SCM 435 丸棒の応力変動時の疲労き裂進展挙動[†]

川 上 善 道* 三 沢 啓 志**
児 玉 昭 太 郎** 福 島 明***

Fatigue Crack Propagation Behavior under
Stress Changing in SCM 435 Steel

by

Yoshimichi KAWAKAMI*, Hiroshi MISAWA**, Shotaro KODAMA**
and Akira FUKUSHIMA***

The constant and variable stress amplitude fatigue tests were carried out on smooth and pin-holed specimens of SCM 435 steel under rotating bending conditions.

In the constant stress amplitude tests, the fatigue crack propagation rate was not affected by the stress level and it was represented well by ΔK .

The crack initiated by the over-stress σ_{a1} cycles was retarded by the under-stress σ_{a2} cycles, when the difference between σ_{a1} and σ_{a2} was large. In the case of non-propagating cracks, their length was shorter than that in plain carbon steels. The condition of crack retardation under σ_{a1} repetition following σ_{a2} application was elucidated.

The crack propagation behavior of pin-holed specimens in two step multi-fold tests was similar to that in two step two-or three-fold tests. The discussion was made on the shift from unity in cumulative cycle ratio for smooth specimens, based on the results of crack propagation behavior of pin-holed specimens.

キー・ワード：変動荷重，疲労き裂進展，遅延挙動，Cr-Mo 鋼

1 結 言

機械構造物に作用する荷重は複雑に変動しており，その大部分は疲労限度以下の応力である．疲労強度を考慮に入れた設計の際には，このような疲労限度以下の応力の繰返しを多く含む変動応力をどのように評価すべきかが重要な問題となる．そこで著者らは今までに疲労限度以下の応力を含む応力変動後のき裂進展の過渡現象について明らかにしてきた^{1)~4)}．また，それらの結果にもとづいて，疲労限度以上と以下の応力の組み合わせによる二段多重試験を行い，1ブロック中の応力の繰返し数を系統的に変化させ最も過酷な条件の検討を行うとともに，疲労限度以下の応力の繰返しによるき裂進展に注目する必要性を示してきた⁵⁾．

いっぽう，機械構造物の軽量化をはかるため，いわゆる高強度鋼が多く用いられるようになってきたが，高強度鋼は，引張強さや降伏点が高くすぐれた特性を示す一方で，切欠き感度が低強度鋼にくらべて高く，その使用に際しては疲労強度とくに疲労き裂進展挙動には十分な配慮が必要である．ところが，低強度鋼を用いた疲労強度の研究は著者らを含めて数多く報告されているが，高強度鋼に関する疲労現象の研究はいま

だ数少なく^{6)~8)}，とくに応力変動にともなう疲労き裂進展挙動の解明や疲労寿命推定法の確立が急がれている．

そこで，本報では日本材料学会疲労部門委員会の共同利用材料である SCM 435 丸棒を用い，回転曲げ条件下で平滑試験片を用いた二段多重疲労試験を行い，さらに，小穴付試験片により変動荷重下の疲労き裂進展挙動を観察し，変動応力下の疲労寿命推定の一助とした．

2 実験方法

試験片の素材は機械構造用合金鋼 SCM 435 であり，その化学成分を Table I に示す．納入材を 1143 K で 30 分保持後焼ならしを行い，荒けずりをした後に 1128 K で 30 分保持後油冷，873 K 1 時間保持後水冷の調質処理を行い，その後機械加工により試験片を作製した．熱処理後の機械的性質を Table II に示す．試験片の形状寸法を Fig. 1 (a), (b) に示す．Fig. 1 (a) は，平行

Table I. Chemical composition (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.37	0.26	0.74	0.022	0.020	1.07	0.18

† 原稿受理 昭和60年1月10日 Received Jan. 10, 1985

* 学生会員 東京都立大学大学院 東京都世田谷区深沢, Graduate Student, Tokyo Metropolitan University, Fukazawa, Setagaya-ku, Tokyo

** 正 会 員 東京都立大学工学部 東京都世田谷区深沢, Faculty of Technology, Tokyo Metropolitan University, Fukazawa, Setagaya-ku, Tokyo

*** 正 会 員 山梨大学工学部 甲府市武田, Faculty of Engineering, Yamanashi University, Takeda, Kofu

Table II. Mechanical properties.

Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	True rupture stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
877	965	1612	15.2	63.0

Fig. 1. Shape and dimensions of specimens.

部直径 8 mm の平滑試験片であり用いた試験機は小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 98 N・m, 回転数 2800 rpm) である。また, Fig.1 (b) は, 直径 8 mm の平行部中央に直径 0.2 mm, 深さ約 0.3 mm のドリル穴をあけ, き裂の発生点を限定し, き裂進展挙動の観察を容易にした小穴付試験片であり, 片持式回転曲げ疲労試験機 (容量 98 N・m, 回転数 2800 rpm) を用いた。き裂長さの測定は, アセチルセルロースフィルムを用いたレプリカ法により行い, き裂全長 $2a$ は小穴を含む試験片表面のき裂長さで示す。

実験は以下の項目について行った。すなわち, (1) 平滑試験片と小穴付試験片を用いて二段多重疲労試験を行い, (2) 小穴付試験片を用いて一定応力振幅下の疲労限度以上の応力の繰返しによるき裂進展特性を明らかにし, (3) 疲労限度以上の応力の繰返しにより予き裂を導入した試験片に, それより低い応力を繰返したときのき裂進展特性の観察 (二段二重試験) と, (4) 二段二重試験後に再び応力振幅を上昇させたときのき裂進展特性の観察 (二段三重試験) を行った。

3 実験結果と考察

3.1 一定応力振幅疲労試験結果

Fig. 2 に平滑試験片の S-N 曲線を示す。疲労限度はステアケース法により $\sigma_{wb}=545$ MPa と決定した。

また時間強度部は片対数表示で最小二乗法により次式で直線近似した。

$$\sigma_a = 1428.6 - 156.8 \log N_f \quad (1)$$

Fig. 3 は小穴付試験片による S-N 曲線である。図中の○印は破断寿命 N_f を示し, ●印はき裂全長 $2a$ がき裂長さ 1.25 mm に達するのに要した繰返し数 $N_{2a=1.25}$ である。それぞれの時間強度部は片対数表示

Fig. 2. Conventional S-N diagram for smooth specimens.

Fig. 3. Conventional S-N diagram for pin-holed specimens.

で最小二乗法により,

$$\sigma_a = 1275.8 - 166.1 \log N_f \quad (2)$$

$$\sigma_a = 1215.2 - 164.0 \log N_{2a=1.25} \quad (3)$$

また, 疲労限度はステアケース法により $\sigma_{wb}=296$ MPa と決定した。

3.2 小穴付試験片によるき裂進展挙動

3.2.1 一定応力下のき裂進展挙動 Fig. 4 に $\sigma_a=450$ MPa 一定振幅下のき裂進展速度 da/dn と応力拡大係数範囲 ΔK の関係を示す。ただし, 現在のところ本研究で用いた試験片形状に対する精度のよい K の式は求められていないので, 便宜的に有限幅の中央切欠き付平板の場合のセカント公式を用いて ΔK を計算した。すなわち,

$$\Delta K = \Delta \sigma_a \sqrt{\pi a} \sqrt{\sec(\pi a/W)} \quad (4)$$

ここで, W は試験片円周, $\Delta \sigma_a = 2\sigma_a$ である。 $\sigma_a=450$ MPa 一定振幅の場合, 3 本の試験片による da/dn - ΔK 関係は, ほぼよく一致した。

Fig. 5 は, $\sigma_a=450, 390, 330$ MPa の一定振幅試験の da/dn - ΔK 関係をまとめて示したものである。この場合の da/dn - ΔK 関係を直線近似すると次式のようにになる。

$$da/dn = 2.09 \times 10^{-12} (\Delta K)^{2.45} \quad (30 \leq K \leq 80) \quad (5)$$

Fig. 5 に示すように応力振幅と疲労限度との比 σ_a/σ_{wb} が 1.1~1.52 の範囲で da/dn - ΔK 関係は, Fig. 4 に示す 3 本の試験片による一定応力 ($\sigma_a=450$ MPa) の da/dn - ΔK 関係のばらつきにくらべるとやや広いものの狭いバンド内に収まっている。S35C 炭素鋼のような低強度鋼では, 既報のように da/dn - ΔK 関係は著

Fig. 4. Relation between da/dn and ΔK under constant stress amplitude $\sigma_a=450$ MPa.

