

論文

[1086] 超高強度コンクリートのワーカビリティ改善・発熱低減に関する研究

正会員○古賀一八（長谷工コーポレーション・技術研究所）

大倉真人（同 上）

高橋保男（日東コンクリート技術事務所）

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造建築物の高層化に伴い、高強度コンクリートが使用されてきている。今後、更に高強度化が図られ、設計規準強度600kgf/cm²以上の超高強度コンクリートによる施工が行われるようになるものと思われる。普通ポルトランドセメントを使用した、超高強度コンクリートの施工に当たっては、通常のコンクリートと比較して極めて富調合であることに起因する、粘性の増大によるワーカビリティの低下、ならびに、水和熱の増加に伴う温度ひび割れ発生危険率の増加等が問題となる。

本報は、微粉末状の結合材を多量に使用することで、水和熱による温度上昇を少なくする事、セメント等の微粒分の増大によりコンクリート全体としての粒度分布のバランスが細粒分に片寄る事から細骨材の細粒分を減少させ、出来るだけバランスよくする事により粘性の増大を防止する事、以上2点に着目した結果これらが有効であるとの実験結果を得たので報告するものである。

2. 実験概要

使用した骨材は表1に示したようにW/C=20~40%では葛生産石灰石、W/C=15~40%実験では段戸産の細・粗骨材を用いた。段戸産の細骨材は、ワーカビリティ向上の目的で0.15mm以下を除去したものをを用いた。モルタルおよびコンクリートの結合材は、表2に示したように普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末（コンクリート実験2では未使用）およびシリカフェームを用いた。

2.1 モルタル実験

コンクリートより粗骨材をウェットスクリーニングしたときに得られるモルタルを仮定して調合を決定した。単位水量は表5と同一となるようにした。骨材は葛生産を用いた。実験の要因と水準は表3に示した様に、水結合材比、高炉スラグ微粉末混合率、細骨材の粒度分布を変化させた。なお、細骨材は0.15、0.3mm以下の細粒分を除去す

表1 骨材の物理的性質

産地	種別	表乾比重	吸水率	F.M.
葛生	砕砂	2.62	0.90%	2.72
葛生	2005砕石	2.71	1.00%	6.67
段戸	砕砂	2.60	1.02%	3.03
段戸	2005砕石	2.60	0.94%	6.65

表2 結合材の物理的性質

結合材種別	比重	比表面積 cm ² /g	SiO ₂ 含有率%
普通ポルトランドセメント	3.15	3350	—
高炉スラグ微粉末	2.88	8260	—
シリカフェーム	2.68	200000	94.8

表3 実験の要因と水準（モルタル、コンクリート実験1）

要因	水準
水結合材比	20, 30, 40 %
高炉スラグ混合率	0, 15, 30 %
細骨材粗粒率 F.M.	2.72, 3.21, 3.72

ることで、図1に示したように、粗粒率を3水準（F.M.=2.72、3.21、3.72）に変化させた。測定項目は、スランプ、スランプフロー、テーブルフロー、粘性係数、温度変化である。粘性係数は回転粘度計により、温度変化は厚さ100mmの発泡スチロールで作成した中空の箱の、100x100x100mmの空洞部にモルタルを挿入して、熱電対により測定した。モルタルの調合は表4に示したとおりである。

