

## 論文

## [2078] RC部材における中間主筋の座屈性状に関する実験的研究

大矢廣之\*<sup>1</sup>・加藤大介\*<sup>2</sup>

## 1. まえがき

日本建築学会の鉄筋コンクリート(RC)造建物の終局強度型耐震設計指針(学会指針)[1]では、主筋の座屈防止の観点からの横補強筋の配筋規定が定められている。この規定は、ニュージーランドのコンクリート構造設計基準(NZS3101)[2]を参考にして、主に主筋の座屈防止の観点から定められている規定であるが、「拘束されている主筋から200mm以内にある主筋を除き、全ての主筋を拘束する」というものであり、これらの構造規定の考え方やその背景は曖昧である。

筆者らは、座屈防止筋の設計法を確立することを目的とし、正方形横補強筋により拘束されたRC角柱試験体(全主筋4本)の一方向単軸圧縮実験を行い、隅角部の主筋の座屈歪度の評価式を提案してきた[3]。さらに、実際の設計において重要となる隅角部以外の中間の主筋の効果を検討するために、中間主筋が断面1辺に1本ある場合(全主筋8本)の一方向単軸圧縮実験を行った[4]。この結果、中子筋に拘束されない中間主筋が1本ある場合、全主筋に対する平均的な横拘束筋の効果は、横補強筋による拘束効果が全主筋に平均的に作用すると考えてよいこと、および、中子筋に拘束される中間主筋が1本ある場合には、中子筋の効果を外周の横補強筋の効果の1.6~2.7倍として評価してよいことが分かった。

本報告は、正方形横補強筋および副帯筋により拘束されたRC角柱試験体(主筋12本)の一方向単軸圧縮実験を行い、断面1辺に2本中間主筋が有る場合にも、文献[4]の結論が適用できるかどうかを検討したものである。特に、副帯筋の有無を主要なパラメータとしている。

## 2. 中間主筋の単調載荷座屈実験

## 2.1 実験概要

主筋の座屈を考える際に、主筋の径の他に横補強筋の径と間隔および中子筋あるいは副帯筋の有無が重要な因子となる。本節ではこの観点から主筋と横補強筋の配筋法をパラメータにした実験を計画した。表-1に計画した試験体名を主筋と横補強筋の配筋法別に示す。主筋の配筋法は3通り(内1つは主筋の無いものと考えている4- $\phi$ 4あるいは12- $\phi$ 4)を想定した。横補強筋は径と間隔について4通りとし、それぞれについて副帯筋の有無をパラメータとして計8通り想定した。以上の24通りのうち20体の実験を行った。試験体の名前は、例えば12D10D6S70Iは、主筋にD10を12本、横補強筋にD6を用い間隔を70mmとし、副帯筋(Interior Hoop)を用いたものを意味する。同図には使用した鉄筋とコンクリートの強度、および、軸歪度の測定区間の間隔も示した。図-1の右側に試験体12D10D6S47の配筋と主筋の歪ゲージ位置を示す。試験体は15x15x53cmの角柱、加力方法は両端固定の軸方向単調載荷、軸方向変形の測定は2面の側面で計4箇所電気式変位計にて行った。表1に軸歪度の測定間隔を示しておく。なお、試験体の形状と加力方法は文献[3]で示した単調加力シリーズと全く同じである。

\*1 新潟大学大学院 工学部建設学科 (正会員)

\*2 新潟大学助教授 工学部建設学科、工博(正会員)

