報告 高炉スラグ高含有セメントを用いた 100N/mm² 級高強度コンクリー トの実大柱施工実験

辻 大二郎*1・村上 裕貴*2・齊藤 和秀*3・坂田 昇*4

要旨:シリカフューム混合量を3%まで低減させた高炉スラグ高含有セメントを用いて,100N/mm²級の高強 度コンクリートの実大 RC 柱部材の施工実験を実施した。実機製造したコンクリートは良好なフレッシュ性 状と流動保持性を示し,実大 RC 柱部材へのホッパーによる打設において,鉄筋間,かぶりコンクリートの 細部まで密実に自己充填されること 柱部材のコア供試体の構造体強度は113N/mm²を発現することなどが確 認された。高炉スラグ高含有セメントを用いた高強度コンクリートにおけるシリカフューム使用量を大きく 削減できる見通しを得た。

キーワード: CO2 削減,高炉スラグ高含有セメント,高強度コンクリート,実大柱,施工性,構造体強度

1. はじめに

近年,地球環境保護の観点からエネルギーと二酸化炭 素排出の発生量を抑制するための有効な手段として高炉 セメントの利用拡大が期待されている。筆者らの研究グ ループは高炉スラグ微粉末の含有量が 40~45 重量%の 高炉セメントB種よりも更にクリンカーの使用量を減少 させ,より高い CO₂削減効果を得ることを目的として高 炉スラグ微粉末を60%以上と多く含有するセメントを開 発してきた¹⁾。

一方,このような高炉スラグ高含有セメントを用いた コンクリートの更なる高強度化を目指し,100N/mm²級 の超高強度コンクリートを実現するためには,シリカフ ュームなどの超微粒子の混合が必要となる。これまで筆 者らの研究グループは低水セメント比での練混ぜと流動 性を向上させるために,シリカフュームを10%混合させ た高強度用の高炉スラグ高含有セメントを開発し,実機 実験による模擬部材による施工性と強度の検討を実施し てきた²⁾。その結果,従来セメントよりも CO₂排出量を 1/3 程度に低減できる100N/mm²級超高強度コンクリート の実現が可能であることを示した。

しかし,高強度コンクリートの環境負荷低減とコスト 競争力を両立させて推し進めていくためには,コスト高 の要因となるシリカフュームの使用量を可能な限り低減 することが望ましい。

そこで,本報告は,シリカフューム混合量を10%から 3%にまで低減させた高強度用高炉スラグ高含有セメント(以下,BCHと表記)を新たに開発し,このセメント を用いた100N/mm²級高強度コンクリートの実製造実験 および実大 RC 柱の施工実験について報告する。フレッ シュコンクリートの施工性,部材への充填性およびコア 供試体の構造体強度を検討し,シリカフューム使用量を 低減させた場合でも,100N/mm²級の高強度コンクリー トが製造,施工が可能であり,構造体強度が確保できる ことを示すことを目指す。

2. 実験概要

千葉県内のレディーミクストコンクリート工場で,設 計基準強度 100N/mm²を目標として,高強度用高炉スラ グ高含有セメント(BCH)を使用した高強度コンクリー トを製造し,アジテータ車による 30 分程度の運搬後,ホ ッパー打設による実大 RC 柱の施工実験を実施し,施工 性,部材への充填性および構造体強度の把握を行った。 2.1 使用材料

コンクリートの使用材料を表 - 1 に示す。

(1) セメント

使用したセメントの物理的性質と化学成分を表 - 2 に

表 - 1 使用材料

種類	記号	種類
水	W	地下水
セメント	всн	高強度用高炉スラグ高含有セメント(シリカフューム3%) (OPC:高炉スラグ微粉末:シリカフューム=30:67:3) セメントの密度:2.92g/cm ³
細骨材	S	君津産山砂 表乾密度 ∶2.60g/cm ³ ,吸水率∶2.09%,粗粒率∶2.45
粗骨材	G	大月産安山岩砕石2005 表乾密度:2.61g/cm ³ ,吸水率∶2.43%,粗粒率∶6.59
有機繊維	PP	ポリプロピレン繊維 繊維長10mm
混和剤	SP	BCH用 高性能減水剤(マレイン酸系)
	R	遅延剤(有機系低分子化合物系)

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 研究主任 工修 (正会員)*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 研究員 工修 (正会員)

