

D

金属材料の破壊じん性試験

阪神淡路大震災で、高層ビルや高速道路の鉄骨・鉄柱がほとんど伸びをともなわずにぜい性的に破壊したことは記憶に新しい。破壊じん性とは、一般にぜい性的な破壊に対する材料の抵抗力のことをいう。しかし、最近は一時的に大規模破壊を生じる不安定破壊だけでなく、予き裂からじわじわと延性き裂が発生・成長する安定破壊をも対象とされ、き裂材の単調増加荷重下での破壊抵抗を総称して破壊じん性と呼んでいる。

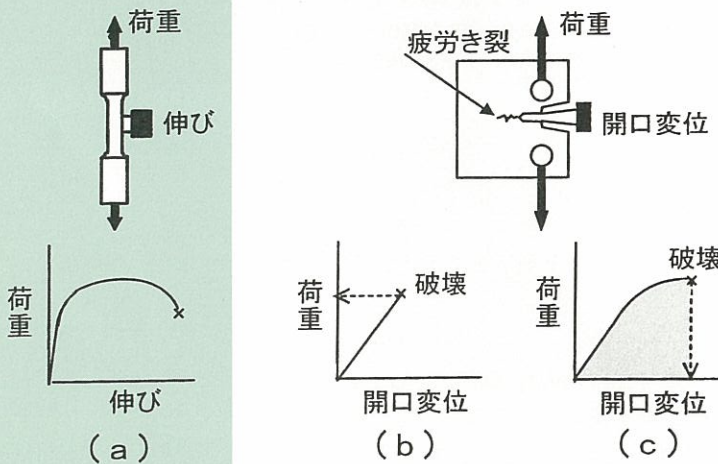
本稿では、破壊じん性試験の種類やその方法について概説する。

D-1

破壊じん性試験とは

引張試験との比較

最もポピュラーな材料試験である引張試験は、第1図(a)に示すように平滑試験片に伸び計をとり付けて引張り負荷をあたえ、破壊までの荷重と伸びの関係を記録する。破壊じん性試験も基本的にそれと同じであるが、第2図に示す切欠き(先端は疲労き裂)を有する試験片を用いる。この試験片に単調増加荷重をあたえ、クリップゲージと呼ばれる変位計を用いて、荷重と開口変位の関係を記録する。引張試験で延性を示す場合でも、き裂を設け、さらに低温にして負荷すると、第1図(b)の



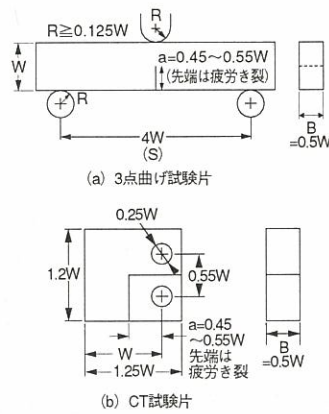
第1図 破壊じん性試験と引張試験の比較

ような線形域での破壊、すなわちぜい性的破壊を生じるようになる。き裂長さや板厚などの試験片寸法や試験温度の条件によっては、第1図(c)のように非線形を示しながら不安定破壊を生じる。

破壊パラメーター

破壊時の荷重や開口変位は、試験片形状や寸法に依存するため、破壊じん性のパラメーターとして使用できない。第1図(b)の場合、破壊時の荷重と試験片形状・寸法から、破壊を支配するき裂先端近傍の応力・ひずみ場の強さを表す線形破壊力学パラメーターである応力拡大係数(K値)を計算

し、破壊じん性値とする。第1図(c)の場合は破壊時の開口変位、または荷重と荷重作用線上の開口変位の関係線図の面積から、それぞれ試験片寸法を介して、き裂先端での開口変位(Crack Tip Opening Displacement, CTODと略し δ と記す)およびJ値と呼ばれるひずみエネルギーを計算し、破壊じん性値とする。



第2図 破壊じん性試験片

D-2

破壊じん性試験の種類

第1表 破壊じん性試験の種類と規格

発生	静的	線形— K_{Ic} 試験 (ASTM E399-90, BS 7448-1991, JSME S001-1992)
		非線形
停止	動的—高速載荷 K_{Ic} 試験 (ASTM E399-90, ANNEXES A7)	CTOD試験 (BS 7448-1991, WES 1108-1995, WES 1109-1995)
		J_{Ic} 試験 (ASTM E813-89, JSME S001-1992)
停止	EESO試験 (日本溶接協会認定委員会 鋼種認定試験方法 (1985))	J_c 試験 (BS 7448-1991, JSME S001-1992)
		Rカーブ (延性き裂進展抵抗曲線)試験 (ASTM E561-92, ASTM E1152-87)

