



슬래브 형식 프리캐스트 모듈러교량 종방향 연결부의 휨강도 및 균열 사용성에 관한 정적재하실험

이정미¹⁾ · 이상윤^{1)*} · 송재준¹⁾ · 박경훈¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 구조융합연구소

Static Load Tests on Flexural Strength and Crack Serviceability of a Longitudinal Joint for the Slab-Type Precast Modular Bridges

Jung-mi Lee,¹⁾ Sang-Yoon Lee,^{1)*} Jae-Joon Song,¹⁾ and Kyung-Hoon Park¹⁾

¹⁾Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Structural Engineering Research Institute, Goyang, 411-712, Korea

ABSTRACT The slab-type precast modular bridge consists of the precast slab bridge modules which are connected in the transverse direction. The longitudinal joints between the precast slab bridge modules are filled with cast-in-place mortar. The construction of the slab-type precast modular bridge is completed by applying the prestressing force on the longitudinal joints. In this study, 4-points bending tests and 3-points bending tests were conducted to examine the effects of the prestressing force and the shape of joint on the flexural strength and crack serviceability of longitudinal joint. The results of 4-points bending tests showed that the flexural strength is affected by the prestressing force but not by the shape of joint. From the results of 3-points bending tests by which the bending moment and the shear force are simultaneously applied on the joints of the specimens, it is observed that the shape of joint affects on the flexural strength and the crack behavior. The results of two types of bending tests confirmed that the prestressing force according to the design code is appropriate and the joint with two shear keys gives the better performances against the crack of joint.

Keywords : slab bridge, modular bridge, joint, shear key, prestressing force

1. 서 론

모듈러교량은 소프트웨어, 기계, 자동차, 플랜트 등의 분야에서 적용되어 오던 모듈러 기술을 교량 건설 분야에 적용하는 것으로서, 사전 제작된 표준화된 모듈을 조합하여 다양한 현장 조건에 대응할 수 있도록 만드는 교량 시스템으로 단면, 폭, 길이 방향으로 확장이 가능하고 간편 조립이 가능한 교량 시스템이다.¹⁾ 모듈러교량의 국내외 기술수준을 살펴보면 국외의 경우에는 임시교량용으로 제한되어 제작되고 있으며, 국내의 경우에는 모듈러교량 기술이 아직 정립되어 있지 않은 상태이다.

프리캐스트 모듈러교량은 모듈러 기술에 프리캐스트 콘크리트 기술을 접목시킨 교량 시스템으로서 교량의 상부구조 대부분을 표준화된 프리캐스트 모듈로 제작하여 현장에서 빠른 시간 내에 조립해 교량을 완성하는 형식으

로서 대부분의 부재가 표준화된 프리캐스트 모듈로 제작된다는 점에서 기존의 프리캐스트 콘크리트와 차이를 갖는다고 할 수 있다.²⁾

슬래브 형식의 프리캐스트 모듈러교량은 Fig. 1과 같이 횡방향으로 분절되어 미리 제작된 프리캐스트 모듈을 현장에서 조립하여 교량을 완성하는 형태의 교량이다. 횡방향으로 분절된 프리캐스트 모듈 사이에는 종방향의 연결부가 형성되며, 프리캐스트 모듈의 조립은 횡방향으로 분절된 프리캐스트 모듈 사이에 고성능 무수축 모르타르를 주입한 후에 횡방향으로 긴장력(PS, Prestressing force)을 도입함으로써 이루어진다.³⁾

이상윤 등(2012)은 슬래브 형식 프리캐스트 모듈러교량의 연결부의 형상을 결정하기 위한 연구를 수행하였으며, 이 연구에서 두 개의 전단키를 가지며 20 mm 이하의 연결부의 폭을 갖는 연결부의 형상을 효율적인 안으로 제시하였다. 이 연구에서 결정된 연결부의 형상은 직접 전단 실험 및 해석을 바탕으로 전단성능과 단면 효율을 최적화 할 수 있는 형태로 제안된 것으로, 최종적인 단면 형상을 결정하기 위해서는 휨 성능 및 사용성에 미치는

*Corresponding author E-mail : sylee@kict.re.kr
 Received August 13, 2014, Revised December 18, 2014,
 Accepted December 22, 2014
 ©2015 by Korea Concrete Institute

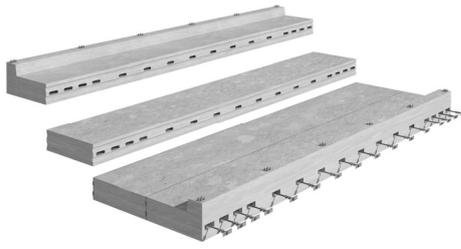


Fig. 1 Concept of the slab-type precast modular bridge

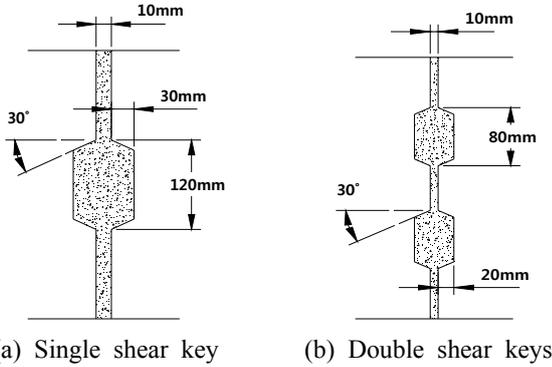


Fig. 2 Shape and dimensions of longitudinal joint

영향에 대한 검토가 추가적으로 필요하다.

슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량의 연결부에는 보강재 없이 모르타르만이 채워지므로 연결부의 휨강도 및 균열 사용성을 확보하기 위해서는 적절한 수준의 긴장력이 도입되어야 한다. 정철현 등(1998)은 보강재 없이 모르타르를 채우는 형태의 프리캐스트 콘크리트 바닥판에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에서 프리캐스트 바닥판이 일체로 거동하기 위해 필요한 긴장력의 크기(압축응력=0.245 MPa)가 검토되었다.⁴⁾ 슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량의 연결부는, 교축직각방향으로 형성되어 사용하중에 의해 압축응력의 작용을 받는 교량 바닥판의 연결부와 달리, 2방향 슬래브로 거동하는 슬래브 교량의 교축방향으로 형성되어 사용하중에 의해 휨 모멘트가 작용하는 구조적 특징을 갖는다.⁵⁾ 즉, 슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량의 연결부는 프리캐스트 바닥판의 연결부와 달리 사용하중에 의해 휨모멘트의 작용을 받는 구조이므로 각 지간별 단면 높이에 맞는 적절한 긴장력이 결정되어야 한다.

