

[1080] 連続炭素繊維で補強したモルタルの力学的特性

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

炭素繊維補強セメント (CFRC) については、すでにセメントペーストまたはモルタルのマトリックス中に短炭素繊維を二次元あるいは三次元にランダムに配向させる方法により、曲げ強度や曲げタフネスを著しく改善できるなどの良好な研究成果が報告されている [1] ~ [3]。また、連続炭素繊維を一次元に配置させたCFRCの力学的特性についても研究されている [4] ~ [6]。CFRCの作製方法やその性状は、当然ながら、繊維の種類や品質、配置方法、混和材料の種類などによって相当に相違する。今後のコンクリートへの炭素繊維の利用という見地からすれば、その使用量や配置方法を考慮したCFRCの力学的特性についての検討も必要と思われる。

本研究は、炭素繊維の使用量の減少に有効と思われる連続炭素繊維を用い、この形態を変えてモルタル中に集中配置した連続炭素繊維補強モルタルを作製し、その曲げ強度、破壊曲げモーメントおよび曲げタフネスについて実験した結果を報告するものである。さらに炭素繊維の種類および供試体の寸法の影響についても検討した。

2. 実験の概要

1) 使用材料

炭素繊維は、表-1のような性質をもつA社製のPAN系およびF社製のピッチ系の連続繊維をそれぞれ用いた。炭素繊維の形態は、写真-1に示すように、連続繊維をそのまま束状にしたもの (以下束と呼ぶ)、束を幅10mm程度に広げて帯状にしたもの (以下帯と呼ぶ) および束を幅40mm程度に広げて布状にしたもの (以下布と呼ぶ) の3種類を用いた。炭素繊維の容積混入率 V_f は、PAN系の場合が 0.011, 0.22, 0.33および 0.44%、また、ピッチ系の場合が 0, 0.18, 0.36, 0.54および 0.72%の4種類とした。なお、一部の実験には0.26%も用いた。

セメントはC社製の普通ポルトランドセメントを、また、細骨材は豊浦標準砂をそれぞれ用いた。

2) 配合および供試体の作製方法

モルタルの配合は、水セメント比を 40%、砂セメント

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 ⁵ kgf/cm ²)	伸度 (%)
PAN系連続繊維	7.5	1.78	30000	23	1.3
ピッチ系連続繊維	18	—	8000	3.4	2.4

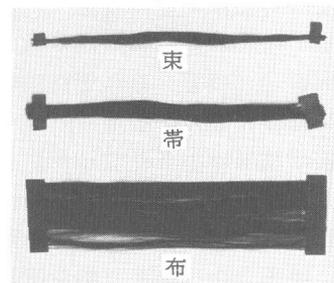


写真-1 炭素繊維の形態

比を 1.0 と一定にした。モルタルのフロー値は 170 ± 10 であった。供試体の作製は、まずモルタルを型枠底部に厚さ 1mm あるいは 2mm 程度に敷き、この上に、後で述べる方法によってあらかじめセメントペーストを含浸させておいた所定量の炭素繊維を、有効高さが 17mm あるいは 35mm と一定になるように配置し、最後にモルタルを補充して仕上げた。なお、供試体中の繊維の本数は、繊維の混入率が 0.1% 当り、後で述べる供試体 A の場合、PAN 系が 21800 本、ピッチ系が 3300 本、また供試体 B の場合には、PAN 系が 36900 本、ピッチ系が 6100 本である。

炭素繊維中へのセメントペーストの含浸方法は、繊維の本数を同一にした束、帯および布を水セメント比が 50% のセメントペースト中に浸し、手により繊維間の空げき部分を十分にセメントペーストで満たした後、それぞれの形態を整えて直ちに使用した。なお、帯および布の場合には、所定量になるまで積層させて用いた。それぞれの炭素繊維の形態とその配置状態の例を図-1 に示す。

曲げ試験用の供試体の寸法は、幅が 40mm、高さが 20mm、長さが 160mm（以下供試体 A と呼ぶ）、あるいは、幅が 40mm、高さが 40mm、長さが 300mm（以下供試体 B と呼ぶ）とした。また、モルタルの圧縮強度試験用として、 $\phi 5 \times 10$ cm の円柱供試体も用いた。いずれの供試体も材令 1 日で脱型し、以後曲げおよび圧縮試験の材令 7 日まで、 20 ± 2 °C の水中養生を行った。

