ソーダ石灰ガラスの円板圧裂引張りによる静疲労試験*

池田 清彦^{*1}, 井垣 久^{*2}

Static Fatigue Test by Diametral Compression in Soda-Lime Glass Disk Specimen

Kiyohiko IKEDA and Hisashi IGAKI

In order to study the static fatigue behavior of soda-lime glass, disk specimens with an indented-induced flaw at the center were fractured under a constant load applied by a diametral compression of the disk, where a transverse tensile stress across the loaded diameter was present, with the compressive stress acting in the direction of loading. Equibiaxial tension static fatigue tests were also conducted by loading a disk with concentric rings to examine the effect of the stress applied parallel to the crack. Although the scatter in these fatigue data was large, the time-to-failure increased with decreasing applied stress, and the degree of the increase was significantly lower in the diametral compression loading. This suggests that the nominal compressive stress applied parallel to the initial crack plane causes intensified tensile stress at the crack tip blunted by the annealing process, and promotes the occurrence of a sharp crack.

Key Words: Fracture, Static Fatigue Test, Soda-lime Glass, Diametral Compression, Equibiaxial Tension

1. 緒 言

ガラスやセラミックスの力学的性質として、負荷応力を時間に対して一定のままにしておくと、き裂がゆっくりと成長した後破壊に至るという静疲労と呼ばれる性質があり、これを明らかにすることは機械設計や部品の寿命予測において重要である。脆性材料の疲労に関する研究は最近盛んに行われているものの、その試験方法は金属での疲労試験方法を準用している場合が多く、いまだ確立しているとはいえない。特に多軸応力負荷のもとでのデータは完全脆性材料特有の材料試験における困難さのために十分ではない。さて、従来より脆性材料の多軸応力試験法の一つとして円板状の試験片を円周上の両端より直径方向に押し付けることによって、円板中央部に荷重方向と垂直な向きに引張応力を生じさせて破壊する方法が使用されているが^{(1)~(4)}、その際、そこには引張応力とともにその3倍の大きさを持った圧縮応力が荷重方向に作用しており、二軸応力場を形成している。

本研究ではソーダ石灰ガラスから成る円板状試験片の中央部にビッカース圧子を導入することによって人工欠陥を形成し、き裂面と平行な方向より一定負荷を加えて圧裂引張りによる静疲労試験を行った。さらに、等二軸引張応力のもとでの静疲労試験も併せて行い、多軸応力下での静疲労特性を検討した。

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(a)に示すような形状の円板状試験片の中央に、微小硬さ計用のビッカースダイヤモンド圧子を9.8 Nの荷重で表面に押し付けることによって、半円状の表面き裂から成る単一の人工欠陥を形成した。圧裂試験片に関しては圧縮子と試験片との接触部が平面になるように、Shawらの文献⁽¹⁾に従って、弦の部分が直径の約0.2倍になるように研磨して取り除いた。さらに圧縮子との接触部と非接触部

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
81.0	13.0	2.0	4.0

* 昭和63年11月26日 関西支部第248回講演会において講演、原稿受付 昭和63年4月27日。

*¹ 正員、大阪府立大学工学部 (〒591 堺市百舌鳥梅町4-804)。

*² 正員、大阪産業大学工学部 (〒574 大東市中垣内3-1-1)。

との境界の角部も研磨紙で磨いて面取りを行った。また圧子押付けの際にき裂の近傍に生じる残留応力を除去するために、き裂導入後ただちに565°C、1hの真空焼なましを行った。以上のようにして用意した試験片はき裂面と圧縮方向とが平行になるように負荷棒と負荷板との間に挿入した。また試験片と圧縮子との接触部での分布圧が均等になるように負荷棒および負荷板と試験片の間に図2に示すように高分子材料から成るスペーサを挟み込み、試験片とスペーサとの間には機械用グリースを塗布した。試験片を装てんした試験装置主要部は図3に示すような疲労試験機のテーブルの上に置かれ、昇降ハンドルにより位置を固定した後、所定の荷重を右端の分銅により設定した。試験片に加わる荷重は作用棒の上部に取付けたロードセルによって測定した。ロードセルからの出力はひずみ測定器を通してマルチコーダ(自動平衡型記録器)に送られる。実験を通して記録紙を一定速度で送ることにより、負荷出力-時間曲線を自記した。所定の荷重の分銅を置くと同時に紙送りをスタートさせ、破断時において試験片から音が発せられたとき停止させた。破断時には圧裂引張りの際にも出力にわずかな変動があるので、それにより破断に至るまでの時間 t_f を測定することができる。ここでは圧裂引張負荷とともに図1(b)に示すように同一寸法を持った円板状の試験片をリング状の支持部に置き、リング状の荷重部を押し付ける負荷方法によっても材料を破壊させた。

