

京都大学工学部

正 大 谷 隆 一 正 北 村 隆 行
○ 学 坂 之 上 悦 典

1. 緒 言

高温におけるクリープおよび疲労のき裂伝ば試験がさかんに行われるようになってきた。ただし、その多くは貫通き裂に関するものであって、表面き裂についてはほとんど行われていない。ここで問題となるのはき裂長さ（形状）測定の方法である。高温においては有効な測定法が限られるが、現在のところ電位差法が有力なようであり、筆者らもすでに貫通き裂に対して直流電位差法を適用している⁽¹⁾。さらに高温疲労における表面き裂伝ば試験の実施を計画しており、これに直流電位差法を適用するために、前もって電位差とき裂寸法・形状の較正関係を求めておきたい。

そこで、本研究ではき裂材に低融点金属（ウッド合金）を用いて、較正関係を簡便に得る実験手法を開発した。さらにこの手法を用いて、半円および半楕円表面き裂の較正関係を明らかにした。また、表面き裂を有する平板試験片において、試験片背面および側面が電位場におよぼす影響についても検討した。

2. 試験方法の概要

較正関係を得るためのき裂材の供試材として、融点が $70\sim 80^{\circ}\text{C}$ 前後と極めて低いウッド合金（成分重量：Bi 40%, Pb 20%, Sn 10%, その他20%）を採用した。き裂材の形状に成形したアクリル板製の容器に融解させたウッド合金を流し込み、これに抵抗率の高い材料で作成した模擬き裂体を挿入した後冷却し、三次元き裂材を作成した。本手法によって、任意の位置に、任意の数・形状・寸法のき裂体を挿入することが可能となり、さらには、任意形状のき裂材を作成することが可能となった。また、ウッド合金は、容易に融解させることができるため、き裂形状を変えて短時間で測定を行うことが可能である。低融点という特性を生かすことにより、電圧測定端子をハンダゴテで溶着させること、およびき裂近傍のみを融解し、模擬き裂体のみを交換することが可能となった。

ウッド合金のき裂材両端より複数の端子から一定電流 9A を供給した。通電による発熱の影響を小さくするために、通電時間は 1 回あたり 3 秒弱とし、再度通電する際は、十分に冷却した後に通電した。

き裂材は直方体であって、その寸法・形状は Fig.1 に示すとおりである。なお、電位差測定端子の位置は、き裂中央直上下(y軸上)にとりつけたものと、

y軸上から x 方向にずれたき裂に平行な位置にとりつけたものの 2 種類である。

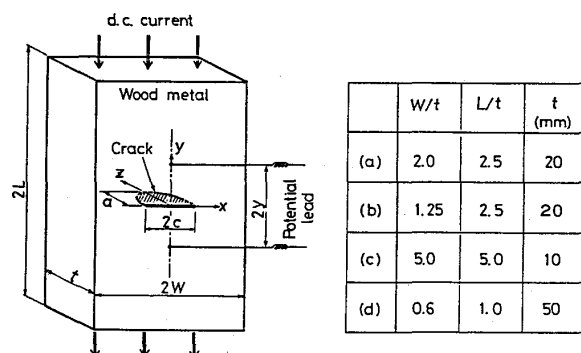


Fig.1 Shape and size of test specimens.

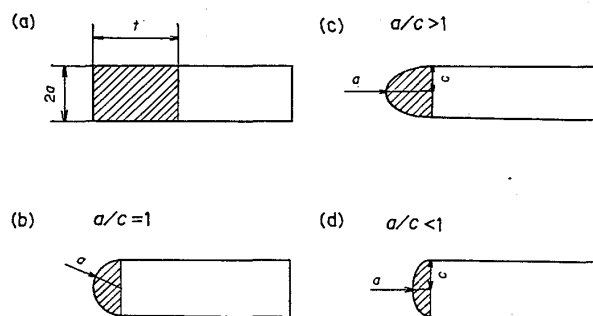


Fig.2 Shape of model cracks.

