



CT試験片および円周切欠付丸棒試験片を用いた HT780鋼の破壊靱性評価

村上 哲也*・戸田 裕之*²・赤堀 俊和*²・新家 光雄*²・小林 俊郎*²

Assessment of Fracture Toughness by CT and Round Bar Specimens in a HT780 Steel

Tetsuya MURAKAMI, Hiroyuki TODA, Toshikazu AKAHORI, Mitsuo NIINOMI and Toshiro KOBAYASHI

Synopsis : It is known that fracture toughness value of steels is affected by test temperature, specimen thickness and loading rate. In this research, it is attempted to investigate it by changing temperature and loading rate with the rate parameter then being applied. The fracture toughness value is also obtained by round bar specimen with a circular notch. This result has been compared with the results by the CT specimens, and the validity of the fracture toughness value that has been obtained from round bar specimen with a circular notch is examined. The sample material used is HT780 steel. The CT specimens were 1T, 2T and 4T-CT defined in ASTM E399, test temperature is varied from 77K to room temperature. The loading rate is also varied for the 1T-CT and the round bar specimen with a circular notch from static to 1 m/s. The fracture toughness value decreases as the test temperature decreases. It decreases with loading rate and specimen thickness. The fracture toughness test result is arranged using the stress intensity factor rate to obtain the rate parameter. Moreover, the fracture toughness value which has been obtained from the round bar specimen with a circular notch is lower than those by 1T-CT specimen, closer to 2T-CT specimen. The test temperature and the loading rate dependency of the fracture toughness value can be arranged by the rate parameter that is the function of temperature and stress intensity factor rate. Availability of the round bar specimen with a circular notch test specimen is discussed to obtain valid fracture toughness values.

Key words : fracture toughness; CT specimen; round bar specimen; dynamic fracture toughness.

1. 緒言

鋼のへき開破壊靱性値は、板厚の増大、速度の上昇に伴い、遷移域が高温側へ移行することが知られている。破壊靱性値は降伏応力の関数であり、降伏応力の上昇に伴い、破壊靱性値は低下する。Bennet¹⁾らは活性化エネルギー論的立場より、降伏応力は Strain rate-temperature parameter (R) で表されることを導出した。従って、降伏応力と同様にへき開破壊靱性値も R の関数として表すことができると考えられる。

ところで、有効なへき開破壊靱性値を得るためには平面ひずみ状態を満足することが必要である。高靱性材料の場合、ASTM E399に規定されている有効条件を満たすには極厚の試験片が必要となり、現実的でない。また素材の制限から十分な板厚を確保できない場合も多く見られる。一方、円周切欠を有する丸棒試験片の切欠底では、塑性拘束により脆性破壊を生じやすくなることが知られている。すなわち、へき開破壊靱性試験における平面ひずみ状態が得られやすいと考えられる。また試験片形状を丸棒にすることで単純引張試験と同様の設備で試験が可能であり、高速領域の試験もCT試験片の場合に比べて容易となる。

このようなことからへき開破壊靱性値に及ぼす板厚、速度、温度の影響について検討し、Strain rate-temperature parameter (R) で整理することを試みた。また簡易的な破壊靱性評価方法として疲労予き裂を導入した円周切欠付丸棒試験片を用いて試験を行い、得られた結果とCT試験片による結果との比較を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片形状

本研究では素材の板厚を確保する必要があり、また靱性に優れた素材が好ましい。そこで供試材として溶接構造用高張力鋼HT780を用いた。化学成分および機械的性質をTable 1に示す。

平滑丸棒試験片はFig. 1に示す試験部直径5 mm、標点間距離20 mmの断面急変試験片を用いた。動的試験時の荷重測定のため、つかみ部を長くした試験片形状とした。シャルピー衝撃試験片はJIS Z 2202 4号に準拠した標準Vノッチシャルピー試験片を用いた。破壊靱性試験片はASTM E399に準拠したCT試験片を用いた。試験片の大きさは1T (厚さ $B=25$ mm)、2T (厚さ $B=50$ mm)、4T (厚さ

平成16年6月1日受付 平成16年12月16日受理 (Received on June 1, 2004; Accepted on Dec. 16, 2004)

