

CFRPパイプの突合せ接合における新手法の開発

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、ボルトやリベッ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が確立されている。しかし機械的接合では金属材料の重量が大であるためCFRPの特徴である比強度、比剛性が活かせない。またボルト等を用いた接合では円孔付近で応力集中し、円孔接合部における破壊モードも複雑となるなどの欠点がある。一方、接着接合は接着条件により強度に差が生じたり、引き剥がしには弱く、寿命が短いなどの問題がある。そこで本研究では新手法を用い、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の接合法を提案する。本報告では新接合法により製作された突合せ接合と、その引張強度について報告する。

2. 突合せ接合試験片製作工程

試験片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℃、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℃一定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12本の束に分け、互いに繊維の束を交互に編みこむように絡める(Figs.1,2)。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。このピールクロスは樹脂の硬化後、除去する。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¹⁾。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。

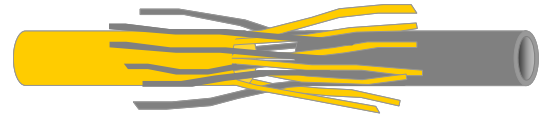


Fig.1 Image of "I" Joint



Fig.2 Process of "I" 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。試験により下記の4つの項目について検証した。

- (1) 露出繊維長さの影響
- (2) 繊維束分割数の影響
- (3) 異種配向角接合の影響
- (4) 治具を使用した影響

4. 露出繊維長さの影響

試験片はパイプ端部を100mm燃焼したものと50mm燃焼したものの2種類を用意した(Fig.3)。

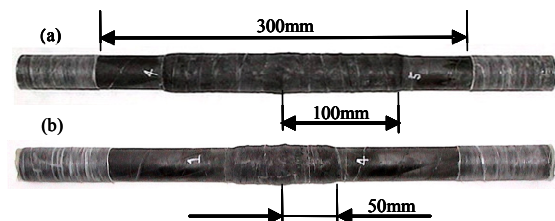


Fig.3 Dimension of Specimens
(a) 100mm Type, (b) 50mm Type

燃焼部長さを50mmで製作した試験片は100mm対し最大引張応力は8.5%低下した。しかし、50mm試験片の重量は100mmの物に対して平均で約62%軽減した。その結果、接合部重量あたりの最大引張応力で比較すると50mm試験片は100mm対し60%向上し約2.5倍になっており、比強度は50mm試験片の方が高い(Tables 1, 2)^{1), 2)}。この継手の継手効率をFWパイプ単体の引張破壊強度の平均値(578.2[MPa])と比較しTable. 3に示す。

破壊様相は100mmのタイプでは接合部中央で繊維が破断し、接合部のいずれか一端でパイプが接合部から引き抜けるのが確認された(Fig.4)。5本のうちの試験片No.3だけは接合部の両端部で引き抜けが確認された(Fig.5)。50mmのタイプの破壊形態は100mmのNo.3以外の4本のものと同様であった。試験の様子から破壊は繊維のすべりではなく、一部の繊維の破断とそれに引き続いて起こる接合部中央での繊維の一齐破断が主なプロセスと考えられる。荷重変位線図からも一齐破断により破壊していることを読み取ることが出来る(Figs.6,7)。

5. 繊維束分割数の影響

さらに接合部強度を向上させるために露出繊維の分ける束数を12束から20束に増やした。燃焼する長さは前述の結果をふまえ50mmとした。引張試験の結果を50mm燃焼12束分けの結果と比較すると最大引張応力は38.7%向上し、接合部重量あたりの最大応力は67%向上した。また継手効率は平均で98.4%に達した。この結果から繊維の分ける束数を増やすことにより、継手強度が大きく向上されたことを確認できた^{1), 2)}。結果をFig.8及びTable 4に示す。

Fig.9に示す破壊様相を見ると、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、これまでの2つのタイプの試験片に比べ、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。繊維の分ける本数を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考えられる。



Fig. 4 Failure Aspect of the SpecimenNo.2 (100mm, 12Pieces) Cut Section

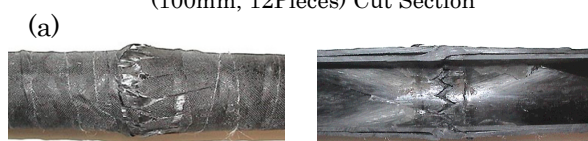


Fig. 5 Failure Aspect of the Specimen No.3(100mm, 12 Pieces) (a) Appearance, (b) Cut Section