ウッド合金に挿入する模擬き裂体の条件としては、(1)絶縁体である（抵抗率が大きい）、(2)薄片がつくれる、(3)正確な形状に加工できる、(4)熱に対して強い、(5)適度な剛性がある、などがあげられる。本研究では、これを考慮してガラス板 ($t=0.15\text{mm}$) と雲母片 ($t=0.2\text{mm}$) を用いることにした。これらをき裂形状に切断し、模擬き裂体としてウッド合金に挿入した。製作したき裂形状は、Fig.2 に示すように 4 タイプである。図中の斜線部が供試材に挿入された部分であり、残りの部分は支持部である。なお、(a)は貫通き裂用であり（ガラス製）、(b)～(d)は表面き裂用である（雲母片）。

3. 試験結果および考察

3-1 貫通き裂

Fig.3 に中央貫通き裂平板の測定結果を示す。ジョンソンらによると、中央貫通き裂平板の電位差とき裂長さの関係式は、次式で与えられる⁽²⁾。

$$\frac{V(a/w)}{V(a_0/w)} = \frac{\cosh^{-1}\left(\frac{\cosh(\pi \cdot y/2w)}{\cos(\pi \cdot a/2w)}\right)}{\cosh^{-1}\left(\frac{\cosh(\pi \cdot y/2w)}{\cos(\pi \cdot a_0/2w)}\right)} \quad (1)$$

ここにおいて、 $2w$: 板幅、 $2y$: き裂中央上下の電圧測定端子間距離、 $V(a/w)$: き裂半長比 a/w のときの電位差である。式(1)の結果を Fig.3中に実線と破線で示す。測定結果は、式(1)の結果と良好な一致を示している。

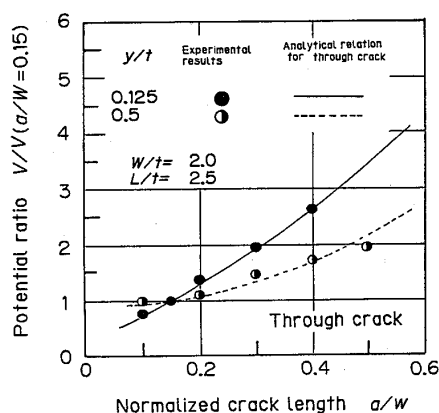


Fig.3 Relationship between normalized crack length and potential ratio for through cracks.

3-2 半円き裂

Fig.4 は、電圧測定端子がき裂中央上下方向の場合の結果をプロットしたものである。この場合の横軸は下方に示すとおり、き裂長さ(深さ) a を板厚 t で除した無次元化量をとっている。以下に示す図にも、同様な目盛を横軸に付した。

半無限体中における半円表面き裂の解析解は、次式で表わされる。この式は、扁平回転楕円体空孔を有する無限体の電位場に関する解析⁽³⁾の結果から、円形き裂き裂を有する無限体の電位場を導いて得たものである。

$$\frac{V(a)}{V(a_0)} = \frac{a \cos \theta \left\{ \sinh \eta - \frac{2}{\pi} \sinh \eta \cdot \cot^{-1}(\sinh \eta) + \frac{2}{\pi} \right\}}{a_0 \cos \theta' \left\{ \sinh \eta' - \frac{2}{\pi} \sinh \eta' \cdot \cot^{-1}(\sinh \eta') + \frac{2}{\pi} \right\}} \quad (2)$$

ここで、 a , a_0 はき裂半径、 (η, θ, ψ) , (η', θ', ψ') は扁平回転座標における座標点を表わす。座標系を x - y - z 座標系変換しなおすと、電圧測定端子が $(x, y) = (0, \pm y_1)$ のときには式(2) は下記のように

変換される。

$$\frac{V(a)}{V(a_0)} = \frac{y_1 - \frac{2}{\pi} y_1 \cot^{-1}\left(\frac{y_1}{a}\right) + \frac{2}{\pi} a}{y_1 - \frac{2}{\pi} y_1 \cot^{-1}\left(\frac{y_1}{a_0}\right) + \frac{2}{\pi} a_0} \quad (3)$$

