

## 論文 細骨材としてシラスを使用した高靱性セメント複合材料の材料特性

渡部 憲<sup>1</sup>・加藤 雄介<sup>2</sup>

**要旨:**本研究では、コンクリート二次製品として内・外装用パネルをターゲットとし、セメントに白色セメント、細骨材にシラスを使用し、さらにPVA繊維を混入した繊維補強白色セメントシラスモルタルの材料特性について検討を行った。その結果、水セメント比を50および60%、繊維体積混入率を3%とすることで、シラスを細骨材として使用した場合でも、十分なひび割れ分散性および曲げ靱性を有し、高靱性セメント複合材料が実現可能であること等の知見が得られた。

**キーワード:**白色セメント, シラス, モルタル, 繊維, 高靱性セメント複合材料

## 1. はじめに

現在、地球環境問題に対する取り組みは重要な課題であり、コンクリートの分野においても、天然骨材採取に伴う環境破壊や天然骨材資源の枯渇問題から、再生骨材コンクリートの研究が活発に実施されている。

このような背景の中、武若ら<sup>1)</sup>および川俣ら<sup>2)</sup>は、南九州に大量に存在するシラスをコンクリート用細骨材の代替材料とし、その適用性について一連の検討を行い、シラスコンクリートの調合、強度特性等を明らかとし、橋脚基礎コンクリートへの適用事例も報告している<sup>3)</sup>。また、角らは、細骨材にシラス、粗骨材に火山礫を使用したコンクリートに関する研究成果としてコンクリート強度推定式等を提案している<sup>4)</sup>。

以上、コンクリート用細骨材の代替材料として、シラス使用の可能性は有望であり、構造部材用コンクリートへの使用のみでなく、様々な使用方法が考えられる。

筆者らもこれまでに、コンクリート二次製品として内・外装用パネルをターゲットとし、セメントに白色セメント、細骨材にシラスを使用した白色セメントシラスモルタルの調合、強度特性、長期性状等について検討を行った<sup>5)</sup>。その結果、1) 白色セメントシラスモルタルの28日圧縮強度-セメント水比関係は一般的なコンクリートと同様に直線関係にあること、2) 水セメント比が同一の場合、細骨材セメント比が相違しても白色セメントシラスモルタルの28日圧縮強度は大きく変動しないこと等の知見を得た。

ところで、最近になって、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回る性能を有する高靱性セメント複合材料(以下、DFRCCと略記)が開発されている<sup>6-9)</sup>。DFRCCとは、セメント系材料を繊維で補強した複合材料で、曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料<sup>9)</sup>であり、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<sup>8)</sup>。DFRCCをコンクリート二次製品に適用することにより、強度特性のみでなく、耐久性の向上にも大きく寄与すると考えられる。

そこで本研究では、コンクリート二次製品として内・外装用パネルをターゲットとし、セメントに白色セメント、細骨材にシラスを使用し、さらにPVA繊維を混入した繊維補強白色セメントシラスモルタルの材料特性について検討を行った。

## 2. 実験方法

本研究では、表-1に示すプレーンモルタルおよび繊維補強モルタルの1軸圧縮試験および切欠き梁3点曲げ試験を行った。モルタル種類は、白色セメント(WH, 密度: 3.05g/cm<sup>3</sup>)およびシラス(S, 表乾密度: 2.09g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 6.53%, 粗粒率: 1.32)を使用した白色セメントシラスモルタル(WHS)、普通ポルトランドセメント(OP, 密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>)および砕砂(表乾密度: 2.70g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 1.36%, 粗粒率: 2.94)と山砂

表-1 実験概要

試験体名	セメント種類	細骨材種類	水セメント比(W/C)(%)	細骨材セメント比(S/C)	繊維体積混入率(V <sub>f</sub> )(%)	
WHS40-VF0	WH	S	40	0.15	0	
WHS40-VF2					2	
WHS40-VF3					3	
WHS50-VF0			50	0.40	0.80	0
WHS50-VF2						2
WHS50-VF3						3
WHS50-VF4			60	0.80	1.00	4
WHS60-VF0						0
WHS60-VF2						2
WHS60-VF3	3					
OPN40-VF0	OP	N	40	0.60	0	
OPN40-VF3					3	
OPN50-VF0			50	0.80	1.00	0
OPN50-VF3						3
OPN60-VF0			60	1.00	1.00	0
OPN60-VF3						3

\*1 東海大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

\*2 東海大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

(表乾密度：2.57g/cm<sup>3</sup>，吸水率：2.55%，粗粒率：1.51)を質量比7：3の割合で混合した天然細骨材(N)を使用した普通天然細骨材モルタル(OPN)の2種類である。水セメント比(W/C)は、40, 50および60%, 使用繊維はPVA繊維(径：0.20mm, 長さ：24mm)で、繊維体積混入率(V<sub>f</sub>)を0, 2および3%(VF0, VF2およびVF3)とした。

