論文　早強ポルトランドセメントに各種混和材を用いたコンクリートの諸特性に関する研究

森　裕介[*1]・櫨原　弘貴[*2]・添田　政司[*3]・阿部　稜[*4]

要旨：早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末 6000 やフライアッシュを用いたコンクリートの力学的特性や塩化物イオンに対する抵抗性，高さ 50cm の型枠を用いてブリーディングおよび高さごとのコンクリートの品質の違いについて検討を行った。その結果，材齢 7 日での水中養生の強度はいずれも同等となり，透気性や塩化物に対する抵抗性が向上した。塩化物に対する固定化性状は，高炉スラグ混和では，早強単味よりも固相塩化物の割合が増加し，吸着塩化物の割合は低く，フライアッシュではそれと対象的であった。しかし，ブリーディング発生量は，混和材を用いると増加する傾向が確認された。

キーワード：早強セメント，高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，塩化物イオン，ブリーディング

1. はじめに

早強ポルトランドセメント（以下早強セメント）は主にプレストレストコンクリート（以下 PC）として利用されている。PC は低水セメント比であるが，飛来塩分や凍結融解剤の影響を受ける地域では，早期の塩害劣化が顕在化してきている。近年では，塩害対策に加えて環境負荷低減も踏まえた，早強セメントに高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を置換したコンクリートの積極的な活用が望まれている。これらの混和材は塩化物イオンの抵抗性の向上やアルカリシリカ反応の抑制に効果的であり，コンクリート構造物の耐久性の向上や長寿命化が期待できる。

一方で，土木学会コンクリート標準示方書［設計編］には，普通ポルトランドセメントや高炉セメントについての塩化物イオン拡散係数は記載されている [1)]が，早強セメント単味のものや早強セメントに混和材を用いたコンクリートについての塩化物イオン拡散係数は明確にされていない。近年では，早強セメント単味のコンクリートは，見かけの塩化物イオン拡散係数が大きいため，フライアッシュや高炉スラグ微粉末 6000 を使用することで早強セメント単味よりも拡散係数が小さくなることが報告されている [2)]。

しかしながら，今後より積極的に PC 構造物に適用していくには，早強セメントに高炉スラグ微粉末 6000 やフライアッシュを置換したコンクリートの塩化物イオンの固定化性状や実効拡散係数などの，さらなる検討が必要である。また，施工時に想定されるブリーディングや打設高さによるコンクリート品質のバラツキ等を検討しなければならない。

そこで本研究は，混和材を用いたコンクリートのさらなる利用を目的として，早強セメントに高炉スラグ微粉末 6000 あるいはフライアッシュを置換したコンクリートの力学的特性および塩化物イオンに対する抵抗性，透気試験等の耐久性に関連する事項について評価を行い，その品質について早強セメント単味のコンクリートと比較した。加えて，現場打設を想定して，高さ 50cm の型枠を用いて，ブリーディングの発生状況や高さ方向のコンクリートの品質による違いについて圧縮強度や比抵抗によって評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表－1 に使用材料とその物性を示す。セメントには，早強ポルトランドセメント（密度 3.14g/cm^3），混和材として高炉スラグ微粉末（略語：BS）（比表面積 5750cm^2/g，密度 3.04g/cm^3），フライアッシュ（略語：FA）（Ⅱ種，比表面積 3960cm^2/g，密度 2.34g/cm^3）をそれぞれ用いた。細骨材には，長崎県壱岐産（表乾密度 2.58 g/cm^3）および福岡県玄海灘産海砂（表乾密度 2.58 g/cm^3）を使用し，粗骨材には，佐賀県唐津市産（表乾密度 2.80 g/cm^3）および大分県津久見市産（表乾密度 2.70 g/cm^3）を使用した。混和剤には，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた。