3) 強度試験方法

曲げ試験は、荷重の増加速度を平均 5kgf/sec とし、供試体 A の場合はスパンを 100mm の中央点荷重で、また供試体 B の場合はスパン 220mm で、荷重位置を 85+50+85mm の 2 点荷重で、それぞれ行った。そして、同時に供試体中央部の荷重-たわみ曲線を記録した。モルタルの圧縮強度試験は、JIS R 5201 の方法に準じて行った。なお、これらの試験はそれぞれ 3 個の供試体について行った。

3. 曲げ強度および破壊曲げモーメント

供試体 A および供試体 B の曲げ強度と破壊曲げモーメントを、表-2 に示す。曲げ強度は、JIS R 5201 の算出方法を用いて求めた。破壊曲げモーメントの計算値は、モルタルの圧縮応力-ひずみ曲線を等価応力ブロックに、また炭素繊維の引張応力-ひずみ曲線は塑性領域を持たないとそれぞれ仮定し、曲げ引張破壊するものとして求めた。なお、供試体の有効高さは、繊維の形態によってやや異なっていたが、ここでは平均の有効高さを用いた。また圧縮強度は、モルタルの円柱供試体の強度 (420kgf/cm^2) を用いた。

表中の曲げ強度と繊維混入率との関係を示したものが図-2 である。供試体 A の場合、繊維の形態にかかわらず、一般に、繊維混入率が増加すると曲げ強度は増加している。そして、PAN 系の繊維の場合は繊維混入率が 0.22%、ピッチ系繊維の場合には繊維混入率が 0.54% で、それぞれ 200kgf/cm^2 程度の曲げ強度を示した。しかしながら、それ以上に繊維の混入率を増加しても、強度の増加は小さくなった。

PAN 系の繊維を用いた場合、曲げ強度はピッチ系の繊維を用いた場合に比べ大きな値を示している。そして、繊維の形態が、

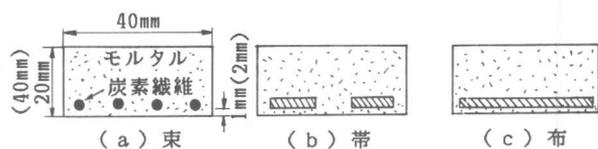


図-1 炭素繊維の形態および配置状態の例

帯、束、布の順に大きくなっている。

ピッチ系の繊維を用いた場合、繊維混入率が小さい範囲では、繊維の形態にかかわらず曲げ強度はほぼ同じ値を示した。これは、いずれの供試体も繊維の切断によって曲げ引張破壊したためである。しかしながら、布を用いた場合、炭素繊維の増加に伴う曲げ強度の増加の程度は、他の炭素繊維の形態に比べて小さい。そして、繊維混入率を0.54%に増加した場合には、モルタルと炭素繊維間の剝離によって破壊した。供試体Bの曲げ強度も図-2に示している。繊維混入率は、ピッチ系が0.36%、PAN系が0.26%である。PAN系の場合には、束として用いた場合が、他の形態に比べ曲げ強度は高くなった。この場合、束および帯はせん断破壊し、布は剝離によって破壊した(写真-2(a)、(b)参照)。ピッチ系の場合には、供試体Aと同様に曲げ破壊し、曲げ強度は同程度を示した。PAN系の炭素繊維を布および帯として用いる場合には、繊維の位置や積層方法をさ

表-2 曲げ強度および破壊曲げモーメント

(a) 供試体A

繊維の種類	Vf (%)	繊維の形態	曲げ強度 f_b (kgf/cm ²)	破壊曲げモーメント (kgf-cm)	
				実測値 M_u	計算値 M_{uc}
ピッチ系	0.18	束	84	225	202
		帯	85	225	
		布	98	260	
	0.36	束	113	302	394
		帯	126	335	
		布	122	325	
	0.54	束	189	502	575
		帯	189	502	
		布	137	365	
0.72	束	210	560	746	
	帯	237	633		
	布	178	475		
PAN系	0.11	束	160	425	504
		帯	144	383	
		布	184	490	
	0.22	束	273	728	939
		帯	213	568	
		布	295	785	
	0.33	束	318	850	1302
		帯	272	720	
		布	253	940	
	0.44	束	305	801	1592
		帯	320	844	
		布	374	1014	

(b) 供試体B

繊維の種類	Vf (%)	繊維の形態	曲げ強度 f_b (kgf/cm ²)	破壊曲げモーメント (kgf-cm)	
				実測値 M_u	計算値 M_{uc}
ピッチ系	0.36	束	110	1182	1476
		帯	94	1005	
		布	95	1016	
PAN系	0.26	束	229	2448	3881
		帯	201	2142	
		布	190	2027	

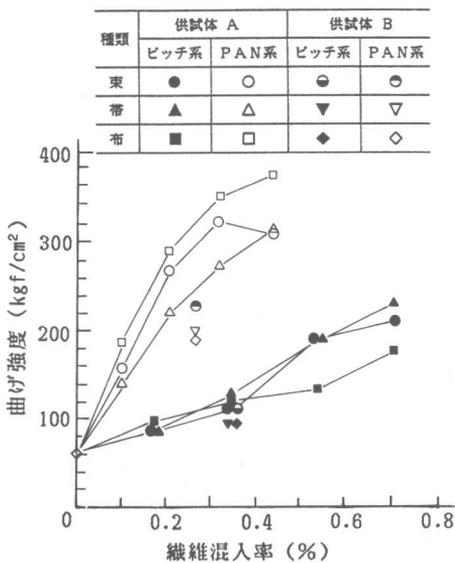
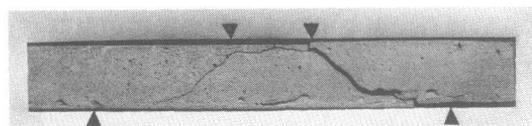
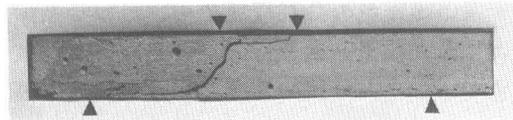


図-2 曲げ強度と繊維混入率の関係



(a) せん断破壊



(b) はく離破壊

写真-2 供試体Bの破壊状態 (PAN系)

らに検討することが必要である。

破壊曲げモーメントと繊維混入率との関係を図-3に示す。図中には、PAN系およびピッチ系の繊維を用いた場合の破壊曲げモーメントの計算値を、それぞれ破線および2点鎖線で一緒に示している。

図-3(a)に示す供試体Aでは、PAN系の繊維の場合、いずれの繊維の形態を用いても、実測値は繊維混入率が大きくなるにつれ計算値よりやや小さくなる。特に繊維混入率が0.22%以上になると、帯の場合は、他の繊維の形態に比べて相当に小さくなった。帯の場合は、同一の繊維量であっても、他の形態に比べて積層部分が厚くなりやすく、結果として有効高さが低くなったこと、および破壊が曲げ引張破壊とならなかったことが主原因と考えられる。また、束および布の場合には、繊維混入率が多くなると、破壊が曲げ引張破壊とならなかったことが、計算値と実測値のことなる原因と考えられる。ピッチ系の繊維の場合には、いずれの形態の繊維を用いても、繊維混入率が小さい範囲では、曲げ引張破壊し、その時の実測値は計算値に近い値を示している。

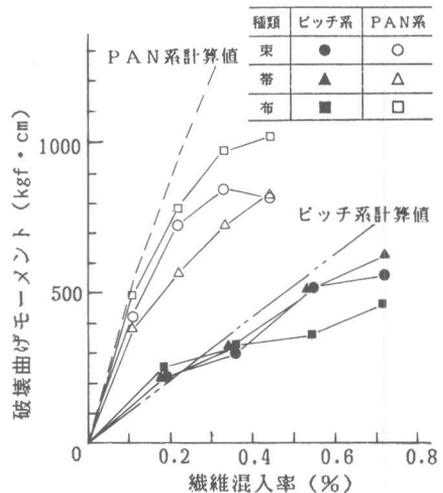
図-3(b)に供試体Bの場合を示している。いずれの場合も、計算値の方が実測値より大きくなり、ピッチ系の場合は、図-3(a)の供試体Aの場合よりその差が少し大きくなったが、PAN系の場合ほどの差はなかった。これらの結果から、本実験のように連続炭素繊維を用いて曲げ引張破壊する場合の破壊曲げモーメントは、鉄筋コンクリートと同様な算定方法によって求めることが可能と思われる。

4. たわみ

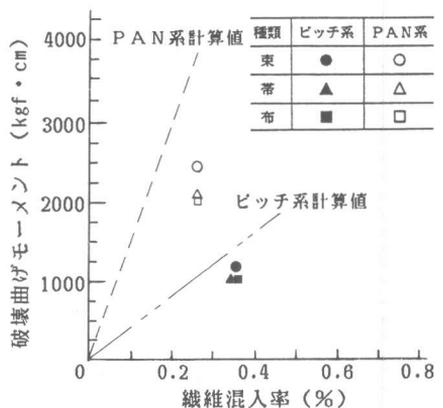
供試体AおよびBの荷重-たわみ曲線を、それぞれ図-4(a)および(b)に示す。PAN系の繊維混入率は、ピッチ系のものより少なくしている。

