不織布挿入型ハイブリッド複合材料の静的押込み特性*
(第1報, 損傷の観察)李 丞 桓*¹, 野口 博 司*², 青野 雄 太*²Static Indentation Characteristics of Hybrid Composites
with Non-Woven Tissue
(1st Report, Observation of Damage)Seung-Hwan LEE, Hiroshi NOGUCHI*³ and Yuuta AONO*³ Faculty of Engineering, Kyushu University,
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 812-8581 Japan

The objective of this investigation is to study the effect of non-woven carbon tissue (NWCT) in order to fundamentally understand the impact damage mechanism of hybrid composites with NWCT. Damage mechanism of hybrid composites was investigated under a quasi-static indentation loading condition with a steel ball as an indenter. Four kinds of cross-ply laminates were studied; i.e. CFRP laminates ($[0_5/90_5/0_5]$ and $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$) and hybrid laminates ($[0_5//90_5//0_5]$ and $[0_3//90_3//0_3//90_3//0_3]$). Here, the symbol “//” means that the NWCT layer is located at an interface between the CFRP layer interfaces. Under the same condition of the indentation energy, the total delamination area of the $[0_5//90_5//0_5]$ hybrid specimen was about 56% smaller than that of the $[0_5/90_5/0_5]$ CFRP specimen, and also the $[0_3//90_3//0_3//90_3//0_3]$ hybrid specimen was about 38% smaller than that of the $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ CFRP specimen. The mechanism of the NWCT interleaving's effect was clarified based on the observation of damage on the specimens' crosssections cut after testing. It was found that the Mode II interlaminar fracture is predominant in the delamination by the indentation loading.

Key Words: Hybrid Composites, Non-Woven Carbon Tissue, Short Fiber, Indentation Loading, Depley Technique, Delamination

1. 結 言

構造材として幅広く使用されている繊維強化複合材料(FRP)は、繊維方向には高強度を有するが、層間の強度が低く層間破壊を生じ易いことが知られている^{(1), (2)}。特に、外部からの衝突によって発生する傷(FOD: Foreign Object Damage)は構造物の安全性あるいは信頼性を低下させる原因の一つである⁽³⁾⁻⁽⁶⁾。一方、層間破壊に対する材料の抵抗特性を改善するため、マトリックスの高じん性化、インタリーフ、強化繊維の3次元配置、ステッチングなどの研究が行われており⁽⁷⁾⁻⁽¹¹⁾、その中で不織布(NWT: Non-woven tissue)プリプレグ⁽¹²⁾をCFRPプリプレグの層間に挿入したハイブリッド複合材料に関する研究も著者らによって行われている⁽¹²⁾⁻⁽¹⁷⁾。その研究によると、カーボン不織布

(NWCT: Non-Woven Carbon Tissue) 挿入によるハイブリッド化によっては、Mode II 層間破壊じん性値は約3倍上昇し、Mode I 破壊じん性値は、ほぼ保持されるという特徴をもつ^{(13), (14)}。また静的及び疲労強度のばらつきが小さくなり、さらに疲労後の残留引張特性の低下はあまり見られなかった⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾。したがって、層間破壊じん性が支配的な衝撃特性⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾についても、不織布挿入によってその特性が上昇することが期待される。

そこで本研究では、層間破壊に対する抵抗特性を改善するため、低速衝撃による損傷特性と類似な損傷特性を持つ静的押込み実験^{(21), (22)}によりカーボン不織布を使用した不織布挿入型ハイブリッド複合材料の押込み特性とその損傷のメカニズムについて論じる。

2. 実 験

2.1 材料および試験片 板厚をほぼ等しくして、不織布プリプレグ⁽¹³⁾を挿入する位置をかえた4種類の複合材料；つまり2種類のCFRP積層板 $([0_5/90_5/0_5])$ と

* 原稿受付 2001年8月29日。

*¹ 正員, 九州大学大学院工学府(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)。*² 正員, 九州大学大学院工学研究院。

E-mail: nogu@mech.kyushu-u.ac.jp

Fig. 1 Lay-ups processing of indentation specimens.

Fig. 2 Schematic of static indentation test.

Table 1 Specimens configuration.

Specimen Type	Specimen Size (mm) $L \times W \times T$
[0 ₃ /90 ₃ /0 ₃] CFRP Specimen	110×110×1.8
[0 ₃ /90 ₃ /0 ₃] Hybrid Specimen	110×110×1.9
[0 ₃ /90 ₃ /0 ₃ /90 ₃ /0 ₃] CFRP Specimen	110×110×1.8
[0 ₃ /90 ₃ /0 ₃ /90 ₃ /0 ₃] Hybrid Specimen	110×110×2.0

Fig. 3 Typical F - δ relationship in indentation tests.

