

高靱性セメント複合材料の各種材料特性

渡部 憲^{*1}

Material Properties of Ductile-Fiber-Reinforced Cementitious Composite

by

Ken WATANABE

(Received on Mar. 30, 2005, accepted on May 20, 2005)

Abstract

Recently, the research and development of ductile-fiber-reinforced cementitious composites (DFRCCs) that are superior to existing ones has been actively conducted. DFRCC is a cementitious composite material reinforced with fibers, and it exhibits crack dispersing properties under tensile, flexural or compressive stress. Consequently, DFRCC is a material with high ductility under flexural, tensile or compressive failure. The use of DFRCC as an energy absorbing material will be one of the applications to reduce the seismic response of a structure. Using DFRCC instead of concrete will also enhance the durability of reinforced concrete (RC) structures. To apply DFRCC to RC structures, it is needed to clarify the material properties (such as shrinkage, creep, and strength development) of DFRCC. In order to evaluate the material properties of DFRCC, shrinkage, creep, strength development, and cyclic loading tests were carried out. This paper presents the conclusions that the equation proposed in this study can be used to estimate the strength development of DFRCC, and the present hysteresis model is applicable to predicting the hysteresis of DFRCC under cyclic stresses.

Keywords: Shrinkage, Creep, Strength development, Cyclic behavior, FEM

1. はじめに

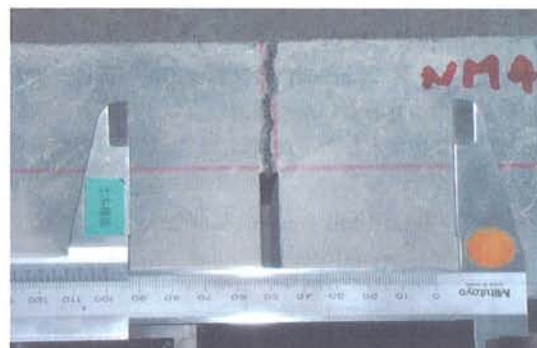
最近、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回るひび割れ分散性や破壊靱性を有する「高靱性セメント複合材料(以下、DFRCC(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite)と略記)」が注目を集めており¹⁻⁴⁾、構造物のエネルギー吸収デバイスとして適用しようという試みも報告されている⁵⁾。DFRCCを鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物に積極的に適用していくことは、RC構造物の耐震性のみでなく、優れたひび割れ分散性を有することから、ひび割れが発生しても1箇所に集中することなく多数の微細ひび割れとなるため、漏水の危険性を低減可能であり、耐久性の向上にも大きく寄与すると考えられる。

筆者も、これまでに細骨材種類、水セメント比、ピニロン繊維寸法、繊維体積混入率を変動因子としたピ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、Fig. 1に示すようにDFRCCの優れたひび割れ分散性および破壊靱性を確認している⁵⁾。

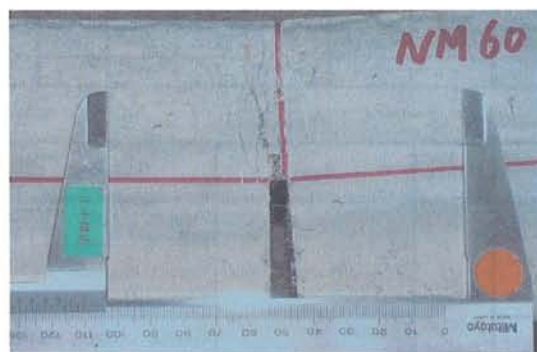
DFRCCをRC構造物に適用しようとする場合、収縮、クリープ、強度発現等の長期性状について十分検討しておく必要がある。これまで、コンクリートや繊維補強コンクリートの長期性状に関する研究は数多く行われている⁶⁻¹¹⁾。しかしながら、DFRCCの長期性状に関する研究報告は少ない。また、DFRCCをRC部材に適用し、地震時の応答特性を解析的に評価しようとする場合、DFRCCの圧縮・引張繰返し挙動についても把握しておく必要がある。

