

各種アルカリ刺激材を用いた環境負荷低減コンクリートの耐久性状に関する研究

宇都宮大学大学院 ○ 学生会員 鈴木 成
 宇都宮大学大学院 正会員 藤原浩巳
 宇都宮大学大学院 正会員 丸岡正知

1. はじめに

現在、地球温暖化が深刻化し、その原因はCO₂を中心とする温室効果ガスの排出であると指摘されており、社会的な取り組みとしてCO₂排出量の削減が求められている。セメント産業から排出されるCO₂は、日本の総排出量の約4%を占めており¹⁾、セメントを1t製造するに当たり、約0.8tのCO₂を排出していると言われている²⁾。また、循環型社会形成推進基本法が制定され、産業副産物の再利用が活発化している。

さらに建設部門では近年、コンクリート構造物の高層化・大スパン化、高耐久化に伴い、高強度コンクリートの需要が高まっており、一部では、設計基準強度が200N/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³⁾。しかし、一般に高強度コンクリートは多量のセメントを必要とするために、CO₂排出による環境負荷が大きく、また水和発熱による温度ひび割れや自己収縮によるコンクリート構造物のひび割れ等、耐久性低下の恐れがある。

本研究は、ポルトランドセメントを無使用または、使用量を大幅に減じ、代替として産業副産物である高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを主材料とした、標準養生材齢28日で60N/mm²以上の圧縮強度を有する高強度コンクリートの開発を目的としている。

実験では高い強度発現性や良好なフレッシュ性状を得るため、各種アルカリ刺激材について検討を行った。アルカリ刺激材として品質の異なる3種類の消石灰と、生コンスラッジを乾燥・粉砕した生コンスラッジ粉、さらに2種類のセメントを使用した際の諸性状について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。

主材料をポゾラン物質であるフライアッシュと潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末とした。また、その他の混和材料として、自己収縮抑制および初期強度確保の目的で無水石膏を使用した。

フライアッシュは一般にセメントの水和によって生成される水酸化カルシウムと緩やかに反応し、カルシウムシリケート水和物等を生成し、コンクリートの耐久性や水密性を高める。高炉スラグ微粉末はガラス質であり活性が高く、アルカリ水溶液のもとでは安定な水和物を生成し、硬化体組織を緻密化する。環境負荷低減コンクリートは上記の主材料を用いているため、一般のセメントコンクリートのようなアルカリの供給がなく、そのままでは硬化しない。そこでアルカリ刺激材として、比表面積が46m²/g以上と粒子が非常に細かく、高い反応が期待できる多孔性高比表面積消石灰(TK)および、コストと入手のしやすさを考慮し、

表-1 使用材料

材料	記号	材料名	密度
結合材	FA II	フライアッシュJIS II種規格品	2.20
	BS4	高炉スラグ微粉末(ブレン値4000cm ² /g)	2.90
	AG	無水セッコウ	2.90
アルカリ刺激材	TK	多孔質高比表面積消石灰	2.24
	CHs	特号消石灰	2.24
	CH1	1号消石灰	2.24
	SD	乾燥スラッジ	2.21
	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16
	HAC	試作セメント	3.16
水	W	上水道水	1.00
細骨材	S	鬼怒川産川砂	2.63
粗骨材	G	笠間産砕石	2.64
高性能減水剤	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ロール誘導体	1.00

表-2 消石灰の物性値

品質	JIS規格 特号	多孔性高比表面積消石灰 TK	特号消石灰 CHs	1号消石灰 CH1
BET比表面積 cm ² /g	—	469000	15000	12000
平均粒径 μm	—	6.0	9.4	12.0
CaO %	72.5以上	73.4	73.9	70.0以上

表-3 セメントの物性値

試料	lg-loss (%)	化学成分(%)							ブレン値 (cm ² /g)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	
SD	—	—	—	—	—	—	—	—	7540
OPC	0.99	20.69	5.52	3.14	63.44	2.03	2.27	0.30	3330
HAC	1.06	19.24	5.37	3.42	64.82	1.91	2.80	0.28	4780

