

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.6.685>

JCCT 2022-11-84

## 강합성 콘크리트 박스구조물(트랜스퍼 거더)의 건조수축 균열에 대한 연구

### A Study on Shrinkage Crack of Steel Composite Concrete Box Structure (Transfer Girder)

최정열\*, 김대일\*\*

Jung-Youl Choi\*, Dae-Il Kim\*\*

**요약** 본 연구의 대상구조물은 지하철 본선 직상부에 시공된 초고층 빌딩 하중을 지지하기 위해 설치한 전이구조체인 강합성 콘크리트 박스구조물(트랜스퍼 거더)로서 연구의 목적은 대상구조물에 발생된 균열의 원인을 분석하는 것이다. 본 연구에서는 강합성 콘크리트 구조물에 발생된 균열조사결과와 수치해석결과를 비교, 분석하여 강합성 콘크리트 구조물에 발생된 균열의 원인이 건조수축균열임을 해석적으로 입증하였다. 연구결과, 콘크리트 내부에 매립된 철골의 형상 및 수직보강재의 위치와 폐합 단면의 면적에 따라 외기온도에 따른 콘크리트와 강재간의 내부 온도차가 발생하는 것으로 나타났다. 수직보강재의 간격이 좁은 경우 넓은 단면에 비해 상대적으로 내부 온도의 집중도가 상승하여 외기와의 온도차가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 온도 및 온도에 따른 변형율이 크게 발생하는 위치와 현장균열조사 결과와 일치하는 것으로 분석되었다. 따라서 구조물 중앙부의 짐검통로와 철골에 형성된 수직보강재 유무 및 간격에 따라 내부 온도 집중부가 형성되고 해당위치에서 강재에 의한 콘크리트의 온도신축거동이 구속되어 건조수축균열이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 본 연구결과를 바탕으로 향후 강합성 콘크리트 구조물에 대한 유지관리 및 점검 시 건조수축에 의한 비구조적인 균열과 구조적인 균열을 구분하여 관리하는 것이 중요한 것으로 판단된다.

**주요어** : 트랜스퍼 거더, 건조수축균열, 수치해석, 강합성 콘크리트 구조

**Abstract** This study was based on the steel composite concrete box structure (Transfer girder) which was installed to support the skyscrapers directly above the subway line. In this study, it was analytically proved that the cause of cracks on the steel composite concrete box structure were the shrinkage cracks by comparing the results of crack investigation and numerical analysis. As the results, it was found that the internal temperature difference between concrete and steel members occurred according to the shape of the steel frame embedded in concrete, the location of vertical stiffener, and the closed section area. The narrower spacing of vertical stiffener was occurred the internal temperature concentration of the structure and the temperature difference increased. And the location of higher thermal strain and temperature were similar to the location of actual cracks by the visual inspection. Therefore, the internal temperature concentration parts were formed according to the presence and spacing of the vertical stiffeners and the inspection passage in the central part of the structure. The shrinkage cracks were occurred by the restrained of temperature expansion and contraction of the concrete. As the results of this study, it was important to separate and manage the non-structural cracks caused by shrinkage and the structural cracks in the maintenance of serviced steel-composite concrete structures.

**Key words** : Transfer Girder, Drying Shrinkage Crack, Finite Element Analysis, Steel-composite Concrete Structure

\*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)

\*\*정회원, 롯데건설(주) 차장 (교신저자)