式(3)の計算値を Fig.4中の実線で示してある。ただし、この場合の図の横軸はき裂長さ a の実寸法である($y_1 = 2.5\text{mm}$)。測定結果と解析解とは、ほぼ全域にわたり良好な一致を示した。

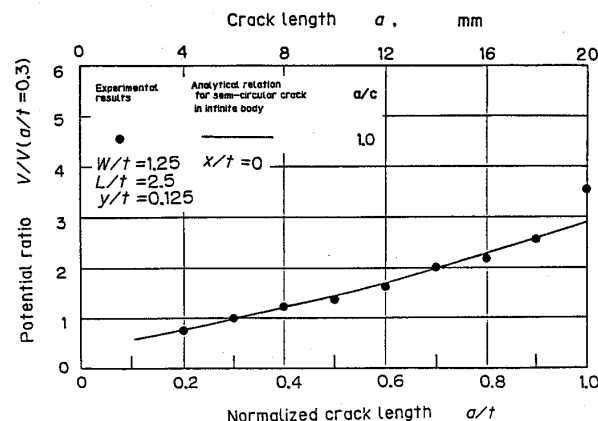


Fig.4 Relationship between normalized crack length and potential ratio for semi-circular cracks.

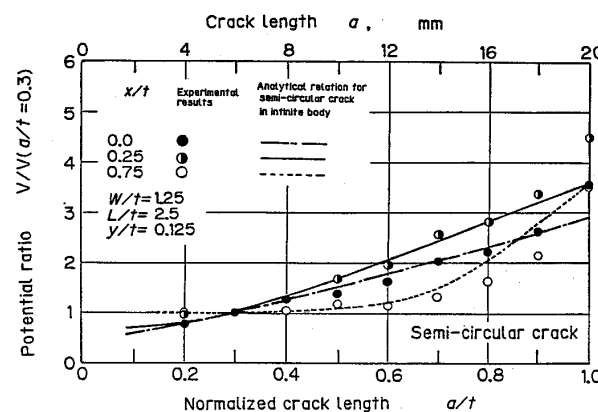


Fig.5 Relationship between normalized crack length and potential ratio for semi-circular cracks at $x/t=0, 0.25, 0.75$.

次に、電圧測定端子がき裂中央線(y 軸上)より x 方向にずれたき裂に対して平行な場合の測定結果を、Fig.5にプロットした。図中の実線、一点鎖線、点線は式(2)にもとづく解析解の結果を示したものである。式(2)の結果と試験結果は、ほぼ良好な一致を示している。ただし、Fig.4, Fig.5において、無次元化き裂長さ a/t が1に近づくとき、測定結果が式(2)あるいは(3)よりも、上方にずれる傾向を示している。これは、式(2)あるいは(3)が半無限体中の半円き裂の

解であって、き裂材の背面および側面の影響を考慮していないためと考えられる。

3-3 半楕円き裂

半楕円き裂の較正関係を、初等関数の範囲内で求める。表面き裂長さ $2c$ 、き裂深さ a の半楕円き裂（アスペクト比： a/c ）を有するき裂材を考える。また、き裂上下方向（ y 軸上）の電位差を $V(c, a/c)$ と表わすことにする。 $V(c, 1)$ は、半円の電位差であり、式(3)より得られ、 $V(c, \infty)$ は二次元貫通き裂の電位差であり、式(1)より得られる。アスペクト比 $a/c \geq 1$ の試験結果を Fig.6 に示す。Fig.6中の直線は、二次元き裂の解と半円き裂の解を結んだものであり、その関係は次式で表わされる。

$$V(c, a/c) = \frac{c}{a}V(c, 1) + (1 - \frac{c}{a})V(c, \infty) \\ = \frac{c}{a} \left\{ y_1 - \frac{2}{\pi} \cot^{-1} \left(\frac{y_1}{c} \right) + \frac{2}{\pi} \right\} + (1 - \frac{c}{a}) \sqrt{y_1^2 + c^2} \quad (4)$$

