

---

論文

Paper

# 横拘束鉄筋を有する鉄筋コンクリート正方形断面柱の 終局耐力と韌性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON ULTIMATE STRENGTH AND DUCTILITY OF  
REINFORCED SQUARE COLUMNS WITH CONFINING REINFORCEMENT

平澤 征夫\*・伊藤 光明\*\*・古澤 誠司\*\*\*

By Ikuo HIRASAWA, Mituaki ITO and Seiji FURUSAWA

An experimental study on the ultimate strength and ductility of reinforced square columns with confining reinforcement is described. Sixty specimens, each 200 mm square by 800 mm high, containing either 8 or 12 longitudinal steel bars and different arrangement of square or octagonal steel hoops, were subjected to concentric or eccentric loads to failure under uniaxial or biaxial bending. Other variables were the spacing of hoops and the eccentricities of loads. Based on the test results and analyses, new formulas are proposed for the ultimate strength and ductility of the columns with confinement subjected to uniaxial or biaxial bending. A new parameter which was defined, in this study, as the confining ratio of confining reinforcement ratio to the longitudinal reinforcement ratio was used in the formulas. As it is difficult to predict analytically ductilities of columns under biaxial bending, a simple design method is proposed.

**Keywords:** reinforced concrete column, ultimate strength, ductility, biaxial bending, confined concrete

## 1. はじめに

昭和61年10月より、わが国におけるコンクリート構造物の設計方法が、許容応力度設計法から限界状態設計法に移行した<sup>1)</sup>。これに伴って、その基礎となる終局限界状態に対する、より深い理解のための研究の必要性が生じている。特に従来、問題にされることが少なかった終局時の変形および韌性に対する研究が、より重要となってきている<sup>2)~7)</sup>。

鉄筋コンクリート（以下RCと略記）柱部材を横拘束鉄筋で補強する主目的は、耐震設計における部材の曲げ韌性およびせん断韌性を増加させることである。最近の構造物は高層化、大型化する傾向にあり柱部材にかかる軸力が高くなっている。すなわち、実際には自重が大きくなるため、部材をスレンダー化する必要があり、そのためには高強度コンクリートを使用する必要がある。その一方で、必要な耐力と韌性に対する安全性を確保しなければならないという問題が生じてきている。

本研究では、高強度コンクリートを用いて作製した横

拘束鉄筋を有する正方形断面柱の終局耐力および韌性に着目した実験を行い、まず従来から提案されてきた5つの代表的な応力-ひずみ曲線（以下 $\sigma$ - $\epsilon$ 曲線と略記）モデル<sup>8)~11)</sup>を取り上げて、実験値と解析値による終局耐力および韌性の比較を行う。また曲げモーメント-曲率曲線（以下M- $\phi$ 曲線と略記）から得られる曲率韌性率および面積韌性率（後述）により、韌性の定量化を試みる。さらに実験結果に基づいて、これまで補強効果の要因としては取り上げられていない横方向補強比（軸方向鉄筋比に対する横拘束鉄筋比の比で定義する）に着目した考察を行い、耐力と韌性を評価するのにこの横方向補強比を用いる方法を提案した。また正方形断面柱の2軸曲げ耐力と韌性を評価する方法も併せて提案した。

## 2. 耐力および韌性に関する解析方法

ここで取り扱った柱は、RC短柱であるので、その最大耐力および韌性の解析は、計算で求めた断面のM- $\phi$ 曲線によって行うこととする。したがって、M- $\phi$ 曲線を求めるには断面要素法を用いる。これは断面をまず載荷方向に直交する多数の小断面（100個）に分割し、それらをさらに軸方向鉄筋、拘束コンクリート、無拘束コンクリートの3要素に分割し合計126~136個に要素分割して解析する方法である。変化させる要因は、断面中

\* 正会員 工博 中部大学教授 工学部土木工学科  
(〒487 春日井市松本町1200)

\*\* 工修 中日本建設(株) (〒465 名古屋市名東区藤森2-286)  
\*\*\* 正会員 工修 新構造技術(株) (〒102 千代田区二番町12)

心のひずみと曲率とする。解析手順は、まず偏心距離を与える、次に断面中心のひずみおよびある曲率を与える、これらより上縁および下縁のひずみを計算する。さらに、その応力状態における軸方向力および曲げモーメントを計算し、ある曲率段階のモーメントと荷重の比が、与えた偏心距離に達するまで断面中心のひずみを変化させて計算を繰り返す。このようにして得たモーメントと曲率の連続した点を結び  $M-\phi$  曲線とする。また、この曲線のうち、求まった最大のモーメントを終局耐力とする。なおコンクリートおよび鉄筋の  $\sigma-\epsilon$  曲線には、それぞれのヤング係数を一定とする減力曲線をも仮定する。

本研究の解析に用いるコンクリートの  $\sigma-\epsilon$  曲線モデルとして、5種類を取り上げて実験結果と比較検討する。以下に各モデルの概要と特徴を簡単に述べる。

① J.S.C.E.<sup>1)</sup>：土木学会標準示方書に示されているもので、ピーク応力までは2次曲線、以後、終局ひずみ0.0035まではピーク応力を保つものとする。材料係数  $\gamma_c=1.0$  とする。終局ひずみを0.0035までと仮定するため、耐力の算定には適当であるが韌性の解析には適さないモデルである。

② Kent & Park<sup>8)</sup>：ピーク応力  $f'_c$ （コンクリート圧縮強度）までは2次曲線、軟化域は拘束程度に応じた勾配を有する直線でピーク応力の30%まで下降させ、以後は一定応力を保つとするもの。拘束効果による強度増加は考慮していない。初期のモデルであり、軟化域の勾配に特徴がある。一応韌性の評価が可能である。

③ Modified Kent & Park<sup>11)</sup>：②のモデルを拘束による強度増加を考慮するよう修正したモデル。強度増加係数を決めるパラメーターは理解しやすく、広範囲の拘束コンクリートに適用できる有用なモデルである。問題点としては横拘束鉄筋が降伏することを仮定して強度増加係数を求めるため、拘束鉄筋の強度が高いと過大評価となる傾向があることである。

④ Sheikh & Uzumeri<sup>10)</sup>：帯筋と軸方向鉄筋で囲むコアの「有効拘束面積」の概念を取り入れた強度増加型モデル。ピーク応力までは2次曲線、ピーク応力で平坦部を有し、軟化域はピーク応力の30%まで直線で下降し、以後一定の応力を保つとするものである。このモ

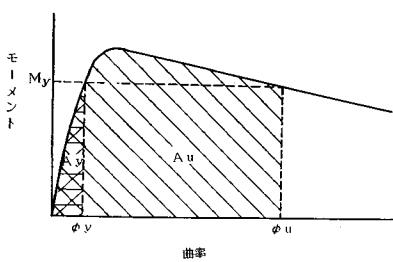


図-1 韌性の評価方法

ルでは、高強度コンクリートを用いた場合に平坦部の長さを決定するためのひずみの算定式に問題がある。

⑤ Vallenay<sup>9)</sup>：ピーク応力までは Sargin の連続関数式で表示し、軟化域に Kent & Park モデルの勾配を組み合わせて修正した強度増加型のモデルである。強度増加係数の算定に鉄筋径や軸方向鉄筋量も考慮している。拘束面積の算定には拘束鉄筋の内側を用いる。パラメーターが多く取扱いが複雑である。

