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)

VARIOUS MECHANICAL CHARACTERISTICS IN FUNDAMENTAL
PROPERTIES OF HARDENED CFRCExperimental study on mix proportions and fundamental properties of
light-weight carbon fiber reinforced concrete (CFRC) (Part 2)

三井宜之*, 村上 聖**, 坂井廣道***, 武田浩二****

中村守康*****, 久部修弘*****

*Yoshiyuki MITSUI, Kiyoshi MURAKAMI, Hiromichi SAKAI, Koji TAKEDA,
Moriyasu NAKAMURA and Nobuhiro HISABE*

In this study, in order to obtain mechanical properties of hardened carbon fiber reinforced concrete (CFRC), compression, bending, fracture toughness and flexural fatigue testings were conducted.

From the results, following items were investigated and discussed: 1) fundamental mechanical properties such as Young's modulus and compressive and flexural strengths, 2) tension-softening curves and J-integral values estimated by means of an inverse analytical approach using the cohesive force model, 3) evaluation of size effects on flexural strength based on a highly-stressed volume concept, and 4) flexural fatigue endurance and residual flexural strength after fatigue testing.

Keywords : carbon fiber reinforced concrete, mechanical characteristics, static strength, fracture mechanics, size effect, flexural fatigue

炭素繊維補強コンクリート, 力学的特性, 静的強度, 破壊力学, 寸法効果, 曲げ疲労

1. はじめに

炭素繊維補強コンクリート(以下、CFRCと略記する)は、そのすぐれた力学的特性を利用し、カーテンウォールなどの各種建材への用途開発が進められており、その適用例も着実に増えつつある。その際に、CFRCが設計可能な材料であることが要求され、所要のフレッシュおよび硬化時の特性を得るための調合設計や、所要の部材性能を得るための断面設計の確立が今後の重要な課題である。

調合設計に関しては、フレッシュ時の特性として繊維分散性、コンシステンシーおよび空気量など、硬化時の特性として比重、脱型強度、材料強度および耐久性などについて、所要の特性を得るための使用材料の選定や、繊維長さ、繊維体積率および水セメント比などの調合因子の決定が必要になる。筆者らは、既報¹⁾(その1)において、単位セメント量、使用骨材のうちのけい砂の粒

径や軽量化のために用いたシラスパルーンの混合割合、水セメント比、繊維長さおよび繊維体積率などの調合因子が、フレッシュおよび硬化CFRCの諸特性に及ぼす影響に関し実験的検討を行い、繊維分散性、フロー値、空気量、気乾比重、脱型強度および材料強度に対して、所要の設計目標値を得るための最適調合の選定について報告している。

本報では、その2として、部材の断面設計に供しうる基礎的データを得ることを目的に、硬化CFRCの基礎物性における各種力学的特性に関して実験的検討を行った結果について報告する。ここでは、硬化CFRCの圧縮、曲げ、破壊靱性および曲げ疲労試験を行い、圧縮強度、ヤング係数および曲げ強度などの基礎的力学性状、結合力モデル(cohesive force model)の逆解析手法により推定された引張軟化曲線とJ積分値、高応力体積の概念(highly-stressed volume concept)により定量化

* 熊本大学工学部建築学科 教授・工博

** 熊本大学工学部建築学科 助教授・工博

*** 三菱化学(株)黒崎事業所 工博

**** 熊本大学大学院自然科学研究科
大学院生・工修

***** 三菱化学(株)黒崎事業所 工修

***** 三菱化学(株)黒崎事業所

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

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

Kurosaki Plant, Mitsubishi Chemical Corporation, Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., M. Eng.

Kurosaki Plant, Mitsubishi Chemical Corporation, M. Eng.