2.1 1軸圧縮試験

1軸圧縮荷重の概要を図-1に示す。荷重は2000kN耐圧試験機を使用した。試験体は100φ×200mmの円柱供試体とし、各要因3体製作した。計測項目は、荷重、コンプレッソメーターによる試験体中央部の縦・横ひずみおよび載荷盤間変位とした。各データは、データロガーを使用して取込んだ。なお、試験体は打設後1日で

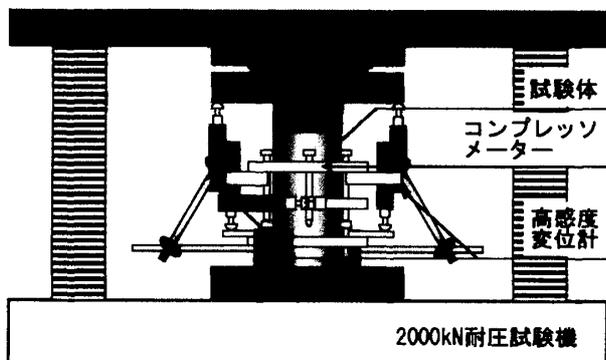
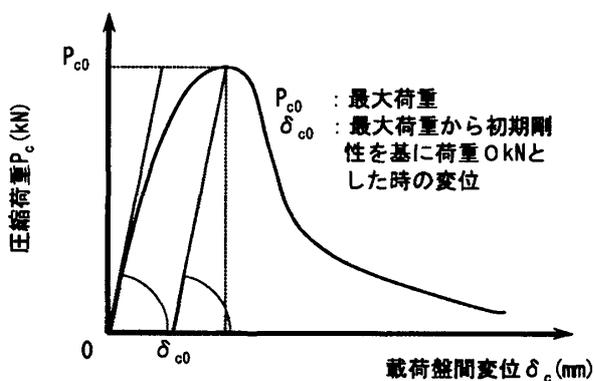
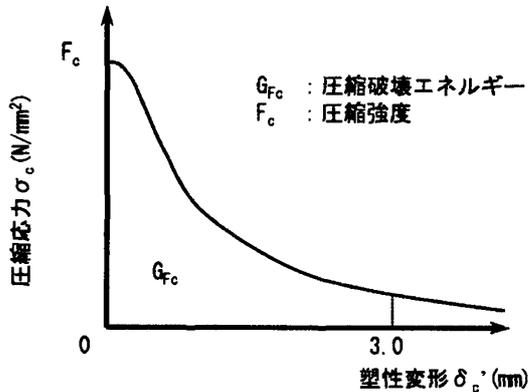


図-1 1軸圧縮荷重



(a) 圧縮荷重-載荷盤間変位関係



(b) 圧縮応力-塑性変形関係

図-2 圧縮軟化挙動の評価方法

脱型し、試験時(材齢28日)まで標準水中養生とした。

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<sub>c</sub>) - 載荷盤間変位(δ<sub>c</sub>)関係を圧縮応力(σ<sub>c</sub>) - 塑性変形(δ<sub>c</sub>')関係に変換する。次に、σ<sub>c</sub>-δ<sub>c</sub>'関係からδ<sub>c</sub>'が3.0mm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<sub>fc</sub>)とする。実験結果でδ<sub>c</sub>'が3.0mmまで得られていないものは、実験データを外挿する。δ<sub>c</sub>'が3.0mmとなるまで評価する理由は、プレーンモルタルと繊維補強モルタルのG<sub>fc</sub>およびσ<sub>c</sub>-δ<sub>c</sub>'関係の形状の差異をより明確に示すことができると考えたためである。

2.2 切欠き梁3点曲げ試験

切欠き梁3点曲げ荷重の概要を図-3に示す。試験体は100×100×400mmの角柱供試体とし、各要因3体製作した。切欠きは、載荷直前に、ダイヤモンドカッター(刃厚：1mm)を使用して試験体中央に深さ50mmとなるように施工した。支点間のスパンは300mmである。荷重は、100kNのAUTOGRAPH型精密万能試験機を用いて行い、クロスヘッド速度を制御した。クロスヘッド速度は、繊維補強モルタルでは0.2mm/minの載荷速度としたが、プレーンモルタルでは最大荷重後の急激な荷重低下を防ぐため、0.01mm/minの載荷速度とした。計測項目は、荷重、スパン中央部のたわみおよび切欠き口の開口変位とした。各計測データは、データロガーを使用して取込んだ。なお、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。

