表面硬化材の疲労強度に及ぼす残留応力の影響*

大内田 久** 西岡 章夫*** 早山 徹****

The Effect of Residual Stress on the Fatigue Strength of Case Hardened Steel

by

Hisashi OHUCHIDA

(Fundamental Engg. Technology Center, Hitachi Ltd., Tokyo)

Akio NISHIOKA

(Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi)

and Toru HAYAMA

(Mechanical Engg. Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tokyo)

It is well-known that the enormous increase in fatigue strength of case hardened steel is due to the high compressive residual stress in the material and to the doubled hardness caused by heat treatment, and that the effect of the residual stress on the endurance limit can be accounted for by taking it as the mean stress.

In this paper the fatigue test results which were obtained of the carburized and induction hardened steel, have been re-examined from the viewpoint of crack propagation process. It appears that the fatigue strength of case hardened steel can be regarded as resistance against fatigue crack propagation in the specimen having minute flaw, because, in highly hardened material, the micro inclusions and metallurgical discontinuity can be taken as the origins of fatigue cracks.

(Received June 9, 1972)

1 緒 言

表面硬化材においては、表面層の圧縮残留応力ならびに材質改善により疲労強度が著しく向上することが知られている。これまでの結果よりみると、疲労強度に対する残留応力の影響は平均応力¹⁾として利くものとみなし、耐久限度線図上より求めうると考えられるが、現時点においては上述の両因子について別個に疲労強度への影響を調べたものはほとんどなく、また、残留応力は分布が複雑である上疲労試験中の挙動についても定説がないことなどのため、明解な結論を出す段階には至っていない。

これまで高周波焼入れ材においては、き裂疲労強度は大幅に増大するが、停留き裂の生じない疲労強度はほとんど上昇しないこと²⁾、表面硬化したような高硬度材においては微細な介在物や組織の不連続などの微視

的欠陥が疲労強度に影響することなどがわかっている。これらのことから、ここでは表面硬化材を一種の欠陥材とみなして、その疲労強度は微視的欠陥からのき裂の進展問題として取り扱うことを試みた。

高硬度材について疲労強度と平均応力の関係を調べたものは少なく、著者らが先に行なった表面高周波焼入れ材とその芯部を除去して残留応力を解放した試験片との疲労強度比較³⁾、浸炭焼入れ材での平均応力を変えた疲労試験結果等がある程度である。これらの結果からいえることは、この種の高硬度材においては、平均応力あるいは残留応力が疲労強度に及ぼす影響は顕著であり、耐久限度線図上に示した場合のこう配が45°に近くなることである。これらの結果と Fuchs が示した破断よりみた疲労強度 σ_{w2} と平均応力との関係が類似していること⁴⁾、この程度の高降伏点の材料になると疲労限度に影響する最小欠陥寸法は10 μ 程度と非常に小さくなると考えられることから、以下ではき裂進展に主眼をおき検討を加えることとした。

2 浸炭焼入れ層の疲労強度に及ぼす平均応力の

* 原稿受理 昭和47年6月9日

** 日立製作所エンジニアリング推進センタ

東京都千代田区大手町

*** 正 会 員 日立製作所日立研究所 日立市幸町

**** 正 会 員 日立製作所機械研究所 東京都足立区

影響⁷⁾⁸⁾

浸炭焼入れは一般に表面強化を目的として用いられているが、ここでは小形試料により全体浸炭を行ない、残留応力がほぼ零の状態での疲労試験を実施し、負荷応力を変えて平均応力の影響を調べた結果を述べる。

2・1 引圧荷重の場合

供試材は JIS 規定のはだ焼鋼 SNC21 (引張強度: 93.9 kg/mm², 0.2%耐力: 69.9 kg/mm², 伸び: 21.8%) であり、試験片形状を Fig. 1 に示す。Fig. 1(a) の直径 5 mm の切欠き試験片 (応力集中係数: 1.6) はパイプロフォ万能疲労試験機 (9600 c/min) を用い軸荷重にて平均応力を変えて実験された。この試験片は浸炭焼入れ後 180~200℃にて焼もどしを行ない、切欠き底をエメリ紙にて 1 S 程度に仕上げ後疲労試験に供した。断面のかたさ分布は H_V 720~780 であり、芯部まではほぼ一様に硬化されており、また、試験片の平行部にて測定された長手方向残留応力 (平行ビーム型 X 線応力測定装置により測定) は 2 kg/mm² 以下であった。

