

국내 도심지 콘크리트 교각 취약부의 탄산화 조사에 대한 연구

A Study on Survey of Carbonation for Sound, Cracked, and Joint Concrete in RC Column in Metropolitan City

권성준* 박상순** 남상혁*** 조호진****
Kwon, Seung Jun Park, Sang Sun Nam, Sang Hyuk Cho, Ho Jin

Abstract

The concrete structures in Metropolitan city are usually exposed to carbonation and corrosion of embedded steel occurs due to the carbonation. In inspection and diagnosis of concrete structures, carbonation depth in sound concrete is mainly evaluated and service life for concrete structure is predicted based on the result. Generally, however, mass concrete structures such as columns have construction joint for suitable placing and also have cracks in early-age. In this study, carbonation depth in RC columns used for 20 years in metropolitan city is evaluated and also analyzed by considering the local conditions like sound, cracked, and joint area. The carbonation depth in cracked and joint area is more rapid than that in sound area, and it is thought to be more desirable to consider this effect in concrete structures with small cover depth. Furthermore, the technique for carbonation prediction in cracked concrete is derived in terms of crack width and the results from this technique are verified by comparing those from previous research.

요 지

대도시의 콘크리트 구조물은 주로 탄산화에 노출되고 이에따라 매립된 철근은 시간이 경과함에 따라 부식이 발생한다. 콘크리트 구조물의 조사 및 진단에서, 건전부의 탄산화 깊이가 주로 평가되며, 이를 근거로 내구수명이 평가된다. 그러나 일반적으로 교각과 같은 매스 콘크리트 구조물에서는 적절한 타설을 위하여 조인트를 설치하게 되며, 초기재령에서 균열이 쉽게 발생한다. 본 연구에서는 20년 경과된 국내 대도시의 교각 구조물을 대상으로 탄산화 깊이를 평가하였으며, 건전부, 균열부, 시공이음부와 같은 국부적인 환경을 고려하여 탄산화 거동을 분석하였다. 균열부 및 시공이음부의 탄산화 깊이는 건전부에 비하여 크게 증가하였으며, 피복두께가 작은 구조물에 대해서는 이러한 영향을 고려하는 것이 바람직하게 평가되었다. 또한 균열폭의 함수로 균열부 탄산화 깊이를 예측할 수 있는 기법을 제시하였으며, 기존의 실태조사 결과와 비교하여 그 적용성을 검증하였다.

Keywords : Carbonation, Concrete, Service life, Crack, Construction joint

핵심 용어 : 탄산화, 콘크리트, 내구수명, 균열, 시공이음

* 정희원, 비엔티 엔지니어링 차장, 공학박사

** 정희원, 비엔티 엔지니어링 부장, 공학박사

*** 정희원, 연세대학교 토목공학과 연구교수, 공학박사

**** 정희원, 대림산업(주) 기술연구소 연구원, 공학박사

E-mail : jjuni@cmme.yonsei.ac.kr 031-478-5212

•본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2007년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트 구조물은 구조적인 안전성을 확보하더라도 사용기간의 증가에 따라 내구적인 성능저하가 발생한다. 최근들어 대도시의 콘크리트 구조물은 산성비와 상대적으로 높은 이산화탄소의 영향으로 탄산화가 심각하게 진행되고 있는 실정이다. 탄산화란 외부의 이산화탄소의 유입으로 인해 콘크리트 내부 공극수의 pH가 감소하는 현상이며, 염해와 더불어 가장 지배적인 열화현상으로 분류된다.

