거더형식 프리캐스트 모듈러교량 연속화 지점부에 적용되는 연결슬래브의 휨성능 및 피로성능 평가

주봉철¹⁾ · 송재준¹⁾ · 이상윤^{1)*}

¹⁾ 한국건설기술연구원 SOC성능연구소

Flexural & Fatigue Evaluation of Link Slab for Continuous Girder-Type Precast Modular Bridges

Bong-Chul Joo,¹⁾ Jae-Joon Song,¹⁾ and Sang-Yoon Lee^{1)*}

¹⁾Korea Institute of Construction Technology, Structural Engineering Research Division, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT The modular technology has been already applied in automotive industry, plant and shipbuilding industry. Recently, the modular technology was applied in bridge construction. The modular bridge is different from the existing precast bridges in terms of standardized design that the detailed design of members is omitted by using the standard modules; the design of the modular bridge is completed by only assembling the standard modules without design in member level. The girder-type precast modular bridge has been developed as a simply supported bridge. The girder-type precast modular bridge could be applied to the multi-span bridges through the continuity method. The continuity of the girder-type precast modular bridge is achieved by using the link slab which is easy to construction and appropriate to the rapid construction. The link slabs have been used as the type of reinforced concrete structure in US from the 1950's. In 2000's, the link slab using the engineered cementitious concrete (ECC link slab) has been developed. In this study, the RC type link slab which is more reproducible and economic relative to the ECC link slab was used for the continuity of the girder-type precast modular bridges, and the construction detail of RC type link slab was modified. In addition, the modified iterative design method of RC type link slab was proposed in this study. To verify the proposed design method, the flexural tests were conducted using the RC type link slab specimens. Also, the fatigue test using the mock-up specimen was conducted with cyclic loading condition up to two million cycles.

Keywords : modular bridge, link slab, continuity method, flexural test, fatigue test

1. 서 론

모듈러 기술은 자동차, 플랜트, 조선 산업 분야에서 이
미 오래전부터 적용해 오던 기술로, 현장별 개별 설계-생
산에서 표준화, 모듈화로 발전되어 왔으며, 독립된 기능
을 갖는 모듈을 조합하여 시스템을 구성하는 기술을 의
미한다. 교량 분야에서도 레고(Lego) 블록과 같이 사전에
제작된 표준 부재들을 이동과 조립만으로 교량을 건설하
는 개념의 모듈러교량 기술에 대한 연구가 진행되고 있
다.¹⁾ 모듈러교량은 부재별 세부설계 과정이 생략되고, 모
듈별로 표준화 된다는 점에서 기존의 조립식 교량과는
차별화 된다. 그러나 모듈별로 제작, 조립을 하는 모듈러

교량에서도 반드시 모듈간의 현장 이음부가 존재하게 되
며, 다경간 교량의 경우에는 단순교로 설계/제작된 모듈러
교량을 연속화하는 과정이 필요하다. 이 연구에서는 다경
간 조건에서 단순교로 설계/제작된 거더형식 프리캐스트
모듈러교량을 연속화하는 방법에 대한 연구를 수행하였다.

단순교 형식의 상부구조는 다경간 조건에서 반드시 신
축이음부가 내부지점부마다 존재하게 되며, 신축이음부
는 온도변화에 따른 신축량을 수용하는 역할을 한다. 또
한 연속교 형식에서도 2~4경간 마다 신축이음부를 두어
온도변화에 따른 신축량이 구조물에 영향을 미치지 않도
록 하고 있다. 이와 같은 신축이음부는 신축이음장치를
수반하는데, 이는 운행 중인 차량의 주행성능을 떨어뜨
리고, 초기 공사비의 상승을 유발하며, 내구성이 낮아 유
지관리비용(점검, 보수 및 교체)이 상승하는 원인이 된다.

이와 같은 신축이음부의 단점을 해결하고자 신축이음
을 최소화하거나 무신축이음 교량을 건설하기 위한 노력
이 꾸준히 진행되어 왔다.^{2-12,14-17)} PSC 거더의 경우 일반

*Corresponding author E-mail : sylee@kict.re.kr

Received December 24, 2012, Revised September 4, 2013,
Accepted September 4, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

적으로 단순교를 연속화시켜 이와 같은 문제를 해결한다. 교각 위 지점부(내부지점)에서 상부구조를 연속화시키는 일반적인 방법은 크게 연결부 단면 전체(바닥판과 거더)를 연속화시키는 방법과 연결부 단면의 일부(바닥판)만을 연속화시키는 방법으로 구분된다.

이 연구의 대상인 거더형식 프리캐스트 모듈러교량은 바닥판과 거더가 일체화된 모듈을 공장에서 제작한 후 현장에서 조립하여 단순교로 거치하고 내부지점에서 연속화하는 방법을 적용한다. 모듈러교량은 신속한 시공이 목적이기 때문에 공정이 복잡하고 현장 작업량이 많은 시공방법은 적합하지 않다. 따라서 연결부 단면 전체를 연속화시키는 방법은 바닥판 하부에서 추가적인 공정이 필요하므로 모듈러교량의 연속화 방법으로 적합하지 않으며 바닥판만을 연속화시키는 방법이 적합하다고 할 수 있다.

연결슬래브(link slab)를 이용하여 바닥판만을 연속화시키는 방법은 미국에서 1950년대에 사용된 이래로 여러 단계를 거쳐 발전되었다. 독일에서는 1964년에 바이에른 지방에서 처음 시공된 이후에 70년대와 80년대에 많은 프리캐스트 PSC 거더 교량의 연속화 방법으로 사용되었다. 독일 바이에른 지방에서만 최소한 380개의 교량에 790개의 연결슬래브가 시공된 것으로 알려져 있다. 바이에른 지방 설계지침(EZTV-K Bayern 1990)에 의하면 연결슬래브의 최소길이는 1.5 m, 연결슬래브와 거더 사이의 분리층은 최소 2.5 cm를 확보해야 한다고 기술하고 있다.²⁾

2006년에 Zilch와 Weiher는 노후화된 PSC거더 교량의 상태에 대해 조사한 바 있다. 조사대상인 18개의 교량 중 10개가 연결슬래브로 시공된 교량이었으며, 이들 중 8개 교량의 연결슬래브에서 손상이 전혀 나타나지 않았다고 기술하고 있어 연결슬래브를 이용한 연속화 방법의 높은 신뢰성을 보여주었다. 나머지 두 개의 교량에 대해서는 연결슬래브 상태에 대한 정보를 알 수 없어 제외되었다.³⁾

미국에서는 1930년대부터 이음부가 없는 교량 바닥판 설계방법을 개발하여 왔으며,^{4,5)} 최근에는 고인성 콘크리트(ECC, engineered cementitious concrete)의 개발과 함께 이를 사용한 ECC 연결슬래브를 적용하기에 이르렀다.⁷⁻⁸⁾ Caner와 Zia는 실험실시험체를 이용한 연결슬래브의 구조적 실증 실험연구를 수행하였다. 전체길이 12.55 m(경간길이 각 6 m)인 2경간 강합성 교량과 2경간 콘크리트 교량 실험체 2개를 제작하고 다양한 지점조건에서 연결슬래브의 거동특성을 확인한 바 있다.⁹⁾

김윤용 등은 연결슬래브 채움재료로 일반 콘크리트 대신 ECC를 적용하고 연결부 단면을 일부 수정한 새로운 연결슬래브 형식을 제안하고 실증연구를 수행하였다.⁶⁻⁸⁾ PVA(polyvinyl alcohol) 섬유로 보강된 ECC는 콘크리트의 수 십, 수 백배의 인장 변형 능력을 갖는 고인성 재료이다. 이와 같은 특성의 ECC를 연결슬래브에 적용하여 균열을 분산시키는 효과와 연결슬래브 전단면을 유효단면으로 설계함으로써 연결부 주철근(교축방향 철근)양이 감소되어 연성능력이 향상되는 효과를 확인하였다. 또한

