

Study on the Hardness of Curved Rebar by a Simple Bending Machine

Satoshi HIGAKI,* Ikuho MATSUKUMA,** Tomoki GO,** Masahiro SASADA,** and Tatsuya TANAKA***

(Received April 12, 2024)

Rebars are used by bending according to the purpose. The material properties of bent portion of rebars change due to work hardening. In civil engineering work, it is important to understand the changes in material properties because bent portion are sometimes further bent. The purpose of this research was to clarify the hardness distribution of a rebar after bending as a first step in understanding the changes in material properties due to processing. In this research, rebars bent at three different rotation angles were divided into four areas for hardness test. The area that is pressed against the fulcrum roller and bent does not change much in hardness as the rotation angle increases. In the area between the rebar receiver and the fulcrum roller and between the fulcrum roller and the circular roller, the closer to the fulcrum roller, the greater the hardness measurement.

Keywords: rebar, bending, hardness test, axial displacement

キーワード: 異形棒鋼, 曲げ, 硬さ試験, 軸方向変位

簡易曲げ加工機により曲げられた異形棒鋼の硬さに関する研究

桧垣 智史, 松熊 郁甫, 呉 其樹, 笹田 昌弘, 田中 達也

1. 緒言

異形棒鋼は用途に応じて曲げ加工され、コンクリートとともに利用される。1 か所を所定の角度まで曲げる場合だけでなく、柱や梁に使用される帯筋やあばら筋と呼ばれるものは複数か所を曲げ加工する。曲げ加工された部分は、塑性変形が進むことから加工硬化が起こり、材料特性が変化する。土木で使われる異形棒鋼の中には、一度曲げられた部分に対してさらに曲げ加工する場合があります。加工にともなう材料特性の変化を把握することは重要である。また、異形棒鋼の材料特性は建造物の強度と関係するため、材料特性の変化について明らかにすることは、建造

物の耐震性を向上することや、寿命計算を高精度化することに有益である。

曲げ加工にはいくつかの方法がある。本研究で対象とする簡易曲げ加工機では、支点ローラ、力点ローラ、棒鋼受けにより加工する。支点ローラを中心として、力点ローラが回転運動する。支点ローラと力点ローラの上に配置された異形棒鋼が、力点ローラにより支点ローラへ押し付けられ、このとき異形棒鋼の他端が棒鋼受けに接触することにより異形棒鋼の回転運動を抑制する。このように曲げられた異形棒鋼には、支点ローラに押し付けられて曲げられる部分と、工具に接触することなく曲げられる部分が混在する。工具に接触せずに曲げられる部分があ

*TOYO KENSETSU KOHKI CO., LTD., Osaka

Telephone : +81-6-6552-0341, E-mail : s_higaki@toyokensetsukohki.co.jp

**Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-6556, E-mail : msasada@mail.doshisha.ac.jp

***Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone : +81-774-65-6465, E-mail : tatanaka@mail.doshisha.ac.jp

ること、力点ローラの回転運動により逐次的に加工が進むため異形棒鋼と力点ローラの接触位置が変化することから、加工中の材料変形が部分ごとに異なることが考えられる。つまり、加工硬化の程度が、力点ローラの回転角度ならびに異形棒鋼の部分ごとに異なることが考えられる。

これまでに異形棒鋼の曲げ加工に関しては、曲げ戻し加工による破断に関する研究¹⁾、曲げ加工部分の耐衝撃性に関する研究²⁾などが報告されている。成形後の異形棒鋼に関する有益な報告があり、曲げ加工後の異形棒鋼の材料特性の把握が重要であることがわかる。一方、硬さ試験は、物理的意味は明確でないが、引張強さと相関があるため広く利用されている³⁾。また、ビッカース硬さとひずみ $\epsilon=0.08$ での変形抵抗の関係がほぼ比例関係にあることが報告されている⁴⁾。硬さ試験であれば、成形後の異形棒鋼の各部分の材料特性の変化を確認できる。加工による材料特性の変化を把握する第一歩として、簡易曲げ加工機による成形後の異形棒鋼の硬さを測定し、力点ローラの回転角度ならびに異形棒鋼の部分ごとの違いを明らかにすることが有用と考える。

