

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.6.727>

JCCT 2022-11-89

철근부식으로 인한 지하철 박스구조물의 콘크리트 피복층 균열특성 분석

Analysis of Crack characteristic on Concrete Cover for Subway Box Structure Due to Reinforcement Corrosion

최정열*, 신동섭**, 정지승*

Jung-Youl Choi*, Dong-Sub Shin**, Jee-Seung Chung*

요약 도시철도 지하구조물에서 중요한 열화 중 하나인 철근부식은 철근의 부피 팽창에 의해 콘크리트의 피복층의 균열 또는 표면박리, 박락 등을 초래하여 철근콘크리트 구조물의 사용성과 안전성이 저하된다. 본 연구에서는 부식 환경에서의 도시철도 지하박스 구조물을 대상으로 철근부식으로 인한 콘크리트 피복층의 균열발생 위치에서 철근의 팽창율을 측정하고 이를 바탕으로 철근부식으로 인한 콘크리트 피복층 들뜸 및 손상에 대한 분석을 수행하였다. 부식된 철근의 방사형 변위 분포 모델을 산출하고 기존 제안식과 비교, 분석하였다. 또한 대표 단면을 대상으로한 수치해석(역해석)을 수행하여 부식철근의 방사형 변위장에 의한, 철근의 불균일한 부식팽창을 해석모델에 적용하였다. 수치해석 결과를 바탕으로 철근부식율 진전에 따른 철근콘크리트 구조물의 균열 및 피복층 박리의 영향을 해석적으로 도출하고 현장 시료와의 비교를 통해 수치모델의 적정성을 입증하였다.

주요어 : 철근부식, 콘크리트 피복층, 지하 박스구조물, 균열, 팽창율

Abstract Applying the calculated cross-sectional reduction due to the corroded rebar investigated in the field to the numerical analysis model, the damage pattern and delamination of concrete in the field showed a tendency relatively similar to the numerical analysis results. It was analyzed that when the expansion pressure due to corrosion of the reinforcing bar is greater than the tensile stress of the concrete, cracks are generated and the concrete cover can be fracture. As a result of this study, the correlation between the corrosion rate of reinforcing bars and the crack occurrence of the concrete cover of the subway box structure was verified based on the numerical analysis and field test results. To prevent rebar corrosion, the corrosion rate can be reduced by applying rust prevention to the reinforcing bar and changing the material. In the case of exposed to a corrosive environment, the tensile strength of the concrete is improved by adjusting the concrete compressive strength to secure durability against the expansion pressure caused by the corroded rebar.

Key words : Rebar Corrosion, Concrete Cover, Subway Box Structure, Crack, Expansion Rate

*정희원, 동양대학교 건설공학과 교수

**정희원, 서울교통공사 토목사업소 차장 (교신저자)

접수일: 2022년 9월 26일, 수정완료일: 2022년 10월 25일

게재확정일: 2022년 11월 1일

Received: September 26, 2022 / Revised: October 25, 2022

Accepted: November 1, 2022

**Corresponding Author: neil75@naver.com

Dept. of Civil Engineering Office, Seoul Metro, Korea

I. 서 론

도시철도 지하박스 구조물의 균열과 열화는 시간 경과에 따라서 박락으로 발달하며 콘크리트의 박락은 열차운행 중지를 초래할 수 있으며 원상태 복구까지는 많은 시간과 비용이 소요된다[1,2]. 본 연구의 대상구간은 도시철도 지하박스 구조물에 인접하여 하천을 통과하는 교량이 부설된 구조물로서 지하박스 구조물은 Under Pinning 공법으로 시공되었다. 현장 조사결과 상, 하선 천장 슬래브에 일정한 폭의 종방향 들뜸이 발생되었으며, 들뜸부 제거과정에서 누수로 인한 철근의 부식이 발생된 것을 확인하였다[1].

