CFRP の衝撃特性に及ぼすプレストレス効果

平野 充^{*1} 松尾 敦^{*2} 広中直人^{*1} 西 義武

東海大学大学院工学研究科金属材料工学専攻

J. Japan Inst. Metals, Vol. 72, No. 6 (2008), pp. 477-482
© 2008 The Japan Institute of Metals

Effects of Pre-Stressing on Impact Value of Carbon Fiber Reinforced Polymer

Mitsuru Hirano^{*1}, Atsushi Matsuo^{*2}, Naoto Hironaka^{*1} and Yoshitake Nishi

Graduate School of Metallurgical Engineering, Tokai University, Hiratsuka 259-1292

In order to strengthen carbon fiber reinforced polymer (CFRP), effects of a pre-stressing on Charpy impact value have been investigated. The pre-stressing remarkably enhances the impact value. It probably depends on the residual compressive stress induced by the pre-stressing in CFRP.

(Received January 18, 2008; Accepted March 12, 2008)

Keywords: pre-stress, carbon fiber reinforced polymer, carbon fiber, Charpy impact value

1. 緒 言

繊維の束を樹脂で覆い、複合化させた繊維強化複合高分子材料は高比強度であるため、構造材料として多様な分野に利用されている。その中でも炭素繊維強化型高分子(CFRP)は特に高強度であり、航空機の軽量化を可能にしている^{1,2)}。CFRPは、繊維の束を織物にしてから樹脂を含浸し、成型している場合が多く、現実の航空機に使われる量が、さらに多くなって来ているため、信頼性の向上の観点から強度の増加が期待されている。しかしながら、最近ではこれらの向上を目指す処理は見られず、低エネルギー電子線照射処理の一連の研究³⁻⁵⁾しか見当たらない。この表面改質処理は、表面から200 μm 以下の深さまでしか効果が発現しないが、表面から破壊が始まる疲労や衝撃破壊では有効である。しかしながら、数cm以上の厚さの内部までCFRPの強度を増加するためには工夫が必要となる。そこで、試料厚さに関係なく、効果が発揮できる強化方法が期待されている。

そこで、鉄筋コンクリートを補強するため、予め引張応力を鉄鋼線に負荷した状態でコンクリートを流し込み、凝固後、除荷し、圧縮残留応力をコンクリートに負荷し、強度を向上させるプレストレスコンクリート(PC)工法の技術に注目した⁶⁻⁹⁾。すなわち、CFRP製造時に、炭素繊維にプレストレス(予荷重)を加え、樹脂を流し込み、凝固させた後に除荷することにより、圧縮残留応力を樹脂に負荷する手法である。

この手法でプレストレス強化処理を施したCFRPは、すでに縦弾性係数、引張強度、引張強度時の歪の向上が確認さ

れ、プレストレス処理によるCFRPの強化に成功している¹⁰⁾。そこで、本研究では靱性を判断するのによく用いられているシャルピー衝撃試験を行い、CFRPのシャルピー衝撃値へのプレストレス効果を検討することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試験片作製

炭素繊維束に予加重を与え、熱硬化性樹脂を用いてCFRPを作製した。使用した繊維はM30SC-18000(Toray Ltd, TOKYO JAPAN)、樹脂にはエポキシ樹脂(NISSIN RESIN Co., Ltd. TOKYO JAPAN)を用いた。Fig. 1に

Fig. 1 Schematic drawing of sample preparation of CFRP pre-stressed.

