粗骨材混入炭素繊維補強コンクリートの調合と力学的特性
に関する実験的研究EXPERIMENTAL STUDY ON MIX PROPORTION AND MECHANICAL
CHARACTERISTICS OF CARBON FIBER REINFORCED
CONCRETE INCLUDING COARSE AGGREGATE

村上 聖*, 三井宜之**, 武田浩二***, 坂井廣道****, 白木 明*****

*Kiyoshi MURAKAMI, Yoshiyuki MITSUI, Koji TAKEDA,
Hiromichi SAKAI and Akira SHIRAKI*

Applications of carbon fiber reinforced concrete (CFRC) to various building materials have been progressed because of its excellent mechanical characteristics. The conventional CFRC made of mortar with no coarse aggregate has some defects such as large drying shrinkage and low modulus of elasticity, which will be reduced by substituting concrete-mix including coarse aggregate for the mortar. In this study, in order to develop the CFRC using concrete-mix, experimental investigations were conducted concerning evaluations of an optimum mix proportion and various mechanical characteristics of the CFRC. As the results, it was shown that the CFRC of concrete-mix was superior in modulus of elasticity, flexural and fracture toughnesses to that of the mortar-mix and the mechanical characteristics of the former was, if anything, similar to those of steel fiber reinforced concrete.

Keywords : carbon fiber reinforced concrete, mix proportion, sand percentage, unit cement content, water-cement ratio, mechanical characteristics

炭素繊維補強コンクリート, 調合, 細骨材率, 単位セメント量, 水セメント比, 力学的特性

1. はじめに

炭素繊維補強コンクリート(以下、CFRCと略記)は、そのすぐれた力学的特性を利用して、各種建材への用途開発が進められ、その適用例も着実に増えている。しかし、ここでいうCFRCは、厳密にはマトリックスに粗骨材を含まないモルタル調合のものであり、そのことに起因した用途上の制約がある。例えば、セメントリッチによる乾燥収縮などに起因した寸法安定性の問題、モルタルマトリックスに起因した剛性の問題などがあげられる。寸法安定性に関しては、セメントに低収縮セメントを使用したり¹⁾、混和剤として収縮低減剤などを用いて²⁾、乾燥収縮を低減するための使用材料や調合上の配慮が必要になる。また、剛性に関しては、強度的には部材を薄肉軽量化することが十分に可能であっても³⁾、剛性の不足により、例えばカーテンウォールの場合にはリブを設けたり、H形鋼などによる剛性の補強⁴⁾など、断面上の工夫が要求される。以上の制約は、マトリックスをコンクリート調合にすることにより大幅に低減できる可能性があり、これまでもCFRCに限らず、ガラス繊維強化セメント(GRC)などにおいても同様の試みがなされてきたが、いずれも成功していない。これは、炭素繊維やガラス繊維

が引張強度は高いもののせん断強度が低いので、粗骨材を混入した場合、ミキサーによるせん断攪拌の際に繊維が折損したり、表面に傷が生じて、繊維補強効果が大きく低減するためである。

そこで、本研究では、炭素繊維の集束状態を工夫することによって、粗骨材を混入しマトリックスをコンクリート調合にした場合でも、ミキサーのせん断攪拌による繊維の折損を低減し、十分な繊維補強効果が得られるCFRCの開発を目的に実験的検討を行った。そのコンセプトは、炭素繊維のフィラメントを水溶性接着剤で集束しストランドにすることによって、ミキサーのせん断攪拌による繊維の折損をストランド表面にとどめ、攪拌に伴い解繊した両端部分にセメントペーストが充填されることにより、繊維の付着力が確保されることを意図している。

2. 実験方法

本実験の内容を表1に示す。シリーズA～Eは、ベース調合の選定を目的に、細骨材率、単位セメント量および水セメント比がCFRCの圧縮、引張および曲げ特性に及ぼす影響について調べ、細骨材率、単位セメント量および水セメント比の最適値を求めた。シリ

* 熊本大学工学部環境システム工学科 助教授・工博

** 熊本大学工学部環境システム工学科 教授・工博

*** 熊本大学工学部環境システム工学科 助手・工博

**** 三菱化学㈱複合材事業部 部長・工博

***** 三菱化学㈱複合材事業部 工修

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ., Dr. Eng. Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

General Manager, Composite Materials Dept., Mitsubishi Chemical Corporation, Dr. Eng.