最大荷重点までのたわみ量を比較すると、いずれの供試体の場合も、たわみ量は炭素繊維の形態によって少し異なっている。すなわち、供試体Aの場合、束を用いると他の繊維の形態を用いた場合よりも最大荷重点のたわみは大きくなった。たわみ変形を期待する場合には、束としての使用が有効である。PAN系の場合には、ピッチ系の繊維量の2/3程度でも、ピッチ系の場合より最大荷重およびその点のたわみ量は大きな値を示した。繊維の強度差が4倍程度と高いためである。

5. 曲げタフネス



(a) 供試体A



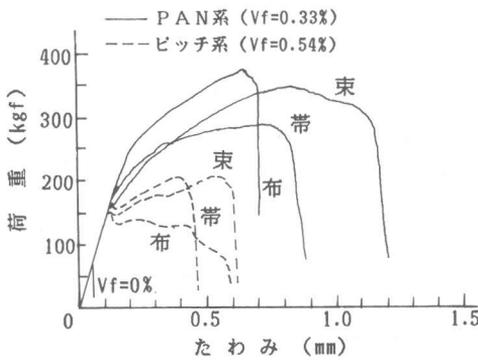
(b) 供試体B

図-3 破壊曲げモーメントと繊維混入率の関係

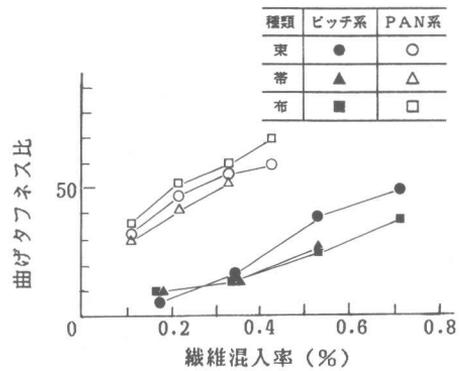
曲げタフネスは、その評価方法だけでなく、スパンや供試体の寸法などにより相違する。ここでは、日本コンクリート工学協会の「繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準」に準じて、スパンの 1/150 のたわみを生ずるまでの荷重-たわみ曲線下の面積として求める方法（JCI法と呼ぶ）と、最大荷重を生ずる点までの荷重-たわみ曲線下の面積として求める方法（最大荷重点法と呼ぶ）を用いた。

JCI法および最大荷重点法による場合の、炭素繊維を混入しないモルタルの曲げタフネスに対するCFRCのそれとの比を曲げタフネス比とし、これを図-5および図-6に示す。JCI法による図-5(a)の供試体Aの場合、曲げタフネス比は繊維混入率の増加に伴って増加する。PAN系の繊維を用いた場合、たわみ量は炭素繊維の形態によって相違したにもかかわらず、曲げタフネス比はほぼ同じ値を示した。

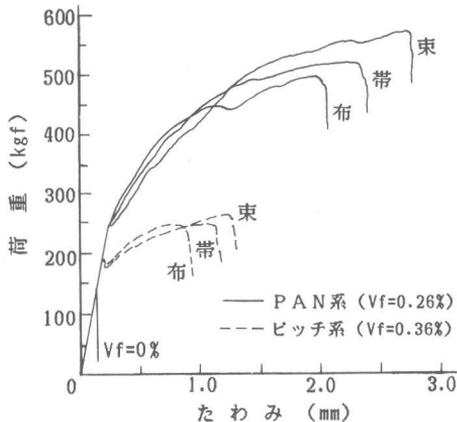
図-5(b)に最大荷重点法により求めた曲げタフネス比と炭素繊維混入率との関係を示している。ピッチ系の繊維を用いた場合には、図-5(a)のJCI法の場合とほぼ同じ程度の値を示している。しかしながら、PAN系の繊維を用いた場合には、JCI法に比べ、2~3倍程度の大きな値を示し、両者間に差異が認められる。このような傾向は、供試体Bの場合も同様となっている（図-6(a)、(b)参照）。これは、JCI法の場合には、スパンの1/150（図-4(a)の0.6mmあるいは図-4(b)の1.5



