論文 ORIGINAL PAPERS

炭素鋼 S45C の中高温度域における 高サイクル疲労特性の速度効果†

金 澤 健 二* 木 村 恵**
佐 藤 守 夫** 西 島 敏*

Frequency Effect on High Cycle Fatigue Properties of a Carbon Steel S45C at Intermediate Temperatures

by

Kenji KANAZAWA*, Megumi KIMURA**,
Morio SATO** and Satoshi NISHIJIMA*

In order to clarify the frequency effect on high cycle fatigue properties at intermediate temperatures, rotating bending fatigue tests were carried out on a carbon steel S45C at 200, 300, 400 and 500°C with frequencies of 10 and 1 Hz.

The conclusions obtained were as follows:

- (1) The fatigue strength at 300°C was larger than that at 200°C, and a negative frequency effect on fatigue strength was observed at this temperature range. At above 400°C, the fatigue strength decreased with increasing test temperature and a positive frequency effect was observed.
- (2) The frequency dependence of fatigue strength corresponded with that of deformation stress. The negative frequency dependence of fatigue strength observed at 300°C was considered as the result of decreasing cyclic plastic strain at the surface of specimen with decreasing frequency by hardening on account of dynamic strain aging.
- (3) The positive frequency dependence of fatigue strength observed at 500°C was considered as the result of increasing cyclic plastic strain at the surface of specimen with decreasing frequency by creep deformation and by softening on account of tempering effect.

Key words : High cycle fatigue, Frequency effect, Carbon steel, Dynamic strain aging, Temper softening

1 緒 言

炭素鋼や低合金鋼のなかには、高温機器を構成する材料として中高温度域にさらされるものもある。そのような環境における材料の疲労特性を明らかにしておくことは、機器の信頼性を高める上で重要である。中高温度域の定義を、常温よりも高いクリープ変形が生じにくい温度域とすると、炭素鋼などでは青熱ぜい性により引張強度が増大するというような、ひずみ時効に関連する変形の時間依存現象が現れる。疲労特性もひずみ時効に影響を受け、疲労強度は増大と言われている^{1)~4)}。

炭素鋼や低合金鋼の中高温度域における疲労特性の温度効果や速度効果については古くから調べられているが、系統的になされた試験による知見の蓄積は少ない。

金材技研においてはこれまでに種々の国産実用金属材料について疲労特性を系統的に明らかにし、その結果を「金材技研疲れデータシート」として公表してきた⁷⁾。その一貫として中高温度域における疲労特性も明らかにしようとしている。本実験は計画を策定するために予備的に行ったものであるが、高サイクル疲労特性の温度、速度効果について、新たな知見が得られたので報告する。

2 実験方法

Table I へ供試材の化学成分、熱処理条件を示す。

Table I. Chemical composition and heat treatments.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.46	0.20	0.80	0.020	0.020	0.10	0.03	0.02

845°C/30 min, air cooled

845°C/30 min, water quenched

600°C/60 min, water cooled

† 原稿受理 昭和62年6月10日 Received June 10, 1987

* 正会員 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒, National Research Institute for Metals, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

** 金属材料技術研究所 東京都目黒区中目黒, National Research Institute for Metals, Nakameguro, Meguro-ku, Tokyo

供試材は機械構造用炭素鋼 S45C で、焼入れ、焼もどし処理の後試験に供した。疲労試験は $100\text{N} \cdot \text{m}$ の 4 点曲げ回転曲げ試験機により行った。試験片は Fig. 1 に示す JIS1-8 号平滑材で、平行部の最終仕上げは 600 番紙やすりで軸方向研磨によった。試験温度は予備試験のため多少高温側を含めた 200, 300, 400, 500°C とし繰返し速度は 1, 10Hz とした。なお、本供試材の室温を含めた各温度における 125Hz のもとでの疲労特性については、すでに金材技研疲れデータシートとして公表されている⁸⁾。

Fig. 1. Profile of specimen (in mm).

3 結果および考察

3・1 S-N 曲線および疲労強度の温度、速度依存性

Fig. 2 に各温度、各周波数における S-N 曲線を示す。実線は 125Hz における S-N 曲線である³⁾。点線は 1, 10Hz のデータ点に対して目視で引いた S-N 曲線である。125Hz のもとでは、 200°C に比べ 300°C の方が S-N 曲線は高応力側に位置し、 300°C 以上では高温になる程 S-N 曲線は低応力側に位置する。速

Fig. 2. S-N diagrams of S45C steel.

