

燃焼法によるCFRPパイプのT型及びI型接合の開発とその力学的評価

美浦一葉（日大・院）
邊吾一（日本大学）

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、リベット接合では円孔付近で応力集中し、破壊モードも複雑となるなどの欠点がある。機械的接合の他に接着接合もあるが、接着条件により強度に差が生じる問題がある。そこで本研究では燃焼法を用い、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とともに、既報であるT型接合試験片の曲げ強度の評価を解析により行ったのでこれについても報告する。

2. 新接合法の概要

本接合法の工程は次の2工程からなる。

樹脂を燃焼，強化繊維を露出させる

CFRPパイプを燃焼し，繊維を露出させる。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る超音波洗浄を行いこれを除去した。

露出繊維を相手部材に絡め樹脂を再含浸

露出繊維をもう一方のCFRPパイプに絡める。絡めた繊維に樹脂を再含浸させ，硬化させて接合する。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して，金属材料であれば溶接に相当するような接合法と言える。

3. 突合せ接合試験片

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22.5°とした。硬化サイクルは100℃，2hrである。

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。露出繊維は12本の束に分け、これを2つ用意し、互いに繊維の束を交互に編みこむようにして接合する(Fig.1)。樹脂の含浸はこの作業と並行して行った。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に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。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メタノールによる脱脂を施した。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)。

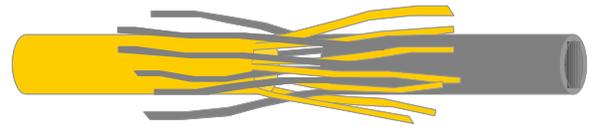


Fig.1 Image of "T" Joint



Fig.2 J Process of "T" Joint

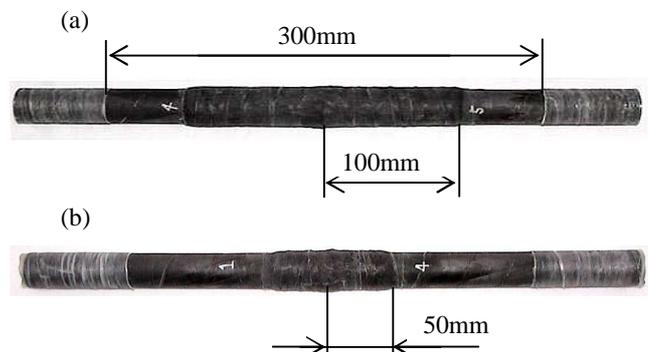


Fig.3 Dimension of Specimens
(a) 100mm Type, (b) 50mm Type

4. 引張試験

接合部の評価を引張試験により行った。試験はJISK7033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。

5. 試験結果

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。試験片 だけは接合部の両端部で引き抜けが確認された。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斉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斉破断により破壊していることを読み取ることが出来る(Fig.4,5)。このことから、本接合法において強度的に重要な要因に露出繊維付け根の応力状態、あるいは編みこむ形状、繊維劣化等が考えられる。

そこで燃焼繊維の長さを100mmから50mmに変更し、同様に引張試験を実施し、パイプの未燃焼部表面と露出繊維との界面の影響を調べた。50mmで製作した試験片の重量は100mmの物に対して平均で約62%低減した。50mmのタイプも破壊形態は100mmのタイプとほぼ同様であり、接合部中央で繊維が破断し、一方のパイプが引き抜けるのが確認できた。引張破壊荷重は100mmのタイプに比べ平均で約8.5%の低下に留まった。その結果、接合部重量あたりの引張破壊荷重で比較すると約2.5倍になっており、効率の面では100mmのタイプより50mmのタイプの方が優れる結果となった。このことから燃焼繊維の長さを100mmとしても50mmとしても破壊荷重に大きな違いはないと言える。この継手の継手効率をFWパイプ単体の最大引張応力(578.2MPa(平均))と比較し求めた(Table.4)。一部の結果に80%~90%以上を示すものがあるが、平均すると80%を下回ることで、最大引張応力の変動係数が100mmのタイプで13.4%、50mmのタイプで6.8%と、全体的にばらつきが見られるため、今後改善していく必要がある。ばらつきの要因として繊維の編み方やパイプの表面状態が考えられるが、これらは改善しうるパラメータであるため、今後の改善により安定的に高い引張強度を得ることは可能と考えられる。

露出繊維を12本の束に分けたタイプにおいて、本試験片サイズでは露出繊維長さは100mmより50mmの方が効率に優れることが分かったが、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本数を12本から20本に増やした。燃焼するパイプ長さすなわち露出繊維の長さは50mmとした。引張試験の結果、最大引張応力は平均値で570.9MPaとなり、50mm燃焼12本分けに比べ、38.7%向上した。一方、接合部重量あたりの最大応力では、50mm燃焼12本分けに比べ67%向上し

