

철도교 바닥판용 프리캐스트 패널과 합성 바닥판의 휨거동에 대한 실험적 연구

설대호¹, 이경찬², 윤석구^{*}

¹서울과학기술대학교 건설시스템공학과

²한국철도기술연구원 고속철도연구본부 첨단인프라연구팀

Experimental Study for the Bending Behavior of Precast Concrete Panel and Composite Deck for Railway Bridge

Dae-Ho Seol¹, Kyoung-Chan Lee², Seok-Goo Youn^{*}

¹Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

²Korea Railroad Research Institute

요약 이 논문에는 철도교 교량 바닥판의 영구거푸집 목적으로 개발된 리브가 부착된 프리캐스트 콘크리트 패널과 그 패널을 적용한 교량바닥판의 구조 성능 검증을 위한 정적하중재하실험을 수행결과를 정리하였다. 영구거푸집 용도의 리브가 부착된 프리캐스트 콘크리트 패널을 대상으로 폭 400mm 보부재와 폭 1200mm 판부재를 각각 3개씩 제작하였고 후타설 콘크리트와 리브가 부착된 프리캐스트 콘크리트 패널이 합성된 교량 바닥판 부재를 대상으로 폭 400mm 보부재와 폭 1200mm 판부재를 각각 3개씩 제작하여 총 12개의 실험체에 대하여 정적하중재하 실험을 수행하였다. 모든 실험체의 단면은 바닥판 설계지간 1.6m를 갖는 두께 240mm의 철도교 바닥판을 가정하여 결정하였고, 시공하중이 작용하는 프리캐스트 패널에 대하여 콘크리트 표준시방서에 따른 거푸집 설계하중을 재하하였을 때 리브가 부착된 프리캐스트 콘크리트 패널 하면의 인장응력이 콘크리트 인장강도를 초과하지 않도록 단면을 설계하였다. 각 실험체에 대하여 하중에 따른 철근변형률, 콘크리트 변형률, 균열폭, 처짐, 합성부재의 시공이음면의 슬립량을 측정하여 그 결과로부터 구조물의 안전성과 사용성 평가를 수행하였다. 모든 실험체는 현행 설계기준에서 요구되는 안전성 및 사용성 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

Abstract This paper presents an experimental investigation on the structural performance of precast ribbed panel specimens and bridge deck specimens fabricated from the panels. The panel specimens are developed for permanent deck forms of railway bridges (PSC girder). The decks of railway bridges have short span lengths compared with highway bridges. Therefore, precast panels for railway bridges are different from those of highway bridges. The precast panels have ribs designed for crack control at the bottom of the sections. Two kinds of specimens were examined: one with 400-mm width and one with 1200-mm width. Three specimens of each type were fabricated, and a total of 12 specimens were tested. In this test, the ultimate load, strain of the reinforcement and concrete, crack width, deformation, and slip were measured. The structural performance of the specimens was assessed using the Korea railway bridge design code and Eurocode. All specimens met the current design criteria for structural strength and serviceability.

Keywords : Bridge deck, Crack width, Permanent concrete deck form, Precast panel, Sliding rail system

본 논문은 국토교통부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Seok-Goo Youn (Seoul National University of Science and Technology)

Tel: +82-2-970-6515 email: sgyoun@seoultech.ac.kr

Received January 18, 2018

Revised February 19, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

1. 서론

도로교와는 달리 철도교에서는 바닥판 영구 거푸집용 프리캐스트 패널이 적용된 사례가 극히 드물다. 철도교 PSC 거더교의 경우 교량 상부폭이 거의 일정하므로 도로교에 비해 바닥판 지간의 변동성이 작다. 철도교는 도로교와 달리 거더간격이 2.0m 정도로 바닥판 지간이 비교적 짧은다는 점에서 차이가 날 뿐, 교량 바닥판으로써의 구조적 요구 성능은 동일하다. 따라서 철도교는 철도설계기준(노반편)[1]에서 요구하는 바닥판의 구조적 안전성과 사용성 기준을 만족한다면 프리캐스트 패널을 바닥판에 적용하는데 있어 제약을 둘 이유는 없다고 판단된다.

최근 철도교 상호작용 완화를 위한 콘크리트 슬라이딩 레도와 연계하여 리브가 부착된 철도교 바닥판용 프리캐스트 패널 단면을 개발한 바 있다[2]. 거더교에 적용된 콘크리트 슬라이딩 레도의 일반적인 단면을 Fig. 1에 나타냈다. 단면에서 볼 수 있는 것과 같이 슬라이딩 콘크리트 레도는 상호작용 완화를 위해 바닥판과 콘크리트 레도가 분리되어 있기 때문에 횡방향 변형을 막기 위한 횡방향 지지블럭이라는 변형방지장치가 필요하다.

교량 지간이 긴 경우 횡방향 지지블럭 설치 개소수가 많아져 시공성이 떨어지므로 공기지연의 원인이 될 가능성이 높다. 이 경우에 프리캐스트 패널 영구거푸집을 철도교에 적용하면 설계단계에서 횡방향지지블럭 위치를 고려한 패널 제작이 가능하므로 횡방향 지지블럭 시공이 편리해지는 장점이 있을 것으로 예상된다.

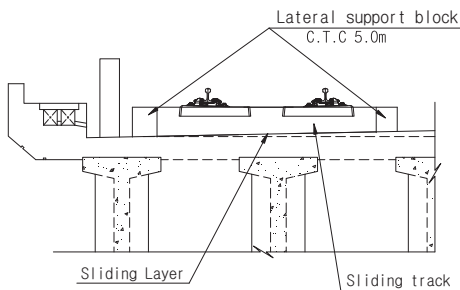


Fig. 1. Sliding track

이 연구에서는 철도교에 적용되는 바닥판 영구거푸집용 프리캐스트 패널에 대하여, PSC 거더교에서 일반적으로 철도교 바닥판 순지간장인 1.4m, 유효지간장은 1.6m 정도임을 고려한 실험체를 제작한 후 정적하중재하 실험을 수행하였다. 실험체는 프리캐스트 패널 보부재 3개,

프리캐스트 패널 판부재 3개, 후타설콘크리트와 합성단면을 갖는 보부재 3개, 판부재 3개를 제작하여 총 12개의 시험체에 대하여 하중재하 실험을 수행함으로써, 철도교 바닥판에서 요구되는 시공중 패널단면과 완공후 합성바닥판단면의 안전성 및 사용성을 검증하고자 하였다.

