

## 철근 부식과 축방향 하중을 받는 철근-콘크리트 기둥 단면의 손상 평가

# Evaluation of Cross-Sectional Damage for RC Column Subjected to Axial Loading and Steel Corrosion

김창영<sup>1</sup> · 안기용<sup>2\*</sup>

Changyoung Kim<sup>1</sup> · Ki Yong Ann<sup>2\*</sup>

(Received November 8, 2023 / Revised November 27, 2023 / Accepted November 28, 2023)

The present study concerns modelling the structural behaviour for concrete structure into the crack initiation at corrosion of steels. The degradation source included the axial load and steel corrosion. A development of the rust formed on the steel surface was considered with the interfacial gap between steel and concrete. As a result, the tensile damage could occur on the surface of concrete into the cracking with no steel corrosion, which could be further developed by the increasing rust formation, while the cracking at the steel-concrete interface was mainly attributed to the compressive deformation, being restricted within the interfacial zone.

**키워드** : 콘크리트, 철근, 손상, 변형, 균열개시

**Keywords** : Concrete, Steel, Damage, Deformation, Crack initiation

## 1. 서론

해상교량에서 교각은 사용 하중(service load)을 직접적으로 지탱하는 구조요소로서 지속적인 축방향 하중을 받게 된다. 사용하중은 통상적으로 일정한 양의 축방향 하중으로 취급되며, 설계시 콘크리트 압축강도의 10 ~ 30 % 수준으로 가정된다. 이 사용하중으로 취급되는 축방향 하중에 의한 기둥 변형은 종방향으로의 압축변형과 횡방향으로의 인장변형이 동시에 발생된다. 즉, 기둥의 길이는 축소되는 변형이 발생되고 동시에 포아송비로 단면적은 확장되는 변형 형상을 보인다. 이와 같은 기둥의 3차원 변형은 축방향 하중, 탄성계수 그리고 포아송비에 의해 발현되며, 이는 Hooke의 법칙에 따른다.

염화물(Cl<sup>-</sup> 이온)의 침투 측면에서 해상교량은 일반 교량에 비해 취약한 환경적 특성을 갖고 있다. 이러한 조건은 축하중에 의한 3차원 변형과 함께 교각의 구조적 성능에 매우 치명적이며 불리한 조건을 부여하게 된다. 콘크리트 구조물에 근입된 철근의 부식은 표면에 녹을 발생시켜 철근의 유효 직경을 감소시킬 수 있다. 실제로 철근 부식에 의한 콘크리트 기둥 단면의 결정적인 손상은 부식

개시 시점이 아닌 일정량 이상의 부식이 진행된 후 발생된다. 이는 철근-콘크리트 계면에 존재하는 간극이 철근 표면에 생성된 녹으로 메워진 이후 단면의 손상이 발생됨을 의미하며, 이는 녹에 의한 철근 직경의 팽창에 대한 계면 간극의 완충효과에 기인한다(Hwang and Ann 2023). 결과적으로 부식이 진행될수록 철근 표면의 녹은 그 직경을 확장시키고, 이는 축하중에 의한 콘크리트 기둥 단면의 인장 변형과 중첩된다. 그 결과 콘크리트 단면은 인장 변형에 의해 항복(탄성한계)에 도달할 가능성이 더욱 높아지므로 철근 부식과 사용하중(축하중)의 조합은 콘크리트 기둥의 성능에 불리하게 작용하게 된다.

사용하중에 의해 종방향으로 구속효과를 갖는 철근-콘크리트 구조물에서 철근의 부식효과를 반영한 기존 대다수의 해석적 연구에서는 철근-콘크리트 철근 부식에 대한 계면 공극의 완충 효과를 무시했다(Melchers and Li 2009; Alexander and Beushausen 2019; Li et al. 2008; Andrade 2017). 본 연구에서는 콘크리트 기둥 단면 균열의 철근 부식과 사용하중의 영향성을 분석하기 위해 사용하중으로서 축방향 하중이 반영된 콘크리트 기둥을 범용 유한요소 프로그램(ABAQUS)을 이용하여 모델링했다. 기존의 해석적

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

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

<sup>2</sup>한양대학교 건설환경공학과 교수 (Department of Civil & Environment Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

Copyright © 2023 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

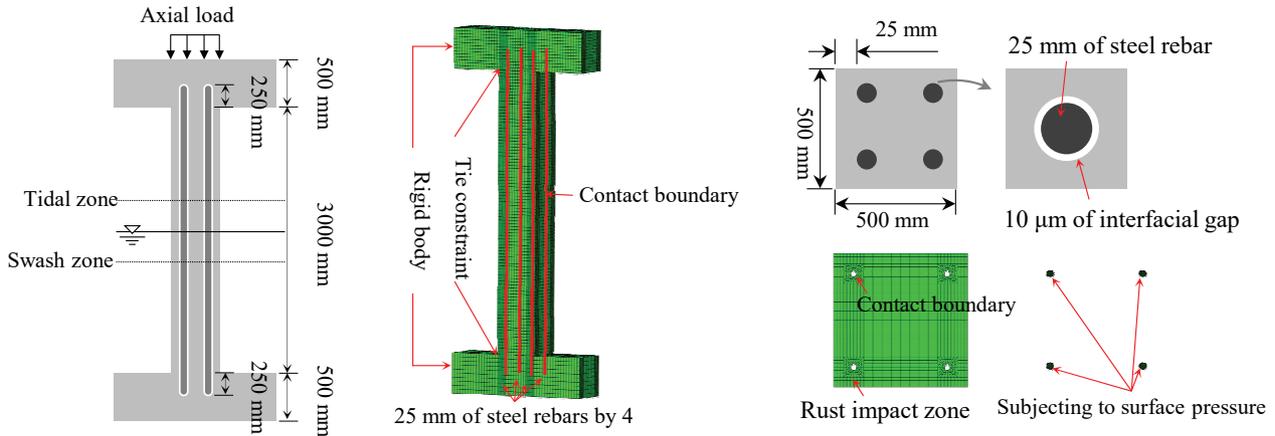


Fig. 1. Schematic for modelling bridge pier exposed to a seawater environment at steel corrosion

