

論文 鉄筋曲げ加工部のひずみおよび応力分布に関する研究

佐々木 一則^{*1}・久利 良夫^{*2}・五十嵐 弘行^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨：アルカリ骨材反応による鉄筋破断の原因究明に係る研究の一環として、異形鉄筋の曲げ加工により、曲げ内側の節根元にき裂が生じる場合があることに着目して、曲げ加工実験によるき裂発生状況の確認とFEM解析による曲げ加工後のひずみおよび応力分布を求めた。その結果、鉄筋加工用ベンダーにより節がつぶれること、つぶれの数は曲げ加工半径に影響すること、現行市販鉄筋でも曲げ加工半径が1dの場合にき裂が生じる場合があることを確認した。また、曲げ内側の表層部の応力は、加工後の除荷により圧縮応力から引張応力に変化し、300Mpa程度の引張り残留応力の発生により、き裂進展の可能性があることがわかった。

キーワード：アルカリ骨材反応、鉄筋破断、異形鉄筋、き裂、つぶれ、相当塑性ひずみ、残留応力

1. はじめに

近年、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張によって、鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の曲げ加工部などで鉄筋が破断している事例が複数報告されている¹⁾。鉄筋破断の原因究明に関する研究は、各方面で進められているが、そのメカニズムはまだ明らかになっておらず、同様の劣化構造物を維持管理していく上で、解決すべき急務の課題となっている。筆者らは原因究明に係る研究の一環として、既往の調査および検討において、鉄筋の曲げ加工部内側の節根元付近で、微小なき裂が発生する場合があること¹⁾に着目し、異形鉄筋の節根元にき裂が発生するメカニズムを解明するために、鉄筋の曲げ加工用ベンダーを使用した曲げ加工実験とFEM解析による曲げ加工後のひずみおよび応力分布を求めた。本稿では、まず、曲げ加工半径をパラメータとした曲げ加工実験について、①外観観察による異形鉄筋の節のつぶれ(変形)の度合い、②縦断面観察による節根元部のき裂発生の有無とその状況、③金属組織観察による節根元部のメタルフロー(鍛流線)の観察結果について示した。次に鉄筋加工用ベンダーによる曲げ加工を模擬した3次元FEM解析により、曲げ角度90°の状態における加工終了後と除荷後(ベンダー治具解放時)について、①ひずみの分布状況とその変化、②応力の分布状況とその変化、特に残留応力の状況について示した。

2. 異形鉄筋の曲げ加工実験

2.1 目的

鉄筋の曲げ加工時における初期き裂の入りやすさは、鉄筋の節形状と曲げ加工半径が大きく関与すると考えられる。このことから、鉄筋の節形状と曲げ加工半径

の違いによる破断の感受性について、曲げ加工実験により検討することを目的とする。

2.2 曲げ加工実験

(1) 供試材

曲げ加工実験に使用する鉄筋の規格・サイズは、現行市販品のSD295A(D16)とし、節形状を写真-1に示す。

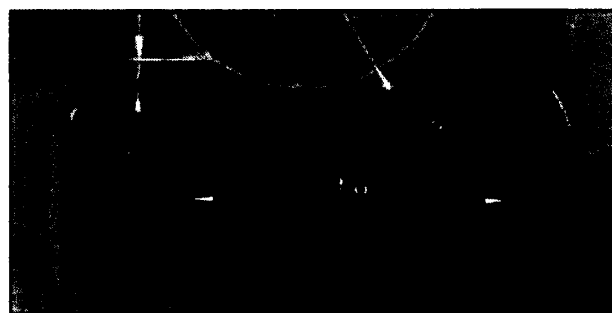


写真-1 鉄筋の縦断面における節の形状 (単位: mm)

供試材は、曲げ加工半径 $r=16\text{ mm}$ (1.0d) (r =曲げ内半径, d =鉄筋の呼び径), $r=24\text{ mm}$ (1.5d), $r=30\text{ mm}$ (1.9d), $r=40\text{ mm}$ (2.5d) の各曲げ加工半径に対して2試料を用意した。

(2) 実験方法

- a) 曲げ加工は鉄筋曲げ加工用ベンダーを用いて各曲げ半径に加工を行った。
- b) 外観観察は、曲げ加工後の鉄筋の外観と曲げ内側および外側の節のつぶれ具合を観察した。
- c) 縦断面観察は、切断加工材を用いて中心線縦断面の観察を行った。
- d) メタルフローは、縦断面形状観察試料を用いて加工後の組織の観察を行った。

