

第一セメント(株) 正会員 神崎隆男 第一セメント(株) 反町達也
 第一セメント(株) 広島明男 足利工業大学 依田彰彦

1. はじめに

高炉スラグ微粉末(BS)、フライアッシュ(FA)を用いた低発熱混合セメントは水密性、海水、薬品などの化学抵抗性に優れているが、気中構造物に使用した場合、同一W/Cでは中性化の進行が速く、またBSを用いたセメントは自己収縮が議論されている。以上のことを踏まえ、本研究は低発熱混合セメントを構成するBSの粉末度の影響、SO₃量の影響、更にFAを混合した影響について、圧縮強度、耐海水性、(促進・暴露養生)、中性化、耐薬品性、凍結融解、ひび割れ発生試験、乾燥収縮、自己収縮試験を行い総合的に耐久性の再確認を行った。また低熱、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと比較検討を実施した。本実験のうち乾燥収縮、自己収縮については、宮沢らが報告している。¹⁾

今回は、促進耐海水性試験、海水暴露試験の材齢20年迄のうち1年、凍結融解試験の結果について検討したので報告する。

2. 実験

実験に用いたセメントは、表1に示した母体材料をプレミックスした。細骨材は、表乾比重2.60、吸水率1.70%、粗粒率2.67の君津産山砂、粗骨材は最大寸法20mm、表乾比重2.69、吸水率0.51%、粗粒率6.79の石灰岩質碎石、水は上水道水を使用した。コンクリートの配合を表1に示した。普通コンクリートは、材齢91日設計基準強度(f'_{ck})を27、35N/mm²、

スランプ15±2.5cm、空気量4.5±1.5%とし、リグニン系AE減水剤を使用した。材齢91日の高強度コンクリートはf'_{ck}を45N/mm²、スランプフロー60±5cm、空気量4.5±1.5%とし、ボリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した(NCは材齢28日をf'_{ck}とした)。促進耐海水性試験は、フレッシュコンクリートを5mmのフルイに通してモルタル分を採取し、4×4×16cmの型枠に成型後、翌日脱型の上、28日間標準養生を行った供試体を48時間海水に浸漬後、60°C、48時間乾燥を1サイクルとした試験を7サイクル実施した。塩分浸透深さは、促進養生後、供試体を半分に切断し、その断面にフルオレセインナトリウム溶液と硝酸銀溶液を噴霧し、白色部を測定した。塩化物イオン濃度は、またもう1片の切断面より外周部から7mmまでを表層、7~14mmまでを中層、14mmから中心部までを深層として、105μmフルイを全通する分析試料を作成し、測定した。海水暴露試験は、コンクリートを20×20×30cm型枠に成型後、翌日脱型し、91日間標準養生を行い川崎市運河にて干満潮の繰り返す場所に材齢1年まで浸漬し、φ10×20cmコア供試体を採取後、割裂し、塩分浸透深さおよび表面より1、3、5cm付近の塩化物イオン濃度を測定した。凍結融解試験は、コンクリートの打込み温度を10°Cとし、JIS R 6204付属書により行った。

3. 実験結果と考察

試験結果を表3に示す。

促進海水性試験 BS粉末度の違いでは、BS60%の混合セメントは、図1、2に示すとおり、BS4000から6000にすることにより塩分浸透深さが小さくなり、塩化物イオン濃度も中層までは少なくなった。FAを

表1 実験に使用したセメント・混和材							
セメント種類 No.	記号	母体材料の混合割合(%)			BS の粉 末度 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	母体材料の説明と物性
		NC	BS	SO ₃ (AG)			
1	B4S2	38.0		2.0 (2.0)	4000		NC 普通ポルトランドセメント 比表面積:3380cm ² /g
2	B6S1	40.0	60.0	0.9 (-)	-		LC 普通ポルトランドセメント 比表面積:3280cm ² /g
3	B6S2	38.0		2.0 (2.0)	6000	3.00	BS 高炉スラグ微粉末4000 比重:2.90 比表面積:4390cm ² /g 塩基度:1.78
4	B6S3	36.1		3.0 (3.9)			高炉スラグ微粉末6000 比重:2.90 比表面積:4150cm ² /g 塩基度:1.81
5	B4F20			2.0 (2.4)	4000		AG 無水石膏 比表面積:3380cm ² /g SO ₃ :56.2%
6	B6F20	29.6	48.0		20.0		FA フライアッシュ 比表面積:2730cm ² /g 強熱減量:1.9%SiO ₂ :31.4% アルカリ一般燃焼量:0.3mg/g
7	INC	100	-	2.2 (-)	-		
8	LC	-	-	2.2 (-)	-	3.16	FA
					100	-	
						3.22	

