

[1199] 炭素繊維ネットの分担引張力の均等性に関する基礎的実験

鶴田浩章^{*1}・牧角龍憲^{*2}・丸目一弘^{*3}・阪本好史^{*4}

1. はじめに

連続繊維補強材を用いたコンクリート部材を設計する場合、連続繊維補強材がほぼ弾性状態のまま脆的に破断に至るため、その引張破断が生じる破壊モーメントを的確に定めてコンクリートの曲げ圧縮破壊が先行するような部材の曲げ耐力を設計する必要がある。その際、連続繊維補強材そのものの材料特性のみならず、コンクリート部材中での引張力を各補強材が分担する性状を明らかにしておくことが重要である。すなわち、ひび割れ面の性状や付着性状などの不均一性を考慮すれば、多数本配置された補強材の各分担引張力は必ずしも同一であるとは言えないことが考えられるからである。

そこで、本研究では、補強材の引張破断により曲げ破壊が生じるような補強材比のはりの曲げ試験を行い、補強材の分担引張力の不均一性の有無ならびにそれが部材の破壊に及ぼす影響について検討した。連続繊維補強材としては、格子状に成形した炭素繊維ネット（以下CFNと略する）を用い、引張力を測定するひび割れ位置を特定するために、切り欠きをいれたはり試験体を試験に供した。その結果、補強材の引張破断で部材の曲げ破壊が生じる場合、各補強材間の分担引張力は再分配されないまま、すなわち不均一な応力状態のまま破壊にいたることが観察された。

2. 補強材の分担引張力の均等性について

従来のコンクリート部材の曲げ耐力の算定においては、コンクリートの引張補強に多数本配置された補強材が均等に引張力を分担することを前提としているが、これは鉄筋の降伏特性によるところが大きい。