*1 阪神高速道路(株) 大阪建設部工事企画グループアシスタントマネージャ (正会員)

*2 阪神高速道路(株) 技術部技術開発グループチーフ 博士(工学)

*3 神鋼鋼線工業(株) 開発本部開発部材料開発室主任研究員 工修

*4 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

(3) 実験結果

a) 外観観察

① $r=16\text{ mm (1.0d)}$

写真-2 に $r=16\text{ mm (1.0d)}$ で曲げ加工を行った後の外観写真を示す。曲げ部内側の節が大きくつぶされているのが観察できた。また、曲げ内側の節が変形している数は4個であった。

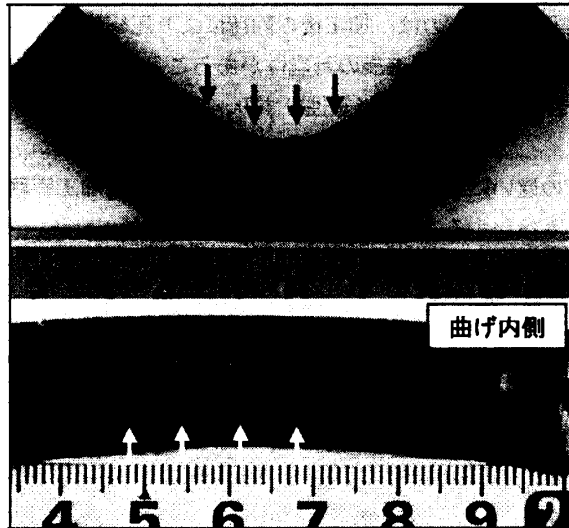


写真-2 1.0d 曲げ加工後の外観写真

② $r=24\text{ mm (1.5d)}$

写真-3 に $r=24\text{ mm (1.5d)}$ で曲げ加工を行った後の外観写真を示す。曲げ部内側の節がつぶされているのが観察できたが、1.0d 曲げ加工よりも根元部分の形状が少し多く残っていた。また、曲げ内側の節が変形している数は6個であった。

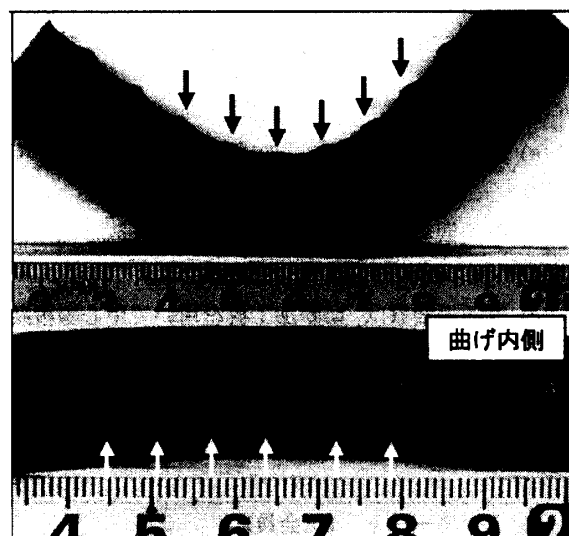


写真-3 1.5d 曲げ加工後の外観写真

③ $r=30\text{ mm (1.9d)}$

写真-4 に $r=30\text{ mm (1.9d)}$ で曲げ加工を行った後の外観写真を示す。曲げ部内側の節が少しつぶされているのが観察できた。また、曲げ内側の節が変形している数は8個であった。

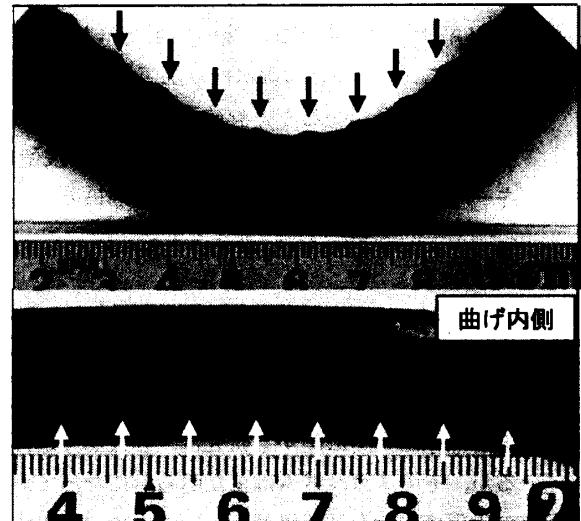


写真-4 1.9d 曲げ加工後の外観写真

④ $r=40\text{ mm (2.5d)}$

写真-5 に $r=40\text{ mm (2.5d)}$ で曲げ加工を行った後の外観写真を示す。曲げ部内側の節が少しつぶされているが節の形状はほぼ保たれていた。また、曲げ内側の節が変形している数は8個であった。

