

高炉スラグ細骨材のPC部材への適用性およびASR抑制効果について

オリエンタル白石(株) 正会員 工修 ○俵 道和
 オリエンタル白石(株) 正会員 工修 杉田 篤彦
 オリエンタル白石(株) 正会員 博(環境学) 二井谷 教治

Abstract : In this study, an exposure test was performed using pretension girders with a full-scale aiming at confirming applicability to PC structures as well as ASR suppression effect of blast-furnace slag fine aggregate. As a result, it is believed to be possible to apply a blast-furnace slag fine aggregate to PC structures since a composition using it by 100 % showed a tendency equivalent of composition of crushed sand regarding embedment length of wire for prestressed concrete as well as shrinkage and creep coefficients. In addition, ASR suppression effect of blast-furnace slag fine aggregate was also confirmed by a composition in combination with reactive coarse aggregate since cracking and pop-outs were reduced than a case of mixture using crushed sand.

Key words : Blast-furnace slag fine aggregate, Alkali-silica reaction, Exposure test

1. はじめに

近年、天然骨材の減少や採取規制、副産物の利用促進にともない、スラグ骨材や再生骨材などがコンクリートに使用されてきている。スラグ細骨材の一つである高炉スラグ細骨材（以下、BFS砂）は、製鉄所において品質管理が行われ製造される人工の砂である。高炉スラグ骨材コンクリート施工指針¹⁾では、BFS砂を20~60%の範囲で均一に混合された高炉スラグ混合細骨材を使用したコンクリートの品質は、普通骨材コンクリートとなんら違いがないことが確認されており、コンクリート用骨材として天然砂の代用として活用されている。しかしながら、細骨材を100%高炉スラグ細骨材に置換えた配合について耐硫酸塩性を目指した構造物などには実用化されているが、PC部材に適用された事例はない。

BFS砂のコンクリート用骨材への利用については様々な研究機関で研究がおこなわれており、プレストレストコンクリート（以下、PC）を想定した水セメント比30~45%程度でBFS砂を25~50%程度置換したコンクリートについては、天然細骨材のみを使用したコンクリートと同等のフレッシュ性状を示し、乾燥収縮および自己収縮が低減し、耐久性状として凍結融解抵抗性および中性化抵抗性も増加する²⁾ことが確認されている。しかしながら、BFS砂をPC部材へ適用した際のPC鋼材の定着長、収縮およびクリープは確認されておらず、さらにアルカリシリカ反応（以下、ASR）の抑制効果については、高炉スラグ微粉末については効果が確認されている³⁾が、BFS砂について検討されていないのが現状である。そこで本研究では、PC部材を想定した水セメント比35%の配合でBFS砂をコンクリート用細骨材として100%使用した配合について、BFS砂のPC部材への適用性およびASR抑制効果をASR促進試験および実物大のプレテンション桁を用いた暴露試験で検討した。

2. 実験概要

2.1 高炉スラグ細骨材および砕砂

高炉スラグ細骨材はJIS A 5011-1コンクリート用スラグ骨材第1部：高炉スラグ細骨材に適合し、倉敷の製鉄所から副産されたBFS砂を使用した。砕砂は、茨城県桜川市大泉産の硬質砂

表-1 細骨材の物性値

	BFS砂	砕砂
表乾密度 (g/cm ³)	2.77	2.63
吸水率 (%)	0.22	0.84
粗粒率	2.11	2.85

表-2 ASR 促進試験用のコンクリート配合

配合種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)							NaCl (kg/m ³)	NaOH (kg/m ³)	Na ₂ O _{eq} (kg/m ³) ^{※1}
		水 W	セメント C	細骨材			粗骨材				
				砕砂	BFS 砂	反応性骨材	砕石	反応性骨材			
A	35.0	153	437	732	—	—	—	1003	25.48	4.60	17.1
B	35.0	153	437	—	797	—	—	1040	25.48	4.60	17.1
C	35.0	153	437	732	—	—	1018	—	—	—	—
D	35.0	153	437	—	797	—	1056	—	—	—	—
E	35.0	153	437	—	—	726	—	1008	25.48	—	13.5
F	35.0	153	437	732	—	—	—	1003	25.48	—	13.5
G	35.0	153	437	—	797	—	—	1040	25.48	—	13.5

