塑性ねじりによる残留応力のねじり応力 繰返しによる変化について*

平 修 二** 村 上 裕 則***

On the Changes in Residual Stress Produced by Plastic Torsion Due to Repeated Stressing

by

Shuji TAIRA and Yasunori MURAKAMI
(Kyoto University) (Ritsumeikan University)

Setting process is often practiced on coil springs in order to improve their fatigue resistance and prevent their creep deflection. Torsional residual stresses are produced by this process, and it is generally understood that these stresses would play a role in improving the fatigue properties. In this experiment, round bar specimens of the spring steel SUP2 were used, and after being twisted by the torsional moment 25% beyond that corresponding to the yield point, they were subjected to the fatigue test in alternating torsion. The distribution of residual stresses was measured by the etching method, by measuring the angle of torsion during the etching process. Three stress levels were employed in repeated stressing and the number of stress cycles was made to be the same in each stress level. As a new attempt, we studied the fading of residual stresses under repeated stressing in successive two stress levels.

The results obtained are summarized as follows:

(1) Residual stresses produced by plastic torsion are of the thermal stress type near the surface, being negative at the surface layers.

(2) Residual stresses subjected to repeated stressing fade noticeably in the first stage of fading and then gradually with the repetition of stress cycles. In the second stage of fading, the relation obtained between the ratio of surface residual stresses τ_r/τ_0 , (τ_r is the current value and τ_0 is the initial value of surface residual stress) and the logarithm of cycle ratio n/N , formed straight lines, and experimental formulas concerning the fading of residual stresses were established.

(3) In repeated stressing under successive two stress levels, the fading of residual stresses is larger in the case of descending stressing than in the case of ascending stressing, when the same numbers of stress cycles are given to each stress level, respectively. Hardness has also the same tendency as the residual stress.

(Received Nov. 14, 1959)

1. 緒 言

ばねにはしばしばセッチング作業が行なわれるが、これは弾性限度を高めて疲れ強さの向上およびへたりの減少を得ることを目的としている。この作業によってねじり残留応力を生じるが、ばねはこの残留応力をもった状態で繰返し応力を受けるのであるから、この残留応力の応力繰返しによる変化について調べることは、残留応力の疲れ強さおよびへたり防止に対する寄与を知るうえに実用上意義のあることである。ばねは普通

焼入、焼戻しの状態で使用されることが多いが、焼入によって残留応力を生じ、これが焼戻しによって多少減少するけれども、なお熱処理による残留応力は残る。この状態でセッチングを施すと、セッチングによる残留応力と熱処理による残留応力とが重疊して複雑な状態となり、この状態で繰返し応力を加えると両者の残留応力の変化が組み合わされて現われ、セッチングのみによる残留応力の変化は不明となる。今回はセッチングのみによる残留応力の変化を明らかにする目的で、熱処理は省き焼鈍材について実験することとした。すなわち、ばね鋼の焼鈍材を用い、これにねじり降伏点に相当するモーメントを25%こえたねじりモーメント

* 原稿受付 昭和34年11月14日、第3回材料試験連合講演会にて講演(昭34.9)

** 正員 京都大学工学部

*** 正員 立命館大学理工学部

ントを加えて塑性ねじりを与え、疲れ限度の上下にわたる応力振幅において両振りのねじり応力繰返しを与えて残留応力の変化を調べた。なお、2段2重重複応力繰返しにおいて総繰返数を一定とし、各応力で与える繰返数の大きさが、また1次および2次応力を加える順序、すなわち増加応力と減少応力が残留応力の変化に及ぼす影響についても実験した。

2. 使用材料および実験方法

材料はばね鋼第2種 SUP2 を使用した。その化学成分を Table 1 に、830°C、1hr 焼鈍したもの引張りおよびねじりの機械的性質を Table 2 に示す。試験片の形状は Fig. 1 に示すとおりで、疲れ試験用と残留応力測定用のものとでは平行部分の長さを少しく変えた。残留応力の測定には腐食法を用い、実験装置としては西原、平の用いたものと同様な装置を用いた。すなわち、試験片の腐食部分 25 mm を除いて他は全部耐酸ラッカーを塗布し、両端にプラスチックのキャップを挿入して試験片を垂直とし、下端はガラス容器中の台にテーパ部分ではめ合わせ上端には鏡を取りつけた。腐食の進行に伴って試験片の上端部は軸の回りに回転するが、この回転角の変化をスケールを付けた望遠鏡によってスケールの読みの変化として読んだ。最初各部の腐食進行の不同を懸念したが、予備実験ではやや軸方向に凹凸を生じ、また上下部の直径差も多少みられたけれども、数本繰返すうちに各部の

