

最上層エネルギー集中型柔剛混合構造多層骨組の弾塑性振動実験

兼 光 知 巳 真 瀬 伸 治
(技術研究所) (技術研究所)

矢 部 喜 堂 寺 田 岳 彦
(技術研究所) (技術研究所)

§ 1. はじめに

耐震設計を行なう上で、エネルギー論的設計法¹⁾²⁾は有効な手段である。本設計法は、地震に伴う構造物への総エネルギー入力と構造物のエネルギー吸収能力を比較し設計するものである。実際、現行設計においてもこの考え方は取り入れられている。しかし、地震による総エネルギー入力を定量的に評価したものではなく、真の意味でのエネルギー論的設計法とはいえない。

筆者らは、本設計法に基づいた新しい耐震構造「エネルギー集中型構造」について検討してきた。本構造は、特定層の強度を他層と比較し相対的に低減することにより、強度低減層に大部分の地震エネルギー入力を集中させ、一方ではエネルギー集中層以外の層は弾性範囲に留める構造である。したがって、耐震設計時にはエネルギー集中層にのみ十分な配慮を行なえばよく、単純明快な設計体系を実現できる。また、本構造の特徴として、エネルギー集中層に剛部材と柔部材を配する柔剛混合構造形式を採用している点が挙げられる。剛部材はエネルギー吸収機能を有し、地震エネルギー入力の大部分を塑性ひずみエネルギーとして吸収する。一方、エネルギー吸収能力を高めるためには比較的大きな層間変形を生ずる可能性がある。柔部材は、層間変形に対する復元力機能を有し、層間変形を抑制する。

エネルギー集中層としては、任意に設定できることを地震応答解析シミュレーションによって確認している³⁾。また、第1層を集中層とした構造は、解析シミュレーションと弾塑性振動実験などによって地震応答性状を確認し、既に実建屋に適用している^{4)~6)}。

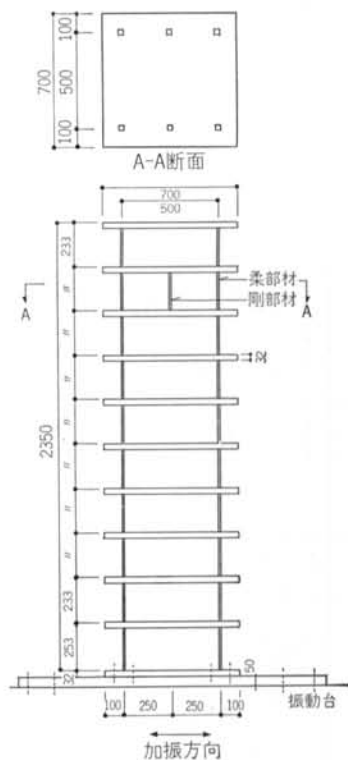
最上層にエネルギー集中層を設けた構造については、これまで応答解析シミュレーションによって地震応答性状を調べてきた^{7)~9)}。本報告では、最上層エネルギー集中型構造を用いた多層骨組について弾塑性振動実験を行ない地震応答性状を調べ、応答解析シミュレーションによって得られた結果を確認し、耐震構造としての有効性

を検証する^{10)~12)}。また、実験で用いた試験体をせん断バネ一質点系に置換した解析モデルについて応答解析を行ない、実験結果と比較することにより応答解析が実現象を追跡できることを確認する。

§ 2. 実験方法

2.1 試験体

図一に試験体の形状寸法を示す。試験体は10層1×1スパンのラーメン構造で、実建屋の1/15縮尺モデルであ



図一 試験体の形状寸法

る。柱はすべて矩形断面で、床板と溶接接合した。

表一1 に試験体の構造特性を、表一2 に寸法諸元を示

試験体名	第1層降伏せん断力係数	エネルギー集中層	エネルギー集中層の構造形式	強度低減係数
T10-1	0.30	最適分布	—	—
T10-2	0.30	9	非混合	0.50
T10-3	0.30	9	柔剛混合	0.70
T10-4	0.30	9, 10	柔剛混合	9層: 0.80 10層: 0.70
T10-5	0.30	1, 9	柔剛混合	1層: 1.00 9層: 0.80