表－1　使用材料

使用材料	種類・性質
セメント	早強ポルトランドセメント（HPC）密度3.14g/cm^3
混和材	高炉スラグ微粉末（BS）比表面積5750cm^2/g，密度3.04g/cm^3
	フライアッシュⅡ種（FA）比表面積3960cm^2/g，密度2.34g/cm^3
細骨材	長崎県壱岐産　表乾密度2.58g/cm^3
	福岡県玄界灘産　表乾密度2.58g/cm^3
粗骨材	佐賀県唐津市砕石　表乾密度2.80g/cm^3
	大分県津久見市砕石　表乾密度2.70g/cm^3
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤（AE減水剤 標準形Ⅰ種）

*1 福岡大学　工学部社会デザイン工学科　(学生会員)
*2 福岡大学　工学部社会デザイン工学科　博士(工学)　(正会員)
*3 福岡大学大学院　工学研究科資源循環・環境工学　博士(工学)　(正会員)
*4 福岡大学大学院　工学研究科資源循環・環境工学専攻　(学生会員)

表－2　配合表

記号	セメントの種類	混和材の種類	混和材置換率	水結合材比（%）	細骨材率（%）	空気量（%）	スランプ（cm）	コンクリート単位量(kg/m^3)					
								水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	混和剤
HPC	HPC	－	－	41	42.3	4.5±1.0	10±2.0	162	395	－	729	1063	3.36
HBS		BS	50%		46.8				218	177	876		
HFA		FA	20%		41.5				316	79	705		

2.2 コンクリート配合

コンクリート配合を**表－2** に示す。実験に用いた配合は，早強セメント単味のコンクリート(以下略号:HPC)，早強セメントに高炉スラグ微粉末を 50%混和させたコンクリート（以下略号：HBS），早強セメントにフライアッシュを 20%混和させたコンクリート（以下略号：HFA）の 3 種類として，水結合材比（W/B）は PC 部材を想定して，いずれも 41%とした。目標空気量とスランプは，それぞれ 4.5±1.0%，10±2.0cm とした。

2.3 供試体および実験概要

供試体は，強度試験用と透気係数測定用，塩化物イオンの浸透特性用でそれぞれ形状の異なるものを作製した。打設後は，翌日に脱型し，所定の材齢まで水温 20℃の水中養生と温度 20℃，湿度 60%の恒温室にて気中養生をそれぞれ行った。

(1) 圧縮強度試験

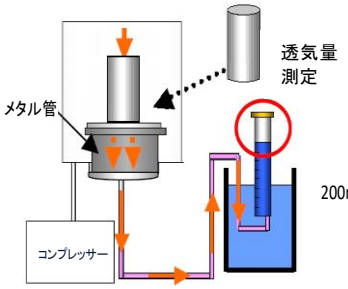
試験には，φ100×200mm の円柱コンクリートを用いた。試験材齢は 5，7，28，182 日とし，成形面を研磨した後に万能試験機で最大荷重を測定し，圧縮強度を算出した。また，円柱コンクリートの側面に，ひずみゲージを貼り付けてデータロガーにより，ひずみを計測して静弾性係数を算出した。

(2) 透気試験

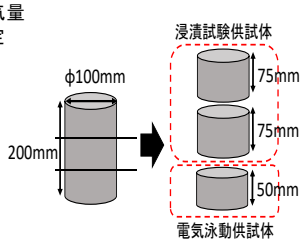
φ75×150mm の円柱コンクリートを作製し，中央位置でコンクリートカッターにてカットした φ75cm×75cm の円柱供試体を使用した。透気係数の測定は，材齢は 28 日とし，測定前に側面部より空気の流出を抑制するために，側面にアルミテープで被覆した。その後，**図－1** のようにメタル管に設置し，メタル管と供試体の接触の隙間をシリコンで覆い密閉性を高めた後は，コンプレッサーにより 0.2～0.6MPa の範囲で圧力を加えた。コンクリートを介して下面へ通過する単位時間当たりの空気量を測定して，ダルシー則により供試体形状と空気圧を計算式に入れて透気係数を算出した [3]。

