

第1層エネルギー集中型鉄骨多層骨組の弾塑性振動実験

矢部 喜堂
(技術研究所)
寺田 岳彦
(技術研究所)
宇野 寿郎
(技術本部)

真瀬 伸治
(技術研究所)
平間 敏彦
(技術本部)

§ 1. はじめに

筆者らの提案する第1層エネルギー集中型鉄骨耐震構法¹⁾は、意図的に第1層の強度を第2層以上に比べて弱くして地震入力エネルギーを集中的に吸収し、第2層への地震入力を低減させる新しい鉄骨構法である。本構法の第1層には、柔部材と剛部材とで構成される柔剛混合架構を配置し、強地震時に剛部材を塑性化させて入力エネルギーを吸収し、柔部材は弾性に留めて復元力を確保するものである。

これまで、地震入力エネルギーによる多層骨組の損傷集中則については、加藤・秋山の研究²⁾に示されているが、それを実験的に検証した研究は見当たらない。

また、本構法では地震入力エネルギーの大部分を第1層で吸収するため、第1層の剛部材に比較的大きな塑性変形が許容されるが、この変形は柔部材の復元力によって元に戻されるよう意図されている。この柔剛混合架構が、意図されたとおりの機能を発揮するか否かを実験的に確認する必要がある。

本実験は、せん断型多層骨組の弾塑性振動実験によって地震入力エネルギーによる骨組の損傷集中則を実証するとともに、本構法における第1層の柔剛混合架構の復元力特性、エネルギー吸収性状、残留変形の抑制等の性能を調べ、本構法の有効性を確認することを目的としたものである。

§ 2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、図-1に示すように柱は矩形断面、梁・床は剛な厚板で構成されたせん断型の5層1スパン立体ラーメンで、実物の約1/10スケールの架構モデルである。各層の重量は高さ方向に均等分布とし、実際の建物の床荷重をスケール則に基づいて縮尺し、梁・床用厚鋼板に

重量用鋼板を加えて調整した。

各試験体の実験条件は表-1に示すとおりである。試験体F-1は、第1層の降伏せん断力係数 α_1 を0.45として全層の強度が最適降伏せん断力係数分布に従うものである。試験体F-2は、第2層以上の強度をF-1と同等にし、第1層の降伏せん断力係数を0.30として第1層と第2層以上との間に1.5倍の強度ギャップをつけている。試験体F-3、F-4は、全層の強度分布を試験体F-2と同等にし、第1層の主柱を柔部材、間柱を剛部材とした柔剛混合架構を組み込んでいる。両者の試験体では柔部材の強度を等しくし、柔部材の降伏変形量を一定として柔

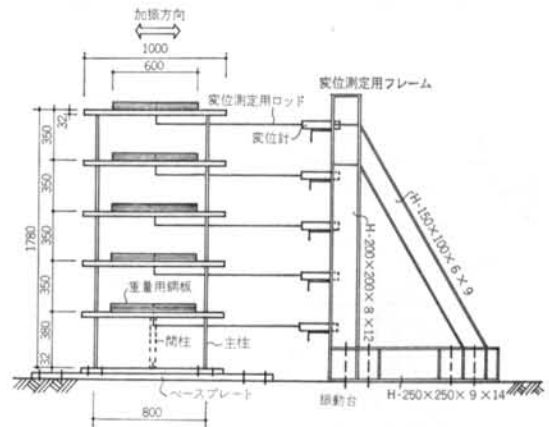


図-1 試験体の形状寸法および変位測定用フレームとの取り付け

試験体	強度分布		剛部材の有無	柔剛強度比	柔剛降伏変形比
	α_1	$\alpha_i (i \neq 1)$			
F-1	0.45	$\alpha_1 \bar{\alpha}_i$	無	—	—
F-2	0.30	$1.5\alpha_1 \bar{\alpha}_i$	無	—	—
F-3	0.30	$1.5\alpha_1 \bar{\alpha}_i$	有	1.0	5
F-4	0.30	$1.5\alpha_1 \bar{\alpha}_i$	有	1.0	10

α_i : i 層の降伏せん断力係数

$\bar{\alpha}_i$: 最適降伏せん断力係数分布

表-1 各試験体の実験条件

部材と剛部材の降伏変形比を変えている。

ここで、従来型の骨組である試験体 F-1 および第 1 層の強度を弱くした試験体 F-2 は、相互に比較して骨組の損傷の集中性を調べるものである。また、試験体 F-3、F-4 は降伏変形比を変化させて柔剛混合架構の諸機能、残留変形の抑制の効果等を調べるものである。

各層の柱は、所期の強度分布に従って求める降伏耐力に、 $P-D$ 効果による耐力の劣下分を予め付加した断面としている。

なお、エネルギー吸収部材としての剛部材には塑性変形能力の大きい軟鋼 SS 41 を使い、復元力部材としての柔部材には弾性変形能力の大きい高張力鋼 HT 70 を用いた。

試験体の柱の供試材の機械的性質を表-2 に、各試験体の諸元を表-3 に示す。

2.2 加振方法

試験体の加振には電気油圧式振動台を用いた。加振時に試験体に振れが生じることなく一軸方向加振が保証されるように、振動台上に一對の平行加振フレームを設置し、このフレームと試験体の各層の間にそれぞれ 2 組の

