

フライアッシュセメントにメタカオリン含有人工ポゾランを混合した 三成分系コンクリートの海洋環境下における耐久性に関する検討

鹿児島大学工学部 学生会員 ○上田 尚道 鹿児島大学大学院 正会員 武若 耕司
鹿児島大学大学院 正会員 山口 明伸 鹿児島大学大学院 学生会員 江口 康平

1. はじめに

著者らは、炭鉱ボタや石炭灰を利用して人工的に製造されるメタカオリン含有人工ポゾラン(以下、メタカオリン)と呼ばれる材料について以前から検討を行っており、高炉セメントにメタカオリンを混合することで、高炉セメントの塩害耐久性を損なうことなく、問題点となっている初期強度や乾燥収縮ひずみを改善できることを確認している。

一方、石炭火力発電所から排出されるフライアッシュは年々生産量が増加しており有効活用が求められている。著者らは、フライアッシュセメントの更なる高品質化を目指して、フライアッシュセメントにメタカオリンを混合した三成分系コンクリートについて検討を行っており、強度試験と乾燥収縮試験を行った結果、強度改善は認められなかったが乾燥収縮の低減効果を確認している。そこで本論では、実海洋環境での耐久性について検討するため海洋暴露試験を実施した結果について報告する。

2. 材料特性

実験に使用した材料の基礎物性値および蛍光X線分析装置(XRF)にて測定した化学組成を表-1に示す。メタカオリンは、普通ポルトランドセメント(以下、普通セメント)や高炉スラグ微粉末、フライアッシュに比べて比表面積が大きく、非常に粒子の細かい材料である。また、化学組成に注目すると、 SiO_2 や Al_2O_3 、 CaO を多く含む材料である。

表-1 物性値と化学組成

	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	化学組成 (mass%)						
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O
普通ポルトランドセメント	3.15	3370	18.0	4.5	4.3	66.9	1.6	3.5	0.6
高炉スラグ微粉末	2.90	4189	30.7	14.1	0.4	44.1	7.4	1.7	0.3
フライアッシュ 種	2.25	4614	65.0	19.2	5.7	5.0	1.1	0.7	1.7
メタカオリン	2.70	8233	34.0	14.6	1.9	32.7	9.1	5.4	0.7

表-2 供試体配合

W/B (%)	s/a (%)	供試体名	結合材混合割合 セメント:アッシュ:メタカオリン	単位量(kg/m^3)							sp (%)
				水	セメント	アッシュ	メタカオリン	石膏	川砂	粗骨材	
50	45	OPC	100:00:00	175	350	0	0	0	818	1000	0.20
		FB	80:20:00		280	70	0	0	808	987	0.20
		C72:F18:M10	72:18:10		252	63	33	1.75	807	986	0.26
		C64:F16:M20	64:16:20		224	56	67	3.50	805	984	0.25
		C56:F14:M30	56:14:30		196	49	100	5.25	804	983	0.24

3. 実験概要

実験に使用した供試体配合を表-2に示す。配合決定に際しては水結合材

比(W/B)を50%、単位水量を $175\text{kg}/\text{m}^3$ で一定とした。目標スランプ値は $9\pm 2\text{cm}$ 、目標空気量を $2\pm 0.5\%$ とし、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤で流動性を調整した。供試体には、普通セメントを使用した普通コンクリート(OPC)、普通セメントの20%をフライアッシュで置換し、フライアッシュセメントB種相当としたもの(FB)に加え、FBの結合材の一部をメタカオリンで置換し、メタカオリン混合フライアッシュセメントとして使用した三成分系コンクリート(C72:F18:M10、C64:F16:M20、C56:F14:M30)の計5種類とした。なお、メタカオリンに関しては、既往の研究を参考に、無水石膏を内割り5%添加した。暴露供試体を図-1に示す。供試体はかぶり2cm、3cm位置にそれぞれ、D10鉄筋を2本ずつ埋設した $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体であり、初期水中養生を28日間施した。その後、気中環境に静置し、供試体端部から5cmまでエポキシ樹脂で被覆した後に暴露を開始した。なお、角柱供試体と同時に作製した円柱供試体についても併せて暴露を行っている。暴露環境は鹿児島県谷山港内の暴露場の干満帯で行った。ここでは、暴露経過1年経過時の各供試体における圧縮強度、中性化深さ、全塩化物イオン量および鉄筋腐食状況について、調査結果を示す。

