

免震建物のねじれ応答特性に関する研究 (その2)

—— 1 軸剛性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 2)

—— Dynamic Tests of Building with Eccentricity of Stiffness 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 the torsional effects of a building which has asymmetry in stiffness. Model tests using a shaking table and dynamic analyses are conducted. The building model has two masses with the upper mass supported by four steel columns for asymmetry in the stiffness arrangement. In the earthquake tests, the base-fixed model and the base-isolated model supported by four laminated rubber pads to interpose horizontally flexible but vertically rigid supports between the base of the building and its foundation are adopted, while still another base-isolated model has two cantilever dampers of prestressing steel bars added. The following results are obtained from this study. In sine wave input tests changing frequency and earthquake waves input tests, the base isolation system has considerable effects in reducing building response acceleration, lateral deformation and torsional deformation, and dynamic analyses show good coincidence with test results.

概 要

剛性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が小さくなることを振動実験および解析により検討した。試験体は2層より成っており、上層は断面の異なるS造の柱を2本ずつ組合わせた4本の柱で支持され、加振方向に関して1軸剛性偏心を有する。振動実験では試験体の下層を固定した非免震モデルと、試験体の下層に免震装置を取付けた免震モデル(積層ゴム4個で支持した場合と、更にそれに片持梁PC鋼棒ダンパー2本追加した場合)を用いた。正弦波共振実験より求めた固有振動数および固有振動モードは固有値解析結果と良い対応を示しており、免震化による剛性偏心建物のねじれの影響の抑制効果が確認された。また、EL-Centro波入力の地震応答実験および応答解析では、免震化によるねじれの影響の抑制効果と、片持梁PC鋼棒ダンパーによる免震装置部の変形の抑制効果が確認された。

1. 序

本報告は、剛性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が小さくなることを振動実験および解析に基づき示したものである。

試験体は2層より成っており、上層は断面の異なるS造の柱を2本ずつ組合わせた4本の柱で支持され加振方向に関して1軸剛性偏心を有する。振動実験では試験体

の下層を固定した非免震モデルと、試験体の下層に免震装置を取付けた免震モデル(積層ゴム4個で支持した場合と、更にそれに片持梁PC鋼棒ダンパー2本追加した場合)を用いた。

実験項目は、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)の特性を把握する静的な特性試験と、1軸剛性偏心の建物(非免震モデル)およびその建物の免震装置を取付けた免震建物

(免震モデル) についての動的基本特性実験および地震応答実験である。

動的基本特性実験においては、正弦波共振実験より固有振動数および固有振動モードを求め、固有値解析の結果と比較した。また、地震波入力実験においては、積層ゴムのみの免震化による1軸剛性偏心建物の弾性応答実験により、ねじれの影響の抑制効果を確認し、更に、片持梁PC鋼棒ダンパーを取付けた弾塑性応答実験により、免震装置部の変形の抑制効果を調べて、それぞれ地震応答解析結果と比較検討した。

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、静的特性試験により求めた試験体の構成部材(おもり、柱材、積層ゴム)の諸元および柱と積層ゴムの水平剛性を表-1に示す。

試験体の上下各層のおもりの形状および重量はほぼ等しく、総重量は約6tonである。上層(2層)は断面の異なる3種類の柱材(S柱、M柱、L柱)を2本ずつ組合わせた4本の柱で支持され、加振方向に関して1軸剛性偏心を有している。ここで、1軸剛性偏心とは、上部建物において加振方向軸(X軸)に関する両側の柱の剛性分布が異なり、かつ加振直交方向(Y軸)に関する両側の柱の剛性分布が等しい状態を言う。なお、免震装置部には同じ種類の積層ゴムを使用し、剛性偏心はない。

表-2に柱材と積層ゴムの組合わせにより構成された各1軸剛性偏心試験体の偏心量の諸元をまとめて示す。

(1) 非免震モデル 非免震モデル (FLM: 偏心率小, FLS: 偏心率大) は、柱の剛性分布の組合わせにより偏心率を変化させた1軸剛性偏心建物の試験体で、下層(1層)を振動台上の架台に直接固定支持している。

(2) 免震モデル 免震モデル (2MLM, 2MLS, 3MLS) は、非免震モデル (FLM: 偏心率小, FLS: 偏

率大)の下層(1層)を、積層ゴム(2M: 水平剛性の小さい積層ゴムまたは3M: 水平剛性の大きい積層ゴム)4個で支持した試験体である。なお後述する地震応答実験においては、免震装置部に積層ゴム(2M)4個とA種11φPC鋼棒の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(ゴム+ダンパー)も用いている。

