

安定延性き裂成長をともなう不安定破壊限界に及ぼす初期き裂長さの影響

著者	塚本 光夫
雑誌名	熊本大学教育学部紀要 自然科学
巻	43
ページ	153-162
発行年	1994-09-30
その他の言語のタイトル	Effect of Initial Crack Length on Critical COD of Unstable Fracture with Stable Fibrous Crack Growth
URL	http://hdl.handle.net/2298/2289

安定延性き裂成長をともなう不安定破壊限界に及ぼす 初期き裂長さの影響

塚 本 光 夫

Effect of Initial Crack Length on Critical COD of Unstable Fracture with Stable Fibrous Crack Growth

Mitsuo TSUKAMOTO

(Received May 23, 1994)

An investigation was conducted of the effect of initial crack length on the following items: fibrous crack initiation, fibrous crack growth and unstable fracture with stable fibrous crack growth. 3-point bending specimens with initial crack length 1, 2, 5, 10mm and plate width 20mm were extracted from SM41B mild steel. Monotonic loading and constant loading tests were carried out using Olsen type and constant load type testing machine.

Critical COD (Crack Opening Displacement) at fibrous crack initiation is constant when a ratio of initial crack length to plate width is greater than 0.2, but it increases in proportion to the ratio when the ratio is less than 0.2. Decrease of crack length gives an increase of critical COD under monotonic loading and constant loading. This is recognized above the temperature in a brittle-ductile transition; not below the temperature in a brittle fracture manner. Decrease of crack length gives an increase in the ratio of critical COD of unstable brittle fracture with unstable fibrous crack under constant loading to critical COD at crack initiation, but the ratio of critical COD of unstable brittle fracture with stable fibrous crack growth under constant loading to critical COD under monotonic loading at the same temperature is almost constant regardless of initial crack length.

Key words: crack length, crack growth, constant loading, monotonic loading, mild steel

1. 緒 言

構造物が破壊する場合には内在する初期き裂先端から安定延性き裂成長をともなって不安定破壊へ遷移する現象が多く見られる。この不安定破壊の限界を知る手段として、不安定破壊が開始するときのき裂の開口変位の大きさ等で判断し、材料の破壊限界性能を知る方法があり、このための破壊靱性試験法¹⁾²⁾も規定されている。破壊靱性試験法で用いられる試験片には初期段階であらかじめ機械切欠きや疲労き裂が導入されているが、それらは他の寸法からみれば比較的長い。比較試験あるいは材料特性把握の意義からは初期き裂長さが同じであれば問題はないが、実際の構造物に先在するき裂は構造物の寸法からみれば必ずしも長いとは限らず、圧倒的に短いき裂が多い。したがって、短いき裂の破壊限界は長いき裂で得られた破壊限界とどのような関係をもつかを知ることは構造物の耐破壊性能を把握することになり、安全性評価のためには重要である。

不安定脆性破壊限界に及ぼす初期き裂長さの影響に関して、佐藤ら³⁾は述べているが、き裂先端が機械切欠きであるため延性き裂の発生及び成長挙動に及ぼす初期き裂長さの影響について不明確な点もある。一方、初期き裂先端から延性き裂が成長するような荷重レベルまで単調載荷した

後、試験片を一定荷重に保持するような定荷重試験での延性き裂の成長挙動及び不安定延性・脆性破壊限界についても佐藤ら⁴⁾は明らかにしているが、定荷重試験での破壊限界に及ぼす初期き裂長さの影響については述べていない。

そこで、本研究では比較的低強度で変形能の大きい軟鋼 SM41B を取り上げ、それから切り出した 3 点曲げ試験片に先端が疲労き裂である種々の長さのき裂を設け、破壊靱性指標としてき裂開口変位 (Crack Opening Displacement, 以後 COD と呼ぶ) を用いて、以下の三つの点を明らかにすることを目的とする。

- 1) 延性き裂の発生・成長挙動に及ぼす初期き裂長さの影響
- 2) 単調載荷中に安定延性き裂成長をともなって不安定破壊へ遷移する限界 COD に及ぼす初期き裂長さの影響
- 3) 定荷重を受ける場合の安定延性き裂成長をともなう不安定破壊、特に不安定脆性破壊へ遷移する限界 COD に及ぼす初期き裂長さの影響

