

論文 再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の圧縮破壊挙動

渡部 憲^{*1}・大岡 督尚^{*2}・白都 滋^{*3}・加藤 雄介^{*4}

要旨：本研究では、再生細骨材を使用したプレーンモルタルおよび高靱性セメント複合材料（以下、DFRCC）の1軸圧縮試験を行い、各種材料特性に与える試験体寸法、繊維補強の影響について検討を行った。検討の結果、再生細骨材を使用したDFRCCの圧縮破壊エネルギーは、試験体寸法の相違に係わらず、大きく変動しないこと、試験体高さ/試験体直径=2以上の場合、破壊領域および破壊個所を適切に評価することにより、再生細骨材および天然細骨材を使用したDFRCCの圧縮応力-縦ひずみ関係の試験体寸法依存性はある程度改善されること等の知見が得られた。

キーワード：再生細骨材、高靱性セメント複合材料、繊維、圧縮試験、圧縮破壊

1. はじめに

近年、コンクリートに対する要求性能は、高強度、高靱性、超軽量、リサイクル等、非常に多様化しており、今後、これらの諸性能を有するコンクリートを使用する機会も増えてくると思われる。前述のような性能の中でも、コンクリートの高靱性化をねらったものとして、高靱性セメント複合材料¹⁾（以下、DFRCCと略記）が挙げられるが、DFRCCを使用した鉄筋コンクリート構造物の性能を評価する場合、材料レベルでの性能を明確にしておく必要がある。特に、破壊挙動に注目すると、圧縮および引張軟化挙動が重要であり、コンクリートや繊維補強コンクリート（以下、FRCと略記）の軟化挙動については、コンクリートの破壊力学のめざましい発達により多くの部分が解明され、モデル化された²⁻⁶⁾。DFRCCの軟化挙動についてもいくつかの研究結果^{7,8)}が報告されているが、解体コンクリート塊から取り出した再生細骨材を使用したDFRCCに関する研究報告はほとんどない。

そのため本研究では、再生細骨材を使用したプレーンモルタルおよびDFRCCの1軸圧縮試験を行い、各種材料特性に与える試験体寸法、繊維補強の影響について検討を行った。また、1軸圧縮試験時の載荷盤の拘束による影響についても検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本研究では、表-1に示すプレーンモルタルおよびDFRCCの1軸圧縮試験を行った。モルタル種類は、再生細骨材（MR）を使用した再生細骨材モルタル（MRM）および天然細骨材（NN、砕砂と山砂を質量比7:3で混合）を使用した天然細骨材モルタル（NM）の2種類、水セメント比（W/C）は、40、50および60%、使用繊維はビニロン繊維（V）および鋼繊維（S）で、繊維体積混入率（ V_f ）を0および3%（VF0、VF3）とし、一部の試験体では繊維混合割合を変化させた（ビニロン繊維のみ（V10）、ビニロン繊維を7割、鋼繊維を3割（V7-S3）およびビニロン繊維を5割、鋼繊維を5割（V5-S5））。試験体寸法は、50φ×100、100φ×200および100φ×400mmの3種類、載荷盤の拘束は、鋼製載荷盤で試験体を直接載荷したもの（テフロン無し：図表中では

