半円き裂を有するセラミックスの混合モード負荷による破壊*

小 磯 信 重^{*1}, 三 沢 啓 志^{*2}, 児 玉 昭 太 郎^{*2}Fracture under Mixed-Mode Loading in Ceramics Having
a Semi-Circular Crack

Nobushige KOISO, Hiroshi MISAWA, and Shotaro KODAMA

Mixed-mode fracture tests for sintered silicon carbide and sintered silicon nitride were carried out by torsion. The specimens with two types of indentation crack as pre-crack were prepared. The one was with a residual stress by indentation, and the other one was without it removed by grinding. These test results were compared with test results with bending formerly reported. According to the test results of the case of SiC and Si₃N₄, it was cleared that the direction of crack propagation was perpendicular to loading direction of tensile normal stress, and that the value of K_{II}/K_{CI} differed with a existence of the residual stress and a loading condition.

Key Words: Fracture, Ceramics, Mixed-mode Fracture, Critical Stress Intensity Factor, Torsion

1. 結 言

セラミックスが構造部材として使用される場合には従来の金属にも増してき裂発生の原因に遭遇する機会が多く、疲労、熱衝撃、粒子の衝突、応力腐食割れ、組立時における粒子のはさみ込みなどはその代表的なものである。これらの原因により生じたき裂はその発生原因により力学的特性も異なり、複雑な応力の下で構造部材を破壊に導く。したがってその部材の強度評価も、き裂自身が持っている力学的特性とそれに負荷される応力との関連において行われなければならない。このようなき裂材の強度評価の一つとして混合モード負荷による破壊の問題がある。セラミックスの混合モード負荷による破壊に関しては、ホットプレス窒化けい素を用いた Petrovic⁽¹⁾および Marshall⁽²⁾の研究があるが、両者とも曲げによる混合モード負荷であり、より広範な検討が必要である。

本研究では、常圧焼結炭化けい素および同窒化けい素の丸棒に半円状表面き裂を導入しねじり試験を行

い、混合モード負荷による破壊強度を調べるとともに、同質材料の曲げによる結果およびパイレックスガラスの場合と比較した。

2. 実 験 方 法

供試材は常圧焼結炭化けい素 (SiC) および同窒化けい素 (Si₃N₄) である。その機械的性質を表1に、試験片の形状寸法を図1に示す。試験片中央部にはヌープ圧子により半円状予き裂が導入されている。ねじり試験は図2に示すような小形のねじり試験機を製作し試験を行った。試験時のトルク増加速度はねじり軸に取付けたアームの先端の容器に水道水を注入することにより一定に保った。このときのトルク増加速度は約 2.5 N·m/min である。またトルクはひずみゲージにより検出し、X-Yレコーダに記録した。試験片は圧子押込みにより生じる残留応力を除去しないものと除

表 1 供試材の機械的性質

Material	Young's modulus	Poisson's ratio
SiC	412 GPa	0.15
Si ₃ N ₄	268 GPa	0.25
Glass	63 GPa	0.20

* 平成元年 3 月 10 日 東海支部第 38 期総会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 10 月 28 日。

^{*1} 正員、東京都立科学技術大学 (〒191 日野市旭が丘 6-6)。

^{*2} 正員、東京都立大学工学部 (〒158 東京都世田谷区深沢 2-1-1)。

去したものの2種類を準備し、それぞれをA材およびB材とした。以下に試験片製作の手順を記す。

(1) 供試材の形状寸法が直径5 mm、長さ50 mmの丸棒であるため、軸と平行に表面を数十 μm 研削除去し圧子押込みを行うための平面を作り、炭化けい素については265 Nで、窒化けい素については196 Nで圧子を押込み予き裂を導入した。予き裂のき裂面の方向 θ は45, 60, 75, 90°とした。

(2) (1)により製作した供試材をA1合金のつかみ部に差込み⑩部を接着剤により接着したものを試験片とした。これをA材と呼ぶ。

(3) (1)により製作した供試材の圧子押込み面をさらに約60 μm 研削除去し、圧子押込みにより生じる残留応力を取り除いた後、(2)と同様に製作したものを試験片とした。これをB材と呼ぶ。

