

論文

[1175] CFRCロッドの引張強度試験方法

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

モルタルやコンクリートの補強材として連続炭素繊維を用いる場合には、作業性や強度の観点から、連続炭素繊維に合成樹脂を含浸させて成形したものを利用する機会が多い。筆者らは、合成樹脂の代わりに、セメントペーストを含浸させて棒状に成形したCFRCロッドをはりの補強材に使い、はりの曲げ性状やせん断性状への補強効果について報告してきた^{1)~4)}。このような補強効果の定量化においては、CFRCロッドの引張性状を十分に把握した検討が必要になるものの、CFRCロッド自体の引張性状については、その試験が困難なため、まだ検討するに至らなかった。このためには、どのようなロッドの形状寸法および定着方法を用いて引張強度試験を行うのが適切かを検討することが必要と考えられる。

本研究では、棒状に造ったCFRCロッドに純引張力を作用させて試験するに適切なロッドの形状寸法および定着方法の選定、ならびに、ロッドのひびわれ発生荷重、切断荷重およびびりずみなどについて実験した結果を報告する。さらに、CFRCロッドの作製に用いるセメントの種類の影響についても検討する。

2. 実験方法

2.1 使用材料

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) の他に、炭素繊維の間隙への含浸を容易にし、CFRCロッドの断面積を減ずることを目的として、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。さらに、グラウトセメントを用いる場合には、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セメントの重量の1%添加した。

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 ⁹ 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

表-2 CFRCロッドの諸元

供試体	繊維の種類	繊維の本数	平均直径(mm)		繊維含有率(%)		備考
			N-C ¹⁾	G-C ²⁾	N-C	G-C	
A-G1 A-G2	ビッチ系	12000 24000	7.5 9.6	6.5 8.1	6.5 8.0	8.7 11.2	A供試体
A-H1 A-H2	PAN系	12000 24000	4.3 6.0	4.0 4.9	3.6 3.6	4.2 5.6	
B-G1 B-G2 B-G3	ビッチ系	12000 24000 30000	8.0 9.5 10.8	5.1 8.1 8.9	5.7 8.1 7.9	14.1 11.2 11.6	B供試体
B-H1 B-H2 B-H3	PAN系	12000 24000 36000	5.9 7.2 8.2	4.6 5.5 6.6	1.9 2.6 3.0	3.2 4.5 4.7	

1)普通セメント、2)グラウトセメント

2.2 CFRCロッドの作製および引張強度試験方法

CFRCロッドは、所定本数の炭素繊維に水セメント比が50%の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日間室内で空中養生の後、材令28日まで $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生を行った。CFRCロッドの直径、ロッド中の炭素繊維の含有率および炭素繊維の本数は、表-2の通りである。

繊維とセメントあるいは繊維と合成樹脂を用いた複合材の引張強度試験には、これまで図-1の例^{5)~8)}に示すような形状寸法の供試体以外に、コンクリート工学協会の基準方法(JCI-SF8⁹⁾)や図-2a)と同形状¹⁰⁾のものなどが用いられている。供試体の形状寸法は、部材の形状ならびに使用する繊維やマトリックスの種類などにより異なり、CFRP(例えばASTM D3039)以外については明確な基準等はこれまでのところ見受けられない。

そこで、CFRCロッドの引張強度試験を、図-2に示すようなCFRCロッドの端部に定着部を設けたA供試体およびB供試体の2種類を用いて行った。A供試体は、定着部に水セメント比が50%

のセメントペーストを用い、B供試体では、セメントペーストの代わりに、引張強度が $500 \sim 800 \text{kgf/cm}^2$ で圧縮強度が $800 \sim 1000 \text{kgf/cm}^2$ のエポキシ樹脂を用いた。引張強度試験の際には、ロッドの中央部に貼り付けたワイヤストレインゲージによりひずみを測定した。

3. ひびわれ発生時の引張応力度

CFRCロッドの作製にグラウトセメントを用いると、表-2に示したように、普通セメントを用いた場合に比べてロッドの直径を15~20%細くすること、また、ロッド中の繊維含有率を40~70%高めることができた。グラウトセメントは、普通セメントに比べて粒径が小さく、

