

論文 連続繊維フレキシブル筋によるせん断補強筋に関する研究

富田早季*¹・神崎諭*²・佐藤靖彦*³・小林朗*⁴

要旨：本論文において、連続繊維フレキシブル筋の被覆チューブの厚さを薄くし、さらに、端部定着を施すことにより RC はりのせん断耐力が大きくなることを明らかにした。さらに、被覆チューブの厚さを実験変数とした U 字型引張試験を通じて、折り曲げ部で繊維が滑り抜けていること、チューブの変形が引張荷重方向の変位を大きくし、繊維の効果を発揮させにくくしていることがせん断耐力に大きな影響を及ぼす要因であることを示した。

キーワード：連続繊維フレキシブル筋、折り曲げ部、せん断補強効果

1. はじめに

現在、コンクリート橋脚の耐震性能の向上を目指した研究が精力的になされており、その多くは、新設コンクリート構造物に対しては、帯鉄筋や中間帯鉄筋を密に配置することによりじん性を付与し、既設コンクリート構造物に対しては、鋼板や連続繊維シートを巻き立てることによりじん性を付与することを目的としたものである。しかし、前者の場合、密に帯鉄筋を配置し、その中にさらに中間帯鉄筋を内部コンクリートに確実に定着させることは施工上難しく、設計時の仮定と大きなギャップを生じることが懸念される。

著者らは、この施工性の向上を目的として、プラスチックチューブに入った連続繊維を現場で軸方向鉄筋などに巻き付け、その後チューブに樹脂を注入し硬化させる新しい連続繊維補強材、すなわち、連続繊維フレキシブル筋（以下「CFFR」）を開発した。この CFFR は樹脂硬化前の柔軟な状態で施工できるため、補強筋を密にまた複雑に配置する場合の施工が非常に容易である。

本論文は、被覆チューブの厚さおよび端部の定着の有無を実験変数とした CFFR で補強した RC はりのせん断耐力に関する検討を行うとともに、RC 部材中の CFFR をモデル化した U 字型引張試験を行い、被覆チューブが引張剛性に及ぼす影響、並びに、折り曲げ部での挙動に関する検討を行う。

2. はり試験供試体と実験結果

本研究ではまず断面高さ 400mm、有効高さ 340mm せん断スパン比 $a/d=2.35$ 主鉄筋比 2.24% のコンクリートはり部材を 3 体製作した。はり供試体は鋼スターラップ（φ6 鉄筋）に図-1 に示すような CFFR が中間スターラップとして巻き付けられている（図-2 参照）。本研究で用いた CFFR は従来の連続繊維補強筋と異なり、繊維がなめらかな表面形状を有するプラスチックチューブで覆われているため、荷重をかけると繊維が供試体内で滑ってしまい端部での定着が十分にとれないことが予想された。そこで、供試体 SF-2、SF-3 は図-3 に示すように CFFR の端部に鋼管を通し破砕材を注入して定着し、コンクリートを打設後、ボルトで固定した。また、CFFR のチューブ厚を供試体 SF-1、SF-2 は 2.5mm、供試体 SF-3 は 1.0mm とした。実験の結果、いずれの供試体も斜め引張破壊を起こした。表-1 に供試体番号と各供試体のコンクリート圧縮強度、せん断耐力を示す。本実験より CFFR 端部を機械的に定着することでせん断耐力が増加することがわかった。図-4 に各供試体の荷重-変位曲線を示す。CFFR 端部を定着することにより斜めひび割れ後の剛性が大きくなっており、さらに端部定着した場合にはチューブが薄い方が剛性が大きい。図-5 に各供試体の

* 1	(株) オリエンタルコンサルタンツ	(正会員)
* 2	九州旅客鉄道 (株)	
* 3	北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻	工博 (正会員)
* 4	日鉄コンポジット (株) トウシート事業部	工修 (正会員)