鋼種	σ_y (t/cm^2)	σ_{st} (t/cm^2)	E $\times 10^3$ (t/cm^2)	ϵ_{st}	E_{st} $\times 10$ (t/cm^2)
SS41	2.77	4.42	2.17	0.021	2.65
HT70	7.57	8.04	2.11	0.016	1.12

表-2 供試材の機械的性質

試験体	層	層重量 (ton)	降伏 せん断 力係数	柱断面(mm)		1次固有 周期 (sec)	
				B	D		
F-1	5	0.40	0.904	1.345	1.345		
	4	0.40	0.685	1.546	1.546		
	3	0.40	0.564	1.659	1.659	0.323	
	2	0.40	0.495	1.750	1.750		
	1	0.40	0.450	1.883	1.883		
F-2	1	0.40	0.300	1.662	1.662	0.352	
F-3	1	柔 剛	0.40	0.300	0.996	0.996	0.410
					1.905	0.908	
F-4	1	柔 剛	0.40	0.300	0.996	0.996	0.355
					1.905	3.022	

(注) F-2、F-3、F-4 の第 2 層以上の諸元は F-1 と同じ

表-3 試験体の諸元

ワットのマニピュレーターを取り付けた (図-2 参照)。入力地震波は El Centro 1940、NS 成分の加速度記録で、各試験体への総エネルギー入力を揃えるために、減衰定数を $h=0.1$ とした 1 質点弾性系の応答における入力エネルギースペクトルのピークの幅が骨組の 1 次固有周期にほぼ一致するように原波形の時間軸を 1/2 に縮小した。図-3 に、入力波形および入力エネルギースペクトルを示す。

2.3 計測方法

測定項目は、振動台および試験体の各層床面の応答加速度、各層床面の水平変位、各層柱の応せん断力、第 1 層柱の付加軸力などである。

応答加速度については、振動台上および試験体の各層床面の中央部にひずみゲージ式小型加速度計を各 1 個ずつ取り付け、加振方向成分の測定を行なった。

各層床面の水平変位については、振動台上に設置した変位測定用フレーム (不動点) に差動トランス型変位計を取り付け、変位測定用ロッドを介して各層床下面の水

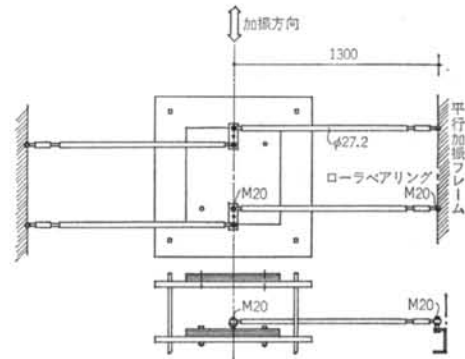


図-2 ワットのマニピュレーター

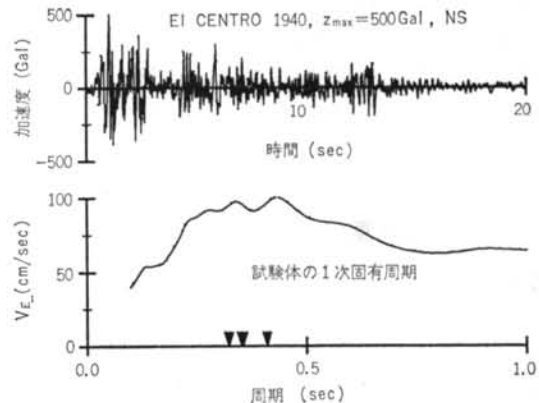


図-3 入力地震波形および入力エネルギースペクトル ($h=0.1$)

平変位を測定した。

各層柱の応答せん断力については、各層柱の中央部において100mm離れた二つの断面で、加振方向に相対する2面に貼付した4枚のひずみゲージによって測定した。

第1層柱の付加軸力については、第1層柱の中央部の加振方向に相対する2面に貼付した2枚のひずみゲージによって、軸力の変動を測定した。

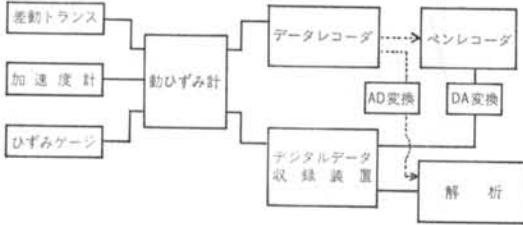


図-4 測定系

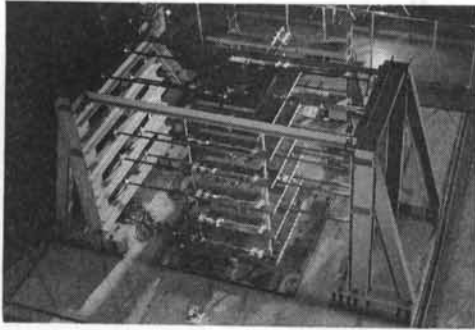


写真-1 実験状況

試験体	最大加速度 (Gal)	最大加速度発生時刻 (sec)	原波とベース上波形との相関係数
原波	500	1.065	—
F-1	461	2.255	0.8069
F-2	587	1.110	0.8229
F-3	517	1.055	0.8549
F-4	619	1.110	0.7950

