

ブリッジング応力の直接測定法*

森 和也^{*1}, 今井良一^{*1}

Direct Method of Measuring Bridging Stresses

Kazuya MORI and Ryoichi IMAI

A direct method of measuring bridging stresses using a double notched plate (DNP) specimen is developed. Bridging stresses are measured from the stable fracture of the DNP specimen using a bridging stabilizer developed in this study. The opening displacement of fracture surfaces can be evaluated from the deformation of the bridging stabilizer without the need for microscopic measurement. As an example application, the bridging stresses of polycrystalline alumina are measured under monotonic load. The bridging characteristics measured using the present method are compared with those obtained by other methods. An approximate expression of the bridging characteristics is shown.

Key Words: Ceramics, Crack Opening Displacement, Experimental Stress Analysis, Bridging Stress, Alumina, Bridging Stabilizer

1. 緒 言

アルミナや窒化けい素などの多結晶セラミックスは、き裂の進展した破面間に結晶粒によるブリッジングが起きる。繊維強化材料は、繊維によって同様にブリッジングが起きる。ブリッジングが生じる材料の破壊を把握するためには、ブリッジング応力の定量化が不可欠である。これまでに提案されているセラミックスのブリッジング応力の評価法として、き裂開口変位から求める方法^{(1)~(4)}とコンプライアンスから求める方法^{(5)~(7)}とがある。また、金属基複合材料に対して、マトリックスを機械的および化学的に取り除き、繊維を露出させてブリッジング応力を測定する方法が提案されている⁽⁸⁾。これまでに提案されているセラミックスのブリッジング応力を測定する方法はき裂を測定対象としているが、き裂は同時に多様な開口変位をもちリガメント部が存在する。この二つの理由のために、直接的にブリッジング応力を求めることができず、ブリッジング特性のモデルを仮定しブリッジング応力を求めている。

本研究では、両縁切欠入り薄板試験片(DNP試験片)を今回開発したブリッジングステビライザを用いて安定的に破壊し、き裂貫通後のブリッジング応力を求める。この測定法では、破面の開口変位が一様となり、試験片に作用する力がそのままブリッジング力となるため、ブリッジング応力を直接的に測定することができる。また、開口変位は、ブリッジングステビライザと試験片の変形から簡単に求めることができる。応用例として、多結晶アルミナの結晶粒によるブリッジング応力の測定を行い、他の測定方法による結果との比較を行う。

2. 測定方法

2.1 試験片およびブリッジングステビライザ

試験片形状を図1に示す。平面研削盤によって60°-V切欠きを両側からそれぞれ3.25 mm導入した後、さらに、その切欠底にダイヤモンドペーストとかみそりの刃を用いて、深さ0.25 mmの鋭い切欠きを施す⁽⁹⁾。

図2に、試験片を組み込んだブリッジングステビライザを示す。試験片はステビライザと試験片押えとに挟まれる状態で熱可塑性接着剤を用いて固定する(試験片押えとステビライザとの間も接着する)。ステビ

* 原稿受付 1996年6月20日。

*1 正員、久留米工業高等専門学校(〒830 久留米市小森野町1232)。

ライザの直線部 B には、半導体ひずみゲージを前後左右に貼付けている。ステビライザの直線部 B の下端は切断されており、直線部 B に作用する荷重は試験片に作用する力と等しい。ステビライザの荷重軸と試験片の中心軸は一致しており、試験片押えが組み合わされたステビライザの構造は軸対称であるため、試験片には曲げ荷重が作用しない。

ブリッジングが生じるメカニズムを以下に示す。ステビライザに作用させる荷重を増加させると、試験片に作用する引張荷重も増加し、やがて試験片は破断に至る。試験片の破断によって解放される荷重は、試験片の両側に配されたステビライザの直線部 A および C によって支えられるため、破断直後の開口変位は極めて狭い間隔に維持され、結晶粒あるいは繊維によるブリッジングが生じる。

2.2 ブリッジング応力の測定

試験片に作用する力 F は、ブリッジングステビライザの直線部 B に作用する引張荷重に等しい(図 2 参照)。よって、ステビライザの直線部 B のひずみを ε とすれば、

$$F = A_B E \varepsilon \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 A_B と E は、ステビライザの直線部 B の断面積とヤング率である。 ε の値は、直線部 B に貼付けた

