

## 表面切欠き材の強度に及ぼす切欠き長さや形状の影響

塚本光夫・羽田憲治\*

### Effect of Notch Length and Shape on Strength of Flat Plate with Surface Notch

Mitsuo TSUKAMOTO and Kenji HADA\*

(Received September 1, 1997)

Fracture mechanics provides a linear fracture mechanics parameter, e.g. K-value, in a small strain fracture region, or a non-linear fracture mechanics parameter, e.g. J-integral or crack opening displacement, in a large strain fracture region. These parameters give evaluations of fracture toughnesses for materials with large crack length. Crack length existing in structures, however, is less than a few percent in comparison with other geometrical dimensions. Poor data and knowledge about behaviors, fracture mechanism, fracture criteria of small defects are a problem.

Investigations were conducted into the effect of notch length or geometry, including small cracks, on strength. 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. Fracture stress, in the fraction of crack area to gross area more less about 10%, is higher than stress in proportional to net cross-section area. Fracture stress, on the other hand, in the fraction of crack area to gross area more than about 10%, is lower than stress in proportional to net cross-section area. The effect of geometry of crack tip is not recognized at temperature in fracture with ductile crack extension. The smaller the radius of crack tip, however, the smaller the fracture stress at temperature in full brittle fracture.

**Key words** : notch length, strength, 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き裂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・知識が乏しいのが現状である。これまで微小き裂に関する研究<sup>1)~4)</sup>はなされているが、微小き裂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、微小き裂における破壊現象について不明確な点もある。前報<sup>5)</sup>では、変形挙動に及ぼす切り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強度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荷重を明らかにすることは重要である。

そこで、本研究では切り欠き長さが、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、強度に及ぼす切り欠き長さや形状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き裂長さや形状の影響を調べるために、き裂長さ約 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<sup>5)</sup>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

各温度における切欠きのない平滑材料の機械的性質を把握するために、この三温度についてそれぞれ直径 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。それぞれの試験から得られた降伏応力  $\sigma_Y$ 、引張強さ  $\sigma_U$  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。き裂長さ  $b$  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。初期き裂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、切り欠き先端半径の影響を調べるために切り欠き先端半径  $\rho$  が 0.1mm と 0.5mm の機械切り欠きを用意した。疲労き裂は先端半径が 0mm に相当する。

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	$\sigma_Y$ (MPa)		$\sigma_U$ (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

$\sigma_Y$  : Yield stress,  $\sigma_U$  : Ultimate tensile strength

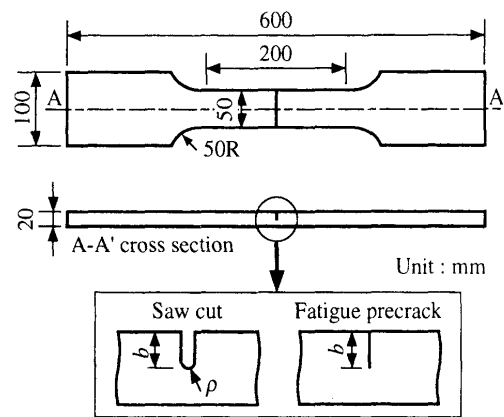


Fig.1 Specimen geometry

## 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 150mm または 140mm の伸びを測定し、記録した。室温においてダイヤルゲージ（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、それぞれの出力電気信号を記録した。

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  $\pm 5K$  になるように留意した。

## 3. 強度に及ぼす切欠き寸法と形状の影響

切欠き材の強度を知る上で最も基本的な考え方は、切欠き材の破壊強度はネット断面の平均応力が平滑材の引張り強さに等しいというものである。すなわち、切欠き材の強度は断面欠損に一義的に支配されているという考え方である。しかし、切欠きが存在することによって、強度は断面欠損で一義的に決定できないことも考えられる。特に、最終的に脆性破壊へ移行して破断するような場合には、その影響は顕著であることが予想される。

### 3.1 室温での強度

Fig.2 は、延性破壊によって破断するような室温（297~301K）における引張試験において力学的不安定によって呈した最大荷重におけるグロス応力を、その切欠き材の耐荷重と考えて、その応力とき裂長さ、または面積欠損率（グロス断面に対する欠陥断面積の割合）との関係を示したものである。破線はネット断面の平均応力が平滑材の引張り強さに等しくなった線として、き裂長さ  $b$  が 0 の時に平滑平板の引張り強さ  $\sigma_y$  となり、き裂長さ  $b=20\text{mm}$ （面積欠損率 100%）の時に 0 になるとして、この間に線形関係が成り立つとしたものである。き裂長さが小さい場合においては、ほぼこの線形関係よりも若干大きな応力を示すが、き裂長さが大きな場合においては、この線形関係で示す値よりも小さな応力で最高荷重を呈している。この理由としては、次の 2 つが考えられる。

