

## 混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に関する実験的研究

(独)土木研究所 正会員 工修 ○中村 英佑  
 (独)土木研究所 正会員 工修 石井 豪  
 (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 工博 鈴木 雅博  
 (独)土木研究所 正会員 工博 渡辺 博志

Abstract : This paper presents the strength and durability of concrete containing supplementary cementitious materials (SCMs) on the basis of test results derived from outdoor exposure and laboratory tests. The test results indicated that the mixing of SCMs enhanced resistance to chloride ingress but resulted in increased carbonation depth and low strength development; however, the carbonation depths predicted from the outdoor exposure test were smaller than typical concrete cover depths. The test results also revealed that the strength development and the resistance to chloride ingress and carbonation at early ages were substantially affected by wet curing periods especially in the concrete containing SCMs.

Key words : Supplementary cementitious materials , GGBF slag , Fly ash , Strength , Durability

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート構造物の建設に付随して発生する環境負荷の抑制や耐久性の向上を目的として、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材で置換したコンクリートの利用が注目されている。混和材を用いたコンクリートをプレストレストコンクリート構造物で積極利用するためには、初期材齢の強度発現や塩化物イオン浸透と中性化に対する抵抗性、これらに湿潤養生日数が与える影響を適切に把握しておくことが不可欠である。しかしながら、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートの特性を実環境下で検討した事例は必ずしも多くなく、実験データの蓄積が求められている。

本研究では、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートの強度特性と塩化物イオン浸透抵抗性、中性化抵抗性を暴露試験の結果をもとに考察し、これらの各特性に湿潤養生日数が与える影響を室内試験により検討した。暴露試験では、国内3ヶ所の屋外暴露場に供試体を暴露し、約20ヶ月後に解体調査を行った。また、室内試験では、湿潤養生日数が異なる供試体を製作し、圧縮強度試験と非定常・電気泳動試験<sup>1)</sup>、促進中性化試験を行った。

### 2. 実験方法

#### 2. 1 コンクリート配合

コンクリート配合を表-1に示す。配合は、早強ポルトランドセメント(HPC)単味のH40、高炉スラグ微粉末4000(BS4)を30%置換したH40B430、高炉スラグ微粉末6000(BS6)を50%置換したH40B650、フライアッシュⅡ種(FA)を20%置換したH40F20の4種類とした。各混和材の使用が強度特性と耐久性に与える影響を明らかにすることを目的としたため、水結合材比(W/B)を40%、単位水量(W)を165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量(G)を968kg/m<sup>3</sup>に統一した供試体を製作して実験を行った。

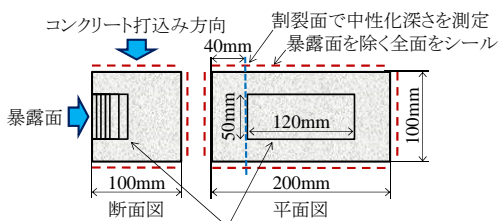
#### 2. 2 暴露試験の方法

実環境下での強度特性と耐久性を把握するため、つくば、新潟、沖縄の3ヶ所の屋外暴露場に供試体を暴露し、約20ヶ月後に回収して塩化物イオン濃度と中性化深さを測定した。暴露供試体の形状と調

表-1 コンクリート配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						暴露試験		室内試験		
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S	G	Slump (cm)	Air (%)	Slump (cm)	Air (%)
			HPC	BS4	BS6	FA						
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	11.5	4.6	13.0	5.3
H40B430			289 (70%)	124 (30%)	—	—	749		10.5	3.8	12.0	4.4
H40B650			206 (50%)	—	206 (50%)	—	745		14.5	4.8	11.5	4.5
H40F20			330 (80%)	—	—	83 (20%)	734		14.0	4.5	9.5	4.4