^{*1} 東海大学大学院生(Graduate Student, Tokai University)

^{*2} 東海大学学生(Undergraduate Student, Tokai University)

CFRP 作製におけるプレストレス導入方法を示す。炭素繊維束にプレストレスを導入する前に、前処理としてエポキシ樹脂を炭素繊維束に含浸させた。この処理は、繊維と樹脂の密着度を向上させるために行った。前処理を施した炭素繊維束をアルミニウム製の型に取り付けてプレストレスを導入した。なお、炭素繊維束はアルミニウム製の試料作製部分の中央に配向するように配置した。本研究室では炭素繊維束にプレストレスを導入するために Fig. 2 に示したジャッキアップ装置を用いた。この装置の片側の稼動端により末端を補強した炭素繊維束に張力を与えた。この値はジャッキアップ装置にあるロードセル (DIGI-TAL FORCE GAUGE; MODEL-DORS50TR (0-490Nf) IMADA) により確認した。以上のような方法で炭素繊維束にプレストレスを導入した。プレストレスを導入した炭素繊維束を固定した型にエポキシ樹脂を流し込んで常温硬化させた。なお、試験片を型から取り外す時、型から試験片を容易に取り外すために離型剤 (PVA; SHOWA HIGHPOLYMER CO., LTD) をあらかじめ塗付している。樹脂が完全に硬化した後、炭素繊維束に導入したプレストレスを徐荷、型から取り外し試験片とした。

2.2 シャルピー衝撃試験

本研究グループでは、プレストレス効果を確認するためにこれまでに強度評価方法として引張試験を行い、引張強度の向上を確認している¹⁰⁾。そこで、さらにプレストレス CFRP の機械的性質を知るため、プレストレス値を変化させた試験のシャルピー衝撃試験を行った。試験片作製は JIS 規格の K7077 に準拠した。試験片形状は長さ L : 80 mm, 幅 b : 10 mm, 厚さ t : 2 mm である。

本研究で使用した試験機は富士試験製作所製シャルピー衝撃試験機 FC3002 を用い、試験条件は室温、大気圧下、ハンマの振り上げ角は 141.5° で行った。

$$E = WR[(\cos \beta - \cos \alpha) - (\cos \alpha' - \cos \alpha)(\alpha + \beta) / (\alpha + \alpha')] \quad (1)$$

式(1)より吸収エネルギーを算出した。ここで E は吸収エネルギー(J)で、 W はハンマの質量(N), R はハンマの回転中心から重心までの距離(m), β はハンマの振り上がり角, α はハンマの持ち上げ角度, α' は空振り時の振り上がり角度を表している。この値を元に、式(2)にてシャルピー衝撃値を算出した。

$$a_{uc} = [E / (b \times t)] \times 10^3 \quad (2)$$

a_{uc} はシャルピー衝撃値(kJm^{-2})であり、 b は試料中央部の幅(mm), t は試料の厚さ(mm)である。

3. 結 果

3.1 シャルピー衝撃値に及ぼすプレストレス処理の影響

式(1), (2)より、シャルピー衝撃値を算出し、グラフ化した。Fig. 3 に炭素繊維にプレストレスを負荷した値と、それらの CFRP におけるシャルピー衝撃値の変化を示す。この図より、プレストレス値を増加させるとシャルピー衝撃値が向上する場合が多いことを確認した。プレストレス値が 4.9 MPa の時に、最大の衝撃値を示し、プレストレス値が 7.4 MPa の時に、実験で得られた最小破壊確率値における衝撃値は最大を示した。9.8 MPa のプレストレスを炭素繊維に与えると、最大破壊確率における衝撃値は低下したが、最小破壊確率における衝撃値は若干低下する程度であった。一方、プレストレス値を増加させるにつれ、実験誤差が小さくなる傾向が見られた。

Fig. 3 Influences of pre-stressing on Charpy impact value of CFRP.

Fig. 2 Schematic drawing of jack-up device for pre-stressing process.

Fig. 4 Relationships between Charpy impact value and fracture probability of CFRP pre-stressed at each stress.

