

I형강 합성 중공바닥판의 휨거동

Flexural Behavior of I-beam Composite Hollow Slabs

김 대 호^{*} 심 창 수^{**} 박 창 규^{***} 정 영 수^{****}
Kim, Dae Ho Shim, Chang Su Park, Chang Kyu Chung, Young Soo

ABSTRACT

For the replacement of deteriorated concrete decks or wider-span slab, composite slab could be very attractive due to higher stiffness and strength. Based on the previous research, a modified I-beam composite hollow slab was suggested. In order to investigate the static flexural behavior of the proposed composite slab and to suggest its flexural design method, experiments were performed. Judging from the tests, a composite slab with I-beam having a semi-circle hole showed better structural performance. The effect of web details on the flexural stiffness was negligible. Flexural stiffness, ultimate strength, and ductility of the composite slabs were significantly greater than the RC slab due to composite action. While the failure of the RC slab was punching shear failure, the composite hollow slab showed flexural cracking and failure by yielding of the I-beams and crushing of concrete. Therefore, the current one-way design concept is appropriate for the design of I-beam composite hollow slab.

1. 서론

교량 바닥판은 차량 하중을 일차적으로 받는 구조부재로 가장 먼저 유지관리의 대상이 되는 항목이다. 교량의 설계 추세가 재료를 최소화하는 설계에서 현장 작업의 최소화로 인한 내구성 증대, 유지관리 용이성 등의 합리화 설계의 개념으로 바뀌면서 단순한 형태의 교량 단면을 선호하는 경향이 두드러지게 나타나고 있다. 국내의 경우 교량을 통과하는 차량의 축중의 증가와 함께 전체적인 통행량의 증가로 인해서 상당수 교량의 콘크리트 바닥판이 보수나 보강을 필요로 하는 정도의 손상을 보여주고 있다. 손상 바닥판을 교체할 경우에는 교체된 후의 바닥판의 내구 수명이 교량의 다른 구조부재에 비해서 짧지 않도록 고내구성일 필요성이 있다. 이를 위해서 프리캐스트 바닥판, 영구거푸집의 활용 등 다양한 형태의 바닥판이 제시되고 있는데 I형강 합성바닥판은 현장 작업의 최소화를 확보할 수 있고 현재의 콘크리트 슬래브의 주된 파괴모드인 편칭전단 파괴를 방지할 수 있는 효과적인 대안의 하나가 될 수 있을 것이다.

현재 국내에서 활발하게 시도되고 있는 합성형 교량에서 소수주형교와 같은 교량 구조에서는 콘크리트 바닥판의 지간 증가에 따른 두께 증대로 인하여 실무 적용에 어려움을 겪고 있다. 이는 현행 설계 규정이 다소 과다하여 이를 줄여야 할 필요성이 있음과 동시에 지간에 비해서 두께가 작아도 충분한 내하력 및 내구성을 확보할 수 있는 형태의 바닥판의 개발을 필요로 한다는 의미를 가지는 것이다. 이 연구에서 수행한 I형강 합성 중공바닥판은 두께에 비해서 높은 강성 및 강도를 가짐으로써 교량 설계의 추세에 부합할 수 있는 효과적인 구조라고 판단된다.

I형강을 이용한 바닥판 개발은 우리나라와 유사한 바닥판 피로 손상을 보이고 있는 일본에서 활발

* 정회원, 중앙대학교 토목환경공학과 석사과정

** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

*** 정회원, 중앙대학교 토목공학과 박사과정

**** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

하게 이루어져 적용된 사례가 다수 있다¹⁾²⁾. 국내에서도 I형강의 punch hole의 상세 등을 개선하기 위한 연구들이 수행되어 정적 및 피로성능을 검토하였고 이를 바탕으로 구조적 성능 및 경제성을 개선한 형태의 바닥판이 제시되었다³⁾⁴⁾⁵⁾.

선행된 연구결과를 바탕으로 높은 강성과 강도를 확보하고 동시에 자중을 경감시킬 수 있는 새로운 형태의 합성 중공 바닥판을 제안하고 이에 대한 구조적 거동을 밝히고 추후 설계규정 마련의 기초자료를 확보하기 위한 실험적 연구를 수행하였다.

