アルミナ粒子分散エポキシ樹脂の疲労強度[†]

山 崎 利 春* 千 葉 和 夫*

Fatigue Strength of Alumina Particulate Filled Epoxide Composites

by

Toshiharu YAMAZAKI* and Kazuo CHIBA*

Fatigue tests of notched and smooth specimens of alumina particulate filled epoxide composites were conducted and the effects of alumina dispersion on the fatigue strength, the fatigue limit, the fatigue fracture process, the final fracture condition in fatigue and the inherent flaw size were studied. The alumina volume fractions V_f used in this experiment were 13% and 37%. As a basis of comparison epoxy resin with no filler was also tested.

The results obtained are summarized as follows.

(1) Alumina dispersion had both (a) reinforcement effect and (b) flaw dispersion effect from the viewpoint of fatigue strength. The fatigue strength of the smooth specimens with 13% V_f reduced from the level of epoxy resin, and the strength recovered when V_f increased to 37%.

(2) The fatigue strength of the notched specimens was improved as alumina V_f was increased.

(3) The inherent flaw size became longer by the alumina dispersion and the composite became less sensitive to surface flaws than the epoxy resin.

(4) The fatigue limit of the composites seems to be determined by the condition that microbond of particle/matrix interface in surface layer does not propagate. A model of fatigue limit was proposed based on the observation and the fatigue limit stress level vs. V_f relation was satisfactory explained.

キー・ワード：アルミナ粒子，エポキシ樹脂，疲労強度，破壊力学

1 緒 言

粒子分散エポキシ樹脂は，安価で優れた絶縁材料として，広く用いられている。粒子分散の目的は，

- (1) 増量材として材料コストを下げる。
- (2) 線膨張係数を下げ¹⁾，注形時の硬化収縮量をへらして，成形性を改善する。
- (3) 弾性率を上げ，製品の剛性を増す。

などであり，分散剤としてはシリカやアルミナが用いられている。

粒子分散のもう一つの特筆すべき効果として，破壊じん性値の改善があり，シリカまたはアルミナを充てんしたエポキシ樹脂での実験がある。またガラスビーズなどをぜい性マトリックスに充てんしたモデル実験^{2,3)}も行われており，ぜい性プラスチック材料に，剛い粒子を充てんすることにより破壊じん性値が向上することは一般的である。またその強化機構としては，いわゆるピンニング機構が支配的であろうと考えられている^{4,5)}。

しかし引張強度は必ずしも粒子分散で向上する訳ではなく⁵⁾，また構造部材にとって重要な疲労強度に及ぼす粒子充てん効果についての研究は少ない^{7,8)}。

一般論として，破壊じん性値の改善は，疲労き裂伝ば特性の改善に通ずると考えられるから，切欠き材の疲労特性は，粒子充てんにより向上するものと予想される。

Lange が提案し²⁾，Evans が計算した⁹⁾ pinning 機構は，き裂長さが粒子径や粒子間距離に対して十分大きいレベルのものであった。一方，実用上より重要な平滑材の疲労特性は，き裂の発生や，粒子径，粒子間距離と同じオーダーの長さのき裂の伝ば特性などに支配されると考えられるから，pinning 機構による強化がそのままでははまるとは限らないであろう。このように，粒子分散と疲労強度特性との関連は，実用上重要であるのみならず，科学的にも非常に興味ある分野である。

著者らはこれまで，アルミナ粒子分散エポキシ樹脂¹⁰⁾の強度について系統的な研究をすすめ，破面解析技術，切欠き材の強度およびクリープ変形挙動等について明らかにしてきたが，以上の観点に立脚して本研究では，疲労強度に及ぼすアルミナ粒子分散効果を明らかにする。

[†] 原稿受理 昭和60年8月28日 Received Aug. 28, 1985

* 正 会 員 (株)東芝重電技術研究所 川崎市川崎区浮島町, Heavy Apparatus Engineering Laboratory, Toshiba Corporation, Ukishima-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki

2 実験

2.1 材料

Table I に供試材料の配合比を示す。

充てん剤はアルミナ粒子で、重量比で 0 phr, 60 phr および 250 phr の 3 種類の材料を用いた。それらは体積分率 V_f では各々、0, 13 および 37% となる。またアルミナ粒子は粒径が $1 \sim 50 \mu\text{m}$ の分布を有しており、形状は無定形で、界面強度を制御するための処理は特に行っていない。

Table I. Formulation of epoxide composites.

