

현장 배근이 LB-DECK 패널의 구조거동에 미치는 영향

A Study on the Structural Behavior of LB-DECK Panel
Considering Rebar-Arrangement in Site

노 병 철*
Lho, Byeong-Cheol

조 규 대**
Cho, Gyu-Dae

Abstract

The objective of this study is to verify whether the composite action is sufficiently strong to withstand at the interface and the structural behavior of LB-DECK panel with field concrete slab strengthened with main reinforcing bars. Static and fatigue tests are performed for LB-DECK panels with varied shapes and amounts of rebars, and the results are compared with those of field concrete panel(FCP). The test results indicate that the LB-DECK panel with 1.5 times of more rebars inside significantly increase the overall stiffness. LB-DECK panel usually shows on average 52.1 percent of improved stiffness compared with the FCP. The fatigue test results also show that the LB-DECK panel can withstand two-million cycles of repeated loads without any damage.

요 지

본 연구는 최근 교량에 많이 이용되고 있는 프리캐스트 바닥판(LB-DECK) 패널과 후타설 현장콘크리트 슬래브의 합성거동 여부 및 내부에 매입된 하면 주철근의 합성 후 구조적 거동을 분석한 것이다. 이를 위하여 현장배근 주철근의 철근량 및 배근방법에 따라 LB-DECK 패널의 정적거동 실험을 하여 현장타설 콘크리트 패널(FCP)과 비교·분석하였으며, 반복하중에 대한 평가를 위하여 피로실험을 하였다. 실험 결과, LB-DECK 패널 주철근량의 50%를 LB-DECK 패널 내부에 추가 배근하였을 경우 가장 우수한 강성을 나타내었으며, LB-DECK 패널이 FCP에 비해 평균 52.1%의 강성 증가 효과가 있음을 알 수 있었다. 또한 LB-DECK 패널에 대한 피로 실험 결과 200만회 반복하중에서도 충분한 건전도를 유지함을 알 수 있었다.

Keywords : LB-DECK panel, Main reinforcement, Precast deck, Static and fatigue behavior

핵심 용어 : LB-Deck 패널, 주철근, 프리캐스트 바닥판, 정적 및 피로거동

* 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 부교수

** 정회원, (주)효성 대표이사

E-mail : bclho@sangji.ac.kr 033-730-0474

•본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2008년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 교량 바닥판 시공에 있어 거푸집을 대체할 목적으로 개발된 거푸집 겸용 프리캐스트 바닥판인 LB-DECK 패널은 그 공법의 우수성이 인정되어, 2007년 9월 현재 시공교량 133개소와 실시설계교량 588개소에 적용되었다. 이처럼 많은 교량에 적용됨에 따라 LB-DECK 패널의 안전성 및 시공성에 대한 연구도 지속적으로 진행되어 왔다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾

LB-DECK 패널 공법은 영구 거푸집 형태로 두께 60mm의 DECK에 일부 주철근 및 Lattice bar을 삽입하여 프리캐스트 형태로 제작, 현장 거치 후 나머지 철근을 현장에서 배근하여 완성하는 바닥판 공법이다. 이러한 공법의 특성상 DECK에 미리 삽입된 주철근 및 Lattice bar은 초기 가설하중 및 차량하중 등을 지지하는데 있어 매우 중요한 구조적인 역할을 하게 된다. 일반적으로 Lattice bar의 경우 LB-DECK 패널 설계 시 철근량 산정에 포함되지 않으나, 실제로는 LB-DECK 패널 내부에 배근되는 주철근과 추후 현장 배근되는 주철근에 의해서 하중을 저항하게 된다. 따라서 본 연구에서는 현장배근 주철근과 LB-DECK 패널 내부에 배근되는 주철근의 합성 후 구조적 기여도에 대한 정적 및 피로거동을 평가함으로써 보다 효율적이며, 경제적인 단면을 제시하고자 한다.

