



단면 상세가 변화된 LB-DECK의 균열하중에 대한 실험적 연구

윤석구^{1)*} · 조규대²⁾

¹⁾서울과학기술대 건설공학부 ²⁾(주)효성 엘비테크

Experimental Study on the Cracking Loads of LB-DECKs with Varied Cross-Section Details

Seok-Goo Youn^{1)*} and Gyu-Dae Cho²⁾

¹⁾School of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

²⁾Hyosung LB-DECK Co. Ltd, Seoul 137-897, Korea

ABSTRACT LB-DECK, a precast concrete panel type, is a permanent concrete deck form used as a formwork for cast-in-place concrete pouring at bridge construction site. LB-DECK consists of 60 mm thick concrete slab and 125 mm height Lattice-girders partly embedded in the concrete slab. These decks have been applied to the bridges, which girder spacings are short enough to resist longitudinal cracking caused by construction loads. This paper presents experimental research work conducted to evaluate the cracking load of LB-DECKs designed for long span bridge decks. Twenty four non-composite beams and four composite beams are fabricated considering three design variables of thickness of concrete slab, height of lattice-girder, and diameter of top-bar. Static loads controlled by displacements are applied to test beams to obtain cracking and ultimate loads. Vertical displacements at the center of beams, strains of top-bar, crack propagation in concrete slab, and final failure modes are carefully monitored. The obtained cracking loads are compared to the analytical results obtained by elastic analyses. Long-term analyses using age-adjusted effective modulus method (AEMM) are also conducted to investigate the effects of concrete shrinkage on the cracking loads. Based on the test results, the tensile strength and the design details of LB-DECKs are discussed to prevent longitudinal cracking of long span bridge decks.

Keywords : bridge deck, precast concrete panel, permanent concrete deck form, cracking, LB-DECK

1. 서 론

합성형 교량의 철근콘크리트 교량 바닥판은 프리캐스트 바닥판을 적용하거나, 콘크리트를 현장에서 타설하는 방법을 이용하여 시공할 수 있다. 콘크리트 현장타설 방법을 적용하는 경우, 콘크리트 자중을 지지할 수 있는 거푸집으로 일반 거푸집과 콘크리트 타설 후에도 철거하지 않는 영구 거푸집이 이용되고 있다. 영구 거푸집으로 강재 거푸집 또는 프리캐스트 콘크리트 패널이 적용될 수 있는데, 국내의 경우 프리캐스트 콘크리트 패널이 주로 사용되고 있다.

현행 LB-DECK은, 프리캐스트 콘크리트 패널의 한 종류로, Fig. 1과 같이 두께가 60 mm인 고강도 콘크리트 슬래브와 지름이 12 mm인 top-bar가 연결된 구조이다. 초기 LB-DECK은 지간장이 2.2 m 이하인 PSC 거더교에 주로 적용되었지만, 시공의 간편성으로 지간장이 2.2 m 이상인 강박스 거더교에도 적용되고 있다. 교량 바닥판

의 지간장이 길어지면, 콘크리트 타설시 LB-DECK 하부에 종방향 균열이 발생할 수 있으며, 실제 일부 교량에서 균열이 발생하는 사례가 보고되기도 하였다.¹⁾ LB-DECK을 이용한 철근콘크리트 바닥판은 트럭의 윗중 작용시 휨파괴가 아닌 편칭전단에 의해 파괴되기 때문에 종방향 균열이 교량 바닥판의 안전성에 미치는 영향은 매우 작다.^{2,3)} 하지만, 프리캐스트 콘크리트 패널은, 콘크리트 고정하중을 지지하는 거푸집 역할과 더불어 현장타설된 콘크리트와 합성 거동하는 바닥판 부재로서의 역할을 동시에 수행해야 하기 때문에, 교량 바닥판 시공시 종방향 균열이 발생하지 않도록 상세한 설계 검토가 필요하다. 이를 위해 현행 도로교설계기준⁴⁾에도 프리캐스트 콘크리트 패널의 경우 시공 단계와 공용 단계에 대해 사용성과 안전성을 만족하도록 상세한 설계 검토를 요구하고 있다. 하지만, 국내의 경우 LB-DECK을 포함한 프리캐스트 콘크리트 패널을 많이 적용하고 있음에도 불구하고, 프리캐스트 바닥판에 비해 종방향 균열과 관련된 연구 성과가 매우 부족한 상태이다.⁵⁻⁷⁾

LB-DECK 콘크리트 슬래브에 발생하는 종방향 균열은 콘크리트의 균열강도 f_r 이 콘크리트 슬래브 하부에 발생하는 인장응력보다 작을 때 발생할 수 있다. 일반적으로 휨부

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

Received May 17, 2011, Revised August 1, 2011,

Accepted August 2, 2011

©2011 by Korea Concrete Institute

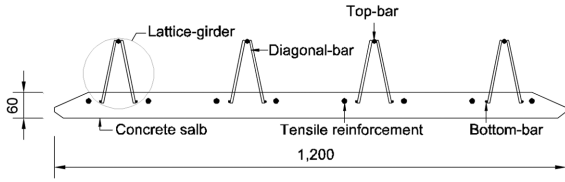


Fig. 1 Cross section of LB-DECK (unit: mm)

재 설계시 콘크리트의 균열강도 f_r 로 휨인장강도 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 를 적용할 수 있다. 하지만, Fig. 1에 나타난 바와 같이, LB-DECK은 콘크리트 슬래브가 인장력을 받고 top-bar가 압축력을 받는 형태로 일반 철근콘크리트 바닥판의 하중 저항 구조와 커다란 차이가 있다. 콘크리트의 균열강도는 부재 단면에 작용하고 있는 응력의 분포 형태에 따라 차이가 있으며, 휨모멘트가 아닌 직접 인장력이 작용하면 균열강도가 감소된다.⁸⁾ 또한 LB-DECK 콘크리트 슬래브에 발생하는 인장응력은 LB-DECK의 단면 2차 모멘트와 밀접한 연관이 있다. LB-DECK의 단면 상세 중에서 콘크리트 슬래브의 두께, top-bar의 지름, 그리고 lattice-girder의 높이가 변화되면 단면 2차 모멘트에 영향을 미치며, 동일한 휨모멘트 작용시 콘크리트 슬래브 하부에 발생하는 인장응력의 크기가 변화된다.