## 2. 2 実験結果およびその整理

図-1に試験体12D10D6S47の主筋の座屈形状および隅角部の主筋の歪度（各位置の表裏に貼付した2枚の平均）の分布を示す。この試験体はE～Hの4区間で座屈を生じており、この座屈区間で主筋の歪が大きくなっていることがわかる。次に、図-2(a)(b)に横補強筋がD6で間隔47mmのシリーズの軸方向力-測定区間の平均軸歪度の関係を示す。図(a)が副帯筋が無く主筋の有無のみが異なる試験体、図(b)が副帯筋が有り主筋の有無のみが異なる試験体である。これらのデータを用いて文献[3]で示した方法により各試験体の主筋の応力度-歪度関係を推定した。すなわち、先ず主筋の有無のみが異なる試験体の軸方向力の差を主筋の負担分とし、全主筋の断面積で除して主筋の平均軸応力度とした。次に、座屈区間以外の主筋の歪度を歪ゲージの値より推定し、測定区間の平均軸歪度を座屈区間内の軸歪度に修正した。なお、座屈区間は座屈が横補強筋間隔の何倍かを示しているもので、実験後目視により決定したものを、表-2の()内に示す。本手法による修正例を図-3(a)(b)に示す。図(a)は副帯筋の無い試験体12D10D6S47であるので、隅角部の主筋と副帯筋の無い無拘束中間主筋の平均的な挙動を表していることになる。同様に、図(b)は副帯筋の有る試験体12D10D6S47Iであるので、隅角部の主筋と副帯筋の有る拘束中間主筋の平均的な挙動を表していることになる。

図-3の修正結果をみると、抽出された主筋の応力度-歪度関係には降伏点がみられるが、この降伏応力度は必ずしも引張試験から得られた降伏応力度（図中破線参照）と一致しない。これは主筋のある試験体と主筋のない試験体の差をとるときの誤差であると考えられる。しかし、明確な降伏点がみられるので、この降伏応力度を基本にして座屈点を定義した。すなわち、降伏後に歪硬化域に入り、再び降伏点に達した点を座屈点とした。図中の○が評価された座屈点となり、このときの軸歪度を座屈歪度  $\epsilon_{BUC}$  とした。隅角部と中間主筋の平均的な座屈歪度  $\epsilon_{BUC}$  の実験値を座屈区間  $N_B$  とともに表-2にまとめた。なお、表-2には、中間主筋の無い隅角部の場合として文献[3]の試験体のうち今回の横補

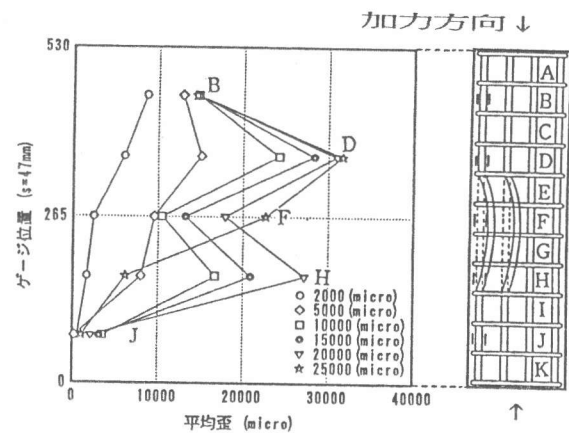


図-1 試験体の配筋と座屈形状および主筋の歪度の分布の例（試験体12D10D6S47）

表-1 試験体のパラメータと名称および材料強度

|                               | 主筋の配筋法          |                    |                                   | 横筋降伏<br>応力度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | コンクリ<br>ート $\sigma_B$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 軸歪度<br>測定間隔<br>(mm) |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------|
|                               | 12-D13          | 12-D10             | 4- $\phi$ 4<br>or<br>12- $\phi$ 4 |                                       |   |                     |
| 横補強筋                          | 2-D6-S70        | 12D10D6S70         | 4 $\phi$ 4D6S70                   | 3697                                  | 276   | 300                 |
|                               | 4-D6-S70        | 12D10D6S70I        | 12 $\phi$ 4D6S70I                 |                                       | 280   | 360                 |
| 中間主筋の配筋法                      | 2-D6-S47        | 12D13D6S47         | 4 $\phi$ 4D6S47                   | 6842                                  | 258   | 360                 |
|                               | 4-D6-S47        | 12D10D6S47I        | 12 $\phi$ 4D6S47I                 |                                       |   |                     |
|                               | 2- $\phi$ 4-S47 | 12D10 $\phi$ 4S47  | 4 $\phi$ 4 $\phi$ 4S47            |                                       |   |                     |
|                               | 4- $\phi$ 4-S47 | 12D10 $\phi$ 4S47I | 12 $\phi$ 4 $\phi$ 4S47I          |                                       |   |                     |
|                               | 2- $\phi$ 4-S35 | 12D13 $\phi$ 4S35  | 4 $\phi$ 4 $\phi$ 4S35            | 275                                   | 350   |                     |
|                               | 4- $\phi$ 4-S35 | 12D13 $\phi$ 4S35I | 4 $\phi$ 4 $\phi$ 4S35I           |                                       |   |                     |
| 主筋降伏応力度(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 3425            | 3583               | 6842                              |                                       |   |                     |
| 主筋破断応力度(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 4910            | 4882               | 7564                              |                                       |   |                     |

