SCM 440 鋼の高平均応力下の疲労強度に関する研究*

川上善道^{*1}, 櫻井剛^{*1}, 出口明雄^{*1}

Study on Fatigue Strength of SCM 440 Steel under High Mean Stress

Yoshimichi KAWAKAMI^{*2}, Tsuyoshi SAKURAI and Akio DEGUCHI^{*2} Yokohama Research & Development center, Mitsubishi Heavy Industries,
12 Nishiki-cho, Naka-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 231-8715 Japan

Fatigue tests of SCM 440 chromium molybdenum steel were carried out under high mean stress. Prediction method of fatigue strength based on fracture mechanics was developed and the following conclusions reached. (1) It has been shown that the ΔK_{th} becomes constant value at strain ratio $R_e > 0.5$, just as the fatigue limit becomes constant at $R_e > 0.5$. (2) It has been shown that the fatigue diagram could make without fatigue tests, if the range of stress intensity factor ΔK of intrinsic crack was compared with ΔK_{th} in various mean stress. (3) The prediction fatigue limit is in good agreement with the experimental value under high mean stress.

Key Words: Fatigue, Fracture Mechanics, Crack Closure, Notch, High Mean Stress, Intrinsic Crack, Stress Intensity Factor, SCM 440

1. 緒 言

稼働中の機械構造物において、冷却用の油穴交差部やねじ底等の応力集中部では、降伏ひずみをはるかに越える平均ひずみが生じることがある。

近年、FEM などの応力解析の急速な進歩により、高応力集中部のピーク応力が算出できるようになってくると、稼働実績のある機器において、従来の Goodman 線図等を逸脱するような高平均応力下で使用されていたにも関わらず、疲労損傷が生じていないケースがあることが判明してきた。

このような事実から、高平均応力下において、ある応力振幅以下では疲労破壊しない領域があることが分かってきた^①。そこで、近年の限界設計に対応して、高平均応力下の疲労強度評価法を確立して、機械構造の強度信頼性を確保する必要がある。

本研究では、SCM440 平滑材および切欠材について、高平均応力場を主体とした疲労試験を行い、疲労破壊しない限界応力を破壊力学的に評価する手法について検討した。

2. 実験方法

2・1 試験体 試験材には、クロムモリブデン鋼 SCM440 を用いた。表 1 にその機械的性質を示す。本材料は取鍋精錬法 (VHF 法) によって製造されたインゴットから所定の寸法に鍛伸された後、TR 鍛造によって鍛造加工されたものである。

試験片は全てフローに平行な方向で採取した。

Table 1 Mechanical properties

0.2% proof stress MPa	Tensile strength MPa	True stress of fracture MPa	Elongation %	Reduction of area %
697	883	1388	21.6	54.9

2・2 疲労試験 平行部径 $\Phi 8$ mm の丸棒試験片を用いて、平均応力と応力振幅を変化させた疲労試験を実施した。試験は荷重制御とひずみ制御の 2 種類を実施したが、1%未満のひずみについては試験片に貼り付けたひずみゲージにより、それ以上のひずみについては評点間距離 25mm の伸び計により計測した。平滑材の試験片形状を図 1 に示す。

* 原稿受付 2002 年 4 月 24 日。

^{*1} 正員、三菱重工業 (株) 横浜研究所 (〒231-8715 横浜市中区錦町 12)。

E-mail: Yoshimichi_Kawakami@dymw.mhi.co.jp

また、図2に示す切欠半径が3mm, 1mm, 0.1mmの3種類の切欠き付き平板試験片についても、疲労試験を行った。

実験は、室温、大気中にて、容量 $\pm 98\text{kN}$ または $\pm 49\text{kN}$ の電気油圧式サーボ疲労試験機を用いて行った。荷重は、繰り返し速度 $f=20\sim 30\text{Hz}$ の正弦波である。

Fig. 1 Round bar specimen geometry

Fig. 2. Geometry of specimen with hole notch

3. 実験結果

3・1 平滑材の疲労強度 各試験条件と結果を表2に示す。そのうち、荷重制御試験の繰返し応力条件および、疲労破壊の有無を図3に示す。同様に変位制御試験について図4に示す。

これらの図中で、破線で示した繰返し応力条件が、疲労破壊したものであり、実線で示したものが疲労破壊しなかったものである。各条件の最大応力は、本材料の応力-ひずみ曲線上にあるが、ひずみが8%程度の高平均ひずみ領域においても、疲労破壊しない振幅