본 연구에서는 슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량의 연결부를 적용한 실험체를 이용하여 휨 성능 실험을 수행하였으며, 연결부의 휨 거동을 바탕으로 설계단계에서 산정된 횡방향 도입 긴장력 수준의 적정성, 연결부의 형상이 휨 거동에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 연결부 형상 및 횡방향 설계

이상윤 등(2012)의 연구에서 최종적인 종방향 연결부의 단면 형상은 Fig. 2(b)와 같이 두 개의 전단키를 갖는 구조로 제시되었다. 이상윤 등(2012)의 연구 결과에 따르

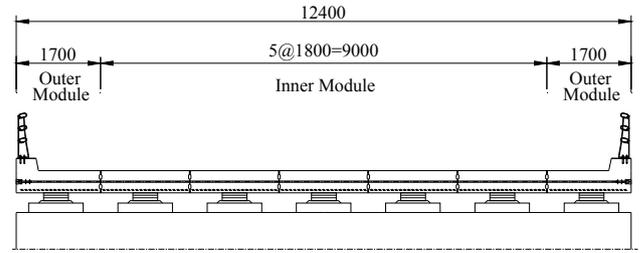


Fig. 3 Cross-section of the slab-type precast modular bridge (L=10.0 m)

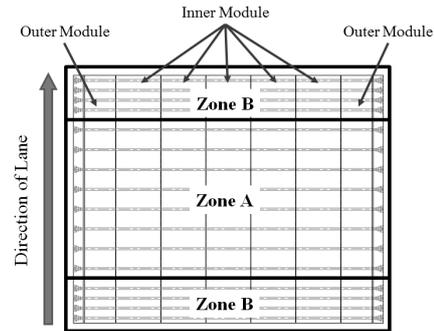


Fig. 4 Arrangement of PT tendons and classification of area for the safety check

면, 두 개의 전단키를 갖는 연결부는 하나의 전단키를 갖는 구조(Fig. 2(a))와 비교하여 유사한 전단강도를 유지하면서 단면적을 줄일 수 있는 장점이 있다. 종방향 연결부에 적용되는 긴장력은 연결부에 채워진 모르타르와 프리캐스트 슬래브 모듈 간의 계면에 적절한 수준의 압축력이 작용하도록 하여 연결된 모듈들이 일체화된 거동을 하도록 하는 역할을 한다. PS 강재는 단면 높이의 중심에 위치하도록 하여, 긴장력의 편심 효과로 인한 불필요한 솟음과 편심 모멘트의 발생을 방지하였다.

슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량의 설계는 종방향 단면 설계와 횡방향 설계로 이루어진다. 종방향 단면 설계에서는 슬래브 모듈의 단면 높이, 폭, 그리고 프리텐션 PS 강재량이 결정되며, 횡방향 설계에서는 횡방향 단면에 대한 응력 검토 결과로부터 연결부에 적용되는 긴장력(이하, 횡방향 긴장력) 및 PS 강재량이 결정된다.

이 연구에서 수행한 연결부에 대한 휨 성능 검증은 지간장 10 m를 갖는 슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량을 대상으로 하였으며, Fig. 3은 종방향 설계에 의해 결정된 종방향 단면 형상을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 연석을 제외한 슬래브의 높이는 450 mm이며, 운반중량을 고려하여 횡방향으로 7개의 모듈로 분절된 구조를 갖도록 계획되었다. 받침은 각 모듈의 중앙에 위치하도록 하였다. 이러한 종방향 단면 설계 결과를 바탕으로 교축직각방향으로 배치되는 PS 강재량을 결정하기 위한 횡방향 설계를 수행하였다.

슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량의 종방향 연결부에 작용하는 전단력과 모멘트는 횡방향 긴장력이 도입된

이후에 교량에 작용하는 2차고정하중(포장 및 방호울타리 하중)과 활하중에 의해 발생한다. 횡방향 긴장력은 2차고정하중과 활하중에 의해 교축직각방향(횡방향)으로 발생하는 모멘트에 의한 인장응력을 상쇄하는 소정의 압축응력이 유지될 수 있는 수준으로 결정된다. 교축직각 방향으로 작용하는 모멘트와 전단력은 교축방향을 기준으로 지점부에 가까울수록 크게 발생하기 때문에, Fig. 4와 같이 지간중양부(zone A)에 비해 지점부(zone B)에 보다 많은 양의 횡방향 긴장재가 배치되어야 한다.²⁾

Table 1은 지간중양부(Zone A)와 지점부(Zone B)의 횡방향 PS 강재량을 결정하기 위한 설계결과를 정리한 것이다. 설계결과, 지간중양부와 지점부에 직경 15.2 mm를 갖는 강선을 기준으로 각각 6 EA/m와 12 EA/m의 긴장재가 필요한 것으로 산정되었다. 도로교설계기준(국토해양부, 2010)에 따르면 프리캐스트 블록 이음부에서는 활하중 및 충격하중에 의한 응력을 70% 할증시켜 계산한 단면의 휨인장응력이 2.5 MPa를 넘지 않아야 한다.⁶⁾ Table 1에서 횡방향 단면에 적용된 PS 강재량과 긴장력을 기준으로 계산된 연결부의 응력(f_{bottom} in service)은 이 규정

을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

설계결과를 바탕으로, 지간중양부와 지점부에 실제로 적용되는 강연선은 15.2 mm 강선 5가닥을 한 묶음으로 하는 플랫덕트(flat duct)를 기준으로 각각 800 mm와 400 mm 간격으로 배치되었다. 즉, 지간중양부에는 6.25 EA/m의 PS 강재가 배치되고, 지점부에는 12.5 EA/m의 강재가 배치되어 필요한 PS 강재량을 만족시킬 수 있다.

