

論文 細骨材としてシラスを使用したモルタルの長期性状

渡部 憲^{*1}・河村 準^{*2}

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た白色セメントシラスモルタルの材齢2年までの長期性状（強度発現，収縮特性）および細骨材にシラスを使用した高靱性セメント複合材料の強度発現，収縮特性（材齢28日まで）について検討を行った。その結果，8mmアンダーシラスを使用した白色セメントシラスモルタルの強度発現を，本研究で示した各推定式により推定する場合，材齢13週までが妥当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，繊維，高靱性セメント複合材料，収縮

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¹⁾および川俣ら²⁾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³⁾。

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。

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破壊靱性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^{4,7)}。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。

そこで筆者らは，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た白色セメントシラスモル

タルの調合，強度特性等について検討を行い，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等の知見を得た⁸⁾。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い，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等の知見を得た⁹⁾。しかし，白色セメントシラスモルタルおよび細骨材にシラスを使用したDFRCC（以下，SHDFRCCと略記）の強度発現，収縮特性について，長期材齢での検討を実施していない。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する場合，使用時のパネルの欠け，割れ，変形等による不具合を防ぐため重要な検討項目であると思われる。

そのため本研究では，白色セメントシラスモルタル（材齢2年まで）およびSHDFRCC（材齢28日まで）の強度発現，収縮特性について検討を行った。

2. 実験方法

実験概要の一覧を表－1に示す。検討項目は，フレッシュ性状，強度発現および収縮特性である。なお，目標フロー値は試し練りにより決定した。

表－1 実験概要

試験体名	試験シリーズ	セメント種類	細骨材種類	混和剤種類	水セメント比 W/C (%)	繊維体積 混入率 V _f (%)	細骨材セメント比 S/C	目標フロー値 (mm)	検討項目							
									強度発現					収縮特性		
									1週	4週	13週	1年	2年	角柱	平板	
1-WH8P40-VF0	1	WH	8	P	40	0	0.53	180	○	○	○	—	—	○	—	
1-WH8P50-VF0			8'		50		0.92		○	○	○	○	○	○	○	
1-WH8' P50-VF0					50		0.92		○	○	○	○	○	—	—	
1-OP8P50-VF0		OP	8	A	60		0.92		○	○	○	—	—	○	—	
1-WH8P60-VF0					60		1.30		○	○	○	—	—	○	—	
1-WH8A50-VF0					60		1.16		—	○	—	—	—	○	—	
1-WH2P50-VF0		WH	2	P	50		0.92		○	○	○	—	—	○	—	
1-WHNP50-VF0			N		50		1.15		○	○	○	○	○	○	○	
2-WH8P40-VF3	2	WH	8	P	40	3	0.15	180	○	○	△	—	—	○	—	
2-WH8P50-VF3					50		0.40		○	○	△	△	△	○	○	
2-OP8P50-VF3					OP		60		0.40	○	○	△	—	—	○	—
2-WH8P60-VF3		WH	N	G			50		0.80	○	○	△	—	—	○	—
2-WHNG50-VF3							50		0.80	○	○	△	△	△	○	○
					50		0.80		○	○	△	△	△	○	○	

*1 東海大学 工学部建築学科准教授 工博（正会員）

*2 (株)トータル・インフォメーション・サービス（正会員）

表－1中の試験シリーズについて、(1)は文献⁸⁾の継続実験(材齢28日を越え、2年程度までの長期実験)、(2)は新規実験(シリーズ1の実験要因を基本とし、繊維を混入しDFRCCとした実験)である。セメントについて、(WH)は白色セメント(密度:3.05g/cm³)、(OP)は普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)である。細骨材について、(8)は8mmアンダーシラス(8mmふるいを通過したもの)、(2)は2mmアンダーシラス(2mmふるいを通過したもの)および(N)は砕砂と山砂を質量比7:3の割合で混合した天然細骨材であり、(8')は8mmアンダーシラスから0.15mmアンダーを取り除いたシラスであり、シラスはいずれも霧島産である。細骨材の表乾密度、吸水率および粗粒率を表－2に示す。さらに、混和剤について、(P)は混和剤未使用モルタル、(A)は高性能AE減水剤をセメント質量に対して、1%添加したもの、(G)は分離低減剤をセメント質量に対して、1.5%添加したものである。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_f)を0および3%(VF0およびVF3)とした。検討項目の○印は実施項目、△印は実施予定項目である。

