

## [2105] 変動圧縮力とくり返し曲げ・せん断を受ける壁柱の 弾塑性性状

正会員 ○田村 裕之（日本設計事務所）

正会員 南 宏一（大阪工業大学工学部）

### 1. 序

地震時に、建物の柱、特に外柱ははりまたは耐力壁からの付加曲げモーメントの影響により変動軸力を受ける。また、壁柱のように偏平な柱ほど変動軸力の影響が強いと思われる。既往の研究では、一般に軸力はせん断力に比例して変動すると言われており、比例的な載荷手法をアクチュエーターにより実現している。しかしながら、著者らはアクチュエーターを使わずに、マニュアルジャッキによって軸力の変動を考慮した載荷実験を試みた。本研究では曲げ破壊とせん断破壊の2つの破壊形式の実験を行い、軸力とせん断力により表される荷重履歴の違いが履歴曲線、破壊状況等に及ぼす影響を調べることを目的とする。

### 2. 実験概要

#### 2. 1. 試験体

試験体は、15階程度の中高層壁式ラーメン構造の1階部分の柱で実大寸法の1/3のスケールである。試験体の断面および形状を図-1、2に示す。断面は、シリーズ1、2ともに同一とし、 $B \times D = 600 \times 120$  の偏平な柱であり、高層壁式ラーメンの外柱をモデル化したものである。主筋はD 8 (SD 35)、4.5φ (SR 30) 帯筋は4.5φ (SR 30) で、閉鎖型の口型フープである。また、コンクリートの拘束効果を高め、かつ主筋

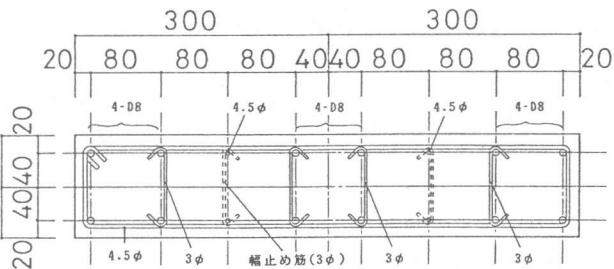


図-1 試験体の断面

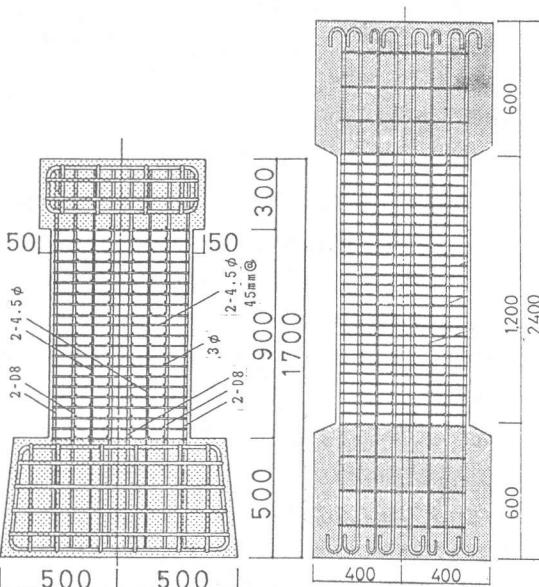


表-1 試験体リスト

シリーズ	試験体名※	荷重履歴	最大応力度 $\sigma_c$
1	FA0	A	0
	FA4	A	0.4 F <sub>c</sub>
	FB4	B	0.4 F <sub>c</sub>
	FC4	C	0.4 F <sub>c</sub>
	FD4	D	0.4 F <sub>c</sub>
2	SA0	A	0
	SA4	A	0.4 F <sub>c</sub>
	SB4	B	0.4 F <sub>c</sub>
	SC4	C	0.4 F <sub>c</sub>
	SD4	D	0.4 F <sub>c</sub>

※試験体名は、次のように名付ける。

☆ ☆ ☆   
 破壊形式 (F: 曲げ破壊、S: せん断破壊)  
 荷重履歴の種類 (A, B, C, D)  
 最大応力度  $\sigma_c$ . (0.4 → 4)

