



入門講座

材料試験法編 機械的性質-3

破壊靱性

新家光雄

Mitsuo Niinomi

豊橋技術科学大学

生産システム工学系 教授

Fracture Toughness

1 はじめに

材料の破壊に対する信頼性を評価するためには、材料の破壊に対する抵抗を評価することが重要である。材料の破壊に対する抵抗は、一回の負荷に対しての材料の壊れにくさを示す靱性によって判定するのが通常である。靱性にはいろいろあるが、本稿では最も代表的な破壊靱性について概説することとする。

2 破壊靱性

材料の理論強度と材料が実際に破壊するときの強度とを比較すると、材料の実際の破壊強度は、理論強度の1/10から数1/100になる。このことから、材料内部には当初から小さな欠陥(小さなき裂)が存在しており、このために実際の材料強度が、理論強度より低くなると考え、その場合に材料が破壊する条件をGriffith¹⁾が求めている。すなわち、材料内部の微小き裂が、拡大し進展する条件を定義した。これが破壊力学の出発点となっており、破壊力学によりその条件の臨界値が定義され、破壊靱性に発展している。

破壊靱性は、材料中に既に存在する微小き裂の進展が開始される時に、それに対して材料が示す抵抗(材料の破壊に対する抵抗)と説明するとわかりやすい。破壊靱性には、き裂が急激に(不安定に)進展を開始する時に材料が示す荷重を基にして求める平面歪破壊靱性と、き裂がゆっくりと(安定に)進展を開始する時の荷重および開口変位の積(エネルギー)を基にして求める弾塑性破壊靱性が代表的である。前者は、極めて脆い材料(脆性材料)に、後者はねばり材料(延性材料)の場合に評価されるのが一般的である。

ところで、破壊靱性は、後述するように疲労き裂(き裂先端が最も鋭く、自然き裂に近い：き裂先端半径が0と見なせる場合)付き試験片を用いて評価され、切欠き(き裂先端

半径が0と見なせない場合)付き試験片を用いて同様に評価される値は靱性と呼ぶべきと著者は考える。したがって、破壊靱性は、物理的意味がより明確で、より厳密な靱性と言える。

ここでは、き裂が開口して破壊に至る破壊様式の場合の平面歪破壊靱性および弾塑性破壊靱性の代表的な評価法を中心に破壊靱性を述べることにする。

2.1 平面歪破壊靱性

線形破壊力学に基づく破壊靱性であり、ASTM E 399²⁾に規格化されている平面歪破壊靱性(K_{Ic})試験法により、最も一般的に評価できる。一般の実用材料では、応力が負荷され、き裂が進展を開始するまでに、き裂の先端では塑性変形を生じる。塑性変形により、き裂は鋭さを失い(鈍化)、さらなる負荷によりき裂が進展する。線形破壊力学は、き裂先端に生じる塑性域の大きさが、き裂長さに比べて十分に小さい場合(小規模降伏)、すなわち脆性破壊に相当する場合に成り立ち、き裂先端の応力状態を応力拡大係数 K を用いて表わしている。破壊を生じる下限界の応力拡大係数を破壊靱性と定義し、 K_{Ic} で表わしている。したがって、脆性破壊条件は、次式で与えられる。

$$K \geq K_{Ic} \dots\dots\dots (1)$$

試験片の板厚と K_{Ic} との関係では、図1に示すように、 K_{Ic} はある板厚以上で一定になる。図1での各領域((a)、(b)および(c))での破面を模式的に示すと図2のように描け、上述の K_{Ic} が一定になる領域では図2(c)のように側面に極めて狭いせん断型の破断面(シアリップ)を残すだけで、ほぼ破面全体が平坦となる。この領域では、板厚方向の変形拘束が十分に高い平面歪状態が主であり、この領域における破壊靱性は平面歪破壊靱性、 K_{Ic} と定義され、板厚に影響されない材料の固有値となる。

