

ロープ状連続繊維補強材を用いたコンクリート部材の力学性状

コンクリート研究室 田坂 雄治
指導教官 下村 匠

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上，塩害対策，耐震補強のために，鋼材に比べ引張強度，耐腐食性に優れ，かつ軽量である炭素，アラミド，ガラスなどの連続繊維をコンクリート用補強材として使用する研究が進められ，実構造物への適用も行われている。その多くは連続繊維をエポキシ樹脂で固めたFRPとしてコンクリート用補強材として使用するものであり，これまでに，連続繊維棒材，連続繊維シートが広く実用されている¹⁾²⁾。

一方，そのほかの形態のコンクリート用連続繊維補強材についての研究もさかに行われている。本研究で使用するロープ状連続繊維補強材(写真 - 1，以下 CF Rope)は，エポキシ樹脂などを使用しない，繊維単体からなる新素材である。さまざまな形状に容易に加工することができるので，可搬性，配筋の作業性に優れるという利点がある。

連続繊維補強コンクリート部材のせん断性状および評価方法について，最近の 15 年間，数多くの研究が行われ，連続繊維の力学的性質が鋼材と大きく異なることから，そのせん断特性は



写真 - 1 ロープ状連続繊維補強材

多くの点において鉄筋コンクリート部材とは異なることが確認されている。

CF Rope をコンクリート用補強材として使用するには，基本的な材料特性として引張特性が必要となる。しかしながら，この種の材料の引張試験においては，供試体端部の定着方法，ひずみの測定方法に工夫を要する。連続繊維は一般に一方向性材であるため，せん断，支圧強度が低く，定着方法が強度試験結果に影響する。このため，使用する材料の性質，形状などにより適切な定着方法の選定が必要となる。

そこで本研究では，CF Rope の引張特性を調査するため，引張試験方法について検討を行った。また，CF Rope のコンクリート用補強材への適用として，せん断補強筋として使用することを試みた。

2. CF Rope の引張試験概要

2.1 はじめに

FRP 棒材の定着装置は，鋼管またはテーパ状の鋼管に FRP 棒材を挿入し，その隙間にエポキシ樹脂，モルタル，膨張材などを充填し，鋼管と FRP 棒材を一体化させる方法が主に用いられている。

予備実験として，鋼管に CF Rope を挿入し，充填材としてエポキシ樹脂と定着用膨張材を使用し比較を行った。その結果，エポキシ樹脂を使用した場合は，CF Rope の引き抜けまたは鋼管内で繊維の破断が生じた。一方，定着用膨張材を使用した場合は，試験区間での破断は起こらなかったが，強い付着強度を示した。従って本研究では，充填材として定着用膨張材を使用することとした。

表 - 1 繊維素材の物性

繊維	アラミド
引張強度(MPa)	2920
弾性係数(MPa)	70500
伸び率(%)	3.6
密度(g/cm ³)	1.44

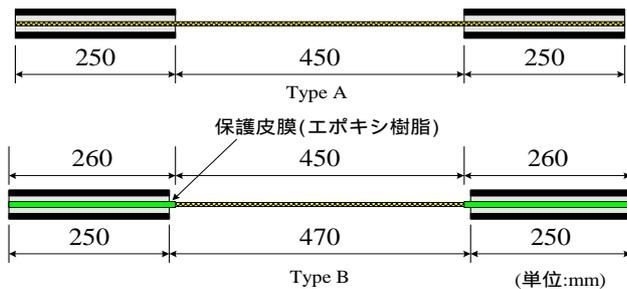


図 - 1 供試体概略図

2.2 使用した繊維材料

本研究で使用したCF Ropeの素材はアラミド繊維である。繊維素材の物性値を表 - 1 に示す。CF Ropeはこの繊維よりなる 8 本の繊維束(繊維束 1 本は 6000 本のフィラメントを束ねたもの)を組紐状に成形加工したものである。組紐状にした状態での断面積は 5.56mm²である。

2.3 引張試験用供試体の作製

試験に用いる CF Rope はすべて同一ロットから採取した。定着部にエポキシ樹脂による保護被膜を施した Type B 供試体 32 本,保護被膜を施していない Type A 供試体 12 本の計 44 本の供試体について引張試験を行った。

引張試験用の供試体の概略図を図 - 1 に示す。試験区間はいずれも 450mm とした。Type B の供試体は,鋼管内での繊維の破断を防ぐため,端から 260mm までの区間にエポキシ樹脂を含浸硬化させた。

