

# コンクリートの横拘束効果に及ぼす帯鉄筋の冷間加工ひずみの影響

堺淳一<sup>1</sup>・川島一彦<sup>2</sup>・宇根寛<sup>3</sup>・米田慶太<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 修(工) 東京工業大学大学院博士後期課程 (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)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 建設省東北地方建設局仙台台工事事務所 (〒982-8566 宮城県仙台市太城郡山 5-6-6)

<sup>4</sup>正会員 修(工) 大林組東北支店 (〒039-4224 青森県下北郡東通村大字白糖字前坂下 34-1)

円形帯鉄筋はコンクリートの横拘束効果が大きいことが既往の研究により明らかにされているが、鉄筋を円形に冷間加工すると帯鉄筋の内側には圧縮ひずみが、外側には引張ひずみがそれぞれ生じ、そのひずみはひずみ硬化が始まる2~4%に達する場合もある。そこで、低温焼なましにより冷間加工ひずみを除去した円形帯鉄筋と冷間加工ひずみを除去しない円形帯鉄筋を配置した供試体をそれぞれ3体ずつ作製し、これらに対する一軸圧縮載荷実験を行い、また、冷間加工ひずみを除去する帯鉄筋と冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋の引張力をファイバー要素解析から求め、帯鉄筋の冷間加工ひずみがコンクリートの横拘束効果に及ぼす影響を検討した。

**Key Words:** seismic design, residual strain, annealing, confinement effect, hoop reinforcement

## 1. まえがき

橋梁の耐震設計においては、鉄筋コンクリート橋脚の変形性能の向上が重要であり、このためには帯鉄筋を適切に配置しコアコンクリートを横拘束することが有効である。円形帯鉄筋やスパイラル筋は、拘束効果が大きく、橋脚の変形性能の向上に効果的であることがコンクリート柱に対する一軸圧縮載荷実験<sup>1)~4)</sup>や模型橋脚に対する正負交番載荷実験<sup>5)~6)</sup>から明らかにされている。

帯鉄筋による横拘束効果を定式化するには、コンクリートに作用する横拘束力は帯鉄筋比と鉄筋の降伏強度の積に比例すると仮定される場合が多い。しかし、鉄筋を曲げ冷間加工すると、帯鉄筋の内側には圧縮ひずみが、外側には引張ひずみがそれぞれ生じ、曲げ理論に基づけば一軸圧縮載荷実験や正負交番載荷実験で用いられる直径200mm~1000mm程度の模型供試体に用いる帯鉄筋では、最外縁および最内縁のひずみはひずみ硬化が始まる2~4%に達する場合もある。また、直径2~5mの実橋脚においても降伏ひずみを上回るひずみが帯鉄筋には生じる。降伏した状態でコアコンクリートに横拘束を与えるだけのフープテンションを帯鉄筋として負担できるのか、拘束効果が低下することはないのか等の指摘がされるこ

とがある。

しかしながら、こうした疑問に答え、円形帯鉄筋による横拘束効果を評価する際に降伏ひずみを上回るような冷間加工ひずみがどのように横拘束力に影響するのか、また、この横拘束力がコンクリート柱の軸方向応力度~軸方向ひずみ関係にどのように影響するのかという観点から検討された研究は、著者らの知る限り存在しない。

このような点から、本研究では低温焼なましにより冷間加工ひずみを除去した円形帯鉄筋と冷間加工ひずみを除去しないままの円形帯鉄筋を配置した供試体をそれぞれ3体ずつ作製し、これらに対する一軸圧縮載荷実験を行い、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋と除去しない帯鉄筋の横拘束力およびコンクリート柱の軸方向応力度~軸方向ひずみ関係に及ぼす影響を検討したので、その結果を報告する。

## 2. 実験供試体と実験方法

供試体は、表-1、図-1に示す直径200mm、高さ600mmの円柱であり、帯鉄筋比 $\rho_s$ は0.57%、1.14%、1.71%の3種類に変化させた。矩形断面の場合には隅角部でより大

表-1 実験供試体

		帯鉄筋比 (体積比) $\rho_s$ (%)	帯鉄筋の 冷間加工ひずみ
A シリーズ	A-1	0.57	除去
	A-2	1.14	
	A-3	1.71	
N シリーズ	N-1	0.57	あり
	N-2	1.14	
	N-3	1.71	

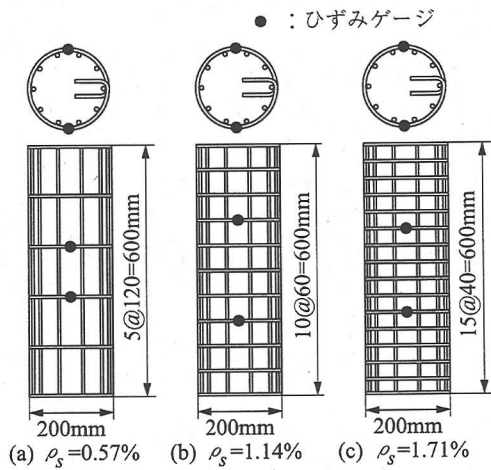


図-1 帯鉄筋の配筋と周方向ひずみ測定位置

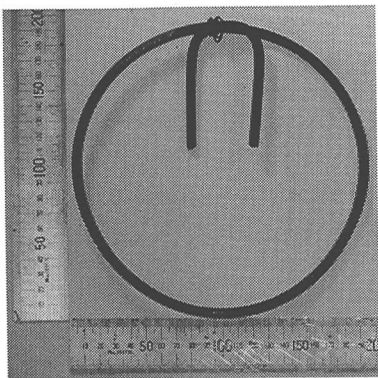


写真-1 円形に冷間加工した帯鉄筋

きな冷間加工ひずみが生じるが、円形断面の方が横拘束効果をフープテンションとして評価しやすいことから、ここでは検討の第一段階として円形断面を対象とした。

そのうえで、後述する手法で焼なまして冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋を配置したAシリーズ3体と、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を配置したNシリーズ3体の計6体の供試体を作製した。軸方向鉄筋および帯鉄筋にはSD295A、直径6.35mmの異形棒鋼(D6)を用いた。テストピースによるコンクリートの圧縮強度は29.8

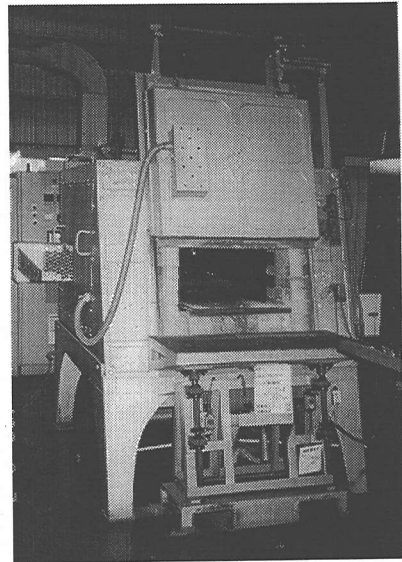


写真-2 焼なましに用いたニクロム炉

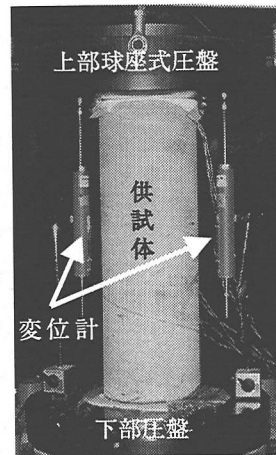


写真-3 一軸圧縮荷重実験方法

MPaであり、ミルシートによる鉄筋の降伏強度 $\sigma_{sy}$ は376MPa、引張強度 $\sigma_{su}$ は544MPa、伸びは21%である。本来ならば、帯鉄筋を円形に冷間加工した後に、これを焼なまして冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋と冷間加工ひずみが残留している帯鉄筋に対して引張試験を行い、その引張力～引張ひずみ関係を求めることが望ましいが、円形に加工した鉄筋に対して実験上様な引張力を与えることは困難である。したがって、本研究では、帯鉄筋の引張力～引張ひずみ関係は後述するファイバー解析か

表-2 ファイバー解析に用いた鉄筋の物性値

鉄筋の初期弾性係数 $E_s$ (GPa)	206
鉄筋の降伏強度 $\sigma_{sy}$ (MPa)	376
鉄筋の引張強度 $\sigma_{su}$ (MPa)	544
鉄筋の降伏ひずみ $\epsilon_{sy}$	0.00183
鉄筋のひずみ硬化開始時のひずみ $\epsilon_{sh}$	0.02921
鉄筋の引張強度時のひずみ $\epsilon_{su}$	0.16921

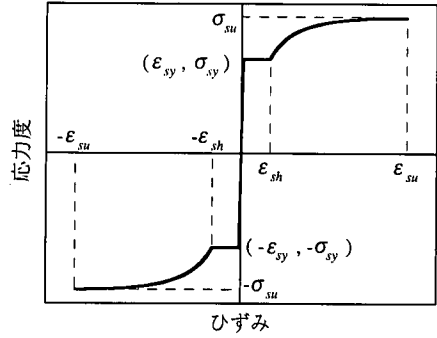


図-2 弾性域から一方向に載荷した場合の鉄筋の応力度～ひずみ関係 (Park モデル)

ら求めることとした。

冷間加工によって帯鉄筋内部に発生している残留ひずみを除去するために、写真-1のように直径  $d=185\text{mm}$  の円形に冷間加工した帯鉄筋を低温焼なましした。低温焼なましとは、鑄造、塑性加工、焼き入れなどによって鋼材内部に発生している残留ひずみを除く目的で、 $A_{c1}$  変態点以下の温度で鋼材を加熱処理する手法である<sup>7),8)</sup>。

