

변형과 부착강도 기반 철근 부식에 의한 RC구조물의 구조적 성능 평가

Determination of Structural Capacity Based on Deformation and Bond Strength for RC Structure at Steel Corrosion

이정욱¹ · 안기용^{2*}Jung Wook Lee¹ · Ki Yong Ann^{2*}

(Received November 7, 2023 / Revised November 27, 2023 / Accepted November 28, 2023)

In this study, the structural limit for concrete was experimentally determined against corrosion of steel. The structural limit was taken as (1) the deformation of concrete at yielding, (2) the maximum pull-out strength and (3) the pull-out strength at the level for uncorroded specimen. Corrosion of steel was accelerated by extracting charges from steel surface to govern degree of steel corrosion. As a result, an increase in the steel diameter resulted in an increase in the corrosion degree to reach the concrete deformation at yielding. Again, an increase in the steel diameter resulted in an increase in the extracted charge to meet the maximum and uncorroded-equivalent level for the bond strength. However, the mass loss was marginally affected by the steel size, reflecting that these parameters could be used to alert the structural limit.

키워드 : 구조적 한계, 철근 부식, 변형, 부착강도**Keywords** : Structural limit, Corrosion of steel, Deformation, Bond strength

1. 서론

철근 부식은 철근 자체의 강도 또는 성능 저하뿐만 아니라 콘크리트 구조물의 성능저하에도 밀접한 관련이 있음에 따라 부식위험에 노출된 철근-콘크리트 구조물의 사용 수명(service life) 평가에 대한 중요성이 부각되고 있다. 부식은 개시 후 급격히 확산되어 피복 콘크리트의 균열과 철근 단면적의 손실을 초래할 수 있다. 따라서 부식환경에 노출된 철근콘크리트 구조물의 사용수명 예측은 구조 안전성 확보를 위한 주요 인자가 될 수 있다. 콘크리트의 철근 부식은 주로 철근 배근 깊이까지 침투된 염화물에 의해 발생된다. 콘크리트 내부로 침투된 염화물은 철근 표면에서 전기화학적 반응을 발생시켜 부동태피막(Passive film)을 제거하고 녹을 형성시킨다. 이 때 철근 표면에 생성되는 녹의 양과 속도는 콘크리트 내 간극(pore)에 존재하는 물과 산소의 양에 의존된다. 염화물 침투 외에도 철근 주변의 공극수의 산성화를 수반하는 피복 콘크리트의 탄산화 또한 철근부식의 주요 위험인자가 된다. 철근의 부식

개시 시점이 명확하게 정의 될 수 있는 이유로 구조물의 사용성 한계로 정의 된다(ISO WD 2022; ACI 222R-19 2019). 예를 들어, 염화물 침투에 의한 철근 부식 위험에 노출된 콘크리트 구조물에서 부식 개시 시점은 부식에 대한 일정한 염화물 임계치(Threshold)를 이용하여 염화물 이동 속도에 대한 모델에 의해 대략적으로 정의 된다(ACI 365.1R-17 2017; Weyers 1998; Bazant 1979; Liu and Weyers 1998; El Maaddawy and Soudki 2007). 또한 대부분의 연구(ISO 1920-12:2015 2015; Neves et al. 2018)에서 콘크리트의 탄산화 속도는 시멘트 종류, 습도, CO₂ 농도 등 탄산화에 영향을 미치는 요인을 고려한 실험과 해석적 모델링을 통해 산정된 탄산화로 인한 부식 개시 시점을 예측했다.

그러나 부식은 철근 표면에서 공식 형태(pitting corrosion)로 시작되기 때문에 부식 개시 자체는 콘크리트 구조물의 구조적 거동과 안전성에 영향을 미칠 수 없다고 볼 수 있다. 철근 부식에 의해 구조물이 구조적 한계에 도달되기까지는 부식 개시 이후 많은 시간이 소요되므로, 콘크리트 구조물의 사용성의 한계는 철

* Corresponding author E-mail: kann@hanyang.ac.kr

¹한양대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Department of Civil & Environment System Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)²한양대학교 건설환경공학과 교수 (Department of Civil & Environment Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

근 부식 위험에 노출된 구조물이 구조적 한계 도달 시점으로 정의될 수 있다(Liu and Weyers 1998; Ahmad 2003; Andrade 2017). 이와 같은 이유로 콘크리트의 균열 발생 시점이 철근 부식에 의한 구조적 한계를 예측하는 지표로 사용되었다(Zhu and Zi 2017; Lim et al. 2016; Paewchompoo et al. 2020; Kallias and Rafiq 2010; Sánchez-Deza et al. 2018). 또한 철근 부식을 촉진시키기 위해 염화물 용액을 배합수로 사용한 콘크리트 시편에 대해 균열 발생까지의 부식 속도를 측정하여, 이를 통해 부식에 의한 균열 가능성을 예측하는 실험적 연구가 수행되었다(EI Maaddawy and Soudki 2007; Andrade et al. 1993; Concha and Oreta 2018). 그러나 콘크리트 구조물의 휨강성은 표면 또는 철근-콘크리트 계면에서 발생하는 균열에 큰 영향을 받지 않을 수 있다. 이 때문에, 균열 발생시점이 철근 부식에 대한 콘크리트 구조물의 성능 한계를 대변할 수 없다. 따라서 철근 부식에 의한 콘크리트 구조물의 정확한 사용 수명 평가를 위해서는 철근 부식이 구조물의 거동에 미치는 영향을 반영한 합리적인 매개변수 정의가 필요하다.

