

CFRC ロッドで補強したコンクリートはりの曲げ性状

古川 茂¹・辻 幸和²・大谷杉郎³

¹正会員 工博 群馬工業高等専門学校教授 土木工学科 (〒371 前橋市鳥羽町 580)

²正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科

³工博 東海大学教授 開発工学部素材工学科

本文は、連続炭素繊維にあらかじめセメントペーストを含浸して棒状に成形した炭素繊維補強セメント複合材料 (CFRC ロッド) を、コンクリートはりの補強材として用いるための基礎的知見を得るために行った実験結果をとりまとめたものである。すなわち、モルタルあるいはコンクリート中に CFRC ロッドを一次元に配置したはりの曲げ強度試験を行い、CFRC ロッドを作製する際の含浸用セメントの種類、炭素繊維の種類や繊維量、炭素繊維の品質ならびにその組合せなどが、CFRC ロッドで補強したはりの曲げ耐力、たわみ、曲げタフネスおよび補強材のひずみなどに及ぼす影響についてとりまとめたものである。

Key Words: CFRC concrete beam, continuous carbon fiber, CFRC rod, failure bending moment, strain of CFRC rod, cracking strength, calculating method.

1. 序 論

連続炭素繊維にセメントペーストを含浸させた複合体 (以下、CFRC と称する) を、未硬化の状態でもルタルはりの補強材として用いる方法については、既に報告した¹⁾。このような未硬化状態の CFRC としての炭素繊維をはりの補強材として利用する際には、補強材の作製後直ちにコンクリートはりを作製することが必要なために作業が煩雑になること、炭素繊維を所定の方向および位置に配置することが困難になること、またこのためにはりの曲げ耐力が低下する可能性があることなどが考えられる。また、はり部材の力学的性状を定量的に取り扱うための基礎試料となる補強材のひずみの測定も困難である。

そこで、炭素繊維に合成樹脂を含浸させた補強材などと同様に、補強材自体の取扱いを容易にするとともに、部材の作製作業を単純化し、併せて部材の曲げ耐力の向上を図るためには、未硬化状態の CFRC の代わりにあらかじめ硬化させた状態の CFRC ロッドとして用いる方法が有望と考えられる。この方法はまた、結合材としてセメント系材料を用いているため、CFRC ロッドとしての付着強度、高温下の品質や長期間にわたる耐久性の向上が図れる利点もある。しかしながら、硬化させた状態の CFRC ロッドをコンクリート部材の補強材として用いる場合、含浸させるセメントの種類、炭素繊維の種類および品質、コンクリートの配合などが、部材の曲げ性状やせん断性状へ及ぼす補強効果を定量的に把握することが必要であるが、これまでこの種の研究結果はほとん

ど報告されていない。

本論文は、連続炭素繊維にセメントペーストを含浸させてあらかじめ硬化させた状態の CFRC ロッドを、コンクリートはりに利用するための基礎研究として、はりの曲げ耐力、ひび割れ状態、たわみおよび CFRC ロッドのひずみなどについての実験結果を報告するものである。すなわち、モルタルあるいはコンクリート中に CFRC ロッドを一次元に配置して補強した炭素繊維補強モルタルおよびコンクリートのはりを作製し、炭素繊維の種類と繊維量^{2)~7)}、炭素繊維の品質ならびにその組合せ^{5),6)}、含浸させるセメントの種類^{5)~7)}などが、はりのひび割れ状態、破壊性状、破壊モーメント、たわみ、CFRC ロッドのひずみおよび曲げタフネスなどに及ぼす影響について行った実験結果をとりまとめて報告するとともに、はりの曲げ耐力の算定方法についても検討するものである。

2. 実験の概要

(1) 使用材料および配合

連続炭素繊維は、表-1 に示す品質をもつピッチ系の汎用品および高性能品と、PAN 系の高性能品を用いた。

炭素繊維に含浸させるセメント (以下、含浸用セメントと称する) には、普通ポルトランドセメント (以下、普通セメントと称する)、およびブレン値が $9200 \text{ cm}^2/\text{g}$ のグラウト用セメント (以下、グラウトセメントと称する) を用いた。さらに、ナフタリンスルホン酸塩系を主成分とする高性能減水剤を用いた。含浸用セメントペー

表一 炭素繊維の品質

連続炭素繊維の種類	略号	繊維直径 (10 ⁻³ mm)	比重	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	伸度 (%)	備考
ビッチ系	汎用品	G-A	18.0	1.63	784	33320	A, B 供試体
		G-B	17.5	1.62	833	37240	C, D 供試体
	高性能品	G-H	10.0	2.15	2636	499800	C 供試体
PAN系	高性能品	H-A	7.5	1.78	2940	225400	A, B, C, D 供試体
		H-B	7.5	1.76	3528	235200	C 供試体

表二 モルタルおよびコンクリートの品質

(a) モルタル

配合	水セメント比 (%)	砂セメント比	フロー値	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	備考
a	4.0	1.0	170±10	48.7(41.2)	25970	A, B, C 供試体
b	4.0	2.0	130±10	20.6	20776	C 供試体

()内はAおよびB 供試体の場合

(b) コンクリート

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Slump (cm)	Air (%)	単 位 重(kg/m ³)					圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	備考
					W	C	S	G	S.P.			
10	58	62	12±1	4±1	203	350	1050	642	2.8	23.6	22932	D 供試体

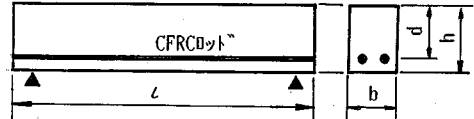
ストの配合は、いずれのセメントの場合も一般には水セメント比を50%とし、グラウトセメントを用いる場合には、高性能減水剤をセメント質量の1%添加した。実験の一部には、普通セメントを用いた水セメント比が40%のセメントペーストも用いた。

モルタルには普通セメントおよび豊浦標準砂を用いた。コンクリートには、普通セメント、利根川産の川砂(比重:2.63, 粗粒率:2.78)および川砂利(比重:2.65, 粗粒率:5.25, 最大寸法:10 mm)を用いた。使用したモルタルおよびコンクリートの配合および品質を表一に示す。

(2) CFRC ロッドの作製、はり供試体および強度試験

CFRC ロッドは、所定本数の炭素繊維の束を広げ、その間に所定のセメントペーストを十分に含浸させた後、繊維の配列や直径ができるだけ一定になるように棒状に成形して作製した。成形したCFRC ロッドは1日間空中養生した後、材齢7日まで水中養生を行った。その後、CFRC ロッドの中央部にワイヤストレーンゲージ(幅3 mm, 長さ6 mm)をエポキシ樹脂を用いて貼り付けてから防水処理を行った。CFRC ロッド中の炭素繊維の使用本数、ロッド中の炭素繊維含有率、ロッドの配置本数、図一に示すはり供試体の寸法およびはり供試体中の炭素繊維の総断面積をはりの幅 b と平均有効高さ d の積で除した比率(以下、繊維比率 (P_f))と称すを、それぞれ表一に示す。また、実験の一部には、せん断補強材を用いるため、軸方向補強材と同様に PAN 系繊

