

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耐久性

(株) 安部日鋼工業 正会員 工修 ○辛 軍青
愛知工業大学 正会員 博士(工学) 吳 承寧

Abstract : In this study, it was investigated that the ground granulated blast furnace slag powders (BFS) and fly ash (FA) were admixed with the high-early-strength portland cement (HPC) to improve the concrete durability of prestressed concrete structure. According to results of durability experiments, it is clearly that the resistance to degradation of the ASR can be improved significantly, which compared to the normal concrete used HPC, and/or admixed with BFS or FA only. In addition, compared to the concrete used HPC, it was confirmed that the chloride ion penetration resistance, neutralization resistance, and freezing and thawing resistance were also improved considerably.

Key words : Concrete durability, High-early-strength portland cement, Blast furnace slag, Fly ash

1. はじめに

高炉スラグ微粉末、フライアッシュなどの混和材は、資源の有効利用、CO₂排出量の削減およびコンクリート構造物の耐久性向上の観点から利用の拡大が望まれている。

筆者らは既往の研究において、プレストレストコンクリート(PC)構造物を対象に、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した三成分結合材を使用し、コンクリートの強度発現、水和反応および細孔構造特性について検討した^{1)~3)}。混和材を併用したコンクリートは、ASR劣化抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性などの耐久性の更なる向上が期待されるが、定量的な比較検討が少ないのが現状であり、混和材を使用した多種多様な配合・仕様の中で、混和材併用による耐久性向上効果を適切に評価しにくい面がある。また、これ以外にも、例えば中性化は単位セメント量の減少などに伴い早期に進行する懸念があり、混和材の利用拡大を妨げるひとつの要因となっている。

本研究ではこれらのことを背景に、早強ポルトランドセメントの一部に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各種の耐久性試験を行った。本稿では、ASR促進試験、塩化物イオン浸透抑制試験、促進中性化試験および凍結融解試験の結果を報告し、2種類の混和材を併用したコンクリートの耐久性向上効果を評価した。

表-1 使用材料一覧表

材料分類	種類	記号	特性値・産地など
セメント	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14 g/cm ³ , 比表面積 4,380 cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 6000	B	密度 2.88 g/cm ³ , 比表面積 6,290 cm ² /g
	フライアッシュ(Ⅱ種)	F	密度 2.28 g/cm ³ , SiO ₂ 57.8%, ig-loss 2.5%, 比表面積 3,550 cm ² /g, 活性度指数: 83(28日), 103(91日)
骨材	非反応性骨材	S	岐阜県揖斐川産川砂, 表乾密度 2.30 g/cm ³ , 吸水率 1.29%
		G	岐阜県揖斐川産川砂利, 表乾密度 2.64 g/cm ³ , 吸水率 1.19%
	反応性骨材	S-R	北海道産安山岩砕砂, 表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 2.53%
		G-R	北海道産安山岩碎石, 表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水率 2.02%
混和剤			ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(SP), AE 剤(AE)

表-2 ASR 促進試験のモルタル配合

記号	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	細骨材 反応性
		(W)	(H)	(B)	(F)	(S-R)
H	50	300	600	0	0	1350
HF		300	600	0	60	1290
HB		300	300	300	0	1350
HBF		300	300	300	60	1290

表-3 ASR 促進試験のコンクリート配合

記号	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)							
		水	セメント	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	細骨材 反応性	粗骨材 反応性	高性能 AE 減水剤	AE 剤
		(W)	(H)	(B)	(F)	(S-R)	(G-R)	(SP)	(AE)
H	34	152	447	0	0	740	1026	2.682	0.018
HB	34	152	224	224	0	732	1015	3.584	0.018
HBF	34	152	224	224	45	710	984	4.032	0.027