より一般的な特号消石灰(CHs)と特号消石灰より純度が低く低コストである1号消石灰(CH1)の3種類の消石灰を使用した。消石灰の物性値を表-2に示す。また、生コン工場などにおいてミキサーの洗浄時や、現場からの残りコン・戻りコンなどの処理の際に発生する生コンスラッジの脱水ケーキを200℃で24時間乾燥し、微粉砕した生コンスラッジ(SD)を使用した。さらに、最も一般的なアルカリ刺激材として、普通ポルトランドセメント(OPC)および、試作セメント(HAC)の2種類のセメントを使用した。なお、本実験で使用した試作セメントとは、OPCと比較してC₃S(エーライト)を多く含む鉱物組成を有し、初期の水和反応でより多くの水酸化カルシウムを生成し、強度の増加が期待できる。表-3に化学成分、ブレン値を示す。

2.2 実験条件

本研究の配合条件を表-4に示す。配合条件は既往の超高強度コンクリートの研究⁴⁾を基に水粉体比を20%、細骨材粉体比を32%、粗骨材絶対容積割合(Xv)を37.5%とした。高性能減水剤はスランブフローが650±50mm、消泡剤は空気量が2.0以下となるようにそれぞれ適宜添加量を調整した。

キーワード 環境負荷低減コンクリート フライアッシュ 高炉スラグ微粉末 アルカリ刺激材

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 TEL 028-689-6211

表-4 配合条件

スランブフロー 値	空気量 (%)	水粉体比 (%)	細骨材粉体比 (%)	Xv (%)
650±50	2.0以下	20.0	32.0	37.5

表-5 粉体構成

配合No.	アルカリ 刺激材	W/P (%)	質量比(%)				
			OPC	FA II	BS4	AG	刺激材
No.1	TK	20	0	40	40	10	10
No.2	CHs						
No.3	CH1						
No.4	SD						
No.5	OPC						
No.6	HAC						

また、粉体構成を表-5に示す。混合割合は、フライアッシュ、高炉スラグ、無水石膏、アルカリ刺激材を全ての配合で一定とした。

2.3 試験項目

(1) 硬化性状

(a) 圧縮強度試験

JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。測定は脱型直後の材齢1日、標準水中養生材齢7日および28日とした。

(b) 静弾性係数試験

JISA 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した。測定は標準水中養生材齢28日に行った。

(2) 耐久性状

(a) 乾燥収縮試験

JISA 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法(ダイヤルゲージ法)」に準拠した。試験体は100×100×400mm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。

(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。養生は20℃、湿度60%rh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) 促進中性化試験

JISA 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠した。測定は促進期間1、4、8、17、26週に行った。

(d) 凍結融解試験

JISA 1148「コンクリートの凍結融解試験」に準拠した。本研究では、水中凍結融解試験方法とした。

(e) 水銀圧入による細孔径分布の測定

水銀圧入式ポロシメータ(細孔径範囲は、約0.003～380μm)を用いて、標準養生材齢28日における細孔径分布の測定を行った。

3. 試験結果及び考察

(1) 硬化性状

硬化性状試験結果を表-6に示す。また、各配合における圧縮強度を図-1に示す。刺激材にTK、CHs、CH1、SDを使用した場合には、目標としていた標準養生材齢28日で60N/mm²を満足することができなかった。しかし、刺激材

表-6 硬化性状試験結果

配合No.	アルカリ 刺激材	圧縮強度(N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)
		1日	7日	28日	
No.1	TK	12	40	56	35.5
No.2	CHs	11	39	53	35.7
No.3	CH1	20	34	49	32.0
No.4	SD	19	42	52	39.4
No.5	OPC	6	55	67	38.3
No.6	HAC	6	56	70	37.6

