ソーダ石灰ガラスの破壊強度に及ぼす静水圧の影響* (サブクリティカルなき裂成長による検討)

池 田 清 彦*¹, 井 垣 久*¹

Effect of Hydrostatic Pressure on the Fracture Strength of Soda-Lime Glass (Investigation with Respect to Subcritical Crack Growth)

Kiyohiko IKEDA and Hisashi IGAKI

In order to examine the effect of subcritical crack growth on fracture strength under multiaxial stress states by considering subcritical crack growth, soda-lime glass specimens having a controlled surface flaw introduced by Knoop microhardness indentation were fractured by four-point bending under different hydrostatic pressures up to 100 MPa and different stressing rate conditions. For both as-indented specimens and specimens without residual stresses, it was found that the fracture stress evidently increased under hydrostatic pressure of 100 MPa and a high stressing rate condition, as subcritical crack growth was fully restricted under those conditions.

Key Words: Strength, Fracture, Surface Flaw, Subcritical Crack Growth, Hydrostatic Pressure

1. 緒 言

ガラスやセラミックスなどのぜい性材料の破壊強度への多軸応力効果に関しては、ファインセラミックスの構造材料への適用の普及とともに盛んに行われてきている^{(1)~(6)}。しかしながらそこには相異なる種々の説が存在し、いまだ確立されているとはいえない。多軸応力効果の主な原因としては、無秩序に分布した欠陥に基づく統計的見地に依存するものと、単一の欠陥からのき裂の伝ば過程に依存するものとが考えられるがそれを正しく認識するためにはそれらを別々に区別して考えることが重要である。後者に属するものとして表面き裂の臨界値以下の応力での成長いわゆるサブクリティカルなき裂成長によるものが考えられている⁽⁶⁾、それに対して単一のき裂に注目して克明に調べたものは少ない。

そこで本報ではガラス試験片の表面にヌーブ圧子を押しつける方法により人工的に半だ円状表面き裂を形成し、それらを約 100 MPa までの静水圧下で、さらに低負荷速度と高負荷速度のもとで破壊し、得られた破

壊応力をサブクリティカルなき裂成長の影響に着目して検討する。

2. 試験片および実験方法

供試材は市販のソーダ石灰ガラスであり表 1 にその化学組成を示す。図 1 に示すような形状の曲げ試験片の中央にマイクロビッカース硬さ試験機を用い、ヌーブダイヤモンド圧子を表面に押しつけることによって半だ円状の表面き裂から成る単一の人工欠陥を形成した。このようにダイヤモンド圧子を試料表面に押しつける加傷方法においてはき裂の近傍に残留応力が生ずる。ここではき裂を入れたまま残留応力除去処理を施さない試験片とともに、表面層を SiC 研磨紙 (# 320) でみがいて約 20 μm 取り去ることにより残留応力除去処理を施した試験片に関しても実験を行った。なお最初にそう入したき裂長さは前者の場合においては約 140 μm 、後者の場合においては約 150 μm である。

以上のようにして用意された試験片は高压容器内に装てんされ、約 100 MPa までの静水圧下で図 1 に示すような負荷条件のもとで四点曲げ負荷が加えられる。さらにサブクリティカルなき裂成長を促進させるために比較的低い応力速度 (0.2~0.4 MPa/s)、またそれを抑制するために高い応力速度 (30~50 MPa/s)

* 昭和 62 年 3 月 13 日 関西支部第 62 期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 8 月 29 日。

*¹ 正員、大阪府立大学工学部 (〒591 堺市百舌鳥梅町 4-804)。

の両方の負荷速度が各静水圧下で加えられた。静水圧下での実験においては、表面き裂への圧力油の浸入を防ぐために試験片の全面にわたってネオプレンゴムで何層も被覆した。形成した表面き裂の寸法および形状は破壊した試験片断面を光学顕微鏡で観察することによって決定した。なお、破面のこん跡から測定された初期き裂長さは圧子押し付けた直後に測定されたき裂長さより全体的に大きく、圧子押込みの後の残留応力によるゆるやかなき裂成長が考えられるが、その増加の割合は圧子押し付け直後のき裂長さに対して平均1.04倍と小さいものであった。

3. 実験結果および考察

図2は破面で観察された表面き裂の一例を示したものである。大気圧下および低負荷速度のもとで破壊したもののにおいては初期き裂の周辺にサブクリティカルなき裂成長の跡が明らかに認められる。

得られた実験結果を整理したものを表2に示す。同一条件下で約5本の試験片を破壊させた。最大引張応力はく形断面はりの引張側最外層に生ずる軸方向応力 $\sigma_a = M_b/Z_b$ (M_b : 曲げモーメント, Z_b : はりの断面係数) から静水圧力 p を引いたものである。またここで示した K_{Ic} は図2のような破面で観察された人工き裂の形状・寸法および破壊時の最大引張応力 $\sigma_a - p$ の値を次式に代入することにより求めたものである。

$$K_{Ic} = \frac{\alpha\sqrt{\pi a}}{\phi}(\sigma_a - p) \quad \dots\dots\dots (1)$$