[0₃/90₃/0₃/90₃/0₃])及びカーボン不織布プリプレグをCFRP層の界面に挿入させた2種類のハイブリッド積層板([0₃/90₃/0₃])と[0₃/90₃/0₃/90₃/0₃])を製作した。ここで、“//”は0度と90度の界面にカーボン不織布を挿入することを意味する。図1に押込み試験片の積層過程を示している。

層間にはく離の面積をデプライ手法(Deply technique)⁽²³⁾により調べるため、図1と図2に示すように、試験片の縁から15mmまでの領域の界面に厚さ12μmのテフロンフィルムを挿入した。ここでデプライ手法によると、ハイブリッド試験片の各層での層間にはく離や繊維破断などの各種の損傷を直接観察ができる利点がある(非破壊検査(C-scan 超音波探傷など)の方法では、ハイブリッド試験片の界面に位置したカーボン不織布層の超音波散乱⁽²⁴⁾によって層間にはく離などの損傷の区別が困難である)。

試験片の成型にはオートクレーブを使用した⁽¹⁵⁾(用いた材料の機械的性質は文献(13), (16)を参考されたい)。

2.2 実験装置および方法 図2及び表1には、静的押込み実験装置の概略と試験片の寸法(板厚は公称厚さ)を示す。試験片は治具を用いて固定し、すべらないようにするため、支持台との接触部にはエメリペーパー(#200)を挿入した。直径20mmの鋼球をクロスヘッド先端に付け、万能引張試験機(Shimadzu AG5000A)を用いて、クロスヘッドスピード1mm/minにて圧縮荷重を試験片に負荷した。試験片のたわみ δ の測定には、図2に示すように、試験片裏面に装置したひずみゲージ型変位計(SGTDT: Strain Gauge Type Displacement Transducer)を用いた。圧縮荷重によって、鋼球と試験片の接触部では局所変形による圧こんが生じるので、その影響を除くため試験片のたわみの測定は、試験片の裏面で測定した。

Table 2 Results of static indentation tests.

Specimen Type	No. of Specimen	Indentation Force (kN)	Deflection (mm)	Indentation Energy per Unit Plate Thickness (J/mm)	Total Delamination Area (mm ²)	Absorption Energy per Unit Plate Thickness (J/mm)
[0 _s /90 _s /0 _s] CFRP	1	0.70	2.1	0.37	95	0.08
	2	1.23	3.1	0.89	251	0.20
	3	2.04	4.0	1.78	541	0.45
	4	2.23	4.3	2.08	553	0.52
[0 _s /90 _s /0 _s] Hybrid	1	1.41	3.1	0.96	123	0.21
	2	2.22	4.0	1.79	254	0.42
	3	2.43	4.3	2.47	285	0.53
[0 ₃ /90 ₃ /0 ₃ /90 ₃ /0 ₃] CFRP	1	0.89	2.2	0.56	156	0.17
	2	1.45	3.0	1.14	430	0.34
	3	2.30	4.0	2.17	804	0.62
	4	2.45	4.3	2.40	789	0.63
[0 ₃ /90 ₃ /0 ₃ /90 ₃ /0 ₃] Hybrid	1	1.56	3.0	1.08	187	0.28
	2	2.47	4.0	2.05	496	0.57
	3	2.85	4.3	2.58	600	0.72

$$Area = \pi a b / 4$$

Fig. 4 Definition of delamination area by an elliptic region.

試験片は各タイプあたり 4~6 本用意し、たわみが約 2, 3 または 4mm の点まで負荷した後、除荷した。その時、それぞれの試験片に対して、図 3 に示すように負荷過程における F - δ 線図上の面積を押込みエネルギーとして、また負荷過程と除荷過程の F - δ 線図上の面積の差を吸収エネルギーとして求めた。

押込み実験による損傷としての層間はく離を評価するため、デプライ手法を適用後、図 4 に示したように層間はく離の面積を楕円型に近似して求めた。ここで、層間はく離の様子はピーナツ形態に近いが、CFRP とハイブリッド試験片との両者の相対比較するため、楕円型に近似した。また、内部損傷の観察のため、図 9 と図 13 に示す X , Y_1 及び Y_2 にそって試験片を切断し、切断面をアルミナ研磨剤 (0.3 μ m) で研磨した。

3. 実験結果および考察

3.1 押込みエネルギーと層間はく離面積 損傷がなくても弾性非線形によって図 3 における関係は凹の型となる。最下の CFRP 層におけるマトリックスき裂の発生による初期破損及びその後の層間はく離の発生による AE の発生とともに、押込み荷重は低下する。このような物理現象と図 3 の関係の詳細については、その場直接観察が可能な GFRP ハイブリッド複合材料に関する論文にて詳しく述べる予定である。

表 2 に押込み実験結果を示す。図 5 は層間はく離損

Fig. 5 View of delaminations by deply technique.