본 연구에서 철근-콘크리트 계면에서의 변형과 부식 증가에 따른 부착강도 변화를 매개변수로 포함하는 구조적 성능에 대한 한계를 정의했다. 실제로 콘크리트 구조물의 사용 수명을 정의함에 있어 구조물의 성능 한계 상태 도달 시점이 더욱 합리적일 것으로 판단되었기 때문이다. 이를 위해 콘크리트에 배근된 철근의 전자를 추출하는 전기화학적방법을 채택하여 철근의 부식량을 제어했다. 또한 철근의 질량 손실량(mass loss)을 이용하여 구조적 성능 한계와 철근 부식량의 관계를 정량화하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료 및 시험체제작

전기화학적 부식된 철근을 배근한 콘크리트 시험체의 구조적 거동을 평가하기 위해 우선적으로 철근 부식에 따른 콘크리트 계면에서의 변형률을 계측 하였고, 철근의 부착 강도를 측정했다. 콘크리트 시험체는 일반 포틀랜드 시멘트(OPC), 물, 잔골재, 굵은 골재를 각각 1.00:0.40:2.12:2.43의 비로 배합했다. 잔골재의 비중은 2.60(Grade M), 굵은골재의 비중은 2.65였으며, 전기화학적 부식 과정에서 골재 크기에 대한 영향을 최소화하기 위해 굵은골재 최대치수(G_{max})는 10 mm로 정했다. 시험체 제작을 위해 사용된 OPC의 성분은 Table 1과 같다. 철근부식에 따른 구조적 거동에 대한 철근의 영향을 고려하기 위해 직경이 6.35(D6), 7.94(D8), 9.53(D10) 그리고 12.7 mm(D13) 인 이형철근을 사용하였다. 콘크리트

리트 계면의 변형 계측을 위해 콘크리트 타설 전 철근에 종방향 변형률 게이지를 3축 방향(시편의 정면, 후면, 그리고 상면 방향)으로 부착했다.

철근콘크리트 시험체는 타설된 후 시멘트 수화를 위해 상대 습도 95 %의 챔버에서 25 ± 2 °C로 양생하였다. 철근에 직류 전류(DC)를 인가 전 콘크리트 시편을 $Ca(OH)_2$ 포화용액에 48시간 동안 침전시켜 일정한 저항값으로 유지시켰다. 이를 통해 전기화학적 부식에 의한 콘크리트의 저항 변화(즉, IR drop)를 방지했다. 콘크리트 계면의 변형 및 철근의 부착강도 측정을 위한 설정과 시편에 대한 모식도는 Fig. 1과 같다.

2.2 철근-콘크리트 계면 변형 계측

Fig. 1에서와 같이 콘크리트 시편(150 × 200 × 300)에 이형철근을 80 mm 길이로 배근하였으며, 콘크리트 계면의 변형을 계측하기 위해 철근-콘크리트 계면 중앙부에 변형률 게이지를 배치한 후 콘크리트를 타설하였다. 철근 양단에는 부식을 방지하기 위해 cement-rich paste로 마스킹 한 후, 열수축밴드(heat-shrink band)로 덮어씌웠다. 마스킹 된 영역을 제외한 철근의 길이는 260 mm이며, 철근 돌출부에 전원 공급 장치와 연결하였다. 콘크리트 타설 및 양생 후, 전해질 용액의 염화물에 의한 예상치 못한 철근의 부식을 방지하기 위해 시험체 양단에 돌출된 철근을 에폭시 수지로 한 번 더 밀봉했다.

직류 전류 공급 효과를 극대화하기 위해 전류 공급장치가 연결된 시편을 0.5M NaCl 용액에 침전시켰다. 이때 음극재는 티타늄 메쉬를 사용했는데 이 티타늄 메쉬는 전기 저항을 최소화하기 위

Table 1. Oxide composition of ordinary Portland cement (%)

| | CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | MgO | SO ₃ |
|-----|-------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|------|-----------------|
| OPC | 63.98 | 5.97 | 18.44 | 4.16 | 0.34 | 1.24 | 1.61 | 3.42 |

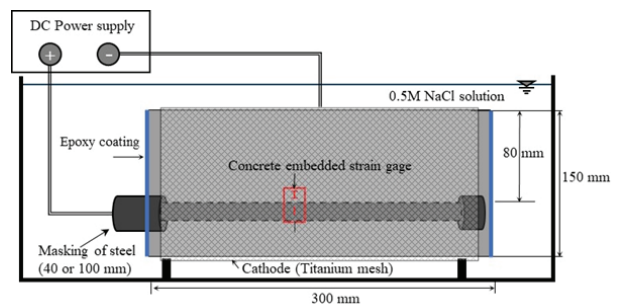


Fig. 1. Schematic for concrete specimen subjected to an electrochemically corrosive condition

해 시편에 최대한 근접하여 설치하였다. 철근 직경의 크기에 상관 없이 NaCl 용액에 침전된 모든 시편에 50 mA의 정전류를 공급하였다. 콘크리트 시편의 변형은 철근 표면에 부착된 변형률 게이지로부터 전하량이 10 coulomb 증가할 때마다 계측하였다. 전류 흐름으로부터 총 전하량은 전류 밀도와 전기화학적 추출 시간으로부터 결정되며, 이를 통하여 철근의 부식 정도를 평가하였다. 본 연구에서 채택된 전기적 연결은 철근 표면에서 전자를 추출하는 것으로서 부식 과정을 촉진시킬 수 있으며, 전기화학적 방법을 이용한 전자추출법은 음극방식법(cathodic protection)과는 반대의 접근 방식이다. 각각의 철근 직경에 대해 세 개의 시편을 제작하여 실험을 수행하였다.

2.3 철근 부식에 따른 부착강도

철근 부식이 발생할 때 콘크리트와 철근 사이의 부착강도를 측정하기 위하여 동일한 크기의 콘크리트 시험체를 제작하였다. 콘크리트 시편 외부로 돌출된 철근의 한쪽 끝단은 전기공급과 부착강도를 측정하기 위한 것으로서 모든 시편에서 철근이 돌출된 길이는 100 mm이다. 콘크리트 시험체의 중앙부에 철근을 배근하므로 피복깊이는 철근 직경에 따라 80 ± 6 mm 범위 내에서 결정되었다. 전기적 연결이 완료된 후, 부동태화 및 부식반응 과정에서 시편을 다시 0.5M NaCl 용액에 침전시켰다.

