

# CFRPパイプの突合せ接合における新手法の開発と評価

日大生産工 (院) ○ 角倉 浩平  
日大生産工 邊 吾一

## 1. 緒言

CFRPは比強度、比剛性に優れた構造部材として航空宇宙分野等で広く用いられている。その接合法としては現在フランジやソケット、ボルト等の金属材料を用いた機械的接合と接着剤を用いた接着接合法の二つが確立されている。二つの接合法は利点も多いが、多くの問題点もある。機械的接合では金属材料を用いるため重くなってしまい、CFRPの特徴である比強度・比剛性が活かさない。またボルト・リベット接合では接合部円孔付近で応力集中し、破壊モードも複雑になるなどの問題点がある。これは機械的接合法を選択した場合、必然的な問題点であり、改善することは難しい。また接着接合も接着界面に繊維は存在せず、接着剤の強度に依存するために、CFRPを活かすという意味では十分ではない。また、引き剥がし荷重が小さくなる傾向があり、耐熱性や強度寿命の面などの問題も抱えている。今後さらにCFRPの用途拡大のためには現存の接合法だけではなく、これらの問題点を補うような新たな接合法の開発も必要であると考えられる。

本研究では新しい接合法の開発を行い、簡便でかつ現場での組立・作業性に優れた接合法を確立すべく新たなCFRPの接合法を提案し、その継手についての評価を行った。接合法の形態として、一般的にもよく用いられるT型接合及び突合せ接合は、本接合法においても基本的な接合形態になると考えられる。T型接合の評価においては以前までの研究により、実験による継手強度も100%近くを示し、解析評価も非線形性まで考慮できるところまで構築されている<sup>1)2)3)</sup>。ここでは、突合せ接合の作製法の確立、引張り試験による力学特性の評価、汎用有限要素法プログラムANSYSを用いたモデルの構築及び評価を行い、それらの成果について報告する。

## 2. 突合せ接合試験片製作工程

試験体にはフィラメントワインディング成型装置により製作したFWパイプを用いた。強

化繊維には炭素繊維T300、樹脂にはビニルエステルR-802、硬化剤にパーメックNをそれぞれ用い、ヘリカル巻きで製作した。マンドレル径は25mm、外径は28mm、積層数3ply、配向角22°とした。硬化サイクルは100°C、3hrである。

両CFRPパイプの端部を燃焼し、繊維を露出させる。試験片の燃焼には熱分布が均一な専用の燃焼炉で500°C一定で15分間燃焼した。非燃焼部の保護は、金属の中子を挿入するとともに外側にアルミテープを巻き付けた。燃焼後、露出繊維には煤が付着しているためアセトンによって洗浄し、これを除去する。露出繊維はいくつかの束に分け、互いに繊維の束を交互に編みこむように絡める(Fig.1とFig.2)。この作業と同時に樹脂を再度含浸させる。編みこんだ露出繊維はパイプ軸方向に揃え、ロービング(T300)で周方向に上から巻き付けた。最後に余分な樹脂を除去するためにテープ状のピールクロスをテンションをかけながら巻き付ける。最後に硬化サイクルはFWパイプ成型時と同様に硬化させ、ピールクロスを樹脂の硬化後に除去し、完成となる。露出繊維付け根近傍のパイプ部分はもう一方のパイプの露出繊維がかぶさるため、400番の耐水ペーパーによるサンディングとエタノールによる脱脂を施した<sup>1)</sup>。このような方法で行われた接合法は自身の繊維を用いた接合法のため、CFRPにとって最も効率的な接合法と言える。

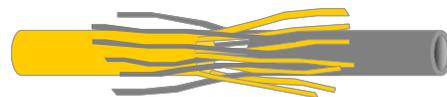


Fig.1 Image of Butt Joint



Fig.2 Process of Butt Joint

### 3. 引張試験

突合せ接合部の評価を引張試験により行った。試験はJIS K 7033に準じてオートグラフで実施した。試験片寸法は全長450mm、標点間距離は300mmとした。試験速度は1mm/min、試験片本数は各タイプとも5本ずつとした。試験により引張強さに及ぼす下記の3つの項目の影響について検証した。