※1 セメントおよび混和剤の Na₂O_{eq}は除く

表-3 暴露試験用のコンクリート配合

配合種類	W/C (%)	使用量 (C×%)			単位量 (kg/m ³)						NaCl (kg/m ³)	Na ₂ O _{eq} (kg/m ³) ^{※2}
		高性能 AE 減水剤	高性能 減水剤	増粘剤	水 W	セメント C	細骨材		粗骨材			
							砕砂	BFS 砂	砕石	反応性骨材		
砕砂+反応性骨材	35.0	—	1.00	0.004	153	437	732	—	—	1003	25.48	13.5
BFS 砂+反応性骨材	35.0	—	2.00	—	153	437	—	797	—	1040	25.48	13.5
砕砂+砕石	35.0	0.80	—	0.004	153	437	732	—	1018	—	—	—
BFS 砂+砕石	35.0	1.15	—	—	153	437	—	797	1056	—	—	—

※2 セメントおよび混和剤の Na₂O_{eq}は除く

岩砕砂を使用した。表-1にその物性値を示す。

2.2 その他の使用材料

セメントは早強ポルトランドセメント (密度: 3.13g/cm³) を使用した。無害の粗骨材は、茨城県桜川市大泉産の硬質砂岩砕石 (密度: 2.65g/cm³) を使用した。反応性の細骨材は川砂 (密度: 2.61g/cm³)、粗骨材は川砂利 (密度: 2.61g/cm³) を使用した。反応性骨材は、事前に実施したモルタルバー法による試験で、細骨材は 26 週の膨張量が 0.54%、粗骨材は 0.61%と顕著な ASR 膨張が確認された細骨材および粗骨材を使用した。混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤およびカルボキシル基含有ポリエーテル系化合物の高性能減水剤を使用した。空気調整剤として AE 剤、消泡剤を使用した。また、BFS 砂を使用した配合については、液体タイプの高機能特殊増粘剤 (アルキルアリルスルホン酸塩, アルキルアンモニウム塩) を使用した。

2.3 実験概要

2.3.1 アルカリシリカ反応促進試験

高炉スラグ微粉末のASRの抑制効果は、アルカリ量の希釈、スラグの水和物によるアルカリの固定化、水和組織の緻密化による水やアルカリイオンの移動速度の減少などにより説明³⁾されているが、明確には解明されていない。BFS砂のASR抑制効果についてもモルタルでの評価⁴⁾は行われているがコンクリートで評価された事例は少ないのが現状である。本研究では、表-2に示す配合について100×100×400mmのコンクリート供試体を作製し、ASTM C 1260 (80℃の1N・水酸化ナトリウム水溶液に浸漬)⁵⁾の促進試験方法に準拠しBFS砂のASR抑制効果を検討した。ASRを促進させるためにNaClおよびNaOHを外割りで添加した配合についても検討を行った。

2.3.2 実物大のプレテンション桁を用いた暴露試験

BFS 砂を用いたコンクリートについて、PC 部材への適用を目指し、プレテンション桁の構造特性および ASR の抑制効果を実構造物を模擬した暴露試験により検討した。暴露試験に用いたプレテンション桁は、JIS A 5373 に規定される AS09 を使用した。

暴露試験体に使用した配合を表-3に示す。コンクリートの目標スランプは12±2.5cmとし、目標空気量は砕砂を使用した配合は4.5±1.5%、BFS砂を用いた配合は2.0±1.5%とした。空気量については、

砕砂を用いた配合はAE剤のみを用いることで空気量を調整した。BFS砂を用いた配合は、既往の研究²⁾より消泡剤を使用しない場合にはエントラップトエア

表-4 暴露試験体の測定項目

測定項目	検討項目	計測の有無	
		砕砂+反応性粗骨材 BFS砂+反応性粗骨材	砕砂+砕石 BFS砂+砕石
①硬化特性	圧縮強度, ヤング係数	○	○
②ダミー鉄筋のひずみ	PC鋼材の定着長	-	○
③無応力計	収縮ひずみ	○	○
④ひずみ計	クリープ	○	○
⑤外観性状	ひび割れ, ポップアウト	○	○