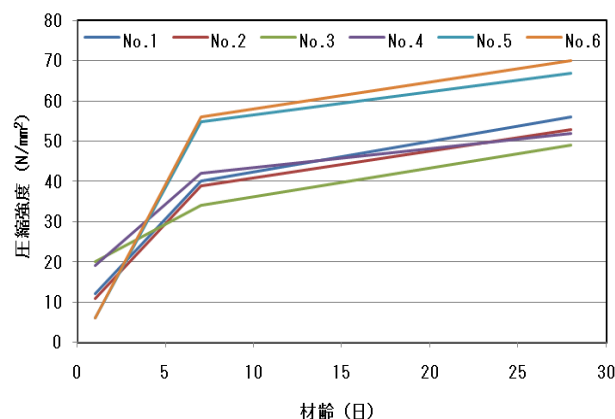


図-1 各配合における圧縮強度

にセメントを使用した配合では70 N/mm²程度の圧縮強度が得られた。材齢7日から28日にかけての圧縮強度の増加の程度は、すべての配合で同様の傾向を示した。

静弾性係数に関しては、消石灰を刺激材として用いた3配合が若干小さくなる結果となった。

(2) 耐久性状

(a) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験結果を図-2に示す。アルカリ刺激材に消石灰(TK、CHs、CH1)を使用した3配合で長さ変化率が增大する傾向が確認され、特にTKを使用した配合No.1の長さ変化率が特に大きいことが分かる。乾燥収縮はセメントペーストを構成するゲル粒子間に作用する表面張力の作用や、粒子間に存在する水が形成するメニスカスに生じる毛細管張力作用によるものとされている。したがってTKを使用したことによって粉体の微粒分が増加し、微細空隙が増加したため配合No.1の長さ変化率が増大したと考えられる。

また、アルカリ刺激材にセメントを使用した配合No.5とNo.6では共に長さ変化率が小さい。これは、静弾性係数が大きいためであると考えられる。また、No.6は初期に膨張を示していることが確認された。

(b) 自己収縮試験

自己収縮試験結果を図-3に示す。全ての配合で初期に膨張を示し、CHsとCH1を用いた配合において長期的な膨張が確認された。初期における膨張は無水石膏による膨張作用であると考えられる。長期的な膨張は酸化カルシウムと水とが反応しているものと考えられるが詳細な検討が必要である。

