

(昭和 52 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

破壊発生における延性-脆性遷移と亀裂端の 変形挙動との関連について

正員 大塚 昭 夫* 正員 宮 田 隆 司*
正員 西 村 誠 二*

Fracture Toughness and the Transition in Fracture Initiation Mode in Low
and Medium Strength Steels

by Akio Otsuka, *Member* Takashi Miyata, *Member*
Seiji Nishimura, *Member*

Summary

The effects of specimen thickness on the fibrous/cleavage transition in the mode of fracture initiation were investigated. Tests were made on five low and medium strength steels, using 3 point bend specimens. The temperature at which the above transition occurs increases with the increase in specimen size and takes the upper limiting value when the plane strain state develops at the notch tip in the midthickness region, which was confirmed from observing the distribution of the stretched zone depth along pre-crack front. A region of constant stretched zone depth, whose deformation state was assumed to satisfy plane strain condition, was observed in the midthickness region in the specimens which showed the upper limiting transition temperature, while in other cases the stretched zone depth usually showed convex parabolic distribution.

As the specimen size requirement to give this upper limiting value of the transition temperature in the mode of fracture initiation, the formula

$$a, B, W-a > 0.4 \frac{\delta_i E}{\sigma_Y R}$$

is proposed, where a is crack length, B thickness, $W-a$ uncracked ligament, δ_i COD at fibrous crack initiation, σ_Y yield stress, and R the ratio of the yield strength to the ultimate tensile strength.

1 緒 言

低中強度構造用鋼における予亀裂からの破壊発生は、高温域では延性亀裂 (Fibrous Crack) により、低温域では劈開亀裂 (Cleavage Crack) により起こることはよく知られている。この破壊発生様式の延性-脆性遷移はまた亀裂端の塑性拘束の増大によっても促進される。構造用鋼の破壊靱性はこの遷移温度を境として急激に変化する。破壊発生様式の延性-脆性遷移温度を T_i とよぶことにすると、 T_i 以下の温度では靱性が急激に低下するので、その鋼材の使用環境下における T_i が構造物の最低使用温度設定の際の一つの目安となると考えられる。破壊発生が延性亀裂で起こる T_i 以上の温度域では破壊発生時の COD, δ_i は試験片形状^{1)~5)}、温度^{5), 6)}、荷

重速度⁶⁾等に依存しない安定した値をとる。したがって構造用鋼の靱性はこれら T_i と δ_i という二つの特性値によって代表させることができる。

T_i と δ_i によって靱性を表わす際に問題となるのは、 T_i が材料定数でなく、試験片寸法、荷重速度などに依存するという事実である。試験片寸法、板厚の増大に伴う T_i の上昇は亀裂端の塑性拘束 (例えば $\sigma_{\max}/\tau_{\max}$) の増大によるものであろう。したがって破壊が最初に発生する板厚中心部が平面歪状態に到達するような試験片寸法、板厚に対応して、遷移温度 T_i に上限が存在すると考えられる。そのような T_i (平面歪遷移温度) は、材料定数と考えて良いと思われる (ただし、荷重速度が大幅に変化すれば当然変化する)。本報告では遷移温度 T_i の板厚依存性を調べ、亀裂端の変形状態を表わすストレッチド・ゾーン深さ (SZD) の板厚方向の分布状態との

* 名古屋大学工学部

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions (%) of steels

Steel	Thickness (as rolled) mm	Yield Strength kg/mm ²	U.T.S. kg/mm ²	Chemical Compositions(%)								
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
SM50C	50	35	54	0.16	0.33	1.40	0.021	0.014	0.02	0.02		
A387B	50	36.1	55.9	0.17	0.25	0.58	0.014	0.009		1.10	0.50	
SM58Q	50	50.0	60.7	0.13	0.42	1.02	0.013	0.005	0.170	0.010	0.250	0.014
HT80	25	77.7	82.9	0.15	0.22	1.00	0.015	0.006	0.017	0.29	0.27	
SM50C	25	34.7	52.2	0.16	0.30	1.40	0.013	0.013	0.013	0.05	0.02	0.02

