

低炭素鋼丸棒穴材の引張りにおける延性破壊の進展挙動について*

真壁朝敏*¹, 兼城英夫*², 宮城清宏*²

The Extension Behavior of the Ductile Fracture of a Low Carbon Steel Round Bar with a Hole under Tension

Chobin MAKABE, Hideo KANESHIRO, and Kiyohiro MIYAGI

The ductile fracture mechanism of a round bar of S 15 CK with a hole is investigated in order to obtain an understanding of the extension behavior of a ductile surface crack from a hole. A ductile crack starting from a hole grew stably with mixed mode fracture which combined tensile mode and shear mode fracture, and the nondimensionalized growth rate of crack for strain increment was proportional to nondimensionalized crack size l/D independent of the hole shape, which can be written as

$$d(l/D)/d\epsilon \propto l/D$$

where l is crack length, D is the diameter of a specimen and ϵ is the true strain. Hence, the extension behavior of a ductile crack depends on crack size in this investigation. The ductile fracture originated in a surface is different from the cup-and-cone type in macro-scope features.

Key Words: Fracture, Ductile Fracture, Surface Hole, Crack Growth Rate, Crack Length, Tensile Test, S 15 CK

1. 結 言

低炭素鋼などの実用金属材料の引張りによる延性破壊は、カップアンドコーン形破壊として知られている。カップアンドコーン形破壊は、破壊過程において発達するポイドを核として生じ、部材の延性はポイドの発生、成長挙動に左右される⁽¹⁾。カップアンドコーン形破壊の最終過程は、局所的に発達するせん断変形をともなった不安定破壊である⁽²⁾⁽³⁾。Rogers⁽³⁾によると、不安定破壊はせん断帯でのポイドシートの形成により延性き裂が拡大することにより生じる。また西谷ら⁽⁴⁾は、巨視的ポイドを起点として、強せん断変形域が生じ、内部き裂が形成されていく過程を詳細に観察することによって、不安定破壊開始時には複数の内部き裂が干渉すると述べている。カップアンドコーン形破壊における内部き裂の拡大機構については、このような報告がなされてきているが、それに対し、表面から開始する丸棒の延性破壊の報告は少ない。

村上ら⁽⁵⁾は、低サイクル疲労過程における残留破断延性の低下の主要原因が微小表面き裂の存在であること

を明らかにした。その報告によると疲労試験後の一方引張りにおける、表面の疲労き裂から開始する巨視的延性破壊の様相は、カップアンドコーン形破壊と異なり、破断面の大部分がせん断形破面を呈する。村上らは、このような表面き裂から開始し、引張りとせん断による混合モードで進展する延性破壊をせん断形破壊と称したが、試験片表面に人工欠陥を加工した場合も、同様にせん断形破壊で延性破壊が進行していく⁽⁶⁾。

本研究では、人工穴を有する低炭素鋼丸棒試験片を用いてこのような表面から拡大するせん断をともなう延性破壊の挙動について検討する。三軸応力状態のもとで形成された内部き裂と表面より発生するき裂の進展挙動は異なるものと思われるが、一般的にせん断形破壊を理解するためにも、表面き裂によるせん断形破壊の挙動を調べておく必要があるものと考えている。

また、著者らは、70/30黄銅⁽⁷⁾および本実験で使用したのと同じS 15 CK⁽⁸⁾を用いて中央き裂試験片および中央切欠試験片の延性き裂進展挙動を調べた。その結果、弾塑性破壊じん性試験法⁽⁹⁾の推奨値に比べ、試験片板幅に対し板厚が薄く、初期き裂長さが短い場合、延性材料ではひずみの増加率に対するき裂進展速度がき裂長さに依存することが明らかとなった。本研究で

* 昭和63年3月12日 中国四国支部第26期総会講演会において講演、原稿受付 昭和62年8月19日。

¹ 琉球大学短期大学部 (〒903-01 沖縄県中頭郡西原町千原1)。

² 琉球大学工学部。

は、このような延性き裂の進展する際の特徴も考慮して表面からのせん断形の延性破壊挙動を検討する。

2. 使用材料および実験方法

素材は、低炭素鋼 S15 CK である。それを 900°C で 1h, 焼なました後、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。試験片は図 1 に示す砂時計形試験片である。表面からのき裂の進展挙動を観察するため試験片中央部には図 2 に示す人工穴を加工した。穴寸法を図 2 の範囲で変化させることにより穴からの延性き裂発生およびせん断形破壊開始条件の検討を試みた。以下、穴を有する試験片を穴材と呼ぶ。