平面歪破壊靱性試験では、3点曲げおよびCT(Compact

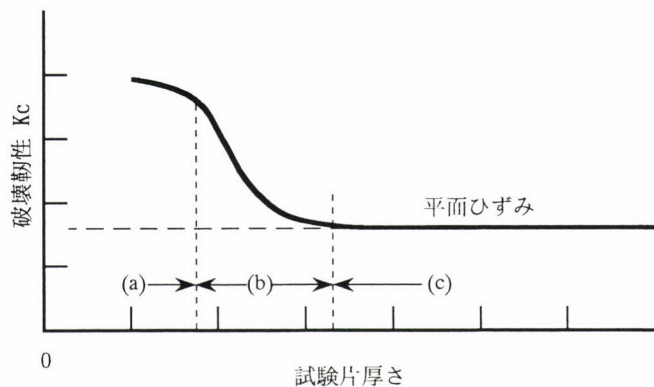
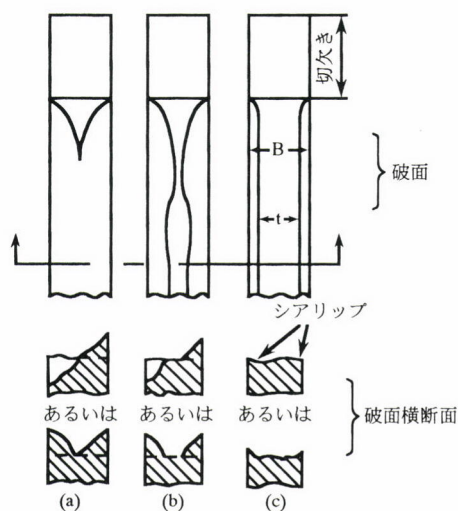
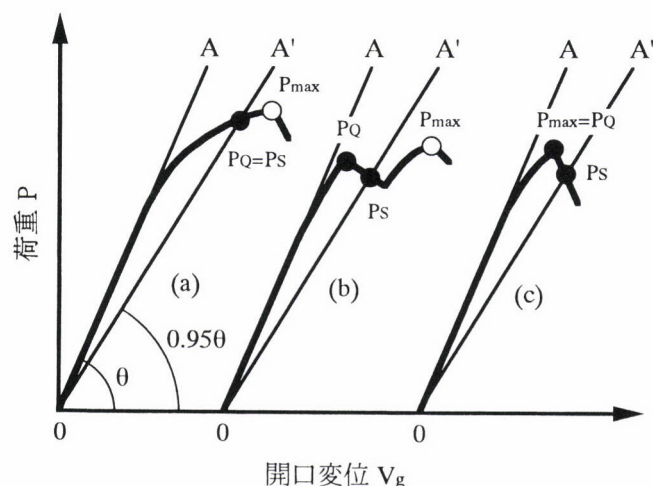
図1 K_c の試験片厚さに対する変化

図2 図1の(a)、(b)および(c)領域に対応する破面形態の変化

Tension) 試験片が主に用いられるが、AT (Arc-Shaped) 試験片、DC (T) (Disk-Shaped Compact) 試験片およびA (B) (Arc-Shaped Bend) 試験片も規格化されている。いずれの試験片の場合にも、片側に切欠きを付し、その先端に疲労き裂を導入後(疲労予き裂)、破壊させ、その際の荷重と切欠き部の開口変位とを測定する。荷重-開口変位曲線上の不安定破壊開始時の荷重(P_Q)より、応力拡大係数 K (これを K_Q とする)を算定し、それがき裂長さの精度や後に示す(4)式および(5)式等の所定の有効条件を満足するとき、 K_Q を K_{IC} とする。 P_Q から K_Q を計算する式は規格に示されているが、例えば代表的な3点曲げおよびCT試験片での K_Q の計算にはそれぞれ次に示す(2)式および(3)式を用いる。

$$K_Q = P_Q S f(a/W) / (B W^{3/2}) : 3 \text{ 点曲げ試験片} \cdots (2)$$

ここで、 $f(a/W) = 3(a/W)^{1/2} \{1.99 - (a/W)(1-a/W)(2.15 - 3.93a/W + 2.7a^2/W^2)\} / \{2(1+2a/W)(1-a/W)^{3/2}\}$ 、 B は板厚、 S は支点間距離、 a はき裂長さ、 W は板幅である。

図3 平面歪破壊靱性試験での荷重 P -開口変位 V_g 曲線の形態

$$K_Q = P_Q f(a/W) / (B W^{1/2}) : \text{CT試験片} \cdots (3)$$

ここで、 $f(a/W) = (2+a/W)(0.886+4.64a/W-13.32a^2/W^2+14.72a^3/W^3-5.6a^4/W^4)/(1-a/W)^{3/2}$ である。

