

해양콘크리트 구조물의 염해 예측 및 유지보수 시뮬레이션시스템 개발

Development of Maintenance Simulation System and Prediction of Chloride Ion Permeation for Marine Concrete Structures

이 창 수^{1)*} 김 명 원²⁾
Lee, Chang Su Kim, Meyong Won

Abstract

As both laboratory accelerated experiment and field exposure experiment were performed, at recent, the fifth field test at five year exposures was proceeded according to long period experimental plan. Field experiment, for the adoption of the developed evaluation model, which is consisted of the analysis of chloride penetration profile at gate bridges of sea-dike completed 30 years ago was carried out during upgrading the basic evaluation model with analyzing the annual field test data. The surface concentration of chlorides was replaced to the concentration of chloride of inner concrete near the surface chlorides among his research results at basic model. Maage's suggestion function was accepted too as a diffusion coefficient of chloride after verifying the change of diffusion coefficient by analysis of annual field test data. The comparison of field data with model predictions and the estimation of remaining life time demonstrates that the proposed updated model and maintenance simulation system can be used to predict the chloride penetration profile in the marine tidal zone and appropriate repair period and cost.

Keywords : Chloride penetration coefficient, Surface chloride contents, Threshold chloride contents, Maintenance period, Dry-wet cycling, System

1. 서론

해양콘크리트 구조물의 노후손상 원인 중 염화물로 인한 철근 부식과 그로 인한 구조물 성능저하가 차지하는 비중이 가장 크다.

대형 배수갑문의 경우 이를 보수하기 위해선 육상에서와 달리 가물막이 및 많은 부대시설이 필요할 것이기 때문에 적정시점의 예측을 통한 최적 시뮬레이션이 필수적이다.

콘크리트 구조물의 내구성을 향상시키기 위한 연구는 결과에 비해 너무 많은 노력과 비용이 수반되기 때문에 줄곧 실내축진실험을 통하여 콘크리트의 내구성 변화를 찾아내어오고 있다. 일본 공항항만연구소에서는 40여 년간 해양환경하에서 모니터링해오고 있다. 본 연구에서는

해수노출 시험장에 비말대와 간만대의 공간을 확보하고 650여개의 실험체 폭로를 시작한지 5년째를 맞고 있으며, 역학적 특성, 염화물에 대한 침투특성 등을 주기적으로 분석해오고 있다. 이러한 현장장기폭로실험과 실내축진 실험을 겸한 지속가능한 염해예측모델을 개발하고자한다.

2. 콘크리트 염해예측모델

2.1 콘크리트 염해예측기법

콘크리트의 염화물 침투 현상은 물질의 평형으로 설명되며 여기에는 이온과 수분의 확산 및 구속현상이 포함되며 편미분방정식으로 가시화될 수 있다.

1) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수, 교신저자
2) 정회원, 한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원

* Corresponding author : csll@uos.ac.kr 02-2210-2428

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J_C}{\partial x} - \frac{\partial C_b}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, C 는 자유 염화물이온(free chloride ion) 농도(kg/kg), J_C 는 염화물이온의 유동율(flux) (m/s), C_b 는 구속 염화물이온(bound chloride ion) 농도(kg/kg), t 는 시간(s), x 는 거리(m)이다.

식 (1) 우측 첫 번째 항이 나타내는 염화물이온의 유동율은 이온의 확산(diffusion)과 대류(convection)에 의해 이루어지며 콘크리트내부 수분이동, 건조, 공극구조 등의 영향을 받게 된다. 염화물이온의 확산은 콘크리트 확산계수로서 콘크리트마다의 확산특성을 표현하게 되는 데 이는 콘크리트의 내적특성, 상대습도, 온도, 이온농도 등의 다양한 영향인자에 의해 결정된다.

두 번째 항은 콘크리트내 염화물의 구속을 나타내는데 염화물이온(Cl^-)과 C_3A 가 반응하여 고정염(calcium chloroal uminate, Friedel's salt)을 생성하는 반응 등이 이에 해당된다. Tritthart에 따르면 콘크리트가 해수에 접한 경우 자유염화물량은 총염화물량의 55%정도인 것으로 발표하였다(Tritthart, 1989). 식 (1)에 여러 경계조건들을 반영하여 유도한 공학적 해가 식 (2)로서 염화물 침투예측에 중요한 Fick의 제2확산법칙이다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$C(x,t) = C_s(t) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}(t) \cdot t}} \right) \right\} \quad (3)$$

여기서, $C(x,t)$ 는 시간 t(sec) 경과 시 깊이 x (cm)에서 염화물농도(%), $C_s(t)$ 는 표면염화물 농도(%), D_{cl} 는 염화물 확산계수(cm^2/sec), erf 는 오차함수(error function)이다.

2.2 콘크리트 표면염화물량

Weyers는 표면염화물량(C_s)이 2.4~4.7kg/m³범위에 있으면 부식 환경이 “보통”이라고 했다(Weyers, 1993).

본 연구에서는 콘크리트 표면의 염화물농도를 시간의 함수로 표현한 많은 연구결과들 중에서 Takeda 등이 적

Table 1 Chloride content at surface

No.	Developer	Function	Remark
1	竹田宣典, 1998 Kassir, 2002 Arora, 1997	$C_s(t) = C_o^*(1 - e^{-at})$	C_o^* : final chloride content
2	CEB, 1998	$C_s(t) = at^b$	a, b : constant
3	Uji, 1990 Weyer, 1994	$C_s(t) = S\sqrt{t}$	S : cumulative constant

Table 2 Chloride diffusion coefficient with time

Developer	Function	Explain
Maage et al, 1995 竹田宣典, 1996	$D_{cl}(t) = D_r \cdot \left(\frac{t_r}{t}\right)^{-m}$	t_r : ref. year D_r : Diffusion coef. $m = 0.4-2.5w/c$
Bamforth, 1997	$\log D_{cl}(t) = -a\sqrt{t} + b$	a, b : constant

용한 Table 1의 첫 번째 식을 적용하였다. Takeda은 일본청수항 방파제에서 장기폭로실험을 수행하며 침지대에 0.63%를 적용한다. 따라서 본 연구에서는 이를 수용성염화물량으로 환산한 0.346%를 표면염화물량의 초기값($t=0$)으로 반영하였다(Takeda et al., 1998).

2.3 염화물 확산계수

콘크리트의 염화물 확산계수는 많은 연구자들이 Table 2와 같이 시간의 함수로 표현하고 있다. 또한 염화물 확산계수에 영향을 미치는 주요 요인인 물-시멘트비(w/c)로 나타내려는 노력이 있었다. 본 연구에서는 일차적으로 실내실험에서 식 (3)을 통해 D_{cl} 값을 역 추정하여 기본 예측식을 만들고 장기폭로 실험 자료를 획득하여 시스템에서 D_{cl} 값을 재산정하도록 계획하였다.

2.4 철근부식을 유발하는 임계염화물량

본 연구에서는 국내 콘크리트 표준시방서(2009)를 참고하여 염화물에 노출된 철근콘크리트의 경우 굳은 콘크리트 최대 수용성 염화물량 규정치인 0.15%(시멘트량 대비)를 적용하였다. Table 11의 배합비에서 SRC30의 단위시멘트량이 393kg/m³이므로 콘크리트 중량($w=2,300kg/m^3$) 대비 임계염화물량(%)로 환산하면 0.026%가 된다. 철근이 묻힌 위치에서 임계염화물량에 도달하면 철근의 부식이 시작되는 것으로 가정하였다.