2. 실험체 제작계획 및 제작

2.1 구조원리에 따른 실험체 제작계획

LB-DECK 패널은 Fig 1에 나타난 바와 같이 제반 두께에 따른 저항모멘트 부족을 해결하기 위해 Lattice bar을 상면에 설치하여 가설하중에 대한 압축저항력을 증가시켰다. 이는 LB-DECK 패널에 작용

하는 초기 가설하중에 대하여 압축력은 콘크리트와 Lattice bar의 상부철근(top bar)이 저항하며, 인장력은 패널 내부에 배근된 주철근이 저항하게 된다. 또한 합성 후 Lattice bar은 현장타설 콘크리트와의 합성거동에, LB-DECK 패널의 주철근은 추후 현장 배근되는 주철근과 함께 차량하중 등 2차 하중에 의한 인장력에 저항하게 된다. 이처럼 LB-DECK 패널에 삽입되는 Lattice bar과 주철근은 구조적으로 매우 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 Lattice bar의 경우 LB-DECK 패널 설계 시 철근량 산정에 포함되지 않으며, 실질적으로 패널에 배근되는 주철근과 추후 현장 배근되는 주철근에 의해서 하중을 저항하게 된다. 따라서 본 연구에서는 현장 배근되는 주철근과 LB-DECK 패널 내부에 매입된 주철근의 합성 후 구조적 기여도에 대한 실제거동의 평가를 위한 실험체를 제작하고 이에 대한 평가를 통하여 설계하중에 의해 요구되는 효과적인 배근 방법을 도출하였다.

2.2 실험체 제작

실험에 사용된 LB-DECK 패널 실험체는 Fig 2에 나타난 바와 같이 두께 60mm, 폭 1,200mm, 길이 2,270mm의 패널을 설계기준 강도 40MPa로 증기양생하여 제작한 후 현장 배근하여 완성하게 된다. 실험체 형식은 주철근 배근 방법에 따라 Table 1에 나타난 바와 같이 현장 배근되는 주철근량 및 배근방법을 달리하여 각각 2개씩 제작하였으며, 이들에 대한 배근도 및 단면제원을 Fig 3~Fig 5에 나타내었다. 또한 기존 공법과의 성능비교를 위하여 Fig 6과 같이 현장시공단면(FCP)으로 실험체 2개를 추가 제작하였다. 한편, LB-DECK 패널의 강박스 거더교와 같은 장시간적용이 늘어남에 따라 피로 강도 측정을 위하여 Fig 7과 같이 폭 2,200mm 길이 3,000mm인 실험체를 제작하여 반복하중에 따른 실험을 실시하였다.

