

加工硬化した鋼材の疲労 (第 5 報)

福井伸二, 佐藤四郎*, 北川義雄

On the Fatigue of Work-Hardened Steel (5th Report)

Shinji FUKUI, Shiro SATO and Yoshio KITAGAWA.

ABSTRACT: The Ono type rotational bending fatigue limits are studied about specimens of usual carbon steel after plastically deformed by statical uniform bending moment of about 2~4% maximum strain. The plastic bending produces the residual stress, but the effect of it upon the fatigue strength can not be found. The fatigue fracture is always due to the progressive spreading of fatigue crack started at tension side bending, that is, at side having the residual compressive stress. The reason of the fatigue crack starts at tension side is thought to be due to that the fatigue strength of specimen which is not repolished after tensile pre-working, is weaker than that by compressive pre-working of the same degree.

(Received December 11, 1952)

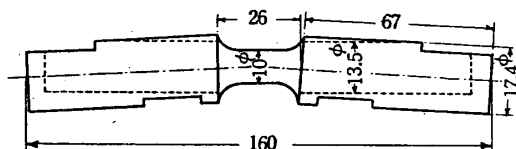
1. 緒言

前報で半円切欠溝を有する丸棒に予め引張或は圧縮加工を与え, 加工硬化のみでなく互視的に見た残留応力をもともなっている疲労強度につき報告した⁽¹⁾. しかしその場合の残留応力の大きさは今の所推定する事が出来ない. そこで今回は割合正確に残留応力値が計算により求められる予め曲げ加工を与えた後の疲労強度につき実験を行い, 加工硬化と残留応力の疲労強度に及ぼす影響をしらべた.

2. 実験材料と実験方法

実験に使用した材料は, 第 2 報⁽²⁾ で用いたと同じ 0.22% の普通構造用炭素鋼である. 曲げ加工を与える時の試験片の寸法と形状を第 1 図の実線で示す. 曲げ加工を与えた後に点線で示すような疲労試験片を製作した. 疲労試験片の製作に当つては, 無理な曲りや発熱のないよう充分注意して切削した.

予め与える曲げモーメントは四点荷重による純



第 1 図 試験片の寸法・形状

粋曲げであつて, M/M_s で 1.97, 2.10, 及び 2.28 の 3 種とした. ここで M_s とは試験片の上下面の応力が引張試験の下降伏点である 20.7kg/m² になる時の曲げモーメントである. 予め曲げ加工前に試験片の表面をエメリー紙の No. 04 まで充分に研磨し, 曲げ加工後は残留応力の変化するのを恐れて研磨は行わなかつた. 曲げ加工を与えてから疲労試験機に掛ける迄に約 6 ヶ月間放置したので, 時効の進行は充分で安定状態に達していたものと思われる.

使用した疲労試験機は小野式回転曲げ試験機で, 毎分 2,200~2,400 回転で実験を行い, 疲労限の決定は 10^7 の繰返数を基準とした.

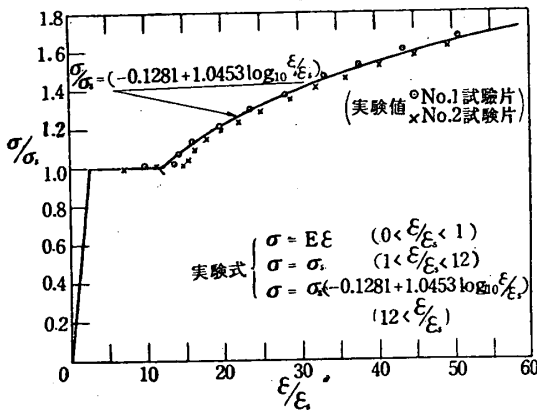
3. 残留応力の計算

曲げ加工にともなる残留応力の計算は多くの人

* 東京都立大学工学部

により研究されているが、こゝでは寺沢一雄博士の方法⁽³⁾にしたがつた。

先ず引張試験の応力-歪関係としては、第 2 図中に示すような式を使用した。この式は図に示すようになりによく実験値と一致している。こゝで σ_s とは下降伏点であり、 ϵ_s は σ_s/E である。この式を用いて曲げモーメント (M) と曲率半径 (ρ) との関係は計算により求める事が出来る。計算より得られた $M/M_s - \rho_s/\rho$ との関係(**) を実験値と比較すると第 3 図となり、よく一致しているものと考えられる。 $M/M_s - \rho_s/\rho$ 関係が計算出来れば、 ρ_s/ρ より ϵ/ϵ_s もわかり、 M/M_s に対する材料内の応力分布が計算出来る。



