

## 論 文

## [1187] CFRCロッドで補強した軽量モルタル板の力学的性状

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）

宮本正雄（群馬工業高等専門学校）

## 1. まえがき

セメント系の建設材料の軽量化については、これまでにも種々の方法が検討されている。すでに、軽量砂を用いたモルタルのマトリックス中に短炭素繊維をランダムに分散させて補強した軽量モルタル板については、研究開発されている<sup>1)・2)</sup>。筆者らは、軽量砂を用いたモルタル板の補強材として、短炭素繊維の代わりに連続炭素繊維にセメントベーストを含浸させて棒状に成形したCFRCロッドを一次元に配置し、主として曲げ作用下における補強効果について報告してきた<sup>3)～5)</sup>。しかしながら、軽量砂を用いたモルタル板におけるCFRCロッドのひずみやせん断耐力などについては未検討であった。

本研究では、棒状のCFRCロッドを軽量砂を用いたモルタルの補強材として配置した炭素繊維補強軽量モルタル板を作製し、この曲げモーメントとせん断力の作用下におけるCFRCロッドのひずみ、曲げひびわれ発生応力度、破壊曲げモーメント、たわみおよびせん断耐力などについて実験した結果を報告する。

## 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系の高性能品およびピッチ系の汎用品である。

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、CFRCロッドの作製には粉末度が9200cm<sup>2</sup>/gの微粒なグラウト用のセメントを主として用いた。砂は、水置換見かけ比重が0.6で平均粒径が150μmの鹿児島県産の軽量砂を用いた。さらに、混和剤として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。

モルタルの配合は、水セメント比が50%で砂セメント比を0.3と一定にした。なお、一部の実験は水セメント比を40%で行った。高性能減水剤は、いずれの配合ともセメント重量の1.0%を添加した。使用したモルタルの品質は表-2の通りである。

## 2. 2 CFRCロッド、供試体および強度試験

CFRCロッド（以下、ロッドと略称す）は、所定本数の連続炭素繊維に水セメント比が50%で、高性能減水剤をセメントの重量の1%添加したセメントベーストを含浸させて棒状に成形

表-1 炭素繊維の品質

繊維の種類	繊維直径(10 <sup>-3</sup> mm)	比重	引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数(10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	伸度(%)
PAN系連続繊維	7.5	1.78	30000	23	1.3
ピッチ系連続繊維	18.0 17.5	1.63 1.62	8000 8500	3.4 3.8	2.40 2.45

表-2 モルタルの品質

W/C (%)	フロー値	圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )		弾性係数(10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )		備考
		7日	28日	7日	28日	
40	145	120	--	--	--	A供試体
50	160	112	147	7.16	6.55	B、C供試体

表一3 CFRCロッドおよび供試体の諸元

供試体	炭素繊維 の種類	繊維の 本数	平均直径 (mm)	繊維含有率 (%)		ロッド の使用 本数	供試体の諸寸法(mm)						単位容 積重量 (t/m <sup>3</sup> )		
				ロッド	Acf/(b*d)		b	d	h	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	e	f		
A-G1	ピッチ系	3000	3.3	9.2	0.22	2						10	20	1.44	
A-G2		3000	3.3	9.2	0.45	4						5	10	1.44	
A-H1	PAN系	12000	3.2	6.1	0.16	2	40	17	20	100	160	10	20	1.35	
A-H2		12000	3.2	6.1	0.31	4						5	10	1.40	
B-G1	ピッチ系	12000	5.0	14.7	0.82	6	150	14	13	20	400	450	12.5	2.5	1.14
B-G2		18000	7.0	11.2	1.33		150	13	20	400	450	12.5	2.5		1.15
B-H	PAN系	12000	3.3	6.2	0.14		15								1.15
C-G2	ピッチ系	24000	9.0	9.1	0.72	6	150	32	40	400	450	12.5	2.5		1.14
C-H2	PAN系	24000	6.0	3.8	0.13		33								1.14

