

動的破壊靱性およびその評価法



中野善文*

Dynamic Fracture Toughness and Its Measurement

Yoshifumi NAKANO

1. はじめに

材料の破壊は材料を道具として使い始めた時から、人間にとつての重要な問題となつたと言つてよい。破壊には、脆性破壊で代表される瞬間的な破壊から、疲労破壊あるいはクリープ破断のような長時間を要する破壊まで多くの種類がある。とくに、ここ 40 年ほどは、もつとも一般的に使われるフェライト系鉄鋼材料に見られる脆性破壊が最重要課題として多くの研究がなされ、破壊力学が開発され、用いられるようになった。破壊力学が使われるようになる以前にも、脆性破壊の問題を取り扱うことがなされてきたが、それはすべて衝撃力により材料を破壊させて、その特性を見るものであつた。すなわち、シャルピー衝撃試験などがこれである。これらは、本稿の主題である動的破壊靱性の評価手法に属するものであり、工業的試験として一般に用いられている。しかしながら、これらは手軽に脆性破壊を起こさせる目的で試験片に衝撃負荷しているのであつて、静的に対する動的という観点でのものではない。そこで、本稿ではこのような非破壊力学的材料評価には触れず、主として破壊力学的なものについて述べる。

2. 動的破壊靱性

材料の破壊靱性は、非破壊力学的破壊靱性と破壊力学的破壊靱性に大別される。非破壊力学的破壊靱性は、シャルピー衝撃試験による吸収エネルギーや破面率、落重試験による NDT (Nil-ductility Transition, 無延性遷移) 温度などがこれにあたる。

一方、本稿で述べる破壊力学的破壊靱性は、破壊の段階に応じて Table 1 に示すように分類できる。破壊はまず発生する必要がある、発生したき裂は伝播し、ある条件下では停止する。この各段階に応じて材料の破壊靱性が定義され、評価される。

破壊力学で扱う破壊発生は、材料内にき裂が存在し、

Table 1. Classification of fracture toughness.

Fracture characteristics		Parameter	Standard
Initiation	Static	K_{Ic} $CTOD$ J_{Ic}	ASTM E399 BS5762 ASTM E813
	Dynamic	$K_{Ic}(t)$ J_{Ia} K_{Ia}	ASTM E399
Propagation	Dynamic	$K_{I D}$	
Arrest	Static	K_{Ia} K_{Ca}	WES 3003

t: Test time in second

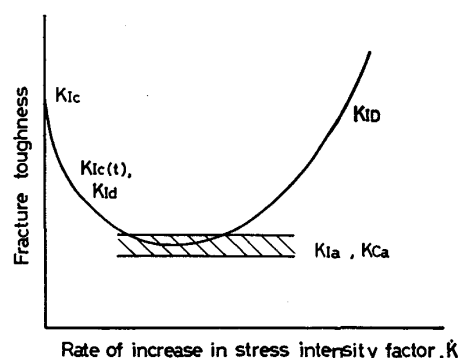


Fig. 1. Effect of loading rate on fracture toughness.

それに外力が作用することが前提になるが、力の作用の仕方により静的と動的に分かれる。力の作用する速度がきわめて低く、得られる材料特性(破壊靱性)に速度効果が現れない場合を静的、速度効果が現れる場合を動的と区別される。具体的にどの速度での負荷を静的と呼ぶかは、たとえば英国規格 BS 5762¹⁾においては切欠付き三点曲げ試験片に対して応力拡大係数速度 $\dot{K}=15\sim 80 \text{ Nmm}^{-3/2}/\text{s}$ の場合を静的と定義している。これを厚さ 25 mm の切欠付き三点曲げ試験片にあてはめると、0.026~0.137 mm/s のクロスヘッド速度での負荷が静的ということになる。脆性き裂が伝播しているときは、き裂先端の材料が受ける負荷速度は大きく、当然動的な現

昭和 61 年 5 月 28 日受付 (Received May 28, 1986) (依頼解説)

* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所水島研究部主任研究員 Ph. D (Mizushima Research Dept., Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Mizushimakawasakidori Kurashiki 712)

