연속 프리캐스트 합성바닥판의 비탄성 거동

Inelastic Behavior of Continuous Precast Composite Slabs

심 창수* 정 영수** 민 진***
Shim, Chang-Su · Chung, Young-Soo · Min Jin

ABSTRACT

A prefabricated composite hollow slab with perforated I-beams was suggested for the replacement of deteriorated concrete decks or the construction of new composite bridges with long-span slabs. Composite slabs with embedded I-beams have considerably higher stiffness and strength. For the application of prefabricated composite slabs to bridges, joints between slabs should satisfy the requirements of the ultimate limit state and the serviceability limit state. In this paper, three types of the detail for loop joints were selected and their structural performance in terms of strength and crack control was investigated through static tests on continuous composite slabs. A main parameter was the detail of the joint, such as an ordinary loop joint and loop joint with additional reinforcements. Even though there was no connection of the steel beams at the joints, the loop joints showed good performance in terms of strength. In terms of crack control, the loop joint with additional reinforcements showed better performance. In ultimate limit state, the continuous composite slabs showed good moment redistribution and ductility.

Keywords: prefabricated composite hollow slab, perforated I-beams, loop joint, strength, crack width.

1. 서론

합성바닥판은 바닥판 자체가 콘크리트와 강재의 합성작용을 통해 높은 강성과 강도를 확보하는 구조로 구조적 성능으로 인해 바닥판의 두께를 감소시켜서 교량의 자중을 감소시킬 수 있다. 특히, 바닥판의 지간이 긴 경우에는 효과적으로 적용될 수 있기 때문에 최근의 소수거더교 등에 적용될 수 있다. 교량의 바닥판은 주로 I형강 매입 합성바닥판이 적용되어 왔는데 합성바닥판은 구조적 장점을 갖는 반면에 설계의 복잡성이라는 단점을 가지고 있기 때문에 적절한 표준화와 함께 설계의 단순화가 필요하다.

I형강 합성바닥판은 형강의 복잡한 형태로 인한 피로 문제와 더불어 설계의 어려움이 제기되어 왔다. 기존의 형강의 상세를 개선하고 이를 활용하기 위한 실험적 연구가 진행되었고 추가적인 사하중 경감을 도모하기 위해 교축방향으로 중공시킨 새로운 형태의 I형강 중공합성바닥판을 제안하였는데(정영수 등, 2001) 이를 검증하기 위한 실험 및 해석적

* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수 (E-mail : csshim@cau.ac.kr)
** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 교수 (E-mail : chung47@cau.ac.kr)
*** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : parkcg@ms.cau.ac.kr)

연구가 수행되었다(정영수 등, 2003, 심창수 등, 2003). 이를 토대로 이 논문에서는 정모멘트부와 부모멘트부의 균열폭을 평가하였고, 각 변수별 이음부 강도와 연속부재의 비탄성 거동에 의한 하중 재분배 효과를 평가하였다.

2. 프리캐스트 합성중공바닥판의 교축방향 이음부 상세

바닥판의 횡방향 설계에서 교축방향으로 발생하는 이음부를 설계하기 위한 기본적인 아이디어의 출발은 단순한 루프 철근이음인데 형강의 위치가 바닥판의 하부에 위치하기 때문에 부모멘트를 받는 영역에서는 상부의 콘크리트 덮개가 크고 균열폭 제어의 필요성이 있기 때문에 이를 고려하여 세 가지 안을 결정하여 시험체를 제작하였다. 표 1에 나타낸 바와 같이 루프이음을 갖는 기본부재와 추가적인 보강철근을 바닥판 상부에 배치한 이음부, 상부철근의 부식을 고려해서 보강철근 대신에 스테인레스 와이어메쉬를 보강한 이음부 상세안에 대해서 각각 2개의 부재를 만들어 접지판 재하와 선하중 재하를 실시하였다. 주철근 방향의 이음부 철근이 한 단면에서 모두 끝나지 않도록 지그재그 배치를 하였고 형강과 형강 사이의 공간을 이용하여 루프 이음을 만들 수 있도록 설계하였다. 프리캐스트 바닥판을 제작하여 거치할 때 서로 겹치지 않도록 좌우의 이음부 철근의 위치를 결정하였다.