인가된 전류밀도는 $0.5 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 범위였으며, 목표 전하량에 도달하기 위해 200시간 동안 전류를 공급하였다. 모든 시편의 철근 표면에서 추출된 전하량과 전류밀도는 Table 2에 나타내었으며, 각 전하량 조건(즉, 서로 다른 부식 수준)에서 부착강도를 측정하였다. 부착 강도 측정을 위해 하중은 변위 하중으로 제어되었으며, 0.3 mm/min 속도로 시편의 돌출부에 재하하였다. 이때 발생하는 철근의 밀림 현상(slippage)에 의한 변위량은 시편에 연결된 LVDT를 통해 모니터링되었다. 부식 정도에 따른 철근의 질량 손실량은 식 (1)과 같이 패러데이의 법칙을 사

용하여 계산할 수 있다.

$$\Delta m = \frac{Mt}{zF} \tag{1}$$

여기서, Δm 은 녹 발생에 의한 철근의 질량, M 은 철근의 원자량, t 는 전기화학적 부식 시간, z 는 전하량, F 는 패러데이 상수(Faraday's constant)로 96,500 A/s이다.

콘크리트 시편에 10,000 coulomb의 전하량을 공급하는 동안 콘크리트의 변형률이 측정된 후에 부착 강도 시험을 수행하였다. 부식에 의한 철근의 질량 손실량 측정을 위해 시편 제작 전 철근의 무게를 측정하였으며, 철근에 묻은 콘크리트는 브러싱하여 제거하여 무게 측정 후 1.0M HCl 0.5 % 과 Sn_2O_3 로 구성된 산성용액에 10분간 침전시켰다.

이러한 절차 진행 후 철근에 녹이 남아 있다면 철근을 다시 산성용액에 담고 녹이 완전히 제거될 때까지 브러쉬로 닦아냈다. 그 후, 철근을 정류수로 세척한 후 공기 중에서 2시간 동안 건조 시켰다. 이 과정을 거친 철근의 무게를 측정하여 질량 손실량을 결정했다. 또한 이 과정에서 부식되지 않은 철근의 질량 손실량을 검토하기 위해 동일한 절차를 거쳐 시편에 사용된 동일한 크기의 부식되지 않은 4개의 철근질량을 측정하고 이러한 과정을 통해 확보된 질량과 식 (2)를 이용하여 부식에 의한 철근의 질량 손실량을 계산할 수 있다.

$$ML(\%) = \frac{M_1 - M_2 - M_b}{M_0} \tag{2}$$

여기서, ML 은 질량손실, M_1 은 부식된 철근의 무게, M_2 는 녹 제거 후 철근의 무게, M_0 은 부식되지 않은 철근의 무게, M_b 은 부식되지 않은 철근을 산성용액에 침전시킨 후 무게이다.

Table 2. Charge applied to steel to accelerate corrosion process for a measurement of the bond strength

| Charge applied (coulombs) | | | | | | | | | | |
|---|------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| Current density ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | 0.0 | 0.5 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 6.0 | 8.0 | 10.0 |
| D6 (6.35 mm) | 0.00 | 297.22 | 594.44 | 891.66 | 1188.88 | 1783.32 | 2377.76 | 3566.64 | 4755.52 | 5944.40 |
| D8 (7.94 mm) | 0.00 | 396.29 | 792.59 | 1188.88 | 1585.17 | 2377.76 | 3170.34 | 4755.52 | 6340.69 | 7925.86 |
| D10 (9.53 mm) | 0.00 | 495.37 | 990.73 | 1486.10 | 1981.47 | 2972.20 | 3962.93 | 5944.40 | 7925.86 | 9907.33 |
| D13 (12.7 mm) | 0.00 | 643.98 | 1287.95 | 1931.93 | 2575.90 | 3863.86 | 5151.81 | 7727.71 | 10303.62 | 12879.52 |

