

繊維系新素材の構造部材への適用に関する研究（その3）

——炭素繊維を補強筋としたはりの曲げせん断実験——

木村 耕三 小島 克朗
岡野 素之

Research and Development on Structural Members Using New and Advanced Fiber Materials (Part 3)

——Experiments on Flexural Behaviors of Beams Reinforced with Carbon Fibers——

Kohzo Kimura Yoshiro Kobatake
Motoyuki Okano

Abstract

Carbon fibers have excellent characteristics such as high strength, high modulus of elasticity, and good durability. Because of these characteristics, carbon fibers have been used in civil engineering and building construction. An aim of this study is to comprehend the characteristics and make them applicable to practical use. This paper describes the results of experiments on flexural behaviors of beams reinforced with carbon fibers (FRP). The following results were obtained with these experiments. ① As FRP bars have good bonding properties the equivalent of deformed bars, they can be used for flexural reinforcements. ② Shear reinforcement is required for beams with less flexural reinforcement. ③ Cracking along compression reinforcement and splitting of cover concrete occur in flexural members reinforced with carbon fiber strands.

概 要

炭素繊維等の高弾性で比強度が高く、耐久性に優れた繊維系新素材は、過酷な環境下にある土木建築物の構造材としてその利用が検討されている。本研究の目的は、繊維系新素材を構造部材に適用するための諸性状の把握とその実用化の検討である。本報告は、炭素繊維による新補強材を用いた補強コンクリート部材の曲げせん断実験結果について述べたものである。実験の結果から、以下のことが分かった。① 表面加工した新補強材は、異形鉄筋と同等の付着性状を有し、曲げ補強筋として利用出来、その曲げ耐力は通常の RC 部材と同様の方法で評価出来る。② 曲げ補強筋量の少ない部材での曲げせん断引張破壊を防止するためには、引張強度と剛性を考慮してせん断補強筋量を決める必要がある。③ より線加工の新補強材を圧縮補強筋とした曲げ部材では、圧縮補強筋に沿ったひびわれとかぶりコンクリートの割裂が生じる。

1. はじめに

炭素繊維、アラミド繊維をはじめとする高強度、高弾性で耐久性に優れた繊維系新素材は、土木建築分野で構造材としての利用が検討され、一部の構造物では試験的に用いられている¹⁾。

本研究の目的は、連続繊維にエポキシ樹脂を含ま硬化させた繊維強化プラスチックを鉄筋代替やプレストレストコンクリートの緊張材として用いた補強コンクリート部材の構造性能を把握し、新素材による新補強材の構造部材への適用を検討することである^{2),3),4)}。

本報告は、炭素繊維による新補強材あるいは鉄筋（丸鋼、異形棒鋼）を曲げ補強筋（以下、引張補強筋あるいは、圧縮補強筋と記す）、異形鉄筋あるいは炭素繊維強化プラスチックをせん断補強筋とした補強コンクリート部材の曲げせん断実験結果について述べたものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、図-1 に示す幅 20 cm×せい 30 cm×長さ 350、あるいは 280 cm の矩形ばり 9 体である。

引張、圧縮補強筋は、鉄筋（丸鋼、異形棒鋼）のほか、写真-1 に示す石炭ピッチ系の炭素繊維を用いて Pultrusion 法で製造した外径 8mm の棒材（CF 丸棒）の表面に深さ 0.2 mm の凹凸をつけた異形棒（以下、CF 異形棒）と、CF 丸棒に炭素繊維の糸を巻き付けて表面に凹凸を付けた異形筋（以下、CF 織棒）および PAN 系の炭素繊維ストランドを 7 本より合わせた外径 10.5 φ のケーブル（以下、CF より線）である。鉄筋は両端で端部プレートとの溶接により、炭素繊維補強材は表面の凹凸によるコンクリートとの付着によって試験体端部で定着（定着長さ 550 mm）している。

CM3C, CC3C 試験体を除く試験体の引張補強筋は、試験体の曲げ降伏荷重あるいは最大荷重が近似するように、また上記2試験体では、CM2S, CC2S 試験体より引張補強筋をそれぞれ1本ずつ多く配筋した。

せん断補強筋は異形鉄筋 (D13) の降伏強度と同等の強度を有するように、エポキシ樹脂で石炭ピッチ系炭素繊維を集束硬化させて製作した閉鎖型 (矩形) の炭素繊維強化プラスチック (以下, CFRP) で²⁾、試験体には異形鉄筋と同間隔で配筋した。

