

論文 200N/mm²級超高強度コンクリートにおける使用材料が強度特性に及ぼす影響の検討

小出 貴夫^{*1}・長岡 誠一^{*2}・西本 好克^{*3}・河上 浩司^{*4}

要旨: 圧縮強度 200N/mm²級の超高強度コンクリートを製造するためには、水結合材比、調合、使用材料の最適化が不可欠であると考えられる。本研究では結合材用シリカ質微粉末の種類・混合量を変えた場合、また骨材の種類・粒径を変えた場合の圧縮強度に及ぼす影響を検討した。その結果、水結合材比 13.7%、結合材にジルコニア起源シリカ質微粉末を 20%混合した低熱ポルトランドセメント、粗骨材に硬質砂岩砕石または安山岩砕石、細骨材に粒径 1.2mmのフェロニッケルスラグ細骨材を使用することで、標準養生 91 日材齢または 70°C加熱養生 7 日材齢で圧縮強度 200 N/mm²前後を発現する超高強度コンクリートが得られた。

キーワード: 200N/mm², 低熱ポルトランドセメント, シリカ質微粉末, フェロニッケルスラグ細骨材

1. はじめに

これまで筆者らは低熱ポルトランドセメント (以下LCと略記) に対してシリカフェーム (以下SFと略記) を 10% 混合した結合材を使用して設計基準強度 150N/mm²までの超高強度コンクリートの開発・実用化に成功している^{1,2)}。しかし、建築物のさらなる高層化や大スパン化の傾向は今後も進展すると予想され、将来的には設計基準強度 180~200N/mm²級の超高強度コンクリートが必要になるものと考えられる。一方、モルタルあるいはコンクリートの圧縮強度や流動性は結合材に用いるシリカ質微粉末の種類・混合量、骨材の種類・粒径などによって大きく変化することが知られている^{3,4),5),6)}。したがって、圧縮強度 200N/mm²級の超高強度コンクリートを製造するためには、水結合材比 (以下W/Bと略記)、調合、使用材料の最適化が不可欠であると考えられる。

本研究では、W/B および使用材料である混和材、細骨材、粗骨材、高性能減水剤 (以下 SP と略記) の種類が、モルタルおよびコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響の検討を行った。

2. 試験概要

2.1 試験項目

シリーズ 1 において、予備試験としてモルタル試験を行い、(1)W/B、(2)混和材の種類・混合量、(3)細骨材の種類・粒径、(4)SP の銘柄が、超高強度モルタルの圧縮強度および流動性に及ぼす影響の検討を行った。

シリーズ 2 において、シリーズ 1 で高い圧縮強度が得られた W/B、結合材、細骨材を使用し、(5)粗骨材の種類・最大寸法が、超高強度コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響の検討を行った。

表-1 モルタルの使用材料

材料	種類	粒径 (mm)	密度※ (g/cm ³)	その他の物性等	記号
セメント	低熱ポルトランドセメント	—	3.24	JIS R 5210, 比表面積: 3300cm ² /g, C ₂ S: 56%	LC
混和材 (シリカ質微粉末)	ジルコニア起源シリカ質微粉末	—	2.25	中国産, 比表面積: 10.2m ² /g, SiO ₂ : 95.9%	ZSF
	ノルウェー産シリカフェーム	—	2.20	JIS A 6207, 比表面積: 17.9m ² /g, SiO ₂ : 94.0%	SFN
	エジプト産シリカフェーム	—	2.25	JIS A 6207, 比表面積: 15.1m ² /g, SiO ₂ : 94.2%	SFE
	光ファイバー起源超微粒シリカ質微粉末	—	2.22	日本産, 比表面積: 49.7m ² /g, SiO ₂ : 98.6%	OSF
細骨材	愛知県産珪石砕砂3号	<2.4	2.66	質量比40%混合, 吸水率: 0.8%	SS
	愛知県産珪石砕砂4号	<1.7	2.66	質量比40%混合, 吸水率: 0.9%	
	愛知県産珪石砕砂7号	<0.3	2.65	質量比20%混合, 吸水率: 1.3%	
	フェロニッケルスラグ細骨材5-0.3	5~0.3	2.97	JIS A 5011-2 FNS5-0.3, 吸水率: 0.7%, FM: 3.87	FNS5
	フェロニッケルスラグ細骨材1.2	<1.2	3.01	JIS A 5011-2 FNS1.2, 吸水率: 0.8%, FM: 2.21	FNS1.2
	ガーネット砂	0.6~0.25	4.00	鉄鑿柘榴石 (almandine), ウォータージェット用砥材	GS
化学混和剤	高性能減水剤A	—	1.08	A社製, ポリカルボン酸エーテル系, 固形分率28.0%	SP1
	高性能減水剤A改	—	1.08	A社製, ポリカルボン酸エーテル系, 固形分率28.0%	SP2
	高性能減水剤B	—	1.07	B社製, ポリカルボン酸エーテル系, 固形分率28.0%	SP3
	高性能減水剤C	—	1.07	C社製, ポリカルボン酸エーテル系, 固形分率27.8%	SP4
	高性能減水剤D	—	1.08	D社製, ポリカルボン酸エーテル系, 固形分率27.8%	SP5
	消泡剤	—	約1.0	A~D社製, ポリオキシアルキレンアルキルエーテル系	NonAE

