

熱可塑性樹脂を用いた 炭素繊維ストランドロッドの開発 ー 接合部と撚り性能に関する研究 ー

櫻井 祥人¹・持田 泰秀²

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1)

E-mail: ru0036kk@ed.ritsumei.ac.jp

²立命館大学教授 理工学部 建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1丁目1-1)

E-mail: mochida@fc.ritsumei.ac.jp

本研究は、短時間に大量かつ安価で製造できるという利点のある、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材 (CFRTP: Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics) を撚り線状とする部材を開発することで、建築基準法の指定材料に認められていない炭素繊維複合材の建設資材における構造用材料としての活用と普及を目的とする。

本論では、炭素繊維複合材と定着樹脂の接合部に注目し、コンクリート埋め込み型、ソケット止めおよび内ねじ切り鋼管の接合方法での引張強度試験より比較検討し、接合部強度の評価を行なうと共に評価式を用いてロッド材の必要定着長さを算出し提案する。また、撚り角度がCFRTPストランドロッドの力学的特性に及ぼす影響を評価し、CFRTPストランドロッドの撚り角度と耐力、剛性の関係性を、評価式を用いて示す。

Key Words : CFRTP, thermoplastic, joint, twisting performance

1. はじめに

近年、多様な分野において炭素繊維の性質に注目が集まっているが、建築分野もその例外ではない。その優れた性質を建築技術に活用すべく、多くの研究が行なわれている。しかし現行の建築基準法では、2006年における見直しにより既存建築物の耐震補強に限り炭素繊維の使用が認められているものの、指定材料として認められておらず、主要構造材としての採用は現状では困難である。

炭素繊維に樹脂を浸透させ硬化させた炭素繊維複合材は、軽量・高強度・耐薬品性などの優れた性質を持つ材料であり、その中の一つである炭素繊維ストランドロッドを耐震補強材として用いた実験的な施設はすでに存在しており、耐震性能や施工性などの観点において十分に炭素繊維の可能性を証明している。

本研究では、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維 (以下 CFRTP: Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics) ストランドロッドと樹脂との接合部に注目し、各種試験による接合部強度の評価を行うと共に評価式を用いてロッド材の必要定着長さを算出する。また、撚り角度がCFRTPストラ

ンドロッドの力学的特性に及ぼす影響を評価し、CFRTPストランドロッドの撚り角度と耐力、剛性の関係性を、評価式を用いて示す。

2. 炭素繊維ストランドロッド概要

本研究で用いたCFRTPは、日本の伝統産業である組紐の技術と現代の炭素繊維技術を融合した、強さとしなやかさを有するロープ状の部材である。図-1に示すよう

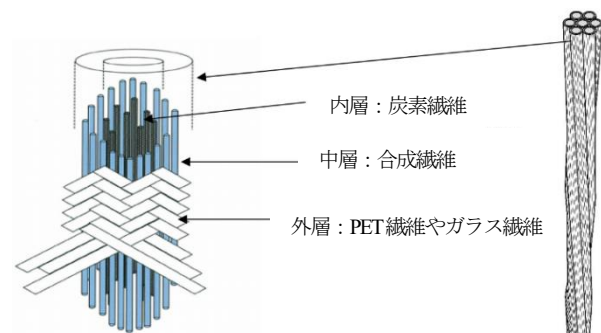


図-1 炭素繊維の部材構造

に、部材構造は中心から、炭素繊維・エポキシ樹脂・高強度繊維の3層構造で形成する。接着剤の機能を持つエポキシ樹脂に芯となる炭素繊維を浸し円柱状に乾燥。最後に外側の高強度繊維を編み機で組紐状の形状に仕上げる。炭素繊維には東レのトレカ®T700SCを用いた。母材樹脂には可変性等の観点から、熱可塑性エポキシ樹脂を用いた。

特徴としては、①熱変形が可能（約150℃以上で複雑形状に加工が可能）、②強度が高く棒鋼より細径で、建造物への負担が少ない、③錆びず結露しにくい、④難燃性がある、⑤素材ごとに分別ができ、リサイクルが可能、⑥使用樹脂は耐衝撃性に優れることなどが挙げられる。

3. 接合部試験概要

本研究では（1）コンクリート埋め込み型、（2）ソケット止め、（3）内ねじ切り鋼管の3種類の接合方法による引張試験データを用い、その各種接合方法について性能を評価した。

（1）コンクリート埋め込み型引張試験概要

本来耐震補強に用いる埋め込みタイプの炭素繊維ストランドアンカー（CFアンカー）をT型梁や壁に対して適用することを目的とした引き抜き性能の改善について検討を行っている、『炭素繊維ストランドアンカーの引き抜き性状』（2000年9月実施、日本建築学会学術講演）のデータを用いた。

