

報告

[1121] 炭素及びアラミド長繊維強化プラスチック異形筋補強  
コンクリートの力学的性状に関する実験研究

正会員 ○福島敏夫（建設省建築研究所）

正会員 櫻野紀元（ ” ）

正会員 柳 啓（建材試験センター）

1. はじめに

近來、コンクリートの予想外に早い中性化や、海砂の使用及び海岸地帯での飛来塩分等によるコンクリート中の内部鉄筋の腐食に伴う各種環境下でのコンクリート構造物についての劣化問題とその対策についての社会的関心が高い。内部鉄筋の腐食に伴うコンクリート構造物の劣化の抑制のために、仕上材による補修効果を期待したり<sup>1)</sup>、劣化した鉄筋コンクリート部材の補強・交換を行ったりする場合もある<sup>2)</sup>が、いずれも対症療法的で、その後も鉄筋の腐食による劣化は進行する恐れがある。補強筋として鉄筋を使用する限り、腐食という宿命は避けることができない点は否めない。他方、最近、炭素繊維やアラミド繊維等の軽量・高強度・高耐食性の新繊維が供給されるようになり、建設分野への有効な活用への期待が大きく、短繊維補強コンクリートに関する研究報告も多い<sup>3), 4)</sup>。しかし、新素材繊維の特性を最大限生かした補強効果を期待するためには、長繊維補強コンクリートの方が合理的であると考えられる。従って、このような状況を勘案すれば、炭素長繊維やアラミド長繊維等で強化されたプラスチック異形筋を鉄筋代用のコンクリート用高機能性補強筋として利用することができれば、内部鉄筋の腐食の問題の解決と新素材の有効な活用によるコンクリート構造物の性能向上という一石二鳥の効果が期待され、この線に添ったいくつかの、研究報告もある<sup>5)</sup>。本報告では、炭素繊維及びアラミド繊維強化プラスチック異形筋補強コンクリートの力学的性状と耐久性に関する実験の結果<sup>6), 7)</sup>を述べると共に、これらの補強筋に対する許容応力度に関して考案を加えるものである。

2. 実験方法

2.1 使用補強筋およびコンクリート

2.1.1 補強筋

強化プラスチック異形補強筋は、PAN系HT型炭素長繊維を50%含む不飽和ポリエステル樹脂及びアラミド繊維（ケブラー49）を50%含むビニルエステル樹脂製の直径9mmの円柱棒に、鏡巻状に長繊維のスライスを巻きつけて、同種の樹脂で固めることより異形突起部をつけて、コンクリートとの付着性を高めるようにしたものであり、図1の形状を持つ。また、それぞれ表1及び表2に示される物性を示す。補強コンクリートの力学的性状の比較用補強筋

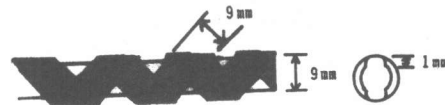


図1 強化プラスチック異形補強筋の形状

表1 炭素長繊維強化プラスチック異形補強筋の物性

項目	炭素繊維 (PAN系HT型)	CFRP補強筋 (不飽和 ポリエステル樹脂)
繊維含有率 (%)		50
引張り強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	350	140
引張り弾性率 (tf/mm <sup>2</sup> )	23.5	11.5
曲げ強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )		110
曲げ弾性率 (tf/mm <sup>2</sup> )		11.0
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.74	1.47
伸び率 (%)	1.4	
径	7μ	9mm

としてみがき丸鋼(9mmφSDGA)及び異形鉄筋(D10SD30)を使用した。炭素長繊維強化プラスチック異形補強筋

(CFRP)は、140kgf/mm<sup>2</sup>、アラミド長繊維強化プラスチック異形補強筋 (AFRP)は、117kgf/mm<sup>2</sup>の引張強度を持ち、鉄筋 (SD30)の降伏強度30kgf/mm<sup>2</sup>に比し5～4倍である。いずれも、強化用

