

## Numerical analysis of static fracture of porous ceramics

Tomoyuki FUJII, Yoshiaki AKINIWA and Takafumi AMATA

## 1. 緒言

近年、材料への機能の付与が積極的に進められ、微視構造の制御による各種特性の向上が図られている。特に、多孔質セラミックスはその構造特性より断熱性、ガス吸着性、またセラミックスとしての耐熱性、耐食性、耐摩耗性を有し、フィルタや触媒担体など多岐にわたっての利用が試みられている。多孔質セラミックスは機能性発現のために多くの気孔を有するため、その強度特性には、応力ひずみ関係の非線形性やR曲線挙動を有するなど、従来の緻密質のセラミックスには見られない特異な挙動を示す<sup>(1)</sup>。このような材料からなる部材要素の信頼性を確保するためには破壊挙動の把握および破壊解析手法の開発が重要である。

本研究では多孔質体を円状粒子で単純化した微視破壊モデルを構築し、マクロな破壊挙動、機械的性質に及ぼす微視構造、微視き裂発生の影響について検討を行った。また、既報<sup>(2)</sup>で提案した破壊解析モデルと比較検討した。

## 2. 解析方法

**2.1 解析モデル** 二次元平面問題として解析した。単純化のために、多孔体は円状の粒子が相互に接合されて構成されているものとし、以下のようにモデル化を行った。空間に生成した寸法  $L$  の容器内に、乱数で与えられた直径  $D$  の粒子を落下させる。このとき、落下開始位置も乱数を用いてランダムな座標  $(x, \infty)$  からとした。落下した粒子が、安定な位置に落ち着いた後に次の粒子を落下させ、容器に粒子が充填するまでこの操作を繰り返した。この際、落下時の加速度、粒子の変形、回転、摩擦、衝突による跳ね返りは無視した。作成した円状粒子充填体より、任意の場所から解析領域を切出した。ついで、粒子の中心位置をそのままに、全ての粒子の半径を  $\Delta r$  だけ増加させることによって重なった部分を粒子間の結合領域とした。Fig.1.にその一例を示す。

本研究では多孔質炭化ケイ素を模擬し、実際の組織形態を基にして、粒子の直径は  $50 \sim 250 \mu\text{m}$  の一様乱数とし、 $\Delta r$  はバインダ層の厚さに相当する  $5.0 \mu\text{m}$  とした。

解析対象は、外形寸法が  $7 \times 40 \text{ mm}$  の長方形板に種々の寸法の片側切欠きを有する片側切欠き平板とした。切欠き近傍の幅  $3.0 \text{ mm}$ 、長さ  $1.5 \text{ mm}$  の領域を上述の粒子充填モデルとし、それ以外は均質等方性とした。上述の方法で得られる気孔率は約  $10\%$  である。切欠きは充填粒子を取り除くことで作成した。Table 1 に解析条件を

Table I. Analytical condition.

Notch depth, $t$ mm	0.4, 0.8, 1.6
Porosity %	10
Analysis method	Finite element method

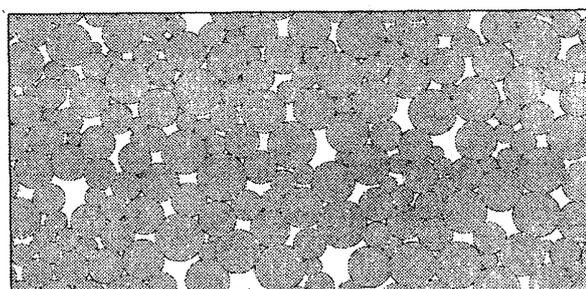


Fig.1. Model of porous material.