*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 東海大学 工学部建築学科（正会員）

表-1 実験概要

試験体名	細骨材 s	水セメント比 W/C (%)	細骨材セメント比 s/C (wt.%)	繊維体積 混入率 V _f (vol.%)	繊維F体積 混合割合 V:S	試験体形状 (mm) *						
						(テフロンシートの有・無)						
						50φ×100	100φ×200	100φ×400				
MRM40-VF0	MR	40	60	0	—	—	無	無				
MRM40-VF3-V10				10:0	—	有・無	無					
MRM40-VF3-V7-S3				7:3	—	無	—					
MRM40-VF3-V5-S5				5:5	—	無	—					
MRM50-VF0				50	80	0	—	有・無	有・無	有・無		
MRM50-VF3-V10						10:0	有・無	有・無	有・無			
MRM50-VF3-V7-S3		7:3	—			無	—					
MRM60-VF0		60	100			0	—	—	有・無	無		
MRM60-VF3-V10						10:0	—	有・無	無			
MRM60-VF3-V7-S3						7:3	—	無	—			
NM40-VF0				NN	40	60	0	—	—	有・無	—	
NM40-VF3-V10							3	10:0	—	有・無	—	
NM50-VF0	50						80	0	—	有・無	有・無	有・無
NM50-VF3-V10		3	10:0					有・無	有・無	有・無		
NM60-VF0		60	100					0	—	—	有・無	—
NM60-VF3-V10								3	10:0	—	有・無	—

細骨材(s) MR:再生細骨材(吸水率:4.32%,表乾密度:2.53g/cm³,粗粒率:2.55,最大寸法:5.0mm)

NM:天然細骨材(砕砂と山砂を質量比7:3で混合使用)

砕砂(吸水率:1.36%,表乾密度:2.70g/cm³,粗粒率:2.94,最大寸法:5.0mm)

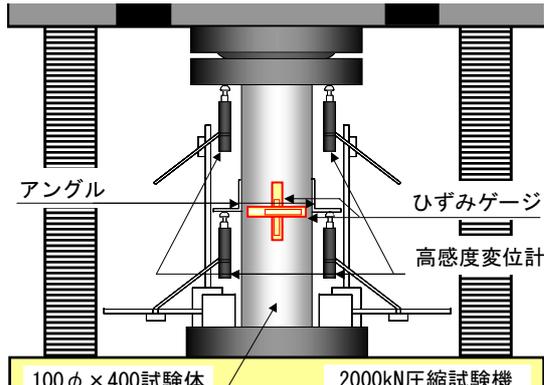
山砂(吸水率:2.55%,表乾密度:2.57g/cm³,粗粒率:1.51,最大寸法:2.5mm)

セメント(C) 普通ポルトランドセメント

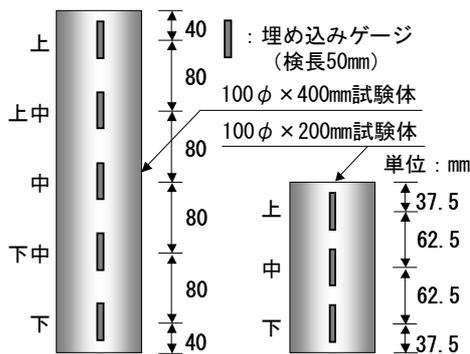
繊維(F) V:ビニロン繊維(径:0.20mm,長さ:24mm,弾性係数:29kN/mm²,引張強度:975N/mm²)

S:鋼繊維(径:0.60mm,長さ:30mm,弾性係数:210kN/mm²,引張強度:1000N/mm²)

* 斜体文字で示されたものは、試験体3体中1体に埋め込みゲージが設置してある。



(a) 荷重方法の一例 (100φ×400mm試験体)



(b) 埋め込みゲージ設置位置
図-1 荷重および計測方法

「無」と表記) および2枚のテフロンシート(厚0.1mm)の間にシリコンオイルを塗布し、鋼製荷重盤と試験体の上下間に挿入したもの(テフロン有り:図表中では「有」と表記)の2種類とし、試験体は各要因3体製作した。試

