

混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に関する検討

俵 道和*1・栗原 勇樹*2・石井 豪*3・中村 英佑*4

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をプレストレストコンクリート橋に適用することを想定し、混和材の使用や打込み後の養生方法の違いがコンクリートの強度と耐久性に及ぼす影響について暴露試験と室内試験を行って検討した。この結果、混和材を用いたコンクリートでは、強度発現が初期材齢で遅延するが長期的に継続すること、塩化物イオン浸透抵抗性が向上すること、中性化の進行速度が速いが適切なかぶりを確保することによって中性化に起因する鋼材腐食を防止できること、化学混和剤を用いて AE コンクリートとすることによって凍結融解抵抗性を確保できることなどを確認した。また、混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性は湿潤養生期間の影響を受けやすいが、適切な湿潤養生期間を設定することによって所定の強度と耐久性を確保できることを確認した。

キーワード：混和材，圧縮強度，塩化物イオン浸透，中性化，凍結融解，湿潤養生期間

1. はじめに

プレストレストコンクリート橋の耐久性向上や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橋に適用する際には、混和材の使用が実環境下での強度と耐久性に及ぼす影響を正確に把握しておく必要がある。また、打込み後の養生方法の違いが混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に及ぼす影響を把握し、打込み後の養生を適切に行う必要がある。筆者らの所属する（国研）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は、「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究委員会（平成 23～27 年度）」を設置し、「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）」（以下、マニュアル（案）と呼ぶ）を発刊した¹⁾。

本報では、混和材の使用や打込み後の養生方法の違いが、圧縮強度、塩化物イオン浸透抵抗性、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性に及ぼす影響について、マニュアル（案）の作成の過程で得られた知見^{1, 2)}に長期暴露試験の結果^{3, 4)}を加えて報告する。

2. 実験方法

2.1 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-1に示す。マニュアル（案）の検討では、早強ポルトランドセメント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で置換したコンクリート（H40B430）、50%を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリート（H40B650）、

20%をフライアッシュⅡ種で置換したコンクリート（H40F20）の4種類の結合材の組合せを標準とした。

すべての配合で、単位水量を165 kg/m³、水結合材比を40%、単位粗骨材量を968 kg/m³に統一した。また、スランプ12±2.5 cmと空気量4.5±1.5%のフレッシュ性状を確保するため、化学混和剤の使用量を調整した。ただし、凍結融解抵抗性の検討に用いた供試体では、空気量を4.0～4.5%とした。

表-1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
			W	B = H + B4 + B6 + F				S	G
				H	B4	B6	F		
H40	40	—	165	413	—	—	—	758	968
H40B430		30	289	124	—	—	749		
H40B650		50	206	—	206	—	745		
H40F20		20	330	—	—	83	734		

H: JIS R 5210 に適合した早強ポルトランドセメント、B4: JIS A 6206 に適合した高炉スラグ微粉末4000、B6: JIS A 6206 に適合した高炉スラグ微粉末6000、F: JIS A 6201 に適合したフライアッシュⅡ種、S: 細骨材（静岡県掛川産陸砂）、G: 粗骨材（茨城県笠間産砕石6号と5号を均等に混合、最大寸法20 mm）

2.2 実験概要

混和材を用いたコンクリートの圧縮強度、塩化物イオン浸透抵抗性、中性化抵抗性、凍結融解抵抗性について、シリーズⅠ、シリーズⅡの2つの実験を行って検討した。

シリーズⅠでは、混和材の使用が実環境下での強度と耐久性に及ぼす影響について、つくば、新潟、沖縄の雨掛かりのある屋外暴露試験場で暴露試験を行って検討した。

シリーズⅡでは、打込み後の養生方法の違いが強度と耐久性に及ぼす影響について、暴露試験と室内試験を行って検討した。

*1 Michikazu TAWARA：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会

*2 Yuuki KURIHARA：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会

*3 Tsuyoshi ISHII：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会

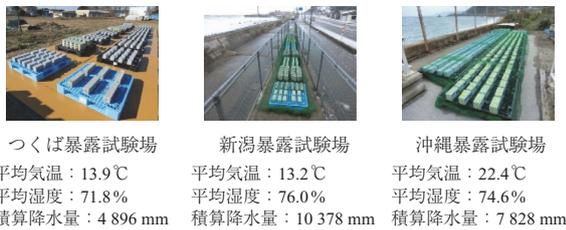
*4 Eisuke NAKAMURA：（国研）土木研究所

供試体の養生条件を表 - 2、暴露試験の実施状況と各暴露試験場付近の気象データを図 - 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こともある環境である。