表-1 試験体概要（CFアンカー）

郡	番号	穿孔径(mm)/ ストランド本数	孔の深さ(mm)	拡底数	穿孔角度
Ⅰ	1	φ 18/50	135～139	無	0度
	2		121～136	1段	
	3		114～116	2段	
	4		113～121		
	5		111～122		
Ⅱ	6	φ 18/30	108～119	1段	0度
	7		104～120	2段	
Ⅲ	8	φ 14/38	108～112	無	0度
	9		96～100	1段	
	10		99～108	2段	
	11		90～94		
	12		87～90		
Ⅳ	13	φ 12/24	82～96	無	0度
	14		78～83	1段	
	15		82～88	2段	
	16		71～78		
	17		75～80		
Ⅴ	18	φ 12/32	149～153	無	0度
	19		148～150	1段	
	20		148～149	2段	
	21		148～151		
	22		79～82		
Ⅵ	23	φ 18/24	127～132	1段	0度
Ⅶ	24	φ 18/72	197～207	無	

表-2 コンクリートの機械的性質

	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (Mpa)	ヤング係数 (Gpa)	ポアソン 比
A	25.9	2.38	26.5	0.210
B	27.6	2.84	27.2	0.221
番号1～16はコンクリートA、				
番号17～24はコンクリートBを使用				

表-1に試験体の概要を示し、表-2にコンクリートの機械的性質を示す。試験体は、必要量の炭素繊維ストランド（CFストランド）を束ね、全長にエポキシ樹脂（熱硬化性樹脂）を含浸させ、一端に接着剤を充填した穿孔部に埋め込む。埋め込まない部分は、可能な限りたわまないように上部を引き上げた状態で硬化させる。硬化後、鋼製パイプを被せ隙間に静的破砕剤を入れ固定した。

各試験体は5本ずつ作製し、最大耐力はその平均値とした。なお、使用したCFストランドは24K（炭素繊維24,000本）の高強度タイプとし、収束剤の付着量0.2%の製品を用いた。

パラメータは穿孔部の拡底数、穿孔角度、孔の深さとした。

（2）ソケット型引張試験概要

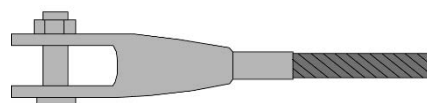


図-2 ソケット止め

ソケット止めはソケット金具の内部に炭素繊維の素線を挿入した後、先端部を茶筌状にばらし、脱脂・洗浄等の過程を施しソケット内部にばらし部を引き込み、定着樹脂を注入して一体化させる接合方法である。今回は定着樹脂としてウレタン系樹脂を用いた。

表-3に試験体概要を示す。本試験では、炭素繊維構成の違いによる強度発現度の変化を調べる。3種類の試験体（24K40本、60本、80本）それぞれ2本計6本を用いて引張実験を行い、あらかじめ算出した推定値に対する測定値から強度発現度を割り出し、目標強度の発現に適切な炭素繊維構成を明らかにする。

表-3 試験体概要（ソケット）

試験体No.	No.1	No.2	No.3
構成	24K40本	24K60本	24K80本
試験体数	2体	2体	2体
固定治具	ソケット	ソケット	ソケット
	長さ:91mm	長さ:91mm	長さ:91mm
	テーパ角度:10.5°	テーパ角度:10.5°	テーパ角度:10.5°
推定値70% (kN)	110.85	165.78	221.7

（3）内ねじ切り鋼管引張試験概要

内ねじ切り鋼管による接合は内ねじ入り鋼管とCFRTPを、熱硬化性樹脂を接着剤として用いることで接合する

形式である。樹脂と外層被覆材、埋め込み長さによって引張強度に差が生じる。

本試験では、内ねじ切り鋼管を用いたCFRTPの接合でのロッド材の撓りと端部被覆の必要性、そして外層素材（PET及びガラス）による引張強度への影響を検討する。

a) 撓りの必要性の検討

エポキシ樹脂を接着剤として用い、ロッド両端に内ねじ切り鋼管を取り付けたものを試験体とする。表-4に試験体仕様を示す。

表-4 試験体概要（撓り）

製品名	炭素繊維ストランドロッド	
試験体区分	A	B
試験体構成	24K×7本(ストランド)	24K×7本(ストレート)
試験体寸法	440mm	300mm
繊維構成	芯層:CF24K(T700SC)被覆:ガラス繊維	
定着樹脂	エポキシ樹脂(常温硬化)	
定着治具	鋼製、外形φ19mm×長さ120mm	