연구와 달리 본 연구의 유한요소모델은 철근 부식에 대한 콘크리트 계면 공극의 완충 효과를 반영했으며, 철근의 부식과정은 그 직경을 점진적으로 확장시켰다. 철근의 녹형성으로 인한 콘크리트 기둥 단면의 균열은 철근과 콘크리트 사이의 계면으로부터 시작되어 단면의 표면으로 진행되는 것으로 간주되었다. 그러나 실제로 인장 및 압축 변형으로 인한 철근 콘크리트 기둥의 항복, 균열, 파단 또는 파괴는 철근 부식과 축방향 하중의 중첩에 의해 발생된다. 또한 축방향 하중은 철근 부식에 비해 기둥의 변형에 더 민감한 영향을 미치므로, 구조물의 기하학적 특성 및 경계 조건 관점에서 단면 손상 또는 파괴에 지배적인 매개변수가 될 수 있다. 이에 따라 해석적 접근을 통해 단면균열에 대한 (1) 기하학적 조건으로 대변되는 단면에서의 위치와 (2) 경계조건으로 대변되는 축방향 하중과 철근 부식량의 영향성을 분석했다.

축방향 하중으로 인해 철근이 부식된 콘크리트 기둥 단면균열 검토를 위해 조수간만대(Tida splash zone)에 노출된 교각을 모사하였으며, 부식으로 인해 철근에 형성된 녹은 기둥의 중앙부에서 시작되는 것으로 가정하였다. 또한 콘크리트에 근접된 철근 표면의 녹은 염소 이온에 의해 발생되고 일정한 속도와 선형적 형태로 형성되며, 그 물성은 철근과 동일한 것으로 가정했다. 녹 형성으로 인한 철근의 직경팽창은 표면 압력 재하를 통해 구현됐다. 콘크리트 계면의 공극이 모두 채워진 후, 철근 직경의 1 μm 팽창은 콘크리트 계면에 38.91 MPa 압축 응력으로 작용한다(Hwang and Ann 2023). 부식에 의한 녹 증가 과정을 단순화하기 위해 부식(즉, 공식)의 시작은 철근 임의의 위치에서 발생한 후, 녹은 철근 표면을 따라 전파되어 균일한 녹으로 형성되는 것으로 가정했다. 결과적으로 녹은 강철 표면에 균일하게 발달하도록 모델링 되었다. 본 논문에서는 부식 개시 및 전파의 모델링은 본 연구에 포함되지 않는다.

## 2. 유한요소 모델링

사용하중과 철근 부식의 중첩으로 인한 콘크리트 기둥의 단면 균열 검토를 위해 Fig. 1과 같이 4개의 원형 철근으로 보강된 철근-콘크리트 기둥이 3차원 8절점 연속체(C3D8) 요소로 모델링 됐다. 구조물의 3차원 거동에서 수직방향 축하중과 콘크리트 기둥의 체적 변형은 필연적인 관계이며 프아송비(Poisson's ratio)로부터 기인된다. C3D8 요소를 사용한 3차원 유한요소 모델은 수직방향 축하중에 의한 기둥의 체적 변형과 철근 부식으로 인한 인장 변형의 중첩을 순차적으로 구현할 수 있다. 콘크리트 기둥의 압축강도와 인장강도는 각각 35.0 MPa와 3.5 MPa로 가정했으며, 프아송 비는 0.3으로 사용했다. 이때 탄성계수는 26,987 MPa이며, 비선형 콘크리트의 응력-변형을 관계는 Fig. 2와 같다.

콘크리트 기둥은 보와 기초로 구속되는데 축방향 하중으로 발생하는 변형을 온전히 콘크리트 기둥에 집중 시키기 위해 강체(rigid body)로 모델링했다. 철근 표면에 균일하게 형성된 녹이 부식 진행에 따라 선형적으로 발달되는 것을 모사하기 위해 4개의 철근은 선형 탄성 물성치를 적용했으며, 탄성계수 프아송비는 각각 210,000 MPa와 0.3이다. 반면, 콘크리트 기둥은 단면의 손상 및 균열을 검토하기 위해 concrete damaged plasticity를 이용했다. 철근의 기하학적 체원은 직경 25 mm와 길이 3500 mm이며, 콘크리트 기둥 단면은 500 mm × 500 mm이며, 그 길이는 3000 mm이다. 콘크리트 단면의 피복 두께는 유한요소 모델에서 철근 직경과 콘크리트 기둥 단면의 크기를 고려하여 25 mm로 설정했다. 콘크리트 계면 공극이 갖는 철근 부식에 대한 완충효과를 반영하기 위해 철근과 콘크리트 모델 사이에는 10 μm의 공간을 설정했다. 콘크리트 기둥 단면균열에 대한 주철근의 부식 영향성 분석을