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。



(a) Ordinary fiber reinforced mortar



(b) DFRCC

Fig. 1 Crack pattern observed after the test

* 1 工学部建築学科講師

2. 実験概要

本研究では、Table 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、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とした。試験体は、100φ×200mm の円柱供試体で各要因ごとに 3 体製作し、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℃, 湿度 60%RH) での養生 (空中養生)、2) 恒温水槽内 (水温 20℃) 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、100φ×200mm の円柱供試体を用意した。各試験体は 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。試験体は、各要因ごとに 3 体製作した。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。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 100φ×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 Table 2 に示す。試験体数は各調合 3 体とした。各試験体は DFRCC 打設後 2 日で脱型して標準養生を行い、試験の 7 日前に標準養生を打ち切り、恒温恒湿室内 (室温 20℃, 湿度 60%RH) での空中養生とした。なお、引張および繰返し載荷用試験体は、標準養生打ち切り後、試験体の上下部 50mm にガラス繊維シート (繊維方向: 試験体高さ方向) をエポキシ樹脂により貼付けて補強した。これは、1) 試験体掴み治具により、確実に試験体を固定するため、2) 試験区間 (Fig. 2 中の 100mm と示してある区間) 以外にひび割れを生じさせないためである。載荷は独立行政法人建築研究所の 2000kN 高靱性試験機を使用し、クロスヘッドの変位速度を 0.005mm/sec. として制御した。載荷および計測方法を Fig. 2 に示す。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

Table 2 Loading program

Loading	Specimen	Target strain (μ)
Compressive loading	SVFRM	0,-3000,-5000,-10000,-20000
	NVFRM	0,-2000,-5000,-10000,-20000
	LVFRM	0,-3000,-5000,-10000,-20000
Tensile loading	SVFRM	0,+1500,+15000
	NVFRM	0,+10000,+20000
	LVFRM	0,+10000,+20000
Cyclic loading	SVFRM	0,±1000,±2000,±3000,±10000,±20000
	NVFRM	0,±1000,±2000,±10000,±20000
	LVFRM	0,±2000,±3000,±10000,±20000

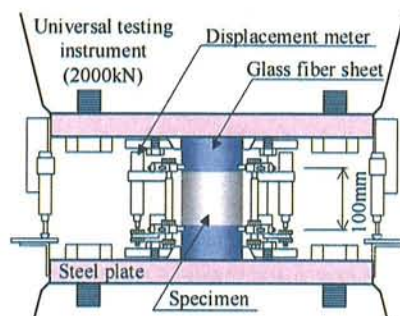


Fig. 2 Cyclic loading setup

Table 1 Mix proportions of DFRCC

(a) Mix proportions

Name of mixing	Water-cement ratio W/C (wt.%)	Sand-cement ratio S/C (wt.%)	Fiber volume fraction (vol.%)	Mass per unit volume (kg/m ³)			
				Water	Cement	Sand	Fiber
SVFRM	55.0	34.5	2.0	504	916	316	26
NVFRM	60.0	191		334	556	1062	26
LVFRM	40.0	23.4		335	837	196	26

(b) Materials

Name of mixing	Cement	Sand	Fiber
SVFRM	Ordinary portland cement	Silica sand (Maximum size: 0.2mm)	Vinyon fiber (Diameter: 0.04mm, Length: 12mm, Young's modulus: 40kN/mm ² , Tensile strength: 1600N/mm ²)
NVFRM		Pit sand (Maximum size: 2.5mm)	Vinyon fiber (Diameter: 0.1mm, Length: 24mm, Young's modulus: 25kN/mm ² , Tensile strength: 1100N/mm ²)
LVFRM		Artificial light weight sand (Maximum size: 5.0mm)	

