

黒鉛の衝撃破壊

Impact Fractures of Graphite

車田 亮*, 今泉 水城**, 佐藤 千之助*

(平成2年8月30日受理)

Akira KURUMADA*, Mizuki IMAIZUMI** and Sennosuke SATO*

ABSTRACT—As a contribution to the safety assessment of graphite such as reactor materials for high temperature testing reactors subjected to earthquake and/or electrode graphite for steel-making arc furnaces subjected to impulsive forces due to short circuit during the practical operations, impact strength tests of graphites are carried out. In this study, first a drop weight type impact testing apparatus having a long bar is designed, then preliminarily obtained results of tensile strengths and fracture toughnesses for a reactor grade graphite and an electrode graphite are discussed.

1. 緒 言

多結晶黒鉛は軽量でかつ耐熱性、耐熱衝撃性、耐摩耗性および耐食性に優れており、これらの特性を活かした高温構造強度部材としての実用化が検討されている。従来、多くの種類の黒鉛に対して機械的性質および破壊靱性の温度依存性¹⁾、熱衝撃抵抗²⁾および熱衝撃破壊靱性³⁾などの評価がなされているが、黒鉛の衝撃荷重による強度および破壊靱性の評価についてはシャルピー型試験および自由落下試験による破壊エネルギーの評価⁴⁾および 10^{-4} ~ 10^{-2} s⁻¹のひずみ速度の範囲における強度はひずみ速度に影響されない⁵⁾などが知られている他、研究例が多くない。

本研究は日本原子力研究所において建設中の高温工学試験研究炉(HTTR)の炉心部の主要構成材料である黒鉛IG-11の地震などによる衝撃応力または製鋼用

アーク炉の電極用黒鉛Nの電流の短絡による衝撃的電磁力に対する安全性を評価することを目的とし、1本の長い検出棒を用いた単純な形式の落錘式衝撃引張試験装置および衝撃曲げ試験装置を設計試作し、黒鉛の衝撃強度のひずみ速度依存性および衝撃破壊靱性の応力拡大係数速度依存性の実験的な評価を行ったものである。

2. 実験方法

2.1 試料および試験片

本研究に用いた黒鉛材は東洋炭素製のラバープレス法により製造された等方性で微細組織を有する黒鉛IG-11および昭和電工製の押し成形により製造された異方性黒鉛Nであり、それぞれ日本原子力研究所で現在建設中の高温工学試験研究炉の主要な炉心構成材

*茨城大学工学部機械工学科 (日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

**茨城大学大学院工学研究科 (日立市中成沢町), 現在;日立製作所 那珂工場 (勝田市市毛)

Graduate student, Ibaraki Univ., Hitachi 316, Japan, Present Naka Works, Hitachi Ltd., Ichige, Katsuta 312, Japan