験体は、打設後1日で脱型し、試験時(材齢28日)まで標準水中養生とした。

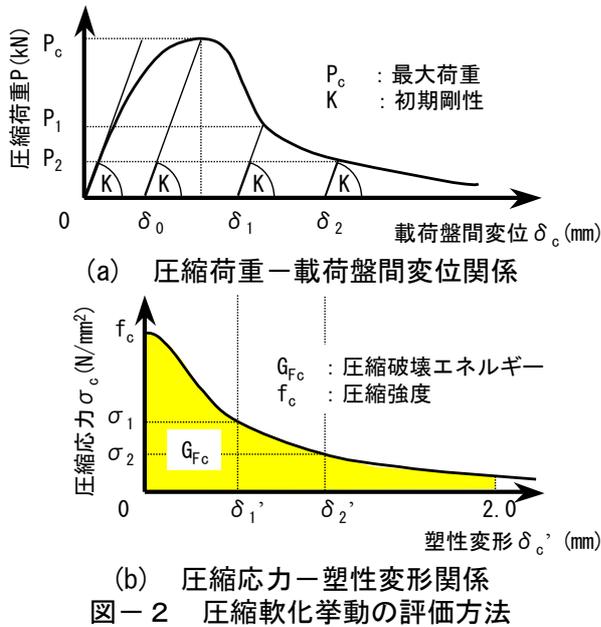
なお、試験体寸法を前述のように定めた理由は、コンクリートやFRCについては圧縮強度等に関する試験体寸法依存性が指摘されているものの、DFRCCについては、その優れたひび割れ分散性や破壊靱性から、コンクリートやFRCとは相違する傾向があると考えたためである。

2.2 荷重および計測方法

荷重は2000kNアムスラー型試験機を使用した。図-1に、試験体の荷重および計測方法を示す。計測項目は、荷重、コンクリート表面に貼り付けたひずみゲージによる縦および横ひずみ(100φ×400mm試験体)、コンプレッソメーターによる縦および横ひずみ(50φ×100および100φ×200mm試験体)、埋め込みゲージ(検長50mm)による試験体内部ひずみ(100φ×200および100φ×400mm試験体の一部)、荷重盤間変位および荷重盤~試験体中央部変位(100φ×400mm試験体)とした。各計測データは、データロガーを使用して取込んだ。

2.3 圧縮軟化挙動の評価方法

図-2に、圧縮軟化挙動の評価方法について示す。まず、実験により得られた圧縮荷重



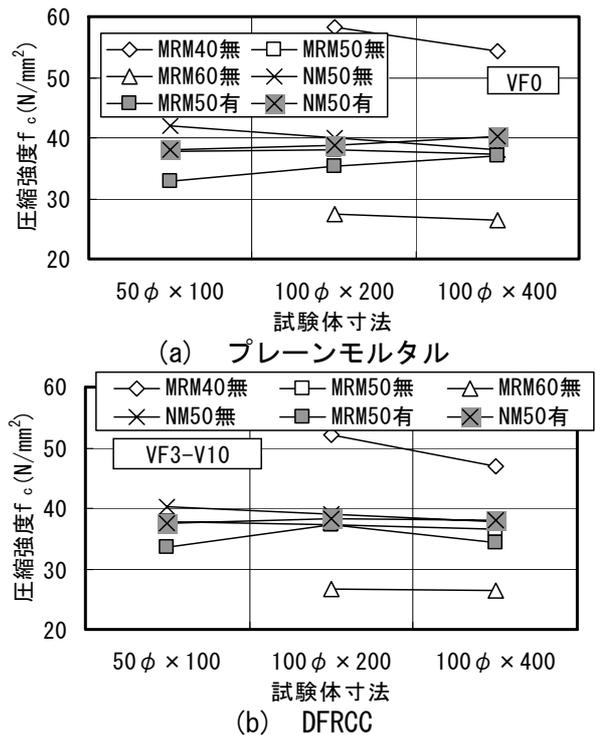
(P)－載荷盤間変位 (δ_c) 関係を圧縮応力 (σ_c)－塑性変形 (δ_c') 関係に変換する。このとき、 P － δ_c 関係の最大荷重 (P_c) 時から初期剛性 (K) を基に荷重 0kN までおろした点 δ_0 を求め、その点を $\delta_c' = 0\text{mm}$ とする。 σ_c は圧縮強度 (f_c) となり、 σ_c － δ_c' 関係の第1点が定まる。以後、圧縮荷重 P_1 時では、 K を基に荷重 0kN までおろした点 δ_1 を求め、 $\delta_1' = \delta_1 - \delta_0$ 、 $\sigma_1 = P_1 / \text{試験体断面積}$ となり、結果として σ_c － δ_c' 関係が得られる。次に、 σ_c － δ_c' 関係から δ_c' が 2.0mm までの面積を求める。本研究では、これを圧縮破壊エネルギー (G_{F_c}) とする。実験結果で δ_c' が 2.0mm まで得られていないものは、実験データを外挿する。