접수일: 2022년 9월 19일, 수정완료일: 2022년 10월 25일

게재확정일: 2022년 11월 1일

Received: September 19, 2022 / Revised: October 25, 2022

Accepted: November 1, 2022

\*\*Corresponding Author: daeil41@naver.com

Dept. of Civil Estimation, LOTTE Engineering & Construction,  
Korea

## I. 서론

콘크리트는 수화작용에 필요한 수량보다 많은 양의 물을 콘크리트 배합 시 사용한다. 따라서 수화작용 후 콘크리트에 남은 물은 자유수로서 콘크리트에 머물다 대기 중에 방치될 때 증발하며, 그 결과로 콘크리트의 건조수축이 발생하고 수축으로 인한 변형이 구속될 경우 구조물에 응력이 발생하게 된다[1-3]. 건조수축이 가지는 특성과 영향을 연구해왔으며, 그 연구결과에 따른 실험적 및 경험식들을 토대로 여러 가지 모델이 제안되었다. 대표적인 모델로 ACI model, CEB-FIP model, Korea standard model 등이 있다. 건조수축은 콘크리트의 배합비, 온도, 습도, 재료, 콘크리트의 단면형상 등 다양한 요인으로 영향을 받기 때문에 이러한 특성으로 인한 구조물의 거동은 완벽하게 밝혀져 있지 않다[4-7]. 일반적으로 구조물에서 발생하는 균열은 횡방향 균열, 망상균열 등 시공초기 건조수축 등에 의해 발생하는 비구조적 균열이 다수를 차지하고 있었다[1-3].

본 연구에서는 지하철 본선 구조물의 직접적인 영향을 방지하고자 설치된 콘크리트 구조물에 대하여 손상 및 이상변위 발생 유무를 판단하고 구조물의 균열에 대한 현장 정밀조사, 수치해석, 등을 실시하여 현재 시공된 콘크리트 구조물의 균열 원인을 분석하는 데 목적이 있다. 선행연구에서는 지하철 8호선 잠실역 구간 구조물 직상부에 초고층 빌딩이 근접 시공되는 사례로서, 지하구조물인 8호선의 안정성 평가 및 확보방안이 검토되었고 상부 구조물인 초고층빌딩의 하중 지지를 위한 구조체 등에 대한 대책방안이 연구되었다[1]. 또한 굴착 및 지반보강공법, 시공단계별 부등변위에 대한 안정성, 양압력 안정성 및 상부 구조물의 하중지지 구조체의 안정성 평가 등을 수행하였다. 초고층빌딩의 구조물 하중이 기존 지하철 시설물에 영향을 미칠 가능성이 있으므로 초고층빌딩의 하중이 직접적으로 지하철 시설물로 전달되지 않도록 하는 것이 중요하다[1]. 트랜스퍼 거더는 상부하중 지지를 위한 전이구조체로서 선행연구에서는 트랜스퍼 거더를 적용하여 기존 지하철 시설물로 전달되는 직접적인 하중을 방지하고 상부 구조물의 하중을 분산시켜 지하철 구조물의 안정성을 확보하고자 하였다. 지하철 8호선 본선 구조물에 직접적인 영향을 방지하고자 트랜스퍼 거더를 설치하였으며 트랜스퍼 거더의 개요도는 그림 1과 같다.



그림 1. 트랜스퍼 거더 개요도[1]  
Figure 1. Schematic of transfer girder

트랜스퍼 거더는 RCD파일과 콘크리트 월(t=1,200)을 지점으로 하며 건물하중을 지지하는 단순보 형태로 II형 강재의 철골 및 철근 콘크리트 부재로 힘에 의해 지배되는 구조이다.

## II. 외관상태 평가

지하 박스구조물 직상부에 신설구조물 공사가 이루어지면서 상부 구조물 하중에 대한 하중지지 및 분산을 위한 전이구조체인 트랜스퍼 거더의 시설물 현황은 그림 2와 같다.