Kurosaki Plant, Mitsubishi Chemical Corporation

された曲げ強度の寸法依存性、S-N曲線と曲げ疲労強度などについて検討し、それらの結果から、硬化CFRCの力学的特徴を総合的に考察した。

2. 実験方法

2.1 CFRCの使用材料および調合

曲げ疲労試験に供した試験体を除くCFRCの使用材料および調合を表-1,2に示す。セメント、骨材および混和剤は、その1で使用したものと同一のものであり、炭素繊維には、その1で使用したもの（ここでは、タイプAと呼ぶことにする）に加えて、タイプAよりも高強度のもの（ここでは、タイプBと呼ぶことにする）も用いて、繊維強度の違いが各種力学的特性に及ぼす影響について検討した。また、調合は、その1に示した実験結果に基づいて、タイプAでは、繊維長さが6,10および18mmの3種類について、繊維体積率を1.8%、水セメント比を

表-1 CFRCの使用材料(曲げ疲労試験体を除く)

セメント	低収縮セメント：比重=2.97
骨 材	けい砂6号(熊本産)：比重=2.7 シラスパルーン：比重=1.0 けい砂：シラスパルーン=1：1(質量比)
混 和 剤	分散剤：メチルセルロース 高性能減水剤：高縮合トリアジン系化合物 消泡剤：アルキレンオキッド系化合物 凝結時間調節剤：クエン酸
繊 維	炭素繊維(タイプA)：比重=1.9 寸法： $\phi 17 \mu m \times 6, 10, 18mm$ 引張強度：180kgf/mm ² 引張弾性率：18000kgf/mm ² 炭素繊維(タイプB)：比重=1.8 寸法： $\phi 7 \mu m \times 6, 12, 18mm$ 引張強度：500kgf/mm ² 引張弾性率：24000kgf/mm ²

表-2 CFRCの使用調合(曲げ疲労試験体を除く)

繊維種類	lf (mm)	Vf (%)	W/C (%)	S/C (%)	70-値 (mm)	空気量 (%)
タイプA	6	1.8	47.5	25.0	157	5.4
	10				149	5.3
	18				145	10.3
タイプB	6	0.5	44.0	25.0	175	4.9
	12				164	6.5
	18				162	5.5

* lf:繊維長さ, Vf:繊維体積率, W/C:水セメント比, S/C:骨材セメント比
** メチルセルロース、高性能減水剤、消泡剤、クエン酸は、セメント質量のそれぞれ0.25%, 3.0%, 2.0%, 0.5%を混入した。

47.5%、骨材セメント比を25.0%とし、タイプBでは、繊維長さが6,12および18mmの3種類について、繊維体積率を0.5%、水セメント比を44.0%、骨材セメント比を25.0%として、混和剤の使用量は、すべてについて表中に示す値に固定した。なお、繊維分散性は、すべてについてファイバーボールもなく良好であった。また、表中に併記しているフロー値や空気量も、その1で提示した設計目標値(それぞれ130以上および $6 \pm 2\%$)をほぼ満足している。

曲げ疲労試験に供したCFRCの使用材料および調合を表-3,4に示す。セメントには、試験時材令の短縮のために早強ポルトランドセメントを用い、炭素繊維にはタイプAを使用した。また、調合は、フロー値が130以上を目標に、繊維体積率を2.0%、骨材セメント比を60.0%と一定にし、水セメント比を変化させ、最大の曲げ強度が得られる範囲で試し練りにより定めた。なお、表中には、 $\phi 5 \times 10cm$ の円柱供試体による圧縮および割裂引張強度、 $4 \times 4 \times 16cm$ の角柱供試体による曲げ強度(JIS R 5201に準拠)の測定値を併記している。

以上のCFRCの練混ぜには、容量30 lのオムニミキサーを使用し、練混ぜ手順および練混ぜ時間は、その1で示した方法と同様である。また、CFRCの締め固めには、高周波振動機および棒状振動機を併用した。

2.2 試験方法

1) 圧縮試験

圧縮試験には、 $\phi 10 \times 20cm$ の円柱供試体を用いて、圧縮応力-ひずみ曲線を測定した。なお、ひずみの計測には、コンプレッソメーターを使用した。また、供試体は同一条件ごとに3個ずつ作製し、曲げ疲労試験のシリーズを除いて、セメントに低収縮セメントを使用している