### 3. RC 柱断面の韌性の定義

曲率韌性率 ( $R$ ) よび面積韌性率 ( $A$ ) を次式によって定義する。なお本論文では圧縮載荷を受ける軸方向鉄筋が、降伏ひずみに達したときの荷重に対するモーメント（以下  $M_y$  と略記）を基準とする。しかし比較のために最大荷重の80%および85%の荷重を受けたときのモーメントを  $M_y$  に設定した場合も併せて検討する（図-1 参照）。

表-1 1軸載荷実験における供試体の種類

供試体名	主鉄筋		拘束鉄筋		偏心距離 (cm)
	本数	直径 (mm)	形状	ピッチ (cm)	
HA10-8-0-0	8	10	—	—	0.00
HA10-8-0-3	8	10	—	—	3.33
HA10-8-4-0	8	10	A	4.5	0.00
HA10-8-4-1	8	10	A	4.5	1.67
HA10-8-4-3	8	10	A	4.5	3.33
HA10-8-4-5	8	10	A	4.5	5.00
HA10-8-9-0	8	10	A	9.0	0.00
HA10-8-9-1	8	10	A	9.0	1.67
HA10-8-9-3	8	10	A	9.0	3.33
HA10-8-9-5	8	10	A	9.0	5.00
HB10-12-0-0	12	10	—	—	0.00
HB10-12-0-3	12	10	—	—	3.33
HB10-12-4-0	12	10	B	4.5	0.00
HB10-12-4-1	12	10	B	4.5	1.67
HB10-12-4-3	12	10	B	4.5	3.33
HB10-12-4-5	12	10	B	4.5	5.00
HB10-12-9-0	12	10	B	9.0	0.00
HB10-12-9-1	12	10	B	9.0	1.67
HB10-12-9-3	12	10	B	9.0	3.33
HB10-12-9-5	12	10	B	9.0	5.00
HC10-8-0-0	8	10	—	—	0.00
HC10-8-0-3	8	10	—	—	3.33
HC10-8-4-0	8	10	C	4.5	0.00
HC10-8-4-1	8	10	C	4.5	1.67
HC10-8-4-3	8	10	C	4.5	3.33
HC10-8-4-5	8	10	C	4.5	5.00
HC10-8-9-0	8	10	C	9.0	0.00
HC10-8-9-1	8	10	C	9.0	1.67
HC10-8-9-3	8	10	C	9.0	3.33
HC10-8-9-5	8	10	C	9.0	5.00
HC10-12-0-0	12	10	—	—	0.00
HC10-12-0-3	12	10	—	—	3.33
HC10-12-4-0	12	10	C	4.5	0.00
HC10-12-4-1	12	10	C	4.5	1.67
HC10-12-4-3	12	10	C	4.5	3.33
HC10-12-4-5	12	10	C	4.5	5.00
HC10-12-9-0	12	10	C	9.0	0.00
HC10-12-9-1	12	10	C	9.0	1.67
HC10-12-9-3	12	10	C	9.0	3.33
HC10-12-9-5	12	10	C	9.0	5.00
HC16-8-4-1	8	16	C	4.5	1.67
HC16-8-4-3	8	16	C	4.5	3.33
HC16-8-4-5	8	16	C	4.5	5.00
HC16-8-9-1	8	16	C	9.0	1.67
HC16-8-9-3	8	16	C	9.0	3.33
HC16-8-9-5	8	16	C	9.0	5.00
HC16-12-4-1	12	16	C	4.5	1.67
HC16-12-4-3	12	16	C	4.5	3.33
HC16-12-4-5	12	16	C	4.5	5.00
HC16-12-9-1	12	16	C	9.0	1.67
HC16-12-9-3	12	16	C	9.0	3.33
HC16-12-9-5	12	16	C	9.0	5.00

表-2 各供試体別の軸方向鉄筋比と拘束鉄筋比

	軸方向鉄筋比	横拘束鉄筋比	横方向補強比
HA10-8-4	1.43 %	2.78 %	1.94
HA10-8-9	1.43	1.39	0.97
HB10-12-4	2.14	2.93	1.37
MB10-12-9	2.14	1.46	0.68
MC10-8-4	1.43	1.70	1.19
HC10-8-9	1.43	0.85	0.59
HC10-12-4	2.14	1.70	0.79
MC10-12-9	2.14	0.85	0.40
MC16-8-4	3.97	1.70	0.43
MC16-8-9	3.97	0.85	0.21
HC16-12-4	5.96	1.70	0.29
HC16-12-9	5.96	0.85	0.14

注： 橫方向補強比 =  $\frac{\text{横拘束鉄筋比}}{\text{軸方向鉄筋比}}$   
 橫拘束鉄筋比 =  $\frac{\text{横拘束鉄筋の体積}}{\text{柱断面積} \times \text{横拘束鉄筋ピッチ}}$

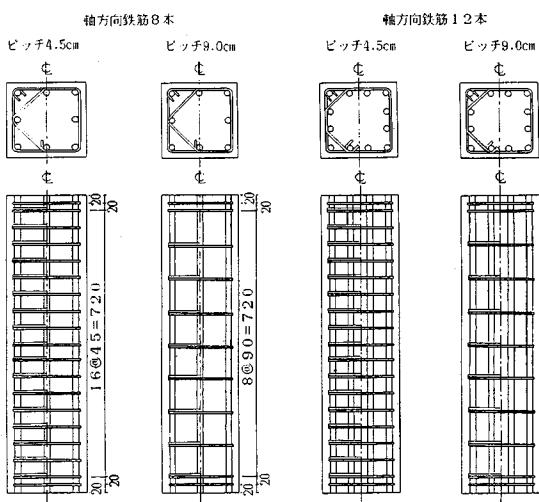


図-2 軸方向鉄筋と横方向鉄筋の配置 (単位:mm)

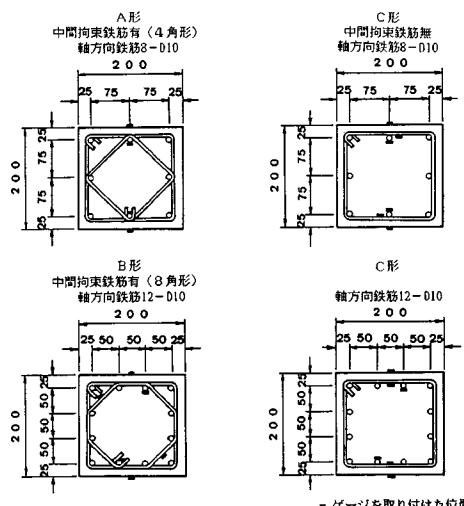


図-3 横拘束鉄筋の形状とひずみ測定位置 (単位:mm)

$$R = \frac{\phi_u}{\phi_y} \dots (1), \quad A = \frac{A_u}{A_y} \dots (2)$$

ここで、 $\phi_y$ : 軸方向鉄筋の降伏モーメント ( $M_y$ ) 時の曲率、 $\phi_u$ : 最大モーメント到達後、再び  $M_y$  となったときの曲率、 $A_y$ : モーメント-曲率曲線の  $\phi_y$  までの面積、 $A_u$ : モーメント-曲率曲線の  $\phi_u$  までの面積。