の存在が認められる。この振幅範囲は、上限が応力-ひずみ曲線であり、下限が図3、図4中に示した一点鎖線である。なお、両図中の一点鎖線の応力-ひずみ関係は、同じものである。

これより、①荷重制御、変位制御によらず、平均応力が大きくなっても一定の応力振幅以下では疲労破壊しない、②その振幅は、荷重制御、変位制御とも、ほぼ同じく、約 400MPa であるということが分かる。

また、試験後の破面を観察すると、疲労き裂の

Table 2 Results of fatigue test used smooth specimen

TP. No	C.V.	Symbol	Stress MPa (Strain %)		Stress ratio (Strain ratio)	Number of cycles at failure
			Mean	Amplitude		
L1	L	◆	0 (0.00)	372 (0.18)	-1.0 (-1.0)	$>10^7$
		■	676 (4.01)	157 (0.08)	0.62 (0.96)	2.43×10^5
L2	L	▲	0 (0.00)	421 (0.20)	-1.0 (-1.0)	$>10^7$
		■	725 (4.03)	108 (0.06)	0.74 (0.97)	$>10^7$
L3	L	◆	0 (0.00)	490 (0.24)	-1.0 (-1.0)	1.31×10^5
		■	294 (0.14)	294 (0.14)	0.0 (0.0)	$>10^7$
L4	L	◆	0 (0.00)	490 (0.24)	-1.0 (-1.0)	1.31×10^5
		■	637 (3.99)	196 (0.10)	0.53 (0.95)	1.80×10^5
L5	L	▲	343 (0.36)	343 (0.19)	0.0 (0.31)	1.31×10^5
		■	780 (2.26)	49 (0.03)	0.88 (0.97)	$>10^7$
L6	L	◆	0 (0.00)	490 (0.24)	-1.0 (-1.0)	$>10^7$
		■	676 (4.01)	157 (0.08)	0.62 (0.96)	$>10^7$
L7	L	◆	0 (0.00)	490 (0.24)	-1.0 (-1.0)	$>10^7$
		■	735 (2.93)	97 (0.06)	0.77 (0.96)	$>10^7$
S1	S	◆	399 (0.34)	197 (0.10)	0.34 (0.55)	1.11×10^6
		■	503 (0.34)	87 (0.04)	0.70 (0.79)	$>10^7$
S2	L	◆	637 (1.53)	157 (0.08)	0.60 (0.91)	$>10^7$
		■	676 (7.51)	196 (0.10)	0.55 (0.98)	7.49×10^5
S3	L	◆	495 (0.42)	157 (0.07)	0.52 (0.71)	$>10^7$
		■	676 (4.01)	157 (0.08)	0.62 (0.96)	5.59×10^5
S4	L	◆	515 (0.84)	153 (0.08)	0.54 (0.83)	$>10^7$
		■	676 (4.01)	157 (0.08)	0.62 (0.96)	7.11×10^5
S5	S	◆	489 (0.88)	206 (0.11)	0.41 (0.78)	3.11×10^5
S6	S	◆	626 (4.51)	193 (0.12)	0.53 (0.95)	4.58×10^5
S7	S	◆	745 (7.71)	77 (0.05)	0.81 (0.99)	$>10^7$

*) C.V.: Controlled value L: Load S: Strain

Fig. 3 Non-failure stress range under load controlled condition

Fig. 4 Non-failure stress range under strain controlled condition
 起点に介在物や、前段の荷重条件による停留き裂が観察されるケースが見られた。

図5は、TP No.S1の変位制御型疲労試験の破面の観察結果である。走査型電子顕微鏡を用いたX線分析により、疲労き裂の起点にAlの偏析が認められた。

(a) SEM photograph of fracture surface at crack initiation

(b) Aluminum distribution view by EPMA

Fig. 5 Scanning microscope view of fracture surface
 (TP No. S1)

また、図6は $\sigma_m = 725 \text{ MPa}$, $\sigma_a = 108 \text{ MPa}$ の荷重制御型疲労試験を繰返し数 $N = 10^7$ 回まで行い、疲労破壊しなかった試験片を、引続き $\sigma_m = 637 \text{ MPa}$, $\sigma_a = 196 \text{ MPa}$ の条件で繰返し、 $N = 1.74 \times 10^8$ 回で疲労破壊した破面を観察したものである(TP No. L2)。

Fig. 6 Scanning microscope view of non propagation surface crack (TP No. L2)

