

## 混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に湿潤養生期間が及ぼす影響

(国研) 土木研究所 正会員 工修 ○中村 英佑  
 (国研) 土木研究所 正会員 工修 栗原 勇樹  
 (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，湿潤養生期間，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や長寿命化，建設時に発生する環境負荷の低減を目的として，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で置換したコンクリートの適用方法を検討している。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，構造物に所要の性能を付与するため，打込み後の湿潤養生期間の違いが強度や耐久性に及ぼす影響を把握し，適切な方法で養生を行う必要がある。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と，打込み後の湿潤養生期間の違い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>。

本稿では，この室内試験の結果<sup>1)</sup>に，室内試験後に継続して行った暴露試験の結果を加えて，打込み後の湿潤養生期間の違いが混和材を用いたコンクリートの長期的な圧縮強度と塩化物イオン浸透抵抗性，中性化抵抗性に及ぼす影響について追加的に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。配合は，早強ポルトランドセメント(HPC)のみを用いた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H40B430，50%を高炉スラグ微粉末6000(BS6)で置換したH40B650，20%をフライアッシュⅡ種(FA)で置換したH40F20の4種類である。また，混和材の使用有無による差を比較するため，全配合で，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。

#### 2. 2 供試体の養生方法と屋外暴露試験の実施状況

供試体の養生方法を表-2，屋外暴露試験の実施状況を図-1に示す。養生方法は，標準養生(W)，気中養生(1d)，湿潤養生(3d，7d)の4種類である。標準養生(W)では材齢28日まで水中養生，気中養生(1d)では打込み翌日に脱型して気中養生，湿潤養生(3d，7d)では材齢3，7日まで湿潤養生を行った。その後，材齢91日まで供試体を実験室内(室温20℃，湿度60%)に保管し，材齢91日以降で屋外暴露試験を開始した。暴露環境は，茨城県つくば市の雨掛かりのある屋外である。

#### 2. 3 試験方法

打込み後の湿潤養生期間の違いが圧縮強度と塩化物イオン浸透抵抗性，中性化抵抗性に及ぼす影響を検討するため，圧縮強度試験，非定常・電気泳動試験<sup>3)</sup>，中性化試験の3種類の試験を行った。

圧縮強度試験では，表-2の4種類の養生方法で製作した円柱供試体(φ100×200mm)を用い，材齢7，28，56，91，365日にJIS A 1108に準拠して圧縮強度を測定した。材齢365日の圧縮強度試験には，材齢91日以降で屋外に暴露した供試体を用いた。

非定常・電気泳動試験では，表-2の4種類の養生方法で製作した円柱供試体(φ100×100mm)を用い，

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 (%)	練上がり温度 (°C)	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S				G
			HPC	BS4	BS6	FA					
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	13.0	5.3	23.0
H40B430			289 (70%)	124 (30%)	—	—	749		12.0	4.4	21.3
H40B650			206 (50%)	—	206 (50%)	—	745		11.5	4.5	21.5
H40F20			330 (80%)	—	—	83 (20%)	734		9.5	4.4	23.0

※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=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=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=4,460cm<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=6,020cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.89%(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%値は全結合材に各結合材が占める割合を表示

※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: 高性能 AE 減水剤と空気連行剤の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるように調整

表-2 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

※打込み直後から翌日まで封緘養生, 1d以外で材齢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に実験室内(室温 20°C, 湿度 60%)に保管, 材齢 91 日以降で屋外に暴露



