

구조물의 표면마감 특성이 해양콘크리트의 내구성에 미치는 영향

Effects of Surface Material of Forms on Durability of Offshore Concrete

박 상 준*

Park, Sang-Joon

Abstract

This paper presents an experimental study on the air contents and the chloride penetration in offshore concrete depending on the types of forms. Three types of concretes(plain, MSF, and FA concretes) with four kinds of forms(wood, coating wood, steel, and polypropylene film) were investigated. The test results show that the air contents in the concrete cured with steel and polypropylene forms were higher than those with wood and coating wood forms. The concrete with wood forms has the least air content. The variation of chloride ingress time was large depending on the types of forms on the same concrete, i.e. 13.2, 20.3, and 17.7% for Plain, MSF, and FA concretes, respectively. Consequently, the surface conditions of forms should be considered for design of durable concrete.

요 지

본 연구에서는 구조물의 표면마감 특성이 해양콘크리트의 공극 및 염화물 확산특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 콘크리트의 종류는 Plain과 함께 실리카폼을 사용한 경우와 플라이애시를 사용한 콘크리트를 대상으로 하였고, 표면거푸집 종류로는 목재합판, 코팅합판, 철 및 폴리프로필렌 필름으로 하는 총 4 case를 대상으로 하였다. 검토결과, 공극은 콘크리트 시험체의 중앙부 절단면이 철이나 폴리프로필렌 필름을 사용한 경우에 비해 상대적으로 많은 공극량을 포함하는 것으로 나타난 반면, 목재 합판을 사용한 경우가 가장 적은 공극량을 포함하는 것으로 나타났다. 염화물 침투시기는 동일한 콘크리트라 할지라도 거푸집 종류에 따라 Plain 콘크리트의 경우는 최대 13.2%, MSF 콘크리트는 20.3%, FA 콘크리트는 17.7% 수준까지 상이하게 되는 것으로 평가되었다. 따라서 콘크리트의 내구성을 평가하는데 있어 콘크리트의 표면마감 특성에 대해서도 면밀히 검토되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Offshore concrete, Chloride ingress time, Surface material of forms, Interfacial transition zone

핵심 용어 : 해양콘크리트, 염화물 침투시기, 표면마감재료, 전이영역

* 정희원, (주)대우건설기술연구원, 건축연구팀 선임연구원

E-mail : concrete@dwconst.co.kr 031-250-1122

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2009년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트는 대상 구조물의 특성에 따라 배합조건, 시공 및 평가방법 등을 상이하게 적용해야 하는데, 특히 해양콘크리트의 경우는 염화물 이온에 대한 저항성을 반드시 고려할 필요가 있다. 즉, 해양콘크리트에 있어 매우 중요한 품질관리 항목 중 한 가지가 염화물 침투 저항성을 평가하는 것인데, 이는 주로 KS F 2711(전기 전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험 방법) 또는 NT Build 492(The Rapid Chloride Migration Test)⁽⁷⁾에서 제시하고 있는 전기촉진법을 이용하게 된다. 이 방법은 콘크리트의 염화물 침투 저항성을 단시간에 정량적으로 평가함으로써 콘크리트 구조물의 내구수명을 예측할 수 있다. 그러나 상기 시험방법의 경우는 콘크리트 공시체의 중앙부 절단면으로부터 최초 염화물이 침투되는 것으로 가정하여 평가하고 있는데, 이는 실제 시공된 구조물의 경우 최초로 염화물이 침투되는 경로가 거푸집에 접한 면이라는 것을 감안하여 볼 때 표준적인 시험방법의 결과 값과 실제 구조물의 염화물 침투거동이 다소 상이하게 될 수도 있어, 실제 콘크리트 구조물의 표면마감특성을 고려한 염화물 침투특성에 대해 검토가 필요하다. 즉, Barnes⁽⁸⁾는 Fig. 1에서와 같이 시멘트 수화반응시 골재, 철근 및 거푸집 등과 같은 경계면에서 형성되는 약 40 μ m 두께의 불안정한 천이영역(interfacial transition zone)이 존재한다고 보고하고 있는데, 이는 콘크리트 구조물의 표면마감특성에