図一 供試体の諸元



維(12000本)にグラウトセメントを含浸させたせん断補強材も作製した。

はり供試体はすべて矩形断面であり、モルタルを用いたAからCと、コンクリートを用いたDの各シリーズに分けて実験した。シリーズAとBは、未硬化のCFRCの代わりに硬化したCFRC ロッドで補強した部材の作製作業と曲げ性状への補強効果の確認のため、シリーズCはCFRC ロッドに2種類の炭素繊維を混用した補強効果の把握のため、またシリーズDは、シリーズCまでに用いたモルタルはり供試体でのCFRC ロッドの効果をコンクリートはりで確認するためにそれぞれ行った。それぞれのシリーズに用いたはり供試体を、A 供試体、B 供試体、C 供試体およびD 供試体と称する。

モルタルのはり供試体の作製は、型枠の底部にモルタルを、A 供試体の場合が厚さ1 mm~2 mm, B 供試体およびC 供試体の場合が2 mm~3mm程度敷き、この上にCFRC ロッドを前者で17 mm, 後者で35 mmの有効高さとなるようにそれぞれ配置した。その後、残りのモルタルを打ち込んで仕上げた。締固めは、JIS R 5201に準じて2層に分けて行った。同時に、 $\phi 5 \times 10$ cmの圧縮強度試験用の円柱供試体も作製した。

コンクリートはりD 供試体を用い、その作製は、型枠の底部にコンクリートを厚さ2 cm程度敷き、この上にCFRC ロッドを85 mmの有効高さとなるように配置し、その後残りのコンクリートを打ち込んで仕上げた。締固めは、棒状の振動機を用いてコンクリート中および型枠の外部から、2層に分けて行った。同時に、 $\phi 10 \times$

表-3 CFRC ロッドの諸元および供試体の寸法

供試体	略号	繊維の本数 (10 ³ 本)	平均直径 (mm)	繊維含有率 (%)	ロッドの 配置本数	供試体の寸法(mm)				Pf=Acf/bd ³ ×100 (%)	備考						
						b	h	d	ℓ								
A-1 A-2	G-A H-A	3 12	(5.0) (3.0)	(6.1) (4.4)	2,4,6,8 2,4,6,8	40	20	17	160	0.22, 0.45, 0.67, 0.90 0.17, 0.32, 0.47, 0.62	モルタル						
B-1 B-2	G-A H-A	5.5 24	(8.0) (5.0)	(2.7) (3.5)	2, 4 2, 4	40	40	35	400	0.20, 0.40 0.15, 0.30							
C-11 C-12 C-21 C-22	G-B G-B G-H G-H	9 12 8 12	5.3(6.3) 5.6(6.5) 2.7(4.2) 3.5(4.5)	9.8(6.9) 11.7(8.7) 10.9(5.0) 9.7(5.9)	2	40	40	35	400	0.31 0.41 0.09 0.12	(ピッチ系)						
C-31 C-32 C-41	H-A H-A H-B	12 24 12	3.9(4.6) 4.6(5.7) 3.7	4.4(3.2) 6.4(4.2) 4.9						0.08 0.15 0.08		(PAN系)					
C-51 C-52 C-53 C-54	G-B+G-H G-B+H-A G-B+H-B G-B+H-B	6+6 3+12 6+6 3+12	4.5(5.5) 4.5 4.3 4.3	12.0(8.1) 7.9 11.8 8.6						0.27 0.18 0.24 0.18	モルタル (混用)						
C-12B C-22B	G-B G-H	12 12	5.6(6.5) 3.5(4.5)	11.7(8.7) 9.7(5.9)						2	40	40	35	400	0.41 0.13	(ピッチ系) モルタル (PAN系)	
C-31B	H-A	12	3.9(4.6)	4.4(3.2)											0.08		
D-11 D-12 D-13 D-14	G-B	12 18 24 30	5.6(7.6) 5.6(9.1) 6.2(9.9) 7.2(11.4)	13.1(6.4) 17.6(6.7) 19.1(7.5) 17.7(7.0)						2	50	100	85	750	0.14 0.20 0.27 0.34	(ピッチ系)	
D-21 D-22 D-23 D-24 D-24S ²⁾		H-A	12 24 36 48 48	4.9(5.5) 5.2(7.7) 6.7(8.6) 7.2(11.7) 7.2											2.9(2.3) 5.0(2.3) 4.5(2.7) 5.2(2.1) 5.2		0.03 0.05 0.08 0.10 0.10

1) Pf:繊維比率、Acf:繊維の総断面積、b:幅、d:平均有効高さ、2)せん断補強材を配置用、
*()内の数値は含浸用に普通セメントを用いた場合

20 cm の圧縮強度試験用の円柱供試体も作製した。供試体はいずれも材齢 1 日で脱型し、材齢 7 日まで標準養生を行った。なお、コンクリートの円柱供試体は材齢 2 日で脱型した。

モルタルはり供試体の曲げ強度試験は、A 供試体の場合にはスパンが 10 cm の中央点荷重、B 供試体の場合にはスパンが 22 cm で、8.5+5+8.5 cm の位置における 2 点荷重、また C 供試体の場合にはスパンが 34 cm で、14+6+14 cm の位置における 2 点荷重によりそれぞれ行った。そして、コンクリートはりの D 供試体は、スパンが 68 cm で、28+14+28 cm の位置における 2 点荷重で行った。曲げ強度試験はいずれの供試体も材齢 7 日で行い、荷重の増加速度は平均 29.4 N/s とした。供試体のせん断スパン有効高さ比は、A 供試体、B 供試体、C 供試体および D 供試体が、それぞれ約 2.9、2.4、4.0 および 3.3 である。

はりの上縁、下縁および CFRC ロッドのひずみは、一定の荷重毎にそれぞれに貼付したワイヤストレインゲージ(上・下縁用:幅 8 mm、長さ 30 mm および 70 mm)により測定した。また、中央部の荷重-たわみ曲線も X-Y レコーダーによって記録した。なお、A 供試体および B 供試体の場合には、ひずみの測定は行わなかった。モルタルおよびコンクリートの圧縮強度試験は、それぞれ JIS R 5201 および JIS A 1108 の方法に準じて行った

(表-2 参照)。試験はいずれも 3 体の供試体を用いて行い、たわみはそれらの代表を、それ以外は平均値を用いた。

3. CRFC ロッドの作製状態

含浸用セメントペーストのフロー値は、普通セメントを用いると、水セメント比が 40% の場合が 200±10、水セメント比が 50% の場合が 240±10、また、グラウトセメントを用いた場合には 290±10 であった。