3. 실내축진시험

3.1 사용재료

3.1.1 시멘트

본 연구에서 사용한 시멘트의 종류는 3가지로 내황산염 시멘트(Sulphate Resisting Cement, 5종), 삼성분계 혼합시멘트(Ternary Blended Cement, 저발열), 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, 1종)이다. 시멘트의 화학조성은 Table 3, 물리적 특성은 Table 4와 같다.

3.1.2 잔골재

본 연구에서 사용한 잔골재는 물리적 성질이 Table 5와 같으며, 해양콘크리트 구조물인 배수갑문에 많이 사용된 부여산 모래를 사용하였다.

3.1.3 굵은 골재

굵은 골재는 전복 부안소재 석산의 굵은 골재 최대치수 25mm의 부순 돌을 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 6에 나타내었다.

Table 3 Typical values of chemical components of used cement

Type of Cement		Chemical component (%)						
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. Loss
SRC	type V	22.5	3.5	4.7	62.3	2.6	1.9	1.2
TBC	LH	35.3	12.2	3.3	39.3	2.9	2.0	1.5
OPC	type I	20.4	5.1	3.0	61.6	4.7	2.4	1.4

Table 4 Mechanical properties of the used cements

Test item	Sort	Unit	Test value			
			V	LH	I	
physical properties	Specific gravity	Mg/m ³	3.21	2.80	3.12	
	Fineness	Blaine	cm ² /g	3,426	4,636	3,340
		BET	m ² /g	-	2.5	-
	Setting Time (Gillmore)	Initial	minute	302	312	285
		Final	hour	10.4	9.16	10.27
	Compressive strength	3 days	MPa	26	19	34
7 days		MPa	30	27	35	
28 days		MPa	34	32	42	
Heat of hydration	Calorimeter (72hr)	J/g	207	191	323	
Chemical components	MgO	%	1.97	2.90	2.71	
	SO ₃	%	1.46	2.02	2.50	
	Ignition Loss	%	0.86	1.5	1.17	

3.1.4 혼화제

혼화제는 Table 7, 8과 같이 콘크리트의 압축강도에 따라 고성능AE감수제와 AE 감수제를 사용하였다.

3.1.5 단면복구재

단면복구재(Recover Material)는 최근 국내에서 사용되는 그 종류 및 성분별 현황을 분석하고 사용빈도가 높은 폴리머 시멘트 모르타르 2종, 폴리머 모르타르 1종, 실리카 시멘트 모르타르 1종, 시멘트 모르타르 1종을 선택하였으며 Table 9에 정리하였다. 단면복구재의 기본구성은 프라이머, 단면복구용 필링재, 마무리 코팅재 등으로 이루어진다. R1의 경우는 비정질 실리카도포제, 특수 경질골재인 가넷과 고강도 백시멘트, 수성아크릴 폴리머 에멀전으로 구성된 접착모르타르, 단면복구모르타르, 수중속 경화에폭시도포제로 구성되고, R2는 무기질침투성 폴리머 모르타르가 주요성분으로서 신구접착용 프라이머인 밀크모르타르, 단면복구재, 표면보호코팅재로 구성된다. R3 역시 친수성 고내구성 폴리머 시멘트 모르타르로

Table 5 Properties of fine aggregate

Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Bulk Density (kg/L)		0.08mm passing rate (%)	Fineness modulus
		loose	dense		
2.60	1.14	1.41	1.58	2.61	2.32

Table 6 Properties of coarse aggregate

G _{max}	Density (g/cm ³)	Absorption rate (%)	Bulk Density (kg/L)		Abrasion loss (%)	Fineness modulus
			loose	dense		
25mm	2.62	0.78	1.31	1.64	16.8	6.94

Table 7 Chemical admixtures

Chemical Admixture	AE & Superplasticizer		AE & water reducing agent	
Mixtures	OPC30, SRC30, TBC30	TBC32, SRC32	OPC24	OPC21

Table 8 Properties of chemical admixtures

Type	Specific gravity	pH	Solid content (%)	Quantity (%) (by weight of cement)	Main component
AE & Superplasticizer	1.20	7.0±1	40±2	1.0~2.5	Carbon acid
AE & water reducing agent	1.20	7.0±1	42±2	0.5	Lignosulfonate

Table 9 Recover materials

No.	Main components	Remarks
R1	Polymer cement mortar	Polymer containing garnet
R2	Polymer mortar	Perviousness
R3	Polymer cement mortar	Silica series
R4	Mortar containing hydrotalcite	$Mg_6Al_2(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4(H_2O)$
R5	Silica cement mortar	Containing nitrous acid rust inhibitor

서 콘크리트표면을 치밀화하는 프라이머로 항균개질재, 단면복구재, 중성화방지목적의 탑코팅재로 이루어지며, R4는 프라이머, 하이드로탈사이트함유 단면복구 모르타르, 함침계 표면보호재, 변성실리콘계 세라믹표면코팅재로 마무리된다. R5 또한 아질산계 방청제가 혼입된 알칼리회복제, 분말방청제를 첨가한 방청모르타르, 수성표면강화제, 탄성마감재로 단면을 복구하게 된다. 이상 5종류의 단면복구재를 실내축진시험 및 현장폭로시험용 실험체에 적용하였다.

3.1.6 표면보호재

표면보호재(Surface Repair Material)는 건축용마감도재로 주로 쓰이는 무기계 도료 1종, 유기계 도료 1종, 유기계 혼합1종을 선택하여 Table 10과 같이 정리하였다. S1은 항균성 무기계 콘크리트개질재인 프라이머 코트제와 해양구조물염화물차단기능 등이 있는 탑코트제로 구성되며 S2는 부착력이 뛰어난 표면편흡과 같은 결함부위체거용 프라이머와 바탕조정제, 표면강화제, 그리고 변성실리콘세라믹 코팅재로서 자외선에 색상변화가 없는

Table 11 Mix proportion of the concrete

Type*) (MPa)	Target Slump (mm)	Target Air cont. (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					
					W	C	S	G	Ch. admix.	
									S.P. (kg)	AE (g)
OPC21	150±25	5±1.5	55.4	46.0	180	325	815	972	1.6	16
OPC24	150±25	5±1.5	51.2	45.0	181	354	785	974	1.8	18
OPC30	150±30	5±1.5	41.0	45.0	161	393	774	975	5.9	-
SRC30	150±30	5±1.5	41.0	45.0	161	393	774	975	5.9	-
SRC32	150±30	5±1.5	37.5	45.3	155	413	774	935	5.8	-
TBC30	210±30	5±1.5	41.9	44.9	160	382	761	933	4.2	92
TBC32	210±30	5±1.5	37.5	38.0	165	440	621	1017	4.3	205

*) ○○○ △△→ Concrete strength

↓
Cement Type
SRC: Sulphate resistance cement (Type V)
TBC: Ternary blended cement (Low Heat)
OPC: Ordinary portland cement (Type I)

Table 10 Repair materials

No.	Main components	Remarks
S1	Fine-polymercement	Inorganic, final coating
S2	Surface repair material	organic & inorganic mix, final coating
S3	Epoxy resin series	organic, paint

표면코팅재로 구성된다. S3는 부착성 및 내충격성이 우수한 유기계인 에폭시 수지계로서 샌딩성이 우수한 필러제와 표면강화와 부착력을 증가시켜주는 기능을 하는 강화제, 에폭시수지를 주성분으로 하는 후막형 도료, 그리고 아크릴/폴리우레탄수지를 주성분으로 하는 톱코우트재로 구성된다. 이상의 3종류 표면보호재는 단면복구재와 같이 실내축진시험 및 현장폭로시험용 실험체에 적용되었다.