(Weight ratio)		
Epoxy resin	Diglycidyl ether of bisphenol A (Epoxide equivalent 400)	100
Curing agent	Phthalic acid anhydride	30
Filler	Alumina	0, 60, 250

以下、 $V_f=0\%$ を無充てん材、 $V_f \neq 0\%$ を充てん材と称する。

2.2 試験片形状および試験方法

Fig. 1 (a)(b) に示す 2 種類の試験片形状を用いた。いずれも $170 \times 40 \times 20 \text{ mm}$ の角片を注形により製作し、その後機械加工を行った。

(a) は切欠き試験片で、切欠き長さ C_0 は 5 mm と 8 mm である。切欠きの先端部にはマイクロブレードでスリットを入れたが、アルミナ充てんのため加工しにくく、0.2 mm 幅が加工しうる最小のものであった。

(b) は平滑試験片で、前記角片から機械加工により削り出し、最小断面部を #600 エメリーペーパーで仕上げた。

(a), (b) とも機械加工などによる残留応力（巨視的残留応力）を除去するため、 $100^\circ\text{C} \times 6 \text{ Hr}$ の焼なましをしてから実験した。

実験は電気油圧式疲労試験機にて、(a) は図中に破線で記した寸法の 4 点曲げで片振り 1 Hz で、(b) は片振

(a) Notched specimen.

(b) Smooth specimen.

Fig. 1. Specimen geometry (dimensions in mm).

引張りにて 3 Hz で行った。

3 実験結果

3.1 応力-ひずみ関係

平滑材での静的引張りによる応力-ひずみ曲線を Fig. 2 に示す。ここで応力は公称応力であり、ひずみは試験片最小断面部の側面で測定したものである。試験片側面の曲率 (R 60) により多少の応力集中が見込まれたが、弾性 FEM 解析では約 3% であったので、以下これを無視して平滑材として扱う。

複合材としてのヤング率はアルミナ V_f にほぼ比例して増加しているが、応力-ひずみ関係の非線形性は、アルミナ充てんによる影響をあまりうけていない。

アルミナ粒子の充てんにより、引張強度 σ_B は上がり、破断ひずみは減少している。引張強度に及ぼす粒子充てん効果には、充てん粒子とマトリックスとの界面強度が大きく影響し、界面強度が低い場合は引張強度が低下するという報告もある。本材料の場合は、界

Fig. 2. Stress-strain curves in uniaxial tension.

Fig. 3. $4K_p$ - N curves for notched specimens under 4-point bending fatigue.

面強度を高めるような処理は行っていないが、粒子が無定形でマトリックスからはくりにくい形状であること、注形時の樹脂の収縮が粒子をしめつける作用（微視的残留応力）をしていること等が界面強度を維持しているものと考えられる。

平滑材の静的引張試験の際、無充てん材では破断荷重のばらつきが大きく、軸ひずみが2%を越える時点で、図示した破断点以下の荷重でしばしば破壊した。しかし、粒子充てん材の破断荷重のばらつきは小さかった。すなわち、epoxy樹脂の欠陥に敏感な特性が、粒子分散により改善されていることが示唆された。