Fig. 5. All test results under constant stress amplitudes $\sigma_a=450$, 390 and 330 MPa.

Fig. 6. Comparison of crack propagation behavior of different σ_{a2} repetition for pre-cracked specimens.

しい応力依存性が見られた。 da/dn - ΔK 関係が狭いバンド内に収まる理由については、既報で考察しているので詳細は省略するが、高強度鋼では σ_{wb}/σ_{ys} の値が低く、通常の炭素鋼に比べて小規模降伏の条件をより満足しているためであると考えられる。

3・2・2 二段二重試験 変動応力下の疲労き裂進展挙動を明らかにするため、最も基礎的な変動応力である二段二重試験を行った。試験は、 σ_{a1} の繰返しにより予き裂を $2a \div 1.25$ mm まで導入した後、それよりも低い応力 σ_{a2} を繰返した。そのときのき裂進展挙動を da/dn - ΔK の関係で Fig. 6 に示す。 σ_{a2} が 360 MPa の場合も、280 MPa の場合も、応力変動直後にはき裂の進展量が少なく、したがって da/dn は著しい遅延を示す。その後実験点は図中に直線で示した一定振幅の da/dn - ΔK 関係に漸近する。著しいき裂進展の遅延挙動がどのようにして回復するか、その機構は明らかではない。この遅延挙動の回復を Fig. 6 で示すのははたは困難ではあるが、図中のデータ点が縦軸にほぼ平行な著しい遅延を示す領域から一定振幅の da/dn - ΔK 関係へ遷移するあたりのき裂進展量を Δa とすると、 Δa は前後の σ_{a1} の繰返しによる繰返し塑性域寸法 $w=1/3\pi(\Delta K/2\sigma_{ys})^2=55 \mu\text{m}$ とほぼ等しくなる。したがって、遅延は前段の σ_{a1} の繰返しによる塑性域寸法と密接な関連があると考えられる。

二段二重試験において、二重目の応力 σ_{a2} を $\sigma_{a2}=360$ MPa と同一にし、予き裂を導入する応力 σ_{a1} を変え、 σ_{a1} と σ_{a2} の応力差がき裂進展挙動に及ぼす影響について調べた結果を Fig. 7 に示す。図中に○印で示した $\sigma_{a1}=390$ MPa で $\sigma_{a2}=360$ MPa である応力差が小さい場合のき裂進展挙動は、一定振幅の da/dn - ΔK 関係 (図中の直線) とほぼ等しく遅延現象は見られない。いっぽう図中に●印で示した $\sigma_{a1}=450$ MPa と $\sigma_{a2}=360$ MPa の組合せのような応力差が大きい場

Fig. 7. The effect of σ_{a1} of previous step on crack retardation in same σ_{a2} repetition for pre-cracked specimens.

合は、応力変動後の遅延が明りように認められる。応力を減少させた場合にはき裂の遅延挙動が観察される場合が多いが、応力差が小さい応力減少の場合には、き裂進展の遅延が明りように現れないことがあることが明らかとなった。

3・2・3 二段三重試験 二段二重試験では応力変動のうち応力が高→低へ変化する場合について調べたが、ここでは低応力の繰返しとその後繰返される高応力のき裂進展挙動に及ぼす影響を明らかにするため、 σ_{a1} の繰返しで予き裂を導入したのちに、それよりも低い応力を n_2 回繰返し、再び $\sigma_{a3}=\sigma_{a1}=\sigma_{a1,3}$ を繰返した場合のき裂進展挙動を調べ da/dn - ΔK の関係で Fig. 8 に示す。応力条件は $\sigma_{a1,3}=390$ MPa、 $\sigma_{a2}=240$ MPa と同一であるが、 σ_{a2} の繰返し数 n_2 が異なり、図中に○印で示した $n_2=1.5 \times 10^4$ 回は σ_{a2} の繰返しでき裂が進展中に、また●印の $n_2=1 \times 10^6$ 回はき裂が完全に停留した後に $\sigma_{a1,3}$ に応力を変動させた場合である。なお、この場合の停留き裂長さ a_2^* は既報の

Fig. 8. The effect of number of cycles n_2 of previous step on crack propagation in $\sigma_{a1,3}$ repetition.

