熱処理した炭素鋼を曲げ加工したときに あらわれる残留ひずみについて*

米 谷 茂**

On the Residual Strain of the Heat Treated Plain Carbon Steel under the Bending Test

by

Shigeru YONETANI
(Musashi Technical College)

The heat treated plain carbon steel which has been worked shows the various residual strain according to the heating conditions and the kinds of load, even when the applied load is below the yield stress.

In this report, first, the author shows the residual strain which is measured with the electric resistance strain gauge on the tension, compression, and the simple bending.

Next, the residual deflections in the simple bending test are measured with the electric resistance strain gauge, optical flat, and mirrors.

It is found that the test pieces are bent to the opposite side against the bending moment when the load is removed, especially in case of the steel of about 300°C tempering.

Besides, the accuracy of the electric resistance strain gauge is discussed.

(Received July 31, 1958)

1. 緒 言

焼入および焼戻した鋼に加工を加えるとき、電気抵抗線ひずみ計によって測定した結果では、その熱処理条件、作用荷重の状況によって、作用荷重が降伏応力以下のときも除荷重後の残留ひずみは種々な様相を示す。しかし、この残留ひずみは引張り、圧縮などの単純応力の場合には、他の機械的あるいは電気的測定では保証しえない程度の量であり、曲げ試験を行って除荷重後の残留たわみ角度を各種の方法で求めることによって、その残留ひずみを保証しうる程度の微小なものである。

本報はまず、焼入、焼戻した炭素鋼に引張り、または圧縮の単純応力の加工を行い、抵抗線ひずみ計によって残留ひずみを測定した結果を述べる。降伏点下の応力でも塑性変形があり、特に300°C付近で焼戻したものは荷重時のひずみと反対方向の特に大きい負のひずみが生ずる。

次に、降伏点下の曲げ荷重で単純曲げ試験を行い、抵抗線ひずみ計、オプティカルフラット、鏡式の3方法によって残留たわみ角度を求めた。抵抗線ひずみ計で求められる残留ひずみは、接着剤のクリープあるいはゲ

ージそのものの特性などによる誤差を含む可能性があるかも知れないので、電気抵抗線ひずみ計の精度を吟味する意味をも兼ねて単純曲げ試験を行って、曲げ加工を行ったときの残留たわみに対する熱処理の影響、および3方法による結果の差違を吟味したものである。この結果、抵抗線ひずみ計の測定における接着剤のクリープなどによる見かけ残留ひずみの量はきわめて小さかった。

2. 実験方法

引張りおよび圧縮試験片は Fig. 1 に示すような丸

Fig. 1 Shapes and dimensions of specimens

* 原稿受付 昭和33年7月31日

** 正員 武蔵工業大学

棒試験片である。また、曲げ試験片は $10.3\text{mm} \times 10.3\text{mm} \times 140\text{mm}$ の角形試験片である。材料は $0.2\%C$ のボロン鋼、 $0.4\%C$ 、 $0.6\%C$ 、 $0.9\%C$ の炭素鋼を使用し、これらを予備処理後、所定の寸法に切削研磨し、 1000°C に加熱後、 $0.2\%C$ 鋼は 20% 塩水に、他は油中焼入を行い、焼戻しを 100°C 、 200°C 、 300°C 、 400°C 、 500°C 、 600°C で30分間行って空冷したものである。熱処理は真空中で行った。引張りおよび圧縮試験は10 ton フムスラー試験機を用い、曲げ試験は単純曲げとして行い、装置としてブリネル硬度計の荷重部分を改造したものを用いた。その概要は Fig. 2a に示す。引

Fig. 2a Apparatus of the bending test

Fig. 2b Apparatus of the mirror

張りおよび圧縮のひずみの測定は共和無線製静的ひずみ計を用い、試料の外周両側にゲージを貼付け、その平均値でひずみを求めた。使用したゲージは K 22 である。また、単純曲げにおいても材料中央上下面にゲージを貼付けて、これらのひずみより一様曲げとして後述の方法によって試片中央より 27mm の点のたわみ角度を求めた。また、オプティカルフラットによる測定は曲げのとき圧縮になる面における干涉縞の幅よりこの面の曲率を求め、一様曲げとして試片中央より 27mm におけるたわ

