論文 高靭性セメント複合材料の材料特性に関する基礎的研究

渡部 憲*1・大岡 督尚*2・白都 滋*3・白井 伸明*4

要旨:本研究では、最近注目を集めている高靭性セメント複合材料を取り上げ、高靭性セメント複合材料を鉄筋コンクリート構造物に適用しようとする場合の重要な検討項目である、収縮、クリープ、強度発現および圧縮・引張繰返し挙動等について検討を行った。その結果、高靭性セメント複合材料の圧縮強度およびヤング係数発現は、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]およびCEB-FIP Model Code 1990に示される既往式をベースとした推定式により、良好に推定可能であること、 高靭性セメント複合材料の繰返し構成則は、本研究で仮定したモデルで概ね評価可能であること等の知見が得られた。

キーワード:収縮,クリープ,強度発現,繰返し挙動,FEM

1. はじめに

最近、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回るひび割れ分散性や破壊靭性を有する「高靭性セメント複合材料(以下、DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite)と略記)」が注目を集めており^{1,2)}、構造物のエネルギー吸収デバイスとして適用しようという試みも報告されている¹⁾。DFRCCを鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物に積極的に適用していくことは、RC構造物の耐震性のみでなく、耐久性の向上にも大きく寄与すると考えられる。

筆者らも、これまでに細骨材種類、水セメント比、ビニロン繊維寸法、繊維体積混入率を変動因子としたビニロン繊維補強モルタルの切り欠き梁3点曲げ実験を行い、DFRCCの優れたひび割れ分散性および破壊靭性を確認した3。

DFRCCをRC構造物に適用しようとする場合、収縮、クリープ、強度発現等の長期性状について十分検討しておく必要がある。これまで、コンクリートや繊維補強コンクリートの長期性状に関する研究は数多く行われている例えば4)。しかしながら、DFRCCの長期性状に関する研究報告は少ない。また、DFRCCをRC部材に適用し、その応

答特性を解析的に評価しようとする場合, DFRCCの圧縮・引張繰返し挙動についても把握 しておく必要がある。

そのため、本研究では、骨材種類の異なる3種類のDFRCCの収縮、クリープ、強度発現および圧縮・引張繰返し挙動について検討を行った。

2. 実験概要

本研究では、表-1に示すDFRCCの収縮、クリープ、強度発現および圧縮・引張繰返し実験を行った。使用細骨材種類は、珪砂、山砂および廃ガラス発泡骨材である。なお、DFRCCの繊維体積

表-1 DFRCCの調合 (a) 調 合

調合名	W/C	S/C	繊維 混入率	単位量(kg/m³)			
	(wt. %)	(wt.%)	(vol. %)	W	С	S	繊維
SVFRM	55. 0	34. 5		504	916	316	26
NVFRM	60.0	191	2.0	334	556	1062	26
LVFRM	40.0	23. 4		335	837	196	26

(b) 使用材料

調合名	С	S	繊維		
SVFRM	普通 ポル トラ	7 号珪砂 (最大寸法: 0.2mm)	ビニロン(径: $0.04mm$,長さ: $12mm$,弾性係数: $40kN/mm^2$, 引 張 強 度: $1600N/mm^2$)		
NVFRM			ビニロン (径:0.1mm,		
LVFRM	セメント	廃ガラス発泡細骨材 (最大寸法:5mm)	長さ:24mm,弾性係数: 25kN/mm², 引 張 強 度 : 1100N/mm²)		

^{*1} 東海大学 工学部建築学科講師 工博 (正会員)

^{*2} 東急建設(株) 技術研究所先端技術グループ 工博 (正会員)

^{*3} 東急建設(株) 技術研究所先端技術グループ Ph.D. (正会員)

^{*4} 日本大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

混入率は2%とした。

2.1 強度発現試験

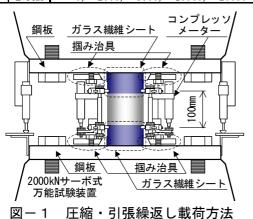
DFRCCの強度発現に及ぼす養生条件および材齢の影響を調べるため、 $100\phi \times 200$ mmの円柱供試体を各要因ごとに3体製作した。試験材齢は7,28および91日,養生方法は空中養生および標準養生である。試験体は、DFRCC打設後試験体型枠脱型までの2日間は湿布養生、試験体脱型から試験時まで、1)恒温恒湿室内(室温20°C、湿度60%RH)での養生(空中養生)、2)恒温水槽内(水温20°C)での養生(標準養生)とした。

