



| | |
|------------|--|
| Title | S15CK中央切欠試験片の延性き裂進展とき裂開口状況の関係について |
| Author(s) | 真壁, 朝敏; 兼城, 英夫 |
| Citation | 日本機械学会論文集. A編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, 54(499): 503-508 |
| Issue Date | 1988-03-25 |
| URL | http://hdl.handle.net/20.500.12000/209 |
| Rights | Copyright (c) 1988 日本機械学会 |

S15CK 中央切欠試験片の延性き裂進展と
き裂開口状況の関係について*真壁朝敏*¹, 兼城英夫*²The Correlation Behavior between Crack Growth and the Opening
of a Ductile Crack in a Center Notched Plate of S15CK

Chobin MAKABE and Hideo KANESHIRO

The growth behavior of a ductile crack resulting from a notch root was investigated in tensile tests of a center notched plate of low carbon steel S 15 CK. Four different notch root radii, ρ , that is, $\rho=0.0$ (crack), 0.08, 0.14 and 0.25 mm were prepared for testing. It was found by measurement of strain, ϵ , and the notch shape in tension, that the notch root was blunting in the same way, independent of the notch root radius, before ductile crack initiation. The crack grew with mixed mode fracture which combined tensile mode and shear mode fracture. In the growth process of the ductile crack, the crack growth rate, $da/d\epsilon$, for the strain increment is proportional to crack length, a , and the proportional constants of the $da/d\epsilon$ - a relation take nearly the same values independent of the notch root radius. The crack opening angle, COA, decreases with crack growth.

Key Words: Fracture, Stable Fracture, Ductile Crack, Crack Growth Rate, Crack Opening Displacement, Tensile Test, Center Notched Plate, S 15 CK

1. 緒 言

高靱性材料においては、延性き裂の安定成長および不安定成長挙動は、Tearing Modulus⁽¹⁾⁽²⁾や、き裂先端開口角CTOA⁽³⁾等をパラメータとして評価されてきている。この背景には最近のコンピュータによる解析手法の進歩により延性破壊現象への数値破壊力学の応用がなされてきたことや、弾塑性破壊靱性試験方法⁽⁴⁾の発達等が考えられる。しかし、試験片が大変形し、断面収縮等が伴う際の破壊問題に関しては、解析や実験的な定量的解釈が十分にはなされていない。

著者らは前報⁽⁵⁾において、実験条件等の違いの影響も考えられるが、延性き裂安定成長挙動は70/30黄銅中央き裂試験片の引張りの場合と高靱性材料の引張りや曲げの場合⁽⁶⁾とで異なることを示した。前報の70/30黄銅では、き裂進展は板厚が元の厚さの約1/2以下となりながら進行したが、そのような著しい断面収縮を伴う際のき裂進展の場合、き裂先端開口角CTOAは必ずしも一定とはならないことが考えられ、き裂進展速度はき裂長さに依存して変化することを示した。

そして、図1に示す模式図のように、図1(a)の横軸のみをき裂長さ(き裂半長 a)で無次元化することにより(b)のようにき裂先端付近におけるき裂開口形状および引張り方向ひずみ ϵ_y の分布は、き裂長さにかかわらず、ほぼ同じ状態になることを示した。高靱性材料における J 値を用いたこれまでの弾塑性破壊力学的評価法を応用した破壊問題と異なり、前報⁽⁵⁾のような延性材料における大きな塑性ひずみを伴う破壊の問題に関しては定量的な理論解析や数値解析は困難であるが、実験・観察を通して破壊現象を検討しておくことは、後に塑性加工等における延性破壊のクライテリオンを考える際にも有意義になるとと思われる。また、そのような報告例は少ない。

そこで、本研究では、さきの報告⁽⁵⁾の妥当性と70/30黄銅以外の他の延性材料への適用性を検討するため、低炭素鋼中央切欠試験片の引張りにおける延性き裂進展挙動を調べた。さきの報告によれば、延性材料では試験片に顕著な断面収縮が伴う際、き裂進展の特徴がき裂開口形状に反映されると思われるので、特にき裂開口形状を詳細に調べた。