2.2 コンクリート実験1：

モルタル実験と同様に水結合材比、高炉スラグ微粉末混入率、細骨材粒度分布を実験要因とし、L9型実験計画法にもとずい

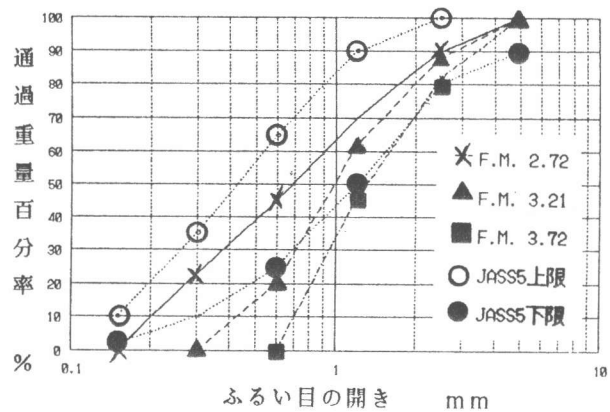


図1 使用細骨材の粒度分布

表4 モルタルの調合およびフレッシュ試験結果

水結合材比 (%)	細骨材種別	結合材料混合比 (%)			砂結合材比 (%)	水和剤添加量 (%)	フレッシュ時の試験結果				熱的性質	
		Cement	Silica	Slag			スランプ (cm)	スランプフロー (mm)	テーブルフロー (mm)	粘性係数 (dPas)	最高温度 (°C)	到達時間 (h:m)
20	2.72	85	15	0	66.6	2.5*A	12.5	195	170	3.36	54	14:50
	3.21					2.4*A	13.4	220	180	2.26	57	17:00
	3.72					2.0*A	12.7	200	180	1.81	51	14:20
	2.72	70	15	15	65.8	2.5*A	13.5	285	240	2.31	45	20:00
	3.21					2.5*A	13.5	295	230	2.08	45	19:15
	3.72					2.5*A	13.7	305	245	1.80	43	21:00
	2.72	55	15	30	64.7	2.5*A	13.5	290	235	1.89	42	25:00
	3.21					2.5*A	13.2	290	235	1.71	37	23:40
	3.72					2.5*A	13.8	300	245	1.61	39	25:00
30	2.72	85	15	0	92.2	2.1*B	12.0	175	175	1.05	44	39:30
	3.21					2.1*B	11.8	205	175	0.83	44	39:10
	3.72					2.1*B	11.5	195	185	0.73	45	40:10
	2.72	70	15	15	91.5	2.1*B	12.0	195	173	1.03	39	42:40
	3.21					2.1*B	12.5	220	190	0.77	42	43:30
	3.72					2.1*B	13.0	230	200	0.76	40	43:20
	2.72	55	15	30	90.9	2.1*B	12.0	192	180	1.07	28	50:20
	3.21					2.1*B	12.2	202	186	1.05	28	50:20
	3.72					2.1*B	12.0	200	185	1.10	28	53:00
40	2.72	85	15	0	107.8	1.8*B	10.5	170	167	0.88	29	50:50
	3.21					1.8*B	11.1	188	178	0.65	35	46:30
	3.72					1.8*B	9.7	190	195	0.50	32	48:00
	2.72	70	15	15	107.3	1.8*B	7.5	160	185	0.85	31	53:20
	3.21					1.8*B	7.9	154	179	0.77	36	52:00
	3.72					1.8*B	9.7	180	189	0.53	36	51:40
	2.72	55	15	30	106.7	1.8*B	7.0	138	182	0.88	33	51:50
	3.21					1.8*B	7.9	159	176	0.84	30	53:00
	3.72					1.8*B	5.5	111	160	0.75	28	53:10

注 1) *A:高性能AE減水剤 (TYPE A) *B:高性能AE減水剤 (TYPE B) 2) 珪砂の練り上がり温度=16.0±2°C

て、実験を行った。骨材は葛生産を用いた。測定項目は、スランプ値、スランプフロー、空気量、圧縮強度、およびヤング率とした。コンクリートの調合は表5に示したとおりである。

