

루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 이용한 교량 바닥판의 피로성능

Fatigue Performance of Bridge Decks using Half-Depth Precast Panel with Loop Joint

정철현* · 임승준** · 김현준***

Chung, Chul Hun · Lim, Seung Jun · Kim, Hyun Jun

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. However, in order to apply the precast panels to bridges properly, it is necessary to fully understand the structural characteristics of joint in precast panels. Particularly, since the bridge deck is under repeated loads such as traffic loads, fatigue behavior and characteristics of joint should be investigated. In this paper, fatigue tests of composite deck with shear ties and loop joints were conducted. The fatigue tests were conducted with an application of repeated loading and wheel loading. Test results were analyzed to examine the current design code for fatigue of reinforcement bar and serviceability under repeated loading.

Keywords : precast panel, composite deck, repeated loading, wheel loading, fatigue test, serviceability

요 지

프리캐스트 패널은 교량바닥판의 합성 구조부재로서 사용된다. 프리캐스트 패널의 횡방향 강재는 교량바닥판의 주철근 역할을 하며, 또한, 패널 상부의 현장타설 콘크리트 시공시 거푸집 대용으로 적용된다. 그러나 프리캐스트 패널의 장점을 살리기 위해서는 필연적으로 갖게 되는 구조적 특징이자 취약점이 될 수 있는 이음부 부분에 대한 이해와 지식이 필요하다. 특히, 교량바닥판은 차량하중과 같은 반복하중을 받는 구조물이므로 피로하중에 대한 이음부의 거동 및 성능 평가가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 전단철근과 루프이음부를 갖는 프리캐스트 패널 합성바닥판의 피로실험을 수행하였다. 피로실험은 고정점 반복하중과 운하중을 적용하여 수행되었다. 피로에 대한 현행 설계기준을 고려하고 이음부의 피로파괴 특성과 반복하중 하에서의 사용성 평가를 위해 결과 분석을 수행하였다.

핵심용어 : 프리캐스트 패널, 합성바닥판, 반복하중, 운하중, 피로실험, 사용성

1. 서 론

반단면 프리캐스트 교량바닥판 공법은 바닥판 두께의 일부분을 프리캐스트 콘크리트 패널로 제작하여 이를 거더간에 거치한 후, 영구거푸집으로 활용하여 나머지 바닥판을 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 바닥 구조체의 일부로 사용하는 경우도 있고 단지 거푸집 대용으로만 사용하는 경우도 있는데 구조체의 일부로 사용하기 위해서는 프리캐스트 패널의 두께가 도로

교설계기준의 관련 규정(도로교설계기준, 2005)을 만족하여야 한다. 도로교설계기준에서는 현장타설 되는 콘크리트와 합성되는 프리캐스트 콘크리트 패널이 구조부재로 적용되기 위해서는 패널의 두께는 합성된 최종 바닥판두께의 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 패

*정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : chchung5@dankook.ac.kr)

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

***정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (E-mail : rolandgarros@hanmail.net)

널 사이의 종방향으로 루프이음 철근을 도입하였고, 가설하중에 대한 내하력을 확보하기 위해 패널의 교축직각 방향으로 프리스트레스를 도입하였다. 정철현 등(2009)은 루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 이용한 교량 바닥판의 정적실험을 통해서 합성 바닥판의 정적강도 및 패널간 이음부의 구조적 연속성을 확인하였다.

본 연구에서는 루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 갖는 합성바닥판에 대해서 일점하중피로실험과 윤하중 주행실험을 수행하여 사용성과 피로성능을 평가하였다. 윤하중 주행시험에 의한 피로손상이 고정점 피로하중에 의한 피로손상보다 더 크기 때문에 그 차이를 확인하기 위하여 2가지 형태의 피로실험을 수행하였다. 기존 연구에서 현장타설 바닥판에 대해서는 일점하중 피로와 윤하중 피로에 대한 피로성능 비교가 이루어 졌지만, 반단면 패널을 적용한 바닥판에 대해서는 연구사료가 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 반단면 패널을 적용한 바닥판에서의 피로하중 상태에 따른 비교를 위하여 2가지 피로실험을 수행하였다. 일점하중 피로실험에서는 패널간 이음부 위치에 피로하중을 재하하여 피로성능을 평가하였으며, 윤하중 주행실험에서도 패널간 이음부 존재하도록 바닥판 실험체를 제작하여 패널간 이음부의 피로성능을 평가하였다.

2. 반단면 프리캐스트 바닥판의 피로실험

2.1 피로 실험체의 제작

피로실험이 수행된 루프이음을 갖는 반단면 프리캐스트 패널 교량바닥판의 기본형상 및 제원은 그림 1과 같다. 바닥판 실험체의 설계활하중은 DB-24이며, 충격효과와 하중계수를 고려한 단위폭당 설계모멘트는 $61.52 \text{ kN}\cdot\text{m}(1.3 \times 2.6 + 2.15 \times 27.04)$ 이다. 기본실험체인 프리캐스트 패널의 형상은 $2000 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ 의 크기인 정사각형이며, 패널에 설치된 루프철근은 패널간 일체성 확보를 위한 연결부 철근으로 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 횡인장 응력에 저항할 수 있게 바닥판 하부의 패널부분에 약 70 kN 의 긴장력을 도입한 강연선과 바닥판 상부에 SD40-D13 철근이 200 mm 간격으로 배치되

