

名古屋大学〔院〕 ○神藤健 名古屋大学〔院〕 北泰樹
 名古屋大学 田中啓介 名古屋大学 秋庭義明

1 緒 言

多孔質セラミックスは、軽量、断熱、吸音、選択的透過性といったさまざまな機能を有し、かつ、セラミックスが持つ耐熱性、耐薬品性といった性質を併せもつことから、断熱材、触媒担体、高温フィルター、人工骨などの生体材料、と多様な用途に適用されている。実用にあたっては長期使用中の疲労や破壊に関する健全性の保証の確保が重要な課題となる。

本研究では、多孔質炭化ケイ素セラミックスの平滑材および2種類の切欠き材（V型切欠き、半円孔切欠き）を用いて4点曲げ繰返し疲労試験を行い、疲労寿命に及ぼす切欠き形状の影響を検討した。

2 実験方法

2.1 材料および試験片 実験に用いた材料は、日本ボール（株）（旧日本シューマツハ（株））製の多孔質炭化ケイ素セラミックスSL#5（平均粒子径10 μ m、気孔率35%）である。試験片には、平滑材では幅8mm、高さ6mm、長さ80mm、切欠き材では幅6mm、高さ8mm、長さ80mmの角材を使用した。切欠き材においては、試験片の6 \times 80mm²の面の中央に、高さ方向に片側V型切欠きと片側半円孔切欠きの2種類を導入した。切欠き深さは2種類とも1.6mmである。V型切欠き材の先端の開き角は22 $^\circ$ 、先端の曲率半径は20 μ m、半円孔切欠き材の切欠き半径は1.6mmである。またV型切欠き材に関しては、試験片の加工中に浸透し、加工後試験片に残留したワックスを焼き飛ばすため、入手後、真空中で500 $^\circ$ C、1h保持した後、曲げ試験に使用した。切欠き試験片にはひずみゲージを試験片中央に切欠きの付いていない圧縮側の面に貼り付けた。

2.2 実験方法 実験には電気油圧サーボ式試験機（島津サーボパルサー EHF-FB1-10LA ロードセル容量2kN（200kgf））を用いて室温大気中で荷重制御にて4点曲げ疲労試験を行った。平滑材では4点曲げの外スパンは60mm、内スパンは30mm、切欠き材では外スパンは40mm、内スパンは20mmである。疲労試験は荷重比 $R=0.1$ のサイン波を負荷し、周波数は30Hzで行った。疲労試験中には予め設定した繰返し数において一周分荷重ひずみ関係を計測した。繰返し数は10⁷回で実験打ち切りとした。

2.3 破壊応力の算出 切欠き底先端における公称応力 σ_n は荷重 P より材料力学の次の公式で求めた。

$$\sigma_n = \frac{3P(L-l)}{2b(h-t)^2} \quad (1)$$

ここで b 、 h は試験片の幅と高さ、 t は切欠き深さ、 L 、 l は4点曲げ試験におけるピンの外スパンと内スパンである。

また、切欠き底先端における応力集中係数 K を考慮した応力 σ は次式で与えられる。

$$\sigma = K\sigma_n \quad (2)$$

3 実験結果および考察

3.1 疲労寿命 疲労寿命の関係をFig. 1に示す。ここで横軸には破断繰返し数、縦軸には式(1)より求めた切欠き底での最大公称応力をとった。破壊はすべて切欠き材では切欠き先端より、平滑材では内スパン内から生じていた。疲労寿命は多少のばらつきはあるもののそれぞれの試験片形状に対して切欠き底での最大公称応力が小さいほど寿命が長い。また、平滑材、半円孔切欠き材、V型切欠き材の順で疲労強度は高く、傾きもこの順で大きい。

3.2 応力集中係数による整理 Fig. 2に破断繰返し数と、切欠き形状から求まる弾性応力集中係数 K_t を式(2)に代入し得られた疲労強度の関係を示す。平滑材については $K_t=1$ で与えられ、切欠き材については有限要素法を用いて算出し、V型切欠き材では $K_t=12.947$ 、半円孔切欠き材では $K_t=1.826$ を用いた。なお、有限要素法は汎用プログラムMARC 2001を使用し、八節要素を用い、二次元弾性問題の平面応力状態で行った。

