

論文 クリンカーフリーコンクリートの基礎性状に関する研究

齋藤 賢^{*1}・藤原 浩巳^{*2}・丸岡 正知^{*3}・小倉 恵里香^{*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、更には環境負荷低減にも有効である、セメントを使用しないコンクリートの基礎性状を検討した。コンクリートへの環境負荷低減の方策は、産業副産物であるフライアッシュ、高炉スラグ微粉末を用いた。その結果、圧縮強度は、標準水中養生、材齢 28 日で 60N/mm^2 以上の強度発現が確認された。また、耐久性では無水セッコウが多く含まれた配合において、十分な凍結融解抵抗性を有していること、中性化深さが小さい結果が得られた。IV種のフライアッシュ、低比表面積の高炉スラグ微粉末の利用が可能であることを確認できた。

キーワード：フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、耐久性

1. はじめに

近年、社会基盤整備のための原資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いなどの設計の自由度の向上により初期目的とは異なる用途での運用を可能とすること、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ること等により、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、シリカフュ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。

一方、セメント製造においては、温室効果ガスの一つとされている二酸化炭素 (CO_2) が大量に排出される。我が国の部門別 CO_2 排出割合をみると、製造業が全体の 46% 占め、そのうちセメント産業は約 4% を占めている¹⁾。

普通セメント 1t を製造するために、原料・燃料等から約 800kg の CO_2 を排出するとされている²⁾。

このような中、環境負荷低減の方策としては、産業副産物であるフライアッシュ、高炉スラグ微粉末の有効利用により、結合材中のポルトランドセメントの割合を低減可能であれば、セメント製造時に排出される CO_2 量の低減につながるため、環境負荷低減効果が期待できる。

その一例として、鉄道総研では、ポルトランドセメントをフライアッシュに置き換えたジオポリマーコンクリ

ートの研究を進めている³⁾。産業副産物を使用することで二酸化炭素の発生量を抑制できるため、環境に優しいコンクリート技術として確立を目指している。

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 II 種灰相当の高品質品が大半で、IV種灰相当の低品質品はほとんど利用されていない。従って、低品質フライアッシュの多量利用ができれば、非常に有用な技術となると考えられる。

一方、高炉スラグ微粉末は、比表面積が大きいもの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、環境負荷低減を考える場合、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、本研究では、コンクリートへの環境負荷低減として、産業副産物である JIS IV種フライアッシュ及び比表面積 $4400\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を主材料とし、ポルトランドセメントを無使用としたクリンカーフリーコンクリート (以下、CFC (Clinker Free Concrete) と称す) の基礎性状に関して検討することとした。

2. 実験概要

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 (HSPC) を使用し、CFC との物性比較を行った。

使用し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。また、使用した高炉スラグ微粉末の品質を表-3に示す。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、ボ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

*1 日本シーカ(株) 技術研究所 (正会員)

*2 宇都宮大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学大学院 工学研究科助教 工博 (正会員)

*4 宇都宮大学大学院 工学研究科

では、反応促進効果を期待し、比表面積が 45m²/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セッコウも用いた。

表－1 使用材料

材料	記号	種類	密度 (g/cm ³)
結合材 (P)	FA4	フライアッシュⅣ種	2.20
	BS4	高炉スラグ微粉末(比表面積 4400cm 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 (BET比表面積 45m ² /g)	2.24
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	大月市初狩町産碎石	2.63
高性能減水剤	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	HSPC	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
	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16

表－2 フライアッシュの品質

品質		JIS A6201 (JISⅣ種)	FA4
二酸化けい素 (%)		45.0以上	52.2
湿分 (%)		1.0以下	0.01
強熱減量 (%)		5.0以下	2.1
密度 (g/cm ²)		1.95以上	2.20
粉末度	45μmふるい残分	70以下	—
	比表面積 (cm ² /g)	1500以上	1920
フロー値比 (%)		75以上	104
活性度指数 (%)	材齢28日	80以上	78
	材齢91日	90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-4、粉体構成を表-5 およびコンクリート配合を表-6 にそれぞれ示す。

