

V-40

局部応力を受ける連続繊維補強材の曲げ成形部の力学性状について

北海道大学工学部 学生員 小原 孝之
 北海道大学工学部 正員 佐藤 靖彦
 北海道大学工学部 正員 上田 多門
 北海道大学工学部 正員 角田 與史雄

1. はじめに

連続繊維補強材は軽量かつ高強度で耐食性に優れた新素材でありコンクリート構造物への適用に期待が寄せられている。しかし、連続繊維補強材は降伏域を持たない脆性材料であるため注意を要する。特に、連続繊維補強材をせん断補強筋として用いる場合に、その曲げ成形部において一軸引張強度よりも低い引張力で破断することが報告されている^{[1][2]}。この現象の解明を目的として連続繊維補強材の材質、曲げ半径、成型方法、コンクリート圧縮強度に着目した研究^{[3][4][5]}が行われているものの、耐力低下のメカニズムの解明には至っていない。

本研究は、連続繊維補強材をせん断補強筋として用いた場合を想定したモデル供試体を用いた実験を通じ、曲げ成形された連続繊維補強材の力学性状を明らかにする。なお、連続繊維補強材にはアラミド繊維と炭素繊維の2種類の異なる繊維の材料を用いている。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した連続繊維補強材はFiBRAであり、連続繊維を組紐状に編み樹脂を含浸させたものである。公称直径9mmのアラミド繊維と炭素繊維の二種類の繊維のものを用いた。それらの材料の緒元をTable 2.1に示す。なお、連続繊維補強材の引張強度及び引張りずみは補強筋径50倍の長さの試験区間を持つ試験体を各々2体用い、それらの引張試験値の平均を求めている。また、コンクリートには早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法は25mm、単位水量は160g/m³、細骨材率は41%とした。また目標コンクリート強度は35MPaである。

Table 2.1 Specifications of CFRM(Composite Fiber Reinforced Material)

Specimen	Fiber	Diameter	Cross Sectional Area	Young's Modulus	Maximum Load	Tensile Strength	Tensile Strain
RA9	Aramid	9.0mm	63mm ²	70GPa	100.6kN	1572MPa	2.2%
RC9	Carbon	9.0mm	63mm ²	140GPa	153.8kN	2403MPa	1.7%

2.2 実験供試体と実験方法

実験供試体はFig. 2.1に示す。連続繊維補強材をせん断補強筋として用いた場合を想定したもので、斜めひび割れをまたぐ位置でのせん断補強筋の挙動をモデル化している。用いた連続繊維補強材の曲げ加工における曲げ半径は両供試体共に9mmである。供試体は材料の種類を変えた2体を作成した。Table 2.2に供試体の緒元を示す。

Mchanical Behavior at Bent Portion of CFRM(Conposite Fiber Reinforced Material) Subjected to Local Stress
 by Takayuki OBARA, Yasuhiko SATOU, Tamon UEDA, Yoshio KAKUTA

モデル供試体の中には連続繊維補強材のせん断補強筋が一巻き分配筋されていて、その四隅の内側に主筋に見立てた公称径13mmの同種の連続繊維補強材を配筋した。供試体の中央には人工ひび割れを設けており、ひび割れ間を連続繊維補強材のみがまたいでいる。Fig. 2.1において、人工ひび割れをまたぐ下側のコンクリートブロックに埋まっている半周分の連続繊維補強材とコンクリートの間の付着応力を取り除いている（連続繊維補強材の表面にグリースを塗り、その上にビニルテープを巻き、またさらにその上からグリースを塗った状態でコンクリートを打設し付着応力を発生させないようにした）。図中の下側の連続繊維補強材の曲げ成形部で必ず破壊が起こるように、上側の補強筋には非付着区間を設けていない。

引張荷重は、ヒンジ、鋼板、鋼棒を経て支圧板に伝わり、人工ひび割れを広げ、連続繊維補強材の曲げ成形部に伝達するようになっている。また、人工ひび割れは0.5mmのプラスチック板によって完全に仕切られている。載荷は、100ton万能試験機を用いて、2.5kNづつ引張荷重を与えることにより行った。このとき、荷重ステップごとに連続繊維補強材ひずみ及びコンクリートブロック