2. 実 験

2. 1 破壊限界試験手法

供試材料として軟鋼 SM41B を用いた。その化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。また、本実験で用いた 3 点曲げ COD 試験片の形状・寸法を Fig. 1 に示す。初期き裂長さは、 $a=1, 2, 5, 10\text{mm}$ の 4 種類を用い、それぞれに疲労予き裂を導入してある。これらの試験片を用いて種々温度を変化させて単調載荷試験と定荷重試験を実施した。

単調載荷試験には最大容量 98kN のオルセン型試験機を用い、定荷重試験の場合には最大容量 78.4kN の定荷重試験機を用いた。定荷重試験機はこの原理に基づいて定荷重速度負荷・定荷重保持ができる試験機⁴⁾である。その外観図を Fig. 2 に示す。一次側荷重用竿の上に載せるおもりはモータにより駆動して一定速度で移動し、荷重は一定速度で連続的に変化する。試験片の変形により荷重点の位置が変わると、荷重点の変位の変化量をスイッチで絶えず感知し、変化量に相当する量だけ昇降竿を直ちに下降し、2 本の荷重用竿の平行を保つようにして、各支点間の直線距離の変化によって荷重の増加速度が変わらないようにしている。この原理により、一次側荷重用竿の一端におもりを載せた位置が力点となり、二次側荷重用竿の作用点ではおもりの重量 (最大 1568N) の 50 倍の荷重が負荷されることになる。

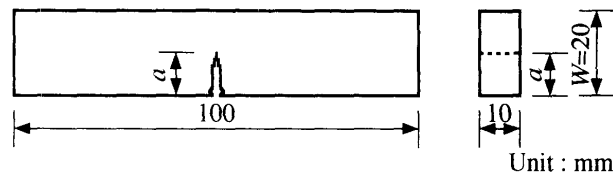
試験片の冷却には二重壁をもつ冷却槽と自動温度調節装置を用い、内槽内にて試験を実施した。冷却槽の外槽に液体窒素を充填し、その液体窒素を蒸発させて内槽に低温の窒素雰囲気を生成して、試験片を冷却した。温度の測定は疲労予き裂先端付近に貼付した銅-コンスタンタン熱電対で行い、所定の温度の $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲で一定になるように温度管理した。

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM41B

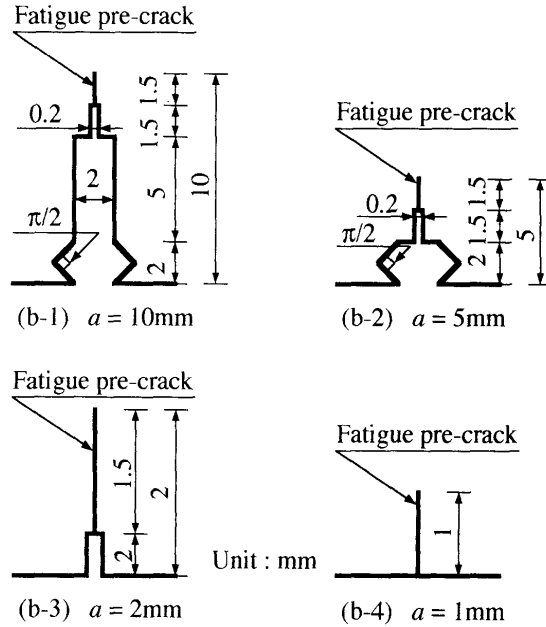
Chemical composition (mass%)					σ_Y	σ_U	
C	Si	Mn	P	S	Fe	(MPa)	(MPa)
0.16	0.20	1.07	0.023	0.015	Bal.	253	470

σ_Y : Yield stress

σ_U : Ultimate tensile strength



(a) Total view



(b) Detail of initial crack

Fig. 1 3-point bending COD specimen

試験中は荷重とき裂末端の開口変位を測定した。き裂長さ $a=5, 10\text{mm}$ の場合には加工時に設けておいたナイフエッジに、き裂長さ $a=1, 2\text{mm}$ の場合には試験片に貼付したナイフエッジにクリップゲージを装着して、き裂末端の開口変位を測定した。き裂末端の開口変位からき裂先端の COD 値の換算には以下に示すような BS5762¹⁾ の Dawes の式を用いた。

$$\delta = \frac{K^2(2-\nu^2)}{2\sigma_y E} + \frac{r(W-a)V_p}{r(W-a)+a+Z} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$K = \frac{VP}{BW^{1/2}}$$

