

コンパクト試験による構造用鋼材の脆性き裂伝播停止靱性の評価

中野善文*・田中康浩*²

Crack Arrest Toughness of Structural Steels Evaluated by Compact Test

Yoshifumi NAKANO and Michihiro TANAKA

Synopsis:

Crack arrest tests such as compact, ESSO and DCB tests were made on SA533B Cl. 1, HT80 and KD32 steels to evaluate the crack arrest toughness. The main results obtained are as follows:

- 1) The crack arrest toughness was evaluated by K_{Ia} which was obtained by the static analysis of compact test.
- 2) K_{ID} determined by the dynamic analysis of compact test was greater than K_{Ia} , though K_{ID} became close to K_{Ia} as K_{Ia}/K_Q became a unity. K_Q is the stress intensity factor at the crack initiation.
- 3) No significant difference was observed between K_{Ia} and K_{ca} obtained by ESSO and DCB tests, though K_{ca} obtained by DCB test tended to be smaller than K_{Ia} at lower temperatures.
- 4) K_{Ia} was smaller than K_{Ic} in the transition temperature range, while it was greater than K_{Id} . In the temperature range where K_{Ic} which was determined from J_{Ic} decreased with temperature increase, however, it was smaller than K_{Ia} .
- 5) The fracture appearance transition temperature and the absorbed energy obtained by 2 mm V notch Charpy test were appropriate parameters for representing the crack arrest toughness, while the NDT temperature was not.

1. 緒 言

鋼材の脆性き裂伝播停止靱性の評価には、我が国においては主として ESSO 試験および二重引張試験、米国においては DCB (Double Cantilever Beam) 試験によつて得られる種々の特性値を用いてきた。ESSO および二重引張試験結果の評価には初期負荷応力と伝播き裂長さの静的解析が行われ、得られた脆性き裂伝播停止靱性値 K_{ca} は日本溶接協会規格 WES 3003¹⁾ の基礎として用いられている。テーパー付 DCB 試験の結果として得られる伝播き裂長さとき裂停止時のき裂開口変位から、静的解析により K_{Ia} 値が得られ²⁾、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. III Appendix G³⁾ の K_{IR} 曲線作製のための基礎データとして使われた。また、短冊型 DCB 試験結果を動的解析することによつて K_{ID} あるいは K_{Im} が得られる⁴⁾。

CROSLY および RIPLING により提案された K_{Ia} 値の決定方法²⁾ は静的解析を用いたものであり、き裂伝播に伴う運動エネルギーの効果を考慮に入れておらず、動的

有限要素解析を行つた URABE ら⁵⁾ によつて、脆性き裂伝播停止靱性を過大に評価するとして批判された。HOAGLAND ら⁴⁾ による動的解析により得られる K_{ID} の決定方法もまた、IRWIN ら⁶⁾ によつて光弾性縞模様の解析結果と矛盾するとして批判された。しかしながら、これらの批判が必ずしも当たつていないわけではない。たとえば、理論解析に用いられた条件が実験で用いられた試験片の挙動と必ずしも一致するものではない。とくに、実験結果に大きな影響を与える試験片形状および試験片への負荷装置の剛性の問題などは理論解析への導入が困難である。また、理論解析においては伝播き裂が停止するための条件が不明確な場合もある。そこで、試験片形状および試験片への負荷方法を改良したものとしてコンパクト試験が ASTM E24 委員会において採用され、共同実験が世界的規模において実施された⁷⁾。その結果、コンパクト試験が脆性き裂伝播停止靱性試験方法として適当であることが確認された。しかしながら、解析方法については静的あるいは動的のいずれを採用すべきか結論が得られていない。

昭和 54 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 55 年 8 月 22 日受付 (Received Aug. 22, 1980)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 Ph. D. (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chiba 260)

*² 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

Table 1. Chemical composition.

(wt%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B
SA533B Cl. 1, t250, 1/4 t	0.18	0.27	1.40	0.008	0.003	0.01	0.62	0.15	0.55	0.006	—
HT80-1, t25	0.11	0.27	0.78	0.014	0.006	0.25	0.98	0.46	0.44	0.031	—
HT80-2, t50	0.12	0.23	0.90	0.018	0.005	0.24	—	0.41	0.43	0.031	0.001
KD32, t30	0.13	0.34	1.39	0.017	0.007	0.01	0.02	0.02	—	—	—

本研究においては、4種の構造用鋼材についてコンパクト試験を実施し、解析方法についての検討を行うとともに、コンパクト試験によつて得られた脆性き裂伝播停止靱性値と従来から用いられている ESSO 試験および短冊型 DCB 試験によつて得られる値との比較、シャルピー衝撃試験結果などとの関連性について調べた。

2. 実験方法

脆性き裂伝播停止試験に供した鋼材は、厚さ 250 mm の原子炉圧力容器用鋼 (SA533B Cl. 1), 厚さ 25 mm および 50 mm の 80 kg/mm² 級高張力鋼 (HT80-1 および HT80-2), そして厚さ 30 mm の造船用 50 kg/mm² 級高張力鋼 (KD32) であつた。供試材の化学成分および機械的性質を Table 1 および 2 に示す。