3. 성능 검증 실험

본 연구에서는 설계단계에서 계산된 횡방향 긴장력의 적절성 및 연결부의 형상이 휨 거동 및 균열 거동에 미치는 영향을 검토하기 위해 슬래브 형식 프리캐스트 모듈러교량의 종방향 연결부에 대한 휨 실험을 실시하였다. 휨 실험에 대한 실험변수로는 횡방향 긴장력의 크기와 연결부 형상(전단키의 수)을 적용하였다. 휨 실험은 휨강도 검토와 균열 사용성 검토라는 두 가지의 목적에 따라 각각 4점 재하 휨 실험과 3점 재하 휨 실험으로 구분하여 수행되었다.

Table 1 Amount of PS strands and results of stress check

Zone	Shear forces (kN/m) & Moments (kN·m/m) in transverse direction				# of Strands ³⁾ (EA/m)	PS forces (kN/m)			Stresses after PS (MPa)		Stresses in service (MPa)	
	V_{DL2} ¹⁾	V_{LL} ²⁾	M_{DL2} ¹⁾	M_{LL} ²⁾		$F_{jacking}$ ⁴⁾	F_{ps1} ⁵⁾	F_{pe} ⁶⁾	f_{top} ⁷⁾	f_{bottom} ⁸⁾	f_{top}	f_{bottom}
A	5.8	128.3	4.4	75.4	6	1091.0	1077.4	994.8	3.15	1.63	6.90	-2.48
B	7.7	113.8	2.5	112.1	12	2477.0	2253.6	2046.2	5.48	4.54	10.74	-1.64

¹⁾ V_{DL2} (M_{DL2}) : Shear force (Moment) induced by additional dead load (2nd dead load)

²⁾ V_{LL} (M_{LL}) : Shear force (Moment) induced by live load (DB-24, DL-24) including dynamic impact (impact factor = 0.3)

³⁾ Diameter of strand = 15.2 mm; Type of strand : SWPC7BL (KS D 7002; Korean Agency for Technology and Standards, 2011)

⁴⁾ $F_{jacking}$: Jacking force

⁵⁾ F_{ps1} : PS force considering short-term loss of PS force

⁶⁾ F_{pe} : Effective PS force considering long-term loss of PS force

⁷⁾ f_{top} : Concrete stress at top of section in transverse direction

⁸⁾ f_{bottom} : Concrete stress at bottom of section in transverse direction

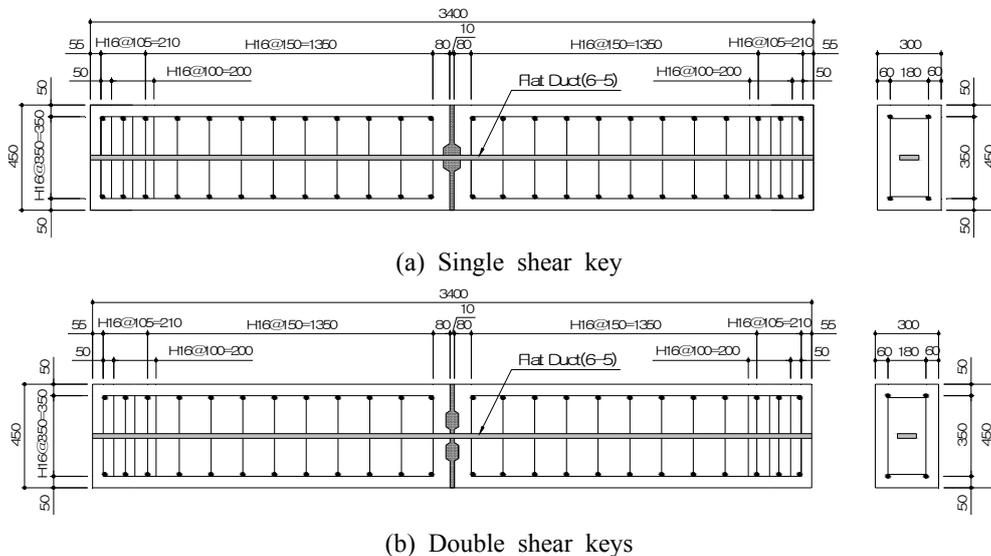


Fig. 5 Specimen configuration for 4-points bending test

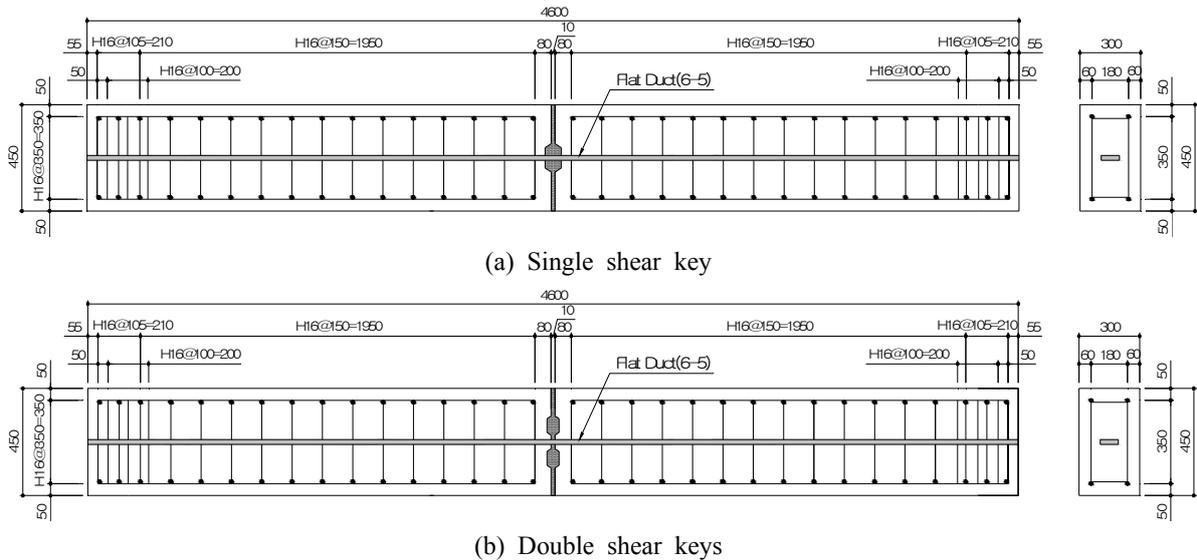


Fig. 6 Specimen configuration for 3-points bending test

3.1 실험체 제작

Fig. 5와 6은 4점 재하 휨 실험과 3점 재하 휨 실험을 위한 실험체의 제원을 나타낸 것이다. 휨강도 검토를 목적으로 하는 4점 재하 휨 실험은 전단키의 수와 횡방향 긴장력의 크기가 실험변수로 적용되었으며, 균열 사용성 검토를 목적으로 하는 3점 재하 휨 실험은 전단키의 수만을 실험변수로 적용하였다.