第 2 図 応力-歪関係の実験式と実験値

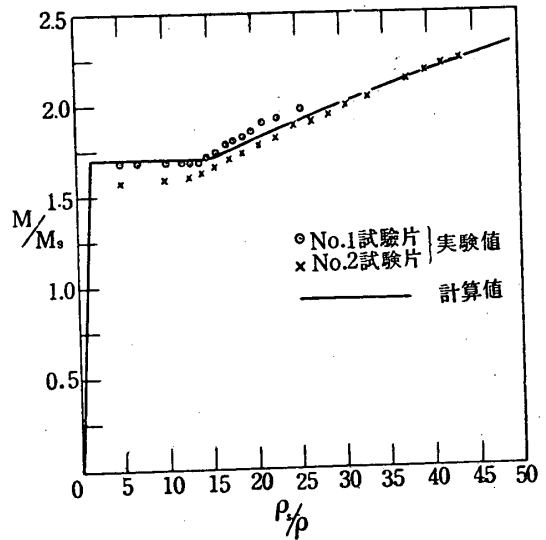
次に一度加えた M/M_s を除去する時を考えるに、材料内の応力はすべて E なる常数を持つ Hooke の法則に従うものと仮定する。しかる時には容易に残留応力が計算出来る。 $M/M_s=1.97$, 2.10 , 及び 2.28 を与えた時の残留応力 (σ_1) 並びに曲げ加工歪の値を示すと第 1 表となる。1 例として $M/M_s=2.28$ の時の応力分布 σ/σ_s と残留応力 σ_1/σ_s の状態を示すと第 4 図となる。

(**) $M/M_s - \rho_s/\rho$ の関係式は次のようになった。

$$\frac{M}{M_s} = \frac{2}{\pi} \frac{12}{\sin \theta} \left(\alpha - \frac{1}{4} \sin 4\alpha \right) - \frac{16}{3\pi} (\cos^3 \theta - \cos^3 \alpha) + \frac{16}{3\pi} \cos^3 \theta \times (-0.1281) + \frac{16}{3\pi} (1.0453) \left\{ \log_{10} \frac{1}{\tan \frac{\theta}{2}} - 0.4343 \cos \theta + (\log_{10} 12 - 0.4343 \times \frac{1}{3}) \cos^3 \theta \right\}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \theta} = \frac{4}{9\pi}$$

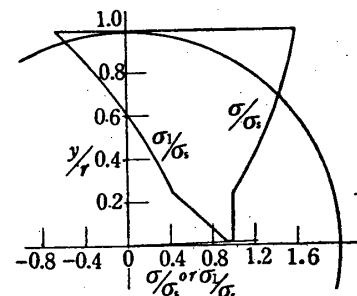
$$\frac{\rho_s}{\rho} = \frac{12}{\sin \theta}$$



第 3 図 $M/M_s - \rho_s/\rho$ 関係の計算値と実験値

第 1 表 曲げ加工による残留応力と残留歪

与えし曲げモーメント	M/M_s	1.97	2.10	2.28
曲率	ρ_s/ρ	28.4	35.1	46.4
最大曲げ応力	kg/mm ²	±28.8	±30.8	±33.3
上下面の残留応力	kg/mm ²	±12.0	±12.6	±13.9
	σ_1/σ_s	0.58	0.61	0.67
上下面の残留歪	%	±2.46	±3.08	±4.11

