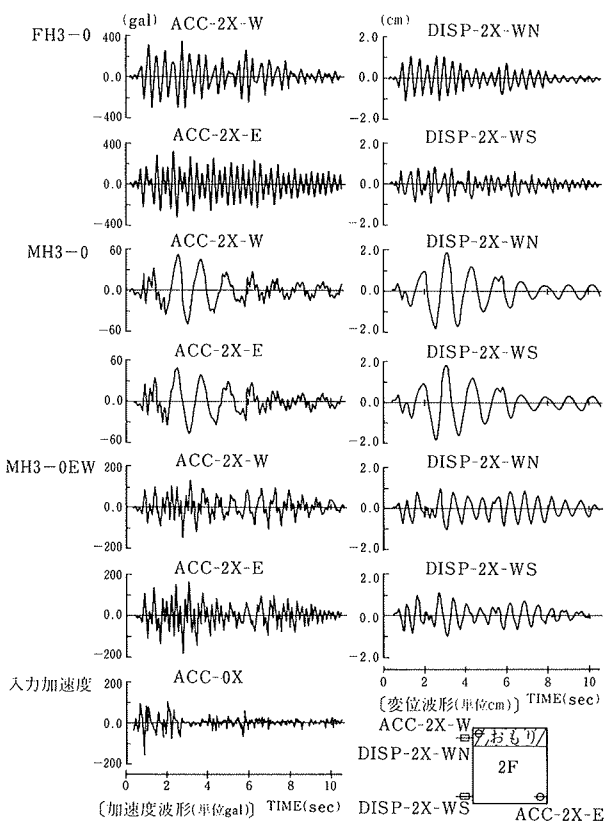


図-4 実験波形 (El-Centro 波 150 gal 入力)

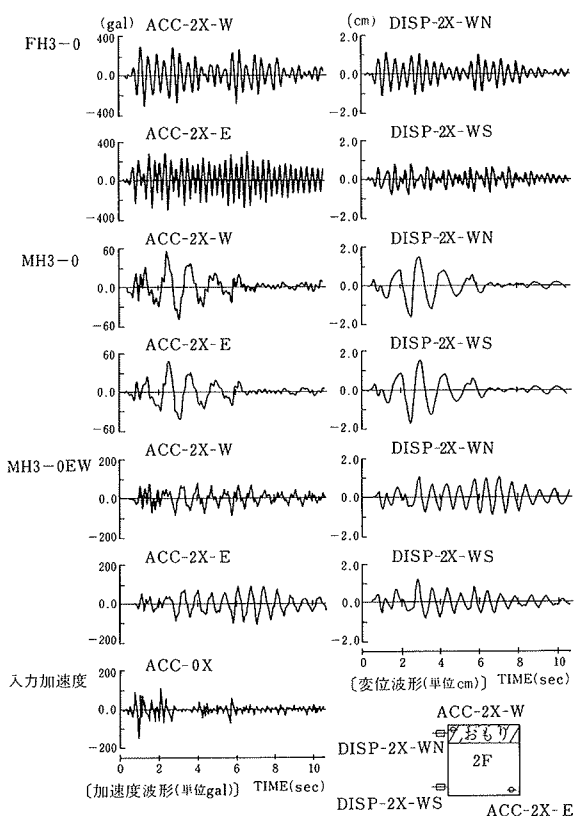


図-5 解析波形 (El-Centro 波 150 gal 入力)

3.2.1. 波形および伝達関数 図-4に非免震の1軸質量偏心建物モデル (FH3-0) および積層ゴムによる免震モデル (MH33-0, MH3-0) の El-Centro 波 150 gal 入力実験における上層の X 方向の加速度および変位波形を示す。また、図-6に非免震の1軸質量偏心建物モデル (FH3-0) および積層ゴムによる免震モデル (MH33-0,

MH3-0) の El-Centro 波 150 gal 入力実験の応答加速度のフーリエ振幅を入力加速度のそれで除して求めた伝達関数を示す。伝達関数のピークの振動数および高さの分布 (振動モード) は図-3の正弦波共振実験結果とほぼ対応している。

図-5に弾性応答解析により求めた FH3-0 モデルと

MH3-0 モデル, および弾塑性応答解析により求めた MH3-0 モデルの El-Centro 波 150 gal 入力における X 方向 2 層位置の応答加速度波形と応答変位波形を示す。減衰行列は, FH3-0 モデルについて材料減衰として柱に 0.4% を与え, 1 次の固有円振動数で除した値を基に作成し, MH3-0 モデルについては, 材料減衰として柱に 0.4%, 積層ゴムに 6% を