Fig. 2よりV型切欠き材、半円孔切欠き材の強度が平滑材に比べて大幅に高くなっていることが分かる。これは疲労試験中に切欠き底近傍において多数の微視き裂が発生し、切欠き底の応力が緩和され、実際の応力集中係数が解析的応力集中係数より小さくなったためと考えられる。さらに、半円孔切欠き材に比べてV型切欠き材の方がはるかに強度が高くなっていることから、弾性応力集中係数の大きい切欠き形状の方が切欠き底で多くの応力緩和を引き起こすと考えられる。

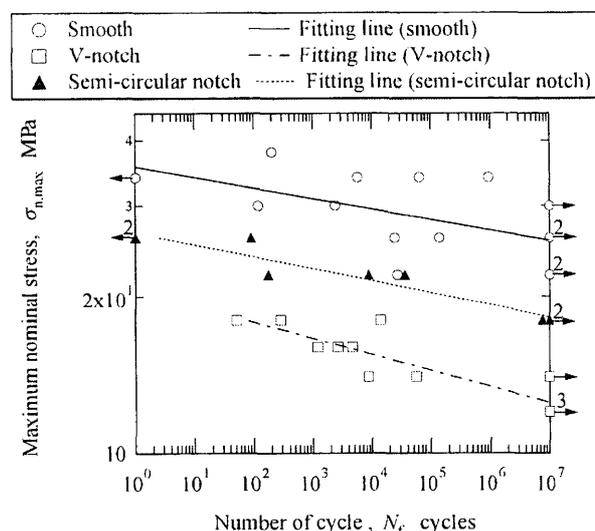


Fig. 1. Fatigue life curves.

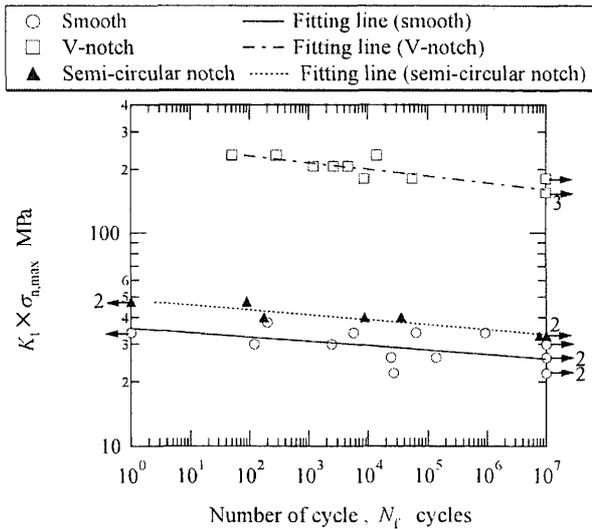


Fig. 2. Fatigue life curves modified by stress concentration factor.

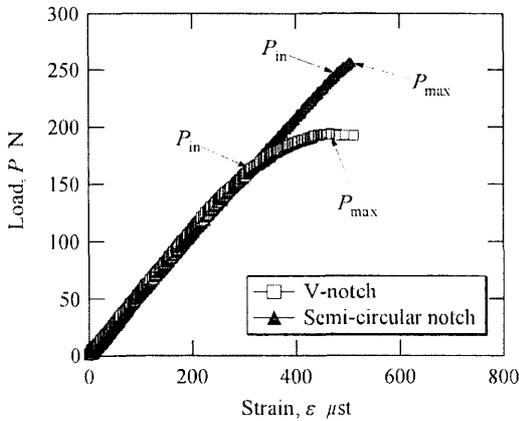


Fig. 3. Load vs. compressive strain relation.

3.3 即時破壊強度による整理 Fig.3に4点曲げ即時破壊試験より得られた切欠き材の代表的な荷重-ひずみ関係を示す。ここで4点曲げ破壊試験は、室温大気中にてクロスヘッド速度を0.1mm/minの条件で行った。4点曲げのスパンと試験片寸法は疲労試験の場合と同様である。図中の P_{max} , P_{in} はそれぞれ最大荷重とき裂進展開始荷重であり、き裂進展開始点の決定には荷重-ひずみ関係の非線形開始点を用いた。これらの荷重から式(1)を用いて最大公称応力 σ_{max} およびき裂進展開始公称応力 σ_{in} を算出した。平滑材の結果を含めてTable Iにまとめる。ここで、即時破壊試験での平滑材と切欠き材の最大公称応力の比を K_a とすると、V型切欠き材では1.645、半円孔切欠き材では1.420であった。また、き裂進展開始応力の比を K_b とすると、V型切欠き材では1.993、半円孔切欠き材では1.486であった。これらの強度比を式(2)に代入し、疲

Table I. Bending strength of specimens.