이 연구에서는 LB-DECK의 단면 상세 중에서 콘크리트 슬래브의 두께, top-bar의 지름, 그리고 lattice-girder의 높이가 변화되는 경우에 대해 콘크리트 슬래브의 균열하중 크기를 평가하고자 한다. 이를 위하여 길이가 2 m인 비합성 LB-DECK 보부재를 24개, 합성 LB-DECK 보부재 4개를 제작한 후 정적하중 재하실험을 수행하였다. 하중 재하 실험에서 얻어진 실험체의 균열하중을 토대로 LB-DECK 콘크리트 슬래브의 균열강도 f_r 의 크기를 분석하고, 균열 발생을 최소화시킬 수 있는 LB-DECK의 단면 상세 변화 방안을 제시하고자 한다. 또한, 실험 부재에서 얻은 극한하중을 토대로 LB-DECK의 안전성을 평가하고자 한다.

2. LB-DECK의 균열 검토

2.1 시간장과 슬래브 두께 변화에 따른 균열 검토

LB-DECK의 단면 상세 변화에 따른 균열 발생 여부를 검토하기 위하여 LB-DECK 전용 설계 프로그램을 개발하였다. MS-excel의 매크로 기능을 이용하여 개발된 프로그램은 콘크리트의 휨인장강도(또는 균열강도, f_r)와 콘크리트 슬래브 하면에 발생하는 인장응력의 크기를 비교한 후 균열발생계수(cracking factor)를 나타낸다. 여기서 균열발생계수는 콘크리트 슬래브 하면에 발생하는 인장응력 크기에 대한 콘크리트의 휨인장강도의 비를 나타낸다. 인장응력 계산시 LB-DECK에 작용하는 하중은 LB-DECK 자중, 현장 타설되는 콘크리트 하중, 그리고 타설시 활하중 2.5 kN/m^2 을 적용하였다.⁹⁾

개발된 프로그램과 Table 1에 나타난 변수들을 이용하

Table 1 Variables in parametric analyses

Variable		Min. value (mm)	Max. value (mm)
LB-DECK	Thickness	60	70
	Lattice-girder height	125	135
	No. of lattice-girders	3	8
	Top-bar diameter	12	16
Slab	Span length	1,200	4,000
	Thickness	220	400

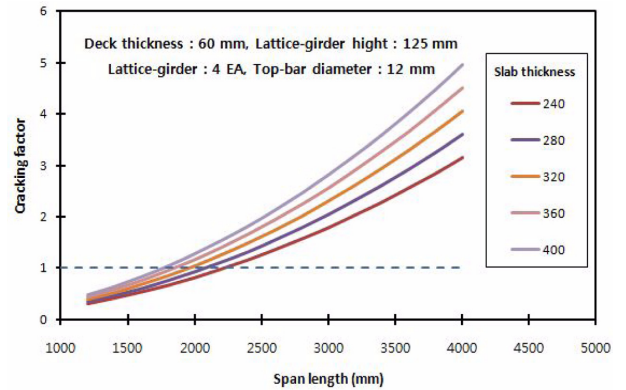


Fig. 2 Cracking factors with varied span length and slab thickness

여 다양한 변수 해석을 수행하였으며, 변수해석 결과의 한 예를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 수직축은 균열발생계수, 수평축은 시간장을 나타내는데 시간장과 교량 바닥판 두께가 증가할수록 균열발생계수가 1을 초과하여 급격히 증가됨을 확인할 수 있다. 균열발생계수가 1을 초과하는 구간은 LB-DECK 콘크리트 슬래브 하면에 균열이 발생할 수 있음을 의미한다.

2.2 교량 형식에 따른 균열 검토

현재 LB-DECK이 주로 적용되고 있는 교량 형식은 PSC 거더교, IPC 거더교, E 빔교, 강박스 거더교이며, Table 2에는 각 교량에 적용되는 교량 바닥판의 순시간장과 두께 분포를 나타내었다.

Table 2에 나타난 교량에 LB-DECK 적용시 균열 발생계수를 평가하였으며, 변수해석 결과의 한 예를 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타난 해석 결과는 LB-DECK에 적용된 lattice-girder의 개수를 4개로 고정 한 상태에서 교량 바닥판의 순시간장과 두께가 평균치인 경우에 해당하는데, 강박스 거더교의 경우에는 횡구배가 2%인 경우만을 나타내었다. 표에서 세 가지 변수인 LB-DECK 콘크리트 슬래브의 두께, lattice-girder의 높이 그리고 top-bar의 지름이 증가되면 균열발생계수가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 세 가지 변수 중에서 콘크리트 슬래브의 두께와 lattice-girder 높이를 변화시켰을 경우에 비해 top-bar의 지름을 12 mm에서 16 mm로 증가시키는 경우 균열에 대한 저항강도가 크게 증가되는 것으로 평가되었다.

Table 2 Span length and slab thickness in bridge types

Bridge type	Span length (m)	Slab thickness (mm)
PSC girder	Min. L = 1.4 Max. L = 2.2 Average L = 1.8	T = 240~250
IPC girder	Min. L = 1.0 Max. L = 1.7 Average L = 1.35	T = 240~250
E beam	Min. L = 1.1 Max. L = 1.8 Average L = 1.45	T = 240~250
Steel box (with stringer)	Min. L = 2.0	S = 2% : T1 = 240, T2 = 320 S = 5% : T1 = 240, T2 = 440
		Max. L = 2.5
	Average L = 2.25	S = 2% : T1 = 240, T2 = 330 S = 5% : T1 = 240, T2 = 465
Steel box (without stringer)	Min. L = 2.4	S = 2% : T1 = 240, T2 = 288 S = 5% : T1 = 240, T2 = 360
		Max. L = 3.2
	Average L = 2.8	S = 2% : T1 = 240, T2 = 296 S = 5% : T1 = 240, T2 = 380