脆性き裂伝播停止試験として、コンパクト試験, ESSO 試験および短冊型 DCB 試験を実施した。コンパクト試験片形状を Fig. 1 に示す。試験片は 200 mm × 200 mm であり、あらかじめ盛つておいた硬くて脆い溶着金属部に先端が位置するように機械切り欠きを入れた。試験片厚さは SA533B Cl. 1 および HT80-2 については 50 mm, HT80-1 および KD32 については 25 mm とした。試験は、試験片の穴に割りピンとくさびを入れ、50 t 万能材料試験機を用いてくさびを押し込み、切り欠きを押し拡げることにより行つた。試験片の切り欠き開口変位の測定は、試験片厚さ中心で、負荷軸から 0.25 W

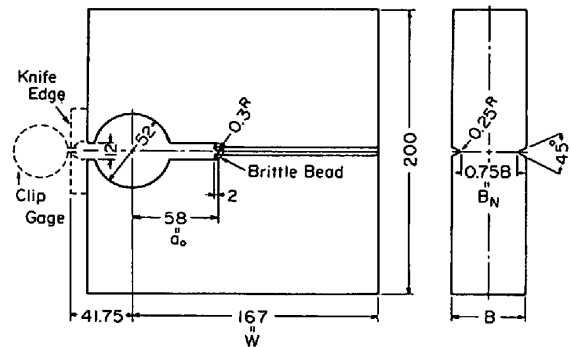


Fig. 1. Geometry of compact specimen.

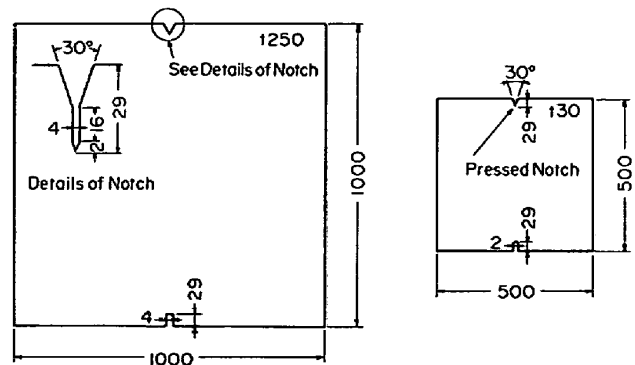
(=41.75 mm) 離れた位置に固定したつめに取り付けたクリップゲージを用いて行つた。

ESSO 試験は、SA533B Cl. 1 については 250 mm × 1000 mm × 1000 mm の試験片を用いて 8000 t テストリグにより、KD32 については 30 mm × 500 mm × 500 mm の試験片を用いて 1200 t テストリグにより、いずれも温度勾配型で実施した。試験片形状を Fig. 2 に示す。

短冊型 DCB 試験は Fig. 3 に示す形状の試験片を用いて、KD32 について実施した。脆性き裂は、電子ビームにより切り欠き先端に造つた脆化部から発生させた。試験片の切り欠き開口変位は Fig. 3 に示す位置でクリップゲージを用いて測定した。試験は 50 t 万能材料試

Table 2. Mechanical properties.

Steel	Tension test			V Charpy	DWT
	Y. S. (kg/mm ²)	T. S. (kg/mm ²)	El. (%)		
SA533B Cl. 1, t250, 1/4t, T-Dir.	49.7	62.6	27	-3	-25
HT80-1, t25, L-Dir.	78.6	83.2	26	-110	-60
HT80-2, t50, L-Dir.	80.0	84.9	24	-78	-25
KD32, t30, L-Dir.	32.0	48.4	27	-14	-35



(a) Specimen of SA533B Cl. 1

(b) Specimen of KD32

Fig. 2. Geometries of ESSO specimens.

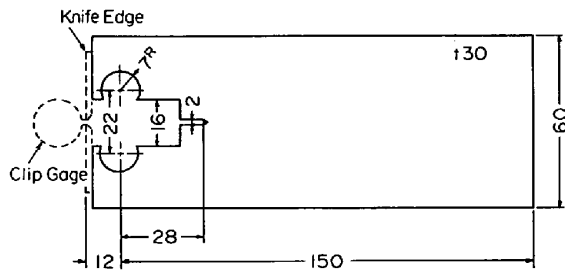


Fig. 3. Geometry of DCB specimen.

試験機を用いて、2本のピンの間にくさびを押し込み荷重し、その間隔を広げることにより実施した。

3. 解析方法

3.1 コンパクト試験

3.1.1 K_{Ia} の決定方法

き裂線上で荷重したときのコンパクト試験片の応力拡大係数と荷重の関係およびき裂長さとして試験片のコンプライアンスの関係式を基に導かれた式 (1)⁸⁾ を用いて、脆性き裂伝播停止時の荷重軸から 0.25W 離れた位置での切り欠き開口変位 Δ_f および荷重軸から伝播停止したき裂の先端までの距離で定義されるき裂長さ a_f から、静的解析による脆性き裂伝播停止靱性値 K_{Ia} を求めた。

$$K_{Ia} = Y \Delta_f E \sqrt{\frac{B}{B_N W}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 E は縦弾性係数、 B 、 B_N および W は Fig. 1 に定義した試験片寸法であり、 Y は下のように入れられる。

$$Y = \frac{2.2434(1.7164 - 0.9\alpha + \alpha^2)\sqrt{1-\alpha}}{(9.85 - 0.17\alpha + 11.0\alpha^2)}$$

$$\alpha = a_f / W$$

式 (1) において、 Δ_f の代わりに脆性き裂発生時の切り欠き開口変位 Δ_0 を、 a_f の代わりに初期き裂長さ a_0 を用いると、脆性き裂発生時の応力拡大係数 K_Q が計算できる。

