常圧焼結窒化けい素の常温におけるねじり疲労強度*

猿 木 勝 司^{*1}, 山 田 明^{*2}

Torsional Fatigue Tests of Sintered Silicon Nitride at Room Temperature

Katsushi SARUKI and Akira YAMADA

For strength design of ceramic parts, static, static fatigue and cyclic fatigue torsional tests were carried out at room temperature on smooth specimens and notched specimens of sintered Si_3N_4 . (1) The cyclic fatigue strength (maximum principal stress) at stress ratio $R=0$ was lower than the static fatigue strength. This was due to the effect of cyclic stress. The cyclic fatigue strength at stress ratio $R=-1$ was lower than that at $R=0$. This difference was almost equal to the difference in strength calculated from the effective volume. In this case, the effective volume of $R=-1$ is twice as much as that of $R=0$. (2) In the case of a gentle notch, both static torsional strength and cyclic torsional strength increased unlike in the case of static plane bending and rotating bending respectively. This can be accounted for by the difference in the effective volume.

Key Words: Fatigue, Nonmetallic Materials, Ceramics, Sintered Silicon Nitride, Torsion

1. 緒 言

セラミックスの強度に関する研究は、試験の簡単な曲げで行われる場合が多い。しかし、セラミックスを構造材料として利用するには、曲げ等の単軸応力下の強度のほかに、ねじり荷重による二軸応力下の強度についても検討しておく必要がある。

前報⁽¹⁾では常圧焼結窒化けい素について曲げ疲労強度の検討を実施したが、本報では引き続き報告例のほとんどない平滑試験片の静ねじり⁽²⁾⁻⁽⁴⁾試験、静ねじり疲労試験および繰返しねじり疲労試験を常温で行い、強度に及ぼす繰返し負荷、圧縮側応力の影響を調べるとともに、切欠試験片による静ねじりおよび繰返しねじり疲労試験を行い、切欠きの影響についても検討を加えた。

2. 実 験 方 法

供試材は、 $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-MgAl}_2\text{O}_4$ を焼結助剤として添加した常圧焼結窒化けい素で、粒径は $0.4\text{ }\mu\text{m}$ である。試験

片の形状寸法を図 1 に示す。

表面粗さは試験部を軸方向に測定した結果、 $R_{\text{max}}=0.8\text{ }\mu\text{m}$ 程度であった。また、比重はアルキメデス法により測定した結果 3.24 であった。

静ねじり試験には容量 $490\text{ N}\cdot\text{m}$ の静ねじり試験機を用い、 $49\text{ N}\cdot\text{m}$ レンジで行った。また、静疲労および 2 種類の繰返し疲労試験にはいずれも容量 $39\text{ N}\cdot\text{m}$ のシェンク式ねじり曲げ疲労試験機を用いた。なお、

図 1 試験片形状

* 昭和 63 年 11 月 16 日 第 954 回講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 11 月 30 日。

^{*1} 正員、(株)豊田中央研究所 (〒480-11 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道 41-1)。

^{*2} (株)豊田中央研究所。

繰返し疲労試験の際の試験速度は 3 000 cpm で、負荷波形はきれいな sin 波である。

3. 実験結果と考察

3.1 負荷形式と強度の関係 静疲労と片振疲労試験結果の比較を図 2 に示す。図の横軸は時間尺度とし、静疲労、繰返し疲労とも負荷開始から破断までの総時間を単純に取って示した。縦軸の応力は最大主応力で表した。また、所定の荷重に達する前に破壊した実験点は、破断時の応力を縦軸にとって横軸の 1~2 秒のスケール上に記入した。この表示法は以下の図においても同じである。白丸印で示した試験結果からもわかるように、ねじり荷重下においても静的な一定応力を負荷しておくだけで、時間の経過により破壊する静疲労現象が認められた。次に、この静疲労試験結果と黒丸印で示した片振疲労試験結果を比較すると、短寿命域では差は認められないが、長寿命域になると片振疲労のほうが多少強度レベルが低くなっている。 10^7 回繰返しに相当する強度（破断までの時間では 2×10^6 秒に相当）を比較してみると、図 2 中に示したように

図 2 静疲労と片振疲労試験結果の比較

図 3 片振疲労と両振疲労試験結果の比較

静疲労が 380 MPa であるのに対し、片振疲労では 320 MPa であり、その比は 0.84 となる。両者の有効体積は等しいのでその影響を考える必要はなく、上記の差は繰返し負荷の影響と考えられる。

