ボロンフィラメントの引張破断挙動*

森 田 幹 郎**

Mikio Morita : Fracture Processes in Boron Filaments. Brittle filaments with high Young's modulus, such as boron or graphite, are usually broken into pieces when tested under tension. To make clear the fracture mechanism, boron filaments were tensile tested monofilamentally, and the fracture processes were observed photographically.

The following results were obtained :

(1) The filament fractured first at the weakest point where a relatively large imperfection might exist.

(2) Then, fracture due to the buckling occurred.

(3) Elastic stress wave interference caused the filament to break into pieces.

(Received October 13, 1972)

I. 緒 言

ボロンフィラメントとは、タングステン細線の上に金属ボロンを化学的に蒸着して作った、直径100~140ミクロンの、高強度、高弾性率を有する繊維⁽¹⁾で引張試験をすると、一般の金属繊維と異なり、降伏現象を示さず弾性範囲で破断する脆性材料である。破断時の試験片の様子をみると、カーボン繊維などと同様に、切れた瞬間に粉々に破砕され飛散する。この原因としては、(1)材料が極めて均質で、引張試験を行なうと全体が同時に破壊応力に達するため、粉々に破断する、(2)どこか比較的大きな欠陥の存在していた場所で破断したのち、弾力的にもとの長さに復元しようとする。その時の衝撃的な応力波の干渉により、2次的に破砕される、の二つが考えられる。もし前者ならば、ボロンフィラメントがいくらか高強度ではあっても、一定の応力に到達した途端に全体がバラバラに壊れることになるので、安全率をかなり高くしておかなければ、危なくて1次構造材には使えない。もし後者ならば、2次的な応力の発生を何らかの方法で抑えることも可能なので、補強用繊維として使えよう。

このような観点から、ボロンフィラメントの破断の瞬間を、写真のフィルム上に固定し、破断挙動を調べたので、報告する。

II. 実験方法

現象がかなり速いので、高速度映画で連続撮影することは、できなかった。そこでやむを得ず、Fig.1のように装置をならべて、破断の瞬間を捕えることにした。すなわちボロン繊維に微弱な電流を流しておき、これを引張って破

断した瞬間に信号を取り出し、切れてから一定時間経過したところでストロボスコープを発光させる。繊維をはさんでストロボと反対側にカメラを固定しておき、発光時間中だけフィルムに感光させるという方法である。この遅延時間を種々に変化させ、破断後の試験片の挙動を調べた。

Fig.1 Experimental set-up block diagram
a : specimen, b : strobo-scope, c : camera with Polaloid film, d : power supply, e : breaking signal codes

1. 試験片とその処理

試料として、東芝製直径104μのボロン繊維(Lot No. 266)を用いた。試験時のチャック間の距離は40mm一定とした。しかし繊維の中の内部欠陥の量や質のバラツキにより、強度変動があるので、破断時を予想することが出来ない。そこで試料に弱い電流を流しておき、試料が切断したときに電流が切れることで破断信号を出すことにした。ボロンは常温では電気抵抗が高いため導電体としては取り扱えないが、心線にタングステン線を用いているので、このW線を信号線とした。心線は、ボロン部よりも伸びが大きいので、タングステン線が外側より先に破断するおそれのないことも、一つの利点である。

この目的で、試験片のチャック部分をニッケルメッキして、心線のタングステンと導通を持たせ、このニッケルメッキ部をさらにアルミ箔で挟んで端子とした。

2. 試験方法

引張試験機は Tensilon UTM-II 型(東洋測器製、ロードセル最大荷重5kg)を用いた。引張速度毎分0.4mm(ひ

** 東京芝浦電気株式会社総合研究所(Toshiba R & D Center, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd., Kawasaki)

* 1971年4月金属学会東京大会に発表

(1) 清水省吾 他：金属材料，9(1969)，No.11，34。

ずみ速度毎分1%)で試験を行った。

試験機の配置は、先に述べたように Fig.1 に示す通りである。記録システムとして、大型スチールカメラおよび ASA 3000 のボラロイドフィルムを用いた。照明はストロボスコープ MS-210 型(菅原研究所製、出力 5 W、閃光時間 $0.8\ \mu\text{s}$ または $2\ \mu\text{s}$)である。主として $2\ \mu\text{s}$ を用いた。遅延回路を用いて、フィラメントが切断してから発光するまでの時間を $1.5\sim 24\ \mu\text{s}$ の間に調節して現象を追いかけた。遅延時間 DT は破断してから、ストロボが発光し最大輝度の半分に到達するまでの時間で表わした。