#### 4. 1 軸曲げを受ける RC 短柱の実験

##### (1) 実験的目的

本実験は1軸曲げを受けるRC柱の耐力および韌性に着目し、これらに及ぼす横拘束鉄筋の影響を調べる目的で行ったものである。

##### (2) 実験計画

実験は、表-1に示す次のような要因を変化させた52体の供試体について行う。

i) 中間横拘束鉄筋の有無

ii) 軸方向鉄筋比4種類(表-2参照)

iii) 横拘束鉄筋比6種類(表-2参照)

iv) 横拘束鉄筋形状3種類(図-2参照)

v) 荷重偏心距離4種類(0, 1.67, 3.33, 5.00 cm)

なお供試体記号名は次の約束とする。たとえば、HB10-12-4-3は、左からそれぞれH:高強度コンクリート、B:(拘束鉄筋形状)、10:(軸方向鉄筋直径)、12:(軸方向鉄筋本数)、4:(拘束鉄筋間隔)、3:(偏心距離)を示すものとする。

##### (3) 供試体

実験に用いた供試体寸法は全実験を通じて図-2, 3に示すように断面が20×20 cm、高さが80 cmのものである。使用コンクリートは、粗骨材の最大寸法を15

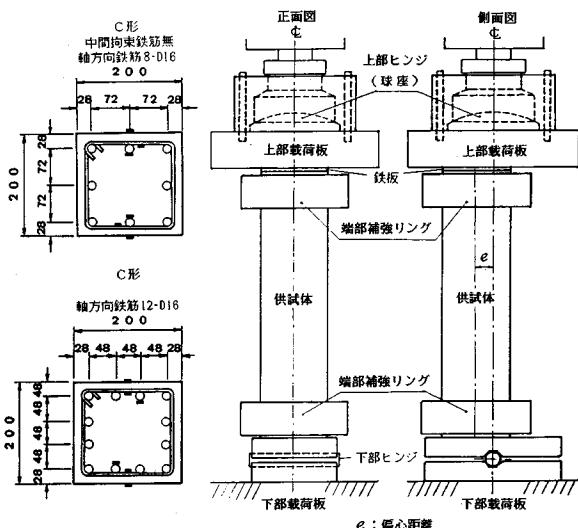


図-4 偏心載荷方法

mm とし、材令 28 日における目標圧縮強度を  $600 \text{ kgf/cm}^2$  の高強度コンクリートとした。

#### (4) 実験方法

載荷は中心軸圧縮載荷以外のものは、両端をヒンジとして行った。端部の局部破壊を防ぐための補強は、供試体上下端に鋼製の補強リングを、膨張セメントコンクリートで固定するという方法により補強を行った（図-4 参照）。

#### (5) 測定方法

測定方法は、供試体側面（偏心方向に垂直な 2 面）に取り付けた電気抵抗型変位計の測定値より供試体の曲率を計算で求めた（図-5 参照）。また軸方向鉄筋および横拘束鉄筋のひずみ、コンクリート表面ひずみを電気抵抗式ワイヤストレインゲージによって計測した。その計測位置を図-3 に示す。

#### (6) 実験結果

本実験により得られた耐力と韌性の結果をまとめて表-3 に示す。

### 5. 2 軸曲げを受ける RC 短柱の実験

#### (1) 実験の目的

本実験は 2 軸曲げを受ける RC 柱の耐力および韌性に着目し、これに及ぼす拘束鉄筋の影響を調べる目的で行ったものである。ただし、ここで行う実験は正方形断面の面に直交する主軸から  $45^\circ$  傾いた方向での偏心載荷実験であるので、厳密には 1 軸曲げと同じである。

#### (2) 実験計画

実験は、表-4 に示す次のような要因を変化させた 30 体の供試体について行う。

- 中間横拘束鉄筋の有無
- 軸方向鉄筋比 2 種類（表-5 参照）
- 横拘束鉄筋比 6 種類（表-5 参照）
- 横拘束鉄筋形状 3 種類（図-6 参照）

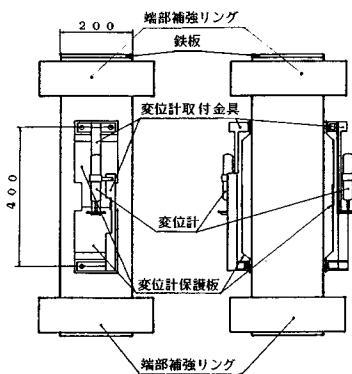


図-5 変位計による曲率の測定方法（単位：mm）

表-3 1 軸載荷実験の結果

供試体名	$A_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$A_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	降伏荷重 (t)	最大荷重 (t)	面積 率	曲率 率
HA10-8-0-0	4057	3426	661	222	270	-	-
HA10-8-0-3	4057	3426	717	156	220	3.06	1.79
HA10-8-4-0	4057	3426	704	191	295	-	-
HA10-8-4-1	4057	3426	546	173	268	39.05	17.47
HA10-8-4-3	4057	3426	546	139	225	31.08	13.70
HA10-8-4-5	4057	3426	704	113	181	27.79	10.92
HA10-8-9-0	4057	3426	696	222	300	-	-
HA10-8-9-1	4057	3426	589	130	195	31.72	14.25
HA10-8-9-3	4057	3426	589	123	168	26.84	13.32
HA10-8-9-5	4057	3426	696	114	164	25.68	11.97
HB10-12-0-0	4057	3426	640	233	320	-	-
HB10-12-0-3	4057	3426	495	155	200	2.66	1.72
HB10-12-4-0	4057	3426	588	217	315	-	-
HB10-12-4-1	4057	3426	679	185	290	52.51	21.10
HB10-12-4-3	4057	3426	679	125	210	86.42	35.72
HB10-12-4-5	4057	3426	588	106	150	26.81	12.00
HB10-12-9-0	4057	3426	441	162	207	-	-
HB10-12-9-1	4057	3426	563	120	240	39.16	14.63
HB10-12-9-3	4057	3426	563	150	228	58.65	23.39
HB10-12-9-5	4057	3426	441	86	128	33.60	14.86
HC10-8-4-0	3746	3454	701	217	316	-	-
HC10-8-4-1	3746	3454	657	178	256	46.38	22.54
HC10-8-4-3	3746	3454	657	170	206	10.79	6.29
HC10-8-4-5	3746	3454	652	118	163	16.81	7.92
HC10-8-9-0	3746	3454	652	212	280	-	-
HC10-8-9-1	3746	3454	689	164	247	99.01	39.17
HC10-8-9-3	3746	3454	689	129	196	25.53	11.71
HC10-8-9-5	3746	3454	701	105	157	19.41	9.03
HC10-12-4-0	3746	3454	592	237	320	-	-
HC10-12-4-1	3746	3454	587	190	277	87.85	34.01
HC10-12-4-3	3746	3454	587	135	205	27.37	12.66
HC10-12-4-5	3746	3454	592	122	181	18.23	8.85
HC10-12-9-0	3746	3454	608	212	288	-	-
HC10-12-9-1	3746	3454	608	171	216	15.65	8.42
HC10-12-9-3	3746	3454	637	138	190	12.66	6.76
HC10-12-9-5	3746	3454	637	106	156	12.95	6.55
HC16-8-4-1	3635	3454	613	168	228	25.40	13.06
HC16-8-4-3	3483	3454	589	132	171	16.78	8.58
HC16-8-4-5	3483	3454	619	111	140	19.85	10.53
HC16-8-9-1	3483	3454	578	158	222	12.20	6.83
HC16-8-9-3	3483	3454	589	168	194	5.23	3.57
HC16-8-9-5	3483	3454	647	103	129	12.08	6.94
HC16-12-4-1	3635	3454	613	200	270	27.78	13.20
HC16-12-4-3	3483	3454	578	154	210	20.46	10.71
HC16-12-4-5	3483	3454	657	172	184	3.24	2.61
HC16-12-9-1	3483	3454	603	174	242	21.51	10.17
HC16-12-9-3	3483	3454	657	194	199	7.88	4.75
HC16-12-9-5	3483	3454	619	137	158	1.50	3.85

