

# 長方形断面コンクリートに対する 中間帯鉄筋の横拘束効果

堺淳一<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 東京工業大学大学院 (日本学術振興会特別研究員)

(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

本研究では、横拘束筋のコンクリートに対する拘束メカニズムを解明するために、長方形断面に配置する中間帯鉄筋の効果に着目して、横拘束筋で拘束した RC 柱に対する一軸圧縮載荷実験を行った。実験から、同じ量の横拘束筋を配置するのであれば中間帯鉄筋の配置間隔を小さくする方がコンクリートの変形性能を向上する上で効果があることを明らかにした。さらに、中間帯鉄筋の配置間隔がコンクリートの耐力や変形性能に及ぼす影響を定量的に評価するために、中間帯鉄筋間において拘束力が低下することを取り入れた横拘束効果評価モデルを開発した。

**Key Words:** seismic design, bridge, concrete, confinement effect, cross tie

## 1. はじめに

RC 橋脚で支持された橋の耐震設計においては、橋脚の変形性能の向上が必要である。このため、平成8年の道路橋示方書<sup>1)</sup>以後は、RC 橋脚には横拘束筋が配置されるようになっていく。矩形断面の RC 橋脚に対しては帯鉄筋と同時に中間帯鉄筋が配置されるようになっており、RC 橋脚の変形性能を精度よく評価するためには、中間帯鉄筋の効果も含む横拘束筋の拘束効果の評価法を確立する必要がある。

道路橋示方書<sup>1)</sup>では、Hoshikuma et al. の提案<sup>2)</sup>に基づき、帯鉄筋と中間帯鉄筋で囲まれた1つのコアコンクリートの応力~ひずみ関係を求めるように規定している。しかし、実際には帯鉄筋は1つのコアコンクリートに対して横拘束力を与え、中間帯鉄筋は隣接する2つのコアコンクリートに横拘束力を与えるため、中間帯鉄筋がコアコンクリートに与える横拘束効果は帯鉄筋とは異なる可能性がある。

そこで、本研究では、中間帯鉄筋の配置間隔やその本数をパラメータとして、一軸圧縮載荷実験<sup>3)</sup>を行い、中間帯鉄筋の効果を含む横拘束効果の評価法を開発したので、この結果を示す。

## 2. 実験供試体及び載荷方法

本研究では、表-1、図-1に示すように、断面寸法が200mm×555mm、高さが600mmの合計24体の長方形断面供試体に対して一軸圧縮載荷実験を行った。また、長方

形断面と正方形断面の横拘束効果の違いを調べるために、断面寸法が200mm×200mm、高さが600mmの8体の正方形断面供試体に対する実験も行った。

長方形断面では、1段に配置する中間帯鉄筋の箇所数 $k$ と同一箇所配置する中間帯鉄筋の本数 $m$ を図-1に示すように7通りに変化させると同時に、帯鉄筋を配置する高さ方向の間隔 $s$ を60, 80, 120mmの3通り、計21通りに変化させた。1段に配置する中間帯鉄筋の総本数 $n_{ct}$ は、

$$n_{ct} = k \times m \quad (1)$$

となり、横拘束筋の配置間隔 $d_t$ は、

$$d_t = 531 / (k + 1) \quad (2)$$

となる。表-1では、供試体名を R s-k@m という形で表している。ここで、R は長方形断面であることを示す。

正方形断面供試体としては、177mm×177mmの正方形に加工した帯鉄筋を $s=60$ mm, 80mm, 120mm間隔で配置した供試体を、それぞれ2体ずつ作製した。なお、中間帯鉄筋は配置していない。

帯鉄筋の定着部では、定着長を60mmとし135度曲がりのフックを用いた。中間帯鉄筋は定着長60mm, 180度曲がりのフックにより両端を帯鉄筋に定着した。

体積比というもとの定義に基づいて横拘束筋比 $\rho_s'$ を求めると、本研究で対象とする横拘束筋比 $\rho_s'$ は、0.4%~1.79%となる。ただし、長方形断面供試体においては断面の長辺方向と短辺方向とでは横拘束筋の配置本数や間隔が異なる。そこで、方向別に横拘束効果が異な

