C/C複合材料ならびにチラノヘックスの剪断強度の負荷速度依存性

田邊靖博*, 石黒陽介, 赤津 隆, 安田榮一

(平成14年1月17日受理, 平成14年3月28日採択)

Strain-Rate Dependence of the Shear Strength of C/C Composites and Tyrannohex

Yasuhiro Tanabe*, Yohsuke Ishiguro, Takashi Akatsu and Eiichi Yasuda

Inter-laminar shear strengths (ILSSs) of two types of C/C composites and two types of Tyrannohex were measured as a function of strain rate. Charpy impact test machine can be used to measure ILSS for dynamic tensile loading in double notched configuration. ILSS of the unidirectional C/C composite was nearly constant at the strain rates ranging from 1.6×10^{-3} /s to 617/s, while that of cross-ply C/C composite increased with the rate. On the contrary, ILSSs of the both types of Tyrannohex decreased at the higher strain rates. For the unidirectional C/C composite, the crack propagation velocity could be measured using crack gages. The velocity of a crack which appeared between the double notches increased with the strain rate; 480m/s at 1.6×10^{-3} /s and 1,400m/s at 1.6×10^{-1} /s. The propagation velocity of the crack at higher strain rates above 1.6×10^{-1} /s could not be measured, because the crack gages failed to respond to the crack propagation in velocity.

KEYWORDS : ILSS, Strain-rate dependence, C/C Composite, Tyrannohex

1. はじめに

炭素繊維強化炭素複合材料 (C/C複合材料) あるいは SiC/SiC複合材料などの長繊維強化セラミック基複合材料は、次世代エネルギー創製あるいは次世代宇宙航空分野での構造関連部材としての利用展開に向けた研究が進められている。このような環境下では、準静的な負荷環境ばかりではなく衝撃的な負荷がかかることが予想される。しかし、セラミック基複合材料の強度の歪速度依存性に関する研究は非常に少ない^{1), 2)}。

繊維強化複合材料は、繊維配向軸にかかわる強化特性にばかり注目が集まり、層間剪断強度 (ILSS) のようにマトリックスあるいは界面の特性が重要な力学特性に関する研究は限られている。C/C複合材料についても準静的な環境下でのILSSについては、研究報告がなされている³⁾が、衝撃的な負荷環境下でのILSSに関する研究は皆無といえる。

そこで、本研究では、一般の材料試験機ならびにシャルピー衝撃試験機を用いて、広範な歪速度域にわたるC/C複合材料ならびにSiC/SiC複合材料のILSSの歪速度依存性を測定することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試料

C/C複合材料として、プリフォームドヤーン法で作製した株式会社アクロス製一方向強化材料 (UD-C/Cと略記) ならびに $0^\circ/90^\circ$ 直交積層強化材料 (CP-C/Cと略記) を用いた。SiC系複合材料として宇部興産株式会社製一方向強化 (UD-Tyranoと略記) ならびに直交積層強化チラノヘックス (CP-Tyranoと略記) を用いた。

引張り目違い切り欠き法 (DNT) 用試験片の形状ならびに寸法は、基本的にはASTM C1292-95aを参考にして決定した。試験片は、15mm幅、6mm厚、30mm長さで、0.5mm厚で3.1mm深さの目違い切り欠きを15mm×30mmの両面に各1本ずつ、切り欠き間隔6mmで入れた⁴⁾。

2.2 剪断試験

標準的なインストロン型材料試験機 (AG-100kNG, 島津製作所) ならびに計装化シャルピー衝撃試験機 (Resil25, CEAST Inc.) を用いて、DNTにより剪断試験を行った。Fig.1にシャルピー衝撃試験機用に開発した引張りDNT用治具とストライカーを示す。図中の治具の (a), (b) をストライカーの (a), (b) がたたく機構になっている。剪断強度は、最大荷重および公称剪断破壊面積 ($6 \times 15 \text{ mm}^2$) から算出した。

* Corresponding Author, E-mail: y.tanabe@rlem.titech.ac.jp
東京工業大学応用セラミックス研究所: 〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259
Materials and Structures Laboratory, Tokyo Institute of Technology: 4259 Nagatsuta, Midori, Yokohama 226-8503, Japan

Fig.1 Specimen holding jig and striker for tensile loading on a double notched specimen. The portions of (a) and (b) on the striker hit the portions of (a) and (b) on the jig, respectively.