(c) 促進中性化試験

中性化深さの推移を図-4に示す。SD及びセメントを刺激材として用いた3配合において、中性化の進行が速いことが確認された。一般に圧縮強度の大きいコンクリート程

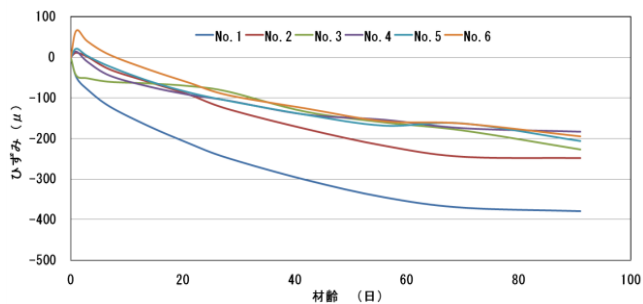


図-2 乾燥収縮試験結果

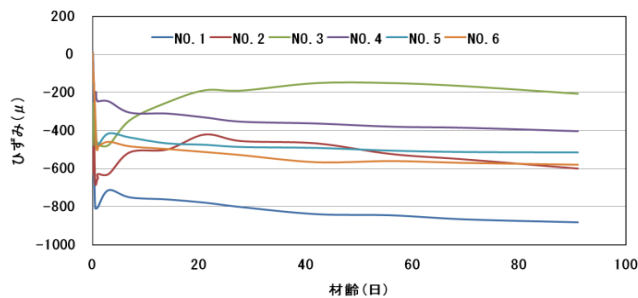


図-3 自己収縮試験結果

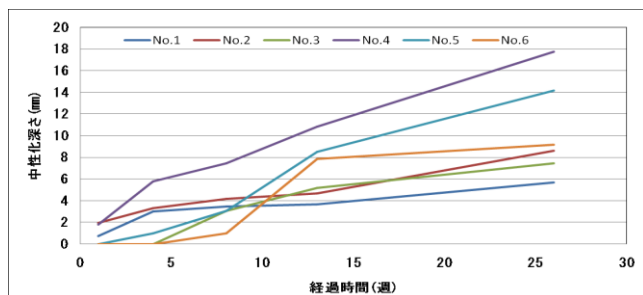


図-4 促進中性化試験結果

中性化しにくいと言われている⁵⁾が、本実験では水酸化カルシウムが主材料の反応で消費され、特に3配合では初期の細孔溶液のpHが低くなり中性化が促進したと考えられる。一方、既往の研究⁶⁾では、W/C=55%の普通コンクリートの場合、材齢26週における中性化深さは13mm程度であり、これと比較すると、一般的な普通コンクリート程度の中性化抵抗性は有していると考えられる。

(d) 凍結融解試験

凍結融解試験結果を図-5に示す。今回の配合条件ではアルカリ刺激材の種類によらず、凍結融解抵抗性を有する配合は得られなかった。特に、アルカリ刺激材に消石灰(TK、CHs、CH1)を用いた3配合は30サイクルで測定した相対動弾性係数が60%を下回った。一般的に、凍結融解抵抗性の向上には、AE剤を使用し3~6%程度のエントレインドエアを連行することが効果的である。しかし本実験では、より高強度なコンクリートとするため消泡剤を使用し、密実な硬化組織を有するコンクリートとすることで、耐凍性の向上を目指した。しかしながら、アルカリ刺激材にセメントを使用し、20℃水中養生材齢28日強度が70N/mm²程度ある配合No.5およびNo.6でも凍結融解抵抗性は大きく劣る結果となった。

(e) 水銀圧入による細孔径分布の測定

細孔径分布測定結果を図-6に0.006~0.02μmの細孔量を図-7示す。ここでは、全粉体をOPCとしたコンクリー

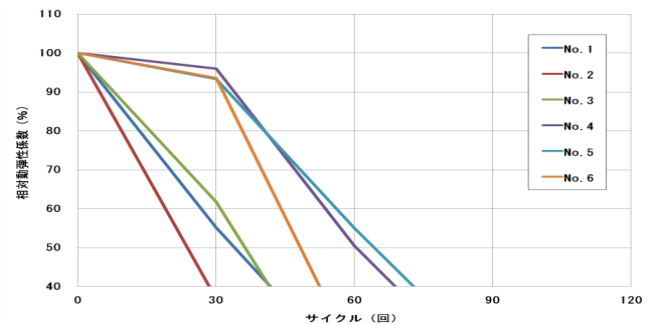


図-5 凍結融解試験結果

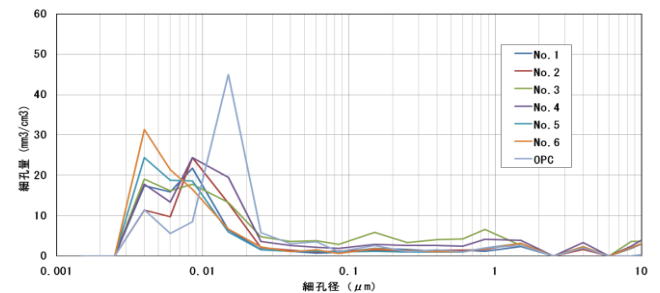


図-6 細孔径分布

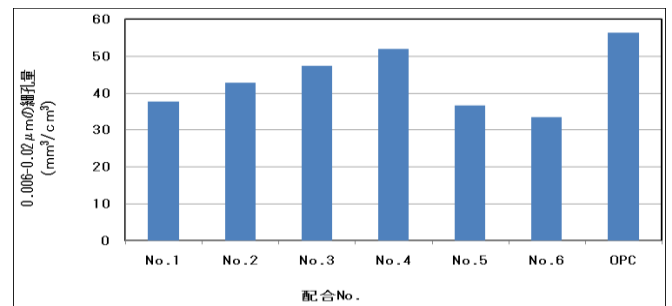


図-7 0.006~0.02μmの細孔量

トと比較を行った。既往の研究⁷⁾より、硬化体の凍結融解抵抗性の悪化に関与する空隙は直径0.1~1μmの空隙であり、この空隙に存在する水が凍結膨張により硬化体組織を破壊すると報告されている。アルカリ刺激材にCH1を使用した配合No.3のみ0.1~1μm細孔量が大きい結果が得られ、そのほかの配合は概ね同量であった。しかしながら、本実験の範囲内では、この径の細孔量が減少しても、凍結融解抵抗性に寄与しないものと思われる。

