

© 1989 ISIJ

 ////////////////  
 論文  
 ////////////////

# 高炉用炭素系れんがの強度特性と そのばらつき原因

藤原 昭文\*・植村健一郎\*<sup>2</sup>・下村 興治\*<sup>3</sup>

## Strength Characteristics of Carbon Refractories for Blast Furnace

Akibumi FUJIWARA, Kenichiro UEMURA and Kohji SHIMOMURA

## Synopsis :

Mechanical properties of eight commercial carbon refractories for blast furnace were examined. Test pieces were cut from large carbon blocks. Bending, compressing and diametral-compressing tests at room temperature and bending test at high temperature were carried out.

Main results are as follows ;

①Correlations were obtained between elastic modulus and compressive strength and also between bending strength and compressing strength.

②There is much difference among commercial carbon refractories in the size of latent crack at matrix-aggregate bond. Those which have small latent crack have high bending strength/elastic modulus ratio and have small an-isotropy of bending strength.

③There is variance in bending strength in large carbon block. The variance of bending strength in each carbon block depends on the variance of its porosity.

④At high temperatures, bending strength decreases with the increase of SiO<sub>2</sub> contents.

Key words : carbon refractories ; aggregate ; matrix ; bond ; bending strength ; compressive strength ; elastic modulus ; an-isotropy ; porosity ; latent crack ; SiO<sub>2</sub> content.

### 1. 緒 言

き裂の問題を取り扱う際には、その材料の機械的性質は、必要不可欠のデータとなる。高炉用の炭素系れんがに限定しても10種類以上と多岐にわたっている。このため、一つ一つの材料については断片的な性質しか得られないこともまれではなく、築炉設計用、き裂損傷評価用のデータが不足することが多いのが現状といえる。

そこで、8種の炭素系れんがを用い、常温で曲げ、圧縮および割裂の各試験、また高温での曲げ試験を実施し、これらの結果から炭素系れんがの基本的な強度性質を明らかにすることを試みた。

### 2. 常温での強度性質測定

#### 2.1 試験材、試験片採取方法および試験概要

Table 1 に本研究に用いた炭素系れんがの一覧を示

す。C-4 は押出成形品であり、それ以外はプレス成形品である。

Fig. 1 は試験片を切り出す前のれんがブロック形状であり、同図の寸法は、実高炉の炉底部に用いられるそれに近い。図中の  $r, \theta, Z$  の記号は高炉に使用される際の高炉の方向を示す。炭素系れんがは、成形時の加圧方向に応じて機械的性質に異方性が生じ、また、部位によって機械的性質が異なることが知られている。そこで、図中に示した  $r_1, r_2, r_3, r_4$  の各断面の  $0, \theta_1, \theta_2, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  の位置で、方向を区別して試験片を採取するとともに、その位置でかさ密度と真密度を測定し、真気孔率を求めた。

曲げ試験片の寸法は、 $25\text{mm} \times 120\text{mm}$  とし、 $r$  方向のそれは Fig. 1 の  $r$  方向4断面 ( $r_1, r_2, r_3, r_4$ ) の  $0, \theta_1, \theta_2, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  の位置から、 $Z$  方向のそれは  $r_1, r_2, r_3, r_4$  各断面の  $Z_2$  の位置から各2本ずつ採取した。また、試

昭和63年7月13日受付 (Received July 13, 1988)

\* (株)神戸製鋼所機械研究所 (Mechanical Engineering Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-5-5 Takatsukadai Nishi-ku Kobe 673-02)

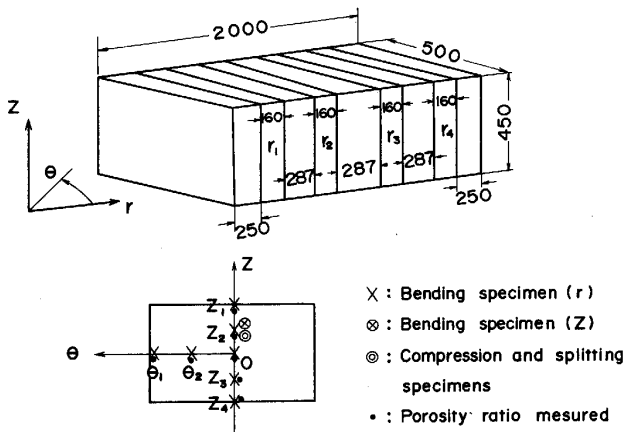
\*<sup>2</sup> (株)神戸製鋼所材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

\*<sup>3</sup> (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

Table 1. List of tested carbon refractories.

Material	Chemical composition (wt%)				Forming		Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Max. grain size (mm)
	Free C	SiC	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Si	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CaO, TiO <sub>2</sub>	Method	Direction		
C-2	86.3	1.8	5.8	5.7	P	Z	1.71	5.7
C-3	81.4	6.7	9.5	2.6	P	Z	1.72	7.0
C-4	81.0	3.8	7.0	13.9	E	r	1.59	5.5
C-5	80.6	5.4	4.1	6.0	P	r	1.67	4.7
C-6	73.3	18.8	6.2	1.0	P	Z	1.73	4.2
C-7	72.9	18.1	5.1	7.2	P	r	1.67	6.0
C-8	69.8	17.1	11.4	5.3	P	Z	1.83	3.6
C-9	45.5	32.5	6.2	18.2	P	Z	1.95	4.5

E : Extrusion P : Press



Cross section of r<sub>1</sub>, r<sub>2</sub>, r<sub>3</sub> and r<sub>4</sub>

Fig. 1. Sampling location of test pieces.

