

長岡技術科学大学建設系 正員 林 健治
 大阪大学溶接工学研究所 正員 堀川 浩甫
 大阪大学 工学部 正員 前田 幸雄

1. はじめに

構造用鋼材が通常の使用温度で不安定破壊を起こす場合には、何らかの外的拘束がなければ、鈍化き裂先端が安定な延性き裂の発生・成長後に不安定破壊に遷移することが知られている。安定延性き裂成長後の不安定破壊遷移に関する研究は、非線形破壊力学に基づきき裂先端開口変位 CTOD 及び経路独立積分 J がき裂先端の弾塑性応力-ひずみ場と密接に関連することを取り上げ、CTOD 及び J がある限界値に達したときに不安定破壊に移行するという材料の破壊靱性評価に関するものが多い。^{1), 2)}

そこで、本研究では、構造部材に伸び能力を要求するという立場から、弾塑性有限変位理論に基づく有限要素法により、鋭い切欠きを有する平板の切欠き先端における変形状と J 積分及び CTOD との関連を明らかにし、また、切欠き材の変形能を表わす Overall Strain とそれらとの関係について検討した結果を報告する。

2. 切欠き材の不安定破壊に対する評価法

大規模降伏状態及び全面降伏状態における切欠き先端の変形状を調べるために、北川³⁾により定式化された埋め込み座標表示の増分形有限要素法を用いて、鋭い切欠きを有する平板の解析を行なう。弾塑性材の構成方程式として Jaumann の応力増分に基く Prandtl-Reuss 型の関係式が成立するものとする。

Rice⁴⁾ により提案された J 積分は次式で定義される (図-1 参照)。

$$J = \int_{\Gamma} (W dy - T \frac{\partial u}{\partial n} ds) \quad (1)$$

ここに、W はひずみエネルギー密度、T は境界面上に作用する表面力ベクトル、u は変位ベクトル、ds は曲線 Γ 上の線素を表わす。また、Rice⁵⁾ は J 積分が非線形弾性体に対してき裂の進展に伴うエネルギー解放率であることより、図-2 に示すような深い切欠きを有する平板の荷重-変位曲線がリガント部 (W-2C) のみに依存する場合の簡便な J 積分算定法を提案している。

$$J = G + (2 \int_0^{\delta} P d\delta - P\delta) / t(W-2C) \quad (2)$$

ここに、G は弾性エネルギー解放率 (平面応力の場合 K^2/E に等しい。K は応力拡大係数、E はヤング係数と表わす)、 δ は荷重点変位、t は板厚と表わす。

一方、き裂開口変位 ψ は BCS モデルを用いて次式より与えられる。⁶⁾

$$V(x) = \frac{4W\sigma_y}{\pi^2 E} \sin \alpha \int_{\chi}^{\pi/2} \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 \chi}} \ln \left| \frac{\sin(\chi + \psi)}{\sin(\chi - \psi)} \right| d\chi \quad (3)$$

ここに、 $\sin \alpha = \sin(\pi a/W)$, $\cos(\pi \sigma/2\sigma_y) = \sin(\pi C/W)/\sin \alpha$
 $\sin \chi = \sin(\pi x/W)/\sin \alpha$, $\sin \psi = \cos(\pi \sigma/2\sigma_y)$
 $a = C + R$ (R: 塑性域寸法)

σ_y は降伏応力、 σ は負荷応力を表わす。一般に、切欠き引張試験の場合、(3)式によって切欠き開口形状が与えられるものとして、き裂先端開口変位 CTOD は実測切欠き端部開口変位 ψ_0 を用いて次式で与えられる。

$$CTOD = V(C)/V(x) \cdot \psi_0 \quad (4)$$

以上の式で定義される J 値及び CTOD は、小規模降伏状態及び大規模降伏状態

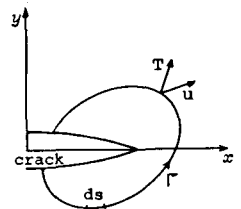


図-1 経路独立積分

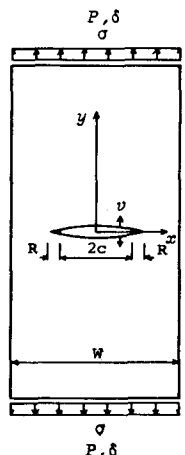


図-2 中央切欠き引張試験片

におけるき裂先端の特異応力-ひずみ場を表わす有効パラメーターであるが、安定延性き裂の進展に伴う不安定破壊（特に、不安定延性破壊）にこれらと適用することは厳密には妥当ではない。しかし、部材の塑性変形性能を示すパラメーターとして取り扱うことは可能である。