の外側の左右に取り付けた変位計によりひび割れ幅を計測している。なお、本研究では連続繊維補強材のひずみ分布を詳細に調べるため、下側のブロックの連続繊維補強材の全長にわたっておよそ2cm間隔で測定点を設け、各々の測定点の内側と外側の2点にストレインゲージを配置した。測定点の位置はFig. 2.2のとおりである。

Table 2.2 Detail of Specimen

Specimen	Fiber	Bent Radius	Concrete Compressive Stress
AUR1	Aramid	9.0 mm	34.2 MPa
CUR1	Carbon	9.0 mm	34.6 MPa

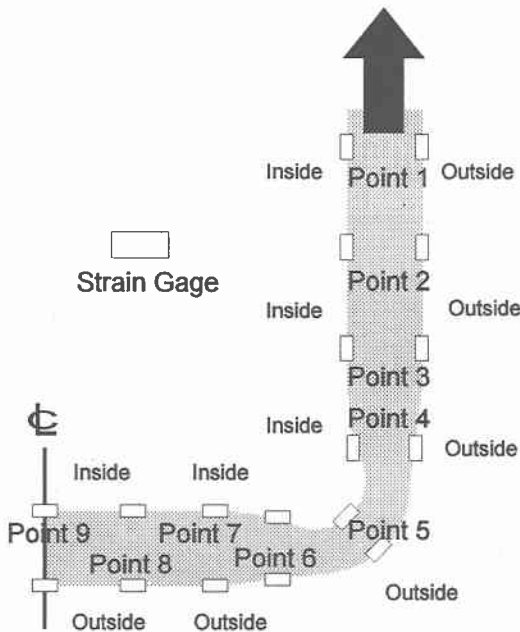


Fig 2.2 Measuring Points in CFRM

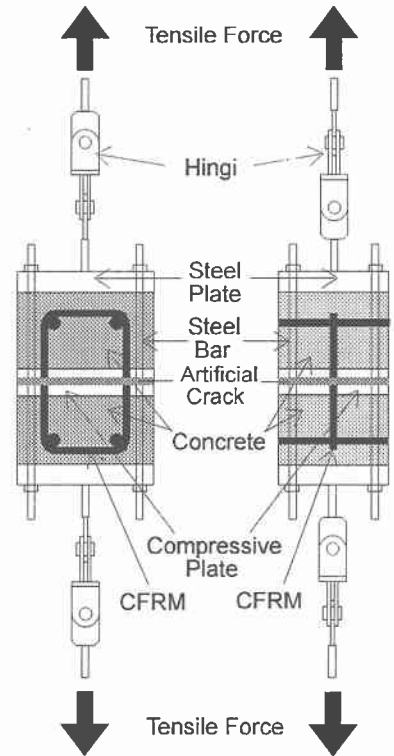


Fig .2.1 Test Specimen

3. 実験結果

実験において終局は両供試体とも曲げ成形部の破断で迎えた。供試体AUR1においては、荷重15kNにおいて左右のひび割れ幅の計測値に大きな偏心が見られたため一度荷重を完全に除荷し、再載荷した。両供試体の荷重と変位の関係をFig3.1に示す。

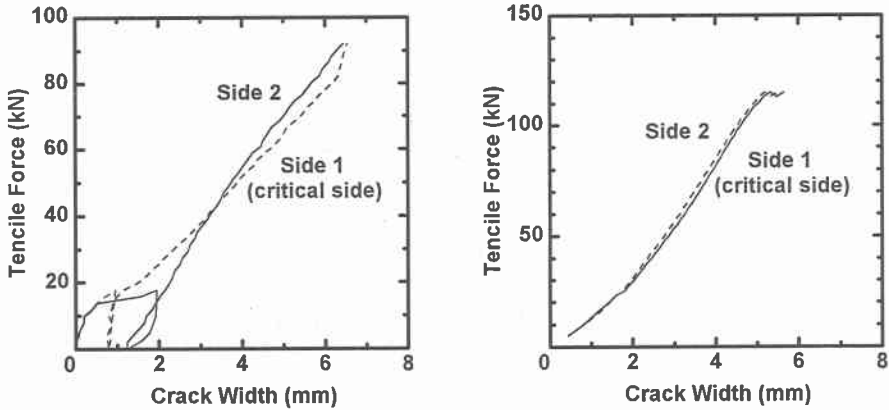


Fig3.1 Load-Crack Width Relationship

Table 3.1 Properties of Experimental Results

3. 1 連続繊維補強材 曲げ成形部の耐力

実験結果の諸元をTable3.1に示す。両供試体とも一軸引張強度に対する曲げ成形部の耐力の低下が大きく、また、炭素繊維の連続繊維補強材を用いた供試体の方が若干耐力低下が大きかった。

