

論文 高炉スラグとフライアッシュを混合した低発熱型セメントを用いたコンクリートの材料特性および耐久性

山路 徹^{*1}・濱田 秀則^{*2}・福手 勤^{*3}・船寄 隆^{*4}

要旨: マスコンクリートに発生する温度ひび割れを防ぐための低発熱型セメントの一種として、中庸熱ポルトランドセメントに高炉スラグ・フライアッシュを混合した三成分系低発熱セメントがある。本論文では、この三成分系低発熱セメントを用いたマスコンクリートの養生方法がコンクリートの力学特性や海洋環境下における耐久性に及ぼす影響について検討を行った。その結果、塩分浸透性、凍結融解抵抗性などの耐久性においては十分な性能を有しているが、初期に高温下で養生された場合に強度発現の伸びがやや劣るということが分かった。

キーワード: 低発熱型セメント, マスコンクリート, 養生方法, 強度発現性, 耐久性

1. はじめに

構造物の大型化に伴い、マスコンクリートの施工が広く行われるようになってきている。この設計・施工の際には、セメントの発熱による温度ひび割れが大きな問題となる。この温度ひび割れを防ぐ手段として、①低発熱型のセメントを使用、②コンクリートの内部と表面の温度勾配を均一にするため、型枠に断熱性のあるものを使用して養生を行う(以下、「断熱養生」)、③コンクリートの温度を下げる、等が行われる。

①の低熱型セメントの一種として、比較的発熱量の低い中庸熱ポルトランドセメント(M)に高炉スラグ(BB)・フライアッシュ(FA)を混合した三成分系低発熱セメントがある。しかし、このセメントを用いたマスコンクリートに断熱養生を行った場合等、初期の養生方法がコンクリートの特性および耐久性に及ぼす影響についてはまだ明確にされていない。

そこで本論文では、三成分系低発熱セメントを用いたマスコンクリートの養生方法がコンクリートの力学特性や海洋環境下における耐久性に及ぼす影響について検討を行っている。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用したセメントの物性を示す。ここで、三成分系低発熱セメントの混合比(質量比)はM:BB:FA=23:50:27である。

骨材は、細骨材として鳥取県上山佐産の砕砂(表乾密度2.62g/cm³, 吸水率1.28%, 粗粒

表-1 使用したセメント

セメントの種類	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	水和熱 (J/g)	CaO量 (%)
普通ポルトランドセメント	OPC	3.16	3380	-	64.8
高炉セメントB種	BB	3.04	3990	-	54.0
三成分系低発熱セメント	MFB	2.73	4950	206	35.5

注)水和熱は28日

- *1 運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室 工修(正会員)
- *2 運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室長 工博(正会員)
- *3 運輸省港湾技術研究所構造部長 工博(正会員)
- *4 運輸省第三港湾局境空港港湾工事事務所工事課長

率2.77), 粗骨材として鳥取県熊野産の碎石(表乾密度 2.64g/cm^3 , 吸水率1.32%, 粗粒率6.69)を用いた。混和剤はAE減水剤(Ad_1), 高性能AE減水剤(Ad_1 : MFBの場合のみ使用), 空気量調整剤(Ad_2)を用いた。

2.2 配合

試験に用いた配合を表-2に示す。目標スランプは12cm, 目標空気量は4.5%とした。また, 練混ぜは温度が 5°C ・ 25°C の2種類の環境で行った。

2.3 養生方法

本試験は養生方法の影響を検討するため, 様々な方法で供試体の養生を行った。図-1に4種類の養生方法およびその温度履歴を, 表-3に試験

水準一覧を示す。以下, 各養生方法について説明する。なお, 文中の「」内の用語は図-1中の用語に対応している。

①標準水中: 5°C および 25°C で練混ぜ・打設を行った供試体を材齢2日(OPCのみ1日)まで打込み時と同一環境に静置し, 脱型後 20°C で「水中養生」を行った。

②封緘: 5°C および 25°C で練混ぜ・打設を行った供試体表面をラップで覆い, ビニール袋に密封し, 材齢7日まで同一環境に静置した(「封緘養生」)。その後脱型し, 20°C ・80%RHの環境で引き続き養生を行った(「気中養生」)。

