

# 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コンクリートの海洋環境下での耐久性に関する基礎的検討

鹿児島大学大学院 学生会員 ○ブイキャンハオ  
鹿児島大学大学院 正会員 山口明伸

鹿児島大学大学院 正会員 武若耕司  
鹿児島大学大学院 学生会員 畠中優成

## 1. はじめ

近年高炉スラグやフライアッシュなどの産業副産物を活用した環境負荷低減型コンクリートが広く利用されている。これらの混合セメントを用いたコンクリートは、長期強度、塩化物イオン等の劣化因子の浸透抑制効果の向上等の長所が存在する反面、初期強度の低下や乾燥収縮ひずみの増大等の問題が存在する。一方、メタカオリン含有人工ポゾラン（以下、MKP）は、炭鉱ボタや石炭灰などの産業廃棄物を利用して製造されたポゾラン材料であり、既往の検討結果から、高炉セメントやフライアッシュセメントに MKP を混合することで、これらの混合セメントを使用したコンクリートの長所である耐久性向上効果を損なわずに、高炉セメントに混合した場合にはその初期強度を改善させ、フライアッシュセメントへの混合では、収縮抵抗性や化学的侵食抵抗性の向上を図れることが明らかとなり、これらの混合セメントの品質改善に MKP が有効であることが確認されている<sup>1)</sup>。しかし、これらの研究結果は実験室で行なわれた試験によって得られた結果であるため、実環境において長期的な挙動を確認する必要があると示唆された。そこで本研究では、フライアッシュセメントに MKP を混合した三成分系コンクリートを作製し、海洋環境（干満帯）に暴露を行なうことで、MKP コンクリートの海洋環境における耐久性評価を試みた。

## 2. 実験概要

実験に用いた供試体は、W/B50%、s/a45%、単位水量 175kg/m<sup>3</sup>で一定として表-1 に示す配合で作製したコンクリート供試体である。なお、結合材混合割合に関しては、普通セメント（C）のみを用いたもの（OPC）、普通セメントの20%をフライアッシュ（F）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）および、フライアッシュセメント B 種相当のものに MKP を併用した場合を想定したもの（C72:F18:M10、C64:F16:M20、C56:F14:M30）の5種類を検討した。なお、いずれのコンクリートも目標スランプ値:9±2cm、目標空気量 2±0.5%を満足するよう高性能 AE 減水剤を使用して調整した。供試体形状は図-1 に示すような 10×10×40cm の角柱コンクリートとし、かぶり 2cm および 3cm 位置に鉄筋を 2 本ずつ埋設するものとした。また同時に、圧縮強度試験用円柱供試体（φ10×20cm）も作製した。作製した供試体は、打設 2 日後に脱枠し、20℃の水中で 28 日間養生後、供試体の両端から 5cm 区間、および鉄筋の露出部分をエポキシ樹脂にて被覆した後、暴露試験を実施した。所定の期間が経過した時点で供試体を解体し、圧縮強度、中性化深さ、全塩化物イオン量、可溶性塩化物イオン量の測定および鉄筋腐食面積率の算出を行なった。今回は、暴露期間 3 年経過時に行なった解体調査結果を中心として、これまでに得られた結果を報告する。

## 3. 実験結果および考察

まず、圧縮強度の経時変化を図-2 に示す。FB の一部を MKP で置換して用いたいずれの供試体も、材齢 28 日

表-1 供試体配

| 供試体名        | W/B (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |    |     |   |     |      |
|-------------|---------|---------|-------------------------|-----|----|-----|---|-----|------|
|             |         |         | W                       | C   | F  | M   | g | S   | G    |
| OPC         | 50      | 45      | 175                     | 350 | 0  | 0   | 0 | 818 | 1000 |
| C80:F20(FB) |         |         |                         | 280 | 70 | 0   | 0 | 808 | 987  |
| C72:F18:M10 |         |         |                         | 252 | 63 | 33  | 2 | 807 | 986  |
| C64:F16:M20 |         |         |                         | 224 | 56 | 67  | 4 | 805 | 984  |
| C56:F14:M30 |         |         |                         | 196 | 49 | 100 | 5 | 804 | 983  |

