

コンクリートの応力度～ひずみ関係に及ぼす 帯鉄筋の冷間加工ひずみの影響

堺淳一¹・川島一彦²・宇根寛³・米田慶太³

¹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）

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科（同上）

³学生会員 東京工業大学大学院修士課程（同上）

1. まえがき

鉄筋コンクリート橋脚の変形性能を向上させるためには、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重要であり、特に円形帯鉄筋は断面の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¹⁾。しかし、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、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。

そこで、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、帯鉄筋の冷間加工ひずみが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 ρ_s は0.57%、1.14%、1.71%の3種類に変化させた。そのうえで、後述する手法で焼なまし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6mmの異形棒鋼を用いた。テストピースによるコンクリートの圧縮強度は29.8MPaであり、ミルシートによる鉄筋の降伏点 σ_{sy} は376MPa、引張強さ σ_{su} は544MPa、伸びは21%である。

表-1 実験供試体

		帯鉄筋体積比 ρ_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-2		
	N-3	1.71	

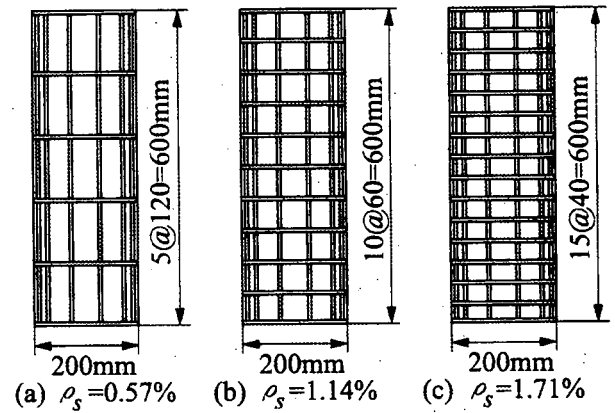


図-1 実験に用いた供試体

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、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。帯鉄筋の焼なましには、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 $650\pm10^\circ\text{C}$ 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。

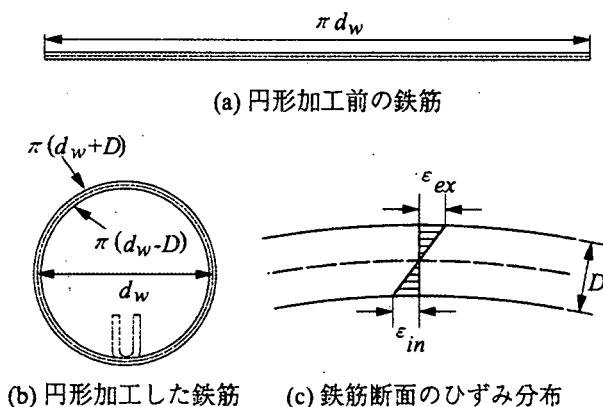


図-2 帯鉄筋の冷間加工

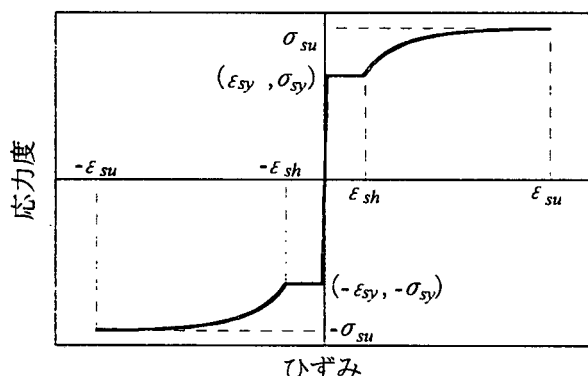


図-3 弾性域から一方向に载荷した場合の鉄筋の応力度～ひずみ関係 (Park モデル)

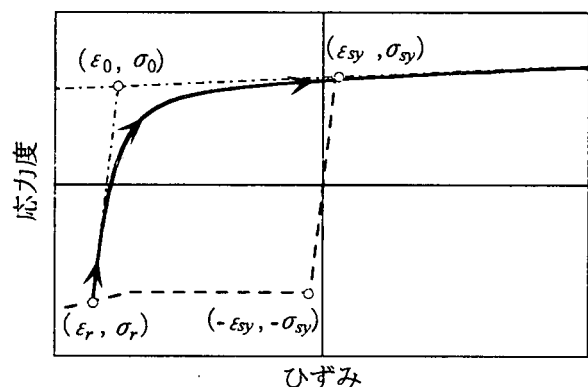


図-4 塑性域から除荷・再载荷した場合の鉄筋の応力度～ひずみ関係 (Menegotto-Pinto モデル)

