

論文

[1003] 高強度コンクリートの強度および断熱温度上昇に及ぼす各種材料の影響

正会員○谷口裕史(間組技術研究所)

正会員 宮野一也(同上)

正会員 福留和人(同上)

正会員 喜多達夫(同上)

1. まえがき

近年、高強度コンクリートに関する研究が活発に実施されるようになり、現場打ちで圧縮強度が1000kgf/cm²程度の高強度コンクリートを製造することも可能となっている¹⁾。実際の工事においても、超高層RC構造物に使用されるコンクリートの設計基準強度が高強度化する傾向にあり、今後、高強度コンクリートを適用する機会が増大するものと予想される。しかし、現在の高強度コンクリートは、圧縮強度を増大させるために単位セメント量がかなり増加しており、セメントの水和熱によるひびわれ発生の問題などが懸念されるが、これに関する資料は少ない。また、混和材料の組合せにより高強度コンクリートの強度を増大できるという報告²⁾があり、高強度コンクリートに最適な材料および配合を選定するための基礎的資料を得ることは重要であると考えられる。

以上のような観点から、本研究では、セメント、骨材、混和材料の種類および置換率が高強度コンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数および断熱温度上昇量に及ぼす影響について実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

本実験に使用した材料を表-1に示す。強度試験では、表-2に示す要因および水準を選定し、L₂₇(3¹³)直交表に割り付けて実験を実施した。断熱温度上昇試験は、強度試験の結果から、材令28日で圧縮強度が1000kgf/cm²程度となるように、単位結合材量

表-1 使用材料

骨材	粗骨材	秩父産碎石(GG)	硬質砂岩	比重2.70
		段戸産碎石(DG)	石英片岩	比重2.63
	細骨材	大井川川砂(OS)	比重2.60	吸水率1.65
		段戸産砕砂(DS)	比重2.58	吸水率1.08
結合材	セメント	普通(OPC)	比重3.16	
		中熱熟(MC)	比重3.22	
		フライッシュ(FC)	F/C+F=30%	フライッシュ比重2.14
	高炉スラグ微粉末	A(BSA)	アレーン値4230(cm ² /g)	比重2.90
		B(BSB)	アレーン値6420(cm ² /g)	比重2.91
		C(BSC)	アレーン値8510(cm ² /g)	比重2.91
シリカフューム(SF)	比重2.2	顆粒状	比表面積20m ² /g	
混和剤	高性能 A E減水剤	D	芳香族アミル林酸系高分子化合物	
		E	アミン系特殊高分子活性剤	
		F	特殊カルボキシル基と加齢 矽基含有多元ポリマー	

550kg/m³、単位水量150kg/m³を一定として、表-3に示す要因および水準を選定しL₉(3⁴)直交表に割り付けて実験を実施した。なお、最大粗骨材寸法は20mm、細骨材率は38%と一定にした。

2.2 実験項目および方法

実験項目は、圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数および断熱温度上昇量である。コンクリートは、容量50ℓのパン型強制ミキサを使用して製造した。練りませは、結合材および砂を15秒間空練りした後に、水および混和剤を投入し90秒間でモルタルを製造し、最後に粗骨材を投入してから60秒間本練りを行った。強度試験は、φ10

表-2 要因と水準(L₂₇)

要因	水準		
	1	2	3
単位結合材量(kg/m ³)	500	550	600
単位水量(kg/m ³)	140	150	160
骨材の種類	CG-OS	DG-OS	DG-DS
セメントの種類	MC	OPC	FC
B/S置換率(%)	0	2.0	4.0
混和剤量	①	②	③
S/F置換率(%)	0	7.5	15
混和剤の種類	D	E	F
B/Sの種類	BSA	BSB	BSC

表-3 要因と水準(L₉)

要因	水準		
	1	2	3
セメントの種類	OPC	MC	FC
B/Sの種類	BSA	BSB	BSC
B/S置換率(%)	0	3.0	6.0
S/F置換率(%)	0	1.0	2.0