Figs.3, 4, 5 にくらべて Fig.5の縦軸電位差比の変化が小さいために多少のばらつきが認められるが、測定結果は直線と良く対応している。ただし、き裂深さ比 a/t が1に近づくと電位差比は急増している。これは背面の影響と考えられる。言い換えれば、測定端子間距離 y/t が小さい場合には、 a/t が小さい（き裂が浅い）領域より式(4)の直線からの逸脱が認められる

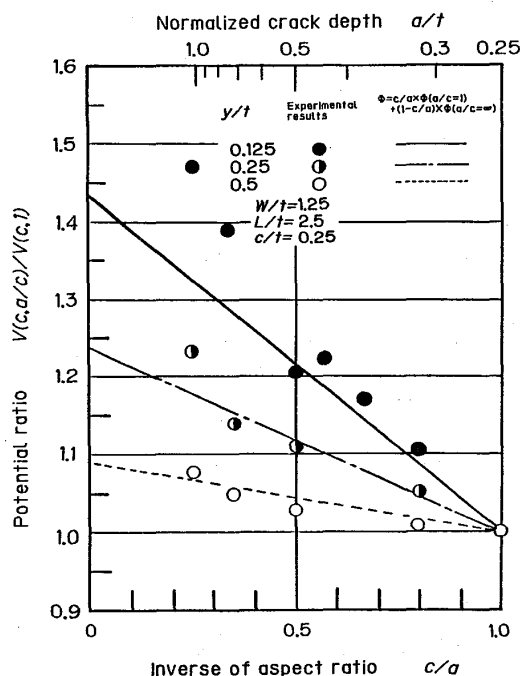


Fig.6 Relationship between inverse of aspect ratio and potential ratio for semi-elliptic cracks ($a/c \geq 1$).

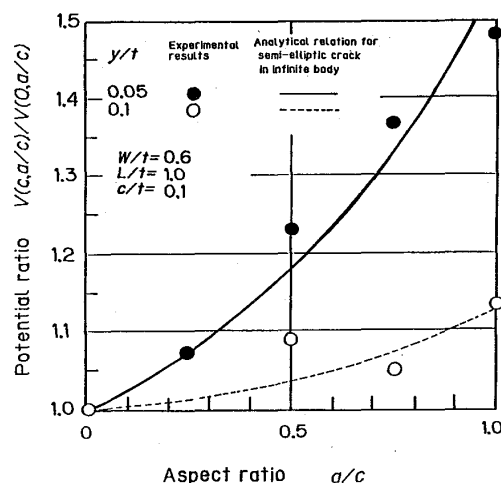


Fig.7 Relationship between aspect ratio and potential ratio for semi-elliptic cracks ($a/c \leq 1$).

が、 y/t が大きくなると直線より試験値が逸脱しはじめる。 a/t が大きくなる。ただし、アスペクト比が大きくなるに従って、二次元貫通き裂の解に収束しなければならないから、その逸脱の上限は二次元貫通き裂の解となる。

Fig.7 にアスペクト比 $a/c \leq 1$ の場合の測定結果を示す。図中の実線および破線は次式による計算値である。この式は、き裂断面の対称性を考慮して表面き裂長さ $2a$ 、き裂深さ c の半楕円き裂を考え、式(4)を書き直したものである。

$$V(a, a/c) = \frac{a}{c}V(a, 1) + (1 - \frac{a}{c})V(a, \infty) \\ = \frac{a}{c} \left\{ y_1 - \frac{2}{\pi} \cot^{-1} \left(\frac{y_1}{a} \right) + \frac{2}{\pi} \right\} + (1 - \frac{a}{c}) \sqrt{y_1^2 + a^2} \quad (5)$$

この図より、アスペクト比が1より小さい場合の較正関係は式(5)によってかなり精度よく与えられることがわかる。

参考文献

- (1) 大谷隆一, 西本淳哉, 平塚隆一, 材料, 33-369 (昭59), 729.
- (2) H.H. Johnson, Materials Research and Standards, 5 (1965), 442.
- (3) P. Moon and D.E. Spencer, "Field Theory for Engineers", D. Van Nostrand, New York (1961), 267.