채널형 관통 합성부를 갖는 강거더 교량의 전단면 바닥판 가설검토 연구

Constructability of Full-Depth Precast Deck on a Steel Girder Bridge with Injection Channel Connection

최찬용* · 이형덕** · 최병호*** · 문지호****

Choi, Chan-Yong*, Lee, Hyeoung-Deok**, Choi, Byung-Ho***, and Moon, Jiho****

Abstract

In this study, the constructability of a full-depth precast deck installation on a steel girder bridge with injection channel connection was evaluated. This type of girder has been developed to avoid the overlap between the shear studs and the bridge deck, which is a major issue causing delays in modular construction. First, the optimal dimensions and lifting method for the deck were determined through finite element analysis. Subsequently, the constructability of deck installation on the bridge was evaluated with various radii of curvature using building information modeling (BIM). For the efficient use of BIM, algorithm-based models for the girder and deck were developed to change their shapes easily.

Key words : Modular Construction, Full-depth Precast Deck, Deck Assembly Planning, Algorithm Based Modeling, Steel-concrete Composite Bridge

요 지

본 연구에서는 채널형 관통 합성부를 갖는 강거더 교량에 대하여 전단면 바닥판 가설검토 연구를 수행하였다. 채널형 관통 합성부를 갖는 강거더는 바닥판 가설 시 전달연결재와 바닥판과의 간섭을 회피하여 모듈러 건설 저해요인인 부재간섭에 따른 공기지연을 방지하기 위하여 개발되었다. 이러한 강거더 교량의 전단면 바닥판 가설 검토를 위하여 가설에 적합한 전단면 바닥판의 제원 및 양중방법을 유한요소해석으로 결정하였다. 이후 대상 거더와 바닥판에 대하여 BIM을 활용하여 다양한 곡률반경에 대하여 바닥판 가설검토를 수행하였다. 보다 효율적인 BIM 활용을 위하여 대상 거더와 바닥판은 알고리즘 기반 모델로 구현하여 거더와 바닥판 제원 변화에 효과적으로 대응할 수 있도록 하였다.

핵심용어 : 모듈러 건설, 전단면 바닥판, 바닥판가설계획, 알고리즘 기반 모델링, 강합성 교량

1. 서 론

현재 다양한 방면에서 건설산업에 스마트화를 위한 연구들이 진행되고 있으며 그중 한 가지 중요한 주제로는 오프사이트 건설(Off-Site Construction, OSC)이 있다. OSC는 공장에

서 주요 부재를 생산하고 현장으로 운반 후 조립하는 방식의 건설을 말한다(Jang et al., 2019). OSC는 종종 모듈을 조립하여 건설이 진행되므로 모듈러 건설(Modular Construction)이라고도 한다. 이러한 선제작 부재를 이용한 모듈러 건설의 활용은 높은 품질의 부재 생산 및 제작·시공 자동화를

*정회원, 강원대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: ccy2044@naver.com)

Member, Master Course, Dept. of Civil Engrg., Kangwon National University

**정회원, 강원대학교 토목공학과(신산업 T-EMS 융합학과) 박사과정

Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg. (Dept. of Integrated Energy & Infra System), Kangwon National University

***정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 교수

Member, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanbat National University

****교신저자, 정회원, 강원대학교 건축·토목·환경공학부(신산업 T-EMS 융합학과) 조교수(Tel: +82-33-250-6234, Fax: +82-33-259-5543, E-mail: jmoon1979@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg. (Dept. of Integrated Energy & Infra System), Kangwon National University

Fig. 1. Example of Steel Girder Bridge with Injection Channel Connection

위하여 필수적이다. 하지만, 제작과정과 현장에서 조립시공 시 오차관리를 엄격히 하지 않은 경우 부재간 간섭으로 인하여 조립시공에 어려움이 있으며 이는 모듈러 건설 저해 요인으로 작용한다(Lee et al., 2012).

강합성 교량은 강재 거더의 제작 및 가설은 많은 부분 모듈화가 되어있는 실정이나 강재거더 가설 후 바닥판과의 합성공정은 대부분 현장 타설에 의한 방법이 사용된다. 이에 전두께 혹은 반두께 바닥판을 사용하여 바닥판 합성공정을 효율적으로 모듈화를 하기 위한 연구가 많이 진행되었다(Kim et al., 2007; Shin et al., 2007; Im et al., 2020).