表2 コンクリートの配合						
配合 No.	セメント 記号	F _{ok}	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	混和材 C x %
1	B4S2	27	59.5	45.7	152	0.25
2	B6S1					
3	B6S2					
4	B6S3					
5	B4F20					
6	B6F20					
7	INC	35	60.0	46.2	160	0.25
8	LC		60.0	46.7	156	
9	B4S2		47.4	43.4	156	
10	B6S2		47.4	43.7	154	
11	B4F20	45	40.4	42.2	148	1.65
12	B4S2		37.8	49.0	145	
13	B4F20		33.0	46.7	145	
14	LC		46.4	50.6	150	

20%混合したセメントでは、BS粉末度の違いによる塩化物イオン濃度の差は認められなかった。また塩化物イオン濃度は、混合セメントの方が、NC、LCより少なかった。これは塩素浸透性に悪影響を及ぼすと言われている $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量がBSの混和により少なくなり（特に微細なBS）外部から浸透した塩分が供試体表面付近でフリーデル氏塩として固定されるためと思われる^{2,3)}。図3に示すとおり SO_3 量の影響では、中層、深層において僅かに SO_3 量の増加とともに高くなる傾向を示した。表層においては、 SO_3 量 0.9%、3.0%で高い値を示した。表3に示すとおり f'_{ck} の違いでは強度の増大に伴い、塩分浸透深さが小さくなり(B6S2は除く)中層の塩化物イオン濃度も低くなかった。

海水暴露試験 図4に示すとおり材齢1年の表層における塩化物イオン濃度は、BSの粉末度による影響がみられなかった。またFAを20%混合したセメントは、塩化物イオン濃度が一番低く、NC、LCは高い値を示した。

凍結融解試験 普通コンクリート(f'_{ck} 27 N/mm²場合)200サイクルまで殆ど差がなく、図5に示すとおり300サイクルではBS6000を用いた混合セメントの相対動弾性係数が高くなり、NC、LCと同等以上となった。BS4000を用いた混合セメントは、FAの混合により相対動弾性係数が高くなつたが、BS6000を用いた混合セメント系では、FAの混合により低い値となつた。図6に示すとおり、混合セメントは、高強度コンクリート(45N/mm²)になると相対動弾性係数が高くなり、LCでは、0(OUT)となつた。その原因として①混和剤量が他に比べて多い。②打込み温度が10°Cと低い。③凝結時間が遅く、ブリーディング量が多い。

④凍結融解を開始する材齢は14日であるため強度が低い。などが考えられる。

4.まとめ

低発熱混合セメントを構成する材料がコンクリートの耐久性に及ぼす影響のうち耐海水性(促進、暴露1年)、凍結融解に及ぼす影響について検討した結果、以下のことがわかつた。①BS6000を用いることにより、促進耐海水性、凍結融解作用に対する耐久性は向上したが、材齢1年における海水暴露では、差がみられなかつた。② SO_3 量が高くなるにつれ促進耐海水性試験では、中層、深層において塩化物イオン濃度が僅かに高くなる傾向を示した。③FAを20%混合することにより、海水暴露試験では、塩化物イオン濃度が一番低くなり、NC、LCは高い値を示した。⑤設計基準強度の増大により、耐海水性、凍結融解作用に対する抵抗性は向上した。

参考文献

- 1)宮沢ら「低熱セメントを用いたコンクリートの収縮」コンクリート工学論文集1997、No.1、p739~744
- 2)鯉川ら、「高強度、高耐久性高炉セメントを用いた高強度コンクリートの実用化研究(その1)」日本建築学会大会学術講演梗概集 1991 p867~868
- 3)依田ら、「20年間海水の作用を受けた高炉セメントコンクリートの耐久性に関する研究」セメント・コンクリート論文集 No.45、1991、p502~507