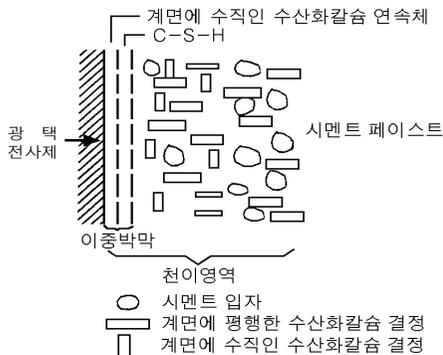


Fig. 1 Barnes 모델⁽⁸⁾

따라 그 결과가 크게 상이하게 될 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

따라서 본 연구에서는 plain콘크리트와 함께 플라이애시와 실리카폼을 일정비율로 혼합한 콘크리트를 대상으로 하고, 여기에 거푸집의 종류를 4개 수준으로 변화시켜 거푸집 계면에서의 염화물 침투 저항성과 공극특성에 대하여 검토하였으며, 그 결과를 바탕으로 콘크리트 구조물의 표면마감특성에 따른 염화물 확산계수와 염화물 침투시기에 대하여 비교 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고 콘크리트의 배합은 Table 2와 같다. 즉, 실험요인으로는 물-결합재비 0.45인 1개 수준에 대하여 무기질 혼화제를 혼합하지 않은 경우와 실리카폼과 플라이애시를 각각 5%와 10%를 혼합하는 총 3가지를 대상으로 하였으며, 콘크리트의 표면 마감특성에 따른 염화물 침투저항성 검토는 콘크리트 시험체의 중앙부 절단면을 대상으로 하는 표준적인 경우와 목재합판, 코팅합판, 철

Table 1 실험계획

구분	W/B	혼화제 종류	표면마감재의 종류
실험요인	0.45	Plain	· 목재합판 · 코팅합판 · 철 · 폴리프로필렌 필름
		Micro silica fume(MSF) 5%	
		Fly ash(FA) 10%	
평가항목	(18.0±2.5cm)	· 슬럼프 · 공기량 (4.5±1.5%)	· 압축강도(7, 28, 56, 91일) · 염화물 확산시험 부위의 공극량(28 days) · 염화물 확산(28 days)

Table 2 콘크리트의 배합

구분	W/B	sp/B (%)	단위용적질량(kg/m ³)						시험결과	
			W	C	FA	SF	S	G	슬럼프 (cm)	공기량 (%)
Plain		0.50	351	0	0	823	961	18.5	5.3	
MSF5%	0.45	0.95	158	334	0	18	820	958	17.5	4.0
FA10%		1.00		316	35	0	817	954	19.0	4.5

및 폴리프로필렌 필름을 사용하는 경우를 대상으로 하였다. 평가항목으로는 굳지 않은 상태에서의 유동성(슬럼프 18±2.5cm)과 공기량(4.5±1.5%)를 경화상태에서는 압축강도 및 표면마감 부위를 대상으로 한 염화물 확산시험(28일 재령)을 수행하였다. 또한 동일한 표면마감 부위를 대상으로 공극특성도 함께 검토하였다.

2.2 사용재료

사용재료로서 시멘트 국내산 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 중국산 강모래를, 그리고 굵은 골재는 25mm 쇄석을 사용하였다. 혼화재료로서 고성능 감수제는 국내산 폴리카르본산계를 사용하였으며, 본 연구에서 사용한 재료의 물리·화학적 특성은 Table 3~6과 같다.