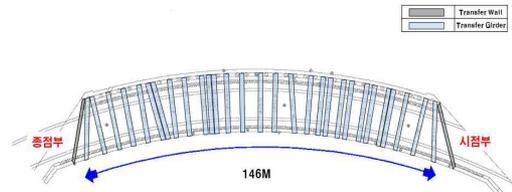


그림 2. 트랜스퍼 거더 현황  
Figure 2. Status of transfer girder

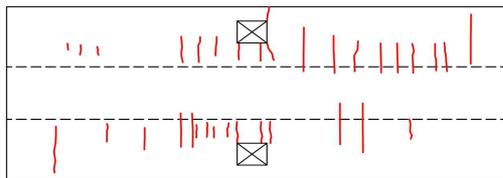
트랜스퍼 거더의 외관조사 결과, 주요 손상으로  $c_w = 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 의 수직균열 및 망상균열이 다수 조사되었으며 그 외 간헐적으로 경미한 백태 손상이 일부 조사되었다. 트랜스퍼 거더 조사방향은 본 구조물의 특성상 최대 휨모멘트가 작용하는 거더 중앙부 주변(정모멘트 구간)에 트랜스퍼 거더 좌측면과 우측면의 균열 발생부 대칭성을 고려하여 실시하였다. 트랜스퍼 거더는 현재 도장으로 마감이 되어 있으며 거더의 좌·우측면에

도장부 표면으로 수직균열 및 망상균열 등이 조사되었다. 따라서 본 구조물(콘크리트 면)에 균열발생여부를 확인하기 위하여 일부 도장 마감부를 제거하고 확인한 결과, 균열은 발생되어 있으나 표면에 보이는 균열보다는 미세한 균열로 확인되었다.

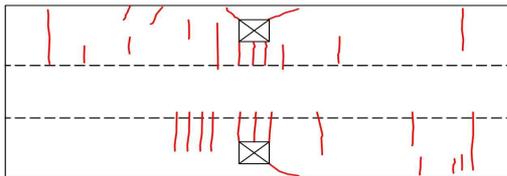


그림 3. 트랜스퍼 거더 내부 전경  
 Figure 3. Photographs of inside of transfer girder

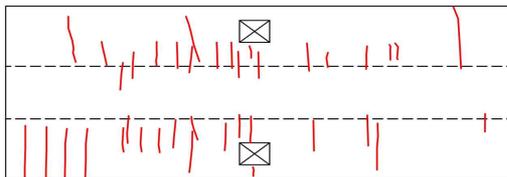
균열조사 결과 균열폭 0.3mm 미만의 균열은 380개소, 0.3mm 이상의 균열은 1개소, 망상균열은 8개소가 확인되었다. 트랜스퍼 거더의 외관조사망도와 손상현황은 각각 그림 4 및 그림 5와 같다. (트랜스퍼 거더 1~2의 외관조사망도는 그림 11 참조)



(a) TSG 3

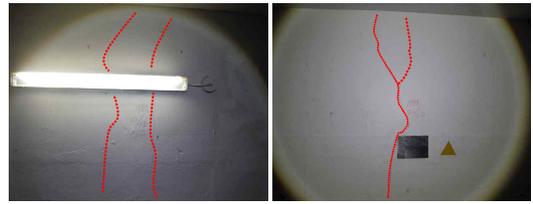


(b) TSG 4



(c) TSG 5

그림 4. 균열 현황  
 Figure 4. Status of cracks on transfer girders



(a) Cracks on wall  
 (W 0.2mm / L 1.2m)

(b) Cracks on wall  
 (W 0.2mm / L 3.0m)



(c) Cracks on bottom

(d) Cracks on bottom

그림 5. 트랜스퍼 거더 손상현황  
 Figure 5. Status of transfer girder damage

거더 측면에서 수렴된 균열이 대부분이나 일부 균열은 거더 하면으로 연결된 것으로 확인되었고, 거더 하면으로 진행된 길이는 약 100~150mm로서 대부분 동일한 길이로 조사되었다. 그림 6과 같이 트랜스퍼 거더 중앙부는 유지관리 시 활용되는 점검통로(개구부)가 거더 중앙에 설치된 상태로 점검통로 우각부인 하단 주변으로 수직 또는 사방향 균열이 공통적으로 조사되었다.