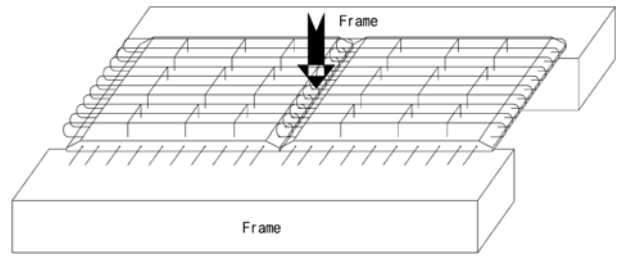


그림 1. 반단면 프리캐스트 패널 교량바닥판의 형상

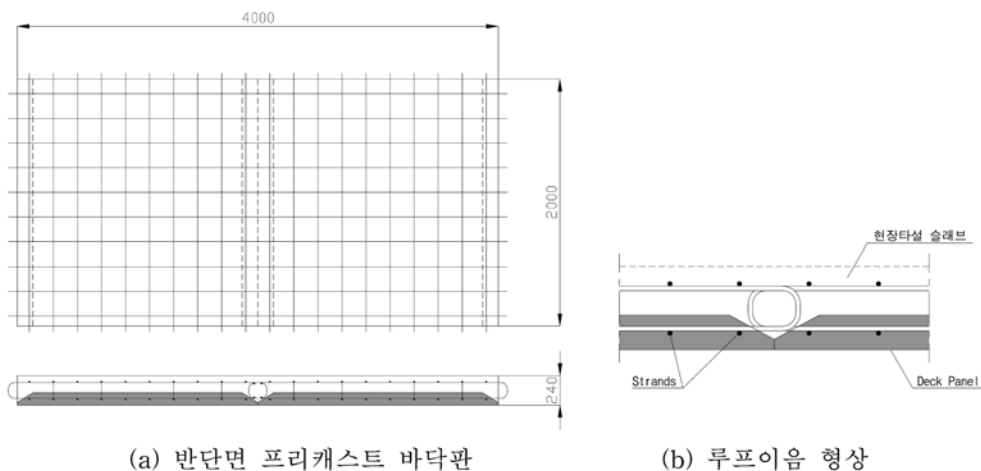
었다. 또한 프리캐스트 패널 상면에는 현장타설 바닥판과의 합성을 위해 루프철근들 사이에 전단철근(SD40-D10)을 배치하였다(그림 1의 □형 철근). 패널간 이음부에 설치되는 루프철근의 겹이음 길이는 현장타설 바닥판과 동등 이상의 구조성능이 확인된 160 mm 를 적용하였다. 전단철근 및 루프철근의 겹이음 길이에 대한 계산과정 및 실험적 검증결과는 참고문헌에 자세하게 수록되어 있다(정철현 등, 2009). 고정점 반복하중을 가하는 일점하중 실험체는 거더와 합성되지 않은 바닥판 실험체이고 윤하중 이동하중을 적용하는 윤하중재하 실험체는 거더와 바닥판을 합성하여 실제의 교량 바닥판 거동과 동일하게 하였다.

피로 실험체인 반단면 프리캐스트 패널 교량바닥판은 그림 2와 같이 두 개의 프리캐스트 패널을 거치하여 루프 이음을 두고 패널 상부에 콘크리트를 타설하여 $4000 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ 크기인 실험체를 제작하였으며, 제작과정은 그림 3과 같다. 콘크리트의 설계강도는 40 MPa 이며, 실린더 공시체의 평균 측정강도는 43 MPa 이다.

일점하중 피로실험이 수행된 피로 실험체는 그림 3과 같이 제작된 2개의 반단면 프리캐스트 패널로 합성된 바닥판을 거더위에 단순 거치시킨 후, 피로실험이 수행되었으며, 윤하중 주행시험이 수행된 피로 실험체는 합성된 바닥판을 강 거더에 합성시킨 후 피로실험이 수행되었다. 윤하중 시험시 바닥판을 단순 거치한 상태에서는 실험 수행이 어려워 완전 합성에서 요구되는 전단연결재 보다는 작은 양을 배치하여 합성시켰다.

2.2 피로실험 방법 및 측정내용

고정점 피로실험시 피로하중은 충격효과를 고려한 DB-24 축중 하중을 200만회 반복 가력하였으며, 피로하중은 가장 취약



(a) 반단면 프리캐스트 바닥판

(b) 루프이음 형상

그림 2. 피로 실험체의 단면 형상

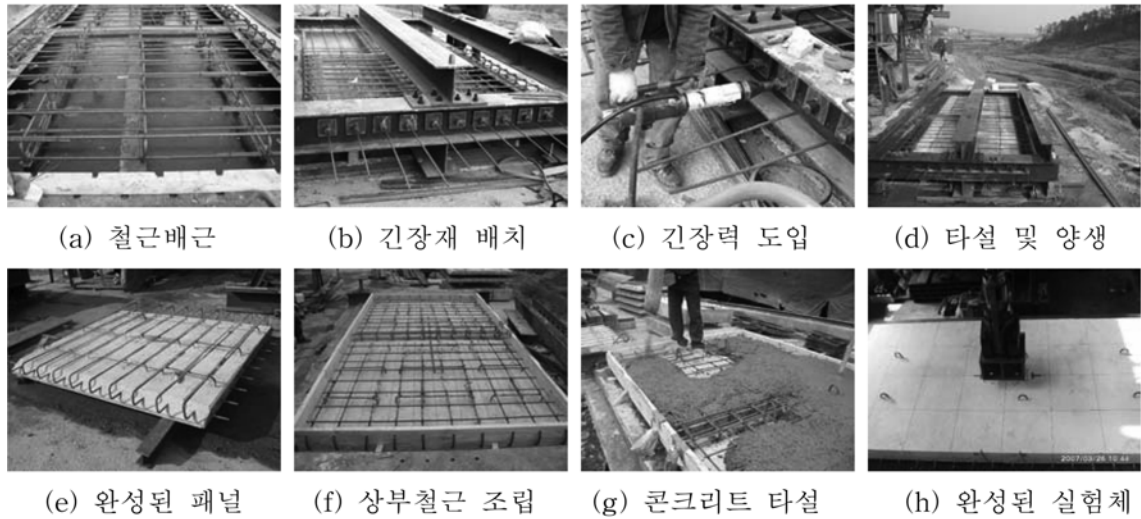


그림 3. 피로 실험체의 제작과정

부로 예상되는 패널간 이음부에 재하하였다(그림 1 참조).

윤하중 재하 피로실험에 적용된 반복하중은 충격효과를 고려한 DB-24 축중의 2배인 250 kN을 적용하여 조기파괴를 유도하였다. 윤하중 피로실험은 실험여건상 200만회 반복재하 실험이 어렵기 때문에 충격효과를 고려한 DB-24 축중이 200만회 재하시 피로손상과 동일한 피로손상이 10만회에서 발생되도록 결정된 하중이다. 윤하중 피로실험시 등가의 피로하중은 松井繁之(1991)가 윤하중 피로실험 결과를 통해 제시한 피로수명 곡선식을 이용하여 산정하였다. 이 피로수명 곡선식에서 등가축중의 반복횟수 산정은 이동 윤하중의 반복에 의한 바닥판 전단피로실험을 수행하여 마이너 법칙을 적용하여 제안되었다. 바닥판에 작용하는 반복하중 P_0 와 P_1 이 각각 N_0 와 N_1 회 작용하여 편칭전단파괴가 발생하였을 때 마이너 법칙을 적용하면 피로 수명식은 식 (1)과 식 (2)와 같으며, 식 (1)과 식 (2)로부터 N_0 와 N_1 의 관계를 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\log\left(\frac{P_0}{P_{sx}}\right) = -k \log N_0 + \log C \quad (1)$$

$$\log\left(\frac{P_1}{P_{sx}}\right) = -k \log N_1 + \log C \quad (2)$$

$$N_0 = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{1/k} N_1 \quad (3)$$

P_{sx} : 철근콘크리트 바닥판의 피로 전단강도
 k : 피로수명 곡선식의 기울기 상수
 C : 피로수명 곡선식의 y축 절편 상수

위의 관계를 이용하여 각기 다른 작용하중 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$ 에 대응하는 반복 재하횟수 $N_1, N_2, N_3, \dots, N_i$ 에 대하여 마이너 법칙을 적용하면 등가축중의 반복횟수는 식(4)와 같다.

