

論文 細骨材の違いが超高強度コンクリートの性状に及ぼす影響

松田 拓^{*1}・蓮尾 孝一^{*2}・野口 貴文^{*3}

要旨：水結合材比=0.12, 単位水量=135kg/m³, 細骨材率=55%のコンクリートに, 空隙構造が粗大で吸水率が大きい細骨材を用いると, 流動性と強度および静弾性係数が高まり, 自己収縮が極めて小さくなった。モルタル試料による実験と細骨材の物性から, その理由を細骨材の内部養生効果と考察した。また, コンクリートとモルタルの圧縮変形時における応力-ひずみ関係から, コンクリートの強度が高まる理由のひとつに, モルタル部分の自己収縮が低減され, 局所的な応力による破壊の危険性が低くなることを考察した。

キーワード：超高強度コンクリート, 細骨材, 内部養生, 空隙構造

1. はじめに

筆者らは既報^{1),2)}で, 水結合材比 (W/B) 0.20 以下の超高強度コンクリートを対象に, 混和材にシリカフュームとフライアッシュを併用する効果を検討した。その結果, 混和材がシリカフュームのみの調査よりも, 併用した調査の方が粘性が低下するため, 単位水量 (W) を 150 から 135kg/m³に低減し細骨材率 (s/a) を 27 から 55%に増加させても十分な流動性を確保でき, 強度と静弾性係数が高まり自己収縮が著しく小さくなることを示した (図-1 に結果²⁾の一部を示す)。ただし, これらは限られた材料 (低熱ポルトランドセメント, シリカフューム, フライアッシュ, フェロニッケルスラグ細骨材, 硬質砂岩砕石) での実験結果である。本研究の目的は, 既報^{1),2)}と異なる材料の超高強度コンクリートへの上記知見の適用性を確かめると同時に, 材料により性状 (流動性, 力学特性, 自己収縮特性) が異なる理由を考察し, 調査設計技術の発展に資する知見を得ることである。

本検討で取り上げた材料を表-1 に示す。実験は 2 シリーズ実施した。結合材は低発熱系のセメントの一部をシリカフュームで置換したプレミックスセメント (SFPC) とフライアッシュ (FA) (JIS A 6201 I 種適合品), 細骨材は安山岩 (S1), 硬質砂岩 (S2), 2 種類のフェロニッケルスラグ (S3, S4), 粗骨材は安山岩 (G1), 2 種類の硬質砂岩 (G2, G3) とした。G2 と G3 は, 産地と粒径が異なる (G2 は 20, G3 は 13mm)。S3 と G3 は既報^{1),2)}で用いたものと同じである。本検討では, 全ての試験体を水分の供給・逸散の無い封かん養生とした。

2. シリーズ 1

2.1 実験手順および測定項目

コンクリートの調査および試験体の種類と養生条件を表-2, 表-3 に示す。全調査の W/B=0.12 である。

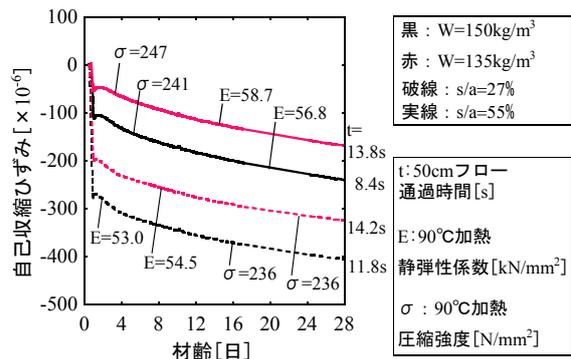


図-1 既報²⁾の結果の一部

表-1 検討に使用した材料

名称および種類		物性等	記号	実験シリーズ
結合材 (B)	シリカフューム プレミックス セメント	密度:3.04g/cm ³ , 比表面積:5780cm ² /g	SFPC	1, 2
	フライアッシュ (1種)	密度:2.40g/cm ³ , 比表面積:5300cm ² /g	FA	
細骨材 (S)	安山岩砕砂	表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:2.81%	S1	1, 2, 既報 ^{1),2)}
	硬質砂岩砕砂	表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:1.24%	S2	
	フェロニッケル スラグ	表乾密度:2.89g/cm ³ , 吸水率:2.91%	S3	
		表乾密度:2.97g/cm ³ , 吸水率:0.95%	S4	
粗骨材 (G)	安山岩砕石	表乾密度:2.60g/cm ³ , 吸水率:2.48%	G1	1
	硬質砂岩砕石 2005	表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.82%	G2	
	硬質砂岩砕石 1305	表乾密度:2.63g/cm ³ , 吸水率:0.95%	G3	
化学 混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP	1, 2, 既報 ^{1),2)}
	消泡剤	エステル系消泡剤	NonAE	