※HPC：早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>，比表面積=4,490cm<sup>2</sup>/g，4,630cm<sup>2</sup>/g)，BS4：高炉スラグ微粉末4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>，比表面積=4,400cm<sup>2</sup>/g，4,460cm<sup>2</sup>/g)，BS6：高炉スラグ微粉末6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>，比表面積=5,950cm<sup>2</sup>/g，6,020cm<sup>2</sup>/g)，FA：フライアッシュII種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>，比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g)，比表面積が1種類の場合は暴露試験と室内試験で同一の値の材料を使用，2種類の場合は前者を暴露試験で後者を室内試験で使用  
 ※単位量の()内の%値は全結合材に各結合材が占める割合を表示  
 ※細骨材：静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm<sup>3</sup>，吸水率=2.23%)，粗骨材：茨城県笠間産砕石6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>，吸水率=0.43%)と5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>，吸水率=0.46%)を均等に混合  
 ※化学混和剤：高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)と空気連行剤を使用



塩化物イオン濃度測定用試料の採取位置  
 表面から0~5, 5~10, 10~15, 15~20, 20~30, 30~40mm

図-1 暴露供試体の形状と調査方法

つくば

平均気温 15.5℃  
 平均湿度 72.9%  
 累積降水量 2,580mm



新潟

平均気温 14.8℃  
 平均湿度 77.3%  
 累積降水量 4,830mm



沖縄

平均気温 23.3℃  
 平均湿度 75.5%  
 累積降水量 4,085mm



図-2 暴露試験の実施状況と気象データ

※気象データは暴露場の最寄りの気象観測地点(つくば(館野)，高田，名護)の暴露期間(2012年2月~2013年10月)の値を引用<sup>2)</sup>

表-2 室内試験の供試体の養生方法

記号	養生方法	
W	標準養生	材齢3日に脱型し，材齢28日まで水中養生
1d	気中養生	打設翌日に脱型し，実験室内に保管
3d	湿潤養生	材齢3日に脱型し，実験室内に保管
7d		材齢3日に脱型し，材齢7日まで湿潤養生

※全供試体で打込み直後から翌日まで封緘養生，1d以外は材齢3日の脱型時まで養生マットを用いて湿潤養生，所定の養生を終えた後は試験実施時まで実験室内(室温20℃，湿度60%)に保管

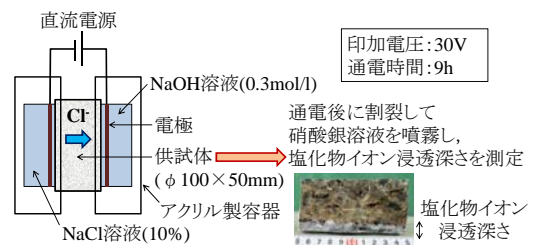


図-3 非定常・電気泳動試験の概略図

査方法を図-1，暴露試験の実施状況と気象データを図-2に示す。暴露供試体は100×100×200mmの角柱であり，材齢28日まで水中養生を行った後，材齢44~69日で屋外に暴露した。つくばの暴露場は内陸部のため塩害環境下にはないが，新潟と沖縄の暴露場は海岸線近くの厳しい塩害環境下にある。塩化物イオン濃度はJIS A 1154，中性化深さはJIS A 1152に準拠して測定した。また，暴露供試体と同時に製作した円柱供試体(φ100×200mm)を用いて，材齢7，28，91，365日に圧縮強度試験を行った。円柱供試体は材齢28日まで水中養生を行い，材齢91日まで実験室内に保管した後，つくばの暴露場に設置した。材齢28，365日の圧縮強度試験では，JIS A 1149に準拠して静弾性係数も同時に測定した。

2. 3 室内試験の方法

打込み後の湿潤養生日数が比較的初期の材齢の強度特性と耐久性に与える影響を把握するため，養生方法の異なる供試体を製作して圧縮強度試験と非定常・電気泳動試験，促進中性化試験を行った。室内試験に用いた供試体の養生方法を表-2に示す。圧縮強度試験は，円柱供試体(φ100×200mm)を用