S = transverse slope
T1 = minimum slab thickness
T2 = maximum slab thickness

Table 3 Cracking factors of parametric analyses

Variables	Span length (m)	Slab thickness (mm)	Cracking factor	
			Before	After
LB-DECK thickness (60 mm → 70 mm)	1.35	240	0.34	0.32
	1.45	240	0.39	0.36
	1.80	240	0.59	0.55
	2.25	285	1.03	0.96
	2.80	268	1.5	1.41
Lattice-girder height (125 mm → 135 mm)	1.35	240	0.34	0.31
	1.45	240	0.39	0.35
	1.80	240	0.59	0.53
	2.25	285	1.03	0.93
	2.80	268	1.5	1.37
Top-bar diameter (12 mm → 16 mm)	1.35	240	0.34	0.26
	1.45	240	0.39	0.29
	1.80	240	0.59	0.45
	2.25	285	1.03	0.78
	2.80	268	1.5	1.14

3. 정적하중 재하 실험

3.1 실험 부재

LB-DECK의 세 가지 단면 상세인 콘크리트 슬래브의 두께, lattice-girder의 높이 그리고 top-bar의 지름이 변화

되는 경우에 대해 균열하중의 크기 변화를 평가하기 위하여 실험 부재를 Table 4와 같이 비합성 보부재와 합성 보부재로 구분하여 계획하였다. 시공시 균열강도 평가를 위한 비합성 보부재는 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이, LB-DECK의 세 가지 단면 상세 변화에 따른 균열하중의 크기를 평가하고 또한 해석 결과와 비교를 목적으로 8가지 종류의 실험 부재로 계획하였다. 공용시 균열강도 평가를 위한 합성 보부재는 Fig. 3(b)와 같이 LB-DECK과 현장타설 콘크리트가 합성된 상태이기 때문에 앞서 언급한 세 가지 변수가 균열강도에 미치는 영향이 작다고 판단하여 4가지 실험 부재를 계획하였다. 모든 실험 부재의 길이는 2.02 m, 폭은 300 mm이며, 합성 보부재의 총 두께는 240 mm로 고정하였다. 또한, 콘크리트 설계 압축강도 f_{ck} 는 LB-DECK 콘크리트 슬래브의 경우 40 MPa의 고강도 콘크리트, 현장타설 콘크리트는 27 MPa를 적용하였다.

각 실험 변수에 대한 실험 부재의 개수는 비합성 보부재의 경우에는 각각 3개씩, 합성 보부재의 경우에는 1개씩 제작하였다. 비합성 보부재의 경우 합성 보부재에 비해 부재 두께가 얇기 때문에 실험체 제작과 이동, 그리고 실험시 측정 게이지 설치 등으로 실험체에 손상이 가해질 수 있다는 판단으로 실험 부재 3개에 대한 평균값을 이용할 수 있도록 계획하였다.

3.2 재료 특성

실험 부재에 사용된 콘크리트의 압축강도와 휨인장강도를 Table 5에 나타내었다. 콘크리트 압축강도는 $\phi 150 \times 300$ mm 원형 공시체, 콘크리트 휨인장강도는 $150 \times 150 \times 500$ mm 무근 콘크리트 보 공시체를 이용하여 시험하였다. LB-DECK에 사용된 콘크리트용 공시체는 실험 부재와 동일하게 하루 증기양생을 한 후 습윤 양생을 하였으며, 현장타설 콘크리트용 공시체는 습윤 양생을 실시하였다. LB-DECK에 사용된 콘크리트의 14일 평균압축강도 f_{cm} 가 42.1 MPa로 설계압축강도 40 MPa를 초과하였기 때문에 재료 실험이 끝난 후 바로 정적하중 재하 실험을 실시하였다.

실험 부재에 사용된 인장철근과 압축철근은 항복강도가 400 MPa인 SD40을 적용하였으며, lattice-girder의 상부철근(top-bar)과 하부철근(bottom-bar)은 항복강도가 각각 460 MPa과 924 MPa이다.

3.3 실험 방법

실험체의 정적하중 재하실험은 2,000 kN 용량의 가력장치를 이용하였다. 가력장치는 최대 하중 크기를 변경시킬 수 있는 하중 조절 장치가 있어서 최대 하중 크기를 100 kN으로 조절한 후에 정적실험을 수행하였다. 정적하중 재하는 변위제어 방식을 이용하였으며, 재하 하중의 크기는 가력장치 자체에 내장된 하중 측정 장치와 로드셀을 이용하여 측정하였다.

Table 4 Test beams

Specimens		LB-DECK thickness (mm)	Lattice-girder height (mm)	Top-bar diameter (mm)	Span length (m)	No. of beams
Non-composite beam	LB60A12	60	125	12	2.02	3
	LB60A16	60	125	16	2.02	3
	LB60B12	60	135	12	2.02	3
	LB60B16	60	135	16	2.02	3
	LB70A12	70	125	12	2.02	3
	LB70A16	70	125	16	2.02	3
	LB70B12	70	135	12	2.02	3
	LB70B16	70	135	16	2.02	3
Composite beam	CLB60A12	60	125	12	2.02	1
	CLB60B16	60	135	16	2.02	1
	CLB70A12	70	125	12	2.02	1
	CLB70B16	70	135	16	2.02	1

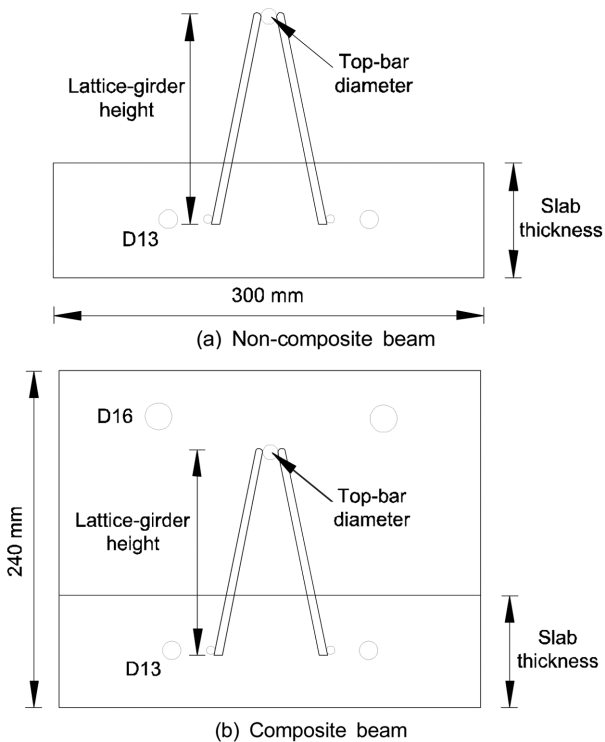


Fig. 3 Cross-sections of non-composite beam and composite beam

하중 재하시 비합성 보부재의 경우 LB-DECK 상면은 콘크리트로 마감되어 있고, top-bar가 돌출되어 있기 때문에 하중을 바로 재하하기 어렵다. 따라서 Fig. 4와 같이 하중 재하를 위해 콘크리트 마감면을 석고를 이용하여 평탄작업을 수행한 후 강판을 거치하고, 강판 위에 나무목재를 올리고 다시 강재를 설치하였다. 합성 보부재 역시 동일한 방법으로 하중을 재하하였다.