2. 試験概要

2.1 試験材料

本研究の使用材料を表-1 に示す。セメントは早強ポルトランドセメント (H) を使用し、混和材は高炉スラグ微粉末 6000 (B) とフライアッシュⅡ種 (F) を使用した。また、骨材について、ASR 促進試験は反応性骨材として北海道産安山岩の砕砂と砕石 (S-R, G-R) を使用し、そのほかの試験は ASR に対して無害と判定された川砂と川砂利 (S, G) を非反応性骨材として使用した。

2.2 試験項目

2.2.1 ASR 促進試験

混和材の ASR 劣化抑制効果を確認するため、反応性骨材を使用したモルタルおよびコンクリートの供試体を作成し、それぞれの ASR 促進試験を行った。

(1) モルタル供試体を用いた ASR 促進試験

モルタル供試体の ASR 促進試験は JIS A 1146 に準じて骨材の粒度調整を行って角柱供試体 (40×40×160mm, 3 本/セット) を作成した。表-2 に示すように、配合は結合材の組合せが異なる 4 種類であり、早強ポルトランドセメント単味配合 (H) , フライアッシュを外割 10%置換した配合 (HF) , 高炉スラグ微粉末を内割 50%置換した配合 (HB) , および高炉スラグ微粉末とフライアッシュを上記割合で併用した配合 (HBF) であった。供試体は打設翌日に脱枠して材齢 4 ヶ月まで標準養生し、その後は ASR 劣化を促進させるため 40℃の NaCl 飽和溶液に浸漬して、膨張率を 1/1000mm ダイヤルゲージ付きの長さ変化測定器を用いて定期的に測定した。

(2) コンクリート供試体を用いた ASR 促進試験

コンクリート供試体の ASR 促進試験は円柱供試体 (φ100×H200mm, 3 本/セット) を使用した。表-3 に示すように、水結合材比は 34%、配合は早強ポルトランドセメント単味配合 (H) , 高炉スラグ微粉末を内割 50%置換した配合 (HB) および高炉スラグ微粉末 (内割 50%) とフライアッシュ (外割 10%) を併用した配合 (HBF) の 3 種類とした。

コンクリートはスランプ 10±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%を確保するよう化学混和剤の量を適宜調整した。初期材齢時の養生方法の違いが試験結果に及ぼす影響を検討するため、打設直後の養生は 20℃の封緘養生と給熱促進養生の 2 種類を実施した。給熱促進養生は養生槽を用い、スチーム給湿と同時に最高温度 50℃×6 時間の給熱により行った。いずれの供試体も打設翌日の脱枠後から 3 ヶ月間に標準養生し、その後、供試体は ASR 促進試験のデンマーク法に準じて 50℃の NaCl 飽和溶液に浸漬して、定期的に膨張率を測定した。

2.2.2 塩化物イオン浸透抑制試験

塩化物イオン浸透抑制試験は JIS A 1154 に従い、モルタル円柱供試体 (φ100×H200mm, 3本/セット) を作成し実施した。配合は表-4 に示すように、水結合材比 50%, 40%, 30% の3種類とし、早強単味配合 (H), 高炉スラグ微粉末を内割 50% 置換した配合 (HB), および高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合 (HBF) を取り上げた。初期材齢時の養生方法については、水結合材比 50% と 40% 配合の供試体は、材齢 1 日に 20°C の封緘養生を行い、また、水結合材比 30% の配合は工場製作のプレキャスト PC 部材を想定し、養生槽で最高温度 50°C × 6 時間の給熱促進養生を行った。いずれのケースにおいても供試体は打設翌日に脱枠し、3 ヶ月間の標準養生後に浸透面以外にエポキシ樹脂を塗布し、環境温度 40°C, 10% の NaCl 溶液に浸漬させた。試料は所定の頻度で切り出して硝酸銀滴定法により全塩分量を測定し、塩化物イオン含有量を算出した。

