

## 混和材を用いたコンクリートの実環境下での強度と耐久性に関する検討

(国研) 土木研究所 正会員 工修 ○栗原 勇樹  
 (国研) 土木研究所 正会員 工修 中村 英佑  
 (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  
 (国研) 土木研究所 工博 古賀 裕久

キーワード：混和材，暴露試験，圧縮強度，塩化物イオン浸透，中性化

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート構造物の耐久性向上による長寿命化と建設時の環境負荷低減を目的として、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など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に適用する際には、混和材の使用が強度と耐久性に与える影響を把握しておく必要がある。そこで、実環境下での強度と耐久性を明らかにするために行った暴露試験の結果と、打込み後の湿潤養生期間が強度と耐久性に及ぼす影響を明らかにするために行った室内試験の結果を報告した<sup>1)</sup>。

本報告では、この暴露試験の結果<sup>1)</sup>に材齢3年の圧縮強度，暴露40ヶ月後の塩化物イオン浸透と中性化深さの結果を追加し、混和材を用いたコンクリートの実環境下での強度と耐久性について検討した。

### 2. 試験概要

#### 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。配合は4種類であり、早強ポルトランドセメント(HPC)単味のコンクリート(H40)，早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000(BS4)で置換したコンクリート(H40B430)，50%を高炉スラグ微粉末6000(BS6)で置換したコンクリート(H40B650)，20%をフライアッシュII種(FA)で置換したコンクリート(H40F20)とした。混和材の使用が強度と耐久性に与える影響を検討することを目的としたため、全配合において、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。

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S			G
			HPC	BS4	BS6	FA				
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	11.5	4.6
H40B430			289 (70%)	124 (30%)	—	—	749		10.5	3.8
H40B650			206 (50%)	—	206 (50%)	—	745		14.5	4.8
H40F20			330 (80%)	—	—	83 (20%)	734		14.0	4.5

※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)，BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>，比表面積=4,440cm<sup>2</sup>/g，SO<sub>3</sub>=2.19%(無水せっこう添加))，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，SO<sub>3</sub>=2.85%(無水せっこう添加))，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)，単位量の()内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

※S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂，密度=2.56g/cm<sup>3</sup>，吸水率=2.23%)，G: 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: スランプ 12±2.5cm，空気量 4.5±1.5%となるよう高性能 AE 減水剤と空気連行剤の使用量を調整

## 2. 2 圧縮強度

円柱供試体(φ100×200mm)を製作し、材齢28日まで標準養生を行い、材齢91日まで室内に保管したのち、つくばの暴露試験場に暴露した。材齢7日、28日、91日、1年および3年で圧縮強度を測定した。

## 2. 3 塩化物イオン浸透状況と中性化深さ

角柱供試体(100×100×200mm)の概要を図-1に示す。同図には、塩化物イオン濃度測定用試料の採取位置と中性化深さの測定位置を併記した。コンクリート打込み翌日に脱型し、材齢28日まで標準養生を行った。その後、材齢44~69日の間で、つくば、新潟、沖縄の雨掛かりのある屋外の暴露試験場に供試体を移設し、各暴露試験場で暴露試験を開始した。コンクリートの打込み方向に対して片側の側面を暴露面とした。暴露面以外の供試体表面をシールし、暴露面以外からの塩化物イオンの浸透と中性化の進行を防止した。

暴露20、40ヶ月後に供試体を回収して、塩化物イオン濃度と中性化深さを測定した。塩化物イオン濃度測定用試料の採取位置は供試体の表面から0~5、5~10、10~15、15~20、20~30、30~40mmとし、JIS A 1154(電位差滴定法)に準拠して塩化物イオン濃度を測定した。中性化深さは、JIS A 1152を参考に、供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、供試体の表面から赤紫色を呈した位置までの距離を等間隔に9点で測定して得られた平均値とした。

暴露試験の実施状況と暴露試験場付近の気象データを写真-1に示す。つくばの暴露試験場は内陸部に位置するため塩害環境にはないが、新潟と沖縄の暴露試験場は海岸線近くの厳しい塩害環境下にある。また、新潟の暴露試験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、沖縄の暴露試験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環境である。

