炭素鋼の焼入による残留応力の時効および 応力繰り返しによる変化について*

平 修 二** 北 野 練 造***

Change of Residual Stress Caused by Heat Treatment in High Carbon Steel due to Aging and Repetition of Stresses

by

Shuji TAIRA and Renzo KITANO
(Kyoto University) (Fuji Electric Mfg. Co., Ltd.)

Residual stresses greatly affect the fatigue strength of metallic materials, in such a way that compressive residual stress improves fatigue life and vice versa. However, the existence of residual stress means instability of structure and therefore natural trends of the change of residual stress must be considered when the influence of residual stress on fatigue strength is discussed, since the application of repeated stressing is to give an excitement to the unstable material structure.

Following the study of authors on the change of residual stress caused by cold working due to stress repetition, the behaviour of residual stress initiated by heat treatment was studied in the same view point. The character of residual stress by heat treatment was classified in two categories:

thermal residual stress—embedded in materials by heat treatment without transformation,
transformation residual stress—embedded in materials by heat treatment accompanied by transformation.

A high carbon steel with 0.88 per cent carbon content was used for the material of specimens, which were 3.2 mm in thickness. Specimens with thermal residual stress were prepared by heating at 500°C and subsequent quenching in water. Those for transformation residual stress were heated at 850°C and then quenched in oil. The distributions of residual stresses were observed by means of the corrosion method with 30 percent solution of nitric acid.

A series of tests were carried out for the study of change of residual stress due to aging effect, and another series of tests were for the study of change due to the repetition of stresses in alternating bending.

The conclusions obtained are as follows;

1) The thermal residual stress changes in monotonous decrease with time. The same trend is observed in greatly accelerated feature when alternating bending stresses are applied.

2) The transformation residual stress remarkably decreases in the course of one week after quenching and then tends to increase slightly. The increase ceases around the end of the second week and then decreases monotonously. The character of residual stress variation was interpreted by the transformation process of retained austenite to martensite.

3) The application of alternating bending stress to the structure with transformation residual stress accerelates and magnifies the trends of change described in the foregoing item. The magnitude of residual stress at the occasional increase was almost the same as the initial value.

(Received JUNE 6, 1958)

1. 緒 言

機械部品や構造物はその成形過程において冷間加工や熱処理をうけ、残留応力のある状態で使用に供される場合が多い。その使用状態においては繰返応力を受

* 原稿受付 昭和33年6月2日 昭和33年5月17日第7期総会講演会で講演

** 正員 京都大学工学部

*** 富士電機製造株式会社三重工場

けるのが通例であるが、かかる場合、残留応力はその疲労強度に影響を与えると考える可きである。すなわち、残留応力は応力繰返しに際して平均応力として作用し、引張残留応力は疲労強度を低下させ、圧縮残留応力は疲労強度を向上せしめる役目を果たす。この場合、残留応力は成形過程における変形の不均衡に基づく不安定な状態に起因するものであることから、これに応力の繰返しを与えると残留応力の大きさになんらかの影響を与えることが考えられる。その変化の模様が、残留応力の疲労強度に及ぼす影響に直接関係するものである。

疲労強度に影響を及ぼす因子については、きわめて多方面より研究が行われている。残留応力の影響は残留応力測定の困難さの故に、その重要性にもかかわらず非常に研究の遅れている問題である。

筆者の一人は、かつて冷間加工により生じた残留応力が応力の繰返しに伴い如何に変化するか、X線による応力測定法を用いて調べ、かかる残留応力が疲労強度に如何に影響するかを論じた^{1,2)}。その結果によると、引張りとか曲げ加工により生ずるような残留応力は定性的には応力の繰返しに伴い減少する。繰返応力の大きさが、その材料の耐久限度以上の場合には、破断繰返数より小なる繰返数で實際上残留応力は消滅し、耐久限以下の応力の繰返しでも減少する傾向はもつが、耐久限の半分以下の大きさの応力繰返しの場合には、残留応力の減少の程度は小さく、實際上変化がないと考えて差し支えない。いづれの場合も、残留応力の変化は応力繰返しの初期にきわめて大で、以後は応力の繰返しとともに対数関係をもって減少する。かくして、冷間加工の疲労強度に及ぼす影響を、加工に基づく材質の変化と、残留応力との2つの因子に分けて解析した結果、これらの因子は2対1の割合で疲労強度の変化に寄与していることを明らかにした。

