

신뢰성 해석을 통한 탄산화에 노출된 타설이음부 및 균열부 콘크리트의 내구수명 평가

A Service Life Prediction for Joint and Cracked Concrete Exposed to Carbonation Based on Stochastic Approach

권 성 준* 박 상 순** 이 상 민***
Kwon, Seung-Jun Park, Sang-Sun Lee, Sang-Min

ABSTRACT

In this study, field survey of carbonation for RC column in city is carried out and carbonation behavior in sound, joint, and cracked concrete is also analyzed. Furthermore, probability of durability failure with time is calculated through considering probability variables such as concrete cover depth and carbonation depth which are obtained from field survey. The probability of durability failure in cracked concrete with considering crack width and time is also calculated and service life is predicted based on intended failure probability in domestic specification. Through this study, it is known that service life in a RC column is evaluated differently for local conditions and each service life is rapidly decreased with decrease in cover depth and increase in crack width.

1. 서 론

대도시에서 주로 발생하는 탄산화는 사용기간의 증가에 따라 철근부식이 발생하며, 구조물의 성능저하로 진전되는 것이 일반적이다. 하나의 RC 구조물이라 하더라도, 콘크리트의 특성상 건전부 뿐 아니라 타설이음부 또는 균열부와 같은 취약부가 발생하기가 쉽지만, 진단시에는 건전부만을 대상으로 탄산화 거동을 분석하고 있다.

본 연구에서는 대도시 옥상구간에 존치하는 RC 기둥을 대상으로 탄산화 실태조사를 수행하여, 건전부, 균열부, 타설이음부에 대한 탄산화 거동을 분석하였다. 이후 각각의 탄산화 깊이와 실태조사 결과 측정된 피복두께를 확률변수로 설정하여, 시간에 따라 증가하는 내구적 파괴확률을 분석하였다. 한편 균열부 콘크리트의 탄산화 확률분포에 대해서는 균열폭과 사용기간의 증가에 따라 내구적 파괴확률을 분석하였으며, 국내시방서의 목표내구적 파괴확률을 기준으로 내구수명을 평가하였다. 동일한 부재라 하더라도 다양한 국부적인 환경에서 내구수명은 다르게 평가되었으며, 피복두께가 낮고 균열폭이 큰 경우에는 매우 빠르게 내구수명이 감소함을 알 수 있었다.

* 정회원, 비엔티 엔지니어링 기술연구소, 차장, 공학박사

** 정회원, 비엔티 엔지니어링 기술연구소, 부장, 공학박사

*** 정회원, 비엔티 엔지니어링 기술연구소, 대표이사, 공학박사

2. 건전부, 균열부 및 타설이음부에서의 탄산화 속도평가

2.1 실태조사의 개요

대상구조물은 국내 대도시에 있는 RC 교각으로 준공후 20년간 사용되고 있는 구조물이다. 시공당시의 정확한 배합은 알 수 없었으나, 설계강도는 24MPa, 반발경도에 의한 환산 강도값은 26~30MPa의 범위를 나타내었다. 표 1에서는 대상구조물의 노출환경을 나타내고 있으며, 탄산화 깊이 측정시 페놀프탈레인 1% 용액과 디지털 버어니어 캘리퍼스를 사용하여 0.05mm 단위로 측정하였다.

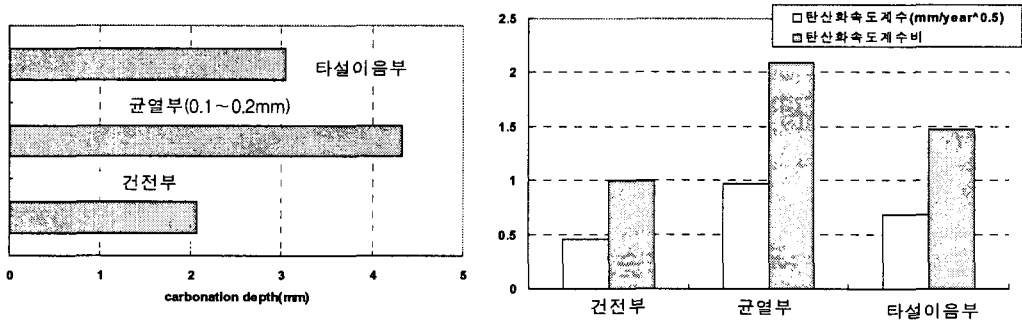
표 1 대상 구조물의 노출환경

| 이산화탄소 농도 | 평균습도 | 평균온도 | 특징 |
|-----------|------|-------|-------------------------------|
| 300ppm 이상 | 69% | 12.2℃ | · 하부구조인 교각이므로 비교적 강수의 영향을 안받음 |

대상구조물인 RC 교각은 연직방향으로 0.1~0.2mm의 균열폭이 존재하였으며, 타설이음부를 가지고 있었으므로, 건전부 뿐 아니라 균열부 및 타설이음부에도 탄산화 깊이를 측정하였다. 균열부의 탄산화 깊이 측정시, 균열면을 끝을 이용하여 쪼아낸 후 탄산화 깊이를 측정하였으며, 타설이음부에 대해서는 최대한 신구콘크리트의 표면차이가 없는 부위를 기준으로 하여, 표면을 쪼아낸 후 타설이음면의 탄산화 깊이를 측정하였다.