いて、表-2の養生方法Wと1dで材齢3, 7, 28, 56, 91日, 3dと7dで材齢7, 28, 56, 91日に行った。

非定常・電気泳動試験は、円柱供試体( $\phi 100 \times 100\text{mm}$ )を表-2の全養生方法で製作し、図-3と文献1)の方法で材齢114~115日に行った。養生方法の違いが塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響を検討するため、型枠底面を試験対象面として、この面が脱型後に湿潤状態あるいは乾燥状態となるように養生を行った。その後、型枠底面から厚さ50mmで供試体を切断し、真空飽水处理後に印加電圧30Vで9時間の通電を行った。通電後の供試体を割裂して硝酸銀溶液(0.1mol/l)を割裂面に噴霧し、塩化物イオンの浸透深さを測定した。文献1)では塩化物イオンの拡散係数の算出方法を検討したが、ここでは養生方法の異なる供試体の塩化物イオンの浸透深さを比較した。

促進中性化試験は、角柱供試体( $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ )を表-2の養生方法1d, 3d, 7dで製作し、材齢49日以降で供試体の片側側面( $100 \times 400\text{mm}$ )以外をエポキシ樹脂塗料でシールした後、材齢56日から開始した。試験条件は、JIS A 1153に準拠し、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5 \pm 2\%$ 、促進期間1, 4, 8, 13, 26週とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 暴露試験の結果

##### (1) 圧縮強度

暴露供試体と同時に製作した円柱供試体の圧縮強度を図-4に示す。材齢7日の圧縮強度は、HPC単味のH40で混和材を用いたH40B430, H40B650, H40F20より大きくなった。その後の強度発現は混和材の種類によって異なり、高炉スラグ微粉末を用いたH40B430とH40B650の圧縮強度は、材齢28, 91日でH40との差が小さくなり、材齢365日でH40とほぼ同等となった。一方、フライアッシュを用いたH40F20の強度発現はポゾラン反応に依存するため他の供試体より遅く、材齢365日においてもH40より若干小さくなった。混和材を用いた供試体では初期材齢の強度発現がHPC単味の供試体より遅れたが、両者の差は長期的には小さくなる傾向にあった。

また、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5に示す。同図には2012年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に記載されている圧縮強度と静弾性係数の関係も併記した。圧縮強度と静弾性係数の関係は混和材の使用の有無にかかわらず概ね同一であり、2012年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕の圧縮強度と静弾性係数の関係ともほぼ一致した。

##### (2) 塩化物イオンの浸透量と見掛けの拡散係数

暴露供試体の塩化物イオン濃度の分布を図-6に示す。表面からの距離が0~5mmの位置の塩化物イオン濃度は、高炉スラグ微粉末を用いたH40B430とH40B650ではH40より大きく、フライアッシュを用いたH40F20ではH40と同等か小さくなった。H40B430とH40B650ではHPCの質量に対して30%あるいは50%の高炉スラグ微粉末を置換したため塩化物イオンの固定化能力が高まり、供試体表面付近の塩化物イオン濃度が大きくなったと考えられる。一方、表面からの距離が5~20mmの位置の塩化物イオン濃度は、混和材を用いた供試体でH40より小さくなった。混和材の使用により供試体内部への塩化物