が入りやすいことが確認されている。本研究では、BFS砂を用いた配合については空気調整剤として消泡剤のみを用いて空気量を調整した。さらに、BFS砂の置換率を増加させると、高性能AE減水剤の添加量を増加させてもスランプが増加しないことや分離傾向が大きくなり荒々しいコンクリートになることが確認されている。本研究では、事前の試験によりBFS砂を使用した配合について、スランプ形状の保持や分離抵抗性などのフレッシュ性状の改善効果が得られた増粘剤を適用した。

暴露試験体は、栃木県真岡市のPC製品工場内の日当たりの良い屋外に単純支持で設置した。暴露試験用プレテンション桁の測定位置を図-1に示し、計測項目を表-4に示す。硬化特性として、暴露試験体と同一条件で保管した圧縮強度およびヤング係数の測定を行った。PC鋼材の定着長は、100mmの間隔でひずみゲージを張り付けたD10のダミー鉄筋を桁端部から1mの範囲に設置しひずみを測定した。収縮ひずみは、無応力容器に設置した埋込み型ひずみ計を用いて測定した。クリープは、桁中央部に設置した埋込み型ひずみ計で測定した全ひずみと無応力計を用いて測定した収縮ひずみから算出した。外観性状としてひび割れ本数、ひび割れ幅およびポップアウト数の測定を行った。その他に、コンクリート表面ひずみ、桁のそり量、照合電極および腐食センサーを用いたPC鋼材および鉄筋の腐食状況の測定を行っており、2015年8月に製作を行い現時点で暴露後約7ヶ月であるが、計測値に大きな変化は確認されていないために今後も引き続き計測を行い別の機会に報告を行う予定である。