試験体のパラメータは、①引張, 圧縮補強筋の種類 (CF 異形棒; 記号 CD, CF 織棒; 記号 CM, CF より線; 記号 CC, 丸鋼; 記号 SR, および異形鉄筋; 記号 SD) と、②引張補強筋量 (補強筋の本数) および③せん断補強筋の種類 (CFRP; 記号 C, 異形鉄筋; 記号 S) で、その一覧を表-1 に示す。なお、試験体名は、各試験体のパラメータが分かるように [(引張, 圧縮補強筋の種類) (引張補強筋量) (せん断補強筋の種類)] で表示した。

使用したコンクリート (設計基準強度 210 kgf/cm², スランプ 18 cm) と補強材の材料特性を表-2 に示す。

2.2 実験方法

実験は、300 tf アムスラー型万能試験機を用い、図-1 に示すスパン 240 cm, 純曲げ区間 60 cm の2点集中荷重による単純ばり形式で行なった。

荷重は、原則として異形鉄筋を引張補強筋とした SD2S 試験体の計算による曲げ降伏荷重の2/3相当荷重 (長期設計荷重) と実験時の曲げ降伏荷重 (荷重 10.5 tf) でそれぞれ2回の繰返しを、それ以降、曲げ降伏時のスパン中央での変位 δ_y の1, 2, 3, 4 倍で各2回の繰返しした後、破壊させた。

引張および圧縮補強筋とコンクリート表面ひずみをストレーンゲージで測定した。

変位の測定は、スパン中央の鉛直方向変位を高感度型変位計で、引張および圧縮補強筋位置での材軸方向変位をスパン全長にわたりパイ型ゲージで行なった。

コンクリートのひびわれは、目視による観察のほか、代表的なひびわれについてその幅をクリップゲージにより測定した。

2.3 実験結果と考察

2.3.1 破壊状況 各試験体の最終破壊状況を写真-2~写真-10に示す。

鉄筋を引張補強筋とした試験体はいずれも鉄筋の降伏後、純曲げ区間のコンクリートの圧壊による曲げ破壊 (以下, 曲げ圧壊) で終局状態に至った。

新補強材2本を引張補強筋とした試験体では、曲げひびわれはせん断補強筋に沿って分散して生じるが、その進展は早く、発生後すぐに圧縮補強筋近傍まで達した。その後、曲げせん断ひびわれの発生が、また、CF より線を用いた試験体では圧縮補強筋に沿ったひびわれの発生が見られた。

せん断補強筋に鉄筋を用いた CM2S, CD2S, CC2S 試験体では、終局時に曲げせん断ひびわれ幅の拡大は見ら

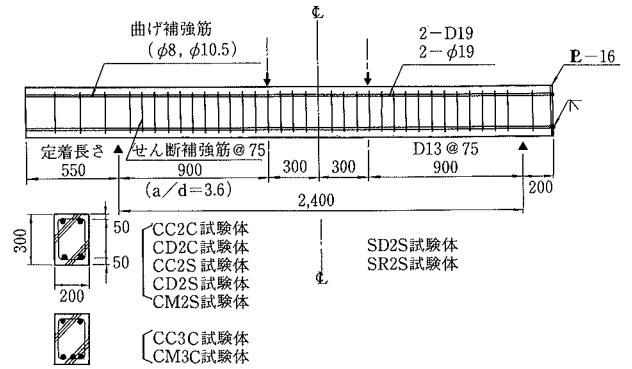


図-1 試験体の形状寸法

表-1 試験体の一覧

| 試験体名 | 引張補強筋 | | | | せん断補強筋 | |
|------|-------|---------|------------------------|---------|--------|----------------------------|
| | 表面形状 | 本数・径 | 断面積*1 | 補強筋比*1 | 種類 | 補強筋比*2 |
| CC2C | CFより線 | 2-φ10.5 | 1.11(cm ²) | 0.23(%) | CFRP | 0.20(%) [D13相当 @ 75] |
| CD2C | CF異形棒 | | 0.88 | 0.18 | | |
| CM2S | CF織棒 | 2-φ8 | 0.98 | 0.20 | 異形鉄筋 | 1.69(%) [D13 @ 75] |
| CD2S | CF異形棒 | | 0.88 | 0.18 | | |
| CC2S | CFより線 | 2-φ10.5 | 1.11 | 0.23 | | |
| SD2S | 異形鉄筋 | 2-D19 | 5.74 | 1.15 | | |
| SR2S | 丸鋼 | 2-φ19 | 5.68 | 1.14 | | |
| CM3C | CF織棒 | 3-φ8 | 1.47 | 0.29 | CFRP | 0.20(%) [D13相当 @ 75] |
| CC3C | CFより線 | 3-φ10.5 | 1.67 | 0.33 | | |

