

論文 セメントフリーコンクリートの物性に関する研究

齋藤 賢^{*1}・藤原 浩巳^{*2}・丸岡 正知^{*3}・山梨 泰斗^{*4}

要旨：本研究は、セメント産業から排出される二酸化炭素の低減、更には地球温暖化対策にも有効であるセメントをほとんど使用しないコンクリートの開発を目的とし、高炉スラグ微粉末、シリカフェーム、フライアッシュなど産業副産物を積極的に用いて、セメントを無使用の場合について諸物性を検討した。その結果、標準水中養生、材齢 28 日で 80N/mm²もしくは 60N/mm²以上の圧縮強度の発現が可能であり、低品質なフライアッシュも利用可能であることが確認された。また、十分な凍結融解抵抗性を有していることや乾燥収縮の抑制にも効果が確認された。

キーワード：高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、比表面積、コンクリート

1. はじめに

近年、社会基盤整備のための資源の減少が問題視されている。構造物構築では、そのライフサイクルコスト(LCC)が最小となるような施策を採る方向にある。

また、コンクリート構造物でも、高強度化や高耐久性を図ることで柱断面を小さく、柱間を大きくとり快適な居住空間を確保しやすくできるなどの設計の自由度の向上、構造部材が長期にわたり必要な耐久性の保持が担保され、LCC 低減につながるとされる。

現在、コンクリート構造物の高層化・高耐久性が進んでおり、高強度コンクリートの需要は今後更に高まると予想される。コンクリート部材において、高強度・高耐久性を図る場合、コンクリート中の硬化組織がより緻密となるような方策を採る。例えば、シリカフェームに代表される混和材料の使用、単位セメント量の増加、水セメント(結合材)比の低減等により、(超)高強度コンクリートの製造が可能となる。一部では、設計基準強度が 150N/mm² を超える超高強度コンクリートが実施工で用いられている¹⁾。

一方、我が国の部門別二酸化炭素排出割合をみると、製造業が全体の 46% 占めており、セメント産業は約 4% 占めている²⁾。普通セメントを 1 トン製造するために、原料・燃料等から約 800kg の二酸化炭素を排出するとされている³⁾。また、大量のセメントが必要となる(超)高強度コンクリートでは、その製造において大量の二酸化炭素が排出されるため、地球環境負荷低減を検討する上で深刻な問題であると考えられる。“産業の静脈”とされるセメント産業活動を抑制することは社会情勢を踏まえると得策でない。しかし、セメント使用量の低減により、二酸化炭素の排出量を大幅に抑制可能であれば、今後有用な技術となり得ると考えられる。

本研究は、セメントを無使用とし、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュなどの産業副産物を主材料としたセメントフリーコンクリート(以下 CFC と称す)の物性に関する検討を行った。

2. 実験概要

現在、コンクリート混和材として用いられているフライアッシュは、JIS に規定されている種灰に相当する高品質なものがほとんどであり、種灰に相当する低品質のフライアッシュはほとんど利用されていない。従って、低品質のフライアッシュを多量に利用することができれば、非常に有用な技術となると考えられる。

また、高炉スラグ微粉末は、比表面積が大きいものほど粉砕に必要なエネルギーが大きくなり、環境負荷が大きくなる。従って、環境負荷を考えた場合、より低比表面積の高炉スラグ微粉末の使用が望まれる。

そこで、本研究は、品質の異なるフライアッシュを用いて実験を行い、低品質フライアッシュの適用性について検討を行った。さらに、高炉スラグ微粉末は、比表面積の異なる高炉スラグ微粉末を用い、低比表面積の高炉スラグ微粉末の適用に関する検討を行った。

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。比較材として、普通ポルトランドセメントおよび普通ポルトランドセメントを主材料とした高強度コンクリート用プレミックスセメント(PMC)を使用し、CFC と物性の比較を行った。

フライアッシュは、JIS 種および JIS 種を用いた。フライアッシュの品質を表-2 に JIS A 6201 (コンクリート用フライアッシュ)の規格と比較して示す。

