

[123] 変動軸力と水平2方向地震力を受ける鉄筋コンクリート柱の挙動

正会員 ○李 康寧 (東京大学大学院)  
 正会員 小谷 俊介 (東京大学工学部)  
 正会員 青山 博之 (東京大学工学部)

1. 序

建物の柱は一般に地震により水平2方向の力を受けるが、建物の外側や隅に位置する柱は転倒モーメントにより大きな変動軸力をも受けることになる。既往の研究を見ると、水平力のみ注目し、軸力について一定とした実験や解析が主である。そこで、本研究では、変動軸力と2方向水平力の繰返しを受ける鉄筋コンクリート柱の復元力特性および軸力と2軸曲げの影響を調べることを目的とした実験を行ない、定軸力下での性状と変動軸力下での性状を比較検討を行なった。

2. 実験概要

2.1 試験体：試験体は同一寸法、配筋のものの7体で(図1)、最大水平力に対して曲げ降伏するように設計した。引張鉄筋比は0.54%、せん断補強筋比は0.64%である。試験体の記号は、加力方法によって、表-1に示す。材料特性は表-2に示す。軸力応力度120~135kg/cm<sup>2</sup>はほぼ本試験体の釣り合い軸力にあたる。

2.2 加力方法：試験体は片持ち柱の形式で反力床に固定し、水平方向2基、鉛直方向1基のサーボアクチュエーターを用いて、変動軸力の下で柱頭に水平方向の強制変位履歴を加えた[加力装置は文献2)を参照]。水平2方向の強制変位履歴は、図2に示すように加力に伴う振れの蓄積が少ない4つ葉形の幾何軌跡を描くものとする。変位振幅は、部材角で3/1000、1/200、3/200、3/100を基本とし、同じの変位振幅で2サイクルずつ繰返した。

試験体 B8-0、B8-1、B8-2は2方向地震力を受ける建物の中柱、外柱、隅柱を想定し、その基本軸力レベルおよび軸力変動の幅を考えた。試験体U8-0、U8-1は水平1方向の加力を行なった。また、試験体B40-1、B40-2は、軸力レベルを大きくし、釣り合い軸力の付近で軸力を変動させた。軸力の変動の仕方は、図3に示したように、軸力を柱のせん断力に比例させて変動させる。これは柱のせん断力が建物の転倒モーメントとほぼ比例するものと考えたことに相当する。

2.3 データ計測：電気変位計を用いて柱頭の水平変形 $\delta_x, \delta_y$ 、柱脚塑性ヒンジ部分の曲げ回転変形 $\theta_x, \theta_y$ 、軸方向変形 $\delta_0$ を測定し、ロードセルによって軸力Nと水平力 $P_x, P_y$ を測定した。柱のせん断力 $Q_x, Q_y$ は、 $P_x, P_y, N, \delta_x, \delta_y$ から、P- $\Delta$ 効果を考慮して算定した。また、危険断面における柱の主筋に貼った歪ゲージによって、主筋の降伏をモニターした。

3. 実験結果および検討

3.1 実験結果：7体の試験体はいずれも曲げひび割れ、鉄筋降伏、コンクリート圧壊、柱脚カバーコン

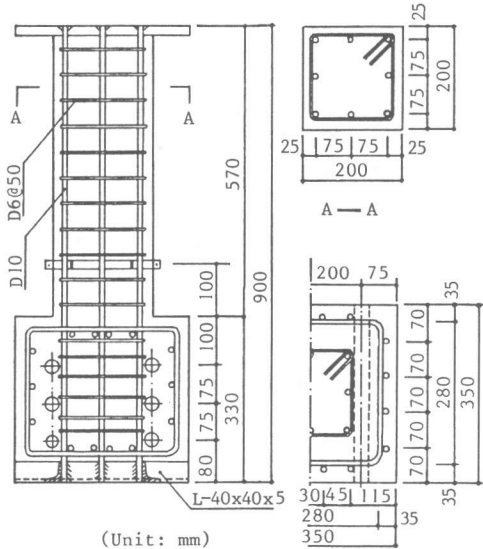


図1 試験体

表-1

試験体 記号	水平 加力	基本軸応力度 $\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )	変動軸力幅 (ton)	
			Y方向 $\Delta N_1$	X方向 $\Delta N_2$
U8-0	1軸	20	0	0
U8-1	1軸	20	±8	0
B8-0	2軸	20	0	0
B8-1	2軸	20	±8	0
B8-2	2軸	20	±8	±8
B40-1	2軸	100	±8	±8
B40-2	2軸	100	±12	±12

