

繊維系新素材の構造部材への適用に関する研究（その2）

——炭素繊維，アラミド繊維をせん断補強筋とした曲げせん断実験——

木村 耕三 小 畠 克 朗
岡 野 素 之

Research and Development on Structural Members Using New and Advanced Fiber Materials (Part 2)

——Experiments on Shear Behaviors of Beams Reinforced with Carbon Fibers or Aramid Fibers——

Kohzo Kimura Yoshiro Kobatake
Motoyuki Okano

Abstract

Carbon fibers or aramid fibers have superior characteristics such as high strength, high modulus of elasticity, and high durability. Because of these characteristics, carbon and aramid fibers have been used in civil engineering and building construction. For example, carbon fiber cables were used as strands instead of steel strands in prestressed concrete members. 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 shear behaviors of beams reinforced with carbon or aramid fibers (FRP). The following results were obtained with these experiments. ① FRP bars can be used for shear reinforcement. ② Bending and shear cracking loads of beams are calculated in the same manner as for an RC beam. ③ The maximum load may be estimated as the sum of forces which are borne by concrete and reinforcing bars running through the fracture plane.

概 要

高弾性，高強度で耐久性などに優れた炭素繊維，アラミド繊維は，土木建築分野において過酷な環境下などでの鉄筋代替やプレストレストコンクリートの緊張材など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。

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，アラミド繊維を用いた新補強材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。実験の結果，次のことが明らかになった。①新補強材はせん断補強筋としての効果が期待できる。②せん断ひびわれ荷重は既往の方法で評価できる。③最大荷重はアーチ機構によるコンクリートの負担せん断力とせん断破壊面を貫通するせん断補強筋の負担力の和として評価できる。

1. はじめに

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，土木建築分野で構造材として利用されはじめている¹⁾。(株)大林組においても，炭素繊維の特性を生かした「既存構造物の耐震補強工法」の開発，実用化を行なっている^{2),3),4)}。

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⁵⁾。

本報告は，せん断補強筋として炭素繊維，アラミド繊維にエポキシ樹脂を含浸，硬化させた繊維補強材(以下，FRP筋と記す)と鉄筋を，曲げ補強筋として外径12.5 mmφの炭素繊維複合材料ケーブル(以下，炭素より線と記す)あるいは鉄筋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⁶⁾。

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280 cmおよび160 cmのはり部材，計12体である。

試験体のパラメータは，①主筋の種類[鉄筋(D22)；記号S，炭素より線；記号C]，②せん断補強筋の種類(炭素繊維；記号C，アラミド繊維；記号A，異形鉄筋；記号S)と，③せん断補強筋量および，④せん断補強筋と主筋の成す角度 θ で，その詳細は，表-1の試験体一覧に示す。

試験体名は，各試験体でのパラメータが分かるように[(主筋・せん断補強筋の種類)-(せん断補強筋量；鉄筋換算径)-(せん断補強筋と主筋の成す角度)]で表示した。

使用したせん断補強筋は，12,000本のモノフィラメントを集束した石炭ピッチ系炭素繊維ストランドあるいは，

表-1 試験体一覧

試験体名	せん断補強筋					曲げ補強筋	
	種類	繊維の実断面積 ar(mm ²)	補強筋の角度θ (°)	ピッチ X (mm)	$2 \cdot P_v \cdot \sin \theta$ / $(b \cdot x)^{1)}$ (kgf/cm ²)	種類	本数・径 (Pt %)
CC-08-90A	CFRP	6.00	90	@100	17.9	CFRP	4-φ12.5 (0.59) (炭素繊維より線)
CC-08-90							
CC-10-90							
CC-13-90		8.74	65	@109	21.7		
CC-10-65							
CC-10-45							
SA-08-90	AFRP	6.22	90	@100	19.3	鉄筋	3-D22 (2.29)
SA-10-90							
SA-13-90							
SA-13-65		9.61	65	@109	24.8		
SA-10-45							
SS-10-90							

