靱性を有する CFRP スtrand 端部定着の開発

DEVELOPMENT OF CFRP STRAND END FIXING WITH TOUGHNESS

高岩裕也 — * 1 布谷勝彦 — * 2
鵜澤 潔 — * 3

YuYa TAKAIWA — * 1 Katsuhiko NUNOTANI — * 2
Kiyoshi UZAWA — * 3

キーワード：
CFRP スtrand, 炭素繊維, 熱可塑性, 熱溶着, 端部定着

Keywords:
CFRP strand, Carbon fiber, Thermoplastic, Heat welding, End fixing

In this study, we proposed a method to determine the frictional resistance by pushing the CFRTP socket at a temperature above T_g and changing its shape without heating it to the melting temperature. Since the surface of the strand and socket were heated to a temperature above T_g , it was confirmed that they were bonded, and the initial behavior was adhesive resistance. However, pull-out tests and observations using CT and digital microscope have confirmed that the frictional resistance after yielding does not cause brittle fracture.

1. 研究の背景と目的

炭素繊維複合材料 (CFRP) は、宇宙・航空、自動車、風車まで、様々な分野で用いられている。CFRP は鋼鉄に比べて、軽くて、高強度、錆びない、結露しにくいといった特長を有している。近年、熱可塑性樹脂を用いた CFRP (CFRTP) の高速成型技術に関する研究開発^{例えば 1)}がなされたことにより、従来に比べて低コスト化、2 次加工が可能となった。そんな中、筆者らが研究・開発した CFRTP によるより線 (CFRTP スtrand) が耐震補強部材として JIS 化²⁾されるなど、建築分野においても期待^{例えば 3), 4)}が高まっている。

現在、CFRTP スtrand の端部定着方法として、楔形の定着具を用いる方法⁵⁾や、定着スリーブの内部に静的破砕剤を充填して膨張圧によって端部定着部を構築する方法^{6) 7)}などが提案されており、それらはプレストレスコンクリートやグラウンドアンカーに適用^{例えば 8) 9)}されている。また、脆性破壊する CFRP の力学的特性を踏まえて、スリーブ¹⁰⁾を介して鋼鉄部材と組み合わせることで、鋼鉄の靱性に期待した端部定着部が開発されており、木造建築物の耐震補強⁴⁾に適用されている。

ところで、耐震補強部材として適用する既存木造建築物の多くは文化財であり、それらを構成する古材にも高い価値があるとされている。鉄鋼による端部定着部は、結露による腐朽が懸念されることから、結露しない端部定着部の開発は、既存木造建築物の耐震補強への適用といった観点において急務であるといえる。また、CFRP が適用されている他分野の多くは弾性域での構造性能が重要となる一方で、木造建築物は高い変形能力を有することが確認^{例えば 11)}されていることから、耐震補強では大変形を許容した設計法を適用するため、塑性域での構造性能が重要となる。よって部材としての靱性も要求性能として挙げられる。

そこで筆者らは、上記背景を鑑みて、CFRP の特長を損なわず、課

題であった脆性破壊を解消するために、熱溶着法を用いた CFRTP ソケットによる端部定着部を開発・提案した。そして、その開発の過程においてソケット繊維方向とスtrand 繊維方向を合わせると比較的高強度だがソケットの脆性破壊、合わせないと低強度だが脆性破壊しないことを確認¹²⁾している。また、加熱温度を上げること、体積を上げることにより、強度が向上することを確認¹³⁾している。

本報では、既報^{12) 13)}で提案した、熱可塑性樹脂および熱伝導率が高い炭素繊維の特性を活かした熱溶着法により作製した靱性を有する CFRTP スtrand 端部定着の抵抗メカニズムを把握するために、引抜き試験を実施し、試験終了後に X 線 CT およびデジタルマイクロスコブによる観察を行い、明らかになった研究知見を報告する。