表-4 試験体ベース上での加速度波形

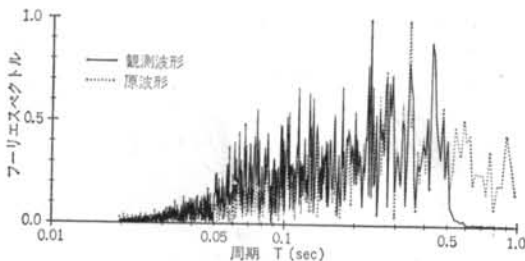


図-5 試験体ベース上での観測波形および原波形のフーリエスペクトル

各成分の記録は、動ひずみ計(増幅器)を経てデジタルデータ収録装置によって収録し、同時にバックデータとしてデータレコーダによって収録した。全データの測定系を図-4に示す。写真-1に実験状況を示す。

§ 3. 実験結果

3.1 入力波の再現性について

弾塑性加振時の入力地震波は El Centro, 1940, NS, $Z_{0max}=500$ Gal, 時間縮尺 1/2 を設定した。ここでは、試験体のベース上での観測加速度波の原波の再現性について検討する。

表-4に、各試験体の最大加速度値、観測波形の最大加速度発生時刻および原波と観測波形の時刻歴データ間の相関係数を示す。加速度の最大値は、461~619 Gal と設定値(500 Gal)に比べてばらつきがあるが、本実験の目的を達成する上で支障はない。

各試験体の観測波形の最大加速度発生時刻も、原波形と比較してピークの大きさがややばらついているもののおおむね一致している。

また、原波形と観測波形の時刻歴データ間の相関係数は0.78~0.85であり、良い対応を示している。

図-5には、各試験体の観測波および原波のフーリエスペクトルの一例を示す。図より、観測波は振動台の駆動制御上の理由から0.5秒以上の長周期成分がカットされているが、表-3に示すように各試験体の1次固有周期は0.32~0.41 secの間にあり、観測波は有意な周波数領域では原波の特性をおおむね再現しているといえる。

