ではVみぞ -10 より F_B/F の値が大きくなるから、当然、この値は小さくなるはずである。以上のことを合わせ考え、最終破断応力として、 σ_1 と σ_2 の平均値を使用することにすれば、同一材料でも、寸法によって一定にならない不便さはあるが、繰返し応力の大きさや切欠きの形状に無関係なほぼ一定の値が得られ、しかも材料の静的強度と、ある程度の関連を持たせることができる。したがって、このようにきめた最終破断応力は、偏心割合および面積割合の規準曲線を使用しないで、破断するとき受けていた繰返し応力を推定する場合の一つの手がかりになるのではないかと考えている。なお、参考のため第12図に示した各点は、破断寸前に熱着色した疲れ試験片を使用して引張試験を行ったときの実験結果である。

縦軸は引張強さ、横軸は熱着色のまえまで受けていた繰返し応力を示すものである。

5. 結 言

一定応力振幅の場合は、受けていた繰返し応力を推定するのに、 $S/Se-\delta/r$ の関係を利用するのが、もっとも簡単である。二段二重および多重の場合は、このほ

かに $S/Se-F_B/F$ の関係を利用すれば、二段階の繰返し応力のうちで、破断するとき受けていた繰返し応力を推定することができる。しかし、他方の繰返し応力の大きさは、繰返しの数比の割合が不明である限り、知ることができない。また、 $S/Se-\delta/r$ および $S/Se-F_B/F$ の関係が利用できないような場合には、筆者らがきめたような最終破断応力は、破断するとき受けていた繰返し応力を推定するための、一つの手がかりになる。

なお、き裂の進展状態を知るため、熱着色法を使用するときは、その影響を考慮に入れる必要がある。終りに、この実験に協力した小倉英邦、辻継道、平野隆三の三君に感謝の意を表する。

文 献

- (1) A.V. deForest, *J. Appl. Mech.*, Vol. 3, p. A-23, A-114.
- (2) R. Cazaud/A.J. Fenner, *Fatigue of Metals*, p. 9 (1953).
- (3) 西岡, 昭和 29 年 4 月 第 31 期定時総会講演会前刷.
- (4) M.A. Miner, *J. Appl. Mech.*, Vol. 12, p. 159.
- (5) 石橋・瓜生・佐藤, 機械学会論文集, 19巻 87 号, 34ページ.
- (6) 河本・西岡, 機械学会論文集, 19巻 83 号, 86ページ.
- (7) 大内田・楠本, 機械学会論文集, 20巻 99 号, 739 ページ.

539.389.2:669.14

繰返しねじり応力を受ける低炭素鋼の かたさ について*

安藤善司** 西野禎志***

The Effect of Completely Reversed Torsional Stress on the Hardness of Low Carbon Steel

by Zenji ANDŌ and Sadasi NISINO

Previously we reported on the effect of rotatory bending stress on the hardness of 0.13% carbon steel. In this paper we deal with the micro-Vickers hardness of the same material, which has been subjected to completely reversed torsional stress. The hardness test was conducted on ferrite under 50-gram load, and on pearlite and ferrite under 1 000-gram load. We also investigated the recovery of the hardness change, which had been caused by repeated torsional stress, by annealing at 600°C for three hours. From the experimental results, we found some similar and some a little different behaviors, compared with the case of rotatory bending stress.

1. 緒 言

繰返し応力による金属の かたさ の変化については従来多くの研究が行われており、ある大きさ以上の応力の繰返しを受けることによってその かたさ の上昇することは、既によく知られていることである。しかしそれらは、比較的大きな測定荷重により、2種類またはそれ以上の組織にまたがって測定して得られた

かたさ数 によるもので、組織別に見た かたさ の変化についてはあまり明らかでなく、繰返し応力による かたさ の変化の模様を正確に知るには不十分の場合が多い。そこで筆者らは、さきに 0.13% 炭素鋼が回転曲げ応力を受けたときの かたさ変化 を微小かたさ計

* 昭和 32 年 6 月 12 日 60周年記念大阪講演会において講演
原稿受付 昭和 32 年 6 月 14 日.

