残留応力と微小かたさの関係について*

平 修 二** 吉 岡 靖 夫***

On the Relation between Residual Stress and Micro Indentation Hardness

by

Shuji TAIRA and Yasuo YOSHIOKA

(Faculty of Engineering, Kyoto University) (Musashi Institute of Technology)

In the present study, experiments were carried out to find the influence of stress on the micro-Vickers hardness, using carbon steel.

Mechanically applied stress, residual stresses due to heat treatment and cold-working were given to specimens. For measuring surface stress, the X-ray technique reported by Christenson and Rowland was employed. As an application of this experiment, the change in residual stress and hardness due to the aging at room temperature were measured. Experimental results were discussed from the standpoint of relief of stress due to indentation.

The results of experiments are summarized as follows:-

- (1) Hardness increases proportionally to the magnitude of surface compressive stress and, on the contrary, inversely to tensile stress. A linear relationship holds between stress and hardness.
- (2) The change in hardness due to cold-working is caused by residual stress and work hardening.
- (3) The change in hardness of the quenched specimen due to aging, is influenced by the residual stress and the transformation of metal. Both hardness and residual compressive stress decrease until about ten days after quenching, and thereafter hardness increases gradually, while residual compressive stress maintains nearly a constant value except for a temporary increase at about 15th days after quenching.

(Received Oct. 25, 1961)

1. 緒 言

著者のうちの一人は前にかたさ基準片に関する研究¹⁾において、基準片表面の残留応力が変化すれば、公称かたさ値が変化することを明らかにし、硬度測定に際しては残留応力の存在はきわめて重要な因子となることを指摘した。

かたさの定義は他の物理量のように明確なものではなく、材料の試験および使用目的に応じた解釈がなされており、したがってその定義の範囲も広範で、降伏強度、引張強度、塑性変形に対する抵抗、耐摩耗性、切削抵抗、材料の均一性等材料の種々の性質の目安として使用されている。

特に硬度を用いての降伏強度の推定については、²⁾Tabor らはかたさ H は降伏応力を σ_s とするとき、 $H = c\sigma_s$ なる関係で表わされることを示している。 c は

ブリネルかたさの場合 2.9 、ビッカースかたさのとき 3.2 であり、引張試験を行なわないで材料の降伏強度を推定することができると述べている。しかし、測定する試料に残留応力が存在すれば、降伏強度は変化することが考えられ、また、上述のようにかたさは残留応力により変化することが当然予期される。この種の問題に関しては、³⁾G. Sines と ⁴⁾R. Carlson および A. Dervishyan がブリネルかたさを引張りまたは圧縮応力を加えたときに測定しているが、材料の有する真の応力に対応するかたさ変化を測定した例はほとんど見当たらない。このことは、従来の応力測定法が単に付加応力のみの測定しかできなかったことに原因する。そこで著者らは、かたさを測定するとともにX線による応力測定法を用い、試料表面の応力を測定して、応力とかたさとの関係についての実験および考察を行なった。

2. 実験について

(I) 実験方法

* 原稿受付 昭和36年10月25日、第5回材料試験連合講演会にて講演(昭36.9)

** 正員 京都大学工学部

*** 正員 武蔵工業大学

かたさはマイクロビッカース硬度計を用いて測定を行なった。応力を変化させる手段としては単純引張りおよび圧縮が好ましいが、微小硬度計に取り付けて測定する関係上大きさが限定されるので、ここでは曲げモーメントを与えて試料表面に引張応力を与えるようにした。装置の概要を Fig. 1 に示す。応力は締付けボルトを締めることによって種々変化させる。

圧縮応力は上記の装置では与えられず、また、挫屈等のために硬度計を破損する危険もあるので、試料表面の圧縮残留応力分布を場所により変化させて、各部分の硬度を測定することにした。その方法としては、Fig. 2 のような偏心リングを造って、変態点以下の温度より水焼入れをして、熱応力による圧縮残留応力を生ぜしめる。リングの幅の狭い部分では、水冷の際内部まで冷却が早くいきわたるので残留応力はほとんど発生しない。しかし幅の広い部分では冷却の際の内外の温度差のため表面に圧縮残留応力が発生する。したがって、リングの幅の変化と残留応力の変化とは対応するので、各部の残留応力とかたさを測定した。

以上二つの実験は、弾性限度内の応力によるかたさ変化を測定するものであるが、次に塑性加工を行なった際に生ずる残留応力とそれに伴うかたさ変化についての実験を行なった。この実験では曲げにより板材の表と裏にそれぞれ圧縮と引張りの等量の応力を加え、付加応力が材料の降伏応力を越えると、それぞれ引張りおよび圧縮の残留応力が表と裏に生ずる。この場合の残留応力の変化に伴うかたさ変化を測定した。