Table 3 Defect shape of smooth specimen

Defect shape mm	$a_s^{*)}$ mm	Defect shape mm	$a_s^{*)}$ mm
TP No. L1 0.38 	0.19	TP No. S1 0.23 	0.12
No. L2 0.19 	0.10	No. S2 0.124 	0.03
No. L3 0.18 	0.10	No. S3 0.11 	0.06
No. L4 0.22 	0.11	No. S4 0.10 	0.10
No. L5 0.07 	0.08	No. S5 0.19 	0.09
		No. S6 0.16 	0.07

□ Fatigue crack
 ▨ Inclusion or segregation

*) a_s : Equivalent radius of semicircular surface crack

同図の上方に、前段の荷重条件下において停留したと考えられる表面き裂が見られる。

このような前段の応力の繰返しによって生じたものの $N=10^7$ 回では破断に至らず、次の応力条件下の疲労進展の起点となった疲労き裂や、起点に認められた不純物の偏析等の形状寸法を表3にまとめた。

実際の欠陥は、複雑な形状をしているが、日本溶接協会規格 WES2805²⁾に従って表面楕円き裂とみなし、それと等価な応力拡大係数 (K 値) を有する半円き裂の深さ a_0 を、Newman & Raju の式³⁾より求め、併せて表3中に記した。

3・2 切欠き材の疲労強度 切欠き材の疲労試験結果は、4章の疲労強度推定結果と併せて記す。電子顕微鏡により、破面起点部を観察したが、平滑材で見られたような、不純物の偏析や前段の荷重による停留き裂は認められなかった。

4. 疲労強度の推定法検討

4・1 平滑材の疲労強度

4・1・1 基本的考え方 平滑材の実験結果では、降伏点 σ_y を越える平均応力条件であっても疲労破壊しない応力振幅が存在し、この振幅は、ほぼ一定となることを確認した。

このような現象が起こる理由として、材料のき裂進展下限界値 ΔK_{th} が高応力比(高平均応力)条件において、一定となることに対応していると考えられる。したがって、破壊力学的手法を用いれば、この現象を評価できると考えられる。

そこで、き裂のない材料についても破壊力学的取扱いが可能である固有欠陥モデル⁴⁾を用い、平均応力の影響を考慮した下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} と固有欠陥 a_0 から、疲労限度線図を推定する手法を検討した。

4・1・2 微小欠陥を考慮した疲労限度の推定

固有欠陥モデル⁴⁾は、平滑材においても材料固有の潜在き裂(固有欠陥)が存在することを仮想し、微小き裂から長いき裂に至るまでの疲労強度を統一的に評価する手法である。

この手法に依れば、材料の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を基に欠陥材の疲労強度 $\Delta \sigma_{th}$ は次式で算定出来る。

$$\Delta \sigma_{th(R)} = \frac{\Delta K_{th(R)}}{f \sqrt{\pi(a + a_{0(R)})}} \quad \dots \quad (1)$$

ここで、 a : 実在の欠陥寸法 a_{00} : 固有欠陥寸法
 f : 補正係数

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad \dots \quad (2)$$

R : 応力比, $\sigma_{\min}$: 最小応力, $\sigma_{\max}$: 最大応力
 式(1)において、欠陥がない平滑材の疲労限度 $\Delta \sigma_w$ は実在の欠陥寸法 $a=0$ の場合に相当することから、固有欠陥寸法 a_0 は次式で求められる。

$$a_{0(R)} = \left(\frac{\Delta K_{th(R)}}{f \cdot \Delta \sigma_{w(R)}} \right)^2 / \pi \quad \dots \quad (3)$$

ΔK_{th} は応力比 R によって変化するが、き裂が開いている範囲の ΔK である有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} はほとんど変化しないことが知られている⁶⁾。

ΔK_{eff} は、次式で示される。

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K \quad \dots \quad (4)$$

ここで、き裂開口比 U は次式で示される。

$$U = \frac{K_{\max} - K_{op}}{K_{\max} - K_{\min}} \quad \dots \quad (5)$$

$K_{\max}$: 最大応力拡大係数

$K_{\min}$: 最小応力拡大係数

K_{op} : き裂開口応力拡大係数

加藤らは応力比 R と U の関係を次式で与えている。

$$U = 1 \quad (R \geq 0.5)$$

$$U = \frac{1}{1.5 - R} \quad (R < 0.5) \quad \dots \quad (6)$$

ΔK_{th} を求める実験は、完全片振り ($R=0$) 条件で実施されることが多いため、 $\Delta K_{th(R=0)}$ を基準にして他の応力比 R における ΔK を求める式を算出する。

