

장기폭로시험과 촉진시험에 근거한 염화물 함유량에 따른 철근콘크리트의 내구특성

Durability Characteristics of RC containing Different Chloride Contents based on Long Term Exposure Test and Accelerated Test

권 성 준*
Kwon, Seung-Jun

송 하 원**
Song, Ha-Won

신 수 철***
Sheen, Soo-Chul

변 근 주****
Byun, Keun-Joo

ABSTRACT

The concrete structures possessing good structural integrity can face durability problems due to deteriorations of concrete structures under various environmental conditions. The durability problems weaken the structural integrity in the long run. Especially, the excessive use of sea sand causes serious reinforcement corrosion and carbonation in the concrete structures. An accelerated test is often used to predict deterioration as a qualitative measure, but without long term exposure test results or understanding of the relationship between the accelerated test and the long term exposure test, the accelerated test result alone can not be used effectively as a quantitative measure.

In this paper, a methodology is proposed to predict the long term deteriorations, based on the result of the short-term accelerated test, of concrete containing different contents of chloride ions. Then, the correlation between two test results on the steel corrosion ratio and the carbonation depth is analyzed for concretes with different chloride contents.

1. 서 론

구조적 안전성이 확보된 콘크리트 구조물이라도 다양한 노출환경에 따른 열화작용에 의해 내구적 성능저하가 발생하며 결국은 시간의 증가에 따라 구조적인 손상으로 전파된다. 더욱이 골재부족에 따른 해사의 사용으로 인해 많은 콘크리트 구조물들이 철근의 부식과 콘크리트의 중성화 등의 내구성 저하의 문제를 야기하고 있는 실정이다.¹⁾ 일반적으로 이러한 열화작용을 예측할 때 상대적인 지표로서 촉진시험등이 수행되고 있으나 장기폭로자료의 부족, 상관관계에 대한 이해의 부족으로 독자적인 연구결과에 머무르거나 정성적인 비교의 수준에 머무르고 있다.

본 논문에서는 주된 열화인자를 염화물 이온으로 규정하고 촉진시험결과를 이용하여 장기폭로된 철근콘크리트 구조물에 대한 열화정도를 예측하는 방법을 제안하였다. 또 이를 이용하여 염화물 이온의 변화에 따른 철근 부식면적률과 중성화 깊이의 변화를 촉진시험과 장기폭로시험을 기준으로 분석하였으며 이에 대한 상관관계를 도출하였다.

2. 촉진시험과 장기폭로시험의 관계

일반적으로 촉진시험은 장기폭로시험에 비하여 짧은 시간에 행할 수 있는 장점이 있는 반면에 시편 간의 정성적인 열화저항성 비교로 국한되기 쉬워 실제 구조물의 열화정도를 경년변화에 따라 정량적으로 평가하기 어렵다. 장기폭로자료는 노출환경의 등급화를 통하여 구조물의 현장상태를 반영할 수 있는 조건이어야 하며 열화지배인자와 내부저항인자의 선정이 필요하다. 또한 장기폭로시험과 촉진시험의 대상이 같은 경우는 결과비교에 따른 촉진시험결과에 의한 열화정도의 정량적 평가가 가능하지만 그렇지 않을 경우는 촉진시험으로 장기간 폭로시험결과로부터 얻어지는 시간에 따른 열화정도를 예측하기는 매우 어렵다. 그림 1은 염해에 대한 촉진시험과 장기폭로시험의 상관관계 개요도를 나타낸다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

*** 정회원, 건설교통부 행정자치부 국가행정연수원, 사무관

**** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

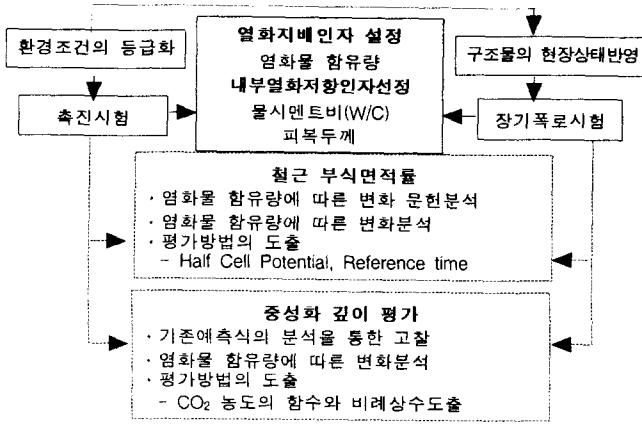


그림 1 염해에 대한 촉진시험과 장기폭로시험의 분석을 통한 상관관계 개요도

3. 염화물 함유량에 따른 내구특성평가

3.1 철근의 부식면적을 평가

내부열화저항인자를 W/C와 철근의 피복 두께로 고려하였으므로 W/C는 0.55, 0.56, 철근의 피복두께는 4.35~5cm인 경우로 제한하였으며 4주간의 촉진시험시 준치조건은 습도 $95 \pm 1\%$, 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지하였다.