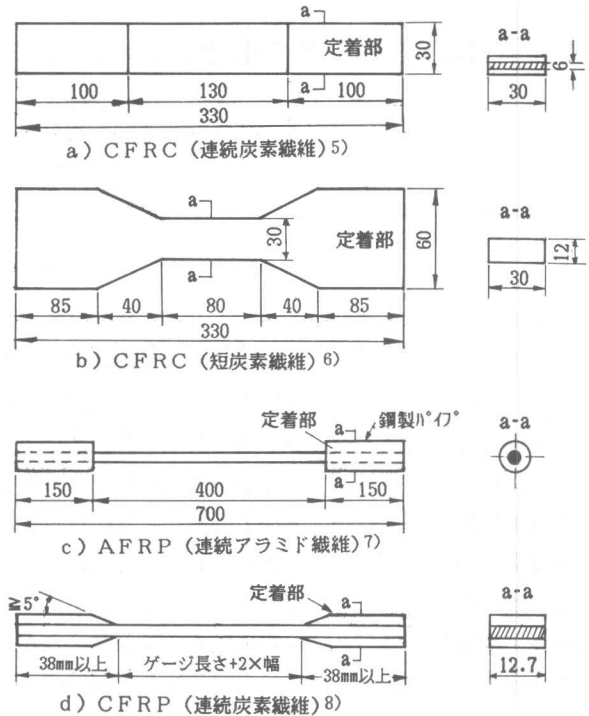


図-1 供試体の形状寸法の例 (単位:mm)

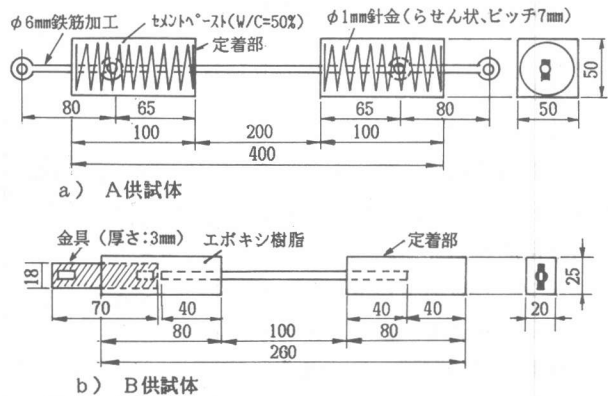


図-2 供試体 (単位:mm)

これを用いると繊維間へのセメントペーストの含浸や成形作業を容易にすることができたためである。

CFRCロッドのひびわれ発生時の引張応力度および切断荷重の実測値を表-3に示す。ロッドのひびわれ発生時の引張応力度は、ひずみの測定値が急変した場合の引張荷重をロッドの総断面積で除して求めた。図-3には、表-3中に示したB供試体の場合について、ロッドのひびわれ発生時の引張応力度を繊維の本数との関係で示す。

グラウトセメントを用いると、先に述べたように普通セメントを用いた場合より直径が細いため、ロッドの総断面積で除したひびわれ発生時の引張応力度は、一般に普通セメントを用いた場合より大きくなっている。そして、セメントの種類による引張応力度の差は、ビッチ系繊維よりPAN系繊維を使用した場合が大きくなっている。PAN系繊維の場合は、繊維の含有率が表-2に示したようにビッチ系繊維の場合より少なく、セメントペーストの影響が大きいと考えられる。

繊維の本数を増加させると、ひびわれ発生時の引張応力度は、同程度かむしろ低下する傾向が認められる。しかしながら、ビッチ系繊維と普通セメントあるいはPAN系繊維とグラウトセメントを用いた場合には、繊維の本数を12000本から24000本に増加すると、ひびわれ発生時の引張応力度は増加している。

この原因は、繊維の本数が少ないにもかかわらず、いずれの繊維を用いた場合も他に比べてロッドが太く成形されたことにより、セメントペーストの負担分が大きく、結果として繊維量の少ない表-3に示す普通セメントを用いたB-G1あるいはグラウトセメントを用いたB-H1供試体の引張応力度が、他に比べて低くなったためと考えられる。

これらのことから、ロッドの直径を太くするとCFRCロッドのひびわれ発生荷重は低下することが確かめられた。また、セメントの種類が異なることによるひびわれ発生荷重への影響は、ビッチ系繊維より繊維の直径の細いPAN系繊維を用いた場合が大きいことが明らかになった。