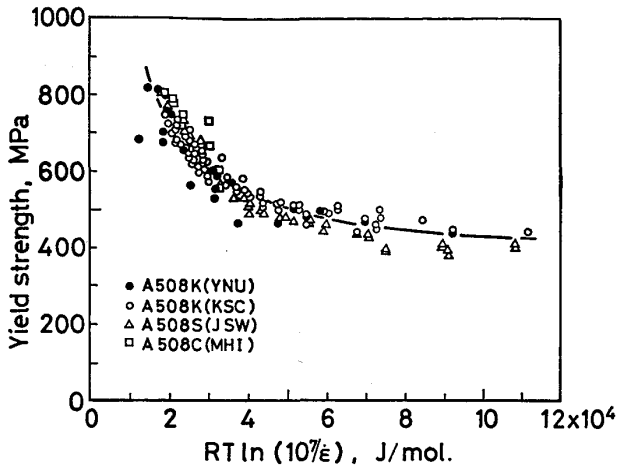


Fig. 2. Relation between temperature-strain rate parameter and yield strength for A508 Cl. 3 steel.

象である。

このような動的破壊に対する材料の抵抗を表すものが動的破壊靱性であるが、静的破壊靱性との関係を線型破壊力学パラメーターである応力拡大係数を用いて模式的に Fig. 1 に示す。

Fig. 1 において、 K_{IC} は静的破壊靱性である。 $K_{IC}(t)$ および K_{Ia} は破壊発生を対象とした動的破壊靱性であり、前者は ASTM 規格 E399²⁾ に規定されている非衝撃的試験により求まる値であり、後者は計装化シャルピー試験などの衝撃試験により求まる値の総称としてここでは用いている。 K_{ID} はき裂が伝播している際の材料の抵抗を表す値である。

破壊発生においては、負荷速度 (\dot{K}) が大きくなるほど破壊靱性は低下するが、き裂が伝播している時は逆に \dot{K} が小さくなるほど破壊靱性は低下する。したがって、ある \dot{K} で破壊靱性は最低になり、この値がき裂伝播停止靱性 (K_{Ia}) に相当しているものと考えられている。

静的負荷状態から負荷速度を増すにつれて破壊靱性は低下する。これは負荷速度の上昇が効果としては温度を

下げることと同じであることによる。

Fig. 2 は丸棒引張試験で求めた降伏強さと温度-歪み速度パラメーターの関係を原子炉压力容器用鍛鋼 A508 Cl.3 について示した例である³⁾。両者の関係は次式で表され、温度と歪み速度が等価であり、温度を下げるか歪み速度を上げると降伏強さが増大することを示している。

$$YS = A \cdot RT \ln(10^7/\dot{\epsilon}) + B$$

ここに、 YS は降伏強さ (MPa), R はガス定数, T は温度 (K), $\dot{\epsilon}$ は歪み速度 (1/s), A および B は定数である。

この式より、負荷速度を増すことによりき裂先端の材料は塑性変形しにくくなり、き裂先端の応力はより高くなりうる。その結果、破壊しやすくなる。すなわち、材料の破壊靱性は低下する。このように、負荷速度 (=歪み速度) が大きくなるにつれ、破壊靱性が小さくなる。

ところが、き裂が伝播する過程で測定される破壊靱性 K_{ID} は伝播速度が大きくなるほど、言い替えれば、負荷速度が大きいくほど大きくなる。これは破壊発生の場合と相反するものである。負荷速度が大きくなるほど、き裂先端の塑性域は小さくなり、その結果破壊靱性が小さくなることは前述した。き裂が進展する際には、き裂先端部の材料は大きな塑性歪みを受けたのち破壊する。この塑性歪みは発熱を伴う。しかしながら、負荷速度がきわめて大きくなると、この熱が発散することなく狭い塑性域内に閉じ込められ、いわゆる断熱状態が生じる。このような状態では、材料は高温で破壊するため破壊靱性は大きくなる。その結果、負荷速度が大きくなるにつれ、破壊靱性が大きくなると考えられる。そして、ある負荷速度の範囲で破壊靱性の最下限値があり、これが脆性き裂伝播停止靱性であると考えられる。