탄산화에 대한 연구는 경화된 콘크리트를 가정하여 간단한 반경험식의 함수 형태로 제안되었으며(Kishitani, 1963; 和泉 등 1986), 최근들어 물리-화학적 반응을 고려한 해석기법이 제안되고 있는 실정이다(Ishida and Maekawa, 2001; Papadakis et al., 1989; Papadakis et al., 1991a,b). 건전부 콘크리트에 대한 연구 뿐 아니라 균열부 콘크리트와 같은 취약부 콘크리트에서도 해석기법이 제안되는 수준으로 발전하고 있지만(권성준 등, 2004; Song et al., 2006), 국내 대도시의 취약부(균열부, 콜드조인트) 콘크리트의 탄산화 실태조사는 거의 이루어지지 않는 실정이다. 국내의 탄산화 실태조사 결과는 주로 지하철 박스구조물 같은 지하구조물에서 이루어지고 있으며, 주로 건전부에 대한 탄산화 깊이가 주를 이루고 있다(시설안전기술공단, 1999; 김무한 등, 1988).

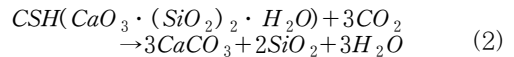
본 연구에서는 국내 대도시의 교각 구조물을 대상으로 하여, 탄산화 깊이를 조사하였으며, 건전부 뿐 아니라 타설이음부 및 균열부의 탄산화 깊이를 조사하였다. 타설이음부 및 균열부의 탄산화 깊이는 건전부에 비하여 크게 증가하였으며, 이 결과를 이용하여 균열을 가진 콘크리트의 탄산화 깊이 예측식을 균열폭의 함수로 제안하였다.

2. 균열부 및 타설이음부 콘크리트에서의 탄산화 거동

2.1 건전부 콘크리트에서의 탄산화 거동

탄산화는 외부의 이산화탄소와 내부의 수화물중

23~26%정도의 체적을 차지하는 수산화칼슘의 반응에 의해서 탄산칼슘을 형성하고 이에따라 공극수의 pH가 감소하는 물리-화학적 현상을 의미한다. 일반적으로 기존의 연구에서는 이산화탄소와 수산화칼슘의 반응을 탄산화라고, 이산화탄소를 포함한 약산과 CSH겔의 반응을 포함한 pH의 저감을 중성화라고 한다(和泉 등 1986). 식(1)에서는 탄산화의 화학반응을, 식(1)을 포함한 식(2)에서는 중성화의 화학반응을 나타내고 있다. 본 논문에서는 이산화탄소와 수산화칼슘의 반응만을 대상으로 하였으므로, 탄산화라는 용어를 사용하였다.



탄산화의 진행에 따라 콘크리트는 표면장력차이에 기인한 포화도 및 확산계수의 변화가 발생하고 공극구조 역시 일정부분 변화하는 것으로 알려져 있으나(Saeki et al., 1991; Ngala and Page, 1997), 본 연구에서는 탄산화 깊이의 변동성에 국한하여 분석하기로 한다. 건전부 콘크리트에서는 이산화탄소의 유입이 되는 주된 통로는 공극률과 천이영역으로 구성되는 것이 일반적이며, 주로 공극률과 포화도의 함수로 구현되고 있다(Ishida and Maekawa, 2001; 권성준 등, 2005). Fig. 1에서는 탄산화에 따른 철근부식의 개요도를 나타내고 있다.

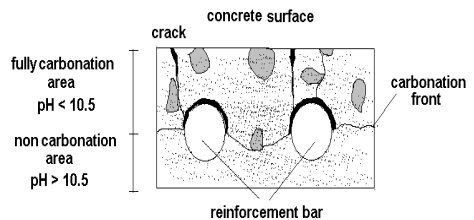


Fig. 1 탄산화에 따른 철근부식 개요도

2.2 콜드조인트에서의 탄산화 거동

콘크리트는 시멘트와 물이 접촉된 직후부터 수화반

응을 개시하는데 그 초기단계에서의 수화반응 정도는 작고, 타설 후 몇 시간 동안은 굳지않은 콘크리트의 성상이 크게 변화하지 않는다. 굳지 않은 콘크리트의 성상의 변화가 크면 배합에서 타설까지의 시간동안 취급이 곤란하기 때문에 시멘트의 초기응결이 일정시간 늦어지게끔 시멘트 품질을 조정하는 것이 일반적이다. 이때 계획된 콘크리트의 타설, 다짐이 어떤 시공상의 문제에 의해 늦어지면 이미 타설된 콘크리트가 벌써 굳어지기 시작해 진동기에 의한 다짐에 의해서도 재유동화 하지 않고, 신·구 콘크리트와 완전히 일체되지 않는 면이 생길 위험성이 크게 된다. 일반적으로는 이러한 면을 콜드 조인트(cold joint)라고 한다.