表一1 試験体の構造特性

試験体名	層番号	層重量 (t)	降伏層せん断力係数	柱断面(cm)		1次固有周期 (sec)
				幅	せい	
T10-1	10	0.135	0.798	0.745	0.745	0.452
	9	0.123	0.603	0.844	0.844	
	8	0.123	0.510	0.909	0.909	
	7	0.123	0.457	0.963	0.963	
	6	0.123	0.414	1.003	1.003	
	5	0.123	0.376	1.035	1.035	
	4	0.123	0.346	1.061	1.061	
	3	0.123	0.330	1.094	1.094	
	2	0.123	0.315	1.122	1.122	
	1	0.123	0.300	1.182	1.182	
T-102	9*1)	0.123	0.302	0.678	0.678	0.469
T10-3	9柔*2) 剛	0.123	0.422	0.500 0.790	0.434 0.580	0.469
T10-4	10柔 剛	0.135	0.558	0.500 0.809	0.301 0.476	0.463
	9柔 剛	0.123	0.482	0.500 0.830	0.387 0.604	
	9柔 剛 1柔 剛	0.123 0.123	0.482 0.300	0.466 0.781 0.708 0.583	0.466 0.623 0.708 1.627	

*1) T10-2~T10-5で記載されていない層の寸法諸元はT10-1と同様である

*2) 柔は柔部材, 剛は剛部材を示す

表一2 試験体の寸法諸元

材種	板厚 (cm)	σ_y (t/cm ²)	σ_B (t/cm ²)	伸び率 (%)
SS400	25	2.67	4.48	41.4
HT790	25	8.36	8.74	15.9

表一3 素材の機械的性質

す。試験体は計5体である。パラメータは、エネルギー集中層の位置および同層の構造形式とした。各試験体の降伏せん断力係数分布は、

$$\alpha_i = a_i \bar{\alpha}_i \alpha_1 \quad \dots\dots(1)$$

で表わされる。ここに、 a_i は強度低減係数、 $\bar{\alpha}_i$ は式(2)に示す最適降伏せん断力係数分布である²⁾。

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_i &= 1 + 1.593x - 11.852x^2 + 42.583x^3 - 59.483x^4 \\ &\quad + 30.159x^5 \quad (x > 2) \\ &= 1 + 0.5x \quad (x \leq 2) \quad \dots\dots(2) \end{aligned}$$

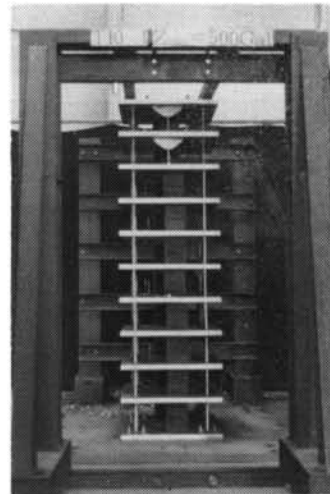
ここに、 $x = (i-1)/N$, i は層番号, N は全層数を示す。

第1層降伏せん断力係数は0.3とした。エネルギー集中層の負担重量は、応答解析シミュレーション結果より全建物重量の20%以上必要であることが確認されている³⁾⁷⁾。したがって、エネルギー集中層として第9層を基本とした。集中層の強度低減係数は、同層に総エネルギー入力⁸⁾の80%以上が集中するように応答解析により設定した。また、2つの層に集中層を設けたT10-4, T10-5は2つの層の累積塑性変形倍率が同等になるように強度低減係数を設定した。柔剛混合構造の強度比 rQ_y/sQ_y および降伏変形比 $r\delta_y/s\delta_y$ は、1.0, 10.0とした、ただし、T10-5の第1層の降伏変形比のみ7.0とした。ここに、 rQ_y , sQ_y は柔部材と剛部材の降伏層せん断力、 $r\delta_y$, $s\delta_y$ は柔部材と剛部材の降伏変形である。

表一3に使用素材の機械的性質を示す。柔部材にHT790, その他の柱にはSS400を用いた。

2.2 加振方法および測定方法

写真一1に加振状況を示す。加振は油圧式振動台によって行なった。加振方向は図一1に示す1方向とした。



写真一1 加振状況

入力地震波は El Centro 1940 NS 記録(継続時間30sec)とした。図-2に入力地震波のエネルギースペクトルを示す。入力波の時間軸は各試験体の入力レベルを一定にするため、原波の3/4に短縮した。入力レベルは第2種地盤に建つ実構造物が極限地震を受けた場合を想定し、総エネルギー入力等の価速度 $V_E=40\text{cm/sec}$ とした。この値は模型則より、実建屋における $V_E=150\text{cm/sec}$ と等価である。