関連を明らかにし、さらに T_i の上限値 (平面歪 T_i) を与える試験片板厚、寸法の条件を提案した。

2 供試鋼、試験片および実験方法

供試鋼は Table 1 に示す SM 50 C, SM 58 Q, HT 80, ASTM-A 387 B の 4 鋼種、5 種類の鋼である。試験は Fig.1 に示すようにすべて疲労予亀裂付の三点曲げ試験

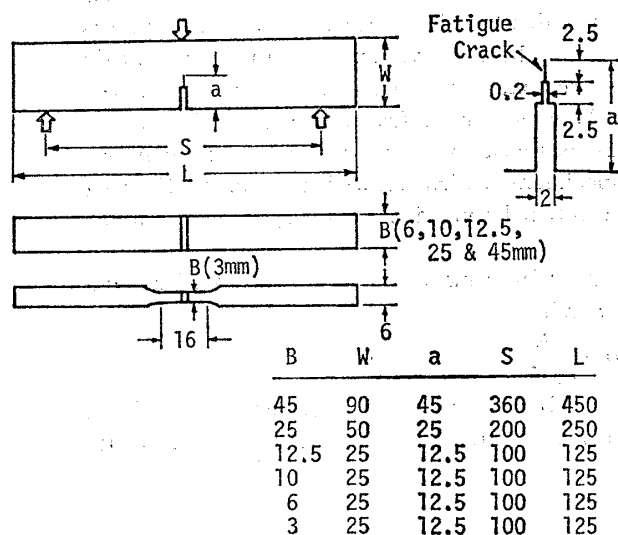


Fig.1 Specimens, dimensions are in mm

によって行なった。板厚効果を調べるため、各鋼種について両面等量切削により減厚した。試験片形状は板厚 45mm, 25mm, 12.5mm については板厚に対して標準寸法となっているが、板厚 10mm 以下の試験片については板厚 12.5mm の試験片と同一形状・寸法とした。COD はクリップゲージによる測定値を各試験片についてあらかじめ求めておいた rotational factor (r) を用いて亀裂先端値 (δ) に換算した。

疲労亀裂と破面との間に観察されるストレッチド・ゾーンと呼ばれる領域は、破壊発生過程において重要な意義を有

し、その深さは COD に対応していることが明らかにされている⁷⁾。そこで亀裂端の局部的変形状態を調べ、かつ rotational factor により換算した COD の値を検証するため走査電顕によりストレッチド・ゾーン深さ (SZD) を測定した。SZD は Fig.2 に示すように走査電顕の試料台に疲労亀裂面が電子ビームの入射方向とほぼ平行になるようににおいて測定した⁷⁾。測定は試料側面から 2mm の位置を始点として、1mm おきの点の各視野で行ない、各視野では三点測定した。また、上下対応する破面では側面から同一距離の各点で測定を行なうようにした。なお、SZD に関する図中、2(SZD)とある値は、上下破面の対応する位置における SZD の和である。

3 実験結果とその考察

3.1 延性亀裂発生

Fig.3 に SM 50 C と A 387 B の各試験片における延性亀裂長さと COD の関係を示す。両者の関係は試験片寸法に依存せず、したがって延性亀裂発生時の COD, δ_i は試験片寸法、板厚に依存しない一定値をとっている。他の鋼についても同様の結果が得られている。ただし、SM 50 C の 6mm 厚試験片にみられるように、板厚の極く薄い試験片では他の厚い試験片に比べ、やや異

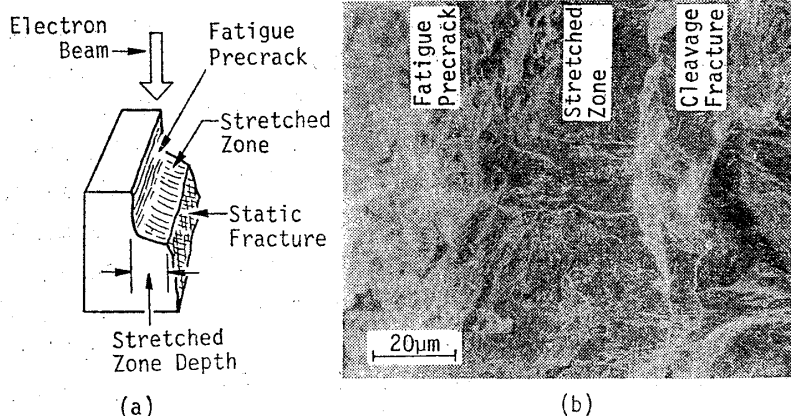


Fig.2 Stretched zone. (a) Measurement of stretched zone depth by SEM. (b) An example of scanning electron micrograph of stretched zone