圧裂引張負荷の際において、円板を集中力 T で圧縮するときの円板中心部に生ずる応力状態は

$$\sigma_1 = 2T/\pi dh \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_2 = -6T/\pi dh = -3\sigma_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

であり、圧裂方向に平行に働く引張応力 σ_1 とともにそれと垂直な方向に圧縮応力 σ_2 が生ずる。一方、円板曲げ負荷においては円板の中央部に

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{3T}{2\pi h^2} \left\{ \frac{2(1-\nu)(a^2 - r^2)}{d^2} + (1+\nu) \ln \left(\frac{a}{r} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(a) 圧裂引張り (b) 等二軸引張り

図1 試験片の形状・寸法および負荷方法

の等二軸引張応力状態が生ずる⁽⁵⁾。ここで T は荷重、 h および d は試験片の厚さおよび直径、 a および r は支持リングおよび荷重リングの半径、 ν はポアソン比である。

3. 実験結果および考察

図4(a)、(b)は破壊した試験片の外観を示したものである。圧裂引張りにおいては初期き裂面に沿って直線状のき裂が圧縮荷重方向に1本はいるだけでき裂の分岐がみられないのに対して、等二軸引張りにおいてはいったん初期き裂に沿って伝ばした後、円板の自由端に到達するまでにき裂の分岐が生じている。図5(a)、(b)は圧裂負荷および等二軸引張負荷のそれぞれの場合に関して、破壊までの時間 t_f を各負荷応力 σ_1 に対してプロットしたものである。一定の設定荷重のもとでも負荷応力は試験片寸法によってかなりのばら

図2 試験装置主要部

図3 疲労試験機

つきがみられた。それぞれの設定荷重によって生じた負荷応力の範囲を示すために図5中に一点鎖線による仕切り線を設けた。いずれも強度のばらつきは大きい負荷応力の低下とともに破壊までの時間が増加する傾向がみられた。なお、約2h以上加えても破断しない場合は途中で負荷を中断した。圧裂負荷の場合は $\sigma_1 = 62\text{MPa}$ 以上の負荷応力のもとで2h以内にすべての試験片は破壊したのに対して等二軸引張負荷の場合は71MPa以上の負荷応力においても、まだ約10%の試験片が破断しなかった。また、等二軸引張負荷の場合は応力の低下に伴い顕著な破断寿命の増大がみられるのに対して、圧裂引張負荷の場合は、その増加の程度が等二軸引張りの場合よりも減少しており、疲労限度は明らかに圧裂引張負荷の場合のほうが小さいことが推測された。

破壊までの時間すなわち静疲労寿命 t_f と負荷応力 σ_1 との間には次式の関係が成り立つことはすでによく知られている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$t_f = B\sigma_{ic}^{n-2}\sigma_1^{-n} \dots\dots\dots (4)$$

ここで

$$B = 2/(n-2)AY^2K_{ic}^{n-2} \dots\dots\dots (5)$$

ここで A 、 n はサブクリティカルなき裂成長において、き裂進展速度 V と応力拡大係数 K_I との関係($V = AK_I^n$)を表すパラメータであり、 Y は応力拡大係数における補正係数、 σ_{ic} は不活性強度、 K_{ic} は臨界応力拡大係数である。式(4)より $\log t_f$ を $\log \sigma_1$ に対してプロットすればその傾きよりパラメータ n を得ることができる。図5中において×印は各設定荷重下でのデータに対して平均値をとったものであるが、大きな実験値のばらつきにもかかわらず、いずれの負荷方法においても比較的良い直線性がみられた。×印に対して最小二乗法を用いて引いた直線の傾きより求めた n 値は、圧裂引張負荷においては13.3、等二軸引張負荷においては26.3であり明らかな差がみられた。き裂進展速度 V を応力拡大係数 K_I が臨界値 K_{ic} に到達するときのき裂進展速度 V_c を用いて表すならば、 $V =$