強筋と主筋の組み合わせが同じものを、さらに、中間主筋が1本の場合として文献 [4] の試験体（横補強筋と主筋の組み合わせは本報告と同じ）も、それぞれ示した。

### 3. 実験結果の考察

#### 3.1 隅角部の主筋の座屈歪度 ( $\epsilon_{BUC}$ ) の評価モデル (文献 [5])

文献 [4] では文献 [3] で提案した普通強度用の座屈モデルを用いて検討したが、その後、高強度まで対応した座屈モデルを提案したので (文献

[5])、本報告では文献 [5] のモデルを用いる。図-4に座屈モデルを示す。このモデルは横補強筋の数区間にわたって座屈が生じる場合の挙動を評価することに重点をおいたモデルであり、座屈歪度  $\epsilon_{BUC}$  の推定式を式(1)で与えている。ただし、式(1)は座屈区間  $N_B$  の関数となっているので、 $N_B$  に対する最小

値が求める座屈歪度となる。また、最大の座屈長さ (座屈区間  $\times$  横補強筋間隔) は断面せいと実験で得られた座屈長さの大きい方としている。なお、式(1)は隅角部の主筋を対象にした式であり、有効な横補強筋の径 ( $\phi_{we}$ ) は、断面積から逆算される横補強筋の平均的な直径としている。

$$\epsilon_{BUC}(N_B) = \epsilon_{ER} + \epsilon_H(N_B) + \epsilon_B(N_B) \quad (1)$$

$$\epsilon_{ER} = -1.45 \cdot \epsilon_y + 0.026$$

$$\epsilon_H(N_B) = 1.4 / (\alpha/2) / N_B - 0.29 \quad (\geq 0)$$

$$\epsilon_B(N_B) = [2 / (3 \cdot N_B \cdot a_x \cdot \alpha) \cdot \{ \gamma_1 \cdot g(N_B) - 1 \}]^2$$

$$g(N_B) = 1 + (\pi \cdot a_x \cdot f(N_B) \cdot N_B \cdot \alpha \cdot \beta^2 \cdot \gamma_2) / 16 \quad f(N_B) = \begin{cases} (N_B^2 - 1) / N_B & N_B: \text{奇数} \\ (N_B^2 + 2) / N_B & N_B: \text{偶数} \end{cases}$$

ここで、 $\alpha = S / \phi_h$

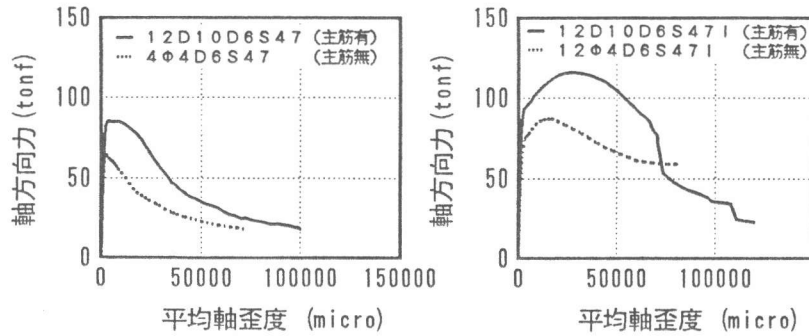
$\beta = \phi_{we} / \phi_h$

$\gamma_1 = \sigma_m / \sigma_y$

$\gamma_2 = \sigma_{we} / \sigma_y$

$a_x = 0.65$  (主筋の  $N-M$  関係の係数)