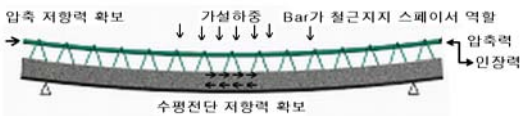


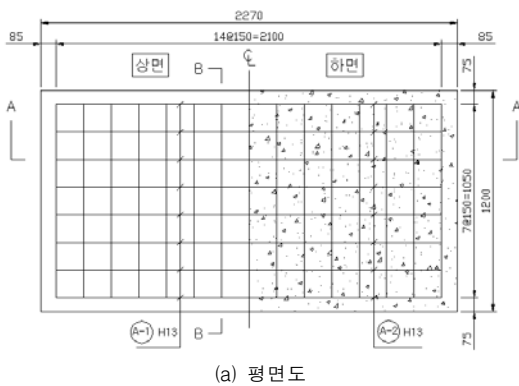
Fig. 1 LB-DECK 패널의 구조원리



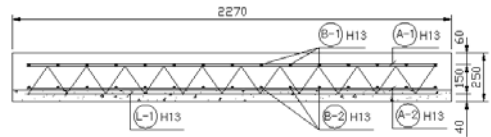
Fig. 2 LB-DECK 패널

Table 1 실험체 형식

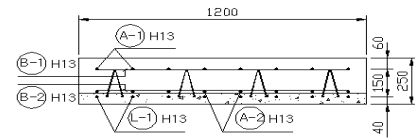
구분	LBD 1	LBD 2	LBD 3	FCP	LBD 4
주철근	LB-DECK:φ13(8개) 현장배근:φ13(8개)	LB-DECK:φ13(8개) 현장배근:φ16(5개)	LB-DECK:φ13(12개) 현장배근:없음	LB-DECK:없음 현장배근:φ13(15개)	LB-DECK:φ22(11개) 현장배근:없음
주철근량(cm ²)	20.272	20.066	15.204	19.005	42.581
주철근 배근 방법	LB-DECK 주철근량의 100% 추가 현장배근	LB-DECK 주철근량의 50% 추가 현장배근	LB-DECK 주철근량의 50% LB-DECK 내부 추가 배근	일반슬래브 배근	현장배근을 포함한 LB-DECK 주철근 배근
실험체 제원 (단위 : mm)	1,200×2,270×250				2,200×3,000×250
적용 교량 형식	PSC 거더교				강박스 거더교
실험체 개수	2	2	2	2	1
용도	정적실험				피로 실험



(a) 평면도

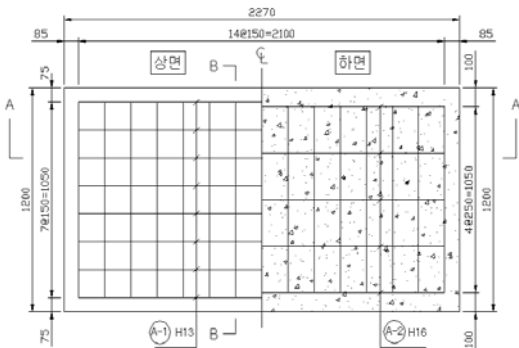


(b) A-A 단면도

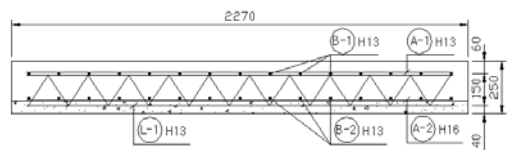


(c) B-B 단면도

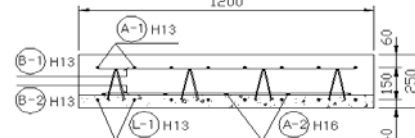
Fig. 3 정적실험용 실험체 (LBD1)



(a) 평면도



(b) A-A 단면도



(c) B-B 단면도

Fig. 4 정적실험용 실험체(LBD 2)

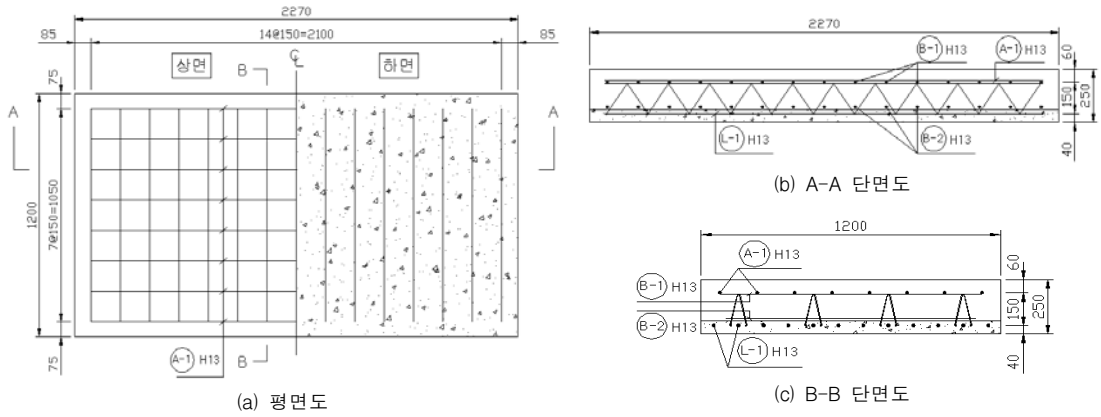


Fig. 5 정적실험용 실험체(LBD 3)