最後に、以上の実験の一つの応用として焼入れした鋼の残留応力とかたさの経日変化を測定した。

Fig. 1 Testing apparatus

Fig. 2 Dimension of eccentric ring

(II) 実験材料

実験に使用した材料はすべて炭素鋼を使用した。最初の実験に使用した試験片は 0.44 % 炭素鋼であり、870°C で 1 時間焼なまし後炉中冷却したもの、および 870°C より水焼入れ後、250°C に 1 時間保持した後、空中冷却を行なった焼もどし材である。

偏心リングに対する実験には 500°C より水焼入れを行なった SK 4 材を用いた。

残留応力およびかたさの経日変化に関する実験に使用した材料は、870°C より水焼入れを施した 0.68 % 炭素鋼である。

(III) かたさ測定について

X 線によって表面応力を測定し、得られた応力の大きさおよび種類とかたさの関係を求めるのが本研究の主目的であるため、できうかぎり試験片表面からの圧子侵入深さが小さい測定法を用いることが好ましい。また、応力を変化させる方法として曲げによる方法を採用しているため、試験片内部に応力こう配が生ずることが考えられるので、本実験においては微小硬度計すなわちマイクロビッカース硬度計を使用した。

微小かたさについては、測定精度、ばらつき、荷重とかたさの関係等、いろいろな問題があり、特に測定荷重の選定は求めるかたさ値に大きな影響を与えることが考えられるゆえ、あらかじめ焼なまし材について荷重-かたさ曲線を求めて本実験における荷重の大きさを決定した。Fig. 3 はその結果を示したものである。500 g 以上の荷重に対してほぼ一定かたさを示すことが認められるゆえ、本実験にては荷重を 1 000 g とした。測定した材料の中のいちばんやわらかいもので圧痕の対角線は約 120 μ 、最もかたいもので約 43 μ であった。

(IV) 応力測定について

本実験に用いた応力測定方法はすべて X 線による方法を採用した。X 線による応力測定法はすでに Glocker らにより確立されて以来、今日まで唯一の非破壊的、局所的な表面応力の測定法として広く用いられてきた。すなわち、被測定材の表面に垂直、および

Fig. 3 Variation of hardness with applied load for carbon steel

45° 方向より特性X線を入射して得られる回折X線をフィルムまたは計数管で受け、回折強度分布曲線を求めて(フィルム法の場合はマイクロフォトメーターにより黒化度の自記曲線を求める)その回折強度最大の位置を測定して次式により応力を算出する。

$$\sigma = \frac{E}{1+\nu} \cdot \frac{1}{\sin^2 \phi} \cdot \frac{d_\phi - d_0}{d_0} \quad (1)$$

ここで $\phi = \phi_0 + \eta$ で ϕ_0 は試料法線に対してのX線入射角, $\eta = 90^\circ - \theta$ で θ は Bragg 角を表わす。

$d_\perp$: 試料に対してX線を垂直に入射したときの格子面間隔

d_ϕ : X線を試料法線に対して ϕ_0 だけ傾けて入射させたときの格子面間隔

d_0 : 試料の無応力状態のときの格子面間隔

しかし最近 Christenson と Rowland は上述の Glocker による方法を発展させ(1)式を次のように変形した。

$$d_\phi = \left[\frac{1+\nu}{E} \cdot d_0 \sigma \right] \sin^2 \phi + d_0 \left[1 - \frac{\nu \sigma}{E} \right] \quad (2)$$

この式は、 d_ϕ と $\sin^2 \phi$ との関係が一次的であること、また、 σ の値のいかんにかかわらず $\sin^2 \phi = \nu/1+\nu$ において、 $d_\phi = d_0$ となる。したがって、実際X線応力測定にあたって ϕ を、二、三変化せしめて、それぞれの角度に対応する d_ϕ を求めれば、もしその測定値が正しければ、 $d_\phi - \sin^2 \phi$ の関係は完全に直線になり、かつ $\sin^2 \phi = \nu/1+\nu$ なる点で d_0 一定なる横軸に平行な直線と交わるはずである。

すなわち、以上のように Glocker 法に比べて、Christenson と Rowland の方法は少し手順を要するが、より精度の高い測定値が得られるものと考えられるゆえ、本実験においては、もっぱらこの Christenson と Rowland の方法を採用して応力を測定した。

用いたX線回折装置はガイガー計数管を用いた自動記録式ひずみ測定用のものであり、Cr の K α 線を用い、垂直および二、三傾斜角を変化せしめて入射して得られる(211)面回折線の回折強度曲線より応力を決定した。

