

## 철근부식에 의한 철근 콘크리트 단면의 손상 해석

# Analysis for Steel Corrosion-Induced Damage in Cross-Section of Reinforced Concrete

김정석<sup>1</sup> · 안기용<sup>2\*</sup>Jung-Suk Kim<sup>1</sup> · Ki Yong Ann<sup>2\*</sup>

(Received February 17, 2023 / Revised February 28, 2023 / Accepted March 2, 2023)

In this study, a development of the rust formation arising from steel corrosion was modelled to quantify the structural impact in steel reinforced concrete. The interfacial gap, cover depth and diameter of steel rebar were taken for variables in modelling. It was found that the interfacial gap was the most influencing on the structural limit at steel corrosion, followed by steel diameter and cover depth. At 75 mm of cover depth with 20 mm of the steel diameter, the rust amount to reach cracking accounted for 16.95-27.69  $\mu\text{m}$  to 1-10  $\mu\text{m}$  of the interfacial gap. It was found that there was no risk of cracking and structural limit until the rust was formed within the interfacial gap. With a further formation of rust, the concrete section was successively behaved to yielding, cracking and failure. Additionally, the interfacial gap was the most dominant parameter for the rust amount to reach the cracking of concrete at the interfacial zone, whilst the cover depth had a marginal effect on cracking but had a crucial influence on the rust to failure.

**키워드 :** 철근부식, 계면 공극, 철근 콘크리트, 구조적 한계**Keywords :** Steel corrosion, Interfacial gap, Steel reinforced concrete, Structural limit

## 1. 서론

부식은 철근의 유효단면적을 손실시킴과 동시에 콘크리트 단면 균열의 원인이 될 수 있다. 이는 철근 부식이 철근 콘크리트 구조물의 인장 및 압축 거동에 모두 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 따라서 철근-콘크리트 구조의 부식 억제 또는 부식 상태 예측을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 그럼에도 불구하고 ACI PRC-365.1-17과 ISO 16311-3:2014는 현재까지 철근 부식에 따른 콘크리트 구조물의 거동 규명에 대한 어려움으로 철근-콘크리트 구조물 사용수명(serviceability)을 부식개시 시점으로 규정하고 있다. 하지만 실제로 콘크리트 구조물에 배근된 철근이 부식되어 구조적 한계수준까지 도달하기까지 시간이 소요된다(Melchers and Li 2009; Alexander and Beushausen 2019; Li et al, 2008; Andrade 2017).

이러한 콘크리트 구조물의 한계와 철근부식의 관계 규명의 일환

으로 부식에 의한 철근과 콘크리트 간의 부착강도 감소현상에 대한 연구가 수행되고 있으며(Hanjari et al, 2011; Zhu and Zi 2017; Lim et al, 2016; Paewchompoo et al, 2020; Kallias and Rafiq 2010; Coronelli and Gambarova 2004), 특히 부식에 의한 철근의 부착력 감소 현상은 최근 미세구조 관찰을 통해 더욱 상세하게 확인되고 있다(Bastidas et al, 2020; Sánchez-Deza and Bastidas 2008) 과도한 철근 부식은 설계수준의 부착 강도를 30~60 % 까지 저하시킬 수 있지만(Ihekwa et al, 1996; Rasheeduzafar et al, 1991; Vennesland et al, 1996), 오히려 부식 초기에는 철근 표면에 형성된 녹이 철근과 콘크리트 사이 계면에 존재하는 공극(porosity)을 채우기 때문에 부착강도를 향상 시킬 수 있다(Ai-Sulaimani et al, 1990). 그러나 철근과 콘크리트 간의 부착강도가 구조물의 성능을 온전히 대변할 수 없기 때문에 부식에 의한 부착강도 변화를 통해 구조물의 안전성 또는 사용성을 평가하는 것은 다소 무리가 있다. 이에 최근 연구에서는 부식 정도를 철근표면의 녹으로 정량된 모델링을 통해

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

<sup>1</sup>한양대학교 건설환경시스템공학과 박사과정 (Department of Civil & Environmental System Engineering, Hanyang University, Kyonggi-do, 15588, Korea)<sup>2</sup>한양대학교 건설환경공학과 교수 (Department of Civil & Environment Engineering, Hanyang University, Kyonggi-do, 15588, Korea)

구조물의 거동을 분석하고 있으며, 이를 기반으로 철근 부식에 의한 콘크리트 구조물의 성능 한계를 피복 균열의 발현 시점으로 정의하고 있는 추세이다(Hanjari et al, 2011; Zhu and Zi 2017; Lim et al, 2016; Paewchompoo et al, 2020; Kallias and Rafiq 2010; Coronelli and Gambarova 2004). 이 연구들에 따르면, 철근 부식에 의한 콘크리트 피복의 균열은 대체적으로 부식이 시작된 후 수천 시간 이내에 생성되는데, 이때 콘크리트의 함수량, 염화물의 농도와 온도, 그리고 콘크리트 배합 비와 같은 부식 조건이 무시되고 있다(Concha and Oreta 2018; El Maaddawy and Soudki 2007; Lu et al, 2011). 또한 부식 속도는  $1,000 \text{ mA/m}^2$  로 일정하게 설정되기 때문에(Andrade et al, 1993; Vu et al, 2005), 이들의 연구 결과와 실제 부식에 의한 구조물의 거동과는 현실적으로 부합되지 않는다. 철근 부식은 표면에 녹을 형성시켜 단면적을 팽창시키고, 이러한 단면적 팽창은 콘크리트 계면에 응력을 가하게 된다. 이때 철근과 콘크리트 사이 계면 공극은 철근 직경의 부식 팽창에 의한 응력을 완충시켜 주기 때문에 콘크리트의 피복 균열을 지연시키는 효과가 있다. 그러나 대부분의 선행 연구들에서 이 계면 공극이 무시되거나  $10\sim 100 \mu\text{m}$  범위의 크기로 일정하게 가정되어, 현실과 부합되지 않는 피복균열 발생 시간이 도출됐다(Liu and Weyers 1998; Cui and Alipour 2018).