3. 結果と考察

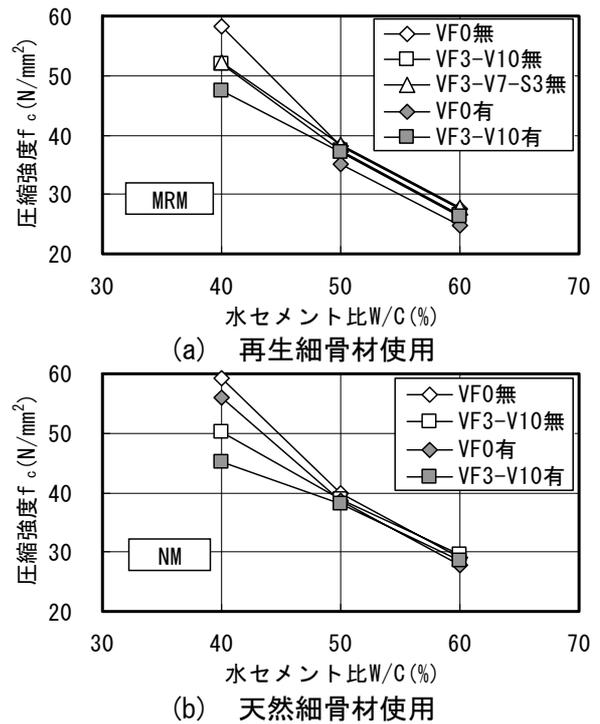
3.1 各種材料特性

(1) 圧縮強度

図－3に、再生細骨材を使用したプレーンモルタルおよびDFRCC (VF3-V10) の f_c と試験体寸法の関係を示す。図中には、 $W/C=50\%$ とし、天然細骨材を使用した場合の結果も併記した。図によれば、テフロン無しの場合、試験体寸法の増大に伴い f_c は低下する傾向にある。しかし、テフロン有りの場合、DFRCCでは、試験体寸法の増大に伴う f_c の低下傾向は不明瞭とな



図－3 圧縮強度－試験体寸法関係



図－4 圧縮強度－水セメント比関係

り、プレーンモルタルでは、試験体寸法の増大に伴い f_c が増加している。 $W/C=50\%$ とし、天然細骨材を使用した場合も同様の傾向である。

図－4に、プレーンモルタルおよびDFRCCの $100\phi \times 200\text{mm}$ 試験体から得られた f_c と W/C の関係を、骨材種類別に示す。図によれば、骨材種類に係わらず W/C の増加に伴い圧縮強度は低下