- (1) 露出繊維長さ、
- (2) 繊維束分割数
- (3) 異種配向角接合

#### 3.1. 露出繊維長さの影響

露出繊維の長さを50, 40, 30, 20mmの4種類を用意して引張試験を実施し、パイプの未燃焼部表面と露出繊維との界面の影響を検証するとともに最適な露出繊維長さを検討した (Fig.3)。最大引張応力は露出繊維長さが40mmより短くなるにつれて徐々に低下し、20mmでは大きく低下した (Fig.4)。また50mmから40mmの傾向をみると、露出繊維部長さを大きくし、露出繊維長さを長くとってもパイプと露出繊維との界面せん断強度の向上は見込めず、強度向上に大きく寄与しないため有効ではなく、接合部重量が過大となるということが明らかになった。単位露出繊維長さ当たりの破壊荷重値を見ると40mmが最大値を示した (Table 1)。この結果から露出繊維長さを、大きくとらずとも継手強度が維持され、軽量化も図れ、それに伴う比強度向上も望める最適値は内径25mmのパイプの場合においては露出繊維長さ40mmであると言える。

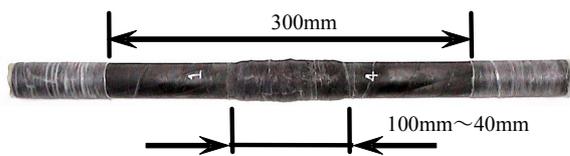


Fig.3 Dimension of Specimens  
50mm Type

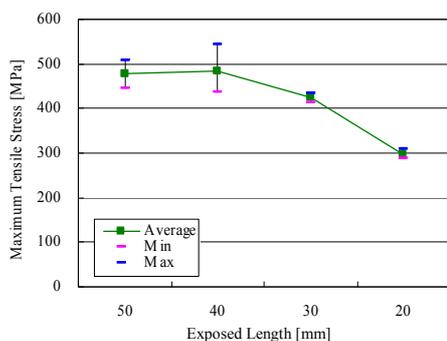


Fig.4 Maximum Tensile Stress vs,  
Exposed Length of CFRP pipe

Table 1 Results of Tensile Test (average)

Specimens (Divided by the Machine, 20Bundles)	Maximum Tensile Stress [MPa] (CV[%])	Failure Load/Exposure Fiber Length [kN/mm] (CV[%])	Joint Efficiency [%]
50mm	479.5 (5.2)	1.20 (5.1)	82.93
40mm	483.9 (9.0)	1.22 (8.6)	83.69
30mm	424.5 (2.4)	1.07 (3.1)	73.43
20mm	297.9 (5.0)	0.75 (3.4)	51.53

#### 3.2. 繊維束分割数の影響

露出繊維を円周方向に分割し束にする数を12,16,20,24束の4種類を用意して引張試験を実施し、分割数を増加させることで継手強度を向上させることを狙うと共に、最適な露出繊維分割数を検討した。露出させる長さは50mmとした。Table 2をみると12束分けから20束分けまでは最大引張応力が徐々に増加し24束では低下した。12束から20束にすることによって最大引張応力は27.9%向上した。また、継手効率も20束で98.7%に達した。この強度向上は、露出繊維の分割数を増やすことにより、接合部で繊維束同士の絡み合う接着面積を大きく増加させることができ、さらに引張応力も繊維束一本一本に対して均等に分配できたことが主な要因であると考えられる。Fig.5に示す20束分けの破壊様相を見ると、突合せ面の一方のパイプの露出繊維が完全に破断し、もう一方のパイプの露出繊維も一部で破断しており、12束分割試験片に比べ、突合せ面で破断している繊維の本数が増えていることが確認された。この結果からも繊維の分ける束数を12束から20束に増やしたことで、応力分布をより均等にすることが出来たと言える。

また、24束と20束を比較すると最大引張応力は10%低下している。接着面積の増加という理由から、分割する束数を多くするに伴い強度を増す傾向を示すと考えていたが、繊維分割数を20束から24束に増加したにもかかわらず、強度が低下した。この要因は分割数を増やすことにより、接着面積を増加させることはできるが、分割した繊維束の一束が細くなり、くさび型の角度が浅くなることでズレ破壊を起こしやすくなったと考えられる (Fig.4)。さらに分割数を多くすることにより、手作業による接合作業のため、樹脂を露出繊維の分割束に均質に含浸させることが困難になることも考えられる。同じ理由から12束ではなくくさび型が大きくなるので強度が大きくなるはず

だが、この場合反対に応力集中を招く結果になり強度は上がらない。このことから一束がズレ破壊を起こしにくく、かつ応力集中を起こしにくい程度にくさび型を形成する分割数が20束であったと結論付けられる。このことから突合せ接合において、露出繊維同士が絡み合う接合部中央部の形状や絡め方が接合部強度に大きく影響すると言える。

Table.2には接合による元のパイプの重量に対する重量の増加比も示すが、束数に関係なくほぼ一定の値を示す。また、一束当たりの破壊荷重値をみると16束が最大値を示したが、強度は20束が最大値を示している。この結果から内径25mmのパイプにおける最適分割数は20束と言える。

