セラミックスのプルーフテストの最適試験条件*
(応力分布が不均一な場合)

市 川 昌 弘*

Optimum Proof Testing Conditions of Ceramics
(The Case of Nonuniform Stress Distribution)

Masahiro ICHIKAWA

When strength degradation due to slow crack growth occurs during proof testing of ceramic components, it is desirable to determine proof test conditions such that $S_{f\min} \geq S_d$ is satisfied and the probability of surviving the proof test becomes maximum, where $S_{f\min}$ is the minimum strength after proof testing and S_d is the required strength. In the previous paper, the optimum proof testing conditions were studied for the case of uniform stress distribution. In the present paper, the case of nonuniform stress distribution is studied. This case is important since real structural components are usually subjected to nonuniformly distributed stresses. It is shown that if a proof test is conducted such that $S_{f\min} \geq S_d$ is satisfied at the point of maximum stress, then $S_{f\min} \geq S_d$ is satisfied automatically at every point in the component. Hence, the optimum proof testing conditions for the case of nonuniform stress distribution can be determined by considering only the point of maximum stress.

Key Words: Proof Test, Ceramics, Structural Reliability, Nonuniform Stress Distribution, Crack Propagation

1. 緒 言

プルーフテストはセラミックス強度部材の信頼性確保の手段の一つとして用いられているが、試験中の安定き裂成長による強度低下に注意を払う必要がある。特に、除荷応力速度 $\dot{\sigma}_d$ (図 1 参照) がある臨界値 $\dot{\sigma}_{cr}$ 以下の場合には、除荷中に破壊するものが生じるようになり、プルーフテスト後の最小強度 (プルーフテストに生き残った部材集団中の最小強度) $S_{f\min}$ が安定き裂成長のために試験応力 σ_p よりもかなり低くなってしまふ恐れがある。したがって、この問題について国内外で研究が行われている^{(1)~(7)}。著者はプルーフテスト後の最小強度 $S_{f\min}$ についてさきに詳細な解析を行った⁽⁸⁾。また、この $S_{f\min}$ が実際に要求される強度 S_d 以上となり、かつ、合格率 (プルーフテストで生き残った部材数と試験した部材総数の比) が最大となるような最適保証試験条件を明らかにした⁽⁹⁾。

この前報⁽⁹⁾の研究では部材の応力分布が均一な場合を考えた。しかし実製品では一般に応力分布は不均一であるから、その場合についてさらに検討する必要がある。そこで本報では応力分布が不均一な場合の最

適保証試験条件を明らかにする。

2. 問題の設定

応力分布が不均一な場合について考えてみると、以下に述べるような問題があることがわかる。臨界除荷応力速度 $\dot{\sigma}_{cr}$ (除荷中に破壊する部材が生じないために必要な除荷応力速度の下限值) は次式で与えられる⁽²⁾⁽⁸⁾。

$$\dot{\sigma}_{cr} = \frac{\sigma_p^3}{B_3(n_3-2)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで

図 1 プルーフテスト中の応力の変化

* 原稿受付 平成 4 年 3 月 5 日。

*1 正員, 電気通信大学 (〒182 調布市調布ヶ丘 1-5-1)。

$$B_3 = \frac{2}{(n_3 - 2)\pi Y^2 A_3 K_c^{n_3 - 2}} \dots\dots\dots (2)$$

A_3 と n_3 は図 2 のように、 K - V 関係 (応力拡大係数 K と安定き裂進展速度 $V \equiv da/dt$ の関係) を

第 1 領域:

$$\frac{da}{dt} = A_1 K^{n_1} = A_1 (Y\sigma\sqrt{\pi a})^{n_1} \dots\dots\dots (3 \cdot a)$$

第 2 領域:

$$\frac{da}{dt} = \text{一定} \dots\dots\dots (3 \cdot b)$$

第 3 領域:

$$\frac{da}{dt} = A_3 K^{n_3} = A_3 (Y\sigma\sqrt{\pi a})^{n_3} \dots\dots\dots (3 \cdot c)$$