ふ：軸方向鉄筋降伏強度  
ふ：横拘束鉄筋降伏強度  
だ：コンクリート圧縮強度  
面積比率および曲率比率の計算は、 $M_y$  が降伏荷重時の場合である。

表-4 2 軸載荷実験における供試体の種類

供試体名	主鉄筋		拘束鉄筋		偏心距離 (cm)
	本数 (根)	直径 (mm)	形狀	ピッチ (cm)	
RA 0-0-4-0	0	-	A	4.5	0.00
RA 0-0-9-0	0	-	A	9.0	0.00
RB 0-0-4-0	0	--	B	4.5	0.00
RB 0-0-9-0	0	-	B	9.0	0.00
RC 0-0-4-0	0	-	C	4.5	0.00
RC 0-0-9-0	0	-	C	9.0	0.00
RA10-8-4-1	8	10	A	4.5	1.67
RA10-8-4-3	8	10	A	4.5	3.33
RA10-8-4-5	8	10	A	4.5	5.00
RA10-8-9-1	8	10	A	9.0	1.67
RA10-8-9-3	8	10	A	9.0	3.33
RA10-8-9-5	8	10	A	9.0	5.00
RB10-12-4-1	12	10	B	4.5	1.67
RB10-12-4-3	12	10	B	4.5	3.33
RB10-12-4-5	12	10	B	4.5	5.00
RB10-12-9-1	12	10	B	9.0	1.67
RB10-12-9-3	12	10	B	9.0	3.33
RB10-12-9-5	12	10	B	9.0	5.00
RC10-8-4-1	8	10	C	4.5	1.67
RC10-8-4-3	8	10	C	4.5	3.33
RC10-8-4-5	8	10	C	4.5	5.00
RC10-8-9-1	8	10	C	9.0	1.67
RC10-8-9-3	8	10	C	9.0	3.33
RC10-8-9-5	8	10	C	9.0	5.00
RC10-12-4-1	12	10	C	4.5	1.67
RC10-12-4-3	12	10	C	4.5	3.33
RC10-12-4-5	12	10	C	4.5	5.00
RC10-12-9-1	12	10	C	9.0	1.67
RC10-12-9-3	12	10	C	9.0	3.33
RC10-12-9-5	12	10	C	9.0	5.00

表-5 各供試体別の軸方向鉄筋比と拘束鉄筋比

	軸方向鉄筋比	横拘束鉄筋比	横方向補強比
RA10-8-4	1.43 %	2.78 %	1.94
RA10-8-9	1.43	1.39	0.97
RB10-12-4	2.14	2.93	1.37
RB10-12-9	2.14	1.46	0.68
RC10-8-4	1.43	1.70	1.19
RC10-8-9	1.43	0.85	0.59
RC10-12-4	2.14	1.70	0.79
RC10-12-9	2.14	0.85	0.40

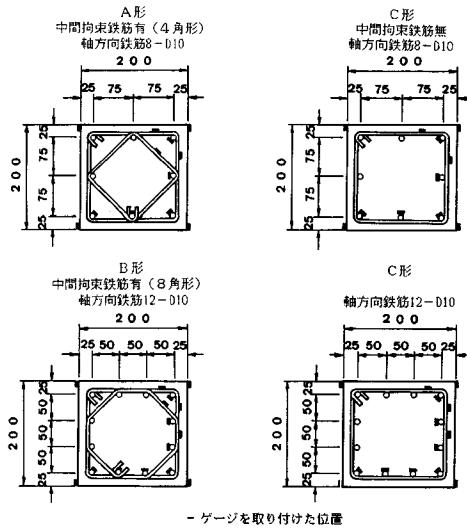


図-6 横拘束鉄筋の形状とひずみ測定位置（単位：mm）

v) 荷重偏心距離 4 種類 (0, 1.67, 3.33, 5.00 cm)  
供試体記号名は、頭文字を R (載荷方向 45°) とした以外 1 軸曲げ実験と同様である。

### (3) 供試体

1 軸曲げを受ける RC 柱の実験で用いたものと同じである。

### (4) 実験方法

偏心載荷方向を 45° 方向とした以外は、1 軸曲げ実験と同様である。

### (5) 測定方法

測定は、電気抵抗形変位計を供試体各側面 (4 面) に取り付けることにより供試体の曲率を測定した。また軸方向鉄筋および横拘束鉄筋のひずみ、外側コンクリート表面の縁ひずみを電気抵抗式ワイヤストレインゲージによって計測した。その計測位置を図-6 に示す。

### (6) 実験結果

本実験により得られた耐力と韌性の結果をまとめて表-6 に示す。

## 6. 1 軸および 2 軸曲げ実験の結果に対する考察

提案されている  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線モデルの適合性および実験

表-6 2 軸載荷実験の結果

供試体名	$\mu$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (kg/cm <sup>2</sup> )	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	塑性率 （%）	曲率 （曲率半径）
KA 0-0-4-0	—	2890	598	—	269	—	—
KA 0-0-9-0	—	2890	598	—	241	—	—
RE 0-0-4-0	—	2890	692	—	294	—	—
RE 0-0-9-0	—	2890	692	—	294	—	—
RC 0-0-4-0	—	2890	557	—	226	—	—
RC 0-0-9-0	—	2890	557	—	240	—	—
RA10-8-4-1	3617	2890	657	109	229	28.4	41.97
RA10-8-4-3	3617	2890	657	94	193	162.5	49.96
RA10-8-4-5	3617	2890	652	67	141	112.72	37.07
RA10-8-9-1	3617	2890	688	83	182	50.50	17.08
RA10-8-9-3	3617	2890	689	94	177	49.07	16.64
RA10-8-9-5	3617	2890	701	64	146	66.03	20.57
RE10-12-4-1	3617	2890	587	113	269	96.57	23.80
RE10-12-4-3	3617	2890	587	83	210	188.01	44.01
RE10-12-4-5	3617	2890	592	64	172	170.81	35.25
RE10-12-9-1	3617	2890	608	114	191	28.80	10.88
RE10-12-9-3	3617	2890	637	76	154	94.10	20.72
RE10-12-9-5	3617	2890	637	52	116	89.00	24.03
RC10-8-4-1	3617	2890	613	214	245	6.02	3.96
RC10-8-4-3	3617	2890	589	103	205	44.70	13.13
RC10-8-4-5	3617	2890	619	75	142	45.56	14.78
RC10-8-9-1	3617	2890	578	113	216	39.94	14.54
RC10-8-9-3	3617	2890	589	91	150	28.19	11.23
RC10-8-9-5	3617	2890	647	82	133	31.06	12.07
RC10-12-4-1	3617	2890	613	118	256	74.88	25.40
RC10-12-4-3	3617	2890	578	93	189	59.47	20.98
RC10-12-4-5	3617	2890	657	78	171	69.59	22.77
RC10-12-9-1	3617	2890	603	146	218	17.28	7.59
RC10-12-9-3	3617	2890	657	85	171	51.54	16.26
RC10-12-9-5	3617	2890	619	70	130	28.15	10.25