2.3 실험방법

실험사항으로 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량은 각각 KS F 2402와 2421, 그리고 경화상태의

Table 3 시멘트의 물리적 특성

밀도	분말도 (cm ² /g)	안정성 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
			초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,222	0.05	235	370	19.5	29.3	39.7

Table 4 무기질 혼화재의 물리 화학적 특성

기호	밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	화학조성(%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
MSF	2.30	260,000	95.0	0.26	0.13	0.19	0.45	0.23
FA	2.15	3,593	56.4	23.7	9.0	2.5	1.3	1.1

Table 5 골재의 물리적 특성

구분	밀도 (g/cm ³)	조립율	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m ³)	0.08mm 체 통과량(%)
잔골재	2.57	2.7	1.83	1,470	1.8
굵은골재	2.63	6.9	0.62	1,577	0.3

Table 6 화학혼화제의 물리적 특성

구분	주요성분	형태	색상	밀도(20℃)
고성능 감수제	폴리카르본산계	액상	연황색	1.20±0.02

압축강도는 KS F 2405에 따라 실시하였다. 한편, 콘크리트의 거푸집 접촉면을 대상으로 실시한 염화물 확산시험은 NT Build 492의 시험방법에 따라 실시하였으며, 시험체는 Fig. 2와 같이 표준적인 시험방법과 함께 시험체의 중앙부에 목재합판(t=12mm), 코팅합판(t=12mm), 철(t=2.5mm) 그리고 폴리프로필렌 필름(t=0.25mm)을 각각 매립하여 제작하였다. 콘크리트의 공극특성은 염화물 확산시험에 사용되는 동일한 형태(Ø100×50mm)의 공시체를 대상으로, 거푸집이 접촉되는 부위에서 1~3mm크기의 다수의 시료를 채취하여 수은압입법으로 평가하였다.(Photo 1참조)

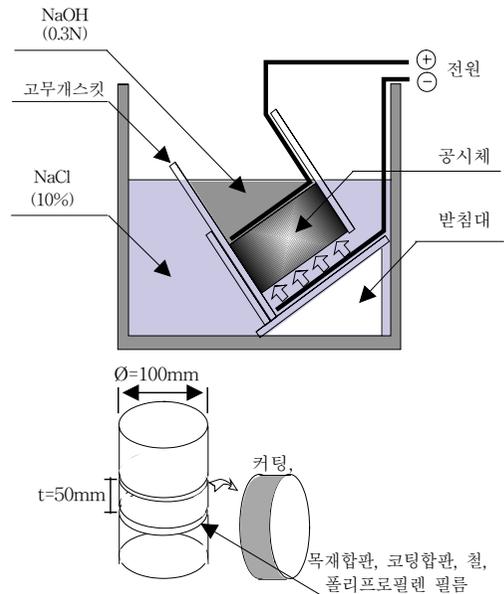


Fig. 2 염화물 확산 시험방법(NT Build 492)⁷⁾



Photo 1 포로시미터

실험결과에 의한 염화물 침투시기의 산정은 먼저, 식(1)을 이용하여 염화물 확산계수를 도출하고, 이후 Duracrete Final Technical Report(document BE95-1347/R17, May 2000)⁽⁹⁾에서 제시하고 있는 식(2)에 따라 콘크리트 구조물의 표면마감상태에 따른 염화물의 침투시기(내구수명)를 평가하였다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U-2)t} \quad (1)$$

$$\cdot \left\{ X_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U-2}} \right\}$$

여기서, D_{nssm} 는 비정상상태에서의 염화물 확산계수($\times 10^{-12}$ m²/s)를, U 는 적용한 전압의 절대 값(voltage), T 는 처음부터 시험종료시까지 양극 용액의 평균온도(°C), L 은 시험체의 두께(mm), X_d 는 염소이온의 침투깊이(mm), t 는 시험지속시간(hour)이다.