※細骨材の密度は「表乾密度」である。

*1 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 (正会員)

*2 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術研究所 (正会員)

*4 三井住友建設 (株) 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

2.2 使用材料および調査

シリーズ1のモルタルの使用材料を表-1に示す。結合材のベースセメントはLC1種類とし、混和材であるシリカ質微粉末は、産地の異なるSFを2種類、電融ジルコニア製造時に副生されるシリカ質微粉末（以下ZSFと略記）、光ファイバー製造時に副生される超微粒シリカ質微粉末（以下OSFと略記）の計4種類を使用した。細骨材は愛知県産珪石砕砂の3種混合品（修正モース硬度7~8、以下SSと略記）、JIS A 5011-2に適合する粒径の異なる2種類のフェロニッケルスラグ細骨材（修正モース硬度7~8、以下FNSと略記）、ウォータージェット用砥材である密度および硬度の高いガーネット砂（修正モース硬度10、以下GSと略記）の計4種類を使用した。SPは4社の計5銘柄を使用した。

シリーズ1のモルタル調査を表-2に示す。モルタルのW/Bは20~12%とし、シリカ質微粉末の混合量はLCに

対して5~60%とした。モルタルの調査は同じW/Bに対応するコンクリートから粗骨材（密度2.65g/cm³、単位量827kg/m³相当）を除外し、単位水量を220kg/m³、目標空気を2.0%一定として、その他の材料の質量比を維持するように定めた。SPの添加量は結合材に対して0.7~4.0%とした。消泡剤はSPと同一メーカーのものをを用い、添加量は結合材に対して0.06%一定とした。シリーズ1およびシリーズ2のいずれにおいても化学混和剤（SP、消泡剤）は固形分も含め練混ぜ水の一部とみなした。

シリーズ2のコンクリートの使用材料を表-3に示す。結合材はZSFを20%混合したLCとし、比較用としてノルウェー産SFを10%混合したLCを使用した。細骨材はSS、粒径1.2mmのFNSおよび千葉県産山砂と高知県産石灰石砕砂の混合品の計3種類を使用した。粗骨材は愛知県産珪石砕砂、山形県産安山岩砕砂、最大寸法の異なる山梨県産安山岩砕砂2種類および茨城県産硬質砂岩砕