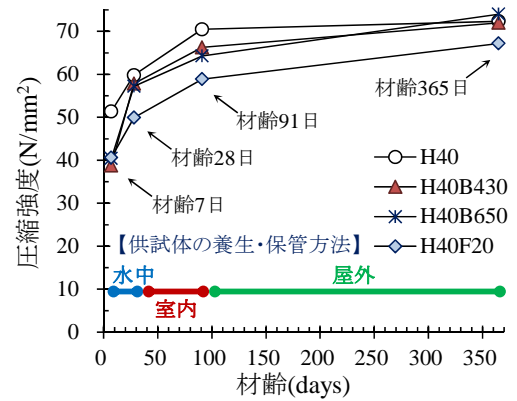


図-4 円柱供試体の圧縮強度

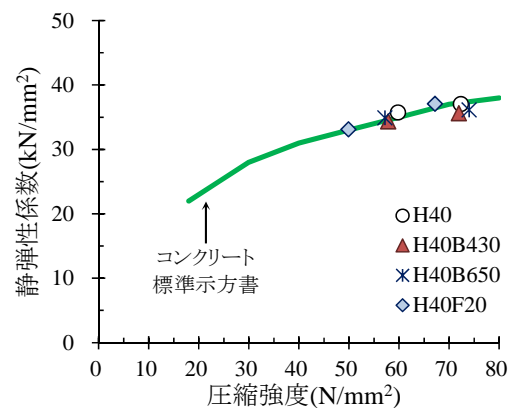


図-5 圧縮強度と静弾性係数

イオン浸透が抑制されたためと考えられる。

塩化物イオンの浸透量は、新潟より沖縄の供試体で大きくなった。この傾向は過去に同じ暴露場で実施した暴露試験の結果<sup>3)</sup>でも確認されており、新潟の暴露場は海中の消波ブロックや波打ち際で生成された海水の飛沫のみで飛来塩分が供給される環境であるが、沖縄の暴露場は天候によっては海水が供試体に直接降りかかる場合もあるため、暴露場間で塩化物イオンの供給量に差があったことが原因ではないかと考えられる。

次に、図-6の測定値と式(1)を用いて算出した塩化物イオンの見掛けの拡散係数と供試体表面の塩化物イオン濃度を図-7, 8に示す。

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

ここで、 $x$ ：表面からの距離(cm)、 $t$ ：暴露期間(year)、 $C(x, t)$ ：距離 $x$ と暴露期間 $t$ での塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_0$ ：供試体表面の塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_i$ ：初期含有塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $D_{ap}$ ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm<sup>2</sup>/year)、 $\operatorname{erf}$ ：誤差関数である。

見掛けの拡散係数は、混和材を用いた供試体で小さく、H40B650で最小となった。ここでも混和材の使用により塩化物イオン浸透抵抗性が向上したことが示された。ただし、見掛けの拡散係数は、いずれの配合においても新潟より沖縄の供試体で若干大きく、文献3)とは逆の傾向を示した。この原因については現時点では明確ではなく、今後も暴露試験を継続し、長期的な実験データを蓄積して検討を行う必要がある。また、供試体表面の塩化物イオン濃度は新潟より沖縄の供試体で大きく、いずれの暴露環境でもH40より高炉スラグ微粉末を用いた供試体で大きくなった。

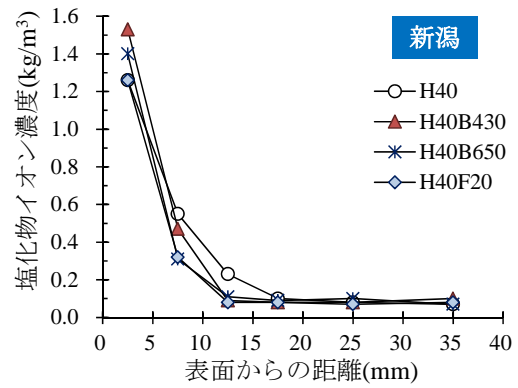
(3) 中性化深さの測定値と100年後の予測値

暴露20ヶ月後の中性化深さの測定値と100年後の中性化深さの予測値を図-9に示す。100年後の中性化深さの予測値は、中性化が $\sqrt{t}$ 則に従って進行すると仮定し、式(2)を用いて算出した。

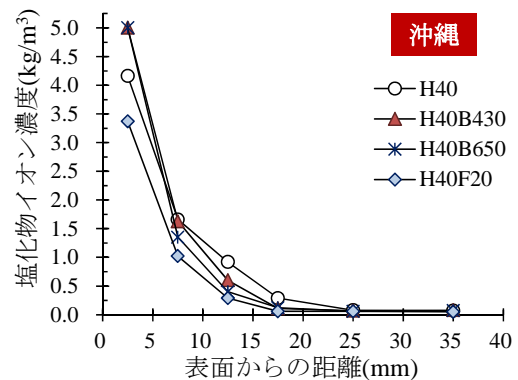
$$C_{estimated} = C_{measured} \cdot \frac{\sqrt{100}}{\sqrt{20/12}} \quad (2)$$