表-4 塩化物イオン浸透抑制試験のモルタル配合

記号	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	細骨材
		(W)	(H)	(B)	(F)	(S)
H-50	50	253	506	0	0	1518
HB-50		252	252	252	0	1512
HBF-50		233	234	234	47	1545
H-40	40	213	533	0	0	1599
HB-40		212	265	265	0	1590
HBF-40		196	245	245	49	1617
H-30	30	216	720	0	0	1440
HB-30		214	357	357	0	1428
HBF-30		197	328	328	66	1444

2.2.3 促進中性化試験と凍結融解試験

コンクリートの促進中性化試験および凍結融解試験は表-5 に示す 3 配合を用いて実施した。

促進中性化試験は JIS A 1153 に、凍結融解試験は JIS A 1148 に従って行った。また、両試験はともにコンクリートの角柱供試体 (100×100×400mm, 3本/セット) を使用し、2.2.1 節のコンクリート供試体と同様な方法で養生して測定を行った。

表-5 促進中性化試験と凍結融解試験のコンクリート配合

記号	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)								スランプ	空気量
		水	セメント	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤	AE 剤	目標値 10.0 ± 2.5	目標値 4.5 ± 1.5
		(W)	(H)	(B)	(F)	(S)	(G)	(SP)	(AE)	(cm)	(%)
H	34	152	447	0	0	728	1011	2.682	0.018	10.0	4.3
HB	34	152	224	224	0	720	1000	2.688	0.018	10.5	4.6
HBF	34	152	224	224	45	698	970	3.205	0.027	12.5	4.0

3. 試験結果

3.1 ASR 促進試験

3.1.1 モルタル供試体の試験結果

モルタル供試体を用いた膨張率の経時変化を図-1 に示す。混和材を使用した配合 (HF, HB, HBF) は早強単味 (H) に比べ膨張率が低く、ASR 反応を大幅に抑制できることが確認された。2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) は 850 日を超えても膨張の動きを示さず、抑制効果は最も大きかった。

一般に、混和材による ASR 劣化抑制のメカニズムにおいては、コンクリート中のアルカリ濃度低減が重要とされる。ここで、過去に行った各配合の主要な水和物である水酸化カルシウム (Ca(OH)₂) の含有量試験結果²⁾ と今回試験の ASR 膨張率の関係について検討した。

図-2 に、膨張率が「無害」の限界値とされる 0.1% に達した日数、および Ca(OH)₂ 含有量との関係を示す。Ca(OH)₂ 含有量は、ASR 促進試験と同じ水結合材比 (50%) のセメントペースト供試体を用い、粉末 X 線回折法 (XRD) を使用した材齢 1 年の測定結果である。また、ASR 促進試験は継続中であり、

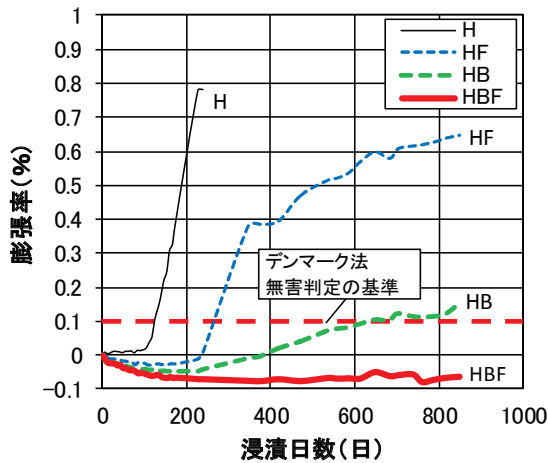


図-1 ASR 促進試験における膨張率経時変化 (モルタル供試体)