表-1 実験に用いた供試体

| 供試体          | s       | 中間帯鉄筋         |            | $\rho_s'$ (%) |
|--------------|---------|---------------|------------|---------------|
|              |         | 配置            | $d_t$ (mm) |               |
| R60-0        | 60 mm   | なし            | 531.0      | 0.80          |
| R60-1@1      |         | 1箇所 1本        | 265.5      | 0.89          |
| R60-1@2      |         | 1箇所 2本        | 265.5      | 0.99          |
| R60-2@1      |         | 2箇所 1本        | 177.0      | 0.99          |
| R60-2@2      |         | 2箇所 2本        | 177.0      | 1.19          |
| R60-5@1      |         | 5箇所 1本        | 88.5       | 1.29          |
| R60-5@2      |         | 5箇所 2本        | 88.5       | 1.79          |
| R80-0        | 80 mm   | なし            | 531.0      | 0.60          |
| R80-1@1      |         | 1箇所 1本        | 265.5      | 0.67          |
| R80-1@2      |         | 1箇所 2本        | 265.5      | 0.75          |
| R80-2@1      |         | 2箇所 1本        | 177.0      | 0.75          |
| R80-2@2      |         | 2箇所 2本        | 177.0      | 0.89          |
| R80-5@1      |         | 5箇所 1本        | 88.5       | 0.97          |
| R80-5@2      |         | 5箇所 2本        | 88.5       | 1.34          |
| R120-0       | 120 mm  | なし            | 531.0      | 0.40          |
| R120-1@1     |         | 1箇所 1本        | 265.5      | 0.45          |
| R120-1@2     |         | 1箇所 2本        | 265.5      | 0.50          |
| R120-2@1     |         | 2箇所 1本        | 177.0      | 0.50          |
| R120-2@2     |         | 2箇所 2本        | 177.0      | 0.60          |
| R120-5@1     |         | 5箇所 1本        | 88.5       | 0.65          |
| R120-5@2     |         | 5箇所 2本        | 88.5       | 0.89          |
| R600 a, b, c | 無横拘束供試体 |               |            |               |
| S60 a, b     | 60      | なし<br>(正方形断面) | 177.0      | 1.19          |
| S80 a, b     | 80      |               |            | 0.89          |
| S120 a, b    | 120     |               |            | 0.60          |
| S600 a, b    | 無横拘束供試体 |               |            |               |

&lt;記号の定義&gt;

R 60 - 5 @ 2  
 ↑ ↑ ↑  
 同一箇所に配置する中間帯鉄筋の本数  $m$   
 1段に配置する中間帯鉄筋の箇所数  $k$   
 横拘束筋間隔  $s$  (mm)

R:長方形断面, S:正方形断面

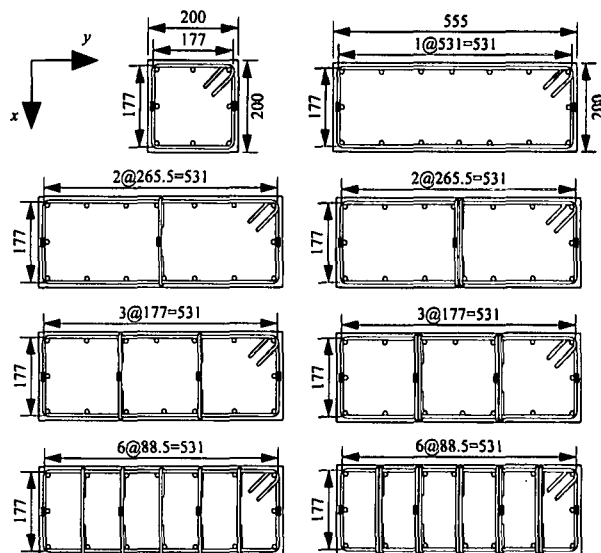
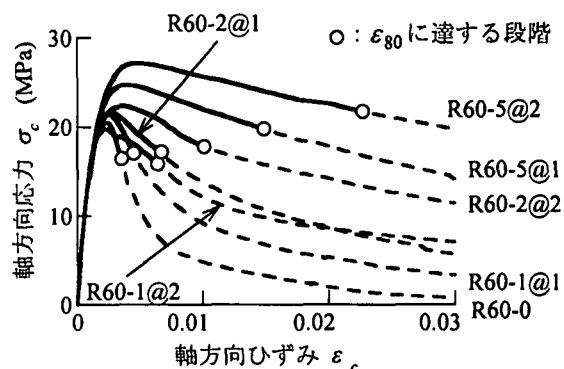
1段に配置する中間帯鉄筋の総本数  $n_{cl} = k \times m$ 