*1) エポキシ樹脂を含んだ公称断面積による値、*2) 繊維のみの実断面積による値

表-2 使用材料の特性

| 使用材料 | 形状 | 品質 | 降伏強度 σ_y (tf/cm ²) | 引張強度 σ_u (tf/cm ²) | 弾性係数 E (tf/cm ²) | 伸び (%) |
|------|-------|--------|--|--|-----------------------------------|-----------|
| 炭素繊維 | 異形織棒 | ピッチ系 | — | 20.2 | 1,460 | 1.4 |
| | CFより線 | PAN系 | | 21.5 | 1,420 | 1.6 |
| 鉄筋 | D19 | S D 30 | 3.60 | 5.30 | 1,820 | 18.5 |
| | D13 | | 3.72 | 5.45 | 1,920 | 19.1 |
| | φ19 | — | 3.30 | 4.82 | 2,020 | 26.7 |

| W/C (%) | 調合 (kg/m ³) | | | | 圧縮強度 F_c (kgf/cm ²) | 弾性係数 E_c (tf/cm ²) | 備考 |
|---------|-------------------------|-----|-----|-----|--------------------------------------|-------------------------------------|---------|
| | セメント | 水 | S | G | | | |
| 59.5 | 311 | 185 | 823 | 972 | 284 | 236 | CC2C試験体 |
| 61.8 | 280 | 173 | 882 | 961 | 337 | 225 | CD2C試験体 |
| 59.5 | 310 | 184 | 833 | 967 | 332 | 244 | 上記以外 |

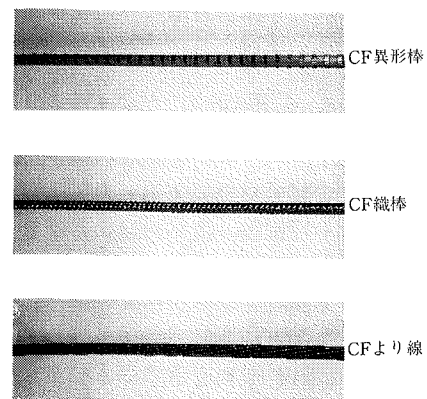


写真-1 炭素繊維補強筋の形状

れず、純曲げ区間で引張補強筋の破断による曲げ破壊あるいは、曲げせん断区間（加力点近傍）でのコンクリートの圧壊（以下、曲げせん断圧縮破壊）を生じた。これに対し、CFRP をせん断補強筋とした CD2C, CC2C 試験体では、圧縮補強筋に沿った曲げせん断ひびわれの進展と、ひびわれ幅の拡大が見られ、曲げせん断区間中央での曲げせん断破壊（以下、曲げせん断引張破壊）によって終局状態に至った。

一方、引張補強筋が3本の試験体では、曲げひびわれの進展が引張補強筋2本の場合に比べて遅く、ひびわれ発生後、はりせいの中ほどでいったん止まっている。その後、引張補強筋に沿ったひびわれが発生し、CM3C 試験体では、終局時に引張補強筋のかぶりコンクリートが

剥落した。CF より線を用いた CC3C 試験体では、圧縮補強筋に沿ったひびわれが多く発生し、終局時には純曲げ区間のかぶりコンクリートが弾き出されるように音と共に急激に剝離した。

両試験体とも CFRP をせん断補強筋として用いたが、曲げせん断ひびわれの発生後、ひびわれ幅の拡大は見られなかった。また、CM3C, CC3C 試験体の終局状態は、それぞれ曲げせん断圧縮破壊、曲げ圧壊であった。

以上の破壊状況から、炭素繊維による引張補強筋量が少なく、せん断補強筋に FRP を用いたはり部材では、曲げせん断ひびわれの進展と、その幅の拡大が大きくなり、曲げせん断引張破壊につながる。一方、鉄筋をせん断補強筋とした場合には、曲げせん断ひびわれ幅の拡大は見られない。これは、せん断補強筋の引張剛性の違いによるものと考えられる。したがって、FRP をはりのせん断補強筋に用いる場合には、強度だけでなく、その剛性を考慮して配筋量を決定する必要がある。

2.3.2 モーメント～曲率関係 図-2～図-8 は、それぞれ各試験体スパン中央（純曲げ区間）での軸方向変位から求めた曲率とモーメントの関係と鉛直変位 $3\delta_y$ での曲率分布の一例である。なお、図中には全断面有効と

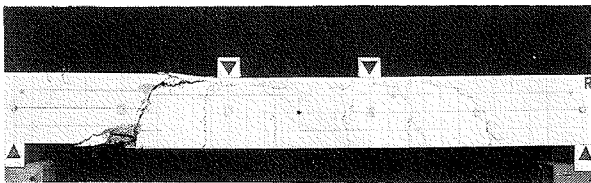


写真-2 破壊状況 (CC2C 試験体)