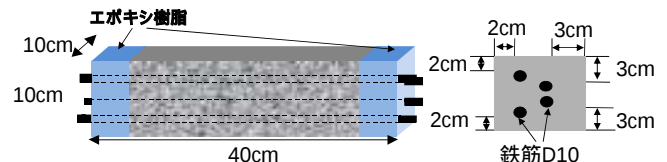


図-1 供試体形状

比(W/B)を50%、単位水量を $175\text{kg}/\text{m}^3$ で一定とした。目標スランプ値は $9\pm 2\text{cm}$ 、目標空気量を $2\pm 0.5\%$ とし、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤で流動性を調整した。供試体には、普通セメントを使用した普通コンクリート(OPC)、普通セメントの20%をフライアッシュで置換し、フライアッシュセメントB種相当としたもの(FB)に加え、FBの結合材の一部をメタカオリンで置換し、メタカオリン混合フライアッシュセメントとして使用した三成分系コンクリート(C72:F18:M10、C64:F16:M20、C56:F14:M30)の計5種類とした。なお、メタカオリンに関しては、既往の研究を参考に、無水石膏を内割り5%添加した。暴露供試体を図-1に示す。供試体はかぶり2cm、3cm位置にそれぞれ、D10鉄筋を2本ずつ埋設した $10\times 10\times 40\text{cm}$ の角柱供試体であり、初期水中養生を28日間施した。その後、気中環境に静置し、供試体端部から5cmまでエポキシ樹脂で被覆した後に暴露を開始した。なお、角柱供試体と同時に作製した円柱供試体についても併せて暴露を行っている。暴露環境は鹿児島県谷山港内の暴露場の干満帯で行った。ここでは、暴露経過1年経過時の各供試体における圧縮強度、中性化深さ、全塩化物イオン量および鉄筋腐食状況について、調査結果を示す。

4. 実験結果および考察

図-2、3は、既往の研究で得られた圧縮強度試験、乾燥収縮試験結果である¹⁾。これら、フライアッシュセメントにメタカオリンを混合しても明確な初期強度改善効果はないが、収縮ひずみを低減させる効果が確認された。

一方、本検討で得られた干満帯に1年間暴露した円柱供試体の強度試験結果を図-4に示す。いずれの供試体も材齢に伴い強度は増加しているが、海洋暴露を行った場合でも、初期強度の改善効果は認められず、いずれの配合でも、暴露1年経過時でOPCの強度を下回り、FBと同程度の強度となっていた。

暴露1年時の中性化深さを図-5に示す。OPC、FB供試体においては中性化が確認されなかったが、メタカオリンを混合したC72:F18:M10とC56:F12:M30供試体において0.5mm未満と非常に僅かではあるが中性化が確認された。また、供試体内部のpHを確認したところ、相対的にpHが低くなっており、メタカオリンを混合したことで結合材中のセメント量が少なくなることに加え、メタカオリンのポゾラン反応によって $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を消費することから、中性化に対する抵抗性低下することが予想された。

図-6には供試体内部の全塩化物イオン量分布を示す。OPC供試体は鉄筋位置である2cm位置で腐食発生限界量である $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を上回る塩分が確認された。一方で、混和材を使用したコンクリートはいずれも供試体内部への塩分浸透を抑制していたが、表層部を見ると、メタカオリンを混合した供試体はFBよりも塩分量が低くなっており、メタカオリンを混合することで、コンクリート内部を緻密化し、FBよりも高い遮塩性が得られたと考えられた。全塩化物イオン量分布状況を基に算出した見掛けの拡散係数を図-7に示す。拡散係数を見ると混和材を混合した供試体はOPC供試体の約1/3程度の値となっており、メタカオリンコンクリートはいずれの配合でもFBよりも値が小さく、拡散係数から見てもメタカオリンを混合することで高い遮塩性が得られることがわかる。

次に、鉄筋腐食面積率を図-8に示す。まずかぶり2cm鉄筋について見てみると、鉄筋位置まで塩化物イオンの浸透が確認されたOPC供試体において僅かではあるが腐食が確認されたのに対し、混和材を混合したその他の供試体においては干満帯暴露1年後でも腐食の発生は認められない。次に、かぶり3cm位置の鉄筋について見ると、殆どの供試体において腐食が見られなかったが、3cm位置への塩分浸透が殆ど見られなかったC56:F12:M30供試体において、点錆程度の非常に僅かな腐食が認められた。これについては、メタカオリンによる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費により、供試体内部のpHが相対的に減少し、少量の塩分でも不動態が破壊された可能性が示唆され、今後の検討課題である。