試験は、ロッドの種類ごとに伸び率及び引張強度の測定を行った。加力は万能試験機を用い、試験体に毎分2mmの速度で引張力を加え、試験体が破断するまで行う。伸び率は、試験機のグリップ間距離の伸び率を試験体のつかみ距離で除して求める。また、引張強度は式(1)より算出した。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

ただし、 σ ：引張応力(MPa)

F：測定荷重(N)

A：中外層を含む試験体の断面積(mm²)

b) 外層素材による引張強度への影響

引張試験により測定した、各試験体の最大耐力と炭素繊維量より求めた引張耐力の推定値と比較し、外層（被覆）材の有無と、その素材が引張強度にどれほどの影響を与えるのかを検討する。推定強度は理論値に過去の実験値より算出した、外層被覆材に応じた係数（PET:70%、ガラス:90%）を乗じたものとする。式(2)に理論値 σ_c の算出式を、表-5に試験体概要を示す。

$$\sigma_c = 0.9\sigma_{fu} \times n \quad (2)$$

ただし、 σ_{fu} ：繊維引張強度

n：CFRTPの束数

$$\sigma_{fu} = 4900 \text{ N/mm}^2$$

（トレカ®系 T700SC-24000 のカタログ値より）

No.1の端部は外層を取り除き、炭素繊維を茶筌状にばらし、固定治具に定着する。No.2-3は外層を残した状態で治具に定着する。図-3にNo.1の端部を示す。

供試体は二つの定着具が試験機に取り付けられる点を

表-5 試験体概要（外層素材）

試験体No.	1	2	3
形状(撓り)	ロッド(-)	ストランド(無)	ストランド(無)
外層材	PET繊維	PET繊維	ガラス繊維
炭素繊維構成	24K20本	24K1本×10本	24K1本×10本
端部(外層)	無(茶筌状)	有	有
試験体数	52体	57体	100体
試験体寸法	500mm	300mm	300mm
固定治具	ねじ切り鋼管	ねじ切り鋼管	ねじ切り鋼管
	φ14mm/20mm	φ14mm/20mm	φ14mm/20mm
	長さ:120mm	長さ:120mm	長さ:120mm
ε測定方法	ひずみゲージ	変形量から算出	変形量から算出
理論値(kN)	89.9	44.1	44.1
推定値(kN)	56.6	27.8	35.7

結ぶ仮想線に、供試体の長軸が一致するように取り付ける。

供試体のヤング係数及び終局ひずみを求めるため伸び計・ひずみゲージを取り付ける。供試体試験部の中央に定着部よりCFRTPの平均外径の8倍以上離して、引張方向に取り付ける。標点距離は、CFRTPの平均外径の8倍以上とし、CFRTPがより線状のものでは、平均外径の8倍以上かつ、よりピッチの長さ以上とする。

載荷速度は1分間につき100～500N/mm²の割合で載荷する。ただし、ひずみ制御方式の試験機を用いる場合のみ1分間につき100～500N/mm²に相当する定ひずみ速度で載荷する。

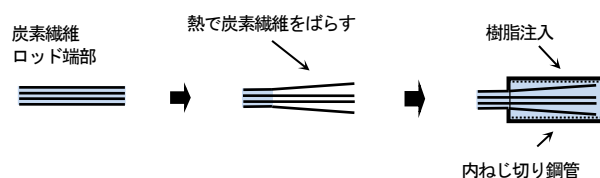


図-3 No.1 端部概念図

4. 接合部試験結果

(1) コンクリート埋め込み型引張試験結果

表-6にコンクリート埋め込み型引張試験の結果を示す。

a) 穿孔部の拡底数や穿孔角度の影響

孔を拡底することによる効果は、V群において特に顕著にみられ、耐力上昇に期待ができることが証明された。

CFアンカーの埋め込み角度と最大耐力の関係については、角度が大きくなるにつれて試験値の平均は顕著に低下し、0度と45度とを比較するとIV群ではおよそ半分、III群では3分の1まで低下した。今回は他の接合方法との比較のため0度を用いる。

b) 孔の深さ

CFストランドの埋め込み長さによって破壊モードが変化することがわかる。I群とIII群を比較すると、I群に対して孔深が28mm減少したことで母材破壊からコー

表-6 試験結果一覧 (CF アンカー)

