

加工硬化した鋼材の疲労 (第3報)

福井伸二, 佐藤四郎*

On the Fatigue of Work-hardened Steel (3rd Report)

Shinji Fukui and Shirô Sato

ABSTRACT: In the previous works, the fatigue limits under the tension-compression, or bending stresses were studied about specimens of usual carbon steel (0.22%C) after plastically deformed by statical tensile, or compressive stresses.

In this paper, the torsional fatigue limits were studied in the same way as in the previous works. Arranging the experimental results by the absolute values of natural strain corresponding to the pre-working stresses, the fatigue limits changed similarly both for tensile and compressive pre-working. Comparing with the annealed states, the fatigue limits decreased few percentage for small strain, and then increased about 15–20% for large strain. This tendency seemed to be similar to that of the proportional limits for torsion, and also to those of the fatigue limits for tension-compression, or bending stresses.

(Received November 28, 1951)

1. 緒言

前報にて、予め引張及び圧縮塑性加工が、引張圧縮疲労強度並びに回転曲げ疲労強度にどのような影響を及ぼすかについて報告⁽¹⁾した。これらの場合は、予め与える加工の方向と繰返し応力の方向が一致している場合であつた。今回は同様な加工を与えただ後、繰返し振り疲労強度を求め、加工による影響を明らかにしようとしたもので、予め与えた加工方向と繰返し応力方向が異なる場合である。尙予め加工後の静的振り試験も併せ行つた。

2. 実験材料と実験方法

実験に供した材料は第2報に用いたものと同

第1表 振りに対する機械的性質 (kg/mm²)

下降伏点	振り破断応力	剪断弾性係数
13.2	36.9	7750

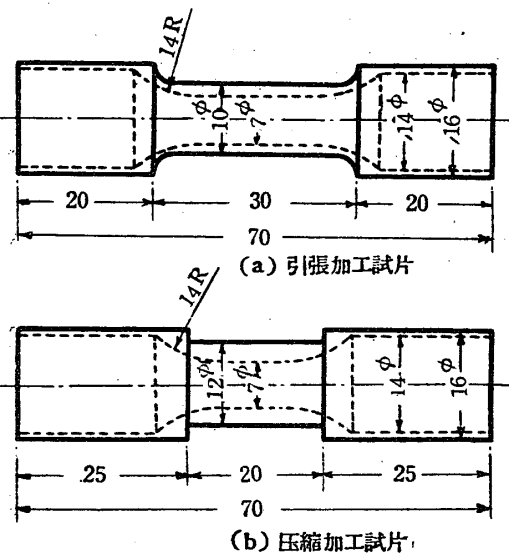
* 東京都立大学工学部

じで、静的振り試験に対する結果は第1表である。下降伏点の値は振りモーメント (T) と単位長さの振り角 (θ) との線図に於て、所謂踏み場と云う水平部分の T に対する弾性最大振り応力値である。この値を用いて中西博士の理論より、引張試験の下降伏点を計算すると 19.8kg/mm^2 となり、第2報で示した引張試験の下降伏点 20.7kg/mm^2 より5%程度低く出たが、これは中西博士も言われて居られる如く⁽²⁾、引張試験の下降伏点は曲げ或は振り等より求められるものより数%高く出るのが普通である爲と考えられる。

第1図の実線で示すような引張並に圧縮加工試片に、第2表に示した見掛応力で加工を与えた後、各々点線で示す疲労試験片を製作した。尙圧縮加工を与える時挫屈しないように、第2報で用いたと同じ圧縮装置を使用した。引張加工も圧縮加工も最大荷重で約1分間荷重を保持してから荷重を除去した。疲労試験片の表面はすべてバフ仕上とし、塑性加工を与えてから約3ヶ月後から疲労試験を行つた。

第2表 疲労試験前に与えた加工の程度

予め引張加工				
見掛応力 kg/mm ²	24.0	30.0	35.0	40.0
眞の応力 kg/mm ²	24.4	31.0	36.9	44.1
断面積変化率(%)	1.59	3.20	5.35	10.22
有効歪(%)	1.58	3.16	5.21	9.74
予め圧縮加工				
見掛応力 kg/mm ²	25.0	33.0	41.0	50.0
眞の応力 kg/mm ²	24.6	32.0	39.1	45.9
断面積変化率(%)	1.53	2.92	4.85	8.86
有効歪(%)	1.52	2.88	4.73	8.49