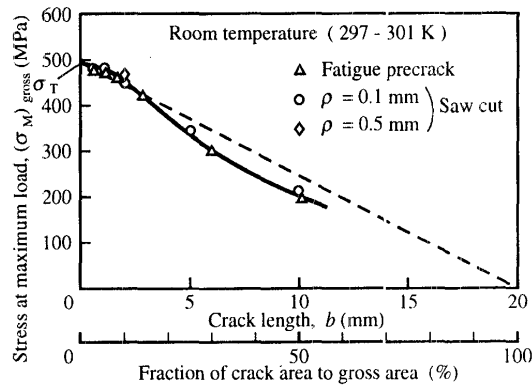


Fig.2 Relationship between stress at maximum load and crack length (or fraction of crack area to gross area) at room temperature

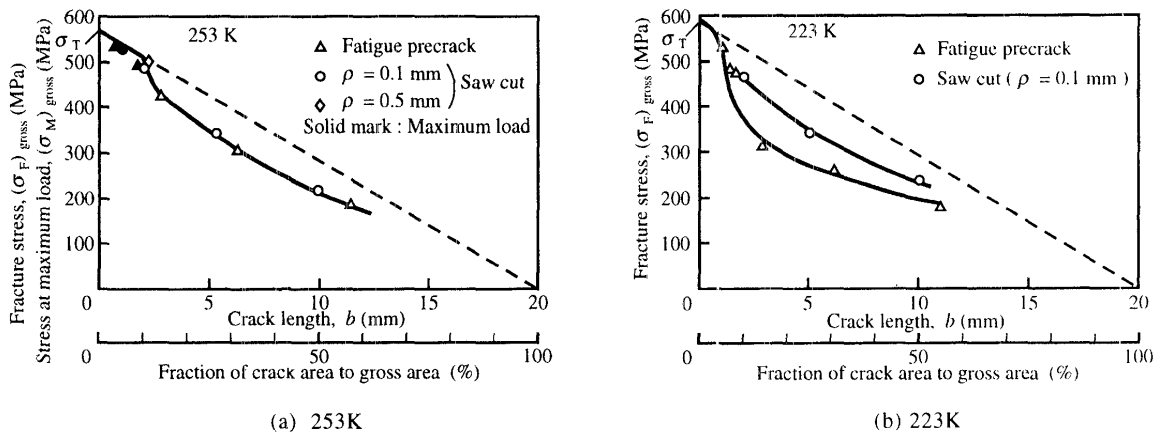


Fig.3 Relationship between fracture stress or stress at maximum load and crack length (or fraction of crack area to gross area) at 253K and 223K

- 1) 最高荷重を呈するまでの安定延性き裂成長により断面減少が生じる。
- 2) 引張を受ける片側切欠き材の場合，中立軸のずれにより曲げ応力が生じる。

この線形関係からのずれは，き裂長さが約 3mm 以上で生じている。また，き裂先端半径の影響は顕著に認められない。

### 3.2 不安定脆性破壊を生じる温度での強度

最終的に不安定脆性破壊を起こす温度での破壊強度とき裂長さ，または面積欠損率の関係をFig.3に示す。Fig.3(a)に253Kの場合を，Fig.3(b)に223Kの結果を示す。253Kにおいては最大荷重を呈したのものもあるが，最大荷重時の応力を限界値として，図中に黒塗り点で示した。最大荷重を呈するようなき裂長さが小さい場合は，応力の限界値がネット断面によってのみ決定されるとした線形関係を示す破線とはほぼ一致しているが，き裂が大きい場合には，この線形関係で示す値よりも小さな応力で破断している。また破線で示す線形関係からの減少量も室温(297~301K)の場合に比べて，よ

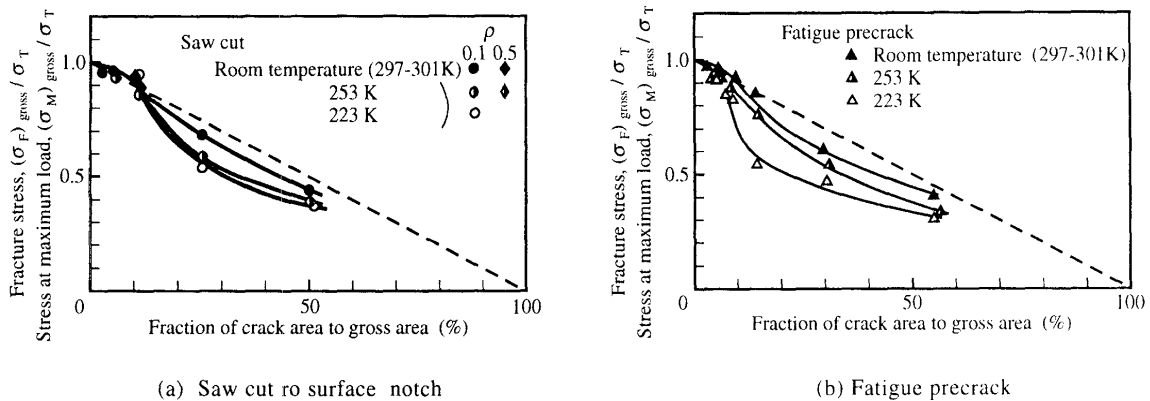


Fig.4 Relationship between stress at maximum load and fraction of crack area to gross area including surface notch at room temperature