Composite Materials Department, Mitsubishi Chemical Corporation, M. Eng.

ーズF, Gは、細骨材率および単位セメント量の低減を目的に、シリカフュームと高性能AE減水剤を用いて、細骨材率および単位結合材量がCFRCの圧縮、引張および曲げ特性に及ぼす影響について調べ、細骨材率および単位結合材量の最適値を求めた。シリーズHは、上記の2種類の割合によるCFRCの力学的特性を調べるために、圧縮、引張、曲げおよび破壊靱性試験を行い、圧縮強度、ヤング係数、引張強度、曲げ強度、曲げタフネス、引張軟化曲線およびJ積分値を評価した。

2.1 ベース割合の選定 (シリーズA～E)

1) 使用材料

表2に使用材料を示す。炭素繊維には、繊維径 $df=7\mu m$ 、繊維長さ $lf=40mm$ のフィラメントを12Kのストランドにしたものを使用した。なお、ここで混和剤として用いた高性能減水剤は、CFRCの練り混ぜが困難な場合に、後添加により適宜混入した。

2) 使用割合

表3に使用割合を示す。シリーズAでは、細骨材率の選定を目的として、繊維体積率 $V_f=0.5\%$ 、水セメント比 $W/C=50\%$ 、単位セメント量 $C=600kg/m^3$ 一定とし、細骨材率 s/a を50～80%の4水準で変化させた。なお、ミキサーには容量50lの強制攪拌型ミキサーを用いた。シリーズB, Cは、単位セメント量の選定を目的に、シリーズBでは $V_f=0.5\%$ 、シリーズCでは $V_f=1.0\%$ に関し、 $W/C=50\%$ 、 $s/a=70\%$ 一定として、シリーズB, CのそれぞれについてCを500～700kg/m³の3水準および500～800kg/m³の4水準で変化させた。なお、強制攪拌型ミキサーでは $V_f=1.0\%$ の練り混ぜが不可能であったために、容量30lのオムニミキサーを使用した。以下のシリーズも同様にオムニミキサーを用いた。従って、シリーズAのみ強制攪拌型ミキサーで、その他のすべてのシリーズではオムニミキサーにより練り混ぜを行った。シリーズD, Eは、水セメント比の選定を目的に、シリーズDでは $V_f=0.5\%$ 、シリーズEでは $V_f=1.0\%$ に関し、 $s/a=70\%$ 、シリーズD, EのそれぞれについてCを600kg/m³および700kg/m³一定とし、 W/C を33～50%の3水準で変化させた。なお、表中には各シリーズで変化させた割合因子を網掛けで示している。

ここで、コンクリート割合のCFRCについて参考となる資料がない現状で、割合の選定は試行錯誤によらざるを得ないが、参考文献1), 5)のモルタル割合のCFRCや鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の割合を参考に、細骨材率や単位セメント量の選定の目安とした。なお、普通コンクリートに比べてセメントリッチで単位水量が多い割合となっているが、繊維補強コンクリートの割合設計では繊維の分散性をもっとも重要な因子であり、単位セメント量や単位水量を小さくすることは2次的な条件とされている⁶⁾。

表1 本実験の内容

[1]ベース割合の選定	
1)シリーズA	細骨材率の選定
2)シリーズB,C	単位セメント量の選定
3)シリーズD,E	水セメント比の選定
[2]細骨材率および単位セメント量の低減	
1)シリーズF	細骨材率の低減
2)シリーズG	単位セメント量の低減
[3]力学的特性の評価	
1)シリーズH	CFRCの各種力学的特性

