

熊本大学学術リポジトリ

Kumamoto University Repository System

Title	表面切欠き材の限界き裂開口変位に及ぼす切欠き長さ と形状の影響
Author(s)	塚本, 光夫; 羽田, 憲治
Citation	熊本大学教育学部紀要 自然科学, 47: 87-94
Issue date	1998-12-18
Type	Departmental Bulletin Paper
URL	http://hdl.handle.net/2298/2366
Right	

表面切欠き材の限界き裂開口変位に及ぼす 切欠き長さとの影響

塚本光夫・羽田憲治*

Effect of Notch Length and Shape on Critical Crack Opening Displacement of Flat Plate with Surface Notch

Mitsuo TSUKAMOTO and Kenji HADA*

(Received September 1, 1998)

Fracture parameters, e.g. K-value, J-integral or crack opening displacement, give evaluations of fracture toughness for material with large crack length. Crack length existing in structures, however, is less than a few percent in comparison with other geometrical dimensions. Investigations are conducted into the effect of notch length or geometry, including small cracks, on fracture criterion, which is critical crack opening displacement. Single-side surface notched specimens are extracted from mild steel with about 0.6-1.0mm notch length representing rates of about 3-50% of plate thickness. Tensile tests were carried out at room temperatures: 253K and 223K – The shorter the notch length, the larger the crack opening displacement in notched flat plate. In notched flat plate with long notch length, no effect of notch length on critical crack opening displacement is recognized, and its critical crack opening displacement is coincide with critical crack opening displacement in 3-point bending test with deep notch which has the rate, which is the rate of notch length to plate width, of 0.5. The results show that critical crack opening displacement, in notched flat plate with short notch length, remarkably increases. The effect of geometry of crack tip is not recognized.

Key words : notch length, crack opening displacement, surface notch, tensile test, mild steel

1. 緒 言

鋼構造物に存在する欠陥の適切な限界評価を行うために、破壊力学指標が用いられている。しかし、指標の取り扱いと比較的欠陥長さが大きい材について考慮されたもので、他の寸法に比べて数%以下のような微小欠陥については、破壊力学的なデータや知識が乏しいのが現状である。これまで微小欠陥に関する研究¹⁾⁴⁾はなされているが、微小欠陥の静的変形挙動に注目して実験的検討を行った例は少なく、微小欠陥における破壊現象について不明確な点もある。前々報⁵⁾で変形挙動に及ぼす切欠き長さの影響について明らかにし、前報⁶⁾で強度に及ぼす切欠き長さの影響について明らかにしたが、構造設計においてはき裂開口変位等の破壊限界指標を指標とする場合も多く、耐荷重性能を評価するためにも破壊限界指標を明らかにすることは重要である。

そこで、本研究では切欠き長さが、約0.6～10mm、板厚に対する割合にして約3～50%といった広範囲に変化させた種々の形状をもつ板厚非貫通片側表面切欠き材を用いて引張試験を行い、限界き裂開口変位に及ぼす切欠き長さとの影響を明らかにすることを目的とする。

* 新日本製鐵株式会社

2. 実 験

2.1 供試材料

切欠き材の強度に及ぼす切欠き長さや形状の影響を調べるために、切欠き長さ約 0.6 ~ 10mm の板幅貫通片側切欠き材を用いて引張試験を実施した。供試材の化学成分を Table 1 に示す。

実験に先立ち供試材の靱性値を把握するために、標準 V ノッチシャルピ衝撃試験と 3 点曲げ COD 試験を実施した。その結果、供試材の破面遷移温度は $\sqrt{T_S}=286\text{K}$ で、エネルギー遷移温度は $\sqrt{T_E}=277\text{K}$ である。

これらの結果よりその破壊様式が顕著に変わる以下の三温度を引張試験の温度として決定した。

- 1) 完全脆性破壊をする 223K
- 2) 延性き裂成長を伴って脆性破壊をする 253K
- 3) 延性破壊をする室温

この三温度について直径 6mm の丸棒と平行部の幅 40mm、板厚 20mm の平滑平板を用いて引張試験を行った。得られた降伏応力 σ_Y と引張強さ σ_U を Table 2 に示す。

