

(昭和 53 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

## 円孔の近傍に亀裂を有する材の延性

正員 佐藤 邦彦\* 正員 豊田 政男\*  
正員 小田 勇\*\*

## Ductility of Steel Plate with Crack Approaching Hole

by Kunihiro Satoh, *Member* Masao Toyoda, *Member*  
Isamu Oda, *Member*

## Summary

We should prefer ductility for the criterion to estimate the safety of structures in the case where the applied net stress is beyond the yield stress. Fracture behaviors of the structural element with crack approaching stress concentrator like open hole, might be affected by interaction between crack and concentrator and by plate thickness. In the present report, the interaction effects as well as the thickness effects on relation of COD vs. elongation, on critical COD and on fracture strains are investigated. Experiments have been carried out using steel plates with crack approaching circular hole under uniform tension.

Main results obtained are as follows :

(1) The relationships between COD and  $\bar{\epsilon}_y$ , elongation averaged in net section, are not affected very much by either  $F_{Ia}$  values or plate thicknesses. Here,  $F_{Ia} = K_{Ia} / \sigma \sqrt{\pi c}$ ,  $K_{Ia}$  is stress intensity factor at the crack tip approaching hole.

(2) The critical COD value increases with increasing  $F_{Ia}$  value and with decreasing plate thickness, and this thickness effect is more remarkable in the case where  $F_{Ia}$  is large.

(3) The fracture strains  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  as well as the fracture overall strains of the plates with large  $F_{Ia}$  values are larger than those of the plates with only a crack, if plate widths are sufficiently large. And the fracture strains increase with decreasing plate thickness.

## 1 緒 言

構造物の使用性能との関連において部材に含まれている欠陥の限界評価を行なう際に、基準量になるものとして静荷重下においては強度と延性が考えられる。欠陥を含む材の破壊荷重が全面降伏荷重以下となる低応力脆性破壊域においては部材の延性はたかだか弾性ひずみ程度であり、大きな変化が考えられないので、欠陥評価における基準量としては破壊強度を考える方が妥当であろう。一方、破壊荷重が全面降伏荷重以上となるような高応力脆性破壊域および延性破壊域においては供試材の強度レベルが定まれば部材の強度はほぼ定まるので基準量としては破壊延性を考えるのが妥当であろう。実際に、構造物の使用性能上その変形能力すなわち延性が要求される場合も多い。このような観点に立ったいわゆる strain criterion という考え方も提案されている<sup>1), 2)</sup>。

全面降伏後に生ずる脆性破壊にも破壊発生条件として

COD 仮説が工学的に有効であることが報告されている<sup>3), 4)</sup>、亀裂を含む材の全面降伏後においては一般に COD の算定は容易ではない。Wells<sup>5)</sup> や Burdekin<sup>6)</sup> は部材に設定したある長さの標点距離の伸び率と COD の関係を求め、これを用いることによって全面降伏後においても COD 仮説を適用した評価の方法を提唱している。この考え方には標点距離の大きさの問題なども残されているが、もし、欠陥を含む材の伸びと COD の関係およびその材の限界 COD がわかれば、部材に要求される延性を満足するような欠陥の許容寸法、あるいは既知の欠陥寸法に対する破壊延性を求めることが可能である。著者らはこのような観点から J 積分の考え方を応用して COD と overall strain の関係を求め<sup>7)</sup>、これを用いて貫通切欠を有する材の破壊 overall strain を算定できることを実験によっても明らかにしている<sup>2)</sup>。

ところで、一般構造物における開口部のような円孔状の応力集中源の近傍に亀裂が存在する場合について、著者らは低応力脆性破壊強度や限界亀裂開口変位に及ぼす亀裂と円孔の平面内での干渉の影響を明らかにした<sup>8)</sup>。

\* 大阪大学工学部

\*\* 熊本大学工学部

しかしながら、このような場合の延性に関して考察した研究は見当たらない。また、破壊挙動に関して三次元的な考察を試みるためには、さらに板厚の影響についても考察する必要がある。本報では、円孔の近傍に亀裂を有する材において、亀裂開口変位と伸びの関係および限界亀裂開口変位に及ぼす亀裂と円孔の干渉の影響ならびに板厚の影響について考察し、それらの結果として決定される破壊延性に関して干渉の影響および板厚の影響を明らかにする。