り顕著になっている。これは最大荷重を呈する前に脆性破壊によって破断したために、低応力で破断したものと考えられる。破線で示す線形関係からのずれは、き裂長さ約 2mm 以上で生じている。また、き裂先端半径の影響は、ほとんど見られない。Fig.3(b)に、最高荷重を呈する前に不安定脆性破壊するような温度 223K での破壊応力とき裂長さ、または面積欠損率の関係を示す。破線で示す線形関係からの応力の減少量は、253K よりも大きくなっている。また、切欠き先端形状の影響が顕著になり、切欠き先端が鋭いと、より低い応力で不安定脆性破壊する。

#### 4. 強度の無次元化による整理と定性的傾向

以上のような結果について、各温度で平滑材の引張り強さ  $\sigma_y$  は異なるので、破壊応力は平滑材の引張り強さに対してどの程度低下するか、また、その低下の割合に対する温度依存性はどうかを明らかにする。Fig.4 は、各温度における応力の限界値（破壊応力、または最大荷重を呈して荷重減少を起こしたものについては最大荷重の応力）をそれぞれの温度の平滑材の引張り強さで徐して無次元化したものと面積欠損率との関係をまとめたものである。き裂先端の形状別に区別して、Fig.4(a) は人工切欠き材、Fig.4(b) は疲労予き裂材について示している。延性破壊から完全脆性破壊に移るにつれて、破壊応力はネット断面によってのみ決定するとした線形関係の示す値よりも小さな応力で破壊する。

このような考え方から、破壊応力または最大荷重の応力と面積欠損率との関係は、模式的に Fig.5 のように表される。約数 % ~ 10% より小さい面積欠損率では、加工硬化の影響が大きいために、破壊応力または最大荷重の応力は、図中に破線で示すネット断面によってのみ決まるとした線形関係の値よりも大きな値をとる。面積欠損率が約 10% 以上では、室温では安定延性き裂成長や曲げの影響が、低温ではこれに加えて最大荷重を呈する以前に不安定脆性破壊が生じるために、破線より小さな値で破断または最大荷重を呈する。

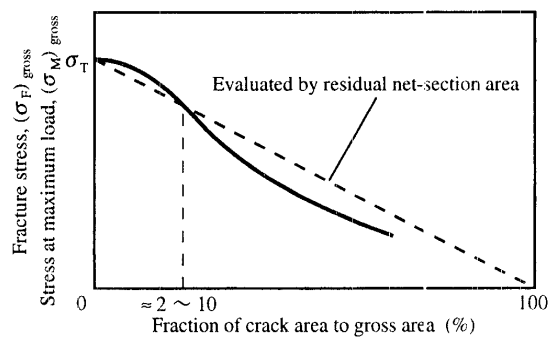


Fig.5 Schematic diagram of relationship between fracture stress and stress at maximum load and fraction of crack area to gross area

## 5. 結 論

本研究は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、切り欠き長さを約 0.6 ~ 11mm と変化させた種々の切欠き形状をもつ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、引張を受ける切欠き材の強度におよぼす切欠き寸法と形状の影響が明らかとなった。以下に得られた結論を示す。

- 1) 室温の場合、面積欠損率が約 10% 以下では、最大荷重あるいは破壊時の応力はネット断面積に比例するとした値よりも高くなる。面積欠損率が約 10% 以上では、曲げなどの影響などにより、最大荷重あるいは破壊時の応力はネット断面積に比例するとした値よりも低くなる。
- 2) 低温の場合、面積欠損率が小さいときには、最大荷重あるいは破壊時の応力はネット断面積に比例するとした値とほぼ一致する。面積欠損率が約 10% よりも大きくなると、曲げなどの影響などにより、最大荷重あるいは破壊時の応力はネット断面積に比例するとした値よりも低くなり、温度が低くなればなるほど低くなる。
- 3) 延性き裂を伴って破壊する場合、強度におよぼすき裂先端半径の影響はほとんどないが、完全脆性破壊をするような温度では、き裂先端半径が小さいほど破壊応力は小さくなる。

## 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，酒井譲，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。