3. 動的破壊靱性の評価方法

3.1 動的破壊発生特性

動的破壊発生特性を調べるには、試験片に高速負荷を

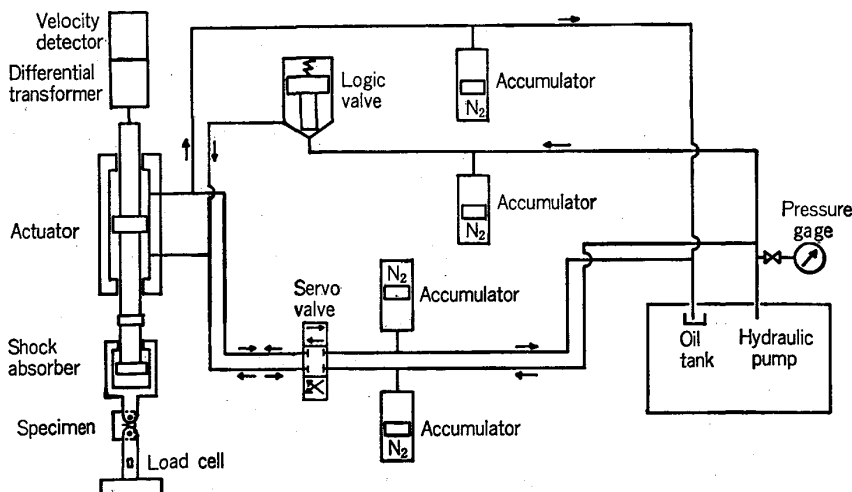


Fig. 3. An example of mechanism of high velocity tensile testing machine.

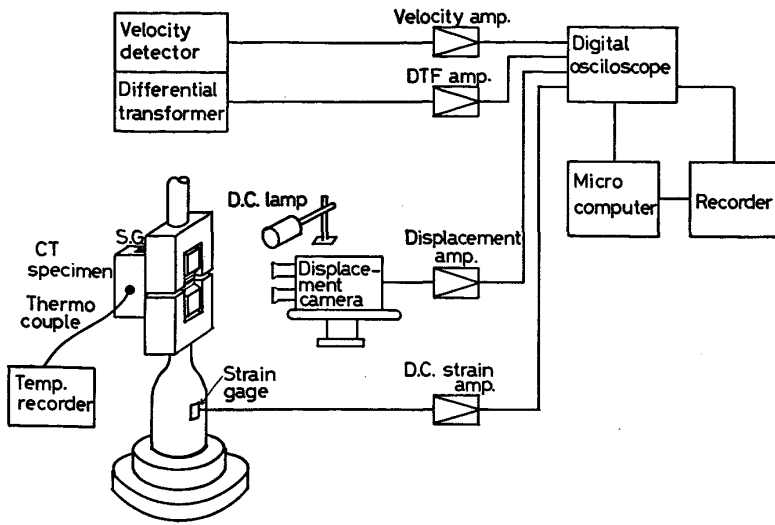


Fig. 4. An example of measuring system in high velocity CT test.

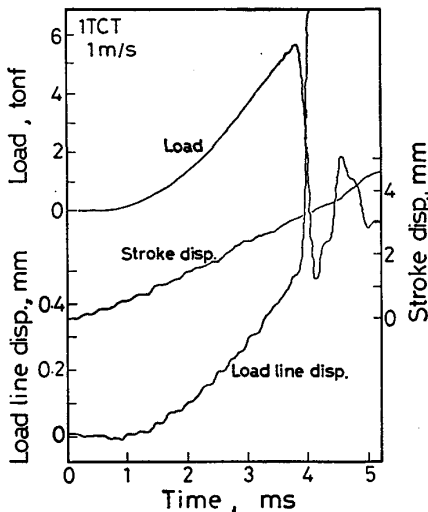


Fig. 5. An example of load and displacement vs. time curves.

かける必要がある。高速負荷の方法には、1) 比較的衝撃を伴わない高速引張り、2) 衝撃、3) 電磁力のような特殊なものがある。

3.1.1 高速引張り

比較的衝撃を伴わない高速引張りは、油圧サーボを用いるのが一般的である。この場合、試験片にある程度荷重が加わるまでは比較的ゆつくりと荷重が増すように緩衝器を利用する。最近の試験機にはこの種のものがふえている。Fig. 3 に、高速引張試験機の機構の一例を示す。また、Fig. 4 に同試験機を用いて CT 試験を行う際の測定機能の例を示す。Fig. 5 に荷重、変位-時間曲線の例を示す。試験片としては、Fig. 6 および 7 に例を示す CT 試験片あるいは三点曲げ試験片が用いられる。

3.1.2 衝撃

衝撃荷重を利用するものは、計装化シャルピー試験機や計装化落重試験機のように、振り子型ハンマーや重錘

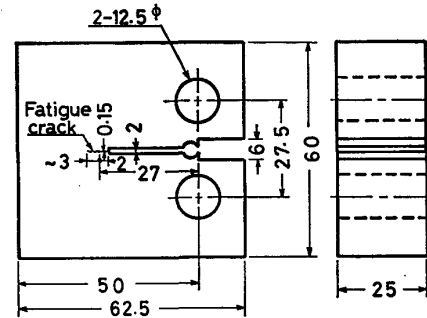


Fig. 6. 1T CT specimen geometry for *J*-integral measurement.

