

V-7

連続繊維フレキシブル筋曲げ成形部の実験的研究

北海道大学	○学生員	神崎 諭
北海道大学大学院	学生員	富田 早季
北海道大学大学院	正会員	佐藤 靖彦
日鉄コンポジット(株)	正会員	小林 朗
北海道大学大学院	フェロー	角田 典史雄

1. はじめに

平成6年の阪神・淡路大震災を契機にコンクリート構造物の耐震性能・じん性の向上を目指した研究が盛んに行われている。しかし耐震性を確保するためには、確実に定着された帯鉄筋および中間拘束筋を密に配すなど、施工上の困難を伴う。そこで著者らは従来の連続繊維補強材とは異なり、強化繊維束を柔軟な被覆チューブで覆い、配筋後に樹脂を注入させ硬化させる新しい連続繊維補強材(以下「フレキシブル筋」)(Fig.1参照)を開発した。また、フレキシブル筋により補強したRCはりの耐荷性状の研究、ならびにフレキシブル筋の性状について研究を行ってきた。その結果、鉄筋を帯鉄筋に、フレキシブル筋を中間帯鉄筋に使用し、両者を併用することが実用的であり、また、チューブの厚さがせん断補強効果に大きく影響している可能性が大きいことが明らかになった。またフレキシブル筋とコンクリートとの付着力は無視できるほど小さく、そのため膨張材などを用いた端部定着を施す必要があることが明らかになった¹⁾²⁾。

本研究では、フレキシブル筋の曲げ成形部における変形状、および強度を明らかにすることを目的としてFig.2のような実験供試体、実験装置を作製し、主な実験変数をチューブの厚さにとり、実験(以下「U字試験」)を行った。本論文は、このU字試験により明らかになった知見を報告する。

2. 実験供試体

2-1 実験供試体

本研究で用いたフレキシブル筋は、繊維束の断面積が 16.89mm^2 、引張強度 4135MPa 、ヤング係数 265GPa である。実験変数は、チューブの厚さで、チューブ厚を 3mm 、 1mm 、 0.5mm とした3体の実験供試体を作製した(Table.1参照)。曲げ内半径は全ての供試体で 10mm とした。樹脂硬化後、曲げ成形部の内側にだけチューブを残し、炭素繊維にひずみゲージを貼った。また、フレキシブル筋の両端を鋼管に入れ破砕材を注入することで定着を確保した(Fig.2参照)。

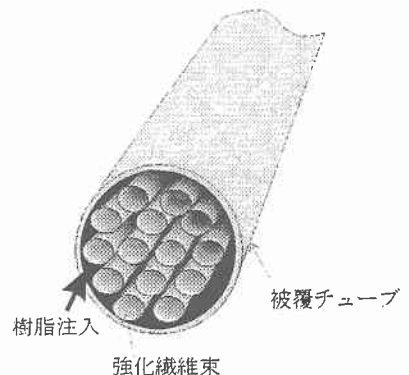


Fig.1 フレキシブル筋断面図

2-2 実験および測定方法

本実験では、フレキシブル筋の両端に引張荷重を与えたときに、反力が曲げ成形部の内側のみに作用するようにし、荷重は約 0.1kN ずつ静的に作用させた。また曲げ成形部におけるチューブのつぶれを、フレキシブル筋の外側から 45° の角度で設置した高精度変位計により測定し(Fig.3のU1とU2)、繊維全体の伸びを反力盤の上に設置した変位計により測定した(Fig.3のU3とU4)。ひずみゲージの位置はFig.3に示している。また曲げ成形部のひずみゲージの位置を拡大してFig.4に示す。

An Experimental Study on Mechanical Behavior of Continuous Fiber Flexible Reinforcement at Bent Portion
By Satoshi KOUZAK I, Saki TOMITA, Yasuhiko SATO, Akira KOBAYASHI and Yoshio KAKUTA