2. 실험개요

2.1. 실험계획

본 연구는 매입되는 I형강의 상세를 개선하고 추가적인 사하중 경감을 도모하기 위해 교축방향으로 중공시킨 새로운 형태의 I형강 합성 중공바닥판을 제안하고 이를 검증하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 현재의 바닥판 설계가 일방향 보 설계의 개념으로 수행되기 때문에 정적 실험을 통해서 합성 중공바닥판의 휨거동을 평가하고 균열 및 파괴거동을 비교하였다.

2.2. I형강 합성 중공바닥판의 상세

본 연구에서 제안하고자 하는 합성 중공바닥판의 개요도는 그림 1과 같으며 주철근 대응으로 매입되는 I형강의 복부에 이전의 실험 및 해석적 연구결과를 바탕으로 punch hole의 형태를 삼각형과 반원형으로 하고 여기에 자중 경감을 좀 더 확보하기 위하여 강관을 삽입하여 중공단면을 형성시켰다. 그림 2, 3과 같은 상세를 채택하여 철근 콘크리트 바닥판에 비해 10% 정도의 추가 자중경감을 할 수 있게 되었다.

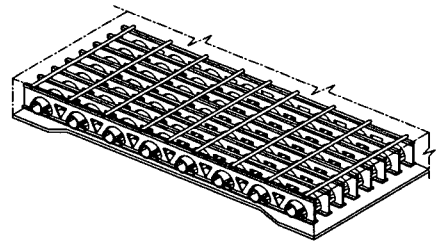


그림 1 I형강 합성 중공바닥판 개요도



그림 2 단면도

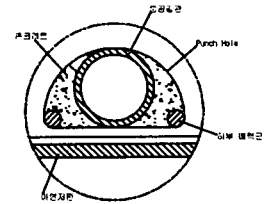


그림 3 중공 및 Punch Hole 상세

2.3. 실험부재

제안된 합성 중공바닥판의 정적 휨 거동을 평가하기 위해서 세 개의 실험부재를 설계, 제작하였다. 형강 복부의 상세가 서로 다른 두 개의 합성 중공바닥판은 주부재인 I형강을 15cm 간격에 단순지지된 경간거리 2,200 mm × 폭 2,200 mm 간격으로 제작하였으며 punch hole의 상세가 삼각형을 선택한 부재(SIT)와 반원형과 삼각형을 조합한 부재(SIC)로 구분할 수 있다. 합성 중공바닥판 부재와의 성능비교 검토를 위해서 철근 콘크리트 바닥판 부재(RC)를 제작하였다. I형강의 복부 상세로 인해서 응력집중이 발생하는데 이를 경감하기 위해서 삼각형과 반원형의 모서리는 원형처리를 하였다. 합성 중공바닥판의 I형강은 그림 4, 5와 같이 직접 제작하였으며 제작시에는 용접변형을 제어하기 위한 세심한 노력을 기울였다.

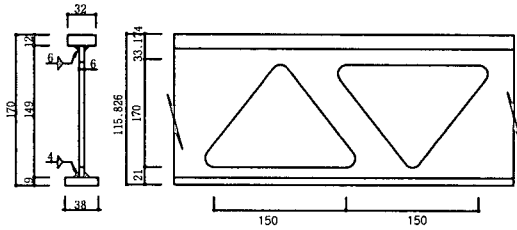


그림 4 SIT부재의 형상 상세

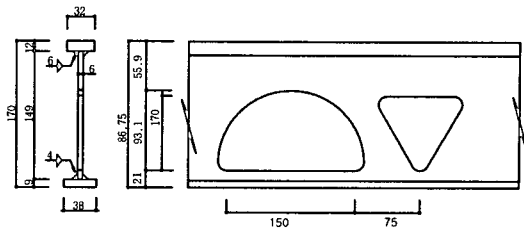


그림 5 SIC부재의 형상 상세

합성바닥판에 대한 별도의 국내 설계 규정이 없기 때문에 이 실험에서 제작된 부재는 허용응력설계법을 적용하였으며 철근콘크리트 바닥판은 강도설계법으로 설계하였다. 설계된 콘크리트 단면에 대한 강재비는 0.013이고 합성 중공바닥판의 강재비는 SIT부재는 0.029, SIC부재는 0.035로 철근 콘크리트 바닥판에 비해서 두 배 정도 높은 수준이다. 각각의 실험체 재원은 표 1과 같다.