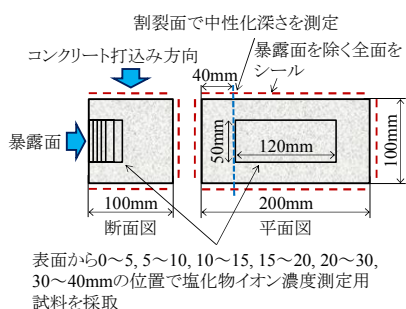


図-1 角柱供試体の概要



(A)つくば  
平均気温 : 13.9℃  
平均湿度 : 71.8%  
積算降水量 : 4,896mm



(B)新潟  
平均気温 : 13.2℃  
平均湿度 : 76.0%  
積算降水量 : 10,378mm



(C)沖縄  
平均気温 : 22.4℃  
平均湿度 : 74.6%  
積算降水量 : 7,828mm

※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)の値<sup>2)</sup>を記載

写真-1 暴露試験の実施状況と暴露試験場付近の気象データ

## 3. 試験結果

### 3. 1 圧縮強度

圧縮強度を図-2に示す。材齢7日では、H40B430、H40B650、H40F20の圧縮強度がH40よりも小さくなった。その後、H40では材齢91日以降の圧縮強度の増加がみられなかった。一方、H40B430、H40B650では材齢1年まで圧縮強度が増加してH40と同等となり、その後は圧縮強度の増加がみられなかった。H40F20では材齢1年まで圧縮強度が増加し、材齢の経過とともにH40との圧縮強度の差が小さくなった。

水結合材比が同一の場合、混和材を用いたコンクリートでは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して初期材齢の強度発現が遅れるが、長期にわたり強度発現が継続するため、圧縮強度の差が小さくなった。

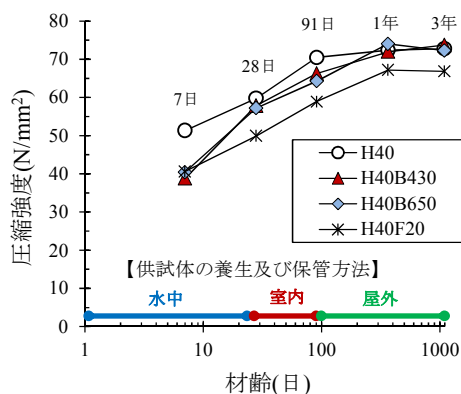


図-2 圧縮強度

### 3. 2 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

暴露20, 40ヶ月後の塩化物イオン濃度分布を図-3に示す。塩化物イオン浸透量は、暴露期間や配合にかかわらず、新潟の暴露試験場よりも沖縄の暴露試験場で大きくなった。暴露環境の違いによって塩化物イオンの供給量に差が生じたためと推察される。また、暴露環境や配合の違いにかかわらず、表面から5mm以深では暴露20ヶ月後から40ヶ月後にかけて塩化物イオン濃度がほとんど増加していなかった。既往の研究<sup>3)</sup>ではフライアッシュを用いたコンクリート構造物で、塩化物イオン浸透の停滞現象が報告されている。今回の暴露試験の結果によると、混和材の使用の有無にかかわらず、すべての配合で塩化物イオン浸透の停滞が生じていた可能性があると考えられる。

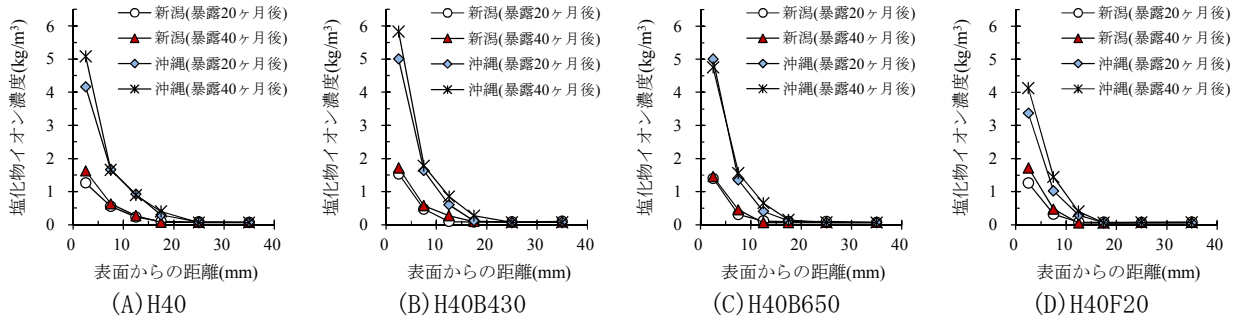


図-3 塩化物イオン濃度分布

次に、図-3の塩化物イオン濃度分布と式(1)を用いて求めた塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面の塩化物イオン濃度を図-4, 5に示す。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$