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(Xv)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それぞれ適宜調整した。

表－3 高炉スラグ微粉末の品質

品質		高炉スラグ微粉末 4000	
		JIS規格値	試験値
密度 (g/cm ³)		2.80以上	2.90
比表面積 (cm ² /g)		3000以上 5000未満	4400
活性度指数 (%)	7日	55以上	67
	28日	75以上	92
	91日	95以上	105
モルタルフロー値比 (%)		95以上	99
化学成分 (%)	酸化マグネシウム MgO	10.0以下	6.0
	三酸化硫黄 SO ₃	4.0以下	0.0
	強熱減量 ig. loss	3.0以下	0.8
	塩化物イオン Cl ⁻	0.02以下	0.006

表－4 配合条件

スランブフロー 値(mm)	空気量 (%)	水粉体比 (%)	砂粉体比 (%)	Xv (%)
650±50	2.0以下	20.0	32	37.5

表－5 粉体構成

配合 No.	質量比 (%)			
	FA4	BS4	AG	TK
CFC-1	20	65	5	10
CFC-2	40	45	5	10
CFC-3	20	60	10	10

表－6 コンクリート配合

配合 No.	単位量 (kg/m ³)							SP (%)
	W	FA4	BS4	AG	TK	S	G	
CFC-1	174	174	565	43	87	278	986	1.05
CFC-2	169	337	379	42	84	270	986	1.15
CFC-3	174	174	522	87	87	278	986	0.95

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90L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、その後に粗骨材を投入し120秒間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) スランプフロー試験

JIS A 1150「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準拠した。

(c) 空気量試験

JIS A 1128-1999「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。

(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。測定条件は、脱型時気中養生（材齢 1 日）、20℃水中養生（材齢 3 日、7 日、28 日）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 の角柱試験体とした。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

φ100×200mm 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。

(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-7 に示す。なお、使用した粉体構成は CFC-3 とし、比較として、普通ポルトランドセメントを主材とした HSPC および OPC を用いた。

表-7 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±50	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。

(g) 促進中性化試験

供試体は脱型後、温度 20℃で材齢 28 日まで水中養生した。その後、温度 20℃、湿度 60%R.H の恒温恒湿室に 56 日間静置した。また、その間に打設時の側面を除く 4 面をエポキシ樹脂で被覆した。促進環境は JIS A 1153 に準拠した環境下で行った。中性化深さの測定は、供試体を試験装置から取り出し割裂し、フェノールフタレイン 1%エタノール溶液を噴霧して未着色の部分を中性化部として中性化深さの測定を行った。測定は促進期間 1, 4, 8, 17, 26 週に行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート性状

フレッシュコンクリート性状の実験結果を表-8 に示す。

CFC は、HSPC よりも目標スランプフローを得るために必要な高性能減水剤(SP)添加率は増加する傾向が認められた。また、練混ぜ時間も増加する結果となった。これは、CFC のボ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。CFC-2 は、他よりも練混ぜ時間が長く、SP 添加率も増加する結果となった。また、コンクリートのハンドリングも他よりも悪い状態であった。

フライアッシュは、一般的に微細な球状の固い粒子であり、フレッシュコンクリートのワーカビリティや単位水量の低減に効果があるとされる。しかし、本研究で用いた FA4 は低品質であり、流動性に効果的な球形でなく、十分なボールベアリング効果が発揮されなかったため、この FA4 を最も多く用いた CFC-2 の SP 添加率は増加したものと考えられる。