(a) シリーズ1

(b) シリーズ2

図-2 試験体の形状

の座屈を防止するため、幅止め筋を各所に配筋している。試験体の形状は曲げ破壊型 ( $\eta = 5$ ) とせん断破壊型 ( $\eta = 2$ ) の2つである。なお、 $\eta$  は  $\eta = L/D$  と定義するもので、L は逆対称曲げをうける場合の等価部材長さを、D は柱せいである。なお、曲げ破壊型の試験体では、反曲点位置に鋼製治具を設けているが、この治具を柱頭部にも固定用ブロックを設けた。主筋量 ( $\rho_s = 0.84\%$ ) および帯筋量 ( $\rho_w = 0.23\%$ ) は、ともに高層壁式ラーメン構造設計指針(案)<sup>1)</sup>に示されている最小主筋量および帯筋量を満足している。試験体リストを表-1に示す。また、表-2に材料特性を示す。

## 2. 2. 加力方法

シリーズ1の加力方法は、片持ち柱形式であり、若林式と呼ばれる実験装置により載荷を行ったが、柱脚部から  $150^\circ$  の位置に水平力を載荷した軸力は、手動式油圧ジャッキにより負荷し、水平力は、電動式油圧ジャッキにより負荷する。シリーズ2の加力方法は、建

研式と呼ばれる実験装置により載荷を行い、水平力は、逆対称曲げせん断を生じるように柱材の  $1/2$  の位置に負荷させた。シリーズ1と同様に、軸力は、手動式油圧ジャッキにより負荷し、水平力は電動式油圧ジャッキにより負荷する。

## 2. 3. 載荷法則

変位は、試験体の柱脚部に対する壁柱の水平変位量  $\delta$  を電気変位計を用いて測定し、その測定値から求められる柱材の変位部材角  $R$  ( $= \delta/l$ ; シリーズ1では  $l=1500$ , シリーズ2では  $l=1200$ ) により行った。載荷法則は、単位振幅を  $R=0.003, 0.006, 0.009, 0.012, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03\text{rad}$  とし、その同一単位振幅で正負2回の繰り返しを行う漸増変位振幅形とした。軸力とせん断力の関係は、図-3に示すように一定軸力載荷の荷重履歴Aと変動軸力載荷の荷重履歴B、C、Dの計4種類とする。荷重履歴Dは、比例載荷をモデル化したものであるが、マニュアルジャッキでは4段階位が時間的にも技術的にも妥当であると言えるものである。また、荷重履歴がC、Bとなるにつれ軸力の変動幅を大きくしており、軸力の変動幅の影響をも含めて検討するものである。なお、図中の曲線は曲げ耐力線を、一点鎖線はせん断耐力線を表している。

表-2 材料特性

種類	鉄筋			コンクリート	
	降伏応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	試験体	圧縮強度
D 8 4. 5φ 3φ	4460	6450	18. 1	FA0	207
	3360	4880	22. 2	FA4	216
	2640	4500	24. 8	FB4、FC4、FD4	218
同上	5110	7380	23. 0	SA0	299
	3354	5086	23. 7	SA4	304
	2476	4709	17. 9	SB4、SC4 SD4	303 294