Table 3 Strength test results

Name of mixing	Curing	Compressive strength (N/mm ²)			Splitting tensile strength (N/mm ²)	Young's modulus (kN/mm ²)		
		7 days	28 days	91 days		28 days	7 days	28 days
SVFRM	Air	23.4	31.8	33.9	2.15	8.87	10.5	10.9
	Standard	23.1	33.6	39.4	—	10.5	12.9	13.8
NVFRM	Air	19.4	27.3	30.6	2.51	11.8	14.6	15.7
	Standard	20.7	32.0	36.3	—	14.1	17.0	18.4
LVFRM	Air	36.5	38.2	40.7	2.17	10.1	9.75	10.3
	Standard	36.9	39.3	42.6	—	11.8	12.5	13.3

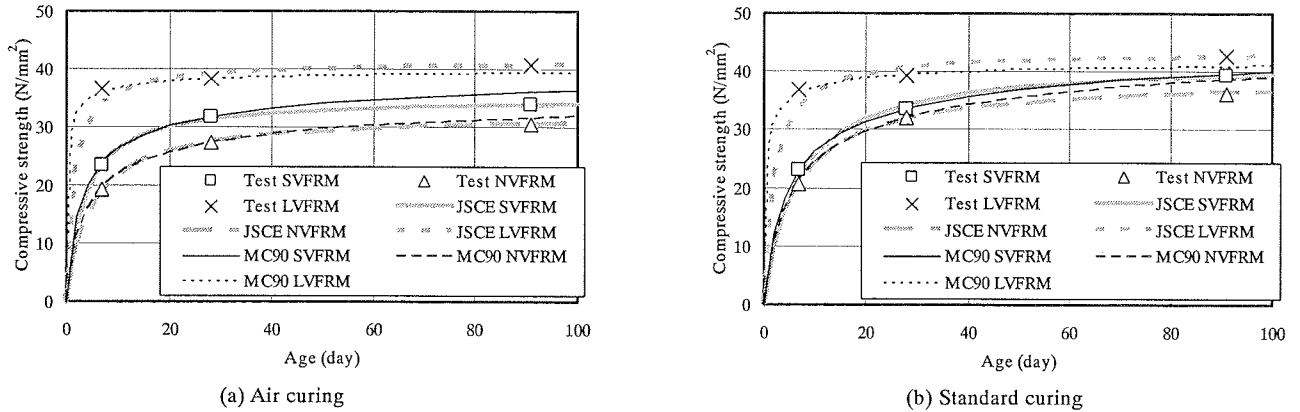


Fig. 3 Compressive strength development

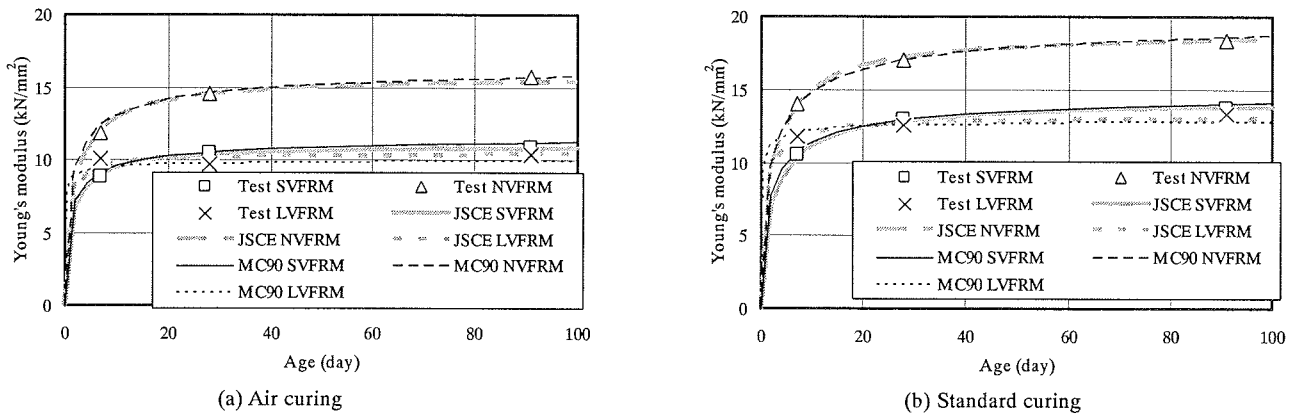


Fig. 4 Young's modulus development

強度試験結果を Table 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]¹²⁾ (以下、JSCE) および CEB-FIP Model Code 1990¹³⁾ (以下、MC90) に示されている各式の材料定数について、DFRCC の実験結果と近似する値を定める。

JSCE 式：

$$f_c(t) = f_c(28) \frac{t}{(\alpha \cdot t + \beta)} \quad (1)$$

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

ここに、 t は材齢 (日)； $f_c(28)$ は DFRCC の 28 日圧縮強度 (ただし、JSCE 式では材齢 91 日圧縮強度) (N/mm²)； α 、 β および γ は材料定数。

MC90 式：

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

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

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。

Fig. 3 および 4 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、図中の曲線は式(1)~(4)による結果である。また、Table 4 に推定材料定数を示す。図によれば、材

Table 4 Material constants of equation (1) to (4)

Name of mixing	Curing	Material constant			
		α	β	γ	s
SVFRM	Air	0.9022	3.0039	1856.7	0.2811
	Standard	0.7986	5.0309	2201.2	0.3708
NVFRM	Air	0.8471	4.0827	2770.2	0.3289
	Standard	0.8284	4.9511	3046.2	0.4127
LVFRM	Air	0.9264	1.3635	1624.4	0.0611
	Standard	0.9055	1.7794	1991.5	0.0839

齢 91 日までの DFRCC の強度発現は式(1)~(4)により良好に近似可能である。

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 Fig. 5 および 6 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。