Specimen	σ_{max} (MPa)	K_a	σ_{in} (MPa)	K_b
Smooth	41.06	1	41.06	1
V-notch	24.96	1.645	20.60	1.993
Semi-circular notch	28.91	1.420	27.64	1.486

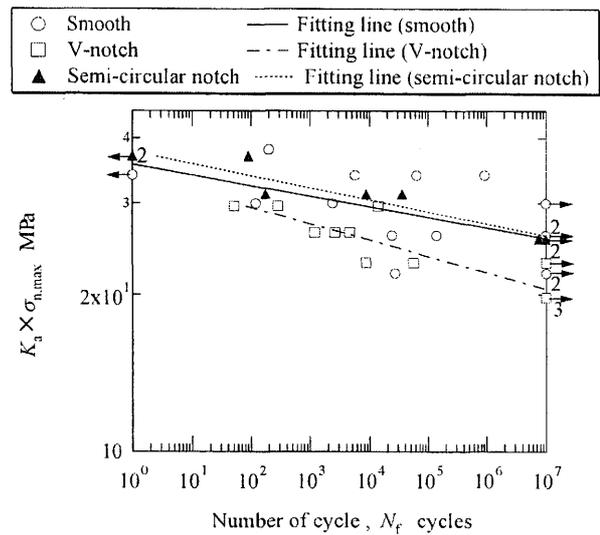


Fig. 4. Fatigue life curves modified by maximum stress under four point bending.

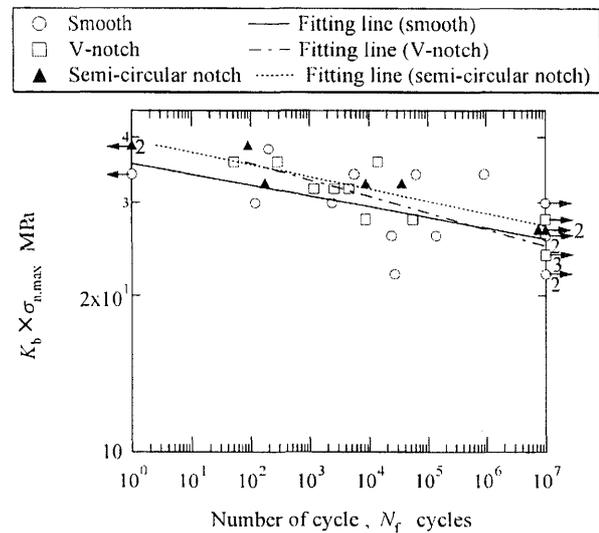


Fig. 5. Fatigue life curves modified by stress at the initiation of crack extension under four point bending.

勞強度を整理したものをFig. 4, Fig. 5に示す。V型切欠き材では、 K_a で整理した強度は平滑材の疲労強度より低くなり、 K_b で整理した強度はほぼ等しい値を示す。一方、半円孔切欠き材では K_b よりも K_a で整理した強度の方が平滑材の強度に一致した。しかし、その差はわずかである。

以上から、疲労における実質的な応力集中係数を K_c とすると、V型切欠き材では

$$K_1 > K_a > K_c \cong K_b > 1 \quad (3)$$

半円孔切欠き材では

$$K_1 > K_c \cong K_a \geq K_b > 1 \quad (4)$$

が成立する。V型切欠き材のように破壊試験において最大荷重に達するまでに非線形が顕著に現れる切欠き形状の場合では最大応力から求まる K_a ではなくき裂進展開始応力より求まる K_b で疲労強度を整理しなければならない。一方で、半円孔切欠き材のように最大荷重に達するまでに非線形がそれほど現れない切欠き形状に関しては K_a と K_b の値がほぼ等しくなるため K_a で疲労強度を整理することが可能である。