

루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 이용한 PSC 바닥판의 강도평가

Strength of PSC Bridge Decks using Half-Depth Precast Panel with Loop Joint

정철현* · 김유석** · 현병학*** · 김인규****

Chung, Chul Hun · Kim, Yu Seok · Hyun, Byung Hak · Kim, In Gyu

Abstract

The panels are used as a composite part of the completed deck. They replace the main bottom transverse deck reinforcement and also serve as a form surface for the cast-in-place concrete upper layer that contains the top of deck reinforcement. Research has also demonstrated that mechanical shear ties on the top of the panels are required. In a composite deck with precast panels, it is required to notice behavior of transverse joints between panels. In this paper, static tests of composite deck with shear ties and loop joints were conducted. From the results, the validity of loop joints for continuity of deck was observed. Also, a composite behavior was observed between precast panel and slab concrete. Tested composite decks with shear ties have 140~164% ultimate strength than have no shear ties due to the increase of composite action. Therefore, the shear ties between the slabs were sufficient to enforce composite flexural behavior to failure.

Keywords : precast panel, composite deck, composite action, shear tie, loop joint

요 지

프리캐스트 패널은 교량바닥판의 합성 구조부재로서 사용된다. 프리캐스트 패널의 횡방향 강재는 교량바닥판의 주철근 역할을 하며, 또한, 패널은 상부의 현장타설 콘크리트 시공시 거푸집 대용으로 적용된다. 이 연구에서는 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판의 합성효과를 위해 패널 상부에 도입되는 전단철근 필요성을 확인하였다. 또한, 프리캐스트 패널을 갖는 합성 바닥판에서 패널간에는 횡방향 이음부의 연속적인 거동이 요구된다. 본 연구에서는 전단철근과 루프이음을 갖는 합성바닥판의 정적실험을 수행하였다. 실험결과로부터 바닥판의 연속성 확보를 위한 루프철근 이음부의 연속성을 확인하고, 패널과 현장타설 바닥판 사이의 합성효과를 확인하였다. 전단철근이 있는 합성바닥판은 합성효과의 증가로 인해 전단철근이 없는 바닥판에 비해 약 140~164%의 극한내력을 보인다. 따라서 접합면에 도입되는 전단철근은 파괴시까지 합성거동을 확보해주는 역할을 하는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 프리캐스트 패널, 합성바닥판, 합성작용, 전단철근, 루프이음부

1. 서 론

교량바닥판 전 두께를 프리캐스트화하여 현장작업을 최소화시키는 교량바닥판은 국외에서는 1970년대 후반부터 실적이 되고 있지만, 국내에서도 1990년대 후반부터 지속적인 연구가 진행되어 현재 실무에서 활발하게 적용되고 있으며, 2000년대 초반부터 루프이음을 갖는 전두께 프리캐스트 교량바닥판의 연구(류형근 등, 2003)도 이루어져 실 적용되기 직전에 있다. 반단면 프리캐스트 교량바닥판 공법은 바닥판 두께의 일부분을 프리캐스트 콘크리트 패널로 제작하여 이를 거더간에 거치한 후, 영구거푸집으로 활용하여 나머지 바

닥판을 현장타설 공법으로 완성시키는 시스템이다. 반단면 프리캐스트 교량바닥판 공법은 국내에서도 몇 가지 형태의 시스템이 제안되어 활발한 연구가 진행되었다(최은수 등, 2005; 노병철 등, 2007; 정철현 등, 2008). 반단면 프리캐스트 패널은 시스템에 따라 바닥판 구조체의 일부로 사용하는 경우도 있고 단지 거푸집 대용으로만 사용하는 경우도 있는데 구조체의 일부로 사용하기 위해서는 프리캐스트 패널의 두께가 도로교설계기준의 관련 규정(도로교설계기준, 2005)을 만족하여야 한다. 도로교설계기준에서는 현장타설 되는 콘크리트와 합성되는 프리캐스트 콘크리트 패널이 구조부재로 적용되기 위해서는 패널의 두께는 합성된 최종 바닥판두

*정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : chung5@dankook.ac.kr)

**단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (E-mail : 73048934@dankook.ac.kr)

***정회원 · (주)비엔지컨설팅 차장 (E-mail : HBHYUN@dankook.ac.kr)

****정회원 · (주)대우건설 기술연구원 책임연구원 (E-mail : gyu@dwconst.co.kr)

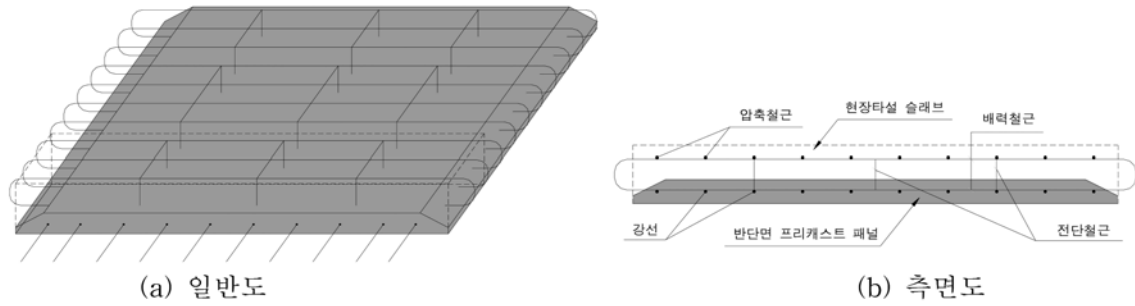


그림 1. 루프이음 반단면 프리캐스트 바닥판의 형상

계의 55%를 초과할 수 없으며, 90 mm 이상의 두께를 요구하고 있다.

반단면 프리캐스트 바닥판은 거푸집과 동바리공을 사용한 공법의 문제점들을 해소시키고 여러 장점을 가지고 있지만 교축방향 패널간 이음부사이의 연속성 확보가 중요하기 때문에 이음부 형식 및 특징에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다(김영진 등, 1998; 정철현 등, 1998; 류형근 등, 2003; Shim, 2001; Ong 등, 2006). 정철현 등(2008)은 교축방향 패널간 이음부의 연속성을 확보하기 위해 패널과 패널 사이의 종방향으로 루프이음 철근을 도입하였고, 가설하중에 대한 내하력을 확보하기 위해 패널의 교축직각 방향으로 프리스트레스를 도입하였다. 프리캐스트 패널의 교축방향 이음부의 구조성능을 확보하기 위해서 설치되는 루프철근은 그림 1의 (a)에서와 같이 콘크리트 현장타설 부분까지 이어져 있어 별도의 종방향 철근의 배근 없이 현장타설 바닥판을 시공할 수 있다. 이 패널 시스템에는 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판과의 합성효과와 내력을 증진시키기 위해 그림 1에서 보면 스트립 형상의 전단철근을 프리캐스트 패널 상면에 설치하였다. 반단면 프리캐스트 교량바닥판은 교축방향으로 패널간 이음부가 존재하기 때문에 이 부분에서 현장타설 바닥판과 동등 이상의 구조내력 확보가 중요하다. 현재 실 적용되고 있는 반단면 패널 시스템은 이음부가 없는 일반 바닥판에 대해서는 구조내력 등이 검증되었으나, 이음부가 존재하는 바닥판의 구조내력에 대해서는 연구가 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 거푸집 대용 및 구조체의 일부로 사용할 수 있는 그림 1과 같은 루프이음 반단면 프리캐스트 패널을

적용한 교량바닥판의 휨성능 및 구조내력을 평가하기 위한 정적실험을 수행하였다. 실험결과로부터 프리캐스트 패널 이음부의 존재유무, 스트립 형상의 전단철근 설치 유무, 바닥판의 지지조건 등에 따른 루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 갖는 교량바닥판의 구조내력, 파괴모드 및 사용성 평가를 수행하였다.

2. 반단면 프리캐스트 바닥판의 정적실험

2.1 실험부재 및 재료성질

정적실험에 적용된 루프이음을 갖는 반단면 프리캐스트 패널 교량바닥판의 기본형상 및 제원은 그림 2와 같다. 바닥판 실험체의 설계활하중은 DB-24이며, 충격효과와 하중계수를 고려한 단위폭당 설계모멘트는 $61.26 \text{ kN} \cdot \text{m} (1.3 \times 2.6 + 2.15 \times 27.04)$ 이다. 기본실험체의 형상은 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 의 크기인 정사각형이며, 패널간 이음부는 루프철근으로 사용되고 바닥판 패널에 배근되어있는 루프철근이 현장타설 콘크리트부분인 바닥판 상부에 나와 있어 별도의 종방향 철근 배치를 필요로 하지 않는다. 교축직각방향으로는 거더와 거더 사이에 작용하는 가설하중에 의한 휨인장 응력에 저항할 수 있게 바닥판 하부의 패널부분에 약 70 kN의 긴장력을 도입한 강연선과 바닥판 상부에 SD40-D13 철근이 200 mm 간격으로 배치되었다. 또한 프리캐스트 패널 상면에는 현장타설 바닥판과의 합성을 위해 루프철근들 사이에 전단철근(SD40-D10)을 배치하였다(그림 1(a)의 \cap 형 철근). 패널간 이음부에 설치되는 루프철근의 겹이음 길이는 현장타설 바닥판과 동등 이상의 구조성능이 확인된 160 mm를 적용하였다(정철현 등, 2008).