1) $P_v = ar \times \sigma_v$, 2) 鉄筋の降伏荷重 P_y で算出

7,500デニールのアラミド繊維ストランドにエポキシ樹脂を含浸, 所定の形状寸法に成形, 硬化させた FRP 筋と異形鉄筋 (D10) である。なお, 主筋と45°, 60°の角度をなすせん断補強筋は, 上記の繊維を用いて連続的に製作した補強筋籠である。

せん断補強筋量 (繊維量) は, ストランドを束ねて製作した FRP 筋の破断荷重が鉄筋 (SD30) の D8, D10, D13 の降伏荷重と近似するようにし, 試験体名での補強筋量の表示は, それぞれ 8, 10, 13 とした。

使用したコンクリートと補強筋 (炭素繊維, アラミド繊維, 鉄筋) の材料特性を表-2 に示す。

2.2 実験方法

実験は, 300 t アムスラー型圧縮試験機を用い, 図-1 に示すスパン 120 cm, 純曲げ区間 60 cm の 2 点集中荷重による単純ばり加力で行なった。なお, CC-08-90A 試験体を除く, 炭素繊維を曲げ補強筋とした試験体の加力は, 曲げ圧壊が生じないように, 純曲げ区間の上下で材軸と直交方向に配した 4 本のチャンネルをボルトで締め付け, コンクリートを拘束した状態で行なった。

荷重は, 原則として, 断面の平均せん断応力度がコンクリートの短期許容応力度 $[=1.5 \times (5 + F_c/100)]$ に相当する荷重と, その 2 倍, 3 倍, 4 倍の荷重時の変位で各 3 回の一方向繰り返しを行ない, その後破壊させる荷重プログラムに従って行なった。

測定は, 補強筋とコンクリート表面のひずみ, 加力点位置での鉛直方向変位, および曲げせん断区間の上下の曲げ補強筋位置での対角方向変位について行なった。

2.3 実験結果

2.3.1 破壊状況 CC-08-90A, CC-10-90, SA-10-90, SS-10-90 試験体の最終破壊状況と CC-13-90 試験体での補強筋の破断状況を写真-1~写真-5 に示す。

炭素繊維を曲げおよびせん断補強筋とした試験体では, 曲げひびわれは純曲げ区間に分散して生じるが, その進展は早く, 発生後すぐに圧縮側の曲げ補強筋近傍まで達した。

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	ストランド	ビッチ系	—	29.9	2230	1.3
	より線	PAN系	—	21.0	1390	1.5
アラミド繊維	ストランド	(テクノール)	—	31.0	730	2.8
異形鉄筋	D10	SD30	3.51	5.09	1820	20.3
	D22		3.67	5.58	1810	17.9
使用材料	設計基準強度 F_c (kgf/cm ²)	スラブ厚 (cm)	W/C (%)	圧縮強度 σ_B (kgf/cm ²)	弾性係数 E_c (tf/cm ²)	備考
コンクリート	210	18	59.5	284	236	

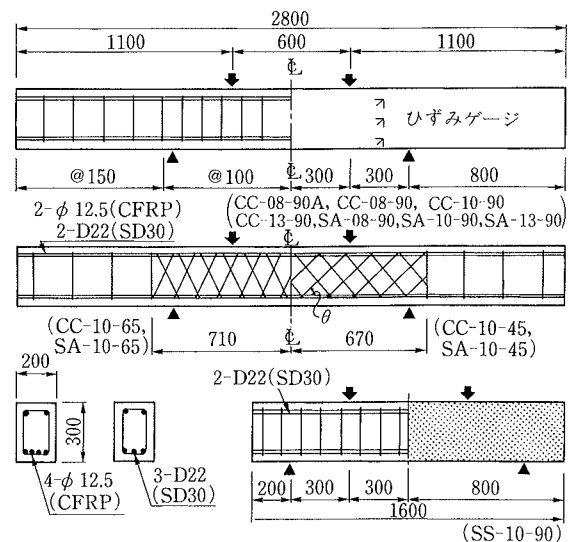
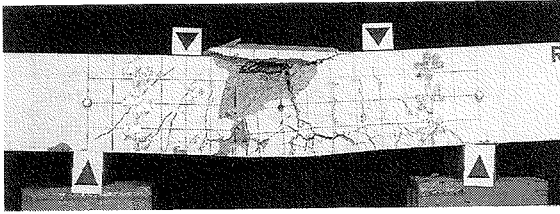


