



철도교용 단시간 프리캐스트 콘크리트패널의 개발

설대호¹⁾ · 이경찬²⁾ · 김기현¹⁾ · 윤석구^{1)*}

¹⁾서울과학기술대학교 건설시스템공학과 ²⁾한국철도기술연구원 고속철도연구본부 첨단인프라연구팀

Development of Short-span Precast Concrete Panels for Railway Bridge

Dae-Ho Seol¹⁾, Kyoung-Chan Lee²⁾, Ki-Hyun Kim¹⁾, and Seok-Goo Youn^{1)*}

¹⁾Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Rep. of Korea

²⁾Korea Railroad Research Institute, Uiwang 16105, Rep. of Korea

ABSTRACT This paper presents experimental static test results of the precast concrete panels developed for short-span concrete bridge deck form. Different from LB-DECK, concrete rib attached to the bottom surface of concrete panel, and Top-bar is not used at the top surface of concrete panel. Number of concrete ribs and cross-section details of concrete rib are determined from the analytical results of parametric study considering the span length and the thickness of concrete bridge decks. Shear rebars are installed at the top surface of concrete panel for composite action between precast concrete panel and cast-in-place concrete. In order to evaluate the safety and the serviceability of the developed short-span concrete panel subjected to design load, static load test is conducted. Three test panels with span length of 1.6m are fabricated, and during the load test displacements, strains and cracks of test panels are measured and final failure modes are investigated. Serviceability of the test panels is evaluated based on the results of displacements, cracking load, and crack width at the design load level. Safety is also evaluated based on the comparison of the ultimate strength and the factored design load of test panels. Based on the test results, it is confirmed the short-span precast concrete panel satisfies the serviceability and safety regulated in design codes. In addition, the range of span length of concrete bridge decks for the short-span concrete panel is discussed.

Keywords : bridge deck, precast concrete panel, permanent deck form, crack

1. 서 론

국내에서도 합성형교량의 철근콘크리트 교량바닥판을 시공할 때 영구거푸집의 일종인 프리캐스트 콘크리트패널이 많이 적용되고 있다.^{1,2)} 교량바닥판용 프리캐스트 콘크리트패널은 설계하중에 대해 안전성, 사용성, 그리고 내구성을 만족하도록 설계해야 한다. 프리캐스트 콘크리트패널의 설계하중은 콘크리트표준시방서(2009)³⁾ 거푸집의 설계하중과 동일한 하중이며, 콘크리트패널의 자중, 현장 타설되는 콘크리트 하중, 그리고 현장 작업할 때 발생하는 충격하중이 포함된다.

교량바닥판에 적용되는 프리캐스트 콘크리트패널은 설계하중이 작용할 때 패널 하면에 발생하는 콘크리트 휨인장응력이 콘크리트 휨균열강도를 초과하지 않아야 하며, 처짐은 콘크리트구조기준(2012)⁴⁾에 규정된 허용처짐량보다 작

도록 단면 휨강성이 확보되어야 한다. 또한 콘크리트패널 단면의 휨모멘트는 계수설계하중에 의한 휨모멘트보다 커 안전성이 확보되어야 한다. 프리캐스트 콘크리트패널의 단면상세는 균열과 관련된 사용성 설계 단계에서 결정되기 때문에 통상 사용성이 만족되면 안전성도 쉽게 만족시킬 수 있다.

프리캐스트 콘크리트패널의 일종인 기존 LB-DECK은 바닥판 순지간장의 변화를 수용할 수 있는 단면 상세를 가지고 있다. Fig. 1에 LB-DECK의 단면 예를 나타내었는데, 바닥판의 지간장이 변화되면 콘크리트패널에 부착된 lattice-girder의 개수를 변화시켜 휨강성을 조절할 수 있는 단면 상세를 가지고 있다.⁵⁻⁹⁾ 프리캐스트 콘크리트패널이 많이 적용되는

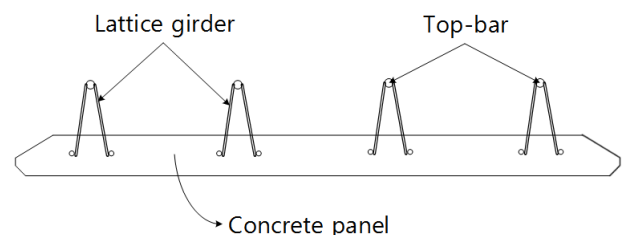


Fig. 1 Cross-section of LB-DECK

*Corresponding author E-mail : sgyoun@seoultech.ac.kr

Received March 28, 2016, Revised July 13, 2016,

Accepted August 18, 2016

©2016 by Korea Concrete Institute

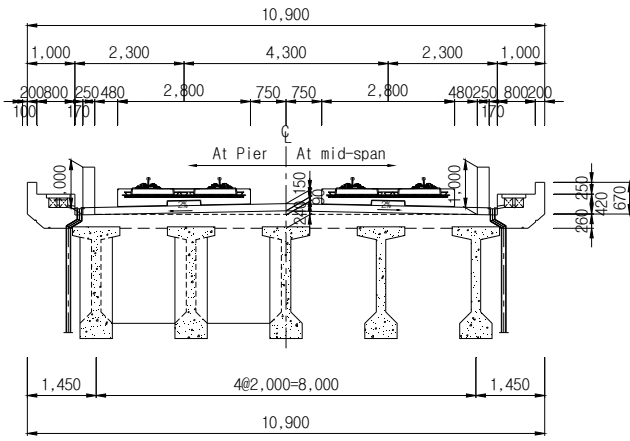


Fig. 2 Example of cross section of PSC girder railway bridge

프리스트레스트 콘크리트(이하 PSC)거더교는 순지간장이 PSC거더 배치간격과 상부플랜지폭에 의해 결정되며, 도로교의 경우 PSC거더교의 바닥판 순지간장은 통상 1.4 m 이상 2.2 m 이하 사이에서 변화된다. 따라서 기존 LB-DECK은 콘크리트패널 두께와 lattice-girder 개수를 변화시켜 시간장 변화를 고려해 설계할 수 있는 단면 상세를 가지고 있어야 한다.