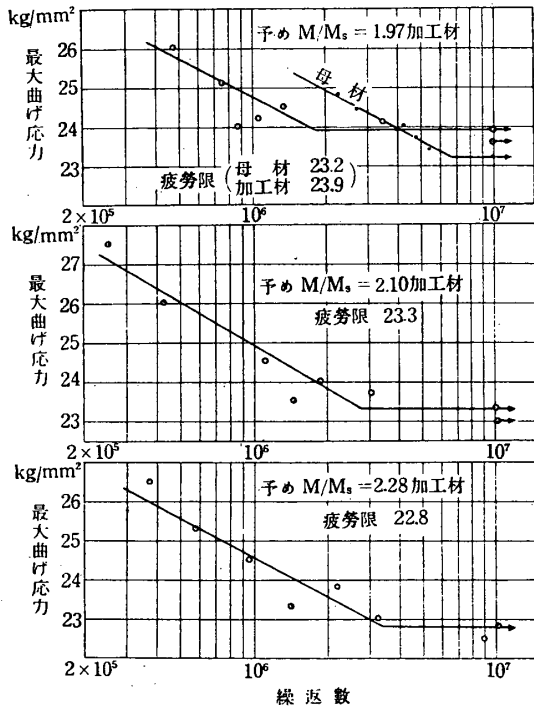


第 4 図 $M/M_s=2.28$ の時の応力分布図

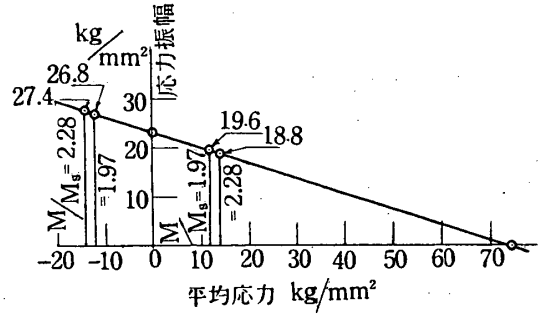
4. 疲労試験結果とその考察

3 種の予め曲げ加工を与えた後、疲労試験を行った時の応力-繰返数線図を示すと第 5 図となる。疲労限の値はいずれも母材のそれと大した差がない。加工硬化から考えると、之等 3 種の曲げ加工による最大加工歪は第 1 表の計算より 2.46%, 3.08%, 及び 4.11% であつて、本材料では之の程度の加工に対しては第 2 報で示したように母材の疲労限と大して変りのない範囲である。次に残留応力について考えてみる。今疲労限度線図が第 6 図に示すように、両振耐久限度の