3) 練り混ぜおよび供試体作製

CFRCの練り混ぜ方法は、セメント、砂、碎石、水をミキサーへ投入し、ブレンコンクリートを練り上げた後で、炭素繊維を投入し60秒間混練した。なお、炭素繊維投入後の混練時間については予備実験を行い、表4にオムニミキサーを用いた場合の混練時間に対するスランプおよび曲げ強度の変化を示す。これより、30, 60, 90

表2 シリーズA～Eの使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント	
骨 材	川砂	碎石6号
	表乾比重=2.61 吸水率=3.09% 最大寸法=5mm 粗粒率=2.79 実積率=64.4%	表乾比重=2.95 吸水率=1.27% 最大寸法=15mm 実積率=56.3%
炭素繊維	フィラメント寸法 $df \times lf = 7\mu m \times 40mm$ ストランド=12K 比重=1.9 引張強度=4410MPa 引張弾性率=226GPa	
混 和 剤	高性能減水剤	

表3 シリーズA～Eの使用割合

記号	V_f (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)				スランプ [°] (cm)
				C	W	S	G	
A-1	0.5	50	50	600	300	605	720	8.7*
A-2	0.5	50	60	600	300	727	576	7.6*
A-3	0.5	50	70	600	300	892	432	1.7
A-4	0.5	50	80	600	300	968	288	5.1
記号	V_f (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)				スランプ [°] (cm)
				C	W	S	G	
B-1	0.5	50	70	500	250	1042	505	5.2*
B-2	0.5	50	70	600	300	892	432	7.5
B-3	0.5	50	70	700	350	742	360	12.8
C-1	1	50	70	500	250	1042	505	3.3*
C-2	1	50	70	600	300	892	432	4.3*
C-3	1	50	70	700	350	742	360	3.2
C-4	1	50	70	800	400	593	287	5.1
記号	V_f (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)				スランプ [°] (cm)
				C	W	S	G	
D-1	0.5	33	70	600	200	1075	521	1.3*
D-2	0.5	40	70	600	240	1002	485	1.3*
D-3(B-2)	0.5	50	70	600	300	892	432	7.5
E-1	1	33	70	700	233	956	463	1.1*
E-2	1	40	70	700	280	870	422	1.1*
E-3(C-3)	1	50	70	700	350	742	360	3.2

[注]* 攪拌時に高性能減水剤混入

表4 混練時間に対するスランプおよび曲げ強度の変化

混練時間 (sec)	スランプ (cm)	曲げ強度 (MPa)
30	1.9	8.37
60	6.4	9.38
90	6.9	8.83

[注] $V_f=1.0\%$, $W/C=50\%$, $s/a=70\%$, $C=700kg/m^3$
 $100 \times 100 \times 400mm$ 角柱供試体各3個使用
 20℃水中養生材齢14日後試験時まで気中養生

秒間の練り混ぜについて、60秒間のときに最大の曲げ強度が得られることを確認した。これは、30秒間では練り混ぜ不足で、90秒間ではミキサーのせん断攪拌による繊維の折損が大きくなるためと考えられる。

供試体作製は、練り上げたCFRCを型枠へ2層に分けて詰め、各層ごとに木づちと棒状パイプレータを用いて十分に締め固めた。供試体として、圧縮および引張強度試験用に $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体、曲げ強度試験用に $100 \times 100 \times 400$ mmの角柱供試体を各3個ずつ作製し、材齢14日まで20℃の水中で養生した後、試験時まで気中養生を行った。

4) 試験方法

圧縮試験では、圧縮応力-ひずみ曲線を測定し、圧縮強度およびヤング係数(1/3割線弾性係数)を求めた。引張試験では、最大荷重を測定し、割裂引張強度を求めた。曲げ試験では、中央3点曲げ載荷(スパン長さ300mm)により荷重-載荷点変位曲線を測定し、曲げ強度および曲げタフネスを求めた。ここで、曲げタフネスは、荷重-変位曲線下の面積で表される吸収エネルギーであり、面積の測定にはプランメータを用いた。