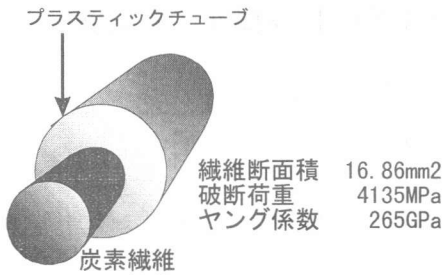


図-1 連続繊維フレキシブル筋

表-1 実験結果

Specimen	Tube thickness t_{tu} (mm)	Concrete Compressive strength f_c (MPa)	Shear force V (kN)
SF-1	2.5	29.7	131.5
SF-2	2.5	30.6	139.7
SF-3	1.0	28.9	168.9

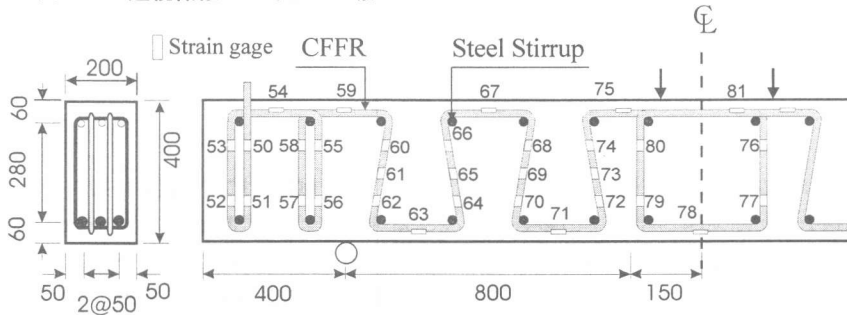


図-2 CFRPの巻き付け方とゲージ番号

供試体高さ方向と軸方向のひずみ分布を示す。グラフ中のゲージ番号は図-2に示す。3体とも供試体軸方向(図-2中の63,67,71)で高さ方向(図-2中の60~62,64~66,68~70)とほぼ同じひずみが観測されている。しかし、端部定着を取りさらにチューブを薄くすることでひずみがひび割れ位置に集中している。この為CFRPが受け持つ分担せん断力が増加し、その結果せん断耐力も増加したと思われる。

3. U字型引張試験供試

3.1. 実験供試体

2. においてチューブの厚さの違いによりせん断耐力が異なることがわかった。そこで、RC部材中の連続繊維フレキシブル筋をモデル化したU字型引張試験を行った。U字方引張試験に用いたCFRPははり試験に用いたものと全く等しく、実験変数はチューブの厚さとした。その値は、2.5mm、1.0mm、0.5mmである。曲げ内半径は10mmと一定とした。CFRPの両端は内径25mm、長さ300mmの鋼管を通し破砕材を注入してボルトで反力板に固定されている。供試体図を図-6に、供試体番号とチューブの厚さ、終局時の最大引張ひずみと

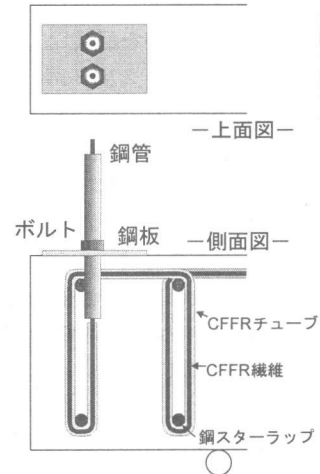


図-3 CFRP 端部の定着方法

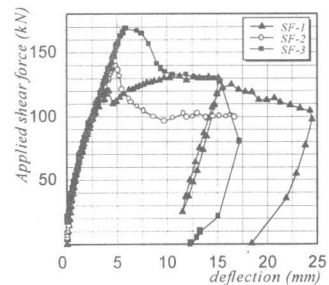


図-4 荷重-変位関係

最大圧縮ひずみ、破断箇所にもっと近いゲージ位置を表-2に示す。

3.2. 実験および測定方法

本実験ではCFFRの両端に引張荷重をかけた際、反力が折り曲げ部のみに作用するように主反力板にR反力板を固定し(図-6参照)、主反力板の間に設置した油圧シリンダーにより約0.1kNずつ静的に荷重を作用させた。繊維のひずみは電気抵抗式ひずみゲージにより(図-7参照)、折り曲げ部におけるチューブのつぶれは繊維の外側から45°の角度で設置した高精度変位計により(図-6のU1)、繊維全体の伸び(図-6のU3)は主反力板に固定した変位計により測定した。なお、チューブは、曲げ部内側にのみ残されており、その他のチューブは、ひずみゲージを貼付するために削り取られている(図-6参照)。