測定は、各階床上の加振方向の応答加速度、各階床の相対変位および柱の応答せん断力について各々、加速度計、変位計およびひずみゲージによって行なった。

§ 3. 実験結果

3.1 最大応答層せん断力係数

図-3に各試験体における各層の最大応答層せん断力係数 $Q_{maxi}/\sum_{j=1}^N w_j$ を示す。ここに、 Q_{maxi} は最大応答層せん断力、 w_i は層重量を示す。集中型の試験体 T10-2~T10-5はいずれもエネルギー集中層のみが塑性化し、他層はほぼ弾性範囲に留まった。柔剛混合形式の試験体 T10-3~T10-5は剛部材のみが塑性化し、柔部材は弾性範囲に留まった。一方、最適降伏層せん断力係数分布に

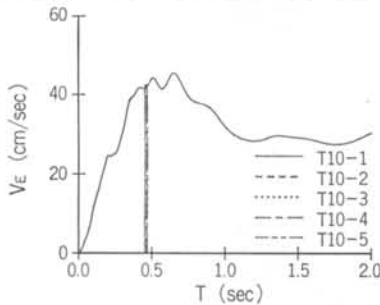


図-2 入力地震波のエネルギースペクトル

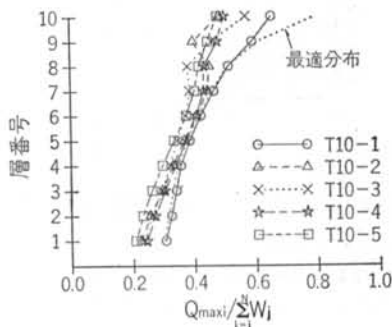


図-3 最大応答層せん断力係数

従った T10-1は10層以外の層はすべて塑性化しており、ひずみ硬化により設計用層降伏せん断力係数を上回った。

3.2 エネルギー吸収率

図-4に、各試験体における各層のエネルギー吸収率 W_{pi}/W_p を示す。ここに、 W_{pi} は第 i 層の塑性ひずみエネルギー、 W_p は試験体全体の塑性ひずみエネルギーを示す。ただし、同塑性ひずみエネルギーは層に生ずる慣性力より算定しており、減衰エネルギーを含んだ値である。集中型の試験体は、いずれも強度低減層にのみエネルギーが集中し、他層はほぼ弾性範囲に留まっている。一方、最適分布に従った T10-1は各層のエネルギー吸収率が大きく異なった。集中型の試験体の設計条件として集中層へのエネルギー集中度率を80%と設定したが、実際いずれの試験体も60%程度に留まっている。これは、エネルギー集中層の塑性化した柱のひずみ硬化による層せん断力の上昇および減衰エネルギーが、塑性ひずみエネルギーに対して比較的大きかったためである。実設計において、減衰エネルギーの影響については減衰を無視することにより安全側の評価になるが、ひずみ硬化の影響については降伏せん断力分布を設定する上で考慮する必要がある。

2つのエネルギー集中層を有する試験体 T10-4, T10-5に着目する。9, 10層の上層部にのみ集中層を設けた場合、集中層にエネルギーが集中したものの最上層の10層のエネルギー吸収率は小さく、9層に大部分のエネルギーが集中し、9層にのみ集中層を設けた T10-3とエネルギー吸収率分布に大差はなかった。一方、9層だけではなく下層部の1層に集中層を設けた T10-5は両層にほぼ均等にエネルギーが集中した。この実験結果より、エネルギー集中層には少なくとも建物重量の20%以上の負担重量が必要であるという応答解析結果を確認できた。

3.3 累積塑性変形倍率

図-5に、各試験体における各層の累積塑性変形倍率

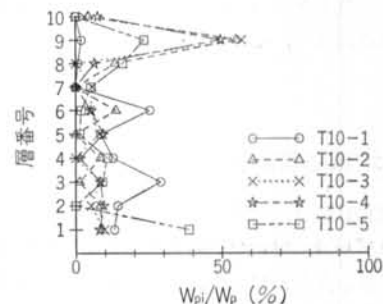


図-4 エネルギー吸収率

(正負の平均値)を示す。ここに、累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ は次式で定義する。

$$\bar{\eta}_i = \frac{W_{pi}}{2Q_{yi}\delta_{yi}} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 Q_{yi} は降伏層せん断力、 δ_{yi} は層の降伏変形である。いずれの試験体もエネルギー吸収率と同様な傾向にあった。