* 住友金属テクノロジー (株) (Sumitomo Metal Technology, Inc., 16 Sunayama Hasaki-machi Kashima-gun Ibaraki)

* 2 豊橋技術科学大学 (Toyohashi University of Technology)

B=100 mm) の3種類である。各試験片の概要をFig. 2に示す。円周切欠付丸棒試験片（以下RB試験片とする）をFig. 3に示す。試験部直径を15 mmとし、中央部にシャルピー試験片と同様の標準Vノッチ（深さ2 mm）を機械加工により施した。従って初期リガメント半径は5.5 mmとなる。

供試材の厚さはおよそ160 mmであり、各試験片の採取位置は引張試験片、RB試験片、1TCT試験片、2TCT試験片および標準シャルピー試験片について、中心軸もしくは

板厚中央面が供試材厚さの1/4位置とした。4TCT試験片は供試材厚さの1/4位置に板厚中央面をとれないため、片側表面を素材の板表面近傍とした。採取方向は引張試験片およびRB試験片は圧延方向と平行、CT試験片およびシャルピー試験片はL-T方向とした。

2・2 平滑丸棒引張試験

供試材の種々のひずみ速度における降伏応力（耐力）の温度依存性を求めるため、試験機アクチュエーター変位速度（以下変位速度とする）を0.02, 10, 500, 2000, 4000 mm/sの5段階に変え、室温以下の低温で試験を行った。試験は動的破壊試験機²⁾を用いて行った。試験機は所定の速度まで加速した後、試験片に負荷がかかるようにした。変位速度0.02 mm/sと10 mm/sにおける荷重測定はひずみゲージ式荷重計から測定した。変位速度が500 mm/s以上の試験では、ひずみゲージ式荷重計は応答性の問題から使用できない。そのため500 mm/s以上の試験では試験片つかみ部（試験部中央から20 mm位置）表裏に貼付したひずみゲージ出力から測定した。静的試験時につかみ部ひずみと荷重の校正値を求め、ひずみを荷重に換算した。耐力の測定は試験部中央に貼付したひずみゲージ出力から求めた荷重—伸び曲線を0.2%オフセットして求めた。破断までの標点間変位を光学式変位計（ZIMMER社製Model200XH）を用いて測定した。

本研究ではひずみ速度を次式で定義した。

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{GL} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、GL：初期試験部長さ、V：実測変位速度である。従って、本試験の場合ひずみ速度範囲は10⁻³/sから200/sとなる。

2・3 シャルピー衝撃試験

破壊靱性試験に先立ち、遷移温度の推定を行うため、シャルピー衝撃試験を行った。試験温度は液体窒素温度から室温までである。

2・4 CT試験片による破壊靱性試験

静的破壊靱性試験の試験速度はASTM E399に準拠し、すべてのサイズの試験片で1 MPam^{1/2}/sとなるよう荷重制御で行った。開口変位の測定はクリップゲージを用いた。

速度の影響について検討するため、1T試験片を用いてASTM E399に規定されている速度を超える範囲での動的

Table 1. Chemical compositions.

mass%						
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.44	0.22	0.68	0.017	0.013	0.01	0.13
Yield Stress (MPa)		Tensile Strength (MPa)		Elongation (%)		
807		867		19.2		

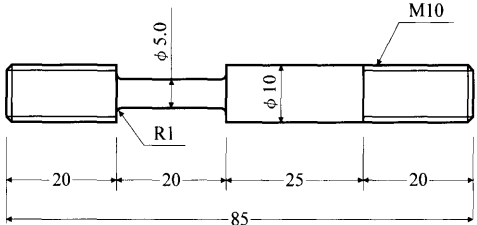
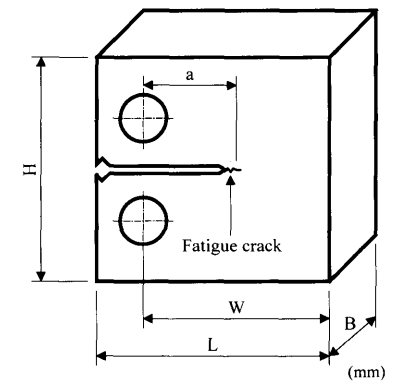


Fig. 1. Geometry of tensile specimen in mm.