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^{1/k} N_i \quad (4)$$

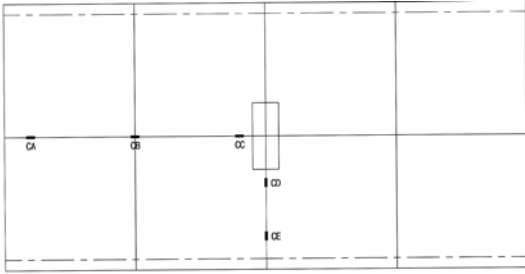
윤하중 피로실험의 등가축중 반복횟수는 松井繁之(1991)가 제안한 식 (5)에 의해서 산정하였고, 식 (5)에서 피로전단강도(P_{sx})는 편칭전단강도(P_s)의 0.43배이다.

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 1.51965 \quad (5)$$

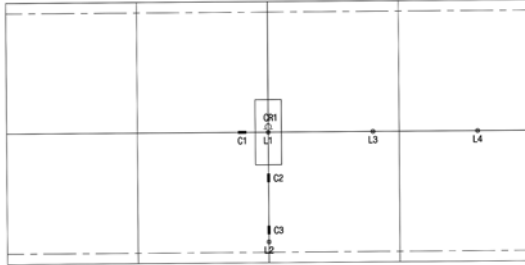
- P : 작용하중
- P_{sx} : 이동 윤하중 작용시 전단내력으로 편칭전단강도(P_s)의 0.43배
- P_s : $\tau_{s, \max} \{2(a+2x_m)x_d + 2(b+2x_d)x_m\} + f_{t, \max} \{2(4C_a + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_a\}$
- $\tau_{s, \max}$: 콘크리트 최대전단응력(=0.252 f_c -0.000246 f_c^2) (kg/cm²)
- $f_{t, \max}$: 콘크리트의 최대 인장응력(=0.583 $f_c^{2/3}$) (kg/cm²)
- f_c : 콘크리트의 압축강도 (kg/cm²)
- a, b : 주철근 방향, 배력철근 방향의 재하면의 길이 (cm)
- x_m, x_d : 인장측 콘크리트를 무시한 주철근 단면, 배력철근 단면의 중립축 거리 (cm)
- d_m, d_d : 인장측 주철근, 배력철근의 유효높이 (cm)
- C_m, C_a : 인장측 주철근, 배력철근의 덮개 (cm)

루프 이음 반단면 프리캐스트 바닥판의 사용성 및 피로성을 평가하기 위한 일점재하 피로실험은 500 kN 용량의 가력기에 의해서 수행되었고, 반복하중이 1회, 1000회, 1만회, 10만회, 50만회, 100만회, 200만회 재하시에 정적실험을 통하여 데이터를 수집하였으며, 200만회 피로실험 후에 정적실험을 수행하였다. 윤하중의 집지면적은 200 mm×500 mm의 재하판으로 DB-24 후륜하중의 집지면적을 고려한 크기이다. 루프이음을 적용한 반단면 프리캐스트 바닥판의 피로성능은 종방향 이음부와 이음부가 없는 구간에 대해서 평가 할 수 있다. 일반적으로 종방향 이음부에 피로하중이 작용하는 경우의 피로성능이 낮은 수준일 것으로 판단하여 본 실험에서는 루프 이음부 위치에 피로하중을 작용시켜 피로실험을 수행하였다.

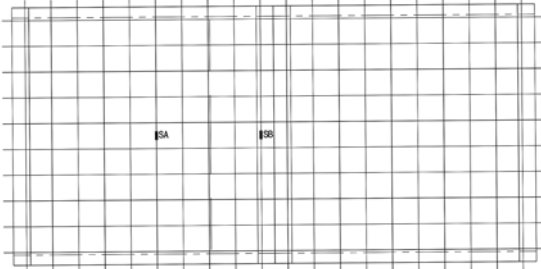
일점재하 피로실험체의 자세한 측정 위치는 그림 4와 같다. 처짐을 측정하기 위하여 실험체의 중앙부를 포함하여 총 4개소에 LVDT를 설치하였다(L1~L4). 교축방향과 교축직각방향 단면의 변형률을 측정하기 위하여 콘크리트 게이지를 상면(CA~CE)과 하면(C1~C3)에 부착하였고, 교축직각방향 철근의 변형률 측정을 위해 상면(SA, SB)과 하면(S1~S4)에 철근게이지를 부착하였다. 패널간 접합면에서의 균열폭 측정



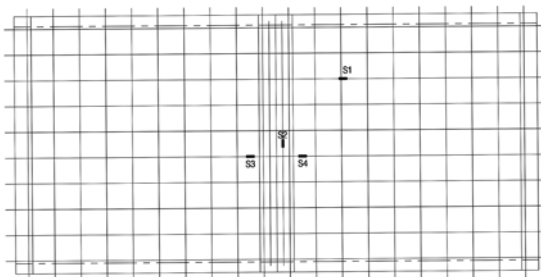
(a) 변위, 콘크리트 변형률 측정 및 하중재하위치(상면)



(b) 변위, 콘크리트 변형률 측정 및 하중재하위치(하면)



(c) 철근 변형률 측정 위치(상면)



(d) 철근 변형률 측정 위치(하면)

그림 4. 일점재하 피로실험체의 측정위치

을 위해 균열게이지(CRI)를 설치하였으며, 일점재하 피로실험의 전경은 그림 5와 같다.