철도교는 사용성 설계 영향으로 요구되는 휨강성이 크기 때문에 동일한 PSC거더가 적용되는 경우 도로교에 비해 거더 간격이 작아진다.¹⁰⁾ 국내의 경우 철도교에 적용된 PSC거더교 바닥판의 순지간장은 약 1.4 m 수준으로 변동폭이 매우 작다(Fig. 2 참조). 따라서 철도 PSC거더교에 적용하는 프리캐스트 콘크리트패널은 시간장 변화량이 작기 때문에 단면 상세 변화의 필요성이 도로교에 비해 적다.

이 연구에서는 교량바닥판의 시간장이 작고 시간장 변화 또한 작은 철도 PSC거더교에 적용하기 위한 단시간용 프리캐스트 콘크리트패널을 개발하고 정적하중이 작용할 때 균열하중과 균열거동을 평가하고자 한다. 이를 위하여 먼저 시간장이 작은 PSC거더교를 대상으로 단면 상세를 변화시키지 않고 적용할 수 있는 단시간용 콘크리트패널 단면을 개발하였다. 또한 개발된 단시간용 콘크리트패널 단면을 이용하여 길이 1.8 m, 폭 1.2 m인 프리캐스트 콘크리트패널 3개를 제작한 후 정적하중 재하실험을 수행하였다. 하중 재하실험을 통해 실험체들의 균열하중과 균열폭 거동, 그리고 최종 파괴될 때 형태를 관찰하였다. 실험결과를 통해 얻은 균열하중과 균열폭 변화량, 그리고 파괴하중 크기를 토대로 개발된 단시간용 프리캐스트 콘크리트패널이 안전성과 사용성을 만족하는지 평가하고자 한다.

2. 단시간용 콘크리트패널

2.1 단면 상세 개발

단시간용 프리캐스트 콘크리트패널 개발은 철도 PSC거더교와 같이 교량바닥판의 순지간장이 짧은 교량을 대상으

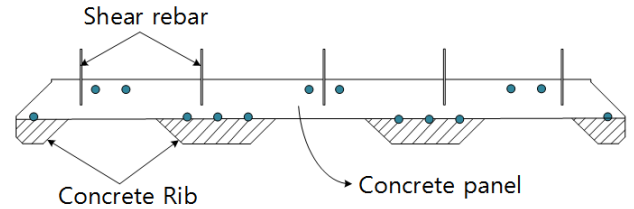


Fig. 3 Short-span precast concrete panel

로 하였다. PSC거더교 교량바닥판의 순지간장은 PSC거더의 배치간격과 PSC거더 상부플랜지 폭에 영향을 받는다. 현행 철도교 PSC거더의 배치간격은 2 m 정도로 도로교에 많이 적용되는 PSC거더의 배치간격인 2.5 m보다 작다. Fig. 2에서 철도교 PSC거더의 배치간격이 2.0 m인 것을 확인할 수 있으며, 철도교의 교량바닥판의 순지간장은 상하행선 강재레일의 위치 변동성이 매우 작아 단시간용 프리캐스트 콘크리트패널의 적용성이 높다고 판단된다.

단시간용 프리캐스트 콘크리트패널을 개발하면서 단면 상세는 크게 두 가지를 고려하였다. 첫 번째는 설계하중이 작용할 때 콘크리트패널 하면에 발생하는 인장응력 크기를 감소시키기 위하여 Fig. 3과 같이 콘크리트 리브가 부착된 단면 상세를 고려하였다. 두 번째는 LB-DECK에 적용된 lattice-girder 대신 철근 배근이 용이하도록 전단 철근을 배치하여 현장 타설되는 콘크리트와의 합성뿐만 아니라 콘크리트패널 상면에 철근을 배근할 때 시공성을 고려한 단면 상세를 개발하고자 하였다.

단시간용 프리캐스트 콘크리트패널은 설계하중이 작용할 때 콘크리트패널 하면에 발생하는 인장응력이 콘크리트의 휨인장강도 f_r 보다 작은 단면 상세이어야 한다. 콘크리트패널 단면의 상세 변화에 따른 균열발생 여부를 검토하기 위하여 단시간용 프리캐스트 콘크리트패널에 대한 설계 프로그램을 개발하였다. 단면 상세 변수로 콘크리트패널의 두께, 콘크리트 리브의 개수, 하면폭, 높이, 그리고 현치폭을 고려하였으며, 설계 변수로는 교량바닥판 순지간장과 두께를 고려하였다. 변수해석 결과는 설계하중이 작용할 때 발생하는 콘크리트의 인장응력 f_t 을 콘크리트의 휨인장강도 f_r 과 비교한 수치인 균열발생계수(cracking factor)로 나타내었다. 이 수치가 1을 초과하면 균열발생 가능성이 있다는 것을 의미한다. 설계하중은 콘크리트표준시방서(2009) 거푸집 규정을 따라 콘크리트패널의 자중, 현장 타설되는 콘크리트 하중, 그리고 타설시 활하중 3.75 kN/m^2 을 적용하였다.³⁾

$$\text{Cracking factor} = \frac{f_t}{f_r} \quad (1)$$

2.2 단시간용 콘크리트패널 확장성 검토

단시간용으로 개발된 콘크리트패널은 콘크리트패널 상면에 lattice-girder가 없는 경우이다. 단시간용 콘크리트패널에 Fig. 1과 같이 lattice-girder를 부착하면 단면의 휨강성이

크게 증가하여 콘크리트 하면에 발생하는 인장응력의 크기가 감소된다. 단시간용으로 개발된 콘크리트패널에 lattice-girder가 추가되는 경우 적용 가능한 교량바닥판의 순시간장 범위를 알아보기 위해 변수해석을 수행하였다. lattice-girder의 설계변수는 Table 1에 수록하였으며 바닥판의 순시간장은 최대 4 m까지 검토하였다.