2.2 収縮およびクリープ試験

自由・自己収縮ひずみおよびクリープひずみ 計測用として、100 φ×200mmの円柱供試体を各 要因ごとに3体製作した。試験体はDFRCC打設 後試験体型枠脱型までの2日間は湿布養生,試 験体脱型後は恒温恒湿室内(室温20℃,湿度60% RH)での空中養生とした。自己収縮ひずみ計測用 試験体は、脱型後の水分逸散を防ぐために試験 体表面をアルミ箔で覆い、恒温恒湿室内(室温 20℃,湿度60%RH)での空中養生とした。各ひず みは試験体中央部分に検長100mmの埋め込み型 ひずみゲージを設置し、データロガーおよび データレコーダーを用いて自動計測を行った。

表-2 計画載荷履歴

		20 日 四 取 刊 版 正
載荷	試験体	目標ひずみ(μ)
圧縮	SVFRM	0, -3000, -5000, -10000, -20000
	NVFRM	0, -2000, -5000, -10000, -20000
	LVFRM	0, -3000, -5000, -10000, -20000
引張	SVFRM	0, +1500, +15000
	NVFRM	0, +10000, +20000
	LVFRM	0, +10000, +20000
繰返し	SVFRM	$0, \pm 1000, \pm 2000, \pm 3000, \pm 10000, \pm 20000$
	NVFRM	$0, \pm 1000, \pm 2000, \pm 10000, \pm 20000$
	LVFRM	$0, \pm 2000, \pm 3000, \pm 10000, \pm 20000$



なお, クリープ試験は載荷材齢を7日とし, 応力 レベルを材齢7日圧縮強度の1/3に設定した。

2.3 圧縮・引張繰返し試験

試験体は100 o×200mmの円柱供試体で、載荷 は、単調漸増圧縮、単調漸増引張および漸増繰返 し(以下,圧縮,引張および繰返し)の3種類と した。ただし、圧縮および引張載荷は除荷、再負 荷を含むものとする。計画載荷履歴を表-2に 示す。試験体数は各調合3体である。なお、引張 および繰返し載荷用試験体は、試験体の上下部 50mmにガラス繊維を施工し、載荷時は図-1に 示すように、掴み治具を鋼板にボルトで締付け ることにより, 掴み治具の楔部分が試験体を固 定する。載荷は独立行政法人建築研究所の 2000kN高剛性試験機を使用し、クロスヘッドの 変位速度を0.005mm/sec.として制御した。計測項 目は荷重, 載荷盤間変位および試験体高さ中央 部100mm間変位である。載荷材齢は、SVFRMおよ びNVFRM:56日,LVFRM:約5ヶ月である。

3. 結果と考察

3.1 強度発現試験結果

養生条件の異なる3種類のDFRCCに関する材齢91日までの強度試験結果を表-3に示す。

DFRCCの材齢tにおける圧縮強度 ($f_c(t)$)およびヤング係数 (E(t)) を近似するため, 土木学会コンクリート標準示方書 [施工編] 5 およびCEB-FIP Model Code 1990 6 (以下, MC90) をベースとした推定式による推定を試みる。

土木学会ベース:

$$f_c(t) = f_c(28) \cdot t / (\alpha \cdot t + \beta) \tag{1}$$

$$E(t) = \gamma \cdot \sqrt{f_c(t)} \tag{2}$$

ここに、tは材齢(日)、 $f_c(28)$ はDFRCCの28日 圧縮強度 (N/mm^2) 、 α 、 β および γ は材料定数。

表一3 強度試験結果

種類	養生 方法	圧縮強度		割裂強度	ヤング係数			
		(N/mm^2)			(N/mm^2)	(kN/mm^2)		
		7日	28日	91日	28日	7日	28日	91日
SVFRM	空中	23. 4	31.8	33. 9	2. 15	8.87	10. 5	10.9
	標準	23. 1	33.6	39. 4		10.5	12. 9	13.8
NVFRM	空中	19.4	27. 3	30.6	2.51	11.8	14.6	15. 7
	標準	20.7	32.0	36. 3	-	14. 1	17.0	18.4
LVFRM	空中	36. 5	38. 2	40.7	2. 17	10.1	9.75	10.3
	標準	36. 9	39.3	42.6	_	11.8	12. 5	13. 3

MC90ベース:

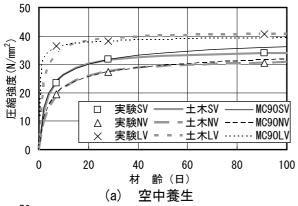
$$f_c(t) = \exp[s\{1 - (28/t)^{1/2}\}] \cdot f_c(28)$$
 (3)