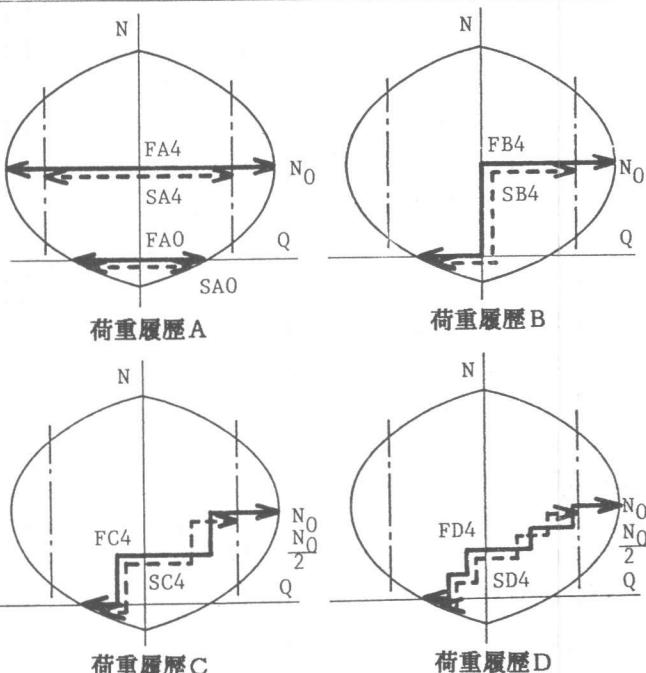


図-3 荷重履歴

また、太い実線はシリーズ1の荷重履歴であり、点線はシリーズ2の荷重履歴である。

シリーズ1は、曲げ圧縮破壊から曲げ引張破壊へ、シリーズ2は、せん断圧縮破壊から曲げ引張破壊へ移行する荷重履歴である。

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1. ひび割れ状況

表-3に各試験体のひび割れ発生荷重および部材角を、そして、最大耐力とその時の部材角を示す。また、写真-1に最終破壊状況を示す。

[シリーズ1] 試験体いずれも曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、圧壊、かぶりコンクリートのはく落を生じて、最終的に鉄筋の座屈をもたらした。変動軸力を受けると、一定軸力の試験体とは異なり、左右非対称の破壊形式となり、圧縮側のみの破壊が進行する。

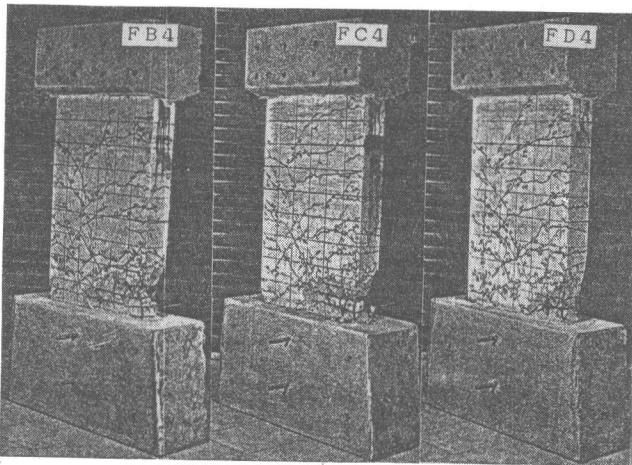
[シリーズ2] 軸力のない試験体S A 0は、斜張力ひび割れが支配的であるが、軸力のある試験体は、斜張力ひび割れよりも断面中央部の主筋に沿う付着割裂ひび割れの方が先行し、試験体中央の破壊のみが進行し、崩壊に至る。このひび割れの原因としては、せん断応力  $\tau$  が最大となるのが柱の中央部であること、主筋の径に比して柱の幅

が小さいことがあげられる。

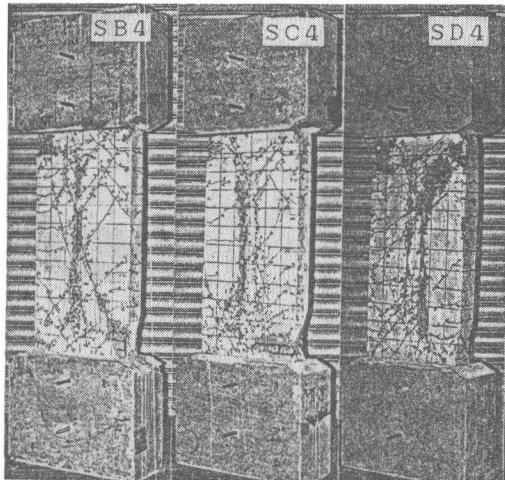
また、変動軸力を受けると、破壊形式は左右非対称となる。

#### 3. 2. 履歴特性

図-4に履歴曲線を示す。縦軸は作用せん断力  $Q$  ( $t f$ )、横軸は柱の部材角  $R$  ( $X 10^{-2} \text{ rad.}$ ) を表している。図中の点線は、転倒モーメントの影響を、実線は累加強度理論による終局曲げ耐力、一点鎖線は累加強度理論による略算終局せん断耐力<sup>2)</sup>を表して



