

無孔性コンクリート(PFC)の塩分浸透抵抗性に及ぼす各種要因の影響

Effects of various factors on chloride ion transportation in porosity-free concrete

北海道大学大学院工学院 ○学生員 白井礼陽 (Noriaki Shirai)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 横田弘 (Hiroshi Yokota)
 太平洋セメント (株) 正会員 安田瑛紀 (Eiki Yasuda)
 太平洋セメント (株) 正会員 河野克哉 (Katsuya Kono)

1. はじめに

塩害や摩耗等の複合劣化作用を受ける過酷環境下では、耐久性に優れるコンクリート構造物が必要となる。超高強度コンクリートは、力学的性能のみならず、塩化物イオンや水分等の劣化因子に対する浸透抵抗性にも優れるため、構造物の高耐久化・高寿命化に大きく寄与すると考えられる。

最近、通常の流し込み成型が可能な超高強度コンクリートとしては 450 N/mm² 以上の圧縮強度を発現する無孔性コンクリート (以下、PFC) が開発された¹⁾。PFC では、紛粒体の充填理論より最密充填を満たす結合材の配合を導出している。その配合設計に基づき製造されたコンクリートの脱型直後に吸水処理を行うことで反応水を供給する。さらに、蒸気養生と加熱養生を行うことにより、水和反応を促進し、硬化体内の空隙を減じることで最高強度を実現している。

PFC では緻密なマトリクスにより超高強度を達成するが、塩化物イオン浸透抵抗性については十分に解明されていない。そこで本論文では、電気泳動試験によって PFC の塩化物イオン浸透性状を評価し、脱気吸水処理の有無、養生方法や水結合材比の違い、炭酸化が塩化物の浸透性状に及ぼす影響の評価を行い、考察する。また、PFC と超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) の塩化物イオン浸透性状を比較した結果を考察する。

2. 試験方法

2.1 使用材料と配合

使用材料として、PFC の結合材(B)には低熱ポルトランドセメント(LC) (密度 3.22 g/cm³)、石英微粉末(Q) (密度 2.69 g/cm³) およびシリカフューム(SF) (密度 2.24 g/cm³) を用いた。また、細骨材には珪砂(S) (表乾密度 2.63 g/cm³)、混和剤には高性能減水剤(SP₁) および消泡剤(DF)、あるいは UFC 用減水剤(SP₂)を用いた。UFC は通常、靱性の確保を目的に鋼繊維等の短繊維を配合する。しかし、電気泳動試験では鋼繊維を使用したコンクリートで試験することができないため、鋼繊維は配合せずに供試体を作製した。

供試体は、表-1 に示す配合により製造した。PFC は、B を構成する各紛体の粒子間空隙をできるだけ減じることで少ない水量(W)で流動できる濃密な紛体混合物が得られるものと考えて、最密粒度となるように結合材を配合している。すなわち、非連続粒度系の 2~4 成分の紛体に対して最密充填状態を与える成分数、粒子径、配合

表-1 配合

水準 No.	単位量 (kg/m ³)						
	W	B			S	SP ₁	DF
		LC	Q	SF			
1~4 (PFC W/B15%)	199	863	360	100	934	B×1.6%	B×0.02%
5~6 (PFC W/B33%)	319	630	263	73	934	B×1.6%	B×0.02%
7~8 (UFC)	180	Premix 1278			934	SP ₂ B×1.7%	-

表-2 試験水準

水準 No.	名称	養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)
1	PFC-15-ASH	脱気吸水→蒸気養生 →加熱養生	-
2	PFC-15-ASHC	脱気吸水→蒸気養生 →加熱養生→炭酸化	-
3	PFC-15-SH	蒸気養生→加熱養生	346
4	PFC-15-S	蒸気養生	243
5	PFC-33-S	蒸気養生	96.2
6	PFC-15-SC	蒸気養生→炭酸化	-
7	UFC-S	蒸気養生	255
8	UFC-SC	蒸気養生→炭酸化	-

比に関する簡易な計算法である Furnace の最密充填理論²⁾に基づいて、各紛体の混合割合を体積比で LC:Q:SF=6:3:1 とした 3 成分系の B としている。PFC の水結合材比は 15%を標準とし、比較用の水準として 33%を設定した。

2.2 供試体の処理

PFC、UFC は練混ぜ後に 40×40×160 mm の型枠に打込み、材齢 48 時間まで室温 20℃にて封緘養生を行った。その後脱型し、表-2 に示す養生を行った。

(1) 脱気吸水処理

脱気吸水処理においては、アクリル製密閉容器内で供試体を完全に水中に浸漬させた状態で真空ポンプを接続させ、その後、容器内を減圧させることで、供試体表面から内部へ水分を供給した。この際、脱気時間は 30 分とした。

(2) 蒸気養生および加熱養生

全ての供試体に蒸気養生 (最高温度 90℃、最高温度保持時間 48 h) を施し、水和反応を促進させた。その後

さらなる水和促進と余剰水の乾燥を目的として、PFC-15-ASH、PFC-15-ASHC、PFC-15-SH に加熱養生（最高温度 180℃、最高温度保持時間 48 h）を実施した。

(3) 炭酸化処理

促進炭酸化処理は JIS A 1153 に基づいて行った。促進期間は 1 か月とした。

2.3 電気泳動試験

電気泳動試験は、土木学会規準 JSCE-G571-2013「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法」を参考にして行った³⁾。試験体は 40×40×160 mm の角柱を厚さ 5 mm にカットしたものを使用した。電気泳動試験の概要を図-1 に示す。