표 1은 염화물 함유량에 대해 4주 촉진 시험결과와 10년과 15년의 장기폭로시험결과를 철근부식면적률에 대해 나타낸 것이다. 여기서 염화물 함유량은 (CI 중량/잔골재 건조중량)으로 정의한다.

표 1. 철근 부식면적률에 대한 촉진시험결과와 장기폭로시험결과

염화물 함유량(%)	부식면적률(%)
0.0	0.0
0.084	0.8
0.168	1.1
0.253	3.4
0.337	4.1
0.505	5.5

(a) 촉진시험결과(30일)

염화물 함유량(%)	부식면적률(%)	
	10년	15년
0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.00
0.04	0.10	0.10
0.10	0.10	0.20
0.20	0.30	0.80
0.50	1.20	1.90

(b) 장기폭로시험결과(10, 15년)²⁾

촉진시험시 동일한 W/C, 철근직경, 피복두께에서 철근의 부식속도는 염화물 함유량에 선형적으로 비례하므로³⁾ 선형회귀분석을 하였으며(그림2), 장기폭로시험결과로부터 부식면적률의 염화물 함유량과 시간에 따른 회귀분석결과를 촉진시험에 대해 식(1), 장기폭로시험에 대해 식(2)로 나타내었다.

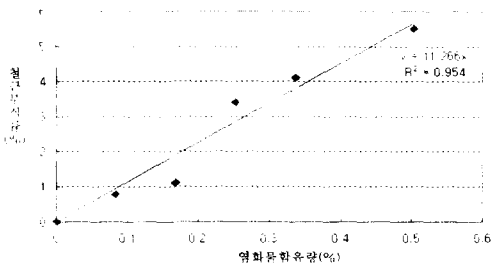


그림 2 철근부식에 대한 촉진시험결과

$$y(c, 28\text{day}) = 11.266 \cdot c \quad (1)$$

$$y(c, t) = [0.169 \cdot t + 0.00544 \cdot t^2] \cdot c \quad (2)$$

여기서 y는 부식면적률, c는 염화물 농도(%) t는 폭로년수를 나타내며 회귀분석결과, 촉진시험과 장기폭로시험의 염화물함유량이 동일할 경우, 촉진시험 4주와 동일한 부식면적률을 야기하는 장기폭로기간은 32.6년이었다.

한편 최근에는 Half Cell Potential(HCP)을 이용하여 철근의 부식가능성을 평가하는 기법이 많은데 초기 24시간내의 HCP의 급격한 변화를 제외하면 그림 3과 같이 염화물 함유량에 따른 HCP의 변화를 볼 수 있다. 촉진시험의 회귀분석식은 식(3)과 같으며 염화물 함유량에 따른 부식면적률을 나타내는 식(1)과 연관지어 식(4)처럼 HCP와 철근부식율과의 관계를 나타낼 수 있다. 한편 장기폭로시험기간과의 관계는 식(5)로 나타낸다.

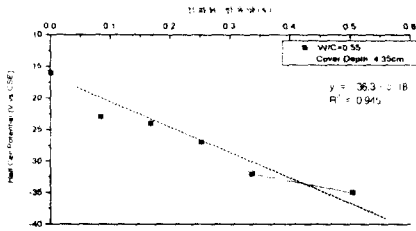


그림 3 HCP에 대한 촉진시험결과²⁾

$$\text{HCP}(V \text{ vs } \text{CSE}) = -36.3 \cdot c - 18 \quad (3)$$

$$y = 11.266 \cdot \left(\frac{-18 - \text{HPC}}{36.3} \right) \quad (4)$$

$$(-5.586 - 0.310\text{HCP})/c = [0.169t + 0.00544t^2]c \quad (5)$$

3.2 중성화 깊이 평가

촉진시험조건은 온도 $38 \pm 5^\circ\text{C}$, 습도 $55 \pm 10\%$, CO_2 농도 $5 \pm 0.5\%$ 로 하였고, 염화물 함유량을 주된 열화인자로 규정하였으며 W/C를 0.56과 0.62인 장기폭로시편과 W/C가 0.58인 촉진시험시편을 대상으로 하였다.