③断熱: 「封緘養生」と同様の方法で密封した供試体に対して, マスコンクリートに断熱型枠を使用した際に生じる仮想温度履歴を与えた(「断熱養生」)。この温度履歴は実際のマスコンクリー

表-2 配合およびフレッシュ性状

セメント	練混ぜ温度($^\circ\text{C}$)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				Ad_1 (kg/m^3)	Ad_2 (g/m^3)	sl (cm)	Air (%)	練上り温度($^\circ\text{C}$)
				W	C	S	G					
OPC	5	50	47.4	169	338	824	953	5.1	6.8	10.0	4.7	9.0
	25		47.4	172	344	818	947	5.2	10.3	14.0	4.7	26.0
BB	5	50	47.0	169	338	812	955	5.1	10.1	11.0	3.8	8.0
	25		47.0	172	344	806	948	5.2	13.8	10.5	3.8	26.0
MFB	5	50	44.0	150	300	783	1040	5.6	78.0	10.5	3.7	6.6
	25		44.0	150	300	783	1039	6.0	84.0	12.5	5.0	26.0

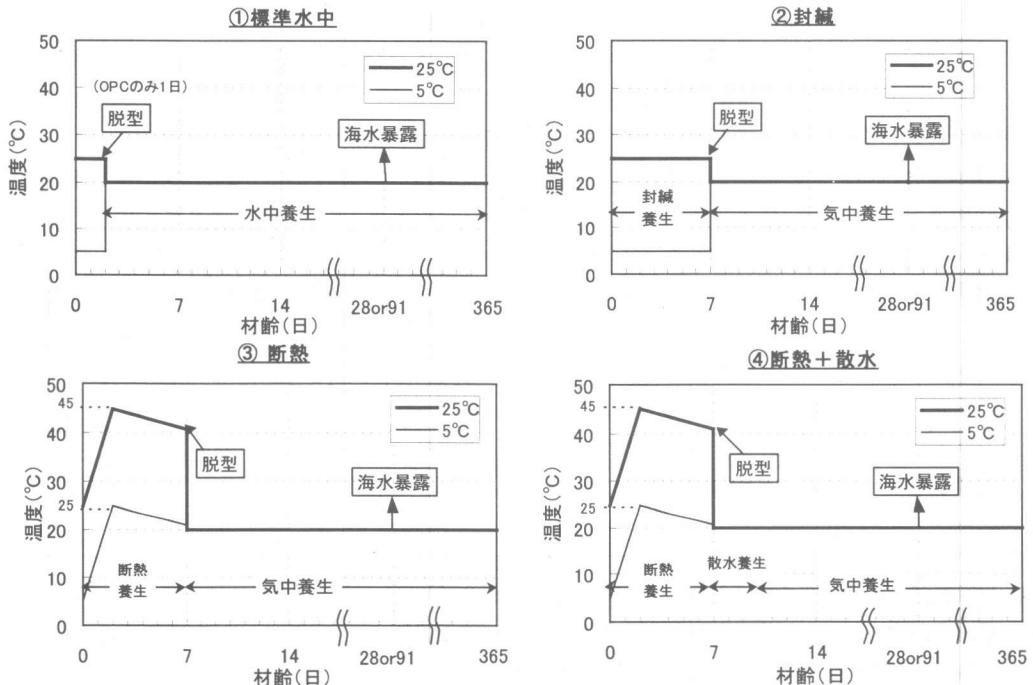


図-1 養生方法および各養生における温度履歴 (凡例の 5°C ・ 25°C は練混ぜ温度)

表-3 試験水準一覧

セメント	練混ぜ温度(°C)	初期養生方法 (図-1参照)
OPC	5°C	①標準水中 ②封緘
	25°C	①標準水中 ②封緘
BB	5°C	①標準水中 ②封緘
	25°C	①標準水中 ②封緘
MFB	5°C	①標準水中
		②封緘
		③断熱
		④断熱+散水
	25°C	①標準水中
		②封緘
		③断熱
		④断熱+散水

