

複合系材料を用いた高強度コンクリートの基本性状に関する研究

宇都宮大学大学院工学研究科 学生会員 ○小倉恵里香
 宇都宮大学大学院工学研究科 正会員 藤原 浩己
 宇都宮大学大学院工学研究科 正会員 丸岡 正知
 宇都宮大学大学院工学研究科 学生会員 山梨 泰斗

1. はじめに

今日、世界では温室効果ガスの一つである CO₂ の排出量増加が問題となっている。日本のセメント産業においては、国内で排出される CO₂ 全体の約 4% を占めている。実際に、セメント製造時に排出される CO₂ 量はセメント 1t 製造するに当たり約 0.8t にも上る¹⁾。そのため、多くのセメントを要する高強度コンクリートの場合、多量の CO₂ を排出することになる。加えて、多くのセメントを使用することで、水和発熱による高い温度上昇に伴う温度ひび割れや、自己収縮によるひび割れを生じる恐れもある。

また、安定した電気を供給するための石油代替エネルギーとして石炭が利用されているが、これにより多量の石炭灰が発生してしまうのが現状である。現在、副産物である石炭灰（フライアッシュ）をコンクリート混和材として用いているが、利用されるフライアッシュは高品質なものが多く、低品質のものはあまり利用されていない。したがって、低品質フライアッシュを多量に利用できるコンクリートを開発できれば、より有用性が高いと考えられる。

加えて、製鉄所の副産物である高炉スラグ微粉末は、粉末度の高いものほど粉砕に必要なエネルギーが大きく、コストや環境負荷が大きい。したがって、環境負荷を考慮した場合、より低粉末度のものを利用すべきと考えられる。

本研究は、CO₂ の排出起源であるセメントを使用せずに、その代替として、産業副産物であるフライアッシュ及び高炉スラグ微粉末を主材料とした、セメント無使用の高強度コンクリート（以下、CFC と略す）を開発することを目的としている。そこで本実験では、品質の異なるフライアッシュ及び粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を用いて、各種性状試験及び耐久性試験を行い、実用化に関する検討を行った。

2. CFC の基本性状に関する検討実験

2. 1 使用材料

本実験では、まず基本的性状を把握するために、各種性状試験を行った。使用材料を表 1 に示す。CFC の主材料として、ポゾラン物質であるフライアッシュ及びシリカフューム、また、潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末を使用した。ここで、フライアッシュは JIS 種及び種の 2 種類を、高炉スラグ微粉末はブレン比表面積が 4000、8000cm²/g の 2 種類を用いた。表 2 にフライアッシュの諸特性を示す。また、自己収縮抑制等の目的で、無水セッコウを用いた。加えて、セメントを無使用とした場合、Ca(OH)₂ が生成されず、ポゾラン反応が抑制されると考えられる。そのため、本研究ではブレン比表面積が 45m²/g であり、高い反応性を有する多孔性高比表面積

表 1 使用材料

材料	記号	材料名	密度
結合材	SF	シリカフューム	2.24
	FA	フライアッシュ 種	2.23
	FA	フライアッシュ 種	2.20
	BS4	高炉スラグ微粉末(ブレン比表面積4000cm ² /g)	2.90
	BS8	高炉スラグ微粉末(ブレン比表面積8000cm ² /g)	2.90
	AG	無水セッコウ	2.90
	TK	多孔性高比表面積消石灰	2.40
	HSPC	高強度用プレミックスセメント	2.99
水	OPC	普通ポルトランドセメント	3.15
	W	水道水	1.00
	S	大月市初狩町産砕砂	2.63
	G	大月市初狩町産砕石	2.63
減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	1.08
消泡剤	DF	ポリアルキレングリコール誘導体	1.00

表 2 各フライアッシュの諸特性

試験項目	JIS 種		JIS 種		
	管理値	FA	管理値	FA	
二酸化ケイ素	45.0以下	55.3	45.0以下	52.2	
湿分 (%)	1.0以下	0.1	1.0以下	0.01	
強熱減量 (%)	5.0以下	1.2	5.0以下	2.1	
粉末度	45 μmふるい残分	40以下	4	—	
	比表面積 (cm ² /g)	2500以上	4410	1500以上	1920
	フロー値比	95以上	110	75以上	104
活性度 指数	材齢28日 (%)	80以上	90	60以上	78
	材齢91日 (%)	90以上	104	70以上	88
メチレンブルー吸着量	—	0.55	—	—	

キーワード 高強度コンクリート、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、水酸化カルシウム、圧縮強度

