106 ゴム変成エポキシ接着剤の繰返し荷重下における損傷挙動

The damage evolution of rubber-modified epoxy adhesives under cyclic loading

○ 谷口 誠 (大教大)

正 今中 誠 (大教大)

木本正樹 (阪府産技総研)

Makoto TANIGUCHI, Osaka University of Education

Makoto IMANAKA, Osaka University of Education

Masaki KIMOTO, Tech. Res. Inst. of Osaka Pref.

Key Words: Rubber-modified adhesive, Fatigue, Damage.

1. 緒言

最近、静的強度をさほど低下させることなく高い靱性が得られることからゴム変成されたエポキシ系樹脂が構造用接着剤として注目されている。これはエポキシ樹脂に極めて粒径の細かいゴム粒子が分散されたもので、荷重を加えた時に、き裂周囲のゴム粒子の剥離やボイド化により損傷領域が形成され、このため破壊靱性値やき裂進展抵抗の大幅な向上をもたらすことが知られている。そのため、破壊靱性値に関して多くの研究が行われている^{1)~3)}。しかし、損傷域の形成は実断面積を減少させ、剛性率や静的強度等の材料力学的な特性は低下すると考えられているが、ゴム変成エポキシ接着剤についてこのような損傷挙動についての研究は少数である^{4)~5)}。本研究では、ゴム変成エポキシ系接着剤により接着された突合せ継手とダンベル試験片の、繰返し荷重下における接着層のひずみの変化を測定し疲労過程における損傷挙動について検討を行った。

2. 試験片および実験方法

実験に使用したダンベル試験片および突合せ継手の形状・寸法を Fig.1(a), (b) に示す。接着剤としては、平均粒径約 $0.070\mu\text{m}$ の架橋ゴム(JSR 製 XER91)をビスフェノール型エポキシ(旭電化工業(株)EP-4100E)に14phr 含有させた樹脂をピペリジンで硬化させたものを使用した。突合せ継手およびダンベル試験片ともに硬化条件は 120°C 、20 時間とした。また、すべての疲労試験は湿度 $55\pm 5\%$ 、温度 $23\pm 2^\circ\text{C}$ に調整された室内で行ない、応力比 $R=0.1$ の片振り引張荷重下で行った。なおダンベル試験片はすべて繰返し周波数 $f=3\text{Hz}$ の条件で、突合せ継手は繰返し周波数 $f=3\text{Hz}$ と $f=30\text{Hz}$ の2つの条件で試験を行なった。疲労過程における突合せ継手の接着層におけるひずみは、Fig.1 のように接着層をまたいで貼られたひずみゲージにより測定した。また、ダンベル試験片のひずみは標点間距離を 11mm に設定したのび計 (INSTRON 製: 2620-601)により計測した。

Fig.1 shape and sizes of the adhesively

bonded butt joint and dumbbell specimen.

Fig.2 S-N plot of the butt joint and dumbbell specimens.

(loading frequency $f=3\text{Hz}$)

Fig.3 Effect of loading frequency on the fatigue strength of the butt joints bonded by XER91

3. 実験結果及び考察

Fig.2 は突合せ継手およびダンベル試験片の S-N 関係を示したものである。縦軸は応力範囲、横軸は破断繰返し数を示す。同図より低寿命側では突合せ継手の方がダンベル試験片よりも高い疲労強度を示しているが、寿命の増加と共に突合せ継手とダンベル試験片の疲労強度は漸近している。

Fig.3 は繰返し周波数の異なる2種類の突合せ継手の S-N 関係を示したものである。縦軸は応力範囲、横軸は破断繰返し数を示す。同図より 3Hz と 30Hz の突合せ継手を比較すると特に繰返し回数 10^5 回以上の高寿命側

で30Hzの突合せ継手の疲労強度の方がやや高い事が認められる。

Fig.4(a)および Fig.4(b)は繰返し周波数 3Hz の突合せ継手の疲労過程における応力-ひずみループの一例である。Fig.4(a)は疲労寿命 $N_f=1.19 \times 10^4$ の突合せ継手の応力-ひずみループであり、Fig.4(b)は疲労寿命 $N_f=6.56 \times 10^5$ の突合せ継手の応力-ひずみループである。同図より、 $N_f=1.19 \times 10^4$ の Fig.4(a)では $N/N_f=0.95$ 程度で顕著なヒステリシスが認められるが、 $N_f=6.56 \times 10^5$ の Fig.4(b)では破断直前である $N/N_f=0.998$ 程度においてもヒステリシスが生じていない。このことから、ヒステリシスの生成に破断寿命に関連するものと考えられる。また、Fig.5 は繰返し周波数 30Hz の突合せ継手の疲労過程における応力-ひずみループの一例である。この試験片の破断寿命は $N_f=9.34 \times 10^5$ と比較的高く、破断寿命が比較的近い $f=3\text{Hz}$ の Fig.4(b)と比較すると、 $f=30\text{Hz}$ の継手の方が早期からヒステリシスがあらわれ、その幅も大きいことが認められる。

なお、ダンベル試験片では、破断寿命によらず、破断直前まで応力-ひずみループは直線性を示し、ほとんど変化を示さなかった。

(a) $\Delta\sigma=39.64\text{MPa}$, ($N_f=1.19 \times 10^4$)

(b) $\Delta\sigma=24.0\text{MPa}$, ($N_f=6.56 \times 10^5$)

Fig.4 Stress-strain loops of the butt joints at $f=3\text{Hz}$.

Fig.5 Stress-strain loops of the butt joints at $f=30\text{Hz}$. ($\Delta\sigma=34.0\text{MPa}$, $N_f=9.35 \times 10^5$)

次に、疲労過程における接着部の損傷評価を行うため、(1)式で定義される損傷変数 D の変化を調べた。

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

Fig.6 Variation of damage variable of the butt joints with life ratio.

Fig.7 Variation of damage variable of the butt joints with life ratio.

(loading frequency $f=30\text{Hz}$)

(1)式において、 E_0 は初期の弾性率、 E は疲労過程での接着層の弾性率であり、損傷変数 D の増加は実断面積の減少に対応している⁶⁾。

Fig.6 および Fig.7 は繰返し周波数 3Hz および 30Hz の突合せ継手の疲労過程における損傷変数 D の変化を寿命比 N/N_f に対して示したものである。 $f=3\text{Hz}$ と $f=30\text{Hz}$ の突合せ継手の損傷変数 D の変化挙動を比較すると、 $N_f < 10^4$ 程度の場合、 $f=3\text{Hz}$ と $f=30\text{Hz}$ の継手の損傷発展挙動は類似しているが、 $N_f > 10^5$ の場合、 $f=3\text{Hz}$ の継手では初期に損傷の増加が認められるものの、中期以降の損傷の発展は破断直前まできわめて緩やかに増加している。一方、 $f=30\text{Hz}$ の継手では中期以降も $f=3\text{Hz}$ に比べると損傷の発展は顕著である。これらの結果および Fig.4 Fig.5 に示したヒステリシス生成により、本ゴム変成接着剤では、周波数の増加に伴い、疲労過程において接着層の粘弾性的性質が変化していることが推察される。