2.3 コンクリート実験2：

現在、経済的に入手可能な結合材料（セメント、シリカフェーム）、減水剤を用いて、細骨材

表5 コンクリートの調合およびフレッシュ試験結果（コンクリート実験1）

コンクリートの調合										フレッシュ試験結果		
水結合材比 %	細骨材種別 F.M.	細骨材率 %	単 位 量 kg/m ³							スランプ cm	スランプフロー mm	Air %
			W	Cement	Silica	Slag	S	G	Ad			
20.0	2.72	35.1	160	680	120	0	536	1003	3.0%*A	23.5	390	2.0
	3.21	34.7		560	120	120	528		3.0%*A	27.0	605	1.4
	3.72	34.4		440	120	240	520		3.0%*A	27.5	690	1.4
30.0	3.72	40.5		453	80	0	718	1065	2.8%*B	20.0	375	1.5
	2.72	40.4		373	80	80	713		2.8%*B	22.0	380	1.6
	3.21	40.1		293	80	160	705		2.5%*B	21.5	345	1.8
40.0	3.21	44.3		340	60	0	836	1065	2.4%*B	20.0	255	2.0
	3.72	44.2		280	60	60	833		2.4%*B	15.5	360	2.8
	2.71	44.0		220	60	120	828		2.4%*B	19.5	305	1.5

注) *A:高性能AE減水剤 (TYPE A) *B:高性能AE減水剤 (TYPE B)

表6 実験の要因と水準（コンクリート実験2）

要 因	水 準	
水結合材比 (%)	15, 20, 25	30, 35, 40
シリカフェーム混入率	15 %	0 %
細骨材粗粒率 F.M.	3.03	

表7 コンクリートの調合およびフレッシュ試験結果（コンクリート実験2）

No	コンクリートの調合								フレッシュコンクリートの性質			
	水結合材比 %	細骨材率 %	単 位 量 kg/m ³						スランプ cm		空気量 %	温度 ℃
			W	C	S.F	S	G	Ad	スランプ	フロー		
1	40	45	160	400	0	832	1022	5.6	2.5	20	2.9	23
2	35	44	160	457	0	785	1022	6.9	20.0	35	2.1	23
3	30	41	160	533	0	723	1022	10.1	23.0	55	1.2	24
4	25	37	160	544	96	601	1022	10.9	22.0	34	1.0	24
5	20	35	160	680	120	520	962	20.0	25.0	50	0.6	24
6	15	23	160	907	160	286	962	74.7	23.5	40	1.8	27

*Ad ; 高性能減水剤 A (W/C=15.20.25%), 高性能減水剤 A (W/C=30.35.40%) 混和剤中の水分は単位水量から補正。

の粒度分布を調整した現場打設可能なワーカビリティを有するコンクリートの圧縮強度の上限を把握するために表6の要因と水準で、表7の調合でコンクリートを製造した。細骨材は、筆者らが提案した骨材試験方法¹⁾により、超高強度コンクリートに適応可能であると判定された段戸産骨材(粗骨材・細骨材共 比重=2.60)を用いた。

3. 実験結果

3.1 ワーカビリティ

水結合材比毎に高性能減水剤の種類・添加量を調節したため、一概に比較することはできないが、水結合材比20%の場合、高炉スラグを置換することで、フロー値は大きくなる傾向にある。(表4, 5) これは、スラグ置換によるセメントの希釈効果によって高性能減水剤が有効にはたらいたためと考えられる。他の水結合材比においては明確な相関は認められなかった。粘性係数に関して、図2に示したように水結合材比、高炉スラグ混入率、細骨材のF.M.に高い相関が認められた。水結合材比20%は水結合材比40%と比較して、普通ポルトランドセメントを用いたFM2.72の粘性係数(decipascal·sec)が約3倍以上の値を示すが、高炉スラグ混入率、及びF.M.値の増加にともない粘性係数は大きく減少し、スコップを用いた練り返し、テストピースへの打設等において通常のコンクリートと同様の作業性であり、超高強度コンクリート特有の粘りが現れず、実施工に於いて打設・仕上げ等の作業が容易になると考えられる。水結合材比30、40%においてはF.M.値の増加にともない、わずかながら粘性係数は減少した。また、水結合材比40%では、F.M.値の増加は、モルタル表面が粗くなり分離傾向が観察された。段戸産骨材を用いた実験では、W/C=15%の調合であっても、作業性は良好であった。従って、細骨材のF.M.