以上より、本研究の目的は、対象とする加工方法により曲げ加工された異形棒鋼の各部分の材料変形ならびに硬さを明らかにすることである。

2. 実験方法

2.1. 試験片

使用した異形棒鋼の概略を Fig. 1 に示す。呼び名 D10、種類 SD345 (JIS G 3112) を使用した。降伏点は 422MPa であり、全長は 400mm である。

2.2. 簡易曲げ加工機

本実験に使用した曲げ加工機の概略と主要な寸法を Fig. 2 に示す。加工中の試験片の変形を高速度カメラにより撮影した。試験片を配置した曲げ加工機の定盤より真上に 290mm 離れた位置より撮影を行った。解像度は 1024×1024pixel、フレームレートは 250fps とした。撮影された動画をもとに運動解析ソフトにより加工中の試験片の変位を確認した。変位

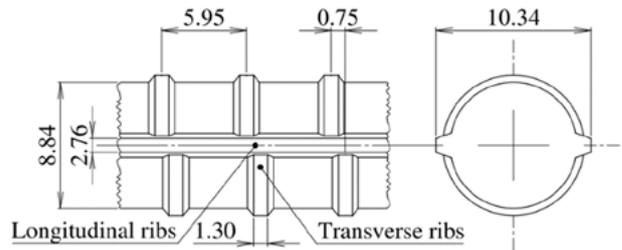


Fig. 1. Schematic diagram of rebar.

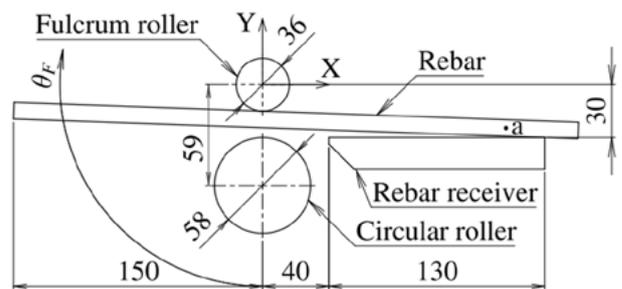


Fig. 2. Schematic diagram of bending machine.

を求めるために追尾した点の位置は、異形棒鋼の支点ローラに接触する側にある横方向節と縦方向節の交点である。

Figure 2 に示すように、異形棒鋼を支点ローラと棒鋼受けに接触するよう配置する。このとき、支点ローラの中心から力点ローラの回転方向側の異形棒鋼端までの長さを 150mm とする。また、高速度カメラで観察される異形棒鋼の節が Fig. 1 の状態となるように配置する。この状態で、支点ローラの中心を回転中心として力点ローラを所定の回転角度 θ_F まで回転運動させて加工を行う。このとき、力点ローラと逆側の異形棒鋼端は、棒鋼受けにより Y 方向変位が拘束される。その後、力点ローラを初期位置まで逆回転させて加工を完了する。なお、力点ローラは軸受が組み込まれており自転できるが、支点ローラは自転できない構造である。力点ローラの回転角度 θ_F を 90°、130°および 180°とした。

2.3. 硬さ試験

曲げ加工された異形棒鋼の断面の硬さをマイクロビッカース硬さ試験機により測定した。本実験では、異形棒鋼を Fig. 3 に示す A から D の 4 領域に分け

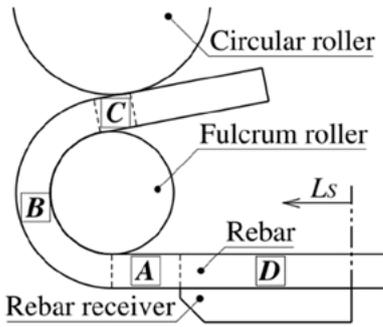


Fig. 3. Zoning based on deformation of bent rebar.

た. 領域 A は異形棒鋼の棒鋼受けとの接触点から支点ローラとの接触点までの間の部分, 領域 B は支点ローラに押し付けられて曲げられた部分, 領域 C は異形棒鋼の支点ローラとの接触点から力点ローラとの接触点の間の部分, 領域 D は棒鋼受けと接する部分である. 各 θ_F において, 領域 A から 2 か所, 領域 B から 1 か所, 領域 C から 2 か所, 領域 D から 1 か所の合計 6 か所を対象として硬さを測定した. 測定位置は, Table 1 に示すように棒鋼受けの端部からの距離 L_S 離れた位置とした. 硬さ試験の試験力 F は 2.942N (HV0.3) とした. 測定点の位置は規格 (JIS Z 2244) に則り測定対象面の端から 0.8mm 間隔とし, Fig. 4 に示される 10 か所とした.

