

拓殖大学 ○森 きよみ
拓殖大学 松井 新一

(株)吉岡精工 神田真理子
拓殖大学 坂田 勝

1. 緒言

高温工学試験研究炉 HTTR (日本原子力研究所が臨界を達成した高温ガス炉) 内は、最高温度が 900°C を越える高温に曝されるため、その炉心構造物として原子炉用微粒等方性黒鉛が使用されている。原子炉用黒鉛は脆性的に破壊する材料であるが、その破壊挙動と強度は負荷速度によって影響されることが報告されている⁽¹⁾。炉体の構造健全性を確保するためには、地震等による動的な荷重が負荷された際の、材料の破壊特性を知っておく必要がある。破壊靱性に関しては、小林ら⁽²⁾ が初期切欠き試験片および疲労予き裂試験片を用いて、室温から 800°C までの真空中における静的な破壊靱性を調べ、応力拡大係数 K により破壊靱性の評価が可能なることを示した。そこで、本研究では破壊力学的手法を用い、静的及び衝撃的な負荷に対する黒鉛の破壊靱性値を測定し、破壊靱性に及ぼす負荷条件と初期欠陥形状の影響について調べることを目的としている。

2. 材料および実験方法

2.1 黒鉛の機械的性質 実験に用いた材料は微粒等方性黒鉛 IG-110 である。この材料は製造過程において集合組織の制御を行い、高純度・高密度・高強度化したものである。試験片材料の機械的性質を表 1 に示す。

2.2 試験片形状 初期欠陥形状の違いによる破壊靱性値の測定結果の比較を行うために 2 種類の試験片を用意した。予き裂を導入した試験片 (CS) を図 1 に、初期切欠きを導入した試験片 (NS) を図 2 に示す。試験片長さ L は 50 mm、試験片厚さ B は 5 mm、試験片幅 W は 7 mm とした。図 1 の試験片では予き裂を Bridge Indentation 法 (BI 法) によって導入した。BI 法は、セラミックスの破壊靱性値測定においてよく用いられる方法であり、矩形に切り出した試験片に機械加工により予き裂発生起点となる切欠きを加工した後、試験片に荷重を加えて Pop-in き裂を発生させ、試験片に予き裂を導入する方法である。

2.3 静的破壊靱性の測定 静的破壊靱性値の測定は 3 点曲げ破壊実験により行った。

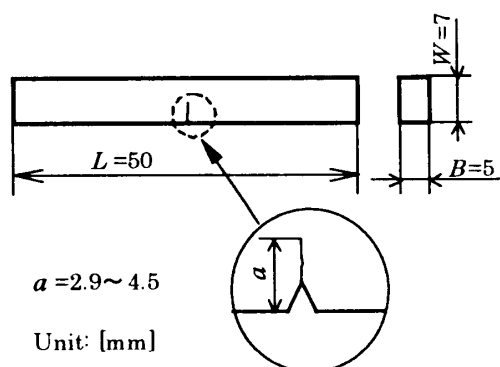


Fig.1 Specimen configuration and dimensions (Cracked Specimen)

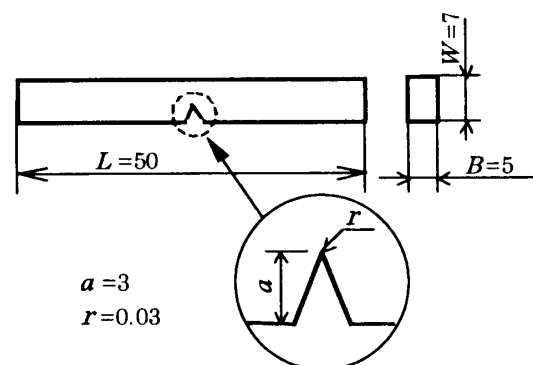


Fig.2 Specimen configuration and dimensions (Notched Specimen)

中央に集中荷重 P を受ける支点間距離 S の 3 点曲げによる破壊試験において、応力拡大係数は次式で表すことができる。

$$K_I = \frac{3}{2} \cdot \frac{PS}{BW^2} \cdot \sqrt{a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

ここで、 B は試験片厚さ、 W は試験片幅、 a はき裂長さであり、 $f(a/W)$ は予き裂長さの関数である。試験片内のき裂が進展を開始する時の荷重 P の値を式(1)に代入することで、破壊靱性値 K_{IC} を求める。

実験は、クロスヘッドの変位速度をほぼ 1mm/min とし静的な破壊実験を行った。その際、荷重と荷重点変位の関係を測定した結果、荷重 -

Table 1 Mechanical properties of IG-110 graphite

Bulk density [g/cm ³]	Tensile strength [MPa]	Compressive strength [MPa]	Bending strength [MPa]	Young's modulus [GPa]	Shear modulus [GPa]	Poisson's ratio
1.77	24.4	71.2	33.6	9.35	4.10	0.14

変位関係はほぼ直線的に変化して破壊に至ることが確認できた。また、顕微鏡によるき裂進展の観察の結果から、き裂は進展を開始すると停留することなく破壊に至ることがわかった。そこで、実験により得られた最大荷重 $P_{\max}$ を用いて、式(1)により静的破壊靱性値 K_{IC} を計算した。

