

高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した三成分系コンクリートの収縮特性および耐久性に関する実験的検討

鹿児島大学大学院 学生会員 ○江口 康平 鹿児島大学大学院 正会員 武若 耕司
鹿児島大学大学院 非会員 久徳 貢大 鹿児島大学大学院 正会員 山口 明伸

1. はじめに

近年、耐久性向上を目的として高炉スラグ微粉末を使用した際、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れが発生するという事例の報告が多数あり、その対策として高炉セメントにフライアッシュを混合したコンクリートが実用化され始めている。ただし、塩害や炭酸化といった劣化が単独で作用した場合の耐久性についてはある程度の検討がなされているが、これらが複合的に作用した場合については十分には検討されていない。ここでは、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したコンクリートの乾燥収縮特性あるいは、塩害や炭酸化が単独で作用する場合の耐久性に加え、塩害と炭酸化が複合作用した場合の耐久性についても検討を行った結果を報告する。

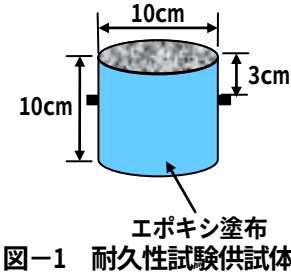
2. 実験の概要

2.1 検討を行ったコンクリートの種類

供試体配合を表-1に示す。配合決定に際しては水結合材比、細骨材率および単位水量を一定、目標スランプを10±2 cmとして高性能 AE 減水剤を用いて流動性を調整した。実験に用いたコンクリートは、セメントとして普通セメントを使用したもの(以下、OPC)、普通セメントの50%を高炉スラグ微粉末で置換し、高炉セメント B 種相当とした高炉セメントを使用したもの(以下、BB)、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 種相当としたフライアッシュセメントを使用したもの(以下、FC)、および上記の高炉セメント B 種相当のセメントの10、20あるいは30%をフライアッシュで置換したフライアッシュ混合高炉セメントを用いたもの(それぞれ OPC:BFS:FA=45:45:10, 40:40:20, 35:35:30)の計6種類である。

2.2 試験内容

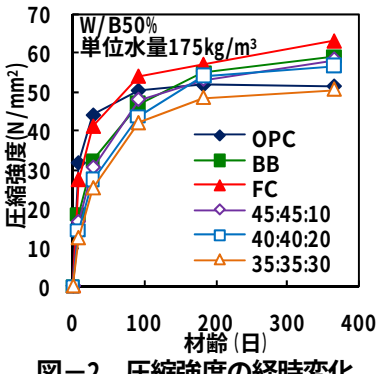
- (1) 圧縮強度試験：φ10×20cmの円柱供試体を用いて、所定の期間(7, 28, 91, 182, 365日)標準水中養生を施した後、「JIS A 1108-2006」に準拠し試験を行った。
- (2) 乾燥収縮試験：端部にゲージプラグを埋設した10×10×40cm角柱コンクリート供試体を用い、初期水中養生期間7日間の後に、相対湿度60±5%、温度20℃の恒温恒湿環境に設置し、所定の期間ごとに収縮ひずみの測定を行った。
- (3) 複合劣化環境下における耐久性試験：実験供試体の形状を図-1に示す。供試体はかぶり3cmとして鉄筋を配筋し、試験面を除く側面および底面はエポキシ樹脂にて被覆を行った。なお、初期養生については、養生期間の違いが耐久性に及ぼす影響についても検討を行うため、養生期間を7, 28日あるいは91日の3種類とした。耐久性試験は、NaCl 5%塩水への浸せきとCO₂濃度5%環境での乾燥を繰り返すことで、塩害と炭酸化の複合劣化促進試験(以下、複合劣化)とした。また、比較用に、蒸留水浸せきとCO₂濃度5%環境での乾燥を繰り返す炭酸化試験(以下、炭酸化)、およびNaCl 5%塩水への浸せきと一般大気中での乾燥を繰り返す塩害試験(以下、塩害)についても併せて検討を行った。なお、何れに試験においても、浸せき3.5日間と乾燥7日間の繰り返しを1サイクルとし、ここでは10サイクルまでの結果を報告する。



3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-2に示す。FCの場合で材齢3カ月以降、BBあるいは、OPC:BFS:FA=45:45:10および40:40:20のコンクリートにおいては材齢6カ月以降において、OPCの強度を上回った。また、OPC:BFS:FA=35:35:30コンクリートでも材齢1年で、OPCと同等の圧縮強度が得られた。



キーワード：高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、乾燥収縮、塩害、炭酸化、複合劣化
連絡先：〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40 鹿児島大学大学院理工学研究科海洋土木工学専攻 TEL099-285-8480

3.2 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の結果を図-3に示す。高炉セメントにフライアッシュを混合したコンクリートは、いずれの配合でもBBよりも収縮ひずみが低減されており、特に、 $\text{OPC:BFS:FA}=35:35:30$ 供試体では、乾燥1年後の収縮ひずみはOPCと同程度となった。そこで、この理由を探るため、それぞれのコンクリートの細孔径分布を測定した結果の一例として、乾燥収縮試験開始直前の初期水中養生7日後の細孔径分布を図-4に示す。BB供試体では、一般に乾燥収縮に最も影響を与えるとされる50~100nm付近で細孔径のピークがあった。それに対して、高炉セメントにフライアッシュを混合した供試体をみると、50~100nm付近の細孔容積はBBよりもやや大きい、200nm程度の細孔径にピークがあり、その領域での細孔容積も大きい。このことより、200nm程度の領域の細孔が、初期の乾燥収縮ひずみの低減に影響した可能性がある。なお、長期的にはフライアッシュの有するポゾラン反応によって緻密化し、約1年間乾燥収縮試験を行った後の細孔径分布では、200nm程度の細孔は減少し、BBと同程度、あるいはそれ以上に緻密なものとなっていた。