高炉スラグ微粉末は、比表面積が 4000cm²/g および 8000cm²/g の 2 種類を使用した。

*1 日本シーカ(株) 技術研究所 (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 工学部建設学科助教 工博 (正会員)

*4 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻

また、従来の(超)高強度コンクリートと同様にシリカフュームも併用した。

さらに、セメントを無使用としているため、水酸化カルシウムの生成が起こらず、ポゾラン反応が抑制されてしまう可能性が考えられる。この対策として、本研究では、反応促進効果が期待できる、比表面積が $45\text{m}^2/\text{g}$ の多孔性高比表面積消石灰(以下、消石灰と称す)を混和し、ポゾラン反応の促進を図った。また、自己収縮の抑制等の目的で無水石膏も用いた。

表-1 使用材料

材料	記号	材料名	密度 (g/cm ³)
結合材 (P)	SF	シリカフューム SiO ₂ 96.6% 比表面積20.0m ² /g	2.24
	FA2	フライアッシュ 種(B電力磯子産)	2.23
	FA4	フライアッシュ 種(C電力西条産)	2.20
	BS4	高炉スラグ微粉末(比表面積 4000cm ² /g)	2.90
	BS8	高炉スラグ微粉末(比表面積 8000 cm ² /g)	2.90
	AG	無水セッコウ	2.40
	TK	多孔性高比表面積消石灰 (比表面積 45m ² /g)	2.90
水	W	上水道水	1.00
細骨材	S	大月市初狩町産砕砂	2.63
粗骨材	G	大月市初狩町産砕石	2.63
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能減水剤	1.08
消泡剤	DF	ポリアルキレングリコロール誘導体	1.00
比較材	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16
	PMC	普通ポルトランドセメントを主材料とした 高強度コンクリート用プレミックスセメント	2.99

表-2 フライアッシュの品質

試験項目	JIS A6201 (JIS 種)	JIS 種 FA2	JIS A6201 (JIS 種)	JIS 種 FA4	
	二酸化けい素 (%)	45.0以上	55.3	45.0以上	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	
密度 (g/cm ³)	1.95以上	2.23	1.95以上	2.2	
粉末度	45 μm以下の残分	40以下	4	70以下	
	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

2. 2 配合条件および粉体構成

本研究の配合条件を表-3に、粉体構成を表-4に示す。配合条件は、既往の超高強度コンクリートに関する研究⁴⁾の配合をもとに、水粉体比を20%、砂粉体比を32%、粗骨材絶対容積割合(X_v)を37.5%とした。また、高性能減水剤はスランブフロー650±50mm、消泡剤は空気量

2.0%以下になるように添加量を調整した。

表-4において 配合の種類CFC-1およびCFC-2はBS4、CFC-3およびCFC-4は、BS8をそれぞれ用いた。

また、CFC-1およびCFC-3では、JIS 種灰(FA2)、CFC-2およびCFC-4では、JIS 種灰(FA4)をそれぞれ用いた。

表-3 配合条件

スランブフロー(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

配合の種類	質量比 (%)						
	SF	FA2	FA4	BS4	BS8	AG	TK
CFC-1	5	35	0	36	0	9	15
CFC-2	5	0	35	36	0	9	15
CFC-3	5	35	0	0	36	9	15
CFC-4	5	0	35	0	36	9	15

2. 3 試験項目

(1)フレッシュ性状

(a) 練混ぜ時間

コンクリートの練混ぜには公称容量100Lの2軸強制練りミキサを用いた。コンクリートの練混ぜ手順は、はじめに十分な流動性を有するモルタルを練混ぜ、その後粗骨材を投入し、十分に練混ぜを行いコンクリートとした。この時のモルタルの練混ぜにおいて、粉体と細骨材を60秒間空練りした後、水と高性能減水剤を加えて練混ぜを行った。練りダマがなくなり、モルタルの流動性が目視で観察されるまでの時間を測定し、練混ぜ時間とした。