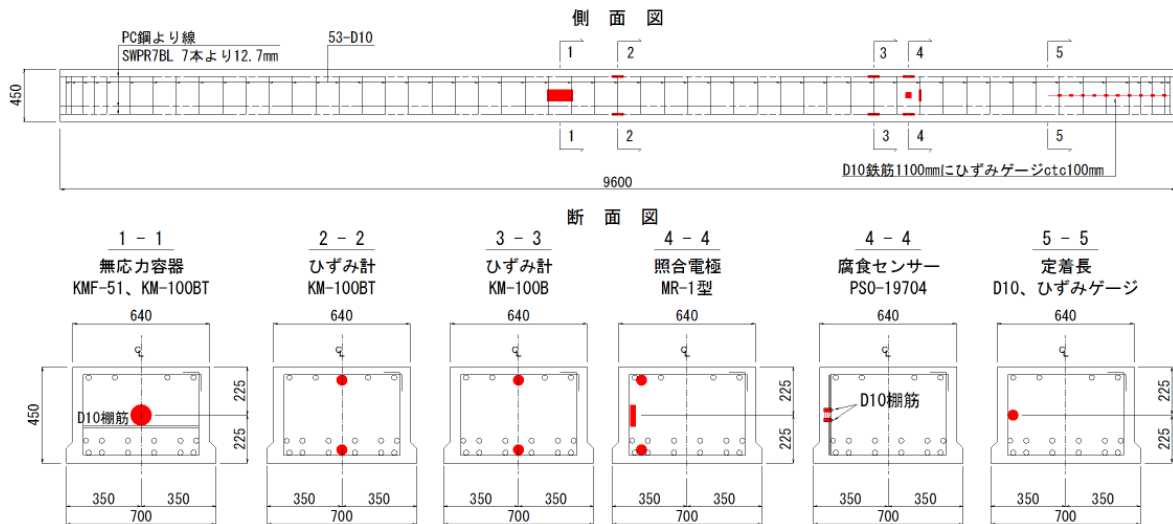


図-1 暴露試験体の計測位置図

3. 試験結果および考察

3.1 アルカリシリカ反応促進試験

コンクリート試験体のASR促進試験の結果を図-2に示す。細骨材および粗骨材ともに反応性骨材を用い、NaClを添加した配合Eが最も大きな膨張率を示した。NaClおよびNaOHを添加し、粗骨材は反応性粗骨材を用い、細骨材として砕砂を用いた配合AとBFS砂を用いた配合Bを比較すると、BFS砂を使用した配合Bの膨張率が小さくなった。NaClのみを添加し、粗骨材は反応性粗骨材を用い、細骨材として砕砂を用いた配合FとBFS砂を用いた配合Gを比較すると、BFS砂を使用した配合Gの膨張率が小

さくなくなった。これより、添加アルカリの種類によって膨張率に若干の違いが見られるが、細骨材としてBFS砂を適用することによるASR抑制効果が確認された。

図-3に標準水中養生を行った材齢4週での圧縮強度の結果を示す。NaOHを添加した配合Aおよび配合Bは、NaOHを添加しなかった配合Fおよび配合Gと比較して膨張量に顕著な差は確認されなかったが、圧縮強度については10~20%低下する傾向が確認された。これより暴露試験においてASR抑制効果を確認するために、自然な状態ではASRの進展は緩慢なためASRを促進させることを目的としNaClのみを添加した配合Fおよび配合Gを選定した。

3. 2 実物大のプレテンション桁を用いた暴露試験

(1) 圧縮強度およびヤング係数

暴露試験体と同一養生を行ったコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を図-4に示す。一般にASRにより劣化したコンクリートは圧縮強度の低下よりヤング係数の低下が大きいことが知られている⁶⁾。土木学会計算値は健全なコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を示しており、反応性粗骨材を用いていない砕砂+碎石およびBFS砂+碎石は計算値と同程度の値を示している。反応性粗骨材を使用した砕砂+反応性粗骨材およびBFS砂+反応性粗骨材は土木学会計算値より圧縮強度に対するヤング係数が小さく推移している。また、砕砂+反応性粗骨材の方がBFS砂+反応性粗骨材より圧縮強度に対するヤング係数が若干小さくなっており、BFS砂を用いることでASRが抑制されたと考えられる。しかしながら、測定材齢が91日までと比較的に短いため、今後も継続して検証を行う予定である。

(2) PC鋼材の定着長

図-5にプレストレス導入直後のダミー鉄筋のひずみを示す。点線で65φ(φはPC鋼より線の直径12.7mm)の位置を示す。ダミー鉄筋のひずみは、砕砂+碎石およびBFS砂+碎石について測定した。細骨材の種類にかかわらず、桁端部からの距離とダミー鉄筋のひずみは同等の傾向を示すことが確認された。

(3) 収縮ひずみ

無応力容器に設置した埋込み型ひずみ計を用いて収縮ひずみを測定した。プレストレス導入直後を基準とした材齢と収縮ひずみの関係を図-6に示す。反応性粗骨材を用いた材齢7ヶ月での砕砂+反応性粗骨材の収縮ひずみは -274×10^{-6} 、BFS砂+反応性粗骨材は -296×10^{-6} 、無害の粗骨材を用いた砕砂+碎石は -360×10^{-6} 、BFS砂+碎石は -367×10^{-6} であり無害の粗骨材の収縮ひずみの方が反応性粗骨材より小さな値を示した。この原因は、反応性骨材を用いた配合はASRの膨張により収縮が抑制されたためと考えられる。さらに、無害の粗骨材を用いた砕砂+碎石およびBFS砂+碎石は同程度の傾向を示して

