

炭素鋼の疲れき裂の発生伝播に 及ぼす平均応力の影響

(昭和45年3月12日 原稿受理)

機械大学院学生 高 尾 健 一
機械工学教室 遠 藤 達 雄

EFFECT OF MEAN STRESS ON THE INITIATION AND PROPAGATION OF FATIGUE CRACK

Kenichi TAKAO
Tatsuo ENDO

Tension-compression fatigue test of 0.44% carbon steel was carried out for investigating the effect of mean stress on the initiation and propagation of fatigue crack.

As a result of experiment on the quenched and tempered carbon steel, the following conclusions were obtained.

1) Stress repetition under compressive mean stress is equivalent to the repetition under tensile mean stress for crack initiation.

2) After the initiation of crack embryo, the specimen is broken by nearly constant number of stress repetition under tensile mean stress almost independent of the number of primarily applied repeated compressive stress, but it does not break off when it is stressed under compressive mean stress.

The results obtained on carbon steel show similar tendency to the experimental results on brass.¹⁾

概 要

焼入れ焼戻した0.44%炭素鋼の引張圧縮疲れ試験を行って、疲れき裂の発生と伝播における平均応力の影響を調べた結果、次の結論を得た。

1) き裂の発生までは片振り圧縮の繰返しも片振り引張りの繰返しも応力振幅が同じならばき裂発生に対して等価的である。

2) 発生したき裂が片振り圧縮のもとでは伝播しないが、片振り引張りのもとでは試験片を破断に到らせるような応力振幅があるが、この場合、さきに片振り圧縮でうけた繰返数とは無関係の一定繰返数で破断する。

3) 実用炭素鋼による本実験の結果は黄銅で行なわれた実験¹⁾の傾向と一致する。

1. 緒 言

金属材料の疲れにおける平均応力の影響については、古くより耐久限度線図を求めることを主目的として研究されてきたが、近年疲れ過程がき裂の発生とその伝播の二つに分けて考えられるようになり、平均応力の影響も疲れき裂の発生と伝播の2期間で区別されて調べられるようになってきている。^{1)~4)}西谷、山下が70/30黄銅で行なった実験によれば¹⁾、き裂の発生までの疲れ被害は平均応力にはほとんど関係せず、応力振幅のみによってほぼ決まるが、その伝播には平均応力の大きさが影響している。すなわち応力振幅が一定の場合を考えると、き裂の発生までは片振り圧縮も片振り引張りも同一繰返しをうける限りその後の寿命に

対し同じ影響を与えるという意味で被害に関して等価的で区別する必要はないが、き裂がいったん発生した後では、片振り圧縮では破断しないような振幅の応力繰返しを片振り引張で加えるようにかえると（これを以後「反転」という。）、前に受けた片振り圧縮の繰返しにあまり依存しない繰返しで破断することが示されている。このような材料の性質が黄銅のみならず強度を要求される実用強度材料においてもあらわれるか否かは工学的に極めて興味がある。よって本論文では焼入れ焼戻した実用炭素鋼を用いて平均応力のき裂発生ならびにその伝播に対する効果をしらべた結果を報告すると共に、試験部分のビッカース強度も測定して、この値と応力繰返し数の関係を求め、あわせて平均応力の疲れき裂伝播速度に及ぼす影響をも検討した結果を報告する。

2. き裂の発生と伝播

試験片に引張圧縮繰返し荷重を与える場合、荷重軸に対して 45° の角度をなす面に最大せん断応力が作用するが、試験片表面附近の弱い結晶（粒径が比較的大きく、その向き面が最大せん断応力の作用する面に一致するかそれに近い結晶）では応力繰返しによってまず向き線が発生し、それが多数集って向き帯を形成し、応力の繰返しと共にその中に微視的き裂を含むようになることが観察されている。（そのような微視的き裂のモデルを図1に示す。）、ついでき裂は応力の繰返しにつれて成長し、数粒子にわたる寸法をもつに至る。この状態を「き裂発生」と呼べば、き裂発生は繰返される向きの結果と考えられるから、その主原因であるせん断応力の繰返振幅に主として依存することが理解される。すなわち応力振幅が一定ならば、平均応力の大きさが変わってもほぼ一定の総