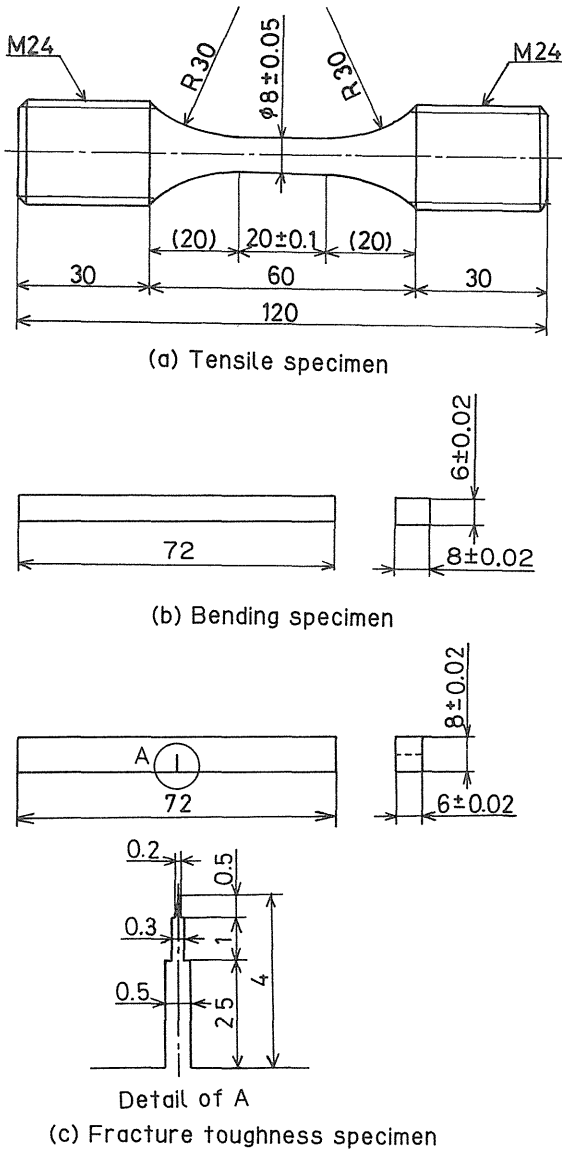


Fig. 1 Shapes and dimensions of specimens.

およびアーク製鋼炉電極の接合用ニップル材である。
 Fig. 1 は本研究に用いた黒鉛試料の引張り、曲げおよび破壊靱性試験片の形状、寸法を示す。それぞれの試験部の形状は引張試験用が直径 ϕ 8 mm、平行部長さ 20 mm、曲げ試験用が $6 \times 8 \times 72$ mm および破壊靱性試験用が $8 \times 6 \times 72$ mm であり、破壊靱性試験片の縁スリットは幅 0.5 mm、長さ 4 mm で先端の曲率半径は 50μ m 以下である。

2. 2 実験装置

Fig. 2 は本研究において設計試作した落錘式の(a)衝撃引張り、(b)衝撃曲げおよび衝撃破壊靱性試験装置を示す、いずれの試験も衝撃荷重は錘の自由落下高さを変えることにより、試験片に負荷する。

ひずみ検出用のゲージは長さ 2 mm、抵抗値約 120 Ω 、ゲージ率-94の自己温度補償型半導体ひずみゲージ(共和電業製 KSN-2-E4-16)を使用し、下端より検出棒直径の10倍の位置に2枚のゲージを接着し、2枚アクティブゲージ法により棒の曲げ成分を消去するようにした。

また、ひずみゲージからの出力電圧は増幅度 66 dB、周波数帯域 0~50 kHz の直流増幅器(日本電気三栄製 6M72)で増幅された後、サンプリングタイムが最大 1 μ s で 8192 個の記憶素子を持つ高速波形記憶装置(理研電子製 トランジェントコンバータ TCDC-12-8000E)に一時記憶し、シンクロスコープに波形を表示するとともに、X-Yレコーダに電圧-時間曲線を記録した。

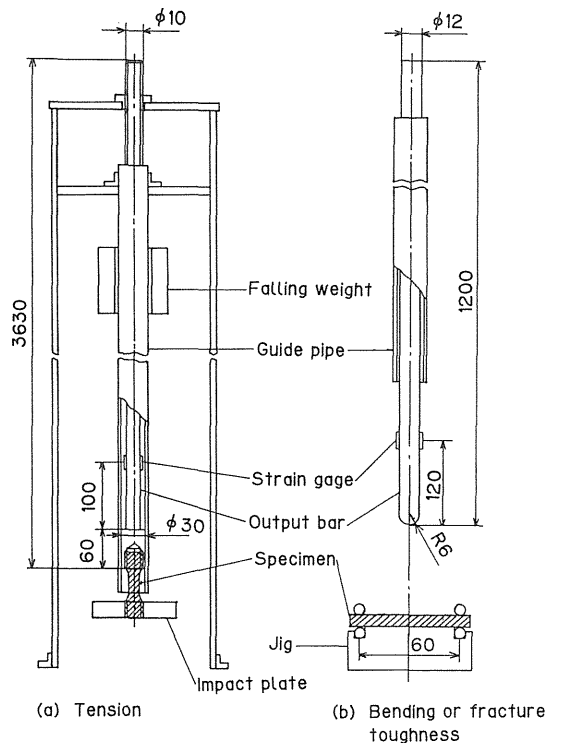


Fig. 2 Schemata of impact testing apparatus.