表-8 フレッシュコンクリート性状試験結果

粉体構成 の種類	SP (P×%)	DF (P×%)	スランプフロー (mm)	練混ぜ時間 (min)	空気量 (%)	温度 (℃)
CFC-1	1.05	0.02	665	6	1.2	18.0
CFC-2	1.15	0.02	695	9	1.0	17.0
CFC-3	0.95	0.02	690	6.5	1.0	17.0
HSPC	0.85	0.02	665	4	0.7	16.0

3.2 硬化性状

(1) 圧縮強度試験

図-1 に圧縮強度結果を示す。CFC は、20℃水中養生の条件で、材齢 28 日において 60N/mm²以上の圧縮強度発現性を示した。粉体構成の違いによる強度発現性については、若材齢ではやや影響が認められるもの、材齢 91 日では、ほぼ同程度の強度発現性を示し、影響は小さいと考えられる。

材齢 1 日における圧縮強度は、CFC-1 が最も高い強度が得られた。これは、フライアッシュよりも比表面積の大きい高炉スラグ微粉末の混和量が多いため、水和生成物の生成速度が速かったためと考えられる。

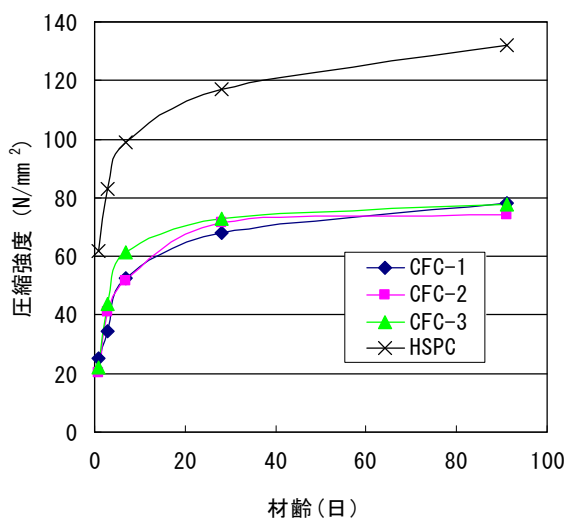


図-1 圧縮強度結果

一方、HSPC と比較すると、CFC の圧縮強度は低い結果であった。これは、CFC では普通ポルトランドセメントを無混和としているため、水酸化カルシウムの生成量が潤沢ではないこと、また高強度発現性を有するシリカフェュームを含まないため、硬化体のマトリックス形成が不十分で緻密でないことなどが考えられる。

(2) 自己収縮試験

自己収縮試験結果を図-2 に示す。図-2 より、CFC の自己収縮ひずみは、HSPC と比べ大きくなる傾向が認められた。

その要因としては、HSPC は材齢 1 日の強度発現性が優れており、初期材齢から十分な強度を有しているため、コンクリートの収縮変形が抑えられることから自己収縮が小さくなったと考えられる。

一方、粉体中のセッコウ量の増加は自己膨張をもたらすと考えられ、結果として自己収縮を低減できるとされている⁵⁾。今回、自己収縮の抑制等の目的で無水セッコウ(AG)を用いたが、その効果については確認されず今後の課題とする。

(3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮ひずみ測定結果を図-3 に示す。図-3 より CFC の中では、AG によるエトリングライト生成における自由水拘束効果により、AG が最も多い CFC-3 の乾燥収縮ひずみが小さく、FA4 が最も多い CFC-2 では、水和反応が緩慢になり、未水和の水が増加することに起因し乾燥収縮が大きくなったと考えられる。また、HSPC よりも CFC は、大きな乾燥収縮を示した。これは、HSPC の圧縮強度は CFC よりも高いこと、HSPC のコンクリートの硬化体中の未水和水量が少ないこと、および硬化組織が緻密であるため、硬化体内部の水分が表面に移動する速度が遅いことなどが考えられる。

