

(昭和 52 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

安定延性亀裂成長から不安定破壊への遷移について

正員 佐藤 邦彦* 正員 豊田 政男*
 正員 伊藤 義康*

Unstable Brittle Fracture with Stable Fibrous Crack Growth

by Kunihiko Satoh, *Member* Masao Toyoda, *Member*
 Yoshiyasu Itoh, *Member*

Summary

In fracture safe design of welded steel structure, it is one of the way to prevent the unstable brittle fracture beyond general yield, or under the case in which overall strain of welded member at fracture becomes beyond yield strain of material used. Generally, stable fibrous crack growth from the tip of pre-existing crack proceeds before unstable brittle fracture. Investigation has been carried out on the mechanical behaviors of stable fibrous crack to unstable fracture transition.

In the present paper, attention is focussed on the experimental study on the effects of various factors such as crack size, mode of loading and pre-straining on transition behaviors, and to the consideration of property of COD-criterion as the criterion which unstable brittle fracture with stable fibrous crack starts to grow.

Main results are summarized as follows :

(1) In the unstable brittle fracture with stable fibrous crack, the length of stable fibrous crack at brittle fracture, l_F , is independent on the various factors such as crack size, mode of loading and pre-straining under a certain temperature. However, the relationship of fibrous crack length vs. crack opening displacement at initial crack tip is different between tensile straining test and bending test.

(2) The COD-criterion is applicable to the criterion of starts of unstable brittle fracture in the engineering sense if using the value obtained by tensile test as the critical COD value.

1 ま え が き

構造物の安全性を確保する観点から、どの構造物においても破壊防止に対する考慮が払われている。大型構造物では不安定破壊を防止することがその影響の大きさから考えて最重要となる。構造物の安全性の点からは、たとえ降伏点設計がなされているような構造であっても十分な変形能力をもつことが必要であろう。この十分な変形能力は構造対象によって異なるが、破壊は不測の事態に対して考慮される必要性から考えて、少なくとも Over-all strain が材料の降伏ひずみ以上になることが必要であろう。このような観点にたった、いわゆる Strain criterion と呼ばれる基準の必要性を Soete らも提案しており、著者らもこれに基づく性能評価方法に検討を加えている²⁾。

このような Strain criterion に基づいて評価するには、対象となる破壊はかなり高ひずみの不安定破壊とな

り、また先在亀裂から安定な延性亀裂の成長を伴う場合が多い。この範囲の破壊に対しては従来の亀裂の力学の適用性に問題が残し、何らかの指標となるパラメータの抽出が必要となる。従来、安定延性亀裂の発生に注目した研究は多くあり(たとえば文献 3)~5))、また安定延性亀裂を伴う脆性破壊に対して COD 仮設の適用性を検討したのも発表されている⁶⁾。

ところで、Strain criterion に基づく評価にとっては、この安定延性亀裂から不安定な破壊への遷移を支配する因子を明らかにすることが必要である。本報ではこのような観点から、安定延性亀裂の成長挙動と不安定脆性破壊の遷移に及ぼすいろいろな因子の影響について、実験的な検討を行ない、不安定脆性破壊開始条件としての COD 仮設の有用性に関する考察を行なう。

2 切欠材の破壊遷移挙動と安定延性亀裂の成長

Fig. 1 は Fig. 5(b)に示すような切欠材を引張った

* 大阪大学工学部

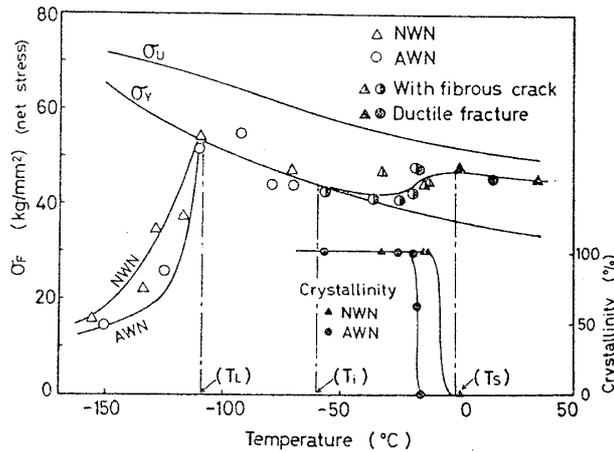


Fig. 1 Fracture behaviors of notched specimens

場合の破壊応力 (net stress), 脆性破面率と温度の関係を示したものであり, T_L は低応力脆性破壊発生温度(これは K-concept に基づく T_Y -温度⁷⁾ではほぼ代表される), T_S は脆性・延性遷移温度を表わしている。この T_L と T_S の間の温度範囲では破壊応力がほぼ降伏応力レベルの脆性破壊を生ずる。また図中に脆性破面率を示すが T_i -温度以上になると切欠から安定な延性亀裂が成長し, T_S -温度近くなると急に延性破面の割合が増す。