表-2 モルタルの調査およびフレッシュ性状

検討項目	調査No.	モルタルの調査									モルタルのフレッシュ性状				
		W/B (%)	混和材		細骨材種類	SP種類	単位量(kg/m ³)				SP添加量(B×%)	練混ぜ時間※(min)	0打モルタルフロー(平均:mm)	温度(°C)	
			種類	混合率(%)			W	B		細骨材					
								LC	混和材						
(1) W/Bの検討	1	20.0	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	880	220	1176	0.7	4(0~1)	365	21	
	2	18.0	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	978	244	1052	1.3	4(0~1)	400	21	
	3	16.0	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	1100	275	898	1.8	4(0~1)	390	21	
	4	14.3	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	1231	308	733	2.2	4(0~1)	359	23	
	5	13.7	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	1285	321	664	2.7	5(0~1)	343	22	
	6	13.0	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	1354	338	577	3.2	6(1~2)	321	23	
	7	12.0	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	1467	367	435	3.8	7(1~2)	270	25	
(2) 混和材の検討	1	8	14.3	ZSF	10	SS	SP1	220	1385	154	703	2.2	5(3~4)	325	28
		9	14.3	ZSF	15	SS	SP1	220	1308	231	675	2.2	5(2~3)	321	25
		10	14.3	ZSF	20	SS	SP1	220	1231	308	647	2.2	5(1~2)	350	25
		11	14.3	ZSF	30	SS	SP1	220	1077	462	592	2.2	5(1~2)	318	25
		12	14.3	ZSF	40	SS	SP1	220	923	615	536	2.2	5(1~2)	290	24
		13	14.3	ZSF	50	SS	SP1	220	769	769	481	2.2	5(3~4)	255	26
		14	14.3	ZSF	60	SS	SP1	220	615	923	425	2.2	7(4~5)	250	28
	2	15	14.3	SFN	5	SS	SP1	220	1462	77	729	2.4	16(10~11)	185	33
		16	14.3	SFN	10	SS	SP1	220	1385	154	699	2.2	5(3~4)	243	27
		17	14.3	SFN	15	SS	SP1	220	1308	231	669	2.2	7(4~5)	210	26
		18	14.3	SFN	20	SS	SP1	220	1231	308	639	3.0	16(15~16)	測定不可	30
		19	14.3	SFE	10	SS	SP1	220	1385	154	703	2.2	5(3~4)	218	27
		20	14.3	SFE	20	SS	SP1	220	1231	308	647	2.2	5(2~3)	340	23
		21	14.3	OSF	10	SS	SP1	220	1385	154	701	3.0	17(11~13)	169	30
22	14.3	OSF	20	SS	SP1	220	1231	308	642	4.0	25(21~23)	測定不可	28		
(3) 細骨材の検討	23	14.3	ZSF	20	SS	SP2	220	1231	308	647	2.2	5(1~2)	331	25	
	24	14.3	ZSF	20	FNS5	SP2	220	1231	308	723	2.2	5(1~2)	354	24	
	25	14.3	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	1231	308	733	2.2	5(1~2)	359	23	
	26	14.3	ZSF	20	GS	SP2	220	1231	308	974	2.2	6(2~3)	343	24	
	27	12.0	ZSF	20	SS	SP2	220	1467	367	384	3.8	7(2~3)	260	26	
	28	12.0	ZSF	20	FNS1.2	SP2	220	1467	367	435	3.8	7(2~3)	270	25	
	29	12.0	ZSF	20	GS	SP2	220	1467	367	577	3.8	7(2~3)	260	26	
(4) SPの検討	30	14.3	ZSF	10	SS	SP1	220	1385	154	703	2.2	5(1~2)	320	24	
	31	14.3	ZSF	10	SS	SP2	220	1385	154	703	2.2	5(0~1)	350	26	
	32	14.3	ZSF	10	SS	SP3	220	1385	154	703	2.2	5(1~2)	330	25	
	33	14.3	ZSF	10	SS	SP4	220	1385	154	703	2.2	5(1~2)	328	25	
	34	14.3	ZSF	10	SS	SP5	220	1385	154	703	2.2	5(1~2)	322	26	
	35	14.3	SFE	10	SS	SP1	220	1385	154	703	2.2	5(1~2)	206	26	
	36	14.3	SFE	10	SS	SP2	220	1385	154	699	2.2	5(0~1)	275	26	
	37	14.3	SFE	10	SS	SP3	220	1385	154	699	2.2	5(1~2)	268	25	
	38	14.3	SFE	10	SS	SP4	220	1385	154	699	2.2	5(1~2)	269	25	
	39	14.3	SFE	10	SS	SP5	220	1385	154	699	2.2	5(2~3)	213	24	

※括弧内は、モルタルが塊状になるまでの時間

石 3 種類の計 7 種類を使用した。SP は A 社製 A 改の 1 銘柄のみを使用した。

シリーズ 2 のコンクリート調合は表-4 に示すように単位水量を 150kg/m³一定、粗骨材絶対容積を 0.320m³/m³一定、目標空気量を 1.5%とし、W/Bは 14~13%とした。目標スランプフローを 72.5±7.5cmとし、SPの添加量は結合材に対して 1.7~2.8%とし、消泡剤の添加量は結合材に対して 0.06%一定とした。

2.3 試験方法

シリーズ 1 において、モルタルの練混ぜは 20℃恒温下、容量 10L のモルタルミキサを用いて 1 バッチの練混ぜ量を 3~4L とし、結合材と細骨材を 1 分間空練りし、練混ぜ水と化学混和剤を加えて 1 分間練り混ぜた後かき落としを行った。注水からの練混ぜ時間はモルタルの状態により 4~25 分間の範囲内で調整した。練上がり後、直ちにモルタル温度および JIS R 5201 規定のモルタルコーンを用いて 0 打モルタルフローを測定した。圧縮強度の確認は φ 50mm×h100mm の円柱供試体を用い、標準養生では材齢 7 日、28 日、91 日で、70℃加熱養生では材齢 7 日で実施した。本研究における 70℃加熱養生方法は、供試体を封かん状態にして、注水 24 時間後から型枠のまま