2.4 引張試験方法

鋼管を直接,引張試験装置のチャックで固定し,引張力を載荷した。

いくつかの供試体では繊維の伸びひずみを計測した。ひずみの測定は,試験区間中央に接着したひずみゲージにより行った。ひずみゲージ

表 - 2 破断形式別の試験結果

	Type A		Type B	
	口元	境界	中央	
破断箇所	口元	境界	中央	
サンプル数	12	24	8	
平均破断荷重(kN)	10.92	11.62	12.08	
平均引張強度(MPa)	1963	2090	2173	

表 - 3 引張試験結果

		Type A	Type B
破断荷重 (kN)	平均値	10.92	11.74
	標準偏差	0.72	0.67
	変動係数(%)	6.64	5.75
平均引張強度(MPa)		1963	2111

は,検長 5mm の複合材料用ひずみゲージを使用した。供試体中央の繊維表面に樹脂を塗布し,硬化後表裏対称となる位置に 2 枚貼付した。

3. 実験結果

本実験で実施した全ての供試体は,定着部分で繊維が引き抜けることなく,最終的には繊維の破断により試験が終了した。繊維の破断形態は 3 パターンで,保護皮膜のない供試体(Type A)は,鋼管の口元で破断が生じ,保護皮膜を施した供試体(Type B)においては,試験区間の中央で破断が生じたものと,保護皮膜による補強区間と試験区間の境界で破断が生じたものが確認された。

表 - 2 に破断形式別の実験結果,図 - 2 に Type A および Type B の破断荷重と破壊確率の関係をそれぞれ示す。図 - 2 および表 - 2 に示すとおり,破断形式別の平均破断荷重は口元破断,境界破断,中央破断の順に増加している。

表 - 3 に Type A, Type B の破断荷重の平均値,標準偏差,変動係数を示す。表 - 3 より,破断荷重について Type B は Type A に比べ,約 10%程度大きくなっている。これは供試体の破断形態の違いによるものである。鋼管の口元

で破断した Type A 供試体による結果は，正しい材料の強度を表していないと思われる。

実験結果のばらつきは Type A については変動係数 6.64% ,Type B では変動係数 5.75%といずれも小さく，信頼できる結果と考えている。

表 - 4 に弾性係数と破断ひずみの平均値 ,標準偏差 ,変動係数を示す。弾性係数は荷重 - ひずみ曲線から引張荷重の 20%と 60%の割線勾配より算出した。供試体の破断時のひずみは測定できなかったため，破断ひずみは破断荷重と弾性係数より算出した。変動係数は弾性係数につい

表 - 4 CF Rope の弾性係数と破断ひずみ

	弾性係数(MPa)	破断ひずみ(%)
サンプル数	15	15
平均値	97515	2.1
標準偏差	5278	0.17
変動係数(%)	5.41	7.87

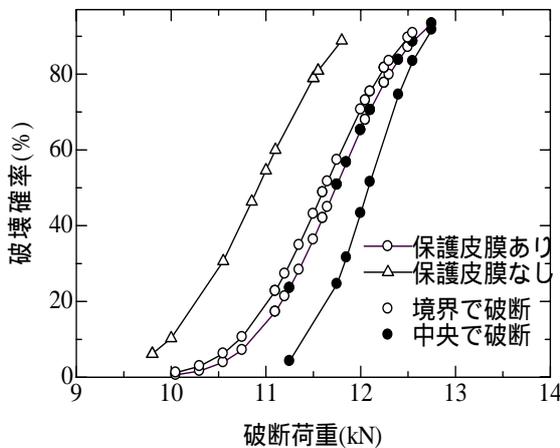


図 - 2 破断荷重 - 破壊確率関係

ては 5.41% ,破断ひずみについては 7.87%と精度の良い結果が得られたと考えている。

4. CF Rope を用いたはりのせん断試験

4.1 使用材料

本研究で使用した補強材の材料特性を表 - 5 に示す。供試体はせん断破壊を先行させるため，主筋には高強度異形鉄筋 (D22 , USD685B)を使用した。また ,組立筋には異形鉄筋 D10(SD295A) ,せん断補強筋には CF Rope と異形鉄筋 D10(SD295A)を使用した。

コンクリートはレディーミクストコンクリートを使用した。コンクリートの呼び強度は 36N/mm² 細骨材の最大寸法は 25mm とした。

4.2 供試体の寸法形状および配筋方法

図 - 3 に供試体の寸法および断面形状の一例を示す。

せん断補強筋のひずみおよびひび割れ幅の観察を容易にするため，右側を試験区間(せん断区間) ,反対側を非試験区間(補強区間)とした。非試験区間には十分な鉄筋スターラップ