3・2 切欠き材の疲労強度

切欠き材の ΔK_p - N 曲線を Fig. 3 に示す。ここで縦軸は切欠き（切欠き半径 0.1 mm）をき裂 C_0 と見なしたときの応力拡大係数範囲 ΔK_p で、次式で評価した。

$$\Delta K_p = \Delta \sigma_n \sqrt{\pi C_0} \cdot F_1(C_0/b) \quad (1)$$

ただし、 $\Delta \sigma_n$ は公称の曲げ応力範囲、 b は試験片の幅、 $F_1(x)$ は幾何形状補正係数で、純曲げに対する公式を用いた。

試験結果は C_0 によらず、各 V_f に対応してほぼ1本の ΔK_p - N 曲線でまとめられる。アルミナ粒子の V_f とともに疲労強度は高くなっている。

繰返し数 $N=5 \times 10^5$ での ΔK_p を疲労限度と考えると、このレベルもアルミナ V_f とともに高くなっている。

3・3 平滑材の疲労強度

平滑材の引張りにおける S - N 曲線を Fig. 4 に示す。ここで縦軸は公称の引張応力範囲である。

疲労強度は無充てん材で最も高く、 $V_f=13\%$ で疲労強度に低下が認められ、さらに充てん量を増やすと改善される傾向にある。

この結果はき裂材での実験結果とおおいに異なっ

Fig. 4. S - N curves for smooth specimens under tensile fatigue.

ている。すなわち、粒子の充てんが(1)補強効果のみならず、(2)欠陥の導入という効果も有しており、疲労強度は両者のバランスで決まっていることを示唆している。

4 考 察

4・1 破面観察

Fig. 5 は切欠き材の疲労破面に、炭素を蒸着したものの写真である。アルミナ充てん材(b)(c)では切欠き底に、き裂の安定成長を示す領域と、それに続く平坦な不安定破壊領域とが明りょうに識別される。無充てん材(a)では、き裂の安定成長の形跡が見られず、破面は鏡面状である。

Fig. 6 は疲労き裂発生部の SEM 写真である。(a)、(b)は充てん材($V_f=13\%$)の切欠き材と平滑材で破面上にてアルミナ粒子やその抜け跡が観察され、アルミナ粒子/マトリックス界面のはくりによりき裂が形成されたことが理解される。一方、微視写真は略すが、Fig. 5 (b)(c)で平坦に見えた部分は、不安定破壊領域で、き裂は粒子をう回して進む¹⁰⁾。この破壊プロセスは $V_f=37\%$ でも同様であり、Fig. 7 に模式的に示す。(c)、(d)は無充てん材の切欠き材と平滑材の場合である。(c)は切欠き材の切欠き底近傍のごく浅い部分で観察されたもので、破面からはほぼ 45° 傾いた面でのすべり跡が観察される。これは、切欠き底での対数すべり線¹⁴⁾¹⁹⁾に沿うすべりによりき裂が発生した跡と考えられる。(d)

Fig. 5. Macroscopic fatigue fracture surface appearances of notched specimens.

Fig. 6. SEM photographs of fatigue crack initiation sites.

Fig. 7. Crack growth from notch root in particulate-filled composite.

は平滑材の疲労き裂発生部で、自由表面からほぼ 45° 傾斜した面での、いわゆる第1期成長の跡があり、約 $20\mu\text{m}$ 進展した後、引張軸に垂直な破壊になっている。切欠き材、平滑材とも、き裂の安定成長を示す striation や、不連続成長帯は観察されなかった。

このように、本研究で用いた epoxy 樹脂は、橋かけ密度が高く craze が容易に生成されないため、疲労き裂が発生しにくいという特性をもっている。これに対してアルミナ粒子充てん材では、粒子/マトリックス界面のはくりによりき裂が発生し、これらの合体などによりき裂が成長するという過程を径る。

粒子/マトリックス界面が、き裂発生のお供を提供するという事は、粒子充てんが欠陥導入効果という一側面を持つことを意味する。平滑材の場合は、初期欠陥サイズが切欠き材に較べて短いためにこの効果が顕著に現れたのであろう。