実験には、東京工業大学の 5000kN 万能試験機を使用し、毎分 0.5mm の载荷速度で変位制御により荷重を作用させた。载荷時には供試体の荷重、軸方向変位を計測した。コンクリート柱の応力度は作用荷重を初期断面積で割って、また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。

3. 帯鉄筋に生じる冷間加工ひずみと残留応力度

図-2 に示すように、長さ πd_w 、鉄筋の直径 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。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。

$$\varepsilon_{in} = -\frac{D}{d_w}, \quad \varepsilon_{ex} = \frac{D}{d_w} \quad (1)$$

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とした。弾性域から一方向に载荷した場合の鉄筋の応力度 σ_s ～ひずみ ε_s 関係には図-3 に示す Park モデル²⁾を用いた。ひずみ硬化開始時のひずみ ε_{sh} および引張応力度 σ_{su} に達する時のひずみ ε_{su} は次式により求めた²⁾。

$$\varepsilon_{sh} = 16 \varepsilon_{sy}, \quad \varepsilon_{su} = \varepsilon_{sh} + 0.14 \quad (2)$$

ここで、 ε_{sy} は鉄筋の降伏ひずみである。

また、塑性域まで一方向に载荷した後、除荷・再载荷した場合の鉄筋の応力度 σ_s ～ひずみ ε_s 関係には図-4 に示す Bauschinger 効果を考慮した Menegotto-Pinto モデルを用いた³⁾。

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、その後外力を取り除いてフープ直径 $d = 185\text{mm}$ の円形帯鉄筋を作製したときの鉄筋断面の曲げモーメント～曲率の履歴を示した結果が図-5 である。フープ加工直径 $d_w = 165\text{mm}$ で加工した後は、16.4kNmm の曲げモーメントが生じ、外力を取り除いた後は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/mm に達した段階で曲げモーメントが 0 になり、このときフープ直径 d は 185mm 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 σ_s ～ひずみ ε_s の履歴がどのように変化したかを示した結果が図-6 である。加工後には、曲率が 0.0121/mm となるため、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。外力を取り除いた後は、最外

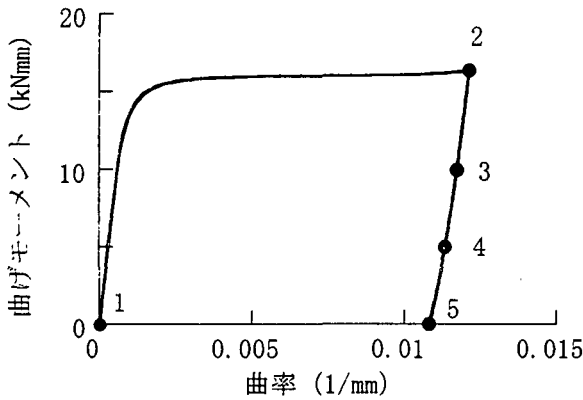
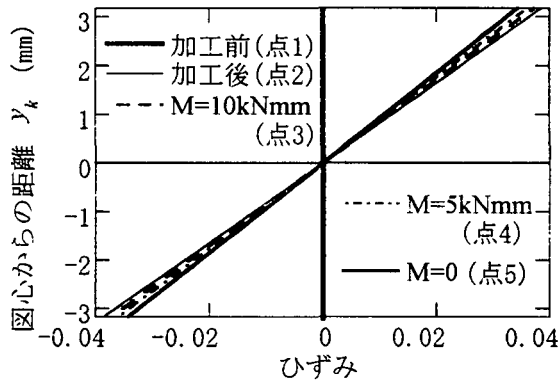
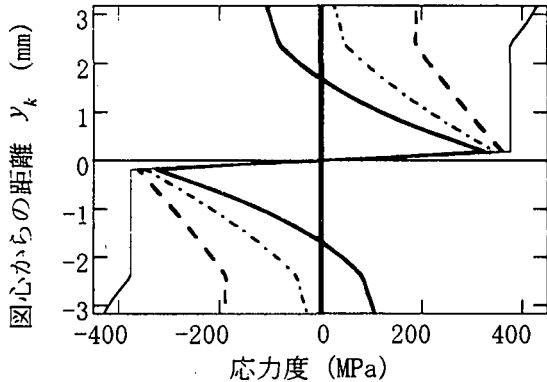