曲げ靱性の評価方法は、文献10を参考に、以下の手法で評価した。

まず、曲げ強度は以下の式より求めた。

$$f_{1b} = \frac{P \cdot \ell}{b \cdot h^2} \times \frac{3}{2} \tag{1}$$

ここに、f<sub>1b</sub>：曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>)，P：最大荷重(N)，ℓ：スパン(mm)，b：破壊断面の幅(mm)，

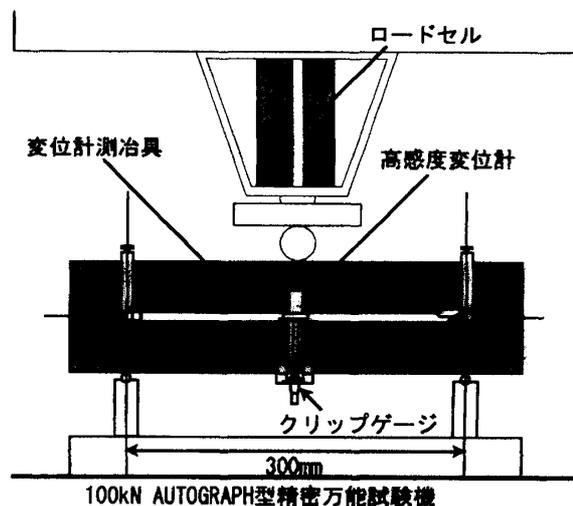


図-3 切欠き梁3点曲げ荷重

表-2 材料特性一覧

試験体名	フレッシュ時			硬化時									
	フロー値 (mm)	空気量 (%)	モルタル温度 (°C)	単位容積質量 (g/cm <sup>3</sup> )	ヤング係数 E (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 F <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮破壊エネルギー G <sub>Fc</sub> (N/mm)	割裂強度 <sup>*1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 f <sub>1b</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	ひび割れ本数 <sup>*2</sup> (本)	ひび割れ領域 <sup>*2</sup> (mm)	曲げ靱性係数 f <sub>2b</sub> <sup>*3</sup>	
												たわみ 7.5mm時 (N/mm <sup>2</sup> )	たわみ 15mm時 (N/mm <sup>2</sup> )
WHS40-VF0	250	0.3	23.5	2.01	15.6	61.9	31.9	3.65	3.71	1.0	—	2.20	—
WHS40-VF2	203	1.2	24.0	1.98	15.2	55.4	55.6	4.15	6.45	1.3	2.93	3.95	2.45
WHS40-VF3	182	2.0	23.5	1.98	14.8	52.5	70.8	3.27	9.91	2.7	15.8	6.49	4.24
WHS50-VF0	246	1.0	22.0	1.97	13.4	42.5	30.2	3.58	3.70	1.0	—	2.40	—
WHS50-VF2	219	1.7	22.0	1.95	13.1	40.4	44.1	3.55	5.88	1.5	9.22	3.74	2.31
WHS50-VF3	168	1.6	21.5	1.93	12.7	37.0	57.3	3.23	10.8	7.2	36.6	7.90	5.64
WHS50-VF4	176	1.7	22.5	1.91	11.2	34.8	78.1	3.42	9.57	6.8	25.7	8.08	6.14
WHS60-VF0	253	0.0	20.5	1.93	12.9	31.5	33.9	3.12	3.64	1.0	—	2.29	—
WHS60-VF2	239	2.4	21.0	1.90	12.1	28.4	42.2	2.76	4.65	1.0	6.87	3.18	2.08
WHS60-VF3	181	0.9	24.0	1.87	10.1	26.7	49.7	3.01	8.81	6.7	24.8	6.16	4.14
OPN40-VF0	248	0.7	20.0	2.16	19.5	59.2	46.8	3.30	4.42	1.0	—	2.59	—
OPN40-VF3	175	1.8	20.0	2.10	17.0	50.1	67.7	3.16	12.2	2.0	7.84	6.01	3.42
OPN50-VF0	245	0.9	19.0	2.11	16.2	40.0	23.2	3.05	3.39	1.0	—	1.93	—
OPN50-VF3	180	2.4	19.5	2.06	13.9	38.9	53.1	2.73	10.0	4.5	27.6	6.39	4.13
OPN60-VF0	239	0.9	19.0	2.05	12.9	29.0	18.9	2.26	2.74	1.0	—	1.77	—
OPN60-VF3	174	2.0	19.0	2.01	12.0	29.5	57.0	2.35	9.82	6.0	28.5	7.62	5.35

\*1: 繊維補強モルタルについては、初期ひび割れ発生時の値。  
 \*2: 切欠き先端に生じたひび割れ本数およびその発生領域を、曲げ試験終了後に計測。  
 \*3: たわみ15mmまで計測出来ないものは、—とした。プレーンモルタルについては、最大荷重までの値。

