定荷重下での延性き裂成長と不安定破壊遷移限界 に及ぼす負荷様式の影響

正員 佐 藤 邦 彦* 正員 豊 田 政 男*
正員 塚 本 光 夫*

Effect of Loading Mode on Fibrous Crack Growth and Unstable
Fracture Under Constant Loading

by Kunihiko Satoh, *Member* Masao Toyoda, *Member*
Mitsuo Tsukamoto, *Member*

Summary

Constant loading tests and monotonic loading tests have been carried out at two temperature levels, i. e. room temperature and -70°C at which unstable brittle fracture occurs after stable fibrous crack growth, by using double edge-cracked tensile specimens and 3-point bending specimen of 4 mm thickness extracted from mild steel. Fibrous crack growth, time-dependent deformation and unstable fracture transition behaviors have been observed. According to above results, consideration has been conducted on the effect of loading mode on fibrous crack growth and unstable fracture transition.

Fibrous crack growth under constant loading is independent of kind of loading mode, i. e. tensile and bending. Though, near-tip strain distributions of tensile and bending specimens are different, equivalent plastic strain at 0.2 mm ahead of crack tip is the determined by the value of COD at the original crack tip. Fibrous crack growth and time-dependent deformation behaviors under constant loading at -70°C is the same as those at room temperature. Critical CODs, $(\delta_m)_d$, $(\delta_u)_d$ obtained by constant loading test are lower those obtained by monotonic loading, δ_m , δ_u . Particularly, $(\delta_u)_d$ becomes about half of δ_u , and it is almost the same as the COD δ_i at fibrous crack initiation.

1 緒 言

切欠きをもつ鋼材を全面降伏するまで単調載荷した後にある一定荷重に保持すると、初期切欠きの先端から延性き裂が成長した後、保持する荷重レベルの高い場合には不安定破壊に移行する。この現象について著者らは、室温における軟鋼の両側切欠き付引張り試験による詳細な実験と検討を行ってきた^{1),2)}。従来、定荷重下でのき裂開口変位の増加挙動と延性き裂成長について報告された例^{3)~6)}はあるものの、負荷様式や温度がこれらの挙動に及ぼす影響について述べたものは見当たらないようである。そこで、前々報¹⁾、前報²⁾に引き続き本研究では、定荷重下での延性き裂成長と不安定破壊現象に及ぼす負荷様式の影響を検討するため、室温における切欠き付 3 点曲げ試験を行い、文献 1) の結果と併わせて比較検討

を行った。さらに、3 点曲げ COD 試験によって求められる限界 COD-温度曲線の遷移温度付近の比較的低温において両側切欠き付引張り試験と切欠き付 3 点曲げ試験を行い、低温における上記の現象について検討・考察を行った。

2 実 験

実験には著者らが文献 1), 文献 2) で用いたのと同じ板厚 22 mm の軟鋼 SM 41 B (C : 0.13%, Si : 0.23%, Mn : 0.75%, 室温での降伏応力 $\sigma_Y = 245 \text{ MPa}$, 引張り強さ $\sigma_T = 409 \text{ MPa}$, ひずみ硬化指数 $n = 0.24$) から Fig. 1 に示す両側切欠き付引張り試験片と 3 点曲げ COD 試験片を切り出した。両試験片ともに板厚は 4 mm, き裂長さ/板幅 = 0.5 であり、さらにいずれも切欠き先端には約 2 mm の疲労予き裂を導入している。