表-3 曲げ疲労試験に供したCFRCの使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント：比重=3.13
骨 材	けい砂8号(熊本産)：比重=2.7
混 和 剤	分散剤：メチルセルロース
繊 維	炭素繊維(タイプA)：比重=1.9 寸法： $\phi 17 \mu m \times 18mm$

表-4 曲げ疲労試験に供したCFRCの使用調合

Vf (%)	W/C (%)	S/C (%)	70-値 (mm)	f _c (kg/cm ²)	f _t (kg/cm ²)	f _b (kg/cm ²)
2.0	55.0	60.0	147	314	80.0	148

* f_c:圧縮強度, f_t:割裂引張強度, f_b:曲げ強度

** 圧縮および割裂引張試験には $\phi 5 \times 10cm$ 円柱供試体を使用。曲げ試験には $4 \times 4 \times 16cm$ 角柱供試体を使用し、試験方法はJIS R5201に準拠。なお、材令1週(水中養生)。

ために、試験時（材令28日以上）まで約20℃の恒温室内で気中養生を行った。一方、曲げ疲労試験のシリーズでは、材令14日まで約20℃水中養生後、試験時まで気中養生を行った。

2) 曲げ試験

曲げ試験には、幅×せい×長さ（スパン長さ）が10×10×40(30)cm、10×15×55(45)cm、10×20×70(60)cm、15×25×240(75, 100, 200)cmのはり試験体を用いて、荷重－スパン中央変位曲線を測定した。なお、はり試験体は、同一条件ごとに、10×10×40cmについて3～5個ずつ、10×15×55cmおよび10×20×70cmについて各3個ずつ作製し、また15×25×240cmについては2個ずつ作製し、スパン長さを200cmで曲げ試験をした後、その折片を利用して、スパン長さを75および100cmで再度曲げ試験を行った。また、載荷形式は、すべて中央集中3点曲げとし、試験体は、試験時まで気中養生を行った。

3) 破壊靱性試験

破壊靱性試験には、幅×せい×長さ（スパン長さ）が10×10×40(30)cmの切欠きはり試験体を用いて、荷重－切欠き肩口開口変位（crack mouth opening displacement, CMOD）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（刃厚約1mm）により設け、その深さはすべて30mmとした。また、載荷形式は、中央集中3点曲げとし、CMODは、切欠き肩口にナイフエッジを介して取り付けたクリップゲージにより計測した。ここで、切欠きはり試験体は、同一条件ごとに3個ずつ作製し、試験時まで気中養生を行った。

4) 曲げ疲労試験

曲げ疲労試験には、幅×せい×長さ（スパン長さ）が10×10×40(30)cmの切欠きはり試験体を用いて、荷重－CMOD曲線を測定した。切欠きを設けたのは、ひびわれ発生位置を特定するためであり、切欠き深さは5mmとした。また、載荷は、油圧サーボ型試験機により、中央集中3点曲げの片振りとし、制御波形はsin波、載荷速度は1～4Hzとした。なお、上限荷重は、切欠き深さが5mmの切欠きはり試験体の静的最大荷重の測定値の約80%程度を目安に、1.80および1.90tfの2種類とし、下限荷重は約0.20～0.40tfとした。また、載荷方法は、図-1に示すように、切欠きを設けた面が上側に位置するように加力した。ひびわれの観察には、倍率が10倍のルーペを使用し、表面ひびわれの進展をリアルタイムで調べた。

本実験では、後述するように、繰り返し回数が数十万回に達した時点で、切欠き先端からのひびわれ進展がほぼ停留して、破壊の兆候がみられなかったために、途中で疲労試験を打ち切り、静的曲げ載荷により残存曲げ強度を測定した。その際に、切欠き深さが5, 10および20mmの切欠きはり試験体の静的曲げ試験も同時に行い、曲げ疲労試験体との比較検討を行った。なお、試験体数は、

図-1 CFRCの曲げ疲労試験方法

静的曲げ試験に供した、切欠き深さが5, 10および20mmの切欠きはり試験体が各3個ずつ、曲げ疲労試験に供した切欠き深さが5mmの切欠きはり試験体が3個で、すべての試験体は、材令14日まで約20℃の水中で養生後、試験時まで気中養生を行った。