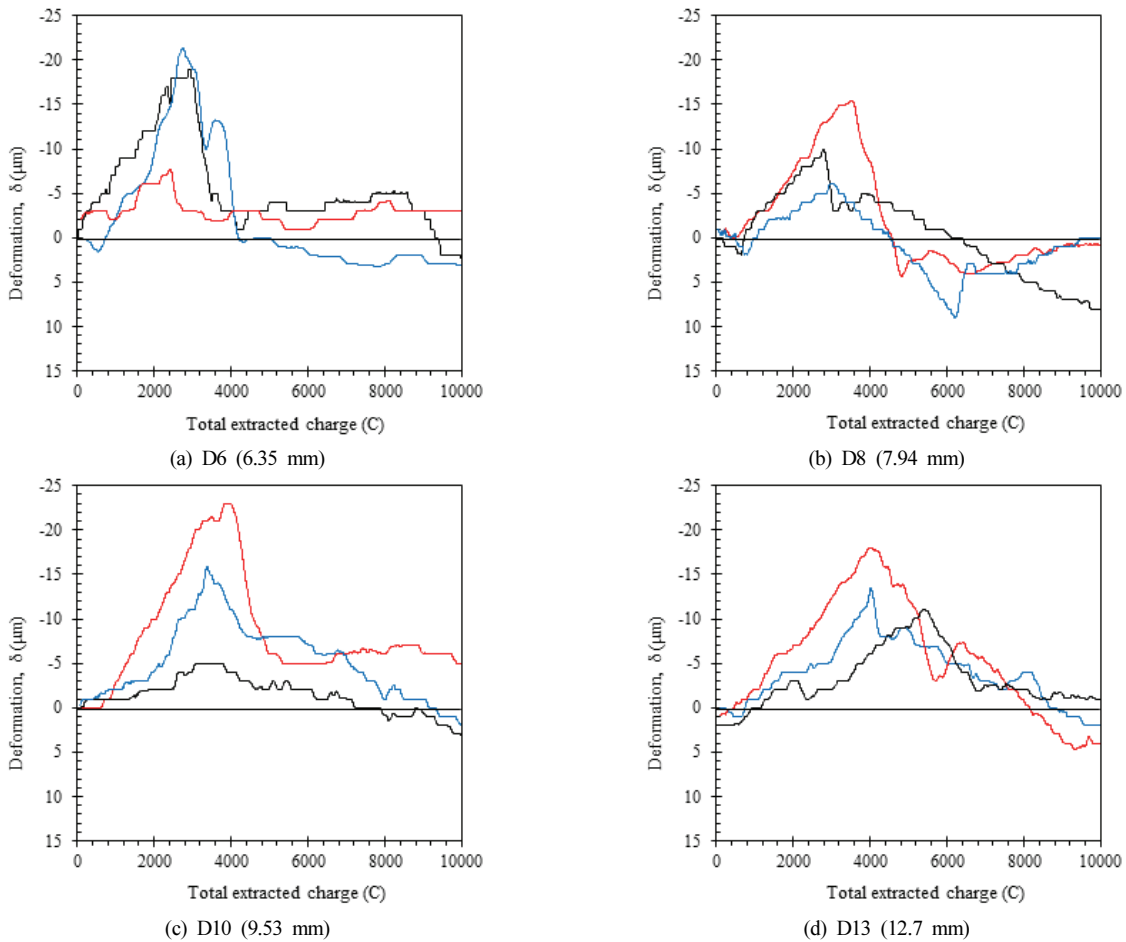


Fig. 2. Interfacial deformation with increasing corrosion degree against charge extracted from steel surface

3. 결 과

3.1 철근 부식에 의한 콘크리트의 변형

철근의 직경을 달리한 시험체의 철근과 콘크리트 계면에서 철근의 부식 정도에 따른 콘크리트의 변형을 모니터링하였으며, 이는 Fig. 2와 같이 철근의 부식은 표면에서 일정한 속도로 전자를 추출하는 전기화학적으로 제어되었다. 철근 직경과 관계없이 부식 정도에 따라 콘크리트 계면의 변형은 점차 음의 값으로 증가되었으며, 이후 철근의 직경에 따라 특정한 전하량에서 변형의 급격한 감소가 확인되었다. 그러나 최대 변형량과 철근 직경 사이에는 특별한 관계가 없는 것으로 판단된다. 또한 부식량의 증가는 콘크리트 계면에 작용하는 압축 응력을 생성시키고, 이 압축응력으로 인해 콘크리트는 항복상태에 도달하게 된다. 부식 초기에는 콘크리트의 탄성 즉, 변형에 대한 복원력으로 인해 녹 발생에 비례하여 콘크리트 변형도 증가하는 선형 관계를 형성할 수 있다. 그러나 철근 표면에

형성되는 녹이 증가하여 압도적인 양으로 형성되면, 콘크리트 계면에 압축 응력이 발생되고 그 결과 콘크리트를 항복하여 소성 상태에 도달하게 된다. 따라서 일정량 이상의 녹이 형성되면 콘크리트 변형은 최대치에 도달하게 된 후 급격히 감소하게 되는데, 이는 콘크리트가 철근 부식에 의해 복원력을 상실함을 의미함과 동시에 콘크리트의 구조적 거동이 제한될 수 있음을 의미한다.

부식에 의한 콘크리트 계면에서의 변형은 철근 직경에 크게 의존하여 발전되었다. 즉, 철근 직경의 증가로 인해 최대 변형량과 이에 상응하는 전류인가량 모두 증가되었다. 예를 들어, D10 철근에 대한 최대 변형은 전류 인가량이 3,000~4,000 coulomb에서 발생된 반면, D6 철근이 배근된 모든 시편의 최대 변형은 전류 인가량이 3,000 coulomb 이하일 때 발생되었다. 이는 녹에 의한 철근의 직경 팽창에 대한 콘크리트의 완충 능력이 다르기 때문이라고 판단된다. 또한 콘크리트 계면에 압축력을 가하기 위해 요구되는 철근 부식량은 그 직경에 비례하게 된다.

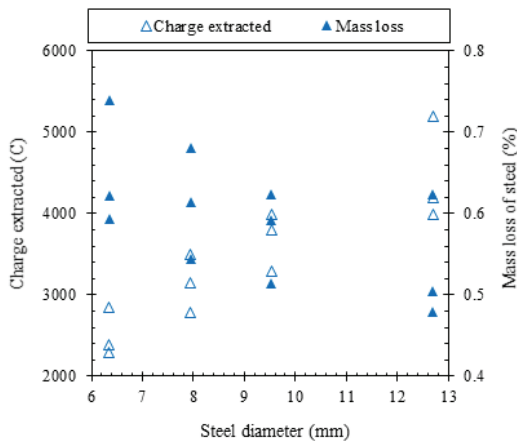


Fig. 3. Charge extracted from steel surface and mass loss of steel at structural limit detected by strain at corrosion

철근 직경에 따른 최대 변형 발생 시 부식 수준은 Fig. 3과 같으며, 여기서, 부식 수준은 전류 인가량으로 나타냄과 동시에 부식에 의한 철근의 질량 손실량으로도 나타내었다. 철근 직경의 증가와 함께 전류 인가량 증가에 관계없이 철근의 질량 손실량은 0.48~0.74 %로 작은 차이지만 감소되었다. 실제로 질량 손실량의 감소에도 불구하고 철근 직경의 증가에 따라 철근 부식 수준이 증가하여 콘크리트의 변형을 최대 발생시킨 것으로 나타났다.