図1 熱溶着による CFRTP スtrand の端部定着構造

2. 試験体材料および熱溶着方法の概要

本研究の試験体材料は、スtrand は表 1 に示す仕様の CFRTP スtrand (補強繊維: 炭素繊維, 母材: 熱可塑性エポキシ樹脂, 被覆材無し), ソケットは表 2 に示す仕様の CFRTP チップ (熱可塑性樹脂含浸炭素繊維) を用いてプレス成型した板材から楕円高さ 28mm × 幅 20mm で積層方向にウォータージェットにより切り出している。

¹⁾ 東洋大学理工学部建築学科 講師・博士 (工学)
(〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

²⁾ 金沢工業大学革新複合材料研究開発センター 研究員

³⁾ 金沢工業大学革新複合材料研究開発センター所長 教授・博士 (工学)

¹⁾ Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Toyo Univ., Dr. Eng.

²⁾ Researcher, Innovative Composite Materials Research and Development Center, Kanazawa Institute of Technology

³⁾ Prof., Director, Innovative Composite Materials Research and Development Center, Kanazawa Institute of Technology, Dr. Eng.

ストランドの公称直径 6 mmを、ソケット断面重心に設けた直径 7 から 7.5 mmの孔に貫通させて図 1 の方法に基づいて油圧式ホットプレス機を用いて熱溶着を行う。油圧式ホットプレス機に直径 20mm, 長さが 50mm の貫通孔を有するセパレートタイプの金型を設置した。温度管理は、ソケット表面およびストランド表面に設置した熱電対によりリアルタイムで確認した。

本研究では、接着による抵抗力ではなく、摩擦による抵抗力による抵抗メカニズムを期待し、融点 T_m のような高温ではなく、ガラス転移点温度 T_g 以降のゴム状態における加圧を行うことで、ソケットの貫通孔断面を変化させる成形を目標とした。そのため、加熱温度は、融点 T_m ではなく、ガラス転移点温度 T_g 以降をターゲットとした。そこで、ガラス転移点温度 T_g を把握するために、ソケットを削って 1mg の粉体を採取し、示差走査熱量計 (DSC) を実施した。DSC の結果を図 1 に示す。70℃あたりから熱流が変化し始め、 T_g は約 90℃付近に位置することを確認した。マトリクスに同材料を用いた既往研究の T_g が約 100℃に位置する動的粘弾性測定結果¹⁴⁾とも一致している。これらの結果を踏まえて、加熱目標温度について、確実に T_g を超えた温度域である 120℃に設定した。

熱溶着の成形プロセスは、ソケット貫通孔内面の温度が目標温度 120 度に到達した後、油圧プレスにより加圧し、エアーで冷却してストランド表面温度が 80℃未満になり、ガラス転移温度を下回ったところで加圧を終了した。既往研究で、熱電対を埋め込んだまま加圧冷却して成形すると、その影響によって試験結果がばらつくことが示唆されたため、約 8 分冷却によってストランド表面温度が 80℃未満になる結果を踏まえて、冷却時間を 10 分に設定し、以降の試験体制作においては目標温度到達後、ソケット内部温度が 120 度に達して、加圧する直前に熱電対を取り出し、その後、上記の必要冷却時間を踏まえて加圧冷却を行った。

図 1 熱溶着による端部定着方法

表 1 CF RTP ストランドの概要

強化繊維	高強度炭素繊維 原料: ポリアクリロニトリル (PAN)
マトリクス	熱可塑性樹脂 (熱可塑エポキシ)
繊維の単位体積含有率 V_f	70 程度
より本数	7 本
公称径	6 mm (素線径 2mm)
重量平均分子量 M_w	40,000 以上
試験体長さ	500mm
よりピッチ (より角度)	200mm 程度 (5 度程度)

表 2 CF RTP ソケット材料の概要

仕様	CF RTP-01
外観	平面寸法 320mm×320mm, 厚さ 43mm 貫通孔を有するプレート
材料	CF RTP チップ (KB-B46) 繊維長 50mm
装置	真空チャンバープレス機
成形条件	240 度まで加熱, 30 分加圧 (4MPa) 後, 100 分加圧力を保持したまま冷却
重量	6.135kg

