

I 형강 격자 상판의 피로 성능에 관한 실험적 연구

Experimental Fatigue Performance of Concrete Slab with I-shaped Steel

박 창 규* 김 용 곤** 김 철 환*** 이 재 형**** 정 영 수*****
Park, Chang Gyu Kim, Yong Gon Kim, Chul Hwan Lee, Jae Hyung Chung, Young Soo

ABSTRACT

Recently, there have been increased much concerns about repair and rehabilitation works for aged concrete structures to keep up with rapid economic growth in Korea since the early 1970's. In particular, it is believed in these days that there are significantly increasing number of aged concrete bridge slabs, which are strongly needed to construct and rehabilitate by innovative construction method.

The objective of this research is to develop the new construction method of concrete slab in bridge structure, which can contribute to minimize the traffic congestion during the repair and rehabilitation works of aged concrete slab, and can also sufficiently assure the quality through the minimization of in-situ works at the site. I-beams with punch holes, which are substituted instead of main reinforcing steels in concrete slabs, will be manufactured in accordance with the specification in the factory, and will be preassembled into the panel. After erecting the reassembled panels in the site, concrete will be poured into the slab panel.

This test is to investigate physical properties of I-Beam with punch holes itself, and then to investigate structural properties of assembled I-Beam panels through static and fatigue test, of which can be utilized for the development of new construction method of concrete slab in bridge structure.

1. 서 론

최근 교량상 통과하중의 증대 및 교통량증대로 공용중의 상판교량은 가혹한 하중하에서 편칭등의 파괴가 발생하여 사용상에 중대한 영향을 미치고 있는 실정이다. 이는 상판의 보수나 교체등의 필요성을 증대시켜 보다 신속하고 간편하며 또한 품질에 신뢰성이 있는 상판개발이 필요하게 되었다. 이와 같은 새로운 상판개발의 필요성으로부터 I형강 격자상판의 개발에 필요한 I형강 자체의 물성 및 구조적 특성에 대하여 심도 있는 고찰이 절실히 요청되는바 본 I형강 구조 실험을 수행하게 되었다. 그림 11에서 나타낸 바와 같이 I형강 격자상판은 구조특징에서 상판두께의 저감, 현장시공의 간편화가 가능하므로 소수 주형교로의 사용이 빈번히 이루어지고 있으며, 상판은 하중을 직접 지지하는 부재이기 때문에 피로내구성 확보가 무엇보다도 중요하다.

* 정희원, 중앙대학교 대학원 지구환경시스템공학과 석사과정

** 정희원, 한경대 이공학부 안전공학과 교수

*** 정희원, (주)현대건설 기술연구소 구조부 과장

**** 정희원, 중앙대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정

***** 정희원, 중앙대학교 건설대학 교수

따라서, 본 연구에서는 국내 여건에 맞는 상판개발을 위한 방안으로, 국내실정에 맞게 설계한 I형강으로 제작한 I형강 콘크리트 상판의 정적 및 피로성능을 알아보고, 또한 RC 콘크리트 상판의 정적 및 피로 성능 실험 결과와 비교 분석하여, 설계 및 시공 설계서의 제시로 I형강의 국산화와 I형강 합성바닥판에 관한 국내의 도로교 표준시방서에 새로운 규정의 도입 및 국내교량에서의 적극적인 활용방안을 모색하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구는 I형강 격자상판의 국산화 개발을 위하여 사전 I형강에 대하여 배력근의 용접위치와 Punch hole 단면형상에 따른 정적재하시험 및 피로성능시험을 수행하여 배력근 용접위치에 따른 피로 균열이 횡방향으로 배력근을 용접한 실험체가 우수함을 확인하였고, 단면형상에 따른 피로성능이 삼각형 단면보다 반원형 단면이 우수함을 확인하였다. 따라서 사전연구를 통하여 얻은 결론을 토대로 I형강 격자 상판을 제작하고 RC 상판과의 정적성능 및 피로성능을 실험하여, 다음의 연구를 수행하였다.