2.2 実験内容

2.2.1 試験片形状と寸法

Fig.1 に試験片形状、寸法および切欠きの詳細部を示す。試験片は板厚非貫通で板幅貫通である片側表面切欠き材を用いる。切欠き先端形状の比較をするため機械切欠き材と疲労予き裂材の二種類を用意した。切欠き長さ b は約 0.6 ~ 10mm、面積欠損率（グロス断面に対する欠陥断面積の割合）にして、約 3 ~ 50% と広範囲に変化させた。初期切欠き長さは引張試験の破断後にコンパレータで計測した実測値を用いた。また、切欠き先端半径の影響を調べるために切欠き先端半径 ρ が 0.1mm と 0.5mm の機械切欠きを用意した。疲労き裂は先端半径が 0mm に相当する。

2.2.2 実験方法

引張試験には容量 1.96MN の電子管式万能試験機を用いた。試験中、荷重と切欠きをまたぐ標点間距離の伸びを測定し、記録した。室温においてはダイヤルゲージ（標点間距離 150mm）、低温においてはパイ形ゲージ（標点間距離 140mm）を用いた。

Table 1 Chemical composition of material used

Material	Chemical composition (mass%)				
	C	Si	Mn	P	S
SB42	0.23	0.22	0.82	0.016	0.005

Table 2 Mechanical properties of material used

Test temperature	σ_Y (MPa)		σ_U (MPa)	
	Round bar	Flat plate	Round bar	Flat plate
Room Temperature (284K)	274	281	489	492
253K	297	306	532	562
223K	336	324	561	581

σ_Y : Yield stress, σ_U : Ultimate tensile strength

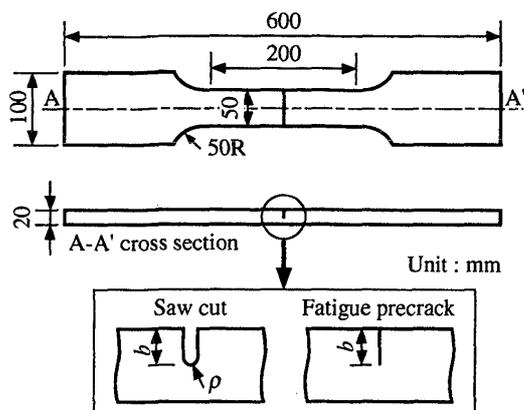


Fig.1 Specimen geometry

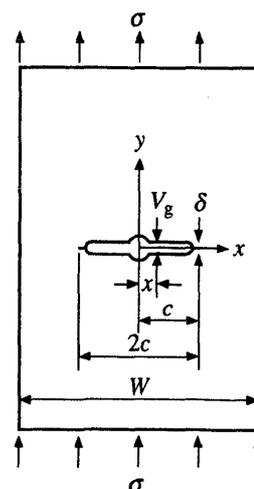


Fig.2 DBCS model in notched specimen under tension

液体窒素とメチルアルコールを冷媒としたものを冷却バスに入れ、冷却を行った。温度管理には切欠き近傍の試験片表面にあらかじめ付けておいた銅-コンスタン熱電対を用いて切欠き付近の温度を測定し、所定の温度からのずれが ±5K になるように留意した。

2.2.3 き裂開口変位 (COD) の換算手法

片側切欠き材の切欠き末端開口変位 V_g から、き裂先端開口変位 (Crack Opening Displacement, 以後 COD と略す) に換算する手法は以下の通りである。