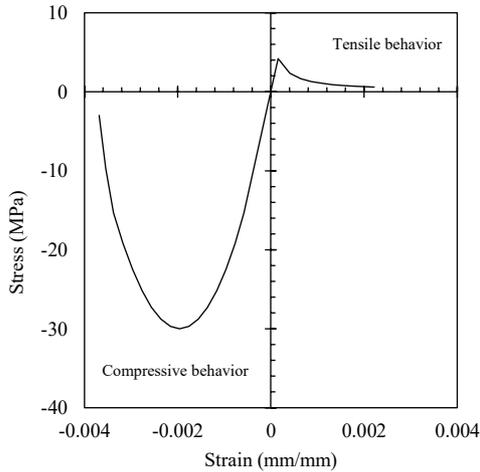


Fig. 2. Constitutive model for concrete

위해 횡방향 구속 철근(confinement)의 배근은 생략되었으나 축방향 하중에 대한 안전성 측면에서 설계기준을 만족한다. 또한 그림 1에서 보여지는바와 같이 기둥 조수간만에 노출된 기둥을 모사함에 따라 철근 부식은 기둥의 중앙부에서 시작되는 것으로 가정했다. 또한 사용하중으로 적용된 수직방향 축하중의 크기는 콘크리트 압축 강도의 5 ~ 30 % 수준(437.5~2625 kN)으로 가정했다.

콘크리트 기둥의 양단은 강체로 모델링된 보와 기초의 중앙면에 tie-constraint를 이용하여 결합시켰으며, 기초 부분의 경계조건을 고정단으로 설정했다. 또한, 축하중에 기인한 기둥의 길이방향 압축 변형에 의해 철근이 기둥과 접합된 보 또는 기초를 통과하지 않도록 하기위해 철근의 양단부를 강체로 모델링 된 보와 기초의 250 mm 깊이까지 근접시켜 tie-constraint를 적용했다.

부식으로 인해 철근 표면에 형성된 녹에서 기인된 철근 단면의 확장과 이로부터 콘크리트 계면에 작용하는 응력의 상호작용을 구현하기 위해 철근과 콘크리트 모델의 표면에 면대면 접촉경계(surface to surface contact boundary)를 적용했다. 콘크리트 계면은 master surface로 철근의 표면은 slave surface로 각각 정의했으며, 접촉면에서 수직방향의 거동은 hard-contact로 수평방향 거동은 friction rough로 각각 정의했다. 수직방향 거동인 hard-contact은 해석과정에 걸쳐 유한요소 모델의 slave surface 가 master surface로 침투하는 것을 방지하는 역할을 한다. 철근 계면의 공극의 철근 부식에 대한 완충 효과를 유한요소 해석상에서 구현하기 위해 철근 주변에 존재하는 Rust impact zone(Fig. 1)은 약 12.5 mm 크기의 메쉬를 사용하여 모델링 했으며, 그 밖의 영역은 이보다 큰 약 25 mm 크기의 메쉬를 사용하여 모델링 했다.

### 3. 결과

#### 3.1 부식으로 인한 구조적 열화

본 연구에서 부식은 간만에 위치한 기둥의 중앙 높이에서 시작되어 철근 직경을 따라 고르게 분포되는 것으로 이상화시켜 모델링 됐다. 따라서 균열 위험성은 기둥의 중앙 높이에서 검토되었다. 이에 따른 축방향 하중과 철근 부식 진행에 따른 콘크리트 기둥의 구조적 열화는 압축응력과 인장응력으로부터 기인한 기둥 단면의 손상 분포도(damage contour)로 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 콘크리트 공칭강도의 20 % 수준의 축방향 하중과 함께 철근 부식을 받는 철근-콘크리트 기둥의 구조적 열화는 0 ~ 0.99 까지의 손상 매개변수(damage parameter)로 표현된다. 단면의 손상 분포도에서 파란색은 손상 매개변수 0을 나타내며, 외력에 의해 발생된 콘크리트의 변형이 외력이 제거된다면 구조체의 변형이 완전 복원됨을 의미한다. 이 경우 콘크리트 구조체는 탄성 계수가 전혀 소실되지 않아, 완전 탄성체로서 거동한다. 반면 빨간색은 손상 매개변수 0.99를 의미하는 것으로서 외력이 제거된 후에도 한번 발생된 구조체의 변형은 전혀 복원되지 않음을 의미한다. 즉, 콘크리트는 탄성 계수의 99 % 소실로 인해 변형에 대한 복원력을 상실하여 완전 소성체로 거동하게 된다.

축 방향 하중과 철근 부식의 중첩은 기둥 단면에 인장응력과 압축응력으로 작용하여 콘크리트 피복과 철근-콘크리트 계면에 과도한 손상을 일으켰다. 기둥 단면에 작용하는 인장응력은 콘크리트 피복부에 먼저 균열을 발생시킨 후, 콘크리트 계면 방향으로 균열을 성장시킨 반면, 기둥의 양끝 단면의 손상에는 영향을 미치지 못했다. 압축응력은 콘크리트 계면에 직접적으로 작용하여 손상을 발생시켰다. 콘크리트 피복에 과도한 열화가 집중적으로 분포되면 재료의 탄성계수가 손실됨에 따라 변형에 대한 복원력(resilience)이 상실된다. 변형에 대한 콘크리트의 복원력은 인장 거동에서 더욱 취약하기 때문에 탄성계수 손실 즉, 복원력 상실에 의한 단면 손상 또는 균열은 인장변형에 의해 지배적으로 발생된다. 또한 인장변형의 영향성은 콘크리트 단면의 중앙부에 비해 피복부에 압도적으로 큰 영향을 때문에 축방향 하중과 철근 부식의 중첩에 의한 균열은 피복부에서 먼저 발생될 것으로 추정된다. 피복부와 달리 단면 중앙부에 더 가까운 철근-콘크리트 계면은 압축 변형의 영향이 더 크게 나타났다. 철근-콘크리트 계면은 인장변형보다 압축변형의 영향을 크게 받았으며, 균열은 계면에 제한되어 국부적으로 발생되었다. 또한 압축변형에 의한 균열은 철골-콘크리트 경계면에서 국부적으로 개시되어 진행되었다. 콘크리트 기둥

