

高炉スラグ微粉末を多量混和したコンクリートの各種性状改善に関する実験的研究

宇都宮大学大学院 学生会員 ○定山 千尋
 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
 宇都宮大学 学生会員 山路 麻未

1. はじめに

現在、地球温暖化の深刻化が進んでいる。セメント産業から排出される二酸化炭素は、2008年度時点で我が国のCO₂総排出量の約4%を占めている。セメントは、その製造にあたり1tにつき約0.8tものCO₂を排出することから¹⁾、その排出削減が望まれる。

また、近年我が国における鉄鋼の生産量は増加傾向にあり、それに伴い高炉スラグの生産量も増加傾向を示している²⁾。しかし、近年セメントの国内需要が減少し、高炉スラグもセメント混和材としての必要量が減少しているため国外への輸出が増加傾向にある。国内での資源循環型社会の実現の観点からも更なる高炉スラグの有効利用が求められていると考える。

筆者らは、このような社会的背景を受けて、産業副産物を主材料としたセメント低混和型環境負荷低減コンクリートの研究を進めている。本研究では、環境負荷低減コンクリートの実用化に際し改善が必要であるとされているスランプフローロス及び凍結融解抵抗性に着目し、消泡剤とAE助剤を併用することによってこれらの性状の改善に関する検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

主材料として、高炉スラグ微粉末(BS)はJIS A 6206に規定されるブレン比表面積4000cm²/gクラスのものを使用した。アルカリ刺激材として普通ポルトランドセメント(OPC)と試作した高エーライトセメント(HAC)の2種類のセメントを用いてその混和量と種類が与える影響を比較した。HACは、OPCに比べエーライト(C₃S)を多く含有する、高粉末度のセメントであり、初期強度の増進を期待することができる。また、アルカリ刺激材及び自己収縮抑制等の目的で石灰系膨張材(EX)、特号消石灰(CHs)、無水石膏(AG)を用いた。複

キーワード 高炉スラグ微粉末、フレッシュ性状、硬化性状、凍結融解抵抗性

連絡先 〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2 宇都宮大学工学部土木材料研究室

TEL. 028-689-6211 E-mail: masai0723@gmail.com

数の異なる刺激材を用いることにより、Ca(OH)₂の溶出速度に差を持たせることにより硬化体中に長期的にCa(OH)₂を残存させることを狙っている。

化学混和剤は、ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤(SP)を用いた。さらに、空気量を調整するために、消泡剤としてポリアルキレングリコロール誘導体を、AE助剤としてアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤(AE)を用いた。

2.2 配合条件及び粉体構成

表-3に配合条件、表-4に配合表をそれぞれ示す。

配合条件は、実施工での適用実績がある配合条件を基に定めた。水粉体比(W/P)を32%、単位粉体量(P)

表-1 使用材料

	記号	材料名	密度 (g/cm ³)
主材料	BS	高炉スラグ微粉末 4000	2.90
	OPC	普通ポルトランドセメント	3.16
刺激材	HAC	高エーライトセメント	3.16
	EX	石灰系膨張材	3.05
	CHs	特号消石灰	2.24
	AG	無水石膏	2.90
結合材	LS	石灰石微粉末	2.71
	S	鬼怒川産川砂	2.63
細骨材	G	笠間産砕石(5号6号混合)	2.64
粗骨材	W	上水道水	1.00
水	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤	1.05
減水剤	AE	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤AE剤	1.01
AE剤	DF	ポリアルキレングリコロール誘導体	1.00
消泡剤			

表-2 セメントの鉱物組成

記号	密度 (g/cm ³)	ブレン比表面積 (cm ² /g)	鉱物組成(ボーグ式)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
OPC	3.16	3340	56.0	18.0	9.0	9.0
HAC	3.16	4780	71.1	1.8	8.6	10.3

を 500kg/m³とした。目標スランプフロー値は、施工性の向上のため 450±50mm、目標空気量は、十分な凍結融解抵抗性を付与するために 5.5±1.0%とした。

粉体構成については、実施工現場において用いられた配合を基に粉体量を調整した配合を A25 とし、それを基に BS の一部を OPC または、HAC に置換した配合をそれぞれ O シリーズ、H シリーズとした。なお、EX、CHs、LS の混和量は一定とした。また、これらの配合に対し DF を混和した配合を D シリーズとした。