2 実 験

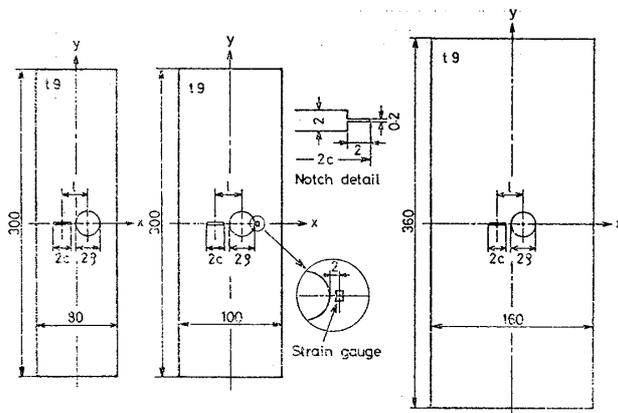
円孔の近傍に亀裂を有する材の延性について検討するために、伸びを表わすものとして引張力方向のひずみ  $\epsilon_y$  の最小断面における平均値  $\bar{\epsilon}_y$  をとり上げ、これに及ぼす亀裂と円孔の干渉の影響について考察する。伸び率  $\epsilon_y$  は亀裂および開口部を含む（亀裂+開口部）の数倍程度の領域の平均ひずみと解釈される。実際の構造物においてはこのような領域の外側は、多くの場合、たとえば補強材などによって拘束されていることなどを考えると  $\bar{\epsilon}_y$  のようなひずみを限界評価の基準として用いることも一つの方法として妥当性があるように思われる。

供試材の化学組成と機械的性質を Table 1 に、試験片の形状と寸法を Fig. 1 に示す。試験片の中央部に中心線が一致するような近接した円孔と亀裂を設定してい

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of material

Chemical compositions (%)					Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	S	Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	T.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	El. (%)	vTrs (°C)
0.19	0.04	0.71	0.022	0.031	25.1	43.4	35.5	+18

Y.S. : Yield strength  
 T.S. : Tensile strength  
 El. : Elongation in 30 mm  
 vTrs : Transition temperature



(a)  $W=80$ mm (b)  $W=100$ mm (c)  $W=160$ mm  
 Fig. 1 Shapes and dimensions of specimens

Table 2 Dimensions of crack and hole, distances between crack and hole, and values of factor  $F_{Ia}$  in specimens

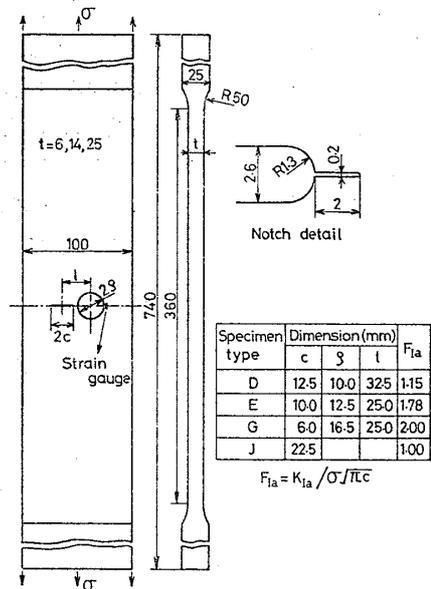
Specimen type	Dimension (mm)			$F_{Ia}$
	c	$\xi$	l	
J	22.5			1.00
B	13.0	2.0	32.5	1.00
C	5.0	9.5	33.0	1.07
D	12.5	10.0	32.5	1.15
E	10.0	12.5	25.0	1.78
G	6.0	16.5	25.0	2.00
Q	8.5	20.0	29.5	>2

$$F_{Ia} = K_{Ia} / \sigma \sqrt{\pi c}$$

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of material for thickness effects

Chemical compositions (%)					Mechanical properties			
C	Si	Mn	P	S	Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	T.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	El. (%)	vTrs (°C)
0.15	0.16	0.56	0.020	0.022	28.1	45.2	28.7	+1

Y.S. : Yield strength  
 T.S. : Tensile strength  
 El. : Elongation in 30 mm  
 vTrs : Transition temperature



Specimen type	Dimension (mm)			$F_{Ia}$
	c	$\xi$	l	
D	12.5	10.0	32.5	1.15
E	10.0	12.5	25.0	1.78
G	6.0	16.5	25.0	2.00
J	22.5			1.00

$$F_{Ia} = K_{Ia} / \sigma \sqrt{\pi c}$$

Fig. 2 Shape and dimensions of specimen for thickness effects

る。延性に及ぼす試験片幅の影響を検討する目的で、試験片の幅  $W$  が 80, 100 および 160mm の 3 種類に異なるものを用いた。この際、亀裂、円孔の寸法および両者の相対位置は同一 type においては  $W$  の違いにかかわ

らず同一とし、Table 2 のようにした。type J は円孔がなく単一亀裂のみを有するものである。表中には無限板における円孔側亀裂先端での応力拡大係数  $K_{Ia}$  に関する干渉効果係数  $F_{Ia}$ <sup>8)</sup> も示してある。本報においても文献 8) と同様に亀裂と円孔の干渉効果の目安としてこの  $F_{Ia}$  値に注目する。さらに、延性や限界亀裂開口変位に及ぼす板厚の影響に関して考察する目的で Table 3 のような構造用鋼板より Fig. 2 のごとき試験片も製作した。試験片平行部の板厚  $t$  を 6, 14 および 25mm の 3 種類に変えている。

