

## 赤外線映像装置による応力拡大係数の測定\*

白 鳥 正 樹<sup>\*1</sup>, 三 好 俊 郎<sup>\*2</sup>  
野 田 哲 司<sup>\*3</sup>, 原 田 衛<sup>\*3</sup>Measurement of Stress Intensity Factors  
by Infrared Video SystemMasaki SHIRATORI, Toshiro MIYOSHI,  
Tetsuji NODA, and Mamoru HARADA

The authors have shown that the stress intensity factor,  $K$ , can be analyzed by measuring the distribution of the sum of the principal stresses around the crack tip by an infrared stress measuring device, SPATE-8000. The errors of the measured  $K$ -values for CT-specimens are at most 10~20%, and they decrease with the decreasing amplitude of the applied cyclic stresses. The method has been applied to the measurement of  $K$  for a surface crack. Finally, the method for analyzing  $K_I$  and  $K_{II}$  for mixed mode cracks has been proposed.

**Key Words:** Experimental Stress Analysis, Linear Fracture Mechanics, Stress Intensity Factor, Infrared Video System, SPATE-8000

## 1. 緒 言

近年、赤外線応力測定装置が、産業分野で使われ始めている。これは、物体のひずみ状態が断熱的に変わるとき、微小温度変化を生じる現象(熱弾性効果)に着目したもので、構造物を加振することによって表面の応力分布が非接触で測定できるという利点がある。しかし、赤外線による応力測定は、構造物表面の主応力のみしか測定できないため、応力集中を見るには適しているが、応力のテンソル成分を分離して求めることができないので、そのまま設計等に应用するのは難しい。

著者らは前報<sup>(1)</sup>において、破壊力学パラメータである応力拡大係数  $K$  がスカラーであることに注目し、赤外線応力測定を応用してこれの解析が可能であることを示した。今回はその応用として、高精度の赤外線応力測定装置を用いて、まず片側き裂材のき裂先端近傍の応力測定より  $K$  値を求め、この測定法の有効性

を示した。さらに表面切欠材の  $K$  値、斜めき裂材の  $K$  値等を求めて考察をした。

## 2. 実 験 方 法

**2・1 赤外線応力測定装置** 実験に使用した赤外線応力測定装置は、英国オメトロン社製 SPATE (Stress Pattern Analysis with Thermal Emission) 8000 である。この装置は、対象物が外部から繰返しの荷重を受けた時に生じる非常に小さな温度変化を検出し、さらに外乱の影響を避けるため外部荷重の信号をリファレンスとして相関をとり、主応力の変化に対応した温度変化だけを取り出すことができる<sup>(2)</sup>。すなわち、温度と応力の関係は Kelvin の理論より

$$\Delta T = -K_m T \Delta \sigma_{ii}$$

ただし、 $K_m$  は定数で、次の式で与えられる。

$$K_m = \frac{\alpha}{\rho C_p}$$

(ここで、 $\Delta T$ : 温度変化、 $T$ : 絶対温度、 $\Delta \sigma_{ii}$ : 主応力の変化量、 $\alpha$ : 線膨張係数、 $\rho$ : 密度、 $C_p$ : 定圧比熱)と表されるため<sup>(3)</sup>、あらかじめ入力しておいた定数に基づいて応力値に変換し、応力分布画像を得る。SPATE-8000 の主な性能を以下に記す。

測定感度 : 0.4 N/mm<sup>2</sup> (アルミニウム)

\* 昭和 63 年 3 月 18 日 関西支部第 63 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 6 月 6 日。

<sup>\*1</sup> 正員、横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156)。

<sup>\*2</sup> 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

<sup>\*3</sup> 学生員、横浜国立大学大学院。

1.1 N/mm<sup>2</sup> (スチール, チタン)

測定視野 : 水平 25° × 垂直 25°

焦点距離 : 0.25 m 以上

最小測定範囲 : 0.5 mm × 0.5 mm

測定周波数 : 0.5 Hz ~ 20 kHz

画像分解能 : 255 × 255 points

検出器冷却 : 液体窒素冷却

**2・2 測定システムの構成** システム構成を図1に示す。荷重装置は油圧サーボ疲労試験機(±30 t, および±100 t)を使用し, 試験機からの周波数信号と, 赤外線検出器からの温度信号をアナログ相関計に入力し, 外乱の影響を除去する。応力によって生じた温度データは, 不揮発性メモリーに記憶され, 一画面分の測定終了後に内部演算処理を行い, 応力分布画像をカラーモニター上に映し出す。また, 温度データはフロッピーディスクに記録でき, 応力分布のグラフをX-Yプロッタに出力することも可能である。