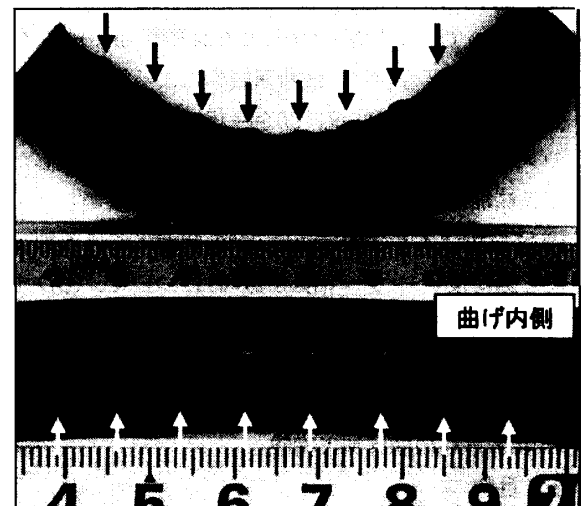


写真-5 2.5d 曲げ加工後の外観写真

b) 縦断面観察

① $r=16\text{ mm (1.0d)}$

写真-6 に $r=16\text{ mm (1.0d)}$ で曲げ加工を行った後の縦断面観察写真を示す。曲げ内側中央付近の4個の節がほとんどつぶれて無くなっている。最もつぶれていた中

中央の節の根元付近を 40 倍に拡大して確認すると、深さ約 $50\mu\text{m}$ のき裂が生じていた。

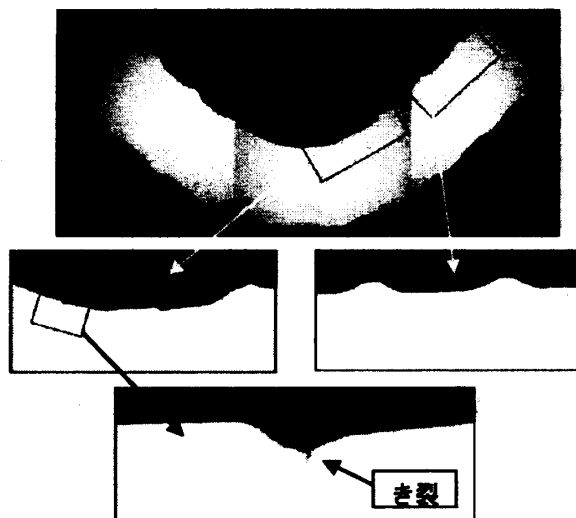


写真-6 1.0d 曲げ加工後の縦断面写真

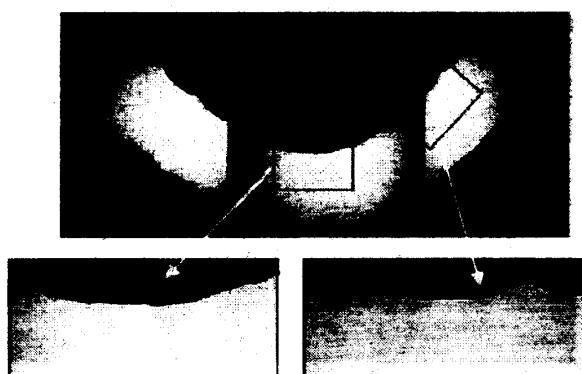


写真-7 1.5d 曲げ加工後の縦断面写真

② $r=24\text{mm}$ (1.5d)

写真-7 に $r=24\text{mm}$ (1.5d) で曲げ加工を行った後の縦断面観察写真を示す。中央の4個の節がほとんどつぶれて無くなっているが、根元付近の形状は確認できる。き裂の発生は無かった。

③ $r=30\text{mm}$ (1.9d)

写真-8 に $r=30\text{mm}$ (1.9d) で曲げ加工を行った後の縦断面観察写真を示す。節の高さが低くなっているが、形状はほぼ保たれていた。き裂の発生は無かった。

④ $r=40\text{mm}$ (2.5d)