(b) スランブフロー試験

JIS A1150「コンクリートのスランブフロー試験方法」に準拠した。

(c) 空気量試験

JIS A1128-1999「フレッシュコンクリートの圧力による試験方法(空気室圧力方法)」に準拠した。

(d) 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)硬化性状

(a) 圧縮強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。測定は、脱型時気中養生(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)

とした。

(b) 自己収縮試験

JCI 自己収縮委員会「セメントペースト、モルタルおよび自己収縮及び自己膨張試験方法(案)」に準拠した。

供試体の作製、養生は 20℃、湿度 60%で行い、脱型以降の測定は、3日、7日、14日、21日、28日、42日、56日、70日、91日とした。

(c) 乾燥収縮試験

JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法(ダイヤルゲージ方法)」に準拠した。試験体は 10×10×40cmの角柱試験体を用いた。材齢7日まで20℃水中養生を行った後、測定を開始した。乾燥条件は温度 20℃、湿度 60%とした。測定材齢は、1日、3日、7日、14日、21日、28日、42日、56日、70日、91日とした。

(d) 簡易断熱温度上昇試験

100×200mmの円柱型枠にコンクリートを流し込み、中心部に熱電対を埋め込み供試体を成形した。成形後、ポリエチレン袋を用いて封緘状態とし、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容器内に静置し、熱電対により供試体中心温度を測定した。また、この状態で材齢 28日まで養生し、自己発熱による温度履歴を受けた条件(簡易断熱養生)での圧縮強度を測定した。

(e) アルカリシリカ反応性試験

JIS A 1146「骨材のアルカリシリカ反応性試験(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がより促進する状態で試験を行った。モルタルの配合条件を表-5に示す。使用した粉体構成は、強度発現性の良好な組成の中から FA2-BS8の CFC-3を用いた。

比較として、普通ポルトランドセメントを主材とした PMC および OPC を用いた。

表-5 モルタルの配合条件

モルタルフロー (mm)	空気量 (%)	水粉体比 (%)	砂粉体比 (%)
250 ± 20	2.0以下	20.0	32.0

(f) 凍結融解試験

JIS A 1148「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とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の実験結果を表-6に、高性能減水剤の

添加率および練混ぜ時間について図-1にそれぞれ示す。

CFCはPMCよりも目標スランブフローを得るために必要な高性能減水剤の添加率が大幅に増加する傾向が認められた。これは、CFCのポゾラン活性の促進材として用いた消石灰が、多孔質であるため、水分を多く拘束したことが原因であると考えられる。

高炉スラグ微粉末の比表面積の違いにより比較した場合(CFC-1とCFC-3)、BS8を用いることで高性能減水剤の添加率が低くなる傾向が認められた。さらに、スランブフロー試験における50cm到達時間では、JIS種のフライアッシュを用いたCFC-3はPMCとほぼ同等であったのに対し、JIS種を用いたCFC-2およびCFC-4では、5秒ほど遅くなる傾向が認められた。この原因として、低品質な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、コンクリートの粘性を増加させたためと考えられる。練混ぜ時間に関しては、BS8を用いると、練混ぜ時間が長くなる傾向を示した。

表-6 フレッシュ性状試験結果

配合の種類	SP (P×%)	DF (P×%)	スランブフロー (mm)	50cm到達時間 (秒)	練混ぜ時間 (分)	空気量 (%)	温度 (℃)
CFC-1	2.65	1.00	700	5.9	7.0	1.0	23.0
CFC-2	2.50	0.80	645	13.1	6.0	1.0	21.5
CFC-3	2.40	1.00	615	8.0	9.0	1.8	24.0
CFC-4	2.50	0.90	640	13.2	8.0	1.3	22.0
PMC	0.85	0.70	665	8.6	3.0	0.6	16.0