繊維の引張強度の約40%の引張強度を示している。他方、CFRPの引張弾性率は

11.5tf/mm<sup>2</sup>

であり、AFRPのそれは6.3tf

/mm<sup>2</sup>で、鉄

筋 (SD30)の引張弾性率 21.0tf/mm<sup>2</sup>と比較すると、それぞれ約2分の1及び3分の1である。また、いずれも強化用繊維の引張弾性率の半分の引張弾性率を示しており、繊維の体積百分率に基づく複合法則に従っている。

### 2.1.2 コンクリート

コンクリートの製作のために使用された材料を表3に示す。コンクリートは、表4の調査表に示されるように水セメント比60%、スランブ 18cmの普通 AE コンクリートである。硬化コンクリートの圧縮強度及びヤング係数の養生条件による違いを表5に示す。標準水中養生でのコンクリートの28日圧縮強度は、364

kgf/cm<sup>2</sup>でありヤング係数は 2.99 × 10<sup>3</sup> kgf/cm<sup>2</sup>である。補強筋に対するコンクリートのかぶり厚さは、いずれも2cmである。

### 2.2 試験体

図2に示されるように、2本の引張補強筋を持つはり部材を想定した曲げ実験用の10×10×40cm 寸法の試験体を製作した。また、図3に示されるように、外装材及び床スラブ部材を想定した曲げ実験用の20×6×60cm

表2 アラミド長繊維強化プラスチック異形補強筋の物性

項目	アラミド繊維 (KEVLAR-49)	AFRP補強筋 (エポキシ樹脂)
繊維百分率(%)		50
引張強度(kgf/mm <sup>2</sup> )	280	117
引張弾性率(tf/mm <sup>2</sup> )	13.3	6.3
曲げ強度(kgf/mm <sup>2</sup> )		50
曲げ弾性率(tf/mm <sup>2</sup> )		5.3
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.45	1.38
伸び率(%)	2.4	
径	12μ	9mm

表3 コンクリート用材料

セメント	普通ポルトランドセメント	比重 3.16
細骨材	富士川産川砂(粗粒率2.86)	比重 2.60
粗骨材	青梅産硬質砂岩砕石 2005 (25mmフルイ全通)	比重 2.62
混和剤	AE減水剤標準型 (ポゾリス No. 70)	
練り混ぜ水	イオン交換水	

表4 コンクリートの調査

スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )			単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤 (kg/m <sup>3</sup> )
					セメント	細骨材	粗骨材		
18	4	60	45	175	290	822	999	2.285	0.725

表5 硬化コンクリートの物性

物性値	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
処理条件		
標準水中養生 (28日)	364 ± 6	2.99 ± 0.26
20℃ 気中養生 (28日)	424 ± 5	2.98 ± 0.25
250℃ 高温処理	265 ± 2	1.64 ± 0.12

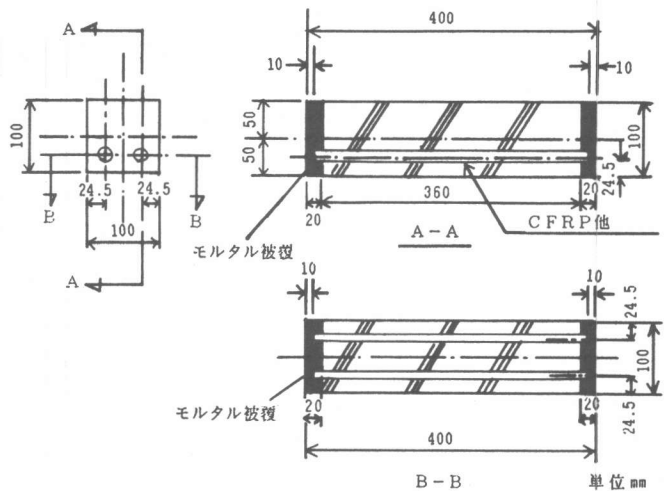


図2 曲げ試験 (I) 用試験体

寸法の試験体を製作した。別に、補強筋のコンクリートとの付着強度を調べる目的で図4に示されるように一辺15cmの立方体コンクリートに補強筋を埋め込んだ試験体を製作した。