3.1.2 K_{ID} の決定方法

KANNINEN⁹⁾ が短冊型 DCB 試験片内の脆性き裂の伝播問題に対して行った動的解析をコンパクト試験片に適用し、動的応力拡大係数のき裂伝播に伴う変化を求め、その平均的なものとして HAHN らが作成した K_{ID}/K_Q と $\Delta a_{total}/W$ の関係を示すグラフ¹⁰⁾ を用いて、脆性き裂発生時の応力拡大係数 K_Q と伝播き裂長さ ($\Delta a_{total} = a_f - a_0$) を用いて、動的解析による K_{ID} を計算した。

3.2 ESSO 試験

ESSO 試験による脆性き裂伝播停止温度における脆性き裂伝播停止靱性値 K_{ca} は、次式¹⁾ を用いて計算した。

$$K_{ca} = \sigma \sqrt{\pi a} \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2W}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ は初期荷重応力、 a は停止き裂長さ、 W は試験片幅である。

3.3 短冊型 DCB 試験

短冊型 DCB 試験片では、き裂の伝播過程において荷重点変位 V が変化しないと仮定し、KANNINEN¹¹⁾ により提案された次式を用いて脆性き裂伝播停止靱性値 K_{ca} を計算した。

$$K_{ca} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{Eh^{3/2}V}{a^2} \times \left[\frac{1 + 0.64(h/a)}{1 + 1.92(h/a) + 1.22(h/a)^2 + 0.39(h/a)^3} \right] \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 E は縦弾性係数、 h は試験片幅の 1/2、 a は停止き裂長さである。なお、荷重点変位 V はクリップゲージ変位から比例計算により求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 コンパクト試験結果

Fig. 4 に代表的な荷重および切り欠き開口変位の時間的变化の記録を示す。脆性破壊の発生に伴い、変位は急

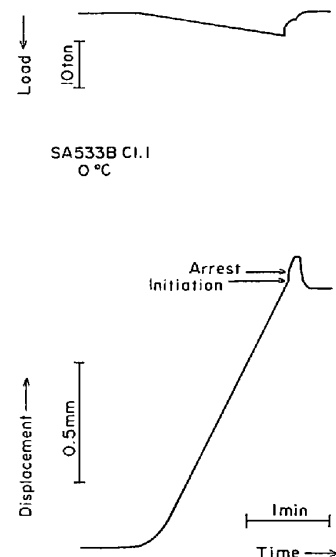


Fig. 4. Typical record of displacement and load vs. time for compact test.

激に増加し、一方荷重は急激に減少する。変位の急増が終了した点を脆性き裂が伝播を停止した点とした。

Photo. 1 にコンパクト試験片の破面の例を示す。破面で黒つぶくなっている部分は、脆性き裂伝播停止後、最終破断させる前に試験片を加熱し、酸化着色させたものであり、測定したき裂伝播部に相当する。白つぶい部



Photo. 1. An example of the fracture appearance of a compact specimen of SA533B Cl. 1 steel tested at 10°C.

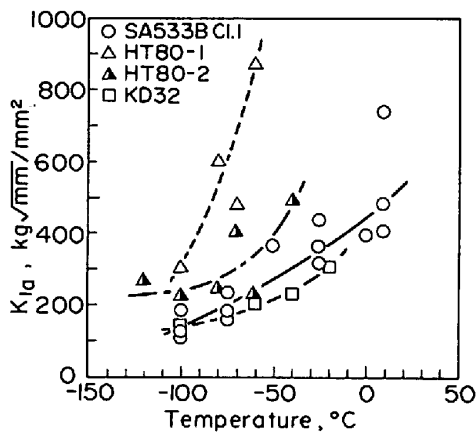


Fig. 5. Plot of K_{Ia} vs. temperature for SA533B Cl. 1 steel.

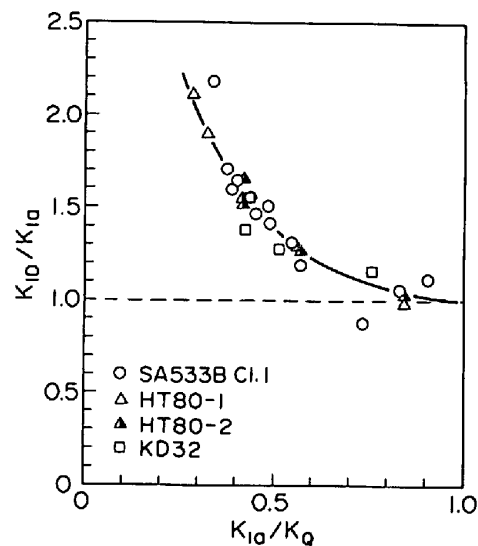


Fig. 6. Relation between K_{ID}/K_{Ia} and K_{Ia}/K_Q .