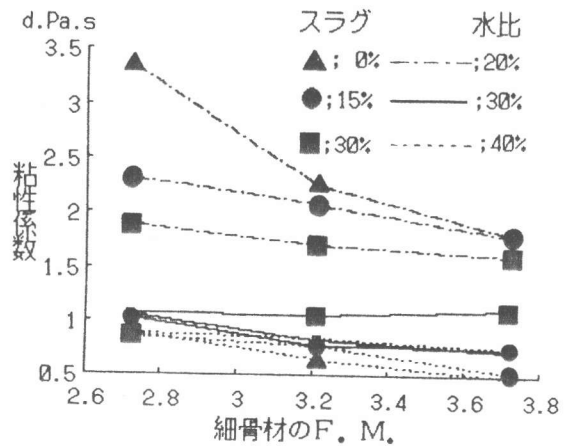


図2 粘性係数試験結果

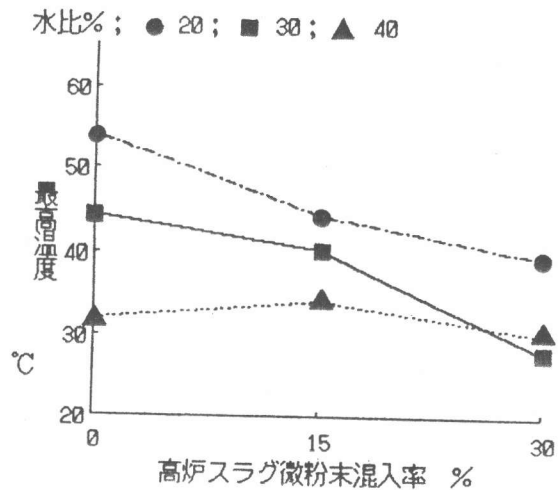


図3 高炉スラグ混入率と最高温度

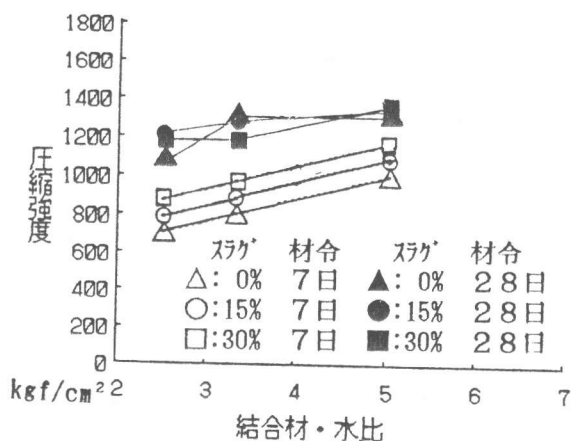


図4 結合材・水比と圧縮強度(実験1)

値を増加させ、コンクリートの変形性を高める事は、高性能減水剤を用いた極めて粉体量の多い材料分離抵抗性の高いコンクリートに対し効果があるといえる。

3.2 発熱量

モルタル実験に於ける、最高温度と高炉スラグ微粉末混入率の関係を図3に示した。最高温度は、水結合材比、即ち単位結合材量及び高炉スラグ混入率に大きな相関が認められ、水結合材比20、30%では高炉スラグ微粉末を30%混入することで最高温度到達時間が10時間程度長くなり、温度上昇を約15℃低減することができた。実施工に於いても温度上昇を大きく低減する事が可能と考えられる。

3.3 力学的性質

コンクリートの養生は、標準養生とした。図4および表8に示したように、1週圧縮強度は、結合材水比及び高炉スラグ微粉末混入率に比例する。これは、高炉スラグ微粉末の結晶がセメントの結晶間の空隙を埋めるため（微粉末効果）為と考えられる。