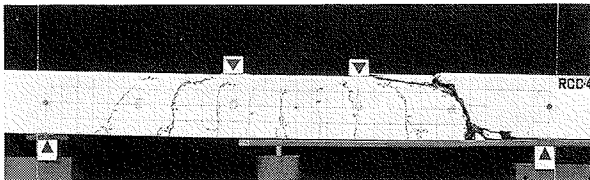


写真-3 破壊状況 (CD2C 試験体)

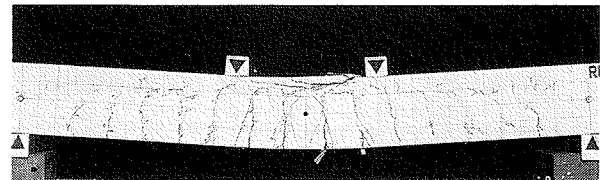


写真-7 破壊状況 (SD2S 試験体)

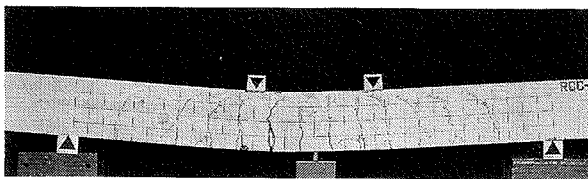


写真-4 破壊状況 (CM2S 試験体)

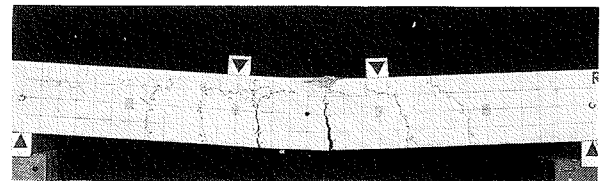


写真-8 破壊状況 (SR2S 試験体)

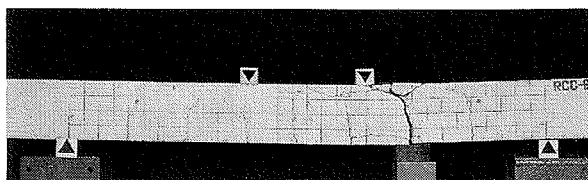


写真-5 破壊状況 (CD2S 試験体)

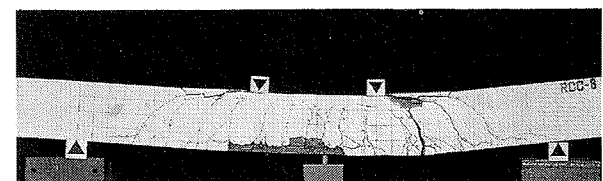


写真-9 破壊状況 (CM3C 試験体)

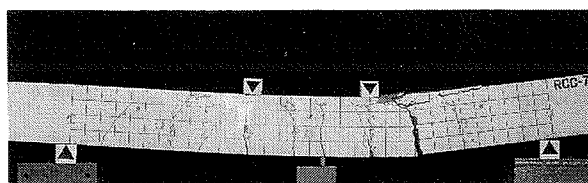


写真-6 破壊状況 (CC2S 試験体)

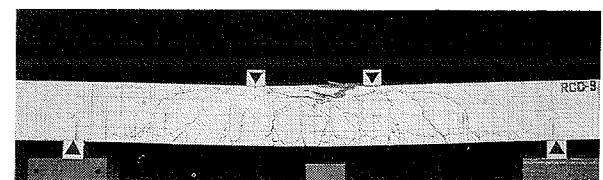


写真-10 破壊状況 (CC3C 試験体)

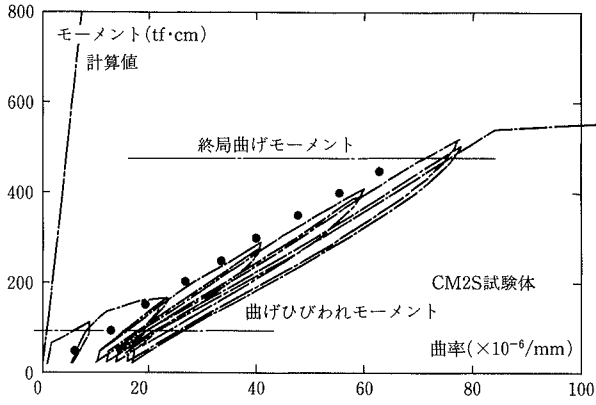


図-2 モーメント～曲率関係 (CM2S 試験体)