た。継手効率は平均値で98.4%に達した。このことから繊維の分ける本数を増やすことで、継手強度を大きく向上させることができることがわかる。

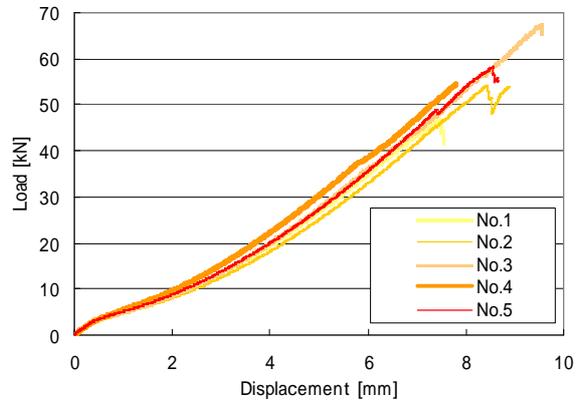


Fig.4 Load-Displacement Curves (100mm, 12Pieces)

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

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	9.36
No.4	436.3	51.42	8.49
No.5	466.0	50.42	9.24
average	449.8	53.97	8.45
Coefficient of Variation	13.4%	12.8%	17.9%

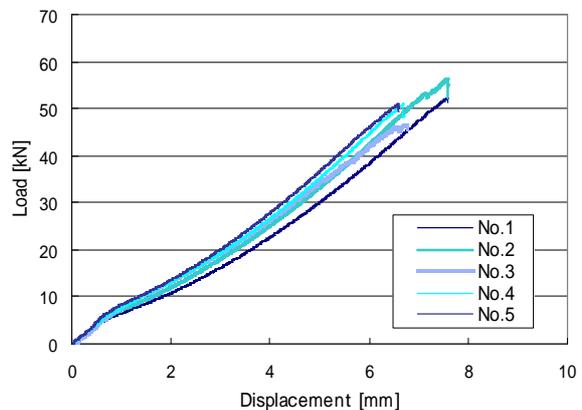


Fig.5 Load-Displacement Curves (50mm, 12Pieces)

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

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	22.71
No.5	407.5	12.98	31.39
average	411.5	20.51	21.35
Coefficient of Variation	6.8%	25.3%	30.1%

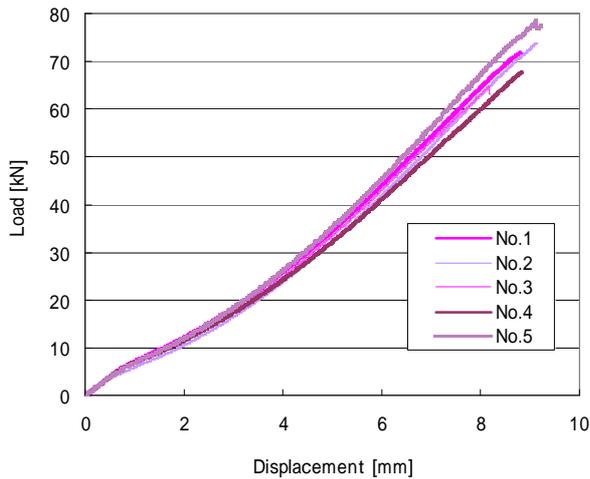


Fig.6 Load-Displacement Curves (50mm, 20Pieces)

Table.3 Results of Tensile Test (50mm, 20Pieces)

Specimens	Maximum Tensile Stress (MPa)	Weight of Joint ($\times 10^{-2}N$)	Stress/Weight ($\times 10^8m^{-2}$)
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%

Table.4 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

6. 破壊様相

破壊した試験片を軸方向に切断し、破壊様相の観察を行った。最も高い破壊強度を示した100mmタイプの試験片では交互に編みこんである繊維同士がずれ、このずれにより未燃焼なパイプ部分に軸方向に割れが生じていた。繊維の破断は見られず、相手方パイプにオーバーラップしている露出繊維が互いに滑っていた(Fig.7)。100mmタイプの試験片以外は全て一方のパイプの繊維が接合面で破断し、繊維破断した側のパイプが接合部から引き抜けている(Fig.8)。100mmタイプの試験片は接合部の露出繊維全体に均等に応力が分布したことから繊維破断より先にはずれによる破壊が生じたと考えられる。これ以外の試験片では繊維の編み方や繊維の束の分け方に偏りやムラがあり接合部の繊維に均等に応力が伝達せず一

部分あるいは一方のパイプの繊維に応力が集中し、繊維破断したものと考えられる。50mm,12本分けタイプはいずれも100mmタイプの試験片以外の破壊様相と同様であった。露出繊維の束数を20本に増やしたタイプでは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(Fig.9)。繊維の分ける本数を12本から20本に増やしたことで、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.7 Failure Aspect of the Specimen (100mm, 12Pieces)

(a) Appearance, (b) Cut Section



Fig.8 Failure Aspect of the Specimen (100mm, 12Pieces) Cut Section



Fig.9 Failure Aspect of the Specimen (50mm, 20Pieces)

(a) Appearance, (b) Cut Section

7. T型接合とその解析

7-1 T型接合試験片

試験片の製作手順等については既報であるため省略する。本試験片は露出繊維を相手パイプの中央部に絡め、接合部全体をカーボンクロスで補強したものであり、接合部強度は曲げ試験により評価した。