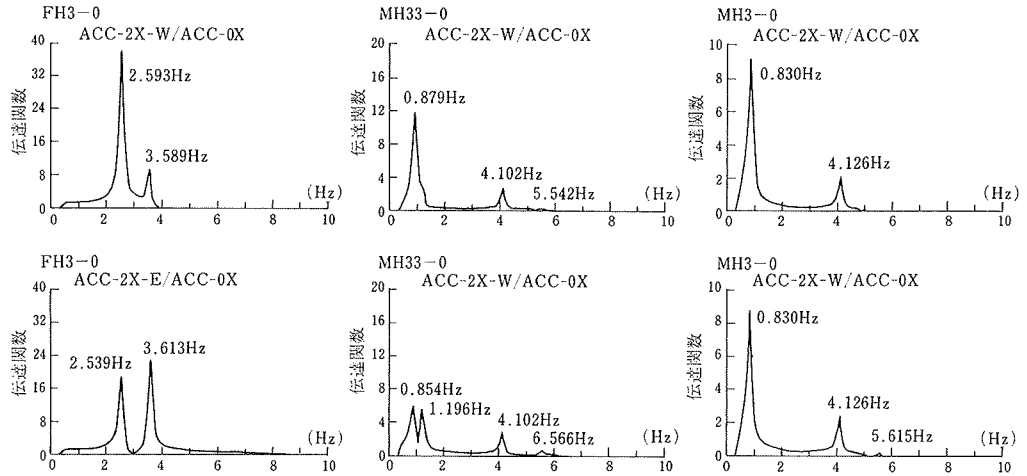


図-6 伝達関数 (El-Centro 波 150 gal 入力実験)

与え, かつそれぞれが卓越する次数の固有円振動数で除した値を基に作成している。また MH3-0EW モデルのダンパーの復元力はバイリニア型とし, 弾性剛性 300 kg/cm, 降伏耐力 200 kg とし, 塑性剛性は弾性剛性の 1/100 としている。なおダンパーの弾性域においては減衰を無視し, 塑性域における履歴減衰のみを考慮した。図-4 の実験波形と図-5 の解析による波形は, ほぼ対応している。

3.2.2. 最大値分布 図-7 に非免震の 1 軸質量偏心建物モデル (FH3-0), 免震装置部の剛心を上部質量偏心試験体の重心位置に合せた免震モデル (MH3-0) およびそれにダンパーを取り付けたモデル (MH3-0EW) について, El-Centro 波の入力加速度をパラメータとした時の X 方向各層の応答加速度および変位の最大値分布を示す。

(1) 弾性応答実験 非免震モデル (FH3-0) と免震モデル (MH3-0) の応答最大値分布を比較すると, 免震化 (長周期化) により, 応答加速度および層間変形が低減されると共に, 免震部および上層部のねじれ変形が抑制されていることが分かる。

(2) 弾塑性応答実験 変位応答の最大値分布を比較すると, ダンパーを取り付けたモデル (MH3-0EW) は, 免震部のダンパーの剛性による短周期化および弾塑性変形により, 積層ゴムだけの免震モデル (MH3-0) に比べて積層ゴムの変形が抑制されている。また上層部のねじれ変形についても免震モデル (MH3-0) と同様, 非免震モデル (FH3-0) に比べて低減されていることが分かる。

3.2.3. 層間変形 表-6 に実験による各モデルの最大層間変位と, El-Centro 波 150 gal 入力の解析による結

試験体		1次	2次	3次	4次	5次	6次
非免震	FH3-0				2.55	—	3.64
					2.55	2.67	3.56
試験体		1次	2次	3次	4次	5次	6次
免震 (積層 ゴム)	MH33-0	0.88	—	—	4.14	—	5.67
	MH3-0	0.881	0.915	1.21	4.02	4.20	5.63
	MH3-0	0.83	—	—	4.15	—	5.62
	MH3-0	0.830	0.831	1.06	4.01	4.17	5.57

上段: 実験値, 下段: 解析値, —: 測定不能  
(参) 非免震の 1 次および免震の 1, 4 次は x 方向並進モードが卓越  
非免震の 2 次および免震の 2, 5 次は y 方向並進モードが卓越  
非免震の 3 次および免震の 3, 6 次は θ 方向ねじれモードが卓越

表-4 固有振動数 (Hz)

試験体		1次		3次	
		1層	2層	1層	2層
非免震	FH3-0			—	0.00347
				—	0.00402
試験体		4次		6次	
		1層	2層	1層	2層
免震 (積層 ゴム)	MH33-0	0.00376	0.00345	0.00270	-0.000585
	MH3-0	0.00375	0.00377	0.00400	0.00390
	MH3-0	0.000202	0.00271	0.00275	-0.000567
	MH3-0	0.000204	0.000393	0.00394	0.00360