본 연구는 철근 부식에 따른 콘크리트 구조물의 거동과 그 거동에 있어 계면 공극의 영향을 규명하기 위한 기초 단계 연구의 일환으로 철근 부식에 따른 콘크리트 단면의 구조적 성능변화를 해석적으로 접근했다. 콘크리트 단면의 항복, 균열, 그리고 파단 상태에 이르게 하는 부식량을 철근 표면에 형성된 녹의 양으로 정량화했다. 부식에 의한 콘크리트 단면의 성능 변화에 있어 설계변수 영향과 콘크리트 계면의 완충효과를 규명하기 위해 철근의 직경, 피복두께, 콘크리트 계면의 크기( $1.0\sim 10.0 \mu\text{m}$ )를 매개 변수로 설정했다. 이를 통해 철근 부식 진행에 따른 콘크리트 구조물에 대한 사용성과 안전성 판단의 근거를 마련하고자 한다.

## 2. 유한요소 모델링

### 2.1 이론적 배경

철근의 부식은 철근-콘크리트 계면의 조건인 세공용액(pore solution)의 알칼리 함유량 및 물 분자와 산소를 포함하는 음극제의 접근성에 따라 다른 속도로 전파된다. 부식의 시작 시점에서 철근 표면에는 극히 미소량의 녹이 형성되는데 이는 철근-콘크리트의 구조적 거동에 거의 영향을 미치지 않는다. 실제로, 부식 초

기 콘크리트에 매립된 철근은 부식에 의한 순단면의 손실 또는 단면적 증가량이 매우 미미하여 콘크리트 거동에 영향을 미치지 못한다. 그러나 부식이 진행되면 염화물, 물, 산소 등과 같은 부식 촉진 물질이 지속적으로 공급됨에 따라 철근 표면에 생성되는 녹의 양은 증가된다. 이 과정에서 부식은 콘크리트 계면에 응력으로 작용하게 된다.

철근과 콘크리트 계면 사이에는 양생과정 중 전기화학적 반응이 발생되고 그 결과  $1.0\sim 10.0 \mu\text{m}$ 의 공극이 생성된다. 이 공극은 콘크리트 계면에서 부식에 의한 철근 직경 팽창에 대해 여유 공간을 제공함으로써 계면에 가해지는 응력을 완충시키게 된다. 따라서 철근 표면의 녹이 콘크리트 구조물의 거동에 결정적인 영향을 미치기 위해서는 계면 공극량을 초과하여 발달 되어야 할 것이다. 부식에 따른 콘크리트 단면 거동 분석을 위한 모델링에 있어 철근 표면의 녹 증가에 대한 콘크리트 계면 공극의 완충효과(buffering effect)는 철근과 콘크리트 사이  $1.0\sim 10.0 \mu\text{m}$ 의 간격 설정함으로써 구현될 수 있다(Ann 2005; Reou and Ann 2010). 본 연구에서는 부식에 따른 철근-콘크리트 단면의 명확한 거동 변화를 규명하기 위해 계면 공극과 철근 표면에 생성되는 녹의 불균일성에 대한 영향을 무시하였다. 따라서 콘크리트 계면의 공극은 철근의 표면을 따라 균일하게 분포되고, 녹 또한 철근 전체 표면에 걸쳐 균일하게 발생 되는 것으로 가정했다.

### 2.2 철근 콘크리트 단면의 구조적 거동 모델링

부식에 따른 철근 표면의 녹 증가에 따라 콘크리트 계면 공극이 메워지는 과정과 철근-콘크리트 단면의 구조적 성능변화(항복, 균열, 파단)를 해석하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(SIMULIA 2017)를 사용했다. 철근과 콘크리트는 각각 2차원 평면변형요소(CPE4)로 모델링 됐는데, 이는 단면 거동측면에서 프아송비(Poisson's ratio)에 의한 단면 수축(shrinkage)과 휨 모멘트에 의한 영향을 배제하고 순수한 철근 부식의 영향만이 반영될 수 있는 장점이 있다. 유한요소 모델의 경계조건은 단면에 분포되는 응력을 대칭적으로 발현시키기 위해 콘크리트 모델 상·하부를 고정단으로 적용했다.

Table 1. Material properties of concrete

Mechanical properties	Concrete
Compressive strength	35.0 MPa
Tensile strength	3.5 MPa
Elastic modulus	26,987 MPa
Poisson's ratio	0.18

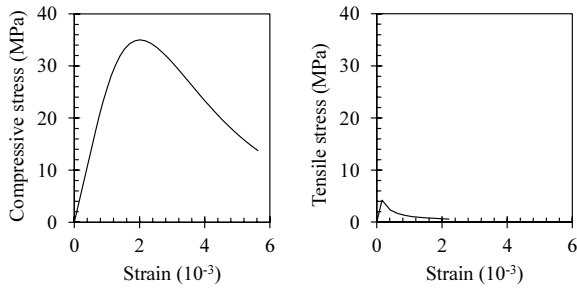
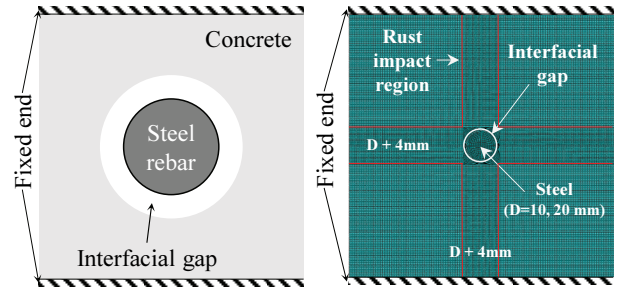


Fig. 1. Constitutive relation of concrete for FE model

해석과정에서 철근 모델이 콘크리트 모델에 침투할 가능성을 배제하고, 부식에 의한 철근 직경 팽창이 콘크리트 계면에 응력으로 작용될 수 있도록 철근과 콘크리트 표면에 접촉 요소(contact element)가 적용됐다. 또한 철근은 Slave surface로 설정하고 콘크리트 계면은 Master surface로 각각 정의됐다. 철근과 콘크리트를 구성하는 요소들 간의 침투현상을 없애기 위해 철근은 콘크리트 보다 더 세밀한 메쉬(mesh)를 적용했고, 두 모델 표면의 접선방향과 법선방향 거동은 각각 마찰계수 0.40와 Hard contact로 설정했다.

