

報告

[1043] 高粉末度スラグを用いたコンクリートの性質と靱性改善

遠山俊一 (神戸製鋼所スラグ・建材部)

正会員○堀井 勝 (")

正会員 吉川勇一 (")

1. まえがき

高炉水砕スラグを8000, 10000 cm³/gの高粉末度に粉碎し, 低水セメント比(20~30%)におけるコンクリートの性能を調査した。高粉末度スラグは普通ポルトランドセメントに内割重量比で置き換えて利用し, 圧縮強度, その他の性質を調査した。また爆裂対策としてスチールファイバーによる靱性改善効果も確認した。

2. 実験

2-1 使用材料

- (1)高粉末度スラグ; 8000 (8^k), 10000(10^k) cm³/g
- (2)普通ポルトランドセメント; 三製造所等量混合 (OPC)
- (3)シリカフェーム; 200000cm³/g
- (4)骨材; 細骨材は加古川産川砂。粗骨材; 高槻市砕石(硬質砂岩)
- (5)高性能減水剤; 変成リグニンとアルキルアリルスルホン酸化合物。
- (6)流動化剤; メラミンスルホン酸化合物
- (7)混練水; 神戸市上水道水
- (8)スチールファイバー; 伸線異形加工 (0.6φ×30^t mm)

表-1に結合材の性質を, 表-2に骨材の性質を示す。

表-1 結合材の性質

結合材	比重	ブレン値	50% 径	凝 結		* 圧縮強度(kgf/cm ²)		
				始 発 hr-min	終 結 hr-min	7 日	28 日	91 日
OPC	3.15	3330	14.6	2-25	3-45	375	475	525
8 ^k	2.91	8500	4.3	2-40	4-50	344	515	564
10 ^k	2.91	10500	3.1	2-45	4-45	328	545	589
シリカフェーム	2.22	200000	0.15	—	—	—	—	—

* 8^k, 10^k のスラグ 粉末の圧縮強度はOPC50%置換で W/C 50% S/C 2.5で実施した。

表-2 骨材の性質

骨 材	比 重	吸水率 (%)	洗い損 失 (%)	単 重 (T/m ³)	粒度分布 通過重量(%) (mm)								
					20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
粗骨材	2.54	1.6	0.0	1.575	100	76	39	0					
粗骨材	2.68	0.7	0.8	1.650				100	90	70	40	11	2

2.2 試験方法

- (1)スランプ・フロー値；JIS A 1101によった。
- (2)空気量；JIS A 1128によった。
- (3)凝結時間；ASTM C 403によった。
- (4)断熱温度上昇量；JCI マスコンクリートひび割れ制御指針に示される方法によった。
- (5)供試体の作成；JIS A 1132（棒状バルブレーター法）によった。
- (6)供試体の養生；標準養生とした。圧縮強度の一部は封緘養生20℃とした。
- (7)圧縮強度；JIS A 1108によった。
- (8)ヤング係数；ASTM C 469（最大荷重の1/3における割線法）によった。
- (9)引張強度；JIS A 1113によった。
- (10)曲げ強度；JIS A 1106によった。
- (11)曲げ靱性係数；曲げ強度測定時に供試体中央部のたわみ量を測定し算出した。（土木学会規準・鋼繊維補強コンクリート設計施工指針案 III-2-5）
- (12)剪断強度；曲げ試験後の供試体を用い二面剪断方法によった。

2.3 調合

目標としたコンクリートは粗骨材最大寸法が20mm、スランプ21cmとし単位セメント量の上限は700kg/m³、単位水量の上限は175kg/m³とした。細骨材率は高粉末度スラグの置換率が50%の時にOPCに対して2%減とし高粉末度スラグの置換量に比例させた。混和剤の使用量は混和剤メーカー仕様による最大量を限度として用いた。高粉末度スラグの置換量は30, 50, 70%をOPCに内割重量比で置き換えた。スチールファイバーはW/C25%時に0.5%を、W/C30%時に1.0%コンクリートの内割容積比で用いた。調合表を表-3に示す。