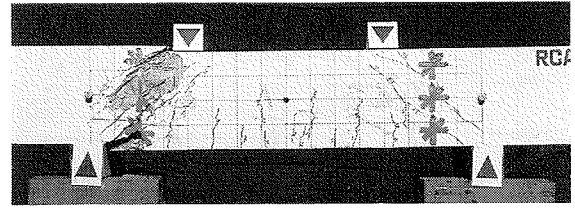
図-1 試験体の形状寸法

純曲げ区間を拘束していない CC-08-90A 試験体では, 荷重の増大に伴いせん断ひびわれの進展, かぶりコンクリートの剝落が生じて, 終局状態に至った。破壊後, 圧縮側の曲げ補強筋を見ると 7 本のより線がばらばらとなり, その一部は座屈により折損していた。

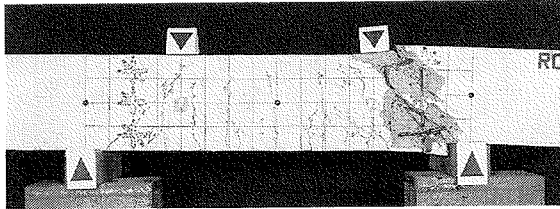
純曲げ区間を拘束した試験体では, 曲げせん断区間中央



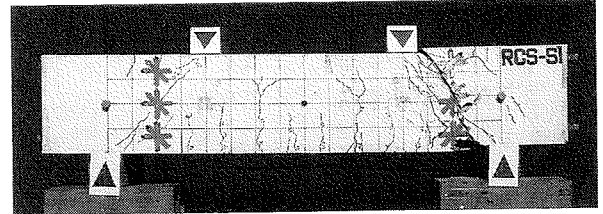
写真一 破壊状況 (CC-08-90A 試験体)



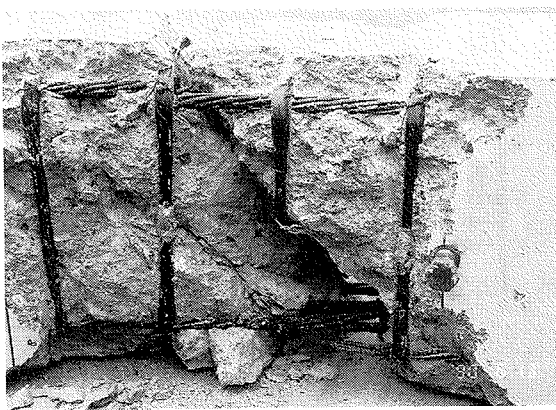
写真三 破壊状況 (SA-10-90 試験体)



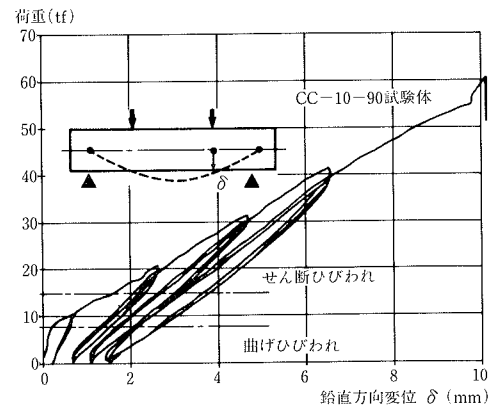
写真二 破壊状況 (CC-10-90 試験体)



写真四 破壊状況 (SS-10-90 試験体)



写真五 破壊状況 (CC-13-90 試験体)