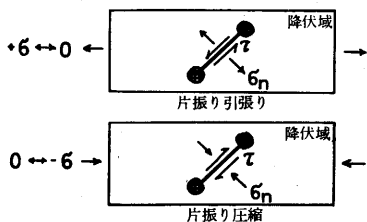


図1 微視的き裂のモデル

繰返しでき裂が発生するものと考えられる。以下、本論文にて報告する実験に対応させてこれをもっと具体的に述べよう。

片振り圧縮繰返し応力を N_1 回加えた後、その応力振幅が等しい片振り引張繰返し応力に反転して N_2 上回の繰返しで試験片を破断させる実験を考える。前述のような応力振幅のみに主として依存するき裂発生繰返し数 N_f があるとすると、 N_1 と N_2 との大小関係で次の2つの場合が考えられる。

a) 片振り圧縮繰返し数 $N_1 <$ き裂発生繰返し数 N_f

N_1 がき裂発生繰返し数よりも少ないこの場合には反転後 $(N_f - N_1)$ 回の片振り引張繰返しによってき裂の発生を起し、ついには破断する。この場合 $(N_1 + N_2)$ は N_f に無関係に一定となる。

b) 片振り圧縮繰返し数 $N_1 >$ き裂発生繰返し数 N_f

$(N_1 - N_f)$ 回の繰返し中はき裂は発生しているが伝播しない。よって N_2 はき裂の伝播（進展開始と伝播）に使われ一定となる。この場合 N_1 回の繰返し中はつねに圧縮の繰返しであるのでき裂は N_f で発生したあとも口を開かず伝播しないものと考えられる。

以上の考察をもとに片振り圧縮につづいて片振り引張りをうける材料の疲れ寿命を表現する方法を図2に示す。この図で横軸には始めに与えた片振り圧縮の繰返し数 N_1 を、また縦軸には片振り圧縮の繰返し数 N_1 と反転後の片振り引張繰返し数 N_2 との和すなわち総繰返し数のほか、 N_2 もとっている。また図において破線はき裂発生寿命 N_f である。

また図の両座標軸は対数目盛を用い、図は一定

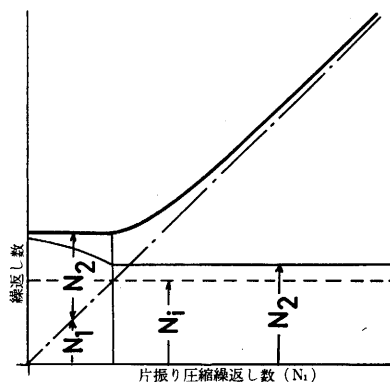


図2 疲れ寿命のモデル
(座標軸は対数目盛を用いている)

表 1 化 学 成 分

| 成 分 | C | Si | Mn | P | S | Cu | Ni | Cr | Mo |
|-----|------|------|------|-------|-------|----|----|------|------|
| % | 0.44 | 0.38 | 0.78 | 0.021 | 0.022 | — | — | 0.03 | 0.02 |

の繰返振幅 σ_a (本実験では特記しない限り $34\text{kg}/\text{mm}^2$) に対して作られている。片振り圧縮の繰返しのと片振り引張りの繰返しを与えるとき、総繰返数 $N_1 + N_2$ の実験点が 図中太線上に来ることなどが予想されるが、果してそのようになるかを明らかにするため次の実験を行った。

3. 実験方法

引張圧縮疲労試験には共振型疲れ試験機 (バイプロフォア型, 東京衡機製, 容量10トン) を用いた。所定の長さに切り出した炭素鋼 S 45 C を 845°C に加熱後水焼入れし, 600°C に加熱後油焼戻しを行ったあと, 図3の寸法に切削した。断面積の変化による応力集中係数は Neuber の三角則によれば, ほぼ 1.07 であるが本論文中ではすべて公称応力で示してある。切削による表面硬化等を取り除くために, 半径方向に 5μ ずつ紙やすりで削除しながら硬度を測定した結果, 約 30μ 削り取ればほぼ一様な硬度が得られることを認めたので, 試験片はすべて半径方向に 30μ だけ紙ペーパー (0~0/6) で削り取り, 仕上げを行った。表1, 表2はそれぞれ材料の化学成分およびこの熱処理状態での機械的性質である。