この T_i -温度は従来の研究^{5),6)}において, 切欠長さなどに依存せず材料にのみ依存する材料特性値であると考えられており, 材料評価の基準とすることも提案されている⁶⁾。一般には Fig. 2 のように, 材料の限界 COD 値 δ_c と室温付近で求めた安定延性亀裂発生限界開口量 δ_i とから図のように求められる温度 T_i を評価に用いようとするものである。これによると, Fig. 2 に示すように δ_c の温度依存性が同じで δ_i の大きい材料は T_i -温度が高くなり, もし T_i -温度を遷移温度的に評価しようとするとき, 多少問題が残る, δ_i の大小も問題にすべきであろう。また δ_i の温度依存性は軟鋼クラスのものではほぼ温度に無関係に一定となるが, HT 80 のような高張力鋼では Fig. 2 に示すように必ずしも温度に対して一定とならない実験結果も示されており⁸⁾, 軟鋼から高張力鋼まで画一的に T_i -温度で評価していくことにも問題があるかもしれない。このような温度範囲の性能評価にはやはり不安定破壊の防止が重要であり, 延性亀裂成長から不安定への遷移点が問題となろう。

Fig. 2(b) は先在切欠から不安定破壊に移るまでの破面形態を模式的に示した一例である⁸⁾。切欠部からストレッチ・ゾーン, ティア・デンプルゾーンと等軸デンプル・ゾーンをへて不安定脆性破面へと遷移している一例であり, この等軸デンプル部は急速破断していることが示された例もある⁸⁾。このように, 破断後にみられる切欠先端近傍の延性破面部には, 比較的安定に成長する部分と不安定破壊に先立つ急速破断部とに分けられるよう

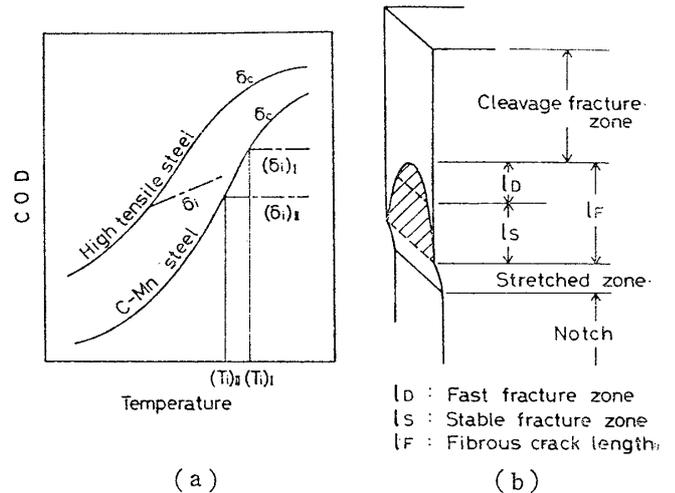


Fig. 2(a) Temperature dependency of critical COD, δ_c , at fracture and critical COD-value, δ_i , in stable crack initiation

(b) Schematic figure of Fracture appearance of specimen which brittle fracture occurs with stable fibrous crack

である。

3 平面応力下での安定亀裂の成長に関する実験と不安定破壊の解析的検討

Fig. 3 は Broek⁹⁾ が行なった板厚 2mm のアルミ合金 7075-T6 の中央切欠を有する薄板 (680×300mm) の引張における安定亀裂成長開始 (σ_i) と不安定成長開始 (σ_f) の各応力と亀裂長さの関係に関する実験結果を示したもので, □印で亀裂成長しはじめ, ○印で不安定になることを示している。Broek は R-curve を用いて

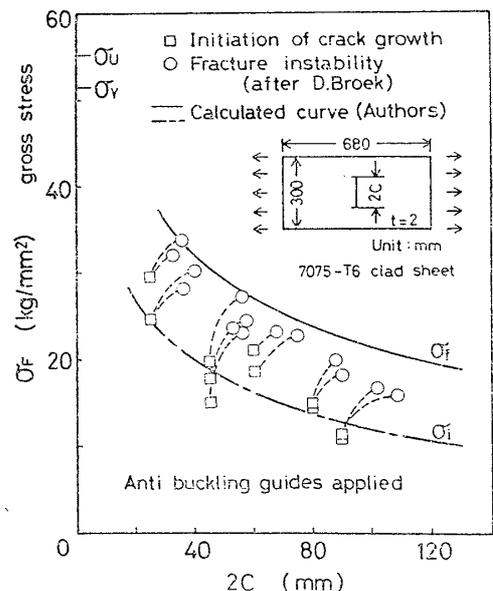


Fig. 3 Stable crack initiation and fracture instability under plane stress condition