한편, 정적하중 재하 실험시 실험체 중앙부 처짐 측정 은 LVDT를 이용하였으며, 콘크리트 상면과 하면의 변형을 변화량 측정을 위해 콘크리트 변형률 게이지를 실험체 중앙부 상하면에 부착하였다. Top-bar의 압축변형률 변화는 철근 변형률 게이지를 이용하였다. 또한 균열이

Table 5 Material properties of concrete (unit : MPa)

Concrete mold Concrete	LB-DECK concrete				Cast-in-place concrete
	14 days		28 days		28 days
	CS*	FS**	CS	FS	CS
Mold 1	42.72	4.86	46.57	5.19	36.71
Mold 2	41.40	4.99	47.07	5.07	34.48
Mold 3	42.79	4.94	48.21	5.16	32.74
Mold 4	-	-	-	-	36.09
Mold 5	-	-	-	-	34.79
Average	42.06	4.92	47.28	5.14	34.96

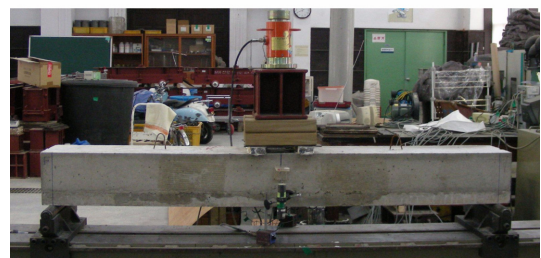
* CS = Compressive strength

**FS = Flexural tensile strength

발생하는 초기부터 균열폭 변화를 측정하기 위하여 Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이 균열 발생이 예상되는 부위에 5개의 균열 게이지를 부착하였다.



(a) Non-composite beam

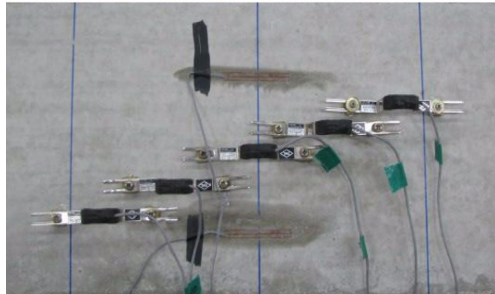


(b) Composite beam

Fig. 4 Test setup



(a) LVDT



(b) Crack gages

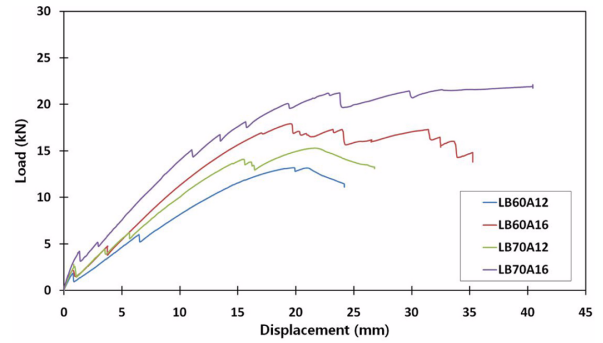
Fig. 5 Gauge setup

4. 실험 결과

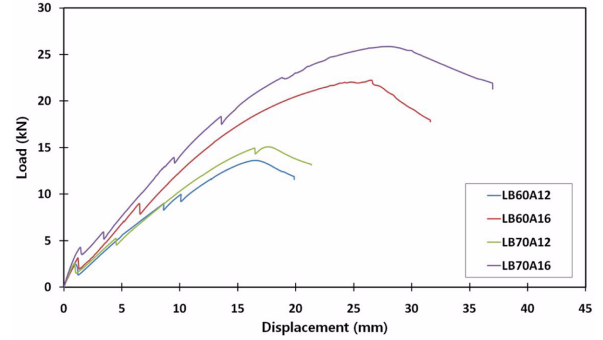
4.1 비합성 보부재

최종 파괴시까지 측정된 비합성 보부재의 하중-처짐 관계 곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 모든 비합성 보부재는 재하 하중이 증가함에 따라 처짐이 선형적으로 증가하다가, 균열이 발생한 후 비선형 거동을 보이며 파괴하중에 도달하였다. 중앙부 하면에서 발생한 휨 균열들은 콘크리트 하면에서 시작되어 수직방향으로 진전되었으며, 파괴 하중에 가까워지면서 일부 수직 균열 선단에서 수평 방향으로 균열이 전파되는 양상을 보였다. 모든 실험체에서 발생한 균열의 형태는 비슷한 양상이었으며, 최종 파괴시까지 관통 균열로 진전되지 않았다(Fig. 7 참조). 초기에 발생한 균열을 대상으로 측정된 균열폭 변화를 Fig. 8에 나타내었는데, 균열폭은 초기 균열하중 단계에서 크게 증가되다가 균열 안정화 단계를 거치면서 균열폭이 서서히 선형적으로 증가되었다.