최근에는 Fig. 1과 같이 채널형 관통 합성부를 갖는 강거더 교량이 개발되었다. 채널형 관통 합성부를 사용함으로써 전단연결재와 바닥판간의 간섭을 회피하여 모듈러 건설 저해요인을 최소화할 수 있으며 충분한 그라우팅 공간을 확보하여 현장조절 능력을 확보할 수 있다. 이러한 상세는 해외의 일부 PSC 거더교에 성공적으로 적용된 사례(Graybeal, 2012, 2014a, 2014b)가 있으며 강합성 거더에 대하여는 국내에서 성능검증에 대한 연구가 진행되고 있다(Choi, 2020).

본 연구에서는 채널형 관통 합성부를 갖는 강거더 교량에 대하여 전단면 바닥판 가설검토에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 유한요소해석을 사용하여 양중해석을 수행하였다. 이러한 양중해석을 통하여 전단면 바닥판의 적정 제원 및 인양고리 배치를 제시하였다. 이후 BIM을 활용하여 다양한 곡률반경에 대하여 바닥판을 배치하고 간섭검토를 하였다. 이때 보다 효율적인 바닥판 가설검토를 위하여 거더 및 바닥판은 알고리즘 기반 모델을 개발하였다. 이를 통하여 거더 및 바닥판의 제원을 보다 효과적으로 모델에 반영할 수 있었다.

2. 대상 교량의 제원

Fig. 2는 본 연구에서 대상으로 선택한 채널형 관통 합성부를 갖는 강거더 교량을 보여준다. 4차선에 지간 40 m의

Fig. 2. Dimensions of the Bridges

(a)

(b)

Fig. 3. Details of Connection between Deck Panels: (a) Side View, (b) Plane View

교량으로 교량의 폭(b_d)은 12.3 m이다.

전단면 바닥판의 높이(h_d)는 240 mm이며 폭(l_d)은 운반 시 차량의 폭 3 m를 고려하여 가능한 크게 2.5 m로 설정하였다. 상하부 플랜지의 폭은 500 mm이며 두께는 16 mm이다. 복부판의 높이(h_w)는 1,650 mm이며 두께(t_w)는 14 mm이다. 상부플랜지는 Fig. 2와 같이 U형 채널형태이며 상부플랜지 높이는 120 mm이다. 전단면 바닥판의 경우도 합성부 하단은 역U형으로 파져있으며 하부 주철근이 노출되어 있는 형태이다. 따라서, 합성 시 □ 모양의 공간이 형성되며 바닥판 배치 후 이 공간을 그라우팅하여 거더와 바닥판을 합성하는 형태이다. 전단연결재의 높이는 150 mm이다.

전단면 바닥판간 연결부의 상세는 Fig. 3과 같다. 본 연구 대상에서는 기존 연구를 참조하여 바닥판의 겹침이음 루프 철근 제원을 결정하였으며 겹침이음 길이는 160 mm이다(Kim

and Shim, 2015). 여기서 철근은 모두 H16철근을 사용하였다. 현행 도로교 설계기준 및 콘크리트 구조기준에는 루프이음에 대한 설계규정이 존재하지 않는다. 다만 표준갈고리에 대하여 설계기준을 참조할 수 있으며 바닥판의 이음부 철근의 형태는 180° 표준갈고리를 사용하였다.

Fig. 3에서 바닥판의 상·하면 피복두께는 각각 60 mm와 50 mm이므로 180° 표준갈고리의 반지름은 65 mm이다. 이는 KDS 14 20 50 (MOLIT, 2021)에 규정된 180° 표준갈고리의 최소 내면 반지름을 만족한다. 또한, KDS 14 20 50 (MOLIT, 2021)에서 180° 표준갈고리는 구부린 반원 끝에서 철근 직경의 4배 혹은 60 mm 이상 더 연장되어야 하는 것으로 규정하고 있으며 Fig. 3에 나타난 상세는 이를 만족한다. 이 밖에 도로교설계기준(2016)에서는 겹침이 되는 철근 사이의 순간격을 50 mm 이하가 되도록 규정하고 있으며 연구 대상 바닥판에서는 인근 루프이음 철근간의 순간격을 직선교량의 경우 40 mm로 가정하였다.