** , *** 正員, 岐阜大学工学部.

によりフェライトのみについて、またフェライトとパーライトとを含んだ従来の かたさ について研究し、その結果を報告した⁽¹⁾。その後引続き、同一の材料について、両振ねじり応力を受けたときの かたさ 変化について、前回と同様フェライトのみについて、また測定荷重 1 kg によるフェライトとパーライトとにまたがる 合成かたさ について、その変化の模様、およびこれを 焼なまし したときの かたさ の変化の回復について研究したので、以下その結果を報告する。これにより前回の報告と相まって、繰返し応力による炭素鋼の かたさ の変化の模様を相当正確に知ることが出来たと考える。

2. 試験材料および実験方法

使用した材料は 0.13% C の炭素鋼でその化学成分は第 1 表に示す。素材は直径 25 mm の丸棒で、前回の実験⁽¹⁾で使用したものは 18 mm の丸棒であったが、両者は同一のインゴットから製造されたものである。これを 920°C で 2 時間焼なまし、炉中で冷却したのち、ねじり疲れ試験片に加工した。焼なまし後の機械的性質は第 2 表に示すとおりで、疲れ試験片の形状は第 1 図のようである。使用した疲れ試験機は西原式組

第 1 図 疲れ試験片

合曲げねじり疲れ試験機で、毎分 2 300 回の繰返し速度で所定の両振りねじり応力を破断に至るまで、または所定の繰返し数与えたのち、かたさ測定試験片を作製した。その作製法および かたさ の測定法は回転曲げ応力を受けたときの かたさ 変化を測定したとき⁽¹⁾と全く同様であるが、その概略を記せば、かたさ測定面は破断部の影響を避けるため疲れ破面より十分離れた位置、すなわち 15~20 mm 離れた箇所、軸に直角な断面をとり、ごく低速、軽切削で旋盤加工後、04 番エメリーペーパーで研磨、バフ仕上を行った。かたさの測定は明石の微小かたさ計を用い、測定荷重はフェライトのみを測定するときは 50g を用い、パーライトとフェライトとにまたがる かたさ (以下、合成かたさと称することにする) を測定するときは 1 000 g

を使用した。この実験に使用した材料の顕微鏡組織、および押込み荷重 50 g および 1 000 g で測定したときの 圧こんは前回の報告⁽¹⁾中の第 1 図の写真に示すとおりで、1 000g の押込み荷重によるときはパーライトとフェライトとを比較的広範囲にわたって含んでいる。フェライト部の かたさ を測定するに当っては、5% ピクリン酸アルコール溶液で腐食後、一つの断面につき直径方向に圧こんの中心間隔約 0.2 mm で 5 列の合計 300 個測定した。また合成かたさの測定は直径方向に約 0.5 mm 間隔で 5 列、合計約 112 個測定した。この場合 120 個に達しないのは中心付近で重なる所が出来るためである。

3. 実験結果および検討

(1) 繰返し応力を受けるまゝの試験片のかたさ

試験片に加工したままで、繰返し応力を受けていない試験片の中から任意に 5 本を抽出して かたさ 測定面を作り、上記の方法で合成かたさ およびフェライトの かたさ を測定した結果は第 3 表のとおりである。

第 3 表 繰返し応力を受けない処女試験片のかたさ

試験片	合成かたさ 測定荷重 1 000 g		フェライトのかたさ 測定荷重 50 g	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A	120.0	1.69	103.4	3.17
B	119.0	1.66	103.0	3.09
C	118.8	1.52	102.9	2.77
D	117.2	1.95	105.0	3.12
E	115.4	1.67	105.5	2.76

第 2 図 処女試験片の合成かたさ

第 1 表 素材の化学成分

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.13	0.29	0.53	0.018	0.009	0.23	0.08	0.10

第 2 表 機械的性質 (920°C 2 時間熱処理後)

引上降伏点 kg/mm ²	引下降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	真破断力 kg/mm ²	伸び %	絞り %	ねじり降伏点 kg/mm ²	ねじり強さ kg/mm ²
31.8	30.0	42.0	89.6	32	64	20.7	48.4