윤하중 피로실험에서는 한국건설기술연구원에 설치된 실험

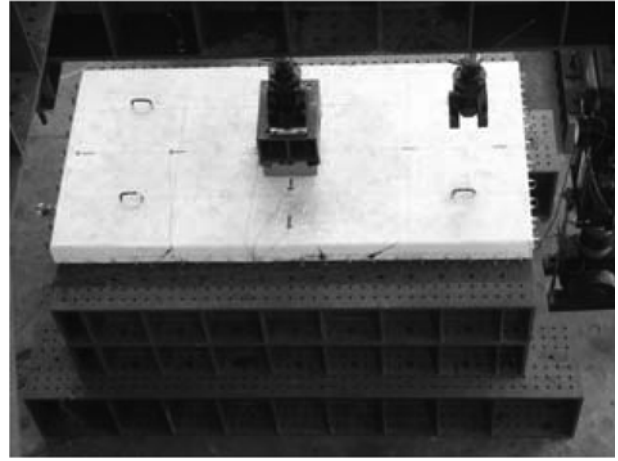


그림 5. 일점재하 피로실험 전경

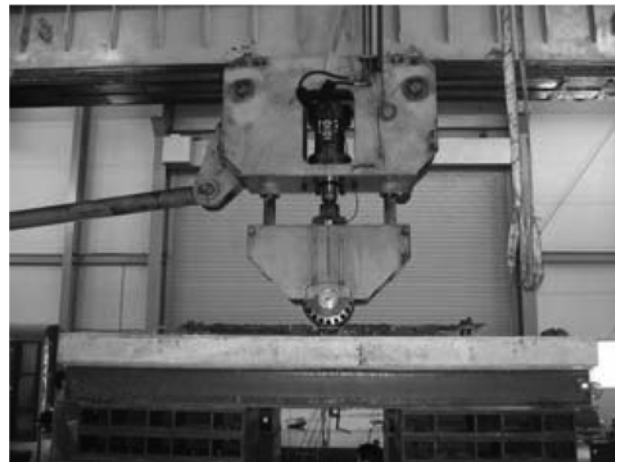
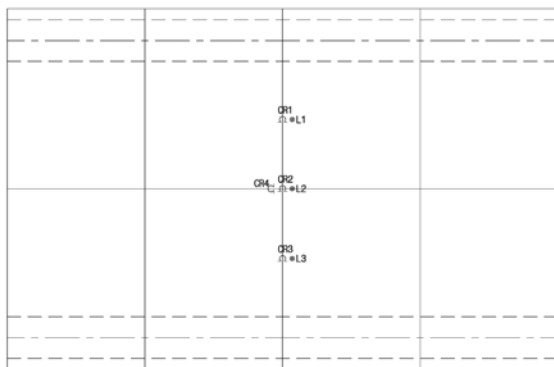
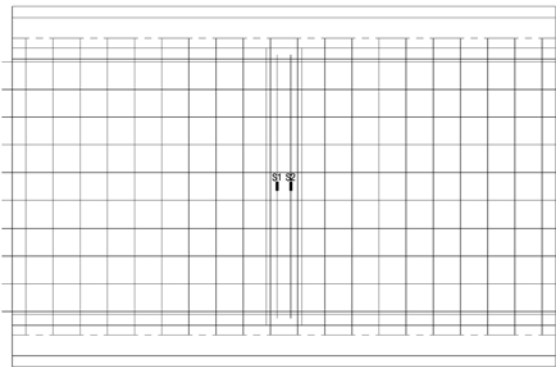


그림 6. 윤하중 피로실험 전경

장치를 이용하여 1회, 2000회, 5000회, 1만회, 2만회, 4만회, 10만회일 때 각각 정적실험을 수행하여 구조거동을 평가하였다. 바닥판에 대한 차륜 이동하중의 재하는 교축 직각 방향에 대해 차륜 폭을 모사한 철륵을 통하여 재하하게 된다. 윤하중의 접지면은 DB-24 후륜의 접지면 크기(580 mm×230 mm)와 같도록 하였으며, 1회 주행거리는 2.8 m이다. 이때 콘크리트 표면에 철륵을 직접 접촉하여 재하하는 경우에는 설계기준에서 제시한 차륜폭을 교축방향으로 모사하지 못하고, 평탄성이 균질하지 않은 콘크리트 표면에 대해 부분적으로 집중하중을 재하할 수 있고, 높이가 다른 부분 통과시 충격하중이 가해질 수 있다. 이를 해소하기 위해 차륜 폭을 모



(a) 변위 및 균열폭 측정위치(하면)



(b) 철근게이지 측정 위치

그림 7. 윤하중 피로실험시의 측정위치

사히는 운하중 재하 궤도를 철륵과 바다판 사이에 추가하여 하중을 재하하도록 하였다. 그림 6은 운하중 피로실험의 전경이며, 운하중 피로실험시의 측정위치는 그림 7과 같다. 처짐 측정을 위해 3개소(L1~L3)에 LVDT를 설치하였고, 균열 폭을 관찰하기 위해 패널 간 이음부에 3개소(CR1~CR3), 교축방향 균열의 균열폭 측정을 위해 1개소(CR4)에 균열계 이지를 설치하였다. 철근 게이지는 루프 이음부 안에 배근된 교축직각방향 보강철근 중앙에 부착하였다.

3. 실험결과 분석

3.1 일점재하 피로실험

그림 8은 각 위치에서의 반복하중 횟수별 하중-처짐 곡선이다. 각 위치에서의 측정 결과는 잔류처짐은 증가하지만 반복횟수별로 강성변화가 거의 없는 경향을 보이고 있다. 바다판 중앙에서 측정된 (a)는 1만회부터 잔류처짐이 증가하지 않고 수렴하는 경향을 보인다 200만회 반복하중 이후 증가하였다. (b)는 교축직각방향으로 거더측에서 100 mm 떨어진 위치의 처짐량을 측정한 결과로서 10만회까지는 일정한 수준의 잔류처짐을 보이다가 50만회에 잔류처짐이 증가하여 200만회까지 일정한 결과를 보이고 있다. (c)는 (a)의 측정점에서 교축직각방향으로 800 mm 떨어진 위치의 결과로 경향은 (a)와 비슷하나 전반적으로 잔류처짐이 중앙에서 측정한 결과보다는 낮은 수준으로 평가되었다. (d)는 교축방향으로 1600 mm 떨어진 위치의 측정점으로 1만회까지 잔류 처짐이 증가하다 그 이후 수렴하는 경향을 보였다.

그림 9는 바다판 중앙 이음부에서 반복하중 횟수별로 균열폭을 측정한 결과이다. 반복횟수가 증가하면서 패널 간 접합면의 균열폭은 선형적으로 증가하였고, 200만회 반복하중 이후에도 발생 균열폭은 도로교설계기준에서 제시하는 프리