3.2 弾塑性加振による応答結果

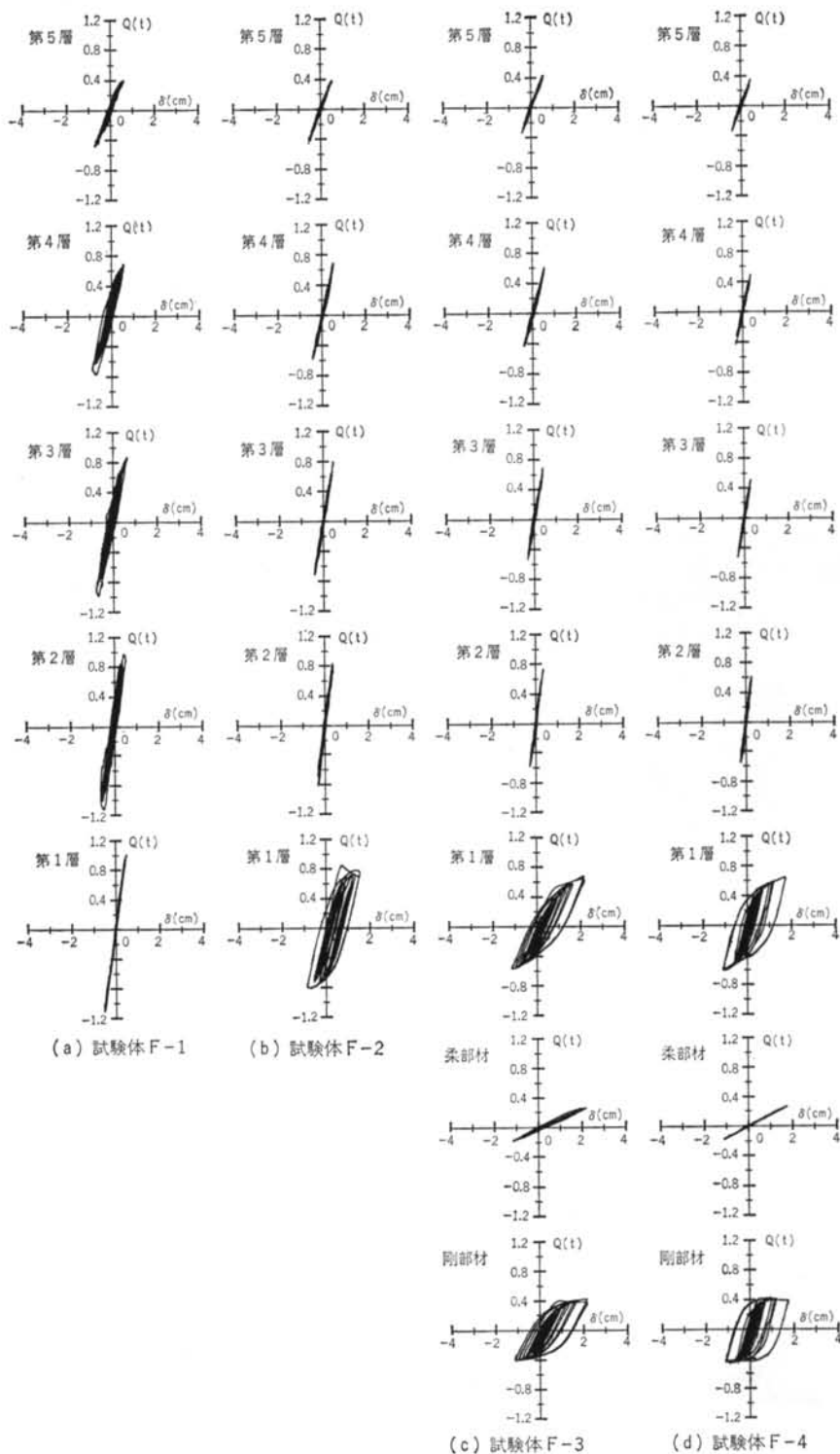
(1) 層せん断力-層間変形関係

図-6に、各試験体の層せん断力-層間変形関係を示す。

試験体F-1の場合、第2, 3, 4層が塑性化している。試験体F-2の場合は、意図したとおり第1層のみが塑性化し、第2層以上はほぼ弾性に留まっている。第1層に柔剛混合架構を組込んだ試験体F-3, F-4の場合、第1層は層全体としてはF-2とほぼ同様な挙動を示すが、構成される部材ごとの挙動を見ると剛部材が著しく塑性化し、柔部材はほぼ弾性に留まっている。また、第2層以上は試験体F-2と同様に、ほぼ弾性範囲内にある。

(2) 累積塑性ひずみエネルギー

図-7に、各試験体の累積塑性ひずみエネルギーの分布を示す。



図一六 各試験体の層せん断力一層間変形関係

試験体 F-1 の場合、全層が塑性化しているが、第 2 層および第 4 層に集中が見られ、層によってエネルギー吸収量が大きく異なり、不規則である。

これに対して、第 1 層の強度を相対的に弱くした試験体 F-2~F-4 の場合は、いずれも骨組のひずみエネルギーの約 90% が第 1 層に集中しており、第 2 層以上の損傷は少ない。

以上のことは、試験体 F-1 のように各層の強度を最適降伏せん断力係数分布に合わせた場合でも必ずしも各層に一律な塑性化が生じるとはいえず、損傷の集中層を予測することが困難なことを示すものである。一方、試験体 F-2~F-4 のように損傷の集中層を意図的に設けることによって、その層のみにひずみエネルギーの集中を導くことができることを示すものである。

(3) 累積塑性変形倍率

累積塑性変形倍率については、各層の層せん断力-層間変形関係より横軸を横切る点の変位の増分を正側および負側のそれぞれについて累積したものを各層の降伏変形量で除した量を、それぞれ η^+ 、 η^- とする。

図-8 に、各試験体の累積塑性変形倍率(平均値) $\bar{\eta} = (\eta^+ + \eta^-)/2$ の分布を示す。

試験体 F-1 の場合、第 2 層以上には塑性化によりかなり大きな累積塑性変形倍率を示す層が生じ、その生起層

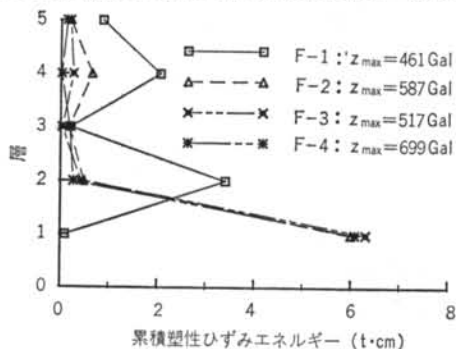


図-7 累積塑性ひずみエネルギーの分布

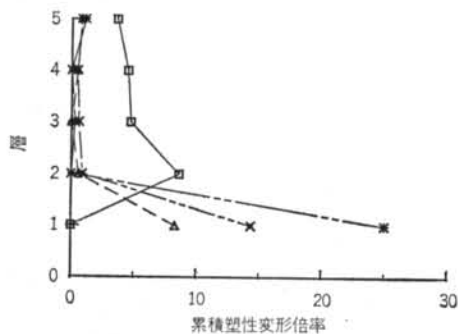


図-8 累積塑性変形倍率の分布

は不規則である。

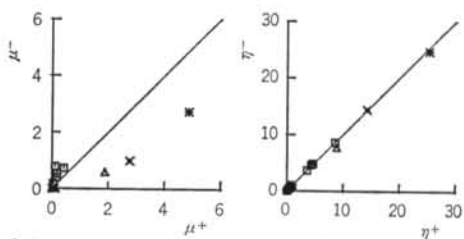
第 1 層の強度を弱くした試験体 F-2~F-4 の第 1 層に注目すると、いずれも第 1 層に大きな累積塑性変形倍率を生じているが、試験体 F-3 の場合、第 1 層の剛部材の強度が F-2 の第 1 層の強度に比べて 1/2 になっているため累積塑性変形倍率は F-2 のほぼ 2 倍となり、さらに試験体 F-4 の場合、F-3 に比べて降伏変形比が 2 倍になっているため、等量の塑性変形量でも累積塑性変形量の値は大きくなる。したがって、塑性化の程度を表わす指標としては、累積塑性ひずみエネルギーより累積塑性変形倍率の方が合理的である。