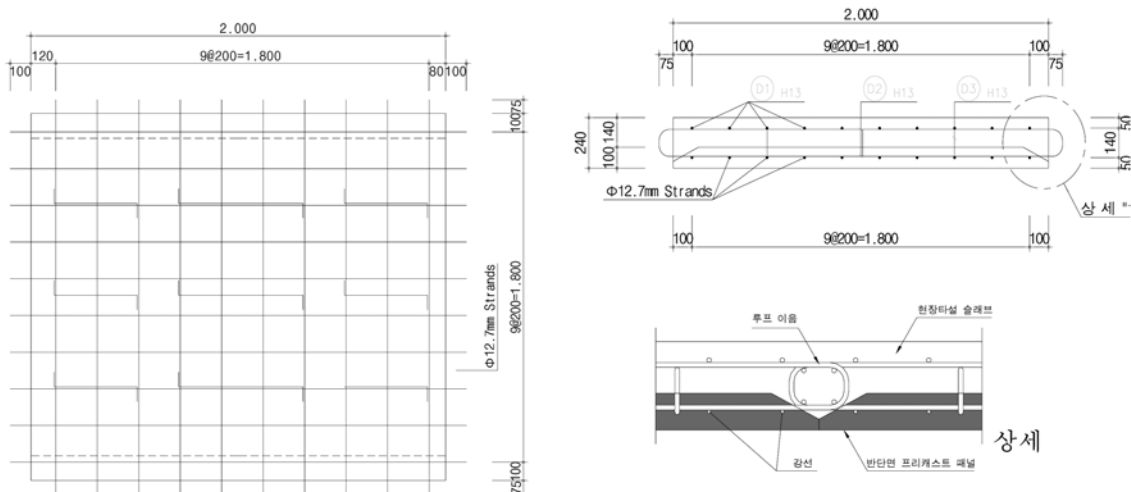


그림 2. 기본실험부재의 형상 및 제원

반단면 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판의 합성을 위하여 스트립 형상의 전단철근이 배근되었는데, 구조특성상 패널과 현장타설부 사이에 발생하는 수평전단은 합성 이후에 추가 고정하중과 활하중에 의해 발생한다. 전단철근은 충격 효과를 고려한 DB-24 하중과 추가 사하중에 의해서 발생하는 계수 전단력인 식(1)에 의해 결정된다.

$$V_u \leq \phi V_{nh} \quad (1)$$

식(1)에서 V_u 는 계수 전단력(시험체:173.4 kN), V_{nh} 는 공칭수평전단력, $\phi(0.8)$ 는 강도감소계수이다. 최소전단연결재가 배치되고, 접촉면이 청결하고 부유물이 없으며 표면이 대략 6 mm 깊이로 일부로 거칠게 만들어진 경우, 식(1)를 만족하면 연결재의 최소단면적은 식(2)에 의해서 결정된다(콘크리트구조설계기준, 2007).

$$A_s = 0.35b_v s / f_y \quad (2)$$

식(2)에서 b_v 는 접촉면에서의 단면 폭 (mm), s 는 연결재의 간격(mm)이다. 설계하중에서 결정된 V_u 는 173.4 kN으로 이를 만족하기 위해서 요구되는 수평전단 철근량은 433.5 mm^2 로 SD40-D10 철근 8개(4개의 \cap 형 전단철근, 단면적:570.64 mm^2)가 필요하다. 이는 식(2)에 의해서 요구되는 최소전단철근량(1050 mm^2)을 만족하지 못하기 때문에 패널 내부의 배력철근과 루프이음으로 연결된 상부 배력철근의 형상을 유지하고 시공성을 고려하여 9개의 \cap 형 전단철근을 배치하였다.

루프이음 반단면 프리캐스트 패널의 제작과정은 그림 3과

같다. 먼저 제작대에 철근을 조립한 후 KS D 7002 SWPC7의 강연선을 200 mm 간격으로 배치하여 프리텐션으로 약 70 kN의 긴장력을 도입한다. 그리고 설계압축강도가 40 MPa인 콘크리트를 타설 후 증기 양생하여 그림 3의 (e)와 같은 100 mm 두께의 루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 제작한다.

완성된 루프이음 프리캐스트 패널과 합성되는 현장타설 바닥판(두께:140 mm)을 포함하는 총 두께 240 mm인 바닥판 시험체의 거푸집을 설치하고, 교축방향 및 교축직각방향 압축철근을 조립한 후 설계압축강도 40 MPa의 콘크리트를 패널 상부에 타설한다. 현장타설부 바닥판의 콘크리트를 타설한 후 증기양생을 거쳐 그림 3의 (i)와 같은 루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 갖는 교량바닥판의 기본시험체가 완성된다. 프리캐스트 패널의 콘크리트 강도는 현장타설부 바닥판과 합성되는 시기에 43 MPa로 측정되었고, 합성된 이후 실험 직전에 측정된 현장타설부 콘크리트의 강도는 43 MPa이었다.

2.2 실험변수 및 측정위치

2.2.1 실험변수

기존연구에 의하면 루프이음을 갖는 full-depth 프리캐스트 부재는 일반 RC와 유사한 수준의 극한강도를 갖는 것으로 확인되었다(류형근 등, 2003). 또한 루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 갖는 교량바닥판의 요소실험을 통하여 루프이음을 갖는 패널 이음부 구간에서 사용성 및 구조성능이 확보되어 교축방향으로 연속성을 갖는 것이 확인되었다(정철현



(a) 제작대 및 철근배근



(b) 긴장재 배치



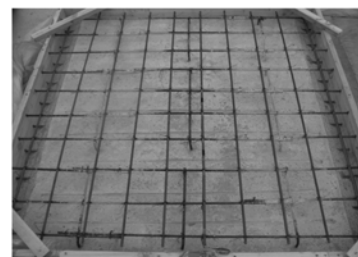
(c) 긴장력 도입



(d) 콘크리트 타설 및 양생



(e) 완성된 패널 형상



(f) 거푸집 및 철근 조립



(g) 현타 바닥판 타설



(h) 바닥판 표면 처리



(i) 완성된 기본시험체의 형상

그림 3. 기본시험체의 제작과정

표 1. 실험변수

실험부재	전단철근 유무	지지조건	비고
DP-P4	X	4변 지지	바닥판 성능 평가
DP-S4	○	4변 지지	바닥판 성능 평가
DP-P2	X	2변 지지	바닥판 성능 평가
DP-S2	○	2변 지지	바닥판 성능 평가
DP-C	○	2변 지지	이음부 바닥판의 성능 평가

등, 2008).

본 실험에서는 기본실험부재의 지지조건을 그림 4와 같이 2변 지지와 4변 지지에 대해서 정적실험을 수행하여 휨거동과 파괴시의 극한내력, 파괴양상 등을 관찰하고 파괴모드를 평가하였다. 또한 전단철근이 프리캐스트와 현타부의 합성거동 및 극한내력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 반단면 프리캐스트 패널에 전단철근이 배치된 기본 실험부재와 전단철근이 배치되지 않은 실험부재에 대해서 실험을 수행하였다. 프리캐스트 패널을 갖는 교량바닥판은 교축방향으로 패널간 이음부가 존재하게 되는데 본 실험에서는 그림 4의 (e)와 같이 패널이 접합되는 부분에 정적하중을 재하하여 이음부 바닥판의 구조성능 및 극한내력을 평가하였다. 루프철근이 접합되는 프리캐스트 패널간 이음부의 자세한 형상은 그림 4의 (f)와 같다. 자세한 실험변수는 표 1에 나타내었으며 반단면 프리캐스트 패널의 두께 100 mm와 현장타설 구

간의 두께 140 mm, 긴장재의 긴장력 등 다른 모든 변수들은 동일하게 제작하여 실험을 수행하였다.

2.2.2 측정위치

정적실험을 통해서 각 실험체에서 처짐과 변형률을 측정하였으며, 각 실험체별 자세한 측정위치는 그림 5~그림 7에 나타내었다. 처짐을 살펴보기 위하여 최대 처짐이 발생하는 실험체 중앙으로부터 균열과 편심을 고려하여 양쪽으로 200 mm 거리에 각각 200 mm의 LVDT를 설치하였고 부재의 1/4지점에도 각각 200 mm의 LVDT를 설치하여 교축방향과 교축직각방향의 처짐을 살펴보았다. 또한, 교축방향과 교축직각방향 단면의 변형률을 측정하기 위하여 콘크리트 게이지를 압축, 인장면에 하중 재하면으로 부터 거리별로 부착하였으며 바닥판 하부 인장철근의 변형률을 측정하기 위하여 콘크리트가 타설되기 전에 철근게이지를 부착하였고 상부 압축철근 역시 철근게이지를 부착한 이후에 콘크리트를 타설하였다.

그림 7은 루프이음부의 교축방향 연속성을 평가하기 위한 DP-C 바닥판 시험체의 측정항목 및 측정위치로서 루프이음부를 기준으로 하여 동일한 거리에 LVDT를 설치하여 각 처짐량을 측정하였다. 루프이음 중앙에서 교축방향으로 100 mm 떨어진 위치와 1000 mm 떨어진 위치에 변위계를 설치하였다. 또한, 교축직각방향으로는 중앙에서 500 mm 떨어진 위치에 설치하였다.