表 - 5 補強材の材料特性(鉄筋)

種別	SD295A	USD685B
公称直径(mm)	9.53	22.2
呼び名	D10	D22
用途	せん断補強筋	主筋
公称断面積(mm ²)	71.33	387.1
弾性係数(Pa)	175310	194026
降伏強度(MPa)	364	704

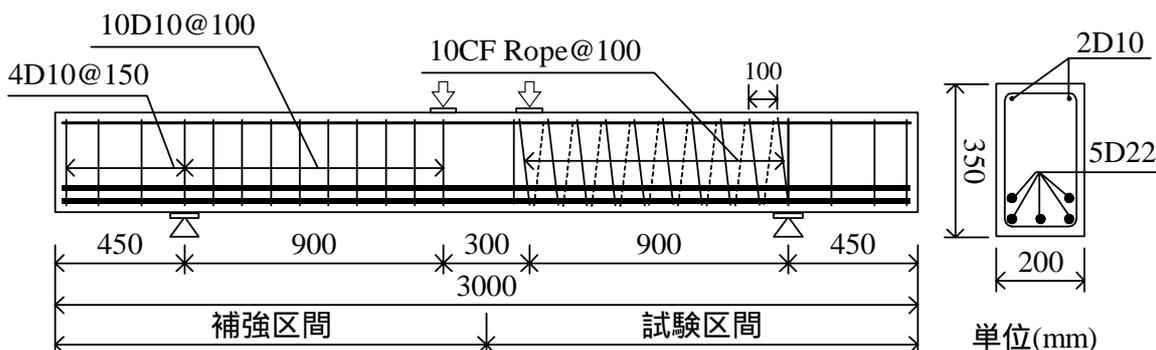


図-3 供試体断面の一例

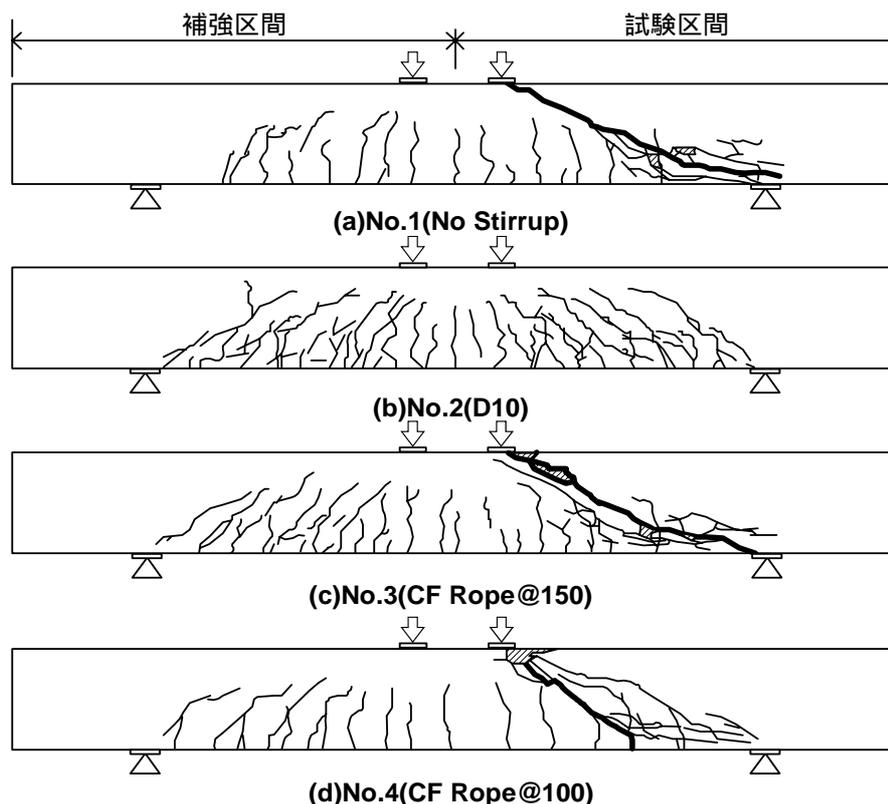


図 - 4 ひび割れ図

を配置し、この区間でせん断破壊が生じないようにした。供試体は せん断補強筋のないはり(No.1) せん断補強筋に異形鉄筋 D10 を 150mm 間隔で配置したはり(No.2) CF Rope を 150mm 間隔で配置したはり(No.3) CF Rope を 100mm 間隔で配置したはり(No.4)の 4 体を使用した。