2.1 強度発現試験

モルタル打設後1日で脱型し、所定材齢(1、4、13週(一部1、2年)、シリーズ2について、現時点で得られている結果は、材齢4週までの結果である)まで標準養生した100φ×200mm円柱試験体(各要因3体製作、次章の実験結果については、3体の平均値)の圧縮強度試験を行った。計測項目は、圧縮強度、ヤング係数およびポ

試験シリーズ	細骨材種類	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
1	8	2.08	7.70	1.49
	2	2.17	4.60	1.21
	N	砕砂	1.46	3.03
		山砂	1.78	1.79
	8	2.09	6.59	1.36
2	N	砕砂	1.27	2.95
		山砂	2.45	1.47
	8	2.09	6.59	1.36
	2	2.17	4.60	1.21

アソン比である。載荷はJIS A 1106に準じ、2000kN耐圧試験機を使用し、ロードセルにより荷重を、コンプレッソメーターにより縦および横ひずみを計測した。各計測データは、データロガーを使用して取込んだ。

2.2 収縮試験

モルタル打設後1日で脱型し、その後標準養生とし、材齢7日で恒温恒湿室(20℃、60%RH)内に設置した(乾燥開始材齢7日)。試験体は100×100×400mm角柱および300×300×60mm平板試験体で、各要因について2体用意した。計測は、試験体内部中央に埋め込みゲージ(検長:100mm、見かけの弾性係数:約40N/mm²)を設置し、収縮ひずみを計測した。各計測データは、データロガーを使用して取込んだ。なお、次章の実験結果については、2体の平均値とした。

3. 結果と考察

3.1 強度発現試験結果

白色セメントシラスモルタルおよびSHDFRCCの圧縮強度(f_c)およびヤング係数(E)に関して、土木学会式¹⁰⁾をベースとした推定式による推定を試みる。

土木学会ベース式:

$$f_c(t) = f_c(28) \cdot t / (\alpha \cdot t + \beta) \quad (1)$$

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

ここに、 t は材齢(日)、 $f_c(28)$ は28日圧縮強度(N/mm²)、 α 、 β および γ は材料定数。なお、Eの単位は、(kN/mm²)である。

表－3に、式(1)および(2)の推定材料定数を示す。また、表－4に、各実験結果に対する式(1)および(2)の推定誤差を示す。

図－1および2に、シリーズ1より得られた、W/Cの異なる8mmアンダーシラス、白色セメントを使用したモルタルおよび骨材種類の異なるW/C=50%、白色セメントを使用したモルタルの f_c －材齢関係を示す。なお、図－1中には普通ポルトランドセメントを使用した場合の結果も併記してある。また、図－2中の細骨材として2

表－3 材料定数一覧

試験体名	式(1)および(2)の材料定数								
	4週までの実験結果から推定			13週までの実験結果から推定			2年までの実験結果から推定		
	α	β	γ	α	β	γ	α	β	γ
1-WH8P40-VF0	0.8670	3.7247	2.1800	0.7986	4.8187	2.1739	—	—	—
1-WH8P50-VF0	0.8352	4.6150	2.2761	0.7523	5.9404	2.1841	0.5717	20.763	2.3592
1-WH8' P50-VF0	0.8445	4.3535	2.3145	0.7992	5.0785	2.2557	0.6350	19.721	2.5280
1-OP8P50-VF0	0.8940	2.9685	2.2937	0.8274	4.0332	2.3266	—	—	—
1-WH8P60-VF0	0.8202	5.0332	2.3562	0.7086	6.8198	2.2711	—	—	—
1-WH2P50-VF0	0.8043	5.4790	2.2491	0.7627	6.1445	2.1447	—	—	—
1-WHNP50-VF0	0.7542	6.8829	2.8601	0.6835	8.0139	2.7914	0.6607	12.904	2.8126
2-WH8P40-VF3	0.8441	4.3643	2.2265	—	—	—	—	—	—
2-WH8P50-VF3	0.8609	3.8939	2.2713	—	—	—	—	—	—
2-OP8P50-VF3	0.8583	3.9674	2.3472	—	—	—	—	—	—
2-WH8P60-VF3	0.7341	7.4452	2.4727	—	—	—	—	—	—
2-WHNG50-VF3	0.7954	5.7290	2.4082	—	—	—	—	—	—