2.2 대상 구조물의 탄산화 깊이 분포

RC 교각의 경우, 동일한 배합을 가지고 있다 하더라도, 시공중 발생한 균열부, 타설이음부 등을 가지게 되며, 이러한 취약부에서 발생한 탄산화 깊이는 건전부에 비하여 크게 증가되는 것으로 알려져 있다. 그림 1에서는 대상구조물의 탄산화 측정결과를 나타내고 있는데, 하부의 잦은 강우 및 상대적으로 높은 습도로 인해, 탄산화 깊이는 매우 낮은 수준으로 측정되었다. 한편 균열부의 탄산화 깊이는 균열폭 0.1~0.2mm를 대상으로 하였으며, 정확한 균열폭을 측정하기가 어려웠다.



(a) 평가된 탄산화 깊이 분포

(b) 탄산화 속도계수 및 비율

그림 1 대상 구조물의 탄산화 깊이 및 특성

3 확률론을 이용한 대상구조물의 내구수명평가방법

3.1 내구적 파괴확률식의 구성

본 장에서는 탄산화에 따른 내구적 파괴확률을 산정하기 위해 건전부, 균열부, 타설이음부의 탄산화 속도식을 실태조사결과를 통하여 식(1)~(3)과 같이 도출하였다.

$$\text{건전부} \quad C = 0.4628 \sqrt{T} \quad (1)$$

$$\text{균열부} \quad C = 0.9682 \sqrt{T} \quad (2)$$

$$\text{타설이음부} \quad C = 0.6820 \sqrt{T} \quad (3)$$

여기서, C 는 탄산화 깊이(mm)를, T 는 사용기간(년)을 나타낸다.

阿部(1999)의 연구에 의하면 탄산화 깊이는 균열폭의 제곱근에 비례하게 증가한다고 알려져 있으므로, 균열부의 균열폭을 0.15mm로 가정한 뒤 탄산화 증가분을 고려하면 균열부의 탄산화 깊이는 식(4)와 같이, 건전부를 기준으로 한 타설이음부의 탄산화 깊이는 식(5)에 나타낼 수 있다.

$$C = (2.8195 \cdot \sqrt{w} + 1) \cdot A_1 \cdot \sqrt{T} \quad (4)$$

$$C = 1.4736 \cdot A_1 \sqrt{T} \quad (5)$$

여기서, A_1 는 건전부의 탄산화 속도계수, w 는 균열폭(mm)을 나타낸다.

시간에 따라 증가하는 탄산화깊이와는 다르게, 피복두께는 일정하게 가정하고 있는데, 본 연구에서는 측정개소는 30개소, 평균은 6.85cm, 표준편차는 3.55로 조사되었다.

3.2 목표내구적 파괴확률을 고려한 내구수명의 변화

본 장에서는 도출된 내구적 파괴확률과 사용기간의 관계를 통하여, 내구수명을 도출하도록 한다. RILEM(1994)에서는 시간의존적 함수로 구성된 외력과 저항응력과의 절대치 비교를 통한 결정론적 설계방법(deterministic design method)과, 목표내구수명에 대한 파괴확률보다 내구적 파괴확률을 작게 유도하는 확률론적 설계방법(stochastic design method)으로 분류하고 있다. 본 연구에서는 확률론적 설계방법을 따르기로 하며 식(6)과 같이 정리할 수 있다.

$$P(\text{failure})_t = P(R - S < 0)_t < P_{fmax} \quad (6)$$

여기서, $P(\text{failure})_t$ 는 시간의존적인 내구적 파괴확률로서 확률변수인 외력(S)이 확률내력 내력(R)보다 클 경우를 의미하며, P_{fmax} 는 내구적 파괴확률의 최대치, 즉 목표 내구적 허용확률을 나타낸다. 일반적으로 구조안전성 설계에서는 1.75~3.2정도의 신뢰도 지수(β)를 가지도록 하고 있으며, 이는 4%~0.07%의 수준을 나타내고 있다(Nawy, 1990). 그러나 이러한 값을 내구성에 고려하기에는 너무 보수적인 값인데 국내시방서에서는 탄산화에 대하여, 안전률 1.2, 즉 목표신뢰도 지수를 1.3으로 제한하고 있으며, 신뢰도 지수 1.3은 정규분포표(1- $\phi(\beta)$)를 이용하면 9.68%의 내구적 파괴확률(P_f)을 가지게 된다(콘크리트 학회, 2004). 실태조사시의 탄산화 속도를 사용하고 피복두께를 변화시켰을 경우의 내구적 파괴확률을 그림 2에 도시하였으며, 균열폭이 증가했을 경우의 내구적 파괴확률을 그림 3에 도시하였다 한편 그림 2 및 그림 3에 대하여 각각 내구수명을 평가하면 그림 4 및 5와 같이 내구수명 변화를 도시할 수 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이 탄산화 속도가 매우 낮은 수준이므로 내구수명은 매우 크게 평가되었으나 그림 5와 같이 피복두께가 낮고 균열폭이 큰 경우에는 내구수명의 급격한 감소가 발생하고 있음을 알 수 있었다. 특히 피복두께 3cm, 균열폭 0.2mm 이상인 경우는 모두 내구수명 100년을 확보하지 못하는 결과를 알 수 있다. 피복두께가 3cm 이하인 부재와 0.2mm이상의 균열폭에 대해서는 적절한 보수를 선택하여 탄산화의 진전을 제어할 필요가 있다.