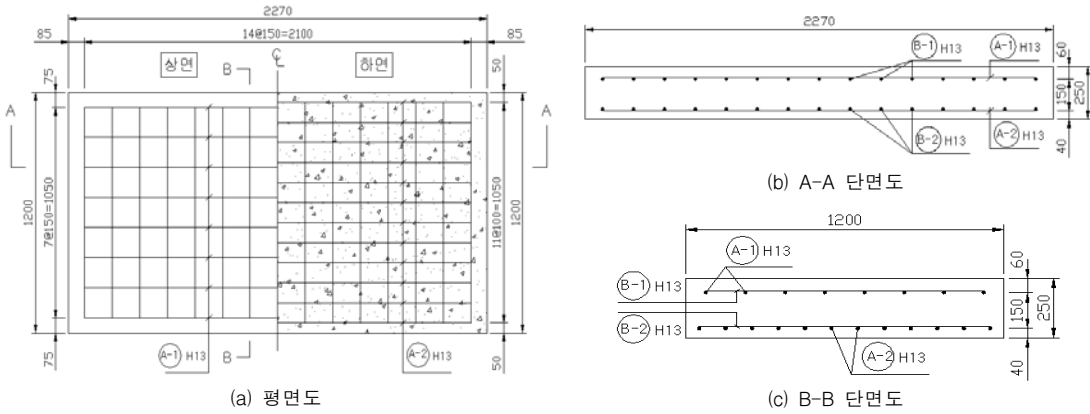


Fig. 6 정적실험용 실험체(FCP)

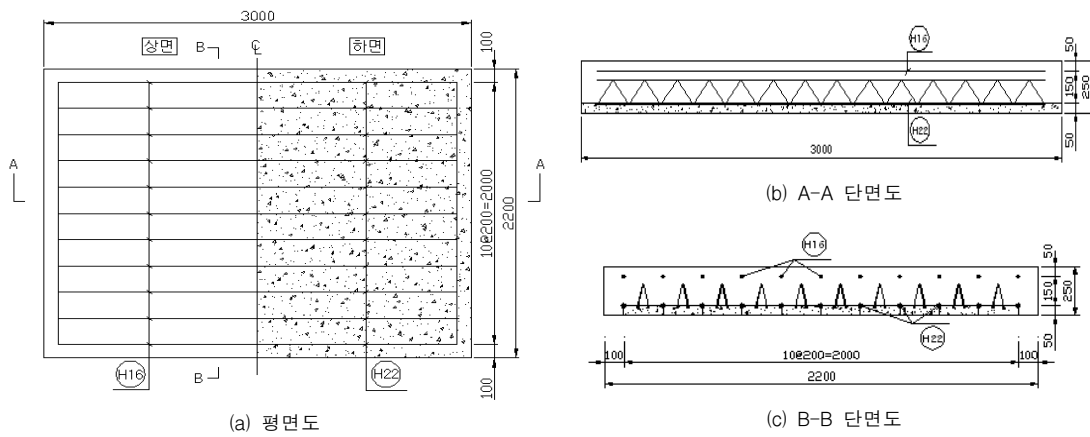


Fig. 7 피로실험용 실험체(LBD 4)

3. 실험

3.1 LB-DECK 패널 제작을 위한 재료

LB-DECK 패널 제작에 있어서 주철근과 함께 구조적으로 가장 중요한 역할을 하는 Lattice bar은 한 개의 상부철근에 삼각형 모양의 대각철근(diagonal bar)이 양쪽으로 맞대어져 있고, 하부는 두 개의 하부철근(bottom bar)이 용접된 형태이다. 실험체 제작 시 설계기준강도 40MPa의 LB-DECK 패널에 대한 배합설계를 Table 2에 나타내었다.