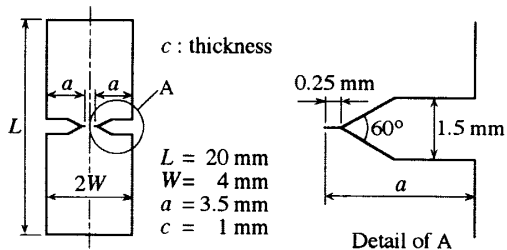


Fig. 1 Configurations of the DNP specimen

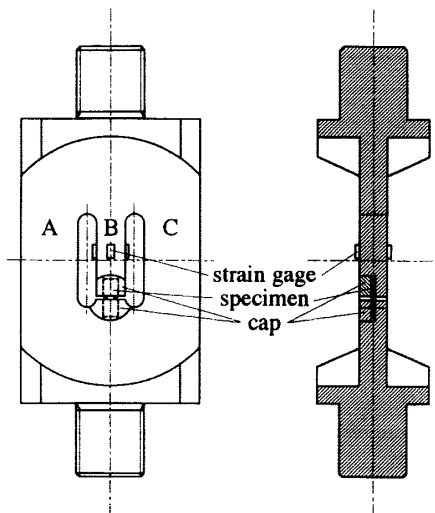


Fig. 2 Bridging stabilizer with the DNP specimen

半導体ひずみゲージによって測定する。

ブリッジング応力 σ_b は、 F を試験片の破面の面積 A_0 で割って求めることができる。すなわち、

$$\sigma_b = \frac{F}{A_0} = \frac{A_B E \varepsilon}{A_0} \dots\dots\dots (2)$$

2.3 開口変位 δ の決定

破面間の開口変位 δ は、ブリッジングステビライザと試験片の変形から求めることができる。図 3 に δ の決定法を示す。ステビライザを荷重 P で、試験片の破面間を力 F で引張るときに生じる開口変位をそれぞれ $\delta_P(P)$, $\delta_F(F)$ (< 0) とすると δ は、

$$\delta = \delta_P(P) + \delta_F(F) \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここで、 $\delta_P(P)$ と $\delta_F(F)$ とは、ステビライザが弾性体であることより、それぞれ次の形で表すことができる。

$$\delta_P(P) = \beta \cdot P \dots\dots\dots (4)$$

$$\delta_F(F) = \gamma \cdot F \dots\dots\dots (5)$$

図 2 のブリッジングステビライザに対する式 (4) と式 (5) の β と γ を三次元有限要素法を用いて求めたところ、 $\beta = 6.03 \times 10^{-4} [\mu\text{m}/\text{N}]$, $\gamma = -1.87 \times 10^{-3} [\mu\text{m}/\text{N}]$ を得た。完全に破断した試験片は $F = 0$ となるので、そのときの開口変位は $\delta_P(P)$ となる。そこで、完全に破断した試験片の開口変位をレプリカを用いて測定して、 β の校正を行った。その結果、 $\beta = 6.33 \times 10^{-4} [\mu\text{m}/\text{N}]$ の実験値を得た。有限要素法で求められた γ の値も同程度の誤差を含むものと考えられるが、 $\delta_P(P)$ のオーダは $\delta_F(F)$ のオーダより 1 けた大きいので、開口変位の測定には有限要素法で求められた γ の値をそのまま用いた。

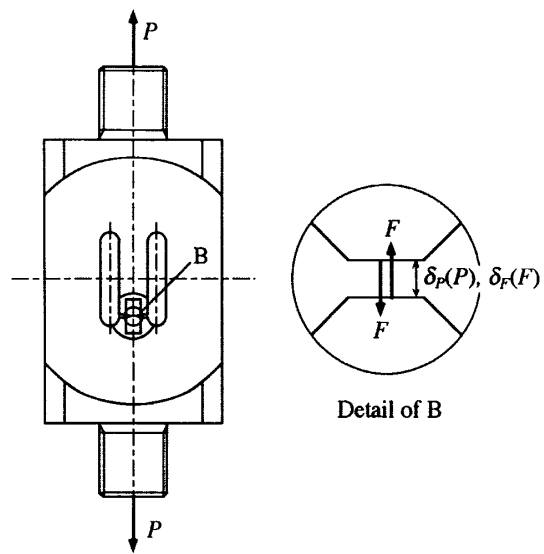


Fig. 3 Determination of the opening displacement

3. 実験結果

ブリッジング応力の測定の例として、多結晶セラミックスの結晶粒によるブリッジングの評価を試みた。試験に用いた材料は99.99%アルミナで、その機械的特性を表1に示す。

試験は大気中室温で行い、試験片を引張る速度を1 $\mu\text{m}/\text{min}$ とした。図4に、ブリッジング応力 σ_b と開口変位 δ との関係の一例を示す。数回の測定を行ったところほぼ一様な結果を得た。