3.2 철근 부식에 의한 부착 강도 변화

철근의 부식 정도와 직경의 변화에 따른 철근과 콘크리트의 부착강도 시험결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 부식 수준은 전기화학적 방법을 통해 전자를 추출함으로써 증가시켰다. 철근이 부식되지 않은 상태에서의 부착강도는 구조적 한계 상태를 정의하기 위해 초기에 산정되었으며, 철근 직경이 증가에 따라 비표면적이 증가하여 부착강도도 증가하였다. 부식 초기에 부착 강도가 증가한 것을 볼 수 있는데, 이는 철근 표면에 형성된 녹이 철근-콘크리트 계면의 기공(pores)을 채웠기 때문인 것으로 추정된다(Reou and Ann 2010). 대부분의 선행 연구(Liu and Weyers 1998; Reou and Ann 2010; Ann 2005)에서 철근과 콘크리트 사이의 기공에 의해 형성된 약 5~20 μm 범위의 간격이 형성되는 것으로 보고되고 있으며, 이를 계면 공극(Interfacial gap)으로 명명하고 있다. 철근 표면에 형성된 녹이 계면 공극 영역 이내로 제한될 수 있도록 부식 수준을 제어하면 구조물의 휨 거동(강성과 강도)을 개선시킬 수 있다(Kordtabar and Dehestani 2021). 이러한 측면에서 철근 직경에 관계없이 부식 수준이 증가되면 부착 강도 또한 증가하게 된다. 부착 강도는 부식 증가에 따라 최대치에 도달 후 급격히 감소

하였다. 이는 부식 수준이 높아지면 철근 표면에 형성된 녹은 계면 간극 크기 이상으로 확장되어 그 결과, 철근-콘크리트 계면에 파손을 유발시켜 서로 분리될 수 있음을 의미한다.

부식에 따른 콘크리트 구조물의 구조적 한계상태 평가를 위한 지표는 1) 부착강도 상한 한계; 철근의 최대 부착 강도, 2) 부착강도 하한 한계; 최대 부착강도 도달 이후 감소하여 건전상태의 부착강도와 동일해지는 지점(즉, Fig. 4의 lower bound)으로 사용될 수 있다. 철근의 부착 강도는 부식 진행과 함께 점차 증가하여 최대치에 도달 후 급격히 감소되어 콘크리트 구조물의 거동에 악영향을 미치게 된다. 이러한 이유로 최대 부착강도 발생 시점이 철근 부식에 의한 구조물의 구조적 성능 한계를 의미할 수 있다. 또한 철근의 부착 강도가 최대치에 도달 후 감소됨에도 불구하고 건전상태의 부착 강도보다 크거나 같을 수 있는데, 이는 구조물의 기능 수행 측면에서 철근 부식에 의한 구조적 성능 한계상태에 도달까지 여유가 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 철근 부식에 의한 구조물의 성능 한계상태를 결정함에 있어 두 가지 지표(부착강도 상한과 하한 한계)로 정의했다.

철근 직경에 따른 전류 인가량으로 대변되는 부식 정도와 철근의 질량 손실량은 Fig. 5와 같다. 철근 부식과 부착 강도의 관계는 Fig. 4를 이용하여 철근 직경에 대한 단일 수치로 결정했다. 앞서 정의한 부착강도의 상한치와 하한치에 관계없이 철근의 부착 강도는 그 직경에 많은 영향을 받는 것이 명확하게 나타났으며, 실제로 철근 표면에서 추출된 전자의 영향을 받는다. 철근 직경 증가는 부착 강도를 상·하한치에 도달시키기 위한 전류 인가량을 증가시켰으며, 이는 철근 직경에 대한 부착 강도의 의존성 때문이다. 그러나 철근의 질량 손실과 부착강도 한계상태의 관계는 철근 직경에 큰 영향을 받지 않았다. 예를 들어, 최대 부착 강도(구조적 상한 한계)에 도달하기 위한 질량 손실은 1.39~1.55 % 범위인 반면, 부착강도 하한에 도달하기 위한 질량 손실은 2.16~2.39 %였다. 산용액에서 철근 표면의 녹을 제거하는 과정에서 부식되지 않은 철근의 질량 손실 비율은 일반적으로 0.10~0.30 %(Reou and Ann 2009)인 것을 고려하면, 서로 다른 철근 직경 간 발생하는 질량 손실의 차이는 무시할 수 있는 수준이었다. 구조적 성능 한계 도달 시 철근 표면에 형성된 녹의 양은 철근 직경이 증가함에 따라 증가되는 것이 명확하게 나타났다. 결과적으로, 부식되지 않은 철근 대비 녹의 비율 (즉, 질량 손실 백분율)은 특정 범위로 제한된다. 이는 상대적으로 더 큰 직경의 철근 사용은 구조물의 한계상태에 도달하는 시간을 지연시켜 구조물의 안전성 향상에 유리함을 시사한다(Hwang and Ann 2023).