未使用試験片を数本用いて, 断面積最小部のピ

表 2 S 45 C の機械的性質

| 降伏点 (kg/mm^2) | 引張強さ (kg/mm^2) | 真破断応力 (kg/mm^2) | 絞り (%) | 伸び (%) |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------|
| 69.7 | 83.3 | 155.3 | 63.2 | 16.2 |

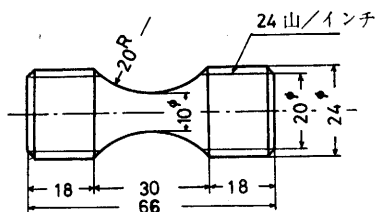


図 3 試験片寸法

ッカーズ硬度 H_v (荷重 5kg, 30 秒保持) を測定した結果, 平均 248.0, 標本標準偏差 5.0 を得た。

片振り引張りによる疲労限は $30.0\text{kg}/\text{mm}^2$ であった。断面積最小部に, 円周方向に 5~10mm のき裂を認めたときを破断とみなし, 試験機を停止した。試験中, 断面積最小部の直径の増減が起るが, ほぼ 9,000 回の応力繰返しで大きい断面積の変化は停止することを認めたので, 5,000 回および 10,000 回あるいは 30,000 回の応力繰返しで試験機を止めて定応力試験となるように荷重の調整を行なった。実験は片振り圧縮繰返応力を N_1 回負荷したのち, 片振り引張りあるいは部分片振り引張りにして応力を繰返し N_2 回で破断に到らせた。破断後, 試験片の断面積最小部のピッカーズ硬度 H_v を測定し, H_v と片振り圧縮繰返数 N_1 との関係を求めた。

き裂の伝播速度を求めるために, 一部の試験片はペーパー仕上げののち, さらにバフ仕上げを行ない荷重軸と垂直方向のペーパーによるひっかき傷を取り除いた。き裂の発見を容易にするために断面積最小部の表面に, 先端の角度が約 60° の円錐を押し込み, 直径 0.11~0.18mm の孔を作った。き裂長さの測定にはレプリカ用のセルローズ, アセトブチラート (通称ビオデン) を使用し, それで円周方向のき裂を写し取り, 100 倍の読み取り顕微鏡でそのき裂長さを読み取った。応力振幅は始終 $34\text{kg}/\text{mm}^2$ に保持した。

4. 実験結果および考察

片振り圧縮繰返応力を N_1 回負荷したのち片振り引張りに反転後 N_2 回の応力繰返しで試験片を破断に至らしめた場合の実験結果を図4に示す。また N_1 と破断後の断面積最小部のピッカーズ硬度 H_v との関係を図5に, $N_1 = 0, 5 \times 10^4, 5 \times 10^5, 10^7$ の応力繰返しの後, 片振り引張りに反転

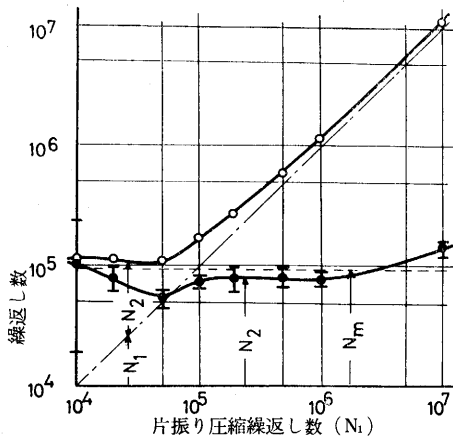


図4 実験結果（黒丸を通る太線は反転後の寿命の95%信頼区間を示す。N_mは片振り引張りにおける平均寿命である）

後求めたき裂伝播状態をそれぞれ図5、図6に示す。実験結果（図4）と疲れ寿命に関する予想（図2）とを比較してみると、大体において一致している（この結果は70/30黄銅を用いて行った西谷、山下の実験結果と同様な傾向を示す。）が、詳細に見れば、N₁が大きいところではN₂は大きい。疲れ寿命の予想の曲線を求めたときに述べたように、N₂>N₁では破断までの寿命(N₁+N₂)はN₁に関係なく一定であるようにみえるから、図4において、き裂発生寿命N_iは5×10⁴程度であ