### 2.3 力学的実験及び耐久性実験の方法

#### 2.3.1 曲げ試験 (I)

図2で示される試験体については、材令28日まで20℃の水中で標準養生を行った後に、JIS A1106(コンクリートの曲げ強度試験方法)に準じたスパン30cmの3等分点2点載荷曲げ試験(曲げ試験(I))を行った。また、曲げ強度の耐久性を調べる目的で、ASTM C666に準じた水中凍結水中融解処理30サイクル後に曲げ強度試験(I)を行い、同様に耐熱性を調べる目的で、図4に示される高温処理条件によ

って、250℃の高温に115時間暴露した後に、曲げ強度試験(I)を行い、曲げ強度の低下の有無の確認を行った。

#### 2.3.2 曲げ試験 (II)

図3で示される試験体については、材令28日まで標準養生を行った後に、JIS A1408(建築用ボード類の曲げ強度試験方法)に準じたスパン40cmの2等分1点集中載荷曲げ試験(曲げ試験(II))を行った。

#### 2.3.3 付着強度試験

図4に示される試験体については、材令28日まで

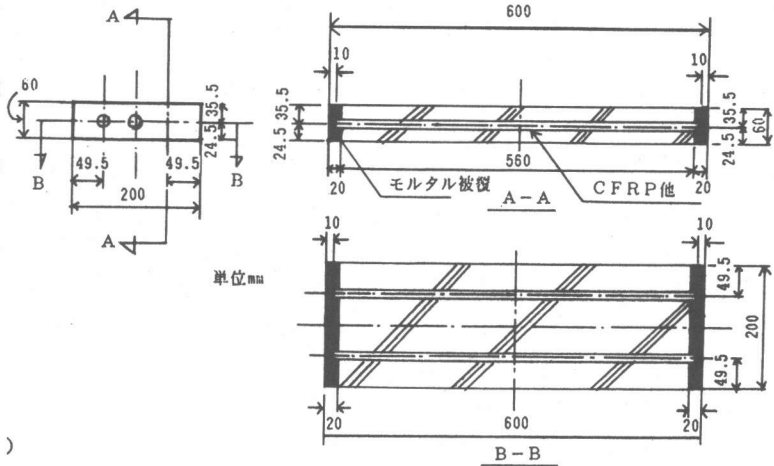


図3 曲げ試験(II)用試験体

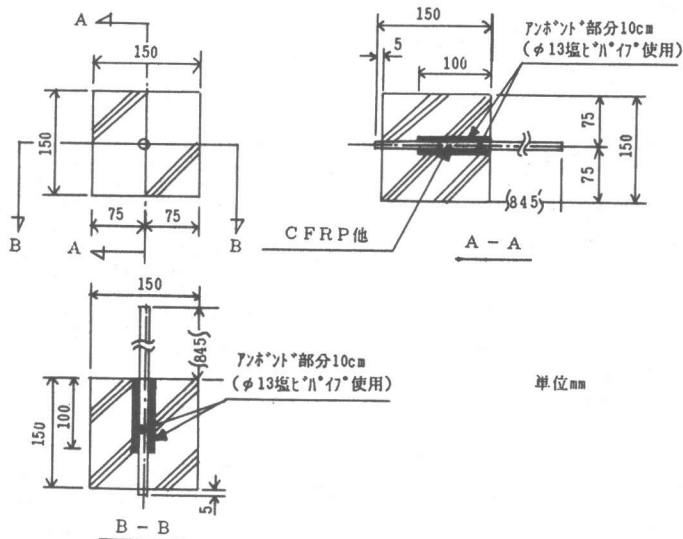


図4 付着強度試験用試験体

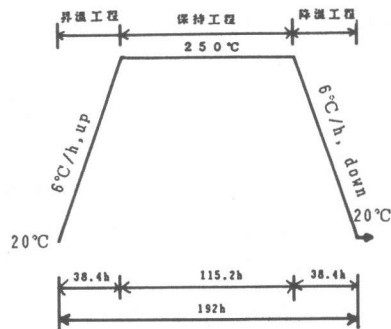


図5 高温処理条件

標準養生を行った後にASTM C 234に準じて、図6に示される方法で付着強度試験を行った。付着応力度は、(1)式から算出した。

$$\tau = \frac{P}{\pi D \times \ell} \dots (1)$$

ここで、 $\tau$ ：付着応力度 [kgf/cm<sup>2</sup>]、 $P$ ：引張荷重 [kgf]、 $D$ ：補強筋の公称直径 [cm]、 $\ell$ ：補強筋の付着長さ [cm]。但し、CFRP及びAFRPについては、突起部を考慮して $D$ を1.1cmとした。