콘크리트는 단면의 항복, 균열, 그리고 파단을 구현하기 위해 비선형 물성치인 Concrete damaged plasticity를 적용했으며, 이때 적용되는 변수는 ABAQUS 매뉴얼에 제시된 디폴트(default) 값을 적용했다. 반면, 철근은 부식에 의한 직경팽창을 균일한 형태로 구현하기 위해 선형 탄성체의 물성치(탄성계수: 210,000 MPa, 프아송비: 0.3)를 적용했다. 콘크리트의 물성치는 Table 1과 Fig. 10에 상세히 정리되어 있다. 녹 형성으로 인한 철근의 직경팽창은 표면 압력 재하를 통해 구현됐으며, 예비 해석을 통해 콘크리트 계면의 공극이 모두 채워진 후 철근 직경  $2.57 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ 의 팽창은 콘크리트 계면에 가해지는 응력 1.0 MPa로 계산된다.

메쉬는 철근 표면에 발생하는 녹의 영향의 민감도에 따라 Fig. 2와 같이 두 개의 영역으로 분류되며, 메쉬의 크기는 콘크리트 피복 두께에 따라 변화된다. 철근 부식의 영향이 크게 미치는 영역과 그 외의 영역은 각각 콘크리트 피복 두께의 1/100과 3/200로 메쉬 크기를 설정했다. 철근-콘크리트 단면은 단철근이 배근된 정사각형 단면으로 모델링 되었고, 콘크리트 피복두께는 50, 75, 100 mm 범위로 설정됐다. 동시에 철근은 10.0와 20.0 mm 직경의 원형철근으로 가정했으며, 계면 간격은 1.0, 5.0 및 10.0  $\mu\text{m}$ 로 설정했다.



Interfacial gap: 1.0, 5.0 and 10.0  $\mu\text{m}$   
 Cover depth: 50, 75 and 100 mm  
 Steel diameter (D): 10 and 20 mm  
 Fixed end at top and bottom  
 Contact boundary at Interface  
 Rust impact region meshed with 1/100 of cover depth  
 Other area meshed with 3/200 cover depth

Fig. 2. Schematic and finite element model for steel corrosion in concrete

### 3. 해석결과

#### 3.1 철근 부식에 따른 콘크리트 단면의 거동

본 연구에서는 부식에 의한 철근 직경팽창과 이로부터 파생되는 콘크리트 계면의 인장응력 관점에서 콘크리트 단면의 거동을 분석했다. 이때 콘크리트 계면에 발생하는 응력은 계면 상부에서 도출된 최대 인장 주응력(maximum principal tensile stress)이다. 즉, 철근 부식 정도에 따른 콘크리트 단면의 성능 변화(항복, 균열, 파단)와 콘크리트 계면의 완충효과는 철근표면에 형성된 녹(rust formation)과 콘크리트 계면에 작용하는 최대 인장 주응력의 관계를 통해 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 부식은 철근 표면에 생성된 녹이 콘크리트 계면의 공극을 채우기 전까지 단면 거동에 아무런 영향을 미치지 못했다. 또한 철근 표면에 생성된 녹이 계면의 공극을 채운 후 단면은 빠르게 항복상태에 도달 후 균열이 시작됐다.

철근 부식에 따른 콘크리트 단면의 거동에서 피복두께의 영향은 Fig. 4와 같으며, 피복두께와 철근 직경에 관계없이 철근 표면의 녹이 콘크리트 계면의 공극을 채우지 못한다면 인장응력은 발생되지 않았다. 또한 철근 표면의 녹이 콘크리트 계면의 공극을 채운 후 약 1.0  $\mu\text{m}$  증가되면, 콘크리트 계면에 작용하는 인장응력은 급격히 증가되어 단면을 항복시켰다. 이는 콘크리트 계면 공극이 철근 표면에 생성되는 녹에 대한 완충 효과를 제공함을 의미한다. 만약 이 공극이 없다면 콘크리트 단면은 철근의 부식 개시와 동시에 손상(항복 또는 균열)을 입게 될 수 있다. 피복두께는 부식에 의한 철근 표면의 직경 팽창과 관련하여 콘크리트 계면의 항복 및 균열 발생에 큰 영향을 미치지 못했지만, 콘크리트 계면의 파단

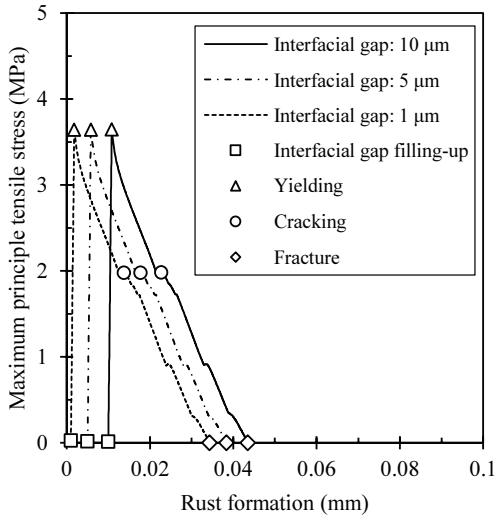


Fig. 3. Cross-sectional behaviour of steel reinforced concrete under corrosion with 50 mm of cover depth and 10 mm of steel diameter

에 대해서는 지배적인 영향을 미친다. 20 mm 직경의 철근이 배근된 경우, 피복두께 50 mm인 단면은 약 25 μm의 녹이 철근표면에 형성된 후에 균열이 발생된 반면, 피복두께 100 mm인 단면은 약 30 μm의 녹이 철근표면에 형성된 후 균열이 발생되었다. 이러한 경향은 단면의 파단 상태에서 더욱 명확하게 나타나는데, 피복두께가 50 mm와 100 mm인 단면은 각각 40 μm와 80 μm 이상의 녹이 철근 표면에 형성되어야 계면의 파단이 발생됐다. 이는 콘크

리트 피복은 철근 부식으로부터 유발되는 콘크리트 계면 응력에 대한 저항력을 증가시키기 때문이다. 그러나 항복 후 응력 저하와 같은 구조적 거동에 대한 피복두께의 영향은 미미하게 나타났는데, 이는 단면의 기하학적 특성이 아닌 탄성 계수, 콘크리트의 손상 매개변수(damage parameter)와 같은 콘크리트의 재료적 특성에서 비롯된 것이다.