分は、試験片加熱着色後液体窒素により冷却し、さらに切り欠きを拡げるように負荷して破壊させることにより生じた破面である。

Fig. 5 に供試材の K_{Ia} の温度依存性を示す。 K_{Ia} と温度の関係を示す曲線は、HT80-1 がもつとも低温側にあり、SA533B Cl. 1 と KD32 がほぼ同じで、もつとも高温側に位置している。これは Table 2 に示す供試材の破面遷移温度 vTs の順にほぼ一致するが、NDT 温度 (T_{NDT}) の順とは一致しない。これについては後述する。

4.2 コンパクト試験結果の解析方法についての検討

Fig. 6 に、同一のコンパクト試験片を用いて測定した切り欠き開口変位および伝播き裂長さから静的解析により求めた K_{Ia} と動的解析による K_{ID} の比較を、 K_{ID}/K_{Ia} の K_{Ia}/K_Q に対するプロットとして示す。両者の関係は鋼種によらず 1 本の曲線で表され、 K_{Ia}/K_Q が小さいほど K_{ID}/K_{Ia} は大きく、 K_{Ia}/K_Q が 1 に近づくにつ

れ K_{ID}/K_{Ia} も 1 に近づく。 Fig. 6 に示した実験結果は、HAHN ら¹⁰⁾が解析的に求めた K_{ID}/K_{Ia} と K_{Ia}/K_Q の関係とほぼ一致するものである。しかしながら、静的解析による K_{Ia} が動的解析によつて得られる伝播停止時の K_{ID} に比して 2 倍程度の値を与えるという URABE ら⁵⁾のテーパー付き DCB 試験片についての理論解析結果とは相容れないものである。

Fig. 7 は試験片幅 W に対する比として表示したき裂伝播長さ da_{total} に対して、応力拡大係数 K の変化を示したものである。実線はき裂長さおよび切り欠き開口変位が時間とともに直線的に増加すると仮定して、静的解析による式 (1) を用いて計算した SA533B Cl. 1 のコンパクト試験片中をき裂が伝播する際の応力拡大係数の変化を示している。一方、HAHN らの動的解析¹⁰⁾では K_{ID} をき裂伝播速度の平均値に対応する破壊に対する抵抗と

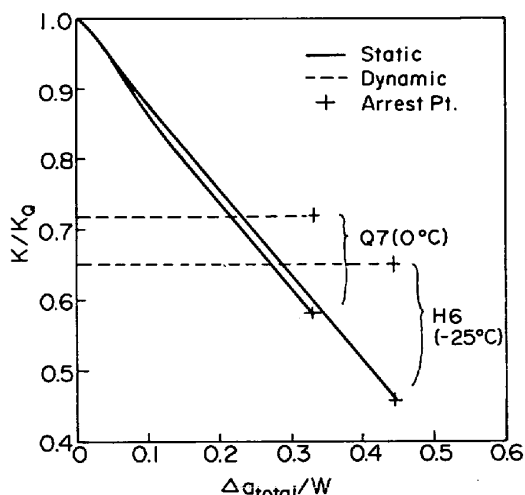


Fig. 7. Change in stress intensity factor during crack propagation in compact specimens.

考えて求めているので、き裂伝播過程において K_{ID}/K_Q は破線のように一定値となる。すなわち、静的解析によつて得られる K/K_Q 値はき裂伝播停止近くになつて動的解析によつて得られる値より小さくなり、き裂伝播停止時の両者の差は伝播停止までのき裂長さが大きいほど大きい。

伝播停止までのき裂長さ Δa_{total} はき裂の平均伝播速度に対応づけることができ、 Δa_{total} が大きいほど平均伝播速度は大きくなる¹⁰⁾。したがつて、Fig. 7 に示したように伝播停止までのき裂長さが大きいほど動的解析と静的解析の結果の差が大きいのは、動的解析で考慮している運動エネルギーが大きくなることによることがわかる。

HAHN らの動的解析では前述のようにき裂の伝播に伴い発生する運動エネルギーを考慮して K_{ID} を決めているが、脆性き裂が伝播を停止する際には運動エネルギーは 0 ないしはきわめて 0 に近い値となる。したがつて、脆性き裂伝播停止靱性値におよぼす運動エネルギーの効果は存在しても小さいと考えられる。また、 K_{ID} は平均き裂伝播速度に対応した応力拡大係数であることから、き裂の伝播停止時の応力拡大係数である脆性き裂伝播停止靱性値を過大評価する可能性がある。