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 曲げ試験 (I) の結果

標準水中養生、凍結融解処理、高温暴露処理後の曲げ強度試験 (I) の結果は、表6に示される。曲げ強度試験 (I) では、引張側コンクリートにひびわれが発生した後に、補強筋が一定程度荷重に抗しながら、破断強度に致らない間に、圧縮側コンクリートに圧縮破壊を生じて、補強コンクリートの終極破壊に致る傾向を示す。他方、一部にはせん断破壊の傾向が、見られた (丸鋼および異形鉄筋の場合)。図7にその荷重-たわみ曲線を示す。曲げひびわれモーメント  $M_c$  は、次の式で与えられる。

$$M_c = 1.8 F_c \times Z_e \quad (2)$$

従って、曲げひびわれ荷重  $(Q_{cr})_c$  は、次式で求められる。

$$(Q_{cr})_c = 6M_c / \ell \quad (3)$$

但し、 $\ell$ ：スパン長、 $F_c$ ：コンクリート強度、 $Z_e$ ：補強筋を含んだ断面係数。実験値と計算値との比  $(Q_{cr})_e / (Q_{cr})_c$  は、かなり1よりはずれているが、ひびわれが、曲げよりもせん断により起こったことによると考えられる。他方、鉄筋コンクリートばりの許容曲げモーメントは、つりあい鉄筋比以下の場合、 $a_t$ を引張鉄筋断面積、 $f_t$ を許容引張応力度として

$$M = a_t f_t j \quad (j = (7/8)d \quad d : \text{有効せい}) \quad (4)$$

で与えられる。この考え方が、今回のプラスチック異形筋補強コンクリートはり部材にも適用できると考えて、最大引張強度  $f_{m,ax}$  の3分の1または、3分の2を補強筋の許容引張応力度として、最大曲げ荷重の計算を行った。実験値とこの式による計算値との比は、余りよくなく、せん断破