3.2 배합

콘크리트의 배합비는 내황산염, 삼성분계, OPC, 3종류의 시멘트와 서남해안에 위치한 배수갑문 교량의 설계기준강도를 조합하여 7종류로 구분하였다. 배합비의 구분은 '시멘트종류-설계기준강도'로 하였으며 Table 11과 같다.

3.3 실험방법

콘크리트의 염분침투특성 분석을 위해 실내실험에서 주로 사용되는 실험방법인 전위차 축진시험과 침지시험을 병행하였다.

3.3.1 전위차 촉진시험

시험시간의 단축을 위해 적용되는 급속 염화물이온 침투성 시험(Rapid Chloride Penetrability Test, AASHTO T 277, ASTM C 1202)방법을 채택하였다.

시험체는 Table 11의 7종 배합, Table 9의 단면복구재 적용 공시체, Table 10의 표면보호재 적용 시험체 54개를 Table 12와 같이 제작하여 28일 재령에서 Fig. 1 (a)와 같이 기준콘크리트는 원주형공시체를 제작하여 중앙부 50mm를 채취하고, 표면보호재적용 콘크리트와 단면복구재는 Fig. 1 (b)와 같이 35×35×26cm 블록 시험체를 제작하여 단면복구재로 복구한 단면에서는 1개의 코어를, 표면보호재를 적용한 반대단면에서는 2개의 코어를 채취하여 5cm가 되도록 절단하였다. 절단된 실험편은

Table 12 Test specimens for RCPT

Test Method	Specimen size(mm)	Division	Number
RCPT	φ100×50	Basic concrete : 7 types	7
		Surface repair material : 3 types	7×3×2=42
		Recover material : 5 types	1×5=5
			total 54

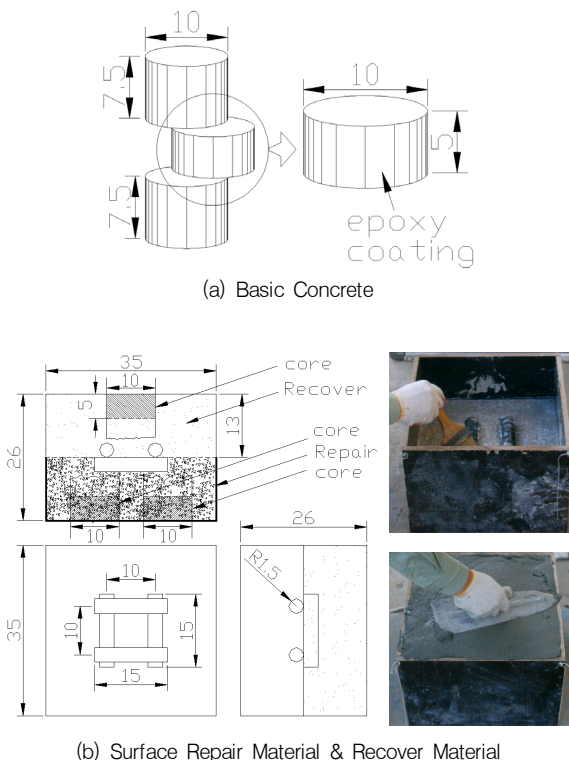


Fig. 1 Test Specimen Design

95% 이상의 상대습도를 유지하였다. 용액과 접할 면을 제외한 실험체 표면은 불투수성 재료로 도포하여 실험도중 건조를 방지하였다. Fig. 3은 확산셀의 개요도를 나타낸 것이며, Fig. 2의 전위차 촉진시험장치의 확산셀의 (-)전극에 3.0%의 NaCl용액을 채우고 (+)전극에는 0.3M의 NaOH용액을 채운다. 시험 시 용액의 초기 온도는 20~25°C의 범위에 있어야 하고 실험 중에는 대기의 온도를 20~25°C를 유지하도록 한다. 또한 실험 중 용액의 온도는 90°C이하가 되도록 한다. 확산셀에 30V의 전압을 가하여 전위차에 의해 음극에서 양극으로 이동한 염화물 이온의 침투깊이를 측정한다. 침투깊이의 측정은 0.1N AgNO₃용액을 분무한 후 변색된 부분을 염화물 이온 침투깊이로 한다.

염화물 이온의 확산계수는 다음 식에 의해 산정할 수 있다.

$$D = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - a\sqrt{x_d}}{t} \quad (4)$$

$$a = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFU}} \cdot \operatorname{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2C_d}{C_0}\right)$$

여기서, D는 확산계수 cm²/s, z는 이온의 원자가(염화

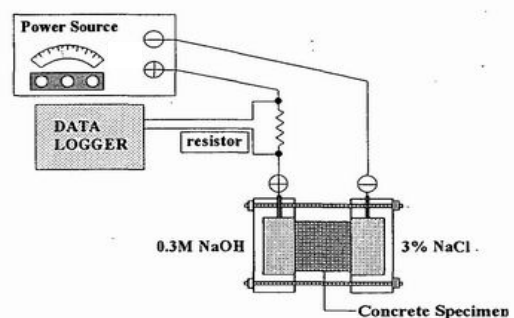


Fig. 2 Test Apparatus

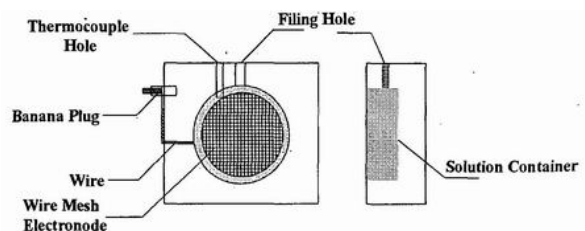


Fig. 3 Cell Design

물 이온의 경우 $z=1$), F 는 페레데이 상수(96,485.04 J/Vmol), U 는 양극과 음극 사이의 전압차(V), R 는 기체 상수(8.314 J/Kmol), T 는 용액의 온도(K), L 는 실험체의 두께(cm), x_d 는 염화물 이온의 침투깊이(cm), t 는 실험 지속시간, C_d 는 질산에 의해 변색된 부분의 염화물 이온 농도, C_0 는 음극쪽 셀의 염화물 이온 농도이다.

3.3.2 침지실험

실험체 종류별 염화물 확산계수산출을 위해 100×100×200mm 입방체를 3개씩 제작하고 일 방향 침투유도를 위해 5면은 에폭시도장을 실시하였다. 0.5M NaCl 용액을 제조하여 침지시켰다. 1, 3, 6, 9, 12개월에 핸드 그라인더를 이용하여 분말을 채취한 후 건조시켜 10g의 분말시료를 채취하였다.