2. 실험계획

2.1 프리캐스트 패널 단면

Youn(2016) 등에 의한 선행연구[3]에서 철도교의 일반적인 바닥판 지간을 고려한 리브가 부착된 프리캐스트 패널 단면을 고안하였다. 이 연구에서 실험체 제작에 사용된 단면은 선행연구에 의해 제안된 단면형상을 따랐다.

리브가 부착된 철도교 단지간용 프리캐스트 패널은 바닥판 지간이 짧은 철도교에서 경제성을 높이기 위해 기존의 LB-Deck에서 Lattice girder를 제거하고 패널 하부에 리브를 부착한 단면형상이다. 패널 상부에는 후타설 콘크리트와 합성단면을 형성할 수 있도록 전단연결재 역할을 하는 Shear rebar가 패널단면에 매립되도록 하였다. 단면의 하단에 부착된 리브는 Lattice girder 제거로 감소된 강성을 일부 증가시켜 후타설 콘크리트 자중 및 시공하중에 의해 발생할 수 있는 균열발생을 억제하기 위한 단면 상세이다[2-5].

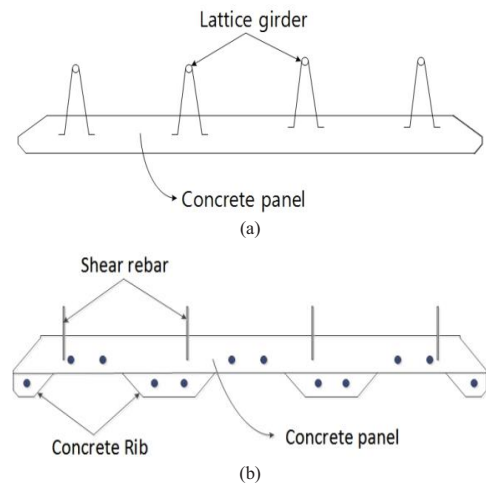


Fig. 2. Precast panel section
(a) LB-Deck (b) Short-span precast concrete panel for railway bridge deck

2.2 실험체 단면

실험체는 리브가 부착된 프리캐스트 패널 단면부재와 후타설콘크리트를 합성시킨 합성부재 두 종류로 제작하였다. 두 종류는 각각 400mm, 1200mm의 시험체로 이 연구에서는 폭 400mm인 부재를 보부재, 폭 1200mm인 부재를 판부재로 명명하였다. 시험체 종류와 단면제원을 Table 1과 Fig. 3, Fig. 4에 나타냈다. 시험체는 종류별로 3개씩 제작하였다. 보부재는 하중 증가에 따른 휨거동을 보다 명확히 관찰하기 위해 제작한 시험체이며, 판부재는 실제 교량 바닥판에 가까운 형상 조건으로 하중재하시험을 하여 그 거동을 관찰하기 위한 목적으로 제작하였다. 두 종류의 실험체 모두 현행 철도설계기준(노반편)[1]을 준용하여 강도설계법으로 설계하였다[1,6].

프리캐스트 패널의 두께는 시공하중이 작용할 때 균열을 억제 할 수 있는 두께로 설계하여 판 두께 70mm에 리브두께 60mm를 더하여 총 130mm로 제작하였고, 합성보부재와 판부재는 완성된 교량 바닥판의 설계 두께를 240mm로 가정하고 프리캐스트 패널 두께 130mm에 후타설 콘크리트 두께 170mm를 더하여 총 높이 300mm로 제작하였다. 프리캐스트 패널의 리브에는 피복 40mm를 확보하여 H13규격의 철근 두 가닥을 배치하여 합성전과 합성후 단면에서 주철근 역할을 할 수 있도록 하였다.

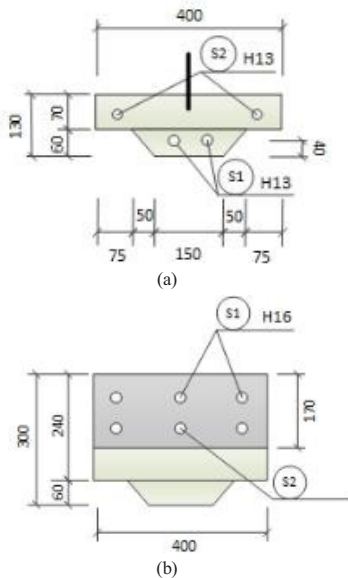


Fig. 3. Cross section (width=400mm)
 (a) Precast panel (LB18B)
 (b) Composite specimen (CLB18B)

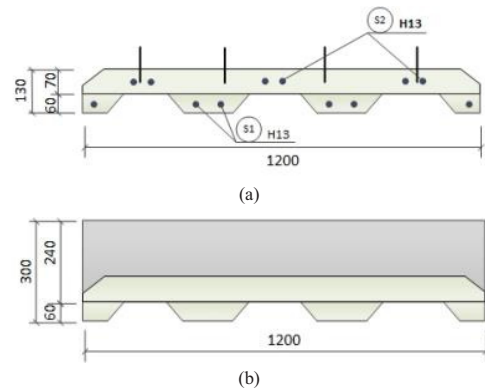


Fig. 4. Cross section (width=1200mm)
 (a) Precast panel (LB18P)
 (b) Composite specimen (CLB18P)

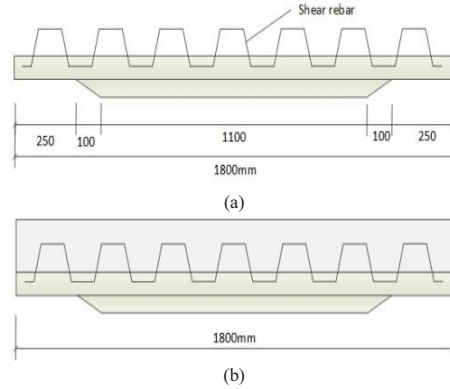


Fig. 5. Longitudinal section
 (a) Precast panel (LB18P)
 (b) Composite specimen (CLB18P)

Table 1. Test specimens

Test specimen		Width (mm)	The number (EA)
Precast panel	LB18B	400	3
	LB18P	1200	3
Composite (panel + topping concrete)	CLB18B	400	3
	CLB18P	1200	3

2.3 재료 특성값

프리캐스트 패널 부재 제작에 사용된 콘크리트의 KS F 2405에 따른 공시체 압축강도 시험 결과는 3개 평균 44.5MPa로 측정되었으며, 합성부재의 후타설 콘크리트의 압축강도는 3개 평균 36.9MPa로 측정되었다. 사용철근의 인장강도는 3개의 평균 항복응력이 505MPa로 나

타났다. 이상의 재료시험 결과는 Table 2에 정리하였다.