^{*3} 竹本油脂株式会社 第三事業部 営業統括部 営業技術グループ シニアマネージャー (正会員)

示す。高強度用高炉スラグ高含有セメント(BCH)は, 普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末およびシ リカフュームを 30:67:3の割合で混合した開発品であ る。高炉スラグ微粉末の比表面積は約 5000g/cm²であり, 高炉スラグ微粉末 4000 もしくは 6000 の JIS 規格に適合 している。但し,スラグ特有の粒子形状に起因する摩擦 を低減して流動性を改善するためにスラグ微粉末の粒度 分布を調整している。このため,シリカフューム混合量 を 3%まで低減させても,低水セメント比領域の練混ぜ を可能としている。

(2) 化学混和剂

化学混和剤はマレイン酸を主成分とし,保持成分を 10%含有する高性能減水剤を使用した。高炉スラグ高含 有セメントの低水セメント領域の練混ぜおよび流動保持 性を向上させた開発品である³⁾。また遅延剤を使用した。

(3) 骨材

細骨材はコンクリートの粘性を下げる目的で,粒径の 良好な山砂を使用した。粗骨材は安山岩砕石を使用した。

(4) 有機繊維

爆裂防止繊維としてポリプロピレン繊維を 1kg/m³の 使用量で外割で混合させた。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表 - 3 に示す。目標強度 100N/mm²に対し 調合強度を標準養生 28 日で 115N/mm² に定め,水セメント比を 20%に設定した。単位水量は 170kg/m³ とし,目標スランプフローは 65cm,空気量は 2.0%とした。

2.3 コンクリートの練混ぜ,運搬

コンクリートは 11 月上旬に, レディーミクストコンク リート工場にて,容量 6m³の強制二軸バッチャープラン トを用いて練り混ぜた。化学混和剤は高性能減水剤をセ メント量の0.725%,遅延剤をセメント量の0.05%の使用 量で投入した。モルタルを210秒練混ぜたのちに粗骨材 を投入し,更に120秒練混ぜて排出した。1 バッチ1.75m³

表-2 セメントの化学成分

化 学 成 分 (%)							
ig-loss SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3 CaO MgO SO_3						SO3	
0.60	30.63	10.97	1.15	47.59	4.68	2.41	

表 -	3	コンクリー	トの調合
-----	---	-------	------

目標			コンク	リート0)調合			
スランプ	空気量	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
(cm)	(%)			W	С	S	G	PP (外割)
65+5cm -10cm	2+0.5 -1.0	20	37.5	170	850	506	846	1

もしくは 2.0m³で練混ぜて 2 バッチを合わせて出荷し,1 台目は 3.5m³,2 台目は 4.0m³ とした。有機繊維はアジテ ータ車内で投入して撹拌した。出荷から実大 RC 柱試験 体の設置した場所までおよそ 30 分間運搬した。 2.4 試験体

実大 RC 柱試験体の詳細を図 - 1 に , 無筋の 1m マス模 擬部材の詳細を図 - 2 に, 簡易断熱養生槽の詳細を図 -3に示す。実大 RC 柱試験体の寸法は断面 1000×1000mm, 高さ 3000mm とした。配筋は超高層 RC 造の1 階柱を想 定し,主筋は 16-D41(主筋比:2.14%),帯筋は 5,5-D13@100(帯筋比:0.63%)とした。主筋の引張強度 は,本実験では軸力はかけず,構造体コンクリート強度 (コア強度)および鉄筋の収縮歪の測定を目的としたた め,高強度鉄筋は使用せず,SD295鉄筋を使用した。か ぶり厚さは 67mm とした。基礎コンクリートは呼び強度 24N/mm²の普通コンクリートであらかじめ打設を行った。 コア採取位置を図中に示す。高さ 3m の鉛直コアから高 さ 200mm の圧縮試験用供試体を合計 9 体採取した。柱 試験体の中央部の鉛直ひずみを測定するために,コンク リートは中心部(C1)に設置し,鉄筋は端部(平面部 R1 および外端部 R2 の 2 か所)に設置した。



2.5 施工手順と打設方法

コンクリートの打設は 0.8m³ 容量のホッパーを用いて 約 0.5m³ ずつコンクリートを投入して行った。筒先にサ ニーホースを設置して自由落下を防止し,鉛直方向に 500mm ずつ 6 層に分けて打ち込んだ。それぞれの層毎に