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

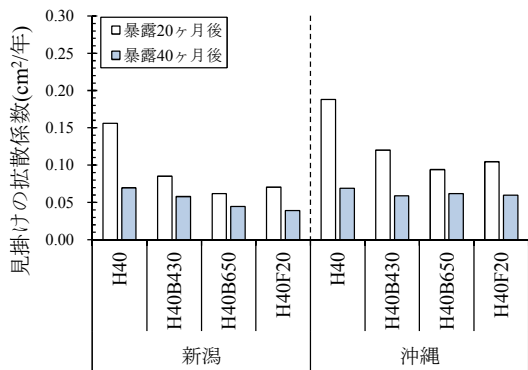


図-4 見掛けの拡散係数

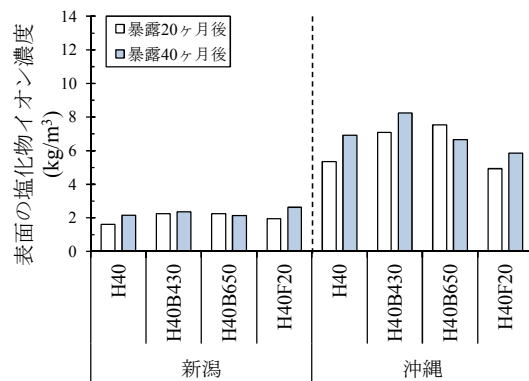


図-5 表面の塩化物イオン濃度

見掛けの拡散係数は、暴露環境や暴露期間にかかわらず、H40よりも混和材を用いたコンクリートで小さくなった。混和材の使用によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上したと考えられる。また、前述したように、暴露20ヶ月後から40ヶ月後にかけて内部の塩化物イオン濃度がほとんど増加していなかったため、暴露20ヶ月後よりも暴露40ヶ月後の見掛けの拡散係数が小さくなった。

表面の塩化物イオン濃度は塩化物イオン浸透量と同様に新潟の暴露試験場よりも沖縄の暴露試験場で大きくなった。前述したように、暴露環境の違いによって塩化物イオンの供給量に差が生じたためと推察される。なお、本報告では暴露40ヶ月後までの調査結果を示したが、今後も暴露試験を継続して長期的な塩化物イオン浸透状況を調査する予定である。

### 3. 3 中性化に対する抵抗性

暴露20, 40ヶ月後の中性化深さの測定値を図-6, 中性化速度係数と100年後の中性化深さの推定値を図-7に示す。100年後の中性化深さについては, 中性化が暴露期間の平方根に比例して進行すると仮定して, 暴露20, 40ヶ月後の中性化深さの測定値から回帰分析によって求めた中性化速度係数を用いて推定した。

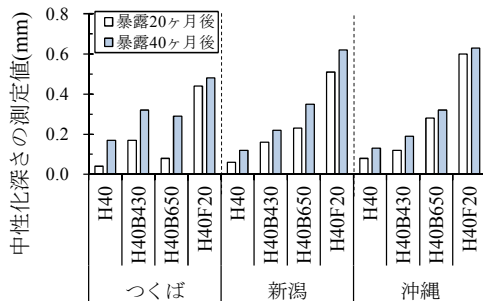


図-6 中性化深さの測定値

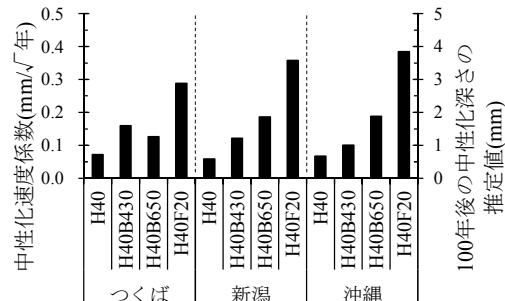


図-7 中性化速度係数と100年後の中性化深さの推定値

すべての配合で暴露20ヶ月後よりも暴露40ヶ月後の中性化深さが大きくなった。暴露期間や暴露環境の違いにかかわらず, 中性化深さはH40よりも混和材を用いたコンクリートで大きく, とくにH40F20でもっとも大きくなった。しかし, 暴露40ヶ月後の中性化深さの測定値は最大で0.6mm程度であり, 100年後の中性化深さの推定値も最大で4mm程度であった。水結合材比が40%以下であれば, 混和材を用いたコンクリートにおいても, 早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様に, 適切なかぶりを確保することによって, 中性化の進行による鋼材腐食の発生を防止できると考えられる。

### 4. まとめ

本報告では, 水結合材比を40%とし混和材を用いたコンクリートを対象として, 実環境下での強度と耐久性について検討した。本報告の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 混和材を使用すると, 早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して初期材齢の強度発現が遅れたが, 材齢1年まで強度発現が継続し, 圧縮強度の差が小さくなった。
- (2) 混和材の使用によって, 暴露40ヶ月後においても早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも見掛けの拡散係数が小さくなり, 塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上した。また, 暴露20ヶ月後から40ヶ月後にかけて内部の塩化物イオン濃度がほとんど増加していなかったため, すべての配合で暴露20ヶ月後よりも暴露40ヶ月後の見掛けの拡散係数が小さくなった。
- (3) 混和材の使用によって中性化深さが大きくなったが, 100年後の中性化深さの推定値は最大でも4mm以下であった。水結合材比が40%以下であれば, 適切なかぶりを確保することによって, 中性化の進行による鋼材腐食の発生を防止できると考えられる。

本稿は, (国研)土木研究所, (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会および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。

### 参考文献

- 1) 中村英佑ほか: 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, 第23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. 53-58, 2014
- 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) 高橋佑弥ほか: 実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol. 32, No. 1, pp. 803-808, 2010