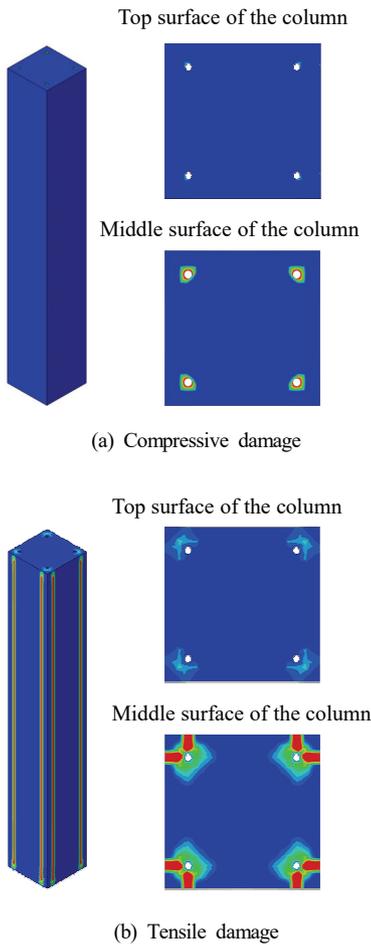


Fig. 3. Damage contour for column subjected axial load equated to 20 % of nominal strength with 30  $\mu\text{m}$  of the rust formation

단면 전반에 걸쳐 발생된 균열 또는 손상은 피복과 철근-콘크리트 계면에 국한되어 발생되었다. 철근 표면에 생성된 녹이 계면의 공극 이상으로 발달하게 되면, 철근을 둘러싼 계면은 이 녹으로 인해 압축응력에 의해 변형된다. 또한 기둥에 재하되는 축방향 하중은 길이방향으로는 압축변형을 발생시키는 반면, 단면의 면적을 확장시키는 변형을 발생시킨다. 이러한 철근 부식과 축 방향 하중의 중첩으로부터 기인된 단면의 변형은 콘크리트 피복과 계면에서의 균열을 유발시킬 수 있다.

### 3.2 균열에 대한 지배적 인자

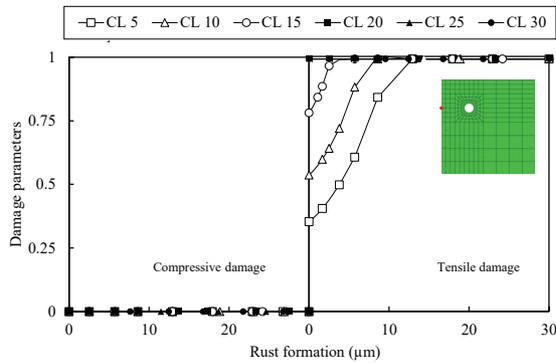
균열 위험은 압축 및 인장 응력으로부터 기인된 손상변수로 표현될 수 있으며, 이 균열 위험에 대한 축방향 하중과 철근 부식의 영향은 Fig. 4와 같다. 축방향 하중의 변화는 콘크리트 강도의 공칭 강도의 0 ~ 30 % 범위 내에서 이루어졌으며, 철근의 부식량은

철근 표면으로부터 30  $\mu\text{m}$ 까지 증가되었다. 또한 본 논문에서 각 공칭 강도에 해당되는 모델은 CL 5~CL 30으로 명명했다. 대칭적인 단면의 기하학적 특성에 의해 모든 역학적 특성은 대칭적으로 발현되므로 수평방향에 대한 손상변수만을 검토했다. 또한 이 손상변수는 철근 부식과 축하중에 직접적으로 영향을 받는 절점에서 유한요소해석을 통해 계산되었으며, 대칭적인 단면의 기하학적 특성에 의해 모든 역학적 특성은 대칭적으로 발현되므로 수평방향된 콘크리트 기둥 표면에서는 축방향 하중이 압축손상에 미치는 영향이 미미한 반면, 인장손상은 녹발생에 의해 큰 영향을 받았다. 실제로 인장 손상은 철근 부식 발생없이 공칭강도의 5, 10, 15 % 축 하중의 재하 만으로도 0.35, 0.53, 0.78에 도달할 수 있다. 인장 손상에 대한 축하중 효과는 철근 부식과 중첩을 통해 더욱 명확히 발현되었다. 즉, 일정 수준의 부식조건에서 축 하중의 증가는 인장 손상을 증가시켰다.