Con-1 と Con-2 は混和材にシリカフュームを用いた調査, Con-3~Con-9 は混和材にシリカフュームと FA を併用した調査である。Con-1~Con-4 は W=155kg/m³, s/a=29% で, Con-5~Con-7 は W=135kg/m³, s/a=55% である。Con-8, 9 は W=125, 95kg/m³ の調査条件である。シリーズ 1 で

*1 三井住友建設 (株) 技術開発センター 博士 (工学) (正会員)

*2 三井住友建設 (株) 技術開発センター (正会員)

*3 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリートの調合 (シリーズ1)

調合名称	Sの種類	Gの種類	W/B	s/a [%]	目標空気量 [%]	単位量[kg/m ³]				V _s /V _{mor} ※					
						W	B		S		G				
							SFPC	FA							
Con-1	S1調合	S1	G1	0.12	29	155	-	307	748	0.17					
Con-2	S2調合	S2	G2				1292	-	307		759				
Con-3	S1調合	S1	G1				1034	258	287		709				
Con-4	S2調合	S2	G2				55	1.5 +1.5, -1.0	135	900	225	659	548	0.32	
Con-5		S2	G2							125	834	208	729		549
Con-6	S3調合	S3	G2							125	834	208	729		547
Con-7		S3	G3							95	634	158	792	592	
Con-8		S3	G3							95	634	158	845	850	0.43
Con-9	S3	G3								48					

※V_s/V_{mor}: 細骨材とモルタルの体積比

表-3 試験体一覧 (シリーズ1)

養生条件	方法	試験項目	試験体寸法[mm]	材齢 [日]	備考
20℃一定	20℃環境に存置	圧縮強度	φ100×200円柱	28	-
		静弾性係数	φ100×200円柱	28	-
		圧縮強度	φ50×100円柱	28	ウェットスクリーニングモルタル
		静弾性係数	φ50×100円柱	28	-
		自己収縮ひずみ	□100×100×400角柱	28	-
90℃加熱	20℃環境に48hr存置⇒90℃環境に120hr存置	圧縮強度	φ100×200円柱	7	-
		静弾性係数	φ100×200円柱	7	-
		圧縮強度	φ50×100円柱	7	ウェットスクリーニングモルタル
		静弾性係数	φ50×100円柱	7	-

は便宜上、「細骨材にS1を用いた調合」を「S1調合」の様に、調合を必要に応じて細骨材の種類で呼称する。試験体の種類と養生条件を表-3に示す。各コンクリートでウェットスクリーニングモルタルを採取しコンクリートと同条件で養生した。コンクリートの練混ぜには強制2軸ミキサを使用し、化学混和剤 (SP) の添加量は全調合で同じ (B×2.30%) とした。フレッシュコンクリートの空気量は2.0~3.0%, 温度は28.5~32.0℃の範囲にあった。自己収縮ひずみは、□100×100×400mm角柱に埋込み形ひずみ計を設置し測定した。

2.2 実験結果および考察

スランプフロー試験結果, 圧縮強度試験結果, 静弾性係数試験結果, 自己収縮試験結果を図-2, 図-3, 図-4, 図-6に示す。詳細検討の前に, それらの図で細骨材がS2で粗骨材がG2のCon-4とCon-5の結果を比べる。Wを155から135kg/m³に減らしs/aを29から55%に増やすと, 流動性が低下し, 強度と静弾性係数および自己収縮はほとんど変化していない。これは既報^{1),2)}の傾向(図-1)と全く異なる。すなわち, 超高強度コンクリートの性状は材料の違いで全く異なる場合があるとわかった。

(1) 流動性

スランプフロー試験結果 (図-2) によれば, Con-1~4の結果から, 本実験の範囲でも, 混和材にシリカフェームとFAを併用すれば, シリカフェームのみの場合より流動性が高まるとわかる。骨材がS1+G1の場合(Con-1, 3)とS2+G2(Con-2, 4)の場合とで, また粗骨材がG2(Con-6)とG3(Con-7)とで流動性に違いは無い。一方, S2をS3に置き換えると明らかに粘性が低下し(Con-5, 6), Wを95kg/m³としても, Con-1, 2より低粘性なコンクリートが得られた。この理由に, S3調合のモルタル部分の流動性が他の調合に比べ高いことが考えられる(3.でモルタル試料により検証する)。