度効果についてみると、200, 300°C では速度が遅くなると疲労強度は高くなる。一方 500°C では速度が遅くなると疲労強度は低下し、特に高寿命でその傾向は顕著である。 400°C では 300°C と 500°C の結果の中間的な挙動を示し、低寿命域では 300°C の結果と、高寿命側では 500°C の結果と同じ速度依存性を示している。

Fig. 3 は繰返し数 10^7 回における疲労強度の温度依存性を試験周波数をパラメータとして示したものである。 200°C から 300°C にかけて疲労強度は急激に高くなり、この温度域では速度が遅くなるにつれて疲労強度は高くなっている。一方、 300°C 付近を境として温度が高くなると疲労強度は大きく低下する傾向にある。この温度域では周波数が小さくなると疲労強度は低下する。すなわち、温度の上昇に伴い疲労強度が大きくなるような中高温度域においては疲労強度に負の速度依存性が、また、温度の上昇にともない疲労強度が急激に低下する温度域では正の速度依存性が認められる。いずれの温度域においても、温度を高くすると周波数を低下させることとは疲労強度に対して同等の効果をもたらすものとみることができる。このことは、ある周波数のもとでの疲労強度の温度依存性を詳細に調べておけば、各温度における疲労強度の速度依存性がある程度は推定できることを示唆している。

Fig. 3. Temperature dependence of fatigue strength at 10^7 cycles.

3・2 繰返し曲げ応力下の変形挙動

一般に回転曲げ疲労試験の結果は曲げモーメントと断面係数から得られる表面の公称応力でまとめられている。しかし、表面に塑性変形が生じているのか、また、温度や周波数などの条件によって塑性変形の生じ方が異なるのかどうかなど不明である。塑性変形の生じ方を知ることは疲労強度の温度、周波数依存性を理解する上で重要である。

応力制御下の疲労寿命の周波数依存性を、発生する塑性ひずみの量によって説明する試みは Forrest に

よってなされている²⁾。そこでは、0.17% 炭素鋼の 450°C で認められる応力で表示した場合の疲労寿命の正の周波数依存性が、周波数が小さくなる程発生する塑性ひずみが大きくなるため、塑性ひずみ範囲で表示すると周波数によらず 1 本の直線で表されることが示されている。しかし疲労強度が極大を示す 350°C から 400°C の温度域においては繰返し応力下での塑性ひずみの生じ方の周波数依存性は調べられていない。

低炭素鋼の低サイクル疲労域における繰返し変形特性については、そのひずみ速度依存性などが詳細に調べられており、205°C、370°C では同一ひずみ範囲に対する変形応力は低ひずみ速度条件程大きくなり 540°C では逆に小さくすると報告されている⁹⁾。

このような結果から、本実験のような回転曲げ疲労試験においても、試験片表面に発生する塑性ひずみの周波数依存性は、300°C では周波数が小さくなると塑性ひずみは小さくなり、500°C で逆に大きくなること が類推される。

中高温度条件下での回転曲げ疲労試験中に試験片表面のひずみを直接測定することは困難である。しかし回転曲げ疲労試験機の荷重点のたわみを測定することによって、試験片表面における公称応力に対する塑性ひずみを推定することができる。比較的短時間の間に試験片を回転させながら荷重を段階的に増加させ、その間のたわみを測定することによって公称応力と塑性ひずみの関係を調べた。塑性ひずみの求め方は付録に示す。

Fig. 4 に各温度における各々の周波数に対する公称

Fig. 4. Relation between stress amplitude and plastic strain amplitude at specimen surfaces.

応力と塑性ひずみの関係を示す。300°C と 500°C では周波数依存性が明りょうであった。すなわち、300°C では周波数が低下すると同一応力に対する塑性ひずみは小さくなり、一方、500°C では逆に大きくなる傾向がある。言い換えると 300°C では繰返し変形応力に負の速度依存性が、500°C では正の速度依存性が認められた。また図には示さなかったが、400°C では 300°C と 500°C の中間的な挙動を示し、同一応力に対する塑性ひずみは 10Hz の場合に最も小さくなった。

Fig. 2 や Fig. 3 に示す疲労寿命、疲労強度に周波数効果が表れる原因の一つとして、試験片表面における塑性ひずみの大きさが周波数によって異なることが考えられる。周波数に依存して塑性ひずみが大きくなると寿命は低下する傾向にある。変形応力の速度依存性が負の場合には疲労強度に負の速度依存性が認められ、また逆に、変形応力の速度依存性が正の場合には正の疲労強度の速度依存性が認められる。