$$t_i^d = \left[\frac{2}{x^c - \Delta x} \cdot erf^{-1} \left(1 - \frac{c_{cr}^c}{\gamma_{c_{cr}}} \cdot \frac{1}{A_{c_{cr,d}} \cdot \frac{W}{B} \cdot \gamma_{c_{cr,d}}} \right) \right]^{-2} \frac{1}{1 - n_{cl}^c} \cdot \frac{R_{o,cl}^c}{k_{c,cl}^c \cdot k_{c,cl}^c \cdot t_o^{n_{cl}^c} \cdot \gamma_{Rd}}$$

(2)

여기서, t_i^d 는 염화물 침투시기(year)를, x^c 는 콘크리트 구조물의 피복두께(mm), Δx 는 콘크리트 피복 두께의 할증(mm), c_{cr}^c 는 임계염화물농도(%), 전체 결합재량에 대한 중량비), $\gamma_{c_{cr}}$ 은 임계염화물농도의 안전계수, $A_{c_{cr,d}}$ 은 물-결합재와 표면염화물량간의 상수(%), W/B 는 물-결합재비, $\gamma_{c_{cr,d}}$ 은 표면염화물량의 안전계수, $k_{c,cl}^c$ 은 환경계수, $k_{c,cl}^c$ 은 양생계수, t_o 는 염화물 확산시험을 수행한 재령(28일/365일=0.0767), n_{cl}^c 은 재령계수, γ_{Rd} 은 염화물 확산계수의 안전지수, $R_{o,cl}^c$ 은 염화물이 1mm²침투하는데 소요되는 시간(year/mm², 염화물 확산계수를 바탕으로 산정)이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축강도

Fig. 3은 압축강도 특성을 나타낸 것이다. 즉, 재령 7일까지는 무기질 혼화재의 종류에 따른 영향이 적은 것으로 나타났으나, 재령 28일의 경우 실리카폼을 혼합한 경우가 plain이나 플라이애시를 혼합한 경우에 비해 각각 21.6%와 17.2% 정도 높은 강도특성이 있는 것으로 나타났다. 이는 실리카폼의 공극충전 효과와 함께 포졸란 반응에 기인한 결과로 분석된다.⁽¹⁾⁽⁴⁾ 또한 플라이애시를 혼합한 경우는 재령 28일까지 plain과 유사한 강도발현특성을 보이고 있으나, 재령 91일이 경과한 시점에서는 플라이애시의 포졸란 반응에 기인하여 plain에 비해 다소 높은 압축강도특성을 발휘하는 것으로 나타났다.

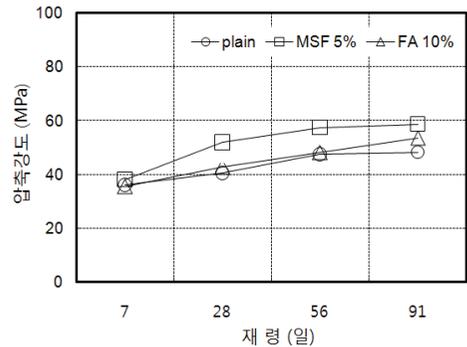
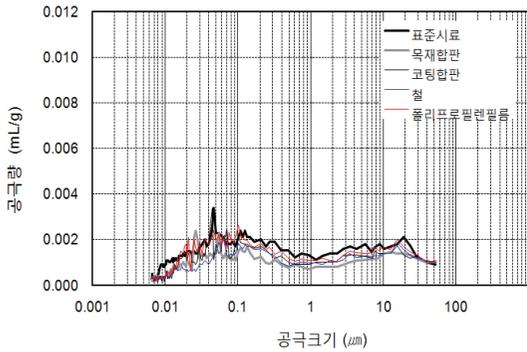