帯鉄筋の焼なましには、写真-2に示す新日本製鐵総合技術センター所有の中型ニクロム炉を用いた。炉内の温度を  $650 \pm 10^\circ\text{C}$  とし、この中に円形に冷間加工した帯鉄筋を入れ、この温度で1時間加熱保持した。加熱保持後、帯鉄筋は炉外において空冷し、徐々に室温まで温度を下げた。

一軸圧縮載荷実験の状況を写真-3に示す。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、軸方向変位、帯鉄筋の周方向ひずみを計測した。コンクリート柱の軸方向応力度は作用荷重を初期断面積で割って、また軸方向ひずみは変位計で測定した供試体上下間の変位を供試体の初期高さで割って、それぞれ算出した。また、図-1に示すように各供試体に4か所ずつひずみゲージを貼付し、帯鉄筋の周方向の変形を計測した。ひずみゲージは帯鉄筋の内側と外側に貼付した。以下には、これより求めた軸ひずみを帯鉄筋の周方向ひずみとして示す。

### 3. 帯鉄筋に生じる冷間加工ひずみと残留応力度

#### (1) 鉄筋の応力度～ひずみ関係の仮定

冷間加工した円形帯鉄筋でコンクリートに横拘束を与えた場合の効果を検討するためには、塑性域における引張と圧縮をくり返した場合の鉄筋の応力度～ひずみ関係を与えなければならない。このためには、弾性域から一方向に載荷した場合の応力度～ひずみ関係と、塑性域か

ら除荷・再載荷した場合の応力度～ひずみ関係が必要となる。

弾性域から一方向に載荷した場合の鉄筋の応力度  $\sigma_s$  ～ひずみ  $\epsilon_s$  関係には図-2に示す Park らによって提案された次式 (以下、Park モデルと呼ぶ) を用いることとした<sup>9)</sup>。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \epsilon_s & 0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \\ \sigma_{sy} & \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh} \\ \sigma_{sy} \left\{ \frac{m(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right\} & \epsilon_{sh} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、

$$m = \frac{\sigma_{su} / \sigma_{sy} (30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2} \quad (2)$$

$$r = \epsilon_{su} - \epsilon_{sh} \quad (3)$$

ここで、 $E_s$  : 鉄筋の初期弾性係数、 $\sigma_{sy}$  : 鉄筋の降伏強度、 $\sigma_{su}$  : 鉄筋の引張強度、 $\epsilon_{sy}$  : 鉄筋の降伏ひずみ、 $\epsilon_{sh}$  : 鉄筋のひずみ硬化開始時のひずみ、 $\epsilon_{su}$  : 鉄筋の引張強度時のひずみである。 $\epsilon_{sh}$  および  $\epsilon_{su}$  はそれぞれ次式で表される<sup>9)</sup>。

$$\epsilon_{sh} = 16 \epsilon_{sy} \quad (4)$$

$$\epsilon_{su} = \epsilon_{sh} + 0.14 \quad (5)$$

式(1)～(5)に用いた鉄筋の物性値は、表-2に示す通りである。

また、塑性域まで一方向に載荷した後、除荷・再載荷した場合の鉄筋の応力度  $\sigma_s$  ～ひずみ  $\epsilon_s$  関係には図-3に示す Menegotto-Pinto モデル (以下、MP モデルと呼ぶ)

を用いた<sup>10),11)</sup>。このモデルは、応力度がひずみの関数として陽に与えられており、ひずみが反転した点から次に反転する点までひとつの式（以下に示す式(6)）で与えることができるという実用性を有していると同時に、Bauschinger 効果を考慮できる。これは次式のように表される。

$$\sigma_s = (\sigma_0 - \sigma_r) \left\{ b\tilde{\epsilon} + \frac{(1-b)\tilde{\epsilon}}{(1+\tilde{\epsilon}^R)^{1/R}} \right\} + \sigma_r \quad (6)$$

ここで、

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_r}{\epsilon_0 - \epsilon_r} \quad (7)$$

ここで、 $\sigma_r$ ：反転点応力度、 $\epsilon_r$ ：反転点ひずみ、 $b$ ：初期弾性係数  $E_s$  と降伏後弾性係数  $E_{s2}$  の比、 $\epsilon_0$ 、 $\sigma_0$ ：次の2式の交点として求められるひずみおよび応力度である。

$$\sigma = E_s(\epsilon - \epsilon_r) + \sigma_r \quad (8)$$

$$\sigma = bE_s(\epsilon - \epsilon_{sy}) + \sigma_{sy} \quad (9)$$

ここで、初期弾性係数  $E_s$  と降伏後弾性係数  $E_{s2}$  の比  $b$  をどのように与えるかが重要である。MP モデルにより鉄筋の非線形くり返し履歴を表す場合には、除荷・再載荷した場合のひずみ硬化を考慮するために  $b=2\%$  とした研究もある<sup>10),11)</sup> が、本解析では降伏後弾性係数  $E_{s2}$  を次式による降伏点と引張強度点を結ぶ平均弾性係数とし、 $b$  を次式から求めることとした。

$$b = \frac{\sigma_{su} - \sigma_{sy}}{\epsilon_{su} - \epsilon_{sy}} \cdot \frac{1}{E_s} \quad (10)$$

上式から、 $b$  を求めると 0.5% となる。

また、 $R$  は Bauschinger 効果を表すパラメーターであり、次式から求める。

$$R = R_0 - \frac{a_1 \xi}{a_2 + \xi} \quad (11)$$

ここで、 $R_0$  はパラメーター  $R$  の初期値、 $a_1$ 、 $a_2$  は式(11)の定数であり、ここでは文献(11)に従い、 $R_0=20$ 、 $a_1=18.5$ 、 $a_2=0.15$  とした。 $\xi$  は次式から求める。

$$\xi = \frac{|\epsilon_0 - \epsilon_{sy}|}{\epsilon_{sy}} \quad (12)$$

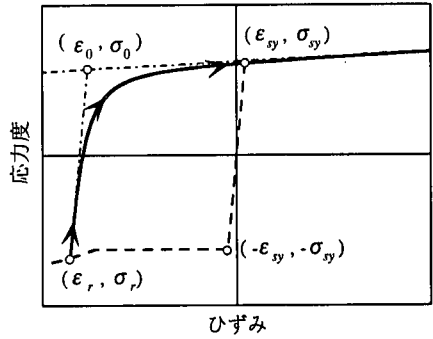


図-3 塑性域から除荷・再載荷した場合の鉄筋の応力度～ひずみ関係 (Menegotto-Pinto モデル)

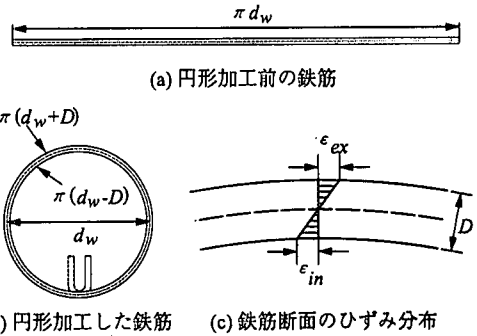


図-4 帯鉄筋の冷間加工

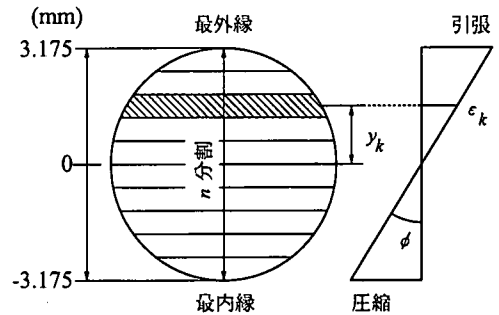
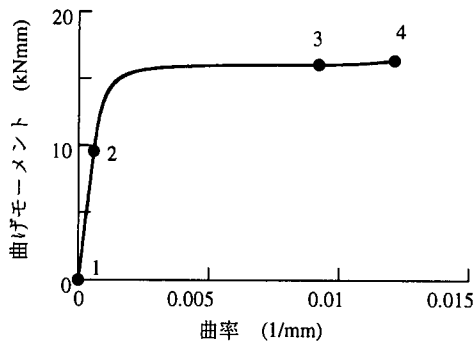


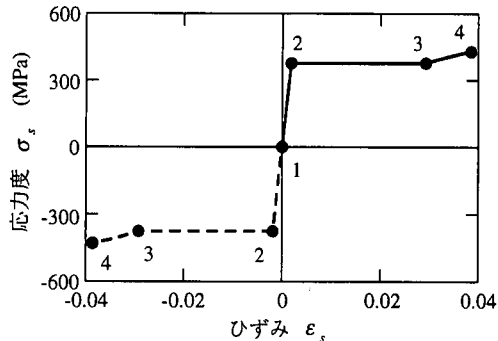
図-5 直径 6.35mm の鉄筋断面の分割と図心からの距離およびひずみ分布

## (2) 帯鉄筋の冷間加工ひずみと残留応力度

図-4 に示すように、長さ  $\pi d_w$ 、直径  $D$  の鉄筋をフープ直径  $d_w$  の円形に冷間加工すると、この円形鉄筋の最内縁および最外縁の長さはそれぞれ  $\pi(d_w - D)$ 、 $\pi(d_w + D)$  となる。フック部は曲げ半径 12mm、90 度曲がりとしているため、円形に帯鉄筋を加工するよりもはるかに大きなひずみが生じるが、これは局所的なものであるため、ここではこの効果は考えない。これより、最内縁および最外縁の冷間加工ひずみはそれぞれ次式で表される。