第3図 処女試験片のフェライトのかたさ

また 0.5 mm あるいは 0.2 mm 間隔の同心円の間にはさまれる 10 個の測定値の平均値をとり、中心よりの距離を横軸にとってプロットしたのが第2図、第3図である。それによれば、当然のことではあるが、前回の実験⁽¹⁾において処女試験片のフェライトについて測定したのと同様な結果を、フェライトのかたさおよび合成かたさについて得た。すなわちフェライトについては同じ程度の標準偏差を得、測定荷重の大きい合成かたさでは標準偏差はフェライトのときの半分程度になっている。また素材丸棒よりの試験片の採取位置により平均かたさ数そのものには差異があるが一つの測定面については直径方向にはかたさの差が認められず、疲れ試験片およびかたさ測定面作製のときの加工の影響も受けていないと考えることが出来る。5本の試験片の間のかたさの差がフェライトより合成かたさの方が大きいのは、フェライト中のパーライトの分布の密度が測定断面の位置により異なっているためである。

前回の報告中でも述べているとおり、この場合も10個の平均値をもって繰返しねじり応力を受けた試験片のかたさ分布を比較することは不当ではないと考えられるので、繰返しねじり応力を受けた試験片のかたさ分布の表示は第2,3図の様式によることにするが、ただ測定面の採取位置によりかたさの差異があるた

第4図 S-N 曲線

め、縦軸は応力を受けない中心部とのかたさの差をもって表わしたのは前回と同じである。

(2) 繰返しねじり応力によるかたさの変化

2.1 疲れ試験 両振ねじり応力による疲れ試験の結果は第4図のとおりで、疲れ限度は 14.1 kg/mm^2 である。このうち所定の試験片についてかたさの測定を行った。また繰返し数とかたさ変化の関係を知らるために疲れ限度以上の応力において、繰返しの途中の所定の回数で停止してかたさを測定した。

2.2 フェライト・パーライトの合成かたさの変化

疲れ限度以上の応力では破断するまでねじり応力を繰返したもののについて、疲れ限度またはそれ以下の応力では 10^7 回で停止したものについて、押込み荷重 1 000 g で測定したかたさの応力繰返し前と比較した変化の模様を示したのが第5図である。ねじり応力の繰返しにより外周よりある深さの層は中心部に比してかたさが増しているが、それは疲れ限度の約80%以上の応力で認められる。疲れ限度またはそれ以下でも疲れ限度の80%以上の応力であれば、わずかで

第5図 繰返し応力と合成かたさの変化

るが かたさ が上昇し、ある程度ねじり応力の繰返しの影響を受けることがわかる。これは西原、河本両博士の腐食法による疲れ層の検出が、疲れ限度の77%以上の応力の繰返して認められること⁽²⁾とほぼ一致している。次に疲れ限度より大きい応力を繰返し与えた場合、疲れ限度よりわずかに 0.1 kg/mm^2 高いだけでも、疲れ限度に等しい場合とは違ってかたさの上昇はきわめて著しく、しかもそれ以上では繰返し応力が大きくなっても、かたさの上昇数にはあまり差異がない。そしてかたさの上昇しているのは外周よりある深さの層だけで、その層内では繰返しねじり応力の分布にはこう配があるにもかかわらず、かたさの上昇数の分布は水平に近く、中心附近のかたさの上昇しない部分との間に明らかな差異があって、硬化層とも言う

べきものが第5図ではっきりと認められる。この硬化層の深さは必ずしも正確に決めうるとは言い難いが、おおよその値を見当づけて応力との関係を表わしたのが第6図である。横軸は両振りねじり応力と両振りねじり疲れ限度との比で、縦軸は硬化層の深さと試験片の半径との比である。これは前記の西原、河本両博士の腐食法により検出された繰返しねじり応力による疲

第6図 疲れ硬化層の深さ

れ層の深さと繰返し応力の大きいさとの関係ときわめてよく似ていることは、この図中に示すとおりである。第7図は硬化層内の かたさ測定値 の平均値と非硬化部のそれとの差を表わしたものである。繰返し応力(周辺応力、すなわちその断面の最大応力)の大きいほどかたさ上昇は大きいが、疲れ限度を境としてそれを越える場合とそれ以下の場合とに分けると、そのおのおの場合では応力の差に対して かたさ変化 にはそれほど著しい差はないが、この二つの場合の間にはかく然とした差がある。疲れ限度より大きい応力を繰返し