S35C材に比べて短く $30\ \mu\text{m}$ 程度であった。図より応力条件は同じでも進展性のき裂に再び高応力 $\sigma_{a1,3}$ を繰返した場合に遅延が認められず、停留き裂の場合はその繰返しの初期に遅延が認められる。著者らは、炭素鋼 S35C材を用いて σ_{a2} の繰返しの後に再び σ_{a1} を繰返した場合の初期の遅延は、前段の σ_{a2} の繰返しによる停留き裂長さ a_2^* が長く、かつ σ_{a2} が大きいほど著しく、それ以外の場合には $\sigma_{a1,3}$ の繰返しによる遅延は期待できないことを明らかにしてきた。この遅延条件に加えて、本試験結果から $\sigma_{a1,3}$ による遅延は、停留性のき裂においてのみ生じ、応力の増加型の場合には進展性のき裂では遅延は生じないことが明らかとなった。

3・3 二段多重疲労試験結果

3・3・1 平滑試験片による二段多重疲労試験

Table III に平滑試験片を用いた疲労限度以上と以下の応力の組合せによる二段多重疲労試験の実験条件とその結果を示す。表中の σ_{a1} は疲労限度以上の応力、 σ_{a2} は疲労限度以下の応力である。また N_{f1} は σ_{a1} を単独で繰返した場合の破断繰返し数を式(1)から計算したものである。 N_{f2} は式(1)の関係を疲労限度以下まで延長して σ_{a2} の破断繰返し数を推定して計算したものである。さらに、 n_1 、 n_2 は1ブロック中の σ_{a1} 、 σ_{a2}

の繰返し数である。ここで、Test No.1~4 の n_1 は、 $n_1 \doteq N_{f1}/25$ とし、破断寿命がマイナー則に従うものとすれば25ブロックで破断に至ることになる。また、Test No.5 の n_1 は、 $n_1 \doteq N_{f1}/580$ であり、1ブロック中の σ_{a1} の繰返し数を他の四つの条件に比べて少なくしたものである。1ブロック中の σ_{a2} の繰返し数 n_2 は、Test No.1~3 はおよそ1日に1回応力変動を行うように選んだのに対し、Test No.4 は5分ごとに、また Test No.5 は1時間に1回応力変動を行うようにし、Test No.1~3 に比べてひん繁に応力が変動する実験条件である。

Σn_1 、 Σn_2 はそれぞれ破断までに繰返した σ_{a1} 、 σ_{a2} の総繰返し数であり、 $\Sigma n_1/N_{f1}$ はマイナー則による累積繰返し数比、 $\Sigma n_1/N_{f1} + \Sigma n_2/N_{f2}$ は修正マイナー則によるものである。いずれの実験条件においてもマイナー則による累積繰返し数比は1未満となり、危険側の評価となっている。これは疲労限度以下の応力 σ_{a2} の繰返しにより疲労損傷が進行していることを意味している。

3・3・2 小穴付試験片による二段多重試験 予き裂を $\sigma_{a1}=450\ \text{MPa}$ の繰返しで $2a \doteq 1.25\ \text{mm}$ まで導入した後に行った二段多重試験結果を $da/dn \sim \Delta K$ の関係で Fig.9 (a), (b) に示す。図中の直線は式(5)で示した一定振幅下の $da/dn \sim \Delta K$ 関係である。また、応力条件および1ブロック中のそれぞれの応力の繰返し数と、試験結果をマイナー則と修正マイナー則で整理した累積繰返し数比も図中に示した。