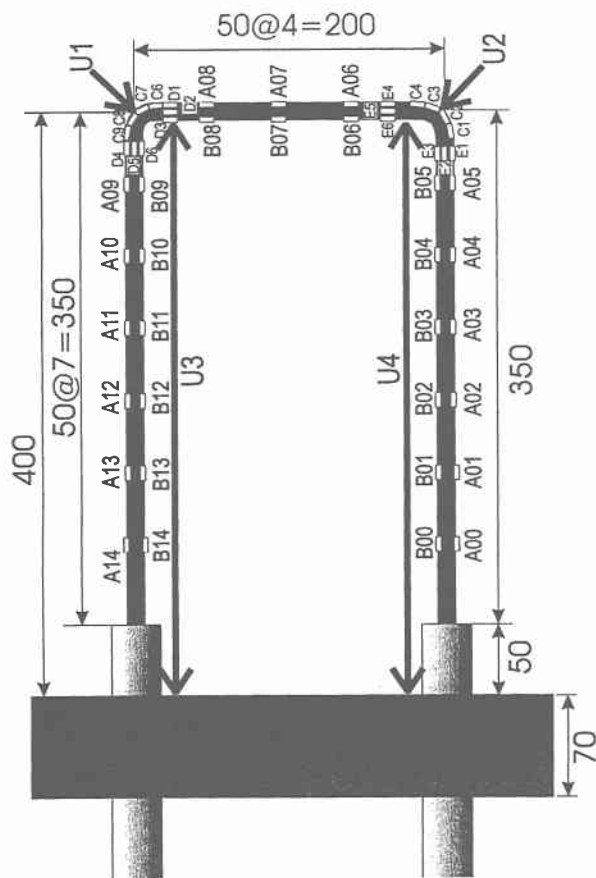


Fig.3 ひずみゲージ位置

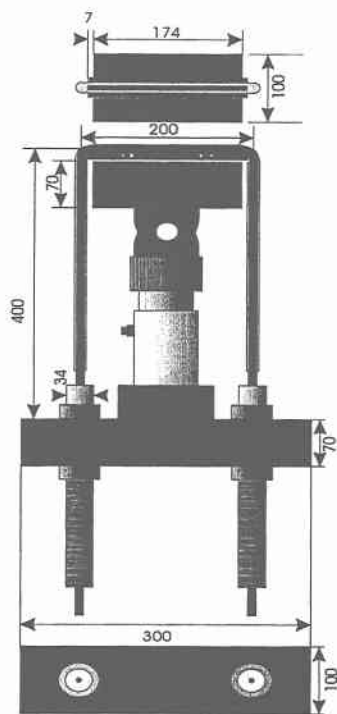


Fig.2 実験装置

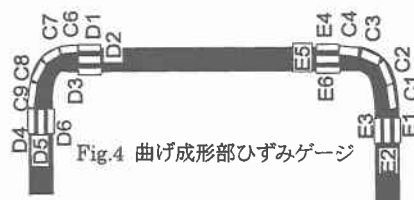


Fig.4 曲げ成形部ひずみゲージ

3.実験結果と考察

3-1 荷重-変位特性

Table.1 に供試体番号、チューブ厚、終局時のチューブの潰れ、終局荷重、破壊形式を示す。

U0510-1 の終局荷重が他の 2 体に比べてほぼ 2 倍である。これは供試体を作製する際に直線部を真っ直ぐにするために U 字片の内側に繊維が張り付いたまま樹脂を注入したため、繊維が極端に偏平になり、その結果、応力集中が小さくなり強度が大きくなったためと考えられる。

U3010-1 は作製時に直線部ゆがみがあり、繊維へ樹脂がよく含浸されていたため繊維は偏平でなく円形断面となっていた。U1010-1 は U0510-1 と同様に曲げ成形部で樹脂と繊維の分離が見られたが、端部の定着治具から繊維が抜け出してしまい実験が途中で終了してしまった。

Table.1 実験結果

Specimen	Thickness of Tube u_w [mm]	Deformation of tube Δu_w [mm]	$\Delta u_w / u_w$	Ultimate load P[kN]	Failure mode
U3010-1	3.0	1.6	0.53	27.9	Breakage at bent portion
U1010-1	1.0	0.6	0.60	24.5	Slipping at anchorage
U0510-1	0.5	0.17	0.34	54.3	Breakage at bent portion