×20cm (圧縮強度試験用) およびφ15×20cm (割裂引張強度試験用) の円柱供試体を使用し、所定の材令(7, 28および91日)まで水中養生(20±3℃)を行った後に実施した。静弾性係数は圧縮強度試験実施時にひずみゲージを用いて測定した。断熱温度上昇試験は空気循環式の試験機を使用し、温度上昇量が0.1℃/日以下となるまで測定を継続した。また、同時に断熱温度上昇温度により追従養生した供試体の圧縮強度試験も実施した。

3. 実験結果および考察

実験結果一覧表を表-4に、分散分析結果と要因効果を表-5に示す。

3.1 圧縮強度

本実験に使用した27種類の配合の大部分で材令28日で900kgf/cm²以上、材令91日で1000kgf/cm²以上の圧縮強度が得られた。最も強度の高かったものは材令7日で999kgf/cm²、材令28日で1315kgf/cm²および材令

91日で1530kgf/cm²の圧縮強度であった。圧縮強度に及ぼす各種要因の影響を図-1に、分散分析表を表-6に示す。圧縮強度を増大させるためには通常のコングリートと同様に、単位結合材量を増大させ、単位水量を減少させることが有効である。セメントの種類は普通セメントが最も高い圧縮強度を示し、続いて中庸熱セメント、フライア

表-4 実験結果一覧表(強度試験)

NO	W/C (%)	W	配合				セメントの種類	骨材の種類	BSの種類	圧縮強度 (kgf/cm ²)			割裂引張強度 (kgf/cm ²)		静弾性係数 (×10 ⁸ , kgf/cm ²)	
			単位量 (kg/m ³)							7日	28日	91日	28日	91日	7日	28日
			C	BS	SF	FC										
1	28.0	140	500	-	-	MC	CG-OS	-	668	979	1172	45.1	60.7	3.72	4.23	4.81
2			362	100	38	OPC	DG-OS	BSB	781	1065	1273	60.0	63.4	3.31	3.79	4.35
3			225	200	75	FC	DG-OS	BSC	832	1267	1363	58.4	67.9	3.06	3.84	4.05
4	30.0	150	425	-	75	MC	CG-OS	-	588	966	1201	53.7	65.1	3.62	4.31	4.61
5			400	100	-	OPC	DG-OS	BSA	697	1015	1143	52.3	64.6	3.16	3.82	4.10
6			262	200	38	FC	DG-OS	BSB	610	950	1161	40.4	54.7	2.90	3.43	3.82
7	32.0	160	462	-	38	MC	CG-OS	-	533	857	1083	45.3	52.3	3.35	4.15	4.59
8			325	100	75	OPC	DG-OS	BSC	751	1045	1146	48.6	60.4	3.12	3.81	3.89
9			300	200	-	FC	DG-OS	BSA	422	609	762	37.4	38.2	2.61	2.95	3.51
10	25.5	140	330	220	-	OPC	CG-OS	BSC	882	1315	1415	61.5	73.2	3.87	4.61	5.14
11			509	-	41	FC	DG-OS	-	695	1081	1270	45.8	61.8	3.10	3.62	3.99
12			357	110	83	MC	DG-OS	BSB	785	1149	1397	56.6	58.4	3.06	3.79	4.22
13	27.3	150	247	220	83	OPC	CG-OS	BSB	714	976	1265	55.1	63.4	3.33	4.11	4.68
14			550	-	-	FC	DG-OS	-	678	881	1112	42.5	51.8	3.06	3.57	3.79
15			399	110	41	MC	DG-OS	BSA	647	982	1222	53.6	63.2	3.00	3.73	3.94
16	29.1	160	289	220	41	OPC	CG-OS	BSA	684	902	1263	59.3	72.7	3.23	3.89	4.66
17			467	-	83	FC	DG-OS	-	651	878	978	39.3	55.2	3.05	3.41	3.72
18			440	110	-	MC	DG-OS	BSC	648	1029	1095	49.6	58.2	2.86	3.72	4.00
19	23.3	140	480	120	-	FC	CG-OS	BSB	829	1159	1239	60.1	68.5	3.29	3.88	4.18
20			315	240	45	MC	DG-OS	BSC	877	1244	1315	62.1	67.6	3.32	3.88	4.28
21			510	-	90	OPC	DG-OS	-	999	1251	1530	54.9	54.8	3.58	4.19	4.35
22	25.0	150	173	120	90	FC	CG-OS	BSA	571	938	1213	48.4	61.1	3.35	4.20	4.61
23			360	240	-	MC	DG-OS	BSB	801	1165	1308	55.8	63.1	3.25	4.18	4.40
24			555	-	45	OPC	DG-OS	-	906	1149	1261	61.4	64.0	3.15	3.96	4.03
25	26.7	160	304	120	45	FC	CG-OS	BSC	739	1002	1168	53.4	67.4	3.31	3.95	4.58
26			270	240	90	MC	DG-OS	BSA	434	821	1022	36.7	52.1	2.54	3.13	3.89
27			600	-	-	OPC	DG-OS	-	824	994	1125	54.6	62.6	3.25	3.63	3.99

