

# 루프이음을 가진 모듈식 슬래브 연결부의 휨성능에 관한 실험적 연구

김동완\*, 신정열<sup>2</sup>

<sup>1</sup>포스코건설 R&D 센터, <sup>2</sup>한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부

## An Experimental Study on the Flexural Performance of Modular Slab Connections with Loop Joints

Dong-Woan Kim<sup>1\*</sup>, Jeong Ryo Shin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research & Development Center, Posco Engineering & Construction

<sup>2</sup>Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute

**요약** 최근, 도로를 따라 지하 5~7m의 저심도에 설치되는 저심도 도시철도시스템의 경제성을 확보하기 위해, 신개념의 모듈식 개착 시공법을 개발 중에 있다. 본 연구에서는 상부 슬래브간의 연결부에 대한 구조성능 검증을 위해 루프이음을 가진 프리캐스트 철근콘크리트 부재들의 4점 재하 실험을 수행하였다. 전체 11개의 실험체가 제작되었으며 단면형상, 이음부 형상, 이음길이, 횡방향 보강철근을 변수로 이음이 없는 전단면 및 반단면 실험체와 비교하였다. 실험결과, 루프이음 실험체는 항복하중과 최대하중시 변위량 차이가 컸으며 이는 항복이후 접합부에서 발생한 균열이 확장됨에 따라 강성저하로 변위량이 급격히 증가한 것으로 판단된다. 또한 200mm의 루프이음을 가진 반단면 실험체의 경우, 이음이 없는 기준 실험체에 상당하는 휨성능을 확보하며 200mm 초과시 휨성능 향상의 정체를 보였다.

**Abstract** Recently, new open-cut modular construction method, which is built within a 5~7m depth below the road, was proposed for the near-surface transit system to ensure the economic feasibility of underground structures. In this paper, the precast modular construction method was developed for the low-cost and rapid construction of underground structures. For the experiment on the flexural performance of the modular slab connections, a total of eleven specimens were fabricated according to the test variables; section shape, joint type, lap length, and transverse reinforcement. The test results were compared with those of the specimens without loop joints. To verify the performance of the slab connections, the 4-point loading tests of precast RC members with loop joints were conducted. As a result of the test, the flexural performance of the half-depth specimens with a 200mm lap length of loop joints were confirmed to be similar to those of the specimens without joints.

**Keywords** : Flexural test, Loop joint, Modular construction, Modular slab connections, Near-surface transit, Open-cut

### 1. 서론

국내 도시철도는 주로 광역시이상에서 수송능력을 감안하여 중전철(지하철)로 건설이 시작되었으며 전국적인 광역도시화에 따라 각 지자체에서도 도시철도의 도입을 계획하였다. 그러나 재정여건을 감안한 지상 고가방식의 경전철은 도시미관저해와 소음·진동 등의 문제를 야기하

였다. 이에 경제성, 접근성 및 친환경성을 갖춘 신개념의 도시교통수단인 저심도 도시철도 도입이 추진되고 있으며, 이에 저비용, 공기단축을 위한 모듈식 개착시공기술 개발에 관한 연구가 진행되고 있다[1]. 저심도 모듈식 구조체의 연결부는 벽체와 벽체간의 연결(Wall to Wall), 벽체와 슬래브의 연결(Wall to Slab)이 있는데[2], 본 편은 모듈간 거리가 2m인 상부 슬래브와 슬래브 간의 연

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 "저비용 저심도 인프라 핵심기술 개발" 연구비지원(15RTRP-B068762-03)에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Dong-Woan Kim(Posco Engineering & Construction)

Tel: +82-32-748-1945 email: dwkim@poscoenc.com

Received November 23, 2015

Revised (1st December 8, 2015, 2nd December 21, 2015)

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

결(Slab to Slab)을 대상으로 하였다. 한편, 국내 원전시설의 공기단축, 노후교량의 교체와 신설교량의 급속시공을 위하여 모듈화 연구[3, 4]가 선행된 바 있다.

## 2. 모듈식 슬래브 연결부의 휨실험

### 2.1 실험개요

모듈식 지하구조물의 연결부중 상부 슬래브와 슬래브의 연결(Slab to Slab)형식은 프리캐스트 바닥판간의 연결부 형식으로 기 연구된 루프 이음 형식을 채택하였다 [5, 6]. 루프이음에 대한 기존의 연구는 부재높이 240mm이하의 교량바닥판이 대부분으로 모듈식 지하구조물의 상부슬래브를 형성하는 부재높이 500mm인 루프 이음 실험체에 대한 구조성능 검증을 위해서 Fig. 1과 같이 4점 실험재하실험을 계획하였다[7, 8].