기존 바닥판과 연결슬래브가 접하는 신규 콘크리트 접합부(시공이음부)와 연결슬래브의 완전비합성 구간 사이에 거더와 합성되는 천이구간을 두어 기존 연결슬래브 접합부에 발생하는 응력집중 현상을 방지할 수 있는 개선 방안을 제시하였다. 이를 통해 연결슬래브의 성능이 크게 향상되는 결과를 얻었으며 2005년에는 ECC를 사용한 연결슬래브(5.5 m × 20.25 m × 0.225 m)를 실제 교량에 시범 적용한 바 있다.¹⁰⁾

이 연구는 프리캐스트 모듈러교량에 적용되는 연결슬래브의 적용상세와 설계방법을 제안하고, 제안된 설계방법에 대한 적정성을 검토하는데 목적이 있다. 제안된 연결슬래브 설계방법의 검증을 위하여 연결슬래브 바닥판 실험체를 설계/제작하고 연결슬래브의 휨성능 및 균열 사용성 검증실험을 수행하였다. 또한, 실제 교량시스템을 모사한 실험체를 이용하여 200만회 피로성능 검증실험을 수행하였다.

2. 연결슬래브(link slab)

2.1 연결슬래브 개념

다경간 단순교(Fig. 1(a) 참조) 내부지점부 연속화 방법은 크게 2가지로 전단면을 연속화하는 방법(이하, 강성연결 방법; Fig. 1(b) 참조)과 단면의 일부, 즉 바닥판만 연속화하는 방법(이하, 연성연결 방법; Fig. 1(c) 참조)이 있다.

강성연결 방법은 거더 상호간 구속효과가 크기 때문에 활하중에 의하여 큰 부모멘트가 내부지점부에 발생하게 되어 이에 대한 검토와 보강이 필요하다. 그러나 연성연결 방법은 기존 강성연결 방법과 달리 거더는 연결하지 않고 바닥판만 연결시키는 방법으로 상호 구속효과가 미미해 휨모멘트 분포가 연결 이전과 유사한 양상을 보인다.

연성연결 방법은 교량 내부지점부에서 바닥판간 연결을 위해 타설되는 연결슬래브만으로 교량을 연속화시키는 방법으로 시공이 용이하고 다른 연속화 방법에 비해

(a) Multi-span bridge with simple supported bridge

(b) Connected by whole section

(c) Connected by slab

Fig. 1 Continuous bridge systems

공사비 절감 효과가 크며, 상대적으로 강성이 약해 주경간의 거동에 미치는 영향을 최소화 할 수 있다. 그러나 연결슬래브가 거더의 단부 휨변형(처짐각)을 대부분 수용해야 하기 때문에 큰 연성능력이 요구되며, 제한된 폭 이상의 균열이 발생하지 않도록 하기 위한 주의가 필요하다.

2.2 기존 연결슬래브

2.2.1 철근콘크리트(RC) 연결슬래브

일반적으로 연결슬래브의 채움재는 바닥판과 동일한 철근콘크리트(RC)를 사용해 왔으며, 연결슬래브의 주철근과 바닥판에서 연장된 배력철근을 상호 연장하여 시공한다. 일반적으로 연결슬래브는 경간장의 약 10%의 길이를 갖고 있으며, 거더와 합성하지 않는다. Fig. 2는 철근콘크리트 연결슬래브 단면 개념도이다.

단면설계 방법은 일반적으로 균열폭 제한법과 사용응력 제한법에 의하여 설계된다. 사용응력 제한법은 활하중(표준트럭하중) 조건에서 연결슬래브의 주철근에 발생하는 최대 응력이 항복응력의 40%를 초과 하지 않도록 설계하는 것으로 도로교설계기준¹¹⁾의 허용응력설계법과 유사하다. 균열폭 제한법은 사용하중에 의하여 발생하는 균열폭이 설계기준의 허용균열폭 이하가 되도록 설계하는 방법이다. FHWA의 보고서에 따르면 RC 연결슬래브에 발생하는 휨균열을 제어하기 위해 최소한 0.015의 철근비에 해당하는 철근을 배근하도록 제안하고 있다.¹²⁾

선행연구 결과, 철근콘크리트 연결슬래브는 사용하중 조건에서도 균열이 발생하는 것으로 확인되어 에폭시 코팅된 철근을 사용할 것을 권장하며,^{6,8-9)} 단부의 휨변형을 최대한 수용하기 위하여 거더지점부 양측에 각각 경간장의 5%에 해당되는 완전비합성(deliberately debond zone) 구간을 두도록 제안하고 있다.⁸⁾

2.2.2 ECC 연결슬래브

기존 철근콘크리트 연결슬래브의 균열문제를 해결하기 위해 개발된 ECC 연결슬래브는 ECC를 채움 재료로 적용한 연결슬래브이다.^{6,8,10)} PVA 단섬유를 시멘트 부피의 약 2%정도 혼입한 ECC는 인장변형률이 2% 이상인 고인성 콘크리트로 높은 인장변형률을 수용할 때 다수의 미세균열을 발생시켜 균열분산 능력이 탁월한 것으로 보고되고 있다.

Fig. 2 Schematic of RC link slab

Fig. 3 Schematic of ECC link slab⁹⁾

ECC는 고가의 재료이기 때문에 경제적인 문제로 연결슬래브 부분에만 적용하게 된다. 따라서 철근콘크리트 연결슬래브가 바닥판 타설 시 동시에 일체로 타설하는 반면에 ECC 연결슬래브는 바닥판을 먼저 타설하여 양생한 후에 연결슬래브를 2차로 타설하여 완성하게 된다. 그러나 비합성구간의 끝단인 연결슬래브와 기존 바닥판 사이에 신구 콘크리트 접합부가 형성되어 응력집중 현상이 발생하게 된다. 이로 인하여 연결슬래브와 바닥판의 접합부가 교량 바닥판 시스템 내에서 가장 취약단면이 되는 단점이 있다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 연결슬래브 양 끝단에 각각 경간장의 약 1.25%(총 2.5%)의 천이구간을 두어 신구 콘크리트 접합부를 비합성구간의 끝단에서 이격시킨 새로운 연결슬래브 단면이 제안되었다. 이를 통해 접합부에 발생하는 균열을 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 보고되었다⁹⁾. Fig. 3은 ECC 연결슬래브의 개념도이다. 이와 같은 ECC 연결슬래브는 신설교량의 연속화 방법 보다는 기존의 철근콘크리트 연결슬래브의 보수공사에 유용한 방법이라 할 수 있다. 그러나 ECC 연결슬래브는 기존 단면보다 확장된 단면을 고가의 ECC 콘크리트로 채우게 되어 비용 상승의 원인이 되며, 보강섬유 분산도에 따라 인장력에 대한 저항능력이 일정하지 않아 현장배합시 세심한 주의가 요구되는 단점이 있다.

3. 거더형식 프리캐스트 모듈러교량의 연성연결 방법

3.1 연구에 적용된 연결슬래브 특징

프리캐스트 모듈러교량은 슬래브와 거더가 일체화된 단면으로 공장에서 제작되기 때문에 미리 제작된 슬래브와 현장에서 타설되는 연결슬래브 사이에 신구 콘크리트 접합부가 불가피하게 생기게 되므로 ECC 연결슬래브와 같이 천이구간을 적용하였다. Fig. 4는 프리캐스트 모듈러교량의 지점부 연속화에 적용되는 연결슬래브의 시공 순서를 간략하게 나타낸 것이다.