引張試験は、変位制御方式で引張速度 5 mm/min で行った。破断に至るまでの穴の変形およびき裂の発生、成長の観察は試験機に取付けた金属顕微鏡により直接観察し、変形時の試験片最小断面直径およびき裂寸法などの測定はダイヤルゲージと顕微鏡を組合せて行った。

試験片に加わる平均応力⁽¹⁰⁾ σ および真ひずみ ϵ は次式により算出した。

$$\sigma = P/A, \epsilon = \ln A_0/A \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 P は外力(荷重)であり、 A は引張時の断面積、

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

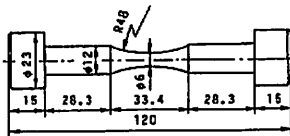


図 1 試験片形状と寸法(mm)

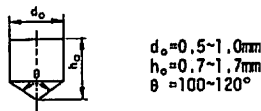


図 2 穴の形状

A_0 は初期断面積である。なお、断面積 A 、 A_0 はき裂寸法および穴寸法を含めた面積である。くびれが生じると式(1)の応力は真応力と一致しないが、本報ではくびれた後の破壊挙動を主に検討するので式(1)の応力を平均応力と呼ぶ。

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 公称応力、公称ひずみによるき裂進展挙動の検討 前報⁽⁷⁾⁽⁸⁾において、延性材料の平板試験片の引張破壊では中央部の貫通き裂が実験条件によってはき裂長さに依存して成長していくことを明らかにした。本実験の丸棒穴材では非貫通き裂により延性破壊が進展していくが、前報との比較のため公称応力 σ_n 、公称ひずみ ϵ_n とき裂長さの関係を検討する。公称ひずみ ϵ_n は式(1)により求めた真ひずみ ϵ を用いて $\epsilon_n = e^\epsilon - 1$ として求めた。

穴材の延性破壊過程におけるき裂進展状況を公称応力との関係で検討したのが図 3 である。試験片最小断面直径 D で無次元化した穴あるいはき裂の引張軸方向への表面での投影長さ l/D と公称応力 σ_n との関係であるが引張強さ σ_B に達するわずかに前に発生したき裂の進展は引張強さ σ_B 以後に顕著となることからわかる。このことは、引張強さ以後のき裂進展挙動が穴材の延性に大きな影響を及ぼすことを示唆している。

村上ら⁽⁶⁾⁽⁹⁾は、表面欠陥から進展する延性破壊をせん断形破壊と呼んでいるが、本実験の穴材の破壊も同様にせん断形破壊と呼ぶことにする。せん断形破壊は穴縁から発生したき裂が引張軸に対し斜め方向に進展することにより生じ、破壊モードは引張りとしせん断の混合モードとなる。このようなせん断形の破面の例を図 4 に示すが、せん断形の破面の大部分は、カップアンドコーン形破面のせん断縁部分に類似した破面とな

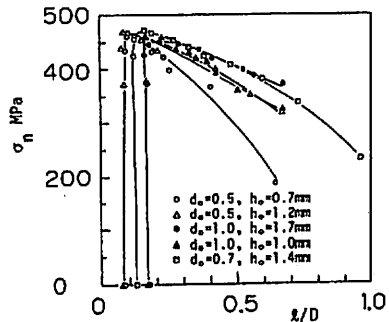


図 3 公称応力 σ_n と無次元き裂長さ l/D の関係

っている。

穴より発達するせん断形破壊によるき裂進展曲線の例を図5に示す。初期寸法 ($l_0 = d_0$) で無次元化した穴あるいはき裂の引張軸方向への投影長さの対数 $\ln(l/l_0)$ と公称ひずみ ϵ_n の関係を示している。図5は、初期穴径 $d_0 = 1.0$ mm の場合であるが、試験片の変形が σ の時点に達した以後においては、き裂進展挙動の目安としての実線から $\ln(l/l_0) \propto \epsilon_n$ という傾向があることがわかる。したがって、穴から発生した非貫通き裂のせん断形での進展も前報⁽⁷⁾⁽⁸⁾の貫通き裂同様、延性き裂はき裂長さに依存して成長する傾向があることがわかる。