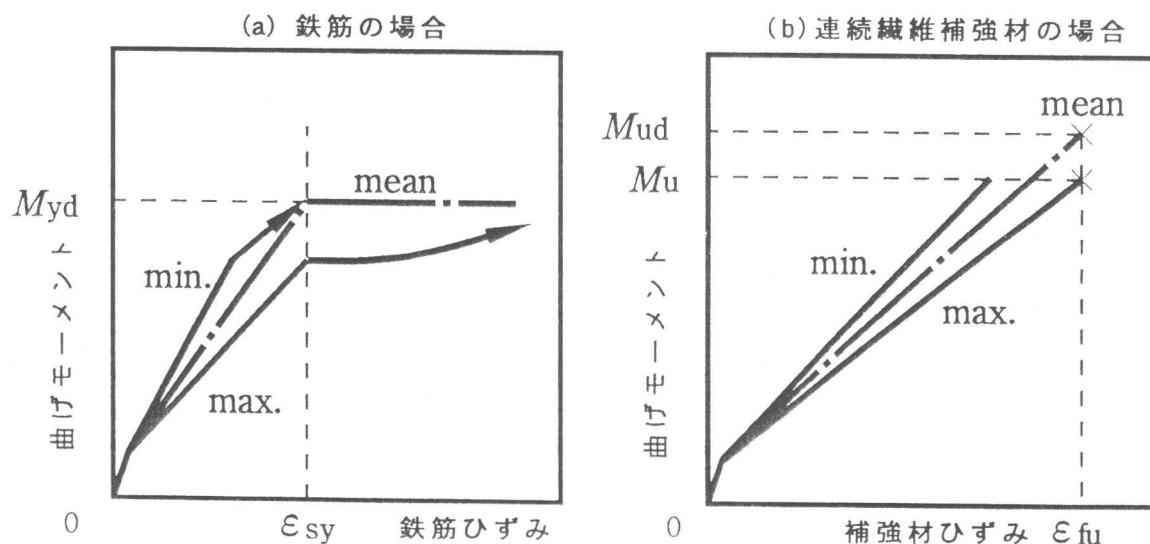


図-1 曲げモーメントと鉄筋ひずみ・補強材ひずみの関係図

*1 九州大学助手 工学部建設都市工学科、工修（正会員）

*2 九州大学助教授 工学部建設都市工学科、工博（正会員）

*3 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻

*4 九州大学教授 工学部建設都市工学科、工博（正会員）

すなわち、図-1(a)に模式的に示すように、同一断面中の鉄筋相互に分担引張力(=鉄筋ひずみ)の差が生じたとしても、最大ひずみを示す鉄筋が降伏点ひずみ(ε_{fu})に達した以降において、その鉄筋は降伏点応力以上の引張力を分担できないため、他の鉄筋に引張力が再分配される。そのようにして、ひずみが大きい鉄筋から順次降伏していくことにより、すべての鉄筋が降伏状態に移行する。すなわち、同一断面中の鉄筋全てが均等な引張力(=降伏点応力×断面積)を負担することになる。これに対して、降伏特性を有さない連続繊維補強材を用いたコンクリート部材においては同一断面内で補強材相互の分担引張力の差が生じた場合、応力を再分配する何らかのメカニズムが作用しない限り、分担引張力が最大の補強材がそのままの状態で破断ひずみ(ε_{fu})に至り、その1本が破断することにより、部材の破壊が生じることが十分想定される[1]。その場合、図-1(b)に示すように均等に引張力を分担するとして算定されたひずみと最大ひずみとの差の比率にほぼ等しい比率で、破壊モーメント(M_u)は設計曲げ耐力(M_{ud})より低下することになる。

したがって、コンクリートの引張補強材に連続繊維補強材を用いる場合には、各補強材の分担引張力の不均一性を十分考慮して設計しなければならない。しかしながら、もし分担引張力を再分配して均一化するメカニズムが存在するとすれば、そのメカニズムが作用する条件を明らかにすることにより、補強材の強度物性を有效地に活用した断面を設計することが可能になる。そこで連続繊維補強材の分担引張力についてCFNを用いて基礎的な実験を行ったので報告する。

3. 実験概要

(1) 使用したCFN

本実験に使用したCFNは、48K(1Kは素線1000本)30mmメッシュ簡易織り[2]のネット(写真-1)で、素線はPAN系炭素繊維、素線径は $7\mu\text{m}$ 、素線の引張強度は 360kgf/mm^2 、ヤング係数は $2.35 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、伸びは1.5%、結合材にはビスフェノール系のエポキシ樹脂を使用した。CFNは実験室において熱硬化させ作成したものであり、平均樹脂含浸率は45.2%であった。

(2) 供試体および試験方法

供試体は図-2のように $15 \times 15 \times 53\text{cm}$ の曲げ供試体の中央部に厚さ10mmの切り欠きを設け、かぶりが10mmとなるようにCFNを配置した。試験は、100tonf万能試験機を用い、スパン450mm、載荷スパン100mmの中央2点載荷で行った。

なお、切り欠き部でのCFNの

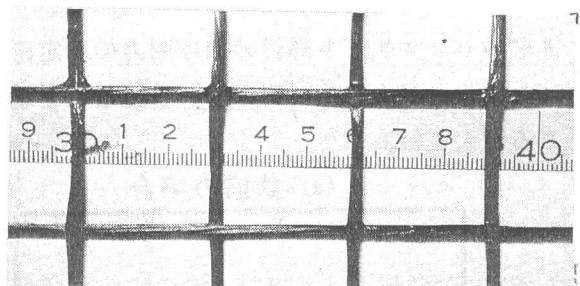


写真-1 使用したCFN

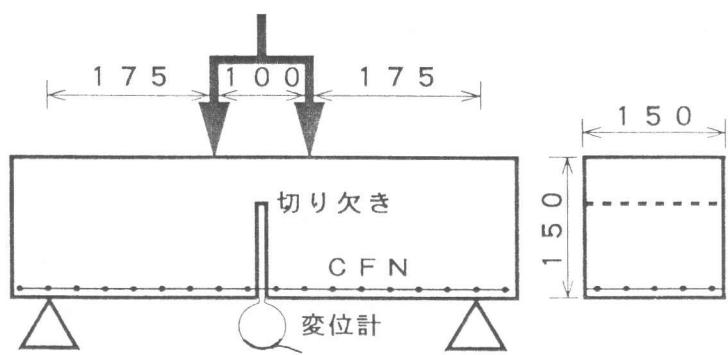


図-2 供試体および試験方法(単位:mm)

