

加工硬化した鋼材の疲労 (第9報)

福井伸二, 佐藤四郎, 北川義雄

(1954年11月15日受理)

On the Fatigue of Work-Hardened Steel (9th Report)

Shinji FUKUI, Shiro SATO and Yoshio KITAGAWA

(Received November 15, 1954)

ABSTRACT: The Ono type rotary bending fatigue limits are shown about three groups of specimens of 0.53% carbon steel.

The first group of specimens, having circular groove of 1.0 mm radius, were deformed by statical tensile or compressive stresses of 36.0 kg/mm² and 56.0 kg/mm² beyond the yield point before bending fatigue test.

The second group were deformed by statical uniform bending moment of about 3% maximum strain.

The third group were deformed by statical torsional shear strain of 3%, 10% and 21%.

These plastic deformations have produced the work hardening and the residual stress, and the effect of residual stress upon the fatigue limit is shown by comparing with the effect of the work hardening only in previous work (8th report).

The experimental results are as follows:

(1) The fatigue limit of notched specimens, pre-worked by tensile stress of 36.0 kg/mm², rises by 6% as compared with the annealed state, and falls by 10% for compressive pre-working of the same degree. These results indicate that the fatigue limit increases by the residual compressive stress induced at the root of notch, and decreases by the residual tensile stress. Accordingly, the influence of the residual stress upon the fatigue limit is quite appreciable.

(2) The fatigue tests on the notched specimens, pre-worked by large stress of 56.0 kg/mm², indicate that the work hardening have a greater effect on the fatigue strength than the effect of residual stress.

(3) The effect of residual stress upon the fatigue strength can not be found by the fatigue of specimens pre-worked by plastic bending. The fatigue fracture is always due to the progressive spreading of fatigue crack started from bending tension side, that is, at side having the residual compressive stress.

(4) Comparing with the annealed state, the fatigue limit obtained by specimens after plastically deformed by torsion falls about 8% for 3% shearing strain, and rises about 20% for large strain of about 21%. This tendency is similar to that obtained by specimens of the work hardening only (8th report). The effect of residual stress upon the fatigue limit can not be found.

(5) The effect of residual stress upon the fatigue strength appears to depend on the mechanical property of material and constrained condition of the residual stress. The fatigue strength of the hard materials are affected appreciably by the residual stress.

1. 緒 言

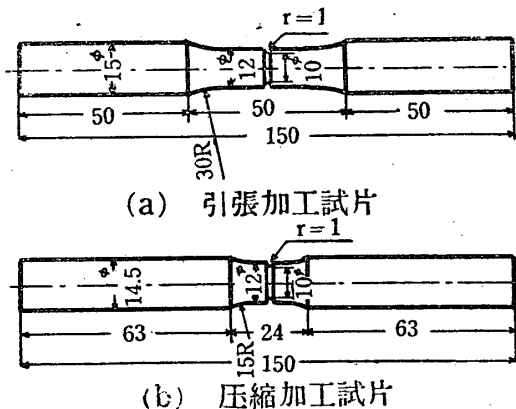
前報にて 0.53% 炭素鋼を用い、巨視的に見て加工硬化のみを生じていると考えられる単純引張並びに圧縮加工材の疲労強度につき報告した。今回は同じ材料を使用し、半円切欠溝を有する丸棒に引張あるいは圧縮加工を与えた場合、丸棒に曲げ加工を与えた場合並びに振り加工を与えた場合につき、これ等の加工の回転曲げ疲労強度に及ぼす影響をしらべた。この場合の加工により、加工硬化と共に残留応力をも生ずるから、前報と比較することにより残留応力の疲労強度に及ぼす影響を明らかにしようとしたものである。0.22% および 0.17% 炭素鋼を用いたこの種の実験については、既に第4報⁽¹⁾、第5報⁽²⁾及び第7報⁽³⁾で述べてあり、これ等の結果とも比較した。

2. 実験材料と実験方法

実験に供した材料は0.53%炭素鋼で、第8報⁽⁴⁾に於て用いたのと同じものである。

(i) 半円切欠試験片の場合.