2・2・1 衝撃引張試験

衝撃引張試験において検出棒の材質は検出棒のひずみを大きくするため縦弾性係数が比較的小さな黄銅(BsBE2)を選んだ。

落錘は外径100mm, 内径44mm, 高さ100mmの鋼製円筒で, その重量は49kNである。衝撃板は直径100mm, 厚さ30mmであり, M24のねじりにより試験片を中心にセットする。また, 落錘は予めガイドにより衝撃板に垂直に自然落下するよう調整される。

本装置の試験片に働く衝撃引張応力は, 一次元弾性波伝播理論に基づき以下のように説明される。^{6, 7)}

まず, 試験片は端面で反射され測定される応力波の反射周期の波長に比べて非常に短いので, 試験片には一定の衝撃荷重が作用すると考えられ, 試験片保持部に働く衝撃応力 σ_0 は次式から求められる。

$$\sigma_0 = \sigma A / A_0 \quad (1)$$

ここで, σ は試験片の衝撃応力, A は試験片の断面積であり, 添字なしおよび0は試験片および試験片ネジ部に対応する。次に, 試験片ネジ部と検出棒のチャック部との応力波の透過比を考えると検出棒のチャック部に働く衝撃応力 σ_1 は次式から求められる。

$$\sigma_1 = 2A_0 \rho_B C_B \sigma_0 / (A_1 \rho_B C_B + A_0 \rho C) \quad (2)$$

ここで, ρ は密度, C は応力波の伝播速度であり, 添字Bおよび1はそれぞれ検出棒および検出棒のチャック部に対応する。

さらに検出棒のチャック部と検出部との応力波の透過比を考えると, 検出される衝撃応力 σ_B は次式から求められる。

$$\sigma_B = 2A_1 \sigma_1 / (A_B + A_1) = E_B \varepsilon_B \quad (3)$$

ここで, A_B は検出部の断面積, E_B は検出棒の縦弾性係数および ε_B は検出されたひずみである。

以上より, 試験片の衝撃引張り応力 σ は次式から求められる。

$$\sigma = (1/4) (A_0/A) \{ (A_1/A_0) + (\rho/\rho_B) \times (C/C_B) \} \times \{ 1 + (A_B/A_1) \} E_B \varepsilon_B \quad (4)$$

2・2・2 衝撃曲げ試験

黒鉛の弾性波伝播速度は約2000~3000m/s程度で

あり, 本研究の落錘による衝撃負荷速度程度では衝撃荷重が試験片に静的に負荷されるものとして扱える。よって, 3点曲げ強度 σ_b は単純支持はりの理論から次式で与えられる。

$$\sigma_b = 3 S A_B E_B \varepsilon_B / 2 B W^2 \quad (5)$$

ここで, S は下部支点間距離, B および W は試験片の幅および厚さである。

また, 検出棒は直径 ϕ 12mm, 長さ1200mmであり, その材料は試験片やジグとの衝突を考慮して, ステンレス鋼(SUS304)とした。また, 両端の支点において試験片を上下2本の鋼製丸棒で軽く支持することにより, 試験片の跳ね上りを防いだ。

2・2・3 衝撃破壊靱性試験

衝撃破壊靱性試験はFig.1(C)に示すようにSingle Edge Notched Beam法^{8, 9)}によった。衝撃破壊靱性 K_{Ia} の測定は複雑な動的効果を含むことが知られているが,¹⁰⁻¹²⁾ここでは前項の曲げ試験と同様に検出棒で単純に測定された衝撃荷重が試験片に静的に負荷されるものと考え, 次式から求める。