철근 직경의 증가는 단면이 파단 상태에 도달하는데 필요한 녹의 양을 압도적으로 증가시키고, 항복 후 응력 감소 속도를 지연시켰다(Fig. 5). 단면 손상 측면에서 철근 직경의 영향은 콘크리트 계면의 면적 차이로부터 발생할 수 있다. 따라서 비록 철근 표면에 재하되는 압력은 동일할지라도 철근 직경의 변화에 따라 계면에 작용하는 응력이 분포되는 면적은 증가 또는 감소하게 된다. 즉, 철근 직경의 증가는 콘크리트 계면의 면적 증가를 수반하게 되고 그 결과 동일한 응력에 대해 분포면적을 증가시킨다. 따라서 동일한 속도로 철근 부식이 진행될 때, 철근 직경의 증가는 콘크리트 단면의 균열 및 파단을 지연시킬 수 있으며, 항복 이후 응력 감소 속도도 지연시킬 수 있다.

### 3.2 철근 부식에 의한 단면 균열 요인

철근 부식의 정도에 따른 콘크리트 단면의 성능점(항복, 균열 및 파단) 변화를 계면 공극, 철근직경, 그리고 피복두께를 매개변수로 하여 Fig. 6에 도식화했으며, 범례의 C는 피복두께를 R은 철근 직경을 각각 의미한다. 각 단면에 대한 성능점은 부식으로 인한

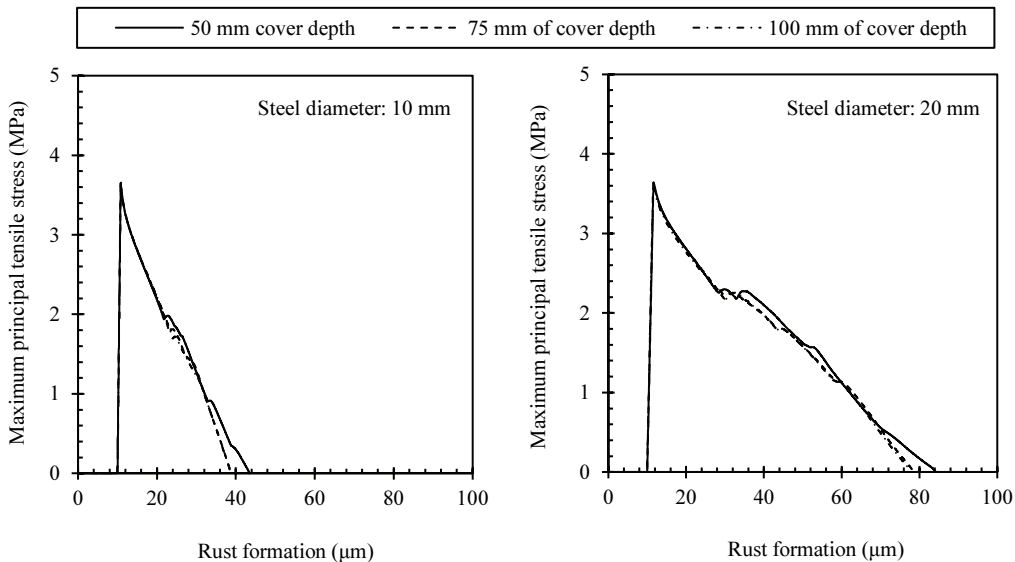


Fig. 4. Cover depth impact on the cross-sectional behavior of reinforced concrete arising from steel corrosion

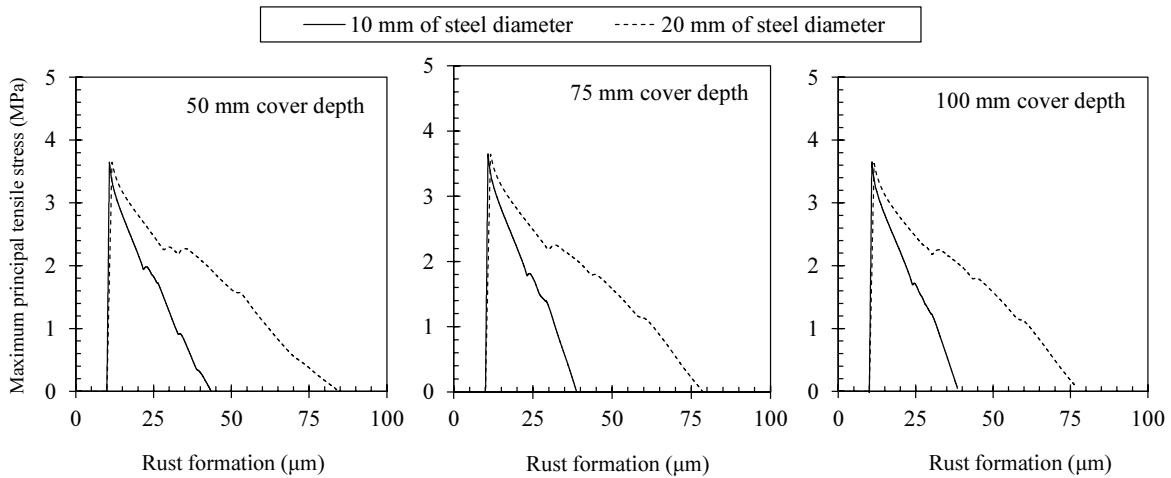


Fig. 5. Maximum principal tensile stress to concrete with respect to rust formation

철근의 직경팽창과 콘크리트 계면에 발생하는 인장응력의 관계를 통해 도출됐다. 철근 부식에 의한 콘크리트 단면의 손상에 있어 피복두께는 큰 영향을 미치지 못했다. 예를 들어, 계면 공극에 대한 철근 직경비  $2.0 \times 10^{-3}$ 인 단면(철근 직경 20 mm, 계면 공극  $10 \mu\text{m}$ )인 단면에서 항복 및 균열 발생을 위한 녹량은 각각  $11.2 \sim 11.6 \mu\text{m}$ 와  $26.1 \sim 28.0 \mu\text{m}$ 이다. 반면에 피복두께의 증가는 단면 파단을 유