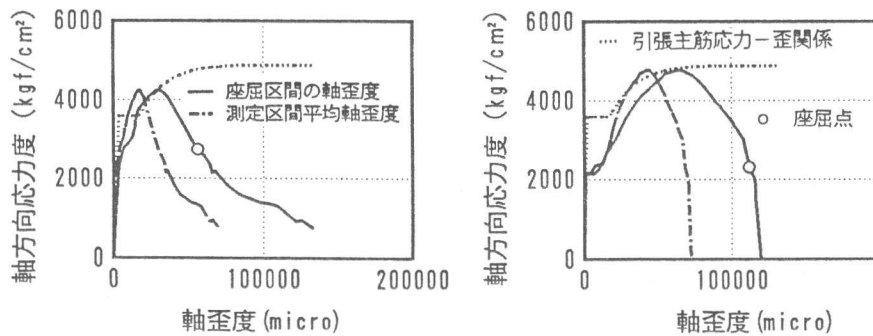
$\sigma_{we} = 65 \sqrt{\sigma_{wy}} \quad (\leq \sigma_{wy})$



(a) 副帯筋の無い試験体

(b) 副帯筋の有る試験体

図-2 横補強筋がD6S47シリーズの荷重-測定区間平均軸歪度



(a) 試験体12D10D6S47

(b) 試験体12D10D6S47I

(隅角部主筋と無拘束  
中間主筋の平均値)

(隅角部主筋と拘束中  
間主筋の平均値)

図-3 D6S47シリーズの主筋の挙動の抽出例と座屈歪度の定義

であり、また、 $\epsilon_y$ は主筋の降伏歪度、 $E_s$ は鉄筋ヤング係数、 $\phi_h$ は主筋径、 $\sigma_y$ は主筋降伏応力度、 $\sigma_m$ は主筋最大応力度、 $\phi_{we}$ は主筋にかかる有効な横補強筋の径、 $\sigma_{wy}$ は横補強筋の降伏応力度、 $S$ は横補強筋間隔、 $N_B$ は座屈区間である。

### 3. 2 中間主筋のモデル化

図-5は実験から得られた座屈時歪度と式(1)による計算値を比較したものである。図(a)は文献[3]の試験体のうち今回の横補強筋と主筋の組み合わせが同じもの、図(b)が文献[4]で示した断面1辺に中間主筋が1本有る場合の隅角部の主筋と中間主筋の平均値、図(c)が本報告で示した試験体、すなわち、断面1辺に中間主筋が2本有る場合の隅角部の主筋と中間主筋の平均値である。図(b)(c)は中子筋の有無別に示してある。なお、以降、中子筋と副帯筋を連続的に扱うために、副帯筋のある試験体を中子筋が2本ある試験体と呼ぶ。図-5をみると、中子筋の無い中間主筋を含む場合の全主筋の平均的な座屈歪度実験値は隅角部主筋のみのものより小さく、中子筋のある中間主筋を含むものは相当大きいことがわかる。

図-6は横補強筋による主筋への拘束効果を模式的に表したモデルである。図は、断面1辺に主筋が5本(全主筋だと16本のケース)あり、そのうち隅角部主筋と中子筋により拘束されない中間主筋がそれぞれ2本、中子筋により拘束される中間主筋が1本の例である。ここで、一方向で力の釣合を考え、全主筋を全横補強筋が平均的に拘束していると仮定すると、主筋1本当たりの平均的な拘束力 $C$ は、図の下に示した式により表せる。ただし、中子筋の拘束効果は外周の横補強筋より大きいことが予想されるので、その拘束効果の比を $\nu$ として考慮した。なお、このモデルは文献[4]では一方向モデルと呼んでいたものであり、断面1辺に中間主筋が1本ある場合の検討では、この拘束比 $\nu$ は1.6~2.7であった。なお、隅角部を対象にした式(1)のモデルは、横補強筋からの拘束力として横補強筋1本分降伏力を与えているので、拘束比 $\nu$ は中間主筋が有る場合の主筋1本にかかる横補強筋の有効断面積比と言い代えることもできる。

図-7は断面の1辺の中間主筋の数と図-6の $e$ で表される主筋1本の平均的な拘束力比の関係を示したものである。図(a)は中子筋の無い場合、図(b)は中子筋のある場合を示してある。図中の○は実験値であるが、これは表-2で示した座屈歪度の実験値に一致する有効横補強筋断面積を、式(1)を用いて各試験体ごとに逆算したものである。