図二 荷重～鉛直方向変位関係

で加力点と支点を結ぶ方向にせん断ひびわれが生じた後、荷重の増大と共にひびわれ幅が拡大、荷重 50 t を超える頃から繊維の局所的な破断と思われる音が生じた。終局時には、せん断補強筋の破断のほか、せん断による曲げ補強筋の破断が見られた。

せん断補強筋量の少ない CC-08-90 試験体では、せん断ひびわれは一箇所に集中したが、補強筋量が多くなるとせん断ひびわれの分散が見られた。なお、せん断補強筋角度 45°、65° の試験体では、初期のせん断ひびわれは補強筋に沿って生じた。

鉄筋を曲げ補強筋とした試験体では、曲げひびわれは純曲げ区間に分散し、せん断ひびわれ発生時でのひびわれの進展は、引張曲げ補強筋位置あるいは、はりせいの中ほどまでとなっており、炭素繊維を用いた場合に比べてひびわれの進展は遅い。せん断ひびわれの発生状況は炭素繊維を曲げ補強筋とした試験体と同様であった。これらの試験体では、せん断ひびわれ面でコンクリートのずれが生じて終局状態に至った。

2.3.2 変位性状 図二～図四は、最終破壊が生じたせん断スパンでの鉛直方向変位～荷重関係の一例である。

この結果、炭素繊維を曲げ補強筋とした試験体では、曲

げひびわれ発生により剛性の低下がみられるが、せん断ひびわれによる剛性の低下はほとんど見られない。一方、鉄筋を曲げ補強筋とした試験体では、曲げひびわれによる剛性の低下は見られないが、せん断ひびわれの発生によって剛性が低下している。

炭素繊維を曲げ補強筋、あるいはアラミド繊維をせん断補強筋とした部材の最大荷重時の変位は、通常の鉄筋コンクリート部材に比べて大きい(表一参照)。これは、補強筋の引張剛性の差によるものと考えられる。

曲げせん断区間で測定した対角方向(引張側)変位から求めた変形(以下、せん断変形と呼ぶ)と荷重の関係の一例を図五～図七に示す。

図五、図六はそれぞれ炭素繊維、アラミド繊維の補強量による荷重～せん断変形の関係を包絡線で比較したものである。この結果、せん断補強筋量が多くなるとせん断ひびわれ後の剛性低下が少なくなる傾向が見られる。なお、CC-13-90 試験体の剛性が CC-10-90 試験体に比べて小さいのは、後述するように、せん断破壊面を貫通している補強筋の本数が少ないためと考えられる。