図-1 中間帯鉄筋の配置

図-2  $\sigma_c \sim \epsilon_c$  関係 ( $s=60\text{mm}$  とした例)

ることを表すため、ここでは図-1に示すように長方形断面の短辺方向をx軸、長辺方向をy軸と呼ぶこととする。

帯鉄筋および中間帯鉄筋には D6-SD295A を用いた。ミルシートによる横拘束筋の降伏強度  $\sigma_{sy}$  は 363MPa、引張強度は 531MPa、伸びは 27%である。また、長方形断面供試体には 16本、正方形断面供試体には 8本の D10-SD295A ( $\sigma_{sy}=378\text{MPa}$ ) を軸方向鉄筋として配置した。

コンクリートの圧縮強度は、載荷実験に用いた供試体と同寸法で、軸方向鉄筋だけを配置した供試体(無横拘束供試体)に対する圧縮載荷実験から求めた。この結果、コンクリートの圧縮強度は長方形断面供試体、正方形断面供試体で、それぞれ  $\sigma_{c0}=22.6\text{MPa}$ 、 $22.8\text{MPa}$  となる。

実験には東京工業大学の 5MN 万能試験機を使用し、毎分 0.5mm の載荷速度で変位制御により荷重を作用させた。載荷時には供試体の荷重  $P$ 、軸方向変形量  $\delta$ 、帯鉄筋と中間帯鉄筋のひずみを計測した。荷重  $P$  はロードセルを用いて測定し、上下の圧盤間の相対変位を変位計により計測した値を軸方向変形量  $\delta$  とした。

コンクリートの軸方向応力  $\sigma_c$  は、軸方向鉄筋の負担荷重を除去するために次式から求めた。この際、軸方向

鉄筋の応力  $\sigma_{sl} \sim$  ひずみ  $\epsilon_{sl}$  関係は完全弾塑性モデルとした。

$$\sigma_c = (P - \sigma_{sl} A_{sl}) / A_c \quad (3)$$

また、コンクリートの軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  は供試体の初期高さ  $h$  に対する平均ひずみとして求めることとした。

### 3. 応力～ひずみ関係に及ぼす中間帯鉄筋の影響

図-2 は、 $s=60\text{mm}$  の場合を例として、長方形断面供試体のコンクリートの軸方向応力  $\sigma_c \sim$  軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係を示した結果である。なお、図-2では、 $0.8\sigma_{cc}$ にまで低下したときのひずみを  $\epsilon_{80}$  とし、これを上回る段階を破線によって示している。これは、応力下降域において  $\sigma_c$  が  $\sigma_{cc}$  の 50～70%にまで低下すると軸方向鉄筋が座屈し始めるため、この段階では式(3)によってコンクリートの応力度  $\sigma_c$  を正確に求められないためである。本研究では、 $\epsilon_{80}$  を応力下降域の応力低下度を表す指標とすることとする。図-2によれば、全体としては、中間帯鉄筋の総本数  $n_{cl}$  が増えると、 $\sigma_{cc}$ 、 $\epsilon_{cc}$ 、 $\epsilon_{80}$  は大きくなるがわかる。

しかし、総本数  $n_{cl}$  が同じでも、中間帯鉄筋の配置間隔  $d_t$  が変われば  $\sigma_c \sim \epsilon_c$  関係も変化する。中間帯鉄筋の

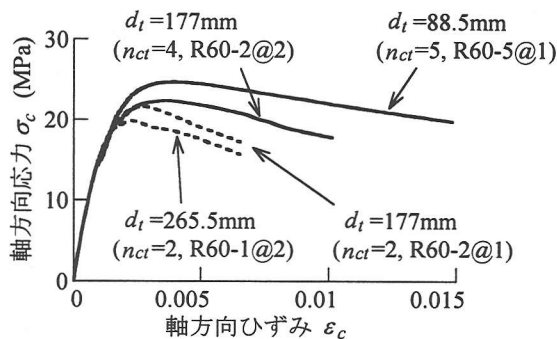


図-3 横拘束筋の配置間隔  $d_t$  の影響 ( $s=60\text{mm}$  とした例)