図 2 示差走査熱量計によるガラス転移温度 T_g の評価

表 3 試験体仕様・概要

No.	貫通孔径	端 末 仕 様	成 形 条 件	共 通 項 目
1-1	7.5 φ	A : カット	加 圧 冷 却	ソケット断面： 楕円形状 高さ：28mm 幅：20mm 長さ：43mm 成形条件： 目標温度 120℃ (10kN 加圧)
1-2				
1-3				
2				
3-1	7 φ	B : 延長		
3-2				
3-3				
3-4				
3-5				
4				
			除 荷 冷 却

図 3 熱溶着後の端部処理仕様

3. 万能試験機による引抜き試験

試験体製作後、万能試験機により CF RTP ストランドに引張力を与えて載荷を行い、ロードセルを介して引抜き力を計測する。自由端側に設置した変位計によって計測した変位を拔出し変位とする。試験体セットアップ状態の載荷装置を Fig. 4 に示す。試験速度は 1mm/min とした。図 2 のような温度依存性を有する材料のため、試験室の温度は、室温を想定した 24℃に設定した。

図4 引抜き試験概要

ここで、本試験体の引抜き試験を実施した結果、既往研究^{5)~7)}に見られるような一般的な引抜き力と拔出し変位の関係とは異なる挙動となることを確認した。そこで、第4章の観察・分析結果を踏まえて図20のような2段階の挙動を定義し、引抜き力と拔出し変位の関係から最大接着力、最大摩擦力をそれぞれ評価した。また、拔出し変位が15mm時（ソケット長さの30%となる変位）の引抜き力を残存摩擦力として評価した。

はじめに、図5に示す試験体 No. 1-1, 1-2, 1-3 および 2 の比較した結果から、自由端側ストランドを延長することで、最大接着力、最大摩擦力が高くなることを確認した。また、拔出し変位が10mmを超えたあたりから、自由端側ストランドを延長した試験体 No. 2 において残存摩擦力が高い結果となった。

次に、試験体 No. 3-1, 3-2, 3-3 および 2 の比較した結果を図6に示す。貫通孔径を7.5mmから7mmに変更した結果、最大摩擦力が高くなることを確認した。ここで、試験体 No. 3-3 に使用したソケットには熱溶着前に一部デラミネーションが生じていることを確認したが、最大接着力、最大摩擦力、残存摩擦力への顕著な影響は確認できなかった。これは、ホットプレスして再度、成形しているためであると推察する。

最後に、既往研究¹²⁾¹³⁾より、本端部定着部は2段階の挙動が確認されたため、その結果を踏まえて、試験体 No. 3-4 および No. 3-5 において、試験体 No. 3-1 から 3-3 の結果を踏まえて15kNまで一度載荷を行い、その後除荷をしても影響がないかを確認する試験を実施した。1回目の載荷結果を試験体 No. 3-4-1, No. 3-5-1 とし、2回目の載荷結果を試験体 No. 3-4-2, No. 3-5-2 とした。また、試験体 No. 4 においては加圧冷却せずに、加圧後に除荷した状態で冷却することで、成形時の加圧プロセスの影響を確認している。それら試験体 No. 3-4-1, 3-4-2, 3-5-1, 3-5-2, 4 を比較した結果を図7に示す。試験体 No. 3-4 および No. 3-5 の最大接着力、最大摩擦力、残存摩擦力から、一度除荷することによる顕著な影響は確認できなかった。加圧冷却せずに、加圧後に除荷した状態で冷却した試験体 No. 4 においては最大接着力、最大摩擦力、残存摩擦力が最も低い値となり、成形時の加圧プロセスによる影響を確認した。

試験結果の一覧を表4に示す。すべての試験体において、拔出し変位15mmまで載荷を行い、脆性的な破壊は無いことを確認した。

図5 引抜き力ー拔出し変位関係
(試験体 No. 1-1, 1-2, 1-3, 2 の比較)