写真-9 に $r=40\text{mm}$ (2.5d) で曲げ加工を行った後の縦断面観察写真を示す。節の形状はほぼ保たれていた。き裂の発生は無かった。

c) メタルフロー観察

① $r=16\text{mm}$ (1.0d)

写真-10 に $r=16\text{mm}$ (1.0d) で曲げ加工を行った後のメタルフロー写真を示す。加工度の大きな曲げ内側およ

び外側の加工組織の間隔が狭くなっていた。また、き裂が生じていた節の根元付近では、加工組織が局部的に湾曲していたが、メタルフローがずれていたり、途切れたりするような不連続部分は確認できなかった。

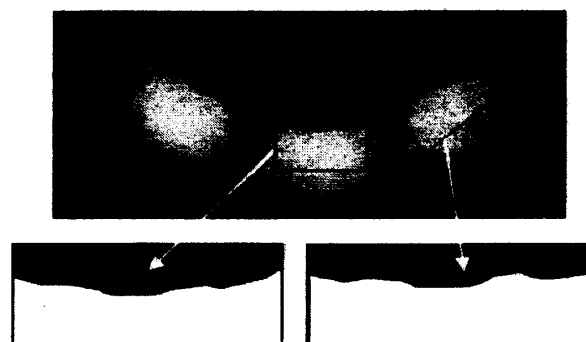


写真-8 1.9d 曲げ加工後の縦断面写真

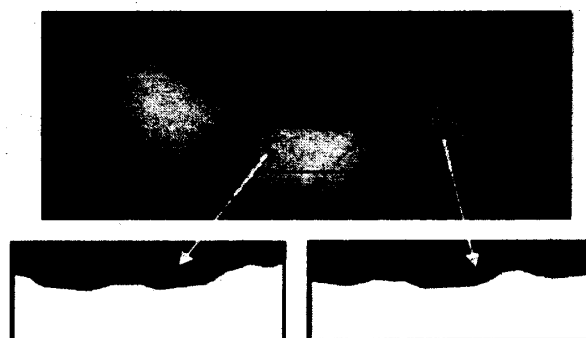


写真-9 2.5d 曲げ加工後の縦断面写真

② $r=40\text{mm}$ (2.5d)

写真-11 に $r=40\text{mm}$ (2.5d) で曲げ加工を行った後のメタルフロー写真を示す。節の根元付近でもきれいなメタルフローが観察できた。

2.3 曲げ加工実験のまとめ

(1) 曲げ加工により曲げ内側の節はつぶれていた。特に曲げ加工半径が小さくなると、ベンダーのダイスに接触する節の数が少なくなるため節がつぶれやすい。

(2) 曲げ加工半径が最も小さかった $r=16\text{mm}$ (1.0d) だけが、節の根元にき裂（深さ約 $50\mu\text{m}$ ）が生じた。

(3) $r=16\text{mm}$ (1.0d) において、メタルフローが局部的に湾曲している箇所と、き裂の発生箇所は一致していた。しかし、メタルフローのずれや途切れは無かった。

(4) き裂は、ベンダーのダイスが節に強く押し当たることにより、節が鉄筋断面中心方向に押しつぶされ、加工の進行に伴い根元部を巻き込むような変形により、生じたものと考えられる。