3. 結果および考察

3.1. 加工中の異形棒鋼の変形

力点ローラの回転角度 $\theta_F=180^\circ$ とした場合の加工途中ならびに加工完了後の材料変形を Fig. 5 に示す. $\theta_F=45^\circ$ では, 力点ローラが異形棒鋼を支点ローラに接触するように押ししており, 異形棒鋼の他端が棒鋼受けに接触している. $\theta_F=45^\circ$ の材料変形より, Fig. 3 に示した領域 A から領域 D に分けて考えることとした. 棒鋼受けに接している部分 (領域 D) は, 大きな変形がない. 棒鋼受けと支点ローラの間部分 (領域 A) は, 工具に接触することなく, 曲げ変形が発生している. 支点ローラに押し付けられた部分 (領域 B) は, 支点ローラの外径に近づくように変形している. 支点ローラと力点ローラの間部分 (領域 C) にも, 工具に接触することなく曲げ変形が発生している. なお, 領域 A と領域 C は長さが異

Table 1. Distance L_S from the rebar receiver end to the surface to be measured.

θ_F	90°	130°	180°
Area A-1 [mm]	154	154	154
Area A-2 [mm]	160	160	160
Area B [mm]	172	184	172
Area C-1 [mm]	206	218	236
Area C-2 [mm]	212	224	242
Area D [mm]	10	22	22

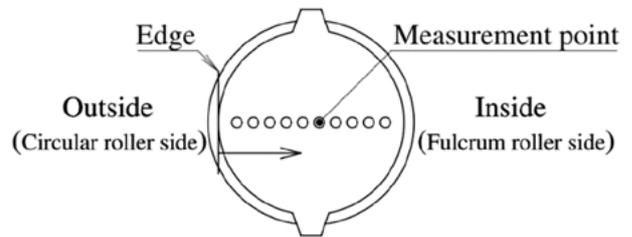


Fig. 4. Measurement points for hardness test.

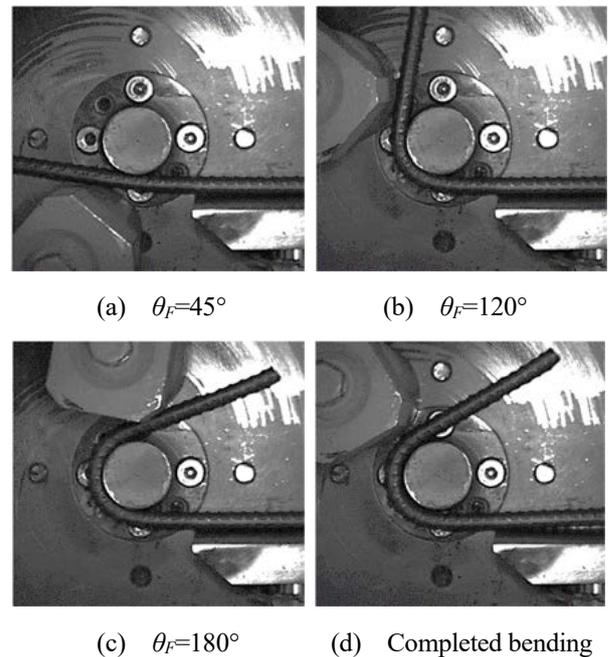


Fig. 5. Deformation of rebar in bending for $\theta_F=180^\circ$.

なるため, 曲げ変形の大きさが異なる. $\theta_F=45^\circ$ から $\theta_F=120^\circ$ ならびに $\theta_F=120^\circ$ から $\theta_F=180^\circ$ へ力点ローラの回転角度が増加すると, 支点ローラに押し付けられて曲げられた部分 (領域 B) が長くなる. このように力点ローラと異形棒鋼の接触位置が変化しながら

ら、力点ローラにより異形棒鋼が支点ローラに押し付けられて逐次的に曲げ加工が行われている。加工初期に θ_F の増加にともない領域Aの曲げ変形は増加すると考えられ、 θ_F がある程度増加すると領域Aの曲げ変形が増加し難くなることが推察できる。Figure 3 に示した領域ごとならびに θ_F ごとに材料変形と硬さを確認することが必要と考えられる。