3. 評価方法

1) CFRCの基礎的力学性状の評価

硬化CFRCの圧縮強度、ヤング係数（1/3割線弾性係数）および曲げ強度について、圧縮強度とヤング係数の関係や圧縮強度と曲げ強度の関係を、既報^{2), 3)}の鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRCと略記）の場合と比較検討し、CFRCの基礎的力学性状を考察した。

2) CFRCの引張軟化曲線とJ積分値の評価

ここでは、既報⁴⁾のJ等価Dugdaleモデルの逆解析により、荷重－CMOD曲線の測定値と計算値との一致から、CFRCの引張軟化曲線と、その曲線下の面積で表されるJ積分値を求め、CFRCにおける繊維強化機構の特徴と、後述の曲げ強度の寸法依存性や曲げ疲労強さとの対応について考察した。

3) CFRCの曲げ強度の寸法依存性の定量化

ここでは、R. J. Torrentによる⁵⁾、高応力体積の概念により、CFRCの曲げ強度の寸法依存性について考察した。ここで、高応力体積とは、試験体中で最大引張応力の95%以上の引張応力を受ける領域の体積と定義される。その概念は、高応力領域で発生するひびわれが終局的破壊をもたらすことから、その領域の体積が増加するほど、引張あるいは曲げ強度が低下するという確率論的最弱リンク理論に基づくものであり、引張あるいは曲げ強度と高応力体積の関係は、一般に次式で表示される。

$$f_t \text{ or } f_b = A \cdot V^{-a} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 f_t :引張強度、 f_b :曲げ強度、 V :高応力体積、 A, a :材料定数。

また、高応力体積 (V) は、曲げを受ける場合には、平面保持を仮定した初等曲げ理論により、中央集中3点曲げについて次式により計算される。

$$V = 6.25 \times 10^{-4} b \cdot d \cdot l \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 b :はり幅、 d :はりせい、 l :スパン長さ。

ここで、式(1)からわかるように、引張あるいは曲げ強度と高応力体積の関係を両対数表示すると、その間に直線関係が成立し、その直線の負勾配が指数、 a となり、引張あるいは曲げ強度の寸法効果を表すパラメーターとなる。そこで、ここでは、曲げ強度の測定値と高応力体積の両対数の回帰直線から、指数、 a を求めた。

4. 実験結果および考察

4.1 CFRCの基礎的力学性状

表-5, 6に、CFRCの気乾比重、圧縮強度、ヤング係数および曲げ強度の測定値の平均を示す。なお、比重は $\phi 10 \times 20$ cm円柱供試体の質量を外形寸法により算定された容積で割って求めた。また、図-2は、圧縮強度とヤング係数の関係を示す。なお、既報²⁾のSFRCに関する実験結果も比較のために併記している。また、次式に示すRC構造計算規準式を、SFRCについては気乾比重 (γ) を2.3、CFRCについては $\gamma=1.53$ (すべての気乾比重の測定値の平均) として、図中に示している。

$$E = 2.1 \times 10^5 (\gamma / 2.3)^{1.5} \sqrt{f_c} / 200 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \quad \dots\dots(3)$$

図より、同一比重の比較で、普通コンクリートに比べて、SFRCおよびCFRCともにヤング係数は小さくなり、CFRCでは計算値の約0.75~0.85になっているが、その低下はSFRCとほぼ同程度で、また繊維の混入によりヤング係数が低下するという実験事実に対応す

表-5 CFRCの気乾比重と圧縮試験結果

繊維種類	l (mm)	γ	f_c (kgf/cm ²)	$E (\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$	
				測定値	計算値
タイプ A	6	1.52	303	1.04(0.75)	1.39
	10	1.53	294	1.03(0.75)	1.38
	18	1.51	282	1.05(0.79)	1.33
タイプ B	6	1.57	323	1.17(0.77)	1.51
	12	1.52	300	1.20(0.87)	1.38
	18	1.55	317	1.25(0.86)	1.46

* γ :気乾比重、 f_c :圧縮強度、 E :ヤング係数 (1/3 割線弾性係数)