4・2 疲労破壊における最終破断条件

疲労破壊において、不安定破壊を開始するときの応力拡大係数 K_f を疲労試験結果から次式により算出し、Fig. 8 にき裂長さに対してプロットした。

$$\text{切欠き材 ; } K_f = \Delta\sigma_n / \sqrt{\pi a} \cdot F_1(a/b) \quad (2)$$

Fig. 8. Stress intensity factor at final fracture vs. crack length.

$$\text{平滑材 ; } K_f = \frac{2}{\pi} \Delta\sigma_n \sqrt{\pi C} \quad (3)$$

式(2)で b は試験幅、 a は安定/不安定遷移時の疲労き裂の長さで、Fig. 5 (b), (c) のように充てん材では明りょうに読める。 F_1 は式(1)に用いたものと同じである。無充てん切欠き材では ΔK_p が K_{Ic} を越える状態であったため、切欠き底にき裂が発生するとともに最終破断に至ったと考えられるので、 K_f としては、疲労限の ΔK_p をその近似値として採用し、破線で示した。

平滑材の場合は、角部から円形き裂が成長する傾向にあった。 C はその安定/不安定遷移時のき裂半径だが、切欠き材の場合ほどに識別が容易ではなく、したがってその K_f はおおよその値である。

これらは近似的に K_{Ic} に等しいと考えられるが、 K_f は V_f ごとにほぼ一定であり、無充てん材、充てん材とも最終破断については K_{Ic} 基準が適用できる

Fig. 9. Surface observation of the specimens tested at fatigue limit stress level (tensile axis is along vertical line).

と考えられる。

K_f のレベルは V_f とともに高くなっており、粒子充てんによる補強効果が明白である。

4・3 平滑材の引張疲労限度

平滑材の引張りにおける疲労限度は、構造設計の基本となる重要なパラメータである。平滑材の疲労限度とはどのような状況であるのかを明らかにするため、Fig. 4 (引張疲労) の RUNOUT 材の最小断面部の表面観察と、その部位の縦断面の観察を光学顕微鏡で行った。

Fig. 9 に表面写真を示す。無充てん材(a)では、試験片の角部に長さ約 $20\mu\text{m}$ の微小き裂が認められ、アルミナ充てん材(b), (c)では、アルミナ粒子が脱落した跡や、粒子/マトリックス界面の部分的なはくりが散在しているのが観察される。

一方、この部位の断面写真を Fig. 10 に示すが、粒子間にわたるき裂やはくりは存在しないことから、前記表面での部分的なはくりは、深さ方向には粒子径を越えていないと推察できる。

結局、この観察から、平滑材の疲労限度は引張応力

σ_w の下で、無充てん材では微小表面き裂が成長しない条件により、粒子充てん材では粒子/マトリックス界面のはくりが成長しない条件により、各々決まると結論づけられる。

そこで、粒子充てん材の疲労限度のモデルとして、Fig. 11 (a)のように、粒子が2次的にピッチ p で配列されて、 y 軸方向に疲労限応力 σ_w をうける場合を

Fig. 11. A model of fatigue limit for particulate-filled composite.

考える。粒径の分布は無視して、平均粒径 D のみで考える。粒子間距離 d は次式で与えられる。

$$d = p - D = \frac{2}{3} D \frac{1 - V_f}{V_f} \quad (4)$$

また、粒子、マトリックスのヤング率およびポアソン比を各々、 E_p , E_m , ν_p , ν_m とする。

いま、表面層の1個の粒子界面 ($y=0$) ではくりが生じたとすると、それは近傍の応力場を緩和し、近辺の粒子は、特に y 軸方向の変形が影響を受け、当初の2次元配列による変形の周期性は局部的に失われる。そのような影響範囲を $|y| \leq np/2$ とすると、結局、 np ごとにき裂(はくり)が周期的に存在する問題と同一になる。

Fig. 10. Cross-section of surface layer of the specimens tested at fatigue limit stress level (tensile axis is along vertical line).