도시철도 지하 박스구조물은 철근콘크리트 구조로 이루어져 있으며, 콘크리트에 매립된 철근은 다양한 외부조건 등으로 인해 부식되어 팽창함으로써 콘크리트의 균열, 표면박리, 박락 등의 2차 손상을 초래한다[3-6]. 따라서 철근의 부식방지를 위한 관리가 중요하나 공용중인 도시철도 지하박스 구조의 경우 열차운행 종료 후 제한된 시간 동안 시행해야 하므로 작업시간에 제약이 따르는 실정이다[7-9]. 이에 본 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 철근에 발생된 부식과 이에 따른 피복층의 균열 현황을 수치 해석적으로 재현하여 철근의 부식에 따른 철근 주변 응력 변화 및 피복층의 균열 발생 메커니즘을 해석적으로 입증하였다[1].

본 연구에서는 콘크리트에 매립된 철근 부식율 수준에 따른 팽창압력을 모사한 수치해석 결과를 바탕으로 실제 구조물에 발생된 철근부식 수준을 역해석으로 도출하였다. 또한 수치해석 결과를 통해 피복층의 균열 패턴을 현장에서 채취한 코어시료와 비교검토 하였다[1]. 해석 및 실험결과를 바탕으로 철근 부식율과 지하박스구조물 피복층 균열발생 경향과의 상관관계를 분석하였다[1].

II. 현장조사

도시철도 지하 박스구조물의 외관조사 결과, 상부 슬래브에 그림 1과 같은 현황에서 들뜸이 다수 조사되었다. 현장에서 조사된 건설당시 이력 자료를 통해 시공 시 또는 준공 직후 설치된 FRP 보강 부위에서 누수가 발생되었고, 1998년도에 FRP제거 후 균열누수보수 및 베그라이트판 설치로 보수되었으나, 2001년 누수 및 백태

등으로 인해 베그라이트 제거 후 H-pile 주변 고강도 우레탄 주입을 실시한 것을 확인하였다.

외관조사 결과, 상부 슬래브에는 일정한 폭을 가지고 종방향으로 약 60m에 걸쳐 들뜸이 조사되었다. 외관조사 결과에 따라 박리, 박락으로 인한 열차 운행에 문제가 될 수 있는 구간에 대해서 추가적인 파취 작업을 진행하였으며, 박락, 철근 노출, 철근부식 등이 확인되어 이에 따른 상세조사를 실시하였다.



(a) Concrete cover lifting (b) Rebar exposed

그림 1. 콘크리트 피복층 균열 및 박락
Figure 1. Concrete cover cracking and block-out

그림 1과 같이 운행중인 도시철도 구조물 천장부를 점검하면서 타격 확인으로 들뜸 부위를 확인하였다. 열차 안전운행에 중대한 사고의 영향을 미칠 우려가 있어서 고소 대차를 이용하여 파취 작업을 진행하여 철근부식으로 인한 콘크리트 팽창부위를 제거함으로써 열차 안전사고를 예방하였다.



(a) Damaged core (b) Corroded rebar

그림 2. 코어 채취 조사
Figure 2. Core sampling

철근직경은 D29mm이며 철근피복 두께는 71.5mm로 조사되었다. 들뜸부에 대해 코어채취 후 손상부를 조사하였으며, 그 결과는 그림 2와 같다.

III. 수치해석

본 연구에서는 도시철도 지하 박스구조물에 발생된 철근 피복층의 균열 현황을 수치모델로 구현하여 철근의 부식에 따른 철근 주변 응력변화 및 피복층의 균열 발생 메커니즘을 해석적으로 입증하였다. 본 해석은 범용 유한요소해석프로그램인 Ansys Workbench Ver. 17.2를 사용하였다[10].

