遷移温度域での破壊じん性の簡易決定法†

岩 館 忠 雄* 竹 俣 裕 行** 劉 世 程***

Simplified Method for Determination of Fracture Toughness in Transition Temperature Region

by

Tadao IWADATE*, Hiroyuki TAKEMATA** and Shicheng LIU***

The fracture toughness K_{Jc} values of small specimens in the transition temperature region were analyzed to confirm the offset method standardized by JSPS 129 Committee. The offset method is a very useful method for the determination of lower-bound fracture toughness K_{JcI} of material especially in the lower shelf temperature region where the stable crack growth is smaller than about 0.2 mm. The K_{JcI} values obtained from the offset method showed a good agreement with the K_{Jc} values of large specimens per ASTM E399 and the K_{JcI} value from the fractography method standardized by JSPS 129 Committee.

Key words : Elastic-plastic fracture, Fracture toughness, Transition region, J-integral, Testing technique

1 緒 言

材料の破壊じん性の測定方法には、上部棚温度域においては、JSME S001 および ASTM E813 の J_{Ic} 試験法があり、遷移温度域においては、ASTM E399 の K_{Jc} 試験法がある。ここで、遷移温度域を考えると、大形試験片を用いた K_{Jc} の測定は、試験費用や試験片採取などの問題があり、破壊じん性の測定が不可能な場合が多い。一方、小形試験片による破壊じん性の測定は、 J_{Ic} 試験の適用などが検討されているが、得られる破壊じん性のばらつきが大きいという問題がある^{1)~3)}。

最近、日本学術振興会第 129 委員会(委員長 横堀武夫)においては、小形試験片を用いて遷移温度域における破壊じん性の最小値を求める標準試験法として、試験片の破面観察に基づいたフラクトグラフィ法、また簡易決定法としてのオフセット法を提案している^{4),5)}。本研究は、その学振第 129 委員会の推奨するオフセット法の提案の背景となった研究であり、その研究内容について取りまとめ報告する。

2 試験材および試験方法

Table I に本研究で使用した原子炉圧力容器用鋼の A508C1.3 鋼および A533B 鋼の機械的性質を示す。ここで、両鋼はともに学振第 129 委員会および米国の MPC (Material Properties Council) によって実施され

た国際共通試験に用いられた試験材であり、A533B 鋼は不純物元素量を調整し、じん性値を極度に低くした材料である^{4),5)}。また、本研究で提案したオフセット法と大形試験片による K_{Jc} 試験の結果との比較には、Table I に示すロータ材の A470Ni-Cr-Mo-V 鋼を使用した。

試験片は 1T-CT 試験片を主に、20% のサイドグループを付与した 0.5T, 1T, 2T, 4T, 6T の CT 試験片を使用した。疲労予き裂は $a_0/W=0.50\sim0.65$ (a_0 : 予き裂長さ, W : 試験片幅) とし、JSME S001 および ASTM E813 に従い挿入した。

試験は、変位制御によって試験片に荷重を負荷し破壊させた。試験片の個数は一温度につき 5 個以上とした。破壊じん性 K_{Jc} は荷重-荷重点変位曲線から破壊時の J 積分を算出し、次式により K_{Jc} に変換した。

$$K_{Jc} = [J_c E / (1 - \nu^2)]^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。

3 遷移温度域での破壊じん性特性

3・1 破壊じん性特性

Fig. 1 は国際共通試験での日本側の研究機関によって得られた A508C1.3 鋼の破壊じん性試験の結果を示したものであり^{4),5)}、Fig. 2 は著者らの自主研究によって得られた A533B 鋼の共通試験材の結果を示したものである。破壊じん性 K_{Jc} のばらつきは両鋼とも高温側で大きく、

Table I. Mechanical properties of the steels used.

Steels	σ_{ys} (MPa)	σ_{TS} (MPa)	El. (%)	R. A. (%)	FATT (°C)	NDTT (°C)	CVN-us (J)
A508C1.3	456	599	24.8	75.9	-15	-30	245
A533B	504	692	20.2	52.0	50	—	70
A470	644	766	23.5	63.0	-2	—	165

† 原稿受理 平成 7 年 10 月 27 日 Received Oct. 27, 1995

* 正 会 員 (株) 日本製鋼所研究開発本部 〒183 府中市日鋼町, Res. & Development Headquarters, The Japan Steel Works, Ltd., Nikko-cho, Fuchu, 183

** (株) 日本製鋼所室蘭研究所 〒051 室蘭市茶津町, Muroran Res. Lab., The Japan Steel Works, Ltd., Chatsu-machi, Muroran, 051

*** 大連鉄道学院 大連市黄河路 (現在 東北大学工学部), Dalian Railway Inst., Huanghe Road, Dalian, China

Fig. 1. Fracture toughness K_{JC} values as a function of temperature for A508C1.3 steel.