ここで、 $C_{estimated}$ ：100年後の中性化深さの予測値(mm)、 $C_{measured}$ ：暴露20ヶ月後の中性化深さの測定値(mm)である。

暴露20ヶ月後の中性化深さの測定値は、H40より混和材を用いた供試体で大きく、混和材を用いた供試体同士の比較ではフライアッシュを用いたH40F20で最も大きくなったが、最大でも0.6mm以下で



(A)新潟



(B)沖縄

図-6 暴露供試体の塩化物イオン濃度の分布

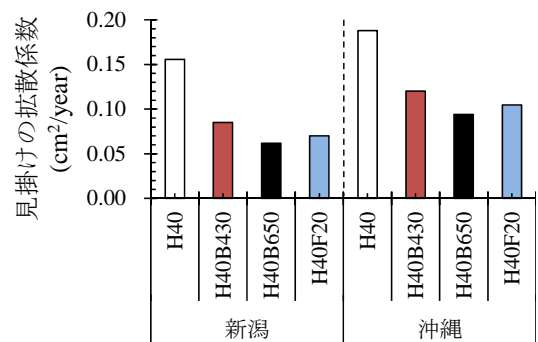


図-7 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

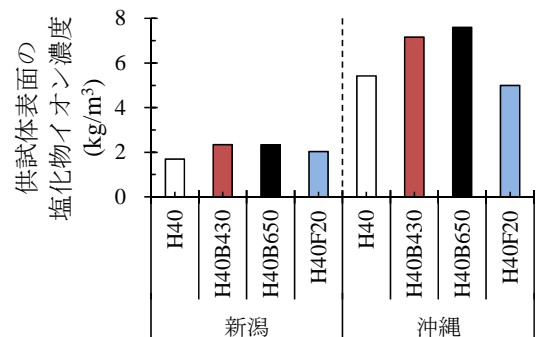


図-8 供試体表面の塩化物イオン濃度



あった。また、これをもとに算出した100年後の中性化深さの予測値は最大でも5mm以下であった。このため、混和材を用いた供試体では中性化深さがHPC単味の供試体より大きくなるが、適切なかぶりを確保することにより、中性化による鋼材腐食の発生を防止することができると考えられる。

### 3. 2 室内試験の結果

#### (1) 湿潤養生日数の異なる供試体の圧縮強度

養生方法の異なる供試体の圧縮強度の推移を図-10に

示す。いずれの配合においても、材齢56日から材齢91日の圧縮強度は概ね一定で推移し、湿潤養生日数の長い供試体ほど圧縮強度が大きくなった。また、図-4と同様に、混和材の置換率の高い供試体ほど強度発現が遅れたが、長期的な圧縮強度の増加量は大きくなった。

図-10には標準養生を行った供試体の材齢28日の圧縮強度を水平線で挿入した。これと湿潤養生日数の異なる供試体の圧縮強度の推移を比較すると、強度発現の傾向は混和材

の種類によって異なっていたことが読み取れる。H40B430とH40B650では、養生方法1dと3dの供試体の圧縮強度と標準養生を行った供試体の材齢28日の圧縮強度の差がH40より大きく、初期材齢の湿潤養生日数が短い場合に強度発現が滞る傾向にあった。ここでは全配合のW/Bを40%に統一しており、HPCの一部を高炉スラグ微粉末で置換した供試体では強度発現が湿潤養生日数の影響を受けやすく、標準養生を行った供試体の材齢28日の圧縮強度と同等の圧縮強度を得るために必要な湿潤養生日数が長くなったためと考えられる。一方、H40F20の強度発現は傾向が異なり、材齢28日の時点で養生方法3dと7dの供試体が標準養生を行った供試体の圧縮強度を上回った。湿潤養生後に乾燥させた供試体では湿潤養生を継続している供試体よりも一時的に圧縮強度が増加することが報告されており<sup>4)</sup>、この傾向がH40F20で明確に現れたためではないかと考えられる。