도시철도 지하 박스구조물의 콘크리트 강도는 24MPa, 피복층의 두께는 71.5mm이고, 철근직경은 29mm이다. 유한요소 해석을 위해 Mesh의 분할은 콘크리트는 3mm 간격의 사각형으로 나누었고, 철근 주변은 10mm까지 원형으로 구성했다. 철근과 콘크리트는 완벽하게 접합된 것으로 가정하였다[1]. 또한 콘크리트 피복의 단부에 고정된 연결을 경계조건으로 사용하였고, 균열해석에서는 변위 경계조건을 추가하였다. 철근의 부식은 축방향을 따라 균일한 것으로 가정하여 철근의 부식 팽창을 평면 변형을 문제로 고려하여 해석하였다[11]. 철근부식의 녹층 반경 최대 범위는 u_1 식 (1)과 같다.

$$u_1 = 0.0568 \cdot f_t^{0.92} \cdot (1 + c/d) \cdot d \quad (1)$$

여기서, u_1 은 철근부식 녹층 반경 최대 범위

c : 71.5mm(콘크리트 구조물 피복두께),

d : 29mm(철근직경)

$$f_t = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$$

여기서, f_t : 콘크리트 인장강도,

f_{ck} : 콘크리트 압축강도(24MPa)

$$f_t = 0.63 \sqrt{24} = 3.086 \text{ MPa}$$

$$u_1 = 0.0568 \times (3.086)^{0.92} \times \left(1 + \frac{71.5}{29}\right)^2 \times 25 = 48\mu\text{m}$$

철근부식 팽창율에 따른 피복층에서 발생하는 응력을 검토하였으며, 검토 위치는 철근으로부터의 이격거리별(70mm, 52.5mm, 35mm, 17.5mm, 0mm)로 철근부식에 따른 주변 응력변화를 분석하였다.

표 1과 같이 수치해석조건을 팽창변위(μm)에 따른 부식율(%)로 Case A~D 까지 구분하였다. 이는 팽창

변위가 클수록 부식율도 큰 것으로 가정하였다.

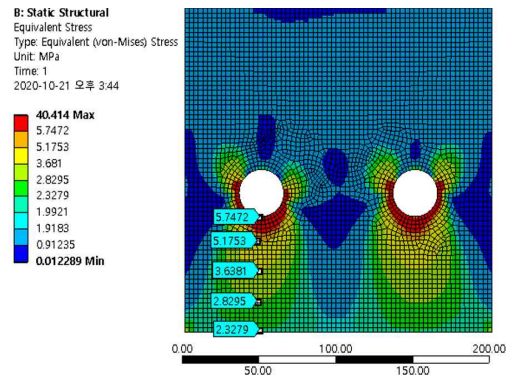
표 2. 수치해석조건 정의

Table 2. Numerical analysis conditions definition

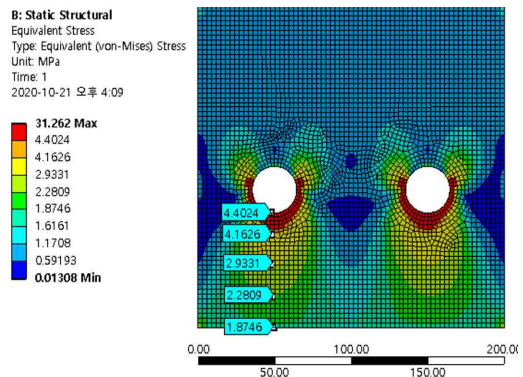
Case	팽창변위(μm)	부식율(%)
A	46 μm	60%
B	36 μm	50%
C	26 μm	40%
D	16 μm	30%

철근부식에 따른 철근 주변 응력변화 해석결과, 그림 3(a)와 그림 3(b)와 같이 Case A와 Case B의 해석결과 철근 주변 콘크리트의 최대응력은 각각 40.414MPa 및 31.262MPa로 분석되었다.

또한 철근 주변부에서 발생한 응력은 콘크리트 인장강도(3.086MPa)보다 최대 13배 큰 것으로 분석되어 철근 주변부를 시점으로 균열이 발생되어 콘크리트와 대기에 접하는 피복층이 박락될 수 있을 것으로 분석되었으며 이는 현장조사 결과와 유사한 경향으로 나타났다.