발시키는 녹의 양을 증가시켰다. 즉, 계면 공극에 대한 철근 직경비  $2.0 \times 10^{-3}$ (철근 직경 20 mm, 계면 공극  $10 \mu\text{m}$ )이고 피복두께가 각각 50, 75, 그리고 100 mm인 단면은 각각 철근 부식량 53.1, 84.0 및  $92.6 \mu\text{m}$ 에서 파단됐다. 이는 외부 부식 환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물을 설계하는 데 중요한 의미가 있다. 증가된 피복 두께는 부식에 대한 저항성 향상보다 콘크리트 내 염화물이온의 이동 속도를 감소시키는 역할이 지배적인 것이며, 이를 통해 구조물의 사용수명을 더욱 확보할 수 있음을 시사한다. 그러나 구조물의 자중, 수화열 및 경제적 비용과 같은 잠재적인 부작용 때문에 과도한 피복두께를 사용한 콘크리트 구조물 설계는 지양해야 한다.

철근 직경은 콘크리트 단면의 항복, 균열 및 파단을 유발시키는 철근 부식량에 매우 주요한 영향을 미치며, 그 영향성은 파단 > 균열 > 항복 순이다. 즉, 피복두께가 75 mm 이며, 계면 공극 대 철근 직경비가  $1.0 \times 10^{-3}$ 과  $2.0 \times 10^{-3}$ 인 단면에서 항복, 균열, 그리고 파단을 유발시키는 부식량은 각각 10.8, 22.5,  $43.6 \mu\text{m}$ 와 11.6, 27.7,  $84.0 \mu\text{m}$ 이다. 균열 측면에서 구조물의 사용 수명을 판단할 경우, 20 mm의 철근이 배근된 콘크리트 단면은 10 mm의 철근이 배근된 콘크리트 단면에 비해 약  $5.2 \mu\text{m}$ 의 추가적인 녹을 허용할 수 있으며, 이는 약 수십년 이상 구조물의 사용수명 증가를 의미한다.

콘크리트 계면 공극은 부식으로부터 유발되는 단면 균열에 가장 중요한 요소로 작용한다. 계면 공극의 크기가  $1.0 \mu\text{m}$ 인 단면에서 철근 표면에 생성된 녹은 계면을 채운 후 약  $10.4 \sim 18.0 \mu\text{m}$  더 성장되어야 단면의 균열을 유발시킬 수 있으며, 이 수치는 계면 공극 크기가 5.0와  $10 \mu\text{m}$ 인 단면에서 각각  $10.3 \sim 18.0 \mu\text{m}$ ,  $10.8 \sim 18.0 \mu\text{m}$ 의 범위로 나타났다(Table 2). 또한 단면의 항복을 유발시키는 철근의 부식량은 그 직경에 다소 영향을 받았다. 즉, 10 mm 와 20

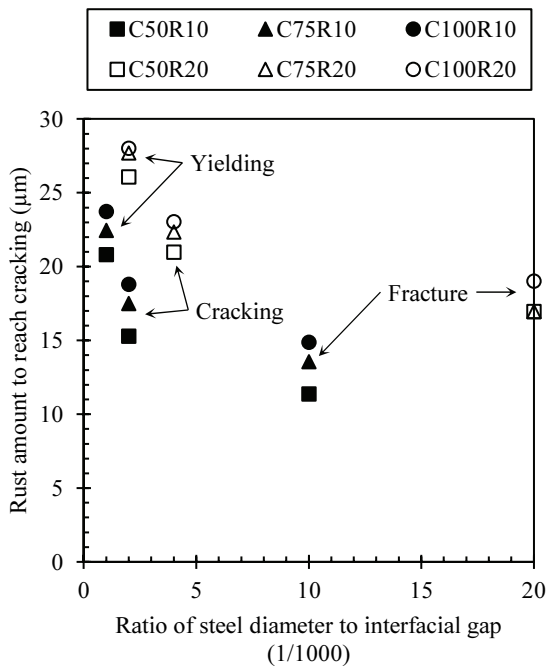


Fig. 6. Structural performance of steel-reinforced concrete driven by steel corrosion

**Table 2. Rust amount beyond the interfacial range to reach yielding and cracking of concrete cover depending on interfacial gap, steel diameter and cover depth**

Cover depth (mm)	Steel diameter (mm)	Interfacial gap (μm)	Rust amount beyond the interfacial range to reach (μm)	
			Yielding	Cracking
50	10	1.0	0.844	10.372
		5.0	0.843	10.294
		10.0	0.812	10.800
	20	1.0	1.644	15.951
		5.0	1.638	15.975
		10.0	1.267	16.061
75	10	1.0	0.850	12.556
		5.0	0.846	12.500
		10.0	0.823	12.452
	20	1.0	1.661	15.951
		5.0	1.666	17.353
		10.0	1.584	17.694
100	10	1.0	0.856	13.877
		5.0	0.875	13.795
		10.0	0.823	13.737
	20	1.0	1.674	18.016
		5.0	1.606	18.028
		10.0	1.598	18.028

mm 직경의 철근이 배근된 콘크리트 단면의 경우, 철근 표면에 생성된 녹이 계면 공극을 채운 후 약 0.8~1.6 μm의 녹이 철근표면에 추가적으로 생성되어야 단면을 회복시킬 수 있었다. 이는 철근의 직경이 커짐에 따라 철근 부식에 의해 콘크리트 계면에 작용하는 합력(resultant force)을 지지할 수 있는 면적이 증가되기 때문이다.