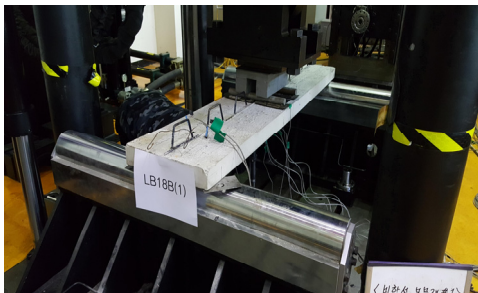
Table 2. Material properties

Material	Material Properties
Concrete (Precast panel)	Average compressive strength $f_{cm} = 44.5\text{MPa}$
Concrete (Topping)	Average compressive strength $f_{cm} = 36.9\text{MPa}$
Rebar	Yield strength $f_y = 505\text{MPa}$

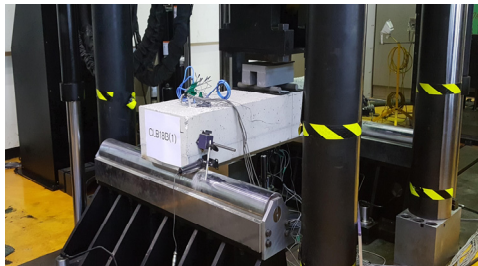
3. 정적하중재하 실험

3.1 보부재 하중재하실험

보부재의 정적하중재하실험은 한국철도기술연구원의 2500kN UTM을 이용하여 변위제어방식으로 수행하였다. 하중재하위치는 시험체 중앙에서 양쪽으로 각각 90mm 이격하여 4점재하방법으로 재하하였다. 하중재하 위치에서 콘크리트 상면에 지름 30mm, 길이 350mm의 강봉 2개를 배치하고 그 위에 ㄷ자 형태의 하중분배용 강형을 올려 전단철근과의 간섭을 피하였다. 합성보부재 (CLB18B)의 경우에도 합성전 프리캐스트 패널 부재 (LB18B)와 동일한 위치에 동일한 방법으로 하중을 재하하였다. (Fig. 6 참조)



(a)



(b)

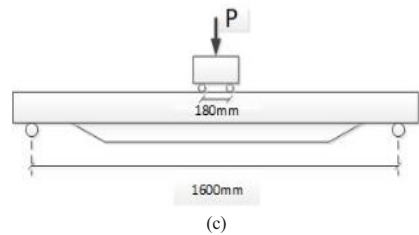


Fig. 6. Loading test (width = 400mm)

(a) LB18B (b) CLB18B (c) Setting of specimen

보부재의 하중 재하에 따른 처짐량을 측정하기 위해 시간 중앙 하면에 수직 처짐계를 설치하였고, 부재의 상, 하면에 콘크리트 변형률 게이지, 시간중앙부 인장철근에 변형률 게이지를 부착하여 하중증가에 따른 변위를 측정하였다. 시간 중앙부 하면에 휩균열이 예상되는 150~200mm범위에 걸쳐 균열게이지를 연속하게 약간 중첩되도록 5개를 설치하여 적어도 1개 이상의 균열이 균열게이지 설치 범위를 통과하도록 설치하였다. 합성보부재의 경우에는 프리캐스트 패널과 후타설 콘크리트의 슬립량을 측정할 수 있도록 단부에 수평으로 처짐계를 설치하였다. (Fig. 7 참조)

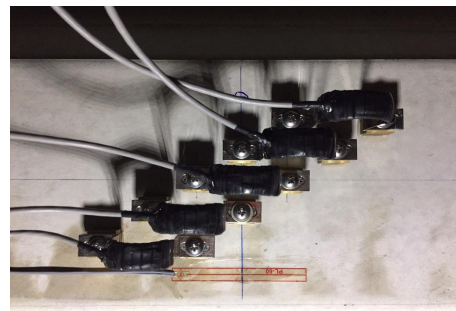


Fig. 7. Installed crack gages

3.2 판부재 하중재하실험

판부재도 보부재와 마찬가지로 변위제어방식으로 정적하중재하 실험이 진행되었다. 판부재의 종방향 하중재하 위치는 보부재와 동일하게 시간 중앙에서 양쪽으로 각각 90mm 이격하여 4점재하가 되도록 하였으며, 횡방향 하중재하 위치는 부재 상면에 전단연결재의 간섭을 피하여 대칭으로 2 곳에 재하 하였다. 판부재를 UTM에 거치한 모습을 Fig. 8에 나타냈다.

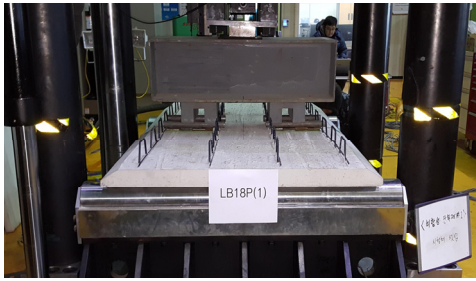


Fig. 8. Loading test (width = 1200mm)

하중 증가에 따른 휨거동을 평가하기 위해 시간 중앙에 수직 처짐계를 설치하였고, 부재 상하면에 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였다. 보부재와 동일한 방식으로 균열폭을 측정하기 위해 균열게이지를 시간 중앙부 리브 하면에 설치하였다. 합성부재의 경우 프리캐스트 패널과 후타설 콘크리트의 슬립량 측정을 위해 단부에 수평으로 처짐계를 설치하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 프리캐스트 패널 보부재 (LB18B, width=400mm)

비합성 프리캐스트 패널 보부재(LB18B)는 시간 중앙부에 휨균열하중 부근에서 하중-처짐 곡선의 기울기가 약간 감소하였으며, 약 33kN까지는 거의 선형에 가까운 거동을 보이다가 완만한 비선형 곡선을 그리면서 극한하중에 도달하였다.