第1図 試片の寸法形状

疲労試験機は倉石一久野式繰返振り試験機を使用し、回転数は毎分 1800 回転で行った。繰返応力は両振り応力であり、疲労限の決定には 10⁷ 回の繰返数を基準とした。

3. 静的振り試験

母材並に予め引張及び圧縮加工材の静的振り試験を行って、疲労試験結果の参考に供した。之等の振り試験は、試験片の平行部分に 2 箇の鏡装置を標点距離 13mm に取りつけて、振りモーメント T と単位長さ捩れ角 θ の関係を測定した。先づ母材の振り試験と引張試験とを Nádai⁽³⁾ の Octahedral Shear Stress τ_n と Strain γ_n で比較した。即ち振り試験の $T-\theta$ 関係より次に示す (1), (2) 式を用いて $\tau_n-\gamma_n$ 関係を求めた。

$$\tau = \frac{1}{2\pi r^3} \left(\theta \frac{dT}{d\theta} + 3T \right) \quad \left. \vphantom{\tau} \right\} \quad (1)$$

$$\gamma = r\theta$$

$$\tau_n = \sqrt{\frac{2}{3}} \tau \quad \left. \vphantom{\tau_n} \right\} \quad (2)$$

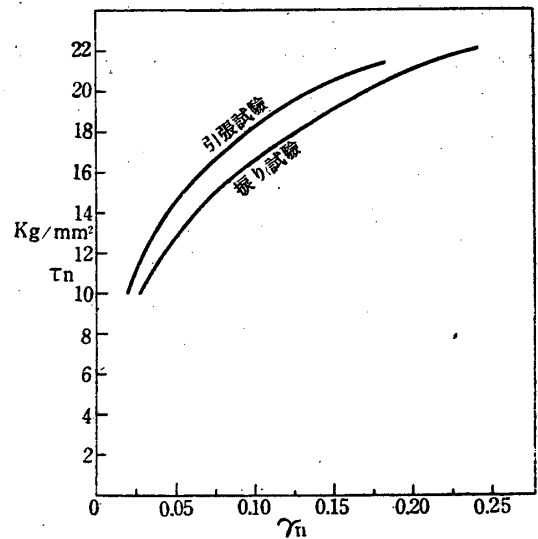
$$\gamma_n = \sqrt{\frac{2}{3}} \ln \left\{ 1 + \frac{\gamma^2}{2} + \gamma \left(1 + \frac{\gamma^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}$$

一方引張試験の実応力 σ と有効歪 ε とより (3) 式を用いて、 $\tau_n-\gamma_n$ が求められた。

$$\tau_n = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma \quad \left. \vphantom{\tau_n} \right\} \quad (3)$$

$$\gamma_n = \sqrt{2} \varepsilon$$

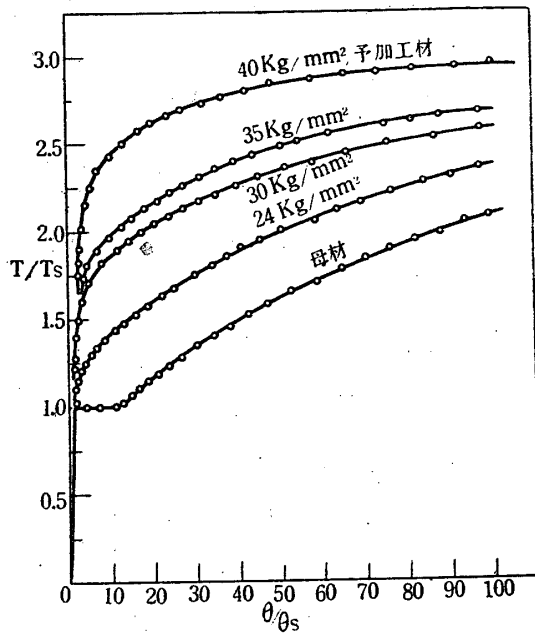
之等の比較を第2図に示したが、引張試験の方が約 10%程度高く出た。これは Mac Gregor と