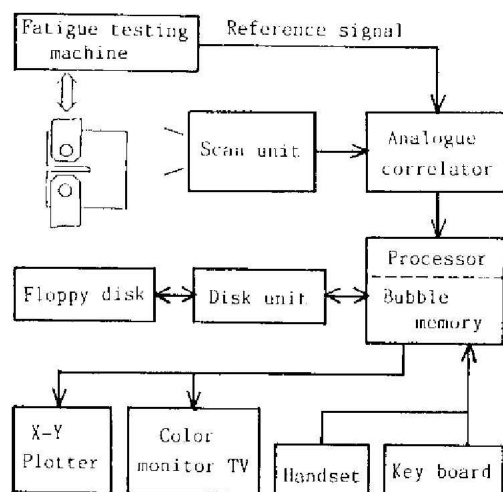


図1 測定システムの構成

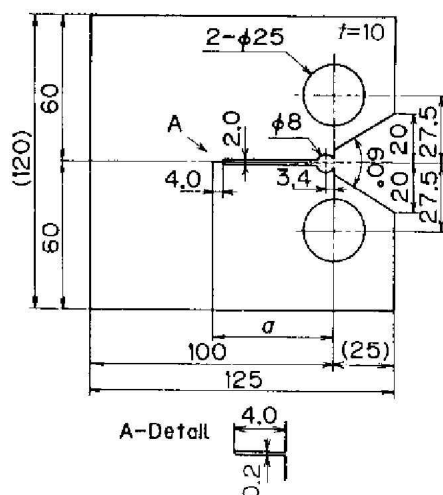


図2 CT試験片の形状(mm)

**2・3 試験片** 本実験に使用した試験片は, 図2~図4に示すようなCT試験片, 表面切欠試験片, 斜めき裂試験片である。材質は軟鋼(SS 41)を使用した。また, CT試験片はき裂長さ比  $a/W=0.4, 0.5, 0.6$  (図中の  $a=40, 50, 60$  mm) の3種類を用意し, 表面切欠試験片は,  $a/t=0.8, a/c=0.4$  (図中の  $a=8$  mm,  $c=20$  mm) を用いた。斜めき裂試験片は, スリット両端から両側へ疲労き裂を入れたものを用い, 計5種類に対して実験を行った。

**2・4 実験方法** CT試験片に対してはピン荷重で, 他の試験片に対しては片側一様の片振り引張繰返し荷重で実験を行った。また, 荷重周波数は, いずれも10 Hzで行い, 測定面に黒体塗料を塗布することにより, 放射率を0.92<sup>(2)</sup>とした。荷重の大きさは, 測定時間が長く(約90~100分)かかるため, その間にき裂が進展しないような小さな荷重で実験を行った。また, 応力値への変換を行う定数決定は, 試験片にひずみゲージ(クロスゲージ)を取付け, その点の計測応力値  $\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y$  と, クロスゲージに近接した3点の温度変化の平均値(SPATEで測定)を比較するという方法で行った。

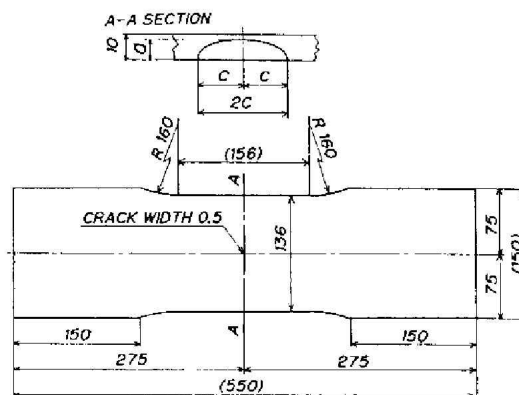


図3 表面切欠試験片の形状(mm)

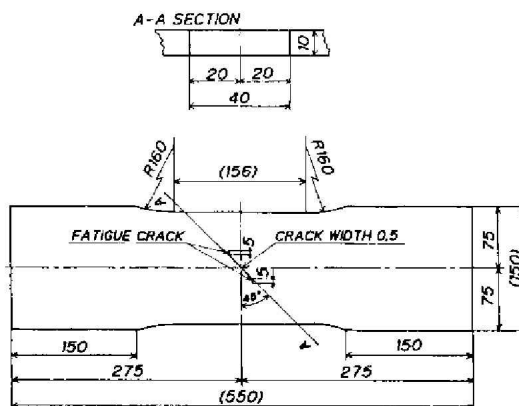


図4 斜めき裂試験片の形状(mm)

