

論文

[1145] 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

正会員 ○古川 茂 (群馬工業高等専門学校)

正会員 辻 幸和 (群馬大学 工学部)

大谷杉郎 (群馬大学 工学部)

小島 昭 (群馬工業高等専門学校)

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、連続炭素繊維に合成樹脂を含浸させ、これを格子状やロッド状に成形して用いる研究開発が行われ、すでに貴重な成果が報告されている^{1)~4)}。筆者らは、合成樹脂の代わりに、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ロッドとしての利用方法も提案し、主としてはりの曲げ性状への補強効果につき報告してきた^{5),6)}。しかしながら、はりの曲げ性状については、CFRCロッドの補強効果をロッドのひずみを含め定量的に検討するまでには至っていなかった。また、はりのせん断性状などへの補強効果についてもまだ未検討であった。

本研究では、棒状に造ったCFRCロッドをコンクリート中に一次元に配置して補強した炭素繊維補強コンクリートはりを作製し、曲げモーメントの作用下におけるロッドのひずみ、曲げひびわれの発達状態、破壊曲げモーメントについて、またはりのせん断耐力等について、それぞれ実験した結果を、鉄筋コンクリートはりと対比して報告する。さらに、CFRCロッドの作製に用いるセメント(以下、含浸用セメントと称す。)の種類の影響についても検討した。

2. 実験方法

2.1 使用材料および配合

使用した連続炭素繊維は、表-1に示す性質をもつPAN系の高性能品とビッチ系の汎用品である。また、比較のための鉄筋はφ6mmのものを用いた。

セメントは普通ポルトランドセメント(以下、普通セメントと称す。)、また含浸用セメントには、普通セメントの他に、炭素繊維の間隙への含浸を容易にして、CFRCロッドの断面積を減ずることを目的に、ブレン値が9200cm²/gのグラウト用のもの(以下、グラウトセメントと称す。)も用いた。

表-1 炭素繊維の性質

繊維の種類	繊維直径 (10 ⁻³ mm)	比重	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (10 ⁶ kgf/cm ²)	伸度 (%)
PAN系 連続繊維	7.5	1.78	30000	23	1.3
ビッチ系 連続繊維	17.5	1.62	8500	3.8	2.45

骨材は利根川産の川砂(比重2.63、粗粒率2.78)および川砂利(比重2.65、粗粒率5.24、最大寸法10mm)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も用いた。

コンクリートの配合は、水セメント比が58%、単位セメント量が350kg/m³、細骨材率が62%、スランプが12±1cm、空気量が4±1%とした。高性能減水剤はセメントの重量の1%を添加した。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%とした。なお、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重量の1%添加した。

2.2 CFRCロッド、はり供試体および強度試験

CFRCロッドの作製は、所定本数の炭素繊維の間隙にセメントペーストを含浸させた後、

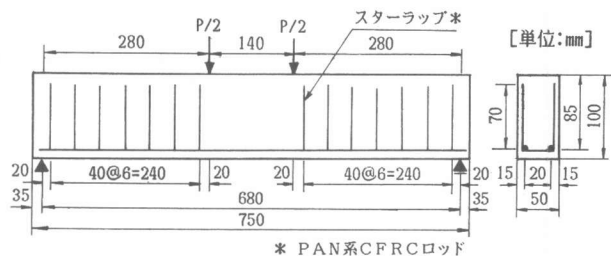
棒状に成形した。成形したロッドは、1日間空中養生の後、材令7日まで20±2℃の水中養生を行った。その後、CFRCロッドの中央部にワイヤストレーンゲージを防水処理を行って貼り付けた。CFRCロッドの直径、ロッド中の炭素繊維の混入率および供試体中の炭素繊維の総断面積とコンクリートの総断面積の比率（以下、繊維比と称す。）は、表一2の通りである。含浸用セメントにグラウトセメントを用いると、所