3.2 穴材の変形とき裂の発生、成長について

西谷ら⁽⁴⁾は、剛性を高くした特殊な引張装置を用いることによりカップアンドコーン形破壊におけるポイドからのき裂形成過程を詳細に観察している。その結果によると、カップアンドコーン形破壊過程は、ほとんどポイドの発生、成長過程であり、ポイドからのき裂発生機構の考察が破壊ひずみを検討するうえで重要である。

それに対して、丸棒穴材では、図3.5に示す線図から推察できるように、き裂の進展挙動が破壊ひずみに大きな影響を及ぼし、穴材の破壊機構を考えるには、



図4 せん断形破面の例

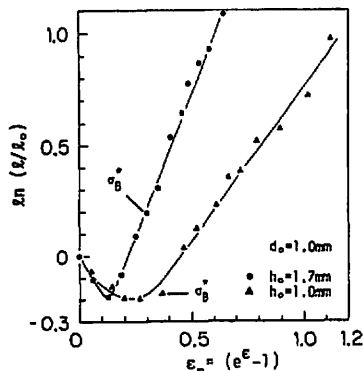


図5 公称ひずみ ϵ_n によるき裂進展の検討

試験片の変形とき裂発生、成長過程を関連させて検討する必要がある。穴材および平滑材の平均応力-真ひずみ(式(1))の関係の例を図6に示す。図6には、穴縁からのき裂発生、引張強さ σ_b およびき裂が穴底まで拡大し穴全体がき裂で覆われる時点付近(*印)を記している。また、*印付近での試験片直径 D による無次元き裂長さ l/D の値も併記してある。■印は穴のない平滑材の場合であるが、平均応力-真ひずみ線図にみられる穴材の変形挙動は、穴底割れ(*印)付近までは、平滑材の場合とほぼ同様であるとみなせる。このことから、穴材の破壊ひずみは、き裂発生時期よりも穴底割れ付近以後のき裂進展挙動に大きく影響されることが想像できる。したがって、今後、破壊ひずみと穴形状の関係を定量的に明らかにするためにも、穴底割れ付近以後のき裂進展挙動を検討しておくのは有意義である。なお、穴径 $d_0 = 1.0$ mm、穴深さ $h_0 = 1.7$ mm の場合は、他の場合と異なり *印の点の応力の値は平滑材に比べて若干低めの値となっているが、後に示すようにき裂を半円形と仮定してき裂面積を含まない実断面積で平均応力を評価すると $\sigma \cong 720$ MPa となる。この値は同じひずみのときの平滑材の平均応力 σ とほぼ等しい。

西谷ら⁽⁴⁾の70/30黄銅を用いた平滑材の実験によると、内部き裂の発生時点すなわち強せん断変形域の著しい発達によって平均応力の低下が生じる。穴材においても、同様に穴底割れが生ずる付近あるいは穴底割れ以後において平均応力の低下が生じる。その平均応力低下は、穴から発生したき裂のせん断形による拡大にともなって起こったものであるが、平滑材のように不安定ではなく比較的安定的である。これは高い三軸応力状態のもとで部材内部から開始するせん断形破壊と、表面から開始する低い三軸応力状態でのせん断形破壊との違いであると思われる。しかしながら、穴底割れ付近のせん断形破壊の開始は、西谷らの