郡	番号	穿孔径(mm)/ ストランド本数	孔の深さ(mm)	拡底数	穿孔角度	試験値の 平均 (kN)	破壊モード
Ⅰ	1	φ 18/50	135～139	無	0度	74.5	コーン
	2		121～136	1段		60.2	コーン
	3		114～116	2段		61.0	母材コン
	4		113～121		30度	56.0	コーン
	5		111～122	45度	29.5	母材	
Ⅱ	6	φ 18/30	108～119	1段	0度	73.0	コーン母材
	7		104～120	2段		70.7	コーン母材
Ⅲ	8	φ 14/38	108～112	無	0度	61.8	コーン
	9		96～100	1段		63.4	コーン
	10		99～108	2段		62.2	コーン
	11		90～94		30度	39.1	コーン
	12		87～90	45度	21.3	コーン	
Ⅳ	13	φ 12/24	82～96	無	0度	42.0	コーン母材
	14		78～83	1段		40.1	コーン
	15		82～88	2段		40.4	コーン
	16		71～78		30度	26.6	コーン
	17		75～80	45度	19.5	母材	
Ⅴ	18	φ 12/32	149～153	無	0度	40.1	母材
	19		148～150	1段		55.1	母材
	20		148～149	2段		62.7	母材
	21		148～151		30度	42.1	母材
	22		79～82	45度	22.4	母材	
Ⅵ	23	φ 18/24	127～132	1段	0度	62.3	母材
Ⅶ	24	φ 18/72	197～207	無		102.4	母材
破壊モード:コーン(4-5体コーン破壊), コーン母材(3体コーン破壊), 母材コン(3体母材破壊), 母材(4-5体母材破壊)							

ン破壊に変わっている。これは、埋め込み深さを短くすることでコンクリートの耐力を母材の耐力が上回ったことが要因と考えられる。

(2) ソケット型引張試験結果

表-7に試験結果を示す。試験体No.3およびNo.4 (24K60本) の場合、強度発現度が異常に低いことから、作製段階において充填不良等の何らかの原因があったと考えられる。試験体No.1および2 (24K40本) の場合、比較的強度発現度が高い結果となり、目標強度の発揮も達成している。破壊モードが定着部の抜けであることから、樹脂の充填性能が重要といえる。

使用樹脂について本試験では、ウレタン系樹脂を用いたが、この樹脂は一般的に薄く延ばすように使用することに用いられており、何かに充填する場合には適当でなかったと考えられる。強度発現度の異常な低下は、こうした要因が考えられる。一方、エポキシ樹脂の場合であれば、主剤と硬化剤の2液を均等に混合さえすれば充填用にも十分使用することができるため、より高い強度発現度を期待できると考えられる。

表-7 試験結果一覧 (ソケット)

No.	炭素繊維構成	固定治具	推定値70% (kN)	測定結果 (kN)	破壊モード	強度発現度
1	24K40本	ソケット 長さ:91mm テーパ角度 10.5°	110.85	87.89	ソケット内 定着抜け	79%
				78.48	ソケット内 定着抜け	71%
2	24K60本	ソケット 長さ:91mm テーパ角度 10.5°	165.78	58.86	目刺き部 破断	36%
				55.91	目刺き部 破断	34%
3	24K80本	ソケット 長さ:91mm テーパ角度 10.5°	221.70	142.24	内層母材 破断	64%
				149.11	ソケット内 定着抜け	67%

(3) 内ねじ切り鋼管引張試験結果

a) 撚りに関する試験結果

表-8 試験結果一覧 (撚り)

試験体構成	No.	伸び率(%)		最大荷重(kN)		破断モード
		個別	平均	個別	平均	
A ストランド	1	4.5	4.6	36.97	37.12	母材破断
	2	4.9		39.42		母材破断
	3	4.5		35.64		母材破断
	4	4.7		36.64		母材破断
	5	4.4		36.94		母材破断
B ストレート	1	12.9	12.9	40.08	40.30	母材破断
	2	13.3		40.95		母材破断
	3	12.6		40.29		母材破断
	4	12.6		38.89		母材破断
	5	12.8		40.05		母材破断

表-8に試験結果一覧を示す。試験結果より、撚りの有無によって最大荷重に大きな差異は生じなかったが、伸び率はストレートの方がストランドに対して約3倍小さくなった。通常、同質材料のロープ状の引張材の場合、撚りを加えた部材の方が引張り剛性は落ちる(6章に記載)が、本試験では試験体のつかみ間距離を用いて伸び率を測定したため、接合部の炭素繊維と定着樹脂の付着がストランドの方が大きくなり、その影響が撚りによる剛性低下よりも大きく出たものと思われる。

b) 外層素材による引張強度への影響

図4, 6, 8に試験体No.1-3の最大荷重のヒストグラムを図-5, 7, 9に試験体No.1-3の剛性のヒストグラムを表-10に試験結果を示す。

No.1は最大荷重のヒストグラムから標準偏差は3.74、剛性のヒストグラムから標準偏差は11.90となり、ばらつきが大きくなった。これは端部の外層(PET繊維)を無くし、炭素繊維を茶筌状にした状態で固定治具(内ねじ切り鋼管)に熱硬化性樹脂で定着しているため、引張試験においてズレてしまい、ばらつきが生じたことが原因に考えられる。