また、実験の一部、すなわち残留応力分布の変化とかなさの関係に用いた偏心リングには、特に照射面積が限定されるためにフィルム法を採用して、X線ビームの直径を 1 mm ϕ とした。

3. 実験結果

Fig. 1 に示す装置によって弾性限度内の応力を与えた場合のかなさと応力との関係のうち、焼なまし材についての結果を Fig. 4 に示す。引張応力が材料に加わるとビッカースかなさはほぼ直線的に減少していくことがわかる。ブリネルかなさについては Sines³⁾ の実験結果があるが、その傾向は今回の実験と同じで

直線的な減少を示している。このかなさ減少に伴い Fig. 4 のように、付加応力の方向と一致した対角線の長さを b 、応力方向と 90° の方向の圧痕対角線を a として、圧痕対角線比 a/b を求めると、この a/b も引張応力の増加に伴い減少していく。すなわち b の増加は a の増加より大きいことを示している。

この材料の引張試験より得た降伏応力は約 32 kg/mm² であった。表面の応力が 0 kg/mm² の際のかたさは 143 であるから、前述の Tabor の式に代入すると $c=4.4$ となる。

次に Fig. 5 に同じ実験を、焼入れ後焼もどしを行なった材料について行なった結果を示す。焼なまし材と同じく、引張応力の増加にしたがってかなさはおよそ直線的に減少していく。

以上の実験は外部から応力を与えたときのかたさ変化であるが、試料の残留応力の変化によっても同じ変化が起こると考え、偏心リングによる実験を行なった。

残留応力およびかなさを測定した結果を Fig. 6 に示す。リングの幅の最も狭い部分では、残留応力はほとんどないが、いちばん幅の広い場所では約 15 kg/mm² 程度の圧縮残留応力が生じている。そうして幅の増加とともにほぼ直線的に残留応力は増加している。これに対してかなさも圧縮残留応力の増加とともに増加している。したがって前の実験と、この実験から弾性限

Fig. 4 Stress-hardness and diagonal ratio of indent for the annealed specimen (0.44 % C)

Fig. 5 Stress-hardness relation for the tempered (250°C, 1h) specimen (0.44 % C)

Fig. 6 Breadth of eccentric ring-residual stress and hardness relation

Fig. 7 Change in surface residual stress of bending bar after bending (annealed specimen)

Fig. 8 Ratio of hardness change on the surface of bending bar after bending (annealed specimen)

度内の引張応力はかたさを減少させ、圧縮応力はかたさを増加させるといえる。

次に塑性域の応力を与えた際の実験結果を Fig. 7, 8 に示す。Fig. 7 は曲げ試験を行なった際に板の両面(引張側と圧縮側)に生じた残留応力と付加応力の関係を示したものである。曲げを加えると板の支点間の中心の両面には符号が逆で、大きさの等しい応力が生ずる。弾性限度内では、付加応力を除荷したとき残留応力は理論的には発生せず、付加応力が降伏応力を越えると、ほぼ付加応力から降伏応力を差し引いただけの残留応力が試料表面に生ずる。Fig. 7 では点線で示したのが理論的な応力変化である。付加応力が 40 kg/mm^2 までは測定値はほとんど理論値に等しいが、付加応力が 60 kg/mm^2 では、引張り、圧縮の両残留応力とも、理論値より小さい値である。このときのかたさ変化比を Fig. 8 に示すが、引張側、すなわち圧縮の残留応力が生じた側のかたさのほうが、圧縮側、すなわち引張残留応力の生じた側のかたさより大きく変化している。

最後に焼入れ後の経日変化についての結果を Fig. 9 に示す。残留応力は焼入れ直後には圧縮で約 57 kg/mm^2 であったものが、徐々に減少していき、10日後には約 32 kg/mm^2 程度になる。しかし、15日ころでは圧縮側にいったん増加するが、20日以後はまた減少してある一定の値になる傾向がある。この残留応力の変化過程は、平、北野および平、村上によって求められた結果とほぼ同じ傾向である。かたさ変化については、焼入れ直後より10日ころまでは、残留応力の減少とともにかたさも減少するが、そこを境としてその後

Fig. 9 Change in hardness and residual stress due to aging for the quenched specimen (0.68% C)