すなわち, n ピッチ間隔で存在する界面き裂の K 値を評価する必要がある. この問題は形状が非常に複雑であるから, 厳密解を得るのは困難であろう. しかし下記のような点を考慮すれば, そのおおよその値として, Fig. 11 (b) に示すピッチ $p' = nd$ で均質半無限体の表面から等間隔で発生したき裂の K 値で代用しうることが理解される.

(1) Fig. 11 (a) に破線で示したように, 粒子が帯状につながっている場合を考えると, 界面に沿うはくり応力は, $\sigma_{yy} = \sigma_w$ 一定である. またこのときの界面き裂の K_I は, 近似的に均質体中のき裂の K_I に等しい.¹⁵⁾¹⁶⁾

(2) ここで粒子帯を x 軸方向に分断すると, σ_{yy} はピッチ p で変動する周期関数となる. ゆえに, 粒子帯の界面にこの周期応力が作用する問題におきかえてよい. 粒子上での σ_{yy} の応力集中係数を α とすると, 周期関数の最大値は $\alpha\sigma_w$ である.

(3) 一般に $E_p/E_m \gg 1$ であり, 粒子帯は y 軸方向の変形にほとんど寄与しないから, 前記周期応力を残したまま, 近似的にこれを除去してもよい. このとき粒子帯は x 軸方向の拘束をマトリックスに課しているが, 一般に K 値に及ぼす 2 軸効果は大きくない. ゆえに, $p' = nd$ で配列されたき裂面上に, 前記周期応力を圧力として作用させる問題に帰着される. したがって, Fig. 11 (a) に示す, 引張応力 σ_w をうける試験片表面から生じた一粒子分の長さの粒子/マトリックス界面のはくりの K 値は, 界面の結合力を σ_{bond} として, 近似的に次式で与えられるであろう.

$$K = (\alpha\sigma_w - \sigma_{\text{bond}}) \sqrt{\pi D} \cdot F_2(S) \quad (5)$$

ここに $F_2(S)$ は形状補正関数で, き裂長 D と半ピッチ $p'/2$ を用いて次式で定義されるパラメータ S の関数として Benthem¹³⁾ により数値解が得られている.

$$S = \frac{D}{D + p'/2} = \frac{3V_f}{n + (3-n)V_f} \quad (6)$$

疲労限度では K は, epoxy の下限界値 K_{epoxy} に等しいと考えてよいから, 疲労限度 σ_w は次式となる.

$$\sigma_w = \frac{1}{\alpha} \left\{ \sigma_{\text{bond}} + \frac{K_{\text{epoxy}}}{\sqrt{\pi D F_2(S)}} \right\} \quad (7)$$

$F_2(S)$ の近似式として $S > 0.2$ で $F_2(S) \doteq \{(1-S)/\pi S\}^{1/2}$ が提案されているので,¹³⁾ これと式(6)を用いると式(7)は次のように簡略化される.

$$\sigma_w = \frac{1}{\alpha} \left\{ \sigma_{\text{bond}} + \frac{K_{\text{epoxy}}}{\sqrt{nD}} \sqrt{\frac{3V_f}{1-V_f}} \right\} \quad (7')$$

α は, 無限体中の 1 個の球形粒子の Goodier¹⁷⁾ その他の解によれば,¹⁸⁾ $\nu_p = \nu_m = 0.3$ の場合, $E_p/E_m = 10, 20, \infty$ について各々 $\alpha \doteq 1.76, 1.84$ および 1.94 であるから, おおよその値として $\alpha \doteq 1.8$ を用いた.

$$\sigma_{\text{bond}} = \sigma_A + \sigma_T \quad (8)$$

σ_A は epoxy とアルミナの接着強度であるが, 界面の

表面処理により左右される. ここでは特殊処理を行っていないので無視した. σ_T は粒子とマトリックスの線膨脹係数の差 $\Delta\alpha$ に起因して, 注形時の温度降下 ΔT により生ずる熱応力で, $E_p/E_m \gg 1$ として三次元球で近似すると次式でおおよそ評価ができる.¹⁰⁾

$$\sigma_T = \frac{2E_m}{1+\nu_m} \Delta\alpha \cdot \Delta T \quad (9)$$

$E_m = 3.3 \text{ GNm}^{-2}$, $\Delta\alpha \doteq 6 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ (以上実測値), $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ より $\sigma_{\text{bond}} \doteq 30.5 \text{ MNm}^{-2}$ である.