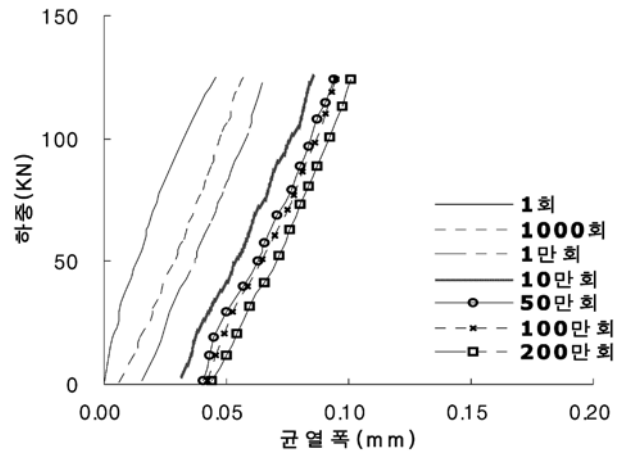


그림 9. 반복횟수-이음부 균열폭 관계

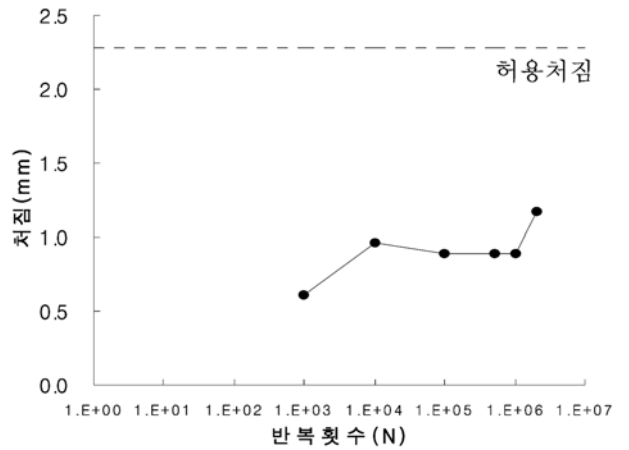
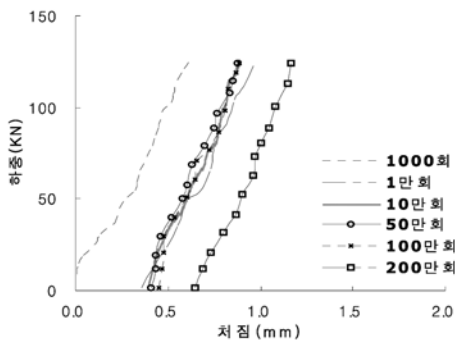


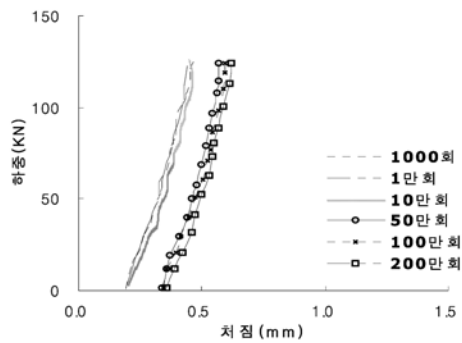
그림 10. 반복횟수-최대처짐 관계(L1)

스트레스 강제를 도입한 부재의 일반 환경에서의 허용균열 폭인 0.2 mm보다 훨씬 작은 수준을 보였다.

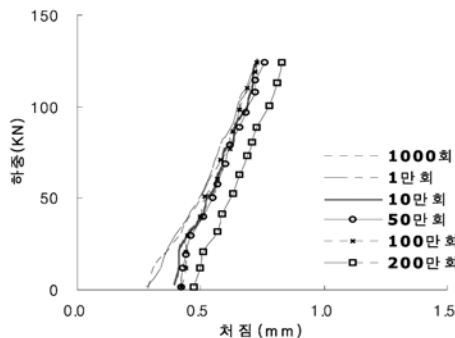
그림 10은 각 반복하중 횟수별 정적실험에서 측정된 바다



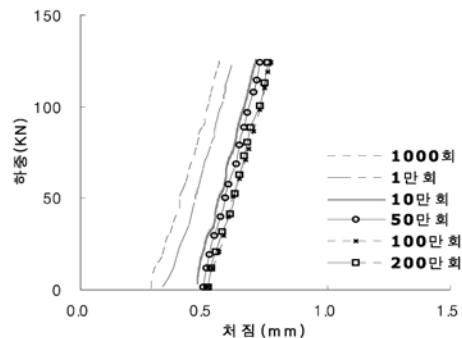
(a) 교축직각방향 중앙(L1)



(b) 교축직각방향 거더측(L2)



(c) 교축방향 800mm 지점(L3)



(d) 교축방향 1600mm 지점(L4)

그림 8. 반복하중 횟수별 하중-처짐 곡선

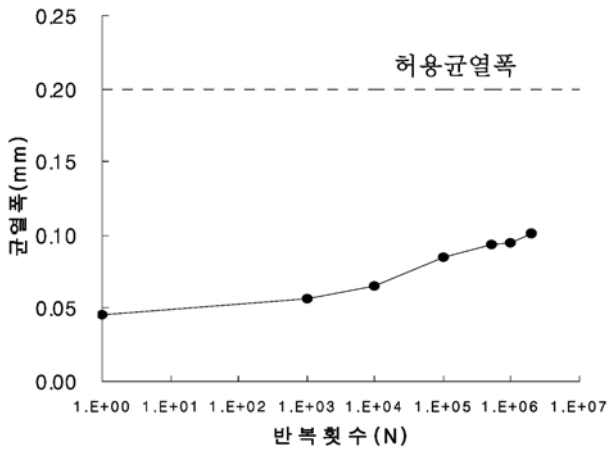


그림 11. 반복횟수-최대균열폭 관계

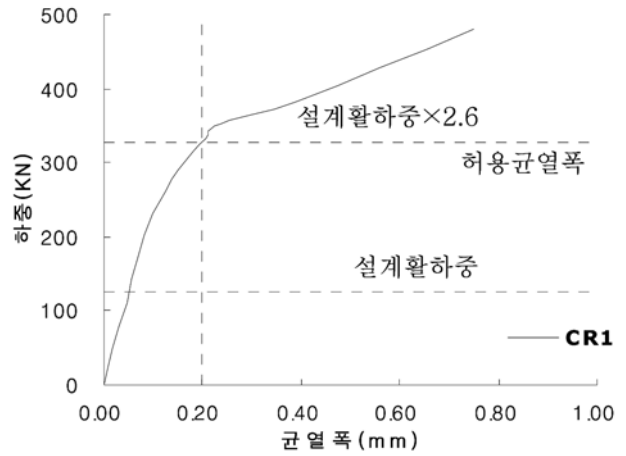


그림 13. 하중-균열폭 관계(200만회 재하 후 정적실험)

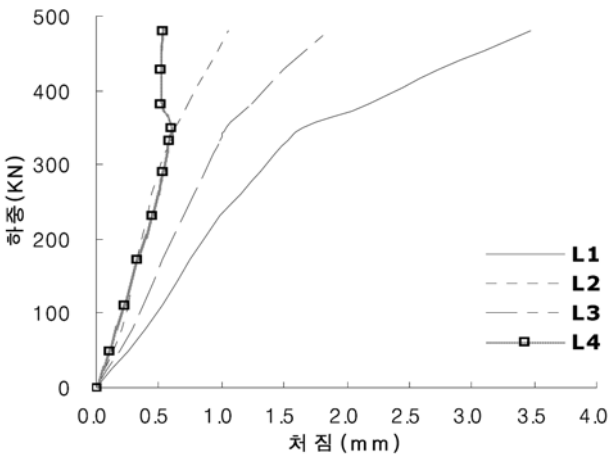


그림 12. 하중-처짐 곡선(200만회 재하 후 정적실험)

판 중앙부에서의 최대처짐을 허용 처짐값과 비교한 것이다. 바닥판의 허용 처짐값은 도로교설계기준의 상부구조물 처짐을 기준으로 하였으며 일점재하 피로 실험체의 조건에서는 2.275 mm(지간의 1/800, 상부구조물의 처짐제한)이다. 바닥판 중앙의 처짐은 허용 처짐량의 51.4%의 수준을 보였다. 따라서 현행 도로교설계기준에서 제시한 허용처짐과 비교할 경우 200만회 반복하중이 작용한 이후에도 반단면 프리캐스트 바닥판의 처짐은 허용치 이내로 사용성이 만족되는 것으로 나타났다.

