539.319.08 : 620.179.152

X線による金属材料の残留応力に関する研究*

(炭素鋼に熱処理を行なったときの残留応力について)

平 修 二**, 吉 岡 靖 夫**

X-Ray Investigation on the Residual Stress of Metallic Materials

(On the Residual Stress in Carbon Steel Caused by Thermal Stress)

by Shuji TAIRA and Yasuo YOSHIOKA

In the case of measurement of residual stress by means of X-rays, there remains a question whether the stress measured by X-rays represents the macroscopic residual stress itself.

In the present study, carbon steel plate specimens were heat-treated and the residual stress appeared in the specimens was measured by both the X-ray method and the mechanical method, and the results were compared.

Obtained results are summarized as follows:

1. The scattering of the stress values obtained by means of X-rays is less than 1 kg/mm^2 by using the $\sin^2 \psi$ method.
2. The residual stress on the surface is not uniform and varies from place to place of the surface.
3. The macroscopic residual stress in carbon steel caused by thermal stress can be accurately measured using the X-ray method when the specimen surface is treated by the electro-polishing method. However, if such method of surface treatment which raises the selective corrosion as etching by nitric acid is used, the relief of surface stress affects the measured value of residual stress.

1. 緒 言

X線による応力測定法は、最近数年来、特に残留応力の非破壊的かつ局所的な測定法として、研究室および現場においてしだいに多く使用されてきているが、一方、得られた残留応力の値が巨視的な残留応力であらわしているか否かについては、まだ議論の余地があるようである。すなわち、この理由として回折面依存性——応力を測定する格子面が異なると残留応力が異なる——のあることが指摘せられる。

著者らは前に炭素量 0.14% から 1.00% までの種々の炭素鋼焼なまし材に、一軸引張塑性変形を与えた板状試験片の残留応力分布をクロム $K\alpha_1$ 線を用いてX線的に、また機械的に測定して両測定値の間の関連性について検討を行ない、大略次のごとき結論を得た⁽¹⁾。

i) X線による応力測定値は、 $\sin^2 \psi$ 法によって測定することにより、信頼度の高い、また再現性のよい

値が得られる。

ii) 引張塑性変形をした試料について、X線により測定された残留応力分布は、試料表面において圧縮であり、さらに中央部にはいっても値は小さくなるがなお圧縮であり、巨視的な残留応力の平衡条件を満足していない。そうして炭素含有量が多くなるにつれて、試料中央部における圧縮残留応力が大きくなる傾向がある。この事実より、一軸塑性引張りによって生ずる残留応力のX線の測定値には、巨視的な残留応力以外に微視的な残留応力も含まれるものと考えられる。

iii) 一軸塑性引張りのような、いちおう均一と考えられる変形においても、残留応力は場所により著しく異なった値を示す。このため一般に局所的な残留応力を測定しているX線法と、比較的大きな面積内で残留応力が均一に分布するものと仮定して測定を行なう機械法とでは、測定条件が著しく異なるために、両測定値の比較検討を行なう際には、この点に関する十分の考慮が必要である。

この結論は、一軸引張塑性変形をした試料に発生した残留応力について得られたものであるが、残留応力の発生機構が異なるものではないかなる結果が得られる

* 昭和 39 年 4 月 2 日 第 41 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 39 年 6 月 15 日。

** 正員、京都大学工学部（京都市左京区吉田本町）。

かを調べることは、微視的残留応力発生の原因追究および実用面から重要な問題である。

塑性引張りを行なった場合の微視的残留応力については多くの報告があり⁽²⁾⁻⁽⁹⁾、種々の考察がなされているが、残留応力の発生機構が他のものについては系統的な研究はほとんど行なわれていない。

そこで、ここでは、数種の炭素鋼に低温焼入れをして生じた熱残留応力および低温焼入れした材料に一軸引張塑性変形を与えた場合に生ずる残留応力の挙動について研究した結果を報告する。