3. 바닥판 양중해석

채널형 관통 합성부를 갖는 강거더에 사용되는 전단면 바닥판은 합성부의 하부에 역U형의 홈이 있고 주철근이 노출되는 형태로 기존의 전단면 바닥판과는 다른 형상을 가지고 있어 가설 시 양중에 따른 안전성을 검토할 필요가 있다. 양중 시 바닥판에 과도한 변형 혹은 균열이 발생하면 바닥판의 성능 및 수명에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 양중 시 바닥판의 안전성을 검토하였다. 바닥판의 크기는 가급적 연결부의 수가 줄어들 수 있도록 차량으로 운반이 가능한 최대의 크기를 고려하였다. 일반적으로 차량 운반을 위하여는 길이는 15 m 이하이며 폭은 차량의 폭 3 m를 고려하여 이보다 작아야 한다. 이러한 사항을 고려하여 본 연구에서는 바닥판의 폭과 교축방향 길이를 각각 12.3 m와 2.5 m로 결정하였다. 여기서 바닥판의 높이는 240 mm이다. 바닥판의 무게는 약 20.8 tonf로 한국도로공사의 가이드라인(KECRI, 2018)에서 제안하는 제한값 이하이다.

3.1 해석모델

양중해석에는 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS (2021)을 사용하였으며 재료 및 기하 비선형을 고려하였다. Fig. 4는 바닥판 양중 해석에 사용된 재료 모델을 보여준다. 콘크리트 압축강도는 30 MPa이며 인장강도는 압축강도의 10%인 3 MPa로 가정하였다. 콘크리트의 탄성계수는 28,000 MPa이며 단위중량은 2,500 kg/m³이다. 철근은 H16철근을 사용하였으며 철근인장강도는 400 MPa, 탄성계수 205,000 MPa로 가정하였다.

Fig. 5는 바닥판 양중해석에 사용된 경계조건을 보여준다. Fig. 5에서 Points A, B, C는 인양고리의 위치를 나타낸다.

Fig. 4. Material Model: (a) Concrete, (b) Rebar

Fig. 5. Boundary Condition

Line a-a는 z 축의 변위를 고정하였으며 Line b-b는 x 축의 변위를 고정하였다. 따라서, 자중이 바닥판에 작용하는 경우 바닥판의 중심을 기준으로 대칭적인 변형이 발생한다.

해석은 총 4가지 경우(Case 1-4)에 대하여 수행하였다. Case 1은 외측 4점(Point A)에 인양고리를 설치하는 경우이다. Case 2는 내측 4점(Point B)에 인양고리를 설치하는 경우이다. Case 3은 외측 4점과 중심 2점(Points A, C)에 인양고리에 설치하는 경우이며 Case 4에서는 내측 4점과 중심 2점(Points B, C)에 인양고리를 설치한다.

해석은 인양고리 설치지점을 경계조건으로 처리하고(y 축(수직) 변위 고정) 바닥판에 자중을 입력하여 비선형 해석을 수행하였다.

3.2 해석결과

비선형 해석을 수행하고 바닥판에 작용하는 응력, 변위 및 균열발생 여부를 검토하였다.

Case 2-4에서 바닥판 콘크리트 및 철근에 발생하는 응력은 각각 최대 2.6 MPa와 122.4 MPa로 모두 탄성 범위안에

Fig. 6. Crack Formation in Case 1

Fig. 7. Deformed Shape: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, (d) Case 4

있었다. Case 1의 경우 가장 큰 응력이 발생하였으며 바닥판의 중앙 밑면에서 콘크리트와 철근에 발생하는 응력은 각각 7.4 MPa와 170 MPa이었다.

균열의 경우 Case 1에서 Fig. 6과 같이 내측 역U형 홈 근처에 균열이 발생하는 것을 알 수 있었으며 Case 2-4에서는 바닥판에 균열은 나타나지 않았다.

Fig. 7은 해석결과 나타난 Case 1-4에 대한 변형형상을 보여준다. 해석결과 Case 1-4에 대하여 각각 최대 59 mm, 1.28 mm, 1 mm, 2.85 mm의 수직 처짐이 발생하였다. 바닥판의 양중해석 결과 최대수직 처짐은 Case 2와 Case 3에서 1.5 mm 이내로 발생하였다. Case 2와 3은 각각 4개와 6개의 인양고리를 설치하여 양중하는 경우로 실무에서 주로 4점 양중을 선호하므로 Case 2가 양중방법으로 적합한 것으로 판단된다.