表-4 推定誤差一覧

(a) シリーズ1

試験体名	実験結果に対する式(1)および(2)の推定誤差(%)															
	13週までの実験結果から推定						2年までの実験結果から推定									
	圧縮強度			ヤング係数			圧縮強度					ヤング係数				
	1週	4週	13週	1週	4週	13週	1週	4週	13週	1年	2年	1週	4週	13週	1年	2年
1-WH8P40-VF0	-5.91	3.02	-0.27	-5.18	3.21	0.51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1-WH8P50-VF0	-6.65	3.69	-0.33	-8.46	-1.03	9.02	-57.8	-23.9	1.88	18.7	-4.82	-33.5	-8.38	19.1	1.81	-15.4
1-WH8' P50-VF0	-3.82	1.98	-0.18	-5.65	-0.27	5.40	-57.5	-25.3	0.21	18.1	-4.61	-29.7	-4.37	18.4	-10.9	-11.5
1-OP8P50-VF0	-6.09	2.94	-0.25	-2.06	3.29	-2.87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1-WH8P60-VF0	-8.53	5.02	-0.47	-10.5	1.77	7.84	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1-WH2P50-VF0	-3.26	1.82	-0.16	-9.38	-0.29	10.7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1-WHNP50-VF0	-4.97	3.12	-0.30	-7.68	2.23	5.01	-30.6	-10.8	-4.15	8.84	-2.16	-20.5	-4.22	3.75	7.18	-5.73

(b) シリーズ2

試験体名	実験結果に対する式(1)および(2)の推定誤差(%)			
	4週までの実験結果から推定			
	圧縮強度		ヤング係数	
	1週	4週	1週	4週
2-WH8P40-VF3	0.00	0.00	1.59	-1.54
2-WH8P50-VF3	0.00	0.00	-1.70	1.76
2-OP8P50-VF3	0.00	0.00	-0.78	0.80
2-WH8P60-VF3	0.00	0.00	-6.78	7.84
2-WHNG50-VF3	0.00	0.00	0.37	-0.37

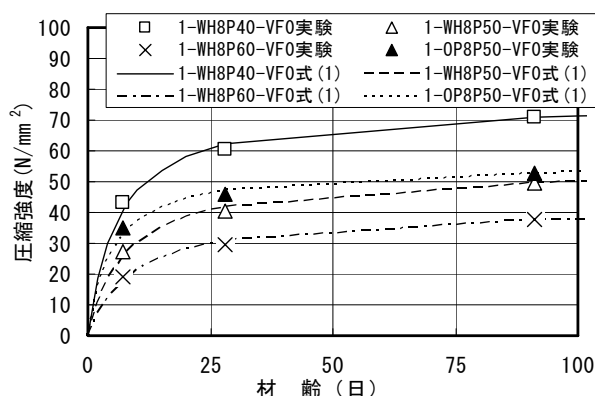


図-1 圧縮強度-材齢関係 (シリーズ1: 水セメント比別, 材齢13週までの実験結果から推定)