70℃温水中で 6 日間養生するものである。

シリーズ 2 において、コンクリートの練混ぜは 20℃恒温下、容量 55L または 100L の二軸強制練りミキサを用いて 1 バッチの練混ぜ量を 30L または 50L とした。粗骨材、結合材、細骨材の順でミキサに投入して 15 秒間空練りを行い、練混ぜ水と化学混和剤を加えて 2~4 分間練り混ぜた後、5 分間静置してから排出した。排出後直ちにコンクリートの温度、スランプフロー (JIS A 1150)、空気量 (JIS A 1128) を測定した。圧縮強度の確認は φ 100mm×h200mm の円柱供試体を用い、標準養生では材齢 7 日、28 日、91 日で、70℃加熱養生では材齢 7 日で実施した。また調合 No.45~50 は、コンクリートを目開き 5mm のふるいでウェットスクリーニングして採取したモルタルを φ 50mm×h100mm の円柱供試体とし、70℃加熱養生して材齢 7 日でも圧縮強度試験を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 シリーズ 1

モルタルのフレッシュ性状を表-2 に示す。ZSF を用いた調合は練混ぜ時間が短く、0 打フローが大きい傾向にあった。SFN を用いた調合は同一混合率の ZSF を用い

表-3 コンクリートの使用材料

材料	種類	粒径 (mm)	密度※ (g/cm ³)	吸水率 (%)	その他の物性等	記号
比較用結合材	低熱ポルトランドセメント	—	3.24	—	ベース:90%混合, 比表面積:3300cm ² /g	LC
	ノルウェー産シリカフェウム	—	2.20	—	混和材:10%混合, 比表面積:17.9m ² /g	SFN
結合材	低熱ポルトランドセメント	—	3.24	—	ベース:80%混合, 比表面積:3300cm ² /g	LC
	ジルコニア起源シリカ質微粉末	—	2.25	—	混和材:20%混合, 比表面積:10.2m ² /g	ZSF
細骨材	愛知県産珪石砕砂(3種混合)	<2.4	2.66	1.0	質量比 3号:40%, 4号:40%, 7号:20%	SS
	フェロニッケルスラグ細骨材1.2	<1.2	3.01	0.8	JIS A 5011-2 FNS1.2, FM:2.21	FNS1.2
	千葉県富津産山砂	<5	2.59	2.2	容積比60%混合, FM:2.10	PS
	高知県鳥形山産石灰石砕砂	<5	2.66	1.1	容積比40%混合, FM:3.40	
粗骨材	愛知県岡崎産珪石砕砂2005	20~5	2.64	1.1	JIS A 5005, 実績率:59.1%, FM:6.40	G1
	山形県産安山岩砕砂2005	20~5	2.64	1.3	JIS A 5005, 実績率:60.8%, FM:6.55	G2
	山梨県大月産安山岩砕砂2005	20~5	2.62	2.0	JIS A 5005, 実績率:60.6%, FM:6.67	G3
	山梨県大月産安山岩砕砂6号	13~5	2.64	2.0	実績率:60.3%	G4
	茨城県岩瀬産硬質砂岩砕砂2005	20~5	2.65	0.7	JIS A5005, 実績率:61.3%, FM:6.40	G5
	茨城県岩瀬産硬質砂岩砕砂6号	13~5	2.63	0.8	実績率:62.5%	G6
	茨城県岩瀬産硬質砂岩砕砂7号	5~2.4	2.62	1.5	実績率:58.8%	G7
化学混和剤	高性能減水剤A改	—	1.08	—	A社製, ポリカルボン酸エーテル系	SP2
	消泡剤	—	0.98	—	A社製, ポリオキシアルキレンアルキルエーテル系	NonAE