ト構造物の温度応力解析結果に基づいて定めたものであり、供試体外部環境を10°C/日で2日間上昇させ、0.8°C/日で5日間降下させることにより与えた。その後脱型し、「気中養生」を行った。④断熱+散水:「断熱養生」後、脱型を行い、20°C・80%RHの環境において供試体を養生シートで覆い、シート上から散水し、3日間静置して養生を行った(「散水養生」)。その後「気中養生」を行った。

2.4 試験方法

(1) 試験実施材齢および暴露方法

圧縮試験は、前述の養生環境下にある供試体に対し、材齢7日、28日、91日、365日に実施した。塩化物イオン浸透深さおよび塩化物イオン量測定は、前述の養生環境下にある供試体を基準材齢(OPC・BBが28日、MFBは91日とした)から港湾技術研究所構内の海水水槽中の海中部(干満なし)に暴露し、材齢365日に試験を行った。この水槽中の塩化物イオン濃度は約17g/lである。凍結融解試験および細孔径分布測定は、前述の養生環境下にある供試体に対し、基準材齢に実施した。以下に各試験方法の概要について述べる。

(2) 圧縮試験

φ10×20cm供試体を用い、JIS A 1108に準拠して実施した。

(3) 塩化物イオン浸透深さ測定

φ10×20cm供試体を長軸方向と平行に割裂し、

割裂面に0.1%フルオロイントリウム溶液および0.1N硝酸銀溶液を噴霧して、供試体表面から蛍光を発する範囲の深さを塩化物イオン浸透深さとした。

(4) 塩化物イオン量測定

φ10×20cm供試体底面から深さ方向に0~10、10~20、20~30、30~40、40~50mmの範囲で試料を採取し、JCI-SC4に準拠し電位差滴定方法により全塩分量を測定した。なお、供試体の側面部および打込み面はアクリル樹脂塗料でシールし、供試体底面を上にして、その面からのみ塩分が浸透する状態にして暴露した。

(5) 凍結融解試験

10×10×40cmの供試体を用い、JSCE-G501に準拠して行った。

(6) 細孔径分布測定

φ10×20cm供試体の中心部分から試料を切り出し、前処理後、水銀圧入法により行った。

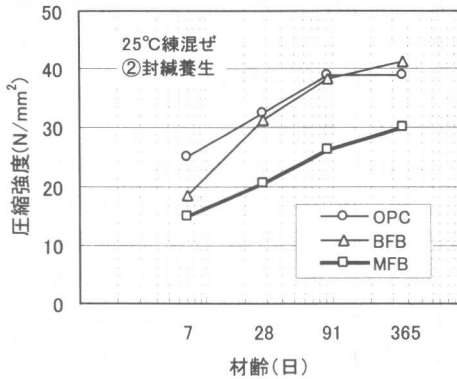
3. 実験結果

3.1 圧縮強度

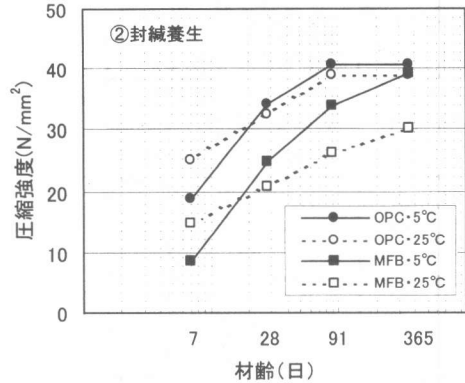
図-2に各セメントを用いて25°Cで練り混ぜ、②封緘養生を行った場合の圧縮強度を示す。MFBは他に比べて強度が小さいことが分かる。

図-3にセメントがOPCおよびMFBで、5°Cおよび25°Cで練り混ぜ、②封緘養生を行った場合の圧縮強度を示す。いずれも初期温度の影響が見られ、特にMFBにおいて顕著に現れている。すなわち、25°Cの場合初期においては5°Cの場合よりも強度が大きい、次第に強度の伸びが小さくなる傾向にあった。これは初期に温度が高いと、急速な水和反応により、セメント粒子の周りが密度の高い水和物で覆われ、その後の水和を抑制している¹⁾ためと考えられる。