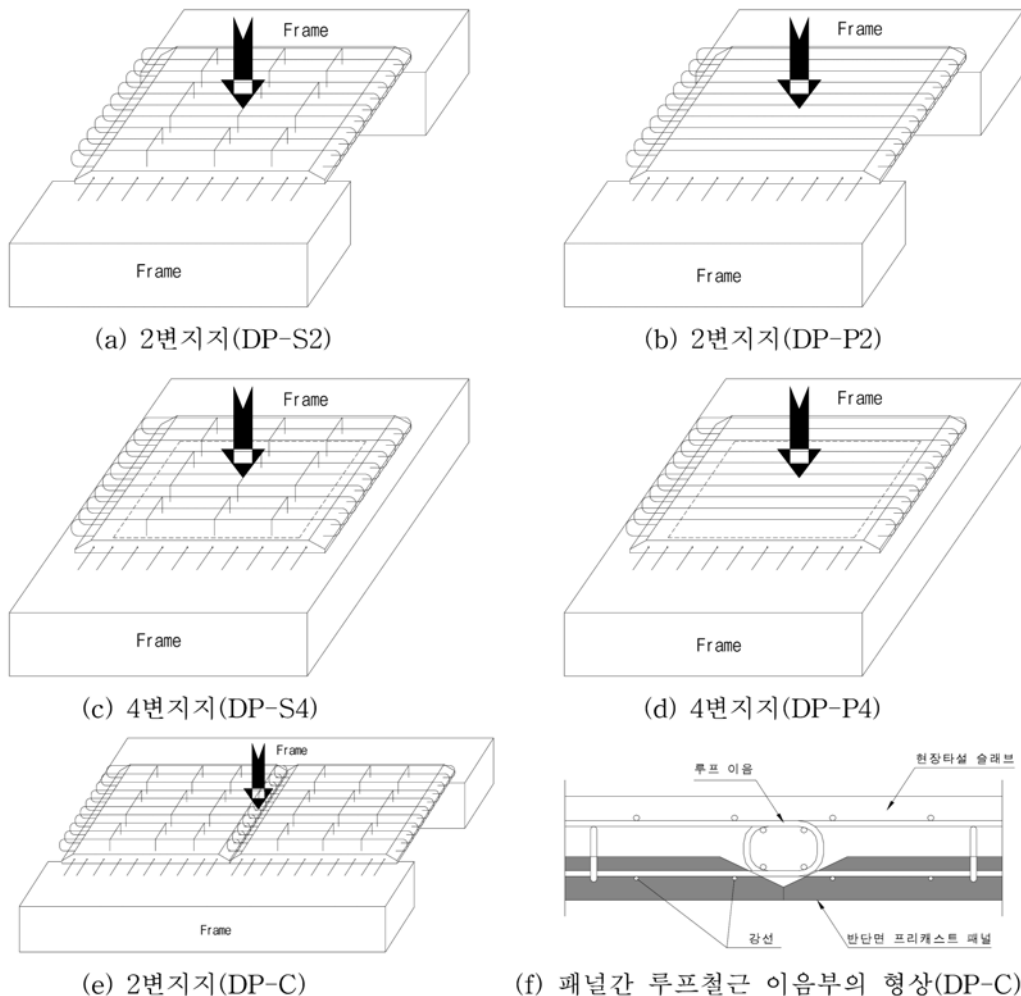
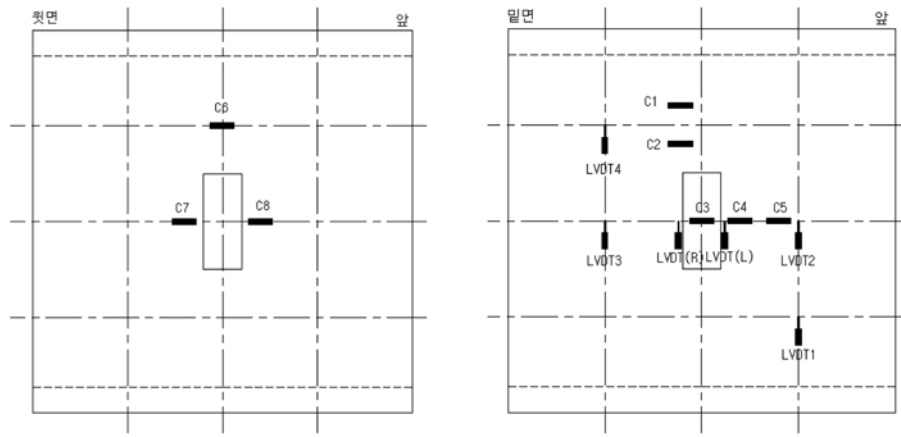
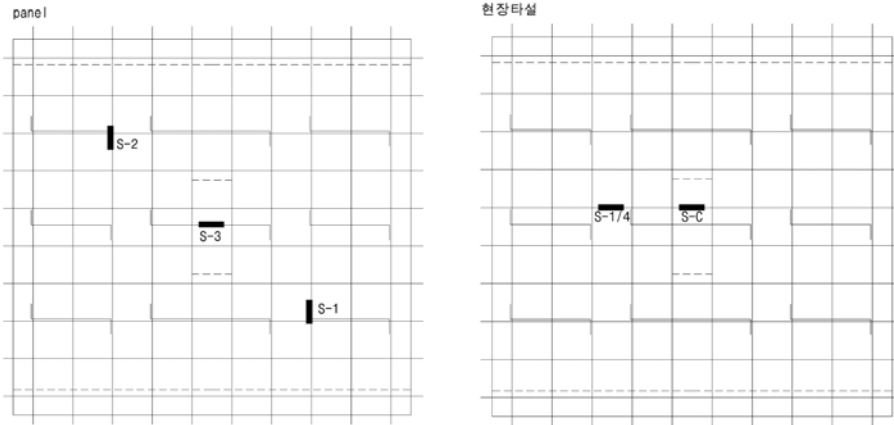


그림 4. 바닥판 실험체의 지지조건 및 하중재하위치



(a) 변위, 콘크리트 변형률 측정 및 재중재하 위치



(b) 철근변형률 측정 위치

그림 5. DP-S2 및 DP-P2 실험체

루프이음을 갖는 프리캐스트 패널 바닥판에서 전단철근 영향과 지지조건에 따른 휨거동 및 교량바닥판으로서의 적용성을 평가하기 위한 정적실험은 1000 kN 용량의 가력기로 수행하였다. 하중 재하시 하중재하면적은 유효중의 접지면적을 고려한 200 mm×500 mm의 하중재하판을 사용하였으며 실험부재의 중앙에 1점 재하 하였다. 하중재하방식은 사용중상태에서는 하중제어방법으로 후반부에서는 파괴시까지 변위제어방법(1 mm/180 sec)으로 하중을 재하하였다. 그림 8은 유효중의 접지면적을 고려하여 재하판을 설치한 바닥판 실험체의 실험전경이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴형상 및 최대내력

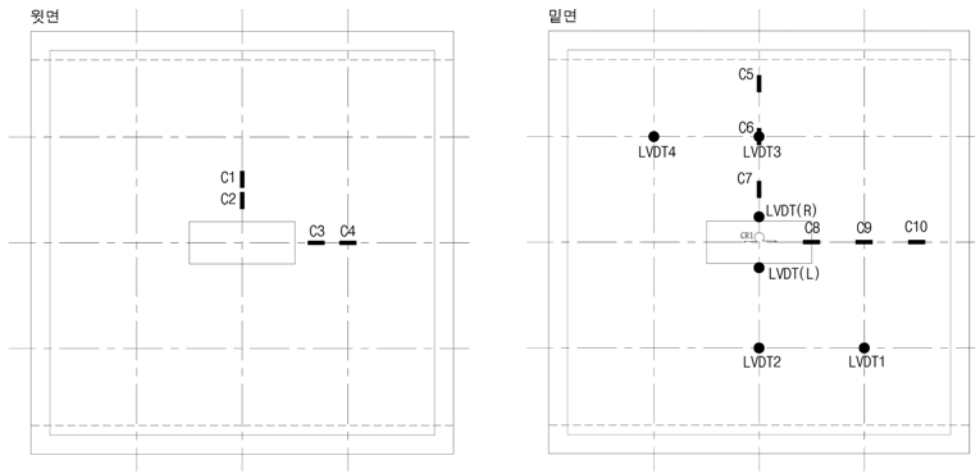
그림 9는 바닥판 상면에서의 균열형상이고, 그림 10은 바닥판 하면에서 발생된 균열도이다. 그림 9와 그림 10의 (a)와 (b)에서 보면 2번지지 바닥판은 전단철근이 없는 경우는 휨 파괴가 발생되었고, 전단철근이 있는 경우는 휨-전단에 의한 파괴양상을 보이면서 휨 파괴에 가까운 파괴가 발생되었다. 그림 9와 그림 10의 (c)와 (d)에서 보면 4번지지 바닥판은 모두 편칭전단 파괴가 발생되었다.