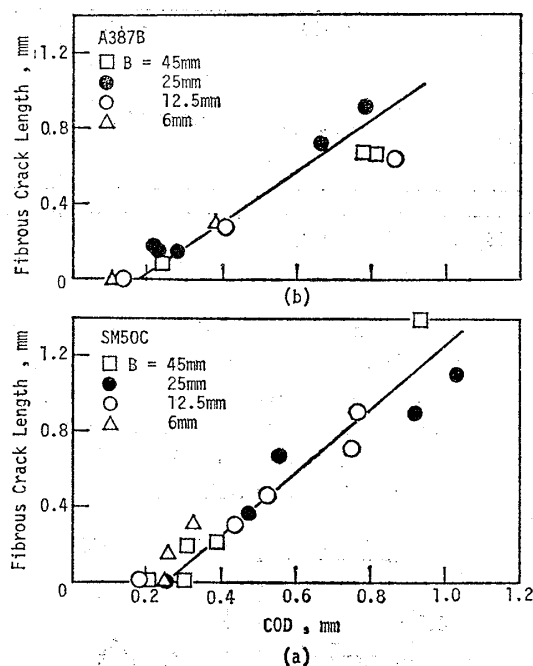


Fig. 3 COD versus fibrous crack length

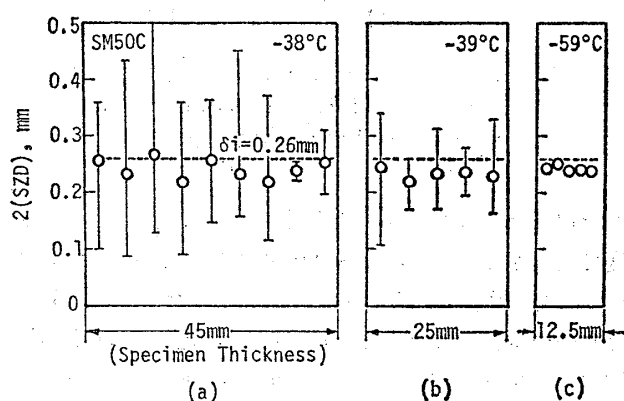


Fig. 4 Distribution of 2 (SZD) along the crack front for SM50C. 2 (SZD) is the sum of the S.Z.D.'s at the mating positions.

- (a) 45mm thick specimen, fibrous crack length=1.45mm
- (b) 25mm thick specimen, fibrous crack length=1.10mm
- (c) 12.5mm thick specimen, fibrous crack length=0.9mm

なった傾向を示している。

Fig. 3 に示した関係から外挿により求めた δ_i の値を検証するため、SZD との対応を調べた。その一例が Fig. 4 で、延性亀裂により破壊が発生した試験片の 2 (SZD) の亀裂前縁に沿う板厚方向の分布を示したものである。2(SZD) の分布は一樣であり、 δ_i に非常に近い値であることがわかる。他の鋼種についても同様の検討を行ない、 δ_i と延性亀裂発生後の破面から観察される 2(SZD) との間に良い対応があることを確認した。