No.2では最大荷重のヒストグラムからは標準偏差は3.28となり、No.1と同程度のばらつきがみられたが、剛

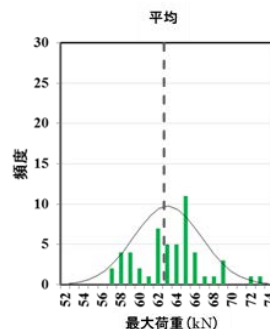


図-4 No. 1 最大荷重

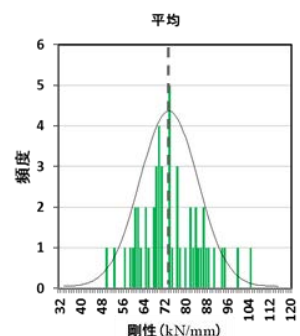


図-5 No. 1 剛性

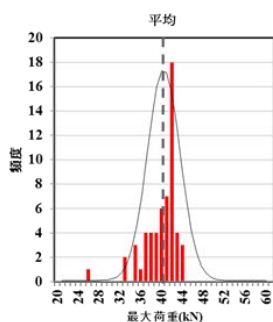


図-6 No. 2 最大荷重

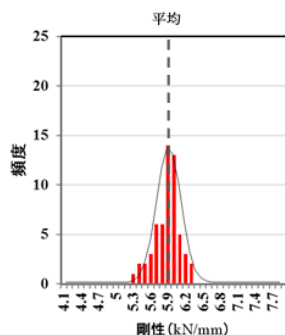


図-7 No. 2 剛性

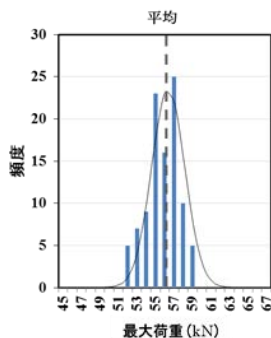


図-8 No. 3 最大荷重

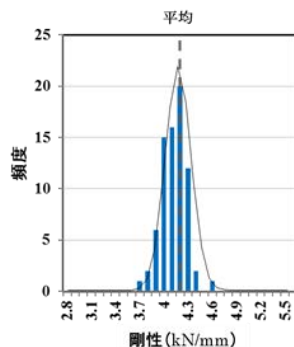


図-9 No. 3 剛性

表-9 各種繊維の引張弾性率

	PET繊維	ガラス繊維
引張弾性率	3.0-8.5GPa	75GPa

性のヒストグラムでは標準偏差が0.22とほとんどばらつきが無い結果となった。これは外層（PET繊維）を残して固定治具に定着したことにより、各試験体での精度のばらつきが小さくなったことが影響したと考えられる。

No.3では最大荷重のヒストグラムから標準偏差は1.71、剛性のヒストグラムの標準偏差は0.16となり、どちらもばらつきはほとんどないという結果になった。これは外層（ガラス繊維）を残して固定治具に定着していることに加え、外層にPET繊維よりも引張弾性率の大きいガラス繊維を使用していることで、引張強度試験において外層の影響がPET繊維よりも小さくなっていることが理由に考えられる。

表-10より、各試験体の推定値に対する強度発現度を比較すると、No.3が最も大きくなり、No.1が最も小さくなった。No.2、No.3は外層を残したまま接合しているため、外層が引張力に抵抗し、炭素繊維量より求められた推定値より大きな最大荷重となったと考えられる。また、外層素材の中でも引張弾性率の大きいガラス繊維の方がより大きく引張力に影響し、強度発現率を引き上げたと考えられる。

表-10 試験結果（外層素材）

試験体No.	No.1	No.2	No.3
推定値(kN)	56.6	27.8	35.7
最大荷重の平均(kN)	62.2	40.4	56.3
強度発現度(%)	109.9	145.3	157.8
標準偏差(最大荷重)	3.74	3.28	1.71
標準偏差(剛性)	11.9	0.22	0.16

5. 接合部強度評価

試験結果を用いて式(3)の評価式より、母材—樹脂間における引抜体力の評価を行う。

$$P_n = \pi \cdot k \cdot \tau \cdot D \cdot L \quad (3)$$

P_n : 定着耐力 (kN)

D : 部材径 (mm)

L : 有効埋込長さ (mm) (埋込深さ一部材径)