3.2 재료 물성

설계기준강도 27MPa의 현장타설 콘크리트 패널과 40MPa의 LB-DECK 패널의 강도발현에 대한 평가를 위하여 KS F 2405에 따라 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 실험체 제작 시 다짐 방법과 동일한 방법으로 제작한 수 수증양생 하였다. 압축강도 시험은 2,000 kN 용량의 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 측정하

Table 2 LB-DECK배합표(설계기준강도 40MPa)

f_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	단위 중량 (kg/m^3)				
				W	C	S	G	AD
40	20	6.0	45±1.5	165	460	710	1112	2

Table 3 압축강도시험 결과(재령 28일)

구분	압축강도(MPa)	평균(MPa)
FCP	39.2	37.1
	34.7	
	37.3	
LBD	57.5	55.8
	54.0	

였으며, 시험 결과는 Table 3에 나타낸 바와 같이, 현장타설 콘크리트 패널(FCP)과 LB-DECK 패널(LBD)의 실험 시 압축강도는 평균 37.1MPa와 55.8MPa로 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타났다.

3.3 실험 계획 및 방법

본 연구에서는 LB-DECK 패널의 구조거동 평가를 위하여 정적실험과 피로실험을 실시하였다. 실험 전 하중 재하위치 및 변형률게이지 부착 위치 등을 확인하여 오차가 없도록 하였으며, 재하 실험은 5,000kN 용량의 가력기를 사용하여 하중제어 방식을 적용하였으며, 모든 실험체는 중앙에 하중을 재하하며, 재하판(재하면적 200mm×500mm)을 통하여 하중이 균등하게 분산되도록 하였다. 본 실험을 수행함에 있어 실험체의 거동 분석을 위하여 Fig. 8에 나타낸 바와 같은 위치에 LVDT 및 변형률게이지를 부착하여 처짐 및 철근의 응력상태를 파악하고자 하였으며, 각 하중 단계마다 균열을 기록하여 균열거동을 파악하였다.

LB-DECK 패널의 피로성능 평가를 위하여 실험체 1개를 제작하여 실험하였다. 피로하중은 DB-24후륜 하중에 충격계수 0.3을 고려한 122.6kN을 최대하중으로 하였으며, 하중 재하방법은 Fig. 9, Fig. 10과 같이 패널 중앙에 재하판을 설치한 후 집중하중으로 재하 하였다.

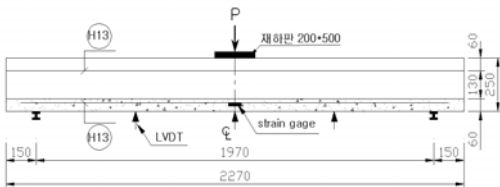


Fig. 8 하중 재하 방법(정적실험)



Fig. 10 하중재하모습(피로실험)

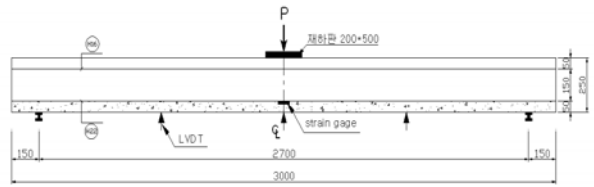


Fig. 9 하중 재하 방법(피로실험)

4. 실험결과 분석

4.1 정적실험 결과

Fig 11에 나타낸 바와 같이 하중에 따른 변형률을 도시하여 각 실험체의 주철근에서의 응력을 산출하였다. 그 결과 균열하중과 항복하중 사이인 200kN 및 250kN의 두 하중단계에서 배근방법에 따른 실험체의 인장응력은 Table 4에서 보는 바와 같이 LBD 3 실험체가 평균 응력 183.4 MPa과 261.8 MPa로 다른 실험체에 비하여 우수한 성능을 나타내었으며, 인장응력 감소율은 LBD 2 실험체와 비교하였을 때 53%와 46%의 응력 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 주철근량을 감소시켰음에도 현장 배근되는 주철근을 고강도 LB-DECK 패널에 삽입함으로써 구조적인 거동에서 휨에 대한 저항능력이 향상되었음을 의미한다.