疲労試験結果を耐久限度線図にて示すと、Fig. 2 のようになる。同図より平均応力が引張りの場合には疲

勞強度が著しく低下し、逆に圧縮の場合には大幅に疲労強度は増大することがわかる。

2・2 平面曲げ荷重の場合

SNC21 鋼 (引張強度: 86.4 kg/mm², 0.2%耐力: 65.0 kg/mm², 伸び: 20.3%) を用い Fig. 1 (b) の切欠き試験片 (応力集中係数: 約 1.5) について浸炭焼入れ後 200℃にて焼もどしを行ない、平面曲げ疲労試験 (3000 c/min) を行なった結果が Fig. 2 の一点鎖線のごとく得られた。本試験片の場合には切欠き底付近のかたさは H_V 830 程度、中心部かたさ H_V 420 程度で、その間にはほぼ直線的なかたさ分布になっていたため、残留応力の存在が考えられたが、Fig. 2 では負荷した平均応力でプロットしてある。以上の結果から、引圧、曲げ両者とも片振引張りより左側では耐久限度線図の傾斜はほぼ 45° になっている。片振圧縮試験の場合に切欠き底を 70 倍の拡大鏡にて試験中に観察したところ、疲労限度以上の試験片では比較的初期にコアの発生がみられ、微細な疲労き裂が認められた。すなわち、圧縮応力のみの場合には繰返しひずみにより発生した微小き裂は、停留き裂になる場合があることが確認された。なお、圧縮応力ではき裂が進展しないために疲労強度が増大すること以外に、き裂の発生抵抗の増加、すなわち Table I に示すごとく、浸炭層では引張強度よりも圧縮強度が約 2 倍になることも圧縮平均応力下での強度上昇に利いているものと考えられる。

Table I. Ultimate strength of carburized layer (kg/mm²).

Material	Tension	Compression
SNC 21	159.7	359.3

以上の切欠き試験片では、切欠き底の残留応力を実測していないが、次に残留応力の測定が容易な平滑試験片の結果を述べる。材料は同様に SNC21 鋼 (引張強度: 85.0 kg/mm², 0.2%耐力: 63.5 kg/mm², 伸び: 21.4%) であり、板幅 14 mm, 板厚 3.5 mm の全体浸炭試験片により平面曲げ疲労試験を行なった。X 線にて試験片表面の残留応力を測定した結果、少々のはらつきはみられたがほぼ零と考えてよい値であった。疲労試験結果は Fig. 2 の二点鎖線のごとく求まり、こう配はややゆるやかにはなっているが一般のやわらかい材料に比較すると平均応力の影響が大となっている。平滑材と切欠き材でこう配に差が生じたのは、平滑材では浸炭焼入れ後の焼もどし温度が 270℃ と高いため表面かたさが H_V 600 と切欠き材に比し低下したことによるものと考えられる。

3 表面硬化材の疲労強度に及ぼす残留応力の影響

Fig. 1. Details of carburized specimens.

Fig. 2. Endurance limit diagrams for carburized steels (SNC21).

3・1 高周波焼入れの場合³⁾

供試試験片の形状は Fig. 3 に示すもので、材料は S45C を用いた。切欠き底半径 $\rho=4$ mm を選んだのは切欠き底の残留応力測定を比較的容易にするためである。この場合の応力集中係数は $\alpha=1.67$ である。試験片は表面高周波焼入れを行なった後 180℃ にて焼もどした。その場合の切欠き底断面のかたさ分布は Fig. 4 のごとくである。Fig. 4 の試験片とは別に残留応力を解放するために試験片中心に 10 mm ϕ の穴をあけた肉厚 3 mm の中空試験片を用い、中実試験片との比較実験により残留応力の影響を調べた。疲労試験には 20 ϕ 電気油圧式疲労試験機を用い、軸荷重にて平均応力を変えて試験した。

Fig. 3. Details of induction hardened specimen.

Fig. 4. Hardness distribution for induction hardened specimen.

疲労試験結果を Fig. 5 に示す。中空、中実試験片いずれも負荷応力による平均応力にてプロットしたものである。しかし、試験前に写真式 X 線法とひずみゲージにて測定した残留応力は中実試験片が -83 kg/mm 2 、中空試験片は -2 kg/mm 2 であり、この残留応力の差から考えると疲労強度の差は少ないので、疲労限度を決定した中実試験片の試験後の残留応力を再度測定

Fig. 5. Endurance limit diagrams for induction hardened specimens (S45C, direct loading).

した。その結果、両振りの場合の残留応力は -45 kg/mm 2 と得られ Fig. 5 の $\bigcirc$ -印の位置にプロットされることになり、疲労強度に及ぼす残留応力の影響は平均応力の影響と等価として考えることができよう。なお応力繰返しによる残留応力の減衰については後述する。

3・2 浸炭焼入れの場合⁴⁾

供試材は SNC21 鋼 (引張強度: 90.9 kg/mm 2 , 0.2%耐力: 61.4 kg/mm 2 , 伸び: 27.4%) であり、Fig. 6 に示す疲労試験片を用いた。浸炭焼入れ後 200℃ にて焼もどしを行ない、切欠き底を約 0.1 mm 研摩後試験に供した。試験片のかたさ分布は Fig. 7 に示すごとくで、表面層では硬化しているが芯部は素材かたさとなっている。

Fig. 6. Details of carburized specimen ($\alpha=1.6$).