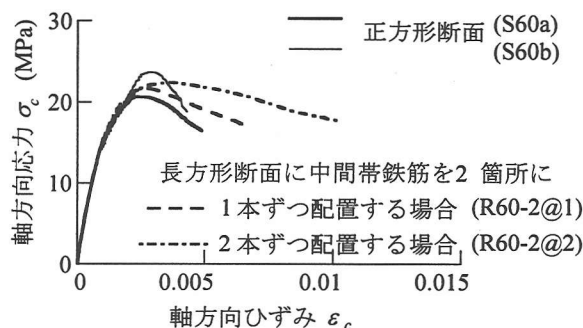


図-4 中間帯鉄筋と帯鉄筋の拘束効果の違い ( $s=60\text{mm}$  とした例)

総本数を  $n_{ct}=2$  本に固定し、1箇所2本配置する場合 ( $d_t=265.5\text{mm}$ ) と2箇所に1本ずつ配置する場合 ( $d_t=177\text{mm}$ ) の  $\sigma_c \sim \varepsilon_c$  関係を比較した結果が図-3である。また、 $n_{ct}$  は多少異なるが、2箇所に2本ずつ配置する場合 ( $d_t=177\text{mm}$ ,  $n_{ct}=4$  本) と5箇所に1本ずつ配置する場合 ( $d_t=88.5\text{mm}$ ,  $n_{ct}=5$  本) の結果もあわせて示している。これによれば、 $d_t$  を  $177\text{mm}$  から1.5倍の  $265.5\text{mm}$  にした場合には  $\sigma_{cc}$ ,  $\varepsilon_{cc}$ ,  $\varepsilon_{80}$  はそれぞれ20%, 9%, 2%小さくなり、 $d_t$  を大きくすると拘束効果は小さくなる。 $d_t$  を  $88.5\text{mm}$  から  $177\text{mm}$  にした場合にも、同様の傾向がある。

1段に2箇所中間帯鉄筋を配置した場合には、コアコンクリートの断面は  $177\text{mm} \times 177\text{mm}$  の正方形が3つ連なった形となる。これと正方形断面を比較することにより、正方形断面の帯鉄筋と長方形断面の中間帯鉄筋の拘束効果の違いを検討する。同一箇所に1本の中間帯鉄筋を配置した場合 ( $m=1$ ) と2本ずつ配置した場合 ( $m=2$ ) の  $\sigma_c \sim \varepsilon_c$  関係を正方形断面供試体 (2体) と比較して示すと図-4のようになる。ここで、中間帯鉄筋の横拘束力が単純に両側のコアコンクリートに分散されて与えられると考えると、中間帯鉄筋を長方形断面に2箇所に2本ずつ配置した場合の横拘束効果は正方形断面に対する帯鉄筋の横拘束効果と等価となってよいはずである。

図-4によれば、正方形断面供試体の  $\sigma_c \sim \varepsilon_c$  関係は、中間帯鉄筋を2箇所に2本ずつ配置した場合よりもむしろ2箇所に1本ずつ配置した長方形断面供試体の  $\sigma_c \sim \varepsilon_c$  関係に近い。中間帯鉄筋を2箇所に1本ずつ配置する