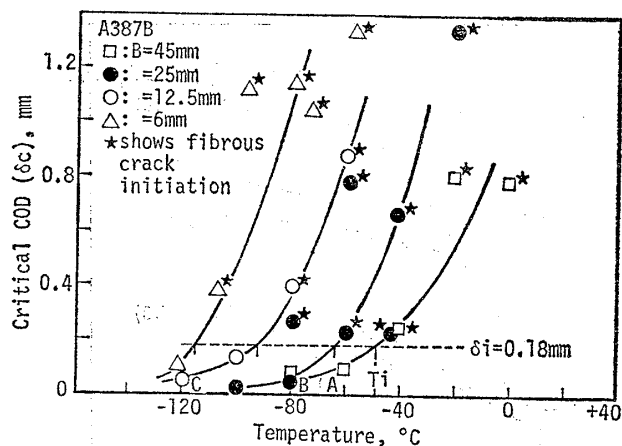


Fig. 5 Variation of critical COD with temperature, A 387 B

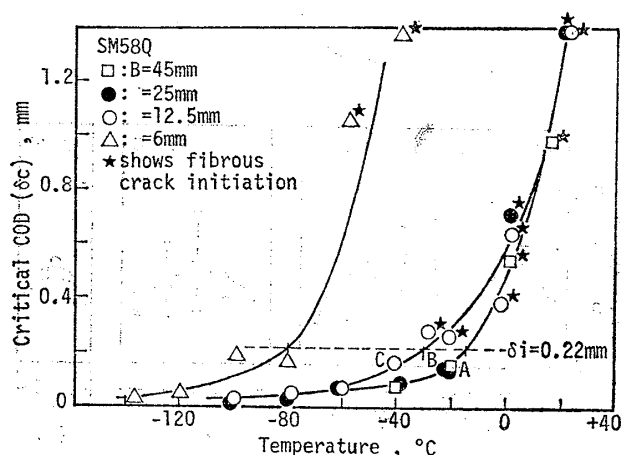


Fig. 6 Variation of critical COD with temperature, SM 58Q

3.2 遷移温度 T_i に及ぼす板厚効果

Fig. 5, 6 に A 387 B と SM 58 Q の不安定破壊時の限界 COD と試験温度との関係を示す。限界 COD (δ_c) が δ_i に一致する温度が、破壊発生の延性-脆性遷移温度 T_i である。板厚、試験片寸法の増大により遷移温度 T_i は上昇するが、その程度は鋼種によってかなり異なるようである。各鋼についてこの T_i に及ぼす板厚の影響をみたのが Fig. 7 である。同図には参考データとして、ASTM A 533 B 鋼に関する結果⁹⁾を引用して示した。Fig. 7 から一般に板厚の増加に伴って T_i は上昇するが、SM 58 Q の 25mm 厚以上、および HT 80 の 10mm 厚以上にみられるように T_i が飽和する現象のあることがわかる。この、 T_i が上限値に達する現象は、前に述べたように、ある板厚以上で、破壊の発生する板厚中心部において変形が平面歪状態となり、亀裂端の塑性拘束が最大値に到達することに対応していると考えられる。 T_i が板厚に依存して変化する領域では、その依存の程度は鋼によってかなり差があり、SM 58 Q, A 387 B, A 533 B では急激に変化している。このような鋼種による顕著