表-4に、見かけの塑性変形倍率 $\bar{\mu}_i$ (正負の平均値)の累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}_i$ に対する比を示す。見かけの塑性変形倍率は次式で定義する。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\mu}_i &= \frac{\mu_i^+ + \mu_i^-}{2} \\ \mu_i^+ &= \frac{\delta_{maxi}^+}{\delta_{yi}} - 1, \quad \mu_i^- = \frac{\delta_{maxi}^-}{\delta_{yi}} - 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

ここに、 δ_{maxi} は最大層間変形を示す。柔剛混合形式の場合、0.17~0.24の範囲にあり、平均0.18であった。

3.4 最大層間変形角

図-6に各試験体における各層の最大層間変形角 δ_{maxi}/h_i を示す。ここに、 δ_{maxi} は最大層間変形、 h_i は層内法高さである。9層の最大層間変形角に着目すると、柔剛混合形式のT10-3は非混合形式のT10-2とほぼ同等であった。一方、2つの層にエネルギー集中層を設け、柔剛混合形式のT10-4、T10-5は、柔剛混合形式で1つの層のみに集中層を設けたT10-3の6割程度に低減された。また、集中層を1層に設けたT10-5は、上層部にのみ集中層を設けたT10-4に比べ9層の変形は小さかった。これらの結果より、集中層を負担重量の小さい上層部のみに設けた場合、所定のエネルギー吸収率を得るためには比較的大きな層間変形を許容する必要があるといえる。

3.5 残留変形

図-7に各試験体における各層の残留変形 δ_{ri} を示す。9層の残留変形に着目すると、9層にのみ集中層を設けた場合、柔剛混合形式の如何に関わらず同等の残留変形が生じた。一方、2つの層に集中層を設けた場合、残留変形は殆ど生じなかった。この結果は最大層間変形角の傾向とほぼ同等で、その要因も同様である。

§ 4. 地震応答解析

4.1 解析方法

解析モデルは、実験で用いた試験体をせん断バネ-質点系で置換したものである。バネの復元力特性および減衰の有無をパラメータとし、表-5に示す4つのモデル

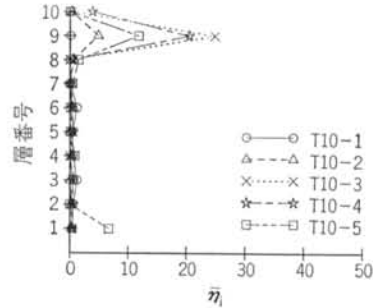


図-5 累積塑性変形倍率

試験体名	層番号	実験結果	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
T10-2	9	0.34	0.32	0.32	0.24	0.39
T10-3	9剛*	0.17	0.32	0.28	0.19	0.33
	10剛	0.19	0.26	0.38	0.22	0.08
T10-4	9剛	0.15	0.37	0.38	0.24	0.33
	9剛	0.17	0.22	0.24	0.15	0.40
T10-5	9剛	0.17	0.22	0.24	0.15	0.40
	1剛	0.24	0.46	0.44	0.19	0.55

*) 剛は剛部材を示す

表-4 $\bar{\mu}_i/\bar{\eta}_i$

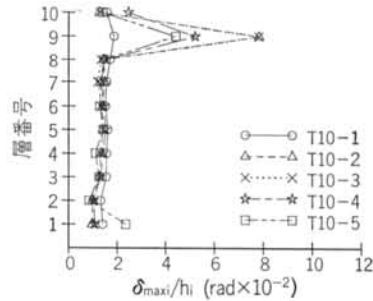


図-6 最大層間変形角

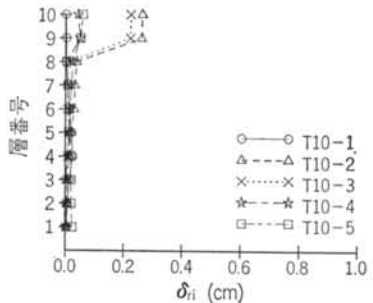


図-7 残留変形

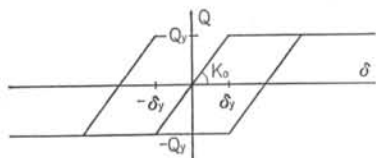
について地震応答解析を行なった。図-8にバネの復元力特性を示す。減衰は、1次、2次モードの減衰定数を等しくおいたレーリー減衰とした。