式(6)で $R=0$ とすると、

$$U = 2/3 \quad (R=0) \quad \dots \quad (7)$$

任意の応力比 R と、片振り ($R=0$) における有効下限界応力拡大係数範囲 $\Delta K_{th,eff}$ が等しいとくと⁶⁾、

$$\Delta K_{th,eff(R)} = \Delta K_{th,eff(R=0)} \quad \dots \quad (8)$$

となり、 $R < 0.5$ のとき、式(6)と式(7)から次式が成り立つ。

$$\Delta K_{th(R)} \times \frac{1}{1.5 - R} = \Delta K_{th(R=0)} \times \frac{2}{3}$$

$$\Delta K_{th(R)} = \left(1 - \frac{2}{3} R \right) \Delta K_{th(R=0)} \quad (R < 0.5) \quad \dots \quad (9)$$

$R \geq 0.5$ については、 U が一定なので、

$$\Delta K_{th,eff(R)} = \Delta K_{th,eff(R=0)}$$

$$\Delta K_{th(R)} = \frac{2}{3} \Delta K_{th(R=0)} \quad (R \geq 0.5) \quad \dots (10)$$

一方、疲労限度 $\Delta \sigma_w$ に対する平均応力の影響は修正 Goodman 線図の考え方にに基づき、さらに ΔK_{th} が $R \geq 0.5$ ではほぼ一定となることから⁹⁾、 $R \geq 0.5$ においては疲労き裂が一定応力以下では発生しないと考えると、 $\Delta \sigma_w$ についても一定として評価する。

修正 Goodman の考え方は、式(11)で示される。

$$\sigma_{w(R)} = \sigma_{w(R=-1)} - \frac{\sigma_{w(R=-1)}}{\sigma_B} \times \sigma_m \quad \dots (11)$$

また、平均応力 σ_m と、疲労限度 (片振幅) $\sigma_{w(R)}$ は、応力比 R を用いて、式(12)で表される。

$$\sigma_m = \frac{1+R}{1-R} \times \sigma_{w(R)} \quad \dots (12)$$

よって、式(11)と式(12)から、 $R < 0.5$ の場合の疲労限度線図は、以下ようになる。

$$\Delta \sigma_{w(R)} = \frac{2(1-R) \cdot \sigma_B \cdot \sigma_{w(R=-1)}}{(1-R) \cdot \sigma_B + (1+R) \cdot \sigma_{w(R=-1)}} \quad (R < 0.5) \quad \dots (13)$$

また、 $R \geq 0.5$ の場合は、次のように一定値になる。

$$\Delta \sigma_{w(R)} = \frac{\sigma_B \cdot \sigma_{w(R=-1)}}{0.5 \sigma_B + 1.5 \sigma_{w(R=-1)}} \quad (R \geq 0.5) \quad \dots (14)$$

以上により、無欠陥材の片振りの ΔK_{th} と、両振りの疲労限度 σ_w の実験値を用いて、欠陥材の疲労限度線図を推定する手法の流れを図7に示した。手順としては、まず、実験値から、無欠陥材における様々な応力比 R に対応した ΔK_{th} と σ_w を推定する。その結果から a_0 を求め、式(1)に代入して、種々の R に対する欠陥材の疲労限度 $\Delta \sigma_{th}$ を算出する。そして、各平均応力に対応した、任意の欠陥寸法を有する材料の疲労限度線図を作成する。

この手法では、 $R \geq 0.5$ の高平均応力下では、 ΔK_{th} と a_0 は一定値になり、従って、 $\Delta \sigma_{th}$ も一定値になる。

無欠陥の平滑材疲労限度 σ_w については、物質・材料研究機構の疲労強度データ⁹⁾より、供試材 SCM440 の引張り強さ $\sigma_B = 883 \text{ MPa}$ を基に推定すると、両振り ($R = -1$) で $\sigma_w = 477 \text{ MPa}$ となる。

また、種々の鋼材の ΔK_{th} をまとめた文献⁹⁾から、本供試材の降伏点 $\sigma_y = 700 \text{ MPa}$ に対応した値として、 $\Delta K_{th} = 9.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ と推定した。