2. 使用材料および実験方法

・素材はS 15 CKである。それを900°Cで1時間、焼

* 昭和62年11月21日 第949回講演会において講演、原稿受付 昭和62年4月8日。

¹ 正員、琉球大学短期大学部 (〒803-01 沖縄県中頭郡西原千原1)。

² 正員、琉球大学工学部。

なました後、試験片を製作した。表1および表2にその化学成分および機械的性質を示す。図2に試験片形状を示す。図3に切欠形状および寸法を示す。切欠きは主に放電加工により試験片板幅中央部分にワイヤカット加工した。切欠先端半径 ρ は4種類である。 $\rho = 0.08, 0.14$ mm の場合は、ワイヤカットのままであるが、 $\rho = 0.0$ mm (き裂) の場合は、ワイヤカット加工後、疲労試験 (応力比 $R \cong -1$, 繰返し応力幅はき裂発生前 450 MPa, き裂発生效后 400 MPa とした) により予き裂を導入した。 $\rho = 0.25$ mm の切欠半径は、ワイヤ直径 ($d \leq 0.2$ mm) の都合によりドリル加工した。以下、疲労による初期き裂 ($\rho = 0.0$ mm) も切欠きと呼ぶ。公称切欠長さ $2a_0$ は、5 mm であり初期板幅 $2W_0$ (20 mm) の1/4倍である。この a_0/W_0 の値は弾塑性破壊靱性試験法⁽⁴⁾の場合に比べ小さな値であるが、試験片が大きく塑性変形した後のき裂進展挙動を調べる目的のため、あえて $a_0/W_0 \cong 1/4$ とした。

引張試験は、変位制御方式により引張速度 1 mm/min で行い、破断に至るまでの切欠きの変形やき裂の

発生、成長は、金属顕微鏡で試験片表面から直接観察した。

用いた試験機は島津オートグラフ IS-5000 形である。

3. 実験結果および考察

3.1 試験片変形挙動と延性き裂の発生、成長挙動の関係 延性破壊においては、形状変化等の試験片変形挙動が、その破壊過程におけるき裂の発生・成長形態に大きな影響を及ぼすものと思われる。本節では応力、ひずみおよびき裂長さ等の関係から試験片変形挙動と破壊挙動について検討する。

図4は、リガメント部の初期面積で評価した公称応力 σ と板幅中心線上の切欠きをはさむ位置での標線間 10 mm の公称ひずみ ϵ の関係であり、図5は、公

表 1 化学成分 (wt %)

| | | | | | | | |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Ni | Cr | Cu |
| 0.15 | 0.30 | 0.50 | 0.013 | 0.013 | 0.05 | 0.19 | 0.14 |

表 2 機械的性質 (MPa, %)

| | | | |
|---------------|------------|------------|--------|
| σ_{S1} | σ_B | σ_T | ψ |
| 283 | 449 | 956 | 68.8 |

σ_{S1} : Lower yield point σ_B : Ultimate tensile strength
 σ_T : True fracture stress ψ : Reduction of area

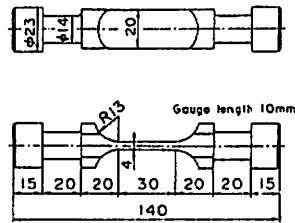


図 2 試験片形状と寸法 (mm)

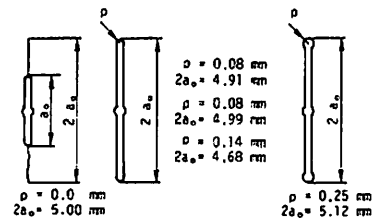
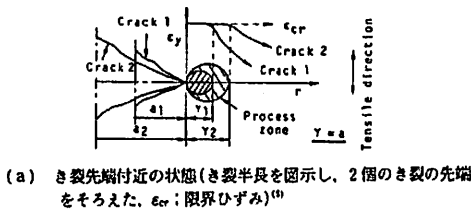
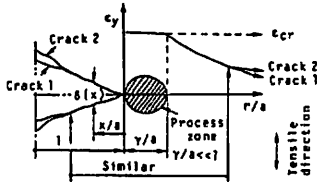


