

論文 高弾性・高強度の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

古川 茂^{*1}、辻 幸和^{*2}、大谷杉郎^{*3}、小島 昭^{*4}

要旨：コンクリートはりの曲げ性状の一層の向上のため、補強材として従来よりも高弾性あるいは高強度の連続炭素繊維にセメントペーストを含浸させて造ったCFRC ロッドを用いた場合のはりの破壊モーメント、たわみやせん断耐力などを検討した。

破壊モーメントは、高強度の繊維を用いると向上すること、たわみは、いずれの繊維を用いても土木学会コンクリート標準示方書設計編（RC示方書）の算定式から求めた計算値より小さくなること、せん断耐力は、高弾性の繊維を用いるとRC示方書の算定式に繊維の換算断面積を用いた計算値に近くなることなどが明らかになった。

キーワード：CFRCロッド、連続炭素繊維、破壊モーメント、たわみ、せん断耐力

1. まえがき

連続炭素繊維をコンクリートの補強材として用いる場合には、繊維に合成樹脂を含浸させてロッド状などに成形して用いる研究開発が行われ、一部実用化され始めている。筆者らは、主にコンクリートの付着性能、高温下の品質、および耐久性の向上などの観点から、合成樹脂の代わりに無機系のセメントペーストを連続炭素繊維に含浸させて棒状に成形したCFRCロッドを、補強材として利用する場合の、はりの曲げ性状やせん断性状について報告してきた [1～3]。しかしながら、最近では、従来より高強度で高弾性のピッチ系の繊維や高強度のPAN系の繊維などが開発されており、曲げ性状を一層向上させるためにはこれらの繊維を用いた場合についての検討が必要と考えられる。また、有効高さやコンクリートの品質がこれらのはりの曲げ性状やせん断性状へ及ぼす影響については、これまで未検討であった。

本研究では、従来より高弾性あるいは高強度の連続炭素繊維を用いて造ったCFRCロッドをコンクリート中に一次元に配置した炭素繊維補強コンクリートはりを作製し、はりのひび割れ状態、破壊モーメント、たわみおよびせん断耐力等について実験した結果を報告する。さらに、有効高さやコンクリートの品質の影響についても検討する。

2. 実験の概要

2.1 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繊維およびPAN系の繊維を用いた。セメントは普通ポルトランド

表-1 炭素繊維の品質

繊維の種類	略号	繊維直径 (10 ⁻³ mm)	比重	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (10 ⁵ kgf/cm ²)	伸度 (%)
ピッチ系	A	10.0	1.61	33800	55.0	0.61
PAN系	C	7.0	1.78	36000	23.5	2.1
	D	7.0	1.80	50000	23.5	2.1

*1 群馬工業高等専門学校助教授 土木工学科、工博（正会員）

*2 群馬大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*3 東海大学教授 開発工学部素材工学科、工博

*4 群馬工業高等専門学校教授 工業化学科、工博

セメントを用いた。
また、CFRCロッドの作製には、ブレン値が $9200\text{cm}^2/\text{g}$ の微粒なグラウト用のセメントを用いた。

表-2 コンクリートの配合および品質

配合	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	S.P. (%)	C (kg/m ³)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (10 ⁵ kgf/cm ²)
a	10	12±2	4±1	77	65	0.8	280	209	2.30
b	10	12±2	4±1	58	62	0.8	350	337	2.64

W/C:水セメント比、s/a:細骨材率、C:単位体積量、S.P.高性能減水剤

骨材は利根川産の川砂（比重：2.63、粗粒率：2.78）および最大寸法が10mmの川砂利（比重：2.65、粗粒率：6.24）を用いた。また高性能減水剤は、ナフタリンスルホン酸塩系を主成分とするものを用いた。

コンクリートは、表-2に示す配合および品質のものを用いた。CFRCロッド作製のための含浸用セメントペーストは、水セメント比が50%で、高性能減水剤をセメント質量の1%添加した。

2.2 CFRCロッドの作製

CFRCロッドの作製は、24000本および36000本の炭素繊維に、それぞれ所定配合のセメントペーストを含浸させ、繊維が表面にでないように棒状に仕上げた。仕上げたロッドは1日間室内に放置した後、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インゲージを防水処理を行って貼り付けた。CFRCロッドの直径、ロッド中の炭素繊維含有率は、表-3の通りである。CFRCロッドは、いずれのほりも2本ずつ配置した。供試体中の炭素繊維の総断面積をほりの幅 b と有効高さ d の積で除した比率を繊維比率と称して、表-4中に示している。

表-3 CFRCロッドの諸元

略号	繊維の本数	平均直径(mm)	繊維含有率(%)
A 1	24000	5.5	8.1
A 2	36000	6.5	8.5
C 1	24000	5.2	4.2
C 2	36000	5.3	6.3
D 1	24000	5.2	4.4
D 2	36000	6.0	4.9

2.3 ほり供試体の作製および曲げ試験

ほり供試体は、幅が5cm、高さが10cm、長さを73cmとし、図-1に示すように、CFRCロッドを有効高さが7.0cmおよび8.5cmになるように配置した。コンクリートは2層に分けて打ち込み、各層とも棒形振動機を用いて、コンクリート中および型枠の外部から締固めを行って仕上げた。供試体は、材齢7日まで水中養生を行い、それ以降は強度試験の材齢28日まで湿布養生を行った。

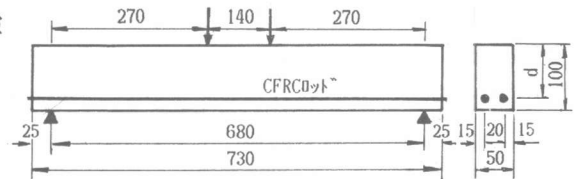


図-1 断面諸元および荷重方法

ほり供試体の曲げ試験は、材齢28日において図-1に示すような方法の2点荷重で行った。曲げ試験時には、ほりの上縁、下縁およびロッドのひずみを、ワイヤストレインゲージによって測定した。また、ほり中央部の荷重-たわみ曲線を、X-Yレコーダによって記録した。同時に、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の圧縮強度試験用の円柱供試体を作製した。各供試体は材齢2日でそれぞれ脱型し、材齢7日までは水中養生、その後は材齢28日まで湿布養生を行った。

3. ひび割れ状態および曲げひび割れ発生応力度

ひび割れ状態の例を、図-2および図-3に示す。曲げひび割れは、最大曲げモーメントの区間で発生した。その後は、表-4中に示す破壊モーメントの実測値にS印を付記したピッチ系の高弾性繊維AおよびPAN系の高強度繊維Dを用いたほりでは、斜めひび割れが発生して、

図-2のようにせん断圧縮により破壊した。それ以外のはりでは、図-3 (a)のようにロッドの切断により曲げ破壊した。なお、コンクリートの強度が低い配合aとPAN系の繊維Dを多く用いたはり D2-aLの場合

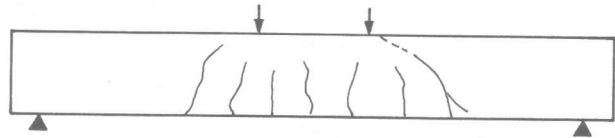


図-2 せん断破壊 (はりA2-aH)

には、破壊の直前で図-3 (b)のように、ロッドに沿ったひび割れが発生する場合があった。

曲げ破壊した場合のCFRCロッドの破断面を観察すると、PAN系の高強度繊維Dを用いた場合には、繊維が少し引き抜ける場合があったが、それ以外の繊維を用いた場合には、繊維はほぼ一様に切断されていた。繊維Dを用いた場合は、他の繊維に比べて繊維が解裁しにくかったことから、セメントペーストの含浸状態が不均一になり易かったことが考えられる。なお、いずれのはりでも、コンクリートとロッドとのずれは認められなかった。

表-4 曲げひび割れ発生応力度、破壊モーメントおよびせん断応力度

供試体	配合	繊維比率 (%)	曲げひび割れ発生応力度 (kgf/cm ²)	破壊モーメント (kgf.cm)			せん断応力度 (kgf/cm ²)			略号
				M _m	M _c	M _m /M _c	τ _m	τ _{c1}	τ _{c2}	
ブレン	a		29.2	2430			1.8			
	b		39.4	3281			2.4			
A1-aL A1-aH	a	0.105	37.3	7128	8220	0.87	7.3	4.9	6.7	A1
		0.089	42.1	8697	9875	0.88	7.1	4.4	6.1	
A1-bL A1-bH	b	0.105	42.1	6710	8581	0.78	6.9	5.7	7.8	A1
		0.087	45.4	7979	10491	0.76	6.8	5.1	7.0	
A2-aL A2-aH	a	0.159	40.5	9329	11231C	0.83	9.7	5.6	7.8	A2
		0.130	45.4	11610S	14483	0.80	9.9	5.0	6.7	
A2-bL A2-bH	b	0.159	43.8	8991S	12238	0.73	9.4	6.6	9.1	A2
		0.130	45.4	11165	15295	0.73	9.5	5.9	8.0	
C1-aL C1-aH	a	0.051	37.3	3497	4527	0.77	3.6	3.5	3.6	C1
		0.044	37.3	4131	5324	0.78	3.6	3.5	3.6	
C1-bL C1-bH	b	0.052	37.3	3442	4558	0.76	3.6	4.5	4.7	C1
		0.044	38.9	4347	5555	0.78	3.7	4.0	4.2	
C2-aL C2-aH	a	0.078	34.0	4874	6301C	0.77	5.1	4.4	4.6	C2
		0.068	37.3	6313	7593	0.83	5.7	4.1	4.2	
C2-bL C2-bH	b	0.076	41.3	4698	6917	0.68	4.8	5.1	5.3	C2
		0.066	44.6	6275	8014	0.78	5.5	4.7	4.9	
D1-aL D1-aH	a	0.052	32.4	4401	5321C	0.83	4.6	3.9	4.0	D1
		0.043	32.4	5427	7193C	0.75	4.7	3.5	3.6	
D1-bL D1-bH	b	0.052	38.1	4334S	6245	0.69	4.5	4.5	4.7	D1
		0.042	39.7	5292	7722	0.69	4.5	4.0	4.2	
D2-aL D2-aH	a	0.078	35.7	6197	6301C	0.99	6.5	4.4	4.6	D2
		0.064	38.9	6966S	8700C	0.80	5.9	3.9	4.1	
D2-bL D2-bH	b	0.080	38.9	6575S	7955C	0.83	7.1	5.3	5.5	D2
		0.064	43.8	7898S	11351	0.70	6.7	4.6	4.8	

M_m:破壊モーメントの実測値、M_c:破壊モーメントの計算値、
τ_m:せん断応力度の実測値、τ_{c1}:せん断応力度の計算値(総断面積)、
τ_{c2}:せん断応力度の計算値(換算断面積)、
実測値にS印を付記したものはせん断圧縮破壊、
計算値にC印を付記したものは曲げ圧縮破壊

CFRCロッドを無視して弾性計算により求めた曲げひび割れ発生応力度を、表-4にまとめ示す。曲げひび割れ発生モーメントは、主にコンクリートの下縁に貼ったワイヤストレインゲージのひずみの急変点より求めた。曲げひび割れ発生応力度は、繊維比率の大きいピッチ系の繊維Aを用いた場合に少し増加しているが、それ以外では、各はりとも同程度の値を示している。ロッドによる曲げひび割れ発生応力度の増加は、小さいといえる。

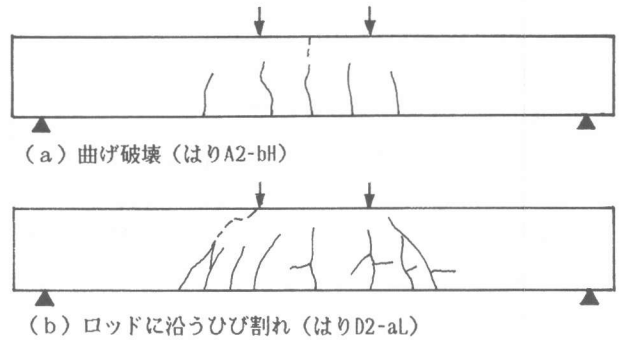


図-3 ひび割れ状態

4. 破壊モーメント

破壊モーメントの実測値と計算値も、表-4に示している。破壊モーメントの計算値は、コンクリートの応力-ひずみ曲線を等価応力ブロック、コンクリートの最終圧縮ひずみを0.35%、炭素繊維の応力-ひずみ曲線は降伏領域を持たないとそれぞれ仮定して求めた。

表-4からは、破壊モーメントは高強度の繊維を用いると向上すること、また破壊モーメントは、いずれの繊維を用いても繊維量が多い方があるいは有効高さが高い方がそれぞれ大きくなるが、コンクリートの強度が高くても、ロッドの切断により曲げ破壊した場合の破壊モーメントはほとんど大きくなることが確かめられた。

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%以上の値を示している。はりD1-bHの場合に実測値と計算値の差が大きい原因は、3.で述べた繊維の引き抜けおよび繊維の配列の影響と思われる。なお、曲げ破壊したはりの中には、表-4中の実測値にCを付記した計算上で曲げ圧縮破壊とされる場合も含まれており、破壊形式が相違している。今後さらに検討を進めたい。

5. CFRCロッドのひずみおよびはりのたわみ

繊維量が多いはりの荷重とCFRCロッドのひずみとの関係を、図-4に示す。図中の破線は、炭素繊維の総断面積を用いて、鉄筋コンクリートはりと同様にして弾性計算により求めた計算値を示している。

ひび割れ発生後におけるロッドのひずみの増加は、ピッチ系の高弾性の繊維Aを用ると小さいが、鉄筋とほぼ等しい弾性係数をもつPAN系繊維を用いると大きく増加する。その後、ロッドのひずみは計算値に近づき、計算値付近あるいはその値を超えてロッドが切断した。CFRCロッドは、いずれの場合も、

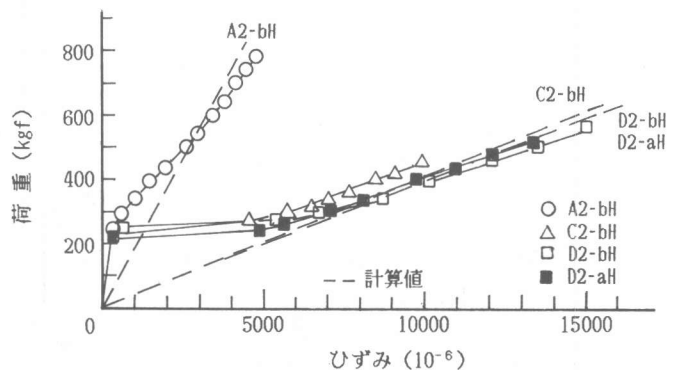
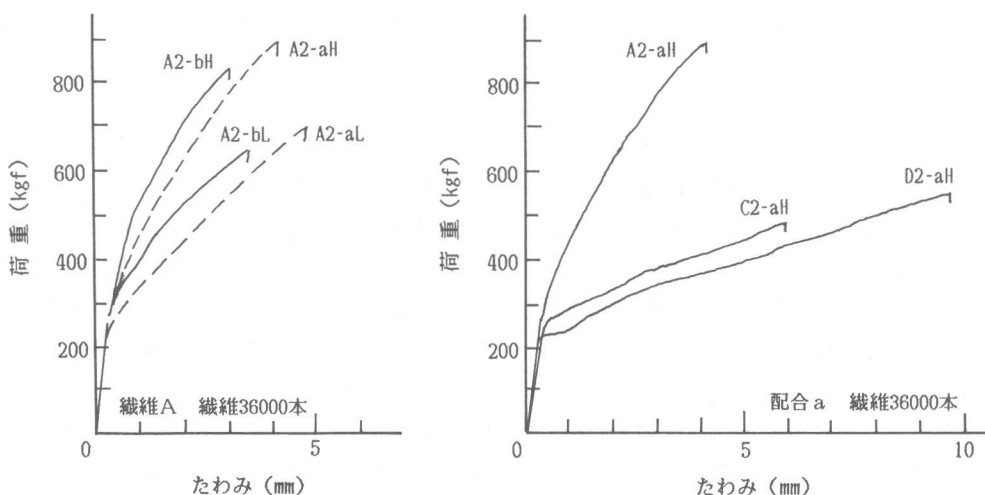


図-4 荷重とロッドのひずみの関係



(a) 有効高さおよび配合を変えた場合

(b) 繊維の種類を変えた場合

図-5 荷重とたわみの関係

表-1に示した繊維自体の破壊ひずみより小さなひずみで破壊した。

図-5には、繊維量の多いはりの荷重-たわみ曲線の例を示す。同一荷重下のたわみは、いずれの場合も、図-5(a)のように有効高さおよびコンクリートの強度の高い方が小さい。またたわみは、PAN系の繊維を用いると、図-5(b)のように大きくなるが、ピッチ系の繊維を用いた場合には、弾性係数および繊維比率が他の繊維より高いことから、小さくなっている。

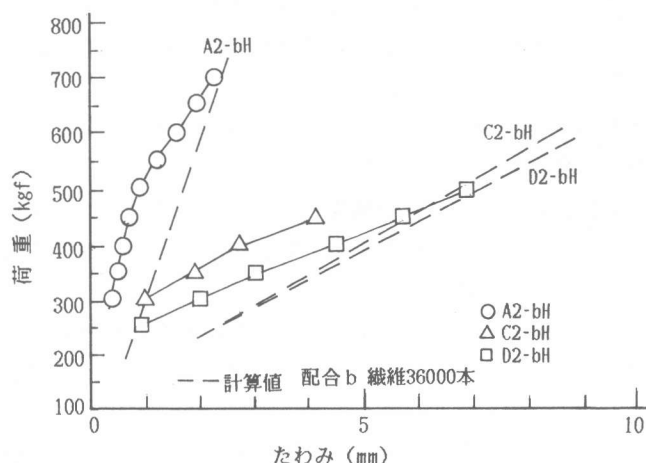


図-6 たわみの実測値と計算値

配合bを用いた繊維量の多い場合のたわみの実測値と計算値との関係を、図-6に示す。図中には、繊維の総断面積 A_{cf} を鉄筋の断面積と仮定し、土木学会コンクリート標準示方書設計編(RC示方書)に示されている換算断面二次モーメント I_e を用いる算定式から求めた計算値を、破線で示している。

ひび割れ発生後のたわみの実測値は、いずれの場合も、図-6のように通常の状態では計算値より小さく、破壊付近では計算値に近くなることが認められた。

格子状のFRPを用いたコンクリートはりでは、たわみの実測値はRC示方書の式を用いて求めた計算値より大きくなることが報告されているが[4]、本研究の場合は、鉄筋と同様な付着性状を示すことと、繊維の弾性係数が鉄筋と同程度かそれより大きいことから、計算値より小さくなったと思われる。

高強度繊維Dを用いたD2-bHで、ひずみやたわみの実測値が計算値に近い理由は、せん断破

壊のため曲げ破壊に比べて破壊荷重が小さく、含浸状態の影響が小さかったためと思われる。

6. せん断耐力

表-4には、はりの破壊時および斜めひび割れ発生時のせん断応力度の実測値および計算値も、一緒に示している。計算値は、繊維の総断面積 A_{cf} および炭素繊維の弾性係数 E_{cf} を考慮した換算断面積($A_{cf}(E_{cf}/E_s)$)をそれぞれ鉄筋の断面積と仮定し、RC示方書の棒部材の設計せん断耐力 V_{cd} をはりの幅 b と有効高さ d の積で除して求めた。なお、部材係数 γ_b は1.0とした。

せん断応力度の実測値は、一般に計算値と同程度以上の値を示している。また、実測値は、ピッチ系高弾性繊維Aを用いると、破壊時および斜めひび割れ発生時とも総断面積を用いて求めた計算値より大きく、斜めひび割れ発生時の実測値は換算断面積を用いて求めた計算値に近い値を示す。それ以外の繊維を用いた場合には、総断面積と換算断面積が大きく異なるため、それらを用いて求めた計算値とほぼ同等の実測値を示しているが、換算断面積により近い実測値が得られていると考えられる。

7. 結論

従来より高弾性あるいは高強度の連続炭素繊維を用いて造ったCFRCロッドで補強したコンクリートはりについて、破壊モーメント、たわみおよびせん断耐力などを検討した。これらの結果より、次の知見が得られた。

- 1) 破壊モーメントは、繊維の強度あるいは有効高さが高い方が大きくなること、たわみは繊維の弾性係数、有効高さおよびコンクリートの強度が高い方が小さくなることが確かめられた。
- 2) 曲げ破壊した場合の破壊モーメントは、いずれの繊維を用いても、鉄筋コンクリートはりと同様にして求めた計算値に近い値を示すが、計算上の破壊形式と異なる場合もあることから、さらに検討が必要である。
- 3) ひび割れ発生後のたわみは、いずれの繊維を用いても、土木学会コンクリート標準示方書設計編(RC示方書)に示された換算断面二次モーメントを用いる算定式で求めた値より小さくなる。
- 4) せん断耐力は、高弾性の繊維を用いた場合は、RC示方書に示された算定式を用いて求めた計算値より大きく、換算断面積を用いて求めた計算値に近い値を示す。またそれ以外の繊維を用いた場合には、総断面積と換算断面積を用いて求めた計算値がほぼ等しいため明瞭でないが、換算断面積を用いて求めた計算値により近い実測値が得られた。

[謝辞]

本研究の実施には、群馬高専の宮本正雄氏および卒業生の富岡隆君の援助を得ました。付記して謝意を表します。

[参考文献]

- [1] 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
- [2] 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、Vol.11、No.1、pp.849~854、1989
- [3] 古川茂、辻幸和、大谷杉郎、小島昭：CFRCロッド補強コンクリートはりの繰返し荷重作用下の曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.777~782、1991
- [4] 廣田孝夫、大即信明、内藤英晴、浜崎勝利：格子状FRP筋を用いたRC梁の曲げ特性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.795~800、1991