실험부재에 사용된 I형강은 SWS400 강재를 사용하였고 바닥판의 철근은 SD30 강재를 사용하였다. 실험체를 위한 콘크리트는 240 kgf/cm²의 설계강도로 하였고 $\Phi 10 \times 20$ cm 공시체를 이용한 압축강도 실험결과는 SIC, SIT/RC가 각각 381 kgf/cm², 330 kgf/cm² 이었다. SIC 부재는 먼저 타설하였고 SIT와 RC 부재는 동시에 타설하였는데 겨울철 강도발현을 위해서 증기양생을 실시하였다. 실험체의 콘크리트 배합설계표는 표 2에 정리하였다.

표 1 바닥판 실험체 재원(단위 mm)

구분	길이	폭	높이	주부재 간격
SIT	2,200	2,200	220	I형강(삼각형) @ 150
SIC	2,200	2,200	220	I형강(반원형) @ 150
RC	2,200	2,200	220	D19 @ 150

표 2 실험체의 콘크리트 배합설계표

굵은 골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물-시멘트비 (W/C)	잔골재율 (%)	단위중량 (kg/m ³)				설계기준강도 (kgf/cm ²)
					물	시멘트	잔골재	굵은골재	
25	12	4.5	50.9	47.3	168	330	839	960	240

2.4. 실험방법 및 측정

합성 중공바닥판의 정적 휨거동을 평가하기 위해서 균열하중을 기준으로 하중재하의 크기를 결정하였다. 바닥판의 정적 재하 실험의 하중재하는 RC바닥판과 I형강 합성 중공바닥판 모두 350 tonf 용량의 Actuator를 사용하여 50 cm×20 cm의 재하면적에 재하하였고 재하위치는 바닥판의 중앙으로 하였다. 하중재하는 그림 6와 같이 4단계로 나누어서 10.0 tonf 까지 하중재하 후 하중을 제거하여 초기 휨 거동을 평가하였다. 20.0 tonf, 40.0 tonf 까지 재하한 후 하중을 제거하여 균열하중을 평가하고 균열 초기 단계의 거동을 살펴보았다. 마지막으로 0.02 mm/sec로 실험체가 더 이상 외력에 저항하지 못할 때까지 변위제어로 파괴실험을 수행하였다.

I형강 합성 중공바닥판 실험체는 상부 압축측에 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였고, I형강의 Punch Hole 하부, 하부플랜지 및 배력근, 중공강관의 중앙에 변형률 게이지를 부착하여 변형률을 계측을 하였으며, 하부에 주철근의 위치와 동일하게 변위계를 부착하여 처짐을 측정하였으며 그림 7, 8에 나타내었다. 실험에서 발생하는 데이터의 계측은 Data Logger로 측정하였다.

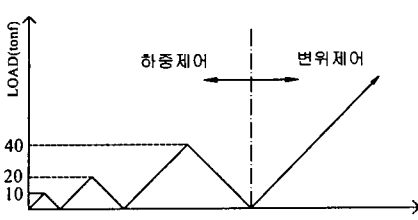


그림 6 하중 재하

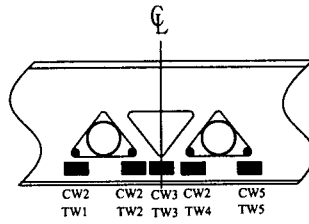


그림 7 복부의 변형을 측정위치

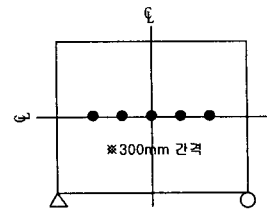


그림 8 처짐 측정위치

3. 실험 결과 및 분석

두 가지 형태의 Punch hole 형상을 갖는 I형강 합성 중공바닥판 실험부재(SIC, SIT)와 철근콘크리트 바닥판 실험부재(RC)에 대하여 균열전후의 휨 거동, 균열하중 및 균열양상, 균열 발생이후의 비선형 거동, 극한거동으로 구분하여 각각에 대한 결과를 비교·정리하였다.