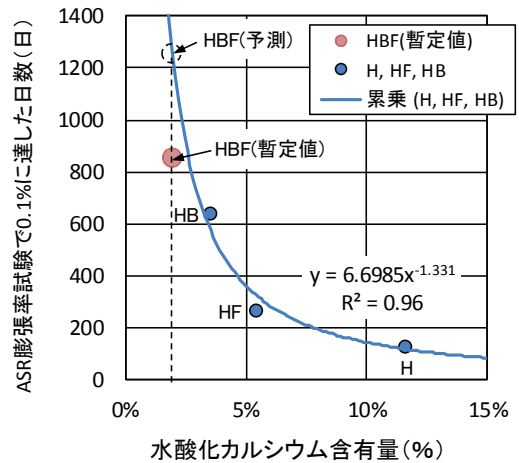


図-2 膨張率が0.1%に達した日数とCa(OH)₂含有量の関係

試験結果の中に2種類併用の配合(HBF)の膨張率はまだ0.1%に達していないため、現時点の試験日数を暫定値として使用した。

試験結果によると、まず、Ca(OH)₂含有量はH, HF, HB, HBFの順で減少したことが分かり、その理由は混和材の使用によりセメントの水和に由来するCa(OH)₂量が少いうえ、混和材のポズラン反応などによりCa(OH)₂量がさらに消費されたと考えられる。次に、膨張率が0.1%に達した日数とCa(OH)₂含有量とは反比例の相関関係を表しており、Ca(OH)₂量が最も少ない2種類併用の配合(HBF)は、日数が最も長くなるのが必然性があると示している。

したがって、混和材の使用によりコンクリート中のアルカリ濃度が低減されることでASRを抑制することができ、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用した配合は最も優れた抑制効果を示した。

3.1.2 コンクリート供試体の試験結果

コンクリート供試体を用いたASR促進試験の結果として、膨張率の経時変化を図-3に示す。

早強単味の配合(H, H-Heat)は、浸漬日数約60日付近から膨張し始めたことが確認され、中には初期材齢時に給熱養生を行った場合(H-Heat)は119日に、湿潤養生を行った場合(H)は182日に膨張率は「無害」の限界値とされる0.1%を超えた。これに対して、混和材の単独使用または併用の配合(HB, HB-Heat, HBF, HBF-Heat)は、270日を超えた時点でもほとんど膨張の動きを示しておらず、ASR反応が大幅に抑制されていることが確認された。ただし、モルタル供試体を用いた試験で明らかになった混和材併用配合(HBF)の優位性を確認するには、より長期的な計測が必要であると考えられる。

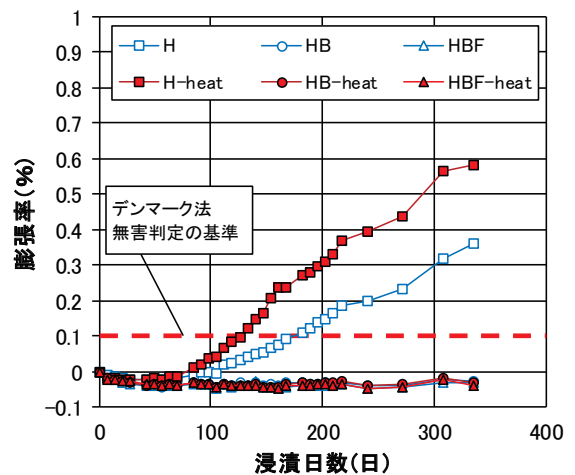


図-3 ASR 促進試験における膨張率の経時変化 (コンクリート供試体)

給熱養生を行ったコンクリートは、反応が早く進行する傾向がある。2種類の混和材を併用した配合はASR抑制効果が大きいことから、ASRを抑制する観点からも給熱養生を行う工場製品に優先的に使用すべきと考えられる。