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科土木材料研究室 TEL 028-689-6211

消石灰（以下、消石灰と略す）を混和し、ポゾラン反応の促進を図った。

また、実験の一部で比較用として、高強度用プレミックスセメント（以下、HSPC と略す）及び普通ポルトランドセメント（以下、OPC と略す）を用いた。

2.2 配合条件及び粉体構成

本実験の配合条件を表3に、粉体構成を表4にそれぞれ示す。配合条件は、既往の研究²⁾を基に、水粉体比（重量比）を20%、砂粉体比（重量比）を32%、粗骨材絶対容積割合 X_v を37.5%とした。また、配合条件であるスランプフロー値と空気量を得られるように、高性能減水剤と消泡剤の添加量を調整した。

ここで、配合No.1及びNo.2ではブレン比表面積 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、No.3及びNo.4では $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いた。また、配合No.1及びNo.3ではJIS 種規格品、No.2及びNo.4ではJIS 種規格品のフライアッシュを用いた。

2.3 試験項目

2.3.1 フレッシュ性状

(1) 練り混ぜ時間

粉体と細骨材を1分間空練りした後、水と高性能減水剤を加えて練り混ぜてからモルタルが形成されるまでの時間を測定し、練り混ぜ時間とした。

(2) スランプフロー試験

JIS A1150「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準拠した。

(3) 空気量試験

JIS A1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 - 空気室圧力方法」に準拠した。

(4) 凝結試験

JIS A1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠した。

2.3.2 硬化性状

(1) 圧縮強度試験

JIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、気中養生材齢1日、20 水中養生材齢3日・7日・28日、簡易断熱養生材齢28日に試験を行なった。

(2) 自己収縮試験

JCI 自己収縮委員会「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法（案）」に準拠した。

(3) 乾燥収縮試験

JIS A1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法 - ダイアルゲージ方法」に準拠した。

(4) 簡易断熱温度上昇試験

$\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ の円柱型枠を用いて、中心部に熱電対が埋め込まれた供試体を成形した。成形後、ポリエステル袋を用いて封緘し、20 に制御された恒温室内に設置した、厚さ20cmの発泡スチロール製の簡易断熱養生容器（写真1）内に静置し、熱電対により供試体内温度を測定した。

(5) アルカリシリカ反応性試験

JIS A1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法）」に準拠した。ここでは、細骨材を高シリカ質であるパイレックスガラスとし、アルカリシリカ反応の抑制効果について検討を行なった。粉体構成は配合No.3のものとし、比較として、HSPC と OPC を用いた。

(6) 凍結融解試験

JIS A1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠した。本研究における凍結融解は、水中凍結融解試験方法により行なった。

2.4 実験結果及び考察

2.4.1 フレッシュ性状

試験結果を表5に示す。

まず SP 添加率について、CFC は HSPC と比較すると、目標スランプフロー値を得るためにより多くの添加量を

表3 配合条件

スランプフロー値 (mm)	空気量 (%)	水粉体比 (%)	砂粉体比 (%)	X_v (%)
650 ± 50	2.0以下	20.0	32.0	37.5

表4 粉体構成

配合 No.	重量比(%)							
	NC	SF	FA	FA	BS4	BS8	AG	TK
1	0	5	35	0	36	0	9	15
2	0	5	0	35	36	0	9	15
3	0	5	35	0	0	36	9	15
4	0	5	0	35	0	36	9	15
HSPC	—	—	—	—	—	—	—	—



写真1 簡易断熱養生容器

要した。この原因として、ボゾラン活性の促進剤として用いた消石灰が多孔質であるため、水分を拘束したことが考えられる。高炉スラグ微粉末の種類で比較すると、ブレン比表面積 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ のものを用いた No.3 及び No.4 において、SP 添加率が減少する傾向が認められた。

また、スランブフロー試験における 50cm フロー到達時間について、フライアッシュの種類で比較すると、JIS 種を用いた No.1 及び No.3 では HSPC とほぼ同等だったのに対し、JIS 種を用いた No.2 及び No.4 では 5 秒程度遅くなる傾向が認められた。この原因として、低品質のフライアッシュでは十分なボールベアリング効果が得られず、粘性が増加したことが考えられる。

練り混ぜ時間については、ブレン比表面積が大きい $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いることで、長時間化する傾向が認められた。

次に、凝結試験結果を図 1 に示す。図 1 より、ブレン比表面積 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いた No.3 及び No.4 では HSPC と同程度の凝結時間となった。しかし、ブレン比表面積 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いた No.1 及び No.2 では約 2 倍程度遅くなる結果となった。この原因として、高粉末度の高炉スラグ微粉末ほど水和反応が活発であることが考えられる。

2.4.2 硬化性状

(1) 圧縮強度試験

表 6 に各配合における圧縮強度と弾性係数の試験結果を、図 2 に圧縮強度試験結果を示す。表 6 より、セメント無使用の場合でも、20 水中養生材齢 28 日で 60 N/mm^2 以上の強度を発現することが確認された。また、ブレン