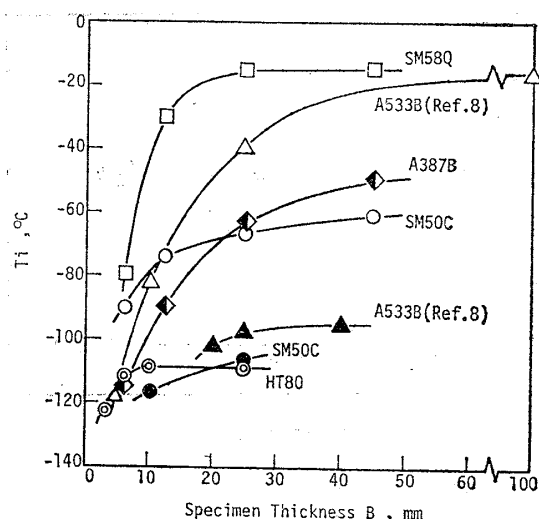


Fig. 7 Variation of T_i with specimen thickness for various steels

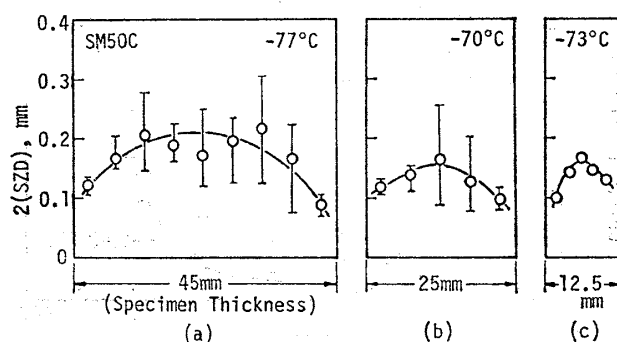


Fig. 8 Distribution of $2(SZD)$ along the crack front for SM 50 C. (a) 45mm thick specimen, (b) 25mm thick specimen, (c) 12.5mm thick specimen

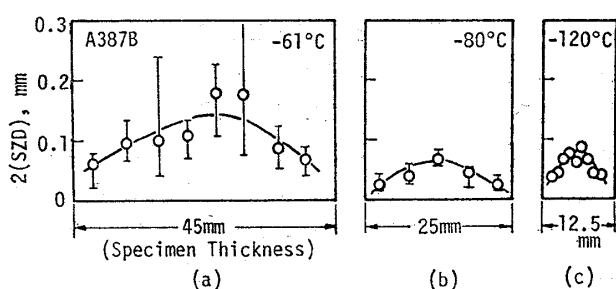


Fig. 9 Distribution of $2(SZD)$ along the crack front for A 387 B. The specimens shown in figures (a), (b) and (c) are indicated in Fig. 5 by the letters A, B and C, respectively. (a) 45 mm thick specimen, (b) 25mm thick specimen, (c) 12.5mm thick specimen

な差は 0.2mm 幅の機械切欠付試験片について報告されている傾向^{9),10)}と異なっている。

T_i の飽和現象と亀裂端の塑性変形挙動との関連を調べる目的で、亀裂前縁に沿う SZD の板厚方向の分布状

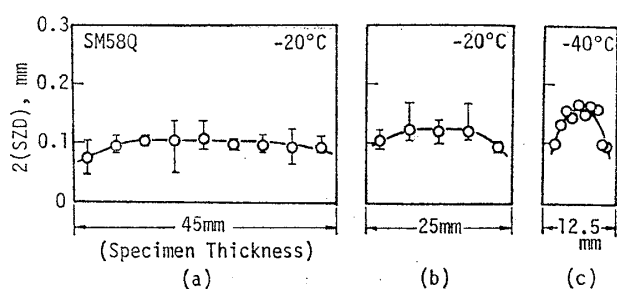


Fig. 10 Distribution of $2(SZD)$ along the crack front for SM58Q. The specimens shown in figures (a), (b) and (c) are indicated in Fig. 6 by the letters A, B and C, respectively. (a) 45 mm thick specimen, (b) 25mm thick specimen, (c) 12.5mm thick specimen

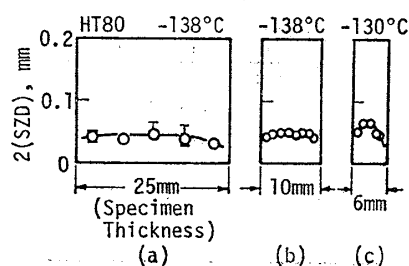


Fig. 11 Distribution of $2(SZD)$ along the crack front for HT 80. (a) 25mm thick specimen, (b) 10mm thick specimen, (c) 6mm thick specimen

態を調べた。Fig. 8~11 に各鋼について、 T_i 以下の温度で破壊させた種々の板厚の試験片で測定された SZD の分布を示す。これらを Fig. 7 に示された板厚効果を参照しつつ検討してみると、 T_i が上限に達している SM 58 Q の 25mm 厚および 45mm 厚試験片、HT 80 の 10mm 厚および 25mm 厚試験片では SZD の分布が板厚中心部で平坦になっているのに対し、それらより板厚の小さい試験片および T_i の飽和現象のみられない他の鋼のすべての試験片においては、板厚中心部で最大となるような山形の分布を示しており、平坦な分布を示す領域がみられないことがわかる。したがって平坦な SZD の分布すなわち一様な変形はその領域が平面歪状態に達していることを示唆するものと考えられる。板厚中心部が平面歪状態となれば、その位置で塑性拘束度 (σ_{max}/τ_{max}) が上限に達するので遷移温度も飽和値をとり、一方、塑性拘束度が平面歪状態よりも小さい場合には、 T_i は塑性拘束度 (板厚) に対応した種々の値をとり、また SZD は山形の分布を示すと結論してよいと思われる。