4. U字型引張試験結果と考察

4.1. 荷重-変位特性について

供試体U2510-1は図-7のC07付近で繊維が破断し、供試体U0510-1は図-7のC02付近の繊維が破断すると同時に鋼管内の繊維も破断し鋼管から繊維が抜け出した。供試体U0510-1の引張強度はU2510-1の約2倍と非常に大きくなっている(表-2参照)。これは、供試体U0510-1がU2510-1に比べチューブが薄いためその分剛性が小さく折り曲げ部が扁平になりやすく、また、施工の際に供試体を強く引っ張った状態で樹脂が注入され、繊維が扁平な状態で硬化した為、折り曲げ部での応力集中が小さくなり引張強度が上がったものと考えられる。供試体U1010-1は引張荷重24.4kNで繊維が鋼管から抜け出してしまい、繊維の破断には至らなかった。これは破砕材の注入時に不備があったためと考えられる。

図-8に各供試体の作用引張荷重-チューブの変形(図-6のU1)関係を、図-9に各供試体の作用引張荷重-全体の変位(図-6のU3)関係を示す。図-9の供試体U0510-1は変位計の設置時に不備があり変位U3が5mmのところまで計測が終了してしまい結局時の変位を測定することができなかった。図-8より供試体U2510-1とU1010-1はチューブがもとの厚さの60%以上も変形していることがわかる。供試体U0510-1のチューブは

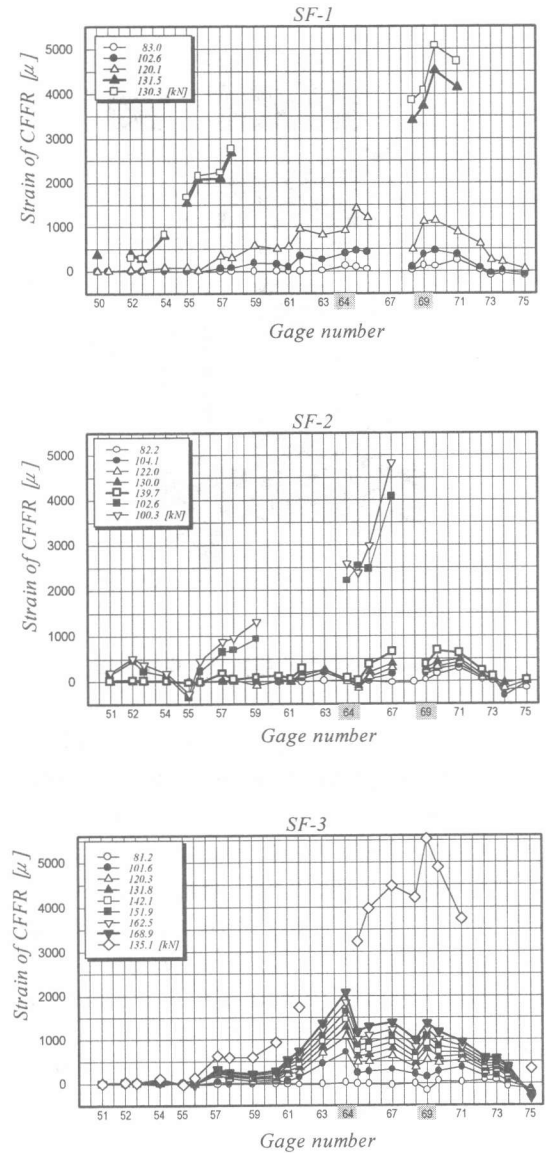


図-5 はり供試体 CFRF のひずみ分布

0.17mm くらいまで曲線的に変形したがその後は変形が止まっており、チューブの変形量にある程度の限界がありそれ以上はチューブの変形が起こらないことがわかる。また、図-9よりチューブの変形量が大きい供試体U2510-1は全体の変位も曲線的に増加しているのに対し、チューブの変形量が小さい他の2体は全体の変位がほぼ直線的に増加していることがわかった。