(3) 塩化物イオンの浸透特性

塩水浸漬試験と電気泳動試験にて塩化物イオンの浸透特性に関する検討を行った。試験体は，φ100mm×200mm で作製して，**図－2** に示す様にコンクリートカッターで高さ 75mm と 50mm 部に分けてカットした。塩水浸漬試験には，φ100×75mm の円柱コンクリートを用いることにし，養生 28 日終了後にカット面以外をアルミテープで被覆した後に，NaCl 濃度 10%の水溶液に供試体を 3 カ月間浸漬させた。浸漬終了後は，深さごとに粉体を採取して JCI-SC4-2004「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの分析方法」および JSCE-G572「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの塩化物イオン拡散係数試験方法（案）」に準拠して，電位差滴定装置により全塩化物イオン量と見かけの塩化物イオン拡散係数を算出した。また，電気泳動試験は，φ100×50mm 部を用いて JSCE-G571-2003「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの塩化物イオン実効拡散係数試験方法」準拠して，実効拡散係数を算出した。また，試験終了後は，JCI-SC4-2004 に準拠して粉体を採取して全塩化物イオンと可溶性塩化物イオン量の測定を行った。



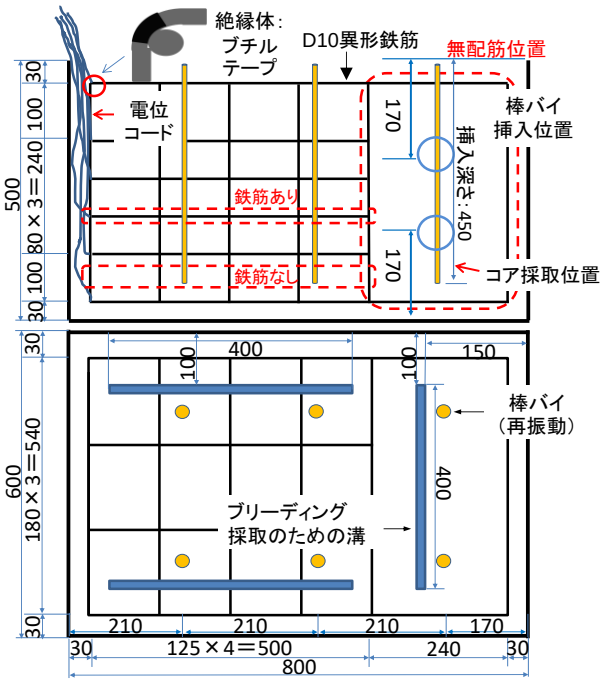
図－1　透気試験装置



図－2　供試体概要

(4) 実施工を想定したコンクリートの品質評価

図－3 に示す様に 600mm×800mm×500mm の型枠でコンクリートを作製した。打設した配合は，**表－2** に示したものと同様である。D10 異形鉄筋を用いて型枠内に**図－3** に示す様に配筋し，かぶりはスペーサーで 30mm を確保した。鉄筋が接する個所には，絶縁体としてブチルテープを巻き付けた。生コン車から直接コンクリートを投入しながら，孔径 3.0cm，周波数 50Hz～60Hz の棒状バイブレータを用いて，深さ 450mm 位置まで挿入し，全体的に均一に締め固めるため，1 型枠辺り 6 箇所（15 秒/1 箇所）に振動を与えた。1 層で高さ 500mm のコンクリートを打設して金コテにて整形した。成形後は**図－3**，**写真－1** に示した箇所にてブリーディング水を採取するために所定の箇所に幅 1cm，深さ 1cm，長さ 30cm の溝を掘り，そこに溜まったブリーディング水を経時的にスポイトで採取した。併せて JIS A 1123 の準拠したブリーディング試験も別途に実施したが，今回の試験では，ブリーディングを確認することができなかった。ブリーディングが確認されなくなった後は，金ゴテで再度成形して，材齢 7 日まで実験室内で型枠内に水をはり養生を行った。脱型した後は，**図－3** に示した上層と下層位置にて φ75mm の貫通コアの採取を行った。貫通コアは，上記と同様の方法でコンクリートカッターにてカットして，材齢 154 日で 2.3 に記した(1)圧縮強度試験を実施した。加えて，**図－3** に示した鉄筋なし領域にて，上層および下層位置で接触型の 4 プルーブを用いてウィナー法によ