2.4 衝撃破壊靱性値の測定

衝撃破壊靱性値は 1 点曲げ衝撃破壊実験⁽³⁾により求めた。この実験は、試験片両端を糸でつるし、両端自由の境界条件のもとで試験片中央に衝撃棒を落下、衝突させて、試験片が破壊するときの荷重を衝撃棒に貼ってあるひずみゲージにより測定するものである。

動的応力拡大係数は、き裂を持つ梁として試験片をモデル化し、両端自由の境界条件のもとで解析を行って得られた簡便評価式⁽³⁾を用いて、次式により計算する。

$$K_I(t) = k \frac{EI}{S^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Y_{Fm}(1/2) Y_{Fm}''(1/2)}{\omega_{Fm} W_{Fm} S} \int_0^t F(\tau) \sin \omega_{Fm}(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

ここで、 Y_{Fm} は梁の固有関数、 ω_{Fm} は固有角振動数、 k は 3 点曲げ試験片の中央部の曲げモーメントと静的応力拡大係数の間の比例定数である。

実験により試験片の衝撃力 $F(t)$ を求め、動的応力拡大係数 $K_I(t)$ を式(2)により計算する。さらに、静的な破壊実験で試験片が脆性的に破断していることから、求めた $K_I(t)$ の最大値を衝撃破壊靱性値 K_{Id} とした。

図 3 に実験装置の概略を示す。衝撃棒を試験片中央の予き裂や初期切欠きの真上に落下させて試験片を破断する。このとき衝撃棒に貼付してあるひずみゲージからの圧縮ひずみの波形をオシロスコープにより測定し、衝撃棒の圧縮力を求める。これを試験片の受けた衝撃力 $F(t)$ とし、式(2)を用いて動的応力拡大係数の波形を求め、その最大値を破壊靱性値 K_{Id} としている。

3. 実験結果

3.1 破壊靱性値の測定結果 静的破壊靱性値 K_{IC} の平均値は、予き裂試験片では $0.78 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、初期切欠き試験片では $0.87 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。また、衝撃破壊靱性値 K_{Id} の平均値は、初期切欠き試験片において $0.93 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。平均値で比較すると、 K_{Id} のほうが K_{IC} よりも大きく、また、予き裂を導入した試験片の結果が初期切欠き試験片の結果よりも小さい値を示している。しかし、実験結果にばらつきがあるため、平均値のみで比較するのではなく、ワイブル分布による比較を行った。

図 4 に実験結果のワイブルプロットを示す。ワイブルプロットの直線の傾き m はそのデータのばらつきを示し、値が大きいほどばらつきが小さいことをあらわしている。ワイブルプロットで比較

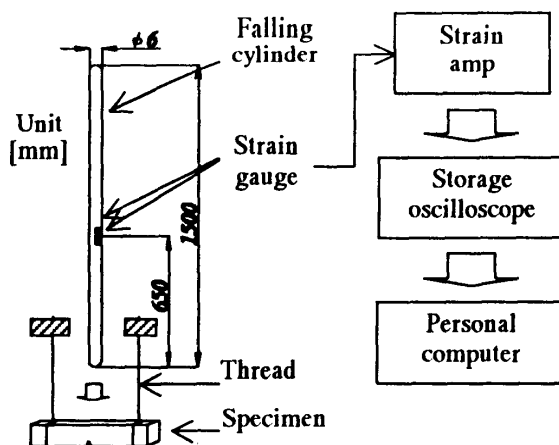


Fig.3 Device and measurement system for impact fracture testing

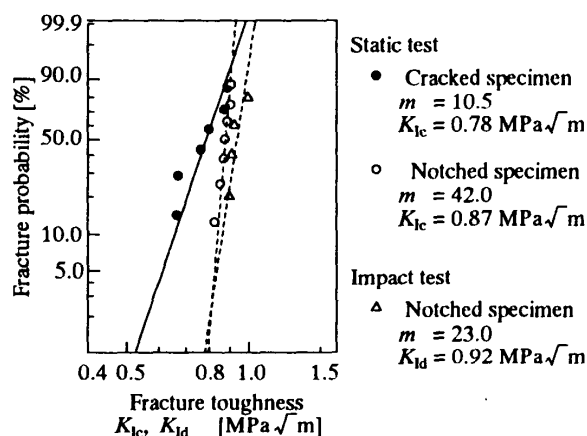


Fig.4 Weibull plot for fracture toughness K_{IC} and K_{Id} for IG-110 graphite

するには実験本数が不足しているが、傾向としては、初期切欠き試験片の結果の方が予き裂導入試験片に比べてばらつきが小さく、値は大きくなっている。

4. 結言

1. 破壊靱性値を構造部の設計に用いるには、静的な負荷によって得られた破壊靱性値を用いることで、衝撃的な負荷に対しても安全側で設計されることになる。
2. 破壊靱性値の測定において初期欠陥形状はき裂で行うことが望ましい。しかし、強度、靱性ともに低い黒鉛に安定した予き裂を導入することは難しく、また、予き裂試験片による実験結果はばらつきが大きい。

なお、本研究を行うにあたり、原子炉用黒鉛材料 IG-110 をご提供いただいた日本原子力研究所 菊地賢司氏に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 郷野拓彦, 田辺裕治, 二川正敏, 日本機械学会講演論文集 No.98-3, 675(1998).
- (2) 小林英男, 他 3 名, 材料, 39, 1076(1990).
- (3) 坂田 勝, 他 4 名, 材料, 37, 910(1988).