(5) 外側の節はベンダーの回転治具に押し付けられるために変形は生じるが、節の内側ほど大きな変形ではなかった。

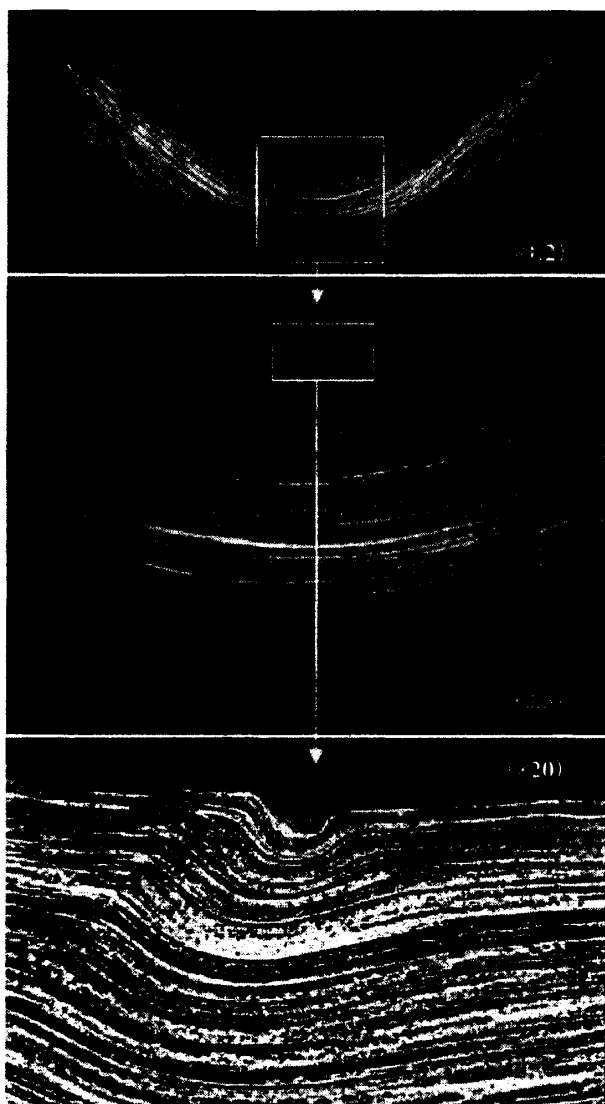


写真-10 1.0d 曲げ加工後のメタルフロー写真

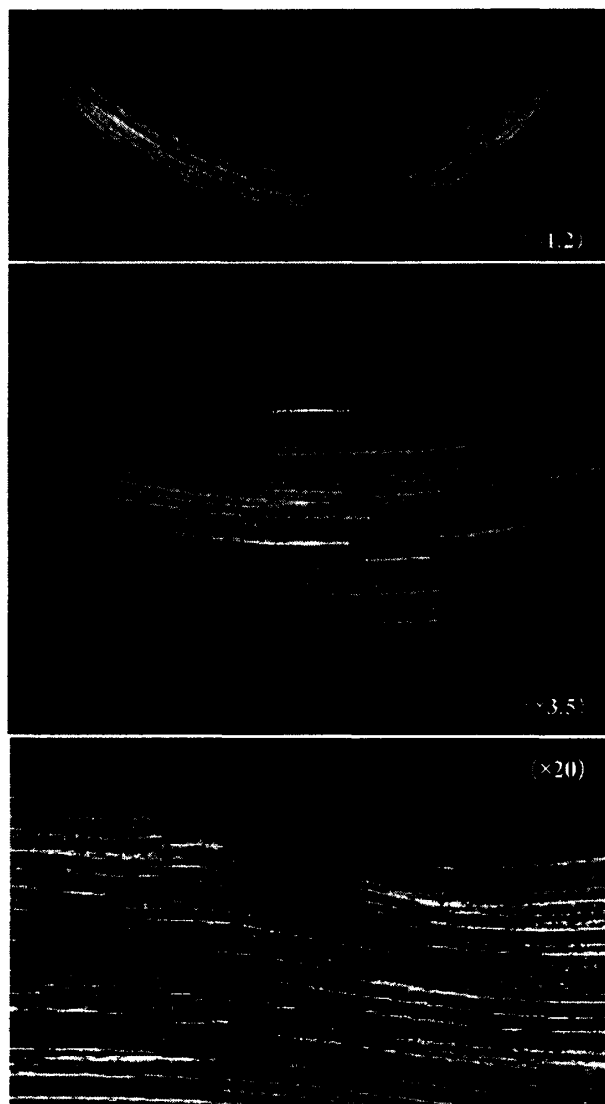


写真-11 2.5d 曲げ加工後のメタルフロー写真

3. 曲げ加工後のひずみおよび残留応力の解析

3.1 目的

異形鉄筋を曲げ加工することにより、曲げ加工内側の節根元にき裂が生じる場合がある。この現象を解明するために、曲げ加工終了後および除荷後のひずみ分布および応力分布を解析することにより、き裂発生メカニズムの基礎検討を行うことを目的とする。

3.2 解析方法

(1) 解析方法

曲げ加工の解析で使用する鉄筋の規格・サイズは、実橋でも損傷が多く見られたスターラップ筋に使用されている SD295A(D16)を使用した。鉄筋の形状としては、曲げ加工実験と同じ写真-1 のような現行形状鉄筋を用い、曲げ加工半径は $r=17.5\text{ mm}$ (1.1d) とした。曲げ加工のモードは、鉄筋の曲げ加工用ベンダーでの曲げを再現することとした。また、曲げ加工による鉄筋の拘束を除いたときに回復する弾性ひずみ、いわゆるスプリングバック²⁾の現象を考慮した。解析プログラムは ABAQUS