4. 알고리즘 기반 3D 형상 모델

여기서는 대상 거더 및 바닥판에 대하여 효율적인 간섭검토를 수행하기 위하여 알고리즘 기반 3D 형상 모델을 개발하였다. 알고리즘 기반의 3D 형상모델을 개발함으로써 단면제원 변화에 대하여 즉각적으로 대응하여 모델을 생성할 수 있다. 알고리즘 기반 3D 형상모델 개발에는 Dynamo Sandbox (2021)을 사용하였다.

4.1 채널형 관통 합성부를 갖는 거더

Fig. 8은 본 연구에서 개발한 채널형 관통 합성부를 갖는 거더의 알고리즘 기반 모델을 보여준다.

개발된 모델은 단면의 제원뿐만 아니라 곡선교를 모사하기 위하여 거더의 곡률반경과 강거더 제작 시 흔히 적용되는 솟음(Camber)를 모사할 수 있도록 개발되었다. 곡률반경과 솟음은 모두 원곡선으로 모사를 하였다. 예를 들어 지간이 L 이며 곡률반경이 R 인 곡선 거더의 경우 Fig. 8에 나타난

Fig. 8. Overview of Steel Girder with Injection Channel Connection

중양부의 이격거리, e_l 은

$$e_l = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \quad (1)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 본 모델링에서는 e_l 을 입력하여 곡선 거더를 모사할 수 있도록 하였다. 단면의 제원은 상하부 플랜지폭과 복부판의 높이 및 각 부재의 두께, 그리고 U형 플랜지의 상세를 변수로 한다. 또한, Fig. 8과 같이 전단연결재의 제원 및 배치 간격을 변수로 하여 모델링을 수행하였다.

채널형 관통 합성부를 갖는 거더 알고리즘 모델링의 순서는 다음과 같다. ① 참조선(Reference line) 구현, ② U형 상부플랜지를 갖는 거더 단면 구현 및 참조선을 사용하여 종방향으로 단면 밀어내기, ③ 전단연결재 구현 및 참조선을 활용하여 전단연결재 배치하기. 최종적으로 2장에 언급한 $R = 300$ m인 대상 거더에 대한 형상은 Fig. 8과 같이 구현할 수 있다. 참고로 이 모델은 알고리즘 기반 모델이므로 제원이 변경되는 경우 변경된 입력 매개변수만 수정하여 모델을 손쉽게 갱신할 수 있다.

4.2 전단면 바닥판

전단면 바닥판은 콘크리트와 철근 부분 두 개로 나누어 모델링 하였다. Fig. 9는 전단면 바닥판의 알고리즘 기반 모델을 보여준다. 모델은 기본적으로 바닥판에 4개의 거더가 합성된다고 가정하였다. 즉, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 역U형의 합성부는 총 4개이며 중앙을 기준으로 대칭이다.

콘크리트 부분의 변수는 바닥판의 폭, 높이 그리고 바닥판 최외측으로부터 역U형의 합성부가 시작하는 부분까지의 길이($b_{d,s}$), 합성부의 폭(b_c), 합성부의 높이(h_c)이다. 철근의 경우 변수는 철근의 직경, 간격 및 콘크리트의 피복두께이다. 철근은 상부와 하부에 2단 배치만 고려하였으며 철근의 간격도 등간격만 적용 가능하다.

Fig. 9. Overview of Deck Model

5. 전단면 바닥판 가설검토 모델

이번 장에서는 4장에서 개발된 채널형 관통 합성부를 갖는 강거더 및 바닥판 모델을 활용하여 지간 40 m의 대상교량에 대하여 다양한 곡률반경에서 바닥판 가설검토를 수행하였다.

Fig. 10은 본 연구에서 개발한 알고리즘 기반 모델을 활용하여 지간 40 m, 곡률반경 300 m의 채널형 관통 합성부를 갖는 거더 교량을 모델링 한 예제를 보여준다.

일반적으로 곡선교에서 선제작 바닥판의 배치는 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)는 바닥판의 상하 폭을 다르게 제작하여

Fig. 10. Overview of 40 m Full-Depth Precast Deck on the Steel Girder Bridge with Injection Channel Connection Model ($R = 300$ m)

(a)

(b)

Fig. 11. Radial Arrangement of Deck Panel on Curved Girder: (a) by Using Trapezoidal Deck Panel, (b) Rectangular Deck Panel

바닥판간 이음부 간격을 일정하게 하는 방식으로 가장 바람직하다. 하지만 이런 방식은 곡선별로 서로 다른 바닥판 형태의 바닥판이 필요함으로 곡선별로 서로 다른 제작 몰드 혹은 가변형 몰드가 필요한 단점이 있다.