τ : 引抜耐力に対する付着強度 (N/mm²)

k : 撚りによる付着割り増し係数

今回は、先込充填樹脂性能表より $\tau=9.8$ (N/mm²)、実験値より $k = 1.1$ を用いる。

前述の各試験データの撚りの加えられている試験体から式(3)の評価式に用いる必要数値を以下の表-11に示す。

式(3)を用いて算出した値 P_n (kN) を計算値、実際の試験データによる最大荷重を P_{max} (kN) を実験値とし、各試験体における数値の大小関係を比較する。比較結果を表-12、図-10に示す。No.4は試験体作成段階で問題があった可能性があるが、No.4を除いた全てが $P_{max} > P_n$ の関係になっており構造物にCFRTPストランドロッドを適用する際に式(3)の評価式を用いて P_n 値を求めることが可能であると言える。

表-11 試験体数値

番号	炭素繊維構成	埋込深さ(mm)	D	L	P	データ元
			部材径(mm)	有効埋込長さ(mm)	最大荷重(kN)	
①	24K50本	137	φ 14	123	74.5	CF-1
②	24K38本	110	φ 13	97	61.8	CF-8
③	24K24本	89	φ 10	79	42.0	CF-13
④	24K32本	151	φ 12	139	40.1	CF-18
⑤	24K72本	202	φ 18	184	102.4	CF-24
⑥	24K40本	91	φ 13	78	83.2	ソケ-1,2平均
⑦	24K3本×7	120	φ 9	111	87.2	ねじb-4
⑧	24K7本	120	φ 5.8	114.2	37.1	ねじa-A

表-12 数値比較表

番号	Pmax(kN)		Pn(kN)	備考
①	74.5	>	56.8	
②	61.8	>	41.6	
③	42.0	>	26.1	
④	40.1	<	54.9	試験体不良
⑤	102.4	>	100.5	
⑥	83.2	>	33.4	
⑦	87.2	>	32.9	
⑧	37.1	>	21.8	

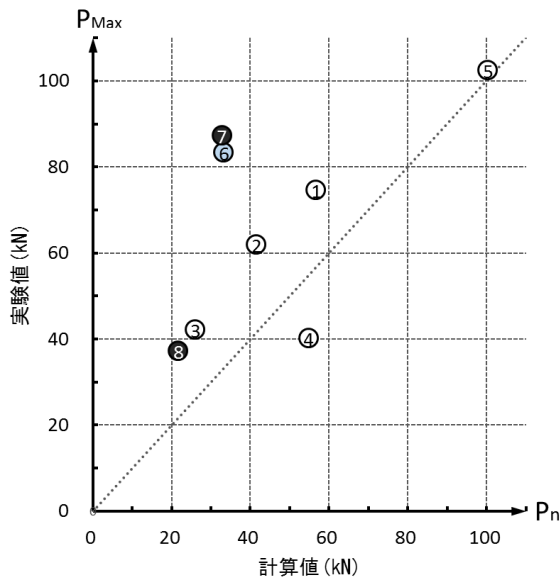


図-10 実験値—計算値の比較

$P_{max} > P_n$ の関係が明らかとなったため、式(3)より求めた P_n から、式(3)を L' について解くことで最低必要埋込長さ $L'n$ が求められる。その結果、表-13に示すように L_n と $L'n$ の差異は大きくないことが分かった。そのため、CFRTPの接合部のディティールはその性能を発揮するうえで非常に重要といえる。

表-13 最低必要埋込長さとの差異

番号	$L'n$ (mm)	L_n (mm)	差異 Δ (mm)
①	121.4	123.0	1.6
②	95.7	97.0	1.3
③	78.0	79.0	1.0
④	137.0	139.0	2.0
⑤	181.4	184.0	2.6
⑥	77.0	78.0	1.0
⑦	109.4	111.0	1.6
⑧	112.6	114.2	1.6

6. 撓り角度と剛性の関係性

ワイヤーロープやPC鋼より線などの撓り線材には様々な撓り方があり、その撓りの角度や本数などを工夫することで強度や形状等に様々な効果が生まれている。

4(3)a)より、CFRTPの接合においても撓りを加えた部材を使用することで接着樹脂との付着力が高まり、接合部の引張り剛性が高まるという利点が得られることが確認できた。しかし、一般的に接合部を除く撓り線材だけを見ると撓りを加えると撓り線材の引張り剛性は子線より低下することが分かっている。

そこで本章ではCFRTPストランドロッドの撓り角度と部材自体の引張剛性の関係性について評価式を導出し、簡易的に検証を行う。

(1) 評価式の導出

今回の検証には文献3)で展開されているストランドロープについての関係式を参考にCFRTPストランドロッドのヤング率を求める式を導出する。

a) 素線の弾性的性質

素線の弾性的性質は素線の伸びとねじれ、さらに素線の直径の細りとで式(4)のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} T \\ M_T \\ M_B \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{34} \end{bmatrix} \times (\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \rho, k) \quad (4)$$