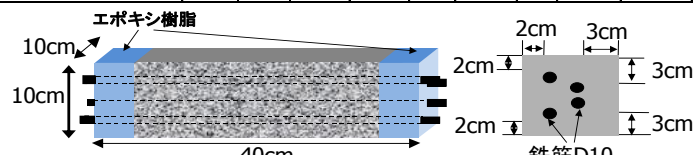


図-1 角柱供試体形状

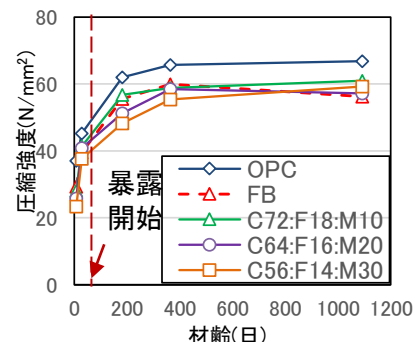


図-2 圧縮強度の経時変化

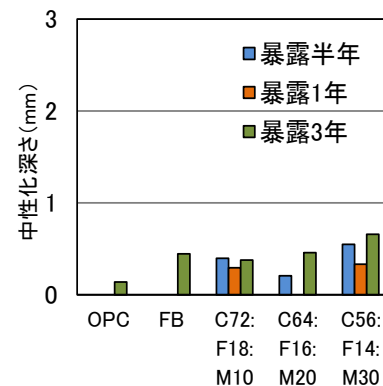


図-3 中性化深さ

時点の目標強度( $30\text{N/mm}^2$ )を確保し、その後3年間経過した時点までの調査結果でもFBと同程度の強度であった。

次に、暴露環境(干満帯)下で耐久性上特に問題となると予想される中性化と塩害に対する検討として、中性化深さおよび全塩化物イオン量の測定を行なった。図-3に暴露半年、1年、3年の解体調査時に行なった中性化深さの測定結果を示す。混和材を混合した供試体はいずれもOPC供試体よりも中性化深さが大きくなった。また、FBにMKPを混合した供試体はFBに比べ、僅かではあるが中性化深さが大きくなった。これは、MKPを混合することで相対的にセメント量が低下することや、ポゾラン反応によってコンクリート内部の水酸化カルシウムが消費されたことにより、中性化が進行したためと考えられた。しかし、いずれの供試体も、暴露3年経過時においても中性化深さは1mm以下と僅かなものであった。図-4に暴露3年時における供試体表面からの深さ方向の全塩化物イオン量分布を示す。供試体表面近傍ではC56:F14:M30を除くいずれの供試体においても塩分量がOPCより多くなっているが、深さ1cm以降では、混和材を混合した供試体はいずれもOPCより塩分量が少ない。また、鉄筋位置である深さ2cm位置においては、全塩化物イオン量がFB、C72:F18:M10、C64:F16:M20、C56:F14:M30の順にそれぞれ、 $3.49$ 、 $1.99$ 、 $1.88$ 、 $0.64\text{kg/m}^3$ と小さくなり、FBに対しMKPを内割りで混合することで、遮塩性が向上することが確認された。これは、MKPを混合することで、コンクリート内部がより緻密化し、外部からの塩分の浸透を抑制したためだと考えられた。そこで、水銀圧入法を用いて供試体内部の細孔構造の分析を行った。結果を図-5に示す。FBと比較し、MKPを混合した供試体はいずれも、毛細管空隙に相当する20~100nmの空隙が減少しており、6~20nmの非常に細かな空隙が増加している。このことから、MKPを混合することで、コンクリートの細孔構造が緻密化することで塩分浸透抵抗性が向上したと考えられた。

図-6に、供試体に埋設していた鉄筋の腐食状況を面積率で示す。OPCはいずれのかぶり位置の鉄筋でも、またFBではかぶり2cm位置の鉄筋において、明らかな腐食が確認されたが、FBのかぶり3cm位置および、MKPを混合した供試体では鉄筋腐食面積率が1%以下と僅かに腐食が確認される程度であった。ただし、FBやMKP使用供試体での鉄筋位置での全塩化物イオン量は $1.0\text{kg/m}^3$ 以下であったにもかかわらず、僅かではあるが鉄筋に腐食が確認されたことから、FBやMKPでは相対的に使用OPC量が減少することでコンクリート内部のpHが幾分低下し、少量の塩分でも鉄筋腐食が発生しやすい状況にあることも推察された。それでも、MKPを混合したコンクリートは暴露3年後でも極めて高い塩分浸透抑制効果を有してことから、今後の腐食の進展に対しては十分に抑制可能と予想された。

#### 4. まとめ

フライアッシュセメントにMKPを混合したコンクリートは、海洋環境下に長期暴露を行なった場合においても、MKPが急速にポゾラン反応を生じてFBと同程度の強度を有し、さらに、コンクリート内部を緻密な組織とする効果が発揮され、結果として塩分浸透抵抗性は向上する結果が得られた。また、MKPを混合することで中性化抵抗性は幾分低下するが、暴露3年経過時においても中性化深さは1mm以下と僅かなものである。結論として、フライアッシュセメントにMKPを混合することで塩害と中性化の複合的影響が懸念される海洋環境下におけるコンクリートの耐久性を向上することが可能であることが確認された。

謝辞：本研究は、「メタカオリン含有人工ポゾラン実用化研究会」の中で実施した検討の一部である。関係各位に心より感謝する次第である。

参考文献：1)江口康平：メタカオリン含有人工ポゾランを利用したコンクリートの品質改善に関する基礎的研究 鹿児島大学博士論文

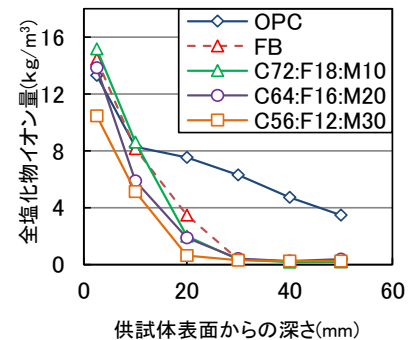


図-4 全塩化物イオン分布

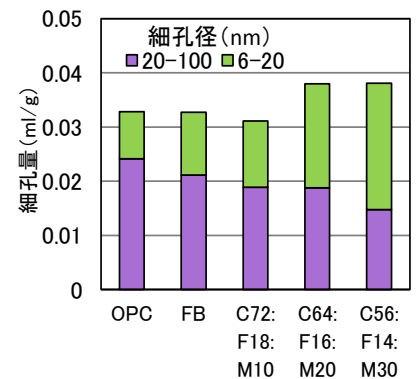


図-5 細孔構造

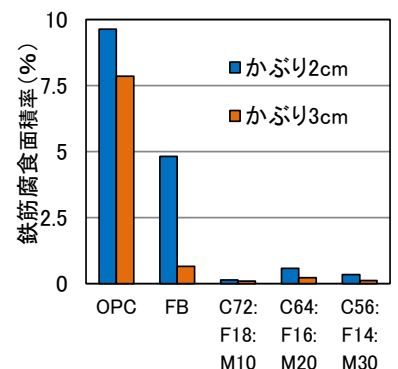


図-6 鉄筋腐食状況