

論文

[1013] 高炉スラグ微粉末を用いた超高強度コンクリートの実用化に関する研究

竹内博幸^{*1}・山影久尚^{*2}・長尾之彦^{*3}・福島正一^{*4}

1. はじめに

近年、圧縮強度が 1000kgf/cm^2 を超えるコンクリートの研究が盛んに行われているが、強度の発現性、フレッシュコンクリートの取扱い易さの点から混和材にシリカフュームを用いる例が多い。しかし、この種のコンクリートは、耐凍結融解性などの耐久性に関して検討の余地を残している[1] ほか、材料の取扱い、経済性などが実用化に向けての阻害要因として指摘されている。

本研究は、これらの要因に関して優れているとされる高炉スラグ微粉末[2] を混和材として用いることにより、圧縮強度が 1000kgf/cm^2 を上回り、かつ、実用化可能な超高強度コンクリートを開発すべく、室内での練り混ぜから実大規模での打設にわたる一連の実験を行い、その結果について検討したものである。なお、今回の一連の実験においては、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの各性状に加え、実機（生コン工場バッチャープラント）による製造、施工方法および構造体コンクリートに関して検討を行ったので、その結果についても報告する。

2. 実験の概要

2. 1 実験の構成

(1) 予備実験

混和材の混入により、フレッシュコンクリートおよび強度発現などの性状がどのように改善されるかを定量的に把握することを目的として、混和材に高炉スラグを単独で用いて室内での練り混ぜ実験を行った。対象とした水結合材比（以下 W/B）は、別途行ったセメント単味での練り混ぜにおいて限界領域であった23および25% とした。なお、比較のため、混和材にシリカフュームを用いた場合についても練り混ぜを行った。

(2) 室内実験

混和材に高炉スラグを用いて室内での練り混ぜを行い、最適調合を把握するとともに、実用的な高強度の範囲を求めた。また、同時に、得られたコンクリートの各種物性を把握した。

(3) 実大施工実験

実機での製造、実車運搬および実大規模での打設を行い、実強度 $1000\sim 1500\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートの製造および施工を実証するとともに、構造体コンクリートとしての性状を把握した。

2. 2 使用材料および試験項目

各実験に使用した材料の種類および品質を表-1に示す。また、試験・測定項目は表-2に示す通りである。

* 1 五洋建設(株) 技術研究所 第一研究開発室（正会員）

* 2 同 上 第三研究開発室

* 3 新日鐵化学(株) 建材本部セメント部（正会員）

* 4 花王(株) 化学品事業本部建材事業部

表－１ 使用材料

使用材料	種 類	物性および成分	適用実験		
			予備	室内	実大
セメント	普通ポルトランド (N社製)	比重 3.15 比表面積 3,300cm ² /g	○	○	○
細骨材	葛生産砕砂	表乾比重 2.62 吸水率 2.22% 粗粒率 3.09	○		
	鹿島産陸砂	〃 2.61 〃 1.37% 〃 2.59	○		
	上河内産川砂	〃 2.61 〃 2.31% 〃 2.77		○	○
粗骨材	葛生産硬質砂岩系砕石	表乾比重 2.68 吸水率 0.68% 粗粒率 6.49	○	○	○
	段戸産石英片岩系砕石	〃 2.63 〃 0.50% 〃 6.60	○		○
混和材	高炉スラグ 8000 ⁷ レン (S社製)	比重 2.89 比表面積 8,380cm ² /g	○	○	
	〃 10000 ⁷ レン (〃)	〃 2.90 〃 10,160cm ² /g		○	○
	シリカフューム (E社製)	〃 2.20 〃 200,000cm ² /g	○		
混和剤	高性能A E減水剤 (K社製)WH-X	ナフタリン系 比重 1.15	○	○	
	〃 (〃) 3000	芳香族系共縮合物 〃 1.14		○	
	〃 (〃) WHZ	ポリカルボン酸系 〃 1.06		○	○