(a) Case A(46 μm)

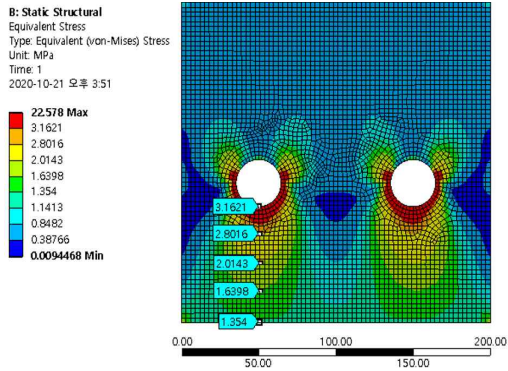


(b) Case B(36 μm)

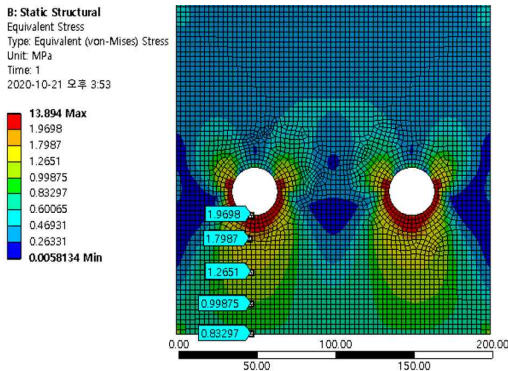
그림 3. 철근부식에 따른 철근 주변 응력변화 (계속)

Figure 3. Stress change around rebar due to rebar corrosion

그림 3(c)와 그림 3(d)와 같이 Case A와 Case B의 해석결과 또한 발생응력의 크기는 다소 낮아졌으나 철근 주변 콘크리트의 발생응력이 콘크리트의 인장강도를 최대 7배 이상 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 부식율 30%에 해당하는 철근의 부식에 따른 팽창변위는 철근 주변의 콘크리트의 균열을 유발하기에 충분한 것으로 분석되었다.



(c) Case C(26µm)



(d) Case D(16µm)

그림 3. 철근부식에 따른 철근 주변 응력변화
Figure 3. Stress change around rebar due to rebar corrosion

또한 Case A~Case D에서 콘크리트의 인장응력은 그림 3의 응력Contour에서 나타낸 바와 같이 철근 주변에서 고르게 분포하지 않는 비 방사형 응력패턴이며, 철근에서 멀어질수록 발생응력이 크게 감소하여 비교적 작은 단면에서 발생응력의 편차가 상대적으로 크게 분석되었다. 이에 따라 현장코어시료를 바탕으로 파악했던 철근주변의 콘크리트 파괴형상과 유사한 응력분포를 나타내는 것으로 분석되었다. 수치해석 결과, 철근의 부식이 커지면서 팽창압이 증가하면 균열의 확산은

철근에서 멀어지면서 줄어들며, 콘크리트 인장강도가 감소되는 것으로 분석되었다.

IV. 분석 및 고찰

1. 철근부식율에 따른 콘크리트 응력 변화

그림 4는 콘크리트 피복두께 변화에 따른 콘크리트의 발생응력을 분석한 결과를 나타낸다. 그림 4와 같이 콘크리트 피복두께의 증가로 인해 철근에서의 이격거리가 증가할수록 철근부식에 따른 콘크리트의 발생응력은 감소하는 것으로 분석되었다. 그림 4와 같이 Case A(부식율 60%)의 경우 피복두께 증가에 따라 발생응력이 약 60% 감소하며 부식율은 약 24.8%로 감소하는 것으로 나타났다. Case B(부식율 50%)의 경우에도 피복두께 증가로 인해 발생응력은 약 87% 감소하였으며 부식율은 약 6.7%로 감소하는 것으로 분석되었다. Case C(부식율 40%)의 경우에도 피복두께 증가로 인해 발생응력은 약 88% 감소하였으며 부식율은 약 4.9%로 감소하는 것으로 분석되었다. Case D(부식율 30%)의 경우에도 피복두께 증가로 인해 발생응력은 약 87% 감소하였으며 부식율은 약 4.0%로 감소하는 것으로 분석되었다.