50mm(最大 200Hz)の棒状振動機で締固め,巻込み空 気の除去を行った。1 台目のアジテータ車で RC 柱の高 さ 1000mm まで打設し,2 台目で残りの高さ 1000~ 3000mm および 1m マス模擬体の打設を行った。

2.6 試験項目

試験項目を表 - 4 に示す。フレッシュコンクリート試 験は,粘性の評価のために 50cm フロータイムの測定に 加えて,図 - 4 に示すL型フロー試験器によりLフロー 初速度を計測した。硬化コンクリートの圧縮強度試験は, 標準養生,簡易断熱養生および1mマス模擬体と実大RC 柱のコア供試体を材齢28日で実施した。温度測定は,簡 易断熱養生,1mマス模擬体,実大RC柱試験体の内部温 度を測定した。自己収縮ひずみは10×10×40cm試験体 による20 環境下での測定のほか,実大柱内のコンクリ ートおよび鉄筋のひずみを測定した。沈降量はJASS5法 および新都市ハウジング法の2つの方法で測定した。

3. 実験結果(フレッシュコンクリート)

3.1 表面水の影響

工場出荷時の単位水量の測定値の結果を表 - 5 に示す。 単位水量試験は高周波加熱乾燥法(電子レンジ法)によ リ測定した。当日の細骨材の表面水率は6.0%程度であり, 事前に室内実験にて実施した表乾状態の細骨材を使用し た同一調合の単位水量測定値と比較し,差が小さいこと を確認した。これらから,練り混ぜられたコンクリート が,計画したコンクリート調合の単位水量および水セメ ント比にて製造できていることを確認した。 3.2 フレッシュコンクリートの物性

(1) フレッシュ試験結果

フレッシュ試験結果を表 - 6 に示す。またスランプフ ローの経時変化を図 - 5 に,L フロー初速度の経時変化 を図 - 6 に示す。1台目,2台目ともにスランプフロー は出荷から100~150分の経過時においても十分な流動 性を有しており,目標管理値内であった。またLフロー 初速度 V1 は,施工性の目安としている5cm/s以上を十 分に上回る値であった。

表 -	5	単位水量測定結果
-----	---	----------

百日	安市	実機(出荷時)		
現日	至内	1台目	2台目	
細骨材の表面水率	表乾状態	6.0%		
単位水量測定値 (kg/m ³)	177.0	177.7	174.3	
計画調合の単位水量 (W=170)との差(kg/m ³)	+ 7.0	+ 7.7	+ 4.3	







表 - 4 試験項目

<u>ノレッシュコノクリート</u>	い 験 しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん し
試験項目	詳細
スランプフロー	JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
50 cm フロー 通過時間 (秒)	スランプフロー試験にて50cmを通過する時間を計測
Lフロー初速度(V1)	図 - 4に示すL型フロー試験器によりa点+30mm とa点+80mmの間を通過する速度を計測

硬化コンクリート試験

	試験項目	詳細
	標準養生	JIS A 1108 材齢28日 (N=3)
正惊没座	簡易断熱養生	JIS A 1108 材齢28日 (N=3)
<u></u> 广	コア供試体(1mマス模擬体)	JISA 1108 材齢28日 (中心部:N=4,端部:N=4)
	コア供試体(実大RC柱)	JISA 1108 材齢28日 (鉛直方向:N=9体)
	簡易断熱養生	JASS5T-606∶2005に準拠 簡易断熱養生箱内の熱電対による測定
温度	実大RC柱	中心部および外端部を計測
	1mマス模 擬 体	中心部および外端部を計測
ひずみ	自己収縮	日本コンクリート工学協会,超流動コンクリート研究 委員会報告書()(仮称)高流動コンクリートの自己 収縮試験法、10×10×40cm (N=2)
0.9 07	実大RC柱	コンクリート内部:埋込み型ひずみゲージを使用 鉄筋:歪ゲージを使用
沈降量	JASS5法	レーザー変位計で計測,20 で14日間測定 15×30cm,N=2体
	新都市ハウジング法	レーザー変位計で計測,20 で14日間測定 15×100cm,N=2体