まとめる。負荷形式は4点曲げとし、外スパン  $40 \text{ mm}$ 、内スパン  $20 \text{ mm}$  とした。

解析には、有限要素法を用い、粒子の弾性特性は、ヤング率が  $410.0 \text{ GPa}$ 、ポアソン比が  $0.20$  の等方性材料とした。ただし、実際の多孔体にはバインダ層が存在するが、ここでは簡単化のため、結合部分も全て同じ弾性定数を有するものと仮定した。また、均質等方部分の弾性定数は、粒子充填モデルより得られたヤング率  $207 \text{ GPa}$ 、ポアソン比  $0.203$  とした。なお、シミュレーションには有限要素解析ソフト MSC.Marc 2001 を用いた。

**2.2 破壊基準** 多孔体の破壊は、粒子同士の結合部分にき裂が発生することで生じるものとした。結合部分は、荷重軸方向に対して種々の角度を有するため、接合部に対する垂直応力のみならずせん断応力の効果も考慮する必要がある。一般に多結晶材料における微視き裂の発生には、結晶の大きさと粒界の角度を考慮した基準が提案されている<sup>(3)</sup>。ここでは、多孔質体においても同様の破壊基準を適用する。き裂発生の破壊クライテリアは、結合部の長さを  $l$ 、結合部の破壊じん性値を  $K_{CB}$  とすると、実験的な式として次式で表される。

$$l(\sigma_{11}^2 + \tau_{12}^2) \geq \beta K_{CB} \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{11}, \tau_{12}$  は結合部に作用する垂直応力およびせん断応力である。 $\beta$  は実験上の定数で、ここでは単純化のため  $1.0$  とする。結合部の破壊じん性値  $K_{CB}$  は、多孔質炭化ケイ素セラミックスにおける単一き裂進展開始の限界値  $K_{in} = 0.332 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  を採用した<sup>(4)</sup>。

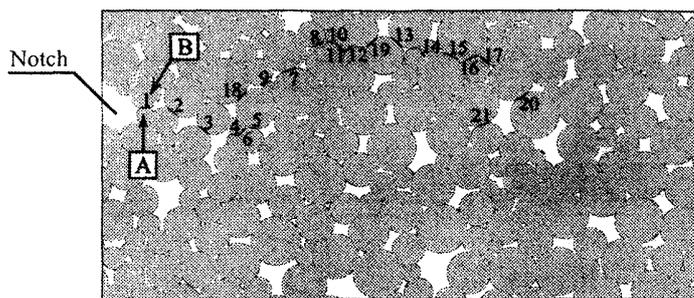


Fig. 2. Fracture path for  $t = 0.4$  mm.

### 3. 解析結果

**3.1 き裂進展経路** Fig. 2 に切欠き長さが 0.4mm の場合のき裂進展挙動を示す。図の左側が試験片の表面であり、長さ 0.4mm の切欠きを、充てん粒子を取り除くことによって導入した。紙面上下方向が材料長手方向である。図中の数字が破壊順序を表している。まず、切欠き底の粒子 A と B の結合部が破壊し、その後順にほぼ水平方向にき裂が伝ばする。6 番目のき裂が発生した後に、き裂はそれよりも右側上方に不連続的に発生して 7 番目の結合部が破壊した。他の乱数による粒子モデルや、切欠き深さが異なる場合にも、このようにき裂は不連続的に発生した。

**3.2 破壊のマクロ挙動** 多孔体の曲げ破壊においては、負荷応力と切欠き背面のひずみの関係に非線形性が現れ、初期切欠き深さが大きくなるほど、非線形性が強くなるということが知られている。Fig. 3 には、三種類の切欠き深さについて得られた応力ひずみ関係を示した。切欠き深さが 0.4mm では、負荷応力がおおよそ 8.4 MPa となった時点で、切欠き底近傍の結合部が破壊したものの、即時破壊はしない。最終破壊のためにはさらに応力を増加させることが必要で、10.2 MPa で最大応力をとった後に応力は減少した。切欠き深さが 0.8mm においては、最大応力は減少するものの、傾向はほぼ同様である。これらに対して 1.6mm ではひずみが  $4.1\mu\text{m}$  および  $4.7\mu\text{m}$  でほぼ同じ最大応力となり、非線形性がより強く現れる。ただし、実際の材料では三次元的に粒子間が結合されているのに対して、本解析は二次元問題としているため、その非線形傾向はさほど顕著ではない。