(2) 力学特性

圧縮強度の試験結果 (図-3) では, 既報¹⁾と同様に, 混和材にシリカフェームとFAを併用した調合 (Con-3,

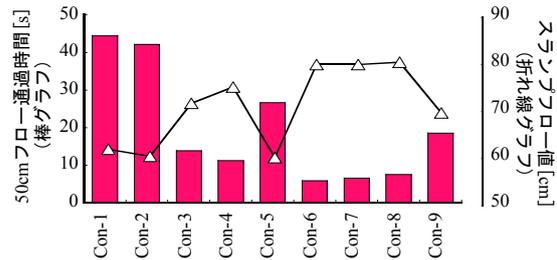


図-2 スランプフロー試験結果 (シリーズ1)

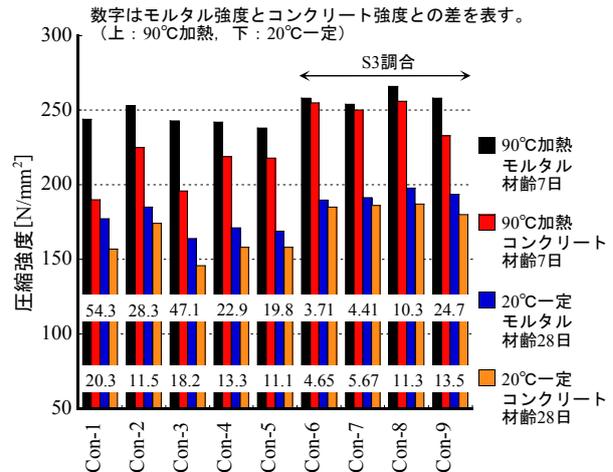


図-3 圧縮強度試験結果 (シリーズ1)

4) の強度は, 混和材がシリカフェームの調合 (Con-1, 2) に比べ, 20℃一定では低いが 90℃加熱では同等となった。いずれの調合も, モルタル強度はコンクリート強度より高い。結合材が同じ Con-3~Con-9 を見る。20℃一定では, コンクリートとモルタル強度どちらも, S1<S2<S3 調合である。90℃加熱では, モルタル強度はいずれも 240N/mm²以上得られ, S1≒S2<S3 調合である。一方, コンクリート強度は S1<S2<S3 調合となり, 特に S1 調合においてモルタル強度とコンクリート強度との差が大きい (この理由を本項の最後と 3.で考察する)。