低温における実験の試験温度を選定するため、あらか

* 大阪大学工学部

(a) Double edge-cracked tensile specimen

(b) 3-point bending COD specimen

Fig.1 Specimen geometries

じめ本研究で使用した軟鋼 SM 41 B から切り出した板厚 4mm の 3 点曲げ COD 試験片を用い、初期形状に対する応力拡大係数の増加速度 $\dot{K}=520 \text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の載荷速度で単調載荷試験を実施し、限界 COD の温度依存性を調査した。その結果によれば、おおよそ $-80^\circ\text{C} \sim -60^\circ\text{C}$ の範囲で安定な延性き裂成長の後、脆性破壊にいたる破壊挙動、すなわち BS 5762 の定義による δ_u を示し、脆性-延性遷移温度はおおよそ -70°C であった。そこで単調載荷時において、安定な延性き裂成長の後不安定脆性破壊を呈するような試験温度として -70°C を選んだ。 -70°C での供試材料の降伏応力 $\sigma_Y=301 \text{ MPa}$ 、引張り強さ $\sigma_T=475 \text{ MPa}$ である。

両試験片を用いて、室温ならびに -70°C において、

- ① 単調載荷試験
- ② 定荷重試験
- ③ 載荷速度が極めて遅い単調載荷試験

を実施した。室温においては、初期き裂先端の COD、延性き裂成長、ならびにき裂先端でのひずみ分布を測定した。 -70°C では初期き裂先端での COD、延性き裂成長を測定した。なお、初期き裂先端での COD δ 、延性き裂長さ Δa 、ひずみ分布の測定手法は文献 1) と同じであるが、 -70°C の延性き裂長さ Δa については、破断は不安定脆性破壊したことから、破断後に測定された破面上の最大延性き裂長さを Δa とした。

両試験片ともに単調載荷試験は荷重制御により実施した。載荷速度は初期形状に対する応力拡大係数の増加速度 $\dot{K}$ に換算して $520 \text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ となるように荷重を制

御した。また、載荷速度が極めて遅い単調載荷試験は一定変位速度により実施した。

3 室温における延性き裂成長に及ぼす荷重様式の影響

3.1 延性き裂成長挙動に及ぼす荷重様式の影響

室温での両側切欠き付引張試験片の定荷重下での延性き裂の成長挙動、ならびにき裂先端でのひずみ挙動はすでに文献 1) で示した。ここでは文献 1) の結果を室温での 3 点曲げ COD 試験結果と比較して考察することにする。

Fig. 2 は 3 点曲げ COD 試験片を用いた単調載荷試験、および定荷重試験で得られた延性き裂の発生・成長挙動を示したもので、(切欠きネット断面での曲げモーメント M)/(切欠きネット断面の完全弾塑性体の梁を塑性崩壊させるために必要な全塑性モーメント M_P) と初期き裂先端の COD δ の関係を上図に示し、延性き裂長さ Δa と COD δ の関係、すなわち δ_R 曲線を下図に示した。上図の実線で示した曲線は、載荷速度 $\dot{K}=520 \text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ における単調載荷試験の結果を示しており、破線は $\dot{K}=0.74 \text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の載荷速度が極めて遅い単

Fig.2 Crack growth and increase in COD under monotonic loading and constant loading of bending specimens tested at room temperature

調載荷試験の結果を示している。 $\dot{K}=0.74\text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ のときの最大荷重点 (M点) での COD (δ_m)_L は約 0.82 mm であった。

Fig. 2 の上図に示す $\dot{K}=520\text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の単調載荷試験の途中の⊗印および○印で示す荷重レベルで除荷した5個の試験片について延性き裂の発生の有無を調べたところ、下図に示すように⊗印で示す2個の試験片には延性き裂の発生が認められなかったが、○印で示す3個の試験片には 0.05 mm~0.17 mm 程度の延性き裂の発生が確認された。

そこで、単調載荷試験の途中で延性き裂が発生する二つの荷重レベル A, B で定荷重試験を行った。荷重レベル A は $\dot{K}=0.74\text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の極めて遅い載荷速度の単調載荷試験の最大荷重点 M に近い荷重レベルで、この場合には定荷重保持によって●印の位置まで COD が増加し、以後 COD の増加は実験的には観測されなかった。●印の位置の COD $\delta=0.62\text{ mm}$ は $\dot{K}=0.74\text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の単調載荷試験による同じ荷重レベルでの COD 値に比較的近い。