不安定破壊開始時の荷重(P_Q)は、通常図3(a)に示すように5%オフセット線と荷重-開口変位との交点で決定され、この点では約2%のき裂進展があると言われている。この他、荷重-開口変位は、図3に示した(b)および(c)の各形態に分類されており、それらの場合の P_Q の取り方が示されている。すなわち、(b)の場合には P_s に至るまでの間の最大荷重を P_Q とし、(c)の場合には P_Q は P_s に至るまでの最大荷重 P_{max} となる。 P_{max} が次式の条件を満たす時、 K_Q を算出できる。

$$P_{max}/P_Q < 1.10 \cdots (4)$$

K_Q が K_{IC} として認められるには、切欠きに関する条件、疲労予き裂の導入条件および疲労予き裂の長さに関する条件等を満足し、最終的に次式を満足することが必要である。

$$B \text{ および } a \geq 2.5 (K_Q / \sigma_y)^2 \cdots (5)$$

ここで、 σ_y は降伏応力である。本条件が満たされない場合は、試験片の寸法を1.5倍にして再度試験をする。

なお、 K_{IC} が得られない場合の靱性の相対比較のために、最大荷重(P_{max})と降伏応力(σ_y)との比に関する強度比(R_s で示される)を評価報告することが推奨されている。例えば、3点曲げおよびCT試験片を用いた場合の強度比、 R_{sb} および R_{sc} は、それぞれ次に示す(6)式および(7)式で計算される。

$$R_{sb} = 6P_{max}W / \{B(W-a)^2\sigma_y\} : 3 \text{ 点曲げ試験片} \cdots (6)$$

$$R_{sc} = 2P_{max}(2W+a) / \{B(W-a)^2\sigma_y\} : \text{CT試験片} \cdots (7)$$

ASTM E399以外の平面歪破壊靱性試験法としては、シェブロン切欠き付SR (Short Rod) 試験片あるいはSB (Short Bar) 試験片を用いる試験法がASTM E1304³⁾に規格化されている。

応力拡大係数 K は、引張負荷応力方向であるき裂に垂直な方向の引張負荷応力を σ とし、き裂の長さを a とすると、これらの間には次の関係が成り立つ。

$$K = \sigma Y \sqrt{\pi a} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 π は円周率、 Y は試験片形状やき裂形状に関する係数である。

したがって、破壊靱性値 K_{IC} が与えられた材料があるとし、その材料に応力 σ_s が負荷されるような状態であれば、その場合のき裂長さ a_s は、

$$a_s = (K / \sigma_s Y)^2 / \pi \quad \dots\dots\dots (9)$$

と求まり、この長さ以下のき裂(欠陥)長さであれば、この場合の応力負荷条件では材料は破壊しないことになる。また、例えば負荷応力 σ が与えられており、欠陥の大きさ a もわかっていれば、材料が破壊しないために必要とされる破壊靱性値 K_{IC} がわかる。このようにして、破壊靱性値 K_{IC} は設計によく応用される。

2.2 弾塑性破壊靱性

弾塑性破壊靱性は、平面歪条件を満足しても前述したようにき裂長さに比べてき裂先端に形成される塑性域の大きさが十分に小さい状態である小規模降伏を満たさない場合、すなわちき裂長さに比べてき裂先端に形成される塑性域の大きさが無視できない大規模降伏条件下での破壊靱性である。上述の K_{IC} 試験では小規模降伏条件を満たすために大型試験片が必要となり、多大な費用がかかる場合が生じるが、弾塑性破壊靱性試験ではより小さな寸法の試験片による破壊靱性の評価が可能となり、そのような制約が緩和される。

弾塑性破壊靱性試験には、大別して弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験とCOD(Crack Opening Displacement：き裂開口変位)試験とがある。これらの試験法では、安定き裂進展開始時の J 積分(ポテンシャルエネルギー解放率)あるいは δ 値(き裂先端開口変位)(各々 J_{in} 、 δ_{in})を決定する。 J_{in} および δ_{in} の板厚に対する変化を図4に示す。図中、 J_c および δ_c は、各々不安定破壊開始時の J 積分および δ である。 J_c および δ_c は、板厚の増大とともに低下し、平面歪および小規模降伏状態となれば一定値となる。一方、 J_{in} および δ_{in} は、平面歪状態となれば一定値となっており、 K_{IC} が得られる板厚で小規模降伏状態となる以前の板厚で一定値となる。

2.2.1 J_{IC} 試験

J_{IC} 試験の代表的な規格はASTM E813⁴⁾であり、我が国では日本機械学会基準によるJSME S001⁵⁾がある。標準試験片は、疲労予き裂を導入した3点曲げ試験片およびCT試験片であるが、ASTMでは代替試験片が認められている。