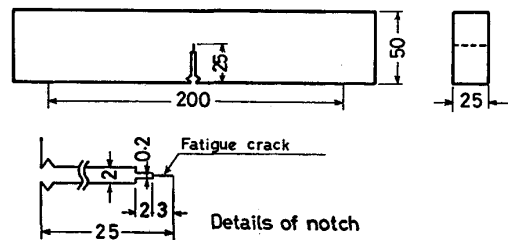


Fig. 7. 1T three point bend test specimen geometry.

を高所より落下させ、試験片にぶつけ、その時の衝撃エネルギーを用いて試験片を破断させるものである。Fig. 8 および 9 に計装化シャルピー試験機および計装化落重試験機の概略図を示す。Fig. 10 に計装化シャルピー試験機で得られた荷重-時間曲線の例⁴⁾を示すが、衝撃的に荷重するために荷重振動が顕著になる場合がある。これを防ぐために振り子の振り上げ角度を小さくしてハンマーが試験片に当たる時の衝撃速度を低くする低角打撃の技術が用いられる。

Fig. 11 に計装化シャルピー試験で用いられる試験片形状の一例を示す。これは通常のシャルピー衝撃試験片の切欠きを長くかつ疲労き裂としたものである。計装化落重試験では Fig. 7 に示したと同様の三点曲げ試験片

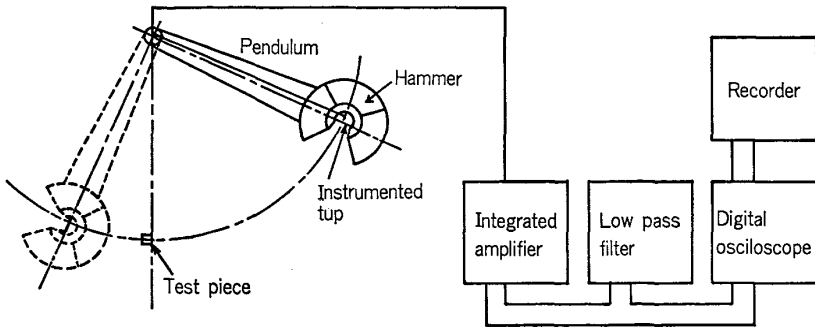


Fig. 8. Illustration of instrumented Charpy test.

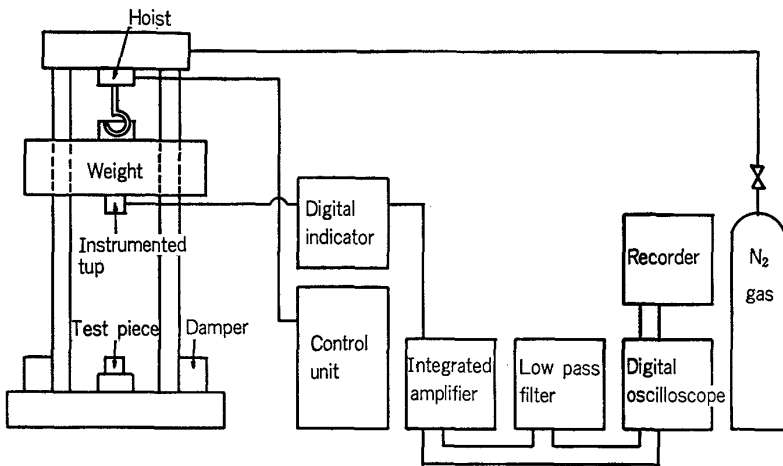


Fig. 9. Illustration of instrumented drop weight test.

