

混和材を用いたプレキャストPC部材の耐久性に関する検討

	(国研) 土木研究所	正会員	工修	○水戸	健介
	(国研) 土木研究所	正会員	工博	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	正会員	工博	古賀	裕久

Abstract : This paper presents investigation results of durability of precast prestressed concrete members. Concrete specimens fabricated in a laboratory and a precast concrete factory were used to clarify influences of supplementary cementitious materials and water curing periods after steam curing on the durability. The test results derived from both laboratory and factory specimens revealed that use of the supplementary cementitious materials contributed to improve the resistance to chloride ingress but impaired that to carbonation. Additionally, the water curing of three days after the steam curing was found to enhance the resistances to chloride ingress, carbonation, and salt scaling.

Key words : Precast prestressed concrete, GGBF slag, Fly ash, Durability, Curing

1. はじめに

近年、プレキャスト PC 部材の高耐久化を実現するための方法として、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの積極的な使用と蒸気養生後の後養生の実施などが注目されている^{例えは¹⁾}。しかし、これらの方法によって得られるプレキャスト PC 部材の耐久性の向上効果は十分には明確にされていない。混和材を用いたプレキャスト PC 部材の耐久設計や製造方法、品質確認方法を確立するためには、実験データの更なる蓄積が必要とされている。

そこで、本研究では、まず、20℃の環境下で供試体を製作して、塩水浸せき試験、促進中性化試験、凍結融解試験を行い、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用がコンクリートの耐久性に与える影響を検討した(後述する「シリーズI」)。次に、プレキャスト工場で製造する部材と同一の蒸気養生設定とし、かつ、蒸気養生後の後養生の条件を変化させた壁状の試験体を製作して、塩水浸せき試験、促進中性化試験、スケーリング試験、細孔径分布の測定を行い、蒸気養生後の後養生の実施がコンクリートの耐久性に与える影響を検討した(後述する「シリーズII」)。

2. 実験方法

2. 1 シリーズ I (混和材の効果)

コンクリートの配合および基礎物性を表-1に示す。配合は、早強ポルトランドセメントのみを用いた H, 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 BS430, 50%を高炉スラグ微粉末6000で置換した BS650, 20%をフライアッシュII種で置換した FA20, 計4種類である。20℃の実験室内で供試体を製作し、材齢28日まで標準養生を行った後、塩水浸せき試験、促進中性化試験、凍結融解試験を実施した。

塩水浸せき試験では、円柱供試体を JSCE-G 572-2013 の「浸せきによるコンクリート中の見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して加工し、濃度3%の塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。浸せき90, 180, 365日後に、供試体表面から厚さ5mmごとに切断して試料を採取し、電位差滴定法によって塩化物イオン濃度を測定した。促進中性化試験では、JIS A 1153:2012 の「コンクリートの促進中性化試

表-1 コンクリート配合と基礎物性 (シリーズ I)

配合	W/B (%)	単位量(kg/m ³)						スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)			
		B=HPC+BS4+BS6+FA					S			G	材齢 3日	材齢 28日	材齢 91日
		W	HPC	BS4	BS6	FA							
H	36	165	458(100%)	—	—	—	721	968	12.0	5.3	49.3	65.3	74.0
BS430			321(70%)	138(30%)	—	—	712		10.0	5.9	33.5	60.5	71.1
BS650			229(50%)	—	229(50%)	—	707		12.0	5.0	35.6	69.4	80.5
FA20			367(80%)	—	—	92(20%)	696		8.0	4.8	40.4	60.6	65.7

※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=3.14 g/cm³, 比表面積=4480 cm²/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89 g/cm³, 比表面積=4350 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 2%)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91 g/cm³, 比表面積=6210 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 3%)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.35 g/cm³, 比表面積=4330 cm²/g), S: 細骨材(静岡県掛川産砕砂: 密度=2.56 g/cm³, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.43%, 硬質砂岩)と同 5号(密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.46%, 硬質砂岩)を均等に混合), 化学混和剤: スランブ 12±2.5 cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう高性能減水剤と空気連行剤の使用量を調整