- ① RC 슬래브와 I-170 형강 슬래브의 정적성능 비교 실험
- ② RC 슬래브와 I-170 형강 슬래브의 피로성능 비교 실험
- ③ I형강 슬래브의 하부배력근 용접유무에 따른 피로성능 비교 실험

이에 따라 정적성능 비교에서는 RC 슬래브와 I형강 슬래브의 하중-변형률, 하중-처짐, 파괴현상 등을 분석하였으며 피로성능 비교실험에서는 각 실험체의 재하횟수에 따른 재하횟수-변위, 재하횟수-변형률 관계를 비교하여 피로조건에 대한 상대적 성능비교를 하고자 하였다.

본 실험체는 단순 지지된 경간거리 2.2m x 폭 2.1m로 계획하였다. 우선 RC 슬래브의 경우는 교량에서 설계 및 시공되고 있는 일반적인 형태로 상부피복 6cm 하부피복 4cm, 슬래브의 두께는 25cm로 결정하였으며, 주철근은 D19 C.T.C 15cm로 계획하였다. I형강 슬래브는 균열 관측을 위하여 아연 저판을 설치하지 않았으며, C.T.C 15cm인 I형강 슬래브를 제작하였다. I형강 슬래브의 두께는 22cm로 결정하였다. 다음 표1은 실험체 제원을 나타내었다.

표 1 슬래브 실험체 제원 (단위: mm)

실험체명	슬래브의 길이	슬래브의 경간거리	슬래브의 폭	슬래브의 높이	주 부 재
I형강 슬래브	2,500	2,200	2,100	220	I-170SC
RC 슬래브	2,500	2,200	2,100	250	D19

2.2 사용재료

2.2.1 강 재

주부재 강재의 재질은 일반 구조용 강재 SS400으로 정하였으나, 본 실험에서는 제작상 용접이 불가피하여 허용응력과 항복응력이 동일한 SWS400으로 정하였으며, 철근은 SD30을 사용하였다.

2.2.2 콘크리트

본 연구에서 사용된 콘크리트 배합 및 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 로 제작된 공시체의 28일 압축강도는 다음과 같다.

표 2 실험체 배합설계표

Max. size of Coarse Agg. (mm)	slump (cm)	W/C	Fine Coarse Agg. Ratio (%)	Unit Weight (kgf/cm^3)				Compressive Strength (kgf/cm^2)
				Water	Cement	Fine Agg.	Coarse Agg.	
25	8	54	44.1	178	330	698	1263	287

2.3 실험방법

2.3.1 정적실험

슬래브의 정적 재하 시험용 실험체는 RC 슬래브(SR)와 I형강 격자상판(SIW) 각 1기씩 제작하였다. 하중은 100 tonf 급 Actuator를 사용하여 50cm×20cm의 재하면적에 재하속도 200 kgf/sec로 30.0 tonf 까지는 하중제어로, 그 이후 실험체가 더 이상 외력에 저항하지 못할 때까지 변위제어로 실험을 하였다.

2.3.2 피로실험

피로 시험용 실험체는 RC 슬래브 3기 및 I형강 슬래브 4기로, 하중은 50 tonf급 Actuator를 사용하여 실험체 중앙에 재하면적 50cm×20cm, 재하속도 2.0 Hz로 재하하였다.

각 실험체별 재하하중은 최소하중 (P_{min})은 2.0 tonf 으로 설정하였고, 최하중 (P_{max})은 각 실험체에 재하되는 하중을 달리하여 아래 표 3과 같이 설정하였다. I형강 슬래브 실험체(FIB)는 하부배력근을 주부재에 용접하지 않고 배근한 실험체이다. 본 실험체(FIB)는 하부배력근을 주부재에 용접한 실험체(FIW)와의 용접으로 인한 피로 성능을 비교하기 위하여 계획하였다.

