

# 内部拘束鉄筋を有する鉄筋コンクリート短柱の 二軸曲げ終局耐力に関する実験と解析

平澤征夫\*・本山茂希\*\*・藤城正裕\*\*\*

本研究は RC 柱部材が 2 軸曲げ偏心荷を受けた場合の最大耐力と靱性におよぼす内部拘束鉄筋の拘束効果を調べるために行った実験結果と、3 種類の解析方法によって求めた耐力と靱性の計算結果を比較し、解析上の仮定の妥当性を検討した。その結果、有効拘束面積を帯鉄筋の外側までとし、応力～ひずみ曲線に Kent & Park の提案式を仮定し、断面要素分割法によって求める方法が最も適合性がよいことを示した。

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

## 1. はじめに

内部拘束鉄筋を有する鉄筋コンクリート柱（以下、RC 柱と略）が、2 軸曲げ偏心荷を受ける場合の終局耐力の算定において、内部拘束鉄筋の拘束効果を定量的に評価する方法については、いまだ説明されていない点が多く存在している。そのうちの基本的問題として、簡単にいえば単軸圧縮試験によって得られた種々の応力～ひずみ曲線の提案式が偏心荷の場合も適用できるかどうか、また 2 軸曲げ偏心荷に対してはどうかという問題がある。横拘束鉄筋の効果に関する初期の研究はすべて単軸圧縮試験で行われ、拘束鉄筋で囲まれた部分の 3 軸応力下のコンクリートの応力～ひずみ関係を、等価な 1 軸の応力～ひずみ関係で置き換えるためのものであった。その結果中心軸圧縮柱に関しては、種々の要因を考慮して耐力および靱性の増加を考慮した等価応力～ひずみ曲線が提案された。しかし、これを 1 軸偏心荷された柱に適用した場合には、断面内に中立軸が存在することも必ずしも耐力と靱性を正当に評価できないことは明白である。この場合の問題点は、従来の種々の提案式のうち適用可能なものはどれか、また、その場合の有効拘束面積の取り方は適当かなどである。さらに、2 軸曲げ偏心荷を受けた場合には内部拘束鉄筋の形状の影響をも考慮する必要があることが推定できる。この 2 軸曲げに関する検討は現在のところほとんど行われていないのが現状である。

従来の種々の提案式（Kent & Park, 修正 Kent & Park, Sheikh & Uzumeri など）を 1 軸曲げ偏心荷柱に適応した結果については Sheikh & Uzumeri 式より

も Kent & Park 式あるいは修正 Kent & Park 式が一般性があり、使用にあたっては簡便であることが既に明らかになっている<sup>1)</sup>。2 軸曲げ解析を行うにあたり、まず 1 軸曲げ解析に対しても有効な提案式を 2 軸曲げ解析に用いるべきであるとの観点から、本研究では、RC 柱がとくに 2 軸曲げ偏心荷を受けた場合の最大耐力や柱の靱性を解析する上で内部拘束鉄筋の形状の影響を考慮した応力～ひずみ曲線の仮定および拘束面積の取り方を明らかにする目的で行った実験と解析の結果について述べるものである。具体的には、3 種類の異なった解析方法によって終局耐力に対する従来の提案式による解析結果より拘束効果の影響を明らかにするとともに実験結果と比較してその適合性を検討し、柱の 2 軸曲げ設計に用いることができる応力～ひずみ曲線の仮定と拘束面積の取り方を提案するものである。

研究手法としては従来の提案式の適合性を実験と解析により検討する形をとっているが、2 軸曲げ偏心荷をうける RC 柱の内部拘束鉄筋の形状の違いおよび水平変位の影響を考慮した新たな解析手法を用いて、耐力と靱性の両方を考慮した場合の適合性を論じている点に本研究の新規性があると考えられる。また、最近の研究は、一般性を求めるあまりに要因を増し、不確定性を増大させる傾向がみられるが、一つ一つの事実の積み重ねによる地道な研究が実際の設計の目的には重要と考える。また、本研究は用いた供試体数は少ないが、比較的大型のものとしてデータの信頼性を増している点に特徴がある。

## 2. 横拘束鉄筋を有する RC 柱の 2 軸曲げ 偏心荷実験

### (1) 実験概要

本実験の目的は、横拘束鉄筋を有する RC 柱部材の内部拘束鉄筋の形状の違いが 1 軸曲げおよび 2 軸曲げ偏心荷された柱部材の終局耐力や靱性にどのような影響

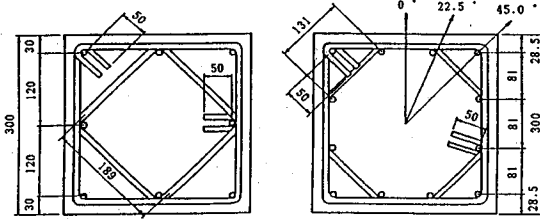
\* 正会員 工博 中部大学教授 工学部 土木工学科  
(〒487 春日井市松本町 1200)

\*\* 正会員 工修 愛知県津島土木事務所

\*\*\* 学生員 中部大学大学院 工学研究科 博士前期課程

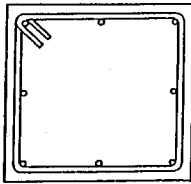
表-1 実験供試体種類

供試体名	軸方向鉄筋本数(本)	軸方向鉄筋直径(mm)	拘束鉄筋配置形状	軸方向鉄筋単位強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
A10-000 A10-225 A10-450	8	16		3451	396 425 391
SAL-000	8	16		3503	402
SBL-000 SBL-225 SBL-450	12	13		3952	391 415 414
SCL-000	8	16		3503	376
SDL-000	12	13		3952	404

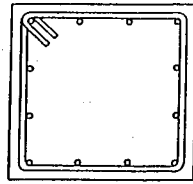


SAL-000 A10-000  
A10-225  
A10-450

SBL-000  
SBL-225  
SBL-450



SCL-000



SDL-000

単位: mm

図-1 (a) 供試体寸法, 配筋および荷重方向

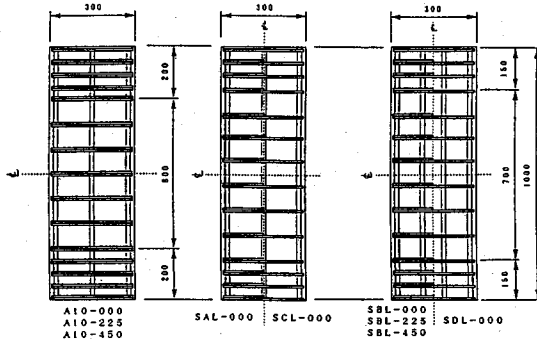


図-1 (b) 配筋方法

単位: mm

をおよぼすかを調べることにある。実験に用いた供試体の種類を表-1に示す。その供試体の寸法および配筋は図-1(a), (b)に示すように、軸方向鉄筋として四角形の内部拘束鉄筋を有するA10-000, 225, 450およびSAL-000(これらをAタイプ供試体と称す)には軸方向鉄筋としてD16mmを8本、八角形の内部拘束鉄筋を有するSBL-000, 225, 450(これらをBタイプと称す)にはD13mmを12本を用いており、いずれの場