表－２ 試験・測定項目

実験対象	試験・測定項目	試験・測定方法	適用実験			備 考
			予備	室内	実大	
フレッシュ コンクリート	スランブ	JIS A 1101	○	○	○	
	スランブフロー	直径をスケール測定	○	○	○	スランブ 測定時の広がり
	空気量	JIS A 1128	○	○	○	
	コンクリート温度	アルコール温度計	○	○	○	
	単位容積重量	電子秤	○	○	○	
	流動時間 ¹⁾	ストップウォッチ計時	○	○	○	
	凝結	JIS A 6204 附属書 1	○	○	○	
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108	○	○	○	
	引張強度	JIS A 1113	○	○		
	曲げ強度	JIS A 1106	○	○		
	ヤング係数	コンプレッションメータ法			○	
	長さ変化率	JIS A 1129	○	○		
	比重 (管理用供試体)	ノギス、電子秤	○	○	○	
	中性化	促進中性化試験方法 ²⁾			○	
構造体 コンクリート	凍結融解抵抗性	JIS A 6204 附属書 2			○	
	圧縮強度 (コア供試体)	JIS A 1107			○	
	ヤング係数 (〃)	抵抗線歪みゲージ法			○	
	比重 (〃)	ノギス、電子秤			○	
	コンクリート内部温度	熱電対			○	一部温度追従養生

注) 1) スランブ測定時スランブコーン引き上げからスランブフローが完全に停止するまでの時間を測定する。

2) 建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」の付1.コンクリートの促進中性化試験方法(案)による。

3. 予備実験

3. 1 実施概要

予備実験における条件を表－３に示す。なお、練り上がりの目標値は、スランブ 25cm、空気量 3% とした。細骨材には、砕砂と陸砂の混合砂を使用した。

表－3 実験条件（予備実験）

混和材の種類	W/B (%)	単位水量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)	混和材置換率 (%)	粗骨材の種類		練り混ぜ時間 (秒)			練り混ぜ条件
					硬質砂岩系碎石	石英片岩系碎石	空練り	モルタル練り	コンクリート練り	
高炉スラグ [8000 ⁷ レー]	25	155	39	0	○		30	150	90	実験環境：温度 20℃ 相対湿度 60% 使用ミキサ：パン型強制練り ミキサ (容量 55l) 練り混ぜ量：30l
				30	○					
				50	○					
				70	○					
	23	165	38	50	○	○	30	300	90	
シリカ フューム	25	155	39	0	○		30	150	90	実験環境：温度 20℃ 相対湿度 60% 使用ミキサ：水平 2 軸式 強制練りミキサ (容量 100l) 練り混ぜ量：55l
				10	○					
				15	○					
				20	○					
	23	165	38	15	○	○	30	300	90	

3. 2 実験結果

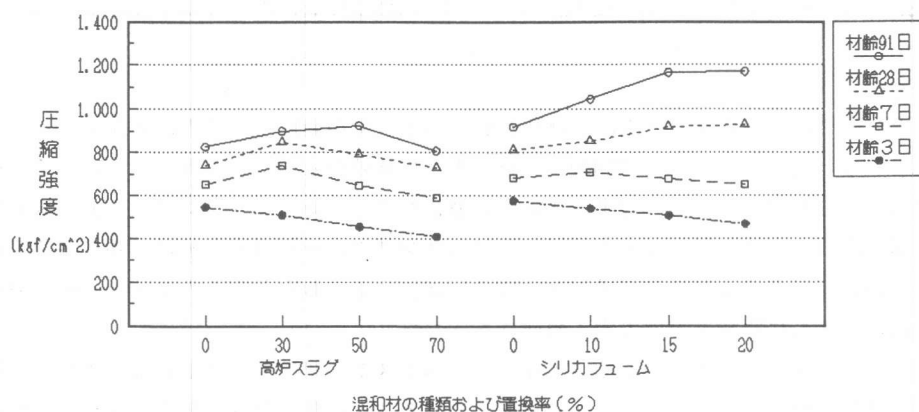
セメント単味での練り混ぜは、水結合材比が23～25% 以下の範囲になると、不充分となった。その結果をふまえて、高炉スラグ [8000⁷レー級] または比較用としてシリカフュームをそれぞれ単独で混入して練り混ぜを行った結果、決定した調合およびフレッシュコンクリート試験結果は表－4 に示す通りである。同一のスランプおよびスランプフローを得るために必要な混和剤の添加量は、高炉スラグによる置換率が増大するに従い減少する。しかしシリカフュームの場合は、逆に、置換率とともに添加量が増大する傾向にあった。