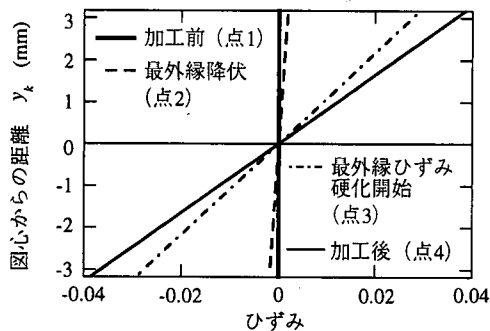


(a) 曲げモーメント～曲率関係

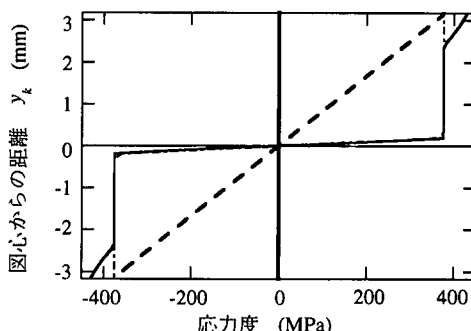


(b) 帯鉄筋断面の最外縁および最内縁の応力度 $\sigma_s$ ～ひずみ $\epsilon_s$ の履歴

図-6 帯鉄筋を冷間加工したときの曲げモーメント～曲率と応力度～ひずみの履歴



(a) 帯鉄筋断面のひずみの変化



(b) 帯鉄筋断面の応力度の変化

図-7 冷間加工したときの帯鉄筋断面に生じるひずみと応力度

$$\epsilon_{in} = -\frac{D}{d_w} \quad (13)$$

$$\epsilon_{ex} = \frac{D}{d_w} \quad (14)$$

$$\phi = \frac{\epsilon_{ex} - \epsilon_{in}}{D} = \frac{2}{d_w} \quad (16)$$

実際には、鉄筋を曲げるために加えた外力を取り除くと曲げモーメントが0になるように帯鉄筋の変形が戻るため、フープ直径 $d$ は加工直径 $d_w$ よりも大きくなる。そこで、本研究では帯鉄筋のフープ直径が $d=185\text{mm}$ となるように加工するために、フープ加工直径は $d_w=165\text{mm}$ とすることとした。

帯鉄筋に生じる曲げモーメント～曲率関係は、ファイバー要素を用いた断面解析から求めることができる。まず、対象となる鉄筋断面を図-5のように $n=50$ 個のファイバーに分割し、図心から $y_k$ の距離にある $k$ 番目のファイバーの断面積を $A_k$ 、ひずみを $\epsilon_k$ 、応力度を $\sigma_k$ とする。残留ひずみが生じていない帯鉄筋を円形に冷間加工した場合には、 $k$ 番目のファイバーのひずみ $\epsilon_k$ は、

$$\epsilon_k = y_k \phi \quad (15)$$

ここで、 $\phi$ は鉄筋断面の曲率であり、次式で表される。

ファイバーの分割数 $n$ を上述のように50としたのは、これ以上細かく分割した結果とほとんど変わらない結果が得られるためである。

ParkモデルおよびMPモデルの関係を用いて、ひずみ $\epsilon_k$ より $k$ 番目のファイバーの応力度 $\sigma_k$ を求め、次式から鉄筋断面の曲げモーメントを求める。

$$M = \int_A \sigma y dA = \sum_{k=1}^n (\sigma_k y_k A_k) \quad (17)$$

ここで、直径 $D=6.35\text{mm}$ の鉄筋をフープ加工直径 $d_w=165\text{mm}$ (曲率 $\phi=0.0121/\text{mm}$ )となるように冷間加工したときの曲げモーメント～曲率の履歴および最外縁と最内縁部分の応力度 $\sigma_s$ ～ひずみ $\epsilon_s$ の履歴をそれぞれ示した結果が図-6である。これより、曲率 $\phi$ が $0.0006/\text{mm}$ に達した段階(図-6中の点2)で最外縁および最内縁部分から降伏が始まり、徐々に鉄筋内部が降伏していき、 $\phi=0.005/\text{mm}$ を超えるとほぼ全断面が降伏するため曲げモーメントは $16\text{kNmm}$ で

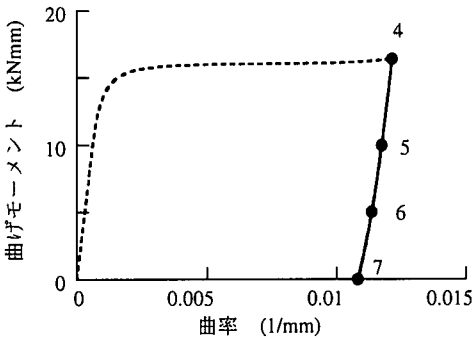
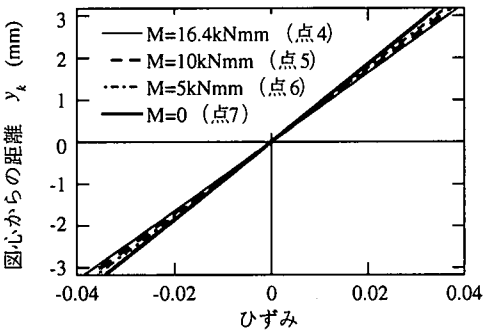
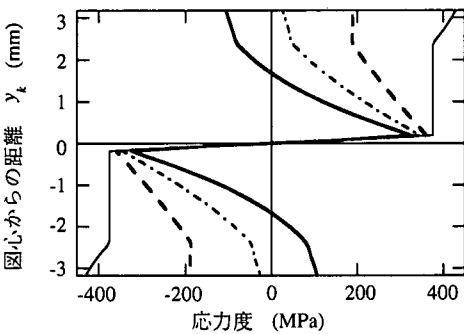


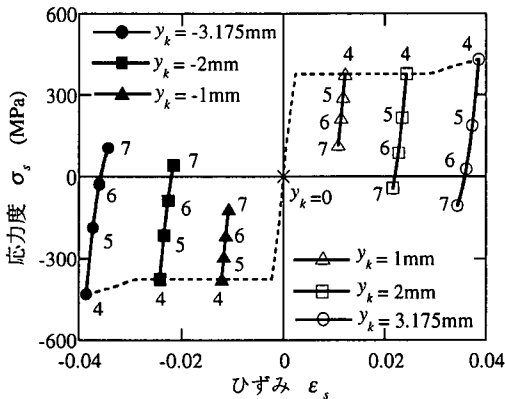
図-8 冷間加工後に外力を取り除いたときの帯鉄筋断面の曲げモーメント～曲率関係



(a) 帯鉄筋断面のひずみの変化



(b) 帯鉄筋断面の応力度の変化



(c) 主要なファイバーにおける応力度 $\sigma_s$ ～ひずみ $\epsilon_s$ の履歴

図-9 冷間加工後に外力を取り除いたときの帯鉄筋断面に生じるひずみと応力度

おむね一定となる。さらに、 $\phi=0.0093/\text{mm}$ を超える(図-6中の点3)と、最外縁および最内縁部分のひずみが、ひずみ硬化開始時のひずみ $\epsilon_{sh}=2.92\%$ を上回り、曲げモーメントが再び増加し始める。したがって、フープ加工直径 $d_w=165\text{mm}$ で加工した後は、 $16.4\text{kNmm}$ の曲げモーメントが生じ、最内縁には $\epsilon_{in}=3.86\%$ の圧縮ひずみが、最外縁には $\epsilon_{ex}=3.86\%$ の引張ひずみがそれぞれ生じている。

図-6に示した点1～4の際に帯鉄筋の断面ではどのようなひずみ分布および応力度分布となっているかを示した結果が図-7である。加工後には鉄筋断面の約95%が塑性化していることがわかる。

曲げモーメントを作用させて円形に冷間加工した帯鉄筋では、加工後に外力を取り除くと曲げモーメントが0になるように変形が戻る。図-8は、曲げモーメントが $16.4\text{kNmm}$ から0に戻るときの鉄筋の曲げモーメント～曲率関係を示した結果である。曲げモーメントの低下とともに曲率も低下し、曲率が $0.0108/\text{mm}$ に達した段階で曲げモーメントが0になり、式(16)からフープ直径 $d$ は $185\text{mm}$ となる。

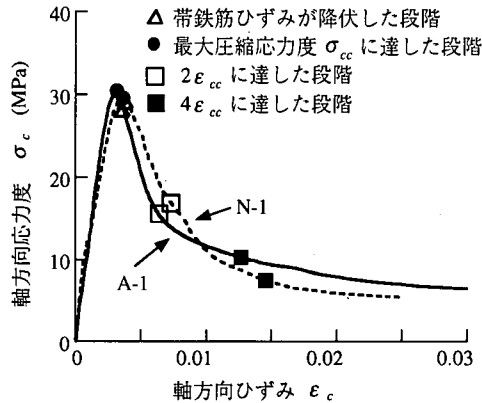
このときに、断面のひずみ分布、応力度分布および応力度 $\sigma_s$ ～ひずみ $\epsilon_s$ の履歴がどのように変化したかを示した結果が図-9である。加工後に $0.0121/\text{mm}$ であった曲率が $0.0108/\text{mm}$ まで低下するため、最外縁の引張ひずみおよび最内縁の圧縮ひずみはそれぞれ $3.86\%$ から $3.43\%$ まで低下する。また、式(15)からもわかるように、図心からの距離 $y_k$ が大きいほど、曲率の低下にともなうひずみの低下が大きい。このため、応力度分布をみると、図心付近ではほとんど応力度は低下しないのに対し、最外縁および最内縁ではともに応力度の低下が大きく、最外縁では冷間加工後に $430\text{MPa}$ の引張応力度(点4)であったが、曲げモーメントが $5\text{kNmm}$ まで低下した段階(点6)では応力度はほぼ0となり、さらに曲げモーメントが低下し0に達するとき(点7)には、 $107\text{MPa}$ の圧縮応力度が生じるようになる。最内縁における応力度も、冷間加工後に $430\text{MPa}$ であった圧縮応力度が、曲げモーメントが0に達するときには $107\text{MPa}$ の引張応力度となる。