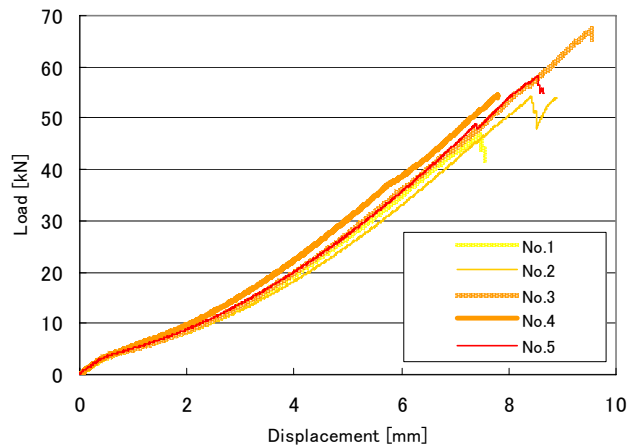


Fig. 6 Load-Displacement Curves (100mm, 12Pieces)

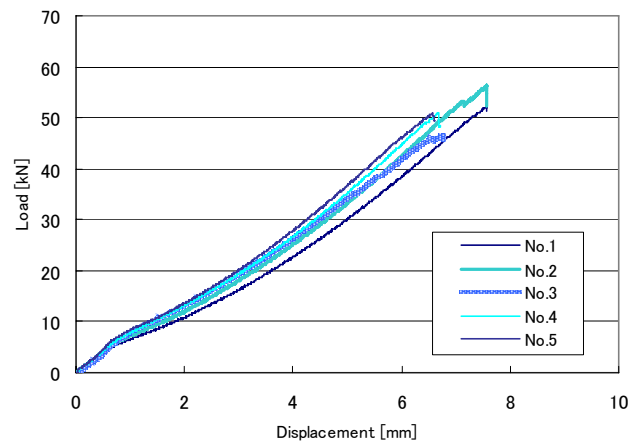


Fig. 7 Load-Displacement Curves (50mm, 12Pieces)

Table 1 Results of Tensile Test (100mm, 12 Pieces)

Specimens	Maximum Tensile Stress [MPa]	Weight of Joint [$\times 10^{-2}$ N]	Stress/Weight [$\times 10^8$ m ⁻²]
No.1	373.4	64.01	5.83
No.2	433.8	46.37	9.36
No.3	539.4	57.66	9.35
No.4	436.3	51.42	8.49
No.5	466.0	50.42	9.24
average	449.8	53.98	8.45
Coefficient of Variation	13.4%	12.8%	17.9%

Table 2 Results of Tensile Test (50mm, 12 Pieces)

Specimens	Maximum Tensile Stress [MPa]	Weight of Joint [$\times 10^{-2}$ N]	Stress/Weight [$\times 10^8$ m ⁻²]
No.1	417.7	22.14	18.87
No.2	450.7	22.85	19.72
No.3	372.8	26.55	14.04
No.4	408.9	18.01	22.70
No.5	407.5	12.98	31.39
average	411.5	20.51	21.35
Coefficient of Variation	6.8%	25.3%	30.1%

Table 3 Joint Efficiency

Specimens	100mm, 12Pieces	50mm, 12Pieces	50mm, 20Pieces
	[%]	[%]	[%]
No.1	64.4	72.0	99.1
No.2	74.8	77.7	101.9
No.3	93.0	64.3	89.4
No.4	75.2	70.5	93.6
No.5	80.3	70.3	108.2
average	77.5	71.0	98.4

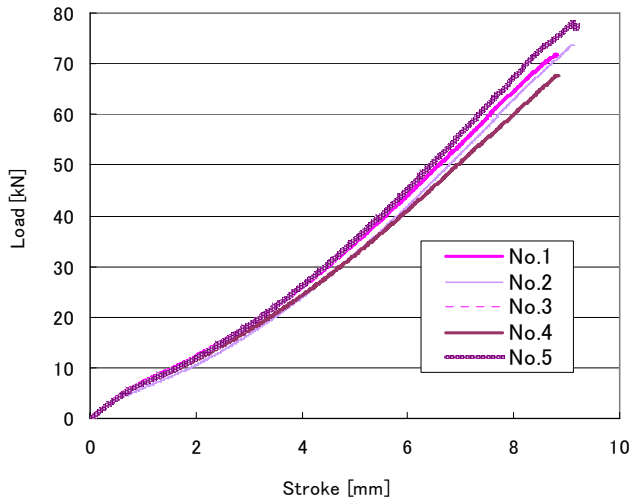


Fig.8 Load-Displacement Curves (50mm, 20Pieces)