일반적으로 콜드조인트가 발생한 부위는 구조적, 내구적인 성능저하가 빠르게 발생하는데, Table 1에서는 콜드조인트 발생에 따른 악영향을 나타내고 있다.

내구적인 관점에서는 콜드조인트 부재에서 탄산화 및 염해의 증가가 더욱 가속화된다. 그 이유는 일체화된 구조물의 경우 하나의 겉보기 확산계수로 인해 물질이동을 설명할 수 있으나, 동일한 확산계수를 가진 콘크리트라 하더라도 타설층사이의 레이턴스(laitance) 등에 기인한 천이영역을 통해 유입하는 확산이 추가로 발생하기 때문이다. 콜드조인트부에서의 탄산화 연구는 주로 실험조사 결과를 통한 접근방법이 연구되고 있는 실정이다. 콜드조인트가 발생하면, 일체타설부에 비하여, 탄산화 속도계수는 빠르게 증가하고, 더 작은 균열폭에서도 콜드조인트 부에서는 발청이 빠르게 발생한다고 알려져 있다(阿部, 1998; 日本土木學會, 2000). 일본토목학회의 경우, 내구성 저하의 요인으로 평가하고 있으며, 면처리 방법을 분류하여 내구성 저하를 평가하고 있다(日本土木學會, 1995). Fig. 2에서는 콜드조인트의 발생개념에 대하여 나타내고 있다.

Table 1 콜드조인트 발생에 따른 영향(日本土木學會, 2000)

구조물 성능	영향
내하성능	탈락, 전단저항 저하
공간성능	누수, 소음
내구성능	투수, 통기에 의한 강재 부식
미관	외관, 도장 장애, 타일 균열, 들뜸, 박락

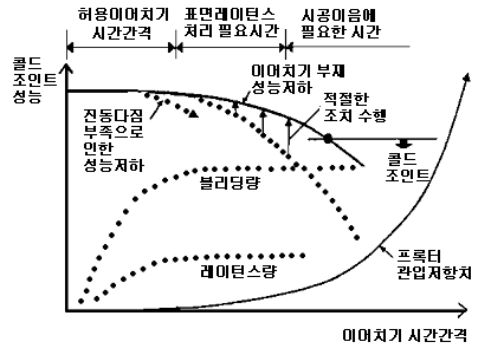


Fig. 2 콜드조인트의 발생 개요도(日本土木學會, 2000)

2.3 균열부에서의 탄산화 거동

균열부의 경우, 콘크리트의 대표체적 내에서 독립된 열화인자의 통로가 발생하므로 내구적인 취약점을 보이게 된다. 일반적으로 촉진탄산화 또는 신타조사를 통하여, 균열부의 탄산화 깊이를 도출하며, 탄산화 속도계수를 균열폭의 함수로 고려하여 사용하기도 한다(阿部, 1998). 최근들어 균열폭과 탄산화에 대한 연구가 집중되고 있는데, 개념적인 수준의 접근이거나(Isgor and Razaqpur, 2004), 단일 균열폭과 대표체적의 관계를 이용한 열역학적 연성모델이 제시되고 있지만(권성준 등, 2005; Song et al., 2006), 국내에서 광범위한 신타조사를 통한 관계는 정립되지 않은 수준이다.

Fig. 3에서는 타설이음부 및 균열부의 탄산화 거동에 대하여 나타내고 있다.