み角度を計算した。使用光源としてはナトリウムランプを用いた。また、鏡装置の概要を Fig. 2b に示す。鏡を支持点以内に中央より 27mm 、または、より広いスパンのものでは 35mm の点に対称に2個つけて鏡より 2000mm 離れた点で、望遠鏡とスケールによってこの点のたわみ角度の測定を行った。

なお、オプティカルフラットによる測定には、試料は1条件について2本あるいは5本(特に 300°C 焼戻し)を用い、試料は熱処理後に測定面を研磨したものについて行った。また、鏡による測定も1条件について2本以上を測定した結果である。また、残留応力の測定は腐食による曲率測定の方法によって行い、表面より断面内各層の残留応力を調べた。この場合、1条件2個の試料を用いた。

3. 実験結果

(1) 電気抵抗線ひずみ計による引張り、圧縮および曲げの残留ひずみ

$0.6\%C$ の炭素鋼を 1000°C より焼入後 100 、 200 、 300 、 400 、 500 、 600°C に焼戻しを行ったものについて、引張りおよび圧縮試験を行った結果を Fig. 3 に示す。荷重を低荷重より次第に高荷重まで増加せしめて、毎回付加した荷重に対する残留ひずみの総和を示したものである。両者いずれも焼戻温度が高くなるにつれて残留ひずみは大きくなり、 300°C 焼戻のときにもっとも大きく、 300°C 以上の焼戻しのときには残留ひずみは小さくなっている。いずれも作用荷重と反対方向の残留ひずみを示し、かつ、圧縮の場合のほうが大である。この残留ひずみ曲線で応力が増すにつれて初めは残留ひずみが徐々に増加し、やがてある応力をこしたときは残留ひずみが少なくなる点がある。この値も圧縮したときのほうが大である。このような値をCohenは true elastic limit と呼んでいる。しかし、このよ

Fig. 3 Residual strain in tension and compression

Fig. 4 Diagram of total strain to residual strain in the tension, compression and bending test

うにあらわれた残留ひずみは電気抵抗線ひずみ計ゲージの接着剤のクリープ、またはゲージの特性にもとづく見掛けのものか、あるいは材料の本質的なものによるかはこの測定のみでは判定しえない。

次に、引張りおよび圧縮の場合の丸棒とほぼ等断面積の角棒の曲げ試験片で、材料中央上下の引張りおよび圧縮側にゲージを貼付けて単純曲げ試験を行い、作用荷重下の全ひずみに対する除荷重後の残留ひずみを単純引張りおよび単純圧縮の場合の全ひずみに対して比較を行った。Fig. 4 はこれらの全ひずみに対する残留ひずみを示す。一様曲げにおいても単純引張り、圧縮と同じく作用応力のひずみと反対方向に残留ひずみを生ずることが見られ、焼戻温度の低い付近では全ひずみに対して負の残留ひずみは引張りの場合、曲げのほうが大であり、圧縮のほうが小である。このように引張り、圧縮いずれについても降伏点以下の応力下でも、その残留ひずみは一致していない。全ひずみの増加につれて、引張り、圧縮それぞれについて接着剤のクリープやゲージの特性などにもとづく影響があっても、降伏点下の低荷重範囲で完全弾性が成立するものとする、同一の全ひずみに対して同一の残留ひずみを生ずるはずであるが事実は一貫していない。

(2) 曲げ試験における残留たわみ

抵抗線ひずみ計によって測定せられた残留ひずみが正確なものであるとすると、降伏点下の荷重で

曲げ試験を行うと、作用曲げモーメントと逆方向に試片はたわむはずである。したがって、抵抗線ひずみ計の測定結果により残留たわみ角度を求め、次に機械的測定としてオプティカルフラットでの曲率測定による残留たわみ角度の測定と、鏡と望遠鏡による残留たわみ角度の直接測定とを同時に行い、3方法の結果を吟味しつつ降伏点下の曲げ応力下での残留たわみを調べた。