定性的に、また小林ら¹⁰⁾は有限要素法を用いたシミュレーションを試みている。

いま、このような full yield (net section の全面降伏) 以前における安定亀裂の成長挙動を Dugdale 模型を応用して定量的な評価を試みしてみる。

安定亀裂成長のモデルとして次のようなものを考える。

i) 亀裂先端開口変位 δ が δ_i に達したとき、初期亀裂先端 (長さ $2c$) に安定な亀裂が発生し $2\Delta c$ だけ進展する。鋭化した長さ $2(c+\Delta c)$ の亀裂は負荷を増すことによって、その先端の亀裂開口変位が δ_i' に達したとき再び安定亀裂が $2\Delta c$ だけ成長する。ここで Δc は一定とし、亀裂先端の塑性ひずみを考慮して $\delta_i' < \delta_i$ と考える。

ii) 安定亀裂が成長してある長さ ($2c_{cr}$) に達すると、荷重を増加しなくとも亀裂開口変位は δ_i' 以上となり不安定へと遷移する。

このモデルに従うとき、亀裂進展に伴う亀裂先端の開口量を求める必要がある。この場合の開口量の算定は Dugdale 模型において、Fig. 4 に示すように亀裂が進展した後の、進展部分の開口変位量は進展する前に Dugdale 模型によって、計算されるその部分の仮想開口量を残留塑性ひずみ量に相当するものとして差引くことによって求められるものとする。

このような開口量の算定手法によって、上述の亀裂成長モデルに対して Broek の実験に対応する計算を行なったものが Fig. 3 中の曲線である。ここで $\delta_i = 0.07$,

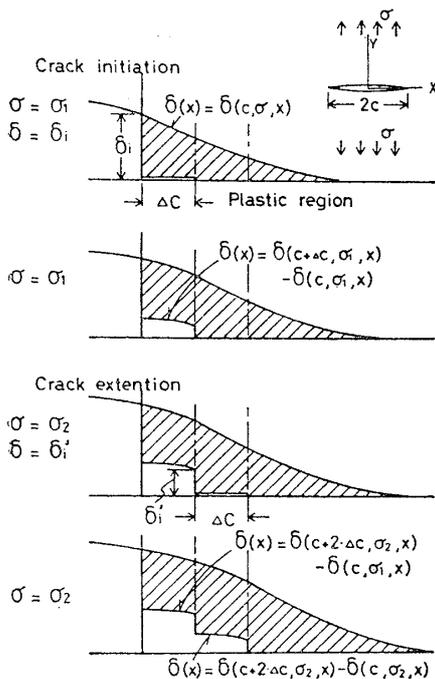


Fig. 4 Crack opening model in Stable crack growth using Dugdale model

$\delta_i' = 0.015$, $\Delta c = 0.25$ mm と仮定した。図のように実験における不安定に移る応力がほぼ評価できている。

ところで、このような計算手法は Dugdale 模型の性格から安定亀裂の成長が full yield 前に生ずる場合のみしか単純には適用できない。鋼のようなものを対象とする場合、非常に極端な亀裂長さの場合を除いて安定亀裂成長は full yield 後に生ずるのが普通である。また鋼などでは不安定破壊への遷移は延性・脆性遷移である場合が多い。そこで、次にこのような場合について考察する。

4 安定延性亀裂の成長と亀裂開口変位挙動

安定延性亀裂の発生・成長挙動については、これまでも変形の代表量として、亀裂の初期先端位置の開口変位 (CTOD, 以下亀裂開口変位 δ はこの値をさすものとする) をとって、実験結果の整理されたものがある (たとえば文献 3), 4), 6) など)。ここでは (安定) 延性亀裂長さ l と亀裂開口変位 δ との関係について考察する。

この延性亀裂長さ l と開口変位 δ の関係は切欠寸法、荷重様式 (引張、曲げなど)、荷重形式 (分布荷重、集中荷重などの差、すなわち応力勾配などの差)、ひずみ効果、残留応力などいろいろの因子の影響を受けることが考えられる。これらの影響を調べるために、Fig. 5 に

