高炉セメントにフライアッシュを混合した三成分系コンクリートの複合劣化環境下における耐久性に関する実験的検討

鹿児島大学大学院　学生会員　○久徳　貢大　　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　江口　康平　　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セメントを使用した際，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三成分系コンクリートの利用が検討され始めている．著者らは，高炉セメントを用いたコンクリートの性能向上の観点から，この三成分系コンクリートの検討を行っており，高炉セメントを使用した場合に比べて乾燥収縮を抑制しつつ，塩害に対する抵抗性も保持できることを確認している[1)]．しかし，高炉セメントを使用した場合には中性化速度が大きくなることから，塩害に関しても，中性化の影響を加味した複合劣化環境下での検討が必要となる．そこで本研究では，高炉セメントにフライアッシュを混合した三成分系コンクリートに，塩害と中性化が複合的に作用した場合の耐久性について実験的検討を行った．

２．実験概要

2.1 供試体概要

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（W/B），細骨材率（s/a）および単位水量を一定とし，目標スランプを 10±2cm となるよう高性能 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，結合材として普通セメントのみを使用した普通セメントコンクリート（以下，N），N の結合材の 50%を高炉スラグ微粉末で置換し高炉セメント B 種相当として使用した高炉セメントコンクリート（以下，BB），BB の結合材の一部をフライアッシュで内割置換しフライアッシュ混合高炉セメントとして使用した三成分系コンクリート 3 配合（以下，BB+FA10%，BB+FA20%，BB+FA30%）の計 5 種類である．使用した結合材の物性値と化学組成を**表-2** に示す．

表-1　供試体配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					
			W	OPC	GGBS	FA	S	G
N	50	45	175	350	0	0	824	996
BB				175	175	0	818	989
BB+FA10%				158	158	35	814	984
BB+FA20%				140	140	70	810	978
BB+FA30%				123	123	105	805	973

表-2　結合材の物性値と化学組成

材料	密度 (g/cm^3)	ブレーン値 (cm^2/g)	化学組成(mass%)				
			SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
普通セメント（OPC）	3.15	3370	18.0	4.5	4.3	66.9	1.6
高炉スラグ微粉末（GGBS）	2.90	4010	30.7	14.1	0.4	44.1	7.4
フライアッシュⅡ種（FA）	2.25	4614	65.0	19.2	5.7	5.0	1.1

供試体は，**図-1** に示すように，試験面からかぶり 3cm 位置に D10 鉄筋を配筋したφ10×10cm 円柱供試体である．なお，標準水中養生（7，28，91 日の 3 水準）終了後，試験面以外からの劣化因子侵入を防ぐため，試験面を除く面（底面，側面）および鉄筋端部をエポキシ樹脂にて被覆した．

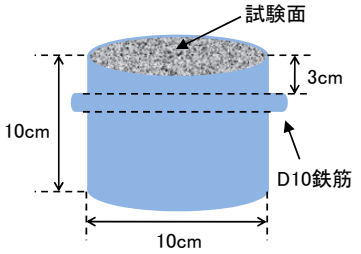

図-1　供試体形状

2.2 耐久性試験方法

耐久性試験は，浸せき 3.5 日間と乾燥 7 日間を繰り返し，計 10.5 日間を 1 サイクルとして 40 サイクルまで実施した．劣化促進サイクルは**表-3** に示すように，塩水浸せき（NaCl 濃度 5%溶液）と CO_2 濃度 5%環境での乾燥を繰り返すことにより，塩害と中性化の複合劣化試験（以下，複合劣化）とした．なお，比較のために単独劣化環境として，蒸留水浸せきと CO_2 濃度 5%環境での乾燥を繰り返す中性化促進試験（以下，中性化），ならびに塩水浸せき（NaCl 濃度 5%溶液）と一般大気中での乾燥を繰り返す塩害試験（以下，塩害）も併せて検討を行い，計 3 種類の試験を実施した．

表-3　劣化促進サイクル

試験	浸せき (3.5日間)	乾燥 (7日間)
複合劣化	NaClaq 5%	CO_2 5%
中性化	蒸留水	CO_2 5%
塩害	NaClaq 5%	一般大気

2.3 検討項目

所定の期間あるいは，サイクルの劣化促進を行った後，(1) 塩分浸透抵抗性（全塩化物イオン濃度測定および拡散係数の算出），(2) 中性化抵抗性（フェノールフタレイン法による中性化深さ測定），(3) 鉄筋腐食抵抗性（トレーシングおよび画像処理による鉄筋腐食面積率の算出）を比較検討し，各配合の耐久性を検討した．

キーワード：高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，三成分系混合セメント，塩害，中性化，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．実験結果

(1) 塩分浸透抵抗性：一例として**図-2** に，初期養生 28 日の後に，複合劣化を 40 サイクル行った場合の全塩化物イオン濃度分布の測定結果を示す．N では，鉄筋位置である 3cm 付近で 2.45kg/m^3 と腐食限界塩分量（1.2kg/m^3）を超える塩分量が確認された．一方で，混和材を用いた供試体は中性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確認されたが，何れの供試体でも鉄筋位置では 1.2kg/m^3 以下の塩分量となっていた．また，これらの塩分分布を基に算出した見掛けの塩化物イオン拡散係数を**図-3** に示す．塩害単独および複合劣化いずれの試験を行った場合も，養生期間が長くなるほど拡散係数は小さくなっていた．また，試験方法で比較すると，混和材を使用した供試体は何れの配合でも塩害単独よりも複合劣化の方が，拡散係数は大きくなり，中性化との複合劣化環境下では塩害抵抗性が幾分低下することが予想される．ただし，いずれの劣化環境においても，三成分系コンクリートが BB と同程度の塩分浸透抵抗性を維持できることが確認された．