K_{epoxy} は, Fig. 9 (a) の疲労限度微小き裂 (半径約 $20\mu\text{m}$ の角円き裂) が, $\sigma_w = 58.6 \text{ MN}^{-2}$ の下で存在しえたことから, $K_{\text{epoxy}} \doteq 0.29 \text{ MNm}^{-3/2}$ とした. D は平均粒径 $15\mu\text{m}$ を採用した.

Fig. 12 に式(6), (7) による計算結果と実験結果を比較した. 計算結果は疲労限度のおおよその傾向を予測しており, ほぼ 1.5 ピッチ分 ($n=3$) が影響範囲と考えた曲線がよく一致している. 式(4)によれば, $D = 15\mu\text{m}$ より, $V_f = 13\%$, 37% に対して各々 $p = 82\mu\text{m}$, $32\mu\text{m}$ となるが, $n=2\sim 3$ は Fig. 9 の表面観察とも対応している.

Fig. 12. Fatigue limit of smooth specimen vs. alumina V_f .

このように, 粒子充てんによる疲労限度の向上は, マトリックスより剛性の高い粒子の集合体が, 微小はくりの開口を抑制し成長を止めている点にある. ゆえに n はその作用力を行行使する粒子群の範囲を表すものと解釈できるであろう.

本節の解析はおおよそのものであるから, 細部では検討を要する点が多々ある. それらは例えば, α の V_f 依存性や, σ_T に及ぼす表面層の効果などである. また式(7)によれば, 小径粒子を充てんする方が有利な結果を与えるが, これはき裂長さ $= D$ を仮定したためである. pinning 機構からは大径粒子の方が有利であるとされているので, 疲労限度と D の関係を結論づける前にもう少し詳細な検討が必要であろう.

4・4 固有欠陥サイズ

固有欠陥サイズ a_0 を次式により試算した.

$$a_0 = (K_{Ic}/\sigma_B)^2/\pi \quad (10)$$

ここで K_{Ic} には, Fig. 8 の K_f で代用した. また, 引張強度 σ_B には Fig. 2 の破断点の値を用いた. a_0 の算出法として, 疲労強度にもとづいて次式を用いる考え方もある.²⁰⁾

$$a_0 = (K_{th}/\sigma_w)^2/\pi \quad (11)$$

ここで K_{th} は, 疲労き裂伝ばの下限界応力拡大係数であるが, 近似的に切欠き材の疲労限度 (Fig. 3) で代用した. また σ_w は平滑材の引張疲労限度 (Fig. 4) である.

Table II に式(10)および式(11)による a_0 および式(4)による粒子間距離 d の計算値を, アルミナ V_f に対して比較した.

Table II. Alumina V_f vs. inherent flaw size and interparticle spacing.

Alumina V_f (%)	0	13	37
Inherent flaw size a_0 by eq. (10)(μm)	31	48	149
Inherent flaw size a_0 by eq. (11)(μm)	39	137	110
Interparticle spacing d (μm)	—	67	17

a_0 はいずれの計算式でも同程度で, epoxy 樹脂の約 $30\mu\text{m}$ が, アルミナ粒子の充てんにより 4~5 倍に増加している. Moloney³⁾ らも同様な試算を行い, epoxy 樹脂の $50\mu\text{m}$ が, アルミナ30% V_f 充てんで $100\sim 400\mu\text{m}$ になったと報告している. また Young²¹⁾ らのシリカ充てん ($V_f=42\%$) epoxy では a_0 は $100\sim 150\mu\text{m}$ で d の約 2 倍としている. しかしデータが少ないので, a_0 と d との関連については現時点では明確なことは言えない.