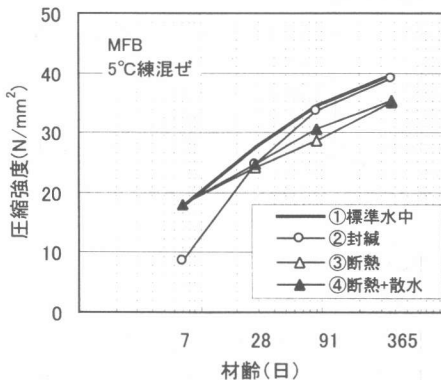
図-4および図-5にセメントがMFBで、5°Cおよび25°Cで練り混ぜ、各種養生を行った場合の圧縮強度を示す。5°Cの場合は①標準水中と他の養生方法との差は比較的小さいが、25°Cの場合は養生方法②~④において、初期は標準水中養生よりも強度発現が大きい、次第に低下し、伸びが小さくなる傾向にあった。この結果も図-3の結果と同様に、養生方法②~④において、初期に①



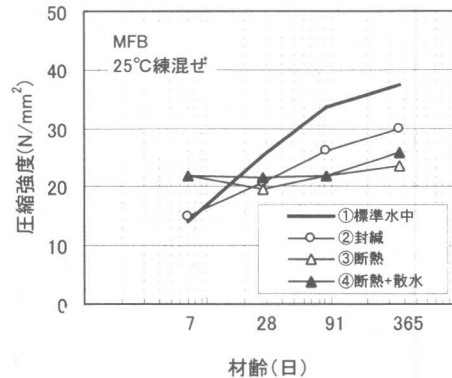
図—2 圧縮強度に及ぼすセメントの影響



図—3 圧縮強度に及ぼす初期温度の影響



図—4 圧縮強度に及ぼす養生方法の影響(5°C)



図—5 圧縮強度に及ぼす養生方法の影響(25°C)

標準水中よりも高温の温度履歴を受けたことに起因していると思われる。また、養生方法②～④を比較すると、顕著な差はないものの、②封緘>③断熱、④断熱+散水となっており、④の「散水」の顕著な効果は認められなかった。

以上の結果から、高温環境下でのマスコンクリート打設の際にMFBを使用する際には、強度発現性が低くなる可能性があるため、配合選定などを注意して行う必要がある。

3.2 塩化物イオンの浸透性

図—7に練混ぜ温度が25°Cで、①標準水中および②封緘養生を行った場合の塩化物イオン浸透深さを示す。OPCに比べ、BBおよびMFBの浸透深さがかなり小さい。これは高炉スラグの潜在水硬性およびフライアッシュのポゾラン反応により組織が緻密になったためと考えられる。またOPC・BBにおいて②封緘の方が①標準水中

よりも浸透深さが2倍以上大きくなっている。この結果は、初期養生が塩分浸透性に非常に大きな影響を及ぼすことを示唆している。

図—8にセメントがMFBで、5°Cおよび25°Cで練り混ぜ、各種養生を行った場合の塩化物イオン浸透深さを示す。25°Cの方が5°Cよりもやや浸透深さが大きくなる傾向にある。また養生方法による顕著な差は認められなかった。

図—9は練混ぜ温度が25°Cで、②封緘養生を行った場合の塩化物イオン量の分布を示す。OPC>BB>MFBの順に奥まで塩化物イオンが浸透していることが分かる。またBBおよびMFBは表面近傍にしか塩化物イオンが存在していないことがわかる。これは高炉スラグが表面に塩分を固定し、内部まで浸透しなかったためと考えられる²⁾。

図—10はセメントがMFBで、5°Cおよび25°Cで練り混ぜ、各種養生を行った場合の塩化物イオン量の分布を示す。図—8と同様に初期温度・養

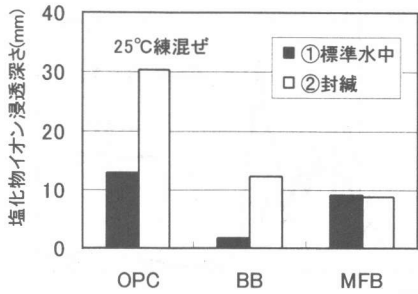


図-7 塩化物イオン浸透深さ (セメント別)