値と、横軸上の真の破断応力値(74.7kg/mm²)の点とを結ぶ直線で表わされるとする。予め与えた曲げ加工により、第 1 表に示した残留応力が存在



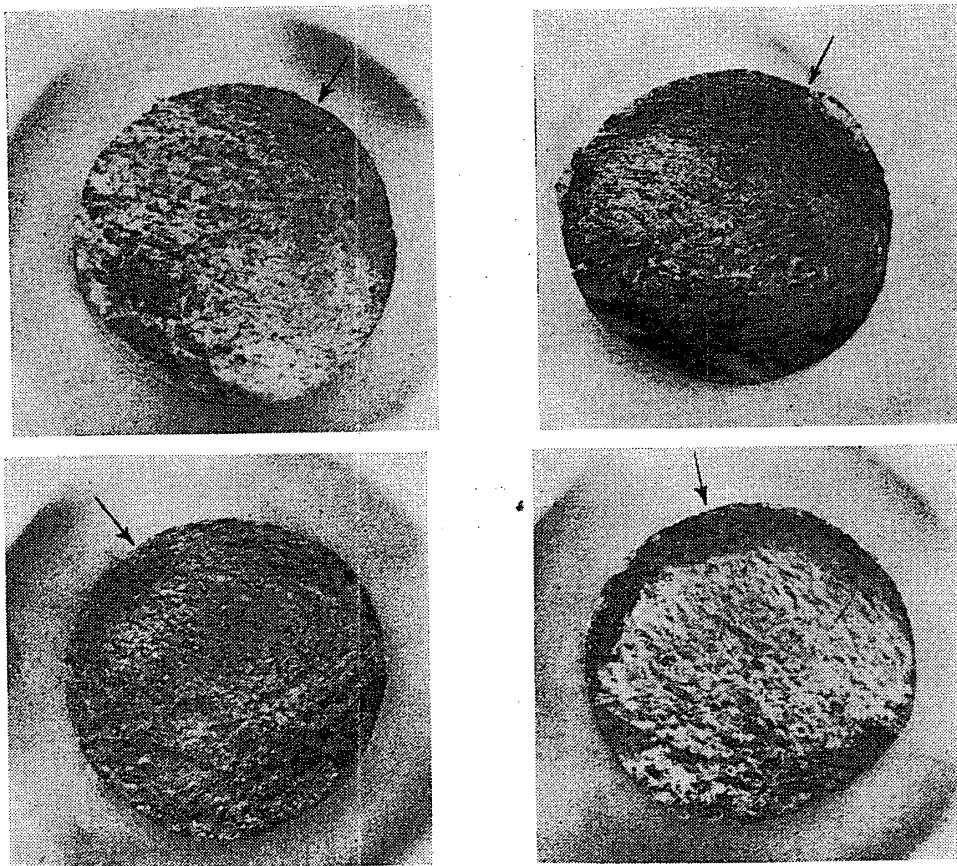
第 5 図 繰返応力—繰返数線圖



第 6 図 耐久限度線圖

していると考え、これが繰返応力を受けても変化せず破断する迄そのままであるとするならば、曲げ加工の圧縮側に存在する引張残留応力の為に、疲労限は第 6 図に示すように約 19kg/mm² 程度に低下する事が予想される。しかし実験結果は母材の疲労限と大した変化はなかつた。従つて残留応力の影響は余り顯著なものではないと考えられる。

次に疲労破断面を考察すると、亀裂の発生し始める点はすべて曲げ加工の引張側にあり、残留応力としては圧縮応力が存在している側である。第 7 図は疲労破断面の 1 例で、亀裂の発生し始め

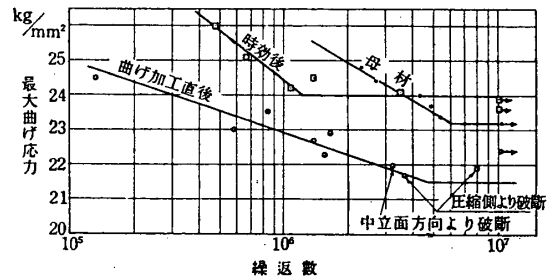


第 7 図 予曲げ加工材の疲労破断面 (破断面の上方が予曲げ加工の引張側下方が圧縮側)

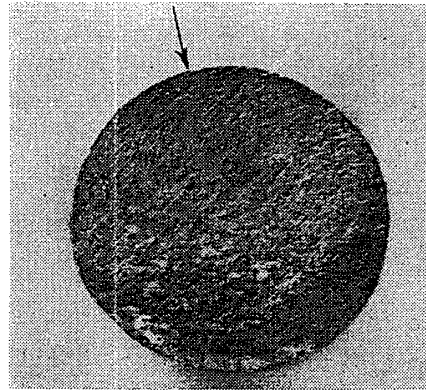
たと思われる点を矢印で示した。破断面から見ても、引張残留応力が存在すれば疲労限は低下するという事は、本実験に関しては言えないと思われる。予め加工の引張側から何故に亀裂が出始めるかについては後述する。

以上の如く曲げ加工後充分時効させたものでは、残留応力の疲労強度に及ぼす影響は余り見られない。時効の影響をしらべるために、 $M/M_s = 1.97$ の予め加工を与え、3~4 時間後から疲労試験に掛けた応力—繰返数線図を示すと第8図となる。加工直後のものは時効後に比べると、応力—繰返数曲線がねており、疲労限も低い。これは前者は後者に比べると時効硬化が小であるためと考えられる。又繰返数の大きな所で予め曲げ加工

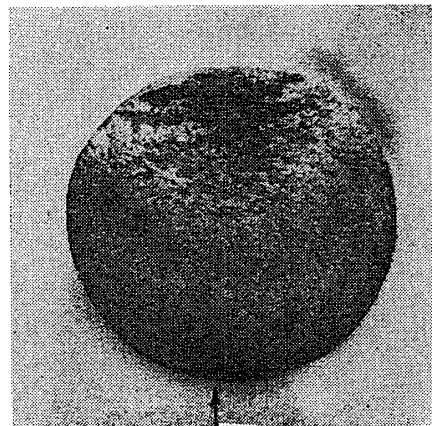
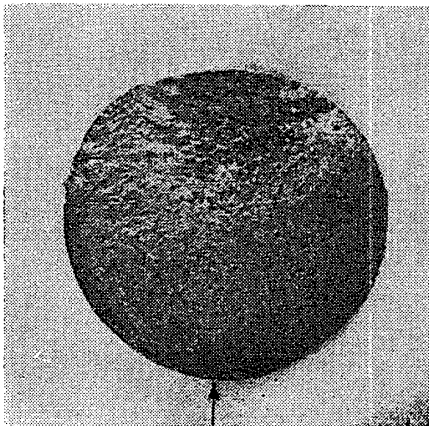
の圧縮側即ち引張残留応力のある点から疲労亀裂が発生しているものが得られた。この時の破断面の写真を第9図に示す。従つて曲げ加工直後に於ては幾分残留応力の影響があるものと考えられる。