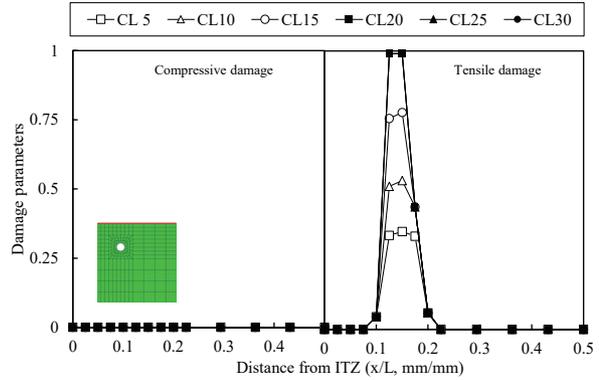
압축 변형은 철근-콘크리트 계면 균열의 주된 손상 원인이었으며, 인장 변형은 계면 균열에 직접적인 원인은 아니지만 계면의 균열 발달에 기여했다. 축방향 하중에 관계없이 철근 부식량이 증가됨에 따라 압축 손상변수도 증가되며, 철근 표면의 부식량이 약 20  $\mu\text{m}$  이상이 되면 압축손상 변수는 0.99로 수렴됐다. 그러나 인장손상 변수는 철근의 부식 진행 정도에 상관없이 약 0.125~0.143 범위로 유지됐다. 계면의 좌측부에서 압축손상 변수는 축하중의 변화 보다 철근 부식량에 더 민감한 응답을 보였다. 또한 동일한 부식량 조건에서 인장손상 변수는 축하중 증가에 따라 미미하게 감소했는데, 이는 철근-콘크리트 경계면에서 압축과 인장 변형이 서로 상쇄되는 효과에 기인된다. 따라서, 압도적으로 많은 철근 부식량은 오히려 철근-콘크리트 계면 내부 표면의 균열 위험을 낮추는 역효과를 가져올 수 있다.

### 3.3 균열에 대한 축하중 효과

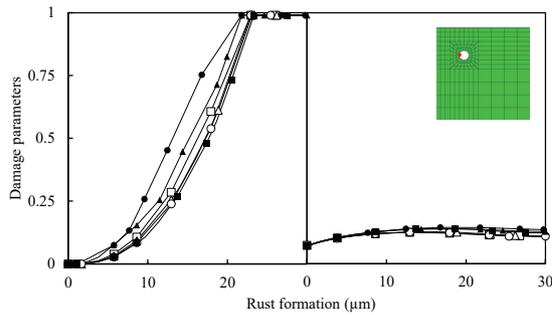
수직방향 축하중에 기인된 압축과 인장응력으로부터 발생하는 콘크리트 기둥 단면의 손상은 Fig. 5와 같이 손상변수의 분포로 정의될 수 있다. 콘크리트 기둥 단면의 손상에 대한 하중 영향을 분석하기 위해 철근 부식 조건은 배제됐으며, 손상 분포는 기둥 단면의 길이 비에 대한 손상변수로 나타냈다. 예컨대, 거리비 0과 0.5는 각각 기둥단면의 표면과 기둥 단면의 중심을 나타낸다. 수직 방향 축하중에 의해 발생하는 압축손상은 단면 어디에서도 발생되지 않았다. 그러나 인장손상은 철근 배근위치의 좌측과 상단 단면 표면에서 수직방향 축하중의 크기에 의존적으로 발생되었다. 즉, 축하중의 증가에 따라 인장손상의 크기 또한 증가되었다. 축 하중



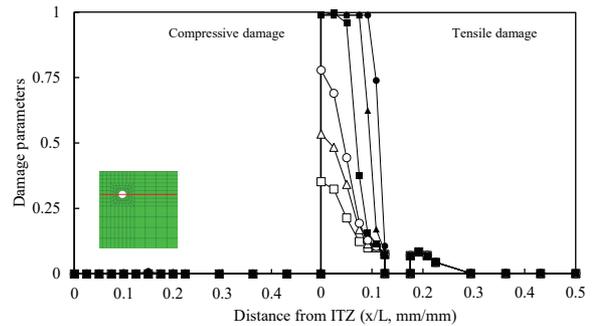
(a) The surface shifted to the left from the center of the interface



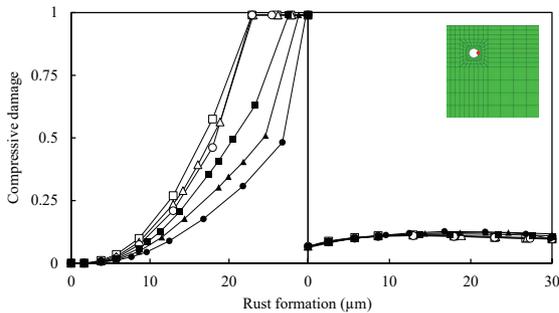
(a) Top surface



(b) Left-hand side for node of the steel-concrete interface



(b) Centerline of steel rebar in the horizontal direction



(c) Right-hand side for node of the steel-concrete interface

Fig. 4. Damage distribution at the cross-section with interface with rust formation

의 크기가 콘크리트 공칭강도의 15% 수준 이상이 되면, 기동 단면의 피복 부분은 심한 손상이 발생되어 균열발생 가능성이 매우 높아졌다. 공칭강도 15% 수준의 축하중 조건에서 단면 상단부의 인장 손상은 거리비 0.1 ~ 0.2범위에 집중적으로 분포되었으며, 그 최대치는 약 0.8로 나타났다. 또한 그 외의 범위에서 모든 인장 손상변수는 0으로 수렴했다. 반면에, 철근의 중심으로부터 수평방향으로 분포되는 인장손상변수는 단면의 표면(거리비 0)에서 발생된 후 거리비 약 0.10내의 영역까지 급격히 감소된다. 이 범위