#### 4. コンクリート柱の応力度～ひずみ関係に及ぼす冷間加工ひずみの影響

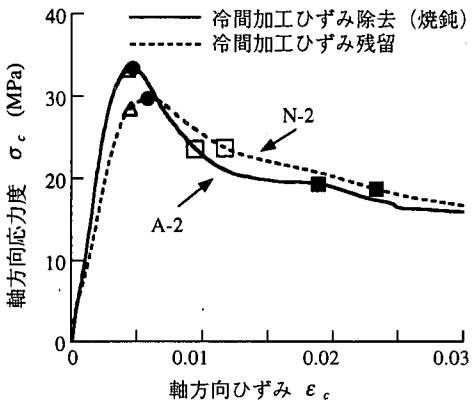
供試体を載荷していくと、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋を用いた場合、除去しない帯鉄筋を用いた場合ともに、最大圧縮応力度 $\sigma_{cc}$ に達するまでは外観上は健全である。応力度下降域に入ると表面コンクリートにひび割れが生じ、さらに軸方向ひずみを増加させていくと表

表-3 最大圧縮応力度 $\sigma_{cc}$  およびそのときのひずみ $\epsilon_{cc}$  と帯鉄筋ひずみ

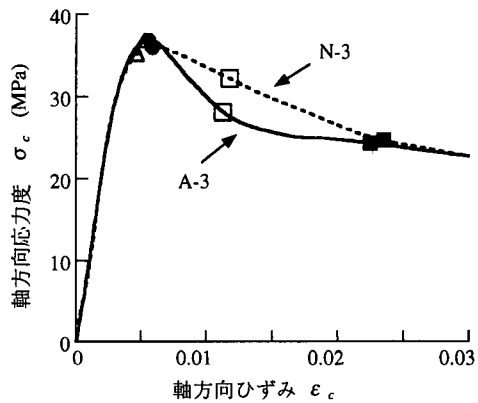
	帯鉄筋比 $\rho_s$ (%)	帯鉄筋の 残留ひずみ	最大圧縮応力度 時のひずみ $\epsilon_{cc}$	最大圧縮応力度 $\sigma_{cc}$ (MPa)	$\epsilon_{cc}$ の時の帯鉄筋 の周方向ひずみ	$\epsilon_{hoop} = \epsilon_{sy}$ 時の 軸方向ひずみ
A-1	0.57	除去	0.00317	30.5	0.00078	0.00368
N-1		あり	0.00365	29.6	0.00097	0.00392
A-2	1.14	除去	0.00476	33.4	0.00403	0.00419
N-2		あり	0.00584	29.7	0.00467	0.00447
A-3	1.71	除去	0.00562	36.8	0.00374	0.00518
N-3		あり	0.00588	35.9	0.00472	0.00469



(a)  $\rho_s = 0.57\%$  の場合



(b)  $\rho_s = 1.14\%$  の場合



(c)  $\rho_s = 1.71\%$  の場合

図-10 コンクリート柱の軸方向応力度 $\sigma_c$  ~ 軸方向ひずみ $\epsilon_c$  関係

面コンクリートが剥落した。

図-10 は焼なまして冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋を用いた供試体と冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いた供試体の軸方向応力度 $\sigma_c$  ~ 軸方向ひずみ $\epsilon_c$  関係をそれぞれ 3 種類の帯鉄筋比 $\rho_s$  ごとに比較した結果である。また、表-3 は、各供試体の最大圧縮応力度 $\sigma_{cc}$  および最大圧縮応力度時のひずみ $\epsilon_{cc}$  を比較した結果である。ここで、帯鉄筋の周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$  は、各供試体ごとにそれぞれ 4 か所で計測したひずみのうち、最も大きな値を示している。4 か所の単純平均ではなく、最も

大きなひずみを用いたのは、供試体の応力度が最大圧縮応力度 $\sigma_{cc}$  付近に達してコンクリートに損傷が生じた後には、コンクリートの損傷が局所化し、同一の供試体でも計測箇所によって周方向のひずみが異なるため、帯鉄筋の周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$  から帯鉄筋の横拘束効果を評価するには、帯鉄筋が最初に降伏ひずみに達する点が重要と考えたためである。

いずれの供試体も、軸方向応力度 $\sigma_c = 0$  から載荷していくと軸方向ひずみ $\epsilon_c$  が 0.003 ~ 0.006 程度に達した段階で供試体の軸方向応力度 $\sigma_c$  は最大圧縮応力度 $\sigma_{cc}$  に

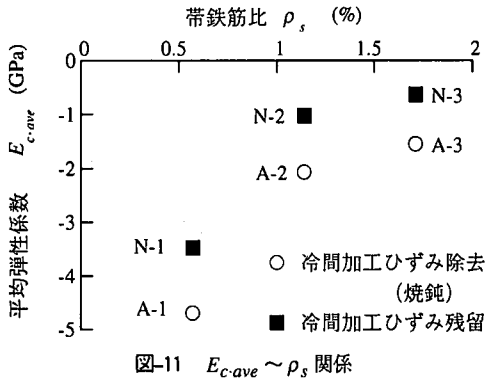
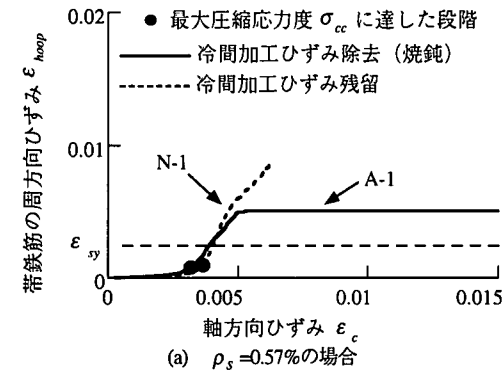
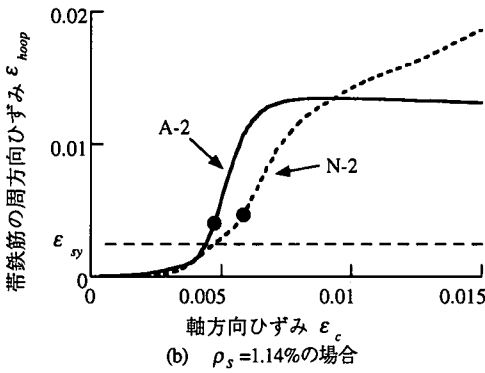


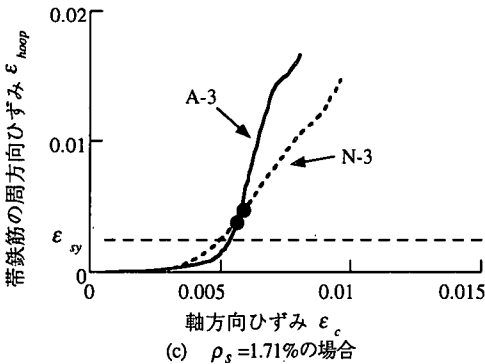
図-11  $E_{c,ave} \sim \rho_s$  関係



(a)  $\rho_s = 0.57\%$  の場合



(b)  $\rho_s = 1.14\%$  の場合



(c)  $\rho_s = 1.71\%$  の場合

図-12 帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  ~ コンクリート柱の軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係

達する。その後、軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  の増加とともに軸方向応力度  $\sigma_c$  は低下するが、 $\epsilon_c$  が大きくなると  $\sigma_c$  の低下は緩やかになり、軸方向ひずみが  $\epsilon_c > 4\epsilon_{cc}$  に達するような段階では、応力度はほぼ最終値に近づく。また、図-10には帯鉄筋ひずみが次式で求められる降伏ひずみ  $\epsilon_{sy} = 0.00183$  に達した点を  $\Delta$  で示し、また表-3にはそのときの供試体の軸方向ひずみの値を示している。

$$\epsilon_{sy} = \frac{\sigma_{sy}}{E_s} \quad (18)$$

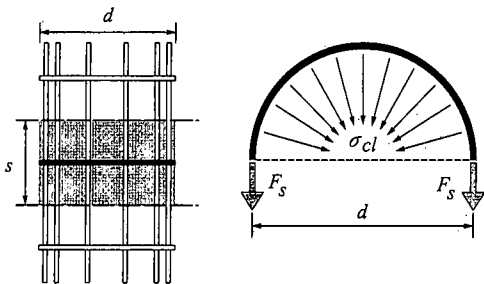
ただし、後述するように冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋では降伏点が明確ではないため、必ずしもこのひずみで帯鉄筋が降伏していないことに注意が必要である。これによれば、帯鉄筋の冷間加工ひずみを除去した場合、しない場合ともにおおむね帯鉄筋ひずみが降伏ひずみ  $\epsilon_{sy} = 0.00183$  に達する付近でコンクリートは最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達している。これらの点は、現在までの各種の研究で報告されているとおりである<sup>11-14, 12-14)</sup>。