図-7には図-6に示したモデルによる評価式(横軸が $n$ で縦軸が $e$ )も示した。図-7(a)では中子筋が無いので評価結果は $\nu$ の値には無関係となるが、概ね実験値の傾向を表していることがわかる。すなわち、中子筋に拘束されない中間主筋がある場合、全

表-2 座屈歪度の実験結果のまとめ  
(文献[3,4]の結果を含む)

|                                 |                                      | 主筋の配筋            |             |             |            |
|---------------------------------|--------------------------------------|------------------|-------------|-------------|------------|
|                                 |                                      | D13              | D10         |             |            |
| 横<br>補<br>強<br>筋<br>の<br>配<br>筋 | 隅<br>角<br>部<br>の<br>み                | D6-S70           | -           | 42500(1)    |            |
|                                 |                                      | D6-S47           | 65000(3)    | 60000(3)    |            |
|                                 |                                      | Φ4-S47           | -           | 27500(3)    |            |
|                                 |                                      | Φ4-S35           | 55000(5)    | 118000(3)   |            |
|                                 | 中<br>間<br>主<br>筋<br>一<br>本<br>有<br>る | 中<br>子<br>筋<br>無 | D6-S70      | -           | 86500(1,2) |
|                                 |                                      |                  | D6-S47      | 73600(4,5)  | 40900(3,4) |
|                                 |                                      |                  | Φ4-S47      | -           | 19200(4,5) |
|                                 |                                      |                  | Φ4-S35      | 46500(6)    | 31800(5)   |
|                                 |                                      | 中<br>子<br>筋<br>有 | D6-S70T     | -           | 104500(1)  |
|                                 |                                      |                  | D6-S47T     | 114000(3)   | 162700(3)  |
|                                 |                                      |                  | Φ4-S47T     | -           | 105500(3)  |
|                                 |                                      |                  | Φ4-S35T     | 58200(6)    | 68000(4)   |
| 中<br>間<br>主<br>筋<br>二<br>本<br>有 | 中<br>子<br>筋<br>無                     | D6-S70           | -           | 26000(1,1)  |            |
|                                 |                                      | D6-S47           | 42000(4,4)  | 57000(4,4)  |            |
|                                 |                                      | Φ4-S47           | -           | 33000(5,4)  |            |
|                                 |                                      | Φ4-S35           | 20000(6,7)  | 16000(4,4)  |            |
|                                 | 中<br>子<br>筋<br>有                     | D6-S70T          | -           | 108000(1,1) |            |
|                                 |                                      | D6-S47T          | 116000(4,4) | 113000(2,2) |            |
|                                 |                                      | Φ4-S47T          | -           | 60000(3,3)  |            |
|                                 |                                      | Φ4-S35T          | 89000(5,5)  | 108000(4,4) |            |

単位: micro, ( )内は隅角部と中間主筋の座屈区間数

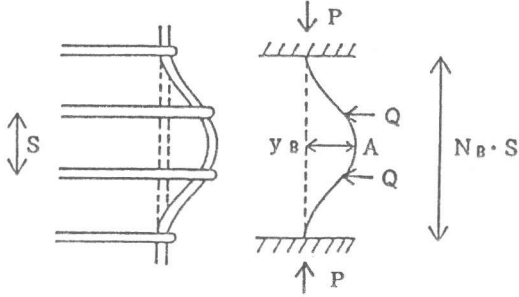
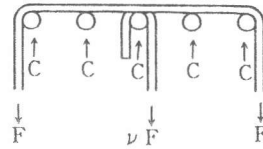