図 3 切欠形状と寸法



(a) き裂先端付近の状態(き裂半長を図示し、2個のき裂の先端をそろえた。 ϵ_{cr} : 限界ひずみ)⁽⁴⁾



(b) (a) の横軸のき裂半長による無次元化

図 1 70/30 黄銅における延性き裂安定成長の特徴

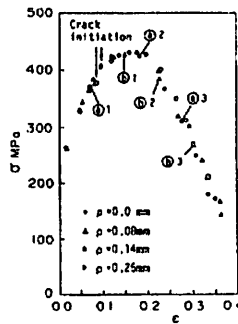


図 4 公称応力 σ と標線間ひずみ ϵ の関係

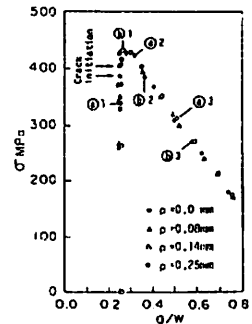


図 5 公称応力 σ と無次元き裂長さ a/W の関係

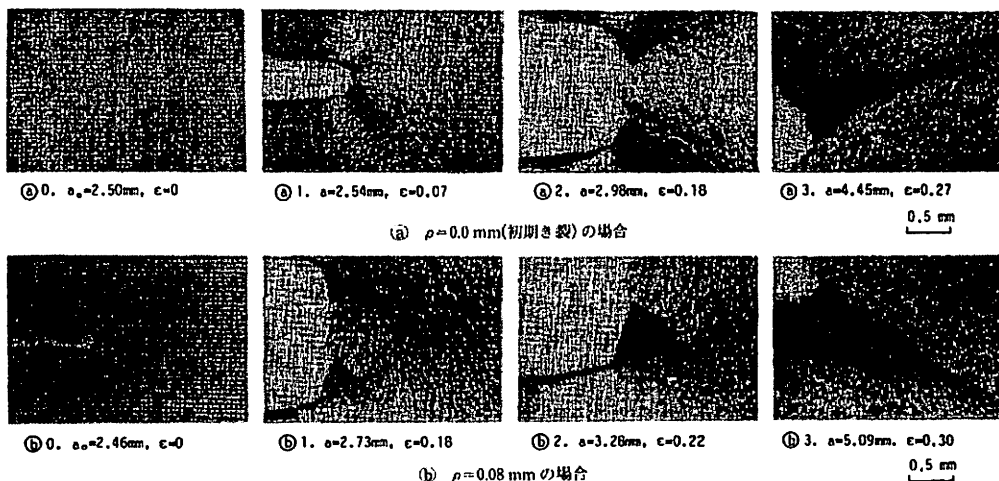


図 6 切欠端よりのき裂発生と進展の状況の観察 (引張方向↑)

称応力 σ とき裂長さあるいは切欠長さを板幅 $2W$ で無次元化した量 a/W の関係である。なお、き裂長さは、切欠長さを含めた表面長さであり、引張軸に対し垂直な面に投影した長さである。これらの図からわかるように、本実験範囲の切欠形状では巨視的な試験片変形および破壊挙動の傾向にほとんど差がない。また、 $\rho=0.08\sim 0.25$ mm の場合、図中に示す矢印間付近で切欠端よりき裂の発生が観察されたが、き裂は試験片変形が引張強さ σ_f に達した時点の後に顕著な成長をする。

図 6 に、切欠きから発生、成長していくき裂の観察例を示す。①が切欠半径 $\rho=0.0$ mm (き裂) の場合であり、④が $\rho=0.08$ mm の場合である。写真の番号は図 4, 5 の番号の位置と対応している。これらの例ではき裂は切欠端から 2 方向に分岐して発生したが、破壊をもたらしたのはそのうちの 1 個であり、他方はき裂進展初期段階で成長が停止した。また $\rho=0.0$ mm の場合においては、引張強さ付近の写真(②) からわかるように疲労き裂の鈍化後、延性き裂が進展していく。き裂の発生形態は、切欠半径 $\rho=0.14$ mm の場合も図 6 と同様であった。 $\rho=0.25$ mm の場合には、切欠先端より 1 個のき裂が進展した。き裂の進展方向は、どの場合も引張軸に対し斜め方向であった。さきの報告¹³⁾ の 70/30 黄銅では、き裂が引張軸にほぼ垂直方向に進展し、破壊がほぼモード I で進展した。それに対し、S15CK では、引張りとせん断の混合モードで延性き裂が進展していく。