Fig. 2. Fracture toughness K_{JC} values as a function of temperature for A533B steel.

かつ試験片寸法が小さくなるにつれて、ばらつきは大きくなる結果を示している。

Fig. 4 は破壊じん性のばらつきを検討するために、学振第 129 委員会じん性試験小委員会において解析された結果の一例である。すなわち、破壊した試験片の破面を観察し、Fig. 3 に示す安定き裂長さ Δa_0 、安定き裂先端からトリガーポイントまでの距離 X および $\Delta a_0 + X$ を測定し、破壊じん性 K_{JC} 値との関係で示したものである。破壊時の K_{JC} 値は Δa_0 、 X 、および $\Delta a_0 + X$ と良い相関にあり、破壊じん性 K_{JC} のばらつきは Δa_0 、 X 、 $\Delta a_0 + X$ の大きさによって支配されていることがわかる^{6),7)}。この事実は後述の 4・1 節に示す学振第 129 委員会の標準試験法の一つであるフラクトグラフィ法の基礎となっている。

3・2 破壊じん性のばらつきとその下限値

Fig. 5 は疲労き裂を付与した大形試験片および小形試験片を荷重した場合の破壊過程を示したものである。荷重の上昇にともないき裂先端はすべり鈍化し、やがてその鈍化域前方にボイドが発生する。ボイドはその後の荷重で合体し安定き裂が発生する。安定き裂の発生後に、さらに荷重すると安定き裂は進展し、ある長さになった

Fig. 3. Schematic representation of Δa_0 , X and $\Delta a_0 + X$.

Fig. 4. K_{JC} vs. Δa_0 , K_{JC} vs. X and K_{JC} vs. $\Delta a_0 + X$ relationships.

Fig. 5. Fracture process around a crack tip.

時に材料の不均一性に基づく最弱部を起点（トリガーポイント）として、急速破壊を起こす。したがって、破壊じん性のばらつきは、その急速破壊に至るまでに発達した安定き裂長さ Δa_0 、およびトリガーポイントまでの距離 X 、 $\Delta a_0 + X$ の差によって生ずる^{6),7)}。

ここで、小形試験片の場合には、破壊のトリガーポイントとなる材料の最弱部が疲労予き裂前縁に含まれる確率は小さく、またき裂先端周りの塑性拘束が小さいために、大きなばらつきを示す^{1),2)}。一方下部棚温度域を除く遷移温度域においては試験片寸法が大きくなり十分な平面ひずみの条件が満足されるようになるにつれ、急速破壊の開始点はFig. 5 にみるように安定き裂の発生とはほぼ時期を同じくして起こり、破壊じん性のばらつきは小さく

なる。このようなき裂先端での破壊過程から、破壊じん性の最小値は安定き裂の発生開始時の破壊じん性によって定義されている。¹⁾⁻³⁾

4 フラクトグラフィ法によるデータ解析

4.1 フラクトグラフィ法の概要

学振第129委員会の標準試験法の一つであるフラクトグラフィ法の手順を以下に示す。⁴⁾⁻⁷⁾

(1) 6個の試験片を用いて所定の温度で破壊じん性試験を行なう。

(2) 試験片の破面の観察を行ない、ぜい性破壊の特徴であるシェブロンパターンを逆にたどりながら破壊の起点であるトリガーポイントを見つける。

(3) トリガーポイントおよびそのライン上で疲労予き裂の前縁を含むように、走査型電子顕微鏡を用いて拡大写真を撮影し、Fig. 3に示すように安定き裂長さ Δa_0 、安定き裂先端からトリガーポイントまでの距離 X 、および $\Delta a_0 + X$ を測定する。

(4) Fig. 6の一例に示すように、 K_{JC} と $\Delta a_0 + X$ の関係のグラフ、同様に K_{JC} と Δa_0 の関係、 K_{JC} と X の関係のグラフを作成する。