験はスパン 100 mm で荷重速度一定の 3 点曲げとした。なお、ここで、試験片採取方向は強度測定方向と同じ意味である。

圧縮試験片は、50 φ×100 l とし、r 方向の 4 断面の Z<sub>2</sub> において、r, θ, Z 方向各 1 本ずつを採取し、試験はひずみ速度一定で行った。

割裂試験片は、50 φ×50 l とし、断面 r<sub>2</sub> の Z<sub>2</sub> の位置より採取し、荷重速度一定の試験に供し、r 方向の強度を求めた。

### 2.2 機械的性質の相関関係

完全脆性体で全く均質な材料の場合は、GILMAN<sup>1)</sup> あるいは GRIFFITH<sup>2)</sup> のモデルで示されるように、弾性率と強度は材料によらず一定の比を持つ。

また、引張応力一定の条件でスリット先端からき裂が発生すると仮定した GRIFFITH のモデル<sup>3)</sup> では、スリットの形状と配向の均一性があれば、完全脆性材料の引張り強度と圧縮の強度比は材料によらず、1:8 の一定値となる。

以上に示すように、脆性材料という点に着目すれば、炭素系れんがについても、引張強度、弾性率、圧縮強度の間の相関性が期待できることになる。

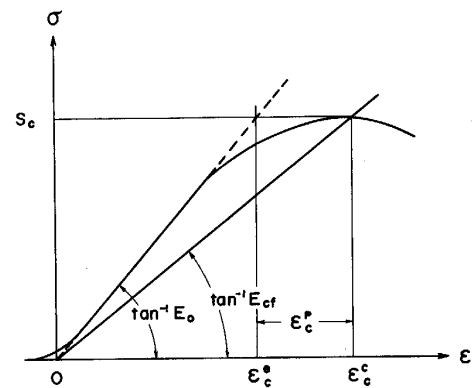


Fig. 2. Stress strain relation under compressive loading and definition of symbols.

設計の観点からは、一つの機械的性質から、他の機械的性質が推定できることは極めて有意義なことと考えられる。れんがと類似して、やはり骨材とマトリックスから構成される多孔質脆性材料であるコンクリートの分野では、例えば、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造設計基準<sup>4)</sup> における弾性率と圧縮強度の関係、あるいは、CEB-FIP 国際指針<sup>5)</sup> における引張（割裂）強度と圧縮強度の関係のように、一つの機械的性質から他のそれが容易に推定できる状態にある。

また、セラミックスの分野では、例えば ASTBURY<sup>6)</sup> が曲げ強度と弾性率の関係を調べている。炭素系れんがと組成の近い多結晶黒鉛でも、曲げ強度と圧縮強度の関係、および、曲げ強度と直接引張強度の関係が調べられているようであり<sup>7)</sup>、一つの機械的性質から他のそれがある程度の精度で予測できる状態にある。

そこで、炭素系れんがについても、曲げ強度、圧縮強度、割裂強度および弾性率における相関関係を調べ、その過程において炭素系れんがの強度特性を検討する。

ここでは、弾性率は圧縮試験から求めるものとし、Fig. 2 の応力ひずみ関係で定義される初期弾性率 E<sub>0</sub> を用いることにする。

炭素系れんがは、押出またはプレス成形時に粒（骨材）が配向性を持つ。また、粒は長軸方向が基底面方向

Table 2. List of test results ( $Z_2$ ).

Material	True porosity (%)	$S_t^b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )		$S_c$ (kgf/mm <sup>2</sup> )		$E_0$ (kgf/mm <sup>2</sup> )		$\epsilon_c$ (%)	
		L	T	L	T	L	T	L	T
C-2	18.8	1.56	1.49	4.54	4.91	690	930	0.952	0.695
C-3	19.5	1.55	1.30	5.41	4.98	730	630	1.221	1.268
C-4	20.2	1.10	0.93	3.80	3.78	740	776	0.764	0.694
C-5	19.7	1.47	1.08	5.91	6.07	830	1030	0.875	0.880
C-6	22.4	0.97	0.61	3.96	3.24	940	460	0.643	1.368
C-7	21.7	1.08	0.95	4.63	4.27	790	680	0.898	0.979
C-8	23.6	1.49	1.46	4.79	5.19	690	830	1.170	1.091
C-9	25.9	1.93	1.12	7.54	6.74	1480	1180	0.742	1.036

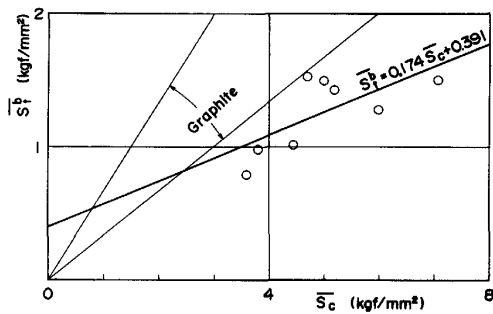


Fig. 3. Relation between compressive strength ( $S_c$ ) and bending strength ( $S_t^b$ ).