$$K_{Ia} = Y (3 S A_B E_B \varepsilon_B) \sqrt{a} / 2 B W^2 \quad (6)$$

$$Y = 1.964 - 2.837 \alpha + 13.71 \alpha^2 - 23.25 \alpha^3 + 24.13 \alpha^4$$

ここで Y は形状係数¹³⁾, a はスリット長さであり, 式中の α は (a/W) である。

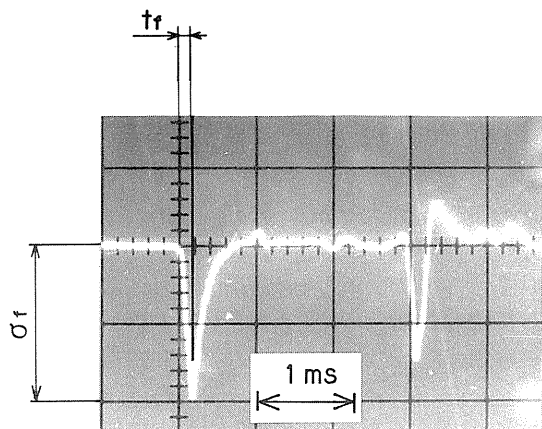
3. 実験結果

3.1 衝撃強度

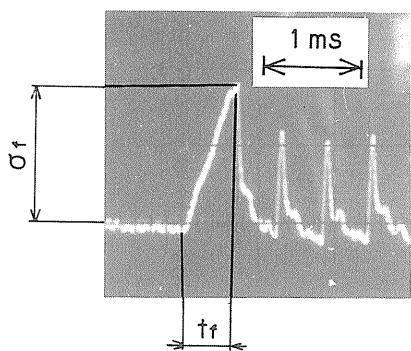
Fig.3(a)は衝撃引張および(b)衝撃曲げ試験における典型的な破壊時の応力波形を示す。(a)の衝撃引張の場合, 破断時間 t_f は2.2msであり, 他端で反射した応力波が, 再びひずみゲージに達する時間(2.2 ms)と一致する。一方, (b)の衝撃曲げの場合, 破断時間 t_f は他端で反射した応力波が再びひずみゲージに達する時間より長く, 他端からの反射波による重量が懸念される。

ここでひずみ速度 ε は衝撃応力の最大値 σ_f および破断までの時間 t_f により, 次式から求められる。

$$\varepsilon = \sigma_f / t_f E \quad (7)$$



(a) Tension



(b) Bending

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma_f}{t_f \cdot E}$$

Fig. 3 Typical signals of experimental measurements.

ここで、Eは試料の縦弾性係数であり、超音波法により求めた結果、IG-11が8.92GPa、Nが15.7GPaであった。

Fig. 4 および5はそれぞれIG-11およびNの曲げ強度 σ_b および引張強度 σ_t に対する衝撃速度 $V = \sqrt{2gh}$ (hは落下高さ)の影響を示す。衝撃強度 σ_b および σ_t は衝撃速度Vが4 m/sの引張り強度のデータを除けば、Vの増大とともに全体的には増加する傾向がある。この衝撃速度の増大とともに衝撃強度が増大する傾向は、同様の試験装置による一般構造用圧延鋼SS41および機械構造用炭素鋼S45C¹⁴⁾の結果と一致する。ここ

で衝撃速度Vが4m/sの引張り強度のデータは、試験中に落錘がガイドに接触し、実際の衝撃速度が $\sqrt{2gh}$ の計算値よりもかなり小さくなっていてと考えられる。そこで本研究においては、衝撃強度のひずみ強度 ϵ による影響を中心に考察する。