ただし、

- δ : き裂先端部の COD
- V_p : クリップゲージ開口変位の塑性成分量
- Z : き裂末端から測定点までの距離
- P : 荷重
- σ_y : 降伏応力
- W : 試験片板幅
- ν : ポアソン比
- B : 試験片板厚
- E : ヤング率
- a : き裂長さ
- K : 応力拡大係数
- r : 回転因子
- Y : 応力拡大係数補正值

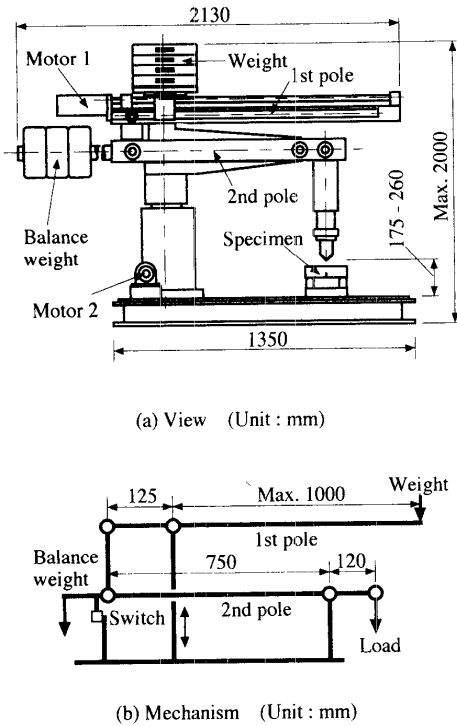


Fig. 2 Schematic view and mechanism of loading system of constant loading machine

Table 2 Average initial crack length measured

a (mm)	Total number of specimens	\bar{a} (mm)	\bar{a}/\bar{W}
1	18	1.35	0.067
2	14	2.18	0.109
5	18	5.37	0.268
10	16	10.30	0.514

\bar{a} : Average crack length
 \bar{W} : Average plate width

試験片のうち最終破断に至らなかったものは試験後液体窒素中で負荷を与え完全へき開破壊させ、破面観察を行った。いずれの試験片も破面観察を行い、機械切欠き長さ及び疲労き裂長さをコンパレータで測定した。機械切欠き長さは板厚の 25, 50, 75%の位置での測定値の平均値をとり、疲労予き裂長さは板厚の 25, 50, 75%の位置での測定値と最小および最大値の計 5 箇所の平均値をとった。ストレッチド・ゾーンおよび延性き裂長さは走査式電子顕微鏡を用いて測定した。どちらの場合も板厚の 25, 50, 75%の位置での測定値の平均値をとった。このようにして得られたき裂長さの平均実測値を Table 2 に示す。

2. 2 回転因子の測定

式 (1) の右辺第 2 項は COD の塑性成分を表しており、Fig. 3 のようにき裂先端より r ($W - a$) の深さだけ下の回転中心まわりの回転運動による変形を仮定して導かれる項である。この回転因子については BS5762¹⁾ によれば $r=0.4$ 一定としているが、田中ら⁵⁾ は初期き裂長さが短いと r の値は 0.4 よりも小さくなるとしている。しかし、この実験ではき裂先端形状が機械切欠きであるため本研究で対象となる疲労予き裂の場合での回転因子に及ぼすき裂長さの影響は明確ではない。そこで初期き裂長さが比較的短い $a=1, 2$ mm のものについて実験を行い、回転因子の導出を試