3.1. 균열전·후의 휨 거동

균열전·후의 처짐 측정결과를 나타낸 그림 9, 10로부터 판단할 때 형강의 상세 차이에 따른 휨강성의 차이는 없는 것으로 나타났고 그림 11의 처짐 곡선을 보면 합성 중공바닥판이 철근콘크리트 바닥판에 비해 I형강과의 합성작용으로 인해서 휨강성이 상당히 높은 것으로 판단된다. 이는 바닥판의 경간이 길어지는 소수주형교 등에 적용할 때 상당히 중요한 장점이 될수 있을것으로 판단된다.

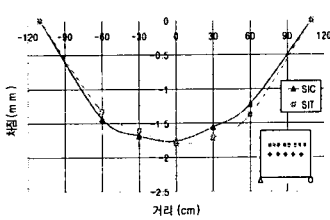


그림 9 균열 전(20tonf) 처짐곡선

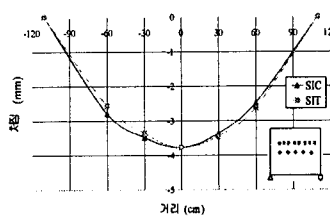


그림 10 균열 후(40tonf) 처짐곡선

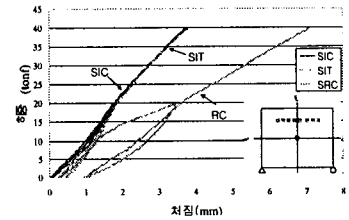


그림 11 균열 전·후 하중-처짐곡선

3.2 합성 중공바닥판의 변형률 변화

균열전·후의 각 구성부재의 위치별로 하중에 따른 변형률의 변화를 살펴보기로 한다. 그림 12, 13의 SIT와 SIC 부재의 형강 복부 변형률은 두 부재에서 차이를 보이고 있고 SIT 부재의 경우에는 낮은 하중에서 하중-변형률 관계의 변화를 보이고 있어서 이는 합성 중공바닥판의 극한거동에 좋지 않은 효과를 미치는 것으로 나타났다.

형강의 하부 플랜지의 변형률 측정결과는 그림 14, 15에 나타내었으며 반원형 상세를 가진 부재가 SIT부재에 비해서 동일하중에서 낮은 변형률 수준을 보이는 것으로 나타났는데 이는 SIC 부재가 콘크리트 강도가 높아서 강재의 하중분담률이 상대적으로 작은 것과 형강 복부의 상세 차이로 인한 것으로 판단된다.

합성 중공바닥판은 2방향 휨 거동을 하기 때문에 배력근의 위치를 고려할 때 측정된 변형률의 크기는 형강의 복부와 하부 플랜지의 변형률의 크기보다 약간 작은 정도의 크기를 보이고 있는데 이는 배력근이 구조 부재로서 제대로 거동함을 보여준다. 그림 16, 17은 배력근이 형강의 punch hole에 위치하여 휨의 분배를 효율적으로 했음을 나타내는 것이다.

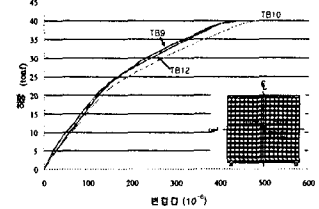
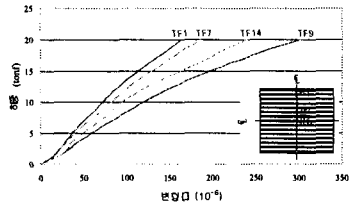
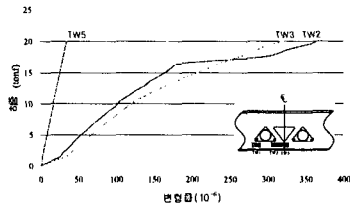