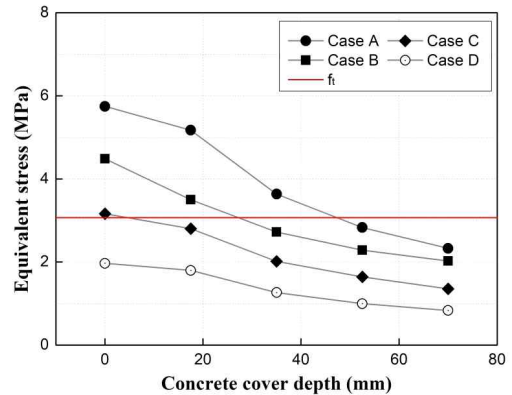


그림 4. 콘크리트 피복두께 변화에 따른 콘크리트 응력 해석결과
Figure 4. Concrete stress analysis result according to concrete cover

철근의 부식은 변형율을 산출해서 변형율의 값이 작아도 콘크리트 균열이 국부적으로 시작되고 변형율이 커지면 피복까지 탈락되며 이러한 경향은 불규칙적이며 부식이된 철근과 마주하는 면에서는 최댓값이 발생

하는 것을 예측할 수 있다.

콘크리트허용 인장강도(f_t)이상인 Case A에서 Case C의 일부 부식율은 인장강도(f_t)를 현재 값(3.86MPa)보다 상향조정(6.0MPa)하면 철근의 부식율은 감소하여 피복의 변형을 억제할 수 있을 것으로 유추할 수 있다.

2. 콘크리트 피복 두께에 따른 피복층 손상 역해석

본 연구에서는 도시철도 지하박스 구조물에서 철근을 보호하고 있는 콘크리트와 매립된 철근부식에 따른 팽창압과 이에 따른 콘크리트의 피복층 균열 진행성 및 철근부식 상태를 현장에서 조사하였다. 현장조사 결과를 수치해석 모델로 반영하여 해석을 수행하였으며, 해석 및 현장시험 결과를 바탕으로 철근부식율과 피복층의 균열발생과의 상관관계를 입증하였다.

부식된 철근과의 이격거리 증가는 발생응력의 영향이 감소하는 것으로 나타났다. 팽창압을 모사한 수치해석 결과를 바탕으로 실제 구조물에 발생된 철근부식 수준을 역해석으로 도출하고 이에 따른 피복층의 균열 패턴을 코어시료와 비교하였다. 또한 해석 및 실험 결과를 바탕으로 철근부식율과 지하박스 구조물 피복층의 균열발생 경향과의 연관성을 도출하였다. 해석결과(피복층 균열패턴)와 현장에서 채취한 코어시료를 비교하여 그림 5에 나타내었다.

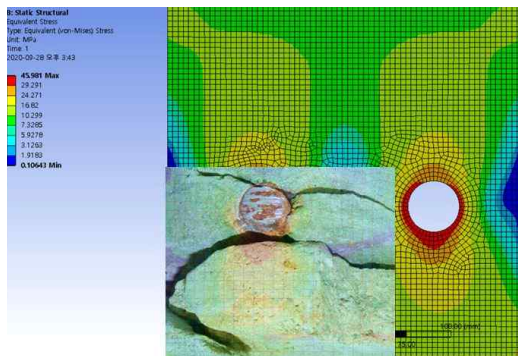


그림 5. 피복층 균열패턴과 현장 코어시료 비교
 Figure 5. Comparison of Concrete cover crack pattern and core sample

콘크리트에 매립된 철근부식율 수준에 따른 팽창압을 모사한 수치해석 결과를 바탕으로 실제 운행중인 도시철도 지하 박스구조물에 발생된 철근부식 수준을 역해석으로 도출하였다.

해석결과, 피복층의 균열 패턴은 팽창압이 증가할수록 근접된 주변의 콘크리트에서 발생응력이 뚜렷하게 증가되는 것으로 분석되었다. 현장에서 조사된 철근부식에 따른 단면 감소량을 산정하고 이를 해석모델에 적용한 결과, 현장 콘크리트 손상패턴 및 박락 현상과 비교적 유사한 경향을 나타내었다.

연구결과, 역해석 및 현장에서의 실험 결과를 바탕으로 철근부식율과 지하박스 구조물 피복층의 균열발생 경향과의 상관관계를 입증하였다. 철근부식에 따른 철근의 팽창압력이 콘크리트 인장응력보다 커지면 균열이 발생되어 철근 피복이 박락될 수 있음을 현장조사결과와의 비교를 통해 확인하였다.