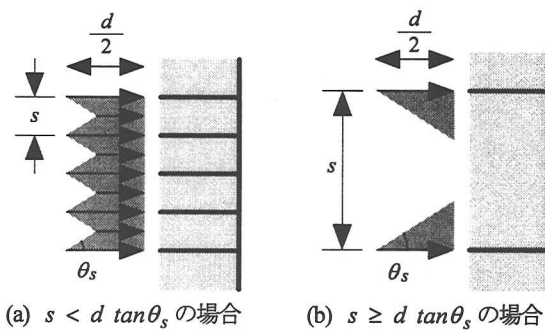


図-5 高さ方向の帯鉄筋間隔  $s$  の影響

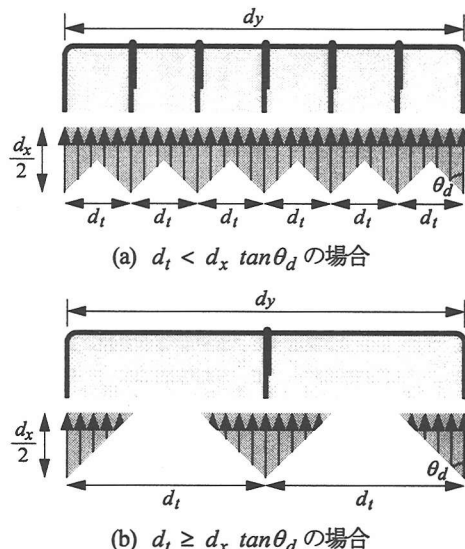


図-6 横拘束筋の配置間隔  $d_t$  の影響

ということは、0.5本分の中間帯鉄筋の拘束効果が両側のコアコンクリートに与えられていると考えられる。すなわち、正方形断面の帯鉄筋は、長方形断面の中間帯鉄筋の50%の横拘束効果を与えている。この理由は、コンクリートが圧縮力を受けて徐々に周方向に膨張し始めても、長方形断面内の中間帯鉄筋はその材軸方向の膨張に対して抵抗するだけであるが、正方形断面の帯鉄筋は軸方向と同時にコンクリートが側方に膨張するために曲げ変形も生じる。このため、正方形断面の帯鉄筋は長方形断面の中間帯鉄筋よりもコンクリートに対する横拘束効果が小さいと考えられる。

#### 4. コンクリートに対する横拘束圧のモデル化

高さ方向の横拘束筋間隔  $s$  の影響、横拘束筋の断面における配置間隔  $d_t$  の影響、中間帯鉄筋と帯鉄筋の横拘束効果の違いを、次式により考慮することとする。

$$\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{c0}} = 1 + \alpha \frac{\kappa_s \kappa_d \sigma_{lu}}{\sigma_{c0}} = 1 + \alpha C \quad (4)$$

ここで、 $\alpha C$  は横拘束筋による横拘束効果を表しており、 $C$  を横拘束効果係数と呼ぶこととする。また、 $\kappa_s$  は高さ方向の横拘束筋間隔  $s$  による低減係数、 $\kappa_d$  は断面内の横拘束筋の配置間隔  $d_t$  による低減係数である。 $\sigma_{lu}$  は、

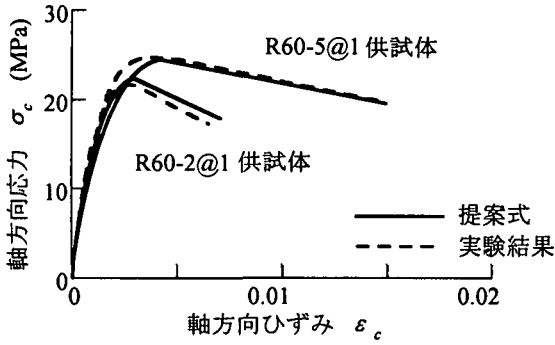


図-7 本研究による提案モデルの適用性

横拘束筋の拘束圧が横拘束筋間で高さ方向にも水平方向にも低下せず、コアコンクリート全体に一樣に作用すると仮定した場合のコアコンクリートに作用する横拘束圧であり、次式で与える。

$$\sigma_{lu-x} = \frac{\sigma_{sy}}{s d_y} (2\kappa_h A_h + n_{cl-x} A_{cl}) \quad (5)$$

ここで、 $s$ は横拘束筋の高さ方向間隔、 $A_h$ は帯鉄筋の1本あたりの断面積、 $A_{cl}$ は中間帯鉄筋の1本あたりの断面積、 $d_y$ は $y$ 軸方向のコアコンクリートの辺長、 $n_{cl-x}$ は $x$ 軸方向に配置する中間帯鉄筋の本数である。また、 $\kappa_h$ は、図-4に示したように、正方形断面の帯鉄筋の方が長方形断面の中間帯鉄筋よりも横拘束効果が小さいことを表す低減係数である。前述したように、正方形断面の帯鉄筋による横拘束効果は、長方形断面の中間帯鉄筋による横拘束効果の50%程度であると考えられるため、ここでは $\kappa_h = 0.5$ とする。なお、ここで、長方形断面の帯鉄筋の拘束効果も正方形断面と同じであると仮定している。

続いて、 $s$ による低減係数 $\kappa_s$ 、 $d_l$ による低減係数 $\kappa_d$ はそれぞれ次のように仮定する。

$$\kappa_s = 1 - \frac{s}{d \cdot \tan \theta_s} \geq 0 \quad (6)$$

$$\kappa_d = \begin{cases} \frac{d_x \cdot \tan \theta_d}{2d_l} & d_l > d_x \cdot \tan \theta_d \\ 1 - \frac{d_l}{2d_x \cdot \tan \theta_d} & d_l \leq d_x \cdot \tan \theta_d \end{cases} \quad (7)$$