第7図 硬化部の かたさ の平均上昇数

た場合、非硬化部より硬化部への移行はきわめて急激であるが、移行点附近の応力は応力分布より求めると $5 \sim 6 \text{ kg/mm}^2$ である。公称応力（周辺応力）が疲れ限度の 80% 以下の繰返しでは $5 \sim 6 \text{ kg/mm}^2$ より大きい場合でも、まったくかたさが変化しないことは第 5 図に示したとおりである。すなわち断面内のある点のかたさの変化は、その点の繰返し応力の大きさよりも、最大応力（周辺応力）の関係することがわかる。

次に、一定の繰返しねじり応力におけるかたさ変化と繰返し数との関係を調べると第8図のようになった。繰返し途中では硬化層の深さは変化しないが、

その かたさ上昇 の分布は繰返しの比較的初期においてはなだらかであるが、破断の近くにおいては外周部で飽和した硬化が繰返しとともに漸次内部に進展し、破断したものでは硬化層内の かたさ分布 は水平に近くなり、非硬化部から硬化部への変化が急激となっている。

第8図 繰返し数と合成かたさの変化

以上の結果を総合すると、硬化層の深さは最大繰返し応力の値により異なるが、繰返しの比較的初期においてほぼ決まるもののようで、以後繰返し数の増加とともにこの層内の かたさ の上昇は進み、疲れ寿命の限度に近づくにつれて飽和する。疲れ限度またはそれ以下の応力が繰返される場合には寿命は無限に続くものであって、この実験における繰返し数 (10^7 回) では飽和していないと考えられる。したがって上述の疲れ限度を境とした かたさ変化 の差異は飽和しているか否かの差異に過ぎないのではないかと考えられる。

2・3 フェライトのかたさの変化 荷重1 000g
で 合成かたさ を測定した試験片を再び研磨，バフ仕
上後，荷重 50 g でフェライトのみの かたさ を測定
した．その結果を第 9 図に示す．疲れ限度以上の両振
りねじり応力の繰返しにより，外周部が硬化し，その
かたさ上昇数は 合成かたさ の場合に比べて，2 ない
し 7 程度少いことは第 7 図よりも明らかであるが，そ

第9図 繰返し応力とフェライトの
かたさの変化

の硬化の傾向は合成かたさのそれとよく似ている。すなわち、フェライトの硬化する深さが合成かたさのそれと一致しているのは第6図に示されるとおりであり、疲れ限度に等しい応力の繰返しではかたさは上昇しないのに、わずか 0.1 kg/mm^2 大きいだけでも著しいかたさ上昇を示している。また外周部ではかたさ分布が水平に近いこともよく似ている。

一定の繰返し応力における繰返し数とフェライトのかたさ変化の関係は第10図に示されるが、この場合も硬化層の深さは変化せず、ただその層内におけるかたさの変化が進むのみであることも、合成かたさの場合と同様である。

第10図 繰返し数とフェライトのかたさ変化

ただ合成かたさの変化と違っては、合成かたさの場合は疲れ限度より小さい応力でも、80%以上であれば 10^7 回の繰返しにより、疲れ限度以上のときほど顕著ではないが、かたさ上昇が認められたのに対して、フェライトでは全く認められない。 10^7 回以後、更に応力繰返しをつづける場合に、合成かたさはあるいはきわめてゆるやかであるにしても、更にかたさが増加することが期待されるが、フェライト部はその可能性はないと考えられる。疲れ限度以下でその80%以上の応力の繰返しによりフェライトのかたさは変化しないで、パーライト、もしくはパーライトとフェライトの境界付近でかたさ変化が起るものと考えられる。

次に回転曲げによるかたさ変化と比較すると、疲れ限度以上の応力の繰返しにより外周部のかたさの変化することは同じであるが、回転曲げのときは繰返し応力が大きくなるに従い、かたさ上昇が漸次増加し、かたさの上昇の飽和が認められなかったのに対し、今回の実験では繰返し応力が疲れ限度を越えると、かたさの変化は不連続に急増し、しかも飽和の傾向が認められることが違っている。

(3) 焼なましによるかたさ変化の回復 以上のかたさ測定をした試験片を 600°C で3時間焼なまし、炉中冷却後、前記の方法でかたさ測定面を作って測定した。第11図、第12図にその結果を示す。