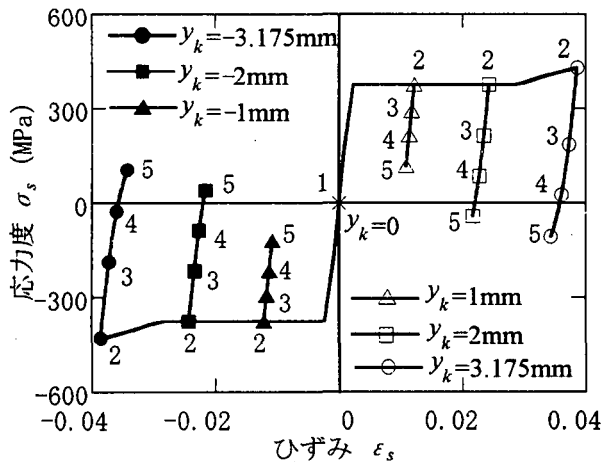
図-5 帯鉄筋断面の曲げモーメント～曲率の履歴



(a) 帯鉄筋断面のひずみ分布の変化



(b) 帯鉄筋断面の応力度分布の変化



(c) 主要なファイバーにおける応力度～ひずみの履歴

図-6 帯鉄筋断面に生じるひずみと応力度

縁の引張り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。応力度は図心付近ではほとんど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 430MPa の引張応力度 (点 2) であったが、曲げモーメントが 5kNmm まで低下した段階 (点 4) では応力度は 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 5) には、107MPa 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 430MPa 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 107MPa 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 σ_{cc} に達するまでは外観上は健全である。応力度下降域に入った段階で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面コンクリートが剥落した。

図-7 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 σ_c ～軸方向ひずみ ϵ_c 関係をそれぞれ 3 種類の帯鉄筋比 ρ_s ごとに比較した結果である。なお、図-7 (b) には、N-2 供試体と同じ特性の供試体に対して単調載荷ではなく完全除荷・完全再載荷を繰り返した場合の実験結果 (以下、N-2 供試体と呼ぶ) もあわせて示している。N-2 供試体に対する実験では、理由はよく分からないが、初期弾性係数 E_c と最大圧縮応力度 σ_{cc} がともに小さめに求められたため、ここではこれを補完する意味で示したものである。

図-7 から、帯鉄筋比 ρ_s が同じであれば、コンクリート柱の最大圧縮応力度 σ_{cc} 、最大圧縮応力度時のひずみ ϵ_{cc} 、軸方向ひずみ ϵ_c が $4\epsilon_{cc}$ に達したときの応力度 σ_{st} 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えることができる。

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急激である。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 ρ_s の関係を示した結果が図-8 である。いずれの帯鉄筋比 ρ_s の場合にも、冷間加工ひずみを除去した帯鉄筋の場合は、冷間加工ひずみを除去しない帯鉄筋の場合に比べて平均弾性係数 E_{c-ave} は約 1GPa 小さい。したがって、 $\epsilon_{cc} < \epsilon_c < 2\epsilon_{cc}$ 区間における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く、これには図-6 に示