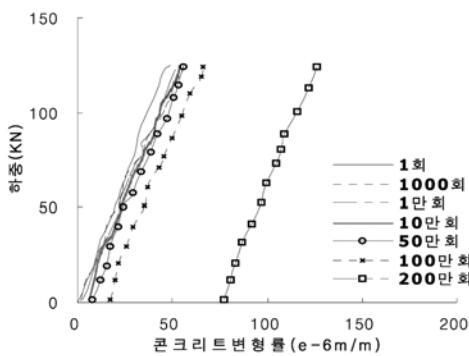
그림 11은 반복하중 횟수별로 측정된 최대균열폭을 허용균열폭과 비교한 것이다. 균열폭은 반복하중의 횟수가 증가함에 따라 지속적으로 증가되는 양상을 보이지만, 200만회 재

하 이후 최대균열폭은 허용균열폭의 50.6% 수준을 보였다. 그림 12는 200만회 반복하중 이후의 정적실험에서 측정된 하중-처짐 곡선으로 설계활하중의 약 2.8배까지 선형적인 경향을 보였으며, 실험여건상 파괴단계까지 실험이 수행되지 못했지만, 약 4배의 하중상태에서도 파괴가 발생되지 않았다. 따라서 설계활하중이 200만회 작용한 이후에도 반단면 프리캐스트 바닥판의 사용성 및 구조성능이 확보되는 것으로 판단된다.

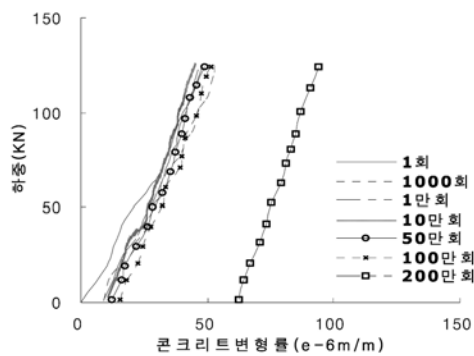
그림 13은 200만회 반복하중 이후의 정적실험에서 측정된 패널간 이음부에서의 균열폭을 나타낸 것이다. 충격을 고려한 설계활하중 작용시 도로교설계기준에서 제시한 허용균열폭 0.2 mm의 약 25% 수준이었으며 설계활하중의 2.6배에서 허용균열폭 0.2 mm에 도달하였다. 따라서 충격을 고려한 설계활하중이 200만회이상 반복하여 작용하여도 반단면 프리캐스트 바닥판은 균열폭 측면에서 사용성 기준을 만족하는 것으로 확인되었다.

그림 14는 하중재하 부근 하면의 교축직각방향과 교축방향 콘크리트 변형률의 반복하중 횟수별 측정 결과이다. 콘크리트 변형률은 1회부터 100만회까지 하중 반복횟수가 증가하여도 거의 유사한 수준을 보이다가 200만회 반복하중 이후 잔류변형률이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 잔류 변형률은 콘크리트의 인장변형률 129.0×10^{-6} 보다 낮은 수준이었으며, 활하중 변형률은 인장변형률과 유사한 수준이다. 하중 증가에 따른 기울기의 변화는 200만회 반복하중 이후까지 강성의 감소 없이 일정한 경향을 보였다.

그림 15는 200만회 반복하중 재하 후 정적실험에서 측정



(a) 하면 교축직각방향(C2)



(b) 하면 교축방향(C1)