※細骨材および粗骨材の密度は「表乾密度」である。

表-4 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

検討項目	調合 No.	コンクリートの調合											コンクリートのフレッシュ性状						
		W/B (%)	s/a (%)	混和材		骨材種類		単位量 (kg/m ³)					SP2 添加量 (B×%)	練混ぜ時間 (min)	スランプフロー		Air (%)	温度 (°C)	
				種類	混合率 (%)	細骨材	粗骨材	W	B		細骨材	粗骨材							
									LC	混和材					50cm通過 (sec)	フロー (平均:cm)			
(5) 粗骨材の検討	1	40	14.0	34.5	SFN	10	PS	G5	150	964	107	442	848	1.9	4	11.1	79.5	2.0	21
		41	14.0	32.7	ZSF	20	PS	G5	150	857	214	407	848	1.7	2	4.3	81.0	1.7	20
		42	13.0	30.7	ZSF	20	PS	G5	150	923	231	360	822	2.2	3	6.2	80.3	2.0	20
		43	14.0	32.7	ZSF	20	SS	G5	150	857	214	413	848	1.7	2	6.1	80.5	1.9	20
		44	14.0	32.7	ZSF	20	SS	G1	150	857	214	413	845	1.7	2	4.7	83.5	1.9	19
	2	45	13.7	31.5	ZSF	20	FNS1.2	G2	150	876	219	443	845	2.8	3	5.3	87.3	1.2	23
		46	13.7	31.5	ZSF	20	FNS1.2	G3	150	876	219	443	838	2.8	3	7.6	79.8	1.2	23
		47	13.7	31.5	ZSF	20	FNS1.2	G4	150	876	219	443	845	2.8	3	6.4	82.3	1.3	23
		48	13.7	31.5	ZSF	20	FNS1.2	G5	150	876	219	443	848	2.8	3	7.9	78.0	1.6	21
		49	13.7	31.5	ZSF	20	FNS1.2	G6	150	876	219	443	842	2.8	3	7.2	79.0	1.7	22
50	13.7	31.5	ZSF	20	FNS1.2	G7	150	876	219	443	838	2.8	3	7.6	80.3	2.1	21		

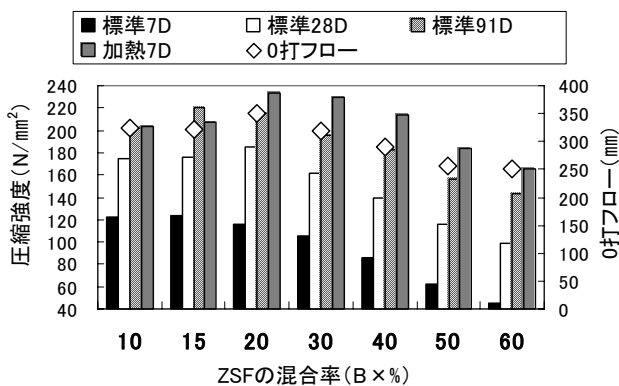
た調合より練混ぜ時間が長く、0打フローが小さかった。混合率20%では、粘性が極めて高くフローが測定できなかった。SFEを用いた調合は同一混合率のZSFを用いた調合と比較すると練混ぜ時間は同等で、0打フローは混合率10%ではやや小さく、混合率20%では同等であった。OSFを用いた調合はSPの添加量を大幅に増やしても練混ぜが極めて困難で、0打フローは著しく小さい、または測定ができなかった。いずれの調合も練混ぜ時間が長くなるにつれて温度が上昇する傾向にあった。

調合No.1~7の圧縮強度および0打フローの結果を図-1に、結合材水比と圧縮強度の関係を図-2および図-3に示す。調合No.1~7は混和材(ZSF20%)および細骨材(FNS1.2)を同じ種類とし、W/Bを変えた場合である。0打フローはW/Bが小さくなるに伴って小さくなる傾向にあった。圧縮強度は標準養生91日ではW/B=14.3%、加熱養生7日ではW/B=13.7%で最大となった。結合材水比(以下B/Wと略記)と圧縮強度の関係では、SPの固形分率の補正の有無にかかわらずB/W=7.0程度で圧縮強度は最大となった。以上から本材料の組合せにおいて最

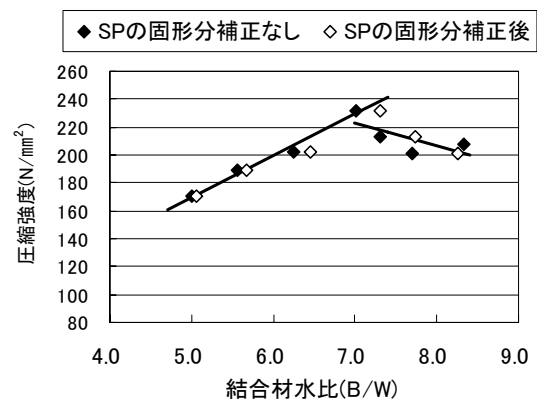
も高い強度が得られるW/Bは14%程度であった。

調合No.8~14の圧縮強度および0打フローの結果を図-4に示す。調合No.8~14はW/B(14.3%)および細骨材(SS)の種類を同一とし、混和材ZSFの混合率を変えた場合である。0打フローは混合率が増えるに伴って小さくなる傾向にあった。本材料の組合せにおいて最も高い圧縮強度が得られるZSFの混合率は20%程度であった。