表 - 2 供試体の養生条件

養生条件	記号	養生方法	シリーズ	
			I	II
標準養生	W	打込み翌日に脱型し、材齢 28 日まで標準養生	○	○
気中養生	D	打込み翌日に脱型したのち、室内で気中養生	-	○
湿潤養生	C3	打込み翌日に脱型し、材齢 3 日まで湿潤養生	-	○
	C7	打込み翌日に脱型し、材齢 7 日まで湿潤養生	-	○

※養生終了から試験実施までは室内で気中養生とした。



つくば暴露試験場 新潟暴露試験場 沖縄暴露試験場
 平均気温：13.9℃ 平均気温：13.2℃ 平均気温：22.4℃
 平均湿度：71.8% 平均湿度：76.0% 平均湿度：74.6%
 積算降水量：4896mm 積算降水量：10378mm 積算降水量：7828mm
 ※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³⁾を記載

図 - 1 暴露試験の実施状況と気象データ

2.3 実験項目

実験項目と養生条件、試験材齢を表 - 3 に示す。実験項目は、圧縮強度、塩化物イオン浸透、中性化、凍結融解の 4 種類である。

表 - 3 実験項目と養生条件、試験材齢

シリーズ	実験項目	養生条件	試験材齢
I	圧縮強度	圧縮強度試験 (JIS A 1108)	W 材齢 7 日, 28 日, 91 日, 1 年, 3 年
	塩化物イオン浸透	暴露試験	W 暴露 20, 40 ヶ月後に、塩化物イオン濃度を測定 (JIS A 1154)
	中性化	暴露試験	W 暴露 20, 40 ヶ月後に、中性化深さを測定 (JIS A 1152)
II	圧縮強度	圧縮強度試験 (JIS A 1108)	W, D 材齢 3 日, 7 日, 28 日, 56 日, 91 日, 1 年 C3, C7 材齢 7 日, 28 日, 56 日, 91 日, 1 年
	塩化物イオン浸透	電気泳動試験 (非定常法)	W, D, C3, C7 材齢 4, 30 ヶ月
		促進中性化試験 (JIS A 1153)	D, C3, C7 材齢 56 日から開始 促進期間 1, 4, 8, 13, 26 週
	中性化	暴露試験	C3, C7 暴露 30 ヶ月後に、中性化深さを測定 (JIS A 1152)
	凍結融解	凍結融解試験 (JIS A 1148 A 法)	W, C3 材齢 28 日から 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 サイクル

(1) 圧縮強度 (圧縮強度試験)

供試体は、φ100×200 mm の円柱供試体である。表 - 2 の各養生条件に従って養生を行い、材齢 91 日以降につくばの暴露試験場に供試体を暴露した。シリーズ I の試験では材齢 7 日, 28 日, 91 日, 1 年, 3 年、シリーズ II の試験では材齢 3 日 (標準養生を行った供試体 (W) と気中養生を行った供試体 (D))、7 日, 28 日, 56 日, 91 日, 1 年で JIS A 1108 に準拠して圧縮強度を測定した。

(2) 塩化物イオン浸透 (暴露試験)

供試体は、□100×200 mm の角柱供試体である。材齢 28 日まで標準養生を行い、材齢 44~69 日で、新潟と沖縄の暴露試験場に供試体を移設し、暴露試験を開始した。

供試体の暴露面は、コンクリートの打込み方向に対して片側の側面とした。暴露面以外の供試体表面を塗装材料でシールし、暴露面以外からの塩化物イオン浸透を防止した。

暴露 20, 40 ヶ月後に供試体を回収して、塩化物イオン濃度を測定した。供試体の形状と塩化物イオン濃度を測定した試料の採取位置を図 - 2 に示す。供試体の表面から 0~5, 5~10, 10~15, 15~20, 20~30, 30~40 mm の位置で試料を採取し、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。

