

長岡技科大 武藤睦治 坂本 勲
 長岡技科大 井上昌弘

1 緒言 一般に構造物の破壊原因となるき裂は、表面き裂や内部き裂である場合が多いが、特に内部き裂に関してはこれまで寸法および形状を制御した試験片の製作が困難なこともあり、有限要素法などによる数値解析が一部行われているにすぎない。著者らは第1報⁽⁵⁾において拡散接合法による円状内部き裂材を製作し、靱性試験片としての有効性を確認した。また、第2報⁽⁶⁾においては、楕円状内部き裂材による靱性試験を行い、楕円状内部き裂のJおよびKの簡便評価に関する検討を行った。本報告ではき裂の寸法・位置を制御した円状内部き裂材の靱性試験を行い、偏心円状内部き裂のK値簡便評価法等に関する検討を行った。また、楕円状内部き裂材の靱性試験を行い、第2報におけるK値簡便評価法についてさらに検討を加えた。

2. 実験方法 供試材はS10C圧延丸棒鋼でその機械的性質を表1に示す。拡散接合法を用いた内部き裂試験片の製作方法は前報⁽⁶⁾と同様であり、その最終的な形状寸法を図1に示す。靱性試験は容量25tonのオートグラフを用いクロスヘッド速度を1mm/minとし、また試験温度は-196°Cとして行った。偏心円状内部き裂のK評価に際してはFan⁽⁶⁾の数値解析結果を用い、実験結果からその妥当性を検討した。また、偏心量を考慮しない軸対称の場合のK評価式⁽¹⁾を用いた検討も行った。楕円状内部き裂のK評価に際しては、表2に示す3種類の引き直し円に置き換え式⁽¹⁾を用いた場合、無限体中の楕円状内部き裂の短軸部のK評価式⁽²⁾を用いた場合、ASME Sec. XI⁽⁷⁾を準用し式⁽³⁾を用いて評価した場合などについての検討を行った。

表1 供試材の機械的性質

σ_{ys} (MPa)	σ_{ts} (MPa)	R.A. (%)	K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
257.1	376.2	77.3	22.0(-196°C)

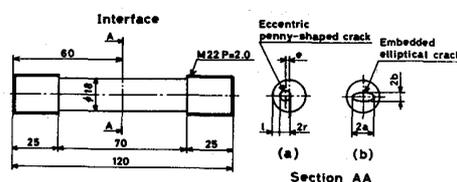


図1 試験片形状・寸法

表2 楕円から円への引き直し

名称	説明	図
Circle A	楕円の短軸を円の直径と等しいと見做した短軸相当円の場合	
Circle B	楕円の面積に等しい面積をもつ等積面積円の場合	
Circle C	楕円の長軸を円の直径と等しいと見做した長軸相当円の場合	

$$K_I = \frac{2P}{\pi^2(R^2 - r^2)} \sqrt{\pi r} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right) - \frac{5}{8} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 0.421 \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right] \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R} \right)} \quad (1)$$

$$K_{I, \max} = \frac{\sigma \sqrt{\pi b}}{E(k)} \quad (2)$$

$$K_I = \sigma M \sqrt{\pi} \sqrt{\frac{b}{Q}} \quad (3)$$

ここで、rは円状内部き裂の半径、Rは平滑部の半径、Pは負荷荷重、 σ は膜応力、bは楕円状内部き裂の短軸半長である。また、 $k^2 = 1 - (b/a)^2$ 、E(k)はkを母数とする第2種完全楕円積分 $E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta$ であり、Mは膜応力に関する補正係数、Qは欠陥形状パラメータである。