表-3 調合表

NO	結合材	W/ (C+S) %	S/A %	粗骨材 高容積 m ³ /m ³	単位 水量 kg/m ³	重 量 (kg / m ³)					化学混和材				
						結 合 材			細骨材	粗骨材	F ₁ -F ₂	減水剤 C×%	流動化 剤 C×%		
						OPC	スラグ 微粉末	シキ ファム							
1	OPC	20	40.0	0.656	140	700	--	--	673	1023	--	2.0	4.0		
2	10% 50%		36.0	0.664		350	350	--	609	1041	--	2.0	2.0		
3	OPC		42.0	0.656		600	--	--	700	1023	--	2.0	2.0		
4	OPC-S		50.0	0.555		600	--	--	875	874	39.3	2.0	2.0		
5	8% 30%	25	41.0	0.656	150	420	180	--	685	1033	--	2.0	0.5		
6	10% 30%		41.0	0.656		420	180	--	685	1033	--	2.0	0.5		
7	8% 50%		40.0	0.663		300	300	--	665	1045	--	2.0	0.0		
8	8% 50%-S		48.0	0.571		300	300	--	702	899	39.3	2.0	1.5		
9	10% 50%		40.0	0.663		300	300	--	665	1045	--	2.0	0.0		
10	10% 50%-S		48.0	0.571		300	300	--	702	899	39.3	2.0	1.5		
11	8% 70%		39.0	0.671		180	420	--	645	1057	--	1.5	0.8		
12	10% 70%		39.0	0.671		180	420	--	645	1057	--	1.5	0.8		
13	OPC		30	42.0		0.653	175	583	--	--	685	992	--	1.0	0.0
14	OPC-S			58.0		0.449		583	--	--	931	707	78.5	1.0	1.2
15	8% 30%	41.0		0.636	408	175		--	664	1002	--	1.0	0.0		
16	10% 30%	41.0		0.636	408	175		--	664	1002	--	1.0	0.0		
17	8% 50%	40.0		0.644	292	292		--	645	1014	--	1.0	0.0		
18	8% 50%-S	56.0		0.464	292	292		--	888	731	78.5	1.0	0.7		
19	10% 50%	40.0		0.644	292	292		--	645	1014	--	1.0	0.0		
20	10% 50%-S	56.0		0.464	292	292		--	888	731	78.5	1.0	0.5		
21	8% 70%	39.0		0.651	175	408		--	625	1025	--	1.0	0.0		
22	10% 70%	39.0		0.651	175	408		--	625	1025	--	1.0	0.0		
23	OPC90%-SF10%	42.0	0.623	525	--	58	678	982	--	1.0	0.7				
24	8% 40%-SF10%	40.0	0.639	292	233	58	639	1006	--	1.0	0.7				
25	10% 40%-SF10%	40.0	0.639	292	233	58	639	1006	--	1.0	0.7				

(OPC=普通セメント 8%=8000/トン 10%=10000/トン S=スチールファイバー SF=シキファム)

3. 試験結果および検討

3-1 フレッシュコンクリートの性質

フレッシュコンクリートの性質を表-4に示す。

(1)ワーカビリティ

打設したコンクリートのワーカビリティは粘性が大きくフロー値も大きい。

(2)断熱温度上昇量

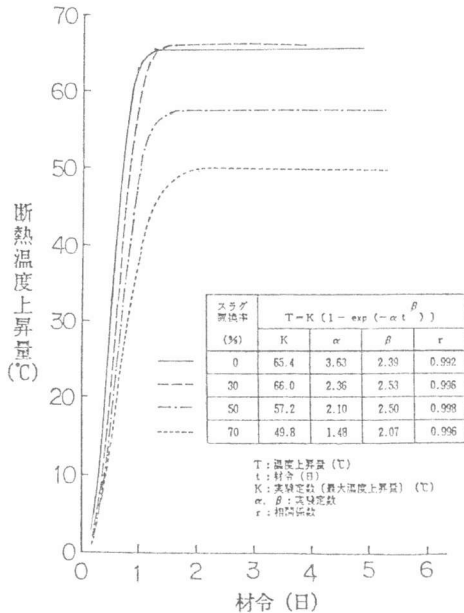


図-1. 高粉末度スラグの置換率と断熱温度上昇量

高粉末度スラグをOPCへ30, 50, 70%置き換え W/C25%の調合で断熱温度上昇量を測定した結果を図-1に示す。高粉末度スラグ置換量が30%以下ではOPCと同等であるが、50%以上になると温度が低減する傾向がみられた。