図-9(a)および(b)は、見掛けの塑性変形倍率と累積塑性変形倍率の正側および負側のそれぞれの値をプロットしたものである。

図より、見掛けの塑性変形倍率 $\mu = \delta_{max}/\delta_y - 1$ はいずれの試験体についてもかなり一方向に偏るが、累積塑性変形倍率 η はいずれの試験体とも正側、負側で等量となり、ほとんど偏らないことが分かる。

(4) 層間変形角

図-10 に、各試験体の最大層間変形角の分布を示す。最適降伏せん断力係数分布をもつ試験体 F-1 の場合、各層とも比較的大きな層間変形がほぼ一様に生じている。これは、各層とも塑性化するとともに復元力を失うためである。第 1 層の降伏せん断力係数を第 2 層以上に対して相対的に弱くした試験体 F-2~F-4 の場合、第 1 層に



(a) 正負の見掛けの塑性変形倍率 (b) 正負の累積塑性変形倍率

図-9 正負の見掛けの塑性変形倍率および累積塑性変形倍率

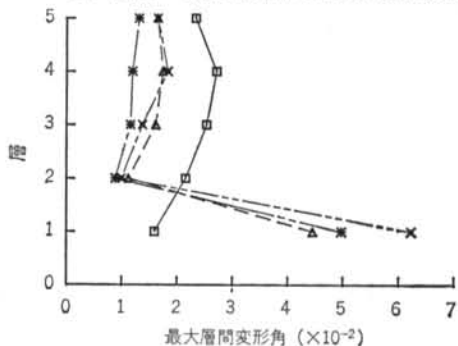


図-10 最大層間変形角の分布

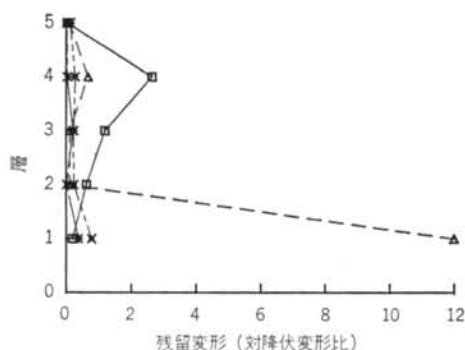


図-11 残留変形（主柱の降伏変形量に対する比）の分布
大きな層間変形を生じているが、第2層以上ではほぼ一様に層間変形は小さいことが分かる。これは、第1層のみ大きく塑性化し地震入力エネルギーを塑性ひずみエネルギーとして吸収してしまい、第2層以上に入るエネルギーが小さくなるためである。

降伏変形比による差異を見ると、降伏変形比の大きい試験体 F-4 の方が試験体 F-3 より第1層の最大層間変形角が小さくなっている。これは、試験体 F-3 と試験体 F-4 では後者の方が同じ層間変形角に対するエネルギー吸収能力が大きいためである。第1層の最大層間変形角も、降伏変形比の大きい試験体 F-4 の方が小さい。

(5)残留変形

図-11に、各試験体の降伏変形量に対する残留変形量の比の分布を表わす。

試験体 F-1 では層によって大きな残留変形が見られ、その生起層は不規則である。また、試験体 F-2 では第1層にきわだって大きな残留変形が生じているが、これは主柱の塑性化により復元力が失われたためである。これに対し、柔剛混合の試験体 F-3、F-4 では、剛部材が塑性化しても柔部材の復元力が働くため、残留変形はきわ

試験体	層	重量 (t)	層剛性 (t/cm)	降伏層せん断力 (t)	降伏変形 (cm)
F-2	5	0.408	0.7423	0.4216	0.5680
	4	0.408	1.3350	0.6384	0.4782
	3	0.408	1.6293	0.7848	0.4817
	2	0.408	2.0710	0.9148	0.4417
	1	0.408	1.2964	0.6964	0.5372
F-4	5	0.408	0.7505	0.4216	0.5618
	4	0.408	1.3608	0.6384	0.4691
	3	0.408	1.7135	0.7848	0.4580
	2	0.408	2.0471	0.9148	0.4469
	1 柔剛	0.408	0.1399 1.1875	0.2991 0.3500	2.1380 0.2947

表-5 解析モデルの諸元

めて小さい。

降伏変形比による差異を見ると、降伏変形比の大きい試験体 F-4 は、降伏変形比の小さい試験体 F-3 に比べて残留変形はかなり小さくなっている。試験体 F-4 の方が試験体 F-3 に比べて入力加速度が2割程度大きいことを勘案すれば、その差異はさらに顕著であるといえる。

§ 4. 弾塑性応答解析

4.1 解析手法

骨組をせん断バネ-質点系でモデル化し、運動方程式を次式で与える。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = [M]\ddot{z} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $[M]$: 質量行列, $[C]$: 減衰行列,
 $[K]$: 剛性行列, $\{y\}$: 相対変位,
 \ddot{z} : 地震加速度

