限界ストレッチゾーン幅と引張特性を用いた オーステナイト系ステンレス鋼の破壊じん性評価*

鳥丸 忠彦^{*1}, 杉山 正成^{*2}, 板谷 雅雄^{*3}, 越石 正人^{*4}

Fracture Toughness Estimation of Austenitic Stainless Steel Using Critical Stretched Zone Width and Tensile Properties

Tadahiko TORIMARU^{*1}, Masanari SUGIYAMA,
Masao ITATANI and Masato KOSHIISHI

^{*1} Toshiba Corporation, Power Systems Company, Isogo Nuclear Engineering Center, System Design & Engineering Dept., Material Engineering Group
8, Shinsugita-Cho, Isogo-Ku, Yokohama, 235-8523 Japan

Austenitic stainless steel has high fracture toughness. Generally, large CT specimen over 1.5TCT is needed to obtain valid elastic-plastic fracture toughness, J_{IC} , due to the high toughness. The good relationship between J_{IC} and stretched zone width was reported, however, the application was considered to be restricted to the case of large specimen which satisfied plane strain condition. In this study, in order to obtain the similar value of J_{IC} in the case of small CT specimen which was judged invalid in ASTM E1820, adding the tensile properties as parameter to J_{IC} estimation was tried. J_{IC} tests of SUS304 and SUS316L were performed according to ASTM E1820-06 with varying the parameter of the cold-work degree and specimen size. Specimen size, stretched zone width, tensile properties and J_Q were analyzed, and the model to estimate valid J_{IC} from J_Q was proposed. Regression analysis was carried out using the parameter of stretched zone and tensile properties. Based on the proposed equation, J_{IC} was successfully estimated from J_Q with the small deviation within 10% in all size of CT specimen.

Key Words : Fracture Toughness, Critical Stretched Zone Width, Tensile Properties, Austenitic Stainless Steel

1. 緒 言

靱性の高いオーステナイト鋼のような材料の J_{IC} 試験では, CT 試験片に荷重を負荷して開口すると, 疲労予き裂先端に応力が集中して先端が塑性変形によって鈍化し, その後塑性限界に達するとディンプルを形成しながら破壊を開始し, 延性き裂が進展を開始する. 疲労予き裂先端の塑性変形による鈍化の結果として, 疲労予き裂と延性き裂の間に組織を引き延ばしたような無特徴の領域 (ストレッチゾーン) が形成される. ストレッチゾーンを破面真上から観察したときに測定される投影幅は限界ストレッチゾーン幅 (SZW_C) と定義されており, Kobayashi ら⁽¹⁾ は, 合金鋼, 銅合金, チタン合金およびアルミ合金などについて, SZW_C と J_{IC}/E (E : ヤング率) との間に $SZW_C = 89J_{IC}/E$ の普遍的な直線関係があることを報告している. この関係は SZW_C を用いた単一試験片による J_{IC} 評価を可能にするものであるが, 現状では平面ひずみ判定条件を満足する場合にのみ適用できると考えられている. また, Torimaru ら⁽²⁾ は SUS304 冷間加工材の CT 試験片寸法, J_Q および SZW_C を用いて Invalid と判定される試験片から J_{IC} を予測する方法を提案し, $\pm 20\%$ の精度で予測可能としているが, 鋼種が限定されている. 本研究では, 単一試験片の SZW_C や機械的性質から有効な破壊じん性値を精度良く予測するため, 従来データ⁽³⁾ に 12% 冷間加工した SUS316L のデータを加え, 寸法の異なる CT 試験片の J_{IC} 試験および破面の詳細 SEM 観察から SZW_C を求めてデータベースを拡充し, SZW_C , 引張特性をパラメータにしたフィッティング式を検討し, 十分な試験片寸法が取れず, $J-R$ 曲線から有効な J_{IC} を得られない場合でも, 鋼種に依存しない高精度の J_{IC} 予測方法を提案する.