表-5 分散分析結果と要因効果(強度試験)

特性	圧縮強度 (kgf/cm ²)						割裂引張強度 (kgf/cm ²)						静弾性係数 (×10 ⁸ kgf/cm ²)					
	7日		28日		91日		28日		91日		7日		28日		91日			
	有意性	主効果	有意性	主効果	有意性	主効果	有意性	主効果	有意性	主効果	有意性	主効果	有意性	主効果	有意性	主効果		
1 単位結合材量	**	-59.3	**	-52.2	**	-58.5	*	-2.6	*	-2.4		0.00		-0.04		-0.04		
2 単位水量	**	103.6	**	143.0	**	127.0	*	4.5	*	3.1	**	0.17	**	0.15	**	0.15		
3 骨材の種類		-23.0	0	-14.3		19.8	*	2.0	*	4.0	**	0.25	**	0.31	**	0.41		
4 セメントの種類	**	-48.3	**	-3.4	**	-1.7	**	-0.6	*	-0.9	**	-0.01	**	0.07	**	0.08		
5 BS置換率	0	14.1	0	-20.8	0	-11.0		-2.4		-2.3	**	0.12	*	0.06		-0.02		
6 水和剤の種類	*	-4.1	*	6.1	**	-23.9		-1.9	0	0.4	0	-0.02	*	-0.06	*	-0.07		
7 SF置換率	0	3.7	0	-8.6		-51.1		-0.6		-0.9	0	0.03		0.01		-0.02		
8 骨材の割合	0	6.3	0	1.0	**	20.6		1.9		2.0	-0.02	0	-0.01	0	0.02	0.02		
9 BSの種類	**	-66.5	**	-71.7	**	-26.0	*	-3.4	*	-2.2	**	-0.06	**	-0.09	0	-0.02		
10 1×6		54.0		75.0		27.4		3.0		3.0		0.06		0.10		0.03		
データの総平均		712.8	*	1024.8		1203.4		51.6		61.0	**	3.20	*	3.84	*	4.23		

** (*): 有意水準1% (5%) で有意 (): 誤差にプール

ッシュセメントの順になっている。フライアッシュセメントは材令91日でもフライアッシュのポゾラン反応による顕著な圧縮強度の増大は認められなかったが、材令91日で1100kgf/cm²以上の圧縮強度が得られている。混和剤量は多めの使用である水準③の強度が大きくなっている。