表-3 ひびわれ発生時の引張応力度および切断荷重

供試体	ひびわれ発生時の引張応力度** (kgf/cm ²)		切断荷重				実測値計算値 (%)	備考	
	N-C	G-C	***計算値 (kgf)	実測値(kgf)		N-C			G-C
				N-C	G-C				
A-G1	159	151	245	120	152	49	62	A 供試体	
A-G2	125	173	490	168	162	34	33		
A-G2*		227	490		283		58		
A-H1	300	346	159	112	107	70	67		
A-H2	321	420	318	131	199	41	63		
A-H2*	290		318	182		57			
B-G1	146	230	245	157	174	64	71	B 供試体	
B-G2	197	212	490	257	305	52	62		
B-G3	196	226	613	294	375	48	61		
B-H1	270	276	159	133	164	84	103		
B-H2	243	346	313	223	297	70	93		
B-H3	221	303	477	310	407	65	85		

*ロッドに定着部を設けず、直接引張強度試験を行った。
 **ひびわれ発生時の引張応力度は、ひびわれ発生荷重をロッドの総断面積で除して求めた。
 ***計算値は、繊維の総断面積に繊維の引張強度を乗じて求めた。

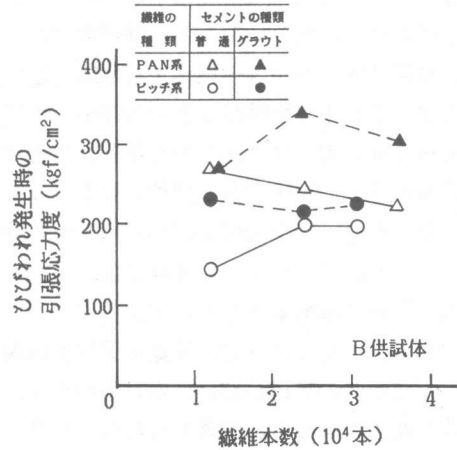


図-3 ひびわれ発生時の引張応力度と繊維本数の関係

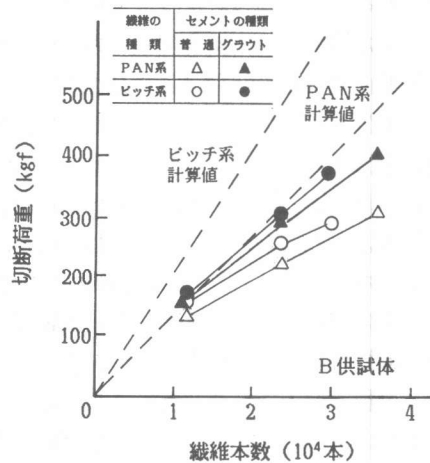
4. CFRCロッドの破壊状態および切断荷重

表一3中には、切断荷重の実測値および表一1に示した繊維の引張強度に繊維の総断面積を乗じて求めた切断荷重の計算値も一緒に示している。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に比べて、切断荷重は一般に20~30%大きくなっている。普通セメントに比べてCFRCロッドの作製が容易で、セメントペーストの含浸状態が良好なためと考えられる。

繊維量が少ない場合は、A、Bいずれの供試体を用いても、ロッドは中央部付近で切断した。しかしながら、繊維量が多くなると、定着部にセメントペーストを用いたA供試体の場合は、いずれのセメントを用いてもロッドと定着部との間で切断するが多かった。セメントペーストの引張強度が20kgf/cm²程度と小さかったため、加工鉄筋とロッドの接合部の定着部において加力方向に直角にひびわれが発生して切断して破壊する場合もあった。このため、切断荷重は、表一3中で*印を付記してあるロッドに定着部を設けずに直接引張試験を行った場合よりも小さくなった。なお、直接引張試験を行う方法では、ロッドは引張によって切断する前に、ロッドを固定する部分でそれ自体が破壊した。

B供試体を用いた場合には、繊維量が多くても、定着部が破壊することはなかったものの、普通セメントを用いたB-G2, B-H2, B-H3およびグラウトセメントを用いたB-H3は、CFRCロッドと定着部との間で切断した。繊維量が多くなると、B供試体の方がA供試体より切断荷重が大きいの、このような破壊状態の相違のためである。