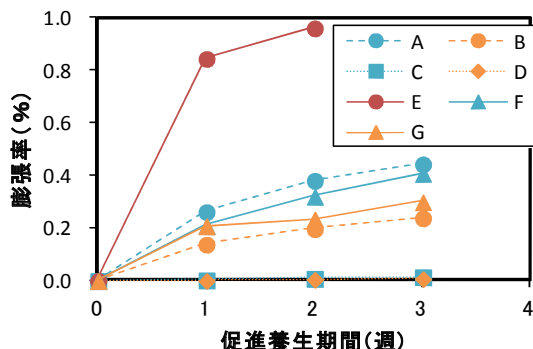


図-2 促進養生期間と膨張率の関係

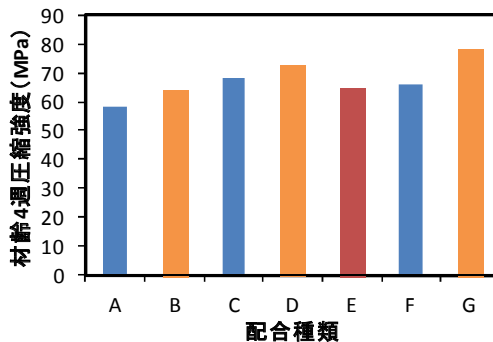


図-3 材齢4週の圧縮強度

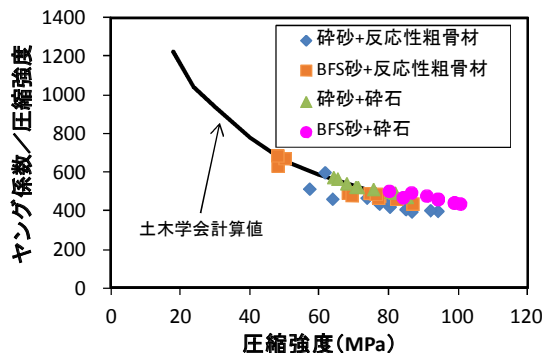


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

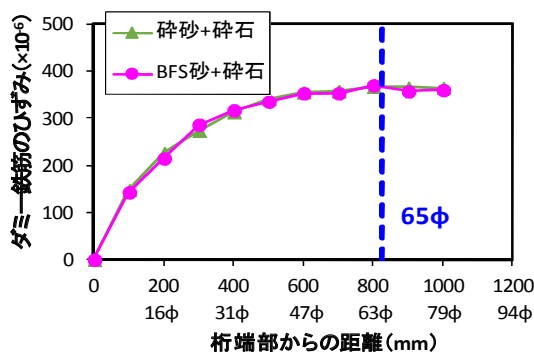


図-5 ダミー鉄筋のひずみ

いるが、反応性粗骨材を用いた配合は、BFS砂+反応性粗骨材より砕砂+反応性粗骨材の収縮が小さくなる傾向が確認された。これは、BFS砂を用いることでASRによる膨張が抑制されたためと考えられる。

図-7に試験体寸法を100×100×400mmとしJIS A 1129-3モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法、ダイヤルゲージ法に準拠した室内試験での材齢と収縮ひずみの関係を示す。材齢約250日で砕砂よりBFS砂の収縮ひずみは30%程度小さくなることを確認されている。実物大試験体については部材寸法が大きく、雨掛りの影響などで細骨材種類による収縮ひずみの差が小さくなっているが長期的には室内試験と同様の傾向が確認されると考えられる。

(4) クリープ

材齢と全ひずみの関係を図-8に示し、材齢7ヶ月時点のクリープ係数を図-9に示す。クリープ係数は、式(1)より求めた。桁中心部(2-2断面)上下のひずみゲージの平均値から求めたプレストレス導入時の全ひずみから載荷時の弾性ひずみおよび無応力計で計測された無載荷ひずみ(乾燥収縮ひずみ)を差し引いて求めたクリープひずみを、載荷時の弾性ひずみで除すことでクリープ係数を算出した。

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st}}{\varepsilon_e} \quad (1)$$

ここで、 ϕ_t :クリープ係数、 ε_{at} :全ひずみ、 ε_e :載荷時弾性ひずみ、 ε_{st} :無載荷ひずみ(収縮ひずみ)