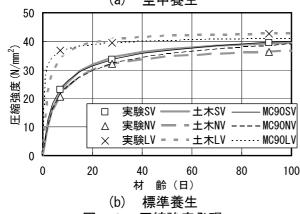
$$E(t) = \sqrt{\exp[s\{1 - (28/t)^{1/2}\}]} \cdot E(28)$$
 (4)

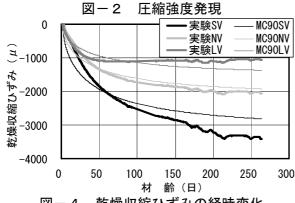
ここに、tは材齢(日)、f_c(28)およびE(28)は DFRCCの28日圧縮強度 (N/mm²) およびヤング係 数(kN/mm²), sは材料定数である。

図-2および3にDFRCCに関する圧縮強度お よびヤング係数の発現状況を示す。なお、図中の

材料定数推定結果 調合名 SVFRM 5. 0309 0.3708 1856. NVFRM 0.8284 4.9511 3046. 2 0.4127 0.92641624.4 0.0611 LVFRM 7794 1991.5 0.083950







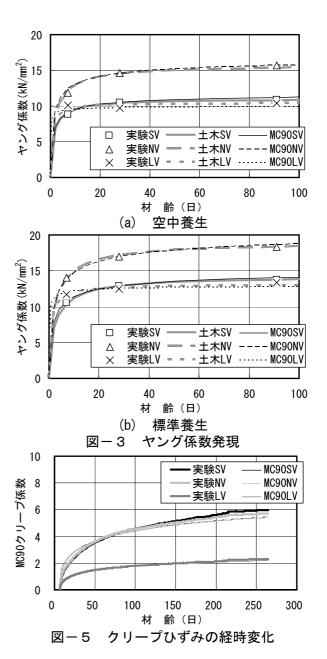
乾燥収縮ひずみの経時変化 図-4

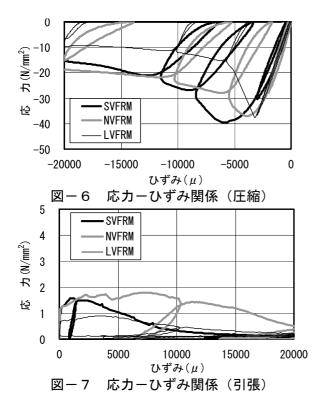
曲線は式(1)~(4)による結果である。 また, 表-4に推定材料定数を示す。図によれば、材齢 91日までのDFRCCの強度発現は式(1)~(4)によ り良好に推定可能である。

3.2 収縮およびクリープ試験結果

各DFRCCの乾燥収縮ひずみおよびクリープ係 数の計測結果を図ー4および5に示す。なお、乾 燥収縮ひずみは「(自由収縮ひずみ)-(自己収 縮ひずみ)」として、クリープ係数はMC90に準 じて算出した。また、図中の曲線は後述の式(5) および(6)による結果である。

実験から得られた乾燥材齢182日時点の乾燥 収縮ひずみは、それぞれSVFRMでは3120 μ 、





NVFRMでは1972 μ , LVFRMでは1108 μ である。また,載荷材齢182日時点のクリープ係数は,それぞれ SVFRMでは5.51,NVFRMでは5.34,LVFRMでは2.10である。

以上のようにDFRCCの乾燥収縮ひずみは非常に大きい値となっている。また、クリープ係数もLVFRM以外は同様の傾向を示しており、DFRCCを適用する部材の選定には注意を要する。

DFRCCの乾燥収縮ひずみ($\varepsilon_{cs}(t, t_s)$)およびクリープ係数($\phi(t, t_0)$)を推定するため,MC90をベースとした推定式による推定を試みる。

$$\varepsilon_{cs}(t,t_{s}) = \kappa \cdot \left[\begin{cases} 160 + 10 \times 5 \\ \times (9 - f_{c}(28)/10) \end{cases} \times 10^{-6} \right]$$

$$\cdot (-1.55 \times 0.784)$$

$$\cdot \left\{ \frac{(t - t_{s})/1}{350 \cdot (h/100)^{2} + (t - t_{s})/1} \right\}^{0.5}$$