一方、 $\dot{K}=0.74\text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の単調載荷試験の最大荷重点 M より高い荷重レベル B で定荷重保持すると、▲印に示すように COD が次第に増加して最後に不安定破壊に至った。なお、この場合、定荷重保持の途中の▲印の位置で除荷した試験片には、Fig. 2 の下図に示すように延性き裂の著しい成長が認められた。以上の特性は両側切欠き付引張試験片で得られた特性¹⁾と一致している。

次に Fig. 2 下図に示す斜線の範囲は、両側切欠き付引張試験片を用いて行った単調載荷試験 ($\dot{K}=520\text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$) および定荷重試験で得られた COD δ に対する延性き裂長さ Δa の測定値のばらつき範囲を示したものである (文献 1) の Fig. 4 参照)。今回行った3点曲げ試験の測定値はほぼこのばらつきの範囲にあり、荷重様式の如何にかかわらず δ_R 曲線はほぼ同じであると見なすことができる。

ただし、Fig. 2 下図に示すように、延性き裂発生限界 COD δ_i は、引張り負荷の場合 0.43 mm と 0.55 mm の間にあり、曲げ負荷の場合 0.38 mm と 0.42 mm の間にあって、 δ_i の値は引張り負荷の場合の方がやや大きい。 δ_i は、き裂先端付近の応力多軸度が小さくなるほど大きくなることが知られている^{7,8)}。試みに BS 5762 に準拠した3点曲げ COD 試験片 (Fig. 1(b) の試験片形状で板厚を 10 mm にしたもの) を用いて供試材料の δ_i を求めたところ、 δ_i は 0.16 mm と 0.20 mm の間であった。すなわち、同じ試験片形状でも板厚を 10 mm から 4 mm に減厚すると、 δ_i はかなり大きくなること分かる。しかし、引張り負荷の場合と曲げ負荷の場合の上記のような δ_i 値の僅かな差が、応力多軸度の相違

による本質的なものであるかどうかは、試験データ数が少ないので明らかではない。

3.2 き裂先端近傍のひずみに及ぼす荷重様式の影響

Fig. 2 上図の荷重レベル B で、定荷重試験の途中の a 点 ($\delta=0.95\text{ mm}$) で除荷した試験片の板厚中央面での延性き裂先端付近の変形の様相を Fig. 3 に示す。文献 1) で述べたように引張り負荷の場合には、単調載荷、定荷重負荷といった荷重履歴にかかわらず COD が同じならばき裂先端付近の変形の様相、延性き裂長さ Δa およびき裂先端付近のひずみ分布はほぼ同じになる。そこで Fig. 3 には比較のために引張り負荷による単調載荷試験 ($\dot{K}=520\text{ kNm}^{-3/2}/\text{s}$) で $\delta=1.01\text{ mm}$ の場合の延性き裂先端付近の変形の様相を併わせて示した。Fig. 3 によれば、引張り負荷、曲げ負荷といった荷重様式の如何にか

Fig. 3 Fibrous crack profiles at mid-cross section of tensile specimen and bending specimen

Fig. 4 Strain distributions along crack line of cracked tensile specimen and 3-point bending specimen

Fig. 5 Effect of COD on crack-tip strain of cracked tensile specimens and 3-point bending COD specimens

かわらず、COD が同じならば延性き裂長さ Δa および延性き裂先端付近の変形の様相に大きな相違はないようである。

Fig. 3 に示した二つの試験片を用いて、板厚中央面におけるき裂先端前方の相当塑性ひずみ分布を求めた結果を Fig. 4 に示す。ひずみの測定は文献 1) で述べたピッカース硬さ (荷重 9.8 N) から換算する手法によった。Fig. 4 によれば、き裂先端から十分離れた位置でのひずみ分布は負荷様式によって異なるが、き裂先端からの距離 $r=0.2\text{ mm}$ といったき裂先端に極めて近い位置の相