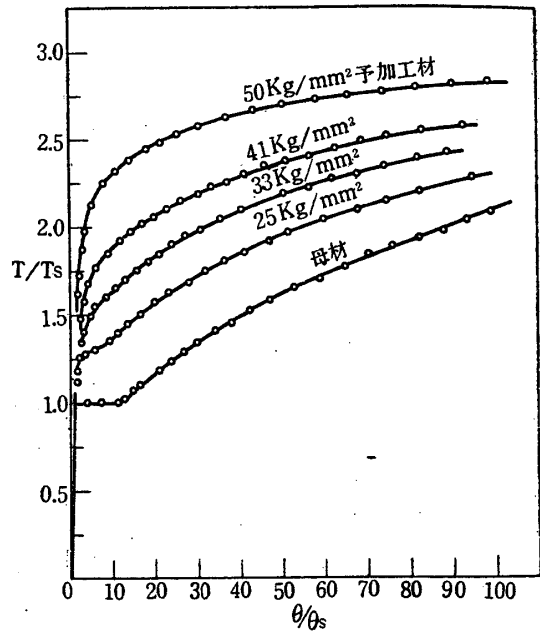
第2図 振り試験と引張試験の比較

Hrones⁽⁴⁾ が S. A. E. 1045, 1112 の軟鋼につき、Octahedral Shear で引張りと振りの結果を比較し、引張りの方が 10% 位高く出たと報告しているが、之の結果とよく合っている。

次に前節に述べた様な予め引張並に圧縮加工を与えた材料の振り試験を行って、振りモーメント (T) と単位長さの捩れ角 (θ) との関係を求めると、第3, 4図の如くなる。ここで T_s とは弾性最大剪断応力が第1表に示す下降伏点応力になった時の振りモーメントであり、その時の単位長さの捩れ角を θ_s とした。これらの図は T_s, θ_s を用いて、得られた振りモーメントと捩れ角の関係を無次元で表わしたものである。第3, 4図より予め引張及び圧縮加工を与えたものは加工硬化の爲に、加工の程度が大になるに従って $T-\theta$ 線図



第 3 図 引張加工後の振り試験



第 4 図 圧縮加工後の振り試験

は高く出て来る。しかし破断時の T の値はこれらの場合に対してもほとんど変りがない事は、第 3 表の振り破断應力** の値を見ても解かる。第

3, 4 図で得られた曲線の直線部分から離れる点を読み取つて、振り比例限と名づけ第 3 表に示した。僅かな加工を加えると甚だしく振り比例限

第 3 表 予め加工後の振り試験結果 (kg/mm²)

	予め加工 見掛応力	振り破断 応力	振り比例 限 (τ_s)	疲労後の振り比例限		τ'_s/τ_s	τ''_s/τ_s
				6×10^5 後 ¹⁾ (τ'_s)	10^7 後 ²⁾ (τ''_s)		
予め引張加工	母材	36.9	13.2	8.4	8.4	0.64	0.64
	24.0	37.1	10.2	7.7	—	0.75	—
	30.0	37.0	11.5	8.9	—	0.77	—
	35.0	37.4	12.6	10.3	9.9	0.82	0.79
	40.0	37.3	16.4	12.6	11.7	0.77	0.71
予め圧縮加工	25.0	38.0	9.9	7.8	8.6	0.79	0.87
	33.0	36.7	12.0	8.2	10.7	0.68	0.89
	41.0	36.9	12.6	8.7	12.1	0.69	0.96
	50.0	37.2	14.4	—	12.4	—	0.86

- 1) 第 4 表に示す疲労限応力で 6×10^5 の繰返数を加えた直後のもの
- 2) 1) と同じ応力で 10^7 の繰返数を加えて後 3 ヶ月以上常温時効せるもの