(a) 供試体A

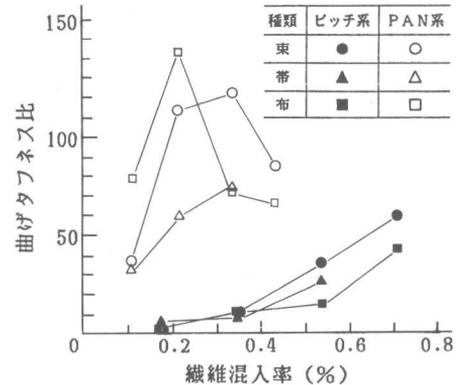


(a) JCI法



(b) 供試体B

図-4 荷重-たわみ曲線



(b) 最大荷重点法

図-5 曲げタフネス比 (供試体A)

mmに相当)以降のたわみが、曲げタフネスに影響していないためである。PAN系の連続炭素繊維のように、大きな変形を生じる場合には、曲げタフネスを求める基準についての検討が必要と思われる。

6. 結論

連続炭素繊維を、容積比で最大0.4% (PAN系)あるいは0.7% (ピッチ系)程度まで用い、その配置方法を変えて集中配置した炭素繊維補強モ

ルタルを作製し、曲げ強度および曲げタフネスについて行った実験結果を報告した。本実験の範囲内で次のことが言えると思われる。

- 1) 連続炭素繊維をモルタル中に集中配置することにより、PAN系あるいはピッチ系のものを容積比でそれぞれ0.2%あるいは0.5%程度混入すれば、200kgf/cm²あるいはそれ以上の曲げ強度を得ることができる。
- 2) 炭素繊維の形態としては、帯あるいは布に比べ作業性、破壊性状およびたわみ変形に優れた束としての使用が望ましい。
- 3) 当然ながら、曲げ強度、破壊曲げモーメントおよび曲げタフネスとも、PAN系の繊維を用いた場合の方が、ピッチ系の繊維を用いた場合より大きいことを確かめた。
- 4) JCI法と最大荷重点法の2つの方法を用いて曲げタフネスを求めたが、PAN系繊維を用いる場合は、変形量が大きいことから、両者間に相違が認められた。連続繊維を用いる場合には、曲げタフネスの算定に新たな基準の検討が必要である。
- 5) 連続炭素繊維を用いて曲げ引張破壊する場合には、鉄筋コンクリートと同様にして、曲げ引張破壊モーメントを求めることが可能である。

本研究の実施の際には、群馬高専卒業生の清水明、竹内雅士の両君に協力を頂いた。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 白川潔、中川憲一：炭素繊維補強セメントの曲げ強度におよぼす諸因子、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、p.p.153~156,1982。
- [2] 秋浜繁幸、末永龍夫、坂野正：炭素繊維を用いたセメント系複合体(CFRC)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, p.p.75~84, Aug.1982。
- [3] 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、p.p.111~116,1984.2。
- [4] 秋浜繁幸：炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の実験的研究—その1 CFRCが純引張りを受けた場合の挙動について—、日本建築学会論文報告集、第316号、p.p.1~8、昭和57年6月。
- [5] 平居孝之、安藤達夫、坂井広道、村上淳：連続せんい補強セメントの試作研究(その2 炭素せんいにおける付着)、日本建築学会大会学術講演梗概集、p.p.75~76、昭和61年8月。
- [6] 平居孝之、安藤達夫、坂井広道、村上淳：連続せんい補強セメントの試作研究(その3 炭素せんい補強板の曲げ性状)、日本建築学会大会学術講演梗概集、p.p.77~78、昭和61年8月。

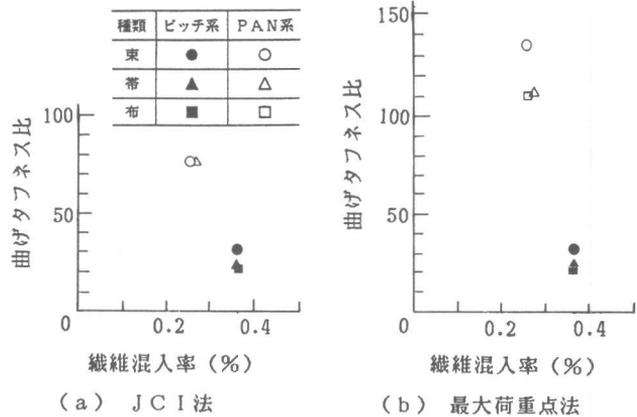


図-6 曲げタフネス比 (供試体B)