실험체 제원은 600mm×500mm×3,800mm(폭×높이×길이)로 반단면(half-depth) 실험체 6개, 전단면(full-depth) 실험체 5개로 전체 11개의 실험체를 제작 후 하중용량 2,000kN인 UTM을 이용하여 가력속도 0.2mm/min로 실시하였다.

### 2.2 사용재료

본 실험에 사용된 콘크리트는 설계강도 40MPa의 레미콘(Ready-mixed concrete)이며 사용된 철근은 KS D 3504 항복강도 400MPa의 이형철근이다. 반단면 실험체의 상면콘크리트(Topping concrete)는 하면콘크리트와 동일한 레미콘을 이용하였으며 전단면 실험체의 연결부는 20°C, 재령28일의 압축강도가 63MPa인 프리믹스형(Pre-mixed type) 무수축 그라우트제를 적용하였다.

### 2.3 제작과정

실험체는 Fig. 2와 같이 반단면인 경우는 (a) 철근가공조립/센서 설치, (b) 콘크리트 1차 타설 및 양생, (c) 연결부와 상면콘크리트 2차 타설 및 양생 순으로 제작하였으며, 전단면인 경우는 (a), (b)를 수행한 이후 이음부에 (d) 무수축 그라우팅 및 양생 순으로 진행하였다.

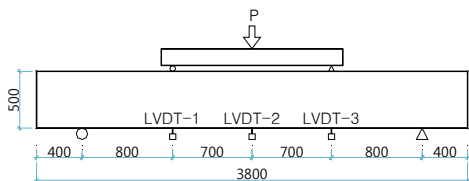


Fig. 1. Schematic of Test



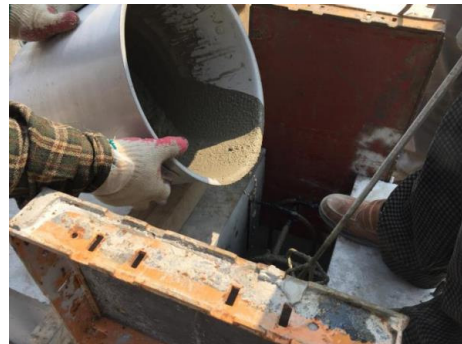
(a) Rebar assembly / Sensor installation



(b) 1<sup>st</sup> casting concrete



(c) 2<sup>nd</sup> casting concrete



(d) Non-shrink grout

Fig. 2. Method for preparing specimens

Table 1. Test Variables of Specimens

No.	Name of Specimens	Section Shape	Joint Shape (Top/Bottom)	effective depth (mm)	Lap Length (mm)	Lateral Reinforcement
1	HJ+0	Half-depth	(Continuous/Continuous)	420	-	-
2	HJ-1	Half-depth	(Continuous/Discontinuous)	80	-	-
3	HJ+1	Half-depth	Loop Joint	420	150	H16-2EA
4	HJ+2	Half-depth	Loop Joint	420	200	H16-2EA
5	HJ+2*	Half-depth	Loop Joint	420	200	H16-4EA
6	HJ+3	Half-depth	Loop Joint	420	250	H16-2EA
7	FJ+0	Full-depth	(Continuous/Continuous)	420	-	-
8	FJ+1	Full-depth	Loop Joint	420	150	H16-2EA
9	FJ+2	Full-depth	Loop Joint	420	200	H16-2EA
10	FJ+2*	Full-depth	Loop Joint	420	200	H16-4EA
11	FJ+3	Full-depth	Loop Joint	420	250	H16-2EA

### 2.4 실험변수

실험변수는 Table 1과 같이 단면 형상, 이음부 형상, 겹이음 길이 및 횡방향 보강철근량을 변화시키며 단면형상에 따라 전단면과 반단면 실험체로 구분하였다. 실험체 제작에 적용된 제작상세도는 Fig. 3과 같으며 이음이 없는 기준 실험체(HJ+0, FJ+0)와 비교하여 루프이음부를 가진 실험체의 구조성능을 검증하였다.

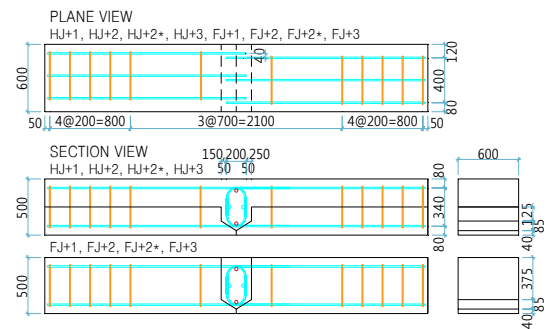
연결부의 시공성 향상을 위해 추가 실험변수로 하단 철근이 단절되고 상면철근만 연속인 반단면 실험체(HJ-1)의 적용성을 검토하였다. 루프이음 철근은 저심도 지하구조물 상부슬래브의 종방향 배력근인 H13@200 철근을 동일하게 사용하고 휨거동 평가가 용이하도록 H10-12EA 전단철근으로 전단보강하였다. 전단면과 반단면 실험체의 겹이음 길이에 대한 변수는 150, 200, 250mm이며, 이음부의 횡방향 보강철근량에 따른 거동 검토를 위해 H16 보강철근을 2EA, 4EA로 변화하였다.