본 연구에서는 수용성 염화물량을 채취한 10g분말 시료에서 KS F 2713규정에 따라 증류수로 여과시켜 추출한 후 적정기(G20-Mettler Toledo, Switzerland)를 이용하여 정량 분석하였다. 거름종이로 거른 여과액에 3±0.1ml의 1:1질산희석용액과 과산화수소(30%용액)를 가하여 황화물의 영향을 제거하였으며 0.05N 질산은 표준용액으로 적정하여 염화물량을 0.001%까지 계산하였다.

Fick의 확산제2법칙에 의해 유도된 식 (3)에 의해 침지재령(t), 표면염화물량(C_s), 측정 깊이(x)를 고려하여 염화물확산계수(D_{cl})를 산출하였다.

3.4 실험결과

3.4.1 전위차 촉진실험

배합별 염화물이온 확산계수를 Table 13과 같이 정리하였으며, 표면보호재의 염화물이온 확산방지효과를 기준 콘크리트의 확산계수 대비 표면보호재적용 콘크리트의 확산계수의 비로서 Fig. 4와 같이 도시하였다. 유기계에 폭시 수지계인 S3의 효과가 가장 큰 것으로 나타남을 알

Table 13 Chloride-ion diffusion coefficients at RCPT test with repair material unit : $\times 10^{-7}(\text{cm}^2/\text{s})$

Repair	OPC21	OPC24	OPC30	SRC30	SRC32	TBC30	TBC32
-	16.90	14.03	10.73	18.93	13.92	12.17	11.93
S1	8.95	8.32	5.68	10.02	7.11	6.41	6.26
S2	11.63	9.65	7.39	13.03	9.24	11.05	8.88
S3	7.69	6.39	4.89	8.57	6.11	5.54	5.38

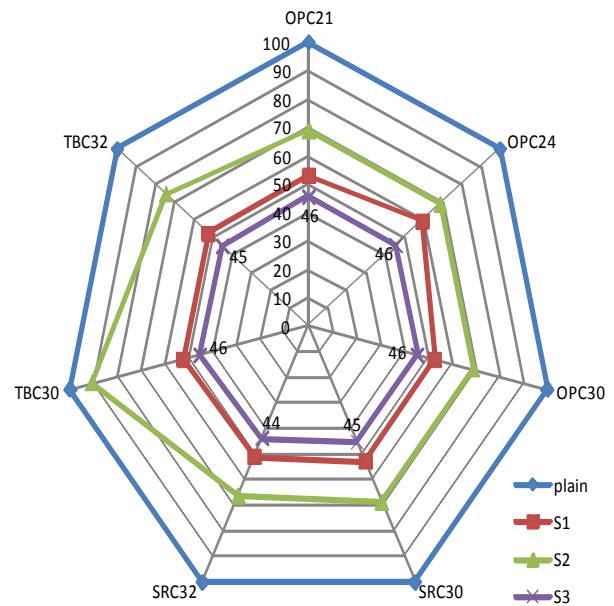


Fig. 4 Effect of repair material in comparison to plains

Table 14 Chloride-ion diffusion coefficients at RCPT test with recover material unit : $\times 10^{-7}(\text{cm}^2/\text{s})$

Recover	R1	R2	R3	R4	R5
-	11.34	8.46	6.32	16.40	9.33

수 있으며 표면보호재가 기준콘크리트의 기본물성에 일 정비율만큼의 효과를 주는 것으로 나타났다. 콘크리트의 강도 30MPa를 서로 비교할 경우 OPC, TBC, SRC 순으로 나타났음을 확인할 수 있다.

단면복구재의 염화물이온 확산계수를 Table 14와 같이 정리하였으며 주성분이 폴리머시멘트모르타르인 R3에서 가장 낮은 값을 보임을 알 수 있었다. 이어서 침투성폴리머모르타르가 주성분인 R2, 분말방청제를 첨가한 방청모르타르가 주성분인 R5, 그리고 R1, R4순으로 나타났다.

3.4.2 침지실험

침지실험에서 얻은 콘크리트의 종류별 깊이에 따른 염화물 침투프로파일을 Fig. 5와 같이 도시하였으며, 염화물이온 확산계수는 Table 15에 정리하였다. 침지 12개월간의 결과로 염화물이온확산계수를 산출한 결과 OPC, TBC, SRC순으로 전위차실험과 같은 순으로 나타났으나 전체적으로 침지실험결과 값이 전위차실험결과보다 작게 나타났다. 문헌에 따르면 전위차 셀내부 용액의 온도상승에 따른 영향 때문인 것으로 분석되었다.

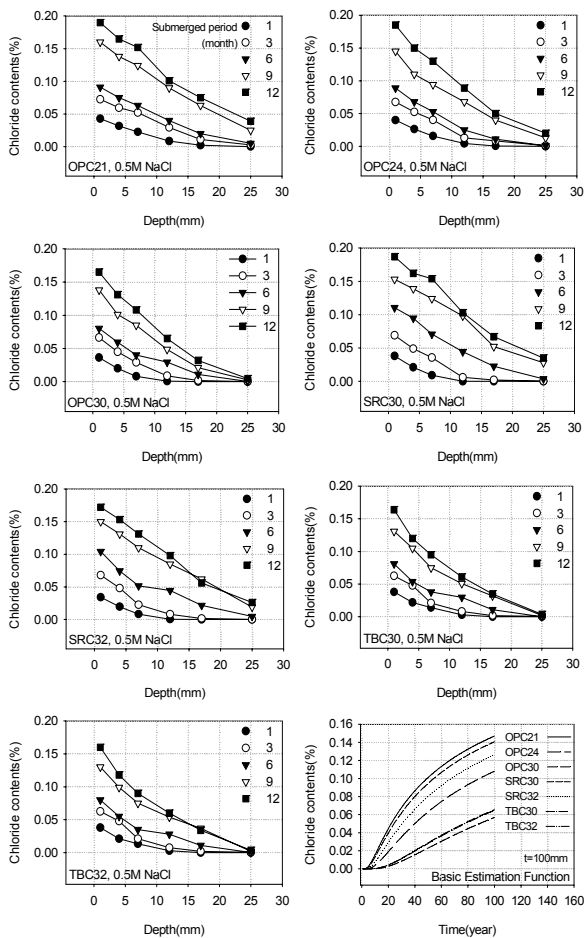


Fig. 5 Chloride-ion penetration profile at submerged test

Table 15 Chloride-ion diffusion coefficients at submerged test
unit : $\times 10^{-8} (\text{cm}^2/\text{s})$

Type	OPC21	OPC24	OPC30	SRC30	SRC32	TBC30	TBC32
D_i	6.25	3.90	2.06	5.78	4.85	2.31	2.29

4. 현장폭로시험

4.1 현장폭로시험장

해양환경 현장폭로시험장은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 간만조시 해수와 직접 접촉하거나, 해풍에 의해 해수의 간접적인 영향을 받는 전라북도 부안군의 해안가로서 10여 년간 염분함유량이 0.3% 이상으로 침투 축적이 예상되고(Kwon et al., 2007), 해안으로부터 약 60m까지 연평균 비례염분량이 2.6~12mdd ($\text{mgNaCl}/\text{dm}^2/\text{day}$)로 예상되는 장소를 폭로시험장으로 설정하였다(Kwon et al., 2008). 시험장은 콘크리트 중공블럭 조적식 박스 구