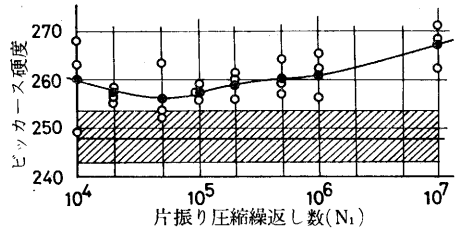
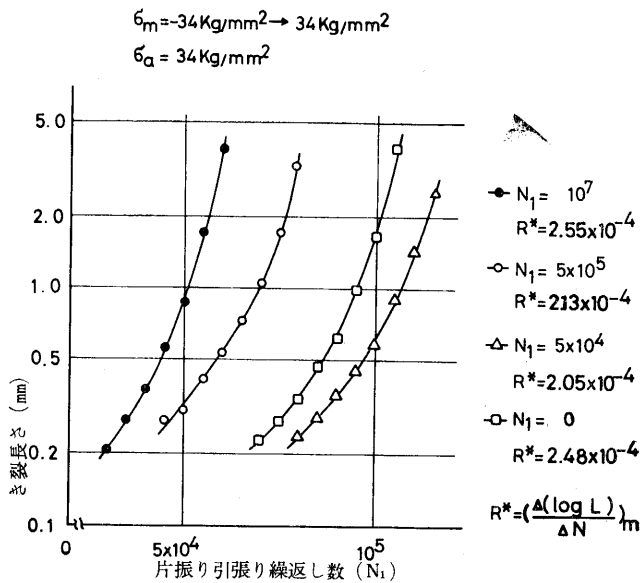


図5 H_vとN₁との関係（斜線部は未使用試験片の平均硬度（中央太線）のまわりのばらつきの標準偏差内の値を表わす）

ると考えられる。すなわちき裂発生までの応力繰返しにおいては片振り圧縮も片振り引張りも材料に等価な被害を与え、全寿命の約46%でき裂発生になるとして理解される。言い換えれば、き裂の発生には平均応力はほとんど関係せずき裂発生ののちには、片振り圧縮ではき裂は伝播せず、片振り引張りに反転後、き裂は伝播して試験片を破断に導くとみてよいようである。

モデルの曲線と実験結果との差異は以下のように解釈される。図5に示すように、N₁の変化に伴うH_vの変化があり、また図6に示すように、き裂の伝播速度R*はN₁が変化してもほとんど大きい差がない。以上2点をあわせ考えると、反転後の寿命N₂がN₁の増加とともに増加しているのは、材料の硬化により、き裂の伝播の開始が遅くなったためであると考えられる。

片振り圧縮にてN₁回の繰返応力を負荷したのち、正の平均応力24kg/mm²、34kg/mm²、40kg/mm²のもとで、片振り引張り及び部分片振応力を負荷した

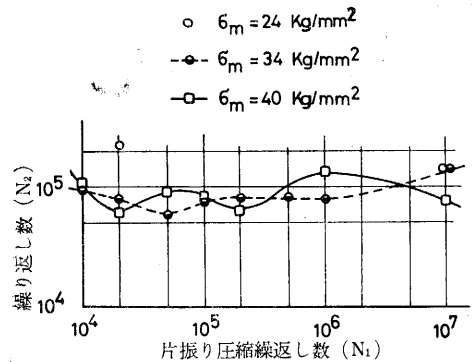


図7 反転後の寿命

ときの N_2 を図7に、また平均応力 σ_m を 24, 34, 40, 46kg/mm² として応力振幅 $\sigma_a = 34$ kg/mm² でき裂伝播速度を求めた結果を、図8に示す。図7によれば、反転して片振り引張りになる時の寿命も、はじめから部分片振り引張りで求めた寿命も大きい差異は認められない。また図8においても σ_m (平均応力) $\geq \sigma_a$ の場合には、き裂伝播速度 R^* はほぼ一定であり、平均応力の違いにはあまり関係しないようである。このことは (i) 疲れき裂の発生には平均応力はほとんど関係しないこと、(ii) き裂先端に形成された塑性域によって、応力緩和を起し、材料内部では部分片振り引張り状態になっていても、き裂先端付近での応力状態は部分両振り引張り、あるいは両振り応力に近い状態になっているためではないかと考えられる。