不同がほとんどない実にきれいな腐食面が得られるようになった。この状態は本実験中維持することができた。残留応力の計算式は次式を用いた。

$$\tau_n = A \frac{\sum_{n=1}^{n-1} \Delta \theta_n \cdot \left(\frac{d_{n-1}}{d_0} \right)^4 - \sum_{n=1}^n \Delta \theta_n \cdot \left(\frac{d_n}{d_0} \right)^4}{\left(\frac{d_{n-1}}{d_0} \right)^3 - \left(\frac{d_n}{d_0} \right)^3}$$

$$\text{ここに } A = \frac{3Gd_0}{16al}$$

G: せん断弾性係数 (kg/mm²),

a: 鏡面とスケールとの距離 (mm)

l: 腐食長さ (mm)

d₀: 試験片のもとの直径 (mm)

d_n: 任意の n 回目の腐食後における直径 (mm)

Δθ_n: n 回目の腐食後におけるねじり角の変化の差で最初に加えたねじり方向を正とする。これはスケールの読みの変化として読む。

試験片は機械加工後すべて真空炉中において 830°C で 1hr 焼鈍した。焼鈍後の顕微鏡組織を Photo. 1 に示す。

塑性ねじりで与えたねじりモーメントは降伏点に相当するモーメントを 25% 越えた 824 kg·cm で、明石製ねじり試験機を用いて手動により行なった。塑性ねじりにさいしては Fig. 1 には表わしていないが、試験片の両端部にウェッジの当る平行部分を加工した。塑性ねじり後のねじり角はキー溝内側部において約 14° であった。Fig. 1 に示すキー溝は疲れ試験機取付用のもので塑性ねじり後に切ったものである。塑性ねじり後の残留応力測定結果は Fig. 3 の白丸印にみるように単純な熱応力型をなし、表面における負の残留応力の値は約 19 kg/mm² であった。ただし、残留応力の計算には G=8 350 kg/mm² の値を用い、a=1100 mm, l=25 mm とした。

3. 疲れ試験

Fig. 1 (a) の試験片を用いて西原式組合せ曲げねじり疲れ試験機によって、塑性ねじり後のものについて両振りねじりの疲れ試験を行なった。試験速度は 1 400 cpm とした。得られた S-N 曲線は Fig. 2 に

Table 1 Chemical composition of material

Chemical composition (%)				
C	Si	Mn	P	S
0.61	0.28	0.59	0.014	0.006

Table 2 Mechanical properties of material

Tension	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Area contraction (%)
	43.5	75.7	14.7	27.9
Torsion	Yield point (kg/mm ²)	Shear strength (kg/mm ²)	Specific angle of torsion (°/mm)	
	33.6	70.8		
			10

(a) l=20 for fatigue test
(b) l=25 for residual stress measurement

Fig. 1 Dimension of specimens

Photo. 1 Micrograph of an annealed specimen (x800 x 2/3)

示すとおりで、疲れ限度は 19 kg/mm^2 であった。

4. ねじり応力繰返しによる残留応力の変化

疲れ限度 19 kg/mm^2 以下の 15 kg/mm^2 および以上の $20, 23 \text{ kg/mm}^2$ において主として同じ繰返数を与えて残留応力の変化を調べた。Fig. 2 の×印は各応力振幅において与えた繰返数を示すものである。その結果は Fig. 3~5 に示すように残留応力は初期の繰返数 2×10^4 においていちじるしく減衰し、その後は繰返数とともに単調に減少した、そうしてこの減衰は従来の結果と同様応力振幅の高くなるほどいちじるしくなっている。Fig. 6 に応力振幅による表面残留応力の減衰のありさまを示す。このように減衰はいちじるしいが、疲れ限度以下の 15 kg/mm^2 においては繰返数 10^7 後においても残留応力は完全には消滅せず、もとの値の約 30% の値を保有している。本実験のように残留応力が繰返数に伴って単調に減衰する現象は、応力繰返しによって時効作用を生じない場合には一般

Fig. 2 S-N curves

Fig. 3 Change in residual stress distribution due to repeated stressing ($\sigma_a = 15 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 4 Change in residual stress distribution due to repeated stressing ($\sigma_a = 20 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 5 Change in residual stress distribution due to repeated stressing ($\sigma_a = 23 \text{ kg/mm}^2$)