式(1)をエネルギーとして評価すると、次式を得る。

$$W_k + W_h + W_s = E \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{ここに、} W_k = \int_0^{t_0} \{\dot{y}\}^T [M] \{\dot{y}\} dt$$

$$W_h = \int_0^{t_0} \{\dot{y}\}^T [C] \{\dot{y}\} dt$$

$$W_s = \int_0^{t_0} \{\dot{y}\}^T [K] \{y\} dt$$

$$E = \int_0^{t_0} \{\dot{y}\}^T [M] \ddot{z} dt$$

W_k : 運動エネルギー, W_h : 減衰によって消費されるエネルギー, W_s : ひずみエネルギー, E : 総エネルギー入力

運動方程式の解法として Newmark- β 法による直接積分法を用いる。解析モデルは、第1層の強度を相対的に弱くした試験体 F-2 (非混合系) および試験体 F-4 (混

解析ケース	復元力特性	減衰定数(h) (%)
I	完全弾塑性型	0.0
II	Bi-linear 型 (ひずみ硬化モデル) $\gamma_1 = 0.02$	0.0
III	修正 Tri-linear 型 (ひずみ硬化モデル) $\gamma_1 = 0.3, Q_c = 2Q_y/3, \gamma_2 = 0.02$	0.0
IV	完全弾塑性型	F-2: 0.847
		F-4: 1.012

表-6 解析ケース

合系)とし、それぞれの諸元を表一5に示す。

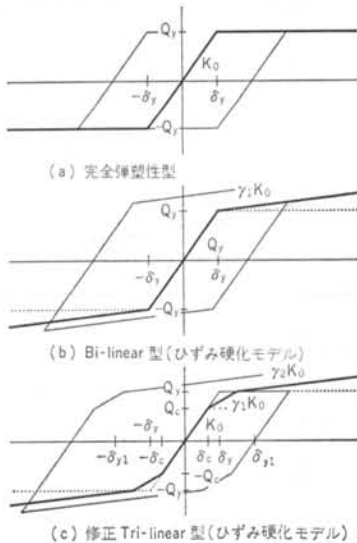
解析は、表一6に示す4ケースについて行なった。復元力特性は、完全弾塑性型、Bi-linear型(ひずみ硬化モデル)および修正Tri-linear型(ひずみ硬化モデル)の3種類を用いた(図一12参照)。

減衰については、1次および2次の減衰定数を等しくおいたRayleigh型を用いた。入力地震波は、各試験体のベース上で観測した加速度波形を用い、継続時間は $t_0=20$ sec、時間刻みを $\Delta t=1/400$ secとした。

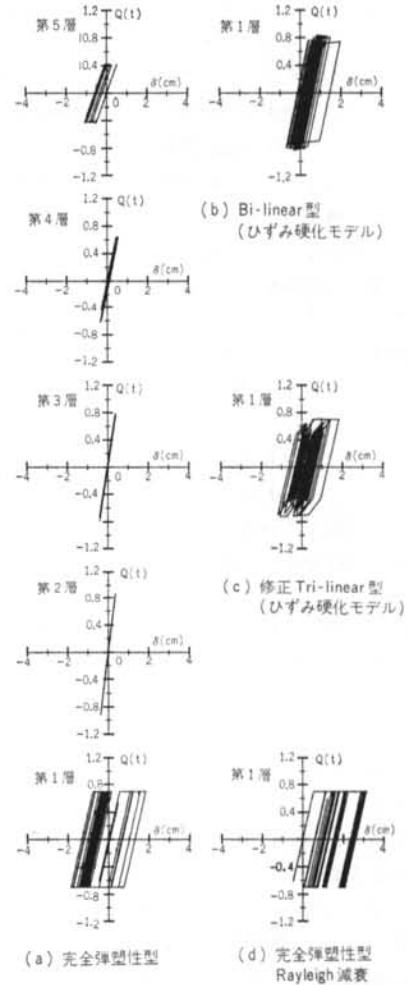
4.2 解析結果と実験結果の比較

(1)層せん断力-層間変形関係

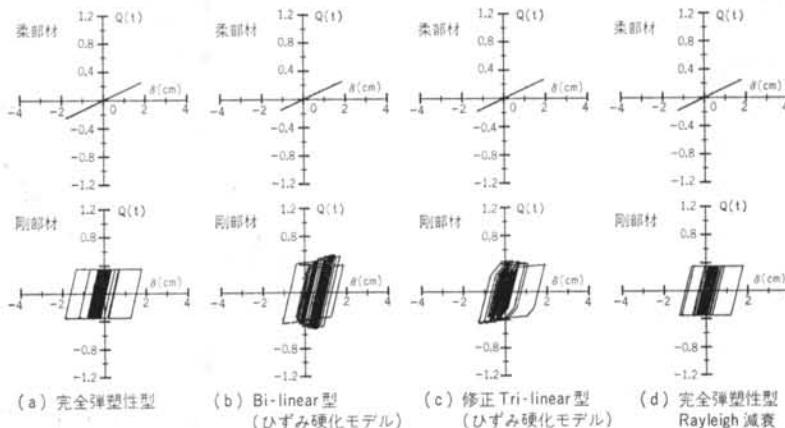
図一13、図一14に各試験体の応答解析による層せん断力-層間変形関係の一例を示す。



図一12 復元力特性



図一13 試験体F-2の弾塑性応答解析による層せん断力-層間変形関係



図一14 試験体F-4の弾塑性応答解析による層せん断力-層間変形関係(第1層のみを示す)