철근부식 예방을 위해서는 철근에 방청 도포 및 재료 변경을 통해 부식율을 저감을 할 수 있다. 또한 부식 환경하에 노출된 경우 콘크리트 강도 조정으로 콘크리트 인장강도를 향상시킴으로서 철근부식율에 의한 팽창압력에 대한 내구성을 확보하는 데에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구에서는 도시철도 지하 박스구조물에 매립된 철근이 준공 후 20년이상 경과된 도시철도 지하구조물의 철근부식에 따른 피복층의 균열 발생 및 철근의 부식상태를 조사하고 그 결과를 수치모델로 재현하여 실험결과와 상관관계를 비교, 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 운행선 현장조사결과를 모사한 수치해석결과, 최대부식율(약 60%)이 아니더라도 부식율 30%에서 철근 주변의 콘크리트 경계면에서 균열이 발생되어 피복이 박락될 수 있음을 수치해석을 통해 확인하였다.

(2) 본 연구에서는 철근 피복두께(71.5mm)가 충분하더라도 심각한 부식 환경에 노출된 철근의 경우 철근의 부식에 따른 팽창압이 콘크리트 계면의 파괴를 초래할 수 있음을 현장 콘크리트 손상패턴과의 비교를 통해 유사성을 입증하였다.

(3) 부식환경에 노출된 경우, 철근부식 예방을 위한 조치(방청제 적용 등)를 통해 철근의 부식율을 저감시킴으로서 지하철 박스구조물의 내구성을 확보하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 부식 환경에 노출된 경우 고강도 콘크리트를 사용하여 인장강도를 높임으로서 철근부식에 의한 팽창압에 대한 저항성능을 확보

하여 콘크리트 박락을 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] D.S. Shin, "Evaluation on Structural Safety of Subway Box Structure According to Corroded Rebar", Master thesis, DongYang University, 2021.
- [2] J.Y. Choi, I.S. Jang, J.S. Chung, "Influence of Inadequate Rebar Lap Position Crack of Underground Box Slab", Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No.4, pp. 685-692, 2020. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.4.685>
- [3] J.Y. Choi, S.J. Lee, J.S. Chung, "A Study on Correlation between Compressive Strength and Rebound Hardness of Urban Underground Structures", Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 4, pp. 655-661, 2020. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.4.655>
- [4] K.H. Kim, "Experiment and Analysis of the Crack Initiation on Concrete Cover Due to Reinforcement Corrosion", Master thesis, Seoul University, 2002.
- [5] H.J. Kim, "Micro-corrosion Model of Steel in Reinforced Concrete Structures and Prediction of Corrosion Cracking", Master thesis, Yonsei University, 2003.
- [6] K.B. Kim, K.T. Park, S.J. Kwon, "Evaluation of Half Cell Potential Measurement in Cracked Concrete Exposed to Salt Spraying Test", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 25, No.6, pp. 621-630, 2013.
- [7] S.W. Choi, "Structural Performance Investigation for the Reinforced Concrete Frames Deteriorated by the Reinforcement Corrosion", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 28, No.5, pp. 563-570, 2015.
- [8] Y.S. Chae, I.Y. Choi, I.K. Min, "An Experimental Study on Steel Bar Corrosion of Reinforced Concrete Structure", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 28, No. 6, pp. 29-35, 2013.
- [9] K.S. Kim, "Degradation Analysis of Deteriorated Reinforced Concrete Structures due to Cracks and Steel Corrosion", Master thesis, Yonsei University, 2004.
- [10] Ansys Inc. ANSYS® 2017, ANSYS Workbench 2017 R1, ANSYS Inc, Cannonsberg, PA, USA, 2017
- [11] L. Zhang, D. Niu, B. Wen, D. Luo, "Concrete Protective Layer Cracking Caused by Non-Uniform Corrosion of Reinforcements", Materials, Vol. 12, No.24, pp. 1-20, 2019.