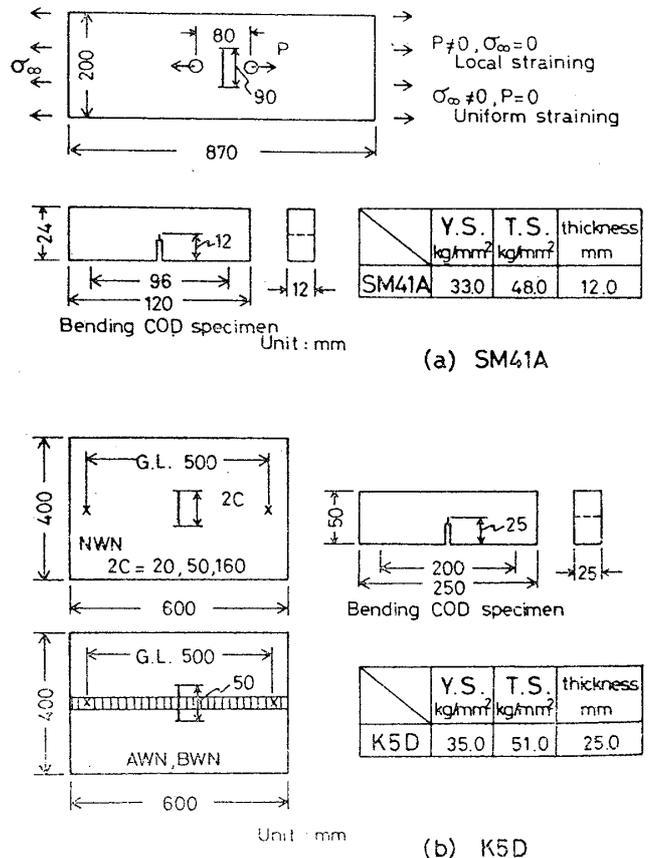


Fig. 5 Specimen design in notched specimen and mechanical properties of material used

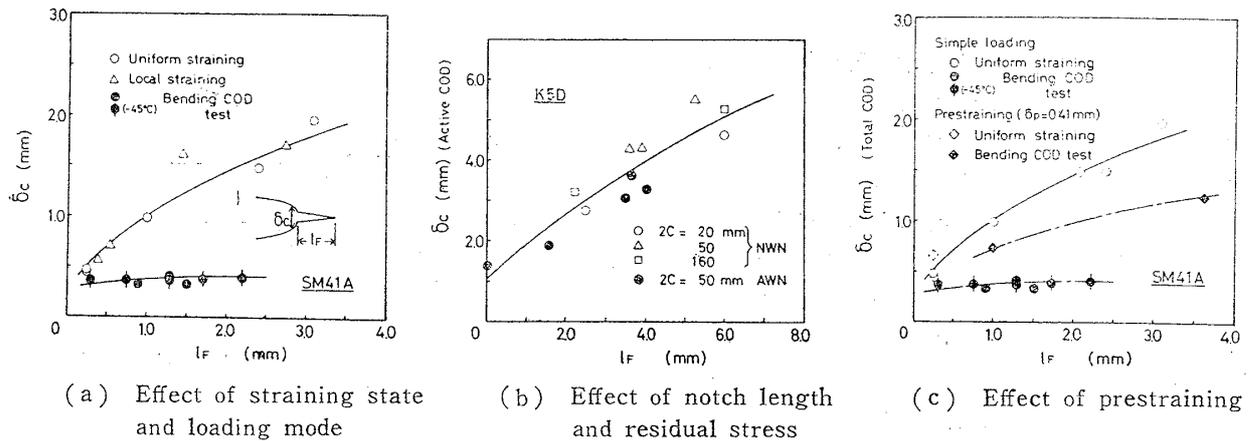


Fig. 6 Relationship between the length of fibrous crack, l_F , and critical COD, δ_c , at brittle fracture

示すように (a) 図の軟鋼を用いた引張荷重位置を変えて切欠部近傍を局部的に引張ったものと一様引張、および曲げ COD 試験、あるいは (b) 図の K5D 材を用いた切欠長さを変えたものと溶接残留応力をもつものの引張、および曲げ COD 試験を行なった。また軟鋼のものについては引張・曲げ試験ともに予荷重に関する実験も行なった。