2번지지 바닥판중 전단철근이 없는 DP-P2부재는 중앙의 교축방향으로 초기균열이 약 250 kN에서 발생한 후 최대내력은 약 319 kN으로 측정되었다. 이는 충격효과를 고려한 설계활하중(124.8 kN)의 약 2.56배 수준이다. 전단철근이 있

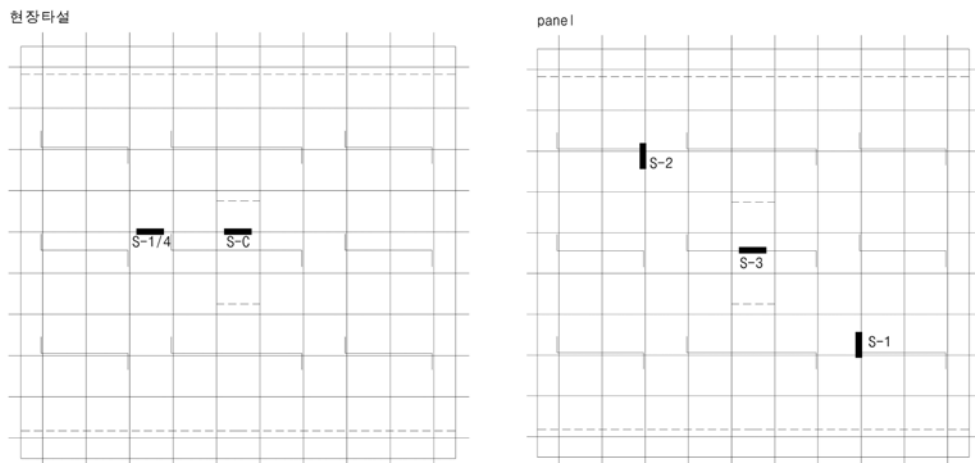
는 DP-S2부재는 초기균열이 약 350 kN에서 교축방향으로 발생하였으며 최대내력은 약 523 kN 수준으로 나타났는데 이는 설계활하중(124.8 kN)의 약 4.19배 수준이다. 전단철근이 있는 경우가 균열하중은 약 40% 증가하고, 최대내력은 약 64% 증가하는 결과를 보여 콘크리트구조설계기준(2007)에서 요구하는 접합면의 최소 수평전단철근을 만족하도록 프리캐스트 패널 상면에 설치된 전단철근은 패널과 현장타설 바닥판과의 합성효과를 크게 향상시키는 것으로 확인되었다.

4번지지 바닥판은 두 부재 모두 균열형상은 유사하게 나타났고 초기균열은 두 부재 모두 약 150 kN에서 발생하였다. 전단철근이 있는 DP-S4 부재는 최대내력은 약 479 kN이며, 전단철근이 없는 DP-P4 부재의 최대내력은 약 338.4 kN으로 나타났다. 전단철근의 유무와 상관없이 균열하중 수준은 유사하지만, 최대내력은 전단철근이 있는 경우가 약 41% 증가하였다. 하중이 증가함에 따라 균열은 중앙에서 외측으로 확장되었고, 이 후 격자모양의 균열형상을 보이며 편칭전단 파괴가 발생되었다. 파괴시 두 부재 모두 상면의 하중 재하면 주위에서 국부적으로 함몰된 파괴형상을 보이고 하면에서는 보다 넓은 범위에서 파괴면이 형성되었다.

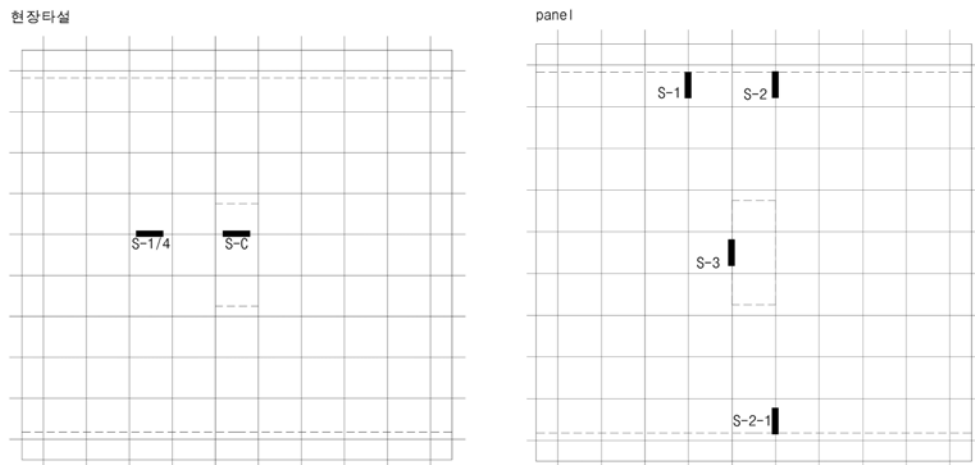
루프이음부의 교축방향 연속성을 평가하기 위한 DP-C 시험체의 균열발생 상황은 그림 11과 같다. 바닥판 이음부의 균열은 그림 11에서와 같이 중앙에서 교축방향으로 약 400 kN에서 최초 균열이 발생하여 점차 재하판을 중심으로 방사형으로 발생하다가 파괴되었으며, 최대내력은 약 695 kN으로 충격효과를 고려한 설계활하중의 약 5.57배 수준으로 나



(a) 변위, 콘크리트 변형률 측정 및 하중재하 위치



(b) DP-S4 바닥판 철근 변형률 측정위치

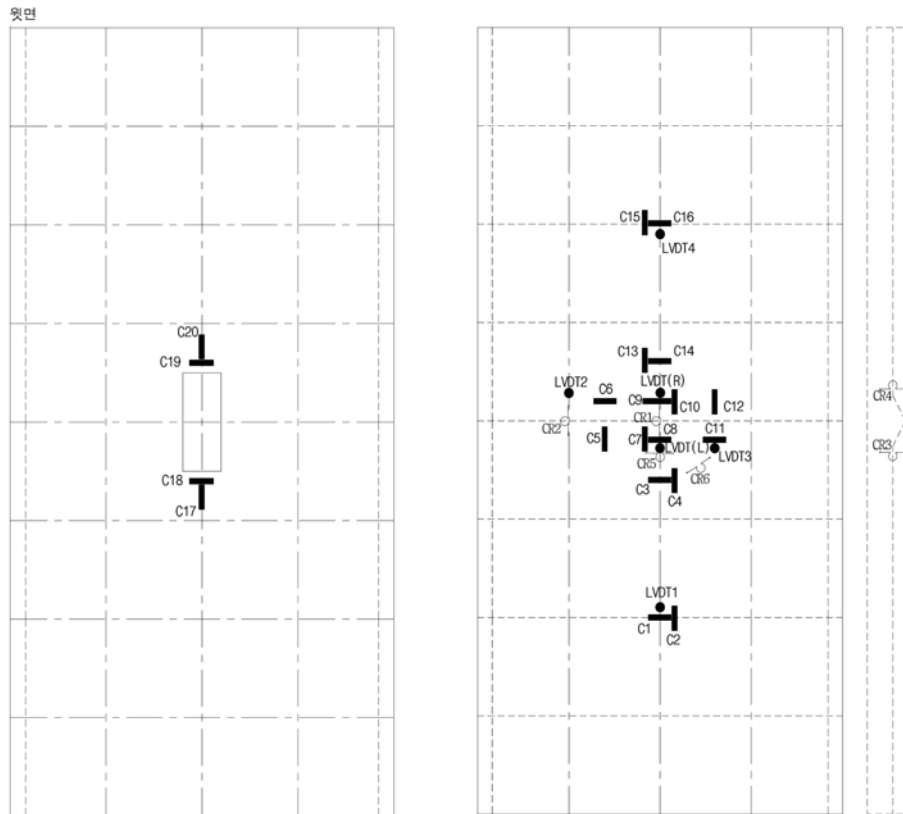


(c) DP-P4 바닥판 철근 변형률 측정위치

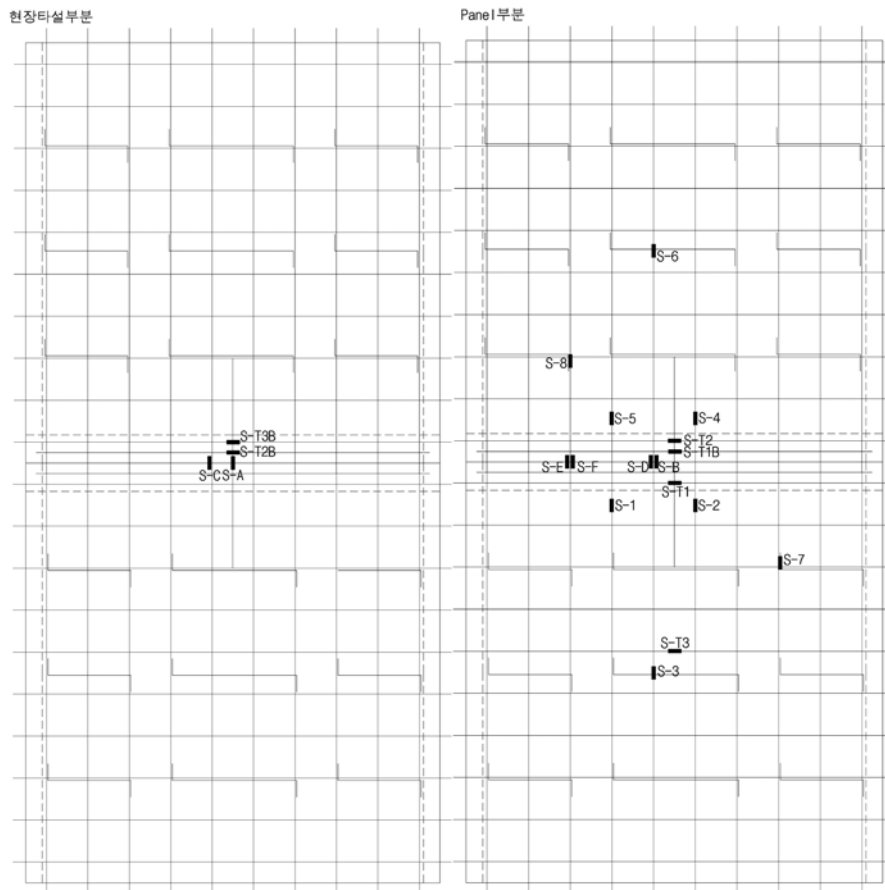
그림 6. DP-P4 및 DP-S4 실험체

타났다. 최종 바닥판의 파괴형상은 편칭전단과 유사한 형상을 보이면서 파괴되었다. 바닥판 상면에서 교축방향으로 일정거리 떨어진 지점에서 교축직각방향으로 부모멘트부 균열이 명확하게 발생되지 않은 것으로 미루어 항복선 파괴는 아닌 것으로 판단된다. 균열이 루프이음부에 집중되지 않고 바닥판 전체로 분포되면서 파괴가 발생되었고, 단면의 중심부인 루프이음부를 중심으로 균열발생 양상이 대칭인 것으로 미루어 루프이음부는 구조적으로 취약부가 아니며 연속성을 확보하는 것으로 판단된다.