Fig. 5. Damage distribution at the cross-section with no corrosion

서 인장손상 변수는 축하중의 크기와 밀접한 연관이 있다. 즉, 공칭강도 5 ~ 15% 수준의 수직방향 축하중이 재하된 조건에서 단면 표면의 인장손상 변수는 각각 0.35, 0.53 그리고 0.77로 발현된 직후 계면표면에 가까울수록 점차 감소하여 0으로 수렴했다. 반면 공칭강도 20% 수준 이상의 축하중 조건에서 단면 표면에서 인장손상 변수가 0.99로 발현된 후 일정 영역까지 유지되다가 계면의 표면부에서 급격히 0으로 수렴했다. 이후 단면 내부 계면 표면 (거리비 약 0.17)영역 인장손상 변수는 약간 증가하였다가 거리비 0.3에서부터 0으로 수렴했다. 이를 통해 수직방향 축하중은 콘크리트 피복 균열의 주된 요인으로 작용함을 알 수 있다. 콘크리트 구조물의 피복 균열은 구조물의 성능측면에서 큰 영향을 미치지 않을 수 있지만, 표면으로부터 철근 위치까지 염화물 이온의 침투경로를 감소시킬 수 있다. 그 결과 염화물 침투에 의한 철근 부식과정이 촉진되고, 그 결과 철근 부식으로 인해 계면에 작용하는 압축응력에 기인한 변형 또는 손상은 구조물의 성능을 변화시키게 된다.

## 4. 고 찰

### 4.1 부식과 축하중의 영향

콘크리트 구조물에서 철근 부식은 유효 단면 감소와 피복 균열 때문에 휨강성 측면에서 구조적 용량 저하를 수반하게 된다. 따라서 선행연구(Pantazopoulou and Papoulia 2001)에서 콘크리트 보의 철근 부식속도와 휨강도의 상관관계가 정의됐으며, 그 외에도 부식 진행에 따른 콘크리트 보의 휨강도 저하와 철근이 부식된 구조체의 연성과 강성 변화에 대한 실험적 연구가 수행되었다(Lu et al. 2011; Kordtabar and Dehestani 2021; Liu and Weyers 1998; Andrade et al. 1993; Dao et al. 2010). 철근 부식으로 인한 콘크리트 구조물의 성능 감소를 수학적 모델링과 컴퓨터 모델링을 통해 확인했다. 하지만 이러한 선행 연구들에서 철근 부식에 따른 구조적 성능변화는 외부 하중을 배제한 제한적 조건에서 수행되었으며, 이는 실제 현장조건을 온전히 반영할 수 없는 한계가 있다. 철근-콘크리트 구조물에서 부식은 물, 산소와 함께 염화물 이온이 충분히 공급될 수 있는 조수간만대(Tide splash zone)에서 더욱 빈번하게 발생되므로 해양환경에 건설된 교각은 철근 부식의 위험과 상판구조로 인한 축방향 하중에 항상 노출 되어있다. 따라서 축하중과 철근 부식은 구조물의 특성에 상호 영향을 미치기 때문에 이 두가지 요인의 조합은 구조물의 용량과 내구성을 정의함에 있어 매우 주요한 인자로 작용할 수 있다. 본 연구에서는 단면에 작용하는 인장응력과 압축응력은 각각 피복콘크리트의 균열과 철근-콘크리트 계면의 균열에 주된 영향인자임을 확인했다. 특히 피복균열은 철근 부식의 진행정도에 따라 민감하게 반응했으며, 축하중 또한 피복균열에 매우 주요한 영향을 미쳤다. 하지만 계면균열은 철근 부식량이 30  $\mu\text{m}$ 까지 도달하는 동안 철근이 배근된 위치 주변에서 제한적으로 발생되었다. 축하중이 없는 경우 콘크리트 구조물의 표면균열은 발생되지 않을 것이며, 콘크리트의 피복균열이 발생된다면 염화물 이온은 철근 깊이까지 더 빠르게 침투하여 부식 과정을 가속화시킬 수 있다. 결과적으로, 부식 진행과 함께 계면 균열은 더욱 발달될 수 있으며, 이러한 현상의 반복은 콘크리트 구조물의 성능을 저하시킬 수 있다.

균열과 철근 부식의 과다한 증가는 구조적 한계상태를 의미할 수 있다. 축하중은 철근부식과 증첩되어 콘크리트 구조물의 열화를 가속시킴과 동시에 표면의 인장균열을 유발시킨다. 이 균열로 인해 철근 부식 과정은 더욱 가속화되고 콘크리트 표면과 계면의 균열의 성장속도 또한 가속화될 수 있다. 일정 수준 이하의 균열, 특히 피복콘크리트 표면의 인장균열은 연성, 휨강도 측면에서 구

조적 능력에 영향을 미치지 않을 수 있다. 오히려 부식 진행에 따라 철근-콘크리트 계면의 공극이 채워지며 콘크리트와 철근의 결합력이 증진될 수 있다. 그러나 이 공극량 이상의 녹이 형성된다면 계면에서 심각한 균열이 발생될 수 있으며, 계면에서 발생된 균열은 단면 표면 방향으로 성장하게 된다. 그 결과 계면 공극량 이상 녹을 발생시킬 수 있는 정도의 철근 부식은 유효 단면 감소뿐만 아니라 콘크리트에 대한 부착강도 저하로 이어진다. 즉, 계면에서 압축균열이 발생될 정도의 압도적인 수준의 철근부식은 유효 단면 감소와 철근과 콘크리트의 분리로 구조물의 연성 및 휨강성을 저하시킬 수 있다. 따라서 철근 부식은 항상 압축응력에 의한 계면의 균열을 수반하게 되며, 이는 구조물의 성능 저하로 귀결된다.