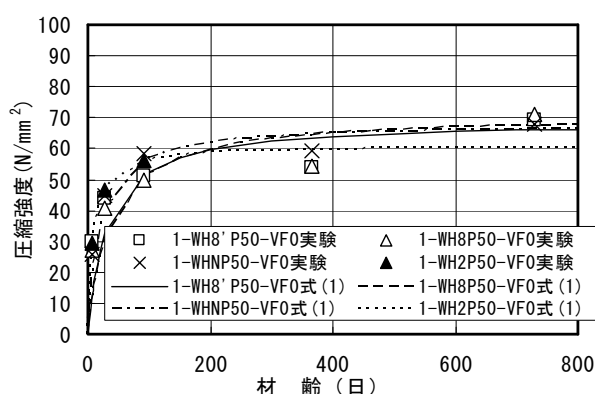


図-2 圧縮強度-材齢関係 (シリーズ1: 骨材種類別, 材齢2年までの実験結果から推定)

mmアンダーシラスを使用した場合の結果は, 材齢13週までのものである。

図-1によれば, 材齢13週までの f_c は, W/Cおよびセメント種類に係わらず, 式(1)により概ね推定可能であり, 表-4(a)によれば, 材齢13週までの実験結果に対す

る式(1)による推定誤差は, +5.02~8.53%であった。

しかし, 図-2によれば, 材齢2年までの実験結果に対する式(1)による推定精度は低下しており, 表-4(a)によれば, 材齢2年までの実験結果に対する式(1)による推定誤差は, +18.7~-57.8%であった。なお, 材齢13週から1年において, 全ての実験結果で f_c の増加が停滞しているが, これは, 恒温水槽の故障(材齢13週の試験後, 2月初旬から5月下旬までの約4ヶ月間, 温度制御、水循環不能)が原因であると思われる。今後, 積算温度を考慮した検討を実施する予定である。

ここで, 図-1の実験結果に注目すると, 材齢13週までの f_c は, 同一セメント種類の場合, W/Cの増加に伴い低下している。セメント種類が異なる場合の f_c は, 普通ポルトランドセメントを使用した場合(1-OP8P50-VF0)と比較して白色セメントを使用した場合(1-WH8P50-VF0)の方が小さくなっている。

また, 図-2の実験結果(材齢2年まで実験を行ったもの)に注目すると, 材齢4週および13週の f_c は, 天然骨材を使用した場合(1-WHNP50-VF0)が最も大きく, 次に8mmアンダーシラスから0.15mmアンダーを取り除いたシラスを使用した場合(1-WH8'P50-VF0), 最後に8mmアンダーシラスを使用した場合(1-WH8P50-VF0)となっている。しかし, 材齢2年の f_c は, 1-WH8P50-VF0が最も大きく, 次に1-WH8'P50-VF0, 最後に1-WHNP50-VF0となっている。武若等によれば, シラスを微粉砕したものをセメントと所定量置換して使用したモルタルにおいて長期に渡って強度増進が見込まれるとしているが³⁾, 本実験結果においても, このような事象が確認できた。なお, 材齢13週において, 2mmアンダーシラスを使用した場合の f_c は, 8mmアンダーシラスを使用した場合より大きくなっている。使用骨材の表乾密度による影響と思われるが, 微粒分の影響等も調査する必要があると考えられ, 今後, 追実験を行う予定である。

図-3および4に, シリーズ1より得られた, W/Cの異なる8mmアンダーシラス, 白色セメントを使用したモルタルおよび骨材種類の異なるW/C=50%, 白色セメントを使用したモルタルのE-材齢関係を示す。なお,