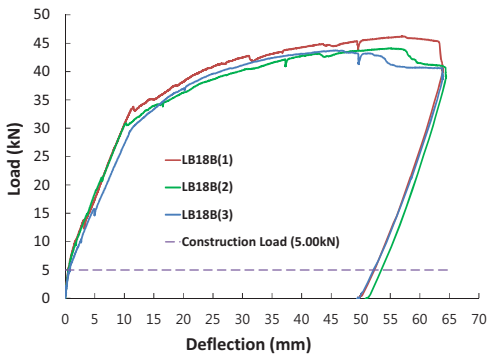


Fig. 9. Load-Deflection curves of LB18B

하중이 33kN 부근에서 인장철근이 항복하고 처짐이 급격히 증가하는데, 이 때 실험체는 철근 항복 전까지 발

생한 처짐의 약 5배 크기의 처짐이 발생된 후에 파괴되는 연성거동을 보였다. (Fig. 9 참조)

LB18B 3개 부재의 정적하중재하실험 결과 극한 하중은 각각 46.2kN, 44.1kN, 43.75kN으로 휨파괴를 가정하여 산정한 극한휨강도에 이르는 하중 35.6kN을 상회하는 하중에서 파괴되었다. (Table 3 참조)

Table 3. Ultimate load of the test specimens

Test specimen	Ultimate load (kN)			Ultimate moment test (kN-m) ③	Factored design moment** (kN-m) Concrete standard manual④	Safety Factor ③/④
	Test ①	Calculated ②*	①/②			
LB-18B	(1)	46.23	35.6	1.30	1.776	9.24
	(2)	44.10		1.24		8.82
	(3)	43.75		1.23		8.74
CLB-18B	(1)	248.6	223.88	1.11	17.17	5.14
	(2)	254.9		1.14		5.27
	(3)	248.8		1.11		5.14
LB-18P	(1)	125.58	105.30	1.19	5.328	8.37
	(2)	123.73		1.18		8.24
	(3)	131.55		1.25		8.77
CLB-18P	(1)	620.30	671.64	0.92	51.50	4.28
	(2)	674.05		1.00		4.65
	(3)	678.45		1.01		4.68

* : Calculated ultimate load is based on the plastic moment

** : Factored design moment is obtained by using the dead load factor 1.35 and the live load factor 1.85 in the Korea railway Bridge Design Code(2011)

합성 프리캐스트 패널 보부재(LB18B)는 교량 바닥판 영구거푸집 목적의 구조부재를 대상으로 제작한 실험체인 만큼 시공하중이 작용하였을 때 휨균열이 발생하지 않도록 단면을 결정하는 것이 중요하다. 따라서 시공하중에 대한 균열저항성능을 균열지수(Cracking factor)를 통해 확인하고, 유로코드 2[7]에 따른 균열폭 계산 결과와 실험에 의한 균열폭 측정치를 비교 검토하였다[2,7]. 균열지수는 사용하중이 작용할 때 모멘트와 정적하중실험에 의한 균열모멘트에 대한 비를 나타낸 것으로 1보다 작을수록 균열발생 가능성이 작은 것으로 판단할 수 있다. 균열지수 산정을 위해 적용된 시공하중은 콘크리트 표준 시방서[8]를 따라 공사중 발생하는 활하중 3.75kN/m²에 고정하중을 더하여 결정하였다. 시공하중이 작용할 때 부재에 작용하는 휨모멘트는 1.78kN-m이며, 그에 해당하는 실험체의 하중재하 조건에서의 하중의 크기는 5.0kN이다.

LB18B 부재에 대한 정적하중재하 실험에서 각 부재

의 균열발생 하중 크기의 편차가 크게 나타나, 부재의 균열지수(Cracking factor) 역시 0.44, 0.79, 0.99로 3개의 실험체 모두 시공하중보다 큰 하중에서 균열이 진전된 것을 알 수 있다. (Table 4 참조)

Table 4. Comparison of cracking load and design load

Test specimen	Cracking load (kN)			Cracking moment test (kN-m)③	Design moment (kN-m) Concrete standard manual④	Cracking factor ④/③	
	Test ①	Calculated* ②	②/①				
LB-18B	(1)	11.38	7.36	0.65	1.78	0.44	
	(2)	6.30		1.17		2.24	0.79
	(3)	5.07		1.45		1.80	0.99
CLB-18B	(1)	-	52.43	-	13.63	-	
	(2)	29.60		1.77		1051	1.30
	(3)	47.93		1.09		17.01	0.80
LB-18P	(1)	14.92	15.00	1.00	5.33	0.78	
	(2)	15.40		1.33		5.64	0.744
	(3)	16.98		1.25		6.03	0.88
CLB-18P	(1)	114.28	157.28	1.38	40.90	1.01	
	(2)	94.56		1.66		33.56	1.22
	(3)	91.73		1.71		32.56	1.26

* : Calculated cracking load is based on the concrete compressive strength 44.5MPa.

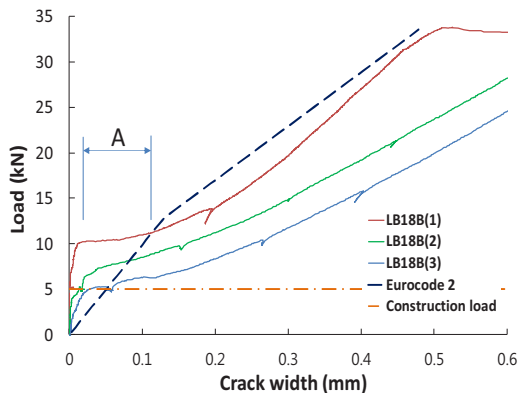


Fig. 10. Load-crack width curves of LB18B

Fig. 10 하중-균열폭 곡선에는 유로코드 2[7]에 따른 균열폭계산치를 비합성 프리캐스트패널 보부재의 균열폭 측정치와 함께 나타내었다. Fig. 10으로부터 LB18B(1) 부재는 약 10kN에서 균열이 진전되었고, LB18B(2), LB18B(3)부재는 각각 약 8kN, 5kN의 하중이 재하될 때 균열폭이 진전되는 것을 알 수 있다. 콘크리트 표준 시방서[8]에 따른 거푸집 설계하중과 측정치를 비교하였을 때 설계하중 5.0kN보다는 큰 하중에서 균열이 크게 진

전되는 것으로 나타났다. 또한 시공하중 5.0kN이 작용할 때 발생한 균열폭은 각각 0.000mm, 0.0210mm, 0.0589mm로 허용 균열폭 0.3mm에 비해 상당히 낮은 수준이었다.

