ぜい性き裂伝ば過程におけるき裂速度と動的破壊じん性値*

中 野 善 文**

Crack Velocity and Dynamic Fracture Toughness
during Brittle Crack Propagation

by

Yoshifumi NAKANO

(Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., Chiba)

The X-ray fractography was applied to the compact and ESSO specimens of pressure vessel steels for nuclear reactors to evaluate the dynamic fracture toughness K_{ID} during brittle crack propagation. The relation between K_{ID} and the crack velocity was studied.

In the compact specimen, K_{ID} decreased as the crack propagated and its value at crack arrest was equal to K_{Ia} but smaller than K_{Im} . The steady crack velocity in the compact specimen at -60°C was about 550 m/sec, at which K_{ID} was almost equal to K_{Im} . The relation between the steady crack velocity and the arrested crack length was similar to the experimental and analytical results obtained previously on DCB specimens.

The dynamic fracture toughness during the crack propagation became greater with an increase in both crack velocity and temperature, while it was independent of the test method.

(Received Oct. 8, 1981)

キー・ワード：ぜい性破壊，き裂伝ば，動的破壊じん性値，X線回折，原子炉用鋼材

1 緒 言

鋼材のぜい性き裂伝ば停止じん性を評価する方法として，コンパクト試験あるいは ESSO 試験が用いられている。両試験におけるぜい性き裂伝ばおよび停止現象については，試験片破面に X 線を照射して得られる X 線回折強度曲線の半価幅を用いて定量的に評価し，これら試験片内をぜい性き裂が伝ばする際および停止時の動的破壊じん性値を求め，試験方法の違いによら

ず，伝ば停止時の動的破壊じん性値の温度依存性が変^{1)~3)}らないことを示した。

本研究では，コンパクト試験片および ESSO 試験片内におけるぜい性き裂伝ば過程の X 線フラクトグラフィにより求めた動的破壊じん性値と伝ば速度の関係について調べた。

2 実験方法

2・1 供試材

供試材は厚さ 250 mm および 163 mm の原子炉圧力容器用鋼板 SA533B Cl.1 (Q1 および Q3) であり，

* 原稿受理 昭和56年10月8日

** 正 会 員 川崎製鉄(株)技術研究所 千葉市川崎町

Table I. Chemical composition.

(wt %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V
Q 1	0.18	0.27	1.40	0.008	0.003	0.01	0.62	0.15	0.55	0.006
Q 3	0.18	0.22	1.39	0.004	0.002	0.01	0.67	0.09	0.49	0.006

Table II. Mechanical properties in T-direction at 1/4 t.

	Yield stress (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	vT_s ($^{\circ}\text{C}$)	RT_{NDT} ($^{\circ}\text{C}$)
Q 1	49.7	62.6	27	69	-3	-25
Q 3	46.0	60.6	28	71	-30	-40

Thickness Q1 : 250 mm, Q3 : 163 mm

その化学成分および機械的性質を Table I および II に示す。

2・2 ぜい性き裂伝ば停止試験

ぜい性き裂伝ば停止試験は、Q1 についてはコンパクト試験を、Q3 については原厚の ESSO 試験を実施した。試験片形状を Fig.1 および 2 に示す。

Fig. 1. Geometry of compact specimen.

Fig. 2. Geometry of ESSO specimen.

コンパクト試験片は通常用いられる両側V溝付きのものではなく、片側の溝を円弧とし、クラックゲージを6 mm 間隔に貼付した。き裂伝ば速度はき裂伝ばによるクラックゲージの切断を電圧変化として記録することにより測定した。試験片破面を Fig.3 に示す。破面で黒っぽい部分は試験後の加熱着色によるものであり、試験時にぜい性き裂が伝ばした部分である。

ESSO 試験は、タブ板に溶接した試験片の上部を冷却し、下部を加熱することにより所定の温度こう配を与え、8 000 トンテストリグにより引張荷重を負荷し、切欠きにくさびを打ち込むことによりぜい性き裂を發

Fig. 3. Fracture appearance of compact specimen.