** E の計算値は、 $2.1 \times 10^5 (\gamma / 2.3)^{1.5} \sqrt{f_c} / 200$ による。また、()内の数値は、計算値に対する測定値の比を示す。

るものである。

図-3は、圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。なお、図中には、既報³⁾のSFRCに関する実験結果も比較のために併記している。なお、曲げ強度は、寸法が $10 \times 10 \times 40(30)$ cmのはり試験体の中央集中3点曲げによる値を示している。図より、圧縮強度に対する曲げ強度の比は、SFRCで約1/8~1/4、CFRCで約1/3~1/2となっ

表-6 各種寸法のCFRCはり試験体の曲げ試験による曲げ強度の測定値 (平均)

1) 繊維種類: タイプ A

はり試験体寸法 $b \times d \times l$ (cm)	V (cm ³)	f_b (kgf/cm ²)		
		$l=6$ mm	$l=10$ mm	$l=18$ mm
$10 \times 10 \times 30$	1.88	97.8	120	131
$10 \times 15 \times 45$	4.22	84.6	104	170
$10 \times 20 \times 60$	7.50	89.4	82.2	133
$15 \times 25 \times 75$	17.6	93.3	96.5	116
$15 \times 25 \times 100$	23.4	86.2	102	91.9
$15 \times 25 \times 200$	46.9	58.2	77.7	98.1

2) 繊維種類: タイプ B

はり試験体寸法 $b \times d \times l$ (cm)	V (cm ³)	f_b (kgf/cm ²)		
		$l=6$ mm	$l=12$ mm	$l=18$ mm
$10 \times 10 \times 30$	1.88	115	104	103
$10 \times 15 \times 45$	4.22	104	84.5	95.0
$10 \times 20 \times 60$	7.50	97.7	77.3	94.4
$15 \times 25 \times 75$	17.6	89.9	82.2	66.4
$15 \times 25 \times 200$	46.9	85.4	67.1	64.3

* b :はり幅、 d :はりせい、 l :スパン長さ、 V :高応力体積 (highly-stressed volume) $= 6.25 \times 10^{-4} b \cdot d \cdot l$ 、 f_b :曲げ強度 (3点曲げ)

図-2 CFRCの圧縮強度とヤング係数の関係

おり、SFRCよりもCFRCの方が曲げ強度に対する繊維の補強効率がかかなり高いことがわかる。

4.2 CFRCの引張軟化曲線

図-4に、CFRC（タイプAおよびタイプB）の結合応力-COD（crack opening displacement）関係で表示される引張軟化曲線の推定値を示す。また、比較のために、既報⁶⁾の普通コンクリートおよびSFRCに関する結果も併記している。なお、これらの普通コンクリートおよびSFRCは、後述のCFRCの曲げ強度の寸法依存性との比較にも利用している。図により、普通コンクリートでは大きな引張軟化特性を示しているが、CFRCおよびSFRCはともに、CODの大きい範囲まで繊維のブリッジング作用により高い結合応力を保持していることがわかる。また、繊維種類の違いによる差異をみると、SFRCの場合、CODが0.05cmま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、ピーク応力はSFRCよりも全体的に高いが、ピーク応力の発現が早く、CODが約0.01cm以上で引張軟化特性が支配的になっている。さらに、CFRCの繊維タイプの違いによる差異をみると、高強度型のタイプBでは、繊維体積率がタイプAの繊維体積率の約1/4とかなり小さいにもかかわらず、ピーク応力は、タイプAのそれとほぼ同じくらいで、ピーク後の引張軟化の程度も小さくなっている。繊維補強コンクリートの引張軟化挙動は、ひびわれ面に介在する繊維の引き抜けや破断によるが、タイプAとBで界面状態にほとんど差異がなく、繊維の引き抜け抵抗がほぼ同程度であると考え、両タイプにおける引張軟化特性の差異は、主として繊維の破断に起因し、繊維が高強度になると繊維の破断が遅延されるために、引張軟化の程度が小さくなるものと推察される。なお、繊維長さの違いの影響については、引張軟化形状について明確な傾向は認められないが、後述の表-7に示すように、引張軟化曲線下の面積で表されるJ積分値については、タイプAでは、繊維長さが大きくなるほどJ積分値は増加し、タイプBでは、逆に繊維長さが大きくなるほどJ積分値が減少している。