また、X 線測定の際に、普通の局所的な残留応力のほかに、大きな平面で残留応力が均一に分布すると仮定して測定した結果についても報告する。

2. 実験材料

本研究に使用した材料は、第 1 表に化学成分を示した炭素鋼である。試験片は第 1 図の形状に加工後、真空中 600°C に 1 時間保持後水中に投入して熱応力に

よる残留応力を発生させた (試験片 A)。また上記熱処理を行なったものにさらに一軸塑性引張りを与えたものも用意した (試験片 B)。試料のうちの若干の組織写真を第 2 図に示す。

3. 実験方法および実験装置

3.1 残留応力測定 3.1.1 X 線による残留応力測定

X 線による残留応力測定には、ガイガー計数管を用いた平行ビーム形自動記録式 X 線応力測定装置を用いた。特性 X 線はクロム $K\alpha_1$ 線を使用して鉄の (211) 面の応力を測定した。測定法は $\sin^2 \psi$ 法を採用、X 線入射角は、0°, 15°, 30° および 45° である。X 線照射面積は約 $2 \times 15 \text{ mm}^2$ であり、入射側および受光側のスリット前部に V の薄はくをつけて散乱 X 線による回折線の乱れを防いだ。このフィルタの効果は、第 3 図に示すように回折強さ曲線の形状が、フィルタなしの場合に比較して改善され、ピーク位置測定の精度が向上した。

残留応力の試料断面内での分布は著者らが前に報告したごとく⁽¹⁰⁾試料両面を徐々に等量だけ削除して現われた面の残留応力 σ_x を測定、この σ_x に表層除去により生ずる応力解放の影響を補正して除去前の応力 σ を求めた。補正式は次に示すものである。

$$\sigma = \sigma_x - \frac{2}{H-2a} \int_0^a \sigma da \quad \dots\dots\dots (1)$$

第 2 図 試料の組織 (×300)

第 1 図 試験片の形状および寸法

(a) フィルタをつけた場合 (b) フィルタのない場合

第 3 図 回折強さ曲線の一例

第 1 表 試験片の化学組成 (%)

鋼 種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
S 15 C	0.14	0.21	0.54	0.017	0.028	0.10	0.25	0.05	0.33
S 35 C	0.39	0.28	0.74	0.017	0.024	—	0.01	0.01	0.24
S 55 C	0.50	0.29	0.67	0.029	0.014	0.09	0.19	0.02	0.17
SK 5	0.82	0.22	0.40	0.009	0.007	0.02	0.06	0.01	0.18
SK 2	1.10	0.26	0.37	0.018	0.008	0.05	0.06	0.02	0.19

ここで σ は、板厚 H の板の深さ a の層の初期残留応力である。

試料表面の除去には 15% 硝酸と電解研磨(無水酢酸 80+過塩素酸 20)により行なった。

3.1.2 機械法による残留応力測定 機械法による残留応力の測定は、板の片面を順次除去して、応力解放にともなう曲率変化より残留応力を求める片面除去法を用いた。曲率測定はダイヤルゲージを使用した三点接触式のゲージによった。測定式は次のものである。

$$\sigma = \frac{E}{3l^2} \left[(H-a)^2 \frac{dh}{da} - 4(H-a)h + 2 \int_0^a h da \right] \dots\dots (2)$$

ここで l は曲率測定ゲージの長さ、 h は試料中心部のたわみ量である。

3.2 試料往復装置 1章にて述べたごとく、引張塑性変形した試料の残留応力は局所的にはきわめて不均一なものであった。今回の研究においても局所的な応力を測定するX線法による測定値が、試験片の測定場所により異なることが予想せられる。

このため、X線応力測定の際に、試験片をX線ビームに対して一定の距離を往復させて、見掛け上のX線照射面積を拡大させて、残留応力を測定する面積を機械法の場合とほぼ同一にするための装置を試作した。第4図はこの装置の外観で、歯車とラックピニオンにより上部の試料台を定速度で往復させている。往復に要する時間はストローク 10 cm で約 4 秒である。X線