Fig. 6 は破断面から測定した延性亀裂最大長さ l_F と、不安定破壊発生時の開口変位 δ_c の関係をプロットしたものである。ここで δ_c は初期亀裂先端から離れた位置における測定値を、引張の場合、full yield 時の Dugdale 模型によって⁶⁾曲げの場合 Wells の式¹²⁾によって初期亀裂先端へ換算した値である。延性亀裂長さ l_F と亀裂開口量 δ_c との関係は、引張と曲げという負荷様式の影響を大きく受け、実験のような引張型では局部引張のように、切欠線上の応力勾配が急であっても一様引張とほぼ同じ挙動を示す。このような曲げと引張の差は金沢らの実験においてもみられている⁶⁾。また切欠長さや残留

応力の存在の影響はほとんどみられない。予荷重の影響については、(c) 図に示すように、引張に比べて曲げの場合に l_F - δ_c 関係は大きく影響を受け、予荷重 (δ_i 近い開口量を与えたもの) によって曲げの場合同じ l_F 値のときの開口量が大きくなっている。

このように l_F - δ_c 関係は同じ材料でも引張と曲げでは異なり、予荷重などの効果も曲げの場合には大きな影響をうける。

5 不安定破壊開始条件としての COD 仮説

亀裂開口変位 δ が一定値 δ_c になると不安定に破壊が進行するという仮説については、破壊応力が full yield 以前の場合について、線形破壊力学的にその適用性が示されている。ところで、安定延性亀裂が成長した後不安定となるような場合には、亀裂開口変位そのものがないままのものになり、その適用性が疑問視される。そこで、工学的見地から初期亀裂先端で考えた亀裂開口変位が、不安定破壊開始の目安として用いられる値であるか

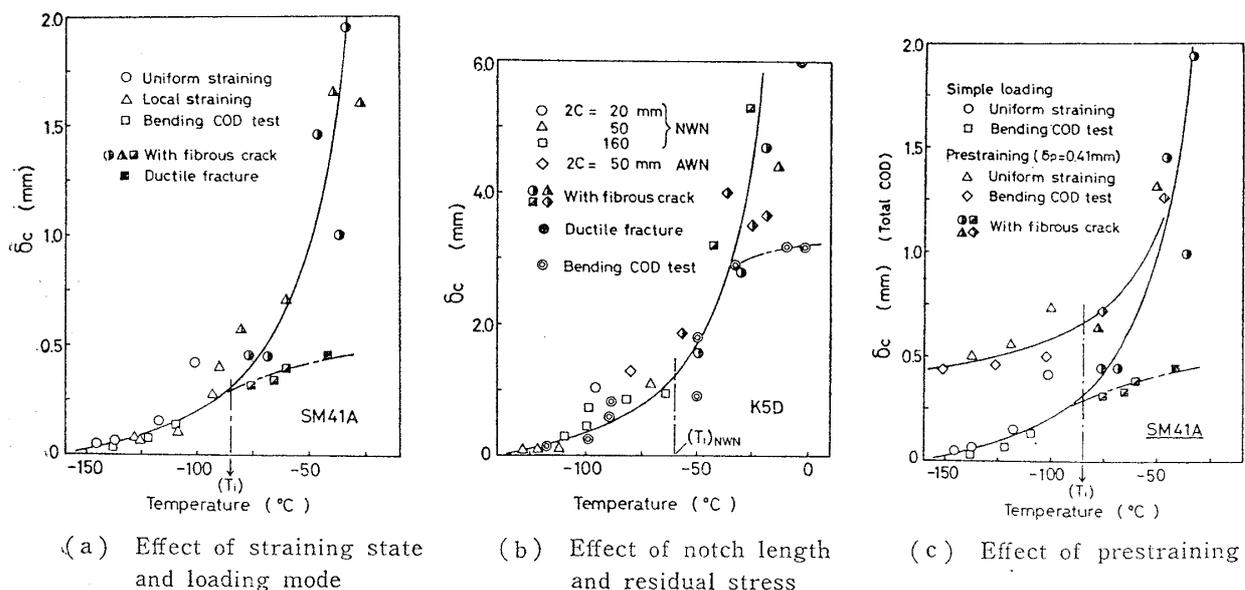


Fig. 7 Critical COD at unstable brittle fracture versus temperature curve

について検討を加える。

Fig. 7 は Fig. 5 の実験に対応する限界亀裂開口変位 δ_c と温度 T の関係を示したものである。図からわかるように、安定延性亀裂が発生する温度 T_i 以下では引張、および曲げの場合ともに限界値 δ_c はほとんど等しいが、 T_i 温度以上になるといずれも曲げ試験のほうが引張型に比べて小さな δ_c 値を示している。しかし、引張型の場合には一様引張、局部引張の差、および切欠長さの差などのある場合、あるいは溶接残留応力が存在する場合であっても試験温度が一定の場合はほぼ同じようなばらつきの範囲を示していることがわかる。したがって初期亀裂先端の開口量という、物理的にはその意義が明らかでない量ではあるが、安定延性亀裂の成長を伴う場合の不安定破壊開始の目安として、引張型の場合に限れば、その開口量を工学的見地から用いられる可能性を示している。