注) ASTMは米国、BSは英国、WESは日本溶接協会、JSMEは日本機械学会の規格

破壊じん性試験の種類を第1表に示す。

発生と停止

破壊じん性試験は一般にはき裂の発生を対象とするが、発生したき裂を停止させる材料の抵抗力を停止破壊じん性という。

静的と動的

き裂発生を対象とした破壊じん性試験には、静的試験と動的試験がある。この場合も一般に破壊じん性試験とは静的な試験をいい、動的な場合を動的破壊じん性試験と呼ぶ。米国規格 ASTM E399-90によると線形域でのK値の増加速度が $2.75\text{MPam}^{1/2}/\text{s}$ 以下を静的、それを超える場合を動的と規定している。ちなみに、第2図(b)のCT試験片としてよく使用される試験片厚さが1inの標準試験片の場合、K値の増加速度 $2.75\text{MPam}^{1/2}/\text{s}$ は負荷速度 $1.5\text{kN}/\text{s}$ に相当する。

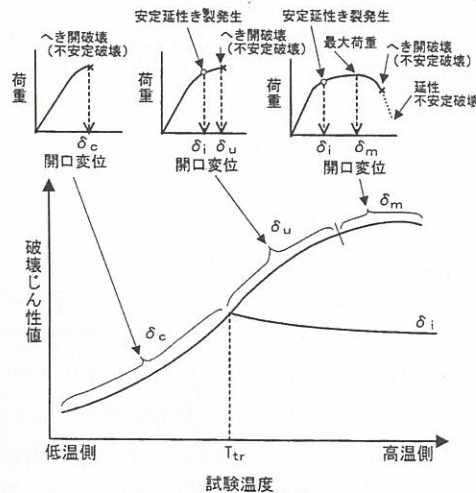
線形と非線形

静的試験には、荷重と開口変位の関係がほぼ線形域で破壊する場合を対象とする K_{IC} 試験と、非線形域をも含めたCTOD試験や J_{IC} 試験などがある。これらの試験法については後述する。

へき開破壊とマイクロボイド合体形破壊

構造用金属材料の一般的な破壊形態は、へき開破壊とマイクロボイド合体形破壊である。へき開破壊は結晶のへき開面に沿って分離破壊が進み、破面にはリバーパターンが見られる。基本的にぜい性破壊を示す。いっぽう、マイクロボイド合体形破壊では非金属介在物や第2相粒子を核として発生したマイクロボイドが成長・合体して破壊が進行し、低・中強度鋼では通常延性破壊となる。破面にはデンプル模様が見られる。

以下、CTOD試験を例にとり、試験温度を変化させたときの両破壊形態の遷移について説明する。第3図に低・中強度鋼の破壊じん性値と温度の関係を模式的に示す。 T_{tr} 温度以下では、予き裂



第3図 破壊じん性値の試験温度依存性と破壊形態の遷移

先端から直接へき開破面の不安定破壊が生じ、温度の低下とともに破壊じん性 (δ_c) は減少する。いっぽう、 T_{tr} 温度より高温側では、き裂先端での開口変位 (δ) が第3図の δ_i のレベルに達すると、まず予き裂からマイクロボイド合体形の延性き裂が発生し、荷重の増加とともに延性き裂が安定的に成長したのち最終的にへき開形の不安定破壊に移行する。安定延性き裂発生時の破壊じん性 (δ_i) の温度依存性は弱く、通常温度の増加とともにわずかに減少する。マイクロボイド合体形の安定延性き裂成長後のへき開破壊時の破壊じん性 (δ_u) は温度の上昇とともに増大する。さらに温度が上昇すると、第3図に示すように最大荷重を示した後にへき開破壊または延性不安定破壊を生じる。この場合は、最大荷重到達時のCTOD (δ_m) を破壊じん性とする。なお、高力アルミ合金、チタン合金、降伏応力が $1,000\text{MPa}$ を超えるような高強度鋼では、マイクロボイド合体形破壊であっても荷重—開口変位線図がほぼ線形域で不安定破壊を生じ、 K_{IC} 試験で評価できることが多い。

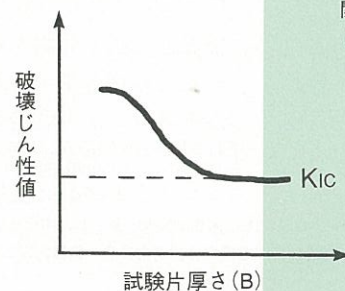
静的破壊じん性試験法とその規格

ここでは、代表的な静的破壊じん性試験である① K_{IC} 試験、②CTOD試験、および③ J_{IC} 試験について概説する。各試験法には約束ごとが細かく示されているが、詳細は各試験法の規格や解説書¹⁾を参照されたい。

K_{IC} 試験

K_{IC} 試験は高力アルミ合金・チタン合金や高強度鋼を対象に米国で開発された試験法 (ASTM E399-90) であり、第2図(b)のCT試験片がよく用

いられる。構造用金属材料でへき開破壊が生じる場合や高力アルミ合金やチタン合金でマイクロボイド合体形の不安定破壊が生じる場合、破壊じん性値 (ASTM E399では K_Q と記す) は第4図に模式的に示すように試験片厚さ (B) の増加とともに減少する。 K_Q の減少が飽和するときの破壊じん性