／STANDARD Ver6.3 を使用した。鉄筋のモデル化は、3 次元連続体要素により曲げ加工中心からの対称モデルとし、ベンダーのダイス部分は剛体とした。

(2) 材料モデル

使用する材料モデルの物性値は、以下のとおりとした。

鉄筋の物性値：ヤング率=210,000MPa

ポアソン比=0.3, 降伏応力=305MPa

(3) 境界条件

FEM 解析における境界条件は、鉄筋と工具との摩擦係数を 0.1 とし、拘束条件は図-1 に示すとおりとした。

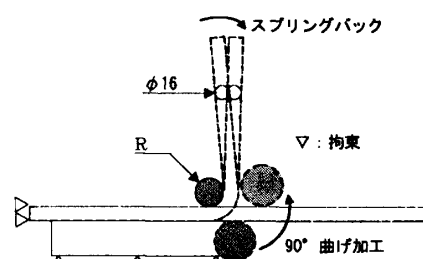


図-1 解析モデル (イメージ)

(4) 評価方法

鉄筋は曲げ加工により大変形(非線形)となることから、ひずみ量の評価は、多軸応力状態で与えられたひずみが、単軸応力状態でどのくらいのひずみ量に相当するかを示す、相当塑性ひずみ(equivalent strain)²⁾により評価した。応力の評価は、曲げ加工終了後およびベンダー除荷後における各断面の鉄筋軸方向(鉄筋固定側の軸に平行な方向)の応力分布により評価した。

3.3 解析結果

(1) 相当塑性ひずみ分布

図-2 に除荷後の相当塑性ひずみ分布を示す。曲げ加工終了後と除荷後では、相当塑性ひずみ分布に大きな変化はなかった(曲げ加工終了後の分布は省略)。曲げ内側の節根元付近の断面②から節頂部の断面④にかけて、表層部の相当塑性ひずみが集中している状況がわかる。

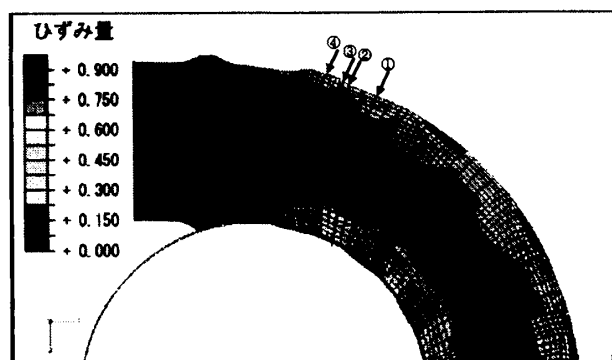


図-2 相当塑性ひずみの分布(除荷後)

図-3 に鉄筋各断面における除荷後の相当塑性ひずみ分布を示す。節根元付近の断面②から節頂部の断面④にかけて、表層部のひずみが集中している状況がわかる。

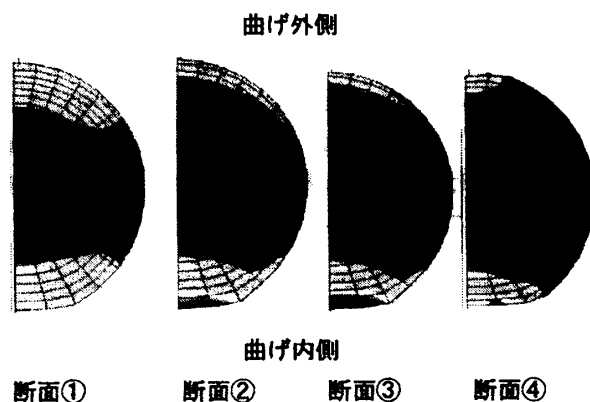


図-3 鉄筋各断面における相当塑性ひずみ分布(除荷後)

図-4 に鉄筋各断面位置での除荷後の相当塑性ひずみ分布を示す。曲げ内側の節の根元にあたる部位の断面③

では、相当塑性ひずみの値は1.05を示し、他の断面と比べて卓越していることがわかる。

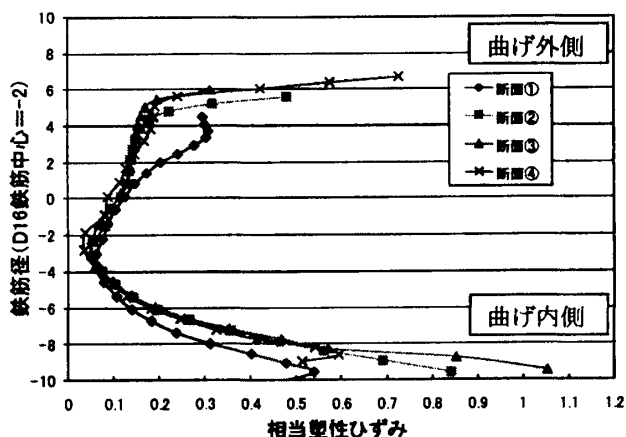


図-4 相当塑性ひずみ分布(除荷後)