Fig.5 は繊維全体の伸びの実測値と計算方法と計算値を示す。u1 は直線部（ゲージ番号 A,B）のひずみを積分した値で、u2 は u1 に曲げ成形部（ゲージ番号 C）のひずみを積分した値を加算した値である。さらに u3 はチューブの潰れの実測値に曲げ内半径の $\pi/2$ を乗じたものを u2 に加算したものである。U3010-1、U1010-1 は 10kN 近くまで実測値は u3 とほぼ一致しているが、その後は治具から抜け出したために u3 とは異なった挙動をとったと思われる。U0510-1 は破砕材の定着が甘く始めから抜け出しがあったため、u3 と実測値が合わなくなっていると考えられる。

チューブの厚さにより、変位が異なるのはチューブの剛性が極端に小さいため、曲げ成形部でチューブが潰れ、潰れの引張方向の成分がそのまま変位として表れていることによる。

3-2 曲げ成形部の強度維持率の定量的評価

連続繊維補強材は引張力を受けるとき曲げ成形部に局部応力が付加し、一軸の破断強度より低い引張力で破断することが知られている。小原³⁾ は曲げ内半径の大きさが破壊断面におけるひずみ分布に与える影響を有限要素解析から定量化し、また連続繊維補強材の剛性の影響や付着性状の影響を実験結果から定量化し、その双方から曲げ成形部の破壊強度の推定式を構築している。

この強度維持率は、軸方向ヤング係数と曲げ内半径、および付着、定着性状をパラメータとしている。

以下に曲げ成形部の強度維持率の評価式を示す。

$$\frac{f_{fb}}{f_{fu}} = \frac{\beta}{\alpha} \ln(1 + \alpha) \quad (1)$$

$$\alpha = 1.974 \times D/R + 0.4014 = 1.317$$

$$\beta = -0.00218 \times E_L + 1.338 = 0.7603$$

$$\gamma = 1.0 \quad (\text{付着の良好なとき})$$

$$= 0.8181 \quad (\text{抜け出しの大きいとき})$$

f_{fb} : 曲げ成形部の耐力 f_{fu} : 一軸引張強度

E_L : 補強筋軸方向ヤング係数

D : 補強筋径 R : 曲げ内半径

この評価式を基に本実験の評価を Table.2 に示す。なお、D=2.319mm、R=10mm、 γ は、フレキシブル筋の付着力は無視できるほど小さいため 0.8181 を用いたところ、

$$f_{fb}/f_{fu} = 0.397, \quad f_{fb,cal} = 1641(\text{MPa}) \quad \text{となった。}$$

