

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 塩化物イオン浸透特性に関する研究

福岡大学	学生会員	○森裕介	福岡大学	正会員	樋原弘貴
福岡大学大学院	正会員	添田政司	福岡大学	正会員	村上哲
			福岡大学大学院	学生会員	阿部稜

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）として橋梁の主桁等に利用されている。材齢初期にプレストレスを導入する必要があるため、初期の強度発現が重要となる。近年では、飛来塩分や凍結融解剤の散布により塩害劣化が顕在化してきているため、塩害対策と環境負荷低減の両者の観点から早強セメントに高炉スラグ微粉末 6000 ブレーンあるいはフライアッシュを置換したコンクリートの PC 部材への適用が検討されている。ただし、早強セメントに各種混和材を置換した場合の塩化物イオンに対する抵抗性についての知見が少ないため、本研究では、早強セメントに高炉スラグ 6000 ブレーンあるいはフライアッシュで置換したコンクリートの塩化物イオン浸透特性について検討を行った。

2. 実験概要

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（比表面積 $5750\text{cm}^2/\text{g}$ 、密度 3.04g/cm^3 ）、フライアッシュ（Ⅱ種、比表面積 $3960\text{cm}^2/\text{g}$ 、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 2.58g/cm^3 ）および福岡県玄海灘産海砂（表乾密度 2.58g/cm^3 ）を使用し、粗骨材には、佐賀県唐津市産（表乾密度 2.80g/cm^3 ）および大分県津久見市産（表乾密度 2.70g/cm^3 ）を使用した。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：HBB）、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 $4.5\pm 1.0\%$ 、 $10\pm 2\text{cm}$ とした。

圧縮強度試験には、 $\phi 100\times 200\text{mm}$ の円柱コンクリートを用いた。気中と水中養生を行い成形面を研磨した後、万能試験機で最大荷重を測定し、圧縮強度を算出した。

塩化物イオンに対する抵抗性試験においては、塩水浸漬試験と電気泳動試験にて塩化物イオンに対する抵抗性について評価を行った。試験体は、 $\phi 100\text{mm}\times 200\text{mm}$ で作製して、コンクリートカッターで高さ 75mm と 50mm でカットした。塩水浸漬試験には、 $\phi 100\times 75\text{mm}$ の円柱コンクリートを用いており、気中および水中養生 28 日終了後にカット面以外をアルミテープで被覆し、NaCl 濃度 10% 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、全塩化物イオン量を測定した。また、電気泳動試験は、 $\phi 100\times 50\text{mm}$ 部を用いて実効拡散係数を算出した。試験終了後は、粉体を採取して全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量を測定し、固定化割合を算出した。

3. 結果及び考察

図-1 には、一例として水中養生における圧縮強度の経時変化を示す。圧縮強度は、材齢 5 日においては、 $\text{HPC} > \text{HBB} > \text{HFA}$ の順となっているものの、材齢 7 日では、全ての配合で同程度の圧縮強度を示し、材齢 28 日になると、 $\text{HPC} \approx \text{HBB} > \text{HFA}$ の順となった。さらに、長期材齢になると HBB、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 HBB 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考えられ、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

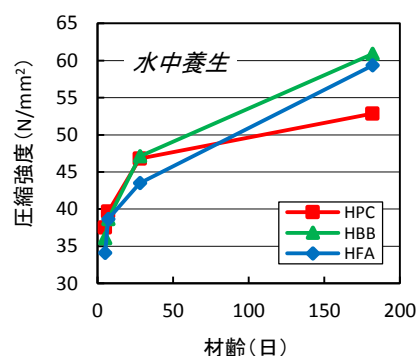


図-1 圧縮強度と材齢の関係

度は、養生の影響を大きく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-2 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と実効拡散係数を併せて示す。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、HBB 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。また、HFA においては、養生の違いによる差が大きく、水中養生にて HBB と同程度の結果となった。実効拡散係数においても、塩水浸漬の結果と同様に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、気中養生においては、HBB が最も小さく、水中養生においては、HBB および HFA は同等で小さかった。電気泳動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-3 には、電気泳動試験により算出した固定化割合と、塩水浸漬試験により算出した固定化割合を併せて示す。固定化割合は、測定深さごとに異なっており、いずれも内部に行くに従って固定化割合も高くなる傾向であった。そのため、表層 3cm までの範囲

における測定結果の平均で表した。気中養生における固定化割合は、HBB>HFA>HPC の順で大きくなる結果となった。塩化物イオンの固定化は、HPC は、NPC（普通ポルトランドセメント）よりも一般的に小さいと言われている。また、アルミネート相に取り込まれて固定化されると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 HBB 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、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 の固定化割合が低くなったものと考えられた。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、気中養生よりも多くの C-S-H が存在するため、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。電気泳動試験における固定化割合は、養生別にみても HBB>HPC>HFA の順に大きかった。電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、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）となり、ほとんどが固相塩化物となっていると推測できる¹⁾。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量による違いと考ええると、本結果から、HBB では、HPC と固相塩化物量は同程度であり、吸着塩化物イオンが若干多いと考えられ、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顕著に多いと思われる。

4. まとめ

- (1) HPC と HBB の初期強度は同程度であり、長期になると HBB、HFA とともに強度増進が確認された。
- (2) HBB、HFA の水中養生での見かけの拡散係数は HPC の 1/2 以下となった。
- (3) HBB、HFA は、HPC よりも塩化物イオンの固定化割合が大きかった。
- (4) 塩化物イオンの固定化性状が配合ごとに異なり、HBB は、HPC と固相塩化物量は同程度であり、吸着塩化物イオンが若干多いと考えられ、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顕著に多い結果となった。

参考文献 1) 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

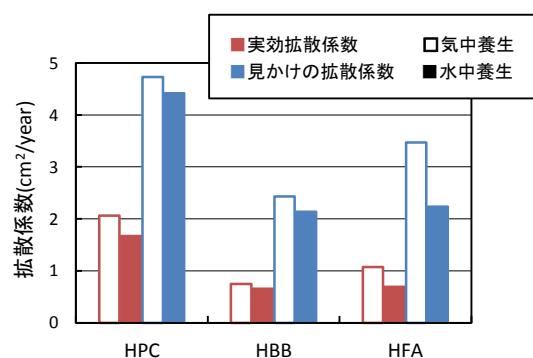


図-2 各配合別の拡散係数

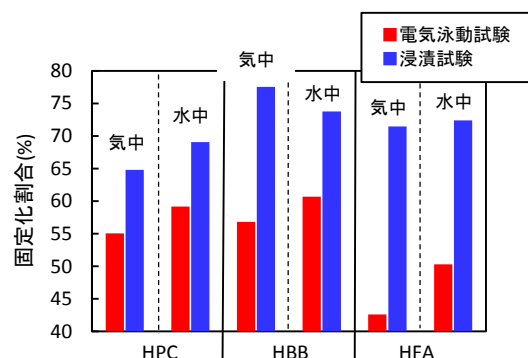


図-3 試験方法による固定化割合の違い