### 2.5 센서설치

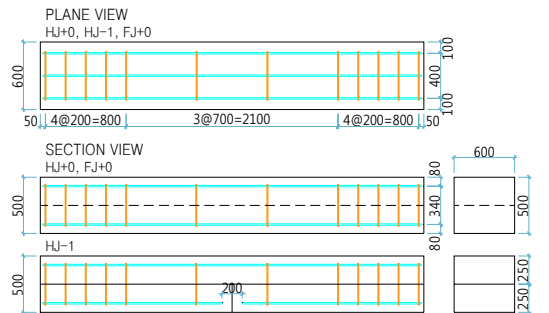
실험시 계측항목은 재하하중, 하중에 따른 변위, 철근과 콘크리트의 변형률, 접합부의 벌어짐을 그 대상으로 하였다. 실험체의 제작시 Fig. 4와 같이 TML사의 철근 변형률 센서(FLA-5-11-5L)과 콘크리트 변형률 센서(PL-60-11-5L)을 설치하였으며, 그 제원은 Table 2와 같다.

Table 2. Sensor Specifications

Model	Sensor size(mm)		Base size(mm)		R.(Ω)
	length	width	length	width	
FLA-5-11-5L	5	1.5	10	3	120
PL-60-11-5L	60	1	75	8	120



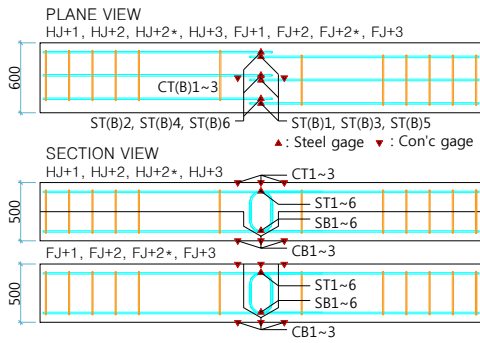
(a) Specimens with loop joint



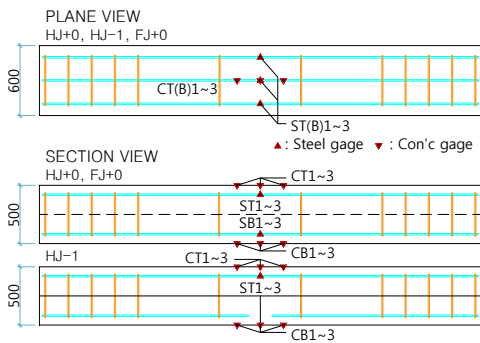
(b) Specimens without loop joint

Fig. 3. Detail drawings for specimens

처짐측정을 위한 변위계는 용량 200mm, 민감도 50×10<sup>-6</sup>mm의 SDP-200D모형을 사용하여 Fig. 5와 같이 실험체의 중앙과 좌우측으로 각각 700mm씩 이격된 롤러지점의 하단부를 측정위치로 하였다. 균열계는 이음부 하면과 주된 균열이 관찰되는 위치에 실험체 종류마다 1~3개를 부착하였다.



(a) Specimens with loop joint



(b) Specimens without loop joint

Fig. 4. Sensor location

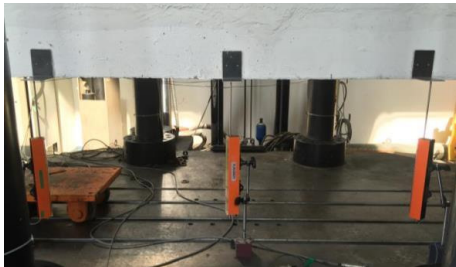


Fig. 5. LVDT(SDP-200D)



Fig. 6. 2,000kN Dynamic UTM

## 2.6 하중재하

실험체의 가력장치는 Fig. 6과 같이 한국건설기술연구원 하중용량 2,000kN UTM을 사용하였으며 주황색의 가력빔을 설치하여 Fig. 1과 같이 중앙부의 좌우측으로 각각 700mm씩 이격된 롤러지점에 가력하중의 1/2씩 재하하고 하중은 변위제어로 가력속도 0.2mm/min으로 제어하였다. 정적데이터 측정장치는 구조물 계측시 범용되는 TML사의 TDS-530 데이터로거를 이용하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 하중과 변위