Fig. 6 Fading of surface residual stresses

的な現象であって、残留応力は初期の繰返数において顕著に減衰し(第1期減衰)、それ以後はややゆるやかに減衰する(第2期減衰)。前に行なったショットピーニングの場合には、第2期減衰において表面残留応力の比 σ_r/σ_0 (σ_r は応力繰返し後の残留応力で、 σ_0 は初期の残留応力) と繰返数比 n/N の対数との間には各応力振幅とも直線関係が得られた。よってこの場合にもこのような関係が成立することが予想されるので、これをプロットしてみると、予想どおり Fig. 7 にみえるようにきれいな直線関係が得られた。図によれば疲れ限度以下の 15 kg/mm^2 と以上の $20, 23 \text{ kg/mm}^2$ との間には勾配の差があるが、 20 kg/mm^2 および 23 kg/mm^2 の間にはほとんど差は認められず、両者は平行とみなしてさしつかえない。ショットピーニングの場合と同様にこれらの直線をもとにして第2期における残留応力の減衰に関するつぎの実験式を作った。ただし、疲れ限度以下においては直線の勾配は応力振幅に比例するものと仮定し、疲れ限度以上では $20, 23 \text{ kg/mm}^2$ における実験結果から勾配は一定と仮定した。

疲れ限度以下の場合

$$\tau_r/\tau_0 = 1 - 0.0473 \tau_a - 0.01 \tau_a \cdot \log_{10} n/N \quad (\tau_a \leq \tau_w)$$

疲れ限度以上の場合

$$\tau_r/\tau_0 = 0.205 - 0.004 \tau_a - 0.215 \cdot \log_{10} n/N \quad (\tau_a > \tau_w)$$

上式の適用範囲は第1式は繰返数比 $0.002 \sim 1.0$ の範囲、第2式は $\tau_a < 1.15 \tau_w$ ならば $0.03 \sim 1.0$ の範囲、 $\tau_a \geq 1.15 \tau_w$ ならば $0.1 \sim 1.0$ の範囲とする。

5. 応力繰返しによる硬度の変化

各応力振幅において応力繰返し後の硬度を明石製微小硬度計(荷重 200 gr)で測定した。その結果は Fig. 8 に示すとおりで、いずれの応力振幅においても初期の繰返数 2×10^4 において硬度はいちじるしく減少し、その後は測定した最後の繰返数まで硬度は減少し続けた。そうしてこの硬度の減少は残留応力の場合と同様

Fig. 7 Relation between ratio of surface residual stress and cycle ratio

に応力振幅の高いほど大きく現われた。このように硬度の変化はほぼ残留応力の変化と同一の傾向を示した。

6. 2段2重重複応力繰返しによる残留

応力および硬度の変化

前に焼鈍鋼を用いて2段2重および3段3重重複繰返応力を与えて残留応力の変化を調べたが、今回も2段2重重複繰返応力の場合について実験した。実験方法としてはつぎのふたとりの場合を選んだ。

(1) 1次および2次応力における繰返数をそれぞれ一定として、1次および2次応力を加える順序を逆にしたとき、すなわち、増加応力と減少応力の場合について残留応力の変化を比較する。

(2) 増加応力の場合について、1次および2次応力における総繰返数を一定とし、各応力における繰返数の配分を異ならしめて残留応力の変化に対する影響を調べる。

まず、1次および2次応力として 15 kg/mm^2 および 20 kg/mm^2 をとり、それぞれの繰返数を 2×10^5 および 10^5 として(1)の趣旨によって 15 kg/mm^2 、 $2 \times$

Fig. 8 Change in hardness with repetition of stress cycles

Fig. 9 Change in surface residual stress by repeated stressing under two stress levels

$10^5 \rightarrow 20 \text{ kg/mm}^2$, 10^5 後と 20 kg/mm^2 , $10^5 \rightarrow 15 \text{ kg/mm}^2$, 2×10^5 後の残留応力を測定した。その結果は Fig. 9 にみるように高い応力を最初に与えたほうが減衰は大きく現われた。すなわち増加応力よりも減少応力の場合のほうが減衰はいちじるしい。それぞれの場合の減衰率を求めてみると、増加応力のときは 55%, 減少応力のときは 70% となり 15% の差を生じる。同様にして応力段階に 20 kg/mm^2 および 23 kg/mm^2 をとり、 20 kg/mm^2 , $7 \times 10^4 \rightarrow 23 \text{ kg/mm}^2$, 3×10^4 とこの順序を逆にした 23 kg/mm^2 , $3 \times 10^4 \rightarrow 20 \text{ kg/mm}^2$, 7×10^4 とを比較すると、やはり後者すなわち減少応力の場合が減衰は大きく現われている。この場合の両者の減衰率の差は約 10% である。つぎに (2) のねらいによって 15 kg/mm^2 , $10^5 \rightarrow 20 \text{ kg/mm}^2$, 2×10^5 後の残留応力をも測定したが、これと 15 kg/mm^2 , $2 \times 10^5 \rightarrow 20 \text{ kg/mm}^2$, 10^5 後の残留応力とを比べると前者のほうが減衰は大きい。すなわち、高い応力における繰返数の大きいものほど減衰は増すこととなる。同様なことは 20 kg/mm^2 , $7 \times 10^4 \rightarrow 23 \text{ kg/mm}^2$, 3×10^4 および 20 kg/mm^2 , $3 \times 10^4 \rightarrow 23 \text{ kg/mm}^2$, 7×10^4 の場合についてもいえる。なお、これら増加応力および減少応力について得た結果を 1 次応力一定の場合と比較すると、増加応力のときには減衰は増し、減少応力のときには減衰は減じることがわかる。