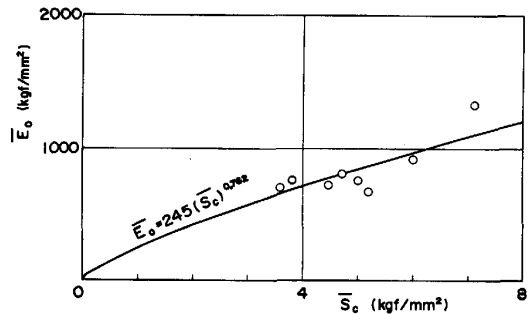


Fig. 4. Relation between compressive strength ( $S_c$ ) and elastic modulus ( $E_0$ ).

になるため得られた製品は一般的には異方性を示す。また、揮発分の散逸条件の不均一性のため、部位によつて機械的性質が異なる。

そこで、異なる機械的性質の比較を行う場合には、粒の配向方向 ( $L$  方向、押出材では押出方向、プレス材ではプレスに垂直方向) とそれに直交 ( $T$  方向) の平均値を用いるとともに、近接位置 (Fig. 1 の  $Z_2$  の位置) のデータのみを用いることにした。

$r_1, r_2, r_3, r_4$  断面の  $Z_2$  の位置における曲げおよび圧縮試験結果を Table 2 に示す。同表では圧縮は  $L, T$  方向とも各 4 本、曲げは  $L, T$  方向とも各 8 本の平均値で表示している。

2.2.1 曲げ強度と圧縮強度

Fig. 3 に各材料の曲げ強度  $S_t^b$  の  $L$  方向および  $T$  方向の平均値  $\bar{S}_t^b$  と  $L$  方向および  $T$  方向の圧縮強度  $S_c$  の平均値  $\bar{S}_c$  の関係を示す。

同図において最小二乗法によつて回帰直線を求めると次式が得られた。

$$\bar{S}_t^b = 0.174 \bar{S}_c + 0.39 \dots\dots\dots (1)$$

式(1)はコンクリートの分野での CEB-FIP 国際指針<sup>5)</sup>における割裂強度と圧縮強度の関係と同様に原点を通らないものとなる。同式で  $\bar{S}_c$  から  $\bar{S}_t^b$  を予測すれば、誤差は最大で 25% 程度となる。また、同図には多結晶黒鉛における  $S_t^b$  と  $S_c$  の相関関係範囲<sup>7)</sup>を示しているが、炭素系れんがは、多結晶黒鉛と比較して、圧縮強度の割に曲げ強度が低いことになる。これは、後述するよ

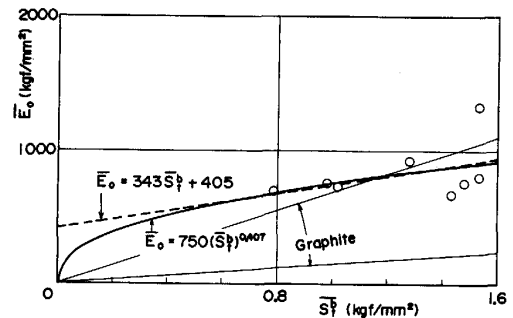


Fig. 5. Relation between bending strength ( $S_t^b$ ) and elastic modulus ( $E_0$ ).

うに、炭素系れんがに用いられる炭素の粒度が多結晶黒鉛のそれに比較して大きいことが一つの原因になると考えられる。

2.2.2 強度と弾性率

Fig. 4 に弾性率  $E_0$  の  $L$  方向と  $T$  方向の平均値  $\bar{E}_0$  と  $S_c$  の関係を示す。

鉄筋コンクリート構造設計基準<sup>4)</sup>にならない、原点を通るべき乗関数で回帰曲線を求めると次式が得られた。

$$\bar{E}_0 = 245 (\bar{S}_c)^{0.762} \dots\dots\dots (2)$$

式(2)を用い  $\bar{S}_c$  から  $\bar{E}_0$  を予測すれば、誤差は最大で約 20% となる。

Fig. 5 に  $\bar{E}_0$  と  $\bar{S}_t^b$  の関係を示す。同図において、回帰直線と原点を通るべき乗の回帰曲線を求めると次式となった。

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_0 &= 343 \bar{S}_i^2 + 405 \\ \bar{E}_0 &= 750 (\bar{S}_i^2)^{0.407} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

同図からわかるように、式(3)のいずれを用いても実質的には等価と思われる。また、式(3)を用いて  $\bar{S}_i^2$  から  $\bar{E}_0$  を予測すると、誤差は最大で40%と比較的大きなものとなる。

同図には、最大粒径が異なる多結晶黒鉛に関する  $K_{NIBBS}^{(9)}$  のデータから求めた  $\bar{S}_i^2/\bar{E}_0$  の範囲も併示している。 $K_{NIBBS}^{(9)}$  の弾性率は音波法による値であるため、圧縮試験より求めた弾性率よりは若干高めを示すと考えられる。したがって、炭素系れんがは多結晶黒鉛に比べて弾性率の割には曲げ強度が低いことになる。

2.2.3 曲げ強度と割裂強度

コンクリートの分野では、曲げ強度  $S_i^b$  より低目の強度を与える割裂強度  $S_i^c$  を引張強度として設計に用いている。また、耐火物の分野でも、れんが積み構造体のき裂発生の目安として、加藤ら<sup>9)</sup> は直接引張強度  $S_i^t$  を用いている。以上に示すように、多孔質脆性材料では、高目の引張強度を与える  $S_i^t$  は、発生応力評価、き裂評価に適さないことが多い。そこで、 $S_i^t$  や  $S_i^c$  が必要となる。