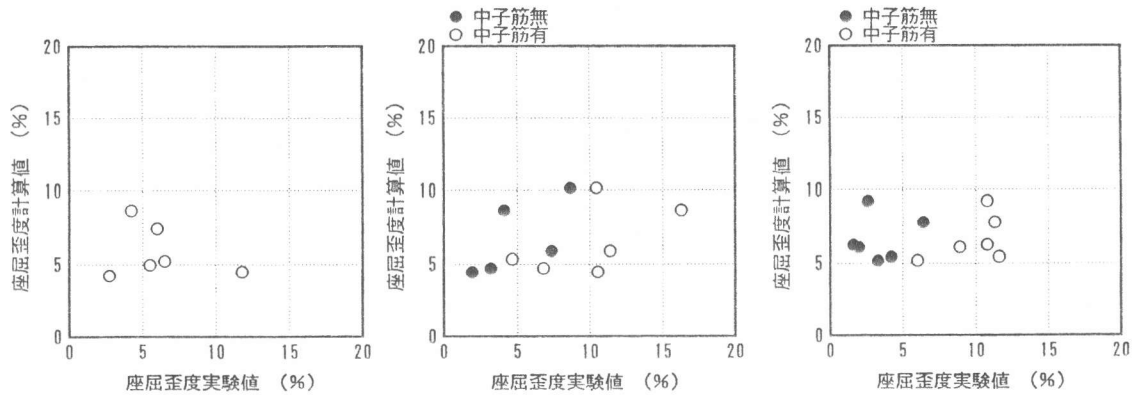
図-4 主筋の座屈モデル (文献 [3]) (3区間座屈の例)



$$C = e \cdot F = (2 + \nu m) / (2 + n) \cdot F$$

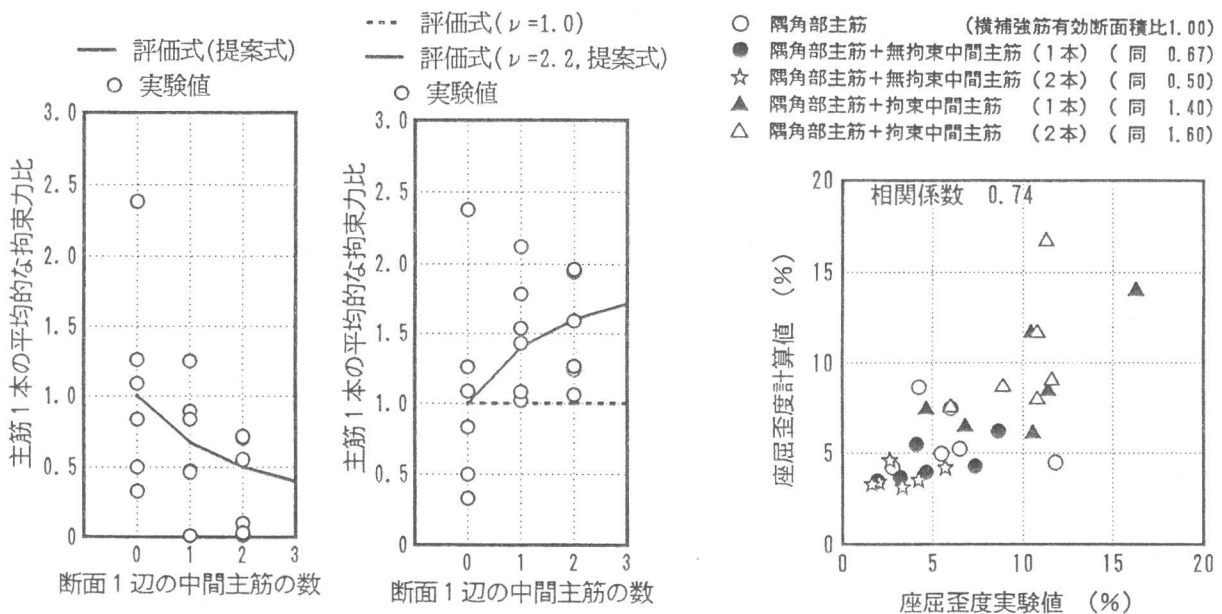
C: 主筋一本当たりの横補強筋からの平均拘束力  
 F: 横補強筋1本の降伏力 (=  $a_w \cdot \sigma_{wy}$ )  
 e: 全主筋に対する1本あたりの平均的な横補強筋の拘束比  
 $a_w, \sigma_{wy}$ : 1本の横補強筋の断面積と降伏応力度  
 n: 断面1辺の中間主筋の総数  
 m: 中間主筋数nのうち中子筋により拘束されている主筋数  
 $\nu$ : 拘束されている中間主筋1本に対する横補強筋の拘束比