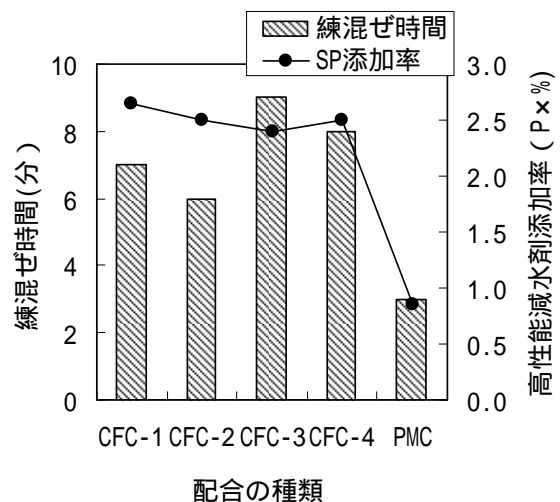


図-1 練混ぜ時間および高性能減水剤添加率

凝結試験結果を図-2に示す。図-2より、BS8を用いたCFC-3、CFC-4は、PMCと同程度の凝結時間となった。

また、BS4 を用いた CFC-1 と CFC-2 は、CFC-3、CFC-4 および PMC と比較し約 7 時間程度遅くなった。これは、BS8 のほうが、BS4 よりも、初期の水和反応を促進する効果が高いためと考えられる。

一方、FA2 と BS8 を使用した CFC-3 が、最も凝結時間が早くなった。これは、表-2 より、活性度指数は 種のほうが 種より高く、また、比表面積も 種のほうが 種よりも大きくなっているため、初期の水和反応を促進する効果が高くなり、 種灰を用いた方が、凝結時間が早くなったと考えられる。

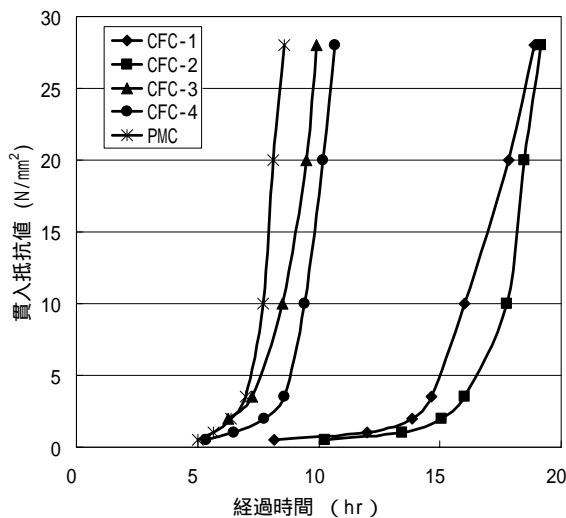


図-2 凝結試験結果

3.2 硬化性状

(1) 圧縮強度試験

表-7 に各配合における圧縮強度と静弾性係数の試験結果を、図-3 に圧縮強度結果をそれぞれ示す。

図-3 より、CFC は PMC と比較し、圧縮強度発現性は、劣る結果となった。しかしながら、20 水中養生、材齢 28 日で、60N/mm² 以上の圧縮強度を示した。また、BS8 を用いた CFC-3 と CFC-4 の圧縮強度は、20 水中養生、材齢 28 日で 80N/mm² 以上を示した。比表面積の大きい BS8 の混和により、圧縮強度は向上した。これは、BS8 の混和により、硬化組織をより緻密化しやすくなったためと考えられる。

材齢 1 日における CFC の圧縮強度は、PMC より低い結果であった。図-2 より、BS8 を使用した CFC-3 と CFC-4 は、PMC と同程度の凝結時間であった。しかし、CFC の場合、高性能減水剤の添加率が PMC よりも多く必要となることから、材齢 1 日では、水酸化カルシウムの生成量および硬化体のマトリックス形成が緻密でないことが考えられる。

一方、フライアッシュの品質の影響による圧縮強度の

差異は認められなかった。この結果より、低品質のフライアッシュを用いた場合でも、十分な強度発現を期待できると考えられる。

表-7 各配合における圧縮強度と静弾性係数の試験結果

配合の種類	圧縮強度 (N/mm ²)					弾性係数 (kN/mm ²)	
	1日	3日	7日	28日	断熱28日	28日	断熱28日
CFC-1	11.3	32.0	41.0	59.0	74.0	29.3	33.3
CFC-2	12.1	32.0	40.0	61.0	73.0	29.8	31.4
CFC-3	39.4	58.0	68.0	82.0	85.0	33.4	33.8
CFC-4	36.9	59.0	69.0	83.0	89.0	32.2	33.4
PMC	62.2	83.0	99.0	117	147	35.6	38.0