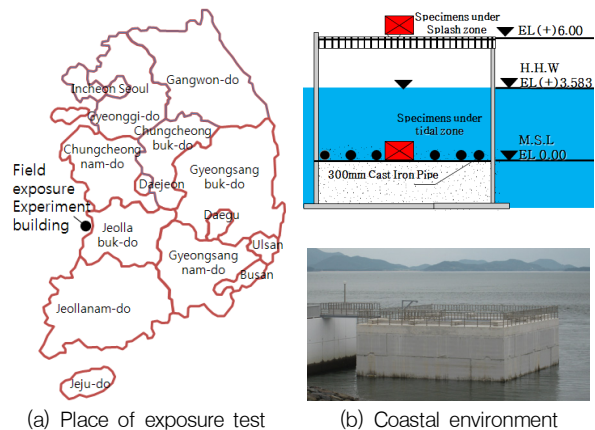


Fig. 6 Exposure experiment station

Table 16 Exposure specimens

Zone ^{*)}	Concrete			Repair				
	TM30	TM24	TM21	TR1	TR2	TR3	TR4	TR5
Tidal								
Splash	SM30	SM24	SM21	SR1	SR2	SR3	SR4	SR5

*) TM30 : Mother material under tidal zone(OPC)
TR1 : Repair material under tidal zone(R1)
SM30 : Mother material under Splash zone
SR1 : Repair material under Splash zone(R1)

조물로서 가로×세로×높이를 9m×12m×9m 규모로 외해(外海)에 설치하였으며, 실험체를 비말대와 간만대에 각각 폭로 시켰다.

4.2 폭로실험체

염화물 침투깊이 및 깊이별 함량 측정용 실험체는 설계 기준강도와 사용시멘트 종류를 구분인자로 Table 16과 같이 명명하였으며, 그 크기는 350×350×260mm이다.

폭로 시험에서 실험체 제작에 사용한 재료는 Table 3~8에 나타난 바와 같으며, 콘크리트 배합은 Table 11과 같다.

4.3 실험체 분석

2006년 9월에 해수 및 해풍에 노출을 시작한 실험체의 염화물 함량 분석은 1년 주기로 분석을 실시하였으며, 실험체 표면으로부터 1, 2.5, 5, 10, 15, 25mm 깊이별로 콘크리트 분말을 채취하여 KS F 2713 (콘크리트 및 콘크리트 재료의 염화물 분석시험방법)에 제시된 방법에 준하여 실시하였다. 시료의 전처리 및 분석과정은 Photo 1과 같이 부호너 칼대기, 진공펌프, 증류수 제조장치 등을



(a) Titration (b) At Field
Photo 1 Chloride contents analysis and field test

사용하였으며, 염화물 적정기는 G20모형을 이용하여 적정함으로서 염화물 함량을 측정하였다.

4.4 예측모델의 개발

해양콘크리트 구조물의 염해예측 기본모델을 실내실험을 통해 완성하고, 이를 수치 모델화하여 시스템으로 구축하였다. 실내실험과 현장구조물의 격차를 최소화하기 위해 노출 5년차의 실험체 분석 자료를 통해 기본모델을 업그레이드하고 염화물 함량 측정 자료를 분석하여 Fig. 7과 같이 도시하였다. 5년차 노출 실험체의 염화물 함량 측정값의 프로파일과 가장 가까운 추정곡선은 최적화기법을 통해 얻었다. 즉, 최적의 확산계수(D_5)를 도출하였다. Table 2의 시간에 따른 확산계수의 변화를 나타내는 식들 중 본 연구에서 택한 Maage의 제안식으로 5년경과 시점의 확산계수를 검증하고 철근의 위치에서 임계염화물 함량이 검출될 시점의 확산계수를 추정하였다(Maage et al., 1996).

염화물 예측식의 변수는 확산계수와 표면염화물함량인데 확산계수는 시간의 함수로서 물시멘트비의 영향을 받는 것으로 정하였는데 표면염화물 함량은 어떻게 변화될 것인가를 주목하여 분석하였다. 현장폭로기간이 짧은 관계로 6장에서 분석한 준공된 지 30년이 경과한 해양콘크리트 구조물의 염화물 함량분포(Fig. 11)를 함께 분석함으로써 6.2절에서 언급된 바와 같이 농도평형의 개념과 달리 Zhang이 제시한 건설반복조건하에서 콘크리트표면 염화물 농도는 표면염화물함량($C_{s,0}$)의 α 배로 축적될 수 있다는 결과와 일치하는 경향을 보임에 따라 간만대 해수 노출실험체의 노출 해수고도(sea level)와 Zhang의 연구 결과를 고려하여, 자싱(Jiaying)항과 해수노출실험장이

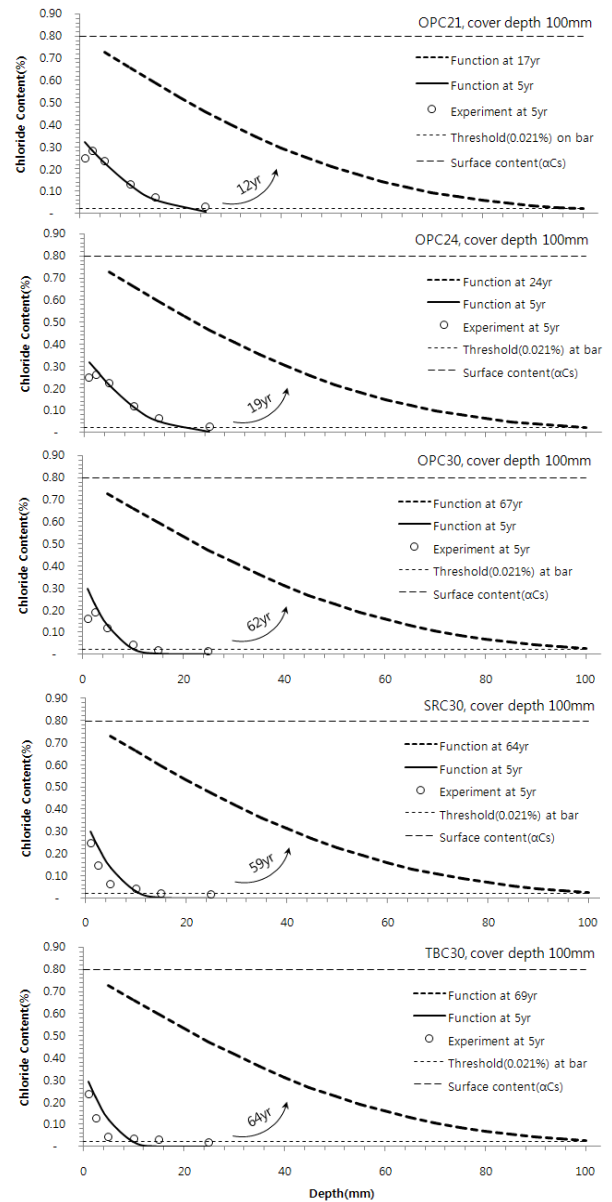


Fig. 7 Prediction model upgrade according to test data at every year and service-life estimation

Table 17 Diffusion Coefficients driven from test data
unit : $\times 10^{-8} (\text{cm}^2/\text{m}^2/\text{s})$

Type	OPC21	OPC24	OPC30	SRC30	SRC32	TBC30	TBC32
w/c	55.4	51.2	41.0	41.9	37.5	41.0	37.5
5-year (D_5)	0.40	0.33	0.10	0.11	0.13	0.09	0.08
Threshold (D_{cr})	2.00	1.00	0.51	0.54	0.52	0.49	0.47
Re.Life (yr)	12	19	62	59	62	64	71

서해에 위치한 점을 감안하여, α 를 2.3으로 정하고 임계염화물 함량 도출 시점을 추정하였다(Zhang and Jin, 2011). 확산계수와 도출결과를 Table 17과 같이 정리하였다.