本結果から, S3 調合のコンクリート強度が S1, S2 調合より高い理由のひとつに, モルタル部分の強度が高いことが考えられる。

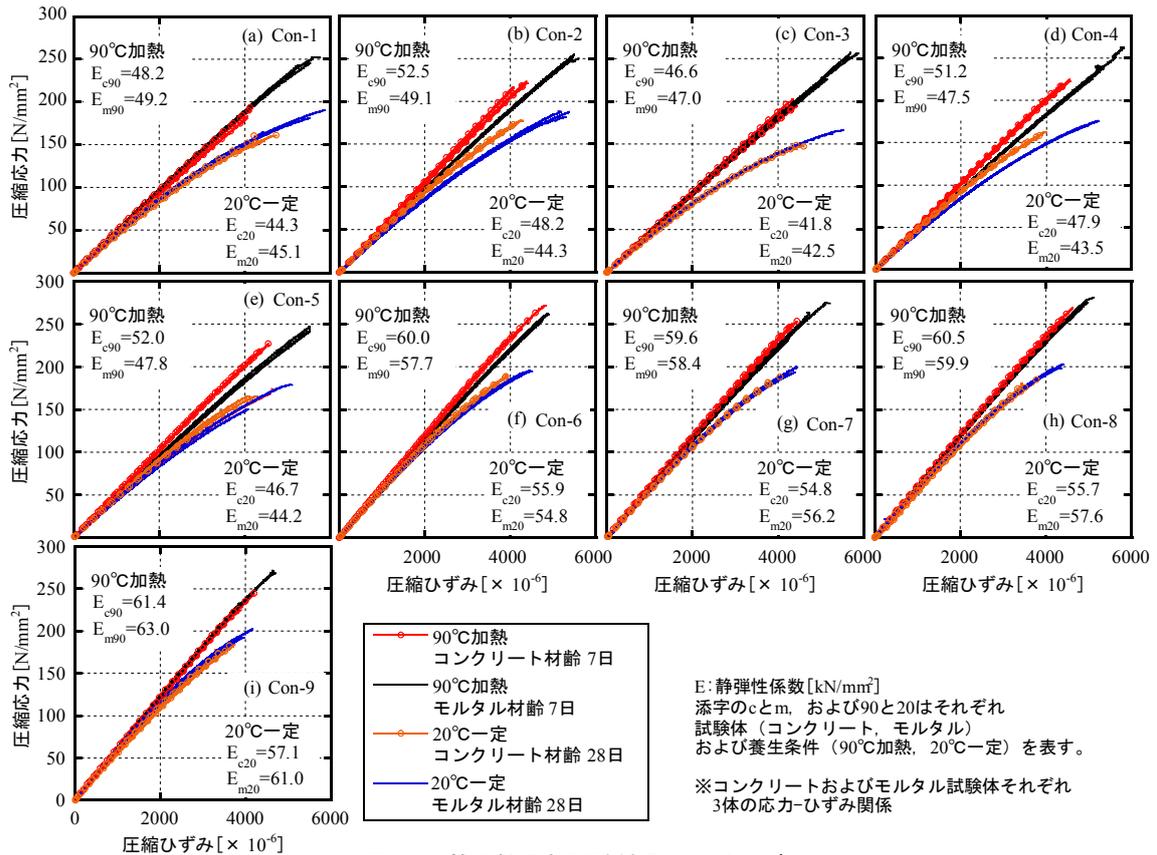


図-4 静弾性係数試験結果 (シリーズ 1)

静弾性係数の試験結果 (図-4) によれば、結合材が同じ Con-3~Con-9 において、静弾性係数はモルタルとコンクリートどちらも $S1 < S2 < S3$ 調合となった。S1, S3 調合は、コンクリートとモルタルの応力ひずみ曲線の傾きがほとんど同じであるのに対し、S2 調合ではコンクリートの応力ひずみ曲線の傾きがモルタルよりも大きい。また全ての結果で圧縮破壊時点のひずみはモルタルがコンクリートより大きい。

圧縮破壊時におけるモルタルとコンクリートのひずみ差 $\Delta \epsilon$ [$\times 10^{-6}$] (3 体の平均) と、静弾性係数比 (E_m/E_c) との関係を図-5 に示す。S3 調合の $\Delta \epsilon$ は S1, S2 調合に比べ、明らかに小さい。

ここで、粗骨材以外の調合条件が同じ Con-6 と Con-7 の結果に大きな差異は無いことから、硬質砂岩の G2 と G3 の剛性は同じとみなし、力学特性について考察する。まず粗骨材の剛性が同じである S2, S3 調合を見る。コンクリートの剛性はモルタルと粗骨材との間にあり、モルタルと粗骨材の剛性が近いほど、コンクリートとモルタルの剛性も近い。すなわちモルタル部分の剛性は、S3 調合が S2 調合よりも粗骨材 (G2 および G3) に近いと考えられる。文献によると、硬質砂岩 (G2 と G3) の静弾性係数は ($56.5 \sim 71.0 \text{ kN/mm}^2$)^{3),4)} の範囲にある。これと図-4 中の値から静弾性係数は概ね、S2 調合のモルタル部分 $<$ S3 調合のモルタル部分 \leq 粗骨材 (硬質砂岩)

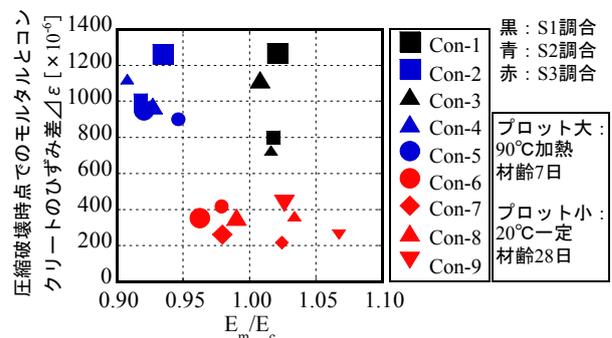


図-5 圧縮破壊時におけるモルタルとコンクリートのひずみ差 $\Delta \epsilon$ と静弾性係数比 E_m/E_c との関係

であり、本考察は妥当と考えられる。S3 調合のコンクリートは S2 調合に比べ、圧縮載荷時の応力分布が一樣で、粗骨材-モルタル間の剛性の違いによる応力集中による破壊^{5),6)}が生じにくいと考えられる。すなわち S3 調合は、S2 調合に比べ E_m/E_c が 1.0 に近いために $\Delta \epsilon$ が小さくなり (図-5)、その結果コンクリートの破壊強度が S2 調合より高くなる (図-3) と説明することが出来る。

