

無孔性コンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性

Chloride ion transportation in porosity-free concrete

北海道大学大学院工学院 ○学生員 岩谷和磨 (Kazuma Iwatani)
 北海道大学大学院工学研究院 フェロー 横田弘 (Hiroshi Yokota)
 (株) 太平洋セメント 正員 河野克哉 (Katsuya Kono)
 (株) 太平洋セメント 正員 安田瑛紀 (Eiki Yasuda)
 北海道大学大学院工学院 学生員 日下部護 (Mamoru Kusakabe)

1. はじめに

沿岸構造物のよう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。

現在、 450 N/mm^2 以上の圧縮強度を発現する超高強度コンクリートである無孔性コンクリート（以下、PFC）が開発されつつある¹⁾。これは、通常の流し込み成型が可能なコンクリートとしては世界最高強度となる材料である。PFCでは、最密充填を満たす結合材の配合を紛粒体の充填理論より導出して実現し、脱型直後に脱気吸水処理を行うことで未水和セメントと空隙の量を減少させる。さらに、蒸気養生と熱養生を行うことにより、外部から補給された水が内部のセメントの水和反応を促進させる。PFCは北海道に位置する鉄筋コンクリート海岸護岸の補修工事において試験的に使用されている。

PFCでは、上述の脱気吸水処理を行うことで空隙の量を減少させるが、このことが塩化物イオン浸透抵抗性に与える影響については十分に解明されていない。そこで本論文では、脱気吸水処理を行った場合とこの処理を省略した場合のPFCに対して、直流動電流を用いた電気泳動方法によって塩化物イオンの浸透性状を評価し、通常のコンクリートの浸透性状と比較した結果を考察する。

2. 実験方法

2.1 使用材料と配合

PFCは、表—1に示す材料により製造した。ここで、結合材(B)には低熱ポルトランドセメント(C)、石英微粉末(Q)およびシリカフューム(SF)を用いた。また、細骨材には珪砂(S)、混和剤には高性能減水剤(SP1)および消泡剤(DF)を用いた。

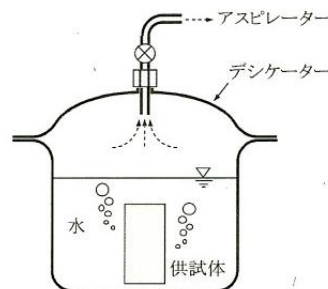
配合は表—1に示したとおりである。既述のとおり、PFCは、Bを構成する各紛体の粒子間空隙をできるだけ減じることで少ない水量(W)で流動できる濃密な紛体混合物が得られるものと考えて、最密粒度となる結合材を使用している。すなわち、非連続粒度系の2~4成分の紛体に対して最密充填状態を与える成分数、粒子径、配合比に関する簡易な計算法であるFurnaceの最密充填理論^{2), 3)}に基づいて、各紛体の混合割合をC:Q:SF=6:3:1

表—1 配合

単位量(kg/m ³)						
W	B			S	SP1	DF
	LC	Q	SF			
199	863	360	100	934	B×1.6%	B×2.0%

表—2 供試体試験水準

水準No.	マトリクス	養生条件
1	PFC	吸水→蒸気→乾燥
2	W/B15%	蒸気→乾燥



図—1 脱気吸水処理

とした3成分系のBとしている。

2.2 脱気吸水処理ならびに熱養生

PFCは練混ぜ後に $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ の型枠に打込み、材齢48時間まで室温 20°C にて封緘養生を行った。その後脱型して直ちに、以下に示す脱気吸水処理と熱養生をNo.1に、No.2には脱気吸水処理を行わずに蒸気養生と熱養生のみを行った（表—2）。

(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し、上層空気を排出させて減圧することで、供試体表面から内部へ水分を供給した。脱気吸水処理の様子を図—1に示す。この際、脱気時間は30分とした。

(2) 蒸気養生および熱養生

脱気吸水処理を行った供試体に蒸気養生（最高温度 90°C 、最高温度保持時間48h）を施し、水和反応を促進させた。その後さらなる強度発現と供試体の乾燥を目的として、熱養生（最高温度 180°C 、最高温度保持時間48h）を実施した。

2.3 電気泳動試験

供試体を厚さ 5mm にカットした試験片を電気泳動試験に供した。試験片を電気泳動セルの中央に挟み、陽極セルと陰極セルにはそれぞれ 0.3 mol/L の水酸化ナトリウム水溶液と 0.5 mol/L の塩化ナトリウム水溶液を充填した。