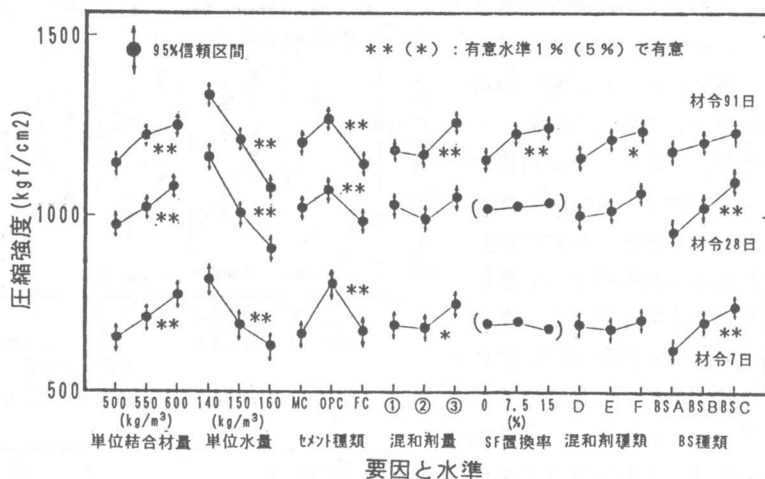


図-1 圧縮強度に及ぼす各種要因の影響

この水準での使用量が最も結合材の分散効果が効果的に発揮されたものと考えられる。シリカフェーム置換率は材令28日までは置換したものと置換しないもので圧縮強度が同程度になっている。しかし、材令28日から材令91日までの圧縮強度の増大は、シリカフェームで置換したもので著しい。シリカフェームの主なポゾラン反応は、他のポゾラン反応と比較して早く、20℃噴霧養生では材令3日から材令28日で反応するという報告³⁾もあるが、本実験の結果では、材令28日以降に強度が増大している。このことから、材令28日以前はシリカフェームのフィラー効果などの物理的要因と早期のポゾラン反応が圧縮強度に影響し、材令28日以降もシリカフェームのポゾラン反応は進行しており、長期材令においても圧縮強度の増大が認められたと考えられる。高炉スラグ微粉末では置換率の影響は小さく、通常のコンクリートに使用した場合のように初期材令において圧縮強度が低下する傾向は認められておらず、高強度コンクリートに高炉スラグ微粉末の種類では、いずれの材令においてもブレン値の大きいものほど圧縮強度が大きくなる傾向が認められるが、材令91日では圧縮強度の差は小さくなっている。このように、高炉スラグ微粉末を使用する場合、初期材令の圧縮強度を増大させるために高炉スラグ微粉末のブレン値を大きくすることは有効であるが、長期材令ではブレン値の差による圧縮強度の差は認められなくなる。

3. 2 割裂引張強度

割裂引張強度に及ぼす各種要因の影響を図-2に分散分析表を表-7に示す。各種要因の及ぼす影響は、シリカフェーム置換率および骨材の種類を除いてほぼ圧縮強度と同様の傾向を示している。シリカフェームは割裂引張強度では材令91

表-6 圧縮強度の分散分析結果(材令91日)

要因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F0
①単位結合材量	47911.63	2	23955.82	16.04 **
②単位水量	302466.00	2	151233.00	101.27 **
③骨材の種類	12067.18	2	6033.59	4.04
④セメントの種類	72875.71	2	36437.85	24.40 **
⑤混和剤量	48578.33	2	24289.16	16.26 **
⑦SF置換率	35655.60	2	17827.80	11.94 **
⑥混和剤の種類	27040.57	2	13520.28	9.05 *
⑧BSの種類	12769.38	2	6384.69	4.28
①×⑥	20261.94	4	5065.48	3.39
誤差	8960.23	6	1493.37	

表-7 割裂引張強度の分散分析結果(材令91日)

要因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F0
①単位結合材量	77.65	2	38.82	2.93
②単位水量	182.58	2	91.29	6.89 *
③骨材の種類	229.23	2	114.61	8.64 *
④セメントの種類	164.06	2	82.03	6.19 *
⑤BS置換率	78.45	2	39.22	2.96
⑦SF置換率	56.16	2	28.08	2.12
⑥混和剤の種類	239.84	2	119.92	9.04 *
⑧BSの種類	128.25	2	64.12	4.84
①×②	187.28	4	46.82	3.53
誤差	79.55	6	13.26	

日においても圧縮強度のよ
うな置換による強度の増大
は認められない。骨材の種
類では、材令91日において
差が認められ、秩父産碎石
（硬質砂岩）を使用した方
が段戸産碎石（石英片岩）
を使用したものよりも強度
が大きくなっている。本実
験に使用した骨材はいずれ
も強度の高い比較的良質な
骨材であるために、圧縮強
度に及ぼす影響は小さかつ
たが、粗骨材の石質は圧縮
強度よりも引張強度に影響
を及ぼすことから、高強度
な引張強度域では骨材の影
響を受けたと考えられる。
また、割裂引張強度は材令
91日で50~73kgf/cm²程度で
あり圧縮強度と比較して強
度の伸びは小さい。