실험체의 단면은 모든 실험체에 동일하게 적용하였으며, 실험체의 길이는 하중 재하 방법에 따라 설계단계에서 계산된 모멘트와 전단력이 실험체에 작용할 수 있도록 계산된 적절한 지간장을 기준으로 양측으로 200 mm 씩 연장된 길이로 적용하였다.

Table 2는 실험체의 종류와 각 실험체에 대한 실험변수를 정리한 것이다. Table 2에서 100%에 해당하는 긴장력(PS force)은 실험체 단면 하단의 응력이 설계결과와 동일한 수준이 되도록 하는 횡방향 긴장력을 의미한다. 즉, 횡방향 긴장력(100%)은 하중을 재하하기 전에 실험체의 단면 하단에 작용하는 응력이 Table 1의 B 구역에 대한 설계결과와 같이 긴장력 도입 직후에 단면 하단에 발생하는 응력(stress after PS, f_{bottom})과 같아지도록 결정되었다. 4점 재하 휨 실험에서 횡방향 긴장력의 변화에 의한 거동을 비교하기 위해 100%의 횡방향 긴장력을 기준으로 $\pm 20\%$ 의 변동폭을 주어 실험체를 제작하였다. 20%의 긴장력이 도입된 실험체(SK2-PS20-4P)는 긴장력이 도입되지 않은 상태를 모사하기 위해 제작된 실험체로서 췌기의 정착에 필요한 최소한의 긴장력이 도입된 것이다.

Fig. 7은 실험체의 연결부 타설이 완료된 모습을 보여주고 있다. 실험체는 프리캐스트 모듈에 해당하는 부분의 제작이 완료된 후 2개의 프리캐스트 모듈을 연결부 간격 10 mm에 맞춰 배치한 후에 고성능 무수축 모르타르를 연결부에 주입하였다. 이때, 연결부 측면과 하면에

는 목재를 이용하여 거푸집을 설치하였다.

기준에 시공된 프리캐스트 콘크리트의 설계기준압축강도를 살펴보면 미국의 Dalton교 46 MPa, Fremont Street 교 42.2 MPa이며, 일본의 井根地교와 毛利교는 50 MPa로서 40 MPa 이상의 설계기준압축강도를 가지도록 시공되었다.⁷⁾ 재료비의 큰 증가가 없다면 콘크리트의 설계압축강도가 증가할수록 휨강도와 연결부의 전단강도가 증가하는 이점을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 재료비의 큰 증가 없이 수급과 품질 관리가 용이한 범위 내에 있는 콘크리트의 설계압축강도인 50 MPa를 프리캐스트 모듈에 적용하였으며, 실험 시점에서 발현된 압축강도는 평균 48.9

Table 2 Experimental parameters for bending tests

Label	Shear key (EA)	PS Force (%)
SK1-PS100-4P	1	100
SK2-PS20-4P	2	20
SK2-PS80-4P		80
SK2-PS100-4P		100
SK2-PS120-4P		120
SK1-PS100-3P	1	100
SK2-PS100-3P	2	100



Fig. 7 View of specimens

MPa 수준이었다. 연결부에 타설된 고성능 무수축 모르타르의 설계기준압축강도는 80 MPa이며, 실험 시점에서 발현된 압축강도는 평균 88 MPa 수준이었다.

3.2 실험 세팅 및 계측

실험은 1,000 kN 용량의 가력기를 사용하여 변위를 제어하는 방식으로 진행하였다. Fig. 8은 4점 재하 실험과 3점 재하 실험의 하중 재하 개요를 나타낸 것이다. 4점 재하 휨 실험(Fig. 8(a))은 순수 휨모멘트에 의한 연결부의 휨 거동 및 휨강도를 검토하기 위한 목적으로 계획된 것으로, 지간 길이는 지점부에 대한 전단보강이 필요하지 않은 수준의 재하하중에 의해 지간 중앙부에 사용하중(2차 고정하중 + 활하중)에 의한 휨모멘트가 발생하도록 결정되었다. 3점 재하 휨 실험(Fig. 8(b))은 연결부에 사용

하중에 의한 전단력과 휨모멘트를 동시에 적용시켜 연결부에 발생하는 균열에 대한 사용성을 검토하기 위한 목적으로 계획되었다. 3점 재하 휨 실험에 적용된 하중 조건은 축하중(axial load)이 연결부에 인접한 위치에 있는 사용하중 상태를 모사한 것이다. 이러한 조건은, 최대 모멘트가 발생하는 위치에 축하중을 적용하는 일반적인 하중 조건에 비해, 모멘트는 크게 감소하지 않고 전단력이 추가적으로 작용하는 조건이 된다. 따라서, 3점 재하 휨 실험의 하중 조건은 일반적으로 적용하는 사용하중 상태에 비해 보다 보수적인 상태를 모사한 것이라 할 수 있다. 3점 재하 휨 실험의 지간 길이와 하중의 위치는 사용하중에 의해 모듈 연결부에 작용하는 모멘트와 전단력이 실험체의 연결부에 작용하도록 결정되었다.

4점 재하 휨 실험의 경우 재하 하중에 의한 변위를 측정하기 위해 실험체 중앙부(연결부)의 앞면과 뒷면에 각각 1개의 변위계(LVDT)를 설치하였으며, 실험체의 하단에 균열이 발생한 이후에도 안정적으로 변위를 계측하기 위해 실험체의 양측면에 부착된 L-형 앵글로부터 변위를 계측하였다. 3점 재하 휨 실험의 경우에는 실험체 중앙부(연결부)와 가력 지점의 앞면과 뒷면에 각각 1개의 변위계를 설치하였으며, 4점 재하 휨 실험과 같이 실험체의 측면에 설치된 L-형 앵글로부터 변위를 계측하였다. 실험체에 발생한 균열의 폭을 측정하기 위해 초기 균열이 확인된 시점에서 하중을 제거하고 균열이 발생한 위치에 균열 게이지를 설치하였으며, 하중을 다시 가력하면서 균열 폭을 측정하였다. Fig. 9는 휨 실험 전경을 나타낸 것이다.