2.2 細骨材率および単位セメント量の低減(シリーズF, G)

1) 使用材料

表5に使用材料を示す。ここで、細骨材率および単位セメント量の低減のために、シリカフュームと高性能AE減水剤を用いた。前記の表3から分かるように、細骨材率や単位セメント量が小さくなると、高性能減水剤を混入しないと練り混ぜが困難であり、また流動性を増すために高性能減水剤を多量に用いると、細骨材率や単位セメント量が小さいので材料分離が生じやすくなる。そこで、材料分離低減材としてシリカフュームを混入し、高性能AE減水剤を比較的多量に用いても材料分離を生じることなく、細骨材率および単位セメント量を低減できる可能性がある。

2) 使用調合

表6に使用調合を示す。シリーズFでは、細骨材率の低減を目的として、シリカフューム混入率(対セメント質量比)がSi/C=0%および10%の2水準について、Vf=1.0%、水結合材比 W/B=50%、単位結合材量 B=700kg/m³一定とし、s/aを70, 67.5, 65%の3水準で変化した。なお、高性能AE減水剤および補助AE剤の使用量は、それぞれB×1.0%およびB×0.01%一定とした。ここで、シリカフューム無混入の場合、s/aが65%よりも小さくなると、本実験の高性能AE減水剤の使用量では練り混ぜが困難となり、使用量を増すとセメントペーストの分離が著しくなった。一方、シリカフュームを混入した場合には、s/aが65%でもセメントペーストの分離はみられず、高性能AE減水剤の使用量を増せば、さらに小さいs/aの範囲まで練り混ぜが可能と考えられる。シリーズGでは、単位セメント量の低減を目的に、Vf=1.0%、W/B=50%、s/a=67.5%、Si/C=10%一定とし、Bを700, 650, 600kg/m³の3水準で変化した。また、高性能AE減水剤および補助AE剤の使用量は、シリーズFと同一である。なお、表中には各シリーズで変化した調合因子を網掛けで示している。

3) 練り混ぜ、供試体作製および試験方法

練り混ぜ、供試体作製および試験方法については前述のとおりであるが、シリカフュームの混入によりマトリックスの粘性が増すので、CFRCの締め固めには高周波パイプレータを使用した。

表5 シリーズF, Gの使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント	
骨 材	川砂	碎石6号
	表乾比重=2.59 吸水率=4.17% 最大寸法=5mm 粗粒率=3.18 実積率=66.1%	表乾比重=2.95 吸水率=1.27% 最大寸法=15mm 実積率=56.3%
混和剤	高性能AE減水剤、補助AE剤	
混和材	シリカフューム	
炭素繊維	フィラメント寸法、df×lf=7 μ m×40mm ストランド=12K 比重=1.9 引張強度=4410MPa 引張弾性率=226GPa	

表6 シリーズF, Gの使用調合

記号	Vf (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)					スパン [°] (cm)
				C	Si	W	S	G	
F1-0	1	50	70	700	0	350	700	342	7.8
F1-1	1	50	70	636	64	350	685	334	6.3
F2-0	1	50	67.5	700	0	350	675	370	7.7
F2-1	1	50	67.5	636	64	350	660	362	7.1
F3-0	1	50	65	700	0	350	650	399	6.4
F3-1	1	50	65	636	64	350	636	390	7.1

記号	Vf (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)					スパン [°] (cm)
				C	Si	W	S	G	
G1	1	50	67.5	636	64	350	685	334	5.4
G2	1	50	67.5	591	59	325	733	402	4.6
G3	1	50	67.5	545	55	300	806	442	4.1