7-2 解析

T型接合試験片についてANSYS7.0を用いて構造解析を行った。使用要素はSHELL91、節点数17045。破壊の評価には最大応力説によって各要素において繊維方向、繊維直交方向の各方向における引張、圧縮応力、面内せん断応力のいずれかが破壊基準値を超えた時点で破壊と評価した。従来の解析モデルでは、試験片全体の剛性を実験値とほぼ合わせることが出来たが、接合部のモデリングが詳細なものではなかったため、初期損傷位置と初期損傷荷重において実験と解析で大きなずれを生じた¹⁾。改良したモデルでは接合部の形状と繊維配向角をより詳細に再現した。実験結果では1.10kN(214.5Nm)負荷時に接合部引張側コーナー部で初期損傷が確認され、次いで1.49kN(290.6Nm)負荷時に圧縮側コーナー部で損傷が確認された。以前のモデルでは0.82kN(159.9Nm)で初期損傷となったが、改良したモデルでは1.08kN(210.6Nm)負荷時に引張側コーナー部で初期損傷する結果となり、よりモデルの再現性が向上した。破損層は最外層(カーボンクロス)、破損方向は繊維直交方向引張であった。

実験においては初期損傷後は損傷の進展に伴い剛性が低下し、非線形な挙動を示した。解析上では各応力のいずれかが破壊基準値を超え、損傷したと評価される部分の要素の弾性定数を樹脂の弾性定数に逐次置き換えることにより非線形性を再現した。本解析では3ステップで近似している。解析の結果、二次損傷は1.48kN(288.6Nm)負荷時に圧縮側コーナー部で生じた。破損層は最外層、破損方向は繊維直交方向であった。非線形解析を行ったことで実験とほぼ同様な結果を得ることができた(Fig.12)。

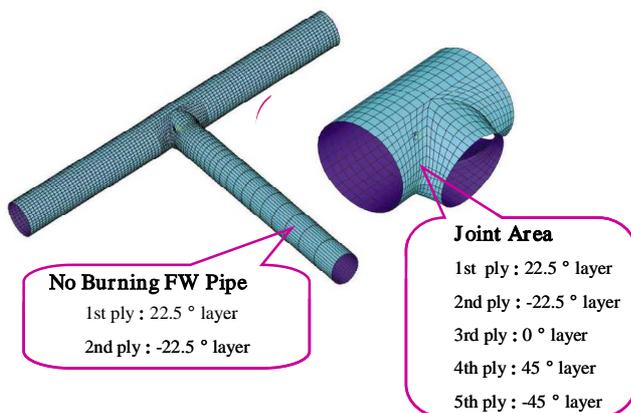


Fig.10 Finite Element Model

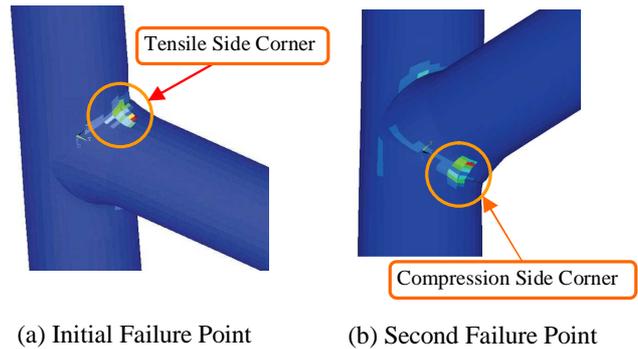


Fig.11 Failure Point of FEM

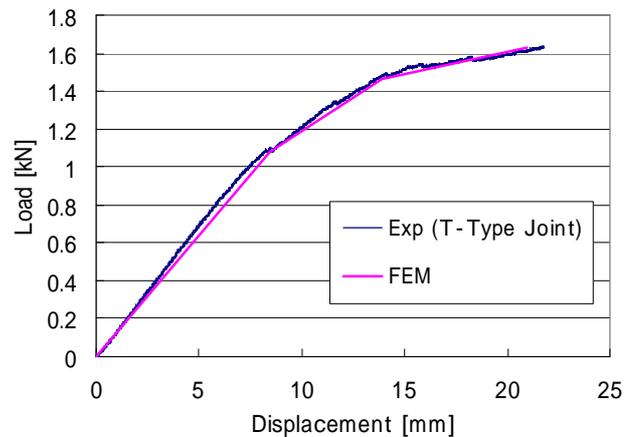


Fig.12 Load-Displacement Curves of T-Type Joint (Experimental and FEM Results)

8. 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が接合部強度に大きく影響する。また、繊維の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、接合部重量過大となることが示唆された。露出繊維の分ける本数を12本から20本に増やすことで引張強度を向上させることができた。T型接合の解析においてモデルの再構築により、剛性と荷重、初期損傷箇所が高い解析精度を示し、非線形解析の結果、剛性低下と二次損傷箇所を確認することができた。

9. 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) 邊, 美浦 第33回FRPシンポジウム講演論文集, 2004年, P356-357