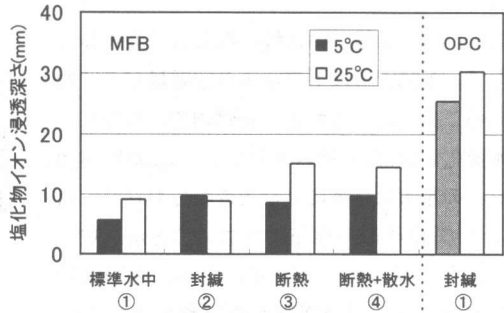


図-8 塩化物イオン浸透深さ (MFB・養生方法別)

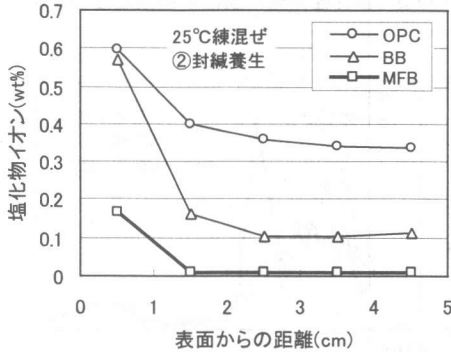


図-9 塩化物イオン分布 (セメント別)

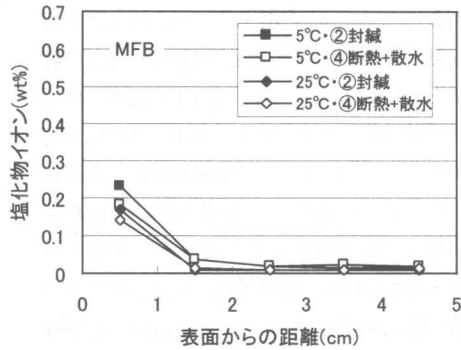


図-10 塩化物イオン分布 (MFB・養生方法別)

養生方法による差はほとんど認められなかった。すなわち、MFBの塩分浸透性はOPC・BBとは異なり、温度・養生方法の影響を受けにくいといえる。

以上の結果からMFBは塩分浸透性が非常に低く、海洋環境下における耐久性に優れているといえる。

3.3 凍結融解抵抗性

図-11にセメントがMFBで、5°Cおよび25°Cで練り混ぜ、各種養生を行った場合の凍結融解試験結果を示す。25°C・④断熱+散水養生の際に相対動弾性係数がやや低くなっているが、全体として概ね良好な凍結融解抵抗性を示す結果となった。また、圧縮強度が小さくなるほど相対動弾性係数が小さくなる傾向となった。

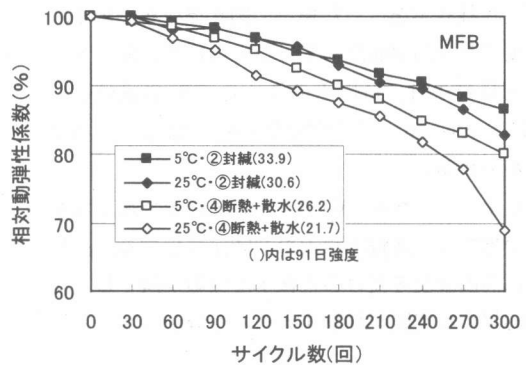


図-11 凍結融解試験結果

3.4 微細構造

図-12に練混ぜ温度が25°Cで、②封緘養生を行った場合の細孔径分布を示す。OPC・BBによる明確な差は見られないが、MFBはそれらと

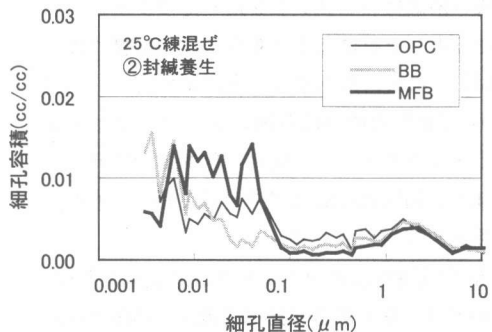


図-12 細孔径分布に及ぼすセメントの影響

比べて0.1~1 μm 程度の比較的粗大な空隙が非常に少なく、0.05 μm 以下の微小な空隙量が多くなっていることが認められる。骨材周辺に存在し、主に水酸化カルシウムから構成されている遷移帯は0.05~2 μm の粗大な空隙に富むとされており³⁾、MFBにおいて遷移帯の存在が少ないことが示唆される。また、本論文では割愛したが、電子顕微鏡観察結果および粉末X線回折試験結果においても、水酸化カルシウムの存在は認められなかった。