実験では、低温において亀裂と直角方向に一様引張りを加え、亀裂先端部に挿入したクリップゲージにより開口変位を測定した。また、Fig. 1, 2 に示すように試験片の両面において亀裂と反対側の円孔縁に低温用の電気抵抗線ひずみゲージ (G.L. = 1mm) を貼付し、円孔縁における伸び率  $e$  を測定した。そして、測定値  $e$  および FEM による弾塑性計算<sup>9)</sup> によって得た  $\bar{\epsilon}_y/e$  の値を用いて引張力方向ひずみ  $\epsilon_y$  の最小断面における平均値  $\bar{\epsilon}_y$  を求めた。

### 3 亀裂開口変位と伸びの関係

円孔と亀裂が近接して存在し、 $F_{Ia}$  値が大きな場合には初期の負荷段階から円孔側亀裂先端からの塑性域の発達が著しく、比較的低負荷段階で亀裂・円孔間の全断面が降伏する<sup>9)</sup>。このような比較的変形の大きくなる範囲での破壊発生条件として COD 仮説に注目して考察を進める。まず、円孔の近傍に亀裂を有する材の亀裂開口変位と試験片の伸びの関係について考察する。Fig. 3 は  $W=100\text{mm}$  の試験片 type B における円孔側亀裂先端部の開口変位  $\delta$  と伸び率  $\bar{\epsilon}_y$  の関係を示したものである。 $\delta$  は亀裂先端から先端半径に相当する 0.1mm だけ内部に入った位置における開口量とし、クリップゲージ開口変位を FEM 計算結果に基づいて換算して得た値であ

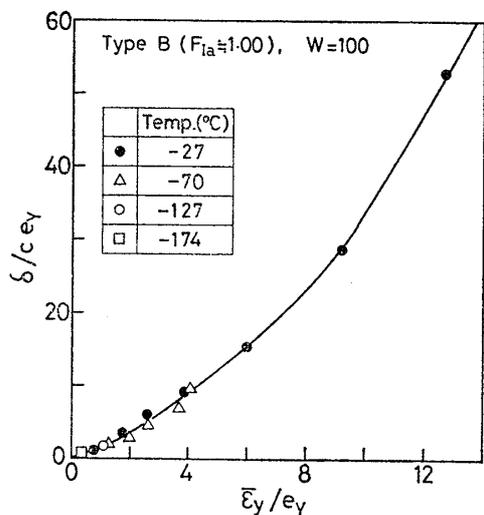


Fig. 3 Relationship between COD  $\delta$  and elongation  $\bar{\epsilon}_y$  in various temperatures

る。図のような無次元化を行えば、 $\delta$  に及ぼす亀裂長さや温度の影響、および  $\bar{\epsilon}_y$  に及ぼす温度の影響をおおよそ取除くことができ、 $\delta$  と  $\bar{\epsilon}_y$  の関係は試験温度にかかわらずほぼ 1 本の曲線で表わすことができる。ただし、 $\epsilon_y = \sigma_y / E$ ,  $\sigma_y =$  降伏応力,  $E =$  ヤング率 である。このようにして得た各 type の試験片における  $\delta$  と  $\bar{\epsilon}_y$  の関係曲線をまとめて描くと Fig. 4 のようになる。円孔側亀裂先端部の開口変位  $\delta$  と伸び率  $\bar{\epsilon}_y$  の関係曲線は  $F_{Ia}$  値との間に特定の関係を有せず、すべての type の試験片に対してあるばらつき幅をもった曲線群によって表わされるようである。

$W=160\text{mm}$  のように板幅が大きい場合には Fig. 4 に示した  $W=100\text{mm}$  の場合と同様に  $\delta$  と  $\bar{\epsilon}_y$  の関係は円孔の有無や  $F_{Ia}$  値との間に特定の関係を有せず、あるばらつき幅を有する曲線群になる。しかしながら、 $W=80\text{mm}$  のように板幅が極めて小さくなると、円孔近傍に亀裂を有する場合には、円孔がなく亀裂のみの場合よりも同一の  $\delta$  に対して  $\bar{\epsilon}_y$  は小さくなり、かつ、この

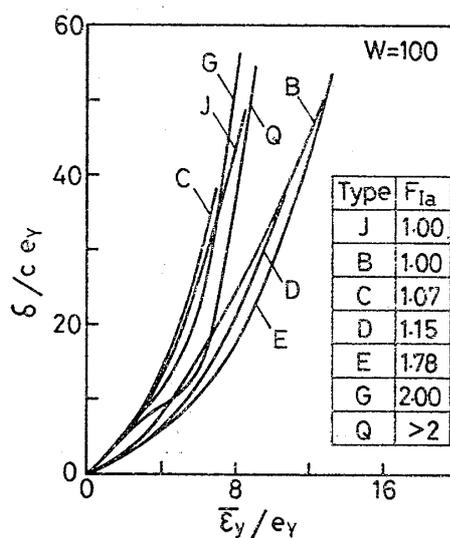


Fig. 4 Relationships between COD  $\delta$  and elongation  $\bar{\epsilon}_y$  in various  $F_{Ia}$  values