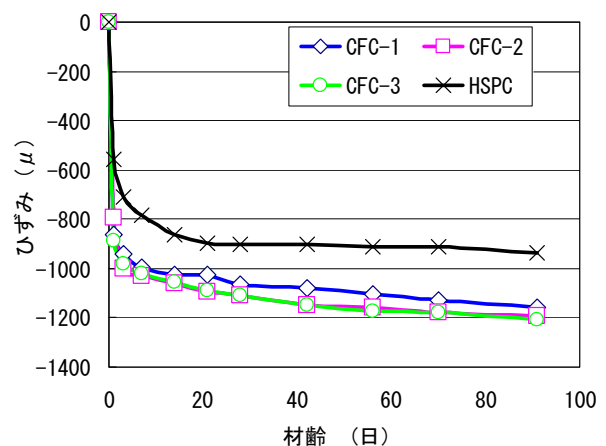


図-2 自己収縮試験結果

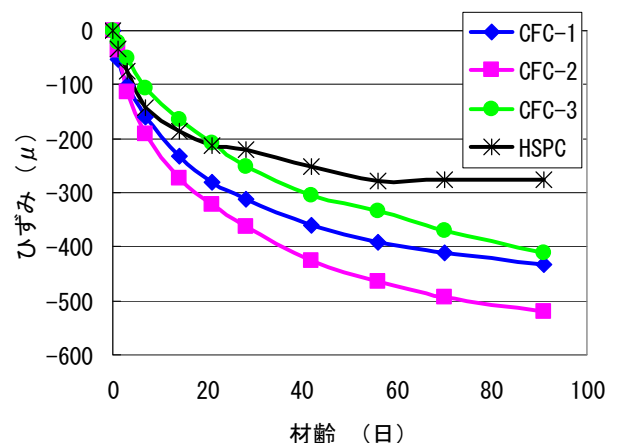


図-3 乾燥収縮試験結果

(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-4 に示す。図-4 より、CFC は、HSPC に比べピーク時の温度が大幅に低くなる傾向が認められた。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、および発熱速度が低下したことが寄与していると考えられる。既往の研究⁹⁾では、Fc60N/mm² コンクリートにおいて、20℃環境下での普通セメントを使用した簡易断熱養生の試験体中心温度の最

高温度は約 68℃であった。CFC は粉体構成により供試体中心温度が異なるが、今回の結果では概ね 32℃から 35℃であり、コンクリートの発熱を抑制できると考えられる。FA4 と BS4 では、BS4 を多く用いた CFC-1 が他よりもピーク温度が低い結果であった。この結果より、CFC の場合、BS4 を用いた方が水和発熱量を低減できると考えられる。また、AG 量の多いほうが、水和発熱量は高い結果が得られた。

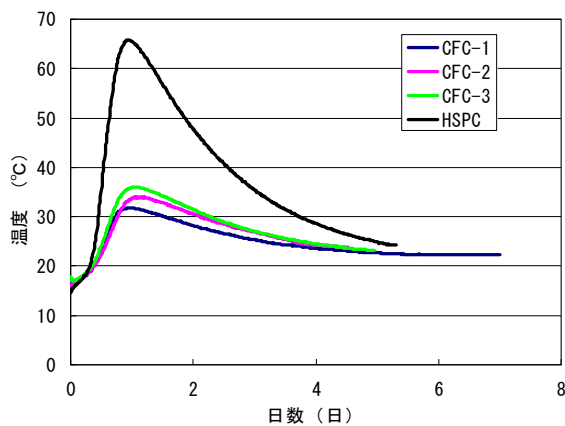


図-4 簡易断熱温度上昇試験結果

(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-5 に示す。アルカリシリカ反応によるモルタルの膨張は、モルタル中のアルカリ量に比例して大きくなる。図-5 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が生じにくく、膨張が小さくなったためと考えられる。

また、HSPC を用いた場合、OPC と比べ膨張率は大幅に小さくなった。一方 CFC の場合は、自己収縮は HSPC よりも大きい、材齢 13 週における膨張率は-0.03%程度であったため、HSPC と同様に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。