5. まとめ

フライアッシュセメントにメタカオリン含有人工ポゾランを混合した検討を行った結果、塩分浸透に対する向上効果が確認されたが、中性化抵抗性は低下する傾向にあり、今後、継続的に暴露を行い、より長期的な評価を行っていく必要がある。なお、本研究はメタカオリン含有人工ポゾラン実用化委員会の協力により実施した研究の一部である。

参考文献：1) 久徳大貢ほか：フライアッシュセメントにカオリン系人工ポゾランを混合した三成系系コンクリートの収縮特性に関する検討 土木学会西部支部研究発表会, V-046, pp.815-816, 2012

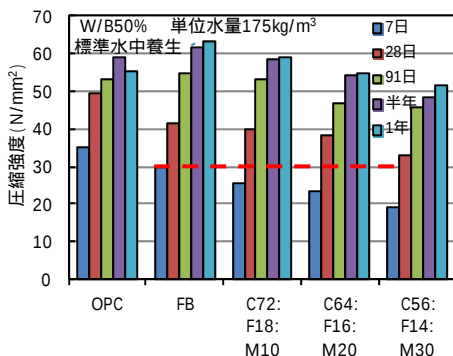


図-2 圧縮強度

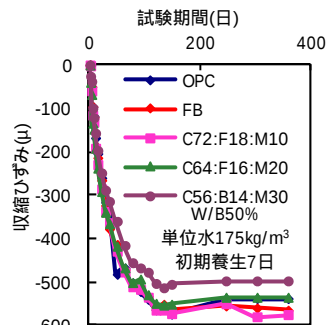


図-3 収縮ひずみ

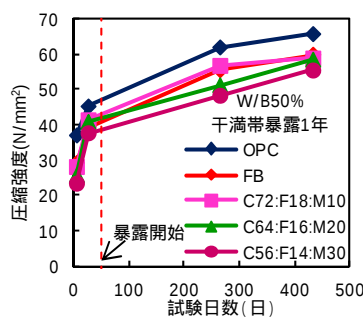


図-4 圧縮強度の経時変化

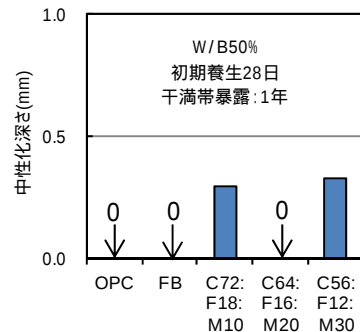


図-5 中性化深さ

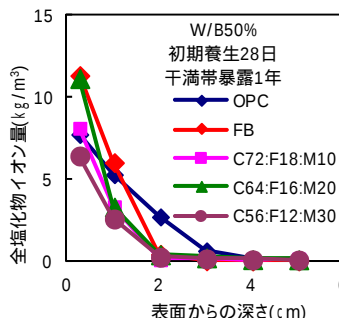


図-6 全塩化物イオン量

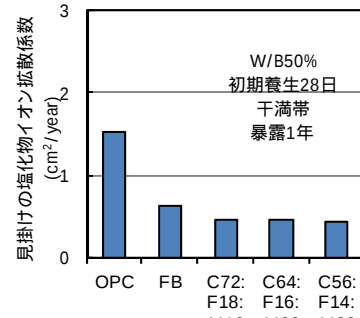


図-7 見掛けの塩化物イオン拡散係数

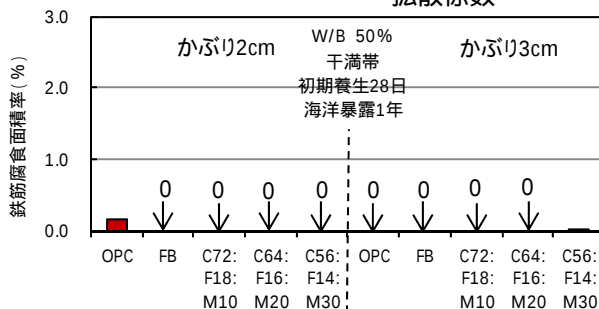


図-8 鉄筋腐食面積率