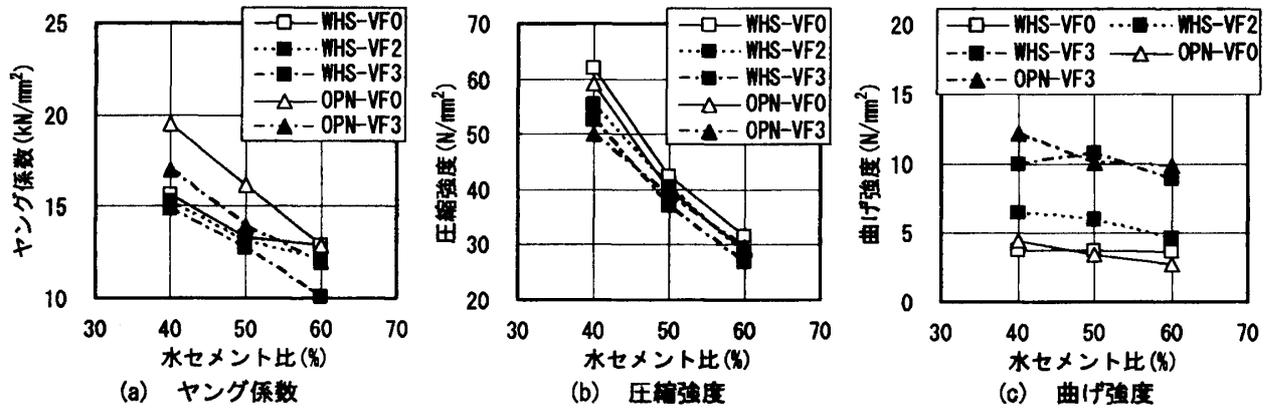


図-4 ヤング係数、圧縮強度、曲げ強度-水セメント比関係

h: 破壊断面の高さ (mm) である。

次に、曲げタフネスは曲げ靱性係数で表され、以下の式によって求めた。

$$f_{2b} = \frac{T_b}{\delta_b} \times \frac{l}{b \cdot h^2} \times \frac{3}{2} \quad (2)$$

ここに、f<sub>2b</sub>: 曲げ靱性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、T<sub>b</sub>: 原点から δ<sub>b</sub>までの曲線下の面積 (N・mm)、δ<sub>b</sub>: スパン中央部のたわみ (mm)、l: スパン (mm)、b: 破壊断面の幅 (mm)、h: 破壊断面の高さ (mm) である。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 各種材料特性

表-2に、実験により得られたプレーンモルタルおよび繊維補強モルタルの各種材料特性一覧を示す。

##### (1) ヤング係数、圧縮強度および曲げ強度

図-4に、プレーンモルタルおよび繊維補強モルタルのヤング係数 (E)、圧縮強度 (F<sub>c</sub>) および f<sub>1b</sub> と W/C の関係を示す。図によれば、繊維混入の有無に係わらず、WHS、OPNの両者とも W/C の増加に伴い F<sub>c</sub>、E は低下し

ている。しかし f<sub>1b</sub> では、この傾向が不明瞭となる。また、W/C に係わらず、OPN と比較して WHS の E は小さくなっているものの、F<sub>c</sub> および f<sub>1b</sub> はほぼ同程度の値となっている。さらに、WHS、OPN の両者とも、W/C に係わらず、プレーンモルタルと比較して繊維補強モルタルでは、E および F<sub>c</sub> が低下している。しかし、f<sub>1b</sub> は上昇する傾向にあり、V<sub>f</sub> = 3% の場合、f<sub>1b</sub> の上昇が顕著である。

##### (2) 圧縮破壊エネルギー、曲げ靱性係数およびひび割れ本数

図-5に、プレーンモルタルおよび繊維補強モルタルの G<sub>Fc</sub>、f<sub>2b</sub> およびひび割れ本数と W/C の関係を示す。

まず、G<sub>Fc</sub> (図-5 (a)) に注目すると、繊維混入の有無に係わらず、W/C = 50% までは、W/C の増加に伴い G<sub>Fc</sub> は低下する傾向にある。しかし、W/C = 60% では、その傾向が不明瞭になる。なお、WHS、OPN の両者とも、W/C に係わらず、プレーンモルタルと比較して繊維補強モルタルの G<sub>Fc</sub> は増加している。また、WHS では、V<sub>f</sub> の増加に伴い、G<sub>Fc</sub> が増加していることも分かる。