(a) シリーズ1



(b) シリーズ2

写真1 最終破壊状況

表-3 ひび割れ荷重

	N	$Q_{FL}$	$R_{FL}$	$Q_{DT}$	$R_{DT}$	$Q_{SL}$	$R_{SL}$	$Q_u$	$R_u$
F A 0	pos. 0	1.35	0.11	3.42	0.35	-----	-----	5.65	2.51
	neg.	-1.99	-0.08	-3.75	-0.25	-----	-----	-5.74	-2.49
F A 4	pos. 62.2	8.95	0.24	9.76	0.34	13.21	0.87	13.21	0.87
	neg.	-8.47	0.15	-11.47	-0.37	-13.11	-0.92	-13.35	-0.83
F B 4	pos. 62.2	6.18	0.18	9.16	0.31	12.52	0.70	12.64	0.87
	neg. -1.0	-1.45	-0.10	-3.63	-0.24	-----	-----	-5.95	0.86
F C 4	pos. 62.2	6.24	0.21	8.53	0.29	11.64	0.47	12.72	0.66
	neg. -1.0	-1.42	0.08	-3.79	0.23	-----	-----	-6.30	-1.98
F D 4	pos. 62.2	6.43	0.14	8.53	0.27	12.58	0.54	13.05	0.63
	neg. -1.0	-1.56	0.01	-3.79	-0.29	-----	-----	-5.97	-1.39
S A 0	pos. 0	2.00	0.03	9.90	0.25	12.10	0.41	15.00	2.39
	neg.	-4.10	-0.02	-10.00	-0.27	-10.90	-0.36	-16.20	-1.81
S A 4	pos. 87.6	23.40	0.19	28.50	0.30	28.50	0.30	34.10	0.64
	neg.	-15.80	-0.13	-26.20	-0.52	-20.50	-0.34	-27.25	-0.69
S B 4	pos. 87.6	17.70	0.13	29.50	0.28	30.40	0.32	34.80	0.73
	neg. 1.0	-9.70	-0.18	-11.70	-0.30	-----	-----	-15.60	-1.43
S C 4	pos. 87.6	22.70	0.21	31.20	0.39	27.20	0.28	34.20	0.69
	neg. 1.0	-8.00	-0.03	-10.30	-0.30	-----	-----	-15.60	-1.42
S D 4	pos. 87.6	7.40	0.05	29.90	0.31	29.90	0.31	34.40	0.73
	neg. 1.0	-10.30	-0.07	-10.00	-0.23	-----	-----	-15.00	-1.42

単位 Q, N :  $t f$ , R :  $10^{-2} \text{ rad.}$ 、FL : 曲げひび割れ、DT : 斜張力ひび割れ、SL : 付着ひび割れ

いる。また、▼1は曲げひび割れ、▼2は斜張力ひび割れ、▼3は主筋に沿う付着割裂ひび割れ、そして▼4は主筋の座屈した点を表している。

【シリーズ1】軸力を負荷した試験体はいずれも  $R=0.006\sim0.009\text{rad}$  で最大耐力に達している。そして、 $R=0.012\text{rad}$  を過ぎてから耐力低下が著しい。軸力変動が最大耐力や履歴性状にあたえる影響については、正荷重時にはあまりないが、負荷重時においてその影響が大きく表れている。また、負荷重時の除荷過程において、履歴曲線が原点付近に向かう傾向がある。

【シリーズ2】シリーズ1よりも早い時期の  $R=0.006\text{rad}$  で最大耐力に達し、かつ、シリーズ1に比して正荷重時での耐力劣化の度合は大きい。なお、シリーズ1と同様に負荷重時の除荷過程において履歴曲線が原点付近に向かう傾向がある。