表-2 材料特性 (単位:強度kg/cm<sup>2</sup>、剛性10<sup>6</sup>kg/cm<sup>2</sup>)

鉄筋(SD35)			コンクリート	
$\sigma_y$	$E_s$		試験体	$f'_c$ $E_c$
D10	4260	2.16	U8-0,1, B8-0	276 0.23
D6	3940	1.80	B8-1,2, B40-1,2	314 0.23

クリート剝落を経験して、最後に鉄筋座屈で破壊した。高軸力の試験体B40-1、B40-2は鉄筋の圧縮降伏が先行した。実験結果の柱のせん断力 $Q_y$ 、 $Q_x$ とその方向の部材角 $R_x$ 、 $R_y$ の関係は、それぞれ図4の(a)~(e)に示す。図中○内の数字は、変動軸力を受ける試験体のその時点の軸力大きさを単位tonで示したものである。また、▼の記号で、鉄筋の座屈が起こった点を示した。実験結果は要約すると次のようになる。

<1> 変動軸力と1方向水平強制変形を受ける試験体U8-1の結果[図4の(a)]では、軸力変動の影響で全体の性状が非対称となる。軸力増大側(正側)の耐力、剛性が大きくなって、最大耐力後耐力の低下が生じた。これに対して、軸力減少側の耐力、剛性が比較的小さくなるが、最大耐力に達した後、耐力が少しでも上昇し、曲げ靱性が大きくなることが見られる。最大部材角1/17のサイクルで鉄筋座屈が生じて破壊した。

<2> 定軸力と2方向水平強制変形を受ける試験体B8-0の実験結果[図4の(b)]は、最大部材角1/17(1方向最大部材角1/25)のサイクルまで耐力が低下せず、荷重-変形関係のループが安定していた。1方向の最大部材角が1/17のサイクルで鉄筋座屈が生じて破壊した。 $Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}$  で見た最大耐力は1方向加力の試験体U8-0より約10%低くなった。

<3> 変動軸力と2方向水平強制変形を同時に受けた試験体B8-1、B8-2の実験結果[図4の(c)、(d)]は、耐力と剛性が軸力増大に従って大きくなる。変動軸力と1軸加力の試験体U8-1の結果と同様に、非対称の性状が現れている。しかし、軸力増大側でも、減少側でも、最大耐力後の耐力低下が生じた。

1方向のみの水平力に比例して変動した軸力を受ける試験体B8-1の結果[図4の(c)]では、非対称な荷重-変形関係は主に軸力の変動する方向で現れるが、軸力が変動しない方向では見られない。これは、軸方向変動によってその影響が違うことを示した。軸力が2方向の水平力に比例して大きく変動した試験体B8-2の場合、1方向部材角が約1/70のサイクルでは柱脚カバーコンクリートが急に圧壊し剝落して、その後のサイクルでは耐力が大きく低下した。試験体B8-1、B8-2は、共に1方向最大部材角1/25のサイク

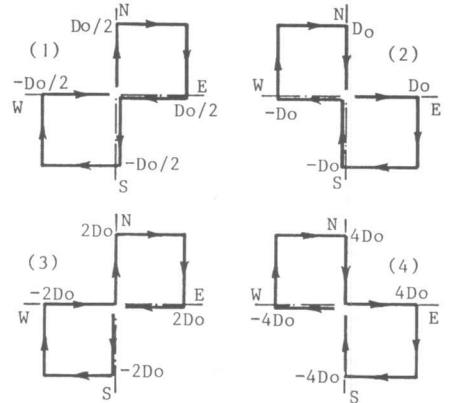
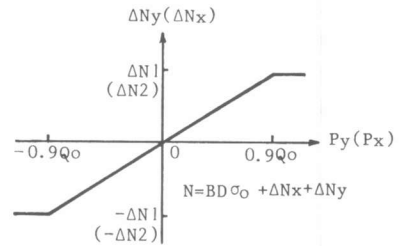