次に、この COD 仮設の適用性について、破面遷移に関する石橋^{13),14)}の理論を用いて考察してみる。石橋は Fig. 8 に示すように亀裂が速度 v で進展しているとき、 Δl 間の部分の連続的破壊モデルを考え、 Δl 間が破壊したとき次の Δl 間に新しくできる塑性域幅 s が小さいとき脆性となると考えている。この理論を拡張し図のように AB 間が延性的に破壊したとき、次の Δl 間 (BC 間) に新しくできる塑性域幅 s が $(s)_{cr}$ 以下になったとき破壊は不安定脆性破壊に遷移するものと仮定する。石橋¹³⁾によると、この s の値はほぼ $\Delta l \cdot C_p / v$ (C_p : 塑性波の伝播速度) で与えられる。いま材料、温度が与えられると $\Delta l \cdot C_p$ はほぼ一定と考えられるから不安定遷移条件は

$$v \geq v_{cr} \quad (1)$$

となる。

Fig. 2(b) に示したように、破面の延性亀裂部は長さ l_s の安定な延性破壊部と長さ l_D の急速亀裂伝播部に分けることができ、この l_D の部分にて亀裂速度 v が 0 から v_{cr} まで変化して脆性破壊に移ると考える。いま l_D 間で加速度が同じであるとすると、 l_D 進んだ後の速度 v は $\sqrt{l_D}$ に比例する (Fig. 9)。すなわち

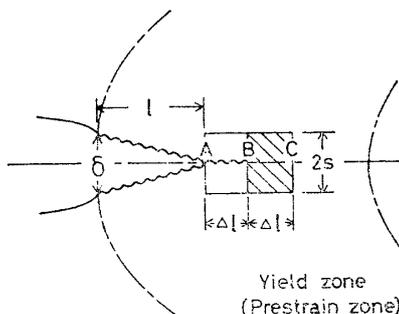


Fig. 8 Model of transition of fracture appearance

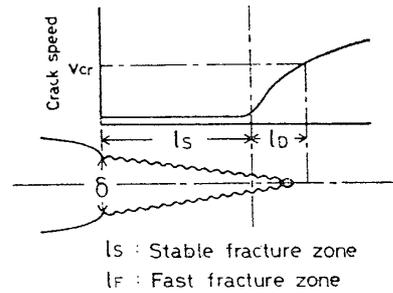


Fig. 9 Model of transition of fracture appearance

$$v \propto \sqrt{l_D} \quad (2)$$

不安定破壊時の延性亀裂長さ l_F と初期亀裂先端における開口量 δ_c との関係は Fig. 6 にも示したように

$$\delta_c = \delta_i + A l_F^m \quad (3)$$

(δ_i : 延性亀裂発生限界開口量, A : 材料定数)

の形で近似することができるようである。ここで $l_F = l_s + l_D$ である。(1), (2), (3)式より一定温度における不安定破壊遷移条件は

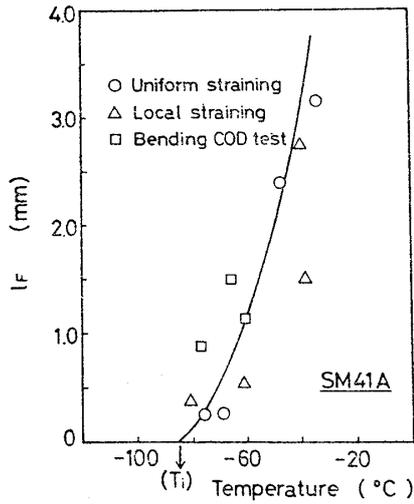
$$\sqrt{\left(\frac{\delta_c - \delta_i}{A}\right)^{1/m} - l_s} \geq C \quad (C: \text{材料定数}) \quad (4)$$