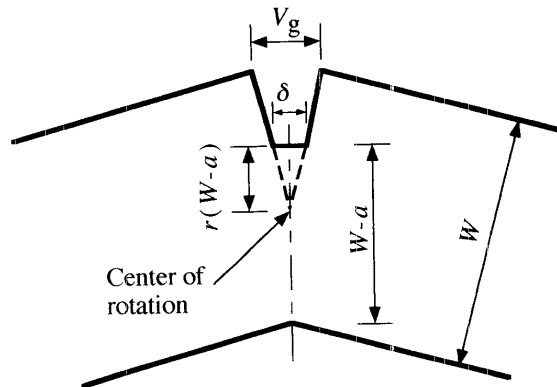


Fig. 3 Notch profile during bending

みた。

実験の前にあらかじめ試験片表面に Fig. 4 に示すようなビッカース圧痕を疲労予き裂を挟んで 0.6mm の位置につけておく。次に単調載荷した後除荷を行い、ビッカース圧痕の間隔の変化量を測定した。Fig. 5 はその変化量と機械切欠き先端からの距離との関係を示したものであり、ここで回転中心は各変位量を最小 2 乗法で直線回帰し、外挿して求めた。このような手順で延性き裂先端から回転中心までの距離 $r(W-a)$ から回転因子 r を求めた。

Fig. 6 は板幅 W に対する初期き裂長さ a の比 a/W と回転因子 r との関係を表したもので、本研究で求めた値と同時に田中ら⁵⁾の結果も併せて示している。この図より $a/W \geq 0.2$ では BS5762 で示されている $r=0.4$ とおおよそ一致するが、 $a/W < 0.2$ では a/W が小さくなると r は減少し、図の実線で示すような直線関係にある。そこで、本研究では回転因子を以下のように定め、式(1)

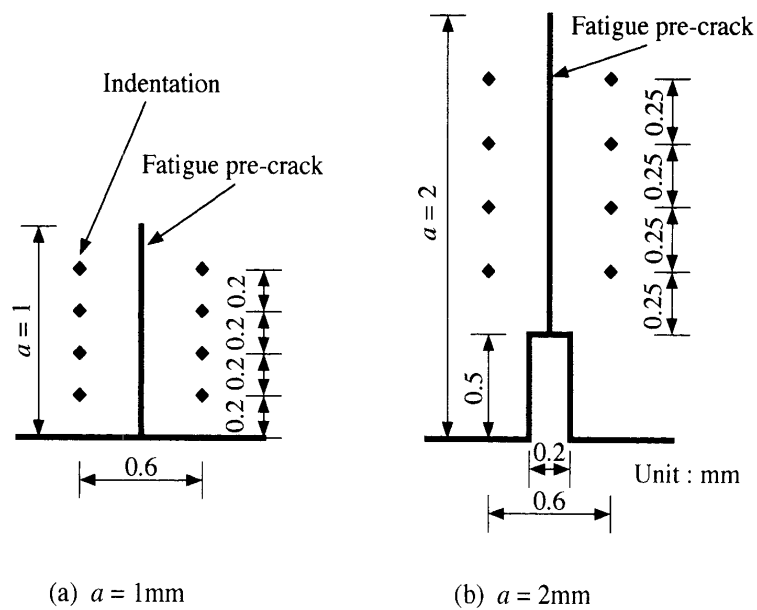


Fig. 4 Locations of indentations to measure crack face opening displacement

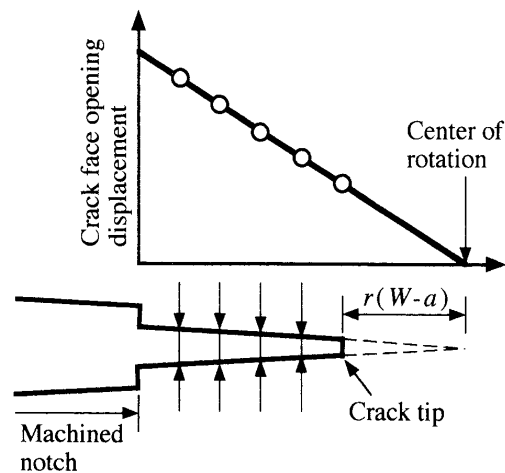


Fig. 5 Method for determining rotational factor from crack face opening displacement profile