次に、繊維のひずみを積分して算出した変位 u_1 に、チューブの変形の引張方向成分を足した値 u_2

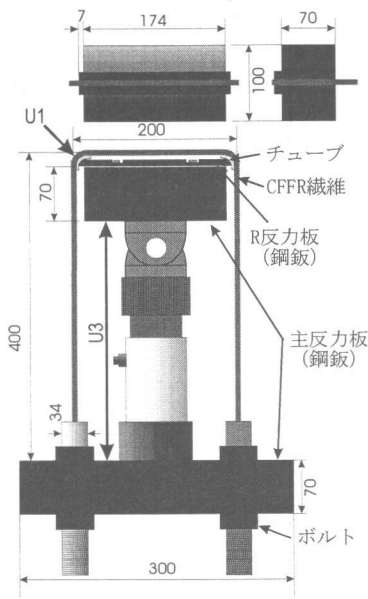


図-6 U字型引張試験 供試体図

を求めた。これらの計算値と実験値 u_{test} (図-6のU3)の比較を図-10に示す。供試体U0510-1は終局時に繊維が鋼管から完全に抜け出していることから、定着が不十分だったため実験中から鋼管内の繊維が伸びていたか、繊維が鋼管から徐々に抜け出していた可能性があり、このため計算値と実験値があまり合わなかったものと考えられる。しかし、U2510-1、U1010-1はチューブの変形を足し合わせることで実験値に近い値となることがわかった。以上の事柄からチューブの変形が全体の変位に大きく影響していることがわかった。

4.2. 荷重-ひずみ特性について

図-11に供試体U2510-1の直線部(図-7のA07、B07、A12、B12)の作用引張力-ひずみ関係を示す。供試体U2510-1は樹脂注入後、繊維を硬化させる際に直線部が多少ゆがんでしまったため直線部で荷重-ひずみ関係が図-11のA07、B07に示すような非線形になっているところがあったが、U1010-1、U0510-1は直線部の他の位置でも図-11のA12、B12に示すように線形的な関係が見られた。また繊維の内側と外側のひずみに多少差があったが平均値は弾性係数に断面積を掛けて算出した計算値ともほぼ一致した。さらに、

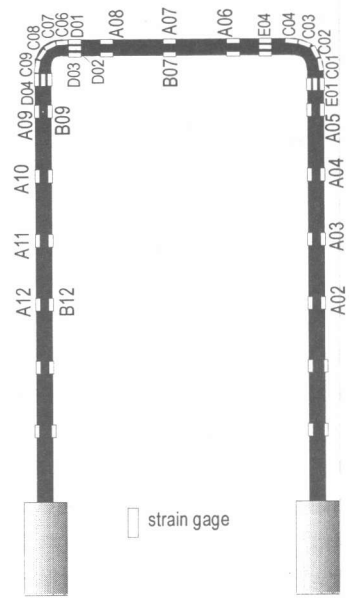


図-7 U字型引張試験 ゲージ位置

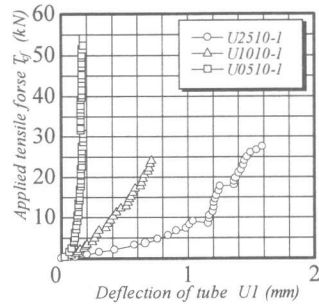


図-8 チューブの変形

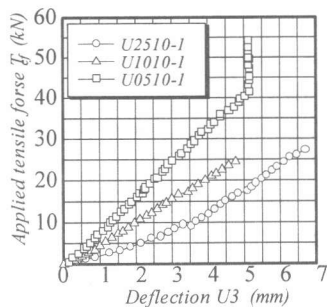


図-9 引張方向の変形

各供試体とも引張荷重と垂直方向の直線部(図-7のA07、B07)でも引張荷重方向(図-7のA12、B12)とほぼ同等のひずみが測定されており、折

表-2 U字型試験 実験変数と実験結果

Specimen	Tube thickness t_w (mm)	Tensile force T_{cf} (kN)	Maximum tensile strain ϵ_{max} (μ)	Gage number of ϵ_{max}	Maximum tensile strain ϵ_{min} (μ)	Gage number of ϵ_{min}	Gage number of breakage point	α	ϵ_{break} (μ)
U2510-1	2.5	27.9	15260	E04	-9252	C02	C07	2.24	6963
U1010-1	1.0	—	11272	C07	-3462	C09	—	2.02	7720
U0510-1	0.5	54.3	16155	C07	-11451	C01	C02	2.14	7287