Fig.9 (a)の場合、マイナー則による寿命が若干安全側の評価となったのは、 $\sigma_{a2}=260\ \text{MPa}$ の繰返しでき裂が停留しなかったために、その後繰返される $\sigma_{a1}=450\ \text{MPa}$ によるき裂進展速度 da/dn が図中に○印で示すように一定応力下の da/dn (図中の直線) より低くなっているからである。また、修正マイナー則による寿命が安全側の評価となったのは、図中に●印で示した σ_{a2} の繰返しによる1ブロック中の平均き裂進展速度が一定振幅の速度に比べて十分下方に位置しているのに、 σ_{a2} による推定の da/dn が図中の実線で示される速度とみなして寿命推定をしていることがその理

Table III. Two step multi-fold tests conditions and results for smooth specimens.

Test No.	σ_{a1} (MPa)	σ_{a2} (MPa)	N_{f1} ($\times 10^4$)	N_{f2} ($\times 10^5$)	n_1 ($\times 10^3$)	n_2 ($\times 10^5$)	Σn_1 ($\times 10^4$)	Σn_2 ($\times 10^6$)	$\frac{\Sigma n_1}{N_{f1}}$	$\frac{\Sigma n_1}{N_{f1}} + \frac{\Sigma n_2}{N_{f2}}$
1	654	381.5	8.71	47.6	3.5	42.7	8.05	98.7	0.92	21.7
2	600	381.5	19.3	47.6	7.7	42.7	12.3	63.8	0.64	15.0
3	654	463.3	8.71	14.3	3.5	42.7	2.45	26.0	0.24	18.4
4	654	381.5	8.71	47.6	3.5	0.14	7.0	0.27	0.80	0.86
5	654	381.5	8.71	47.6	0.15	1.68	1.52	17.0	0.17	3.74

(a) In the case of small n_2 . (b) In the case of large n_2 .Fig. 9. Relation between da/dn and ΔK under two step multi-fold tests for pre-cracked specimens. Fig. 10. Relation between da/dn and ΔK under two step multi-fold test for pin-holed specimen.

由である。

いっぽう、Fig. 9 (b)に、 σ_{a2} の1ブロック中の繰返し数を Fig. 9 (a) に比べて10倍にした場合の結果を示す。この場合の σ_{a1} の繰返しによるき裂進展速度 (図中の○印) は、Fig. 9 (a)と同様にとくに ΔK の低い領域で、さらに全般的にも一定応力下のき裂進展速度より遅くなっている。これは、二段三重試験で明らかになったように、1ブロック中の σ_{a2} の繰返し数が $n_2 = 1 \times 10^5$ 回と多いために、き裂が停留しその後の σ_{a1} の繰返しによるき裂の遅延条件が成立したためである。図中に●印で示す σ_{a2} の繰返しによるき裂進展速度は、 σ_{a2} によって進展したき裂長さ Δa_2 を1ブロック中のき裂が停留した後の繰返し数も含めた繰返し数 $n_2 = 1 \times 10^5$ 回で割って求めたものである。したがって、この σ_{a2} のき裂進展速度は、一定振幅の進展速度よりも遅く、また1ブロック中の n_2 が少ない Fig. 9 (a) の σ_{a2} の繰返しによる平均き裂進展速度よりもさらにおそくなっている。また、前述のようにき裂が長く ΔK が大きい領域でも、 σ_{a2} の繰返しによる平均き裂進展速度は遅延を示している。これは二段二重試験で示したように、 σ_{a1} と σ_{a2} の間の応力差が大きいので σ_{a2} に応力を変動させた後のき裂の遅延を含んでいるためである。以上のことから、修正マイナー則による寿命が大幅に安全側の評価となった。いっぽう、マイナー則による累積繰返し数比が0.85と若干危険側の結果となった理由は、 σ_{a2} の繰返しによるき裂進展量はき裂が短かければ n_2 が多くても停留き裂になるので短いが、き裂が長くなれば停留現象が起らず、 n_2 が多ければ繰返し数が増すにつれてき裂も進展し続けて破断に至るからである。この実験結果は、SCM 435 材のような高強度材料では、低応力による停留き裂長さ Δa_2^* はS35C材などくらべて十分短く、この Δa_2^* をこえて σ_{a2} でき裂が進展すると破断に至ることがあるこ