※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

※圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200 mm)を用いて, 材齢 3, 28, 91 日に JIS A 1108:2006 に準拠して測定

表-2 コンクリート配合と基礎物性 (シリーズ II)

配合	W/B (%)	単位量(kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)
		W	B=HPC+BS6		S	G			材齢 28日
			HPC	BS6					
H-S	36	152	422(100%)	—	753	1024	13.0	3.4	74.8
BS650-S	33	150	227(50%)	227(50%)	766	972	11.0	4.0	75.1

※W: 上水道水(岐阜県本巣市), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14 g/cm³, 比表面積=4560 cm²/g), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.87 g/cm³, 比表面積=6060 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 3%)), S: 細骨材(岐阜県掛川産砕砂: 密度=2.67 g/cm³, 吸水率=0.70%), G: 粗骨材(岐阜県掛川産川砂利: 密度=2.64 g/cm³, 吸水率=1.29%), 化学混和剤: スランブ 12±2.5 cm, 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

※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

※圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200 mm)を用いて, 材齢 28 日に JIS A 1108:2006 に準拠して測定

表-3 養生条件 (シリーズ II)

記号	養生条件
D	蒸気養生後, 材齢 1日に脱型し, 気中養生を実施
W3	蒸気養生後, 材齢 1日に脱型し, 材齢 3日まで後養生を行った後, 気中養生を実施
W7	蒸気養生後, 材齢 1日に脱型し, 材齢 7日まで後養生を行った後, 気中養生を実施
W14	蒸気養生後, 材齢 1日に脱型し, 材齢 14日まで後養生を行った後, 気中養生を実施

※蒸気養生: 注水から約 4 時間の前養生を行い, 45°Cまで 2 時間で昇温し, 45°Cを 5 時間保持し, 自然冷却

験方法」に準拠して 1, 4, 8, 13, 26 週に中性化深さを測定した。凍結融解試験では, JIS A 1148:2010 の「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠して, 凍結融解 300 サイクルまで 30 サイクルごとに質量減少量および相対動弾性係数を測定した。

2.2 シリーズ II (後養生の効果)

コンクリートの配合および基礎物性を表-2, 養生条件を表-3, 試験体の概要を図-1に示す。蒸気養生後の後養生の影響を検討するために, 4 種類の養生条件とした。コンクリート打込み後に蒸気養生を行い, 材齢 1日で脱型した。その後, 養生条件「D」では気中養生を実施し, 養生条件「W3, W7, W14」では材齢 3, 7, 14 日まで後養生を行った後に気中養生を実施した。後養生ではプレキャスト工場に併設されている

屋外の養生水槽に試験体を静置し, 気中養生では室内に試験体を静置した。なお, 蒸気養生後の後養生がコンクリートの圧縮強度に与える影響を確認するために, 4 種類の養生条件で製作した円柱供試体(φ100×200 mm)を用いて, 材齢 14, 28 日に JIS A 1108:2006 に準拠して圧縮強度を測定した。

材齢 38 日の時点で, φ100 mm または φ150 mm のコアを採取した。コアの採取位置については, 試験体の端部を避け, 採取作業時に他のコアに損傷が生じないように配慮して選定した。塩水浸せき

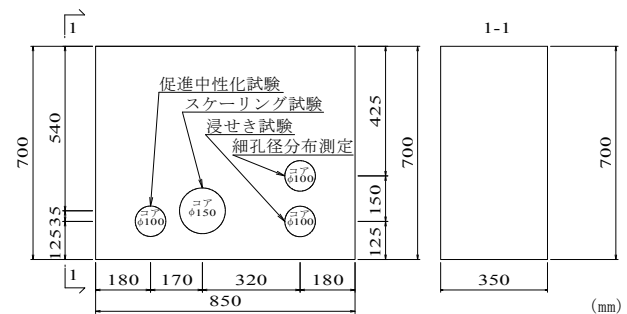


図-1 試験体の概要 (シリーズ II)