3.2. 加工中の異形棒鋼の長手方向への変位

曲げ加工中に異形棒鋼が長手方向に移動する軸方向変位が発生することが知られている⁵⁾。先に述べたように Fig. 3 に示した4つの領域に関して材料変形ならびに硬さを評価する場合に、軸方向変位の大きさを確認することが必要である。加工初期から加工完了までの間に、領域の分類が変わる可能性があるためである。例えば、加工初期は領域Aに分類されるとしても、一部分が軸方向変位により支点ローラと接触することとなり、加工完了時には領域Bに分類される部分があると推察される。

運動解析ソフトにより、撮影した動画から軸方向変位を求めた。Figure 2 に示した点aのX軸方向への変位を軸方向変位 u とし、力点ローラの回転角度 $\theta_F=180^\circ$ までの結果を Fig. 6 に示す。 θ_F が増加すると u も増加し、最大で3.1mmの軸方向変位が発生する。 $\theta_F=19^\circ$ までは軸方向変位が発生していない。この間は力点ローラが異形棒鋼に接触していないためである。異形棒鋼と力点ローラの接触後に u が増加し始め、 $\theta_F=140^\circ$ 以降は u が増加し難くなる。

3.3. 加工中の領域ごとの材料変形

曲げ加工中の異形棒鋼について更に詳しく観察を行うため、軸方向変位 u の増加を参考として変形形状を確認することとした。力点ローラが異形棒鋼に接触した後から u が大きく増加していることから、 $\theta_F=42.96^\circ$ の変形形状を確認した。また、 $\theta_F=150^\circ$ 程度までは緩やかに u が増加することから、 $\theta_F=150^\circ$ の変形形状を確認した。最後に、加工が完了する $\theta_F=180^\circ$ の変形形状を確認した。

$\theta_F=42.96^\circ$ における変形形状を Fig. 7 (a) に示す。また、異形棒鋼の縦方向の節をもとに描いた線を Fig. 7 (b) に示す。比較のため、 $\theta_F=180^\circ$ における変形形状をもとに描いた線も合わせて示す。 $\theta_F=42.96^\circ$ では、支点ローラと接触する部分はわずかであり、異形棒鋼の支点ローラとの接触点から棒鋼受けとの接触点の間が曲げ変形することがわかる。また、 $\theta_F=180^\circ$ における支点ローラと棒鋼受けの間の変形

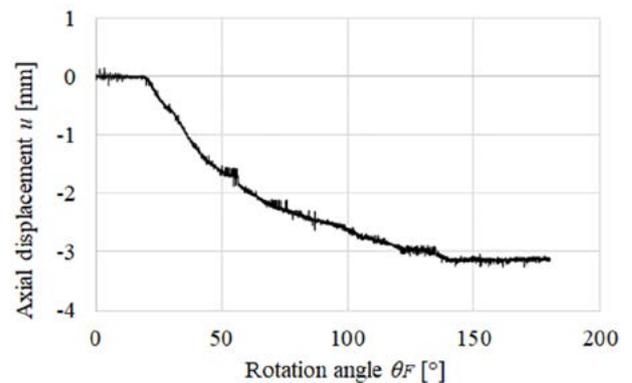
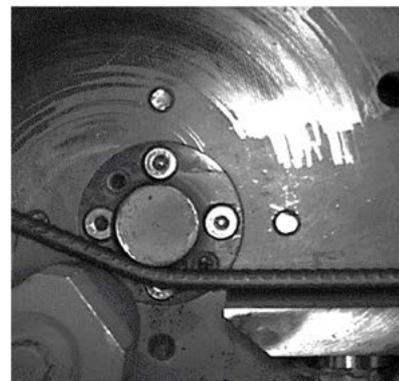
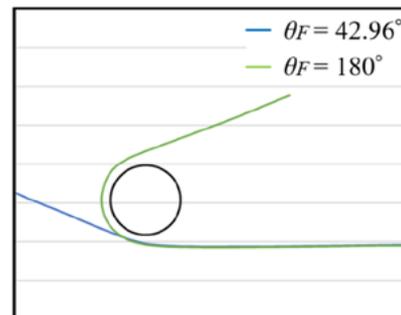


Fig. 6. Relationship between rotation angle θ_F and axial displacement u .