3.2 연결슬래브 설계 개념

이 연구에 적용된 연결슬래브는 강도설계법을 기준으로 철근량을 결정하고 사용하중에 의한 균열폭을 제한하는 방법으로 설계된다.

연결슬래브는 순수한 휨모멘트만이 작용하는 것으로

Fig. 4 Construction procedure of continuous systems in modular bridge

가정하여 설계되며, 연결슬래브에 작용하는 휨모멘트는 단순지지 형식의 교량모델에서 얻어진 단부 처짐각과 연결슬래브의 휨강성으로부터 구해진다. 연결슬래브의 단면2차모멘트는 균열이 발생한 연결슬래브 단면의 거동을 합리적으로 반영할 수 있도록 가정되어야 하는데, 단면2차모멘트를 크게 가정하면 실제로 연결슬래브에 발생하는 휨모멘트보다 큰 휨모멘트를 기준으로 설계하게 되어 과설계로 이어질 수 있다. 반대로, 단면2차모멘트를 작게 가정하면 단면에 실제로 발생하는 휨모멘트가 가정된 휨모멘트에 비해 커지게 되어 불안정한 설계로 이어질 수 있다.

이 연구에서는, 연결슬래브의 실제 거동을 합리적으로 반영하고 안전측의 설계를 유도하기 위해, 콘크리트 총 단면에 대한 단면2차모멘트와 균열단면에 대한 단면2차모멘트의 평균값을 연결슬래브의 단면2차모멘트로 적용하였다. 도로교설계기준에서는 균열단면에 대한 단면강성을 고려하기 위해 균열단면에 대한 유효단면2차모멘트를 제시하고 있다. 후술할 이 연구의 실험 결과로부터, 유효단면2차모멘트를 연결슬래브의 단면2차모멘트로 가정하여 연결슬래브를 설계하는 경우 실제 단면에 발생하는 휨모멘트에 비해 높은 휨모멘트가 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 반면, 이 연구에선 제안한 단면2차모멘트를 적용하여 계산된 설계 휨모멘트는 실험체에 발생하는 휨모멘트를 합리적으로 예측한다는 사실을 알 수 있었다. 즉, 도로교설계기준에서 제시하는 균열단면에 대한 유효단면2차모멘트 보다 이 연구에서 가정한 연결슬래브의 단면2차모멘트로부터 보다 합리적인 결과를 얻을 수 있다고 할 수 있다.

Fig. 5 Design procedure of a link slab

Fig. 5는 연결슬래브 설계과정 간략하게 도시한 것이다. 연결슬래브의 단면2차모멘트는 연결슬래브에 배근된 철근량과 비례하는 관계에 있으므로, 연결슬래브의 설계는 가정된 철근량과 재산정되는 철근량이 같아질 때까지 철근량을 가정하고 재산정하는 과정이 순환되는 반복적인 과정을 갖는다.

3.3 연결슬래브 상세설계

3.3.1 설계 대상교량 및 연결슬래브 재원 결정

이 연구에서는 경간장 35 m를 갖는 2경간의 거더형식 프리캐스트 모듈러교량을 대상으로 연결슬래브를 설계하고 휨성능 및 피로성능을 검토하였다.

Table 1은 대상교량에 적용되는 연결슬래브 단면의 재원을 정리한 것이다. 대상교량의 상부플랜지 유효폭(바닥판 유효폭)은 거더 간격과 동일한 2.75 m이며, 연결슬래브의 두께는 상부플랜지의 두께 220 mm에서 비합성구간을 형성하기 위해 연결슬래브의 하단에 설치되는 EPS 판의 두께 20 mm를 제외한 200 mm가 된다. 상부에 배치되는 종방향 철근의 중심과 상단과의 거리(피복 두께)는 70 mm를 적용하였다. 콘크리트의 설계압축강도는 프리캐스트 모듈러교량에 적용되는 콘크리트 설계압축강도와 동일하게 50 MPa를 적용하였다.

후술할 경간장 35 m의 모듈러교량에 적용되는 연결슬래브에 대한 설계 결과로부터, 비합성구간의 길이는 1800 mm로 결정되었다. 천이구간의 길이는 비합성구간의 양 단부에 각각 비합성구간 길이의 1/4에 해당하는 길이(각각 450 mm, 총

900 mm)로 적용하였다. 결과적으로, 연결슬래브의 길이는 비합성구간과 천이구간을 포함하는 2700 mm가 된다.

3.3.2 거더 단부 최대 처짐각 결정

사용하중에 의한 처짐각은 교량 상부구조의 길이와 휨강성에 의해서 결정된다. 연결슬래브는 상부구조 모듈이 거치된 이후에 적용되므로, 연결슬래브의 양단부에 발생하는 거더의 단부처짐각은 2차고정하중과 활하중에 의해 발생한다. Table 2는 교량모델에 대한 유한요소해석으로부터 계산된 활하중 및 2차고정하중에 의해 발생하는 경간 중앙부의 처짐과 단부 처짐각(이하, 설계 단부 처짐각)을 정리한 것이다.

3.3.3 연결슬래브 단면2차모멘트 산정

이 연구에서 연결슬래브 단면설계를 위해 고려한 연결

슬래브의 단면2차모멘트는 총단면에 대한 단면2차모멘트와 균열단면에 대한 단면2차모멘트의 평균값을 적용하였다. Table 3은 연결슬래브의 콘크리트 총단면에 대한 단면2차모멘트와 균열단면에 대한 단면2차모멘트 및 이 연구에서 고려한 단면2차모멘트를 정리한 것이다. 이때, 단면에 적용된 철근량은 직경 22 mm의 철근이 100 mm 간격으로 배치된 것으로 가정하여 산정하였다.

여기서, I_{ls} 는 연결슬래브의 단면2차모멘트, I_g 는 총단면에 대한 단면2차모멘트, I_{cr} 은 균열단면에 대한 연결슬래브의 단면2차모멘트를 의미한다.

3.3.4 연결슬래브에 발생하는 휨모멘트

거더의 단부 처짐각에 의해 연결슬래브에 순수한 휨모멘트가 발생하는 것으로 가정하면, 식 (1)과 같이 연결슬래브에 발생하는 최대 휨모멘트(M)를 계산할 수 있다.

$$M = \frac{2E_{ls}I_{ls}}{L_{ls}}\theta_{\max} \quad (1)$$

여기서, E_{ls} 는 연결슬래브의 탄성계수(MPa), $\theta_{\max}$ 는 거더 단부 처짐각(rad), L_{ls} 는 연결슬래브의 비합성 구간 길이(m)를 의미한다. 계산 결과는 Table 4와 같다.

3.3.5 연결슬래브 철근량 산정

산정된 연결슬래브의 단면2차모멘트와 설계 휨모멘트를 적용하고 도로교설계기준의 강도설계법으로 철근량을 결정하였다. 계산된 철근량은 6670 mm²이며, 시공성을 고려하여 SS400 H22 철근을 100 mm 간격으로 배치하도록 하였다. 설계조건에 따라 계산된 주철근량과 공칭모멘트를 Table 5에 나타내었다.

3.3.6 천이구간 수평전단철근 설계

연결슬래브를 천이구간에서 거더와 합성시키기 위해 수평전단철근을 배치하였으며, 배치간격 및 철근의 직경은 단부 거더 단면에 적용된 스트립의 간격과 도로교설계기준을 고려하여 결정하였다.