は下り、加工の程度が増すに従つて次第に大きくなり、40kg/mm² の引張加工、50kg/mm² の圧縮加工の場合には母材の下降伏点より大となつてい

る。予め加工の有効歪に対する比例限の値を第 9 図に示して置いたが、引張加工と圧縮加工に対する両曲線がよく一致している。

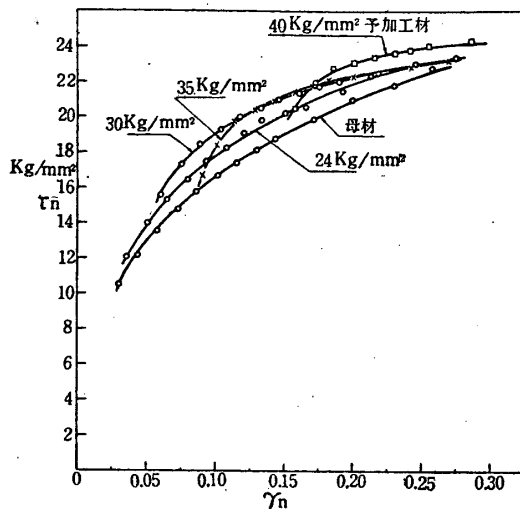
** 破断応力 τ_b は次のように計算した。

$$T_b = \int_0^r 2\pi x \cdot dx \cdot \tau_b \cdot x$$

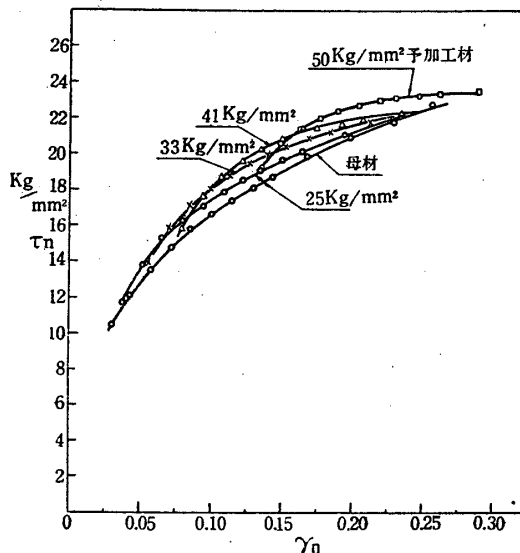
$$= \frac{2}{3} \pi r^3 \tau_b$$

こゝで T_b は破断時の振りモーメント、 r は試験片の半径である。

次に予め加工を与えた材料の振り応力と剪断歪との關係を、Octahedral Shear Stress と Shear Strain で比較して見よう。予め加工を受けた材料は已に引張或は圧縮歪に相当する Octahedral Shear Strain を受けて居るので、之を加えて図示して見れば第 5, 6 図となる。第 2 図に示した



第5図 予め引張加工材の振りによる $\tau_n-\gamma_n$ 線図



第6図 予め圧縮加工材の振りによる $\tau_n-\gamma_n$ 線図

ように、引張試験と振り試験の間に約 10% の差が表われて居るから、之の差が 5, 6 図に表われて来る事は勿論考えられるが、予め加工を加えたものはいづれも時効硬化によつて母材の $\tau_n-\gamma_n$ 曲線より高くなつて居り、予め与えた加工の程度が大になる程時効硬化も大きい事が解かる。この事は第1報の引張試験の時に認められた事実と一致するものと考えられる。

4. 疲労試験の結果並びにその考察

予め引張並びに圧縮加工を与えた場合の繰返し振り疲労試験の結果を示すと第4表の如くなる。第2報で得られた回転曲げ疲労限 σ'_w をも併せ示して居いた。又疲労試験の結果を縦軸に繰返応力を、横軸に繰返数 N の対数 $\log N$ を取つて図示すれば、第7, 8 図になる。

24.0kg/mm² の引張加工即ち 1.6% の引張歪を与えたものは、母材の疲労限より 3% 減少している。それ以上の引張加工を与えたものは、加工の程度が大になるに従つて疲労限も大となり、40kg/mm² の引張加工を与えたものでは、18% も母材の疲労限より大となつた。この事は第1報及び第2報で示した引張圧縮疲労限及び回転曲げ疲労限の場合と同じ傾向を示した。