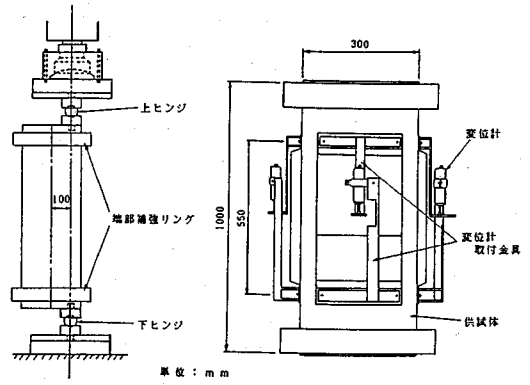


図-2 (a) 荷重方法 図-2 (b) 曲率の測定方法

表-2 実験結果 (昭和63年度)

フェイル名		A10-000	A10-225	A10-450
載荷方向		0°	22.5°	45.0°
コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		396	425	391
軸力	本数(本)	8	8	8
	直径(mm)	16	16	16
軸力	強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	3451	3451	3451
軸力	拘束鉄筋比	0.018	0.018	0.018
横鉄	直径(mm)	10	10	10
	強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	3776	3776	3776
横鉄	ピッチ(cm)	10	10	10
横拘束鉄筋				
体積比(ρ)		0.018	0.018	0.018
偏心距離(cm)		10	10	10
最大耐力	荷重(tf)	153.8	145.9	146.0
	E-μ(tf-m)	15.38	14.59	14.60
降伏時鉄筋の降伏強度(tf)	主引鉄	148	126	118
	筋圧縮	103	93	88
降伏時鉄筋の降伏強度(tf)	筋圧縮	148	146	146
	筋鉄筋	10.4	10.5	12.3
降伏率	ρ <sub>u</sub> (×10 <sup>-3</sup> rad)	108.3	110.8	149.9
	ρ <sub>y</sub> /ρ <sub>y</sub>	10.21	10.49	12.24
面積	A <sub>u</sub> (×10 <sup>3</sup> rad)	76.4	73.4	86.5
	A <sub>y</sub> (×10 <sup>3</sup> rad)	1387.0	1400.0	1897.0
比	A <sub>u</sub> /A <sub>y</sub>	18.16	18.07	21.33

表-3 実験結果 (平成2年度)

フェイル名		SAL-000	SBL-000	SBL-225	SBL-450	SCL-000	SDL-000
載荷方向		0°	0°	22.5°	45.0°	0°	0°
コンクリート強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		402	391	415	414	376	404
軸力	本数(本)	8	12	12	12	8	12
	直径(mm)	16	13	13	13	16	13
軸力	強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	3503	3952	3952	3952	3503	3952
軸力	拘束鉄筋比	0.018	0.017	0.017	0.017	0.018	0.017
横鉄	直径(mm)	10	10	10	10	10	10
	強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	3659	3659	3659	3659	3659	3659
横鉄	ピッチ(cm)	10	10	10	10	10	10
横拘束鉄筋							
体積比(ρ)		0.018	0.019	0.019	0.019	0.011	0.011
偏心距離(cm)		10	10	10	10	10	10
最大耐力	荷重(tf)	147.0	150.6	150.0	130.0	128.0	126.0
	E-μ(tf-m)	15.52	16.47	16.11	14.49	13.52	13.38
降伏時鉄筋の降伏強度(tf)	主引鉄	141	150	130	106	117	115
	筋圧縮	115	116	95	81	121	126
降伏時鉄筋の降伏強度(tf)	筋圧縮	146	150	149	130	127	90
	筋鉄筋	11.8	11.3	12.2	15.5	10.4	11.0
降伏率	ρ <sub>u</sub> (×10 <sup>-3</sup> rad)	103.3	142.0	154.2	197.2	89.0	71.3
	ρ <sub>y</sub> /ρ <sub>y</sub>	9.78	12.53	12.80	12.72	8.57	6.51
面積	A <sub>u</sub> (×10 <sup>3</sup> rad)	89.5	83.0	91.0	101.3	70.8	67.4
	A <sub>y</sub> (×10 <sup>3</sup> rad)	1302.3	1879.6	2039.9	2286.0	990.7	758.0
比	A <sub>u</sub> /A <sub>y</sub>	14.54	22.65	22.42	22.53	13.99	11.25

(\*) 荷重降下時

合も横拘束鉄筋にはD10mmを10cmピッチで配筋した。また、このA, Bタイプの供試体より内部拘束鉄筋のみを取り除いた配筋のものをそれぞれSCL-000(Cタイプ)およびSDL-000(Dタイプ)と名付けた。偏心距離はすべて10cmとし、SAL, SCL, SDL-000は

1軸曲げ偏心載荷, A10およびSBLシリーズは2軸曲げ偏心載荷も行い, その載荷方向を図-1(a)に示す3種類とした. また, 図-2(a), (b)に示す載荷方法および曲率の計測方法により合計9体の供試体で載荷実験を行った<sup>2), 3)</sup>.

(2) 実験結果

本実験の結果をまとめて表-2, 3に示す.

3. 内部拘束鉄筋を有するRC柱の2軸曲げ終局耐力に関する解析

本研究では, 内部拘束鉄筋の形状および載荷方向の違いなどの影響, さらに適用する従来の応力~ひずみ曲線の提案式の違いが, 各解析方法にどのような影響をおよぼすかを検討する. その結果より, 2軸曲げを受けるRC柱の最大耐力の増加や靱性の向上の予測計算を可能にする適切な解析方法を提案しようとするものである.

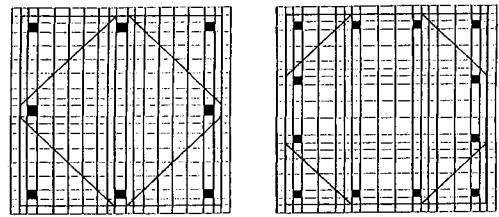
本研究では, まず以下に示す3通りの解析方法を用いて柱の耐力を求める. そして, その解析結果と実験結果とを比較し, その適合性を耐力比(=実験値/計算値), 靱性率, モーメント~曲率(以下 $M\sim\phi$ と略す)曲線を用いて検討する. また, すべての解析方法において耐力の算定に用いる応力~ひずみ曲線には従来からの3種類の提案式としてKent & Park, 修正Kent & Parkおよび土木学会の式を用いるものとする. ここでの解析に用いた計算方法は次の3つの方法とする.