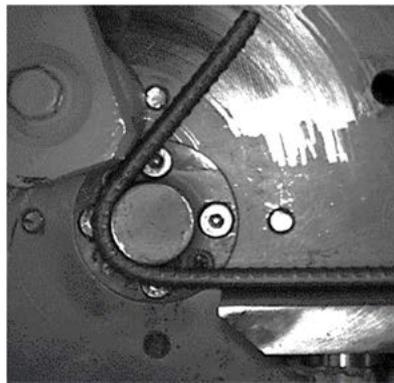


(a) Deformed shape

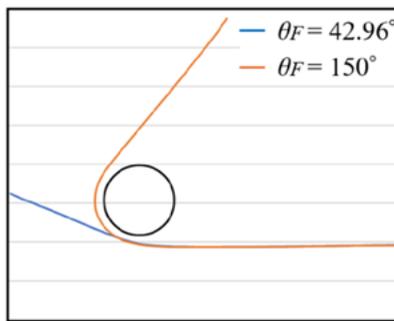


(b) Trace lines of longitudinal rib

Fig. 7. Deformed shape of rebar for $\theta_F=42.96^\circ$.



(a) Deformed shape



(b) Trace lines of longitudinal rib

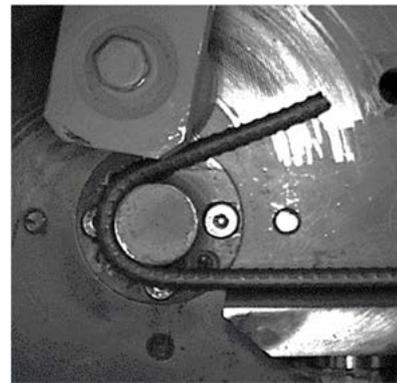
Fig. 8. Deformed shape of rebar for $\theta_F=150^\circ$.

形状は $\theta_F=42.96^\circ$ のものとあまり違いがない。

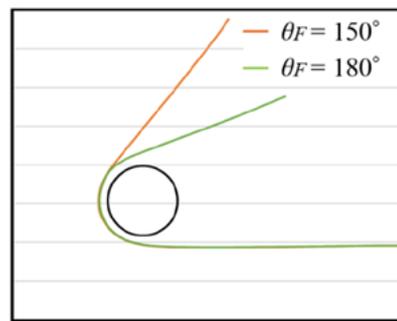
$\theta_F=150^\circ$ における変形形状を Fig. 8 (a) に示す。また、異形棒鋼の縦方向の節をもとに描いた線を Fig. 8 (b) に示す。比較のため、 $\theta_F=42.96^\circ$ における変形形状をもとに描いた線も合わせて示す。 $\theta_F=150^\circ$ では、支点ローラに沿うように異形棒鋼が曲げられている。 $\theta_F=150^\circ$ における支点ローラと棒鋼受けの間の変形形状は $\theta_F=42.96^\circ$ のものとあまり違いがない。

Figure 6 より $\theta_F=42.96^\circ$ までと比較して、軸方向変位 u の θ_F に対する傾きは緩やかとなる。加工初期では、支点ローラと棒鋼受けの間の曲げ変形が増加するため、棒鋼受けに作用する反力が増加すると考えられる。また、 θ_F が大きくなると、力点ローラと異形棒鋼の接触点に作用する力の方向が変化する。このようなことから、 $\theta_F=42.96^\circ$ 程度までは軸方向変位が大きく増加し、その後は増加し難くなると考えられる。

$\theta_F=180^\circ$ における変形形状を Fig. 9 (a) に示す。また、異形棒鋼の縦方向の節をもとに描いた線を Fig. 9 (b) に示す。比較のため、 $\theta_F=150^\circ$ における変形形状をもとに描いた線も合わせて示す。 $\theta_F=180^\circ$ で



(a) Deformed shape



(b) Trace lines of longitudinal rib

Fig. 9. Deformed shape of rebar for $\theta_F=180^\circ$.