【茨城県つくば市】

平均気温: 15.5°C

平均湿度: 72.9%

累積降水量: 2,580mm

※気象データは最寄りの気象観測地点(つくば(館野))の測定値<sup>2)</sup>である。

図-1 屋外暴露試験の実施状況

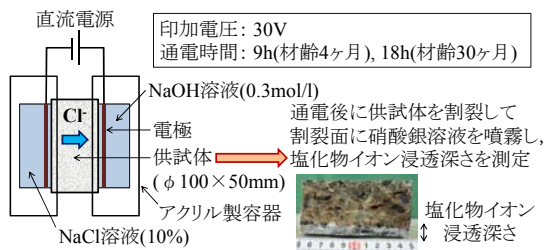


図-2 非定常・電気泳動試験の概略図

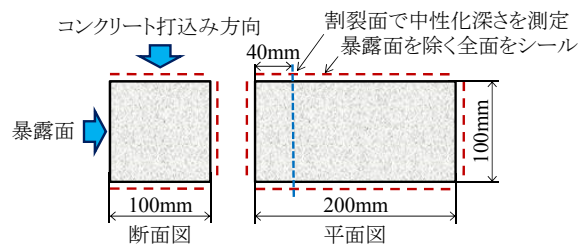


図-3 角柱供試体の形状と中性化深さの測定位置

材齢4ヶ月と材齢30ヶ月で試験を行った。材齢4ヶ月の試験では実験室内に保管した供試体, 材齢30ヶ月の試験では材齢91日以降で屋外に暴露した供試体を用いた。湿潤養生期間の違いが塩化物イオン浸透抵抗性に及ぼす影響を検討するため, 型枠底面を試験対象面とし, 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。試験時には, 型枠底面から厚さ50mmとなるように供試体を切断し, 文献<sup>3)</sup>と同様に真空飽水処理後に図-2に示す方法で通電を行った。通電後, 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。通電中に塩化物イオンが供試体を通過して塩化物イオン浸透深さの測定が困難になることを避けるため, 通電時間を材齢4ヶ月の試験で9時間, 材齢30ヶ月の試験で18時間とし, 印加電圧を30Vとした。試験材齢によって異なる通電時間を採用したため, AASHTO TP 64<sup>4)</sup>を参考に塩化物イオン浸透深さを印加電圧と通電時間で除して塩化物イオン浸透率を計算し, この値を用いて塩化物イオン浸透抵抗性を比較した。

中性化試験では, 表-2のW以外の3種類の養生方法で製作した角柱供試体(100×100×200mm, 図-3)を用い, 屋外暴露30ヶ月後に中性化深さを測定した。JIS A 1152を参考にフェノールフタレイン溶液を割裂面に噴霧し, 赤紫色を呈した位置までの距離を均等に9点で測定して平均値を中性化深さとした。

3. 実験結果および考察

3. 1 圧縮強度

圧縮強度を図-4に示す。材齢91日までの結果では、湿潤養生期間の違いによる圧縮強度の差が明確に現れており、湿潤養生期間を長くするほど圧縮強度が大きくなった。また、材齢56日から材齢91日にかけて、圧縮強度は概ね一定で推移した。一方、材齢365日の結果では、圧縮強度は屋外暴露後の材齢91日以降で再び増加し、湿潤養生期間の短い供試体ほど材齢91日から材齢365日までの圧縮強度の増加量が大きくなった。この結果、材齢365日の圧縮強度は、湿潤養生期間の違いにかかわらず同程度となり、標準養生を行った供試体の材齢28日の圧縮強度を上回った。この傾向は、混和材の使用有無にかかわらず、全ての配合で共通するものであった。屋外では雨掛かりなどによって水分が供給される環境に供試体が置かれるため、結合材の反応が長期的に継続したことが原因で、打込み後の湿潤養生期間の違いによる圧縮強度の差が小さくなったと考えられる。

また、本稿の実験では全配合で水結合材比を同一としていたため、材齢91日までの比較的初期の材齢では、混和材を用いた供試体の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よりも小さくなった。しかし、混和材を用いた供試体では材齢91日以降の圧縮強度の増加が著しく、材齢365日では混和材の使用有無による差が小さくなった。

3. 2 塩化物イオン浸透率

非定常・電気泳動試験で得られた塩化物イオン浸透率を図-5に示す。塩化物イオン浸透率が大きい／小さいほど、塩化物イオン浸透抵抗性が低い／高いことを示している。なお、塩化物イオン浸透深さの最大値は、材齢4ヶ月の試験で約20mm、材齢30ヶ月の試験で約12mmであった。

若干のばらつきはあるが、材齢4ヶ月では、混和材を用いた供試体の塩化物イオン浸透率は湿潤養生期間が短いほど大きく、早強ポルトランドセメントのみを用いた供試体よりも大きくなるがあった。一方、材齢30ヶ月では、塩化物イオン浸透率は全ケースで材齢4ヶ月よりも小さくなり、混和材を用いた供試体の塩化物イオン浸透率は、いずれの湿潤養生期間の場合にも早強ポルトランドセメントのみを用いた供試体よりも小さくなった。また、混和材を用いた供試体では、試験材齢にかかわらず、湿潤養生期間の違いによる塩化物イオン浸透率の差が早強ポルトランドセメントのみを用いた供試体