그림 12 복부의 하중-변형률곡선(SIT) 그림 14 하부플랜지의 하중-변형률곡선(SIT) 그림 16 배력근의 하중-변형률곡선(SIT)

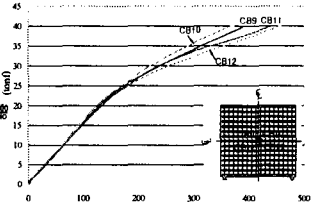
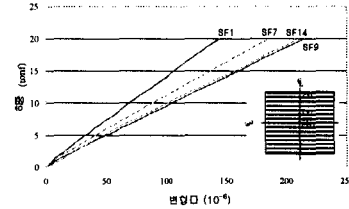
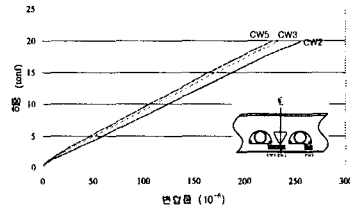


그림 13 복부의 하중-변형률곡선(SIC) 그림 15 하부플랜지의 하중-변형률곡선(SIC) 그림 17 배력근의 하중-변형률곡선(SIC)

3.3. 균열하중 및 균열 양상

I형강 합성 중공바닥판 부재에서 균열하중의 평가는 매우 중요한 의미를 지닌다. 실험에서 육안으로 관찰된 균열하중 및 균열폭은 아래 표 3과 같이 철근콘크리트 바닥판에 비해서 높은 균열하중을 나타내고 있으며 같은 하중에서의 균열폭 또한 철근콘크리트 바닥판이 두드러지게 큰 균열폭을 보여주었다. 또한, 그림 18, 19, 20과 같은 균열 양상에서도 차이가 뚜렷이 나타나고 있는데 합성 중공바닥판 부재는 종방향과 횡방향 균열이 구분되어 나타나고 있고 철근 콘크리트 바닥판은 전형적인 대각선 균열을 포함한 격자균열을 나타내었다. 실험에서 균열 측정은 육안 초기 균열 발생 후 하중단계가 0일 때 균열 Gage를 부착하여 측정하였다.

표 3 균열하중 및 균열폭

구분	균열하중(tonf)		균열폭(mm)		
	육안초기균열	0.2mm 균열	40tonf	60tonf	80tonf
SIT	39	31	0.25	0.46	0.70
SIC	25	34	0.23	0.39	0.54
RC	19	19	0.50	1.56	-

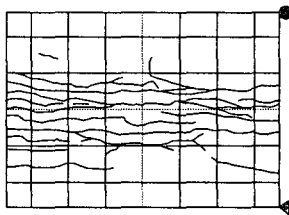


그림 18 균열 양상(SIT)

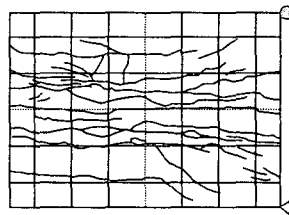


그림 19 균열 양상(SIC)

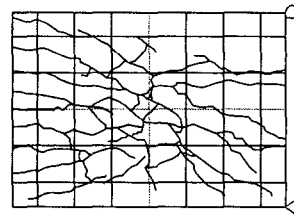


그림 20 균열 양상(RC)

3.4. 극한거동

균열발생후에 바닥판의 극한 내하력을 평가하기 위한 I형강 합성 중공바닥판의 극한 거동을 살펴보고자 한다. 그림 21의 하중-처짐곡선으로부터 판단할 때 철근 콘크리트 바닥판에 비해서 높은

내하력을 보임과 동시에 상당히 큰 연성을 보여주고 있다. 이는 I형강의 존재로 인해서 바닥판의 파괴모드가 휨파괴를 보이기 때문이다. 최대 내하력에 도달한 이후에도 합성 중공바닥판의 내력 감소가 상당히 완만하게 일어나고 강재의 소성 변형의 양상을 충분히 보여주고 있다. 이에 비해서 철근 콘크리트 바닥판은 휨-전단 파괴의 양상을 보임으로써 상대적으로 급격한 내력 저하를 보여주고 있다. SIT 부재의 극한하중은 103.0 tonf, SIC 부재는 107.0 tonf, RC 부재는 70.0 tonf로 평가되었다. punch hole의 형상에 따른 휨 거동의 차이는 미미하지만 반원형이 우수함을 볼 수 있다.