第4図 試料往復装置

第5図 X線装置にとりつけた往復装置

装置にとりつけた本装置を第5図に示す。

なお、この装置を使用することにより粗大結晶粒の試料の応力測定もある程度可能となるものと考える。

4. 実験結果

4.1 平面上の残留応力分布 平面上での局所的な残留応力がいかなる分布をなすものであるか、また試料を往復させX線照射面積を見掛け上拡大して測定

第6図 試料表面における残留応力分布

第7図 第6図の各測定点の θ - $\sin^2 \psi$ 線図

を行なった場合はいかなる結果が得られるかについての検討をまず行なった。

実験は試験片表面で 5 mm おきに残留応力を 18 箇所測定した。測定した場所に対応した残留応力を第 6 図に示す。試料は S15C 材の 600°C 焼入試験片である。残留応力はいずれの場所でも圧縮であるが試験片の左端から右端へ行くにしたがって減少している。し

かし測定場所が 5 mm はなれるのみで測定値は著しく異なった値を示している。この測定における同一場所での測定値の再現性は良好であり、第 7 図に示すごとく、応力を求めるための $2\theta\text{-}\sin^2\psi$ 線図上でも測定点は理論どおりほとんど一直線上にあり、測定値のばらつきは約 1 kg/mm^2 以内におさまっている。なお、第 7 図中の左肩の数字は第 6 図中の測定場所番号を、右下の数字は求めた応力 (kg/mm^2) を示している。

この測定値 18 個の平均値は -21.4 kg/mm^2 である。一方、試料を前述の装置により約 90 mm 往復させて X 線照射面積を拡大して測定した場合には -21.0 kg/mm^2 となり、平均値とほぼ同一の値を示している。この結果は試料を往復揺動させて測定面積を拡大すれば、平均的な残留応力が得られることを示すものである。

この結果より、以下に述べる測定では、すべて試験片を X 線ビームに対して往復揺動させながら平均的な残留応力を測定した。

4.2 熱応力による残留応力分布(表層除去に電解研磨を用いた場合) 第 8 図に、S15C, S35C および S55C 材を 600°C より水焼入れをした際に生じた残留応力分布を X 線法および機械法によって測定した結果を示す。この場合、表層除去の方法としては電解研磨法を用いた。X 線による測定では、まず表層除去に

第 8 図 熱応力による残留応力分布 (表層除去を電解研磨にて行なった場合)

ともない起る応力解放の影響を補正していない値 σ_x を見ると、いずれの材料でも、試験片中心部では、ほとんど零になっている。このことはX線測定値が巨視的な残留応力をあらわしていることを示すものである。すなわち、試料内の巨視的な残留応力は板の両面を等量ずつ除去していけば、試料中心部に行くにしたがって応力解放のため、残留応力は零に近づくというこ

とより判定せられる。

次に、応力解放の影響を補正した $\sigma_{x,corr}$ を見ると、機械的に求めた値 σ_M ときわめてよく一致しており、表面で圧縮、中心で引張りの残留応力が見られている。

4.3 熱応力による残留応力分布(表層除去に硝酸を用いた場合) 4.2節で述べたように、表層除去に電解研摩法を用いた場合のX線測定値は、機械的測定値とよく一致するが、一般に残留応力測定の際に表層除去の方法としてはよく硝酸が用いられる。しかし、この場合には、除去後の表面が多少あらかなることと選択的腐食が起ることが考えられ、これらが表面の応力を直接測定するX線法においては、測定値になんらかの影響を与えることが考えられる。この考えより、次に表層除去を15%硝酸にて行なったときの残留応力分布を測定した。測定は、S15C, S55CおよびSK2材について行なったが、その結果を第9図に示す。この場合も σ_x は中心部では零になって巨視的な残留応力が測定されるが、 $\sigma_{x,corr}$ と σ_M とを比較すると、 $\sigma_{x,corr}$ は表面近傍で急激な圧縮残留応力の減少があり、 σ_M より小さい値を示す。また、引張残留応力も機械的に測定したものよりはるかに小さい値を示している。