III. 実験結果

引張試験の結果得られた代表的な破断写真を Photo.1～Photo.6 に示す。写真説明文中 DT は遅延時間、uts は破断強度を示す。測定的方式上、一つの試料では1枚の写真しか撮影されなかったため、厳密な意味では同一繊維の破断後の挙動とはいえないが、大体の傾向はつかめよう。

Photo.1 は、破断 $2\ \mu\text{s}$ 後の写真である。この時点では破断はほぼ中央の1カ所できちんと切れていない。やはりどこか最も弱い場所から破断することが、明らかにされた。線に振動が生じたためか、実際のものより太めに写っている。

Photo.2 は破断 $7\ \mu\text{s}$ 後の写真である。(a)では試料の中

央よりやや下の方で切れたのち、残った線の長い方のチャック部で挫屈により切れ、(b)では逆に短い方のチャック部で2次的に切断している。したがってチャック部で切れるのに試料長さの半分以上のものの運動エネルギーがないと切れないということではなく、比較的小さなエネルギーで挫屈しそうである。全体に波動が生じている。Photo.3 ではこの時間ではチャック部での挫屈は認められない。試験終了後には全部の試料が破断しチャック部には何も残っていない。

さらに時間が経過すると、Photo.4 にみられるように、最初の大きく屈曲した部分の中がさらに細分化され、粉末となって飛散する。これはボロンのみが粉末になる、あるいは W とボロンの剥離が生じるというのではなく、ボロン部とタングステン部は密着したまま長手方向に細分化される。この細分化の程度は、強度の高いものすなわち、破断に到るまでに貯えられるひずみエネルギーの大きなものほど大きい。Photo.5 に中程度の強度を示す試料、Photo.6 は低応力で破断したものを示すが、この場合はかなり長いままで試料が残る。逆にいうとチャック部に残るのは何らかの意味で欠陥を持つ弱い繊維で、欠陥の少ない健全な繊維は試験後、チャックには何も残らない。

試験片の破断の順序を模式的に示すと、Fig.2 が得ら

Photo.1 Fracture behavior of a boron filament at $2\ \mu\text{s}$ (uts = $387.9\ \text{kg/mm}^2$)

Photo.2 Fracture behavior of a boron filament, (a) : at $7\ \mu\text{s}$ (uts = $352.7\ \text{kg/mm}^2$), (b) : at $8\ \mu\text{s}$ (uts = $392.1\ \text{kg/mm}^2$)

Photo.3 Fracture behavior of a boron filament at $7\ \mu\text{s}$ (uts = $390.2\ \text{kg/mm}^2$)

Photo.4 Fracture behavior of a boron filament at $15\ \mu\text{s}$ (uts = $422.7\ \text{kg/m}^2$)

Photo.5 Fracture behavior of a boron filament at $14\ \mu\text{s}$ (uts = $323.8\ \text{kg/mm}^2$)

れる。この実験により、ボロン繊維の破断は、仮定(2)のようにどこか1カ所で切れ、その後2次的に粉々になることが明らかになった。

なお、引張試験時に曲げ応力が作用していないことは、切断された試験片(比較的長いもの)が、真直に軸方向に反対側のチャックに突きささることにより確認された。

Photo.6 Fracture behavior of a boron filament at $23 \mu s$ ($uts=232.9 \text{ kg/mm}^2$)

Fig.2 Fracture processes in a boron filament

破断面の SEM 写真の例を **Photo.7~Photo.9** に示す。Photo.7は、低強度の繊維で、ボロンとタングステン線の界面から、クラックが発生しているようである。この界面には、 W_2B_5 , WB_4 のようなボライドの生成している可能性が高い。Photo.8は中程度の強度を示した繊維の断面である。Photo.9は、高強度を示したもので、きれいな一つ

Photo.7 SEM micrograph of the fractured part in a boron filament under a relatively low ultimate tensile strength ($\times 1000 \times \frac{3}{5}$)

Photo.8 SEM micrograph of a boron filament section under a medium tensile strength ($\times 1000 \times \frac{3}{5}$)

Photo.9 SEM micrograph of a boron filament section under a high tensile strength ($\times 1000 \times \frac{3}{5}$)

の面で切れている。しかし、前述のように繊維は粉々になるので、これら Photo.8, 9 がクラックの最初に発生した面の写真という訳ではなく、試験後拾い集めた試料の中に、このような破面を呈するものが多かったことを意味しているに過ぎない。W と B の剥離した写真は得られなかったのでこの間の結合はかなり強いものと認められる。