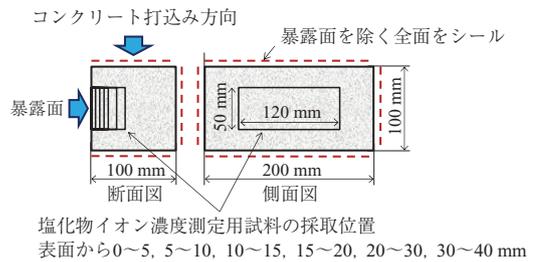


図 - 2 塩化物イオン濃度測定用試料の採取位置

(3) 塩化物イオン浸透 (電気泳動試験 (非定常法))

供試体は、φ100×100 mm の円柱供試体である。表 - 2 の各養生条件に従って養生を行い、材齢 91 日以降につくばの暴露試験場に供試体を暴露した。材齢 4, 30 ヶ月で図 - 3 に示す方法で電気泳動試験 (非定常法) を行った。材齢 4 ヶ月の試験では表 - 2 の各養生条件後に室内で気中養生した供試体、材齢 30 ヶ月の試験ではつくばの暴露試験場に暴露した供試体を用いた。

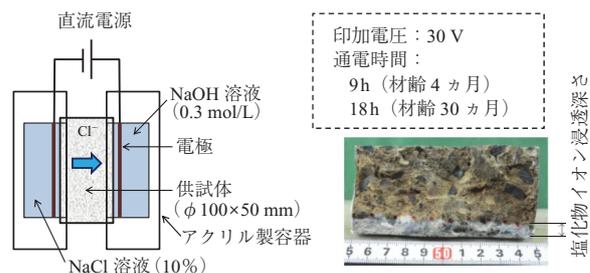


図 - 3 電気泳動試験 (非定常法) の概要

養生条件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、型枠底面を試験面とし、試験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。養生後、型枠底面から厚さ 50 mm で供試体を切断し、真空飽水処理後に印加電圧 30 V で通電を行った。通電時間を材齢 4 ヶ月の試験では 9 時間、材齢 30 ヶ月の試験では 18 時間とした。通電後、供試体を割裂して硝酸銀溶液 (0.1 mol/L) を割裂面に噴霧し、塩化物イオン浸透深さを測定した。

(4) 中性化 (暴露試験)

供試体は、□100×200 mm の角柱供試体である。表 - 2 の各養生条件に従って養生を行い、シリーズ I の試験では材齢 44～69 日で、つくば、新潟、沖縄の暴露試験場、シリーズ II の試験では材齢 91 日以降で、つくばの暴露試験場に供試体を移設し、暴露試験を開始した。

供試体の暴露面は、コンクリートの打込み方向に対して片側の側面とした。暴露面以外の供試体表面を塗装材料でシールし、暴露面以外からの中性化の進行を防止した。

シリーズ I の試験では暴露 20, 40 ヶ月後、シリーズ II の試験では暴露 30 ヶ月後に供試体を回収して、中性化深さを測定した。供試体の形状と中性化深さの測定位置を図 - 4 に示す。中性化深さについては、端部から 40 mm の位置で供試体を割裂して、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間隔で 9 点測定し、この平均値とした。

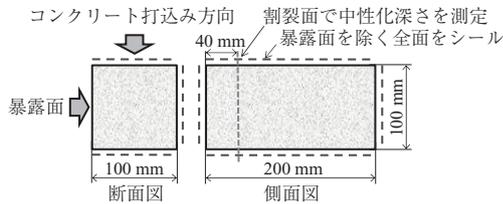


図 - 4 中性化深さの測定位置

(5) 中性化 (促進中性化試験)

供試体は、□100×400 mm の角柱供試体である。表 - 2 の各養生条件に従って養生を行い、材齢 49 日以降でコンクリートの打込み方向に対して片側の側面以外を塗装材料でシールし、材齢 56 日から促進中性化試験を開始した。JIS A 1153 に準拠して、試験条件を温度 20±2℃、湿度 60±5%、二酸化炭素濃度 5±0.2% とし、促進 1, 4, 8, 13, 26 週に達した時点で中性化深さを測定した。

中性化深さについては、端部から約 60 mm の位置で供試体を割裂して、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間隔で 9 点測定し、この平均値とした。

(6) 凍結融解 (凍結融解試験)