3.3 遷移温度 T_i に関する平面歪条件

延性-脆性遷移温度 T_i の上限値 (平面歪 T_i) を実験的に求め得る試験片の寸法の満すべき条件を明らかにすることは、実用的に重要なことと思われるので以下これ

について検討する。

K_{IC} における平面歪条件は K_{IC}^2/σ_Y^2 というパラメータによって決定されており、これは小規模降伏時の塑性域の大きさという性格を有している。亀裂端の塑性拘束度は塑性変形の広がり試験片寸法（特に板厚）との相対的な関係に支配されると考え、ここでも $\delta_i E/\sigma_Y B$ なる小規模降伏時には塑性域の大きさを表わす値と板厚との比を基礎パラメータとしてとった。ここで E は弾性定数、 σ_Y は温度 T_i における材料の降伏強さ、 δ_i は延性亀裂発生時の COD、すなわち T_i における限界 COD である。さらに亀裂端の塑性変形には材料の歪硬化特性が関係しているはずで、歪硬化の小さい材料では亀裂端の歪集中が大きく、塑性拘束が大となる傾向にあると思われる。また、降伏を始めてからネッキングを起すまでの歪量が大きい材料ほど破壊発生までの塑性変形量も大きく、したがって塑性拘束度が飽和するのにより大きな板厚を要する傾向を示すことが考えられる。そこで、ここでは、このような材料の変形特性を表わす量として簡単のため降伏比 R (降伏応力/引張強さ) をとり、 $\delta_i E/\sigma_Y BR$ なるパラメータで遷移温度 T_i の板厚効果を調べてみた。Fig. 12 がこのパラメータによって整理した結果である。この図から判断して大略、

$$\delta_i E/\sigma_Y BR < 2 \sim 4 \quad (1)$$

の範囲で T_i は上限値をとるようである。本実験で、 T_i の上限値を与えている試験片もしくはそれに近い試験片では、一部の例外はあるが、試験片寸法は板厚に比例しており、平面歪 T_i を与える試験片寸法の条件としては、(1)式を書き直した下記のような条件で与えられると考えるのが妥当と思われる。

$$a, B, W-a > 0.4 \frac{\delta_i E}{\sigma_Y R} \quad (2)$$

ここで a は亀裂深さ、 W は試験片深さである。

Fig. 13 は本実験に供した材料が (2) 式を満足するときの板厚がその材料の降伏強さ (室温) に応じてどの程度変わるかをみたものである。ただし、 δ_i (および R) が必ずしも降伏強さの関数とはならないので限界板厚が降伏強さによって決まることを意味するものではない。

(2) 式を $J = \lambda \sigma_Y \delta$ の関係を用いて J 積分の形に書く次のようになる。

$$a, B, W-a > \frac{0.4}{\lambda} \frac{J_i E}{\sigma_Y^2 R} \quad (3)$$

ここで J_i は δ_i に対する J 積分値 (延性亀裂発生時の J) である。 λ の値は数多くの研究者が FEM あるいは実験により求めており、たとえば Robinson¹¹⁾ によれば En 24 鋼 ($\sigma_Y = 1025 \text{ MN/m}^2$) では $\lambda = 1$ 、En 32 鋼 ($\sigma_Y = 275 \text{ MN/m}^2$) では $\lambda = 2.6$ である。