#### (2) 湿潤養生日数の異なる供試体の塩化物イオン浸透深さと中性化速度係数

非常常・電気泳動試験による塩化物イオン浸透深さと促進中性化試験による中性化速度係数を図-11に示す。若干のばらつきはあるが、混和材の使用の有無にかかわらず、湿潤養生日数を長くするほど、塩化物イオン浸透深さと中性化速度係数は小さくなる傾向にあった。また、湿潤養生日数の違いによる各指標の差はH40より混和材を用いた供試体で大きくなった。塩化物イオン浸透と中性化に対する抵抗性においても混和材を用いた供試体は湿潤養生日数の長短の影響を受けやすいと考えられる。

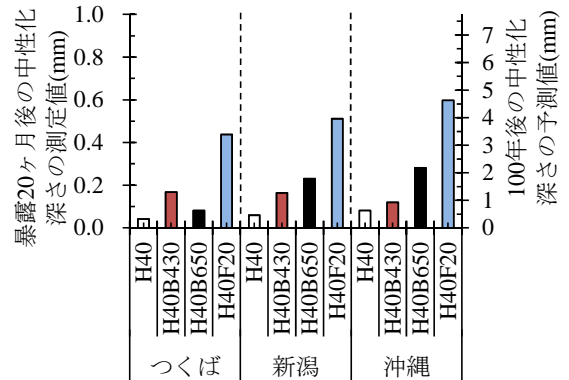


図-9 中性化深さの測定値と予測値

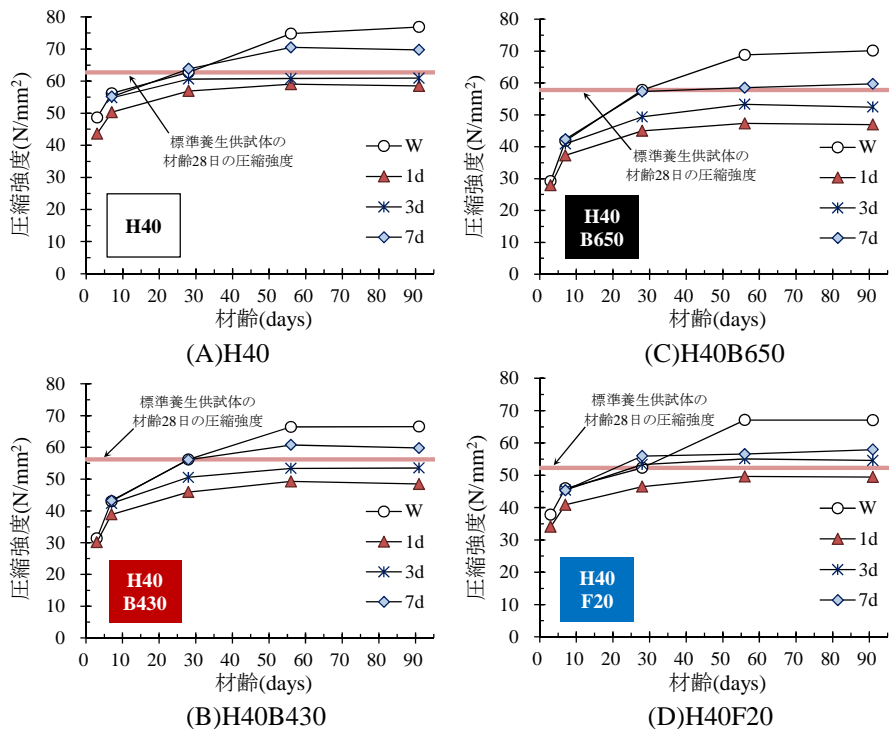


図-10 養生方法の異なる供試体の圧縮強度の推移

H40B430とH40B650の塩化物イオン浸透深さは、標準養生を行った供試体ではH40より小さくなったが、湿潤養生日数が短い供試体ではH40より大きくなることもあった。また、H40F20の標準養生以外の供試体の塩分浸透深さはH40より大幅に大きくなった。文献1)の傾向と同様に、これらの結果は混和材を用いた供試体の塩化物イオン浸透抵抗性が湿潤養生日数の影響を受けやすいことを示しており、混和材の使用による塩化物イオン浸透抵抗性の向上効果を得るためには初期材齢の養生を適切に行うことが重要と考えられる。ただし、上記は材齢初期の促進試験の結果であり、養生方法の異なる供試体でも図-1, 2と同様の暴露試験を行っているため、この調査結果も踏まえた上で、初期材齢の養生方法の違いが実環境下での長期的な耐久性に与える影響を検証する予定である。

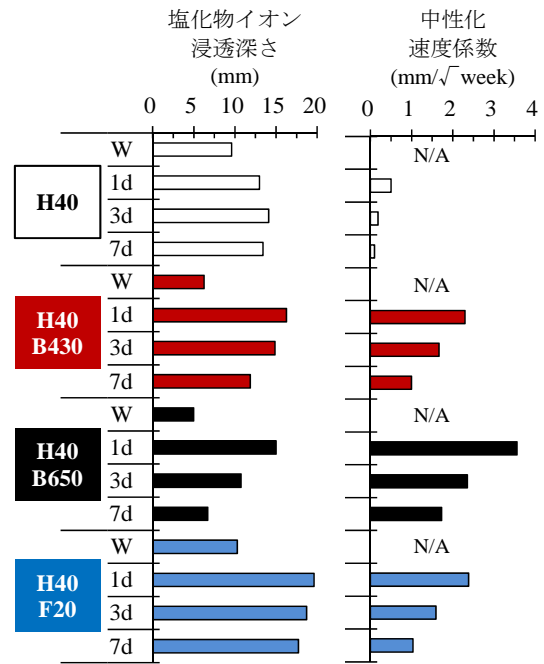


図-11 塩化物イオン浸透深さと中性化速度係数

#### 4. まとめ

本研究では、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換したコンクリートの強度特性と塩化物イオン浸透抵抗性、中性化抵抗性、これらに湿潤養生日数が与える影響について、暴露試験と室内試験により検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 暴露試験の結果、混和材を用いた供試体の見掛けの拡散係数は早強ポルトランドセメント単味の供試体より小さく、混和材の使用により塩化物イオン浸透抵抗性が向上することが分かった。