供試体は、□100×400 mm の角柱供試体である。表 - 2 の各養生条件に従って養生を行い、材齢 28 日から JIS A 1148 の A 法に準拠して凍結融解試験を開始した。凍結融解 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 サイクル後にたわみ振動の一次共鳴振動数と質量を測定した。

3. 実験結果

3.1 混和材の使用が実環境下での強度と耐久性に及ぼす影響の検討 (シリーズ I)

(1) 圧縮強度

圧縮強度を図 - 5 に示す。材齢 7 日では、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度が 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。材齢 1 年から材齢 3 年にかけて、すべての配合で圧縮強度の増加はみられなかった。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傾向にあった。しかし、混和材を用いたコンクリートでは、長期にわたり強度発現が継続したため、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートとの圧縮強度の差が小さくなった。

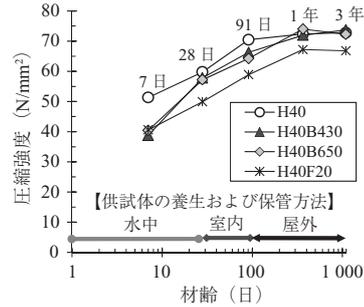


図 - 5 圧縮強度

(2) 塩化物イオン浸透

暴露 20, 40 ヶ月後の塩化物イオン濃度分布を図 - 6 に示す。表面から 10 mm 以深の塩化物イオン濃度は、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、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透が抑制されたためと考えられる。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、暴露 20 ヶ月後から 40 ヶ月後にかけて表面から 5 mm 以深の塩化物イオン濃度がほとんど増加していなかった。

次に、図 - 6 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 - 7, 8 に示す。

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

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

塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、暴露環境の違いにかかわらず、H40 よりも混和材を用いたコンクリートで小さくなった。この傾向は、とくに暴露 20 ヶ月の結果で顕著に現れ、混和材の使用によって塩化物イオン浸透抵抗性が向上したことが確認された。また、図 - 6 に示したように、暴露 20 ヶ月後から 40 ヶ月後にかけて表面から 5 mm 以深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 40 ヶ月後の見掛けの拡散

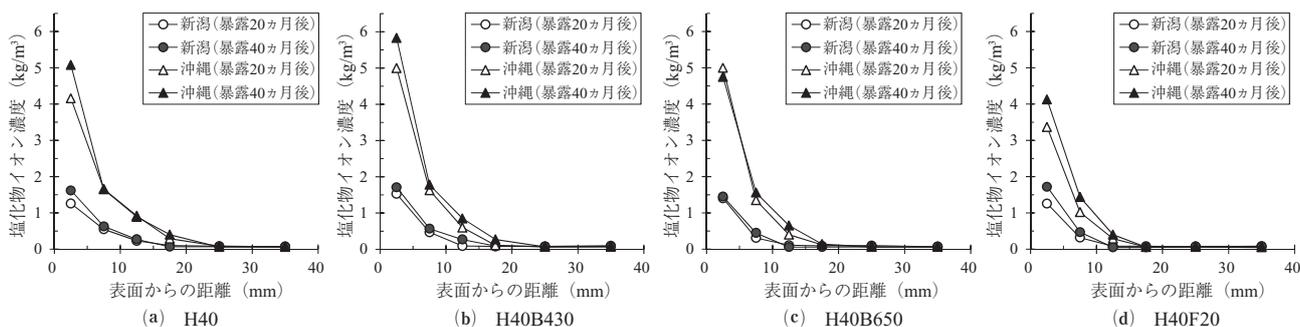


図 - 6 塩化物イオン濃度分布

係数が小さくなった。

表面の塩化物イオン濃度は、図 - 6 と同様に、暴露期間や配合の違いにかかわらず、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。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。また、図 - 6 では表面から 5 mm 以深の塩化物イオン濃度の増加がみられなかったのに対して、表面の塩化物イオン濃度は暴露期間を長くすると一部の配合を除いて大きくなる傾向にあった。