μ : 橫方向鉄筋降伏強度  
 σ<sub>u</sub> : 橫拘束鉄筋降伏強度  
 φ : コンクリート圧縮強度  
 プレヤリティ率および曲率塑性率の計算は、Myが降伏荷重時の場合である。

結果より得られる韌性率の評価を行う尺度の 1 つとして、本研究では横方向補強比（軸方向鉄筋比に対する横方向鉄筋比（記号 :  $C_r$ ）の比と定義する）を取り上げて検討、考察を行うものとする。

まず解析計算で得た最大耐力値に対する実験結果から得た最大耐力値の比と横方向補強比の関係を、 $\sigma$ - $\epsilon$  曲線モデル別に図-7 (1 軸載荷)、図-8 (2 軸載荷) に示す。図-7 に共通する傾向として、横方向補強比が高いほど耐力比が向上している点がある。しかし、図-8 は図-7 と異なり横方向補強比の増加に対する耐力比の改善は、あまり認められない。これは解析に用いた  $\sigma$ - $\epsilon$  曲線モデルによって 2 軸曲げを受ける部材の耐力を求めた場合の 2 軸曲げ耐力の推定に問題があり、2 軸曲げの場合の耐力の低下が見込まれていないためと考えられる。

次に実験結果より得られた  $M$ - $\phi$  曲線に基づき、前述の方法で求めた曲率塑性率と横方向補強比の関係を図-9 (1 軸偏心載荷の場合)、図-10 (2 軸偏心載荷の場合) に示す。まず、図-9、10 (a) の一般的傾向として、供試体の横方向補強比が大きいほど塑性率も増加することが認められる。しかし、これらの図の (b), (c) 図からは、塑性率の改善効果を明らかにするのは難しいと判断される。また図-9 (a) より、横拘束鉄筋形状が A と B のものを比較すると、B のものの中には横方向補強比の大きい A ( $C_r=1.94$ ) のものより塑性率の改善効果が大きいもの ( $C_r=1.37$ ) がみられる。1 軸曲げ (図-9 (a)) と 2 軸曲げ (図-10 (a)) を比較すると、1 軸曲げより 2 軸曲げの方が、横方向補強比による塑性率の改善は大きいことを示している。

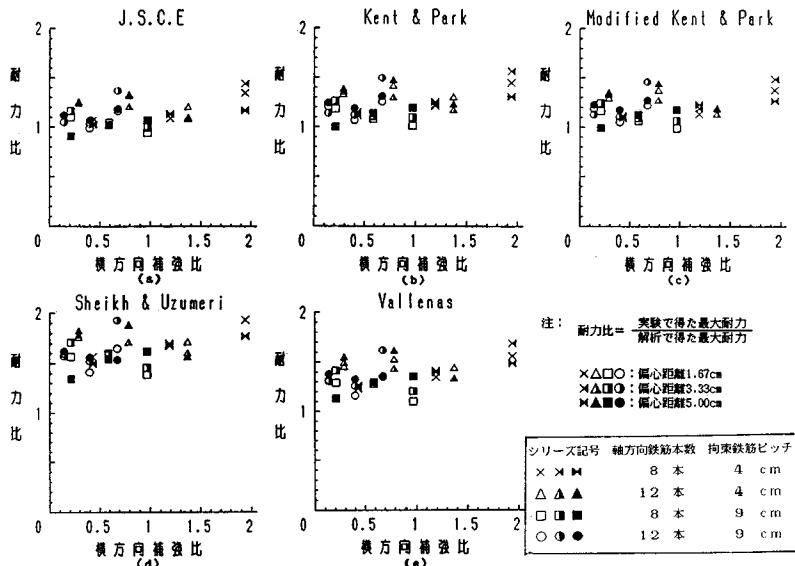


図-7 1軸載荷における耐力比と横方向補強比の関係

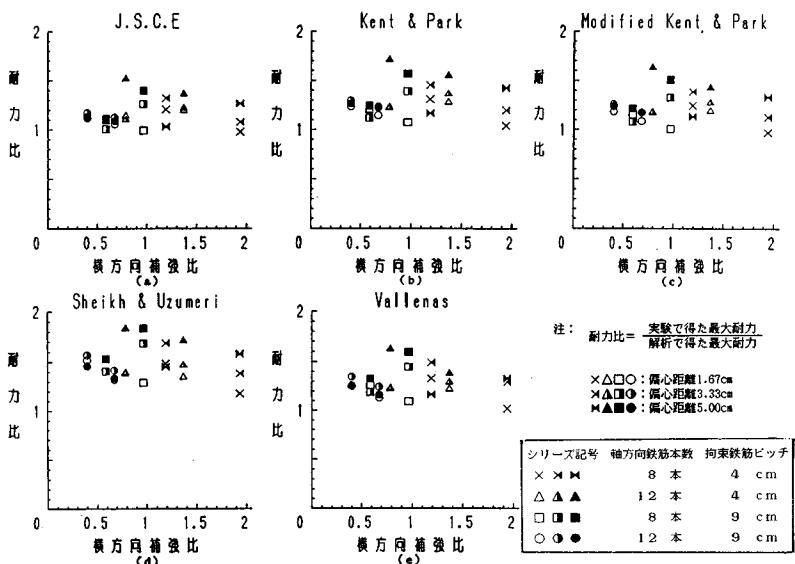


図-8 2軸載荷における耐力比と横方向補強比の関係

以上を含めて、この実験および解析結果から得た主な内容をまとめると次のようになる。

i) RC柱において横拘束鉄筋により耐力および韌性の改善を行う場合、横拘束鉄筋の必要量を従来のように横拘束鉄筋の公称径と配置間隔だけで求めるのは不十分であり、軸方向鉄筋量との関係で決定するのが妥当であろう。そこで新たな要因として横方向補強比を取り上げて検討することにした。

ii) しかし、横方向補強比が大きい供試体でも横拘束鉄筋の配置間隔が大きい場合(9 cm ピッチの場合)には、

軸方向鉄筋の座屈によるかぶりコンクリートの破壊を生じやすくなり、図-7 (a), (c) 中の横方向補強比 0.97 % の供試体 HA 10-8-9 のように、耐力の実験値が解析値を下回る場合も生じた。さらに、2軸曲げを受けた場合には、図-8 (a), (c) 中の横方向補強比 1.94 % の場合 (RA 10-8-4) のように、横方向補強比が大きく横拘束鉄筋間隔が小さい (4.5 cm ピッチ) 場合でも、解析値の耐力を下回るもののがみられた。この場合は軸方向鉄筋の座屈というよりはむしろ横拘束鉄筋の間隔が狭いことにより、かぶり部分の付着が弱くなったものと考え