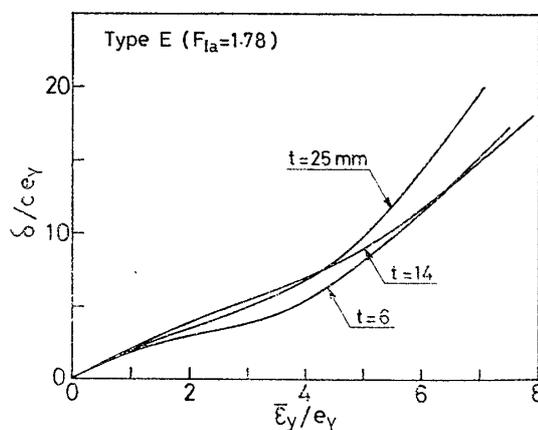


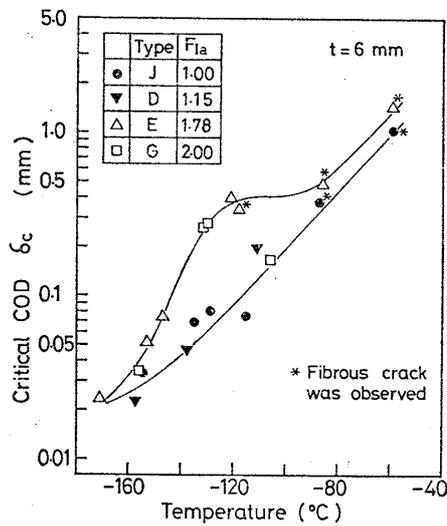
Fig. 5 Relationships between COD and elongation for different plate thicknesses

傾向は  $F_{Ia}$  値が大きいほど顕著となることが認められた。

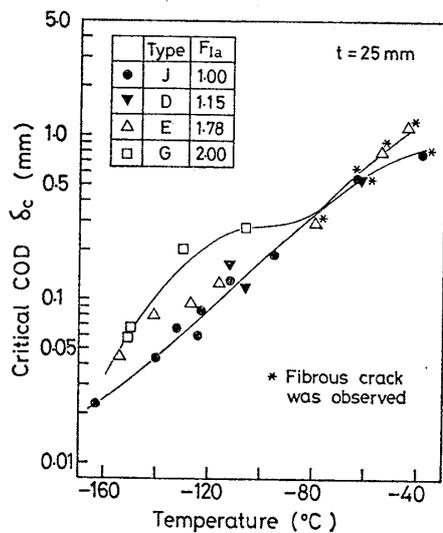
同一 type の試験片において  $\delta$  と  $\epsilon_y$  の関係を板厚の異なる場合について示すと Fig. 5 のようになる。この関係曲線には板厚による有意差はほとんど認め難い。図には示さないが、 $\epsilon_y$  は同一負荷応力において板厚が薄いほど大きくなることが認められた。このことと、 $\delta$  も同一負荷応力において板厚が薄いほど大きくなる<sup>9)</sup> ことから、Fig. 5 のような現象を理解することができる。

#### 4 限界亀裂開口変位

Fig. 6 は各 type における円孔側亀裂先端部の限界亀裂開口変位  $\delta_c$  と温度の関係を示したものである。 $\delta_c$  は板厚の大小にかかわらず、文献 8) で明らかにしたと同様に  $F_{Ia}$  値が大きい場合 (type



(a)  $t=6$  mm



(b)  $t=25$  mm

Fig. 6 Relationships between critical COD and temperature in different thicknesses

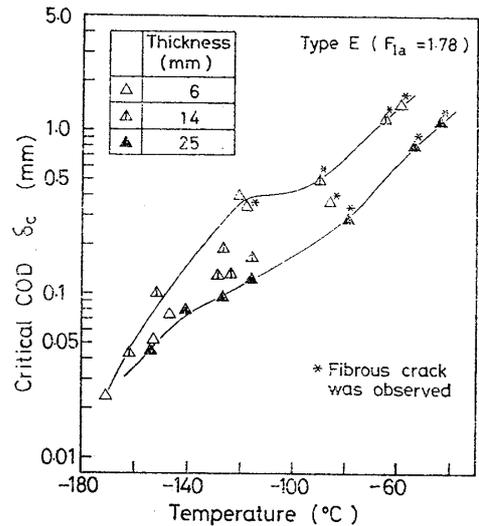
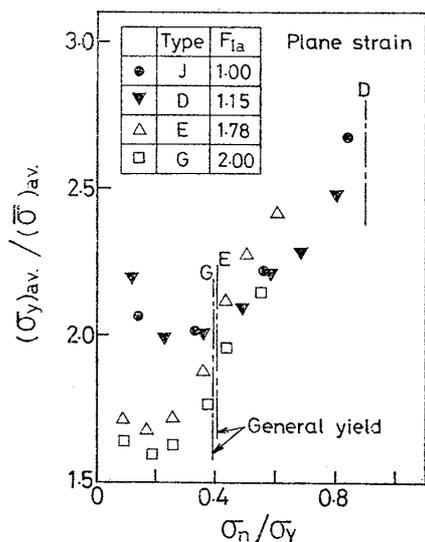