Specimen	Maximum Load	Ratio of Ultimate Strength to Uniaxial Strength
AUR1	95.6 kN	0.475
CUR1	112 kN	0.364

3. 2 破断位置及び形状

破断位置及び形状をFig. 3.2に示す。両供試体で破断位置は概ね一致しているが、形状は若干異なり炭素を繊維とする補強材では補強材軸方向に対して斜めに切断されているのに対し、アラミドを繊維とする補強材では、補強材の軸方向に

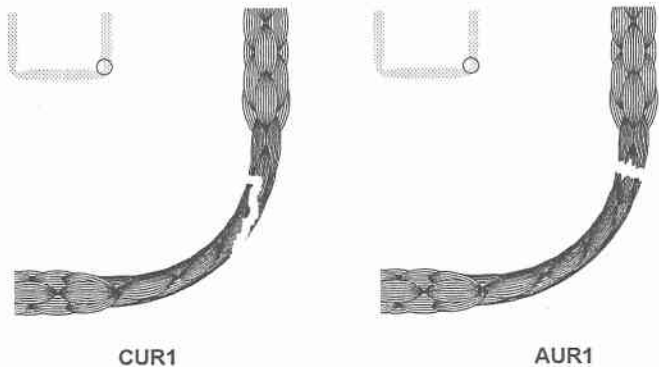


Fig.3.2 Fracture Behavior

直角に近い角度で切断されていた。

3.3 ひずみ性状

3.3.1 アラミド繊維の連続繊維補強材を用いた供試体 (AUR1) のひずみ性状

荷重92.1kNのときの各点におけるひずみ分布をFig. 3.3に示す。また、Point4、Point5、Point6における各荷重に対するひずみの測定値をFig. 3.4に示す。

Fig. 3.3より、Point1においては、補強材の内側と外側で多少のひずみ勾配があるが断面内ではほぼ一様な引張応力が作用している。それに対して、それ以外の測定点ではひずみ勾配が顕著に現れており、断面内で引張応力が一様ではないことが明らかである。その中でもPoint5とPoint6においては、ひずみ勾配が顕著に現れていて、この位置で局部的に大きな曲げモーメントが作用しているものと考えられる。Point6では、内側のひずみが大きな圧縮ひずみを示していて、その外側では一軸の破断ひずみ近くまで大きくなっている (Fig. 3.4 参照)。また、Point5においては内側のひずみが卓越するのに対し、Point6においては外側のひずみが卓越してひずみ勾配の傾きが逆転しており、その性状のままPoint9に続く。破断箇所が一番近いと思われるPoint4ではひずみ勾配が現れていないが、その平均値の絶対値がPoint3の値と比べ非常に小さい。従って、Point4における内側のストレインゲージが載荷途中に支圧力により測定が不安定になったものと思われる。