第8図 曲げ加工直後の繰返応力—繰返数関係 ($M/M_s = 1.97$ の場合)



予曲げ加工の引張側から亀裂発生



予曲げ加工の圧縮側から亀裂発生

第9図 予曲げ加工直後の疲労破断面 (破断面の上方が予曲げ加工の引張側下方が圧縮側)

5. 予曲げ加工材の疲労亀裂発生位置についての実験並びにその考察

前節で述べたように、時効後の試験片では、残留応力から言えば圧縮残留応力が存在している側から亀裂の発生が見られた事になり、Thum⁽⁴⁾が始めて述べ且つ実験的にたしかめた結果に反する

事になった。この理由としては、こゝで使用した程度の軟鋼材に於ては、引張或は圧縮加工されたまゝの表面をもつものでは、引張加工を受けた方が疲労強度に弱いのではないかと考えて実験を行った。

以下に述べる実験には、20mm 板厚の普通構造

用炭素鋼の 880°C, 1 時間焼鈍材を使用し(***)、疲労試験片には電解研磨を行つた。予め与える曲げ加工の程度としては、 $M/M_s=2.00$ の 1 種類とし、曲げ加工後 1 つは加工表面のままで疲労試験に掛け、他は直径で 5/100~7/100 mm 程度研磨してから試験機に掛けた。尚曲げ加工 1 ヶ月後から疲労試験を行つた。

第 3 節と同様な計算により、予め曲げ加工による加工歪並びに残留応力は第 2 表のようになった。

第 2 表 曲げ加工による加工歪と残留応力

与えし曲げモーメント	M/M_s	2.00
曲率	ρ_s/ρ	35.1
最大曲げ応力	kg/mm ²	±29.9
	σ/σ_s	1.41
上下面の残留応力	kg/mm ²	±12.4
	σ_1/σ_s	0.58
上下面の残留歪	%	±3.34

第 3 表 予め曲げ加工材の疲労限

	試験片の 表面状態	疲労限	
		kg/mm ²	%
母材	研磨	25.5	100
	加工のまま	21.5	84
予め曲げ加工材	加工後研磨	24.0	94

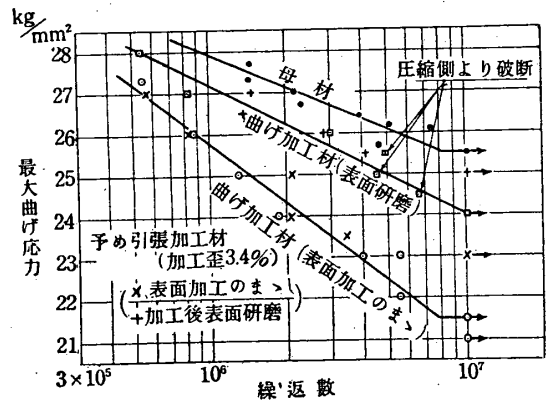
疲労試験の結果得られた繰返応力—繰返数線図を示すと第 10 図となり、これより得られる疲労限の値を第 3 表に示す。曲げ加工後試験片表面を研磨したものの疲労限は、母材のそれより 6% 低下したが、曲げ加工されたままの表面を有するものでは 16% も低下した。疲労破断面の亀裂発生位置は、曲げ加工されたままの表面を有するものは、前節と同様にすべて引張側に存在したが、加工後表面を研磨したものは圧縮側に存在するものも見られた。従つて疲労亀裂の発生位置が曲げ加工の引張側に存在するのは、引張加工されたままの表面を持つ部分が、同程度の圧縮加工を受け

(***) 本材料の化学的成分 (%) と主なる機械的性質:

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.17	0.22	0.58	0.029	0.025	0.36

降伏点 21.2kg/mm², 引張強さ 44.2kg/mm²
伸率 41.2%, 断面収縮率 64.5%

たままの表面を持つ部分より疲労強度に弱い事が推測される。



第 10 図 繰返応力—繰返数関係

6. X 線による残留応力の測定

前節で用いた曲げ加工された疲労試験片の、最大引張並びに圧縮加工を受けた部分の残留応力を X 線により測定し、計算により求めたものと比較し、残留応力の存在を確認した。X 線は $C_0K_{\alpha 1}$ 線を用い、比較物質として 400°C にて 1 時間焼鈍した銀箔を試験片表面にはりつけ、鐵干渉環と同じフィルム上に撮影した。使用二次電圧は 60kV、管電流は 10mA である。X 線の入射方向は、試験片表面に法線方向と、法線と試験片の軸方向と各々 45° をなす方向との 2 方向で、2 枚のフィルムより原子平面間の距離 $d_{0,9.5^\circ}$ と $d_{0,45^\circ+9.5^\circ}$ の二つを測定して残留応力を求めた。尚フィルム上の干渉環の位置を求めるために、理研式マイクロ光度計に掛けた。