정적 파괴실험 통해서 측정된 각 바닥판 실험체의 균열하중 및 최대내력은 표 2와 같다. 표 2에는 바닥판의 극한내력 평가시 적용되는 주요 방법들에 의한 이론적인 최대내력 산정결과도 수록하였다. 2번지지 실험체(DP-P2, DP-S2)는 상대적으로 교축방향 길이가 짧아 모두 휨파괴가 발생되었기 때문에 충격효과와 하중계수를 고려한 설계활하중과 항복선 이론에 의한 최대내력과 비교하였고, 4번지지(DP-P4, DP-S4) 및 2번지지(DP-C) 이지만 상대적으로 교축방향 길이가 긴 루프이음 바닥판은 모두 편칭전단에 의해서 파괴가



(a) 변위, 콘크리트 변형률 측정 및 하중재하 위치



(b) 철근 변형률 측정 위치

그림 7. DP-C 실험체

발생되어 설계기준에 제시된 편칭전단식과 항복선 이론에 의한 최대내력을 비교하였다.

4번지지 바닥판과 루프이음부 바닥판 실험체에서 측정된 최대내력은 설계기준에서 요구하는 편칭전단내력에 비해서



그림 8. 정적실험 전경

낮은 수준으로 평가되었다. 이는 시험체의 지지조건은 거더와 합성되지 않은 단순지지형태의 지점조건을 갖고 있고, 설계기준에서 제시된 평가식은 바닥판과 거더가 완전 합성된 조건에서 제시된 것으로 실험 및 이론에서의 최대내력 차이는 바닥판의 구속조건에 따른 차이가 가장 큰 이유인 것으로 판단된다. 교량바닥판에서 구속정도는 거더와 바닥판의 합성정도에 따라 다르며, Kuang(1992)의 실험결과에서도 구속정도가 클수록 편칭전단내력이 증가하는 결과를 보였다.

바닥판 실험체의 보다 정확한 내력을 평가하기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 철근과 콘크리트, 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판은 완전부착으로 가정하였고, 전단철근이 없는 실험체는 패널과 현장타설부 접합면의 부착 및 슬립 특성을 확인하기 위한 별도의 실험이 수행되지 않아 해석에서 제외하였다. 콘크리트 재료모델은 ABAQUS 6.4-1에 내장되어있는 콘크리트 손상 소성 모델(Concrete Damaged Plasticity Model)을 적용하였고, 재료모델에 사용된 콘크리트의 응력-변형률 관계는 40 MPa의 콘크리트 재료를 1축 압축거동에 대하여 응력이 0.3 f_{cu} 에 도달할 때까

지 선형 탄성구간으로 가정하였고 극한강도까지 Hognestad (1951)가 제안한 응력-변형률 곡선, 최대강도 이후는 Karsan *et al.*(1969)의 제안식을 적용하였다. 철근은 완전탄소성 모델로 가정하였다. 각 재료모델은 그림 12와 같고, 유한요소모델의 형상은 그림 13과 같다. 실험결과와 해석결과는 대표적으로 그림 14에 비교하였고, 해석에서 산정된 내력은 표 2에 수록하였다.

그림 14의 하중-처짐 곡선에서 보면, DP-S2 바닥판은 실험에서 나타난 전단철근 항복으로 인한 접합면의 분리를 모델에서 고려하지 못해 최대내력이 약 10% 정도 크게 나타났지만, 전반적으로 해석 및 실험결과가 잘 맞는 것으로 나타났다.

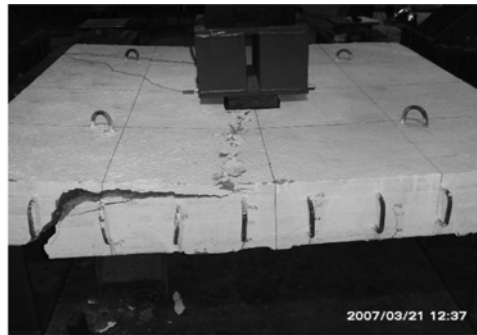
3.2 전단철근의 유무에 따른 거동

그림 15는 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판의 합성효과를 높이기 위해 도입된 전단철근(그림 1 참조)의 유무에 따른 하중-변위 곡선이다. 지지조건에 상관없이 전단철근이 있는 경우가 최대내력이 상당히 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 전단철근이 프리캐스트 부재와 현장타설 부재 사이 합성효과에 크게 기여하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 16(a)는 전단철근이 있는 2변지지 바닥판에 배근된 전단철근의 높이방향(S-1)과 수평방향(S-3)에서 측정된 변형률이다(측정위치 : 그림 5의 (b) 참조). 그림에서 보면, 바닥판이 최대내력에 도달할 때까지 전단철근이 외력에 저항함을 알 수 있다. 따라서 전단철근이 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판의 합성에 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 그림 16(b)는 현장타설부에 배근된 시험체 상면에 배근된 철근에서 측정된 변형률로서 초기에 압축응력이 발생하다가 균열이 진전되면서 중립축이 위로 이동하여 인장영역으로 변화됨을 알 수 있는데 이로 미루어 패널과 현장타설 바닥판



(a) DP-P2 부재(2변지지, 전단철근 무)



(b) DP-S2 부재(2변지지, 전단철근 유)

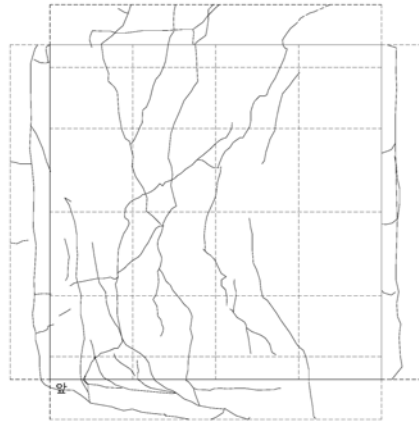


(c) DP-P4 부재(4변지지, 전단철근 무)

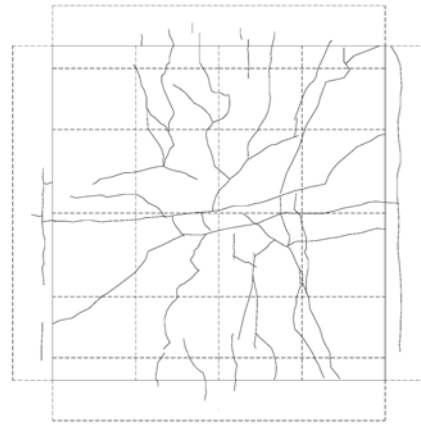


(d) DP-S4 부재(4변지지, 전단철근 유)

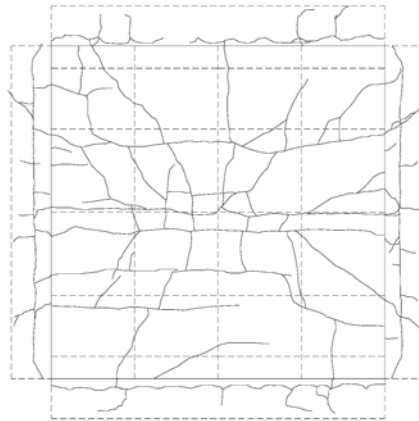
그림 9. 바닥판 상면의 파괴형상



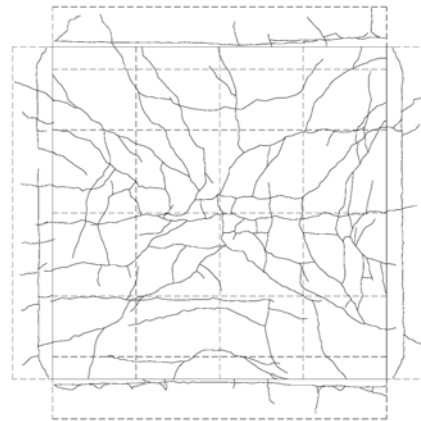
(a) DP-P2 부재



(b) DP-S2 부재



(c) DP-P4 부재



(d) DP-S4 부재

그림 10. 바닥판 하면의 균열도

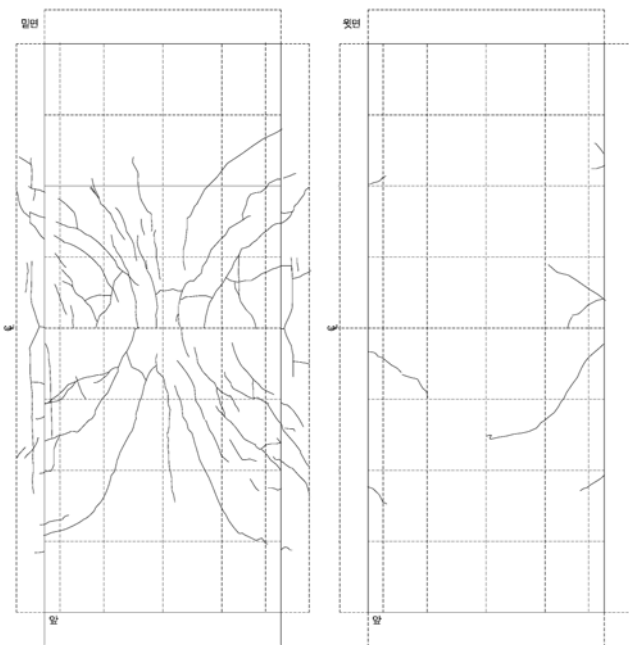


그림 11. DP-C 바닥판의 균열도

이 구조적으로 일체 거동을 하는 것으로 판단된다.