表-6 フレッシュ試験結果

	経過時間	スランプ フロー (cm)	50cm フロー 通過時間 (s)	Lフロー 初速度 V1 (cm/s)	Air (%)	CT ()
	0分(出荷)	61.5	6.8	10.0	1.4	22
1台目	40分(受入)	62.5	9.3	-	1.1	24
	100分	58.0	6.6	9.6	1.7	24
2台目	0分(出荷)	65.0	5.6	11.1	1.2	22
	40分(受入)	69.5	4.4	10.0	1.2	22
	150分	66.5	4.4	7.1	1.1	22

(2) 沈降量

打設後14日までの沈降量の測定結果を図-7に示す。 2体の沈降量はほぼ同値を示しており,平均値はJASS5 法で約0.3mm,新都市ハウジング法で約0.9mmであり, 規定値の2mm以下を満足していた。大幅な沈降が生じ ないことが確認された。

3.3 打設時の状況

スランプフロー試験の状況を写真 - 1 に,ホッパーへ の積込み状況を写真 - 2 に,ホッパーによる打設状況を 写真 - 3 および写真 - 4 に示す。コンクリートは良好な 流動性と粘性を有しており,ホッパーとサニーホースを 用いた打設でも閉塞することなく,かぶりコンクリート 部の隅々まで自己充填して密実に打込まれた。材料分離 等の不具合は確認されなかった。



図 - 7 沈降量測定結果



写真 - 1 スランプフロー試験



写真 - 2 ホッパー積み込み状況



写真-3 ホッパーによる打設状況(全景)



写真-4 ホッパーによる打設状況(上部)

4. 実験結果(硬化コンクリート)

4.1 出来形

実大 RC 柱は打設 10 日後に型枠を取り外した。試験体 の外観を写真 - 5 に示す。かぶりコンクリートは密実に 充填されており,表層部に豆板,気泡,ひび割れなどの 不具合は生じていなかった。また,柱上部の打設面に沈 降ひび割れなどの不具合は生じていなかった。 4.2 硬化コンクリートの物性

(1) 圧縮強度

材齢 28 日の圧縮強度試験結果を表 - 6 に示す。また実 大 RC 柱のコア強度の鉛直分布を図 - 8 に示す。標準養 生強度は 116N/mm² に達し,調合強度の 115N/mm² を満 足した。実大 RC 柱のコア平均値は 113N/mm²であり, 目標強度の 100N/mm²を上回る構造体強度を発現した。 図 - 8 より鉛直方向の強度のバラつきは小さく,標準偏 差 =3.4N/mm²,変動係数 V=3.0%であった。28 日の構 造体強度補正値(以下,S値)は₂₈S₂₈ = 3.0N/mm²であり プラスの S 値を示した。1m マス模擬体の平均強度は 112N/mm² と実大柱コア平均強度とほぼ同等の値を示し た。一方,簡易断熱養生強度は 120N/mm² であり,コア 供試体の構造体強度よりも 7~8N/mm² 程度大きい傾向 を示すことから,簡易断熱養生によって本コンクリート の構造体補正強度(S 値)を定める場合には,この差を 考慮してS 値を適切に設定する必要がある。

(2) 内部温度

内部温度の測定結果を図 - 9 に示す。実大 RC 柱の中 心部温度は最高 65 付近まで上昇しており,打設からの 温度上昇量はおよそ 40 であった。外端部の鉄筋の最高 到達温度は 50 程度であり,中心部より 15 近く小さい ことが確認された。

(3) ひずみ

コンクリートおよび鉄筋のひずみ測定結果を図 - 10 に示す。実大 RC 柱内部のコンクリートひずみ(C1:中央 部)は温度膨張により 200µの膨張を示し,その後収縮 が進み,最終的には鉄筋(R1 および R2)のひずみと一



図 - 9 内部温度測定結果



写真-5 型枠取外し後の試験体外観

表-6 圧縮強度試験結果(材齢28日)

養生方法		圧縮強度 材齢28日 (N / mm ²)		構造体 補正強度 ₂₈ S ₂₈ (N/mm ²)
		1台目	2台目	2台目
標準養生		116	116	-
簡易	断熱養生	119	120	- 4.0
1 m 7 7	中心(N=4)	-	115	-
模擬体	端部(N=4)	-	108	-
	コア平均	-	112	4.5
実大RC柱	コア平均(N=9)	-	113	3.0