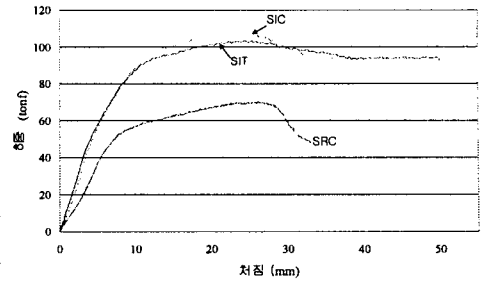


그림 21 하중-처짐곡선

4. 결론

실험적 연구를 통해 평가된 합성 중공바닥판의 휨거동에 관한 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 합성 중공바닥판의 균열 전·후의 형강 상세에 따른 휨강성의 차이는 없는 것으로 나타났고 철근 콘크리트 바닥판에 비해서는 I형강과의 합성작용으로 인해 휨강성이 상당히 높은 것으로 판단된다.
- 2) 균열 전후의 하중-처짐 곡선으로부터 I형강 합성 중공바닥판의 경우에는 콘크리트 부분의 균열발생으로 인한 휨강성의 감소 정도가 미미하지만 철근 콘크리트 바닥판의 경우는 균열 발생으로 인한 휨강성의 감소가 뚜렷하게 나타난다. 이는 합성 중공바닥판의 경우 콘크리트 바닥판이 전체 휨강성의 크기에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문이고 적절한 수준의 균열제어를 할 경우에 강성의 감소를 크게 일으키지 않고 합성 중공바닥판의 경제성을 높일 수 있음을 보여준다.
- 3) 합성 중공바닥판 부재의 파괴모드는 종방향과 횡방향 균열이 구분되어 나타나면서 형강의 항복 및 압축 콘크리트의 파쇄로 인한 휨파괴인데 비하여 철근 콘크리트 바닥판의 파괴모드는 전형적인 대각선 균열을 포함한 격자균열을 나타내는 편칭전단 파괴를 보였다. 합성 중공 바닥판의 파괴모드는 현재의 바닥판 설계 개념과 일치하는 파괴 모드이다.
- 4) I형강의 존재로 인해서 합성 중공바닥판의 극한 거동은 철근 콘크리트 바닥판에 비해서 높은 내하력을 보임과 동시에 상당히 큰 연성을 보여주고 있다. 최대 내하력에 도달한 이후에도 합성 중공바닥판의 내력 감소가 상당히 완만하게 일어나고 강재의 소성 변형의 양상을 충분히 보여주고 있다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 “BRIDGE200” 과제에의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Koji Ohta, Tadahiko Mori, (1994) *Recent Development of Concrete Filled I-Beam Grid Decks*. Proc. of Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering. pp.605-616.
2. Masahide Takagi, Shigeyuki Matsui, Koji Ohta, Kanji Mori, (1997) *Design Method and Fatigue Strength of Large-Span Concrete Filled I-Beam Grid Deck*. IABSE, Austria pp.223-228.
3. 박창규, 석윤호, 김철환, 김용곤, 정영수, (2000) I형강 격자상판에 대한 실험적 연구. 한국콘크리트 학회 학술발표회 논문집, Vol.12 No.1, pp.458-463.
4. 박창규, 김용곤, 정영수, (2001) I형강 격자 상판의 주부재 I형강에 대한 해석적 연구. 한국콘크리트 학회 학술발표회 논문집, Vol.13, No.1, pp.437-442.
5. 정영수, 박창규, 김용곤, 이원표, (2001) I형강 합성바닥판의 정적성능 평가. 한국콘크리트 학회 논문집, Vol.13, No.5, pp.430-437.