2.2. 実験方法

2.2.1. 測定項目 測定は図-1に示す振動台の加速度、試験体各層の加速度および変位、柱およびダンパーの歪などである。

部 材	形 状 寸 法	水平剛性	
おもり	下層(1層)	□2000×2000×280mm, 重量: W1=3.07t (2ML SのW1=3.12t)	
	上層(2層)	□2000×2000×280mm, 重量: W2=2.89t	
柱材	S柱	□50×50×3.2mm, 長さ: H=1390mm	0.164t/cm
	M柱	□60×60×3.2mm, 長さ: H=1390mm	0.289t/cm
	L柱	□75×75×3.2mm, 長さ: H=1390mm	0.556t/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59.2kg/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37.0kg/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

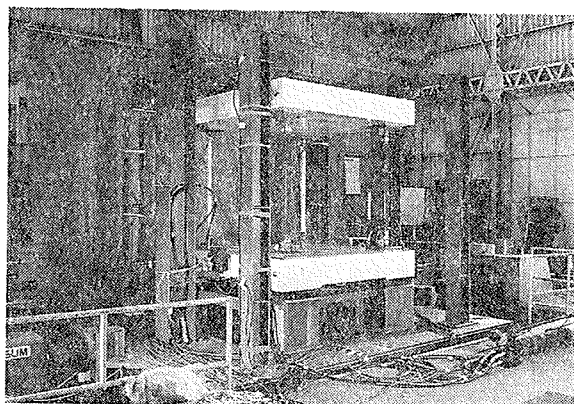


写真-1 試験体 (免震モデル)

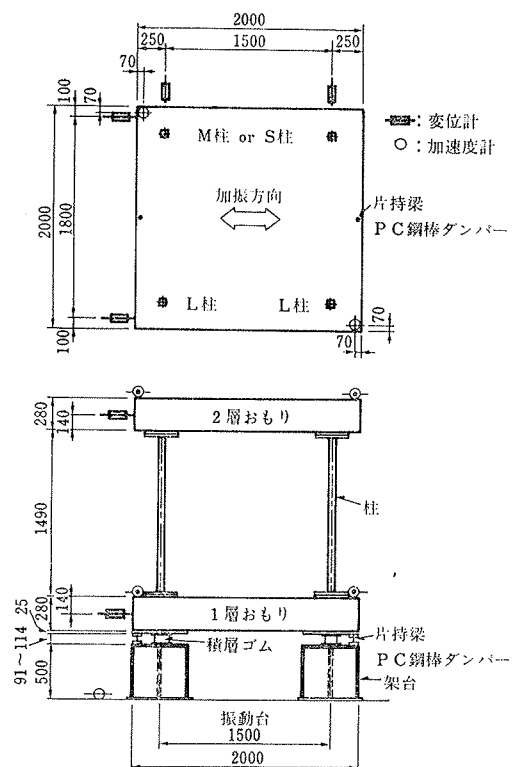


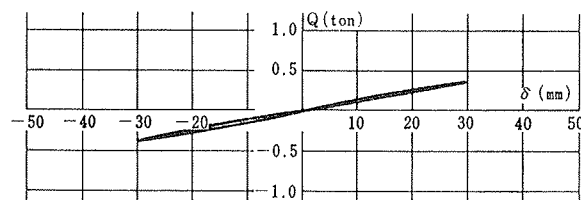
図-1 試験体 (免震モデル) および測点

2.2.2. 実験項目 以下に示す3種類の実験を行なった。なお、各種実験においては、試験体の上部建物の柱の歪が弾性内に収まる（層間変形はL柱で1.0cm, M柱で1.3cm, S柱で1.5cm以下になる）ように、また、免震モデルについては更に積層ゴムの変形が3cm以下に収まるように、入力を制御した。

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 e'	弾力半径 j (cm)	弾力半径比 j'	偏心率 Re
上部構造 (非免震)	FLM	1.69	17991.	2.89	19.66	81.65	24.58	0.301	103.2	1.264	0.238
	FLS	1.44	13675.	2.89	19.66	81.65	41.88	0.513	97.45	1.194	0.430
免震部 (積層 ゴム)	3MLS	0.233	2626.	3.07	20.88	81.65	0	0	106.2	1.300	0
	2MLS	0.144	1617.	3.12	21.22	81.65	0	0	106.0	1.298	0
	2MLM	0.144	1617.	3.07	20.88	81.65	0	0	106.0	1.298	0