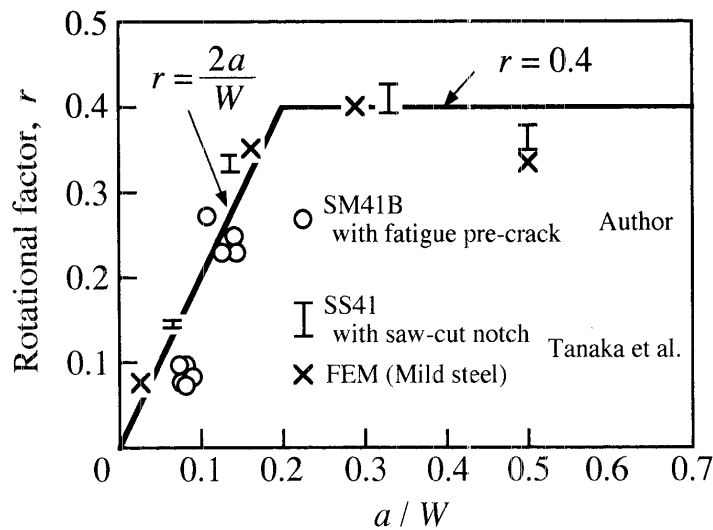


Fig. 6 Relation between rotational factor and ratio of initial crack length a to plate width of specimen W

を用いて COD を換算することとした。

- 1) $a/W < 0.2$ の場合, $r = 2a/W$
- 2) $a/W \geq 0.2$ の場合, $r = 0.4$

3. 単調载荷による延性き裂成長の挙動に及ぼす初期き裂長さの影響

Fig. 7 は単調载荷による限界 COD の温度依存性を示したものである。ここで、 δ_m は安定延性き裂成長をした後最高荷重を呈したもので、最高荷重時の COD 値で示す。 δ_u は延性き裂が発生した後、脆性破壊へ遷移したもので、脆性破壊発生時の COD 値で示す。また、 δ_c は安定延性き裂成長を伴わない完全な脆性破壊や停留脆性き裂を招く不安定破壊を表し、その発生時の COD 値で示す。各初期き裂長さともに室温から低温になるにつれて δ_m から δ_u 、そして δ_c へと移行している。完全脆性不安定破壊を生じる温度域での δ_c には、ほとんど初期き裂長さの影響は見られないが、 δ_m や δ_u は初期き裂長さが短いほど大きくなっている。また、不安定延性破壊から不安定脆性破壊へ遷移する温度は初期き裂長さが短いほど低温側に移行している。

日本機械学会の規定²⁾ではストレッチド・ゾーンを含む延性き裂長さ Δa が 1mm 以内のデータについて、COD と Δa の関係 (R 曲線) が直線関係になるものとして、それらを最小二乗法により直線近似して R 曲線を求め、 $\Delta a = 0$ での値を延性き裂発生限界 COD δ_i を得るように定めている。このような方法によって得られた δ_i に及ぼす初期き裂長さの影響を示したものが Fig. 8 である。ここで図の横軸の初期き裂長さは Table 1 に示した平均実測値を用いた。初期き裂長さが長い場合にはほぼ一定値をとり、初期き裂長さが 2mm 以下のように短くなると δ_i は急激に増加する。大塚ら⁶⁾によればき裂先端付近の 3 軸応力状態が δ_i の大きさに影響し、塑性拘束が小さくなると δ_i は大きくなると報告しており、本研究の初期き裂長さの短いものは長いものに比べて塑性拘束が小さいため延性き裂発生に対する抵抗が大きくなるものと考えられる。

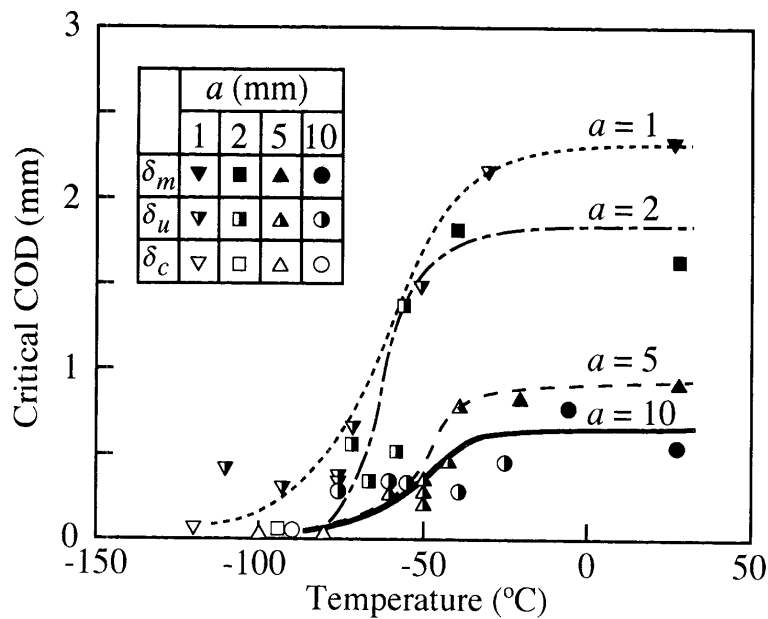


Fig. 7 Critical CODs obtained by monotonic loading for various initial crack lengths