試験片の寸法は半円切欠底部の直径を 10 mm とし、切欠半径を 1 mm とした。第1図に引張並びに圧縮加工試験片を示す。これ等の試験片はすべて加工前に切欠底部を電解研磨した。



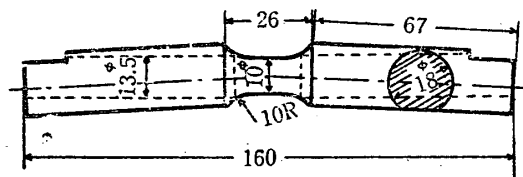
第1図 半円切欠試験片の寸法・形状

疲労試験前に与える加工の程度としては、切欠底断面面積に対し引張及び圧縮加工共に 36.0 kg/mm^2 及び 56.0 kg/mm^2 の各々2種類ずつとし

た。 36.0 kg/mm^2 の加工に対しては、切欠底断面面積変化率は測定誤差範囲内にあり、正確な値は得られなかつたが、 56.0 kg/mm^2 の加工に対しては引張加工で 2.0% (有効歪で 1.9%)、圧縮加工で 1.8% (有効歪で 1.7%) であつた。尚圧縮加工の場合は第2報⁽⁵⁾で用いた圧縮用装置を使用した。第1図の試験片は加工後、チャック部のみ直径 13.5 mm に切削し、尚加工を与えてから少くも1ヶ月以上常温で放置した後、疲労試験を行つた。

(ii) 予め曲げ加工の場合.

曲げ加工を与える時の試験片の寸法、形状を第2図の実線で示す。曲げ加工を与えてから、点線で示すような疲労試験片を製作した。



第2図 曲げ加工試験片の寸法・形状

予め与える曲げモーメントは4点荷重による純粹曲げであつて、 $M/M_0=2.39$ の1種とした。ここで M_0 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 31.0 kg/mm^2 になる時の曲げモーメントである。予め曲げ加工前に電解研磨し、1種類は曲げ加工後加工表面のまま疲労試験機に掛け、他は直径で $3/100 \sim 4/100 \text{ mm}$ 程度エメリー紙により研磨し、更に電解研磨して試験機に掛けた。尚曲げ加工1ヶ月後から疲労試験が行われた。

(iii) 予め振り加工の場合.

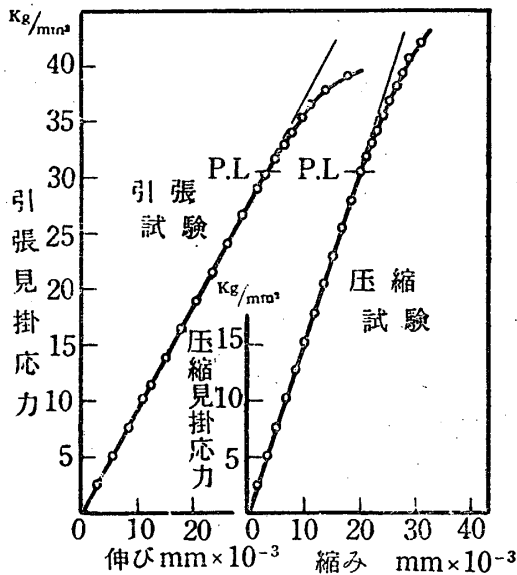
第7報に於けると同様に試験片表面は電解研磨した後、単位長さの振れ角で 0.006 rad/mm 、 0.020 rad/mm 及び 0.042 rad/mm の3種の加工を与えた。しかる後試験片のチャック部のみを疲労試験機のチャック部の直径 13.5 mm に切削し、加工を与えてから少くも1ヶ月以上常温で放置して疲労試験機に掛けた。