は増加の傾向をたどり、30日後では焼入れ直後のかたさとほとんど同じ値を示す。

4. 考 察

まず、最初に引張応力によりかたさが減少し、圧縮応力によってかたさが増加する現象について考察する。この考察は定量的に行なうのが理想であるが、三次元問題であるので、現在完全解を得るのは困難であるので定性的な考察にとどめる。Fig. 10 に圧子を押し込んだときの圧子近辺の状態を示す。Hill によれば、図中のハッチを入れた部分が塑性変形した部分である。普通ビッカースかたさを測定するには、圧痕の対角線を測定してこれより圧痕表面積を計算して、これと荷重よりかたさ H を求める。そこで Fig. 10 の圧子断面は一つの圧子の稜線を表わしているものと考え、図の矢印の方向に引張応力が加わっているものとする。圧子を試料に押し込んだことにより、試料の表面近傍は局部的に二つに分けられたものと考え、図では OB の部分で二つに分けられ O の位置は A に移動したものとする。このとき応力は圧子により解放され A の位置は圧子稜線より離れ外側へ移動し図中に点線で示した OA' が新しい圧痕の稜線の位置となる。したがって、ビッカースかたさは、圧痕対角線が大きくなるので減少する。逆に圧縮応力が存在すれば、A' の位置は A より内側に向かうゆえ、かたさは増加する。

以上の考察は応力が加わる方向に圧子の稜線の一つが一致した面について考えたものである。一方、応力方向に直角な方向の圧子稜線について考えると、応力方向と一致した圧子稜線が試料より離れるために、この方向の圧子稜線付近に荷重が集中するため、この方向に塑性変形がさらに起こり、圧痕対角線にある程度の増加が起こる。ゆえに圧痕対角線は付加応力が一軸であっても、縦、横とも無応力の場合よりも引張応力の存在のときには増加する。

上記の考察は単に圧子の押し込みによる応力の解放という見地から定性的に行なったものであるが、押し込みかたさでは Tabor²⁾らの述べるように降伏強度との密接な関係があるから、次にこの点から測定値に対する検討を行なう。

Fig. 10 Plastic deformation area by indenter

試料に引張応力が作用していれば、その応力方向の引張降伏応力は $(\sigma_s - \sigma)$ である。したがってこの降伏応力のかたさ試験で推定するのであれば $H = c(\sigma_s - \sigma)$ とならなければならない。しかし Fig. 4 の実験例で示すように、引張応力が 15 kg/mm^2 の際のかたさは 134 であり、実験結果の項で述べた、 $\sigma_s = 32 \text{ kg/mm}^2$ 、 $c = 4.4$ を用いて計算するとき、 $H = 4.4(32 - 15) = 75$ となるのと大きな開きがある。このことは、かたさ試験によって得られる降伏応力は、材料の 3 軸方向の値であり、単に一軸方向のみの降伏応力が変化しても、その変化は Tabor の式からは求められない。このことから残留応力が試料にある場合には降伏強度の推定には、はなはだしい誤差を生ずることになるので、この点に対する注意が必要である。

以上は弾性限度内の応力が加わった場合のかたさ変化に対する考察であるが、次に塑性加工によるかたさ変化について述べる。Fig. 8 に見られるように、圧縮、引張りの残留応力が生じても加工硬化のため、降伏点以上ではかたさが増加しているが、引張りの残留応力の生じた側のかたさ増加が圧縮残留応力の生じた側のかたさ増加より少ないのは、弾性限度内のかたさ変化と同じ理由で引張残留応力が生ずれば、真の加工硬化より引張応力による変化が差し引かれるためと考える。また、圧縮残留応力が生ずれば、加工による硬化に、圧縮応力による変化が重畳してさらにかたくなるものとする。すなわち Fig. 8 の点線で示した曲線は、加工硬化による値と仮定し、実測値はこれに残留応力の影響があるものとする。このように弾性限度内の応力によるかたさ変化に対して行なった考察を塑性加工の場合にも拡張して解釈できる。

ただし、Fig. 8 の点線は説明上仮定したものであり、実際はこれとは異なることも考えられるが、機構の説明という点では無理はないものとする。

このような塑性加工においてもかたさは残留応力の影響を受ける。工業製品、特にショットピーニングや表面ロール、高周波焼入等により表面硬化した部品では、普通表面に大きな圧縮残留応力を生ずる。このような製品が使用中になんらかの原因によって残留応力が減少すれば、かたさもそれに対応して減少するから、初期のかたさをいつまで保持するかは疑問である。したがって、目標とするかたさは、残留応力の変化による減少を見込んだ値として考える必要がある。

Fig. 9 の焼入れ材の経日変化については、残留応力が 10 日目ころまで減少していくのは、安定化への移行として、表面から中心部への応力分布のこう配が急であったものが徐々にゆるやかになり、表面の応力は減少していくものとする。しかし焼入れ後 15 日目くらいになると、焼入れの際に残っていた残留オーステナ