$V_c(K_I/K_{ic})^n$ となる。Shettyら⁽⁸⁾によれば V_c は応力状態には依存しない定数としており、 $(K_I/K_{ic}) < 1$ であることを考慮するならば、 n 値が小さいほど V は大きくなる。これは圧裂引張負荷におけるほうが、き裂進展速度が大であることを意味するが、等二軸引張応力下においてはき裂の進展方向の自由度が増大することを考えるならば、予想に反した事実である。それについては次のように考えた。

同一の化学成分を持ち同一の熱処理を施した試験片を不活性環境下(5 Paの真空中、応力速度200 MPa/s)で四点曲げにより破壊させた際に、破壊応力と初期き裂形状をもとに得られた破壊靱性値は $1.07\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ であったが、この値は市販のソーダ石灰ガラスとしてはかなり高い値である。これは焼なましによる残留応力除去処理の段階においてき裂の先端が鈍化したことを示唆している。鈍化したき裂は近似的に図6に示すような偏平回転円体状空かとみなすことができ

(a) 圧裂引張り

(b) 等二軸引張り

(a) 圧裂引張り (b) 等二軸引張り

図4 破壊した試験片の外観

図5 静疲労寿命と負荷応力との関係

る。圧裂引張負荷においてはき裂面に垂直に働く引張応力 σ_1 とともに、き裂面に平行な方向より圧縮応力 $\sigma_2 (= -3\sigma_1)$ が作用する。Sadowsky らの解⁽⁹⁾によれば応力集中によって空か端縁には σ_1 による $k_1\sigma_1$ (k_1 : 応力集中係数) とともに σ_2 による σ_1 方向の小応力 $-k_2\sigma_2$ ($k_2 > 0$) も重畳される。 σ_2 が圧縮である場合は σ_1 による $k_1\sigma_1$ とともに σ_2 による引張応力成分 $-k_2\sigma_2$ が付加して空か端縁での鋭いき裂の発生に關与する。空かの短軸半径 b_i に対する長軸半径 a_i の比が大きい場合は k_1 に対して k_2 の値は小さいが σ_2 が大きい場合は $-k_2\sigma_2$ の大きさは $k_1\sigma_1$ に対して無視できない大きさになる。図6は σ_1 を1とした場合の空か端縁での σ_1 方向の局部応力 $(k_1\sigma_1 - k_2\sigma_2)$ と a_i/b_i の関係を各応力状態に対して示したものである。等二軸引張りでは σ_2 による小応力 $-k_2\sigma_2$ が圧縮として $k_1\sigma_1$ に重畳するため、空か端縁には圧裂引張負荷と等二軸引張負荷との間に明らかに無視できない差が生ずる。いま、局部引張応力 $(k_1\sigma_1 - k_2\sigma_2)$ が限界値 σ_c に到達したときに鈍化したき裂から、ふたたび鋭いき裂が発生するとするならば、き裂を発生させるのに必要な無限遠方負荷応力 σ_1 は等二軸引張りの場合のほうが圧裂引張りの場合よりも大きくなる。また、そのき裂発生応力 σ_c は水環境下では時間とともに単調に減少すること⁽¹⁰⁾が知られており、等二軸引張応力下においては、負荷応力が小さくなるにつれてき裂発生までに長い時間を必要とする。すなわち、負荷応力による破壊時間の差は、き裂の成長過程の時間の差よりもむしろ、き裂が発生するまでの時間の差に負うところが大きいといえることができる。また、そ