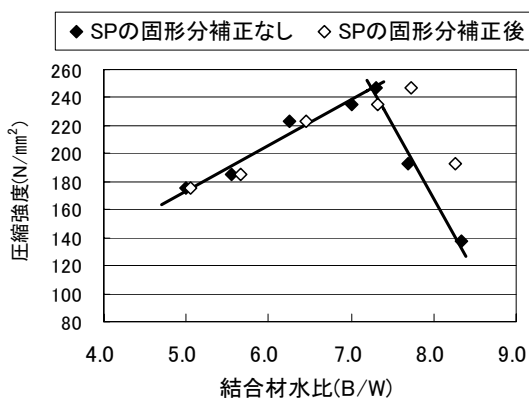
調合No.15~22(比較用No.8, No.10)の圧縮強度および0打フローの結果を図-5に示す。調合No.15~22はW/B(14.3%)および細骨材(SS)の種類を同一とし、混和材の種類・混合率を変えた場合である。SFNまたはSFEを用いた場合、いずれも混合率10%が最も練混ぜ時間が短く、圧縮強度・0打フロー値も良好であったが、混合率が増えるに伴ってSPの添加量と練混ぜ時間が増大し0打フロー値も低下した。SFEを用いた場合、混合率20%では0打フロー値は良好であったが、圧縮強度は同混合率のZSFより低かった。OSFを用いた場合、混合率10%でSPの添加量を増やしても練混ぜが困難で、圧縮強度・0打フロー値は著しく低かった。SFNおよび



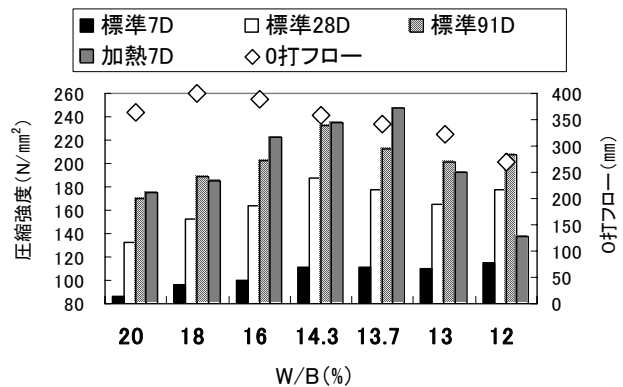
混和材=ZSF20%, 細骨材=FNS1.2, 減水剤=SP2
図-1 圧縮強度および0打フロー(W/Bの検討)



混和材=ZSF20%, 細骨材=FNS1.2, 減水剤=SP2
図-2 結合材水比と圧縮強度の関係(標準91D)



混和材=ZSF20%, 細骨材=FNS1.2, 減水剤=SP2
図-3 結合材水比と圧縮強度の関係(加熱7D)



W/B=14.3%, 混和材=ZSF, 細骨材=SS, 減水剤=SP1
図-4 圧縮強度および0打フロー(混和材の検討1)

OSFを用いた場合、混合率20%ではフローが測定できないほどに粘性が高くなったため、実用的ではないと判断された。混和材であるシリカ質微粉末は比表面積が大きい（粒径が小さい）ほど、セメントと練り混ぜた際に粘性が高くなるものと考えられる。

調合No.23～29の圧縮強度および0打フローの結果を図-6に示す。調合No.23～29はW/B(14.3%または12%)および混和材(ZSF20%)の種類を同一とし、細骨材の種類・粒径を変えた場合である。本材料の組合せにおいて最も高い圧縮強度が得られる細骨材はFNS1.2であった。同じFNSでも最大粒径の大きいFNS5は強度が低く、細骨材の粒径が圧縮強度に及ぼす影響は大きいと考えられる。今回検討した細骨材の中で最も密度および硬度の高いGSはFNS1.2およびSSを用いた場合よりも圧縮強度が低かった。原因としてはGSとセメントペーストの付着がよくないことなどが考えられる。

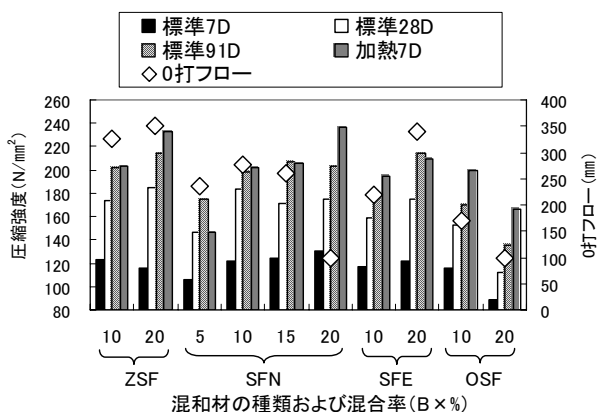
調合No.30～39の圧縮強度および0打フローの結果を図-7に示す。調合No.30～39はW/B(14.3%)、混和材(ZSF10%またはSFE10%)、細骨材(SS)の種類を同一とし、SPの銘柄を変えた場合(添加量B×2.2%一定)で