反応性粗骨材を用いた砕砂+反応性粗骨材およびBFS砂+反応性粗骨材のクリープ係数は、無害の粗骨材を用いた砕砂+砕石およびBFS砂+砕石と比較すると1.5倍程度の大きな値を示した。既往の研究⁷⁾より、ASRで劣化したコンクリートは、湿潤や乾燥などの環境条件によっても影響を受けるが、ASRゲルの発生により生じた骨材自体の微細な空隙やひび割れが載荷荷重によって潰されることによりクリープひずみが増大することが示されている。本試験の結果においても同様の現象が生じたことにより、反応性粗骨材を用いた砕砂+反応性粗骨材およびBFS砂+反応性粗骨材のクリープ係数が、砕砂+砕石およびBFS砂+砕石より大きくなったと考えられる。さらに、砕砂+砕石とBFS砂+砕石は同等のクリープ係数を示しているが、BFS砂+反応性粗骨材は砕砂+反応性粗骨材よりクリープ係数が小さくなっており、このことからBFS砂を用いることによるASR抑制効果が示唆された。

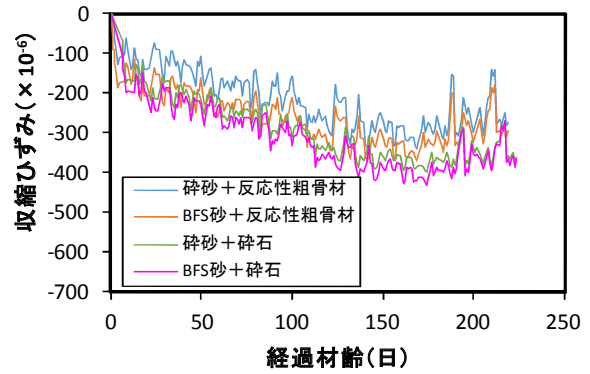


図-6 暴露試験体の材齢と収縮ひずみの関係

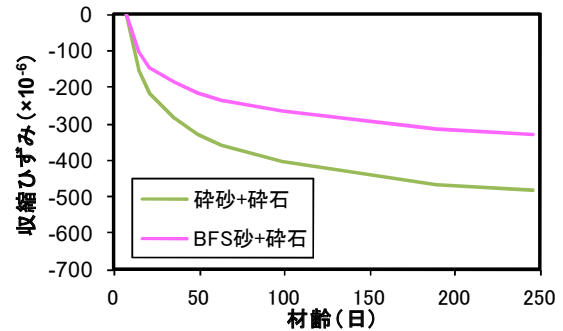


図-7 室内試験での材齢と収縮ひずみの関係

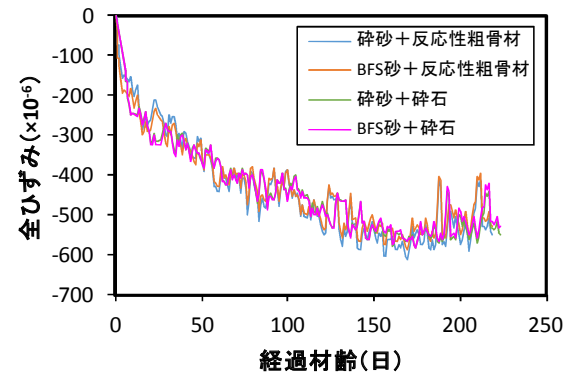


図-8 暴露試験での材齢と全ひずみの関係

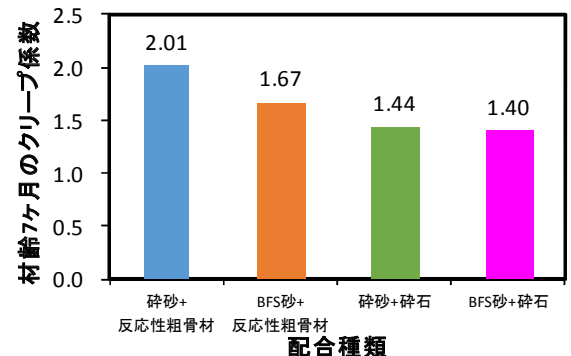


図-9 暴露試験材齢7ヶ月でのクリープ係数

(5) 外観性状

材齢とひび割れ累計本数およびポップアウト累計個数の関係を図-10に示す。ひび割れについてはひび割れ幅が0.2mm以上について計測を行った。ひび割れおよびポップアウトが確認されたのは、反応性粗骨材を用いた配合のみであり、無害の粗骨材を用いた配合については細骨材の違いによる外観性状の変化は確認されなかった。