3.1 従来の方法: 簡易法(中立軸の傾きを載荷方向と直角と仮定した簡易法)

3.2 提案方法1: 断面要素分割法(内部拘束鉄筋の形状の影響を考慮した方法)

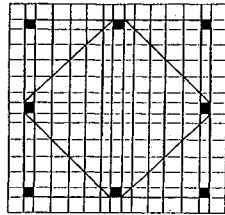
断面要素分割法の特徴は以下の3項目である.

- ① 柱の一断面を拘束鉄筋による拘束効果の度合いの違う領域に分け, その領域をさらに250~400個程度の小さな要素に分割する. また, その拘束効果の度合いの違う領域の境界線の取り方について拘束鉄筋の外側面, 拘束鉄筋の内側面(すなわち軸方向鉄筋の外側面)および軸方向鉄筋の内側面を境界線として, それぞれを外拘束, 中拘束および内拘束の3種類を提案し, その適合性を比較する. 図-3に解析に用いたAタイプおよびBタイプの断面の要素分割形状を示す.
- ② 分割した各要素を以下に示す3種類の拘束条件に分類し解析計算を行う.
  - 1) 無拘束: かぶり部分
  - 2) 一重拘束: 外拘束鉄筋と内部拘束鉄筋の間の部分
  - 3) 二重拘束: 内部拘束鉄筋の内側部分
- ③ 計算に用いるコンクリートの応力~ひずみ関係は, ②で分類した各要素の拘束の度合いに応じて異なった応力~ひずみ関係曲線を仮定して解析計算を行う. その解析に用いる具体的な応力~ひずみ関係式として従来

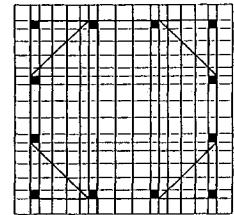


SAL-000 A10-000  
A10-225  
A10-450

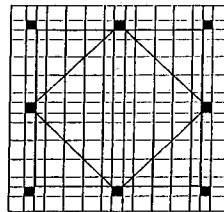
SBL-000  
SBL-225  
SBL-450



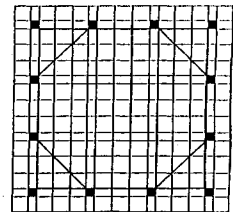
SAL-000 A10-000  
A10-225  
A10-450



SBL-000  
SBL-225  
SBL-450



SAL-000 A10-000  
A10-225  
A10-450



SBL-000  
SBL-225  
SBL-450

図-3 断面要素分割図

から提案されているつぎの3種類の提案式を用いるものとする.

a) 土木学会式<sup>4)</sup>: 土木学会標準示方書に示されているもので, ピーク応力までは二次曲線, 以後, 終局ひずみ0.0035まではピーク応力を保つものと仮定する. ただし, この式は耐力計算のみに使用するモデルであり, 変形や靱性の計算には別に下降域を含む曲線を仮定することになっている. ここで, あえてこの式を用いたのは無拘束の場合の変形と靱性の程度を示す指標とするためである. 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靱性の解析には適さないモデルである.

b) Kent & Park式<sup>5)</sup>: ピーク応力 $f'_c$ (コンクリート圧縮応力度)までは二次曲線, 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20%まで下降させ, 以後は一定応力を保つものとする. 拘束効果による強度増加は考慮していない. 初期のモデルであって, 軟化域の勾配に特徴がある. 靱性の評価が可能である.

c) 修正Kent & Park式<sup>6)</sup>: b)のモデルを拘束による強度増加を考慮するように修正したモデルである. 強

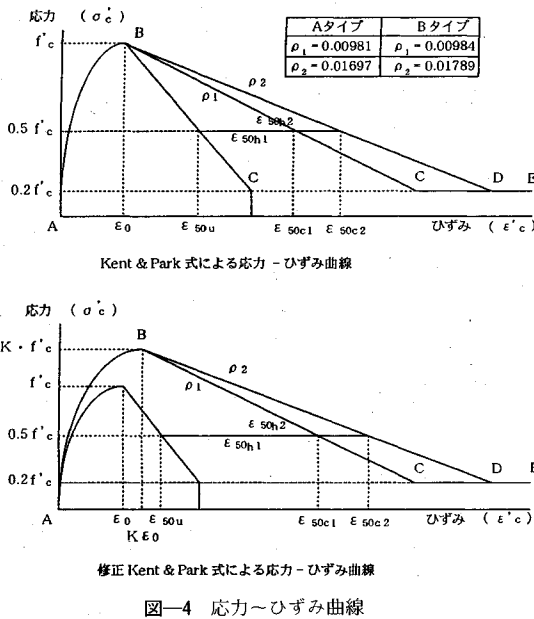


図-4 応力-ひずみ曲線

度増加係数を定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。

d) Sheikh & Uzumeri 式<sup>7)</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である。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%まで直線で降下し、以後一定の応力を保つとするものである。このモデルでは、高強度コンクリートを用いた場合に平坦部の長さ的决定するためのひずみの算定式に問題があるといわれている<sup>8)</sup>。

ただし a) の土木学会式の場合、拘束効果の違いは考慮しないが b), c) の場合、一重拘束部分と二重拘束部分との拘束効果の違いの影響は、横拘束鉄筋とコンクリート・コアとの体積比  $\rho (= A_s \cdot l_s / S \cdot W$ : ここで、 $A_s$ : 拘束鉄筋の断面積、 $l_s$ : 拘束鉄筋の中心の長さ (二重拘束は外側と内側の拘束鉄筋の和)、 $S$ : ピッチ、 $W$ : コア寸法) の違いによって考慮するものとし、具体的な違いは図-4に示すようになる。図-4中の  $\rho_1, \rho_2$  は、それぞれ次の拘束鉄筋比を示す。

$\rho_1$ :  $l_s$  に外側拘束鉄筋の長さを用いた場合の拘束鉄筋比

$\rho_2$ :  $l_s$  に外側および内部拘束鉄筋の長さを用いた場合の拘束鉄筋比

3.3 提案方法2: 水平変位を考慮した解析方法<sup>9)</sup> (断面要素分割法を進展させ柱の長さ方向にも15のセグメントに分割して解析する方法)

表-4 各荷重段階での繰り返し回数および  $\Delta P$  のとり方

荷重 P の範囲	繰り返し回数
$P < 0.5P_u$	10
$0.5P_u < P < 0.75P_u$	15
$0.75P_u < P < 0.9P_u$	20
$0.9P_u < P < 0.95P_u$	25
$0.95P_u < P$	30

供試体	0.5Pu以下	0.75Pu以下	0.9Pu以下	0.95Pu以下	0.95Pu以上
Aタイプ 0°	7800	3900	2300	800	500
Aタイプ 22.5°	7600	3800	2300	800	500
Aタイプ 45°	7300	3700	2100	800	500
Bタイプ 0°	7500	3700	2300	800	500
Bタイプ 22.5°	7500	4200	2200	1000	500
Bタイプ 45°	6500	3300	1900	700	500