図 7 は、き裂発生時点付近までの切欠先端の鈍化の状況を示したものである。縦軸は、切欠先端から 0.2

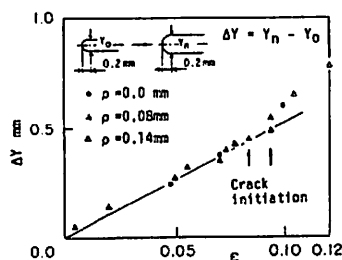
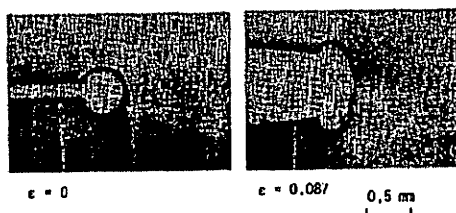


図 7 切欠先端の鈍化状況

図 8 $\rho=0.25$ mm における切欠きの変形状況 (引張方向↑)

mm の位置における、切欠開口変位 ΔY ($\Delta Y = Y_n - Y_0$, Y_n : 変形後の切欠幅, Y_0 : 初期切欠幅) である。これから明らかなように、矢印で示す切欠端 (初期切欠半径 $\rho=0.08, 0.14$ mm) からのき裂発生が確認される付近まで ΔY とひずみ ϵ にはほぼ直線関係がある。また、その直線こう配は一定であり、 $\rho=0.0$ mm (き裂) を含め、同図に示した初期切欠半径の違いによらず、切欠先端の鈍化状況に定量的な差がほとんどないことがわかる。したがって、このような切欠寸法の範

図では、延性き裂の初期進展機構に大きな違いが生じない。また図6に示されるように、 $\rho=0.0\text{ mm}$ (き裂)でも、他の切欠き同様に引張強さ σ_0 付近での切欠きの変形量 (例えば ΔY) に対し、き裂進展量は少ないように思える。き裂は引張強さ σ_0 に達した以後において顕著に進展するが、以上のようなことが、後述する全体的な延性き裂安定成長傾向にも切欠形状の影響がほとんど生じないことの原因にもなっている。

3.2 延性き裂安定成長挙動とき裂開口形状の関係

これまでの結果より、変位制御試験においては、延性材料の場合、初期寸法として、板幅 W_0 に対して切欠長さ a_0 が小さければ、延性き裂安定成長は引張強さ σ_0 に達した以後において顕著であることは重要である。本実験では、試験機を一時停止した状態で試験片およびき裂の形状を測定したが、引張強さ σ_0 以後においては、再負荷により試験片の変位をわずかに増加させることによりき裂はただちに進展した。したがって、本実験結果は、き裂が進展するか否かの限界状態に近い状態での観察結果に基づくものである。

図9は、標線間ひずみ ε と初期切欠長さ a_0 で無次元化した変形後の切欠長さあるいはき裂長さ a/a_0 の対数との関係である。特徴的なこととしては、切欠半径 ρ の違いにより多少のばらつきはあるものの、引張強さ σ_0 以後においては $\ln(a/a_0)$ と ε の間には平均的

に次の関係が成り立つ (直線関係がある)。

$$\ln(a/a_0) \propto \varepsilon$$

微分して、変形すると

$$da/de \propto a \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、延性き裂安定成長の際には図6に示すように破壊は混合モードで進展しているにもかかわらず、さきの報告の70/30黄銅の場合のほぼ引張モードのみでのき裂進展と同様に、き裂進展速度 da/de はき裂長さ a にほぼ比例している。