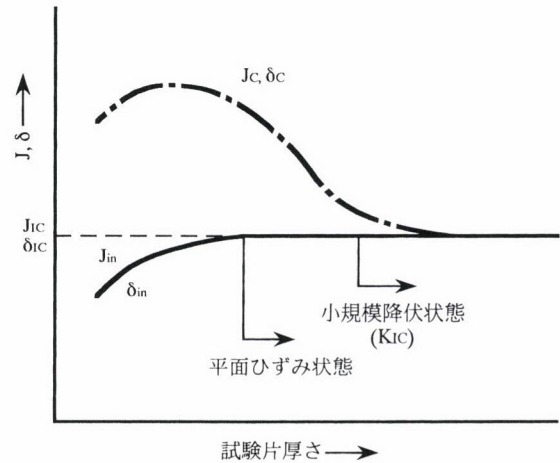


図4 J_{in} および δ_{in} の試験片厚さに対する変化

ASTMでは、さらにASTM E1737⁶⁾が J_{IC} 試験もカバーしており、その場合DC(T)試験片も標準に加えられている。前述したが、本試験法では安定き裂の進展開始を検出することが必要であり、図5に示すき裂進展量(Δa)と J 積分値との関係を求めることが基本となる。図5には、疲労予き裂からき裂が発生する(き裂進展開始)状況を J - Δa 関係に対応させて示してある。最も基本的な J - Δa 関係の求め方は、複数の試験片を用いて、種々の所定荷重まで載荷し、それらの場合の各荷重-荷重線(CT試験片の場合)あるいは荷重点(3点曲げ試験片の場合)変位(この場合は K_{IC} 試験で述べた開口変位ではなく、荷重のかかる線上での変位：荷重点変位あるいは点の変位：荷重点変位)を記録することから始まる。次いで、各荷重線変位での J 積分を計算し、

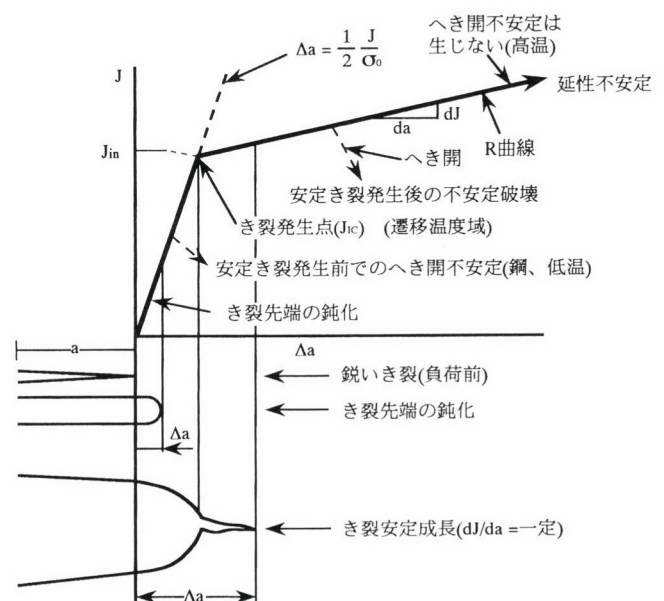


図5 J - Δa 関係とき裂の発生および進展との対応

それに対応するき裂進展量(Δa)を試験片破面上で測定し、両者を関係付ける。試験片の疲労予き裂は荷重の上昇とともに、塑性変形によりその先端が広がり鋭さが低下する鈍化現象を示す。さらに荷重が上昇すると、鈍化した疲労予き裂からき裂が発生し、進展して行く。J- Δa 関係は、疲労予き裂の鈍化量とJ積分値との関係を示す部分である鈍化直線およびその後のき裂進展量とJ積分値間の関係を示すR曲線からなる。鈍化直線とR曲線との交点が安定き裂進展開始点に相当し、ここでのJ積分値を求めれば J_{Ic} 値となる。

図6に示すある荷重(P_i)－荷重線変位(V_i)でのJ積分値 J_i は、図6の斜線で示す荷重－荷重線変位下の面積(A_{pi})と除荷重(P_i)から計算する。ただし、前述した P_Q から K_Q を計算する場合と同様にして、 P_i より P_i における応力拡大係数 K_i が計算できるので、 J_i は次式で求まる。

$$J_i = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \\ = \{ (1 - \nu^2) K_i^2 \} / E + f(a_0/W) A_{pi(i)} / (Bb) \quad \cdots (10)$$

ここで、 $J_{el(i)}$ は V_i における J_i の弾性成分、 $J_{pl(i)}$ は J_i の塑性成分、 ν はポアソン比、 E はヤング率、 $f(a_0/W)$ は試験片の形状係数、 B は試験片厚さ、 $b = W - a_0$ 、 W は試験片幅、 a_0 は初期き裂長さである。