(5) 測定点にフィットするように直線近似を行ない、 $\Delta a_0 = 0$ 、 $X = 0$ 、 $\Delta a_0 + X = 0$ で定義される縦軸との交点 K_{JCIQ} を決定する。

(6) その際、 Δa_0 、 X 、 $\Delta a_0 + X$ の最小値を示すデータ点 Δa_{0min} 、 X_{min} 、 $\Delta a_0 + X_{min}$ は最大値を示すデータ点 Δa_{0max} 、 X_{max} 、 $\Delta a_0 + X_{max}$ の1/2の値以下の範囲に入っていないといけない。

(7) また、直線近似から最も離れた点の K_{JC} 値が、その直線とデータ点との差が K_{JC} 値（実線上の値）の $\pm 15\%$ 以上離れている場合には、そのデータ点を除いて再度直線近似し、得られた直線と縦軸との交点を K_{JCIQ} とする。ここで、直線近似のために必要なデータ数は4個以上とする。

(8) このようにして決定される Δa_0 、 X および $\Delta a_0 + X$ に対応した K_{JCIQ} 値の最小値が上記(6)、(7)の条件を満足する場合において、破壊じん性の最小値として有効な K_{JCI} 値と定義する。

4.2 フラクトグラフィ法の問題点

Fig. 7 (a) は -50°C 、 -75°C 、 -100°C で得られた A508C1.3 鋼の K_{JC} と Δa_0 の関係および K_{JC} と $\Delta a_0 + X$ の関係、および Fig. 7 (b) は 25°C 、 0°C 、 -25°C で得ら

Fig. 6. Measurement of K_{JCI} using the fractography method.

れた A533B 鋼の K_{JC} と Δa_0 の関係および K_{JC} と $\Delta a_0 + X$ の関係をまとめて示したものである。いずれの試験温度においても K_{JC} と Δa_0 および $\Delta a_0 + X$ の関係は明瞭に観察され、破壊じん性 K_{JC} の大きさやばらつきは安定き裂長さ Δa_0 およびトリガーポイントまでの距離 $\Delta a_0 + X$ の大きさに支配されていることがわかる。

ここで、学振第129委員会のフラクトグラフィ法を考えると、下部棚温度域や A533B 鋼のように安定き裂長さ Δa_0 が小さい場合には、その適用は精度上多分に問題がある。すなわち Δa_{0max} が小さい場合には、Fig. 7にみるように、 K_{JC} と Δa_0 の関係は鈍化曲線上に位置することがあり、 K_{JC} と Δa_0 の関係を直線近似し、 $\Delta a_0 = 0$ によって決定される K_{JCI} 値は大きなばらつきを与え、場合によっては K_{JCI} 値がゼロになることも予想される。また Δa_0 が小さい場合には、 X および $\Delta a_0 + X$ の値も極めて小さく、 K_{JC} と X および K_{JC} と $\Delta a_0 + X$ との関係から K_{JCI} を決定することは極めて難しい。さらに、試験片によっては、破壊の起点であるトリガーポイントを見つけるためのシェブロンパターンが観察されない場合がある。

Fig. 8はそのようなフラクトグラフィ法の測定精度を検討するために、学振第129委員会の共通試験によって

(a) A508C1.3 steel.

(b) A533B steel.

Fig. 7. K_{JC} vs. Δa_0 and K_{JC} vs. $\Delta a_0 + X$ relationships.

Fig. 8. Scatter of dK/da at different temperatures.

得られた A533B 鋼の試験結果において、各研究機関の K_{Jc} と Δa_0 の関係図の勾配 dK/da を温度ごとに示したものである。低温になるに従い dK/da の勾配は各研究機関によって大きくばらついている。

Fig. 9 はそれらの dK/da を安定き裂長さの最大値 Δa_{max} との関係でプロットし直したものである。ここで、図中には A508C1.3 鋼の結果もあわせて示した。勾配 dK/da のばらつきは、明らかに Δa_{max} が小さくなるにつれて大きくなることを示している。フラクトグラフィ法においては、勾配のばらつきは得られる破壊じん性 K_{Jc} 値のばらつきを大きく支配する。したがって、試験片に観察される安定き裂の長さが小さく、また起点までの距離 $\Delta a_0 + X$ が小さい場合には、他のデータ解析の方法が必要である。