表一2 CFRCロッドの諸元

供試体	繊維の種類	平均直径(mm)		繊維混入率(%)		総断面積 (cm ²) Acf	換算断面積 (cm ²) Acf(Ecf/Es)	Acf/bh ×100(%)
		N-C ¹⁾	G-C ²⁾	N-C	G-C			
A-1	PAN系	5.5	4.9	2.3	2.9	0.0106	0.0116	0.021
A-2		7.7	5.2	2.3	5.0	0.0212	0.0232	0.042
A-3		8.6	6.7	2.7	4.5	0.0318	0.0348	0.063
A-4		11.7	7.2	2.1	5.2	0.0424	0.0464	0.085
A-4S ³⁾		—	7.2	—	—	5.2	0.0424	0.0464
B-1	ビッチ系	7.6	5.6	6.4	13.1	0.0577	0.0104	0.115
B-2		9.1	5.6	6.7	17.6	0.0865	0.0157	0.173
B-3		9.9	6.2	7.5	19.1	0.1154	0.0209	0.231
B-4		11.4	7.2	7.0	17.7	0.1442	0.0261	0.289
S-1	鉄筋 ⁴⁾	6				0.5652		1.130

1)普通セメント、2)グラウトセメント、3)せん断補強材配置、4)降伏点応力度3800kgf/cm²、Acf:炭素繊維の総断面積、Ecf:炭素繊維の弾性係数、Es:鉄筋の弾性係数、bh:コンクリートはりの総断面積

定数の炭素繊維を集束したロッドの平均直径が普通セメントを用いた場合の60%~90%と減少することができた。CFRCロッドは、いずれのはり供試体とも2本配置した。CFRCロッド中の炭素繊維の総断面積をはりの断面積で除した値は、表一2に示すように、0.02%~0.29%であり、鉄筋の1.1%に対して少量であった。また一部の実験には、せん断補強材として、軸方向補強材と同様にPAN系繊維（12000本）にグラウトセメントを含浸させたものも作製した。



図一1 断面諸元および荷重方法

はり供試体の寸法は、高さが10cm、幅が5cm、長さが75cmである。はり供試体の作製は、まず型枠底部にコンクリートを厚さ2cm程度敷き、この上にCFRCロッドあるいは比較のための鉄筋を図一1に示すように有効高さが8.5cmとなるように配置した後、残りのコンクリートを打込んで仕上げた。せん断補強材の間隔は、はり有効高さの1/2以下として、図一1に示すように配置した。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、φ10×20cmの円柱供試体も作製した。円柱供試体は材令2日、はり供試体は材令1日でそれぞれ脱型し、材令7日まで20±2℃の水中養生を行った。

はり供試体の曲げ試験は、材令7日において、図一1に示すような位置における2点荷重で行った。同時に、供試体の表面およびロッドに貼付したワイヤストレーンゲージによって、ひずみを測定した。さらに中央部の荷重-たわみ曲線をX-Yレコーダーによって記録した。

3. 曲げひびわれ状態および曲げひびわれ発生モーメント

炭素繊維量が多い場合の、曲げひびわれ状態の例を図一2に示す。曲げひびわれは、まず曲げモーメントが最大の区間に発生し、図のように圧縮側に発達した。その後、PAN系繊維を用いたはりA-4の場合には、いずれの含浸用セメントを用いても、図一2a)に示すように斜めひびわれが発生し、このひびわれの発達によってせん断破壊した。しかし、炭素繊維にセメントペーストを含浸させて造ったせん断補強材を配置したはりA-4Sの場合には、図一2c)に示すように斜めひびわれが発生して少し発達したが、最終破壊は軸方向補強材の切断に

より曲げ破壊した。

ピッチ系繊維を用いたはりB-4では、含浸用セメントにグラウトセメントを用いた場合は、斜めひびわれによってせん断破壊した。そして、普通セメントを用いたはりB-4の場合には、斜めひびわれは発生せず、図-2b)に示すように破壊近くになって、軸方向補強材に沿うひびわれが発生した。しかし、はりの破壊は、ロッドの切断による曲げ破壊であった。これら以外のはりは、いずれとも、CFRCロッドの切断による曲げ