Fig. 11(b)는 일반적으로 직선교량에 사용되는 직사각형 바닥판을 배치하는 경우로 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 바닥판간 이음부 간격이 서로 달라지게 되어 곡률 반경이 작아질수록 상하부 간격이 크게 차이가 발생하여 적용이 어려우며 철근의 겹침이음 길이, 간섭 등 치밀한 사전 검토가 필요하다. 장점으로는 직선에서 사용되는 제작 몰드를 사용하여 곡선까지 적용할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 Fig. 11(b)의 방법을 사용하여 직선 교량에서 사용되는 직사각형 전단면 바닥판을 얼마의 곡률반경까지 적용 가능한지에 대하여 가설검토를 수행하였다. 바닥판 배치 시 바닥판의 역U형 합성부와 거더의 U형 플랜지부를 서로 일치하도록 하여 합성부의 간섭은 없도록 하였다.

검토에 사용된 곡률은 총 4개로 1,500 m, 700 m, 500 m, 300 m이다. 겹침철근의 최대 이격 될 수 있는 순간격은 50 mm이므로(MOLIT, 2016) 상부 최외측 겹침이음 철근의 순간격을 50 mm로 고정하고 곡률반경 감소에 따른 하부 최외각 철근의 순간격 변화를 검토하였다. 또한, 직선교량에서 바닥판간 간격이 200 mm이므로 하부 최외각 바닥판간 간격을 200 mm로 고정하고 곡률감소에 따른 상부 최외각 바닥판간 간격 변화를 검토하였다. 이러한 검토 결과는 Fig. 12와 같다.

Fig. 12에서 볼 수 있듯이 겹침이음 철근의 순간격은 상부 최외측(upper in Fig. 12)의 순간격을 50 mm로 고정한 경우 하부 최외측(bottom in Fig. 12)에서는 R 이 1,500 m에서 300 m로 감소하면서 49 mm에서 42 mm로 크게 감소하지는 않았다. 반면에 바닥판간의 간격은 곡률반경이 감소하면서 크게 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

하부 최외측의 바닥판간의 간격을 200 mm로 고정한 경우, R 이 1,500 m에서 300 m로 감소하면서 상부 최외측 패널간 거리는 223 mm에서 313 mm로 증가한다. 즉, 패널간 거리가 200 mm인 경우 겹침 이음 길이가 160 mm이므로 R 이 1,500 m에서 300 m로 감소하면서 상부 최외측 철근의 겹침이음 길이는 137 mm에서 47 mm로 감소한다. 이러한 의미는 겹침이음 길이의 부족으로 겹침이음 길이 160 mm를 확보하기 위하여 $R = 1,500$ m와 300 m에서는 기존 직선 패널의 루프철근 길이를 각각 약 11.5 mm와 56.5 mm 늘려야 한다는 것이다. 이때 하부 바닥판간의 간격은 200 mm로 고정되어 있으므로 20 mm 이상 루프철근의 길이를 연장할 수 없다. 따라서 $R = 300$ m에서는 해당 이음부 상세를 갖는 직사각형 바닥판 배치는 불가하다.

연구 결과, $R = 700$ m인 경우 겹침이음 길이 160 mm를 만족하기 위하여는 루프철근 길이를 약 17.5 mm를 연장하면 된다. 다만, 이는 최대 가능 연장길이 20 mm와의 차이가

Fig. 12. Deck Arrangement Results (a) $R = 1,500$ m, (b) $R = 700$ m, (c) $R = 500$ m, (d) $R = 300$ m

Fig. 13. Deck Arrangement Results ($R = 700$ m, Loop Joint Splice Length = 195 mm)

매우 작아 이에 대한 추가적인 가설검토를 Fig. 13과 같이 수행하였다.

Fig. 13에서 볼 수 있듯이 하부 최외측 철근의 겹침이름 길이가 195 mm일 때 상부 최외측 철근의 겹침이름 길이는 160 mm를 확보할 수 있었다. 다만, 하부 최외측 철근과 바닥판과의 여부는 2.5 mm로 바닥판 사이의 간격을 보다 넓게 확보할 필요가 있었다. 이러한 방법론을 사용하여 바닥 판 배치를 사전에 수행하여 시공 효율성을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 채널형 관통 합성부를 갖는 강거더 교량에 대하여 전단면 바닥판 가설검토에 대한 연구를 수행하였다. 먼저, 바닥판의 크기 및 바닥판 이음부에 대한 재원을 결정하고 양중해석을 통하여 적정 인양방식을 제안하였다. 그 결과 내측지점에 4개의 인양고리를 설치하여 인양하는 방법(Case 2)이 가장 적절한 것으로 나타났다.