これまでの研究⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾によれば、延性き裂安定、不安定成長挙動を調べるためのパラメータとしてき裂開口

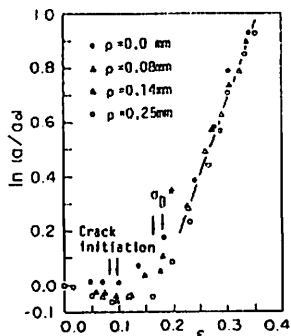
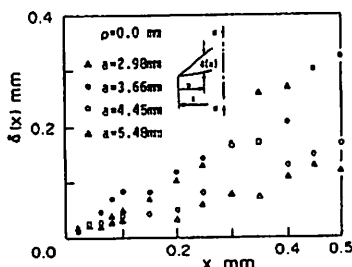
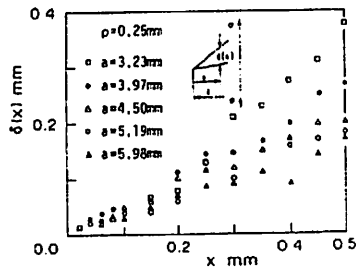


図9 標線間ひずみ ε と無次元き裂長さの対数 $\ln(a/a_0)$ の関係

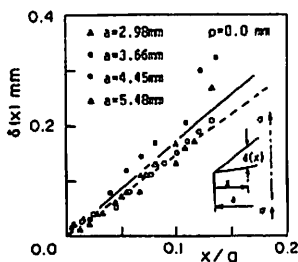


(a) $\rho=0.0\text{ mm}$ の場合

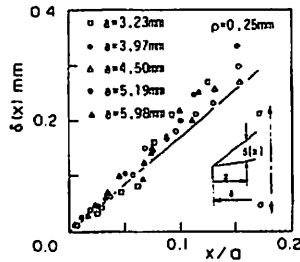


(b) $\rho=0.25\text{ mm}$ の場合

図10 き裂開口量 $\delta(x)$ と測定位置 x との関係 (き裂先端を原点とした)



(a) $\rho=0.0\text{ mm}$ の場合



(b) $\rho=0.25\text{ mm}$ の場合

図11 き裂開口量 $\delta(x)$ とき裂半長による無次元距離 x/a の関係

角 COA が重要であるとされている。そこで、次にき裂開口形状について検討した。

図 10, 11 は、き裂先端からき裂中心軸方向への距離 x におけるき裂開口量 $\delta(x)$ の変化を調べたものである。き裂は図 6 に示すように引張軸に対し斜め方向に進展するが、 $\delta(x)$ は引張軸方向の寸法で定義した。両図とも、(a) が切欠半径 $\rho = 0.0 \text{ mm}$ (き裂)、(b) が $\rho = 0.25 \text{ mm}$ の場合である。なお、他の切欠寸法の場合もほぼ同様な傾向を示した。

図 10 は、き裂開口量 $\delta(x)$ と測定位置 x との関係であるが、進展していく過程のき裂長さによってばらつきがみられ、き裂開口角 COA は一定となっていない。

図 11 は、き裂開口量 $\delta(x)$ とき裂長さによる無次元距離 x/a の関係である。進展していくき裂長さによらず、 $\delta(x)$ と x/a の関係には、ほぼ一定した関係がみられる。また、図中に示した実線は、本実験で使用した 4 種類の切欠きの場合の平均傾向を示したものである。本実験範囲の切欠寸法では、き裂の進展に対し前述した切欠きの鈍化等の影響がほとんどないことから、き裂開口形状が、切欠先端半径の影響をほとんど受けない結果となっている。なお、図 11(a) の破線は前報⁽⁶⁾ の 70/30 黄銅中央き裂試験片 (板幅 12 mm, 板厚 2 mm, 初期き裂長さ 2.32 mm) の場合の結果である。試験片寸法、初期き裂寸法が異なるので詳細な議論はできないが、参考までに併記した。