当塑性ひずみは、引張り負荷でも曲げ負荷でも大きな相違は認められない。

延性き裂成長は、き裂先端近傍のボイドの発生・成長・合体によって生じるから、延性き裂の成長はき裂先端に極めて近い位置の塑性ひずみに支配されるであろう。そこで、き裂先端から 0.2 mm 前方の位置で測定した相当塑性ひずみを $(\epsilon_p)_{r=0.2}$ とし、引張試験片および曲げ試験片の単調荷試験と定荷重試験で得られた $(\epsilon_p)_{r=0.2}$ と初期き裂先端の COD δ との関係をもとめたものを Fig. 5 に示す。Fig. 5 から分かるように、き裂先端でのひずみは COD の増加と共に大きくなっており、実験データにはばらつきがあるものの、引張り負荷、曲げ負荷によらず、また、単調荷試験、定荷重試験によらず、実験点はほぼ図中の斜線で示すような範囲に存在している。

以上のことから、負荷様式や荷重履歴が異なっても同じ COD を示す場合のき裂先端極く近傍のひずみの大きさはほぼ同じであることが分かる。また、COD の増加、すなわち延性き裂の成長と共にき裂先端のひずみは増加し、加工硬化が進行していることも分かる。

4 低温における延性き裂成長に及ぼす負荷様式の影響

Fig. 1 に示す試験片を使用し、供試材料の 3 点曲げ

(a) Tensile tests

(b) Bending tests

Fig. 6 Crack growth and increase in COD under monotonic loading and constant loading tests at -70°C

COD 試験によって延性—脆性遷移挙動を示す -70°C において単調載荷試験と定荷重試験を実施した。実験の要領は室温における実験の場合と同様である。

Fig. 2 と同様の手法で実験結果を取りまとめた結果を Fig. 6(a) (両側切欠き付引張試験片) および Fig. 6(b) (3点曲げ COD 試験) に示す。

$\dot{K}=520\text{kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の単調載荷試験の場合には引張り試験, 曲げ試験共に最大荷重点を示す以前に図の◇印の位置で脆性破壊した。一方, $\dot{K}=7.8\text{kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の比較的遅い載荷速度で単調載荷試験を行うと, 図のM点で最大荷重を示し, 曲げ試験の場合にはその直後に脆性破壊した。

次に $\dot{K}=520\text{kNm}^{-3/2}/\text{s}$ の単調載荷の途中で図のA, B, C などの荷重レベルで定荷重保持すると COD が時間と共に増加し, 荷重レベル A では●印の位置で COD の増加は事実上停止したが, その他の場合には◇印の位置で不安定脆性破壊に移行した。不安定破壊の破壊様式が脆性的であることを除けば, 以上の特性は室温における定荷重試験で得られる特性と同様である。

次に Fig. 6(a), (b) の下図に示す δ_R 曲線を見ると, 室温と -70°C とで有意差は認められない。また引張り負荷と曲げ負荷といった負荷様式による相違も認められなかった。

5 低温における定荷重下での変形の時間依存性

文献 2) で明らかにしたように, 定荷重下での延性き裂成長はクリープひずみが支配的であり, 延性き裂成長挙動は切欠き材の変形の時間依存性を探ることによって明確なものとなる。そこで, -70°C での定荷重試験結果について, 定荷重下での変形の時間的推移に注目した考察を行う。

Fig. 7(a), (b) は, それぞれ両側切欠き付引張試験片と3点曲げ COD 試験片の定荷重試験中の初期き裂先端の COD δ とその速度 $\dot{\delta}$ を, 試験開始後の時間を横軸にとって整理したものである。図中の破線は単調載荷中の変化を示しており, 実線は Fig. 6(a), (b) で示した A, B, C などの荷重レベルで定荷重保持した場合の δ と $\dot{\delta}$ の時間的変化を示している。上図の◇印は, その点で脆性破壊に遷移したことを示している。また, 上図に示す δ_i は単調載荷試験と定荷重試験で得られた COD と Δa の関係の試験結果を, 最小自乗法にて曲線近似した結果から得たものである。