次に S1 調合を見ると、コンクリートの応力ひずみ曲線はモルタルとほぼ同じ曲線を描き (図-4)、 E_m/E_c は S3 調合に比べ 1.0 に近く分布している (図-5)。しかし、S1 調合の $\Delta \epsilon$ は S3 調合より明らかに大きい。S1 調合の粗骨材である安山岩の強度は、文献によると $182 \sim 218 \text{ N/mm}^2$ の範囲にある^{3),4),7)}。S1 調合の 90°C 加熱、20°C 一定のコンクリート強度はそれぞれ $190 \sim 196 \text{ N/mm}^2$,

146~157N/mm²であるから、90℃加熱のコンクリートではモルタルより先に粗骨材が破壊したために $\Delta\varepsilon$ が大きい可能性が考えられる。しかし、90℃加熱より低強度で骨材の破壊を考えにくい20℃一定でも、 $\Delta\varepsilon$ はS3調合より大きい。このことは、粗骨材とモルタル部分の強度と剛性以外に、コンクリートの圧縮強度を決定する要因が存在することを示唆する(この要因を3.で考察する)。

(3) 自己収縮特性

自己収縮の結果(図-6)によれば、混和材にシリカフュームとFAを併用した調合(Con-3, 4)の自己収縮は、混和材がシリカフュームの調合(Con-1, 2)に比べ小さい。また自己収縮ひずみの大きさを細骨材以外の調合条件が同じもので比較すると、Con-1と2およびCon-3と4からS2調合<S1調合、Con-5と6からS3調合<S2調合とわかる。Con-5にくらべCon-6の自己収縮が著しく小さいことから、S3調合のモルタル部分の自己収縮は極めて小さいと考えられる(この理由を3.で考察する)。

シリーズ1の検討において、コンクリートの性状に最も影響が大きかったのは、細骨材の違いと言える。

3. シリーズ2

シリーズ2では、細骨材の違いによるモルタルの性状変化を実験により確かめ、1)モルタル性状の違いがコンクリートの性状に及ぼす影響、2)細骨材の違いでモルタル性状が変化する理由、を考察する。

3.1 実験手順および測定項目

検討対象とした細骨材はS1~S3に加え、フェロニッケルスラグS4である。S1とS2は、表乾密度が同じで吸水率はS1が大きい。フェロニッケルスラグのS3とS4

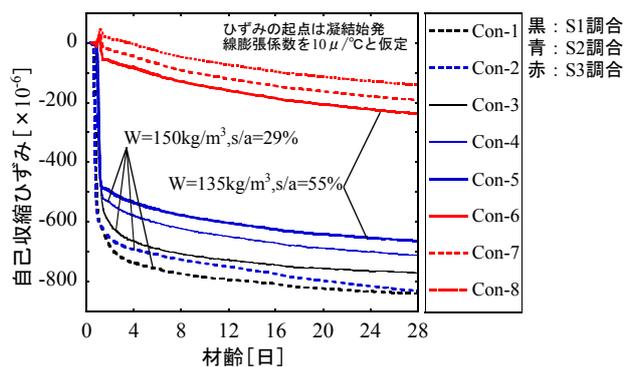


図-6 自己収縮試験結果(シリーズ1)

表-4 モルタルの調合およびフレッシュ性状(シリーズ2)

調合名称	Sの種類	W/B	目標空気量 [%]	単位量[kg/m ³]			V _s /V _{mor} ※	フレッシュ性状				
				W	B			空気量 [%]	温度 [°C]	0打フロー※※ [mm]	JP漏斗流下時間[s]	
					SFPC	FA						S
S-1	S1	0.18	3.0 ±2.0	180	800	200	0.44	2.5	26.8	278	131	
S-2	S2							1158	2.6	25.6	250	147
S-3	S3							1282	2.0	25.5	330	66
S-4	S4							1317	1.3	25.6	345	54

※V_s/V_{mor}: 細骨材とモルタルの体積比

※※JIS R 5201規定のフローコーンによる

表-5 試験体一覧(シリーズ2)

養生条件	試験項目	試験体寸法[mm]	材齢 [日]
20℃一定	圧縮強度	φ50×100円柱	4, 7, 28
	静弾性係数		28
	自己収縮ひずみ	□100×100×400角柱	28
	一軸拘束応力	□100×100×850角柱	28
90℃加熱	圧縮強度	φ50×100円柱	7
	静弾性係数		7