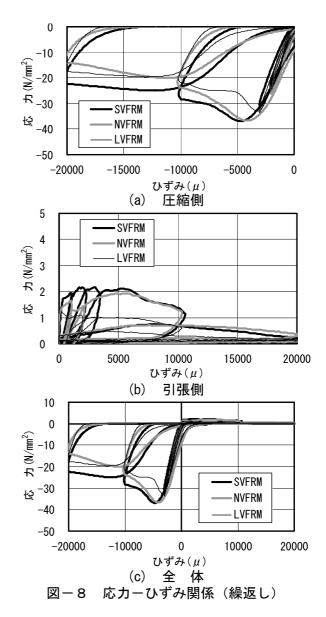
$$\phi(t,t_{0}) = m \cdot \left[1 + (1 - 0.6)/\{0.46 \cdot (h/100)^{1/3}\} \right]$$

$$\cdot \left\{ 5.3/\sqrt{f_{c}(28)/10} \right\} \cdot \left[1/\{0.1 + (t_{0}/1)^{0.2}\} \right]$$

$$\cdot \left[(t - t_{0})/1/150 \cdot \left\{ 1 + (1.2 \times 0.6)^{18} \right\} \right]^{0.3}$$

$$\cdot h/100 + 250 + (t - t_{0})/1 \right]$$
(6)

ここに、 t_s および t_0 は乾燥開始および載荷開始 材齢(日)、 $f_c(28)$ はDFRCCの28日圧縮強度(N/mm²)、h(mm)=(2×部材断面積)/(大気に接する部材周長)、 κ およびmは材料定数であり、

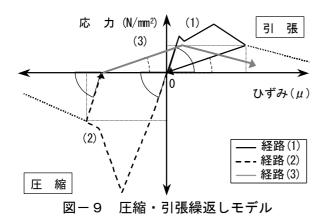


SVFRMに対しては κ =5.9311および m=1.7644, NVFRMに対しては κ =3.8681および m=1.6328, LVFRMに対しては κ =3.1103および m=0.7835の 値がそれぞれ得られている。

図-4および5によれば、DFRCCのクリープ係数は式(6)で概ね推定可能であるが、乾燥収縮ひずみは式(5)では良い近似解は得られておらず、更なる検討を要する。

3.3 圧縮・引張繰返し試験結果

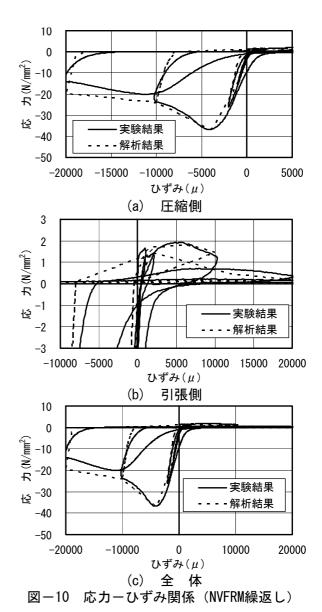
図-6~8に各DFRCCの圧縮・引張繰返し試験から得られた応力とひずみの関係を示す。これらの図によれば、いずれのDFRCCも単調載荷および繰返し載荷の相違に係わらず、除荷挙動は圧縮側では、低ひずみレベルで弾性除荷的な挙動を示すが、ひずみの増大とともに除荷勾配



が少しずつ緩やかとなり、除荷応力0 N/mm²付近で原点に向かう傾向にある。そして、いずれのDFRCCも再負荷を行った場合、圧縮側については、載荷方法の相違に係わらず除荷開始時のひずみレベルにおいて、ふたたび除荷開始時の応力レベル程度に到達している。

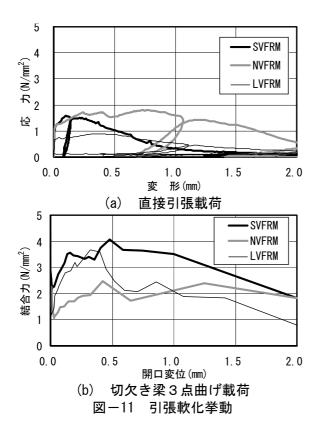
一方、引張側の除荷挙動は、圧縮側と比較して、低ひずみレベルから原点に向かう傾向を示し、ひずみの増大とともにその傾向が顕著となっている。そして、いずれのDFRCCも再負荷を行った場合、単調載荷では圧縮側と同様の傾向を示しているが、繰返し載荷では除荷開始時のひずみレベルが $10000\,\mu$ 程度となると、除荷開始時のひずみレベルのかなり手前で除荷開始時の応力レベルに近づき、その後、応力は低下する。

以上の結果から,多少大胆ではあるが,マクロ 的にはDFRCCの除荷挙動は圧縮側では弾性除 荷、引張側では原点指向除荷で近似可能である と考えられる。そのため、NVFRM試験体の繰返 し結果を対象としたFEM解析⁷⁾を実施し, DFRCC の圧縮・引張繰返し挙動の評価を試みた。解析で は、試験区間100mm部分を1要素でモデル化し、 圧縮、引張とも単調載荷で得られた応力ーひず み関係を多直線近似して入力した。そして DFRCCの繰返し構成則を、図-9のように定義 した。繰返しの履歴は、まず、1)引張載荷を行 うと、DFRCCのヤング係数(材齢56日の単調圧縮 載荷で得られた値) に従い, ひび割れ発生強度ま で引張応力が上昇する。ひび割れ発生後は, 仮定 した引張軟化挙動(単調載荷で得られた軟化挙 動)に従う。除荷を行うと、その時点から原点に