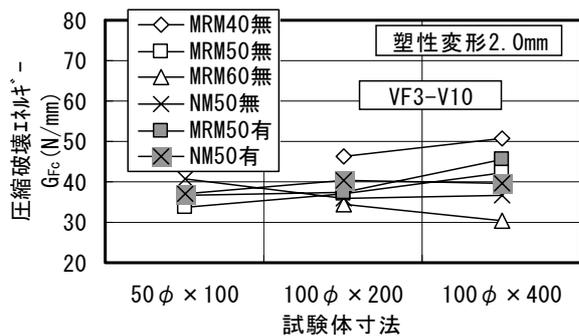


図-5 圧縮破壊エネルギー—試験体寸法関係

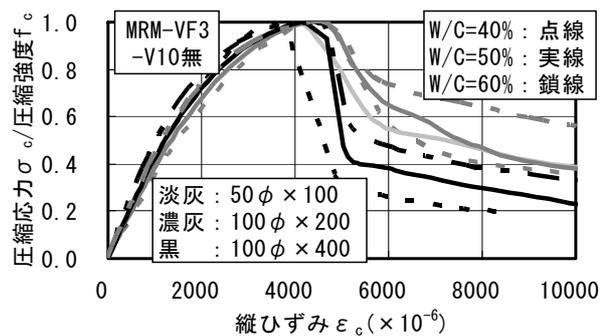
している。また、テフロン無しの結果と比較してテフロン有りの結果は、W/Cに係わらず f_c が低下しており、この傾向はW/C=40%の場合に顕著である。なお、いずれのW/CにおいてもMRMの f_c はNMの f_c と比較して若干低めとなっているが大きな差異は見られない。

(2) 圧縮破壊エネルギー

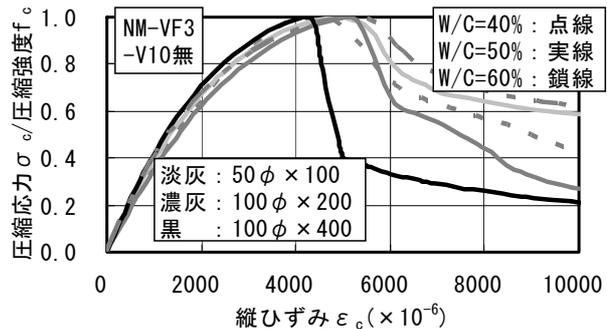
図-5に、再生細骨材を使用したDFRCC (VF3-V10) の G_{Fc} と試験体寸法の関係を示す。図中には、W/C=50%とし、天然細骨材を使用した場合の結果も併記してある。図によれば、試験体寸法の相違が G_{Fc} に及ぼす影響は、骨材種類、W/Cおよびテフロンシートの有・無により相違しており、不明瞭であるものの、試験体寸法の相違に係わらず G_{Fc} は、大きく変動しない。

3.2 圧縮応力—縦ひずみ関係

図-6に、W/Cおよび試験体寸法の異なるDFRCC (VF3-V10無) 試験体の1軸圧縮試験により得られた圧縮応力 (σ_c) / f_c —縦ひずみ (ϵ_c) 関係を骨材種類別に示す (図中の ϵ_c は δ_c を試験体寸法で除したものである)。まず、骨材種類の影響について注目すると、試験体寸法、W/Cが同じ場合、 $\sigma_c/f_c - \epsilon_c$ 関係の傾向に大きな差異は見られない。次に、W/C=50%の結果に注目すると、骨材種類に係わらず50φ x 100mm試験体から得られた結果と100φ x 200mm試験体から得られた結果の傾向は近似している。しかし、100φ x 400mm試験体から得られた結果は、他の試験体寸法から得られた結果と明らかに相違し、 f_c 以降脆性的な傾向を示している。さらに、W/C=40および60%のMRM



(a) 再生細骨材使用



(b) 天然細骨材使用

図-6 圧縮応力—縦ひずみ関係 (試験体寸法の影響)