次に、片振および両振疲労試験結果を比較し、図 3 に示す。図の縦軸は応力振幅ではなく、最大応力とした。両者の結果を比較すると、若干両振りのほうが低めで、 10^7 回繰返し強度は両振りが 305 MPa であるのに対し、片振りは 320 MPa で、その比は 0.95 となった。ここで、両振繰返しねじりでは、最大主応力が 2 方向に働くので、その有効体積 V_{qr} は片振りの有効体積 V_{pr} の 2 倍と考え、試験片の R 部については前報⁽¹⁾と同様の考え方を用い、それぞれの有効体積を計算すると、 $V_{pr}=89.2 \text{ mm}^3$ 、 $V_{qr}=178.3 \text{ mm}^3$ となる。ワイブル係数 m としては、前報と同様 $m=10$ を用い、両者の有効体積から両振りと片振りの強度比 σ_{qr}/σ_{pr} を算出すると

$$\begin{aligned}\sigma_{qr}/\sigma_{pr} &= (V_{pr}/V_{qr})^{1/m} \\ &= (89.2/178.3)^{1/10} = 0.93\end{aligned}$$

となった。この値は試験結果である 0.95 にほぼ一致する。このことから、両振りの強度レベルが若干低下したのは、有効体積の影響による可能性が大きい。いずれにしても両者の差はわずかで、曲げの場合と同様、強度は最大応力に依存しており、両振負荷による圧縮側応力の影響は顕著には認められない。

3.2 切欠きと強度の関係 まず、形状係数の異なる 3 種類の試験片の静ねじり試験結果を図 4 に示す。縦軸は公称最大主応力である。平滑試験片の静ねじり強度は $\sigma_{S(T1.0)}=427 \text{ MPa}$ 、ワイブル係数は $m=9.1$ であった。これに対し、形状係数 K_t が比較的小さな切欠試験片すなわち $K_t=1.28$ の試験片の場合は強度のばらつきの程度は平滑試験片と大差ないが、強度レベルは $\sigma_{S(T1.28)}=534 \text{ MPa}$ と逆に高くなった。しかし、形状係数が $K_t=2.11$ と大きくなると、強度は再び平滑

図 4 静ねじり試験結果

試験片より低くなり、 $\sigma_{S(T2.11)}=362$ MPa となった。なお、先の平滑試験片および $K_t=1.28$ の試験片では、破壊起点に 50~150 μm の大きさの欠陥の存在するものがほとんどであったが、 $K_t=2.11$ の試験片の場合は、実体顕微鏡（最高倍率 $\times 60$ ）で観察した限りでは、すべての試験片とも破壊起点に 10 μm 程度以上の欠陥は認められず、強度のばらつきも著しく小さくなった。これは鋭い切欠きを付けることにより、切欠底に大きな欠陥が含まれる確率が小さくなるためと考えられる。

図 5 には前報⁽¹⁾の静曲げ試験結果も含めて、静的強度に及ぼす切欠きの影響をまとめた。今回の切欠試験片の強度は、形状係数の小さなものでは前述したように、平滑試験片より強度が逆に高くなった。そこで前報の静曲げの結果も含めて、切欠きの影響を考えてみることにする。ここで、図中に示した（）内の数字は、破壊起点に欠陥が認められた試験片の割合、すなわち欠陥が認められた試験片本数/破壊した試験片の総数である。

初めに、破壊起点に欠陥が全く認められなかった $K_t=3.14$ の切欠曲げ試験片の強度 $\sigma_{S(B3.14)}$ を基に、欠陥の影響を受けない場合の単軸応力下の強度 σ_s を

$$\sigma_s = \sigma_{S(B3.14)} \times (3.14/K_t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

図 5 静的強度に及ぼす切欠きの影響

より推定し、図中に実線で示した。曲げの実験点および破壊起点に欠陥が全く認められなかった $K_t=2.11$ のねじりの実験点は、この実線にほぼ乗っている。これに対して、破壊起点に欠陥が認められる場合のある $K_t=1.28$ 以下のねじり試験片の実験点は、この線からはずれる傾向にあり、特に平滑試験片のはずれ度合いが大きい。