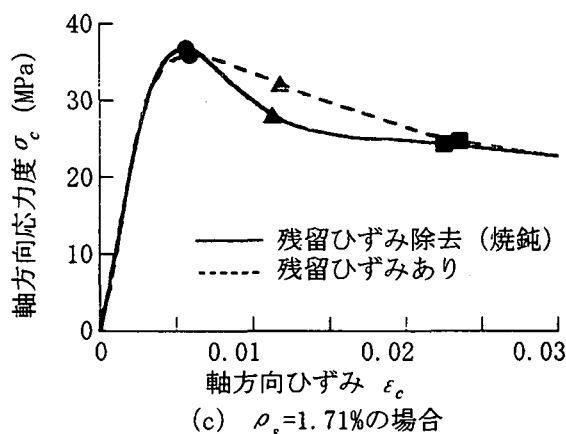
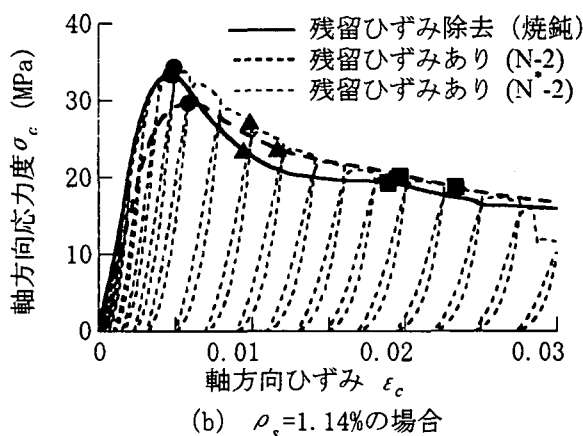
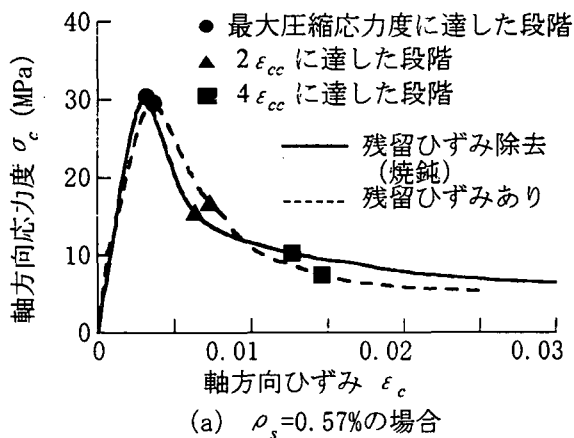


図-7 コンクリート柱の応力度 σ_c ~ ひずみ ε_c 関係

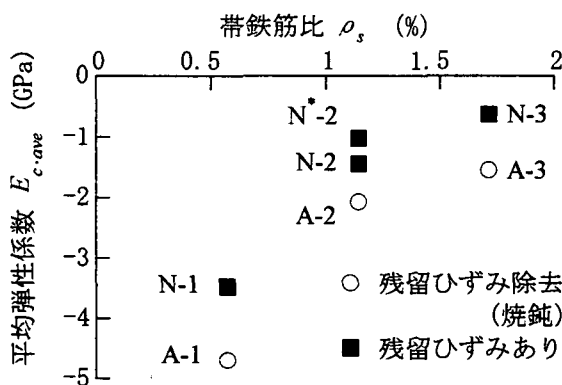


図-8 平均弾性係数 $E_{c,ave}$ ~ 帯鉄筋比 ρ_s 関係

した残留ひずみと残留応力度が影響を及ぼしていると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 直径 6mm 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 3.85% 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は、最外縁ではひずみが $\varepsilon_{ex}=3.42\%$ (引張)、応力度は 107MPa (圧縮)、最内縁ではひずみが $\varepsilon_{in}=3.42\%$ (圧縮)、応力度は 107MPa (引張) という残留ひずみ、残留応力度が生じている。
- 2) コンクリート柱の軸方向応力度 σ_c ~ 軸方向ひずみ ε_c 関係の最大圧縮応力度 σ_{cc} 、最大圧縮応力度時のひずみ ε_{cc} 、軸方向ひずみ ε_c が $4\varepsilon_{cc}$ に達したときの応力度 σ_{sl} は、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である。
- 3) コンクリート柱の軸方向ひずみが $\varepsilon_{cc} < \varepsilon_c < 2\varepsilon_{cc}$ 区間では、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よりも平均弾性係数 $E_{c,ave}$ は約 1GPa 小さく、帯鉄筋による横拘束効果は小さいと考えられる。

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。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) 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.
- 3) 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 LABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads*, pp15-22, 1973.
- 4) 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柱の応力度 ~ ひずみ関係に及ぼす帯鉄筋間隔の影響および応力度下降域のモデル化, 地震工学研究発表会講演論文集, pp.725-728, 1999