図 - 8 実大 RC 柱コア強度の鉛直分布





致して 400 µ 程度の収縮ひずみで一定となった。20 の

10×10×40cm 試験体の自己収縮ひずみは700µに達して いたが,実際の実大 RC 柱の収縮ひずみは熱膨張と鉄筋 拘束の効果により300µ程度小さいことが確認された。 4.3 既往値との比較検討

圧縮強度試験結果について,本実験結果とこれまでの 既往の文献値を比較について図 - 11 に示す。既往値²⁾は シリカフュームを10%混合させた高炉スラグ高含有セメ ント(以下,HS-SF)を使用した高強度コンクリートで あり,骨材は細骨材,粗骨材とも本報告と同種を使用し ている。本実験で用いた BCH(シリカフューム3%)は HS-SF(シリカフューム10%)よりも圧縮強度がやや大 きい傾向を示した。この理由として,BCHはシリカフュ ーム混合量が1/3と少ないために,所定のフレッシュ性 状を得るための単位水量がよりも増加することが一因と 考えられる。単位セメント量が110kg/m³(850kg/m³ -740kg/m³)増加し,マトリックスとなるペースト量が増 加するためである。

また,同じ水セメント比でのコンクリート 1m³あたり のシリカフューム使用量は,HS-SF の場合で 74kg/m³ (740kg/m³×10%),BCH の場合で 25.5kg/m³(850kg/m³ ×3%)であり,その差の 48.5kg/m³のシリカフューム量 を同一強度レベルで低減できる試算を得た。また,フレ ッシュ性状は問題なく,施工性は良好であり,圧縮強度 は標準養生,構造体強度とも同等以上を発現することが 確認された。

5. まとめ

シリカフューム混合量を 3%まで低減させた高強度用 の高炉スラグ高含有セメント(BCH)を用いた 100N/mm² 級高強度コンクリートの実機による実大柱施工実験を実 施し,以下の知見を得た。

- シリカフューム混合量を 3%に低減した場合でも、 W/C=20%の低水セメント比の高強度コンクリートが 実機製造可能である。
- (2) コンクリートの流動性は経時 100 分を超えても保持 され,良好なフレッシュ性状を示した。
- (3) コンクリートは高流動性と自己充填性を有し,鉄筋 間を良好に通過し,材料分離することなく,かぶり コンクリート部の隅々まで充填された。
- (4) 実大 RC 柱の構造体コンクリート強度の平均値は
 113N/mm²であり 100N/mm²超の圧縮強度を発現した。
- (5) 簡易断熱養生強度はコア供試体の構造体強度よりも 大きい傾向がある。
- (6) 実大 RC 柱は打設後,温度膨張に伴い200μ ほど膨張 するが,徐々に収縮に向かい,最終的に-400μのひず みとなった。



図 - 11 既往値²⁾との比較

(7) シリカフュームを 10%混合させた高炉スラグ高含有 セメントを用いた場合よりも,コンクリート 1m³当 りのシリカフューム使用量を48.5kg/m³低減できる試 算を得た。

謝辞:本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の助成による「省エネルギー革新技術開発事業/ 実用化開発/エネルギー・CO2 ミニマム(ECM)セメン ト・コンクリートシステムの研究開発」の一環として, 東京工業大学坂井悦郎教授をはじめ,(株)竹中工務店, 鹿島建設(株),(株)デイ・シイ,日鉄住金高炉セメント (株),太平洋セメント(株),日鉄住金セメント(株)およ び竹本油脂による共同研究として実施した。本研究に関 わられた関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。ま た,実験に際しご協力を賜った船橋レミコン(株)の関係 各位に謝意を表します。

参考文献

- 米澤敏男,坂井悦郎,鯉渕清,木之下光男,釜野博
 臣:エネルギー・CO2・ミニマム(ECM)セメント・ コンクリートシステム,コンクリート工学,Vol.48, No.9, pp.69-73,2010
- 2) 辻大二郎,村上裕貴,井上和政,米澤敏男,黒田萌, 玉木伸二,依田和久,閑田徹志:高炉スラグ高含有 セメントを用いた 100N/mm² 級超高強度コンクリー トの基礎物性 (その1からその3),日本建築学 会学術講演梗概集(北海道), pp.169-174,2013.8
- 3) 辻大二郎,小島正朗,黒田萌,坂田昇:高炉スラグ 高含有セメントを用いた高強度コンクリートの基 礎物性,コンクリート工学年次論文集,Vol.35,No.1, 2013, pp.145-150.