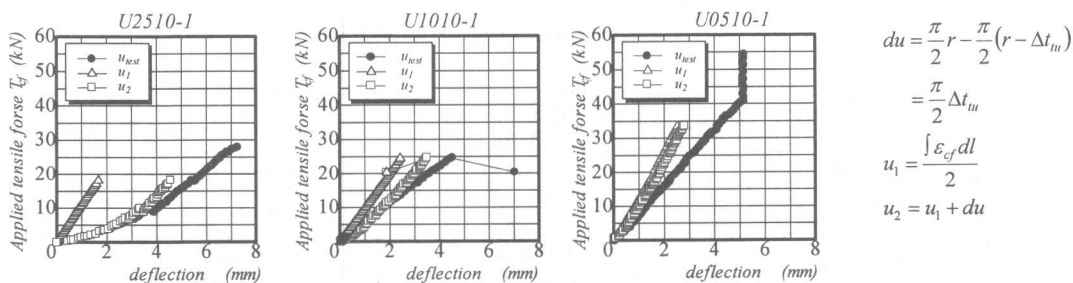


図-10 計算課程と計算結果

り曲げ部での荷重低下がほとんど無く、折り曲げ部を超えて引張力が伝達されていることがわかった。これは折り曲げ部内側の繊維とプラスチックチューブの表面に付着がほとんど無く、繊維が折り曲げ部で滑り抜け、鉄筋や従来の連続繊維補強筋のように折り曲げることによるフック定着の効果がないためと考えられる。

表-2に各供試体の終局時の最大引張ひずみ、最大圧縮ひずみ、破断箇所にもっとも近い位置のゲージ番号を示す。なお、破断箇所では実験途中でゲージが測定不能となったため終局時のひずみは測定できなかった。そのままひずみが測定できていれば最大引張ひずみ程度のひずみがあったものと推測され、一軸引張試験における破断ひずみ(15595 μ)に近い値で破断したと思われる。

次に、図-12に折り曲げ部のひずみ分布を、図-13に折り曲げ部付近の繊維の内側と外側の作用引張荷重-ひずみ関係を示す。図-12に示すように垂直方向(D01、E04)では非常に大きな引張ひずみが観測されているのに対し、引張荷重方向(C01、C09)では圧縮ひずみや非常に小さな引張ひずみが観測された。これは垂直方向の繊維が折り曲げ部に引き込まれ、引張荷重方向の繊維の伸び以上に折り曲げ部からの抜け出しの影響が大きかったために圧縮又は非常に小さな引張ひ

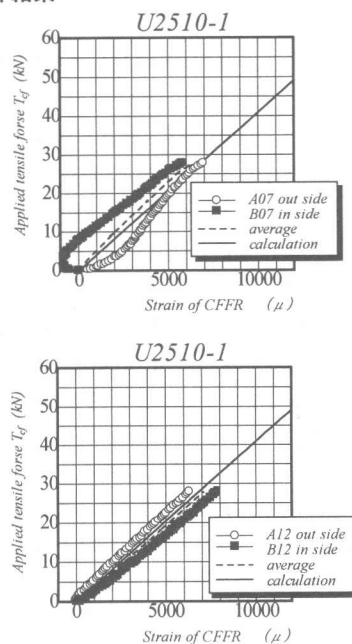


図-11 直線部の荷重-ひずみ関係

ずみが測定されたものと思われる。これらは先に述べた様に折り曲げ部での荷重低下が小さく引張荷重と垂直な方向にも荷重が伝わったため繊維が伸び、その影響が荷重方向にも出たものと考えられる。