図6 引抜き力ー拔出し変位関係
(試験体 No. 3-1, 3-2, 3-3, 2 の比較)

図7 試験力ー拔出し変位関係
(試験体 No. 3-4-1, 3-4-2, 3-5-1, 3-5-2, 4 の比較)

表 4 引抜き試験結果一覧

No.	試験体パラメータ			最大摩擦力 (N)	最大接着力 (N)	残存摩擦力 (N)
	貫通 孔径	端末 仕様	成形 冷却時			
1-1	7.5φ	A	加圧	15925	8926	10862
1-2				16582	9365	11310
1-3				16993	8340	11954
2				17549	7316	14353
3-1	7φ	B	加圧	18303	8311	16136
3-2				19081	8804	16116
3-3				18755	12171	14356
3-4				19562	10610	16829
3-5				18837	9272	15246
4			除荷	10684	3727	9567

※ここで、残存摩擦力は拔出し変位が 15m の時の引抜き力を示す。

4. X線 CT およびマイクロ스코プによる断面形状観察

図 8, 図 9 は引抜き試験終了後における試験体 No. 3-1 のソケットの X 方向断面を示す X 線 CT 画像である。図 8 はストランドが抜けた部分、図 9 はストランドが抜けていない部分の断面である。どちらの X 線 CT 画像においても、中空部のソケット長さ方向の中央に近づく、貫通孔の断面形状が変化して楕円形状となっており、ソケット長さ方向の両端側に近づく、正円形状となっていることが確認できる。そこで、ソケット長さ方向において、寸法がどのように変化しているかを確認するために試験体 No. 3-1 を図 10 のように X-X' 断面に、試験体 No. 3-2 を図 11 のように Y-Y' 断面にそれぞれ切断した。ソケット長さ方向の両端側から 10mm 程度到達した地点から中央まで楕円形状となっていることを確認した。そして、その切断したストランドおよびソケットの界面状態をデジタルマイクロ스코プによって観察した。図 11 から図 18 に界面状況をそれぞれ示す。X-X' 断面におけるストランドーソケット界面においてはストランドとソケットが接触しており、Y-Y' 断面におけるストランドーソケット界面においては隙間が見受けられる。このことから、拔出し変位が増大しても残存していた引抜き力は、X-X' 断面にみられる接触による摩擦抵抗であることがわかる。また、Y-Y' 断面においてストランドとソケットに隙間が見受けられたが、その隙間に CFRTTP の残滓が確認できる。これは、摩擦によって削られたものであると推察する。

以上のことから、想定される抵抗メカニズムを図 19 および図 20 に示す。挙動Ⅰの範囲ではストランドの表面とソケットの内面とが溶着しており界面接着力によるせん断抵抗が生じており、挙動Ⅱの範囲ではストランドの表面とソケットの内面との接触箇所が生じる摩擦抵抗と、貫通孔の縦断面形状に合うようにストランドの断面形状が変化する際に生じる抵抗が生じていることが推察される。このことが、脆性的な破壊が生じない 3 章の要因であると推察する。

図 8 X 線 CT による試験体 No. 3-1 の断面観察
(自由端側ソケット最外縁から左が 5mm, 右が 10mm)

図 9 X 線 CT による試験体 No. 3-1 の断面観察
(自由端側ソケット最外縁から左が 40mm, 右が 45mm)

図 10 X-X' 断面に切断された試験体 No. 3-1

図 11 Y-Y' 断面に切断された試験体 No. 3-2

図 11 位置 A の界面観察

図 12 位置 B の界面観察

図 13 位置 C の界面観察

図 14 位置 D の界面観察

図 15 位置 E の界面観察

図 16 位置 F の界面観察

図 17 位置 G の界面観察

図 18 位置 H の界面観察

図 19 CFRTP ストランドーソケット間の抵抗メカニズム

図 20 CFRTP ストランドーソケット間の抵抗メカニズム
(試験体 No. 3-1 の試験結果に加筆)