이후 채널형 관통 합성부를 갖는 강거더와 바닥판에 대하여 알고리즘 기반 3D 모델링을 수행하였다. 이러한 모델 개발을 통하여 단면 및 선형변화에 보다 효율적으로 대응하여 형상모델을 생성할 수 있었으며 개발된 거더는 특히 곡률 및 솟음을 변수로 포함하여 개발하여 적용성을 향상시켰다.

마지막으로 다양한 곡률반경에 대하여 효율적인 바닥판 배치에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 대상교량에 대하여는 약 $R = 700$ m까지 직선교량에 사용되는 직사각형 바닥판을 적용할 수 있는 것으로 나타났으나 바닥판간의 간격 확대 등 보다 상세한 검토가 필요하다. 적용 가능성 판단은 곡률 변화에 따른 겹침이름 길이의 변화와 인근 겹침 철근과의 순간적 변화였으며 곡률변화에 따른 겹침이름 길이 변화가 보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구에서

사용된 방법을 통하여 바닥판 배치를 사전에 수행하여 시공 효율성을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

This research was conducted with the support of the “National R&D Project for Smart Construction Technology (No.20SMIP-A158708-01)” funded by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and managed by the Korea Expressway Corporation.

References

- ABAQUS. (2021). *Abaqus analysis guide 2021*. Dassault Systems Simulia Corp.
- Choi, B.H. (2020). *Development of innovative technology for prefab steel bridges to promote assembly construction and automation*. Report No. SPR412-20, Hanbat National University, Daejeon, Korea.
- Dynamo Sandbox. (2021). *Dynamo dictionary*. Retrieved August 10, 2021, from <https://dictionary.dynamobim.com/#/Display>
- Graybeal, B. (2012). *Ultra-high performance concrete composite connections for precast concrete bridge decks*. Report No. FHWA-HRT-12-041, FHWA, Washinton, DC, USA.
- Graybeal, B. (2014a). *Design and construction of field-cast UHPC connections*. Report No. FHWA-HRT-14-084, FHWA, Washinton, DC, USA.
- Graybeal, B. (2014b). Ultra-high performance concrete connections for precast concrete bridge decks. *PCI Journal*, Vol. 59, No. 4, pp. 48-62.
- Im, C.H., Park, G.M., Kang, H.E., Choi, B.H., Park, S.J., and Tae, G.C. (2020). Construction of full-depth precast deck for the bridge construction crossing gyeongbu high-speed rail line. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 32, No. 1, pp. 63-68.
- Jang, J.Y., Chen, H., Lee, C.S., and Kim, T.W. (2019). Research trends in off-site consturction management: Review of literature at the operation level. *Korea Journal of Consturction Engineering and Management*, Vol. 20, No. 4, pp. 114-125.
- Kim, D.W., and Shim, C.S. (2015). Crack width control on concrete slab using half-depth precast panels with loop joints. *Korean Journal of Agricultural Science*, Vol. 35, No. 1, pp. 19-29.

- Kim, I.G., Kim, Y.J., Kim, S.W., and Jang, S.K. (2007). Rapid and mechanized construction of bridge deck with precast concrete deck system used longitudinal tendon. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 3, pp. 50-54.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI). (2018). *Guidelines for design, construction and maintenance of full depth precast deck panels*. Report No. 2019-02-536.8, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, Korea.
- Lee, Y.H., Lee, D.H., and Kim, K.T. (2012). Considerations in the early stage of designing the unit modular building. *Korea Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 13, No. 6, pp. 133-142.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016). *Highway bridge design standard (limit state design)*, Korea.
- Min of Land Infrastructure and Transport (MOLIT). (2021). *Concrete Structure Design Details of Reinforcement (KDS 14 20 50)*.
- Shin, D.H., Park, S.J., Kim, I.G., and Lee, S.H. (2007). Application of precast concrete bridge deck in real structure. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 29, No. 3, pp. 57-60.

Received	October 22, 2021
Revised	October 25, 2021
Accepted	November 1, 2021