曲げ加工後 3 ヶ月以上時効させた 2 本の試験片の 4 点から得られた結果を示すと第 4 表となる。引張加工側には圧縮残留応力が、圧縮加工側には引張残留応力が存在している結果が出た事は勿論である。たゞ得られた結果がばらつき、大体 5~10 kg/mm² 程度の残留応力が存在しているよ

第 4 表 X 線による残留応力測定値 (kg/mm²)

加工後時効	No 12 試片		No 11 試片	
	引張加工側	圧縮加工側	引張加工側	圧縮加工側
	-5.5	+4.7	-10.3	+7.3
加工直後	No 1 試片		No 2 試片	
	引張加工側	圧縮加工側	引張加工側	圧縮加工側
	-7.7	+12.9	-18.0	+15.7

うで、計算で求められた $\pm 12.4 \text{ kg/mm}^2$ よりは低いようである。

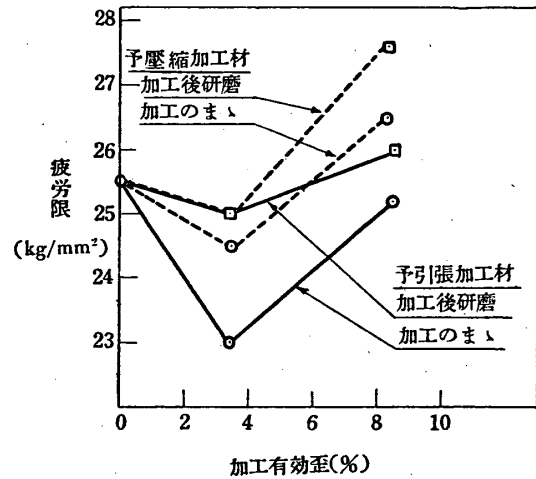
次に曲げ加工直後 2~5 時間で X 線に掛けて得られた結果を第 4 表に示したが、時効させたものより高く出た。

7. 引張或は圧縮加工されたまゝの表面を持つ試験片の疲労強度

予曲げ加工材の疲労亀裂が常に引張加工側より発生している原因について、第 5 節で引張加工されたまゝの表面の方が、圧縮加工されたものより疲労強度に弱い為であると推論した。そこで今回は引張或は圧縮加工をそれぞれ 2 種類えらんで、各々試験片の表面を加工のまゝのもの、直径で $2/100 \sim 3/100 \text{ mm}$ 程度研磨されたものと比較実験を行つた。尙すべての試験片に対し予加工の 1 ヶ月後から疲労試験が行われた。

疲労試験の結果得られた繰返応力—繰返数関係を示すと第 11 図となり、疲労限を加工有効歪に対して図示すると第 12 図となる。一般に同じ程度の加工歪を与えると、引張加工材の方が圧縮加工材より弱いようである。3% 程度の引張加工歪を与えたものの疲労限は特に低く、母材疲労限より 10% 低下しているが、加工後表面を研磨すると 2% の低下となる。同程度の圧縮加工材では疲労限は 4% の低下で、表面を研磨すると 2%

の低下となつた。このように 3% 程度の引張加工歪を与えたものの、試験片表面が加工のまゝのものは特に疲労限が低い事が、予め曲げ加工材の疲労亀裂発生位置が引張側に存在した原因と考えられる。3% の引張加工歪を与えたものは、前節の予曲げ加工材の最大曲げ加工歪と同程度のものであるから、こゝで得られた繰返応力—繰返数関係を予曲げ加工材のそれと共に図示すると、第 10 図に見られるように割合よく一致した結果が得られた。