単位: kgf

RC短柱を長さ方向に  $(2n+1)$  個のセグメントに分割し、各セグメントについて断面の解析を行い、荷重  $P$  に対する断面内のひずみを算定し、そのひずみより各断面の弾性荷重 (= 曲率) を決定する。つぎにこれらを用いて各セグメントに対する水平変位を計算し、偏心距離にこの変位を加えて次の計算での偏心距離とする。そして各セグメントにおける各断面要素のひずみより各要素の水平変位を再度決定し直す。この計算を適当な回数繰り返し、次の荷重段階 ( $P = P + \Delta P$ ) に移る。ここに、各荷重段階での繰り返し回数および  $\Delta P$  のとり方を表-4に示す。

各セグメントでの断面要素の分け方は断面要素分割法の場合と同様とし、各セグメント (長さ  $dH$ ) の中心での弾性荷重を  $M_i$  とすると  $i$  番目のセグメントの水平変位  $D_i$  は次式によって表わせる。

$$D_i = R \left( i - \frac{1}{2} \right) dH - \sum_{j=1}^i M_j (i-j) dH^2 - M_i \frac{dH^2}{8}$$

ここで  $R$  は、弾性荷重による反力で

$$R = \sum_{i=1}^n M_i dH + \frac{1}{2} M_{n+1} dH.$$

この方法で水平変位を考慮したRC短柱の最大耐力を計算する。ただし、この場合の最大耐力は徐々に荷重を上げた場合に水平変位が発散する直前の荷重とした。

#### 4. 解析方法と適合性の検討

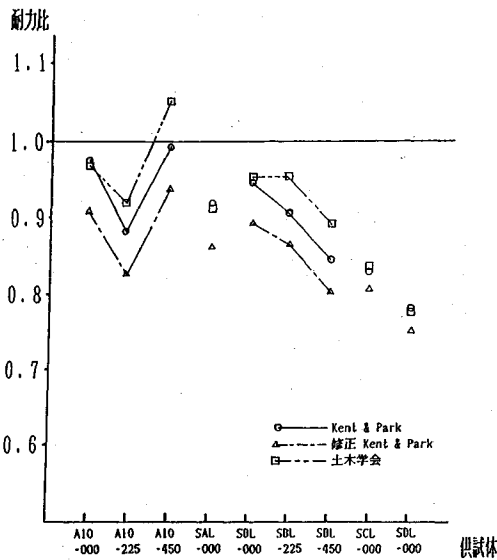
##### (1) 従来方法 (簡易法) による結果と考察

表-5に解析結果と実験結果を示し、図-5は表-5より求めた耐力比の値を図示したものである。解析結果より、ほとんどの場合の耐力比が1.0を下回っており、とくにSDL-000においては8割にも満たないものがある。これは実験により得られた耐力が全体的にやや小さめであったことに加え、柱耐力の計算において、シリンダー圧縮強度  $f'_c$  と実際の柱供試体強度との違いを考慮するための強度低減係数0.85を用いていないことが原因していると考えられる。また、載荷方向別にその解析

表—5 最大耐力による計算値と実験値との比較

	実験値	Kent & Park	修正 Kent & Park	土木学会
A10-000	163.8	158.1	170.0	158.7
A10-225	145.9	166.3	178.6	158.7
A10-450	145.9	147.1	156.4	138.9
SAL-000	146.8	160.1	171.5	161.0
SBL-000	150.4	158.8	168.7	158.3
SBL-225	149.2	165.2	174.0	157.2
SBL-450	130.1	153.7	161.6	145.6
SCL-000	128.0	154.0	159.3	153.1
SDL-000	126.0	161.4	166.5	162.2

(単位: t f)



図—5 供試体別耐力比

値の傾向をみると、四角形の内部拘束鉄筋を有する A10 シリーズおよび八角形の内部拘束鉄筋を有する SBL シリーズともに、Kent & Park 式および修正 Kent & Park 式を用いて計算した最大耐力は 22.5° 方向のものが最も大きな値を示していることがわかる。このことから、簡易法では 22.5° 方向で最も拘束効果が顕著に現れ、それが最大耐力に影響しているものと考えられる。その理由としては、拘束鉄筋の拘束効果を考慮していない土木学会式を用いて同じ解析方法によって求めた計算結果を載荷方向別にその傾向をみると、載荷方向が 0°, 22.5°, 45° 方向と大きくなるにつれて最大耐力の値は減少する傾向を示すことから明かである。

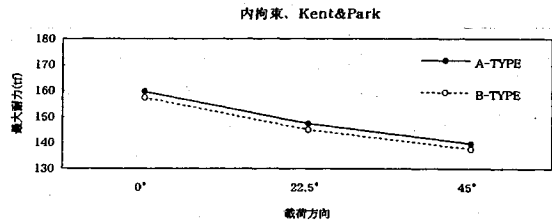
(2) 断面要素分割法による計算結果と考察

a) 最大耐力の比較 (統一の場合の計算値による)

表—6 に断面要素分割法によって求めた最大耐力の値を示し、図—6 に A タイプと B タイプの載荷方向の違いによる最大耐力の変化傾向の一例を示す。ただし、これらの計算値は入力する材料定数を同一の値 (一定値) を使用して、計算結果に材料特性の変動の影響が加わらないようにして比較したものである (以下統一の場合と

表—6 最大耐力 (統一の場合)

		A-TYPE			B-TYPE		
		S-K&P	K&P	土木学会	S-K&P	K&P	土木学会
外拘束	0°	171.6	162.7	157	171.5	159.9	153.8
	22.5°	158.3	150.5	142.3	158.2	148.1	140.9
	45°	151.1	144.4	136.3	150.2	140.6	133.7
中拘束	0°	165.2	160		165	157.7	
	22.5°	153	148.2		152.4	146.5	
	45°	145.7	140.8		144.4	138.9	
内拘束	0°	162.9	159.7		161.7	157.4	
	22.5°	150.2	147.4		149.2	145	
	45°	142.4	139.7		141.2	137.6	



図—6 最大耐力の比較 (統一の場合)

称する)。この結果から解析手法の影響、計算に使用する提案式の違い、さらに拘束面積 (拘束効果が有効に発揮される面積) の取り方の違いによる最大耐力への影響を検討する。

まず、載荷方向別に最大耐力の値の変化をみると 0°, 22.5°, 45° 方向の順で低い値を示している。また、その耐力の低下率は、0° 方向から 22.5° 方向への耐力の低下率が約 8~9% であり、22.5° 方向から 45° 方向への低下率が約 5~6% とやや少なく、0° 方向から 45° 方向への低下率は 13~15% となることわかる。これは、解析手法が、一重拘束、二重拘束あるいは無拘束のように、拘束効果の違いを考慮した方法であるため、0° 方向の場合に内部拘束鉄筋の拘束効果が効率よく発揮されたと考えられ、0° 方向から 22.5° 方向への耐力の低下率が大きくなると考えられる。