Fig. 4에 단시간용 프리캐스트패널에 lattice-girder가 부착된 단면에 대해 교량바닥판 두께 변화에 따른 적용 가능한 순시간장 범위를 나타내었다. 그림에서 lattice-girder를 부착하였을 때 적용 가능한 순시간장이 크게 증가된다는 것을 확인할 수 있다.

3. 정적하중 실험계획

3.1 실험체 설계

정적하중 재하실험을 수행하기 위해 선정된 단시간용 콘크리트패널의 단면 상세를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 실험체명 SLB18은 순시간장 1.8 m를 목표로 콘크리트리

브가 부착된 실험체이다.

실험체의 단면 상세는 Fig. 5에서 확인할 수 있는데, 콘크리트패널 하면에 콘크리트리브가 부착되고 리브당 D13 철근을 3가닥씩 배치하였다. SLB18 실험부재는 Top-bar가 없기 때문에 현장타설되는 콘크리트와의 합성을 위해 전단연결재가 설치된다. 실험체의 콘크리트 패널두께는 70 mm, 콘크리트 리브의 높이와 폭을 60 mm와 160 mm로 고정하였다.

3.2 재료 특성값

실험부재에 사용된 재료 특성값은 Table 3에 나타내었다. 콘크리트 압축강도는 $\phi 150 \times 300$ mm 원형 공시체를 이용하였으며, 콘크리트용 공시체는 실험부재와 동일하게 증기양생후 습윤 양생하였다. 콘크리트의 25일 평균압축강도 f'_c 이 51.81 MPa로 설계기준압축강도 40 MPa를 초과하여 재료실험이 끝난 후 바로 정적하중 재하실험을 실시하였다. 실험부재에 사용된 인장철근은 설계항복강도가 400 MPa인 SD400을 적용하였다.

3.3 하중 재하 방법

실험 부재에 대한 정적하중 재하는 한국철도기술연구원

Table 1 Variables in parametric analyses

Variable		Min. value (mm)	Max. value (mm)
Concrete Panel	Thickness	60	70
	No. of Conc. rib	2	4
Concrete Rib	Rib height	50	120
	Rib bottom width	100	200
	Rib hunch width	30	50
Concrete Slab	Thickness	220	400
	Span length	1,200	1,600
Lattice-Girder*	No. of lattice girder	3	9
	Height	125	135
	Top bar Diameter	12	16

*Variables of lattice-girder are only considered in long-span concrete panel

Table 2 Test Panels

Test panels	Panel thickness (mm)	Concrete rib (mm)			Span length (m)	No. of panels
		height	bottom width	top width		
SLB18	70	60	160	220	1.6	3

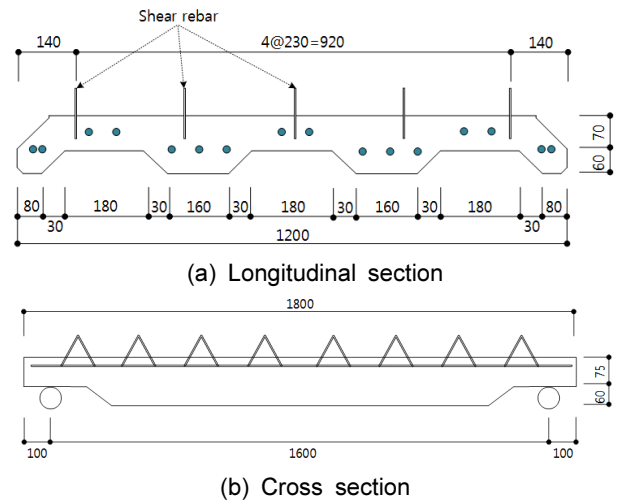


Fig. 5 Test panel

Table 3 Material Properties (unit ; MPa)

Material	Material properties
Concrete	Average compressive strength at 25days $f'_c = 51.81$ MPa
Rebar	SD400, Yield strength $f_y = 400$ MPa