と表した場合の第 3 領域のパラメータである。一方、ブルーテスト後の最小強度は次式で与えられる⁽²⁾⁽⁸⁾。

$\dot{\sigma}_u \geq \dot{\sigma}_{cr}$ の場合

$$S_{f \min} = \sigma_p \left[1 - \frac{\sigma_p^3}{B_3(n_3 + 1) \dot{\sigma}_u} \right]^{1/(n_3 - 2)} \dots\dots (4 \cdot a)$$

$\dot{\sigma}_u < \dot{\sigma}_{cr}$ の場合

$$S_{f \min} = \left(\frac{3}{n_3 + 1} \right)^{1/(n_3 - 2)} [B_3(n_3 - 2) \dot{\sigma}_u]^{1/3} \dots\dots (4 \cdot b)$$

式(4・b)からわかるように、 $\dot{\sigma}_u < \dot{\sigma}_{cr}$ の場合には $S_{f \min}$ は σ_p には無関係となり、 $\dot{\sigma}_u$ の低下に伴い $\dot{\sigma}_u^{1/3}$ に比例して低下する。

さて、応力分布が不均一な場合は、ブルーテストで負荷される応力 σ_p や除荷応力速度 $\dot{\sigma}_u$ が部材中の場所の関数となるから、式(1)、(4・a)、(4・b)からわかるように、臨界除荷応力速度 $\dot{\sigma}_{cr}$ やブルーテスト後の最小強度 $S_{f \min}$ も場所の関数となる。また、高い応力の発生する場所ほど高い強度が要求されるから、要求強度 S_d も場所の関数となる。応力分布が均一な場合に対する前報⁽⁹⁾の結果によれば、除荷応力速度 $\dot{\sigma}_u$ はできるだけ高くし、試験応力 σ_p はできるだけ低くする (ただし $S_{f \min} \geq S_d$ を満足する範囲内で) ほど、合格率が高くなる。したがって、応力分布が不均一な場合にも、 $\dot{\sigma}_u$ はできるだけ高く、 σ_p はできるだけ低くすることが望ましいことは明らかである。いま、応力最大の点での実現可能な最大の除荷応力速度が試験装置の性能などから与えられると、この応力最大の点で $S_{f \min} \geq S_d$ とするために必要な試験荷重が式(4・a)、(4・b)から決まる。このとき、ほかの点での $\dot{\sigma}_u$ は応力分布から決まってくるが、ここで問題となるのはそれらの点でも $S_{f \min} \geq S_d$ が満足されるかどうかである。もしも応力最大の点で $S_{f \min} \geq S_d$ のとき、部材中のすべての点で $S_{f \min} \geq S_d$ となることが示されれば、応力分布が不均一な場合の最適保証試験条件は応

力最大の点のみを考えれば定まることになり、問題は解決されたことになる。そこで以下では、このような角度から問題の検討を行う。要求強度 S_d としては、過大応力による即時破壊に対する要求強度と、静疲労 (または繰返し疲労) に対する要求強度の両方を考える。

3. 理論解析

(その 1. 即時破壊を考えた場合)

部材の応力分布は、即時破壊を引き起こす過大応力作用時とブルーテスト時とで相似とする。ブルーテストにおいて、応力最大の点における σ_p 、 $\dot{\sigma}_u$ 、 $\dot{\sigma}_{cr}$ 、 $S_{f \min}$ の値を σ_{p0} 、 $\dot{\sigma}_{u0}$ 、 $\dot{\sigma}_{cr0}$ 、 $S_{f \min 0}$ とする。それ以外の任意点の応力と応力最大の点の応力との比を $\lambda (< 1)$ とすると、任意点の σ_p 、 $\dot{\sigma}_u$ 、 $\dot{\sigma}_{cr}$ は次のようになる。

$$\sigma_p = \lambda \sigma_{p0} \dots\dots\dots (5)$$

$$\dot{\sigma}_u = \lambda \dot{\sigma}_{u0} \dots\dots\dots (6)$$

$$\dot{\sigma}_{cr} = \frac{(\lambda \sigma_{p0})^3}{B_3(n_3 - 2)} = \lambda^3 \dot{\sigma}_{cr0} \dots\dots\dots (7)$$