使用した疲労試験機は小野式回転曲げ試験機で

毎分 2,300~2,500 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

切欠溝を有する試験片を引張あるいは圧縮加工すれば、切欠底部に圧縮あるいは引張残留応力が生ずることはよく知られているが、その大きさは今のところ推定することが出来ない。56.0 kg/mm² の加工を与えると切欠底部の断面はすでに降伏し、加工硬化並びに残留応力を生じていると見られる。36.0 kg/mm² の加工を与えた場合は、前述せる如く切欠底断面積変化率は正確には求められなかつたが、第3図の引張、圧縮試験の応力-歪線図よりして、切欠底部は降伏点を越しており残留応力が存在している事が予想される。第3図は切欠底断面の見掛応力と伸びあるいは縮みとの関係を示したものであつて、引張試験には標点距離30 mm、圧縮試験には 20 mm のマルテンス歪計を取りつけて歪を測定した。いづれも2本づつ行つた平均値として、30.5 kg/mm² の比例限值が得られた。



第3図 切欠母材の引張、圧縮試験

予め曲げ加工による残留応力は第5報に於けると同様な計算により、第1表のようになった。また X 線による残留応力の測定も第5報と同様にして行い、曲げ加工3ヶ月後2本の試験片の4点から得られた結果を示すと第2表となる。得られた結果はばらついているが、ほぼ計算で得られた値に近い値が求められた。

第1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	2.39
曲率	ρ_s/ρ	23.2
最大曲げ応力	kg/mm ²	±54.1
	σ/σ_s	1.75
上下面の残留応力	kg/mm ²	±20.1
	σ_1/σ_s	0.65
上下面の残留歪	%	±3.10

第2表 X 線による残留応力の測定値 (kg/mm²)

	No. A12 試片	No. A11 試片
引張加工側	+16.6	-14.3
圧縮加工側	+25.2	+21.0

次に予め振り加工による残留応力値は第7報に於けると同様に計算され、第3表にその結果を示す。

第3表 予め振り加工の程度と加工後の残留応力

	0.006	0.020	0.042
予め与えた単位長さの振れ角 θ rad/mm			
剪断歪 γ	0.030	0.100	0.210
Octahedral Shear Strain γ_n	0.026	0.082	0.171
予め与えた振りモーメントによる剪断応力 kg/mm ²	21.5	33.5	39.3
振りモーメント除去により変化せる剪断応力 kg/mm ²	-25.2	-40.4	-48.9
試験片表面の残留剪断応力 kg/mm ²	3.7	6.9	9.6