그림 17은 4면지지 바닥판의 상면에서 측정된 교축방향 콘크리트 변형률이며, 그림 18은 교축직각방향 변형률이다. 전단철근이 있는 경우가 구조적으로 2방향 거동 특성을 보이는 것으로 판단된다.

그림 19는 4면지지 바닥판의 상면인 현장타설부 바닥판에 배근된 교축직각방향 철근에서 측정된 변형률이다. (a)는 하중재하점 바로 밑이고, (b)는 교축직각방향으로 지간의 1/4 지점이다(그림 6 참조). 합성효과로 인해 전단철근이 있는 경우가 없는 경우에 비해서 더 큰 하중수준에서 압축상태에서 인장상태로 변화되었다. 따라서 전단철근이 없는 경우는 전단철근이 있는 경우에 비해서 현장타설부에 배근된 교축직각방향 철근의 위치까지 낮은 수준의 하중에서 균열이 진전되는 것으로 판단된다.

3.3 교축방향 루프철근 이음부의 거동

정적실험을 통해서 측정된 하중-변위 곡선은 그림 20으로서 측정위치는 그림 7의 (a)에 자세히 나타내었다. 약 400 kN 하중에서 교축방향으로 최초균열이 발생하였고, 최대내력은 약 695 kN으로 측정되었다. 그림 21은 루프이음부(DP-C) 바닥판 하면에서 측정된 콘크리트 변형률로서 기호별 자세한 측정위치는 그림 7에 나타나 있다. 바닥판 지간의 중앙부의 하중 재하점에서 교축방향으로 위치별로 측정된 교축직각방향 변형률로서 하중재하점 부근에서 휨변형이 크고 멀어질수록 감소하는 일반적인 바닥판에서의 경향을 보여주고 있다. 그림 22는 바닥판 상면에서 측정된 콘크리트 변형률로서 하중 재하점 부근에서 양방향 모두 압축변형이 일어나고 특히 교축직각방향으로는 압축변형률이 발생하는데 이는 최종 파괴시 편칭전단 파괴의 원인이 되는 것으로 판단

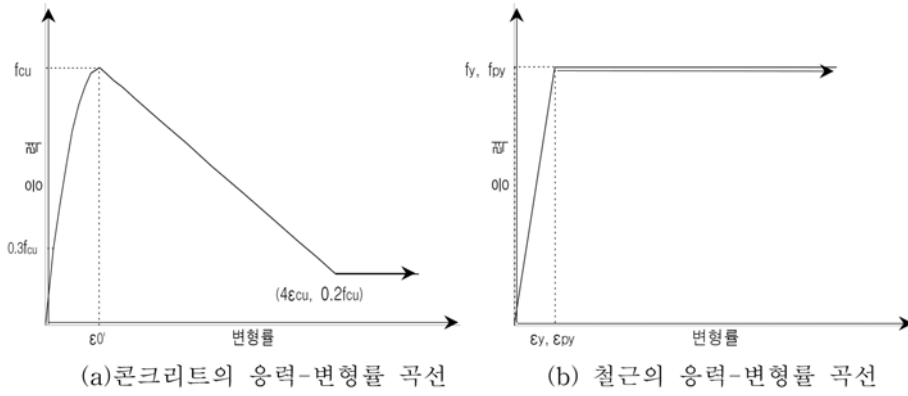


그림 12. 응력-변형률 곡선

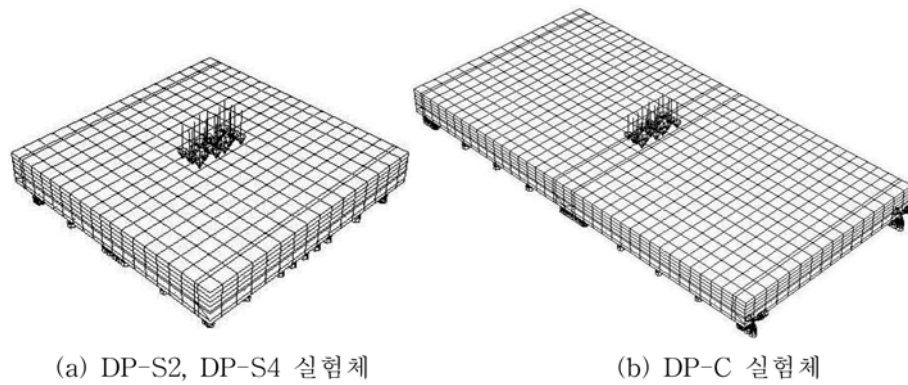


그림 13. 유한요소모델

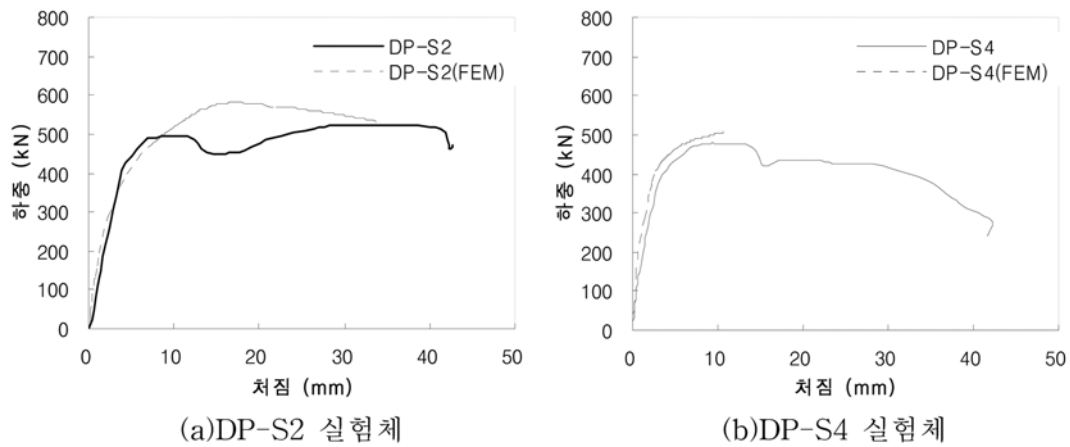


그림 14. 하중-처짐 곡선의 비교

표 2. 균열하중 및 최대내력

시험체		2변 지지		4변 지지		DP-C (루프이음부 바닥판)	
		DP-P2	DP-S2	DP-P4	DP-S4		
실험값 (kN)	균열하중	250.0	350.0	150.0	150.0	400.0	
	최대내력	319.0	523.1	338.4	479.0	695.1	
이론값(kN)	설계활하중(충격 포함)		124.8				
	항복선 이론		574.5	574.5	599.5	599.5	814.0
	편칭전단내력	도로교설계기준	-	-	743.8	743.8	743.8
		CEB-FIP	-	-	542.5	542.5	542.5
유한요소해석 결과(kN)			581.0		507.0	697.0	

된다.

그림 23은 하중 재하점 부근의 배력철근에서 측정된 변형률로서 (a)는 패널간 이음부의 루프철근 상단(S-C)과 하단

(S-B)에서의 변형률이고, (b)는 이음부에서 약간 떨어진 이음부가 아닌 구간의 배력철근에서 측정된 변형률이다. (a)에서 보면, 루프철근 상단부(S-C) 거의 응력이 발생하지 않다가