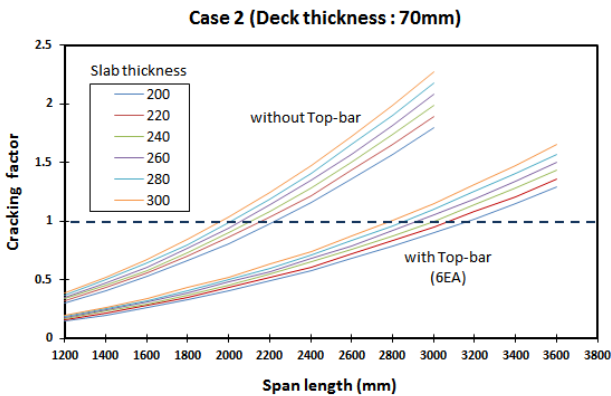


Fig. 4 Cracking factors of short-span concrete panels with/without Top-bar

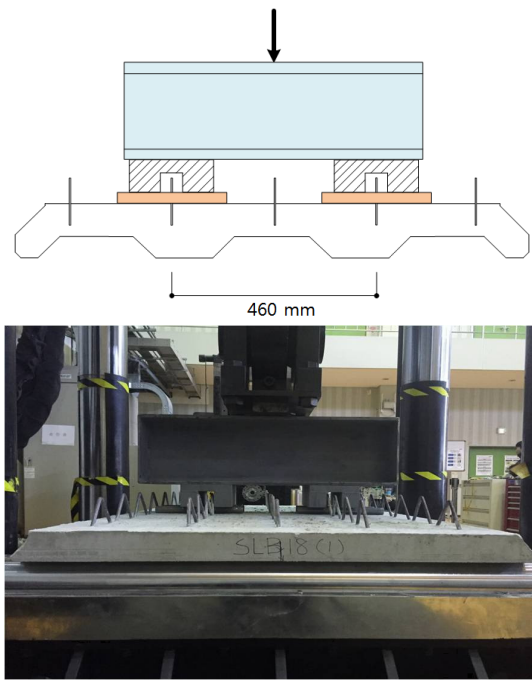


Fig. 6 Load distributing device with C shaped steel member

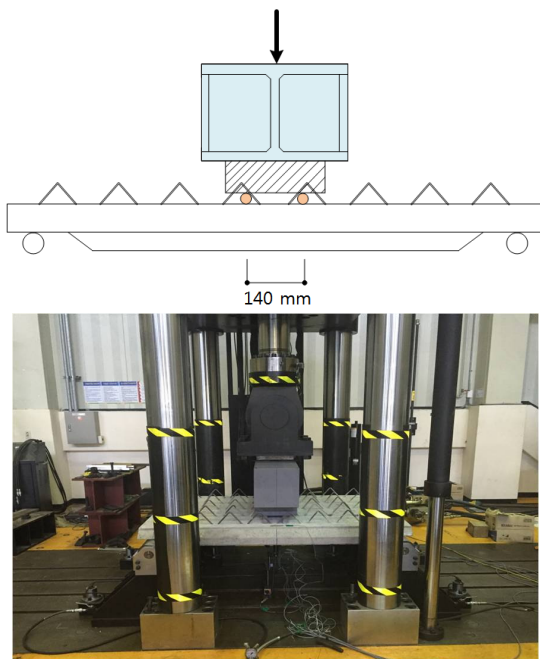
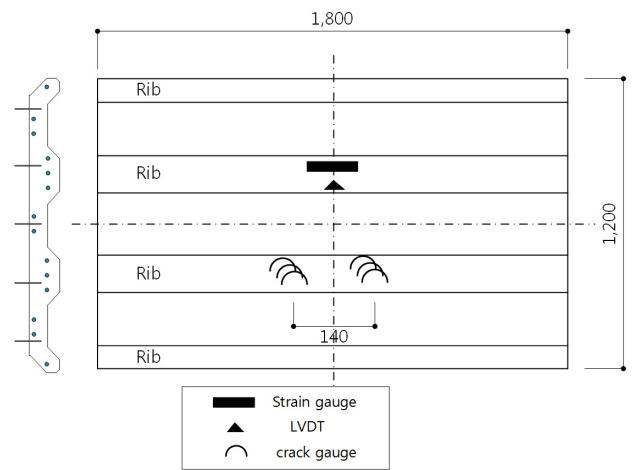


Fig. 7 Three point flexural test

구조실험실에 있는 2500 kN UTM을 이용하였다. 정적하중은 변위제어로 재하하였으며, 실험체에 가해지는 하중 크기는 UTM 자체에 내장된 하중측정장치를 활용하였다.

정적하중을 재하할 때 콘크리트패널 상면에 전단철근이 돌출되어 있어 전폭에 걸쳐 선하중을 재하하기 어렵다. 콘크리트 상면에 돌출된 전단철근 사이에 하중을 분산시켜 가력하기 위해 콘크리트 상면 위에 지름이 30 mm, 길이가 350 mm인 강봉 2개를 140 mm 이격시켜 설치하고, 그 위에 C자 형태의 강재로 된 하중분배장치를 Fig. 6과 같이 설치하였다. 또한 하중분배장치 위에 H형강을 설치하여 재하 하중이



(a) Location of gauges



(b) Installed LVDT and crack gauges

Fig. 8 Installed LVDT and crack gauges

양쪽으로 분배되도록 하였다. Fig. 7은 실험체 SLB18-1에 대해 중앙부에 하중을 가력하는 방법을 나타내었다.

실험체에 정적하중을 재하하면서 실험부재 중앙부 처짐을 측정하기 위하여 부재 하면에 2개의 LVDT를 설치하였다. 콘크리트 리브 하면에는 콘크리트 변형률게이지를 2개를 설치하여 균열이 발생할 때까지 콘크리트 인장변형률을 측정하였다. 콘크리트패널 상면의 압축변형률을 측정하기 위해 콘크리트 패널 상면에 2개의 콘크리트 변형률게이지를 설치하였다. 또한 콘크리트 리브 하면에 균열이 발생하는 초기부터 균열폭 변화를 측정하기 위하여 균열이 예상되는 부재 중앙부에 균열게이지 6개를 부착하였다(Fig. 8 참조).

정적하중은 실험체 콘크리트리브 하면에 균열이 발생하는 균열하중을 초과하여 부재가 최종 파괴될 때까지 단조 증가시켰다. 정적하중을 단조 증가시키면서 콘크리트리브 하면에 부착된 콘크리트게이지 인장변형률이 약 $150 \mu\epsilon$ 에 도달하는 하중, 그리고 그 하중의 2배에 해당되는 하중이 되었을 때 가력을 멈추고 콘크리트 균열 발생 여부를 육안 관찰하였다. 이 때, 균열 관찰을 위해 콘크리트 하면의 변형률 $150 \mu\epsilon$ 을 기준으로 삼은 이유는 콘크리트의 인장 응력이 파괴계수 3.98 MPa에 도달하여 균열이 발생할 것으로 예측되는 변형률 약 $130 \mu\epsilon$ 에 균열을 육안으로 관찰하기 용이하도록 $20 \mu\epsilon$ 를 더하여 $150 \mu\epsilon$ 를 기준으로 정하였다.