は、表乾密度が同等で吸水率はS3が大きい。また安山岩のS1とフェロニッケルスラグのS3は吸水率が同等だが表乾密度はS3が大きい。モルタルの調合とフレッシュ性状、試験体の種類と養生条件を表-4、表-5に示す。W/B=0.18, V_s/V_{mor}=0.44とした。これはシリーズ1の調合(W/B=0.12, V_s/V_{mor}=0.17~0.43)に比べ、W/Bを大きくしてペーストの粘性を低減し、細骨材の単位量を増やした調合により、モルタルの諸性状における細骨材の影響が強調されることを期待したためである。練混ぜにはパドルミキサを使用し、SPの添加量は全調合で同じ(B×1.40%)とした。自己収縮試験では、既報⁸⁾と同様の一軸拘束試験(拘束鋼材はD10の異形棒鋼)も実施した。また、強度試験体と同条件で養生した試料を、強度試験時に粉碎・105℃乾燥して蒸発水量を測定した。さらに、各細骨材の細孔径分布を水銀圧入法により測定した。

3.2 実験結果および考察

(1) 流動性

S1もしくはS2をそれぞれ用いたモルタル(S-1, S-2)より、S3もしくはS4をそれぞれ用いたモルタル(S-3, S-4)のほうが、0打フローが大きくJP漏斗流下時間が短いことから、流動性が高い(すなわちコンクリートにしたときの流動性が高い)とわかる(表-4)。

(2) 力学特性

圧縮強度は養生条件によらずS-1≒S-2≒S-4<S-3であり、静弾性係数は養生条件によらずS-3とS-4が大きい(図-7)。S-3の強度と静弾性係数が特に高い傾向は、シリーズ1のモルタルと同じである。

(3) 自己収縮特性

自己収縮試験結果を図-8に示す。材齢2日までの結果(a)(b)(d)を見ると初期の挙動の違いがわかる。すなわち、発熱と収縮の開始はS-1が最も早く、次にS-2、その後S-3, S-4がほぼ同時である。自己収縮ひずみと拘束応力はともにS-3<S-4<S-2<S-1で、S-3の自己収縮は極めて小さいとわかった。これが、2.2(2)で述べた「粗骨材とモルタル部分の強度と剛性以外に、コンクリートの圧縮強度を決定する要因」と考察する。S3調合のコンクリートはS1, S2調合に比べ、モルタル部分の自己収縮が粗骨材に拘束され生じる内部応力が少ない分、圧縮荷時に局所的な応力で破壊する危険性が低いのである。

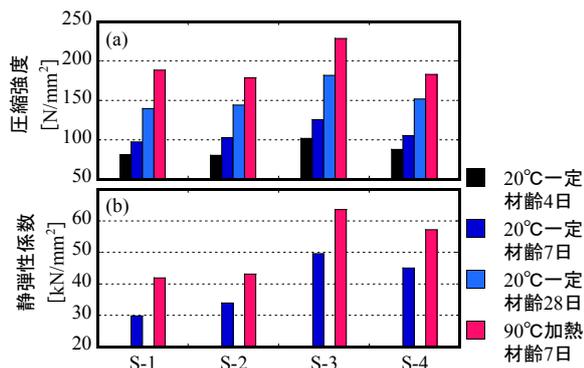


図-7 圧縮強度と静弾性係数 (シリーズ 2)

S-1 の自己収縮が大きい理由に、モルタルの静弾性係数が小さいことから、細骨材 S1 の剛性が他に比べ小さく、ペーストの自己収縮が拘束される度合いが低いことや、細骨材自身が収縮する影響 (すなわち S1 の収縮量が他の細骨材より大きい) 可能性が考えられ、今後の課題である。一方、S-3 と S-4 はともにモルタルの静弾性係数が高いが、S-3 の自己収縮が極めて小さい。細骨材 S3 と S4 の違いに、S3 の吸水率が大きいことが挙げられる (S3 : 2.91, S4 : 0.95%) S-3 では、細骨材からペーストに水が供給される内部養生効果⁹⁾で自己収縮が低減された可能性が考えられる。

(4) 細骨材の違いがモルタル性状へ及ぼす影響

細骨材の空隙径分布を図-9 に示す。ピーク空隙径のサイズは細骨材で異なり、 $S1 < S2 \approx S3 < S4$ であった。S1 と S3 はどちらも吸水率が大きい、S3 は S1 より空隙構造が粗大で水を放出しやすく、内部用養生効果が高いと考えられる。また S2 と S4 は、ピーク空隙径で見れば S3 と同等かそれ以上に水を放出しやすいが、吸水量が少ないため、内部用養生効果が少ないと考えられる。この考察を確かめるべく、表乾調整した各細骨材を 100g 程度皿に取り、20°C60%RH 環境下における質量変化 (含水率変化) を確認した (図-10(a))。S3 の含水率は S1 に比べ減少速度が速い。乾燥による含水率の低下は 24 時間後には概ね収束したが、収束値は S3 のほぼ 0% に対し、S1 は 2%程度と高いままである。図-10(b) は蒸発水量を、細骨材の表乾体積に対する体積比 (縦軸左) と、モルタル調合における細骨材の単位量あたりの量 (縦軸右) にそれぞれ換算した値である。これから、ペースト中での S3 の水分供給量は他より明らかに多いと考えられる。