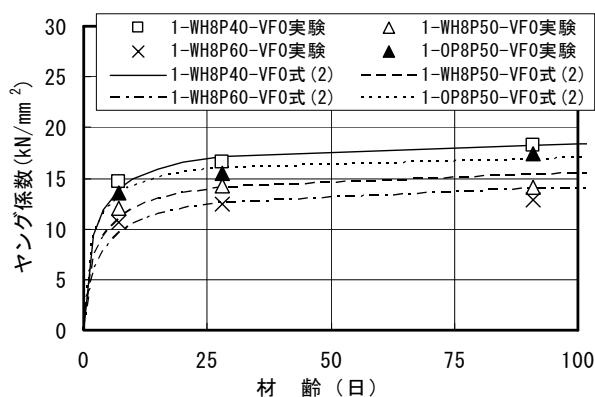


図-3 ヤング係数－材齢関係（シリーズ1：水セメント比別，材齢13週までの実験結果から推定）

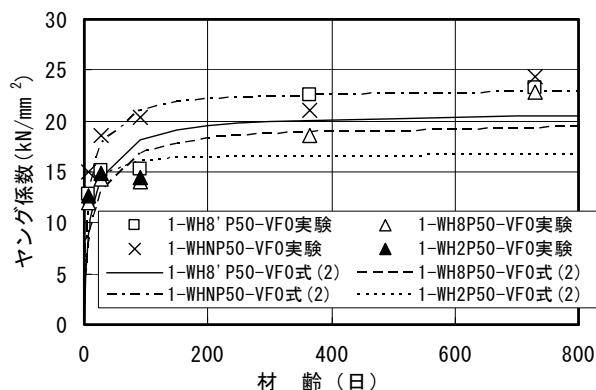
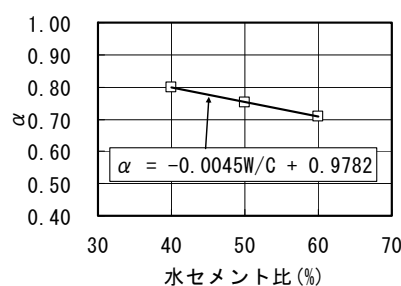
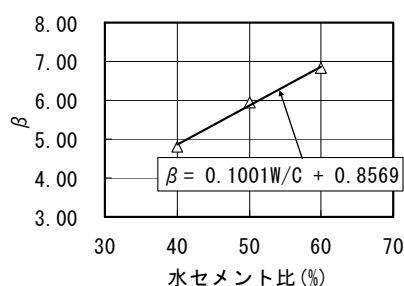


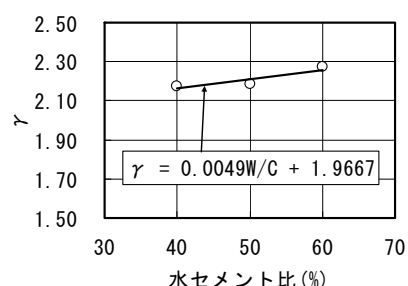
図-4 ヤング係数－材齢関係（シリーズ1：骨材種類別，材齢2年までの実験結果から推定）



(a) 式(1)の α



(b) 式(1)の β



(c) 式(2)の γ

図-5 推定式材料定数－水セメント比関係（シリーズ1）

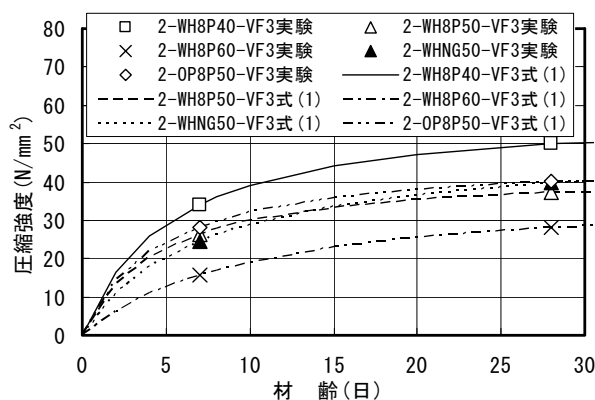


図-6 圧縮強度－材齢関係（シリーズ2：材齢4週までの実験結果から推定）

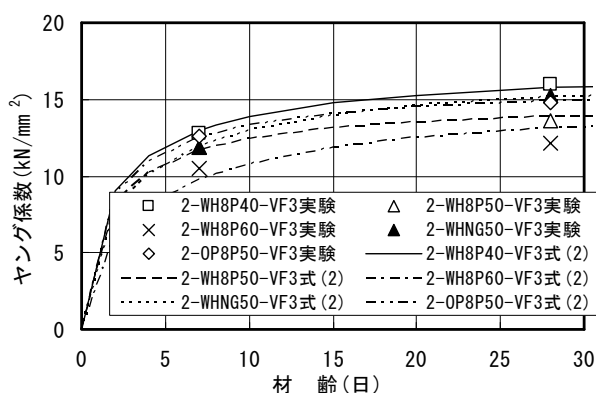


図-7 ヤング係数－材齢関係（シリーズ2：材齢4週までの実験結果から推定）

図-3中には普通ポルトランドセメントを使用した場合の結果も併記してある。また，図-4中の細骨材として2 mmアンダーシラスを使用した場合の結果は，材齢13週までのものである。