또한 초기균열하중 및 항복하중을 측정된 결과, Fig 12의 하중-처짐 그래프와 같은 값을 얻을 수 있었으며, 이를 토대로 각각의 실험체별 균열하중과 항복하

중을 정리한 결과를 Table 5에 나타내었다. 균열하중은 FCP 실험체에 비해 LBD 실험체에서 최대 43%정도 증가한 것으로 나타났고, 항복하중의 경우도 평균 35%정도 증가한 것으로 나타났다. 항복하중의 경우 FCP 실험체에 비해 LBD 실험체를 적용한 콘크리트 바닥판에서 큰 증가율을 보이고 있으나, 철근배근 방법에 따른 항복하중의 증가는 적은 것으로 나타났다.

Fig 12 하중-처짐 관계 곡선으로부터 LBD 실험체는 FCP 실험체에 비해 동일하중 상태에서 처짐이 평균 83% 감소되었고, 항복하중 또한 평균 35% 증가하는 결과를 보이고 있다. 이로부터, 하중과 처짐의 관점에서 두 실험체를 비교해 볼 때, LB-DECK 패널을 적용한 콘크리트 바닥판이 전단면 현장타설 콘크리트 바닥판에 비해 휨에 대한 저항능력이 우수한 것을 알 수 있다.

한편, 정적재하 실험에 따른 각 실험체의 균열 간격은 Table 6에 나타낸 바와 같으며, 상세한 균열형상은 Fig. 13~Fig. 15에 나타낸 바와 같이 모든 실험체는 휨 파괴 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 실험체의 a/d(전단경간/유효깊이의 비)가 짧을 때 발생할 수 있는 사인장 파괴에 대하여 실험체 내부에 삽입

Table 4 실험체 별 주철근 인장응력(단위:MPa)

구분	LBD 1		LBD 2		LBD 3		인장응력 감소율 (평균값이용)
	1	2	1	2	1	2	
200 kN	207	245	297	264	177	190	LBD 3 실험체가 LBD 2 실험체에 비해 53% 감소
	평균:226		평균:282		평균:184		
250 kN	288	336	399	367	250	274	LBD 3 실험체가 LBD 2 실험체에 비해 46% 감소
	평균:312		평균:383		평균:262		

Table 5 균열하중 및 항복하중 비교(단위:kN)

실험체	초기 균열하중(Pcr)	항복하중(Py)
LBD 1	105	373
LBD 2	119	333
LBD 3	149	385
FCP	104	285

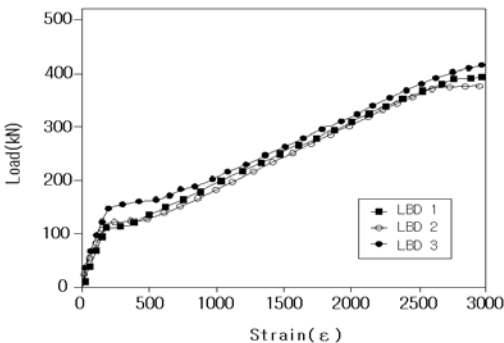


Fig. 11 실험체 별 하중-변형률 관계 곡선

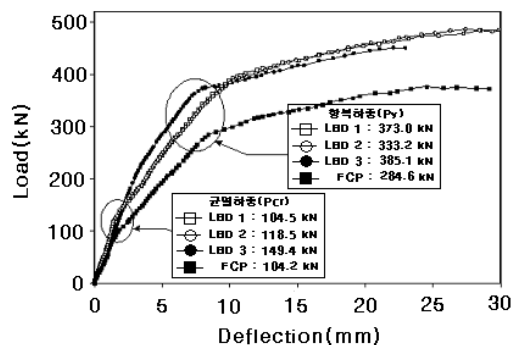


Fig. 12 실험체 별 하중-처짐 곡선

된 Lattice bar가 수평 전단력에 저항하기 때문이다.

