

岡山大学工学部 本田和男  
 津山工業高専 ○戸井詔彦  
 岡山大学工学部 徳田 勝

## 1. 緒言

近年、き裂開閉現象、特に引張り荷重下でのき裂開口現象に対する圧縮残留応力の重要性が議論されており、その効果が解析および実験において確認されている。しかしながら、き裂面の接触圧と圧縮残留応力の関係および繰返し負荷時における残留応力の挙動は定量的には未だ明確ではないなど、き裂開閉に対する残留応力の効果は複雑であり、またき裂近傍の残留応力分布は切欠きの形状寸法、き裂長さ、材質およびき裂作製時の繰返し応力条件によって互に大きく異なっているはずである。したがってき裂伝ばに重要なき裂開閉現象を理解するには、これら種々の因子がき裂近傍の残留応力分布に及ぼす影響を十分把握し、この残留応力分布とき裂開閉の関係を実験的に解明することが重要であると考えられる。この観点から筆者らはき裂開閉現象と残留応力分布の相関性について一連の研究を進め、すでに三種類の材料(S55C, S35C, SS41)について、き裂開閉現象はき裂面近傍に分布する圧縮残留応力と密接に関係していることを実験的に明らかにしている<sup>1)2)</sup>。本報告は種々の繰返し応力の下で作製した疲れき裂について、その開閉挙動を調べるとともにX線を用いてき裂近傍の残留応力分布を測定し、それらの切欠きおよびき裂長さに対する依存性、並びに両者の相関関係を追求したものである。

## 2. 実験方法

2・1 試験片および試験機 用いた材料はS55C、S35C、SS41材であり、焼なまし後の降伏応力はそれぞれ27.0、33.4、38.5 kg/mm<sup>2</sup>であった。試験片はFig. 1に示す三種類の形状寸法に仕上げた後、真空中で730°C (S55C, S35C) 680°C (SS41) でそれぞれ3時間の真空焼なましを行い、電解研磨を施した後実験に供した。疲れ試験は電気油圧式引張り圧縮疲れ試験機で行い、き裂長さの測定は適宜試験を中断し、試験機に具備せしめた光学顕微鏡を用いて±10 μmの精度で行った。

2・2 き裂開閉の測定 き裂開閉挙動はき裂材の荷重-変位曲線より推定した。すなわち疲れ試験を適宜中断し、最初から試験片に具備せしめている渦電流損およびインダクタンス変化式微小変位測定器(Fig. 2)を用いて、試験片を試験機より取り外すことなくその荷重-変位曲線を

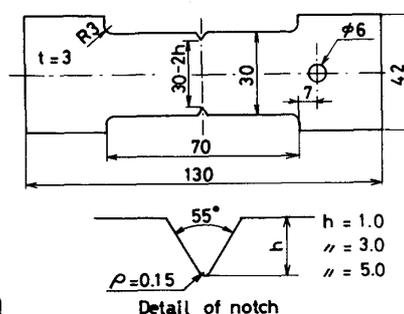


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen.

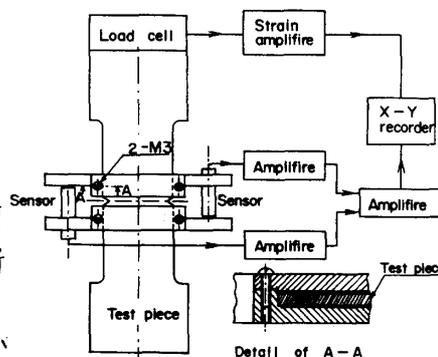


Fig. 2 Measurement diagram of stress-displacement curve.