図-3によれば，材齢13週までのEは，W/Cおよびセメント種類に係わらず，式(2)により概ね推定可能であり，表-4(a)によれば，材齢13週までの実験結果に対する式(2)による推定誤差は，+10.7～-10.5%であった。

しかし，図-4によれば，材齢2年までの実験結果に対する式(2)による推定精度は低下しており，表-4(a)によれば，材齢13週までの実験結果に対する式(2)に

よる推定誤差は，+19.1～-33.5%であった。この原因として，前述の恒温水槽の故障が考えられるが，Eにおよぼす影響は， f_c の場合と相違している。即ち，細骨材として天然骨材を使用した場合の実験結果（1-WHNP50-VF0）については，材齢13週から1年においてEの増加が停滞している。しかし，細骨材としてシラスを使用した場合の実験結果は，材齢4週から13週においてEの増加が停滞するものもあり，材齢13週から1年においてEは順調に増加する。材齢13週の試験後まで，恒温水槽は故障していないため，細骨材としてシラスを使用した場合の影響も考えられる。今後，検討を行う予定である。

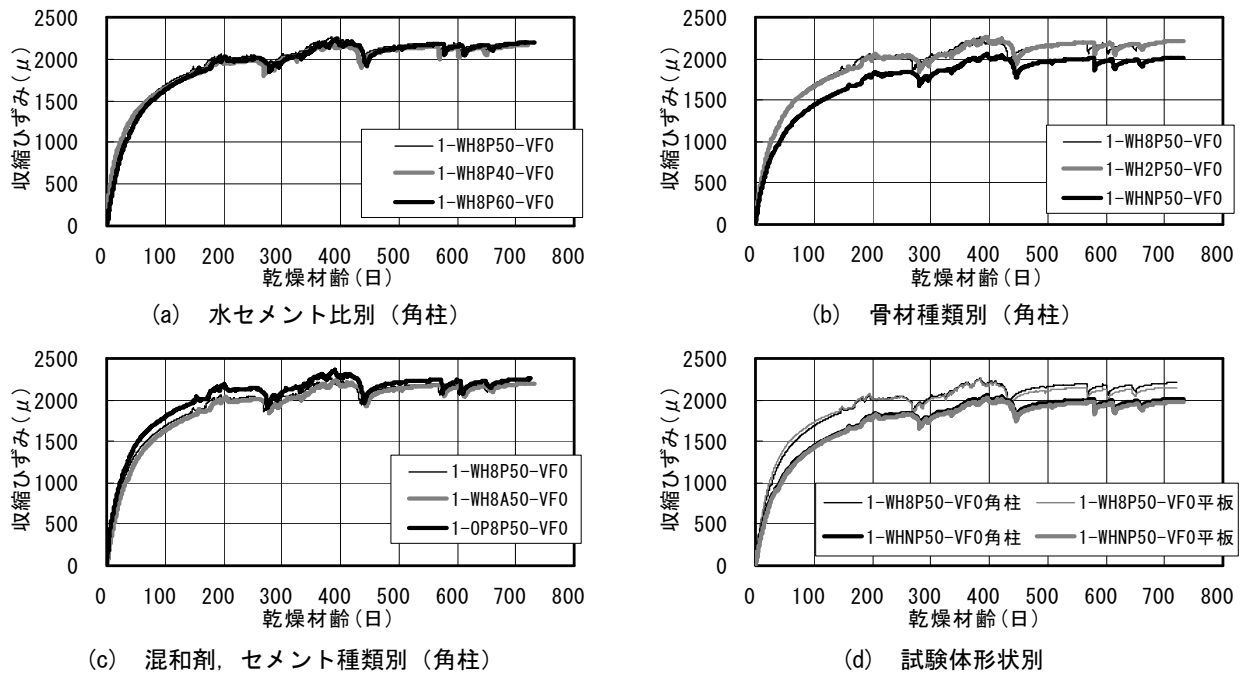


図-8 収縮ひずみの経時変化 (シリーズ1)