- (2) 混和材を用いた供試体の中性化深さは早強ポルトランドセメント単味の供試体より大きくなったが、暴露試験結果から算出した100年後の中性化深さは最大でも5mm以下であり、適切なかぶりを確保することで中性化による鋼材腐食を防止することができると考えられた。
- (3) 水結合材比が同一の場合、混和材を用いた供試体では、早強ポルトランドセメント単味の供試体と比較して初期材齢の強度発現が遅れる傾向にあり、初期材齢の強度特性や塩化物イオン浸透と中性化に対する抵抗性が湿潤養生日数の影響を受けやすいことが分かった。

本論文は、(独)土木研究所と(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会および国内7機関による共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の検討結果の一部をまとめたものである。鉄鋼スラグ協会から高炉スラグ微粉末、電源開発(株)からフライアッシュの提供を受けた。BASFジャパン(株)の土谷正氏から化学混和剤についての助言を得た。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 鈴木聡, 中村英佑, 渡辺博志: 各種モルタル供試体を用いた非定常・電気泳動試験に関する実験的研究, 第21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.97-102, 2012
- 2) 気象庁ホームページ: 気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 3) 中村英佑, 鈴木聡, 古賀裕久, 渡辺博志: 5年間暴露したコンクリートのひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.871-876, 2013
- 4) Walter H. Price: Factors Influencing Concrete Strength, Journal of the American Concrete Institute, Vol.47, February, 1951