まず Fig. 7(a) の引張試験片の結果について考察することにする。A 点まで単調載荷した後, 定荷重保持したとき, 定荷重保持開始の初期には δ は δ_i に達していないため, 初期き裂先端には延性き裂は発生していない。しかし, 定荷重保持を続けると δ は増加し, 数分後に

(a) Tensile tests

(b) Bending tests

Fig. 7 Time-dependent behavior of COD δ and its rate

δ_i に達して延性き裂が発生する。その後 δ の増加と共に延性き裂は成長するが、加工硬化によって δ の増加速度 $\dot{\delta}$ の時間と共に減少し、ついには δ の増加は事実上認められなくなる。B, C 点で荷重保持したときには δ はほぼ δ_i かそれ以上のレベルで、この時点で延性き裂はすでに発生しており、定荷重保持後 COD の増加と共に延性き裂はさらに成長する。しかし、COD の増加速度 $\dot{\delta}$ は加工硬化によって最初減少した後極小値を迎えてその後急激に増加し、ついには脆性破壊へと移行する。

Fig. 7 (a) 下図の $\dot{\delta}$ が極小値を迎える時の各荷重レベルでの COD δ の値は、図中の一点鎖線と矢印で示すように Fig. 6 (a) で示した載荷速度が極めて遅い単調載荷試験の最大荷重点での COD (δ_m)_L (=1.29 mm) とほぼ同じレベルになっており、定荷重保持中に COD がこの (δ_m)_L のレベルを超えると、COD の増加速度は急激に大きくなる。このような傾向は Fig. 7 (b) の 3 点曲げ COD 試験片についても同様である。以上の特性は、両側切欠き付引張試験片を用いて室温において行った定荷重保持中の COD の時間依存性の挙動と同様である²⁾。しかし、 -70°C では定荷重試験の保持荷重レベルの高い場合、最終的には不安定な脆性破壊へと移行することが室温の場合と異なる。

そこで、このような脆性破壊へ移行するときの延性き裂の成長挙動に注目して、考察することを試みる。Fig. 7(a), (b) の下図において、 $\dot{\delta}$ が極小値から急激に上昇して脆性破壊へ移行する時の $\dot{\delta}$ は、負荷様式にかかわらずおよそ $10^{-3}\sim 10^{-4}\text{mm/s}$ のオーダーである。延性き裂成長速度 $\Delta\dot{a}$ は $\dot{\delta}$ のほぼ 1.5~2 倍程度であるから、不安定脆性破壊に移行するときの延性き裂の成長速度 $\Delta\dot{a}$ も $10^{-3}\sim 10^{-4}\text{mm/s}$ のオーダーであろう。

石橋の理論⁹⁾によれば、「脆性破壊は塑性変形が伝播する速度が小さい状態の材料中を速い速さのき裂が進行するために起こる現象」としている。この理論を拡張して著者らの一部¹⁰⁾は、「延性き裂成長によって新しくできる塑性変形幅がある限界以下になったとき破壊は不安定破壊に遷移するものと仮定すると、材料、温度が一定のとき、不安定破壊条件はき裂成長速度がある限界値以上になったときに生じる」ことを示した。本実験の結果はこのことをある程度裏付けているものと考えられる。

6 定荷重試験における不安定破壊遷移限界

切欠き材を単調載荷の途中で定荷重保持した場合、ある時間経過の後に、不安定破壊に移行するか否かの限界を評価する指標として、定荷重保持を開始するときのき裂先端の COD を採用することとし、定荷重保持によって不安定延性破壊を生じる上記の限界 COD を (δ_m)_a、不安定脆性破壊を生じる限界 COD を (δ_u)_a と表わす。

(a) Room temperature

(b) -70°C

Fig. 8 Typical critical COD-values obtained by monotonic loading and constant loading tests. δ_u and δ_m are obtained by monotonic loading tests, $(\delta_u)_a$ and $(\delta_m)_a$ are obtained by constant loading tests, and δ_i is critical COD-value at fibrous crack initiation