3.3.7 균열폭 검토

도로교설계기준과 콘크리트구조설계기준¹³⁾은 철근을 인장영역에 고르게 분산 배치함으로써 휨균열을 제어하는 방법을 채택하고 있으며, 균열폭의 검증이 필요한 경

Table 1 Dimensions of link slab

Effective width, b_{eff} (m)	Thickness, h (mm)	Cover thickness, d' (mm)	Effective height, d (mm)
2.75	200	70	130

Table 2 Angle of deflection at the end of the girder induced by design load

2 nd Dead load		Live load		Total	
Deflection (mm)	Angle (rad)	Deflection (mm)	Angle ⁽¹⁾ (rad)	Deflection (mm)	Angle (rad)
11.9	0.00106	39.2	0.00354	51.1	0.00460

⁽¹⁾Angle of deflection

Table 3 Moment of inertia of the link slab

b (m)	h (m)	$I_g^{(1)}$ (m ⁴)	$I_{cr}^{(2)}$ (m ⁴)	$I_{ls} = (I_g + I_{cr})/2$ (m ⁴)
2.75	0.2	0.001833	0.000508	0.001171

$$^{(1)}I_g = \frac{bh^3}{12}$$

$$^{(2)}I_{cr} = \frac{bx^3}{3} + nA_s(d-x)^2$$

Table 4 Maximum moment of the link slab

E_{ls} (MPa)	L_{ls} (m)	I_{ls} (m ⁴)	$\theta_{\max}$ (rad)	M (kN · m)	
				Live load	2 nd Dead load
32,902	1.8	0.001171	0.00460	151.5	45.4

Table 5 Design condition and area of longitudinal tension reinforcement in link slab

Factored moment, M_u (kN · m)	Design width (mm)	Calculated A_s (mm ²)	Design A_s (mm ²)	Design moment, ϕM_n (kN · m)
384.7	2750	10028	10454	398.5

Table 6 Check Limits of specifications

Check items	Limits of specifications ⁽¹⁾ (mm)	Design values (mm)	Satisfaction
Rebar spacing	315.5	100	OK
Crack width	0.295	0.135	OK

⁽¹⁾Allowable crack width in corrosion condition

우를 고려하여 콘크리트구조설계기준 부록 V.3.2(균열의 검증)에 의해 균열폭을 산정하도록 제안하고 있다. 본 연구에서는 두 가지 방법 모두에 대해 검토하였다. 이 연구에 적용된 연결슬래브는 위의 균열검토를 통해 도로교설계기준의 제한치를 모두 만족함을 확인하였다. Table 6은 균열폭에 대한 검토 결과를 정리한 것이다.

4. 실험 계획 및 실험체 설계

4.1 실험계획

초기 연결슬래브 성능 검증실험 연구는 연속화된 2경간 거더교를 실제크기보다 1/4 또는 1/6 정도 축소 제작

Table 7 Specimens for flexural bending test

Name of specimens	Moment of inertia	Applied rebar	Fiber volume ration (%)
HI-RC	$\frac{I_g + I_{cr}}{2}$	D22 @100 mm	0
HI-FRCa			0.5
HI-FRCb			1.0
EI-RC	I_e	D19 @100 mm	0
EI-FRCa			0.5
EI-FRCb			1.0

Fig. 6 Shape and dimensions of specimens for the flexural bending test (unit: mm)

Fig. 7 Schematic of load condition for test (unit: mm)

Fig. 8 View of flexural bending test

한 실험체를 이용하여 수행되었다. 이러한 축소모형을 사용함으로써 상사율에 따른 시공오차가 포함되어 실제 거동과 다소 상이한 결과를 나타낼 수 있는 가능성이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근의 연구들은 성능 검증 실험체를 실제크기로 설계하는 대신, 교량 전체가 아닌 필요한 부분만을 제작하고 경계조건으로 전체 교량 시스템 환경과 유사하게 모사하여 성능 검증실험을 하고 있다.⁵⁻⁸⁾ 본 연구에서도 연결슬래브를 포함하는 모듈러교량의 내부지점부 일부만을 실제 크기로 제작하고 성능 검증실험을 수행하였다.

이 연구에서 수행한 성능 검증실험은 크게 2가지로, 우선 연결슬래브 단면을 모사한 바닥판 실험체를 이용하여 휨거동 및 균열 사용성 검증을 위한 정적재하실험을 수행하였으며, 거더형식 프리캐스트 모듈러교량의 바닥판과 천이구간을 포함하는 연결슬래브의 시공 상세를 모사한 Mock-up 실험체를 대상으로 피로성능 검증을 위한 피로실험을 수행하였다.

정적재하실험과 피로실험은 모두 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 2000 kN 용량의 만능시험기(UTM, universal test machine)를 이용하여 수행하였으며, 실험체에 발생하는 변위, 처짐각, 균열폭 및 균열패턴을 검토하였다.

4.2 휨성능 검증용 바닥판 실험체

4.2.1 바닥판 실험체 설계

휨성능 검증실험은 이 연구에서 적용한 연결슬래브의 비합성구간에 대한 휨성능을 확인하고 사용하중에 의한 균열 사용성을 검증하는데 목적이 있다. 바닥판 실험체는 3장에서 설계된 연결슬래브의 비합성구간과 동일한 단면을 적용하여 설계/제작하였으며, 가력조건을 고려하여 4.0 m의 길이로 제작하였다.

이 연구에서는 연결슬래브 단면을 보다 합리적으로 설계하기 위하여 연결슬래브 단면2차모멘트(I_s)를 콘크리트 총단면에 대한 단면2차모멘트(I_g)와 균열단면에 대한 단면2차모멘트(I_{cr})의 평균값을 적용하였다. 이 연구에서 제안한 연결슬래브의 단면2차모멘트와 도로교설계기준에서 제시하는 유효단면2차모멘트(I_e) 중 모듈러교량의 연결슬래브 설계에 적합한 방법을 검토하기 위해, 이 연구에서 제안한 연결슬래브의 단면2차모멘트로 설계된 실험체와 도로교설계기준에서 제시하는 유효단면2차모멘트로 설계된 실험체를 각각 제작하여 실험 결과를 비교하였다. 또한 이 연구에서 검토 중인 연결슬래브는 일반 콘크리트를 사용하는 것을 기본으로 하고 있으나, 강섬유에 비해 경제성이 높은 폴리아미드 섬유 혼입에 의한 효과를 검토하기 위해 폴리아미드 섬유를 혼입한 실험체를 추가로 제작하였으며, 폴리아미드 섬유의 혼입율을 0.5%와 1.0%로 구분하여 혼입율의 변화에 따른 실험체의 거동을 검토하였다.

최종 설계 결과, 이 연구에 적용된 단면2차모멘트로

계산된 종방향 철근의 직경은 22 mm이며, 유효단면2차모멘트로 설계된 종방향 철근의 직경은 19 mm이다. 종방향 철근의 간격은 모두 100 mm로 적용하였다. 배력철근의 직경은 16 mm를 적용하였으며, 비합성구간은 125 mm 간격으로 배치하고 나머지 구간은 150 mm 간격으로 배치하였다. 다만, 지점이 위치하는 부근은 전단보강을 위하여 75 mm의 간격으로 배력 철근을 배치하였다. 사용된 콘크리트의 설계압축강도는 50 MPa이다.

Table 7은 실험체의 종류 및 특징을 정리한 것이며, Fig. 7은 실험체의 제원을 도시한 것이다. 이 연구에서 제안한 연결슬래브의 단면2차모멘트로 설계한 실험체를 HI series로, 도로교설계기준에서 제시하는 유효단면2차모멘트 (I_e)로 설계한 실험체를 EI series로 표시하였으며, 섬유혼입이 없는 실험체는 RC, 섬유혼입률이 0.5%인 실험체는 FRCa, 섬유혼입률이 1.0%인 실험체는 FRCb로 명명하였다.