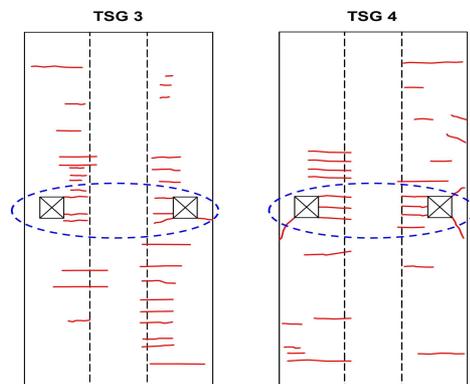


그림 6. 좌우 거더의 대칭성 균열 현황  
 Figure 6. Symmetrical cracks in left and right girders

대부분 거더 좌, 우측에 발생된 균열이 동일한 위치에서 대칭성 균열이 일어나는 것으로 나타났으며 하면을 통해 연결되지 않은 점을 고려하면 시공초기에 발생되어 현재 균열의 진행은 수렴된 상태로 분석된다.

### III. 수치해석

강합성 콘크리트 박스구조물의 구조는 철골이 콘크리트에 매립된 구조로 콘크리트 내부 철골에 의한 내부 구속이 가해지면서 콘크리트 수축인 인장응력이 발생한다. 또한 인장응력이 콘크리트의 인장강도의 한계를 넘을 경우, 콘크리트 균열이 발생된다[8-9]. 콘크리트와 강재 및 철근으로 구성된 강합성 콘크리트 박스구조물의 콘크리트 재령에 따른 비역학적 변형이 거더의 내외적으로 구속됨에 따라 발생하는 건조수축균열을 수치해석적으로 분석하고자 한다. 본 연구는 구속된 구조물에서 일어나는 수축응력이 외부에서 받는 변형보다 파악하기 어려운 구조이므로 건조수축응력을 실용적으로 해석하기 위하여 하중조건이 없는 온도별 발생하는 응력을 고려할 수 있는 해석방법을 제안하였다. 콘크리트 건조수축의 모델링을 위해서는 다변성 등방성(Multi-linear isotropic)의 재료특성이 필요하기 때문에 선행연구를 참고하여 수치해석 모델링에 적용하였다. 수치해석을 통해 온도에 따른 트랜스퍼 거더 구조물에 대한 손상 및 이상변위의 발생 유무를 확인하고 외관조사결과와 비교 분석하여 현재 시공된 트랜스퍼 거더 구조물의 균열 원인을 분석하고자 한다. 본 연구에서는 Ansys workbench ver. 17.2를 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 모델링은 그림 7과 같다.

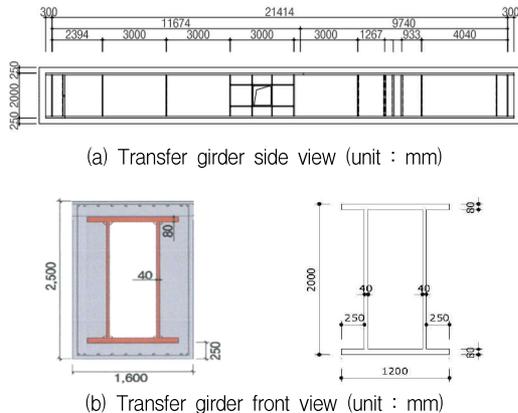


그림 7. 트랜스퍼 거더 단면제원  
Figure 7. Sectional properties of transfer girder

모델링은 그림 8과 같이 철근을 제외한 철골과 콘크리트로 구성하였으며 3D Solid 요소로 모델링하였으며

재료 물성치는 표 1과 같다.