* 原稿受付 2012 年 12 月 20 日 改訂原稿受付日 2013 年 5 月 30 日

^{*1} 東芝 電力システム社 礪子エンジニアリングセンター 原子力システム設計部
(〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8)

^{*2} 日本核燃料開発 (株) 研究部 (〒311-1313 茨城県東茨城郡大洗町成田町 2163)

^{*3} 正員, 東芝 電力システム社 金属材料開発部

^{*4} 日立 GE ニュークリアエナジー 原子力サービス部 (〒317-0073 茨城県日立市幸町 3-1-1)
(現 日本核燃料開発 (株))

E-mail: tadahiko.torimaru@toshiba.co.jp

2. 試験方法

2・1 材料

今回追加した材料は溶体化処理した SUS316L であり, これを室温にて 12%冷間加工した. 文献データ⁽²⁾と合わせて各材料の化学成分と引張特性を表 1 に示す. これらの材料の Valid な破壊じん性値 J_{IC} の範囲は 126~797kJ/m² である.

Table 1 Chemical compositions (wt%) and mechanical properties

Type	The Degree of Cold Work	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	$\sigma_{0.2\%}$ (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	Elongation (%)	J_{IC} (kJ/m ²)
SUS304	5%	0.050	0.50	0.90	0.032	0.003	8.06	18.19	-	255	455	38.1	797
	10%	0.050	0.53	0.86	0.028	0.002	8.14	18.31	-	405	551	27.2	491
	20%	0.046	0.48	1.29	0.032	0.003	8.20	18.20	-	586	678	11.9	126
SUS316L	12%	0.008	0.53	1.06	0.025	0.001	12.08	17.06	2.18	421	491	19.9	555

2・2 J_{IC} 試験と $SZWC$ 測定

前述の材料から 0.25~1.5T の標準寸法の CT 試験片を製作し, ASTM E1820-01 に準拠して大気中で疲労予き裂導入後, 288℃大気中の J_{IC} 試験を行った. 試験後, 室温にて試験片を疲労破断させ, 破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察し, 限界ストレッチゾーンを図 1 に示すように写真撮影した. 画像処理により板厚の中央付近 (板厚の 1/4 幅) の限界ストレッチゾーンの面積を求め, 測定幅で除して $SZWC$ を求めた.

Fig 1 Fracture surface after J_{IC} test

3. 試験結果と J_{IC} 予測式作成

図 2 は, CT 試験片の破壊靱性値と試験片幅の関係である. 5%冷間加工 SUS304 はすべて Invalid と判定され, 10%冷間加工 SUS304 および 12%冷間加工 SUS316L は試験片幅 50.8mm まで Invalid となった. いずれも試験片幅の増加とともに J_Q 値が増加する傾向がある. 0.25TCT まですべて Valid と判定された 20%冷間加工 SUS304 は試験片幅依存性が見られず, ほぼ一定となっている.

今回用いた冷間加工 SUS304 と 316L の J_Q 値と J_{IC} の相関を図 3 に示す。 $J_Q=J_{IC}$ と $J_{IC} \pm 20\%$ のラインを併記している。 20%冷間加工 SUS304 はすべて Valid であるため、ほぼ J_{IC} の一般的なばらつき範囲 $\pm 20\%$ 内にあるが、それ以外は Invalid 判定の小さい試験片のデータを含んでいるため、 J_{IC} から大きく乖離しているデータが複数見られる。

図 4 は、CT 試験片の SZW_C と試験片幅の関係を示す。 J_{IC} 、 J_Q と同様に SZW_C も試験片幅の増加とともに増加する傾向が見られており、 SZW_C と J_{IC} 、 J_Q 値の間に相関があることがわかる。

SZW_C による J_{IC} 予測値 ($SZW_C \times E/89$) ⁽²⁾ と J_{IC} の関係を図 5 に示す。 平面歪み条件を 20%冷間加工 SUS304 以外は満足しないことから、 20%冷間加工 SUS304 以外の予測値は J_Q と同様に J_{IC} から大きく乖離しているデータが複数見られる。 この結果より、 従来の平面歪み条件を満足する場合の予測式を用いて SZW_C だけで Invalid 判定される試験片の J_{IC} を $\pm 20\%$ 程度の精度で予測することはできないと考えられる。