図－3　打設型枠の概要

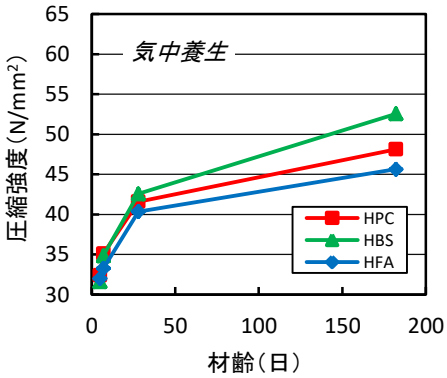
写真－1　ブリーディングの採取状況

りコンクリート比抵抗を経時で測定を行った。その間は，内部鉄筋の腐食特性を検討するために，10%の NaCl 水溶液を染込ませた吸水シートで供試体全体に貼り付けて，その上からビニールシートで覆っている。

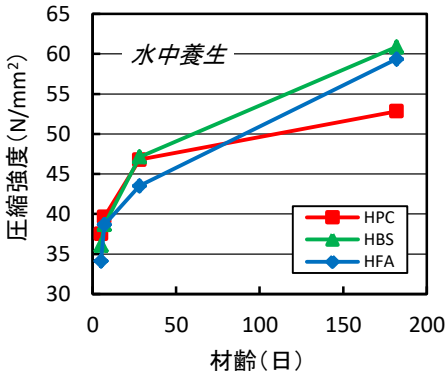
3. 結果および考察

3.1 力学的特性

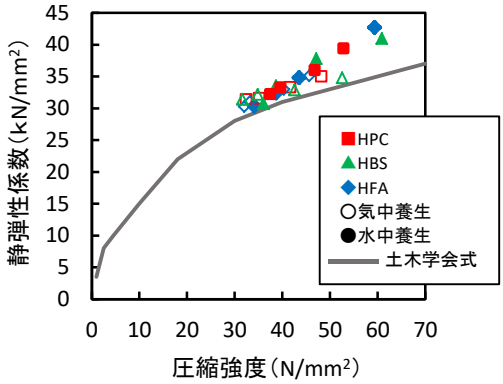
図－4，**図－5** には，気中養生と水中養生における圧縮強度の経時変化を示す。気中養生における材齢 28 日までの圧縮強度は，いずれの配合においても同程度であったが，材齢 182 日なると，HBS>HPC>HFA の順で圧縮強度が大きかった。一方の，水中養生における圧縮強度は，材齢 5 日においては，HPC＞HBS＞HFA の順となっているものの，材齢 7 日になると，全ての配合で同程度の圧縮強度を示した。材齢 28 日になると，HPC≒HBS>HFA の順となった。さらに，長期材齢になると HBS，HFA ともに HPC よりも明確に強度発現を確認することができた。高炉スラグ微粉末の 6000 ブレーンを使用した HBS の場合には，初期強度も HPC と同等と考えることができると思われ，PC 構造物にも十分に適用できる結果が得られた。一方の，HFA の圧縮強度は，養生の影響を大きく



図－4　圧縮強度と材齢の関係（気中養生）



図－5　圧縮強度と材齢の関係（水中養生）



図－6　圧縮強度と静弾性係数の関係

受けやすく初期強度は，幾分か HPC よりも小さくなっている。

図－6 には，圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には，土木学会コンクリート標準示方書［構造性能照査編］[4]に示されている静弾性係数と圧縮強度の関係を併せて表記している。いずれの供試体においても概ね土木学会式に近似する結果となった。

3.2 コンクリートの透気性

表－3 には，材齢 28 日における透気係数を示す。この結果，材齢 28 日おける気中養生の圧縮強度は，いずれの配合においても同程度であったが，透気係数は HPC ＞ HBS＞HFA となり，フライアッシュを混和したものが最