傷をデブライ手法により各層間ごとに観察した写真である。ここで、 $[0_3/90_3/0_3]$ CFRP 試験片と $[0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片では、図 10 に示すように押込み荷重方向から一番目の界面には層間はく離がほとんど見つからなかった⁽²⁴⁾ので、二番目の界面のはく離のみ測定した結果である。また、 $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ CFRP 試験片と $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片の場合は二番目、三番目及び四番目の界面のはく離面積を測定し、それらを合わせたものを総はく離面積とした。

図 6 はデブライ手法により測定した層間はく離の総面積と単位板厚あたりの押込みエネルギー、 E_I (J/mm) を示す。押込みによる試験片の層間にはせん断応力⁽²⁰⁾が生じ、それによって不織布内のき裂や層間はく離などの損傷が発生する。ここで、せん断応力 $\propto F/T$ であるので、CFRP 試験片とハイブリッド試験片の板厚の違いを補正するため、単位板厚あたりの押込みエネルギー(J/mm)を用いる。ここで、層間はく離の総面積と押込みエネルギーの関係はほぼ線形関係である。同じ押込みエネルギーに対して総はく離面積を比べると、 $[0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片は $[0_3/90_3/0_3]$ CFRP 試験

片と比較して約 56%減少し、 $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片の総はく離面積は $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ CFRP 試験片と比較して約 38%減少した。そして、個々の積層界面の層間はく離面積を比べると、最大層間はく離面積では、 $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ CFRP 試験片と $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片の方が $[0_3/90_3/0_3]$ CFRP 試験片と $[0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片の方より小さいが、総層間はく離面積としては $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ CFRP 試験片と $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片の方が大きい。強度と層間はく離の総面積または最大層間はく離面積との関係については第二報にゆずることとする。

図 7 には、吸収エネルギーと押込みエネルギーの関係を示す。吸収エネルギーは押込みエネルギーに対して本実験の範囲内では全ての試験片についてほぼ同じ線形関係となる。このことと、図 6 に示している層間はく離の総面積と押込みエネルギーの関係が線形関係になることと関連して考えると、ハイブリッド試験片では、吸収エネルギーは不織布層のせん断き裂などの損傷(図 10 の□と図 14 の□)に多く使用される。

Fig. 6 Relation between total delamination area and indentation energy per unit plate thickness.

Fig. 8 Relation between absorption energy per unit delamination area and absorption energy per unit plate thickness.

Fig. 7 Relation between absorption energy and indentation energy per unit plate thickness.

Fig. 9 Positions of cross section for microscopic photography ($[0_3/90_3/0_3]$ hybrid specimen).

Fig. 10 Longitudinal section (X) of $[0_s//90_s//0_s]$ hybrid specimen after $F=0.74\text{kN}$, $\delta=2.0\text{mm}$ in Fig. 9.

Fig. 11 Transverse section of $[0_s//90_s//0_s]$ hybrid specimen after $F=0.81\text{kN}$, $\delta=2\text{mm}$ in Fig. 9.

Fig. 12 Mesoscopic model of fracture process for $[0_s//90_s//0_s]$ hybrid specimen.

図8は層間はく離の総面積あたりの吸収エネルギー γ (表面エネルギーに相当)と単位板厚あたりの吸収エネルギーの関係を示す。ここで、 γ は E_A に関係しない定数となる。層間破壊じん性値 G_{IIC} の値⁽¹⁴⁾も付記したが、ハイブリッド試験片内の不織布層のせん断き裂(図10と図14)の存在によって、 $[0_3/90_3/0_3]$ と $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ で γ の値は若干異なる(図内の●と▲印の相違)が、それらの平均値は $[0_{12}/0_{12}]$ の G_{IIC} の値⁽¹⁴⁾とほぼ同じである。CFRP 複合材料では、 $[0_3/90_3/0_3]$ と $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ で γ の値はほぼ一致する(図内の○と△印)が、それらの平均値は $[0_{12}/0_{12}]$ の G_{IIC} の値⁽¹⁴⁾と異なっている。また、同じ吸収エネルギーでは、ハイブリッド試験片はCFRP 試験片より層間はく離の面積が小さいことを表わす。