つぎに、内部拘束鉄筋の形状の違いによる最大耐力の値を比較すると、四角形の内部拘束鉄筋を有する A タイプの方が八角形の内部拘束鉄筋を有する B タイプのものよりほとんどの場合で、1% 前後高い値を示している。このように、二重拘束面積が大きい B タイプの方が小さな値を示した理由としては、軸方向鉄筋比が B タイプ ( $A_s = 15.204 \text{ cm}^2$ ) よりも A タイプ ( $A_s = 15.880 \text{ cm}^2$ ) の方がわずかに大きく、この違いが最大耐力に影響したのと考えられる。したがって、この軸方向鉄筋比の影響を考慮すれば、ここで用いた計算方法による限り計算値におよぼす内部拘束鉄筋の形状の影響はほとんど認められないといえよう。

b) 最大耐力の解析値と実験値の比較 (断面要素分割法による)

表—7 (a) に材料の実測値を入力して求めた最大耐力の値を示す。表—7 (b) は、表—7 (a) より求めた

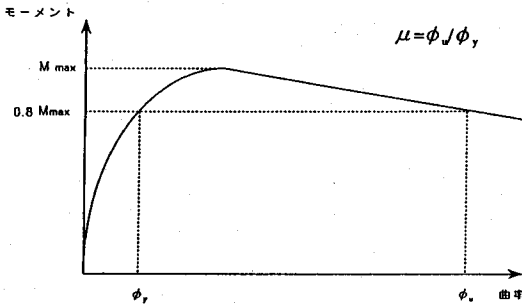
表一七 (a) 最大耐力による計算値と実験値との比較

	実験値	修正 Kent&Park			Kent&Park			土木学会
		内	中	外	内	中	外	
A10-000	153.8	161.7	163.9	170	159	158.4	161.1	154.9
A10-225	145.9	155.8	158.4	163.7	153.1	153.8	156.5	149.2
A10-450	145.9	140.1	143	148.6	137.5	138.5	141.6	133.7
SAL-000	146.8	163.8	165.8	172.1	161.1	160.6	163.3	157.1
SBL-000	150.4	161.9	164.7	171.1	157.5	157.8	160.1	155
SBL-225	149.2	155.3	158.7	164.3	151.2	152.7	155.6	148.6
SBL-450	130.1	147.3	150.6	156.7	143.8	145.1	148.5	140.3
SCL-000	128	154.8	157.4	163.5	152.1	152.7	155.9	149.1
SDL-000	126	164.2	166.2	180.6	161.3	161.6	166.3	165.4

(単位: t・f)

表一七 (b) 耐力比 (実験値/計算値)

	修正 Kent&Park			Kent&Park			土木学会
	内	中	外	内	中	外	
A10-000	0.95	0.94	0.90	0.97	0.97	0.95	0.99
A10-225	0.94	0.92	0.89	0.95	0.95	0.93	0.98
A10-450	1.04	1.02	0.98	1.06	1.05	1.03	1.09
SAL-000	0.90	0.89	0.85	0.91	0.91	0.90	0.93
SBL-000	0.93	0.91	0.88	0.95	0.95	0.94	0.97
SBL-225	0.96	0.94	0.91	0.99	0.98	0.96	1.00
SBL-450	0.88	0.86	0.83	0.90	0.90	0.88	0.93
SCL-000	0.83	0.81	0.78	0.84	0.84	0.82	0.86
SDL-000	0.77	0.76	0.70	0.78	0.78	0.76	0.76

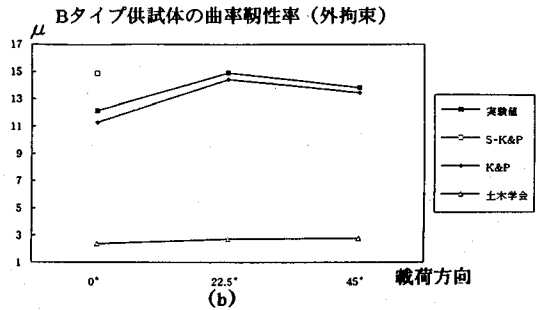
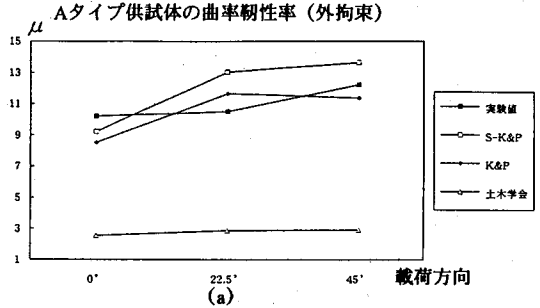


図一七 曲率靱性率の定義

耐力比の値を示している。表一七 (b) より、断面要素分割法による計算値と実験値との適合性は、ほとんどの値が 1.0 を下回っているが、これは簡易法の場合と同様にシリンダー強度を柱供試体強度に変換するための強度低減係数 0.85 を考慮していないためであると考えられる。拘束面積の取り方の違いによる影響は、拘束効果を考慮した Kent & Park 式および修正 Kent & Park 式を用いた場合は、仮定した拘束面積の取り方を外、中、内拘束のように拘束面積を小さくとるほど耐力比の値は 1.0 に近づき、各提案式別にみた値の差も小さくなって行くことがわかる。この結果より、拘束鉄筋による拘束面積を小さく仮定するにしたがって拘束効果の影響による最大耐力の増加量が少なくなり、計算値が小さくなって耐力比の値は 1.0 に近づくことがわかる。このように、最大耐力のみの比較からは拘束面積の取り方は内拘束と

表一八 靱性率による計算値と実験値との比較

	実験値	修正 Kent & Park			Kent & Park			土木学会		
		内	中	外	内	中	外	内	中	外
A10-000	10.21	3.17	5.07	9.23	2.99	3.98	8.53	—	—	2.56
A10-225	10.49	4.08	8.90	13.03	3.62	6.71	11.64	2.88	2.81	2.88
A10-450	12.24	4.37	9.18	13.66	3.88	7.08	11.38	2.94	2.91	2.93
SAL-000	9.08	3.14	4.98	9.32	3.04	4.13	8.67	2.46	2.45	2.47
SBL-000	12.14	—	8.31	14.91	2.97	5.58	11.27	—	—	2.37
SBL-225	14.92	5.76	8.71	—	4.34	8.90	14.44	—	—	2.71
SBL-450	13.85	5.77	11.66	—	4.41	8.97	13.48	—	—	2.79



図一八 曲率靱性率の実験値と計算値の比較 (外拘束の場合)