すなわち、複数の試験片を異なる変位に負荷後除荷し、加熱着色後破断あるいは疲労破壊させる。次いで、き裂長さを測定し、J積分を求め、J vs Δa 関係、すなわちR曲線を求める。その後、鈍化直線とR曲線との交点をき裂発生点として J_{Ic} を求める。鈍化直線については、流動応力 σ_{fs} ($= (\sigma_y + \sigma_B) / 2$ 、 σ_B :引張強さ)を用いて、ASTM E 813では $J = 2\sigma_{fs}\Delta a$ と与えられているが、JSME S 001では基本的には実測する。その後、 J_{Ic} の有効条件を検討し、それら

を満足していれば J_{Ic} とみなす。

ただし、ASTM規格では、当初の厳密なき裂の発生点でのJ積分 J_{Ic} を求めることから、やや不明瞭な定義に改定され、 J_Q 値を求めるようになっている。また、R曲線は、JSME規格では直線近似するが、ASTM規格ではべき乗回帰曲線近似することになっている。このことに関連して、図7にASTM E 813でのJ- Δa 関係および J_Q の求め方を示す。 J_Q は、鈍化直線の0.2mmオフセット線とR曲線との交点とし、その有効性を次に述べる条件に従って判定し、満足されれば J_{Ic} とみなす。すなわち、 J_{Ic} および J_Q の有効性条件はASTM規格およびJSME規格で大きな違いはなく、疲労予き裂等に関する条件を満足し、最終的に次式を満足すれば J_{Ic} と見なされる。

$$B \text{ および } b \geq 25 (J_{Ic} \text{ or } J_Q / \sigma_{fs}) \quad \cdots (11)$$

ここまでは、複数の試験片を用いる複数試験片法を強調してきたが、一本の試験片を用いる単一試験片法も規格化されている。例えば、試験片に一定電流を通電した場合に、き裂をはさんだ位置での電圧変化がき裂の進展開始時に急変し、き裂の進展に応じて増大するので、一本の試験片を用いることでR曲線が得られ、かつき裂発生点も検出できる。この手法を電位差法として、ASTMおよびJSME規格で共に推奨している。この他、JSME規格では、複数試験片法としてストレッチ・ゾーン(SZ)法が、単一試験片法として除荷コンプライアンス法およびアコースティック・エミッション(AE)法が取り入れられている。

現在の所、 J_{Ic} は設計に直接用いられることはほとんどない。しかし、 J_{Ic} と K_{Ic} の間には次の関係があるので、 J_{Ic} から K_{Ic} を計算し、その K_{Ic} を設計に用いることが可能である。