そこで、KALTHOFF らによりエポキシ樹脂の DCB 試

験片について shadow pattern 法によりなされた脆性き裂伝播過程における応力拡大係数の測定結果¹²⁾ を用いて、脆性き裂伝播停止靱性値について検討する。Fig. 7 に示した SA533B Cl. 1 のコンパクト試験片 Q7 と H6 について得られたき裂伝播長さ Δa_{total} から、平均き裂伝播速度 v と音速 C_0 の比が HAHN らの動的解析結果¹⁰⁾ を用いて Table 3 に示すように求まる。コンパクト試験片 Q7 および H6 は鋼材であるが、 C_0 としてエポキシ樹脂内での音速を用いると、エポキシ樹脂を用いて実験したときの平均き裂伝播速度 v が表に示すように計算でき、約 200 m/s となる。 v は平均き裂伝播速度であるが、KALTHOFF らの実験で得られている脆性き裂発生後急激に速度が低下したのち一定速度でき裂が伝播するときの速度と考えることができる。そこで KALTHOFF らの実験結果のうち一定速度が 200 m/s 程度となる試験片の結果を用いると、表に示すように $K_I^{dyn}(0)/K_Q$ および $K_I^{dyn}(v)/K_Q$ が求まる。ここに、 $K_I^{dyn}(0)$ は脆性き裂伝播停止時の、 $K_I^{dyn}(v)$ は速度 v でき裂が伝播しているときの応力拡大係数の実測値である。 $K_I^{dyn}(0)/K_Q$ および $K_I^{dyn}(v)/K_Q$ と試験片 Q7 および H6 について求めた K_{Ia}/K_Q および K_{ID}/K_Q の値を比較すると、 K_{Ia}/K_Q は $K_I^{dyn}(0)/K_Q$ にほぼ等しく、また K_{ID}/K_Q は $K_I^{dyn}(v)/K_Q$ にほぼ等しい。 $K_I^{dyn}(0)$ は脆性き裂伝播停止時の応力拡大係数、すなわち脆性き裂伝播停止靱性値であり、したがつて $K_I^{dyn}(0)$ に等しい K_{Ia} は脆性き裂伝播停止靱性値と見なせる。一方、 K_{ID} は一定速度でき裂が伝播しているときの応力拡大係数 $K_I^{dyn}(v)$ にほぼ等しく、したがつて $K_I^{dyn}(0)$ よりも大きくなる。以上のことより、エポキシ樹脂と鋼、DCB 試験片とコンパクト試験片の違いはあるが、脆性き裂伝播停止靱性値としては K_{Ia} を用いるのがよく、 K_{ID} はその値を過大評価すると考えることができる。これと同じ結論は、コンパクト試験片破面の X 線フラクトグラフィによる脆性き裂伝播過程および停止時の応力拡大係数の測定によつても得られている¹³⁾。そこで、以後コンパクト試験によつて得られる脆性き裂伝播停止靱性値としては K_{Ia} を用いる。

Table 3. Comparison of K_{Ia} and K_{ID} vs. empirically obtained $K_I^{dyn}(0)$ and $K_I^{dyn}(v)$.

Compact test results					v for Epoxy resin (m/s)	Experimental results of Kalthoff, et al.		
	$\frac{K_{Ia}}{K_Q}$	$\frac{K_{ID}}{K_Q}$	$\frac{\Delta a_{total}}{W}$	$\frac{v}{C_0}$		$\frac{v}{(m/s)}$	$\frac{K_I^{dyn}(0)}{K_Q}$	$\frac{K_I^{dyn}(v)}{K_Q}$
Q7	0.55	0.72	0.355	0.106	188	207	0.53	0.65
H6	0.45	0.65	0.460	0.128	227			

4.3 脆性き裂伝播停止靱性値に及ぼす試験方法の影響

Fig. 8 に SA533B Cl. 1 についてコンパクト試験と ESSO 試験の結果を比較して示す。-100°C 近辺で K_{Ia} は K_{ca} とよく一致している。一方、10°C より高い温度ではコンパクト試験が実施できなかったため ESSO 試験結果と直接比較できないが、ESSO 試験結果とコンパクト試験結果の差は大きくない。

コンパクト試験結果とよく一致した靱性値を与えた ESSO 試験片ではき裂は 98 mm 伝播したのち停止し、他の試験片では 570~719 mm 伝播したのち停止した。Fig. 9 にき裂が 636 mm 伝播し、39°C の位置で停止した ESSO 試験片について、き裂伝播速度および試験片に貼付したひずみゲージで測定したひずみの変化を示す。ひずみはき裂が長さ 500 mm に達するまで変化がなく、その後き裂伝播とともに漸減し、き裂が停止したのちさらに減少して安定な状態に落ち着く。したがって、き裂長さが 98 mm と試験片の大きさに比してきわめて小さい場合は、き裂停止までに荷重低下は起こっていないと考えられ、初期荷重応力を用いて静的解析により求めた靱性値がコンパクト試験結果によく一致したものと考えられる。一方、き裂が試験片幅の 1/2 以上にあつて伝播する場合は荷重低下が認められるので、 K_{ca} と K_{Ia} はほぼ同じ値ではあつたが、解析方法には問題がある。

Fig. 10 に、KD32 についてコンパクト試験、ESSO 試験および短冊型 DCB 試験の静的解析によつて得られた脆性き裂伝播停止靱性値を比較して示す。この場合もデータ数は必ずしも十分ではないが、-40°C~0°C の温度範囲では 3 試験方法により求めた値には大きな差は認められない。しかしながら、低温では短冊型 DCB 試験はコンパクト試験より小さい値を与える傾向にある。

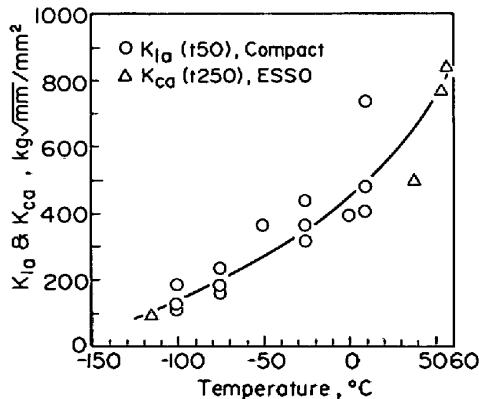


Fig. 8. Comparison of K_{Ia} obtained by compact test and K_{ca} by ESSO test for SA533B Cl. 1 steel.