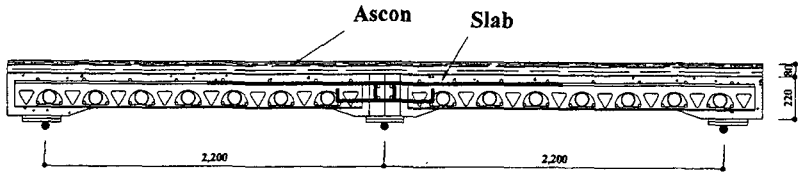


그림 1. 실험단면

표 1. 실험 계획

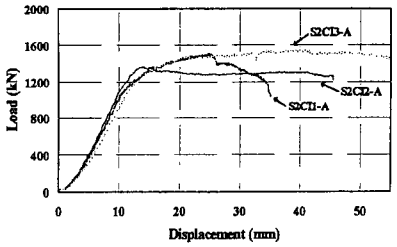
시험체	이음부	내 용	시험체명
교축직각방향 (2@2.2=4.4 m) 교축방향 (1.0 m) 두께 (0.22 m)	제 1 안	루프이음	S2CI1-A
			S2CI1-B
	제 2 안	루프이음 + 보강철근	S2CI2-A
			S2CI2-B
	제 3 안	루프이음 + S.S.W.M	S2CI3-A
			S2CI3-B

3. 사용성 평가

연속바닥판으로서의 사용성은 처짐과 균열거동이라고 할 수 있는데 그림 2에 세 가지 이음부 상세를 가진 각 부재의 하중-처짐 곡선을 나타내었고 하중은 양쪽 지간에 재하된 하중의 합을 나타낸다. 우선, 초기 거동에 대해서는 제 2안이 강성이 다소 크게 나타났지만 세 가지 이음부가 휨강성의 차이는 크게 없는 것으로 보아도 무방할 것으로 판단된다. 변형능력은 스테인레스와이어메쉬를 가진 제3안이 가장 좋은 것으로 나타났다.

균열 거동을 살펴보면 초기 균열 발생하중은 세 가지 이음부 상세에 대해서 일관된 경향은 관찰되지 않았다. 균열양상에서 보면 제2안과 제3안이 균열이 넓게 분포하였고 루프이음만을 사용한 제1안의 경우에는 이음부에 균열이 집중되는 형태를 보였다. 표 2에 초기 균열 발생하중과 0.2mm 균열하중을 정리하였는데 0.2mm 균열폭에 해당하는 하중을 평가한 결과는 제2안과 제3안이 안정적으로 나타났지만 스테인레스 와이어메쉬의 경우는 와이어의 정착부분이 약하고 박리현상의 발생으로 인해 거동이 양호하지 못하였다.

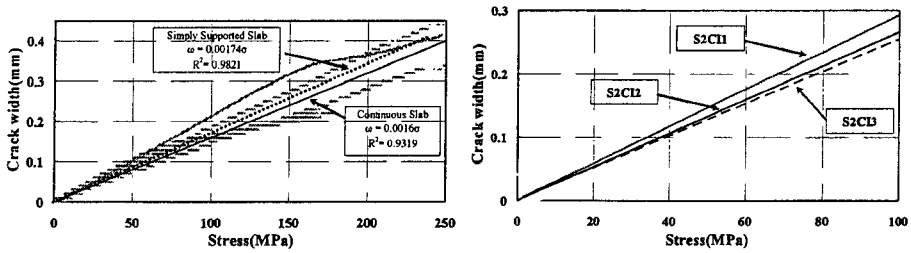
표 2. 균열하중



시험체		균열하중(kN)	
		초기균열	0.2mm 균열
집지판 하중	S2CI1-A	254	207
	S2CI2-A	245	428
	S2CI3-A	196	342
선하중	S2CI1-B	345	464
	S2CI2-B	284	327
	S2CI3-B	255	487

그림 2. 하중-처짐 곡선

철근 콘크리트 부재와 달리 강재매입형 합성단면의 경우에 인장측 단면의 최외측에 철근이 없는 경우에 균열폭 제어에 대한 규정이 요구된다. 이미 수행한 단경간 합성바닥판에 대한 연구결과에 이어서 연속 바닥판 실험에서도 인장측 형강의 하부플랜지 응력과 그 위치에서의 측정 균열폭 사이의 관계를 그림 3에 나타내었다. 두 실험의 결과가 유사하게 나타났기 때문에 추후 실험을 통해서 균열폭 제어식 도출이 가능할 것으로 판단된다. 부모멘트 루프 철근이음부의 균열 거동을 살펴보기 위하여 이음부에 위치한 횡방향 철근과 이음면의 균열폭을 측정하여 관계를 도시하였다. 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 현재의 일체 타설된 철근 콘크리트 구조물에 대한 균열폭 식과 비교하면 균열폭이 과도하게 발생하게 된다. 이는 루프철근이음에서는 신구 콘크리트 접합부이기 때문에 균열이 다소 이음면에 집중되는 측면을 피할 수 없기 때문으로 판단된다. 그러나, 프리캐스트 시공으로 바닥판 자중을 이음부가 받지 않기 때문에 균열폭 제어는 가능하다. 세 가지 이음부 상세별로 철근 인장응력과 균열폭의 관계를 보면 이음부를 보강할수록 균열폭 제어 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있었고 루프 이음에 대한 균열폭 평가 방안을 마련하여 사용성 설계의 기준으로 삼을 필요가 있다.