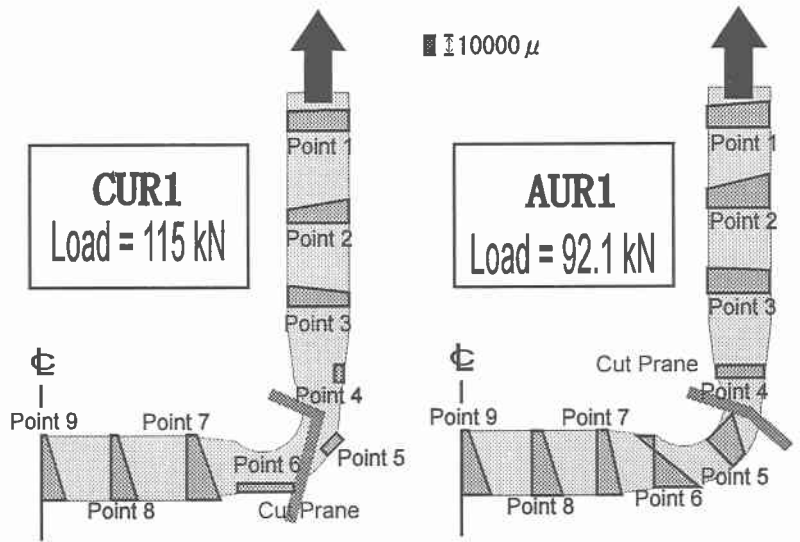


Fig.3.3 Strain Distribution

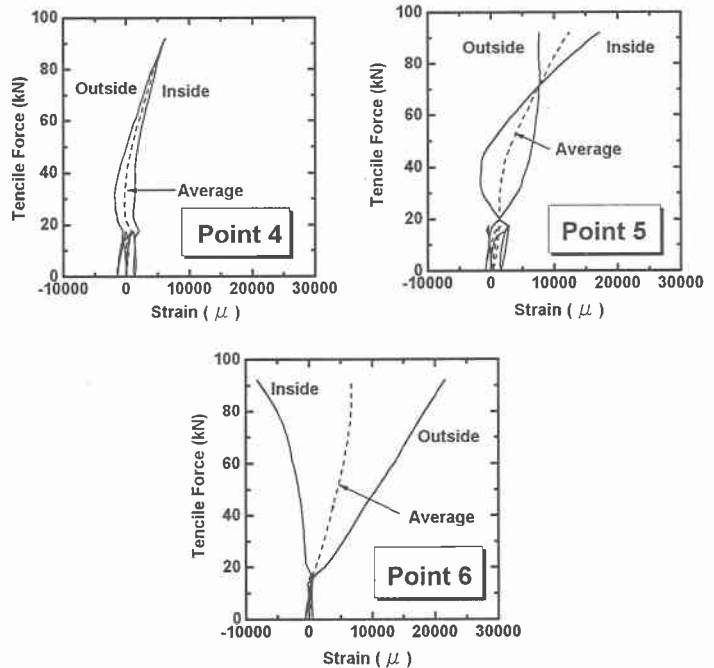


Fig.3.4 Load-Strain Relationship(AUR1)

3.3.2 炭素繊維の連続繊維補強材を用いた供試体 (CUR1) のひずみ性状

荷重115kNのときの各点におけるひずみ分布をFig. 3.3に示す。また、Point4、Point5、Point6における各荷重に対するひずみの測定値をFig. 3.5に示す。これらの位置の内側のストレインゲージは荷重の小さな段階で測定不能になりデータは得られなかった。これは、ストレインゲージが大きな支圧力を受けたためと思われる。

ひずみ性状は、計測が行えた範囲ではアラミド繊維の連続繊維補強材を用いた場合と類似している。特に、Point6における外側のひずみは、他の計測位置のひずみに比べ卓越していて一軸の破断ひずみを遙かに越えている。

支圧力を強く受ける位置でのひずみのデータの計測が困難であること、また、連続繊維補強材の曲げ成形されている部分の補強材軸方向のひずみの変化が急激であるため、ストレインゲージによる計測は困難だったことから、破壊のメカニズムに関してデータからは言及することは難しい。従って、このデータを元に有限要素解析などの数値解析を用いて破壊に対する検討をすべきである。