### 4.2 구조물 거동에 미치는 요인

축하중과 철근 부식이 증첩된 콘크리트 구조물의 거동에 영향을 미치는 인자는 (1) 축하중의 크기, (2) 철근 표면에 형성된 녹, (3) 철근과 콘크리트의 물성치 그리고 (4) 철근-콘크리트 계면의 공극의 크기이다. 콘크리트와 철근의 물성치에 포함되는 재료의 강도는 일반적으로 설계 기준 및 지침에서 제시되고 있다. 예를 들어, 콘크리트의 강도는 그 중요도가 높거나 위험성이 높은 외부 환경에 노출된 경우 35 MPa이상으로 제한된다(Jamal et al. 2013). 콘크리트 구조물을 설계함에 있어 높은 강도의 콘크리트는 철근 부식으로 인해 발생하는 인장과 압축 응력에 대한 저항성이 크기 때문에 직관적으로 선호될 수 있다. 그러나 본 연구에서는 콘크리트의 강도가 높을수록 철근-콘크리트 계면은 압축균열의 위험에 취약한 반면, 인장균열 위험에는 유리한 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 이러한 문제점에 앞서 일반적으로 콘크리트 강도와 철근의 단면적은 구조물 설계 기준에 의해 결정된다. 실질적으로 재료 물성치는 철근 부식에 따른 구조물의 거동에 영향을 미치는 주요 요인으로 간주되지 않지만, 축하중의 크기, 녹의 양 등은 구조적 한계상태에 대해 큰 영향을 미치는 요인으로 간주된다. 예를 들어, 일반적인 경우 철근-콘크리트 기둥에 사용하중으로 재하되는 축하중은 콘크리트 강도의 5 ~ 30 % 범위로 설정한다. 본 연구에서는 축하중의 증가로 인해 콘크리트 표면의 인장균열이 급격히 진행되어 콘크리트 구조물의 연성 및 휨강성이 저하될 수 있음을 확인했다.

철근 표면에 형성된 녹은 그 분포 형태(균일 또는 불균일 부식)에 따라 구조물의 거동에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서 철근의 부식형태는 철근 균일 부식으로 가정했으며, 이는 철근 부식 과정과 이로부터 유발되는 구조적 성능 변화에 대한 모델링의 편의를

위험이다. 이러한 균일 부식은 염화물을 포함여 양생된 콘크리트 구조물에서 발생할 수 있으며, 철근 표면의 녹은 일정한 두께로 잘 분포된 형태로 형성됨을 의미한다. 따라서 콘크리트 구조물 성능에 영향을 줄 수 있을 만큼 압도적인 양의 녹이 형성되면, 콘크리트 계면에 작용하는 내부응력은 철근의 위치를 따라 고르게 분포될 수 있다. 하지만 실제 현장 조건에서 염소이온과 같은 부식 유발 이온은 서로 다른 시멘트 경화체(cement matrix)의 분포로 구성된 콘크리트에 단일 방향으로 침투된다. 이로 인해 철근 표면의 녹은 염소이온 침투방향에 인접된 표면에서 발생되기 시작하며, 불규칙한 분포 형태인 공식(pit corrosion)이 수반된다. 동일한 부식량 조건에서 공식 부식은 콘크리트 계면 임의의 위치에 응력을 집중시키는 반면, 균일 부식은 응력을 고르게 분포시키며, 이러한 응력분포 형태에 따라 구조물의 성능은 확연한 차이를 보일 수 있다.