4. 실험 결과

4.1 균열하중과 극한하중

정적하중 재하실험 결과 실험체 SLB18 부재들은 콘크리트 리브 하면에 휨균열 발생 이후 비선형적인 하중-처짐 거동을 보인다 최종적으로 지점부 콘크리트 리브의 불연속부에서 휨전단균열이 발생하며 파괴되었다(Fig. 9 참조). 각 실험체의 균열하중과 극한하중의 크기는 Table 4에 나타내었다.

정적하중 재하실험을 통해 얻은 각 실험체의 균열하중 실험값을 각 실험체의 휨균열강도와 균열모멘트를 이용해 계산한 균열하중 이론값과 비교한 결과를 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 실험체 SLB18 부재들의 균열하중 크기는 이론값과 비슷하거나 약간 크다는 것을 알 수 있다.

균열하중 크기를 이용해 산정한 각 실험체의 균열모멘트를 설계모멘트와 비교한 결과도 Table 5에 나타내었다. 설계모멘트 크기는 콘크리트표준시방서에 규정된 수치들을 토대로 산정하였다. Table 5에서 실험체 SLB18 부재들의 균열모멘트는 설계모멘트보다 많이 크다는 것을 확인할 수 있다. 균열발생지수(설계모멘트/균열모멘트)가 0.47~0.54 수준으로 균열발생 가능성이 매우 낮다는 것을 의미하며, 또한 실험체 SLB18을 지간장 1.6 m 보다 큰 교량바닥판에 적용할 수 있다는 것을 의미한다(Fig. 10 참조).

정적하중 재하실험을 통해 얻은 극한하중의 크기를 각 실험체가 휨파괴된다는 가정 하에 계산한 파괴하중 이론값과 비교한 결과를 Table 6에 정리하였다. 실험체 SLB18 부재들의 이론값은 콘크리트구조기준(2012)⁹⁾에 따라 압축을 받는 콘크리트가 극한변형률에 도달한다는 가정을 토대로 계산한 공칭휨강도이다. 실험체 SLB18는 지점부가 휨전단에 의해 파괴되었음에도 파괴하중 실험치가 이론값에 매우 근접된 결과를 보였다(Fig. 11 참조). 하지만 모든 실험체들의 극한모멘트는 계수설계모멘트에 비해 최소 6.64배 이상임을 확인할 수 있다(Fig. 12 참조).

이상의 실험결과들로부터 실험체 SLB18 부재들의 극한강도는 계수설계모멘트에 비해 매우 크기 때문에 충분한 안전성을 확보하고 있다고 평가된다.

Table 4 Cracking load and ultimate load (unit ; kN)

Test panels	Cracking load*	Ultimate load	Failure mode
SLB18-1	16.33	119.53	Flexural shear failure at the end of concrete rib
SLB18-2	17.63	121.98	
SLB18-3	18.95	113.78	

*Cracking load are selected when concrete tensile strain or crack width are changed rapidly, or when the crack width is 0.01 mm.

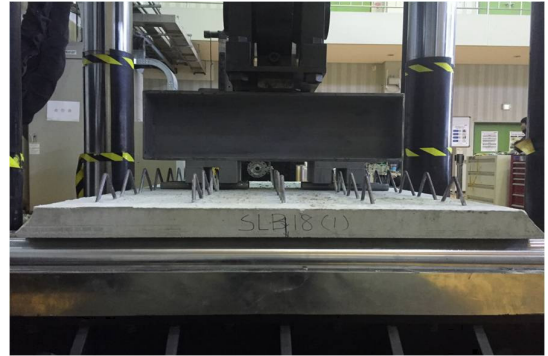


Fig. 9 Closed view of failure mode of test panel SLB18-1

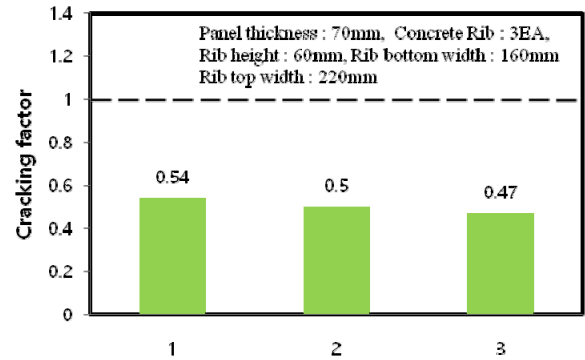


Fig. 10 Cracking factor of the test panels subjected to design load

4.2 하중-처짐 거동 분석

정적하중을 재하하면서 각 실험체 중앙에서 처짐량 변화를 측정하였다. Fig. 13은 실험체 SLB18-1 부재의 하중-처짐

Table 5 Comparison of cracking load and design load

Test panels	Cracking load (kN)			Cracking moment, test (kN·m) ③	Design moment (kN·m) Concrete standard manual ④	Cracking factor Design moment / Cracking moment ④/③
	Test ①	Calculated* ②	②/①			
SLB18-1	16.33	18.14	1.11	7.53	4.02	0.54
SLB18-2	17.63		1.03	8.01		0.50
SLB18-3	18.95		1.04	8.49		0.47

*Calculated cracking load is obtained based on the concrete compressive strength is 51.81 MPa

Table 6. Ultimate load of the test panels

Test panels	Ultimate load (kN)			Ultimate moment test (kN·m) ③	Factored design moment** (kN·m) Concrete standard manual ④	Safety Factor (Ultimate moment / Factored design moment) ③/④
	Test ①	Calculated ②*	①/②			
SLB18-1	119.53	118.87	1.01	45.20	6.49	6.96
SLB18-2	121.98		1.03	46.10		7.10
SLB18-3	113.78		0.96	43.10		6.64