3.2 塩化物イオン浸透抵抗性

図-4 に、浸漬 1 年の塩化物イオン浸透深さの試験結果を水結合材比ごとに示す。混和材を使用した配合 (HB, HBF) は、早強単味 (H) に比べ塩化物イオンの内部浸透を大幅に抑制できることが確認された。とくに 2 種類の混和材を併用した配合 (HBF) は、水結合材比 50%では表面からの深さ 30mm 以上に、水結合材比 40%、30%では深さ 20mm 以上に塩化物イオンがまったく浸透していないことが分かった。これは 2 種類混和材の併用による組織構造の緻密化および塩分固定効果などにより、塩化物イオンの浸透が緩和されたと考えられる。また、今回の試験では高い水結合材比の配合における抑制効果は明確に示されたが、低い水結合材比 (30%全数, 40%の HBF) を中心に、緻密性が高いケースでは塩分浸透は時間が要するため、今後のデータを確認し耐久性向上効果を評価する予定である。

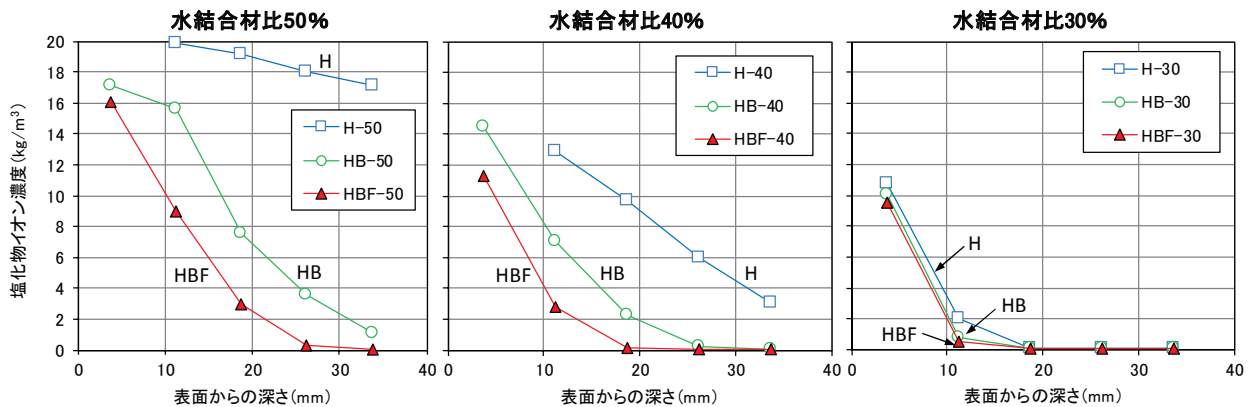


図-4 塩化物イオン浸透深さの試験結果 (浸漬 1 年)

3.3 中性化に対する抵抗性

図-5 に、早強単味 (H)、高炉スラグ微粉末単独使用 (HB)、高炉スラグ微粉末とフライアッシュ併用 (HBF) のコンクリートの促進中性化試験の測定結果を示す。いずれの配合においても初期の養生方法に関係なく中性化深さが 2mm 以内に収まれ、中性化がほとんど進行していない結果であった。

一般的に、コンクリート中の混和材割合が大きいほど中性化が進行しやすい傾向があるが、コンクリートが緻密になり内部空隙が少ないほど中性化が抑制される。本研究では、混和材割合が大きい配合を使用している。一方、PC 構造物に適用するコンクリートとして水結合材比が比較的小さく、また、過去に報告したように、混和材を混合した配合は比表面積が大きい高炉スラグ微粉末 6000 およびフライアッシュ II 種を使用しており、早強単味配合に比べ組織構造が同等以上に緻密になっている³⁾。混和材使用による中性化促進のリスクと組織構造の緻密化による中性化抑制効果が相殺され、結果として混和材を使用しても中性化進行は早強単味と同等程度になったと考えられる。

また、高炉スラグ微粉末とフライアッシュ併用 (HBF) コンクリートの中性化深さは、高炉スラグ微粉末単独使用 (HB) に比べて若干低くなっているが、これは HBF の組織構造の更なる緻密化に関連すると推測される。いずれにしても、混和材使用のコンクリートは早強単味と同様に、適切な鉄筋かぶり確保すれば中性化による早期劣化を考慮しなくてよいとの結果であった。