とを示している。

Fig. 10 は小穴付試験片によりき裂発生前から二段多重試験を行ったときの、き裂発生後 $2a \approx 1.25$ mm 以降の da/dn - ΔK 関係を示したものである。この場合の各応力の1ブロック中の繰返し数は Fig. 9 (a) の場合と同じであるが、 σ_{a2} の大きさを上げほぼ疲労限度と等しくした。すなわち、各ブロックにおいて σ_{a2} の繰返しでき裂は停留しないので、その後の σ_{a1} の繰返しによる遅延条件は成立せず、その進展速度 (図中の○印) はほぼ一定振幅の速度と等しいかやや加速傾向にある。また、 σ_{a2} の繰返しによる進展速度は図中に●印で示すように一定応力の da/dn より低いが、前二例よりその割合は少ない。これらのことから、マイナー則による累積繰返し数比がほぼ1となった。

4 考 察

平滑材に疲労限度以下の応力が繰返される場合でも、試験片表面に部分的にすべり帯が形成されることが良く知られている。本実験でも確認してはいないが過大応力の繰返しによって局所的に形成されたすべり帯は、その後繰返される過小応力によってさらに密度を増すことが十分に考えられる。 σ_{a1} の繰返しによって形成されたすべり帯は、 σ_{a2} の繰返しによってその密度を増すものの、 n_2 が増すにつれて σ_{a2} によるすべり帯密度は、 σ_{a2} が低ければその増加が飽和するものと考えられる。この現象はき裂進展過程にみられる過小応力によるき裂進展と類似の現象と考えられ、直接的には菊川らによる低炭素鋼を用いた塑性ひずみの観察によって確かめられている。

マイナー則による寿命予測がとりわけ危険側となった Test No. 3 と5について考えると、Test No. 3 は他の条件に比べて σ_{a2} が大きいので、すべり帯の形成が急速に進行し、またすべり帯がき裂になった後は n_2 が多いので σ_{a2} によるき裂進展が急速に進み、破断寿

命が短く $\Sigma n_1/N_1$ が小さくなったものと考えられる。Test No. 5 の実験条件では σ_{a1} と σ_{a2} がひん繁に繰返されるので、 σ_{a2} が低くてもすべり帯密度の増加が飽和することなく増加しつづけ、き裂発生後もき裂進展が n_2 の多い他の実験条件の場合に比べて速くなり、疲労寿命を短くしているものと考えられる。

また、Test No. 4 の実験条件では、 n_1 が Test No. 5 の場合の n_1 より多く、したがって破断までのブロック数も約 5 分の 1 程度であり、しかも n_2 も少ないので σ_{a2} の寿命に及ぼす影響が小さいものと考えられる。Test No. 1 と No. 2 では、 σ_{a1} の大きさを変えて比較したものであるが、 σ_{a2} との応力差の大きい Test No. 1 の方が破断寿命は長くなっている。

しかし、修正マイナー則による寿命予測は、Test No. 4 を除くすべての場合が大幅に安全側の見積りになる。これは 1 ブロック中の σ_{a2} の繰返し全過程にわたってすべり帯の形成やき裂が進展するのではなく、前述のようなすべり帯の密度の増加やき裂進展量が飽和する現象を無視して寿命予測をしていることに主要な原因がある。いっぽう、Test No. 4 の場合は n_2 が他の実験条件に比べて極端に少なくしてあり、 σ_{a2} によるすべり帯密度の増加やき裂進展量が飽和する前に応力が σ_{a1} に変動するため、修正マイナー則による寿命予測が実験結果とほぼ等しくなったものと考えられる。

以上示してきたように、応力の組合せや 1 ブロック中の繰返し数を変えると、マイナー則や修正マイナー則による累積繰返し数比が 1 から大幅にずれる場合がある。これらの原因は、前述のように σ_{a1} や σ_{a2} の繰返しにともないすべり帯の形成やその密度の増加がどのように変化するかによって決定されるが、現在のところ直接的に観察する方法は見出されておらず、したがって定量的な検討はできていない。しかし、き裂発生前の過大・過小応力による疲労損傷は、き裂進展過程における過大・過小応力によるき裂進展挙動の観察から得られた疲労寿命の影響と類似の挙動と見なして考えることによって定性的に説明することができた。