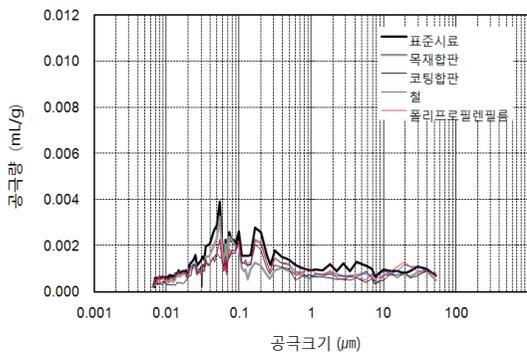
Fig. 3 압축강도 시험결과

3.2 공극특성

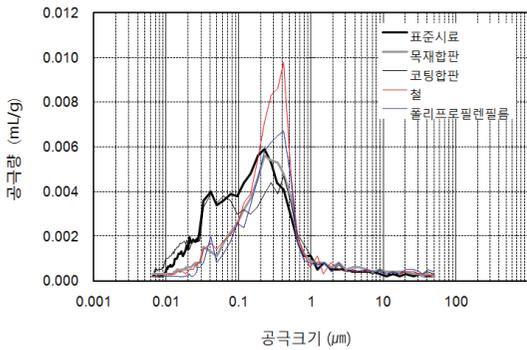
Fig. 4는 표면거푸집 종류에 따른 콘크리트의 공극 특성을 콘크리트 종류별로 구분하여 나타낸 것이다. 즉, 콘크리트 종류에 따른 전체 공극량은 MSF 콘크리트가 가장 많고, 그 다음이 FA 콘크리트 그리고 plain 콘크리트 순인 것으로 나타난 반면, 지름이 1 μ m 이상의 크기를 갖는 공극의 경우는 plain 콘크리트가 가장 많고, 그 다음이 FA와 MSF 콘크리트 순인 것으로 나타났는데, 이는 혼화재료로서 플라이애시와 실리카폼을 사용한 경우 분말도가 각각 3.593cm²/g과 260,000cm²/g인 미세한 입자가 충전되는 효과에 기인하여 10 μ m이상의 크기를 갖는 공극은 감소하고, 10 μ m이하의 크기를 갖는 공극은 증가하게 되어 나타난 결과로 분석된다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁹⁾



(a) Plain concrete



(b) FA 10% concrete



(c) MSF 5% concrete

Fig. 4 표면거푸집의 종류 변화에 따른 공극특성

표면거푸집의 종류에 따른 공극구조의 경우 현저한 경향은 없는 것으로 나타났다. 그러나 전반적으로 표준적인 시험방법에 의한 경우가 상대적으로 많은 공극량을 포함하는 것으로 나타난 반면, 목재 거푸집을 사용한 경우가 가장 적은 공극량을 포함하는 것으로 평

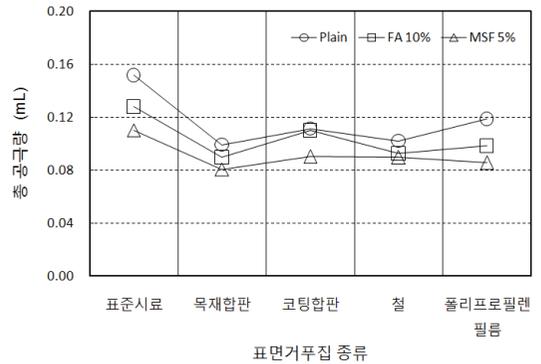


Fig. 5 표면거푸집 종류에 따른 전체 공극량

가되었는데, 이는 목재 거푸집의 흡수특성에 기인하여 거푸집 접촉면에 위치한 콘크리트의 W/B가 낮아지게 되는 효과에 기인한 결과로 분석된다.