のき裂発生時間は鈍化した初期き裂先端の形状および雰囲気によって敏感に影響され、実験データの大きなばらつきを引き起こすと考えられる。一方、圧裂引張負荷の場合はき裂を発生させるのに必要な無限遠方負荷応力が小さくてすむため、負荷応力の違いによる破壊時間の差は、ほぼき裂の成長過程の時間の差に対応できると考えられる。以上のように、等二軸引張りにおける見掛け上の n 値の増加は、低負荷応力におけるき裂発生までの時間の増大に起因し、実際の n 値はこれより小であることが推測される。図8は図7に示すような破面の顕微鏡観察において初期き裂長さ a_i に対するサブクリティカルなき裂成長によって生じたき裂長さ $(a_i + s)$ の比の負荷応力による影響を圧裂引張りや等二軸引張りのそれぞれの場合について示したものであるが、圧裂引張りにおいては負荷応力の減少とともに $(a_i + s)/a_i$ が増大する傾向がみられるのに対して、等二軸引張りにおいては負荷応力が減少し、また破壊時間が増大したにもかかわらず $(a_i + s)/a_i$ に顕著な変化がみられず、上述の説明の妥当性を示している。なお図8におけるプロットは破壊した試験片の中でサブクリティカルなき裂成長のこん跡が比較的明り

図7 破面で観察された初期き裂

図6 空か端縁での応力集中係数

図8 サブクリティカルなき裂成長に及ぼす負荷応力の影響

ようなものを選出して測定した結果であるが、測定精度はかならずしも十分ではなく、これによって定量的な立場からの検討を行うのは困難である。ここでは等二軸引張りにおいて破壊までの時間に大きな差が生じたにもかかわらずサブクリティカルなき裂成長量に顕著な差がみられなかったという定性的な事実を示すことに重きをおいた。

4. 結 言

円板状のソーダ石灰ガラスから成る試験片の中央部にビッカース圧子を押し付けることにより形成した人工き裂に対して、き裂面に垂直な引張応力とともにそれに平行な方向に圧縮応力を生じさせる圧裂引張負荷による静疲労試験を行った。さらに、それに併せて等二軸引張負荷による静疲労試験も行い、疲労き裂進展特性に及ぼす多軸応力効果を調べたところ次の結果を得た。

(1) 人工き裂を導入したにもかかわらず、ここで得られた疲労試験の結果は大きくばらついたが、いずれの負荷方法においても破壊までの時間は負荷応力の減少とともに増加する傾向にあり、各応力レベルで破壊した試験片の平均値をみたところほぼ直線上にのった。

(2) 破断寿命の負荷応力の減少に対する増加の程度は圧裂引張りにおけるほうが明らかに小さく、それらの傾きから求めたき裂進展パラメータ n 値は等二軸引張負荷においては 26.3 であったのに対して、圧裂引張負荷においては 13.3 であった。

(3) 等二軸引張りによる静疲労試験における破断

寿命の傾向から疲労限度の存在が推定されるが、その疲労限度は等二軸引張負荷の場合のほうが圧裂引張負荷の場合よりも明らかに高いと推定された。

(4) 圧裂引張負荷における疲労限度の低下および見掛け上の n 値の低下は、き裂面に平行な方向から加わる無限遠方圧縮応力が、焼なましの際に鈍化したき裂先端において局部引張応力を生じさせ、そこでの鋭いき裂の発生を助長したことによると考えた。

なお、圧裂引張試験装置は大阪府立産業技術総合研究所所有のものを使用させていただいた。また、本研究の遂行に当たっては大阪府立大学学生の若林晃次に協力していただいた。ここに、深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) Shaw, M. C., Braiden, P. M. and Desalvo, G. J., *Trans ASME, J. Eng. Ind.*, **97**(1975), 77.
- (2) Awaji, H. and Sato, S., *Trans ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, **100**-2(1978), 175.
- (3) 淡路・佐藤, 材料, **27**-295(昭53), 342.
- (4) 淡路 機論, **47**-421, A(昭56), 880.
- (5) Giovan, M. N. and Sines, G., *J. Am. Ceram. Soc.*, **62**-9, 10(1979), 510.
- (6) Wiederhorn, S. M., *Fracture Mechanics of Ceramics*, **2** (1974), 613, Plenum, New York.
- (7) Pletka, B. J. and Wiederhorn, S. M., *J. Mater. Sci.*, **17** (1982), 1247.
- (8) Shetty, D. K., Rosenfield, A. R., Bansal, G. K. and Duckworth, W. H., *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**-1 (1981), 1.
- (9) Sadowsky, M. A. and Sternberg, E., *Trans ASME, J. Appl. Mech.*, **14**-3(1947), 191.
- (10) Hirao, K. and Tomozawa, M., *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**-6(1987), 377.