第11図 焼なまし後の合成かたさ

第12図 焼なまし後のフェライトのかたさ

疲れ限度以下の応力の繰返しによる合成かたさの変化はもとに復しているようであるが、合成かたさ、フェライトのかたさともに疲れ限度を越えるねじり応力の繰返しにより変化したかたさは、この熱処理により相当程度もどるが、やはり外周部は中心附近より高く完全に回復していない。もっとも、焼なまし温度あるいは時間を増すことにより更に回復するかも知れないが、同一の材料に対し回転曲げの場合⁽¹⁾は同一温度、時間の焼なましにより、降伏点以下、疲れ限度以上の応力の繰返しによるかたさ上昇は、合成かたさでは完全に回復しないのは繰返しねじりの場合と同じであるが、フェライト部では完全に回復した点が違っている。なお、第11図、第12図よりわかることであるが、繰返しの比較的初期の 10^5 回で認められたかたさ変化も、この熱処理では完全には回復しない。

4. 結 言

炭素鋼が両振ねじり応力を受けるときのかたさの変化は回転曲げによる場合とよく似ているが、疲れ限度以上の繰返し応力を受けるときのかたさの上昇のしかた、焼なましによる回復性には上述のような差異

が認められる。前回の回転曲げに対する研究と相まって疲れによる炭素鋼のかたさ変化を相当に正確に知ることが出来たと考える。おわりに、実験に協力された当時岐阜大学工学部機械工学科学生であった加藤貞

雄、坂田和英の両君に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 安藤・西野, 機械学会論文集, 23 卷 131 号.
- (2) 西原・河本, 機械学会論文集, 5 卷 20 号.

620.194

腐 食 疲 れ の 研 究*

(腐食疲れ強さに及ぼす平均応力の影響)

岩 元 兼 敏**

Study of the Corrosion-Fatigue (on the effect of mean stress)

by Kanetoshi IWAMOTO

0.15% C-steel was tested under repeated torsional stresses ($n=1960$ r.p.m.) in air and in fresh water respectively with several mean stresses, and an endurance limit diagram has been obtained.

The results obtained were as follows:

1. In fresh water the $S-N$ curve does not become parallel to the abscissa even at 10^8 repetition of stress; in general, the curve tends to diverge from horizontal line with the increase of mean stress, and in the case of 18 kg/mm^2 of mean stress, it declines almost linearly.
2. In air the effect of mean stress to the fatigue limit is small.
3. In fresh water the effect of mean stress to the fatigue strength is considerably large.
4. In fresh water the cracks are apt to grow in the direction normal to the principal tensile stress.

1. 緒 言

材料の腐食疲れ強さに影響すると考えられるものには、腐食液、繰返し速度、平均応力等いろいろあるが、この中で平均応力の影響を一貫して調べたものは従来あまりないようである。筆者は繰返しねじりの場合について平均応力の影響をみるために、0.15%炭素鋼を用いて実験し、いちおう疲れ限度線図を描くことが出来たので、その結果を報告する。

2. 実験材料および実験の方法

実験に用いた材料の化学成分、熱処理、機械性質を第1表に示す。試験片は直径 1 in, 長さ約 5 m の圧延材 4 本を素材とし、約 1 mm の仕上しろを残して荒削後熱処理を行い、第1図の形に仕上げ表面は 04 番エメリー紙で研摩した。この試験片に西原式繰返しねじり試験機を用いて、平均応力を 0, 2 kg/mm², 6 kg/mm², 10 kg/mm², 14 kg/mm², 18 kg/mm² の 6 通り

に変えて、空気中および淡水中で疲れ試験を行った。試験機の回転数は毎分 1 960 である。

淡水中の試験は第2図のように、あらかじめベンゾールとアルコールで洗浄して表面に付着した油類を除

第 1 図

いた試験片の平行部に、毎時約 2 500 cc の割で注水しながら試験機を運転した。図において①は試験片、②は水が左右にしたたるのを防ぐために試験片の下方に置いたぶりき板で、水はこの板に案内されてうまく流れ、試験片の平行部だけを水の膜でつつむことが

第 2 図

出来る。なお実験はすべて室温で行った。

* 昭和 32 年 4 月 4 日 第 34 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 32 年 7 月 3 日。

** 正員、九州大学生産科学研究所。