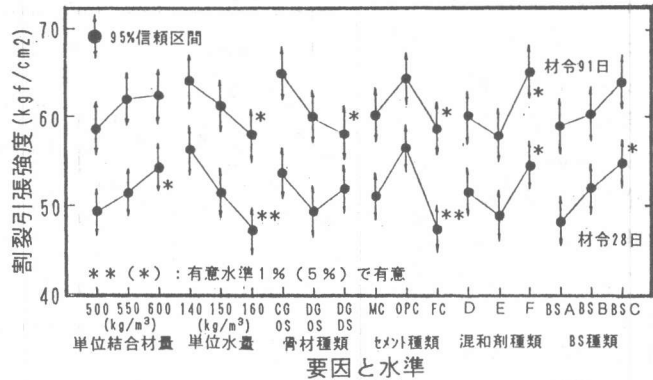


図-2 割裂引張強度に及ぼす各種要因の影響

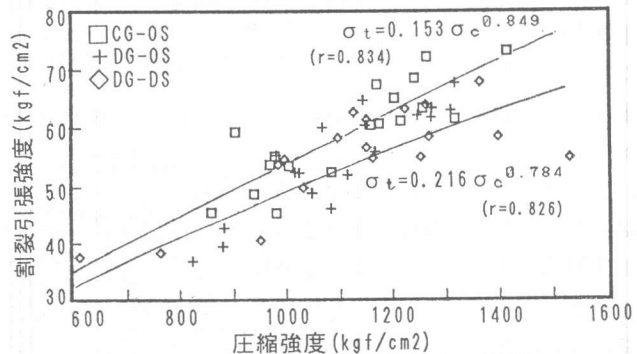


図-3 圧縮強度と割裂引張強度の関係

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-3に示す。割裂引張強度と圧縮強度の比は1/20程度であり、通常のコングリートよりも小さい値となる。引張強度と圧縮強度の関係を $\sigma_t = a \sigma_c^b$ で近似すると秩父産碎石を使用した場合には $\sigma_t = 0.153 \sigma_c^{0.849}$ 、段戸産碎石を使用した場合には $\sigma_t = 0.216 \sigma_c^{0.784}$ であり、本実験結果でも係数が骨材の種類の影響されることが認められた。

3.3 静弾性係数

静弾性係数に及ぼす各種
要因の影響を図-4に、分
散分析表を表-8に示す。
静弾性係数において単位結
合材量およびシリカフェ
ーム置換による影響は認め
られない。要因効果の認め
られる要因の中で骨材の種
類および高炉スラグ微粉末
置換率以外の要因は、圧縮
強度に及ぼす影響と同様の
傾向であり、圧縮強度が大
きいものほど静弾性係数が
大きくなっている。骨材の種