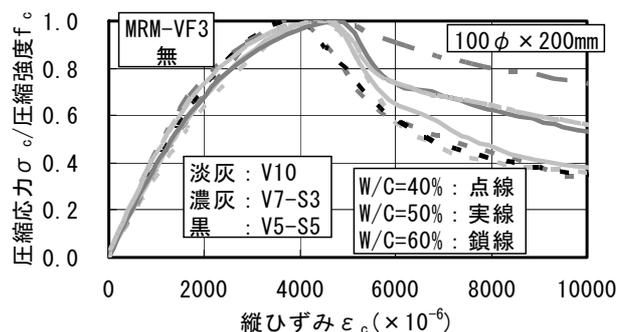
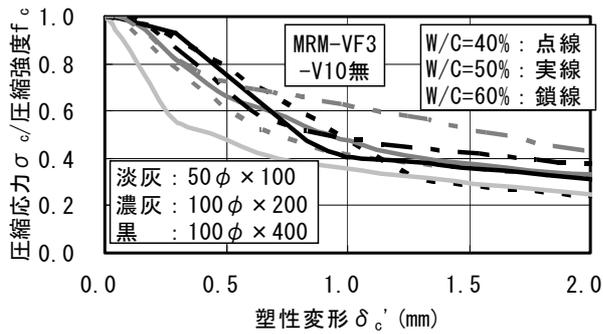


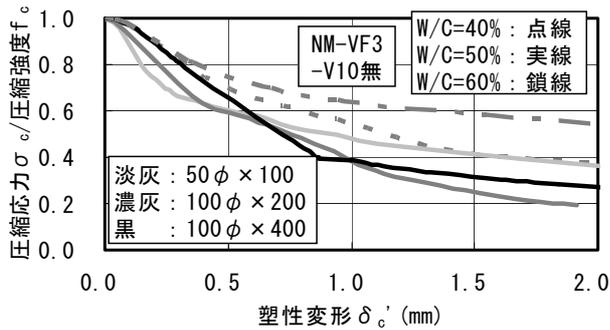
図-7 圧縮応力—縦ひずみ関係 (鋼繊維混入の影響)

の結果に注目すると、W/C=50%の場合と同様、100φ x 400mm試験体から得られた結果は、100φ x 200mm試験体から得られた結果と明らかに相違し、 f_c 以降脆性的な傾向を示している。

図-7に、W/Cおよび繊維混合割合の異なる再生細骨材を使用したDFRCC (MRM-VF3無) 100φ x 200mm試験体の1軸圧縮試験により得られた $\sigma_c/f_c - \epsilon_c$ 関係を示す。図によれば、W/C=40%以外、鋼繊維を混入することにより f_c 以降の靱性が著しく改善することがわかる。つまり、補強用繊維としてビニロン繊維を主材料とした再生細骨材DFRCC (W/C=50, 60%) の場合、剛性の高い鋼繊維を混入することにより、

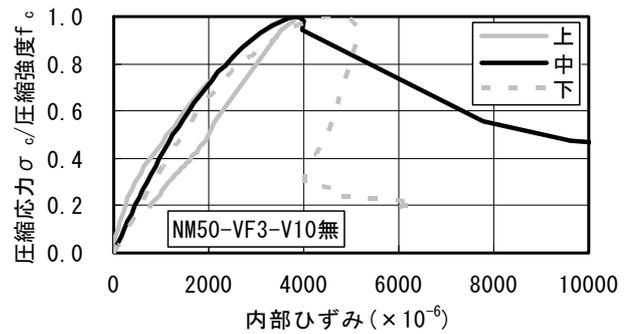


(a) 再生細骨材使用

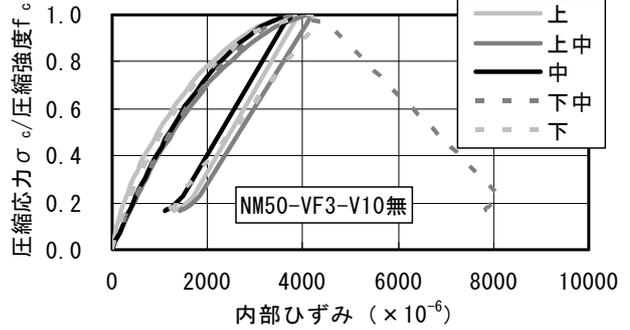


(b) 天然細骨材使用

図-8 圧縮応力-塑性変形関係 (試験体寸法の影響)