*Calculated ultimate load is based on the nominal flexural strength

**Factored design moment is obtained by using the dead load factor 1.4 and the live load factor 2.0 in the Korea Railway Design Code (2011)¹¹⁾

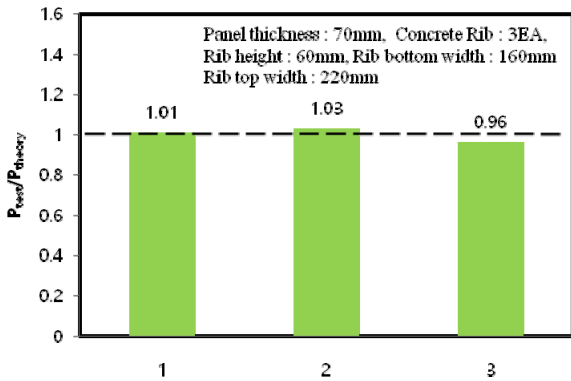


Fig. 11 Comparison of the measured ultimate load and the calculated ultimate load

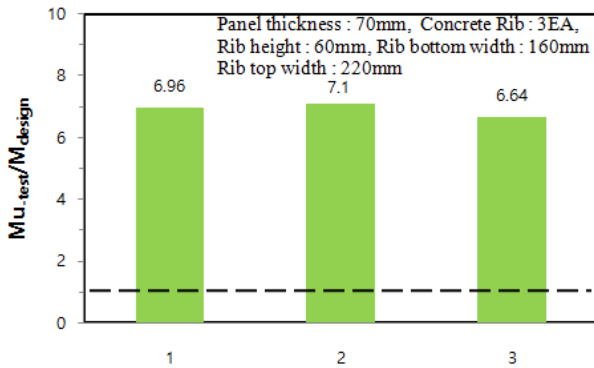


Fig. 12 Safety factor of the test panels for the factored design load based on the Korea Railway Design Code

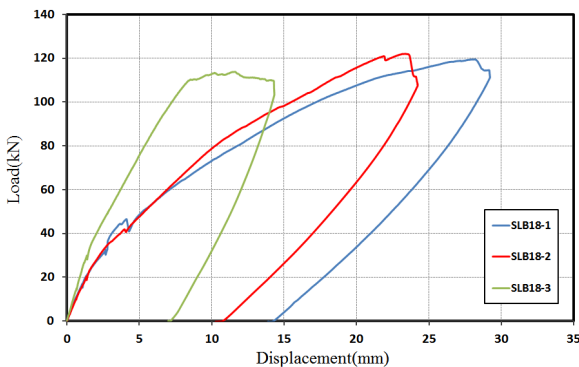


Fig. 13 Load-displacement curves of SLB18

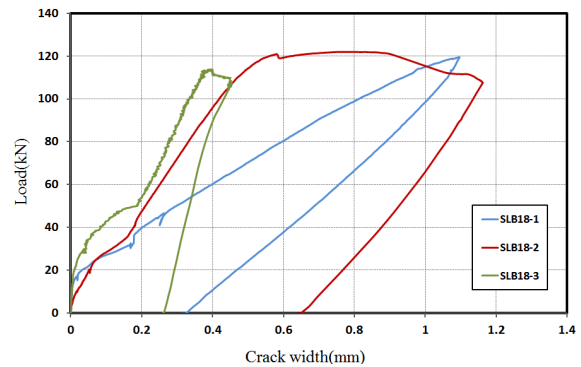


Fig. 14 Load-crack width curves of SLB18

Table 7 Comparison of the measured displacements and the allowable displacement of test panels

Test panels	Design load* (kN)	Vertical displacement (mm)	Allowable displacement (mm)	Reamrk
SLB18-1	6.54	0.29, 0.18	2	Allowable displacement 1/800 of span length
SLB18-2		0.39, 0.26		
SLB18-3		0.29, 0.18		

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

관계를 나타내고 있다. 재하 하중이 균열하중 16.33 kN 부근 까지 증가할 동안 선형적인 거동을 보이다가 균열에 의한 휨강성 감소로 서서히 비선형적인 거동으로 보이다 극한하중에 도달함을 확인할 수 있다. 실험체 SLB18-3의 경우 다른 두 실험체에 비해 균열에 의한 휨강성 감소가 작았지만 지점부 휨전단에 의해 파괴하중의 크기는 다른 실험체들과 유사하였다.

Table 7에는 사용활하중 작용시 실험체 중앙에서 측정된 처짐량을 허용처짐량과 비교한 결과를 나타내었다. 사용활하중은 콘크리트패널의 설계하중에서 패널의 자중을 뺀 나머지 하중을 말한다. 허용처짐량은 콘크리트구조기준(2012) “4.3 처짐”에 규정된 지간장의 1/800 수치를 나타낸다. 실험체에서 측정된 수직처짐량의 크기는 허용처짐량에 비해 작다는 것을 쉽게 확인할 수 있다.

4.3 하중-균열폭 거동

Fig. 14에 실험체 SLB18들의 하중-균열폭 관계를 나타내었다. 모든 실험체는 균열이 발생한 이후 하중 증가와 함께 균열폭도 증가되고 있음을 확인할 수 있다.

Table 8에 각 실험체에 발생된 균열이 균열폭 0.3 mm에 도달할 때 재하하중 크기를 정리하였다. Table 8에서 각 실험체는 허용균열폭 0.3 mm일 때 재하하중의 크기가 균열하중보다 최소치 3.08배 이상 된다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 콘크리트 리브가 부착된 실험체 SLB18은 균열하중에도 달하여도 균열폭이 매우 작고, 또한 균열하중보다 약 3배 이상 큰 하중이 작용해야 허용균열폭 0.3 mm에 도달한다는 실험 결과를 토대로 균열폭과 관련된 사용성을 만족한다고 판단된다.