表7 シリーズHの使用調合

記号	Vf (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)					スパン [°] (cm)
				C	Si	W	S	G	
H-1	1	50	70	700	0	350	697	338	7.0*
H-2	1	50	67.5	591	59	325	733	402	7.4**

[注] * 高性能減水剤使用量 C×0.56%

** 高性能AE減水剤使用量 B×2.0%

2.3 CFRCの力学的特性の評価(シリーズH)

本シリーズでは、シリーズA～EおよびシリーズF, Gのそれぞれにおいて選定された2種類の調合で作製したCFRCについて各種力学的特性を調べた。

1) 使用調合

表7に使用調合を示す。ここで、シリーズA～EおよびシリーズF, Gにおいて選定された調合をそれぞれH-1およびH-2の記号を付けている。なお、使用材料は、それぞれのシリーズで用いたものと同じであるが、調合H-2では、前述のように高性能AE減水剤の使用量を増しても材料分離のおそれがないので、シリーズF, Gのときに比べて使用量を2倍に増やしている。調合H-1およびH-2のスパンは約7cmとほぼ同じであり、建築分野では硬練りに属するが、プレキャストコンクリートへの用途を想定すれば、実用的には問題はないものと考えられる。

2) 練り混ぜ、供試体作製および試験方法

練り混ぜ、供試体作製および試験方法については大略前述のとおりであるが、圧縮、引張および曲げ試験に加えて、破壊靱性試験を同時に行った。破壊靱性試験には、100×100×400mmの切欠きはり供試体を用いて、中央3点曲げ載荷（スパン長さ300mm）により荷重-CMOD(crack mouth opening displacement)曲線を測定した。なお、切欠きは、試験前にダイヤモンドバンドソーによって切断加工し、その深さは30mmとした。また、評価は、既報⁷⁾の結合力モデルの逆解析手法に基づいて、引張軟化曲線とCOD(crack opening displacement)が0.5mmでのJ積分値を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 ベース調合の選定

表8に、シリーズA～Eの試験結果を一括して示す。なお、表中の評点については後述する。図1は、細骨材率(s/a)が圧縮強度、ヤング係数、曲げ強度および曲げタフネスに及ぼす影響を示す。同図中には、s/a=70%についてシリーズBのオムニミキサーによる結果を併記しているが、強制攪拌型ミキサーよりもオムニミキサーの方が繊維分散性にすぐれ、各種強度ともに大きくなっている。図より、圧縮強度およびヤング係数はs/aの増加に伴い低下し、曲げ強度も若干の低下がみられるが、曲げタフネスはs/a=70%まで細骨材率の増加とともに顕著に大きくなっていることが分かる。図2は、単位セメント量(C)が圧縮強度、ヤング係数、曲げ強度および曲げタフネスに及ぼす影響を示す。図より、単位セメント量の違いによる圧縮強度の変化に明確な傾向はみられないが、ヤング係数は単位セメント量の増加とともに低下している。一方、曲げ強度および曲げタフネスは、明確なピークを示す単位セメント量が存在し、曲げ

強度および曲げタフネスともに、Vf=0.5%および1.0%についてそれぞれC=600kg/m³および700kg/m³のときに最大値を示した。図3は、セメント水比(C/W)が圧縮強度、ヤング係数、曲げ強度および曲げタフネスに及ぼす影響を示す。図より、圧縮強度はセメント水比説に従い、C/Wの増加とともにほぼ比例的に増加しているが、Vf=1.0%の場合にはC/W=3のときに締め固め不足に起因して圧縮強度は大きく低下している。ヤング係数も、圧縮強度と同様の傾向を示している。曲げ強度は、セメント水比の違いによる変化に明確な傾向はみ