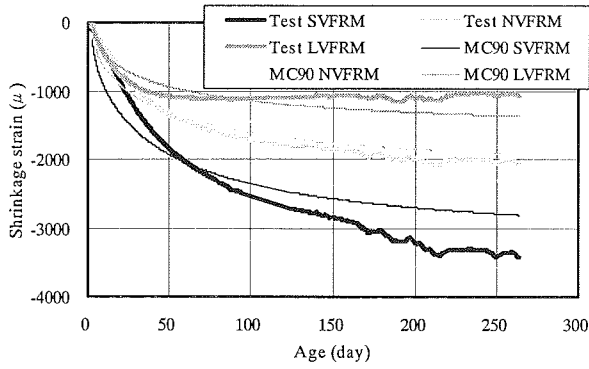


Fig. 5 Shrinkage strain

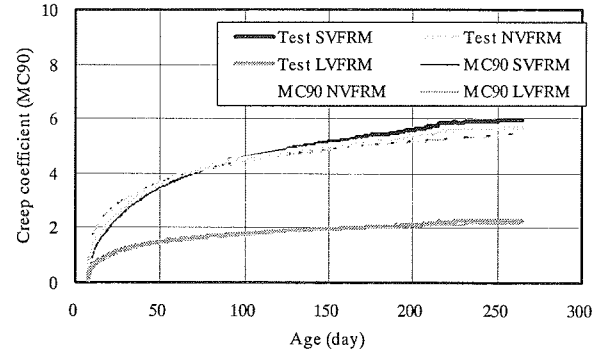


Fig. 6 Creep coefficient

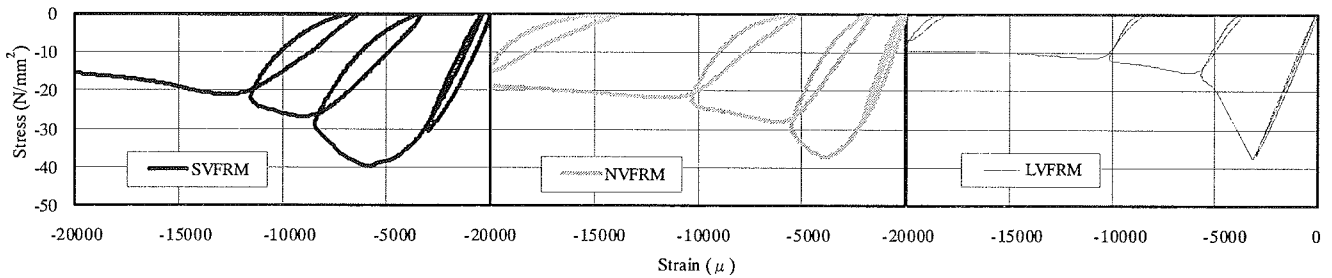


Fig. 7 Stress-strain relation (compressive loading)

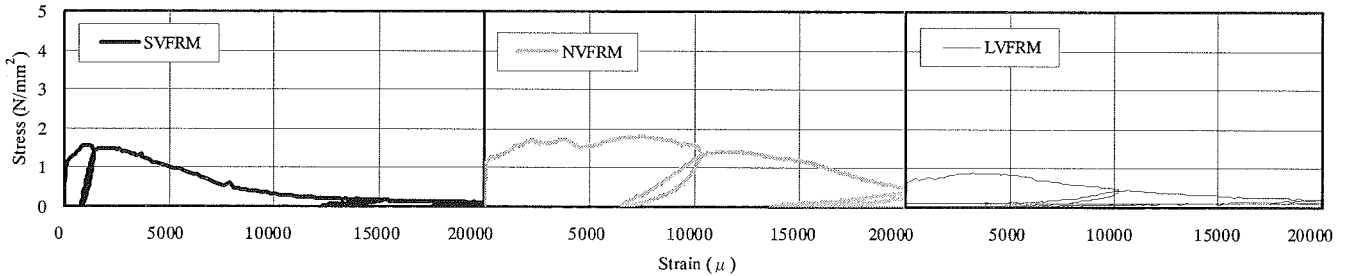


Fig. 8 Stress-strain relation (tensile loading)

DFRCC の乾燥収縮ひずみ ($\epsilon_{cs}(t, t_0)$) およびクリープ係数 ($\phi(t, t_0)$) を近似するため、MC90 の材料定数について、DFRCC の実験結果と近似する値を定める。

$$\epsilon_{cs}(t, t_0) = \kappa \cdot \left[\{1.60 + 10 \times 5 \times (9 - f_c(28)/10)\} \times 10^{-6} \right] \cdot (-1.55 \times 0.784) \cdot \left[\frac{(t - t_0)/1}{350 \cdot (h/100)^2 + (t - t_0)/1} \right]^{0.5} \quad (5)$$

$$\phi(t, t_0) = m \cdot \left[1 + (1 - 0.6) / \{0.46 \cdot (h/100)^{1/3}\} \right] \cdot \left[5.3 / \sqrt{f_c(28)/10} \right] \cdot \left[1 / \{0.1 + (t_0/1)^{0.2}\} \right] \cdot \left[\frac{(t - t_0)/1}{150 \cdot \{1 + (1.2 \times 0.6)^{18}\} \cdot h/100 + 250 + (t - t_0)/1} \right]^{0.3} \quad (6)$$

ここに、 t_0 および t_0 は乾燥開始および荷重開始材齢(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 $\kappa = 5.9311$ および $m = 1.7644$ 、NVFRM に対しては $\kappa = 3.8681$ および $m = 1.6328$ 、LVFRM に対しては $\kappa = 3.1103$ および $m = 0.7835$ の値がそれぞれ得られている。

Fig. 4 および 5 によれば、DFRCC のクリープ係数は式(6)で概ね近似可能であるが、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

Fig. 7~9 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 も単調荷重および繰返し荷重の相違に係わらず、除荷挙動は圧縮側では、低ひずみレベルでは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 も再荷重を行った場合、圧縮側については、荷重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 も再荷重を行った場合、単調荷重では圧縮側と同様の傾向を示しているが、繰返し荷重では除荷開始時のひずみレベルが 10000 μ 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¹⁴⁾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