각 실험체에 발생된 균열폭이 매우 작은 이유를 분석하기 위해 평균균열간격을 측정하였으며, 그 수치를 Table 8에 나타내었다. 또한 유로코드 2¹²⁾에 제시된 식 (1)을 이용해 평균균열간격을 계산해보았다.

$$S_{rm} = 50 + 0.25k_1k_2 \frac{\phi}{\rho_r} \quad (1)$$

여기서, k_1 은 인장철근의 부착특성을 고려한 계수로 이형철근의 경우 0.8이며, k_2 는 변형률 분포의 형태를 고려한 계수로 휨모멘트의 경우 0.5를 적용한다. ϕ 는 인장철근의 공칭 지름을 나타내며, ρ_r 은 유효인장영역 내에 포함된 철근의 유효철근비를 말한다.

실험체 내에는 콘크리트 리브에 D13 철근이 3가닥 배근되어 있고, 콘크리트 리브와 콘크리트패널 두께에서 60 mm 부분을 콘크리트의 유효인장영역이라고 가정하면 유효철근비와 평균균열간격은 다음과 같다.

$$\rho_r = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{380.1}{35,400} = 0.0107$$

$$\begin{aligned} S_{rm} &= 50 + 0.25k_1k_2 \frac{\phi}{\rho_r} \quad (2) \\ &= 50 + 0.25 \times 0.8 \times 0.5 \times \frac{13}{0.0107} \\ &= 171.50 \text{ mm} \end{aligned}$$

평균균열간격 171.50 mm는 실험체 전체의 평균균열간격 100.57 mm보다 큰 수치임을 알 수 있다. 콘크리트패널 두께의 절반인 35 mm만 콘크리트 유효인장영역에 포함시켜도 유효철근비 ρ_r 은 0.015가 되며, 이 때 평균균열간격 S_{rm} 은 136.67 mm가 된다. 이 수치도 실측치 100.57 mm보다 큰 값이다. 이 연구에서 실험체의 평균균열간격이 계산치보다 작은 이유를 명확히 규명하지 못했지만 실험체에 발생된 균열폭 크기가 작은 이유를 설명할 수 있는 한 가지 근거는 될 수 있다고 판단된다.

Table 8 Applied load at the crack width of 0.3 mm

Test panels	Cracking load (kN) ①	Applied load at allowable crack width 0.3 mm (kN) ②	Average crack space* (mm)	②/①
SLB18-1	16.33	50.30	116.7	3.08
SLB18-2	17.63	72.28	100.0	4.09
SLB18-3	18.95	109.83	85.0	5.80

*Average crack space of all test specimens is 100.57 mm and calculated average crack space is 171.5 mm

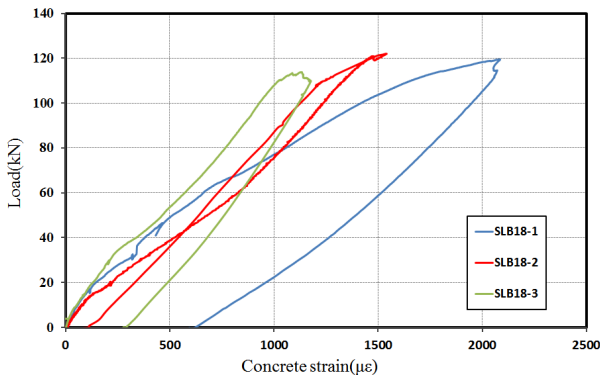


Fig. 15 Load-concrete compressive strain curves of SLB18

Table 9 Concrete compressive strain at the ultimate load

Test panel	Ultimate load (kN)	Compressive Strain (με)	Remark
SLB18-1	119.53	2083, 1856	Concrete ultimate strain $\epsilon_{cu} = 3000 \mu\epsilon$
SLB18-2	121.98	1471, 773	
SLB18-3	113.78	1115, 1128	

4.4 하중-콘크리트 압축변형률 거동

실험체 SLB18는 모두 휨파괴가 아닌 휨전단에 의해 파괴되었다. 이러한 파괴 양상은 압축을 받는 콘크리트의 변형률이 극한변형률에 도달하지 못하였다는 것을 의미한다. Fig. 15에 실험체 SLB18들의 하중-콘크리트변형률 그래프를 나타내었는데, 극한하중 도달시 콘크리트 압축변형률이 0.002 mm/mm 수준 이하로 극한변형률 0.003 mm/mm보다 작음을 확인할 수 있었다(Table 9 참조).