図一4は、表一3に示したB供試体における切断荷重の値を、繊維本数と関連させてプロットしたものである。図中の破線は切断荷重の計算値を示している。図からは、切断荷重は繊維の本数の増加とともに増加すること、およびロッドに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てロッドの直径が細いにもかかわらず、切断荷重が大きくなることが認められる。グラウトセメントを用いた場合に切断荷重が大きいの、先に述べたセメントペーストの含浸状態が良好だったためと思われる。



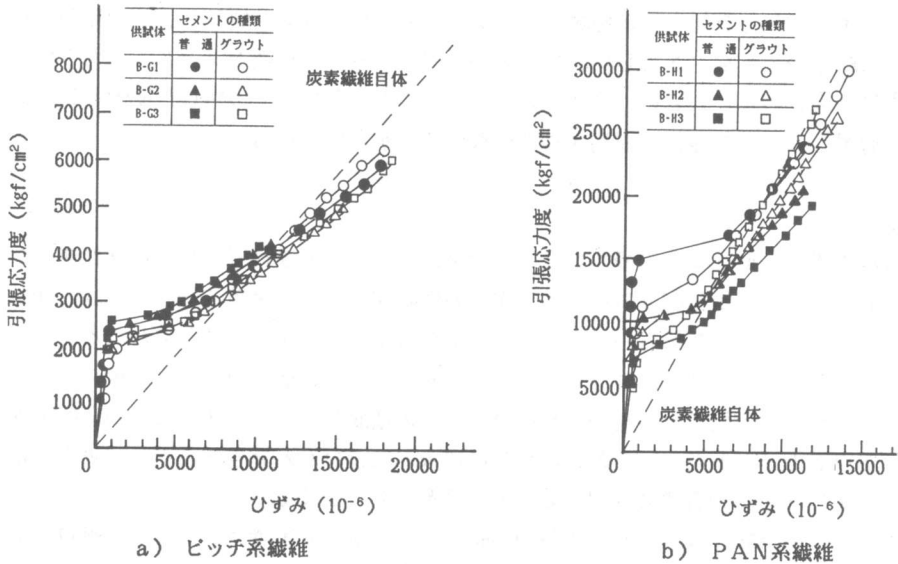
図一4 切断荷重と繊維本数の関係

切断荷重の実測値は、一般に計算値より小さくなっている。繊維の本数が増加すると、実測値と計算値との比率は、いずれの繊維およびセメントを用いてもやや低下している。

グラウトセメントを用いた場合の実測値は、ビッチ系繊維を用いた場合が計算値の61~71%、PAN系繊維を用いた場合が85~103%である。これに対し、普通セメントを用いた場合には、計算値のビッチ系繊維で48~64%、PAN系繊維で65~84%と、グラウトセメントを用いた場合より小さくなった。この中で、PAN系繊維にグラウトセメントを用いた場合には、計算値の80%以上の実測値が得られた。

5. CFRCロッドの応力-ひずみ曲線

図一5には、B供試体についての引張応力とひずみの関係を示す。図中には、表一1に示し



a) ビッチ系繊維

b) PAN系繊維

図-5 CFRCロッドの引張応力-ひずみ曲線 (B供試体)

た炭素繊維自体の応力とひずみの直線関係を破線で示している。いずれの繊維およびセメントを用いても、CFRCロッドの応力-ひずみ曲線は図-5のように2直線で近似される。この原因は、荷重が小さい場合は、CFRCロッド中にマイクロクラックは発生するが、セメントペーストと炭素繊維とが一体となって荷重を負担しているため、ひずみの増加は少ない。しかし、荷重が大きくなり、CFRCロッドにひびわれが発生すると、セメントペーストによる荷重の負担は大きく減少し、主に炭素繊維が引張荷重を負担ようになる。このため、ロッドのひずみは一時的に大きく増加

し、その後は荷重の増加とともに徐々に増加すると考えられる。このことは、切断荷重の計算値の40%程度までの荷重で引張試験を行い、その後に除荷して再度引張試験を行った場合の応力-ひずみ曲線を示した図-6のように、ひずみの増加が直線的であることから予測される。