図1 細骨材率が圧縮および曲げ特性に及ぼす影響

表8 シリーズA～E（ベース調合の選定）の試験結果

記号	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げタフネス (N·m)	評点
A-1	43.9	21.9	4.63	7.41	4.37	42.1
A-2	42.5	20.5	4.61	6.78	5.78	43.9
A-3	36.5	19.2	4.31	7.35	7.23	47.9
A-4	36.7	19.1	4.72	6.70	6.98	45.8
[注]曲げタフネスは、最大荷重の1/2の荷重低下時点での吸収エネルギー						
記号	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げタフネス (N·m)	評点
B-1	41.4	23.3	4.39	7.45	10.8	47.9
B-2	39.7	21.4	4.81	8.03	11.4	48.8
B-3	41.7	19.9	4.59	6.87	8.96	41.9
C-1	35.0	19.9	5.43	8.88	13.4	44.0
C-2	37.8	19.7	5.03	9.27	15.0	46.8
C-3	35.0	19.1	5.29	9.81	17.0	49.2
C-4	34.2	16.5	5.82	9.25	14.6	44.1
[注]曲げタフネスは、載荷点変位が1/300(1mm)時点での吸収エネルギー						
記号	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げタフネス (N·m)	評点
D-1	75.0	29.6	—	8.06	7.60	43.4
D-2	58.8	24.9	—	7.86	8.81	42.4
D-3	39.7	21.4	—	8.03	11.4	44.7
E-1	43.5	19.3	—	8.17	10.2	36.9
E-2	56.9	21.6	—	10.1	13.8	46.3
E-3	35.0	19.1	—	9.81	17.0	46.6

[注]曲げタフネスは、載荷点変位が1/300(1mm)時点での吸収エネルギー

図2 単位セメント量が圧縮および曲げ特性に及ぼす影響

図3 セメント水比が圧縮および曲げ特性に及ぼす影響

られないが、圧縮強度と同様に、 $V_f=1.0\%$ の場合 $C/W=3$ のときに曲げ強度が大きく低下している。一方、曲げタフネスは、 C/W の増加とともに顕著に減少し、マトリックスの高強度化に伴い脆性的になることが分かる。

以上のように、細骨材率、単位セメント量および水セメント比等の調査因子がCFRCの圧縮特性と曲げ特性に及ぼす影響が異なるので、ここではCFRCの用途を考慮し、力学的特性に優先順位を付けて点数化することによって、調査因子の最適値を求めた。繊維補強コンクリートは、一般に圧縮特性よりも曲げ特性の改善が期待されていること、曲げ強度の寸法効果が小さく、部材寸法が大きい場合も曲げ強度を信頼強度として扱えるためには高靱性を有していなければならないこと⁸⁾、マトリックスをコンクリート調合にする意図の一つに剛性の改善があることなどを考え、圧縮強度を5点満点、ヤング係数を10点満点、曲げ強度を15点満点、曲げタフネスを20点満点の傾斜配点とした。その計算方法は、それぞれの力学的特性において最大値を満点とし、最大値に対する比率で点数を振り分け、すべての力学的特性について算出した点数を合計し、最高得点のものを最適値として選定した。そのようにして得られた評点を前記の表8に併記し、各シリーズについて最高得点が得られたものを網掛けで示している。その結果として、細骨材率の最適値は、 $s/a=70\%$ 、単位セメント量の最適値は、 $V_f=0.5\%$ および 1.0% についてそれぞれ $C=600\text{kg/m}^3$ および 700kg/m^3 、水セメント比の最適値は、 $W/C=50\%$ となった。

3.2 細骨材率および単位セメント量の低減

表9に、シリーズF, Gの試験結果を一括して示す。なお、各シリーズについて評点が最高得点のものを網掛けで示している。表より、シリカフュームおよび高性能A E減水剤を使用することによって、細骨材率の最適値は、 $s/a=67.5\%$ 、単位結合材量の最適値は、 $B (=C+Si)=650\text{kg/m}^3$ となり、シリカフュームおよび高性能A E減水剤