3.2 内部損傷と破壊プロセス 内部損傷を調べるため、図9に示している $[0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片の押込み点付近を X 、 Y_1 及び Y_2 のように切断したが、その切断面を図10と図11に示す。図10のAは、図9の繊維方向の切断面(X)であるが、 90_3 のCFRP層からせん断き裂が発生し、そしてそのき裂は進展するが、鋼球が接触している部分から一番目のカーボン不織布層では鋼球の圧縮荷重によりせん断き裂の進展が拘束されるので、このせん断き裂は二番目のカーボン不織布層(写真回)に進展する。写真回では、 90_3 のCFRP層から進展したき裂がカーボン不織布層の界面にそって進展することによって初期の層間はく離が生じる。しかし、写真回に示すようにCFRP層と不織布層の界面にそって進展したき裂は、不織布層内のカー

ボン短繊維の応力集中により不織布層内に進展する。この時、カーボン短繊維のファイバブリッジングによりき裂が進み難くなるメカニズム⁽¹⁴⁾によって、層間はく離が小さくなると思われる。

図12は押込み実験による $[0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片の破壊プロセスのモデルを示す。ここで、図12の(a)では、図10の繊維方向 $([0_3/90_3/0_3])$ におけるハイブリッド試験片の破壊プロセスを説明しているが、これは文献(14)でのハイブリッド試験片のMode II破壊プロセスとほぼ同様である。また、図12の(b)では、図11の繊維垂直方向における破壊プロセスのモデルを示す。押込み荷重により荷重点と逆の表面の 90_3 CFRP層では、引張りによって表面からマトリックスき裂が発生し、カーボン不織布層を貫通して 0_3 CFRP層との界面に至る。そして入ったき裂は押込み荷重の増加によって図12の(b)に示すような過程で進展する。図11の(b)は、図9の Y_2 断面を示している

Fig. 13 Positions of cross sections for microscopic photography ($[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ hybrid specimen).

Fig. 14 Longitudinal section (X) of $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ hybrid specimen after $F=1.47\text{kN}$, $\delta=2.3\text{mm}$ in Fig. 13.

Fig. 15 Transverse section of $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ hybrid specimen after $F=1.35\text{kN}$, $\delta=2.2\text{mm}$ in Fig. 13.

が、図 11 の(a)と比べて不織布層にはファイバブリッジなどの複雑な破壊様子を呈する。

図 13 における X , Y_1 及び Y_2 は $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ ハイブリッド試験片の押込み点付近の切断位置を示す。

図 14 は、図 13 に示している繊維方向の切断面(X)の

写真を示しており、押込み荷重点の逆側表面付近は損傷(CFRP層と不織布層のマトリックスせん断き裂や層間はく離など)が大きいが、鋼球からの一番目の不織布層の界面では鋼球からの圧縮荷重という拘束条件によって、層間はく離が起り難くなっている。また、写

真図と図では、90₃のCFRP層から発生したせん断き裂の進展によってCFRP層と不織布層の界面に初期の層間はく離が生じている。しかし、写真図に示すようにCFRP層と不織布層の界面にそって進展したき裂では不織布層のカーボン短繊維の応力集中によって不織布層にき裂が進展するメカニズムによって、層間はく離が小さくなる。それは、前述した[0₅/90₅/0₃]ハイブリッド試験片の破壊メカニズムと同様だと思われる。

図15は、図13に示している繊維垂直方向の切断面(Y_1 と Y_2)を示す。ここで、図15の(a)の写真図では、CFRP層、不織布層のせん断き裂と引張りき裂が見られる。また、図15の(b)の写真図の中央90₃のCFRP層では、図12の(a)の破壊プロセスと同様にせん断応力によって層間はく離が生じている。

以上で示してきたように、静的押込み実験によってクロスプライハイブリッド試験片では積層構成に依存せず、損傷プロセスとしては、(i)荷重点の逆側表面の引張力によってCFRP層の表面よりき裂は発生し、不織布層を超えて止まる。(ii)試験片の中央では、せん断力によってCFRP層にせん断き裂が発生するが、不織布層の短繊維ファイバブリッジングによって、層間はく離も起り難くなり、それによって押込み荷重が上昇する。(iii)引張力によって表面より入った初期き裂はせん断力によりCFRP層と不織布層の界面にそって進展するが、(ii)のような過程でき裂が発生また停留する。

ハイブリッド試験片のMode II層間破壊じん性値がCFRP試験片より約3倍上昇し、Mode I破壊じん性値はほぼ保持される⁽¹⁴⁾ということから、本実験の押込み特性では、層間はく離の発生原因はMode II層間破壊特性が支配的になると言える。つまり、不織布挿入の効果は以下の2つから成る。