$$K_{Ic} = \sqrt{J_{Ic} E / (1 - \nu^2)} \quad \cdots (12)$$

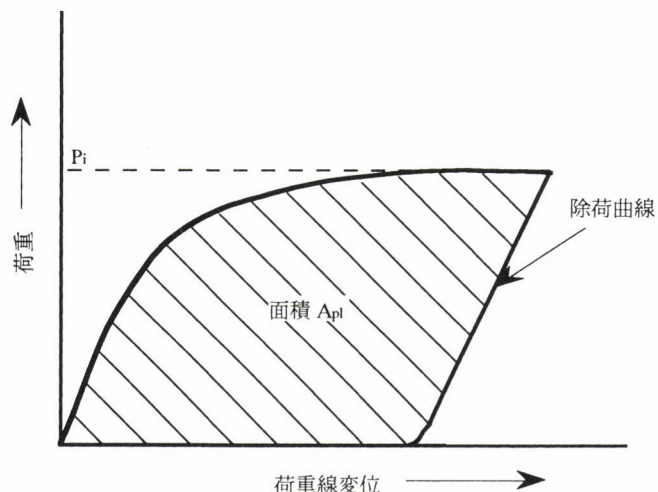


図6 J積分の計算に用いる荷重－荷重線変位下の面積(A_{pi})および除荷重(P_i)の模式図

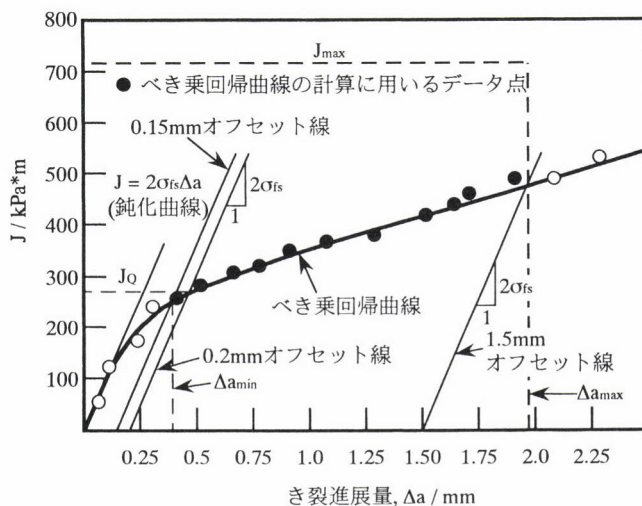


図7 ASTM規格における J_Q 値の決定法の模式図

ここで、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。したがって、 J_{IC} から K_{IC} を計算し、その K_{IC} を設計に用いることが可能である。

ところで、上述のように、 J_{IC} は、き裂進展開始に対応する破壊靱性であり、き裂進展開始靱性とも言われる。これに対してき裂の進展開始後のき裂進展に対して材料が示す抵抗としてき裂進展抵抗靱性が定義されている。き裂が一旦進展しても、そのき裂が急速に進まなければ材料は壊滅的な破壊に至ることはない。そうなれば、その間に部材の修理が可能となる。あるいは少々のき裂が発生しても、材料のき裂進展への抵抗が高ければ、き裂が進展しない応力状態を保つことで材料をそのまま使用して行くことが可能である。すなわち、前者は損傷をある程度許容した設計が可能と言うことで、損傷許容設計と呼ばれ、後者は損傷があっても、その増大を許さないことでフェール・セーフ (fail safe) 設計と呼ばれる。このような設計を行うとき、材料を選定する上で、き裂進展抵抗靱性がその尺度となる。また、このような設計は、材料の節約にも通ずる。

き裂進展抵抗靱性は、 J - R 曲線の傾き dJ/da を無次元化して得られる次式のテアリング・モジュラス T_{mat} で表わされる⁷⁾。

$$T_{mat} = (E/\sigma_{fs}^2) (dJ/da) \quad \dots\dots\dots (13)$$

2.2.2 COD試験

COD試験規格としては、英国規格協会のBS 5762⁸⁾が良く知られている。ASTM規格では、ASTM 1290⁹⁾がある。BS 5762では3点曲げ試験片のみが、ASTM 1290では3点曲げ試験片およびCT試験片が推奨されている。また、板厚は、BS 1290では材料の原厚とするが、ASTM 1290では板幅との関係で規定されている。いずれの場合にも、試験片に疲労予き裂を導入後、荷重および切欠き端での開口変位を記録する。荷重－開口変位曲線は、図8のように5つ

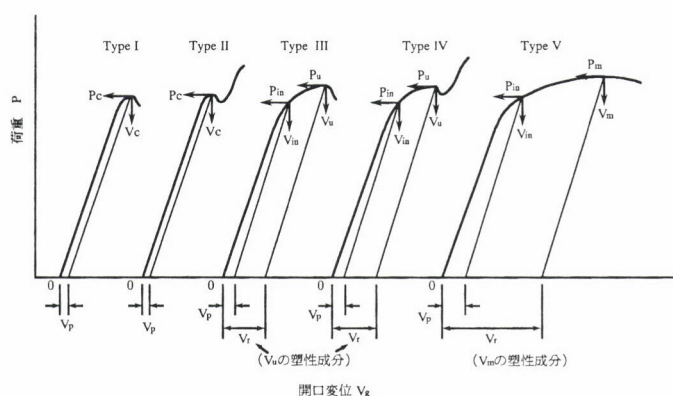


図8 COD試験片での荷重 P －開口変位 V_g 曲線の分類

の形態に分類されている。すなわち、不安定破壊 (Type I)、ポップイン (Type II)、安定破壊の発生 (Type III)、安定破壊を伴う不安定破壊 (Type IV) および最大荷重を示しその後荷重低下を伴って破壊する (Type V) の場合である。それぞれのTypeに対応して、図8に示した開口変位、 V_c 、 V_{in} 、 V_u および V_m を測定し、これらの塑性成分 V_p から所定の換算式により各々のき裂先端開口変位 δ_c 、 δ_{in} 、 δ_u および δ_m に換算する。安定き裂成長がある場合には、 δ_{in} 、 δ_u あるいは δ_m のいずれかを破壊靱性とする。