3-2. 硬化コンクリートの性質

硬化コンクリートの性質を表-5に示す。

(1)高粉末度スラグの置換量と圧縮強度

高粉末度スラグをOPCに対して30, 50, 70%置き換えた場合の圧縮強度結果を図-2に示す。高粉末度スラグの置換量が30~50%にピークがみられる。また高粉末度スラグを用いる事で材令28日における圧縮強度はOPCに対して15~20%程度改善出来た。スラグのブレン値8000cm³/gと10000cm³/gの差はみられない。

(2)シリカフェームを用いたコンクリートの圧縮強度

シリカフェームをOPCに10%, 高粉末度スラグ40%シリカフェーム10%を置きかえた圧縮強度はOPCに用いた場合強度改善効果が見られた。高粉末度スラグの一部にシリカフェームを用いた場合には効果が見られなかった。

表-4 フレッシュコンクリート

NO	フレッシュコンクリート						
	スランブ		単重 kg/m ³	空気量 %	温度 °C	凝結時間	
	45分 cm	70分 mm				始発 hr-min	終結 hr-min
1	0.0	—	—	—	—	—	—
2	7.5	—	2465	1.7	22	—	—
3	20.0	367	2474	1.7	20	14-53	18-22
4	7.5	—	2465	2.9	22	—	—
5	22.0	417	2465	1.5	20	—	—
6	23.0	447	2470	1.4	21	—	—
7	22.5	461	2458	1.3	20	—	—
8	22.0	412	2469	1.7	22	—	—
9	24.0	487	2456	1.3	21	—	—
10	22.5	443	2470	1.8	22	—	—
11	24.0	472	2454	1.1	20	—	—
12	23.0	465	2451	1.1	20	—	—
13	22.0	358	2433	1.2	22	8-29	10-24
14	18.0	290	2461	1.6	22	—	—
15	22.5	429	2438	1.1	19	—	—
16	22.5	436	2435	1.1	18	—	—
17	21.5	373	2420	1.0	19	8-21	10-34
18	20.5	355	2456	1.6	22	—	—
19	21.5	360	2420	1.2	18	7-32	10-01
20	19.0	360	2420	1.8	22	—	—
21	21.5	359	2416	1.2	18	—	—
22	19.0	319	2412	1.1	19	—	—
23	17.5	246	2402	1.8	21	—	—
24	19.0	286	2408	1.6	20	—	—
25	18.5	285	2411	1.7	20	—	—

