CTOD による J_{Ic} の簡易推定法*

河野俊一**, 清水茂俊**, 馬見塚盛芳***

Convenient Method for Estimation of J_{Ic} by CTOD

by Shun-ichi KAWANO, Shigetoshi SHIMIZU, and Moriyoshi MAMIZUKA

The JSME standard (S-001) for determination of J_{Ic} recommended to draw the blunting line or to measure the stretched zone width by an electron microscope. However, this procedure is taken trouble to measure these values. Following the British Standard BS5762, the CTOD value, ϕ_i , at the onset of the ductile fracture is determined by using the CTOD versus fibrous crack extension. Since the fibrous crack extension may be measured by an optical instrument such as a travelling microscope the CTOD procedure is convenient in comparison with the J_{Ic} procedure. It is expected to evaluate J_{Ic} with J -CTOD relationship, if this relation ensures the linear function of CTOD. This paper proposed the method of determining J_{Ic} with J -CTOD relationship. To examine the validity for the evaluation of J_{Ic} by using the proposed method, the fracture toughness tests were performed for HT60, SCW49 and SS41, respectively.

Key Words: Fracture, Material Testing, J -Integral, Crack Tip Opening Displacement (CTOD), Stretched Zone Width (SZW)

1. 緒 言

平面ひずみ弾塑性破壊じん性値 J_{Ic} の試験方法は、すでに ASTM⁽¹⁾および JSME⁽²⁾において規格化され特に後者(S 001 基準)は延性き裂発生点の破壊じん性値の決定に焦点が当てられており、このために鈍化直線あるいはストレッチゾーン幅(SZW)の実測が義務づけられている。しかし、鈍化直線あるいはSZWを求めるためには走査形電子顕微鏡を用いることが必要となるので、S001 基準に基づく J_{Ic} の決定法は工業的にかなり手数がかかるきらいがある。

一方、CTOD 試験方法⁽³⁾は、読取り顕微鏡程度で測定可能な延性き裂進展量と CTOD の関係から延性き裂発生点を推定する方法を採用しており、鈍化直線が必要としないので J_{Ic} 試験に比較して非常に簡便である。そこで、CTOD と J の間に良好な直線関係が成立するならば、延性き裂発生時の CTOD, ϕ_i から J_{Ic} の推定が可能であると考えられる。

以上の観点から、本報は J と CTOD の関係を用いて、簡便かつ比較的精度の良い J_{Ic} の推定法を提案す

るものである。さらに、本方法で求めた J_{Ic} と JSME S001 基準に基づいて決定した J_{Ic} との比較検討を行い、本方法の妥当性を明らかにした。

2. 実験方法

本供試材は、高張力鋼 HT 60、溶接構造用鋼 SCW 49 および構造用鋼 SS 41 であり、納入のまま使用した。各材料の化学成分および機械的性質を表 1～4 に示す。

図 1 に実験に用いたコンパクト引張試験片の形状、寸法を示す。き裂長さ a_0 は $\Delta K = 23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($K_I/E = 0.003 \text{ mm}^{1/2}$) の完全片振り条件で、ロール方向と直角に $a_0/W = 0.5$ まで疲労予き裂を入れ、その後所定の板厚寸法に仕上げた。板厚寸法は、HT 60、SCW 49 および SS 41 に対してそれぞれ 10、40、20 mm と

表 1 HT 60 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.08	0.28	1.33	0.014	0.03	0.25	0.61	0.16
Mo	V	Sol. Al	Ceq				
0.04	0.043	0.055	0.314				

表 2 SCW 49 化学成分 (%)

C	P	S	Ceq
0.22	0.44	0.40	0.43

* 昭和 60 年 4 月 2 日 第 62 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 11 月 5 日。

** 正員、山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台)。

*** 学生員、山口大学大学院。

した。

実験装置の概略を図2に示す。破壊じん性試験は容量20tのクローズドループ形油圧式引張圧縮疲労試験機を用い、ピン間の変位速度が約1mm/h一定となるようにして行った。