次に、f<sub>2b</sub> (図-5 (b)) に注目すると、繊維混入の有

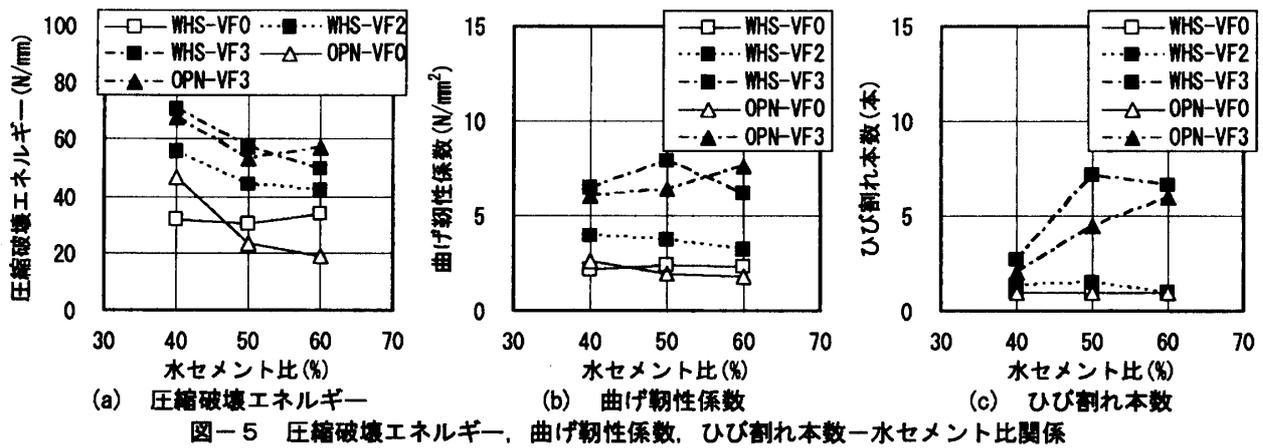


図-5 圧縮破壊エネルギー、曲げ靱性係数、ひび割れ本数-水セメント比関係

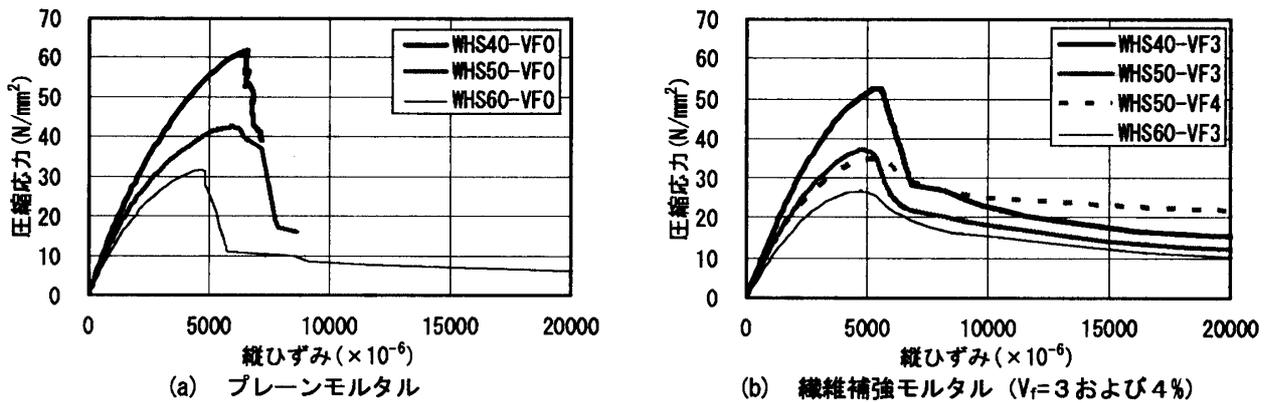


図-6 圧縮応力-縦ひずみ関係 (白色セメントシラスモルタル)

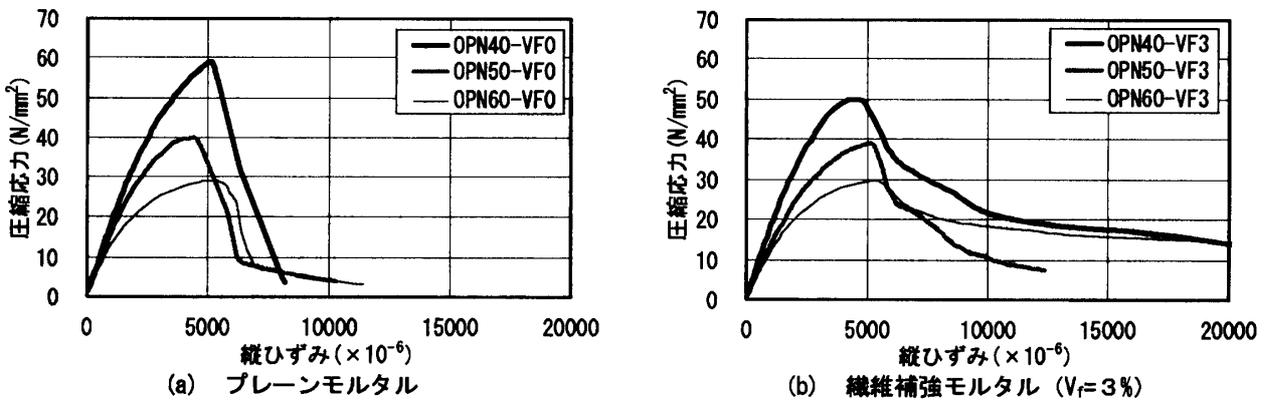


図-7 圧縮応力-縦ひずみ関係 (普通天然細骨材モルタル)