は、支点ローラと力点ローラの間部分を支点ローラに押し付けるように曲げている。また、支点ローラと棒鋼受けの間の変形形状は $\theta_F=150^\circ$ の場合とあまり違いがない。

以上より、Fig. 3 に示した各領域で変形形状を比較すると、領域 B の長さが増加すること以外は、 $\theta_F=90^\circ, 130^\circ, 180^\circ$ で大きな違いはないと考えられる。

3.4. 加工後の異形棒鋼の硬さ分布

加工後の硬さを評価するため、Fig. 3 に示した4領域を対象として硬さ試験を行った。また、各領域内でも中央部分と境界に近い部分で変形形状が変化することが推察される。例えば、領域 A においても、異形棒鋼には節があることで曲げ変形しやすい部分があることから、一様な変形とならないことが考えられる。このため、工具に接触することなく曲げられていた領域 A ならびに領域 C における硬さはそれぞれ2か所を対象として測定した。領域 B ならびに領域 D は、工具に押し付けられていたことからそれ

ぞれ1か所を対象として測定した。

加工後の異形棒鋼の形状を確認しながら節ごとに切断し、Table 1 に示した断面の硬さ試験を行った。 L_S は棒鋼受けの端からの距離であり、領域Dの2か所は10mmあるいは22mmとした。棒鋼受けの長さは130mmであり、Fig. 6 に示した軸方向変位の最大値が3.1mmであることから、本実験条件の θ_F において領域Dにおける測定対象面の位置は、加工完了時まで棒鋼受けに接触していると考えられる。領域Aの2か所は L_S が154mmあるいは160mmである。棒鋼受けの長さが130mmであり、Fig. 2 より棒鋼受けの端から支点ローラの中心までの距離の水平方向成分が170mmである。加えて、Fig. 6 に示した軸方向変位の最大値が3.1mmであることから、本実験条件の θ_F において領域Aにおける測定対象面の位置は、工具に接触することなく曲げ変形していたと考えられる。領域Bならびに領域Cについては、 θ_F の増加にともない領域Cであった部分が支点ローラに押し付けられることとなるため、加工後の異形棒鋼の形状を確認しながら断面を確認することとした。

大きな変形が見られなかった領域Dの硬さ試験の

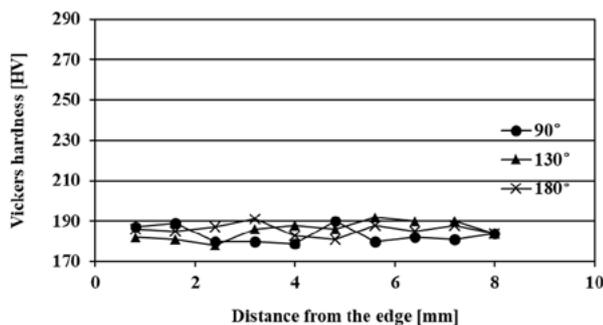


Fig. 10. Variation of hardness in area D.

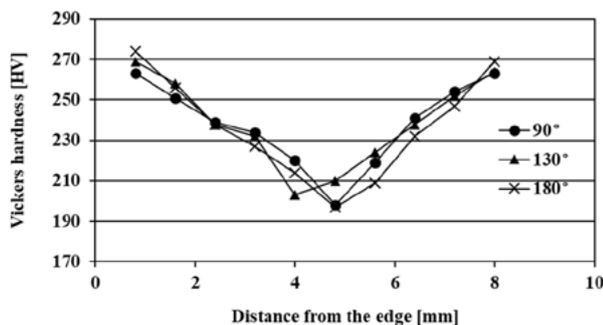
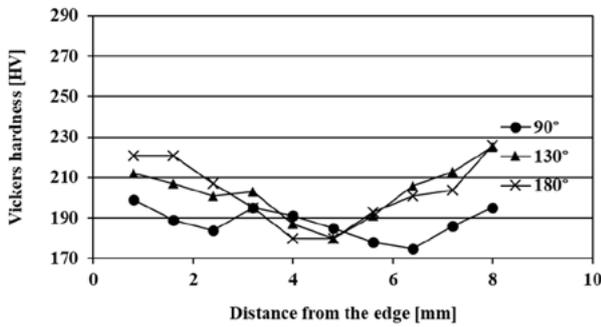


Fig. 11. Variation of hardness in area B.