するのがよいといえよう。しかし、後述の靱性率をも考慮すれば必ずしも内拘束が最適であるとはいえない。

c) 靱性率の比較

従来、靱性率の評価については多くの研究者によって数多くの実験的研究が実施されているが、具体的な数値やその背景について明確な説明がなされていない。よって本研究では図一七に示すように  $M-\phi$  関係より最大モーメント  $M_{max}$  の 80% ( $=0.8 \cdot M_{max}$ ) 時の  $\phi_u$  と  $\phi_y$  を定義し、それらの比によって曲率靱性率  $\mu (= \phi_u / \phi_y)$  を定義する。

表一八にこのようにして求めた靱性率の値を示す。表より、拘束面積の取り方を内、中拘束とした場合は実験値に適合していないことが明らかであるので、図一八に拘束面積の取り方を外拘束とした場合について計算値と実験値を比較して示す。この図は、載荷方向と 3 種類の提案式の比較である。実験値と解析値の適合性は、図一八 (a) より、四角形の内部拘束鉄筋を有する A タイプの場合は、外拘束を仮定し Kent & Park 式を用いた計算値が実験値と最も近い値を示している。載荷方向別にみる靱性率の値の変化傾向は 22.5° 方向において実験値より計算値の方がやや大きな値を示し、同じ傾向を示し

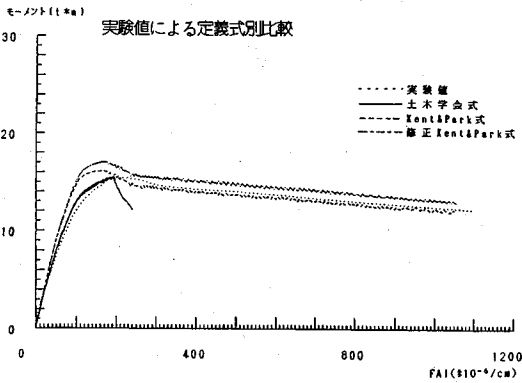


図-9 (a) モーメント～曲率曲線 (A 10-000, 外拘束)

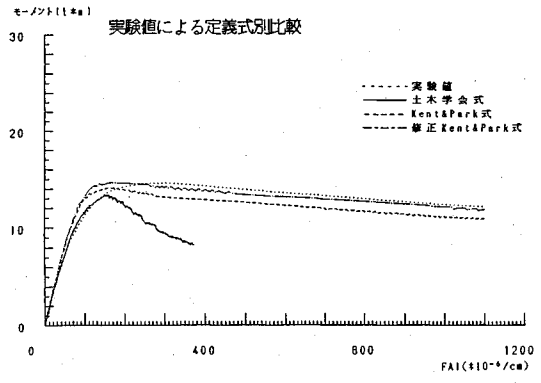


図-9 (c) モーメント～曲率曲線 (A 10-450, 外拘束)

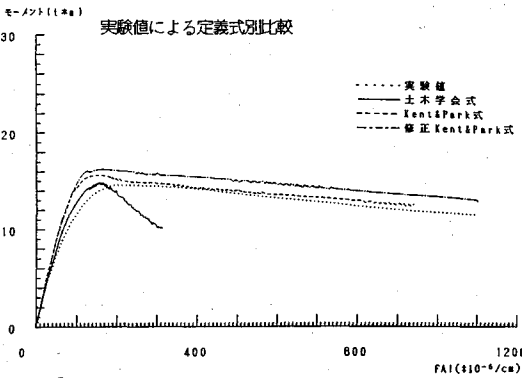


図-9 (b) モーメント～曲率曲線 (A 10-225, 外拘束)

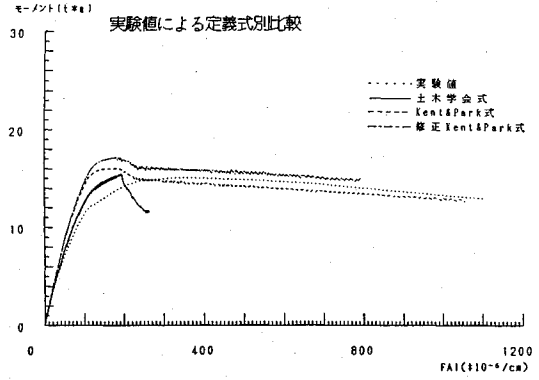


図-9 (d) モーメント～曲率曲線 (SBL-000, 外拘束)

ているとはいえないが、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$  方向に関しては実験値より計算値の方が下回っていることがわかる。

また、図-8 (b) より、八角形の内部拘束鉄筋を有する B タイプの場合は、外拘束を仮定し Kent & Park 式を用いた場合が最も適合していることが明かである。載荷方向別にみた靱性率の値の変化傾向も実験値と一致しており、柱の靱性を推定するには十分であるといえる。

したがって、最大耐力のみでなく曲率靱性率も含めて柱の耐力を推定する場合には、拘束面積の境界線として拘束鉄筋の外側面とする外拘束を仮定し、計算に使用する提案式としては Kent & Park 式を用いることが適当であると判断できる。

d) モーメント～曲率曲線の比較

図-9 に A 10 シリーズおよび SBL シリーズの供試体を用い、拘束面積の取り方を外拘束とした場合の提案式別にみた  $M-\phi$  曲線を示す。

まず、四角形の内部拘束鉄筋を有する A 10 シリーズについては、図-9 (a) より、A 10-000 で最大耐力までのモーメントの増加傾向を良く表現しているのは土木学会式であり、最大耐力以降の減少傾向を良く表現しているのは Kent & Park 式であることが明らかである。つぎに、A 10-225 の場合は図-9 (b) より、A 10-000

の場合と同様な傾向を示している。A 10-450 は図-9 (c) より、最大耐力までのモーメントの増加傾向を良く表現しているのは土木学会式であり、最大耐力以降の減少傾向を良く表現しているのは修正 Kent & Park 式であるといえる。

つぎに、八角形の内部拘束鉄筋を有する SBL シリーズについては、図-9 (d) より、SBL-000 で最大耐力までのモーメントの増加傾向を良く表現しているのは土木学会式であり、最大耐力以降の減少傾向を良く表現しているのは Kent & Park 式である。また図-9 (e) より、SBL-225 は SBL-000 の場合と同様である。さらに図-9 (f) より、SBL-450 は最大耐力までのモーメントの増加傾向を十分に表現できる提案式は認められないが、最大耐力以降の減少傾向を良く表しているのはやはり Kent & Park 式であることがわかる。

以上の結果をまとめると、

① 最大耐力までのモーメントの増加傾向を十分に表現しているのは土木学会式である。

② 靱性率から得られた結論と  $M-\phi$  曲線より得られた結論とを総合すると、断面要素分割法による耐力および靱性の算定には、拘束面積を外拘束とし、応力～ひずみ関係に Kent & Park 式を仮定した場合が適当であ