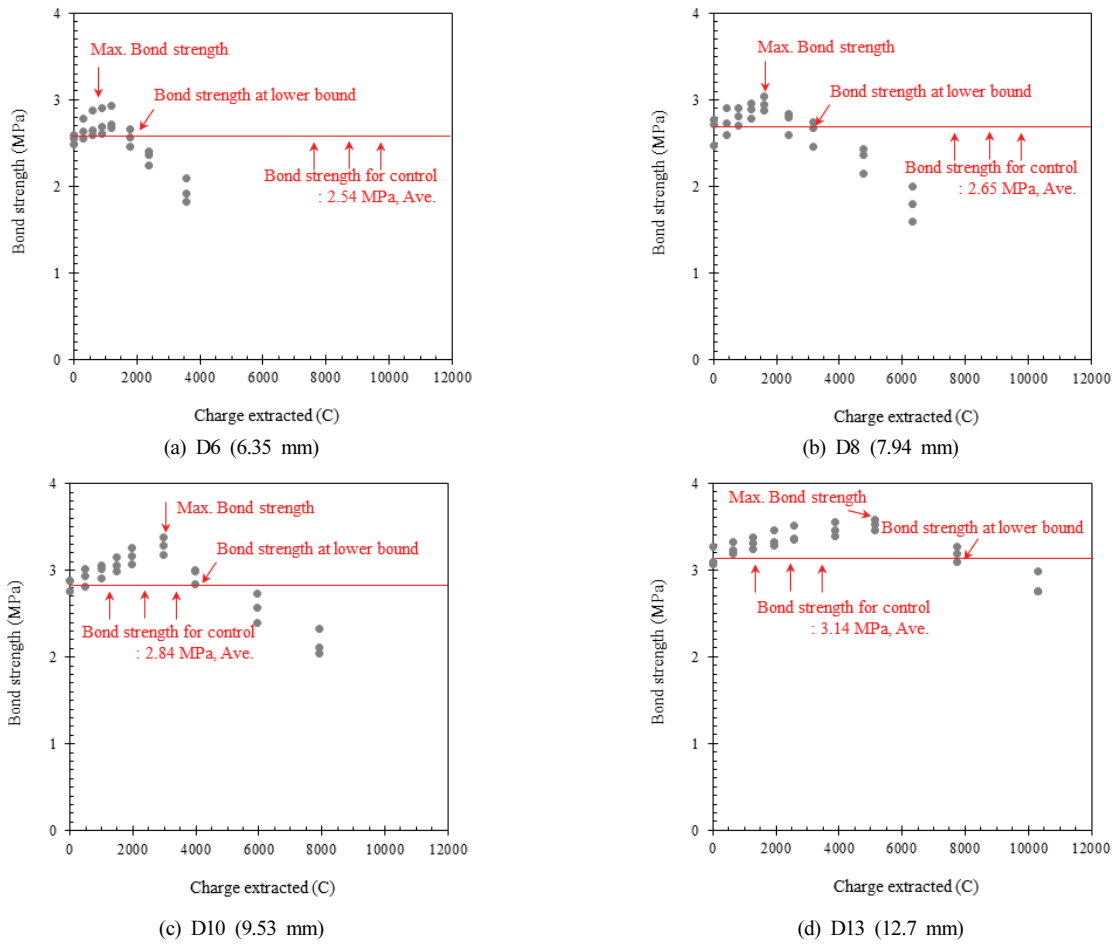


Fig. 4. Bond strength of steel rebar to concrete with respect to the variation in charge extracted at corrosion

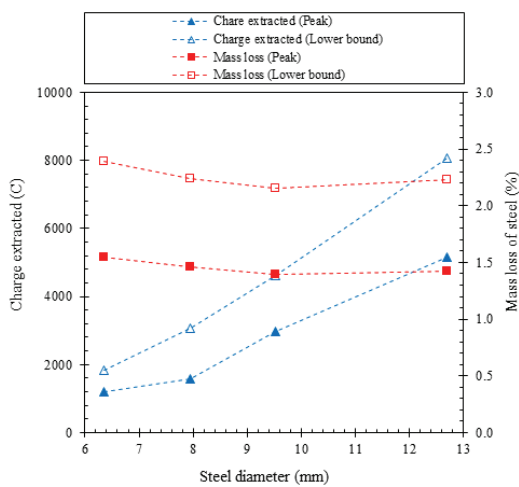


Fig. 5. Charge extracted from steel surface and mass loss of steel at structural limit

3.3 구조적 한계상태에 대한 질량 손실 영향

본 연구에서는 (1) 콘크리트 변형 시험과 (2) 부착강도 시험이 완료된 후 시편에 사용된 모든 철근의 질량 손실량을 측정했다. 질량 손실량은 패러데이 법칙을 적용하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 콘크리트 계면 변형은 크기가 다른 3개의 시편과 4종류 철근 (D6, D8, D10, D13)의 조합을 통해 총 12개의 데이터를 확보했다. 반면에 부착강도 상한 한계 도출을 위한 최대 부착 강도는 각 철근에 대한 한 개씩 총 4개의 데이터가 확보되었고, 부착강도 하한 한계값은 건전 상태 철근의 부착강도 측정으로 인해 8개의 데이터를 확보하였다. 즉, 본 연구에서 부착강도는 최대값과 최소값을 다루고 있다. 질량손실에 대한 실험치(측정값)와 이론치(계산값)는 대부분 동일했지만, 측정과정의 오류로 인해 일부 데이터에서 허용치 이상의 오차가 있었다. 예를 들어, 콘크리트 계면 변형 계측을 위해 측정된 철근의 질량 손실은 약 0.17~0.28 %였으며, 패러

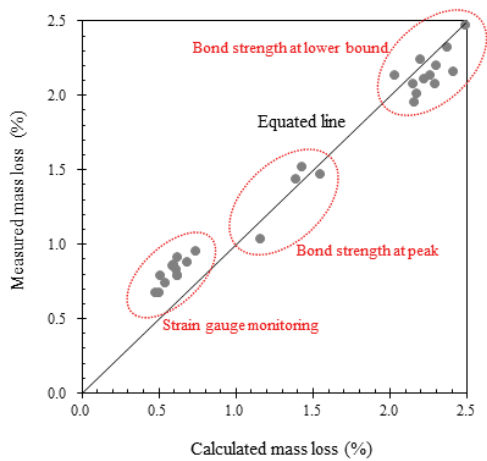


Fig. 6. Relation of mass loss for steel at corrosion

데이 법칙에 의해 계산된 질량 손실 이론치는 0.48~0.74 %로 계산됐다. 즉, 실험치와 이론치는 26~53 %의 오차를 보였는데, 이는 질량 손실 측정 과정에서 발생된 것으로 보인다. 실제로 질량 손실에 대한 이론치는 철근 직경에 따라 전류 인가량 2,000~5,000 coulomb 범위에서 계산된 반면, 실험치는 항상 10,000 coulomb의 전류 인가 완료 후 측정됐다. 다시 말해 실험치 측정을 위한 철근의 부식 조건이 이론치 계산을 위한 철근의 조건보다 더 높았을 것으로 판단된다.