5. 結論

本研究では、CFRP の建築分野への適応に向けた課題に対して、研究背景を鑑みて、熔融温度まで加熱せず、ガラス転移温度を超えた温度で加圧することで、ソケットの貫通孔の形状を変化させ、摩擦抵抗となる方法を提案した。加熱しているため、ストランドおよびソケットの表面がガラス転移温度以下となることにより接着され、初期の挙動は接着抵抗となるが、接着剥離後は、摩擦抵抗となることで、脆性破壊しない端部定着となることを確認した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) CFRTP ストランドは鋼鉄のような靱性は無く、脆性部材であるが、拔出し変位と荷重の関係の計測結果よりソケット長さの 20% を超える変形においても、急激な荷重低下をしないことを確認した。
- (2) 試験終了後の X 線 CT およびデジタルマイクロスコープによる観察の結果、ストランドの表面とソケットの内面との接触箇所が生じる摩擦抵抗と、貫通孔の縦断面形状に合うようにストランドの断面形状が変化する際に生じる抵抗によって抵抗力が残存していることを確認した。
- (3) 自由端側ストランドを延長することで、残存摩擦力が高くなることを確認した。これは自由端側ストランドをカットした場合、ストランドの拔出し変位に伴い、接触面積が減少することによって摩擦抵抗力が低下するためである。
- (4) 貫通孔の径を小さくすることで、最大接着力、最大摩擦力、残存摩擦力が高くなることを確認した。また、成形時に加圧冷却できていない場合、最大接着力、最大摩擦力、残存摩擦力が低下することを確認した。
- (5) 成形前にソケットに欠陥のある場合において、最大接着力、最大摩擦力、残存摩擦力への顕著な影響は確認できなかった。これは、成形時に熱溶着しているためであると推察する。
- (6) 接着切れ後に一度除荷した場合において、最大摩擦力、残存摩擦力への顕著な影響は確認できなかった。
- (7) ストランドの拔出し量によって残存摩擦力がある程度推定できることを確認した。これは、耐震補強工事などに適応した際、構造モニタリングといった観点から有用な結果である。

本研究では、ストランドとソケットに使用したマトリクスが同仕様の熱可塑性樹脂であったため、接着性が高くなり、接着による抵抗が生じたが、接着性の悪いマトリクスを用いれば、接着の挙動Ⅰは無くなり、摩擦による挙動Ⅱのみが生じる端部定着の開発も理論的には可能である。ソケットの貫通孔の断面形状を変化させることができればよいので、ソケットのみCFRTPで、ストランドは熱硬化性のCFRPということも考えられる。勿論、ストランドに限定されることはなく、ロッドにも適応可能であるとする。

今後、既存木造建築物への耐震補強工事への適応が予定されており、工場ではCFRTPストランドにCFRTPソケットを熱溶着して、現場に搬入し、補強対象の構面への設置を行う。そのため、現時点では、両端部をCFRTPソケットとすることができないため、片側（緊張端）はステンレスボルトエンドを計画している。しかしながら、比較的、低温で熱溶着が可能な性質を活かして、今後は、現場で熱溶着が可能な装置の開発、併せて緊張可能なCFRTPボルトエンドの開発を行う予定である。既存木造建築物への耐震補強工事への適応時には、木造軸組を補強した鉛直構面を対象とした面内せん断実験、既存木造建築物への耐震補強シミュレーション、構造モニタリングを行う予定である。