描かした。なお測定時の応力繰返し速度は0.3Hz, 変位測定器の取付方法は試験片両端での点支持とした。

2.3 残留応力測定法 使用した装置はS.C.を用いた普通のX線応力測定装置であり、X線入射角は0°から45°まで5°間隔に10段階とした。なお測定時、X線照射面積 $A_T$ がき裂近傍の塑性域寸法よりも小さくなるように留意し、実際には $A_T$ は $0.10\text{mm}^2$ (平行ビーム法, 振動角 $\Delta\phi = \pm 2.5^\circ$ ) および $0.7\text{mm}^2$ (シングルピンホール法,  $\Delta\phi = \pm 6.5^\circ$ ) の二種類とした。すなわち平行ビーム法では、 $A_T \geq 1.0\text{mm}^2$ で比較的良好な回折X線プロファイルが得られるが、 $0.7\text{mm}^2$ の場合には回折X線強度が微弱で良好なプロファイルが得られず、応力測定も不可能である。しかしシングルピンホールスリットを採用すれば $0.7\text{mm}^2$ でも500~1000 cpsの回折X線強度が得られ、プロファイルの形状も良好である。

Fig.3はシングルピンホールスリット使用に伴う測定応力値の精度を調べた結果である。すなわち測定応力値は機械的に負荷された応力とほぼ一致し、その誤差は高々 $\pm 1.0\text{kg/mm}^2$ であるので、シングルピンホールスリットの使用に関しては何ら問題はないと判断した。

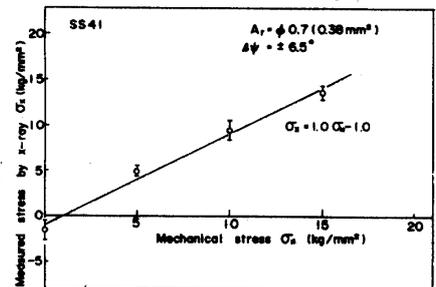


Fig. 3 Relation between mechanical stress and measured stress by x-ray.

3. 実験結果および考察

3.1 き裂開閉挙動 Fig.4は応力振幅 $\sigma_a = 9.0, 12.0, 15.0$ および $18.0\text{kg/mm}^2$ を負荷してそれぞれ長さ $4.0\text{mm}$ のき裂を作製し、それらに対する荷重-変位関係を示したものである。すなわち荷重がA(図中)より増加するに伴い変位 $\delta_c$ は直線的に増加するが、BC間ではその増加率は減少、Cに達すると再び直線的に増加し、また除荷に伴いDEは直線となるのが認められる。なおBC間の変化はき裂の一部開口に伴うコンプライアンスの変化に対応していると考えられるので、B, Cはそれぞれ切欠底およびき裂先端の開口に対応していることになり、それらはいずれも $\sigma_a$ の増大に伴い減少するが、このことは次のように理解できる。すなわち $\sigma_a$ が大きくなれば、き裂面は疲れの圧縮負荷過程において大きく圧縮塑性変形され、したがってき裂面は無負荷時にそのかなりの部分で開口していることになるのでき裂先端はわずかな引張り、また切欠底は大きな圧縮負荷の下で開口したと思われるが、このことはPhoto.1からも明らかである。Table 1に荷重-変位曲線より推定した切欠底およびき裂先端の開口応力 $\sigma_{np}$ ,  $\sigma_{tp}$ を一括して示す。

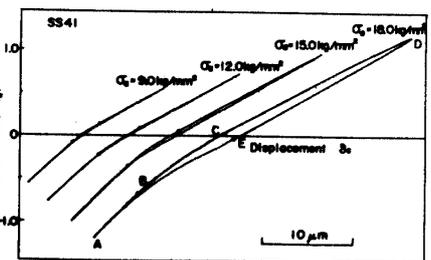


Fig. 4 Load-displacement curves.