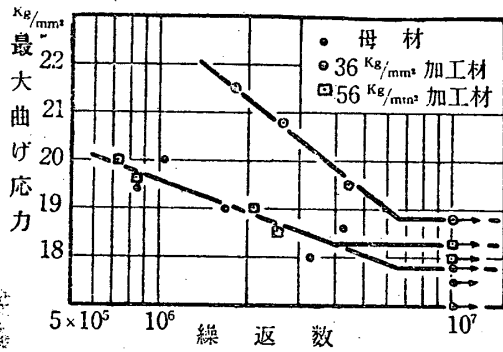
4. 疲労試験結果並びにその考察

予め引張並びに圧縮加工された半円切欠試験片の疲労試験結果を示すと第4表となる。表中に参考のために第8報で得られた加工硬化のみを生じ

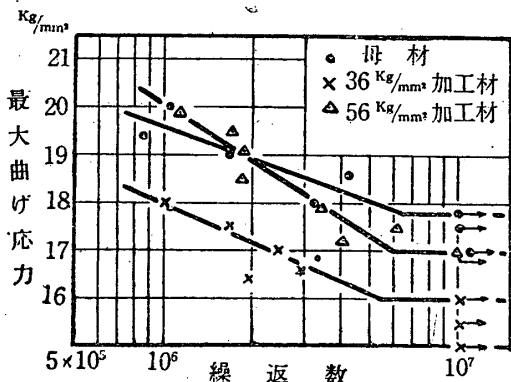
第4表 半円切欠試験片の疲労限

予め引張加工見掛応力 kg/mm ²	切欠試験片				平滑試験片 (第8報)		予め圧縮加工見掛応力 kg/mm ²	切欠試験片				平滑試験片 (第8報)	
	加工有効歪 %	疲労限 kg/mm ²	疲労限 %	疲労限 kg/mm ²	疲労限 %	加工有効歪 %		疲労限 kg/mm ²	疲労限 %	疲労限 kg/mm ²	疲労限 %		
母材		17.8	100	27.6	100	母材		17.8	100	27.6	100		
36.0	—	18.8	106	26.6	96	36.0	—	16.0	90	27.3	99		
56.0	1.9	18.3	103	27.0	98	56.0	1.7	17.0	96	28.0	101		

ている平滑試験片の結果を合せ示した。また疲労試験の繰返応力-繰返数関係を図示すると第4図となる。切欠試験片の焼鈍状態に於ける疲労限は、平滑試験片のそれと比較すると36%の低下となり、0.22%炭素鋼の時の34%(第4報)と同程度の低下を示した。第4表の結果を、縦軸に疲労限を、横軸に加工による有効歪を取つて図示すると第5図となる。

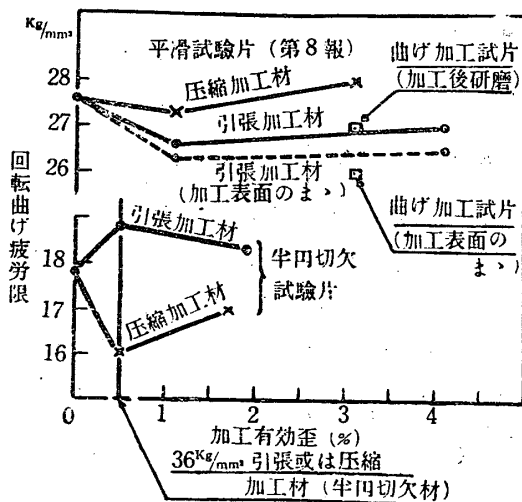


(a) 予め引張加工材



(b) 予め圧縮加工材

第4図 半円切欠試験片の繰返応力-繰返数関係



第5図 切欠試験片の疲労限と加工有効歪

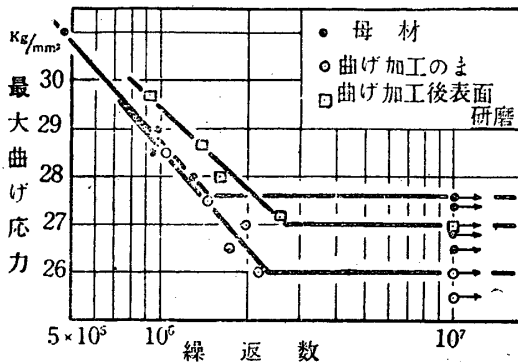
36.0 kg/mm² の引張加工を与えると疲労限は母材より6%の増加となり、圧縮加工を与えると

10%の低下となつている。これは明らかに切欠丸棒に引張加工を与えると、切欠底部に圧縮残留応力が生じて疲労限は上昇し、圧縮加工を与えると引張残留応力が生じて疲労限は低下するというThum⁽⁶⁾が述べた結果と一致する。0.22%炭素鋼では第4表でも述べたように、残留応力の影響は見られず、加工硬化の影響のみが強く見られたが、本材料のような高炭素鋼になつてくると切欠丸棒に対しては残留応力の影響が見られて来る。このような高炭素鋼になるほど切欠底部の残留応力が疲労強度に影響して来ること⁽⁷⁾に関して、西原博士は特に指摘されておられないけれども同氏外2氏⁽⁸⁾による1.5mm半円切欠丸棒試験片による実験結果がそれを示しているものと思われる。またRosenthalとSines⁽⁹⁾がアルミニウム合金を用いた実験で、焼鈍した軟い61S-0材では切欠底部の残留応力は繰返応力と共に消失して行き疲労強度に影響を及ぼさないが、熱処理した硬い61S-T材では残留応力は殆んど消失せず疲労強度に影響して来ることを報告している。