Fig.2に示す板幅 W 、長さ $2c$ の切欠きの位置 x での開口変位 $V(x)$ は、DBCS 模型⁷⁾ によると次式で与えられる。

$$V(x) = \frac{4W\sigma_Y \sin \alpha}{\pi^2 E} \int_x^{\pi/2} \frac{\cos x}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \sin^2 x}} \ln \left| \frac{\sin(x + \varphi)}{\sin(x - \varphi)} \right| dx \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$$\begin{cases} \sin \alpha = \sin\left(\frac{\pi c'}{W}\right) \\ \sin \varphi = \cos\left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_Y}\right) = \sin\left(\frac{\pi c}{W}\right) / \sin \alpha \\ \varphi = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{\sigma}{\sigma_Y}\right) \\ \sin x = \sin\left(\frac{\pi x}{W}\right) / \sin \alpha \end{cases}$$

- 2c : 切欠き長さ
- c' : 切欠き中央から塑性域先端までの距離
- σ_Y : 降伏応力

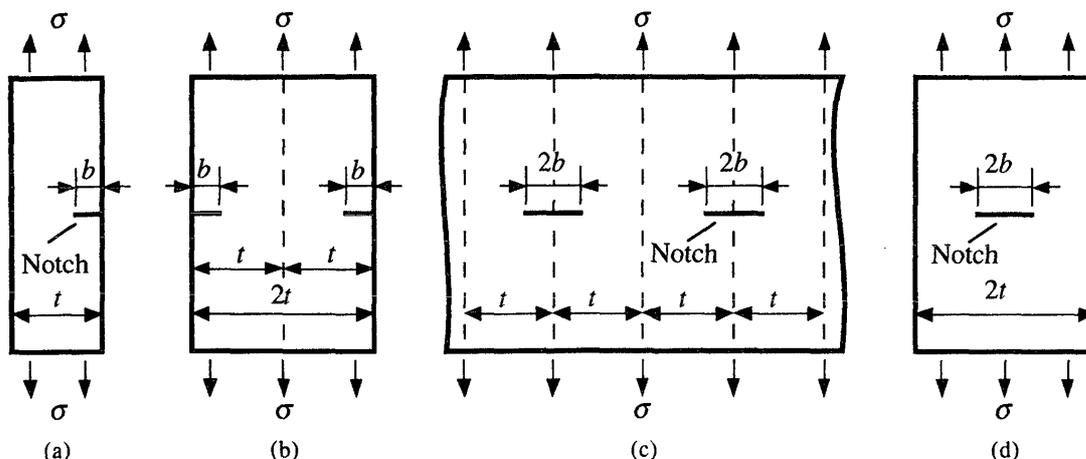


Fig.3 Models used convert single edge notched specimen into center notched specimen

W : 板幅

E : Young率

したがって、中央切欠き付引張試験片での COD 値 δ は切欠き中央部近傍で測定した V_g より、次式を用いて換算できる。

$$\delta = \frac{V(c)}{V(x)} V_g \dots\dots\dots (2)$$

次に、以下に示すモデルから、片側切欠き材の COD の換算手法を決定する。

本実験で使用した試験片は Fig.3(a) に示すような片側切欠き材である。この場合曲げ変形が生じるが、これを無視して Fig.3(b) に示すような両側切欠き材とみなす。これは Fig.3(c) のように連続的に切欠きをもつモデルと等価である。したがって、片側切欠き材は Fig.3(d) に示すモデルと等価と考えて、(1)、(2) 式を用いて換算した。

なお、DBCS 模型ではネット断面降伏後の算出は不可能であるが、Fig.3(c) の場合、全面降伏時には次式の有限要素解⁸⁾ が与えられている。

$$\frac{V(c)}{V(x)} = 0.7784 - 1.1721 \left(\frac{2c}{W}\right) + 1.4346 \left(\frac{2c}{W}\right)^2 - 0.3137 \left(\frac{2c}{W}\right)^3 - 3.06724 \left(\frac{2c}{W}\right)^4 + 4.3965 \left(\frac{2c}{W}\right)^5 - 1.9203 \left(\frac{2c}{W}\right)^6 \dots\dots\dots (3)$$

($0.05 \leq 2C / W \leq 0.9$ で 1% 以内)