2. 3 実験項目及び方法

(1) 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。

(2) 空気量試験

JIS A 1128「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。

(3) スランプフローの経時変化

練り上がり直後から 0, 30, 60, 90 分後におけるスランプフロー値を測定した。練り上がったコンクリートは練り板に乗せてビニールシートで覆い、20℃に設定した室内で静置させた。測定は、所定の時間にスコップを用いて十分に練り混ぜた後行った。測定後、式(1)を用いてスランプフロー減少率(%)を算出した。

$$Loss = \frac{(SLF_{-200}) - (SLF_0 - 200)}{(SLF_0 - 200)} \times 100 \quad (1)$$

ここで、Loss：スランプフロー減少率(%)

SLF：x 分後(x=30, 60, 90)のスランプフロー値(mm)

SLF₀：練り上がり直後のスランプフロー値(mm)

(4) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ100×200mm の円柱供試体を用い、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。養生条件は、20℃水中養生にて材齢 3,7,28 日まで行った標準養生及び、65℃蒸気養生後、材齢 14 日

まで 20℃ 気中静置とした蒸気養生の 2 条件とした。

(5) 凍結融解試験

JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験法」の水中凍結水中融解試験方法に準拠した。

3. 実験結果及び考察

3. 1 フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-5 に示す。

試験の結果、DF を混和した D シリーズにおいて同程度のスランプフロー値となるために必要とした SP 添加率は減少する傾向を示した。コンクリートには、エントラップトエアと呼ばれる比較的粗大で形状が不均一な気泡が潜在的に存在する。これに対し、AE 剤によって連行される空気は微細かつ均一であるエントレインドエアであり、流動性を付与するとされている³⁾。よって、DF と AE を併用することにより、コンクリート中のエントラップトエアを除去し、エントレインドエアの割合が増加したため流動性が向上したと考える。

また、AE 剤の添加率は、D シリーズの方が大幅に増加する傾向を示した。これは、潜在的に存在したエントラップトエアが DF によって除去されたため、目標の空気量を得るために必要とした AE が増加したと考える。

3. 2 スランプフロー経時変化測定結果

スランプフロー減少率の経時変化を図-1、図-2 にそれぞれ示す。

試験結果より、DF を混和することにより、経時変化に伴うスランプフロー減少率は減少する傾向を示した。これは、AE 剤混和により連行される空気は経時変化に伴い減少が少ないことが一因であると考えられる。

表-3 配合条件

W/P (%)	単位粉体量 (kg/m ³)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)
32	500	450±50	5.5±1.0

表-4 配合表

	単位量(kg/m ³)											
	W	BS	OPC	HAC	EX	CHs	AG	LS	S	G	DF	
A25	160	375	0	0	30	40	25	30	719	975	0	
O10		365	10									
O20		355	20									
H10		365	0									10
H20		355	0									20
A25D	160	375	0	0	30	40	25	30	719	975	P×1.0%	
O10D		365	10									
O20D		355	20									
H10D		365	0									10
H20D		355	0									20

セメントの混和量及び種類とスランプフロー減少率の関係に着目すると、セメントの種類によらずその混和量を 20kg/m^3 とした配合において経時変化に伴うスランプフロー減少率が低減する傾向となった。本研究では、AE 剤に陰イオン系 AE 剤を用いている。陰イオン系 AE 剤は、連行された気泡が Ca^{2+} により強固なものとなる³⁾。そのため、セメントの混和量を 20kg/m^3 とした配合 O20D, H20D においてスランプフロー保持性が良好となったと考える。また、A25D はセメント無混和としたにも関わらず、スランプフロー減少率が小さくなる傾向を示した。これは、セメントを無混和としたことにより、水和反応に伴い消費される自由水量が減少し流動性に寄与したと考える。

3. 3 硬化性状試験結果

標準養生を行った際の圧縮強度試験結果を図-3に、蒸気養生を行った際の圧縮強度試験結果を図-4にそれぞれ示す。

図-3より、いずれの配合も DF 無混和時と比べて僅かに圧縮強度が増加する傾向を示した。また、DF を無混和とした配合では、セメント混和量を 20kg/m^3 とした配合の方が低下する傾向を示した。一方、DF を混和した配合では、セメント混和量を 20kg/m^3 とした配合の圧縮強度が 10kg/m^3 と同等もしくはそれ以上となった。これは、DF を混和したことによって、硬化体中の気泡組織が緻密化し、強度発現に寄与したと考える。また、セメント混和量を 20kg/m^3 とした配合の方がコンクリート中に析出する Ca^{2+} の量が多いことから、より強度発現が顕著となったと考える。