4.3 CFRCの曲げ強度の寸法依存性

図-5は、前述の表-6に示す各種寸法のはり試験体による曲げ強度の測定値と高応力体積の関係を示す。なお、図中には、曲げ強度の測定値を式(1)に当てはめて求めた回帰曲線を併記している。また、表-7には、回帰曲線（相関係数）とCODが0.05cmでのJ積分値を示す。なお、比較のために、前述の普通コンクリートおよびSFRCに関する結果も併記している。これらの結果より、曲げ強度は、高応力体積の増加とともに指数関数的に低下し、また、式(1)により、曲げ強度の寸法依存性を高い精度で表示できることがわかる。

図-6, 7は、CFRCのJ積分値と曲げ強度の関係およ

図-3 CFRCの圧縮強度と曲げ強度の関係

図-4 CFRCの引張軟化曲線の推定値

びJ積分値と曲げ強度の寸法依存性の関係についてそれぞれ示す。なお、曲げ強度は、寸法が $10 \times 10 \times 40(30)$ cmのはり試験体による値を示し、曲げ強度の寸法依存性は式(1)における指数、 a の値で表している。また、比較のために普通コンクリートおよびSFRCに関する結果も併記している。図-6より、曲げ強度は、J積分値が大きくなるほど増加しているが、同一のJ積分値の比較ではSFRCよりもCFRCの方が曲げ強度が高くなっていることがわかる。この結果は、前述の圧縮強度に対する曲げ強度の比が、SFRCよりもCFRCの方が高いことに対応している。これは、前述の引張軟化曲線形状の差、すなわちCFRCの方がピーク応力が高く、ピーク応力の発現が早い（曲げ強度に関係するCODの小さい範囲での結合応力が高い）ことに起因しているものと考えられる。

また、図-7より、指数、 a で表される曲げ強度の寸法効果の程度は、J積分値が大きくなるほど小さくなり、CFRCにおいて多少のばらつきはみられるが、繊維種類によらず、J積分値と曲げ強度の寸法効果の関係は、ほぼ同一線上に乗ることがわかる。このことは、小型試験体で測定されるJ積分値により、曲げ強度の寸法依存性を統一的に扱える可能性を示唆している。

図-5 CFRCの曲げ強度と高応力体積の関係

表-7 曲げ強度と高応力体積の関係の回帰曲線

SFRC(異形ファイバー)			回帰曲線(r:相関係数)	J積分値(kgf/cm)
W/C(%)	V _f (%)	l _t (mm)		
50	0	—	$f_b = 76.1V^{-0.201}$ ($r=0.998$)	0.15
	1.0	30	$f_b = 75.4V^{-0.099}$ ($r=0.950$)	1.37
	2.0	30	$f_b = 91.6V^{-0.080}$ ($r=0.862$)	1.74
	1.4	50	$f_b = 96.8V^{-0.056}$ ($r=0.928$)	2.24
CFRC			回帰曲線(r:相関係数)	J積分値(kgf/cm)
タイプ	V _f (%)	l _t (mm)		
A	1.8	6	$f_b = 108V^{-0.108}$ ($r=0.691$)	1.10
		10	$f_b = 120V^{-0.095}$ ($r=0.703$)	1.17
		18	$f_b = 170V^{-0.147}$ ($r=0.776$)	1.30
B	0.5	6	$f_b = 120V^{-0.094}$ ($r=0.987$)	1.70
		12	$f_b = 106V^{-0.115}$ ($r=0.898$)	1.57
		18	$f_b = 119V^{-0.166}$ ($r=0.935$)	1.38