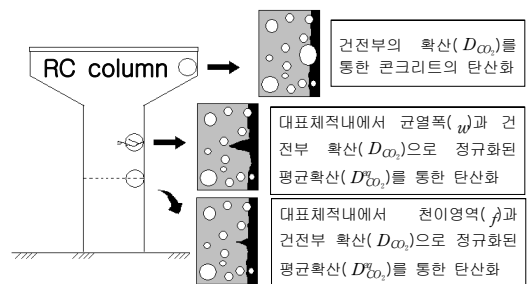


Fig. 3 타설이음부 및 균열부 탄산화 거동의 개요

3. 실태 조사의 개요

3.1 노출 환경의 분석

대상 구조물이 노출된 대도시 환경은 교통량이 밀집된 지역이므로 이산화탄소의 농도는 상대적으로 높으며(300ppm이상), 동해일수는 20년간 -5°C 이하인 날이 1년간 평균 25일 전후로 평가되었다. 연평균 기온은 12.2°C 였으며, 습도는 69%로 측정되었다. 적절한 습도 및 높은 이산화탄소는 탄산화가 진행되기에 좋은 조건을 가지고 있으므로(CEB, 1992), 구조물의 유지관리를 위하여 주기적인 탄산화 평가가 필요하다고 할 수 있다. Table 2에서는 대상구조물의 노출환경을 요약하였다.

3.2 대상 구조물의 제원

대상구조물은 공용기간 20년이 경과한 구조물로서, T형 콘크리트 교각을 대상으로 하였다. 설계강도는 24MPa이었으며, 시공중 발생한 균열이 0.1~0.2mm 두께로 발생하였다. 일부 차량과의 충돌로 발생한 손상 균열이 있었으나 본 연구에서는 시공중 발생한 균열을 대상으로 하였다. 한편 시공시 사용된 배합을 확보할 수 없었으므로, 비슷한 강도 영역에서의 배합을 가정하여 연구에 사용하였다. Table 3에서는 대상 구조물의 배합표를 나타내고 있으며 Fig. 4에서는 대상구조물 전경 및 균열 현황을 나타내고 있다.

한편, 탄산화 깊이 측정시에는 습윤면 또는 단면이 손상된 부위를 제외하고, 교각의 표면을 쪼아낸 후, 페놀프탈레인 변색법 및 0.05mm 단위 디지털 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 탄산화 깊이를 측정하였다.

Table 2 대상 구조물의 노출환경

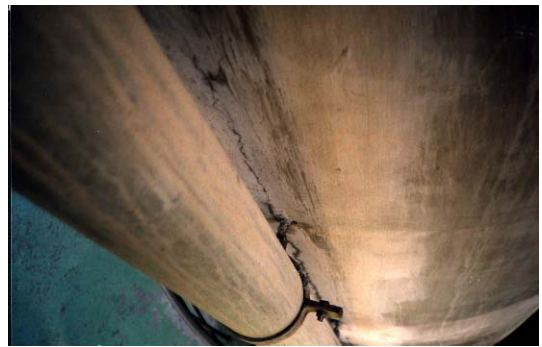
이산화탄소 농도	평균 습도	평균온도	특징
300ppm 이상	69%	12.2 $^{\circ}\text{C}$	· 하부구조인 교각이므로 비교적 강수의 영향을 안받음

Table 3 교각의 콘크리트 배합

강도	시멘트	Gmax	W/C	W	C	잔골재	굵은 골재
24MPa	1종	25mm	0.55	169	327	663	1173



(a) 대상구조물 전경



(b) 대상 구조물의 균열현황

Fig. 4 대상구조물 전경 및 균열현황

외관조사시 타설이음부와 콜드조인트부의 명확한 차이를 알 수 없었으므로, 타설이음부 중 미관손상이 심한 곳을 대상으로 탄산화 깊이를 측정하였다.

4. 대상 탄산화 구조물의 탄산화 거동 분석

건전부에 대해서는 55개소를 균열부에서는 24개소를, 타설이음부에서는 32개소를 평가하였으며 그 결과는 Table 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 탄산화 깊이가 평균값은 건전부가 2.07mm, 균열부에서는 4.33mm, 타설이음부에서는 3.05mm로 평가되었으며, 건전부에 비하여 취약부(균열부, 타설이음부)에서는 탄산화 깊이가 증가함을 알 수 있었다. 일반적인 탄산화 거동에 비하여, 낮은 탄산화 진행을 보이고 있었는데, 주기적인 강우로 인한 표면의 높은 상대습도, 실내에 비해서 낮은 이산화탄소 농도에 기인한다고 할 수 있다.