図2 変位履歴 ( $D_0$ : 1軸曲げ降伏変位)



$BD\sigma_0$ : 基本軸力。  $Q_0$ : 基本軸力下での1軸曲げ降伏せん断力。

図3 変動軸力と水平力の関係

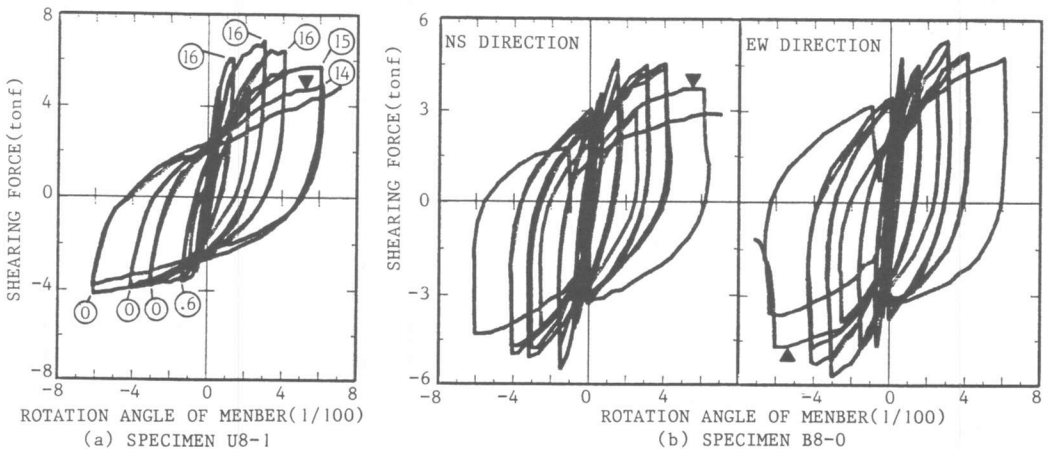


図4 荷重-変形関係 [▼: 鉄筋座屈。⑭: 軸力(tonf)]

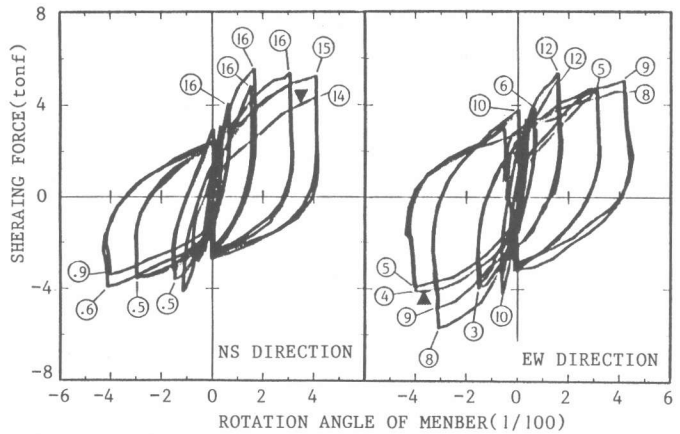
ルで鉄筋座屈が生じて破壊した。定軸力を受ける試験体 B8-0の結果と比べて、変動軸力を受けると、破壊が激しく変形能が小さくなる。

<4> 釣り合い軸力付近の変動軸力を受ける試験体 B40-1、B40-2の結果 [図4の(e)]では、最大耐力後の耐力低下が激しいが、軸力増大と減少側の性状の非対称現象は目立たない。

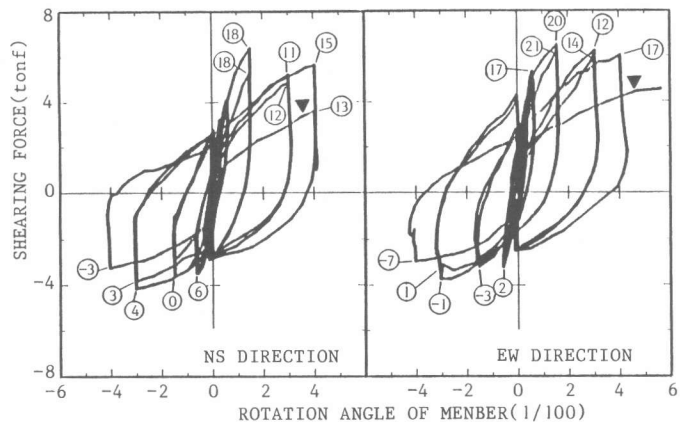
### 3.2 3方向変動力の相互作用:

定軸力を受ける試験体 B8-0の一サイクルの結果 [図5の(a)]について見ると、変形が一定の値に保持される方向の耐力は、直交方向の載荷や除荷に影響されて低下する現象、つまり2軸曲げの相互作用が現れる。定軸力の場合、2軸曲げの相互作用は、正と負の両側でほぼ同程度の耐力低下が現れる。これに対して、変動軸力を受ける試験体 B8-2の一サイクルの結果 [図5の(b)]を見ると、変形が一定の値に保持される方向での耐力は、直交方向の加力や除荷により低下の程度が、軸力大きさあるいは軸力の変化によって異なっている。軸力増大時耐力低下が大きく、軸力減少時耐力低下が小さくなる傾向が見られる。変動軸力を受ける R/C 柱は、一定軸力の場合よりもっと複雑な挙動を示した。

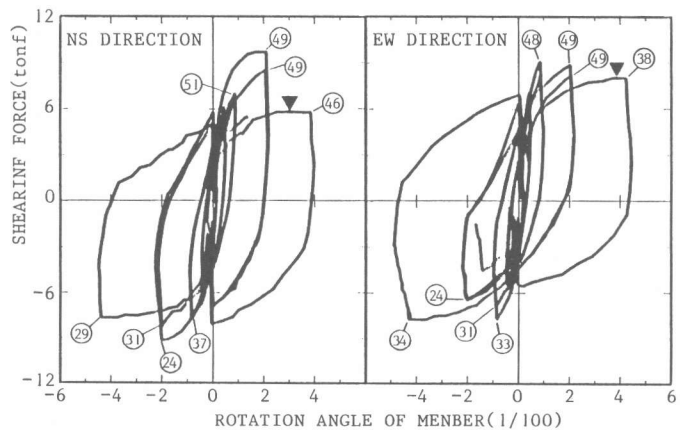
3.3 吸収エネルギー: 基本軸力レベルが等しく、水平強制変形履歴も同じの試験体 B8-0、B8-1、B8-2 について、試験体の破壊までの吸収エネルギーの量を比較する。吸収エネルギーの量は (1)式で計算した。結果は図6に示す。いずれもエネルギー吸収の量は曲げ変形に支配される。変動軸力下でのエネルギーの吸収の能力が定軸力の場合より小さいことは明らかである。変動軸力の幅が大きいくほど、エネルギー吸収の能力が小さくなる傾向がある。



(c) SPECIMEN B8-1



(d) SPECIMEN B8-2



(e) SPECIMEN B40-1

図4(続) 荷重-変形関係 [▼: 鉄筋座屈。Ⓢ: 軸力(tonf)]

$$E = \int F \cdot dD = \int P_x \cdot d\delta_x + \int P_y \cdot d\delta_y + \int N \cdot d\delta_n \quad (1)$$

ここに、F: 柱頭に作用する力のベクトル; dD: 変位増分のベクトル;

$P_x, P_y$ : 水平力;  $\delta_x, \delta_y$ : 水平変形;  
 $N, \delta_n$ : 軸力と軸方向変形。

#### 4. 結び

鉄筋コンクリート造柱を対象として、2方向交番繰返し加力と同時に軸力を水平力に比例させて変動させる実験を行った。定軸力下での2方向加力または変動軸力と1方向加力の実験の結果と比較して、3方向の変動力を受けるR/C柱の性状、変動軸力の効果および変動軸力と2軸曲げとの相互作用について検討を行なった。本研究で得られた結果をまとめると次のようになる:

(1) 釣り合い軸力レベル以下に軸力を変動させる場合では、2方向の繰返し水平力を受ける鉄筋コンクリート柱は、1方向繰返し水平力を受けるものと同様に、軸力増大側の刚性、耐力が大きく、軸力減少側のが小さくなる。復元力特性が非対称の性状を示す。釣り合い軸力付近で軸力を変動させる場合は、非対称の性状が目立たない。

(2) 変動軸力の効果により、2軸曲げの相互作用がより複雑な挙動を示した。

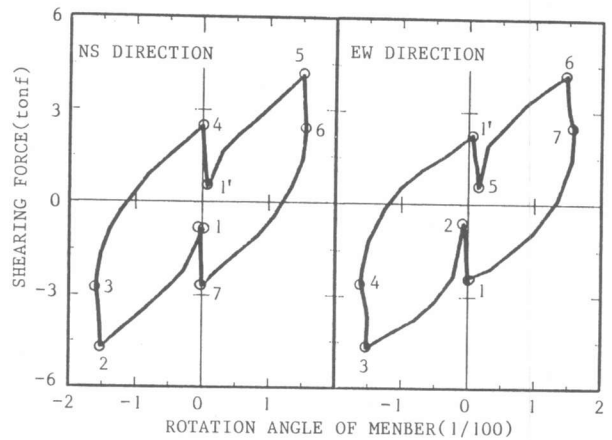
(3) 変動軸力と2方向の繰返し水平力を受ける鉄筋コンクリート柱は、一定軸力を受けるものまたは変動軸力と1方向の繰返し水平力を受けるものとは比して、最大耐力後の耐力低下、破壊の進展等が激しく、エネルギーの吸収能力が小さくなる傾向がある。軸力の変動幅が大きいくほど、その傾向が激しくなる。

#### 5. 謝辞

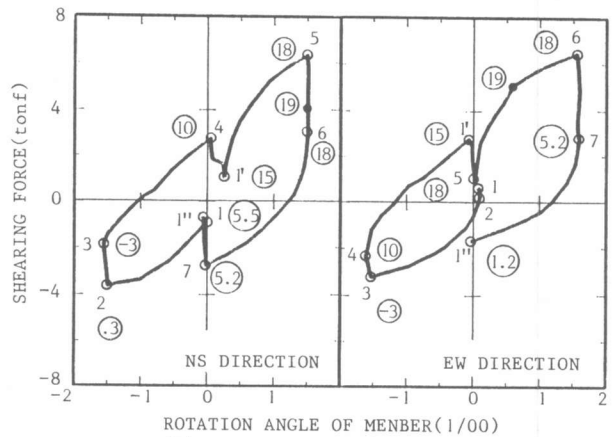
本研究の試験体の設計制作から実験の実施までは、東京大学工学部建築学科の細川洋治助手、同田才晃助手はじめ、青山研究室の大学院生諸氏、昭和六十年年度の卒論生諸君の多大な御協力により行なわれたもので厚く謝意を表します。

#### 6. 参考文献

- 1) 日本建築学会: 「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」、昭和57年6月。
- 2) 鈴木紀雄、青山博之: 「2軸曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の復元力特性(その1. 実験結果)」、日本建築学会、関東支部研究報告集、昭和55年、pp121~124。



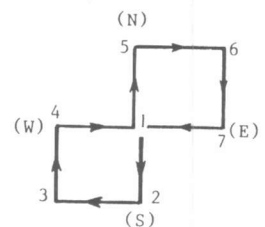
(a) SPECIMEN B8-0 (CYCLE 6)



(b) SPECIMEN B8-2 (CYCLE 5)

図5 軸力と2軸曲げの相互作用

(○内の数字は軸力を示す。単位 tonf)



(c) DISPLACEMENT PATH

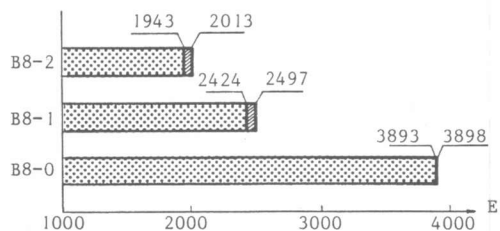


図6 吸収エネルギー (単位: tonf・mm)

■ 水平力によるエネルギー。 ▨ 軸力によるエネルギー。