LB18B부재는 극한하중에서 상연 콘크리트 압축변형률이 3480 $\mu\epsilon$ ~ 5475 $\mu\epsilon$ 에 이른 것으로 측정되었으며, 이로부터 3개의 부재 모두 휨파괴가 일어난 것으로 판단할 수 있다. (Table 5 참조)

Table 5. Concrete compressive strain at the ultimate load

Test panel	Ultimate load (kN)	Compressive Strain ($\mu\epsilon$)	Remark
LB18B	(1)	46.23	Concrete ultimate strain $\epsilon_{cu} = 3000 \mu\epsilon$
	(2)	44.10	
	(3)	43.75	
CLB18B	(1)	248.6	Concrete ultimate strain $\epsilon_{cu} = 3000 \mu\epsilon$
	(2)	254.9	
	(3)	248.8	
LB18P	(1)	125.58	Concrete ultimate strain $\epsilon_{cu} = 3000 \mu\epsilon$
	(2)	123.73	
	(3)	131.55	
CLB18P	(1)	62030	Concrete ultimate strain $\epsilon_{cu} = 3000 \mu\epsilon$
	(2)	674.05	
	(3)	678.45	

4.2 합성보부재(CLB18B, width=400mm)

Fig. 11의 하중-처짐 곡선을 보면 약 200kN~250kN까지 거의 선형에 가까운 하중-변위 관계를 보이다가 이후 하중증가 없이 처짐이 증가하는 상태에서 처짐이 약 25mm정도에 이르렀을 때 파괴가 일어났다. 비합성 프리캐스트 패널 보부재(LR18B)의 경우와 마찬가지로 최종파괴에 이르렀을 때, 탄성구간에서 일어난 5mm변위의 약 5배인 약 25mm의 변위가 발생하여 충분한 연성 거동을 보였다. 휨파괴를 가정하여 산정한 합성보부재(CLB18B)의 극한하중은 223.9kN이고, 3개의 실험체에 대한 극한하중은 각각 248.6kN, 254.9kN, 248.8kN으로 휨파괴를 가정한 이론치를 상회하는 결과로 나타났다. (Table 3 참조)

합성보부재(CLB18B)의 정적하중재하 실험에 의한 하중-균열폭 곡선을 Fig. 12에 나타냈다. 프리캐스트 패널 보부재(LB18B)의 하중-균열폭 곡선에서 초기 균열상태에서 균열폭이 빠르게 진전되는 양상을 보였던 것과는 달리 합성보부재(CLB18B)는 균열발생 직후 초기균열상태에서 거의 일정한 기울기로 균열폭이 진전되는 것을 볼 수 있다.

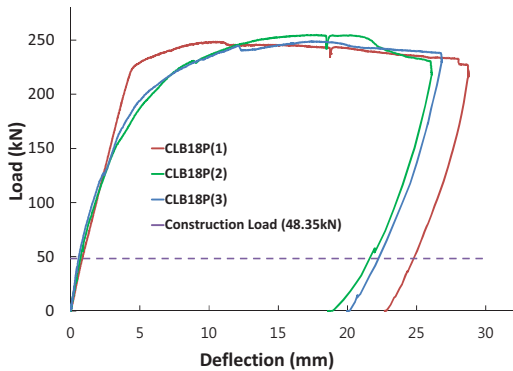


Fig. 11. Load-Deflection curves of CLB18B

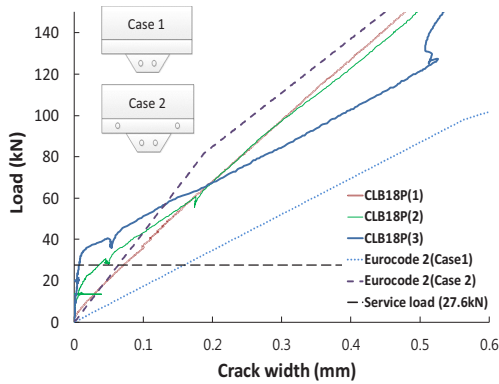


Fig. 12. Load-crack width curves of CLB18B

Fig. 12에는 유로코드 2[7]에 따른 합성보부재(CLB18B)의 균열폭 계산 결과를 균열폭 측정치와 함께 나타냈다. 유로코드 2[7]에 의한 평균균열폭 평가결과와 Fig. 12의 좌측 상단에 단면으로 표현한 Case 1과 Case 2인 경우에 대하여 각각 계산하여 그 결과를 그래프로 나타냈다. 리브에 배치된 인장 철근만을 고려하여 평균균열폭을 계산한 Case 1과 리브에 부착된 철근과 바닥판 하연에 배치된 철근을 전부 균열폭 계산에 고려하여 평균균열폭을 계산한 Case 2 두 가지 경우를 표현하여 비교하였다. 정적하중재하 실험을 통해 측정된 3개 부재의 균열폭은 거의 유사한 결과를 보였으며 Case 1에 의한 최대균열폭 보다는 작고 Case 2에 의한 최대균열폭보다는 크게 발생한 것을 그래프를 통해 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 리브가 부착된 프리캐스트 패널을 적용한 교량 바닥판의 균열폭을 직접 계산하고자 할 때 Case 1의 경우를 따른다면 안전측의 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 12에 철도설계기준(노반편)[1]에 따른 바닥판 계수하중과 사용하중의 크기를 표현하여 설계하중이 작용할 때의 균열폭 수준을 비교하였다.

Table 6. Crack width of service load state

Specimen	Service load* (kN)	Crack width ① (mm)	Allowable Crack width② (mm)	①/② x100 (%)
CLB -18B	(1)	27.85	0.0714	23.8
	(2)	27.65	0.0518	17.3
	(3)	27.68	0.0071	2.4
CLB -18P	(1)	82.73	0.01684	5.6
	(2)	82.65	0.01210	4.0
	(3)	82.33	0.01875	6.3

* : Experimental loading close to the calculated service load

Table 7. Comparison of the measured deflection and the allowable deflection of test specimens

Test specimen	Design load* (kN)	Deflection (mm)	Allowable deflection (mm)	Remark	
CLB -18B	13.63	(1)	0.24	2.67	Allowable deflection 1/600 of span length
		(2)	0.16		
		(3)	0.15		
CLB -18P	40.90	(1)	0.43	2.67	Allowable deflection 1/600 of span length
		(2)	0.16		
		(3)	0.21		

* : Design load is the sum of Cast-in placed concrete and live load except self weight of concrete panel