熱処理により生ずる残留応力は、その発生機構において冷間加工によるものと異っている。この種の残留応力をもつ材料が時効および応力の繰返しをうける場合、その疲労強度が如何に影響されるかは実際問題として非常に興味があり、また、設計上重要な問題である。本論文は、この問題に関連して行っている一連の研究の結果の第一報である。

2. 熱処理に伴う残留応力

残留応力是不均等な塑性変形によって発生するものである。変形の不均等がきわめて狭い範囲においても存在するとき、これは微視的残留応力であり、かなり広い範囲にまたがる不均等な変形は巨視的残留応力の原因となる。前者と後者とでは、残留応力という観点よりすれば本質的に変りはないが、前者は局部において平衡を保つことができるので、巨視的残留応力はない

くとも微視的残留応力がきわめて多い状態もありうる。

熱処理をうけた材料は、その過程において複雑な組織変化をうけるので、上記両種の残留応力をもっている。微視的残留応力の存在は、その材料の機械的強度に影響を与えるものである。この種の残留応力は、応力の繰返しによって変化するもので、これに関しては既に筆者によって報告せられている²⁾。

熱処理に伴う巨視的残留応力の発生については多くの人々の研究があり、熱処理条件により様々な様相を呈するものである。しかし、その発生機構より次の2種類に大別しうる。

i) A_3 変態点以下の温度より急冷せられた場合に生ずるもので、内外層の温度の差に基づく熱膨脹の差および塑性変形抵抗の差により発生するもので、この種の残留応力は熱間加工の際に発生し易い。以後これを熱残留応力と呼ぶ。

ii) A_3 変態点以上の温度より急冷し、変態を生ずるような其の後の処理をうけたもので、熱残留応力の発生機構と変態に伴う組織変化の影響が重畳したような場合である。焼入れ焼戻し材に存在する種類のもので、以後これを変態残留応力と呼ぶ。

本研究においては、上の両種の残留応力を区別し、共析点近傍の炭素含有量をもったばね用鋼材について両種の熱処理を施し、発生した残留応力を取扱うものである。

3. 試験片

試験に供した材料は住友金属工業株式会社製鋼所の提供になるもので、その組成は次のようなものである。

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	%
0.88	0.40	0.43	0.014	0.009	0.22	0.23	

この材料の圧延材を5mm厚さの板に粗仕上げし、次に

850°C	1時間加熱	炉中冷却	RCH 23~24
850°C	1時間加熱	油焼入	RCH 61.5~62.8
500°C	1時間加熱	空冷	RCH 36~37.2

の熱処理を順次に行ったのち、グラインダー仕上げで3.2mm厚さにしたものを工場より提供せられ、これを用いて Fig. 1 のような形状の試験片を作製した。(a)は疲労試験用試片、(b)は残留応力測定用試片の寸法を示す。

各試片は成形加工を施した後、熱残留応力用試片と変態残留応力用試片に分け、それぞれについて次のような熱処理を行った。ただし、加熱はすべて真空炉中にて行い、焼入はきわめて急速に行ったので、表面酸化はほとんど問題にならぬ程度であった。

i) 熱残留応力用試験片

850°C, 1時間加熱→常温まで炉中冷却

Fig. 1 Specimens

(a) for fatigue test

(b) for residual stress measurement

—→500°C, 1時間加熱—→13°C 水中投入

ii) 変態残留応力用試験片

850°C, 1時間加熱—→22°C の油中焼入

—→焼戻し(焼戻し温度については後述する)