그림 4는 岸谷⁵⁾식과 비교한 장기폭로시험의 결과를, 그림 5에서는 Morinaga식⁶⁾과 비교한 촉진시험 결과를 나타내고 있는데 그림 4에서 중성화 깊이의 최대치가 이론치에 근접하고 시험평균치보다 안전측이므로 실측최대치인 ③, ④를 사용하여 중성화 속도범위를 평가하였다. 그림 5에서는 대상시편의 W/C가 0.58이므로 장기폭로시편의 W/C인 0.56, 0.62의 사이에 있으며 단순히 촉진시험결과만으로는 합리적인 평가를 할 수 없다고 판단되어 이론식을 상한치(W/C=0.58)로, 시험치를 하한치로 평가하였다. 각 회귀분석의 결과 및 중성화 속도계수를 표 4에 나타내었는데 염화물의 영향을 배제하기 위해 염화물 함유량이 0%인 시편을 대상으로 하였다.

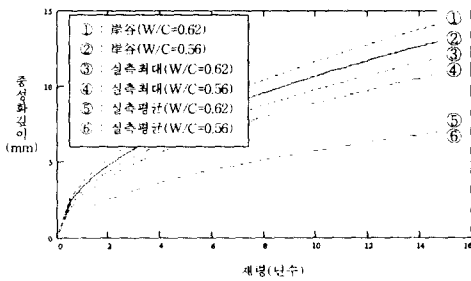


그림 4. 이론식과 비교한 중성화 장기폭로시험

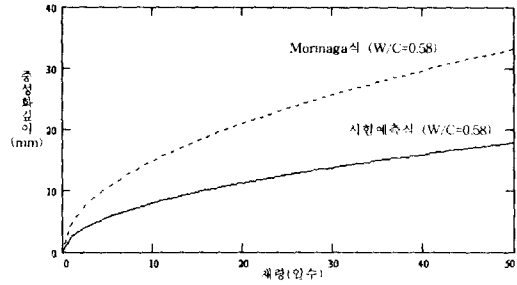


그림 5 이론식과 비교한 중성화 촉진시험

표 4 회귀분석결과와 중성화 속도계수

시험에 대한 회귀분석결과	장기폭로시험 (W/C=0.56, 0.62)		촉진시험 (W/C=0.58)	
	표준오차	상관계수	표준오차	상관계수
중성화속도계수 범위	0.001~0.081	0.999~1.000	1.969	0.920
평균 중성화속도계수	2.82~3.09(mm/year ^(1.7))		2.52~4.70 (mm/day ^(1.7))	
	2.960 (mm/year ^(1.7))		3.612 (mm/day ^(1.7))	

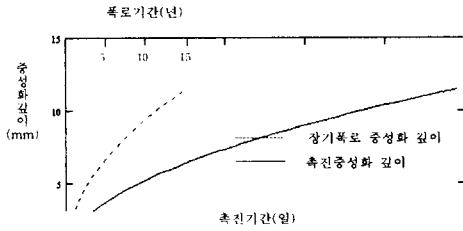
표 4의 평균중성화속도계수를 이용하여 촉진시험기간인 7주에 해당하는 중성화깊이와 장기폭로시험 기간인 15년에 해당하는 중성화 깊이를 동등하게 평가하기 위해서 비례상수를 도입하였으며 동일한 환경에서 중성화깊이는 유입되는 이산화탄소의 농도의 제곱근에 비례하므로¹⁾ 다른 농도로 촉진시험할 경우를 고려하여 본 실험의 농도인 5%를 기준값으로 정하였다. 식(6)에서는 염화물 함유량 0%일때의 촉진시험에 의해 장기폭로시험을 예측한 중성화깊이를 나타낸다.

$$C = K \cdot \sqrt{\frac{C_{\text{CO}_2}}{5}} \sqrt{t} \quad (6)$$

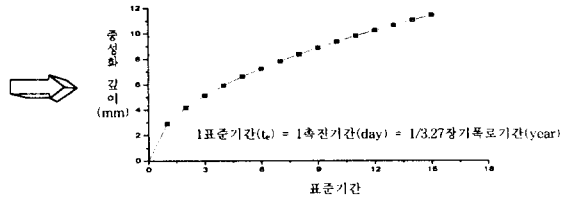
여기서 C는 촉진시험에 의해 장기폭로시험을 예측한 중성화 깊이(mm), K는 1.636 (중성화속도계수 3.612와 비례상수 0.453의 곱), C_{CO_2} 는 이산화탄소의 농도(%), t는 촉진기간(일수)이다.

철근부식면적의 상관관계에서는 촉진시험결과를 4주의 존치기간으로 고정시킨 후 장기폭로시험결과를 평가했으나 중성화 깊이의 상관관계에서는 촉진시험결과가 시간에 대한 함수로 나타나므로 촉진 시험기간과 장기폭로시험기간을 동일한 시간축에 나타내기 위해 시험기간의 비를 이용하여 표준기간을 도입하였다. 평가결과, 표준기간 1은 촉진기간 1일, 장기폭로기간 1/3.27년에 해당한다.