사용하중 수준의 하중이 작용하는 것을 가정했을 때 합성보부재(CLB18B) 3개의 균열폭은 각각 0.0714mm, 0.0518mm, 0.0071mm로 허용 균열폭 0.3mm의 30%미만으로 사용성 기준을 충분히 만족하는 것으로 나타났다. (Table 6 참조) 또한, 사용하중 27.63kN의 하중에서 철도설계기준(노반편)[1]에서 제한하는 허용 처짐 기준 (1/600L)에도 충분히 만족하는 것으로 나타났다. (Table 7 참조)

단부에서 발생한 슬립량은 CLB18B(1)의 경우 좌,우 단부 모두 슬립이 거의 발생하지 않았고 CLB18B(2)부재는 좌측 단부에서는 약 0.03mm, 우측단부에서는 약 150kN의 하중까지는 0.05mm 그 이후 하중에서는 휨과 피가 일어날 때까지 슬립량이 지속적으로 증가하였다. CLB18B(3)부재는 우측단부에서는 슬립이 거의 발생하지 않았고, 좌측 단부에서 약 200kN 하중이 재하될 때까지 0.05mm 이하로 나타나다가 극한하중에 이르렀을 때 0.18mm까지 증가하였다. CLB18B(2), CLB18B(3) 부재

에서 150kN 이상의 하중이 작용할 때 슬립량이 증가하는 양상을 보였으나, 앞서 하중-처짐곡선에서 확인한 바와 같이 부재의 휨강도 및 RC부재의 연성파괴를 저해하는 수준은 아니었다.

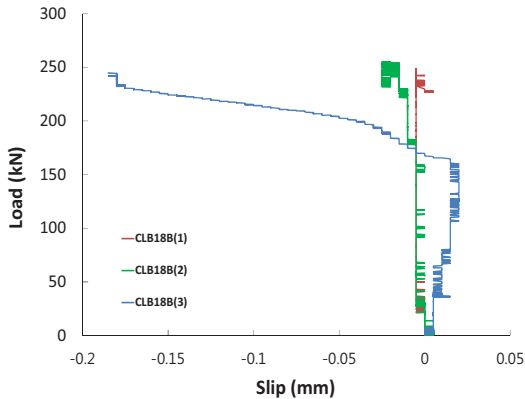


Fig. 13. Longitudinal slip of CLB18B

4.3 프리캐스트 패널 판부재 (LB18P, width=1200mm)

프리캐스트 패널 판부재(LB18P) 3개의 실험체에 대한 정적하중재하 실험결과 각각의 극한하중은 125.6kN, 123.7kN, 131.5kN으로 3개 부재 모두 휨파괴를 가정하여 산정한 극한하중보다 큰 하중에서 파괴되었다. (Table 3 참조)

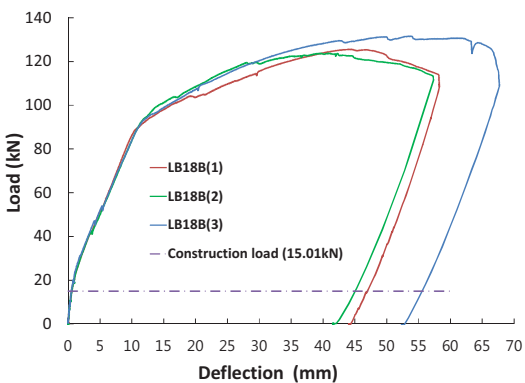


Fig. 14. Load-Deflection curves of LB18P

Fig. 15 하중-균열폭 곡선에서는 LB18P(1), LB18P(2) 두 개의 부재에서 균열발생 초기 빠르게 균열폭이 증가하는 현상이 비합성 프리캐스트 패널 보부재(LB18B,

Fig. 10 참조)와 동일하게 관찰되었다. 또한, 유로코드 2[7]에 따라 계산한 최대균열폭보다 LB18P 3개 실험체에 대한 측정치가 더 큰 값을 보인 것 역시 LB18B와 유사한 결과를 보였다. 콘크리트 표준 시방서[8]에 따라 산출한 시공하중과 이론에 따라 산정한 균열하중을 하중-균열폭 곡선과 비교하기 위해 Fig. 15에 각 하중을 표시하였다. 3개의 부재에서 약 15kN~17kN 부근의 하중이 작용할 때 균열폭이 확연히 커지는 것을 확인할 수 있으며 이론에 의한 균열하중 21.17kN의 71%~80%의 하중에서 균열이 진전되기 시작한 것으로 판단 할 수 있다. 콘크리트 표준 시방서[8]에 따른 시공하중이 작용할 때의 휨모멘트 5.33kN-m와 LB18P 3개 부재 각각의 균열진전이 시작된 모멘트를 비율을 타나낸 균열지수 (Cracking factor)는 1.00, 0.97, 0.88로 시공하중에 의한 모멘트가 정적하중재하 실험결과에 따른 균열모멘트와 같거나 약간 작은 것으로 나타났다.

LB18P 부재에 시공하중에 의한 설계 휨모멘트와 동등한 크기의 모멘트를 발생시키는 하중 15.0kN이 작용할 때 발생 균열폭은 0.0102mm, 0.0121mm, 0.0201mm 정도로 허용 균열폭 0.3mm와 비교하면 상당히 낮은 수준임을 알 수 있다. LB18P 부재의 균열간격에 대한 측정치와 유로코드 2[7]에 따른 계산치를 비교한 결과 측정치가 계산치보다 작은 것으로 나타나 비합성 프리캐스트 패널 보부재(LB18B)와 유사한 결과를 보였다.

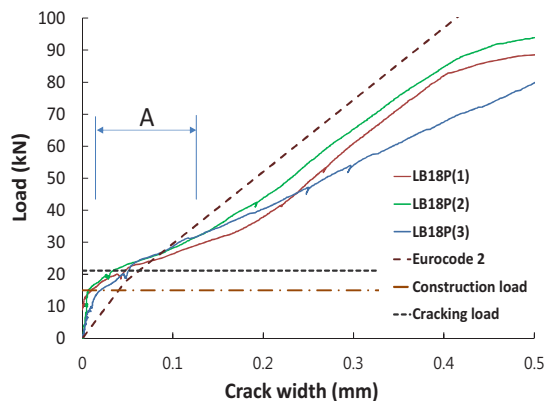


Fig. 15. Load-crack width curves of LB18P

4.4 합성 판부재(CLB18P, width=1200mm)