図-10では、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いて  $\rho_s = 1.14\%$  とした供試体 (N-2) では、他の供試体に比較して初期弾性係数  $E_c$  と最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  がともに小さくなっている。これには、供試体の端面仕上げが水平ではなく、荷重が偏心して作用した可能性等があるが、理由はよくわからない。この点を別とすれば、帯鉄筋比  $\rho_s$  が同じであれば、その最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$ 、最大圧縮応力度時のひずみ  $\epsilon_{cc}$ 、軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  が  $4\epsilon_{cc}$  に達したときの応力度  $\sigma_{sf}$ <sup>12)</sup> は帯鉄筋の冷間加工ひずみを除去する、除去しないに関わらずおおむね同程度ということができる。

これに対して、軸方向ひずみが  $\epsilon_{cc} < \epsilon_c < 2\epsilon_{cc}$  では、冷間加工ひずみを除去した場合の方が除去しない場合に比べて応力度の低下は大きい。そこで、 $\epsilon_{cc} < \epsilon_c < 2\epsilon_{cc}$  区間の平均弾性係数  $E_{c,ave}$  を求め、これと帯鉄筋比  $\rho_s$  の関係を示した結果が図-11である。いずれの帯鉄筋比  $\rho_s$  の場合にも、冷間加工ひずみを除去した場合の平均弾性係数  $E_{c,ave}$  は、冷間加工ひずみを除去しない場合の平均弾性係数  $E_{c,ave}$  に比べて約 1GPa 小さい。したがって、 $\epsilon_{cc} < \epsilon_c < 2\epsilon_{cc}$  区間においては、帯鉄筋による拘束効果は、冷間加工ひずみを除去した供試体のほうが冷間加工ひずみを除去しない供試体よりも小さいと考えられる。

供試体を載荷していくと帯鉄筋は周方向にどのように膨張するかを、帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  ~ 供試体の軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係として示した結果が図-12である。軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  が 0.003 程度までは軸方向ひずみの増加に伴う帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  の増加は緩やかである。図中にはコンクリート柱の応力度が最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達した点を示しており、このときの帯鉄筋の周方





(a) 1 段の帯鉄筋が拘束する範囲 (b) コアコンクリートに作用する横拘束力

図-13 帯鉄筋による引張力と横拘束力の関係

向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  は 0.0008 ~ 0.0047 と降伏ひずみ  $\epsilon_{sy} = 0.0018$  の前後でバラツキがある。図-10 では、帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  が降伏する付近で供試体の応力度はほぼ最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達しているが、図-12 では、供試体の応力度が最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達するときの帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  が降伏ひずみ  $\epsilon_{sy}$  の前後にばらつく。これは、供試体の応力度が最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達する付近では単位軸方向ひずみあたりの帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  の増加度が大きいために、図-10 よりも供試体の応力度が最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達した時点と帯鉄筋の降伏した時点の差が大きく見えるためである。図-12 より、供試体の応力度が最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  となった後も帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  は増加し続け、コンクリートが周方向に膨張し続けていることが分かる。一方、A-1、A-2 供試体のように帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  が頭打ちになるものもあるが、これはひずみゲージを貼付した箇所とは別の箇所です供試体の損傷が卓越したためと考えられる。

## 5. 冷間加工ひずみを除去する帯鉄筋と除去しない帯鉄筋の横拘束力の比較

### (1) 帯鉄筋に生じる引張力と横拘束力の関係

図-13 に示すように、供試体が軸圧縮荷重を受けるとコアコンクリートの変形により、帯鉄筋には次式による一様な引張力  $F_s$  が作用する<sup>4), 12)-14)</sup>。

$$2F_s = ds\sigma_{cl} \quad (19)$$

ここで、 $s$  は帯鉄筋間隔、 $\sigma_{cl}$  はコアコンクリートに作用する横拘束応力度である。したがって、コアコンクリートに作用する横拘束力を評価するためには、帯鉄筋に生じる引張力  $F_s$  を求めることが重要である。

冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋を用いた場合には、

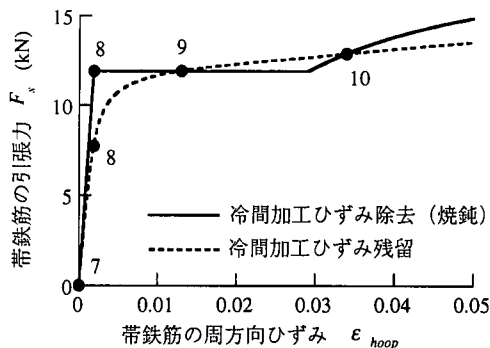


図-14 帯鉄筋の引張力  $F_s$  ~ 周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  関係

帯鉄筋に生じる周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  (帯鉄筋の軸方向引張ひずみ) は断面内で一様であるため、式(19)の引張力  $F_s$  は次式で表される。

$$F_s = \sigma_{hoop} A_s \quad (20)$$

ここで、 $\sigma_{hoop}$  は  $\epsilon_{hoop}$  のときに Park モデルから求められる帯鉄筋の応力度、 $A_s$  は帯鉄筋断面積である。

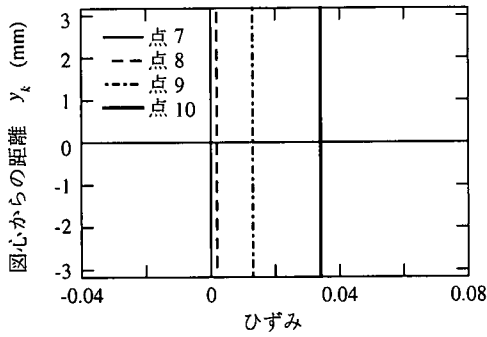
一方、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いた場合には、前述したように図-9 のようなひずみが帯鉄筋に残留している。したがって、帯鉄筋に生じる引張力  $F_s$  は式(20)のように簡単には表せない。そこで、帯鉄筋に生じる引張力  $F_s$  をファイバー解析から求めることとする。断面に一様に引張力  $F_s$  が作用する場合には、図-5 に示した  $k$  番目のファイバーのひずみ  $\epsilon_k$  は次のように与えられる。

$$\epsilon_k = \epsilon_{res-k} + \epsilon_{hoop} \quad (21)$$

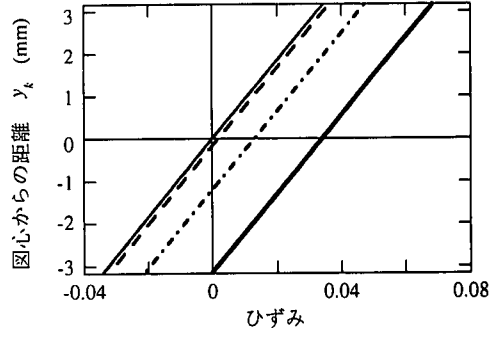
ここで、 $\epsilon_{res-k}$  は冷間加工によって  $k$  番目のファイバーに生じている残留ひずみである。Park および MP モデルを用いて、ひずみ  $\epsilon_k$  より  $k$  番目のファイバーの応力度  $\sigma_k$  を求めると、帯鉄筋に生じる引張力  $F_s$  は次式のように求めることができる。

$$F_s = \int_A \sigma dA = \sum_{k=1}^n (\sigma_k A_k) \quad (22)$$

式(20)、(22)によって、帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  が増加するとどのように引張力  $F_s$  が増加するかを求め、これを冷間加工ひずみを除去した場合と冷間加工ひずみを除去しない場合と比較した結果が図-14 である。冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋を用いた場合には、降伏ひずみ  $\epsilon_{sy} = 0.00183$  (図中の点 8) に達するまで初期勾配を保ったまま、ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  に比例して引張力  $F_s$  も大きくな

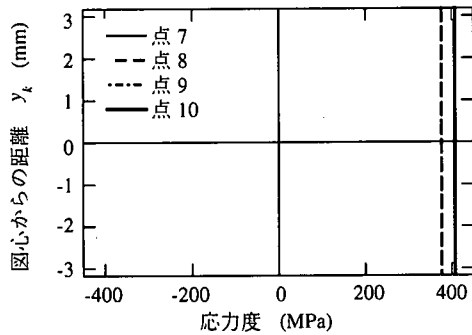


(a) 冷間加工ひずみを除去した場合

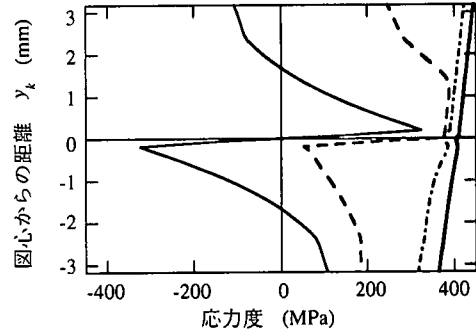


(b) 冷間加工ひずみを除去しない場合

図-15 帯鉄筋断面内のひずみ



(a) 冷間加工ひずみを除去した場合



(b) 冷間加工ひずみを除去しない場合

図-16 帯鉄筋断面内の応力度

る。ここで、初期勾配としては点7~8間の平均勾配として定義している。一方、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋では、点7~8間においても接線勾配が徐々に低下している。この結果、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋は冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋に比べて初期勾配が1.5倍大きい。また、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋には明確な降伏点はなく、式(18)から求められる降伏ひずみ $\epsilon_{sy} = 0.00183$ に達する付近では、この接線勾配は冷間加工した帯鉄筋における初期勾配の約40%にまで低下している。ここで、 $\epsilon_{sy} = 0.00183$ に達した段階の引張力 $F_s$ を比較してみると、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋では7.7kNであるのに対して、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋では11.9kNと1.5倍大きい。一方、降伏ひずみ $\epsilon_{sy} = 0.00183$ を超えた後は、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋では、引張力 $F_s$ は11.9kNで一定となるが、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いた場合には、勾配は徐々に緩やかになるが、除荷・再載荷した場合のひずみ硬化のため、ひずみ $\epsilon_{hoop}$ の増加とともに引張力 $F_s$ は増加し続け、 $\epsilon_{hoop} = 0.013$ (図中の点9)では引張力 $F_s$ は冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋の場合よりも大きくなる。さらに $\epsilon_{hoop}$ が大きくなると、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋ではひずみ硬化開始ひずみ $\epsilon_{sh} = 0.0292$ に達し、再び引張力 $F_s$ は増加するため、 $\epsilon_{hoop} =$