単純な破壊が生じる衝撃試験について、実験結果の整理のためにメディアン・ランク法を用い、破壊確率 P_f を式(3)より算出した。

$$P_f = (I - 0.3) / (n + 0.4) \quad (3)$$

P_f は破壊確率であり、 I が破壊順序数、 n が各条件における試料数である。Fig. 4 に炭素繊維に与えるプレストレスを変化させたときの各破壊確率におけるシャルピー衝撃値の値を示す。この図は式(1)(2)よりシャルピー衝撃値を求め、式(3)より破壊確率を算出し、グラフ化した。この図より、すべての破壊確率においてシャルピー衝撃値がプレストレス処理により向上することを確認した。また、破壊確率 0.5 に注目すると、無荷重では 18 kJm^{-2} であるのに、4.9 MPa のプレストレス処理をした試料では 42 kJm^{-2} になり、7.4 MPa のプレストレスを与えると 49 kJm^{-2} にまで向上し、2.7 倍も向上することを確認した。

3.2 プレストレス処理の破壊形態への影響

Fig. 5 に未処理試料とプレストレス導入試料のシャルピー衝撃試験による試料破断後の試料を示す。Fig. 5 に示すよう

Fig. 5 Photograph of fractured CFRP. (a) unloaded sample, (b) Pre-stressed sample.

に未処理試料ではハンマが衝突する側とその反対側で特に変化は見られないが、プレストレス導入試料では、ハンマが衝突する反対側の面で、全ての試料において母材と炭素繊維の間に剥離が見られた。これは、プレストレスにより結合が弱い繊維-高分子間の界面方向に破壊が進行したことにより発生した現象である。

4. 考 察

4.1 プレストレス処理による実験誤差の低下

本研究では、材料の信頼性の評価に広く用いられ、破壊強度のような単純な機構で成立する式(4)に示すワイブル関数を用いて衝撃値(a_{uc})解析を行った¹¹⁾。

$$P_f = 1 - \exp[-\{a_{uc}/a_0\}^n] \quad (4)$$

式中の a_{uc} は衝撃値、 a_0 は $P_f = 0.632$ のときの衝撃値であり、 n はワイブル係数である。直線式に変換し、その傾き n を求めた。

$$\ln[-\ln(1-P_f)] = n \log a_{uc} - n \log a_0 \quad (5)$$

なお、 $(\ln[-\ln(1-P_f)])$ が零である時、 P_f が 0.632 であり、その時の a_{uc} の値が a_0 である。

Fig. 6 に各プレストレス値における CFRP のワイブル分布を示す。図よりプレストレス処理によりシャルピー衝撃値が増大し、同時に、シャルピー衝撃値の試料による測定結果の差が小さくなることを確認した。

さらに、未処理の試料のワイブル分布は直線関係より大きく異なるプロットが多く見られ、試料による測定結果の差が非常に大きいことが分かる。参考のために、ワイブル係数を求めると、1.54 であった。一方、9.8 MPa のプレストレスを加えた試料のワイブル分布は直線関係に良く対応したプロットが多く見られ、この関係の相関係数が大きいだけでなく、この傾きから求めたワイブル係数は 6.41 と大きく向上し、試料による測定結果の差が非常に小さいことが分かる。

Fig. 6 Weibull plots of pre-stressed CFRP.

以上の一連の結果から、プレストレス処理した CFRP 試料の信頼性の高さを確認した。

この理由として、プレストレス処理は炭素繊維を引張り、高分子材料の平均分子間距離を縮め、圧縮残留応力を発生させることを、プレストレス処理による CFRP の硬さ増大により確認している¹⁰⁾。高分子中の圧縮残留応力により、炭素繊維の断面方向にも圧縮応力がかかり、炭素繊維表面における破壊発生が抑制される可能性もある。これらの考察から、プレストレス処理を加えることにより、衝撃値の向上が説明できる。一方、プレストレス値増加に伴い、繊維束中のプレストレスが効果的に作用している炭素繊維の割合が高まり、繊維およびマトリックスである高分子の配向性が高まることも、衝撃値向上に僅かに寄与する可能性もある。