3. 実験結果および考察

3.1 偏心円状内部き裂

偏心円状内部き裂の靱性試験結果から式(1)で評価した K_{Ic} と e/R の関係を図2に示す。この図より $r/R=0.277$ のような浅いき裂において本実験範囲では偏心の影響はほとんど認められないが、き裂半径が大きくなるにしたがい偏心の影響が顕著に現われることかわかる。したがって $r/R=0.475$ 付近からは偏心を考慮せずに K 値を評価するには無理があるといえる。そこで偏心を考慮した K 評価法を検討するため、Fanらの数値計算⁽⁴⁾による K_{max} 値と ASME Sec. XI の式(3)によつて K_{Ic} 値を評価した。それらの結果をそれぞれ図3および図4に示す。Fanらは本実験と同じく丸棒試験片の内部に円状き裂がある場合の K について解析しているが、図3からは偏心の影響を十分評価しきれていないことかわかる。また、図4に示す式(3)による評価も偏心量を M で補正してはいるが、図2とほぼ同じ傾向を示している。ただし、式(3)は平板中に内部き裂を有する場合のものであるが、ここではその板厚が外径に等しいとおいて用いた。このように偏心を考慮した K 評価式を用いたにもかかわらず偏心量の増加にともない K_{Ic} 値が変化することとしては、(1)リガメントの減少により平面ひずみ・小規模降伏を満足しなくなった、(2)曲げ応力の成分を生じた、などが考えられる。(1)の場合には K_{Ic} 値は減少せずむしろ増加してしかるべきであるので、主要因は偏心により生ずる曲げ応力成分を考慮していないことであろう。そこで本報告における実験結果を基に偏心円状内部き裂の K 値の簡便評価式について検討してみる。図5に式(1)を用いて評価した K_{Ic} 値とリガメント幅 l との関係を示す。図よりわかるように、内部き裂の大きさによらず、いずれも $l/R \geq 0.3$ では K_{Ic} 値が一定値 $22 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ となり、 $l/R < 0.3$ ではリガメント幅の減少にともない K_{Ic} 値が減少している。図5の K_{Ic} と l/R の関係を $l/R < 0.3$ の領域で靱性値のはらつきを考慮し、安全側を与える2次曲線

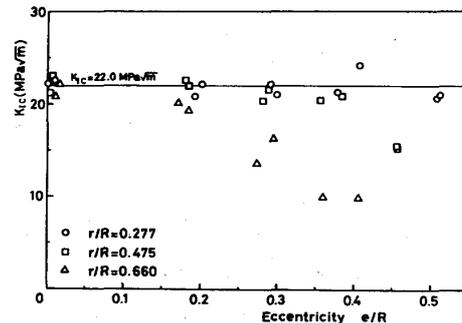


図2 式(1)で評価した K_{Ic} と e/R の関係

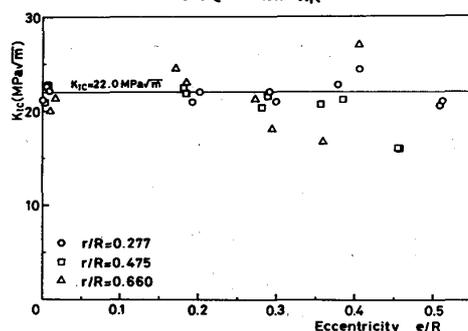


図3 Fanらの計算結果から評価した K_{Ic}

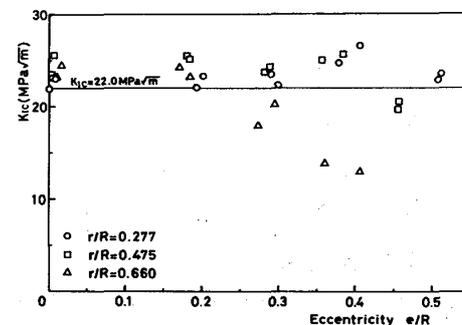


図4 式(3)で評価した K_{Ic}

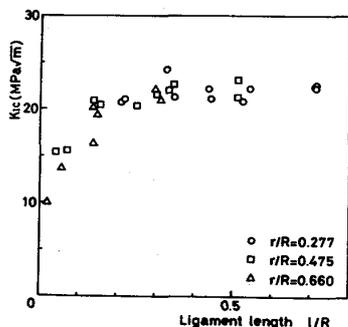


図5 式(1)による K_{Ic} とリガメント l/R の関係

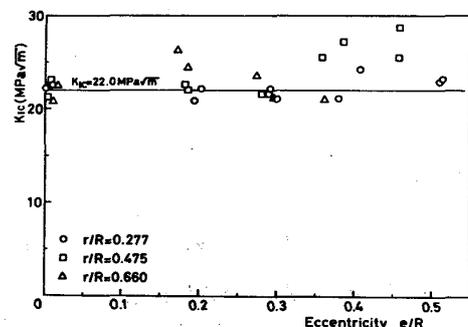


図6 式(4)で評価した K_{Ic}

で近似すると、次式のような偏心円状内部き裂の簡便評価式が得られる。

$$K_{Ic} = \frac{2P}{\pi^2(R^2-r^2)} \sqrt{\pi r} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right) - \frac{5}{8} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 0.421 \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right] \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R} \right)} / \left[0.421 + 3.07 \left(\frac{l}{R} \right) - 3.934 \left(\frac{l}{R} \right)^2 \right] \quad (4)$$