表－3　材齢 28 日における透気係数

養生	透気係数(cm/sec, ×10^{-8})		
	HPC	HBS	HFA
気中	9.97	5.83	2.88
水中	6.56	1.34	2.27

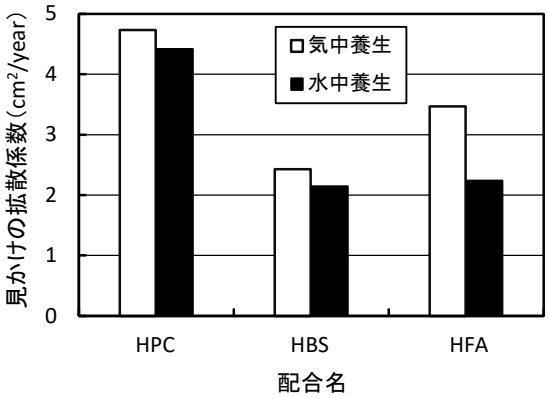
も空気の透過性を低減できることが分かった。一方の，水中養生を行った場合の透気係数は，HPC >HFA> HBS となり，BS を混和したものが低減される結果となった。空気の透過性に及ぼす空隙径は，比較的 1000nm 以上の粗大な空隙であるため [5]，HBS や HFA は，材齢初期から粗大な空隙が HPC よりも少ないと推察された。

3.3 塩化物イオンの浸透特性

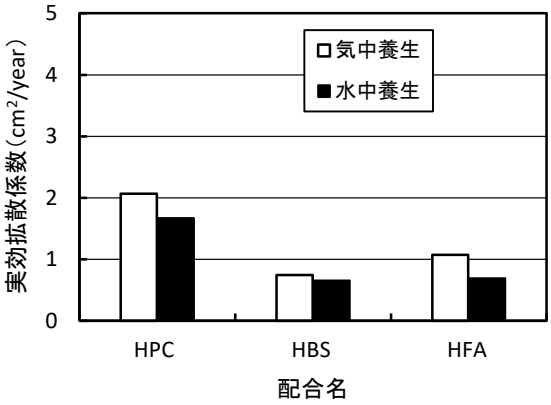
図－7 には，塩水浸漬期間 91 日における見かけの塩化物イオン拡散係数を示す。水中養生を行った供試体の見かけの塩化物イオン拡散係数は，いずれの配合においても気中養生よりも低下する結果を示した。配合別にみると，HBS の拡散係数は，他の供試体と比べて小さく，いずれの養生条件においても HPC の約 1/2 程度となった。一方の，HFA は，養生の違いによる差が大きく，水中養生にて HBS と同程度の結果となった。以上のことから，早強セメントに高炉スラグ 6000 ブレーンあるいは FA を添加することで，比較的に塩化物イオンが浸透しやすいとされる HPC の塩化物イオンに対する抵抗性を改善できることが分かった。

次に，**図－8** には，電気泳動試験における各種供試体の塩化物イオン実効拡散係数を示す。実効拡散係数は，気中養生よりも水中養生の方が小さかった。供試体種類別にみると，塩水浸漬の結果と同様に気中養生においては，HBS が最も小さく，水中養生においては，HBS および HFA は同等で小さかった。電気泳動試験の結果からも塩化物イオンに対する抵抗性を大幅に改善できることが認められた。

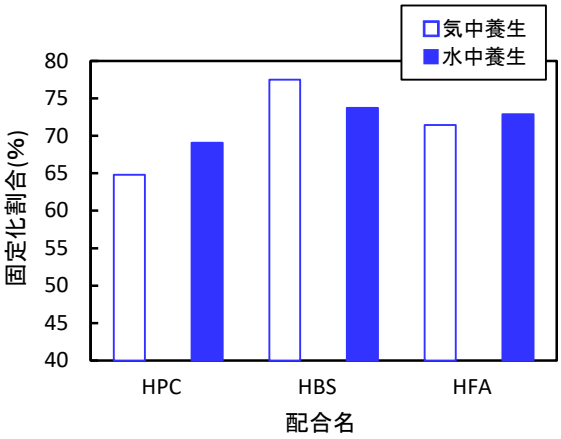
図－9 には，全塩化物イオンに対する固定化された塩化物イオンの割合を算出した結果を示す。測定結果は塩化物イオンが確認された表層 3cm までの範囲とした。気中養生おける固定化割合は，HBS>HFA>HPC の順で大きくなる結果となった。アルミネート相に取り込まれて固定化されると一般的に解釈されている通り，今回の結果でもアルミネート相が最も多い HBS が固定化割合も大きくなった。一方の HFA では，FA は，塩化物イオンの固定化に寄与すると考えられ，その固定化能力は，同体積の普通ポルトランドセメントと比べて同等もしくは若干低い程度であるため [6]，少なくとも早強セメントよりは，固定化能力を有すると思われる。そのため今回の結果では，HPC の固定化割合が最も低くなったと考えられた。一方の，水中養生を行った場合では，供試体間ごとの固定化割合の違いは小さいが，気中養生と同様の傾向を示した。これは，アルミネート相のみに固定化したのではなく，気中養生に比べると大量の C-S-H が存在して