CF Rope の配筋は、曲げ成形部でずれるのを防ぐため、CF Rope と主筋および組立筋との角度が一定となるように配置した。両端は CF Rope を組立筋に結び、結び目をエポキシ樹脂で固定した。CF Rope の配筋には、特別な機械などは使用せず、すべて手作業で行った。

5. 実験結果

5.1 ひび割れ挙動

図 - 4 に各供試体の終局状態でのひび割れ状況を示す。図中の太線は最終的なせん断破壊断面を表す。せん断補強筋に D10 を使用した供試体は油圧ジャッキの限界値である 500kN まで載荷を行ったが破壊に至らず、試験を中断した。

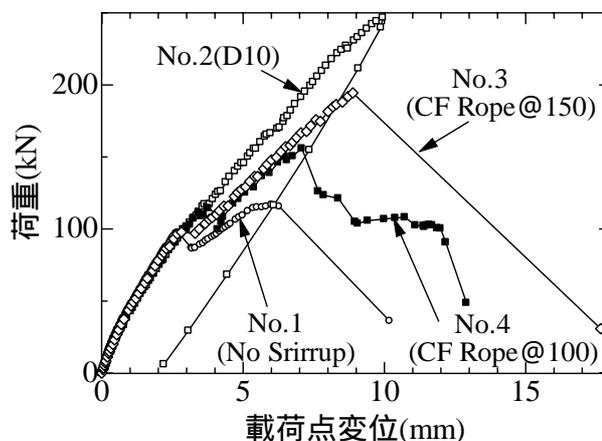


図 - 5 荷重 変位関係

せん断補強筋に CF Rope を使用し、150mm 間隔で配置した供試体は、せん断補強筋のない供試体に比べ、曲げひび割れが多く発生している。また、せん断ひび割れも複数発生していることがわかる。せん断ひび割れ(太線)の角度は、せん断補強筋に D10 を用いた供試体に比べ緩やかで、その角度は 28° となった。

一方、せん断補強筋に CF Rope を使用し、100mm 間隔で配置した供試体は、No.3 の供試体

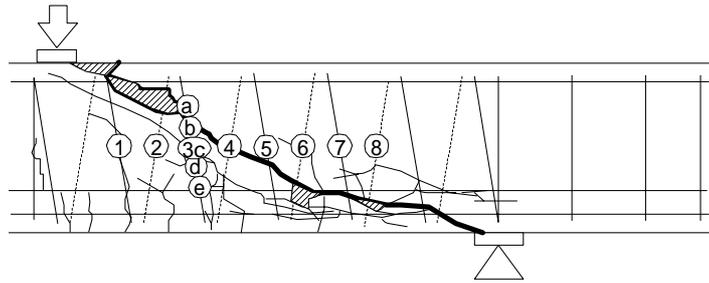


図 - 6 ひずみゲージ貼付位置 No.3 (CF Rope@150)

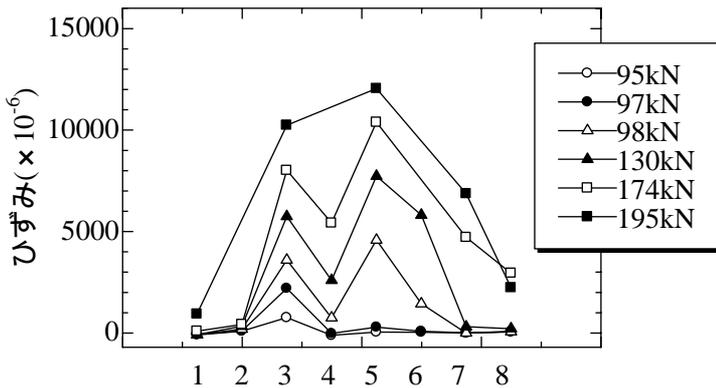


図 - 7 せん断補強筋のひずみ分布
No.3 (CF Rope@150)