Fig. 7 Thickness effect on critical COD

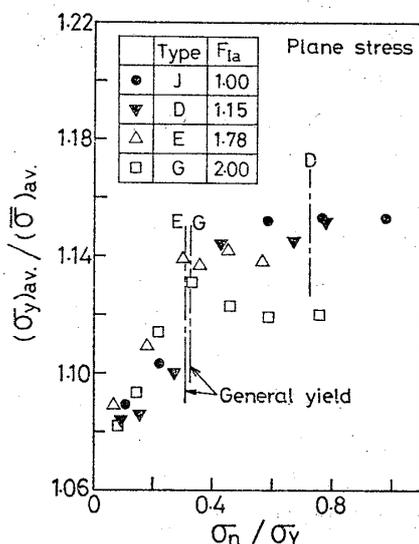
E, G) には円孔がなく単一亀裂のみの場合 (type J) や、 $F_{Ia}$  値が小さい場合 (type D) よりも大きくなっている。また、 $\delta_c$  の上限曲線と下限曲線の差は全般的に厚板の場合の方が薄板の場合より小さくなる傾向が見られる。 $F_{Ia}$  値が大きな type E において各板厚での  $\delta_c$  を比較すると Fig. 7 のようになる。 $\delta_c$  は  $t=25$  mm の厚板において最小となり、板厚がこれより薄くなると増大することが明らかである。 $F_{Ia}$  値が小さい場合および単一亀裂のみを有する場合には、 $\delta_c$  に及ぼす板厚の影響は傾向的にはほぼ同様であったが、板厚による  $\delta_c$  の差は  $F_{Ia}$  値が大なる場合ほどには顕著ではなかった。

$F_{Ia}$  値が大きい場合の  $\delta_c$  が単一亀裂のみの場合に比べて大きくなることは亀裂先端近傍の多軸応力度に関連していることを既に明らかにした<sup>8)</sup>。文献 8) では二軸応力度について考察したが、ここでは多軸応力度を表わすものとして、亀裂の延長線上において亀裂先端から 1mm の領域における引張力方向の応力  $\sigma_y$  の平均値  $(\sigma_y)_{av.}$  と同一領域における相当応力  $\bar{\sigma}$  の平均値  $(\bar{\sigma})_{av.}$  の比  $(\sigma_y)_{av.}/(\bar{\sigma})_{av.}$  をとり上げる。Fig. 8 は平面ひずみおよび平面応力としての FEM 計算結果を用いて各 type における  $(\sigma_y)_{av.}/(\bar{\sigma})_{av.}$  を示したものである。図には各 type において亀裂・円孔間の全断面が降伏する点を全面降伏 (general yield) と定義し、その負荷段階を一点鎖線で示している。いま、目安として各 type と、この全面降伏以前を平面ひずみに近い状態、それ以後を平面応力に近い状態と考えれば、すべての負荷段階において、 $F_{Ia}$  値が大きい場合の多軸応力度  $(\sigma_y)_{av.}/(\bar{\sigma})_{av.}$  は単一亀裂のみの場合あるいは  $F_{Ia}$  値が小さい場合のそれより小さくなる。また、Fig. 8 によると、同一 type における多軸応力度は当然ではあるが平面ひずみの場合の方が平面応力の場合に比べて著しく大きい。

このような場合の限界 COD の大きさは、二次元的な



(a) Plane strain



(b) Plane stress

Fig. 8 Triaxialities of stresses in crack tip zone for different  $F_{Ia}$  values

亀裂と円孔の干渉効果および板厚効果の重畳効果によって決定されと考えられる。 $F_{Ia}$  値が大きいほど、一般に亀裂先端近傍の多軸応力度は小さく、かつ、より低い負荷段階において亀裂・円孔間が全面降伏に至る。 $F_{Ia}$  値が大きい場合において、薄板でかつ、亀裂・円孔間の全面降伏以後であれば、板厚方向の変形拘束は小さく、干渉効果が顕著となり、 $\delta_c$  の上昇が著しくなるであろう。このような理由から Fig. 6 のように一定板厚においては  $F_{Ia}$  値が大きいほど一般的に  $\delta_c$  は大きくなる。この傾向は極めて低温で変形がほとんどない領域および高温で変形の著しい領域を除いた部分、すなわち、降伏応力前後で破断する領域 (Fig. 6 で約  $-120^\circ\text{C}$  前後) において著しい。一方、一般的に板厚  $t$  が大きいほど亀裂先端近傍の多軸応力度は大きくなり、したがって変形