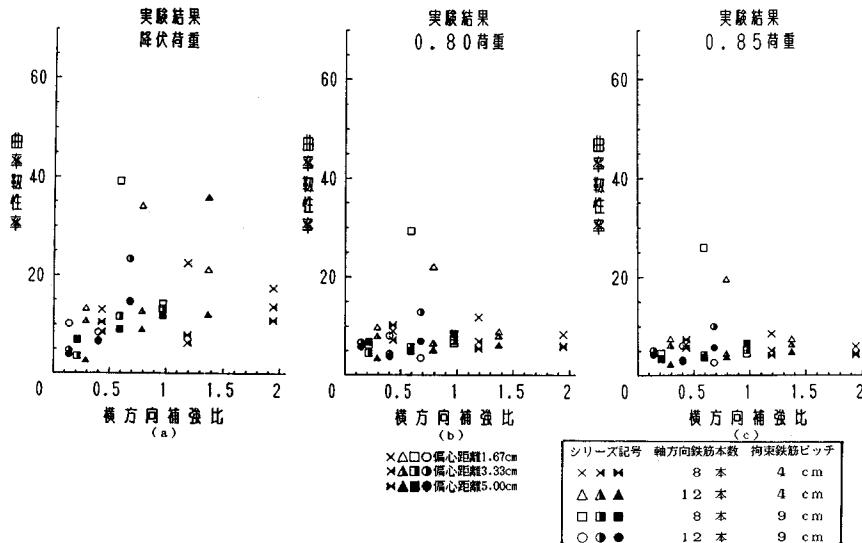


図-9 1軸載荷実験における曲率韌性率と横方向補強比の関係

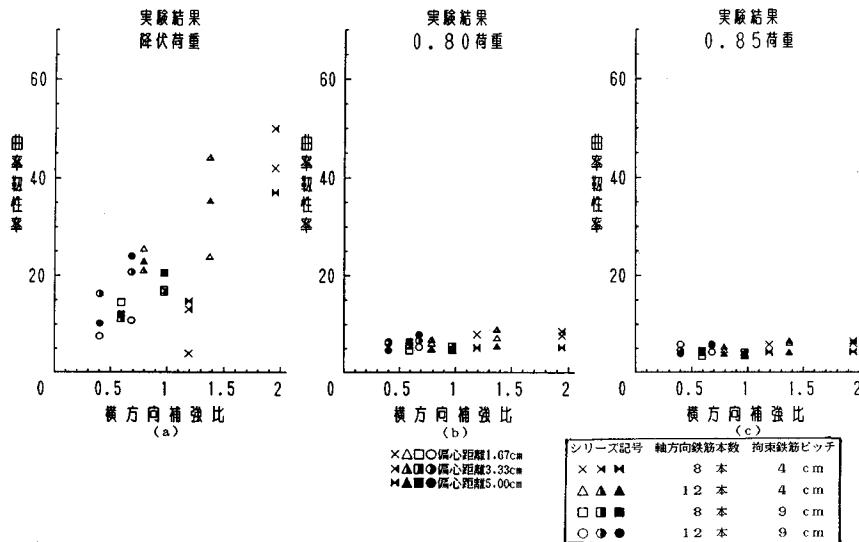


図-10 2軸載荷実験における曲率韌性率と横方向補強比の関係

られること、その他、拘束鉄筋強度が弱かったかあるいは拘束鉄筋の定着部分が弱かったなどの原因のために、偏心距離が小さい場合（圧縮破壊の場合）の耐力が十分に発揮できなかったと考えられる。

このようにRC柱の耐力に及ぼす横拘束鉄筋の配置間隔は、軸方向鉄筋の座屈を抑制する程度およびかぶり部分の付着を弱める程度に影響を与える重要な要因の1つと考えられる。

iii) 中間横拘束鉄筋を用いてRC柱の耐力および韌性の改善をさせるには、その配置形状をも考える必要がある。すなわち、まず軸方向鉄筋に対する横方向鉄筋量

を高めることが必要であるが、その際に中間横拘束鉄筋のコンクリート拘束面積を増加させることを念頭におくことが重要である。さらに、2軸曲げを受ける場合をも考慮するならば、2軸曲げ方向と中間横拘束鉄筋の配置形状との関係が耐力と韌性に影響することも考えなければならないであろう。

## 7. 拘束鉄筋を有する正方形断面柱の設計に関する提案

これまでの解析および実験結果に基づいて、高強度コンクリートを用いたRC柱における終局耐力および韌

性の特徴を考慮した実用的な設計を行うための一提案を行ふ。これは1軸および2軸偏心載荷を受けるRC柱の終局耐力の算定および靶性の定量化を目指すものである。

### (1) 柱断面の終局耐力

まず、中心軸載荷に対する偏心載荷の比を耐力低減係数とし、断面幅に対する比で表わした相対的な偏心位置を相対偏心比（記号：C）と定義して、1軸曲げと2軸曲げの実験を、べき乗回帰分析して得られた結果をそれぞれ図-11 (a), (b) 中に示す。さらに偏心方向による耐力減少は $0^{\circ}$ 方向のとき最小で、 $45^{\circ}$ 方向のとき最大になると考へて、その間は比例すると仮定すると図中の2式より、2軸曲げを受ける柱の耐力低減係数として次の関係式が得られる。

$$K_e = (0.352 - 0.075 \Theta)(C + 0.1)^{-0.466 + 0.101 \Theta} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\Theta$ ：偏心方向（ラジアン）( $0 \leq \Theta \leq \pi/4$ )、 $K_e$ ：偏心方向 $\Theta$ 、偏心比 $C$ のときの中心軸圧縮耐力に対する耐力低減係数。

次に図-12は、1方向載荷に対する2方向載荷の最大耐力比と相対偏心比の関係を表わしたものである。ここでは解析値を2次回帰曲線で表わし、実験値を1次回帰直線で表わした。

図-12より、実験値と比較的適合していると考えられるものは、J.S.C.E<sup>1)</sup>、Kent & Park<sup>8)</sup>および修正Kent & Park<sup>11)</sup>のものである。また、この図より2軸曲げを受けるRC柱の最大耐力を1軸曲げの値から簡単に推定するための近似式として直線式を仮定し、さらに $0^{\circ}$ から $45^{\circ}$ 方向に変化する最大耐力の減少程度も方向角度に比例すると仮定すれば、その関係を次式で表わすことができる。

$$K_r = -0.577 \cdot \Theta \cdot C + 1.0 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $\Theta$ ：偏心方向（ラジアン）( $0 \leq \Theta \leq \pi/4$ )、 $K_r$ ：偏心方向 $\Theta$ 、偏心比 $C$ のときの1軸載荷に対する2