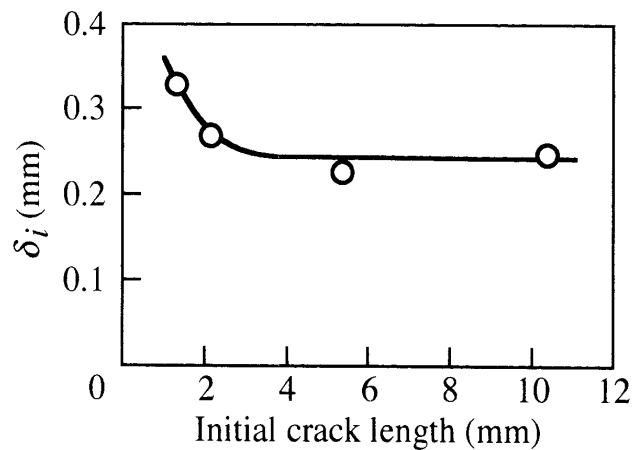


Fig. 8 Effect of initial crack length on critical COD at fibrous crack initiation

4. 定荷重負荷を受ける場合の不安定破壊限界に及ぼす初期き裂長さの影響

単調荷重試験において安定延性き裂成長を伴う不安定脆性破壊を生じる温度領域，すなわち Fig. 7 において δ_u が生じる温度領域において，ある荷重レベルまで単調荷重した後一定荷重保持すると COD の増加が生じ，荷重レベルが高い場合には COD の増加中に不安定脆性破壊に至り，一方，荷重レベルが低い場合には COD の増加が停止し，定荷重保持し続けても破壊には至らない現象がみられる．そこで定荷重試験においては不安定脆性破壊に至るか否かの限界の一定荷重保持開始時の COD をもって定荷重試験における限界 COD ($\delta_{u,d}$) と定義する．すなわち，この限界 COD は実験的には最終的に不安定脆性破壊する場合の一定荷重保持開始時の COD の最小値と

最終的には COD の増加が停止するときの一定荷重保持開始時の COD の最大値の間に存在する。このような定荷重試験で得られる限界 COD は、その COD が生じるような荷重レベルまで保持されたとき、その部材が不安定脆性破壊に至るかどうかの限界を示しており、言い換えれば、不安定脆性破壊に対する耐荷性能を表す指標である。それに対して、単調荷重試験で得られる限界 COD はまさに不安定破壊する限界変形レベルを指し示している。

Fig. 9 は定荷重試験において安定延性き裂成長を伴う不安定脆性破壊限界の COD ($\delta_u)_d$ の存在範囲を示す。比較をするために図中に単調荷重で得られた限界 COD の温度依存性ならびに延性き裂発生限界 COD δ_i も併せて示している。定荷重下での不安定脆性破壊限界 ($\delta_u)_d$ は、初期き裂長さが小さくなるほど大きくなる傾向がある。これは単調荷重での限界 COD δ_u の傾向と同様である。すなわち、定荷重下での不安定脆性破壊限界も単調荷重を受ける場合と同じように延性き裂の成長挙動に依存すると考えられ、R 曲線といったき裂進展抵抗の影響を受けていることが原因であると考えられる。また、初期き裂長さが 2mm のものでは、単調荷重で δ_m を呈した温度で定荷重下では延性き裂成長後脆性破壊を呈する試験片も観察された。このことから定荷重試験結果は単調荷重試験に比べて脆性破壊の生じる温度範囲が多少高温側に移行しているようである。