蒸気養生の場合、標準養生における試験結果と同様に、いずれの配合も DF を混和することにより圧縮強度が増加する傾向を示しており、その傾向はより顕著となった。これは、DF に加え C_3S の水和反応によって生成した C-S-H によって硬化体がより緻密化されたため、標準養生時よりも高い強度発現を示したと考える。

3. 4 凍結融解試験結果

各配合における凍結融解試験結果を図-5、図-6にそれぞれ示す。

なお、DF シリーズの試験結果は、本稿執筆時点(平成27年1月12日)における試験結果を示す。

図-3より、O20D を除く配合において DF を無混和とした配合よりも高い凍結融解抵抗性を示した。よって、DF 及び AE を併用することにより、凍結融解抵抗

性を向上することができる。と考える。

セメントの種類で比較をすると、セメントの種類を HAC とした配合の方が、凍結融解抵抗性がより向上する傾向を示した。これは、DF を無混和とした場合、H シリーズが O シリーズと比べてコンクリート中にエンタラップトエアが多く混入していたためであると考えられる。これに対し DF を混和することにより、練混ぜ時に混入したエンタラップトエアを除去し、併用した AE 剤によって耐凍害性の向上に寄与するエンタラップトエアが連行されたため、凍結融解抵抗性が向上したと思

表-5 フレッシュ性状試験結果

配合名	SP	AE	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)
	Px(%)	Px(%)			
A25	1.3	0.1	440	5.6	19
O10	1.6	0.4	500	6.4	19
O20	1.7	0.6	500	6.5	19
H10	1.4	0.6	500	6.0	20
H20	1.7	0.5	500	5.9	18
A25D	1.2	1.2	455	6.5	18
O10D	0.8	1.3	455	6.0	19
O20D	0.8	1.2	485	5.5	19
H10D	1.2	0.8	425	6.5	18
H20D	1.2	0.7	500	4.5	18

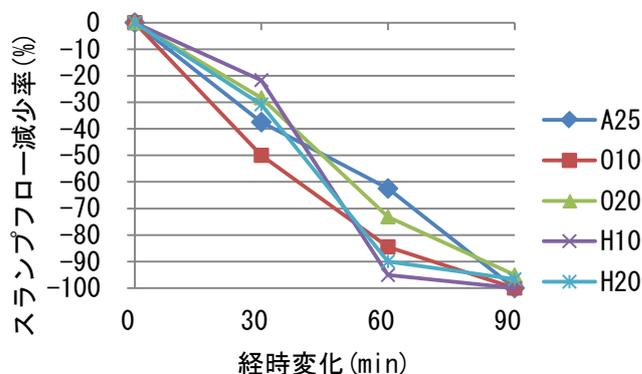


図-1 スランプフロー減少率(DF 無混和)

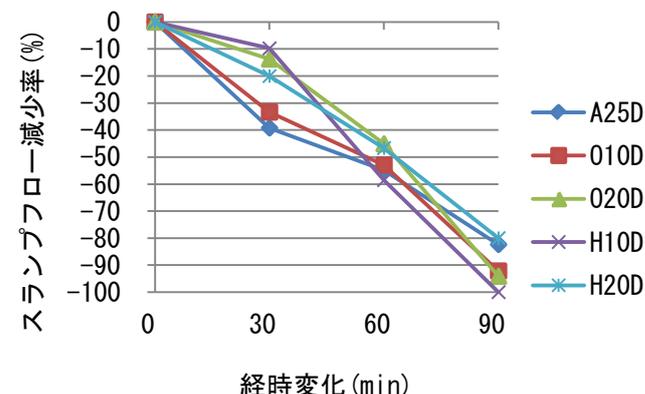


図-2 スランプフロー減少率(D シリーズ)

われるが、今後気泡組織に関する検討が必要であると考える。

4. まとめ

セメント産業における CO₂ 排出削減及び産業副産物である高炉スラグ微粉末の有効利用を目的とし、高炉スラグ微粉末を多量混和したコンクリートの各種性状改善に関する検討をした。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) DF を混和することにより、目標スランプフロー値を得るのに必要となる SP 添加率が減少する。
- (2) DF を混和することにより、経時変化に伴うスランプフロー減少率を低減することができる。
- (3) DF を無混和とした配合と比べ、僅かながら圧縮強度が増加する。
- (4) DF を無混和とした配合と比べ、凍結融解抵抗性が向上する傾向を示す。