また、任意点の $S_{f \min}$ は次のようになる。

$\dot{\sigma}_u \geq \dot{\sigma}_{cr}$ のとき

$$S_{f \min} = \lambda \sigma_{p0} \left[1 - \frac{\lambda^2 \sigma_{p0}^3}{B_3(n_3 + 1) \dot{\sigma}_{u0}} \right]^{1/(n_3 - 2)} \dots\dots (8 \cdot a)$$

$\dot{\sigma}_u < \dot{\sigma}_{cr}$ のとき

$$S_{f \min} = \left(\frac{3}{n_3 + 1} \right)^{1/(n_3 - 2)} [B_3(n_3 - 2) \lambda \dot{\sigma}_{u0}]^{1/3} \\ = \lambda^{1/3} S_{f \min 0} \dots\dots\dots (8 \cdot b)$$

次に、要求強度 S_d は過大応力発生時の各点での応力に比例するように定めることにする。すなわち、すべての点で要求強度と発生応力の比が等しくなるようにする。設計によってはこの比がある箇所で低くなるようにし、万一破壊するときはそこから破壊するように

図 2 K - V 関係

するということも考えられるが、ここではそのような場合は考えず上記のように S_d を定める。したがって、応力最大の点の S_d を S_{d0} とすると任意点の S_d は次式で表される。

$$S_d = \lambda S_{d0} \quad \dots\dots\dots (9)$$

以下では、 $\sigma_{u0} \geq \sigma_{cr0}$ が満足される場合と満足されない場合に分けて考察する。

3・1 $\sigma_{u0} \geq \sigma_{cr0}$ の場合 この場合の $S_{f \min 0}$ は式(4・a)の形で表される。いま、 $S_{f \min 0} \geq S_{d0}$ 、すなわち

$$\sigma_{p0} \left[1 - \frac{\sigma_{p0}^3}{B_3(n_3+1)\sigma_{u0}} \right]^{1/(n_3-2)} \geq S_{d0} \quad \dots\dots\dots (10)$$

が満足されるようにブルーテストの条件を決めたとする。このとき、部材中のすべての点で $S_{f \min} > S_d$ となるかどうかをしらべる。

前提により $\sigma_{u0} \geq \sigma_{cr0}$ であり、また $\lambda < 1$ であるから、式(6)、(7)に留意すると、

$$\sigma_u = \lambda \sigma_{u0} \geq \lambda \sigma_{cr0} > \lambda^3 \sigma_{cr0} = \sigma_{cr} \quad \dots\dots\dots (11)$$

が得られる。すなわち、応力最大の点で $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ が成立するときは、部材中のすべての点で $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ が成立する。したがって、任意点の $S_{f \min}$ は式(8・a)、(8・b)のうちの式(8・a)で与えられる。しかるに、 $\lambda < 1$ であり、また一般に $n_3 > 2$ であるから、次式が成立する。

$$S_{f \min} = \lambda \sigma_{p0} \left[1 - \frac{\lambda^2 \sigma_{p0}^3}{B_3(n_3+1)\sigma_{u0}} \right]^{1/(n_3-2)} > \lambda \sigma_{p0} \left[1 - \frac{\sigma_{p0}^3}{B_3(n_3+1)\sigma_{u0}} \right]^{1/(n_3-2)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

これと式(10)より、次式が得られる。

$$S_{f \min} > \lambda S_{d0} = S_d \quad \dots\dots\dots (13)$$

以上から、応力最大の点で $S_{f \min} \geq S_d$ ならば、部材中のすべての点で $S_{f \min} \geq S_d$ となることがわかった。

3・2 $\sigma_{u0} < \sigma_{cr0}$ の場合 式(1)を用いると、 $\sigma_{u0} < \sigma_{cr0}$ という条件は次のように表せる。

$$\sigma_{u0} < \frac{\sigma_{p0}^3}{B_3(n_3-2)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

また、この場合の $S_{f \min 0}$ は式(4・b)の形で表されるから、 $S_{f \min 0} \geq S_{d0}$ という条件は次のように表せる。

$$\left(\frac{3}{n_3+1} \right)^{1/(n_3-2)} [B_3(n_3-2)\sigma_{u0}]^{1/3} \geq S_{d0} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式(14)、(15)の下で、任意の点で $S_{f \min} \geq S_d$ が成立するかどうかをしらべる。 $\sigma_{u0} < \sigma_{cr0}$ の場合は、部材のある部分では $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ となり、ある部分では $\sigma_u < \sigma_{cr}$ となるので、領域を分けてしらべる。