(a) 100φ × 200mm試験体



(b) 100φ × 400mm試験体

図-9 圧縮応力-内部ひずみ関係の一例 (NM50-VF3-V10無)

効果的に圧縮強度以降の靱性が改善される。

3.3 圧縮応力-塑性変形関係

図-8に、W/Cおよび試験体寸法の異なるDFRCC (VF3-V10無) 試験体の1軸圧縮試験により得られた $\sigma_c/f_c - \delta_c'$ 関係を骨材種類別に示す。まず、W/C=50%の結果に注目すると、骨材種類に係わらず50φ × 100mm試験体から得られた結果は、 f_c 以降から $\delta_c' = 0.5\text{mm}$ の範囲において、他の試験体寸法から得られた結果と比較して多少、脆性的な傾向を示しており、前掲、図-6の傾向(100φ × 400mm試験体から得られた結果が、 f_c 以降脆性的な傾向を示すこと。)とは相違している。ただし、試験体寸法の相違による影響は、前掲、図-6の傾向ほど顕著ではない。次に、W/C=40%のMRMの結果に注目すると、W/C=50%の場合と同様、100φ × 200mm試験体から得られた結果と100φ × 400mm試験体から得られた結果は近似している。更に、W/C=60%のMRMの結果に注目すると、 $\delta_c' = 0.5\text{mm}$ 以降の範囲において、100φ × 400mm試験体から得られた結果と比較して100φ × 200mm試験体から得られた結果は多少、延

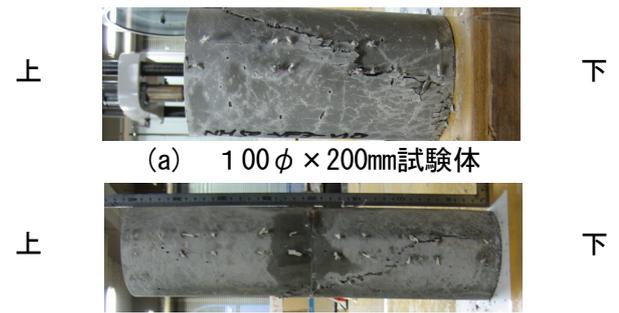
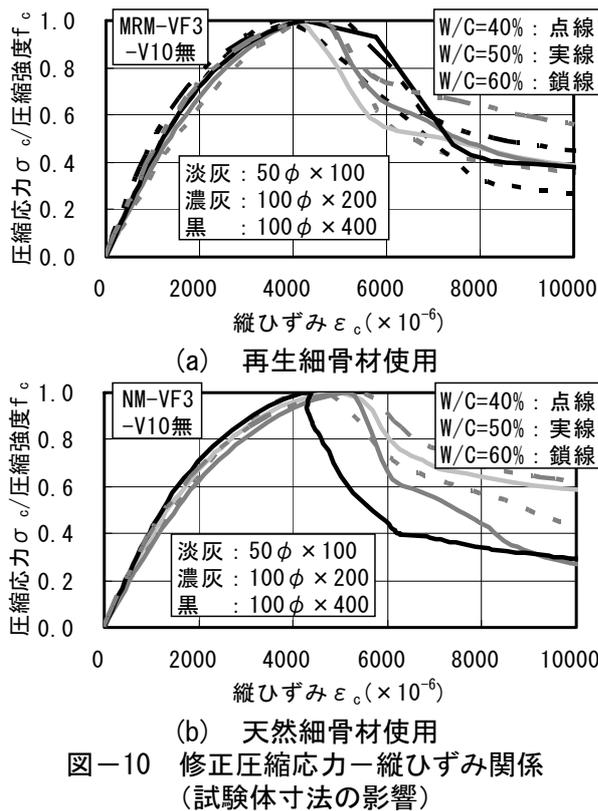


写真-1 破壊状況の一例 (NM50-VF3-V10無)