LBD 실험체의 경우 초기 균열하중은 105~149 kN으로 LB-DECK 패널 하부에서 초기균열이 발생하여 하중 증가에 따라 점차 위쪽으로 진전되며, 항복 하중에 이르러서는 균열의 진전보다 균열폭이 증가하면서 항복에 다다른 모습이었다. 또한, 실험체 바닥면의 균열형상은 기존의 편칭전단실험⁽⁴⁾에서 볼 수 있었던 방사형의 균열형상이 아닌 휨에 의한 균열형상으로 편칭전단이 아닌 휨에 의한 파괴가 일어났음을 확인할 수 있었다.

Table 6 실험체 별 균열발생 간격 비교(단위:cm)

구분	FCP		LBD 1		LBD 2		LBD 3	
최대간격	19.0	21.8	22.4	18.8	18.3	24.0	17.6	23.0
최소간격	7.6	13.2	11.2	9.4	4.4	8.6	11.6	7.6
평균①	13.3	17.5	16.8	14.1	11.4	16.3	14.6	15.3
평균②	15.4		15.4		13.9		15.0	

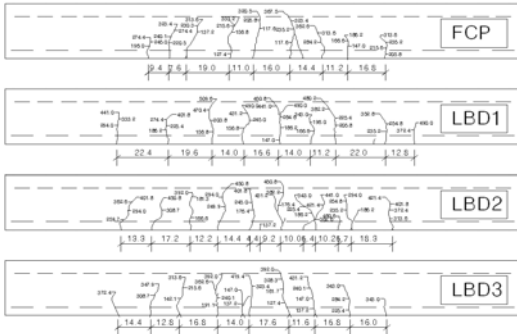


Fig. 13 실험체 별 균열형상 및 간격 (1)

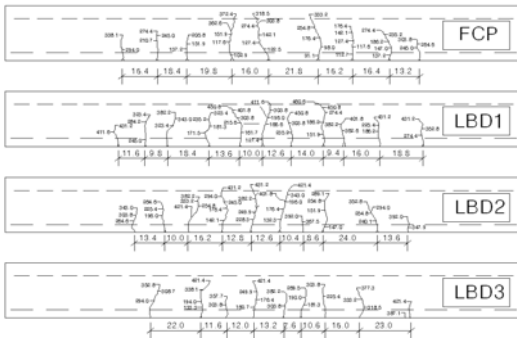


Fig. 14 실험체 별 균열형상 및 간격 (2)

4.2 반복 하중재하 실험 결과

바닥판의 피로평가 기준은 명확하게 제시되어 있지 않으나, 반복되는 트럭하중에 의한 피로손상만을 고려하고 교량바닥판의 설계수명을 50년이라 가정하는 경우 2×10^6 회를 철근콘크리트 바닥판의 피로설계규정으로 적용해도 안전 측인 것으로 보고되었다.⁽¹⁾⁽⁵⁾ 따라서 LB-DECK 패널 합성 슬래브의 피로시험은 사용 하중 하에서 200만회의 피로하중에도 구조적으로 이상이 없는지를 검증하였다. 피로하중은 일정 점에 반복하중을 재하 하는 경우와 실제 반복 재하 되는 트럭하중의 영향을 모사하는 윤택중 주행시험기에 의한 하중재하 방법이 있으며, 본 연구에서는 일정 점에 반복하중을 재하 하는 방법으로, DB-24후륜하중에 충격계수 0.3을 고려한 122.6kN을 최대하중으로, 실험체 중앙에 재하 하였다. Fig 16은 반복하중 후에 중앙하

Table 7 피로실험에 따른 강성도 감소율

반복횟수	강성도(kN/mm)	감소율(%)
10	142.128	-
50만	140.470	1.17
100만	137.117	3.53
150만	132.223	6.97
200만	132.096	7.06