フレッシュコンクリートの状態についてみると、高炉スラグで置換したものは、置換率が増大するに従い粘性が増すが、ハンドリングは無混入の場合に比較してかなり軽く、スランプフローは56～66cmであった。一方、シリカフュームで置換したものは、粘性が小さく、ハンドリングも軽い、その割にスランプフローは36～51cmと小さかった。いずれについても、セメント単味での練り混ぜの限界であった W/B=23% においても充分練り混ぜることが可能であり、さらに水結合材比を小さくしても今回使用したミキサによって練り混ぜることが可能であると考えられた。

表－4 決定調合およびフレッシュコンクリート試験結果（予備実験）

設 定 条 件				計 画 調 合			フレッシュコンクリート試験結果				
W/B (%)	粗骨材の種類	混和材の種類	混和材置換率 (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	混和剤添加量 (結合材%)	スランプ' (cm)	スランプ' フロー (cm×cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	流動時間 (秒)
25	硬質砂岩系碎石	高炉スラグ [8000 ⁷ レー]	0	39	155	2.3	26.0	69 × 70	2.9	21.0	119
			30	〃	〃	1.9	24.5	57 × 55	3.2	21.0	53
			50	〃	〃	1.85	25.0	61 × 58	2.6	21.0	58
			70	〃	〃	1.8	26.0	65 × 67	2.7	21.0	58
23	〃	〃	50	38	165	2.1	26.0	65 × 65	2.3	23.0	98
25	硬質砂岩系碎石	シリカフューム	0	39	155	2.3	25.5	67 × 67	2.6	20.0	114
			10	〃	〃	2.8	24.0	46 × 47	3.0	18.5	51
			15	〃	〃	3.3	23.5	36 × 37	2.0	17.0	30
			20	〃	〃	3.6	23.0	36 × 36	2.0	17.5	17
23	〃	〃	15	38	165	3.8	25.0	50 × 51	2.1	20.0	53

高炉スラグまたは比較用としてシリカフェームをそれぞれ単独で混入した W/B=25% のコンクリートについて、材齢 3～91日の標準養生供試体の圧縮強度を示したものが図－1である。混和材無混入のコンクリートに対する強度増加については、高炉スラグの方は、置換率30～50%で材齢28日では51～108kgf/cm²、材齢91日では68～94kgf/cm²であった。一方、シリカフェームの方は、置換率10～20%でそれぞれ41～118kgf/cm²、114～237kgf/cm²であった。実験条件が異なるので一概に比較できないが、材齢91日ではシリカフェーム置換の方が大きな強度増加を示しているものの、材齢28日では両者の混和材混入による強度増加はほぼ同程度である。したがって混和材に高炉スラグを用いたコンクリートとして調合を最適化することにより、フレッシュコンクリートおよび強度発現性状についてシリカフェーム置換のものにはほぼ相当するコンクリートが得られるものと判断された。さらに、練り混ぜが可能な範囲で水結合材比を小さくすることによりさらに強度の増加を図ることができるものと考えられた。



図－1 混和材置換率と圧縮強度の関係（予備実験）

4. 室内実験

4. 1 実施概要

室内実験の実験条件を表－5に示す。細骨材には川砂を使用した。予備実験の結果から、練り上がりの目標値はスランプ25cm、空気量 3%とした。

表－5 実験条件（室内実験）

W/B (%)	単位水量 (kg/m³)	細骨材率 (%)	混和材の種類 [ブレン値]	置換率 (%)	練り混ぜ条件
23	165	38	高炉スラグ [8000]	40	実験環境：温度 20℃ 相対湿度60% 使用ミキサ：水平2軸式強制 練りミキサ （容量 100ℓ） 練り混ぜ量：55ℓ
W/B=21% から開始 (練り混ぜ 限界値の把握)	(150 から開始)	(36.5 から 開始)	高炉スラグ [8000, 10000]	30	
				40	
練り混ぜの 限界 W/B	練り混ぜ限界の W/B に対応する 単位水量	練り混ぜ限界の W/B に対応する 細骨材率		限界W/Bで 最大強度の 置換率	