(2) 式によって計算した $V(c)/V(x)$ の値が (3) 式の値に達したとき、ネット断面降伏したとして、以後は (3) 式で求められる一定値を用いることにした。なお、本実験の範囲 ($2c/W = b/2t$ は約 0.03 ~ 0.6) は (3) 式の制限条件から著しく逸脱するものではない。

4. き裂開口変位の変形挙動およびその限界値に及ぼす切欠き長さや形状の影響

4.1 き裂開口変位で示した変形挙動

Figs.4, 5, 6は室温 (297~301K) , 253K, 223Kの各温度における引張試験の応力 (gross 応力) と COD の関係を示したものである。Fig.4(a) は, 室温 (297~301K) における機械切欠き材について, Fig.4(b) は, 室温における疲労予き裂材について, Fig.5(a) は253Kにおける機械切欠き材, Fig.5(b) は253Kにおける疲労予き裂材について, Fig.6は223Kにおける疲労予き裂材について, それぞれ示したものである。各温度とも開口量の絶対量は切欠き寸法が小さくなるにつれて大きくなる傾向にある。また, 限界 COD または最大荷重時の COD も, 切欠き寸法が小さくなるにつれて大きくなっている。切欠き先端形状の影響はほとんど見られない。

4.2 限界き裂開口変位に及ぼす切欠き長さや形状の影響

Fig.7に最終的に不安定脆性破壊をおこすような253Kと223Kにおける限界 COD 値と切欠き長さの関係を示す。Fig.7(a) は 253K, Fig.7(b) は 223K について示したものである。253Kにおいて, 最大荷重を呈したものは, 最大荷重時の COD 値を限界値とし, 図中に黒塗りのプロット点で示した。なお限界 COD 値と破壊応力との対応関係を知るために, 破壊応力と切欠き長さの関係⁹⁾を同時に表示した。図中の網掛け部分は前々報⁹⁾で示した3点曲げ試験による限界 COD 値のばらつき範囲である。また, 図中の σ_y は, その温度における平滑平板より求めた降伏応力を示しており, 図の破線部より小さい切欠き長さでは, 切欠き材のgross断面は降伏していることを示している。したがって, gross全断面降伏後に破断するような切欠き長さ b が小さい場合 (253K では b が6mm以下, 223K では b が 2.5mm 以下) においては, 切欠き長さがそれより大きい場合に比べて, 限界 COD 値が著しく増加する。一方, gross断面が降伏せずに σ_y 以下の応力で破断するような切欠き長さが大きい場合, 限界 COD 値は3点曲げ試験によって得られた限界 COD 値にほぼ一致する。