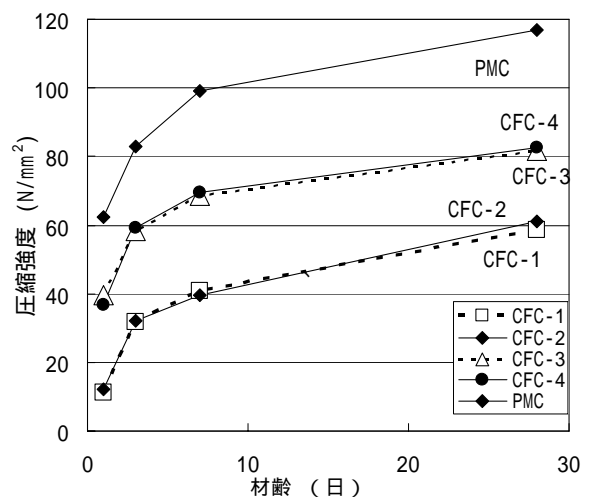


図-3 圧縮強度試験結果(20 水中養生)

(2) 自己収縮試験

自己収縮試験結果を図-4 に示す。図-4 より、CFC-2 の自己収縮ひずみは、材齢 91 日で PMC と比べ同等の結果を示した。他は、自己収縮ひずみが大きくなる傾向が認められた。特に BS4 を用いた場合、BS8 と比較して自己収縮ひずみは 150 ~ 200 × 10⁻⁶ 程度小さくなった。

田澤ら⁵⁾は、高炉スラグ微粉末の粉末度および置換率がセメントペーストの自己収縮に及ぼす影響について検討し、粉末度が 5000cm²/g 以上の高炉スラグ微粉末を使用した場合、粉末度の低いスラグと比較して自己収縮ひずみが大きくなることを示しており、今回の結果は、既往の研究成果と同様の結果となった。さらに、フライアッシュの品質で比較すると、JIS 種のフライアッシュの方が JIS 種よりも自己収縮ひずみは小さくなる傾向が認められた。

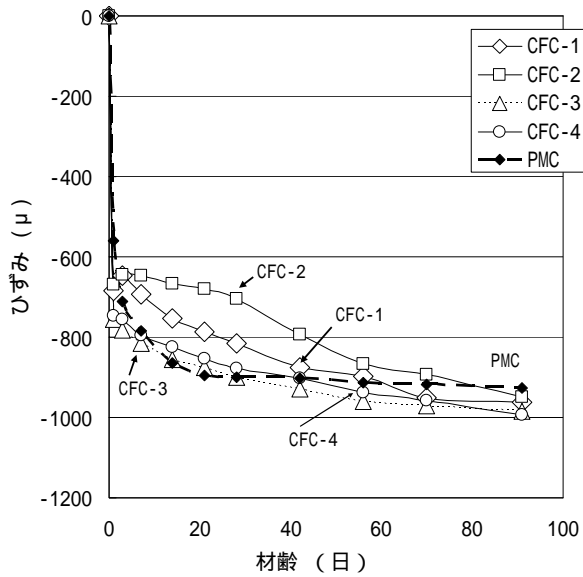


図-4 自己収縮試験結果

(3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮測ひずみ定結果を図-5 に示す。図-5 より、BS8 を用いた方が、乾燥収縮ひずみは小さくなる傾向が認められた。表-7 より BS8 を用いた方が、BS4 よりも圧縮強度は約 20N/mm^2 程度高く、また静弾性係数も大きく剛となるため、変形収縮が生じにくくなったと考えられる。