した。これを1日間室内で空中養生した後、材令7日まで水中養生を行って作製した。その後、ロッドの中央部にワイヤストレインゲージを防水処理して貼り付けた。なお、ロッドの一部は、

同一の水セメント比で普通セメントを用いて作製した。

ロッドの平均直径、ロッド中の炭素繊維含有率、供試体中の炭素繊維の総断面積Acfを有効高さdと幅bの積で除した比率、ならびに供試体の断面諸元は、表一3の通りである。

供試体の軽量モルタル板は表一3に示したA、BおよびCの3種類とした。なお、A供試体では、ロッドの作製に普通セメントを、またピッチ系繊維は引張強度が8000kgf/cm<sup>2</sup>のものをそれぞれ用いた。供試体は、型枠底部にモルタルを敷き、この上にロッドを所定の有効高さおよび間隔になるように配置した後、モルタルを補充して作製した。同時に圧縮強度試験用の円柱供試体(Φ5×10 cm)も作製した。供試体はいずれも材令7日まで水中養生し、その後は強度試験の材令まで湿布養生を行った。

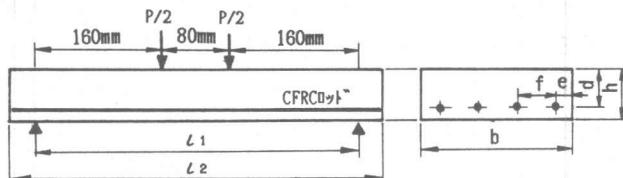
曲げ強度試験は材令7日および28日で行った。試験は、A供試体の場合のみスパンが100mmの中央点載荷とし、それ以外は図一1に示したような2点載荷を行った。同時に、供試体の上面およびロッドに貼り付けたワイヤストレインゲージによりひずみを測定した。さらに中央部の荷重一たわみ曲線を、X-Yレコーダに記録した。なお、A供試体については、荷重一たわみ曲線のみ記録した。

### 3. 曲げひびわれ状態および曲げひびわれ発生応力度

各供試体の単位容積重量は、表一3に示すように、通常のモルタルに比べて30~40%軽減できた。

各供試体におけるひびわれ状態の例を図一2に示す。曲げひびわれは、いずれの供試体でも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。そして、曲げモーメントが増加すると、供試体の寸法が他より小さいA供試体の場合は、PAN系繊維を用いると図一2a)のように斜めひびわれが発生し、これが発達してせん断破壊した。ピッチ系繊維の場合にはロッドが切断して曲げ破壊した。

A供試体より寸法の大きいB供試体の場合、ピッチ系繊維を用いると繊維量が少ない供試体B-G1は、PAN系繊維を用いた供試体B-Hと同様に、ロッドの切断により、図一2b)のよう



図一1 曲げ強度試験方法

に曲げ破壊した。しかし、繊維量が多い供試体B-G2では、図-2 c)のように圧縮側モルタルが圧潰して破壊した。そして、B供試体の高さを増したC供試体では、いずれの繊維を用いても、図-2 d)のように斜めひびわれが発生し、これの発達によりせん断破壊した。せん断破壊した原因については、供試体のせん断スパン比a/dがA供試体の場合で

2.9、C供試体の場合で4.8と小さく、せん断力の影響が大きいにもかかわらず、使用したモルタルの圧縮強度が、表-2に示したように通常のモルタルの1/2程度と小さかったためと考えられる。なお、B供試体のa/dは約12である。

曲げ破壊した供試体の破断面を観察した結果、一般にロッド中の炭素繊維の引き抜けやロッドとモルタルとのずれは認められなかった。なお、PAN系繊維を用いた供試体A-H2の場合には、ロッド中の炭素繊維が少し引き抜ける場合があった。

ロッドの切断状態については、全てのロッドがほぼ同時に切断する場合が多かったが、PAN系繊維を用いた供試体B-Hのように、一本のロッドの切断の後残りが順次切断する場合もあった。ロッドが同時に切断しないのは、炭素繊維が降伏領域をもたないためにロッド自体の強度のバラツキが影響し易いためと考えられる。