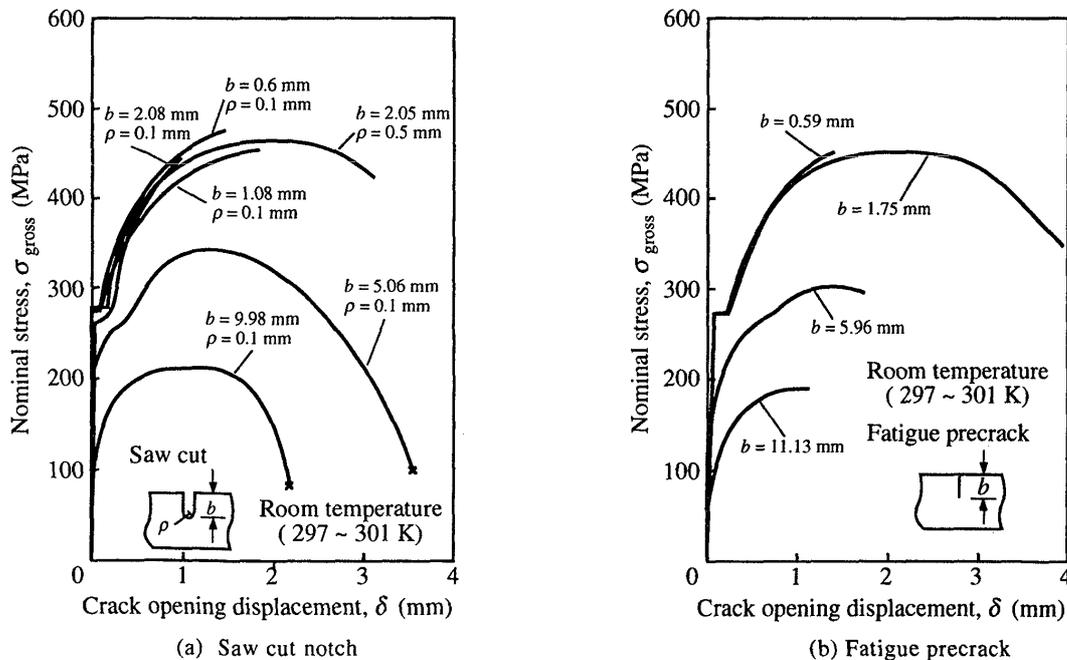


Fig.4 Nominal stress vs. COD curves at room temperature

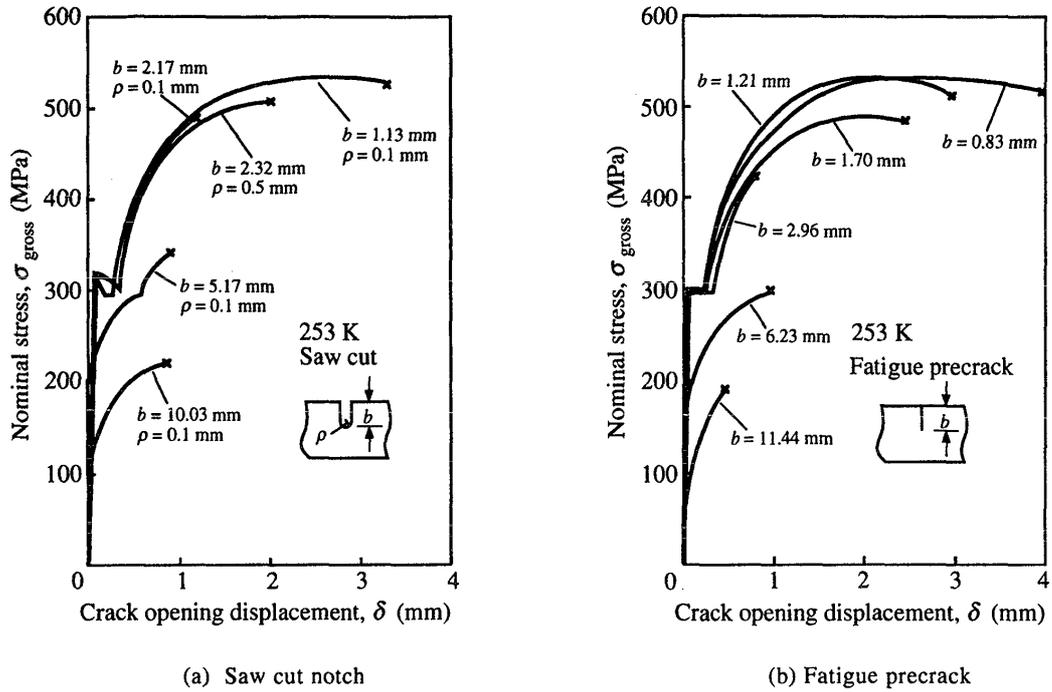


Fig.5 Nominal stress vs. COD curves at 253K

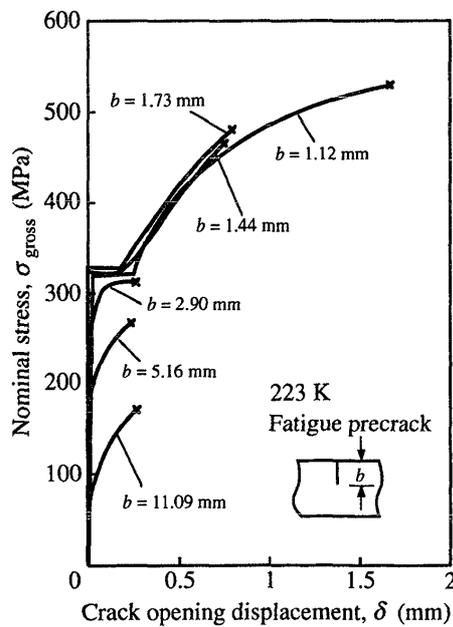


Fig.6 Nominal stress vs. COD curves for fatigue precracked specimen at 223K

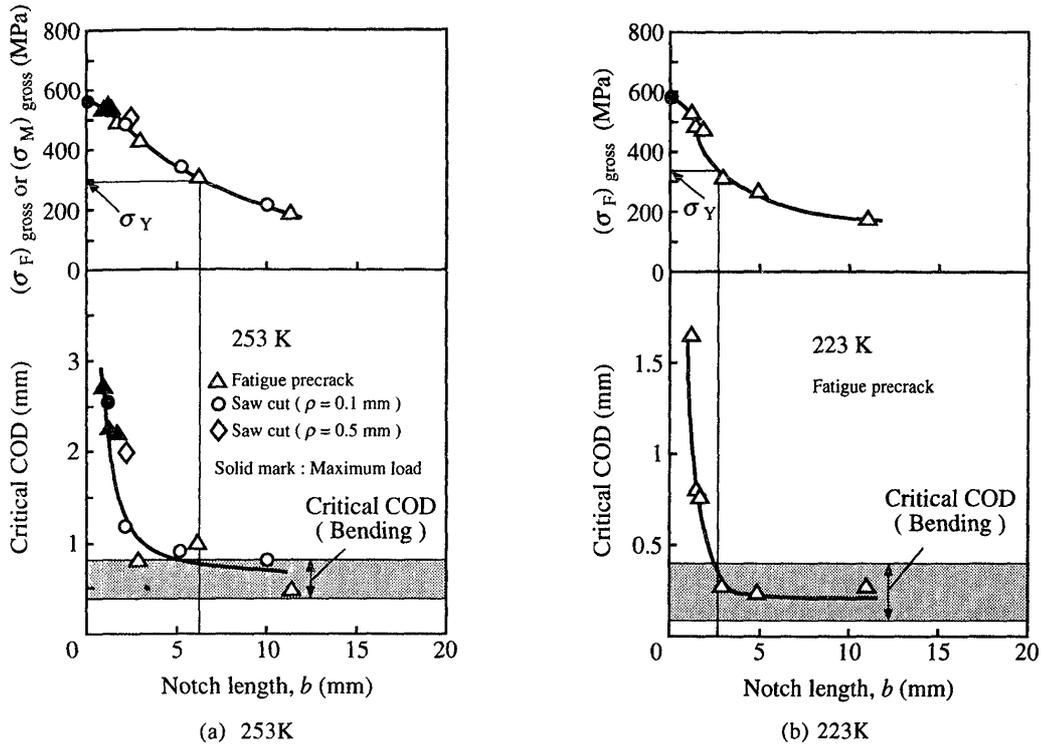


Fig.7 Effect of notch length on critical COD or fracture stress

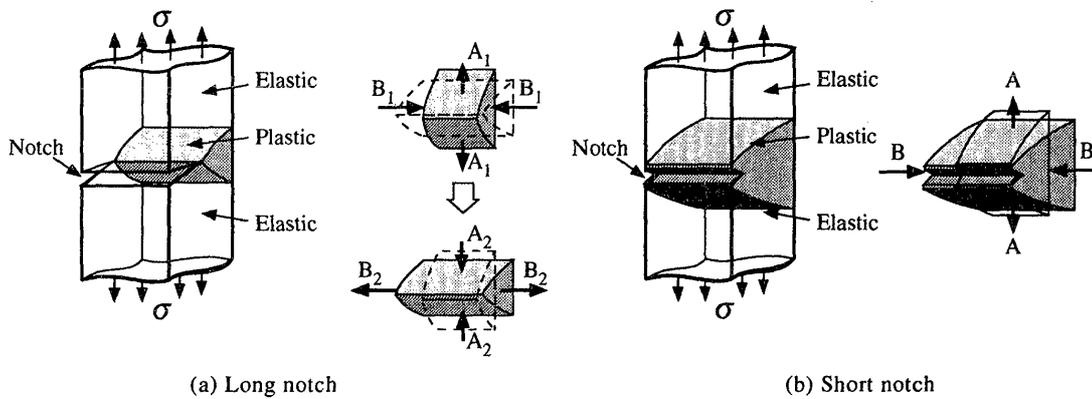


Fig.8 Schematic illustrations of deformation behavior in plastic region for long notch or short notch

4.3 塑性拘束による変形挙動

切欠き長さが大きい場合には、塑性拘束が大きいので開口量が小さくなり、板幅 W に対する切欠き長さ a の比 a/W が 0.5 のような比較的深い切欠きをもつ曲げの限界 COD 値に一致するものと考えられる。切欠き長さによって塑性拘束がどのように変わるかを模式的に示したのが Fig.8 である。