図5は試験片の破面の写真である。粒界破壊を起こしていることがわかる。

Table 1 Mechanical properties of the material used

Mean grain size d (μm)	Mean bending strength σ_B (MPa)	Vickers hardness number H_V	Fracture toughness K_{IC} (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
11	218	1480	3.3

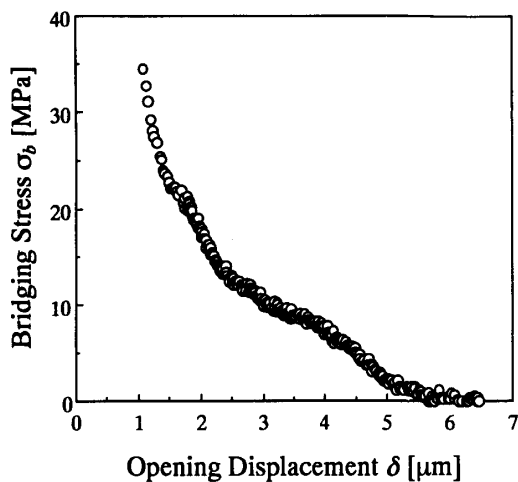
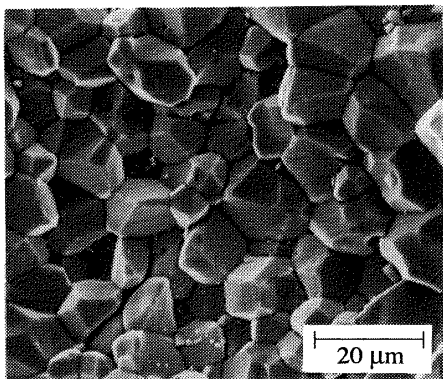
Fig. 4 Relationship between the bridging stress σ_b and the opening displacement δ 

Fig. 5 SEM image showing the fracture surface

4. 考察

図4において、1 μm 未満の開口変位に対するブリッジング応力の値が測定されていない。これは、試験片にき裂が貫通することによって解放された力が、瞬間的に、ブリッジングステビライザの直線部Aおよび直線部Cを伸ばし、直線部Bを縮ませたからである。この瞬間的な伸びと縮みの和が1 μm の開口変位となったわけである。

ブリッジング応力の開口変位に対する測定下限界を向上させるためには、試験片の破断に要する荷重の低下とステビライザの剛性の強化が有効である。試験片の破断荷重を低下させるためには、試験片の切欠きを鋭くすることが必要である。また、ステビライザの剛性の強化には、ステビライザの直線部A、B、Cの断面積を広くするとよい。

次に、他の研究者によって求められたアルミナのブリッジング特性と本研究結果との比較を行う。これまでに提案されているブリッジング応力測定法では、ブリッジング特性を次式で仮定し⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、その係数を種々の方法を用いて決定している。

Table 2 Parameters of bridging characteristics

	Mean grain size d (μm)	Maximum bridging stress σ_{max} (MPa)	Critical opening displacement δ_C	Exponent n
Rödel et al. ¹	11	70	$d/4$	2.5
Hu et al. ³	20	56	$d/4$	2.1
Hay and White ⁵	16	46	$d/3$	11