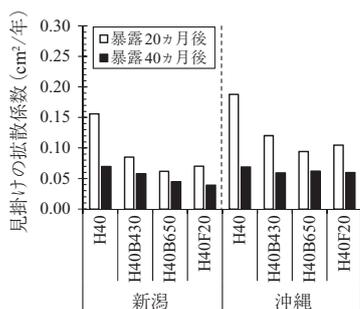


図 - 7 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

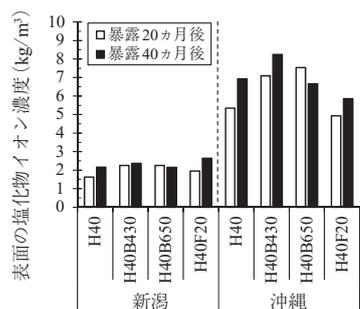


図 - 8 表面の塩化物イオン濃度

(3) 中性化

暴露 20, 40 ヶ月後の中性化深さの測定値を図 - 9, 中性化速度係数と 100 年後の中性化深さの推定値を図 - 10 に示す。ここでは、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の回帰分析によって中性化速度係数を求めた。また、この中性化速度係数を用いて 100 年後の中性化深さを推定した。

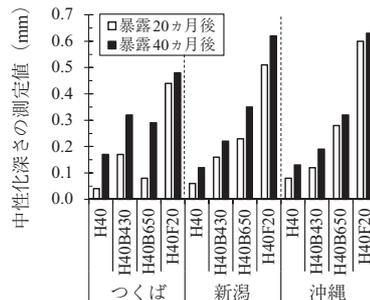


図 - 9 中性化深さの測定値

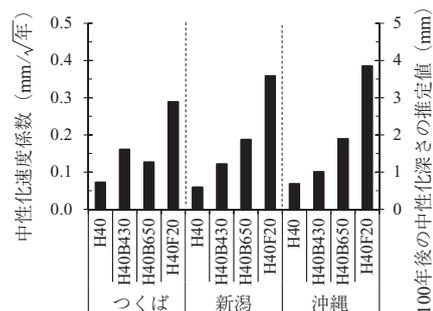


図 - 10 中性化速度係数と 100 年後の中性化深さの推定値

すべての配合で暴露 20 ヶ月後から 40 ヶ月後にかけて中性化の進行がみられ、中性化深さは暴露期間を長くすると大きくなった。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 0.6 mm 程度であり、100 年後の中性化深さの推定値も最大で 4 mm 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。

3.2 養生方法の違いが混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に及ぼす影響の検討 (シリーズ II)

(1) 圧縮強度

圧縮強度を図 - 11 に示す。図中には、標準養生を行った供試体 (W) の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率 50% ($0.5f'_{c,28}$) を点線、70% ($0.7f'_{c,28}$) を破線、100% ($f'_{c,28}$)

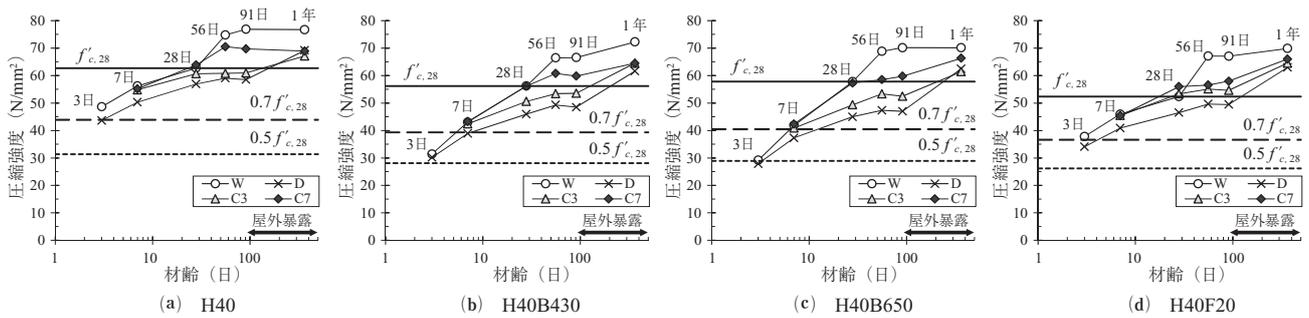


図 - 11 圧縮強度

を実線で示した。

材齢 91 日までの結果では、配合の違いにかかわらず、湿潤養生期間を長くするほど圧縮強度が大きくなった。この傾向はとくに材齢 28 日以降で明確に現れた。また、材齢 56 日から 91 日にかけて、圧縮強度はおおむね一定で推移した。一方、供試体を屋外に暴露した材齢 91 日以降の結果では、湿潤養生期間が短い供試体ほど圧縮強度の増加が大きくなった。また、材齢 1 年での圧縮強度は、湿潤養生期間の違いにかかわらず同等となり、すべての配合で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。このように、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傾向にあった。しかし、材齢 91 日以降の屋外暴露環境では、湿潤養生期間の違いにかかわらず、長期にわたり強度発現が継続したため、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートとの圧縮強度の差が小さくなった。