無に係わらず、W/Cの影響は大きくない。なお、WHS、OPNの両者とも、W/Cに係わらず、プレーンモルタルと比較して繊維補強モルタルでは、 $f_{2b}$ が増加している。また、WHSでは、 $V_f$ の増加に伴い、 $f_{2b}$ が顕著に増加していることも分かる。

さらに、ひび割れ本数(図-5(c))に注目すると、WHS、OPNの両者とも、プレーンモルタルでは、ひび割れ本数は1本である。WHSでは、 $V_f=2\%$ においても、ひび割れ本数は1本程度である。しかし、 $V_f=3\%$ において、W/C=40%では、WHS、OPNの両者とも、ひび割れ本数は2~3本程度であるものの、W/C=50%以上では、ひび割れ本数は5本程度以上となっており、シ

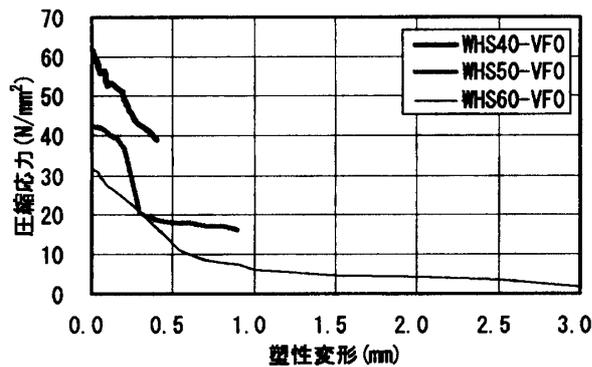
ラスを細骨材として使用した場合でも、十分なひび割れ分散性および曲げ靱性を有し、DFRCCが実現可能であることが分かった。

### 3.2 圧縮破壊挙動

#### (1) 圧縮応力-縦ひずみ関係

図-6および7に、WHSおよびOPNの1軸圧縮試験により得られた、 $\sigma_c$ -縦ひずみ関係を示す。なお、縦ひずみは、载荷盤間に取り付けた変位計により計測した値である。また、各 $\sigma_c$ -縦ひずみ関係は代表的な値を示している。

まず、WHSの結果(図-6)に注目すると、W/Cに係わらず、繊維を混入することにより、 $F_0$ 以降の $\sigma_c$ -



(a) プレーンモルタル

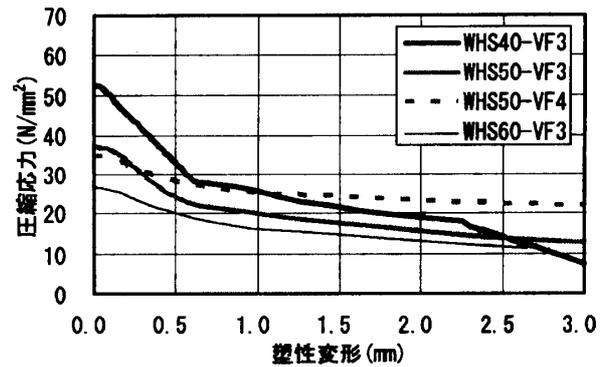
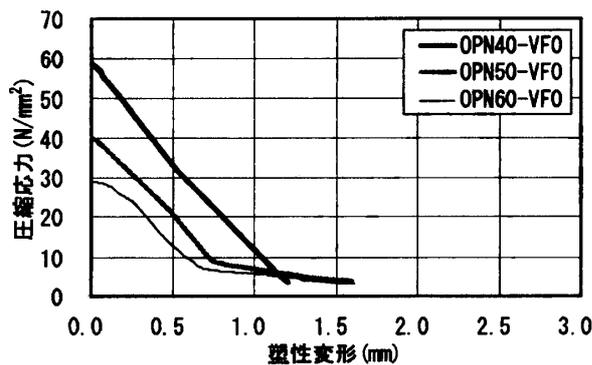
(b) 繊維補強モルタル ( $V_f=3$  および 4%)

図-8 圧縮応力-塑性変形関係 (白色セメントシリスマルタル)



