しめる条件は

$$\frac{\text{ローラと被圧延物との軸方向接触幅}}{\text{ローラの送り量}} \approx 6$$

であり, またこれ以上に送りを小さくすることも無意味であることがわかる。ただしここにいう軸方向接触幅とはヘルツ式より計算したものである。

4. 結 論

本研究により得られた結果を総括すれば次のごとくである。

1. 表面圧延することにより炭素鋼および鋳鉄の曲げ疲れ限度は著しく向上する。しかして曲げ疲れ限度を最大ならしめるには, 前者では $620 \sim 720 \text{ kg/mm}^2$ 後者では 300 kg/mm^2 の圧力で圧延すればよい。ただし前者においては炭素含有量の異なるほどこの圧力を大きくとるべきである。なおこの値はねじり疲れ限度を最大ならしめる圧力より 70 kg/mm^2 大きくなっている。

2. 表面圧延により得られる曲げ疲れ限度の上昇率は炭素鋼では炭素含有量のいかんにかかわらず最高 38 % である。また鋳鉄では最高 9 % である。

3. 最高の疲れ限度上昇率を得る表面圧延圧力は, ローラの曲率半径 r を大にするほど低下するが, その低下量はわずかである。

4. 表面圧延後低温焼なましを行っても疲れ限度はほとんど変化しない。ただし焼なまし温度が 300°C をこえると疲れ限度は低下する。

5. 圧延速度は本実験の範囲すなわち試験片の周速が約 $770 \sim 7800 \text{ mm/mn}$ においては, 疲れ限度に影響を及ぼさない。

6. 表面圧延による外径の減少量は炭素含有量の異なるものほど小さく, 熱処理すれば更に小さくなる。しかして表面圧延圧力が一定であればローラや被圧延物の形には無関係に外径減少量は一定である。

7. 圧延面の仕上状態は送りを小さくするほど良好となるが、

$$\frac{\text{ローラと被圧延物との軸方向接触幅}}{\text{ローラの送り量}} \approx 6$$

において仕上面は最良となり, これ以上送りを小さくする必要はない。

注: 一

(1) 昭和 24 年 10 月 17 日 吳地方臨時大會において講演, 原稿受付 昭和 26 年 6 月 7 日。

(2) 正員, 京都大學。

(3) 准員, 京都大學。

(4) A. T. hum u. W. Bautz, Forschung, Bd. 6, p.121 (1935)。

(5) O.J. Horger, App. Mech., J. p.128 (1935)。

539.219:539.4.014

繰返し応力による残留応力の変化の X 線的研究(続報)⁽¹⁾

西原 利夫⁽²⁾ 平 修二⁽³⁾ 常田 弘⁽⁴⁾ 落合 龍惶⁽⁵⁾

X-ray Investigation on the Variation of Residual

Stress due to Repeated Stress (2nd Report)

by Toshio NISHIHARA, Shūji TAIRA and Others

In the last paper concerned with the same problem, the authors have reported that the residual stress caused by plastic deformation tends to decrease remarkably by the repeated application of stress exceeding the magnitude of the endurance limit of the material. Machine parts in general, however, are subject to the repeated stress smaller than the endurance limit. The present paper will display the results of experimental study on the variation of the residual stress, being caused by stretching or by bending steel specimens to the range of plasticity, due to the repetition of the stress smaller than the endurance limit. The residual stress was measured by means of X-ray. Thus it has been made clear that, even by the repetition of the stress smaller than the endurance limit, the residual stress decreases with increase of the number of stress repetition. By the repetition of the stress of the magnitude near half of the endurance limit, however, the decreasing rate is extremely small, and therefore, we may assume the variation of residual stress does not occur. Moreover, the authors have found that both tensile and compressive residual stress behave in quite a similar manner under repeated stress.