次は欠陥から破壊する場合を考えてみる。いま欠陥を球状と仮定し $\nu=0.3$ とすると、曲げのような一軸応力状態での応力集中率は 2.047 となるのに対し、ねじりのように二軸応力で、しかもその主応力は大きさが等しく一方は引張り、他方は圧縮として作用する状態での応力集中率は 2.729 となる⁽⁵⁾。このことから、曲げに対するねじりの破壊応力の低下度合 C_1 は、 $C_1=2.047/2.729=0.75$ となる。また、欠陥を完全なき裂と仮定すると、一軸、二軸に関係なく、欠陥に垂直な応力のみが効くことになるので、この場合は $C_1=1.0$ となる。

次に、有効体積を考える。ワイブル係数 m を先に述べたように $m=10$ と仮定すると、有効体積の差による曲げに対するねじりの破壊応力の低下度合 C_2 は、平滑試験片の場合、それぞれの有効体積の比の $1/m$ 乗より、 $C_2=(7.56/89.2)^{1/10}=0.781$ となる。したがって、平滑曲げにおける破壊応力の平均値 $\sigma_{S(B1.0)}$ に対する平滑ねじりの破壊応力 $\sigma_{S(T1.0)}$ の比は、欠陥を球状と仮定した場合 $0.75 \times 0.781=0.586$ 、欠陥をき裂と仮定した場合 $1.0 \times 0.781=0.781$ となる。実験値 0.581 は欠陥を球状とした場合に非常に近い値となっている。なお、破壊起点となった実際の欠陥の形状がどちらに近いかは、SEM 観察の範囲では明確にできなかったが、どちらかという球状に近いようであった。

切欠きの場合は次のように考える。すなわち、図 6 において切欠断面部の応力分布を OAB で表すとき、

図 6 単純化した切欠断面部の応力分布

OA 間の任意の点 r における応力 s は, $BC=1$ とすると,

$$s=r/r_0 \dots\dots\dots (2)$$

で表し得る。また, AB 間では, まず応力こう配 χ を,

$$\chi=(2/R)+(1/r_0) \dots\dots\dots (3)$$

R : 切欠半径

r_0 : 試験片半径 (切欠部)

と仮定する⁽⁶⁾ことによって,

$$s=\chi(r-r_0)+K_t \dots\dots\dots (4)$$

が得られる。式(2)と式(4)より, その交点 A は,

$$r_a=R(\chi r_0-K_t)/2 \dots\dots\dots (5)$$

となる。

有効体積の計算範囲は, 前報と同様, 断面係数が切欠部の最小値より 10% 増すまでの範囲とし, $r_1=\sqrt[3]{1.1} \cdot r_0$ を用いて,

$$l_1=\sqrt{R^2-\{R-(r_1-r_0)\}^2} \\ =\sqrt{(r_1-r_0)(2R-r_1+r_0)}$$

によって求める。

以上の値を用いると, 有効体積 V_e は

$$V_e=2l_1\left[\int_0^{r_a}\{r/(K_tr_0)\}^m \cdot 2\pi r dr \right. \\ \left. + \int_{r_a}^{r_0}\{[\chi(r-r_0)+K_t]/K_t\}^m \cdot 2\pi r dr \right] \\ \dots\dots\dots (6)$$

によって求めることができる。平滑曲げ試験片の有効体積と式(6)で求めた有効体積の比の $1/m$ 乗から, 切欠ねじり試験片と平滑曲げ試験片の破壊応力の比が求まる。これは, すなわち前述の C_2 である。したがって, 平滑曲げでの破壊応力の平均値 $\sigma_{S(B1.0)}$ に対する切欠ねじりの公称破壊応力 $\sigma_{S(TKt)}$ の比は, $C_1 C_2 / K_t$ で表されることになる。

このようにして求めた結果を, 図 5 中に一点鎖線および破線で示した。なお, 供試試験片以外の部分は, 切

図 7 両振疲労試験結果 (切欠試験片)

欠きを環状円弧とし, その半径を $R12.0(K_t=1.04)$ から段階的に変えて計算した。この図より, 前述した平滑ねじりの場合のみではなく, $K_t=1.28$ の切欠ねじりにおいても, 破壊応力は欠陥を球状と仮定した考え方では説明し得ることがわかる。