또한, 일반적으로 교량에 수십년 이상의 내용연한을 갖는 것을 목표로 하여 100만회 정도면 충분하나 설계에서는 200만회를 목표로 한다. 따라서, 본 실험에서는 피로파괴시까지 재하하는 것을 기본 목표로 하나 피로파괴가 되지 않을 경우 최대 200만회까지 재하하는 것을 목표로 계획하였다.

표 3 피로실험 하중 계획표

RC-슬래브	하중 (P_{max})	비 고	I-형강 슬래브	하중 (P_{max})	비 고
FR 14.5	14.5 tonf	DB-24	FIW 14.5	14.5 tonf	DB-24
FR 20.5	20.5 tonf	$\Delta f = 1,300 \text{ kgf/cm}^2$	FIW 20.5	20.5 tonf	$\Delta f = 1,300 \text{ kgf/cm}^2$
FR 25.5	25.5 tonf	$\Delta f = 1,625 \text{ kgf/cm}^2$	FIW 25.5	25.5 tonf	$\Delta f = 1,625 \text{ kgf/cm}^2$
-	-	-	FIB 25.5	25.5 tonf	$\Delta f = 1,625 \text{ kgf/cm}^2$

비고) F: Fatigue, R: RC 슬래브, I: I형강 슬래브, W: Welding, B: Binding

3. 실험 결과 및 분석

3.1 정적실험

항복하중의 경우 RC 슬래브의 주철근과 I형 격자상판의 주부재 Web Hole 하단 우각부의 항복은 다소 유사한 하중값을 보였다. 주철근의 경우 40.0 tonf이고, 주부재 Web Hole 하단 우각부의 경우는 46.0 tonf 에서 항복을 하였지만(그림 2 참조), 구조물의 거동에서는 RC 슬래브는 50.0 tonf, I형강 슬래브는 75.0 tonf (그림 3 참조)으로 상당히 큰 차이를 보였다. 이는 RC 슬래브는 주철근이 항복하면서 구조물 전체가 탄성범위를 넘어서지만, I형강 슬래브는 주부재 I형강의 Hole 하단 우각부가 항복을 하여도 하부 플랜지가 탄성범위내에 있어서 구조물의 거동이 전체적으로 탄성체로서 거동을 한 것으로 판단되며, 하부 플랜지가 항복한 후에 구조물이 탄성범위를 넘어선 것으로 판단된다. 또한, 처짐은 I형강 슬래브가 RC 슬래브 보다 처짐이 작은 것을 알 수 있다.

표 4 RC 슬래브와 I형강 슬래브의 정적실험 결과

구 분	RC 슬래브	I형강 슬래브	비 고
항 복 하 중	40.0 tonf	46.0 tonf	
파괴 or 실험종료 하중	63.7 tonf	100 tonf	
변 위	5.88 mm	4.86 mm	(항복시)

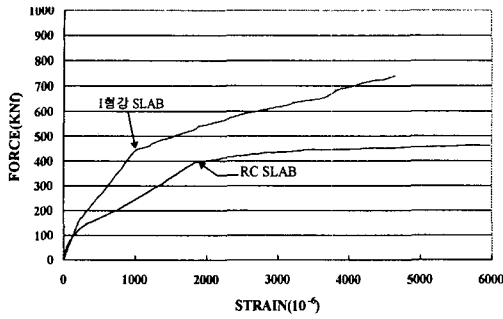


그림 1 I형강슬래브와 RC슬래브의 P-ε 그래프

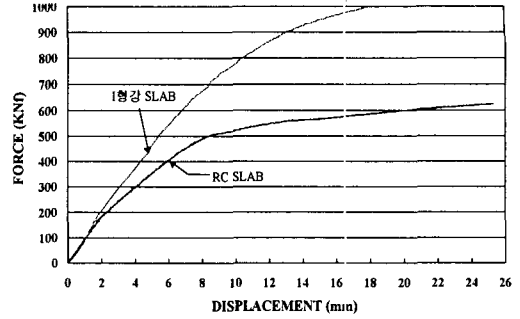


그림 2 I형강슬래브와 RC슬래브의 P-δ 그래프

3.2 피로실험

실험체의 변형률값은 RC슬래브의 경우 초기 휨균열 발생시점부터 100만회 재하후까지 상당히 큰 폭의 변형률값을 보인후 안정세를 이루었고, I형강 슬래브의 경우 초기에는 일정하다가 100만회 이후 증가하는 경향을 모든 시험체에서 동일하게 볼 수 있다. 또한, 실험종료 시점은 실험체 모두 피로파괴가 일어나지 않아 200만회까지 반복재하 하였다.