	L	H	W	B	a
1T	62.5	60	50	25	25
2T	125	120	100	50	50
4T	250	240	200	100	100

Fig. 2. Geometry of CT specimen.

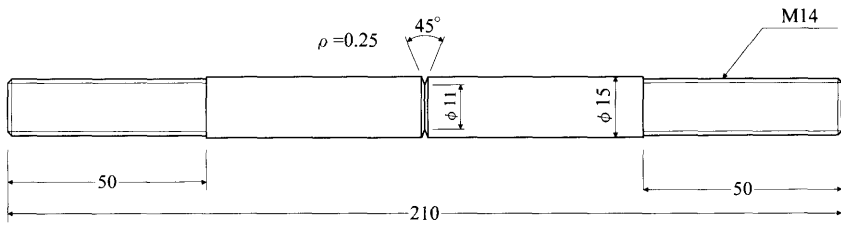


Fig. 3. Geometry of RB specimen in mm.

破壊靱性試験を行った。変位速度は1 mm/sから1000 mm/sである。開口変位の測定は光学式変位計を用い、試験片端面において測定した。動的破壊靱性試験では上述の引張試験と同様の理由からひずみゲージ式の荷重計は使用できない。そのため荷重の測定には試験片に貼付したひずみゲージ出力を用いた。ひずみゲージ貼付位置は藤井ら³⁾の報告に従い、試験片切欠近傍に生じる塑性域の影響を受けない位置とし、荷重線より20 mmの板厚中央部とした。ひずみと荷重の関係は引張試験と同様に静的試験時に校正值を求めた。

試験後の破面から疲労予き裂長さを測定し、ASTM E399に従いへき開破壊靱性値を求めた。また有効なへき開破壊靱性値が得られなかった場合にはASTM E1820に従い J 積分法を適用し、得られた J 値から求めた $K(J)$ 値で評価した。最高荷重点に達した後、荷重が低下して破壊した場合は、最高荷重までのエネルギーから算出した。なお全ての試験片で疲労予き裂導入条件は規定を満足していることを確認している。

2.5 RB試験片による破壊靱性試験

RB試験片の疲労予き裂導入は小野式回転曲げ疲労試験機を用いて導入した。予き裂導入に先立ち、条件を選定するため応力を3条件で破断まで疲労試験を行い、疲労予き裂導入時の繰り返し数の目安とした。疲労予き裂終了時の K 値はおよそ12 MPa $m^{1/2}$ である。回転数は1800 rpmで行った。この回転数で行うことにより1時間におよそ 1.0×10^5 回の繰り返し数が得られる。疲労予き裂の状態はCT試験片と異なり表面から観察できないため、破断回数近傍で試験機を適宜停止し、目視でき裂の状態を確認した。

破壊靱性試験は準静的条件である変位速度0.02 mm/sおよび動的条件である500 mm/sの2条件とした。試験温度はCT試験片と同様に室温以下の低温とした。荷重の測定は引張試験の場合と同様に、準静的試験ではひずみゲージ式荷重計から、動的試験では試験片に貼付したひずみゲージ出力を用いて測定した。変位の測定は準静的試験ではクリップゲージを用い、動的試験では引張試験と同様に光学式変位計を用いて測定した。

RB試験片における破壊靱性値の算出は、破面からリガメント半径を測定し、得られた荷重—変位曲線とその初期勾配の95%の傾きを持つ直線との交点から破壊開始荷重 P_C を求め、この荷重値を円周切欠付丸棒試験片の静的応力拡大係数式(2)に代入して破壊靱性値を決定した⁴⁾。

$$K_I = \frac{P_C}{\pi b^2} \sqrt{\pi b} F_1 \left(\frac{b}{R} \right) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 b ：リガメント半径、 R ：試験片半径、

$$F_1 \left(\frac{b}{R} \right) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + 0.5 \left(\frac{b}{R} \right) + 0.375 \left(\frac{b}{R} \right)^2 - 0.363 \left(\frac{b}{R} \right)^3 \right.$$

$$\left. + 0.731 \left(\frac{b}{R} \right)^4 \right\} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{R} \right)}$$