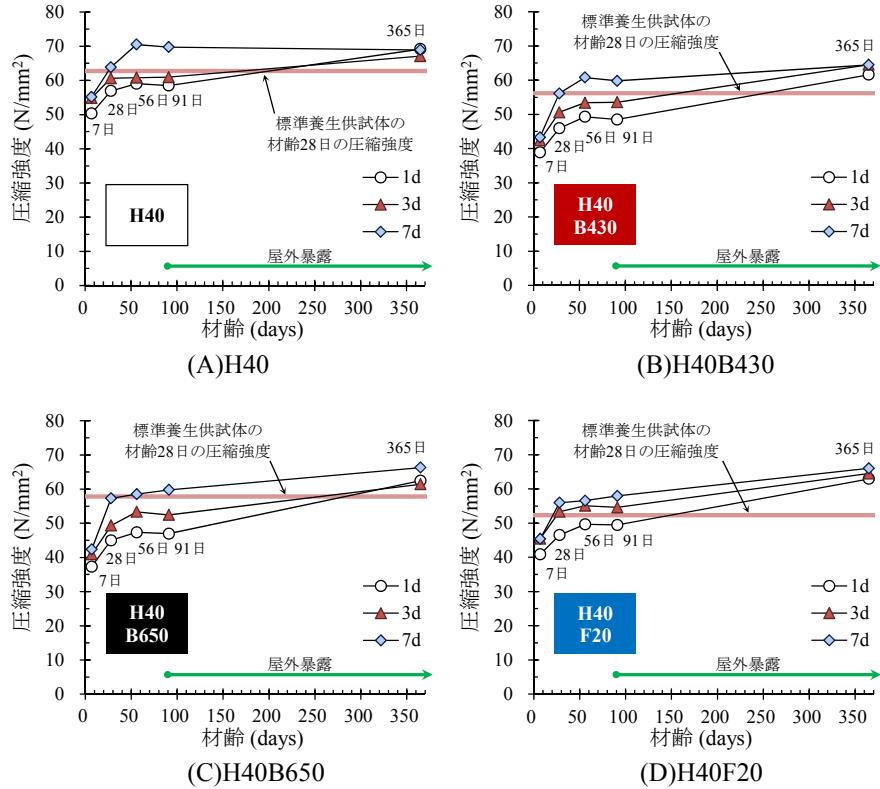


図-4 圧縮強度

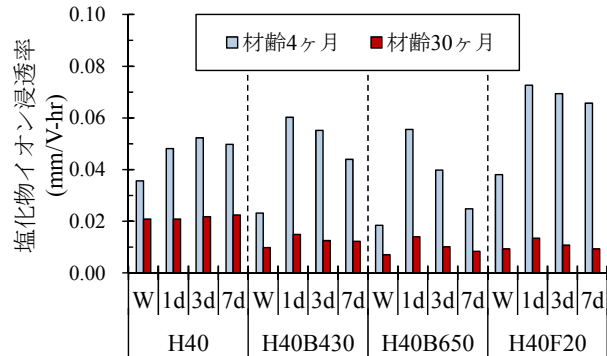


図-5 塩化物イオン浸透率

よりも明確に現れたが、この差は材齢の経過とともに小さくなった。混和材を用いた供試体の塩化物イオン浸透抵抗性は、湿潤養生期間の長短の影響を受けやすいが、屋外では雨掛かりなどによる水分供給などの影響を受けて長期的に向上したため、湿潤養生期間の違いによる差が小さくなったと考えられる。

前述の圧縮強度と異なり、塩化物イオン浸透率では湿潤養生期間の長短の影響が長期的に継続した。圧縮強度が供試体全体の平均的な強度を示す

のに対して、塩化物イオン浸透率は供試体表層のコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性の優劣の影響を受けやすく、供試体表層で湿潤養生期間の違いによる塩化物イオン浸透抵抗性の差が長期的に継続したことが原因と考えられる。

### 3. 3 中性化深さ

屋外暴露30ヶ月後の中性化深さを図-6に示す。中性化深さは、混和材の使用有無にかかわらず、湿潤養生期間が短い場合に大きくなった。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みを用いた供試体よりも中性化深さが大きく、湿潤養生期間の違いによる中性化深さの差も大きくなった。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みを用いた供試体よりも中性化抵抗性が低く、湿潤養生期間の長短の影響を受けやすいことが原因として考えられる。また、ここで示した中性化深さは暴露開始から試験時点までの中性化の進行の程度を現しているため、暴露30ヶ月後の時点においても湿潤養生期間の違いによる差が明確に現れる傾向にあったと考えられる。

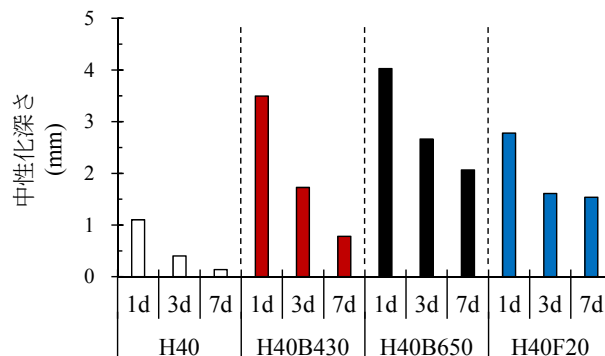


図-6 中性化深さ

### 4. まとめ

本稿では、混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に打込み後の湿潤養生期間が及ぼす影響について検討した結果を報告した。本稿の範囲内で得られた知見をまとめる。

- ・ 圧縮強度は、混和材の使用有無にかかわらず、比較的初期の材齢では湿潤養生期間を長くするほど大きくなったが、屋外暴露後では湿潤養生期間の違いによる差が減少して同程度となった。
- ・ 混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性と中性化抵抗性は、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よりも湿潤養生期間の長短の影響を受けやすく、長期的に湿潤養生期間の違いによる差が明確に現れた。

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) 鈴木聡ほか：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
- 4) AASHTO Designation: TP 64-03(2007): Standard Method of Test for Predicting Chloride Penetration of Hydraulic Cement Concrete by the Rapid Migration Procedure, 2007