性的な傾向を示している。

3.4 試験体の破壊状況

図-9および写真-1に、一例としてNM50-VF3-V10無試験体の1軸圧縮試験により得られた σ_c/f_c -内部ひずみ関係および破壊状況を示す(図中の内部ひずみは試験体内部に設置された埋め込みゲージの値である)。図によれば、100φ × 200mm試験体では試験体下部から試験体中央部までに設置された埋め込みゲージのひずみは f_c 以降増大している。また、100φ × 400mm試験体では試験体下部に設置された埋め込みゲージのひずみは、 f_c 以降、応力減少に伴い多少増加した後、減少に転じているものの、試験体下部中央に設置された埋め込みゲージの



ひずみは、 f_c 以降増大している。また、写真から、 $100\phi \times 200\text{mm}$ 試験体では試験体全長にわたって破壊しており、 $100\phi \times 400\text{mm}$ 試験体では試験体全長の下半分が破壊しているのがわかる。これらのことから、DFRCCの破壊領域は $100\sim 150\text{mm}$ 程度であると考えられる。

この結果を踏まえ、前掲、図-6のDFRCCの $100\phi \times 400\text{mm}$ 試験体の結果を再整理する。即ち、 $100\phi \times 400\text{mm}$ 試験体に対して、破壊領域を踏まえ ϵ_c を改めた場合（試験体全長の半分で計測された載荷盤～試験体中央部までの変位を当該区間の寸法で除した値を ϵ_c とした。）の結果を図-10に示す。図によれば、試験体寸法による $\sigma_c/f_c-\epsilon_c$ 関係の相違はある程度改善されている。つまり、試験体高さ/試験体直径=2以上の場合、破壊領域および破壊個所を適切に評価することにより、再生細骨材および天然細骨材を使用したDFRCCの $\sigma_c-\epsilon_c$ 関係の試験体寸法依存性はある程度改善される。

4. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- (1) 再生細骨材を使用したDFRCCの圧縮破壊エネルギーは、試験体寸法の相違に係わらず、大きく変動しない。
- (2) 補強用繊維としてビニロン繊維を主材料とした再生細骨材DFRCC (W/C=50, 60%)の場合、剛性の高い鋼繊維を混入することにより、効果的に圧縮強度以降の靱性が改善される。
- (3) 試験体高さ/試験体直径=2以上の場合、破壊領域、破壊個所を適切に評価することにより、再生細骨材および天然細骨材を使用したDFRCCの圧縮応力-縦ひずみ関係の試験体寸法依存性はある程度改善する。

謝辞

試験体製作に際し材料を提供して頂いた、(株)ポゾリス物産、(株)ブリヂストン、武蔵野土木工業(株)に謝意を表します。なお、本研究の一部は科学研究費補助金(若手研究(B) 課題番号:17760462, 代表者:渡部憲)の助成を受けて行われたものである。

参考文献

- 1) 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
- 2) 破壊力学の応用研究委員会:破壊力学の応用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1993.10
- 3) CEB:CEB-FIP MODEL CODE1990, Thomas Telford, pp.33-58
- 4) 大岡督尚, 橋高義典:ハイパーコンクリートの破壊靱性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.111-116, 1997.6
- 5) RILEM TC 148-SSC:Report of the Round Robin Test carried out by RILEM TC 148-SSC, Materials and Structures/ Materiaux et Constructions, Vol.30, May 1997, pp.195-209
- 6) Nakamura, H., Higai, T., :Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on post-Peak Behavior of RC Structures subjected to Seismic Loads, pp.259-272, 1999.10
- 7) JCI規準:繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法 (JCI-S-003-2005), コンクリート工学協会, 6pp., 2005
- 8) 金子佳生, 三橋博三, 桐越一紀, 下川博之:繊維補強セメント系複合材料の圧縮軟化特性-繊維混入率と試験体寸法をパラメータとした圧縮試験と数値解析-, 日本建築学会構造系論文集, 第592号, pp.19-26, 2005.6