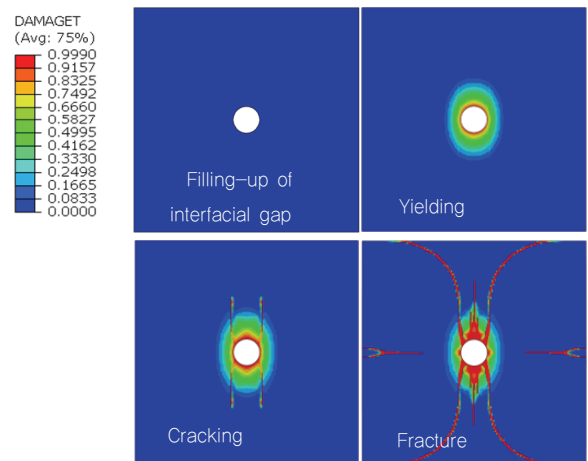
### 3.3 콘크리트 단면의 균열 위험

철근 부식으로부터 유발되는 인장응력에 의한 콘크리트 단면의 균열 가능성은 손상 매개변수(tensile damage parameter)의 분포를 통해 나타낼 수 있으며, Fig. 7은 계면 공극 10 μm, 피복두께 75 mm, 그리고 직경 20 mm의 철근이 배근된 콘크리트 단면의 손상 매개변수 분포이며, 이 분포는 (1) 철근 표면 녹 생성에 의한 계면 공극 채움 (2) 항복 (3) 균열 개시 (4) 단면 파단의 단계로 분류되었다. 손상매개변수 0과 0.99는 각각 단면의 완전 탄성과 소성 상태를 의미한다.

철근 표면에 생성된 녹이 계면 공극을 채우는 단계에서 균열의 가능성은 거의 없었으며, 손상 매개변수의 변화 역시 확인되지 않았다. 철근 표면에 생성된 녹은 콘크리트 계면의 공극을 완벽히

채우기 전까지 콘크리트 단면의 거동에 악영향을 미치지 못했으며, 오히려 철근과 콘크리트의 부착력을 강화시킬 수 있다. 이는 계면 공극이 갖는 철근 부식에 대한 완충 효과이다. 철근 부식이 콘크리트 계면의 공극을 채운 이후에도 지속되면 콘크리트 계면이 항복상태에 도달한 이후 철근 표면에 추가적인 녹 형성으로 인해 균열은 계면으로부터 콘크리트 단면의 상·하면 방향으로 급속하게 성장하여 최종적으로 콘크리트 단면의 좌·우측면에서도 균열을 유발 시켰다. 이는 고정단이 적용된 콘크리트 단면의 상부와 하부 방향으로 인장응력이 집중되기 때문이다.

콘크리트 단면의 인장손상 분포(Fig. 7)는 탄성계수 저하에 대한 시각화를 통해 단면의 균열 가능성과 구조물의 안전성을 나타낸다. 철근 부식으로 인해 콘크리트 계면의 공극이 채워지는 단계에서 인장손상은 확인되지 않았지만, 그 이후 철근 표면에 추가적으로 형성된 녹은 콘크리트 단면의 계면 부분을 항복시켰다. 그럼에도 불구하고 단면에 발생된 인장손상 수준은 콘크리트 구조물의 기능 수행 측면에서 심각한 악영향을 미치지 않을 수도 있다. 다만, 지진과 같은 가혹한 상황에 대한 구조물의 안전성을 확보하기 위해 보강이 필요할 것이다. 균열 초기에 철근을 둘러싼 콘크리트 계면 부근의 탄성계수는 거의 0으로 수렴되었고 이는 철근 부식에 의해 유발되는 콘크리트 계면의 국부적 균열로 인한 결합강도 손실을 의미한다. 하지만 거동학적 측면에서 철근과 콘크리트 간의 부착 강도는 구조물의 성능을 온전히 대변할 수 없기 때문에 부식에 의한 계면의 국부적 균열로써 구조물의 사용수명을 판단하는 것은 무리가 있다.



**Fig. 7. The possibility of cracking at the steel-concrete interface arising from steel corrosion expressed in the form of contour for tensile damage**

## 4. 고찰

### 4.1 철근 부식 시 콘크리트 구조물의 사용수명

염화물이온의 침투속도는 부식개시에 결정적인 영향을 미치는 것은 자명한 사실이며, 부식 환경에서 구조물의 사용성에 지배적인 영향을 미친다. 예컨대, 철근의 공식(pit corrosion)은 콘크리트 구조물의 사용성과 안전성에 영향을 미치지 못한다. 하지만 부식 환경에 노출된 시간이 지속되면, 염화물이온의 침투속도는 콘크리트 구조물의 사용성에 지배적인 영향을 미치게 된다. 염화물이온의 침투속도는 부식 개시뿐만 아니라 재료의 임계 염화물 농도와 함께 콘크리트 단면의 부식 저항성 또한 예측할 수 있는 주요 변수이다(Zhao et al. 2014; KAIA 2018).

부식 환경(즉, 염분 또는/및 탄산화)에 노출된 콘크리트 구조물의 사용수명(serviceability)은 주로 구조 부재에서 부식이 시작되는 시점으로 간주 된다. 철근 부식의 개시는 상용화된 프로그램을 통해 염화물이온 침투속도, 콘크리트 품질과 염화물 공급원(예: 해수, 제빙제), 온도 및 수분 수준과 같은 환경조건을 고려하여 예측될 수 있다. 하지만 이마저도 입력가능한 매개변수가 제한되어 부식 개시 시점에 대한 명확한 판단은 어려운 실정이다. 부식개시가 구조물의 사용성 한계로 간주 된다면 콘크리트 구조물에 대한 불필요한 보수/보강이 이뤄질 수 있다.

철근 부식에 의한 콘크리트 단면의 균열 발생 시점은 구조물의 사용수명을 보다 합리적으로 판단할 수 있는 기준이 된다. 부식에 의한 철근직경의 팽창은 콘크리트 계면으로부터 시작되어 표면까지 성장하는 균열을 유발시킨다. 특히 표면의 균열은 염화물 침투 측면에서 구조물의 성능을 저해하는 치명적인 요인이 된다. 따라서 콘크리트 구조물의 사용성 한계는 주로 표면균열에 의해 판단되었다. Andrade et al.(1993)은 1,000 mA/m<sup>2</sup>의 부식 전류에서 0.1 mm의 표면균열 발생을 실험적으로 확인함으로써 철근부식과 콘크리트 표면균열의 상관관계를 규명했다. 이 수치는 이후 철근부식과 균열의 상관관계에 관한 대부분의 연구(Concha and Oreta 2018; EL Maaddawy and Soudki 2007; Vu et al. 2005; Cui and Alipour 2018; Zhao et al. 2014)들에서 기준값으로 정의되고 있다.