謝辞

本研究を行うにあたり、株式会社デイ・シイの鯉淵清氏、二戸信和氏には、ご多忙の中、研究に対する様々

なご助言を数多く頂戴するとともに、多量の材料をご提供いただきましたこと、ここに記し御礼申し上げます。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金、基礎研究(C) 課題番号 23566547(平成 23~27 年度)の支援を受けて行った研究の一部であることを記し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：2011 年度温室効果ガス排出量
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2011ghg.pdf>
- 2) 鉄鋼スラグ協会：平成 24 年度鉄鋼スラグ需給の概要
<http://www.slg.jp/pdf/fs-136-01.pdf>
- 3) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'08, p.23, 2008
- 4) 公益社団法人日本材料学会：コンクリートの混和材料ハンドブック, p.94, 2004

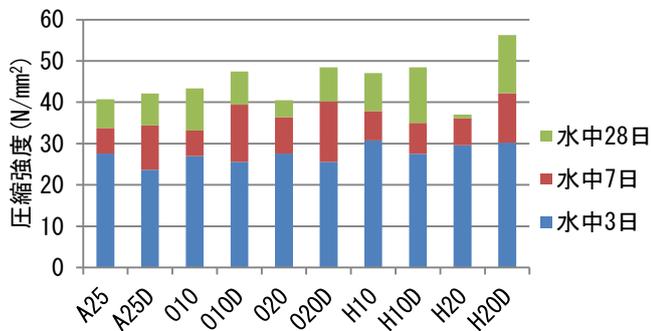


図-3 圧縮強度試験結果(標準養生)

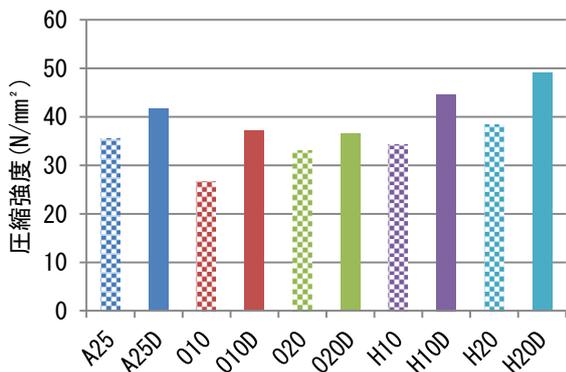


図-4 圧縮強度試験結果(蒸気養生)

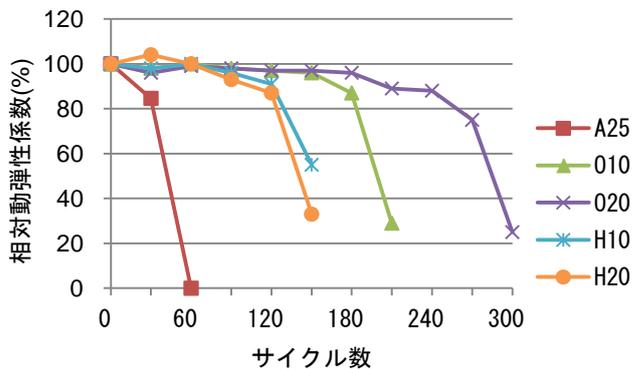


図-5 凍結融解試験結果(DF 無混和)

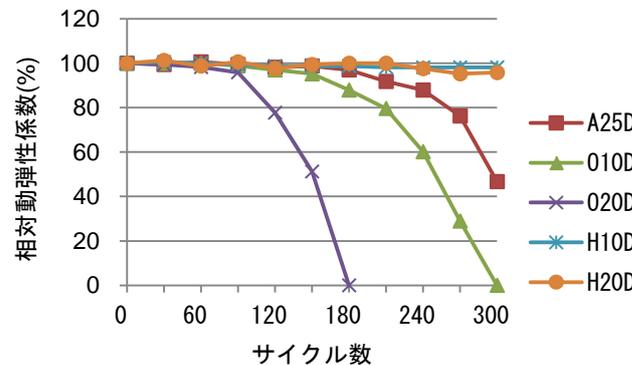


図-6 凍結融解試験結果(D シリーズ)