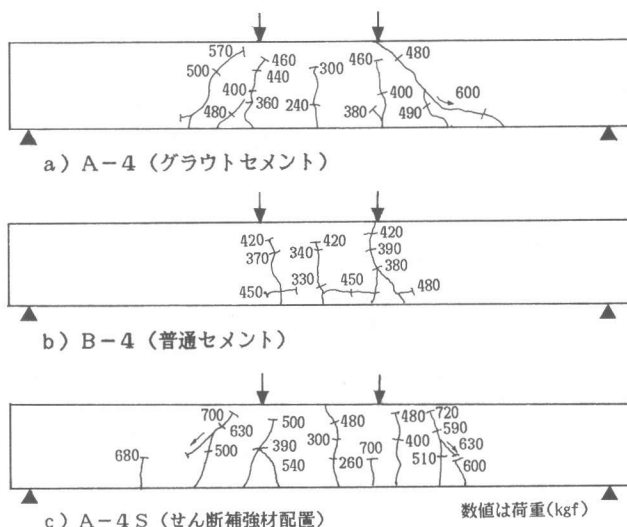


図-2 はりのひびわれ状態

破壊であった。曲げ破壊した場合の破断面を観察した結果、いずれのはりでも炭素繊維はほぼ一様に切断され、コンクリートとロッドとのずれは認められなかった。

曲げひびわれ発生モーメントを表-3にまとめて示す。曲げひびわれ発生モーメントは、コンクリートの引張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。曲げひびわれ発生モーメントは、炭素繊維量が多くなると補強しないはりより少し大きくなる場合もあるものの、各供試体ともほぼ等しい値を示している。いずれにしても、CFRCロッドによる曲げひびわれ発生モーメントの増加は、ほとんど期待できないと考えられる。

4. 破壊曲げモーメント

破壊曲げモーメントの実測値と計算値も、表-3に示している。破壊曲げモーメントの計算値は、コンクリートの応力-ひずみ状態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、曲げ引張破

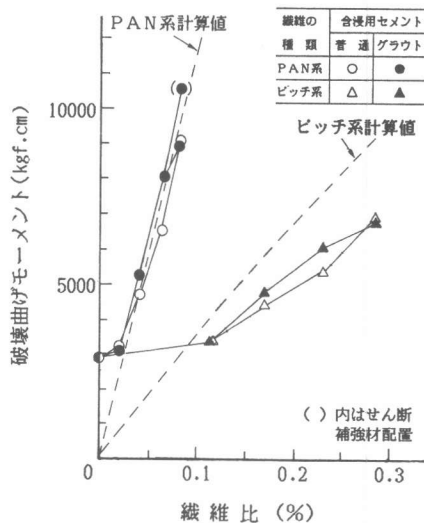
表-3 曲げひびわれ発生モーメント、破壊曲げモーメント、斜めひびわれ発生時のせん断応力度および曲げタフネス比

供試体	曲げひびわれ発生モーメント(kgf.cm)		破壊曲げモーメント(kgf.cm)			せん断応力度(kgf/cm ²)*				曲げタフネス比		
			実測値**		計算値	実測値**		計算値				
	N-C	G-C	N-C	G-C			N-C	G-C	総断面積	換算断面積	N-C	G-C
補強なし	2839		2839			2.4				1		
A-1	3010	3010	3318	3157	2652	2.8	2.7	3.0	3.1	3	9	
A-2	2940	2765	4739	5264	5202	4.0	4.4	3.8	3.9	35	60	
A-3	3018	2940	6538	8078	7651	5.5	6.8	4.4	4.5	61	140	
A-4	3018	2940	9135S	8869S	9999	(6.3)7.7S	(5.8)7.5S	4.8	5.0	143	150	
A-4S	—	3290	—	10647	9999	—	(7.4)8.9	4.8	5.0	—	179	
B-1	2870	2730	3444	3430	4048	2.9	2.9	5.5	3.0	10	11	
B-2	3010	2940	4459	4851	5982	3.7	4.1	6.1	3.5	15	47	
B-3	3080	3010	5411	6188	7855	4.5	5.2	6.7	3.8	60	93	
B-4	3150	2940	7000	6895S	9688	5.9	(5.3)5.8S	7.2	4.1	93	108	
S-1	3360		18200			15961	15.3		11.4		74***	

* せん断応力度の計算には有効断面(bd)を用いた。()内は斜めひびわれ発生時
 ** せん断破壊したのものには、実測値の後に S印を付記した。それ以外は曲げ破壊した。*** 鉄筋降伏時

壊するとして求めた。この時のコンクリートの圧縮強度は、 241kgf/cm^2 であった。表一3の値について、破壊曲げモーメントと繊維比との関係をプロットしたのが図一3である。図中には計算値も破線で一緒に示している。

図一3から、破壊曲げモーメントは、繊維量の増加にともなって、いずれの含浸用セメントを用いても増加すること、および含浸用セメントにグラウトセメントを用いると、いずれの繊維の場合も普通セメントを用いた場合より破壊曲げモーメントは大きくなることが認められる。グラウトセメントを用いると、普通セメントの場合より炭素繊維への含浸および成形とも作業が容易であり、炭素繊維への含浸状態および繊維の配列状態が良好だったことと、グラウトセメントはブレン



図一3 破壊曲げモーメントと繊維比の関係

値が大きいことから、水和反応速度が早いことなどのためと思われる。なお、はりA-4およびはりB-4の場合の破壊曲げモーメントは、グラウトセメントを用いても、普通セメントを用いた場合と、それぞれがほぼ同じ値を示している。これは、先に述べた破壊形式の相違のためである。

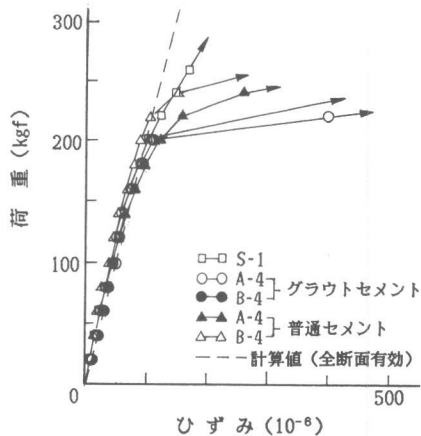
鉄筋を用いたはりS-1の破壊曲げモーメントは、計算値より実測値の方が大きくなっている。そして、PAN系繊維を用いたはりの破壊曲げモーメントの実測値は、計算値の90~120%を示している。これに対して、ピッチ系繊維を用いたはりの場合には、実測値は計算値の70~90%を示しているにすぎない。この理由としては、先にも述べたように、CFRCロッドを作製する時にPAN系繊維の方がピッチ系繊維に比べて、繊維の直径が細くて作製しやすく、繊維の配列や繊維への含浸状態が良好だったことが挙げられる。

ピッチ系繊維に限らず、PAN系繊維を用いた場合においても、破壊曲げモーメントの実測値は計算値より小さい場合が多くなっている。先に述べた原因の他に、繊維の配列が必ずしも整っていないことが理由として挙げられると思われる。今後さらに検討を進めたい。

5. CFRCロッドのひずみ

炭素繊維量が多いはりについて、荷重とCFRCロッドのひずみとの関係を図一4および図一5に示す。図一5中には、表一2に示した炭素繊維の総断面積を用いて、鉄筋コンクリートの場合と同様にして弾性計算した値を、破線で一緒に示している。コンクリートの弾性係数は、 $2.34 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ であった。

荷重が小さい場合のCFRCロッドのひずみは、図一4に示すように、曲げひびわれが発生するまでは、いずれのはり供試体とも全断面を有効とし



図一4 低荷重時の補強材のひずみ

て計算した弾性計算値にほぼ一致している。曲げひびわれが発生すると、繊維量が多い場合でも、図-5に示すようにロードのひずみは、各はりとも相当大きく増加する。そして、弾性計算値を越えてロードが破壊するか、あるいは弾性計算値に近づく以前、あるいはその直後にロードの切断によって破壊した。

CFRCロードの最終ひずみは、含浸用セメントにグラウトセメントを用いた場合の方が大きかった。

このような現象は、炭素繊維量の少ない場合もほぼ同様であった。CFRCロードは、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。炭素繊維を合成樹脂で成形して用いた場合ははりの補強材のひずみは、鉄筋コンクリートの場合と同様に計算できることが報告されている³⁾。しかしながら、本研究のように、セメントペーストを用いた場合については、今後CFRCロード自体の性状と併せての検討が必要である。

図-6には、ピッチ系繊維を用いたはりの荷重とたわみとの関係を示す。最大荷重時のたわみ量は、繊維量の増加にともなって増加すること、および繊維量の多いはりのたわみを示した図-7より、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に比べて、同一荷重に於けるたわみの大きいことが、いずれのはりについても認められる。

6. せん断耐力および曲げタフネス

表-3には、はりの破壊時あるいは斜めひびわれ発生時のせん断応力度を示す。計算値は、繊維の総断面積 A_{cf} を鉄筋の断面積と仮定した場合および炭素繊維の弾性係数 E_{cf} を考慮した換算断面積 $(A_{cf}(E_{cf}/E_s))$ を鉄筋の断面積と仮定した場合⁴⁾のそれぞれについて、土木学会コンクリート標準示

方書設計編 (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。

PAN系繊維を用いた場合の実測値は、破壊時および斜めひびわれ発生時ともに計算値より一般に大きくなっている。こ

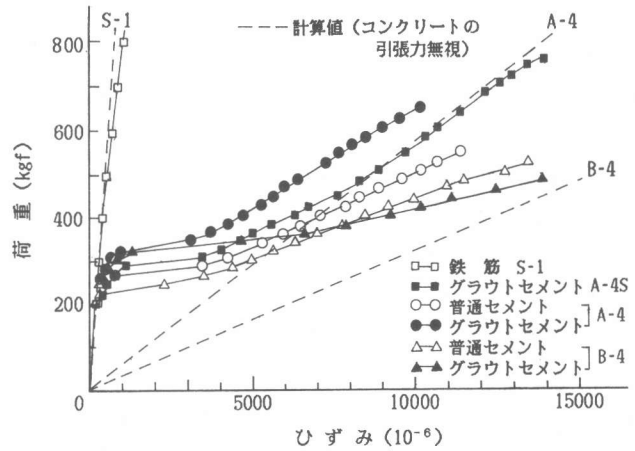


図-5 補強材のひずみ

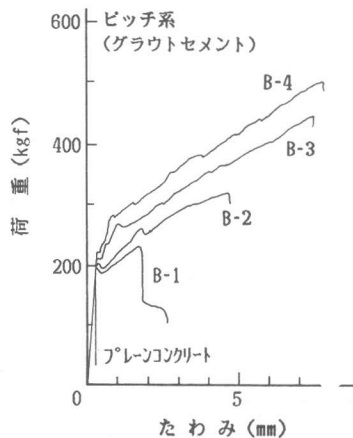


図-6 荷重-たわみ曲線

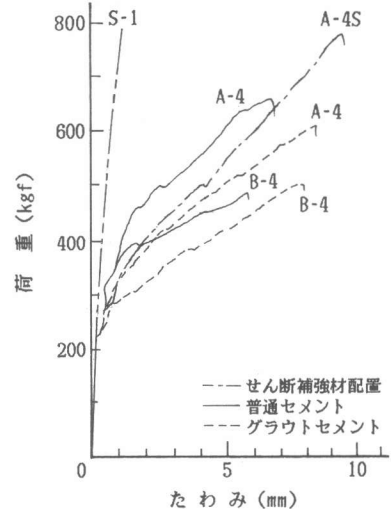


図-7 たわみに及ぼす含浸セメントの影響

れに対してビッチ系繊維を用いた場合は、いずれも実測値は計算値よりも小さいが、総断面積よりも弾性係数を考慮した換算断面積を用いた場合の計算値に近い値を示している。

はりの最大荷重時までの荷重-たわみ曲線下の面積として求めた曲げタフネスと、補強しない場合のそれとの比を、表-3に曲げタフネス比として示している。横軸に繊維比を採って、表の値をプロットしたのが図-8である。図から、グラウトセメントを用いると、普通セメントの場合に比べ、いずれの繊維の場合も曲げタフネスの大きいことが認められる。このことは、図-7からも予測される。

7. 結論

連続炭素繊維にセメントペーストを含ませて棒状に造ったCFRCロッドで補強したコンクリートはりの強度実験を行い、はりの曲げおよびせん断性状等について検討した。本研究により、次のことがいえる。

- 1) 含浸用セメントにグラウトセメントを用いると、炭素繊維の混入率を高めることができる。また、破壊曲げモーメント、CFRCロッドのひずみ、たわみおよび曲げタフネスは、普通セメントの場合より大きくなる。
- 2) PAN系繊維を用いた場合の破壊曲げモーメントの実測値は、RCと同様にして求めた計算値にかなり近い値が得られる。しかし、ビッチ系繊維を用いた場合の実測値は計算値に比べて小さくなり、さらに検討が必要である。
- 3) CFRCロッドは、炭素繊維自体の破壊ひずみより小さい値で破壊した。
- 4) はりのせん断耐力は、PAN系繊維を用いた場合は、RC示方書に示されている算定式を用いて求めた計算値より大きい。ビッチ系繊維の場合には、計算値より小さく、換算断面積を用いた計算値に近い値を示した。
- 5) 繊維量の多いはりに、CFRCロッドをせん断補強材として配置することにより、破壊形式をせん断破壊から、CFRCロッドの切断による曲げ破壊に変えることができた。

本研究の実施の際には、群馬高専卒業生の須藤直行、楠木栄作両君の協力を得ました。ここに謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 小林一輔、趙 力采、神古正弥：繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究、第6回コンクリート工学年次講演論文集、1984、pp.369~372
- 2) 山本邦夫、大橋清一、大即信明：CFRPロッド使用アンボンドPCブロック梁及びプレテンション梁の曲げ実験、コンクリート工学年次論文報告集 第9巻 第2号、1987、pp.501~506
- 3) 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、1987、pp.269~274
- 4) 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10巻 第3号、1988、pp.547~552
- 5) 古川 茂、辻 幸和、大谷杉郎、小島 昭：連続炭素繊維で補強したモルタルの力学的特性、コンクリート工学年次論文報告集 第9巻 第1号、1987、pp.453~458
- 6) 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、1988、pp.471~474

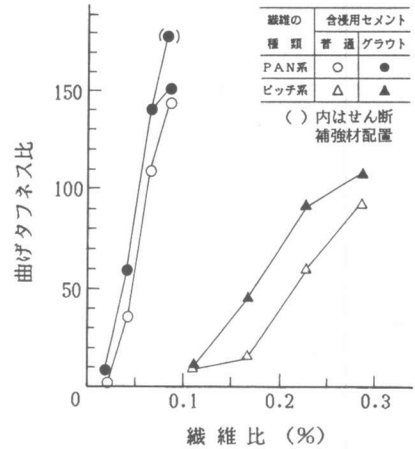


図-8 曲げタフネス比と繊維比の関係