기능수행의 관점에서는 내부 균열을 통해 구조물의 사용성을 평가하는 것이 적합할 수 있다.

철근-콘크리트 계면에서 발생하는 균열은 철근과 콘크리트의 분리된 거동을 초래할 수 있을 뿐만 아니라 구조물의 소성 거동을 유발시켜 외부 하중에 의한 구조적 성능을 저하시킬 수 있기 때문이다. 따라서 실질적으로 내부균열을 철근부식에 의한 구조물 성

능의 한계로 간주하는 것이 더 적합하다. 본 연구에서는 해석적으로 도출된 철근부식에 의한 계면의 인장응력과 이에 따른 손상 분포(Damage contour)를 통해 콘크리트 계면 부에서 항복 직후 균열이 시작됨을 확인했다. 동시에 부식이 진행됨에 따라 표면균열로 발전됨을 확인했다. Andrade et al.(1993)과 KAIA(2018)는 철근으로부터 5~10 mm 범위에 변형률 게이지를 부착하여 내부 균열의 시점을 측정했다. 그 결과 철근의 부식이 진행됨에 따라 내부 균열의 발생 지점에서 변형률은 급격히 감소하는 반면, 그 외의 영역에서 변형률은 점진적으로 증가되었다. 이러한 변형률 계측은 내부 균열에 대한 명확한 정보로 인해 부식에 따른 구조물의 성능변화를 감지하는데 매우 유용하다. 그러나 모든 철근에 변형률 게이지를 배치할 수 없기 때문에 이를 현장 조건에 적용하는 것은 거의 불가능하며, 내부 균열을 계측하기 위해 변형률 값을 시간 경과에 따라 모니터링해야 하는 한계가 있다.

### 4.2 콘크리트 계면 공극 효과

일반적으로 철근-콘크리트 계면의 공극은 두 재료 간의 전기화학적 반발력에 의해 형성되며, 철근 부식으로 인해 콘크리트 계면에 작용하는 응력을 완화시킬 수 있다. 따라서 철근의 부식량이 이 공극의 범위 내에서 진행된다면 부착강도는 증가될 수 있다. 반면에, 이 공극 범위를 초과할정도의 철근 부식은 콘크리트 계면의 균열을 유발시켜 부착강도를 크게 감소시킨다. 철근 부식에 따른 구조물 거동에 있어 이러한 계면 공극의 완충효과(Buffering effect)를 고려한 연구들이 수행되었으나(Maaddawy and Soudki 2007; Lu et al. 2011; Liu and Weyers 1998; Bazant 1979), 대부분 10 μm의 일정한 계면공극을 적용한 단순화 모델을 사용했다. 콘크리트 계면의 공극은 다짐 또는 진동 지속시간에 따라 철근 표면 주변에 1~10 μm 범위로 형성되는 것이 광학 현미경 관찰(backscattered electron imaging)을 통해 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 계면 공극 크기를 1, 5, 10 μm로 다양하게 설정하여 철근 표면에 형성된 녹이 콘크리트 계면 응력에 미치는 영향을 현실적으로 모델링했다.

콘크리트 계면 공극은 철근부식에 따른 단면의 구조적 거동(항복, 균열 및 파손)에 크게 영향을 미치며, 철근의 직경 또한 콘크리트 단면의 항복 및 균열에 결정적인 영향을 미쳤다. 단, 콘크리트 단면이 항복하기 위해 철근 표면에 형성되는 녹은 계면의 공극 크기를 초과할 수 있도록 생성되어야 하며, 그 초과량은 약 0.8~1.6 μm의 범위이다. 이러한 계면 공극의 완충 효과는 단면 균열 시 더 크게 발현되며, 철근 직경과 피복두께에 의존적이었다. 예컨

대, 피복두께 50 mm 단면의 철근직경이 10 mm에서 20 mm로 증가될 때, 단면 균열 발생을 위해 필요한 철근 부식량은 10.3~10.8  $\mu\text{m}$ 에서 15.9~16.1  $\mu\text{m}$ 로 크게 증가됐다. 단면의 파단까지 고려할 경우 계면공극의 완충 효과는 더욱 명확하게 나타났다. 이는 피복 두께와 철근 직경이 클수록 콘크리트 단면의 항복, 균열 및 파단을 지연시키는 데 도움이 된다는 것을 의미한다. 또한 콘크리트 계면 공극은 다른 변수들에 비해 구조물의 성능 한계에 압도적으로 큰 영향을 미치므로, 계면 공극의 추가적인 확보는 구조물의 사용수명을 직접적으로 연장할 수 있다. 계면 공극의 증가는 철근과 콘크리트 사이의 부착력 감소가 우려될 수 있으나 이형 철근을 사용함으로써 철근의 부착 강도에 대한 기준을 충족시킬 수 있을 것이다. 콘크리트 타설 시 진동의 빈도 축소를 통해 더 많은 양의 계면 공극이 확보될 수 있지만, 이는 콘크리트 품질을 저하시키게 된다. 대안적으로 막 전위(membrane potential)의 사용은 계면 공극의 크기를 허용 범위 내에서 확대시킬 수 있다(Reou and Ann 2010; Ann et al. 2011). 다만, 부식촉진요소(염분, 수분, 산소 등)의 침투가 더욱 용이할 수 있으므로 무조건적인 계면공극의 확보보다는 적정 계면공극의 확보가 중요하다.