1. 緒 言

機械部分は, 一般に, その製作の過程において, 熱

処理, 塑性加工, 機械加工等をうけることにより, 残留応力を持ち, その状態で使用されている場合が多い。

筆者等は前報告⁽⁶⁾において、塑性加工をうけた鋼材が、その材料の耐久限以上の応力繰返しをうけた場合につき研究し、残留応力は、繰返し数の増加と共に対数曲線的に減少し、ついに、ある繰返し数において消滅し、そののちは、繰返し数の消えたままの状態に破壊にいたることを明らかにした。ゆえに、耐久限以上の応力の繰返しをうけた場合には、残留応力の減少が著しいため、塑性加工による疲れ強さの上昇は、残留応力の存在よりも、むしろ、加工による材質の変化により多く影響されと考えられる。しかし、繰返す応力が小になるほど、残留応力の減少の度が小になることより考えて、耐久限以下の小なる応力をうけた場合には更に減少の度も小になることが考えられ、実際の機械部分はこの状態で使用されていることより、塑性加工により生じた残留応力が、その材料の耐久限以下の応力の繰返しをうけることにより、いかに変化するかを今回の問題として取り上げた。前回に用いたと同じ材料を用い、これに降伏点以上の引張加工を与え、表面効果⁽⁷⁾によって、表面に圧縮、内部に引張りの残留応力を生ぜしめた。これに、その材料の耐久限以下の数種の大きい繰返し曲げ応力を加え、繰返し数の各段階において、X線によってその表面応力を測定した。

なお、引張塑性加工によると、表面には引張りの残留応力が生じ、したがって、引張残留応力の変化のみしか観察できないゆえ、塑性曲げ加工を与えて、一方の側には引張り、他の側には圧縮の残留応力を与え、これの耐久限以上の応力の繰返しに伴う変化を、同じ方法で吟味した。

2. 試 験 片

用いた試片は、前研究に用いたものと同時に購入せる圧延鋼板よりとったが、ブロックが異なるため、幾分差異があるようである。顕微鏡写真より、その炭素含有量は約0.22%と推定せられ、焼なまし状態で、ショアかたさ21である。これを第1図の形に成形加

第 1 図

工し、900°Cで1時間真空炉中で加熱焼なましし、炉中冷却せるものを使用した。機械的性質を見るために別に第2図の形の試片を製作し、両種の試片について

第 2 図

引張試験を行った。その結果を第1表に示す。

第 1 表

試 験 片	引 張 片	疲 れ 片
弾 性 係 数 E kg/mm ²	20 900	—
降 伏 点 σ_{30} kg/mm ²	25.8	24.2
σ_{su} kg/mm ²	23.6	23.5
引 張 強 さ σ_B kg/mm ²	43.2	44.6
真 破 断 力 σ_T kg/mm ²	76.2	75.3

第1の実験用の試片としては、第1図の試片に焼なまし後中央の平行部分に44 kg/mm²の応力を与えるまで引張加工を加え、表面に約21 kg/mm²の引張残留応力の生じたものを使用した。焼なましのままのもの、および、引張加工を加えたものについて、西原式板曲げ試験機によって行った疲れ試験の結果を第3図に示

第 3 図 ●焼なましせる材料

○初期引張応力 44 kg/mm² を加えたもの

す。引張加工により疲れ強さはわずかに上昇している。

	ρ mm
No.5	24.7
No.6	25.5

第 4 図

第2の実験用の試片としては第1図の形の試片を第4図の形になるようにわん曲し、その状態で焼なまし

し、その後、逆方向にわん曲して真直な状態になったものを使用した。

3. 残留応力の測定

X線による応力測定法によった。応力繰返しの途中で、試片を試験機より取り外し、Co 対陰極の Shearer X線管球によって撮影を行った。管球電圧は30~35 K.V.P., 管電流は約7 mAで撮影時間は2~4時間

である。測定結果としては、三つの異なる方法により計算された $\sigma_{\perp}$, $\sigma_{\perp+}$ および $\sigma_{\perp-}$ の値の平均値⁽⁸⁾を採用した。

4. 実験結果

表面効果によって生じた残留応力が、繰返し応力をうけることなく、時間の経過と共に変化するや否やを検するため、初期引張応力 34 kg/mm^2 加えたものについて、長時日にわたる実験を行った。その結果を第 2 表に示す。すなわち、一旦

第 2 表

経過日数	残留応力 kg/mm^2
2	-12.4
53	-11.3
135	-12.2

生じた残留応力は、単に放置しても、4 ヶ月程度の期間ではほとんど変化がないことがわかる。

i) 実験 1. 引張加工によって残留応力の生じた試片に、それぞれ耐久限 (15.5 kg/mm^2) 以下の、15, 10, 7.5 および 5 kg/mm^2 の繰返し曲げ応力を加え、その応力繰返しの過程における残留応力の変化を測定した。得られた結果を第 3 表および第 5 図に示す。図に見るごとく、耐久限以下の応力を繰返して受けたときも、耐久限以上の応力の繰返しをうけた時と同様に残留応力は、応力の繰返し数と共に対数曲線的に減少する。もちろん、その減少の割合は、繰返す応力の大きいさの小さなものほど小である。