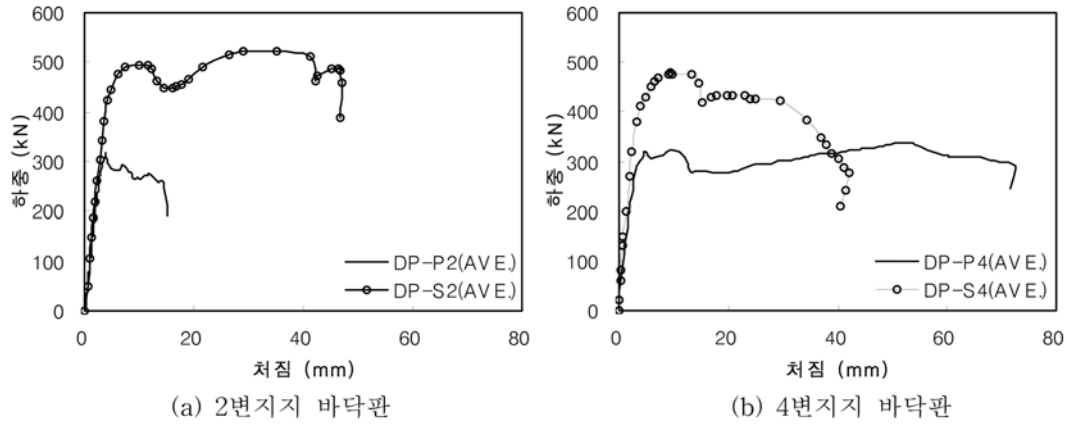


그림 15. 하중-변위 곡선

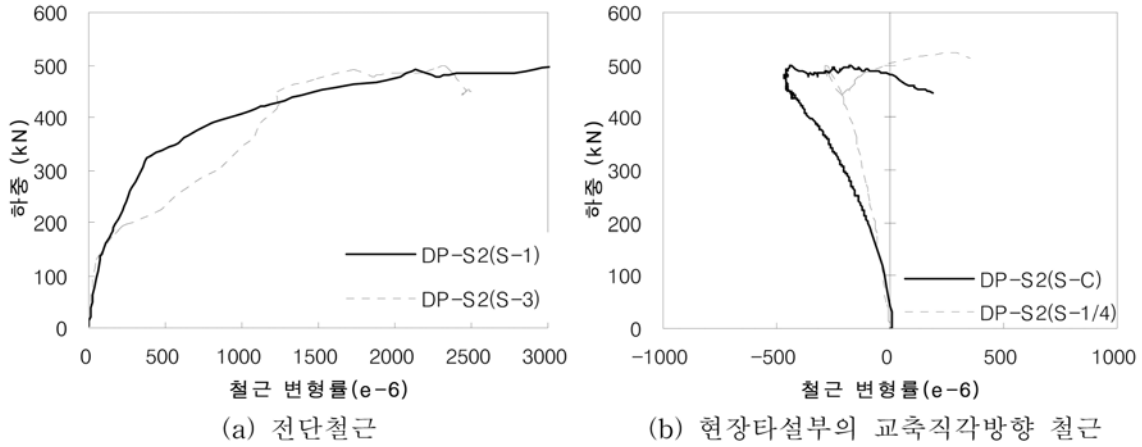


그림 16. DP-S2(2변지지) 바닥판 철근의 하중-변형률 곡선

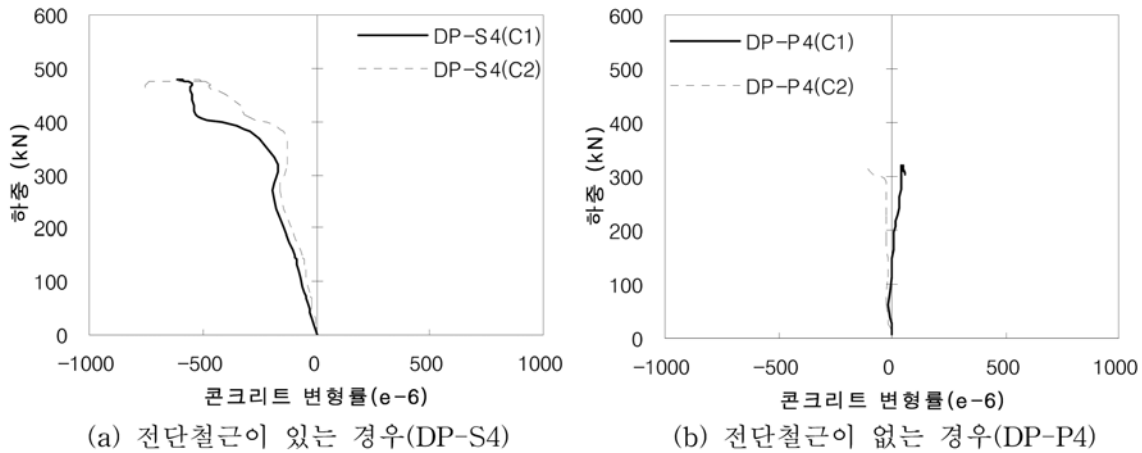


그림 17. 4변지지 바닥판 상면의 교축방향 콘크리트 변형률

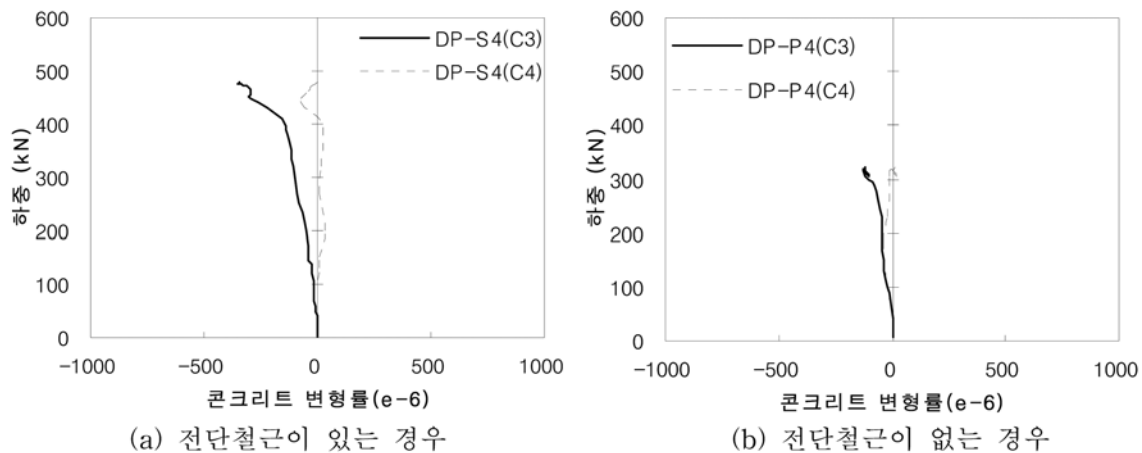
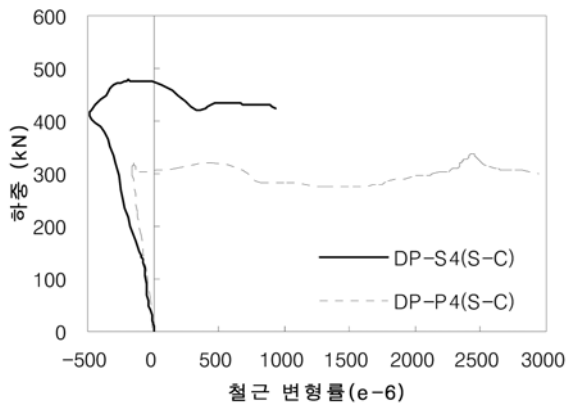
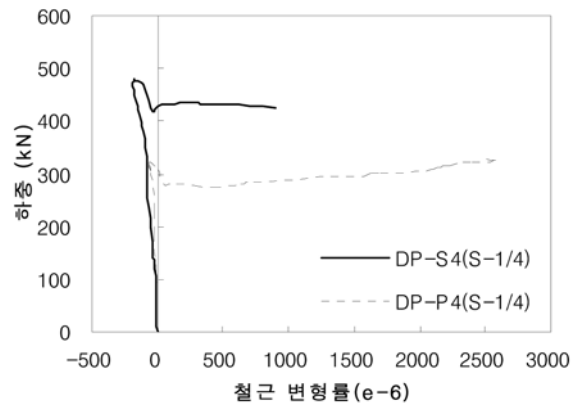


그림 18. 4변지지 바닥판 상면의 교축직각방향 콘크리트 변형률



(a) 지간 중앙부



(b) 지간의 1/4 지점

그림 19. 현장타설부에 배근된 교축직각방향 철근 변형률

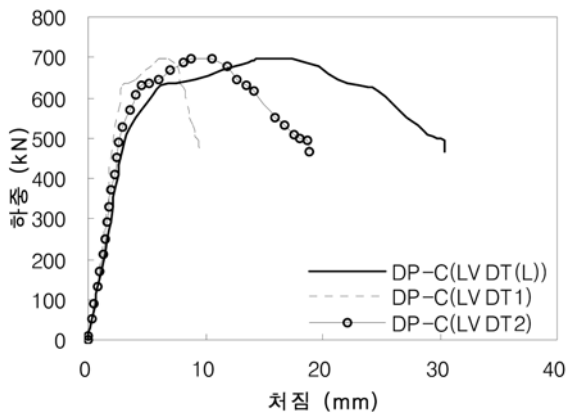


그림 20. DP-C 바닥판의 하중-변위 곡선

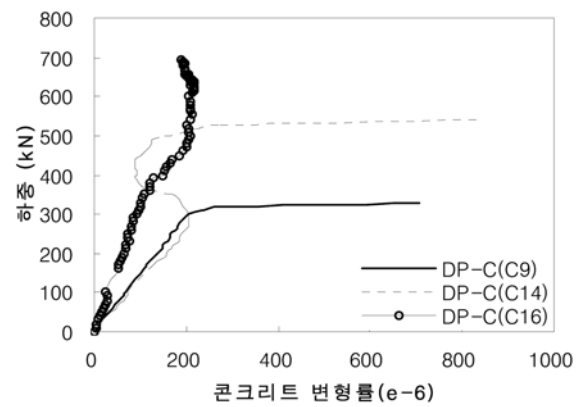
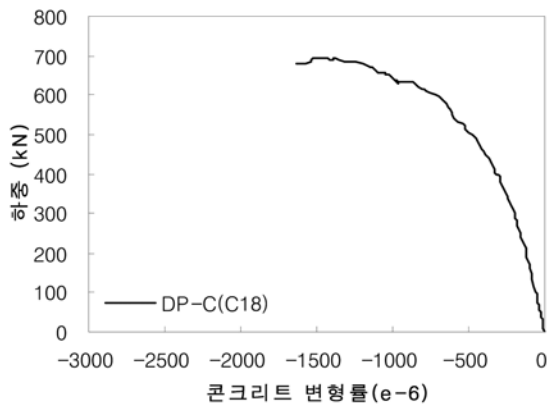
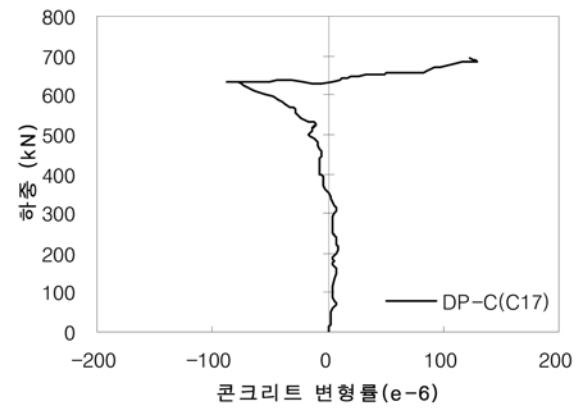