これらは、図-5、6に示すように横拘束圧が帯鉄筋から $\tan \theta_s$ 、 $\tan \theta_d$ の勾配で線形的に低下すると仮定して与えたものである。なお、 $\kappa_s$ は帯鉄筋の中間点における横拘束圧の大きさを帯鉄筋位置における横拘束圧の大きさの比として与えている。 $\kappa_d$ は、図-6のように横拘束筋間で横拘束圧が低下すると仮定する場合に横拘束圧が作用する領域の面積を、横拘束筋間で横拘束圧の低下がないと考える場合に横拘束圧が作用する領域の面積に対する比として与えている。ここで、式(4)、(5)の $\theta_s$ 、 $\theta_d$ をどのように与えるかが重要である。ここでは、円形断面に対する結果<sup>4)</sup>および本実験の結果を分析し、 $\theta_s = 30^\circ$ 、 $\theta_d = 45^\circ$ とすることとした。

## 5. 横拘束効果の定量化と提案式の適用性

$\theta_s = 30^\circ$ 、 $\theta_d = 45^\circ$ とした場合に各供試体ごとに横拘束効果係数 $C$ を求めると、 $C$ と $\sigma_{cc}/\sigma_{c0}$ 、 $\varepsilon_{cc}$ 、 $(\varepsilon_{80} - \varepsilon_{cc})$ の関係はほぼ線形にあることがわかったため、これらの関係を線形回帰して次式を得た。ただし、線形回帰する場合には、長方形・正方形断面供試体の結果だけではなく、円形断面供試体に対する結果<sup>4)</sup>も用いている。

$$\frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{c0}} = 0.94 + 4.7C \quad (r^2 = 0.96) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.0024 + 0.064C \quad (r^2 = 0.95) \quad (9)$$

$$\varepsilon_{80} - \varepsilon_{cc} = \begin{cases} 0.21C & (r^2 = 0.93) \text{ (円形)} \\ 0.0008 + 0.33C & (r^2 = 0.94) \text{ (矩形)} \end{cases} \quad (10)$$

図-7は、本研究によるモデルによる $\sigma_c \sim \varepsilon_c$ 関係を実験値と比較した結果である。これによれば、本研究による計算値は実験結果の傾向をよく表している。

## 6. 結論

- (1) 長方形断面供試体では、同じ帯鉄筋体積比 $\rho_s'$ であれば、中間帯鉄筋の配置間隔 $d_l$ が大きい方が $\sigma_{cc}$ 、 $\varepsilon_{cc}$ 、 $\varepsilon_{80}$ は小さい。これは、横拘束筋間で横拘束力が低下するためと考えられる。
- (2) 正方形断面供試体の $\sigma_c \sim \varepsilon_c$ 関係は、中間帯鉄筋を2箇所1本ずつ配置した長方形断面供試体に近いことから、正方形断面の帯鉄筋による横拘束効果は長方形断面の中間帯鉄筋による横拘束効果の50%程度であると考えられる。
- (3) 横拘束圧が、高さ方向には横拘束筋を配置した位置から $\tan \theta_s$  ( $\theta_s = 30^\circ$ )の勾配で、矩形断面内では中間帯鉄筋や帯鉄筋の位置から $\tan \theta_d$  ( $\theta_d = 45^\circ$ )の勾配で線形的に減少すると仮定したモデルを用いて、 $\sigma_{cc}$ 、 $\varepsilon_{cc}$ 、 $\varepsilon_{80}$ の推定モデルを提案した。本提案モデルは、実験結果の特徴をよく表すことができる。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金（特別研究員奨励費）により行いました。供試体の作製および実験に際しては、東京工業大学の川島研究室のメンバーのご援助を得ました。ここに記して、厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- (1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996。
- (2) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A. W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 123, No. 5, pp. 624-633, 1997.
- (3) 堺淳一、川島一彦、永井政伸、細入圭介：コンクリートの応力度～ひずみ関係に及ぼす中間帯鉄筋の影響，第4回地震時保有水平耐力に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 221-224, 2000。
- (4) 堺淳一：コンクリートの横拘束効果および変動軸力の影響を考慮した橋の地震応答特性に関する研究，東京工業大学博士論文，2001。