6. あとがき

本研究の一部は、JST, COI, JPMJCE1315 の支援を受けたものである。また、本研究に用いたCFRTPストランド(NH6017N)は、小松マテレー株式会社よりご提供頂いた。試験体製作時には革新複合材料研究開発センター(ICC)の佐久間様、松本様にご尽力いただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Kiyoshi Uzawa, Yoshihiro Saito, Atsushi Hokura : APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS TO CIVIL ENGINEERING AND CONSTRUCTION FIELDS -NEW INITIATIVES THROUGH ADVANCED MATERIALS AND INNOVATIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY-, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)) 73(5), II_1-II_9, 2017.5 (in Japanese)
鶴澤潔, 齊藤義弘, 保倉篤 : 土木・建築分野への複合材料利用—先進材料と革新製造技術による新たな取り組み—, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) 73 巻 5 号, p. II_1-II_9, 2017.5
- 2) JIS A 5571:2019 : Tension member for seismic reinforcement--Carbon fibre composite strand wires, 2019.11
- 3) 日本経済新聞 : 隈研吾氏ら、炭素繊維ロッドで初の耐震補強, 2015.11 (in Japanese)
- 4) 日本経済新聞 : 小松精練の炭素繊維材、善光寺の修理に活用 重文「経蔵」, 2017.1 (in Japanese)
- 5) 特許第 5913085 号, 繊維強化プラスチック製線条体の端部定着構造および方法, 2016.4 (in Japanese)
- 6) HARADA Tetsuo, IKUTA Yasukiyo, SASAKI Kenji, OHATA Hiroshi, TOKUYAMA Myokin : STUDIES ON ANCHORING MECHANISM FOR CFRP STRANDS AND PC STRANDS AS TENDON USING HIGHLY EXPANSIVE MATERIAL, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2 (Materials and Concrete Structures) 70(4), 370-389, 2014 (in Japanese)
原田哲夫, 生田泰清, 佐々木謙二, 大畑裕志, 徳山 ミョーキン : 定着用膨張材による CFRP より線と PC 鋼より線の定着機構に関する研究, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート), Vol.70, No.4, pp.370-389, 2014
- 7) T. Harada, Myo Khin, T.Enomoto, H. Kimura : Development of HEM Anchorage Having Large Capacity of 2500kN with CFRP Strands, FRPRCS-5 fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, Tomas Telford, Vol.2, pp.639-648, 2001.
- 8) Is Urs Meier et al. : LONG TERM RELIABILITY OF CFRPs IN BRIDGE ENGINEERING , 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, 19-24th July 2015
- 9) AASHTO CFRP : Guide Specifications for the Design of Concrete Bridge Beams Prestressed with Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Systems, January 2018
- 10) 特開 2017-201090, 耐震補強材, 2017.11 (in Japanese)
- 11) Yuya Takaiwa, Koichi Matsuno : AN EXPERIMENTAL STUDY ON SHEAR STIFFNESS EVALUATION UNDER LARGE LATERAL DEFORMATION OF TRADITIONAL WOODEN BUILDING WITH MUD WALL, Transactions of AIJ. Journal of structural and construction engineering, 82(738), 1245-1253, 2017.8 (in Japanese)
高岩裕也, 松野浩一 : 土塗り壁を有する伝統木造建築物の大変形領域におけるせん断剛性評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 738 号, pp. 1245-1253, 2017.8
- 12) Takaiwa Y, Hokura A and Uzawa K: Proposal of CFRTP Rod-End Fixing Using Thermal Welding Method and Bond Characteristic Evaluation, Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, pp.847-848, 2019 (in Japanese)
高岩裕也, 保倉篤, 鶴澤潔 : 熱溶着法を用いた CFRTP ロッド端部定着の提案およびその付着性能評価, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.847-848, 2019
- 13) Yuya Takaiwa, Katsuhiko Nunotani, Atsushi Hokura, Shiro Noguchi, Nobuaki Inui, Tadashi Sakuma, Kiyoshi Uzawa : INFLUENCE OF WELDING TEMPERATURE ON ADHESION PERFORMANCE OF CFRTP STRAND ROD-SOCKET, 16th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, 3A-06 , 2019.9
- 14) NISHIDA Hirofumi: The Development of Thermoplastic Epoxy Resin and Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics using it, Journal of the Adhesion Society of Japan, 51 (12), pp. 516-523, 2015.9

[2020 年 5 月 16 日原稿受理 2020 年 7 月 21 日採用決定]