그림 14. 반복횟수별 콘크리트 변형률

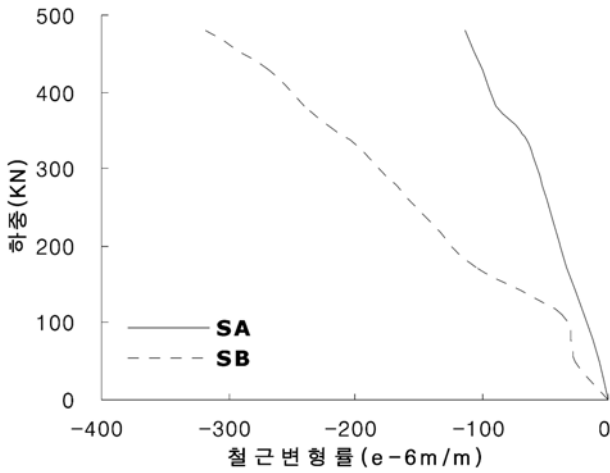


그림 15. 200만회 재하 후 정적실험시 철근 변형률

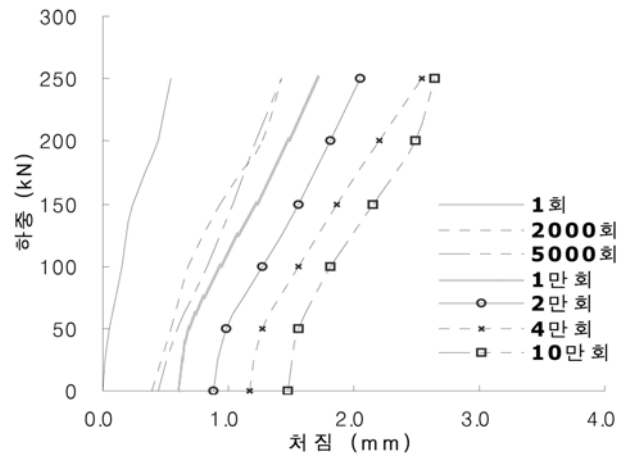


그림 17. 반복횟수별 하중-처짐 관계

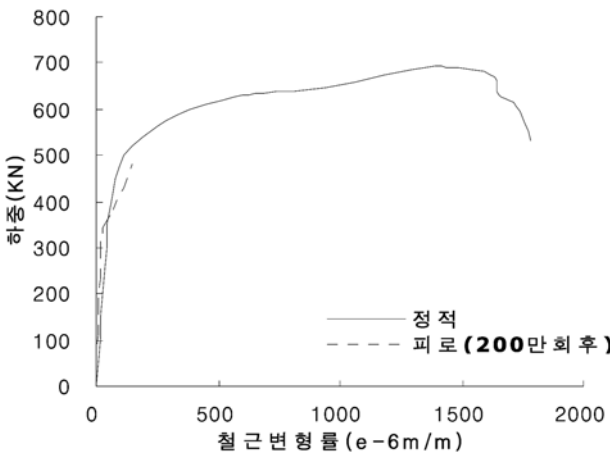


그림 16. 철근 변형률의 비교

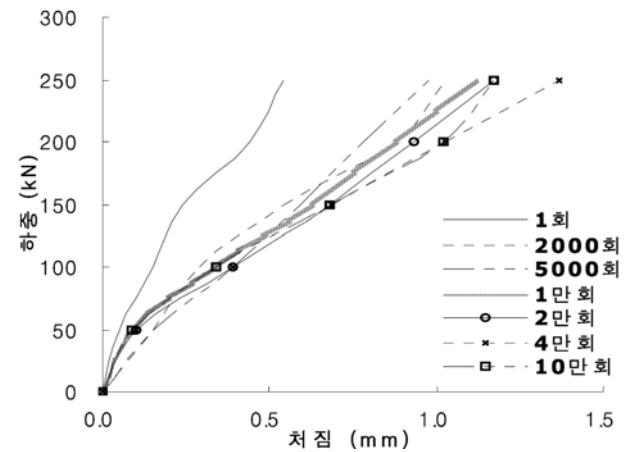


그림 18. 반복횟수별 강성변화

된 교축직각방향 상부철근의 변형률이다. SA는 중앙에서 900 mm, SB는 중앙에서 100 mm 떨어진 위치에서 측정하였다. 두 측정점의 하중 증가에 따른 변형률의 증가는 선형의 거동을 보였다. 하중재하 부근 SA의 변형률이 SB의 변형률보다 약 3배가량 크게 발생하였지만, 설계활하중의 약 4 배 수준에서도 발생하는 변형률이 약 -310×10^{-6} 으로 아주 낮은 수준이다.

그림 16은 단순정적실험(정철현, 2009)과 200만회 반복하중 재하 후 수행된 정적실험에서 측정된 교축방향 철근 변형률을 비교한 것으로 작용하중 범위내에서 단순정적실험의 결과와 유사한 수준을 보여 피로손상 정도가 매우 낮은 것으로 나타났다. 200만회 재하 후 정적실험은 가력기의 용량이 500 kN으로 바닥판의 파괴수준까지 가력하지 못하였다.

3.2 윤하중 피로실험

윤하중 피로실험은 실험기의 여건상 200만회 피로실험은 수행하지 못하고, 10만회 재하시 200만회 피로손상과 등가의 손상이 발생하는 피로하중 크기를 결정하여 실험을 수행하였다. 윤하중 피로실험시 약 13.5만회 반복하중에서 파괴가 발생되어 예상 반복횟수인 10만회는 상회하는 결과를 보였다. 그림 17은 윤하중 재하횟수별로 바닥판 중앙부에서 측정된 하중-처짐 곡선이며, 그림 18은 잔류처짐의 영향을 제외한 하중-처짐 곡선이다. 전체적으로 반복횟수가 증가함에 따라 강성이 점차적으로 감소하는 결과를 보였다. 반복횟수

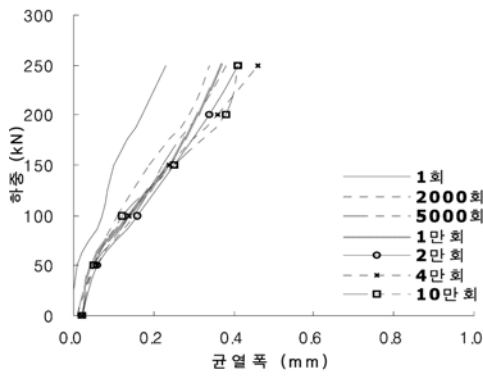
증가에 따라 강성 변화가 거의 없는 일점재하 피로실험 결과에 비해 피로손상이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 잔류처짐을 포함한 중앙부에서의 최대처짐은 2.64 mm로 현행 도로교설계기준에서 제시하는 허용처짐량 2.275 mm를 초과하는 수준이지만, 윤하중 실험에 적용된 반복하중의 크기(250 kN)는 충격을 고려한 설계활하중의 약 2배인 점을 감안하면 처짐에 대한 사용성 조건을 만족하는 것으로 판단된다.

그림 19는 반복횟수별 교축직각방향 이음부와 피로실험 도중 지간 중앙부 부근에서 교축방향으로 발생한 균열의 균열폭을 측정된 결과이다. 패널간 이음부 중앙에서 발생하는 균열폭은 1회 윤하중 재하횟수부터 이미 바닥판의 허용균열폭 수준에 도달하였다. 이는 조기파괴를 위해 적용된 반복하중(250 kN)이 설계활하중(124.8 kN)을 훨씬 상회한 결과이며, 설계활하중 수준에서 발생한 균열폭은 허용균열폭을 만족하였다.

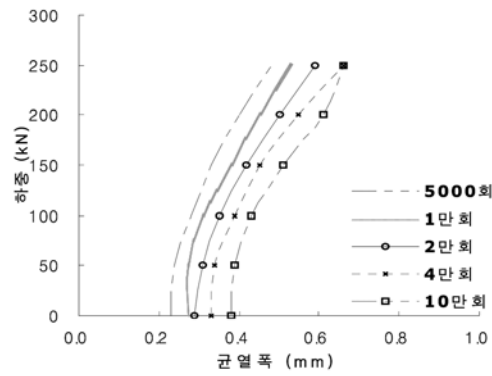
그림 20은 반복횟수별 루프이음내 보강철근의 변형률 측정결과이다. 윤하중 피로실험 동안 철근에서 발생하는 최대인장변형률이 600×10^{-6} 의 수준으로 도로교설계기준에서 피로검증을 위해 요구하는 150 MPa 이하의 응력수준이다.