4. 残留応力の測定

残留応力の測定にはX線によるのが非破壊的であるので、もっともすぐれている。しかし、焼入れ材のように微視的残留応力が高い状態ではX線干渉環の幅がきわめて大きく不鮮明で、ときには干渉環をフィルム上に認めにくい場合もある。ゆえに、応力による干渉環の直径変化の測定を原理とするX線応力測定法は今回の研究には適せず、したがって、方法としては最良ではないが、腐食による残留応力測定法を採用した。用いた残留応力測定の実験装置を Fig. 2 に示す。鉄製の試片支持器Hの一部Aを合成樹脂にし、これに試験片Sの一端をとりつける。試験片の端にもAと同様の合成樹脂の角棒Bを取り付け、これの他端に鏡Mを取り付ける。試験片の固定は、疲労試験機つかみへの取り付け用ボルト孔を利用した。試験片および取り付け用ボルト、ナットは、試片の片側の長さgの平行腐食部を除き、塗料を塗り防食した。かくして腐食液槽に

Fig. 2 Setup for residual stress measurement by corrosion method

30%硝酸溶液を入れ、試片の片側表面の腐食部の表面より徐々に腐食する。時間に対する腐食量を一定にするため、槽の容量を大にして多量の溶液を用い、かつ、液を常に攪拌し、また、腐食面に生ずる生成物を除去するために特殊のくふうを加えた結果、腐食量は時間的に、また、場所的に様になり、腐食量は時間より求めることを予備実験により確かめた。

残留応力をもつ試片が上記の方法により表面より腐食せられると、断面内の応力の平衡を失い湾曲する。この湾曲により鏡Mはその取り付け軸の回りに回転するから、この回転をスケールCおよび望遠鏡Tで読む。腐食深さは、腐食深さと時間の関係の検定値より時間の測定より求められ、これをhとする。このときのスケールCの読みをxとすると、その部分に存在していた残留応力は次の式により求められる。

$$\sigma = C_0 \left(\frac{dx}{dh} t^2 - 4xt + 2 \int_0^h x dh \right)$$

Fig. 3 Result of fatigue test (alternating bending) with 0.88%C steel specimens which were heated at 850°C for 1 hr and then quenched in oil

$$\text{ただし, } C_0 = \frac{E}{2Lg}$$

ここに E はその材料の弾性係数, L はスケールと鏡面との距離, g は上記のように腐食部の長さ, t は腐食後の板の厚さである. 本実験においては $g=30\text{ mm}$, $L=1200\text{ mm}$ である.

実験により上記の $x-h$ 曲線が得られ, これより dx/dh および図式積分により $\int_0^h x dh$ が求まるから, 上式を用いて各腐食深さにおける残留応力値 σ が求まり, これより断面内の残留応力分布を知る.

5. 疲 勞 試 験

疲労試験には西原式板曲げ疲労試験機を用いた. 毎分応力繰返数は 2000 である. Fig. 1 (a) 型の変態残留応力試験片 (500°C 焼戻し材) について, 熱処理直後に試験を開始して得られた両振疲労試験結果は Fig. 3 白丸および実線で示されるようで, 耐久限度は 33 kg/mm^2 であった.

Fig. 1 (b) 型の試験片については, 後述するように応力繰返し途中で試験機より取り外し, 残留応力測定が行われた.

6. 実験およびその結果

熱処理した材料については時効を考える必要があ

Fig. 4 Residual stress distributions near the surface of quenched specimens with subsequent tempering at various temperatures. (Every distribution refer to one day after final heat treatment.)

Fig. 5 Change of thermal residual stress distribution due to stress repetition (all distributions refer to seven days after heat treatment)

る. ことに残留応力は時効の影響が大きく響くことが考えられ, 熱処理による残留応力の応力繰返しに伴う変化を論ずる以上, 時効による残留応力の変化を基礎資料として得ておく必要がある.

熱残留応力試片については顕微鏡組織および硬度の測定結果 (RC 21~25) から組織的には安定したものであることが認められ, これの時効は一応考慮せず, 熱処理後一週間を経たから繰返応力を与えて応力繰返しによる残留応力の変化を調べることとした.