(2) 鉄筋軸方向応力の分布

曲げ加工終了後の鉄筋軸方向応力の分布を図-5 に、各断面における鉄筋軸方向応力の分布を図-6 に示す。

鉄筋断面中心部から曲げ内側にかけて圧縮応力、曲げ外側で引張応力が集中している状況がわかる。

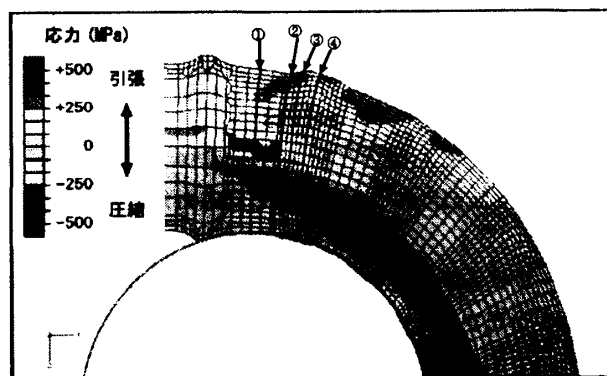


図-5 鉄筋軸方向応力の分布(曲げ加工終了後)

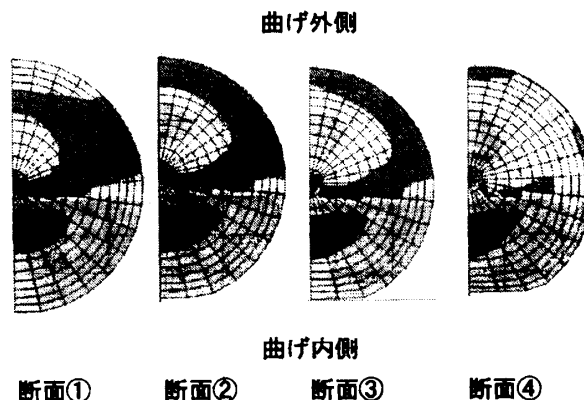


図-6 各断面における軸方向応力分布(曲げ加工終了後)

次に除荷後の鉄筋軸方向応力の分布を図-7 に、各断面における鉄筋軸方向応力の分布を図-8 に示す。

除荷後は曲げ外側に生じていた引張応力の領域が無くなり、曲げ内側の表層部に引張応力の領域が新たに生じている状況がわかる。

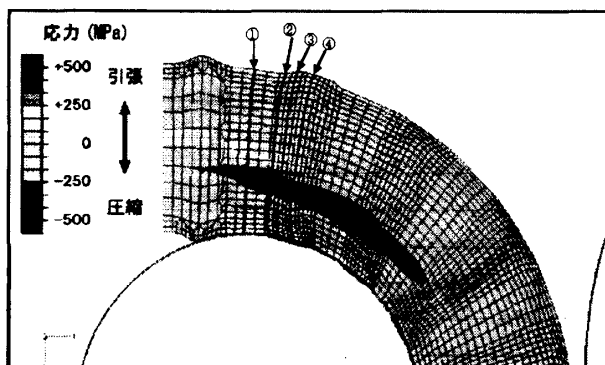


図-7 鉄筋軸方向応力の分布（除荷後）

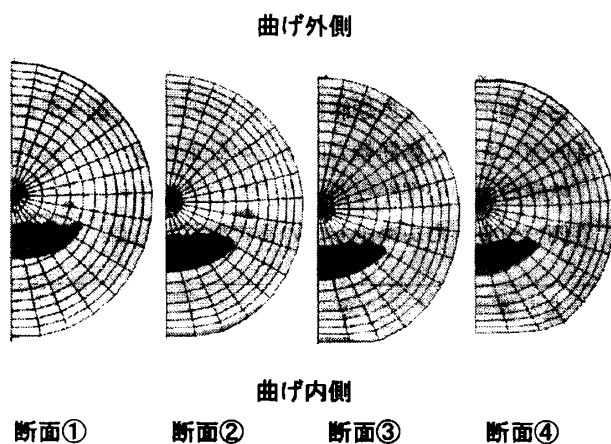


図-8 各断面における鉄筋軸方向応力分布（除荷後）

図-9 に各断面位置における曲げ加工終了後の軸方向応力の分布を、図-10 に除荷後の軸方向応力の分布をそれぞれ示す。曲げ加工終了後から除荷後の応力は、曲げ加工の外側では、概ね引張から圧縮となり、曲げ内側表層部で圧縮（ -100MPa ：断面③）から引張（ 300MPa ：断面③）に変化していることがわかる。