今回の実験では、せん断補強筋の角度による変位性状への顕著な差は見られなかった。

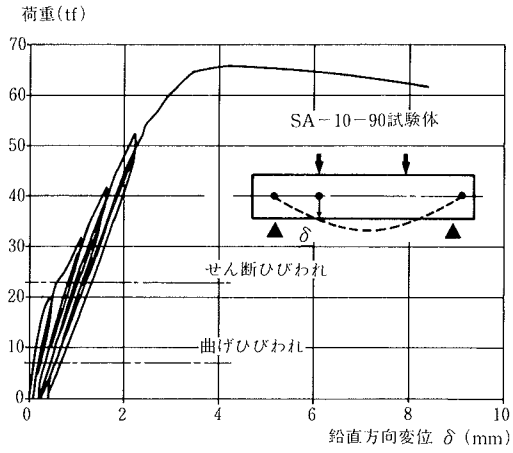


図-3 荷重～鉛直方向変位関係

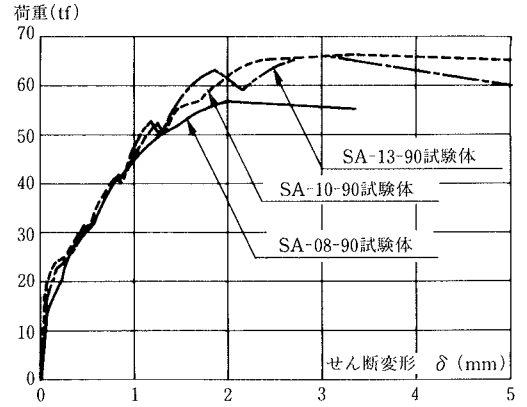


図-6 荷重～せん断変形関係

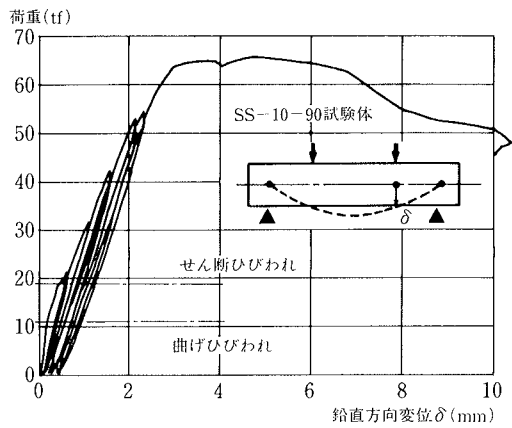


図-4 荷重～鉛直方向変位関係

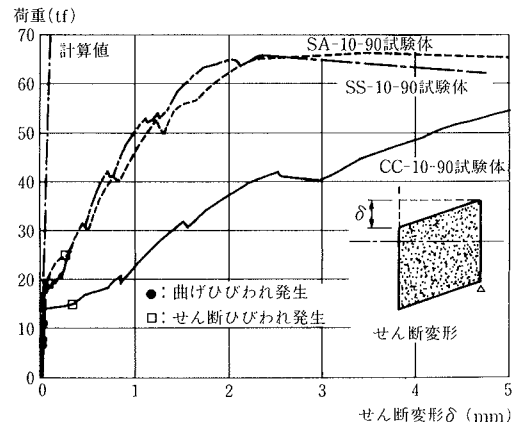


図-7 荷重～せん断変形関係

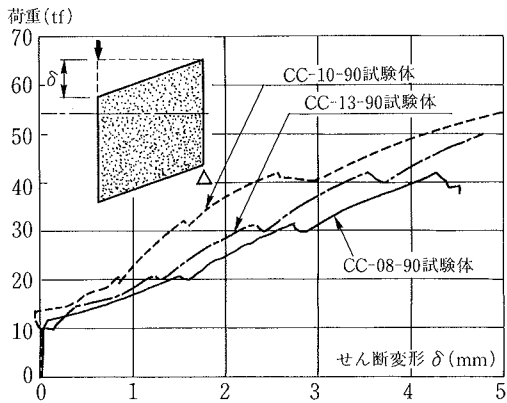


図-5 荷重～せん断変形関係

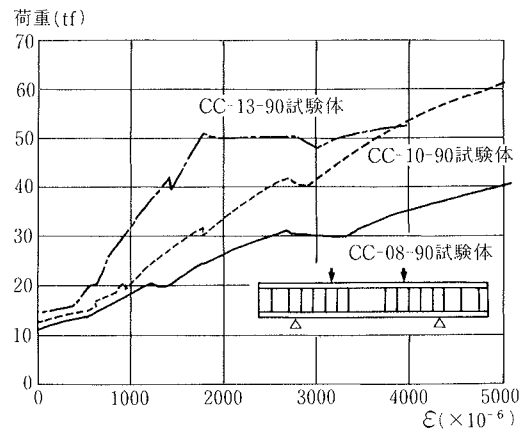


図-8 荷重～ひずみ関係

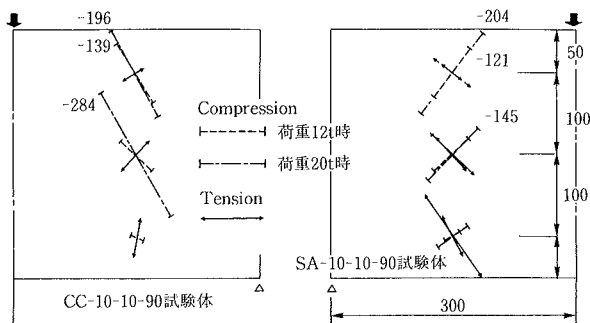


図-9 主ひずみ分布

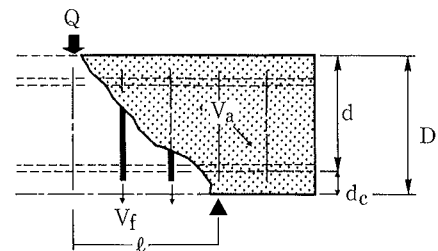


図-10 耐荷機構モデル

図一7は補強筋の種類による荷重とせん断変形の関係と比較したものである。鉄筋、アラミド繊維をそれぞれ曲げ、せん断補強筋としたはり部材のせん断ひびわれ後の剛性は、両補強筋に鉄筋を用いた場合よりも若干低くなっている。これは、測定したせん断ひびわれ幅においても前者の方が後者よりも大きく、アラミド繊維を用いたせん断補強筋の引張剛性が鉄筋に比べて小さいためと考えられる。

2.3.3 ひずみ性状 図一8は、破壊面と交叉するせん断補強筋(炭素繊維)の軸方向ひずみと荷重の関係を包絡線で示したものである。なお、FRP筋の表面は平滑でコンクリートとの附着は小さく、従って同じせん断補強筋内のひずみ分布はひびわれの貫通位置と関係なく一様になると考えられる。

荷重～ひずみ関係から、補強筋量が多くなると同一荷重に対するひずみは小さくなっている。