佐藤ら⁴⁾によると ($\delta_u)_d$ は種々の鋼材で温度依存性がなく、き裂発生限界 COD δ_i にほぼ等しいとしている。しかし、本研究では ($\delta_u)_d$ に大きな温度依存性が見受けられる。初期き裂長さの短い場合には特に温度依存性が大きく、 δ_i よりも大きい値になっている。そこで -30°C 近傍での ($\delta_u)_d$ を δ_i で除した ($\delta_u)_d/\delta_i$ に及ぼす初期き裂長さの影響を Fig. 8 に示す。初期き裂長さが 1, 2mm のように短い場合には ($\delta_u)_d$ は δ_i に比べて 4~5 倍もの大きい値になり、 δ_i を破壊限界指標として用いる場合、かなり安全側評価を与える。

Fig. 11 は ($\delta_u)_d$ をその温度における単調荷重で得られた限界 COD (δ_u もしくは δ_m) で除した ($\delta_u)_d/\delta_x$ ($x=u, m$) と初期き裂長さの関係を示したものである。初期き裂長さの大小に拘わらず ($\delta_u)_d$ は δ_x の約 60~80% になっており、($\delta_u)_d/\delta_x$ はほぼ一定の値になっている。したがって、き裂

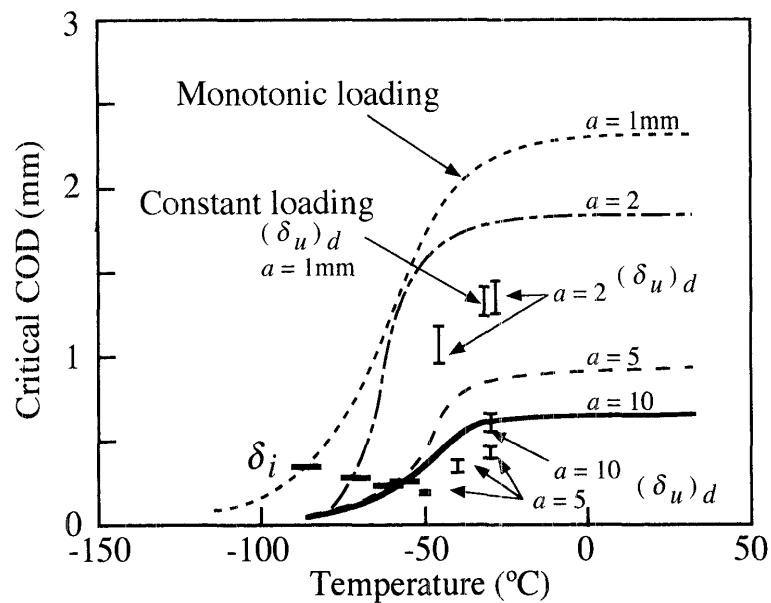


Fig. 9 Comparison of critical CODs obtained by monotonic loading and constant loading for various initial crack lengths

長さに拘わらず定荷重下での限界 COD は同じ温度の単調荷重の限界 COD の約 0.6~0.8 倍程度の大きさで一定である。

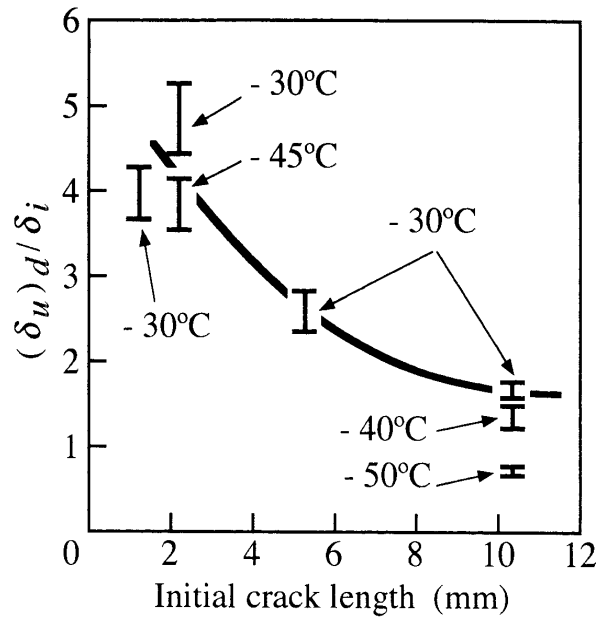


Fig. 10 Effect of initial crack length on ratio of critical COD obtained by constant loading to critical COD at fibrous crack initiation