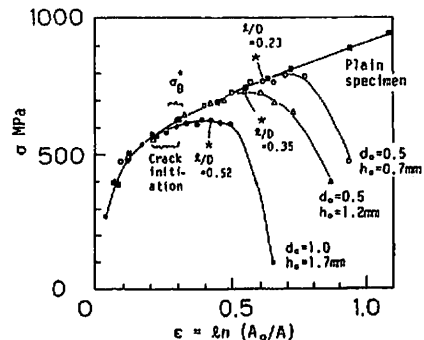


図6 丸棒穴材の平均応力-真ひずみ線図

報告⁽⁴⁾における強せん断変形域の発達による内部き裂の発生時点と対応した意味を持つものと考えられ、穴材の延性破壊機構を考えるうえで重要である。

せん断形破壊の特徴を考えるため、それが、開始する際のき裂形状を調べたのが図7.8である。せん断形破壊は、穴底割れ直後あるいは平均応力の最大値付近で開始すると考えられるが、本研究では、穴底割れの時点に注目した。図7は、引張過程において穴底割れを確認した時点で試験片を除荷し、液体窒素中でぜい性破壊させた破面の写真である。延性破面とぜい性破面の違いから延性き裂のき裂前縁形状がわかるが、ほぼ半円形となっている。本研究では、き裂形状の詳細な測定は行っていないので、式(2)のように穴深さを仮定して、せん断形破壊開始時点付近のき裂形状を検討した。式(2)は、引張りによる穴の深さの減少率と試験片直径の減少率がほぼ等しいとして、穴底割れ時点の穴の深

さすなわちき裂の深さ h' を仮定したものである。

$$h' = h_0 / D_0 \cdot D \dots\dots\dots (2)$$

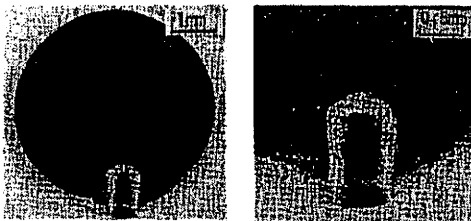
ここで、 h_0 , D_0 はそれぞれ初期穴深さ、初期断面直径であり、 D は穴底割れ時点の断面直径である。

図8は、穴底割れ確認時点における表面き裂長さ l_c と仮定した式(2)によるき裂深さ h' の関係である。これよりアスペクト比 h'/l_c はほぼ0.5~0.6である。したがって、本実験範囲内では図7にみられるように、せん断形破壊開始時点では、き裂がほぼ半円形となって穴全体を覆っていることが考えられる。

3.3 せん断形破壊におけるき裂の進展挙動について
3.1節で述べたように延性き裂の進展挙動にはき裂寸法が関係している。3.1節では前報⁽⁷⁾⁽⁸⁾との比較という観点から公称応力、公称ひずみでの整理結果を示したが、塑性加工や物理的意味づけの面から考察するには、真応力、真ひずみでの整理が必要となる。このような観点から、本節ではせん断形破壊と真ひずみの変化の関係を主に検討する。内部破壊により急激に進展するせん断形破壊の詳細な観察は困難であり、特別な工夫⁽⁹⁾が必要である。それに対し、本例のような表面から開始するせん断形破壊の観察は比較的容易である。

図9は、穴あるいはき裂の引張軸方向への投影長さ l と l の試験片直径に関する無次元量 l/D (以下、無次元き裂長さと呼ぶ) との関係である。物理的背景は明らかでないが、 $l-D$ の関係には引張強さの点以後において直線関係がある。したがって、本実験結果は、 l , l/D のどちらかで整理しても定性的には、同様な傾向を示す。

図10は、無次元き裂長さ l/D と真ひずみ ϵ との関係を片対数グラフ上に示したものである。図10中の直線は、穴底割れ付近以後におけるき裂進展傾向を示している。穴底が割れて、き裂進展に及ぼす寸法の影響