動的ひずみ時効の効果が最大となる温度はひずみ速度条件に依存し、ひずみ速度が大きいと高温側へ移行すると言われている¹⁰⁾。本実験における周波数の範囲では、300°C において低周波数ほど塑性変形量は小さくなり、400°C では 10Hz の場合に塑性変形量は最も小さくなった。このような変形挙動は動的ひずみ時効の効果によるものと思われる。動的ひずみ時効は転位と炭素や窒素の溶質原子との相互作用によって生ずる¹⁰⁾が、本供試材のような実用炭素鋼について動的ひずみ時効の定量的な取扱は困難なので定性的な説明の範囲にとどめることにする。

一方、500°C における繰返し変形応力の正の速度依存性は、本供試材にとって 500°C はクリープ温度域であるので、時間に依存するクリープ変形が生じることによるもの、あるいは高温にさらされることにより、焼もどしの効果が生じ、軟化することが原因と考えられる。なお、500°C では速度が遅くなることによる疲労寿命の低下は高寿命域で顕著に現れた。これは高寿命域の低速度条件の試験ほど、長時間高温にさらされ、焼もどし効果が顕著に生じたことによるものと考えられる。

3・3 疲労試験および静的時効による硬さの変化

疲労強度に及ぼす周波数効果の原因としては、温度によって異なるが、試験中の動的ひずみ時効による硬化および焼もどし効果による軟化を指摘した。そこでこれらの点について確認するために、疲労試験後の試験片の硬さについて調べた。硬さは試験片平行部表面において、酸化皮膜を除去してからビッカース硬度計によって測定した。

Fig. 5 は各温度、周波数で試験した後の試験片表面硬さを破断までの試験時間に対して示したものである。

Fig. 5. Hardness at surface of fatigued specimens.

試験前の硬さは H_v240 弱で、点線で示されている。200, 300°C における試験では、硬さは試験前に比べ大きくなっているが、ばらついていて試験時間に対する変化傾向は明らかでない。一方、400, 500°C における試験では、試験前に比べ硬さは試験時間とともに低下する傾向にある。

また、高温における繰返し応力の下での軟化現象を単に静的に高温にさらした下での軟化現象と分けて考えるために静的な高温時効の試験を行った。時効温度は現象を加速させるために、500, 550, 600°C とした。時間と硬さの関係をプロットしたのが Fig. 6 である。図中の曲線は Fig. 7 に示す焼もどしパラメータによる整理結果から逆に各温度の曲線を求めたものである。時効時間が長くなるにつれ硬さはそれぞれ低下している。

Fig. 6. Change in hardness with increasing exposure time at high temperatures.

Fig. 7 は焼もどしパラメータ M で時効試験の結果をまとめたものであり、パラメータ M は

$$M = (273 + T)(C + \log(t + t'))$$

であらわされた。ここで T は時効温度 (°C), t は時効時間 (h) である。また t' はすでに供試材が受けている 600°C, 1 時間の焼もどしに相当する処理を、各

Fig. 7. Relation between hardness of aged specimen and temper parameter M .

時効温度で行った場合に必要とする時間に換算したものである。定数 C は炭素量に依存するとされているが、ここでは 14 とすることにより、各温度におけるデータをほぼ一本の曲線で表すことができる。なお、黒印のデータは焼入れ後それぞれの温度で 1 時間焼もどし処理を施した材料のかたさで、これらのデータも同一曲線で表すことができる。

Fig. 8 は Fig. 5 に示すそれぞれの温度と周波数で疲労試験した後の硬さをパラメータ M で整理した結果である。そこでは t として試験時間をとっている。400°C までの試験ではパラメータ M の値は疲労試験前の値とほとんど変わらない。そして 200, 300°C における試験では硬さは大きくなるが、400°C においては逆に小さくなる。一方、500°C における試験では、試験時間とともにパラメータ M の値は大きくなり、硬さは試験前に比べ小さくなる。しかも同じ M の値に

Fig. 8. Relation between hardness at surface of fatigued specimen and temper parameter M .

対し、静的に高温にさらした場合よりも、硬さは低下していた。これは繰返し応力による軟化現象が重畳され、軟化が加速したことによるものと思われる。

以上、試験後の硬さの測定結果からも、疲労強度に負の周波数効果の現れる 200, 300°C の温度域では材料は硬化し、正の周波数効果の現れる 500°C では軟化することが明らかとなった。

3・4 破壊様式

疲労強度の周波数効果が互いに反対に現れた 300°C と 500°C における破壊様式を走査電顕で調べた。いずれも試験片表面、破面はかなり酸化皮膜でおおわれていたため、皮膜を除去してから観察した。いずれの破面にもストライエーションや粒界ファセットは認められず、温度、周波数による明りょうな相違はなかった。一方、500°C で試験した試験片表面には、周波数によらず Fig. 9 に示すような微小なき裂が観察されたが、300°C で試験した試験片表面にはそのようなき裂は認められなかった。

Fig. 9. SEM photograph of surface of a fatigued specimen.