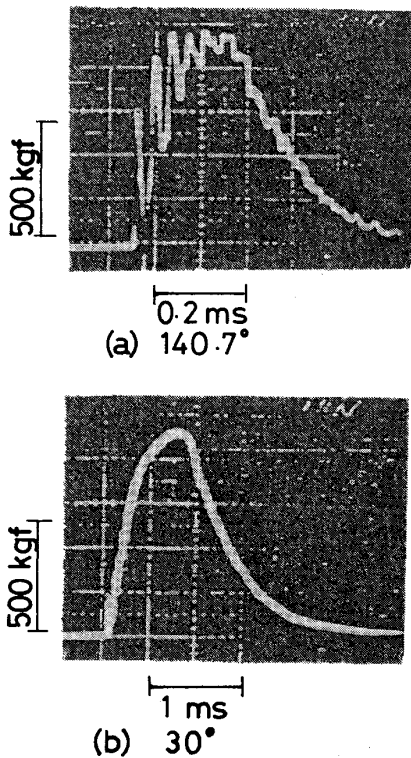


Fig. 10. Examples of load vs. time curve obtained by the instrumented Charpy test with different blow angles.

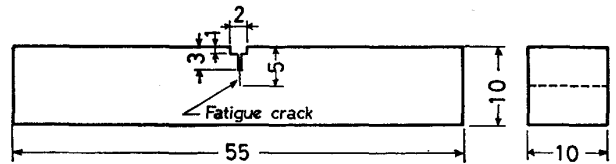


Fig. 11. Instrumented Charpy test specimen geometry.

が用いられる。

衝撃負荷方式は試験機が簡単で安価であるが、衝撃負荷であるがゆえに生じる荷重振動に難があり、また荷重振動との兼ね合いで負荷速度に制限が生じるという欠点がある。これが最近高速引張負荷方式がよく用いられるようになってきた理由である。

一方、より高速での破壊現象を調べる目的で、Air gun 方式の試験³⁾⁵⁾が用いられる場合がある。これは Fig. 12 に示すように、窒素ガスによる発射体を荷重伝達棒につけ、それを介して試験片に荷重を負荷するものである。試験片に負荷される荷重は、荷重伝達棒に添付した歪みゲージにより測定される応力から計算される。試験片き裂先端での応力拡大係数は、き裂先端近傍に添付した歪みゲージで測定した歪みからあらかじめ求めておいた関係式を用いて計算する。

3.1.3 電磁力

電磁力を用いた試験⁶⁾は、磁場内に置かれた導電性の物体に非定常電流を流すと、物体に力(ローレンツ力)

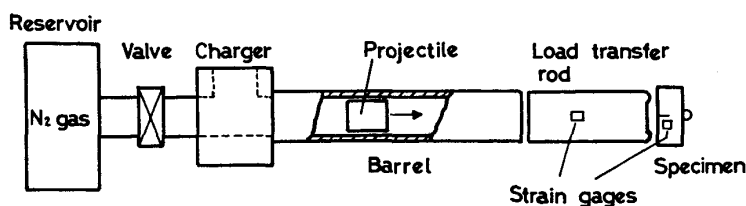


Fig. 12. Schematic illustration of short pulse loading (airgun) test.

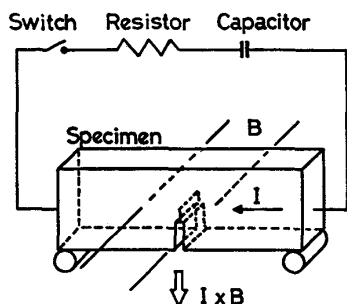


Fig. 13. Illustration of dynamic fracture toughness test using electromagnetic force.

が作用する、いわゆるフレミングの法則を利用したものである。電磁力は体積力として試験片全体に作用するため、荷重振動を伴わない高速負荷が可能となる。電磁力は磁場と非定常電流の大きさに比例するため、それにより試験片の大きさが限定される。Fig. 13 に試験の一例を示す。

Fig. 14 に上記の試験法を用いたときの負荷速度の比較を示す。

現在のところ、動的破壊靱性を求める方法としては、

試験を高速負荷により行い、破壊時の荷重、変位あるいはエネルギーから静的試験と同じ方法で、それぞれに対応した値 ($K_{IC}(t)$, K_{I_d} , $CTOD$, J_{I_d} 等) を計算している。高速負荷による試験においては、荷重および変位の計測さらにはそれらの記録装置として、静的試験用よりはより高速の性能を有するものが要求される。また、それらの測定の仕方にも工夫が必要である。