図-13にセメントがMFBで、5 $^{\circ}\text{C}$ および25 $^{\circ}\text{C}$ で練り混ぜ、④断熱+散水養生を行った場合の細孔径分布を示す。25 $^{\circ}\text{C}$ の場合に0.01 μm 以下の微小な空隙が減少し、0.05~0.1 μm 辺りの空隙量が極端に多くなっている。これは前述のように高温履歴を受けたことに起因すると思われる、その結果圧縮強度などに悪影響を及ぼしていると考えられる。文献14)によれば、圧縮強度と0.01 μm 以上の細孔容積の間に相関があり、今回においても同様の結果となった。

図-14にセメントがMFBで、25 $^{\circ}\text{C}$ で練り混ぜ、各種養生を行った場合の細孔径分布を示す。初期に長く高温履歴を受けたものほど、図-13と同様に0.01 μm 以下の微小な空隙が減少し、0.05~0.1 μm 辺りの空隙量が多くなっていることが分かる。

以上のことから、MFBを用いることで微小な空隙が増加し、比較的粗大な空隙が減少するが、初期に高温履歴を受けると微小な空隙が減少し、比較的粗大な空隙が増加することが分かった。

4. 結論

三分系低発熱セメントを用いたコンクリートの特性およびそれに及ぼす養生方法の影響について検討し、得られた結果を以下に示す。

- (1) 強度発現の伸びは普通ポルトランドセメント・高炉セメントの場合に比べてやや低い。また、初期に高温履歴を受ける場合、強度発現の伸びは低くなる。
- (2) 塩分浸透性は普通ポルトランドセメント・高炉セメントの場合に比べて低く、耐海水性に非常に優れているといえる。また強度発現と

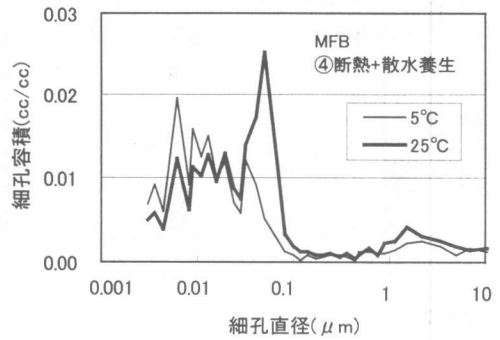


図-13 細孔径分布に及ぼす初期温度の影響

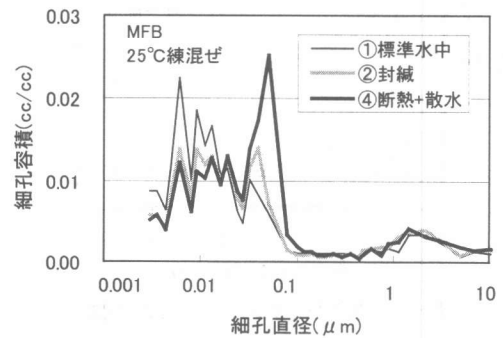


図-14 細孔径分布に及ぼす養生方法の影響

異なり、養生方法の影響を受けない。

- (3) 凍結融解抵抗性は養生方法の影響を受け、高温履歴を受ける場合、やや抵抗性に劣る。

参考文献

- 1) 森本丈太郎他：初期高温養生したポルトランドセメントの細孔構造に関する研究、コンクリート工学論文集、第7巻第1号、1996.1
- 2) 小林一輔他：高炉セメントコンクリートの塩化物遮へい性能(I) - EPMAによる面分析結果 -、41巻6号、1989.6
- 3) 内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響、コンクリート工学、Vol.33, No.9, pp.5-17, 1995.9
- 4) 福手勤他：水和熱による温度履歴がマスコンクリートの力学特性および耐久性に及ぼす影響、土木学会論文集、No.641, V-46, pp.117-132, 2000.2