拘束が大きいために  $\delta_c$  は減少する。さらに、 $F_{Ia}$  値が大きい場合には一般に亀裂先端から円孔縁までの距離  $d$  が小さいために、板厚の絶対値はたとえ同じ  $t$  であっても、亀裂・円孔間のいわば相対的板厚  $t/d$  は大きくなる。したがって  $F_{Ia}$  値が大きい場合にはたしかに平面内での干渉効果も大きい、一方、板厚がある程度大きく、かつ、亀裂・円孔間の全面降伏以前においては  $F_{Ia}$  値が小さい場合よりも亀裂先端近傍での板厚方向の変形拘束、したがって多軸応力度は大きくなると考えられる。このような理由から Fig. 7 のように同一 type において  $\delta_c$  に及ぼす板厚効果は  $F_{Ia}$  値が大きいほど顕著となる傾向にあり、さらに、Fig. 6 に見るように  $F_{Ia}$  値の違いによって生じた  $\delta_c$  の上限曲線と下限曲線の差は板厚が厚いほど小さくなるものと思われる。

### 5 破壊延性

伸び率  $\epsilon_y$  の破断時における値  $(\epsilon_y)_f$  と温度の関係を各 type について示すと Fig. 9 のようになる。ただし、図は  $W=100\text{mm}$  の場合である。 $(\epsilon_y)_f$  はすべての type について温度の上昇とともに大きくなるが、同一温度においては、円孔近傍に亀裂を有する場合の  $(\epsilon_y)_f$  は単一亀裂のみの場合 (type J) のそれよりもつねに大きく、さらに、 $F_{Ia}$  値が大きくなると ( $F_{Ia} \geq 1.78$ ),  $F_{Ia}$  値が小さい場合よりも  $(\epsilon_y)_f$  は大きくなっている。ただ、各 type において亀裂長さが異なるので、各 type の亀裂と同一長の亀裂のみを有する場合の  $(\epsilon_y)_f$  を次のようにして推定し、円孔近傍に同じ長さの亀裂を有する各 type の  $(\epsilon_y)_f$  と比較してみる。すなわち、Fig. 4 に示した (COD-伸び) 関係曲線のうち、亀裂のみを有する type J の場合の曲線、および type J の限界 COD を用いて、各 type の亀裂と同じ長さの亀裂のみを有する場合の  $(\epsilon_y)_f$  を推定すると図中に示した曲線のようになる。この推定曲線は C, E, G の 3 type に対応する場合につ

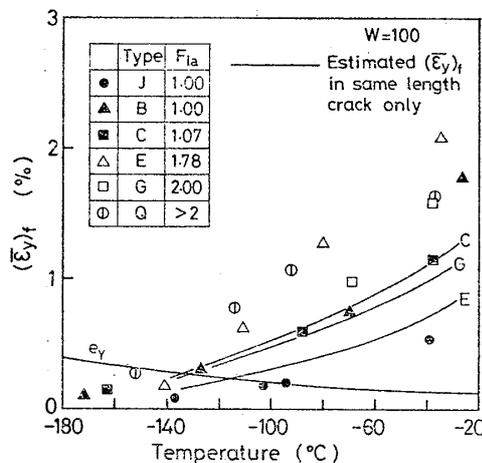


Fig. 9 Effect of interaction on fracture strains  $(\epsilon_y)_f$  ( $W=100\text{mm}$ )

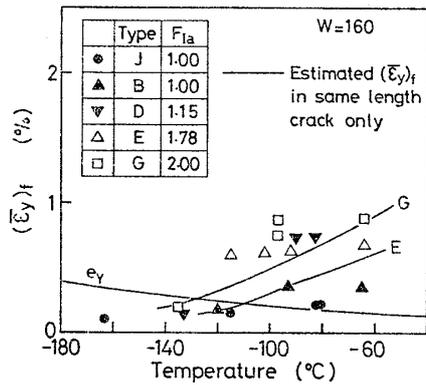


Fig. 10 Effect of interaction on fracture strains  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  in the case of large plate width