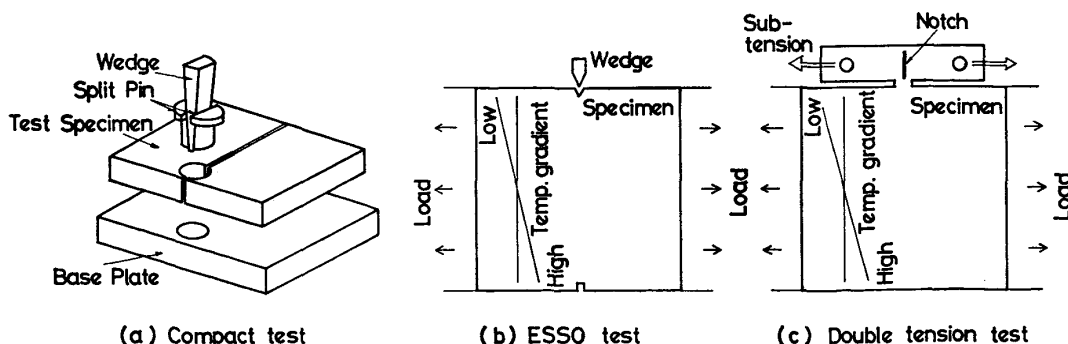
以上はおおむね脆性破壊を対象としたものであるが、高靱性材料については J_{I_d} で代表される動的弾塑性破壊靱性の測定が求められる。この場合は、予き裂先端部に延性き裂が発生する時点の靱性を求める必要がある。そのため、 J_R 曲線と呼ばれるものが用いられる。これは、試験片に種々の変位まで負荷し、そこで負荷を止め、除荷した際の延性き裂進展量とそれまでに試験片により吸収されたエネルギーから計算される J 積分の関係を示すものであり、延性き裂の進展量が0のときの J 積分を J_{I_d} とする。このような試験においては、試験片に任意の変位が与えられた段階で試験片への負荷を止める必要があり、そのために種々の工夫がなされる。

3.2 き裂伝播特性

万が一脆性き裂が伝播し出すと、それを停止させな

Test method	Rate of increase in stress intensity factor, \dot{K} , MPa \sqrt{m}/s								
	10^1	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
Static		■							
High speed hydraulic servo						■	■	■	■
Ordinary hydraulic servo		■	■	■	■	■	■	■	■
Instrumented Charpy								■	■
Instrumented drop weight							■	■	■
Air gun								■	■
Electro magnetic						■	■	■	■

Fig. 14. Relation between test method and rate of increase in stress intensity factor.



(a) Compact test

(b) ESSO test

(c) Double tension test

Fig. 15. Test methods for crack propagation and arrest.

れば構造物は完全に破壊に至る。そのような事故を防止する目的で、材料の脆性き裂伝播停止靱性が求められている。そのために用いられる試験がコンパクト試験、ESSO 試験あるいは二重引張試験である。Fig. 15 に各試験法の概略を示す。

コンパクト試験では、試験片全体が一定温度に保持され、くさびを押し込むことにより切欠きを広げ、き裂先端の位置する脆化ビード部から脆性き裂を発生させる。き裂が伝播するにつれ、応力拡大係数は低下するため、き裂は停止する。このときのき裂長さから切欠き開口変位からき裂伝播停止靱性が計算される。一方、ESSO 試験あるいは二重引張試験では、試験片に温度勾配をつけ、一様応力を負荷した状態で低温部で脆性き裂を発生させる。この場合は、き裂が伝播するにつれ応力拡大係数は増加するが、温度勾配があるためき裂が伝播するにつれき裂先端に存在する材料の温度は上昇し、靱性もまた上昇する。そして、ある点でき裂は停止する。このときのき裂長さから初期負荷応力から静的負荷状態での関係式を用いてき裂伝播停止靱性が計算される。

以上のように、脆性き裂伝播停止試験においては、高速で伝播していたき裂が停止する現象を扱っているにもかかわらず、停止靱性の計算には静的負荷状態に対する関係式を用いている。この当否はさておき、少なくともき裂伝播中の応力拡大係数の変化を知ることは重要である。

脆性き裂は高速 (600~1000 m/s 程度) で伝播するため、そのときのき裂先端での応力状態を調べることは困難であり、高速度写真の使用が不可欠となる。そのために特殊な高速度カメラが開発され、用いられている。このカメラは Cranz Schardin カメラと呼ばれるもので、多数のスパークを連続的に使用し、各スパークに対応した静置フィルム上にイメージを焼き付けるものである。き裂先端の応力拡大係数は光弾性あるいはシャドウパター