(6) 凍結融解試験

凍結融解試験結果を図-6 に示す。ここでは、空気連行剤による空気連行の無い、圧縮強度 45N/mm² 程度の普通コンクリートと比較を行った。図-6 より、空気連行の無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、普通コンクリートでは、空気量 5%程度、気泡間隔は 250 μm 以下であることが、耐久性において必要な最小値と言われている。

一方、同じく空気連行は無いものの、CFC-3 のみが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。CFC-1、CFC-2、CFC-3 の大きな相違は AG 量である。

CFC-3 の AG 混和量は他よりも多く、AG の水和により硬化体組織を緻密化にしたことにより凍結融解抵抗性を有したと考えられる。

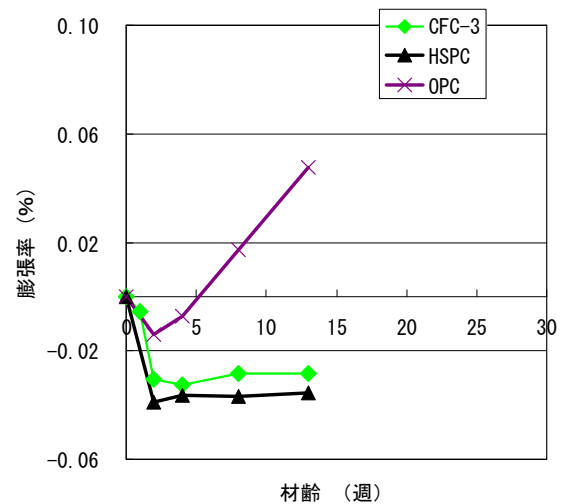


図-5 アルカリシリカ反応性試験結果

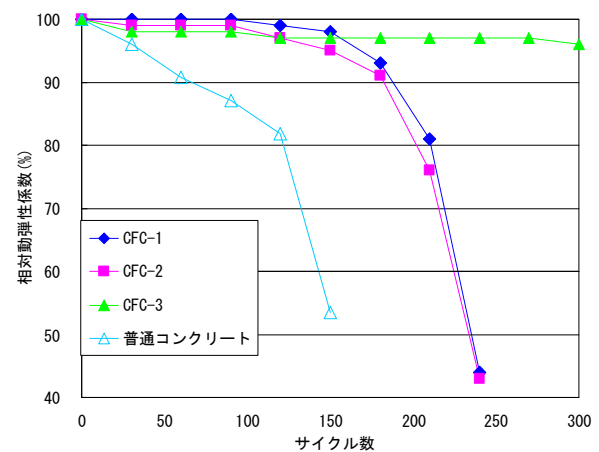


図-6 凍結融解試験結果

(7) 促進中性化試験

中性化深さの推移を図-7 に、中性化速度係数の推移を図-8 にそれぞれ示す。中性化速度係数は式(1)⁷⁾より算出した。

$$b = \frac{y}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

ここに、 b : 中性化速度係数 (mm/√週)

y : 材齢 t 週における中性化深さ (mm)

t : 材齢 (週)

図-7 より、CFC-1 及び CFC-2 は、材齢 8 週から中性化が大きく進行した。一方、CFC-3 は、材齢 17 週において大幅な中性化が確認された。また、材齢 26 週において、CFC-2 が最も中性化が進行しており、CFC-3 が中性化の進行は緩やかとなる結果となった。また、既往の研究⁸⁾