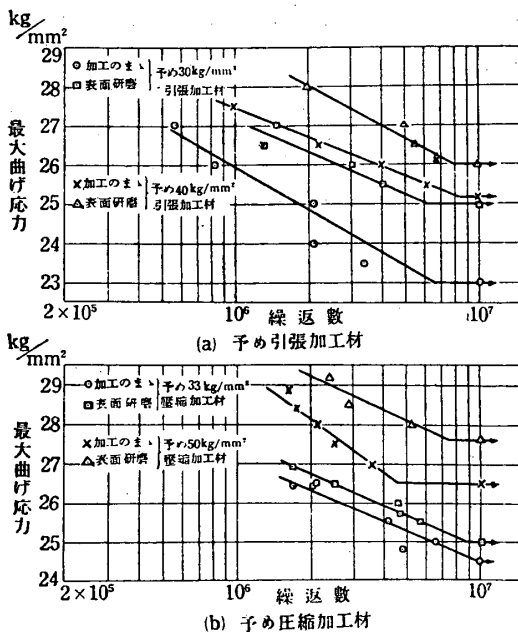


第 12 図 予め引張、圧縮加工材の加工有効歪と疲労限

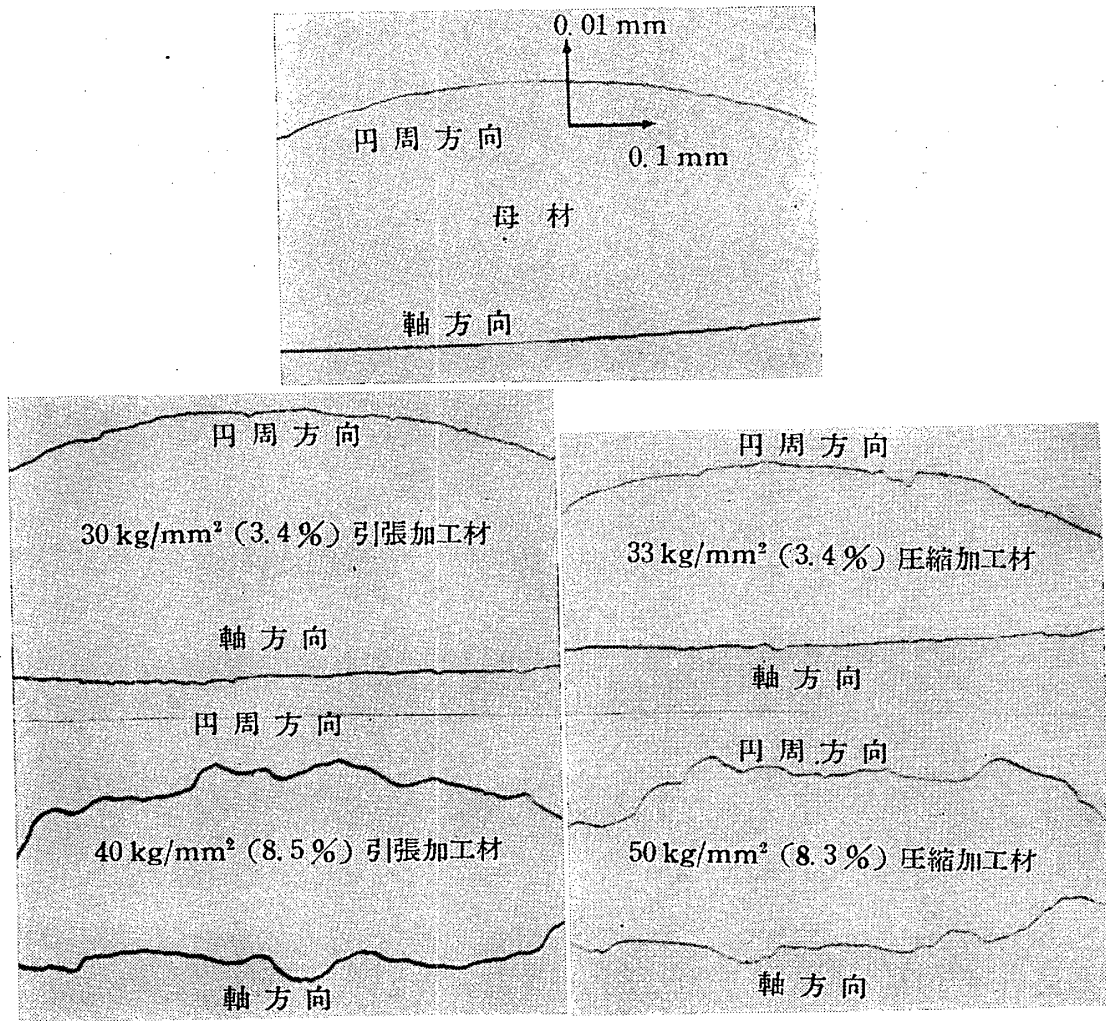
引張或は圧縮加工されたまゝの表面粗さの状態を、小坂式表面アラサ検査機でしらべた結果を第 13 図に示す。使用倍率は縦が 1,000 倍、横 100 倍である。3% 程度の引張加工歪を与えた時の表面粗さ状態が疲労限を著しく低下させる程のものとは考えられず、加工を受けた表面層に疲労強度を弱める原因が存在しているのではないかと考えられる。8% 程度の加工歪を与えると表面状態は甚だしく悪くなるが、加工硬化の為に母材の疲労限度或はそれ以上となつている。そして表面を研磨しても 3~4% 程度の疲労限の上昇が見られるにすぎず、歪が 3% 程度の引張加工材の疲労限が 8% も上昇するのに比して遙かに小さい。