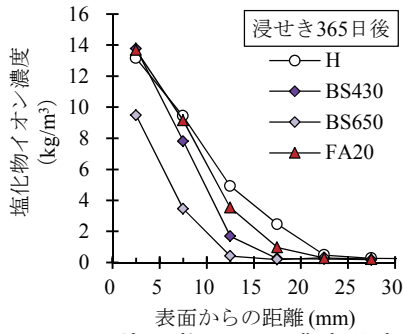


図-2 塩化物イオン濃度分布

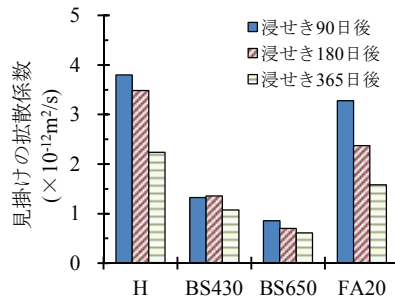


図-3 見掛けの拡散係数

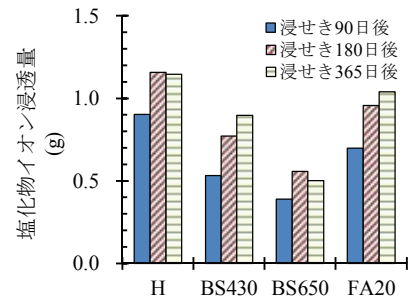


図-4 塩化物イオン浸透量

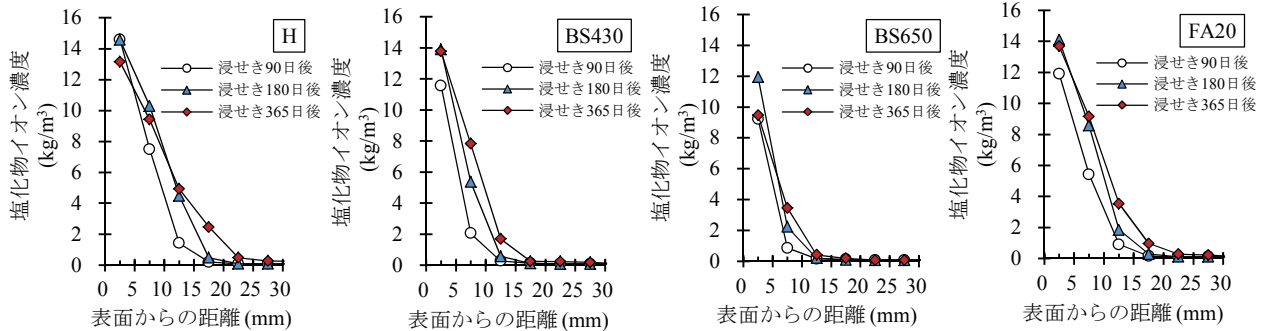


図-5 各配合の塩化物イオン濃度分布

試験, 促進中性化試験, スケーリング試験では, コアの両端部を長さ 75 mm で切断し, 型枠面側の円形面を試験対象とした。塩水浸せき試験では, 試験面以外をエポキシ樹脂塗料でシールし, 濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液に 6 週間浸せきした後, 硝酸銀溶液噴霧法によって塩化物イオン浸透深さを測定した。促進中性化試験では, 試験面以外をエポキシ樹脂塗料でシールし, 二酸化炭素濃度 5% の促進中性化槽に 8 週間静置した後, フェノールフタレイン溶液噴霧法によって中性化深さを測定した。スケーリング試験では, 試験面に深さ 3 mm となるように濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液を溜め, 冷凍庫での保管と温度管理されていない室内での保管による凍結融解を 50 サイクル繰り返した後, スケーリングによる質量減少量を測定した。一方, 細孔径分布の測定では, 「D, W3, W14」の試験体から採取したコアの片側の型枠面側を測定対象とし, 表面から厚さ 5 mm 程度を切断して試料とした。切断後の試料をアセトンに浸せきして水和を停止させ, モルタル部分を 5 mm 角程度の小片に加工して凍結乾燥機で乾燥させた後, 各試料に対して水銀圧入法によって細孔径分布を 1 回ずつ測定した。