表1 供試材の化学組成 (wt %)

SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O ₃
0.81	0.13	0.02	0.04

図1 試験片の形状・寸法および負荷条件

$$\phi = \int_0^{\pi/2} \left\{ \sin^2 \phi + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \phi \right\}^{1/2} d\phi \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで α はき裂の形状と試験片厚さに関連した幾何学的因子であり、 $2c$ は半円状き裂の長軸の長さ、 a はき裂の試験片表面からの深さである。観察されたき裂の多くは a/c が約0.8であり、それらの試験片表面からの深さは試験片厚さに対してはるかに小さいことより $\alpha=1.06$ を使用した。なお、表2中の K_{Ic} は観察されたき裂の中でその形状がはっきりと確認できるものを選出して求めたものであり、括弧内の数字はそれ際使用した試験片の数である。

以上のような方法により求めた K_{Ic} はサブクリティカルなき裂の成長が存在する場合、その材料の真の臨界応力拡大係数よりも小さくなる。一方、サブクリティカルなき裂の成長が完全に抑制される場合は臨界応力拡大係数に近づくことになる。

残留応力除去処理を施していない試験片の破壊時の最大引張応力は低負荷速度、高負荷速度のいずれの場合も50 MPaの静水圧下まではほぼ一定を保っているが100 MPaになると明らかな増加がみられる。またいずれの静水圧下でも高負荷速度の場合のほうが低負荷速度の場合よりも大であるが、100 MPaの静水圧下ではその差は明らかに減少している。以上の事実より表面き裂のサブクリティカルな成長の有無が破壊強度に大きく影響することは明らかであり、そのき裂成長の程度は高い応力速度とともに静水圧付加によっても大きく抑制されることが考えられる。

図3は残留応力除去処理を施していない試験片に対して上記の方法で計算された K_{Ic} を静水圧を関数として示したものであるが、破壊時の最大引張応力と同様の傾向を示し、サブクリティカルなき裂の成長が抑制されるとともに K_{Ic} は増加し、約100 MPaの静水圧下では低負荷速度、高負荷速度とも約0.8 MN/m^{3/2}

図2 破面で観察された人工表面き裂の一例(残留応力除去, 大気圧下, 低負荷速度)

表 2 実験結果

Surface flaw treatment	Stressing rate	Hydrostatic pressure p (MPa)	No. of tests	Avg. max. tensile stress $\sigma_a - p$ (MPa)	Std. dev (MPa)	Avg. K_{IC} ($\text{MN}/\text{m}^{3/2}$)
As-indented	Low	0	6	50.8	8.2	0.49 (5)
		50.8	6	52.4	9.0	0.51 (5)
		99.7	5	75.2	5.1	0.80 (4)
	High	0	4	62.1	2.1	0.63 (4)
		50.8	7	63.5	17.5	0.59 (5)
		100.2	6	81.0	5.8	0.81 (4)
Hand ground	Low	0	5	65.1	5.1	0.62 (5)
		97.7	4	73.7	6.2	0.72 (3)
	High	0	6	90.8	3.7	0.84 (6)
		99.3	5	94.3	11.1	0.87 (1)

図 3 測定された K_{IC} の静水圧による影響 (残留応力除去処理を施していない試験片)

のほぼ同一の値に達している。サブクリティカルなき裂の成長は負荷速度の増加によっても抑制されることを考慮するならば、もしそのき裂成長が完全に抑制されていない場合、同じ静水圧下においては高負荷速度下でのほうが低負荷速度下でより K_{IC} が高くなるはずである。図 3 のように 100 MPa の静水圧下において負荷速度の違いにもかかわらず K_{IC} が一致したことは静水圧の付加のみによってサブクリティカルなき裂成長はほぼ完全に抑制されたことを意味している。したがってこの $0.8 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ が臨界応力拡大係数に近い値ではないかと考えられる。

残留応力除去処理を施した試験片においては、破壊時の最大引張応力は低負荷速度下では静水圧付加により増加しているのに対して高負荷速度下ではほとんどその増加は認められない。また大気圧下の場合、高負荷速度での破壊応力は低負荷速度でのものより著しく大きく、負荷速度の増加のみによってサブクリティカルなき裂成長は完全に抑制されたものと考えられる。

図 4 測定された K_{IC} の静水圧による影響 (残留応力除去処理を施した試験片)

図 4 は残留応力除去処理を施した試験片に関して求められた K_{IC} を静水圧を関数として示したものであるが残留応力除去処理を施していない試験片の場合と比較して K_{IC} は明らかに増大している。いま、大気圧下および低負荷速度のもとで破壊した試験片において、図 2 にみられるようなサブクリティカルなき裂成長の跡より K_{IC} を求めたところ図 4 中に示されるように $0.8 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ の値が得られた。この値は大気圧下および高負荷速度のもとで初期き裂をもとにして得られた K_{IC} の値 $0.84 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ に近い値である。したがってこの試験片の臨界応力拡大係数は $0.84 \text{ MN}/\text{m}^{3/2}$ 付近であると考えられる。