そして、平滑材の各試験の ΔK を、式(15)の丸棒の表面半円き裂の ΔK 算出式¹⁰⁾で求め、応力比 R で整理して図8に、ひずみ比 R_e で整理して図9に示す。

$$\Delta K = 0.66 \Delta \sigma_a \sqrt{\pi(a + a_{0(R)})} \quad \dots (15)$$

Fig. 7 Fatigue diagram prediction flow chart

Fig. 8 ΔK & ΔK_{th} V.S. $1-R$ of smooth specimen with inclusion or segregation

Fig. 9 ΔK & ΔK_{th} V.S. $1-R_e$ of smooth specimen with inclusion or segregation

ここで、固有欠陥寸法 $a_{0(R)}$ は式(9), (10), (13), (14) を式(3)に代入して求めた。 a_0 は、 R によって多少変化するが、ほぼ 0.2mm 程度になる。

図 8 中には式(9), (10)で示される ΔK_{th} を併記した。また、図 9 中には式(9), (10)において応力比 R をひずみ比 $R_\epsilon = (\text{最小ひずみ } R_{\min}) / (\text{最大ひずみ } R_{\max})$ に置き換えた場合の ΔK_{th} を併記した。

両図とも実験におけるき裂進展、非進展の境界付近に ΔK_{th} が位置していることが分かるが、ひずみ比 R_ϵ を基準にした方が、低ひずみ比～高ひずみ比領域において ΔK_{th} と実験結果がより良く一致していることが分かる。

前記の $\Delta K_{th(R)}$ と $a_{0(R)}$ を式(1)に代入して、微小欠陥を有する場合の疲労限度 $\Delta \sigma_{th(R)}$ を計算して、疲労限度線図を作成した。ここで、式(1)における補正係数 f は、式(15)の $f=0.66$ を用いた。

図 10 に、公称応力で表示した疲労限度線図を示す。同図中に、実験結果と式(1)による欠陥寸法 0.1mm の推定限界線を示すが、平均応力が低い領域では誤差があるものの、推定結果は、ほぼ微小欠陥材の疲労強度を良く現わしているものと考えられる。

Fig. 10 Fatigue stress diagram of smooth specimen with small defect

図 11 にひずみで表示した疲労限度線図を示す。

実欠陥の寸法である約 0.1mm を考慮した疲労限度線の推定値は、ほぼ実験結果に対応していると考えられる。高平均ひずみ領域では、塑性崩壊付近まで、一定の疲労限度ひずみ振幅の存在が認められる。

Fig. 11 Fatigue strain diagram of smooth specimen with small defect

4・2 切欠き材の疲労強度 切欠材の場合には、切欠底奥方向に生じる応力分布の影響を考慮する必要があるが、この影響を K 値算出時に考慮すれば、平滑材と同様の方法で評価出来ると考えられる。

切欠底にき裂がある場合の K 値計算式としては、次の Lukas の式(16)がある。

$$\Delta K = \frac{1.122\alpha\Delta\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{1+4.5(a/\rho)}} = \frac{1.122\Delta\sigma_{\max}\sqrt{\pi a}}{\sqrt{1+4.5(a/\rho)}} \quad \dots \dots \dots (16)$$

$\Delta\sigma$: 公称応力範囲 $\Delta\sigma_{\max}$: 切欠底ピーク応力範囲
 α : 応力集中係数 ρ : 切欠半径

上式より、固有欠陥モデルで表せば、切欠材の疲労限度は次式で表される。

ピーク応力表示

$$\Delta\sigma_{\max, th(R)} = \frac{\Delta K_{th(R)}}{1.122\sqrt{\pi(a+a_{0(R)})}} \sqrt{1+4.5\left(\frac{a+a_{0(R)}}{\rho}\right)} \quad \dots \dots \dots (17)$$

公称応力表示

$$\Delta\sigma_{th(R)} = \frac{\Delta K_{th(R)}}{\alpha \times 1.122\sqrt{\pi(a+a_{0(R)})}} \sqrt{1+4.5\left(\frac{a+a_{0(R)}}{\rho}\right)} \quad \dots \dots \dots (18)$$

なお、切欠材試験片は平板であるが、有限板片側に長さ a のき裂がある場合の K 値は、板幅に対して a が非常に小さいとして

$$\Delta K = 1.122 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad \dots \dots \dots (19)$$

であるので、 $a_{0(R)}$ を求める式(3)において補正係数 $f=1.122$ とした。

以上により、式(9)、(10)から $\Delta K_{th(R)}$ を求め、式(13)、(14)から $\Delta \sigma_{w(R)}$ を算出し、それぞれを式(3)に代入して $a_{0(R)}$ を求め、 $\Delta K_{th(R)}$ と $a_{0(R)}$ を式(17)または(18)に代入して、切欠を有する場合の疲労限度 $\Delta \sigma_{th(R)}$ を計算した。