ここで、Fig. 1 の  $r_2$  断面の  $Z_2$  において求めた  $r$  方向の割裂強度  $S_i^c$  と同位置における  $r$  方向の  $S_i^t$  の関係を Fig. 6 に示す。同図より、

$$S_i^c = 0.40 S_i^t \dots\dots\dots (4)$$

となることがわかる。また、式(4)を用い  $S_i^c$  から  $S_i^t$  を推定すれば、誤差は最大で約30%となる。

2.2.4 引張強度と圧縮強度

原点を通る回帰直線で表示すれば、割裂強度  $S_i^c$  と圧縮強度  $S_c$  との関係は次式となる。

$$S_i^c = 0.1 S_c \dots\dots\dots (5)$$

式(5)は GRIFFITH<sup>3)</sup> による脆性材料の計算上の引張り と圧縮の強度比 1:8 とほぼ等しい。ここで、小柳<sup>10)</sup> によるコンクリートの結果から  $S_i^c \approx S_i^t$  と考えることにす

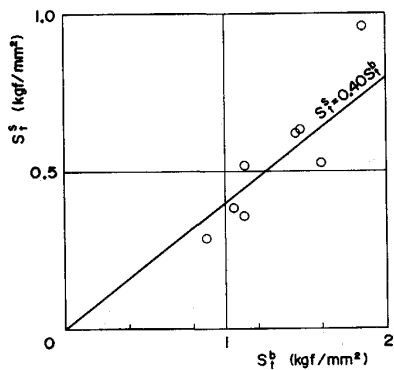


Fig. 6. Relation between bending strength ( $S_i^b$ ) and diametral compressive strength ( $S_i^c$ ).

る。コンクリート<sup>11)</sup> では  $S_i^t/S_c = 1/13 \sim 1/9$ 、また、セラミックス<sup>12)</sup> では  $S_i^t/S_c \leq 0.1$  とされており、炭素系れんがのそれはコンクリートに近いことになる。また、多結晶黒鉛<sup>7)</sup> では  $S_i^t/S_c = 1/6 \sim 1/2.25$  となるようであり、炭素系れんがは多結晶黒鉛と比べて  $S_i^t/S_c$  が小さいことになる。これも、後述するように、多結晶黒鉛と比べた場合の炭素系れんがの最大粒径が大きいことによるものと考えられる。

コンクリートの分野では圧縮強度と引張強度の比を脆度係数と呼び、脆さの目安としているようである。この表現を用いれば、炭素系れんがは類似した組成を持つ多結晶黒鉛に比べて脆いことになる。

3. 考 察

3.1 曲げ強度と弾性率の比のばらつきの原因

以上では最小二乗法によって機械的性質相互の間の回帰直線、回帰曲線を求めた。その際、それぞれの機械的性質には正の相関があるが、回帰式からのずれが比較的大きい材料があることがわかった。その特徴をまとめる と次のようになる。

$\bar{E}_0$  あるいは  $\bar{S}_c$  に比して  $\bar{S}_i^b$  の低いもの : C-9

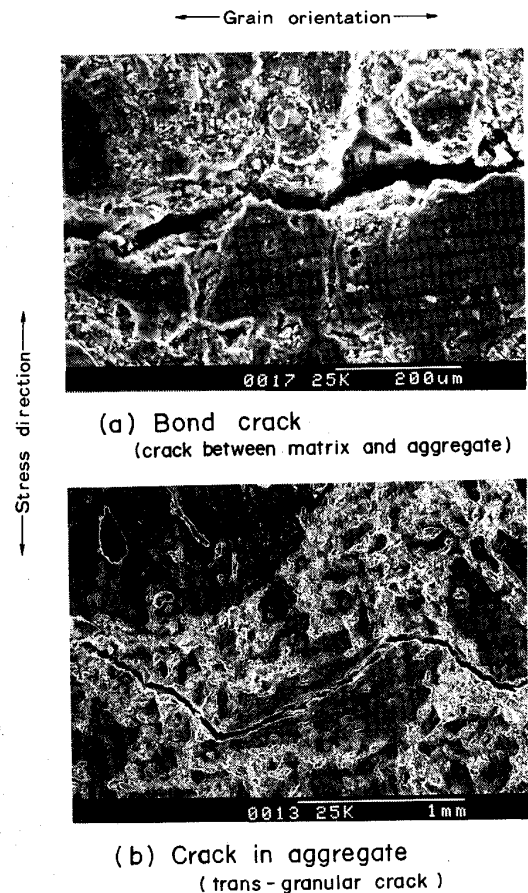


Photo. 1. Crack by bending.

$\bar{E}_0$  に比して  $\bar{S}_c$  が低いもの : C-9

$\bar{E}_0$  あるいは  $\bar{S}_c$  に比して  $\bar{S}_i^0$  の高いもの : C-2, C-3, C-8

$\bar{E}_0$  に比して  $\bar{S}_c$  が高いもの : C-3

ここでは、特に曲げ強度と弾性率の比  $\bar{S}_i^0/\bar{E}_0$  に比較して、回帰式からずれが生じる原因を検討する。

曲げ破壊時のき裂形態を Photo. 1 に示す。同写真は C-8 を例にしているが、他の材料でも同様である。き裂は骨材の基底面に沿った線状欠陥 (Striation) を通ることもあるが、多くは骨材とマトリックス (微粉部) の接合部、いわゆるボンドを通ることが多い。したがって炭素系レンガでは、ボンドが最脆弱部位となつている可能性が高いといえよう。