피로하중에 의한 주철근과 주부재의 변형률값은 14.5 tonf의 하중으로 재하하였을 경우 RC슬래브는 슬래브가 받은 피로응력에 의한 주철근의 변형률 값이 5%~13%라는 미미한 증가를 보여 슬래브가 피로를 거의 받지 않은 것으로 볼 수 있고, I형강 슬래브의 주부재 I형강 Web Hole의 변형률 값이 29%~59%로 일정하게 증가하는 것으로 보아 I형강 Web Hole 하단 우각부가 용접에 의해 피로에는 취약한 것으로 보인다. 그러나, I형강 하부 플랜지의 변형률은 주철근의 변형률보다 평균 8.9% 낮은 변형률값을 보였다(그림 4 참조). 20.5 tonf로 재하하였을 경우 RC 슬래브의 최종 200만회 재하후 주철근 변형률은 평균 23.3%~55.1%의 증가를 보였으며, I형강 슬래브의 주부재 변형률은 평균 24%~61.4%의 증가를 보여 평균적으로는 유사한 값을 나타냈다(그림 6 참조). 또한, 25.5tonf로 재하하였을 경우 RC 슬래브의 주철근 변형률은 평균 21.9%의 증가를 보였으며, I형강 슬래브(FIW 25.5)의 주부재 하부 플랜지의 변형률은 평균 23.7%의 증가로 RC슬래브의 주철근과 유사하였고, Web Hole 하단 우각부는 40.8%의 증가를 보였다.(그림 8 참조).

변위는 14.5 tonf의 경우 RC슬래브의 처짐 증가값은 0.6mm, 처짐 증가율은 25.6%이고, I형강 슬래브의 처짐 증가값은 0.4mm, 처짐 증가율은 18.6%로 RC 슬래브가 비교적 큰 값을 나타나는 것으로 보여 졌다(그림 3 참조). 그리고, 20.5 tonf의 하중으로 재하하였을 경우에도 RC슬래브의 처짐 증가값은 1.6mm, 처짐 증가율은 41.3%이고, I형강 슬래브의 처짐 증가값은 0.7mm, 처짐 증가율은 23.6%로 I형강 슬래브보다 RC슬래브가 상당히 큰 값으로 처짐이 발생하였으며(그림 5 참조), 또한 25.5 tonf의 하중으로 재하하였을 경우에도 RC슬래브의 처짐 증가값은 1.4mm, 처짐 증가율은 37.1%이고, I형강 슬래브(FIW 25.5)의 처짐 증가값은 0.67mm, 처짐 증가율은 20.7%로 I형강 슬래브보다 RC슬래브가 상당히 큰 값으로 처짐이 발생하였다(그림 7 참조). I형강 슬래브가 RC슬래브보다 단면 높이가 낮음에도 불구하고 피로성능이 우수한 것으로 보여진다.

또한, I형강 슬래브에서 배력근 용접 유무에 따른 실험결과 처짐은 FIW25.5(배력근용접)와 FIB25.5(배력근 용접 無) 모두 유사한 결과를 나타내었고(그림 9 참조), 변형률은 FIW25.5의 경우 23.7%~40.8% 증가 하였고, FIB25.5의 경우도 23.9%~33.9%로 유사하게 증가하였으나, FIB25.5 시험체의 하부 플랜지의 변형률값은 약 130~160 $\mu\epsilon$, Web Hole 하단 우각부의 변형률값은 약 460~570 $\mu\epsilon$ 정도 FIW25.5보다 큰 값을 나타내었다(그림 10 참조).