図-5に最大耐力時の履歴曲線および軸力とせん断力の関係一例示す。図中の各ポイントに●印をプロットし、

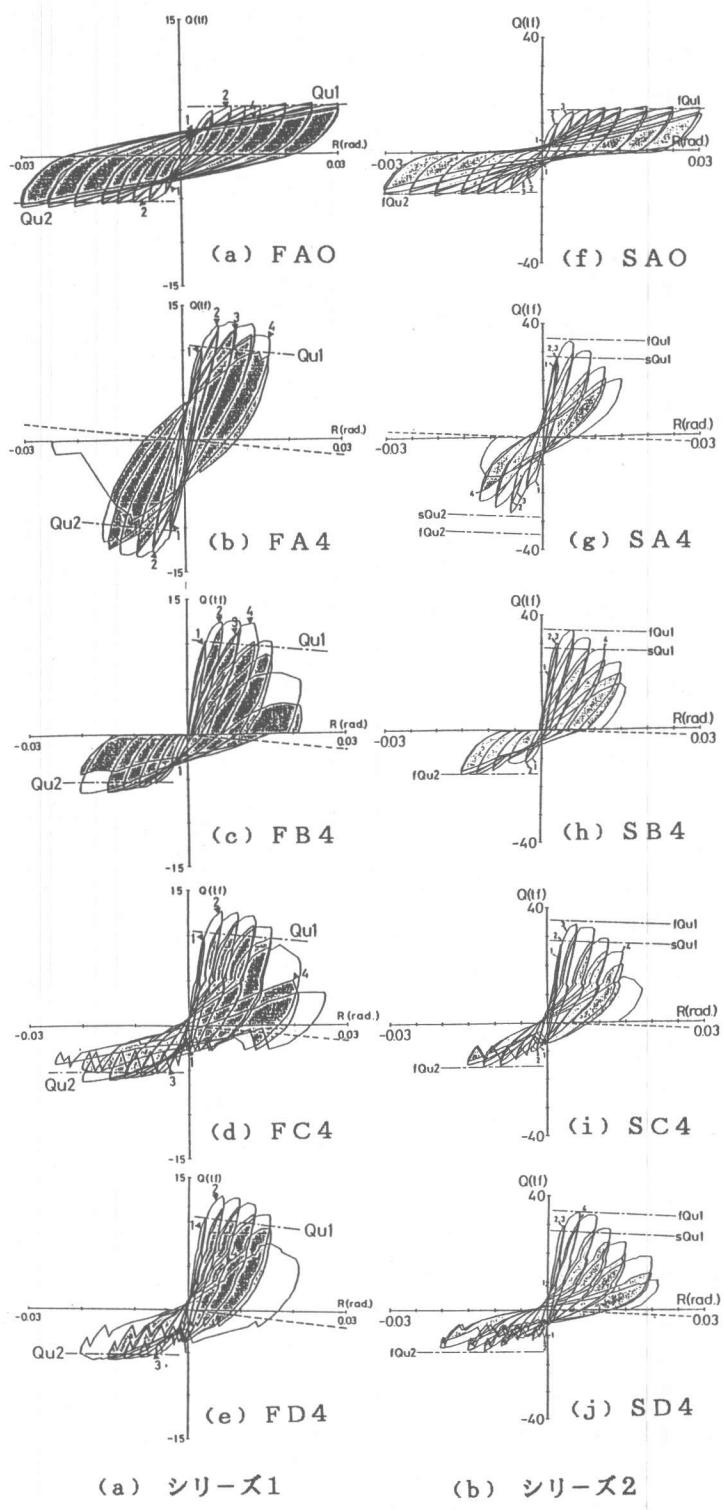


図-4 履歴曲線

AからUまで名付ける。

図中の点線は、軸力を変動させた時のせん断力の位置である。軸力を変動させると、この図に見られるようにせん断力が変動している。これは、軸力を変動させる時には、せん断力を作用させているジャッキの動きを止め、柱材の水平変位を拘束しているために軸力の変動とともにせん断力が変動して、このような現象が生じている。