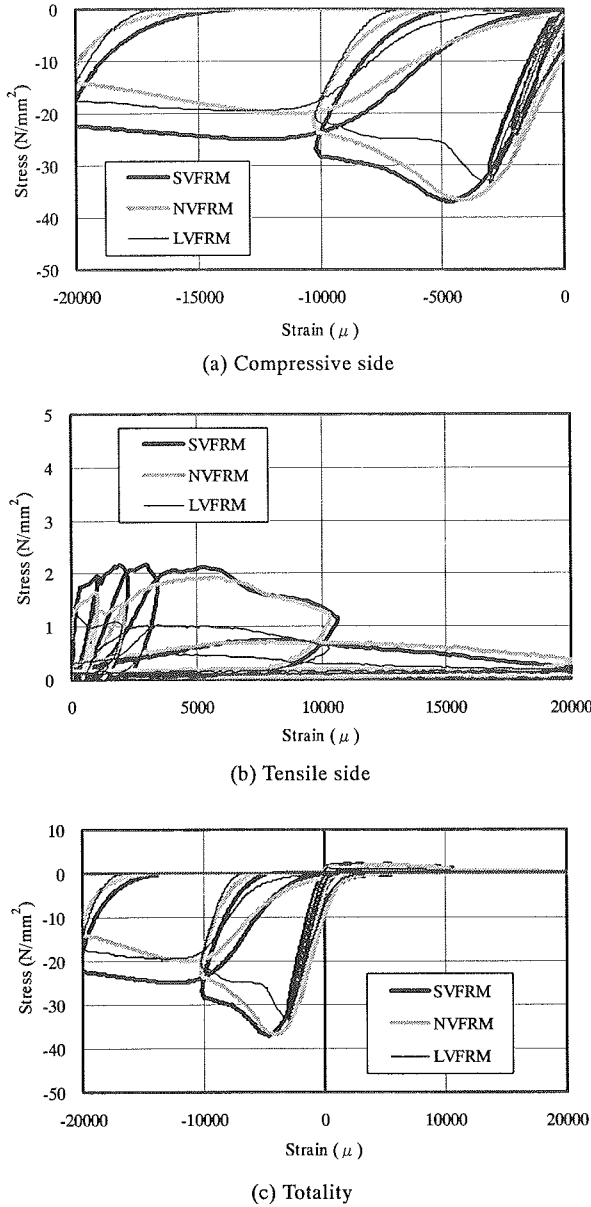


Fig. 9 Stress-strain relation (cyclic loading)

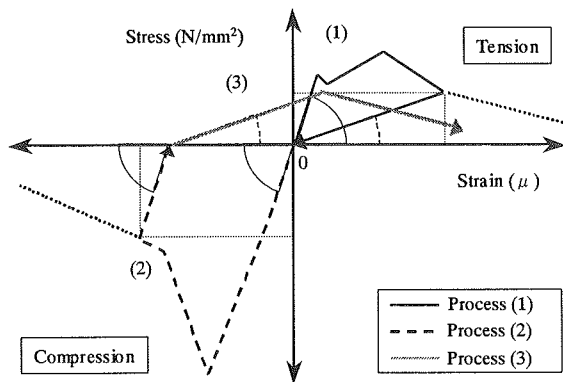


Fig. 10 Modeling of cyclic stress-strain relation

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-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、Fig. 10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のヤング係数に従い、ひ