3.3 複合劣化環境下における耐久性

養生28日後から炭酸化試験あるいは複合劣化試験をそれぞれ10サイクル行った後の炭酸化深さを図-5に示す。何れの試験においても、高炉セメントにフライアッシュを混入した場合には、フライアッシュ混入量が多くなるほど炭酸化は進行しやすくなる傾向にあった。ただし、フライアッシュ混入量が10%の場合の中性化速度は、高炉セメント単独の場合とそれほど大きな差は認められなかった。なお、いずれの供試体においても、炭酸化単独の環境よりも複合劣化環境の方が、炭酸化深さは小さい結果となった。

図-6には、一例として養生28日後から複合劣化試験を10サイクル行った後の全塩化物イオン量分布を示す。この結果によると、高炉セメントにフライアッシュを混合したもので、その結合材混合割合を $\text{OPC:BFS:FA}=45:45:10$ および $40:40:20$ としたコンクリートの遮塩性は、BBと同程度であった。一方、フライアッシュ置換率30%の $\text{OPC:BFS:FA}=35:35:30$ コンクリートでは、炭酸化の影響により表層部の固定塩分が遊離して供試体内部へ拡散する状況が顕著に現れ、結果として塩分浸透状況はOPCと大差ない状況であった。図-7には、これらの分布をもとに算出した見掛けの塩化物イオン拡散係数を示す。塩害単独の環境では、高炉セメントにフライアッシュを混入した全てコンクリートの拡散係数がBBと同程度あるいはそれ以上であったのに対し、複合劣化環境においては、 $\text{OPC:BFS:FA}=45:45:10$ および $40:40:20$ においてBBの場合よりも小さくなる傾向が認められた。

4. まとめ

B種相当の高炉スラグセメントとフライアッシュを併用したコンクリートは、適切な配合を選定することで、高炉セメントの強度や塩分透抵抗性を損ねずに乾燥収縮ひずみを低減できることが確認された。また、塩害と炭酸化が複合作用する環境でも、フライアッシュ混入量20%程度までは良好な遮塩性を有するが、炭酸化についてはフライアッシュ置換率の増加とともに進行しやすくなることを考慮する必要がある。

参考文献:(財)福井県建設技術公社:「フライアッシュ混合型高炉セメントコンクリート」(温度ひび割れ・乾燥収縮ひび割れ低減型コンクリート)配合・製造および施工指針(案)

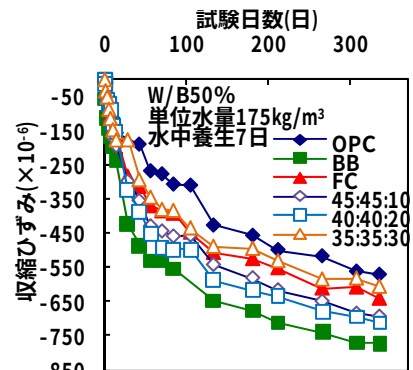


図-3 乾燥収縮ひずみの経時変化

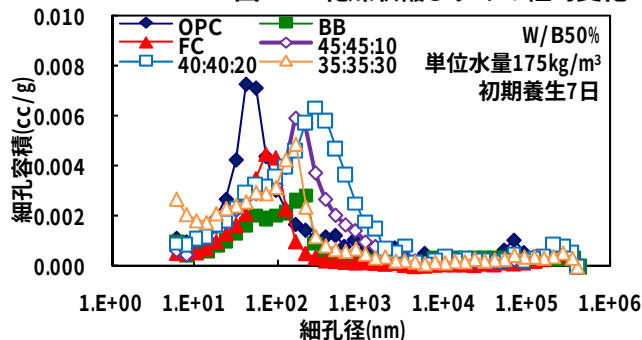


図-4 細孔径分布状況

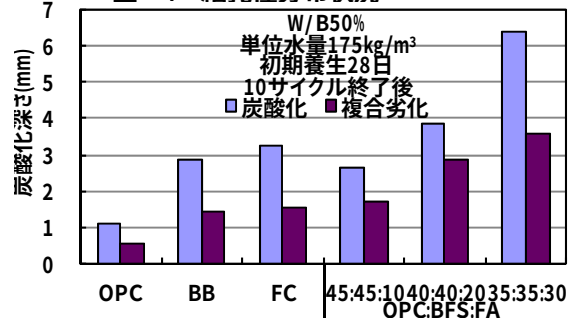


図-5 炭酸化深さ

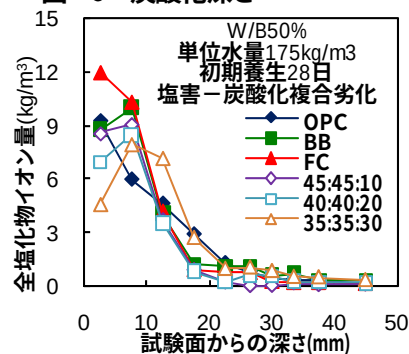


図-6 全塩化物イオン量分布

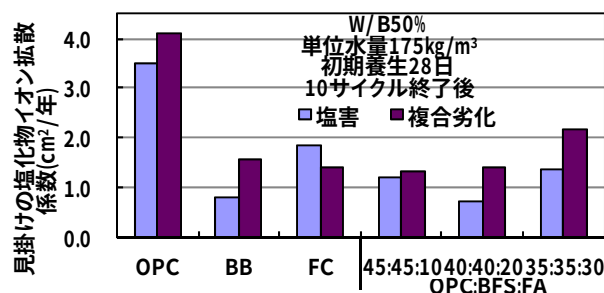


図-7 見掛けの塩化物イオン拡散係数