ひずみを測定するため、切り欠き部の縦線の上下にひずみゲージ(2 mm)を貼付した。ここで、上：圧縮縁側、下：引張縁側とした。また、切り欠き部にはクリップ型変位計を2個セットし、CFNの滑り出し量を含む変位量を測定した。切り欠き高さは125mm、100mm、50mmの3種類で各2体ずつ供試体を用意し、No. 1・2は125mm、No. 3・4は100mm、No. 5・6は50mmとした。

コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、 $G_{max} = 10\text{mm}$ 、 $W/C = 40\%$ 、スランプ8 cmで打設し、湿潤養生後、材齢7日で試験した。

4. 実験結果および考察

本実験に使用したコンクリートは平均圧縮強度 382kgf/cm^2 、平均ヤング係数 $2.86 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ であった。

(1) 破断強度と破断状況について

表-1に破断強度の一覧を示す。表中の破断強度は引張力をCFNのみで受け持つと仮定した場合の $M = T \cdot z$ のTを繊維断面積で除して求めた値であり、zは鉄筋コンクリートはりにおけるアーム長と同様にして求めた。強度比は素線強度 360kgf/mm^2 に対する破断強度の比である。強度比は、ほぼ8割以上の値を示しており、素線強度の80%値は上回る結果となっている。また、切り欠き高さによる強度への影響は供試体数が少ないと明確には把握できなかった。

図-3は、曲げ荷重および繊維応力と切り欠き部変位量の関係図であるが、切り欠き高さにより初期段階の挙動の違いはあるが、以降の傾きはほぼ一致している。このことは、他の3体についても同様で、ばらつきの少ない荷重-変位量図が得られた。

破断の状況は、全ての縦線の破断が一度に発生するのではなかった。荷重が終局状態に近づき、一回目の破断音が発生すると、その後連続的に2、3度破断音が発生し、荷重が低下してしまうという状況だった。破断位置についても、縦線が特定の部分で破断しているのではなく、各縦線によってまちまちであったが、全てに関していえることは、ほとんどの破断が切り欠きに近い横線位置で発生していることであった。

表-1 破断強度一覧

No.	切り欠き高さ(mm)	強度(kgf/mm ²)	強度比
1	125	334	0.93
2		372	1.03
3	100	316	0.88
4		330	0.92
5	50	278	0.77
6		317	0.88

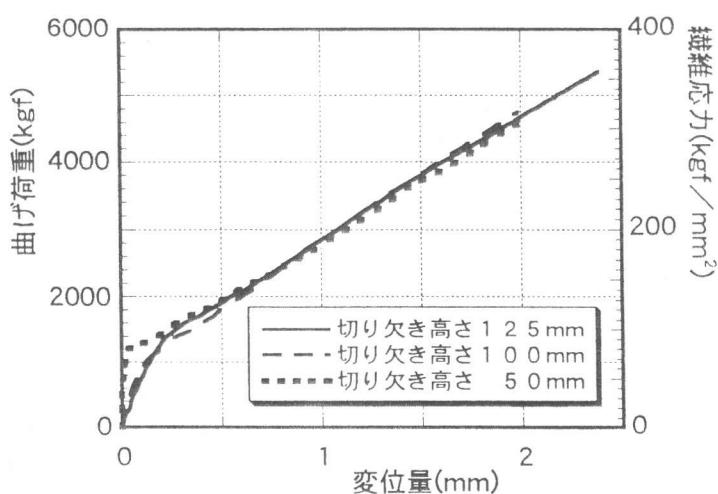


図-3 曲げ荷重・繊維応力と変位量の関係

(2) 各縦線のひずみの性状について

図-4～9は各縦線下側のひずみの挙動を示したものである。図-4は供試体No. 1、図-5はNo. 2、図-6はNo. 3、図-7はNo. 4、図-8はNo. 5、図-9はNo. 6の曲げ荷重と各縦線のひずみとの関係を示している。

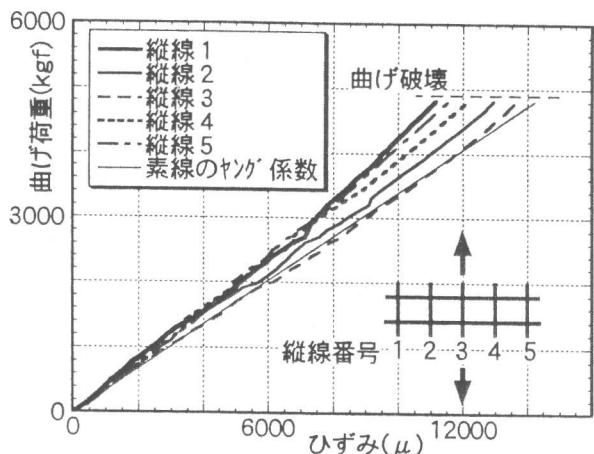


図-4 曲げ荷重-ひずみ関係 (No. 1)

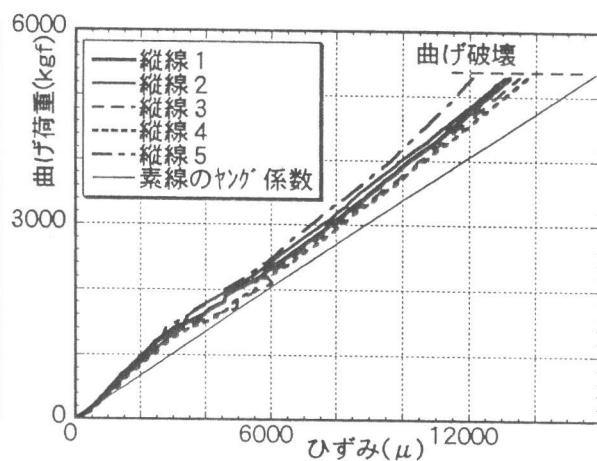


図-5 曲げ荷重-ひずみ関係 (No. 2)

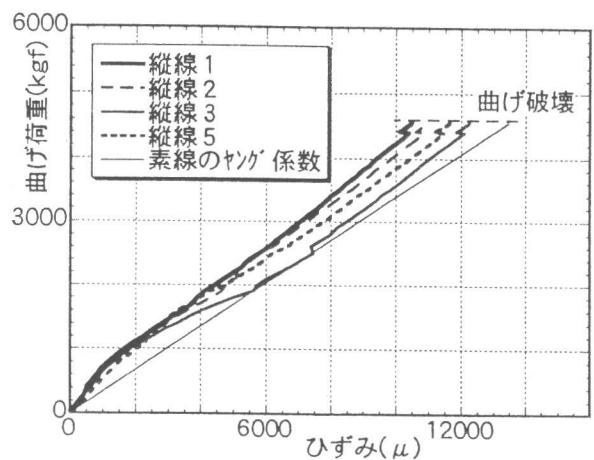


図-6 曲げ荷重-ひずみ関係 (No. 3)

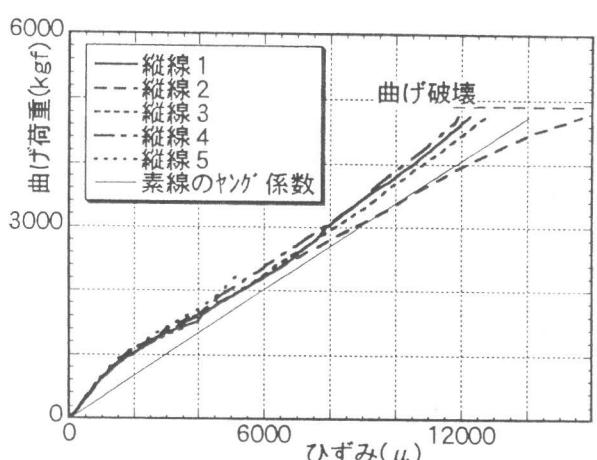


図-7 曲げ荷重-ひずみ関係 (No. 4)

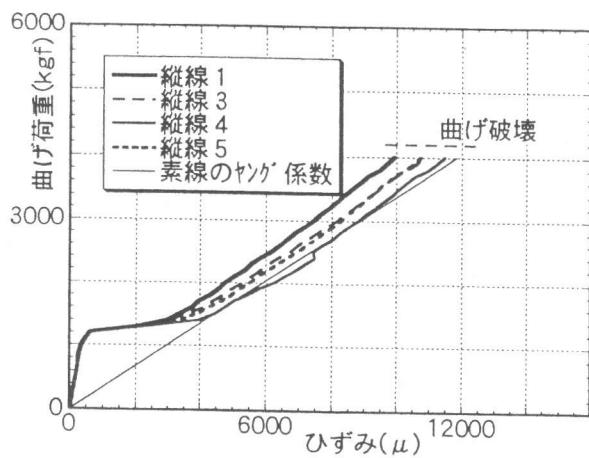


図-8 曲げ荷重-ひずみ関係 (No. 5)