上段: 実験値, 下段: 解析値

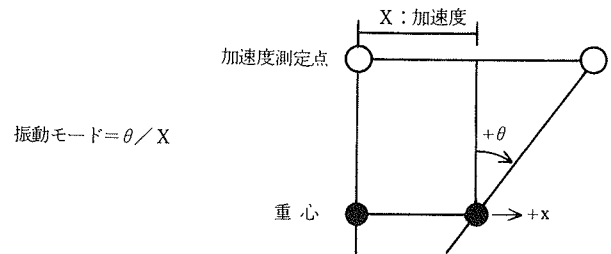


表-5 振動モード

試験体				EL-Centro 波入力										
				実験値								解析値		
				50gal		100gal		150gal		300gal		150gal		
名称	位置	1層	2層	1層	2層	1層	2層	1層	2層	1層	2層	1層	2層	
非免震	FH3-0	北側	固定	M柱	—	0.256 (1.169)	—	0.827 (1.423)	—	1.119 (1.366)	—	—	—	1.015 (1.286)
		南側		M柱	—	0.219	—	0.581	—	0.871	—	—	—	0.789
免震	MH3-0	北側	3Mゴム	M柱	0.401 (1.008)	0.072 (1.416)	1.007 (1.022)	0.163 (1.538)	1.651 (1.007)	0.279 (1.641)	—	—	1.457 (1.017)	0.221 (1.466)
		南側	2Mゴム	M柱	0.398	0.051	0.985	0.106	1.639	0.170	—	—	1.432	0.150
	MH3-0EW	北側	3Mゴム +ダンパー	M柱	0.133 (0.926)	0.094 (1.305)	0.190 (0.760)	0.361 (1.188)	0.607 (0.842)	0.674 (1.139)	1.594 (0.864)	1.119 (1.188)	0.604 (0.982)	0.403 (0.403)
		南側	2Mゴム	M柱	0.161	0.072	0.250	0.304	0.721	0.529	1.844	0.942	0.615	0.273

( )内の数値は、各層の「北側柱の最大層間変位/南側柱の最大層間変位」により求めたねじれ率

表-6 最大層間変位 (cm)

果をまとめて示す。上層部の層間変形は免震化によって低減される。また同表カッコ内に示したねじれ率より、免震モデルにおいて、積層ゴムだけの免震モデル (MH3-0) に比べてダンパーを取り付けたモデル (MH3-0EW) の方が、免震部および上層部のねじれ変形が抑制されていることが分かる。ダンパーに関しては、El-Centro 波 150 gal 入力において、免震部の変形は約 7 mm となり、ダンパーは一部塑性化している。

#### 4. まとめ

上層部に 1 軸質量偏心を有する非免震モデルと、それに免震装置を取り付けた免震モデルを用いた動的基本特性実験および地震応答実験により、次の結果を確認した。

- (1) 質量偏心があり、ねじれの影響が大きな建物でも、免震化によりせん断力とねじれ変形を低減し得る。
- (2) 質量偏心建物と免震装置部の重心が異なる場合は、両者を一致させることによりねじれ振動を抑制し得る。

#### 参考文献

- 1) 鈴木, 岡田, 武田: 免震建物のねじれ応答特性に関する研究(その1), 一軸偏心免震建物モデルの地震

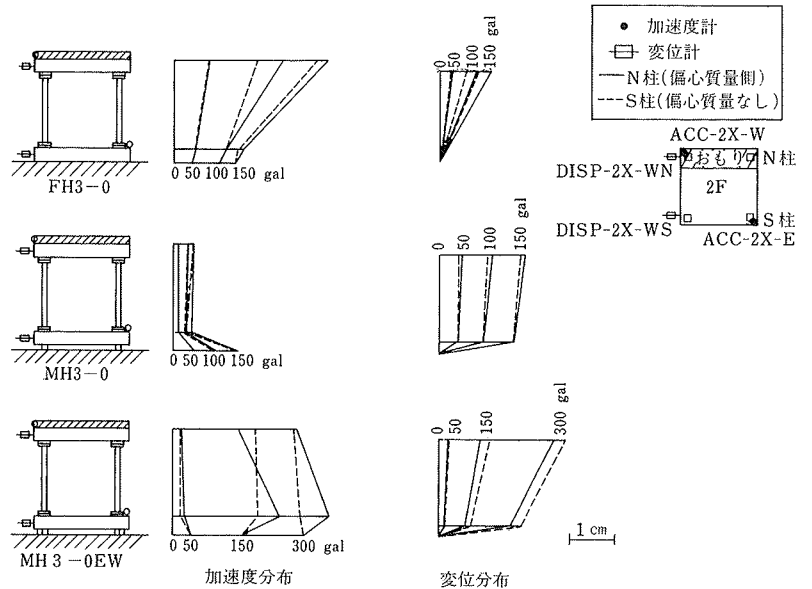


図-7 最大値分布 (El-Centro 波入力実験)

応答解析一, 大林組技術研究所報, No. 36, (1988), pp. 67~71

- 2) 中村, 武田, 岡田, 鈴木: 免震建物のねじれ応答特性に関する研究(その2), 一軸剛性偏心免震建物モデルの振動実験一, 大林組技術研究所報, No. 36, (1988), pp. 72~77

- 3) 武田, 岡田, 中村, 他: 構造物の免震に関する研究(その1), 一積層ゴムと PC 鋼棒を用いた免震装置一, 大林組技術研究所報, No. 30, (1985), pp. 66~75