以上より、8mmアンダーシラスを使用した白色セメントシラスモルタルの強度発現を、本研究で示した各推定式により推定する場合、材齢13週までが妥当であると考えられ、材齢13週までの各推定式の方法定数は、図-5のように直線近似できる。

図-6および7に、シリーズ2より得られた、DFRCCの f_c -材齢関係およびE-材齢関係を示す。

図によれば、材齢4週までの f_c およびEは、W/C、セメント種類および骨材種類に係らず各推定式により概ね推定可能であり、表-4(b)によれば、材齢4週までの f_c の実験結果に対する式(1)による推定誤差は、 $\pm 0.0\%$ 、Eの実験結果に対する式(2)による推定誤差は、 $+7.84 \sim -6.78\%$ であった。

3.2 収縮試験結果

図-8および9に、シリーズ1および2より得られた、モルタルおよびDFRCCの収縮ひずみの経時変化を示す。

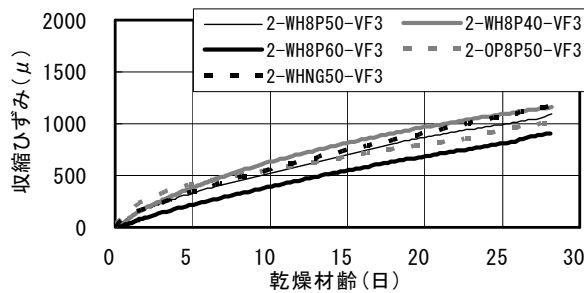
図-8(a)に、8mmアンダーシラス、白色セメントを使用したモルタルの収縮ひずみの経時変化をW/C別に示す。乾燥材齢700日の収縮ひずみは、W/C=50%の場合(1-WH8P50-VF0: 2203 μ)が最も大きく、次にW/C=60%の場合(1-WH8P60-VF0: 2187 μ)、最後にW/C=40%の場合(1-WH8P40-VF0: 2157 μ)である。最大値と最小値の差(W/C影響)は46 μ と小さいが、原因として、各調合における単位細骨材量、単位水量、単位セメント量の増減の影響が重なり合ったものと思われる。

図-8(b)に、8mmアンダーシラス、2mmアンダーシラスおよび天然骨材、白色セメントを使用したモルタル(W/C=50%)の収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥材

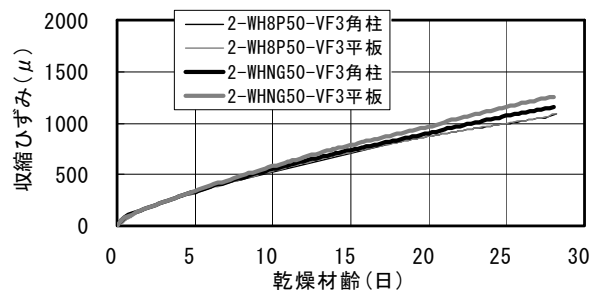
齢700日の収縮ひずみは、2mmアンダーシラスを使用した場合(1-WH2P50-VF0: 2205 μ)が最も大きく、次に8mmアンダーシラスを使用した場合(1-WH8P50-VF0: 2203 μ)、最後に天然骨材を使用した場合(1-WHNP50-VF0: 2004 μ)である。シラスを使用した場合、天然骨材を使用した場合と比較して収縮性状は劣るが、一因として骨材表乾密度の相違が挙げられる。