3. 実験結果

3. 1 シリーズ I の実験結果

浸せき 365 日後の塩化物イオン濃度分布を図-2 に示す。混和材を用いた BS430, BS650, FA20 では, H と比較して, 表面からの距離が 5~20 mm の範囲での塩化物イオン濃度が小さくなった。また, 混和材を用いた配合の比較では, この範囲での塩化物イオン濃度は, フライアッシュを用いた FA20 よりも高炉スラグ微粉末を用いた BS430, BS650 で小さくなり, BS650 で最も小さくなった。

塩化物イオン濃度分布と式(1)を用いて算出した塩化物イオンの見掛けの拡散係数を図-3 に示す。

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

ここで, x : 表面からの距離(m), t : 試験期間(s), $C(x, t)$: 距離 x と試験期間 t での塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_0 : 供試体表面の塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3), D_{ap} : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (m^2/s), erf : 誤差関数である。

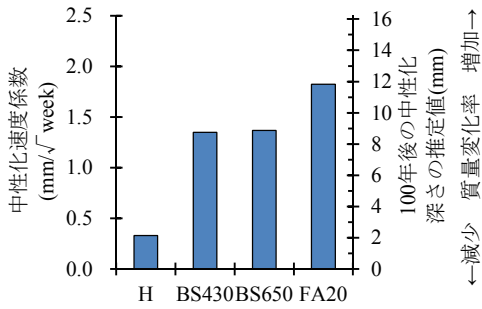


図-6 中性化速度係数と100年後の中性化深さの推定値

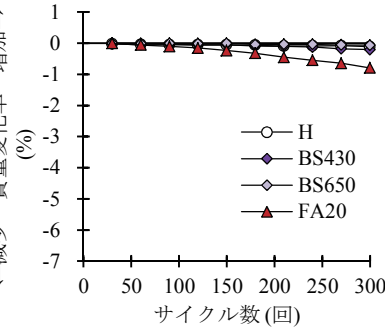


図-7 質量変化率

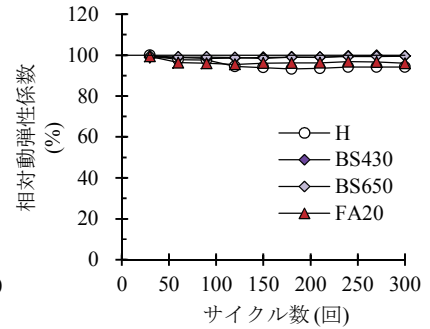


図-8 相対動弾性係数

浸せき期間が同一の場合、混和材を用いた BS430, BS650, FA20 では、H と比較して、見掛けの拡散係数が小さくなった。また、混和材を用いた配合の比較では、見掛けの拡散係数は、フライアッシュを用いた FA20 よりも高炉スラグ微粉末を用いた BS430, BS650 で小さくなり、BS650 で最も小さくなった。混和材の使用によってコンクリートの細孔構造が緻密になり早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも塩化物イオン浸透抵抗性が向上したこと、この傾向が特に高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートで明確に現れたことが原因として考えられる。

塩化物イオン濃度分布を用いて算出した表面から 30 mm までの塩化物イオン浸透量を図-4、各配合の塩化物イオン濃度分布を図-5 に示す。塩化物イオン浸透量が最も小さい BS650 では、表面から 5 mm よりも深い位置での塩化物イオン濃度の経時的な増加の程度も小さくなった。