表-5 硬化コンクリートの性質

単位: kg/cm²

NO	圧縮強度(標準養生)				圧縮強度(封緘養生)				引張強度		曲げ強度				剪断強度					
	7日		28日		91日		180日		28日		91日		7日		28日		7日		28日	
	強度	ワケ率 × 10 ⁴	強度	ワケ率 × 10 ⁴	強度	強度	強度	ワケ率 × 10 ⁴	強度	強度	強度	強度	強度	ワケ率	強度	ワケ率	強度	強度	強度	強度
1	721	36.5	911	40.5	966	960	-	-	-	51.7	57.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	750	37.9	1085	43.0	1119	1091	-	-	-	48.2	57.6	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	785	38.8	872	39.8	932	988	843	39.4	912	52.5	64.5	87.2	0	105.1	0	87.0	108.1	-	-	
4	721	-	852	-	-	-	-	-	-	-	-	81.0	32.6	96.5	34.8	121.0	128.5	-	-	
5	774	38.6	962	40.5	1088	1075	891	39.3	1008	54.8	65.6	-	-	-	-	-	-	-	-	
6	796	39.1	972	40.6	1084	1115	937	40.2	1055	53.5	64.4	-	-	-	-	-	-	-	-	
7	778	37.8	973	41.2	1067	1066	957	41.3	1025	55.1	68.5	95.5	0	117.9	0	97.2	112.4	-	-	
8	720	-	930	-	-	-	-	-	-	-	-	88.1	36.8	108.4	34.8	112.0	119.4	-	-	
9	764	37.9	1003	42.8	1095	1183	987	41.8	1083	54.7	65.6	96.1	0	112.2	0	98.4	116.5	-	-	
10	714	-	970	-	-	-	-	-	-	-	-	87.4	34.7	107.9	34.2	104.0	111.9	-	-	
11	623	33.5	872	38.2	958	1015	841	38.6	989	40.9	55.9	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	645	34.3	900	38.5	1046	1087	864	38.5	1012	43.7	56.5	-	-	-	-	-	-	-	-	
13	660	35.9	759	38.9	910	878	777	38.6	892	47.7	58.8	80.4	0	101.5	0	89.3	94.8	-	-	
14	617	-	731	-	-	-	-	-	-	-	-	80.5	52.4	97.6	56.2	143.3	144.3	-	-	
15	652	33.2	878	40.1	1012	1032	909	40.4	1005	43.2	56.8	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	685	33.6	868	38.5	1031	1029	889	38.5	1022	50.4	56.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
17	638	31.1	867	39.6	1019	1013	814	38.2	961	45.1	59.5	78.9	0	109.1	0	79.4	106.9	-	-	
18	644	-	864	-	-	-	-	-	-	-	-	95.8	62.7	100.4	50.7	134.2	147.3	-	-	
19	624	31.8	889	41.0	1015	1017	845	38.6	944	40.0	53.1	75.3	0	104.6	0	83.5	120.0	-	-	
20	626	-	831	-	-	-	-	-	-	-	-	78.0	62.0	96.4	52.3	127.5	151.3	-	-	
21	505	32.6	737	35.9	938	968	755	35.6	947	38.6	49.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
22	526	30.1	769	35.7	951	984	772	35.6	916	38.0	49.2	-	-	-	-	-	-	-	-	
23	642	32.5	811	37.9	901	903	791	36.4	927	47.3	54.6	-	-	-	-	-	-	-	-	
24	679	33.2	854	37.8	916	955	809	36.5	964	47.9	53.4	-	-	-	-	-	-	-	-	
25	696	33.5	872	39.0	977	1006	819	36.8	976	48.4	53.7	-	-	-	-	-	-	-	-	