Table 4 탄산화 깊이 측정결과(20년 경과후)

위치	평균	표준편차	변동계수	표본수
건전부	2.07	0.248	12%	55
균열부 (0.1~0.2mm)	4.33	0.649	15%	24
타설이음부	3.05	0.488	16%	32

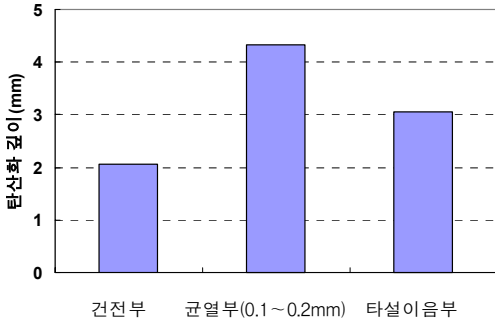


Fig. 5 측정위치에 따른 탄산화 깊이의 변화

균열폭은 0.1~0.2mm로 측정되었는데, 정확하게 분류하기 어려웠으므로 균열폭의 함수로 구현할 수 없었다. 설계피복두께는 6.75cm로 탄산화에 대하여 매우 안전한 수준이라고 할 수 있지만 균열부 및 타설이음부에서의 탄산화 진행은 건전부에 비하여 매우 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있다. 구조적으로 중요한 단면 또는 주철근 외부에 폐합스터럽이 있는 경우는 타설이음부 및 균열부의 탄산화 증가를 고려하는 것이 바람직하다.

5. 취약부 콘크리트 평가기법의 제안

5.1 취약부 탄산화 깊이의 조사

탄산화 깊이 예측은 주로 탄산화 속도계수를 이용하여 예측한다. 실태조사 결과를 통하여 도출된 건전부 탄산화 속도계수를 A_1 , 콜드조인트의 탄산화 속도계수를 A_2 , 균열부(균열폭 0.1~0.2mm)의 탄산화 속도계수를 A_3 라고 하면, Table 5와 같이 건전부 및 취약부의 탄산화 속도계수를 정리할 수 있다. Table 4의 결과를 이용하여 균열부의 탄산화 예측식은 식(1)로, 타설이음부의 탄산화 예측식은 식(2)로 나타낼

Table 5 건전부 및 취약부 콘크리트의 탄산화 속도계수

위치	경과년수 (년수)	탄산화 깊이(mm)	탄산화 속도계수	보정계수
건전부	20	C_1 2.07	A_1 0.4628	B_1 1.000
균열부 (0.1~0.2mm)	20	C_2 4.33	A_3 0.9682	B_2 2.092
타설이음부	20	C_3 3.05	A_2 0.6820	B_3 1.473

수 있다.

$$C_2 = A_1 \cdot B_2 \sqrt{T} \quad (3)$$

$$C_3 = A_1 \cdot B_3 \sqrt{T} \quad (4)$$

여기서, C_2 및 C_3 는 균열부 및 타설이음부의 탄산화 깊이, T 는 사용기간을 나타낸다. 한편, 도출된 결과를 이용하여 탄산화 속도식을 구현한 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

본 연구에서는 대도시의 설계강도 24MPa인 콘크리트를 대상으로 도출하였는데, 강도특성을 고려한 콘크리트 취약부 탄산화 예측역시 본 연구와 같은 조사 방법을 통하여 가능할 것으로 예상된다. 일반적으로 일본에서 연구된 반경험식 수준의 탄산화 예측식이 국내의 실태조사에 사용되고 있지만, 환경조건에 따른 오차가 크게 발생하므로, 실태조사에 근거한 탄산화 예측식을 사용하는 것이 더욱 합리적이라고 할 수 있다. 본 연구결과를 이용한 취약부 콘크리트의 탄산화 예측기법은 Fig. 7과 같이 제안할 수 있다.