図－7　配合別における見かけの拡散係数



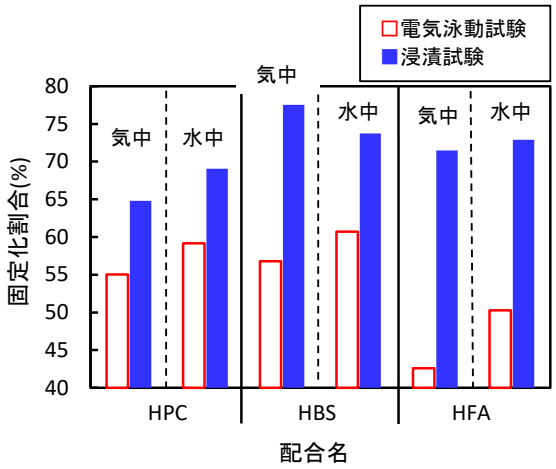
図－8　配合ごとの実効拡散係数



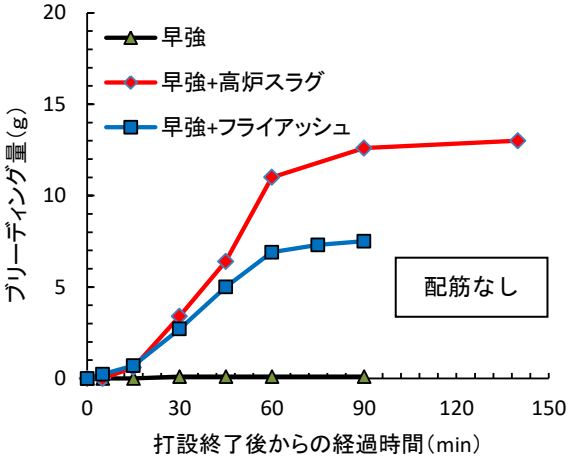
図－9　配合別における固定化割合

いるため，C-S-H にも固定化されたことや吸着されたことが要因と推察される。

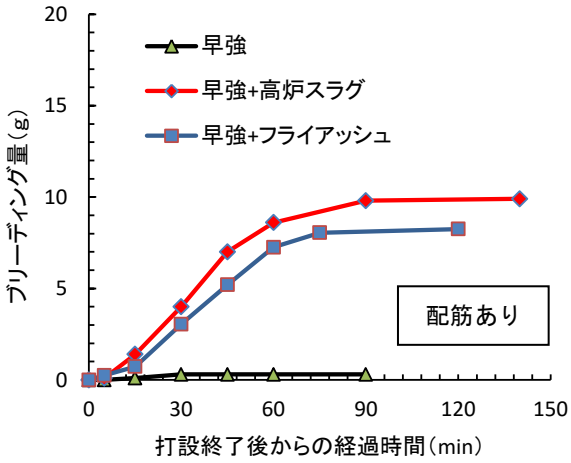
図－10 には，電気泳動試験終了後の供試体を解体した後，全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量の測定し，全塩化物イオンに対する固定化割合を算出した結果を，塩水浸漬試験の結果と併せて示す。この結果，電気泳動試験による固定化割合は，いずれも塩水浸漬試験による固定化割合よりも小さくなる結果となった。電気泳動における固定化割合は，気中養生よりも水中養生が大きく，養生別にみても HBS＞HPC＞HFA の順に大きかった。電



