411

ゴム変成接着剤の多軸応力下における降伏挙動

大阪教育大学 今中 載 日本車輛(株)開発本部 〇鈴木靖昭

1. 緒言

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ゴム変性エポキシ接着剤は、負荷時にき裂周辺のゴム粒子のボイド化により損傷領域が形成されこれにより、破壊じん性値が大幅に向上するため、構造用として最近、注目を集めている。このような接着剤の特性のため、応力解析に際しては、接着層のボイド化を考慮した解析が必要となる。最近、ゴム変性エポキシ樹脂の応力解析に延性破壊時のボイド形成をモデル化したGurson式の適用が検討されはじめている^{1,2)}。筆者らは前報において、ゴム変性エポキシ系接着剤によって接着されたスカーフならびに突合せ接着継手を用いて広範囲に接着層の応力多軸状態を変化させ、降伏応力を実験的に求めている³⁾。ここでは、実験的に求めた降伏応力と接着層にGursonモデルを適用して有限要素法により求めた降伏応力を比較し、Gursonモデルの適用性について検討した。

2. 接着剤および実験方法

前報において、平均粒径70mmのゴム粒子を17wt%含む架 橋ゴム変性エポキシ樹脂(日本合成ゴム(株)製、XER91) をピペリジンで硬化させた接着剤により、一般構造用圧延 鋼材(JIS SS400)と機械構造用炭素鋼(JIS S45C)を被 着体とするスカーフ接着継手ならびに薄肉円筒突合せ継手 を作成し、それぞれ、引張ならびにねじり試験に供した。 実験方法の詳細は前報³¹に示している。

3. 接着層の多軸応力状態

スカーフ継手の荷重状態をFig.1のように近似すると、 接着層には式(1)に示すような垂直な引張応力と平行なせん 断応力の組合せ応力が作用し、その比率はスカーフ角を変 えることにより広範囲に変化させることができる。

$\sigma_n = \sigma \sin^2 \theta$, $\tau_{sn} = \sigma \sin \theta \cos \theta$ (1)

また、ねじり荷重が作用する薄肉円筒突合せ継手には純 せん断応力が作用する。Fig 2はスカーフおよび突合せ継手 の多軸応力状態を示すため各継手の接着層の主応力比を示 している。図より、スカーフ角θが大きくなるほど応力多 軸性が強まり、スカーフ角θ=60°,75°,90°では3軸引 張応力が働くことが認められる。

3. 応力解析および考察

①Gurson モデル:ゴム粒子を初期ボイドと仮定して接着 層の降伏条件を(1)式に示す修正Gurson式により近似した。

$$F = \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f \cosh\left(\frac{q_2 \sigma_H}{2\sigma_y}\right) - \left\{1 - (q_1 f)^2\right\} = 0 \qquad (1)$$

ただし、Fは降伏関数、σ は母材樹脂の降伏時のミーゼス の相当応力、q₁ と q₂ はパラメータ,fはボイドの体積分率。 一般に、ボイド率の増加はボイドの成長、母材中からの



Fig. 1 Load conditions and coordinates system of scarf joint



Fig. 2 Stress triaxiality in adhesive layer



Fig.3 Stress-strain curves of butt joint and dumbel specimens

ボイドの発生や合体によって起こる。ここでは、母材中か らのボイドの発生や合体を無視した。したがって、ボイド 率の増加は次式のようになる。ただし、 ε μ^Pは塑性静水圧 ひずみ。

$$\dot{f} = (1 - f) \dot{\varepsilon}_{kk}^{p} \tag{2}$$

②パラメータの決定:本実験で使用した接着材には17%(V ol)のゴム粒子を含んでいる。そこで、初期のボイド率f, を0.17とした。また、母材のエポキシ樹脂はミーゼスの降 伏条件に従う弾塑性体と仮定した。なお、母材の材料常数 はダンベルの単軸引張試験より求めた。一般にq₂は1.0と 仮定されている。したがって、未知のパラメータはq₁の みである。そこで、q1を実験的に決定するため、θ=90°



Fig. 4 Stress-strain curves of butt and scarf joints

の突合せ継手と接着剤のダンベル試験片の引張試験の応力 -ひずみ関係と有限要素法により求めた応力-ひずみ関係 を比較することにより決定した。Fig.3は突合せ継手ならび にダンベルの応力--ひずみ関係とq_i=1.9と仮定した場合 のそれぞれの試験片の有限要素法による推定値を示してい る。図より、推定値と実験値がよく一致しており、以降の 解析においてq1=1.9を採用する。

③測定された応力-ひずみ曲線と有限要素法による推定値の比較:Fig.4(a),(b),(c),(d)に、スカーフ角 θ=90°, 75°,15°,のスカーフ継手に引張荷重が負荷された場合ならびに薄肉円筒突合せ継手にねじり荷重が負荷された場合の接着層中央部の主ひずみと主応力の関係を示している。なお、図中の実線は測定値、破線は実験条件に対応するボイド率V=17%の場合以外にV=10,5,0%の場合についてGursonモデルに基づく解析値を示している。なお、V=0%はミーゼスの降伏条件にもとづく解析値に対応している。

図より接着層において垂直応力が支配的で多軸性が高い 場合 θ =90° と75°のスカーフ継手では、実験値とV=17%の 解析値が良く一致している。また、ボイド率の低下に伴っ て降伏応力が大きく増加している。特にV=0%の場合、測定 された降伏応力の2倍以上の応力でも降伏は認められない。 一方、せん断応力が支配的で多軸性の低い θ =15°のスカ ーフ継手ならびに薄肉円筒突合せ継手では、V=17%の解析値 の降伏応力が測定値のそれをやや上回る。また、ボイド率 の低下に伴う降伏応力の増加率も θ =90° と75°のスカー フ継手と比較して低下している。さらに、降伏後の応カー ひずみ曲線の勾配も実験値と比較して高いことが認められ る。

Fig. 5位Fig. 4に示した応力-ひずみ曲線より求めた降伏応力とスカーフ角の関係を示している。なお、ねじり試験の結果は接着層において純せん断応力状態がえられることから、スカーフ角 $\theta = 0^{\circ}$ の値としてプロットした。図より、実験値は多軸性の低い $0^{\circ} \le \theta \le 45^{\circ}$ の範囲では降伏応力はほぼ一定値を示し、接着層に3軸引張荷重が作用する $60^{\circ} \le \theta \le 90^{\circ}$ の範囲ではスカーフ角の増加に伴い降伏応力が低下する傾向が認められる。解析値においても $0^{\circ} \le \theta \le 90^{\circ}$ の範囲ではミーゼスの降伏条件に従うV=0%の場合を除きスカーフ角の増加に伴って降伏応力が低下し、低下の割合はボイド率の増加に伴って大きくなることが認められる。また、 $0^{\circ} \le \theta \le 45^{\circ}$ の範囲では実験値がV=10%の解析値に近いが、全体に、V=17%の推定値は実験値とよく一致していることが認められる。



Fig.5 Effect of void fraction of yield stress 参考文献(略)