ここで脆性破壊のひずみ速度依存性について考えてみる。衝撃破壊も静的破壊と同様に試験片の潜在的初期欠陥を起点とするき裂進展による破壊であるとする

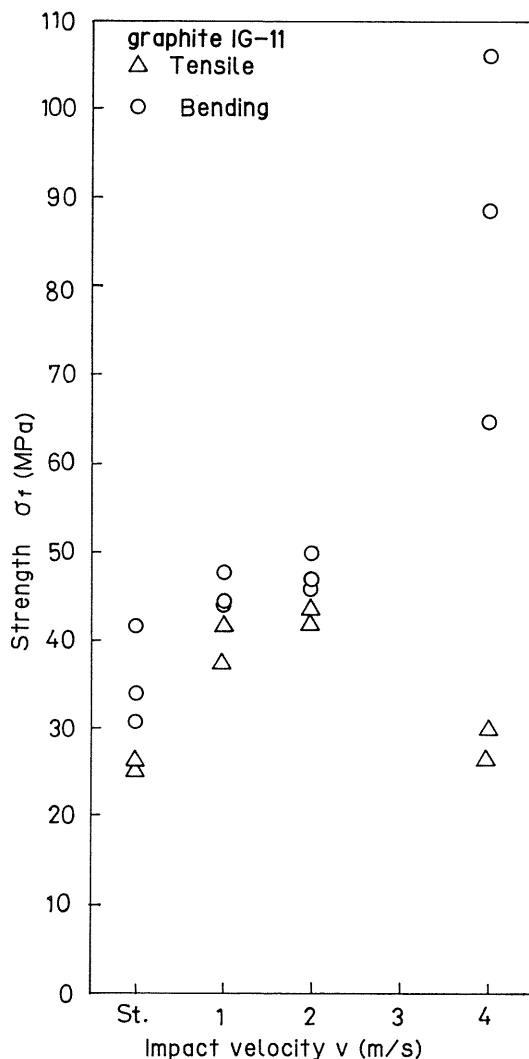


Fig. 4 Relationship between strength and impact velocity (IG-11).

と, Evansら¹⁵⁾の解析によると破壊強度の対数 $\log \sigma_f$ とひずみ速度の対数 $\log \dot{\epsilon}$ は次式のような勾配 $1/(n+1)$ の直線となる。

$$\log \sigma_f = C + \{1 / (n + 1)\} \log \dot{\epsilon} \quad (8)$$

ここでCはひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が1の場合の破壊応力の対数値である。

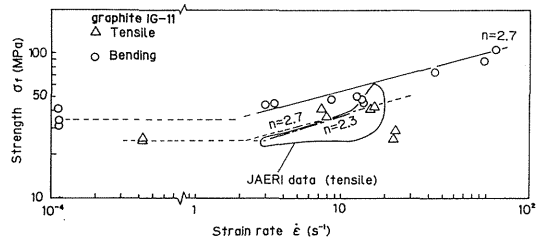


Fig. 6 Dependence of strength on strain rate (IG-11).

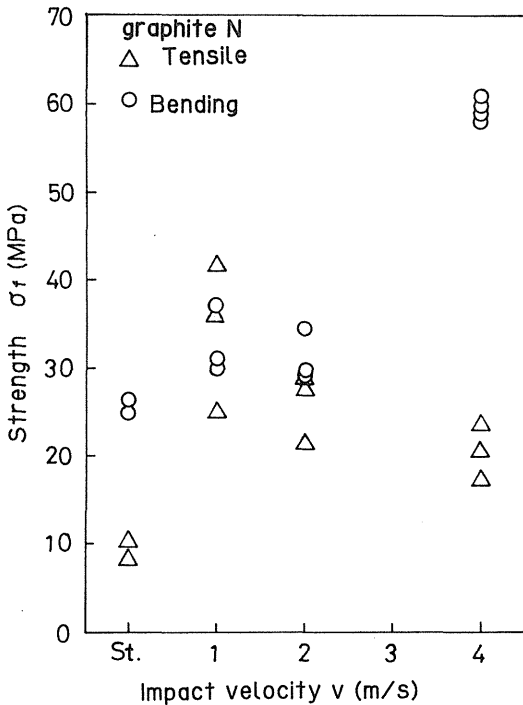


Fig. 5 Relationship between strength and impact velocity (N).