500°C における低速度条件下ではクリープ変形が生じることにより粒界破壊などのクリープ破壊の特徴が生じるものと思われたが、破壊形態には周波数による相違は認められなかった。したがって 500°C における疲労強度の周波数効果は、低速度条件下でクリープ変形により塑性変形がしやすくなること、また焼もどし効果により軟化し塑性変形がしやすくなることによって生じたものと考えられる。

一方、300°C における周波数効果は、動的ひずみ時効により低周波条件下ほど繰返し硬化し、塑性変形がしにくくなることにより生じたものと考えられる。

4 結 言

機械構造用炭素鋼 S45C を供試材とし、中高温度域を中心に、10, 1Hz の速度で回転曲げ試験を行い、疲労強度の温度、速度効果について調べ、以下のことが明らかとなった。

(1) 200°C から 300°C にかけて疲労強度は急激に大きくなり、負の速度依存性が、また 400°C 以上では疲労強度は大きく低下し、正の速度依存性が認められた。

(2) 疲労強度の速度依存性は変形応力の速度依存性と対応した。300°C で認められる疲労強度の負の速度依存性は、低速度ほど試験中に動的ひずみ時効により硬化し、試験片表面に塑性変形が起こりにくくなることによるものと考えられた。

(3) 500°C における疲労強度の正の速度依存性は、低速度ほどクリープ変形により試験片表面に塑性変形が生じやすくなること、長時間高温にさらされることにより焼もどし効果により軟化することによるものと考えられた。

付録 試験片表面における塑性ひずみの求め方

Fig. 1A, 2A はそれぞれ使用した回転曲げ疲労試験機の基本図と試験片つかみ部の構造を示す。支点から L 離れた点に荷重 P を負荷したときの荷重点のたわみを δ とする。Fig. 3A の左側は 300°C における場合を例とし、各周波数のもとで、試験片を回転させながら荷重点を段階的に増加させて得られた荷重、たわみ曲線である。荷重点のたわみ δ は、試験片平行部の変形によって生ずることはもとより、試験片つかみ部

Fig. 1A. Deflection at loading point for 4 point -rotating bending fatigue testing machine.

Fig. 2A. Specimen grip assembly.

Fig. 3A. Relation between load and deflection at the loading point.

や回転機構全体の変形によって生ずるものである。しかし P - δ 関係で高荷重側で直線関係からずれ、非弾性的なたわみ δ_p が生じるのは、試験片平行部に塑性変形が生じたことによるものと考えられる。 P - δ_p の関係を Fig. 3A の右側に示す。試験片表面におけるひずみ ε によって荷重点のたわみ δ_e がどの程度増加するかは、試験片平行部長さ $2l$ 、同直径 d や支点と荷重点との間隔 L などに依存し、近似的に

$$\delta_e = (2lL/d)\varepsilon$$

で表される。¹³⁾ 荷重 P から公称応力 σ_a を、また荷重点の非弾性的なたわみ δ_p から試験片表面の塑性ひずみ ε_{pa} を求め、Fig. 3A の P - δ_p 関係を δ_a - ε_{pa} 関係で表したのが Fig. 4 である。

(昭和61年12月9日 第24回高温強度シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 西原利夫, 平 修二, 田中吉之助, 小寺沢良一, 東 良学, 日本機械学会論文集, **24**, 446(1958).
- 2) P. G. Forrest, J. Iron and Steel Inst., **200**, 452 (1962).
- 3) 金澤健二, 山口弘二, 佐藤守夫, 鈴木直之, 金尾正雄, 材料, **30**, 454(1981).
- 4) 加藤谷三, 広瀬素尚, 長谷川典彦, 片山 勲, 材料, **33**, 1264(1984).
- 5) 河本 実, 石田武徳, 覚前英夫, 材料試験, **5**, 161 (1956).
- 6) 河本 実, 田中道七, 田淵修造, 材料試験, **9**, 742 (1960).
- 7) 金属材料技術研究所, “金材技研疲れデータシート”, No. 0(1978).
- 8) 金属材料技術研究所, “金材技研疲れデータシート”, No. 14(1979).
- 9) H. Abdel-Raouf, A. Plumtree and T. H. Topper, ASTM STP 519, 28 (1973).
- 10) J. C. Levy and G. W. Sinclair, Proc. ASTM, **55**, 866 (1955).
- 11) 日本鉄鋼協会, “鉄鋼便覧Ⅳ (第3版)”, p. 123(1981).
- 12) 金属材料技術研究所, “金材技研疲れデータシート”, No. 3(1978).
- 13) 金澤健二, 山口弘二, 吉田 進, 金材技研研究報告, **18**, 24(1975).