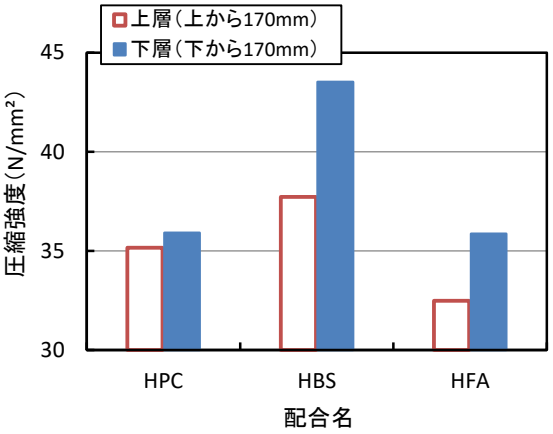
図－10　試験方法による固定化割合の違い



図－11　ブリーディング量の経時変化(配筋なし)



図－12　ブリーディング量の経時変化(配筋あり)



図－13　採取したコアの圧縮強度

気泳動試験の結果が塩水浸漬試験よりも固定化割合が小さかった要因として，直町ら [7]によると，浸漬試験の場合には，可溶性塩化物イオン＝（自由塩化物イオン＋一部の吸着塩化物イオン)，電気泳動の場合には，可溶性塩化物イオン＝（自由塩化物イオン）と考察している。50℃の温水に可溶した可溶性塩化物イオン量は，コンクリート中の自由塩化物イオン量とほぼ同等であると仮定した場合には，電気泳動試験後の固定化塩化物量のほとんどが固相塩化物とであると推測できる。また，電気泳動の固定化と浸漬試験の固定化の差が吸着塩化物イオンの違いと考えることができる。本結果における，HBS では，HPC よりも固相塩化物イオンが多くなり，吸着塩化物イオンの割合が少ないと考えられ，一方の HFA では，HPC よりも固相塩化物イオンは少なく，吸着塩化物イオンが多いと考えられる。以上のことから，HPC，HBS，HFA では，塩化物イオンに対する固定化性状が大きく異なることが分かった。

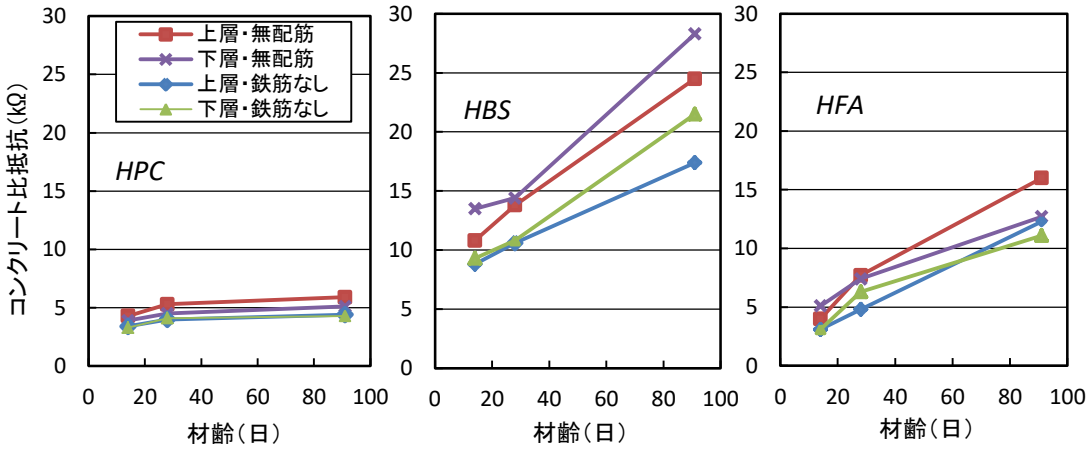
3.4 実施工を想定したコンクリートの品質評価

図－11, 図－12 には, 各種供試体における配筋なしと，あり域におけるブリーディング量の経時変化をそれぞれ示す。 まず，配筋なしにおけるブリーディング量は，HPC では認められなかったが，HBS および HFA では，明確なブリーディングの発生が確認された。特に HBS のブリーディング量が最も多く収束も 90 分程度と長期となった。一方の，配筋あり域においても配筋なし域と同様の傾向を示した。HBS においては，配筋なしに比べてブリーディング量が小さくなっており，鉄筋下面に蓄積していることが予想された。