철근 부식조건에서 철근과 콘크리트 사이 존재하는 계면의 공극과 철근 부식량의 상관관계는 콘크리트 구조물 거동에 지배적인 영향을 미친다. 부식 조건의 콘크리트 구조물 모델링에서 계면 공극은 콘크리트 내부에 작용하는 응력에 대한 완충효과 반영의 어려움으로 인해 대부분 무시되었다. 본 연구에서는 기존 연구들(Lu et al. 2011; Dao et al. 2010)을 고려하여, 철근표면에 10  $\mu\text{m}$ 의 층형태로 계면공극을 설정했다. 일반적으로 계면 공극은 철근과 콘크리트 사이의 반발력(척력)에 의해 발생되며, 유전체층(di-electric layer)으로 형성된다. 실제로 이 공극은 콘크리트로 침투한 염소이온을 철근 깊이까지 도달할 때 경로 역할을 함과 동시에 철근 부식에 의한 단면팽창으로 콘크리트 내부에서 발생하는 응력을 완충시키는 역할을 한다. 계면 공극은 철근 표면에 형성된 녹으로 인해 콘크리트에 작용하는 압축 응력을 완충하기 때문에 계면 균열 시간에 대한 구조적 용량 추가적으로 부여할 수 있다. 50년동안 염화물에 노출된 철근-콘크리트 구조물의 균열 발생시 부식률(corrosion rate)이 1000  $\text{mA}/\text{m}^2$ 를 초과하는 것을 고려한다면(Balafas and Burgoyne 2011), 10  $\mu\text{m}$ 의 계면 공극량은 5~10년 정도 구조물의 내구수명 증가 효과를 가져올 수 있다. 철근에 대한 막 전위(membrane potential)를 제어함으로써 계면 공극은 증가될 수 있으며, 증가된 계면 공극은 구조물의 사용 수명을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 콘크리트 구조물에 배근되는 철근의 직경은 20 ~ 25 mm를 초과함과 동시에 이형철근을 사용하는 반면 막 전위 제어를 통해 증가된 계면 공극량은 10 ~ 20  $\mu\text{m}$ 로 제한되므로 철근과 콘크리트간의 부착강도에 미치는 악영향은 무시될 수 있다. 따라서 철근 부식에 따른 구조물의 사용성 측면에서 계면의 공극은 구조물의 성능을 향상 시키는 역할을 한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 해양환경을 가정하여 염화물 침투에 의한 철근 부식과 수직방향 축하중의 작용 조건이 모두 적용된 철근-콘크리트 기둥의 손상을 3차원 유한요소 해석을 통해 분석했다. 또한 철근과 콘크리트 사이에 존재하는 계면 공극의 완충효과를 고려하여 부식에 의한 단면 균열 가능성을 판단하였다. 모델링을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 철근-콘크리트 계면 균열은 계면 공극을 압도적으로 넘어서는 양의 부식이 진행된 조건에서 압축변형에 의해 발생됐다. 낮은 압축강도에서 이 계면의 균열은 축하중이 증가될수록 억제되었다. 또한 기둥 표면의 균열은 축하중에 의한 인장변형으로 발생되며, 표면에서 발생한 균열은 기둥 단면의 내부로 발달된다.
2. 축방향 하중으로 인해 발생한 단면의 표면균열은 단면의 중심부로 성장하고, 부식증가로 인해 발생한 계면균열은 단면의 표면을 향해 발달되었다. 또한 피복부에서 발생한 균열은 축하중에 의해 더욱 발달되는 반면, 계면에서 발생하여 단면의 중심으로 향하는 균열은 축하중 증가에 의해 억제되었다. 이는 철근 부식에 의해 발생하는 단면 중심부의 변형은 축하중에 의해 구속됨을 의미한다.
3. 인장변형에 의한 계면균열은 축하중에 의존적이었으며, 단면의 피복부 균열 보다 선행적으로 발생됐다. 또한 축하중은 압축변형에 의해 발생하는 계면 균열의 분포와 속도에 영향을 미쳤으며, 인장 변형에 의한 균열에 지배적인 영향을 미쳤다.
4. 압축 및 인장변형에 상관없이 축하중이 클수록 철근 표면에 형성된 녹에 의한 단면 균열 가능성은 감소됐다. 그러나 계면의 공극량 이상으로 철근 부식이 진행된다면, 축하중의 크기에 상관없이 단면 균열이 발생되었다. 이는 철근-콘크리트 계면의 공극은 부식으로 유발된 철근 직경 확장에 의한 응력 완충을 통해 균열위험을 저감시킬 수 있으며, 철근부식에 대한 콘크리트 구조물의 사용성과 성능을 개선할 수 있음을 시사한다.

## 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

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.

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.

Balafas, I., Burgoyne, C.J. (2011). Modeling the structural effects of rust in concrete cover, *Journal of Engineering Mechanics*, **137(3)**, 175–185.

Dao, L.T.N., Dao, V.T.N., Kim, S.H., Ann, K.Y. (2010). Modeling steel corrosion in concrete structures – Part 1, a new inverse relation between current density and potential for the cathodic reaction, *International Journal of Electrochemical Science*, **5(3)**, 302–313.

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.

Jamal, A., Angst, U., Adey, B., Elsener, B. (2013). Modeling of corrosion-induced concrete cover cracking, a critical analysis, *Construction and Building Materials*, **42**, 225–237.

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.

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.

Liu, Y., Weyers, R.E. (1998). Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures, *ACI Materials Journal*, **95(6)**, 675–681.

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.

Pantazopoulou, S.J., Papouliá, K.D. (2001). Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures, *Journal of Engineering Mechanics*, **127(4)**, 342–351.

### 철근 부식과 축방향 하중을 받는 철근-콘크리트 기둥 단면의 손상 평가

본 연구에서는 철근-콘크리트 기둥의 3차원 유한요소 모델링을 통해 콘크리트 기둥 단면의 균열에 대한 철근의 부식과 하중의 영향을 해석적으로 분석했다. 철근 부식에 대한 콘크리트 계면 공극의 완충 효과를 반영했으며, 철근의 부식과정은 표면 하중을 통해 그 직경을 점진적으로 확장시킴으로써 구현했다. 이러한 변수들을 통한 해석적 접근을 통해 단면균열에 대한 (1) 기하학적 조건으로 대변되는 단면에서의 위치와 (2) 경계조건으로 대변되는 축방향 하중과 철근 부식량의 영향성을 분석했다. 철근-콘크리트 계면 균열은 계면 공극을 압도적으로 넘어서는 양의 부식이 진행된 조건에서 압축변형에 의해 발생했으며, 기둥 표면의 균열은 축하중에 의한 인장변형으로 발생되며, 표면에서 발생한 균열은 기둥 단면의 내부로 발달했다. 인장변형에 의한 계면균열은 축하중에 의존적이었으며, 단면의 피복부 균열 보다 선행적으로 발생됐다. 또한 축하중은 압축변형에 의해 발생하는 계면 균열의 분포와 속도에 영향을 미쳤으며, 인장 변형에 의한 균열에 지배적인 영향을 미쳤다.