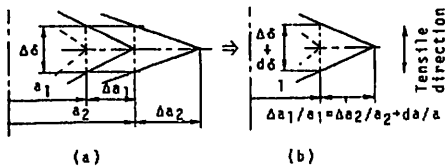


図 12 延性き裂安定成長時のき裂開口形状の変化を示すモデル

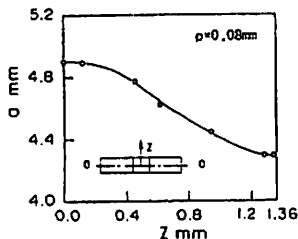


図 13 き裂前縁の形状 (z は、板厚中心から表面 (1.36) 方向への距離)

これらのき裂開口形状測定結果をモデル化したのが、図 12 である。大小 2 個のき裂 (き裂半長 a_1, a_2) のき裂先端が、 $\Delta\delta$ だけ開口した時、元のき裂先端からき裂がそれぞれ $\Delta a_1, \Delta a_2$ だけ進展したとする。実験結果から図 12 (b) に示すように、横軸すなわち測定位置の寸法をき裂長さで無次元することによってき裂先端付近のき裂縁が重なり合う。このことから、 $a \gg \Delta a$ を考慮すると次式が成立する⁽⁸⁾。

$$\Delta a_1/a_1 = \Delta a_2/a_2 = \Delta a/a \propto \Delta\delta$$

さらに、き裂進展量が微小として $\Delta\delta \rightarrow d\delta, \Delta a \rightarrow da$ とすると

$$da/d\delta \propto a \text{ または } d\delta/da \propto 1/a \dots\dots\dots (2)$$

したがって、延性材料においては、延性き裂安定成長過程 (変位制御) の大部分において、き裂開口量変化に対するき裂進展速度 $da/d\delta$ はき裂長さに比例し、図 9 の結果 (式 (1)) と同様な結果が得られた。また、き裂開口角 $d\delta/da$ ⁽⁹⁾ は、き裂長さの逆数に比例する。つまり、き裂は進展していくにつれて、き裂長さに応じて、き裂先端が鋭化していくことになる。ただし、式 (2) にはもう一つの長さの単位をもつパラメータを考慮すべきであり、これについては今後検討したい。

高靱性材料においては、き裂開口角 COA に基づく Tearing Modulus T_r が、ほぼ一定となった報告⁽⁷⁾ もあるが、本実験結果とそれらの結果を直接比較するのは、実験条件および試験片形状の違いなどから問題がある。しかし、本実験条件においては、引張強さ σ_B 以後において、き裂進展速度 $da/ds, da/d\delta$ とき裂開口角 $d\delta/da$ ⁽⁹⁾ が、き裂長さに依存することが、明らかになったのは重要であると思われる。

3.3 試験片内部におけるき裂開口形状について

前節までの結果から、本実験範囲の切欠形状では、ほぼ同様な延性き裂安定成長挙動を示すことがわかった。ただし、前節までの結果は、試験片表面上で計測した結果からの考察である。本節では、試験片内部と表面でき裂開口形状がどの程度異なっているか検討する。実験例は一例のみで、切欠半径 $\rho = 0.08 \text{ mm}$ の試験片において引張強さ σ_B を経た後、約 320 MPa の時点で除荷した試験片の縦断面をペーパー研磨により観察した結果である。

図 13 に、き裂前縁の半分の形状を示す。縦軸が、き裂半長 a 、横軸が板厚中心 ($z = 0 \text{ mm}$) から板表面 ($z \cong 1.36 \text{ mm}$) までの距離である。このように、き裂前縁は凸形になっており、き裂は表面よりも内部で先行して進展している。

試験片内部におけるき裂開口量 $\delta(x)$ の変化を調べたのが図 14 である。横軸の寸法 a は各測定位置 z に

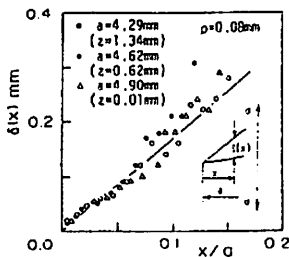
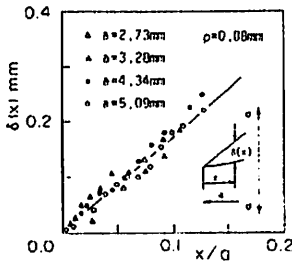
図 14 板内部におけるき裂開口形状 ($\rho=0.08$ mm)