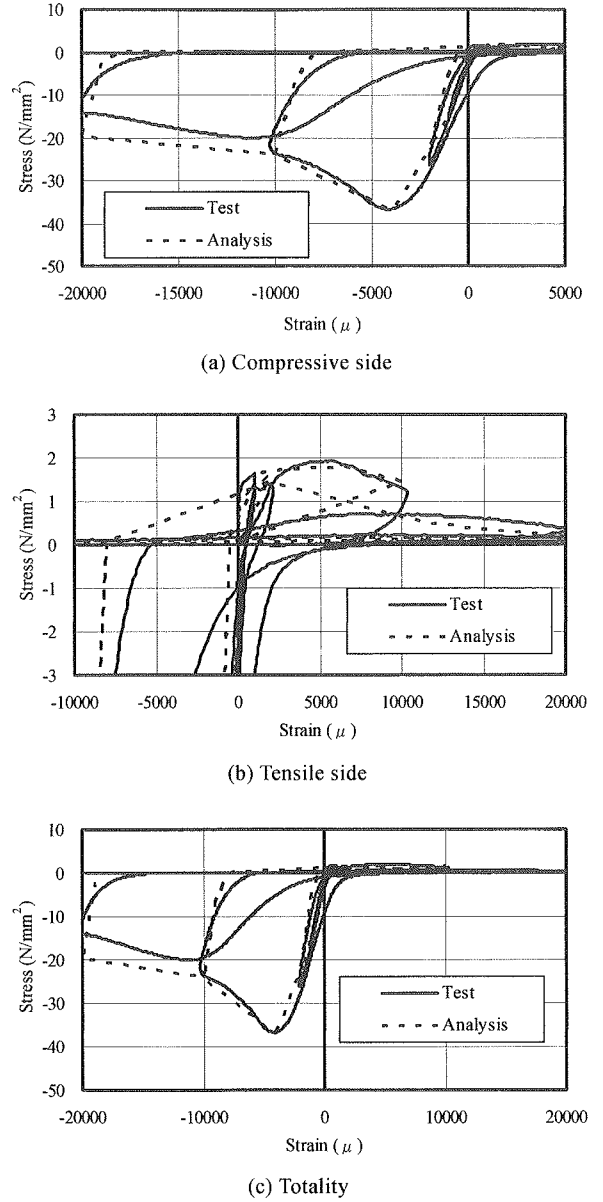


Fig. 11 Stress-strain relation (NVFRM cyclic loading)

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。

Fig. 11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の圧縮・引張繰返し挙動は、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

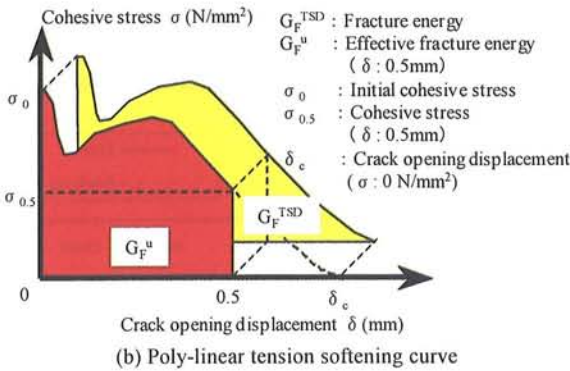
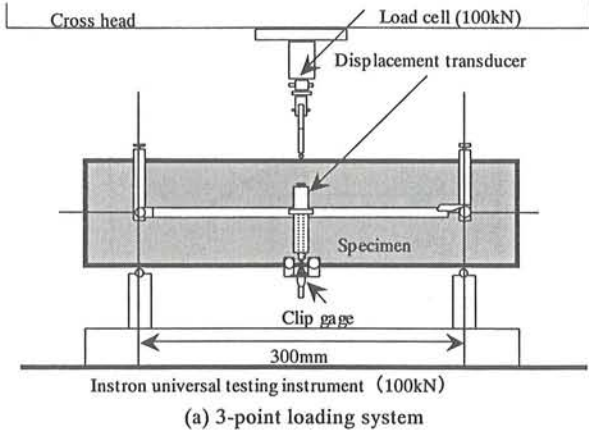