イトがマルテンサイト化を始める。その変化は表面より徐々に内部に向かって進行していく。マルテンサイト化が起これば試料は膨張するため15日ころ、いったん圧縮残留応力が増加する。しかし、それ以後では応力し緩が起こって残留応力はある一定の値に減少する。

かたさのほうは、最初、焼入れ後より10日目ころまでは圧縮残留応力の減少とともにかたさも減少していくのであるが、15日目ころより表面にマルテンサイトが生成を始めるので、かたさは増加を始める。残留応力は20日目ころから減少するが、マルテンサイト化は続いて起こっているため、かたさは増加の傾向を示すのである。しかし、この増加もある量のマルテンサイトができてしまえば、飽和して一定の値になるものとする。この考察は組織変化を観察していないので推論であるが、残留応力とかたさの両者から上のような説明をして無理はないものとする。この例のように焼入れをして残留応力分布や組織が不安定な材料ではかたさ変化は、残留応力および組織の変化に依存する。その変化過程は複雑であるが、両者の変化を知ることによってかたさ変化の様相が判明する。

5. 結 論

炭素鋼の応力によるかたさ変化を測定した結果、次の結論を得た。

(1) 引張応力はかたさを減少させ、圧縮応力はかたさを増加させ、応力とかたさの間には直線関係がある。

(2) Taborの式による降伏強度の推定においては、ある方向に応力が存在して、その方向における降伏強度が他の方向のそれと異なるときには、かたさ試験によって降伏応力を推定すると、大きな誤差をもちやすく、降伏強度の推定は危険である。

(3) 塑性加工によるかたさ変化は、加工硬化と残留応力によるかたさ変化が重畳したものである。

(4) 焼入れによって起こるかたさの経日変化は残留応力と組織の両方の変化が組み合ったものである。

参 考 文 献

- 1) 吉岡, 材料試験, **11**, 103, 227 (1962)
- 2) D. Tabor, Proc. Roy. Soc., A. 192, 247 (1948)
- 3) G. Sines and R. Carlson, ASTM Bulletin, No. 180, 35 (Feb. 1952)
- 4) A. Dervishyan, ASTM Bulletin, No. 215, 71 (July, 1956)
- 5) R. Glocker and E. Osswald, Z. Techn. Phys., **16**, 237 (1935)
- 6) A.L. Christenson and E.S. Rowland, Trans. ASM, **45**, 638 (1952)
- 7) 平, 北野, 材料試験, **7**, 61, 552 (1958)
- 8) 平, 村上, 材料試験, **7**, 62, 591 (1958)
- 9) R. Hill, 塑性学, 211 (1954)

(378頁より)

土 木 建 築 材 料

高強度鋼構造材の経済性 (Economy of High Strength Structural Members) Geerhard Haaijer, Proc. ASCE, Vol. 87, No. ST8, pp. 1-23 (Dec. 1961)

最近の高強度鋼は、一般構造用炭素鋼に比較して、降伏点強度の上昇の割に価格の増加は少ない。この点に着目して、橋梁および建築物に使用される形式の部材断面において、いかに高強度鋼を使用すれば経済的で、かつ軽量化できるかを、降伏点、弾性係数、鋼単価などを考慮して理論的に解析し、その結果を各種のI形断面材に適用して、一般構造用のASTM A-7鋼を用いる場合に対して鋼重と材料費の比較検討を試みたものである。

考えた鋼材は、構造用炭素鋼 ASTM A7, A36;
高強度鋼: ASTM A440, A441 USS COR-TEN;
合金鋼: USS "T-1" type A, USS "T-1" である。

結論として、引張材では板の溶接断面の場合、“T-1”鋼によると67%の鋼重軽減、“T-1” type A鋼板によると32%の材料費節減、圧延型鋼の場合、A440鋼では24%の材料費節約となる。またI型断面はり(梁)の場合は、ウェブ高さと厚さの比を等しくすると、圧延材では“T-1”鋼で最大の軽量化(52%)が得られ、材料費節減はA440鋼で12%となった。ウェブ高さと厚さの比を局部座屈を押え、短スパンのときは鋼重軽減に材料費増大が伴うが、長スパンとなると材料費減少が目立つ。ウェブに低強度鋼、フランジに高強度鋼を使用した溶接混成断面はり、鋼重、材料費とも顕著な減少を示した。たとえば、A-7鋼のウェブと“T-1” type A鋼のフランジよりなる混成材は15%の材料費節減と、37%の軽量化を示した。

(西村 昭)