56.0 kg/mm² という大きな引張加工を与えると、疲労限は36.0 kg/mm² の僅かな加工を与えた場合よりかえつて減少し、56.0 kg/mm² の圧縮加工を与えると上昇して来るのは、大きな加工を与えると切欠底断面全体が降伏して、加工硬化の疲労強度に及ぼす影響が増大して来るためと考えられる。

次に曲げ加工材の疲労試験の結果得られた繰返応力-繰返数関係図を示すと第6図となる。加工後表面を研磨せるものの疲労限は27.0 kg/mm²、加工のままのものは26.0 kg/mm²と得られたから、母材の疲労限と比較すると前者は2%後者は8%それぞれ減少している。また疲労破断面を見るといずれの試験片もすべて引張加工側即ち圧縮残留応力の存在している側から疲労亀裂が発生している。この事は残留応力の疲労強度に及ぼす影響から考えるならば、引張残留応力の存在する側から疲労亀裂が発生すべきであつて、逆の結果を示している。このような事は第5報の0.22%並びに0.17%炭素鋼の時にも見られている。この理由としては、第5報でも述べたが、西原、平外2氏⁽¹⁰⁾がX線応力測定にて証明しているように、繰返応力を加えると共に残留応力は急激に消滅し

て行つて、加工硬化の影響が顕著に現われて来る。加工硬化から見ると、第8報で示したように、同程度の加工を与えた引張並びに圧縮加工材では引張加工材の方が疲労強度が弱く、このために曲げ加工材の引張加工側から疲労亀裂が発生するものと考えられる。尚曲げ加工材の疲労限の値を第5図に記入しておいたが、第8報で得られた引張加工材の疲労限值と似た値を示している。

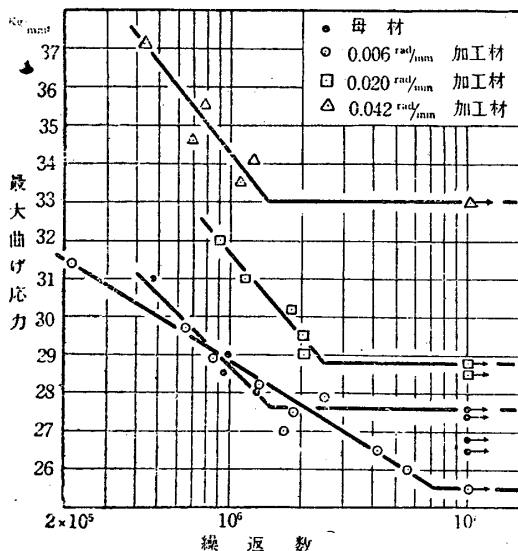


第6図 曲げ加工材の繰返応力—繰返数関係

次に振り加工材の疲労試験結果を示すと第5表となる。また繰返応力と繰返数の関係を示すと第7図となる。0.006 rad/mm という僅かな加工を

第5表 予め振り加工材の疲労限

予め与えた加工程度		疲 勞 限	
rad/mm	γ_n	kg/mm ²	%
0	0	27.6	100
0.006	0.026	25.5	92
0.020	0.082	28.8	104
0.042	0.171	33.0	120



第7図 予め振り加工材の繰返応力—繰返数関係

与えると、疲労限は母材のそれより8%減少し、それより大きな加工を与えるに従つて増大し、0.042 rad/mmの加工で20%増大している。このような結果は0.17%炭素鋼を用いた第7報の結果と一致し、第7報でも述べた如く残留応力の疲労強度に及ぼす影響より加工硬化の影響の方が顕著である。