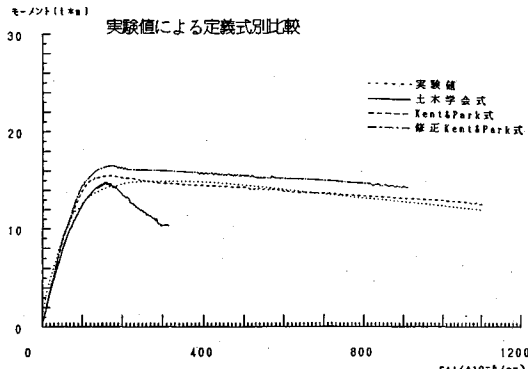


図-9 (e) モーメント～曲率曲線 (SBL-225, 外拘束)

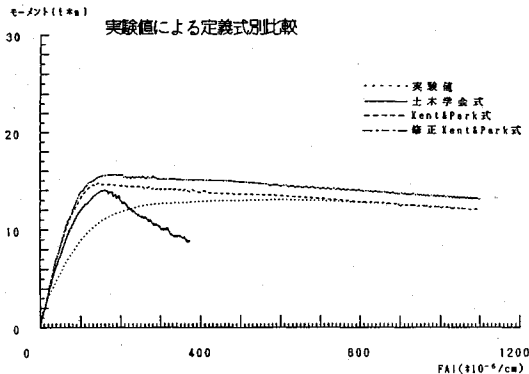


図-9 (f) モーメント～曲率曲線 (SBL-450, 外拘束)

ることがわかる。

(3) 水平変位を考慮した解析方法による解析結果と考察

a) 最大耐力の比較 (統一の場合の計算値による)

表-9は柱の水平変位を考慮した解析法により、内部拘束鉄筋の形状、コンクリートの応力～ひずみ関係に対する提案式、拘束面積の取り方を変えて載荷方向別に求めた最大耐力の値を示したものである。また、図-10はこの結果のうち四角形の内部拘束鉄筋を有するAタイプと八角形の内部拘束鉄筋を有するBタイプの載荷方向の違いによる最大耐力の変化を図示したものである。ただし、この値は断面要素分割法のとときと同様にすべての場合の入力値として一定値を使用し、計算結果に材料特性の変動の影響が加わらないようにして比較している。

表-9および図-10より、0°方向から22.5°方向への耐力の低下率は約6～8%、22.5°方向から45°方向への低下率はすべての場合で4～5%とやや少ない値を示している。すなわち、0°方向から45°方向への低下率は10～13%となっている。つぎに、内部拘束鉄筋の形状の違いによる最大耐力の値を比較すると、四角形の内部拘束鉄筋を有するAタイプの方が八角形の内部拘束鉄

表-9 最大耐力 (統一の場合)

		A-TYPE			B-TYPE		
		S-K&P	K&P	土木学会	S-K&P	K&P	土木学会
外	0°	165.5	157.5	154.5	164	155.5	151
拘	22.5°	153.5	147	142.6	153	144.5	141
束	45°	146.5	140.5	137	146	138	134.5
中	0°	162.5	158		162	156	
拘	22.5°	151.5	147		151	145	
束	45°	145	140.5		144	139	
内	0°	160.5	158		160	155	
拘	22.5°	149.5	147		148	144.5	
束	45°	142.5	140		141.5	138.5	

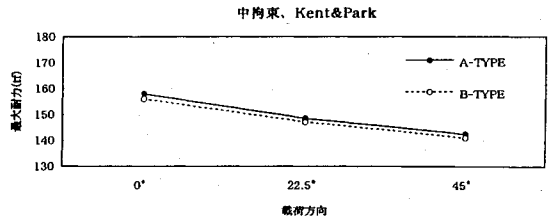


図-10 最大耐力の比較 (統一の場合)

表-10 (a) 最大耐力による計算値と実験値との比較

	実験値	修正 Kent&Park			Kent&Park			土木学会
		内	中	外	内	中	外	
A10-000	153.8	169.5	162	164.5	166.5	156.5	156	153
A10-225	145.9	155.5	157	159.5	152.5	152.5	152.5	148
A10-450	145.9	141.5	143	145.5	138	138	138	134.5
SAL-000	146.8	161.5	164	166.5	158.5	158.5	158.5	155
SBL-000	150.4	159.5	163	165.5	155	156	155.5	153
SBL-225	149.2	154.5	157.5	159.5	150.5	151	150.5	148
SBL-450	130.1	148	150.5	152.5	144	144.5	144	141
SCL-000	128	153.5	155.5	157.5	151	151	151	148
SDL-000	126	161.5	163.5	166	158.5	159	158.5	157

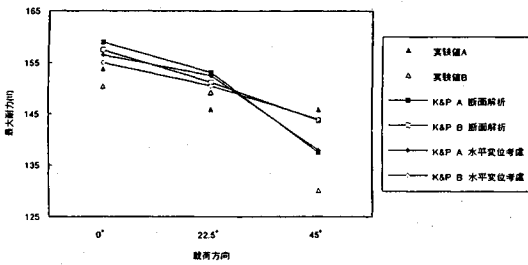
(単位:tf)

表-10 (b) 耐力比 (実験値/計算値)

	修正 Kent&Park			Kent&Park			土木学会
	内	中	外	内	中	外	
A10-000	0.96	0.95	0.93	0.98	0.98	0.99	1.01
A10-225	0.94	0.93	0.91	0.96	0.96	0.96	0.99
A10-450	1.03	1.02	1.00	1.06	1.06	1.06	1.08
SAL-000	0.91	0.90	0.88	0.93	0.93	0.93	0.95
SBL-000	0.94	0.92	0.91	0.97	0.96	0.97	0.98
SBL-225	0.97	0.95	0.94	0.99	0.99	0.99	1.01
SBL-450	0.88	0.86	0.85	0.90	0.90	0.90	0.92
SCL-000	0.83	0.82	0.81	0.85	0.85	0.85	0.86
SDL-000	0.78	0.77	0.76	0.79	0.79	0.79	0.80

筋を有するBタイプのものよりほとんどの場合で、1～2%程度高い値を示している。これも、4.(2)で述べた断面要素分割法の場合と同様に軸方向鉄筋比が影響しているものと考えられる。また、表-9のKent & Park式による耐力では、外、中、内の拘束効果の違いが顕著に現れていないことがわかる。その理由は、Kent & Park式の最大荷重を示した時のひずみの大きさが2500～3000μ程度であり、図-4から明らかなようにこのひずみの大きさまでではKent & Park式の場合は拘束面積の違いが現れないためである。





図—11 最大耐力の比較 (A, B タイプ別)

b) 最大耐力の解析値と実験値の比較

表—10 (a) に材料の実測値を入力して求めた最大耐力の値を示す。表—10 (b) は耐力比 (= 実験値 / 計算値) を示している。この表 (b) より、水平変位を考慮した計算値と実験値との比は、ほとんどの値が 1.0 を下回っていることがわかる。この理由は、従来の数多くの実験結果に基づいた土木学会式による計算結果<sup>10)</sup>と本実験の結果との耐力比よりわかるように、本実験結果が全体的にやや小さめの値を示しているものと判断できる。これは、本実験に用いた供試体断面の大きさが比較的大きいことに起因していると考えられる。