〔附〕 電解研磨仕上と疲労強度

前報迄及び第 4 節に示した試験片はすべて No. 04 エメリー紙仕上後かるくバフ仕上を行い疲労試験に掛けたが、第 5 節以下で述べた試験片にはすべて電解研磨を行つた。電解研磨液としては磷酸 100 c. c., 無水クロム酸 5~6g, 硫酸 1

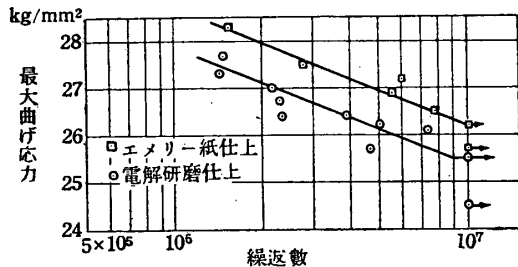


第 11 図 予め引張、圧縮加工材の繰返応力—繰返数関係



第 13 図 引張或は圧縮加工材の表面状態

%, を用い, 使用電流は 20 Amp/dm² である。従来のエメリー紙仕上と今回の電解研磨仕上とを, 小野式回転曲げ疲労試験機による繰返応力-繰返数線図で比較すると第 14 図となる。エメリー紙仕上の方が疲労限で約 3%程度高く出た。これはエメリー紙仕上による表面硬化の結果と思われる⁽⁶⁾。



第 14 図 電解研磨とエメリー紙仕上との疲労強度の比較

8. 結論

0.22% および 0.17% 炭素鋼を用い, 最大曲げ歪で 2~4% 程度の曲げ加工を与えて, 回転曲げ

疲労試験を行い, 次のような結果を得た。

- (1) 予め曲げ加工後相当時効すれば, 残留応力の疲労強度に及ぼす影響は見られない。
- (2) 疲労破断面の亀裂発生位置はすべて予め曲げ加工の引張側に存在した。その原因は 3%程度の僅かな引張加工歪を受けた表面は, 同程度の圧縮加工を受けた表面より疲労強度に弱いためである。
- (3) 加工直後の疲労試験では, 僅かながら残留応力の影響が認められ, 亀裂発生位置が圧縮加工側即ち引張残留応力が存在する側にあるものが繰返数が大なる所で見出された。

終りに臨み本実験に種々御便宜をたまわつた三菱日本重工業横浜造船所の赤木, 桜井両技師並びに X 線応力測定に関し御便宜を与えられた東京大学工学部総合試験所の五弓助教授及び進士公厚氏に深く感謝の意を表す。尙本実験は文部省科学研究費の補助を受けたので, 重ねて謝意を表する次第である。

文 献

- (1) 福井, 佐藤: 理工研報告, 6 (1952), 259.
- (2) 福井, 佐藤: 理工研報告, 4 (1950), 210.
- (3) 寺沢: 常温加工を受けた軟鋼の力学に関する研究, 昭. 16. 4.
寺沢, 山路: 航空機用軽合金板の曲げ加工の研究 (1952年12月11日受理)
- 究 (山海堂), 昭. 19.
- (4) A. Thum: *V.D.I.*, 75 (1931), 1323.
- (5) 例えば,
西原, 小島外2氏: 機械学会論文集, 6 (1940), 11.
- (6) 福井, 工藤, 清野: 理工研報告, 4 (1950), 204.