なお、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」⁶⁾では、標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50% 程度となる材齢を湿潤養生期間の目安として定めている。また、「ACI 308 R-01 Guide to Curing Concrete」⁷⁾では、圧縮強度を確保するために、材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 70% 程度となる材齢まで養生を継続することが望ましいとしている。図 - 10 の標準養生を行った供試体 (W) における材齢 28 日までの圧縮強度と材齢 28 日の圧縮強度に対する比率から、標準養生を行った供試体 (W) の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50% を上回る材齢は、すべての配合において 3 日であった。また、70% を上回る材齢は、H40 と H40F20 で 3 日、H40B430 と H40B650 で 7 日であった。

(2) 塩化物イオン浸透

電気泳動試験 (非定常法) で得られた塩化物イオン浸透速度を図 - 12 に示す。試験材齢ごとに通電時間が異なったため、ここでは塩化物イオン浸透深さを通電時間で除し、塩化物イオン浸透速度を求めて示した。

混和材を用いたコンクリートでは、湿潤養生期間が短いほど塩化物イオン浸透速度が大きくなった。材齢 4 ヶ月の結果によると、混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透速度は、養生条件や配合によっては早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも大きくなった。一方、材齢 30 ヶ月では、養生条件にかかわらず混和材を用いた

コンクリートの塩化物イオン浸透速度が早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなった。この傾向はとくに H40F20 で顕著に現れた。また、混和材を用いたコンクリートでは、材齢の経過とともに、湿潤養生期間の違いによる塩化物イオン浸透速度の差も小さくなった。

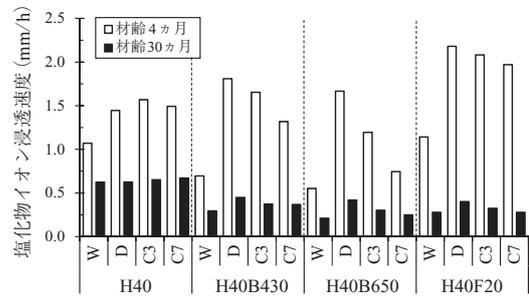


図 - 12 塩化物イオン浸透速度

(3) 中性化

促進中性化試験で得られた中性化速度係数を図 - 13、暴露 30 ヶ月後の中性化深さの測定値と 100 年後の中性化深さの推定値を図 - 14 に示す。ここでは、コンクリートの中性化が促進期間や暴露期間の平方根に比例して進行すると仮定して、促進中性化試験の結果では全促進期間の測定値の回帰分析によって中性化速度係数を求めた。また、暴露試験の結果では暴露 30 ヶ月後の中性化深さの測定値を暴露期間の平方根で除して中性化速度係数を求め、これを用いて 100 年後の中性化深さを推定した。

促進中性化試験による中性化速度係数と暴露試験による中性化深さの測定値と推定値は、配合の違いにかかわらず、湿潤養生期間が短いほど大きくなった。また、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よりも中性化速度係数や中性化深さが大きく、湿潤養生期間の違いによる差も大きくなった。

マニュアル (案) では、現場打ちのプレストレストコンクリート部材に混和材を用いたコンクリートを適用することを想定している。現場打ちのプレストレストコンクリート部材では、道路橋示方書によると、塩害の影響を受けない場合、かぶりの最小値は 35 mm とされている。また、コンクリート標準示方書⁸⁾によると、通常環境下での中性化残りは 10 mm とされている。このため、かぶりの最小値から中性化残りを差し引いた値は、25 mm となる。暴露試験の結果から 100 年後の中性化深さを推定すると、湿

潤養生期間を3日以上とした場合には中性化深さの推定値が25 mm以下となったため、湿潤養生期間を3日以上とすることによって十分な中性化抵抗性を確保できると考えられる。