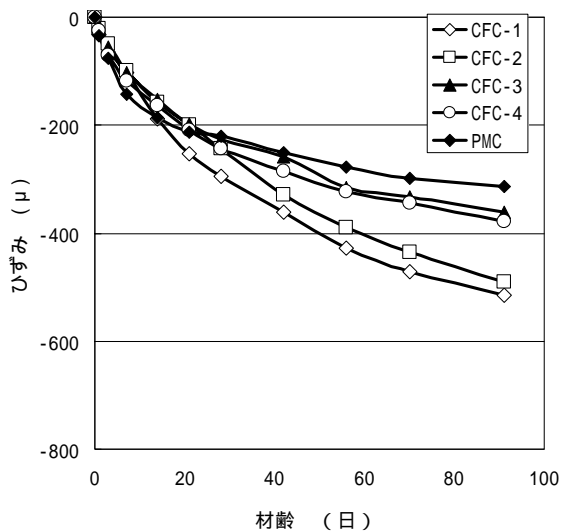


図-5 乾燥収縮試験結果

(4) 簡易断熱温度上昇試験

簡易断熱温度上昇試験における供試体中心温度変化を図-6 に示す。図-6 より、CFC は、PMC に比べピーク時の温度が大幅に低い傾向が認められた。これは、CFC はセメントを無使用としているため、水和による発熱量が減少したことが寄与していると考えられる。これにより、CFC は、低水粉体比の(超)高強度コンクリートや発熱が大きくなるマスコンクリートのような構造物に用いた場合でも、温度ひび割れ等の抑制が可能となると推察される。さらに、BS4 を用いた CFC-1 および CFC-2 において、他よりも温度上昇の低下が確認された。従って、低比表面積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。

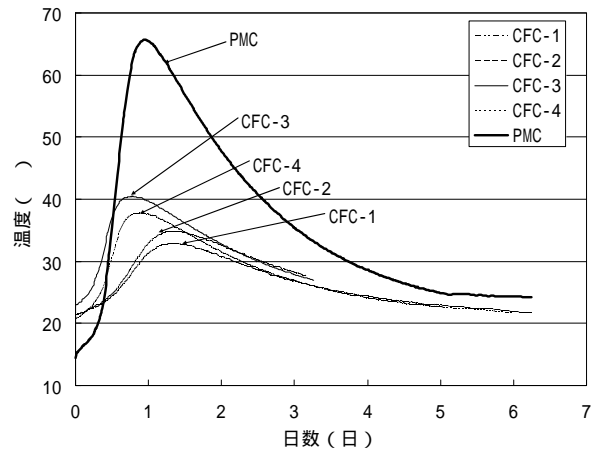


図-6 簡易断熱温度上昇試験結果

(5) アルカリシリカ反応性試験

アルカリシリカ反応性試験結果を図-7 に示す。図-7 より CFC の場合、普通ポルトランドセメントのみの配合よりも、アルカリシリカ反応による膨張が大幅に減少する傾向が認められた。これは、セメントを無使用することで、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抵抗性が向上したことが起因していると考えられる。

また、PMC を用いた場合、膨張率は大幅に小さくなるが、初期材齢において大きな自己収縮を生じた。一方 CFC の場合は、初期の自己収縮は最も小さく、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抵抗性を有していると考えられる。