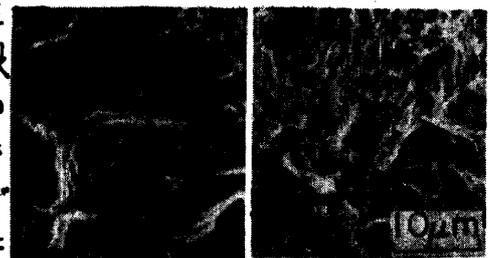
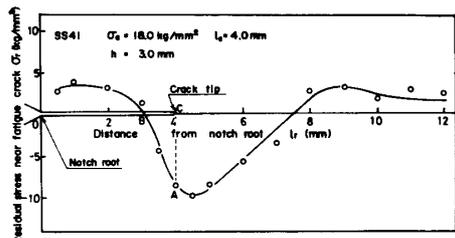


Photo. 1 Electron microfractographs near notch root of SS41. (a)  $\sigma_a = 18.0\text{kg/mm}^2$  (b)  $\sigma_a = 12.0\text{kg/mm}^2$

Cyclic stress ( $\text{kg/mm}^2$ )	S59C		S59C		SS41	
	$\sigma_{tp}(\text{kg/mm}^2)$	$\sigma_{np}(\text{kg/mm}^2)$	$\sigma_{tp}(\text{kg/mm}^2)$	$\sigma_{np}(\text{kg/mm}^2)$	$\sigma_{tp}(\text{kg/mm}^2)$	$\sigma_{np}(\text{kg/mm}^2)$
$\sigma_a = 9.0$		6.7		5.9		4.2
$\sigma_a = 18.0$	-3.2	3.2	-5.1	2.0	-7.9	0.4
$\sigma_a = 15.0$	-3.0	3.4	-4.1	2.3	-5.0	0.7
$\sigma_a = 12.0$	-1.9	3.7	-2.7	3.5	-3.3	1.4
$\sigma_a = 9.0$					-1.2	2.0

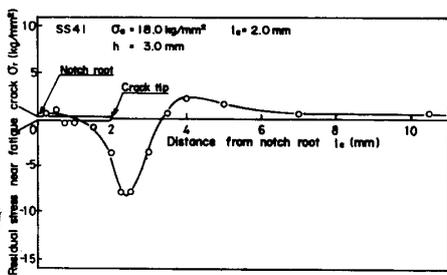
が、このことはPhoto.1からも明らかである。Table 1に荷重-変位曲線より推定した切欠底およびき裂先端の開口応力 $\sigma_{np}$ ,  $\sigma_{tp}$ を一括して示す。

3.2 き裂近傍の残留応力分布 Fig.5は種々の疲  
れき裂について、その近傍に分布する残留応力を測定し  
た結果である。すなわち圧縮残留応力の最大値はいずれ  
もほぼ一定(-8.0~-9.0 kg/mm<sup>2</sup>)となり、この応力はき裂  
先端より前方に向って急激に、また後方に向っても急  
激に減少し、切欠底近傍では0、あるいは引張りに移行

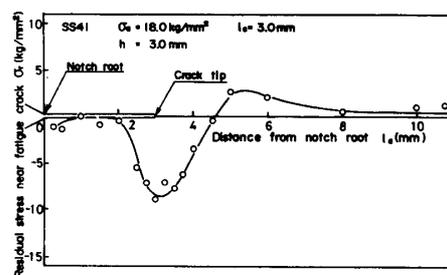


(a)  $\sigma_a = 18.0 \text{ kg/mm}^2$ ,  $h = 3.0 \text{ mm}$ ,  $l_c = 4.0 \text{ mm}$ .

しているのが認められる  
(Fig.5 a~c, e)。しか  
しき裂面近傍におけ  
る圧縮残留応力の消  
失は先に述べたき裂  
面の圧縮塑性変形に  
起因していると思  
われ、この領域のき

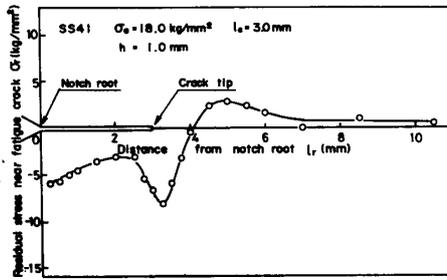


(b)  $\sigma_a = 18.0 \text{ kg/mm}^2$ ,  $h = 3.0 \text{ mm}$ ,  $l_c = 2.0 \text{ mm}$ .