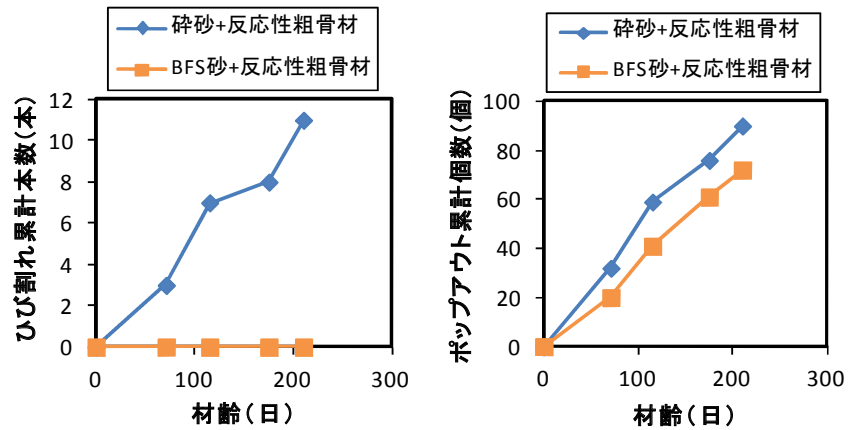


図-10 材齢とひび割れ累計本数およびポップアウト累計個数の関係

反応性粗骨材を用いた配合は、細骨材の種類にかかわらずポップアウトが発生し、砕砂より BFS 砂を用いた試験体の方が少なくなった。ひび割れ本数は、砕砂+反応性粗骨材には最大ひび割れ幅が 0.45mm のひび割れが発生しているが、BFS 砂+反応性粗骨材についてはひび割れの発生は確認されなかった。今後も長期的な観察による検討は必要であるが、ひび割れおよびポップアウトの発生状況からも BFS 砂を用いることによる ASR 抑制効果が確認された。

4. まとめ

- (1) ASR 促進試験の結果より、高炉スラグ細骨材を用いることによる ASR 抑制効果が確認された。
- (2) 実物大のプレテンション桁を用いた暴露試験において、無害の粗骨材と高炉スラグ細骨材を組み合わせた配合は、無害の粗骨材と砕砂と組み合わせた配合と定着長、収縮およびクリープについて同等の傾向を示していることから高炉スラグ細骨材を PC 部材へ適用することは可能であると考えられる。
- (3) 実物大のプレテンション桁を用いた暴露試験において、反応性粗骨材と高炉スラグ細骨材を組み合わせた配合は、反応性粗骨材と砕砂と組み合わせた配合よりひび割れやポップアウトなどの発生が低減されたことから高炉スラグ細骨材の ASR 抑制効果が確認された。

謝辞 本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：NEDO)の一部として実施した。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリートライブラリー76, 高炉スラグ骨材コンクリート施工指針, pp.9,1993
- 2) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋: 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, pp.139-144, 2009
- 3) 川村満紀: コンクリート構造物の耐久性の問題点とその対策アルカリ骨材反応(その2), コンクリート工学, Vol.32, No.5, pp.68-75, 1994
- 4) 關裕司, 齊藤丈士, 釜谷健悦, 白鳥秀幸: 高炉スラグ細骨材のアルカリシリカ反応抑制効果に関する実験的検討, 土木学会第65回年次学術講演会, V - 268, pp.535-536, 2010
- 5) ASTM C 1260: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol.04.02, pp.654-659, 1994
- 6) 三浦正嗣, 幸左賢二, 久利良夫, 川島恭志: ASR を生じた実構造物の長期的な損傷度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1023-1028, 2008
- 7) 奥山和俊, 尾花祥隆, 稲垣崇秀, 鳥居和之: 実構造物から採取したASR劣化コアのクリープ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1231-1236, 2009