## 5. 결론

철근 부식에 따른 콘크리트 구조물의 성능 저하와 철근과 콘크리트 사이에 존재하는 계면 공극을 1~10  $\mu\text{m}$ 로 고려하여 계면의 완충효과를 정량적으로 모델링 했으며, 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 철근부식에 따른 구조물의 거동에 대한 매개변수는 피복두께, 철근직경, 철근과 콘크리트 사이의 계면간격을 포함하며, 구조물의 한계에 도달하기 위한 철근 표면에 생성되는 녹의 양은 이 매개변수들에 크게 의존한다.
2. 철근과 콘크리트 사이의 계면 공극은 콘크리트의 파단 상태에 비해 항복 및 균열에 더욱 지배적인 영향을 미쳤다. 부식에 의해 철근 표면에 생성되는 녹에 대한 콘크리트 계면 공극의 완충효과와 때문으로 추정된다.
3. 철근의 직경의 증가는 철근과 콘크리트 사이에 접촉면적을 증가시킬 수 있기 때문에 콘크리트 피복두께보다 콘크리트 단면이 구조적 한계에 도달하는 것에 더욱 주요한 영향을 미쳤다. 실제로 피복두께는 콘크리트 단면의 항복과 균열을 유발시키는 철근 부식량에 대해 미미한 영향을 미쳤다.

## Conflict of interest

None.

## 감사의 글

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

## References

- ACI PRC-365.1-17 (2017). Report on Service Life Prediction, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- Alexander, M., Beushausen, H. (2019). Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures—review and critique, *Cement and Concrete Research*, **122**, 17–29.
- Al-Sulaimani, G.J., Kaleemullah, M., Basunbul I.A., Rasheeduzzafar (1990). Influence of corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members, *ACI Structures Journal*, **87(2)**, 220–231.
- 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.
- Ann, K.Y. Jung, M.S., Shim, H.B., Shin, M.C. (2011). Effect of electrochemical treatment in inhibiting corrosion of steel in concrete, *ACI Materials Journal* **108(5)**, 485–492.
- Bastidas, D.M., Ress, J., Martin, U., Bosch, J., Iglesia, A.L., Bastidas, J.M. (2020). Crystallization pressure and volume variation during rust development in marine and urban–continental environments: critical factors influencing exfoliation, *Revista de Metalurgia*, **56(1)**, e164.
- Bazant, Z.P. (1979). Physical model for steel corrosion in sea structures—applications, *ASCE Journal of Structural Engineering*, **105(6)**, 1155–1166.
- 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.
- Coronelli, D., Gambarova, P. (2004). Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines, Journal of Structural Engineering, **130(8)**, 1214–1224.
- Cui, Z., Alipour, A. (2018). Concrete cover cracking and service life prediction of reinforced concrete structures in corrosive environments, Construction and Building Materials, **159**, 652–671.
- Dassault Systemes SIMULIA (2017). ABAQUS Software and Documentation, Version 6.14.
- 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.
- Hanjari, K.Z., Kettil, P., Lundgren, K. (2011). Analysis of mechanical behavior of corroded reinforced concrete structures, ACI Structures Journal, **108(5)**, 532–541.
- Ihekwaba, N.M., Hope, B.B., Hansson, C.M. (1996). Pull-out and bond degradation of steel rebars in ECE concrete, Cement and Concrete Research, **26(2)**, 267–282.
- ISO 16311-3:2014. (2014). Maintenance and Repair of Concrete Structures-Part3: Design of Repairs and Prevention, International Organization for Standardization, Switzerland.
- KAIA. (2018). Development of Software for Predicting Service Life of Concrete Structure Exposed to a Marine Environment, OTKCRK180954, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Korea [in Korean].
- Kallias, A.N., Rafiq, M.I. (2010). Finite element investigation of the structural response of corroded RC beams, Engineering Structures, **32(9)**, 2984–2994.
- Li, C.Q., Yang, Y., Melchers, R.E. (2008). Prediction of reinforcement corrosion in concrete and its effects on concrete cracking and strength reduction, ACI Materials Journal, **105(1)**, 3–10.
- 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.
- Lu, C., Jin, W., Liu, R. (2011). Reinforcement corrosion-induced cover cracking and its time prediction for reinforced concrete structures, Corrosion Science, **53(4)**, 1337–1347.
- Melchers, R.E., Li, C.Q. (2009). Reinforcement corrosion initiation and activation times in concrete structures exposed to severe marine environments, Cement and Concrete Research, **39(11)**, 1068–1076.
- 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.
- Rasheeduzafar, S., Hussain, S.E., Al-Saadoun, S.S. (1991). Effect of cement composition on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete, Cement and Concrete Research, **21(5)**, 777–794.
- 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.
- Sanchez-Deza, A., Bastidas, D.M., Iglesia, A.L., Bastidas, J. (2008). A simple thermodynamic model on the cracking of concrete due to rust formed after casting, Anti-Corrosion Methods and Materials, **43(3)**, 248–255.
- Vennesland, O., Humstad, E.P., Gautefall, O., Nustad, G. (1996). Electrochemical removal of chlorides from concrete – effect of bond strength and removal efficiency, Special Publication-Royal Society of Chemistry, **183**, 448–455.
- Vu, K., Stewart, M.G., Mullard, J. (2005). Corrosion-induced cracking : experimental data and predictive models, ACI Structures Journal, **102(5)**, 719–726.
- Zhao, Y., Ding, H., Jin, W. (2014). Development of the corrosion-filled paste and corrosion layer at the steel/concrete interface, Corrosion Science, **87**, 199–210.
- 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.

#### 철근부식에 의한 철근 콘크리트 단면의 손상 해석

본 연구에서는 철근 부식에 의한 콘크리트 단면의 구조적 거동을 정량화하기 위해 철근 표면에 형성되는 녹을 모델링했으며, 변수로는 철근과 콘크리트 사이의 계면 공극, 피복두께, 철근 직경을 취했다. 철근 부식시 구조적 한계에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 계면의 공극크기였으며, 철근 직경, 피복두께 순으로 나타났다. 피복두께 75 mm, 철근직경 20 mm의 콘크리트 단면에서 계면의 공극이 1  $\mu\text{m}$ 에서 10  $\mu\text{m}$ 로 증가되면, 균열을 유발시키는 철근 부식량은 16.95  $\mu\text{m}$ 에서 27.69  $\mu\text{m}$ 로 크게 증가 되었다. 또한 철근 표면에 형성된 녹이 계면의 공극을 다 채우기 전까지 콘크리트 단면에는 손상이 발생되지 않았으며, 계면공극 범위를 넘어서는 양의 녹이 철근 표면에 형성된 후 콘크리트 단면은 항복, 균열 및 파단 상태에 이르렀다.