ある。今回の実験の範囲内では、銘柄によって若干の性能差が認められた。SP2(A社製A改)を用いた場合、練混ぜ時にモルタルが塊状になるまでの時間が他のSPより短く、分散性に優れていた。0打フロー値は銘柄による差は少なかった。圧縮強度は標準養生28日では差が少ないが、標準養生91日および加熱養生7日でSPの銘柄による差が見られた。特にSP4を用いて加熱養生した場合の強度が著しく低かった。原因としてはSPの銘柄によってモルタルの凝結時間が異なるため、加熱養生の開始時期が適切ではなかったことが考えられる。

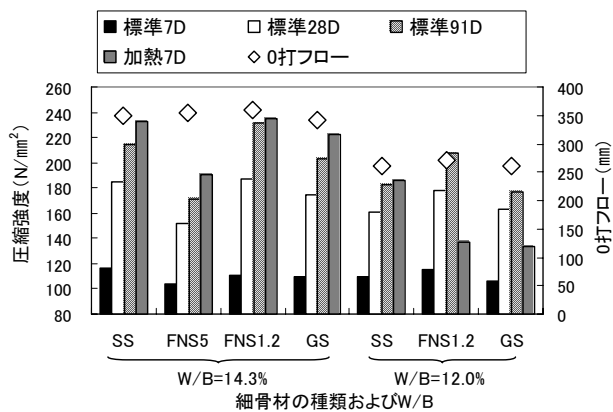
3.2 シリーズ2

フレッシュコンクリートの性状を表-4に示す。SFNを10%混合した比較用結合材を用いた調合No.40とZSFを20%混合した結合材を用いた調合(No.41～50)を比較すると、ZSFを20%混合した結合材を用いた調合はSFNを10%混合した場合より練混ぜ時間が短く、流動性が良好であった。空気量はいずれの調合も1～2%程度で差は少なかった。温度は20℃前後で差が少なかった。

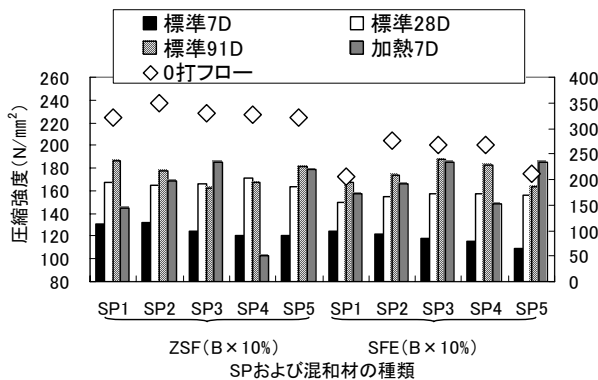
調合No.40～44のコンクリート試験結果を図-8に示す。調合No.40～44の骨材は、設計基準強度150N/mm²ま



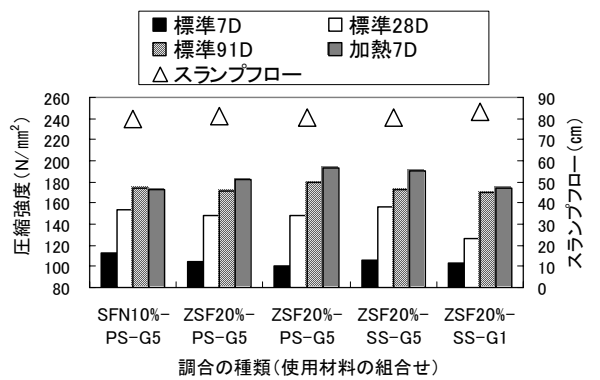
W/B=14.3%, 細骨材=SS, 減水剤=SP1
図-5 圧縮強度および0打フロー(混和材の検討2)



W/B=14.3% or 12%, 混和材=ZSF20%, 減水剤=SP2
図-6 圧縮強度および0打フロー(細骨材の検討)



W/B=14.3%, 細骨材=SS, SP添加量=B×2.2%
図-7 圧縮強度および0打フロー(SPの検討)



W/B=14% or 13%, 減水剤=SP2
図-8 コンクリート試験結果(粗骨材の検討1)