3・2・1 $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ の領域 式(6)、(7)より、 $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ となるのは

$$\lambda^2 \leq \frac{B_3(n_3-2)}{\sigma_{p0}^3} \sigma_{u0} \quad \dots\dots\dots (16)$$

を満足する領域であることがわかる。すなわち、応力

最大の点では $\sigma_u < \sigma_{cr}$ であっても応力の比較的低い場所では $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ となる。

式(14)と式(15)より

$$\left(\frac{3}{n_3+1} \right)^{1/(n_3-2)} \sigma_{p0} > \left(\frac{3}{n_3+1} \right)^{1/(n_3-2)} [B_3(n_3-2)\sigma_{u0}]^{1/3} \geq S_{d0} \quad \dots\dots\dots (17)$$

が得られる。一方、式(16)より

$$\frac{\lambda^2 \sigma_{p0}^3}{B_3(n_3+1)\sigma_{u0}} \leq \frac{n_3-2}{n_3+1} \quad \dots\dots\dots (18)$$

であるから

$$S_{f \min} = \lambda \sigma_{p0} \left[1 - \frac{\lambda^2 \sigma_{p0}^3}{B_3(n_3+1)\sigma_{u0}} \right]^{1/(n_3-2)} \geq \lambda \sigma_{p0} \left[1 - \frac{n_3-2}{n_3+1} \right]^{1/(n_3-2)} = \lambda \sigma_{p0} \left(\frac{3}{n_3+1} \right)^{1/(n_3-2)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

が成立する。式(17)、(19)より

$$S_{f \min} \geq \lambda \sigma_{p0} \left(\frac{3}{n_3+1} \right)^{1/(n_3-2)} > \lambda S_{d0} = S_d \quad \dots\dots\dots (20)$$

となる。したがって、式(16)を満足する領域内のすべての点で $S_{f \min} > S_d$ となることがわかる。

3・2・2 $\sigma_u < \sigma_{cr}$ の領域 式(6)、(7)より、 $\sigma_u < \sigma_{cr}$ となるのは

$$\lambda^2 > \frac{B_3(n_3-2)}{\sigma_{p0}^3} \sigma_{u0} \quad \dots\dots\dots (21)$$

となる領域であることがわかる。すなわち、応力の比較的高い所では $\sigma_u < \sigma_{cr}$ となる。

式(15)を用い、 $\lambda < 1$ に留意すると、次式が得られる。

$$S_{f \min} = \left(\frac{3}{n_3+1} \right)^{1/(n_3-2)} [B_3(n_3-2)\lambda \sigma_{u0}]^{1/3} \geq \lambda^3 S_{d0} > \lambda S_{d0} = S_d \quad \dots\dots\dots (22)$$

すなわち、この場合も式(21)に従う領域内のすべての点で $S_{f \min} \geq S_d$ となることがわかる。

以上から、即時破壊に対する要求強度を考えたとき、応力最大の点で $S_{f \min} \geq S_d$ となるようにブルーテストの条件を決めれば、部材中のすべての点で $S_{f \min} \geq S_d$ が満足されることがわかった。

4. 理論解析

(その2. 静疲労を考えた場合)

実使用時に一定保持応力のもとで t_d なる寿命が要求されているとする。部材内におけるこの一定保持応力の分布とブルーテスト時の応力分布は相似とする。一定保持応力作用時の部材内の任意点における応力を σ_a とし、応力最大の点の σ_a を σ_{a0} と表すと、任意点の σ_a は

$$\sigma_a = \lambda \sigma_{a0} \quad \dots\dots\dots (23)$$

と表される。本章でも $\sigma_{u0} \geq \sigma_{cr0}$ の条件が満足されている場合と満足されていない場合に分けてしるべる。

4.1 $\sigma_{u0} \geq \sigma_{cr0}$ の場合 一定保持応力下での静疲労寿命 t_f は、周知のように実質的に第1領域のき裂進展で決まり、次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$t_f = \frac{B_1 S_0^{n_1-2}}{\sigma^{n_1}} \quad (24)$$