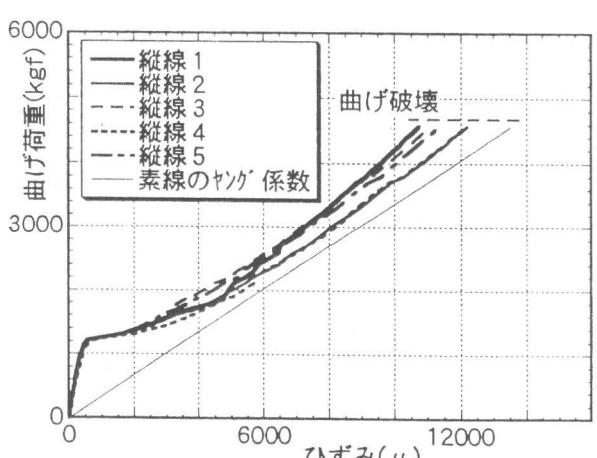


図-9 曲げ荷重-ひずみ関係 (No. 6)

この図から分かるように、荷重が大きくなるにつれて、ひずみの最大値と最小値の差は大きくなっていく傾向にある。初期状態から曲げ荷重 2500kgf位までの間では、5本の縦線のひずみの大小関係が変化する現象が2、3度発生している。具体例として供試体 No. 1の状態を挙げると、荷重1000kgf の段階では、 $3 > 5 > 4 > 1 > 2$ であったひずみの大小関係が、荷重 1500kgfでは $3 > 5 > 2 > 1 > 4$ と変化しているということである。また、荷重 2500kgf以降については、ひずみの大小関係の入れ替わりは発生せず、ひずみの最大値と最小値の差がわずかながら増加していく傾向にあるが、ひずみの大小関係を保ったまま全ての縦線のひずみがほぼ一定の傾きで増加している。

そのようなひずみの最大値と最小値の差を平均ひずみで除した値の百分率をひずみ差の変動率として曲げ荷重との関係を示したのが図-10である。この図において、折れ線が水平に近いということは荷重が大きくなるにしたがって、ひずみ差が一定割合を保っていくことを示し、折れ線が急激な上昇・下降を示しているのはひずみ差が極端に増加・減少をしているということである。この図より曲げ荷重 2500kgf以下の領域ではひずみの変化が激しく、ひずみ差が増大した後減少するという行程を繰り返し、2500kgf以上の領域では、ほぼ一定割合で緩やかに増加していることが分かる。この不安定な 2500kgf以下の領域がどのような作用によって生じているのかということについて考えてみると、この段階はコンクリートにひび割れが発生した荷重段階と一致していることが分かる。したがって、切り欠き部にひび割れが発生してから断面を貫通するまでの間に縦線が不均一な応力状態におかれ、ひずみ差が急に増加していき、ひび割れが貫通することにより一旦ひずみ差が減少し、一定の割合でひずみ差を増加させていくのではないかと考えられる。