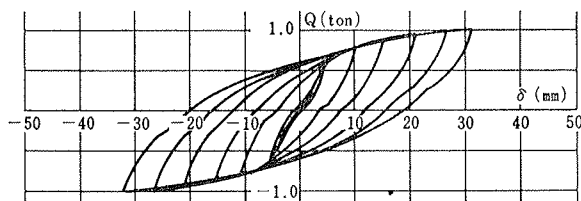
表一2 1軸剛性偏心試験体の諸元

(1) 試験体の構成部材の特性試験 柱材の剛性は、振動台に設置した非免震モデルのX, Yおよび回転(θ)方向の自由振動実験より求めた。また、積層ゴムおよびダンパーの剛性は、免震モデルの下層(1層)重心位置をX方向にジャッキで加力した両振り静的加力試験より求めた。



図一2 積層ゴムの復元力特性(静的試験)

(2) 動的基本特性実験 振動台に各種試験体を設置し、X方向の正弦波共振実験により動的基本特性を調べた。



図一3 積層ゴム+ダンパーの復元力特性(静的試験)

(3) 地震応答実験 入力地震波は再現時間を1/2に短縮したEL-Centro 40 NS, Taft 52 EWおよび十勝沖地震八戸港湾 68 EWの3波を用いた。

3. 実験および解析結果

3.1. 試験体の構成部材の特性実験

図一2に静的試験結果の一例として、免震モデル(2MLS)の積層ゴム(2M)4個の復元力特性を示す。また、図一3に、2MLS試験体の加振中央軸上に長さ75mmのダンパーを2個取付けた地震応答実験の免震モデル(2MLSD: ゴム+ダンパー)の静的弾塑性試験より得た復元力特性を示す。

3.2. 動的基本特性実験

振動台に各種試験体を設置し、X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、固有値解析結果と比較して述べる。

(1) 固有振動数 図一4に正弦波共振実験で得たFLSモデル(非免震モデル)共振曲線を、図一5に2MLSモデル(免震モデル)の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て小さな値となっている。固有振動数を解析結果と比較して表一3に示す。実験値と解析値との固有振動数は良い対応を示している。

(2) 固有振動モード 共振実験で得られたFLSモデルおよび2MLSモデルのねじれ振動モードを図一6, 図一7に示す。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、実験での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非常に小さくなっており、免震の効果が表われている。

表一4に正弦波共振実験と固有値解析により得た振動モードを示す。実験値と解析値の振動モードは良い対応を示している。以上より、剛性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が確かめられた。

3.3. 地震応答実験

本報告では、主に非免震の1軸剛性偏心建物モデル(FLS), 免震モデル(2MLS)およびゴム+ダンパー付免震モデル(2MLSD)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および解析結果について述べる。

(1) 波形および伝達関数 図一8はFLSモデル, 2MLSモデルおよび2MLSDモデルのEL-Centro波150gal入力実験における、加振方向(X方向)に対して軸対称位置にある2層位置測点のX方向応答加速度波形と応答変位波形である。また図一9に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。伝達関数より求められる各固有モードの振動数および振動モードは、図一4, 5に示した正弦波共振実験