ロッドを無視した弾性計算により求めた曲げひびわれ発生応力度を表-4に示す。BおよびC供試体の場合の曲げひびわれ発生モーメントは、モルタル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、またA供試では荷重一たわみ曲線の急変点よりそれぞれ求め

表-4 曲げひびわれ発生応力度、破壊曲げモーメントおよびせん断応力度

供試体	曲げひびわれ 発生応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		破壊曲げモーメント(kgf.cm)				せん断応力度(kgf/cm <sup>2</sup> )*			
			7日		28日		7日		28日	
	7日	28日	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値
フレーン A-G1 A-G2 A-H1 A-H2	46.1 51.6 56.3 56.2 70.2		123 180 348 337 475		188 340 413 572		4.6 5.3 10.2 9.9(9.9) 13.9(13.9)		6.6 9.2 6.6 8.3	
フレーン B-G1 B-G2 B-H	12.0 16.0 12.0 16.0	14.8 16.0 16.0 20.0	120 896 816 952	1173 1120 1219 1123	148 1466 1532 1182		0.38 2.7 2.6 2.6		0.46 3.3 3.6 3.1	13.0 15.5 7.1
フレーン C-G2 C-H2	9.8 28.1 26.0	10.4 36.0 32.0	392 3664 3488	6449 5047	416 4480 4032	7038 5295	0.61 4.8(4.5) 4.4(4.0)	9.4 5.2	0.46 5.8(5.6) 5.1(4.8)	10.1 5.6

\*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

た。曲げひびわれ発生応力度は、AおよびB供試体では補強しないものよりやや高い場合もあるが、その差は小さい。しかしながら、C供試体の場合には、補強しないものの3~4倍の値を示している。供試体の高さが高いことに加え、ロッドの直径が太くロッド自体の引張剛性が高いこと、および断面図心軸から遠い位置にロッドが配置されていることから、他に比べ供試体の曲げ剛性が高かったためと考えられる。

これらのことから、厚い軽量モルタル板では、ロッドの曲げ剛性に寄与する分が大きくなることにより、ロッドによる曲げひびわれ発生応力度の増加は期待できると思われる。

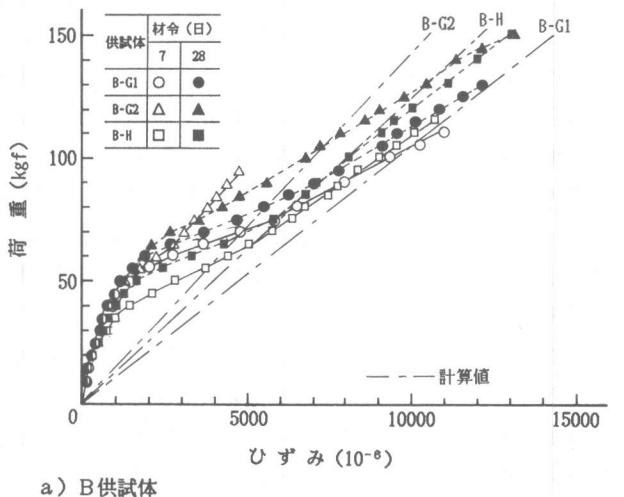
#### 4. CFR C ロッドのひずみ

BおよびC供試体における荷重とロッドのひずみとの関係を、材令も変化させて図-3に示す。図中には、表-2に示したモルタルの弾性係数と表-1に示した炭素繊維の弾性係数を用い、弾性計算により求めた計算値を一点鎖線で一緒に示している。ロッドのひずみは、供試体にひびわれが発生するまであまり増加せず、ひびわれが発生するとモルタルが負担していた引張力を補強材が負担するため、ひずみは大きく増加した。そして、B供試体の場合は、ロッドのひずみが図-3 a) のように弾性計算で求めた値付近、あるいはその値を越えてから曲げ破壊した。しかしながら、図-3 b) に示したC供試体では、供試体がせん断破壊したため、ロッドのひずみは計算値に至らなかった。また、ロッドのひずみは、材令が増加すると一般に小さくなることも認められる。