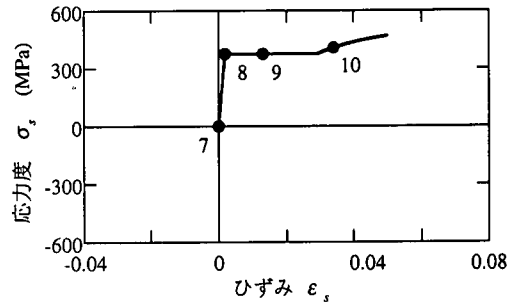
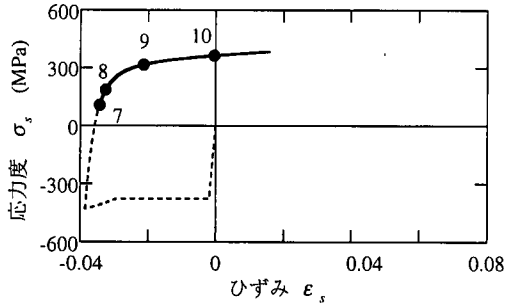


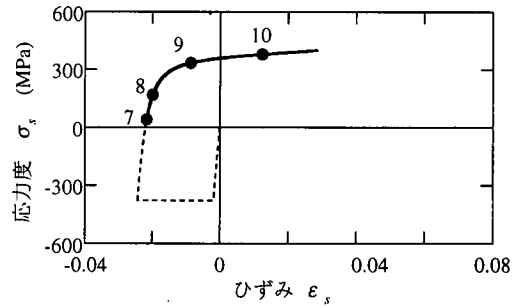
図-17 冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋の応力度 $\sigma_s$ ~ひずみ $\epsilon_s$ の履歴

0.034(図中の点10)で冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋の引張力 $F_s$ を上回るようになる。

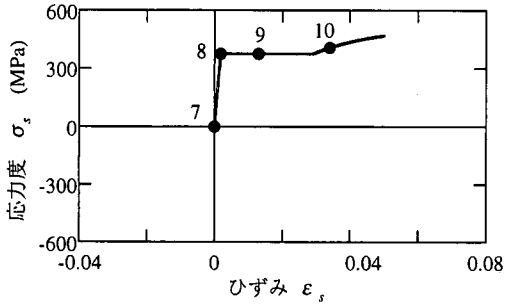
図-14に示した $F_s \sim \epsilon_{hoop}$ 関係がどのような帯鉄筋断面のひずみ分布と応力度分布によって生じたかを示した結果がそれぞれ図-15、図-16である。冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋の場合には、帯鉄筋断面には一様なひずみおよび応力度が生じる。一方、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋では、前述したようにもともと $\phi = 0.0108$ /mmの曲率が残留しており、帯鉄筋の周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$ が増加すると、曲率は一定のまま各ファイバーのひずみ $\epsilon_k$ は増加する。このときの応力度の変化をみてみ



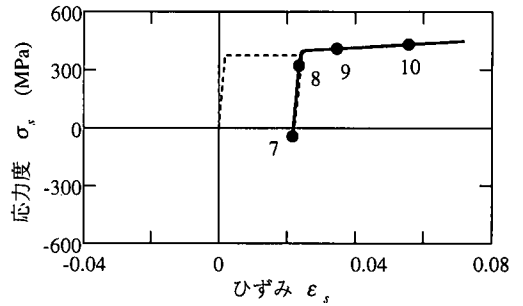
(a)  $y_k = -3.175\text{mm}$  (最内縁) の場合



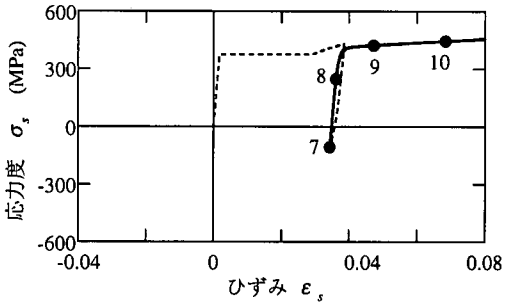
(b)  $y_k = -2\text{mm}$  の場合



(c)  $y_k = 0\text{mm}$  (図心) の場合



(d)  $y_k = 2\text{mm}$  の場合



(e)  $y_k = 3.175\text{mm}$  (最外縁) の場合

図-18 冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋の主要なファイバーの応力度 $\sigma_s$ ～ひずみ $\epsilon_s$ の履歴

ると、帯鉄筋の周方向ひずみ $\epsilon_{hoop} = 0$ のときに前述したように最内縁では引張ひずみが、最外縁では圧縮ひずみがともに107MPa残留しており、 $\epsilon_{hoop}$ の増加とともに各ファイバーの応力度 $\sigma_k$ は引張側に増加する。 $\epsilon_{hoop} = 0.013$  (図中の点9)に達すると冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋に生じる引張力が、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋に生じる引張力を上回るようになるが、この段階では帯鉄筋断面内の応力度はおおむね一様となる。

また、このようなひずみ分布および応力度分布がどのような応力度 $\sigma_s$ ～ひずみ $\epsilon_s$ の履歴によって生じたかを示した結果が図-17、図-18である。冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋では鉄筋断面は一様に図-17に示す応力度 $\sigma_s$ ～ひずみ $\epsilon_s$ の履歴を生じる。これに対して、図-18によれば、冷間加工ひずみを除去しなかった帯鉄筋では、 $\epsilon_{hoop} = \epsilon_{sy}$  (図中の点8)となると図心より内側部分の鉄

筋ファイバーの応力度が200MPa以下であり、また最外縁近傍においても降伏応力度 $\sigma_{sy} = 376\text{MPa}$ に達していない。これは、Bauschinger効果により図心より内側部分の鉄筋ファイバーの接線弾性係数が初期弾性係数 $E_s$ よりも小さいためであり、最外縁近傍では冷間加工によって応力度が圧縮側に残留しているためである。さらに軸方向引張ひずみが増加して $\epsilon_{hoop} = 0.013$  (図中の点9)となると、応力度 $\sigma_s$ ～ひずみ $\epsilon_s$ の履歴は、接線弾性係数が降伏後弾性係数 $E_{s2}$ とおおむね等しい領域に達し、引張力 $F_s$ は11.9kNとなる。その後も降伏後弾性係数 $E_{s2} = 1.03\text{GPa}$ を保持したまま、ひずみの増加とともに応力度は増加する。

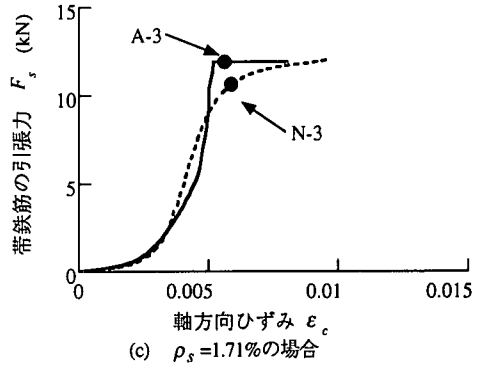
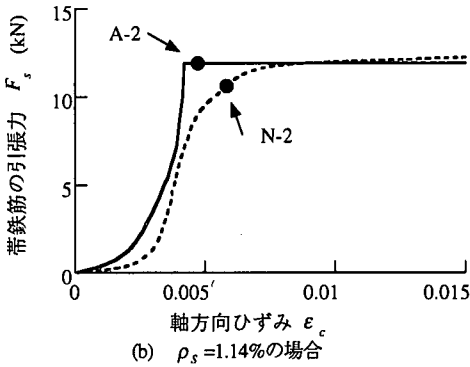
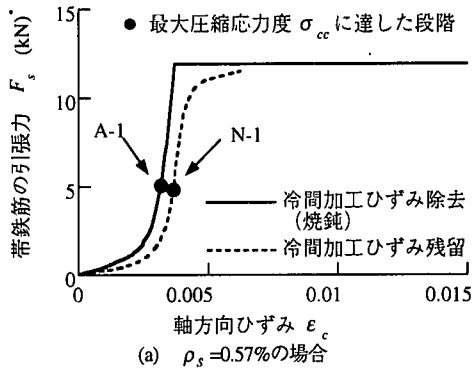


図-19 帯鉄筋の引張力  $F_s$  ~ コンクリート柱の軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係

表-4 最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達するときに帯鉄筋に生じる引張力  $F_s$