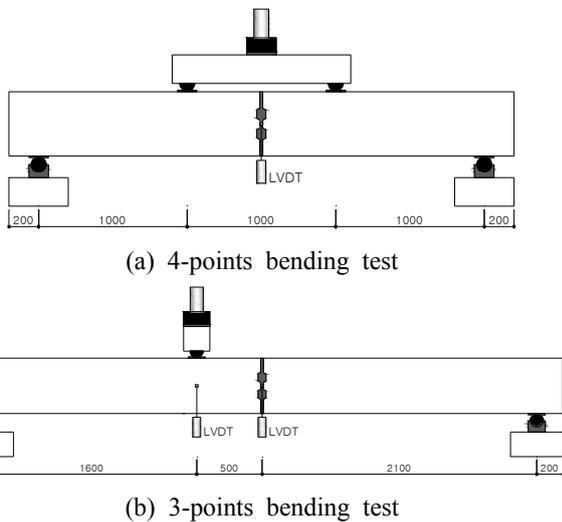
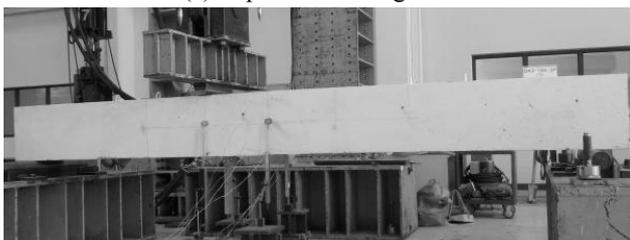


Fig. 8 Setup for bending tests



(a) 4-points bending test



(b) 3-points bending test

Fig. 9 View of bending tests

4. 실험 결과 및 분석

4.1 4점 재하 휨 실험

Fig. 10은 4점 재하 휨 실험에 의한 실험체의 균열 및 파괴 형태를 나타낸 것이다. 균열은 모두 연결부에 집중되어 발생하였으며, 최종적인 파괴는 상단의 콘크리트 압축파괴로 발생하였다. 즉, 슬래브 형식 모듈러교량의 횡방향 휨 거동에 있어서 연결부 단면이 가장 취약한 단면이라 할 수 있으며, 교량 전체의 성능을 확보하기 위해서는 연결부에 대한 시공품질과 긴장력에 대한 관리가 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 11은 4점 재하 휨 실험체의 모멘트-변위 곡선을 나타낸 것이며 Table 3은 실험결과로서, 실험체에 초기 균열이 발생하는 시점의 모멘트인 균열 모멘트(M_{cr})와 휨파괴가 발생하는 시점의 모멘트인 최대 모멘트(휨강도; M_{max}), 사용하중에 의한 모멘트($M_s = M_{DL2} + M_{LL}$) 및 극한하중에 의한 모멘트($M_u = 1.3M_{DL2} + 2.15M_{LL}$)를 비교하여 정리한 것이다. 4점 재하 휨 실험 결과, 모든 실험체의 휨강도는 극한하중에 의한 모멘트에 비해 약 10~75% 이상 높게 나타났다. 그리고 20%의 긴장력이 도입된 실험체(SK2-20-4P)를 제외한 모든 실험체의 균열 모멘트가 사용하중에 의

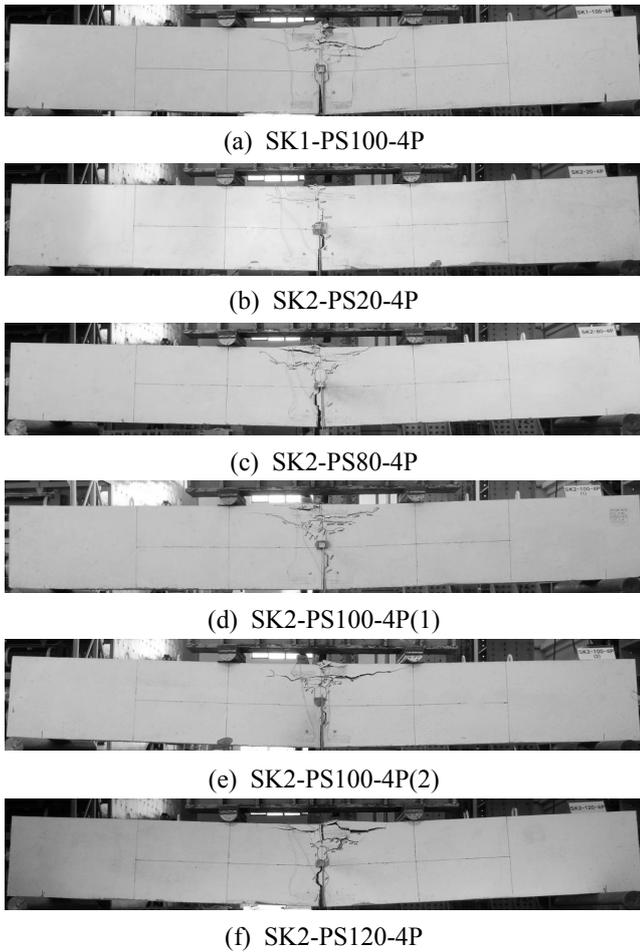


Fig. 10 Crack pattern of 4-points bending specimens

한 모멘트에 비해 약 13~90% 이상 높게 나타남으로서 사용하중 내에서는 선형탄성적으로 거동하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 80%의 긴장력이 도입된 실험체(SK2-80-4P)의 균열 모멘트가 사용하중에 의한 모멘트에 비해 약 13% 정도 높게 나타남으로서, 긴장력을 80%만 도입할 경우에는 선형탄성거동의 한계가 사용하중의 수준과 거의 유사하게 나타날 가능성이 높을 것으로 예상된다. 따라서 사용하중 내에서의 사용성과 극한하중에 대한 휨강도를 충분히 확보하기 위해서는 설계상에서 필요로 하는 긴장력(100%)이 확보되어야 할 것이다.