Table 4 Results of Tensile Test (50mm, 20 Pieces)

Specimens	Maximum Tensile Stress [MPa]	Weight of Joint [$\times 10^{-2}$ N]	Stress/Weight [$\times 10^8 \text{ m}^{-2}$]
No.1	575.0	11.55	49.78
No.2	591.0	15.82	37.36
No.3	518.6	16.19	32.03
No.4	542.7	24.95	21.75
No.5	627.3	16.75	37.45
average	570.9	17.05	35.68
Coefficient of Variation	7.4%	28.6%	28.5%

6. 配向角の影響

前述までのパイプは配向角 22° であったが今度は配向角 33° 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(Table 5). 試験片は燃焼長さは50mm, 露出繊維分割数は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° と比較すると継手効率が98.4%から77.4%に低下した(Table 7). 強度低下の主な要因として, FWパイプ部はヘリカル巻きされているのに対して, 接合部は露出繊維を無理やり軸方向にそろえてオーバーラップするために, FWパイプ部と露出繊維の境目に角度がついてしまう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° と 33° のパイプの接合試験片を同様に試験した(Table 6). 結果を 33° 同士の接合片と比較すると最大引張応力は若干低下した. 破壊様相はFig.4と同様で片方のパイプの露出繊維が破断し引き抜けた. また, すべての試験片が同様に 33° 側の露出繊維が破断したことを確認した. これも 33° 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. 各々の接合における荷重-ストローク線図の比較したものをFig.10に示す. 33° 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.



Fig. 9 Failure Aspect of the Specimen (50mm, 20Pieces)
(a) Appearance, (b) Cut Section

Table 5 Results of Tensile Test ($33-33^\circ$, 50mm, 20 Pieces joint)

Specimens	Maximum Tensile Stress [MPa]	Weight of Joint [$\times 10^{-2}$ N]	Stress/Weight [$\times 10^8 \text{ m}^{-2}$]
No.1	309.0	30.32	10.19
No.2	316.6	26.97	11.74
No.3	295.0	26.85	10.99
No.4	291.5	17.94	16.25
No.5	260.0	25.85	10.06
average	294.4	25.59	11.84
Coefficient of Variation	7.4%	18.0%	21.6%

Table 6 Results of Tensile Test ($22-33^\circ$, 50mm, 20 Pieces joint)

Specimens	Maximum Tensile Stress [MPa]	Weight of Joint [$\times 10^{-2}$ N]	Stress/Weight [$\times 10^8 \text{ m}^{-2}$]
No.1	290.7	23.86	12.18
No.2	277.1	21.47	12.91
No.3	297.3	20.07	14.81
No.4	283.7	20.79	13.65
No.5	269.7	23.23	11.61
average	283.7	21.88	13.03
Coefficient of Variation	3.8%	7.4%	12.4%

Table 7 Joint Efficiency

Specimens	33-33deg joint	22-33deg joint
	[%]	[%]
No.1	82.7	77.8
No.2	84.7	74.2
No.3	78.9	79.5
No.4	78.0	75.9
No.5	69.6	72.2
average	77.4	75.9

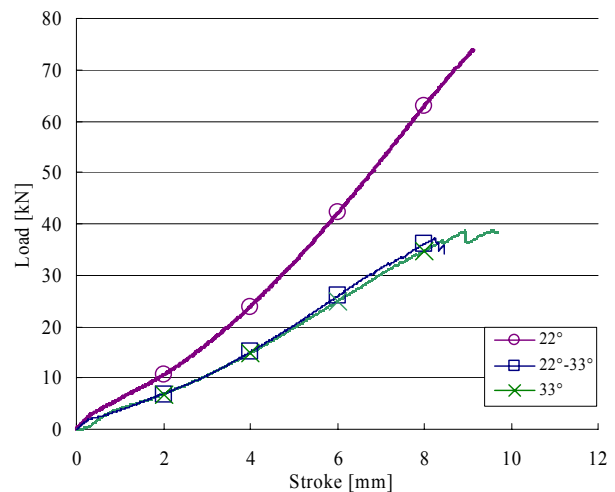


Fig. 10 Comparison of Result ($22-22^\circ$, $33-33^\circ$, $22-33^\circ$ joint)