(a) プレーンモルタル

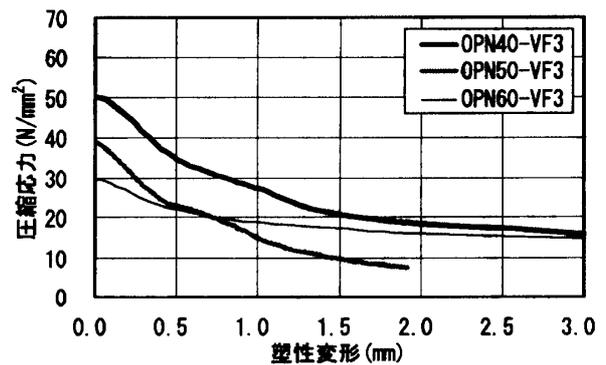
(b) 繊維補強モルタル ( $V_f=3\%$ )

図-9 圧縮応力-塑性変形関係 (普通天然細骨材モルタル)

縦ひずみ関係が延性的となる。 $W/C=50\%$ の繊維補強モルタルでは、 $V_f$ を3%から4%とすることで、 $F_c$ 以降の $\sigma_c$ -縦ひずみ関係はさらに延性的な性状となる。また、繊維補強モルタルでは、 $W/C$ の増加に伴い、 $F_c$ 以降の $\sigma_c$ -縦ひずみ関係が延性的となる。なお、プレーンモルタルにおいてはこのような傾向が不明瞭となるが、一因として、 $W/C$ が低下し、高強度になるほど安定した載荷が難しくなったことも考えられる。

次に、OPNの結果(図-7)に注目すると、WHSの結果と同様、 $W/C$ に係わらず繊維を混入することにより $F_c$ 以降の $\sigma_c$ -縦ひずみ関係が延性的となる。繊維補強モルタルでは、 $W/C=50\%$ の結果を除き、 $W/C$ の増加に伴い $F_c$ 以降の $\sigma_c$ -縦ひずみ関係が延性的となる。

## (2) 圧縮応力-塑性変形関係

図-8および9に、WHSおよびOPNの1軸圧縮試験により得られた、 $\sigma_c$ - $\delta_c'$ 関係を示す。なお、各 $\sigma_c$ - $\delta_c'$ 関係は代表的な値を示している。

まず、WHSの結果(図-8)に注目すると、 $W/C$ に係わらず、繊維を混入することにより、 $\sigma_c$ - $\delta_c'$ 関係延性的となること、 $W/C=50\%$ の繊維補強モルタルでは、 $V_f$ を3%から4%とすることで、 $\sigma_c$ - $\delta_c'$ 関係はさらに延性的な性状となること等、前掲、図-6の傾向と同様である。

次に、OPNの結果(図-9)に注目すると、WHSの

結果と同様、前掲、図-7の傾向と合致している。

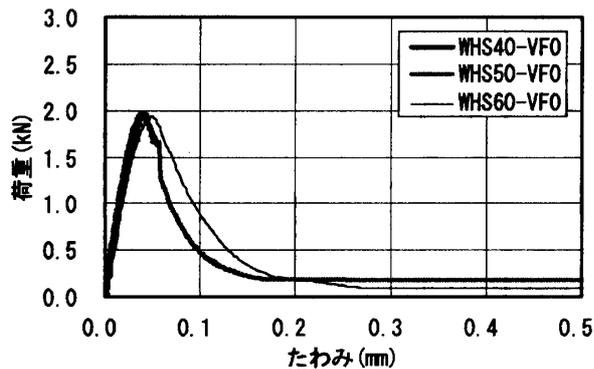
以上より、WHSにおいても、 $\sigma_c$ - $\delta_c'$ 関係を単純化することにより、OPNと同様に<sup>11)</sup>、WHSを使用した部材等の力学的性能を予測するための解析に適用できる可能性が高い。

## 3.3 曲げ破壊挙動

図-10および11に、WHSおよびOPNの切欠き梁3点曲げ試験により得られた、荷重-たわみ関係を示す。なお、各荷重-たわみ関係は代表的な値を示している。

まず、WHSの結果(図-10)に注目すると、 $W/C$ に係わらず、繊維を混入することにより、最大荷重以降の荷重-たわみ関係が著しく延性的となる。また、繊維補強モルタルでは、同一 $V_f$ の場合、 $W/C=40$ および60%の最大荷重以降の荷重-たわみ関係の形状は類似しているが、 $W/C=50\%$ の最大荷重以降の荷重-たわみ関係は、他の結果と比較して延性的である。なお、 $W/C=50\%$ の繊維補強モルタルでは、 $V_f$ を3%から4%に増加しても、大きな曲げ靱性改善効果は確認できない。