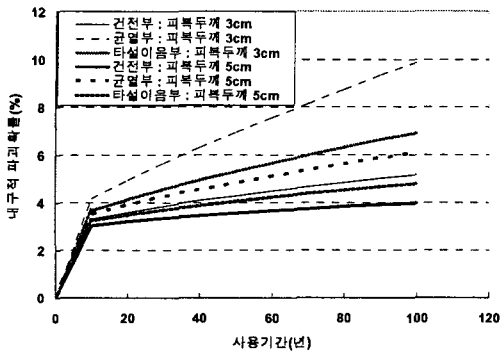


그림 2 균열폭과 피복두께에 따른 내구적 파괴확률의 변화

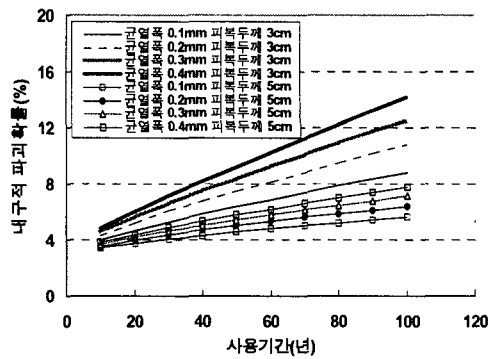


그림 3 피복두께의 변화에 따른 내구적 파괴확률의 변화

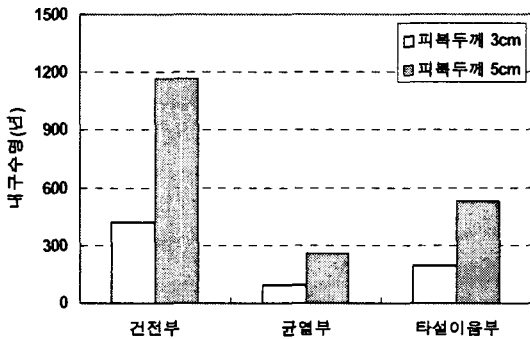


그림 4 피복두께 변화에 따른 내구수명 분포

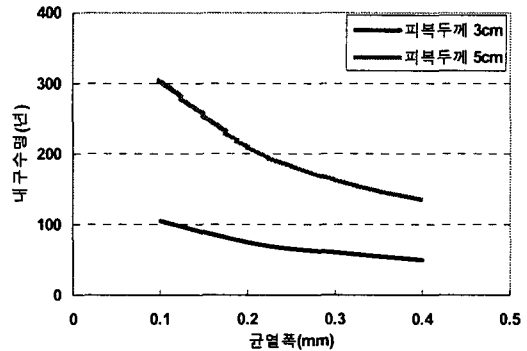


그림 5 균열폭과 피복두께에 따른 내구수명 분포

4. 결론

신뢰성 해석을 통한 탄산화에 노출된 타설이음부 및 균열부 콘크리트의 내구수명 평가를 통한 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 건전부, 균열부, 타설이음부에 대한 탄산화 속도계수를 도출하였으며, 시간에 따른 탄산화 깊이와 실태조사 결과를 기본으로 한 피복두께를 확률변수로 선정하여 내구적 파괴확률을 평가하였다.
- 2) 국내의 내구성 평가기준인 목표내구적 파괴확률과의 비교를 통하여, 대상구조물의 내구수명을 평가하였다. 내구수명은 균열폭의 진전에 따라서 크게 감소하였는데, 균열폭이 0.1에서 0.4mm로 증가할 경우, 내구수명은 피복두께가 3cm 일때 105년에서 50년으로, 4cm일때 305년에서 135년으로 감소하였다.

참고문헌

1. 阿部保彦 (1999), 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関するシンポジウム論文集, pp.7-14
2. RILEM (1994), *Durability Design of Concrete Structures*, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN SPON
3. Nawy, E. G. (1990), *Reinforced Concrete-A Fundamental Approach*, Prentice Hall, Inc. 2nd Edition, pp. 69-72
4. 콘크리트 학회 (2004), *콘크리트 표준시방서(내구성편)*, 건설교통부