Fig. 2 Specimen width dependence of fracture toughness

Fig. 3 Deviation of J_Q from J_{IC}

Fig. 4 Specimen width dependence of SZW_C

Fig. 5 Deviation of $SZW_C \times E/89$ from J_{IC}

SZW_C の他に破壊じん性値に影響するパラメータとして、引張特性がある。き裂の進展のしやすさは、材料強度 (0.2%耐力、引張強さ) と伸びと密接な関係があると考えられ、特に伸びが大きい材料はじん性が高いと考えられる。今回の冷間加工 SUS304 および 316L の破壊じん性試験データベースを用い、破壊じん性値に影響すると考えられる複数のパラメータ、 SZW_C 、試験片幅 (W)、試験片厚さ (B)、0.2%耐力 ($\sigma_{0.2}$)、引張強さ (σ_{UTS})、伸び (EL)

を用いた J_{IC} に対する回帰分析を行い、予測式 $J_{estimate}$ を導出した。パラメータは J_{IC} と相関があるとされる SZW_C 以外を無次元化した。試験片幅、試験片厚さは、それぞれ Valid な値が得られている 1.5TCT の試験片幅 W_0 、試験片厚さ B_0 で除して無次元化した。き裂先端での応力集中により塑性変形が開始し、塑性限界に達してき裂が進展を始めるまでの抵抗は、加工硬化による応力増加分（0.2%耐力と引張強さの差）に対応すると仮定し、引張強度と 0.2%耐力の差をヤング率 E で除して無次元化した。伸びが大きいくほど J_{IC} は大きくなる傾向があったことから、無次元の伸びはそのままパラメータとして採用した。 SZW_C は従来の文献⁽¹⁾を参考に $SZW_C \times E$ をパラメータとして使用した。回帰分析の結果、以下の式が得られた。

$$J_{estimate} = 1.994 \times SZW_C \times E + 54.5 \times \frac{W}{W_0} - 74.1 \times \frac{B}{B_0} - 589600 \times \frac{(\sigma_{UTS} - \sigma_{0.2})}{E} + 3513 \times EL \quad (1)$$

ここで、各パラメータの単位は、 SZW_C : m, W, B : m, $\sigma_{0.2}, \sigma_{UTS}$: MPa である。ヤング率 E は 176500 MPa とした。

図 6 に、(1)式による $J_{estimate}$ を J_{IC} に対してプロットしたものを示す。図 3、図 4 に示したような $J_{IC} \pm 20\%$ を超える乖離はなくなり、 $J_{IC} \pm 10\%$ 以内の範囲に収まる結果となった。なお、20%冷間加工材の乖離は $\pm 10\%$ を超えているが、すべて Valid と判定されていることから、本予測の対象外とする。以上より、(1)式により Invalid と判定される試験片寸法からも、Valid 相当の破壊じん性値が予測可能と考えられる。

Fig. 6 Deviation of $J_{estimate}$ from J_{IC}

4. 結 言

冷間加工した SUS304 および SUS316L の J_{IC} 試験を行い、破面の限界ストレッチゾーン、試験片寸法、引張特性をパラメータとした J_{IC} 予測式を作成した。その結果、SUS304、SUS316L の冷間加工材で J_{IC} が 126~797 kJ/m² の範囲において、Invalid と判定され、 J_Q 値が J_{IC} から 20%以上乖離していた小さい寸法の試験片からも $\pm 10\%$ 以内の精度で Valid 相当の J_{IC} を予測できる見込みを得た。

文 献

- (1) Kobayashi, H., Nakamura, H., and Nakazawa, H. "Comparison of J_{IC} Test Methods Recommended by ASTM and JSME", *Elastic-plastic Fracture Test Methods*, ASTM STP 856, 1985, pp.3-22.
- (2) Torimaru, T., et al., "Fracture Toughness Estimation for Small CT Specimen of Austenitic Stainless Steels Using Stretched Zone Width", *Proceedings of 17th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE17-75233, 2009.