ただし、 l は最小リガメント幅であり、 $l=R-(e+a)$ で与えられる。この K 値簡便評価式の妥当性を確認するために式(4)により求めた K_{Ic} と e/R の関係を図6に示す。さらに式(4)の有効性を確かめるためには寸法的大幅に異なる試験片を用いた試験等を行う必要がある。

3.2 楕円状内部き裂 表2に示すような3種類の引き直し円を用い、楕円状内部き裂の近似的 K 値評価法について検討した結果を図7に示す。 $K_{Ic}=22\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の実線が供試材の K_{Ic} 値で $b/a=0.3$, $b/a=0.6$ のいずれにおいても楕円をCircle Bに引き直して評価した K_{Ic} 値と非常に良い一致を示した。したがって、楕円状内部き裂は等価面積円で評価できること

かわかる。これに対してASME Sec. XIによる K_{Ic} 評価は図8に示すように供試材の K_{Ic} 値とかなり良い一致を示してはいるが、すべて過大評価であることかわかる。 $M=1$ とした場合式(3)は式(2)と等価になることから、ASME Sec. XIは M 値を過大評価しているという傾向がみられる。ところで、内部欠陥の検出方法としては超音波探傷試験(UT)、放射線透過試験(RT)などが挙げられる。UTは内部き裂のような面状欠陥の検出能力がRTよりはるかに優れている上に、探傷器の使用が簡易な事もあり、内部き裂の検出に広く使用されている。UTの最大の欠点は欠陥の形状・種類の識別が極めて困難なことであるが、き裂平面の面積と測定点からの距離は容易に検出することかできる。したがって内部き裂の評価をき裂面の面積を基に何らかの手法により評価することかできればUT結果との組み合わせが可能となり極めて実用的であり、楕円状内部き裂を等価面積円に引き直して評価できるという本結果はそのような手法の可能性を示唆している。

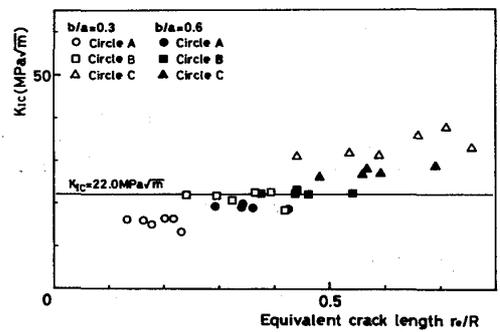


図7 引き直し円で評価した K_{Ic}

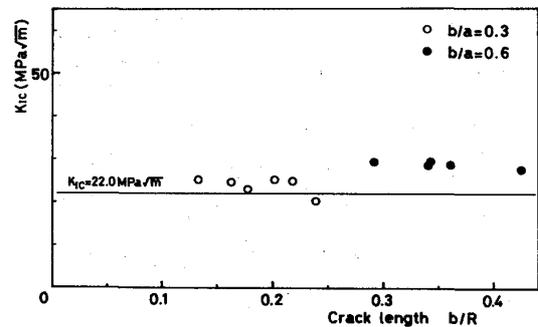


図8 式(3)で評価した K_{Ic}

4. 結言 内部き裂材の平面ひずみ破壊靱性評価を行なうために、偏心円状内部き裂材と楕円状内部き裂材を製作し、靱性試験を行った。その結果、偏心円状内部き裂は $l/R \geq 0.3$ の領域では式(1)で、 $l/R < 0.3$ の領域でも式(4)で簡易に近似的な靱性評価を行えることかわかった。また、楕円状内部き裂は楕円の大きさ・形状比にもかかわらず等価面積円に引き直すことにより簡易に近似的な靱性評価が行えることかわかった。

文献 (1) 石田,野口;機論(A編)48-431(8857-7), 288 (2) M.Y.He and J.W.Hutchinson; Trans. ASME, J. App. Mech., 48(1981), 830
 (3) T.T.Loo; The effect of boundary curvature on the stress intensity factor of penny-shaped embedded defect. Fracture 3, 72-92 (in Chinese (1977)) (4) Y.X. Fan,ほか2名; Engng Fracture Mech., 16(1982), 55. (5) 武藤・ほか2名;機講論 No. 827-1(8857-6), 4.
 (6) 武藤・ほか2名;機講論 盛岡地方講演会にて発表予定(8858-6) (7) Tada, H. et al; The Stress Analysis of Cracks Handbook, (1973). (8) ASME Sec. XI, Rules for Inservice of Nuclear Power Plant Components, (1980)