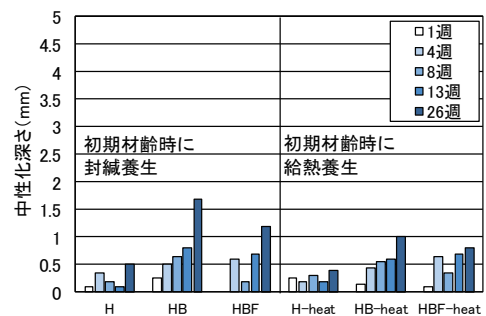


図-5 中性化深さの測定結果

3.4 凍害に対する抵抗性

既往の研究では、フライアッシュを使用したコンクリートは未燃カーボンの影響で空気量が減少または不安定となる報告があり⁴⁾、これによりコンクリートの耐凍害性が低下するおそれがある。本研究では試験を行いコンクリートの凍結融解特性を確認した。

図-6 に示す試験結果によると、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 (HBF) は初期材齢時の養生方法によらず、早強単味 (H) と明確な差異が見られなく、ともに良好な凍害抵抗性を示している。本研究では、未燃カーボンの影響を避けるためフライアッシュの使用量を比較的少なく設定し 10% とし、フレッシュコンクリートの試験時にも空気量の低下が確認されていなかった。したがって、フライアッシュの使用量を適切に設定することは、混和材に起因する凍結融解特性の低下を抑制する一つの方法であると考えられる。

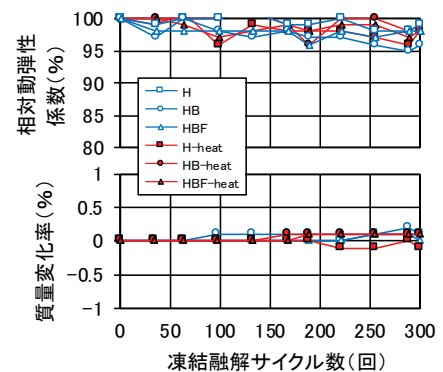


図-6 凍結融解試験の結果

4. まとめ

PC 構造物を対象に、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耐久性に関して、本研究の試験範囲内において得られた知見を以下に示す。

- (1) ASR 劣化抵抗性について、2 種類の混和材を併用した場合は早強単味に比べて膨張率が著しく低下し、また、高炉スラグ微粉末またはフライアッシュの単独使用に比較しても抑制効果が大きくなったことが確認され、ASR 劣化抑制の更なる対策として有効であると考えられる。
- (2) ASR 膨張率が 0.1% に達した日数と水酸化カルシウム含有量とは反比例の相関関係を表している。2 種類の混和材の併用によりアルカリ濃度が大幅に低下することは、ASR 劣化抵抗性向上の要因であると示された。
- (3) 2 種類の混和材を併用した場合は、塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果が最も大きかった。
- (4) 中性化抵抗性および耐凍害性については、2 種類の混和材を併用したコンクリートは早強単味配合と同等程度であった。

謝辞

本研究における一部の試験を実施するにあたり、日鉄住金高炉セメント (株)、竹本油脂 (株) に多大なご協力をいただきました。ここで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 辛 軍青, 呉 承寧: 高炉スラグ微粉末とフライアッシュを併用したモルタルに関する基礎研究, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 275-280, 2014. 10
- 2) Junqing XIN, Chengning WU, Eiji IWATSUKI, Shigeyoshi NAGATAKI: The Hydration Reaction, Microstructure and Strength Development of Cementitious Material Composed of Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash, and High-early-strength Portland Cement, The 14th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC2015), 2015. 10
- 3) 辛 軍青, 呉 承寧: セメント硬化体の細孔構造に及ぼす各種混和材の影響, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 551-556, 2015. 10
- 4) 例えば, 土木学会: コンクリートライブラリー132 号 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術-利用拡大に向けた設計施工指針試案-, pp. 31-33, 2009. 12