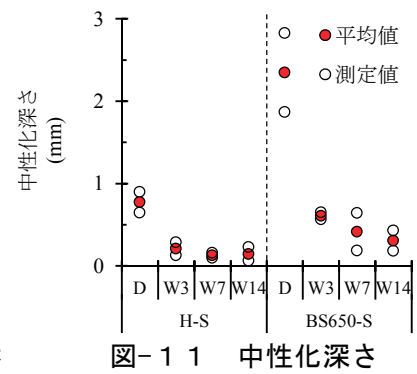
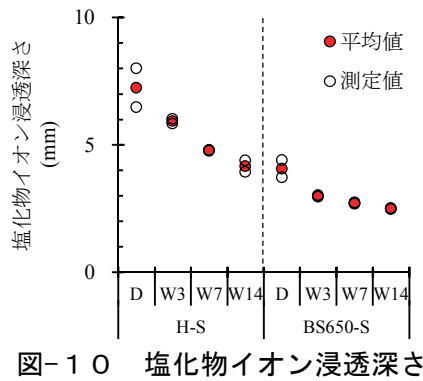
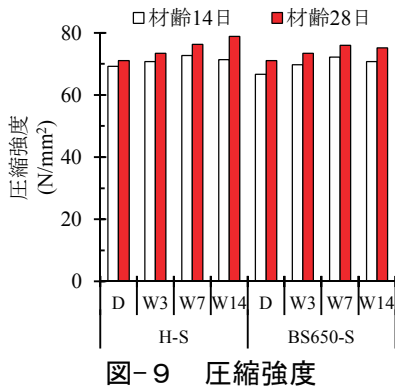
既往の研究^{例え 2)}によると、混和材を用いるなどして極めて緻密にしたコンクリートを適用した構造物では、供用中の塩化物イオン濃度分布がほとんど変化しておらず、ある時点から塩化物イオン浸透が停滞した可能性があることが指摘されている。図-3 と図-4 によると、混和材の使用の有無にかかわらず、見掛けの拡散係数は浸せき期間を長くするほど小さくなり、塩化物イオン浸透量の経時的な増加の程度も小さくなった。材齢の経過とともに結合材の反応が継続することによって、塩化物イオン浸透抵抗性が長期的に向上したためと考えられる。本研究で対象とした水結合材比の小さいコンクリートにおいても、塩化物イオン浸透抵抗性がさらに向上し、塩化物イオン浸透の停滞現象が生じる可能性があるため、引き続き検討を継続する予定である。

中性化速度係数と屋外環境における 100 年後の中性化深さの推定値を図-6 に示す。ここでは式(2)³⁾により、屋外環境と促進試験の二酸化炭素濃度の差を換算して屋外環境における 100 年後の中性化深さの推定値を算出した。

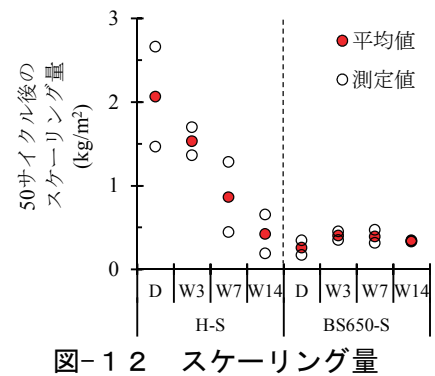
$$C = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2ACT}} \cdot \sqrt{t} \tag{2}$$

ここで、 C : 屋外環境における 100 年後の中性化深さの推定値(mm), A_{ACT} : 促進中性化試験の中性化速度係数(mm/√ week), CO_2 : 屋外環境の二酸化炭素濃度(=0.0403%⁴⁾), CO_{2ACT} : 促進中性化試験の二酸化炭素濃度(=5%), t : 材齢(week)である。