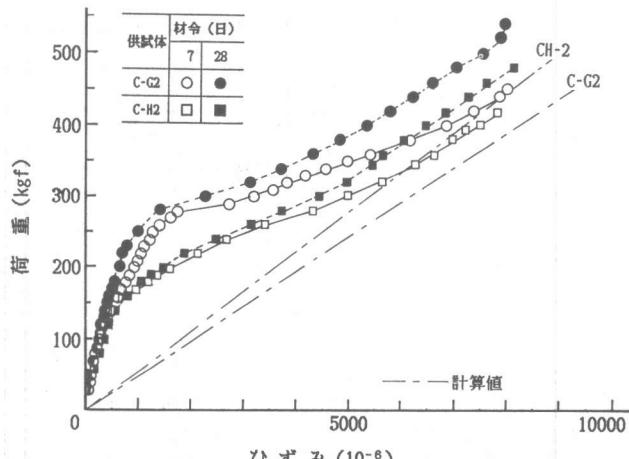
ロッドの最終ひずみは、ロッドが切断した場合でも、既報の普通モルタルおよびコンクリートのはりの場合<sup>4)~7)</sup>と同様に、炭素繊維自体の最終ひずみより小さかった。炭素繊維が必ずしも並行に配列されていないためと考えられる。

#### 5. 破壊曲げモーメント

表-4には、破壊曲げモーメントの実測値および計算値も示している。表中の破壊曲げモーメントの計算値は、モルタルの応力一ひずみ状態を等価応力ブロック、モルタルの最終ひずみを0.35%、炭素繊維の応力一ひずみ曲線を降伏領域を持たない直線とそれぞれ仮



a) B供試体



b) C供試体

図-3 CFR C ロッドのひずみと荷重の関係

定し、曲げ引張破壊するとして求めた。計算には表一2に示した圧縮強度を用いた。

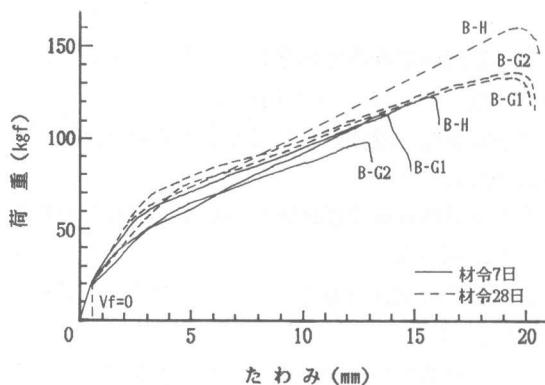
B供試体の場合に、曲げ圧縮破壊したB-G2の破壊曲げモーメントの実測値は、纖維量の少ないB-G1と同じである。このことは、纖維量の増加による曲げ耐力の限界を示すものである。

破壊曲げモーメントの実測値は、A供試体の場合にピッチ系纖維を用いると補強しないものの1.5~2.8倍、せん断破壊したPAN系纖維の場合が2.7~3.8倍の値を示した。そして、B供試体の場合には7~8倍が得られた。しかしながら、C供試体の場合には、せん断破壊したため、いずれの纖維を用いても補強しないものの3倍程度になっている。

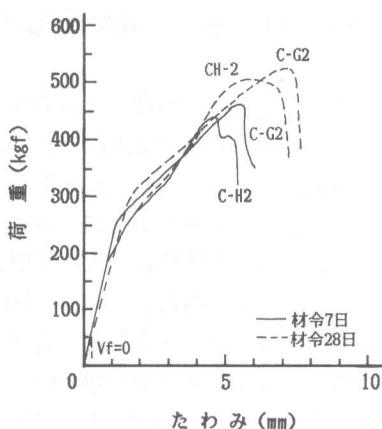
曲げ引張破壊した場合の破壊曲げモーメントの実測値と計算値との比率は、A供試体で95~102%、またB供試体の場合で76~101%を示し、B供試体の方が少し低くなつた。この原因としては、使用したロッド中の纖維の本数の増加による纖維の配列の影響(B-G1)や、ロッドの切断状態の相違(B-H)が挙げられる。いずれにしても、曲げ引張破壊した場合の実測値は、計算値の75%以上が得られた。このことは、曲げ引張破壊する場合の破壊曲げモーメントは、ロッドの引張耐力を推定できると、RCの場合と同様の方法で求めれることを示唆するものである。