3.3 비교분석

반단면 프리캐스트 바닥판의 피로실험은 일점재하와 윤하중재하 방식의 두 가지 방법으로 각각 수행하였다. 일점재하 실험체는 피로실험 동안 강성의 변화는 뚜렷하지 않았으나,



(a) 이음부중앙(교축직각방향)



(b) 중앙부(교축방향)

그림 19. 반복횟수별 하중-균열폭 관계

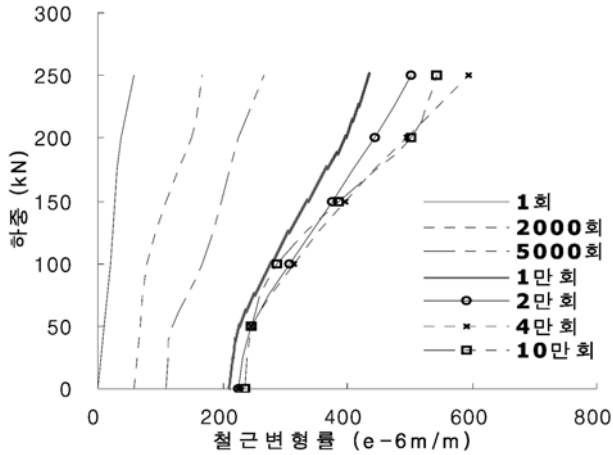


그림 20. 반복횟수별 보강철근 변형률

윤하중 실험체는 반복횟수가 증가하면서 강성이 뚜렷이 감소되는 것이 관찰되었으며 일점재하 실험체와 마찬가지로 잔류처짐이 지속적용 발생하였다. 일점재하 실험체는 처짐, 균열폭, 콘크리트 및 철근에 발생하는 응력이 현행 도로교설계 기준에서 요구하는 수준을 만족하였다. 윤하중재하 실험체는 허용균열폭과 처짐이 규정된 수준을 초과하였지만 조기파괴를 위해 작용하중의 크기가 250 kN으로 적용된 결과로 설계 활하중 수준에서는 허용 균열폭 및 처짐을 만족하였다. 그리고 윤하중 실험에서 측정된 철근의 최대 응력은 도로교설계 기준에서 요구하는 150 MPa 이내로 확인되었다. 이상의 피로실험 결과에서 보면 반단면 프리캐스트 바닥판은 200만회 일점재하 피로하중 후 측정된 균열폭, 처짐 및 응력수준을

도로교설계기준의 사용성 조건을 모두 만족하였다. 윤하중 피로실험에서 반단면 프리캐스트 바닥판은 약 13.5만회에서 파괴가 발생되어 피로성능은 도로교설계기준의 요구조건(10만회)을 만족하는 결과를 보였다.

피로실험 과정에서 발생한 바닥판 하면에서의 균열발생 형상은 그림 21과 같다. 그림 21의 (a)는 일점재하 피로실험이 수행된 실험체의 균열발생 형상으로 일점재하 피로실험에서 일반적으로 나타나는 방사형 균열이 발생되었다. 그림 21의 (b)는 윤하중 피로실험 실험체에서 발생한 균열형상으로 편칭전단에 가까운 형태의 파괴가 발생되었고, 이들 균열은 실험종료 직전에 관통균열로 진전되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 루프이음 반단면 프리캐스트 바닥판의 피로성능을 평가하기 위해 피로실험을 수행하였다. 프리캐스트 바닥판은 패널간 이음부가 구조적 취약점으로 존재하며, 실 적용을 위해서는 정적성능뿐만 아니라 피로에 대한 사용성 및 구조성능이 검증되어야 한다. 이를 위해서 종방향으로 루프 이음을 갖는 반단면 프리캐스트 바닥판의 일점재하 및 윤하중 피로실험을 수행하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1. 루프이음 반단면 프리캐스트 바닥판의 일점재하 피로실험 결과, 잔류처짐은 증가하지만 반복횟수별 강성의 변화는 거의 없었다. 200만회 재하 후 정적실험에서 측정된 최대 처짐과 최대균열폭은 도로교설계기준의 규정보다 각각 51.4%와 50.6%의 낮은 수준으로 평가되었다. 피로 후 정



(a) 일점재하 피로실험체



(b) 윤하중 피로실험체

그림 21. 균열발생 현황

- 적실험에서 설계활하중의 약4배까지 파괴되지 않았으며, 설계활하중 약 2.6배 수준에서 허용균열폭에 도달하였다. 따라서 일점재하 피로하중에 대한 반단면 프리캐스트 바닥판의 사용성은 충분히 확보된 것으로 판단된다.
2. 200만회 반복하중 이후의 콘크리트 변형률은 인장변형률보다 낮은 수준으로 평가되었으며, 철근에 발생하는 응력은 도로교설계기준의 피로응력 규정의 10.3%로 상당히 낮은 수준으로 나타났다. 200만회 피로실험 후, 정적실험에서 측정된 콘크리트의 변형률은 설계활하중의 약2.6배의 하중상태에서 인장변형률에 도달하였으며, 철근은 설계활하중의 약 4배에서도 상당히 낮은 수준의 응력이 발생하였다.
 3. 윤택중 피로실험시 윤택중의 크기는 충격효과를 고려한 DB-24 설계축중이 200만회 작용하는 고정점 피로실험과 동일한 피로손상이 10만회에서 발생하도록 250 kN으로 결정하였다. 윤택중 피로실험시 피로파괴는 13.5만회 하중작용시 편칭전단에 가까운 형태로 발생되었으며, 피로파괴 예상 반복횟수 10만회를 훨씬 상회하는 결과를 보였다. 따라서 일점재하 피로실험 결과보다 피로손상이 매우 가혹한 것으로 평가되는 윤택중 주행 피로실험을 통해서도 반단면 프리캐스트 바닥판의 피로성능이 확보된 것으로 판단된다.

참고문헌

건설교통부(2005) 도로교설계기준.
 김영진, 정철현, 김종희(1998) 프리캐스트 콘크리트 교량바닥판 female-female 이음부의 전단실험, **한국콘크리트학회 논문집**, 한국콘크리트학회, 제10권, 제5호, pp. 161-168.
 노병철, 조규대(2007) LB-DECK의 Lattice bar 높이 변화에 따른 합성거동 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27

권, 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, 성열은, 현병학, 박세진(2008) 루프이음을 갖는 반단면 프리캐스트 바닥판 이음부 성능에 대한 실험적 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제4A호, pp. 581-590.
 정철현, 김유석, 현병학, 김인규(2009) 루프이음 반단면 프리캐스트 패널을 이용한 PSC 바닥판의 강도평가, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제5A호, pp. 433-445.
 최은수, 김학수(2005) 교량 바닥판 건설용 프리캐스트 콘크리트 패널의 거동특성, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제2A호, pp. 395-404.
 한국콘크리트학회(2007) **콘크리트구조설계기준**.
 松井繁之(1991) 道路橋RC床版에疲勞設計法試案, 平成元年度科學研究, 費補助金研究成果報告書 (63550338).
 Hognestad, E. (1951) A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members, Bull. 339, Uni. of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, I11.
 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.
 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.
 Shim, C.S., Choi, K.Y., and Chang, S.P. (2001) Design of transverse joints in composite bridges with precast decks, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 17-27.
 (접수일: 2009.11.18/심사일: 2009.12.30/심사완료일: 2009.12.30)