第 3 表

繰返し数	残 留 応 力 kg/mm^2							
	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4	
	$\sigma_{\perp}$ $\sigma_{\perp+}$ $\sigma_{\perp-}$	平均値	$\sigma_{\perp}$ $\sigma_{\perp+}$ $\sigma_{\perp-}$	平均値	$\sigma_{\perp}$ $\sigma_{\perp+}$ $\sigma_{\perp-}$	平均値	$\sigma_{\perp}$ $\sigma_{\perp+}$ $\sigma_{\perp-}$	平均値
0	-20.6 -19.4 -20.1	-20.0	-24.5 -21.5 -19.8	-21.9	-23.1 -20.2 -20.1	-21.1	-18.5 -22.4 -22.1	-20.0
2.0×10^4	-19.0 -19.7 -17.8	-18.8	-21.8 -20.8 -20.8	-21.1	-21.4 -19.9 -21.3	-20.9	-17.8 -18.3 -19.9	-18.7
5.6×10^4	-17.3 -16.5 -16.7	-16.8	-20.1 -19.4 -20.9	-20.1	-17.3 -17.4 -17.3	-17.3	-17.8 -18.5 -18.2	-18.2
1.6×10^5	-14.0 -12.3 -12.6	-12.9	-17.7 -17.1 -18.4	-17.7	-18.2 -17.7 -17.4	-17.8	-17.1 -18.3 -17.7	-17.7
4.5×10^5	-12.4 -10.0 -10.9	-11.1	-14.8 -15.9 -16.1	-15.6	-18.2 -16.5 -18.4	-17.7	-15.8 -17.6 -17.9	-17.7
1.3×10^6	-9.1 -10.5 -9.2	-9.6	-10.6 -12.7 -11.2	-11.5	-15.7 -16.0 -16.7	-16.1	-17.6 -17.6 -17.9	-17.7
3.9×10^6	-4.1 -6.6 -6.9	-5.9	-9.1 -11.4 -10.4	-10.3	— — —	—	-14.6 -17.7 -16.8	-16.4
1.0×10^7	-2.5 -4.0 -5.2	-3.9	-8.2 -8.9 -9.0	-8.7	-14.0 -15.1 -15.5	-14.9	-14.2 -15.6 -17.4	-15.7
2.0×10^7	+0.8 -0.3 -0.3	+0.1	-8.3 -8.7 -9.0	-8.7	— — —	—	-13.3 -16.1 -17.0	-15.5
3.0×10^7	-0.0 -0.9 +1.2	+0.1	-5.2 -7.1 -8.1	-6.8	-15.7 -15.4 -15.0	-15.4	-14.0 -16.9 -16.3	-15.7
繰返し応力 kg/mm^2	15		10		7.5		5	

ii) 実験 2. 2 種の曲げ加工を加えた試片 No. 6 および No. 7 について、素材の耐久限以上の 24.7 および 25.5 kg/mm^2 の繰返し曲げ応力をそれぞれ加え、No. 5 は、引張り側および圧縮側の両面、No. 6 は圧縮側のみについて、応力繰返しに伴う残留応力の変化を測定した。実験結果は、第 4 表および第 6 図に示す。この場合も、実験 1 の場合と全く同様に残留応力は、

応力繰返し数と共に対数曲線的に減少し、No. 5 の場合より、引張り側も圧縮側も全くその傾向が一致している。この結果を、前報告の結果と比較するとき、両者の場合、加工の種類が異なるため、残留応力分布は異なるが、表面残留応力は、正負のいかなを問わず、加える繰返し応力の大きいささえ等しければ、残留応力の減少の割合および残留応力の消滅する時の繰返し数は

第 5 図

第 4 表

繰返し数	残 留 応 力 kg/mm^2					
	No. 5				No. 6	
	圧 縮 側		引 張 り 側			
	$\sigma_{\perp}$ $\sigma_{\perp+}$ $\sigma_{\perp-}$	平均値	$\sigma_{\perp}$ $\sigma_{\perp+}$ $\sigma_{\perp-}$	平均値	$\sigma_{\perp}$ $\sigma_{\perp+}$ $\sigma_{\perp-}$	平均値
0	18.2 16.2 15.5	16.6	-21.5 -18.8 -19.6	-19.6	15.7 12.5 12.7	13.6
2.0×10^4	14.8 13.1 13.8	13.9	-16.5 -14.5 -15.5	-15.5	12.4 9.1 8.6	10.0
5.6×10^4	11.5 11.4 10.9	11.3	-14.9 -12.8 -12.1	-13.3	8.2 5.4 6.3	6.6
1.6×10^5	8.2 7.7 7.5	7.8	-9.9 -8.6 -8.1	-8.9	4.1 3.1 3.5	3.6
4.5×10^5	4.9 4.3 4.0	4.4	-6.6 -4.6 -5.2	-5.5	— — —	—
破断後(破断部近傍の残留応力)	-2.5 0.3 0.6	-0.5	-1.6 -1.1 -2.3	-1.7	0.8 0.6 1.1	0.8
繰返し応力 kg/mm^2	22.2				25	
破断繰返し数	1.05×10^6				—	
残応力消滅繰返し数	1.5×10^6				4.7×10^5