7. 治具製作

今まで、試験片製作過程のすべてを手作業によって行ってきたが、この場合試験片を作れるようになるのに慣れと経験が必要であった。誰でも簡単にでき、広くこの接合法が使われるためには製作作業工程の機械化が必要であると考え、繊維を分割するための治具を考案し製作した。治具の外観をFig.11に示し、各部の詳細写真をFig.12からFig.15に示し各々簡単にその機能を説明する。

針部(Fig.12)は繊維を分ける際の針を固定している。またモータが設置してあり、その軸には偏心を持たせる機構が設けられていて(Fig.13)、治具中央部のレバーを動かしながら針部を振動させられるようになっている。これは手作業の際に行っていた動きを再現し、治具での作業をより手作業に近づけるために設置した。Fig.14に示す調整つまみでモータの回転速度を調整する。即ち針部の振動速度を調整できる。Fig.15に示す分割部で12束と20束分けに対応している。

針をパイプの根元で刺した後、針部を振動させながらレバーを右から左へスライドさせるだけで簡単に分割することが可能である。

8. 治具使用の影響

治具を用いたとしても以前と同じ強度を保つことができるか検証した。試験片は治具を用いるほかは前述5の試験片と同条件のものを用意し試験条件も同様で試験した。

治具使用で燃焼長さ50mm、20束分けの結果(Table 8)と以前の結果(Table 4)を比較すると最大引張応力は16%低下しているものの、接合部重量あたりの応力の低下は8.6%に留まった。

繊維が抜け落ちる量が手作業の場合より治具を用いた方が多くなるのが強度低下の主な要因であると考えられる。

9. 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ことが示唆された。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、異種配向角において強度は配向角の大きい側に依存する。露出繊維を分割する作業

を半機械化し、均質な分割を可能にする治具を新たに開発した。

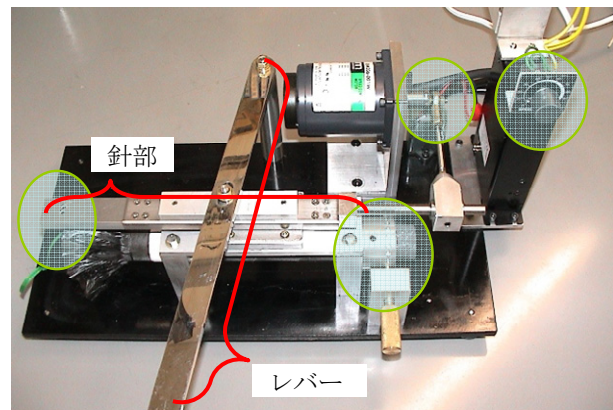


Fig.11 Appearance of Machine



Fig.12 Needle Part

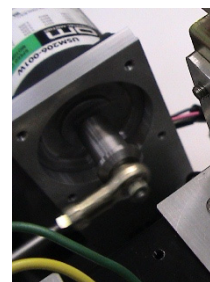


Fig.13 Eccentric of Motor Part



Fig.14 Speed Control Part

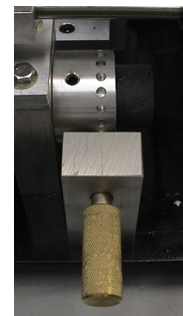


Fig.15 Division Part (12 and 20)

Table 8 Results of Tensile Test (Machine used, 50mm, 20 Pieces)

Specimens	Maximum Tensile Stress [MPa]	Weight of Joint [$\times 10^{-2}$ N]	Stress/Weight [$\times 10^8 \text{ m}^{-2}$]
No.1	493.7	13.29	37.15
No.2	486.4	11.28	43.12
No.3	446.2	16.30	27.38
No.4	462.4	17.77	26.02
No.5	508.9	17.24	29.52
Average	479.5	15.2	32.6
Coefficient of Variation	5.2%	18.3%	22.3%

10. 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, 角倉 第46回構造強度に関する講演会論文集, 2004年, P218-220
- 3) 邊, 美浦, 角倉 日本大学生産工学部学術講演会論文集, 2004年, P61-64
- 4) 邊, 角倉 50th FRP CON-EX 2005 講演要旨集, 2005年, P13-14 A-6/1-A-6/2