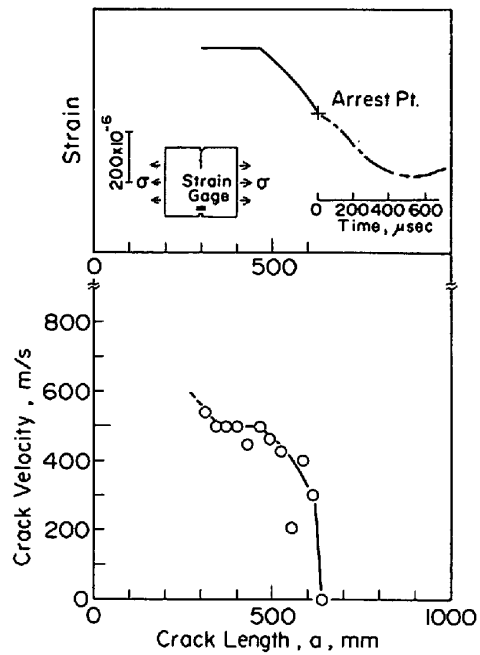


Fig. 9. Change in crack velocity and strain during the crack propagation in an ESSO test specimen of SA533B Cl. 1 steel.

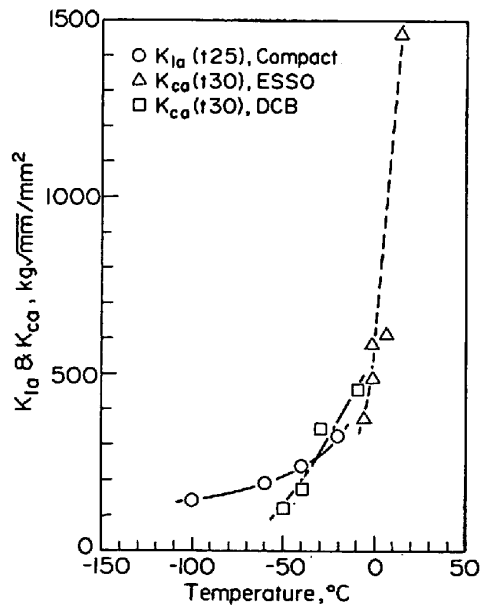


Fig. 10. Comparison of K_{Ia} obtained by compact test with K_{ca} by ESSO and DCB tests for KD32 steel.

4.4 脆性き裂伝播停止靱性値 K_{Ia} 、静的破壊靱性値 K_{Ic} および動的破壊靱性値 K_{Id} の比較

Fig. 11 に SA533B Cl. 1 の K_{Ia} 、 K_{Ic} ¹⁴⁾ および K_{Id} ¹⁵⁾ の温度依存性を示す。 K_{Ic} 値は厚さ 25 mm の 3 点曲げ試験片を用いて、ASTM 規格 E 399 に従つて求めた。E 399 の K_{Ic} 条件を満足しない場合は、 J_{Ic} を測定し、それより $K_{Ic} = \sqrt{J_{Ic}E/(1-\nu^2)}$ を用いて計算により求め

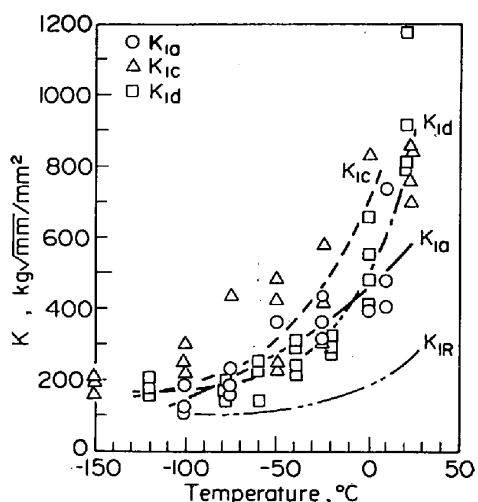


Fig. 11. Plots of K_{Ia} , K_{Ic} and K_{Id} vs. temperature for SA533B Cl. 1 steel.

た. K_{Id} は計装化シャルピー衝撃試験により $K=0.5\sim 3.5\times 10^6 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ で測定した.