となる。

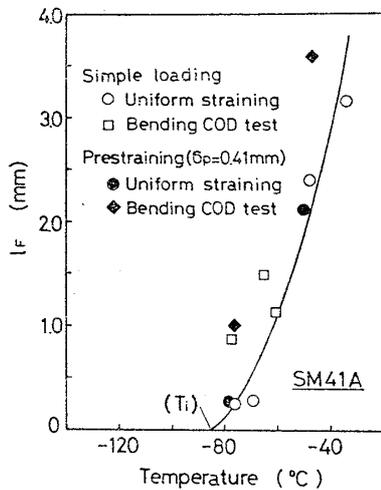
次に不安定破壊時の延性亀裂長さ l_F と各種因子の影響を調べてみる。Fig. 10 は l_F と試験温度の関係を Fig. 5 の実験に対してまとめたものであり、 l_F は一定温度に対してばらつきはみられるが、この実験においてはほぼ同じ値を示し、引張、曲げの差などによって有意差はみられない。石橋理論によると l_D は一定値で不安定に破壊するから Fig. 10 の場合には温度が定まると l_s は荷重様式などの要因によらずほぼ一定の値になると考えられる。

したがって (4)式において、温度が定まると δ_i , l_s は一定となるから、 l_F と δ_c の関係を定める m 値が一定の場合には δ_c が一定になると不安定破壊に遷移するといえる。前項でも述べたように m 値は引張型の場合にはいろいろの因子の影響をほとんどうけないが、曲げと引張では大きく異なる。すなわち不安定に遷移する限界開口量 δ_c は引張型と曲げ型では異なることを示している。したがって Fig. 6 の l_F と δ_c の関係から Fig. 7 の δ_c の値が引張と 3 点曲げとで異なることが理解できる。

次に予荷重の場合について考えてみると、予荷重の効果は、(1)切欠先端形状変化(残留する開口量)とそれに伴う残留応力の存在と(2)予ひずみによる切欠先端部の材質変化、の2つが考えられる。Fig. 7(c)は母材および室温予荷重材の限界開口量 δ_c (Total COD) と温度の関係を示したものであり、この場合必ずしも δ_c が一定とはならない。すなわち単純な COD 仮設の適用の



(a) Effect of straining state and bending mode

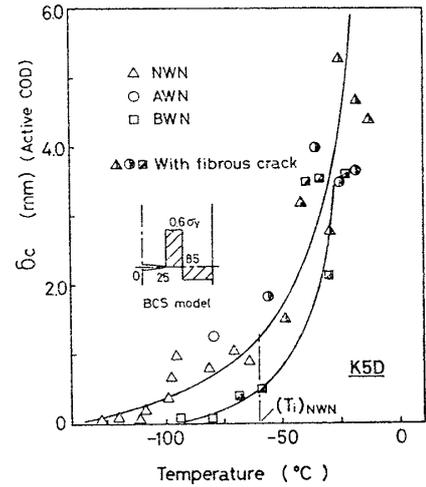


(b) Effect of prestraining

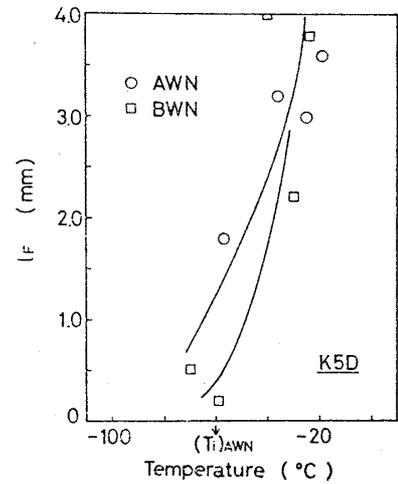
Fig. 10 Effect of various factors on relation of critical fibrous crack length, l_F , vs. temperature

できないことを示している。COD 仮設の単純適用に問題があるのは予ひずみ時効材¹⁵⁾、あるいは高温予ひずみ材¹⁶⁾ではとくに顕著である。これは、主として前述の切欠先端近傍の材質変化に起因する場合が多く、材質の変化を把握しておくことが必要となる。

ただし前述の(1)の効果の問題は依然として残る。この取り扱いの一つとして低応力脆性破壊では active COD をとる概念の有用性が示されている。安定延性亀裂の成長を伴う場合には通常の子荷重では先端形状や残留応力の効果はほとんど無視できるようになり、(4)式での材料定数 C の変化のみと考えるとよいものと思われる。したがって、この場合には δ_c は必ずしも一定温度に対して母材とは等しくならない。しかし通常の子荷重あるいは先在亀裂部が溶接によってうける高温予ひずみなどでは、そのような材質変化部は多くの場合切欠先端から 1~2mm の領域に限られる。したがって安定延性亀



(a) Critical COD vs. temperature curves



(b) Critical fibrous crack length vs. temperature curves

Fig. 11 Critical COD, δ_c , and critical fibrous crack length, l_F , of welded-notched wide plate (BWN)