T : 引張力

$\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$: ひずみ

M_T : ねじれモーメント

ρ : ねじれ率

M_B : 曲げモーメント

k : 曲率

a_{ij} の数値はスパイラルの伸び剛性、およびスパイラルの曲げを扱った各項から定まる。ここに ε_r は素線の直径の細りに関係し、一概に定められないから適当なポワソン比を仮定して ε_α の項に含ませる。そうすれば素線としての変形と応力に関しては式(5)のようになる。

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_\alpha \\ \rho \\ k \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T \\ M_T \\ M_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

素線の撓り角度と半径をそれぞれ β , R と与え子線全体の伸び ε_z , 子線径の細り ε_R , ねじれ変形 γ_R によって素線に生ずる変形量は式(6)のようになる。

$$\varepsilon_\alpha = \varepsilon_z \cos^2 \beta + \varepsilon_R \sin^2 \beta + R \gamma_R \cos \beta \sin \beta$$

$$\Delta k = -\frac{\varepsilon_z}{R} \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \frac{\varepsilon_R}{R} \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \gamma_R \sin \beta \cos \beta (2 - \sin^2 \beta)$$

$$\Delta\rho = \frac{\varepsilon_z}{R} \sin^3\beta \cos\beta - \frac{\varepsilon_R}{R} \sin^3\beta \cos\beta + \gamma_R \cos^4\beta \quad (6)$$

b) 素線に作用する引張力

素線の応力は式(4)に示される素線の変形量に対応して生ずる力を式(6)で求め、方向を考える。子線のポアソン比を ν とすれば引張力は次のようになる。

$$-T \equiv [(a_{11} - \nu a_{22})\varepsilon_\alpha + a_{13}\Delta\rho]V \quad (7)$$

V : 単位接線ベクトル

c) 部材全体の軸方向力

m 本の素線が撚り合わさったとして合力を求めれば、軸方向力 P_z は式(8)のようになる。

$$\begin{aligned} P_z = m & \left\{ [(a_{11} - \nu a_{12})\cos\beta + (a_{21} - \nu a_{22})\frac{\sin^3\beta}{R}] \varepsilon_\alpha \right. \\ & - \left[a_{34} \frac{\sin^2\beta \cos\beta}{R} \right] \Delta k + \left[a_{13} \cos\beta + a_{23} \frac{\sin^3\beta}{R} \right] \Delta\rho \} \\ = & \left[(a_{11} - \nu a_{12})\cos^3\beta + (a_{21} - \nu a_{22})\frac{\sin^3\beta \cos^2\beta}{R} \right. \\ & + a_{34} \frac{\sin^4\beta \cos^3\beta}{R^2} + \frac{\sin^3\beta \cos^2\beta}{R} + a_{23} \frac{\sin^6\beta \cos\beta}{R^2} \left. \right] m \varepsilon_z \\ & + \left[(a_{11} - \nu a_{12})\sin^2\beta \cos\beta + (a_{21} - \nu a_{22})\frac{\sin^5\beta}{R} \right. \\ & - a_{34} \frac{\sin^4\beta \cos^3\beta}{R^2} - a_{13} \frac{\sin^3\beta \cos^2\beta}{R} \\ & - a_{23} \frac{\sin^6\beta \cos\beta}{R^2} \left. \right] m \varepsilon_R \\ & + [(a_{11} - \nu a_{12})R \cos^2\beta \sin\beta \\ & + (a_{21} - \nu a_{22})\sin^4\beta \cos\beta - a_{34} \frac{\sin^3\beta \cos^2\beta}{R} (2 \\ & - \sin^2\beta) + a_{13} \cos^5\beta + a_{23} \frac{\sin^3\beta \cos^4\beta}{R} \left. \right] m T_R \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)は数値計算の結果から見て、ほとんど a_{11} 、 a_{12} の常数について求めてよく、次のように近似できる。

$$P_z \approx m(a_{11} - \nu a_{12})[\cos^3\beta \varepsilon_z + \sin^2\beta \cos\beta \varepsilon_R + R \gamma_R \cos^2\beta \sin\beta] \quad (9)$$

より細く n 本の素線であるとする、 a_{11} 、 a_{12} の常数は $a_{11} = E A n \cos^3\alpha$ 、 $a_{12} = E A n \sin^2\alpha \cos\alpha$ と表され、素線自身のポアソン比 ν とCFRTPストランドロッド全体のポアソン比とが等しく、ねじれ変形 $\gamma_R = 0$ と仮定すれば $m \times n$ 本のストランドの弾性的な性質は次のように要約される。

$$P_z = m \cdot n \cdot EA(\cos^3\alpha - \nu \sin^2\alpha \cos\alpha) \cdot (\cos^3\beta - \nu \sin^2\beta \cos\beta) \varepsilon_z \quad (10)$$