(3)標準養生と封緘養生

標準養生と封緘養生の関係を図-3に示す。標準養生に対し封緘養生の圧縮強度はやや低い。

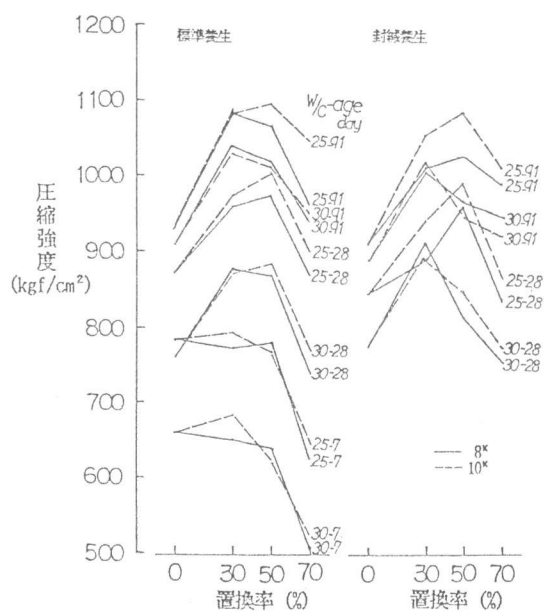


図-2 高粉末度スラグの置換量と圧縮強度

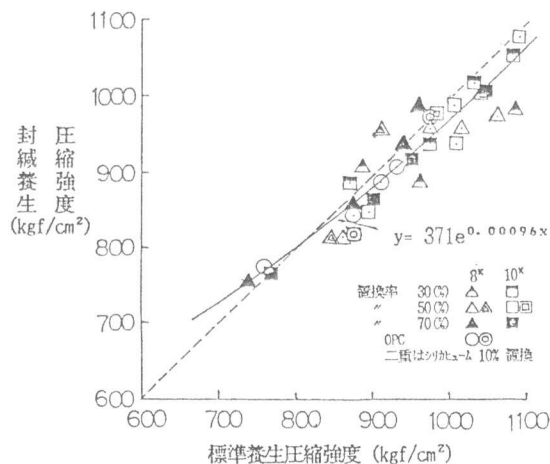


図-3 標準養生と封緘養生の圧縮強度

(4) 圧縮強度とヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-4に示す。ヤング係数は圧縮強度が大きくなってそれほど増大しない。建築学会で用いられているヤング係数と圧縮強度の関係式をやや下廻る結果となった。

(5) 圧縮強度と引張強度

圧縮強度と引張り強度の関係を図-5に示す。引張強度は圧縮強度が大きくなってそれほど大きくなりません。引張り強度は圧縮強度の1/13~1/16程度である。

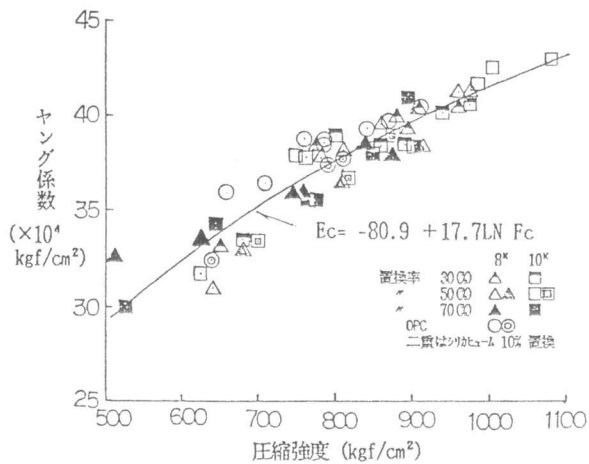


図-4 圧縮強度とヤング係数

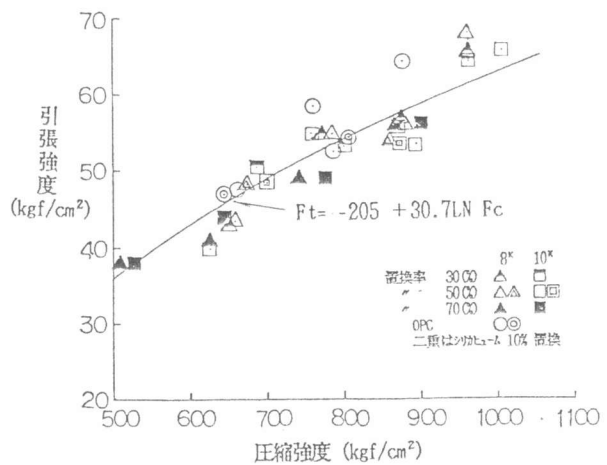


図-5 圧縮強度と引張り強度

(6) 圧縮強度と曲げ強度

圧縮強度と曲げ強度の関係を図-6に示す。曲げ強度は圧縮強度が大きくなってそれほど大きくなりません。スチールファイバーを混入したコンクリートも同様である。スチールファイバーの効果がみられないのは粗骨材最大寸法が20mmと大きいこと、コンクリート強度が限界に近づいていることに起因しているものと考えられた。得られた曲げ強度は圧縮強度の1/7~1/9程度である。