합성판부재의 정적하중재하 실험 결과 CLB18P(2) 부재가 충분한 연성거동을 보이며 휨파괴에 이른 것과

달리 CLB18P(1), CLB18P(3) 2개의 부재는 휨전단 파괴 양상을 보였다. CLB18P(2), CLB18P(3) 2개 부재의 극한하중은 휨파괴를 가정하여 산정한 이론치 671.64kN에 근접한 값을 보였으나 CLB18P(1) 부재의 경우 이론치의 92% 수준인 620.30kN에서 파괴되었다. (Table 3 참조) CLB18P(1)부재는 하중이 증가하여 극한하중에 가까워지면서 패널과 후타설 콘크리트의 슬립량이 크게 증가하였으며, 또한 좌측 지점부에서 전단균열이 빠르게 진전되는 것이 관찰되었다. CLB18P(3) 부재의 경우에는 슬립은 크지 않았으나, 극한하중에 가까워지면서 CLB18P(1)과 마찬가지로 지점부에서 전단균열이 빠르게 진전되는 것을 확인하였다. (Fig. 16 참조)

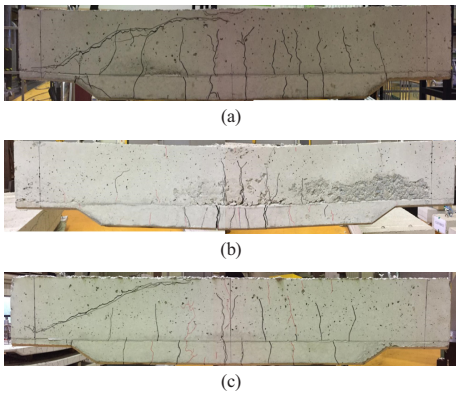


Fig. 16. Crack pattern in CLB18P
(a) CLB18P(1) (b) CLB18P(2) (c) CLB18P(3)

Table 5에 정리한 실험체의 파괴직전 상연 콘크리트 압축변형률 계측치를 보면, CLB18P(1), CLB18P(3) 2개 부재의 압축변형률이 연성거동을 보인 CLB18P(2)의 압축변형률보다 현저히 작은 변형률을 보였으며, 파괴하중이 휨파괴를 가정한 이론치에 미치지 못한 CLB18P(1)의 경우 구조기준에서 공칭휨강도 평가를 위해 제시하고 있는 극한 변형률 3000 μ e에 이르지 못한 것을 알 수 있다.

Fig. 17 하중-처짐 곡선에는 바닥판 계수 휨모멘트를 발생시키는 하중의 크기를 표현하여 실험체의 극한하중과 계수하중에 해당하는 145.06kN을 비교할 수 있도록 하였다. 계수하중과 3개 실험체의 극한하중과 비교하면 각각 23.3%, 21.5%, 21.4%로 모두 극한강도의 약 1/4에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

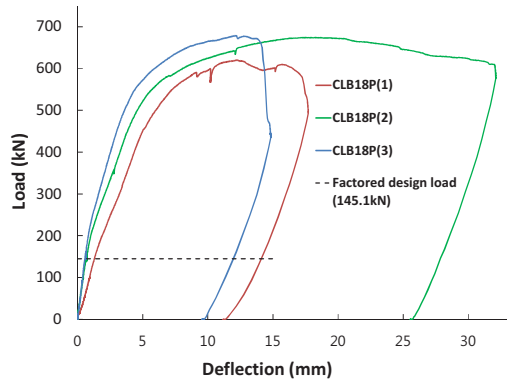


Fig. 17. Load-Deflection curves of CLB18P

CLB18P 부재의 하중에 따른 균열폭 측정치를 Fig. 18에 나타냈다. 유로코드 2[7]에 따른 최대균열폭 평균치를 합성보부재(CLB18B)와 마찬가지로 Case 1, Case 2 단면에 대해 각각 산정하여 함께 표현하였다. 계측치는 Case 2에 의한 최대균열폭 계산치와 상당히 근접한 값을 보였으며 Case 1에 의한 최대균열폭 계산치보다는 작은 값으로 나타나 Case 1의 경우로 균열폭을 평가하는 것이 안전측이 될 수 있음을 재확인하였다.

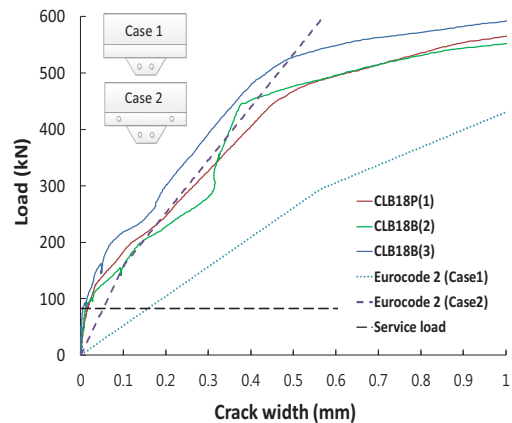


Fig. 18. Load-crack width curves of CLB18P

철도설계기준(노반편)[1]에 따른 바닥판 사용하중에 해당하는 실험재하하중 82.88kN이 작용할 때 균열폭을 Table 6에 정리하였다. CLB18B 부재의 균열폭은 허용 균열폭 0.3mm의 5.6%, 4.0%, 6.3%로 상당히 작은 균열폭 측정치를 보였다.

Table 7에는 82.88kN의 하중이 작용할 때 처짐의 크기를 정리하였다. 철도설계기준(노반편)[1]의 기준에 따

라 바닥판 지간의 1/600을 적용한 허용처짐 2.67mm에 대하여 29.6%, 25.1%, 14.6% 의 처짐이 발생하여 사용성 기준을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