いて示しているが、図によると円孔近傍に亀裂を有する場合の  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  の実験値は、同一長の亀裂のみを有する場合の  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  と比較すると、 $F_{Ia}$  値が小さい場合 (type C) にはほぼ同程度の値となるが、 $F_{Ia}$  値が大きい場合にはつねに大きくなっている。Fig. 10 は  $W$  が 160mm の場合について Fig. 9 と同様に  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  と温度の関係を示したものである。 $(\bar{\epsilon}_y)_f$  の絶対値は板幅が大きくなるにつれて減少する傾向にあるが、 $W=100$ mm の場合と同様に円孔近傍に亀裂を有する場合の  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  はこれと同一長の亀裂のみを有する場合のそれよりつねに大きくなっている。しかし、図には示さないが  $W=80$ mm の場合には必ずしも (円孔+亀裂) の場合の  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  が亀裂のみの場合より大きいとはいえず、ほぼ同程度の値となることが認められた。しかし、本報における  $W=80$ mm のような case は実構造物を考える限り、対象外とみなしてさしつかえないであろう。すなわち、亀裂や円孔の寸法に比べて板幅がある程度以上大きい場合には、円孔近傍に亀裂を有する場合の破壊延性  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  は同一長の亀裂のみを有する場合のそれよりも大きいといえる。

Fig. 11 は同一 type の試験片について破断時におけ

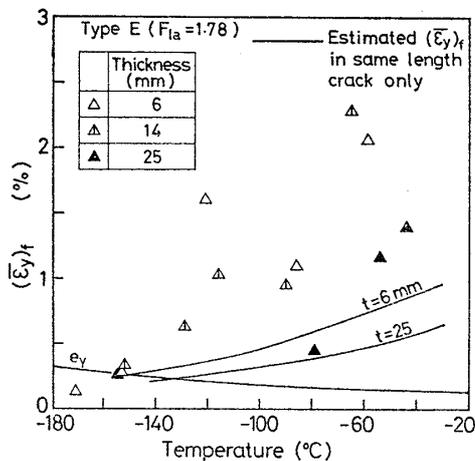


Fig. 11 Thickness effect on fracture strains

る伸び率  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  に及ぼす板厚の影響を示したものである。板厚 25mm において  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  は最も小さく、板厚がこれより薄くなると  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  は大きくなっている。このことは、Fig. 5 のような (COD-伸び) 関係曲線に関する板厚効果と、Fig. 7 のような  $\delta_c$  に対する板厚効果を考え合わせることによって理解される。また、既述のように円孔近傍に亀裂を有する材の  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  は同一長の亀裂のみの場合より大きいことが板厚にかかわらず認められる。

既述のように (円孔+亀裂) の数倍程度の領域のひずみに対応するものとして伸び率  $\bar{\epsilon}_y$  に関して考察してきた。ところで、比較的大型の実構造物においては、より普遍的な変形能力を表わすものとして、欠陥を含む十分に大きな標点距離間の伸び率、すなわち overall strain に注目することも重要となろう。このようなひずみには標点距離の大きさが影響するが<sup>9)~7)</sup>、広幅の切欠材で標点距離が切欠長さの 10 倍以上であればほぼ overall strain を評価できることが示されている<sup>7)</sup>。また、通常の低強度鋼材で切欠長さに比べて十分に広幅の平板が長さ  $2c$  の貫通切欠を有する場合には、overall strain  $e_{ov}$  と亀裂開口変位  $\delta$  の関係は

$$\left. \begin{aligned} \delta/2\pi c e_Y &= \frac{1}{2} (e_{ov}/e_Y)^2 & (e_{ov} < e_Y) \\ \delta/2\pi c e_Y &= e_{ov}/e_Y & (e_{ov} \geq e_Y) \end{aligned} \right\} (1)$$

とほぼみなしてよいことが J 積分の応用と実験によって得られている<sup>2),7)</sup>。

本実験において、 $W$  が 100 および 80mm の場合は欠陥寸法に比べて板幅がそれほど大きくないので、いわゆる試験片全断面が降伏する general yielding での破壊を呈するとは思われない。そこで  $W=160$ mm の場合で、しかも各 type の亀裂長さの 10 倍以上となる標点距離 320mm について破断時の overall strain  $(e_{ov})_f$  を求めてみる。各 type の亀裂と同一長の亀裂のみを有する場合の  $(e_{ov})_f$  は、式 (1) および亀裂のみを有す