向かう(図中の経路(1))。次に,2)載荷が圧縮に転じると,DFRCCのヤング係数に従い,圧縮強度まで圧縮応力が上昇する。その後は,仮定した圧縮軟化挙動(単調載荷で得られた軟化挙動)に従う。除荷を行うと,その時点からヤング係数に従い,応力が下降する(図中の経路(2))。さらに,3)載荷が再び引張に転じると,前引張除荷時の勾配で前引張応力値まで引張応力が上昇する。その後,引張軟化挙動に準じる(図中の経路(3))。繰返し載荷では,この一連の挙動を繰り返すことになる。

図-10にNVFRM試験体の繰返し結果を対象 とした,応力-ひずみ関係に関するFEM解析結 果と実験結果を示す。なお,図(a)および(b)は,図(c)の圧縮側および引張側をそれぞれ拡大表



示したものである。図によれば、DFRCCの繰返し 材料構成則は、本仮定で概ね評価可能である。

ここで、DFRCCの引張軟化挙動(応力-変形関係)についてさらに考察を加える。引張軟化挙動を検討する場合、前掲**図-1**に示したような直接引張試験による方法⁸⁾や切欠き梁3点曲げ載荷の結果を逆解析する方法⁹が挙げられる。

図-11に前掲図-7の横軸を変形に置き換え たものおよび切欠き梁3点曲げ載荷の結果³⁾を 逆解析する方法で得られた引張軟化挙動を示 す。なお、切欠き梁3点曲げ載荷は材齢28日(標 準養生試験体)で実施されたものであり、図(b) 中の縦軸(結合力)は引張応力,横軸(開口変位) はひび割れ幅を意味する。図によれば、いずれの 結果とも同一変形レベルにおいては, 直接引張 試験の応力く切欠き梁3点曲げ試験の応力と なっている。この原因として, 試験体の打設方 法, 試験体形状, 破壊面の応力勾配の影響, ひび 割れ性状の評価方法の妥当性(実験では、いずれ の試験方法においても,数本のひび割れが分散 して発生しており、その本数は試験方法により 相違していたが、本評価手法では考慮していな い)等が考えられ、今後の検討課題である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を,以下にまとめる。

- (1) DFRCCの圧縮強度およびヤング係数発現を 良好に推定できる推定式を示した。
- (2) DFRCCの繰返し構成則は、本研究で仮定したモデルで概ね評価可能である。
- (3) DFRCCの引張軟化挙動は、試験方法の相違により異なる。

謝辞

切欠き梁3点曲げ試験結果の逆解析に際し有益なるご助言を頂いた東京都立大学大学院 工学研究科 建築学専攻の橘高義典教授に謝意を表します。また、円柱供試体の繰返し試験に際し有益なるご助言を頂いた独立行政法人 建築研究所 構造研究グループの福山洋上席研究員に謝意を表します。

参考文献

- 1)(財)日本建築センター:日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」平成11年 度報告書,2000.3
- 2) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造 利用研究委員会:高靱性セメント複合材料を 知る・作る・使う,高靱性セメント複合材料の 性能評価と構造利用研究委員会報告書,日本 コンクリート工学協会,128pp.,2002.1
- 渡部憲,白井伸明,大岡督尚,白都滋:各種 繊維補強モルタル試験体の曲げ変形挙動,コ ンクリート工学年次論文報告集,Vol.23, No.2,pp.355-360,2001.7
- 4) 鈴木計夫, 大野義照: 鋼繊維補強コンクリートの収縮ひびわれ抵抗性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.1051-1056, 1992.6
- 5) 土木学会:平成8年制定 コンクリート標準 示方書[施工編], pp.190-191, 1996
- 6) CEB:CEB-FIP MODEL CODE1990, Thomas Telford
- DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research., 1999
- 8) 佐藤幸博,福山洋,諏訪田晴彦:高靭性型セメント系複合材料の一軸引張―圧縮繰り返し 試験方法の提案,日本建築学会構造系論文集, 第539号,pp.7-12,2001.1
- 9) 橘高義典,上村克郎,中村成春:コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析,日本建築学会構造系論文集,第453号,pp.15-25,1993.3