각 실험 부재에서 측정된 균열하중의 크기를 Table 6에 정리하였다. 먼저 각 실험 부재에서 측정된 균열하중 크기는 실험 전 예상과 같이 동일한 종류의 실험 부재에서도 많은 차이가 발생하였다. 특히 콘크리트 슬래브



(a) Lattice-girder height 125 mm



(b) Lattice-girder height 135 mm

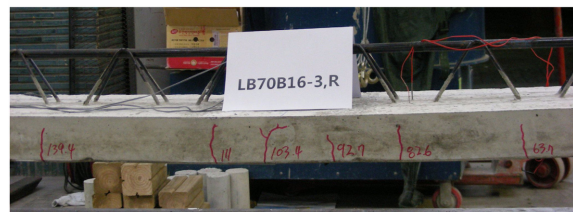
Fig. 6 Load-deflection curves of non-composite beams

의 두께가 60 mm인 실험 부재가, 두께가 70 mm인 실험 부재보다 상대적으로 균열하중의 편차가 크게 평가되었다. 또한 콘크리트 슬래브의 두께가 60 mm인 실험 부재의 경우, 단면 상세 중에서 top-bar의 지름이 증가하면 균열하중이 증가하리라는 초기 예측과 달리 거꾸로 감소되거나(LB60A16 참조) 또는 증가량이 매우 작았다(LB60B16 참조). 하지만, 콘크리트 슬래브의 두께가 70 mm인 실험 부재는 단면 상세 변화에 따른 균열하중 변화가 실험 전 예측과 동일한 양상을 보였다. 특히 top-bar의 지름이 16 mm인 실험 부재 LB70A16과 LB70B16의 경우 균열하중이 크게 증가되었다.

Table 6에는 실험 부재의 평균 균열하중과 콘크리트 균열강도를 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 와 $0.5\sqrt{f_{ck}}$ 로 가정해서 산정한 해석치



(a) LB60B12



(b) LB70B16

Fig. 7 Crack development of non-composite beams

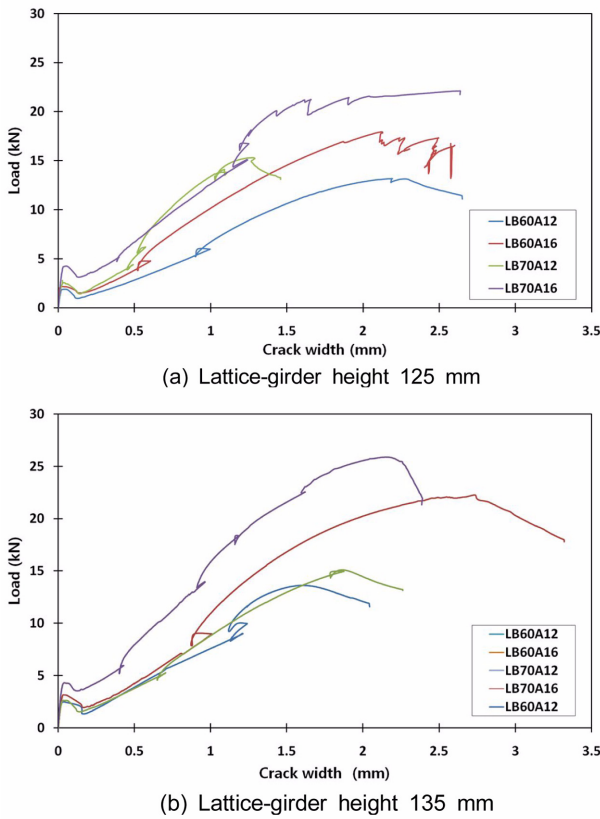


Fig. 8 Load-crack width curves of non-composite beams

와 비교한 결과를 나타내었다. 먼저 모든 실험 부재에서 측정된 평균 균열하중의 크기는 콘크리트 균열강도를 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 로 가정해 산정한 해석치보다 작게 평가되었다. 실험치 대 해석치의 비 ① / ②를 보면, 콘크리트 슬래브의 두께가 60 mm인 실험체 중에서 현행 LB-DECK의 설계 상세를 가진 실험 부재 LB60A12가 0.67로 가장 컸다. 슬래브 두께가 70 mm인 실험체의 경우에는 비록 실험치가 해석치보다 작았지만 모두 0.81 이상이었다. 콘크리트 휨균열강도를 $0.5\sqrt{f_{ck}}$ 로 가정해서 산정한 실험치 대 해석치의 비 ① / ③는 슬래브 두께가 70 mm인 실험체들의 경우 1.1 이상이었으며, 슬래브 두께가 60 mm인 실험 부재중에서는 LB60A12가 0.92로 가장 컸다.

비합성 보부재의 균열하중 크기와 관련하여 실험치가

해석치보다 작은 이유로 먼저 콘크리트의 건조수축이 주요한 원인으로 분석되었다. 콘크리트 슬래브 두께가 얇아 건조수축이 빠르게 진행될 수 있기 때문이다. 또 다른 이유로, 정적하중 재하 실험을 콘크리트 양생을 14일간만 수행하여 콘크리트 압축강도가 충분히 발현되지 못한 측면도 있다고 판단되며, 실험 부재 계획시 우려한 예기치 못한 손상도 있을 수 있다고 판단된다.

콘크리트 건조수축이 비합성 보부재의 균열하중에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 장기거동 해석을 수행하였으며 해석 결과 얻은 콘크리트 슬래브에 발생하는 인장응력 크기를 Table 7에 정리하였다. 장기거동 해석은 현행 콘크리트구조설계기준¹⁰⁾에 제시된 콘크리트의 건조수축과 크리프 규정을 이용하였으며, 콘크리트의 재령 효과를 고려한 AEMM(age adjusted effective modulus method)의 리렉세이션 방법을 이용하였다.^{11,12)} 해석 결과 콘크리트 상면과 하면 모두 인장응력이 발생하며, top-bar는 압축응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 설계 변수에 따른 결과를 보면 전반적으로 LB-DECK 두께가 60 mm인 경우와 top-bar의 지름이 16 mm인 경우 인장응력의 수치가 다른 부재보다 크게 평가되었다. 그러나 lattice-girder의 높이 변화에 따른 콘크리트 인장응력의 수치 변화는 매우 작았다. Table 7에서 콘크리트 슬래브 단면 중앙부에 발생한 콘크리트 인장응력의 크기는 두께가 60 mm인 경우에는 0.50 MPa 정도이며, 콘크리트 슬래브 두께가 70 mm

Table 7 Long-term stresses at 14 days due to drying shrinkage of concrete slab (unit: MPa)