図 12 に公称応力で表示した疲労限度線図を、図 13 にピークひずみ表示の疲労限度線図をそれぞれ示す。

なお、切欠材の実欠陥サイズ a は、破面観察結果において欠陥が見られなかったことから $a=0\text{mm}$ とした。

図 12 において、切欠半径 $\rho=0.1\text{mm}$ および 1mm では、実験結果と推定値がよく合っているが、 $\rho=3\text{mm}$ では平均応力が低い領域において、推定値が実験値より小さくなっている。

図 13 の実験のピークひずみは、切欠き底に貼った集中ゲージで計測した値である。なお、切欠き半径 $\rho=0.1\text{mm}$ の場合は、寸法の制約上、ピークひずみを計測出来なかった。ピークひずみで推定した $\rho=1\text{mm}$ と 3mm の疲労限度線図は、ほぼ同じになり、両者の実験値も同様な傾向を示している。平均ひずみが低い領域では推定と実験値に差が見られるが、高平均ひずみ領域では両者はほぼ一致している。

また、今回の疲労限度推定値は、実験結果に対して低めであり、安全側の評価を与えていることが分かる。

Fig. 12 Fatigue stress diagram of notched specimen

Fig. 13 Fatigue strain diagram of notched specimen

5. 結 言

SCM440 平滑材および切欠材について高平均応力場を主体とした疲労試験を行い、疲労破壊しない限界応力を破壊力学的に評価する手法について検討を行った。その結果を以下に示す。

- ①疲労強度評価法の判定値となる ΔK_{th} を、微小欠陥を有する材料の疲労試験から求めた。その結果、両振から降伏応力を越える高平均応力状態に至る ΔK_{th} を確認出来た。
- ②欠陥を有する材料において固有欠陥寸法 a_0 を、応力比の影響を考慮して算出し、微小欠陥材の疲

労限度線図を作成した。推定した疲労限度線図と実験結果は、両振から高平均応力状態に至るまで良く一致した。

- ③応力集中を有する材料に対し、 a_0 を考慮して疲労限度線図を推定する手法を提案した。 $\rho=3, 1, 0.1\text{mm}$ の切欠きを有する試験片による実験結果は、高平均応力域では推定値と概ね一致し、低平均応力域では推定が安全側になる傾向が見られた。

文 献

- (1) 例えば, Yamanouchi, H., Kino, H., Ebara R., Recent Investigations on Corrosion Fatigue Behavior of 12Cr Stainless Steel for Steam Turbine Blades, ASME Paper 82-JPGC-Pwr-18, (1982)
- (2) 日本溶接協会, 溶接継手の脆性破壊発生及び疲労き裂進展に対する欠陥の評価方法, WES2805-1997, (1997), 7.
- (3) Newman, J.C. Jr. and Raju, I.S., Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads, NASA Technical Paper 1578, (1979)
- (4) Newman, J.C. Jr. and Raju, I.S., Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies, NASA TM83200, (1981)
- (5) El Haddad, M.H., Smith, K.N. and Topper, T.H., Fatigue Crack Propagation of Short Cracks, *Trans. ASME J. Eng. Mater. Technol.*, **110**(1979), 42-46.
- (6) Elber, W., Damage Tolerance in Aircraft Structures, ASTM STP486, (1971), 230-242.
- (7) 加藤昭彦・栗原正好・川原正言, 広範囲の応力比条件下での疲労き裂伝播速度式の検討—き裂開閉口挙動に基づいた考察—, 日本造船学会論文集, No.153(1983), 336-343.
- (8) 科学技術庁金属材料技術研究所(現・物質材料研究機構), JIS 機械構造用鋼の基準的疲労特性, 金材技研疲労データシート資料 5, (1989), 53.
- (9) 中井善一・田中啓介・川島理生司, 鉄鋼材料の疲労き裂伝ば下限界に及ぼす応力比の影響, 材料, **33**-371, (1983), 1045-1051.
- (10) Murakami, Y. et al, Stress Intensity Factors Handbook Vol.2, Pergamon Press, (1987), 654.
- (11) Lukas, P. and Klesnil, M., Fatigue limit of notched bodies, *Mater.Sci.Eng.*34,(1978),61.