Fig. 6 および7はそれぞれ衝撃曲げ強度 σ_b および衝撃引張強度 σ_t のひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に対する依存性を示す。 $\log \sigma_b$ と $\log \dot{\epsilon}$ の関係は、 $2 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ にわたる広範囲において直線関係が成り立っている。その直線の勾配より $1/(n+1)$ の n は、IG-11が $n=2.7$ 、Nが $n=2.4$ となる。一方、 σ_t は $\dot{\epsilon}$ の範囲が狭くばらつきも大きいため、直線関係は見出し難いが、原研がIG-11について行った油圧サーボ駆動の衝撃引張試験による30本

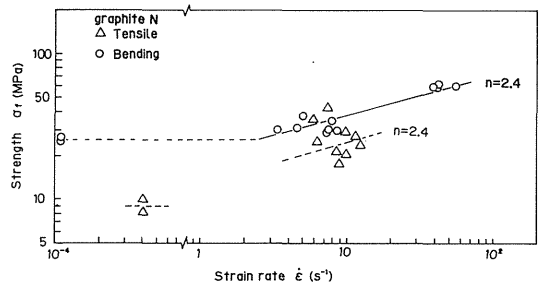


Fig. 7 Dependence of strength on strain rate (N).

のデータの範囲¹⁶⁾を同図中に示すと、 $\dot{\epsilon}$ が 20 S^{-1} までは本研究のデータと比較的一致する。原研のデータより直線を定めると図中の一点鎖線のようになる。その勾配から $n=2.3$ と求まり、曲げ試験における n と近い値となる。したがって、 σ_t についても σ_b と同じ n 値によってひずみ速度依存性が表せるものと考えられる。また、 σ_b の場合はグラフの内挿から、ひずみ速度が 2 s^{-1} 以下では衝撃速度が静的速度と一致すると思われる。

3. 2 衝撃破壊靱性

衝撃破壊靱性試験における波形は曲げ試験と同様の三角波状であったため、次式により負荷速度に起因する応力拡大係数速度 K を定める。

$$K_1 = K_{1d} / t_f \quad (9)$$

Fig. 8 および9はIG-11およびNの破壊靱性値の対数 $\log K_1$ (破壊靱性値 K_{1c} および衝撃破壊靱性 K_{1d}) と応力拡大係数速度の対数 $\log K_1$ の関係を示す。 K_{1d} は K_{1c} よりも大きな値となり、また K_1 の増加とともに著しく増大する。このような衝撃速度による K_{1d} の増大の

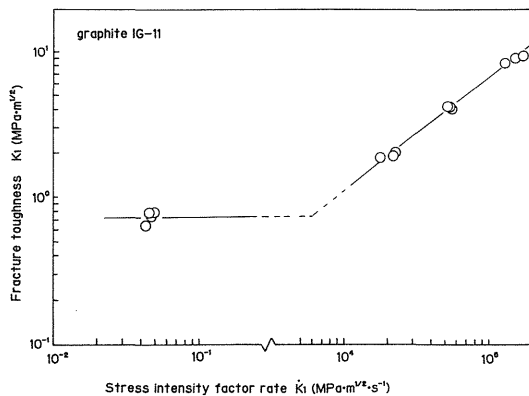


Fig. 8 Relationship between fracture toughness and stress intensity factor rate (IG-11).

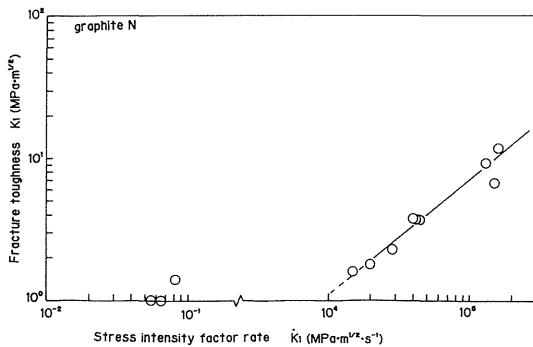


Fig. 9 Relationship between fracture toughness and stress intensity factor rate (N).