生せしめ、伝ば停止させた。試験片破面を Fig.4 に示す。なお、温度測定は試験片厚さ中心で実施した。

2・3 X線測定

コンパクトおよび ESSO 試験により生じた破面直下におけるぜい性き裂伝ばに伴う材料の塑性変形量を定量的に評価するために、計数管式平行ビーム法を用いてX線測定を行った。X線測定条件を Table III に示す。X線測定は、コンパクト試験片ではき裂伝ばが

Table III. X-ray conditions.

Diffraction plane	(211)
Target	Cr
Tube voltage	30 kV
Tube current	8 mA
Filter	V
Counter	Scintillation
Divergency slit	0.35°
Receiving slit	0.35°
Slit area	2 mm×2 mm
Irradiated area	4 mm×4 mm
Incidence angle	0°

Fig. 4. Fracture appearance of ESSO specimen.

厚さ方向に一樣と考えられるので試験片厚さ中心線上で 5 mm 間隔で、ESSO 試験片ではき裂伝ば速度との対応を考へて、クラックゲージを貼付した側の試験片厚さの 1/4 の線上で 10 mm 間隔で実施した。

3 実験結果および考察

3・1 ぜい性き裂伝ば過程の半価幅の変化

Fig. 5 にコンパクト試験片内のぜい性き裂伝ば過程における試験片破面からの X 線回折強度曲線の半価幅の変化を示す。半価幅は最初一様に減少し、その後振動を繰返しながら漸減し、き裂停止に至った。

Fig. 5. Change in half value breadth during crack propagation in a compact specimen.

Fig. 6. Change in half value breadth during crack propagation in an ESSO specimen.

一方、ESSO 試験片では、Fig. 6 に示すように半価幅はき裂伝ば初期に急減するが、その後急激に増加し、漸増して最初のき裂停止に至った。き裂が再び伝ばし出すと半価幅は一度急減し、極小値をもった後、最終き裂停止までの 1/2 程度は大きく増加するが、その後はほぼ一定ないしは微増の段階を経て最終き裂停止に至った。

3・2 ぜい性き裂伝ば過程および停止時の動的破壊じん性値

試験片破面からの X 線回折強度曲線の半価幅 B (deg.) から、(1)および(2)式を用いて動的破壊じん性値 K_{ID} (kgf/mm²/mm²) を求めた。

$$K_{ID} = \sqrt{J_I E / (1 - \nu^2)} \quad (1)$$

$$J_I = 1.849 \times 10^{-9} \exp(9.40 B) \quad (2)$$

ここに、 E および ν は縦弾性係数およびポアソン比である。

(2)式は Fig. 7 に示す種々の温度で試験に供したコンパクト試験片で得られた K_Q および厚さ 100 mm の切欠付き 3 点曲げ試験片により得られた K_{Ic} を (1)式の K_{ID} に代入して得たものである。Fig. 7 には種々の温度における計装化シャルピ試験による K_{Ia} も示してあるが、半価幅との関係は(2)式でほぼ表される。このように、 K_Q 、 K_{Ic} あるいは K_{Ia} から計算した J_I とき裂先端部の破面直下の材料の塑性変形量を表す半価幅の関係は、試験温度およびひずみ速度にあまり依存せず材料固有のものであると考えられる。これは、破壊においては試験温度を下げることにひずみ速度を上げることが等価であると一般に考えられていることを裏づけるものである。ぜい性き裂が高速で伝ばするときには、き裂先端では破壊の発生が大ききひずみ速度で連続的に起っているの、(2)式を用いて K_{ID} を求めることが可能であると考えられる。

Fig. 7. Relation between J_I and half value breadth.