4.2.2 하중조건 및 계측

연결슬래브의 휨성능 검증을 위해 본 연구에서 적용한 하중조건은 연결슬래브 비합성구간에서 최대모멘트가 일정하게 유지되어 순수 휨거동 조건이 구현되도록 Fig. 7과 같은 4점재하 방식을 적용하였다. 하중은 약 3 kN/min의 속도로 가력하였고 실험의 편의를 위하여 실험체를 뒤집은 상태로 실험을 수행하였다. Fig. 8은 연결슬래브 휨성능 검증실험 장면을 나타내었다. 하중을 재하하면서 실험체에 발생하는 처짐각은 천이구간의 중앙부에 해당하는 위치 즉, 경간 중앙부에서 1.35 m이격된 위치를 기준으로 측정하였다. 처짐각은 천이구간의 중앙부에 해당하는 위치에 고정된 앵글의 양 단부에서 측정된 변위로부터 계산하였다.

4.3 피로성능 검증용 mock-up 실험체

4.3.1 피로실험체 설계

이 연구에 적용된 연결슬래브의 피로성능을 확인하기 위하여 Fig. 9와 같은 피로실험체를 제작하고 사용하중 조건에서의 200만회 피로성능을 확인하였다. 연결슬래브의 실제 거동과 유사한 조건으로 연결슬래브의 피로거동을 검토하기 위하여, 거더형식 프리캐스트 모듈러교량의 바닥판과 천이구간을 포함하는 연결슬래브의 시공 상세를 모사하여 피로실험체를 설계/제작 하였다. 다만, 제작의 편의를 위하여 바닥판과 거더가 일체화된 상부구조 모듈 대신, 거더형식 프리캐스트 모듈러교량의 상부플랜지와 동일한 두께의 바닥판을 갖는 강합성단면에 연결슬래브를 적용하였다. 강합성단면에 적용된 강거더는 바닥판을 제외한 거더형식 프리캐스트 모듈러교량과 유사한 강성을 갖는 SS400 재질의 I형강(800×300×14×26)을 적용하였으며, 거더 사이의 순간격은 실제 내부지점부의 조건을 고려하여 50 mm를 적용하였다. 바닥판의 폭은 1.0 m를 적용하였다.

Fig. 9 Shape and dimensions of specimens for the fatigue test

연결슬래브에 의해 연속화된 교량은 내부지점부에서 부모멘트가 발생하며, 정모멘트가 발생하는 경간중앙부에서 내부지점부로 가까워지면서 휨모멘트가 '0'이 되는 지점(변곡점)이 존재한다. 이 연구에서는 내부지점부 근처에 존재하는 변곡점을 하중 위치로 설정하였다. 연결슬래브를 적용한 연속화 교량에 대한 해석결과, 변곡점의 위치는 교량받침 위치로부터 경간길이의 약 7%(2.4 m)에 해당하는 거리가 이격된 위치에 존재하는 것으로 나타났다. 즉, 교량 받침의 간격(0.95 m)을 고려한 변곡점 사이의 거리는 약 5.75 m이다. 선행 연구⁹⁾에서도 변곡점이 유사한 위치에 존재하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 실험체 설치의 편의를 위하여 실험체의 하중 간격을 5.0 m로 계획하였으며, 받침간격을 고려하여 실험체의 길이를 5.4 m로 결정하였다.

연결슬래브 설계는 앞서 상세설계 결과를 적용하여 비합성구간을 1.8 m, 천이구간을 0.9 m(0.45 m×2)으로 적용하였으며, 5 mm의 나무판과 20 mm의 EPS 판을 연결슬래브와 거더 사이에 설치하여 비합성구간을 형성하였다. 실험체를 제작하는 과정에서 비합성구간에 적용되는 나무판과 EPS 판의 높이를 당초 계획한 20 mm로 적용하기 어려워 거더와 연결슬래브의 이격이 25 mm로 증가하였으며, 이를 보정하기 위하여 바닥판 두께를 225 mm로 적용하였다. 하지만, 비합성구간의 두께는 당초 계획된 것과 동일한 200 mm를 유지시켰다. 연결슬래브의 천이구간은 거더 상부플랜지에 용접된 수평전단철근을 적용하여 거더와 합성하였으며, 기존 바닥판과 거더는 전단연결재를 적용하여 합성하였다. 실제 시공과 유사한 조건으로 제작하기 위하여, 연결슬래브 콘크리트는 기존 바닥판 콘크리트의 양생이 완료된 이후에 타설하였다.

피로실험체에 적용된 콘크리트의 설계압축강도는 50 MPa이며, 인성을 향상시키기 위하여 연결슬래브 콘크리트에 1.0%의 폴리이미드 섬유를 혼입하였다.

4.3.2 하중조건

Fig. 10은 피로실험에 적용된 하중조건을 나타낸 그림으로 실험의 편의상 실험체를 뒤집은 상태에서 실험을 실시하였다. 실험체 지점간 거리는 5.0 m이며, 가력점의 거리는 교량 받침 간격과 동일한 0.95 m이다.

활하중에 의해 발생하는 단부 처짐각의 반복적인 작용

Fig. 10 Schematic of load condition for fatigue test

Fig. 11 View of fatigue test

에 의한 연결슬래브의 균열분산 특성 및 균열폭 거동을 검토하기 위하여, 활하중에 의한 단부 처짐각을 피로하중으로 적용하여 200만회까지 피로실험을 수행하였다. Table 2에 정리한 것과 같이, 2차고정하중과 활하중에 의한 단부 처짐각은 각각 0.00106 rad과 0.00354 rad이다. 따라서, 피로하중의 변동범위는 Fig. 10에 표시한 처짐각 측정 위치(천이구간의 중앙, Fig. 10의 'rotation'으로 표시된 위치)에서 0.00106~0.00460 rad의 처짐각이 발생하는 하중으로 적용하였다. 피로실험을 수행하면서 피로 반복 횟수가 1, 10, 100, 1000, 1만, 10만, 100만, 150만, 200만 회에 도달하였을 때 마다 정적 재하실험을 실시하여 강성 및 균열 특성을 검토하였으며, 다음 피로반복 구간에 적용되는 피로하중의 변동범위를 재산정하여 피로실험을 수행하였다. Fig. 11은 피로실험 전경을 나타낸 것이다. 천이구간의 중앙부에 대한 처짐각은 Fig. 11에 보이는 것과 같이 천이구간의 중앙부에 고정된 앵글의 양 단부에서 측정된 변위로부터 추정하였다.