なお、ボンドがき裂の起点となりやすい部位と仮定することは、JENKINS<sup>13)</sup>、KNIBBS<sup>14)</sup> らの多結晶黒鉛の場合と矛盾はない。

$\bar{S}_i^0/\bar{E}_0$  の小さい材料として C-9、その大きい材料として C-2、それらの中間的な材料として C-5 を選び、その組織を Photo. 2 (a), (b), (c) に示す。同写真からわかるように、各材料には次の性質がある。

①  $\bar{S}_i^0/\bar{E}_0$  の小さい C-9 は、骨材が多孔質で、また、

ボンドに大きな欠陥を有することが多い。

②  $\bar{S}_i^0/\bar{E}_0$  が中間の C-5 は、骨材の多くは緻密であるが、一部に多孔質のものが混在している。また、C-9 ほど大きくはないが、ボンドに欠陥を有することが多い。

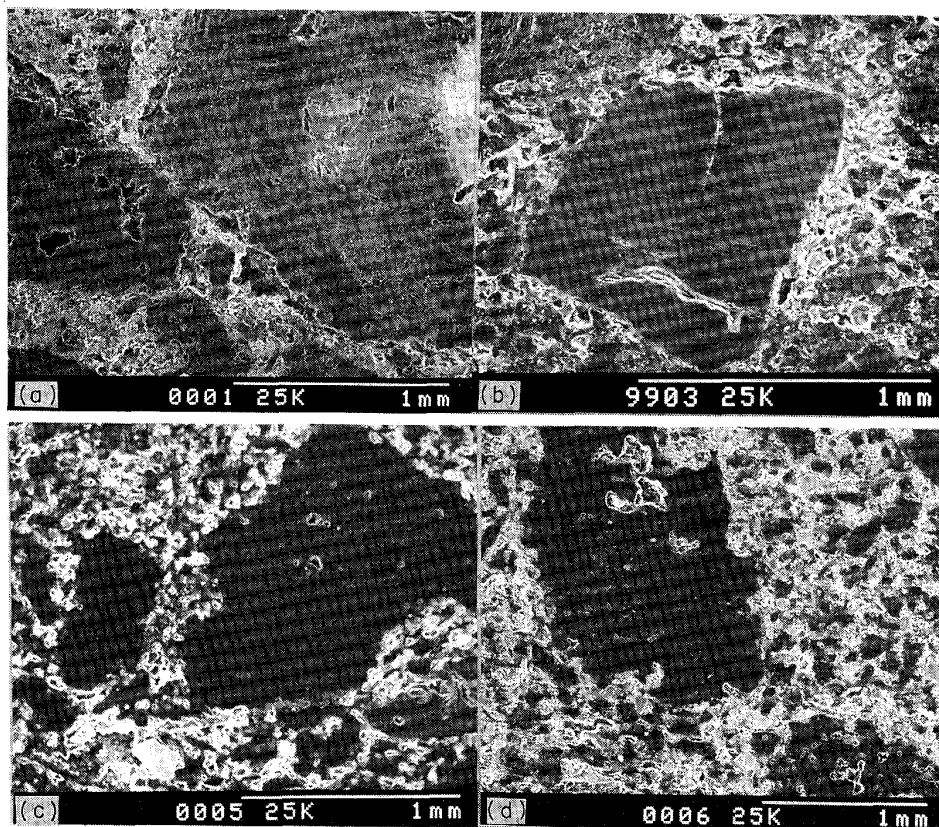
③  $\bar{S}_i^0/\bar{E}_0$  の大きい C-2 は、骨材は多孔質であるが、ボンドにはマトリックス部と同程度の寸法の空孔状の欠陥しか見受けられないことが多い。

以上のことから、ボンドにおける欠陥寸法が  $\bar{S}_i^0/\bar{E}_0$  に大きな影響を与えていると考えられる。

C-9, C-5, C-2 の気孔率はそれぞれ 25.9, 19.7, 18.8% である。したがって①~③の観察結果と気孔率が対応するように思えるが、現実には①~③の現象と気孔率は直接的な関係はないようである。

すなわち、C-8 は C-9 の次に気孔率の高い材料であり、また、C-2 と同様に  $\bar{S}_i^0/\bar{E}_0$  の高い材料である。この C-8 の組織を Photo. 2 (d) に示すが、これも C-2 と同様に骨材とマトリックスの付着状態は極めてよく、ボンドにはマトリックス部の空孔と同程度の欠陥しか存在しないことが多い。したがって、ボンドの欠陥寸法と気孔率は必ずしも直接的な関係はないと考えられる。

また以上のことから、材料間で機械的性質を比較す



(a) C-9 (b) C-5 (c) C-2 (d) C-8

Photo. 2. Comparison of sticking state of aggregate and matrix.

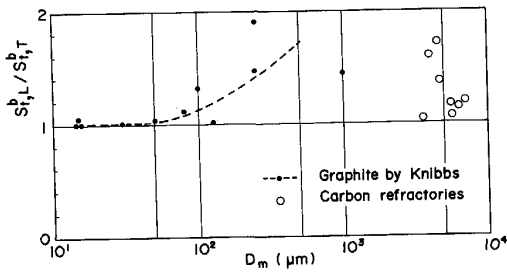


Fig. 7. Relation between maximum grain size ( $D_m$ ) and an-isotropy ( $S^b_{iL}/S^b_{iT}$ ) of bending strength.