4. 2 実験結果

室内実験における結果を表－6に示す。高炉スラグ、高性能 A E 減水剤を用いることにより、

W/B=17.5% まで練り混ぜが可能であったが、良好なワーカビリティが得られたのは W/B=18% までであり、この領域では強度も頭打ちであった。なお、W/B=23% を下回る領域では、比表面積10000cm²/g級の高炉スラグを使用し、W/B=19% を下回る領域では、ポリカルボン酸系の混和剤（WHZ）を使用して練り混ぜを行った。また、混和材の置換率については、フレッシュコンクリートの状態を目視により確認し 30%を限界と判断した。練り混ぜ時間については、コンクリート練りが可能であると判断できるまでモルタル状態を目視により確認しながら決定した。

表－6 フレッシュコンクリートおよび圧縮強度試験結果（室内実験）

計 画 調 合					フレッシュコンクリート試験結果				圧縮強度試験結果 ²⁾			
W/B (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	混和材置換率 (%)	混和剤添加率 (結合材%)	スラグ・スラグ・フロー (cm)	空気量 (%)	流動時間 (秒)	練り混ぜ時間 (秒) 空・モル・コンリ	σ3	σ7	σ28	σ91
23	40	165	40 [8000B]	2.7 [WH-X]	26.4 [61×62]	2.2	106	30-420-240	494	757	781	1006
21	38	175	40 [10000B]	3.3 [3000]	27.8 [70×71]	1.8	180	30-660-120	585	790	909	1046
20	36	165	30 [〃]	3.7 [3000]	27.6 [58×60]	1.8	247	30-900-120	616	863	994	1100
19	〃	160	30 [〃]	4.0 [3000]	27.3 [64×67]	2.3	272	30-1200-180	624	833	968	1067
18	35	〃	〃 [〃]	4.0 [WHZ]	26.9 [65×65]	2.3	149	30-600-90	732	1007	1116	1220
17.5	〃	165	〃 [〃]	6.5 [WHZ]	23.3 [40×39]	3.5	189	30-1080-150	656	953	1026	1162

注) 1) 空練りーモルタル練りーコンクリート練り 2) 養生条件：標準養生

5. 実大施工実験

5. 1 実施概要

実大施工実験の実験条件を表－7に示す。室内実験結果より W/B=19および18% を対象として実機での試し練りおよび実車（アジテータトラック）運搬実験を行った。いずれも良好なワーカビリティを得られたことから、実大打設実験は W/B=18% を対象として行った。

表－7 実施概要（実大施工実験）

設定条件		計 画 調 合				練り混ぜ時間 (秒)			実験項目			備 考
スラグ・スラグ・フロー (cm)	混和材 [ブレン値]	W/B (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)	混和材置換率 (%)	空練り	モルタル練り	コンクリート練り	実機試し練り	実車運搬	実大打設	
25	高炉スラグ	19	37	160	30	30	300	150	○	○		粗骨材：2種類
65	[10000]	18	36	160	30	30	420	150	○	○	○	
打 設 対 象						打込み方法			締固め方法			
形状：φ 850×φ 850×H2100 3体 配筋：縦筋 24-D41 帯筋 D16@100 型枠：在来工法（透明型枠組込み）						場内運搬：クレーン＋バケット 打込み：①層分割（4層） ②連続打ち			機器：棒形振動機 φ60×5 加振時間：①各層 30秒 ②連続掛け			

5. 2 実験結果

実験結果を表－8および9に示す。実機での練り混ぜでは、室内実験に比較して、混和剤添加量が減少し、練り混ぜ時間が短縮されたほか、材齢28日の標準養生供試体の圧縮強度が 1130 ～ 1314kgf/cm²（粗骨材：硬質砂岩）を示し、室内実験結果のそれを大きく上回っていることから、その練り混ぜ能力の大きさによる効果が W/B=20% を下回る領域で顕著に表れたものと考えられた。また、設定した打込みおよび締固め方法により試験体への打設を行ったところ、表面の仕上がり状態は良好で、試験体から採取したコア供試体の目視観察の結果、充填性も良好であった。

3種類の管理用供試体（現場水中養生、現場封かん養生、温度履歴追従養生）の圧縮強度は、一部を除き、コア供試体の圧縮強度を大きく上回っているが、今回の実験の範囲では明確な原因は明らかでない。なお、試験体から採取したコア供試体の圧縮強度はいずれも1000kgf/cm²を上回り、鉛直および水平方向とも強度分布に一定の傾向はみられなかった。