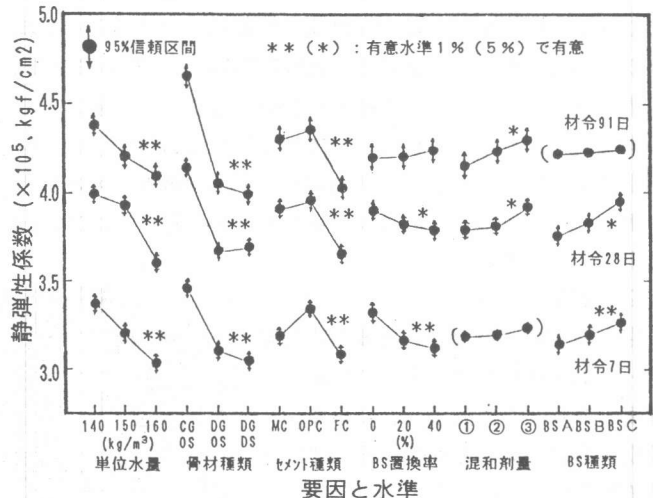


図-4 静弾性係数に及ぼす各種要因の影響

類では、顕著な差が認められており、同一圧縮強度に対する静弾性係数は秩父産砕石を使用したものの方が段戸産砕石を使用したものよりも大きくなっており、その差は材令91日で $0.6 \sim 0.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ となっている。高炉スラグ微粉末の置換率は、初期材令において、置換率の増大にともない静弾性係数が低下する傾向が認められる。しかし、材令の進行にともないその傾向は小さくなり、材令91日においては差が認められなくなっている。これは、材令の進行にともなう高炉スラグ微粉末の反応による強度の増大により内部構造が緻密になってきたことが影響したためと考えられる。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5に示す。静弾性係数と圧縮

強度の関係は骨材の影響を受けており、秩父産砕石-大井川川砂で $E=13182\sqrt{\sigma_c}$ 、段戸産砕石-大井川川砂で $E=11607\sqrt{\sigma_c}$ 、段戸産砕石-段戸産砕砂で $E=11413\sqrt{\sigma_c}$ であった。

3. 4 断熱温度上昇特性

各配合における最終断熱温度上昇量(K)を表-9に、分散分析結果と要因効果を表-10に、最終断熱温度上昇量に及ぼす各種要因の影響を図-6に示す。最終断熱温度上昇量にはセメントおよび高炉スラグ微粉末の種類の影響は小さく、単位結合材量の多い高強度コンクリートにおいて、発熱量を低減させる目的で中庸熱セメントやフライアッシュセメントを使用しても効果は少ない。高炉スラグ微粉末の置換率に関しては、置換率が30%程度では、置換しないものと同程度の最終断熱温度上昇量となるが、60%置換したものでは、12℃程度最終断熱温度上昇量が低下している。このように、高炉スラグ微粉末で置換することにより最終断熱温度上昇量は低下させることができるが、それに必要な置換率は60%程度とかなり多量に置換しなければ効果がないようである。国府ら⁴⁾は、セメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した場合、発熱速度の減少は認められるが、置換率を70%以上にしなければ温度上昇量の抑制効果は表れないと報告しており、同様の傾向が高強度コンクリートにおいても認められて

表-8 静弾性係数の分散分析結果 (材令91日)

要因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F0
①単位結合材量	0.02	2	0.01	1.76
②単位水量	0.96	2	0.18	32.07 **
③骨材の種類	2.42	2	1.21	215.91 **
④セメントの種類	0.56	2	0.28	49.71 **
⑤BS置換率	0.02	2	0.01	2.04
⑥混和剤量	0.10	2	0.05	8.66 *
⑦混和剤の種類	0.04	2	0.02	3.67
①×②	0.15	4	0.04	6.66 *
①×⑥	0.18	4	0.04	7.97 *
誤差	0.02	4	0.01	

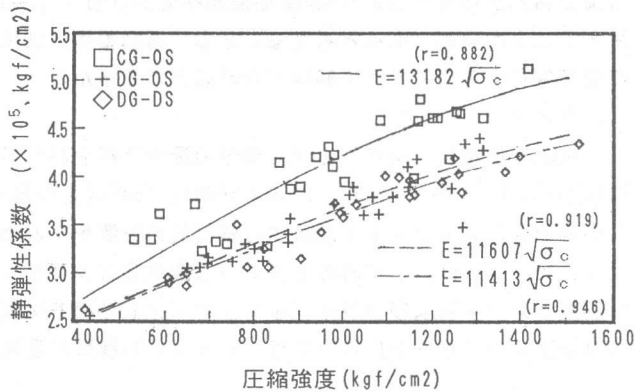


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

表-9 断熱温度上昇試験結果

配合 No	セメントの種類	BSの種類	BS置換率 (%)	SF置換率 (%)	K	α
1	OPC	-	0	0	63.2	2.86
2	OPC	BSB	30	10	56.3	2.05
3	OPC	BSC	60	20	35.9	2.36
4	MC	BSA	30	20	51.1	1.13
5	MC	BSB	60	0	53.0	1.69
6	MC	-	0	10	50.0	2.37
7	FC	BSA	60	10	37.4	1.04
8	FC	-	0	20	49.9	1.67
9	FC	BSC	30	0	58.6	1.75