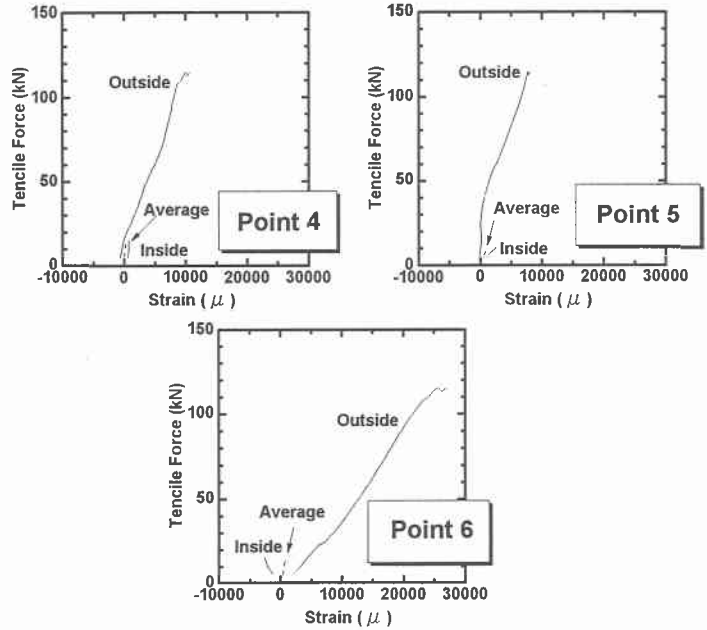


Fig.3.5 Load-Strain Relationship(CUR1)

4. 耐力低下率の考察

連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計指針 (案)⁶⁾によると、曲げ成形された連続繊維補強材の強度は以下の設計式で求めてよいとしている。

$$f_{fb} = \left(\alpha \frac{r}{h} + 0.3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad Eq.(1)$$

- f_{fb} : 曲げ成形強度
- f_{fu} : 一軸引張強度
- r : 曲げ内半径
- h : 連続繊維補強材の断面高さ
- α : 0.05

ここに、本研究における実験結果と上式の計算値との比較を行った。また、既往のデータより回帰した平均強度式との比較も同時に行っている。Fig. 4.1にその結果を示す。

Fig. 4.1は、実験結果と式(1)より得られる予測値との関係を示す。また、図中には、既往の実験データを回帰した平均強度式⁶⁾(式(1)中の α を0.092とした場合)により得られた値を示す。平均強度式による計算値と本実験結果がよく一致しており、式(1)による計算値が本実験結果を安全側に評価できていることが明らかで

ある。

5. まとめ

1. アラミド繊維補強材の破壊形状と炭素繊維補強材の破壊形状は若干異なっていた。また、炭素繊維の連続繊維補強材では一軸引張ひずみよりも遥かに大きなひずみが観測されたにもかかわらず、その位置では破壊していなかった。

2. アラミド繊維補強材の直線部に対する曲げ成形部の耐力低下率は0.475で、炭素繊維補強材の耐力低下率は0.364であった。これらの値は設計強度式より得られる値と比較すると安全側であり、また、平均強度式より得られる値とほぼ等しい。

今後、実験により曲げ成形部の局所的な変形を詳細に計測するのは難しいため、有限要素解析などの数値解析より変形を詳細に調べ破壊を評価する予定である。

謝辞：本研究に用いられた連続繊維補強材は三井建設(株)に提供していただいたものであり、ここに、お

礼申し上げます。なお本研究の一部は、平成7年度文部省科学研究費補助金(奨励研究)を受けて行ったものであり、ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 小沢, 関島, 寺田, 原: FRPで補強したコンクリート梁の曲げ疲労性状, コンクリート工学年次論文集, 1987
- 2) 涌井, 鳥取, 寺田, 原: FRP棒材を緊張材ならびに螺旋状せん断補強筋として用いた梁のせん断試験, コンクリート工学年次論文集, 1989
- 3) 宮田, 鳥取, 寺田, 関島: 曲げ加工したFRP筋の引張耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 1989
- 4) 丸山, 本間, 岡村: FRPロッドの曲げ加工部の引張耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 1990
- 5) 大原, 本田: FRPスターラップの曲げ加工部の引張強度に関する研究, 土木学会第45回年次学術講演概要集, 1990
- 6) 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) [設計編], 1995

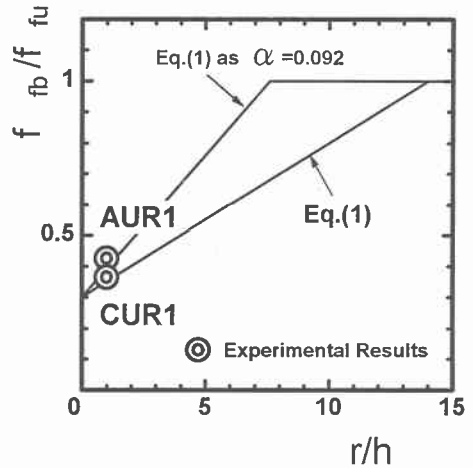


Fig.4.1 Comparison Observed Values with Calculated Values