本報告では、シャルピー衝撃試験機を用いた場合は試料を打撃する直前のストライカーの速度を、材料試験機を用いた場合はクロスヘッド速度を、切り欠き間隔で割った値を歪速度とした。

2.3 亀裂進展速度の計測

切り欠き間にクラックゲージ (KV-5C, 共和電業株) を貼り自作の高速アンプを用いて、試験中の亀裂進展速度の計測を行った。

3. 結果と考察

Fig.2に歪速度 $617/s$ ならびに $5.5 \times 10^{-4}/s$ において得られた一方向強化C/C複合材料の荷重と時間との関係を示す。初期段階を除くと直線的に荷重が負荷されている様子がわかる。今回用いた治具とストライカーを用いて一定の負荷速度でDNT試験を行うことができることがわかった。

Fig.3に各試料の歪速度とILSSとの関係を示す。CP-C/Cは、歪速度が大きくなるとILSSが増加する傾向が認められたが、UD-C/Cのそれは一定であった。歪速度が大きな場合、UD-Tyrano, CP-Tyrano, とともにILSSは減少した。

亀裂の進展速度は、初期には遅く、加速され、最終段階で減速することがわかった。クラックゲージを用いて得られたUD-C/Cの亀裂進展の一例を歪速度 $1.6 \times 10^{-1}/s$ の場合について荷重変化とともにFig.4に示す。なお、亀裂の進展開始を時間ゼロとした相対時間で示してある。クラックゲージの進展量と時間との関係から計測される亀裂進展の平均最大速度 (亀裂長さとの関係の傾きに相当) は、歪速度とともに上昇した。歪速度 $1.6 \times 10^{-5}/s$ では $480m/s$ 程度であったが、 $1.6 \times 10^{-1}/s$ では $1,400m/s$ にも達していることがわかった。しかし、これ以上の歪速度の試験ではクラックゲージの出力が

Fig.2 Load-Time curves for the unidirectional C/C composite (UD-C/C) in static and dynamic loadings.

Fig.3 ILSS of C/C composites and Tyrannohex as a function of strain rate.

Fig.4 Crack length and load of a unidirectional C/C composite (UD-C/C) as a function of time at a strain rate of $1.6 \times 10^{-1}/s$.

途中で追従できなくなり亀裂の進展速度を計測することができなかった。

歪速度が増大するにしたがい、ILSSが大きくなったCP-C/Cの破面を走査型電子顕微鏡で観察したところ、歪速度が大きい条件で破壊した試料のほうが破面の凹凸が大きかった。歪速度の大きな領域でILSSが小さくなったUD-TyranoおよびCP-Tyranoは、歪速度が大きい条件では凹凸が観察されなくなる傾向が認められた。

SiC/SiC複合材料の繊維配向方向の引張り強度（応力－歪曲線における最大応力値）が、歪速度 10^{-4} ～200/s範囲において歪速度の増加とともに増加することが報告されている¹⁾。さらに、表面処理剤によって、この増加の割合に違いが出ることが報告¹⁾されており、興味深い。圧縮ではあるが、 $0^{\circ}/+35^{\circ}/-35^{\circ}$ に編まれた織物を積層した二次元C/C複合材料においても同様に、歪速度を大きくすると強度（応力－歪曲線における最大応力値）が増加し、最大応力値を示す歪が高歪側にずれることが、報告されている²⁾。これらの報告から、繊維軸方向強度において繊維の引き抜けあるいは剥離、つまり界面が高歪速度域において荷重の最大値を決定する重要な役割を演じていることが示唆される。ILSSでは、亀裂の進展方向が繊維配向方向と平行であり報告にある亀裂の進展方向とは異なる。

る。しかし、歪速度の増加とともに強度が増加したCP-C/Cにおいて破面の凹凸が増加したこと、UD-Tyrano、CP-Tyranoともに高歪速度では比較的凹凸が観察されなくなることを考えあわせると、界面あるいは積層間での亀裂の生成（剥離）挙動が、ILSSの歪速度依存性に何らかの影響を及ぼしていることが示唆される。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（No. 10450249）によった。宇部興産(株)からチラノヘックスの提供を受けました。感謝いたします。

文 献

- 1) M. Futakawa, Y. Tanabe, T. Wakui, H. Kogawa, R. Hino and M. Eto, *Int. J. Impact Engng.* **25** (2001) 29-40.
- 2) G. Subhash, S. Sulibhavi and M. A. Zikry, *Composite A* **32** (2001) 1583-1591.
- 3) Y. Ishiguro, T. Akatsu, Y. Tanabe and E. Yasuda, CSJ Series 3, TTP, Switzerland (1999) pp.171-174.
- 4) Y. Ishiguro, T. Akatsu, Y. Tanabe, E. Yasuda, K. Maruyama and S. Yamada, *Materials Science and Engineering Serving Society*, Ed., S. Somya, R. P. H. Chang, M. Doyama, R. Roy, Elsevier (1998) pp.285-288.