### 3. 応力拡大係数の解析

**3・1 解析方法** 赤外線応力測定装置により、き裂先端の  $\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y$  が測定されるので、有限要素法で用いられる応力法と同じ手順で応力拡大係数  $K$  (ただし、ここでは  $\Delta K$ ) を求めることができる。き裂先端近傍の応力と  $K$  値の関係は、モード I については

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{Bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad \cdots (1)$$

モード II については

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{Bmatrix} \quad \cdots (2)$$

となる。すなわちモード I の場合リガメント部 ( $\theta = 0^\circ$ ) では、式(1)の変数を増分の形に変え  $\Delta K$  について整理すると、

$$\Delta K_I = \frac{\sqrt{\pi r}}{\sqrt{2}} (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y) \quad \cdots (3)$$

が求まる。

また、モード I、モード II の混合モードの場合は、式(1)、式(2)より

$$\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi r}} \left( \Delta K_I \cos \frac{\theta}{2} - \Delta K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad \cdots (4)$$

ここで、

$$\Delta K_{I,II,\theta} = \left( \Delta K_I \cos \frac{\theta}{2} - \Delta K_{II} \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad \cdots (5)$$

と定義すると、式(4)は、

$$\Delta K_{I,II,\theta} = \frac{\sqrt{\pi r}}{\sqrt{2}} (\Delta\sigma_x + \Delta\sigma_y) \quad \cdots (6)$$

となり、式(3)と同じ形になる。そこで角度の異なる 2 方向から式(6)を用いて二つの  $\Delta K_{I,II,\theta}$  を求めこれらを式(5)に代入し、連立方程式を解くことで  $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_{II}$  を分離して求めることができる<sup>(4)</sup>。

**3・2 実験結果と考察** 図 5(a) は、 $a/w = 0.6$  の CT 試験片に  $\Delta P = 1.94 \times 10^3$  N の負荷を与えたときの、き裂先端付近の応力分布画像である。また、図 5(b) は、この時のリガメント上の応力分布である。そこで、3 種類の CT 試験片に対して繰返し荷重を与え、き裂先端近傍のリガメント上の応力分布より、式(3)を用いて応力拡大係数を求めた結果が、図 6(a) ~ (c) である。図中の点線は、部材形状と負荷荷重から決まる  $K$  値であり次式で与えられる<sup>(5)</sup>。

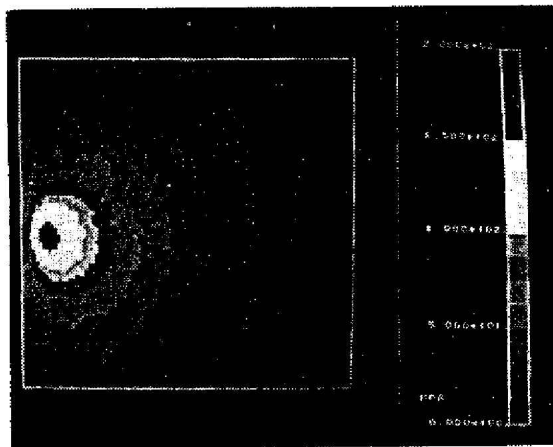
$$\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{a} F(a/W)$$

ただし、 $\Delta\sigma = \Delta P/W$  ( $\Delta P$  は単位厚さ当たりの力)、 $a/W = \xi$  とおくと

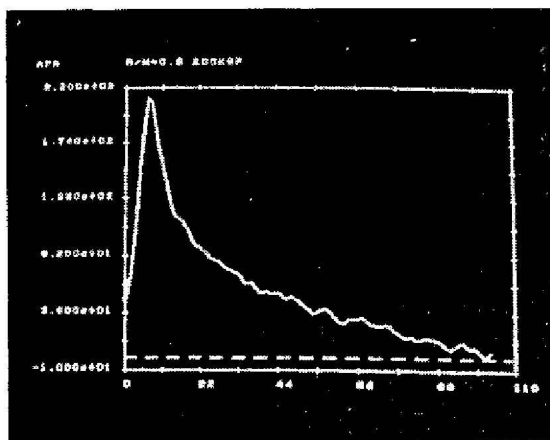
$$F(\xi) = 29.6 - 185.5\xi + 655.7\xi^2 - 1017.0\xi^3 + 638.9\xi^4$$