なお、同様な試験方法を用いた場合のガラスの結果とも比較するため、パイレックスガラスを用いて実験を行った。パイレックスガラスの場合の圧子押込荷重は196 Nであり、B材と同様の方法により残留応力を取り除いたものだけを実験に供した。残留応力を取り除くための研削量は約130 μm とした。また、ガラスの

図1 試験片の形状寸法

図2 ねじり試験機

場合にはき裂の安定成長が予想されるため、光学顕微鏡によりき裂の観察を行いながら試験を行った。混合モードによる破壊の強度評価は、半円状表面き裂の試験片表面における応力拡大係数 K_I , K_{II} により行い、Petrovicら⁽¹⁾と同様、 K_I については半無限体中の半円き裂に関する表示式を、 K_{II} については無限体中の円板状き裂に関する表示式を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊の様相 図3, 4にそれぞれの供試材の破壊の様相を示す。炭化けい素、窒化けい素、パイレックスガラスともに予き裂の長さ $2a$ は0.6~0.7 mmであった。破壊にともなう予き裂先端からのき裂進展

図3 セラミックスの破壊の様相

方向は、A 材の場合は先端より徐々に引張主応力と直行する方向に向きを変えて進展し、B 材は最初から引張主応力と直行する方向に進展している。一方 B 材と同様に残留応力を取り除いたパイレックスガラスの場合は、図から明らかなように B 材とは明確に異なる進展方向を示している。A, B 材ともに窒化けい素の $\theta = 90^\circ$ を除いて半円状の予き裂が破面上に現れている。窒化けい素の $\theta = 90^\circ$ の場合、A 材は予き裂の先端以外から破壊が生じており、B 材は予き裂先端の片方から破壊が生じている。モード II のみの変位様式になると予き裂先端から破壊が生じにくくなるという窒化けい素のこのような性質は、後で述べるモード II における窒化けい素の破壊強度が炭化けい素を大きく上回ることと密接な関係があるように思われる。

図 5 にパイレックスガラスおよび B 材のき裂進展方向 γ_1, γ_2 と $K_{II}/(K_I + K_{II})$ の関係を示す。ここで K_I, K_{II} はそれぞれモード I, モード II における応力拡大係数である。パイレックスガラスは $\theta = 60, 75, 90^\circ$ につきそれぞれ 2 本ずつの試験結果をプロットしたものであるが、いずれの θ に対しても γ_1, γ_2 の片方もしくは両方が最大接線方向応力説 (Maximum stress criterion) に近い値となっている。そして一方がこの説に近い値をとる場合には他方が小さい値をとる傾向があり、これはこの説に近い値をとるき裂の進展開始が他方に対して先行したためと考えられる。すなわち一方のき裂が進展を開始することにより他方のき裂先端での K_I の値が増加し γ が小さくなると考えられる。これに対し、 γ_1, γ_2 が等しい場合はき裂進展が同時に生じると考えることができる。なお破壊時の顕微鏡観察によればき裂の安定成長は観察されなかった。ガラスの混合モード破壊に関しては Freiman ら⁽³⁾、および Erdogan ら⁽⁴⁾の研究があり、特に Erdogan ら⁽⁴⁾は詳細に調べているが本実験方法とは異なるため、結果をそのままセラミックスと比較することには問題がある。よって、改めて検討を行ったものであるが、き裂進展方向に関しては Erdogan ら⁽⁴⁾と同様な結果が得られた。図 5 中の実線はき裂進展が引張主応力と直行する方向に生じる場合の γ_1, γ_2 と $K_{II}/(K_I + K_{II})$ の関係であるが、炭化けい素、窒化けい素ともにこの線にそって破壊が生じると言える。

3.2 破壊強度 図 6 に K_{II}/K_{CI} と K_I/K_{CI} の関係を示す。ここで K_{CI} とは $\theta = 45^\circ$ の場合の予き裂長さと同程度の最

大荷重より求めた応力拡大係数である。A 材の場合は曲げ [Ref.(5), ■: SiC, □: Si₃N₄] とねじりで大きく異なるが、これは予き裂面でモード II 変位が生じる

図 4 パイレックスガラスの破壊の様相

図 5 き裂進展方向

図 6 K_{II}/K_{CI} と K_I/K_{CI} の関係

図 7 予き裂面の SEM 写真 (A 材, SiC, $\theta=90^\circ$)