次に、OPNの結果(図-11)に注目すると、WHSの結果と同様、 $W/C$ に係わらず、繊維を混入することにより、最大荷重以降の荷重-たわみ関係が著しく延性的となる。また、繊維補強モルタルでは、 $W/C$ の増加に伴い、最大荷重以降の荷重-たわみ関係が延性的となる。この傾向は、WHSの傾向と相違している。原因とし



(a) プレーンモルタル

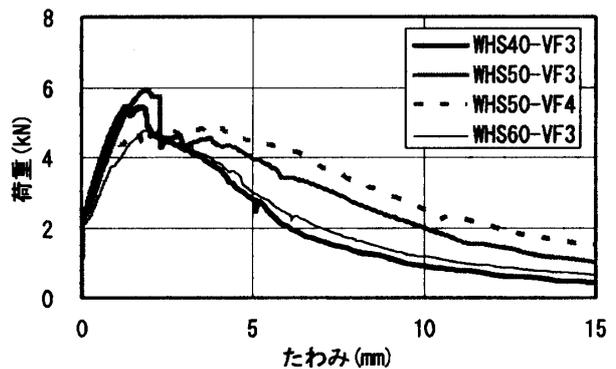
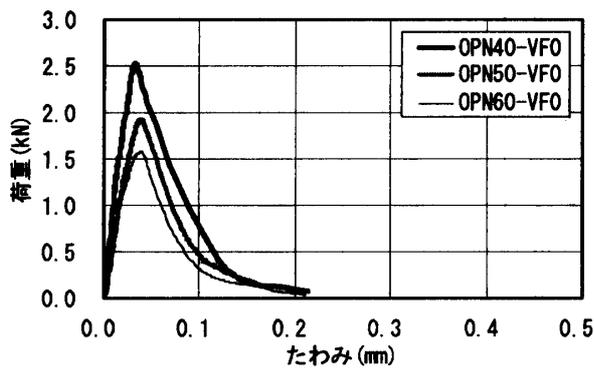
(b) 繊維補強モルタル ( $V_f=3$ および4%)

図-10 荷重-たわみ関係 (白色セメントシラスモルタル)



(a) プレーンモルタル

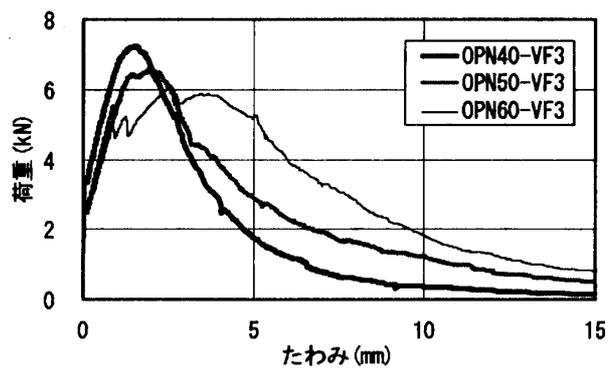
(b) 繊維補強モルタル ( $V_f=3\%$ )

図-11 荷重-たわみ関係 (普通天然細骨材モルタル)

て、骨材種類の影響等が考えられ、今後、詳細に検討していく予定である。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- (1) 水セメント比を50および60%, 繊維体積混入率を3%とすることで、シラスを細骨材として使用した場合でも、十分なひび割れ分散性および曲げ靱性を有し、高靱性セメント複合材料が実現可能である。
- (2) 繊維補強白色セメントシラスモルタルにおいて、繊維体積混入率を3%から4%に増加しても、大きな曲げ靱性改善効果は得られない。

#### 謝辞

試験体製作に際し材料を提供して頂いた、(株)高千穂に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 武若耕司, 松本進, 川俣孝治: しらすのコンクリート用細骨材への利用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.7-12, 1987.6
- 2) 川俣孝治, 武若耕司, 松本進: しらすを細骨材として用いたコンクリートの実用性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.577-582, 1988.6
- 3) 武若耕司: シラスコンクリートの特徴とその実用化

の現状, コンクリート工学, Vol.42, No.3, pp.38-47, 2004.3

- 4) 角徹三, 堀誠治: 粗・細骨材に火山灰を使用したコンクリートの強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.59-64, 1989.6
- 5) 渡部憲, 新留昌泰, 丸矢一夫: 細骨材としてシラスを使用したモルタルの材料特性に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.801-806, 2007.7
- 6) Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W.: Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPRCC2), pp.1-23, 1996
- 7) 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
- 8) (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
- 9) 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
- 10) 土木学会: コンクリート標準示方書 [標準編] 平成11年度版, JSCE-G552 繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法, pp.217-219
- 11) 渡部憲, 白井伸明, 大岡督尚, 白都, 藤田敬: 高靱性ビニロン繊維補強モルタル耐震壁の弾塑性挙動に関する基礎的研究, 日本建築学科構造系論文集, No.559, pp.211-218, 2002.9