그림 21. 하면의 교축직각방향 콘크리트 변형률

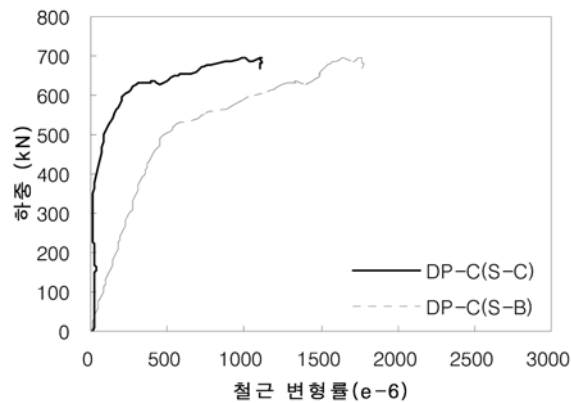


(a) 교축직각방향

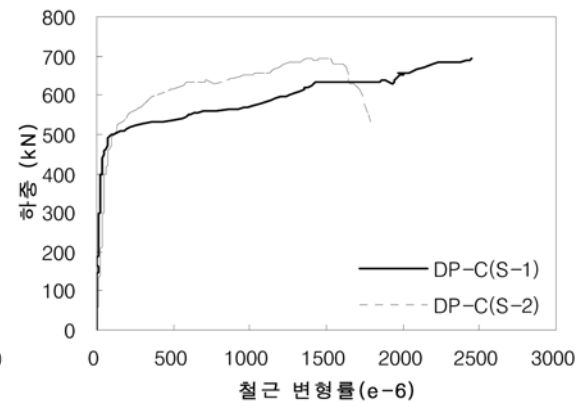


(b) 교축방향

그림 22. 바닥판 상면에서의 콘크리트 변형률



(a) 패널간 이음부 루프철근



(b) 이음부 부근 패널내 배력철근

그림 23. 배력철근에서의 변형률 곡선

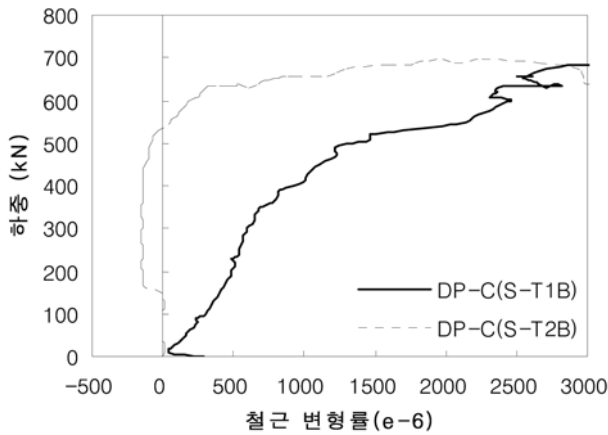


그림 24. 루프철근내 보강철근의 변형률

균열하중(400 kN) 이후부터 인장응력이 발생하고 최종 파괴 시에는 상하단 모두 항복에 도달하였고 재하점에서 떨어진 루프철근 이음부에서도 항복이 발생하였다.

그림 24는 패널간 이음부의 루프철근내에 교축직각방향으로 배근된 보강철근에서 측정된 변형률로서 상단(S-T2B)은 초기에 압축을 받지만, 파괴시에는 상하단 보강철근 모두 항복이 발생되었다. 따라서 패널간 루프철근 이음부는 일체화된 구조거동을 보이는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 루프이음을 갖는 반단면 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판이 합성된 교량바닥판에 대한 구조실험을 수행하였다. 실험을 통해서 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판의 합성을 위해 도입된 전단철근의 유무가 구조거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 교축방향으로 패널간 루프이음부가 있는 교량바닥판의 구조거동을 평가하였다. 구조실험을 통해서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판 접합면에 콘크리트구조설계기준에서 요구하는 최소 수평전단 철근량을 만족하는 전단철근이 도입되는 경우 합성효과의 확보로 바닥판의 최대내력이 약 40~64% 증가되는 것으로 나타났다. 이는 전단철근에서 측정된 철근변형률을 보면 바닥판이 최대내력에 도달할 때까지 항복 이후에도 저항능력을 발휘하는 것으로도 확인되었다. 또한, 현장타설부 상면에 배근된 철근에서 측정된 변형률이 초기에 압축특성을 보이다가 균열이 진전되면서 중립축이 위로 이동하여 인장영역으로 변화되고, 전단철근이 있는 경우가 중립축 상승이 큰 하중수준에서 이루어지는데 이는 전단철근의 의한 합성효과 때문인 것으로 판단된다.

2면지지 바닥판의 최대내력은 전단철근이 도입되지 않는 경우(DP-P2) 충격효과를 고려한 설계활하중의 약 2.56배이고 전단철근이 도입되는 경우(DP-S2)에는 약 4.19배 수준이다. 또한, 루프이음부 바닥판의 최대내력은 충격효과를 고려한 설계활하중의 약 5.57배 수준으로 전단철근이 없는 경우에는 충분한 안전율을 확보하지 못하는 것으로 판단된다. 일반적으로 실험에서 측정되는 교량바닥판의 최대내력은 설계하중의 몇배 이상의 안전율을 갖고 있기 때문에 루프이음 반단면 프리캐스트 패널과 현장타설 바닥판이 합성된 교량

바닥판은 충분한 안전율을 확보하기 위해서는 합성거동을 보장해주는 전단철근의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

루프이음부의 교축방향 연속성을 평가하기 위한 교량바닥판(DP-C)의 루프이음부에 하중을 재하하여 구조실험을 수행한 결과, 최초 균열이 발생한 후 재하판을 중심으로 방사형으로 진전되다가 편칭전단에 가깝게 파괴되었다. 균열이 루프이음부에 집중되지 않고 바닥판 전체로 분포되면서 파괴가 발생되었고, 단면의 중심부인 루프이음부를 중심으로 균열발생 양상이 대칭인 것으로 미루어 루프이음부는 구조적으로 연속성이 확보하는 것으로 판단된다. 하중 재하점 부근의 패널간 접합부의 루프철근에서 측정된 변형률을 보면 균열하중 이후부터 인장응력이 증가하다가 최종 파괴시에는 루프철근 상하단 모두 항복에 도달하여 파괴시까지 바닥판 내력에 구조적으로 기여함을 확인하였다. 패널간 이음부의 루프철근내에 교축직각방향으로 배근된 상하단 보강철근은 항복이 발생하고, 파괴시까지 저항능력을 발휘하였다. 이상의 결과에서 패널간 루프철근 이음부는 단면의 취약부가 아니고 일체화된 구조거동을 보이는 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부(2005) 도로교설계기준.
 김영진, 정철현, 김종희(1998) 프리캐스트 콘크리트 교량바닥판 female-female 이음부의 전 단실험, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제10권, 제5호, pp. 161-168.
 노병철, 조규대(2007) LB-DECK의 Lattice bar 높이 변화에 따른 합성거동 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제27권, 제2A호, pp. 193-200.
 류형근, 장승필, 김영진, 주봉철(2003) 루프 이음 프리캐스트 바닥판의 휨실험, 한국콘크리트학회 2003년도 봄 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, pp. 518-523.
 류형근, 장승필, 정철현, 김영진(2003) 루프 이음 프리캐스트 합성형 교량 바닥판의 적용, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 584-587.
 정철현, 김영진, 장성욱, 김철영, 심창수(1998) 프리스트레스를 도입한 프리캐스트 콘크리트 교량바닥판 연결부에 관한 피로실험, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제10권, 제5호, pp. 159-165.
 정철현, 정영은, 현병학, 박세진(2008) 루프이음을 갖는 반단면 프리캐스트 바닥판 이음부 성능에 대한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제28권, 제4A호, pp. 581-590.
 최은수, 김학수(2005) 교량 바닥판 건설용 프리캐스트 콘크리트 패널의 거동특성, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제25권, 제2A호, pp. 395-404.
 한국콘크리트학회(2007) 콘크리트구조설계기준.
 Shim, C.-S., Choi, K.-Y., and Chang, S.-P. (2001) Design of transverse joints in composite bridges with precast decks, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 17-27.
 Hognestad, E. (1951) A Study of Combined bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, Bull. 339, Uni. of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill.
 Ong, K.C.G., Hao, J.B., and Paramasivam, P. (2006) Flexural behavior of precast joints with horizontal loop connections, *ACI Structural Journal*, Technical Paper, Title no. 103-S68, pp. 664-671.
 Kuang, J.S. and Morley, C.T. (1992) Punching shear behavior of restrained reinforced concrete slabs, *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 1, Jan.-Feb., pp. 13-19.

(접수일: 2009.2.9/심사일: 2009.4.29/심사완료일: 2009.5.13)