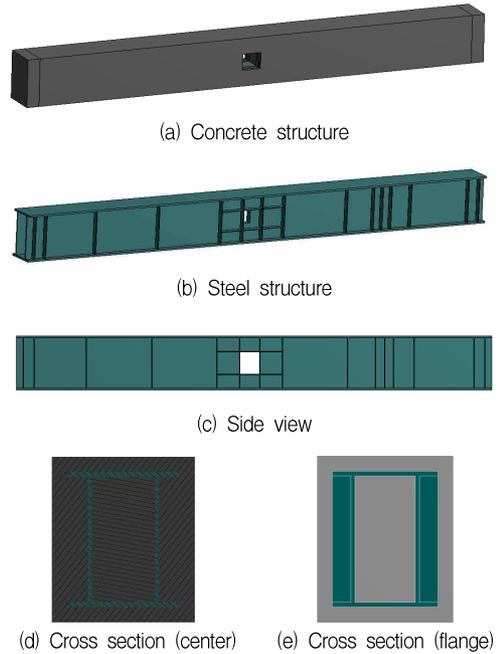


그림 8. 3D 유한요소해석 모델링  
Figure 8. 3D finite element analysis model

표 1. 트랜스퍼 거더의 재료 물성치  
Table 1. Material properties of transfer girder

| Component        | Properties  |
|------------------|---|
| Concrete         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Elastic modulus <math>E_c = 30,000\text{MPa}</math></li> <li>Compressive strength = <math>30\text{MPa}</math></li> <li>Poisson's ratio = 0.18</li> </ul>             |
| Structural steel | <ul style="list-style-type: none"> <li>Elastic modulus <math>E_s = 2.0 \times 10^5\text{MPa}</math></li> <li>Yield strength <math>\sigma_y = 325\text{MPa}</math></li> <li>Poisson's ratio = 0.3</li> </ul> |

그림 9와 같이 Stress-Strain의 상관도인 Multi-linear isotropic을 적용하여 외력이 없는 상태에서 균열이 일어날 수 있도록 설정하였다[10]. 본 연구에서 경계조건은 콘크리트 좌측 콘크리트와 철골의 경계면의 하부를 Line fixed support로 적용하였으며 우측도 Line displacement ( $x=\text{free}$ )를 적용하였다. 또한 온도하중은 외관조사 시 측정된 외기온도인  $20.5^\circ\text{C}$ 로 현장과 동일한 수치를 적용하여 철골과 콘크리트의 자체 온도전달을 이용하여 열변형률을 분석하였다. 강합성 콘크리트 박스 구조물은 철골이 콘크리트에 매립되어 있으므로 철근과 콘크리트가 밀접된 내부에서는 압축응력이 일어나고 표면에서는 인장

응력이 일어난다. 본 연구에서는 내부 및 표면에서의 하중조건 없이 온도별(20.5°C, 22.0°C) 조건을 부여하였다. 수치해석을 통해 콘크리트 구조물에 대한 손상 및 이상변위의 발생 유무를 판단하고 현재 시공된 콘크리트 구조물의 균열 원인을 분석하고자 한다.