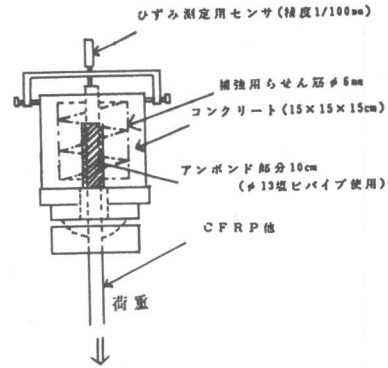


図6 付着強度試験法

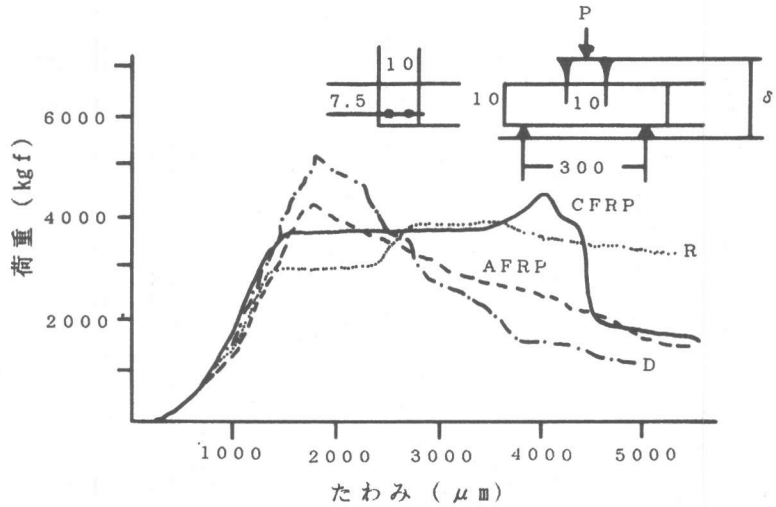


図7 荷重-たわみ曲線

境の傾向を意味するが、許容応力度として、プラスチック異形補強筋の最大引張強度の3分の1をとれば、その比は改善される。標準水中養生では、CFRPは異形鉄筋の曲げ強度177kgf/cm<sup>2</sup>に匹敵する曲げ強度167kgf/cm<sup>2</sup>を示したが、AFRPは若干低く、121gf/cm<sup>2</sup>を示した。みがき丸鋼の場合は、定着がなされていない。い曲げ強度しか示していない。凍結融解処理後においては、CFRP、異形鉄筋の曲げ強度はほとんど低下していないが、AFRPの曲げ強度は20%程低下して98kgf/cm<sup>2</sup>となった。他方、高温暴露処理後では、異形鉄筋も84%程に曲げ強度が低下しているが、CFRPでは、約72%、AFRPでは約58%に低下している。コンクリートの圧縮強度の低下の影響も考えられるが、CFRP、AFRPの付着性の低下が大きいことによるものとする。

3.2 曲げ試験(II)の結果

表7に示される曲げ強度試験(II)でもその終極破壊に致るまでの性状には、曲げ試験(I)の場合と同様な傾向が見られた。しかし、この場合には、最大曲げ荷重の実験値と計算値は、補強筋の引張強度の3分の1を許容応力度とすると、その比は著しく改善され、AFRPではほとんど一致する。このことは、許容曲げモーメントと許容応力度の関係式(4)が成り立つことを

表6 補強コンクリート曲げ試験(I)結果

処理方法	補強筋の種類	実験値			計算値			
		曲げひびわれ荷重 (Q <sub>cr</sub> )e (kgf)	最大荷重 (Q <sub>u</sub> )e (kgf)	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げひびわれ荷重 (Q <sub>cr</sub> )c (kgf)	(Q <sub>cr</sub> )e/(Q <sub>cr</sub> )c	最大荷重 (Q <sub>u</sub> )c (kgf)	(Q <sub>u</sub> )e/(Q <sub>u</sub> )c
標準水中養生	CFRP*	1697	5580	167	1143	1.48	15690 <sup>1)</sup> 7845 <sup>2)</sup>	0.36 0.72
	AFRP***	2367	4023	121	1143	2.07	13113 <sup>3)</sup> 6556 <sup>4)</sup>	0.31 0.62
	R****	2148	2673	80	1143	1.88	—	—
	D****	4277	5903	177	1143	3.74	7408	0.80
凍結融解処理	CFRP	1787	5640	169	—	—	—	—
	AFRP	1917	3273	98	—	—	—	—
	R	2063	2610	78	—	—	—	—
	D	3537	5907	177	—	—	—	—
高温暴露処理	CFRP	1270	4027	121	977	1.30	15690 <sup>1)</sup> 7845 <sup>2)</sup>	0.26 0.52
	AFRP	840	2327	70	977	0.85	13113 <sup>1)</sup> 6556 <sup>2)</sup>	0.18 0.35
	R	1660	2172	65	977	1.70	—	—
	D	3820	4953	149	977	3.91	7408	0.67