表－8 フレッシュコンクリートおよび圧縮強度試験結果（実大施工実験）

実験項目	計 画 調 合				フレッシュコンクリート試験結果					圧 縮 強 度 試 験 結 果				備 考
	W/B (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m³)	混和剤添加量 (結合材%)	スラグ・スラグフロー (cm)	空気量 (%)	流動時間 (秒)	練り混ぜ時間 (秒)	採取場所養生	試 験 材 齢				
										σ 3	σ 7	σ 28	σ 91	
実機試し練り	19	36	160	2.3	26.8 [66×65]	0.9	88	30-270-120	工標準 ¹⁾	747	985	1139	1256	硬質砂岩 砕石使用
	18	35	◇	3.6	24.6 [54×55]	0.9	125	30-480-150	◇	788	1031	1168	1208	
実車運搬	19	37	160	2.0	27.6 [63×64]	1.9	93	30-300-150	現標準 ²⁾	762	1032	1130	1261	◇
	18	36	◇	3.5	26.9 [61×60]	0.9	122	30-570-210	◇	790	1017	1157	1263	◇
実大打設	18	36	160	3.5	27.4 [77×74]	1.8	97	30-510-210	現標準	782	906	1314	1413	◇
				3.5	27.0 [60×61]	1.5	106	30-510-240	◇	766	1251	1469	1573	石英片岩 砕石使用

注] 1) 生コン工場出荷時採取標準養生 2) 現場荷卸し時採取標準養生

表－9 管理用供試体圧縮強度とコア供試体圧縮強度の比較（実大施工実験）

W/B (%)	対象か所 および 打込み方法	材 齢 28 日								材 齢 91 日								備 考
		管理用供試体				コア供試体				管理用供試体				コア供試体				
		標準養生	現場 ¹⁾ 水中	現場 ²⁾ 封かん	温度 ³⁾ 追従	鉛直位置	中央	隅角	圧縮強度	標準養生	現場 ¹⁾ 水中	現場 ²⁾ 封かん	温度 ³⁾ 追従	鉛直位置	隅角	圧縮強度		
18	柱	層分割各層				上	1107	1136						上	1089	硬質砂岩 砕石使用		
		締固め				中	1083	1131					中	1076				
		連続打	1314	1201	1254	下	1127	1082		1413	1169	1306	1279	中	1060	◇		
		連続				上	1065	1059					上	1100				
		締固め				中	1089	1151					中	—				
						下	1074	1064					下	1113				
		層分割各層				上	1318	1215						上	1247	石英片岩 砕石使用		
		締固め	1469	1319	1319	中	1420	1351		1573	1458	1389	—	中	1387			
						下	1362	1313					下	1186				

注] 1) 現場水中；現場水中養生 2) 現場封かん；現場封かん養生
3) 温度追従；温度履歴追従養生。水温が構造体コンクリートの内部温度履歴に追従した水中で行うコンクリート供試体の養生。

6. まとめ

- (1) 混和材に比表面積10000cm²/g級の高炉スラグを、また混和剤にポリカルボン酸系のものを用いることにより、ワーカビリティの良好な W/B=18% の超高強度コンクリートを得ることができた。
- (2) 上記のコンクリートを実機で製造したところ、室内での練り混ぜに比較して、混和剤添加量の減少、練り混ぜ時間の短縮および圧縮強度の増大など、実機の練り混ぜ能力の大きさによる効果が顕著であった。
- (3) 実機で製造した上記コンクリートを設定した施工方法により実大試験体に打設したところ試験体から採取したコア供試体の圧縮強度は、すべて 1000kgf/cm²を上回り、構造体の表面および内部にも有害な欠陥は見受けられず、充填性は良好であった。

参考文献

- 1) 渡辺嗣道ほか：シリカフェーム・高炉スラグ微粉末を使用した高強度コンクリートの諸特性
コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1 pp.99～104、1990
- 2) 加藤元久ほか：高強度コンクリート用混和剤に関する研究（Ⅱ）（その3．硬化コンクリートの乾燥収縮と凍結融解抵抗性）、日本建築学会大会学術講演梗概集、A. pp.753～754、1991