さて、Evans⁽⁷⁾はサブクリティカルなき裂成長が存在する場合の破壊応力 σ_f と、それが完全に抑制された場合の破壊応力 σ_c の間に次のような関係があることを示している。

$$\sigma_f = \left\{ \frac{2\dot{\sigma}(n+1)}{A(Y/\phi)^2(n-2)} \left(\frac{\sigma_{ic}}{K_{ic}} \right)^{n-2} \right\}^{1/(n-1)} \dots (3)$$

ここで $\dot{\sigma}$ は応力速度、 Y はき裂の形状と試験片の厚さに関連した幾何学的因子であり試験片厚さに比較して小さい表面き裂に関しては1.88である。また ϕ はき裂の形状に関連した式(2)に示すような補正係数である。 A および n はサブクリティカルなき裂成長において応力拡大係数 K_I とき裂成長速度 V との関係を与える経験式 $V=AK_I^n$ における材料に依存する定数である。

いま、高負荷速度と静水圧付加によってサブクリティカルなき裂成長が完全に抑えられたと仮定して、得られた実験値を式(3)に適用し、サブクリティカルなき裂成長が助長される場合の破壊応力 σ_f を求めてみる。なお定数 A と n に関してはWiederhornら⁽⁸⁾によりソーダ石灰ガラスの両開き片持り試験片を用いて得られた値、0.000712および16を使用する。まず残留応力除去処理を施していない試験片においては100 MPaの静水圧下および高負荷速度のもとで得られた破壊応力81 MPaを σ_{ic} とおき、その際求められた $K_{ic}=0.81 \text{ MN/m}^{3/2}$ 、および低負荷速度での $\dot{\sigma}=0.24 \text{ MPa/s}$ を式(3)に代入して得られた σ_f は63.7 MPaであり、大気圧下および低負荷速度のもとで得られた50.8 MPaより少し高い値であった。つぎに、残留応力除去処理を施した試験片に対しては大気圧下および高負荷速度のもとで得られた破壊応力90.8 MPaを σ_{ic} とおき、その際求められた $K_{ic}=0.84 \text{ MN/m}^{3/2}$ 、および低負荷速度での $\dot{\sigma}=0.32 \text{ MPa/s}$ を式(3)に代入して σ_f を求めたところ69 MPaとなり、大気圧下および低負荷速度のもとで得られた実験値65.1 MPaに非常に近い値が得られた。

残留応力が存在する場合、式(3)が適合しなかった理由として、き裂近傍に生じている残留応力がサブクリティカルなき裂成長の速度を促進させることが考えられる。いま仮にき裂成長速度のパラメータ n 値を16よりも小さい値11を用いるならば σ_f は53.2 MPaとなり実験値に大きく近づくことになる。

4. 結 言

ヌープダイヤモンド圧子を押しつけることによって

半だ円状き裂をそう入されたソーダ石灰ガラスの曲げ試験片を約100 MPaまでの静水圧下で、さらに異なる負荷速度のもとで破壊させ、サブクリティカルなき裂成長に着目することにより破壊強度に及ぼす静水圧の影響を調べたところ以下の結論を得た。

(1) 表面き裂近傍に生じた残留応力を除去することなしに破壊した試験片においては、約100 MPaの静水圧下で、さらに高負荷速度のもとでサブクリティカルなき初成長が完全に抑制され、破壊強度が大きく増大した。

(2) 表面き裂をそう入した後、試験片表面を研摩することによって残留応力除去処理を施した試験片においても、静水圧付加によりサブクリティカルなき裂成長が抑制される傾向がみられたが、高負荷速度で破壊するのみでもその抑制効果は十分であった。

(3) 表面欠陥を有するぜい性材料を大気圧下および低負荷速度のもとで破壊させた場合、サブクリティカルなき裂成長が存在するが、圧縮側に高い静水圧応力成分をもつ多軸応力のもとではサブクリティカルなき裂成長が抑制されるため破壊強度が大きく増大することが可能であることがわかった。

最後に本研究の実験において協力していただいた本学学生の御園生健一君、および日原年樹君の努力に心から感謝する。

文 献

- (1) Broutman, L. J. and Cornish, R. H., *J. Am. Ceram. Soc.*, 48-10(1965), 519.
- (2) Tappin, G., Davidge, R. W. and McLaren, J. R., *Fracture Mechanics of Ceramics*, 3(1978), 435. Plenum.
- (3) Petrovic, J. J. and Stout, M. G., *J. Am. Ceram. Soc.*, 64-11(1981), 656.
- (4) Petrovic, J. J. and Stout, M. G., *J. Am. Ceram. Soc.*, 67-1(1984), 18.
- (5) Oh, K. P. L., Vardar, O. and Finnie, I., *Int. J. Fract.*, 9(1973), 372.
- (6) Shetty, D. K., Rosenfield, A. R. and Bansal, G. K., *J. Am. Ceram. Soc.*, 64-1, (1981), 1.
- (7) Evans, A. G., *Int. J. Fract. Mech.*, 10-2(1974), 251.
- (8) Wiederhorn, S. M. and Borz, L. H., *J. Am. Ceram. Soc.*, 53-10(1970), 543.