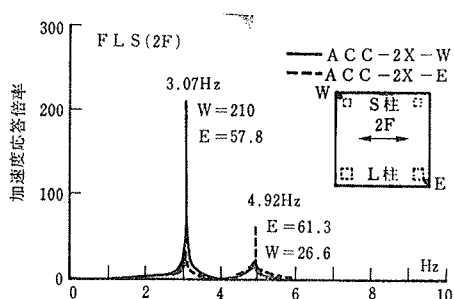


図-4 非免震 FLS モデルの共振曲線

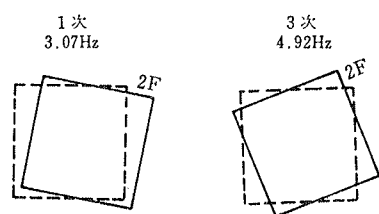


図-6 非免震 FLS モデルの固有振動モード

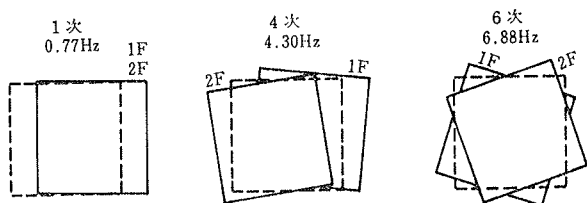


図-7 免震 2MLS モデルの固有振動モード

試験体		1次	2次	3次	4次	5次	6次
非免震	FLM				3.61 3.60	— 3.81	5.13 5.10
	FLS				3.07 3.02	— 3.52	4.92 4.91
	試験体	1次	2次	3次	4次	5次	6次
免震 (積層 ゴム)	3MLS	0.97 0.970	— 0.974	— 1.26	4.43 4.34	— 5.00	7.02 6.95
	2MLS	0.77 0.771	— 0.773	— 1.00	4.30 4.27	— 4.94	6.88 6.88
	2MLM	0.78 0.776	— 0.777	— 1.01	5.00 5.08	— 5.36	7.28 7.18

上段：実験値、下段：解析値(ロッキングの影響は無視)。—：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-3 固有振動数

結果と対応している。

図-10に弾性応答解析により求めた FLS モデルと 2MLS モデル, および弾塑性応答解析により求めた 2MLSD 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, FLS モデルについて材料減衰として柱に 1% を与え, 1 次の固有円振動数で除した値を基に作成し, 2MLS モデルについては, 材料減衰として柱に 1%, 積層ゴムに 6% を与え, 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 2MLSD モデルのダンパーの復元力はバイリニア型と

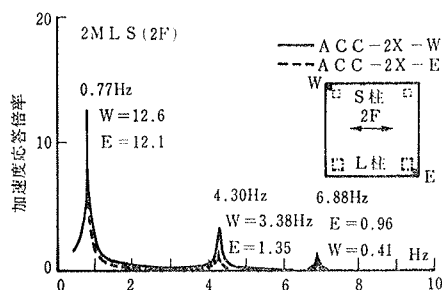


図-5 免震 2MLS モデルの共振曲線

試験体		1次		3次			
		1層	2層	1層	2層		
非免震	FLM	—	0.348 0.417	—	-4.241 -3.114		
	FLS	—	0.568 0.599	—	-2.533 -2.165		
試験体		4次		6次			
		1層	2層	1層	2層		
免震 (積層 ゴム)	3MLS	0.014 0.014	0.059 0.045	0.479 0.607	0.459 0.560	-2.789 -2.249	-2.657 -2.184
	2MLS	0.009 0.009	0.019 0.029	0.470 0.605	0.429 0.576	-3.520 -2.216	-2.500 -2.177
	2MLM	-0.011 -0.011	0.005 -0.002	0.290 0.417	0.284 0.402	-5.316 -3.195	-4.531 -3.141

上段：実験値、下段：解析値(ロッキングの影響は無視)

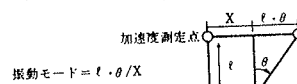


表-4 振動モード

し, 弾性剛性 440 kg/cm, 降伏耐力 240 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-8の実験波形と図-10の解析による波形を比較すると, 以下の傾向が見られる。

① 加速度波形 FLS モデルと 2MLS モデルの弾性応答については, 2MLS モデルの実験波形に 4 次の上部構造の振動成分が卓越しているが, 実験と解析はほぼ対応している。2MLSD モデルの弾塑性応答については, 解析に比べて実験では応答変位の小さな範囲における加速度波形に 4 次の上部構造の振動成分が卓越してい