を使用していないベース調合H-1との比較で、細骨材率および単位セメント量とともに小さくでき、単位粗骨材量で約2割の増加をはかることができた。

3.3 CFRCの各種力学的特性

表10に、シリーズHの試験結果を示す。表により、ベース調合のH-1とシリカフュームおよび高性能A E減水剤を使用した調合のH-2の比較では、H-2の方がややヤング係数が小さく、引張強度が大きくなっている以外は、ほぼ同程度の力学的特性が得られている。

図4は、曲げ試験による荷重-載荷点変位曲線の測定値と、破壊靱性試験による引張軟化曲線(結合応力-COD関係)の推定値を示す。同図中には、比較のために、既報^{5), 9)}のモルタル調合のCFRCとSFRCの結果も併記している。荷重-載荷点変位曲線については、コンクリート調合のCFRCは、モルタル調合のCFRCやSFRCと最大荷重はほぼ同程度であるが、モルタル調合のCFRCに比べて、曲げ剛性が大きく、最大荷重以降の荷重低下も小さくなっており、どちらかというところ、SFRCに近い曲げ性状を示している。引張軟化曲線については、SFRCよりもCFRCの方が全体的にピークの結合応力は高いが、SFRCではCODが 0.5mm 以下の範囲ではほぼ一定の結合応力を保持しているのに対して、CFRCの場合にはピーク応力の発現が早く、ピーク応力以降比較的に大きな引張軟化特性を示すのが特徴である。しかし、コンクリート調合のCFRCは、モルタル調合のCFRCよりも引張軟化の程度は小さくなっている。

図5には、圧縮強度とヤング係数、引張強度および曲げ強度の関係、曲げ強度と曲げタフネスの関係を示す。同図中には、モルタル調合のCFRCやSFRCの結果も併記している。圧縮強度とヤング係数の関係については、図中に示すRC構造計算規準式による普

表9 シリーズF, G ($s/a, C$ の低減)の試験結果

記号	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げタフネス (N・m)	評点
F1-0	33.8	17.2	8.15	14.6	46.0
F2-0	38.5	18.2	7.45	16.2	47.8
F3-0	40.9	19.3	7.10	13.5	44.8
F1-1	48.5	18.5	7.19	13.1	41.2
F2-1	41.7	14.6	8.26	19.2	46.8
F3-1	47.8	19.5	6.44	12.7	39.8

記号	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	曲げ強度 (MPa)	曲げタフネス (N・m)	評点
G1	48.7	18.8	9.03	14.3	43.9
G2	48.5	19.5	8.46	19.1	48.3
G3	49.8	20.9	7.98	12.4	41.3

[注] 曲げタフネスは、載荷点変位がh長の $1/150(2\text{mm})$ 時点での吸収エネルギー

表10 シリーズH (CFRCの各種力学的特性)の試験結果

記号	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	J積分値 (N/mm)
H-1	48.5	19.0	5.96	8.99	1.86
H-2	49.1	16.3	7.00	9.29	1.89

[注] J積分値は、CODが 0.5mm での値

通コンクリートとの対応から、繊維の混入によりヤング係数は一様に低下しているが、モルタル調合のCFRCの場合は、マトリックスが軽量モルタルであることに起因してヤング係数はかなり小さくなっている。コンクリート調合のCFRCのヤング係数は、圧縮強度が高いことにも関係してモルタル調合の場合よりも約6割程度大きくなっているが、SFRCの場合と比べると小さく、ほぼその下限に位置している。これはSFRCに比べて、コンクリート調合のCFRCの方が単位セメント量が多く、単位粗骨材量が少ないためであると考えられる。圧縮強度と引張強度および曲げ強度の関係については、コンクリート調合のCFRCはSFRCとほぼ同程度であり、圧縮強度に対する引張強度および曲げ強度の比は、それぞれ約1/8~1/7および約1/6~1/5となっている。曲げ強度と曲げタフネスの関係については、同一の曲げ強度に対してコンクリート調合のCFRCの方がSFRCよりも曲げタフネスが小さくなっており、前述のように最大荷重以降の荷重低下がSFRCよりもやや大きいことに対応している。