第 6 図

等しいものであることがわかる。なお、本実験は、正負の応力値の等しい両振応力を加えたにもかかわらず試片は、応力の繰返しと共に、最後に加えた曲げとは逆の方向にわん曲し、焼なまし後の状態に帰ろうとする傾向のあることを認めた。そこで No. 6 と同じ試片をつくり、これと同一応力を繰返し、試片の両端を基準にとって、繰返し数の増加に伴うわん曲の度を調べた。その結果を第 7 図に示す。中央におけるたわみ δ と、繰返し数 N との関係は第 5 表に示す。 δ の変化の割合は、繰返し数の増加に伴う残留応力の減少の割合と同一の傾向があるように思われる。

第 7 図

第 5 表

繰返し数 N	0	2.0×10^4	5.6×10^4	1.6×10^5
たわみ δ mm	0	0.02	0.56	0.66

5. 実験結果の考察

以上の実験によって、塑性加工の結果生じた残留応力は、耐久限よりも小さな応力を繰返した場合といえ

第 8 図

第 6 表

繰返し応力 kg/mm^2	残留応力消滅繰返し数
25	6.0×10^5 *
22	2.0×10^6 *
20	3.0×10^6 *
15	3.2×10^7 *
10	8.6×10^8
7.5	9.1×10^{10}
5	9.2×10^{20}

*: 実測値, 他は推定値.

ども, 定性的には減少する傾向のあることが明らかになった. この場合でも, 応力繰返しの極く初期には, その減少はきわめて顕著で, 前報告の場合と総合して, 2×10^4 回における残留応力の減少率を, 繰返し応力の大きさに対して図示すると第 8 図のごとくなる. 繰返し応力の大きさの大なるときにはきわめて顕著である. 2×10^4 回以後は, 残留応力は, 繰返し数の増加と共に対数曲線的に減少する. 耐久限以上の応力を繰返したとき, 残留応力の消滅するに至るときの繰返し数は, 半対数グラフにおいて, 残留応力の大きさ(縦軸)と繰返し数(横軸)の描く直線が横軸と交る点に対応する値に一致したが, 今回の場合に同様な関係がありとすると, 第 6 表のごとくなり, 実際問題として No. 3 および No. 4 の試片においては, すなわち 10 kg/mm^2 以下の応力を繰返した場合には, 残留応力は完全には消滅しないと考えてよいであろう.

なお, X 線写真を見ると, 加工後, 残留応力を加え

ない前の材料について得られた干渉環は, 幅の広い環であるが, 応力を繰返すに伴い鋭くなる. この現象に関しては, 別に詳しい研究を行い報告した⁽⁹⁾.

6. 結 び

今回は, 軟鋼が引張加工をうけることにより生じた残留応力が, 耐久限以下の応力をうけることによる変化, および曲げ加工をうけて生じた残留応力の, 応力繰返しに伴う変化を吟味したのであるが, 第 1 報の場合と総合して,

1). 塑性加工によって生じた残留応力は, 繰返し応力がある程度大なる場合, 応力繰返しと共に, 初はきわめて顕著に, 続いて, 繰返し数の増加と共に対数曲線的に減少する.

2). 残留応力減少の度合は, 加える繰返し応力が大なるほど大である. したがって, 加える繰返し応力が小で, たとえば耐久限度の半分以下の場合には, 実際上, その減少はきわめて少い.

3). 引張残留応力も, 圧縮残留応力も, 応力繰返しに伴う減少の度合は同じである.

注: 一

(1) 昭和 24 年 3 月 22 日 關西支部講演會において講演, 原稿受付
昭和 26 年 6 月 11 日.

(2), (3) 正員, 京都大學.

(4), (5) 學生員, 京都大學學生.

(6) 西原, 平, 機械學會論文集, 14 卷 48 號, 107 ページ.

(7) 西原, 平, " 14 卷 49 號, 2 ページ.

" " " 16 卷 53 號, 101 ページ.

(8) " " " 13 卷 45 號, 119 ページ.

(9) 西原, 平, 機械の研究, 3 卷 7 号, 385 ページ.