### 3.3. 固有ループ

図-6に荷重履歴B, C, Dを比較するため、試験体3体を重ね書きしている。実線は荷重履歴B、点線は荷重履歴C、一点鎖線は荷重履歴Dの試験体を表している。

この図を見ると、シリーズ1, 2ともに正荷重時において

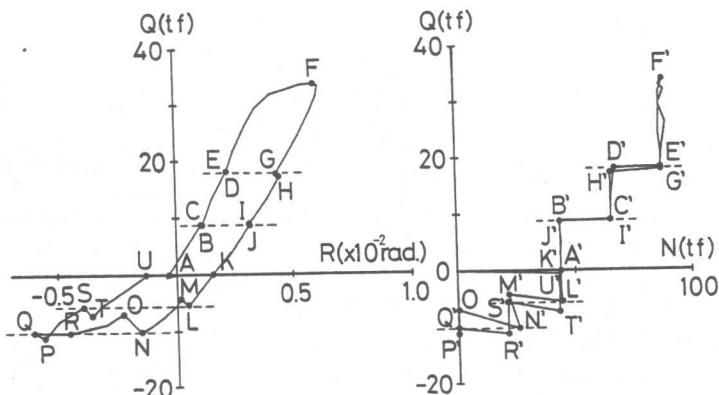


図-5 履歴曲線および軸力とせん断力の関係

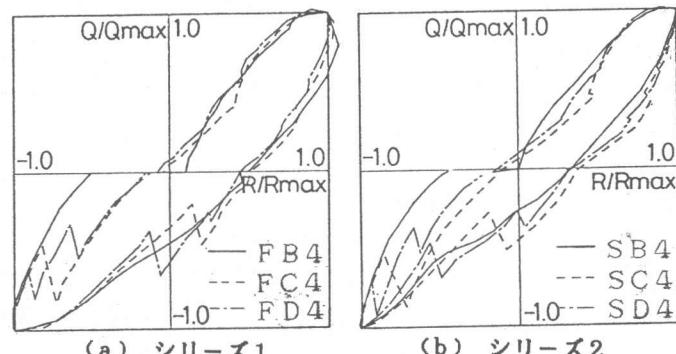


図-6 固有ループ

では荷重履歴の影響は顕著に表れておらず、負荷重時の除荷過程での軸力を変動させるまでは3体とも同じ履歴をたどるが、軸力を変動させた後に、荷重履歴Bと荷重履歴C, Dにおいて違いが顕著に表れている。また、荷重履歴CとDを比較すると、特に負荷重時において、軸力を変動させたときに伴うせん断力の変動を考えなければ同様の履歴をたどっていることがわかる。そのため、軸力の変動幅を荷重履歴Cの2段階位にしておけば、比例載荷による履歴と同様の履歴となる。エネルギーについて見てみると、シリーズ2の試験体は、シリーズ1のと比べ、エネルギー吸収能力は期待できず、逆S字型に近い履歴となっている。

### 3.4. 変形能力

図-7に示すように包絡線上で最大耐力の80%の時の部材角を $R_1$ 、 $R_2$ とし、じん性を $\mu = R_2/R_1$ で評価する。図-8にシリーズ1、シリーズ2の試験体の変形能力を示す。 $R_1$ 、 $R_2$ を○—○(正荷重) ●—●(負荷重)で表し、じん性率 $\mu$ ( $M = R_2/R_1$ と定義する)を □(正荷重) ■(負荷重)で表す。なお、じん性率において、→印は実験終了までに耐力が最大耐力の80%まで低下していないことを表している。シリーズ1では負荷重時において、 $F_A 0$ は耐力が80%までおちていないが、変動軸力を受けると、耐力が80%以下となって