である。

3. 実験結果および考察

3.1 降伏応力の温度およびひずみ速度依存性

(1)式で定義したひずみ速度ごとに降伏応力を整理した結果をFig. 4に示す。ひずみ速度の上昇に伴い、若干ではあるが温度依存性が強くなる傾向が見られる。降伏応力におよぼす温度、ひずみ速度の影響について、(3)式で示されるひずみ速度—温度パラメータ R で整理する¹⁾。

$$R = T_K \ln \left(\frac{A}{\dot{\epsilon}} \right) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 A ：材料定数、 T ：温度(K)、 $\dot{\epsilon}$ ：ひずみ速度。

一方、降伏応力と温度の関係がアレニウス型で表されることから、温度の単位を持つ R パラメータとの関係は

$$\sigma_Y = B \exp \left(\frac{C}{R} \right) \dots \dots \dots (4)$$

で表すことができる⁵⁾。ただし、 B, C ：材料定数である。

本供試材の降伏応力およびひずみ速度の関係から材料定数 A, B, C を最小2乗法で求めた結果、式(3)、式(4)はそれぞれ、

$$R = T_K \ln \left(\frac{1.175 \times 10^{13}}{\dot{\epsilon}} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$$\sigma_Y = 674.9 \exp \left(\frac{1971}{R} \right) \dots \dots \dots (6)$$

となった。

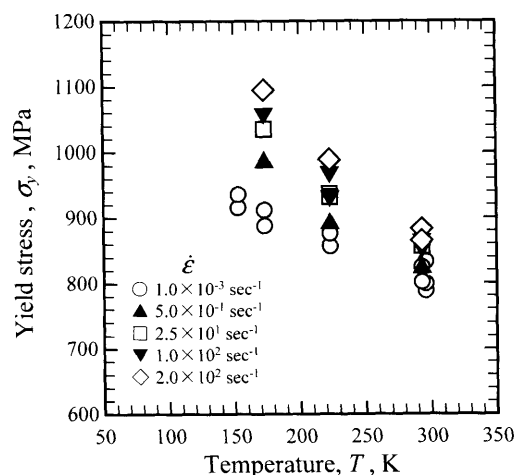


Fig. 4. Relationship between yield stress and temperature with different strain rates.

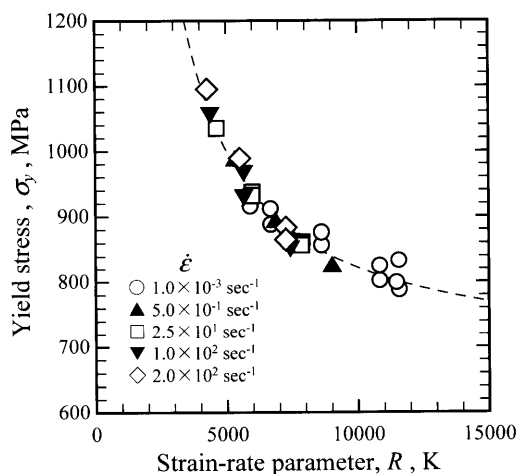


Fig. 5. Relationship between yield stress and strain rate-temperature parameter.

(5) 式を用いて各引張試験結果の R 値を求め、降伏応力との関係で整理し直したのが Fig. 5 である。bcc 金属における A 値はおよそ 10^8 オーダーとされているが¹⁾、本供試材では 10^{13} オーダーと高い値となった。各ひずみ速度の結果とも比較的良好な相関が得られており本供試材の降伏応力は式 (5) および式 (6) で精度よく表されていることがわかる。

3.2 シャルピー衝撃試験結果

シャルピー衝撃試験から得られた試験温度と吸収エネルギー (C_V) および延性破面率 (SA) の関係を Fig. 6 に示す。図中の曲線は野方ら⁶⁾の例にならない、式 (7) および式 (8) でそれぞれ近似した曲線である。

$$C_V = \frac{216}{1 + 4.109 \times 10^{-2} \exp(-3.885 \times 10^{-2} T_K)} \quad \text{.....(7)}$$

$$SA = \frac{100}{1 + 2.145 \times 10^{-5} \exp(-1.548 \times 10^{-1} T_K)} \quad \text{.....(8)}$$