小型試験片において破壊発生時の J_{IC} を求め、小型

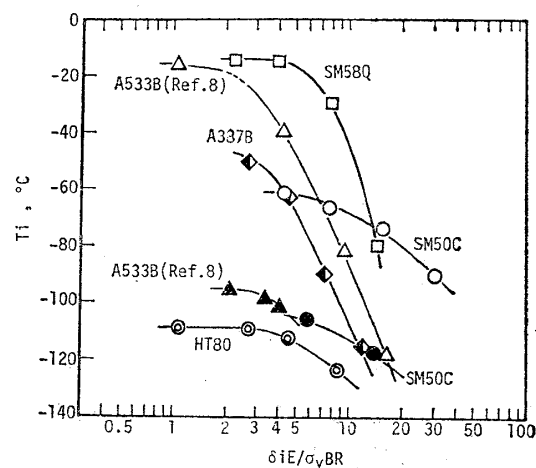


Fig. 12 Variation of T_i with a parameter $\delta_i E/\sigma_Y BR$

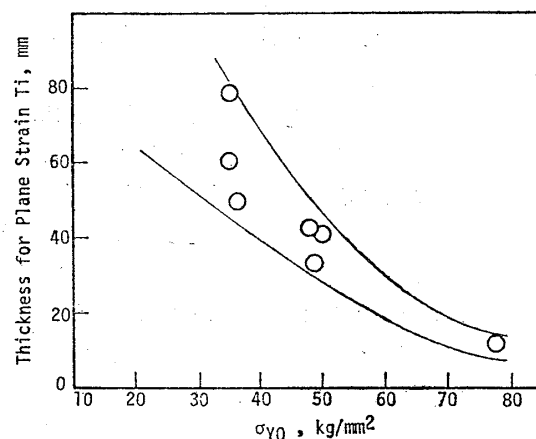


Fig. 13 Estimated thickness for plane strain T_i from eq. (2)

試験では得られない K_{IC} を J_{IC} から評価しようとする試みが最近盛んに行なわれている¹²⁾。その際、 J_{IC} が J_{IC} であるための平面歪条件が提案されているが¹³⁾、 J_{IC} と称されているものが実質的には δ_i に対応するものと考えられ、その J_{IC} を与える条件とされている関係式の意味は、破壊発生がマイクロ・ボイド合体型であるという前提下で δ_i が板厚によらず一定となる条件に対応するものと考えられるのに対し、(3)式は破壊発生がマイクロ・ボイド合体型であるための条件を与えるものであり、基本的意味が異なることに注意する必要がある。Sumpter¹⁴⁾ も指摘しているように、破壊発生時の J_{IC} が常に試験片寸法・形状に依存しないといえるのは、破壊発生がボイドの成長・合体過程による延性破壊 (Fibrous Fracture, Dimpled Fracture) の場合であって、いいかえれば試験温度が平面歪遷移温度 (Plane Strain T_i) 以上のときに初めて J_{IC} が工学的に材料定数的意味をもつといえる (注. δ_i が温度、板厚に対して一定であれば厳密には J_i は一定とはならない)。

構造部材中の先在欠陥の塑性拘束度は通常用いられる

靱性試験におけるそれよりも大きくなりうると予想され、したがって、そのときの T_i もまた通常の靱性試験片より得られる T_i よりも高いことが予想される。しかし、上述の(2)または(3)式を満足する試験片から得られる平面歪 T_i は塑性拘束度が飽和に達した状態における T_i の(上限)値を示すものであるので、構造物中に用いられている状態における T_i もこの値よりは上昇しないことが予想される。したがって、この平面歪 T_i は構造物の安全使用温度の下限値を推定する場合の有力な指標となり得るものと考えられる。ただし、溶接による材質の劣化、環境による脆化、歪速度の影響などは当然別に考慮する必要がある。

また、ここでは平面歪 T_i を与える試験片寸法の満すべき条件を規定する際(1)式左辺のパラメータを提案したが、このパラメータは明確な理論的根拠から決定したものではないので、鋼種が異なった場合なども含めて更に検討する必要がある。

なお、平面歪 T_i を与える最小の試験片寸法は、破壊が最初に発生する“板厚中心部が平面歪に達する条件”に対応するものであるから、板厚の大部分が平面歪状態に達する条件に対応していると考えられる、いわゆる平面歪破壊靱性 K_{IC} に対する条件とは当然異なり、事実、Fig.13 にみられるように平面歪 T_i を求めるための試験片板厚は K_{IC} 条件に比べはるかに緩和されている。しかし、低強度鋼においては、なお決して小さいものではなく、小型試験片によって平面歪 T_i を求める手段についても今後検討する必要がある。