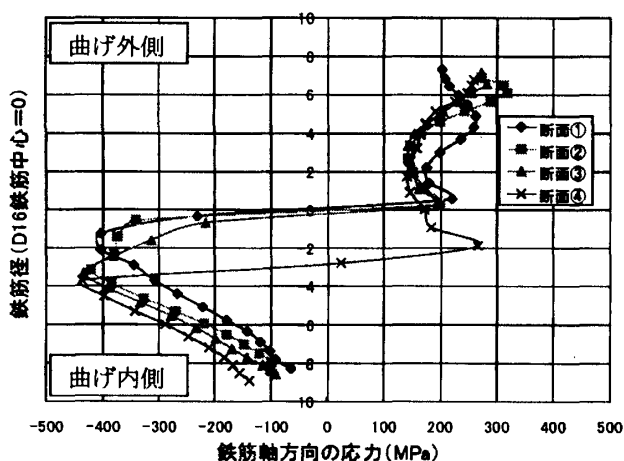


図-9 鉄筋軸方向応力の分布（曲げ加工終了後）

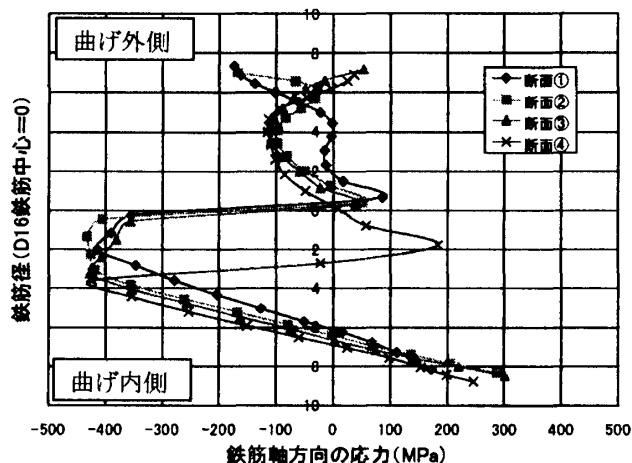


図-10 鉄筋軸方向応力の分布（除荷後）

3.4 曲げ加工後のひずみおよび残留応力の解析のまとめ

- (1) 曲げ加工により、曲げ内側の節の根元付近から節頂部にかけて相当塑性ひずみの集中が見られた。
- (2) 曲げ加工終了後から除荷後の応力の変化は、曲げ加工の外側では、概ね引張応力から圧縮応力に、曲げ内側表層部では、圧縮応力から引張応力に変化した。特に節の根元部では、 300MPa 程度の引張りの残留応力となり、き裂進展の要因になると考えられる。

4. 結論

- (1) 異形鉄筋を鉄筋加工用ベンダーにより曲げ加工すると、曲げ内側の節につぶれが生じた。曲げ加工半径が小さくなると、節のつぶれの数は少なくなるが、つぶれの度合いは大きくなる。
- (2) 現行市販鉄筋でも、曲げ加工半径が小さいと (1d)、曲げ内側の節根元付近に、き裂が生じる場合がある。
- (3) メタルフロー観察により、き裂はベンダーのダイスが節に押し当たることにより、節が鉄筋断面中心方向に押しつぶされ、加工の進行に伴い根元部を巻き込むような変形により、生じたものと考えられる。
- (4) FEM 解析により、曲げ内側表層部で 300MPa 程度の引張りの残留応力を確認した。これにより、き裂の進展や、ASR によるコンクリートの膨張に伴う鉄筋への曲げ戻し力が加わることで、破断の可能性が増すことが考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書－鉄筋破断と新たなる対応－，pp.1-32-1-65，2005.9
- 2) 益田森治，室田忠雄：改訂工業塑性力学，養賢堂，pp.51-53，pp.111-115，2005.9
- 3) 鳥居和之，小川洋之，樽井敏三：ASR により破断した鉄筋の調査，ASR による鉄筋破断メカニズムと対策特別講演会（金沢大学），2005.2