4. 철근 부식이 발생한 콘크리트의 사용수명

콘크리트 구조물의 사용 수명 평가에 있어 휨 강성(flexural rigidity, EI)은 핵심 매개변수로 사용될 수 있다. 그래서 콘크리트의 균열 또는 철근 부식은 실제로 구조물의 휨 강성에 직접적으로 영향을 미치지 않기 때문에 구조물의 사용 수명을 결정하는데 필수사항이 아니다. 콘크리트 구조물이 철근 부식 조건에 노출되면 구조물의 사용 수명은 주로 (1) 부식이 시작되는 시점 또는 (2) 철근 부식이 구조적 거동에 영향을 미치는 시점으로 정의된다(ISO WD 2022). 철근 부식은 구조적 거동에 다양한 측면에서 영향을 미치기 때문에, 일반적으로 부식 개시 시점이 구조물의 사용 수명으로 간주된다(ACI 365.1R-17 2017). 그러나 철근 표면의 공식(pitting)에서 부식이 시작되는 경우가 대부분이기 때문에 부식 개시는 콘크리트 구조물의 휨 강성 측면에서 구조적 거동에 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. 공식 부식(pit corrosion)은 철근의 단면적 감소를 초래하지 않으며 더욱이 콘크리트에 균열을 발생시키지 않는다. 구조적 성능 한계 도달 시점은 철근 부식에 의한 구조물의 사용 수명으로 대체 될 수 있는데, 구조적 성능의 한계 도달 시점은

철근-콘크리트 계면 균열 시작 시점으로 주로 정의된다. 콘크리트의 계면에서 시작된 균열이 표면까지 전파되기 위한 부식 속도는 $1,000 \text{ mA/m}^2$ 를 초과해야 하는 것으로 보고되었으며(Andrade et al. 1993), 이때 최소 10년 동안 부식 환경에 노출된 철근의 녹에 의한 직경 팽창량은 약 $10\text{--}15 \mu\text{m}$ 였다. 대안으로, 철근-콘크리트 경계면에서의 균열은 여전히 강성 측면에서 콘크리트 구조물의 구조적 내력에 영향을 미칠 수 있다. 결과적으로 철근-콘크리트 계면 균열은 구조물의 휨 강성 측면에서 구조적 성능 한계에 영향을 미칠 수 있으며, 계면 균열의 시작은 철근과 콘크리트 사이의 부착강도와 밀접한 관련이 있다(Buenfeld and Broomfield 2002).

본 연구에서는 부식에 따른 구조적 성능 한계에 대한 지표로 (1) 콘크리트 항복 변형, (2) 최대 부착 강도 그리고 (3) 건전상태 수준의 부착 강도로 제시했다. 철근-콘크리트 계면에서 압도적인 양의 녹이 형성되면 콘크리트에 압축력이 작용하여 콘크리트의 변형은 탄성 한계를 넘어 최대 변형에 도달하게 된다. 이때 녹이 증가되면 철근의 부착 강도는 향상될 수 있으나, 추가적인 녹이 형성되면 부착 강도는 급격히 감소되어 건전상태의 부착 강도와 동일한 수준이 된다. 이 세 가지 매개변수는 모두 구조적 성능 한계를 평가하는 지표로서 의미가 있다. 철근 부식으로 인한 콘크리트 변형은 계면 균열을 발생시킴과 동시에 구조적 거동에 큰 영향을 미칠 수 있다. 최대 부착 강도는 매우 높은 부식 수준에서 달성될 수 있는데, 그 이유는 계면의 공극이 녹으로 완전히 채워져야 하기 때문이다. 콘크리트의 탄성(Elasticity) 즉, 복원력을 고려하면 계면 균열을 발생시키기 위한 녹의 두께는 계면 공극량의 2~3배를 초과되어야 하며, 철근 표면에 균일한 형태로 분포되는 조건에서 $40\text{--}50 \mu\text{m}$ 의 녹이 철근 표면에 형성되어야만 한다. 부착 강도가 최대치에 도달한 후 구조물의 휨 강성은 급격히 감소하는데 철근-콘크리트 계면에서 철근의 분리로 인한 것이다(Buenfeld and Broomfield 2002). 대안적으로, 부착 강도 하한 한계는 건전상태의 부착 강도와 동일한 수준이기 때문에 구조적 성능 한계를 나타내기 위한 합리적인 지표일 수 있다. 그러나 철근 부식의 증가로 인해 구조물 거동 측면에서 성능은 다소 저하되었을 수 있으며, 철근-콘크리트 계면의 손상으로 인해 철근은 콘크리트로부터 분리되었을 가능성이 있다.

5. 결론

본 연구에서는 항복상태에서 철근-콘크리트 계면의 변형을 계측하고 철근과 콘크리트의 부착강도 측정을 통해 철근 부식에 노출된 콘크리트 구조물의 사용수명을 평가했다. 부식 과정을 촉진

시키기 위해 일정 기간 내에 직류 전류를 인가하여 철근 표면에서 전자를 전기화학적으로 제거했다. 이를 통해 항복상태 콘크리트의 변형, 부착강도 상한 한계(최대 부착강도), 부착강도 하한 한계(부착강도가 최대 치 도달 후 감소되어 건전상태와 동일한 수준)를 철근 부식 시 구조적 성능 한계에 대한 지표로 사용했다.