5. 유지보수 시뮬레이션 시스템

5.1 예측모델의 수치모델화

보수 계획은 적용구조물에 사용가능한 보수공법과 각 공법에 사용된 콘크리트 종류별 보수효과를 검증하고 이를 토대로 모의운영 모델을 개발하였다.

5.1.1 보수 계획 모델의 입력자료 구성

유지보수 계획의 수립은 본 구조물의 물리적 특성값, 노후 손상정도에 따른 구조물에 수행된 보수이력관리 결과 값을 입력 자료로 구성하였다. 이 자료는 향후의 사용성 제고를 위하여 관계형 데이터베이스로 구축하여 저장하였다.

5.1.2 유지보수 계획의 적정성 평가

보수 계획의 적정성 평가는 각 시나리오 기반으로 비용(TC), 보수요구도(RS) 모델을 이용하여 식 (5)로 정의하였다.

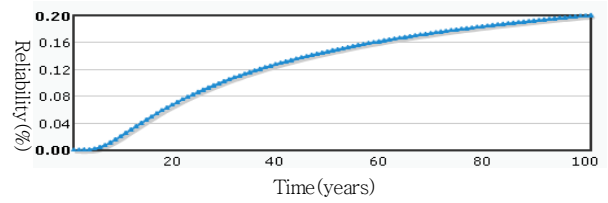
$$TC = RC_0 + \sum \left\{ \frac{RC_{t_j}}{(1+i)^{t_j}} \right\}, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

여기서, RC_0 는 초기에 수행되는 최초보수비용(Repair cost), RC_{t_j} 는 j 번째 보수가 발생한 년도 t_j 에서의 현재 가치로 환산한 보수비용, i 는 할인율이다.

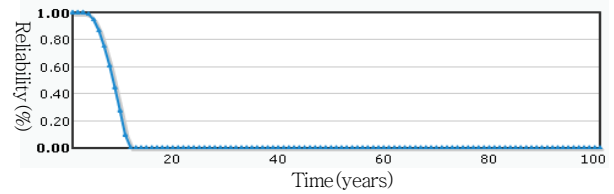
시나리오에 의하여 계획되는 보수공법의 보수효과에 따라 구조시스템은 수명기간동안 차기에 필요한 보수요구도가 달라질 것이다. 이 값은 염해에 의한 임계상태 도달 시간을 이용하여 다음 식 (6)과 같이 보수요구도의 함수로 나타낼 수 있다. 이는 임계값이 0.026%일 경우에 Fig. 8에 제시한 바와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X_{cl}(t) &= (cl_{thr} - cl(t))/cl_{thr} \\ RC_{cl}(t) &= 1 - X_{cl}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, cl 은 철근 깊이에서의 염화물함량, cl_{thr} 은 철근의 부식발생이 시작될 수 있는 임계염화물함량이다. 임계염화물 함량을 초과하는 염화물함량에서는 X_{cl} 은 0이 된다고 가정한다. 이때는 염화물의 침투에 의한 보수요구



(a) Chloride ion penetration profile



(b) Reliability

Fig. 8 Example of numerical model application

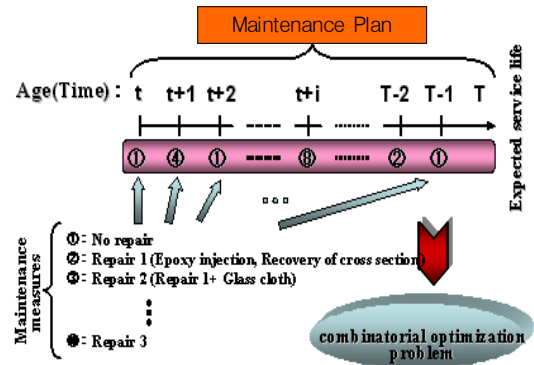


Fig. 9 Maintenance simulation concept

도 함수($RC_{cl}(t)$)는 1.0이 된다.

5.2 유지보수 시뮬레이션

열화해석 단계의 입력자료 외에 보수공법별 효과를 이용하여 열화해석 과정을 재해석 하여야 한다. 보수효과는 크게 표면의 보수에 의한 효과와 단면의 치환 및 복구에 의한 콘크리트 표면 부위의 물성치가 변하는 경우를 대상으로 모델링하여 내부로 침투하는 염화물 이온의 거동량을 예측하므로써 식 (5)에서 제시한 보수요구도 함수를 재사용할 수 있도록 구성하였다. 본 연구에서는 시나리오 작성을 유연하게 할 수 있도록 하기 위하여 보수공법에서 제시하고 있는 정기적 보수 계획과 사용자 측면에서 임의 시기에 보수 계획을 적용하는 것을 가정하여 유지보수 계획의 효과성을 모의할 수 있도록 하였다. 이 과정은 다음 Fig. 9에서 개념적으로 설명하고 있다.

Fig. 10은 보수시나리오에 의한 보수공법의 적용결과를 보수이전 상태 및 보수요구도와 보수를 적용한 이후의 보수 요구도를 함께 제시한 결과이다.

6. 현장적용 및 검증

6.1 해양콘크리트구조물 현장조사

해양콘크리트 구조물의 염해예측 모델의 현장적용을 위해 전라남도 해남군 금호방조제, 영암군 영산강 하구둑 방조제, 영암방조제의 배수갑문 콘크리트 구조물에서 콘크리트 분말시료를 채취하여 염화물 적정장치를 통해 분석하였다. 배수갑문은 Table 18과 같이 준공한 지 각각 15년, 18년, 30년이 경과한 구조물로서 설계 자료에 따르면 콘크리트 압축강도는 모두 21MPa이며, 콘크리트 피복두께는 각각 100, 90, 90mm이다. 간판대의 콘크리트 표면으로부터 5, 10, 15, 25, 35, 50mm 깊이에서 분말시료를 채취하였다.