図一9は、CC-10-90, SA-10-90試験体の曲げせん断区間中央のコンクリート表面に貼り付けた3方向のひずみゲージ(図一1参照)から求めた荷重12t(曲げひびわれ発生後)と荷重20t(せん断ひびわれ発生後)時での主ひずみ分布である。なお、他の試験体においても同様の結果が得られている。このひずみ分布から、せん断ひびわれが生じた後、加力点と支点を結ぶ方向にアーチ機構を構成する圧縮ストラットが形成され、これによって力の伝達が行なわれていることが推測される。炭素繊維を曲げ補強筋とした場合には、曲げひびわれの長さが鉄筋を主筋とした場合に比べて大きく、圧縮ストラットの幅は小さくなることが予想される。

曲げせん断区間で測定した対角方向(圧縮)変位から最大荷重時のコンクリートの圧縮ひずみを求めると、平均(圧縮)ひずみは、 $1,500\sim 3,600 \times 10^{-6}$ となり、その値は、せ

ん断補強筋量が多いほど大きくなる傾向が見られる。この平均ひずみとコンクリートの圧縮試験結果から、圧縮ストラットの強度は、コンクリート強度あるいは、それに近い値に達しているものと推定される。

2.3.4 諸荷重 各試験体の曲げ、せん断ひびわれ発生荷重および最大荷重の実験値とそれらの計算値との比較を表一3に示す。

炭素繊維を補強筋とした試験体での曲げひびわれ荷重は、コンクリートの曲げ引張強度を $1.8\sqrt{\sigma_B}$ として弾性理論で求めた計算値と近似しているが、鉄筋を主筋とした試験体では、実験値が計算値より若干大きくなっている。また、主筋が炭素繊維の場合のせん断ひびわれ荷重は表一3の下欄に示した(1)式[建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁷⁾(以下、RC規準と記す)での(min式)]で求めた計算値と近似している。しかし、鉄筋を主筋とした試験体での実験値は計算値より大きく、その値はRC規準での(mean式)に近似している。