3・2・1, 3・2・2, 3・2・3, 3・3・2項において、高強度鋼におけるき裂進展挙動の特徴について明らかにしてきた。特に、本材料の降伏点は機械構造用炭素鋼に比べて高いために塑性域寸法が短いので、塑性域寸法に支配されると考えられる二段二重や二段二重試験で遅延が生じるき裂長さも短い。また、二段二重試験で σ_{a2} の繰返しによる停留き裂長さも短く、停留するまでに要する繰返し数も少ない。

このように SCM 435 材は過小応力によるき裂進展量も少ないので、低炭素鋼にくらべて過小応力が寿命に及ぼす影響は少ないように見えるが、しかし過小

力でき裂が進展し停留する場合の a_2^* の長さは、低炭素鋼にくらべて 1 けた程短く、この長さを越えてき裂が進展すると停留することなく破断に至る。しかも、き裂長さ a が数 mm を越えて長くなると過小応力による停留現象も起きにくくなり破断に至るので、切欠き材や予き裂材に過小応力が数多く繰返されるような使用条件では、とくにき裂の早期発見が重要な課題となる。

5 結 論

機械構造用合金鋼 SCM 435 を用い、回転曲げによる変動荷重疲労試験を平滑試験片と小穴付試験片で行い、以下の結論を得た。

(1) 小穴付試験片を用いた一定振幅試験によるき裂進展速度を $4K$ を用いて整理すると比較的狭いバンドに収まり著しい応力依存性は認められず、便宜的に $4K$ による整理が可能である。

(2) 疲労限度以上の応力 σ_{a1} の繰返しで予き裂を導入した後、それよりも低い応力 σ_{a2} を繰返ししたときのき裂進展速度の遅延は、応力差が大きいに著しい。また、 σ_{a2} の繰返しでき裂が停留する場合の停留き裂長さは機械構造用炭素鋼と比べて短い。

(3) σ_{a2} の繰返し後に再び応力を σ_{a1} に上昇させる二段三重試験におけるき裂の遅延条件を明らかにした。

(4) 二段多重試験におけるき裂進展挙動は、二段二重、二段三重試験における挙動とはほぼ同様であり、応力変動によるき裂進展現象を考慮することで累積繰返し数比の 1 からのずれを説明できた。

(5) 平滑試験片による二段多重試験による結果を、小穴付試験片のき裂進展挙動の結果から考察した。

最後に、本研究で用いた SCM 435 材は日本材料学会疲労部門委員会の共同利用材料として、(株)神戸製鋼所より提供を受けたものである。付記して謝意を表す。また、実験を担当した当時の本学学生、金子典芳、門元厚嘉の両氏に感謝の意を表す。

(昭和 59 年 11 月 13 日 第 17 回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 三沢啓志, 川田雄一, 日本機械学会論文集, **39**, 2305 (1973).
- 2) 三沢啓志, 川田雄一, 日本機械学会論文集, **41**, 728 (1975).
- 3) 三沢啓志, 材料, **27**, 511 (1978).
- 4) 三沢啓志, 材料, **27**, 865 (1978).
- 5) 福島 明, 川上善道, 三沢啓志, 児玉昭太郎, 日本機械学会論文集, **A-50**, 1471 (1984).
- 6) 福島 明, 児玉昭太郎, 三沢啓志, 日本機械学会論文集, **A-50**, 15 (1984).
- 7) 中島正貴, 加藤容三, 広瀬素尚, 長谷川典彦, 材料, **30**, 584 (1981).
- 8) 中島正貴, 加藤容三, 広瀬素尚, 長谷川典彦, 材料, **31**, 57 (1982).
- 9) 例えば, 菊川 真, 城野政弘, 近藤良之, 材料, **30**, 276 (1981).
- 10) 菊川 真, 城野政弘, 宋 智浩, 材料, **23**, 743 (1974).