Specimens	Top-bar	Concrete slab		
		top	middle	bottom
LB60A12	-1.06	0.86	0.50	0.13
LB60A16	-0.66	0.86	0.50	0.13
LB60B12	-0.71	0.83	0.50	0.16
LB60B16	-0.44	0.84	0.50	0.15
LB70A12	-5.65	0.76	0.43	0.09
LB70A16	-3.52	0.80	0.43	0.06
LB70B12	-4.95	0.74	0.42	0.10
LB70B16	-3.05	0.77	0.43	0.08

Table 6 Comparison of cracking loads of non-composite beams; test results vs. predicted loads

Specimens	LB-DECK thickness (mm)	Lattice-girder height (mm)	Top-bar diameter (mm)	Cracking load (kN)				Predicted load (kN)		① / ②	① / ③
				Test 1	Test 2	Test 3	Average ①	$0.63\sqrt{f_{ck}}$ ②	$0.5\sqrt{f_{ck}}$ ③		
LB60A12	60	125	12	2.72	1.94	1.88	2.18	3.25	2.36	0.67	0.92
LB60A16	60	125	16	2.38	1.74	1.72	1.95	4.60	3.43	0.42	0.57
LB60B12	60	135	12	2.38	1.68	2.38	2.15	3.70	2.71	0.58	0.79
LB60B16	60	135	16	1.70	3.14	1.74	2.19	5.26	3.95	0.42	0.55
LB70A12	70	125	12	2.38	3.34	2.56	2.76	3.27	2.36	0.84	1.17
LB70A16	70	125	16	3.06	4.42	4.20	3.89	4.45	3.29	0.87	1.18
LB70B12	70	135	12	3.40	2.62	2.82	2.95	3.66	2.67	0.81	1.10
LB70B16	70	135	16	4.08	4.28	4.06	4.14	5.05	3.76	0.82	1.10



(a) Non-composite beam LB60B12



(b) Non-composite beam LB70B16

Fig. 9 Buckling of top-bars

인 경우에는 0.43 MPa 정도이다. 이 수치들은 휨인장강도($0.63 \sqrt{f_{ck}}$) 3.98 MPa의 11%에서 13% 수준이기 때문에 균열강도에 영향을 있다고 예상할 수 있다.

비합성 보부재의 최종 파괴 형태는 크게 두 가지로 구분된다. 첫 번째는 콘크리트 슬래브에 발생한 수직 균열이 소성 중립축 부근에서 수평 방향으로 진전되다가 하중 저항 능력이 서서히 감소되는 경우(Fig. 7 참조)이며, 두 번째는 top-bar가 좌굴(Fig. 9 참조)되는 경우이다. 두 경우 모두 최종 파괴하중까지 LB-DECK 상면에 콘크리트 압축파쇄 현상이 나타나지 않았다. 파괴 형태 중 top-bar에 좌굴이 발생한 경우는 총 24개의 실험체 중에서 top-bar의 지름이 12 mm인 5개 부재, top-bar의 지름이 16 mm인 2개 부재, 총 7개의 실험체에서 발생하였다.

비합성 보부재의 파괴하중 크기는 Table 8에 정리하였으며, 모든 실험체의 파괴하중 크기는 균열하중보다 최소 3.42배 이상임을 확인할 수 있다. 또한 파괴하중 크기는 휨파괴를 가정해 산정한 계산치와 비교한 결과

Table 8 Comparison of ultimate loads of non-composite beams; test results vs. predicted loads.

Specimens	LB-DECK thickness (mm)	Lattice-girder height (mm)	Top-bar diameter (mm)	Ultimate load (kN)					⑤/Cracking load*	⑤/④
				Calculation ④	Test 1	Test 2	Test 3	Average ⑤		
LB60A12	60	125	12	13.63	13.94	12.54	13.14	13.21	3.74	0.97
LB60A16	60	125	16	23.80	18.36	20.68	17.46	18.83	3.77	0.79
LB60B12	60	135	12	14.84	13.94	13.18	13.82	13.65	3.42	0.92
LB60B16	60	135	16	25.95	22.44	22.18	21.36	21.99	3.88	0.98
LB70A12	70	125	12	13.63	14.96	15.02	15.28	15.09	4.04	1.11
LB70A16	70	125	16	23.80	22.10	22.06	21.20	21.79	4.25	0.92
LB70B12	70	135	12	14.84	16.66	15.06	16.18	15.97	3.84	1.08
LB70B16	70	135	16	25.95	25.50	25.82	24.38	25.23	4.37	0.97

* These are the average cracking loads presented in Table 6

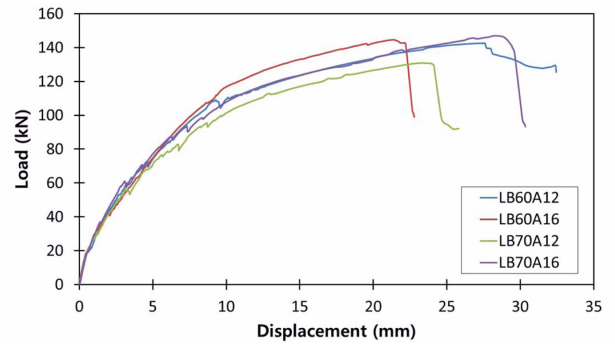


Fig. 10 Load-deflection curves of composite beams

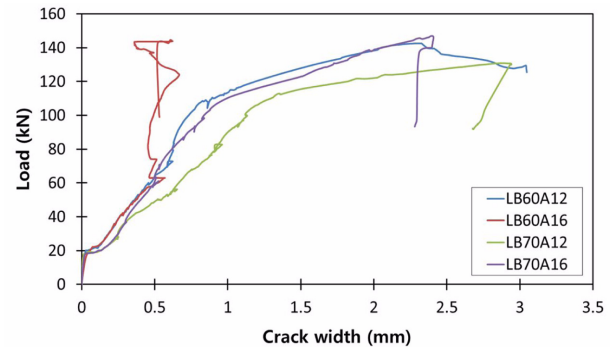


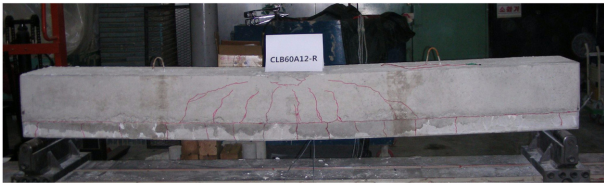
Fig. 11 Load-crack width curves of composite beams

LB60A16 부재가 79% 수준이며 나머지 부재들의 경우 최소 92% 수준 이상이었다.