(a) 破面全体図 (b) 穴付近の拡大

図7 せん断形破壊開始時点付近のき裂形状の観察

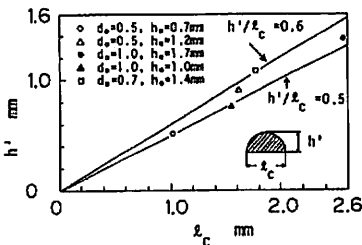


図8 せん断形破壊開始時点付近のき裂形状の推定

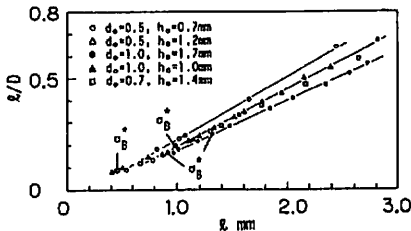


図9 無次元き裂長さ l/D とき裂長さ l の関係

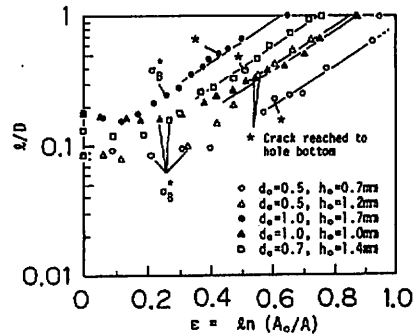


図10 真ひずみによるき裂進展傾向の検討

幅が小さくなると、無次元化き裂進展速度 $d(l/D)/d\epsilon$ は穴の初期寸法にほとんど依存しなくなると思われる。このことを明確にするため、穴底割れ付近以後のデータについて、引裂時の変動するひずみ ϵ から破壊ひずみ ϵ_f を差し引き、図 10 の横軸を平行移動したのが図 11 である。図 11 から、き裂が穴全体を覆いつくした際の無次元化き裂進展速度は、初期寸法によらず、平均的にはほぼ次式で表せることがわかる。

$$d(l/D)/d\epsilon \cong C \cdot (l/D) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで C は定数であり、 $C \cong 3.4$ となった。穴寸法が小さい場合 ($d_0=0.5, h_0=0.7$ mm) はその他の場合の平均傾向と異なる傾向を示すが、 $\ln(l/D)$ と ϵ の関係は平行関係を維持しているため本質的には、式(3)が本実験範囲内の穴形状に適用できる。この穴寸法が小さい場合の結果におけるずれの背景には、試験片形状変化と荷重状態とも関連した、破壊ひずみ ϵ_f に連する直前での応力の三軸性の影響が考えられる。

き裂進展曲線である図 10, 11 から、き裂のせん断形による進展開始は初期寸法の影響を顕著に受けるが、き裂が全体的にせん断形で進展していくときは、初期寸法によらず無次元化き裂進展速度 $d(l/D)/d\epsilon$ が式(3)のように表現でき、ひずみ履歴の影響が少なく、また定性的傾向として穴寸法の影響を受けないことがわかった。このようなせん断形破壊の進展挙動には 3・2 節で示したようにせん断形破壊開始時点のき裂形状が本実験範囲内の穴寸法によらずほぼ半円形であることも関係していると思われる。

著者らは、前報⁷⁾において 70/30 黄銅中央き裂試験片では、試験片の変形が引張強さ σ_f の時点を越えると、き裂進展方向において計測したき裂先端付近の引張方向・真ひずみ ϵ_y の分布は、実験を行った範囲のき裂長さによらず次式のように表せることを示した。

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq r/a \leq 0.01 \text{ のとき} \\ \epsilon_y \cong \epsilon_f \\ 0.01 \leq r/a \leq 0.5 \text{ のとき} \\ \epsilon_y \cong C_1 \cdot \epsilon_f \cdot (a/r)^\beta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 r/a はき裂半長 a に関するき裂先端からのき裂進展方向への距離 r の無次元量、 ϵ_f は材料の破壊ひずみでほぼ 1.5 である。また、 C_1, β は定数でそれぞれ $C_1=0.10 \sim 0.13, \beta=0.4 \sim 0.5$ となった⁷⁾。この場合、き裂は引張方向にほぼ垂直に進展し、破壊の巨視的様相は引裂形であったが、安定成長時にはき裂はき裂先端近傍のひずみが限界値すなわちほぼ破壊ひずみに達しながら連続的に進展した。

S 15 CK の中央切欠試験片(切欠半径 $\rho=0.08$ mm の場合)¹⁰⁾ においては図 12 に示すようにき裂は引張軸より斜め方向に進展し、破壊は本実験同様に引張モードとせん断モードの混合モードで進展した。図 13 は、図 12 に示す写真を用いて引張軸に垂直方向における真ひずみ ϵ_y の分布例をき裂先端からの距離 r の無次元量 r/a に対して求めたものである。この場合、破壊は混合モードで進展するので、式(4)のような明確な関係は得られないが、き裂先端付近では近似的に $\epsilon_y \cong \epsilon_f$ (S15CK の破壊ひずみ $\epsilon_f \cong 1.1$) という関係がある。