4.4 熱残留応力と引張塑性変形による残留応力が重畳した場合 緒言に述べたごとく、炭素鋼焼なまし材に一軸引張塑性変形を与えたもののX線的残留応力は、巨視的な残留応力の平衡条件を満足せずに、試料断面全体にわたり微視的な応力と考えられる圧縮残留

第9図 熱応力による残留応力分布(表層除去を15%硝酸にて行なった場合)

応力が測定された。しかし、熱残留応力については X 線による測定値は、前節で述べたように巨視的なものと考えられる。しかし実際には熱応力と塑性変形による残留応力が重畳する場合も多く、また微視的残留応力の発生原因を追究するために、両者が重畳せる場合の残留応力分布を測定した。その結果を第 10 図に

示すが、この場合には、試料表面および中心部に圧縮残留応力が測定されて、巨視的な残留応力の平衡条件が満足せられていない。

5. 結果の考察

5.1 残留応力の不均一性 第 6 図に示したように、熱残留応力は局所的にはきわめて不均一なものである。この現象は一軸塑性引張りによる残留応力にも見られたところから、残留応力のもつ一般的な性質と考えられよう。特に本実験においては、焼入れの際に試験片が左端から水中に投じられたために生じたと考えられる左端から右端へかけての圧縮残留応力の減少も測定されている。このような残留応力は、機械的な測定法によってはほとんど検出不可能なものである。

X 線による応力測定では、従来は測定精度について疑問が若干存在したが、本研究において測定値のもつばらつきを求めたところ、約 $\pm 1 \text{ kg/mm}^2$ となり、きわめて良好なことが確認され、上記の不均一さは材料自体の有する性質であることがほぼ明らかであると考えられる。

従来の報告においても残留応力は局所的に考えた場合は非常に複雑な変化をして、一般に機械的に測定された残留応力は、平均値を表わすものであるとの説⁽¹¹⁾があるが、本研究においても、X 線照射面積を見掛け上拡大して測定すれば、ほぼ局所的な残留応力の平均値と同じ値が得られるという結果からも、残留応力のもつ本質的な性質と考えられ得る。

ただこのように局所的に不均一となる原因は明確にはなっていないが、試験片の形状、表面あらさ、結晶方位、焼入操作などの残留応力発生に寄与する種々の因子が複雑に作用し合って生ずるものとする。

このように残留応力は場所によって相当にばらつくため、残留応力を考慮して材料の強さを論ずる場合には、単に平均値的な残留応力のみならず試料中の最大値あるいは最小値をも対象として考える必要があるものとする。

5.2 熱応力による残留応力分布 一軸塑性引張りによって生ずる残留応力の X 線による測定値には巨視的残留応力のほかに微視的残留応力が含まれ、巨視的には平衡し得ない。しかし、熱残留応力については、本報告に示したように、表面処理方法を適切に行なうことにより、巨視的残留応力のみが正確に測定される。

X 線測定値に微視的残留応力が含まれるか否かは、残留応力を生ぜしめる変形機構によるものとする。すなわち、熱応力によって生ずる試料の塑性変形は、

第 10 図 熱残留応力と引張塑性変形による残留応力が加わった場合の残留応力分布

変形に際しての異方性が生じても焼なまし効果によって異方性が消滅すること、残留応力が生ずるに必要な塑性変形量が、一軸引張りの場合に比較して著しく小であることなどがおもな原因と考える。

しかし、15% 硝酸により表層除去を行ない残留応力分布を測定した結果では、X線による測定値は表面近傍において著しい圧縮残留応力の低下が見られ、機械的に測定したものと相当なひらきが見られる。熱応力によって発生する残留応力は、局所的な不均一さを考えずに平均的な残留応力のみを考えれば、機械法により、またX線法でも電解研磨法によって表層除去を行なって測定したような表面が圧縮で内部に行くにしたがって、円滑に引張りへと変化するものと考えられる。