入力地震波は、実験で得られた1階床上の加速度時刻歴記録を用いた。継続時間は30secとした。数値解析は

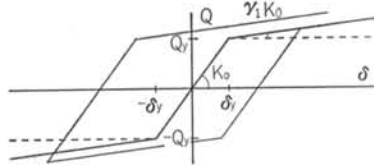
Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) を用い、時間刻みは $1/250 \text{ sec}$ とした。

モデル名	バネの復元力特性	減衰定数(%)
モデル1	完全弾塑性型	0.0
モデル2	Bi-linear型 (ひずみ硬化あり) $\gamma_1=0.02$	0.0
モデル3	Tri-linear型 (ひずみ硬化あり) $\gamma_1=0.30$ $\gamma_2=0.02$ $Q_c=2Q_y/3$	0.0
モデル4	完全弾塑性型	T10-1: 2.07 T10-5: 2.00

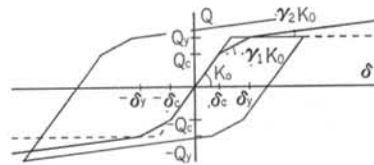
表-5 解析モデルの特性



(a)完全弾塑性型



(b)Bi-linear型



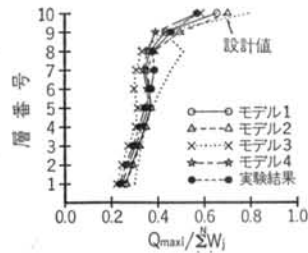
(c)修正Tri-linear型

図-8 バネの復元力特性

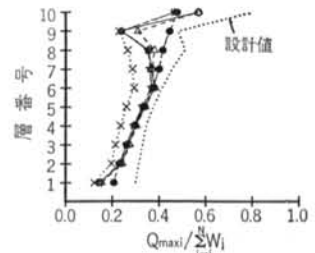
試験体名	実験結果	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
T10-1	27.55	19.38	19.16	26.85	27.42
T10-2	34.77	30.94	30.55	33.18	30.77
T10-3	34.19	28.36	27.55	29.73	31.09
T10-4	33.89	28.27	26.58	29.73	32.37
T10-5	36.45	33.36	32.62	35.60	32.94

(単位: cm/sec)

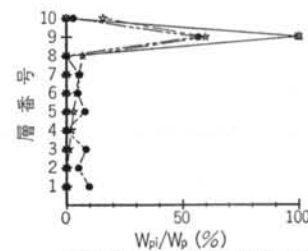
表-6 総エネルギー入力の等価速度 V_E



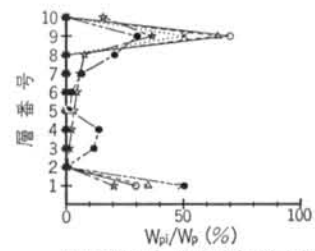
(a)最大応答層せん断力係数(T10-3)



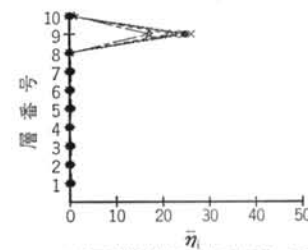
(b)最大応答層せん断力係数(T10-5)



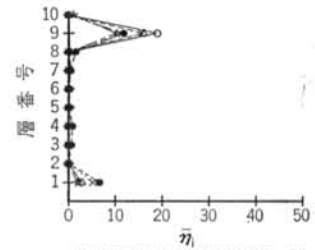
(c)エネルギー吸収率(T10-3)



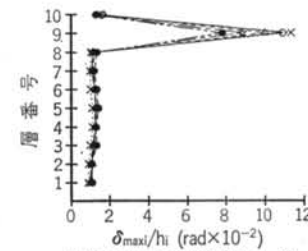
(d)エネルギー吸収率(T10-5)



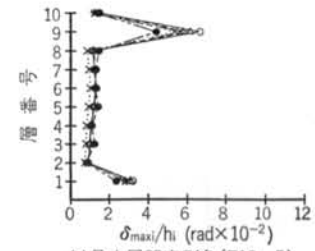
(e)累積塑性変形倍率(T10-3)