まず、抵抗線ひずみ計より求めた残留ひずみから残留たわみ角度を求める。試片中央における残留ひずみから、曲げが一様として試片中央より 27 mm の点における

たわみ角度を次式により求めた。試片中央における引張り、圧縮側の残留ひずみを ϵ_1, ϵ_2 、中立軸のひずみを ϵ_0 、中央より距離 x の点の曲率半径 R 、試片の厚さを $2h$ とし曲げの前後に断面が平面性を保持すると仮定すると、

$$\frac{R+h}{R} = \frac{1+\epsilon_1}{1+\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\frac{R-h}{R} = \frac{1+\epsilon_2}{1+\epsilon_0} \quad (2)$$

(1)(2)式より

$$\frac{1}{R} = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{2h} \cdot \frac{1}{1 + \epsilon_0}$$

$\epsilon_0 \ll 1$ とすると、

$$\frac{1}{R} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2h}$$

試片中央より x 離れた点におけるたわみ角度 i は、

$$i = (\epsilon_1 - \epsilon_2) \frac{x}{2h} \quad (3)$$

Fig. 5 Angle of residual strain and applied bending stress in the bending test in span (1)

(3)式より作用曲げ応力に対応して毎回除荷重後の残留たわみ角度を Fig. 5 に示す。ただし、作用曲げ応力は作用モーメントを断面係数で割ったもので、ひずみ計の測定値より求めたものでない。曲げにおいても作用モーメントと逆方向に残留たわみが生じ、特に 300°C 焼戻しのもはもっとも大きくたわんでいるのが見られる。また、同図に同一のスパンのもので除荷重後、曲げに際しては圧縮になる面にオプティカルフラットをあて、ニュートンリングの大きさより曲率半径を求め、その曲率半径の変化より一様曲げとして中央より 27mm の点における残留たわみ角度を求めた結果を示す。

また、上記のものより広いスパンの装置で曲げモーメントが同一になるようにして、鏡と望遠鏡によって試験片中央より 35mm 離れた点における残留たわみ角度を求めた結果を Fig. 6 に示す。

以上 Fig. 5, 6 よりオプティカルフラット、鏡式いずれも負のたわみを生ずることがわかる。しかし、オプティカルフラットによる測定では負の残留たわみの量は抵抗線ひずみ計による結果に比べて少なく、また、たわみが正の方向に変る荷重が低い。また、鏡による測

定でも負のたわみは求められ、400°C 焼戻しまでは抵抗線ひずみ計により求めた結果とほとんど同じ程度の負のたわみを生ずるが、たわみが正になる荷重は低い。

Fig. 7 の左に 0.2%C 鋼の 300°C 焼戻しせるものについて以上の 3 方法による結果の比較を示す。スパン(1)の試片中央より 27mm の点におけるたわみを求めたものである。0.2%C 鋼は塩水焼入してあるために焼入による表面と内部の残留応力の大きさの比は、0.6%C に比べて大であると思われる。オプティカルフラットで測定するときは研磨により表面は幾分除去されるために、表面の高い応力の除去される割合は 0.6%C 鋼に比べて大である。このことがオプティカルフラットによる測定で、0.2%C 鋼の測定で負のたわみが小である原因と思われる。また、Fig. 7 の右に 0.2%C 鋼と 0.9%C 鋼のものをオプティカルフラットで測定した結果を示す。表面および内部にもより均等に残留応力をもつ 0.9%C 鋼のほうがたわみが大きくあらわれている。

0.6%C 鋼 300°C 焼戻しのものに、試片中央部とスパン内支持部付近(鏡の取付点)にひずみゲージを取付けて曲げ試験を行い、おのおの点について前式(3)