5 オフセット法によるデータ解析

5.1 オフセット法の提案

本研究の提案するオフセット法は、Fig. 6 のフラクトグラフィ法において K_{Jc} と Δa_0 の関係の勾配 dK/da あるいは J_c と Δa_0 の関係の勾配 dJ/da を一定と仮定し、破壊じん性の最小値を求める簡便法である。本方法は走査型電子顕微鏡 (SEM) による破面の観察が不要であり、除荷コンプライアンス法を用いることにより、 K_{Jc} 値あるいは J_{cI} 値を容易に決定することが可能である。以下にその手順を示す。

(1) 上部棚温度域において、J 積分と安定き裂長さ Δa_0 との関係で示される J - R 曲線を求め、Fig. 10 (a) に示すように $\Delta a_0 = 0.2 \text{ mm}$ の位置で原点から R 曲線への接線と平行にオフセット線を引く。ここで、 J - R 曲線の代りに、 K_J と Δa_0 の関係で示される K - R 曲線を用いても良い。

(2) オフセット線と J - R 曲線あるいは K - R 曲線との交点で、 R 曲線に対する接線を引く、その傾き n を求める。

(3) 遷移温度域の所定の試験温度で 6 個の試験片を用

Fig. 9. Relationship between dK/da and Δa_{max} . Fig. 10. Representation of the offset method using slope n of R -curve.

いて破壊じん性破壊を行ない、 J_c と Δa_0 の関係あるいは K_{Jc} と Δa_0 の関係を求める。

(4) 得られた J_c と Δa_0 の関係あるいは K_{Jc} と Δa_0 の関係の図において、Fig. 10 (b) のように傾き n に等しい直線を各データ点を通るように引き、縦軸との交点が最も小さい値を示す J_{cI} あるいは K_{JcI} 値を破壊じん性の最小値と定義する。

(5) ここで、上部棚温度域での R 曲線の測定が不可能な場合には、所定の試験温度において、除荷コンプライアンス法を用いて、 J - R 曲線あるいは K - R 曲線を逐次計測しながら試験片を荷重し破壊させる。

(6) Fig. 11 に示すように、 J - R 曲線に対して一定の

傾き $n=400 \text{ J/m}^3$ を持つ直線, あるいは $K-R$ 曲線に対して等価な $n=300 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{mm}$ の直線を, 破壊した試験片の個々の K_{Jc} 点を通るように引く。

(7) これらの直線と縦軸との交点の中で, 最も小さな値を示す J_c 値あるいは K_{Jc} 値を, 破壊じん性の最小値 J_{ci} あるいは K_{Jci} と定義する。

ここで, フラクトグラフィ法およびオフセット法のデータ解析方法の選定は, 安定き裂の大きさによって選定される。すなわち, 安定き裂長さが最も大きい試験片の $\Delta a_{\max}$ が, き裂の鈍化曲線式

$$\Delta a_s = [(1-\nu^2)/2\sigma_y E] K_{Jc}^2 \quad (2)$$

により計算される Δa_s の2倍以上の場合にはフラクトグラフィ法を用い, $\Delta a_{\max}$ が $2\Delta a_s$ よりも小さい場合にはオフセット法を用いる。

5.2 オフセット法の検討

オフセット法を適用する場合, 上部棚温度域に対して 0.2 mm のオフセット線を引き, 勾配 n を求めることとしているが, この 0.2 mm オフセット線の妥当性について検討する。

Fig. 12 は 38 種類の材料の上部棚温度域での $K-R$ 曲線において, $0.1, 0.2, 0.3 \text{ mm}$ のオフセット線と $K-R$ 曲線との交点で接線の傾き n を求め, それぞれのオフセット線における傾き n の平均値から求めた K'_{Jci} と, 個々の材料の傾きから求めた K_{Jci} の差を K_{Jci} との比

Fig. 11. Determination of lower-bound fracture toughness using the offset method.

Fig. 12. $(K_{Jci} - K_{Jci}') / K_{Jci}$ value at each offset tangent line.