室温および -70°C で行った定荷重試験によって求められたこれらの限界 COD (δ_m)_a, (δ_u)_a, ならびに単調載荷試験で求められた限界 COD δ_m , δ_u , および延性き裂発生限界 COD δ_i をまとめて Fig. 8 に示す。

Fig. 8 から分かるように定荷重試験で得られる限界 COD (δ_m)_a, (δ_u)_a は、単調載荷試験で得られる限界 COD δ_m , δ_u よりも小さく、とくに (δ_u)_a は δ_u の約 1/2 程度まで小さくなっており、ほぼ δ_i のレベルである。また、各限界 COD はおおむね負荷様式の影響を受けないようである。

7 結 論

本研究で得られた主要な結論を要約すると次の通りである。

(1) 単調載荷・定荷重負荷といった荷重履歴の如何にかかわらず、また引張り負荷・曲げ負荷といった負荷様式の如何にかかわらず、初期き裂先端の COD が同じならばき裂先端に極めて近い位置（たとえば、き裂先端前方 0.2mm の位置）でのひずみはほぼ同じである。

(2) 単調載荷試験の途中で定荷重保持した場合の延性き裂成長挙動は、き裂先端の COD が同じならば負荷様式の如何にかかわらずほぼ同じである。

(3) 定荷重下におけるき裂開口変位の増加と延性き裂成長挙動は、室温でも -70°C のような低温でも同じ特性を示す。ただし、定荷重保持の途中で不安定破壊に移行する場合、 -70°C では脆性破壊となる。

(4) 室温の定荷重試験で得られる限界 $\text{COD}(\delta_m)_a$ と低温の定荷重試験で得られる限界 $\text{COD}(\delta_u)_a$ は、それぞれ単調載荷試験で得られる限界 $\text{COD}\delta_m, \delta_u$ よりも小さくなる。本実験の範囲では、 $(\delta_u)_a$ は δ_u の約 1/2 程度になり、延性き裂発生限界 $\text{COD}\delta_i$ とほぼ同じレベルになる。

本研究遂行にあたり、大阪大学大学院瀬渡賢君、大阪大学工学部内海光博君の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐藤邦彦，豊田政男，塚本光夫：定荷重下での延

性き裂の発生・成長挙動とき裂先端近傍のひずみ特性，日本造船学会論文集，159 (1986)，350～357.

- 2) 佐藤邦彦，豊田政男，塚本光夫：定荷重下での延性き裂の発生・成長機構に関する考察，日本造船学会論文集，160 (1986)，510～517.
- 3) G. Green, J. F. Knott: On Effect of Thickness on Ductile Crack Growth in Mild Steel, J. Mech. Phys. Solids., 23 (1975), 167～183.
- 4) 岩館忠雄，田中泰彦，小野信市，渡辺十郎：除荷コンプライアンス法による延性破壊抵抗の評価に関する研究，第1回破壊力学シンポジウム講演論文集，(1981)，86～90.
- 5) 渡辺浪夫，藤田高弘，吉武明英，香川裕之：定荷重条件下の延性き裂進展過程と不安定遷移，鉄と鋼，68-12 (1982)，s 1327.
- 6) 青木 満，木内 晃：荷重保持中のき裂開口変位の挙動，日本造船学会論文集，158(1985)，580～587.
- 7) 大塚昭夫，西村誠二，宮田隆司：延性き裂進展に伴うき裂先端領域における局部破壊条件一試験片形状の影響一，第1回破壊力学シンポジウム講演論文集，(1981)，96～100.
- 8) 大塚昭夫，宮田隆司，西村誠二，木村雅保，馬淵宗人：低強度鋼における延性破壊発生に及ぼす応力三軸度の影響，材料，29，322 (1980)，717～723.
- 9) 石橋 正：構造物のぜい性破壊の機構についての一考察，日本機械学会誌，63-496 (1960)，675～680.
- 10) 佐藤邦彦，豊田政男，伊藤義康：安定延性亀裂成長から不安定破壊への遷移について，日本造船学会論文集，141 (1977)，263～274.