有限要素解析の結果を用いて上式のJ及びCTODを求める場合、Jはエネルギーに関係することより、要素分割の精粗には鈍感であると考えられる。一方、き裂先端の節点変位よりCTODを直接求める方法は要素分割の程度に影響を受ける。そこで、き裂の任意の位置xにおける切欠端部開口変位 v_g を用いてCTODを推定する(4)式の方法を用いれば、要素分割の精粗にはあまり影響を受けまいものと考えられる。

3. 数値計算例

計算結果の妥当性を検討するために実験結果^{7),8)}との比較を行った。表-1に使用鋼材の機械的性質、図-3に解析に用いた要素分割を示す。

表-1 使用鋼材の機械的性質

Steel Grade	Plate Thickness mm	Y.P. kg/mm ²	U.S. kg/mm ²	U.E. %	Maximum True Strain
HT80	6	86.7	90.6	6.8	0.75

Y.p.=Yield Point U.S.=Ultimate Strength
U.E.=Uniform Elongation

計算においては次の2通りの場合と部材の破壊と仮定した。

- ① き裂先端のひずみが破断ひずみ（最大真ひずみ）に達した。
- ② 塑性不安定現象へ移行した（最大荷重に達した）。

図-4 a), b) にそれぞれ荷重-ひずみ曲線、荷重-荷重点変位曲線及び荷重-切欠端部開口変位曲線を示す。実験値と計算

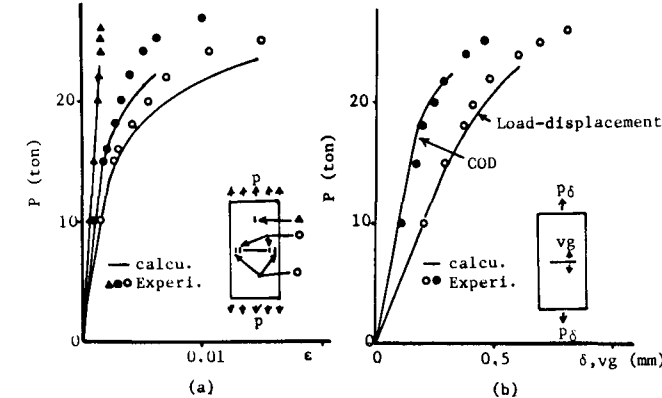


図-4 荷重-ひずみ、荷重点変位、切欠端部開口変位曲線

値は共に比較的良好に一致している。計算値では荷重段階 σ_n/σ_y （割断面応力/降伏応力）の値が0.87でき裂先端のひずみが最大真ひずみに達した。このとき J_c は16.7kg/mm²であり、J積分-R曲線の結果⁸⁾ J_{Rc} は18kg/mm²とほぼ同じである。図-5はJ積分の経路独立性と簡便J値の妥当性を示す。図-6よりJはき裂先端の変形性状を表わすパラメーターのみならず、部材の伸び性能と密接な関係があることが理解される。

参考文献^{1),2)} 造論,第463,474,483,493 機論,315,437,443,454,460,471,482,492,500

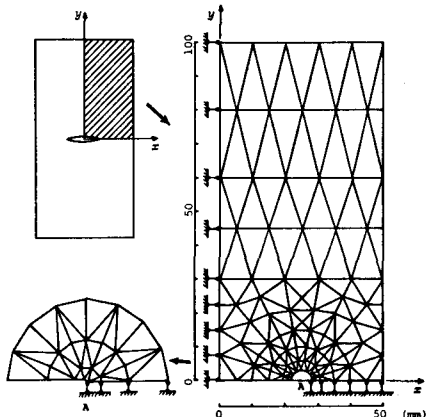


図-3 要素分割と境界条件

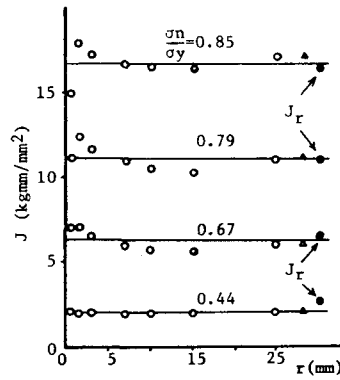


図-5 J積分の経路依存性と簡便J値(J_r)

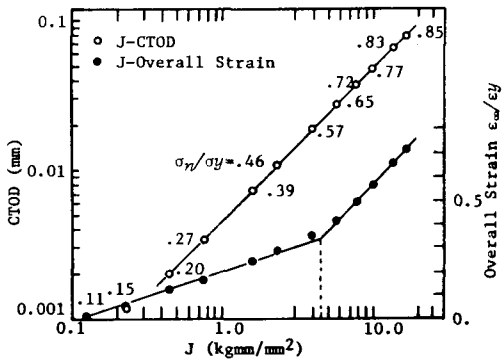


図-6 JとCTOD, JとOverall Strainの関係