(注) \* :炭素繊維強化プラスチック異形補強筋  
 \*\* :アミド繊維強化プラスチック異形補強筋  
 \*\*\* :みがき丸鋼 9mmφ (JIS G3108 SGDA 適合)  
 \*\*\*\* :異形棒鋼 D10 (JIS G3112 SD30 適合)  
 計算式 : 曲げひびわれモーメント :  $M_c = 1.8 \sqrt{f_c} \times Z_e$   
 最大曲げモーメント :  $M_u = a_t \cdot f_t \cdot j \cdot (j = (7/8)d)$   
 1 : CFRPの許容応力度を引張強度の3分の2とする場合  
 2 : CFRPの許容応力度を引張強度の3分の1とする場合  
 3 : AFRPの許容応力度を引張強度の3分の2とする場合  
 4 : AFRPの許容応力度を引張強度の3分の1とする場合

表7 補強コンクリートの曲げ試験(II)結果(水中養生)

補強筋の種類	実験値			計算値			
	曲げひびわれ荷重 (Q <sub>cr</sub> )e (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大荷重 (Q <sub>u</sub> )e (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	曲げひびわれ荷重 (Q <sub>cr</sub> )c (kgf/cm <sup>2</sup> )	(Q <sub>cr</sub> )e/(Q <sub>cr</sub> )c	最大荷重 (Q <sub>u</sub> )c (kgf/cm <sup>2</sup> )	(Q <sub>u</sub> )e/(Q <sub>u</sub> )c
CFRP*	293	1573	131	411	0.71	3689 <sup>1)</sup> 1845 <sup>2)</sup>	0.43 0.87
AFRP*	613	1540	128	411	1.49	3083 <sup>3)</sup> 1541 <sup>4)</sup>	0.50 1.00
R*	803	**	(68)	411	1.95	—	—
D*	790	2190	182	411	1.92	1742	1.25

(注) \* :表6の欄外注参照  
 \*\* :ひびわれと破壊が同時に生じた。  
 計算式 : 曲げひびわれモーメント :  $M_c = 1.8 \sqrt{f_c} \times Z_e$   
 最大曲げモーメント :  $M_u = a_t \cdot f_t \cdot j \cdot (j = (7/8)d)$   
 1 : CFRPの許容応力度を引張強度の3分の2とする場合  
 2 : CFRPの許容応力度を引張強度の3分の1とする場合  
 3 : AFRPの許容応力度を引張強度の3分の2とする場合  
 4 : AFRPの許容応力度を引張強度の3分の1とする場合

表8 補強筋のコンクリートとの付着試験結果

補強筋の種類	最大荷重(kgf)	最大付着強度(kgf/cm <sup>2</sup> )
CFRP *	2260	130.9
AFRP *	1452	84.1
R *	130	9.2
D *	2095	139.0

\*表6の欄外注参照

意味している。異形鉄筋の曲げ強度 $182\text{kgf/cm}^2$ に比して、CFRPでは $131\text{kgf/cm}^2$ 、AFRPでは $128\text{kgf/cm}^2$ のやや小さな曲げ強度を示している。

### 3.3 付着強度試験の結果

図8及び表8は、付着強度試験の結果を示すものである。CFRPは異形鉄筋の付着強度 $139\text{kgf/cm}^2$ に匹敵する付着強度 $131\text{kgf/cm}^2$ を示すが、AFRPは $84.1\text{kgf/cm}^2$ と若干小さい