より試片中央より 27mm の点の残留たわみ角度を求めた結果と、直接鏡による測定結果を Fig. 8 左に示す。また、この試料を荷重 0 より繰返し曲げ荷重を加えたときの残留たわみ角度を Fig. 8 右に示す。電気抵抗線ひずみ計の測定においては初めの負荷では支持部の影響が見られ、支持部付近は始め負のたわみ角度でその値は小さく出ているが、繰返し負荷すると、ある荷重までこの影響はほとんどないようである。また Fig. 5、

Fig. 6 Angle of residual strain and applied bending stress in the bending test in span (2)

Fig. 7 The comparison by the three methods due to the materials

Fig. 8 The effect by the measuring positions and the repeated measuring

6 の 0.6%C 鋼についての鏡による測定と抵抗線ひずみ計による測定結果において、荷重の高い部分では抵抗線ひずみ計による負の残留たわみ角度のほうが一般に大である。これは抵抗線ひずみ計による残留ひずみよりたわみ角度を求める式(3)が負荷前後において、断面平面性を仮定しているためによるのではないと思われる。すなわち、たわみ角度が正に移り明瞭な曲げモーメントの方向への塑性的なたわみが考えられるときは、抵抗線ひずみ計より求められた残留たわみは鏡による測定と大きな差を生じている。したがって、500°C 焼戻しのものについての鏡による測定ではほとんど負のたわみを示していないが、抵抗線ひずみ計より求めたものは負のたわみを示すのではないかと考えられる。次に 0.4%C 鋼の試料を 1000°C 焼入、300°C 焼戻しを行って曲げ試験を行い、作用荷重として 60kg/mm² の曲げ応力を与え、その残留たわみが曲げモーメントの方向に 2.5×10^{-4} rad. であったとき、熱処理のままのものと曲げ試験後のもので、引張側および圧縮側のおおのについて表面より腐食を行い、反対面の曲率の変化を測定して、表面下の軸方向の平均の残留応力を求めた結果を Fig. 9 に示す。300°C 焼戻しのは負の残留たわみがもっとも大きく表われるものであり、この程度の応力負荷においても引張および圧縮側の残留応力は変化しており、熱処理のままのものは表面層近くでは正の残留応力の山があり、また、

Fig. 9 Residual stress in unit layer from the surface

内側に負の残留応力の山を示すが、加工によって引張側、圧縮側いずれもその山の応力は低下している。これらの残留応力は断面内の表面に平行な層における平均残留応力であり、実際には断面各部において局部的には大きな残留応力を持つ部分も考えられる。このようなものに降伏点下の応力で曲げ加工を加えると、局部的に塑性変形を行う部分もあり、したがって、除荷重後、残留応力の分布に変化があらわれて、300°C 焼戻しのもののように負の残留たわみを示すものもあらわれるのではないと思われる。

4. 総 括

(1) 焼処理した断面 10.3mm×10.3mm の炭素鋼の角材について一様曲げ試験を行い、残留たわみ角度を抵抗線ひずみ計、オプティカルフラットおよび鏡式の3方法によって測定した。熱処理の条件によって残留たわみは降伏点下の曲げ荷重で曲げモーメントと逆方向にたわむことを示した。

(2) 上記の3方法による結果の比較によって抵抗線ひずみ計による測定精度を吟味したが、抵抗線ひずみ計の接着層のクリープなどにもとづく見掛けの残留ひずみは小であった。抵抗線ひずみ計による測定を保証した結果として、降伏点下の荷重で引張りおよび圧縮したときにあらわれた残留ひずみは、熱処理条件によって作用荷重に対して負となりうることも考えられる。

(3) 熱処理したものを曲げ試験を行うとき、熱処理条件によってそれぞれ内部応力を持っているものに、荷重付加によってミクロ的な組織や残留応力の変化が加わるために、降伏点下の曲げ荷重でも残留たわみが見られて、300°C 焼戻しのように負の残留たわみを生ずるものもあらわれるのではないと思われる。

終りに、この実験遂行にあたって種々御指導にあづかった東京工大津村教授に慎んで謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 応力測定技術研究会, 応力測定法, 372
- 2) M. Cohen. Tran. ASM, Vol. 47, p. 380 (1955)