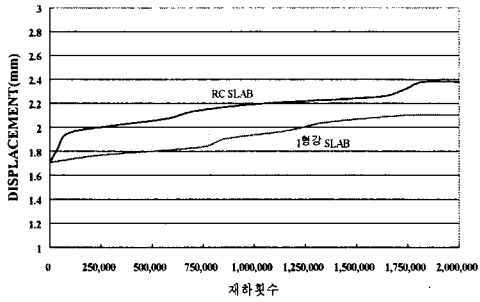


그림 3 FR14.5실험체와 FIW14.5실험체의 재하횟수에 따른 변위 그래프

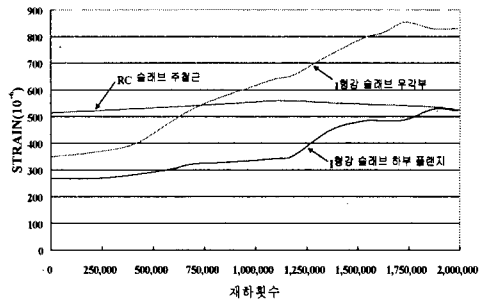


그림 4 FR14.5실험체와 FIW14.5실험체의 재하횟수에 따른 Strain 그래프

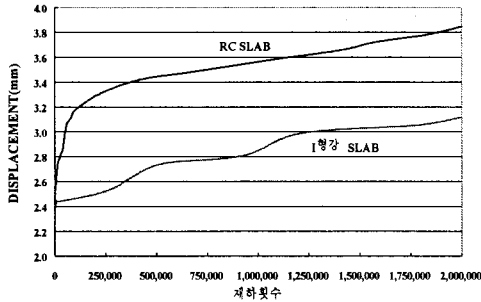


그림 5 FR20.5실험체와 FIW20.5실험체의 재하횟수에 따른 하중-변위 그래프

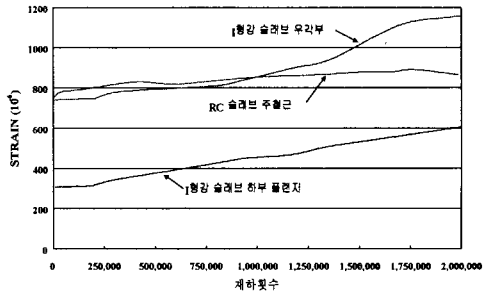


그림 6 FR20.5실험체와 FIW20.5실험체의 재하횟수에 따른 Strain 그래프

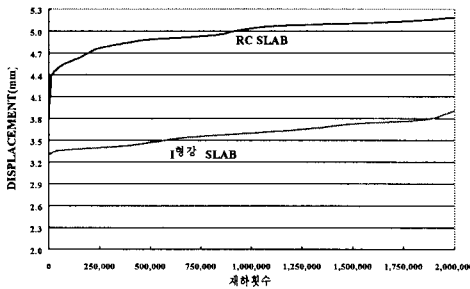


그림 7 FR25.5실험체와 FIW20.5실험체의 재하횟수에 따른 하중-변위 그래프

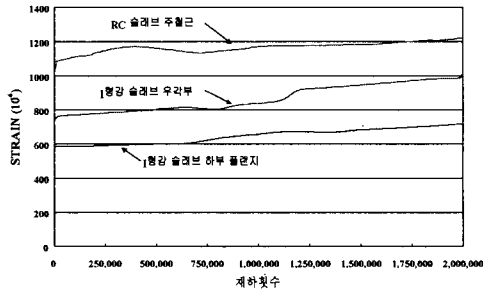


그림 8 FR25.5실험체와 FIW20.5실험체의 재하횟수에 따른 Strain 그래프

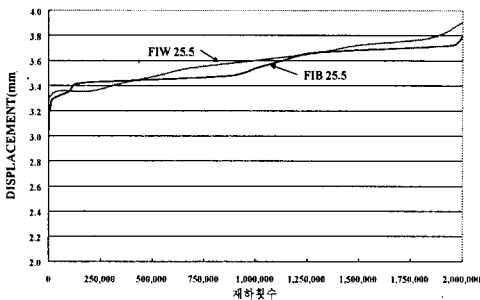


그림 9 FIB25.5실험체와 FIW20.5실험체의 재하횟수에 따른 하중-변위 그래프

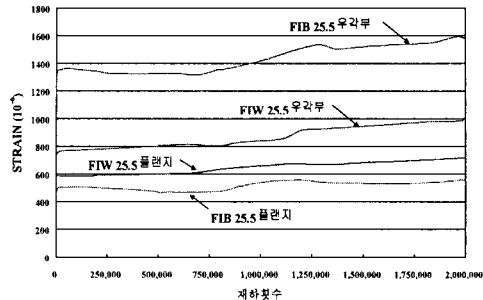


그림 10 FIB25.5실험체와 FIW20.5실험체의 재하횟수에 따른 Strain 그래프

4. 결 론

피로실험 해석 결과 국부적으로는 I형강 Web Hole 하단 우각부가 용접에 의해 피로에는 취약한 것으로 I형강 피로실험과 동일하게 나타났으나, 피로하중 횟수가 증가함에 따른 I형강 슬래브의 처짐량과 처짐증가 기울기 그리고 주부재 I형강 하부플랜지의 변형을 값과 변형을 증가 기울기를 RC슬래브의 처짐 그리고 주철근의 변형률과 비교하였을 때 구조물 전체적으로는 I형강 슬래브가 RC 슬래브보다 피로에 우수한 것으로 판단된다.