* J積分値は、COD=0.05cmでの値。

図-6 CFRCのJ積分値と曲げ強度の関係

図-7 CFRCのJ積分値と曲げ強度の寸法効果

4.4 CFR Cの曲げ疲労特性

表-8に、曲げ疲労試験に供したCFRCの素材試験結果を示す。また、図-8に、曲げ疲労試験による表面ひびわれの進展状況を示す。ひびわれは、切欠き先端から生じ、上限荷重が1.80tfでは約17000～18000回、1.90tfでは約2500回の繰り返し回数で、目視によるひびわれが観察され、上限荷重の大きい方がひびわれの発生や進展速度も早くなっている。また、ひびわれは、切欠きの両側面に生じたが、片側のみが進展し、進展量が約30～40mmに達した時点で、ひびわれの進展がほとんど停留した。このために、本実験では、上限荷重が1.80tfについては800000～850000回、1.90tfについては440000回の繰り返し

し回数で疲労試験を打ち切り、静的曲げ载荷により残存曲げ強度を調べることにした。なお、疲労試験後の試験体の切欠き部に黒色インクを浸透させ、静的曲げ試験後の破断面について内部ひびわれの進展状況を調べたが、目視による表面ひびわれの進展量よりも小さいものの、インクが浸透するほどの内部ひびわれの進展が観察された。

図-9は、静的最大荷重（切欠き深さが5mmの切欠きはり試験体3個の測定値の平均）に対する上限荷重の比と繰り返し回数の関係（S-N曲線）を示す。なお、図中には、既往の研究⁷⁾による普通コンクリートについての結果を比較のために併記している。本実験では、疲労破壊を生じた試験体がないために、直接の比較はできないが、CFRCのひびわれ発生時の繰り返し回数をみても普通コンクリートの疲労破壊寿命を上回っており、CFRCの曲げ疲労強度は、普通コンクリートよりもかなり大きくなることが予想される。

表-9に、疲労試験後の試験体の静的曲げ载荷による残存曲げ強度の測定値を示す。なお、曲げ強度は、切欠きを含む全断面についての公称値を示す。表より、疲労試験後の試験体の曲げ強度の低下はほとんどみられず、曲

表-8 疲労試験に供したCFRCの素材試験結果

f _c (kgf/cm ²)	E(×10 ⁵) (kgf/cm ²)	f _t (kgf/cm ²)	f _b (kgf/cm ²)
384	1.63	81.0	127

* 圧縮および割裂引張試験にはφ10×20cm円柱供試体を使用。曲げ試験には10×10×40cm角柱供試体を使用し、载荷形式は3点曲げ(70°)長さ30cm)。なお、材令2週(水中養生)後、試験時まで気中養生。

図-8 曲げ疲労試験におけるCFRCのひびわれ進展状況

図-9 CFR CのS-N曲線

表-9 曲げ疲労試験に供した試験体の残存曲げ強度

Nmax	Pmax (tf)	f _b (kgf/cm ²)
静的(処女)载荷	—	103
800,000回	1.80	105
850,000回	1.80	100
440,000回	1.90	100

* Nmax: 試験打ち切り時点での繰り返し回数,
Pmax: 上限荷重(なお、下限荷重は0.20～0.40tf), f_b: 公称(残存)曲げ強度

げ強度は、ほぼ100%残存していることがわかる。また、図-10は、疲労試験体の静的曲げ載荷による荷重-CMOD曲線の測定値を示す。なお、比較のために、疲労試験に供していない、切欠き深さが5, 10および20mmの切欠きはり試験体の結果も併記している。図より、疲労試験体の曲げ剛性は、切欠き深さが10および20mmの切欠きはり試験体の曲げ剛性の中間にあり、疲労試験によるひびわれ進展に伴って、大きな剛性低下がみられるが、最大荷重は、初期切欠き深さが同一の5mmの切欠きはり試験体とほぼ同じで、静的耐力の低下はほとんどないことがわかる。疲労ひびわれは、倍率が10倍のルーペで観察される程度の微細なヘア状のひびわれで、ひびわれ幅は約0.1mm以下と考えられ、前述のCFRCの引張軟化曲線の推定値からわかるように、CODが約0.1mm以下では、繊維の引き抜けや破断による引張軟化挙動を示していないことから、ひびわれ面をブリッジしている繊維の引張抵抗が、曲げ疲労強度の向上に大きく寄与していることが推察される。