また、図-8(d) で、S-3 は拘束応力の結果が負側に挙動していることから、初期の自己収縮が膨張側に挙動したとわかる。超高強度コンクリートに人工軽量細骨材を用いて内部養生で膨張した例が報告されている¹⁰⁾が、これも同様な現象の可能性が考えられる。

図-11 は、モルタル試料の蒸発水量の測定結果から、{試料質量に換算した (単位水量+細骨材の吸水量) -

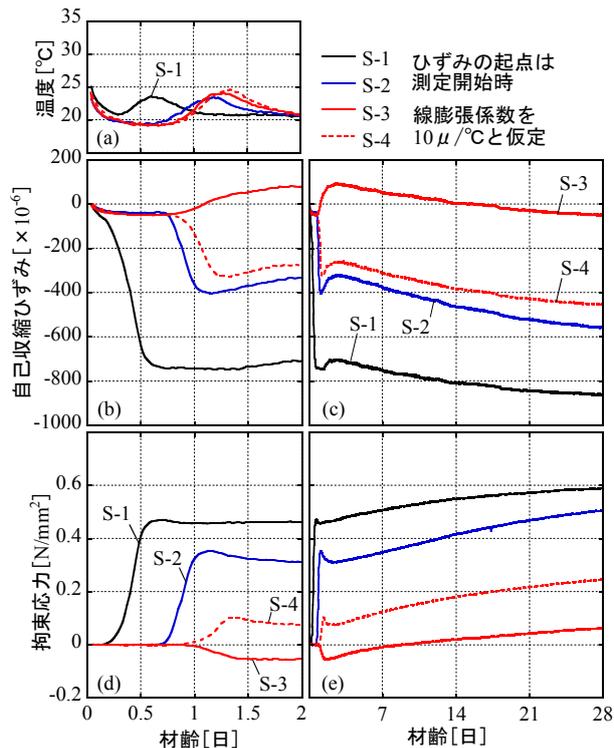


図-8 自己収縮試験結果 (シリーズ 2)

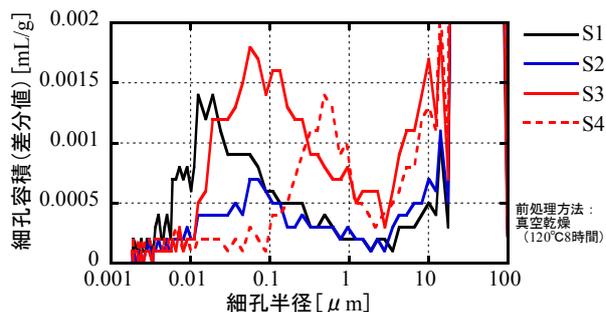


図-9 細骨材の空隙径分布

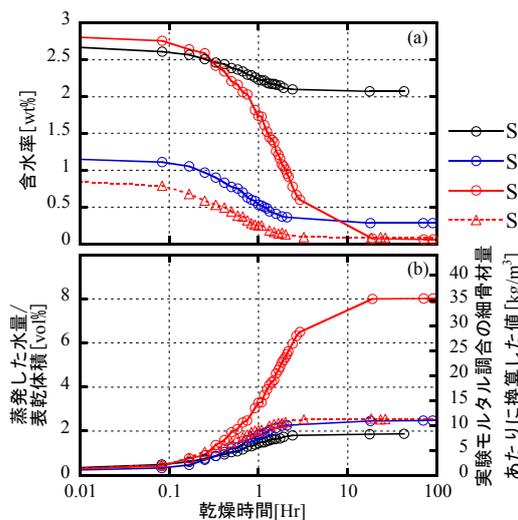


図-10 20°C60%RH 環境下での細骨材の含水率変化

蒸発水量} ÷ 結合材量 B[wt%] を、未蒸発水率と定義したものである。S-3 の値が突出して大きい。この理由は、S3 中の水がペーストに供給され水和反応に寄与したと