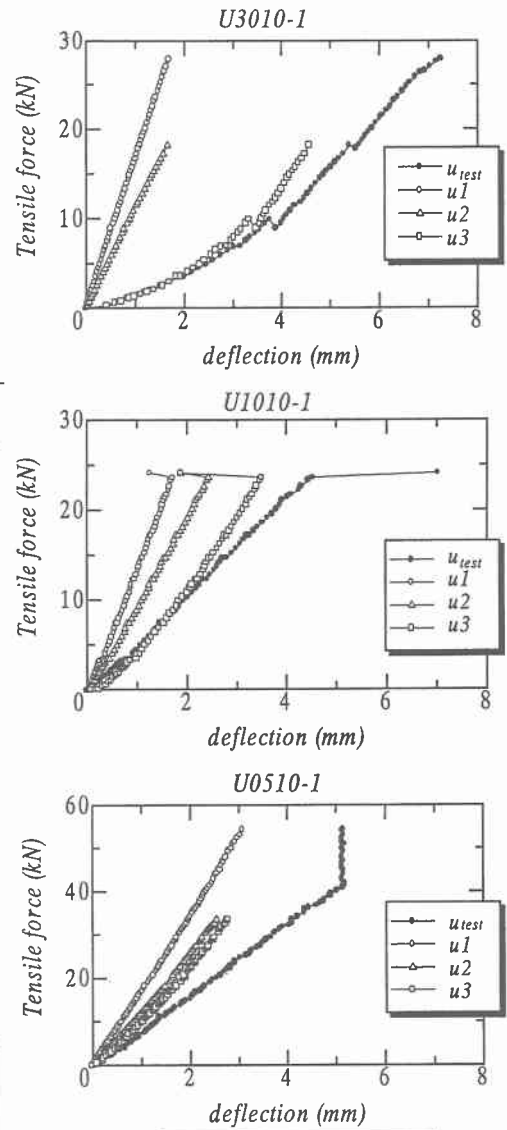


図-5. 荷重-変位関係

Table.2 曲げ成形部強度

Specimen	Bent Radius [mm]	Ultimate load P [kN]	$f_{fb,exp}$ (MPa)	$f_{fb,ca}/f_{fb,exp}$
U3010-1	10	27.9	1651	0.99
U1010-1	10	24.5	1451	1.13
U0510-1	10	54.3	3215	0.51

U1010-1 は治具からの抜け出しで破断に至らなかったため、参考にならないが U3010-1 はほぼ計算値と一致した。しかし、U0510-1 では先述した通り他に比べ極端に扁平な形であり応力集中が小さくなったため、U3010-1 に比べ 2 倍の耐力を保持している。つまり、曲げ成形部を扁平な形にすることで耐力を高めることができることがわかる。

3-3 直線部の荷重－ひずみ特性

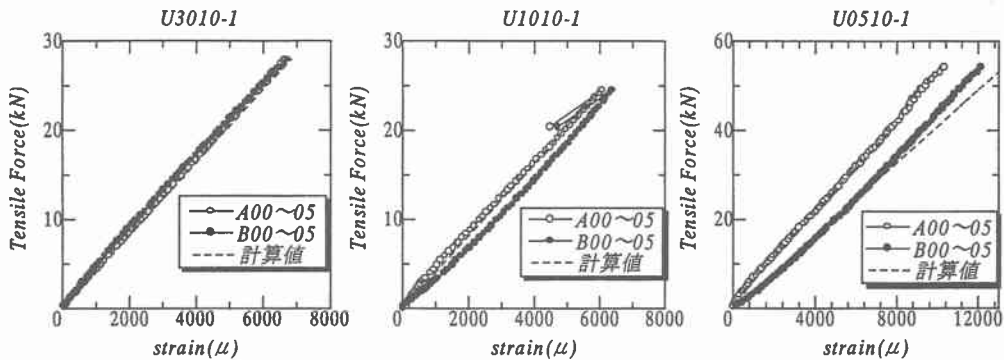


Fig.6 フレキシブル筋直線部のひずみ

Fig.6 に直線部の平均ひずみと計算値を示す。平均ひずみはほぼ計算値と一致している。また荷重方向と垂直な方向の直線部にもひずみも観測された (Fig.3 の A06-A08、B06-B08 の位置)。その値は荷重方向の直線部 (Fig.3 の A00~A05、B00~B05 の位置) と同等であったことから曲げ成形による引張力の減少はほとんどなく、曲げ成形部を超えて力が伝達していることが分かる。

3-4 曲げ成形部の荷重－ひずみ特性

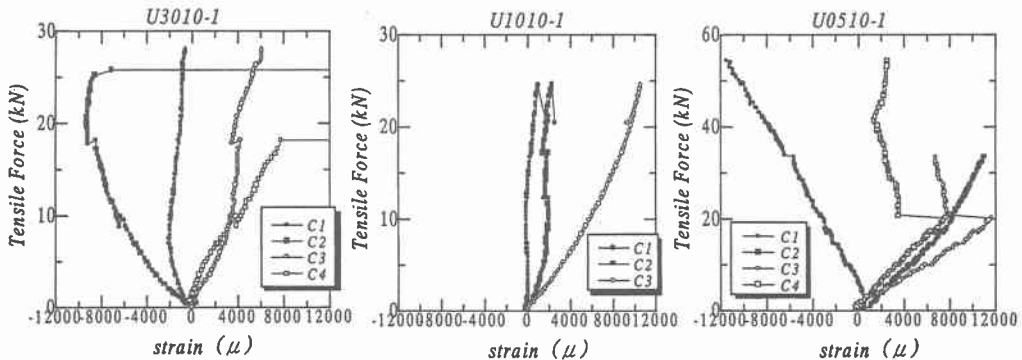


Fig.7 フレキシブル筋曲げ成形部のひずみ

Fig.7 に曲げ成形部の C1～C4 のひずみを示す。U0510-1 において C3,C4 のひずみが 20 kN 付近でほぼ 0 μ まで戻って、その後のひずみ増加が観測されていない。これは、外側の樹脂層が剥離したことによるものと思われる。