ン法⁸⁾といった光学的手法で測定する。光弾性は通常の応力解析に用いられるものであり、試験片表面に焼き付けた格子模様の変化をモアレ縞として観察し、応力拡大係数に対応づけるものである。シャドウパターン法は、き裂を有する透明な合成樹脂平板に外力が作用すると、き裂先端を含む部分の板厚が減少するとともに、その部分の材料の屈折率が変化するため、平行光線を平板に当てると、き裂先端部に明るいリングに囲まれた暗部が生じる。この暗部の形 (シャドウパターン) が応力拡大係数と対応していることを利用するものである。このような光学的手法を利用するため、透明な合成樹脂の板あるいは膜を使用する必要がある。さらに、き裂が実際に伝播している最中の現象を捕らえるため、高速カメラの使用が絶対条件となる。また、装置が精密であり、光学的手法を使うこととあいまつて、大型あるいは低温での実験が困難である。さらに、金属材料の応力拡大係数を直接測定することは不可能であり、合成樹脂被膜を金属試験片表面に貼り付けた反射法を用いる必要がある。

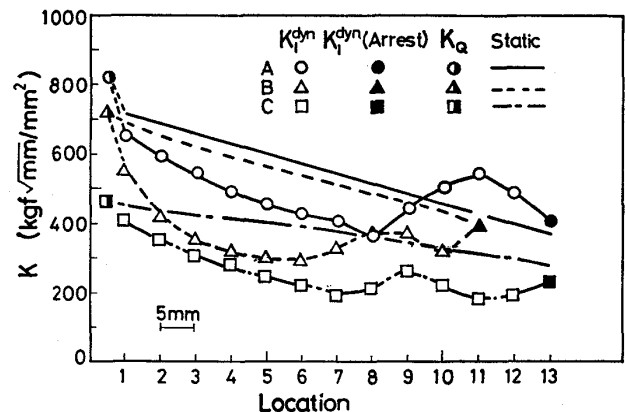


Fig. 16. Relation between dynamic fracture toughness and stress intensity factor determined using a static analysis.

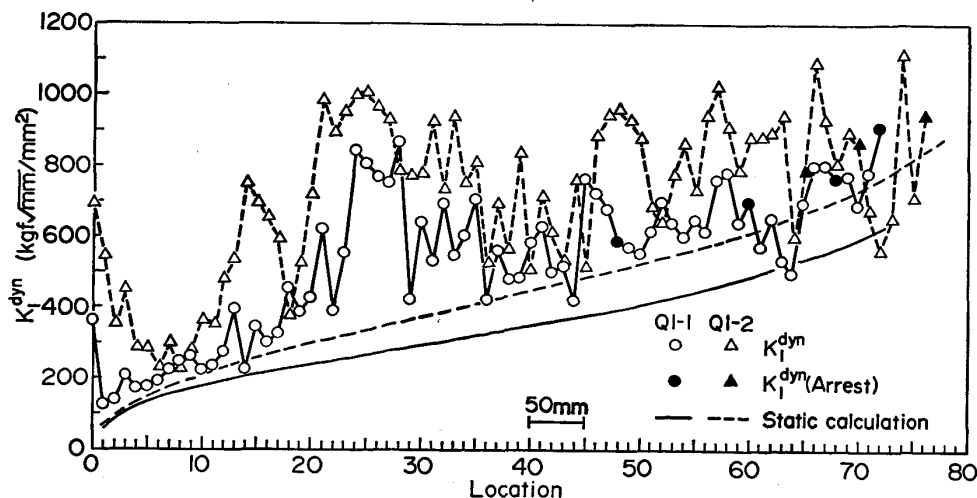


Fig. 17. Change in dynamic fracture toughness during crack propagation in temperature gradient type ESSO test specimens.