$$B_1 = \frac{2}{(n_1-2)\pi A Y^2 K_c^{n_1-2}} \quad (25)$$

ここで、 σ は負荷応力、 S_0 は初期不活性強度である。したがって、設計目標寿命を t_d とするとき、応力最大の点に要求される強度（不活性強度） S_{d0} は次式のようになる。

$$S_{d0} = \left(\frac{t_d}{B_1} \right)^{1/(n_1-2)} \sigma_{a0}^{n_1/(n_1-2)} \equiv L \sigma_{a0}^{n_1/(n_1-2)} \quad (26)$$

$$L = \left(\frac{t_d}{B_1} \right)^{1/(n_1-2)} \quad (27)$$

また任意点での要求強度 S_d は式(26)にて σ_{a0} を $\lambda \sigma_{a0}$ おきかえて、次のように得られる。

$$S_d = L(\lambda \sigma_{a0})^{n_1/(n_1-2)} = \lambda^{n_1/(n_1-2)} S_{d0} \quad (28)$$

さて、最大応力の点で $S_{f \min} \geq S_d$ が成立するとき、ほかの任意点でも $S_{f \min} > S_d$ が成立するかどうかをしるべる。3.1節で示したように、応力最大の点で $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ がなりたつときは、ほかのすべての点でも $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ がなりたつから、任意点の $S_{f \min}$ は式(8・a)で与えられる。そして、3.1節の式(12)と同様にして

$$S_{f \min} > \lambda S_{d0} \quad (29)$$

が導かれる。また、 $\lambda < 1$ 、 $n_1 > 2$ と式(28)より

$$\lambda S_{d0} > \lambda^{n_1/(n_1-2)} S_{d0} = S_d \quad (30)$$

が成り立つ。よって、式(29)、(30)より $S_{f \min} > S_d$ が得られる。以上から、応力最大の点で $S_{f \min} \geq S_d$ ならば、ほかの任意の点でも $S_{f \min} \geq S_d$ が成立することがわかった。

4.2 $\sigma_{u0} < \sigma_{cr}$ の場合 この場合は第3章と同様に、二つの領域にわけて考える。

4.2.1 $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ の領域 これは式(16)を満足する領域である。この領域では $S_{f \min}$ は式(8・a)で与えられる。前提により、 $S_{f \min 0} \geq S_{d0}$ 、すなわち

$$\left(\frac{3}{n_3+1} \right)^{1/(n_3-2)} [B_3(n_3-2) \sigma_{u0}]^{1/3} \geq L \sigma_{a0}^{n_1/(n_1-2)} \quad (31)$$

が成り立っている。また、 $\sigma_{u0} < \sigma_{cr}$ の場合を考えているから式(14)が成立している。式(14)、(31)より

$$\left(\frac{3}{n_3+1} \right)^{1/(n_3-2)} \sigma_{p0} > L \sigma_{a0}^{n_1/(n_1-2)} \quad (32)$$

が成立する。 $n_1 > 2$ であるから、式(32)と式(19)より

$$S_{f \min} \geq \lambda \sigma_{p0} \left(\frac{3}{n+1} \right)^{1/(n_3-2)} > \lambda L \sigma_{a0}^{n_1/(n_1-2)} > L(\lambda \sigma_{a0})^{n_1/(n_1-2)} = S_d \quad (33)$$

が得られる。よって、 $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ の領域内の任意の点で $S_{f \min} \geq S_d$ が成立する。

4.2.2 $\sigma_u < \sigma_{cr0}$ の領域 これは式(21)を満足する領域である。前提により $S_{f \min 0} \geq S_{d0}$ である。また $n_1 > 2$ より $\lambda^{1/3} > \lambda^{n_1/(n_1-2)}$ である。よって、式(8・b)と式(27)より

$$S_{f \min} = \lambda^{1/3} S_{f \min 0} > \lambda^{n_1/(n_1-2)} S_{d0} = S_d \quad (34)$$