4.2 SEM による破面観察

衝撃力(エネルギー)、速度や温度を一定にした条件で、衝撃による破壊の進行方向は主に、衝撃力の方向で決まり、大きなクラックを伴う破壊面組織が得られる。しかし、試料の組織に異方性があると、クラックの進行方向は単純ではなく、方位の異なる多くのクラックを伴う破壊面組織が得られることが期待できる。Fig. 7 に試料の破壊した表面における SEM 観察写真を示す。Fig. 7(a)において、プレストレスが微小な試料は多くの起伏がある破断面が観察された。すなわち、クラック進展方向と衝撃力方向の差が大きくなると、クラック先端周辺部の比較的クラック開口が容易な部分でクラック方位が転換する。そのため、衝撃力の付加方向に沿って進行方向が細かく微調整しながら進行した破壊クラック群をともなう破壊組織が観察された。一方、未処理試料の衝撃値が小さいことから、破壊のために消費されたエネルギーは小さい。すなわち、試料の凝集力が大きくないことがクラック進行方向の変換を容易にしたことにより、微細組織が形成される可能性が高い。

一方、プレストレスをかけた試料(Fig. 7(b))では滑らかな大きなクラックを伴う破壊組織が確認された。この試料は衝撃値が大きいことから、破壊のために消費されたエネルギーは大きく、試料の凝集力が大きいことがクラック進行方向の変換を困難にしたことにより、大きなクラックを伴う破壊組織が形成される可能性が高い。

以上の結果から、プレストレスの増加によって、試験片の破壊機構が衝撃の付加方向に沿って破壊クラックの進行方向に細かく微調整しながら進行する破壊機構の組織から、プレストレスにより、衝撃の付加方向から外れて破壊クラックが進行し、結果として大きなクラックが存在する破壊機構の組織に変化することを確認した。また、マトリックスに圧縮応力が負荷され、繊維の長手方向には引張応力が負荷されているが、繊維の断面方向の界面でマトリックスから圧縮応力が負荷されるためクラックの発生が抑制される可能性が高い。このことから、破壊発生応力が高く破壊進行時の応力も高くなり、破壊伝播速度が高いため、結果として大きなクラックが存在する破壊組織となった。さらに、変形抵抗が増大し、クラック発生・進行時の抵抗(破壊抵抗)が大きくなったため、衝撃値が高くなると考察される。

ところで、Fig. 5 より、プレストレスにより結合が弱い繊維-高分子間の界面方向に破壊が進行し、ハンマが衝突する反対側の面で、全ての試料において母材と炭素繊維の間に剥離が観察されるが、プレストレスの効果により繊維の断面方向のマトリックス全体に圧縮応力が働き衝撃変形時の破壊抵抗が大きくなることも、結果として証明している。

4.3 プレストレス処理による樹脂中の圧縮応力の計算

試料にあらかじめ負荷したプレストレスは次式より算出した。

$$P_p = P/S \quad (6)$$

P_p は繊維にあらかじめ負荷したプレストレス、 P は炭素繊維にあらかじめ負荷した荷重、 S は試料断面積を表している。各繊維に極力均等に応力が加わるように注意を払いながら、繊維に負荷した荷重 P は各 98 N・147 N・196 N である。さらに、繊維の断面積を考慮すると、炭素繊維に負荷した平均プレストレス値は 192.5, 288.8, 385.1 MPa である。この繊維の弾性変形範囲内におけるプレストレスによって樹脂に発生する圧縮応力は試験片がプレストレス開放時に縮む長さに対応しており、炭素繊維が縮むことによって発現されたプレストレスが樹脂に圧縮応力として負荷される。なお、本研究では試験片内に 18000 本の炭素繊維を使用しており、試験片の体積率としては約 3.0 Vol% である。

プレストレス処理により縮んだ長さ l (試料長さに対する割合) は、98 N 負荷時は約 0.5 mm (0.63%)、147 N 時は約 0.8 mm (1.00%)、196 N 時は約 1.1 mm (1.38%) であった。この値より次式にて

$$\sigma_m = E(l/L) S_{CF} / S_m \quad (7)$$

E は炭素繊維のヤング率であり 294 GPa である。 S_{CF} , S_m はそれぞれ試料中の炭素繊維とマトリックスの占める断面積で

ある。上式は炭素繊維が縮むことによって開放される歪にヤング率と炭素繊維の面積をかけることによって、開放された荷重が求まり、マトリックスの面積で除することによってマトリックスに負荷される圧縮応力を算出した。算出した樹脂中残留応力 σ_m は 98 N 負荷時は 57 MPa, 147 N 時は 91 MPa, 196 N 時は 125 MPa である。