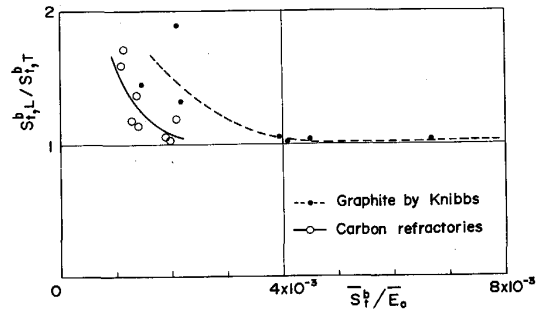


Fig. 8. Relation between the ratio ( $\bar{S}^b_i/\bar{E}_0$ ) of bending strength and elastic modulus and an-isotropy ( $S^b_{iL}/S^b_{iT}$ ) of bending strength.

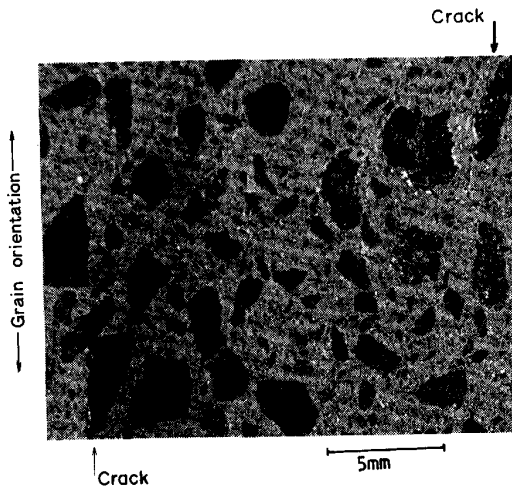


Photo. 3. Relation between latent crack and press direction.

る場合には、気孔（き裂を含める）の存在型態に着目する必要があることがわかる。

### 3.2 曲げ強度の異方性

ここで、曲げ強度に着目して異方性が材料によつて異なる状態を検討する。KNIBBS<sup>8)</sup>は、多結晶黒鉛では最大粒度 ( $D_m$ ) を小さくすれば、マトリックスと骨材の区別が消失し、その結果異方性が小さくなるとしている。

そこで、 $D_m$  と  $S^b_{iL}/S^b_{iT}$  (添え字  $L$  は骨材の配向方向、 $T$  はそれと直角方向を示す) の関係を、KNIBBS<sup>8)</sup> による多結晶黒鉛の結果と併せて Fig. 7 に示す。同図より、炭素系れんがの場合は  $D_m$  の差が小さく、 $D_m$  の差によつて異方性の差を説明できないことがわかる。

焼結体の異方性は、基底面方向に基づく骨材自体の異方性と骨材の配向性に基づくボンド部の欠陥に依存することが考えられる。ここでは前者については考えずにボンドの欠陥についてのみ検討する。

Photo. 3 に曲げ強度の異方性の強い C-9 の潜在欠陥の例を示す。同写真は骨材寸法程度の欠陥について着目したものであり、それがボンド部にあり、また、骨材の配向（長軸）方向にあることがわかる。この欠陥は、配

向方向の曲げ強度が高く、その直角方向のそれが低いことと良好に対応する。したがつて、異方性がこのボンド部の欠陥と対応することが考えられる。

前項では、 $\bar{S}^b_i/\bar{E}_0$  の大小がボンドの欠陥の大小と対応することを述べた。そこで、この  $\bar{S}^b_i/\bar{E}_0$  がボンドの欠陥と対応し、その結果、異方性と対応する可能性があると考え、 $S^b_{iL}/S^b_{iT}$  と  $\bar{S}^b_i/\bar{E}_0$  の関係を図示すれば Fig. 8 となつた。同図には、KNIBBS のデータ<sup>8)</sup> も同じ関係で整理している。

同図から、曲げ強度の異方性が  $\bar{S}^b_i/\bar{E}_0$  と良好に対応し、 $\bar{S}^b_i/\bar{E}_0$  が小さくなれば異方性が大きくなることがわかる。このことから、異方性の強い炭素系れんがは、曲げ強度に比較して弾性率が高いことが多いということになる。

### 3.3 曲げ強度のばらつきと気孔率

高炉湯溜り部では、Fig. 1 程度の寸法を 1 ブロックとして用いることもまれではない。それらは通常、押出またはプレス成形され、1300°C 程度で焼成され、表面側数 10 mm が切断除去されて最終形状となる。この製造工程に応じてれんがは部位ごとに異なつた性質を示す。

KNIBBS<sup>8)</sup> によれば、多結晶黒鉛の曲げ強度は次式で表せるとしている。

$$S^b_i = C_s \cdot \exp(-\xi_s \cdot P_r) \cdot D_m^\eta \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $P_r$  は気孔率、 $D_m$  は最大粒度、 $C_s$ 、 $\xi_s$ 、 $\eta$  は定数である。KNIBBS は  $\eta$  として 0.5 を与えている。(  $\eta = 0.5$  は破壊力学的検討から求めており、これは粒度に比例した寸法の潜在欠陥を仮定したことになる)。

式(6)の気孔率  $P_r$  が強度に与える影響に着目し、C-2~C-9 の各れんがの  $r$  方向の曲げ強度とその部位における真気孔率  $P_r$  の関係を調べる。各れんがでは 28 か所で  $P_r$  を測定し、また、その位置で各 2 本の  $r$  方向曲げ試験を実施している。そこで、その各 2 本の平均曲

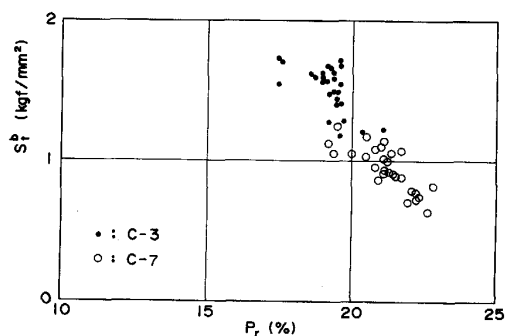


Fig. 9. Relation between porosity ( $P_r$ ) and bending strength ( $S_t^b$ ).