が得られる。すなわち、 $\sigma_u < \sigma_{cr}$ の領域でも任意点で $S_{f \min} \geq S_d$ が成り立つ。

以上から、第3章の即時破壊を考えた場合と同様に、静疲労を考えた場合にも、応力最大の点で $S_{f \min} \geq S_d$ となるように試験条件を設定すれば、部材内のすべての点で自動的に $S_{f \min} \geq S_d$ となることが示された。なお、繰返し疲労の場合には以上の取扱いにおける時間 t を繰返し数 N でおきかえればよいから、本章の結果は繰返し疲労に対しても、同様に成立する。

5. 考 察

ブルーテストでは $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ となるように試験することが望ましい。なぜなら、 $\sigma_u < \sigma_{cr}$ の場合は除荷中に破壊する部材が生じ、 $S_{f \min}$ が試験応力 σ_p よりかなり低くなるので、ブルーテストに合格する部材の比率が低くなるからである。そこで、応力最大の点で $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ の条件が満足される時、それ以外のすべての点でも $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ となるかどうか問題となるが、これについては、3.1節で示したように、応力最大の点で $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ ならばすべての点で自動的に $\sigma_u \geq \sigma_{cr}$ が満足される。これは σ_u は λ の1乗に比例し、 σ_{cr} は λ^3 に比例するからである。

6. 結 論

セラミックス強度部材のブルーテストでは、ブルーテスト後の最小強度が実使用時に要求される強度以上となり、かつ合格率が最大となるように試験条件を決めることが望ましい。前報⁽⁹⁾では応力分布が均一な場合について、この最適試験条件を明らかにしたが、実製品では応力分布が一般に不均一であるので、本報ではこの場合の最適試験条件をしるべた。主な結論は次のとおりである。

(1) 要求強度として、過大応力による即時破壊に対する強度を考えた場合、応力最大の点で $S_{f \min} \geq S_d$ となるように試験条件を設定すれば、ほかの点でも、自動的に $S_{f \min} \geq S_d$ が満足されることがわかった。

(2) 要求強度として、一定保持応力による静疲労や一定応力振幅下での繰返し疲労に対する強度を考えた場合にも、即時破壊の場合と同様に、最大応力の点で $S_{f\min} \geq S_d$ となるように試験条件を設定すれば、ほかの点でも自動的に $S_{f\min} \geq S_d$ が満足されることがわかった。

(3) したがって、応力分布が不均一な場合の最適試験条件は、応力最大の点のみを考えれば決定できる。すなわち、応力最大の点での実現可能な最大の除荷応力速度が試験装置の性能などから与えられると、この応力最大の点で $S_{f\min} \geq S_d$ となるような試験荷重が式(4・a)、(4・b)から決定されるが、この除荷応力速度と試験荷重が部材としての最適試験条件を与える。

(4) 応力最大の点で除荷応力速度 $\dot{\sigma}_u \geq \dot{\sigma}_{cr}$ となるように試験条件を設定すれば、ほかの点で

も自動的に $\dot{\sigma}_u \geq \dot{\sigma}_{cr}$ が満足されることがわかった。

本研究は文部省科学研究費補助金(試験研究(B))により行われたことを記し、謝意を表する。

文 献

- (1) Evans, A. G. and Fuller, E. R., *Mater. Sci. Eng.*, **19** (1975), 69.
- (2) Fuller, E. R., Wiederhorn, S. M., Ritter, J. E. Jr. and Oates, P. B., *J. Mater. Sci.*, **15**(1980), 2282.
- (3) 浜中・中村・林・酒井・武正, 機論, **53**-492, A(1987), 1638.
- (4) 浜中・江積・鈴木・杉山, 機論, **56**-523, A(1990), 462.
- (5) 鈴木・稲村・杉山, 機論, **57**-542, A(1991), 2357.
- (6) 星出・佐藤・井上, 機論, **56**-522, A(1990), 212.
- (7) 星出・佐藤・大原・井上, 機論, **56**-522, A(1990), 220.
- (8) 市川, 機論, **53**-496, A(1987), 2216.
- (9) 市川, 機講論, No. 900-14(Vol. A) (1990-3, 4), 156.
- (10) Evans, A. G. and Wiederhorn, S. M., *Int. J. Fracture*, **10** (1974), 379.