CTOD法による J_{Ic} の評価は、図3に示すように行った。すなわち、

(1) JSME 基準に従って破壊じん性試験を行い、 J 値および延性き裂進展量を測定する。なお、 J 積分値の算出には、Merkle-Corten の簡便式⁽⁴⁾を用いた。また延性き裂進展量は、板厚の3/8、4/8および5/8の位置で測定した。

(2) 図4に示すように、シリコンゴムによってき裂先端近傍の破面の変形形状を型取りする⁽⁵⁾。次にこれを延性き裂進展量の測定位置で薄くスライスして、その断面を精密万能投影機によって観察することによってCTODを測定する。ここで、CTODは図4に示すように A と B を加え合せたものとする。

(3) CTODと延性き裂長さの関係を用い、外挿法によって延性き裂発生時のCTOD、 ϕ_i を推定する。次に J とCTODの関係式に ϕ_i を代入することによって、 J_{Ic} を決定する。

表3 SS41 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.16	0.19	0.58	0.012	0.093

表4 機械的性質

Material	Yield Stress (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation (%)
HT60	554	633	16.8
SCW49	250	442	27.0
SS41	250	411	38.8

図1 試験片形状および寸法

3. 実験結果および考察

図5(a)~(c)に各供試材のCTODと延性き裂進展量の関係を示す。図5より明かなように、CTODはき裂進展量の増加とともに大きくなる傾向にあり、HT60、SCW49およびSS41に対してそれぞれ0.188、0.42および0.30mmが得られた。

図6に J とCTODの関係を示す。いずれの材料も J とCTODの間に良好な直線関係が成り立っており図6に図5から求めた ϕ_i を代入すると、 J_{Ic} はHT60、SCW49およびSS41では、それぞれ192.1 kJ/m²、210.6 kJ/m²および135.4 kJ/m²となった。

JSME S 001では J_{Ic} 決定方法として J - R 曲線およびSZW法を規格化している。そこで、本研究で提唱したCTODによる J_{Ic} の簡便推定法とこれらの方法によって求めた J_{Ic} の比較を行ってみることにする。

図7に、 J と安定き裂進展量 Δa の関係を示す。な

図2 実験装置概略図

図3 J_{Ic} 評価線図

図4 CTOD測定方法

お Δa は SZW をも含めた値であり、走査形電子顕微鏡を用いて求めた値である。図 7 より J_{IC} は HT 60, SCW 49 および SS 41 でそれぞれ 196.3 kJ/m^2 , 222.0 kJ/m^2 および 156.0 kJ/m^2 と求めることができる。ここで $\times$ 印を付けた記号は、上述の破壊じん性試験基準に合致しない実験値であり、これらの実験値は J_{IC} の決定には採用しなかった。

図 8 にフリクトグラフィの一例 (SCW 49) を示す。

図 5 CTOD と延性き裂長さの関係

図 6 J と CTOD の関係

図 9 に、 J と SZW の関係を示す。なお、SZW は JSME S 001 基準にしたがって測定しており、また図中 $\bullet$ 印は延性き裂発生前を、 $\circ$ 印は延性き裂発生後を示す。図 9 より J_{IC} は HT 60, SCW 49 および SS 41 でそれぞれ 322.8 kJ/m^2 , 231.0 kJ/m^2 および 168.5 kJ/m^2 と求めることができる。

表 5 に、 J_{IC} に対する CTOD 法、 J - R 曲線法および SZW 法の実験結果を示す。CTOD 法は、 J - R 曲線法による J_{IC} 値に比べてやや低い値を示すが、その違いは HT 60 において約 2%, SCW 49 で約 5%, SS 41

図 7 J と Δa の関係

図 8 フラクトグラフィ

表 5 J_{IC} 試験結果

Material	J_{IC} (KJ/m ²)		
	Proposed method	J-R curve method	SZW method
HT60	192.1	196.3	322.8
SCW49	210.6	222.0	231.0
SS41	135.4	156.0	168.5