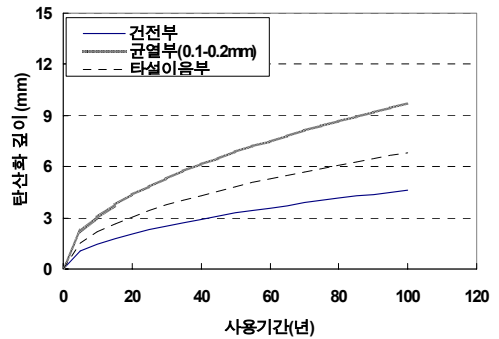


Fig. 6 대상 교각의 탄산화 속도

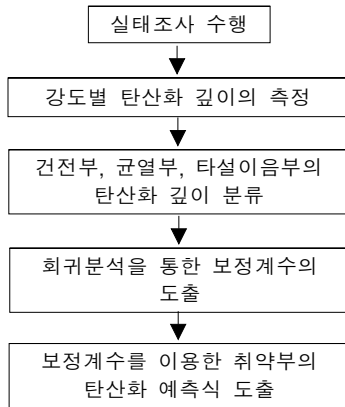


Fig. 7 실태조사 결과를 이용한 취약부 콘크리트의 탄산화 깊이식의 제안

5.2 균열폭을 고려한 탄산화 깊이 예측식의 도출

초기재령에서 발생한 비구조적 균열은 시간이 경과함에 따라 하중에 의해 진전되기도 하고 때로는 자연적으로 감소(auto healing)하기도 한다. 일반적으로 측정당시의 균열폭을 기준으로 하게 되는데, 탄산화 깊이는 $\sqrt{\text{균열폭}}$ 에 비례하는 것으로 알려져 있다(阿部, 1988; 依田, 1979). 본 연구에서 측정된 균열폭이 0.1~0.2mm 이므로, 0.15mm로 평균한뒤, 건전부의 탄산화 깊이를 고려하면 식(5)과 같이 균열폭에 따른 탄산화 깊이를 예측할 수 있다. 실내실험을 통하여 공시체에 하중을 재하함으로써 유도한 균열은 (Song et al., 2006) 비교적 그 폭을 명확히 측정할 있으며, 탄산화 거동을 명확히 알 수 있으나, 20년이 경과한 구조물에서의 정확한 균열폭을 측정하기가 어려웠으므로, 일반적으로 허용균열폭 이하인 균열폭 범위(0.1~0.2mm)를 대상으로 한 것이다.

$$C_2 = (2.8195 \cdot \sqrt{W+1}) \cdot A_1 \cdot \sqrt{T} \quad (5)$$

여기서, W 는 균열폭(mm), A_1 은 건전부의 탄산화 속도계수, T 는 사용기간(년)을 나타낸다.

기존의 실태조사결과와의 비교를 위하여 20~25 MPa 콘크리트를 대상으로 대략 25년 경과후 균열폭

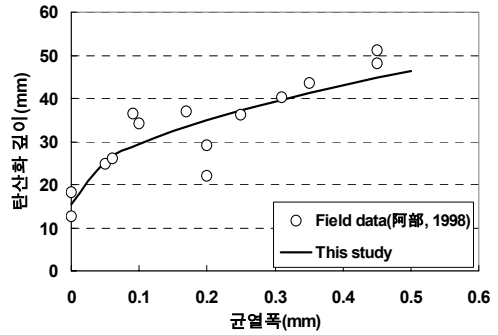


Fig. 8 예측기법과 실태조사결과와의 비교

과 탄산화 깊이와의 관계를 조사하였다(阿部, 1998). 실태조사로부터 건전부(균열폭 0.0mm)에서의 탄산화 속도계수(A_1)는 2.53mm/year^{0.5}로 평가되었으며, 식(5)를 이용하여 균열폭과의 탄산화 깊이 관계를 도출한 결과는 Fig. 8과 같다.