多孔体においては、解析的に得られたき裂の伝ば経路とほぼ同様に、実際の場合にもき裂の屈曲が顕著に認められ、さらに不連続にき裂が発生することが知られている。実験的にはマクロなコンプライアンス変化を基にして、単一のき裂が直線的に伝ばすると仮定して、R 曲線解析が行われている。Fig. 4 には、Fig. 3 の応力ひずみ関係のコンプライアンスから見かけ上の単一き裂の長さを算出し、き裂伝ば量に対する応力拡大係数の変化として示した。実験的に得られる結果と同様に、R 曲線に及ぼす切欠き深さの影響は小さい。ただし、厳密には切欠き深さが小さいほうが、最大応力をとった後の上昇率が大きいようである。また、図中の破線は、最大応力が作用している状態でのき裂伝ばに伴う応力拡大係数の

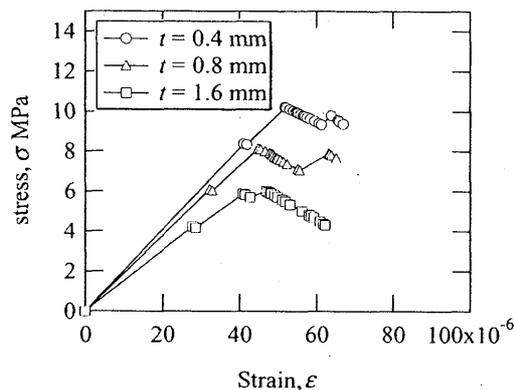


Fig. 3. Stress-strain relationship.

Fig. 4. R-curves.

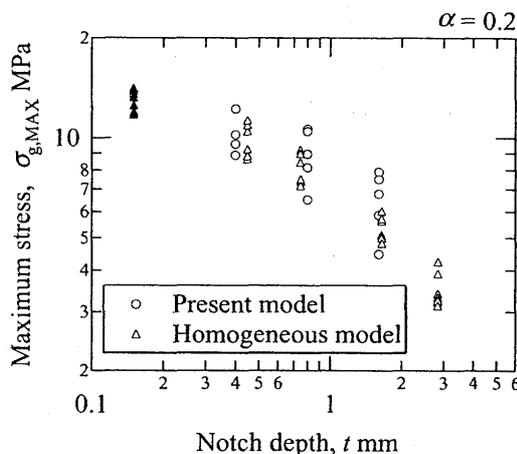
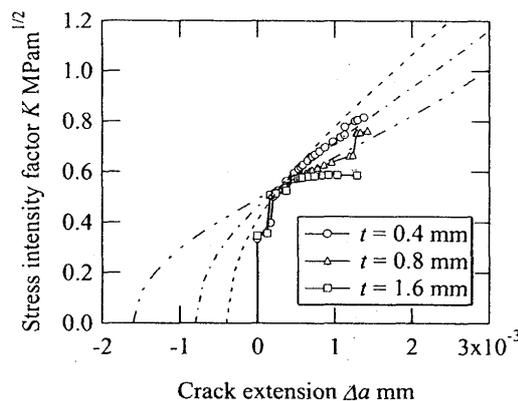


Fig. 5. Relations between maximum stress and notch depth.

変化を示したものである。R 曲線と破線が接する条件で、最大応力を推定することが可能である。

本研究では乱数列を変化させることによって、5 種類のモデルを作成して破壊解析を行った。Fig. 5 はそれぞれの切欠き深さに対する最大負荷応力の関係をまとめたものである。図中の○印が、本研究で得られた結果で、△印は既報で提案した均質材モデルを用いて、同様の解析を行ったものである。限界値のばらつきは 0.2 とした。両者はほぼ同様の傾向を示していることがわかる。

結言および参考文献省略