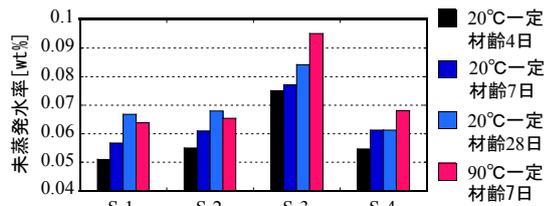


図-11 未蒸発水率の測定結果

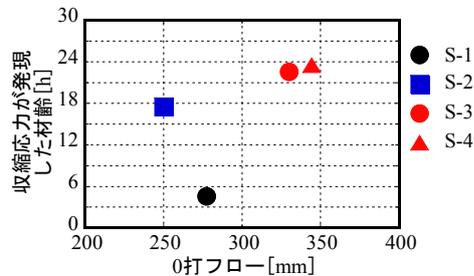


図-12 モルタルのフロー値と収縮応力が発現した時点の材齢との関係

考えられ、これまでの考察を間接的に説明しうる。このことから、S-3 の内部養生効果は自己収縮の低減だけでなく、強度と静弾性係数を高めるものと考えられる。

次に、モルタルの0打フローと収縮応力が発現した材齢との関係を図-12に示す。S-1とS-2はS-3とS-4に比べ0打フローが小さい。この理由には、細骨材の形状や粒度分布等、物理的側面の考察が必要である。その一方、S-1が極めて早期に発熱し収縮開始する理由に、既往の研究¹¹⁾で指摘される、細骨材への化学混和剤の吸着の影響が考えられる。S-1では細骨材S1が化学混和剤を多く吸着し、モルタル中のセメントの分散効果が弱まることで流動性が低下し、水和反応が早まったと考えることが出来る。水を放出しやすい粗大な空隙構造のS3とS4はS1に比べ、化学混和剤を吸着しにくいと推察される。

以上の議論から、水が少なく細骨材量の多い調査条件では、「結合材および水和物と細骨材が、水と化学混和剤を吸着において競争することによる、流動性、力学特性、収縮特性への影響」が非常に大きいと推察される。図-1に示した既報²⁾の結果は、空隙構造が粗大で吸水率が大きい細骨材の単位量を増やすと、内部養生効果が高まることを説明するものと考えられる。今後、細骨材中の水と化学混和剤の挙動を確認する必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 水結合材比=0.12, 単位水量=135kg/m³, 細骨材率=55%のコンクリートに、空隙構造が粗大で吸水率が大きい細骨材を用いると、流動性と強度および静弾性係数が高まり、自己収縮が極めて小さくなった。この理由は、細骨材の内部養生効果と考えられる。
- (2) (1)でコンクリートの強度が高まる理由のひとつに、

モルタル部分の自己収縮が低減され、局所的な応力による破壊の可能性が低くなることが考えられる。

- (4) (1)の内部養生効果は、単位水量が少なく細骨材量の多い調査条件ほど大きいと考えられる。

謝辞 日本シーカ(株)および太平洋セメント(株)の関係各位に、実験材料の提供ならびに実験作業への協力を頂きました。また、東京理科大学の兼松学准教授、小山拓氏、後藤康宏氏に協力を頂きました。感謝いたします。

参考文献

- 1) 松田 拓ほか：シリカフュームとフライアッシュを併用した超高強度コンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.1462-1467, 2014
- 2) 松田 拓ほか：シリカフュームとフライアッシュを併用した超高強度コンクリートの検討，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.111-112, 2014
- 3) 渡邊悟士ほか：高強度コンクリートの圧縮強度に影響を及ぼす粗骨材物性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.588, pp21-27, 2005
- 4) 高木亮一，肥後康秀，吉本 稔：粗骨材の静弾性係数が超高強度コンクリートに及ぼす影響に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.157-162, 2009
- 5) 桜本文敏，鈴木清孝，武居幸次郎：超高強度コンクリートに関する開発研究（その3 骨材の性質がコンクリートの強度性状に及ぼす影響），日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.495-496, 1990
- 6) 渡邊悟士ほか：圧縮応力下における高強度コンクリート中のモルタルと粗骨材の応力・ひずみに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.616, pp25-32, 2007
- 7) 渡邊悟士ほか：物性の異なる砕石を混合して用いた高強度コンクリートの圧縮強度に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.600, pp9-15, 2006
- 8) 加納嘉，松田 拓，蓮尾孝一：超高強度コンクリートの自己収縮特性評価手法に関する検討 その1 実験概要および一軸拘束試験の有効性，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.57-51, 2013
- 9) たとえば，表辰哲ほか：軽量骨材の自己収縮ひび割れ低減効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.565-570, 2009
- 10) 黒岩秀介ほか：人口軽量細骨材による高強度コンクリートの自己収縮低減，日本建築学会構造系論文集，Vol.79, No.695, pp19-26, 2014
- 11) 中村秀三，小川彰一：砂の状態が流動性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.21, No.2, pp.181-186, 1999