당연한 결과이지만, 긴장력이 증가하면서 실험체의 균열 모멘트와 휨강도가 증가하는 것을 Fig. 11과 Table 3에서 확인 할 수 있다. 증가된 긴장력은 단면 하단에 보다 큰 압축응력을 작용시켜 균열 발생 시점을 지연시키고 균열의 폭과 깊이가 진전하는 시기도 늦춰지게 하기 때문에 균열 모멘트와 휨강도가 모두 증가하는 결과로 이어진다고 할 수 있다.

100%의 긴장력이 도입되고 연결부에 형성된 전단키의 개수가 한 개인 실험체(SK1-100-4P)와 전단키의 개수가 두 개인 실험체(SK2-100-4P)는 Fig. 11과 같이 유사한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 휨강도의 경우 전단키 두 개인 실험체가 하나인 실험체보다 약 6% 정도 더 높게

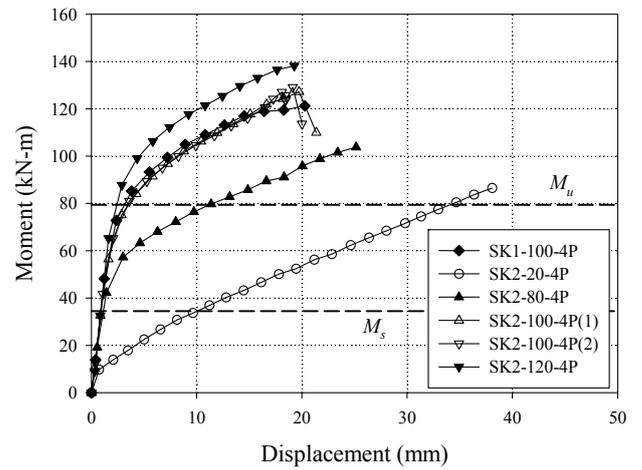


Fig. 11 Moment-displacement curves of 4-points bending test specimens

Table 3 Experimental results of 4-points bending tests

Specimen	M_{cr} (kN·m)	M_{max} (kN·m)	M_s (kN·m)	M_u (kN·m)	M_{max}/M_u
SK1-PS100-4P	57.8	122.0	34.5	79.4	1.5
SK2-PS20-4P	9.73	87.4	34.5	79.4	1.1
SK2-PS80-4P	39.0	105.0	34.5	79.4	1.3
SK2-PS100-4P(1)	55.8	128.5	34.5	79.4	1.6
SK2-PS100-4P(2)	57.7	129.5	34.5	79.4	1.6
SK2-PS120-4P	65.4	138.9	34.5	79.4	1.7

나타났으며, 균열 모멘트의 경우에는 전단키 한 개인 실험체가 두 개인 실험체보다 약 2% 정도 높았을 뿐 연결부 개수에 따른 실험체의 휨 거동은 거의 유사하게 나타났다. 연결부 단면 형상의 변화는, 연결부 계면의 부착면적의 변화를 무시한다면, 연결부 계면의 법선방향으로 작용하게 되는 휨인장응력에 저항할 수 있는 구조적인 변화가 없기 때문에 연결부의 휨성능에 미치는 영향이 없는 것으로 판단된다. 다만, 순수한 휨모멘트가 작용하는 상태가 아닌 전단력이 동시에 작용하는 상태에서는 연결부 형상의 변화에 의해 전단력에 저항하는 구조가 변화되기 때문에 휨거동에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

결과적으로, 긴장력의 변화는 연결부의 휨거동(균열 모멘트와 휨강도)에 영향을 미치며 연결부 단면 형상의 변화는 순수 휨모멘트가 작용하는 연결부의 휨거동에는 영향을 미치지 못한다는 것을 알 수 있다.

4.2 3점 재하 휨 실험

Fig. 12는 3점 재하 휨 실험에 의한 실험체의 균열 및 파괴 형태를 나타낸 것이다. 균열은 연결부와 최대 모멘트가 발생하는 단면인 가력 지점의 하단에서 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 더 이상의 균열의 확산 없이 초기에 발생한 균열의 폭과 깊이가 증가하는 거동을 보

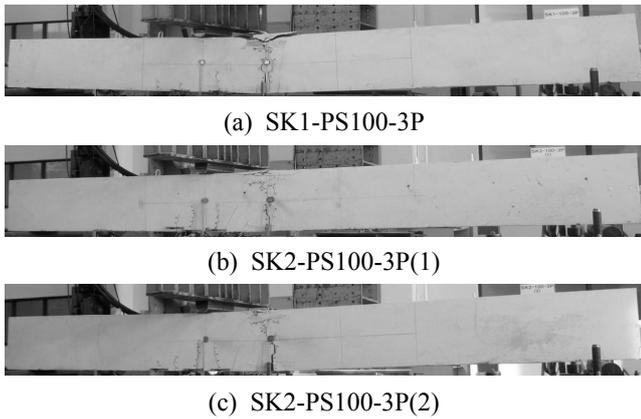


Fig. 12 Crack pattern of crack serviceability test

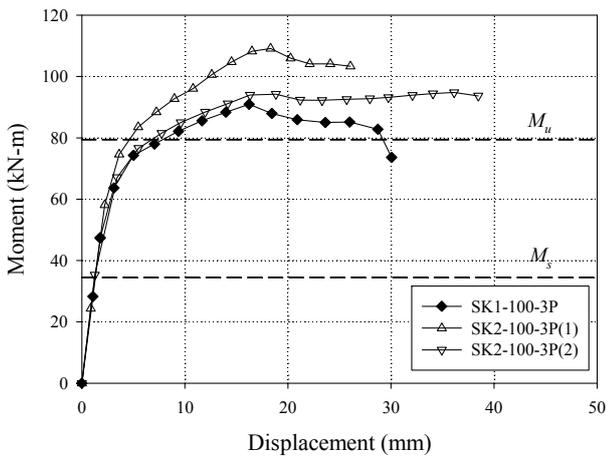


Fig. 13 Moment-displacement curves of 3-points bending test specimens

였다. 3점 재하 휨 실험체의 최종적인 파괴는 4점 재하 휨 실험체와 동일하게 상단의 콘크리트 압축파괴로 발생하였으며, 콘크리트의 압축파괴는 하중이 가력된 지점이 아닌 연결부의 상단에서 발생하였다. 이러한 결과는 초기 균열이 발생한 이후에 불연속단면인 연결부에 발생한 균열이 연속단면인 하중 가력지점의 하단에서 발생한 균열에 비해 빠르게 진전하였기 때문인 것으로 판단된다. 3점 재하 휨 실험의 주요 변수인 연결부의 형상에 따라 육안으로 확인될 만한 균열 및 파괴 거동의 차이는 확인되지 않았다.