図-6 主筋を拘束する横補強筋のモデルと拘束力 (図は中子筋の無い場合、 $n=1, m=0$ )



(a) 隅角部主筋 (文献 [3]) (b) 隅角部主筋と中間主筋の平均 (中間主筋1本、文献 [4]) (c) 隅角部主筋と中間主筋の平均 (中間主筋2本)

図-5 座屈時歪度の実験値と計算値の比較



(a) 中子筋の無い場合 (b) 中子筋の有る場合  
 図-7 横補強筋の有効面積比の実験とモデルの比較

図-8 横補強筋の有効断面積を変えた場合の座屈時歪度の実験値と計算値の比較

主筋に対する平均的な横拘束筋の効果は、横補強筋による拘束効果が全主筋に平均的に作用すると考えてよいことが分かる。一方、図-7(b)では中子筋があるので評価結果は $\nu$ の値に依存してくる。図中の破線は $\nu$ を1、すなわち、中子筋と外周の横補強筋の効果は同じとした場合の評価値となるが、実験値はこの破線を大きく上回っていることがわかる。そこで、最小自乗法により実験値をよく表す $\nu$ を求めてみたのが、図(b)中の実線であり、このときの $\nu$ は2.2となった。すなわち、中子筋に拘束される中間主筋がある場合には、中子筋の効果を外周の横補強筋の効果の2.2倍として評価し、全横補強筋の効果が全主筋に平均的に作用すると考えてよいことが分かる。そこで、主筋1本の平均的な拘束力を表す式として、式(2)を提案した。なお、式(2)は中子筋がある場合と無い場合の両方、あるいは、それらが混在する場合にも適用できる形となっている。

$$C = e \cdot F = (2 + \nu \cdot m) / (2 + n) \cdot F \quad (2)$$

ここで、 $C$ は主筋1本当たりの平均的な拘束力、 $F$ が横補強筋1本の降伏力、 $n$ は断面1辺の中間主筋の数、 $m$ は $n$ のうち中子筋により拘束されている数、である。隅角部だけに主筋がある場合は $C = F$ となるので、 $e$ は平均的な横補強筋の有効断面積比となる。一方、 $m$ にかかる係数 $\nu$ が個々の中子筋の隅角部に対する有効断面積比であり、中子筋の効果といえる。本論文では $\nu$ として2.2とする。具体的な(1)式への適用法は有効断面積比 $e$ を用いて横補強筋の直径を低減し(あるいは増大し)、 $\phi_w e$ を計算することになる。最後に、表-2に示した試験体の座屈歪度を実験値と式(2)を用いた計算値で比較したものを図-8に示しておく。

#### 4. まとめ

正方形横補強筋および副帯筋により拘束された12本の主筋を有するRC角柱試験体の一方向単軸圧縮実験を行い、主筋の座屈歪度を実験的に求め、以下の結論を得た。

(1)副帯筋に拘束されない中間主筋がある場合、全主筋に対する平均的な横拘束筋の効果は、横補強筋による拘束効果が全主筋に平均的に作用すると仮定した式(2)で評価できる。また、その時の座屈歪度は、有効断面積比 $e$ を用いて、式(1)で計算することができる。

(2)副帯筋に拘束される中間主筋がある場合には、副帯筋の効果を外周の横補強筋の効果の2.2倍として評価し、全横補強筋の効果が全主筋に平均的に作用すると仮定した式(2)で評価できる。また、その時の座屈歪度は、有効断面積比 $e$ を用いて、式(1)で計算することができる。

#### [参考文献]

- [1] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990年
- [2] New Zealand Standard : Code of Practice for The Design of Concrete Structures (NZS 3101), 1982
- [3] 加藤大介：鉄筋コンクリート部材の主筋の座屈性状に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、NO. 436、pp. 135-143、1992
- [4] 加藤大介、大矢廣之：RC部材における中間主筋の座屈性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第15巻、第2号、pp. 425-430、1993
- [5] 加藤大介、若月康二：高強度材料を用いたRC部材の主筋の座屈性状、日本建築学会構造系論文報告集、NO. 453、pp. 141-147、1993