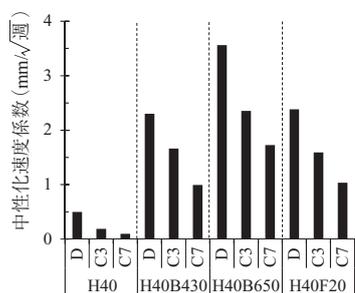


図 - 13 促進中性化試験による中性化速度係数

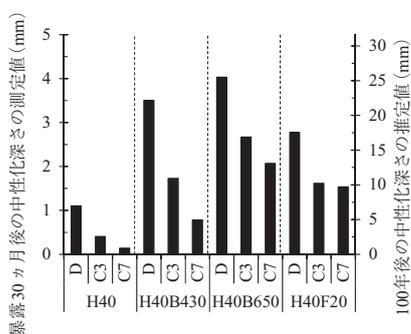


図 - 14 暴露30ヵ月後の中性化深さの測定値と100年後の中性化深さの推定値

(4) 凍結融解

凍結融解試験から得られた相対動弾性係数を図 - 15、質量変化率を図 - 16 に示す。

養生条件にかかわらず、混和材を用いたコンクリートの相対動弾性係数と質量変化率は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等であった。また、相対動弾性係数は100%前後で推移しており、化学混和剤を用いて空気量の目標値を4.5%としたAEコンクリートとすることによって、十分な凍結融解抵抗性を確保できることを確認した。

4. おわりに

本報では、混和材を用いたコンクリートについて、混和材の使用や打込み後の養生方法の違いがコンクリートの強度と耐久性に及ぼす影響について暴露試験と室内試験を行って検討した。この結果、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、強度発現が初期材齢で遅延するが長期的に継続することを確認した。塩化物イオン浸透に対しては、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が小さくなり、塩化物イオン浸透抵抗性が向上することを確認した。中性化に対しては、中性化の進行速度が速いが適切なかぶりを確保することによって中性化に起因する鋼材腐食を防止できることを確認した。凍結融解に対しては、化学混和剤を用いてAEコンク

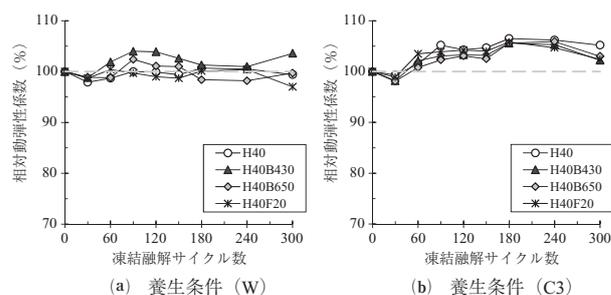


図 - 15 相対動弾性係数

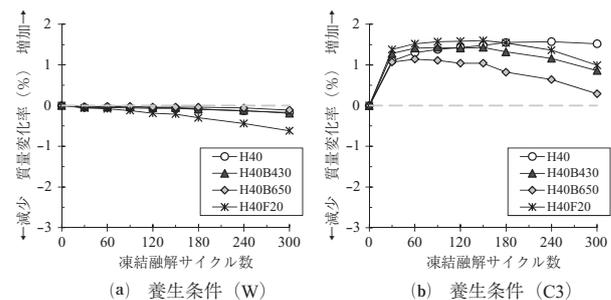


図 - 16 質量変化率

リートとすることによって凍結融解抵抗性を確保できることを確認した。また、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単味のコンクリートよりも湿潤養生期間の長短の影響を受けやすいが、適切な湿潤養生期間を保つことによって所定の強度と耐久性を確保できることを確認した。

参考文献

- (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: 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(Ⅱ) - 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) -, 共同研究報告書第472号, 2016
- 中村英佑, 石井豪, 鈴木雅博, 渡辺博志: 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
- 栗原勇樹, 中村英佑, 鈴木雅博, 古賀裕久: 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, 第25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.405-408, 2016
- 中村英佑, 栗原勇樹, 鈴木雅博, 古賀裕久: 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, 第25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.401-404, 2016
- 気象庁ホームページ: 気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 土木学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, コンクリートライブラリー 86, 1996
- ACI Committee 308: Guide to Curing Concrete, ACI 308R-01, 2001
- 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013

[2017年2月22日受付]