Fig. 13은 3점 재하 휨 실험체의 모멘트-변위 곡선을 나타낸 것이며, Table 4는 실험체의 균열 모멘트(M_{cr})와 최대 모멘트(M_{max}), 사용하중에 의한 모멘트(M_s), 그리고 도로교설계기준(한국도로교통협회, 2010)에서 제시하는 허용균열폭(W_a)과 사용하중(M_s)에 의한 실험체의 균열폭(W_c)을 비교하여 정리한 것이다. Table 4에 나타난 사용하중(M_s)에 의한 균열폭(W_c)은 초기 균열이 확인된 이후에 하중을 제거하고 균열 게이지를 설치한 뒤에 하중을 다시 재하하면서 측정한 값이다.

3점 재하 휨 실험체는 Fig. 13과 같이 사용하중(M_s) 내

Table 4 Experimental results of 3-points bending tests

Specimen	M_{cr} (kN·m)	M_{max} (kN·m)	M_s (kN·m)	W_c (mm)	W_a (mm)
SK1-PS100-3P	44.9	92.3	34.5	0.038	0.25
SK2-PS100-3P(1)	54.6	111.2	34.5	0.029	0.25
SK2-PS100-3P(2)	50.3	96.3	34.5	0.039	0.25

에서 선형탄성적으로 거동하였으며, 균열 모멘트(M_{cr})는 Table 4와 같이 사용하중에 의한 모멘트에 비해 약 30~58% 정도 더 크게 나타났으므로 사용하중에 의한 연결부의 균열가능성은 낮다고 할 수 있다. 3점 재하 휨 실험체의 휨강도와 균열 모멘트는 동일한 긴장력(100%)이 도입된 4점 재하 휨 실험체에 비해 휨강도의 경우 평균 21%, 균열 모멘트의 경우에는 평균 13% 정도 낮게 발생되었다. 이러한 결과는 순수한 휨모멘트만이 작용하는 4점 재하 휨 실험과 비교하여 3점 재하 휨 실험에서는 연결부에 전단력에 의한 변형이 가중되었기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 3점 재하 휨 실험은 4점 재하 휨 실험과 비교하여 보수적인 결과를 얻을 수 있는 방법인 것으로 판단된다.

3점 재하 휨 실험에서는 이러한 전단력의 영향으로 인해 연결부 형상의 변화에 의한 거동의 차이를 명확히 확인 할 수 있었다. Fig. 13과 Table 4를 통해 알 수 있듯이, 두 개의 전단기가 형성된 연결부를 갖는 실험체(SK2-100-3P)의 휨강도는 한 개의 전단기를 갖는 실험체(SK1-100-3P)에 비해 크기는 약 20% 정도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 균열 모멘트 역시 한 개의 전단기가 형성된 실험체에 비해 두 개의 전단기가 형성된 실험체에서 크기는 약 22% 정도 높게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 두 개의 전단기를 갖는 연결부가 하나의 전단기를 갖는 연결부에 비해 휨강도 및 균열강도 발생 측면에서 유리한 구조라고 할 수 있다. 또한, 연결부 채움재로 사용되는 고성능 무수축 모르타르는 일반 콘크리트에 비해 고가의 재료이므로 연결부 형상은 구조 성능과 경제성이 동시에 고려되어야 한다. Fig. 2에 나타난 두 가지의 연결부 단면에서 두 개의 전단기를 갖는 연결부의 단면적은 하나의 전단기를 갖는 연결부의 단면적에 비해 약 11% 감소한 단면적을 갖는다. 따라서, 두 개의 전단기를 갖는 연결부의 형상이 하나의 전단기를 갖는 연결부의 형상에 비해 향상된 성능과 경제성을 갖는 단면이라 할 수 있다.

사용하중에 의한 균열폭(W_c)은 허용균열폭(W_a)의 약 16% 이하의 수준이었으며, 연결부의 형상에 따라서 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 전술한 바와 같이 사용하중에 의한 균열폭은 균열이 이미 발생한 상태에서 하중을 재하하면서 측정한 것이므로, 실제로 사용하중에 의해 균열이 발생한다는 것을 의미하지는 않는다. 다만, 연결부 모르타르와 프리캐스트 모듈 간의 연결면이 분리되어 있다고 하더라도 사용하중에 의해서는 도로교설계기준(한국도로교통협회, 2010)에서 제시하는 허용균열폭을 넘지

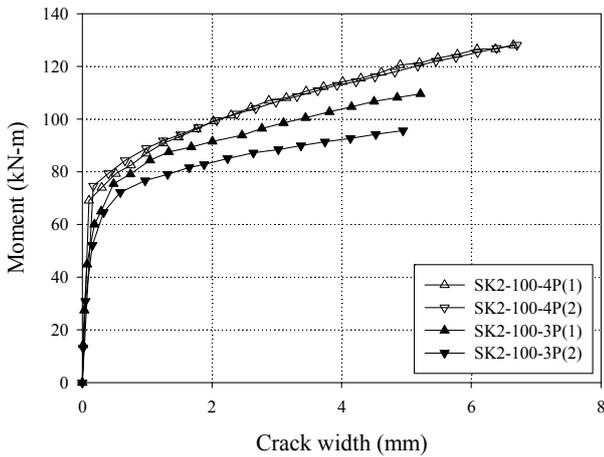


Fig. 14 Moment-crack width curves of 4-points and 3-points bending test specimens

않으므로 사용성을 만족할 수 있다는 데에 의미가 있다고 판단된다.