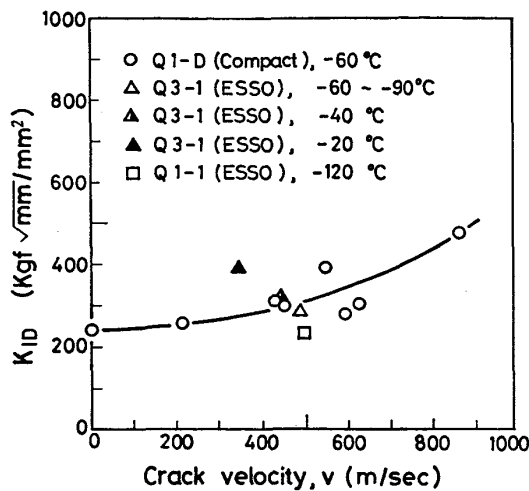


Fig. 18. Relation between dynamic fracture toughness and crack velocity.

脆性き裂が伝播する際には、き裂先端部の材料はまず塑性変形を起こし、ついで破壊する。これは静的試験においてき裂が進展する場合と同様である。材料の破壊靱性が大きいほど破壊までの材料の塑性変形量は大きくなる⁹⁾。材料の塑性変形量はマイクロ歪みとしてX線回折強度曲線の半価幅を用いることにより、測定できる。き裂は応力拡大係数が破壊靱性に等しくなった時に進展するため、事実上応力拡大係数を求めていることになる。この手法を用いると、き裂が伝播したあとの破面を用いることができるため、上記の光学的手法に必要な高速度カメラが不要となり、比較的手軽に脆性き裂伝播過程の動的破壊靱性ないしは動的応力拡大係数の測定が可能である。しかも、試験片形状、試験温度に無関係に適用可能というメリットがある。

Fig. 16¹⁰⁾ および 17¹¹⁾ にコンパクト試験片と温度勾配付き ESSO 試験片で測定した脆性き裂伝播過程における動的破壊靱性の変化の例を示す。動的破壊靱性と別途測定したき裂伝播速度の関係を示したのが Fig. 18¹²⁾ である。

4. ま と め

動的破壊靱性ということで、破壊発生特性としての動的破壊靱性とき裂伝播過程のそれについて述べ、またそ

の評価手法について紹介した。応力拡大係数を用いた取扱いは主として原子力に関して精力的な研究がなされてきた。一方、き裂先端開口変位 (CTOD) については、氷海域で使用する砕氷商船に関する規格の整備に伴い、動的な値が意味を持つようになりつつある。しかしながら、動的破壊に関しては、

- 1) 動的試験による材料の破壊靱性の測定
- 2) 実構造物における動的破壊パラメーターの決定の両方にまだ問題があるのが現状である。前者は試験としては動的であるが、破壊靱性の計算式は静的と同じものを用いるというものであり、後者は動的荷重が作用したときの応力拡大係数などの破壊パラメーターをどう決定するかの問題である。現状は前、後者とも静的な取扱いをする場合が多いが、本来すべて動的な取扱いが必要であり、あるいは静的取扱いが大きな誤差を生まない範囲の把握が必要であり、この点については実験のおよび解析的立場からの研究、両者の結合が待たれる。

文 献

- 1) British Standards Institution, BS 5762, Methods for crack opening displacement (COD) testing (1979)
- 2) ASTM Standards E 399, Standard Test Methods for Plane-strain Fracture Toughness of Metallic Materials (1983)
- 3) 日本溶接協会原子力研究委員会 4 DF 小委員会, 軽水炉一次系健全性の破壊力学的評価に関する研究 (II) (昭和 61 年 2 月)
- 4) 中野善文, 佐野謙一, 田中康浩, 大橋延夫: 川崎製鉄技報, 12 (1980) 4, p.33
- 5) H. HOMMA, D. A. SCHOCKEY and Y. MURAYAMA: J. Mech. Phys. Solids, 31 (1983) 3, p.261
- 6) 吉村 忍, 矢川元基, 曾根田直樹: 日本機械学会論文集 (A編), 51 (1985) 463, p.912
- 7) T. KOBAYASHI and J. W. DALLY: ASTM STP 627 (1977), p.257
- 8) J. F. KALTHOFF, J. BEINERT and S. WINKLER: ASTM STP 627 (1977), p.161
- 9) Y. NAKANO and M. KATAYAMA: Fracture Mechanics of Ductile and Tough Materials and Its Application to Energy Related Structures, The Hague (1981), p.209 [Martinus Nijhoff Publishers]
- 10) 中野善文, 片山道雄: 材料, 30 (1981), p.241
- 11) 中野善文: 材料, 31 (1982), p.204
- 12) 中野善文: 材料, 31 (1982), p.463