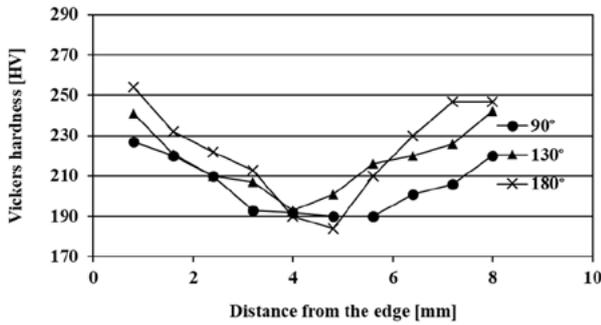
結果を Fig. 10 に示す。横軸は Fig. 4 に示した断面の外側から測定点までの距離である。 θ_F によらず、全ての測定点において硬さが180HVから190HV程度である。表面と中心部分の硬さに大きな違いがないことから、領域Dは曲げ加工の影響を受けていないと考えられる。

支点ローラに押し付けられて曲げられた領域Bの硬さ試験の結果を Fig. 11 に示す。中心付近に比べて、曲げ変形による伸びあるいは縮みが大きい表面に近づくと硬さが増加する。曲げ加工の影響を受けていないと考えられる領域Dの硬さが180HVから190HV程度であったことに比べて、領域Bでは表面付近の硬さが270HV程度となっており、加工により硬さが増加している。Table 1 に示したように、 $\theta_F=90^\circ$ および 180° における棒鋼受けの端から測定対象面までの距離は $L_S=172\text{mm}$ であることに對して、 $\theta_F=130^\circ$ では $L_S=184\text{mm}$ と異なるにも関わらず、硬さ分布に大きな違いが見られない。Fig. 9 に示されているように、領域Bは支点ローラに押し付けられるように変形するため、領域B内の位置が異なる部分の変形状を比較すると大きな違いはない。このようなことから、本実験の領域B内の異なる測定対象面の位置では、硬さ分布に大きな違いがあらわれまいと考えられる。また、 θ_F が増加しても硬さ分布が同じ傾向を示すことも、領域Bは支点ローラに押し付けられるように変形するためと考えられる。

工具に接触することなく曲げ変形する領域Aの硬さ試験の結果を Fig. 12 に示す。領域Aは棒鋼受けと支点ローラの間部分だが、A-1とA-2で同じ θ_F の場合を比較しても場所により硬さが異なる。また、内部から表面に近づくほど硬さが増加する傾向は領域Bと同様であるが、領域Bの表面の硬さよりも領域Aの表面の硬さの値は小さい。しかし、領域Dの硬さが180HVから190HV程度であることから、曲げ加工によりA-1の部分では表面付近の硬さが増加していることがわかる。さらに支点ローラに近づいたA-2の部分では表面付近の硬さがさらに増加する。Figure 9 からわかるように、支点ローラに押し付けられて曲げられた領域Bよりも、工具に接触することなく曲げられた領域Aの材料変形は小さい。この



(a) Location A-1



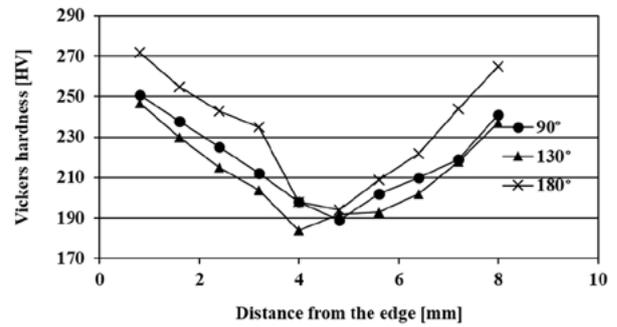
(b) Location A-2

Fig. 12. Variation of hardness in area A.

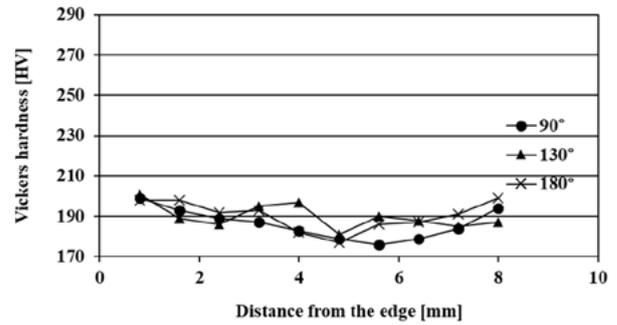
ような材料変形の違いから、領域 B に比べて領域 A の表面の硬さは小さい値となると考えられる。また、領域 B に近い A-2 の方が A-1 よりも表面の硬さが大きい値となると考えられる。