한편, 표면거푸집 종류 변화에 따른 공극특성으로 MSF 콘크리트의 경우가 plain 콘크리트나 FA콘크리트에 비해 0.1~1 μ m범위의 공극량이 크게 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 콘크리트의 고강도화에 유효한 실리카폼의 경우 평균입경이 대략 0.1 μ m이기 때문에 시멘트 수화물 사이의 공극에 충전되는 효과와 함께 시멘트의 수화반응을 촉진시켜 시멘트 수화반응물 중 0.1~1 μ m크기를 갖는 수산화칼슘의 양을 증가시키게 되고, 이로 인하여 1 μ m이상의 공극이 1 μ m 이하의 크기로 되는 특징에 기인한 것으로 분석된다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽¹¹⁾

Fig. 5는 표면거푸집 종류에 따른 콘크리트 접촉부위의 공극량을 콘크리트 종류별로 구분하여 나타낸 것이다. 즉, 표준시료의 공극량이 가장 많은 것으로 평가되었고, 표준시료를 제외한 나머지 경우에 있어서는 거의 유사한 수준의 공극량을 포함하고 있는 것으로 평가되었는데, 이러한 결과는 콘크리트 구조물의 염화물 침투저항성을 평가함에 있어 표준적인 시험방법을 적용하는 경우에 비해 실제 구조물에 적용되는 현장 콘크리트가 상대적으로 적은 공극량을 포함하고 있기 때문에 염화물 침투저항성 측면에서 다소 유리할 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

3.3 염화물 확산특성

Fig. 6은 콘크리트 및 표면거푸집의 종류 변화에

따른 염화물 확산특성을 나타낸 것이다. 시험결과, plain 콘크리트의 염화물 확산계수가 $19.3 \sim 21.1 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$ 로서 가장 높은 것으로 나타났고, MSF 콘크리트는 $12.3 \sim 14.2 \times 10^{-12} (\text{m}^2/\text{s})$ 로서 가장 우수한 염화물 침투 저항성을 갖는 것으로 나타났다. 한편, 거푸집 종류 변화에 따른 염화물 확산특성은 사용한 콘크리트의 종류에 따라 다소 상이한 결과를 보이고 있는데, 콘크리트 종류가 plain이나 FA 콘크리트인 경우는 목재합판과 코팅합판이 그리고, MSF 콘크리트의 경우는 폴리프로필렌 필름이 가장 우수한 염화물 침투저항성이 있는 것으로 나타났다. 즉, 콘크리트 종류가 plain이나 FA 콘크리트인 경우는 거푸집 종류에 따라 최고 9.3%와 13.1%의 차이가 발생하였고, MSF 콘크리트의 경우도 최고 15.4% 정도까지 상이하게 되는 것으로 나타났는데, 이러한 결과는 적용 예정인 콘크리트의 특성을 반영하여 거푸집 재료를 적용하는 것만으로도 콘크리트의 염화물 침투저항성이 어느 정도 향상될 수 있다는 것을 의미하는 것이다. ⁽²⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾

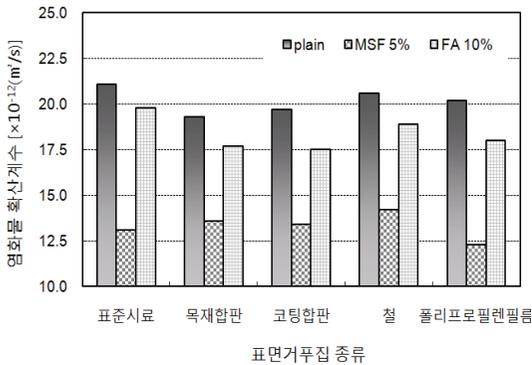


Fig. 6 표면거푸집 종류에 따른 염화물 확산특성

4. 염화물 침투시기의 산정

Table 7은 식(2)를 이용하여 콘크리트 및 표면 거푸집의 종류변화에 따른 염화물 침투시기를 산정할 결과이다. 여기서, 신뢰성 지수 β_n 는 3.72를 적용하였는데, 이는 목표내구수명에 도달하기 이전에 파괴될 확률이 10% 이내인 것이다. ⁽¹²⁾⁽¹³⁾ 여기서, 식(2)에서 요구하고 있는 각종 특성 값은 DuraCrete Final