電気泳動試験では、陰極セルから陽極セルへの塩化物イオンの移動流束が一定に達したとき、電気泳動は定常状態にあるとみなし、塩化物イオンの移動流束を求めた。なお、移動流束の増減値が 0.02 mol/cm²/年となった時に、定常状態に達したとした。

定常状態における塩化物イオンの移動流束は、コンクリートの細孔構造や細孔溶液中でのイオンの移動のし易さを反映している。したがって、この移動流束に対して電気化学的法則である Nernst-Planck の式 (1) を適用して塩化物イオンの実効拡散係数を計算した。

$$D_e = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_C)} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 D_e ：塩化物イオンの実行拡散係数 (cm²/年)、 $J_{Cl(t)}$ ：塩化物イオンの移動流束 (mol/cm²/年)、 R ：気体定数 (=8.31 J/mol/K)、 T ：絶対温度 (K)、 L ：試験片の厚さ (mm)、 Z_{Cl} ：塩化物イオンの電荷 (= -1)、 F ：ファラデー定数 (=96 500 C/mol)、 C_{Cl} ：陰極セルでの塩化物イオン濃度 (mol/L)、 $\Delta E - \Delta E_C$ ：供試体表面間の電位 (V) である。

3. 実験結果および考察

図—2 および図—3 に、電気泳動試験における No.1 および No.2 の陽極セル中の塩化物イオン濃度の経時変化をそれぞれ示す。脱気吸水処理を行った No.1 では、試験開始 3 日目より移動流束が定常状態となった。また、脱気吸水処理を行わなかった No.2 では、試験開始 2 日目より移動流束が定常状態となった。

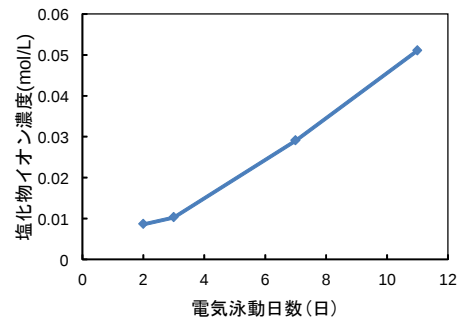
実行拡散係数の計算結果を図—4 に示す。No.1 では、脱気吸水処理により供試体の内部に水分が供給されるため、内部の未水和セメントと反応して緻密化が進むと考えられる。そのため、脱気吸水処理を経た No.1 は No.2 に比べ、実行拡散係数は小さくなると予想していた。しかし、脱気吸水処理の有無による実行拡散係数はほぼ等しく、塩分浸透抵抗性に及ぼす脱気吸水処理の影響が極めて少ない結果を示した。

通常のコンクリートの塩化物イオンの実行拡散係数は 1.50cm²/年程度⁴⁾であるため、無孔性コンクリートは塩分浸透抵抗性が高い。

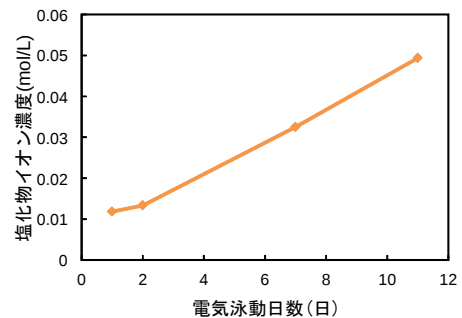
4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

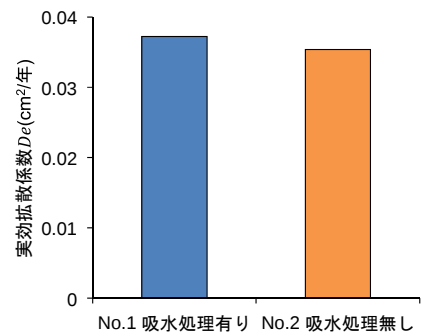
- (1) PFC の実効拡散係数は、脱気吸水処理の有無によらず通常のコンクリートと比較して十分小さな値を示す。⁴⁾
- (2) 今回採用した未水和セメントと空隙を減少させる脱気吸水処理は、PFC の塩分浸透抵抗性に及ぼす影響が小さい。



図—2 No.1 における陽極セル中の塩化物イオン濃度



図—3 No.2 における陽極セル中の塩化物イオン濃度



図—4 実効拡散係数の比較

今後は凍結融解作用や中性化作用を受けた PFC に対して同様の試験を行い、劣化環境にあける塩分浸透抵抗性を評価する予定である。

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) C. C. Furnas: Grading aggregate I – Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density, Industrial and Engineering Chemistry, 23(9), 1052-1058, 1931.
- 3) 三輪茂雄：粉粒体工学、朝倉書店、140-145、1972。
- 4) 北畠裕之、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