このことから考えて、硝酸による表層除去による場合は、結晶粒界が選択的に腐食されて、そのために表面およびその近傍で結晶粒内で応力の解放が起り、そのために圧縮残留応力の低下が生ずるものと考えられる。

この応力解放がX線および機械的な残留応力測定におよぼす影響について検討を試みる。第11図にて、深さ a の部分の残留応力を σ とする。表層を片面のみ a まで除去すると、応力解放のために、中心の曲率 ρ が変化して $\rho + \Delta\rho$ になり、 a 部の応力が σ_x となり、新たな

第11図 表層除去による残留応力の変化(図式的)

残留応力の平衡が生ずる。ここで表面の部分で選択的腐食が起れば、 σ_x が減少して σ_x' となり、曲率もさらに $\Delta\rho$ 増加して、 $\rho + \Delta\rho$ となる。しかし、 $\Delta\rho$ は ρ に比較して微少量であり、無視されるために機械法では、 σ_x が測定されるが、X線法では σ_x' がそのまま測定される。このために両測定値が一致せず $\sigma_x > \sigma_x'$ となるものとする。

この考察の妥当性は、表層除去に際して電解研磨法を用いれば、X線測定値と機械的測定値がほぼ一致することより確認され、炭素鋼の熱残留応力は表面処理法が適切に行なわれればX線法により正確に測定できることが明らかになった。また、これと同時に、表面処理法が適切でないと誤った結論が引出される危険性があり、この点に対する十分の注意が必要であることが明らかにされたものとする。

5.3 熱残留応力と塑性引張りによる残留応力が重畳した場合 この場合のX線による残留応力値は、焼なまし材に一軸塑性引張りを与えた場合とほぼ同様に試料断面全体に圧縮の微視的残留応力が検出されている。この原因は、塑性変形の異方性によるものと考えられ、従来から提唱されている相応力以外の原因も考えるべきである。

すなわち、もし試料断面に存在する圧縮残留応力が相応力であるとすれば、熱処理材に微視的残留応力が生じないことと矛盾する点がある。組織写真において明らかなごとく低温焼入れした試験片の組織は、ほぼ焼なまし材と同一であり、フェライト相およびセメントタイト相の降伏強さの差が問題となるならば、焼入れによる塑性変形においても、たとえ焼なまし効果があるとしても二相間の強度差より当然相応力が発生すべきである。しかし、実際には巨視的なもののみが測定されることから、相応力存在の可能性には疑問の点があるものとする。

さらに、塑性引張りによって生ずる微視的残留応力は、ほとんどフェライトよりなる材料においても見られるという結果と考えあわせ、微視的残留応力の現われる原因は、変形の異方性によるものと考えられるが現段階においては、明確に実証すべき実験事実が存在しないところから、さらに詳細な研究を行なう必要があるものとする。

6. 結 論

炭素鋼板材に熱残留応力を発生させ、これをX線的および機械的に測定、また熱残留応力に引張塑性変形による残留応力を重畳せしめた場合の残留応力を、X線的に測定したところ次の結論を得た。

(1) 熱残留応力をX線によって測定した場合の精度は $\sin^2 \psi$ 法によれば、約 1 kg/mm^2 以内である。

(2) 局所的な残留応力は非常に不均一である。

(3) 熱残留応力はX線により正確に測定し得るが、試料の表面処理法によって結果が異なることがあるため注意を要する。すなわち、表面処理法としては電解研磨のごとき選択的腐食を起しにくい方法を用いるべきである。

(4) 熱残留応力に塑性引張りによる残留応力が重畳した場合の残留応力のX線の測定値には、微視的残留応力が検出され、巨視的な残留応力の平衡条件を満たさない。この原因の究明は今後の重要な問題である。