Fig. 7. Hardness distribution for carburized specimen.

疲労試験は両振り、片振り、部分片振りの平面曲げにて実施し、得られた結果を Fig. 8 の実線にて示す。耐久限度線図のこう配は Fig. 2, 5 と同様な傾向を示している。本試験片では表面焼入れであるため残留応力の存在が考えられたので、試験片の平行部について平行ビーム型 X 線応力測定装置により表面残留応力を測定した結果 $-20 \sim -25$ kg/mm 2 の値であった。しかし試験前の初期残留応力は疲労試験中に減衰することが考えられるので、試験片の切欠き底に 3 mm のひずみゲージを貼付し、応力繰返し過程の変化を調べた。この結果応力段階が高く比較的早期に破壊した試験片では、繰返し初期において測定ひずみの零点移動がみ

Fig. 8. Endurance limit diagrams for carburized specimens (SNC 21, plane bending).

られ、残留応力が変化することがわかったが、疲労限度付近の試験片においてはひずみゲージの零点移動は $20 \sim 30 \times 10^{-6}$ 程度であった。このことから疲労限度を決定した試験片の平行部にて測定された圧縮残留応力は、疲労試験中にも変化せずにそのまま疲労強度に平均応力として利くとみなして、耐久限度線図を修正したのが Fig. 8 の破線である。Fig. 5 においては疲労試験中に残留応力が減衰し、Fig. 8 では変化しなかった原因は明らかでないが、表面残留応力の最大値ならびに深さ方向分布等が影響していること、引圧では内部の応力もかなり高いので塑性変形が生じるために減衰したとも考えられ、この点については今後の検討に待たねばならない。

以上浸炭ならびに高周波焼入れ試験片の結果よりみて、片振引張りよりも左側においては耐久線図のこう配は 45° に近くなることが明らかであり、この点について以下にき裂の進展に着目して検討を加えることにする。

4 疲労き裂進展挙動との比較検討

高硬度材においては疲労強度に対する平均応力（残留応力）依存性が高くなることは以上に述べてきたが、

Fig. 9. Relationship between the sensitivity to mean stress and hardness (plane bending).

著者の一人が行なった他の実験も含めて Fig. 9 に平均応力依存性とかたさとの関係を示す。同図において縦軸は平均応力依存性を片振引張疲労限度と両振り疲労限度との比にて示したもので、この比が 1.0 であれば疲労強度は平均応力によらず応力振幅のみによって決まることを意味し、0.5 であれば最大引張応力により疲労強度は左右されることを意味する。同図より、かたさが高くなるほど疲労強度の平均応力依存性は増大することがうかがわれる。この原因としては鋼材中に含まれている材質欠陥的なものが疲労強度に影響する度合いが異なることが考えられる。このことは以下のことから裏付けられよう。Fig. 10⁶⁾ はき裂あるいは切欠き材の疲労き裂発生限度から、き裂先端あるいは切欠き底において繰り返される塑性域 R_{pw} を求め、この R_{pw} と材料の降伏点との関係を示したものである。この R_{pw} の値はき裂状欠陥を付けた試験片の疲労限度でのき裂先端の塑性域とほぼ等しいことも確認されている。したがって、 R_{pw} 以下の欠陥は疲労限度に影響を及ぼさないとみなすと、疲労限度に影響する欠陥寸法は材料の降伏点に依存し、高硬度材になると微小欠陥でも疲労強度を低下させることが考えられる。以上のことからたとえば、SNC 21 鋼浸炭層の引張強度は Table I に示すごとく 159.7 kg/mm^2 であり、降伏点も同程度であったことから $5 \sim 10 \mu$ 以上の欠陥からの疲労き裂の進展問題として浸炭材の疲労強度を取り扱うことができよう。

Fig. 10. Relationship between material constant and yield strength.

Frost¹⁰⁾ は板幅 63.5 mm の平板の両端に 5.08 mm の鋭い切欠きをつけた 0.22% C 鋼の試験片により、部分両振り疲労試験を行ない Fig. 11 に示す結果を得ている。同図から下限応力が負の場合には、疲労限度は下限応力には無関係であり上限応力によって決定されることがわかる。すなわち耐久限度線図にて示すと 45° のこう配をとることになる。

Fig. 11. Effect of compressive lower stress on the fatigue strength.