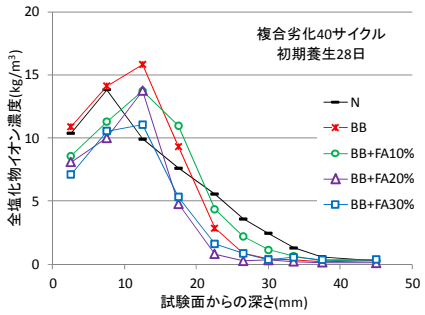

図-2 全 Cl⁻濃度分布

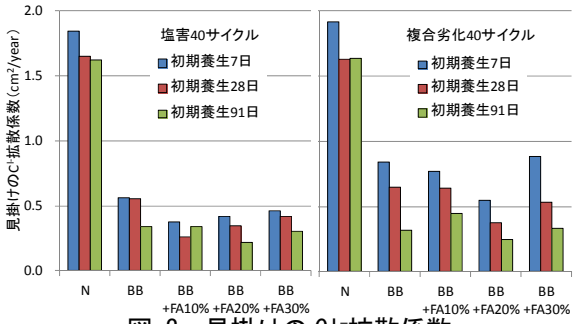

図-3 見掛けの Cl⁻拡散係数

(2) 中性化抵抗性：中性化，複合劣化の両試験を 40 サイクル行った後の中性化深さ測定結果を**図-4** に示す．試験方法で比較すると，複合劣化よりも中性化単独の方が，中性化深さが大きくなる傾向が確認された．また，BB に対するフライアッシュ混合率が 30%になると急激に中性化深さが大きくなっており，普通セメントに対する高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換に伴う結合材中の Ca 量減少の影響だけでなく，フライアッシュのポゾラン反応による $Ca(OH)_2$ の消費が複合的に作用し，中性化速度が急激に増加したと考えられる．

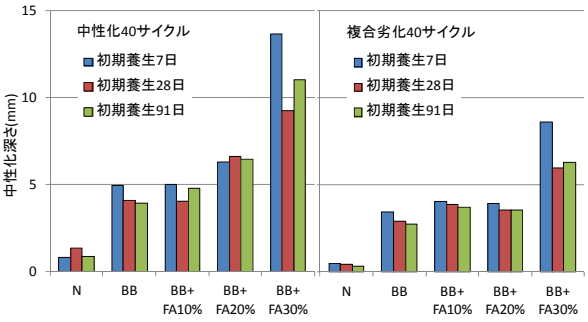

図-4 中性化深さ

(3) 鉄筋腐食抵抗性：複合劣化を 40 サイクル行った後の鉄筋腐食面積率の算出結果を**図-5** に示す．なお腐食率は，鉄筋の表面積に対する腐食面積の比率を 100 分率で示したものである．いずれの供試体もごくわずかな腐食率であったが，BB の腐食率はいずれの養生期間においても普通セメントに比べて小さくなっており，初期養生が不十分な状況でも高炉セメントの持つ塩分固定化能力によって，普通セメントと比べて高い塩害抵抗性が発揮できることが確認された．これに対して，BB+FA10%，BB+FA20%の場合，初期養生 28 日および 91 日では BB よりも高い防食効果が得られたが，初期養生 7 日では BB よりも防食効果が低下する結果となった．さらに BB+FA30%の場合は，N よりも腐食率が高くなっており，鉄筋腐食抵抗性は逆に低くなる結果となった．したがって三成分系セメントの鉄筋腐食抵抗性を評価する場合には，単に塩化物イオンに対する浸透抑制効果だけでなく，$Ca(OH)_2$ 量の相対的な減少やポゾラン反応の進行による細孔構造中の水酸化物イオン量の影響も考慮する必要がある．

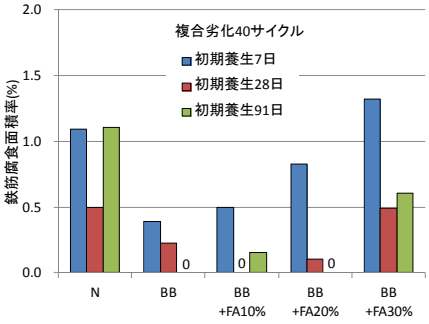

図-5 鉄筋腐食面積率

4．まとめ

高炉セメントとフライアッシュを混合し，結合材混合比を変えた三成分系コンクリートを用いて行った実験的検討により以下の結論が得られた．塩害と中性化が複合的に作用した場合，塩分浸透抵抗性は BB と同程度以上になることが期待されるが，中性化抵抗性に関してはやや低下する．両者の影響により，三成分系セメントを用いる場合は，セメント置換率と初期養生に十分配慮する必要がある．本実験の範囲では，フライアッシュ混合量を 20%以下としたうえで 28 日以上の水中養生を施すことで，BB と同程度の鉄筋腐食抵抗性を維持できることが確認された．

参考文献：1) 江口康平ほか：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，土木学会年次学術講演会 V-262 ， 2011 年