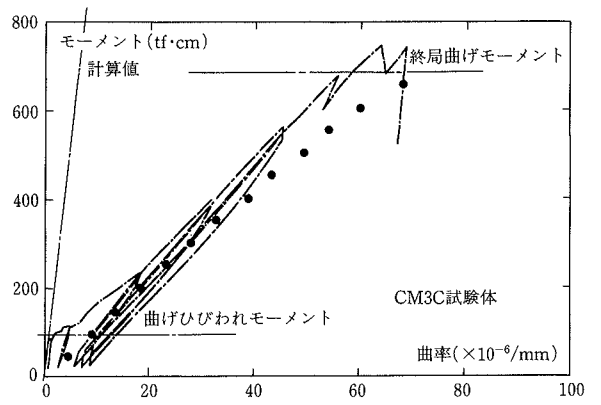


図-6 モーメント～曲率関係 (CM3C 試験体)

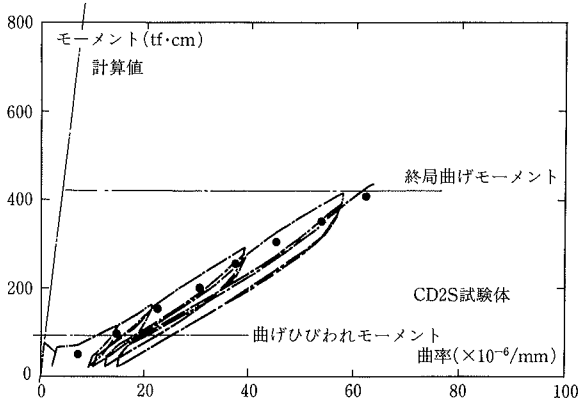


図-3 モーメント～曲率関係 (CD2S 試験体)

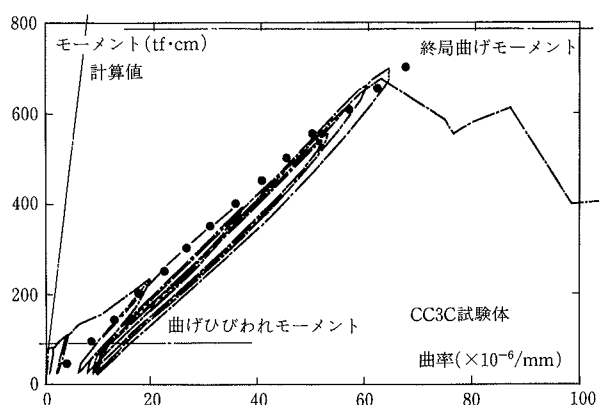


図-7 モーメント～曲率関係 (CC3C 試験体)

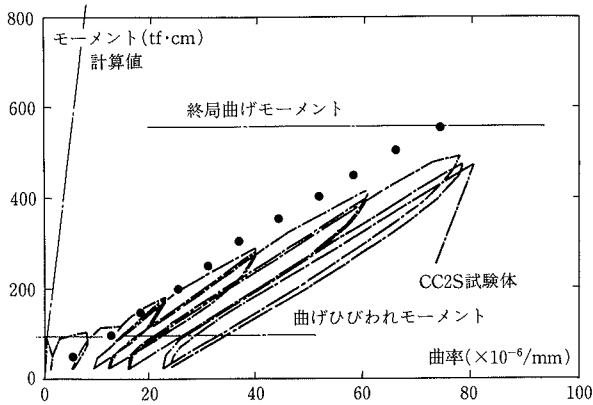


図-4 モーメント～曲率関係 (CC2S 試験体)

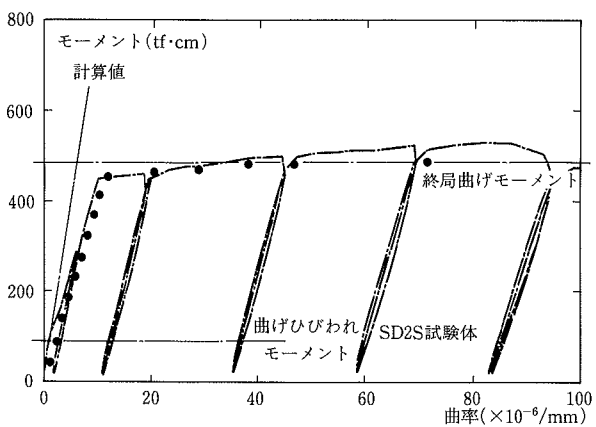


図-5 モーメント～曲率関係 (SD2S 試験体)

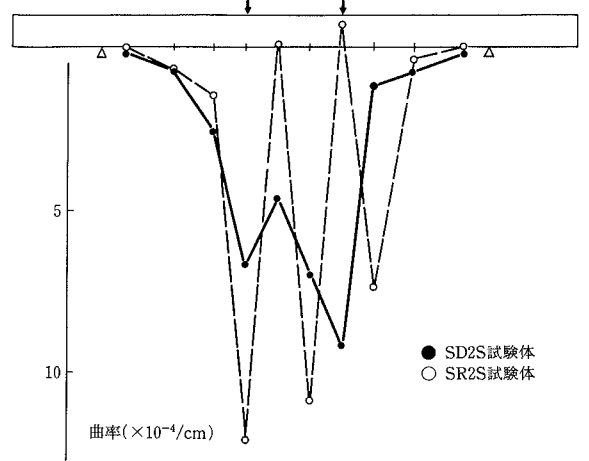
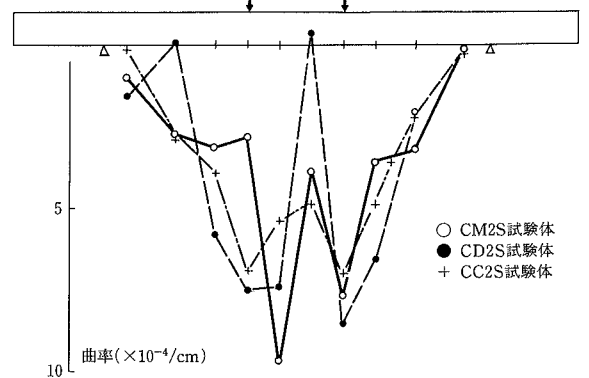


図-8 曲率分布図 (変位 $3\delta_y$ 時)

して求めた弾性剛性と曲げひびわれモーメントおよびコンクリートの最大圧縮応力時のひずみと終局ひずみをそれぞれ2500, 7500×10^{-6} としてe関数法によって求めた計算値 (●印) を合わせて示した。

新補強材を用いた部材の曲率は、曲げひびわれの発生によって増大し、それ以降、破壊まで直線的に増加する。曲げひびわれによる曲率の増大とその後の曲率は、補強筋量が多いほど小さくなっている。一方、鉄筋を補強筋とした場合には、曲げひびわれ時に曲率が若干増大するものの、鉄筋の降伏により曲率が急増するまで、ほぼ直線的に増大する。

実験値と計算値を比較すると、弾性剛性はいずれの試験体においても両者は近似している。

CF 異形棒, CF 織棒を用いた試験体のひびわれ後の曲げ剛性は、計算値と近似している。一方、CF より線を用いたCC2C, CC2S 試験体の曲げ剛性は、計算値より小さい。しかし、補強量の多いCC3S 試験体では実験値と計算値が近似している。

曲率分布を見ると、丸鋼を用いたSR2S 試験体では、ひびわれ位置に曲率が集中し、凹凸の激しい曲率分布となっている。これに対し、炭素繊維を補強筋とした試験体では、いずれも異形鉄筋と同様、緩やかな凸の形状を示しており、異形鉄筋と同等の付着性状を有していると考えられる。

2.3.3 荷重～ひびわれ幅の関係 図-9は、荷重と純曲げ区間の曲げひびわれ幅の関係で、図-10は、引張補強筋の剛性(EA)を考慮したひびわれ幅と荷重の関係の一例である。

この結果から、炭素繊維を引張補強筋とした部材の曲げひびわれ幅は、最大荷重に近い荷重に対してもその除荷によって減少し、 $1\delta_y$ および $3\delta_y$ の変位に対するひびわれの残留幅は、載荷時の0.1~0.3倍である。ひびわれ幅および残留幅の大きさは、CF 異形棒あるいはCF 織棒を引張補強筋とした方がCF より線を用いた場合より小さい。また、引張補強筋量が多くなるとひびわれ幅は小さくなる。一方、鉄筋を引張補強筋とした場合のひびわれ幅は、鉄筋の降伏までは小さいが、降伏後急増し、残留ひびわれ幅は大きい。

引張剛性を考慮したひびわれ幅の関係を見ると、CF 織棒を引張補強筋とした試験体のひびわれ幅は、補強筋の本数に関係なく、また、CF より線3本を引張補強筋とした試験体のひびわれ幅は、異形鉄筋の場合と近似している。しかし、CF 異形棒あるいはCF より線2本を引張補強筋とした試験体のひびわれ幅は大きく、その値は丸鋼の場合に近くなっている。

2.3.4 諸荷重 各試験体の曲げ、曲げせん断ひびわれ発生荷重と最大荷重の実験値とそれぞれの計算値を表-3に示す。

曲げひびわれ荷重、曲げせん断ひびわれ荷重は、計算値に対してそれぞれ0.71~0.96倍 (平均0.91倍)、0.7~1.19倍 (平均0.89倍) で、いずれも計算値と実験値

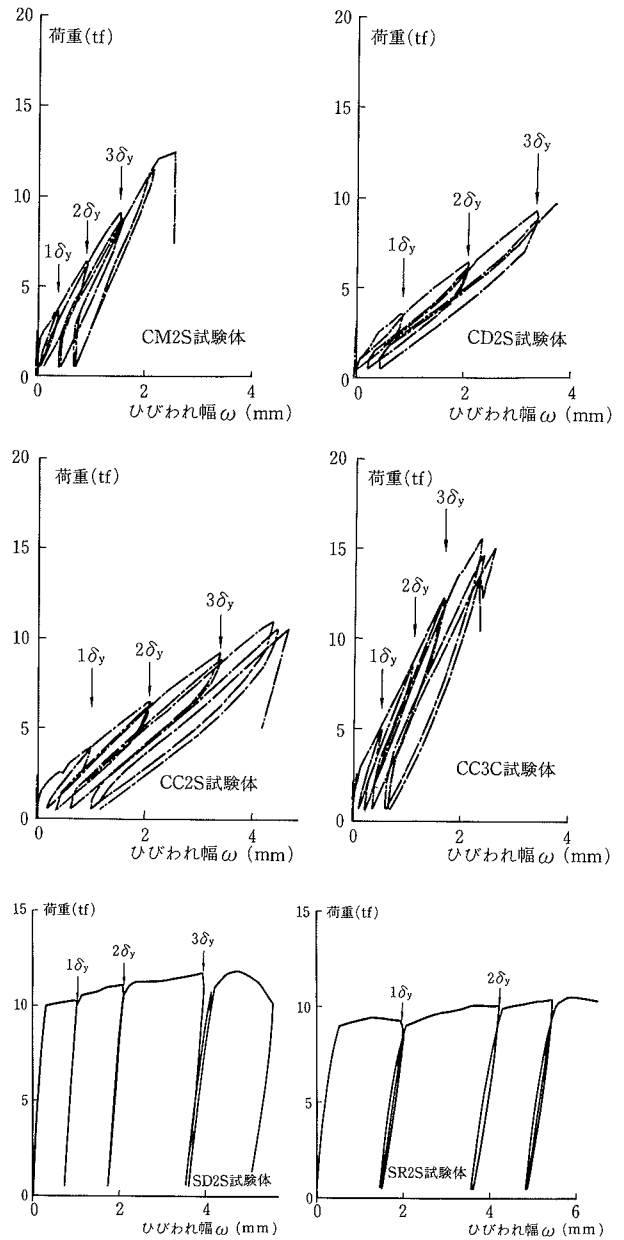


図-9 荷重～ひびわれ幅の関係

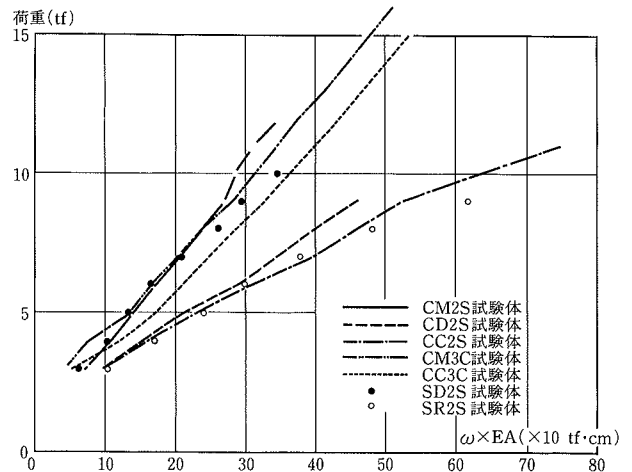


図-10 荷重～ひびわれ幅の関係

が近似しており、補強筋の形状による差は見られない。

CF 繊維棒を用いた CM2S 試験体の最大荷重は、計算値に比べ1.25倍と若干大きくなっている。

CF 異形棒を引張補強筋とした CD2C 試験体は、曲げせん断引張破壊を生じたものの、その最大荷重は、曲げせん断圧縮破壊を生じた CD2S 試験体とほぼ同じで、その値は両試験体とも計算値と近似している。

CF より線を引張補強筋とした試験体の最大荷重では、実験値は計算値の0.88, 0.86倍と若干小さく、また、曲げせん断引張破壊した CC2C 試験体では0.71倍と、さらに小さくなっている。

ひびわれ状況あるいは破壊状況から判断してCF より線を用いた試験体の最大荷重が計算値を下回った原因として次のことが推測される。すなわち、曲げあるいは圧縮を受けたより線が円周方向に広がり、その結果、コンクリートに対して割裂を生じさせるような力の発生と、曲げ圧縮力を負担する断面積の低下を引き起こし、コンクリートの早期圧壊につながったと考えられる。

また、曲げせん断引張破壊を生じた試験体の最大荷重は、計算によるせん断耐力³⁾を大幅に下回っており、曲げせん断引張破壊に対する最大荷重の算定方法について今後検討する必要がある。