第4図 破壊じん性値の試験片厚さ依存性

1) 宮田隆司：日本材料学会関西支部主催「最近の破壊力学とその応用に関する講習会」テキスト (1995), p.28

を平面ひずみ破壊じん性値 K_{IC} と呼ぶ。ASTM E399によると、(1)式を満足すると K_Q は K_{IC} と見なされる。

$$B \geq 2.5 (K_Q / \sigma_Y)^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 σ_Y は試験温度での降伏応力または0.2%耐力である。チタン合金として一般的なTi-6Al-4V材では、室温で $K_Q = 50 \text{ MPam}^{1/2}$ 、 $\sigma_Y = 980 \text{ MPa}$ で、(1)式からえられる B は0.007m (7mm)となり、小型の試験片で K_{IC} が求められる。高力アルミ合金でも同様である。しかし、構造用金属材料、たとえばロータ材として用いられる2.8Ni-Cr-Mo-V鋼では、室温で $K_Q = 290 \text{ MPam}^{1/2}$ 、 $\sigma_Y = 670 \text{ MPa}$ で、(1)式からえられる B は0.468m (468mm)となり、345mm (13.6in)の試験片を用いても K_{IC} はえられない²⁾。このように、高じん性の低・中強度鋼の K_{IC} を求めるためには巨大な試験片を準備する必要がある。

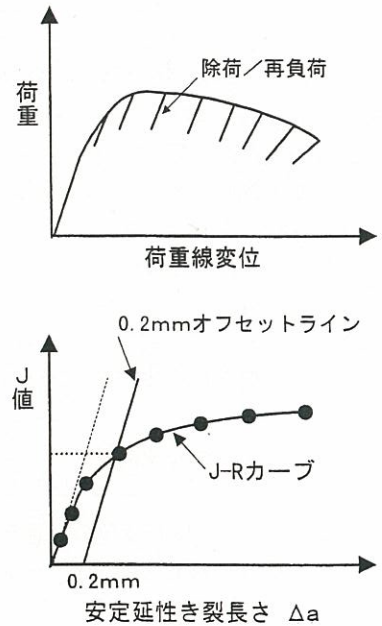
CTOD試験

CTOD試験は低・中強度鋼およびその溶接部を対象に英国で開発された試験(BS7448-1991, WES1108-1995)であり、第2図(a)の曲げ試験片が用いられる。また、試験片厚さの影響に関しては実機の板厚のまま試験することで問題を回避している。CTOD試験の破壊じん性値の種類については前述した。不安定破壊に先立ち安定延性き裂が先行する場合、破壊じん性値として安定延性き裂発生時の δ_I を採用するか、その後のへき開破壊(不安定破壊)時の値である δ_u または最大荷重到達時の値 δ_m を採用するかは当事者の選択にゆだねられているが、 δ_I が採用されるケースは少ない。造船分野やペンストックのじん性評価には、通常この試験法が用いられる。

J_{IC}試験

J_{IC}試験は米国で開発されたマイクロボイド合体形の安定延性き裂の発生のみを対象とした試験(ASTM E813-89, JSME S001-1992)でCTOD試験の δ_I に相当する。通常、第2図(b)のCT試験片が用いられる。J_{IC}試験では、開口変位として荷重作用線上の値を計測する必要がある。

安定延性き裂発生時のJ値(J_Q)を求める方法は複数あるが、1個の試験片で J_Q が求められる除荷コンプライアンス法がよく用いられている。除荷コンプライアンス法とは、第5図に示すように、単調負荷過程で、最大荷重の10%程度の除荷/再負荷を繰り返して行う。荷重と荷重線変位の関係の逆数であたえられるコンプライアンス(荷重線変



第5図 除荷コンプライアンス法によるJ_{IC}試験

位の変化量/荷重の変化量)はき裂が伸びると大きくなる。コンプライアンスとき裂長さの関係は定式化されており、コンプライアンスの値からき裂長さが自動的に計算できる。なお、ASTM E813-89では、厳密さより実用性を重んじてき裂発生を定義しており、J値と安定延性き裂長さの関係曲線(J-Rカーブ)と0.2mmオフセットラインとの交点を J_Q とする。

K_{IC} 試験の場合と同様、J_{IC}試験にも試験片厚に関する判定条件があり、(2)式を満足する J_Q は平面ひずみ破壊じん性値 J_{IC} と見なされる。

$$B \geq 25 (J_Q / \sigma_Y) \dots \dots \dots (2)$$

ただし、ここでの σ_Y は降伏応力または0.2%耐力と引張強さの平均値である。(2)式の条件は、 K_{IC} 試験の場合の(1)式よりゆるく、 B が1 in.の標準試験片を用いればJ_{IC}が求められる確率はかなり高い。

破壊じん性試験は、第1表に示すように多種多様であり、各規格には細かい約束ごとが決められている。破壊じん性試験は、それらの約束ごとに従って正確に実施することは当然として、規格の意味するところや破壊じん性の物理的意味を十分理解しておく必要がある。当社では、第1表に示した各規格に基づく試験は全て経験しており、今後とも世界の動向をいち早く入手し、最新の試験と評価ができるよう取り組んでいく所存である。

[尼崎事業所 材料強度技術室 木内 晃]