また、疲労き裂の進展挙動に及ぼす平均応力の影響を調べたところ同様な傾向が得られている¹¹⁾。試験片は中央に鋭い切欠きを付けた幅 200 mm、板厚 5 mm の平板であり、材料は 80 kg/mm² 高張力鋼である。実験は平均応力を種々変えて実断面応力一定の条件にて行なった。得られた結果は Fig. 12 に示すごとくであり、下限応力が正の場合には応力全振幅に、負の場合には上限応力によってき裂進展速度はきまることがわかる。このような挙動を示す原因としては、下限応力が正の場合には、ほぼ下限応力にてき裂開口量は零となり、下限応力が負の場合は、応力零にてき裂開口量はほぼ零となり、それ以下の圧縮応力では開口量に変化がほとんどみられないことが観察されており、き裂進展はき裂開口量の振幅に依存するためと考えられる。

Fig. 12. Effect of lower stress on the fatigue crack growth rate (a_e : effective crack length).

5 応力繰返しによる残留応力の変化⁸⁾

一般に熱処理により生じた残留応力は繰返し荷重下においても変化しにくいといわれており、高硬度材では疲労限度付近の応力繰返しによる残留応力の変化はほとんどないというデータが多い。Fig. 13 は急速加熱焼入れと類似の熱サイクルにてソルトバス加熱焼入

Fig. 13. Change of residual stress due to stress cycles.

れた後 180℃にて焼もどしを行なった平板試験片（板幅：14 mm、板厚：3.5 mm）に疲労限度の応力を負荷した場合の残留応力変化であり、多少の変化がみられる程度である。なお引張残留応力が生じているのは全面硬化していることと油焼入れであるために熱応力型残留応力分布が現われにくく、逆に変態の時間差による残留応力分布が現われやすいことによるものと考えられる。Fig. 14 はFig. 2 の二点鎖線にて示した浸炭焼入れ平滑試験片の両振り試験結果である。横軸と平行な線が機械的に与えた平均応力の値を示しており、それからの偏差が各繰返し数における残留応力の変化である。

Fig. 14. Change of residual stress due to stress cycles.

これらの結果ならびに 3・2 にて述べたことからみて、浸炭層の残留応力の変化量はわずかであり、実用上は初期残留応力にて強度推定をして差し支えないように思われる。ただ、部材表面層のかたさ分布、外力の種類などにより変化することも考えられる。

6 結 言

表面硬化材の疲労強度に及ぼす残留応力の影響について、これまでに行なった実験結果をもとに考察を加えたが、それらの結果を要約すると次のごとくである。

(1) 表面硬化材における疲労強度に及ぼす残留応力の影響は平均応力の影響と等価であり、やわらかい一般構造用鋼の場合とは異なり、圧縮残留応力による強度増大、引張残留応力による強度低下は顕著となり、この傾向はかたさが増大するほど大となる。

(2) 表面かたさが H_v 700~800 程度となると、疲労強度を低下せしめる欠陥寸法が著しく小 (5~10 μ 程度) となるため、疲労強度と残留応力の関係をうん

ぬんする場合に介在物等の微小欠陥からの疲労き裂の進展問題として取扱い説明することができよう。

(3) 熱処理により表面硬化した部材では、疲労限度近辺における残留応力の減衰はないものとして、初期残留応力が疲労強度にそのまま利くとして強度推定を行なうことができよう。

(4) しかし、表面硬化の条件によっては表面の圧縮残留応力が繰返し荷重により変化することも考えられるので、実用上の最適焼入れ条件のは握も加味して今後データを蓄積する必要がある。

(昭和46年11月24日 「疲れにおける最近の諸問題」シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば、大内田久, 西岡章夫, 岩崎 勤, 材料 **12**, 451 (1963).
- 2) 中村 宏, 鉄道技研研究報告, **82**, 38 (1959).
- 3) 早山 徹, 日本機械学会講演論文集, 720-1, 73 (1972).
- 4) 大内田久, 西岡章夫, 北村一郎, 日本機械学会論文集, **36**, 898 (1970).
- 5) Fuchs, H. O., Trans. ASME. J. Basic Engg., June (1965).
- 6) 大内田久, 西岡章夫, 宇佐美三郎, 日本機械学会講演論文集, 710-9, 37 (1970).
- 7) 大内田久, 西岡章夫, 北村一郎, 日本機械学会講演論文集, 700-3, 25 (1970).
- 8) 早山 徹, 吉武博之, 日本機械学会論文集, **37**, 296, 650 (1971).
- 9) Hayama, T., and H. Yoshitake, Proc. of Int. Conf. on Mech. Behavior of Metals, KYOTO **1**, 281 (1971).
- 10) Frost, N. E., and D. S. Dugdal, J. Mech. Phys. Solids, **5**, 182 (1957).
- 11) 大内田久, 西岡章夫, 宇佐美三郎, 日本機械学会講演論文集, 700-2, 159 (1970).