5. 결과 및 분석

5.1 휨거동 실험 결과 및 분석

5.1.1 강성 검토

Fig. 12는 바닥판 실험체를 이용한 휨성능 검증 실험으로부터 구해진 휨모멘트-처짐각 곡선을 나타낸 것이다. 본 연구에서 제안한 단면2차모멘트를 기준으로 설계된 실험체(HI series, Fig. 12(a)) 및 유효단면2차모멘트를 기준으로 설계된 실험체(EI series, Fig. 12(b)) 모두, 균열의 발생을 전제로 한 연결슬래브의 설계 개념과 같이, 실험체의 단부 처짐각이 설계 단부 처짐각(0.0046 rad)에 이르기 전에 균열의 발생에 의해 강성이 작아지는 거동을 보였다. 실험체에 균열이 발생한 이후, 실험체에 작용하는

(a) HI series

(b) EI series

Fig. 12 Response of moment versus angle of deflection

Table 8 the moment at target angle of deflection⁽¹⁾

HI series (kN · m)				EI series (kN · m)			
Design	RC	FRCa	FRCb	Design	RC	FRCa	FRCb
111	112	125	120	67.1	80	118	102

⁽¹⁾Target angle of deflection: 0.0046 rad

휨모멘트는 일정한 휨강성을 유지한 채로 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

이 연구에서 제안한 단면2차모멘트 산정 방법에 대한 타당성을 검토하기 위해, 설계 단부 처짐각에 의해 실험체에 작용하는 휨모멘트와 콘크리트 총단면에 대한 단면2차모멘트, 유효단면2차모멘트, 그리고 이 연구에서 제안한 단면2차모멘트를 기준으로 산정된 설계 휨모멘트를 Fig. 12에 비교하여 나타내었다. Table 8은 설계 단부 처짐각을 기준으로 각각의 실험체에 작용하는 휨모멘트와 가정된 단면2차모멘트를 기준으로 산정된 설계 휨모멘트를 정리한 것이다. 설계 단부 처짐각에 의해 실험체에 발생한 휨모멘트는 모든 실험체에서 가정된 설계 휨모멘트에 비해 큰 것으로 나타났다. 하지만, 섬유가 혼입되지 않은 실험체를 기준으로 설계 휨모멘트와 실험체에 발생한 휨모멘트의 오차를 비교하면, HI series에 나타난 오차는 1.3%인 반면에 유효단면2차모멘트를 기준으로 설계한 EI series는 19.2%로 상대적으로 큰 오차를 보였다. 즉, 유효단면2차모멘트에 비해 본 연구에서 제안된 단면2차모멘트로부터 실제 연결슬래브의 강성을 보다 정확히 예측할 수 있다고 할 수 있다. 따라서, 콘크리트 총단면에

대한 단면2차모멘트와 균열단면에 대한 단면2차모멘트의 평균값을 연결슬래브의 단면2차모멘트로 가정한 설계 방법으로부터 연결슬래브에 대한 합리적인 설계 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 12의 결과로부터, 섬유가 혼입된 실험체는 섬유가 혼입되지 않은 실험체에 비해 균열이 발생하는 시점이 다소 지연되는 경향을 보였다. 이러한 경향은 섬유 혼입에 의해 콘크리트의 인성이 다소 향상되었기 때문인 것으로 판단되며, 균열 시점이 지연됨에 따라 균열 이후의 휨모멘트-처짐 곡선이 평행하게 오프셋 된 형태로 거동하는 것으로 나타났다. 하지만, 섬유 혼입률이 1.0%인 FRCb 실험체에 비해 섬유 혼입률이 0.5%인 FRCa 실험체에서 상대적으로 큰 휨모멘트가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향의 원인을 파악하기 위해서는 섬유혼입률의 변화를 파라미터로 한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 다만, 이 실험 결과로부터, 섬유 혼입에 의해 연결슬래브 콘크리트의 인성이 향상됨으로써 연결슬래브의 단면 강성이 증대되는 효과를 확인할 수 있었다.

5.1.2 균열 특성 검토

연결슬래브의 균열발생 특성을 검토하기 위해, 바닥판 실험체에 발생한 균열의 수, 간격 및 균열 폭을 검토하였다. Table 9는 각 실험체에 발생한 균열의 특성을 정리한 것이며, Fig. 13은 각 실험체에 발생한 균열의 분포를 나타낸 것이다.

섬유가 혼입되지 않은 실험체를 기준으로, 제안된 설계 방법에 의해 설계된 HI series 실험체와 EI series 실험체의 균열 개수 및 균열 간격으로부터 균열 분산 능력을

유사한 것으로 나타났으며, 균열폭은 두 실험체 모두 허용균열폭(0.295 mm)을 넘지 않는 것으로 나타났다. 하지만, Fig. 12와 Table 8의 결과와 같이 EI series 실험체에 발생하는 휨모멘트는 설계에서 가정된 휨모멘트에 비해 무시할 수 없는 수준으로 크게 발생하기 때문에 극한강도 기준을 만족하기 어렵다.

Fig. 12의 HI series에 대한 결과로부터, 섬유 혼입에 의한 효과는 균열 분산 능력(균열 개수 및 균열 간격)과 균열 폭에서 상반된 결과를 보여 뚜렷한 효과를 파악하기 어려웠다. 하지만, EI series 실험체에서 나타난 것과 같이 섬유 혼입에 의해서 균열 폭은 다소 크게 발생하였지만 균열 개수가 증가하고 균열 간격이 줄어들었으므로 균열의 분산 능력이 다소 향상되는 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

결과적으로, 제안된 설계방법으로부터 실제 연결슬래브의 거동을 합리적으로 예측한 설계결과를 얻을 수 있으며, 허용균열폭 이내로 균열 폭을 제어하여 설계기준에서 제안하는 사용성 기준도 만족할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 균열 분산 능력의 향상을 담보할 수 있는 섬유 혼입률을 결정하여 연결슬래브 콘크리트에 적용하고, 섬유 혼입에 따른 휨강성 향상 효과를 반영하여 설계 방법(단면2차모멘트 산정 방법)을 보완한다면 연결슬래브의 성능을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 피로거동 실험 결과 및 분석

5.2.1 휨거동 검토

Fig. 14는 주요 피로반복회수에서 수행한 정적재하실험

Table 9 Results for moment capacity test of link slab

Name of specimens	I_{assume} (mm ⁴)	Applied rebar	Fiber volume ratio	Number of crack (front/rear)	Extent of crack (mm)		Max. width of crack (mm)
					Average	Maximum	
HI-RC	$\frac{I_g + I_{cr}}{2}$	D22 @100 mm	0.0%	12/13	135.8	195	0.22
HI-FRCa			0.5%	12/9	165.6	230	0.18
HI-FRCb			1.0%	13/11	140.9	215	0.17
EI-RC	I_c	D19 @100 mm	0.0%	12/11	148.4	235	0.16
EI-FRCa			0.5%	14/13	125.7	275	0.2
EI-FRCb			1.0%	14/14	122.1	195	0.22

(a) HI-RC

(b) HI-FRCa

(c) HI-FRCb

(d) EI-RC

(e) EI-FRCa

(f) EI-FRCb

Fig. 13 Crack pattern of specimens for the moment capacity test

험에서 연속슬래브에 작용하는 휨모멘트-곡률 곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 정적재하실험은 천이구간에 발생하는 처짐각이 설계처짐각(0.0046 rad)에 이를 때까지 가력의 변위를 점진적으로 증가시키는 방식으로 수행하였다. 연속슬래브에 작용하는 휨모멘트는 가력에 작용하는 하중과 하중평형조건으로부터 계산된 것이다. 첫 번째 사이클에서 나타난 연결슬래브의 휨강성(휨모멘트-곡률의 기울기)은 연결슬래브에 초기균열이 발생하면서 휨강성이 줄어드는 경향을 보였으며, 이후의 피로반복회수에서는 이미 균열이 발생되어 있는 상태에서 하중(변위)의 증가에 의해 추가적인 균열이 거의 발생하지 않기 때문에 확인한 휨강성의 저하는 나타나지 않았다. Fig. 14에서 각 피로반복회수에 대한 휨모멘트-곡률 곡선을 비교하면, 피로반복회수가 증가하면서 휨강성은 점차 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 피로반복회수가 증가하면서 균열이 진전하거나 인근에 새로운 균열이 발생하는 데에 원인이 있다고 할 수 있다. 또한, Fig. 14로부터 100만회의 피로반복회수부터는 휨강성이 더 이상 감소하지 않는 것을 확인할 수 있다. 즉, 연결슬래브는 피로반복회수가 증가함에 따라 균열의 진전 또는 추가적인 균열의 발생에 의해 휨강성이 점차 감소하지만, 100만회 이상의 피로반복에 의해서는 추가적인 균열의 진전 또는 균열의 확산이 이루어지지 않는 안정적인 거동을 한다고 할 수 있다.