(7) 曲げ靱性係数

高強度コンクリートはもろいので靱性を改善する為にスチールファイバーを用いた。曲げ強度測定時に荷重とひずみ量の関係を図-6に示す。

スチールファイバーを用いると瞬時に破断せずスチールファイバーの付着効果がみられた。スチールファイバーを用いる事で高強度コンクリートの靱性を改善される事が確認出来た。圧縮試験時のコンクリート供試体状況について、スチールファイバーを用いない場合を写真-1に、スチールファイバーを混入した場合を写真-2に示す。

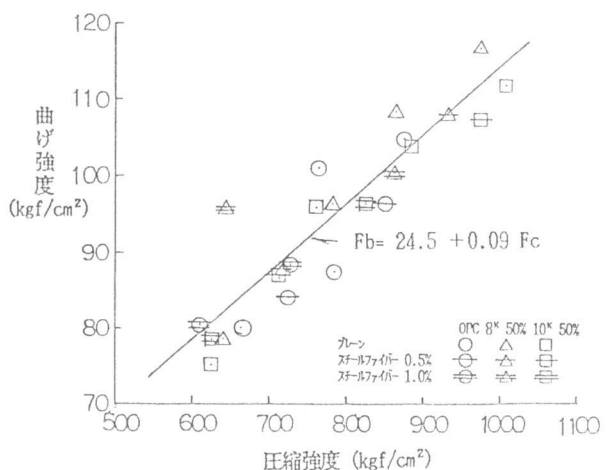


図-6 圧縮強度と曲げ強

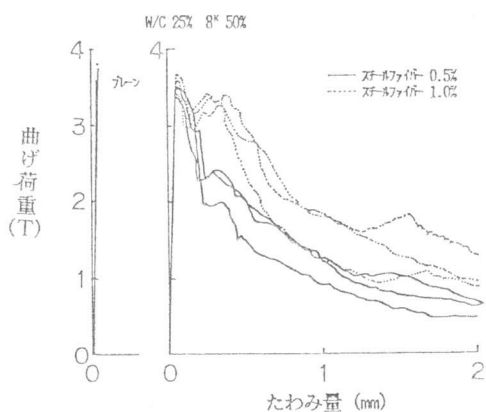


図-6 曲げ荷重-たわみ曲線



写真-1 スチール
ファイバー無混入



写真-2 スチール
ファイバー0.5%混入

(7) 乾燥収縮量

乾燥収縮量の測定結果を図-7に示す。水セメント比が小さくなると乾燥収縮量が小さくなる様である。単位水量に差がある事も一因かと考えられる。高粉末度スラグとOPCとの間に差が見られたのは W/C25%の調査であり30%では差が見られないようである。

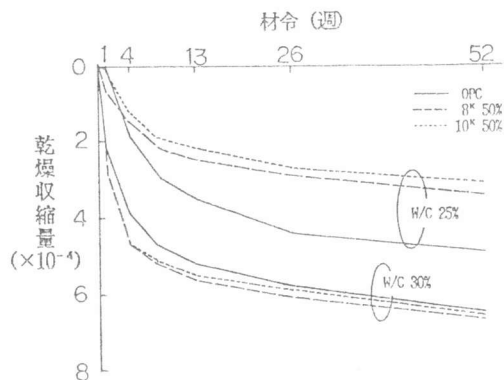


図-7 乾燥収縮量

4. まとめ

低水セメント比コンクリートへ高粉末度スラグを用いる事は有効な手段となる。高粉末度スラグを混和材として用いる場合、混和量によって強度の発現性、水和反応熱の低減等が異なる。高粉末度スラグのOPCへの置換量は30~50%の最も効果を発揮する様である。高粉末度スラグを混和したコンクリートはOPCを単独で用いた場合と同様な考え方で良いものと考えられる。

参考文献

- 1) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計施工指針(案) 土木学会 1988-1
- 2) 高炉スラグ微粉末のコンクリートの適用に関するシンポジウム論文集 土木学会 1987-3
- 3) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案) 土木学会 1983-3
- 4) 高強度コンクリート設計施工指針(案) 土木学会 1980-4
- 5) 高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針案・同解説 日本建築学会 1989-4