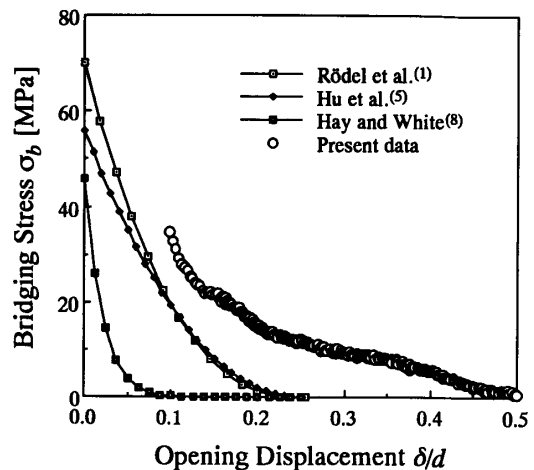


Fig. 6 Comparison with results of other researchers

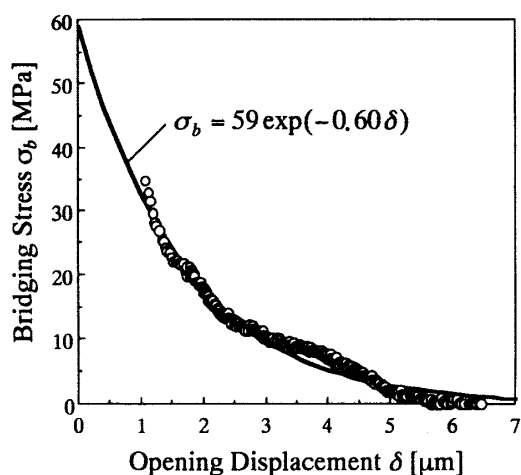


Fig. 7 Approximate expression of the bridging stress

$$\sigma_b = \sigma_{\max} \left(1 - \frac{\delta}{\delta_c}\right)^n \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 σ_{\max} は最大ブリッジング応力、 δ_c はブリッジング力が消失する臨界の開口変位、 n は指数である。

Rödel ら⁽¹⁾、Hu ら⁽⁵⁾ および Hay-White⁽⁷⁾ によって求められた σ_{\max} 、 δ_c 、 n を表 2 に示す。

図 6 に、表 2 の係数によって求められたブリッジング特性と本研究で求めたブリッジング特性を示す。それぞれの試験で用いられたアルミナの結晶粒径は異なるので、開口変位 δ をそれぞれの平均結晶粒径 d で割って無次元化している。

図 6 から、それぞれの最大ブリッジング応力はほぼ同程度であるが、同一のブリッジング応力が生じる開口変位が大きく異なっていることがわかる。この理由は二つ考えられる。平均結晶粒径 d の示す意味が結晶粒径の分布によって異なることと、測定方法によって測定精度が異なり、精度の悪い方法では小さなブリッジング応力を測定できず、ブリッジング応力の減衰が実際より大きく測定されるからである。

最後に本研究で測定されたブリッジング特性を表す近似式を示す。本研究で求められた結果は式(6)ではうまく表現することはできなかった。ブリッジング応力 σ_b が比較的大きい範囲では、 $\ln \sigma_b$ と開口変位 δ との関係がほぼ直線関係になることから、次式を用いて近似を試みた。

$$\sigma_b = \sigma_{\max} \exp(-\alpha \delta) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 α はブリッジング応力の減衰を決定する係数

である。

$\delta < 2 \mu\text{m}$ のデータに基づいて、最小二乗法を用いて σ_{\max} および α を決定したところ、

$$\sigma_{\max} = 59 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\alpha = 0.60 \quad \dots\dots\dots (9)$$

を得た。式(8)と式(9)の値を式(7)に代入したものと本実験結果とを図 7 に示す。図 7 から、近似式と実験結果とがよく一致していることがわかる。

5. 結 言

ブリッジング応力の直接測定法を開発し、応用例として多結晶アルミナのブリッジング応力を測定した。今回開発したブリッジングステビライザを用いた測定法の特長は、

- (a) ブリッジング応力のモデルを必要とせず、
- (b) 開口変位が簡単に評価できる

ことである。

本測定法によって、各種材料の結晶粒あるいは繊維によるブリッジングの特性が明らかになるであろう。特に、ブリッジングを生じる材料の繰返し疲労の鍵である、繰返し変形に対するブリッジング応力の減衰の定量化に有効であると考えられる。

文 献

- (1) Rödel, J., Kelly, J. F. and Lawn, B. R., *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**-11(1990), 3313-3318.
- (2) Steinbrech, R. W., Reichl, A. and Schaarwaechter, W., *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**-7(1990), 2009-2015.
- (3) Cox, B. N. and Marshall, D. B., *Int. J. Fract.*, **49**(1991), 159-176.
- (4) Mutoh, Y. and Takahashi, M., *Theoretical Concepts and Numerical Analysis of Fatigue*, (1993), 541-58, EMAS.
- (5) Hu, X.-Z., Lutz, E. H. and Swain, M. V., *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**-8(1991), 1828-1832.
- (6) Hu, X.-Z. and Mai, Y.-W., *J. Mater. Sci.*, **27**-13(1992), 3502-3510.
- (7) Hay, J. C. and White, K. W., *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**-7(1993), 1849-1854.
- (8) Walls, D. P. and Zok, F. W., *Acta Met. Mater.*, **42**-8(1994), 2675-2681.
- (9) Nisida, T. and Kameyama, I., *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**-2(1994), 606-608.
- (10) Foote, R. M. L., Mai, Y.-W. and Cotterell, B., *J. Mech. Phys. Solids*, **34**-6(1986), 593-607.
- (11) Mai, Y.-W. and Lawn, R. B. *J. Am. Ceram. Soc.*, **70**-4(1987), 289-294.