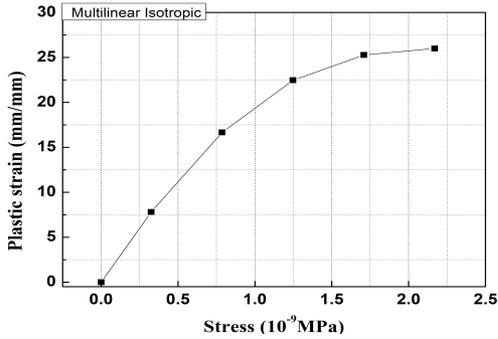


그림 9. Stress-strain 적용 그래프  
 Figure 9. Stress-strain graph

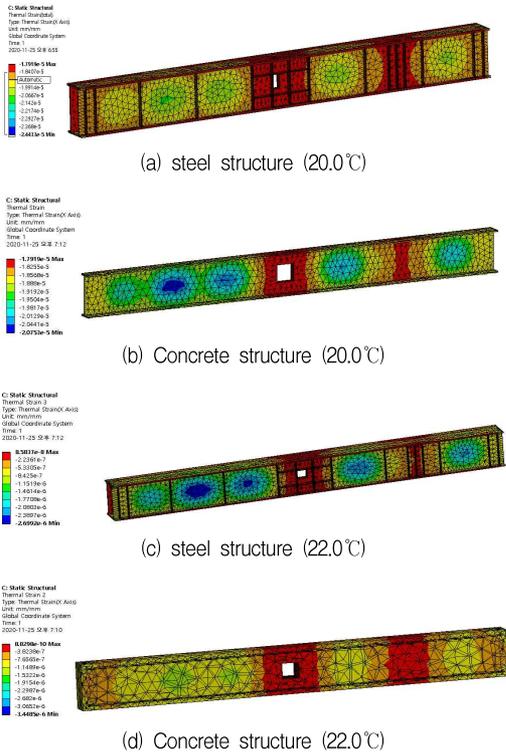


그림 10. 해석결과  
 Figure 10. Analysis result

본 연구에서는 현장과 동일한 온도를 변수로 설정하여 온도하중을 적용하여 외관조사망도와 해석모델링의 적정성을 입증하였다. 또한 온도변화에 따른 트랜스퍼 거더의 내, 외부 단면의 변형 차이를 분석하여 건조수축균열의 발생 위치를 해석적으로 분석하였다. 본 연구에서 수행한 해석결과는 그림 10과 같다.

강합성 콘크리트 박스 구조물 구조 해석결과, 그림 10과 같이 구조물 중앙부 점검 통로부에서 온도가 증가되어 열 변형률이 높아지는 것으로 분석되었다. 또한 수직보강재 간격이 트랜스퍼 거더의 온도에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 중앙부 점검 통로의 경우 수직방향 및 횡방향 보강재로 부분적인 폐합단면이 형성되어 해당 위치에서 콘크리트와 강재의 불균등 수축거동이 발생되어 균열이 발생된 것으로 분석되었다. 또한 철골의 수직보강재 간격이 큰 부분에서 낮은 온도의 열 변형률이 발생되었다. 따라서 강합성 콘크리트 박스 구조물은 강재와 콘크리트의 상이한 열팽창계수 및 탄성계수로 인해 온도변화에 따라 강재와 콘크리트의 열 변형률 차이가 발생되고, 특히 내, 외부 단면의 변형률 차이가 큰 위치에서 균열이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

#### IV. 분석 및 고찰

본 연구에서는 해석결과와 외관조사망도를 비교 분석하였다. 외관조사 결과, 강합성 콘크리트 박스 구조물 구조 중앙부 점검 통로부에서 수직 또는 사방향 균열이 공통적으로 나타나는 것으로 분석되었다. 수치해석결과와 외관조사망도 비교 분석결과는 그림 11과 같다.

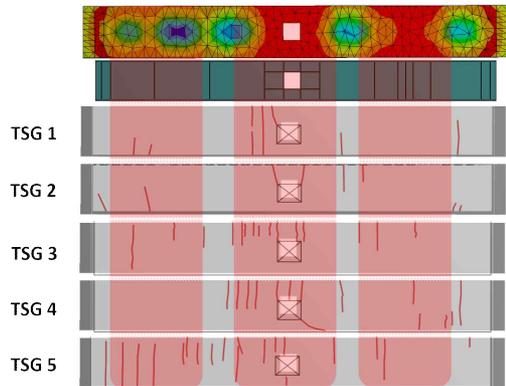


그림 11. 수치해석과 육안조사 결과 비교  
 Figure 11. Comparison of FEA and visual inspection results

해석결과와 육안조사 결과는 그림 11과 같이 수치해석에서 열변형률이 높게 발생하는 위치와 실제 구조물에 발생한 균열의 위치가 유사한 것으로 분석되었다. 본 연구의 대상 구조물인 강합성 콘크리트 박스 구조물 구조의 중앙부 점검통로부에서 발생하는 균열은 수직 보강재로 구분된 철골 구조의 복부에서의 열변형율이 콘크리트단면의 내, 외부와 차이가 발생되어 균열을 야기한 것으로 분석되었다. 또한 콘크리트가 철골에 의해 구속된 구간이 많을수록 온도변형률이 높게 발생하는 것으로 분석되었다. 대상 구조물은 지점을 가지는 구조물로서 중앙부 처짐에 의한 구조적인 균열이 발생하였을 경우, 수직방향의 균열이 아닌 처짐각과 동일한 방향으로 나타났을 것으로 예상된다. 따라서 구조적인 균열보다는 건조수축에 의한 균열인 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 강합성 콘크리트 박스 구조물에서 발생하는 건조수축에 의한 균열원인을 해석적으로 분석하였다. 분석결과, 콘크리트 내부에 존재하는 철골 형상에 의해 대상 구조물의 온도차에 의해 열변형률이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 철골의 수직보강재 위치에 따라 콘크리트 외벽에 발생하는 온도차가 건조수축 균열을 유발하는 것으로 분석되었다.