変態残留応力試片の場合は, 生ずる残留応力は焼戻温度によりいちじるしく異なる. 焼入のまま, および 100°C, 300°C, 400°C, 500°C 焼戻の場合の表面近傍残留応力を Fig. 4 に示す. いずれの場合も表面近傍は引張の残留応力で, 焼戻温度の増加とともに残留応力はいちじるしく減少する. 焼入のままの材料は残留オーステナイトとマルテンサイトよりなる組織であり, 500°C 焼戻し材は完全なソルバイト組織が顕微鏡により観察せられる. このことより, 焼入した後に生じた表面引張の残留応力が残留オーステナイトのマルテンサイトへの変態の際の膨脹により, その度合に応じて減少することがわかる. 本研究は残留応力の大きさを論ずるのが目的であるゆえ, 残留応力がもっとも大きい焼入のままの材料を採用した. このことは, 時効の残留応力に及ぼす影響を見る目的にも適している. 以下に二種の熱処理材について行った実験の結果を述べる.

1) 熱残留応力試験片

熱処理後 1 週間を経た試片につき, 20 kg/mm^2 の両振繰返応力を 2×10^5 , $3 \cdot 7 \times 10^5$, 4×10^5 , 7×10^5 回をそれぞれ与えた各試片について得られた残留応力の表面近傍の分布を, 繰返数を横軸にとって 3 次元表示で

Fig. 6 Change surface thermal residual stress due to repetition of alternating stress $\sigma_a = 20 \text{ kg/mm}^2$

Fig. 5 に示す。図に見るように、表面近傍の残留応力は応力の繰返しにつれて減少する傾向をもつ。これを表面から 0.1 mm の範囲における平均応力をとって示すと Fig. 6 のようになり、上の傾向はさらに明瞭になる。この図には、 23.4 kg/mm^2 の応力を 6×10^5 回繰返した試片について得られた結果をも併せ示したが、 20 kg/mm^2 の場合よりもかなり残留応力の減少のいちじるしいことが分かる。

以上の実験は、筆者が以前に行った冷間加工による残留応力の場合に比べ、不利な実験方法のために実験点は少ないが、残留応力の応力繰返しに伴う変化はほとんど同じ傾向をもつであろうことが推論せられる。

2) 変態残留応力試片

用いた試片は焼入のままのものであるが、硬度より見て 500°C 焼戻し材よりもかなり強度は低いことが考えられる。焼入れ後1日および7日放置した試片について 40 kg/mm^2 および 50 kg/mm^2 の繰返し応力を与えて疲労試験を行った結果、破断寿命は 500°C 焼戻し材よりかなり短かく、Fig. 3 に示すような結果を得た。図よりわかるように、7日経過したものは1日経過したものよりも 40 kg/mm^2 における破断寿命はかなり増加している。このことは時効の影響のあることを意味する。そこで、残留応力も時効により変化すると考え、焼入れ直後より30日経過までの間の数段階の時間試片を放置して、

そのときどきの残留応力を求めた。その結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。Fig. 7 は経過日数を横軸にとって3次元表示したもので、Fig. 8 は表面より 0.1 mm の範囲の層の平均応力を縦軸にとって表わしたものである。図に見るように、残留応力は焼入れ後1週間の間は急激に減少し、いったん最少になり、そののち、わずかに増加の傾向を示して約15日で極大に達し、以後は単調に減少する。このことは残留オーステナイトよりマルテンサイトの析出が焼入れ直後に顕著であり、しかも、この現象が表面より次第に内部に進行することと関係があると解釈せられる。

残留応力の経日変化に見られた、いったん極小に達してふたたび増大の傾向は實際上重要な問題である。したがって、この傾向が応力の繰返しにより、いかなるかを知ることに興味をもち、応力繰返しし

Fig. 7 Change of transformation residual stress distribution due to aging.