裂の成長を伴う破壊の場合には、延性亀裂が 2mm 程成長すればほぼもとの母材と同じ材質となる。これは Fig. 7(c) と Fig. 10(b) および K5D に対する Before weld notch の大型引張試験 (Fig. 5(b))¹⁶⁾ と母材の限界開口量 δ_c および l_F と温度の関係を示す Fig. 11 をみても l_F が 2mm を越えて破壊すると δ_c の値は予ひずみ切欠材でもほとんど等しくなっている。ただし、この場合にも当然一般には引張型と標準曲げとは異なる結果を与える。

6 結 論

(1) 軟鋼, 50 キロ級高張力鋼では安定延性亀裂の成長を伴う不安定破壊において、脆性破壊遷移時の延性亀裂長さ l_F は温度が一定の場合、荷重様式などの因子の影響は本実験の範囲内であまりうけないが、延性亀裂長 l_F と初期亀裂先端における限界開口量 δ_c の関係は引張

と曲げの荷重様式の差を大きくうける。

(2) 低強度 C-Mn 鋼で安定延性亀裂の成長を伴う場合にも、不安定破壊開始条件として COD 仮説を用いることは、亀裂に対して対称な荷重をうける引張型の場合には、工学的見地からほぼ妥当といえる。すなわち標準の曲げ COD 試験によって得られる限界値 δ_c はこの範囲においては小さな値を与えるが、引張型の試験によって得た限界開口変位 δ_c は不安定開始の目安となる。

なお、本報告の実験の一部は川口、有持両氏(住金)、鈴木、多々良両氏(住重)との共同研究として行なったものであり、その結果の一部を引用させて戴いた。ここに誌して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) W. Soete, R. Denys : Acceptability of Defects in Plates Loaded Beyond General Yield., I. I. W., Sydney, (1976), Doc. X-837-76.
- 2) 佐藤, 豊田, 伊藤他 : 切欠材の破壊遷移現象と Over-all Strain に基づく破壊発生温度について, 日本造船学会, 溶接研究委員会資料, (1976).
- 3) 大塚, 宮田, 西村, 大橋, 柏木 : 鋼の破壊様式の遷移と COD 仮説について, 日本造船学会論文集, 第135号, (1974), 307.
- 4) G. Green, R. F. Smith, J. F. Knott : Metallurgical Factors in Low Temperature Slow Crack Growth, British Steel Corporation Conference on the Mechanics and Mechanisms of Crack Growth held in Cambridge, April, (1973), 5.
- 5) 大路, 小倉, 武藤, 内田 : 不安定破壊に先行する安定亀裂成長過程に関する研究, 日本機械学会講演論文集, No.760-13, (1976), 80.
- 6) 金沢, 町田, 工藤 : Fibrous crack Extension を伴う脆性破壊と COD, 日本造船学会論文集, 第138号, (1975), 471.
- 7) 佐藤, 豊田, 川口, 有持 : 脆性破壊発生特性からみた高張力鋼溶接継手のボンド部材質評価について, 日本造船学会論文集, 第135号, (1974), 319.
- 8) 武藤 : 延性破壊に関する基礎的研究, 大阪大学学位請求論文, (1975).
- 9) D. Broek : Artificial Slow Crack Growth under constant stress. The R-Curve concept in Plane stress, Engineering Fracture Mechanics, Vol.5, (1973), 45.
- 10) 沖津, 小林, 本間, 中沢 : 安定破壊継続過程に関する研究, 日本機械学会論文集, Vol. 42-362, (1976), 3010.
- 11) 青木, 木内他 : COD 試験としての小型ディープノッチ試験, 溶誌一講演概要, 第19集, (1976), 148.
- 12) British Standards Institution : Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing, DD 19, (1972).
- 13) 石橋 : 低炭素鋼における亀裂の伝わり抵抗と衝撃値との関係に関する考察, 日本機械学会論文集, 第21号, (1955), 786.
- 14) 石橋 : 構造物の脆性破壊の機構についての一考察, 日本機械学会誌, 第63号, (1960), 675.
- 15) 大塚, 西村, 宮田, 笠井 : 予亀裂端からの破壊発生におよぼすひずみ時効の影響, 日本造船学会論文集, 第139号, (1976), 265.
- 16) 佐藤, 豊田他 : 50 キロ高張力鋼溶接継手の脆性破壊発生挙動におよぼす溶接熱歪履歴の影響, 日本造船学会論文集, 第138号, (1975), 444.