4.3. CFRFのチューブの変形について

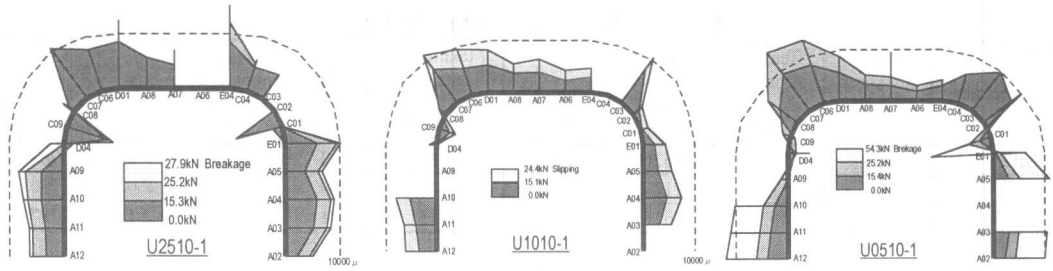


図-1 2 折り曲げ部付近のひずみ分布

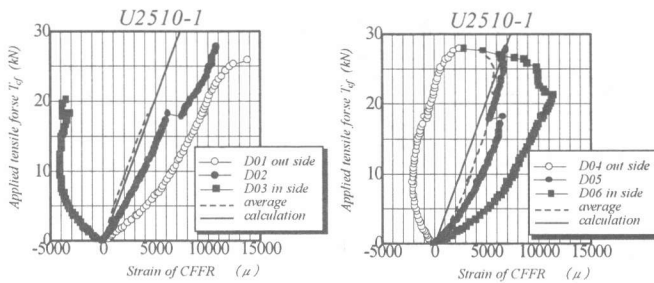


図-1 3 折り曲げ部付近の荷重-ひずみ関係

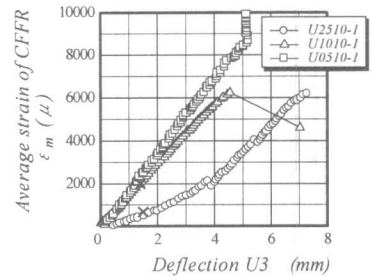


図-1 4 平均ひずみ-変位関係

図-1 4にU字型試験における直線部の平均ひずみ全体の変位関係を示す。U3010-1は他の2体よりかなり大きな変位になっていることがわかる。これは4. 2に述べたようにチューブの変形が影響しているためと思われる。また、はり試験の供試体 SF-2、SF-2 の最大せん断耐力時の CFRR のひずみ (SF-2 は約 700 μ 、SF-3 は約 2000 μ) と同等の平均ひずみに対する変位を見ると(グラフ中の×印)、変位はどちらも 1.7mm 程度である。このことから、チューブの変形を押さえることで早い荷重段階から CFRR の効果が期待できると思われる。しかし、単にチューブの剛性を硬くしたのでは施工性が悪くなるため、柔らかいチューブをできるだけ薄くすることで施工性と耐力の両方を向上させることが望ましい。また、U1010-1 と U0510-1 の平均ひずみ-変位関係にあまり差がないことからある程度以上チューブの厚さを薄くすると影響差はほとんど無くなるものと考えられる。

5. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

- 1) チューブの厚さおよび端部定着の有無が、連続繊維フレキシブル筋のせん断耐力に大きな影響

を及ぼす。

- 2) チューブ厚が大きいと、チューブが潰れることの影響が大きく、フレキシブル筋の引張剛性を見かけ上減少させる。よって、チューブ厚を薄くすることでより大きな補強効果が得られる。
- 3) 折り曲げ部において繊維が滑りぬけるため、折り曲げることによる定着効果が現われない。よって、端部での機械定着を施すことにより大きな補強効果が得られる。
- 4) 曲げ成形部の繊維を偏平にすることにより、折り曲げ部での応力集中を抑え、一軸引張試験で得た破断強度 53.9 kN 近くまで強度を上げることができる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、日鉄コンポジット (株) の杉山哲也氏に多大なご助力をいただきました。また、本論文をまとめるにあたり、北海道大学大学院の角田與史雄教授、上田多門助教授に貴重なご意見を賜りました。ここに深く謝意を表します。