ここに  $a$  はき裂長さ、 $W$  は試験片幅である。また、図中の FEM はき裂先端に特異要素を使用した二次元有限要素法解析結果である。

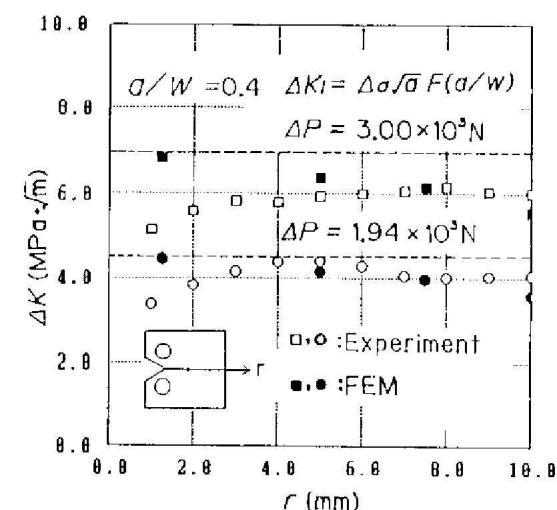
この結果を見ると ( $r > 5$  mm) では FEM の結果と良く合っているが、き裂先端付近 ( $r < 4$  mm) では



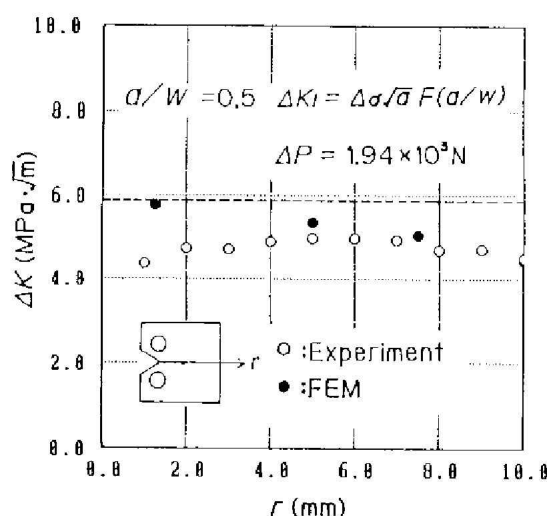
(a) CT 試験片の応力分布画像



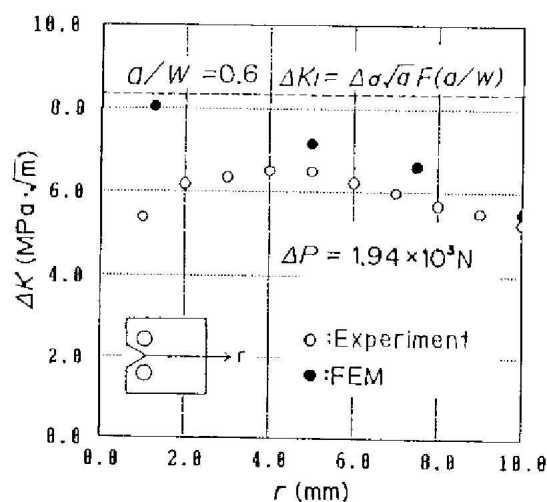
(b) リガメント上の応力分布



(a)



(b)



(c)

図6 CT試験片の $K$ 値の分布

FEMの結果と比べても $K$ 値が低くなっている。これはSPATEで応力分布画像を得る際にSmoothingを行い周囲の応力と平均化してしまうため、応力勾配が大きいほど、実際の応力より低めに現れるのが原因と思われる。このことは、 $K$ 値が大きい(応力勾配が大きい)ほど、実験により求めた $K$ 値が低くなっていることから推測される。

このように先端部分では $K$ 値が低くなってしまうので、 $K$ 値が最大となっている点と理論値とを比較すると、10~20%低めに $K$ 値が評価されている。この誤差は、 $K$ 値の減少とともに小さくなるため、十分低い荷重で応力測定を行えば、かなり良い精度で $K$ 値が求められる。

次に、図7は表面切欠試験片のリガメント部表面の応力測定の結果であり、図中の実験はこの応力分布曲線を $\sigma = c/\sqrt{r}$ の曲線で最小二乗近似したものである。この図を見るととき裂先端部では前述の原因により応力が低めに出ている。また $r$ が大きくなると応力関数における高次の項が影響してくるため $1/\sqrt{r}$ の曲線から外れてくる。そこで、この最小二乗法により求めた曲線と $\pm 10\%$ の範囲に入っている点については $1/\sqrt{r}$ の特異性をよく反映していると思われるので、この範囲内にある点を式(3)に代入し応力拡大係数を求めたのが図8である。図中の実線はこれらの点の平均値であり、また点線は影響関数法<sup>(6)</sup>により求めた $K$ 値である。この結果を見る限りでは、両者は良い一致を示している。