この曲線から遷移温度および破面遷移温度を求めると、それぞれ 191K, 203K となった。

3.3 破壊靱性試験結果

CT 試験片から得られた温度とへき開破壊靱性値との関係を Fig. 7 に示す。液体窒素温度付近では各試験片サイズともほぼ 30 MPa m^{1/2} 程度の値を示し、この値が本供試材における下限界値であるといえる。試験片サイズの影響について見ると、2T 試験片と 4T 試験片では大きな差は見られずほぼ同程度の値を示した。1T 試験片から 2T, 4T 試験片へと大きくなるに従い、遷移温度が高温側へ移行し、その温度差はおおよそ 30K 程度であった。また 1T 試験片の動的破壊靱性試験結果を見ると、変位速度の上昇によりへき開破壊靱性値は急激に低下し、遷移温度が 2T, 4T 試験片よりさらに高温側に移行することがわかる。静的試験との温度差はおおよそ 60K 程度であり、試験片サイズの影響よりも

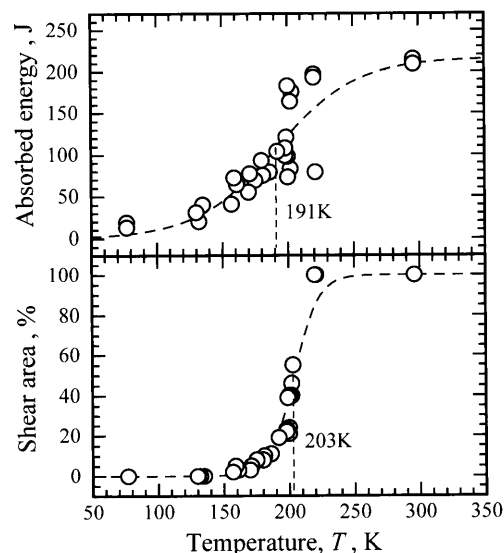


Fig. 6. Ductile-brittle transition curves of the HT780 steel obtained by the V-notched Charpy specimens.

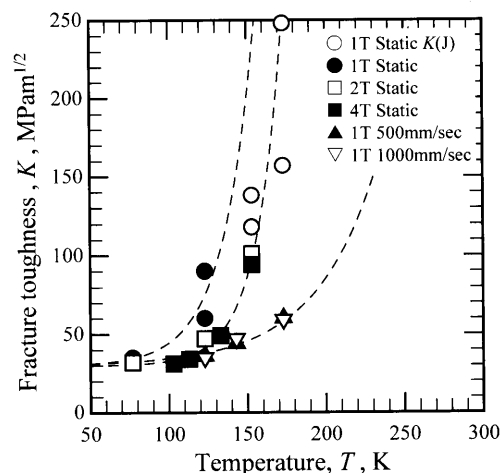


Fig. 7. Relationship between fracture toughness and temperature by the CT specimens.