1. 철근-콘크리트 계면의 변형을 계측 결과, 철근 직경이 커질수록 항복상태에서의 콘크리트 변형률에 대응하는 전류 인가량(corrosion rate)은 증가했다. 전류 인가량에 대한 철근 직경의 영향은 철근 부식에 대한 콘크리트의 완충 효과로부터 기인한다. 또한 콘크리트 항복 상태에서의 변형에 대응하는 철근의 질량 손실량은 철근 직경 증가에 따라 약간 감소되었다.
2. 철근 부식 없는 건전상태 시편의 부착강도는 철근 직경 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 부식이 시작되면 부착강도는 일정 수준까지 점차 증가했고, 부식 정도가 높아지게 되면 부착 강도는 급격히 감소되었다. 최대 부착강도와 부착강도가 최대 치 도달 후 감소되어 건전상태와 동일한 수준을 구조적 성능 한계의 상한점과 하한점으로 정의했다.
3. 철근 직경이 증가 되면 부착 강도 상한과 하한 한계에 도달시 측정되는 전류 인가량도 증가했다. 그러나 상대적 수치인 철근의 질량 감소량은 직경의 증가 또는 감소에 큰 영향을 받지 않았다.
4. 철근 부식에 따른 구조적 성능한계에 대한 세 가지 지표(계면 변형, 부착강도 상한점, 부착강도 하한점)는 철근의 부식 개시 시점을 대체하여 구조물의 사용수명을 평가할 수 있다. 그러나 이러한 지표들을 하나의 값으로 정의하거나 비파괴적 방법으로 현장에서 적용하는 것은 현재로서는 어려움이 있다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 논문은 2021년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(No. NRF-2020 R1A2C3012248). 이에 감사드립니다.

References

ACI 222R-19. (2019). Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

ACI 365.1R-17. (2017). Report on Service Life Prediction, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.

Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review, *Cement and Concrete Composites*, **25(4-5)**, 459–471.

Andrade, C. (2017). Reliability analysis of corrosion onset: initiation limit state, *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, **2(4)**, 200–208.

Andrade, C., Alonso, C., Molina, F.J. (1993). Cover cracking as a function of bar corrosion: part I—experimental test, *Materials and Structures*, **26**, 453–464.

Ann, K.Y. (2005). Enhancing the Chloride Threshold Level for Steel Corrosion in Concrete, Ph.D Thesis, Imperial College London (University of London).

Bazant, Z.P. (1979). Physical model for steel corrosion in concrete sea structures—application, *Journal of the Structural Division*, **105(6)**, 1155–1166.

Buenfeld, N.R., Broomfield, J.P. (2002). Influence of electrochemical chloride extraction on the bond between steel and concrete, *Magazine of Concrete Research*, **52(2)**, 79–91.

Concha, N., Oreta, A.W. (2018). A model for time-to-cracking of concrete due to chloride induced corrosion using artificial neural network, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **431(7)**, 072009.

El Maaddawy, T., Soudki, K. (2007). A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking, *Cement and Concrete Composites*, **29(3)**, 168–175.

Hwang, W., Ann, K.Y. (2023). Determination of rust formation to cracking at the steel-concrete interface by corrosion of steel in concrete, *Construction and Building Materials*, **367**, 130215.

ISO 1920-12:2015. (2015). Testing of Concrete – Part 12: Determination of the Carbonation Resistance of Concrete—Accelerated Carbonation Method, International Organization for Standardization.

ISO WD. (2022). Assessment, Prevention and Repair for Steel Corrosion in Reinforced Concrete Structures, International Standard Organization, Working Draft NP 18726.

Kallias, A.N., Rafiq, M.I. (2010). Finite element investigation of the

- structural response of corroded RC beams, *Engineering Structures*, **32(9)**, 2984–2994.
- Kordtabar, B., Dehestani, M. (2021). Effect of corrosion in reinforced concrete frame components on pushover behavior and ductility of frame, *Structural Concrete*, **22(5)**, 2665–2687.
- Lim, S., Akiyama, M., Frangopol, D.M. (2016). Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, *Engineering Structures*, **127**, 189–205.
- Liu, Y., Weyers, R.E. (1998). Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures, *ACI Materials Journal*, **95(6)**, 675–680.
- Neves, R., Torrent, R., Imamoto, K. (2018). Residual service life of carbonated structures based on site non-destructive tests, *Cement and Concrete Research*, **109**, 10–18.
- Paewchompoo, N., Yodsudjai, W., Chindapasirt, P. (2020). Corrosion-induced cracking time in steel fiber-reinforced concrete: experiment and finite element method, *ACI Materials Journal*, **117(4)**, 3–12.
- Reou, J.S., Ann, K.Y. (2010). The distribution of hydration products at the steel-concrete interface for concretes subjected to electrochemical treatment, *Corrosion Science*, **52(6)**, 2197–2205.
- Reou, J.S., Ann, K.Y. (2009). Electrochemical assessment on the corrosion risk of steel embedment in OPC concrete depending on the corrosion detection techniques, *Materials Chemistry and Physics*, **113(1)**, 78–84.
- Sánchez-Deza, A., Bastidas, D.M., Iglesia, A.L., Mora, E.M., Bastidas Rull, J.M. (2018). Service life prediction for 50-year-old buildings in marine environments, *Revista de Metalurgia*, **54(1)** e111.
- Weyers, R.E. (1998). Service life model for concrete structures in chloride laden environments, *ACI Materials Journal*, **95(4)**, 445–453.
- Zhu, X., Zi, G. (2017). A 2D mechano-chemical model for the simulation of reinforcement corrosion and concrete damage, *Construction and Building Materials*, **137**, 330–344.

변형과 부착강도 기반 철근 부식에 의한 RC구조물의 구조적 성능 평가

본 연구에서는 철근의 부식에 대한 콘크리트의 구조적 한계를 실험적으로 정의하였다. 구조적 한계는 (1) 항복 시 콘크리트의 변형, (2) 최대 부착강도, (3) 부식되지 않은 시험체 수준의 부착강도로 고려하였다. 철근 표면에서 전하를 추출하는 전기화학적 방식을 이용하여 철근 부식을 촉진시켰다. 그 결과, 철근 직경이 증가할수록 부식 정도가 증가하여 콘크리트 변형은 항복상태에 도달하는 것으로 나타났다. 또한 철근 직경의 증가는 최대 부착강도와 부식되지 않은 수준의 부착강도에 도달되기 위한 전류 인가량을 증가시켰다. 그러나 질량 손실은 철근 크기에 미미하게 영향을 받았는데, 이는 구조적 성능의 매개변수(콘크리트 변형, 부착강도의 변화)를 통해 철근 부식에 의한 구조물의 사용수명을 대변할 수 있음을 의미한다.