5. まとめ

本研究では、硬化CFRCの基礎物性における各種力学的特性を調べるために、CFRCの圧縮、曲げ、破壊靱性および曲げ疲労試験を行い、CFRCの力学的特徴について実験的に検討した。その結果として、次のような知見が得られた。

- 1) CFRCの基礎的力学性状について、繊維混入によるヤング係数の低下は、比較としたSFRCの場合とほぼ同程度であり、また、圧縮強度に対する曲げ強度比は、SFRCよりもCFRCの方がずっと大きく、曲げ強度に対する炭素繊維の補強効率が高いことがわかった。
- 2) CFRCの引張軟化曲線について、ピークの結合応力は、比較としたSFRCよりもCFRCの方が全体的に高いが、ピーク応力の発現が早く、CODが約0.1mm以上で繊維の引き抜けや破断に起因する引張軟化挙動が支配的になる。また、繊維タイプの違いでは、高強度の炭素繊維の方が、繊維体積率がかなり小さいにもかかわらず、ピーク応力はほぼ同程度で、引張軟化の程度も小さくなった。これは、高強度になると、繊維の破断が遅延されるためであると考えられる。
- 3) CFRCの曲げ強度の寸法依存性について、高応力体積概念に基づく式(1)により、曲げ強度の寸法効果を精度良く定量表示でき、高応力体積が大きくなるほど、曲げ強度は指数関数的に低下する。また、曲げ強度の寸法効果は、引張軟化曲線下の面積で表されるJ積分値が大きくなるほど小さくなり、炭素繊維や鋼繊維などの繊維種類によらず、J積分値と曲げ強度の寸法効果の間に良い相関が得られた。
- 4) CFRCの曲げ疲労特性について、本実験では、最終

図-10 静的曲げ載荷による荷重-CMOD曲線

的に疲労破壊を生じた試験体がないために、直接の比較はできないが、CFRCのひびわれ発生時点での疲労繰返し回数をみても、既往の研究における普通コンクリートの疲労破壊寿命を上回っており、CFRCの曲げ疲労強度は、普通コンクリートよりもかなり大きくなるものと予想される。また、疲労試験打ち切り後の試験体の曲げ強度の低下はほとんどなく、曲げ強度は、ほぼ100%残存していることがわかった。このことは、ひびわれ面で炭素繊維が引き抜けたり、破断せずに、ひびわれ面をブリッジしている繊維の引張抵抗が、曲げ疲労強度の向上に大きく寄与していることを示している。

謝辞

本研究に当たって、熊本大学工学部技官甲斐定夫氏、当時熊本大学大学院修士の松尾隆一郎氏(現在、旭化成)、当時熊本大学卒論生の松本英治(現在、安藤建設)、徳永貴久(現在、久留米市役所)、長久智(現在、松尾建設)、林田純一(現在、熊本大学大学院)諸氏の協力を頂きました。ここに記して、深謝致します。

参考文献

- 1) 三井宜之ほか5名: 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報告集, No. 482, pp. 17-26, 1996. 4
- 2) 村上聖ほか2名: 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
- 3) 柳淳ほか3名: 鋼繊維補強コンクリート部材の断面設計に必要な素材特性の定量化に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, pp. 41-44, 1994. 3
- 4) 村上聖ほか4名: 繊維長さ、繊維体積率、マトリックス強度が破壊靱性に及ぼす相互作用-繊維補強コンクリートの破壊力学に関する研究-, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 451, pp. 33-39, 1993. 9
- 5) R.J.Torrent; A general relation between tensile strength and specimen geometry for concrete-like materials, Materials and Structures, Vol. 10, No. 58, pp. 187-196, 1977. 7-8
- 6) 村上聖ほか3名: 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, 1996. 1
- 7) U. Ohlsson, P.A. Daerga, L. Elfgren; Fracture energy and fatigue strength of unreinforced concrete beams at normal and low temperature, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, No. 1/2/3, 1990

(1996年1月22日原稿受理, 1996年4月17日採用決定)