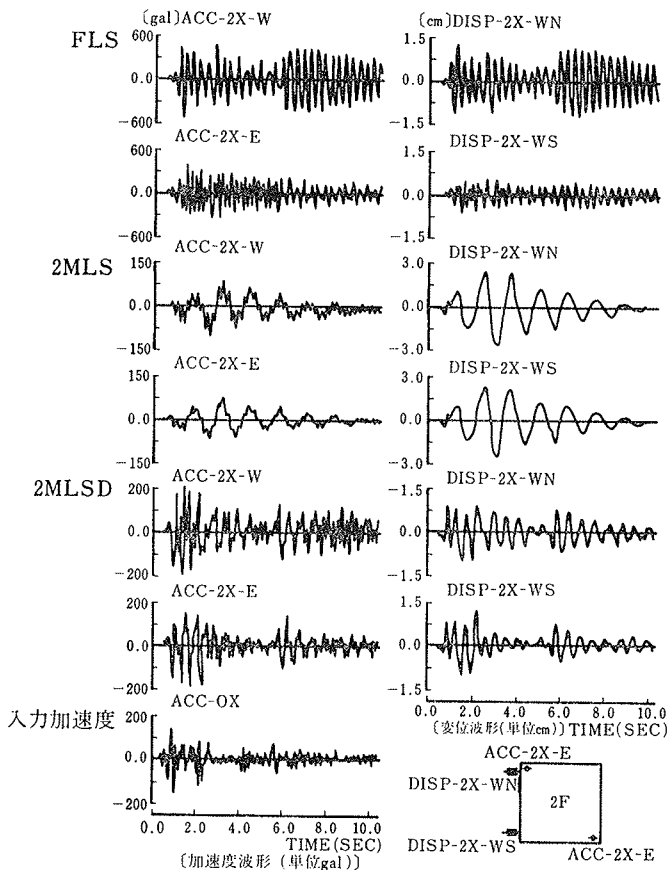


図-8 実験波形 (El-Centro 波 150 gal 入力)

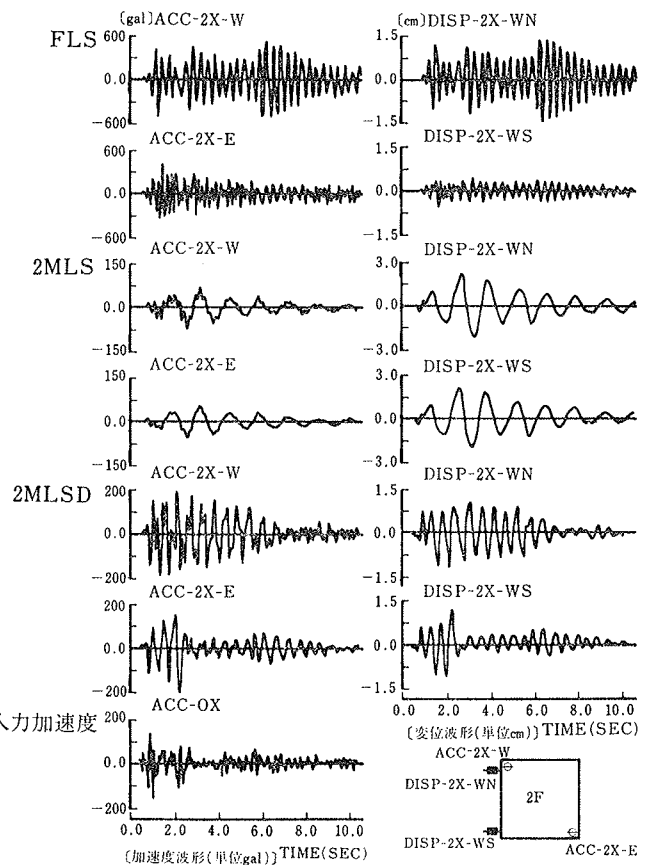


図-10 解析波形 (El-Centro 波 150 gal 入力)

る。これは、解析のダンパーの復元力特性をバイリニア型と仮定したが、図-3の実験での原点近傍の数mmの変位振幅レベルにおいてスリップ型の復元力特性が見られることによるものと考えられる。

② 変位波形

変位波形については、FLSモデル、

2MLSモデルおよび2MLSDモデルとも、実験と解析はほぼ良い対応を示している。

(2) 最大値分布 図-11にFLS, 2MLSおよび2MLSDモデルについて、EL-Centro波の入力加速度をパラメータとした実験の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。また表-5に実験による各モデルの最大層間変位と、EL-Centro波150gal入力の解析による結果をまとめて示す。

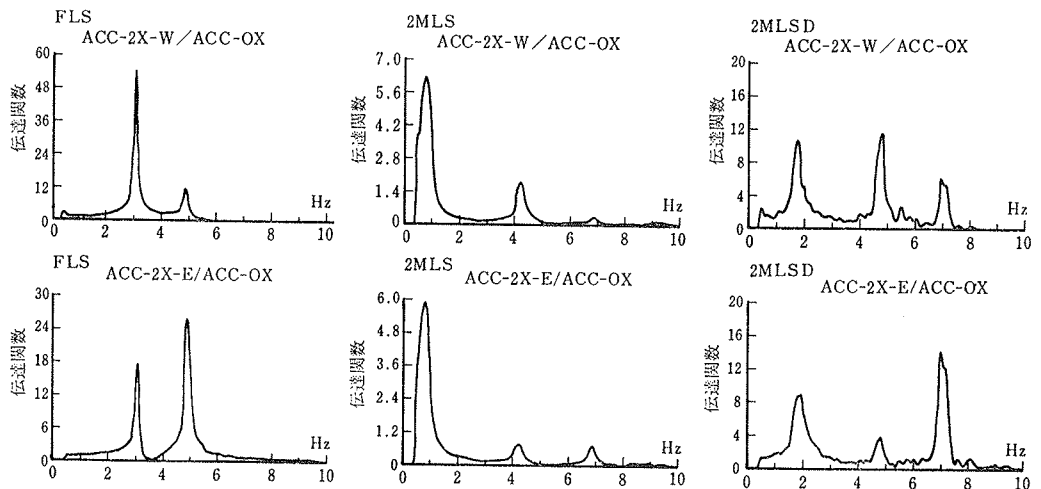


図-9 伝達関数 (El-Centro 波 150 gal 入力実験)