Fig. 14은 두 실험 방법(4점 재하 휨 실험과 3점 재하 휨 실험)이 균열폭에 미치는 영향을 검토하기 위해 두 실험 방법에 의한 모멘트-균열폭 곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 두 개의 3점 재하 휨 실험체는 모멘트-균열폭 거동에서 다소 간의 차이를 보였지만, 4점 재하 휨 실험체와 비교하여 약 10% 이상 낮은 하중에서 동일한 균열폭을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 3점 재하 휨 실험 방법은 휨강도, 균열 모멘트뿐만 아니라 균열폭에서도 4점 재하 휨 실험 방법에 비해 보수적인 결과를 준다는 것을 확인할 수 있다. 이는 4점 재하 휨 실험의 경우에는 하중 재하 시 실험체 연결부에 휨 모멘트만 작용하지만, 3점 재하 휨 실험의 경우에는 휨 모멘트와 전단력이 함께 작용하기 때문이다. 즉, 균열 사용성 검토를 위해서는 4점 재하 휨 실험 보다는 3점 재하 휨 실험이 보다 보수적인 방법이라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 슬래브 형식 프리캐스트 모듈러교량의 연결부에 도입되는 긴장력과 연결부의 형상(전단키의 수)이 연결부의 휨거동 및 균열 거동에 미치는 영향을 검토하기 위해 4점 재하 휨 실험 및 3점 재하 휨 실험을 수행하였으며, 이를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 4점 재하 휨 실험 결과, 연결부에 도입된 긴장력은 연결부의 휨강도와 균열 모멘트를 향상시키는 영향을 미치지만 연결부의 형상은 영향을 미치지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 사용성과 극한하중에 대한 휨강도를 확보하기 위해서는 도로교설계기준의 프리캐스트 블록 이음부에 대한 규정을 바탕으로 계산된 긴장력의 100% 이상 확보되어야 할 것이다.
- 2) 3점 재하 휨 실험 결과, 도로교설계기준의 프리캐스

트 블록 이음부에 대한 규정을 바탕으로 계산된 긴장력의 100%가 도입된 연결부의 균열 모멘트는 사용하중에 의한 모멘트에 비해 큰 것으로 나타났다. 특히, 연결부 모르타르와 프리캐스트 모듈 간의 연결면이 분리되어 있다고 하더라도 균열에 대한 사용성을 만족하는 것으로 나타났다.

- 3) 사용하중 상태를 보다 보수적으로 고려한 3점 재하 휨 실험 결과로부터 판단하면, 두 개의 전단키를 갖는 연결부가 하나의 전단키를 갖는 연결부에 비해 휨강도 및 사용성 측면에서 유리한 구조라고 할 수 있다.
- 4) 결론적으로, 휨강도를 확보하기 위해서는 도로교설계기준의 프리캐스트 블록 이음부에 대한 규정을 바탕으로 계산된 긴장력 100% 이상이 도입되어야 하며, 순수 휨모멘트가 작용하는 경우에는 연결부의 형상이 휨강도에 미치는 영향은 없지만 휨모멘트와 전단력이 동시에 작용하는 경우에는 두 개의 전단키를 갖는 연결부가 보다 향상된 성능을 갖는다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(10기술혁신B01-직선교량의 공사기간 단축을 위한 표준모듈 활용 조립식교량 기술개발 연구단)에 의해 수행되었습니다.

References

1. RIST and KICT, *Research & business development of modular bridge*, Land Transport and Maritime R&D Report, 10CTIPB01, The Construction Technology Innovation Program, MLTM, 2012.
2. Lee, S. Y., Song, J. J., Lee, Y. H., and Kim, H. Y., "Construction of Precast Modular Bridges", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 2, 2013, pp. 21-24.
3. Lee, S. Y., Song, J. J., Kim, H. Y., Lee, Y. H., and Lee, J. M., "Study on the Shape of a Longitudinal Joint of the Slab-type Precast Modular Bridges", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 16, No. 5, 2012, pp. 98-111.
4. Chung, C. H., Kim, Y. J., Kim, S. W., and Park, C. L., "Static Tests on Transverse Joints of Precast Prestressed Concrete Bridge Deck", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, No. 2, 1998, pp. 109-117.
5. Tassios and Tsoukantas, "Serviceability and ultimate limit states of large panel connections under static and dynamic loading," *RILEM-CEB-CIB Symposium on mechanical and insulating properties of joints of precast reinforced concrete elements*, Proceedings, Nat. Techn. Univ. of Athens, 1978.

6. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, *Design Specification of Highway Bridges*, Korea Road & Transportation Association, 2010.

7. Kim, Y. J., Chung, C. H., and Park, C. L., “Application of

Precast Concrete Bridge Decks for Rapid Construction”, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 9, No. 1, 1997, pp. 68-75.

요 약 슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량은 횡방향으로 분절되어 제작된 프리캐스트 모듈을 현장에서 조립하는 형태의 교량으로서 분절된 프리캐스트 모듈 사이에는 종방향 연결부가 형성되며, 프리캐스트 모듈의 조립은 모듈 사이에 고성능 무수축 모르타르를 주입한 후에 횡방향으로 긴장력을 도입함으로써 이루어진다. 본 연구에서는 연결부의 휨 거동을 바탕으로 설계단계에서 산정된 횡방향 도입 긴장력 수준의 적정성 및 연결부의 형상이 휨 거동에 미치는 영향을 검토하기 위해 슬래브 형식 프리캐스트 모듈리교량의 연결부를 적용한 실험체를 이용한 4점 재하 휨 실험과 3점 재하 휨 실험을 수행하였다. 4점 재하 휨 실험은 긴장력의 변화가 연결부의 휨강도에 영향을 미치며 연결부의 형상은 순수한 휨모멘트가 작용하는 단면의 휨강도에는 영향을 미치지 않는다는 결과를 보여주었다. 3점 재하 휨 실험은 연결부에 휨모멘트와 전단력을 동시에 작용시키는 실험 방법으로, 연결부의 형상이 휨강도와 균열 사용성에 영향을 미친다는 결과를 보여주었다. 두 가지의 휨 실험 결과로부터 본 연구에서 적용한 긴장력은 적정하였으며 두 개의 전단키를 갖는 연결부가 균열 사용성 측면에서 유리하다는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 슬래브 교량, 모듈리교량, 연결부, 전단키, 긴장력