その一方で，JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠した試験においても，同時にブリーディングの測定を試みたが，いずれもブリーディングの発生を確認することができなかった。これは，体積量の違いと思われ，HBS や HFA における実施工では，ブリーディング量の発生が HPC よりも顕著に多くなることが予想された。

したがって，混和材を用いることでさらなる耐久性の向上は期待できるが，ブリーディングが多くなるため打継部において弱点となる可能性がある。よって，ブリーディングを入念に採取する必要がでてくる。

図－13 には，貫通コアから採取した材齢 154 日の円柱供試体の圧縮強度の結果を示す。この結果，いずれの供試体においても圧縮強度は，上層よりも下層の方が大きくなる傾向を示した。最も上層と下層で差が見られたのは，HBS であり，ブリーディングの発生からみても上層



図－14　コンクリート比抵抗の経時変化

と下層で実質の W/B が大きく異なったものと考えられた。

また，**図－14** には，配筋ありと，なし域で測定したコンクリート比抵抗の経時変化を示す。HPC の比抵抗は，いずれの領域においても明確な差がなく，経時的な変化もなかった。HBS は，初期材齢から時間の経過に伴って増加しており，コンクリートが経時に従って緻密化しているのが分かる。また，明確に上層の方の比抵抗が小さくなっていることからも，コンクリートの品質が打設高さで異なっていることが確認された。一方の，HFA においても，HBS と同様に比抵抗は，増加しており，この結果から，ポゾラン反応により緻密化している状況を確認することができた。その一方で，コンクリートの品質のバラツキ等を 4 プルーブによる比抵抗測定によって評価できることが分かった。

4. まとめ

本研究では，早強セメントに高炉スラグ微粉末 6000 ブレーンおよびフライアッシュを混和材として使用したコンクリートの諸特性について検討を行った。その結果をまとめると以下の通りである。

(1) HBS は，HPC と初期強度に大差なく，材齢の進行に伴う，強度増加が極めて大きいことを確認した。また，HFA は，初期強度では劣るものの，長期的な強度増進を確認できた。

(2) HBS，HFA ともに塩化物イオンに対する抵抗性の向上が確認され，特に，HBS の拡散係数は，HPC の 1/2 程度であった。

(3) HBS と HFA は，HPC と比べて塩化物イオンの固定化割合が大きかった。固定化された塩化物イオンにおいて，HBS は，固相塩化物イオンが多く，HFA では吸着塩化物イオンが多く，塩化物イオンの固定化性状が異なることが分かった。

(4) JIS 試験においてブリーディングを確認できなかったが，実施工に近づけた型枠で検討を行った結果，HBS のブリーディング発生量が多い。

(5) HBS や HFA は，ブリーディングの発生に伴い，打設上層と下層においてコンクリート品質の違いが HPC よりも大きくなる可能性がある。

以上の結果より，HBS は，ブリーディングを適切に採取することで，初期強度，長期的な耐久性の観点から，高耐久のコンクリートとして, PC 構造物に適用可能であることが分かった。

参考文献

1） 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書［設計編］

2） 国立研究開発法人土木研究所，一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書－混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル（案）－，共同研究報告書，整理番号第 472 号，参考 1－4

3） 林亮太，櫨原弘貴，添田政司，松本涼：透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35, No.1，2013

4） 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書［構造性能照査編］，pp.21-29，2002.3

5） 三浦明，櫨原弘貴，添田政司，金堀雄伍，西嶋大貴：透気係数による各種コンクリートの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究，コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文集, 第 15 巻, pp.253-258

6） 石田哲也，宮原茂禎，丸屋剛：ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性，土木学会論文集 E　Vol.63 No.1，14-26，2007.1

7） 直町聡子，堀圭悟，加藤佳孝，加藤絵万：電気泳動試験を用いた塩化物イオンの固定化性状および硫酸イオンによる変質の実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，2015