すなわち、式(3)が、本実験範囲内で、ひずみ履歴

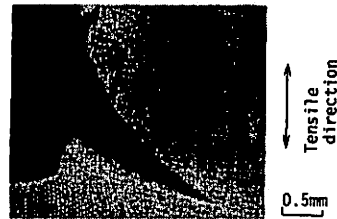


図 12 S 15 CK 中央切欠試験片におけるき裂進展状況の例

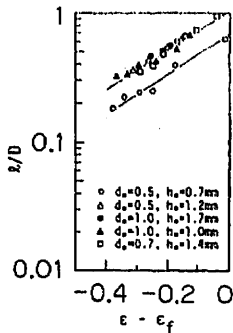


図 11 無次元化き裂進展速度 $d(l/D)/d\epsilon$ の評価

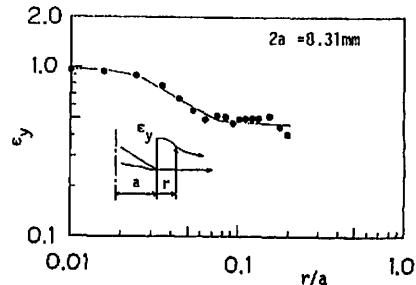


図 13 S 15 CK 中央切欠試験片におけるき裂先端付近のひずみ分布の例

の影響を受けない背景には、式(4)や図13に示されるように、き裂先端近傍のひずみがある限界値に近づきながら、き裂が安定的に進展していくことが考えられる。このような限界ひずみの存在を定量的に考察することは、今後、延性破壊に関する理論式の検討や破壊ひずみ評価を行ううえで重要であると思われる。

4. 結 言

延性材料の丸棒平滑材の延性破壊ではカップアンドコーン形となることが多い。それに対し、同じ材料でも丸棒穴材の引張りによる延性破壊は巨視的様相がカップアンドコーン形と異なる。本研究では、このような丸棒穴材の破壊を村上ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾にならってせん断形破壊と呼び、その破壊機構について検討した。

得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 丸棒穴材の平均応力-真ひずみ線図の後半における応力低下は、穴底が割れ、き裂が全体としてせん断形で進展し始めた時点付近で生じる。

(2) き裂が穴底に達した時点付近のき裂形状は、ほぼ穴深さ h を半径とした半円形となっていると考えられる。

(3) せん断形破壊の開始時点は、加工した穴の初期寸法の影響を受けるが、き裂が穴全体に拡大する時点付近からは、無次元化き裂の進展速度 $d(l/D)/de$ は、初期穴寸法の影響を受けず次式で表せる。

$$d(l/D)/de \propto l/D$$

この結果は、前報の平板試験片で得られた貫通中央き裂の進展傾向と同様な結果であり、き裂がき裂長さに関係して進展することを示している。

最後に、本研究を行うにあ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 村上敬直教授ならびに西谷弘信教授に感謝申し上げます。

文 献

- (1) 例えば、志村・ほか2名, 鉄と鋼, 62-2 (昭51), 267.
- (2) 西谷・清田, 機論, No. 768-1 (昭51), 37.
- (3) Rogers, H. C., *Trans. AIME*, 218, (1960), 498.
- (4) 西谷・真壁, 材料, 31-344 (昭57), 452.
- (5) 村上・ほか2名, 機論, 50-457, A (昭59), 1574.
- (6) 村上・ほか2名, 機論, 51-472, A (昭60), 2721.
- (7) 真壁・村上, 機論, 53-485, A (昭62), 261.
- (8) 真壁・兼城, 機論, 54-499, A (昭63), 503.
- (9) 日本機械学会基準・弾塑性破壊靱性 f_{ic} 試験方法, JSME S001, (昭57), 日本機械学会.
- (10) 山田, 塑性力学, (昭40), 7, 日刊工業新聞社.