### 軸曲げ耐力の低減係数。

なお本実験では最大偏心距離が5cmであるため、提案した式(3)および式(4)の適用範囲は、断面幅の1/4の偏心距離程度までと考えられる。

### (2) 柱断面の靶性の評価

偏心距離と横方向補強比および、曲率靶性率の関係を $M_y$ が降伏荷重の場合と0.80荷重（最大荷重の80%）について、それぞれ図-13, 14に示す。まず図-14(a)の $M_y$ は2軸曲げの場合の隅角部の軸方向鉄筋降伏時としたため、1軸曲げの場合に比べ比較的低い荷重レベルで $M_y$ に到達することになって、靶性率は大きめの値を示すことになり過大評価につながる危険性があると考えられる。次に図-13, 14の(b)は、偏心距離による靶性率の相違があまり認められない。さらに、横方向補強比の違いが靶性率に及ぼす影響を明確にすることも困難と考えられる。したがって靶性率の定量化にあたって最も適当な $M_y$ は、図-13(a)に示した1軸曲げの場合の降伏荷重時と考えられる。この考え方に基づいて、最大荷重に対する軸方向鉄筋降伏時の荷重の比と横方向補強比との関係を示すと図-15のようになる。この図より横方向補強比が大きいほど最大耐力に対する軸方向鉄筋降伏時の荷重レベルが、下降する傾向が明らかである。図中の式から2軸曲げは、1軸曲げより0.14~0.19程度低い耐力比を示すことが明らかとなった。このように2軸曲げの場合の $M_y$ は、1軸曲げの場合の $M_y$ と比べ、かなり小さくなるので、図-14(a)に示したように靶性率を過大に評価する傾向があると考えるのが妥当であろう。

次に1軸曲げの実験値に基づいた面積靶性率および曲率靶性率と横方向補強比の関係を図-16に示す。また、これらを対数回帰分析した結果は、次式となり図中の曲線で示したようである。

$$A_r = 27.33 + 15.05 \cdot \log_e(C_r + 0.2) \dots \dots \dots (5)$$

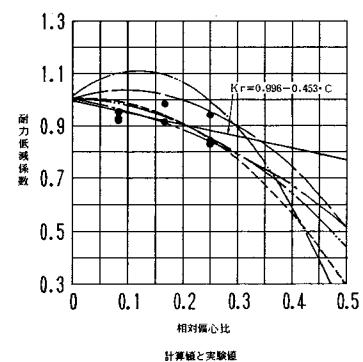
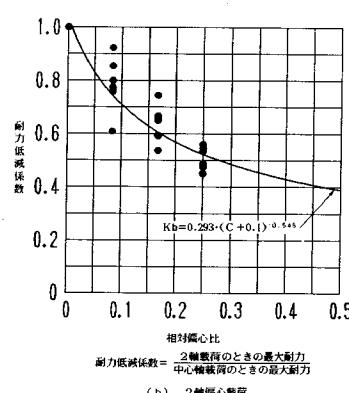
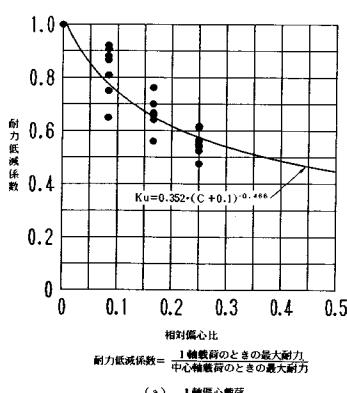


図-11 中心軸載荷に対する偏心載荷の耐力低減係数と相対偏心比の関係

図-12 1軸載荷に対する2軸載荷の耐力低減係数と相対偏心比の関係

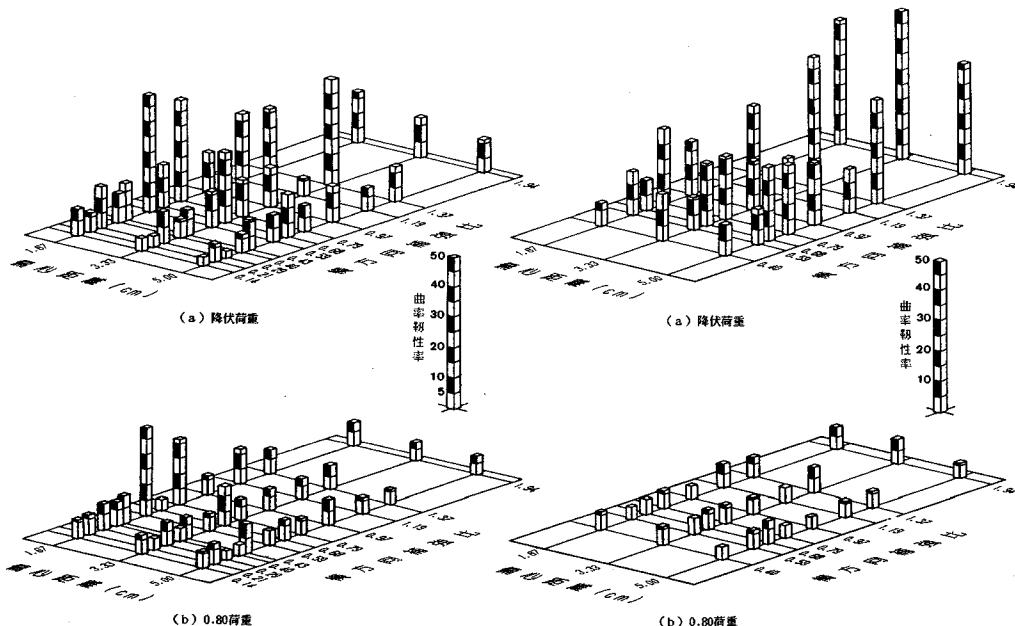
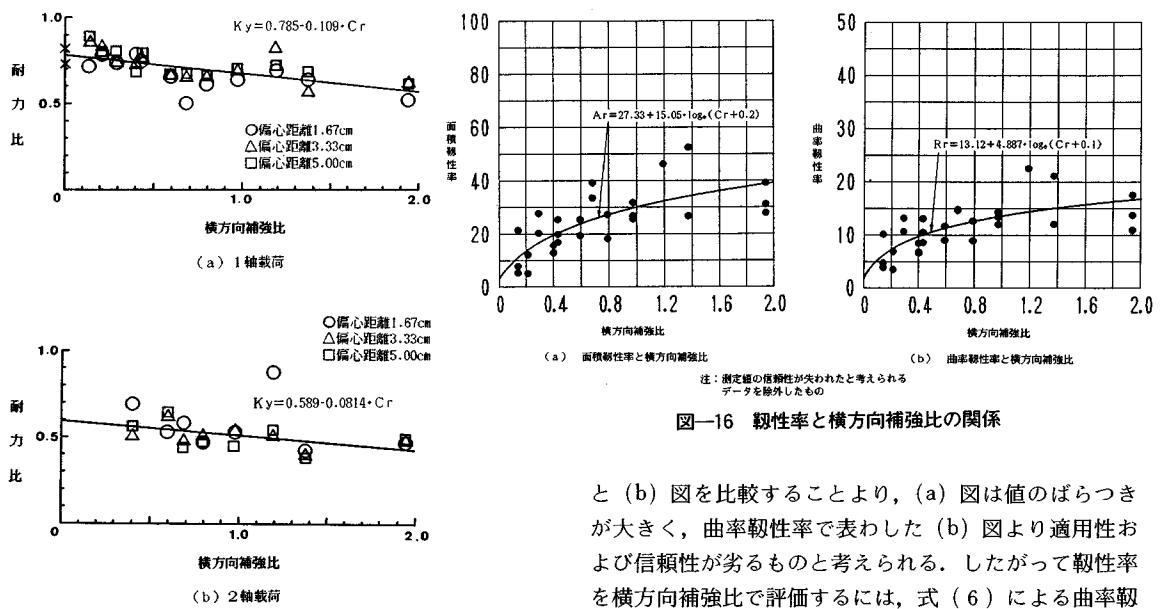