混和材を用いた BS430, BS650, FA20 では、H と比較して中性化速度係数が大きくなった。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の使用量が少なく、中性化の進行が速くなったことが原因として考えられる。また、混和材を用いた配合の比較では、混和材に高炉スラグ微粉末を用いた BS430, BS650 よりもフライアッシュを用いた FA20 で中性化速度係数が大きくなった。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のみを用いたコンクリートよりも中性化抵抗性が低下すると考えられるが、屋外環境における 100 年後の中性化深さの推定値は 12 mm 程度であった。このため、混和材を用いたコンクリートにおいても適切なかぶりを確保することによって、中性化による鉄筋腐食の発生を避けることができると考えられる。

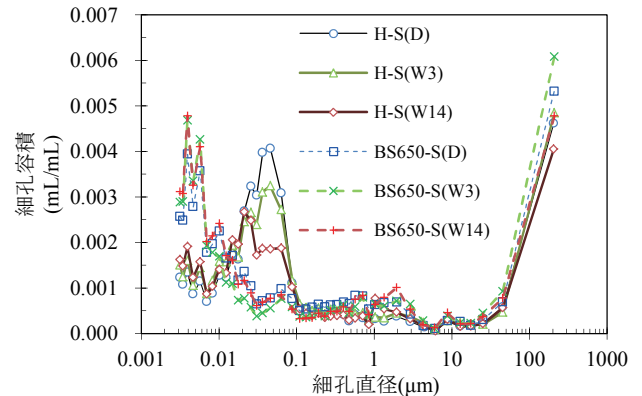


凍結融解 300 サイクルまでの質量変化率を図-7、相対動弾性係数を図-8に示す。高炉スラグ微粉末を用いたBS430、BS650では、Hと比較して、質量変化率が同程度であり、相対動弾性係数が若干大きくなった。フライアッシュを用いたFA20では、Hと比較して、質量の減少が若干大きくなったが、相対動弾性係数は同程度であった。混和材を用いたコンクリートと早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートでは、質量変化率と相対動弾性係数に若干の差があったが、その差は顕著ではなく、同程度の凍結融解抵抗性を有していたと考えられる。

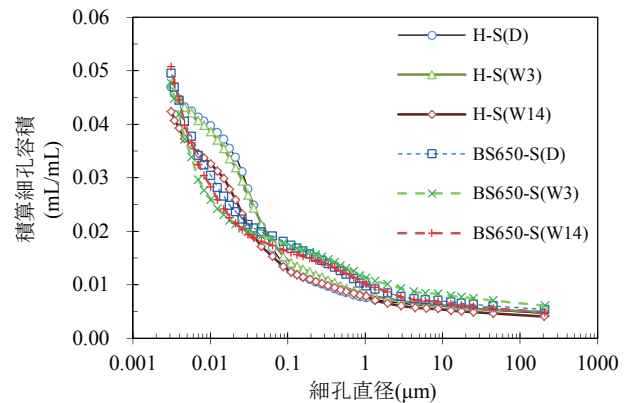


3.2 シリーズIIの実験結果

圧縮強度試験の結果を図-9に示す。H-SとBS650-Sの圧縮強度は同程度であった。また、圧縮強度は、蒸気養生後に後養生を行うことや後養生の期間を長くすることによって若干増加する傾向にあったが、蒸気養生後に気中養生を行った「D」と蒸気養生後に後養生を行った「W3、W7、W14」で大幅な差は生じていなかった。蒸気養生によって初期材齢でのコンクリートの強度発現が進行し、その後の後養生によって得られる強度の増進が小さくなったためと考えられる。



塩水浸せき試験の結果を図-10、促進中性化試験の結果を図-11、スケーリング試験の結果を図-12に示す。まず、蒸気養生後に気中養生を行った「D」に着目すると、高炉スラグ微粉末を用いたBS650-Sでは、H-Sと比較して、塩化物イオン浸透深さとスケーリング量が小さくなった。高炉スラグ微粉末の使用によって、塩化物イオン浸透抵抗性とスケーリング抵抗性が向上したと考えられる。ただし、BS650-Sでは、H-Sと比較して、中性化深さが大きくなった。