4.4 プレストレス処理による衝撃値の向上

本研究では CFRP にプレストレス処理を施すことにより、シャルピー衝撃値の向上を確認した。プレストレス値が 7.4 MPa の時に、シャルピー衝撃値が最大となった。これは、炭素繊維束に適度なプレストレスを加え、樹脂層に埋め、固化後、除荷することにより、 σ 結合している繊維中の最隣接炭素原子間距離がポテンシャルカーブの安定位置に近づくように応力が界面に作用し、樹脂の分子間距離は縮まり、樹脂内に圧縮残留応力が発生する。同時に樹脂は固化しているので、大きな反作用が界面で生じ、炭素繊維内にも断面方向で圧縮応力が発生する。この圧縮残留応力が炭素繊維と樹脂内に発生することにより、クラックの発生を抑制することも、界面での摩擦力の増大とともに、プレストレス処理を施した CFRP 試料全体の衝撃破壊抵抗のため必要なエネルギー増大に寄与する。

一方、9.8 MPa のプレストレス処理を炭素繊維に与えると、最大破壊確率値におけるシャルピー衝撃値は低下した。これは、除荷される際、過剰なプレストレスが炭素繊維と樹脂との界面に不可逆的なすべりを発生させ、繊維と樹脂の付着力を低下させる。これは圧縮残留応力を緩和し、クラックの発生や成長が容易になる可能性が高い過剰なプレストレスにより CFRP のシャルピー衝撃値が低下したことを説明できる。

Fig. 7 SEM image of fracture surface of CFRP pre-stressed. (a) Unloaded sample, (b) Pre-stressed sample.

5. 結 論

本研究は鉄筋コンクリートのプレストレス工法の概念を適用し, CFRP の衝撃特性を向上させることを目的とした. プレストレス処理を施した CFRP はプレストレスが 7.4 MPa の時に, シャルピー衝撃値が最大で 2.7 倍になり, 9.8 MPa のプレストレスを炭素繊維に与えると, シャルピー衝撃値は僅かに低下した. これはプレストレス処理により発生した圧縮残留応力により, 炭素繊維と樹脂内での圧縮応力が適度に働き, シャルピー衝撃値が向上したと考察した. このことから, このプレストレス処理は CFRP の強化, 特に衝撃値に対する効果が期待できると結論づけた.

文 献

- 1) J. D. Brooks and G. H. Taylor: Carbon **3**(1965) 185-192.
- 2) T. Chang and A. Okura: Trans. ISIJ **27**(1987) 229-237.
- 3) Y. Nishi, T. Toriyama, K. Oguri, A. Tonegawa and K. Takayama: J. Mater. Res. **16**(2001) 1632-1635.
- 4) Y. Nishi, A. Mizutani, A. Kimura, T. Toriyama, K. Oguri and A. Tonegawa: J. Mater. Sci. **38**(2003) 89-92.
- 5) A. Mizutani and Y. Nishi: Mater. Trans. **44**(2003) 1857-1860.
- 6) M. Tezuka, R. Sato, K. Yamamoto and S. Tottori: J. Materials, Concrete Structure, Pavements **613**(1999) 43-57.
- 7) S. Shirahana, A. Hattori and T. Miyagawa: J. Materials, Concrete Structure, Pavements **669**(2001) 85-97.
- 8) M. Khin, T. Idemitsu, K. Takewaka and S. Matsumoto: J. Materials, Concrete Structure, Pavements **526**(1995) 121-131.
- 9) H. Sakai, Y. Hamada, M. Hayashida, A. Hattori and T. Miyagawa: J. Materials, Concrete Structure, Pavements **641**(2000) 1173-1178.
- 10) K. Kutaragi, Y. Harada, K. Tanaka and Y. Nishi: J. Japan inst. Metals, **71**(2007) 598-602.
- 11) W. Weibull: J. Applied Mechanichs **18**(1951) 293-297.