Table.3 は曲げ成形部（ゲージ番号；C01～C09、D1～D6、E1～E6）の最大引張・圧縮ひずみをに示す。また、Fig.8 に曲げ成形部のひずみ分布を示す。

Table.3 曲げ成形部でのひずみ

Specimen	Maximum tensile strain $\epsilon_{max}[\mu]$	Gauge number	Maximum compressive strain $\epsilon_{min}[\mu]$	Gauge number
U3010-1	15260	E4	-9252	C2
U1010-1	11272	C7	-3462	C9
U0510-1	16155	C7	-11451	C1

U3010-1、U0510-1 は、曲げ成形部における最大ひずみが一軸引張試験における破断ひずみ（15595 μ ）に近い値で破断している。また 3 供試体とも最大ひずみは曲げ成形部のうち載荷方向直線部の側の位置ではなく、垂直方向直線部の側で生じている（ゲージ番号；C3,C4,C6,C7）。

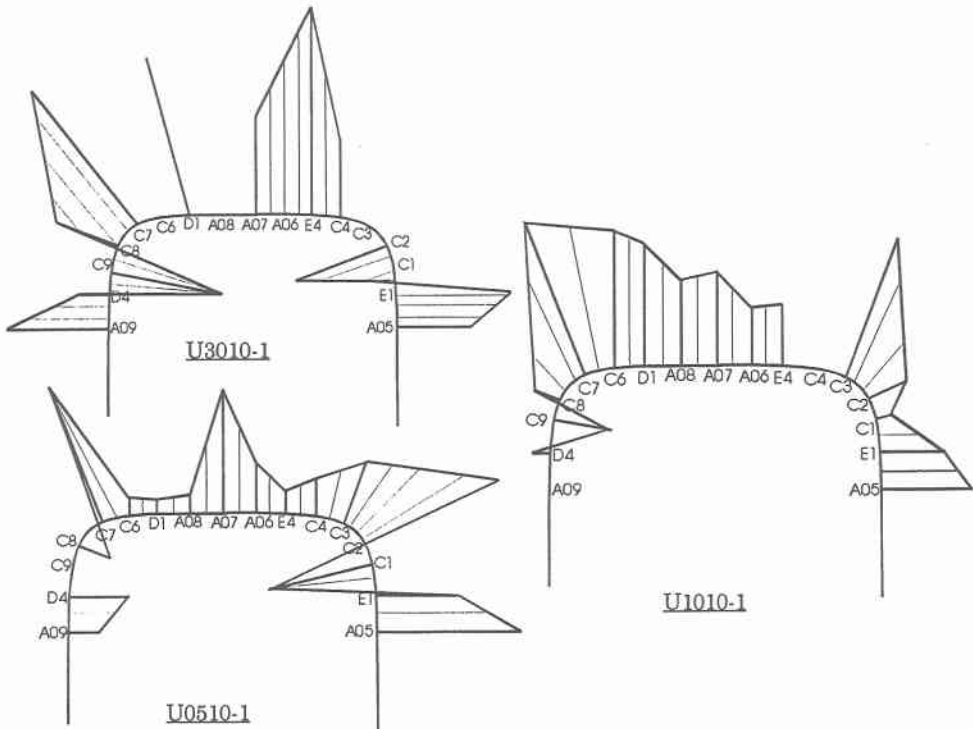


Fig.8 曲げ成形部のひずみ分布

これは、垂直方向直線部の繊維が曲げ成形部に引き込まれることによると思われる。一方、引き抜き側はゲージ番号 E1,A05 方向へと伸びているが、その伸び以上に曲げ成形部から抜け出してきた繊維が影響を及ぼしているため、結果として圧縮ひずみが観測されたと考えられる。この現象は 3 供試体とも如実にその傾向を示している。

Fig.9 は曲げ成形部の最大引張ひずみ $\varepsilon_{\max}$ 、最大圧縮ひずみ $\varepsilon_{\min}$ を荷重毎に表したものである。