大きい。しかし、変位速度 500 mm/s と 1000 mm/s では大きな差は見られなかった。

へき開破壊靱性値と温度との関係は次式で与えられることが知られている⁶⁾。

$$K_{IC} = A \exp(B T_K) + C \quad \text{.....(9)}$$

式 (9) を用い係数を求めると、1T 試験片静的、2T, 4T 試験片静的、1T 試験片の動的負荷条件についてそれぞれ次の関係が得られ、図中に破線で示した。

$$K_{IC} = 0.1021 \exp(0.049476 T_K) + 30 \quad \text{.....(10)}$$

$$K_{IC} = 0.0705 \exp(0.059905 T_K) + 30 \quad \text{.....(11)}$$

$$K_{IC} = 0.3513 \exp(0.025303 T_K) + 30 \quad \text{.....(12)}$$

Fig. 8 に 153K および 123K における板厚と破壊靱性値の

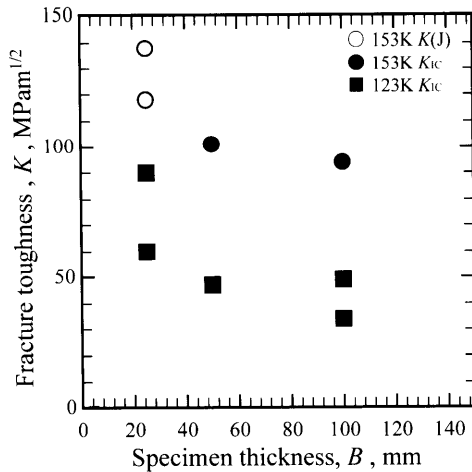


Fig. 8. Relationship between fracture toughness and specimen thickness.

関係を示す。板厚の増加に伴い靱性値が低下する傾向が見られるが、2Tと4T試験片ではほぼ同一の値となることがわかる。本供試材の有効なへき開破壊靱性値を求めるには、板厚が50mm程度必要であるといえる。

3.4 破壊靱性試験結果の R_f パラメータによる整理

3.1で求めた R パラメータに関する定数を用いて破壊靱性試験結果を整理する場合、個々のひずみ速度を求める必要がある。しかしき裂先端におけるひずみ速度は平滑材に比べて数オーダー高くなるといわれており、一義的に決定することができない。またき裂先端の形状の影響も受けると考えられる。一般に破壊靱性試験における速度パラメータとしては次式で表される応力拡大係数速度 K がよく用いられることから、 K をひずみ速度の代わりに用いて評価することにした。

式(3)のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の代わりに K を用い式(13)とする。このときの定数 A は3.1の引張試験結果から求めた値をそのまま用いることにする。

$$R_f = T_K \ln \left(\frac{A}{K} \right) \dots \dots \dots (13)$$

式(13)から R_f パラメータを求め、へき開破壊靱性値との関係をプロットしたのがFig. 9である。図からわかるように1T試験片において試験温度、変位速度の異なる結果が一つの曲線上にプロットすることができた。しかしながら2T試験片、4T試験片の結果はこの曲線から若干ではあるが外れていることがわかる。このことは静的試験において各試験片サイズで変位速度が同じにもかかわらず、得られた靱性値が異なっていることと関連する。 R パラメータは速度の影響を温度に置き換えるものであるから、試験温度、変位速度の影響に関しては整理することができるが、試験片サイズの影響に関しては考慮されていないといえる。

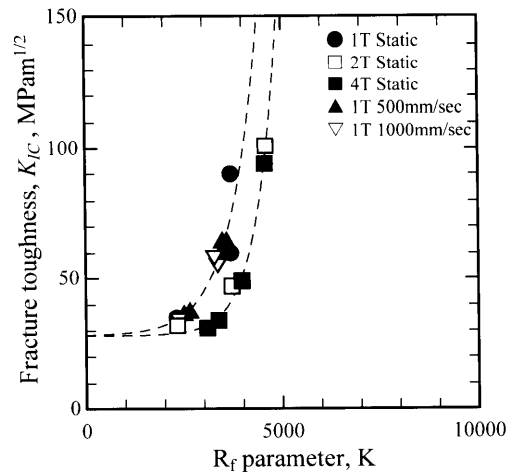


Fig. 9. Relationship between fracture toughness and R_f parameter by the CT specimens.

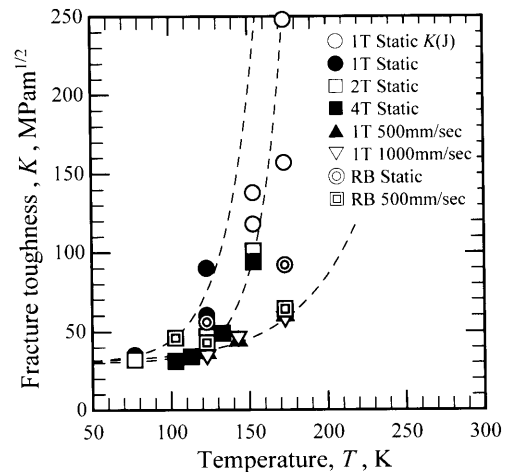


Fig. 10. Relationship between fracture toughness and temperature in RB specimens.