IV. 考 察

フィラメントが、比較的大きな欠陥のある箇所すなわち弱い場所で応力集中によって破断したのち、2次的に粉々に破断する機構として次のようなことが考えられる。

1. チャック部での挫屈

フィラメントを引張試験したとき、破断すると、弾性的に元の長さに戻ろうとするが、チャック部は固定されているため動かず、ここに引張りの反力として大きな圧縮力がかかり、フィラメントが挫屈する。これはボロンに限らず、一般の細線の引張試験においてもよく観察されることで、たとえば **Photo.10** はピアノ線 (0.08ϕ) をボロンと同じような条件、すなわちひずみ速度毎分 1% で試験したの

Photo.10 Fracture behavior of a piano wire

ちの写真であるが、明らかにチャック部で挫屈を起す。ただしピアノ線は塑性変形能が大きいので、チャック部での破壊には到っていない。

一端支持の場合、Euler 挫屈の起こる条件は⁽²⁾

$$P_{cr} = \pi^2 EI / 4l^2 \quad (1)$$

とされている。E は弾性率、l は棒の長さである。円形断面の場合、直径を d とすれば

$$I = \pi d^4 / 64$$

であるため

$$\sigma_{cr} = 4 P_{cr} / \pi d^2 = \frac{1}{64} \cdot \pi^2 \cdot E \cdot \left(\frac{d}{l} \right)^2 \quad (2)$$

$E = 42000 \text{ kg/mm}^2$ 、中央で切れたとして $l = 20 \text{ mm}$ 、 $d = 0.1 \text{ mm}$ とすると

$$\sigma_{cr} = 0.16 \text{ kg/mm}^2$$

というきわめて小さな力で挫屈することになる。切れた瞬間にどの程度の反力がチャック部に生じるかわからないが、エネルギーの loss がないとすれば、引張り強さに相当するだけの力で圧縮され、根本で挫屈する。Euler の式をもとに戻し

$$P_{cr} = (2n+1)^2 \cdot \pi^2 EI / 4l^2 \quad (3)$$

ただし n は 0 を含む任意の整数(周期)とし $\sigma = 400 \text{ kg/mm}^2$ とすると $n = 24$ ときわめて多数回の曲がりを生じることになる。すなわち 0.4 mm ぐらいの長さで全面に曲がり破壊する可能性を示す。

実験では Photo.2(b) などではっきり示されているように $n = 2$ 程度切れているので、チャック部での消費される力はかなり小さい ($n = 2$ とし $\sigma = 4.1 \text{ kg/mm}^2$)。

(2) 仲 威雄 他訳：チモシェンコ、挫屈理論、コロナ社、(1953)。

2. 繊維中央での挫屈

チャック部で切れる、あるいは応力波がチャック部で反射されると、逆向きの力が働く。最初の切断点近傍からの圧縮応力波と、チャック部からの応力の反射がお互いに干渉して残った試料全体を圧縮するとする。両端自由の場合の挫屈条件は

$$P_{cr} = \pi^2 EI / l^2 \quad (4)$$

となり、式(1)より4倍大きい、 1 kg/mm^2 以下の応力で挫屈することになる。

このようにいろいろな原因が重なりフィラメントは細断される。正確なことはわからないが、次の順序で切断している。①中央近傍で切断、②チャック部近傍の繊維の弾力的な復元力によって、チャック部固定端で挫屈して破断、③チャック部での破断によって逆向きの応力波の発生、あるいは固定端での応力波の反射、④最初の切断部近傍の復元による応力波と、チャック側からの反射波の干渉、⑤残った試験片の中央近傍が挫屈破壊する。

しかし、引張試験すると粉々に壊れるのが本質的なものではなく、2 次的なものであり、しかも主因が端部での挫屈、および応力波の反射であれば、複合材料中では一瞬のうちに寸断されるようなことは起らないので、安心して使用できる。というのは、マトリックス中では挫屈のおそれが少ない上、これによって応力波を吸収できるからである。

V. 結 論

ポロンフィラメントを引張試験し、破断の様相を調べた結果次のことが判明した。すなわち、ポロンフィラメントはバラバラに引きちぎられるように見えるが、破壊の順序は、

(1) 比較的弱い1カ所で破断する。

(2) 弾的に元の長さに戻ろうとするが、その反力で固定端で挫屈する。

(3) 固定端で反射される弾性波や、固定端で挫屈され両端フリーになった線間の応力波の干渉によって、残った試験片が寸断される。

したがって、複合材料にした場合にはこの現象は無視でき、全体が一度に破壊することは起らないと考えられる。

写真撮影にあたっては、株式会社ナックの牛窪 正、丸山 欽洋両氏をはじめとする技術陣の方々のお世話になった。深く感謝する。また、SEM 観察をはじめ、種々実験の援助をいただいた、東芝総研、横山時雄氏、竹田博光両氏、また検討に加わっていただいた同武井明朗氏に謝意を表します。