ビッチ系繊維を用いた場合は、同一の引張応力度におけるロッドのひずみは、繊維の本数が異なっても、図-5 a)のように比較的近い値を示している。しかし、PAN系繊維を用いた場合には、図-5 b)のように繊維量やセメントの種類により異なっている。その中でも、繊維の本数が少ないB-H1の供試体の場合には、同一の引張応力度でも他の場合と相当異なっている。先にも述べたように、ロッド中の繊維含有率が他に比べて小さいことから、セメントペーストの部分が引張剛性に及ぼす影響が大きいと思われる。

CFRCロッドは、ひずみの実測値が炭素繊維自体の直線に近づきその値を越えてから、一

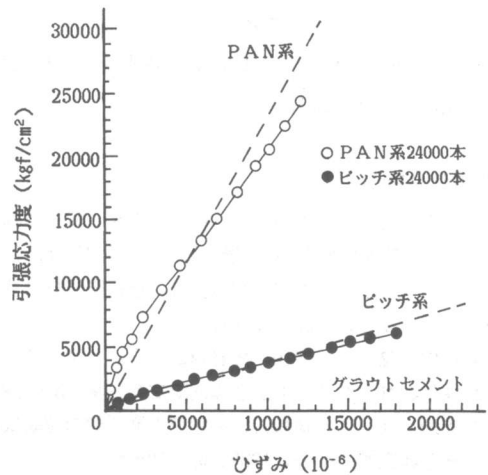


図-6 引張応力-ひずみ曲線 (再載荷)

般に表一1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。この傾向はピッチ系の炭素繊維を用いた場合が著しい。ロッドの最終ひずみは、普通セメントよりグラウトセメントを用いた場合の方が大きい。CFRCロッドが小さなひずみで破壊した原因としては、炭素繊維が必ずしもすべて並行に配列されていないことが挙げられる。

6. 結論

連続炭素繊維にセメントの種類を変えたセメントペーストを含浸させて棒状に造ったCFRCロッドについて、引張強度試験を行う場合の供試体の形状や定着方法、ならびに切断荷重やひずみ性状などについて検討した。本研究により、次のことがいえると思われる。

- 1) CFRCロッドの作製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に比べてロッドの作製が容易で、繊維の含有率やロッドの切断荷重を高くすることが可能である。
- 2) グラウトセメントを用いると、CFRCロッドのひびわれ発生時の引張応力度はロッドの総断面積が小さいため普通セメントを用いた場合より大きくなる。
- 3) セメントの種類がひびわれ発生時の引張応力度に及ぼす影響は、ピッチ系繊維の場合より繊維の直径の細いPAN系繊維を用いた場合が大きい。
- 4) CFRCロッドの応力-ひずみ曲線は2直線で近似され、ロッドは繊維自体の最終ひずみより一般に小さいひずみで破壊した。
- 5) CFRCロッドにエポキシ樹脂と金具で定着部を設ける方法は、引張強度試験として有用な方法の一つである。

[参考文献]

- 1) 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
- 2) 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の曲げ性状、セメント技術年報 42、1988、pp.471~474
- 3) 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、1989、pp.849~854
- 4) 古川 茂、辻 幸和、大谷杉郎：異種類の連続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、1989、pp.548~553
- 5) 秋浜繁幸、末永龍夫、坂野正：炭素繊維補強コンクリートの実験的研究(その1) -CFRCが引張応力を受けた場合の挙動について-、鹿島建設研究所報告第29号、1981、pp.81~88
- 6) 秋浜繁幸、末永龍夫、中川裕章、鈴木清孝：炭素繊維補強セメント複合材(CFRC)の力学的性質、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、pp.445~448
- 7) 岡本 直、谷垣 正治、松原澄行：アラミド繊維による組紐状棒材の研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和62年度、pp.529~530
- 8) 松井醇一：炭素繊維の展開と評価方法、リアライズ社、1989、pp.318~330
- 9) 平居孝之、友沢史紀、秋浜繁幸、石井義郎：GRCの引張試験における載荷方法と試験体寸法、第5回コンクリート工学年次講演会論文集、1983、pp.25~28
- 10) 山田 隆、山田寛次、林 隆介、高野良広：炭素繊維強化セメント(CFRC)に関する研究(その1) -炭素繊維とセメント系材料との界面接着力向上-、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989、pp.727~728