5. 結 論

焼入れ焼戻した機械構造用炭素鋼 S 45 C ($H_v = 248.0$) 試験片に引張圧縮繰返応力を負荷して、疲れき裂の発生および伝播に及ぼす平均応力の影響を調べた結果、以下の諸点が明らかになった。

(i) き裂発生までの応力繰返しにおいては材料の疲れ被害は片振り圧縮においても片振り引張りにおいても同じであるが、き裂発生後の応力繰返しにおいては片振り圧縮ではき裂は伝播せず、片振り引張りに反転後き裂は伝播して試験片は破断する。以上の考察から導いたモデルの曲線と実験結果とは全般的に一致する。しかしこれを詳細に見れば、その差異は破断後の試験部分の硬度変化と対応している。

(ii) 炭素鋼について片振り圧縮ののち、片振り引張りに反転した場合の実験結果は、70/30 黄銅についての西谷、山下の研究と同じ傾向を示す。

(iii) 片振り引張りでの疲労限 $\sigma_m = \sigma_a = 30$ kg/mm² よりも約 13% 上の応力振幅 $\sigma_a = 34$ kg/mm²

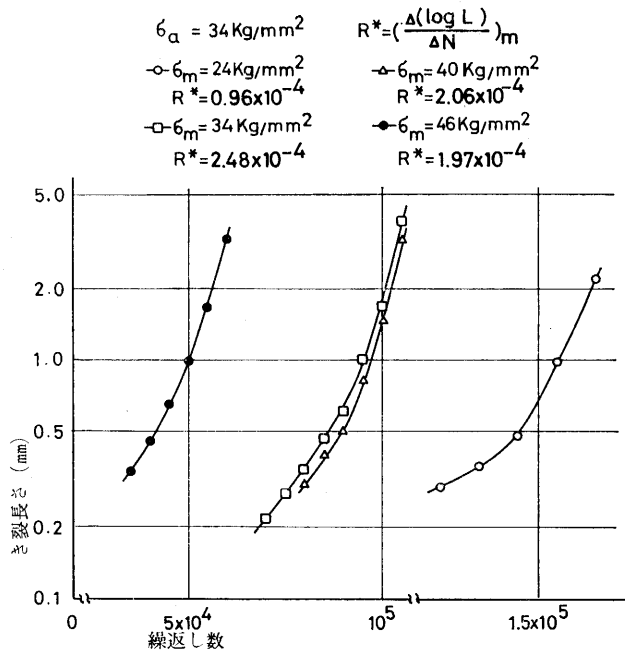


図8 き裂伝ば状態

mm² においては、き裂の発生に要する繰返数 N_i は 5×10^4 回であり、き裂発生までの片振り圧縮応力繰返しを負荷したのち、片振り引張りに反転したときの全寿命の約 46% である。

6. 謝 辞

本研究は九州工業大学機械科材料力学実験室にて行われたもので、実験に協力して下さった同大学昭和43年度卒業生の福武諄、中上義春両君ならびに昭和44年度卒業生の黒野繁、鶴田魁両君に深く感謝します。

文 献

- 1) 西谷, 山下, 機械学会論文集 32-242 (昭和41-10) 1456.
- 2) 中沢, 小泉, 本間, 佐柳 機械学会論文集 35-270 (昭和44-2), 256.
- 3) 平, 本田, 阿部 機械学会論文集 31-221 (昭和40-1), 39.
- 4) 平, 本田, 阿部 機械学会論文集 31-226 (昭和40-6) 891.