以上の結果を総合すると、0.17%及び0.22%の如き低炭素鋼に於ては、切欠丸棒試験片、曲げ加工試験片及び振り加工試験片のいずれの場合も残留応力の疲労強度に及ぼす影響より加工硬化の影響の方が大である(第4,第5及び第7報)。0.53%炭素鋼になると予め曲げ加工試験片や振り加工試験片の如き平滑試験片では残留応力の影響は見られなかつたが、切欠試験片に於ては顕著にその影響を見出すことが出来た。これは繰返応力にとりなう残留応力の消滅のしかたに関係があるものと考えられる。前述の西原,平外2氏の平滑試験片の実験や, Rosenthal と Sines の切欠試験片の実験が示す如く,軟鋼材や軟い材料では平滑試験片は勿論のこと,切欠試験片に於ても残留応力は繰返応力と共に急激に減少する。これに反して高炭素鋼材の如き硬い材料の切欠部の残留応力は,その拘束力が大であるためなかなか消滅せず,そのために残留応力の影響があらわれて来るものと考えられる。要するに残留応力の疲労強度に及ぼす影響は材質と残留応力の拘束状態とに関係し,硬い材料ほど出やすい傾向がある。なほ平滑試験片では第8報の静的試験からも推察される如く,繰返応力にとりなう割合大きな応力一歪の履歴現象を起し,残留応力が急激に消滅するものと考えられる。

5. 結 論

0.53%炭素鋼を使用して,切欠半径1.0mmの半円環状切欠溝を有する試験片に各々2種類の引張並びに圧縮加工を与えた場合と,3種類の予め振り加工を与えた場合及び曲げ加工を与えた場合につき,回転曲げ疲労試験を行つて次のような結果を得た。

(1) 切欠試験片に36.0 kg/mm²の引張加工を与えた場合の疲労限は,母材のそれに比し6%増加し,同程度の圧縮加工を与えた場合は10%の

減少となつた。これは明らかに圧縮残留応力が存在すると疲労限は上昇し、引張残留応力が存在すると低下する結果と考えられ、残留応力の疲労強度に及ぼす影響を顕著に見出すことが出来た。

(2) 同じ試験片に 56.0 kg/mm^2 という大きな加工を与えると、残留応力より加工硬化の影響が顕著に見られた。

(3) 曲げ加工材の場合には残留応力の影響は見られず、疲労亀裂の発生位置は常に引張加工即ち圧縮残留応力の存在する側から発生していた。

(4) 振り加工を与えた場合は、剪断歪で 3% という僅かな加工を与えると疲労限は母材のそれより 8% 減少し、それより大きな加工を与えるに従つて増大し、21% の歪で 20% の疲労限上昇を見た。このような結果は加工硬化のみを与えた場合の傾向と同じで、残留応力の疲労強度に及ぼす影響は見られない。

(5) 以上の結果を総合して、残留応力の疲労

強度に及ぼす影響は、材質と残留応力の拘束状態とに関係し、硬い材料ほど出やすい傾向がある。

終りに臨み本実験は文部省科学研究費の補助を受けたのでここに謝意を表す。

文 献

- (1) 福井, 佐藤: 理工研報告, 6 (1952) 259.
- (2) 福井, 佐藤, 北川: 理工研報告, 6 (1952) 359.
- (3) 福井, 佐藤, 北川: 理工研報告, 7 (1953) 135.
- (4) 福井, 佐藤, 北川: 理工研報告, 7 (1953) 245.
- (5) 福井, 佐藤: 理工研報告, 4 (1950) 211.
- (6) A. Thum: Z. VDI., 75 (1931) 1328.
- (7) このような事を予想して, 機械学会誌, 56 (昭 28—2) 131, に述べておいた.
- (8) 西原外 2 氏: 機械学会誌, 36 (昭 8—10) 673.
- (9) Rosenthal & Sines: ASTM. 51 (1951) 593.
- (10) 西原, 平外 2 氏: 機械学会論文集, 14 (1948) I—107.