一方、0.006~0.02μmの空隙は-43℃まで凍結しないため、凍結融解による組織劣化を軽減すると報告されている⁸⁾。この径の細孔量は配合No.4とOPCが同程度となり、その他の配合は比較的小さい結果となった。0.006~0.02μmの空隙は-43℃まで凍結しないとされるため、この範囲の細孔量が多い方が凍結融解に対して有利であると考えられるが、本実験ではその傾向が確認できず、0.006~0.02μm細孔量と凍結融解抵抗性の関連性は低いと考えられる。したがって本実験の範囲内においては、細孔径分布と凍結融解抵抗性についての関係は確認されなかった。

既往の高流動コンクリートの耐久性に関する研究⁹⁾では、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を使用した2成分系(OPC:BS=32:68)の配合と、さらにフライアッシュを加えた3成分系(OPC:BS:FA=30:30:40)を比較しており、non-AEとした場合でも2成分系の配合は十分な凍結融解抵抗性を有しているが、3成分系は劣って

いるとしている。これについて詳細は不明としながらも、水和組織の緻密さおよびフライアッシュの特性と混入量が起因していると著者は述べている。ポズラン物質の混入は水和反応の遅れによって未水和水が増加することが示されており、凍結水量の増加に影響していることも考えられる。さらに、既往の研究¹⁰⁾において凍結融解抵抗性が確認された配合は、本実験の配合条件においてフライアッシュの混合割合を20%としたものである。

したがって、本実験の配合条件においてはフライアッシュ等のポズラン物質の混合割合が凍結融解抵抗性に関係すると考えられ、今後の検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、産業副産物であるフライアッシュ、高炉スラグ微粉末を主材料とし、6種類のアルカリ刺激材を比較検討した環境負荷低減コンクリートの耐久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)アルカリ刺激材にセメントを使用した場合、標準養生材齢28日において、70 N/mm²程度の圧縮強度が得られる。
- (2)アルカリ刺激材にセメントを使用した場合、乾燥収縮ひずみが小さくなる。
- (3)アルカリ刺激材にSD及びセメントを使用した場合、中性化の進行が速くなる。
- (4)本実験の配合条件ではアルカリ刺激材の種類によらず、凍結融解抵抗性を有する配合は得られなかった。フライアッシュ等のポズラン物質の混合割合が凍結融解抵抗性に関係すると考えられる。

謝辞

本研究で使用した各種材料をご提供いただきました太平洋セメント(株)、(株)デイ・シイ、奥多摩工業(株)、ジェイペック(株)、日本シーカ(株)、BASF ジャパン(株)、東武建設(株)関係者各位に深く感謝致します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費(2011年～2016年、基盤研究(C)、課題番号：23560547)によったものであり、ここに付して謝意を表します。

参考文献

- 1)セメント協会
<http://www.jassoc.or.jp/cement/1jpn/jg1.htm>
- 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)大成建設、
http://www.taisei.co.jp/about_us/release/2011/
- 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、No.60、pp.441-446、2006
- 5)セメント協会、コンクリート委員会、委員会報告ダイジェスト版、2011.3
- 6)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
- 7)セメント協会、わかりやすいセメント科学、1993
- 8)財団法人 材料科学技術振興財団、
http://www.mst.or.jp/tec_edx-sem.html
- 9)梅沢健一、岡沢智、堀部勝芳、中川修：高流動コンクリートの強度および耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.14、No.1、pp.959-964、1992
- 10)小倉恵里香：クリンカーフリーコンクリートの微視的構造および耐久性に関する研究、宇都宮大学大学院博士前期課程修了論文、2009