比表面積 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いたものほど高い強度を発現する傾向が認められ、20 水中養生材齢 28 日で 80 N/mm^2 程度の強度が得られた。一方で、フライアッシュの品質の違いによる圧縮強度の差異は認められなかった。これより、低品質のフライアッシュを用いた場合でも十分な強度発現が可能であると考えられる。

(2) 自己収縮試験

図 3 に示す自己収縮試験結果より、HSPC と比較した場合、CFC は若干自己収縮ひずみが小さくなる傾向が認められた。特に、ブレン比表面積 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いた場合、その傾向が大きかった。また、フライアッシュの品質で比較すると、低品質である JIS 種を用いた配合で自己収縮ひずみが小さくなる傾向が認められた。ここで表 2 より、JIS 種は JIS 種と比較して低粉末度である。これらの結果より、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュは低粉末度のものほど、自己収縮を抑制できると推察される。

(3) 乾燥収縮試験

図 4 に示す乾燥収縮試験結果より、ブレン比表面積 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いたものほど、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向が認められた。この原因として、表 6 の圧縮強度試験結果において、ブレン比表面積 $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いたものが、ブレン比表面積 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いたものより約 20 N/mm^2 程度強度が高く、また、弾性係数も高いため、変形抵抗性が向上し、収縮が生じにくくなったことが考えられる。

表 5 フレッシュ性状試験結果

配合 No.	SP (%)	DF (%)	スランブフロー (mm)	50cmフロー到達時間(s)	練り時間 (min)	温度 (°C)	空気量 (%)
1	2.65	1.00	700	5"93	7.0	23.0	1.0
2	2.50	0.80	645	13"11	6.0	21.5	1.0
3	2.40	1.00	615	8"00	9.0	24.0	1.8
4	2.50	0.90	640	13"24	8.0	22.0	1.3
HSPC	0.85	0.70	665	8"57	3.0	16.0	0.6

表 6 各配合における圧縮強度と弾性係数

配合 No.	圧縮強度 (N/mm^2)					弾性係数 (kN/mm^2)	
	気中1日	水中3日	水中7日	水中28日	断熱28日	水中28日	断熱28日
1	11	32	41	59	74	29.3	33.3
2	12	32	40	61	73	29.8	31.4
3	39	58	68	82	85	33.4	33.8
4	37	59	69	83	89	32.2	33.4
HSPC	62	83	99	117	147	35.6	38.0