終りに、本研究の実施にあたり、実験に協力された

字部興産 広沢和彦氏と宇野製作所 宇野隆介氏に謝意を表する。

文 献

- (1) 平・吉岡, 材料, **12** (昭 38), 852.
- (2) S. L. Smith & W. A. Wood, *J. Inst. Metals*, **67** (1941), 315.
- (3) S. L. Smith & W. A. Wood, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **182** (1949), 404.
- (4) V. Hauk, *Arch. Eisenhüttenw.*, **25** (1954), 254.
- (5) 幸島・ほか 2 名, 機械学会論文集, **23**-135 (昭 32-10), 871, 875.
- (6) E. Macherauch, 材料試験, **11** (昭 37), 669.
- (7) K. Kolb & E. Macherauch, 材料, **12** (昭 38), 841.
- (8) 幸島・ほか 2 名, 材料, **12** (昭 38), 848.
- (9) 田丸・小島, 材料, **12** (昭 38), 861.
- (10) 平・吉岡, 材料試験, **11** (昭 37), 675.
- (11) R. F. Thomson, *Internal Stress and Fatigue in Metals*, (1959), 13.

ね じ 製 造 業 の 近 代 化 計 画

通産省ではこのほどねじ製造業の近代化計画をまとめた。

基本計画 43 年度末における近代化目標

(1) 製品の品質 ▽ボルト＝ねじ精度は JIS B 0209 および B 0211 の 2 級またはそれと同程度の水準で不良率は 2 % 以下とする。

また引張強さは単位体積当たり 70 kg 以上の水準で不良率は 2 % 以下とする。

その他の品質は JIS の規定水準とほぼ同水準で不良率は 4 % 以上とする。

▽ナット＝ねじの精度ならびにその他の品質は前記ボルトと同様であるが、引張強さは単位体積当たり 40 kg 以上の水準で、不良率は 2 % 以下。

▽小ねじ＝いずれも前記ナットと同じ。

▽木ねじ＝品質は JIS の規定水準と同水準で不良率は 4 % 以下とする。

(2) 生産費の引下げは昭和 38 年度末における当該製品と同一の品種を有する製品の生産費に対して 10 % 以上とする。

(3) 適正生産規模はボルトが月産 850 万円以上、ナットは 700 万円以上、小ねじ 700 万円以上、木ねじ 500 万円以上と利益率はいずれも 5.5 % 以上。

(4) その他、注目すべき事項

(i) 近代化設備資金 98 億 5 000 万円。

(ii) ねじ用材料の開発ならびにその購入方法の合理化。

(iii) 製品仕様の標準化および製品種類の単純化ならびに製造品種の専門化を促進。

39 年度近代化計画

1. 品質 ねじ精度とその他品質の水準は基本計画の品質水準とほぼ同じであるが、引張強さは単位面積当たり 40 kg 以上の水準であり、またねじ精度における不良率 4 % 以下、引張強さにおける不良率は 2 % 以下、その他は 6 % 以下になっている。

ナット、小ねじの品質水準はいちおう前記ボルトと同じであるが、不良率は 4 % 以下、木ねじは 6 % 以下となっている。

2. 生産費の引下げは 38 年度末における当該製品と同一品質を有する製品の生産費に対して 2.7 % 以上とする。

3. 39 年度における生産目標はボルトが 326 億 800 万円、ナット 130 億 9 200 万円、小ねじ 120 億 2 600 万円、木ねじ 15 億 1 400 万円、合計 592 億 4 000 万円である。

輸出目標はボルト・ナットで 77 億 8 400 万円、小ねじ 7 億 5 600 万円、木ねじ 5 億 9 400 万円、合計 92 億 3 400 万円とする。

4. 39 年度に設置を要する設備の種類と台数は基本計画にかかげた設備のうち (1) 金属工作機械 396 台、(2) (1) 以外の金属加工機械 234 台、(3) 試験検査設備 53 台、(4) その他 58 台とする。そして、これらに要する資金は 10 億 8 000 万円である。

5. その他、ねじ用線などの原材料共同購入合理化、品種別専門生産体制、国際的な標準製品への統一の促進など。

(服部 敏夫)