で示し, 得られる破壊じん性の精度を検討したものである。一定の勾配 (n の平均値) を用いて求められる破壊じん性 K'_{Jci} と個々の材料の破壊じん性 K_{Jci} の差は, 0.1 mm のオフセット線で大きく, 0.2 mm 以上のオフセット線では, ほぼ等しく $\pm 10\%$ 程度であることを示している。ここで, 0.2 mm のオフセット線付近は, Fig. 9 から明らかなように, R 曲線の安定した領域に位置しており, 測定者によって勾配 n のばらつきが小さいことを示している。一方, Fig. 7 から明らかなように, 破壊じん性の測定を対象としている試験片の Δa_0 の大きさは 0.2 mm 以下である。したがって, 破壊じん性の測定精度が良く, かつ Δa_0 が 0.2 mm より小さい場合ということで, 0.2 mm オフセット線が選定された。

つぎに, 上部棚温度域での試験が不可能な場合, オフセット法では勾配 n を一定とした簡便法を使用しても良いことを提案した。この提案は標準試験法として工業的にだれでも簡単に同じ値を測定できるという点で, 非常に有用であり簡便さを備えている。ここで, 勾配 n の選定にあたっては, Fig. 12 と同様に 38 種の材料の 0.2 mm オフセット線によって決定された Fig. 13 に示す勾配 n の結果をもとに決定された。すなわち, 破壊じん性の測定にあたっては, なるべく大きな勾配に設定し, すべての材料に対して保守的な値が測定されるように, データ解析上の配慮が必要である。この点を考慮して, Fig. 13 の結果から, $K-R$ 曲線に対して 90% 以上が保守的な値を与える勾配として, $n=300 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}/\text{mm}$ が設定された。また $J-R$ 曲線に対しては, それと等価な $n=400 \text{ J/m}^3$ が設定された。

本研究のオフセット法は, 遷移温度域において 6 個の試験片を用い, 得られる最小の破壊じん性に対して, さらに勾配 n の接線を引いて破壊じん性の最小値 J_{ci} あるいは K_{Jci} を求める方法であり, かなりの高い確率で破壊じん性の最小値を求めていることになる。

6 オフセット法により決定される K_{Jci} と大形試験片の K_{Jc} との比較

Fig. 14 および Fig. 15 は, A533B 鋼および A470Ni-Cr-Mo-V 鋼において, オフセット法を用いて得られた K_{Jci} 値と ASTM E399 により得られた大形試験片の有効な K_{Jc} 値およびフラクトグラフィ法により得られた K_{Jci} 値とを比較し示したものである。オフセット法によ

Fig. 13. Slope n determined from the 0.2 mm stable crack growth offset tangent line.

Fig. 14. Comparison of K_{JcI} values obtained from the offset method and fractography method and valid K_{Jc} values for A533B steel.

Fig. 15. Comparison of K_{JcI} values obtained from the offset method and fractography method and valid K_{Jc} values for A470 Ni-Cr-Mo-V steel.

り求められる K_{JcI} 値は、フラクトグラフィ法による K_{JcI} 値および大形試験片の K_{Jc} の下限値と良い一致を示し、遷移温度域での破壊じん性の最小値を求める有効な方法であることを示している。

7 結 論

本研究においては、小形試験片を用いた遷移温度域での破壊じん性の最小値 K_{JcI} を簡易的に決定する方式として、日本学術振興会第129委員会の標準試験法の一つであるオフセット法を提案し、得られる K_{JcI} 値が大形試験片による K_{Jc} 値と良い一致を示し、有用な標準試験法であることを明らかにした。

本研究は日本学術振興会第129委員会（委員長 横堀 武夫，東北大学名誉教授）じん性試験小委員会の共同研究の一環として行なわれたことを記し、関係各位に謝意を表する。

（平成7年9月27日 日本材料学会第8回破壊力学シンポジウムにて講演）

参 考 文 献

- 1) J. D. Landes and D. H. Shaffer, Fracture Mechanics: Twelfth Conference, ASTM STP700, 368 (1980).
- 2) D. E. McCabe and J. D. Landes, Scientific Paper 83-ID7-METEN-P3, Westinghouse Electric Corp. (1983).
- 3) T. Iwadata, Y. Tanaka, S. Ono and J. Watanabe, Elastic-Plastic Fracture: Second Symposium, Vol. II, ASTM STP803, II-531 (1983).
- 4) T. Iwadata and T. Yokobori, Fracture Mechanics: Twenty-Fourth Volume, ASTM STP1207, 233 (1994).
- 5) 日本学術振興会第129委員会基準「延性-脆性遷移温度域での脆性破壊靱性標準試験法」, 日本学術振興会先端材料強度第129委員会編 (1995).
- 6) J. Watanabe, T. Iwadata, Y. Tanaka, T. Yokobori and K. Ando, Engineering Fracture Mechanics, 28, No. 5/6, 589 (1987).
- 7) 田中泰彦, 渡辺十郎, 岩館忠雄, 日本機械学会論文集, A-499, 557 (1988).