① 応答加速度 図-11の非免震FLSモデルと免震2MLSモデルの応答加速度の最大値分布を比較すると、免震化(長周期化)により、応答加速度および上層部のねじれ変形が抑制されていることが分かる。

② 全体変形 図-11の応答変位の最大値分布を比較すると、上層部のねじれ変形は非免震FLSモデルに比べ、免震の2MLSモデルおよび2MLSDモデルの方が低減されている。また、免震部の変形においては、2

試験体				EL-Centro 波入力										解析値	
				実験値								150gal			
				50gal		100gal		150gal		300gal		1層	2層	1層	2層
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	FLS	北側	固定	S柱	—	0.285 (1.696)	—	0.725 (1.835)	—	1.223 (1.873)	—	—	—	1.325 (2.292)	
		南側		L柱	—	0.168	—	0.395	—	0.653	—	—	—	0.578	
免震	2MLS	北側	2Mゴム	S柱	0.590 (1.012)	0.096 (1.627)	1.483 (1.021)	0.233 (1.513)	2.410 (1.031)	0.382 (1.612)	—	—	2.048 (1.011)	0.214 (1.981)	
		南側		L柱	0.583	0.059	1.453	0.154	2.338	0.237	—	—	2.025	0.108	
	2MLSD	北側	2Mゴム + ダンパー	S柱	0.268 (0.957)	0.170 (1.453)	0.568 (0.780)	0.548 (1.535)	0.870 (1.018)	0.631 (1.543)	1.525 (1.035)	0.990 (1.658)	0.901 (0.963)	0.591 (1.841)	
		南側		L柱	0.280	0.117	0.728	0.357	0.855	0.409	1.473	0.597	0.936	0.321	

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

表—5 最大層間変位

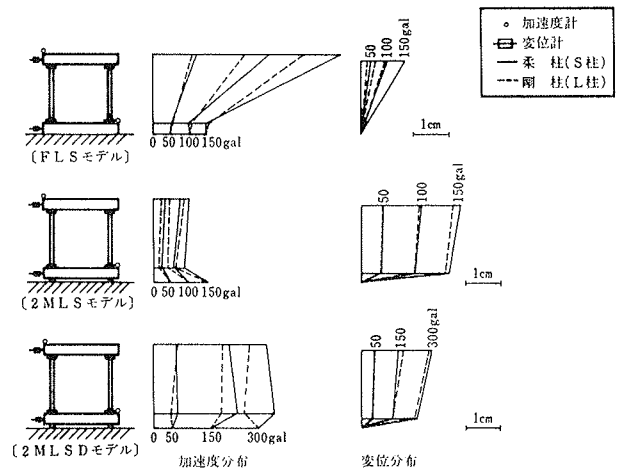
MLSD モデルの方がダンパーの弾塑性変形により、2MLS モデルに比べて積層ゴムの変形が抑制され、より大きな地震波入力に対して余裕がある。

③ 層間変形 表—5 に示した最大層間変位より、免震化によって上層部の層間変形の減少はもちろんのこと、同表の表—5 内に示したねじれ率より、非免震 FLS モデルに対して、免震の 2MLS モデル、2MLSD モデルの順に、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。

4. まとめ

上層部に 1 軸剛性偏心を有する非免震モデルと、それに免震装置を取付けた免震モデルを用いた動的な基本特性実験および地震応答実験により、免震化（免震装置部に剛性偏心がないように積層ゴムを配置）することによって、剛性偏心建物のねじれの影響を、顕著に抑制し得ることを確認した。

現在、上層部に質量偏心を有するモデルについても研究を進めている。なお、本報告の振動実験に関しては、当技術研究所の振動研究室各位の協力を得た。



図—11 最大値分布 (El-Centro 波入力実験)

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 1 軸偏心免震建物モデルの地震応答解析一, 大林組技術研究所報, No. 36, (1988), pp. 67~71
- 2) 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