次に、図9は斜めき裂試験片に対して $\Delta P = 2.94 \times 10^4 \text{ N}$ の負荷を与えた時の斜めき裂付近の応力分布画像である。図10は $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 38.5^\circ$ の線上の応

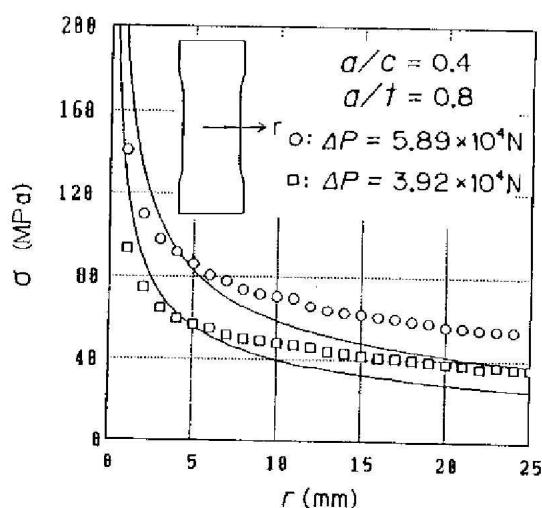


図7 表面切欠試験片のリガメント上応力分布

力測定の結果であり、上記の方法による範囲に入っている点を式(6)に代入して  $K$  値を求めたのが図 11 である。そこで、これらの点の平均値(図中の実線)  $\Delta K_{I \text{ II},0}$ ,  $\Delta K_{I \text{ II},38.5}$  より式(5)を使って  $K_I$ ,  $K_{II}$  を求めたものが表 1 である。この表の BEM は境界要素法を用いて  $K_I$ ,  $K_{II}$  を変位法<sup>(7)</sup>により求めたものである。両者の間に  $\pm 10 \sim 20\%$  の差はあるもののだいたい合っていると言える。

このように赤外線応力測定装置を用いて  $K$  値を求めると約  $10 \sim 20\%$  の誤差が生じてくる。これは、応力が  $1/\sqrt{r}$  の特異性をよく表しているのはき裂先端近傍であり、精度の良い応力拡大係数を求めるには、その部分の正確な応力を測定する必要があるが、SPATE の最小測定範囲が  $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$  であること、Smoothing により応力が低めに評価されることなどにより、き裂先端近傍の高精度の応力測定が難しいことによるものであると考えられる。

これらの欠点を把握した上で、本研究の手法を用いれば、 $0 < r < 30 \text{ mm}$  程度の測定でも、実験的に役立つ精度で応力拡大係数が求められる。

#### 4. 結 言

赤外線応力測定装置 SPATE-8000 を用いて、き裂周りの主応力分布を測定することにより、き裂の応力拡大係数が求められることを示した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) CT 試験片のき裂の  $K$  値の測定誤差は、たかだか  $10 \sim 20\%$  であった。この誤差は、加振する外力を

表 1 斜めき裂試験片の  $K$  値

	Experiment	B E M
$\Delta K_I \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	4.76	5.65
$\Delta K_{II} \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	0.59	0.49