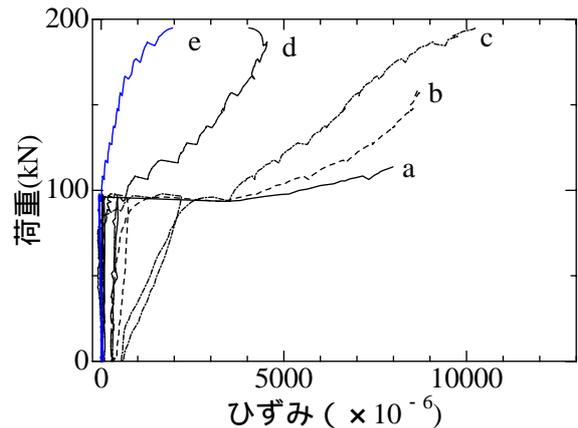


図 - 8 荷重 ひずみ関係
No.3 (CF Rope@150)

に比べせん断補強筋を密に配置しているが，部材の終局荷重が低いため曲げひび割れの数は少なくなった。せん断ひび割れは，角度の異なるひび割れが複数発生した。その中で最終的に破断に至ったせん断ひび割れの角度は，No.3 の供試体に比べ急で 45° となった。

4.2 荷重 変位関係

図 - 5 に各供試体の荷重 - 変位関係を示す。図より，各供試体において，曲げひび割れ発生後，はりの剛性が低下し斜めひび割れ発生に至るまで同じような挙動を示している。

せん断補強筋に CF Rope を 150mm 間隔で配置した供試体は，せん断ひび割れ発生後，一度荷重が低下，その後再び荷重が増加し，最終的には CF Rope の破断により急激に耐荷力を失った。

CF Rope を 100mm 間隔で配置した供試体は，No.3 に比べ CF Rope を密に配置しているにもかかわらず，最大荷重は，No.3 の供試体よりも減少した。No.4 の挙動は，最大荷重に達した後，一度荷重は減少するものの，ある一定の荷重の

元で変位が増加する領域が存在した。最終的には，圧縮側コンクリートの圧壊により部材は終局状態となった。

4.3 せん断補強筋のひずみ

図 - 6 に No.3(CF Rope@150)の供試体におけるひずみゲージ貼付位置を示す。また，図 - 7 は各荷重ステップにおけるせん断補強筋のひずみ分布を示している。図より，ひび割れを跨ぐせん断補強筋においてほぼ均等にひずみの増加が見られる。

図 - 8 は断面の高さ方向に貼付したひずみゲージによる荷重 変位関係を示している。図より，せん断ひび割れ発生荷重付近から，a~c 点において急激なひずみの増加が見られる。この急激なひずみの増加は，せん断ひび割れ発生後の一時的に荷重が減少する点と一致する。CF Rope は樹脂で固めていないフレキシブルな状態のため，せん断ひび割れ付近で局所的にひずみが増加したと思われる。せん断ひび割れから離れた d, e 点では，急激なひずみの増加は見られ

表 - 6 実験結果

供試体 No	せん断補強筋	配置間隔 (mm)	V_c (kN)	V_u (kN)	V_{cf} (kN) = $V_u - V_c$
1	なし		98.10		
3	CF Rope	150	98.10	194.90	96.80
4	CF Rope	100	98.10	155.93	57.83

なかった。また、終局ひずみも、a~c点と比べると小さくなっていることから、せん断ひび割れから離れた地点では、CF Rope とコンクリートに付着があるものと思われる。

4.4 CF Rope によるせん断補強効果

従来の鉄筋コンクリートはりにおけるせん断耐力は修正トラス理論式($V_u=V_c+V_s$)により、コンクリートの受け持つせん断力 V_c とせん断補強筋の受け持つせん断力 V_s の和として考えられる。

CF Ropeをせん断補強筋として用いたはりにおいても同様の手順を用いて、CF Ropeの受け持つせん断力 V_{cf} の評価を行った。コンクリートの受け持つせん断力 V_c は、せん断補強筋のない供試体(No.1)におけるせん断ひび割れ発生荷重とし、CR Ropeの受け持つせん断力 V_{cf} は、供試体の終局荷重 V_u と V_c の差とした。表 - 5 に実験結果を示す。

5. まとめ

- 1) 定着用膨張材により、繊維の引き抜けまたは鋼管内での破断することなく CF Rope を定着させることができた。
- 2) 定着部の繊維にエポキシ樹脂を含浸硬化させ補強することにより、CF Rope を試験区間で破断させることができた。
- 3) 樹脂で複合化されていない CF Rope をせん断補強筋として用いることで、せん断補強効果が得られることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 土木学会:連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案),コンクリートライブラリ-88, 1996.9
- 2) 土木学会:連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針,コンクリートライブラリ-101, 2000.7