25.0kg/mm² の圧縮加工即ち 1.5% の圧縮歪を与えたものは、引張加工を与えた場合と異なり、母材の疲労限より僅か大となつた。そして大きな

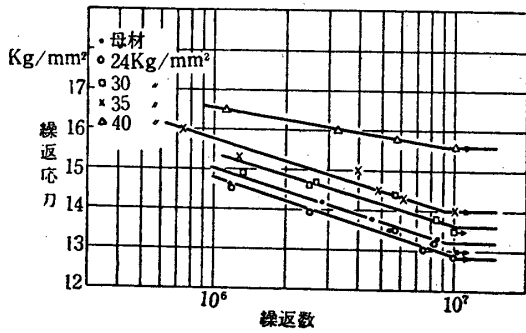
第4表 予め引張及び圧縮加工材の疲労限

予め引張加工 見掛応力 kg/mm ²	振り疲労限 (τ_w)		回転曲げ 疲労限 kg/mm ² (σ'_w)	τ_w/σ'_w	予め圧縮加工 見掛応力 kg/mm ²	振り疲労限 (τ_w)		回転曲げ 疲労限 kg/mm ² (σ'_w)	τ_w/σ'_w
	kg/mm ²	%				kg/mm ²	%		
母材	13.2	100	23.2	·57	母材	13.2	100	23.2	·57
24.0	12.8	97	22.3	·57	25.0	13.5	102	22.4	·60
30.0	13.6	103	23.2	·59	33.0	13.8	105	22.7	·61
35.0	14.0	106	23.5	·60	41.0	14.6	111	23.8	·61
40.0	15.6	118	24.8	·57	50.0	15.0	114	26.4	·57

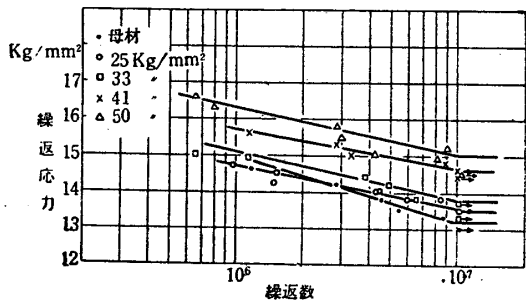
圧縮加工を与えるに従つて疲労限も大となり、50.0kg/mm² の 8.5% 加工を加えると 14% 大となつた。こゝで注意すべきは τ_w/σ'_w の比が 0.59 ± 0.02 の範囲内で略一定になつた事である。剪

断歪エネルギー説に疲労破損が従うものとすれば $\tau_w/\sigma'_w = 1/\sqrt{3} \approx 0.58$ であつて、上記の値は割合よく之の値と合つているものと考えられる。

有効歪を横軸にして、疲労限を図示して見ると

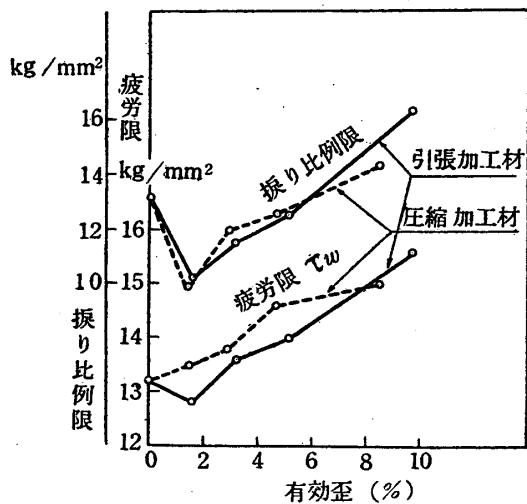


第 7 図 繰返応力—繰返数 (予め引張加工材)



第 8 図 繰返応力—繰返数 (予め圧縮加工材)