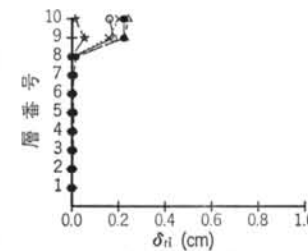
(f)累積塑性変形倍率(T10-5)



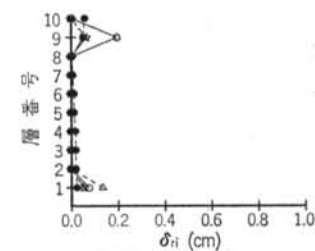
(g)最大層間変形角(T10-3)



(h)最大層間変形角(T10-5)



(i)残留変形(T10-3)



(j)残留変形(T10-5)

図-9 実験結果と解析結果の比較

4.2 実験結果との比較

(1)総エネルギー入力

表—6に各試験体の総エネルギー入力の等価速度を示す。解析結果の実験結果に対する比は0.70~1.00の範囲にあり、いずれの解析モデルもおおむね実験結果と一致した。

(2)最大応答層せん断力係数

図—9(a), (b)に最大応答層せん断力に関して実験結果と解析結果を比較したものを示す。なお、いずれの試験体も実験結果と解析結果の関係は同様な傾向にあったため、以下、主に試験体T10-3とT10-5について述べる。最大応答層せん断力係数の復元力特性による差異は小さく、いずれの解析モデルも実験結果の傾向と一致した。ただし、エネルギー集中層(T10-3の場合9層, T10-5の場合1, 9層)に着目すると、完全弾塑性型は実験結果に比べ過小評価する傾向にある。これは、実試験体では剛部材が塑性化後、ひずみ硬化を生じているためである。また、修正Tri-linear型は完全弾塑性型とBi-linear型に比べ、最大応答層せん断力係数は小さくなる傾向にあり、各層の平均値はT10-3, T10-5各々、完全弾塑性型に対して0.89, 0.80, Bi-linear型に対して0.85, 0.77であった。最大応答層せん断力係数の減衰の有無による差異は小さかった。

(3)エネルギー吸収率

図—9(c), (d)にエネルギー吸収率に関して実験結果と解析結果を比較したものを示す。エネルギー吸収率の復元力特性による差異はややあるものの、おおむね実験結果の傾向と一致した。

減衰を考慮したモデル4の塑性ひずみエネルギーは、減衰エネルギーを加えた値を示している。モデル4は、減衰を無視したモデル1~3に比べ実験結果に近い値を示した。

(4)累積塑性変形倍率

図—9(e), (f)に累積塑性変形倍率に関して実験結果と解析結果を比較したものを示す。累積塑性変形倍率は式(3)に定義した値である。ただし、減衰を考慮したモデル4は式(3)の塑性ひずみエネルギー W_{pl} に減衰エネルギーを加えた値である。累積塑性変形倍率の実験結果と解析結果の傾向はエネルギー吸収率とほぼ同等で、復元力特性と減衰の有無に関わらず解析結果は実験結果とおおむね一致した。

表—4に見かけの塑性変形倍率 $\bar{\mu}_i$ の累積塑性変形倍率 $\bar{\mu}_i$ に対する比を示す。解析モデルによってややばらつきがあるものの、おおむね実験結果と一致した。

(5)最大層間変形角

図—9(g), (h)に最大層間変形角に関して実験結果と解析結果を比較したものを示す。減衰を無視したモデル1~3は、エネルギー集中層の層間変形を過大評価する傾向にあるものの、ほぼ実験結果と対応した。また、復元力特性による差異は小さかった。減衰を考慮したモデル4の場合、集中層を含め実験結果とよく一致した。

(6)残留変形

図—9(i), (j)に残留変形に関して実験結果と解析結果を比較したものを示す。残留変形は、解析モデルによってややばらつきはあるものの、いずれのモデルも実験結果の傾向に対応した。

以上の考察より、解析モデルによって地震応答解析結果にのみ差異はあるものの、おおむね実験結果を追跡できることが明らかになった。したがって、実設計においてはせん断パネ—質点系で復元力特性を完全弾塑性型、減衰を無視した比較的単純な解析モデルで充分対応できるといえる。