Table 3. Effect on porosity on bending strength ( $S_t^b \propto \exp(-\xi_s \cdot P_r)$ ).

Material	C-2 (L)	C-3 (L)	C-4 (L)	C-5 (T)	C-6 (L)	C-7 (T)	C-8 (L)	C-9 (L)
$\xi_s$	2	10	13	10	19	13	9	6

げ強度  $S_t^b$  と真気孔率  $P_r$  の関係を Fig. 9 に示す. 同図では,  $P_r$  の増大によつて  $S_t^b$  が減少する傾向が明瞭に示されている.

ここで, 各材料ごとに  $D_m$  が一定として, 式(6)の  $\xi_s$  を最小二乗法を用いて求めた結果を Table 3 に示す. 同表で C-2 の  $\xi_s$  が極めて小さく, C-6 の  $\xi_s$  が極めて大きいのは, サンプリングの結果得られた  $P_r$  の変動範囲が 1.5~2.0% と小さかつたため,  $\xi_s$  の推定精度が低かつたことによるものと思われる. また, C-2, C-6 以外のれんがにおいて得られた  $P_r$  の変動範囲は約 4% であつた. これらについても  $\xi_s$  の推定精度は十分とはいへないが,  $\xi_s$  はおおむね 10 程度となることがわかる.

KNIBBS<sup>8)</sup> は多結晶黒鉛で  $\xi_s=6.8$  という値を得ている. PASSMORE<sup>15)</sup> は, アルミナで  $\xi_s=11.3\sim 11.8$  という値を得ている. また, KNUDSEN<sup>16)</sup> は, アルミナおよびジルコニアで  $\xi_s$  は 4~9 と大きな幅を持つと述べている.

したがつて, 前述の  $\xi_s=10$  という値は, 多孔質脆性材料に関する即存のデータとほぼ等しいことになる. このことをいいかえれば, 現状の炭素系れんがの曲げ強度の部位によるばらつきは, 気孔率のばらつきに基づく可能性が高いことになる.

### 3.4 高温での曲げ強度

曲げ強度の温度依存性を調べた結果を Table 4 に示す. 同表の試験片は Fig. 1 の  $r_1, r_2, r_3, r_4$  各断面の 0 点近傍で採取したものであり, Table 1 のそれとは試験片採取位置が異なる.

Table 4. Effect of temperature on bending strength.

Material	(kgf/mm <sup>2</sup> )							
	C-2 (L)	C-3 (L)	C-4 (L)	C-5 (T)	C-6 (L)	C-7 (T)	C-8 (L)	C-9 (L)
R. T. (n=8)	1.60	1.63	1.12	1.08	1.03	0.84	1.79	1.92
1 000°C (n=8)	1.99	1.96	1.45	1.48	1.26	1.18	2.11	2.07
1 400°C (n=8)	2.40	2.23	1.52	1.28	1.20	0.94	2.29	1.64

Table 5. Change of SiO<sub>2</sub> content during heat treatment in coak breeze (1 500°C, 3h).

	%							
	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7	C-8	C-9
Before H. T.	3.66	5.01	2.33	1.41	2.55	1.90	7.47	3.91
After H. T.	2.29	2.67	2.33	2.42	4.62	2.35	5.82	10.80

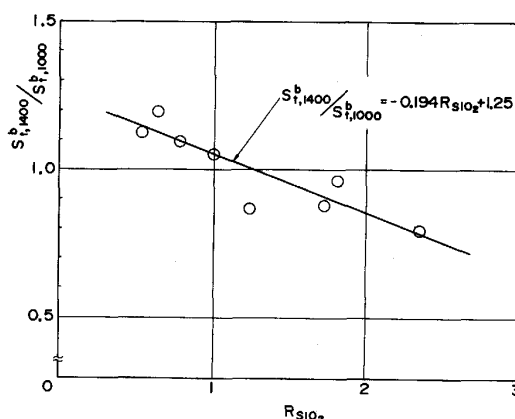


Fig. 10. Relation between bending strength ratio ( $S_{t,1400}^b/S_{t,1000}^b$ ) and SiO<sub>2</sub> content ratio ( $R_{SiO_2}$ ).

同表より, 曲げ強度は 1 000°C~1 400°C では明らかに常温より高いが, 材料によつては 1 400°C での曲げ強度  $S_{t,1400}^b$  が 1 000°C でのそれ  $S_{t,1000}^b$  より高いものと低いものがあることがわかる. ここでは, 材料によつてこのような差が生ずる原因を検討する.