Fig.8(a) は切欠き長さが大きい場合、Fig.8(b) は切欠き長さが小さい場合を示している。Fig.8(a) に示すように、切欠き長さが大きい場合ネット断面のみ降伏し、グロス断面は弾性である。塑性体になっている網掛け部分だけを取り出してみると、(a) 図の右図の引張り荷重を受けて網掛け部分のようになろうとするが、周辺は依然として弾性体であるので、変形が拘束され、 A_2, B_2 方向の力を受けて

網掛け部分のようになる。したがって変形が小さくなって開口量も小さくなると考えられる。一方、切欠き長さが小さい場合、Fig.8(b)に示すようにネット断面が降伏した後にすぐにグロス全段面降伏するため、網掛け部分を拘束する弾性体は存在しない。したがって塑性変形しやすく、網掛け部分はA、B方向に変形して実線部分のようになり、開口量も大きくなると考えられる。

5. 結 論

微小欠陥をもつ切欠き材の変形挙動を把握することを目的として、片側切欠き材の引張試験を室温、延性き裂を伴って破壊する温度および完全脆性破壊をする温度で行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 引張りを受ける切欠き材の開口量は、切欠き長さが小さいほど大きくなる。
- 2) 切欠き長さの大きい場合には、限界 COD に及ぼす切欠き長さの影響はほとんどなく、板幅に対する切欠き長さの割合が 0.5 といった比較的深い切欠きを持つ 3 点曲げ試験の限界 COD 値に一致する。切欠き長さの小さい場合には、切欠き長さの大きい場合に比べて、限界 COD は著しく増大する。
- 3) 切欠き先端半径が異なっても限界 COD の差異は認められず、限界 COD に及ぼす切欠き先端形状の影響はほとんど見られない。

参 考 文 献

- 1) 塚本光夫：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，熊本大学教育学部紀要，自然科学第43号，153-162，1994.
- 2) 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.
- 3) 田中英彦，安藤柱，酒井謙，小倉信和：浅い切り欠きから脆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.
- 4) 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.
- 5) 塚本光夫，羽田憲治：表面切り欠き材の変形挙動に及ぼす切り欠き長さの影響，熊本大学教育学部紀要，第45号，自然科学，171-176，1996.
- 6) 塚本光夫，羽田憲治：表面切欠き材の強度に及ぼす切欠き長さや形状の影響，熊本大学教育学部紀要，第46号，自然科学，197-202，1997.
- 7) B.A. Bilby, A.H. Cottrel, E. Smith and K.H. Swinder : Plastic Yielding from Sharp Notches , Proc. Roy. Soc. (London) Ser. A , 279, 1, 1974.
- 8) 田中清貫；全面降伏後の破壊靱性値の測定手法と破壊延性に関する研究，大阪大学卒業論文，1979.