§ 5. まとめ

最上層エネルギー集中型柔剛混合構造を用いた多層骨組の弾塑性振動実験を行なった結果、以下のことが明らかになった。

(1)上層部の強度を他層と比較して適切に低減することにより、同層に地震エネルギー入力の大部分が集中し、集中層以外の層はほぼ弾性範囲に留まる。

(2)エネルギー集中層を柔剛混合形式とした場合、剛部材はエネルギーを吸収し、柔部材は弾性範囲を保持し層間変形を抑制する。

(3)層のエネルギー吸収性能は層の負担重量に依存し、充分なエネルギー吸収率を得るためには、建物全重量の20%以上を確保するべきである。

(4)上層部にエネルギー集中層を設ける場合、下層部に設けた場合に比べ比較的大きな強度低減が必要である。したがって、下層部に設けた場合に比べ層変形角が大きくなる傾向にある。

(5)エネルギー集中層を複数層設けることは、上記(4)の性状を緩和させる有効な手段である。

(6)実構造物をせん断パネ—質点系に置換した解析モデルは実現象を追跡できる。

謝辞 本研究に当たり、東京大学秋山宏教授に御指導を頂きました。末尾ながら、深甚なる謝意を表します。

〈参考文献〉

- 1) G. W. Housner: "Limit Design of Structures to Resist Earthquakes" Proceedings of 1st WCEE (1956)
- 2) 秋山宏: "建築物の耐震極限設計" 東京大学出版会 (1987年)
- 3) 矢部喜堂, 宇野寿郎, 真瀬伸治, 平間敏彦, 寺田岳彦, 兼光知巳, 加藤征宏, 大竹章夫: "特定層エネルギー集中型柔剛混合構造に関する研究" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1989年10月) pp. 1099~1100
- 4) 秋山 宏, 宇野寿郎, 矢部喜堂, 真瀬伸治, 平間敏彦, 寺田岳彦, 加藤征宏, 大竹章夫: "第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨構造の基本特性" 日本建築学会構造系論文報告集 第402号 (1989年8月) pp. 79~87
- 5) 矢部喜堂, 真瀬伸治, 寺田岳彦, 大竹章夫: "第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨構造の弾塑性振動実験" 日本建築学会構造系論文報告集 第412号 (1990年6月) pp. 53~65
- 6) 矢部喜堂, 真瀬伸治, 塚越英夫, 平間敏彦, 寺田岳彦, 大竹章夫: "第1層エネルギー集中型柔剛混合鉄骨構造の仮動的実験" 日本建築学会構造系論文報告集 第413号 (1990年7月) pp. 41~52
- 7) 真瀬伸治, 矢部喜堂, 宇野寿郎, 平間敏彦, 寺田岳彦, 兼光知巳, 加藤征宏, 大竹章夫: "最上層エネルギー集中型柔剛混合構造に関する研究" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1989年10月) pp. 1101~1102
- 8) 真瀬伸治, 矢部喜堂, 平間敏彦, 寺田岳彦, 兼光知巳: "最上層エネルギー集中型構造の応答性状に関する研究" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1990年10月) pp. 1413~1414
- 9) 真瀬伸治, 矢部喜堂, 平間敏彦, 寺田岳彦, 兼光知巳: "最上層エネルギー集中型構造の応答性状に関する研究 —強度比及び降伏変形比の影響—" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1991年9月) pp. 1501~1502
- 10) 兼光知巳, 矢部喜堂, 真瀬伸治, 平間敏彦, 寺田岳彦: "最上層エネルギー集中型柔剛混合構造に関する研究 —鉄骨多層骨組の弾塑性振動実験— (その1 実験概要および結果), (その2 応答解析)" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1991年10月) pp. 1417~1420
- 11) 兼光知巳, 矢部喜堂, 真瀬伸治, 平間敏彦, 寺田岳彦: "最上層エネルギー集中型柔剛混合構造に関する研究 —鉄骨多層骨組の弾塑性振動実験— (その3 10層モデルの場合)" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1992年9月) pp. 1503~1504
- 12) T. Kanemitsu, Y. Yabe & S. Mase: "Elasto-plastic Shaking Table Test of Top-story Energy-concentrated Multi-story Frame with Flexible-stiff Mixed Structure" Proceedings of 3rd Pacific Structural Steel Conference (Oct. 1992) pp. 813~820