No.	セメント	表3 試験結果									
		供試海水性試験結果			海水暴露試験結果(材齢1年)			海水暴露試験結果(材齢20年)			
		海水露 水濃度 度(ppm)	塩化物イ オニ濃度 度(ppm)	浸透深 さ(cm)	海水露 水濃度 度(ppm)	塩化物イ オニ濃度 度(ppm)	浸透深 さ(cm)	表面 中層 深層 厚さ(mm)	表面 中層 深層 厚さ(mm)	表面 中層 深層 厚さ(mm)	表面 中層 深層 厚さ(mm)
1	BS4S2	4.5	1542	971	81	10.7	1530	30	30	98	98
2	BS6S1	3.8	2039	427	83	7.0	1590	30	30	98	95
3	BS6S2	2.6	581	560	138	8.7	1600	40	40	99	96
4	BS6S3	3.9	1638	709	130	8.0	1440	50	40	99	95
5	BAF2	5.7	1451	431	139	10.2	940	60	30	96	95
6	BAF2	5.3	1709	442	157	10.3	700	70	40	99	95
7	NC	8.0	2488	2071	946	18.2	2700	300	40	98	96
8	LC	2.9	2568	2157	1432	13.5	2390	88	40	100	97
9	BS4S2	4.8	2617	526	83	7.9	1450	50	30	—	—
10	BS6S2	4.3	481	183	82	6.9	1400	40	30	—	—
11	BAF2	4.6	2049	455	153	8.0	900	40	30	—	—
12	BS4S2	2.1	2073	95	29	7.8	1270	55	45	100	100
13	BAF2	4.0	1918	133	16	6.0	833	55	15	100	98
14	LC	1.5	2047	1129	287	9.8	2305	65	40	94	20
										OUT	OUT

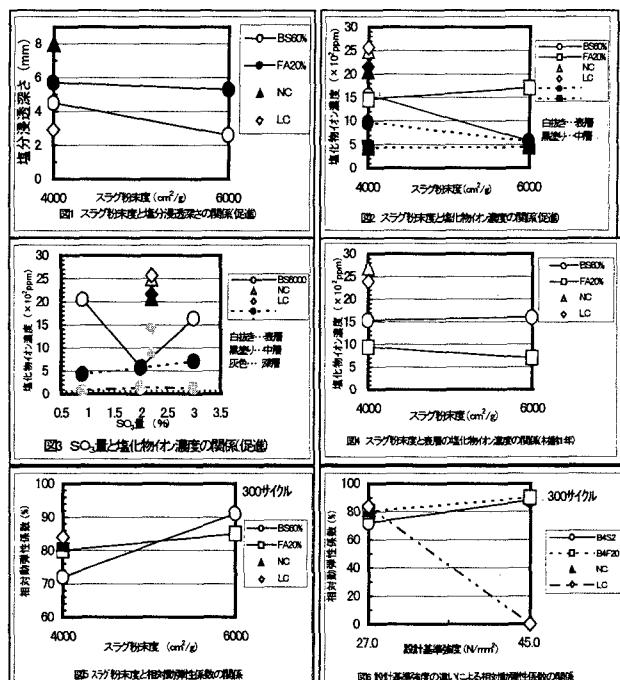


図3 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図4 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図5 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図6 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図7 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図8 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図9 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図10 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図11 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図12 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図13 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図14 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図15 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図16 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図17 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図18 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図19 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図20 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図21 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図22 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図23 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図24 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図25 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図26 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図27 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図28 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図29 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図30 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図31 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図32 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図33 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図34 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図35 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図36 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図37 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図38 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図39 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図40 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図41 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図42 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図43 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図44 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図45 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図46 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図47 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図48 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図49 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図50 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図51 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図52 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図53 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図54 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図55 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図56 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図57 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図58 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図59 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図60 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図61 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図62 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図63 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図64 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図65 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図66 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図67 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図68 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図69 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図70 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図71 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図72 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図73 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図74 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図75 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図76 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図77 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図78 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図79 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図80 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図81 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図82 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図83 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図84 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図85 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図86 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図87 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図88 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図89 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図90 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図91 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図92 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図93 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図94 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図95 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図96 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図97 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図98 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図99 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図100 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図101 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図102 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図103 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図104 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図105 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図106 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図107 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図108 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図109 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図110 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図111 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図112 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図113 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図114 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図115 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図116 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図117 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図118 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図119 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図120 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図121 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図122 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図123 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図124 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図125 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図126 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図127 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図128 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図129 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図130 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図131 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図132 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図133 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図134 施工海水性試験結果(海水露水濃度: 1000 ppm)

図135 施工海水性試験結果(海水露水濃度: