

報告 高炉スラグやフライアッシュを用いたプレキャスト PC 部材用コンクリートの強度発現と耐久性に関する基礎的検討

水戸 健介^{*1}・中村 英佑^{*2}・鈴木 雅博^{*3}・古賀 裕久^{*4}

要旨:結合材や細骨材に高炉スラグやフライアッシュを用いたプレキャスト PC 部材用コンクリートの強度発現と耐久性を検討するために、供試体を製作して暴露試験を行った。高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートにおいて、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた後に追加的に水中養生を行うと、強度発現には明確な効果が現れなかつたが、塩化物イオン浸透抵抗性や中性化抵抗性が向上した。また、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートと天然砂を用いたコンクリートを比較すると、高炉スラグ細骨材の使用は圧縮強度の増加に加え塩化物イオン浸透抵抗性や中性化抵抗性の向上に効果的であった。

キーワード:高炉スラグ、フライアッシュ、強度発現、耐久性、暴露試験

1. はじめに

プレストレスコンクリート構造物の建設時の生産性向上、高耐久化、副産物の有効活用による環境負荷低減に向けた取組みとして、結合材や細骨材に高炉スラグやフライアッシュを用いたプレキャストコンクリート製品の活用が注目されている。最近の研究では、結合材として高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いること^{1), 2)}、細骨材として高炉スラグ細骨材を用いること³⁾、高炉スラグ微粉末を用いる場合に蒸気養生の後に追加的に散水養生を行うこと⁴⁾などによって、プレキャスト PC 部材の耐久性を向上できることが報告されている。しかし、結合材や細骨材に高炉スラグやフライアッシュを用いたプレキャスト PC 部材用コンクリートの強度発現や耐久性を実際に屋外環境で検証した事例は少なく、その耐久設計や製造方法を確立するためには実験データの更なる蓄積が必要である。

そこで、本稿では、結合材や細骨材に高炉スラグやフライアッシュを用いたプレキャスト PC 部材用コンクリートを対象として、供試体を製作して暴露試験を行い、強度発現と耐久性について検討した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 コンクリートの配合と基礎物性

コンクリートの配合と基礎物性を表-1に示す。コンクリートの配合は8種類である。結合材に早強ポルトランドセメントのみ、細骨材に天然砂のみを用いた配合(STD)を基準配合とした。高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュ用いた配合は、結合材の質量の30%を高炉スラグ微粉末4000とした配合(SG430)、50%を高炉スラ

グ微粉末6000とした配合(SG650)、20%をフライアッシュII種とした配合(FA20)の3種類である。高炉スラグ細骨材を用いた配合は、細骨材の容積の30%、50%、70%、100%を高炉スラグ細骨材とした配合(BFS30, BFS50, BFS70, BFS100)の4種類である。プレキャストPC部材への適用を想定して、全ての配合で水結合材比を36%とした。また、結合材と細骨材の構成の違いが強度発現と耐久性に与える影響を検討するために、全ての配合で単位水量を165 kg/m³、単位粗骨材量を968 kg/m³とした。

2.2 供試体の製作方法

供試体は、前報⁵⁾で塩化物イオン浸透抵抗性の迅速評価手法の検討に用いたものと同時に製作したものである。供試体の養生方法を表-2に示す。基準配合のSTDと高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたSG430, SG650, FA20では、養生方法の違いが強度発現と耐久性に与える影響を検討するために、3種類の養生方法(標準養生(Case-C)、模擬蒸気養生(Case-S)、模擬蒸気養生+水中養生(Case-SW))とした。Case-Cでは、材齢28日まで20°Cの養生槽で水中養生を行った。Case-Sでは、コンクリート打込み後、恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴(表-2参照)を与え、翌日に脱型して気中養生を行った。Case-SWでは、Case-Sと同様の温度履歴を与えて翌日に脱型し、材齢3日まで20°Cの養生槽で水中養生を行った。一方、高炉スラグ細骨材を用いたBFS30, BFS50, BFS70, BFS100では、高炉スラグ細骨材の使用有無や混合率が強度発現と耐久性に与える影響を検討するために、Case-Cの1種類の養生方法で供試体を製作した。

2.3 圧縮強度試験

円柱(Φ100×200 mm)を用いて、JIS A 1108に準拠して

*1 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 交流研究員 (正会員)

*2 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 主任研究員 (正会員)

*3 一般社団法人プレストレス・コンクリート建設業協会 (正会員)

*4 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員 (正会員)

表-1 コンクリート配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m³)							スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材齢 28 日 (N/mm²)			
		B = HPC + SG4 + SG6 + FA				S	BFS	G						
		HPC	SG4	SG6	FA									
STD	36	458	—	—	—	721	—	968	12.0	5.3	65.3			
SG430		321	138 (30%)	—	—	712	—		10.0	5.9	60.5			
SG650		229	—	229 (50%)	—	707	—		12.0	5.0	69.4			
FA20		367	—	—	92 (20%)	696	—		8.0	4.8	60.6			
BFS30		—	—	—	—	505	227 (30%)		9.0	5.4	67.8			
BFS50		—	—	—	—	361	379 (50%)		11.5	5.2	67.9			
BFS70		—	—	—	—	216	531 (70%)		13.0	5.0	68.7			
BFS100		—	—	—	—	—	758 (100%)		13.0	5.3	68.7			

※W: 上水道水(茨城県つくば市), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度 3.14 g/cm³, 比表面積 4480 cm²/g), SG4: 高炉スラグ微粉末4000(密度 2.89 g/cm³, 比表面積 4350 cm²/g, せっこう添加(SO₃換算2%)), SG6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度 2.91 g/cm³, 比表面積 6210 cm²/g, せっこう添加(SO₃換算3%)), FA: フライアッシュ II種(密度 2.35 g/cm³, 比表面積 4330 cm²/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度 2.56 g/cm³, 吸水率 2.23%), BFS: 5 mm 高炉スラグ細骨材(密度 2.69 g/cm³, 吸水率 0.68%), G: 粗骨材(茨城県笠間産碎石 6号(密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.43%, 硬質砂岩)と同5号(密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.46%, 硬質砂岩)を均等に混合)

※単位量の()内の%値は、結合材で高炉スラグ微粉末とフライアッシュが占める質量%、細骨材で高炉スラグ細骨材が占める容積%を表示

※化学混和剤: 高性能減水剤と空気連行剤を使用

※圧縮強度は材齢 28 日まで標準養生を行った円柱供試体(Φ100×200 mm)での測定値

表-2 供試体の養生方法

Case	養生方法	コンクリート打込み後の取扱い
C	標準養生	20°Cの室内で封緘養生、翌日に脱型して材齢 28 日まで 20°C の養生槽で水中養生
S	模擬蒸気養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与える、翌日に脱型して気中養生
SW	模擬蒸気養生 + 水中養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与える、翌日に脱型して材齢 3 日まで 20°C の養生槽で水中養生

※蒸気養生を模擬した温度履歴: 十分に湿らせた養生マットで供試体の上面を覆い、20°Cで3時間の前養生、50°Cまで2時間で昇温、50°Cを6時間維持、20°Cまで5時間で降温

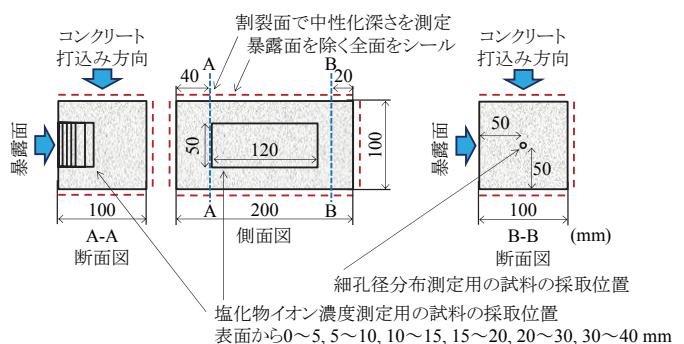


図-1 暴露供試体の概要

表-3 暴露試験の実施状況

	北海道増毛郡	新潟県糸魚川市	茨城県つくば市	沖縄県国頭郡
暴露状況				
日平均気温(°C)	8.6 (Max.33.7 Min.-17.9)	15.2 (Max.38.9 Min.-3.8)	15.5 (Max.37.4 Min.-7.0)	23.3 (Max.34.9 Min.8.0)
日平均湿度(%)	79.5	N/A	74.1	76.9
積算降水量(mm)	1980	4405	1911	3392
地理条件	沿岸部	沿岸部	内陸部	沿岸部

※日平均気温、日平均湿度、積算降水量は、最寄りの気象観測地点の2017年2月から2018年8月までの気象データ⁶⁾である。

※北海道増毛郡では標準養生(Case-C)を行って製作した供試体のみを対象として暴露試験を行った。

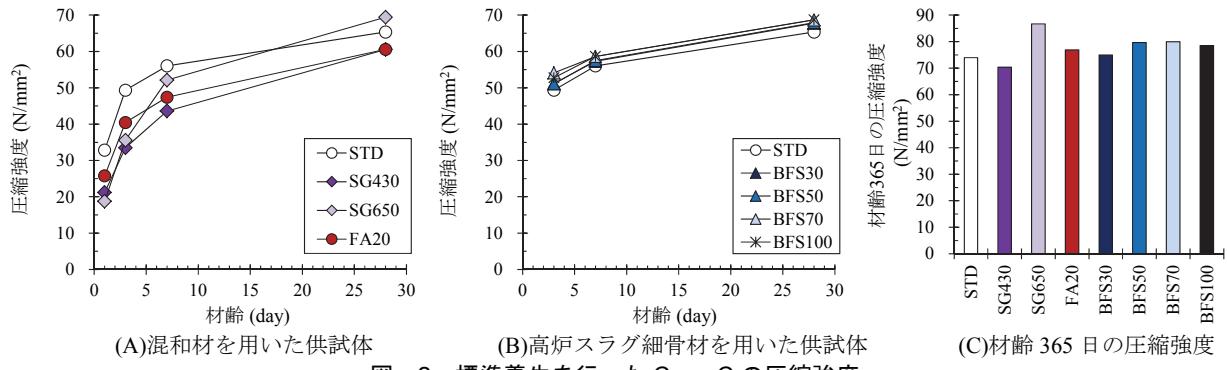
圧縮強度試験を行った。基準配合の STD と混和材を用いた SG430, SG650, FA20 の Case-C と Case-S では材齢 1, 3, 7, 28, 365 日、他では材齢 3, 7, 28, 365 日で圧縮強度試験を行った。材齢 365 日の圧縮強度試験には、次節で述べる耐久性に関する暴露試験と同時に茨城県つくば市の暴露地点に材齢 365 日まで設置した円柱を用いた。

2.4 耐久性に関する暴露試験

角柱(100×100×200 mm)を用いて、暴露試験を行った。暴露供試体の概要を図-1、暴露試験の実施状況を表-3 に示す。表-2 の養生を終えた後、コンクリート打込み方向に対して片側の側面(100×200 mm)を暴露面とする

ために、供試体の暴露面以外を塗装材料でシールした。暴露地点は、北海道増毛郡、新潟県糸魚川市、茨城県つくば市、沖縄県国頭郡の4ヶ所である。材齢 78 日以降で供試体を各暴露地点に移設し、雨掛かりのある屋外に設置した。茨城県つくば市以外の沿岸部の暴露地点では、暴露面を海側に向けて供試体を設置した。

沖縄県国頭郡に設置した供試体を対象として、塩化物イオン濃度、中性化深さ、細孔径分布を測定した。暴露期間は、2017年2月から2018年8月までの約18ヶ月間であった。塩化物イオン濃度の測定では、供試体の中央部から厚さ 5 mm あるいは厚さ 10 mm で試料を切断し、



(B)高炉スラグ細骨材を用いた供試体

図-2 標準養生を行った Case-C の圧縮強度

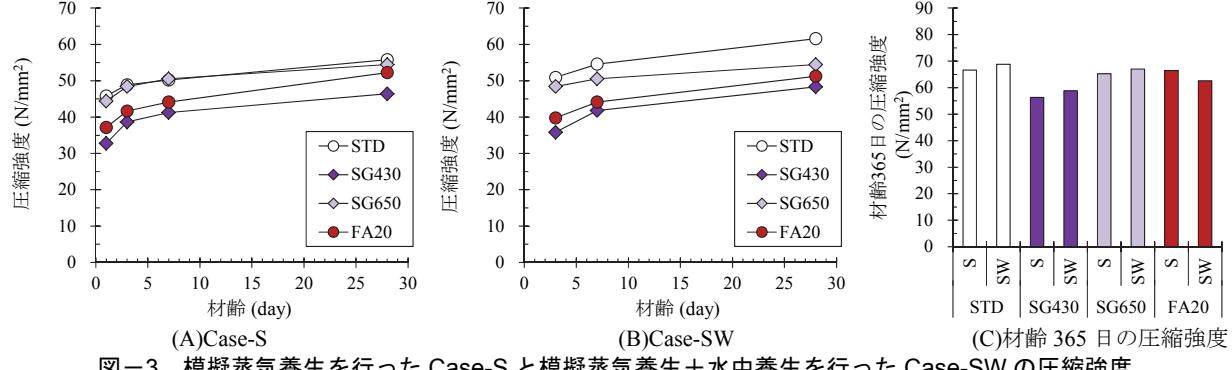


図-3 模擬蒸気養生を行った Case-S と模擬蒸気養生+水中養生を行った Case-SW の圧縮強度

JIS A 1154に準拠した電位差滴定法によって全塩化物イオンの濃度を測定した。中性化深さの測定では、供試体の端部から40mmの位置を割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して表面から赤紫色を呈した部分までの距離をノギスによって均等に9点で測定した。細孔径分布の測定では、基準配合のSTD、混和材用いたSG430、SG650、FA20、高炉スラグ細骨材の混合率を100%としたBFS100の5種類の配合のうち、標準養生を行ったCase-Cを対象とした。供試体の端部から20mm位置の中央のモルタル部から湿式カッターを用いて約5mm角の試料を1個ずつ採取し、切断後の試料をアセトンに浸せきして付着水を除去した後、凍結乾燥機で1週間乾燥させた試料を用い、水銀圧入法によって硬化体の細孔容積の分布を測定した。

また、全ての暴露地点に設置した供試体を対象として、暴露面の表面の状態を目視観察し、ひび割れやスケーリングによる損傷などの変状の有無を確認した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験の結果

(1) 高炉スラグとフライアッシュの使用の影響

標準養生を行ったCase-Cの圧縮強度試験の結果を図-2に示す。図-2(A)において基準配合のSTDと混和材を用いたSG430、SG650、FA20を比較すると、材齢1、3、7日では混和材を用いた供試体の圧縮強度がSTDよりも小さく、材齢28日では圧縮強度の差が小さくなることがわかる。本稿の実験では水結合材比を同一として

おり、混和材を用いた供試体では早強ポルトランドセメントの単位量が少ないため、初期材齢の強度発現が遅くなったと考えられる。一方、図-2(C)の材齢365日では、SG430の圧縮強度がSTDと同程度となり、SG650とFA20の圧縮強度がSTDよりも大きくなっている。混和材を用いた供試体では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの反応が長期的に継続したため、圧縮強度が早強ポルトランドセメントのみを用いた供試体と比較して同程度以上になったと考えられる。

次に、図-2(B)と図-2(C)においてSTDと高炉スラグ細骨材を用いたBFS30、BFS50、BFS70、BFS100を比較すると、材齢3、7、28、365日のいずれの結果においても、高炉スラグ細骨材を用いた供試体の圧縮強度はSTDと同程度か若干大きくなっていることがわかる。この傾向は既往の室内実験の結果⁷⁾と同様であり、本稿の実験結果では、屋外環境においても高炉スラグ細骨材の使用が圧縮強度の増加に寄与したことを確認できる。

(2) 初期材齢の養生方法の影響

高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた場合での模擬蒸気養生を行ったCase-Sと模擬蒸気養生+水中養生を行ったCase-SWの圧縮強度試験の結果を図-3に示す。図-3(A)と図-3(B)では、混和材を用いたSG430、SG650、FA20の材齢1日の圧縮強度が30N/mm²以上となり、コンクリート打込み後に蒸気養生を模擬した温度履歴を与えることによって初期材齢の強度発現の遅延を緩和できたことがわかる。この傾向は高炉スラグ微粉末6000を用いたSG650で明確に現れており、粉末度の高

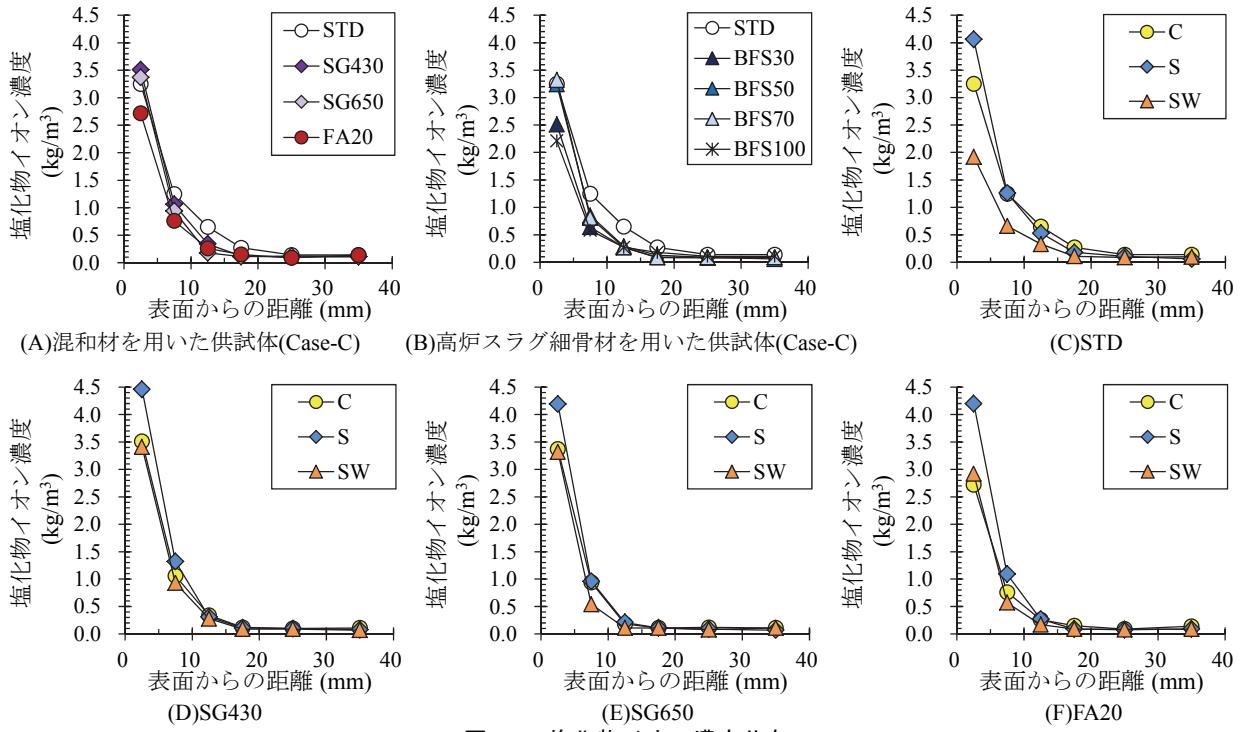


図-4 塩化物イオン濃度分布

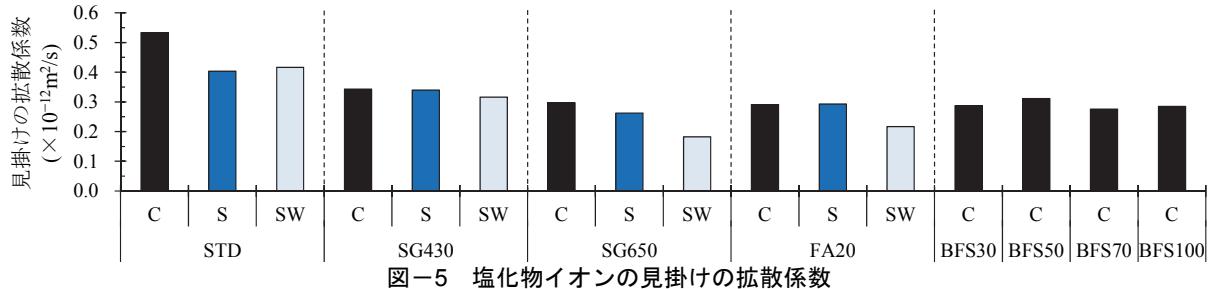


図-5 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

い高炉スラグ微粉末の使用は初期強度の改善に効果的であると考えられる。ただし、SG430とFA20の圧縮強度は、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたCase-SとCase-SWにおいてもSTDよりも小さくなつた。混和材を用いる際に早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同等の初期強度を得るために、水結合材比を低減するなどの対策が必要と考えられる。

一方、図-3(C)の材齢365日では、SG650とFA20の圧縮強度がSTDと同程度となり、SG430の圧縮強度はSTDよりも小さくなつた。また、模擬蒸気養生を行ったCase-Sと模擬蒸気養生+水中養生を行ったCase-SWの圧縮強度の差は小さく、模擬蒸気養生後の水中養生の実施が強度発現に与える効果は明確ではなかった。蒸気養生を模擬した温度履歴を与えることによって初期材齢での強度発現が進行し、その後の追加的な水中養生による強度の増進の程度が小さくなつたためと考えられる。

3.2 耐久性に関する暴露試験の結果

(1) 塩化物イオン浸透抵抗性

塩化物イオン濃度分布の測定結果を図-4、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出結果を図-5に示す。見

掛けの拡散係数は、図-4に示した各供試体の塩化物イオン濃度分布の全測定データを最小二乗法で式(1)にフィッティングして算出した結果である。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$: 距離 x と試験期間 t の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 x : コンクリート表面からの距離 (m)、 t : 試験期間 (s)、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D_{ap} : 見掛けの拡散係数 (m^2/s)、 erf : 誤差関数である。

図-4(A)と図-4(B)において標準養生を行ったCase-Cの塩化物イオン濃度分布を比較すると、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、高炉スラグ細骨材を用いた供試体では、STDよりも表面から5~20mmの範囲の塩化物イオン濃度が小さく、塩化物イオンの浸透が抑制されたことがわかる。また、図-5で標準養生を行ったCase-Cの見掛けの拡散係数を比較すると、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、高炉スラグ細骨材を用いた供試体の見掛けの拡散係数がSTDよりも小さくなつたことがわかる。

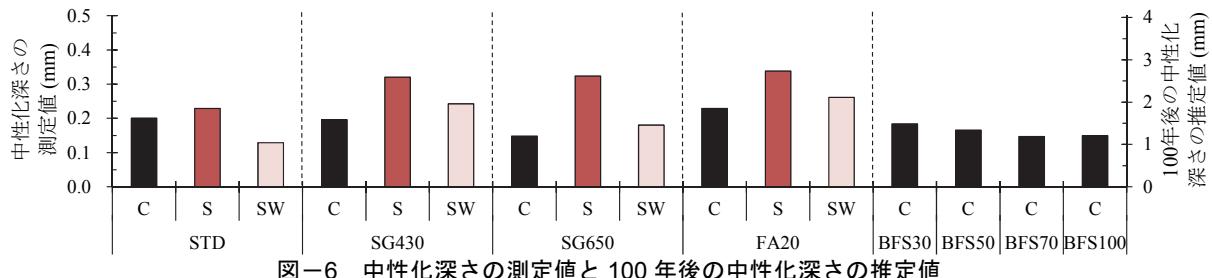


図-6 中性化深さの測定値と100年後の中性化深さの推定値

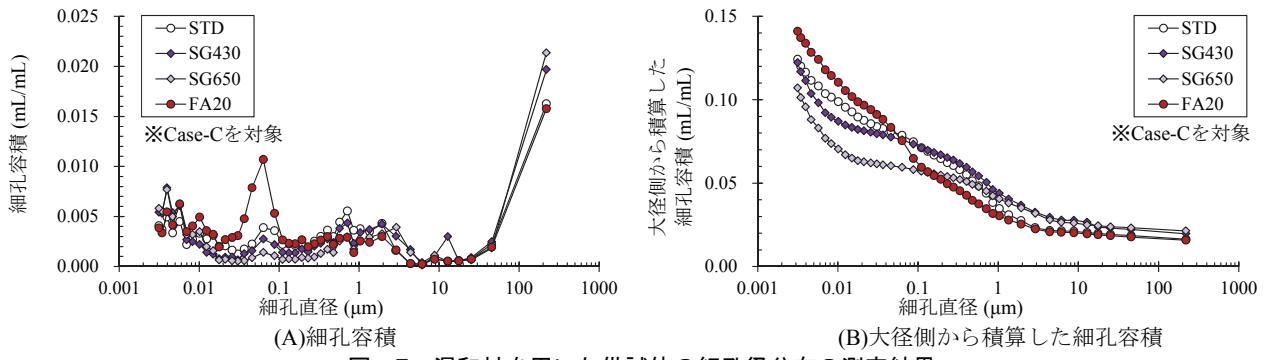


図-7 混和材を用いた供試体の細孔径分布の測定結果

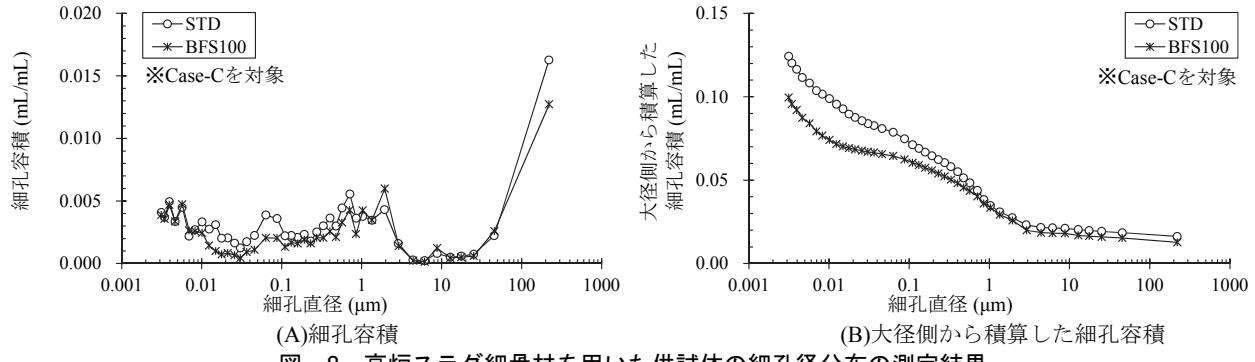


図-8 高炉スラグ細骨材を用いた供試体の細孔径分布の測定結果

本稿の暴露試験の結果においても、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、高炉スラグ細骨材の使用によって塩化物イオン浸透抵抗性が向上したことを確認できる。

次に、図-4(C)～図-4(F)において高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた場合での養生方法の異なる供試体の塩化物イオン濃度分布を比較すると、模擬蒸気養生を行ったCase-Sで表面から5 mmまでの塩化物イオン濃度が大きくなつたこと、模擬蒸気養生後に水中養生を行つたCase-SWで表面から5～15 mmの範囲の塩化物イオン濃度が小さくなつたことがわかる。また、図-5で見掛けの拡散係数を比較すると、混和材を用いたSG430、SG650、FA20では、模擬蒸気養生後に水中養生を行つたCase-SWの見掛けの拡散係数が模擬蒸気養生を行つたCase-Sよりも小さくなる傾向にあつた。模擬蒸気養生後に水中養生を行つたことによつて、コンクリート表層部の塩化物イオン浸透抵抗性が向上したためと考えられる。模擬蒸気養生後の水中養生の実施は、前述したように強度発現の面では明確な効果を認めることはできなかつたが、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性の向上には効果的であ

ったと考えられる。

(2) 中性化抵抗性

中性化深さの測定値と100年後の中性化深さの推定値を図-6に示す。同図の100年後の中性化深さの推定値は、中性化の進行が暴露期間の平方根に比例して進行すると仮定し、暴露試験から得られた中性化深さの測定値から算出した結果である。中性化深さの測定値を比較すると、養生方法が同一の場合、混和材を用いたSG430、SG650、FA20の中性化深さはSTDよりも大きくなる傾向にあつた。ただし、100年後の中性化深さの推定値は、高炉スラグやフライアッシュの使用有無と初期材齢の養生方法の違いにかかわらず、最大でも約3 mmに留まつた。また、高炉スラグ細骨材を用いた供試体の中性化深さは、STDと同程度となつた。これらのことを踏まえると、本稿で対象とした水結合材比の小さいコンクリートでは、高炉スラグやフライアッシュの使用有無にかかわらず、中性化の進行が極めて遅く、かぶりを適切に確保することによって中性化による鋼材腐食の発生を防止できるといえる。

次に、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた場

合での養生方法の異なる供試体の中性化深さの測定値を比較すると、模擬蒸気養生を行った Case-S の中性化深さが標準養生を行った Case-C よりも大きくなる傾向であったが、模擬蒸気養生後に水中養生を行った Case-SW の中性化深さは標準養生を行った Case-C と同程度となつた。本稿で対象とした水結合材比の小さいコンクリートでは、中性化深さの測定値自体が小さいため養生方法の違いによる中性化深さの差も小さくなつたが、蒸気養生後の水中養生の実施は中性化抵抗性の向上に寄与する傾向にあつたと考えられる。

(3) 細孔径分布

標準養生を行った Case-C を対象として、混和材を用いた供試体の細孔径分布の測定結果を図-7、高炉スラグ細骨材を用いた供試体の細孔径分布の測定結果を図-8 に示す。同図では、硬化体の細孔径分布を単位体積あたりの細孔容積に換算して示した。基準配合の STD との比較では、高炉スラグ微粉末を用いた SG430, SG650 と高炉スラグ細骨材を用いた BFS100 では、細孔直径 0.01~1μm の細孔容積が少なく、細孔直径 0.003~0.01μm の細孔容積が多くなつた。特に高炉スラグ微粉末 6000 を用いた SG650 と高炉スラグ細骨材を用いた BFS100 では、高炉スラグ微粉末 4000 を用いた SG430 よりも細孔直径 0.01~1μm の細孔容積が少なくなつた。また、フライアッシュを用いた供試体では、細孔直径 0.1~3μm の細孔容積が少なく、細孔直径 0.003~0.1μm の細孔容積が多くなつた。使用材料の種類によって細孔径分布の傾向が異なつたが、高炉スラグやフライアッシュの使用によって大径側の細孔容積が少なくなり、小径側の細孔容積が多くなつたことがわかる。前述したように高炉スラグやフライアッシュの使用は塩化物イオン浸透抵抗性の向上に効果的であったが、この一因は高炉スラグの水和反応やフライアッシュのポゼラン反応が硬化体の細孔構造の緻密化に寄与したためと考えられる。

(4) 暴露後の供試体の表面状態

暴露後の供試体の表面状態を目視観察した結果、4 ヶ所の暴露地点に設置した全ての供試体の表面において、高炉スラグやフライアッシュの使用有無と初期材齢の養生方法の違いにかかわらず、ひび割れやスケーリングによる損傷などの変状は確認されなかつた。

4.まとめ

本稿で得られた知見を以下にまとめると。

- 高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートにおいて、蒸気養生を模擬した温度履歴を与えた後に追加的に水中養生を行うと、塩化物イオン浸透抵抗性や中性化抵抗性が向上した。一方、圧

縮強度の増進への効果は不明瞭であった。

- 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートと天然砂を用いたコンクリートを比較すると、高炉スラグ細骨材の使用は、圧縮強度の増加に加えて、塩化物イオン浸透抵抗性や中性化抵抗性の向上にも効果的であった。
- 高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、高炉スラグ細骨材の使用は、コンクリートの硬化体の細孔構造の緻密化に寄与したと考えられ、塩化物イオン浸透抵抗性の向上に効果的であった。

本稿では暴露 18 ヶ月後までの調査結果を報告したが、今後も暴露試験を継続し、屋外環境での長期的な強度発現と耐久性を検証する予定である。また、本稿は、国立研究開発法人土木研究所と一般社団法人プレストレス・コンクリート建設業協会による共同研究「新設プレストレスコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築」の検討成果の一部を報告したものである。

参考文献

- 後藤剣也、石井豪、辛軍青、大村一馬：高炉スラグ微粉末を適用した橋梁における長期耐久性について、第 21 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.93-96, 2012
- 山村智、鈴木雅博、小林和弘、鳥居和之：分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンション PC 枠への適用に関する検討、コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.181-186, 2013
- 俵道和、杉田篤彦、二井谷教治：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究、第 26 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.109-114, 2017
- 本荘清司、田中寛規、桐川潔、宮川豊章：プレキャスト PC 床版の耐久性向上のための一考察、第 22 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.207-210, 2013
- 中村英佑、水戸健介、古賀裕久：高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法、コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.219-224, 2018
- 気象庁ホームページ：気象観測データ、
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 藤井隆史、綾野克紀：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの強度、収縮、クリープおよびアルカリシリカ反応抑制効果に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.99-104, 2018