炭素繊維へのセメントペーストの含浸および成形の作業は、表-1 に略号で示した PAN 系の繊維 H-B を用いた場合以外は、いずれの場合も容易であった。また、PAN 系繊維の方がピッチ系繊維に比べて、繊維の直径が細いため作業が容易であった。そして、グラウトセメントは普通セメントに比べて粒径が 1/10 程度と小さく、普通セメントを用いた場合より含浸作業が一層容易であるとともに、含浸後の成形作業は、硬化が早いので、普通セメントを用いた場合の 2/3 程度の時間で行うことができた。炭素繊維に H-B を用いた場合には、他の種類の繊維を用いた場合に比べてサイジング剤の塗布量が多くて、繊維が解裁しにくいため、含浸の作業性はグラウトセメントを用いても、他の繊維に比べ劣っていた。CFRC ロッドの成形状態は、形状が楕円になる場合があったが、

表一 4 曲げひび割れ発生応力度、破壊モーメントおよび曲げタフネス比

(a) AおよびB供試体の場合

供試体	繊維比率 (%)	曲げひび割れ発生応力度 (MPa)		破壊モーメント (N.m)				曲げタフネス比		備考
		40%	50%	実測値		計算値		40%	50%	
				40%	50%	40%	50%			
プレーン		6.9		17.9				1		
A-1	0.22	7.5	7.5	20.1	20.0	20.4	2	2	ヒッチ系	
	0.45	9.6	8.4	30.7	31.4	38.5	9	18		
	0.87	12.8	11.3	44.1	47.8	50.7C	18	53		
	0.90	12.3	12.6	47.5	54.9	58.6C	34	84		
A-2	0.17	7.4	7.9	41.7	40.7	49.9	64	42	PAN系	
	0.32	12.0	11.6	72.3	62.3	80.7C	56	55		
	0.47	14.4	11.0	75.3S	72.5S	94.9C	77	76		
	0.62	13.7	14.2	93.6S	83.8S	104.2C	105	90		
プレーン		5.4		54.1				1		
B-1	0.20		7.4		68.9	75.0		4	ヒッチ系	
	0.40		8.2		122.6	146.2		22		
B-2	0.15		7.4		188.3	198.7		99	PAN系	
	0.30		9.6		262.5S	337.8C		151		

*含浸用セメントペーストの水セメント比、含浸用セメントは普通セメント、実測値にS印を付記したものはせん断破壊、計算値にC印を付記したものは曲げ圧縮破壊

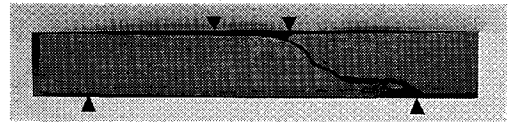
(b) CおよびD供試体の場合

供試体	繊維比率 (%)	曲げひび割れ発生応力度 (MPa)	破壊モーメント (N.m)		曲げタフネス比*	備考	
			実測値				
			実測値	計算値			
プレーン		4.1	43.9		1		
C-11	0.31	4.5 (4.2)	104.0	(89.1)	121.7	105 (49)	ヒッチ系
C-12	0.41	4.5 (4.2)	128.7S	(123.4S)	160.9	217 (83)	
C-21	0.09	4.8 (4.8)	99.5	(86.4)	109.8	32 (16)	
C-22	0.13	4.8 (4.2)	137.9	(102.9)	162.3	61 (24)	
C-31	0.08	4.8 (4.8)	113.9	(100.2)	104.7	145 (69)	PAN系
C-32	0.15	4.8 (4.8)	172.2S	(184.8)	298.0	200 (205)	
C-41	0.08	5.2	82.3		125.3	36	
C-51	0.27	4.5 (4.2)	109.8	(92.6)	98.6	48 (47)	
C-52	0.18	4.8	109.8		127.6	49	
C-53	0.24	4.8	125.4S		117.4	77	
C-54	0.18	5.5	104.3		151.7	64	
プレーン		2.7	28.8		1		
C-12B	0.41	2.9 (2.7)	82.3	(71.1)	128.8C	116 (71)	ヒッチ系
C-22B	0.13	3.2 (3.2)	120.0	(96.7)	156.3	71 (48)	
C-31B	0.08	3.2 (2.9)	89.2	(65.5)	102.7	79 (79)	PAN系
プレーン		3.4	285.4		1		
D-11	0.14	3.1 (3.5)	336.1	(337.5)	398.5	11 (10)	ヒッチ系
D-12	0.20	3.5 (3.1)	475.4	(437.0)	587.2	47 (12)	
D-13	0.27	3.1 (3.3)	606.4	(530.3)	725.4	93 (60)	
D-14	0.34	3.3 (3.3)	675.7	(686.0)	915.4C	108 (93)	
D-21	0.03	3.4 (3.4)	309.4	(325.2)	259.0	9 (3)	PAN系
D-22	0.05	3.1 (3.4)	515.9	(464.4)	506.7	115 (60)	
D-23	0.08	3.1 (3.3)	791.2	(694.1)	754.7	140 (109)	
D-24	0.10	3.3 (3.3)	869.2S	(895.2S)	987.1C	150 (143)	
D-24S	0.10	3.3	1043.4		987.1C	174	

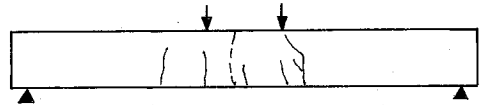
*補強しないものとの曲げタフネスの比、実測値にS印を付記したものはせん断破壊、計算値にC印を付記したものは曲げ圧縮破壊、()内の値はロッドの含浸に普通セメントを使用した場合。

外観上での含浸状態の相違は見られなかった。

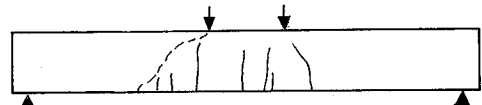
CFRC ロッドの直径は、表一3に示すように、含浸用セメントの種類によって異なり、グラウトセメントを用いると、いずれの炭素繊維を用いても、ロッドの直径は表中の () 内に示している普通セメントを用いた場合より30%~50%細くすることができた。これにより、ロッド中の繊維含有率を普通セメントを用いた場合より



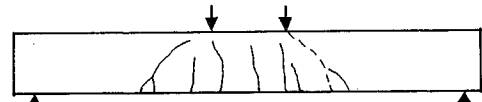
写真一 モルタルはりのひび割れの状態 (B 供試体)



(a) 1種類の繊維を用いた場合 (はり C-31)

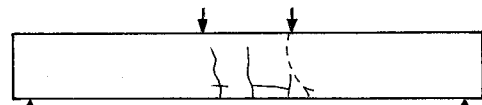


(b) 1種類の繊維を用いた場合 (はり C-12)

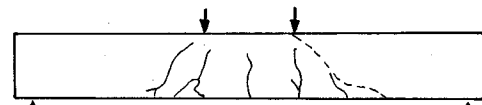


(c) 2種類の繊維を混用した場合 (はり C-53)

図一 モルタルはりのひび割れの状態 (C 供試体)



(a) はり D-14 (普通セメント)



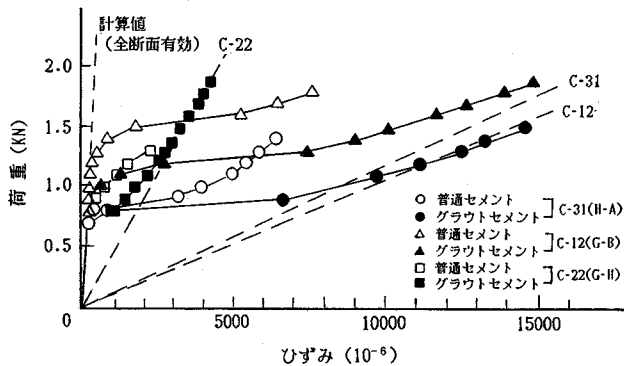
(b) はり D-24 (グラウトセメント)

図三 コンクリートはりのひび割れ状態 (D 供試体)

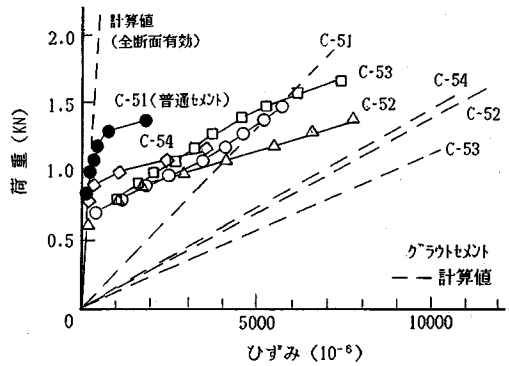
10%から20%高めることができた。

4. 曲げひび割れ発生応力度

CFRC ロッドを無視した弾性計算により求めた曲げひび割れ発生応力度を表一4に示す。曲げひび割れ発生モーメントは、A 供試体の場合は荷重-たわみ曲線の急



(a) 1種類の繊維を用いた場合



(b) 2種類の繊維を混用した場合

図4 モルタルはりのロッドのひずみ (C 供試体)

変点より、それ以外は、はりの下縁に貼付したワイヤストレーンゲージのひずみの急変点よりそれぞれ求めた。

1種類の炭素繊維を用いたモルタルはりのA供試体およびB供試体では、表-4(a)に示すように、繊維量の増加に伴って曲げひび割れ発生応力度は増加し、繊維量の多い範囲では、両供試体とも繊維を用いない場合に比べて50%以上増加している。これに対し、表-4(b)に示すC供試体の場合には、炭素繊維を混用せずに引張強度の高いPAN系繊維(H-B)を用いたはりC-41、あるいはこれとピッチ系繊維(G-B)を混用して用いたはりC-54のように、CFRCロッドの使用により曲げひび割れ発生応力度が25%程度大きくなる場合もあるが、それ以外は繊維を用いないはりよりわずかに大きい値を示しているにすぎない。曲げひび割れ発生応力度の大きいA供試体およびB供試体の繊維比率が、一般に0.3%以上と、C供試体に比べて高いためである。

コンクリートはりのD供試体の場合、曲げひび割れ発生応力度は、モルタルはりで繊維量の少ない場合と同様に、繊維を用いないはりとはほぼ等しい値を示している。

CFRCロッドによる曲げひび割れ発生応力度の増加は、ピッチ系およびPAN系のいずれの繊維を用いても、繊維量が多い繊維比率が高い場合には期待できるが、一般にはほとんど期待できないと考えてよい。

5. 曲げひび割れ性状および破壊性状

ひび割れの状態を写真-1、図-2および図-3にそれぞれ示す。曲げひび割れは、いずれのはりの場合も、曲げモーメントが最大の区間に発生し、その後圧縮側に発達した。

A供試体およびB供試体では、ピッチ系繊維を繊維比率で0.90%まで用いると、両供試体とも、繊維の切断によって曲げ破壊した。PAN系の繊維を用いると、繊維比率がA供試体で0.32%、B供試体で0.15%までは、

CFRCロッドの切断によって曲げ破壊したが、それ以上に繊維比率を増加させると、斜めひび割れが発達し、写真-1に示すようにせん断破壊した。これらの傾向は、既に報告した炭素繊維を束として硬化していない状態で用いた場合¹⁾とほぼ同じであり、硬化したCFRCロッドとして用いても、破壊形式は変わらなかった。

スパンの長いC供試体の場合、砂の量の少ない配合aでは、曲げひび割れは、いずれの炭素繊維および含浸用セメントを用いても、図-2(a)に示すように圧縮側に発達した。そして、PAN系繊維を多量に用いたはりC-32は、図-2(b)のピッチ系繊維を用いたはりC-12の場合と同様に、斜めひび割れが発達してせん断破壊した。それ以外のはりは、CFRCロッドが切断して曲げ破壊した。しかしながら、砂の量を多くした配合bでは、はりC-22Bがロッドの切断により曲げ破壊した以外は、曲げひび割れの発達と同時に、ロッドに沿うひび割れが発達し、この部分で破壊した。この破壊の原因は、モルタル自体の流動性が小さく、締固めが不十分となったことおよびそれ自体の強度が低いためと考えられる。

2種類の炭素繊維を混用したCFRCロッドを配置した場合(配合a使用)、ピッチ系の汎用品G-Bを多量に混用したはりC-53は、図-2(c)に示すように、繊維を混用しないはりC-12およびC-22と同様に、斜めひび割れの発達によりせん断破壊した。しかし、それ以外のはりは、CFRCロッドの切断により曲げ破壊した。

D供試体の場合には、ピッチ系繊維を多量に用いたはりD-14およびPAN系繊維を多量に用いたはりD-24以外は、ロッドの切断により曲げ破壊した。なお、ピッチ系繊維を用いたはりD-14では、含浸用セメントに普通セメントを用いると、図-3(a)に示すように、破壊近くになって補強材に沿うひび割れが発生したが、最終的に破壊はCFRCロッドの切断により曲げ破壊した。PAN系繊維を用いたはりD-24の場合は、いずれの含浸用セメントを用いても、図-3(b)に示すように斜

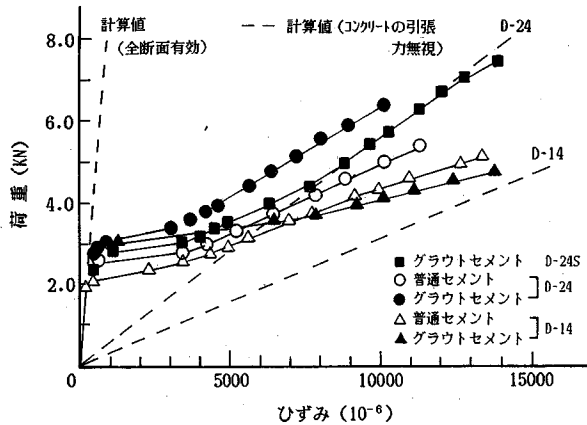


図-5 コンクリートはりのロッドのひずみ (D 供試体)

めひび割れが発生し、これによりせん断破壊した。しかし、これに炭素繊維によるせん断補強材を配置したはり D-24 S では、斜めひび割れは発生したが、最終的に軸方向に配置したCFRC ロッドの切断による曲げ破壊であった。

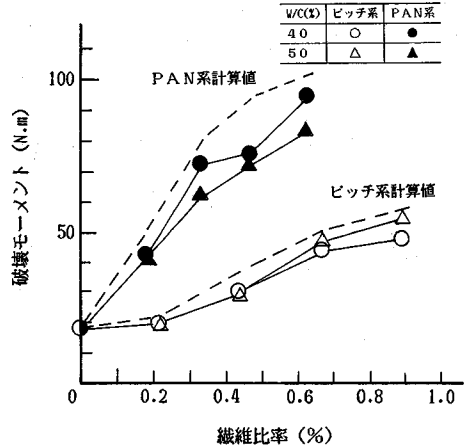
CFRC ロッドの切断により曲げ破壊した供試体の破断面を観察した結果、いずれの炭素繊維を用いても、繊維は破断面でほぼ一様に切断していた。また、マトリクスとロッドのずれならびにロッド中の炭素繊維の引き抜けは認められなかった。ロッドの表面に異形加工等の処理を施さなくても、付着強度は十分であったと推測される。

6. CFRC ロッドのひずみ

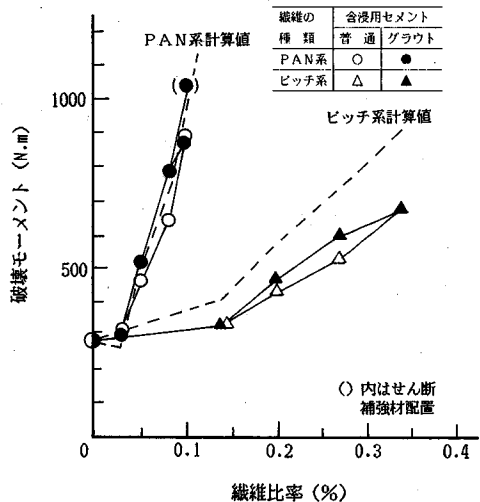
CFRC ロッドの引張ひずみと荷重との関係について、C 供試体の場合を図-4 に、また D 供試体の場合を図-5 にそれぞれ示す。図中には、モルタルあるいはコンクリートの引張力を無視して鉄筋コンクリートと同様に、弾性計算で求めた計算値を破線で示している。

図-4 および図-5 からは、曲げひび割れが発生するまでの CFRC ロッドのひずみは、はりの全断面を有効として求めた弾性計算値とほぼ一致すること、曲げひび割れが発生するとロッドのひずみは急激に増加すること、普通セメントを用いるとグラウトセメントの場合より同一荷重並びに最大荷重時のロッドのひずみが小さいことが、いずれのはりについてもそれぞれ認められる。普通セメントを用いた CFRC ロッドのひずみが小さい原因は、セメントペーストが十分に含浸されずに、曲げひび割れの発生から CFRC ロッドへの負担引張力が十分に発揮されない前に構成する繊維が十分に共同して引張力を分担しない前に切断したためと考えられる。

曲げひび割れの発生後は、いずれのはりも、荷重の増



(a) モルタルはり (A 供試体)



(b) コンクリートはり (D 供試体)

図-6 破壊モーメントと繊維比率の関係

加とともに弾性計算による計算値に近づいている。1種類の繊維を用いたモルタルはりの場合、図-4 (a)に示すように、繊維の総断面積をはりの幅と有効高さで除した繊維比率 P_f に繊維の弾性係数 E を乗じた値 $P_f E$ が大きいほど、曲げひび割れ発生後の補強材のひずみは一般に小さくなることも確かめられた。PAN系繊維を用いたはり C-31 とピッチ系繊維を用いたはり C-12 の $P_f E$ の値は 1.2 であり、ひずみははり C-31 がはり C-12 より $P_f E$ の値に対応する計算値以上に小さくなった。

含浸用セメントにグラウトセメントを用いた CFRC ロッドを配置したはり C-12 および C-22 (ピッチ系) の場合は、表-1 の伸度の値より小さい値で、またはり C-31 (PAN系) ではこの値を少し超えたところで破壊

している。なお、貧配合のモルタルを用いたはりのロッドのひずみは、ロッドに沿うひび割れに起因する破壊形式の相違のため、一般に富配合の場合より小さい値で破壊した。

2種類の炭素繊維を混用した場合には、図-4(b)に示すように、炭素繊維の総断面積に換算断面積⁹⁾を用いて弾性計算により求めた計算値よりも相当に小さい値で、CFRC ロッドは切断直前のひずみを示し、このひずみの値は図-4(a)に示した繊維を混用しない場合より小さくなった。この原因としては、混用した炭素繊維の弾性係数および伸度の差が大きいため、弾性係数の大きいPAN系繊維は、同一のひずみに対して大きな応力となるが、伸度が小さいため、PAN系繊維の繊維量が少ない場合には、この繊維が先に切断し、それ以降は残りのピッチ系繊維のみが荷重を負担するようになり、この荷重負担力がPAN系繊維の切断時における荷重より小さい場合は、その時点でやはり破壊することが考えられる。

D供試体のCFRCロッドのひずみは、図-5に示したように、いずれのはりでも弾性計算値に近づく直前あるいはこれを少し超えたところで、ロッドが破壊した。

ロッドの切断直前のひずみは、モルタルはりの場合と同様に、表-1の伸度の値より小さくなっている。

連続炭素繊維に合成樹脂を含浸させて作製したものを、コンクリートはりの補強材として配置した場合、補強材のひずみの実測値は、弾性計算により求めた計算値とほぼ一致することが報告されている⁹⁾。しかしながら、本研究のようにセメントペーストを含浸させたCFRCロッドの切断直前のひずみは、表-1に示した繊維自体の伸度(切断ひずみ)より小さくなった。この原因としては、先に述べた破壊形式の相違の他に、CFRCロッド中の炭素繊維が必ずしも並列に配置されていないことが挙げられる。

7. 破壊モーメント

(1) 実測値

破壊モーメントの実測値を表-4に示す。破壊モーメントの実測値は、いずれのはりでも、繊維量の増加に伴って増加するが、その増加の程度は繊維量が多くなると小さくなる。また、CFRCロッドにグラウトセメントを用いると、普通セメントを用いた場合より破壊モーメントは大きくなる。この原因は、3.で述べたように炭素繊維への含浸および成形作業が容易になり、炭素繊維への含浸状態および繊維の配列が良好なためと思われる。

表-4(a)に示したA供試体および表-4(b)に示したD供試体のそれぞれの破壊モーメントと繊維比率との関係をプロットして、図-6に示す。

図-6(a)に示したA供試体の場合、繊維比率でピッ

チ系繊維を0.90%およびPAN系繊維を0.32%配置すると、破壊モーメントは補強しないもののそれぞれ2.3~2.5倍および3.3~3.8倍の値が得られた。これらの値は、炭素繊維を束として硬化しない状態で用いた場合⁹⁾とほぼ同じであり、硬化状態のCFRCロッドとして用いた場合もほぼ等しい破壊モーメントの向上が認められた。

ピッチ系繊維を用いた場合は、含浸セメントペーストの水セメント比が異なっても、3.で述べたように、いずれのはりも曲げ破壊したため、破壊モーメントはほぼ同じ値を示した。PAN系繊維を用いた場合には、含浸セメントペーストの水セメント比を40%から50%に増加すると、破壊モーメントは少し小さくなったが、その差は小さいことが認められる。繊維比率がピッチ系で0.67%を、PAN系で0.32%をそれぞれ超えると、破壊モーメントに及ぼす繊維の補強効果がそれぞれ少し小さくなるのは、前者はCFRCロッドが同一平面上に配置できなかったためであり、後者は破壊形式がせん断破壊のためである。

C供試体の場合、2種類の炭素繊維を混用したCFRCロッドを用いたはりC-52およびC-54は、それぞれ炭素繊維を混用しないはりC-31およびC-41よりピッチ系繊維の分だけ繊維量が多いが、破壊モーメントは同程度か少し小さくなった。また、はりC-51およびC-53の場合には、繊維量は同じであるが、引張強度の高いPAN系繊維を用いたはりC-53の方が、C-51より破壊モーメントは少し大きくなった。これらの原因は、前者の場合は前述したピッチ系繊維が十分に寄与していなかったためであり、後者の場合は、3.で述べた炭素繊維のサイジング剤の影響により、繊維とセメントペーストとの付着強度の相違の影響と考えられる。

ピッチ系繊維を多量に混用したはりC-51およびC-53の破壊モーメントは、PAN系繊維を多量に混用して計算上の破壊モーメントの大きいはりC-52およびC-54と同じか少し大きくなっている。ピッチ系炭素繊維の弾性係数がPAN系繊維に比べて相当小さいが、ピッチ系繊維の使用量が多いことから、ピッチ系繊維がPAN系繊維に比べて曲げに対して、その効果を十分に発揮できたと考えられる。

図-6(b)に示したD供試体の場合は、繊維比率でピッチ系繊維を0.34%およびPAN系繊維を0.10%配置すると、破壊モーメントは補強しないもののそれぞれ2.5倍および3.8倍の値が得られた。なお、はりD-12およびD-24の場合には、いずれの含浸用セメントを用いても、4.で述べたようにせん断破壊したため、破壊モーメントはそれぞれほぼ同じ値を示している。はりD-24にCFRCロッドのせん断補強材を配置したはりD-24Sでは、破壊形式を曲げ破壊に変えることができたため、

破壊モーメントははり D-24 の場合より大きい。

(2) 計算値との比較

表一4中には、曲げ破壊モーメントの計算値も示している。曲げ破壊モーメントの計算値には、はりの断面を水平に n 等分に分割する積層モデルを採用した¹⁾。断面内のひずみは直線分布すると仮定し、応力とひずみを各層の図心位置において代表させた。モルタルあるいはコンクリートの応力-ひずみ曲線は、Hognestad の提案式を用い、最終圧縮ひずみを 0.35% と仮定した。また、引張応力も同様に分担するとし、最終ひずみ ϵ_{cu} を 0.015% と仮定した。

炭素繊維の応力-ひずみ曲線は降伏領域を持たないと仮定した。なお、モルタルあるいはコンクリートの圧縮縁のひずみ ϵ_{cc} が破壊圧縮ひずみ ϵ_{cu} に達する前に炭素繊維の応力度が引張強度の f_u に達して破壊する場合を繊維破断型曲げ破壊とし、反対に ϵ_{cc} が先に ϵ_{cu} に達して破壊する場合を曲げ圧縮破壊と称することにする。

2種類の炭素繊維を混用したはりの曲げ破壊モーメントの計算値は、2種類の繊維のうち小さい伸度になったところで、その分は引張強度を、他の分はそのひずみに弾性係数を乗じた引張応力度の分を引張力として分担している状態での曲げモーメントとして求めた。

表一4に示したように、一般に、実測値は計算値より小さい場合が多く、計算値との差は、繊維量が多くなると一般に大きくなる。また、含浸用セメントにグラウトセメントを用いると、普通セメントを用いた場合より実測値と計算値との差が小さくなる。

図一6中には、曲げ破壊モーメントの計算値も破線で一緒に示している。図一6(a)に示した A 供試体の実測値は、ピッチ系繊維の場合が 2~21%、PAN 系繊維の場合が 10~23%それぞれ計算値より小さい値を示している。B 供試体の場合には、繊維量が多くなると、実測値は計算値より 16~24%小さくなった。しかし、繊維量の多い範囲では、計算上は曲げ破壊することから、破壊形式が 5. で述べたことと相違している。CFRC ロッドの切断により曲げ破壊した繊維量の少ない場合の実測値は、一般に計算値の 80%以上が得られた。なお、A 供試体でピッチ系を繊維比率で 0.90% と多量に用いた場合は、曲げ破壊したにもかかわらず、先述した CFRC ロッドが同一平面に配置できなかった影響のため、計算値と実測値の差は 20%程度となった。

C 供試体の場合、実測値は計算値の 10~40%小さい値を示している。実測値が計算値より小さい原因としては、3. で述べた繊維の配列や 5. で述べた破壊形式の影響の他に、CFRC ロッドの作製において、繊維にセメントペーストを含浸させる際に繊維が少し切断する場合があることなどが挙げられる。曲げ破壊した場合の実測値は、

一般に計算値の 75%以上が得られた。なお、はり C-32 の実測値は、繊維の総断面積 A_{cf} を鉄筋の断面積と仮定し、コンクリート標準示方書に示された棒部材の設計せん断耐力の式¹⁰⁾を用い、部材係数 γ_b を 1.0 として求めた曲げモーメントの計算値 (190.7 N.m) より小さくなった。

また実測値は、ピッチ系繊維を多量に混用したはり C-51 および C-53 の場合は計算値と同程度を示し、PAN 系繊維を多量に混用したはり C-52 および C-54 では、計算値より 14~20%小さくなった。ピッチ系繊維を多く混用した場合の方が、補強効果が高くなった。

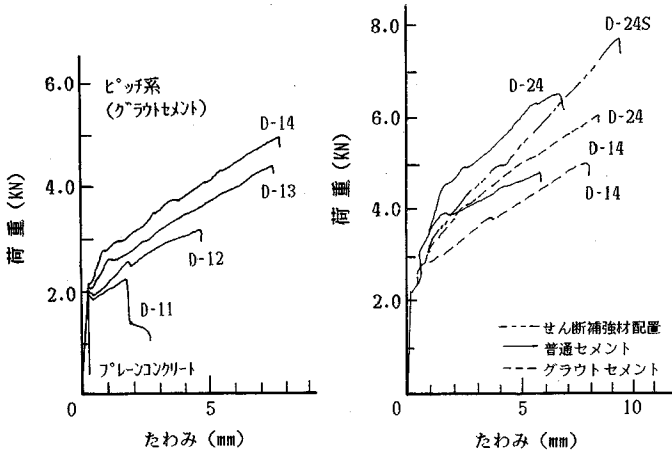
CFRC ロッドにグラウトセメントを用いたはり C-51 では、繊維間へのセメントペーストの含浸状態が良好なため、異なる品質の炭素繊維を混用しても、普通セメントを用いた場合より破壊モーメントの実測値ならびに実測値と計算値の比率が大きくなっている。そして、曲げ破壊した場合の実測値は、1種類の炭素繊維を用いた場合と同様、一般に計算値の 80%以上が得られた。

D 供試体の実測値は、PAN 系繊維の場合には、計算値と同じか 10%程度小さく、中には 20%程度高い値を示す場合もある。しかし、ピッチ系繊維の場合には 15~27%小さい値を示している。この理由としては、先述したように、PAN 系繊維の方がピッチ系繊維より作製しやすく、繊維の配列や繊維間へ含浸が良好なことが挙げられる。繊維量が多い場合は、いずれの繊維を用いても、破壊形式が 5. で述べたことと相違している。また、せん断破壊したはり D-24 の実測値は、コンクリート標準示方書の設計せん断耐力の式を用い、部材係数 γ_b を 1.0 として求めた曲げモーメントの計算値 (561.1 N.m) より大きく、モルタルはり C-31 の場合とは逆の結果になっている。いずれにしても、曲げ破壊した場合の破壊モーメントの実測値は、一般に計算値の 75%以上が得られた。

以上のように、各供試体とも曲げ破壊した場合の曲げ破壊モーメントの実測値は、一般に計算値の 75%以上であり、その平均値は 87%と計算値にかなり近い値が得られたことから、曲げ破壊する場合の曲げ破壊モーメントは、実用上積層モデル方法で算定することが可能と考えられる。

8. たわみ

A 供試体で含浸用セメントペーストの水セメント比を変えたロッドを配置した場合、PAN 系繊維を用いると、最大荷重は相違したが、最大荷重時のたわみはほぼ同じ値を示した。しかしながら、ピッチ系繊維を用いた場合には、含浸用セメントペーストの水セメント比が 50% の場合の方が 40% の場合よりかなり大きな破壊時のたわみを示した。この現象は、繊維比率が 0.62% およ



(a) 繊維量の影響 (b) 含浸用セメントの種類の影響

図-7 コンクリートはりのたわみ (D 供試体)

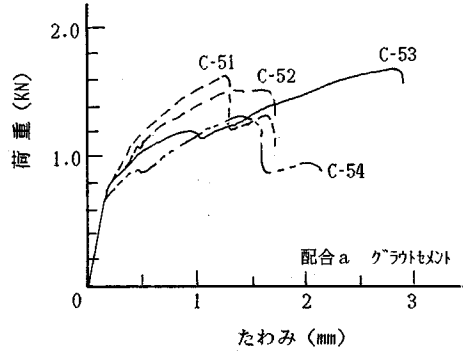
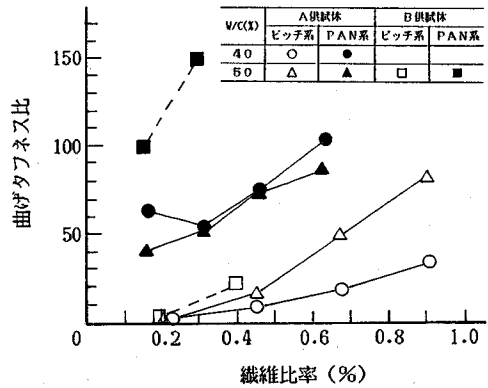


図-8 荷重-たわみ曲線 (繊維を混用した場合)

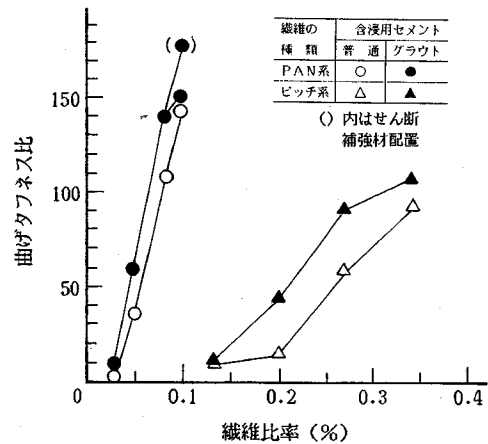
び0.90%といったピッチ系の繊維を多量に配置した場合に認められた。この原因については、50%の水セメント比のセメントペーストは流動性が高く、多量の繊維間に容易にセメントペーストが浸入でき、セメントペーストと繊維間の付着が十分に確保されたことが考えられるが、今後さらに検討すべき課題である。

図-7には、D 供試体の荷重-たわみ曲線を示している。図-7(a)に示すように、最大荷重時のたわみは、繊維比率が増加すると増加する。そして、含浸用セメントにグラウトセメントを用いると、図-7(b)に示すように、最大荷重時のたわみは、普通セメントを用いた場合より大きくなる。この原因は、グラウトセメントを用いると、普通セメントの場合よりロッドの直径が細くそれ自体の曲げ剛性が小さくなることのためと考えられる。なお、破壊時のたわみは、前述した繊維間へのセメントペーストの含浸状態が良好なグラウトセメントを用いたほうが大きい。これらの傾向は、C 供試体でも同様に認められた。

2種類の炭素繊維を混用した場合には、図-8に示すように、弾性係数の小さい、伸度の大きいピッチ系繊維を多量に用いると、繊維を組み合わせることによりたわみが大きくなる場合のあることが認められる。繊維を混用したCFRCロッドを用いても、最大荷重以降の変形状の改善にはほとんど効果がない場合が多いものの、破壊時のたわみは増加する場合がある。繊維を混用して変形状の改善を期待するためには、弾性係数の小さい伸度の大きいピッチ系繊維を多量に用いることが必要と考えられる。



(a) モルタルはり (AおよびB 供試体)



(b) コンクリートはり (D 供試体)

図-9 曲げタフネス比と繊維比率の関係

9. 曲げタフネス

表一4には、曲げタフネス比も一緒に示している。曲げタフネスは、最大荷重を生じる点までの荷重-たわみ曲線下の面積として求めた。そして、CFRC ロッドで補強しないものとの曲げタフネスの比を、曲げタフネス比と称する。

表一4に示した曲げタフネス比の値を、繊維比率と関連させて図一9に示す。図一9からは、一般に、曲げタフネスは、繊維量の増加に伴って増大することおよびPAN系繊維を用いた場合の方が、ピッチ系繊維の場合より大きいことが認められる。

図一9(a)に示すA供試体の場合は、PAN系繊維を用いると、含浸セメントペーストの水セメント比が異なっても、曲げタフネスはほぼ同じ値となった。しかしながら、ピッチ系繊維の場合には、繊維量が多くなると、含浸セメントペーストの水セメント比が40%の場合に比べ50%の場合の方が曲げタフネスは大きくなっている。

図一9(b)に示すD供試体の場合には、グラウトセメントを用いると、普通セメントを用いた場合より曲げタフネスは一般に大きいことが認められる。このことは、砂セメント比および繊維の種類にかかわらず、またC供試体で繊維を混用しない場合にもそれぞれ同様に認められた。なお、2種類の繊維を混用すると、混用しない場合より繊維量が多いにもかかわらず、曲げタフネスは小さくなった。

10. 結 論

連続炭素繊維にセメントペーストを含浸させて硬化させた補強材のCFRC ロッドを、モルタルあるいはコンクリート中に一次元に配置したはりを作製し、CFRC ロッドの引張ひずみ、はりのひび割れ状態、破壊モーメント、たわみ、曲げタフネスなどについての実験結果を報告した。そして、CFRC ロッドの補強効果に及ぼす含浸用セメントの種類、炭素繊維の種類や品質とその組み合わせなどの影響について、はりの曲げ耐力の算定方法とともに検討した。本研究の範囲内で、次のことが言えると思われる。

(1) 硬化状態のCFRC ロッドを用いると、未硬化状態のCFRCを用いた場合のはりの曲げ性状を保持して、はりの作製作業を簡略化することができる。

(2) CFRC ロッドを用いても、はりの曲げひび割れ発生応力度の向上はほとんど期待できない。

(3) コンクリートはりの場合に、繊維比率でピッチ系繊維を0.3%あるいはPAN系繊維を0.1%程度配置すると、補強しないものに比べて、それぞれ破壊モー

メントは2.3倍および3.0倍、破壊時のたわみは10倍および20倍程度向上させることができる。

(4) 補強材のCFRC ロッドの作製に粒径の小さいグラウトセメントを用いると、普通ポルトランドセメントの場合よりロッドの作製が容易で、補強材の炭素繊維の含有率ならびにはりの曲げ耐力や変形性能を10~20%向上させることができる。

(5) CFRC ロッドについては、ピッチ系およびPAN系のいずれの炭素繊維を用いても、繊維一本で測定した炭素繊維自体の破断ひずみより小さい値で破壊した。

(6) 2種類の炭素繊維を混用したCFRC ロッドを用いても、はりの破壊曲げモーメントの向上および変形性能の改善は得られない場合がある。繊維を混用して変形性能の改善および曲げ耐力の向上を期待するためには、弾性係数が小さくて破断ひずみの大きいピッチ系炭素繊維を多量に用いることが必要である。

(7) はりがCFRC ロッドの破断で破壊する場合の曲げ破壊モーメントは、積層モデルを用いて算定することが可能である。しかし、炭素繊維を混用して用いる場合には、(6)で述べた繊維の組み合わせ方法も含めて、さらに積層モデルを用いた算定方法について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 古川 茂, 辻 幸和, 大谷杉郎: セメントペーストを含浸させた連続炭素繊維を補強材に用いたモルタルはりの曲げ性状, 土木学会論文集, No. 433/V-15, pp.149-156, 1991.
- 2) 古川 茂, 辻 幸和, 大谷杉郎: 棒状連続炭素繊維補強モルタルの力学的特性, 第14回土木学会関東支部年次研究発表会講演概要集, pp.282-283, 1987.
- 3) 古川 茂, 辻 幸和, 宮本正雄: セメントペーストを含浸させた連続炭素繊維を補強材として用いたモルタルの力学的性状, セメント技術年報, 41, pp.475-478, 1987.
- 4) 古川 茂, 辻 幸和, 宮本正雄: 連続炭素繊維を補強材として用いたコンクリートはりの曲げ性状, セメント技術年報, 42, pp.471-474, 1988.
- 5) 古川 茂, 辻 幸和, 大谷杉郎: 異種類の炭素繊維で補強したモルタルの曲げ性状, セメント・コンクリート論文集, No. 43, pp.548-553, 1989.
- 6) 古川 茂, 辻 幸和, 大谷杉郎, 小島 昭: CFRC ロッドで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, 第11巻, 第1号, pp.849-854, 1989.
- 7) 古川 茂, 辻 幸和, 大谷杉郎: 各種のCFRC ロッドで補強したコンクリートはりの曲げ性状, 土木学会, 第45回年次学術講演会概要集, pp.334-335, 1990.
- 8) 辻 幸和, 斉藤 等, 関島謙蔵, 小川弘幸: FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, 第11巻, 第3号, pp.

- 547-552, 1988.
- 9) 小沢一雅, 関島謙蔵, 岡村 甫: FRP で補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状, コンクリート工学年次論文報告集, 第9巻, 第2号, pp.269-274, 1987.
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], pp.57-58, 1991. (1994.8.8 受付)

FLEXURAL BEHAVIORS OF CONCRETE BEAMS REINFORCED WITH CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE RODS

Shigeru FURUKAWA, Yukikazu TSUJI and Sugio OTANI

The carbon fiber reinforced composite rod (CFRC rod) was manufactured by impregnating with cement paste into different types of continuous carbon fibers. Normal portland cement and grout cement were used to produce CFRC rod. Workability for producing of CFRC concrete beam was improved by using carbon fibers as a form of rod. When the grout cement was used in the CFRC rod, the failure bending moment and the deflection of CFRC concrete beam at failure were larger than those of CFRC concrete beam using normal cement in the CFRC rod. The failure bending moment of CFRC concrete beam can be estimated by modelling as laminated beam when a CFRC concrete beam fails by cutting of CFRC rod.