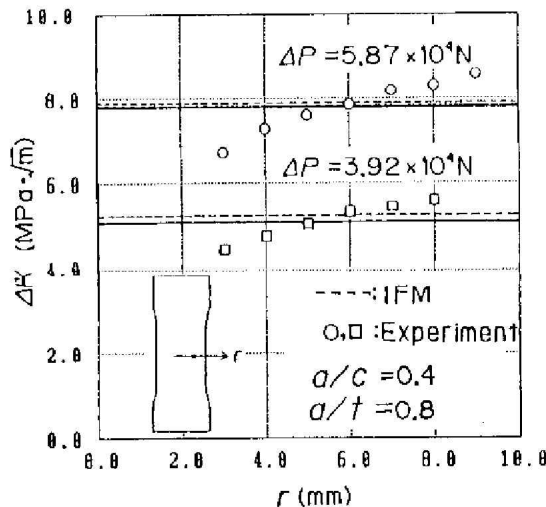


図 8 表面切欠試験片の  $K$  値の分布

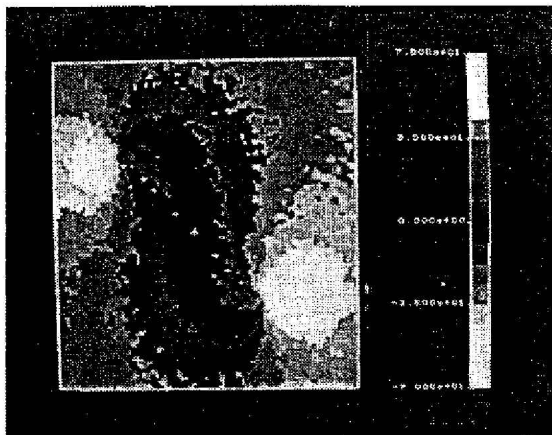


図 9 斜めき裂試験片の応力分布画像

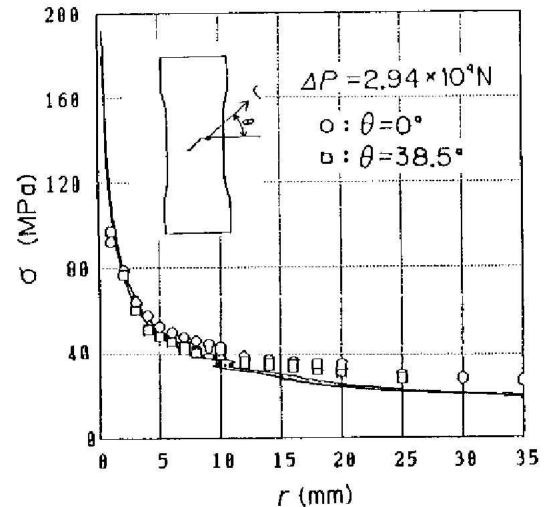


図 10 斜めき裂試験片のき裂先端部応力分布

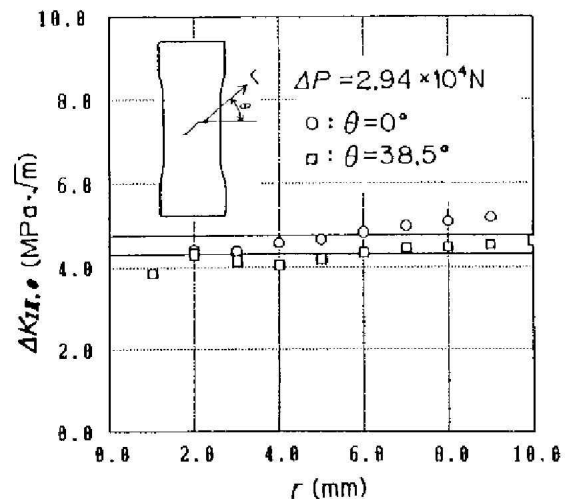


図 11 斜めき裂試験片の  $K$  値の想布

小さくするほど小さくなる。

(2) 表面き裂の表面部における  $K$  値が測定できる。

(3) 混合モード条件下における応力拡大係数  $K_I$ ,  $K_{II}$  値を分離して測定できる。

本研究において使用した SPATE-8000 の使用に際して松下貿易(株)の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

なお、本研究の一部は、昭和 61~62 年度文部省科学研究費(試験研究 1)の補助で行った。

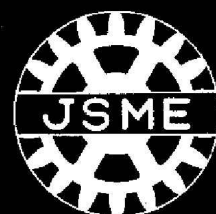
## 文 献

- (1) 白鳥・ほか 3 名, 機論, 53-492, A(昭 62), 1699.
- (2) Oliver, D. E., Ometron Ltd., *Thermoelastic stress analysis with SPATE*. (1982).
- (3) 白鳥・ほか 3 名, 機論, 52-478, A(昭 61), 1553.
- (4) Pukas, S. R., Sira Ltd., *STRESS ANALYSIS BY THERMOELASTIC TECHNIQUES*, (1987), 9-1 SA.
- (5) Tada, H., ほか 2 名, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, (1973), 2-20, Del Reserch Co.
- (6) 白鳥・ほか 2 名, 機論, 52-474, A(昭 61), 390.
- (7) 結城, 機習教(第 596 回), 境界要素法の構造解析への応力技術, (昭 60), 28.

平成元年1月

第509号 A編

# 日本機械学会論文集



**TRANSACTIONS OF  
THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS**

January, 1989

日本機械学会