Fig. 12 Determination of tension softening behavior

さらに考察を加える。引張軟化挙動を検討する場合、前掲 Fig.2 に示したような直接引張試験による方法¹⁵⁾や Fig. 12 のように切欠き梁 3 点曲げ载荷の結果を逆解析する方法¹⁶⁾が挙げられる。Fig. 13 に前掲 Fig. 8 の横軸を変形に置き換えたものおよび切欠き梁 3 点曲げ载荷の結果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 点曲げ载荷は材齢 28 日 (標準養生試験体) で実施したものであり、DFRCC の割合は前掲 Table 1 の通りである。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<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、ひび割れ領域の影響等が考えられるが、今後の検討課題である。

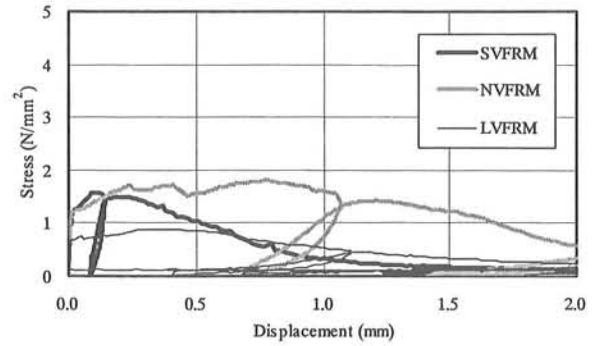
4. まとめ

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。その結果、以下の知見が得られた。

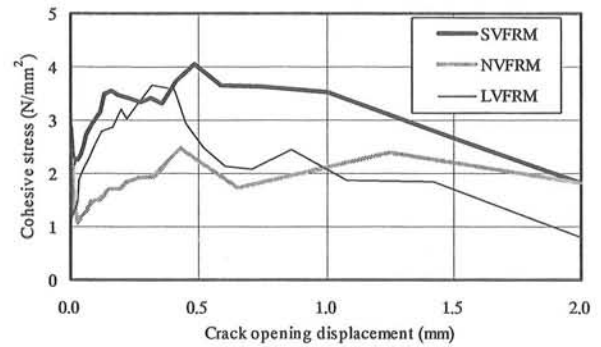
- (1) DFRCC の圧縮強度およびヤング係数発現は、本研究で示した近似式により良好に近似できる。
- (2) DFRCC のクリープ係数は、本研究で示した近似式により概ね近似できるが、乾燥収縮ひずみについては再検討を要する。
- (3) DFRCC の圧縮・引張繰返し挙動は、本研究で仮定したモデルで概ね表現可能である。
- (4) DFRCC の引張軟化挙動は、試験方法の相違により異なる。

参考文献

1) Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W.: Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPFRCC,



(a) Tensile load



(b) Bending load

Fig. 13 Tension softening behavior

High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPFRCC2), pp.1-23, 1996

- 2) Li, V. C.: From Micromechanics to Structural Engineering -The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, Vol.10, No.2, pp.37-48, 1993.7
- 3) (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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) A. M. Neville, W. H. Dilger, J. J. Brooks: Creep of plain and structural concrete, Construction Press, pp.246-263, 1983
- 7) 森田司郎: コンクリートの収縮応力計算例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.305-306, 1974.10
- 8) 徳光善治, 牧角龍憲: 乾燥収縮ひびわれを予測する収縮応力解析方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.6, pp.429-432, 1984
- 9) 自己収縮研究委員会: 自己収縮研究委員会・報告書, 日本コンクリート工学協会, 218pp., 1996.11
- 10) 中村成春, 樹田佳寛, 萩原伸治: 若材齢コンクリートのクリープ及び拘束変形特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 539 号, pp.23-30, 2001.1
- 11) 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
- 12) 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
- 13) CEB: CEB-FIP MODEL CODE1990, Thomas Telford
- 14) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research, 1999
- 15) 佐藤幸博, 福山洋, 諏訪田晴彦: 高靱性型セメント系複合材料の一軸引張一圧縮繰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
- 16) 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