最大荷重は、CC-13-90試験体を除いて、せん断補強筋が多くなるほど大きくなっている。最大荷重の計算値として、鉄筋コンクリートばかりで一般に用いられている(2)式⁷⁾による値(計算値1)と「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)」⁸⁾に示されているせん断強度式(3)式による計算値(計算値2)を表中に示した。計算値2は、トラス機構強度にコンクリートの負担せん断力として塑性理論に基づいたアーチ機構強度を加えることにより部材のせん断強度を求めたものである。実験による最大荷重は、計算値1に対して2.37~4.17倍(平均3.22倍)、計算値2に対して0.55~0.86倍(平均0.72倍)となっている。また、曲げ補強筋に炭素繊維を用いた試験体の方が鉄筋を用いた場合に比べ、最大荷重は小さく、計算値2に対する実験値

表一3 実験結果の一覧

試験体名	ひびわれ荷重(tf)		最大荷重(tf)			せん断補強筋による負担力 V_r (tf)	計算値3(比*) (V_a+V_r)	最大荷重時の変位 δ (mm)	破壊状況
	曲げ(比*)	せん断(比*)	実験値	計算値1(比*)	計算値2(比*)				
CC-08-90A	5.0(0.78)	18.0(1.13)	52.0	16.4(3.17)	80.5(0.65)	14.4	55.4(0.94)	9.51	曲げ圧壊
CC-08-90	8.0(1.25)	14.0(0.88)	44.0	16.4(2.68)	80.5(0.55)		55.4(0.79)	8.11	せん断破壊
CC-10-90	8.0(1.25)	15.0(0.94)	63.0	18.5(3.41)	85.1(0.74)	20.9	59.3(1.06)	10.23	〃
CC-13-90	7.0(1.10)	16.0(1.00)	53.0	22.4(2.37)	95.8(0.55)	36.3	68.3(0.78)	10.15	〃
CC-10-65	8.0(1.25)	17.0(1.07)	63.0	17.4(3.64)	82.7(0.76)	19.0	58.9(1.07)	12.00	〃
CC-10-45	9.0(1.40)	15.0(0.94)	63.0	15.1(4.17)	78.2(0.81)	14.8	57.2(1.10)	9.93	〃
SA-08-90	12.0(1.49)	19.0(1.23)	58.0	18.7(3.10)	80.8(0.72)	14.9	56.1(1.04)	3.26	〃
SA-10-90	7.0(0.87)	23.0(1.49)	67.0	21.2(3.16)	86.3(0.78)	23.8	61.0(1.10)	4.91	〃
SA-13-90	10.0(1.24)	26.0(1.68)	68.0	25.5(2.67)	98.4(0.69)	42.0	71.7(0.95)	4.10	〃
SA-10-65	12.0(1.49)	24.0(1.55)	64.0	20.1(3.18)	83.7(0.76)	21.7	60.3(1.06)	3.86	〃
SA-10-45	10.0(1.24)	19.0(1.23)	68.0	17.6(3.86)	78.9(0.86)	16.8	58.7(1.16)	5.15	〃
SS-10-90	11.0(1.36)	19.0(1.23)	65.0	20.1(3.23)	83.7(0.78)	19.9	58.7(1.11)	3.65	〃

*カッコ内の比は、次式による計算値に対する実験値の比を示す。

$$\text{せん断ひびわれ荷重} : P_{cr} = 2 \times \left\{ \frac{0.065 \cdot kc(500 + F_c)}{M/Q \cdot d + 1.7} \right\} \cdot b \cdot j \quad \dots\dots(1) \text{式}$$

$$\text{最大荷重 計算値1} : P_{u1} = 2 \times \left\{ \frac{0.053 \cdot \rho_t^{0.23}(F_c + 180)}{M/Q \cdot d + 0.12} + 2.7\sqrt{\rho_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} \cdot b \cdot j \quad \dots\dots(2) \text{式}$$

$$\text{計算値2} : P_{u2} = 2 \times \{ b \cdot j \cdot \rho_w \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot\phi + \tan\theta \cdot (1-\beta) \cdot bD \rho \sigma_B / 2 \} \quad \dots\dots(3) \text{式}$$

$$\text{計算値3} : P_{u3} = 2 \times \{ n \cdot a_r \cdot \sigma_{wy} + \tan\theta \cdot (1-\beta) \cdot bD \sigma_B / 3 \} \quad \dots\dots(4) \text{式}$$