第 9 図となる。又前節に示した振り比例限をも示して居いた。1.5% 圧縮加工を与えた時のみ傾向を異にしたが、他は引張加工と圧縮加工が疲労限に及ぼす影響は似たものであり、又振り比例限とも非常によく似た傾向を示している。ここで図示した母材の振り比例限は、所謂下降伏点を取つたものであつて、これは西原博士等⁽⁵⁾も研究されて居られる如く、僅かな繰返応力を与える事により急激に踏り場は上り、比例限は下つて来るものである。このような事を考えに入れば、振り比例限の曲線と疲労限の曲線とは更にもつとよく似

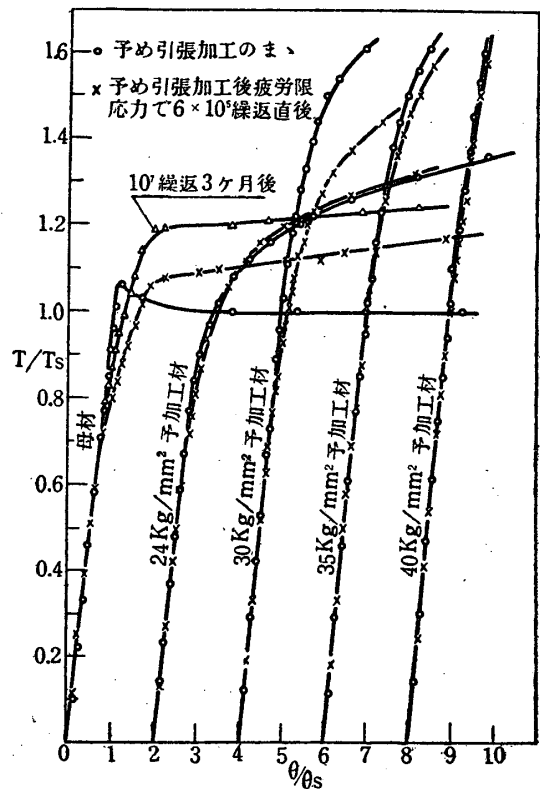


第 9 図 加工有効歪と疲労限、振り比例限との関係

た傾向を示して来る。

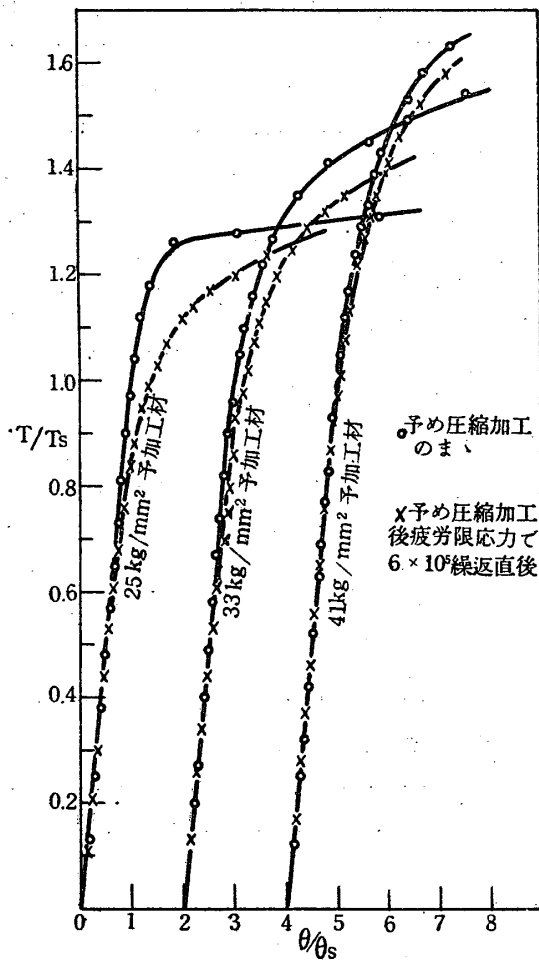
今 1 例として、第 4 表に示した疲労限応力で 6×10^5 の繰返を与えた直後と、 10^7 の繰返を与え 3 ヶ月以上放置せる場合につき振り比例限を求めると、第 3 表に示す結果が得られた。之れから見ても母材の振り比例限は、予め加工を与えたものより、繰返応力を与える事により甚だしく低下する事が見られる。又振りモーメントと振り角との関係を、 6×10^5 の繰返を与えた場合につき、繰返を与えぬ前のものと比較して見ると第 10、11 図の如くなる。尚 10^7 の繰返を与えたものは、第 10 図に母材に対してのみ示して居いた。之れより予め加工を与えたものは、繰返応力を加える前後に対して、 $T/T_s - \theta/\theta_s$ 曲線に大した変りはないが、母材のそれは大きく変化している事が解かる。尚繰返応力を与えた後の機械的性質については、又改めてくわしく実験を行いたい考である。