또한 I형강 슬래브에서 하부배력근을 I형강의 측면에 용접하는 경우와 용접하지 않은 경우에서는 실험체의 처짐과 하부플랜지 변형률값은 유사하나 I형강 Web Hole 하단 우각부의 변형률 값에서 큰 차이를 보여 국부적으로는 용접을 하는 경우가 보다 피로성능이 우수한 것으로 판단된다.

이상의 결과로 미루어 볼 때, I형강 슬래브의 하부플랜지 면적이 RC 슬래브의 철근량과 유사하고 I형강 슬래브의 두께가 RC 슬래브 보다 3cm 작음에도 불구하고 I형강 슬래브 정적강도와 피로성능이 RC 슬래브보다 더 높은 것을 보면 슬래브의 고정하중 감소효과를 기대할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 현대건설 기술연구소 (과제명 : 교량구조물 상판 가설공법에 관한 연구, 1999) 지원 및 1998년 중앙대학교 연구기자재 구입지원 프로그램에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. “도로교 표준시방서”, 건설교통부, 1996
2. “ I 形鋼格子床版 (Concrete-filled I-beam Grid slab)”, 鋼橋と基礎 98-7, pp.45 ~ 51
3. “ I 形鋼格子床版の 疲勞耐久性に 關す 研究 (疲勞試驗計劃) 構造係大 セミ資料”, 1996.6.3
(Study on fatigue durability of grating-slab)
4. “ I 形鋼格子床版の 少化疲勞耐久性に 關す 研究 構造係大 セ”ミ資料”, 1996.1.29
(Deterioration Mechanism and Fatigue Durability of grating-slab)”
5. “ マキノ吊橋の オーフ'ソク"レーテソク ”, 鋼橋と基礎, 98-1 pp.31 ~ 34
(The Open Grating of the Mackinac Straits Bridge)
6. “ I 形鋼格子床版設計資料”, 建設消土木研究所 資料 第308号, 1967.4.
7. “I 형강 격자 상판에 대한 실험적 연구” 한국 콘크리트학회지, 제12권 1호, 2000.5, pp458~463

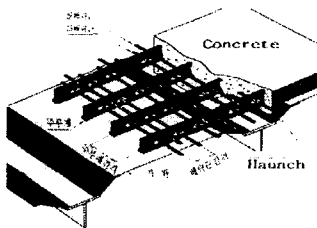


그림11 I형강 격자상판의 주요구조



사진1 슬래브 정적실험



사진2 슬래브 피로실험