つぎに上述の重複応力繰返しにおいて各場合の硬度をも測定したが、その結果は Fig. 10 にみるように残留応力の変化とはほぼ同様な変化を得た。図には 15 および 20 kg/mm^2 の場合を示しているが、20 および 23 kg/mm^2 の場合にも傾向はまったく同じであった。

7. 結果の考察

応力繰返しによる残留応力の変化において初期の繰返数 2×10^4 における減衰はとくにいちじるしく、応力振幅 15 kg/mm^2 では 30%, 20 および 23 kg/mm^2 ではそれぞれ約 50% および 65% に達した。本実験の

Fig. 10 Change in hardness by repeated stressing under two stress levels

場合 23 kg/mm^2 は疲れ限度以上 21% であり、このときの減衰率 65% は、前に実験したショットピーニングの場合の疲れ限度以上約 21% の応力振幅における減衰率約 62% に比べるとほぼ等しいものといえる。

繰返数が進むに従って Fig. 3~5 にみるように表面応力は減少するが、逆に内部の応力がやや増す傾向があるのはショットピーニングの場合にもみられた。この原因としては両振りねじり応力のもっとも大きい表面においては、応力繰返しによる残留応力の解放作用がもっともいちじるしいが、内部にはいるに従ってねじり応力は小となって減衰作用が減ることと、もう一つは焼鈍鋼における実験結果からいいうように、応力繰返しによって局部的に微小な塑性変形を生じるために残留応力を発生するが、表面層では減衰作用があるかにこれを打ち消して減衰作用の小さい内部層にこの残留応力の影響が現われたものと考察される。

つぎに 2 段 2 重重複応力繰返しにおいて、1 次および 2 次応力における繰返数がそれぞれ一定のとき、減少応力の場合が増加応力の場合よりも残留応力の減衰が大きかったことは、Fig. 9 から直ちにわかるように第 1 期減衰が応力振幅によっていちじるしく影響されるためである。

すなわち、減少応力の場合には最初に大きな応力を与えるため、増加応力の場合に比べて第 1 期減衰はいちじるしく大きく現われ、たとえば 15 および 20 kg/mm^2 の場合には第 1 期減衰率の差は 20% に達する。その後、減少応力では応力を低くするとやや減衰作用が弱まり、増加応力では応力を高めることによって減衰作用が強まるけれども、これらの作用はすでに第 2 期減衰の範囲にはいつているためにいちじるしくは現われず、結果的には第 1 期減衰率の差 20% を 5% 縮めるだけである。また、増加応力の場合に 2 次応力における繰返数の大きいものほど減衰がいちじるしいこと、および 1 次応力一定の場合よりも増加応力の場合のほうが減衰が大きいこと、ならびにこの逆の 1 次応力一定の場合よりも減少応力の場合が減衰が小さいことは、応力振幅が高くなるに従って減衰の割合が増すこと、および繰返数とともに減衰が増えることから考えて当然である。しかし、上述の現象は前に行なった焼鈍鋼に生じる残留応力の実験において、漸増応力を加えることによって残留応力が漸次上昇した結果と対照的である。これはうえにも述べたように、初期状態でかなりの残留応力をもっている場合には、表面層においては残留応力発生作用を打ち消してそれ以上に減衰の効果が大きく現われるためと考えられる。このことについては平、本田による焼鈍した線材および引き抜いたままの線材についての実験結果がこれを実証している。すなわち、焼鈍して残留応力を除去した線