Fig. 15는 피로반복회수의 증가에 따른 연결슬래브의 휨강성($E_s I_s$), 단면2차모멘트(I_s) 및 잔류변형의 변화를 나타낸 것이다. 주요 피로반복회수에서 수행한 정적재하실험은 피로반복에 의한 잔류변형이 존재하는 상태에서 추가적인 설계처짐각이 발생하도록 하는 조건으로 수행하였다. 이러한 방법은, 주경간의 거더에 의해 일정한 수준의 단부처짐각이 작용하는 실제 연결슬래브의 거동과는 달리, 피로반복회수가 증가하면서 휨변형이 누적되어 점차 큰 휨변형을 작용시키게 되어 실제 거동과 비교하여 보수적으로 평가하는 방법이 된다.

Fig. 15에 나타난 바와 같이 잔류변형은 균열의 발생이 활발하게 일어나는 피로반복 초기 단계에서 크게 발생하는 경향을 보였으며, 초기의 피로반복 이후부터는 잔류변형이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 다만, 100만회에서 200만회로 피로반복회수가 증가하는 구간에 발생한 잔류 변형은 피로반복회수가 이전의 피로반복회수에 비해 긴 기간에 걸쳐 누적되기 때문에 상대적으로 크게 발생한 것으로 판단된다.

연결슬래브의 휨강성($E_s I_s$)과 단면2차모멘트(I_s)는 설계처짐각(0.0046 rad)이 발생한 상태에서 연속화슬래브에 작용하는 휨모멘트를 기준으로 식 (1)의 관계로부터 계산하였다. 이때, 연결슬래브의 탄성계수 E_s 는 연결슬래브에 적용된 콘크리트의 실험 당시의 압축강도(27 MPa)를 기준으로 계산된 탄성계수를 적용하였다. 이와 같이 계산된 실험체의 휨강성은 휨모멘트-곡률 곡선의 초기

선강성(Secant stiffness)과 같다. 즉, 한 사이클의 하중이력(Loading-unloading)에 의해 실험체에 발생하는 잔류변형이 클수록, Fig. 14의 첫 번째 사이클(1 cycle)에 대한 휨모멘트-곡률 곡선과 같이, 동일한 설계 처짐각(곡률)이 작용한 상태에서 연결슬래브에 작용하는 휨모멘트가 줄어들게 되어 휨강성이 줄어드는 효과로 나타난다. 이러한 이유로, 연결슬래브의 휨강성은 균열의 발생과 진전이 활발히 이루어지는 초기의 피로반복 단계에서 대체로 낮게 나타났지만, 이후 균열의 발생과 진전이 안정되어 가면서 다소 증가하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 또한, 균열의 발생과 진전이 안정된 상태인 50만회 이상의 피로반복 단계에서는 일정한 수준의 휨강성을 유지하는 것으로 나타났다.

200만회 피로반복이 완료된 상태에서 연결슬래브의 최종적인 단면2차모멘트는 약 $4.32 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ 으로 유효폭 2.75 m를 기준으로 계산된 Table 4의 단면2차모멘트(11.71 m^4)로부터 산술적으로 계산한 1.0 m에 대한 단면2차모멘트인 $4.26 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ 와 유사한 수준이었다. 즉, 본 연구에서 제안한 단면2차모멘트 산정 방법으로부터 연결슬래브의 단면2차모멘트를 합리적으로 예측할 수 있다고 할 수 있다. 50만회 이상의 피로반복 단계에서도 잔류변형은 미세한 수준이지만 지속적으로 발생한 것으로 확인되었다. 하지만, 50만회 이상의 피로반복 단계에서 연결슬래브의 휨강성이 일정한 수준으로 유지되는 사실로부터, 50만회 이상의 피로반복 단계에서 나타나는 균열의 발생 및 진전은 연결슬래브의 휨거동에 영향을 미치지 못하는 수준이라 할 수 있다.

Fig. 14 Comparison of moment-curvature curves for certain fatigue cycles

Fig. 15 Moment of inertia & residual displacement with number of cycles

Fig. 16 Crack pattern of specimen for the fatigue capacity test

Fig. 17 Crack width of link slab in cycles loading

5.2.2 균열분포 및 균열폭 검토

Fig. 16은 200만회 피로실험을 완료한 실험체에 발생한 균열의 상태를 나타낸 것이다. 완전비합성 구간에 약 11개의 균열이 발생하였으며, 이는 앞선 휨성능실험결과 (Table 9)와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한, 양측의 천이구간에도 각각 2개의 균열이 발생하였지만 모두 전단연결재가 설치되지 않은 구간(150 mm)에서 발생하였으며, 전단연결재가 설치된 이후 구간에서는 균열이 발생하지 않았다. 이는 기존 ECC 연결슬래브 피로실험 연구결과와 동일한 결과이다.⁹⁾

Fig. 17은 피로반복회수의 증가에 따른 연결슬래브 및 시공이음부의 균열폭을 나타낸 것이다. Fig. 17에 나타난 균열폭은 주요 피로반복회수에서 수행한 정적재하실험으로부터 천이구간의 처짐각이 설계처짐각(0.0046 rad)에 이르는 하중 조건에서 계측된 균열폭이다.

피로반복회수에 따라 균열폭이 변화하는 경향은 Fig. 15에 나타난 단면2차모멘트의 경향과 유사하게 나타났다. 즉, 균열의 발생과 진전이 안정되기 이전인 50만회 미만의 피로반복에 단계에서는 균열이 크게 발생한 단면에 휨변형이 집중된 것으로 판단되며, 균열의 발생과 진전이 안정화된 이후 휨변형이 고르게 분포하는 것으로 판단된다.

균열폭이 가장 크게 발생한 피로반복회수는 10만회이며, 이때의 설계하중(설계처짐각)에 의한 균열폭은 0.243 mm로 도로교설계기준의 허용균열폭 0.295 mm를 만족하는 것으로 확인되었다. 또한, 시공이음부의 최대 균열폭은 0.034 mm로 미세한 수준인 것으로 확인되었다.