그림 6은 각각의 존치기간을 표준기간으로 환산하는 과정을 나타낸다.



a) 장기폭로시험과 축진시험의 관계



b) 표준기간에 따른 중성화 깊이의 변화

그림 6 존치기간과 표준기간과의 관계

한편 15년간의 장기폭로 시험결과로부터 염화물 함유량의 증가에 따른 중성화 깊이의 변화를 W/C가 0.56, 0.62인 시편을 대상으로 평가하였으며 경향성을 파악하기 위해 평균값을 사용하였다. 아래의 표 3는 장기폭로 시험결과 염화물 함유량에 따른 중성화 깊이의 할증율을 나타낸 것이며 이를 그림 7에 나타내었다. 한편 염화물은 함유량에 따라서 야기되는 중성화 깊이변화가 이산화탄소 영향에 독립적이라고 가정하면 염화물 함유량에 따른 중성화 깊이의 할증율(J)는 식(7)로 나타나고 이를 식(6)에 곱하면, 식(8)과 같이 염화물이 함유된 콘크리트가 장기폭로된 경우의 중성화깊이 산정식을 제안할 수 있다.

표 3 염화물의 함유량의 영향에 따른 중성화 깊이의 할증율

염화물의 농도(%)	중성화 깊이의 증가율
0.00	1
0.01	1.02
0.04	1.11
0.10	1.16
0.20	1.22
0.50	1.46

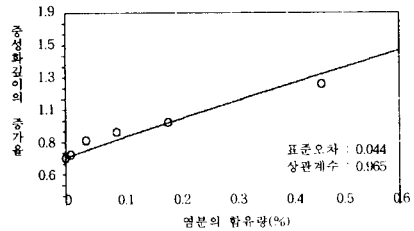


그림 7 염화물 함유량에 따른 중성화 깊이의 증가율

$$J(c) = c^{0.94} + 1 \quad (7)$$

$$C = K \cdot \sqrt{\frac{C_{CO_2}}{5}} \cdot J(c) \cdot \sqrt{t} \quad (8)$$

여기서 C(mm)는 염화물이 함유될 경우 축진시험으로 장기폭로를 예측한 중성화 깊이, K는 1.636, C_{CO_2} 는 축진중성화 농도(%), t는 축진일수, c는 염화물의 함유량(%)을 나타낸다.

4. 결론

다음은 본 연구결과 얻어진 결론이다.

- 1) 축진시험결과를 이용하여 장기폭로시험 결과를 예측할 수 있는 방법론적인 접근법을 제안하였다.
- 2) 동일한 염화물 함유량을 가진 콘크리트에서 습도 $95 \pm 1\%$, 온도 $20 \pm 2^\circ C$ 의 환경에서의 4주의 철근 부식면적률은 보통환경에서 32.6년에 해당하며 4주에 측정되는 Half Cell Potential(HCP)을 이용하여 장기폭로시험의 철근부식면적률을 평가하는 식을 제안하였다.
- 3) 온도 $38 \pm 5^\circ C$, 습도 $55 \pm 10\%$, CO_2 농도 $5 \pm 0.5\%$ 에서 염화물을 포함하고 있지 않은 콘크리트에 대해 1일의 축진기간은 보통환경에서 1/3.27년에 해당하는 중성화 깊이를 나타내며, 회귀분석을 통하여 염화물 함유량이 다른 콘크리트가 다른 CO_2 농도 환경하에서 장기폭로된 경우, 콘크리트의 중성화깊이를 평가할 수 있는 식을 제안하였다.

참고문헌

- 1) CEB Task Group 5.1, 5.2 (1997), New Approach to Durability Design, CEB, Sprint-Druck, Stuttgart, May
- 2) 건설교통부 국립건설시험소 (1998), 콘크리트 내구성에 관한 조사 연구, 12월
- 3) 小林 一輔, 白木亮司, 河合研至 (1990), 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の鹽化物, 硫酸化合物及アルカリ化合物の移動と濃縮, 콘크리트工学論文集, pp. 69~82
- 4) 건설교통부 (1999), 해사 및 일반간결재를 사용한 콘크리트의 품질 및 내구성향상기술, 4월
- 5) 和泉意登志, 喜多達夫, 前田熙信 (1986), 中性化, 技報堂出版
- 6) Morinaga (1991), "Prediction of Service Lives of Reinforced Concrete Buildings based on the Corrosion Rates of Reinforcing Steel," Durability of Building Materials and Components, E & F.N. Spon