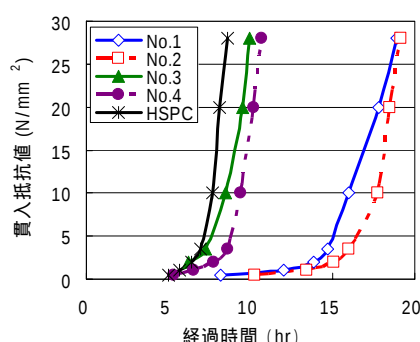


図 1 凝結試験結果

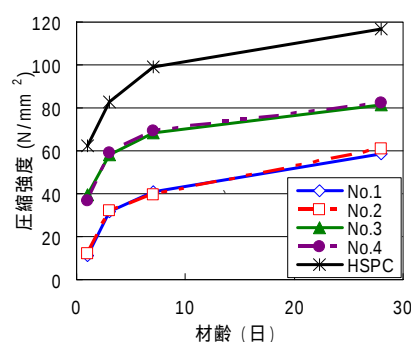


図 2 圧縮強度試験結果

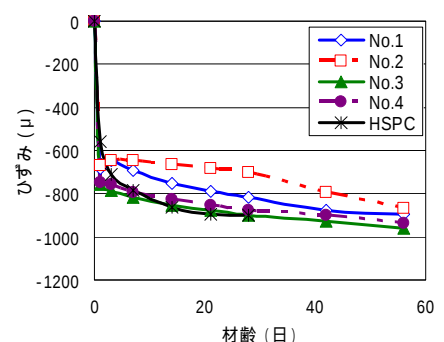


図 3 自己収縮試験結果

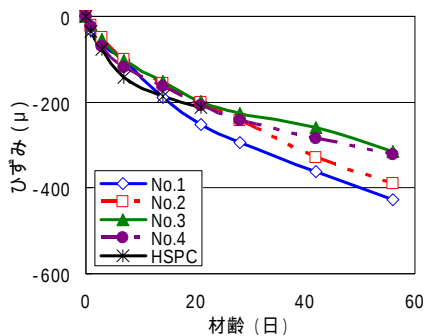


図4 乾燥収縮試験結果

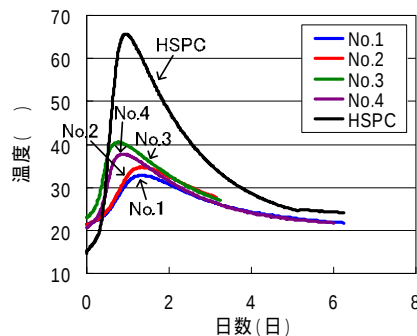


図5 簡易断熱温度上昇試験結果

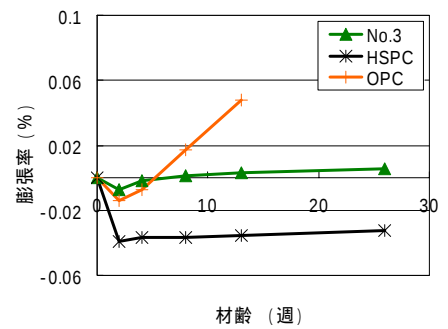


図6 アルカリシリカ反応性試験結果

(4) 簡易断熱温度上昇試験

図5に示す簡易断熱温度上昇試験結果より、CFCはHSPCと比較して、ピーク時の温度が低いことが確認された。この原因として、セメントを無使用としたため、水和による発熱量が減少したことが考えられる。このことから、低水粉体比の高強度コンクリートや発熱が問題となるマスコンクリートに用いた場合でも、温度ひび割れ等の抑制が可能であると考えられる。また、プレーン比表面積 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いた No.1 及び No.2 において、より一層の温度上昇量の低下が確認された。このことから、低粉末度の高炉スラグ微粉末を用いることで、水和発熱量をより低減できると考えられる。

(5) アルカリシリカ反応性試験

図6に示すアルカリシリカ反応性試験結果より、CFCはOPCのみの配合と比較して、アルカリシリカ反応による膨張が抑制される傾向が認められた。この原因として、セメントを無使用とすることで、コンクリート中のアルカリ濃度が減少し、アルカリシリカ反応抑制効果が向上したことが考えられる。また、HSPCの場合、初期材齢において大きな自己収縮を生じたが、CFCの場合、初期の自己収縮も最も小さく、材齢26週における膨張率も0.006%程度であったため、高いアルカリシリカ反応抑制効果を有すると考えられる。

(6) 凍結融解試験

凍結融解試験結果を図7に示す。ここでは、Non AEで、圧縮強度 45 N/mm^2 程度の普通コンクリートと比較を行った。図7より、普通コンクリートでは150サイクルで相対動弾性係数は60%以下となった。一方、CFCでは、凍結融解による相対動弾性係数の低下はほとんど起こらず、高い凍結融解抵抗性を有する結果となった。これは、従来の知見通り、高い圧縮強度を有していたためと考えられる。

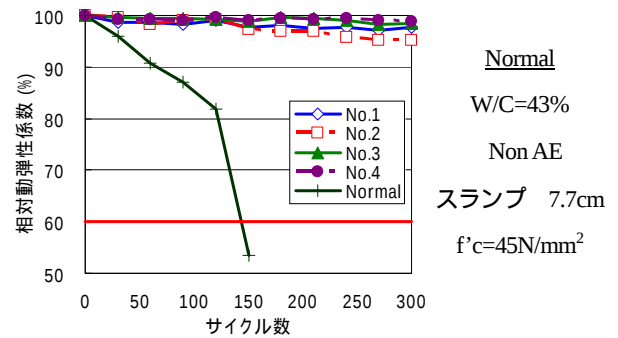


図7 凍結融解試験結果

3. 結論

本研究で得られた結果を以下に示す。

- ・CFCは、水中養生材齢28日で 60 N/mm^2 以上の圧縮強度の発現が可能である。
- ・フライアッシュの品質の違いによる圧縮強度の差異は認められなかった。
- ・低粉末度の高炉スラグ微粉末を用いることで自己収縮ひずみを抑制できることが認められた。
- ・高粉末度の高炉スラグ微粉末を用いることで乾燥収縮ひずみを抑制できることが認められた。
- ・CFCはHSPCと比較して、ピーク時の温度が低下する傾向が認められた。
- ・CFCは、高いアルカリシリカ反応抑制効果を有しており、初期材齢における自己収縮も認められなかった。
- ・CFCは、十分な凍結融解抵抗性を有することが認められた。

参考文献

- 1) 樋口雅也、落合研至：コンクリートの環境負荷評価における環境要因に関する基礎的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.2、pp1531-1542、(2002)
- 2) 藤村ゆい：超高強度コンクリートの諸特性に及ぼす各種混和材の影響に関する研究、宇都宮大学大学院博士前期課程終了論文、(2007)