の比のばらつきも大きい。

計算値2が実験値を上回る原因として次の二つのことが考えられる。①曲げあるいはせん断補強筋としてFRP筋を用いるとひびわれによるコンクリートの損傷が大きく、アーチを形成するコンクリートの有効幅、せん断破壊面でのせん断伝達、補強筋によるダボ効果が小さくなる。②FRP筋は弾性材料で降伏棚がないため、補強筋一本が破断強度に達した時点で最大荷重が決まり、せん断補強筋すべてが最大強度を発揮できない。

そこで、今回の実験結果から、図-10に示す耐荷機構モデルに基づいて最大荷重を検討した(計算値3)。

最大荷重は、アーチ機構による負担せん断力 V_a とせん断補強筋による負担せん断力 V_f の和として求めた。

前者の負担力は、最大荷重時にコンクリートが圧縮強度近くになっていると考え、圧縮強度有効係数 ν を1、トラス機構のストラットの部材軸に対する角度 ϕ を 45° 、アーチを形成する有効幅を実験での支圧プレートの幅等を考慮して $D/3$ として算出した。

後者の負担力は、せん断破壊面を貫通しているせん断補強筋の引張強度の和($a_f \cdot \sigma_f \times$ 本数 n)とした。ただし、計算ではせん断破壊面を貫通する補強筋の本数 n をすべて2組(4本)として求めた。

実験値は、CC-08-90、CC-13-90試験体を除いて計算値3と近似している。破壊面を観察したところ、上記2体の試験体の破壊面を貫通しているせん断補強筋はいずれも1組(2本)しかなく、実験値が計算値を下回った原因は、このためと考えられる。そこで、せん断補強筋1組だけを有効として最大荷重を求めると実験値は、それぞれ計算値の0.91、1.06倍となり、両者は近似する。

3. まとめ

炭素繊維あるいはアラミド繊維を用いたFRP筋はせん断補強筋としての効果が期待できる。また、炭素繊維を曲げおよびせん断補強筋とした部材と鉄筋を曲げ補強筋、アラミド繊維あるいは鉄筋をせん断補強筋とした部材での曲げせん断実験から次のことが分かった。

① FRP筋をせん断補強筋としたはり部材では、補強筋

量が少ない場合、せん断ひびわれは集中し、補強量が多くなるにつれてひびわれは分散する。

② せん断破壊面を貫通する補強筋量が多くなるほどせん断ひびわれ後のせん断剛性、最大荷重は増大する。

③ 曲げ、せん断ひびわれの発生荷重は、既往の計算方法で評価できる。

④ 最大荷重は、アーチ機構によるコンクリートの負担せん断力とせん断破壊面を貫通するせん断補強筋の引張強度の和として評価できる

⑤ 炭素繊維を曲げ補強筋とした場合、曲げひびわれは、発生後直ちに圧縮側の曲げ補強筋近くまで進展する。その結果、曲げひびわれ幅と鉛直方向変位が鉄筋を曲げ補強筋とした場合に比べて大きくなる。

謝 辞

本実験に当たり、炭素繊維およびレジンをお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) 安達, 山下: 新素材(炭素繊維複合材)を用いたPC橋, 土木施工30巻5号, p. 97~107, (1989)
- 2) 勝俣, 小島: 炭素繊維の巻付けによる既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強工法, セメント・コンクリート, No. 497, July, p. 20~29, (1988)
- 3) 木村, 小島, 他: 炭素繊維による既存煙突の耐震補強工法の開発(その1), 大林組技術研究所報, No. 37, p. 73~79, (1988)
- 4) 木村: 材料・工法'89 進む異素材結合一検証編 煙突耐震補強一, 日経アーキテクチャ, 第354号, p. 112~114, (1989)
- 5) 木村, 小島, 他: 繊維系新素材の構造部材への適用に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 34, p. 119~123, (1987)
- 6) 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, p. 1135~1140, 12-1, (1990)
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説