건전부의 탄산화 깊이를 실태조사를 통하여 도출하면, 균열부의 탄산화 깊이를 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

국내 도심지 콘크리트 교각 취약부의 탄산화 조사에 대한 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 교각구조물의 실태조사 결과를 이용하여 건전부 뿐 아니라 균열부 및 타설이음부의 탄산화 깊이를 평가하였으며, 탄산화 속도계수의 비를 도출하였다.
- 2) 실태조사 결과, 도출된 탄산화 속도계수는 균열부(0.1~0.2mm)에서는 2.092배, 타설이음부에서는 1.473배 빠르게 진행되고 있음을 알 수 있었으며, 중요부재 또는 피복두께가 작은 부재에서의 취약부(균열부 및 타설이음부)는 이러한 영향을 고려하는 것이 바람직함을 알 수 있다.
- 3) 탄산화 속도계수비(균열부/건전부)와 균열폭과의 관계를 이용하여, 균열폭에 따른 탄산화 깊이 예측식을 제안하였으며, 실태조사결과와의 비교를 수행하였다. 제안된 예측식은 균열폭의 증가에 따

라 변화하는 탄산화 깊이를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. 권성준, 송하원, 변근주, 이승훈, "균열을 가진 초기재령 콘크리트의 탄산화 해석", 대한 토목학회 논문집, 제24권 5-A호, 2004. 9, pp.1011-1022.
2. 김무한, 김성근, "철근부식에 의한 국내 철근콘크리트 조 아파트 구조물의 잔존수명 검토에 관한 연구", 한국콘크리트 학회 학술발표회, Vol. 10, No. 2. 1988, pp.223-228.
3. 시설안전기술공단, 콘크리트 내구성 평가절차 수립, "연구보고서", 1999.
4. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., "Reaction Engineering Approach to the Problem of Concrete Carbonation," J. of AIChE, Vol. 35, No. 1989. 10, pp.1639-1650.
5. Papadakis, V.G., Vayenas, C. G., and Fardis, M.N., "Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation," ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 4, 1991a, pp.363-373.
6. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 8, No. 2, 1991b, pp.186-196.
7. Saeki, T., Ohga, H., and Nagataki, S., "Change in Micro-Structure of Concrete due to Carbonation", Concrete library of JSCE, No. 18, 1991, pp.1-11.
8. Song, H.W., Kwon, S.J., Byun, K.J., and Park, C.K., "Predicting Carbonation in Early-Aged Cracked Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 36, No. 5, May 2006, pp.979~989.
9. CEB, Durable Concrete Structures, CEB Design Guide, Thomas Telford, UK, 1992, pp.3-7.
10. Ishida, T. and Maekawa, K., "Modeling of PH Profile in Pore Water Based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory", Concrete Library of JSCE, No. 37, 2001, pp.151-166.
11. Isgor, O.B. and Razaqpur, A.G., "Finite Element Modeling of Coupled Heat Transfer, Moisture Transfer and Carbonation Processes in Concrete Structures", Cement and Concrete Composites, Vol. 26, No. 1, 2004, pp.57-73.
12. Kishitani, K., Durability of Reinforced Concrete, Kibodang Pres., 1963.
13. Ngala, V.T. and Page, C.L., "Effects of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hydrated Cement Paste", Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 7, 1997, pp.995-1007.
14. 依田影彦, きれつゝの發生に伴う障害 3 耐久性の低下, 建築雑誌, Vol. 94, No. 1155, 1979, pp.16-17.
15. 阿部保彦, "ひび割れ幅がコンクリートの中性化深さに及ぼす影響に関する文献調査結果", 콘크리트構造物のリハビリテーションに 關するシンポジウム論文集, 1998.
16. 日本土木學會, 콘크리트構造物におけるコールドジョイント問題と對策, 土木學會, 콘크리트 라이브러리 103, 2000.
17. 日本土木學會, 콘크리트構造物의 耐久性設計指針 (案), 콘크리트 라이브러리, 第82号, 1995. 11.
18. 和泉意登志, 喜多達夫, 前田熙信, 中性化, 技報堂出版, 1986.

(접수일자 : 2006년 6월 28일)