	冷間加工ひずみ除去	冷間加工ひずみ残留
$\rho_s = 0.57\%$	5.1 (A-1)	4.8 (N-1)
$\rho_s = 1.14\%$	11.9 (A-2)	10.6 (N-2)
$\rho_s = 1.71\%$	11.9 (A-3)	10.6 (N-3)

## (2) 帯鉄筋による横拘束力から評価したコンクリート柱の軸方向応力度~軸方向ひずみの関係

帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  ~ 供試体の軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係は実験によって図-12 のように求められているので、これと図-14 に示した帯鉄筋の引張力  $F_s$  ~ 帯鉄筋の周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  に対する解析結果を結びつけると、帯鉄筋の引張力  $F_s$  ~ 供試体の軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係が図-19 のように求められる。この結果に基づき、図-10 に示したコンクリートの軸方向応力度  $\sigma_c$  ~ 軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係の評価すると、以下のようになる。

まず、図-19 において、供試体の応力度が最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達するまでの帯鉄筋に生じる引張力  $F_s$  に着目する。冷間加工ひずみを除去する、しないに関わらず軸方向ひずみが  $\epsilon_c = 0.003$  程度に達するまでは帯鉄筋の引張力  $F_s$  は緩やかに増加するが、 $\epsilon_c$  がこれ以上になると引張力  $F_s$  は急速に増加する。表-4 は供試体の応力度

が最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達した段階で帯鉄筋に生じる引張力  $F_s$  を比較した結果である。これによれば、 $\sigma_{cc}$  に達した段階で帯鉄筋に生じる引張力  $F_s$  は冷間加工ひずみを除去する、しない場合に関わらずおおむね同程度である。また、最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達するまでは、コンクリートはまだ健全であるため、帯鉄筋による引張力  $F_s$  がコンクリートの軸方向応力度  $\sigma_c$  ~ 軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係に及ぼす影響は一般に小さい。以上のような点が、図-10 おいて最大圧縮応力度  $\sigma_{cc}$  に達するまではコンクリートの軸方向応力度  $\sigma_c$  ~ 軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  関係にほとんど差が生じない原因と考えられる。

一方、コンクリートの  $\sigma_c$  ~  $\epsilon_c$  関係の応力度下降域では、コアコンクリートが周方向に膨張し続ける。図-19 によれば、この段階では冷間加工ひずみを除去しない場合には、除荷・再載荷した後のひずみ硬化により帯鉄筋の横拘束力  $F_s$  は供試体の軸方向ひずみ  $\epsilon_c$  の増加とともに増加し続けるが、冷間加工ひずみを除去した場合にはこのようにはならず、 $\epsilon_c$  が増加しても  $F_s$  は増加しない。すなわち、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋では周方向ひずみ  $\epsilon_{hoop}$  の増加に対して帯鉄筋の横拘束力は増加しないが、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋では多少ではあるがコンクリートが周方向に膨張すると横拘束力も増加し、これが応力度下降域におけるコンクリートの軸方向応力度  $\sigma_c$  の低下度を小さくするために貢献してい

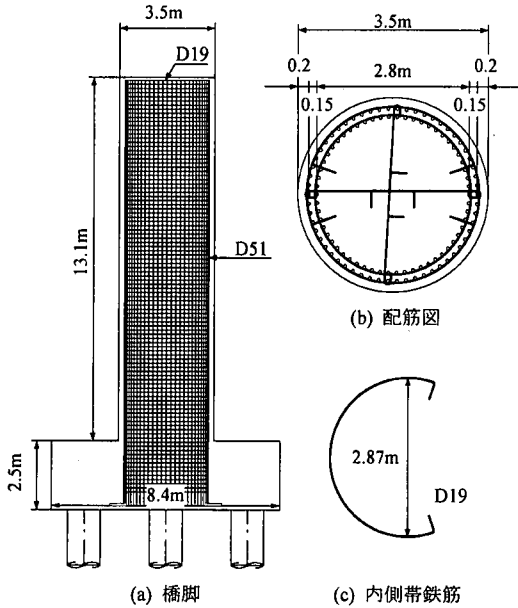


図-20 解析対象とした橋脚

ると考えられる。このような点が、応力度下降域において冷間加工ひずみを除去しない場合の方が除去した場合に比べて応力度の低下が緩やかになるという結果をもたらした原因と考えられる。

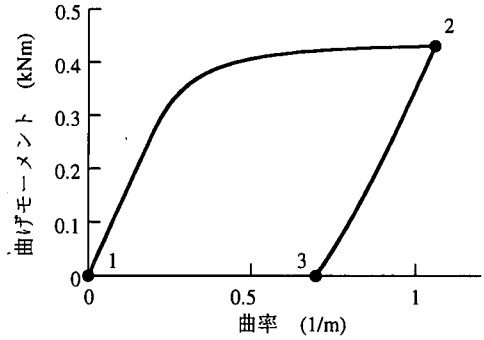
以上のことから、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いて提案された既存のコンクリートの応力度～ひずみモデルは、応力度下降域における下降勾配  $E_{des}$  を過小評価している可能性が高いと考えられる。

## 6. 実橋脚に対する検討

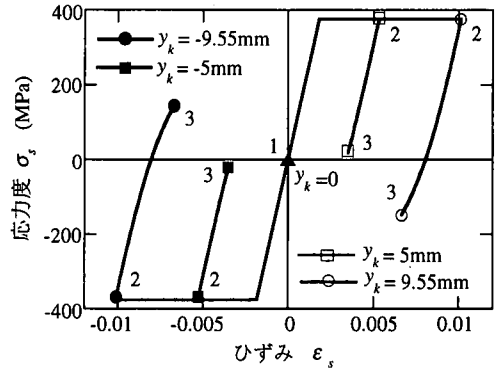
以上の検討結果をもとに、実橋脚を対象として曲げ冷間加工による残留ひずみ、残留応力度の影響を解析する。

解析対象としたのは、平成8年道路橋示方書によって設計された図-20に示す高さ13.1m、直径3.5mの円形断面橋脚である。軸方向鉄筋にはSD345、直径51mmの異形棒鋼を2段配筋しており、横拘束筋としてはSD345、直径19.1mmの異形棒鋼(D19)を直径  $d=3.17m$  に円形冷間加工した外側帯鉄筋と、直径  $d=2.87m$  に円形冷間加工した内側帯鉄筋をそれぞれ0.15mピッチで配置している。内側帯鉄筋の有効長2.87mを用いて道路橋示方書に基づき帯鉄筋比  $\rho_s$  を求めると、0.27%となる。

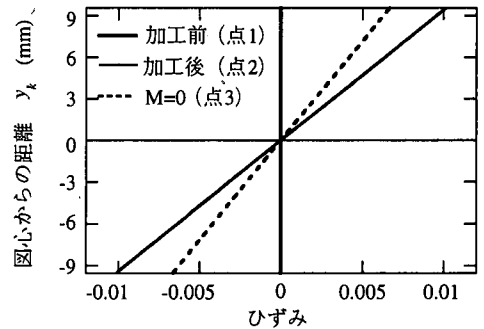
式(16)より冷間加工した帯鉄筋の曲率を求めると、外側帯鉄筋では  $\phi=0.631/m$ 、内側帯鉄筋では  $\phi=0.697/m$  となる。ここでは、曲率がより大きい内側帯鉄筋を対象として解析することとする。また、鉄筋の物性値としては表-2に示した値を用いた。



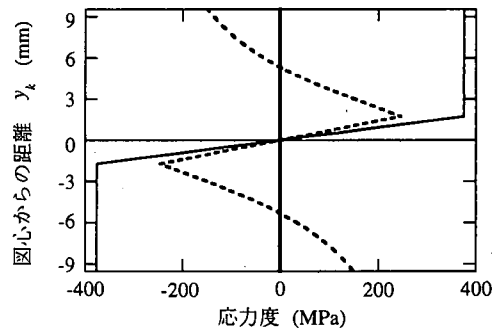
(a) 曲げモーメント～曲率関係



(b) 主要なファイバーにおける応力度  $\sigma_s$  ～ひずみ  $\epsilon_s$  の履歴



(c) 帯鉄筋断面のひずみの変化



(d) 帯鉄筋断面の応力度の変化

図-21 D19をフープ直径  $d=2.87m$  となるように冷間加工した場合の帯鉄筋断面の曲げモーメント～曲率関係と断面に生じるひずみと応力度

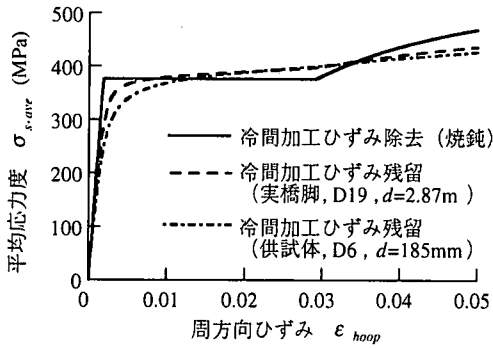


図-22 帯鉄筋の平均応力度 $\sigma_{s,ave}$ ～周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$  関係

図-21は、D19をフープ直径 $d=2.87\text{m}$ (曲率 $\phi=0.697/\text{m}$ )となるように冷間加工したときの帯鉄筋断面の曲げモーメント～曲率関係、断面のひずみと応力度を示した結果である。加工直径は $d_w=1.88\text{m}$ ( $\phi=1.062/\text{m}$ )であり、この直径で加工する(図-21中の点2)と、最外縁の引張ひずみと最内縁の圧縮ひずみはそれぞれ1%に達する。その後、外力を取り除いて曲げモーメントが0になる段階(図-21中の点3)では、曲率は $\phi=0.697/\text{m}$ となり、最外縁の引張ひずみと圧縮ひずみは0.67%まで低下する。このとき、最外縁では149MPaの圧縮応力度が、最内縁では149MPaの引張応力度が生じる。