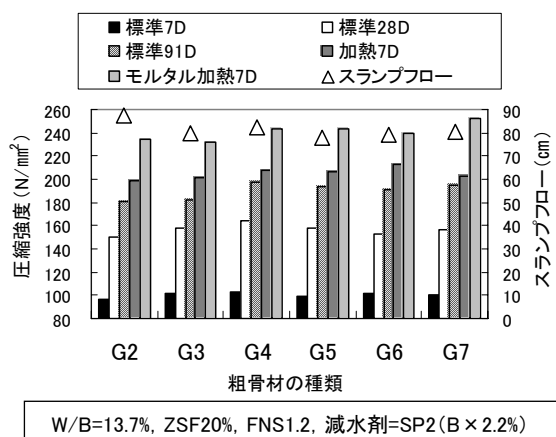


図-9 コンクリート試験結果(粗骨材の検討2)

での超高強度コンクリートの実機製造に使用している茨城県産硬質砂岩砕石 2005 (G5) および混合砂 (PS) を主に使用し、比較用の骨材としてSSおよび愛知県産珪石砕石 2005 (G1) を使用した。

調合No.40~44の圧縮強度は、標準養生91日で170~180 N/mm²、加熱養生7日で173~193 N/mm²であった。使用材料が圧縮強度に及ぼす影響に着目すると、ZSFを20%混合した結合材を用いた調合No.41の方がSFNを10%混合した調合No.40よりも若干強度が高かった。細骨材はSSを用いた調合No.43の方がPSを用いた調合No.41よりも若干強度が高かった。粗骨材は硬質砂岩砕石 2005を用いた調合No.43の方が珪石砕石 2005を用いた調合No.44よりも強度が高かった。

調合No.45~50のコンクリート試験結果を図-9に示す。調合No.45~50はW/B (13.7%)、混和材 (ZSF20%)、細骨材 (FNS1.2)、SP (SP2) の種類を同一とし、粗骨材の種類・最大寸法を変えた場合である。得られた圧縮強度は、標準養生91日で181~198 N/mm²、加熱養生7日で198~213 N/mm²であり、粗骨材に硬質砂岩あるいは安山岩の砕石を使用し、最大寸法が20mmより小さい場合に圧縮強度が高くなる傾向が見られた。

一方、コンクリートから採取したモルタルは加熱養生7日で232~252 N/mm²で、同一条件で養生したコンクリートより大幅に高かった。この原因は粗骨材の有する欠陥あるいは粗骨材の強度不足、粗骨材とセメントペーストの付着の影響、粗骨材とモルタルのヤング係数が異なることなどが考えられる。

4. まとめ

W/B および使用材料が超高強度モルタルおよびコン

クリートの圧縮強度に及ぼす影響を検討して得られた知見は以下の通りであった。

- (1) W/B は、14%程度で圧縮強度が最大となった。
- (2) 結合材は、LC に対して ZSF を 20% 混合した場合に圧縮強度が最大となった。また混和材用シリカ質微粉末は比表面積の小さいものの方が流動性および圧縮強度に優れている傾向にあった。
- (3) 細骨材は、粒径 1.2mm の FNS を使用した場合に圧縮強度が最大となった。
- (4) SP は、添加量を一定とした場合、銘柄によって若干の性能差が確認された。
- (5) 粗骨材は、硬質砂岩あるいは安山岩の砕石を使用し、最大寸法が 20mm より小さい場合に圧縮強度が高くなる傾向にあった。
- (6) W/B=13.7%、結合材としてZSFを20%混合したLC、粗骨材として硬質砂岩砕石または安山岩砕石、細骨材として粒径1.2mmのFNSを使用することで、標準養生91日または70℃加熱養生7日で圧縮強度200 N/mm²前後を発現する超高強度コンクリートが得られた。

参考文献

- 1) 河上浩司ほか：150N/mm²級超高強度コンクリートの強度発現に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1235-1240，2006
- 2) 西本好克ほか：設計基準強度 150N/mm²の「超高強度コンクリート」の開発と実用化について，コンクリートテクノ，セメント新聞社，Vol.25，No.5，pp.31-39，2006.5
- 3) 中根淳ほか：結合材および骨材等が高強度コンクリートの強度性状に及ぼす影響の検討，コンクリート工学年次論文集，vol.12，No.1，pp.241-244，1990
- 4) 内川浩ほか：高強度コンクリートの流動性及び強度に及ぼす骨材の岩種，表面状態，形状及び粒度の影響，セメント・コンクリート論文集，vol.48，pp.214-219，1994
- 5) 神代泰道ほか：ジルコニア起源シリカ質微粉末混合セメントを用いた超高強度コンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，vol.27，No.1，pp.1057-1062，2005
- 6) 渡邊悟士ほか：高品質粗骨材選定技術による超高強度コンクリートの品質の安定化，コンクリート工学，vol.25，No.2，pp.32-40，2007