では、W/C=55%，標準水中養生材齢 28 日における圧縮強度が 40N/mm² 程度の普通コンクリートの場合，促進中性化試験材齢 26 週で中性化深さは，13mm 程度と報告されている。圧縮強度レベルに差があるが，CFC は十分な中性化抵抗性を有していると考えられる。中性化速度係数も中性化深さと同様な結果であった。本研究では，セメントを無使用としているため，そのままでは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してしまう可能性が考えられ，その対策として消石灰を混和している。このため，フライアッシュのポゾラン反応によって，組織が緻密化されるが，この反応により，水酸化カルシウムが消費されるため，組織中の pH が低下し，中性化が進行しやすい状態となると考えられる。今回混和した消石灰の割合は，全て同一であることより，CFC-3 の粉体構成において，FA4 のポゾラン反応と BS4 の水和反応が複合的に絡みあうことで相乗効果が高まり，硬化体の細孔空隙が減じ組織が緻密になったため，他の配合と比較して中性化速度係数は小さくなったと考えられる。

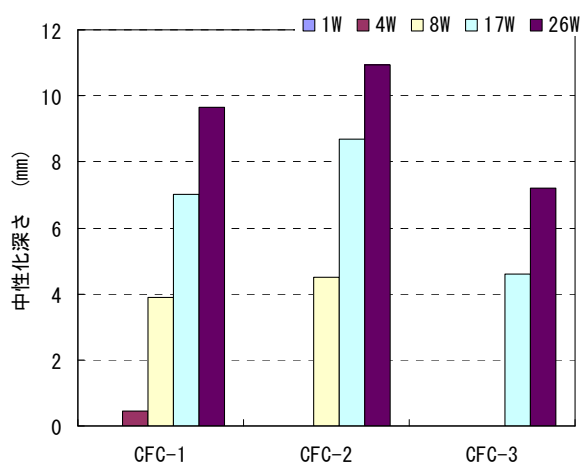


図-7 中性化深さの推移

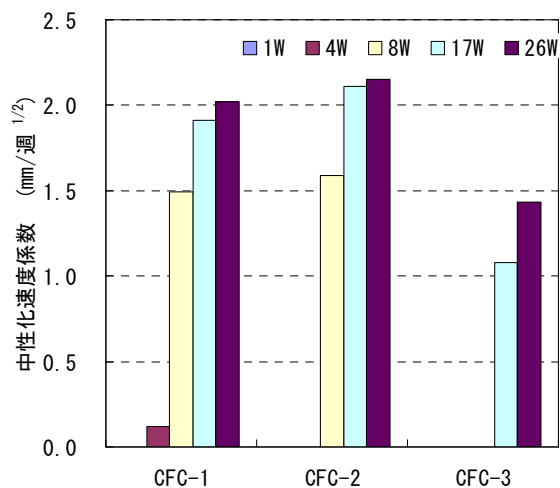


図-8 中性化速度係数の推移

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Ⅳ種，比表面積 4400cm²/g の高炉スラグ微粉末を主材料としたCFCについての基礎性状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 60N/mm² 以上の圧縮強度を発現することが確認された。
- (2) CFC の自己収縮及び乾燥収縮は，初期材齢における反応性が低いため，HSPC よりも大きくなった。
- (3) CFC は HSPC 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ことが確認された。
- (4) CFC は，十分なアルカリシリカ反応抵抗性を有していることが確認された。
- (5) CFC-3 の粉体構成において，十分な凍結融解抵抗性を有していることが確認された。
- (6) CFC-3 の粉体構成において，中性化深さ，中性化速度係数が最も小さくなった。

参考文献

- 1)セメント協会ホームページ，<http://www.jassoc.or.jp/cement/1jpn/jg1.html>
- 2)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
- 3)コンクリート工業新聞，セメントジャーナル社，2009.12.3
- 4)藤原浩已，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，No.60，pp.441-446，2006
- 5)自己収縮研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，1996
- 6)早野博幸，岸良竜，棚木隆，野口貴文：各種セメントを用いた Fc60N/mm² の高強度コンクリートの収縮特性に関する研究：その 2 温度履歴による収縮特性，学術講演梗概集，A-1，pp3-4，2007
- 7)岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，1963
- 8)セメント協会・研究所，日本セメント，秩父小野田，住友大阪セメント：コンクリートの耐久性試験に関する試験報告書，1997.3