実験点にはばらつきがあるため、3種の破壊靱性値の比較には実験点の近似線を用いた。10°Cより低い遷移温度領域では K_{Ic} がもつとも大きく、 K_{Id} は最小であり、 K_{Ia} はその中間的な値であった。これらの靱性値の大小関係は、SA533B Cl. 1について得られている結果²⁾とよく一致している。SA533B Cl. 1の100°Cにおける K_{Ic} は約 $750 \text{ kg}\sqrt{\text{mm}}/\text{mm}^2$ である¹⁶⁾ため、高温においては K_{Id} より小さくなると思われる。しかしながら、 K_{Ic} が安定延性き裂発生点までの荷重-荷重点変位曲線の下面積から計算した J 値から求めた値であるのに対し、 K_{Id} は最大荷重点までの荷重-荷重点変位曲線の下面積から計算した J 値から求めた値であることに注意しておく必要がある。

Fig. 12にHT80-1について K_{Ia} と K_{Ic} の比較を示す。-80°Cより低い温度では K_{Ia} は K_{Ic} より小さく、-80°Cより高い温度では K_{Ia} は K_{Ic} より大きくなった。この場合も K_{Ic} は安定延性き裂発生点までの荷重-荷重点変位曲線の下面積から計算した J_{Ic} より換算したものである。Fig. 12の結果は、 J_{Ic} から求めた K_{Ic} が温度の上昇とともに減少する場合には、その値は脆性破壊を問題とした場合きわめて過小評価した静的破壊靱性値を与えることを示唆している。

4.5 K_{Ia} と落重およびシャルピー衝撃試験結果の関係

落重試験により決定される NDT 温度 (T_{NDT}) は、鋼材の破壊靱性を表すパラメータとしてひろく使われている。Fig. 13に K_{Ia} と $(T-T_{NDT})$ の関係を示す。 T は試験温度である。図よりわかるように、 $(T-T_{NDT})$ に対してプロットした K_{Ia} のばらつきは大きく、ここで

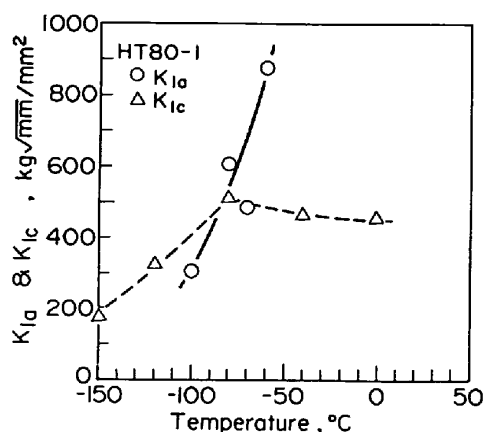


Fig. 12. Plots of K_{Ia} and K_{Ic} vs. temperature for HT80-1 steel.

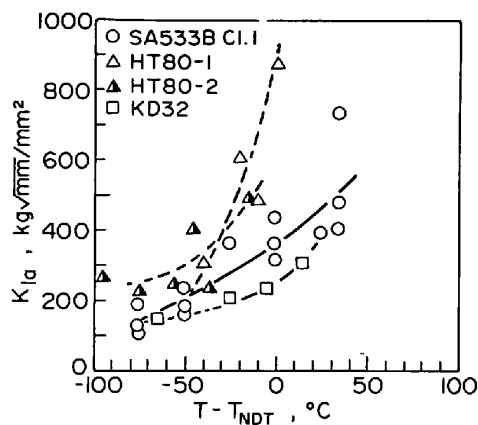


Fig. 13. Plot of K_{Ia} vs. $(T-T_{NDT})$.

得た実験結果について見るかぎり T_{NDT} を種々の鋼材の脆性き裂伝播停止靱性を表す適当なパラメータとは見なすことはできない。

Fig. 14に K_{Ia} と $(T-vTs)$ の関係を示す。 K_{Ia} のばらつきは Fig. 13に示したばらつきよりも小さい。したがって、シャルピー衝撃試験により得られる破面遷移温度 vTs は、 T_{NDT} に較べて、 K_{Ia} と相関のよいパラメータと考えることができる。これと同様の結果は、 K_{Ia} とシャルピー衝撃試験の吸収エネルギー vE の間にも得られた。したがって、今回の実験結果については、脆性き裂伝播停止靱性値 K_{Ia} は、落重試験よりも2mmVノッチシャルピー衝撃試験結果と相関が強い。

従来、落重試験が鋼材の破壊靱性、とくに脆性き裂伝播停止特性を求めるためのよい試験方法とされていたが、Fig. 13に示すように試験結果が大きくばらつくのは、次のようなことによるものと考えられる。すなわち、落重試験片では脆性き裂を発生させるために脆化ビードを試験片表面に置くが、脆性き裂の発生に直接関係する溶接金属および熱影響部の特性は試験材の種類によ

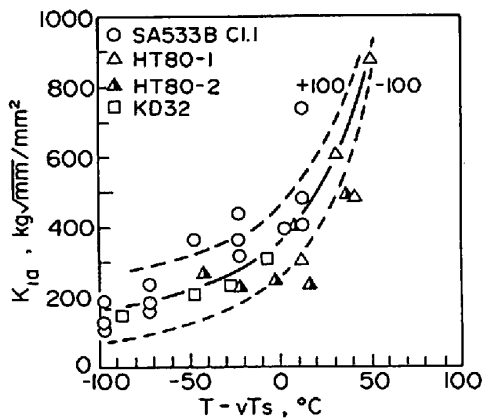


Fig. 14. Plot of K_{Ia} vs. $(T - vT_s)$.