Table 7 염화물 침투시기 산정결과

	표면마감	$A_{c,s,d}^c$	$D_{0,d}^c$	$R_{o,d}^c$	t_i^d
Plain	표준시료	7.76%	21.1	0.001502	21.1
	목재합판		19.3	0.001643	24.3
	코팅합판		19.7	0.001609	23.6
	철		20.6	0.001539	22.0
	폴리프로필렌 필름		20.2	0.001569	22.6
MSF	표준시료	8.96%	13.1	0.002420	40.5
	목재합판		13.4	0.002366	39.1
	코팅합판		13.6	0.002331	38.2
	철		14.2	0.002233	35.7
	폴리프로필렌 필름		12.3	0.002578	44.8
FA	표준시료	7.46%	19.8	0.001601	24.1
	목재합판		17.7	0.001791	28.8
	코팅합판		17.5	0.001812	29.3
	철		18.9	0.001677	26.0
	폴리프로필렌 필름		18.0	0.001761	28.1

여기서, x^c : 100mm, Δx : 20mm, c_{cr}^c : 0.675%, γ_{cr} : 1.20, w/b : 0.45, $\gamma_{c,s,d}$: 1.60, $k_{e,d}^c$: 0.27, $k_{c,d}^c$: 0.79, t_o : 0.0767, γ_{R_i} : 3.25

Technical Report(Project BE95-1347)⁽⁹⁾에서 제시하고 있는 기본적인 특성 값을 적용하였다.

먼저, 콘크리트 종류에 따른 염화물 침투시기는 염화물 확산특성의 결과에서와 같이 실리카폼을 사용한 경우가 가장 유리하고, 그 다음이 플라야에서, 그리고 plain 콘크리트 순인 것으로 평가되었다. 즉, MSF 콘크리트 대비 FA 콘크리트는 평균 69.1%, plain 콘크리트는 평균 57.6%수준으로서 염화물이 빠르게 침투되는 것으로 나타났다.

한편, 거푸집 종류에 따른 염화물 침투시기는 plain 콘크리트의 경우 거푸집 종류로 목재합판을 사용한 경우가 가장 유리한 것으로 나타났으며, 그 다음이 코팅합판, 폴리프로필렌 필름, 철, 표준시료 순인 것으로 나타났다. 그러나 MSF 콘크리트의 경우는 거푸집 종류로 폴리프로필렌 필름을 사용한 경우가 가장 유리하고, 그 다음이 표준시료, 코팅합판, 목재합판, 철 순인 것으로 나타났다. 즉, 동일한 콘크리트라 할지라도

구조물의 표면마감 특성에 따라 염화물의 침투시기가 크게 상이하게 되는 것을 알 수 있었는데, 세부적으로 plain 콘크리트의 경우는 최고 13.2%, MSF 콘크리트는 20.3%, 그리고 FA 콘크리트는 17.7% 수준까지 상이하게 되는 것으로 나타났다.

Duracrete의 내구성 설계방법⁹⁾을 이용하여 콘크리트의 염화물 침투시기를 도출하기 위해서는 구조물의 기하학적 형상, 재료변수, 환경변수, 시공변수, 재료 및 환경의 시간 이력적 변수 및 부분계수 등 다양한 특성 값을 적용하게 되는데, 여기에 추가적으로, 콘크리트의 다양한 표면마감특성(거푸집 종류)에 대한 요인까지도 고려할 수 있다면 더욱 신뢰성 높은 설계방법이 가능할 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구는 구조물의 표면마감특성이 해양콘크리트의 염화물 침투시기(내구수명)에 미치는 영향을 검토할 목적으로 콘크리트의 압축강도, 염화물 확산 및 공극 특성 등을 평가하였고, 그 결과를 바탕으로 염화물 침투시기를 산정하여 상호 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초기재령에서 압축강도는 무기질 혼화재의 종류에 따른 영향이 적은 것으로 나타났으나, 재령 28일의 경우 실리카퓌를 혼합한 경우가 plain이나 플라이애시를 혼합한 경우에 비해 각각 21.6%와 17.2% 정도 높은 강도특성이 있는 것으로 나타났다.
- 2) 표면거푸집의 종류에 따른 공극특성은 표준적인 시험방법의 경우가 철이나 폴리프로필렌 필름을 사용한 경우에 비해 상대적으로 많은 공극량을 포함하고 있었고, 목재합판 거푸집을 사용한 경우가 가장 적은 공극량을 포함하는 것으로 나타났다. 콘크리트의 종류별로는 MSF 콘크리트가 plain 콘크리트나 FA 콘크리트에 비해 0.1~1 μ m범위의 공극량이 크게 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 염화물 침투시기는 동일한 콘크리트라 할지라도 구조물의 표면마감 특성에 따라 염화물의 침투시기가 크게 상이하게 되는 것을 알 수 있었다. 즉,