## 6. せん断耐力

破壊時あるいは斜めひびわれ発生時のせん断応力度も表一4に示している。計算値は、炭素纖維の総断面積  $A_{cf}$  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)の棒部材の設計せん断耐力  $V_{cd}$  を供試体の幅  $b$  と有効高さ  $d$  の積で除して求めた。なお、部材係数  $\gamma_b$  は1.0とした。せん断応力度の実測値は、A供試体のように破壊時では計算値より大きい場合もある。しかしながら、それ以外は破壊時および斜めひびわれ発生時とも計算値より小さく、せん断破壊したC供試体でも計算値の1/2の場合もある。この原因としては、先に述べた軽量モルタル自体のせん断強度が低いことのほか、計算の際に用いる纖維の総断面積の取扱方法<sup>7)</sup>の影響も挙げられる。せん断耐力については、今後さらに検討を進めたい。



a) B供試体



b) C供試体

図一5 荷重ーたわみ曲線(B、C供試体)

## 7. たわみ

供試体の荷重一たわみ曲線を図-4 および図-5 に示す。図-4 に示したA供試体の最大荷重時のたわみ量は0.5~0.7mmで、ロッドで補強しない場合の10~12倍である。そして、B供試体では、図-5 a) に示すように材令28日で約20mmを示し、補強しない場合(0.7mm)の20倍以上の大きなたわみ量を示した。しかし、C供試体の場合には、先に述べた脆い破壊形式のため、図-5 b) のように、B供試体の1/3以下の7mm程度である。また、たわみ量は材令が増加すると、いずれの供試体の場合も増加している。しかし、せん断破壊したC供試体では、B供試体に比べ、たわみの増加はわずかであった。

## 8. 結論

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ロッドで補強した軽量モルタル板を作製し、曲げ強度試験を行って求めたCFRCロッドのひずみ、破壊曲げモーメント、せん断耐力およびたわみなどの結果より、次のようなことが言えると思われる。

- 1) CFRCロッドの引張ひずみと外力モーメントの関係は2直線で近似され、その最終ひずみは炭素繊維自体の最終ひずみより小さい。
- 2) 曲げ引張破壊する場合の破壊曲げモーメントは、鉄筋コンクリートの場合と同様にして求めることが可能である。
- 3) せん断耐力は、RC示方書に示された式を用いて求めた計算値より一般に小さくなる。
- 4) 厚い軽量モルタル板では、CFRCロッドの配置による曲げひびわれ発生応力度の増加は期待できる。
- 5) 供試体中の炭素繊維含有率をPAN系で0.1%、ピッチ系で1.0%程度配置して補強すれば、破壊曲げモーメントは7~8倍、また、たわみ量は20倍以上増大させることができる。
- 6) CFRCロッドを多数配置する場合には、CFRCロッドが個別に切断することに対する配慮が必要になる。

### [参考文献]

- 1) 秋浜繁幸、末永龍夫、坂野 正：炭素繊維補強セメント(CFRC)の建築構造物への適用、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984、pp.329~332
- 2) 小倉 稔、三井宣之、村上 聖、中村守康、鹿毛忠継：炭素繊維補強コンクリートに関する実験的研究—その1 調合及び練り混ぜー、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989、pp.739~740
- 3) 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
- 4) 古川 茂、辻 幸和、宮本正雄：異種類の炭素繊維で補強材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.471~474
- 5) 古川 茂、宮本正雄、大谷杉郎、小島 昭：束状の連続炭素繊維を引張側に配置した軽量モルタルの力学的特性、炭素 1989 (No.137)pp.96~99
- 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
- 7) 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