4 結 論

50 kg/mm² 級から 80 kg/mm² 級までの高張力鋼について三点曲げ試験により破壊発生様式の遷移に及ぼす試験片寸法の影響と亀裂端の変形挙動との関連について調べた結果、次のような結論が得られた。

(1) 破壊様式の遷移を伴う構造用鋼の靱性は、遷移温度 T_i と延性亀裂発生時の COD, δ_i とによって評価するのが適切と考えられる。

(2) T_i は試験片板厚の増大に伴って上昇するが、上限値に近づく傾向がある。

(3) T_i の上限値(平面歪遷移温度)は板厚中心部の亀裂端の塑性拘束が平面歪状態に達したときに得られる。このことはストレッチド・ゾーン深さの亀裂前縁に沿う板厚方向の分布状態から確認された。この平面歪遷移温度は材料定数であると考えられる。

(4) 平面歪遷移温度を与える試験片寸法は次のように与えられる。

$$a, B, W - a > 0.4 \frac{\delta_i E}{\sigma_Y R}$$

謝 辞

本研究にあたり、日本造船学会溶接研究委員会第一分科会において種々有益な御討論をいただいた委員長金沢教授はじめ委員各位に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) P. Terry and J. T. Barnby : Determining Critical Crack Opening Displacement for the Onset of Slow Tearing in Steels, Metal Const. and Brit. W.J., 3 (1971), p.343.
- 2) G.D. Fearnough, G.W. Lees, J.M. Lowes and R.T. Weiner : The Role of Stable Ductile Crack Growth in the Failure of Structures, Pract. Appl. of Fracture Mechanics to Pressure Vessel Tech., London (1971), p.114.
- 3) R.F. Smith and J.F. Knott : Crack Opening Displacement and Fibrous Fracture in Mild Steel, Pract. Appl. of Fracture Mechanics to Pressure Vessel Tech., London (1971), p.65.
- 4) C.G. Chipperfield, J.F. Knott and R.F. Smith : Critical Crack Opening Displacement in Low Strength Steels, 3rd Int. Conf. Fracture, Teil II, Munich (1973).
- 5) 大塚, 宮田, 西村, 大橋, 柏木 : 鋼の破壊様式の遷移と COD 説について, 日本造船学会論文集, 第135号 (1974), p.245.
- 6) 金沢, 三波, 宮, 佐藤, 征矢 : 静的 COD および動的 COD に関する一考察, 日本造船学会論文集 第133号 (1973), p.257.
- 7) 大塚, 西村, 宮田, 笠井 : 予き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), p.279.
- 8) 日本溶接協会鉄鋼部会 JI 委員会 : 同委員会資料 JI-No.57, JI-No.73, JI-No.74 (1977).
- 9) 日本溶接協会鉄鋼部会 BE 委員会 : 溶接構造用鋼板ボンド脆化に関する共同研究, BE 委員会共同研究総合報告書 (1975).
- 10) 萩原, 征矢, 三波, 佐藤 : V シャルピー衝撃特性からの脆性破壊発生特性の評価法, 溶接学会誌, Vol.45, No.8 (1976), p.27.
- 11) J.N. Robinson : An Experimental Investigation of the Effect of Specimen Type on the Crack Tip Opening Displacement and J -Integral Fracture Criteria, Int. Jour. Fracture, Vol.12, No.5 (1976), p.723.
- 12) J.D. Landes and J.A. Begley : Test Results from J -Integral Studies : An Attempt to Establish a J_{IC} Testing Procedure, ASTM STP 560 (1973), p.170.
- 13) P.C. Paris : Discussion on "The J Integral as a Fracture Criterion by J.A. Begley and J.D. Landes", ASTM STP 514 (1971), p.21.
- 14) J.D.G. Sumpter : The Prediction of K_{IC} using J and COD from Small Specimen Tests, Metal Science, Vol.10, October (1976), p.354.