これらのうち、き裂が進展を開始するときのき裂先端開口変位である δ_{in} の決定には、 R 曲線 δ - Δa を用いる。その場合、ASTM規格やJSME規格と異なり、き裂進展量 Δa には疲労予き裂の鈍化量を入れない。 δ - Δa 曲線を $\Delta a=0$ に外挿し、 δ_{in} を決定する。

CODと J 積分との間には、次式が成立するので、CODから K を計算することができる。したがって、CODの臨界値から K_{IC} を計算することが可能である。

$$COD = J/(\lambda\sigma_y) \quad \dots\dots\dots (14)$$

なお、以上の K 、 J およびCOD基準の破壊靱性試験法を一括した規格が比較的最近ASTM E1820¹⁰⁾として登場している。

2.3 衝撃破壊靱性

衝撃荷重下での材料の破壊は、一般により脆性となり、設計上重要である。衝撃破壊靱性試験法は、未だ規格化検討段階にあるが、シャルピー衝撃試験機や落重試験機を用いて、試験片にかかる荷重および試験片の変位を測定できるように計装化した試験システムが用いられる。代表的な衝撃破壊靱性試験法としては、コンピューターによるデータ解析機能を備えた計装化シャルピー衝撃試験機システム (CAIシステム)がある¹¹⁾。その場合、疲労予き裂付き3点曲げ試験片を用いる。一本の試験片から荷重－変位データをコンピューターに取り込む。次いで、荷重－変位データをコンピューターソフトにより破壊力学的に解析することで、応力拡大係数 K 、き裂進展量および J 積分との関係の導出やき裂発生点の決定を行う。動的平面歪破壊靱性 K_{Id} や動的弾塑性破壊靱性 J_{Id} の有効性の判定は、現在の所上述した静的破壊靱性の場合に準拠して行う。

3 おわりに

破壊靱性について記述したが、試験法が主体となった点、および記述が比較的むずかしくなってしまった点をご容赦頂きたい。これらの点を補うために、Q&Aに目を通して頂けると幸いである。

文献

- 1) A. A. Griffith : Trans. Roy. Soc. London, 221 (1920), 163.
- 2) Standard Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM Designation E 399-90, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 3) Standard Test Method for Plane-Strain (Chevron-Notch) Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM Designation E 1304-97, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 4) Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, ASTM Designation E 813-89, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 5) 弾塑性破壊靱性 J_{IC} 試験方法, JSME S 001-1992, 日本機械学会, (1992)
- 6) Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness, ASTM Designation E 1737-96, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 7) P. C. Paris, H. Toda, A. Zhoor and H. Ernst : ASTM STP 668, (1979), 251.
- 8) Method for Crack Opening Displacement (COD) Testing, BS 5762, BSI, London, UK, (1979)
- 9) Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement, ASTM Designation E 1290-93, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 10) Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM Designation E 1820-96, ASTM, Philadelphia, PA, USA, (1997)
- 11) 小林俊郎, 山本 勇 : 日本金属学会会報, 32 (1993), 151.

補遺 ユーザーのためのQ&Aコーナー

破壊靱性について疑問に思われるかもしれない下記の項目について簡単な説明を加える。

Q1：破壊靱性はどのような場合に問題となるのか。

破壊に対して高度な安全性を必要とする、特に重要な箇所に用いられる材料で問題となる。このような箇所には、一般的には高強度材料が使用される。破壊靱性と強度との関係は、一般的には、反比例の関係にあるので、高強度材料程破壊靱性が低いことが想定され、破壊靱性が問題となる。また、破壊靱性は、低温や変形速度が大きい場合等低下するので、そのような場合にも問題となる。

航空機等では、疲労によりき裂が進展し破壊に至る場合が多く、その場合疲労き裂寸法が材料の破壊靱性から計算

される急速破壊に至る臨界寸法に達する前にき裂を検出し部品を修理あるいは取り替える必要が生じる。き裂の検出時間を充分確保し、急速破壊に至る臨界き裂寸法を見極めるためには破壊靱性が重要となる。

Q2：破壊靱性値は材料の選定においてどのように使われているか。

例として航空機での損傷許容設計の場合を取上げてみる。航空機では、疲労により材料に内在する欠陥からき裂が発生し、成長してゆく場合が多い。この疲労き裂が1回の負荷で急速破壊する可能性が生じるのは、材料の破壊靱性から計算される臨界き裂寸法以上に疲労き裂が成長した場合である。このような場合、急速破壊を防ぐには、負荷荷重は一定の大きさであるから、き裂への応力を防ぐために材料の厚さを大きくすることになる。これは重量増につながってしまうので、これを避けるためには、軽くて強い、いわゆる高比強度材料を選定することになる。もちろん、同じ強度なら、破壊靱性の大きな材料を選定する。なお、規格等で材料の破壊靱性値が決められている場合はない。