しかし、4週では、圧縮強度が骨材強度に支配されるため、頭打ち現象が生じ、各要因による明確な差が認められない。また、コンクリート2実験の圧縮強度を、図5

および表9に併せて示した。これより、骨材を適切に選定すれば、現在市販されているセメントで圧縮強度1700

Kgf/cm²程度のコンクリートの製造は可能であると考えられる。なお、水結合材比15%であっても、細骨材の0.15mm以下の細粒分を除去することで、十分にワーカブルなコンクリートが得られた。

4. まとめ

本実験により、微粉末結合

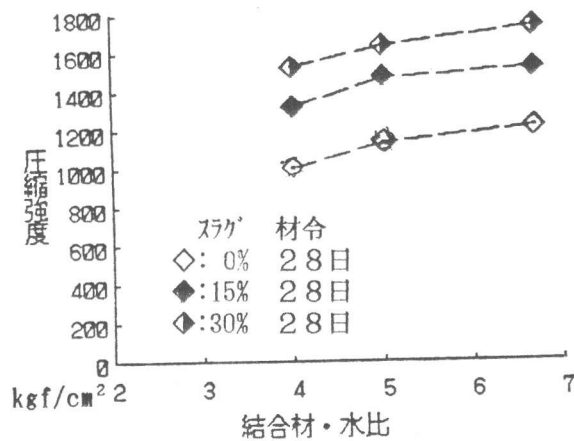


図5 結合材・水比と圧縮強度 (実験2)

表8 圧縮強度試験結果 (コンクリート実験1)

水結合材比 %	細骨材種別 F.M.	細骨材率 %	圧縮強度		ヤング率
			材令7日 kgf/cm ²	材令28日 kgf/cm ²	材令28日 × 10 ⁵ kgf/cm ²
20.0	2.72	35.1	1001	1325	5.27
	3.21	34.7	1081	1380	5.38
	3.72	34.4	1135	1397	5.34
30.0	3.72	40.5	810	1323	4.49
	2.72	40.4	946	1295	5.18
	3.21	40.1	1023	1174	5.22
40.0	3.21	44.3	690	1091	4.70
	3.72	44.2	760	1189	4.87
	2.71	44.0	835	1176	4.87

表9 圧縮強度試験結果 (コンクリート実験2)

No	水結合材比 %	細骨材率 %	圧縮強度				
			材令3日 kgf/cm ²	材令7日 kgf/cm ²	材令4週 kgf/cm ²	材令8週 kgf/cm ²	材令13週 kgf/cm ²
1	40	45	321	424	523	517	569
2	35	44	510	624	779	796	896
3	30	41	662	812	977	1000	1096
4	25	37	770	1000	1316	1358	1527
5	20	35	906	1130	1462	1504	1627
6	15	23	980	1207	1513	1575	1724

材料と細粒分を調節した細骨材を組み合わせ使用することで、ワーカブルな超高強度コンクリートの製造が可能であることが明かとなった。これは、コンクリート全体の粒度分布を適切に調整することが、コンクリートの粘性を低減させる上で有効であることを示唆するものである。また、シリカフェームと高炉スラグ微粉末を多量に混合して使用することで、水和熱の抑制が可能であった。今後は、実大規模の部材でも圧縮強度800Kgf/cm²以上の超高強度コンクリートが確実に得られるかどうか、本実験の手法を、実施工実験に応用する事で確認する予定である。

参考文献

- 1)古賀一八 他：超高強度コンクリートの品質管理に関する研究(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、P653、1990年
- 2)古賀一八 他：超高強度コンクリートの品質管理に関する研究(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、P789、1991年
- 3)木皿 剛 他：シリカフェームを使用した高強度コンクリートに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、P823、1991年
- 4)吉原一裕 他：高炉スラグ微粉末及びシリカフェームを混入したコンクリートに関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、P999、1991年