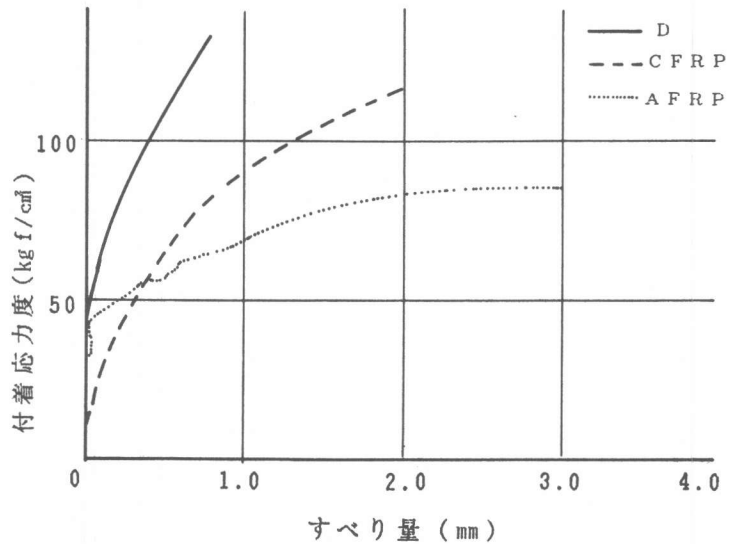


図8 付着応力度—すべり量曲線

値を示した。また、図8に示されるように、異形鉄筋に比して、AFRP、CFRPはすべり量が大きい。

### 3.4 考察

以上の実験結果を考えると、CFRP、AFRP共に異形鉄筋と比較しても、十分にコンクリート用補強筋として適用可能な力学的特性を示すが、CFRPに比して、AFRPは付着強度は若干低く、また、凍結融解処理や高温暴露処理で付着性が低下する傾向が認められることが明らかとなった。

### 4. まとめ

海砂の使用や、コンクリートの予想外に早い中性化や、海岸での飛来塩分に起因するコンクリートの内部鉄筋の腐食の問題に対処する試みとして、炭素長繊維強化不飽和ポリエステル樹脂異形筋及びアラミド長繊維強化ビニルエステル樹脂異形筋の鉄筋代用補強筋としての適用性を検討するために、補強コンクリートについて、曲げ強度及び付着強度試験及び耐久性試験を行って、その性状を調べた。その結果、この実験の範囲内では、コンクリートとの付着性が凍結融解を受けたり、高温に暴露される場合では低下する傾向があるものの、コンクリート用の補強筋として十分適用可能と考えられる結果を得た。許容応力度として、引張強度の3分の1を考えると、つり合い補強筋比の考え方に立って、最大曲げ荷重の実験結果をうまく説明することができる。

(謝辞)：本研究におけるPAN系HT型炭素長繊維強化不飽和ポリエステル樹脂異形補強筋及びケブラー49型アラミド長繊維強化ビニルエステル樹脂異形補強筋については、(株)東レコンポジット事業部の久井大蔵氏の御協力を頂いた。ここに、紙面を借りて謝意を表したい。

(参考文献)：1) 福士勲、福島敏夫：仕上塗材によるコンクリートの中性化及び鉄筋腐食の抑制、セメント・コンクリート、No. 463, Sept. 1985, PP. 74~81. 2) 福島敏夫、平賀友見：技術ノート=鉄筋コンクリートの耐久性向上技術④ 鉄筋コンクリート造建築物の補修・交換技術指針、建築雑誌Vol. 101, No. 1247, 1986年6月号, PP. 337~340. 3) 秋沢繁幸、末永龍夫、坂野正：炭素繊維を用いたセメント系複合材料(CFRP)の力学的性質に関する実験的研究、コンクリート工学、Vol. 20, No. 8, Aug. 1982, PP. 75~84. 4) 大浜嘉夫、天野幹夫：短炭素繊維を用いた炭素繊維補強セメントの製造と性状、日本コンクリート工学協会繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集, 1984, 2, PP. 111~116. 5) 古川茂、辻泰和、大谷杉郎、小島昭：コンクリート工学年次論文報告集Vol. 1. 7 No. 1, 1987, PP. 453~458. 6) 福島敏夫、豊野紀元、柳啓：炭素繊維強化不飽和ポリエステル樹脂異形筋補強コンクリートの曲げ性状と耐久性に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和61年8月, PP. 97~98. 7) 福島敏夫、豊野紀元、柳啓：アラミド繊維強化プラスチック筋補強コンクリートの力学的性状に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和62年10月, PP. 533~534.