3.5 RB試験片による破壊靱性試験結果

RB試験片により得られた破壊靱性値の温度による変化をFig. 7上にプロットするとFig.10になる。この図から低温側で靱性値が若干高くなる傾向が見られるが、CT試験片と同程度の破壊靱性値が得られていることがわかる。またRB試験片から得られた結果は1T試験片と2T試験片の中間に位置しており、同一温度において1T試験片よりもより有効な靱性値が得られると考えられる。本研究で用いたRB試験片は直径15mmであり、引張試験片と同程度のサイズである。また破断時の荷重を比較すると、2TCT試験片のおよそ50%程度になることから、RB試験片を用いる有用性が示唆される。

速度の影響についてもCT試験片と同様に、高速になるに従い、遷移温度が高温側へ移行する傾向を示している。

CT試験片の場合と同様に、応力拡大係数速度 K を速度のパラメータとして R_f パラメータを求め、破壊靱性値との関係を示した結果をFig.11に示す。試験片形状が異なるためCT試験片の結果と同一の曲線上にプロットされないが、

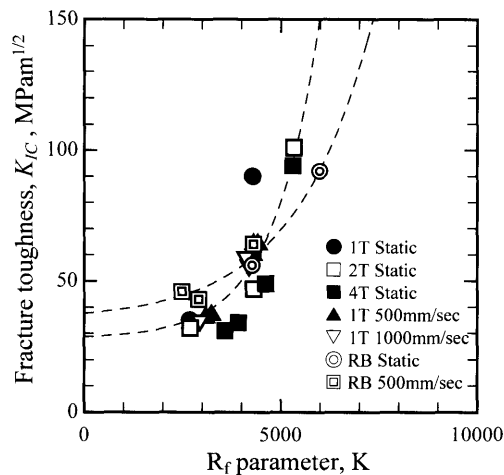


Fig. 11. Relationship between fracture toughness and R_f parameter by the RB specimens.

RB試験片のみでみると、静的および動的試験結果が1つの曲線上にプロットできることがわかる。

4. 結言

鋼の破壊靱性値に及ぼす板厚、変位速度、温度の影響について検討し、また簡易的な破壊靱性試験方法としてRB試験片を用いて破壊靱性値を求め、CT試験片の結果との比較を行った結果、以下の結論が得られた。

(1) 本供試材の降伏応力の温度、ひずみ速度依存性は R パラメータで整理できた。

(2) CT試験片を用いた破壊靱性試験の結果、試験片サイズにかかわらず液体窒素温度でほぼ同一の値を示し、下限界値と考えられる。

(3) 動的破壊靱性試験の結果、遷移温度が2T, 4T試験片の結果よりも高温側に移行し、変位速度の影響が大きいことが明らかとなった。

(4) ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の代わりに応力拡大係数速度 K を用いて求めた R_f パラメータで整理した結果、変位速度、試験温度の影響については一義的に定義できたが、試験片サイズの影響については整理できなかった。

(5) RB試験片から得られた破壊靱性値はCT試験片の結果と同程度であり、本試験片を用いる有効性が示唆された。

本研究の一部は科研費（基盤 (A) (2) 15206076）によった。記して感謝します。

文 献

- 1) P.E.Bennett and G.M.Sinclair: Parameter representation of low-temperature yield behavior of body-centered cubic transition metals, ASME paper 65-Met-11, (1965).
- 2) M.Tsukamoto, T.Denda, K.Suzuki and T.Murakami: *Sumitomo Met.*, **50** (1998), No. 3, 88.
- 3) E.Fujii, I.Okuma, Y.Kawaguchi and M.Tsukamoto: *J. Soc. Nav. Archit. Jpn.*, **158** (1985), 619.
- 4) T.Yokoyama: *J. Jpn. Weld. Soc.* **68** (1999), 505.
- 5) M.Toyosada, E.Fujii, K.Nohara, Y.Kawaguchi, K.Arimochi and K.Isaka: *J. Soc. Nav. Archit. Jpn.*, **161** (1987), 343.
- 6) F.Nokata and H.Takahashi: *J. At. Energy Soc. Jpn.*, **1** (1982), 68.