### 3.3. 配向角の影響

前述までのパイプは配向角 $22^\circ$ であったが、ここでは配向角 $33^\circ$ のパイプにおける接合試験片の引張強度について検証した。試験片の露出繊維長さは50mm、分割数は20束とし、試験条件はこれまでと同様である。引張試験結果を配向角 $22^\circ$ と比較するためTable 2とTable 3を参照すると、継手効率が98.7%から78.8%に低下した。強度低下の主要因として、FWパイプ部はヘリカル巻きしており、繊維が配向角度に巻かれているのに対して、接合部は露出繊維を軸方向にそろえてオーバーラップするために、FWパイプの配向角が大きい程、露出繊維部の繊維を無理やり軸方向に揃えることになるため、その境界部で角度を抑制したことで応力集中が起きると考えられる。

また、異なる配向角を接合した場合の強度についても検証した。配向角 $22^\circ$ と $33^\circ$ のパイプの接合試験片を作製し同様に試験した(Table 3)。結果を $33^\circ$ 同士の接合片と比較すると、最大引張応力の平均値は若干低下したが、バラつきを考えると大差はない。

破壊様相はすべての試験片が同様に $33^\circ$ 側の露出繊維が破断し、引き抜けるのが確認された。これも $33^\circ$ 側露出繊維付け根において応力集中が起きることが原因と考えられる。各々の接合試験片の荷重-変位線図をFig.6に示す。異種配向角接合の場合、強度は配向角の大きい側に依存する。

$33^\circ$ の試験片は継ぎ手効率が76%程度なので今後は強度向上が課題となる。

Table 2 Results of Tensile Test (average)

Specimens Number of Bundles (Divided by the Hand, 50mm)	Maximum Tensile Stress [MPa] (CV[%])	Increase Ratio of Weight [%]	Failure Load/Number of Bundles [kN/Bundle] (CV[%])	Joint Efficiency [%]
12	411.5 (6.8)	28.2	4.28 (6.8)	71.17
16	549.2 (8.5)	27.5	4.30 (8.5)	94.98
20	570.9 (7.4)	27.9	3.56 (7.4)	98.74
24	513.3 (7.1)	27.7	2.67 (7.1)	88.78

(a) Appearance



(b) Cut Section



Fig.5 Failure Aspect of the Specimen(50mm, 20Pieces)

(a) 16 Bundle Division



(b) 24 Bundle Division

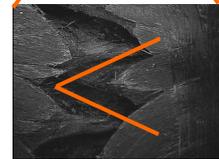
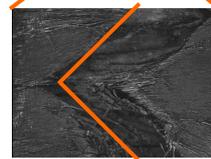


Fig.6 Wedged Enlarged View ( $\times 50$ )

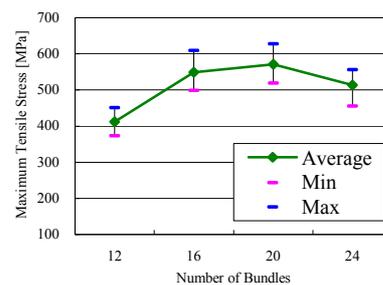


Fig.7 Maximum Tensile Stress Curve in the Number of Bundles Change

Table 3 Results of Tensile Test (average)

Specimens (50mm, 20Bundles)	Maximum Tensile Stress [MPa] (CV[%])	Weight of Joint [ $\times 10^{-2}$ N] (CV[%])	Stress/Weight [ $\times 10^8$ m <sup>-2</sup> ] (CV[%])	Joint Efficiency [%]
33-33°	294.4 (7.4)	25.59 (18.0)	11.84 (21.6)	78.76
22-33°	283.7 (3.8)	21.88 (7.4)	13.03 (12.4)	75.89

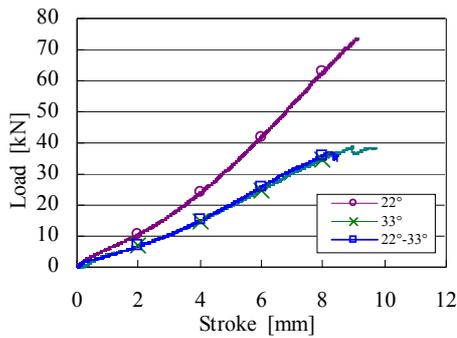


Fig.8 Comparison of the Results  
(22-22°, 33-33°, 22-33° joint)