試験体 F-2 では、いずれの復元力特性の場合にも第 1 層が大きく塑性ループを描き、また第 4 層および第 5 層がわずかに塑性化している。ただし、第 1 層の塑性ループの形状は、完全弾塑性型および Bi-linear 型 (ひずみ硬化モデル) の場合は修正 Tri-linear 型 (ひずみ硬化モデル) の場合より大きい。実験結果 (図-6 参照) と比較すると、修正 Tri-linear 型 (ひずみ硬化モデル) の場合が比較的良く合っている。減衰を考慮した場合、完全弾塑性型では塑性ループが正側に著しく偏り、実験結果と異なっている。

試験体 F-4 では、いずれの復元力特性の場合にも第 1 層の剛部材が大きく塑性ループを描き、第 5 層がわずかに塑性化し、他層は弾性に留まっている。第 1 層の剛部材の塑性ループの大きさは復元力特性の違いによる差異はほとんどない。実験結果と比較しても、いずれの場合にも良く合致しているといえる。減衰を考慮した場合、塑性ループはやや小さめになるものの非減衰と大差はない。

(2) 総エネルギー入力

表-7 に、実験および応答解析による試験体への総エネルギー入力 (等価速度 V_E) を示す。

応答解析結果は、いずれの解析ケースについてもおおむね実験結果に対し 10% の誤差範囲に納まっていることが分かる。

試験体 F-2 では、Bi-linear 型 (ひずみ硬化モデル) が他の 2 者よりやや小さいが、量的にも分布形もおおむね合っているといえる。実験結果と比較すると、いずれの解析ケースも実験結果より 1~2 割程度小さくなっている。また、減衰による影響は少ない。

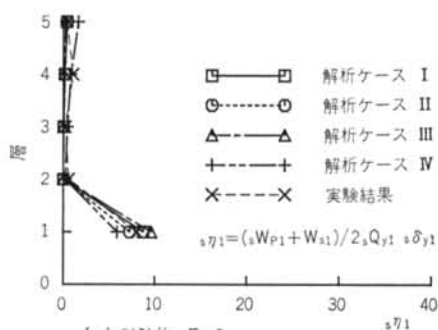
試験体 F-4 では、復元力特性の違い、減衰の評価の有無にもかかわらず量的にも分布形もほぼ良く合っている。実験結果と比較するとやや小さめではあるが、おおむね良く合っているといえる。

	F-2	F-4
実験結果	85.26	78.66
Case I	77.99 (0.91)	74.59 (0.95)
Case II	73.87 (0.87)	75.89 (0.96)
Case III	84.01 (0.99)	77.76 (0.99)
Case IV	77.55 (0.91)	76.32 (0.97)

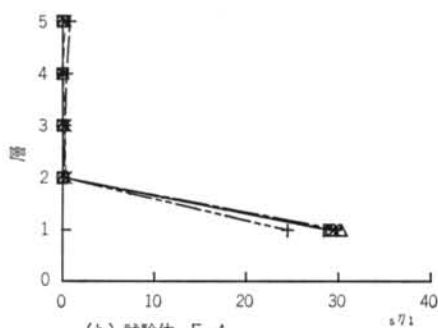
() 内は実験結果に対する比

表-7 総エネルギー入力 V_E (cm/sec)

このように、入力エネルギーは非混合系、混合系にかかわらず、また復元力特性の違いや減衰の評価の有無にもかかわらず応答解析結果は極めて安定しており、実現象を良く表現できることが分かる。

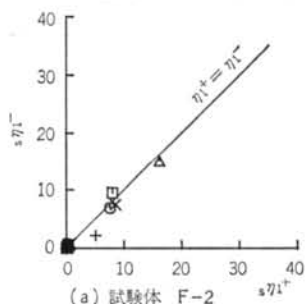


(a) 試験体 F-2

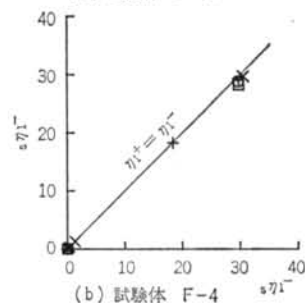


(b) 試験体 F-4

図-15 剛部材の累積塑性変形倍率 (平均率) の分布



(a) 試験体 F-2



(b) 試験体 F-4

図-16 剛部材の累積塑性変形倍率の偏り

(3) 累積塑性変形倍率

図-15に、各試験体の応答解析による累積塑性変形倍率（平均値）の分布を示す。

塑性ひずみエネルギーおよび塑性化の程度の指標となる累積塑性変形倍率は、両試験体とも復元力特性の違いや減衰の有無によらず、解析結果は実験結果と良く合致している。また、正負の偏りもほとんどない。

図-16は、累積塑性変形倍率の正側、負側の値をプロットしたものである。

非混合系、混合系とも復元力特性の違い、減衰の有無にもかかわらず偏りはほとんどない。

このように、累積塑性変形倍率は非常に安定した量で、エネルギー吸収量および塑性化の程度を測る尺度としてきわめて合理的であるといえる。

(4) 最大層間変形角

図-17に、各試験体の最大層間変形角の分布を示す。

最大層間変形角については、試験体 F-2 の減衰系を除いて、いずれの解析ケースも実験結果と良く合致しており、殊に混合系（試験体 F-4）ではほとんど一致している。