Figure 12 に示したように、A-1 の $\theta_F=90^\circ$ のときの表面の硬さは最大 199HV であり、 $\theta_F=180^\circ$ では最大 226HV となる。領域 B の表面の硬さまでは増加しないが、 θ_F が増加すると領域 A の表面の硬さが増加する。A-2 の表面の硬さについては、 $\theta_F=90^\circ$ における硬さの最大値は 227HV であり、 $\theta_F=180^\circ$ における硬さの最大値は 254HV である。一方、Fig. 7 (b) に示した形状の比較では、 $\theta_F=42.96^\circ$ 以降では領域 A の変形形状は大きくは変化しない。領域 A は、加工初期に大きく変形すると考えられ、その後の θ_F の増加による変形の変化は小さくなると考えられる。なお、実験ごとの節の位置や切断位置の影響も考えられることから、 θ_F の増加にともなう領域 A の変形については、今後より詳細な検討が必要と考える。

工具に接触することなく曲げ変形する領域 C の硬さ試験の結果を Fig. 13 に示す。領域 C は支点ローラと力点ローラの間部分である。同じ θ_F の場合を比



(a) Location C-1



(b) Location C-2

Fig. 13. Variation of hardness in area C.

較すると、C-1 の硬さの増加が C-2 と比べてかなり大きい。C-2 よりも C-1 は、変形が大きい領域 B に近いことが影響していると考えられる。また、C-2 に示す表面の硬さの値は領域 B に比べてかなり小さく、領域 D の硬さ分布と比較すると C-2 の内部と表面の硬さの変化はわずかである。領域 A と比べて領域の長さが短いため曲げ変形は起こり難いと考えられ、C-2 付近の変形は小さいためと考えられる。

以上より、本実験条件では回転角度が変化しても、工具に押し付けられながら曲げられた領域の硬さに大きな違いがないことを明らかにした。また、工具に接触することなく曲げられた領域については位置により硬さが異なることを明らかにした。

4. 結論

簡易曲げ加工機により異形棒鋼を曲げ加工し、力点ローラの回転角度の増加にともなう材料変形を観察した。また、加工中の軸方向変位ならびに加工後の異形棒鋼の断面における硬さを測定した。以下の結論を得られた。

- (1) 簡易曲げ加工機では、変形状により異形棒鋼を4つの領域に分けることができる。支点ローラに押し付けられて曲げられる領域を除き、回転角度が90°、130°、180°では各領域の変形状に大きな違いはない。本実験条件では、力点ローラと異形棒鋼の接触後、回転角度の増加にともない軸方向変位の増加が緩やかとなった。
- (2) 簡易曲げ加工機により曲げられた異形棒鋼の硬さは、棒鋼受けに接する領域、棒鋼受けと支点ローラ間の領域、支点ローラに押し付けられて曲げられる領域ならびに支点ローラと力点ローラ間の領域ごとに異なる。
- (3) 加工前の異形棒鋼の硬さに比べて、回転角度の大きさに関係なく支点ローラに押し付けられて曲げられた領域の硬さの測定値は大きくなる。一方、棒鋼受けと支点ローラ間の領域ならびに支点ローラと力点ローラ間の領域は、測定位置が支点ローラに近づくにともなって硬さの測定値が大きくなる。

参考文献

- 1) 沖本 弘, 鶴岡 孝輔, “曲げ戻し加工による異形鉄筋の破断特性に関する実験的研究”, 日本建築学会構造系論文報告集, **442**, 33-41 (1992).
- 2) 三浦 尚, 船本 浩二, 瀬戸 謙一郎, “極低温下での鉄筋の曲げ加工部における耐衝撃性”, 土木学会論文集, **34 [557]**, 15-22 (1997).
- 3) 瀬沼 武秀, 樋渡 俊二, 菊池 正夫, 新塑性加工技術シリーズ2 金属材料, (コロナ社, 東京, 2016), 123-124.
- 4) 中村 雅勇, 戸澤 康壽, “かたさ値と圧こんに現れる現象—押し込みかたさに関する金属塑性学的研究I—”, 塑性と加工, **16 [175]**, 668-675 (1975).
- 5) S. Higaki, H. Nishida, Y. Koike, M. Sasada, T. Tanaka, “Effect of Transverse Ribs on Axial Displacement of Rebars in Bending”, *Procedia Manufacturing*, **50**, 253-256 (2020).