#### 4. 突合せ接合片解析

突合せ接合の破壊予測の検討を行うために汎用有限要素プログラムANSYS version.9.0を用いて突合せ接合のFEM解析を行った。本解析モデルでは接合部のくさび型形状をできる限り忠実に再現し応力集中部の特定と実験のシミュレーションを目的とした。解析モデルの使用要素は三次元20節点積層構造ソリッド(SOLID191)を用い、要素数は4,944、節点数は20,088である。基本形状がパイプであるため周方向端部に対称境界拘束をかけ1/4モデルとした(Fig.9)。オーバーラップ部のパイプ部表面と露出繊維との界面における接着力と接合部中央の絡み合う繊維束同士の接着力を接触要素のTARGE170とCONTA174を用いて面-面接触を定義して、接合を表現した。

実験のパイプの引張強度570.9[MPa](Table 2)と解析のパイプ部分の引張強度を比較した。解析値は周方向の節点位置の違いで多少のバラつきはあるが平均で571.9[MPa]を示し、誤差は1%以内の良好な一致をみせた。このことからパイプ部のモデルの有意性は確認できた。Fig.10に実験値と解析値を比較した荷重-変位線図を示す。

また、実験のひずみゲージを貼った位置と解析モデルのそれに対応する位置での応力・ひずみをそれぞれ比較した(Table 4)。パイプ部の位置では実験と解析が誤差10%弱と比較的良好な一致を示した。しかし、オーバーラップ部、接合中央部、と接合部に近づくにつれ誤差は大きくなる。今後もモデルの改良が必要である。

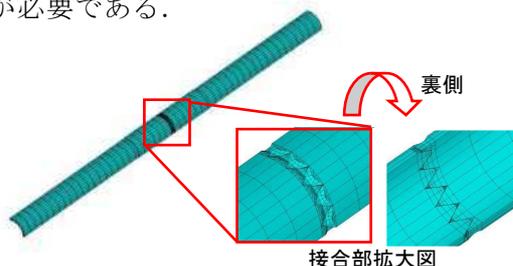


Fig.9 Finite Element Model

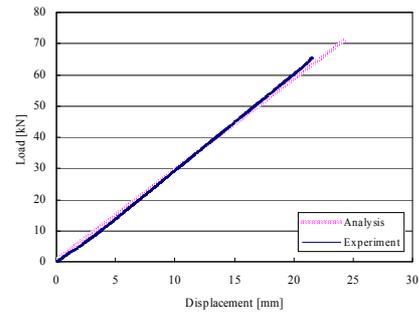


Fig.10 Load-Displacement Curves of Butt Joint  
(Experimental and Analytical Results)

Table 4 Results of Analysis (average)

Part	Stress [MPa]			Strain [μ]		
	Exp	Analysis	Error[%]	Exp	Analysis	Error[%]
Pipe Part	522.2	571.9	8.7	7188	8041	10.6
Joint Center	443.6	660.1	32.8	6106	9618	36.5
Overlap Part	328.7	421.9	22.1	4524	5953	24.0

#### 5. 結言

突合せ接合において、露出繊維同士が絡み合う接合部中央部の形状や絡め方、分割数が接合部強度に大きく影響する。また、必要以上に燃焼部長さを大きくしてもパイプと露出繊維との界面せん断強度は前者に比較し、強度向上に大きく寄与しないため有効ではなく、接合部重量過大となる。露出繊維長さは内径25mmのパイプでは露出繊維長さ40mmが最適である。露出繊維分割数を12束から20束にすることによって、接合面積を増やし、露出繊維の付け根部分における応力の分布の均等化を図ることによって、継手効率を平均で71.0%から98.4%に向上することができた。また最適な露出繊維分割数は20束である。異種配向角試験片において強度は配向角の大きい側に依存する。突合せ接合の強度予測に有用な解析モデルを作製し、パイプ部において概ね良好な一致を得た。

#### 6. 参考文献

- 1) 邊, 美浦 他 第45回構造強度に関する講演会論文集, 2003年, P42-44
- 2) 邊, 美浦 第46回構造強度に関する講演会論文集, 2004年, P218-220
- 3) G.Ben, K.Miura, Proc.11<sup>th</sup> Japan-US Cont. Comp. Mater., 2004年
- 4) 邊, 角倉 50th FRP CON-EX 2005 講演要旨集, 2005年, P13-14 A-6/1-A-6/2
- 6) 邊, 角倉 第35回FRPシンポジウム講演論文集, 2006年, I-9
- 7) 邊, 角倉 51st FRP CON-EX 2006 講演要旨集, 2006年, P87-88 B-20/1-B-20/2