3. まとめ

炭素繊維を補強筋としたはりの曲げせん断実験の結果、以下のことが分かった。

- ① 炭素異形棒、炭素繊維棒および炭素より線は、異形鉄筋と同等の付着性状を有し、引張補強筋として利用できる。
- ② 新補強材を引張補強筋とした曲げ部材の曲げ耐力は、通常の RC 部材と同様に求めることができる。
- ③ 新補強材による引張補強筋量が少ないはり部材では、曲げせん断ひびわれ幅が拡大しないよう、強度と引張剛性を考慮してせん断補強筋量を決める必要がある。
- ④ 圧縮補強筋に炭素より線を用いた場合、終局荷重近くで圧縮補強筋に沿ったひびわれとかぶりコンクリートの割裂が生じる。

表一3 諸荷重一覧

| 試験体名 | ひびわれ荷重(tf) | | | | 最大荷重(tf) | | | | 破壊状況 |
|------|------------|-----|---------|-----|----------|------|------|-----------------|--------------|
| | 曲げひびわれ*1 | | 曲げせん断*2 | | 曲げ耐力*3 | | | せん断耐力*4 (tf) | |
| | 実験値 | 計算値 | 実験値 | 計算値 | 実験値 | 計算値 | 比 | | |
| CC2C | 2.0 | 2.1 | 5.0 | 6.9 | 8.46 | 11.9 | 0.71 | 20.6 | 曲げせん断引張破壊 |
| CD2C | 2.0 | 2.1 | 5.75 | 6.9 | 10.25 | 8.9 | 1.15 | 20.8 | 曲げせん断引張破壊 |
| CM2S | 1.5 | 2.1 | 6.5 | | 12.4 | 9.9 | 1.25 | 25.5 | 曲げ破壊(補強筋の破断) |
| CD2S | 1.7 | 2.1 | 6.5 | 7.4 | 9.6 | 8.9 | 1.08 | 25.5 | 曲げせん断圧縮破壊 |
| CC2S | 2.0 | 2.1 | 8.8 | | 10.5 | 11.9 | 0.88 | 25.6 | 曲げせん断圧縮破壊 |
| SD2S | 2.5 | 2.5 | 7.5 | 7.4 | 11.75 | 10.3 | 1.14 | 26.6 | 曲げ圧壊 |
| SR2S | 2.5 | 2.6 | 6.5 | | 10.5 | 9.4 | 1.12 | 26.6 | 曲げ圧壊 |
| CM3C | 2.0 | 2.1 | 7.0 | 7.4 | 16.5 | 14.8 | 1.11 | 21.0 | 曲げせん断圧縮破壊 |
| CC3C | 1.9 | 2.1 | 5.2 | | 15.5 | 18.0 | 0.86 | 21.1 | 曲げ圧壊 |

*1) [曲げひびわれ荷重] $M_{cr} = 2 \times [M_{sc}/(M/Q)] = 2 \times 1.8 \sqrt{F_c} \cdot Z$
 *2) [曲げせん断ひびわれ荷重] $M_{cr} = 2 \times [0.265 \cdot b \cdot d \times \sqrt{F_c} + M_{sc}/(M/Q - d/2)]$
 *3) [最大曲げ荷重] $M_u = 0.9 \times (a \cdot f_c \cdot d)$, [比]は、計算値に対する実験値の比
 *4) [せん断耐力] $Q = 2 \times b \cdot j \cdot [0.92 \times k_v \cdot k_p \cdot (180 + F_c)] / (M/Qd + 0.12) + 2.7 \sqrt{p_w} \cdot \sigma_w$

⑤ 新補強材を引張補強筋とした補強コンクリートの曲げひびわれ幅は、同等の耐力を有する RC 部材に比べて大きいですが、荷重の除荷によって大幅に減少する。

謝 辞

本実験に当り、炭素異形棒、炭素繊維棒、炭素繊維および、レジンを御提供頂きました三菱化成(株)に対し感謝いたします。

参考文献

- 1) 例えば、古賀、坂井、他：CFRP 製緊張材使用ポストテンション方式 PC げたのスラブ橋耳げたへの適用例、コンクリート工学, Vol. 28, No. 11, p. 14~24, (1990)
- 2) 木村、小島、岡野：炭素繊維およびアラミド繊維を補強筋としたはり部材のせん断実験、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, p. 1135~1140, (1990)
- 3) 岡野、小島、木村：炭素繊維を緊張材に用いたプレストレストコンクリートはりの曲げ実験、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, p. 1111~1116, (1990)
- 4) 木村、小島：新素材の構造部材への適用に関する研究(その3、炭素繊維補強筋のみを用いた部材の曲げせん断性状)、日本建築学会大会学術講演梗概集, p.975~976, (1990)
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説