Fig. 8 にコンパクト試験片について求めたき裂伝ばに伴う動的破壊じん性値 K_{ID} の変化を示す。 K_{ID} は最初一様に減少し、その後振動しながら漸減し、き裂停止に至った。Fig. 8 に、き裂停止時のクリップゲージ開口変位と停止き裂長さから静的解析により計算した K_{Ia} およびき裂伝ば長さとき裂発生時の応力拡大係数から動的解析結果を用いて求めた K_{Im} をあわせ示す。き裂停止時の K_{ID} が 244 kgf/mm²/mm² であるのに対し、 K_{Ia} は 235 kgf/mm²/mm²、 K_{Im} は 310 kgf/mm²/mm² であり、以前得た結果と同様、前二者がほぼ等しい値を与えるのに対し、 K_{Im} は大きい値を与えた。

Fig. 9 に ESSO 試験片内のき裂伝ばに伴う K_{ID} の変化を試験片温度とともに示す。 K_{ID} はコンパクト試験片における漸減とは反対に、全体としてみると漸増してき裂の最終停止に至っている。本研究で用いた試験片における K_{ID} の変化は、以前得たほぼ同一初期応力を負荷した試験片のそれと比べて小さいが、これ

Fig. 8. Change in dynamic fracture toughness during crack propagation in a compact specimen.

Fig. 9. Change in dynamic fracture toughness during crack propagation in an ESSO specimen.

は温度が50℃ほど低いことによると考えられる。Fig. 9 に示す K_{ID} の変化で特徴的なことは、 K_{ID} がき裂伝は開始初期に一度急減し、その後き裂進展とともに大きく増加し、これがき裂停止までの1/2程度まで続き、それを過ぎると K_{ID} の増加が小さくなっていくことである。この現象は24の位置における第1のき裂停止および最終停止の両方について認められる。Fig. 9 には、初期応力と停止き裂長さから静的解析により求めた K_{0a} もあわせ示すが、停止時の K_{ID} とよい一致を示した。

3・3 ゼい性き裂伝は速度と動的破壊じん性値の変化

Fig. 10 にコンパクト試験片内のぜい性き裂伝はに伴う K_{ID} とき裂伝は速度の関係を示す。き裂伝は速度は最初急激に減少し、3から8の位置の間でほぼ一定速度で伝はし、その後停止まで急速に減少した。ここで得られた定常き裂伝は速度 $\bar{v}$ は約 550 m/sec であり、き裂が定常状態で伝はしているときの K_{ID} は約 300 kgf/mm² である。この K_{ID} の値は K_{Im} の値にほぼ等しい。

Fig. 10. Change in dynamic fracture toughness and crack velocity during crack propagation in a compact specimen.

Fig. 11 は Fig. 10 に得られた定常き裂伝は速度 $\bar{v}$ を bar wave speed C_0 で除した値を停止き裂長さ a_f を初期き裂長さ a_0 で除した値に対して示したものである。図には、Hahn らの鋼についての DCB 試験結果⁶⁾、Hahn らおよび、Shmueli⁸⁾ の解析結果も併せ示

Fig. 11. Relation between steady crack velocity and arrested crack length for compact test.

すが、本実験で得られた結果はこれらの試験結果および解析結果とほぼ同じものである。

これらのことは Hahn らの DCB 試験片に対する動的解析結果がコンパクト試験片にも適用できることを示すが、 K_{Im} は定常き裂伝は速度に対応する応力拡大係数であり、き裂伝は停止時のそれでないことを示している。

Fig. 12 に ESSO 試験片内のぜい性き裂伝はに伴う K_{ID} とき裂伝は速度および試験片表面に貼付したひずみゲージにより測定した試験片に生じたひずみの関係を示す。き裂伝は速度およびひずみはき裂が一時停止したのち再伝はしたのちから測定できた。き裂が再伝はした後、試験片表面で停止するまでの約1/2程度はき裂伝は速度は一定で、かつ試験片のひずみも一定であり、 K_{ID} は比較的大きく増加する。その後試験片表面でき裂が停止するまで、き裂伝は速度および試験片のひずみは急減するが、 K_{ID} は増加し続け、その増加が小さくなるのは、試験片表面のき裂が停止した後である。試験片表面で停止したき裂は内部でのみ伝はし、最終停止に至る。

Fig. 13 に K_{ID} とき裂伝は速度の関係を示す。コンパクト試験片で得られた K_{ID} はき裂伝は速度が大きいほど大きく、その関係は1本の直線で表される。一方、ESSO 試験片の-40℃～-90℃の間の温度における K_{ID} とき裂伝は速度の関係は-60℃で試験したコ

Fig. 12. Change in dynamic fracture toughness, crack velocity and strain during crack propagation in an ESSO specimen.