この残留ひずみと残留応力度の状態から、帯鉄筋が一樣に周方向に引張力を受けるときにどのような平均応力度 $\sigma_{s,ave}$ ～周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$ 関係になるかを求めた結果が図-22である。ここには比較のために、図-14に示した直径6.35mmの鉄筋をフープ直径185mmとなるように冷間加工した場合の $F_s \sim \epsilon_{hoop}$ 関係を平均応力度 $\sigma_{s,ave}$ ～周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$ 関係として書き改めた結果も示している。これによれば、直径6.35mmの鉄筋をフープ直径185mmとなるように冷間加工した場合よりも影響は小さいが、依然として残留ひずみの影響は現れている。この結果、図-10に示した結果と同様の効果がこの橋脚のコアコンクリートに対する横拘束効果に現れると考えられる。

帯鉄筋によるコンクリートの横拘束効果を表す現在の提案式は、ほとんど全て冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いた実験から誘導されたものであり、上述した理由により応力度下降域の下降勾配 $E_{des}$ を過小評価している可能性が高い。したがって、正確に橋脚の終局変位を求めるためには、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋を用いてコンクリートの応力度～ひずみ関係を求めると同時に、実橋脚を建設する際に冷間加工により帯鉄筋に生じる残留ひずみの影響を適切に見込む必要がある。

## 7. 結論

本研究では、実橋脚であっても円形に帯鉄筋を冷間加工する段階では帯鉄筋には降伏ひずみを越えるひずみが導入されるが、これがコンクリートの横拘束効果にどのような影響を与えるかを検討するために、低温焼なましにより冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋を用いた供試体と冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いた供試体を各3体ずつ作製し、これらに対する一軸圧縮載荷実験を行った。また、冷間加工ひずみを除去する帯鉄筋と冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋の横拘束力をファイバー要素解析から求め、帯鉄筋の冷間加工ひずみがコンクリートの横拘束力に及ぼす影響に関して検討した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

1) 直径6.35mmの異形棒鋼をフープ直径が $d=185\text{mm}$ となるように加工直径を $d_w=165\text{mm}$ として冷間加工すると、その鉄筋断面の最外縁では引張側に、最内縁では圧縮側にそれぞれ3.86%のひずみが導入され、ひずみ硬化の段階に達する。外力を取り除いて曲げモーメントが0となるように変形が戻ったあとには、最外縁ではひずみが $\epsilon_{ex}=3.43\%$ (引張)、応力度は107MPa(圧縮)、最内縁ではひずみが $\epsilon_{in}=3.43\%$ (圧縮)、応力度は107MPa(引張)という状態となる。

2) 冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋を用いた供試体と冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いた供試体に対するコンクリートの軸方向応力度 $\sigma_c$ ～軸方向ひずみ $\epsilon_c$ 関係を比較すると、最大圧縮応力度 $\sigma_{cc}$ 、最大圧縮応力度時のひずみ $\epsilon_{cc}$ はおおむね一致する。これに対して、軸方向ひずみが $\epsilon_{cc} < \epsilon_c < 2\epsilon_{cc}$ の範囲では、冷間加工ひずみを除去した場合のほうが、冷間加工ひずみを除去しない場合に比べて応力度の低下は大きい。

3) 帯鉄筋の周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$ が降伏ひずみ $\epsilon_{sy}$ に達するまでは、帯鉄筋の引張力 $F_s$ は冷間加工ひずみを除去したほうが除去しない場合よりも1.5倍大きい。一方、帯鉄筋の周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$ が $\epsilon_{sy}$ を超えた後は、帯鉄筋の引張力 $F_s$ は冷間加工ひずみを除去した場合には一定となるが、冷間加工ひずみを除去しない場合には除荷・再載荷に伴うひずみ硬化によって周方向ひずみ $\epsilon_{hoop}$ の増加とともに増加し続けるため、 $\epsilon_{hoop}=0.013$ に達すると冷間加工ひずみを除去しない方が除去した場合よりも帯鉄筋の引張力 $F_s$ は大きくなる。

4) 供試体の応力度が最大圧縮応力度 $\sigma_{cc}$ に達した段階では、帯鉄筋の引張力 $F_s$ は冷間加工ひずみを除去する、しないに関わらずおおむね同程度であるが、応力度下降域では、帯鉄筋の引張力 $F_s$ は冷間加工ひずみを除去しない場合には軸方向ひずみ $\epsilon_c$ の増加とともに増加するのに対して、冷間加工ひずみを除去した場合には一定と

なる。これが、上記(2)に貢献していると考えられる。

5) 帯鉄筋によるコンクリートの横拘束効果を表す既往の応力度～ひずみ関係の提案式は、ほとんど全て冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋を用いた実験から誘導されたものであることから、応力度下降域の下降勾配  $E_{des}$  を過小評価している可能性が高い。したがって、正確に橋脚の終局変位を求めるためには、冷間加工ひずみを除去してコンクリートの応力度～ひずみ関係を求めるとともに、実橋脚を建設する際に冷間加工により帯鉄筋に生じる残留ひずみの影響を適切に評価する必要がある。

謝辞：帯鉄筋の焼なましに関しては、新日本製鐵（株）の川端規之氏、本間宏二氏に大変お世話になりました。実橋脚の特性については、（株）長大の矢部正明氏のご指導を得ました。また、本研究の全般にわたり、大成建設（株）の細谷学氏から有益なご意見を賜りました。ここに記して、厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 六車熙, 渡辺史夫, 勝田庄二, 田中仁史: 横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化, セメント技術年報, Vol. 34, pp. 429-432, 1980.
- 3) 藤井学, 小林和夫, 宮川豊章, 井上晋, 松本利彦: 横拘束コンクリートの応力 ひずみ関係の適用に関する検討, セメント技術年報, Vol. 42, pp. 311-314, 1988.
- 4) Saatcioglu, M. and Razvi, S. R.: Strength and Ductility of Confined Concrete, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607, 1992.
- 5) 藤倉修一, 川島一彦, 庄司学, 張建東, 武村浩志: インターロッキング式橋脚の耐震性に関する実験的研究, Report No. TIT/EERG 98-9, 東京工業大学土木工学科耐震工学研究

グループ, 1998.

- 6) 藤倉修一, 川島一彦, 庄司学, 張建東, 武村浩志: インターロッキング式帯鉄筋を有する RC 橋脚の耐震性, 土木学会論文集, No. 640/I-50, pp. 71-88, 2000.
- 7) (社) 日本鉄鋼協会: 新版鉄鋼技術講座第4巻 鋼材加工法, 地人書館, 1978.
- 8) 笠井芳夫: 新建築技術叢書 10 材料科学概説, 彰国社, 1989.
- 9) Park, R. and Sampson, R. A.: Ductility of Reinforced Concrete Column Sections in Seismic Design, *Am. Concr. Inst. J.*, Vol. 69, No. 49, pp. 543-551, 1972.
- 10) Menegotto, M. and Pinto, P. E.: Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, *Proc. of IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, pp.15-22, 1973.
- 11) Ristic, D.: Nonlinear Behavior and Stress-Strain Based Modeling of Reinforced Concrete Structure under Earthquake Induced Bending and Varying Axial Loads, School of Civil Engineering, Kyoto University, 1988.
- 12) 堺淳一, 川島一彦, 宇根寛, 米田慶太: 帯鉄筋で横拘束したコンクリートの応力度～ひずみ関係に及ぼす帯鉄筋間隔の影響, 構造工学論文集, Vol. 46A, pp. 757-766, 2000.
- 13) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *J. Struct. Engrg.*, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988.
- 14) Penelis, G. G. and Kappos, A. J.: *Earthquake-Resistant Concrete Structures*, E & FN SPON, 1997.
- 15) 細谷学, 川島一彦, 星隈順一: 炭素繊維シートで横拘束したコンクリート柱の応力度～ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp. 37-52, 1998.
- 16) 堺淳一, 川島一彦, 宇根寛, 米田慶太: コンクリートの横拘束効果に及ぼす帯鉄筋の冷間加工ひずみの影響, Report No. TIT/EERG 99-10, 東京工業大学土木工学科耐震工学研究グループ, 2000.

(1999.12.27 受付)

## EFFECT OF RESIDUAL STRAIN IN THE HOOP REINFORCEMENT ON THE LATERAL CONFINEMENT OF CONCRETE

Jun-ichi SAKAI, Kazuhiko KAWASHIMA, Hiroshi UNE and Keita YONEDA

After forming tie reinforcements into the desired shape, plastic deformation may be induced in the ties because of the cold working. Thus, the ties with residual strain are subjected to tension when a bridge column develops inelastic plastic deformation. Since few investigations have been conducted on the effect of the plastic residual deformation of ties on the lateral confinement of concrete, a series of uniaxial loading test was conducted for circular concrete cylinders confined by ties with the residual plastic strain and those confined by ties in which the residual plastic strain was eliminated by annealing. It was found from the test that the residual strain increases the secant stiffness of concrete between  $\epsilon_{cc}$  and  $2\epsilon_{cc}$ , in which  $\epsilon_{cc}$  represents the concrete strain at the peak stress.