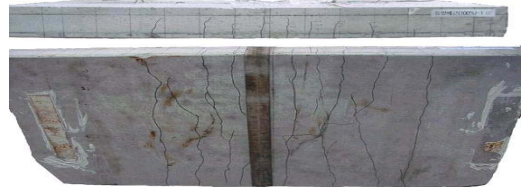


Fig. 15 LBD 3의 균열형상

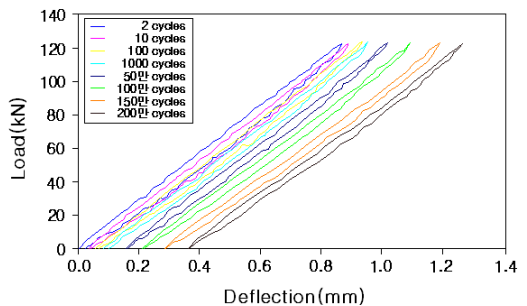


Fig. 16 반복하중재하에 따른 하중-처짐 곡선

부에서의 처짐을 측정할 것을 나타낸 것으로 200만회의 반복하중 후에 0.36mm의 잔류변형이 발생했으며, 피로하중 증가에 따라 하중-처짐 곡선의 기울기는 Table 7에 나타난 바와 같이 초기보다 7% 정도 감소하나, 부재의 파괴는 발생하지 않았다. 따라서 LB-DECK 패널의 현장타설 콘크리트와의 합성 후에 대하여 반복 하중에서도 구조적 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구는 현장배근 및 LB-DECK 패널 내부에 매입된 주철근의 합성 후 구조적 기여도에 대한 실제거동을 평가할 목적으로 실험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 정적실험에 따른 각 실험체 별 인장응력 평가 결과 균열하중과 항복하중 사이의 200kN과 250kN에서의 인장응력은 200kN 일 때 LBD 3이 LBD 1, LBD 2에 비해 23.0%, 53.0%의 감소 효과를 보이고 있으며, 250kN 일 때 또한 LBD 3이 LBD 1, LBD 2에 비해 19.1%, 46.4%의 감소 효과를 보이고 있다. 이는 LBD 3 실험체가 타 등방배근 실험체에 비해 휨에 대한 저항능력이 우수하다는 것을 의미한다.
- 2) 초기 균열하중은 FCP 실험체가 104kN, LBD 실험체가 105~149kN으로 최대 43.0% 증가하였으며, 항복하중은 FCP 실험체가 285kN, LBD 실험체가 333~385kN으로 최대 35.0% 증가하는 것으로 나타나 LBD 실험체의 초기 균열하중 및 항복하중이 비교적 크게 평가됨을 알 수 있었다.
- 3) 균열형상에 따른 평가 결과 모든 실험체는 휨 파괴

의 모습을 나타내었으며, LBD 실험체의 경우 초기 균열이 LB-DECK 패널에서 발생하여 점차 현장타설 콘크리트로 진전되는 모습으로, 이는 프리캐스트로 제작되는 LB-DECK 패널과 추후 타설되는 현장타설 콘크리트가 합성작용으로 인하여 하중 전달이 원활히 이루어지고 있음을 의미한다.

- 4) 피로 실험 결과 LBD 패널은 DB-24후륜하중에 충격계수 0.3을 고려한 122.6kN의 하중으로 200만회 피로실험에서도 충분한 건전도를 유지하고 있는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 “상지대학교 교내 연구비”지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 윤석구, “교량바닥판의 등가축중 반복횟수의 평가,” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제24권 2A호, 2004, pp. 311-319.
2. 최은수의 1인 “교량 바닥판 건설용 프리캐스트 콘크리트 패널의 거동특성,” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 25권 2A호, 2005, pp. 395-404.
3. 노병철의 1인 “LB-DECK의 Lattice bar 높이 변화에 따른 합성거동 연구,” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 27권 2A호, 2007, pp. 193-200.
4. 윤석구의 4인, “LB-DECK를 이용한 철근콘크리트 바닥판의 편칭전단강도,” 2006년 봄학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 제18권 1호, 2006, pp. 390-393.
5. 건설교통부, “도로교설계기준,” 한국도로교통협회, 2000.

(접수일자 : 2008년 1월 9일)