コンパクト試験片で得られたそれに一致するものであった。同一き裂伝ば速度に対する K_{ID} は ESSO 試験片で得られたように、温度が高い方が大きい。なお、 -120°C の結果は、Q1 材の厚さ 250 mm の ESSO 試験片で K_{ID} とき裂伝ば速度が対応していると考えられたものである。ESSO 試験片における K_{ID} とき裂伝ば速度の関係の温度依存性は、金沢らが解析的に求めた結果および Hoagland らの実験結果と一致するものである。したがって、き裂伝ば過程における応力拡大係数とき裂伝ば速度の関係は温度に依存するが、試験方法には依存しないと考えられる。

4 結 言

原子炉圧力容器用鋼板のコンパクト試験片および ESSO 試験片に X 線フラクトグラフィ法を適用してぜい性き裂伝ば過程における動的破壊じん性値 K_{ID} を求め、それとき裂伝ば速度の関係について調べた結果、次の知見を得た。

(1) コンパクト試験片では K_{ID} はき裂進展とともに減少し、き裂停止時の K_{ID} は K_{Ia} に等しく、 K_{Im} より小さかった。

(2) コンパクト試験片における定常き裂伝ば速度は約 550 m/sec であり、このときの K_{ID} は K_{Im} にほぼ等しかった。得られた定常き裂伝ば速度と停止き裂長さの関係は、DCB 試験片で解析および実験により得られているものと同等であった。

(3) ESSO 試験片では K_{ID} はき裂伝ば開始初期に一度急減し、その後き裂進展とともに大きく増加し、き裂停止までの 1/2 程度を過ぎると増加は小さくなった。き裂停止時の K_{ID} は K_{Ia} とよい一致を示した。

(4) ESSO 試験片では、き裂が試験片表面で停止す

Fig. 13. Relation between K_{ID} and crack velocity.

るまでの約 1/2 はき裂伝ば速度および試験片のひずみは一定であり、 K_{ID} は大きく増加した。その後試験片表面でき裂が停止するまでき裂伝ば速度およびひずみは急減するが K_{ID} は増加し続け、その増加が小さくなるのは表面でき裂が停止した後であった。

(5) き裂伝ば過程における動的破壊じん性値はき裂伝ば速度が大きい程大きく、また温度が高い程大きい、試験方法には依存しなかった。

(昭和56年10月2日 第1回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 中野善文, 片山道雄, 材料, **30**, 241 (1981).
- 2) 中野善文, 鉄と鋼, **67**(5), S-485 (1981).
- 3) 中野善文, 日本材料学会第18回X線材料強度に関するシンポジウム, 64 (1981).
- 4) Ripling, E. J., 私信.
- 5) Hahn, G. T., H. T. Corten, K. S. Kim, C. P. Debel, C. W. Marschall, P. C. Gehlen, C. Popelar, R. G. Hoagland, A. R. Rosenfield, M. F. Kanninen, and R. Simon, NUREG/CR-0057, BMI-1995 (1978).
- 6) Hahn, G. T., P. C. Gehlen, R. G. Hoagland, M. F. Kanninen, C. Popelar, and A. R. Rosenfield, BMI-1939 (1975).
- 7) Hahn, G. T., R. G. Hoagland, M. F. Kanninen, A. R. Rosenfield, and R. Sejnaha, SSC-Progress Report on Project SR-201, BCL (1973).
- 8) Shmuely, M., Int. J. Frac., **13**(4), 443 (1977).
- 9) 金沢 武, 町田 進, 吉成仁志, 日本造船学会論文集, **146**, 477 (1979).
- 10) Hoagland, R. G., A. R. Rosenfield, P. C. Gehlen, and G. T. Hahn, ASTM STP627, 177 (1977).