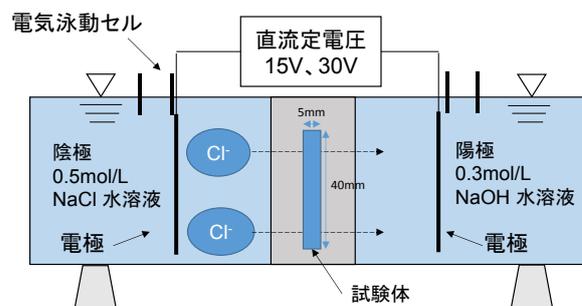


図-1 電気泳動試験概要

3. 試験結果および考察

得られた実効拡散係数を図-2 に示す。蒸気養生と加熱養生を行った PFC-15-ASH と PFC-15-SH より、脱気吸水処理の有無に関わらず、実効拡散係数は 0.01 cm²/year 程度と極めて小さい値となった。一方、加熱養生を行った PFC-15-SH は蒸気養生のみを行った PFC-15-S と比べ、実効拡散係数がわずかに小さくなった。この結果より、PFC は蒸気養生後に加熱養生を行うことによってより物質浸透抵抗性が向上することが示された。

促進炭酸化処理を行った PFC-15-ASHC、PFC-15-SC、UFC-SC はそれぞれ PFC-15-ASH、PFC-33-S、UFC-SC と比べ、実効拡散係数が小さくなった。これは促進炭酸化処理により炭酸カルシウムが生成する際、約 11.7% の体積増加がある⁴⁾ことから、細孔構造が緻密化されたためであると考えられる。

また、PFC-15-S は PFC-33-S、UFC-SC と比べ、実効拡散係数は小さくなった。この理由として、PFC-15-S は PFC-33-S に比して、W/B が小さいことに起因していると考えられる。一方、PFC-15-S と UFC-S においては、両者はほぼ同じ W/B ではあるが、PFC の使用材料と配合により細孔構造が緻密化していることが一因になっていると考えられる。

通常のコンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数は 1.50 cm²/year 程度⁵⁾であるため、無孔性コンクリートは塩分浸透抵抗性がきわめて高いといえる。さらに、同程度の W/B の UFC との比較においてもより高い塩分浸透抵抗性を有している。

圧縮強度について、加熱養生を行った PFC-15-SH は PFC-15-S と比べ、100 N/mm² ほど大きい結果となった。この結果より PFC は加熱養生を行うことで乾燥が進み、圧縮強度が増加すると考えられる。一方、PFC-33-S では、PFC-15-S の 40% ほどの圧縮強度となり、W/B が圧縮強度に及ぼす影響が大きいことが確認された。一方で、同程度の W/B である PFC-15-S と UFC-S では、圧縮強度がほぼ同じであるのに対し、塩化物イオンの実効拡散係数は PFC-15-S の方が小さい結果となっている。このことから、UFC に比べて PFC の方が緻密であると考えられる。今後、MIP による細孔径分布の測定や走査電子顕微鏡による観察などを行うことで PFC と UFC の細孔構造の違いを明らかにし、これらが圧縮強度や物質浸透抵抗性に及ぼす影響の考察を行うことが望まれる。

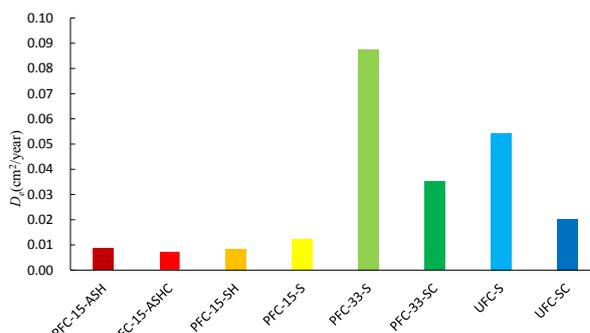


図-2 実効拡散係数

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) PFC の実効拡散係数は、脱気吸水処理の有無によらず通常のコンクリートや UFC と比較して十分小さな値を示す。
- (2) PFC は、W/B 15% においては養生条件が塩分浸透抵抗性に及ぼす影響は極めて小さい。
- (3) PFC は、W/B 33% においては炭酸化の進行による塩分浸透抵抗性の増加は大きい、W/B 15% においては炭酸化の影響は小さい。
- (4) PFC の実効拡散係数は、W/B が小さくなるにつれて、著しく減少する。

参考文献

- 1) 河野克哉, 中山莉沙, 多田克彦, 田中敏嗣: 450 N/mm² 以上の圧縮強度を発現するセメント系材料の製造方法と硬化組織の変化, コンクリート工学年次論文集, 38(1), 2016.
- 2) 三輪茂雄: 紛粒体工学, 朝倉書店, 140-145, 1972.
- 3) 土木学会規準: 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(JSCE-G 571-2013), 2013.
- 4) Prof. Dr. - Ing. habil. Jochen Stark, Dipl. -Ing. Bernd Wicht: Dauerhaftigkeit von Beton[2.Auflage], 技報堂出版, 2018.
- 5) 北島裕之, 前田聡, 武若耕司, 山口明伸: 通電によるコンクリート中の塩化物イオンの泳動に及ぼす諸要因, コンクリート工学年次論文集, 25(1), 2003.