Fig. 8 Change of surface transformation residual stress due to aging

な刺激を与えることであり, したがって, 残留応力の経日変化と繰返応力による変化とは定性的には同一のものである. この現象は変態残留応力試片の場合に明瞭に見られる. したがって, 残留応力の変化の傾向につき, 経日変化の場合を考察してみる.

焼入に際して 22°C の油中に冷却する場合は, 残留オーステナイトを含むマルテンサイトの組織である. オーステナイトは常温においては不安定な組織で, 安定化はマルテンサイトへの移行であり, その際膨脹を伴う.

表面近傍の層は拘束が少ないこと, および内部ひずみの大きいのでオーステナイトよりマルテンサイトへの移行が容易であることより, 表面近傍の変態が早く起り, 表面引張の残留応力は焼入れ後数日にしていちじるしく減少する. この変態に伴う異常膨脹は次第に内部に移行し, そのため, いったん安定した表面層を引張ることになり, 表面近傍の引張残留応力を増すことになる. この現象は焼入れ後15日目ごろにもっともいちじるしくなる. 常温において起りうる残留オーステナイトのマルテンサイト化には限度があり, したがって, 残留応力の増加は止み, 以後は自然のエージングの現象で残留応力は徐々に減少の傾向をたどる. この考え方は, 綿密な組織の研究によって実証されなければならないが, 一応このように解釈してもさして無理はないであろう.

繰り返し応力を与えることは, 先述のように, 上のような傾向をもつ材料にエネルギーを与えて刺激することである. ゆえに, 残留オーステナイトのマルテンサイト化は量的にも, また, 時間的にも常温におけるよりいちじるしく促進され, Fig. 11 に見るような結果が得られたものと考えられる.

以上によって, 繰り返し応力が残留応力に与える影響が明らかになったのであるが, このことを考慮に入れて残留応力の疲労強度に及ぼす影響を論ずる必要がある. この問題は定量的に取り扱う必要があり, 本論文に示した実験結果の範囲では, いまだその段階

ではなく, この点については引続き行っている実験の結果を得て行う予定で, 今回は熱処理による残留応力の特効および応力繰り返しによる変化について得られた実験結果の報告に止める.

8. 結 論

炭素鋼の熱処理により生ずる残留応力を熱残留応力(変態を伴わないもの)および変態残留応力(変態を生じたもの)に分け, それぞれの場合について, 時効および応力繰り返しによる残留応力の変化を調べ, 次のような結論を得た.

1) 熱残留応力は冷間加工による残留応力と同様に, 応力の繰り返しとともに減少する. その減少の傾向は応力繰り返ししの初期に特にいちじるしく, また, 繰返応力の大きなるほど減少量は大きい.

2) 変態残留応力は放置すれば時間とともに最初いちじるしく減少し, 約7日で極小に達し, ふたたび増加し約15日で極大になり, 以後は単調に減少する.

3) 変態残留応力は応力の繰り返しを受けると, 上の経日変化が時間的にも量的にも促進せられる. すなわち, 時効によりいったん減少した残留応力が, 応力の繰り返しにより初応力の大きさ程度にまで増大し, 極値に達し, 以後は熱残留応力の場合と同様に単調に減少する.

最後に, 本研究を行うにあたり試験片用材料を提供された住友金属工業株式会社住友元夫氏および結果の整理に協力された村上裕則, 本田和男両氏に謝意を表す.

参 考 文 献

- 1) 西原, 平, 日本機械学会論文集, **14**, 48, 1~107 (昭23)
西原, 平, 日本機械学会論文集, **18**, 58, 112 (昭27)
- 2) 西原, 平, 機械の研究, **3**, 7, 385 (昭26)
- 3) たとえば, 佐野, 日本金属学会誌, **13**, 3, 19 (昭24)
- 4) R.G. Treuting, W.T. Read, Journ. Appl. Phys. Vol. **22**, p.130 (1951)
- 5) E.C. Bain, Trans. Amer. Soc. Steel Treat., Vol. **8**, p. 422 (1951)