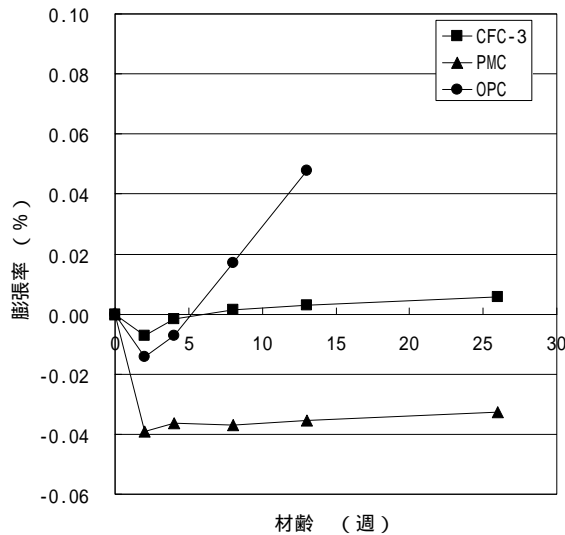


図-7 アルカリシリカ反応性試験結果

(6) 凍結融解試験

凍結融解試験結果を図-8に示す。ここでは、空気連行剤による空気連行量がない、圧縮強度 45N/mm^2 程度の普通コンクリートと比較を行った。図-8より、空気連行量のない普通コンクリートは、150サイクルで相対動弾性係数は60%以下となった。一般に、普通コンクリートは、空気量5%、気泡間隔は $250\mu\text{m}$ 以下が耐久性において、必要な最小値と言われている。

一方、同じく空気連行量のないCFCは、凍結融解作用による相対動弾性係数の低下はほとんど無く、高い凍結融解抵抗性を有している結果が確認された。

小玉ら⁶⁾は、圧縮強度 80N/mm^2 以上のコンクリートは、空気量2%以下で気泡間隔はおよそ $900\mu\text{m}$ であり、微小な空気はほとんど含まれておらず、エンラップドエアがまばらにあるだけであった。しかし、300サイクルにおける相対動弾性係数は95%以上であり、空気量が2%以下であってもコンクリート自身が密実になるため、凍結融解抵抗性において優れた性能を持っていると報告している。今回の結果は、既往の研究成果と同様な結果となった。

4.まとめ

本研究では、セメントを無使用とし、産業副産物であるフライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフェームを主材料としたCFCについての物性に関して実験を行った結果、以下のような知見が得られた。

- (1) CFCは、水中養生、材齢28日で 80N/mm^2 もしくは 60N/mm^2 以上の圧縮強度を発現することが確認された。
- (2) 低品質なフライアッシュを用いても圧縮強度低下は認められなかった。

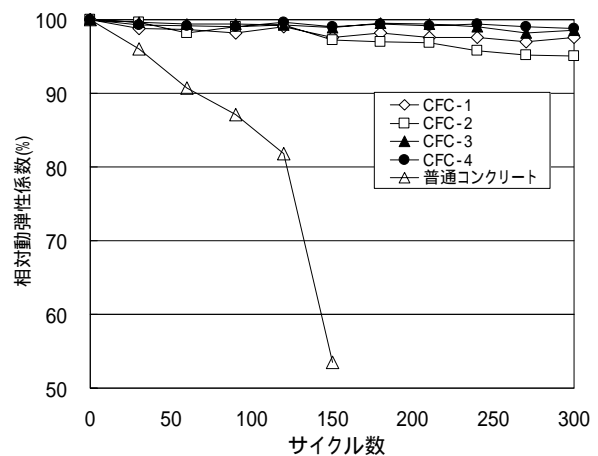


図-8 凍結融解試験結果

- (3) BS4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。
- (4) BS8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。
- (5) CFCはPMCに比べ、水和発熱量が著しく小さく、ピーク時の温度が大幅に低下する傾向が確認された。
- (6) CFCは、十分なアルカリシリカ反応抵抗性を有しており、初期材齢における自己収縮も確認されていない。
- (7) CFCは、十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認された。

参考文献

- 1)陣内浩ほか：Fc 150N/mm^2 の超高強度コンクリートの現と今後の課題，コンクリートテクノ，Vol.26，No.5，pp.9-12，2007
- 2)セメント協会ホームページ，<http://www.jassoc.or.jp/cement/1jpn/jg1.html>
- 3)樋口雅也：コンクリートの環境負荷評価における環境因子に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1531-1536，2002
- 4)藤原浩巳，丸岡正知，藤村ゆい，廣島明男：超高強度コンクリートの硬化性状に及ぼす各種粉体材料の影響に関する実験的検討，セメント・コンクリート論文集，pp.441-446，2006
- 5)田澤榮一ほか：高炉スラグ微粉末を用いたセメントペーストの自己収縮，第19回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp.23-28，1992
- 6)小玉克己，仲宗茂，中村三昭：高強度コンクリートの性状に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.47，pp.696-701，1993