炭素系れんがの主成分である炭素(C)と炭化珪素(SiC)は化学変化がなければ, 2 000°C 以上でも固体で強度と弾性を有する材料である. しかし, 山口<sup>17)</sup>によれば, SiC は酸化雰囲気では SiO<sub>2</sub> となり, CO 雰囲気では SiO となり揮発するとされている. 高温での曲げ試験はコークスブリーズ中で実施しているが, 酸化, 還元いずれの反応が卓越するかは不明である. そこで, コークスブリーズ中で 1 500°C, 3 h の熱処理を行い SiO<sub>2</sub> の増減を調べた. その結果を Table 5 に示す. 同表に示されるように SiO<sub>2</sub> の増加する材料と減少するそれとがあることがわかる.

ここで, 熱処理後の SiO<sub>2</sub> の含有率と熱処理前のそれの比を  $R_{SiO_2}$  とする. この  $R_{SiO_2}$  と前述の  $S_{t,1400}^b$

$/S_{i,1000}^b$  の関係を調べたのが Fig. 10 である。同図では  $S_{i,1400}^b/S_{i,1000}^b$  が  $R_{SiO_2}$  の増大とともに減少してゆくことが明瞭に示されており、高温強度と  $SiO_2$  の関係があることがわかる。

$SiO_2$  による炭素系れんがの高温強度の低下の報告例は見あたらないようであるが、 $Si_3N_4$  焼結体では、不純物としての  $SiO_2$  によるガラス相の生成によつて  $1300^\circ C$  以上で強度が低下することが本間<sup>18)</sup>によつて報告されており、同様の現象が炭素系れんがにも生じると考えれば、高温強度と  $SiO_2$  の関係は理解できよう。

また、分析結果ではいずれの材料にも成分中に金属 Si と SiC の両方が存在している。このことから、焼成前から金属 Si が存在し、焼成中に  $Si+C \rightarrow SiC$  と反応することにより、Si が焼結助剤の役割を演じ、マトリックス内、あるいは、マトリックスと骨材の結合力が増大していた可能性も考えられる<sup>19)</sup>。この場合、SiC が減少し  $SiO_2$  に変化するような材料では、 $1400^\circ C$  での強度の低下をまねくことが考えられる。

以上に示すように、 $SiO_2$  の生成と高温強度の低下とが関連するという考え方は妥当なものと思われる。

#### 4. 結 言

市販の炭素系れんが 8 種の常温および高温での強度特性を調べた結論を得た。

①圧縮強度と曲げ強度、圧縮強度と弾性率の間にはそれぞれ正の相関関係があり、回帰直線または曲線により、前者から後者を推定する場合の最大誤差は、それぞれ、25、20% である。

②き裂発生の評価で重要な割裂強度は曲げ強度の約 40% となる。

③曲げ強度  $\bar{S}_i^b$  と弾性率  $\bar{E}_0$  の比  $\bar{S}_i^b/\bar{E}_0$  は材料間でばらつく。この  $\bar{S}_i^b/\bar{E}_0$  のばらつきは、ボンド部の欠陥と関係するようであり、ボンド部の欠陥の大きい材料は

$\bar{S}_i^b/\bar{E}_0$  が小さい。

④材料間で比べた場合、ボンド部の欠陥の大小は、必ずしも材料の気孔率とは対応しない。これは、材料ごとに気孔の存在型態が異なることを示すといえよう。

⑤曲げ強度の異方性と  $\bar{S}_i^b/\bar{E}_0$  には相関関係があり、異方性の強い材料は  $\bar{S}_i^b/\bar{E}_0$  が小さい。

⑥大型ブロックでは部位によつて曲げ強度がばらつく。曲げ強度の部位によるばらつきは、気孔率のばらつきが主原因と考えられる。

⑦ $1400^\circ C$  まで昇温すれば、一部の材料では曲げ強度が低下しはじめる。この現象は  $SiO_2$  の生成と関係すると考えられる。

#### 文 献

- 1), 2) 例えば, A. S. TETELMAN and A. J. McEVELY, Jr. 著, 宮本 博訳: 構造材料の強度と破壊① (1970), p. 42 [培風館]
- 3) 例えば, 小林昭一: 材料, 20 (1971) 209, p. 164
- 4) 鉄筋コンクリート構造設計規準, 同解説 (日本建築学会編) (1975)
- 5) コンクリート構造設計施工国際指針 (1971) [鹿島出版会]
- 6) N. F. ASTBURY: Metals and Materials, 2 (1968), p. 299
- 7) 金 順一: 炭素材料入門 (炭素材料学会編) (1979), p. 66
- 8) R. H. KNIBBS: J. Nucl. Mater., 24 (1967), p. 174
- 9) 加藤一郎, 森田喜保, 樋上文範: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 105
- 10) 小柳 治: 京都大学学位論文 (1976), p. 61
- 11) 小阪義夫, 森田司郎: 鉄筋コンクリート構造 (1975), p. 36 [丸善]
- 12) セラミックスの機械的性質 (窯業協会編) (1982), p. 65 [技報堂]
- 13) G. M. JENKINS: J. Nucl. Mater., 5 (1962), p. 280
- 14) F. P. KNUDSEN: J. Am. Ceram. Soc., 45 (1962), p. 94
- 15) E. M. PASSMORE, R. M. SPRIGGS and T. VASILOS: J. Am. Ceram. Soc., 48 (1965), p. 1
- 16) F. P. KNUDSEN: J. Am. Ceram. Soc., 42 (1959), p. 376
- 17) 山口明良: 第 3・4 回白石記念講座 (日本鉄鋼協会編) (1983), p. 35
- 18) 本間克彦: 大阪大学学位論文 (1986), p. 84
- 19) 高温セラミック材料 (鈴木弘茂編) (1985), p. 113 [日刊工業新聞社]