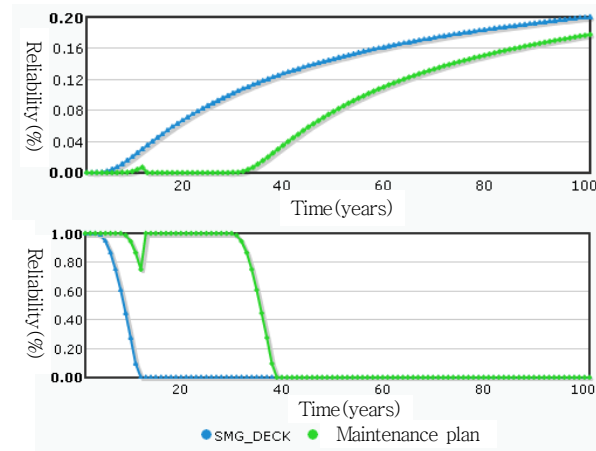


Fig. 10 Maintenance scenario application(before and after)

Table 18 Prediction results with applying suggested model in sea dikes unit : $\times 10^{-8}(\text{cm}^2/\text{s})$

Sea-Dikes	Kum-ho	Young-am	Young-san	
Completion year	1996	1993	1981	
Concrete Strength(MPa)	21	21	21	
Cover depth(mm)	100	90	90	
Chloride Coefficient (α)	2.3	1.6	2.2	
Diffusion coefficient	D_{co}	1.0	0.9	0.8
	D_{cr}	1.5	1.2	0.83
Prediction Life(yr)	7	6	1	

6.2 염화물함량 측정

염화물 함량은 4.3절의 염화물 적정기를 이용한 적정법에 의해 분석하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 금호방조제의 경우 깊이 5mm에서 콘크리트 중량대비 0.7%의 염화물함량을 보인 것으로 나타났다. 이는 2.2절에서 언급한 농도평형의 개념과 달리 Zhang의 연구와 같이 콘크리트내부 염화물 농도가 콘크리트 표면의 염화물 농도 C_{s0} 의 α 배로 축적되는 결과를 보였다(Zhang and Jin, 2011). Zhang은 건습반복조건하의 염화물의 이동은 콘크리트내의 공극의 포화도, 건습반복에서 습윤시간, 공극내의 증발산, 공극의 크기 등의 영향으로 콘크리트 내부 염화물 농도는 콘크리트 표면의 염화물 농도 C_{s0} 의 α 배로 축적되는 결과를 제시하였다. 공극내의 증발산의 영향으로 공극용액의 염화물 농도는 건습이 반복될수록 점점 높아질 수 있음을 수학적 모델링과 자싱(Jiaying) 향의 해수면 고도에 따른 염화물 실측결과를 보임으로서 증명하였다.

본 연구에서는 식 (3)의 예측기본모델에서 표면염화물 함량 $C_s(t)$ 를 αC_{s0} 향으로 대체하고 염화물 확산계수

$$D_{cl}(t) \text{를 Table 2의 첫 번째 식인 } D_{cl}(t) = D_r \cdot \left(\frac{t_r}{t}\right)^{-m}$$

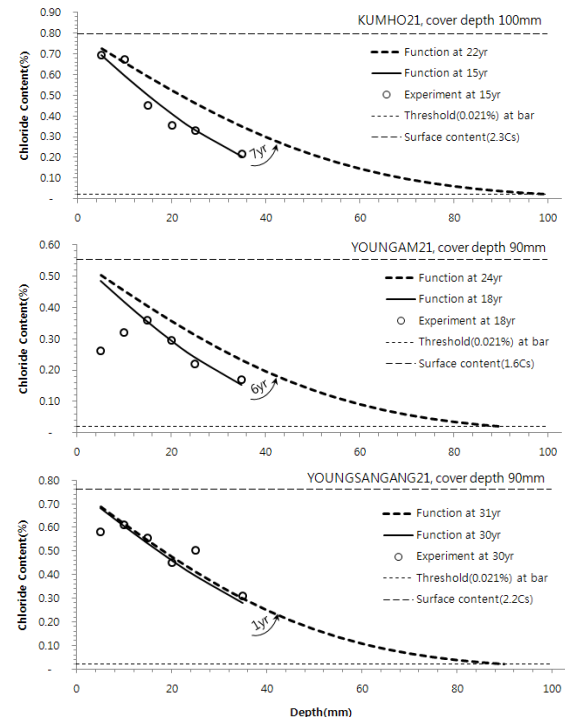


Fig. 11 Verification of prediction model with field applications.

로 적용함으로써 철근의 위치에서 염화물함량이 임계염화물함량에 도달할 시간을 추정하였다. 임계염화물함량에 도달될 시간을 잔존수명으로 표기하였으며, 배수갑문별 α 를 도출하여 Table 18과 같이 요약하였다. 깊이별 실측값과 가장 근사한 예측곡선으로 최적화하는데 황금분할(golden section)법을 적용하여 확산계수 D_{co} 를 도출하고, 철근이 위치한 깊이에서 임계염화물함량이 측정될 시점의 확산계수 D_{cr} 은 Table 2의 Maage 제안식을 적용하였으며 이 때 w/c는 설계 자료인 0.554를 적용하였다(Maage et al., 1996). 각 배수갑문에 적용하여 추정된 보수시점인 잔존수명을 Fig. 11과 같이 도시하였다.

6.3 시스템 적용

해양환경하의 철근콘크리트 구조물에서 보수시점이 도래했음을 확인했을 경우 보수 시나리오를 적용함으로써 구조물의 유지관리 방향을 정할 수 있다. 3.1.5절과 3.1.6 절의 단면복구재와 표면보호재의 해수노출 결과가 얻어지게 되는 시점에 이들 보수재의 효과를 일차적으로 검증하고 본 연구에서 개발된 시스템을 통해 보수시점, 효과 및 비용을 얻을 수 있을 것이다. 초기 개발 수치모델은 노출 실험 자료와 3개 구조물 적용결과에 따라 식 (7)로 수정되었다.

$$C(x,t) = \alpha C_{s0} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}(t) \cdot t}} \right) \right\} \quad (7)$$

αC_{s0} : 콘크리트내부 축적염화물 농도(%) (Zhang제안식)

$$D_{cl}(t) = D_r \cdot \left(\frac{t_r}{t} \right)^{-m} \quad (\text{Maage 제안식})$$

7. 결론

해양구조물의 보수시점을 예측하는 모델을 개발하였으며, 그 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- (1) 전위차 촉진실험에서 3종류의 표면보호재중 유기계에폭시 수지계인 S3의 차단효과가 가장 큰 것으로 나타났으며, 5종류의 단면복구재중 주성분이 폴리머시멘트모르타르인 R3가 염화물 침투저항성이 가장 큰 것으로 나타났다. 이어서 침투성폴리머 모르타르가 주성분인 R2가, 그리고 R5, R1, R4순

으로 나타났다.

- (2) 전위차촉진실험과 침지실험에서 예측한 염화물확산계수를 비교한 결과 두 가지 방법에서 동일하게 OPC30, TBC30, SRC30 순으로 나타났다.
- (3) 염화물침투예측 기본모델식을 $\alpha = (\text{건습반복조건하에서 콘크리트표면 염화물농도/표면염화물함량}(C_{so}))$, $D_{cl}(t) = D_r \cdot \left(\frac{t_r}{t} \right)^{-m}$ 로 개선함으로써 건습반복조건하에 있는 콘크리트에 적용할 수 있는 임계염화물함량에 도달될 시간을 추정할 수 있는 염화물 추정모델식을 개발하였다.
- (4) 개발모델식을 적용함으로써 5년간의 현장폭로실험결과를 통해 OPC30의 철근위치에서 임계염화물함량이 검출될 잔여기간이 62년 임을 도출하였다. SRC30은 59년, TBC30은 64년으로 나타났다.
- (5) 준공 후 30년 경과된 영산호의 콘크리트구조물에 개발식을 적용한 결과 철근위치에서 임계염화물함량이 검출될 잔여기간이 1년으로 예측되었으며, 준공 후 18년경과된 영암호는 6년, 준공 후 15년 경과된 금호호는 7년으로 나타나 염해방지조치가 필요한 것으로 분석되었다.
- (6) 보수시점에 유지보수시나리오를 도출할 수 있는 시스템을 웹기반으로 개발하였으며, 유지보수시나리오의 보수비용은 현재가치로 도출되도록 하고 보수효과제시를 위한 건전도 개념을 함께 도시되도록 개발하였다.