α : 素線が取る撚り角度 β : 子線が取る撚り角度

ここでCFRTPストランドロッドは図-11に示したように子線は撚りを加えられていない形状であるため、 $\alpha = 0$ となり、見かけのヤング係数を示す評価式は式(11)のようになる。

$$E_c = E(\cos^3\beta - \nu \sin^2\beta \cos\beta) \quad (11)$$

(2) 検証

表-14に検証で用いる7本撚りCFRTPストランドロッドの物性値を示す。ポアソン比は文献4)の値を用いた。式(11)に表-14の物性値を代入し撚り角度を大きくしてゆくと図-11のように見掛けのヤング率が減少する性質が見てとれ、軸方向力 P_z に関しても $\cos^3\beta - \nu \sin^2\beta \cos\beta$ によって剛性と同じ割合で低下することがわかる。

図-11上の撚り角度 14.7° の値と試験体から計測した実験値のヤング係数と比較しても大差ない結果となり、式(11)が検証に概算的に適応できることが確認できた。しかし、式(11)は単一素材で構成されるストランドロープを対象とした研究を元に導出された評価式であるため、複合材であるCFRTPストランドロッドのより精度の高い評価には今後、外層材の影響等も考察していく必要がある。

表-14 7本撚り CFRTP の物性値と撚り角度

子線のヤング係数	137(kN/mm ²)
ポアソン比	0.06
撚り角度	約 14.7°

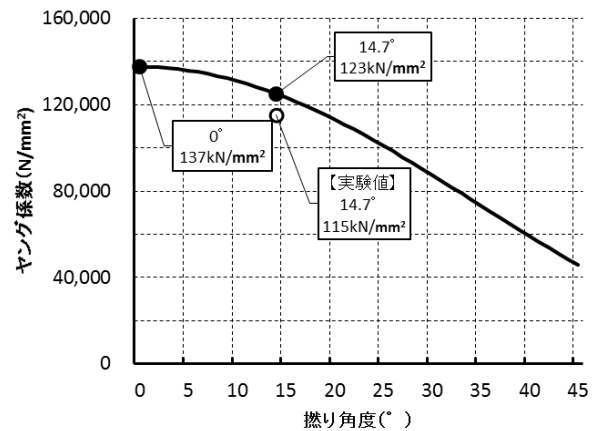


図-11 撚り角度とヤング係数の関係

7. まとめ

本研究では、3方式の接合、延べ40を超える試験体から8つに絞込み評価を行い、CFRTPの接合部に関する研究を行った。また、それに関連するCFRTPストランドロッドの撚りと剛性に関する評価も行った。建築業界でも炭素繊維に注目が集まり、耐震補強材として実験的な取り組みが進んでいるなか、確かな成果を出すことで信頼性の向上にもつながると考える。特に接合部に関しては、応力を負担する個所として非常に大切であり、その接合方法には細心の注意を払うべきである。有効埋め込み長さと最低必要埋込長さに大きな差異は生じないという結果から、接合部のディティールの重要性が分かる結果となった。

また、ストランドロッドの撚りが接合部での付着強度に寄与することが確認できたが、撚り角度と部材強度、剛性の関係性についても検証したところ、撚り角度が大きくなるに従い、部材の性能としては低下することが判明した。

参考文献

- 1) 塚越英夫, 神野靖夫, 池谷純一: 炭素繊維ストランドアンカー (CF アンカー) の引抜き性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.421-422, 2000.
- 2) 一般法人ベターリビング: 引張試験成績表, 2013.
- 3) 島田静雄: 弾性針金の変形と応力, 土木学会論文集第72号・別冊3-1, 1961
- 4) 島津製作所分析計測事業部応用技術部: 島津試験CSC ニュース No.270, 2007.

DEVELOPMENT OF CFRTP ROD USING THE THERMOPLASTIC RESIN -STUDY ON THE JOINT AND TWISTING PERFORMANCE-

Yoshito SAKURAI and Yasuhide MOCHIDA

This research aims to develop a member with a twisted-line structure of CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermo-Plastics), which has an advantage of being able to be mass-produced at low cost in a short time, for the purpose of utilization and dissemination as structural materials in construction materials of carbon fiber composite materials not approved as specified materials of Building Standard Law.

In this paper, attention is focused on the joint between CFRTP and resin, compared with tensile strength test by socket stopping and threading steel pipe joining method, and the evaluation of joint strength is carried out and at the same time, calculate and suggest the required fixing length. The effect of the twist angle on the mechanical properties of the CFRTP strand rod is evaluated, and the relationship between the twist angle and rigidity of the CFRTP strand rod is shown using the evaluation formula.