5. 결 론

영구거푸집인 프리캐스트 콘크리트패널은 설계하중에 대해 사용성과 안전성이 확보되도록 설계해야 한다. 이 연구에서는 철도 PSC거더교와 같이 지간장이 짧은 교량바닥판에 적용할 수 있는 콘크리트패널을 제작한 후 정적하중 재하실험을 수행하여 균열하중과 극한하중의 크기를 평가하였다. 실험부재 3개에 대한 수행한 실험 결과들과 이론적 연구 결과들과의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 시간장이 짧은 교량바닥판, 특히 철도 PSC거더교에 적용 가능한 영구거푸집용 콘크리트패널을 개발하였다. 개발된 콘크리트패널은 하면에 콘크리트리브가 부착된 형태이며, 콘크리트 패널 상면에는 전단철근을 배치하여 현장 타설되는 콘크리트와 합성거동할 수 있는 단면 상세를 가지고 있다.
- 2) 개발된 단시간용 콘크리트패널은 콘크리트패널 상면에 lattice-girder를 설치하는 경우 단면의 휨강성이 커져 적용할 수 시간장이 길어지는 단면 상세를 가지고 있다.
- 3) 정적하중 재하실험 결과 콘크리트패널 하면에 콘크리트리브가 부착된 실험부재 SLB18은 모두 콘크리트리브 불연속부에서 휨전단에 의해 파괴되었으며, 극한하중의 크기는 프리캐스트 콘크리트패널의 계수설계 모멘트보다 최소 6.64배 이상으로 안전성을 확보하고 있다.
- 4) 실험체 SLB18의 균열하중은 콘크리트의 휨인장강도를 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 로 가정해서 얻은 이론값과 매우 유사하거나 약간 더 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 초기 균열하중이 작용할 때 균열폭 크기가 매우 작았으며, 균열하중보다 3배 이상의 하중이 작용해야 허용균열 폭 0.3 mm에 도달하였다.
- 5) 실험체 SLB18는 설계하중이 작용할 때 균열이 발생하지 않았으며, 설계하중에 대한 균열발생지수(설계모멘트/균열모멘트)는 0.47~0.54 수준으로 설계하중 작용시 균열이 발생할 가능성이 매우 낮은 것으로 평가되었다. 이 결과로부터 이 연구에서 개발된 단시간용 콘크리트패널은 설계하중에 대한 휨저항능력이 크기 때문에 콘크리트의 휨인장강도를 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 를 기준으로 설계할 수 있다고 판단된다.
- 6) 실험체 SLB18은 설계하중이 작용할 때 발생하는 처짐량이 허용처짐량인 시간장의 1/800 수준보다 매우 작아 사용성을 만족한다고 판단된다.
- 7) 실험체 SLB18은 파괴에 도달할 때 압축을 받는 콘크리트 변형률은 콘크리트의 극한변형률 0.003 mm/mm에 도달하지 않고, 최대 0.002 mm/mm 수준이었다. 이 결과들로부터 실험체 SLB18들이 휨모멘트가 가장 큰 중앙부에서 휨파괴되지 않고 콘크리트리브 끝단 부위에서 휨전단으로 취성적으로 파괴에 도달하였다는 것을 예측할 수 있다.

이상과 같은 연구 결과를 바탕으로 개발된 단시간용 콘크리트패널은 교량바닥판의 시간장 1.6 m의 설계하중에 대해 안전성과 사용성을 모두 만족한다고 평가된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(과제번호 15RTRP-B071568-03, 과제명: 상호작용완화를 위한 교량 바닥판 설계법 개발)에 의해 수행되었습니다.

References

1. BA 36/90, The use of permanent formwork, DMBR, Vol. 2, Section 3, Feb. 1991.
2. FHWA, Steel bridge design handbook: Bridge Deck Design, FHWA-IF-12-052, Vol.17, 2012.
3. Korea Concrete Institute, Concrete Standard Specification, 2009.
4. Korea Concrete Institute, Concrete Structure Design Code, 2012.
5. Youn, S. G., Cho, S. K., Lee, J. H., Jeong, J. D., and Won, Y. S. "Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Bridge Decks with LB-DECK", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 2006, Vol.18, No.2, pp.390-393.
6. Youn, S. G., Cho, S. K., Lee, J. H., and Won, Y. S., "Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Bridge Decks with LB-DECK", *REAL STRUCTURES: Bridges and Tall Buildings (EASEC-10)*, 2006, pp.381-386.
7. Korea Concrete Institute, Study on the Design and Construction of Precast Concrete Panel (LB-DECK), KCI R 09-005, 2009.
8. Youn, S. G., and Cho, G. D., "Experimental Study on the Cracking Loads of LB-DECKs with Varied Cross-Section Details", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.5, 2011, pp.657-665.
9. Youn, S. B., Cho, K. D., and Youn, S. G., "Development of the Cantilever LB-DECK", *KSCE 2014, Convention 2014 Civil Expo & Conference*, 2014, pp.131-132.
10. Youn, S. G., Park, S. H., and Kim, K. H., "Improvement of Design Details of Reinforced Concrete Deck in Railway Bridges", *KSCE 2015, Convention 2015 Civil Expo & Conference*, 2015, pp.209-210.
11. Korea Rail Network Authority, Railway Bridge Design Code (Trackbed Part), 2011.
12. Eurocode 2, Design of concrete structures, Part 1. General rules and rules for building, ENV 1992-1-1, 1992.

요 약 이 논문에는 교량바닥판의 지간장이 짧은 단지간용 프리캐스트 콘크리트패널에 대해 수행한 정적하중 재하실험 결과들을 나타내었다. 단지간용 콘크리트패널은 콘크리트패널 하면에 콘크리트리브가 부착되어 있으며, 기존 LB-DECK과 달리 콘크리트패널 상면에 Top bar가 없는 단면이다. 콘크리트패널에 부착되는 콘크리트리브의 개수와 단면 상세는 교량바닥판의 지간장과 철근콘크리트바닥판 두께 변화에 따른 설계하중에 대해 변수해석 결과를 토대로 결정하였다. 콘크리트패널 상면에는 현장타설되는 콘크리트와 합성거동을 위해 전단철근을 배치하였다. 변수해석을 통해 산정된 콘크리트패널이 설계하중에 대해 사용성과 안전성을 만족하는 가를 확인하기 위해 정적하중 재하실험을 수행하였다. 지간장 1.6 m인 단지간 콘크리트패널 실험체 3개 제작한 후 정적하중 재하하면서 각 실험체의 처짐, 균열, 그리고 최종 파괴양상을 살펴보았다. 설계하중이 작용할 때 각 실험체의 처짐, 균열하중, 그리고 균열폭을 토대로 사용성을 평가하였다. 또한 각 실험체의 최종 파괴양상과 극한강도를 토대로 계수설계하중에 대한 안전성을 평가하였다. 실험 결과 단지간용 콘크리트패널이 사용성과 안전성을 만족하는 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 단지간용 콘크리트패널을 적용할 수 있는 교량바닥판의 지간장 범위를 검토하였다.

핵심용어 : 교량바닥판, 프리캐스트 콘크리트 패널, 영구거푸집, 균열