주로 국가중요사회간접자본인 해양콘크리트구조물의 효율적인 유지관리를 위해 본 시스템을 적용한다면 적기의 예산확보 및 최적관리를 통해 장수명화, 재해예방, 환경보전 등의 효과가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. AASHTO Designation T 277-83, "Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete", American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. ASTM C 1202-91, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration".
3. B. H Oh, S. Y. Jang and Y. S. Shin, "Corrosion Characteristics of Steel Reinforcements Induced by Internal Chlorides in Concrete and Determination of Chloride Thresholds", Journal of KCI, vol. 11, No. 3, 1999, pp.193-202. (in

- korean)
4. D. S. Choi and J. J. Choi, "Experimental Study on the Time-dependent Property of Chloride Diffusivity of Concrete" Journal of KSCE, vol. 29, No. 4A, 2009, pp.365-371. (in korean)
 5. H. J. Jung, G. S. Zi, J. S. Kong and J. G. Kang, "Durability Prediction for Concrete Structures Exposed to Chloride Attack Using a Bayesian Approach", Journal of KCI, vol. 20, No. 1, 2008, pp.77-88. (in korean)
 6. H. J. Jung, H. M. Park, J. S. Kong, G. S. Zi and G. S. Kim, "Development of a Successive LCC Model for Marine RC Structures Exposed to Chloride Attack on the Basis of Bayesian Approach", Journal of KCI, vol. 21, No. 3, 2009, pp.359-366. (in korean)
 7. H. W. Song, C. H. Lee and K. C. Lee, "A Study on Corrosion Potential of Cracked Concrete Beam According to Corrosion Resistance Assessment", Journal of KSMI, vol. 13, No. 1, 2009, pp.97-105. (in korean)
 8. H. W. Song, S. W. Pack and K. Y. Ann, "Dependent Chloride Transport Evaluation of Concrete Structures Exposed to Marine Environment", Journal of KCI, vol. 19, No. 5, 2007, pp.585-593. (in korean)
 9. Josef Trithart, "The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding", Cement and Concrete Research, vol. 19, No. 5, 1989, pp.683-691.
 10. Magne Maage, Steinar Helland, Ervin Poulsen, Oystein Vennesland and Jan Erik Carl, "Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment", ACI Materials Journal, vol. 93, No. 6, 1996, pp.602-608.
 11. Miguel A. Bermudez and Pilar Alaejos, "Models for Chloride Diffusion Coefficients of Concretes in Tidal Zone", ACI Materials Journal, vol. 107, No. 1, 2010, pp.3-11.
 12. N. Takeda, S. Sogo, Sakoda and T. Idemitsu, "An Experimental Study on Penetration of Chloride Ions into Concrete and Corrosion of Reinforcing Bars in Various Marine Environments", Journal of JSCE, vol. 40, No. 599, 1998, pp.91-104.
 13. S. H. Bae and J. G. Lee, "Durability Evaluation of Concrete Using Ternary Blended Cement", Journal of KSCE, vol. 27, No. 2A, 2007, pp.271-276. (in korean)
 14. S. J. Kwon and S. S. Park, "A Study on Estimation for Chloride Diffusivity in Cracked Concrete in Harbor Structures through Field Survey", Journal of KSCE, vol. 27, No. 5A, 2007, pp.745-752. (in korean)
 15. S. J. Kwon, H. W. Song and K. J. Byun, "A Study on Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete under Combined Deterioration", Journal of KCI, vol. 19, No. 3, 2007, pp.359-366. (in korean)
 16. S. J. Kwon, H. W. Song, K. J. Byun and C. K. Park, "Analysis of Chloride Penetration in Concrete with Mineral Admixtures using Neural Network Algorithm and Micro Modelling", Journal of KSCE, vol. 27, No. 1A, 2007, pp.117-129. (in korean)
 17. S. J. Kwon, S. S. Park and B. C. Ro, "Durability Evaluation of Inorganic-Impregnated Concrete Exposed to Long-Term Chloride Exposure Test", Journal of KCI, vol. 20, No. 3, 2008, pp.283-290. (in korean)
 18. S. J. Kwon, S. S. Park and U. J. Na, "Service Life Prediction based on Stochastic Approach for Cracked Concrete Structures exposed to Chloride attack", Journal of KSCE, vol. 27, No. 6A, 2007, pp.881-890. (in korean)
 19. S. J. Park, "The Effect of Entrained Air Contents on the Properties of Freeze-thaw Deterioration and Chloride Migration in Marine Concrete", Journal of KSMI, vol. 12, No. 5, 2008, pp.161-168. (in korean)
 20. S. K. Yang, D. S. Kim, T. S. Um, J. R. Lee and Katsuya Kono, "Study on the Critical Threshold Chloride Content for Steel Corrosion in Concrete with Various Cement Contents", Journal of KCI, vol. 20, No. 4, 2008, pp.415-421. (in korean)
 21. Weyers, R. E., Service Life Estimates (SHRP-S-668), Strategic Highway Research Program. National Research Council, 1993.
 22. Yi Zhang and Wei-Liang Jin, "Distribution of Chloride Accumulation in Marine Tidal Zone along Altitude". ACI Materials Journal, vol. 108, No. 5, 2011, pp.1-9.

Received : 06/25/2012

Revised : 10/22/2012

Accepted : 11/23/2012

요 지

실내축진실험과 동시에 현장폭로실험을 병행하였기 때문에 연차별 실험계획에 따라 최근 5년치의 현장실험체 분석을 수행하고 모델을 업그레이드하는 과정에서 모델 검증을 위해 준공된 지 30년 가량된 방조제의 배수갑문콘크리트의 염화물 침투프로파일을 분석하였다. Zhang의 연구결과에서 언급된 표면에 가까운 콘크리트내부 염화물 농도를 기본모델의 표면염화물농도 대신으로 적용하였다. 장기간 노출되는 실험체의 염화물 측정자료 분석에서 확산계수의 변화분석을 통하여 Maage의 제안식을 기본모델에 적용하였다. 이렇게 보완된 수정모델을 통하여 예측된 자료와 현장자료를 비교하고, 임계시점, 즉 보수시점을 도출함으로써 본 연구의 제안모델과 유지보수 시스템이 간만대 염화물 침투프로파일 추정과 적정보수 시점 및 비용 예측에 사용될 수 있음을 보였다.

핵심 용어 : 염화물 확산계수, 표면염화물함량, 임계염화물함량, 유지보수시점, 건습반복, 시스템