加工有効歪と振り疲労限の増減率との関係を示すと第 12 図の実線の如くなる。又第 2 報で報告した回転曲げ疲労限の増減率を点線で示して置いた。振り疲労限も回転曲げ疲労限も大体似た傾向で増減して居る事が見られる。たゞ本実験で行つ

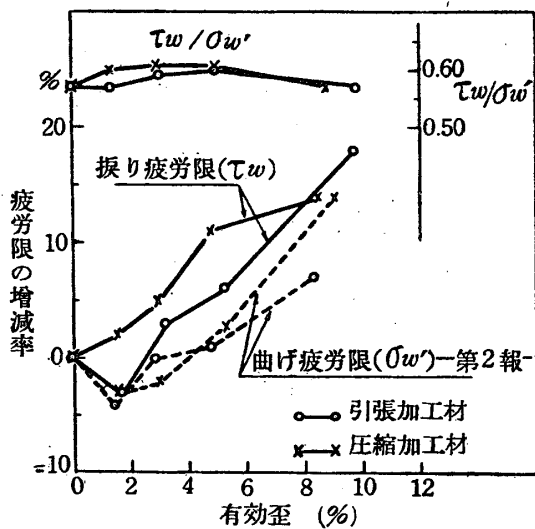


第 10 図 予め引張加工材とその疲労後との振り曲線

た範囲内に於ては、振り疲労限の方が増大率が大きいである。



第11図 予め圧縮加工材とその疲労後との振り曲線



第12図 加工有効歪と疲労限の増減率

5. 結論

予め降伏点以上の引張及び圧縮加工を与えて加工硬化せしめた 0.22% 炭素鋼の繰返し両振振り試験並に静的振り試験を行つて、次のような結果を得た。

(1) 引張塑性加工を加えると、加工の程度の上昇と共に疲労限は始めやゝ減少し、その後加工度の上昇と共に増大する。本実験に於ては 1.5% の加工率で疲労限は 3% 減少し、10% の加工率で 18% 増大した。

(2) 圧縮塑性加工を加えると、加工度の増大と共に疲労限は増大する。本実験では 8.5% の加工率で 14% 疲労限が増大した。

(3) 以上いずれもの塑性加工を与えた振り疲労限 τ_w と曲げ疲労限 σ_w の比 τ_w/σ_w は 0.59 ± 0.02 の範囲で与えられ、剪断歪エネルギー説による値 0.58 とよく合つた。

(4) 前報迄の静的試験及び引張圧縮疲労試験、回転曲げ試験と、本報告の振り疲労試験の結果から見て、引張加工も圧縮加工も強度的には同じ種類のものであると考えられる。

(5) 引張加工及び圧縮加工材の予め加工有効歪に対して図示した静的振り比例限の 2 曲線はかなりよく一致した。

(6) 予め加工による静的振り比例限と疲労限の変化にはよく似た傾向を認めた。

終りに臨み本実験に種々御便宜をたまわつた、東日本重工業横浜造船所の赤木、櫻井両技師並に終始実験に協力して下された北川義雄氏に厚く御礼申し上げる。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，3 (1949) 311，
理工研報告，4 (1950) 210。
- (2) 中西：機械学会論文集，14 (1948) 68。
- (3) A. Nádai: *Jour. of App. Phys.*, (1937) 205。
- (4) C. W. Mac Gregor and J. A. Hrones: *Jour. of App. Mech.*, (1937) 163。
- (5) 西原外 3 氏：金属学会誌，B-14 (1950) 9。

(1951 年 11 月 28 日受理)