(a) HT 60

(b) SCW 49

(c) SS 41

図 9 J と SZW の関係

では約 13 % となり, J - R 曲線法で得た結果に近い評価値が得られた。これに対して SZW 法による J_{IC} 値は, CTOD 法および J - R 曲線法によって求めた J_{IC} 値に比べてやや高い値を示している。

図 10 に HT 60, SCW 49 および SS 41 に対する SZW と $1/2$ CTOD の関係を示す。限界 SZW より推定した ϕ_c は, 図 5 に示す CTOD 法より得られた ϕ_c より大きい値を示している。

4. 結 言

本報で提案した CTOD 法の妥当性を, J - R 曲線法と SZW 法との比較により明らかにするために, CT

図 10 $1/2$ CTOD と SZW の関係

試験片を用いて破壊じん性試験を行った結果, 次のような結果を得た。

(1) 本報で提案した CTOD 法による破壊じん性値 J_{IC} 値は, J - R 曲線法で得られた J_{IC} に比較的良好一致し, また, 実験方法も JSME S001 基準と比較して非常に簡便である。

(2) SZW 法による J_{IC} は, 本報で使用した材料のいずれの実験結果についても CTOD 法および J - R 曲線法による結果と比べてやや高い値を示した。

文 献

- (1) 日本機械学会基準・弾塑性破壊じん性 J_{IC} 試験方法, JSME S001(昭 56), 日本機械学会。
- (2) ASTM E339, Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, (1978), ASTM.
- (3) Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing, DD 19(1972), BSI.
- (4) Merkle, J. G., and Corten, H. T., Trans. ASME, J. Press. Vessel Technol. Ser. J, 94-4 (1974), 286.
- (5) 永井・ほか 6 名, 日本造船学会論文集, 132(昭 47), 405.

討 論

〔質問〕 大塚尚武〔千代田化工建設(株)〕

(1) 現状の J_{Ic} 試験法は鋼の場合上部棚温度域でしか適用できないが、図 7(c)の R 曲線と鈍化直線のこう配の差が小さいことや、図 9(a), (b)で延性き裂発生後の SZW が J に対して必ずしも一定でないという現象は遷移温度域で観察されている(付1)ことから、試験温度が遷移温度域にないことを確認する必要があると思われる。試験中にへき開破壊やポップインが観察されたものが全くなかったのかお聞きしたい。

(2) ご提案の方法では、CTOD と延性き裂量の関係から ϕ_i を求め、次に CTOD と J との関係から J_{Ic} を求めておられるが、 J と延性き裂量が求まっているのなら両者の関係から J_{Ic} を求める(付2)ほうが直接的で CTOD を測定する手間も省けてよいのではないか。

〔回答〕 (1) SS 41 および HT 60 の遷移温度

は、それぞれ約 -40°C および -50°C であった。また、本実験に用いたいずれの試験材料も、へき開破壊やポップインは観察されなかった。

(2) $J-\Delta\bar{a}$ (延性き裂進展量) 曲線のこう配が小さい場合については、ご指摘のとおりである。しかし、本報告の図 7 に見られるように、材質によっては $J-\Delta\bar{a}$ 曲線のこう配が大きくなり、このために延性き裂発生点の決定が困難になる場合がある。これに対して、CTOD- $\Delta\bar{a}$ 曲線のこう配は、 $J-\Delta\bar{a}$ 曲線のこう配と比較して小さくなるので、より正確に延性き裂発生点を推定できると考えられる。したがって、 J と CTOD の間に良好な直線関係が存在するならば、本方法は $J-\Delta\bar{a}$ 曲線から直接 J_{Ic} を求める方法に比べ、より精度よく J_{Ic} を推定できると思われる。

(付1) 大塚, 材料, 33-368(昭59-5), 510.

(付2) 岩館・ほか4名, 機講論, No.760-9(昭51-7), 159.