Q3： K_{IC} と J_{IC} は脆いかねばいかで判断しているがその境は具体的にはどこか。

定性的に納得しやすい表現として、「脆い」および「ねばい」で K_{IC} および J_{IC} 試験の適用を区別した。き裂先端で塑性変形をほとんど伴わない状態(平面歪状態)で破壊する場合の破壊靱性を評価する場合には K_{IC} 試験を、比較的大きな塑性変形を伴って破壊する場合の破壊靱性を評価する場合には J_{IC} 試験を適用することが破壊靱性の評価を可能とする。ねばい材料でも、試験片を大型化し、板厚が大きくなるに伴い、き裂先端の塑性変形量は小さくなってゆき、いずれは K_{IC} 試験が適用可能となるが、試験片が極めて大型となり、試験に困難を伴うようになる。そのような場合に、 J_{IC} 試験を適用し、 J_{IC} を評価することで破壊靱性を議論することができるようになる。

標準的な寸法の試験片で K_{IC} が求められるかどうか、あるいは K_{IC} 試験を適用できるかどうかの判断に延性の1つである伸びを尺度とするのも1つの手であろう。すなわち、伸びが極めて小さい材料では、 K_{IC} 試験が可能であろうし、標準的な寸法の試験で K_{IC} が得られると判断することは有り得る。

Q4：衝撃破壊靱性は具体的にどのような場合に重要となるか

破壊靱性は、負荷速度によって影響を受ける。負荷速度の大きな場合、いわゆる衝撃負荷条件下で測定される破壊靱性が衝撃破壊靱性であることは本文で述べたが、具体的にはどのような負荷速度が衝撃に相当するかを明確に定義することはむずかしい。しかし、概して慣性力がき裂先端

の応力や変位に影響してくるようになる場合を衝撃条件下と考えれば良いと思われる。それは、荷重が0から最大値に達するまでの時間が物体の基本固有周期と同じオーダーかそれより短い場合およびき裂進展速度が応力波の伝播速度の数分の1程度かそれより速い場合である。歪速度で表わすとわかりやすく、およそ 10^2s^{-1} 以上の歪み速度から慣性力が問題となり、衝撃負荷の条件となる。例外はあるが、一般に衝撃破壊靱性は、静的破壊靱性(本文では破壊靱性と表記した)に比べ小さな値となる。

Q5：現実の破壊では複雑な応力がかかる場合が多い。その場合の破壊靱性値はどのように使えば良いか

本稿で述べなかったが、破壊の様式は図9のように、ほぼ開口型(モードI)、面内せん断型(モードII)および面外せん断型(モードIII)に分類できる。本稿での破壊靱性値は、最も一般的な破壊様式であるモードIの破壊の場合に対して評価される。複雑な応力下では、これらの破壊様式が混合(混合モード)した破壊を生じる可能性がある。混合モードの場合の破壊靱性試験法は規格化されてはいないが、 K_{IC} 試験と同様にして行うことが可能である。混合モードでの破壊靱性試験は、Kに基づく場合には比較的容易であるが、Jに基づく場合には容易でない。

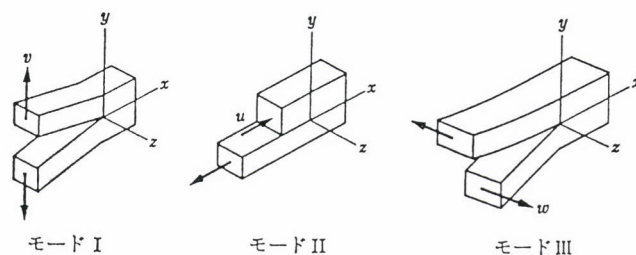


図9 破壊の基本様式

Kに基づく破壊靱性試験が適用されるような場合、すなわち脆性破壊挙動を示す場合、モードIの場合の破壊靱性値(K_{IC})から混合モード破壊靱性値を予測する方法が提案されている。それらは、例えば

円周方向応力最大説(F. Erdogan and G. C. Sih : Trans. ASME, Ser. D, 85 (1963), 519)

ひずみエネルギー密度最小説(G. C. Sih : Int. J. Frac. 10 (1974), 305)

エネルギー解放率最大説(影山, 岡村 : 日本機械学会論文集, 48 (1982), 783)

等である。

(1999年5月28日受付)