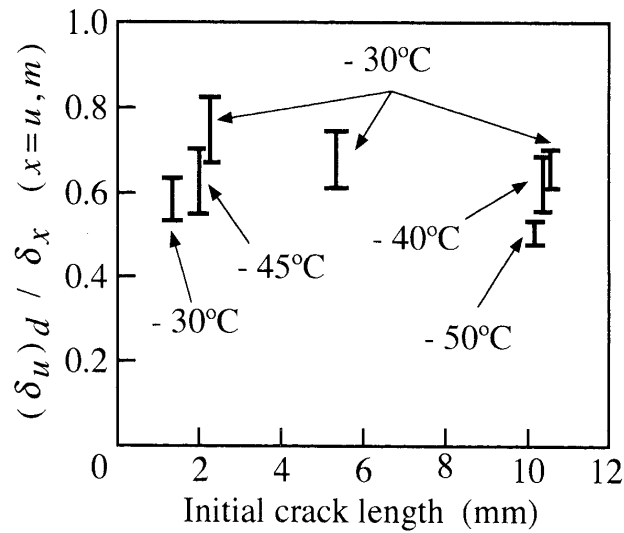


Fig. 11 Effect of initial crack length on ratio of critical COD obtained by constant loading to critical COD obtained by monotonic loading

5. 結 論

軟鋼板から切り出した板幅 20mm で、初期き裂長さが 1, 2, 5, 10mm の 3 点曲げ COD 試験片を用いて、単調載荷試験と定荷重試験を行い、延性き裂発生・成長挙動に及ぼす影響と不安定破壊の限界 COD に及ぼす初期き裂長さの影響を明かにした。以下に本研究で得られた結論を示す。

- 1) 曲げ試験における回転因子 r は試験片の板幅 W に対する初期き裂長さ a の比 a/W が 0.2 以下のような短いき裂の場合には a/W の増加とともに直線的に増加するが、 a/W が 0.2 以上の場合には $r=0.4$ と一定になる。
- 2) 延性き裂発生限界 COD δ_i は初期き裂長さがおおよそ 5~10mm といった比較的長い場合はほぼ一定値になるが、 a/W が 0.2 以下のような短いき裂の場合には δ_i の値は大きくなり、例えば、 a/W が 0.05 の場合には 0.5 の場合の約 5 倍になる。
- 3) 単調載荷での限界 COD ならびに定荷重下での安定延性き裂成長を伴って不安定脆性破壊するような限界 COD は初期き裂長さの影響を大きく受け、初期き裂長さが短くなると限界 COD は大きくなる。単調載荷の場合、高温側になるほど初期き裂長さの影響は大きく、完全脆性破壊を呈するような温度域ではその影響はほとんど見られない。
- 4) 定荷重下での安定延性き裂成長を伴って不安定脆性破壊するような限界 COD ($\delta_{u,d}$) の延性き裂発生限界 COD δ_i に対する比 $(\delta_{u,d})/\delta_i$ は初期き裂長さが小さくなると大きい値になる。また、 $(\delta_{u,d})$ は同一温度における単調載荷での限界 COD δ_x ($x=u, m$) 比べて小さくなっており、その比 $(\delta_{u,d})/\delta_x$ は初期き裂長さに拘わらずほぼ一定で、約 0.6~0.8 である。

謝 辞

本研究の遂行に関して当時大阪大学大学院綿谷剛氏（現日立造船株式会社）ならびに大阪大学工学部東久保智広氏（現三菱重工業株式会社）に協力を得た。ここに感謝する。

参 考 文 献

- 1) British Standard Institution: Method for crack opening displacement (COD) testing, BS5762, 1979.
- 2) 日本機械学会基準：弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験方法, JSME S001-1981.
- 3) 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**, 268-274, 1977.
- 4) 佐藤邦彦, 豊田政男, 福井清之: 定荷重負荷を受ける切り欠き材の延性亀裂成長と不安定破壊遷移限界, 日本造船学会論文集, **155**, 351-359, 1984.
- 5) 田中英彦, 安藤柱, 酒井譲, 小倉信和: 浅い切り欠きからのぜい性破壊発生特性と熱ひずみぜい化, 第 1 回破壊力学シンポジウム講演論文集, 147-151, 1981.
- 6) 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——試験片形状の影響——, 第 1 回破壊力学シンポジウム講演論文集, 96-100, 1981.