図-13 曲率韌性率と横方向補強比および偏心距離の関係：(1軸載荷)

図-14 曲率韌性率と横方向補強比および偏心距離の関係：(2軸載荷)



### 論心載荷を受ける供試体の最大耐力

$$B = 13.12 + 4.887 \cdot \log_e(C + 0.1) \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここで、 $A_r$ :面積韌性率、 $R_r$ :曲率韌性率。  
式(5)、式(6)によれば、高強度コンクリートを用いたRC柱断面の韌性率を横方向補強比により評価することが可能であると考えられる。さらに、図-16(a)

と (b) 図を比較することより, (a) 図は値のばらつきが大きく, 曲率韌性率で表わした (b) 図より適用性および信頼性が劣るものと考えられる。したがって韌性率を横方向補強比で評価するには, 式 (6) による曲率韌性率で表わすのが適当である。

次に、2軸曲げを受けるRC柱の韌性の評価は、前述のように過大となる傾向があることがわかったので、2軸曲げを受けるRC柱の韌性は、1軸曲げを受けるRC柱より劣ると考えて、その韌性率は、1軸曲げの韌性率に0.9を乗じて得られる韌性率を取るのが妥当であると考えられる。

## 8. まとめ

本研究は、高強度コンクリートを使用して、横方向鉄筋により拘束されたRC正方形短柱材が、1軸あるいは2軸偏心載荷を受けた場合の耐力と韌性に対する横拘束鉄筋の効果について実験的研究を行ったものである。特に、これまで考慮されなかった要因である横方向補強比(=横拘束鉄筋比/軸方向鉄筋比)を取り上げ、これによる耐力と韌性の定量化を試みたものである。以下に、本研究で得られた主な結論を総括する。

(1) 柱の終局耐力が軸方向鉄筋の座屈によって生ずる場合をも考慮すれば横拘束鉄筋の量は、軸方向鉄筋量との関係を考慮して決定するのが望ましいと考えられる。

(2) しかし、横方向補強比が大きい供試体でも、横拘束鉄筋の配置間隔が大きい場合、軸方向鉄筋の座屈に対する抑止力が改善されないため、そのようなRC柱の終局耐力および韌性は、期待するほどの増加を見込めないことは明らかである。したがって、横方向補強比で定量化する場合は、従来の柱の構造細目を満足することが前提条件となる。

(3) 中間横拘束鉄筋により終局耐力および韌性の改善を期待するのは、横方向補強比を大きくするだけではなく、コンクリート拘束面積が大きくなるように中間横拘束鉄筋の形状を考慮する必要がある。特に、2軸曲げを受ける場合には偏心方向と中間横拘束鉄筋の形状との関係が、耐力および韌性にも影響することを考慮する必要があると考えられる。

(4) 高強度コンクリートを用いた1軸および2軸偏心載荷を受ける正方形断面柱の終局耐力を比較的簡単に推定する式として、式(1)および(2)を提案する。ただし、その適用範囲は偏心距離が断面幅の1/4程度に制限される。

(5) 1軸偏心を受ける正方形断面柱の韌性の評価は、面積韌性率によるよりも曲率韌性率による方が適当であること、およびその基準とする曲率は軸方向鉄筋が降伏したときの曲率に基づくのが最も適当と考えられる。この考え方から従って、本実験の結果を曲率韌性率と横方向補強比の関係で対数回帰分析した結果、曲率韌性率として評価する式(4)を提案する。

(6) 2軸偏心を受けた場合の韌性の評価方法としては、1軸曲げの評価式(4)で求めた曲率韌性率に0.9を乗じることで表示する方法を提案する。

**謝 辞**：本研究は、1984～1986年度の中部大学工学部土木工学科平澤研究室で行った研究をまとめたものである。実験の遂行にあたり、ご協力頂いた林 克己技術員ならびにこの間、平澤研究室韌性班に在籍された卒業研究生諸氏に深く感謝致します。

なお本研究は、1984～1987年度の中部大学総合工学研究所研究費および昭和61、62年度文部省科学研究費、試験研究(1)，課題番号61850091(研究代表者：京都大学藤井 学教授)によって行ったものであることを、ここに付記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書：設計編(昭和61年度版)，土木学会。
- 2) 堀 孝司・角田与史雄・能町純雄：鉄筋コンクリート柱における帶鉄筋の拘束効果に関する実験的研究，土木学会論文集，第345号/V-2, pp.63～72, 1985年2月。
- 3) 藤井 学・阿河俊夫・本郷忠夫・宮花邦宏：過多鉄筋コンクリートばかりの横拘束鉄筋による韌性改善，土木学会論文集，第348号/V-1, pp.77～88, 1984年8月。
- 4) 平澤征夫・古澤誠司・伊藤光明：拘束鉄筋を有するRC柱部材の終局耐力と韌性に関する実験，土木学会第41回年次学術講演会概要集，V-24, pp.147～148, 1986年11月。
- 5) 伊藤光明・古澤誠司・平澤征夫：RC柱の終局耐力と韌性におよぼす横方向補強比の影響，土木学会第42回年次学術講演会概要集，V-103, 1987年9月。
- 6) Ersoy, U., Tankut, T. and Uzumeri, M. S. : Stress-Strain Relationship for Confined Under Cyclic Loading and Strain Gradient, 8WCEE, Vol. 6, pp. 569～576, July, 1984.
- 7) Sheikh, S. A. and Yeh, C. C. : Flexural Behavior of Confined Concrete Columns, ACI Journal, Vol. 83, pp. 384～404, May-June, 1986.
- 8) Kent, D. C. and Park, R. : Flexural Member with Confined Concrete, ASCE, Vol. 97, No. ST7, pp. 1969～1990, July, 1971.
- 9) Vallenás, J. : Concrete Confined by Rectangular Hoops and Subjected to Axial Loads, UCB/EERC-77/13, University of California, Berkley, August, 1977.
- 10) Sheikh, S. A. and Uzumeri, S. M. : Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 108, No. ST12, pp. 2703～2722.
- 11) Park, R., Priestley, M. J. N. and Gill, W. D. : Ductility of Square-Confining Concrete Columns, ASCE, Vol. 108, No. ST4, pp. 929～951, April, 1982.

(1988.4.5・受付)