(a) 형강 인장플랜지 (b) 이음부 주철근

그림 3. 응력과 균열폭 관계 곡선

4. 비탄성 거동

연속 합성바닥판의 경우에 부모멘트 바닥판 상부에서 균열이 발생하면서 지속적인 하중의 재분배가 발생한다. 만일, 동일단면의 경우라면 부모멘트가 집중하중에서 크게 발생하기 때문에 부모멘트가 먼저 항복에 도달하고 정모멘트 단면이 항복에 도달하여 파괴에 도달하는 메카니즘이 형성될 것이다. 그러나, 합성바닥판의 경우에는 정모멘트 단면에 존재하는 형강의 복부 천공단면으로 인해서 항복 도달시점이 다소 빨라지게 된다. 실험에서 구한 최대하중으로부터 정모멘트와 부모멘트 단면의 휨강도 산정의 어려움이 있게 된다. 그림 4에 하중재분배를 고려한 단면 휨강도 산정의 개념을 도시하였다. 선형적인 범위에서는 하중 P에 의해 발생하는 정모멘트는 M_{pe}, 부모멘트는 M_{ne}이고 부모멘트 단면의 휨강도가 M_{nu}라면 이 때의 정모멘트는 $M_{pe}+(M_{ne}-M_{nu})$로 볼 수 있다. 물론, 부모멘

트 단면이 완전히 하중저항능력을 상실한 단계라면 정모멘트는 $PL/4$의 휨모멘트를 받게 될 것이다. 연속합성 바닥판의 극한상태설계는 정모멘트 단면의 휨강도에 의해서 결정되고 부모멘트 단면의 경우에는 정모멘트 단면이 항복할 때까지 하중저항능력을 지속할 수 있는 변형능력이 중요하게 된다.

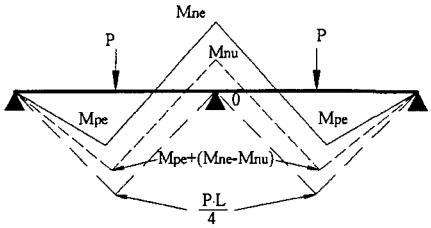


그림 4. 연속바닥판의 모멘트 재분배 개념도

연속합성단면의 비탄성 거동을 좀 더 세밀하게 평가하기 위해서 이음부 주철근의 거동과 정모멘트 형강 하부 플랜지의 거동을 살펴보면 실험부재의 상세에서 예측되듯이 이음부 주철근의 항복시점은 제1안이 가장 빠르다. 즉 이음부 성능은 주철근의 배근 상세에 따라서 개선될 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 정모멘트의 합성단면의 거동에서 알 수 있듯이 이음부 상세와는 무관하게 극한거동을 보이고 있고 이는 매입형강의 용접 품질에 따라서 변동성을 보임을 알 수 있다. 이음부 철근비를 높일수록 주철근의 항복과 형강 하부플랜지의 항복의 도달 시점을 조절할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

프리캐스트로 제작된 I형강 합성중공바닥판의 연속부재에 대해서 세 가지 이음부 상세안에 대한 성능 실험을 수행한 결과를 분석하였다. 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 루프이음으로 연결된 두 개의 합성바닥판 부재의 해석시 정모멘트 단면을 기준으로 동일 강성을 가진 단면으로 보고 수행해도 설계에서 무방할 것으로 판단된다.

2) 휨 강도의 측면에서 극한강도 설계시 연속판이기 때문에 소성힌지 개념을 도입해야 하는데 정모멘트 단면과 부모멘트 단면이 모두 충분한 소성 변형 능력을 보여주고 있고 양호한 하중 분배를 균열과 항복을 일으키면서 할 수 있기 때문에 완전소성해석이 가능할 것으로 판단된다.

(3) 이음부 거동의 측면에서 보면 신구콘크리트 접합이 사용되는 이음부의 사용성 설계에서 균열폭 제어 규정에 대한 보완이 요구되고 현재의 인장철근응력-균열폭 평가식은 이 경우에 대하여 수정이 요구된다.

(4) 휨강도의 측면에서 이음부 주철근의 항복하중과 정모멘트 형강의 항복하중을 비교하면 형강의 항복하중과 거의 유사한 항복강도를 보장할 수 있는 이음부 설계안으로 형강의 강재비와 동일한 수준의 주철근 이음부 철근비를 갖는 경우에 충분한 변형능력을 갖는 것으로 나타났다. 따라서, 부모멘트 철근비 산정시 바닥판 지간을 고려하여 정모멘트 영역의 공칭 휨강도와 동일한 수준을 유지하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 정영수, 박창규, 김용곤, 이원표, (2001) I형강 합성바닥판의 정적성능 평가. **한국콘크리트 학회 논문집**, Vol.13, No.5, pp.430-437.
2. 심창수, 정영수, 박창규, 김병석, "I 형강 합성 중공바닥판의 휨 설계", 대한토목학회 논문집, Vol. 23, No.6A, 2003, 11, pp. 1095-1104.
3. 정영수, 심창수, 김대호, 김병석, "I 형강 합성중공바닥판의 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, Vol. 23, No.6A, 2003, 11, pp. 1105-1112.