つて大きく影響され、その結果脆性き裂の発生条件が異なり、これが NDT 温度に大きな影響を与える。一方、シャルピー衝撃試験結果が、破面遷移温度あるいは吸収エネルギーのどちらを採用しても比較的うまく脆性き裂伝播停止靱性値 K_{Ia} を整理できるのは、シャルピー衝撃試験が試験材そのものの性質を求める試験であり、破面遷移温度や吸収エネルギーとともに脆性き裂の発生と伝播の両方の性質によつて決定されるものであることによる。

5. 結 言

原子炉圧力容器用鋼 (SA533B Cl. 1)、80 kg/mm² 級高張力鋼 (HT80) および造船用 50 kg/mm² 級高張力鋼 (KD32) について、コンパクト試験、ESSO 試験および短冊型 DCB 試験を実施し、鋼材の脆性き裂伝播停止靱性値およびその評価方法について検討するとともに、落重およびシャルピー衝撃試験結果との関連性について調べた。得られた主な結果は次のとおりである。

1) 脆性き裂伝播停止靱性値はコンパクト試験で静的解析を用いて求めた K_{Ia} によつて評価できる。

2) K_{ID}/K_{Ia} と K_{Ia}/K_Q の関係は鋼種によらず 1 本の曲線で表され、 K_{Ia}/K_Q が小さいほど K_{ID}/K_{Ia} は大きく、 K_{Ia}/K_Q が 1 に近づくにつれ K_{ID}/K_{Ia} も 1 に近づく。ここに、 K_{ID} および K_Q はコンパクト試験で動的解析により求めた脆性き裂伝播停止靱性値および脆性き裂発生時の応力拡大係数である。

3) コンパクト試験により求めた K_{Ia} と ESSO 試験あるいは短冊型 DCB 試験により求めた K_{ca} の間には大きな差は認められなかったが、低温では短冊型 DCB 試験はコンパクト試験より小さい靱性値を与える傾向にあった。

4) SA533B Cl. 1 においては、遷移温度領域では K_{Ia} は K_{Ic} より小さく、 K_{Id} より大きい値を与えた。HT80

では、 -80°C より高温で K_{Ia} は K_{Ic} より大きくなった。この場合の K_{Ic} は安定延性き裂発生までの荷重-荷重点変位曲線の下面積から計算した J_{Ic} より求めた値であり、きわめて過小評価した静的破壊靱性値を与えている。

5) 2mm Vノッチシャルピー衝撃試験により得られる破面遷移温度および吸収エネルギーは、落重試験により求まる T_{NDT} よりも、脆性き裂伝播停止靱性値 K_{Ia} とよい相関があつた。

文 献

- 1) 日本溶接協会 WES 3003 「低温構造用鋼板判定基準」(1970)
- 2) たとえば、P. B. CROSLY and E. J. RIPLING: J. Pressure Vessel Tech. (Nov. 1975), p. 291
- 3) 1974 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III, Nuclear Power Plant Component, Appendix G (1974)
- 4) たとえば、R. G. HOAGLAND, A. R. ROSENFELD and G. T. HAHN: Met. Trans., 3 (1972), p. 123
- 5) Y. URABE, A. S. KOBAYASHI, A. F. EMERY, and W. J. LOVE: J. Eng. Mat. and Tech. (1977)
- 6) G. R. IRWIN, J. W. DALLY, T. KOBAYASHI, W. L. FOURNEY, and J. M. ETHERIDGE: NUREG-0072 (1976)
- 7) C. R. BARNES, R. G. HOAGLAND, A. R. ROSENFELD, G. T. HAHN, and P. N. NINCER: "Preliminary Compilation of the Test Data and Supplementary Information of the ASTM E24. 01. 06 Dynamic Initiation-Crack Arrest Task Group," (Feb. 15, 1979)
- 8) F. J. RIPLING: 私信
- 9) M. F. KANNINEN: ASTM Special Publ. 627 (1977) p. 19
- 10) G. T. HAHN, H. T. CORTEN, K. S. KIM, C. P. DEBEL, C. W. MARSHALL, P. C. GEHLEN, C. POPELAR, R. G. HOAGLAND, A. R. ROSENFELD, M. F. KANNINEN, and R. SIMON: NUREG/CR-0057, BMI-1995 (May 1978)
- 11) M. F. KANNINEN: Int. J. of Fracture, 9 (1) (Mar. 1973), p. 83
- 12) J. F. KALTHOFF, J. BEINERT, and S. WINKLER: ASTM Special Publ. 627 (1977), p. 161
- 13) 中野善文, 片山道雄: 日本材料学会第 17 回 X線材料強度に関するシンポジウム (1980), p. 26
- 14) 中野善文, 田中康浩, 大橋延夫: 日本溶接協会原子力研究委員会 7HST 小委員会資料 No. 7HST-63 (1978)
- 15) 佐野謙一, 田中康浩, 大橋延夫: 日本溶接協会原子力研究委員会 7HST 小委員会資料 No. 7HST-78 (1978)
- 16) 中野善文, 田中康浩, 大橋延夫: 未発表