材, および引き抜いたままで残留応力をもつ線材に応力繰返しを与えてX線による回折線の半価幅の変化を測定し, 前者においては微視的ひずみが漸次増加し, 後者においてはこれが漸次減少することが見出されている. このように塑性ねじりのみによる本実験では残留応力の減衰はかなりいちじるしく現われたが, 塑性ねじりを行なってさらにショットピーニングを施した場合⁶⁾には残留応力はほとんど減衰しないという報告もある. 応力繰返しによる硬度の変化は残留応力の減衰と同様な傾向を以て減少し続けた. この現象は一般に応力繰返しによって加工硬化を生じて硬度が上昇する現象と対照的である. このようにあらかじめ冷間加工して硬化させた試験片に応力繰返しを与えた結果, 硬度が減少していわゆる加工軟化を生じる現象は Wood, Segall その他によっても報告されている⁶⁾. 本実験のように残留応力と硬度とがほぼ同様な挙動を示したことはすこぶる興味あることで, 前に行なった焼鈍鋼の場合にも残留応力の発生と加工硬化による硬度の上昇とはほぼ同一の傾向を示し, また, 低温焼入の場合にも常温時効や加熱時効⁷⁾において両者の最大値は同じ条件のもとに現われた. こうした実験事実から残留応力の変化と硬度の変化の二つの機構の間にはなんらかの関連性を有するものと考えられる. 一般に硬度にもっともよくひびくものは微視的ひずみであり, この微視的ひずみはまた巨視的な残留応力に関連していることを考えると, この両者の関連性は微視的ひずみを媒介として結びついていることとなる. さて, 本実験の場合の残留応力および硬度の減少の原因を探究してみると一応つぎのように考えられる. 最初の塑性ねじりによって結晶にはすべりを生じ微視的ひずみを生じている. このような静的な塑性変形によるすべりは一般に Coarse slip である. これに両振りのねじり繰返応力を与えると繰返応力の種類が最初に与えた静的応力と同一であるために, 主として最初生じた Coarse slip 中に繰返応力による Fine slip を生じる. また, 結晶の新たな場所に生じる Fine slip もあるであろう. これらの Fine slip はこれに伴う塑性変形によって微視的ひずみを緩和し, したがって残留応力を解放する. また, これを転位の概念から考えると, 最初の塑性加工によって多数に存在していた転位が, 繰返応力によ

る転位の移動作用によって障害物がないために比較的自由に移動して漸次消滅するものと思われる. つぎに重複応力繰返しによる硬度の変化は残留応力の変化と同様に説明される. すなわち, 両者は微視的ひずみによって相似な挙動をとるからである.

8. 結 論

以上の実験結果を総括してつぎの結論を得る.

(1) 降伏点をこえた塑性ねじりによる残留応力の分布は表面層で負となり, 表面付近ではいわゆる熱応力型となる.

(2) 応力繰返しによる残留応力の変化については第1期減衰はとくにいちじるしく, その後は繰返数とともに単純に減衰してゆく. 第2期減衰において表面残留応力の比 τ_r/τ_0 と繰返数比 n/N の対数との間には各応力振幅において直線関係が成立し, これに基づいて残留応力の減衰に関する実験式を作った.

(3) 応力繰返しによる硬度の変化は残留応力の変化と同様な傾向をもつ. すなわち, 初期の繰返数でいちじるしく減少し, その後はゆるやかに減少し続ける. そうして硬度の減少は応力振幅の高いほど大きく現われる.

(4) 2段2重重複繰返応力による残留応力の変化については1次および2次応力における繰返数がそれぞれ一定のとき, 初期に高い応力を繰り返した場合のほうが減衰は大きい. 硬度の減少についても残留応力と同じことがいえる.

終りに, 本実験に協力された立命館大学学生広田潤哉, 川畑憲久の両君に厚く謝意を表する.

参 考 文 献

- 1) 西原, 平, 機械学会論文集, 18, 68, 65 (1952)
- 2) 平, 村上, 材料試験, 8, 70, 607 (昭34)
- 3) 平, 村上, 機械学会論文集 26巻, 164号掲載の予定, ほかに材料試験へ投稿中
- 4) 平, 本田, 機械学会総会前刷 (1959)
- 5) H.O. Fuchs and R.L. Mattson, Proc. SESA, 4, 1, 64 (1947)
- 6) W.A. Wood and R.L. Segall, J. Inst. Metals, 86, 225 (1957-8)
L.M. Clarebrough, M.E. Hargreaves, G.W. West and A.K. Head, Phil. Trans. Roy. Soc., 242, 160 (1957)
N.H. Polakowski and A. Palchoudhuri, Proc. ASTM, 54, 701 (1954)
- 7) 平, 村上, 金属学会誌, 23, 10, 603 (1959)