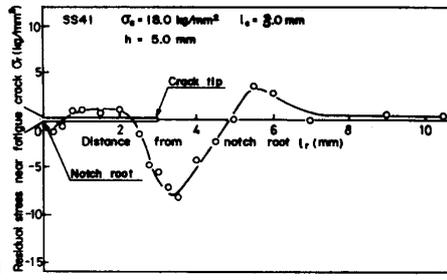


(c)  $\sigma_a = 18.0 \text{ kg/mm}^2$ ,  $h = 3.0 \text{ mm}$ ,  $l_c = 3.0 \text{ mm}$ .

裂面は無負荷時にす  
で開口していること  
になる。またFig.5  
(d)および(f)の  
き裂面近傍に分布  
する残留応力はす  
べて圧縮であるが、  
このことは $\sigma_a$ ある

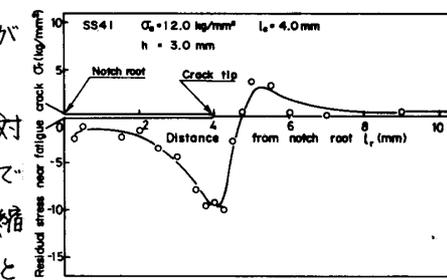


(d)  $\sigma_a = 18.0 \text{ kg/mm}^2$ ,  $h = 1.0 \text{ mm}$ ,  $l_c = 3.0 \text{ mm}$ .



(e)  $\sigma_a = 18.0 \text{ kg/mm}^2$ ,  $h = 5.0 \text{ mm}$ ,  $l_c = 3.0 \text{ mm}$ .

いは切欠の応力集中  
効果が小さいため、  
Photo.1(b)のごと  
き裂面の圧縮塑性変  
形がきわめて局所  
的となることに起因  
すると思われる。



(f)  $\sigma_a = 12.0 \text{ kg/mm}^2$ ,  $h = 3.0 \text{ mm}$ ,  $l_c = 4.0 \text{ mm}$ .

ところで、き裂開口に直接関係するき裂面の接触圧に  
対応する残留応力はき裂面近傍で測定される圧縮残留  
応力であると考えられるので、この尺度としてFig.5(a)  
に示す圧縮残留応力の面積 $A_c$ (ABCで囲まれる面積)を用  
いることにする。Fig.6はき裂先端の開口応力 $\sigma_{op}$ と $A_c$   
の関係を示したものであり、図中の二重丸は無負荷時  
にき裂が切欠底まで完全に開口していたと仮定して  
 $\sigma_{op}$ を補正した計算値である。すなわちこの補正を行  
えば、 $\sigma_{op}$ と $A_c$ の間には $\sigma_a$ 、応力負荷形式、材質な  
どに無関係に一つの直線関係が成立するようであり、  
またこのことはき裂開閉を直接観察することが困難  
な、例えば大型構造物などに生じたき裂に対しても、  
その近傍の残留応力分布が実測できればその開閉挙  
動が推定できる可能性を示唆していることになり興味  
深い。Fig.6 Relation between  $\sigma_{op}$  and  $A_c$ .

Fig. 5 Residual stress distribution near the fatigue crack.

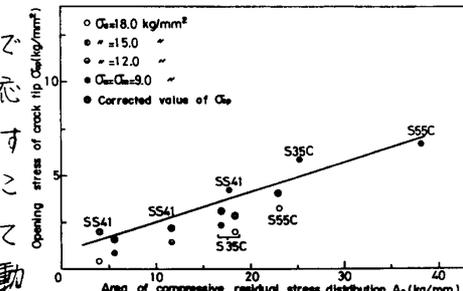


Fig. 6 Relation between  $\sigma_{op}$  and  $A_c$ .

他の実験結果および考察の詳細は当日にゆずる。1) 本田, 小長, 戸井; 非破壊検査 28-4(1979) 243  
2) 本田, 戸井, 徳田; 非破壊検査協会に回応力ひずみ測定シンポジウム前刷集(1980) 45