바닥판 지간 변동성이 적은 거더교 형식의 철도교 바닥판 적용을 위해 리브가 부착된 프리캐스트 패널 영구거푸집을 개발하였다. 개발된 프리캐스트 패널의 시공중 안전성과 사용성, 그리고 후타설콘크리트와 프리캐스트 패널이 합성된 이후 합성바닥판의 안전성과 사용성을 검증하기 위한 정적하중재하 실험을 수행하였고, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) LB18B와 LB18P는 리브가 부착된 프리캐스트 패널 단면을 적용한 교량바닥판 영구거푸집 실험체로써, 정적하중재하 실험을 수행하여 시공중 프리캐스트 패널의 사용성과 안전성을 평가하였다.
- 2) CLB18B와 CLB18P는 리브가 부착된 프리캐스트 패널과 후타설 콘크리트가 합성된 후 합성단면을 갖는 완성된 교량 바닥판의 구조성능 검증을 위해 제작된 실험체로써, 정적하중재하 실험을 수행하여 균열폭과 처짐 그리고 극한하중에 대한 평가를 수행하였다.
- 3) LB18B, LB18P의 각 부재별 3개씩 총 6개 실험체는 하중 증가에 따라 충분한 연성거동을 보이며 휨거동에 지배되어 파괴에 이르렀으며, 휨파괴를 가정한 이론치보다 약간 큰 하중에서 파괴되었다.
- 4) LB18B부재의 이론상의 균열하중은 7.36kN이며 균열폭 측정치를 근거로 판단한 각 부재의 균열발생하중은 약 10kN, 8kN, 5kN으로 나타났다. 각 부재의 균열발생하중과 콘크리트 표준 시방서[8]에 따른 설계시공하중 5.0kN의 비는 0.44, 0.79, 0.99로 설계시공하중이 시험체의 균열발생하중보다 작은 것으로 나타났다. LB18P부재의 이론적 균열하중은 21.17kN이며 균열폭 측정치를 근거로 판단한 각부재의 균열발생하중은 14.92kN, 15.40kN, 16.98kN으로 나타났다. 각 부재의 균열발생하중과 설계시공하중 15.0kN의 비는 1.00, 0.97, 0.88으로 설계균열하중과 같거나 약간 작은 것으로 나타났다. 합성전 패널 부재에서 균열발생하중이 이론적 균열하중의 68.8% ~ 78.2%임

을 고려하면 이론상의 검토만으로 프리캐스트 패널 단면을 설계할 때, 이론적 균열하중에 0.6의 안전계수를 곱해 설계에 고려한다면 시공중 리브가 부착된 패널의 균열 발생 가능성을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

- 5) CLB18B의 3개 부재는 하중 증가에 따라 충분한 연성거동을 보이며 주로 휨거동에 지배되어 파괴에 이르렀다. 또한 각 부재는 휨파괴를 가정한 이론치보다 큰 하중에서 파괴되었다. 철도교 바닥판 설계계수하중 48.4kN을 이론상의 극한하중 223.88kN과 비교하면 4.6배의 크기임을 알 수 있다. CLB18P의 3개 실험체 중 1개 부재는 연성파괴를 보였고 2개 부재는 지점부에서 전단파괴 양상을 보이며 연성거동을 보이지 못했다. CLB18P(2), CLB18P(3) 두 개 부재는 휨파괴를 가정한 이론상의 극한하중보다 약간 큰 하중에서 파괴되었고 CLB18P(1)는 이론치의 92% 수준인 620.3kN에서 파괴되었다. CLB18P(1)의 파괴하중 620.3kN은 설계 계수하중 145.06kN과 비교하면 4.3배 크기임을 알 수 있다. 이 실험에서 CLB18P(1)과 CLB18P(3) 두 개 부재에서 휨전단파괴가 일어났으므로 충분한 연성거동을 보이지는 않았으나 휨파괴를 가정하여 산정한 극한하중의 92% 이상의 하중에 이르러 파괴되었으며, 연성파괴가 나타나지 않음을 고려하여 휨강도감소계수를 0.65로 적용하여도 계수하중에 대하여 2.78배의 휨강도를 보여 설계하중에 대하여 충분한 안전성을 갖추었다고 판단 할 수 있다.
- 6) CLB18B 3개 부재에 실제 사용하중 수준의 하중이 작용할 때 발생한 최대 균열폭은 0.0714mm로 허용 균열폭 0.3mm의 23.8% 이하로 상당히 작게 나타났다. CLB18P 부재의 경우에도 사용하중 수준의 하중이 작용할 때 최대 균열폭이 0.01875mm로 허용균열폭 0.3mm의 6.3% 미만인 것으로 나타났다. CLB18B 실험체에 사용하중 수준의 하중이 작용할 때 최대 처짐은 0.0714mm로 허용치 2.67mm의 23.8%, CLB18P의 경우 최대 처짐은 0.79mm로 허용치 2.67mm의 29.6% 로 나타났다.

이상의 연구 결과를 종합해볼 때 리브가 부착된 프리캐스트 패널 및 그 합성단면을 적용한 순지간 1.6m를 갖는 교량바닥판 구조물이 현행설계기준에서 요구하는 안전성과 사용성을 모두 만족하는 것으로 판단된다.

References

- [1] Korea Rail Network Authority, Railway Bridge Design Code (Trackbed Part), 2011.
- [2] D. H. Seol, K. C. Lee, K. H. Kim, S. G. Youn, "Development of Short-span Precast Concrete Panels for Railway Bridge", *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 28, no. 5, pp. 545-553, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2016.28.5.545>
- [3] S. G. Youn, G. D. Cho, "Experimental Study on the Cracking Loads of LB-DECKs with Varied Cross-Section Details", *Journal of the Korea Concrete Institute*, vol. 23, no. 5, pp. 657-665, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.5.657>
- [4] Korea Concrete Institute, Study on the Design and Construction of Precast Concrete Panel (LB-DECK), KCI R 09-005, 2009.
- [5] S. G. Youn, S. H. Park, K. H. Kim, "Improvement of Design Details of Reinforced Concrete Deck in Railway Bridges", *KSCE 2015, Convention 2015 Civil Expo & Conference*, pp. 209-210, 2015.
- [6] Korea Concrete Institute, Concrete Structure Design Code, 2012.
- [7] Eurocode 2, Design of concrete structures, Part 1. General rules and rules for building, ENV 1992-1-1, 1992.
- [8] Korea Concrete Institute, Concrete Standard Specification, 2009.

설 대 호(Dae-Ho Seol)

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울산업대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 2016년 2월 : (주)호명이씨에스 기술연구소
- 2016년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 (박사과정)

<관심분야>

합성구조, RC구조, PSC구조, 강구조, 교량

이 경 찬(Kyoung-Chan Lee)

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (박사)
- 2008년 8월 ~ 2011년 5월 : Auburn University 연구원
- 2011년 6월 ~ 2013년 3월 : 특허청 심사관
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도교량, 콘크리트 궤도, 궤도-교량 상호작용, 합성구조

윤 석 구(Seok-Goo Youn)

[정회원]



- 1996년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (박사)
- 1996년 3월 ~ 2002년 8월 : 한국도로공사 도로연구소 수석연구원
- 2002년 8월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>

합성구조, RC구조, PSC구조, 강구조, 교량