U3010-1 において計算値 ε_{cal} の 5000 μ の位置で $\varepsilon_{\max}$ の急変点が見られるが、これはそれまで最大値であった C7 のひずみゲージが測定不能となったため次に最大である D6 の値を載せたためであるが、U0510-1 で ε_{cal} 7000 μ の位置での急変は先にも述べたように樹脂の剥離によるものである。ここで $\varepsilon_{\max}$ を曲げの影響を受けない直線部のひずみの平均値 ε_m で除した値を応力集中係数 α とすると、この時点で曲げ成形部の応力集中が $\alpha=2.37$ から $\alpha=1.27$ と急激に低下している。このように曲げ成形部の繊維を偏平な形にし、応力集中を低下させることで耐力増加をはかることが実用的かどうかについては今後の研究が必要である。

3. まとめ

本研究の範囲で得られた結論を以下に示す。

- 1) フレキシブル筋の引張剛性に及ぼすチューブ厚の影響が大きいことが明らかになった。すなわちチューブ厚が小さいと、チューブ厚が潰れることの影響が小さく、フレキシブル筋の引張剛性を見かけ上増加させる。
- 2) フレキシブル筋の引張力は、曲げ成形部を超えて荷重方向と垂直方向の直線部に伝達されることが実証された。
- 3) フレキシブル筋が引張力を受けるとき、曲げ成形部に応力集中が生じ、強度低下が起こる。破断時ににおける曲げ成形部の最大ひずみは、一軸引張試験における破断ひずみとほぼ一致した。
- 4) 曲げ成形部の最大ひずみは荷重方向とは反対側の位置に生じた。
- 5) 連続繊維補強材の曲げ成形部の強度に対する小原の式は、本実験に対し、曲げ成形部が偏平となった場合を除き、適合した。

謝辞：研究を進めるにあたりにあたり、日鉄コンポジット株式会社の杉山哲也氏ならびに北海道大学の上田多門助教授に多大な御助力を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 富田早季、佐藤靖彦、上田多門、角田興史雄、小林朗、連続繊維フレキシブル筋を用いたコンクリート部材の力学的特性、連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集、JCI-C43、pp.227-232、1998
- 2) 富田早季、小林朗、木村勉、佐藤靖彦、角田興史雄、せん断補強筋として連続繊維フレキシブルを用いたコンクリート部材のせん断性状、土木学会北海道支部論文概要集、第 54 号 (A)、pp.542-545、1998
- 3) 小原孝之、局部応力を受ける連続繊維補強材の破壊機構に関する研究、北海道大学大学院修士論文、1995

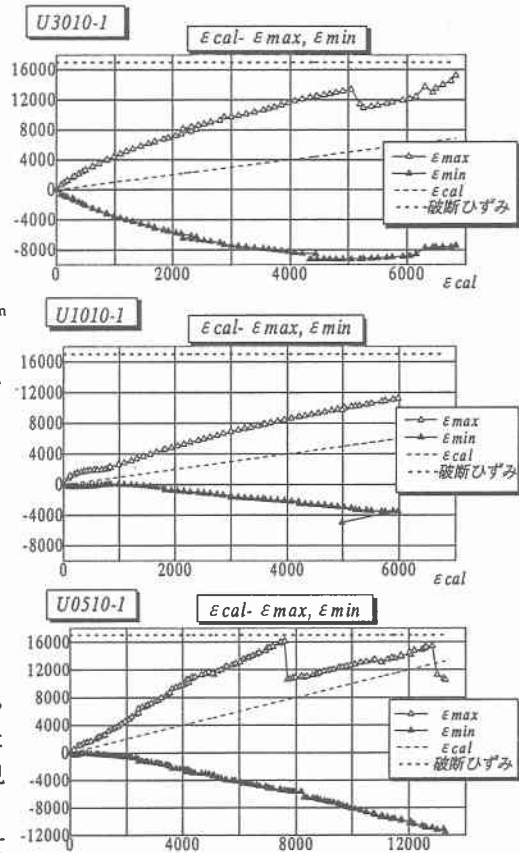


Fig.9 最大引張・圧縮ひずみ