固有欠陥サイズは平滑材の疲労破壊や遅れ破壊の出発点となるから, 短い方が良いという考えもある. しかし反面, 許容しうる表面キズの最大寸法を表すとも考えうるから, a_0 が大きい方が欠陥敏感性が鈍化し, 工業材料としては使いやすいということが言えるであろう.

5 結 言

epoxy 樹脂の疲労強度に及ぼすアルミナ粒子充てん効果について, 実験, 解析両面から検討した. 得られた結果は, 次のように要約される.

(1) 粒子分散は疲労強度という面からは, 補強効果と欠陥導入効果とをもっており, 平滑材の場合, V_f が小さいときは σ_w は下がり, さらに充てん量を

増やすと疲労強度は改善される.

(2) 鋭い切欠き材の疲労強度は, 粒子充てん量とともに高くなる.

(3) 粒子充てんにより材料の固有欠陥サイズは大きくなり, 欠陥敏感性は鈍下する.

(4) 粒子充てん材の平滑材の疲労限度は, 表面層粒子界面の微小はくりが成長しない条件で決まることを観察した. これにもとづき疲労限度のモデルを提案し, σ_w - V_f 関係を推定したところ, そのおおよその傾向を説明することができた.

(昭和59年11月13日 第17回疲労シンポジウムにて一部講演)

参 考 文 献

- 1) S.J. Feltham, B. Yates and R.J. Martin, J. Mat. Sci., **17**, 2309 (1982).
- 2) F.F. Lange and K.C. Radford, J. Mat. Sci., **6**, 1197 (1971).
- 3) A.C. Moloney, H.H. Kausch and H.R. Stieger, J. Mat. Sci., **18**, 208 (1983).
- 4) J. Spanoudakis and R.J. Young, J. Mat. Sci., **19**, 473 (1984).
- 5) J. Spanoudakis and R.J. Young, J. Mat. Sci., **19**, 487 (1984).
- 6) D.J. Green, P.S. Nicholson and J.D. Embury, J. Mat. Sci., **14**, 1657 (1979).
- 7) L.E. Nielsen, J. Comp. Mat., **9**, 149 (1975).
- 8) R. W. Hertzberg and J. A. Manson, "Fatigue of Engineering Plastics", Chap. 5 (1980) Academic Press, New York.
- 9) A.G. Evans, Phil. Mag., **26**, 1327 (1972).
- 10) 山崎利春, 千葉和夫, 材料, **33**, 198 (1984).
- 11) 山崎利春, 千葉和夫, 材料, **33**, 1304 (1984).
- 12) 山崎利春, 大沼秀夫, 材料, **33**, 980 (1984).
- 13) H. Tada, P.C. Paris and G.R. Irwin, "The Stress Analysis of Cracks Handbook" (1973) Del Research Corp..
- 14) 横堀武夫, 成沢郁夫, "高分子材料強度学", p. 177 (1982) オーム社.
- 15) A.F. Mak, L.M. Keer, S.H. Chen and J.L. Lewis, J. Appl. Mech., **42**, 347 (1980).
- 16) 山崎利春, 材料, **34**, 1261 (1985).
- 17) J.N. Goodier, Trans. ASME, **55**, 39 (1933).
- 18) 遠藤修司, 河田幸三, 日本機械学会論文集, **43**, 1620 (1979).
- 19) 北川正義, 日本機械学会論文集, A-50, 1539 (1984).
- 20) K. Tanaka, Int. J. of Fracture, **22**, R39 (1983).
- 21) R.J. Young and P.W.R. Beaumont, J. Mat. Sci., **10**, 1343 (1975).