図-8(c)に、8mmアンダーシラス、白色セメントおよび普通ポルトランドセメントを使用した混和剤未使用モルタルおよび高性能AE減水剤を添加したモルタルの収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥材齢10日の収縮ひずみは、1-OP8P50-VF0 (594 μ)が最も大きく、次に1-WH8P50-VF0 (531 μ)、最後に1-WH8A50-VF0 (411 μ)であり、混和剤使用の有無に注目すると、その差は120 μ である。乾燥材齢700日の収縮ひずみは、1-OP8P50-VF0 (2246 μ)が最も大きく、次に1-WH8P50-VF0 (2203 μ)、最後に1-WH8A50-VF0 (2187 μ)であり、混和剤使用の有無による差は16 μ である。以上より、高性能AE減水剤の使用は、若材齢での収縮ひずみの低減に有効であるが、長期材齢になると、その効果は小さくなる。

図-8(d)に、8mmアンダーシラス、天然骨材、白色セメントを使用したモルタルの収縮ひずみの経時変化を試験体形状別に示す。乾燥材齢700日の収縮ひずみは、8mmアンダーシラスを使用した場合(1-WH8P50-VF0)、角柱試験体で2203 μ 、平板試験体で2146 μ であり、その差は57 μ である。また、天然骨材を使用した場合(1-WHNP50-VF0)、角柱試験体で2004 μ 、平板試験体で1968 μ であり、その差は36 μ である。文献¹¹⁾によ



(a) 水セメント比, 骨材, セメント種類別 (角柱)



(b) 試験体形状別

図-9 収縮ひずみの経時変化 (シリーズ2)

れば、コンクリートの収縮ひずみは、 $h = (2 \times \text{部材断面積}) / (\text{大気}に接する部材周長)$ が同じ場合、算出される収縮ひずみも同値となる。本研究では平板と角柱の h が同値となるように寸法を設定しており、白色セメントシラスモルタルについてもコンクリートと同様の傾向となることがわかった。

図-9(a)に、W/C、骨材種類およびセメント種類の異なるDFRCCの収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥材齢28日の収縮ひずみは、2-WHNG50-VF3 (1156 μ) が最も大きく、次に2-WH8P40-VF3 (1154 μ)、続いて2-WH8P50-VF3 (1081 μ)、更に2-OP8P50-VF3 (1009 μ)、最後に2-WH8P60-VF3 (908 μ) である。前述のモルタル (シリーズ1) の場合、乾燥材齢28日の収縮ひずみは、1-OP8P50-VF0 (1102 μ) が最も大きく、次に1-WH8P40-VF0 (1069 μ)、続いて1-WH8P50-VF0 (997 μ)、更に1-WH8P60-VF0 (915 μ)、最後に1-WHNP50-VF0 (839 μ) であり、DFRCCの場合と傾向が相違している。

図-9(b)に、8mmアンダーシラス、天然骨材、白色セメントを使用したDFRCCの収縮ひずみの経時変化を試験体形状別に示す。乾燥材齢28日の収縮ひずみは、8mmアンダーシラス使用の場合、角柱試験体で1081 μ 、平板試験体で1084 μ であり、その差は3 μ である。また、天然骨材使用の場合、角柱試験体で1156 μ 、平板試験体で1256 μ であり、その差は100 μ である。現時点では、SHDFRCC (8mmアンダーシラス使用) において収縮ひずみが、角柱試験体と平板試験体ではほぼ等しい。

繊維混入および試験体形状の影響等、シリーズ1および2の相違について、更に長期計測を行う必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- (1) 白色セメントシラスモルタルの圧縮強度およびヤング係数発現について、土木学会コンクリート標準示方書[施工編]に示される既往式をベースとした推定式の材料定数を明らかにした。
- (2) 8mmアンダーシラスを使用した白色セメントシラスモルタルの強度発現を、本研究で示した各推定式に

より推定する場合、材齢13週までが妥当である。

- (3) 白色セメントシラスモルタルにおいて、高性能AE減水剤の使用は、若材齢での収縮ひずみの低減に有効であるが、2年程度の長期材齢になると、その効果は小さくなる。

謝 辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た、東海大学学生の浦城卓君、高橋寛治郎君および斉藤純也君に謝意を表します。

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) 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
- 5) 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
- 6) (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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 渡部憲, 加藤雄介: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.375-380, 2008.7
- 10) 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
- 11) CEB: CEB-FIP MODEL CODE1990, Thomas Telford, pp.53-58, 1993