次に、蒸気養生後に後養生を行った「W3、W7、W14」に着目すると、H-Sでは、後養生の実施によって、塩化物イオン浸透深さとスケーリング量が小さくなった。一方、高炉スラグ微粉末を用いたBS650-Sでは、後養生の実施によって、塩化物イオ

ン浸透深さがさらに小さくなり、中性化深さが H-S の「D」と同程度まで小さくなった。前述した H-S と BS650-S の「D」の比較では、H-S で塩化物イオン浸透深さとスケーリング量、BS650-S で中性化深さが大きくなったが、後養生の実施によって H-S の塩化物イオン浸透抵抗性とスケーリング抵抗性、BS650-S の中性化抵抗性を改善できた。後養生の実施は、高炉スラグ微粉末の使用有無にかかわらず、耐久性の向上に効果的であると考えられる。ただし、BS650-S では、「W3, W7, W14」の塩化物イオン浸透深さ、中性化深さ、スケーリング量は同程度であり、後養生の期間を3日間よりも長くすることによって得られる耐久性の向上効果は明確ではなかった。

細孔容積分布を図-13、大径側から積算した積算細孔容積分布を図-14に示す。高炉スラグ微粉末を用いたBS650-Sでは、H-Sと比較して、細孔直径が0.01 μmよりも小さい範囲で細孔容積が多くなり、細孔直径が約0.01~0.1 μmの範囲で細孔容積が少なくなった。細孔直径の極めて小さい範囲の細孔容積が増加し、細孔直径の比較的大きい範囲の細孔容積が減少しているため、高炉スラグ微粉末の使用によって早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも細孔構造が緻密になったと考えられる。次に、養生条件の違いに着目すると、蒸気養生後に後養生を行った「W3, W14」では、蒸気養生後に気中養生を行った「D」と比較して細孔直径が0.01 μmよりも小さい範囲で細孔容積が多くなり、細孔直径が約0.1~0.01 μmの範囲で細孔容積が少なくなった。特にH-Sでは、蒸気養生後の後養生の期間を長くするほど、細孔直径が約0.1~0.01 μmの範囲の細孔容積が少なくなった。前述したように高炉スラグ微粉末の使用や蒸気養生後の後養生の実施は耐久性の向上に効果的であったが、この一因は、ここで示したように高炉スラグ微粉末の使用や蒸気養生後の後養生の実施がコンクリートの細孔構造の緻密化に寄与したためと推察される。

4. まとめ

本研究では、プレキャスト PC 部材を想定したコンクリートを対象として、混和材の使用と蒸気養生後の後養生の実施が耐久性に与える影響を検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 混和材の使用によって塩化物イオン浸透抵抗性が向上すること、塩化物イオン浸透抵抗性は混和材の使用有無にかかわらず経時的に向上することがわかった。長期的には塩化物イオン浸透がある時点で停滞する可能性があるため、引き続き検討を継続する予定である。
- (2) 混和材の使用によって、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比較して、中性化抵抗性が低下すること、凍結融解抵抗性が同程度となることがわかった。ただし、屋外環境における100年後の中性化深さの推定値は最大で12 mm程度であり、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鉄筋腐食の発生を防止できると考えられた。
- (3) プレキャスト工場で製造する部材と同一の蒸気養生設定で製作した試験体の耐久性試験を行った結果、高炉スラグ微粉末の使用によって塩化物イオン浸透抵抗性やスケーリング抵抗性が向上することがわかった。また、蒸気養生後の後養生の実施は、高炉スラグ微粉末の使用有無にかかわらず、耐久性の向上に効果的であることがわかった。

参考文献

- 1) 本荘清司, 田中寛規, 桐川潔, 宮川豊章: プレキャスト PC 床版の耐久性向上のための一考察, 第22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.207-210, 2013
- 2) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治: 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
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 2016
- 4) 気象庁ホームページ: 二酸化炭素の経年変化, http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html