拘束面積の取り方の違いによる影響は、拘束効果を考慮した修正 Kent & Park 式を用いた場合は、仮定した拘束面積の取り方を外、中、内拘束と拘束面積が小さくなるにつれて耐力比の値は 1.0 に近づき、各提案式別の差も小さくなっていくことがわかる。また、この場合の Kent & Park 式において拘束効果が現れていないのは、上述 a) と同じ理由によるものである。

(4) 断面要素分割法と水平変位を考慮する方法による解析結果の比較

一定値を入力して求めた両解析方法による最大耐力の値を比較すると、A, B タイプにかかわらず、0° 方向及び 22.5° 方向の場合は水平変位を考慮した解析法による値の方が 1~4% 小さく得られ、45° 方向の場合には両解析方法による値はほとんど一致していることがわかる。また、材料の実測値を入力して求めた表—7 (b) と表—10 (b) の耐力比の値で実験値と計算値との適合性を見ると、0° 方向及び 22.5° 方向の耐力比は、水平変位を考慮する方法によるものの方がわずかではあるが適合性がよく、45° 方向の場合では、いずれの解析方法が適合しているのか判断しがたい。すなわち、図—11 に示した最大耐力の実験値と解析値の比較より明らかなように、B タイプの 45° 方向の実験値が予想以上に小さかったことから、この実験の結果に問題があったと考えられるからである。

5. 実験と解析における問題点と今後の課題

図—11 より、A, B タイプ別の内部拘束鉄筋の形状

の影響が現れ、荷重方向による違いがみられる。しかし、実験に用いた供試体が少なく、またコンクリート強度の変動の影響も考えられるので、他の場合もこのような傾向を示すとはいえない。今後さらに多くの実験により定量化する必要がある。つぎに、本研究で扱った柱は細長比が 11.55 であり、比較的柱長が短いので、断面要素分割法と水平変位の影響を考慮した場合の両解析法の差が顕著に現れなかった。今後はより長い柱について、水平変位を考慮した解析法の適用性を検討するとともに、さらにねじりの影響をも考慮することが必要となろう。また、今後要素分割法による解析を進展させて特に 2 軸曲げを受ける場合は圧縮域が長方形でないための隅角部の応力集中を考慮することも可能となろう。

6. 結 論

本研究は RC 柱部材が 2 軸曲げ偏心荷重を受けた場合の最大耐力と靱性におよぼす内部拘束鉄筋の拘束効果を調べるために行った実験の結果と、3 種類の解析方法によって求めた最大耐力と靱性の計算結果を比較し、解析上の仮定の妥当性を検討した。得られた主な結論を以下に示す。

(1) 断面要素分割法による計算値最大耐力は荷重方向によって変化し、断面の対称軸方向を 0° 方向とすれば 22.5°, 45° 方向への低下率はそれぞれ 8~9%, 13~15% となった。内部拘束鉄筋の形状の違いは四角形より八角形の方が 1% 前後の耐力の低下が認められた。しかし、軸方向鉄筋比の違い (四角形タイプの方が 0.1% 大きい) を考慮すれば、ほとんど差は認められない。

(2) 水平変位を考慮して求めた断面の最大耐力は、荷重方向によって変化し、0° から 22.5°, 45° 方向への低下率はそれぞれ 6~8% および 10~13% となった。内部拘束鉄筋の形状の違いは断面要素分割法の場合と同様に認められなかった。

(3) 断面要素分割法と水平変位を考慮した場合の計算値を比較した結果、内部拘束鉄筋の形状の違いに関係なく、0° 方向と 22.5° 方向に関しては断面要素分割法による方が 1~4% 大きくなり、45° 方向はほぼ同じ値を示した。

(4) 有効拘束面積の取り方と応力~ひずみ曲線の仮定を変化させて、断面要素分割法によって求めた靱性率および M~φ 関係曲線の計算結果を実測値と比較した結果 (表—8, 図—8, 図—9) より、有効拘束面積を帯鉄筋の外側までとし、用いる応力~ひずみ曲線に Kent & Park の提案式を仮定した場合が、最大耐力および靱性率に対してはよい適合性を示すことが明かとなった。

参 考 文 献

1) 平澤征夫・伊藤光明・古澤誠司：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靱性に関する実験的研究, 土木学会論文集第 408 号/V-11, pp. 21~30, Aug., 1989.
- 2) 平澤征夫・古澤誠司・山内篤: 横拘束鉄筋を有する RC 柱の二軸曲げ偏心耐力, 土木学会第 44 回年次学術講演会概要集, V-210, pp. 474~475, Oct., 1989.
  - 3) 本山茂希・平澤征夫・河野伊知郎: RC 短柱の二軸曲げ偏心耐力に及ぼす内部拘束鉄筋形状の影響評価, 土木学会第 47 回年次学術講演会概要集, V-367, pp. 764~765, Sep., 1992.
  - 4) 土木学会: コンクリート標準示方書: 設計編 (平成 3 年度版), 土木学会, pp. 21~22, 1991.
  - 5) Kent, D. C. and Park, R. : Flexural Member with Confined Concrete, ASCE, Vol.97, No.ST7, pp.1969~1990, Jul., 1971.
  - 6) Park, R., Priestley, M. J. N and Gill, W. D. : Ductility of Square-Confined Concrete Columns, ASCE, Vol.108, No.ST4, pp.929~951, Apr., 1982.
  - 7) 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.
  - 8) 堺 孝司・角田与史雄・能町純雄: 鉄筋コンクリート柱における帯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, Feb., 1985.
  - 9) 岡田 清: 最新コンクリート工学, オーム社, pp. 118~121, 1986.
  - 10) コンクリート・ライブラリー第 61 号, コンクリート標準示方書: 改訂資料, 土木学会, pp. 152~163, Oct., 1986.

(1993. 5. 27 受付)

## THE TEST AND ANALYSIS ON THE ULTIMATE STRENGTH OF SHORT COLUMNS WITH CONFINING REINFORCEMENT UNDER BIAXIAL BENDING

Ikuo HIRASAWA, Sigeki MOTOYAMA and Masahiro FUJISHIRO

Main object of this study is to estimate the shape effects of internal hoops on ultimate capacity of the R/C column under biaxial bending. Nine specimens, each 300 mm square by 1,000 mm high, containing either 8 or 12 longitudinal steel bars and different arrangements of square or octagonal steel hoops, were tested under uniaxial or biaxial eccentric loads.

From the results of the test and analysis, it is found that the analytical values calculated by Element Division Method agree well with that of experiments, and the formula proposed by Kent & Park is the most applicable to estimate the ultimate strength and ductility for biaxial bending.