ときのき裂面の干渉と関係があるものと思われる。SEM による破面観察の結果、ねじり試験片の $\theta=75^\circ$, 90° の場合は両供試材ともに予き裂面上に図 7 に示すようなモード II 変位にともなう破壊のあとが観察された。これに対し、曲げ試験片の場合はこのようなあとが観察されていない。すなわち、ねじりの場合は予き裂面がかみあうことによりモード II 変位が生じにくくなり、結果として K_{II} の上昇が抑えられ、破壊応力が上昇すると考えることができる。一方 B 材の場合は曲げ [Ref. (5)], ねじりともに同様な傾向を示し、負荷方法による差は現れていない。また、A 材と同様に B 材においても $\theta=75^\circ$, 90° の予き裂面上にモード II 変位にともなう破壊のあとが観察され、予き裂面でのかみあいが生じており、このことが $\theta=75^\circ$ を超えてからのパイレックスガラスとの差となって現れていると考えられる。パイレックスガラスについては Erdogan ら⁽⁴⁾の結果と異なり、 K_I/K_{CI} の変化に対して K_{II}/K_{CI} が高めに現れている。これは Erdogan ら⁽⁴⁾の実験方法が平板にスリットを付加して行う方法であるのに対し、著者らの方法は予き裂として圧こんき裂を用いているため、モード II の変位にともない予き裂面での干渉が生じることによるものと思われる。 K_{CII}/K_{CI} の値は A, B 材ともに炭化けい素が 1.5~1.6、窒化けい素が 2.0~2.2 となっており、窒化けい素が炭化けい素を 40% 程度上回っている。これは先に述べた予き裂面の干渉とも関係があり、主たる変位様式がモード II となる場合の破壊強度には、予き裂面のせん断破壊強度が大きく影響するものと考えられる。また、これまで

報告されている金属材料、例えば 4340 鋼⁽⁶⁾の 1.09, 0.04% 炭素鋼⁽⁷⁾の 0.7~0.9 と比較しても約 2 倍の大きさとなっている。

4. 結 言

ヌープ圧子により導入された半円状予き裂を持つ常圧焼結炭化けい素、同窒化けい素、パイレックスガラスの丸棒をねじることにより混合モード破壊試験を行い、以下の結論を得た。

(1) 残留応力を除去した場合の炭化けい素、窒化けい素、パイレックスガラスの混合モード負荷による予き裂先端からのき裂進展方向は、パイレックスガラスが最大接線応力説に従うのに対して、炭化けい素、窒化けい素はともに引張主応力と直行する方向に生じる。

(2) 残留応力を除去しない場合の炭化けい素、窒化けい素のねじりによる混合モード破壊時の K_{II}/K_{CI} の値は、 K_{II}/K_I が大きい領域ほど曲げの場合と比較して大きな値となる。

(3) 残留応力を除去した場合の炭化けい素、窒化けい素、パイレックスガラスの K_{II}/K_{CI} の値は $\theta=75^\circ$ を超えると炭化けい素、窒化けい素がともにパイレックスガラスの値より大きくなり、その差は K_{II}/K_I が大きくなるほど顕著である。

(4) 残留応力を除去しない場合、した場合にかかわらず K_{CII}/K_{CI} の値は窒化けい素が炭化けい素より約 40% 大きい。

(5) 予き裂面の SEM 観察により、上記(2)~(4)の特性は、主としてモード II 変位にともなうき裂面の干渉が原因であることが明らかとなった。

文 献

- (1) Petrovic, J. J. and Mendiratta, M. G., *J. Am. Ceram. Soc.*, **59** (1976), 163.
- (2) Marshall, D. B., *Fracture in Ceramic Materials*, (1984), 243, Noyes Publications.
- (3) Freiman, S. W., ほか 2 名, *J. Am. Ceram. Soc.*, **62** (1979), 206.
- (4) Erdogan, F. and Sih, G. C., *Trans. ASME, Ser. D*, **85** (1963), 519.
- (5) 小磯・ほか 2 名, 日本材料強度学会学術講演会講演集, (1988), 25.
- (6) Shah, R. C., *ASTM, Spec. Tech. Publ.*, 560 (1974), 29.
- (7) 横堀・ほか 3 名, 機論, **48-430, A** (1982), 707.