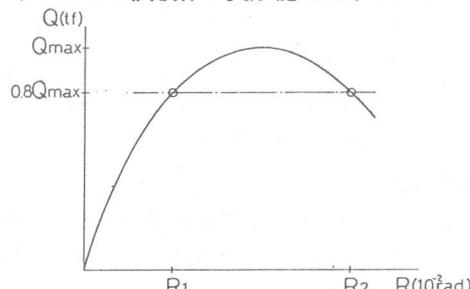


図-7 じん性の評価

おり、変形能力は小さくなっている。一方、正荷重においては、変動軸力を受けない試験体 F A 4 と比べ、多少変形能力は劣っているものの、大きな違いはなく、その変形能力は部材角で 2 % rad. じん性率で 5程度が確保できることを示している。一方、シリーズ2は、シリーズ1とは違い、軸力変動の有無にかかわらず負荷重時の変形能力には差異がみられない。また、変動軸力載荷の S B 4 、 S C 4 、 S D 4 の変形能力は一定軸力載荷の S A 4 と比べ、あまり大きな違いはない。一方、正荷重については変動軸力に対する影響はほとんど見られないが、その変形能力の大きさはシリーズ1に比して若干小さくなっている、部材角で 1.5% rad. じん性率で 4.5程度の値を示している。

#### 4. 結論

本実験により次の結果を得た。

- 1) 破壊形式のいかんにかかわらず、作用軸力が増加する荷重状態では、軸力変動が最大耐力および履歴性状におよぼす影響はほとんどないが、作用軸力が減少する荷重状態では、軸力変動による影響を強く受ける。
- 2) 破壊性状のいかんにかかわらず、負荷重時の除荷過程においては、軸力変動の影響により、せん断力を負荷している時の荷重経路とほぼ同じ履歴をたどり、履歴曲線は原点に向かう傾向にある。そのため、軸力変動を受けた試験体は、エネルギー消費能力は、あまり期待できない。
- 3) 作用軸力が変動すると、破壊形式は、非対称となる。
- 4) 軸力を受ける壁柱せん断破壊を生ずるときには、試験体中央部で、主筋に沿う付着割裂破壊が生じるので、中央部付近では、より多量の帯筋を配筋するなどの工夫が必要である。
- 5) 正荷重時において、最大応力度が 0.4F<sub>c</sub> を受ける壁柱で曲げ破壊が生ずる場合には、部材角で 20% rad. せん断破壊が生ずる場合には 1.5% rad. の変形能力を期待できる。
- 6) 軸力変動の影響を調べるために、荷重履歴Cの2段階程度にしておけば、比例載荷による変動軸力の影響を考慮することが可能である。

#### 【謝辞】

本研究は、(財)日本建築センターに委託された日本建築学会「高層壁式ラーメン構造研究委員会(委員長: 青山博之)」の研究活動の一環として行われたものであります。本研究のシリーズ1の実験を行うにあたり、摂南大学建築学科、佐々木良一助教授には、御援助を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 日本建築センター: 高層壁式ラーメン構造設計指針(案)
- 2) 南 宏一、倉本 洋: 鉄筋コンクリート部材のせん断設計式: コンクリート工学年次論文報告集 9-2 1987年6月, pp. 347-352

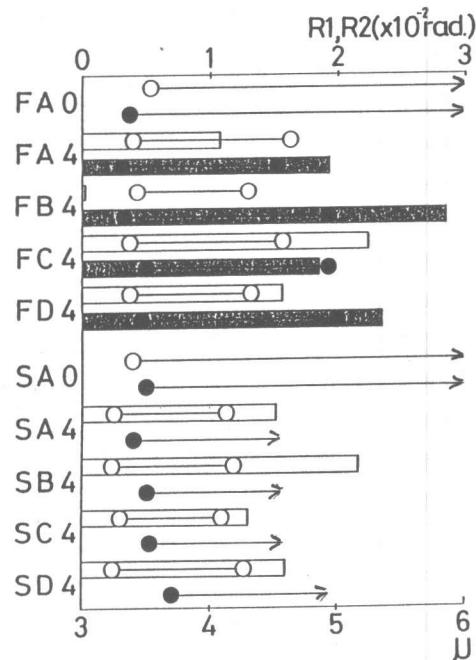


図-8 変形能力