このように応答解析結果は、混合系では復元力特性の違い、減衰の有無にかかわらず実現現象の最大層間変形角を精度よく評価できる。非混合系では、層間変形角が最大となる層の定量的な予測は最適分布型モデルでは困難

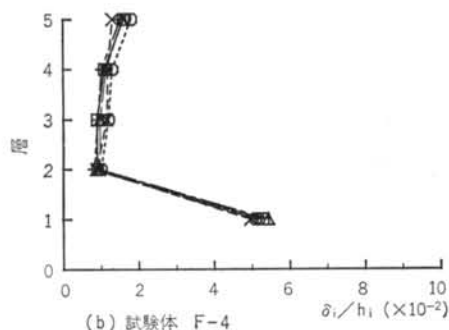
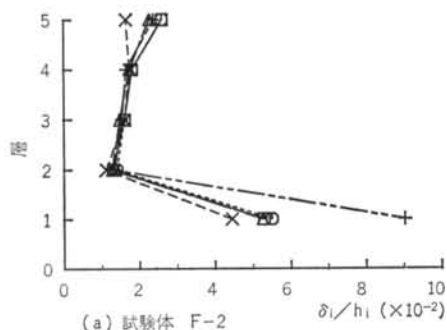


図-17 最大層間変形角の分布

であるが、損傷集中型モデルでは可能である。

(5) 残留変形

図-18に、各試験体の降伏変形量に対する残留変形量の比を示す。

残留変形については、両試験体とも復元力特性の違いや減衰の有無によるばらつきは大きいですが、混合系と非混合系の差異は表現できるといえる。

§ 5. おわりに

第1層エネルギー集中型鉄骨多層骨組の弾塑性振動実験を行なった結果、次のことが明らかになった。

(1) 第1層の降伏せん断力係数を第2層以上に対して相対的に小さくすることにより、第1層で地震入力エネルギーのほとんどを吸収させ、第2層以上をほぼ弾性に留めることができる。

(2) 第1層を柔部材と剛部材で構成される柔剛混合構造とすることにより入力エネルギーのほとんどを剛部材に吸収させ、柔部材で残留変形を抑制することができる。

(3) 柔部材と剛部材の降伏変形比が大きい方が、残留変形の抑制に対して効果がある。

(4) 柔部材の剛性を大きくすることにより、最大層間変形角を小さくすることができる。

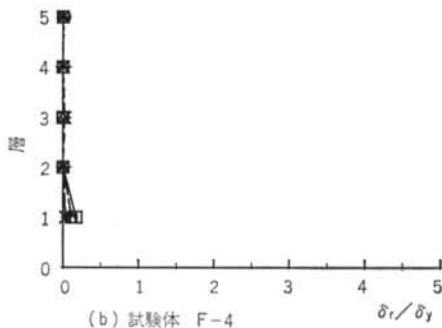
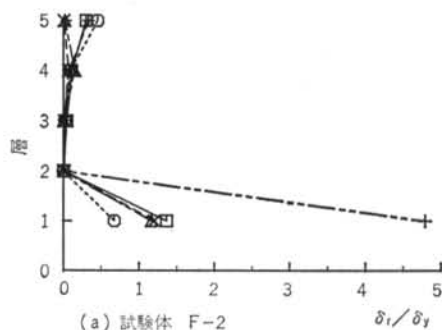


図-18 残留変形（主柱の降伏変形量に対する比）の分布

一方、3種類の復元力特性を用い、また減衰の有無を考慮して応答解析を行なった結果、実験結果と比較して次のことが明らかになった。

(5)総エネルギー入力については、柔剛混合系、非混合系いずれの場合も復元力特性の違いや減衰の有無にかかわらず、良く実験結果を表現できる。

(6)累積塑性ひずみエネルギーについては、復元力特性の違いや減衰の有無にかかわらず、おおむね実験結果を表現できる。

(7)各層の累積塑性ひずみエネルギーの分布および塑性化の程度を評価する指標として累積塑性変形倍率を用いることは合理的である。

(8)最大層間変形は、柔剛混合系では復元力特性の違いや減衰の有無にかかわらず実験結果をよく表現できる。非混合系では、いずれの場合も実験結果に比べてかなり過大となるが、安全側の評価を与える。

以上のように、復元力特性として比較的単純な完全弾塑性型を用い、減衰を無視したせん断バネ—質点系による応答解析は実験結果と良く合致しており、実現象を十分表現しうるといえる。

本研究は、住友金属工業株式会社との共同研究によるものである。なお、本研究の遂行に当たって、東京大学助教授秋山宏博士に終始懇切なご指導を頂いた。末尾ながら、深甚なる謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 矢部喜堂，真瀬伸治，平間敏彦，寺田岳彦，宇野寿郎：“第1層エネルギー集中型鉄骨耐震構法の提案”清水建設研究報告 第48号（昭和63年10月）
- 2) 加藤勉，秋山宏：“地震時における鋼構造せん断型多層骨組の損傷分布則”日本建築学会論文報告集 第270号（1978年）
- 3) 秋山宏：“建築物の耐震極限設計”東京大学出版会（1980年）