4.2 합성 보부재

정적하중 재하 실험 결과 합성 보부재는 LB-DECK 콘크리트 하면에 균열이 발생할 때까지 선형적으로 거동하다가, 균열 발생 이후 비선형 거동을 보이며 최종적으로 압축을 받는 상부 콘크리트가 압축 파쇄되며 파괴하중에 도달하였다.

Fig. 10에는 합성 보부재의 하중-처짐 관계를 나타내었는데, 그림에서 합성 보부재의 휨거동은 일반적인 RC 보부재의 휨거동 양상과 특별한 차이가 없이, 균열이 발생



(a) CLB60A12



(b) CLB70A12

Fig. 12 Crack development of composite beams

하면서 휨강성이 감소되다가 압축을 받는 콘크리트 상면이 파쇄될 때까지 연성거동을 하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 합성 보부재의 하중-균열폭 관계를 나타내었다. 그림에 나타난 균열폭은 실험체에 첫 번째 발생된 균열에 대한 내용으로, 균열하중 도달시 균열폭이 일시적으로 증가되며, 균열하중을 초과하여 재하 하중이 증가함에 따라 선형적으로 균열폭이 증가하였다.

Table 9에는 하중재하 실험을 통해 얻은 합성 보부재의 균열하중과 파괴하중을 정리하였다. 결과에서 보면 합성 보부재의 균열하중 크기를 콘크리트의 휨인장강도를 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 로 가정한 상태에서 계산된 계산값과 비교하였으며, 비교 결과 그 수치는 최소 0.8보다 크게 평가되었다. 이 수치는 앞서 언급한 비합성 보부재보다 큰 수치라는 것을 알 수 있다. 또한, LB-DECK을 적용한 합성 보부재의 파괴하중 크기는 계산값에 비해 최소 1.65배 크기 때문에 충분히 안전하다는 것을 재확인할 수 있었다. LB-DECK을 적용한 합성 보부재의 휨강도가 크게 증가되는 이유는 휨강도 계산시 고려되지 않는 lattice-girder의 하부철근(bottom-bar)과 상부 철근(top-bar)이 인장철근 역할을 수행하여 실제 휨강도에 영향을 미치기 때문으로 평가되었으며, 참고로 이를 고려한 휨강도도 Table 9에 나타내었다.

Fig. 12에 최종 파괴된 합성 보부재의 파괴 형상을 나타내었다. 실험체의 파괴 형상을 보면 최종 파괴시 실험체 측면에 발생된 휨 균열과 휨 전단균열을 확인할 수 있다.

LB-DECK와 현장치기 콘크리트 사이 접합면은 파괴

하중 이전까지는 수평전단 균열이 발생하지 않았지만, 파괴하중에 도달하면서 수평전단 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 최종 파괴하중의 크기가 휨 강도로부터 계산된 극한하중보다 최소 43% 이상 크기 때문에 합성 보부재는 최소한 공칭휨강도에 해당되는 하중까지 완전합성 거동을 한다고 볼 수 있다.

5. 결 론

영구 거푸집이며 콘크리트 프리캐스트 패널의 한 종류인 LB-DECK은 교량 바닥판을 시공할 때 콘크리트 슬래브의 균열하중 크기를 기준으로 설계가 수행된다. 이 연구에서는 LB-DECK의 단면 상세중에서 콘크리트 슬래브의 두께, top-bar의 지름, 그리고 lattice-girder의 높이를 변수로 하는 비합성 보부재와 합성 보부재를 제작한 후, 실험 부재가 파괴될 때까지 정적하중을 재하하여 균열하중과 파괴하중의 크기를 평가하였다. 총 28개의 실험 부재를 이용한 실험 결과들과 이론적 연구 결과와의 비교를 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 먼저 모든 비합성 보부재는 재하 하중이 증가함에 따라 처짐이 선형적으로 증가하다가, 균열이 발생한 후 비선형 거동을 보이며 파괴하중에 도달하였다. 실험체 중앙부 하면에서 발생한 휨 균열들은 콘크리트 하면에서 시작되어 수직방향으로 진전되었으며, 파괴 하중에 가까워지면서 일부 수직균열 선단에서 수평 방향으로 균열이 전파되는 양상을 보였다. 모든 실험체에서 발생된 균열의 형태는 비슷한 양상이었으며, 최종 파괴시까지 관통 균열로 진전되지 않았다.
- 2) 비합성 보부재는 균열하중에 도달하면 균열폭이 크게 증가되는 특징을 보였으며, 균열 안정화 단계를 거치면서 균열폭이 서서히 증가되는 양상을 보였다. 따라서 LB-DECK은 시공단계에 대한 설계시 종방향 균열이 발생하지 않도록 콘크리트 균열강도의 크기를 보수적으로 산정해야할 필요성이 있다.
- 3) 비합성 보부재에 대한 실험결과 콘크리트 슬래브의 균열강도는 철근콘크리트 보 설계시 통상적으로 적용되는 콘크리트의 휨인장강도 $0.63\sqrt{f_{ck}}$ 보다 작게 평가되었다. LB-DECK의 균열강도가 작은 이유는 콘크리트 건조수축이 주요한 요인이라 판단되며, 특

Table 9 Cracking loads and ultimate loads of composite beams

Specimens	LB-DECK thickness (mm)	Lattice-girder height (mm)	Top-bar diameter (mm)	Cracking load (kN)			Ultimate load (kN)				
				Calculation ①	Test ②	② / ①	Calculation ③	Calculation ④*	Test ⑤	⑤ / ③	⑤ / ④
CLB60A12	60	125	12	23.04	20.2	0.87	81.42	107.84	142.3	1.75	1.32
CLB60B16	60	135	16	23.04	22.5	0.97	81.42	123.43	144.3	1.77	1.17
CLB70A12	70	125	12	23.16	18.5	0.80	79.24	105.66	130.6	1.65	1.24
CLB70B16	70	135	16	23.16	18.5	0.80	79.24	121.25	146.7	1.85	1.21

*Top-bar and bottom-bars are included.

히 콘크리트 슬래브 두께가 60 mm로 얇은 실험 부재들의 균열강도가 상대적으로 낮게 평가되었다.