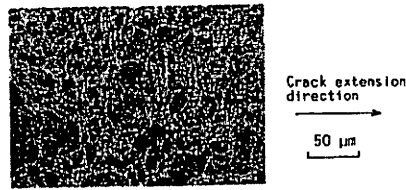
図 15 図 14 と同じ切欠半径の場合の表面でのき裂開口形状

おける値であり、ほぼ、表面、板厚の 1/4 および板厚中心付近で $\delta(x)$ を測定した。図 15 は比較のため同じ切欠半径 $\rho=0.08$ mm をもつ試験片の表面でのき裂開口形状を示したものである。データは少ないが、図 14, 15 の比較により表面と内部でのき裂開口形状の傾向に極端な相異は認められない。また両図の場合とも図中の実線で示す本実験で用いた切欠きの場合の平均傾向とよく一致している。

なお、き裂進展方向は表面、板厚中央で引張軸方向に対し傾斜し、き裂面は板厚方向にもほぼ 45° の角度で傾斜していた。そのため、破壊は複雑な混合モードで進展するが、丸棒平滑試験片中央部のようにディンプルは成長せず、引張軸方向から観察した破断面には、図 16 の破面写真にみられるような等軸形に近いディンプル（厳密には、せん断-伸長形ディンプルである）が多くみうけられた。

4. 結 言

さきの報告⁽⁴⁾における 70/30 黄銅の中央き裂試験片では、延性き裂安定成長挙動の特徴として、き裂進展速度がき裂長さに依存して変化することを示した。このことは、これまでの高靱性材料の場合の報告例にはみられず、延性材料における破壊挙動の一つの特徴と

図 16 破面の例 ($\rho=0.08$ mm)

も考えられる。

そこで、本研究では定性的な観点から低炭素鋼 S15CK の中央切欠試験片を用いて、変位制御方式の実験により延性き裂安定成長挙動について検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 延性き裂は、引張強さ σ_B に達する以前に発生するが、き裂安定成長は σ_B 以後において顕著となる。また、き裂が発生するまでの切欠先端の鈍化傾向は、用いた切欠きの先端半径 [$\rho=0.0$ (き裂), 0.08, 0.14, 0.25 mm] の範囲では、ほぼ同様であった。

(2) 延性き裂は、引張軸に対し傾斜して進展していき、延性破壊は引張りとせん断の混合モードで進展する。

(3) 本実験範囲では初期切欠半径によらず、き裂進展量 da と線間ひずみ増分 $d\epsilon$ の間には、次の関係があり、き裂進展速度 $da/d\epsilon$ はき裂長さに依存している。

$$da/d\epsilon \propto a$$

(4) き裂開口量の変化 $d\delta$ とき裂進展量 da で定義されるき裂開口角 $d\delta/da$ は、本実験条件内で、き裂長さの逆数に比例する。

$$d\delta/da \propto 1/a$$

(5) 本実験範囲で用いた切欠きの寸法では、延性き裂安定成長挙動の平均傾向に極端な違いはみられず、内部での現象と表面での現象には大きな違いはないことが予想される。

最後に、本研究をまとめるに当たりご助言をいただいた九州大学工学部材料強弱学教室、村上敬宜教授に感謝申し上げる。

文 献

- (1) Paris, P. C., ほか 3 名, *ASTM STP*, 668 (1979), 5.
- (2) Shih, C. F., ほか 2 名, 文献(1)の 37 ページ.
- (3) 例えば、三好・ほか 3 名, 機論, 50-453, A (昭 49), 904.
- (4) 日本機械学会基準・弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験方法, JSME S 001, (昭 57), 日本機械学会.
- (5) 真壁・村上, 機論, 53-486, A (昭 62), 261.
- (6) 矢川, 機論, 48-425, A (昭 57), 3.
- (7) 坂・ほか 4 名, 機論, 49-443, A (昭 58), 829.