## V. 결 론

본 연구에서는 강합성 콘크리트 구조물에 발생한 균열의 원인을 분석하고자 현장조사를 수행하였다. 현장조사결과, 0.3mm 미만의 수직 및 망상균열이 다수 발견되었으며 대부분의 균열은 시공 초기에 발생한 것으로 분석되었다. 또한 현장조사와 수치해석 결과를 비교, 분석하여 강합성 콘크리트 구조물에 발생한 균열의 원인이 건조수축균열임을 해석적으로 입증하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 콘크리트 내부에 매립된 철골의 형상 및 수직보강재의 위치와 폐합 단면의 면적에 따라 외기온도에 따른 콘크리트와 강재간의 내부 온도차가 발생하는 것으로 나타났다. 수직보강재의 간격이 좁은 경우 넓은 단면에 비해 상대적으로 내부 온도의 집중도가 상승하여 외기와의 온도차가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 온도 및 온도에 따른 변형률이 크게 발생하는 위치와 현장균열조사 결과와 일치하는 것으로 분석되었다.

(2) 구조물 중앙부의 점검통로와 철골에 형성된 수직보강재 유무 및 간격에 따라 내부 온도 집중부가 형성되고 해당위치에서 강재에 의한 콘크리트의 온도신축 거동이 구속되어 건조수축균열이 발생할 수 있는 것으로 분석되었으며, 이는 현장조사결과와 일치하는 경향으로 나타났다.

(3) 강합성 콘크리트 구조물의 건조수축 균열에 대한 본 연구결과를 바탕으로 향후 대상 구조물에 대한 유지관리 및 점검 시 건조수축에 의한 비구조적인 균열과 구조적인 균열을 구분하여 관리하는 것이 해당 구조물의 균열 추적관리 측면에서 매우 중요할 것으로 판단된다.

## References

- [1] D.I. Kim, "A Study on Shrinkage Crack of Steel Composite Concrete Box Structure (Transfer Girder)", Master thesis, Dongyang University, 2021.
- [2] J.Y. Choi, I.S. Jang, J.S. Chung, "Influence of Inadequate Rebar Lap Position Crack of Under ground 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] J.H. Kim, K.H. Park, Y.K. Hwang, Y.M. Choi, H.N. Cho, "Experimental Study for the Development of Steel-Confined Prestressed Concrete Girder", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 10, No. 3, pp. 593-602, 2002.
- [5] H.K. Kwak, Y.J. Seo, C.M. Jung, Y.H. Park, "Behavior of Steel Box Girder Bridge According to the Placing Sequences of Concrete Slab", Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 12, No.2, pp. 1233-131, 2000.
- [6] S.W. Paik, Y.G. Kim, "A Study on the Bearing Capacity of Steel Composite Concrete Lining Board", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 27, No.6, pp. 122-126, 2012.

- [7] D.B. Bae, S.G. Yoon, S.H. Ham, “Long-term Behavior of Steel-Concrete Composite Girders due to Concrete Shrinkage”, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 16, No.6, pp. 807–818, 2004.
- [8] S.K. Woo, K.J. Kim, Y. Lee, “Reduction of Drying Shrinkage Cracking of Box Culvert for Power Transmission with Shrinkage Reducing Agent”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 20, No. 5, pp. 102-108, 2016.
- [9] D.Y. Yoo, M.K. Min, J.M. Yang, Y.S. Yoon, “Evaluation of Shrinkage Cracking Characteristics and Degree of Restraint for Ultra-High-Strength Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 5, pp. 641-650, 2010.