plain 콘크리트의 경우는 표준시료와 함께, 표면거푸집의 종류에 따라 최고 13.2%, MSF 콘크리트는 20.3%, 그리고 FA 콘크리트는 17.7% 수준까지 상이하게 되는 것으로 평가되었다.

- 4) Duracrete의 내구성 설계는 확률론적 신뢰성 이론을 바탕으로 각종 특성 값을 적용하고 있는데, 여기에 거푸집 종류와 같은 다양한 콘크리트의 표면마감특성이 추가된다면 좀 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 권성준, 박상순, 남상혁, 노병철, "탄산화에 노출된 콘크리트 취약부의 확률론적 내구수명 평가", 구조물진단학회지, 제12권, 2호, 2008, pp. 49-58.
2. 대우건설기술연구원, "GK PJ적용을 위한 고내구성 해양콘크리트 배합설계 보고서", 2006.
3. 오병환, 장승엽, "콘크리트 구조물의 염화물 확산거동 및 침투해석", 한국콘크리트학회 전문연구위원회 발표집, 2004, pp. 201-228.
4. 건설교통부, "콘크리트표준시방서(내구성편)", 2004.
5. 권성준, 박상순, 노병철, "무기계 침투제를 적용한 콘크리트의 장기폭로실험을 통한 염해 내구성 평가", 한국콘크리트학회 논문집, 제20권, 제3호, 2008, pp. 283-290.
6. 朴宣圭, "收縮低減劑および膨張材による若材齡高性能コンクリートの自己收縮低減に關する研究" 東京大博士學位論文, 2004.
7. Nordtest method NT Build 492, "Concrete, Mortar and cement-based repair materials Chloride migration coefficient from non-steady migration experiments", 1999.
8. Barnes, B. D., Diamond, S. and Dolch, W.L. "The contact zone between portland cement paste and glass "aggregate" surface", Cement and Concrete Research Journal, 1978, 8(2), pp. 233~244.
9. Duracrete-Final Technical Report, "Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures", Document BE95-1347/R17, European Brite-EuRam Programme, Published by CUR, the Netherlands, May 2000.
10. H. W. Song, S. J. Kwon, "Permeability Characteristics of Carbonated Concrete Considering

-
- Capillary Pore Structures”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue 6, 2007, pp. 909-915.
11. R. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, “Concrete Structure, Properties and Materials”, Prentice-Hall, 1993.
12. J. K. Yoo, S. J. Park, B. H. Oh, S. W. Kim, “An Experimental Study on the Finish-ability Improvement of High Performance Marine Concrete”, 2nd ASIAN Concrete Federation Conference, November, 2006.
13. Carola K. Edvardsen, Y. J. Kim, S. J. Park, S. K. Jeong, H. C. Im, “Busan-Geoje Fixed Link Concrete Durability Design for the Bridges and Tunnels”, ITA WTC, April. 2006.
- (접수일자 : 2008년 7월 7일)
(심사완료일자 : 2008년 11월 4일)