- 4) 콘크리트 슬래브 두께가 60 mm인 비합성 보부재의 균열하중 크기는 단면상세 변화에 따른 균열하중 예측치와 많은 차이가 있었다. 하지만, 콘크리트 슬래브 두께가 70 mm인 실험 부재들의 경우 단면 상세 변화에 따른 균열하중 예측치 변화와 동일한 양상으로 균열하중 크기가 변화되었다. 따라서 LB-DECK 콘크리트 슬래브의 두께가 60 mm인 경우, 균열하중 크기를 증가시키기 위해 단면 상세를 변화시키면 오히려 균열이 발생할 위험성이 있다.
- 5) 콘크리트 슬래브의 두께를 60 mm에서 70 mm로 증가시키고, top-bar의 지름을 12 mm에서 16 mm로 증가시키는 경우 LB-DECK의 균열하중이 크게 증가되었다. 따라서 시간장이 긴 교량 바닥판에 LB-DECK을 적용하기 위해서는 콘크리트 슬래브의 두께를 포함한 단면 상세를 변경하는 방안을 도입하는 것이 필요하다고 판단되며, 이때 콘크리트 슬래브의 균열강도는 보수적인 측면에서 $0.55\sqrt{f_{ck}}$ 이하로 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.
- 6) 비합성 보부재의 최종 파괴 양상은 두 가지로 top-bar 좌굴 또는 LB-DECK 콘크리트 슬래브의 균열 진전에 따른 하중저항 능력 감소로 구분할 수 있었다. 또한 최종 파괴하중 크기는 균열하중의 최소 3.42배 이상이며, LB-DECK 설계가 콘크리트 슬래브의 균열하중 크기를 토대로 설계되기 때문에 LB-DECK은 시공시 안전성이 확보된다고 평가된다.
- 7) 합성 보부재에 대한 실험 결과, LB-DECK 균열강도의 크기는 비합성 보부재를 이용해 얻은 균열강도의 크기보다 크게 평가되었다. 따라서, LB-DECK 콘크리트 슬래브의 균열강도는 비합성 보부재의 균열강도를 적용하는 것이 안전측이라고 판단된다.
- 8) 모든 합성 보부재의 파괴하중 크기는 계산치에 비

해 최소 1.65배 컸으며, 또한 파괴하중에 도달할 때까지 LB-DECK과 현장타설 콘크리트가 완전 합성 거동을 하기 때문에 설계시 요구되는 안전성이 충분히 확보된다고 판단된다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 프리캐스트 콘크리트패널(LB-DECK)의 설계 및 시공에 관한 연구, KCI R 09-005, 2009, 235 pp.
2. 윤석구, 이재홍, 조선규, 정재동, 원용석, “LB-DECK을 이용한 철근콘크리트 바닥판의 편칭전단강도,” 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 18권, 2호, 2006, pp. 390~393.
3. 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.
4. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2005, 510 pp.
5. 윤석구, 심창수, 정철현, 장승필, “프리캐스트 교량 바닥판에 대한 종방향 프리스트레싱력의 산정 방법,” 대한토목학회 논문집, 18권, 1-6호, 1998, pp. 779~810.
6. 정철현, 심창수, 윤석구, 박기남, “프리캐스트 바닥판의 연속교 적용에 관한 연구,” 대한토목학회 논문집, 22권, 4-A호, 2002, pp. 751~760.
7. 장성욱, 윤석구, 전세진, 김영진, 형태경, “철도교용 프리캐스트 바닥판의 적정한 종방향 프리스트레스 수준의 산정,” 한국철도학회 추계 학술대회 논문집, 2005, 41 pp.
8. CEB, CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft, 1991.
9. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 기문당, 2009, 360 pp.
10. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 기문당, 2007, 327 pp.
11. Gilbert, G. J., Time Effects in Concrete Structures, Elsevier, 1988, 321 pp.
12. 배두병, 윤석구, 함상희, “콘크리트 건조수축에 의한 합성거더의 장기거동,” 한국강구조학회 논문집, 16권, 6호, 2004, pp. 807~818.

요 약 프리캐스트 콘크리트 패널의 일종인 LB-DECK은 콘크리트 교량 바닥판의 시공시 LB-DECK 위에 현장타설되는 콘크리트와 합성 거동하는 영구 콘크리트 거푸집이다. 현행 LB-DECK은 두께가 60 mm인 콘크리트 슬래브와 슬래브 내부에 높이 125 mm인 lattice-girder들의 일부가 매립되어 있는 구조이다. 이러한 LB-DECK은 시공하중에 의해 종방향 균열이 발생하지 않도록 거더 간격이 충분히 작은 교량 바닥판 시공시 주로 적용되고 있다. 이 논문에서는 최근 강박스 교량과 같이 교량 바닥판의 시간장이 긴 교량에 LB-DECK를 적용할 경우 콘크리트 하부에 발생할 수 있는 종방향 균열을 최소화시키기 위하여, LB-DECK의 균열강도를 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. LB-DECK 콘크리트 슬래브의 두께, lattice-girder의 높이, 그리고 top-bar의 지름을 변수로 하는 8종류 24개의 비합성 보부재와 4가지 종류의 합성 보부재 4개를 제작한 후 정적하중 재하실험을 수행하였다. 실험체에 대한 정적하중 재하 실험을 통해 각 실험체의 균열하중과 극한하중을 평가하였으며, 또한 최종 파괴시까지 중앙부 처짐, top-bar의 변형률, 콘크리트 슬래브의 균열 진전 양상 그리고 최종 파괴 형태를 살펴보았다. 각 실험체로부터 얻은 균열하중의 크기는 탄성해석을 통해 얻은 해석치와 비교하였다. 또한 콘크리트 건조수축이 균열강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 AEMM 방법을 이용한 장기 거동 해석을 수행하였다. 실험 결과를 토대로, 시간장이 긴 교량 바닥판에 LB-DECK 적용시, 균열 발생을 예방할 수 있도록 LB-DECK 콘크리트 슬래브의 균열강도와 설계상세를 검토하였다.

핵심어 : 교량 바닥판, 프리캐스트 콘크리트 패널, 영구 거푸집, 균열, LB-DECK