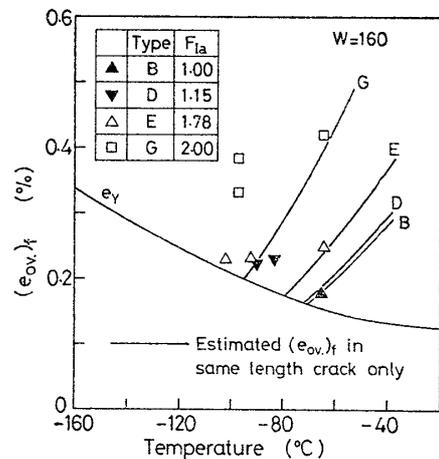


Fig. 12 Effect of interaction on fracture overall strains

る場合 (type J) の限界 COD を用いて算定することができる。また、円孔近傍に亀裂を有する各 type の  $(e_{ov})_f$  は破断時の円孔縁伸び率  $e$  の測定値および、FEM 計算結果に基づく  $e$  と  $e_{ov}$  の関係を用いて求めた。Fig. 12 はこのようにして求めた円孔近傍に亀裂を有する各 type の破壊 overall strain の実験値と、各 type の亀裂と同一長の亀裂のみを有する場合の破壊 overall strain の推定曲線を比較したものである。ただし、図は  $(e_{ov})_f > e_Y$  の場合に限っている。円孔の近傍に亀裂を有し、 $F_{Ia}$  値が比較的大きい場合の破壊 overall strain は同一長の亀裂のみを有する場合のそれよりもつねに大きいことがわかる。破壊延性に関するこのような傾向は既述のような  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  を対象にしたときの傾向と全く同様である。すなわち、伸びを表わすものとして  $\bar{\epsilon}_y$  を考えるにしろ、あるいは overall strain をとり上げるにしろ、円孔の近傍に亀裂を有する材の破壊延性は同一長の亀裂のみを有する場合のそれより大きいといえる。

## 6 結 論

(1) 伸びを表わすものとして引張力方向ひずみの最小実断面における平均値  $\bar{\epsilon}_y$  を用いると、板幅が極めて小さい場合を除けば、円孔の近傍に亀裂を有する材の亀裂開口変位  $\delta$  と伸び率  $\bar{\epsilon}_y$  の関係は円孔の有無や  $F_{Ia}$  値との間に特定の関係を有せず、すべての type についてあるばらつき幅をもった曲線群によって表わされる。また、 $\delta$  と  $\bar{\epsilon}_y$  の関係には板厚の違いによる有意差がほとんど認められない。

(2) 円孔の近傍に存在する亀裂の限界開口変位  $\delta_c$  は、一定板厚においては、単一亀裂のみの場合より一般に大きく、 $F_{Ia}$  値が大きいほど大きくなる傾向がある。一方、 $F_{Ia}$  値が同じでも、板厚が薄いほど  $\delta_c$  は一般に大きくなり、この  $\delta_c$  に及ぼす板厚効果は  $F_{Ia}$  値が大きいほど顕著となる傾向がある。このような  $\delta_c$  に関する現象は、 $F_{Ia}$  値によって表わされる二次元的な亀裂と円孔の干渉効果と亀裂と円孔間の相対的板厚効果の重畳効果によって決定されると考えられる。

(3) 破壊延性として破断時における  $\bar{\epsilon}_y$  の値  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  をとり上げると、板幅が極めて小さい場合を除けば、円孔近傍に亀裂を有する材の  $(\bar{\epsilon}_y)_f$  は、 $F_{Ia}$  値が小さい場合には同一長の亀裂のみを有する場合とほぼ同程度の値となるが、 $F_{Ia}$  値が大きい場合にはこれよりつねに大きい。また、亀裂や円孔の寸法に比べて板幅が十分大きい場合には、円孔の近傍に亀裂を有する材の破壊 overall strain は同一長の亀裂のみを有する場合のそれよりつねに大きい。さらに、破壊延性は、一般に板厚が薄いほど大きい。

## 参 考 文 献

- 1) W. Soete, R. Denys: Acceptability of Defects in Plates Loaded Beyond General Yield, I. I. W. Doc. X-837-76 (1976).
- 2) 佐藤, 豊田, 伊藤, 川口, 有持, 鈴木, 多々良: 切欠をもつ鋼材の破壊遷移現象と破壊 overall strain に及ぼす諸因子の影響, 日本造船学会論文集, 第142号 (1977), 148.
- 3) 佐藤, 豊田, 伊藤: 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, 第141号 (1977), 289.
- 4) 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.
- 5) A. A. Wells: Application of Fracture Mechanics at and Beyond General Yielding, British Welding Journal, 9 (1963), 563.
- 6) F. M. Burdekin, M. G. Dawes: Practical Use of Linear Elastic and Yielding Fracture Mechanics with Particular Reference to Pressure Vessels, I. I. W. Doc. X-641-71 (1971).
- 7) 佐藤, 豊田, 伊藤: 切欠材の全面降伏後の切欠先端近傍の変形挙動と overall strain, 日本造船学会論文集, 第142号 (1977), 141.
- 8) 佐藤, 豊田, 小田: 円孔の近傍に亀裂を有する材の脆性破壊挙動に及ぼす干渉の影響, 日本造船学会論文集, 第143号 (1978), 419.
- 9) 佐藤, 豊田, 小田: 円孔の近傍に亀裂を有する材の脆性破壊挙動におよぼす板厚の影響, 溶接学会全国大会講演概要, 第21集 (1977), 136.