表-10 分散分析結果と要因効果 (断熱温度上昇)

特性		K		α	
判定および効果		有意性	主効果	有意性	主効果
C	セメントの種類		1.171		0.554
	OPC		0.794		-0.151
	MC	0	-1.965		-0.393
B	BSの種類		-0.055		-0.203
	BSA	0	2.453	0	-0.079
	BSB		-2.398		0.282
S	BS置換率		3.802		0.420
	30 (%)	*	4.714		-0.237
	60		-8.515		-0.183
F	SF置換率		7.657		0.220
	10 (%)	*	-2.681	0	-0.060
	20		-4.976		-0.160
データの総平均			50.619		1.881

いる。一方、シリカフュームに関しては、置換率10%で10℃程度最終断熱温度上昇量を低下させることが可能である。これは、シリカフューム置換により単位セメント量が減少したために、初期のセメントの水和反応による発熱量が減少したものと考えられる。置換率の影響に関しては、置換率が大きくなるほど最終断熱温度上昇量は低下する傾向にあるが、置換率10%と置換率20%を比較した場合、2℃程度しか差は認められておらず、温度低減の目的から考えると10%程度の置換率でシリカフュームを使用することが有効であると考ええる。なお、追従養生供試体の圧縮強度は材令7日ですべて900kgf/cm²以上であった。

4. まとめ

本実験に使用した材料により大部分の配合で材令28日で圧縮強度が900kgf/cm²以上、材令91日で1000kgf/cm²以上の高強度コンクリートを得ることができた。この高強度コンクリートに及ぼす各種材料の影響をまとめると以下のとおりである。

(1) セメントは、いずれのセメントも高強度コンクリートに使用できるが、普通セメント、中庸熱セメントおよびフライアッシュセメントの順で強度は大きい。また、単位結合材量の多い高強度コンクリートにおいては、セメントの種類が最終断熱温度上昇量に及ぼす影響は小さい。

(2) シリカフュームで置換したものは、材令28日までは置換しないものと同程度の圧縮強度が得られ、さらに、材令28日以降の圧縮強度の伸びが増大する。また、10%程度の置換により最終断熱温度上昇量を10℃程度低下させることができる。

(3) 高炉スラグ微粉末は、40%程度までの置換率であれば、圧縮強度に及ぼす影響は小さい。また、高炉スラグ微粉末で置換した場合には、ブレン値の大きいものを使用した方が強度および静弾性係数が増大する傾向にあるが、材令91日ではその傾向はほとんど見られなくなる。一方、最終断熱温度上昇量を低下させるには60%程度以上の高置換率のものでなければ効果は少ない。

(4) 本実験に使用した骨材では、圧縮強度において差は認められなかったが、割裂引張強度および静弾性係数については差が認められた。

【参考文献】

- 1) 河井 他：1000kgf/cm²コンクリートの実用化への挑戦、セメントコンクリート、No. 508、June、1989、pp. 31~38
- 2) 依田、横室：超高強度コンクリートの性質に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集10-2、1989、pp. 539~544
- 3) Sellevold, E. J. and Radjy, F. F., "Condensed Silica Fume (Microsilica) in Concrete; Water Demand and Strength Development," Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete, SP-79, American Concrete Institute, Detroit, 1983, pp. 677-694
- 4) 国府 他：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集、昭和62年3月、pp. 51~58

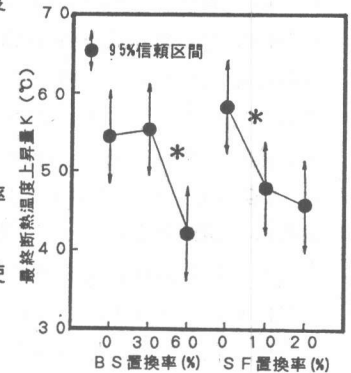


図-6 最終断熱温度上昇量に及ぼす各種要因の影響