傾向は岸本ら¹⁰⁻¹²⁾のセラミックスの場合と同様であるが、その増加率が著しく大きい。ここで、衝撃引張および曲げ強度の場合と同様に衝撃破壊靱性に $K_I = 10^1 \sim 10^2$ の範囲で直線関係があると仮定するとその直線の傾き $1/(n+1)$ の n の値は、IG-11およびNにおいてそれぞれおよそ0.28および0.25となった。黒鉛についてのこれらの値は岸本ら¹⁰⁻¹²⁾のセラミックスの場合の n と比較するとおよそ2桁小さく、今後衝撃による動的応力拡大係数の評価に関し再検討が必要と思われる。

4. 結 論

落錘式の単純形式の衝撃試験装置を試作し、多結晶黒鉛のIG-11およびNを試料として、衝撃破壊試験を行った結果、次のような結論を得た。

- (1) 本研究の範囲において、衝撃速度 v が 4m/s を除いた衝撃強度は引張強度、曲げ強度ともに静的強度よりも大きな値を示し、衝撃速度の増大とともに増大する傾向を示した。
- (2) 本研究の範囲において、衝撃強度のひずみ速度依存性は次式で表される直線関係が認められた。

$$\log \sigma_f = C + \{1/(n+1)\} \log \dot{\epsilon}$$

- 衝撃曲げ強度の場合、その n の値はIG-11およびNに対しそれぞれ2.7および2.4であり、原研のIG-11に対する引張強度の場合のデータとほぼ一致する。また、衝撃曲げ強度の場合ひずみ速度が 2s^{-1} 以下では衝撃速度は静的速度と一致すると思われる。
- (3) 3点曲げ方式による衝撃破壊靱性は落錘検出棒に接着したひずみゲージの出力波形の最大値から得られた荷重を静的な公式に代入して評価を試みた。その結果、黒鉛の衝撃破壊靱性は応力拡大係数速度とともに著しく増大する傾向がある。衝撃引張および衝撃曲げ強度と同様にその直線の傾き $1/(n+1)$ の n の値を求めるとIG-11およびNにおいてそれぞれ0.28および0.25となった。これらの結果はセラミックスの場合の動的破壊靱性の増大の傾向よりも著しく大きいので、今後さらに動的効果について検討の必要があるものと考えられる。

参考文献

- (1) S.Sato, H.Awaji and H.Akuzawa, Carbon,16, 95(1978).
- (2) S.Sato,K.Sato,Y.Imamura and J.Kon,Carbon,13, 309(1975).
- (3) S.Sato,H.Awaji and H.Akuzawa,Carbon,16,103 (1978).
- (4) M.Birch,J.E.Brocklehourst,Carbon,21,497(1983).
- (5) W.V.Kotlensky and H.E.Martens,Proc.5th Conf. Carbon, 2,625(1963).
- (6) W.Jonson,"Impact Strength of Materials", 2 (1972),Edward Arnold,London.
- (7) 林 卓夫, 田中 吉之助, "衝撃工学", 8(1988),日刊工業新聞社.
- (8) G.E.Nash,Int.J.Fract.Mech.,5,269(1969).
- (9) K.Kishimoto, S.Aoki and M.Sakata, Enging Fract. Mech.,13,501(1980).
- (10) K.Kishimoto,S.Aoki and M.Sakata,Enging Fracture Mech.,13,501(1980).
- (11) 岸本 喜久雄, 若林 勤, 青木 繁, 坂田 勝, 材料, 31,No.344,478(1982).
- (12) K.Kishimoto,S.Takahashi and S.Aoki,Proc. KSME/JSME Joint Conference,Fracture and Strength'90,654(Seoul,1989).
- (13) 若井 史博, 阪口 修司, 松野 外男, 窯業協会誌, 93,479(1985).
- (14) 臺丸谷 政志, 内藤 正鄰, 浜田 恒平, 日本材料強度学会誌, 22,85(1987).
- (15) A.G.Evans and S.M.Wiederhorn,Int.Journ. of Fracture, 10,379(1974).
- (16) 宇賀地 弘和, 小西 隆志, 奥 達雄, 荒井 長利, 第15回炭素材料学会年会要旨集, 230(1988).