以上のことから、コンクリート調合のCFRCは、モルタル調合のCFRCに比べて、曲げ強度はやや小さいが、剛性、曲げタフネスおよび破壊靱性の改善が認められ、SFRCに近い力学的特性を有していることが分かった。SFRCのように現場施工にはなじまないが、鋼繊維では耐腐食性が問題となる箇所に、SFRCと同等の力学的特性の扱いでコンクリート調合

図4 荷重-載荷点変位曲線の測定値と引張軟化曲線の推定値

図5 圧縮強度、ヤング係数、引張強度、曲げ強度および曲げタフネスの間の関係

のCFRCを適用できる可能性があり、今後は用途開発を含めて、さらに検討を進める予定である。

4. まとめ

本研究では、マトリックスに粗骨材を含むコンクリート調合のCFRCの開発を目的に、最適調合の選定とCFRCの各種力学的特性について実験的検討を行った。最適調合の選定では、CFRCの圧縮および曲げ特性に対して、細骨材率、単位セメント量および水セメント比の最適値を求め、またシリカフュームと高性能AE減水剤を併用することによって、細骨材率と単位セメント量をかなり低減することができることを示した。CFRCの各種力学的特性の評価では、最適調合のCFRCについて、圧縮、引張、曲げおよび破壊靱性試験を行い、コンクリート調合のCFRCの各種力学的特性を調べ、既往のモルタル調合のCFRCやSFRCの場合と比較検討した。その結果として、モルタル調合のCFRCとの比較で、剛性、曲げタフネスおよび破壊靱性の向上が認められ、コンクリート調合のCFRCは、どちらかというところSFRCに近い力学的特性を有することが分かった。

謝辞

本研究にあたっては、熊本大学工学部技官の甲斐定夫氏、熊本市役所の林田純一氏（当時、熊本大学大学院生修士）、熊本大学大学院生修士の矢加部智子さん、ならびに熊本大学卒論生の鈴木 健、堂地利弘両君の協力をいただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

1)三井宜之ほか：調合因子がCFRCのフレッシュ時および硬化時の特性に及ぼす影響－軽量炭素繊維補強コンクリート(CFRC)

の調合と基礎物性に関する実験的研究(その1)、日本建築学会構造系論文集、第482号、pp. 17-26, 1996. 4

2)一ノ瀬賢一ほか：炭素繊維補強モルタル・コンクリートに関する研究(その3) 炭素繊維を混入したモルタルの乾燥収縮の低減方法、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 423-424, 1995. 8

3)三井宜之ほか：炭素繊維補強コンクリートを用いた大型カーテンウォールの曲げ特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 36B、pp. 233-244, 1990. 3

4)坂井廣道ほか：炭素繊維補強コンクリートとH形鋼の合成パネルの負曲げ特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 39B、pp. 343-354, 1993. 3

5)村上 聖ほか：鋼繊維補強コンクリートの力学パラメータに及ぼす調合因子の相互作用の定量分析、コンクリート工学論文集、第7巻、第1号、pp. 23-30, 1996. 1

6)小林一輔著：繊維補強コンクリート－特性と応用－、オーム社、1981

7)村上 聖ほか：繊維補強コンクリートの破壊力学特性に関する研究、コンクリート工学論文集、第5巻、第2号、pp. 1-10, 1994. 7

8)村上 聖ほか：繊維補強コンクリートの曲げ強度の寸法効果と破壊靱性、セメント・コンクリート論文集、No. 49、pp. 802-807, 1995

9)三井宜之ほか：硬化CFRCの基礎物性における各種力学的特性－軽量炭素繊維補強コンクリート(CFRC)の調合と基礎物性に関する実験的研究(その2)－、日本建築学会構造系論文集、第487号、pp. 39-46, 1996. 9

(1998年4月3日原稿受理、1998年8月21日採用決定)