6. 결 론

이 연구에서는 프리캐스트 모듈러교량에 적용되는 연

결슬래브의 적용상세와 설계방법을 제안하였으며, 정적재하실험 및 피로실험을 수행하여 제안된 설계방법의 타당성 및 연결슬래브의 거동을 검토하였다. 실험 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 바닥판 실험체를 이용한 휨성능 검증실험 결과로부터 설계처짐각에 대하여 예측된 휨모멘트와 실제 실험체에 작용한 휨모멘트의 오차를 비교하면, 이 연구에서 제안한 단면2차모멘트 산정 방법으로 설계한 실험체에 나타난 오차(약 1.3%)가 유효단면2차모멘트를 기준으로 설계한 실험체의 오차(약 19.2%)에 비해 낮게 나타났다. 즉, 제안한 단면2차모멘트 산정 방법으로부터 연결슬래브의 단면2차모멘트를 합리적으로 예측할 수 있다고 할 수 있다. 이러한 결과는, 피로실험체의 연결슬래브에 작용한 휨모멘트로부터 계산된 단면2차모멘트에서도 확인할 수 있었다.
- 2) 설계처짐각을 기준으로 바닥판 실험체에 발생한 균열폭은, 제안된 단면2차모멘트 및 유효단면2차모멘트로 설계된 모든 실험체에서 허용균열폭을 만족하는 것으로 나타났으며, 균열의 분산 능력 또한 유사한 것으로 나타났다. 하지만, 유효단면2차모멘트를 기준으로 연결슬래브를 설계하는 경우, 예측된 설계휨모멘트에 비해 실험체에 발생하는 휨모멘트의 크기가 약 19.2% 정도 크게 발생하여 극한강도기준을 만족하지 못하므로 연결슬래브 설계방법에 적합하지 않다고 할 수 있다.
- 3) 균열 분산 능력을 향상시키기 위하여 연결슬래브 콘크리트에 폴리아미드 섬유를 혼입한 실험체의 거동을 검토한 결과, 섬유 혼입에 의하여 균열 발생시점이 지연되는 효과와 강성이 증가하는 효과를 확인할 수 있었다. 하지만, 섬유혼입에 의한 거동을 명확히 확인하고 섬유혼입 효과를 반영한 설계법을 제안하기 위해서는, 섬유혼입 효과에 대한 보다 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 연결슬래브의 상세를 적용한 실험체를 이용하여 피로실험을 수행한 결과, 균열의 발생과 진전은 초기의 피로반복 단계에서 활발히 이루어지는 것으로 나타났으며 50만회 이상에서는 균열의 발생과 진전이 안정되는 것으로 나타났다. 또한, 안정적인 거동을 보이는 50만회 이상의 피로반복 단계의 거동은 본 연구에서 제안한 설계방법(단면2차모멘트 산정 방법)으로부터 예측된 거동과 유사한 거동을 보였다.
- 5) 피로실험체의 완전비합성구간에 나타난 균열의 분포 형태는 바닥판 실험과 유사하게 나타났다. 균열폭의 거동은 균열의 발생과 진전이 안정되는 것으로 판단되는 50만회 이상에서 안정되는 것으로 나타났으며, 피로실험체에 발생한 최대 균열폭은 허용균열폭을 만족하는 것으로 나타났다. 즉, 이 연구에서 제안한 연결슬래브는 장기적인(피로) 측면에

서 사용성을 만족할 수 있는 것으로 판단된다.

- 6) 전단연결재가 설치된 천이구간에서는 균열이 발생하지 않았으며, 시공이음부에 발생한 균열폭 또한 미세한 수준인 것을 확인 할 수 있었다. ECC 연결슬래브의 연구결과를 바탕으로 이 연구에서 적용한 천이구간은 프리캐스트 모듈러 교량의 연결슬래브의 신구콘크리트 연결부 상부에 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(10기술혁신B01-모듈러교량 기술개발 및 실용화 연구단)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Song, J. J., Kim, H. Y., Lee, S. Y., Lee, Y. H., and Lee, J. M., "Concept of the Precast Modular Bridge and Preliminary Design," *Proceedings of 2011 Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, 2011, pp. 915-918.
2. Wagner, F. J. and Buechting, F., "Die Federplattenbauweise bei Mehrfeldrigen Fertigteilbruecken aus Beton," *Bauingenieur*, Vol. 56, 1981, pp. 131-137.
3. Zilch, K. and Weiher, H., "Untersuchung des Zustandes der Deutschen Spannbetonbruecken," *Lehrstuhl fuer Massivbau*, Technische Universitaet Muechen, 2006.
4. Zuk, W., "Jointless Bridges," Research Report No. VHTRC 81-R48, *Virginia Highway & Transportation Research Council*, 1981.
5. Larson, M. B., "Bridge Decks Going Jointless," Research Record, *Construction & Technology*, Issue No. 100, 2005, pp. 1-4.
6. Kim, Y. Y., Fischer, G., and Li, V. C., "Performance of Bridge Deck Link Slabs Designed with Ductile Engineered Cementitious Composite," *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 6, 2004, pp. 792-801.
7. Kim, Y. Y., Kim, J. S., Ha, G. J., and Kim, J. K., "Development of an ECC (Engineered Cementitious Composite) Designed with Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 1, 2006, pp. 21-28.
8. Kim, Y. Y. and Park, Y. D., "Design Concept and Approach Proposed for Engineered Cementitious Composites (ECC) Link Slabs in a Jointless Bridge Deck System," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 6A, 2004, pp. 1151-1158.
9. Caner, A. and Zia, P., "Behavior and Design of Link Slabs for Jointless Bridge Decks," *PCI Journal*, PCI, Vol. 43, No. 3, 1998, pp. 68-80.
10. Lepech, M. D. and Li, V. C., "Application of ECC for Bridge Deck Link Slabs," *Materials and Structures*, Vol. 42, 2009, pp. 1185-1195. (doi: <http://dx.doi.org/10.3151/jact.1.215>.)
11. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, *Design Specification of Highway Bridges*, Korea Road & Transportation Association, 2010.
12. Oesterle R. G., Tabatabai H., Lawson T. J., Refai T. M., Woltz J. S., and Scanlon A., "Jointless and Integral Abutment Bridges-Summary Report," Research Report, Federal Highway Administration, Washington D.C., 1999.
13. Ministry of Construction & Transportation, *Design Specification of Concrete Structures*, Korea Concrete Institute, 2007.
14. Okeil, A. M. and ElSafty, A., "Partial Continuity in Bridge Girders with Jointless Decks," *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, ASCE, Vol. 10, No. 4, 2002, pp. 229-238. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2005\)10:4\(229\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2005)10:4(229)))
15. Charuchaimontri, T., Senjuntichai, T., Ozbolt, J., and Limsuwan, E., "Effect of Reinforcement in Link Slabs of Highway Bridges," *Engineering Structures*, ScienceDirect, Vol. 30, 2008, pp. 546-560. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0680\(2005\)10:4\(229\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2005)10:4(229)))
16. Aktan, H., Attanayake, U., and Ulku, E., "Combining Link Slab, Deck Sliding over Backwall, and Revising Bearings," Research Report No. RC-1514, Michigan Department of Transportation, 2008.
17. Snedeker, K., White, D., and Kahn, L., "Evaluation of Performance and Maximum Length of Continuous Decks in Bridges," Research Report No. 09-07, Georgia Department of Transportation, 2011.

요 약 모듈러 기술은 자동차, 플랜트, 조선산업 분야에서 이미 오래전부터 적용해 오던 기술로, 최근 교량 분야에도 적용되고 있다. 모듈러교량은 부재별 세부설계 과정이 생략되고, 모듈별로 표준화 된다는 점에서 기존의 조립식교량과는 차별화 된다. 거더형식 프리캐스트 모듈러교량은 단순지지 교량 형식으로 개발되었으며, 다경간 교량에 적용할 경우 단순지지 교량 형식의 모듈러교량을 연속화하는 방법으로 적용할 수 있다. 거더형식 프리캐스트 모듈러교량의 연속화는 시공이 간편하고 급속시공에 적합한 연결슬래브를 적용하는 방법으로 이루어진다. 연결슬래브는 1950년부터 미국에서 RC 형식으로 사용되기 시작하였으며, 2000년대에는 ECC를 적용한 연결슬래브(ECC 연결슬래브)가 개발된 바 있다. 이 연구에서는 ECC에 비해 재연성이 좋고 경제적인 RC를 적용한 연결슬래브를 다경간 거더형식 프리캐스트 모듈러교량에 적용하였으며, 기존의 RC 형식 연결슬래브를 보완한 형태의 연결슬래브와 수정된 연결슬래브의 설계방법을 제안하였다. 제안된 연결슬래브 설계방법의 검증을 위하여 연결슬래브 바닥판 실험체를 제작하고 연결슬래브의 휨성능 및 균열 사용성 검증실험을 수행하였으며, 이후 실제 교량시스템을 모사한 실험체를 이용하여 200만회 피로성능 검증실험을 수행하였다.

핵심용어 : 모듈러교량, 연결슬래브, 연속화 공법, 휨실험, 피로실험