なお, セラミックスの強度に及ぼす切欠きの影響に関しては, 三好らによって破壊力学による強度評価法⁽⁷⁾が提唱されているが, 今回の方法はこれとは異なり, 有効体積の考え方をを用いることにより切欠試験片の強度が平滑試験片の強度より高くなるという現象の説明を可能としたものである。

次に, 形状係数の異なる 3 種類の試験片の両振疲労試験結果を図 7 に示す。静ねじり試験結果ほどではないが, この場合も形状係数が小さな切欠試験片, すなわち $K_t=1.28$ の試験片のほうが平滑試験片より強度レベルが若干高い。しかし, 形状係数が $K_t=2.11$ と大きくなると, 静ねじりの場合と同様強度レベルが低下した。疲労の場合も, 平滑試験片および $K_t=1.28$ の試験片には破壊起点に欠陥の認められるもののがかなりあったが, $K_t=2.11$ の試験片の場合は, 実体顕微鏡で観察した限りでは, すべての試験片とも破壊起点に欠陥は認められなかった。

疲労強度に及ぼす切欠きの影響をまとめて図 8 に示す。縦軸は図 7 より求めた 10^7 回繰返し強度 (破断までの時間で 2×10^5 秒に相当) である。図中の () 内の数字は破壊起点に欠陥が認められた試験片の割合, 実線は破壊起点に欠陥が全く認められなかった $K_t=$

- : Torsion
- ◇ : Bending
- () : Rate of specimen having pore defect at fracture origin
- : Predicted by K_t
- : Predicted on the assumption that defect is crack type
- - - : Predicted on the assumption that defect is sphere type

図 8 疲労強度に及ぼす切欠きの影響

3.14 の回転曲げ試験片の強度 $\sigma_{cf(B3.14)}$ をもとに推定した強度 σ_{cf} 、一点鎖線および破線は欠陥の影響を考慮した場合の強度 σ_{cf} であることは、前掲の図 5 の静的強度の場合と同様である。なおこの場合、 C_2 は平滑試験片では $C_2 = (61.5/178.3)^{1/10} = 0.899$ となる。すなわち、() 内の分子は回転曲げ試験の結果を基本にすることからその有効体積を、分母は両振ねじりであることから片振ねじりの有効体積の 2 倍を取ることになる。また、切欠試験片の C_2 も、分子は 61.5mm^3 、分母は式(6)で求めた値の 2 倍を取って計算した。図より、切欠きの影響は基本的には静的強度の場合と同様と考えられる。欠陥より切欠きの影響のほうが強い領域では、実験点は実線上にあるが、形状係数が小さな領域では欠陥の影響も受けるため、平滑ねじり試験片のほうが、切欠試験片より強度が低くなっていることがわかる。また、疲労の場合は静試験の場合と異なり、欠陥は球状とき裂状の中間的な性格を示すようで、実験結果は両者を仮定して画いた線の間位置している。

4. 結 言

常圧焼結窒化けい素の強度設計に資するために、平滑および切欠試験片について種々のねじり試験を実施

し、強度に及ぼす繰返し負荷、圧縮側応力および切欠きの影響等について検討した。得られた結果をまとめると次のようである。

(1) 曲げの場合と同様、静疲労強度に比べ繰返し疲労強度は少し低く、繰返しの効果は認められたが、両振りと片振りで疲労強度に大差はなく、圧縮側応力の影響は顕著には認められなかった。

(2) 切欠きの影響は内在する欠陥の程度と関連し、形状係数の大きな場合は形状係数のみで評価できるが、形状係数の小さな場合は欠陥の影響を受け、形状係数で評価した値より下がる。この低下度合は、有効体積の考え方をを用いてよく説明ができる。

文 献

- (1) 猿木・浅野・小川, 機論, 54-508, A (1988), 2082.
- (2) 松末・藤沢・高原, 窯業協会誌, 91-8 (1983), 346.
- (3) Petrovic, J. J., *Fract. Mech. Ceram.*, 6 (1983), 63.
- (4) 松井, 第 4 回次世代産業基盤技術シンポジウム-ファインセラミックス-, (1986-11), 141.
- (5) 例えば, 西田, 応力集中, (1967), 224, 森北出版.
- (6) Sigwart, H., *Handbuch der Werkstoffprüfung*, Zweite Auflage, Zweiter Band, (1955), 201.
- (7) 三好・海老原・佐々, 機論, 52-476, A (1986), 1177.