(i) 不織布の剛性は0度CFRPと90度CFRPの剛性の間であることによる、界面に発生するせん断応力の軽減。(ii) 不織布は、き裂が発生しやすく、き裂が伝ばし難いことによる損傷の分散。

また、押込み特性と同様な破壊メカニズムの低速衝撃特性^{(19), (24), (25)}にも不織布挿入の効果が期待される。

4. 結 言

本研究では、CFRP積層複合材料の界面にカーボン不織布を挿入した2種類のクロスプライハイブリッド複合材料の静的押込み特性を調べて以下の知見を得た。

(1) 同じ押込みエネルギーにおいて、[0₅/90₅/0₃]ハイブリッド試験片の層間はく離の総面積は[0₅/90₅/0₃]CFRP試験片より約56%減少した。また、[0₃/90₃/0₃/90₃/0₃]ハイブリッド試験片では、

[0₃/90₃/0₃/90₃/0₃]CFRP試験片より約38%減少した。

(2) 実験後の損傷断面の観察により不織布挿入の効果のメカニズムを明らかにした。このことから、層間はく離の発生原因としてはMode II層間破壊特性が支配的になると言える。

第2報以降において、静的押込み後の機械的性質の低下に対する不織布挿入の有効性を述べる予定である。

供試材の提供とご討論いただいた韓国のソウル産業大学の鄭成均教授と韓国の(株)SK-Chemicalsの林昇奎博士に対し、深く感謝の意を表します。

文 献

- [1] Erich. F., Carbon Fibres and their Composites : United Nations Financing System for Science and Technology for Development, (1985).
- [2] Grady. E. and Sun. C. T., ASTM STP 907, (1986), 5-31.
- [3] Jih. C. J. and Sun. C. T., Journal of Composite Materials, 27, (1992), 684-701.
- [4] Choi. I. H. and Hong. C. S., Mechanics of Composite Materials and Structures, 1, (1994), 157-170.
- [5] 武田展雄, 機論 A, 63, (1997), 2472-2477.
- [6] 松田聡, 北條正樹, 落合庄治郎, 機論 A, 63, (1997), 39-45.
- [7] 盛田英夫, 足立忠晴, 松本浩之, P. H. Wilson TSANG, 機論 A, 63, (1997), 2025-2031.
- [8] Jain. L., Dransfield. K. and Mai. Y. W., Journal of Composite Materials, 32, (1998), 2016-2041.
- [9] 日下貴之, 北條正樹, 黒川知明, 落合庄治郎, 機論 A, 64, (1998), 1625-1631.
- [10] Wu. E. and Wang. J., Journal of Composite Materials, 29, (1995), 2254-2279.
- [11] Svensson. N., Shishoo. R. and Gilchrist. M., Journal of Composite Materials, 32, (1998), 1808-1835.
- [12] Choeng. S. K., Lee. S. H. and Lim. S. G., The First Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-1), (1998), 420.1-420.4.
- [13] 李丞桓, 金永培, 野口博司, 機論 A, 67, (2001), 1471-1476.
- [14] 李丞桓, 金永培, 姜振植, 野口博司, 鄭成均, 日本機械学会材料力学部門講演会, (2000), 85-86.
- [15] Lee. S. H. and Noguchi. H., JSME International Journal Series A, 44, (2001), 535-541.
- [16] 李丞桓, 野口博司, 機論 A, 67, (2001), 1477-1485.
- [17] 李丞桓, 野口博司, 機論 A, 68, (2002), 1054-1062.
- [18] Lee. S. M. and Zahuta. P., Journal of Composite Materials, 25, (1991), 204-222.
- [19] Doxsee. L. E., Rubbrecht. P., Li. L., Verpoest. I. and Scholle. M., Journal of Composite Materials, 27, (1993), 764-781.
- [20] Aksoy. A. and Carlsson. L. A., Engineering Fracture Mechanics, 39, (1991), 525-534.
- [21] Liu. S., Kutlu. Z. and Chang. F. K., ASTM STP 1156, (1993), 86-101.
- [22] Liu. S. and Chang. F. K., Journal of Composite Materials, 28, (1994), 940-977.
- [23] Freeman. S. M., ASTM STP 787, (1982), 50-62.
- [24] 駒井謙治郎, 箕島弘二, 山崎博司, 機論 A, 60, (1994), 2511-2517.
- [25] Wu. E. and Shyu. K., Journal of Composite Materials, 27, (1993), 1443-1464.