のことより、CFNの場合、初期の荷重段階でひび割れの発生等による不均一な状態により各縦線のひずみにばらつきが生じる。

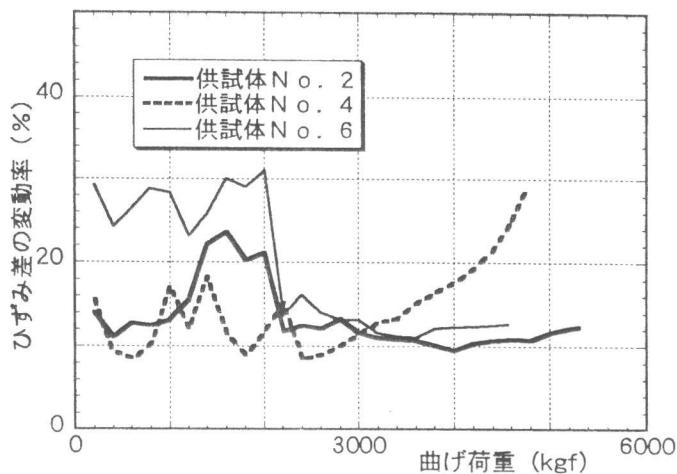


図-10 最大ひずみと最小ひずみの差の変動率と曲げ荷重の関係

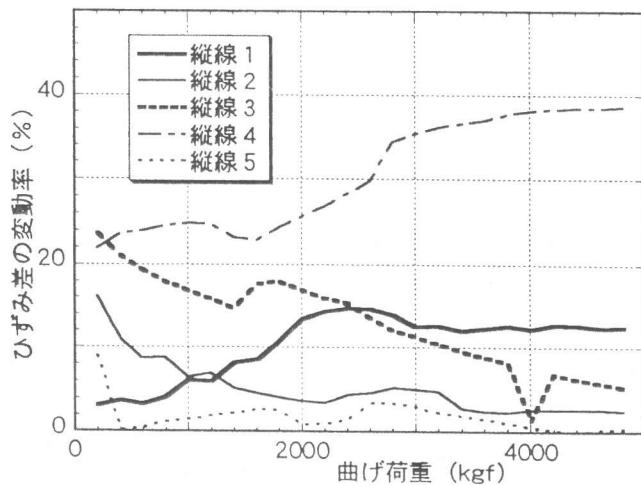


図-11 上下によるひずみ差の変動率と曲げ荷重の関係

その後、ひび割れが貫通することにより縦線間のひずみ差が減少するような作用が働き、ある程度の荷重がかかると、ひずみのばらつきを修正しないまま破断に至る。そうすると、分担引張力が最大の縦線が破断ひずみに到達して破断が生じるということになる。

次に、供試体 No. 1 の上側ひずみと下側ひずみの差の絶対値をその縦線の平均ひずみで除した値の百分率を上下によるひずみ差の変動率として曲げ荷重との関係を示したものが図-11である。縦線 4 を除く 4 本についてはほぼ水平に近い傾向を示し、かなり 0 に近い値も見られ、縦線の上側と下側のひずみ差が少ない状態であることが分かる。また、曲げ荷重が 3000kgfを超えると、ほぼ安定した状態を示しており、ひずみ差が減少するような挙動を示している縦線も見られる。全体的な割合では 5 本の縦線のうち、4 本が (上側ひずみ) < (下側ひずみ) あるいは (上側ひずみ) ≈ (下側ひずみ) の状態で、1 本が (上側ひずみ) > (下側ひずみ) ということになり、ほぼ上下均等に引っ張っていると言える。

5.まとめ

- (1) CFNにおいては、縦線ひずみにばらつきが生じていれば、ひずみ差が改善されない状態のまま破断に至ってしまう。すなわち、分担引張力が最大である縦線の破断により部材が破壊してしまう。
- (2) ひび割れ発生から、貫通するまでの段階では、ひび割れの進展にともなう不均一な状態により縦線間のひずみ差の変化が著しい。
- (3) ひび割れ貫通後は、その段階での縦線間のひずみ差をほぼ一定に保ちながら、破断ひずみに近づいていく。
- (4) 縦線の上下によるひずみの差は、荷重の増加とともに徐々に増加するが、ほぼ一定に保たれていた。
- (5) 切り欠き高さによる強度・変位量への影響は供試体数を増やして検討する必要がある。

最後に、本研究は文部省科学研究費補助金 一般研究 C (研究代表者；牧角龍憲、課題番号 05650436) ならびに総合研究 A (研究代表者；角田與史雄、課題番号 04302040) の分担研究として実施したものである。

謝辞

本研究において使用した炭素繊維は大阪ガス株式会社 開発研究所より提供して頂きました。また、実験に際しては、九州大学 高尾洋平君の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用 (コンクリートライブラリー72)
pp. 8-9, 1992. 4
- 2) 鶴田浩章・阪本好史・牧角龍憲・岡田慎一郎：太径粗メッシュ炭素繊維ネットの試作検討
コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 607-612、1992. 6