#### 3.1.1 비루프이음 실험체

루프이음부가 없는 반단면 실험체(HJ+0, HJ-1)과 전단면 실험체(FJ+0)의 시험결과는 Table 3~4와 Fig. 7(a)와 같이 재하하중 197kN, 28kN, 214kN에서 각각 항복하였고 항복시 처짐량은 각각 2.18mm, 0.32mm, 1.06mm이다. 반단면 실험체(HJ+0, HJ-1)은 실험체의 타설과 약 5일간의 양생후 2차 타설에 의한 합성과정이 있는 반면 전단면 실험체(FJ+0)은 일체로 타설되므로 콘크리트 재령차이로 인하여 보다 우수한 휨거동을 보였다.

한편 비교 검토대상인 하면철근 불연속의 반단면 실험체(HJ-1)은 시공성은 우수하나 유효높이 부족으로 다른 실험체 휨성능의 약 20%내외로 현실적인 적용은 어려울 것으로 판단되며 루프이음 없는 기준실험체는 균열하중시와 최대하중시의 변위량 비가 상대적으로 작은 거동을 보였다.

#### 3.1.2 루프이음 실험체

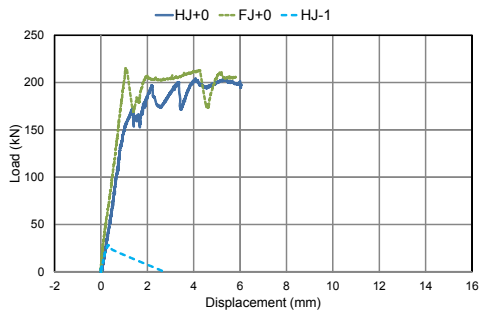
루프이음부가 있는 반단면 실험체(HJ+1, HJ+2, HJ+2\*, HJ+3)과 전단면 실험체(FJ+1, FJ+2, FJ+2\*, FJ+3)의 시험결과는 Table 3과 Fig. 7(b~d)와 같이 재하하중 178kN, 194kN, 195kN, 196kN과 153kN, 169kN, 170kN, 175kN에서 항복하였고, 항복시 처짐량은 각각 4.82mm, 3.92mm, 5.14mm, 4.12mm와 2.80mm, 4.28mm, 4.51mm, 4.23mm이다. 루프이음 실험체는 Table 4와 같이 항복하중과 최대하중시 변위량 차이가 큰 결과를 보였으며 이는 항복이후 접합부에서 발생한 균열의 확장에 따른 강성저하로 변위량이 급격히 증가한 것으로 판단된다.

Table 3. Test Strengths of Specimens

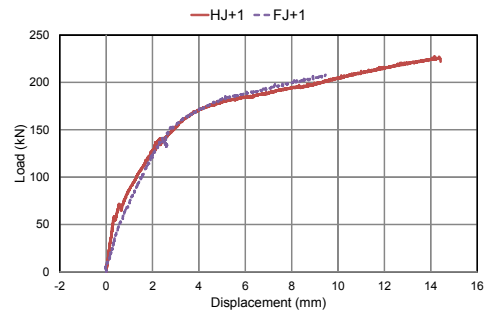
No.	Name of Specimens	Theoretic Strength $M_u$ (kN·m)	Self Weight $M_{u1}$ (kN·m)	0.2mm Cracking Load $P_{cr}$ (kN)	Yielding Load $P_{y2}$ (kN)	Maximum Load $P_{u2}$ (kN)	Yielding Strength $M_{y2}$ (kN·m)	Test Strength $M_u=M_{u1}+M_{y2}$	Ratio ( $M_u/M_n$ )
1	HJ+0	63.290	8.438	188	197	204.9	78.8	87.238	137.8%
2	HJ-1	11.597	8.438	23	28	28.4	11.2	19.638	169.3%
3	HJ+1	63.290	8.438	63	178	227.8	71.2	79.638	125.8%
4	HJ+2	63.290	8.438	68	194	206.4	77.6	86.038	135.9%
5	HJ+2*	63.290	8.438	98	195	207.0	78.0	86.438	136.6%
6	HJ+3	63.290	8.438	98	196	207.1	78.4	86.838	137.2%
7	FJ+0	63.290	8.438	182	214	215.3	85.6	94.038	148.6%
8	FJ+1	63.290	8.438	35	153	208.1	61.2	69.638	110.0%
9	FJ+2	63.290	8.438	38	169	211.3	67.6	76.038	120.1%
10	FJ+2*	63.290	8.438	63	170	212.6	68.0	76.438	120.8%
11	FJ+3	63.290	8.438	41	175	203.9	70.0	78.438	123.9%

Table 4. Displacements of Specimens

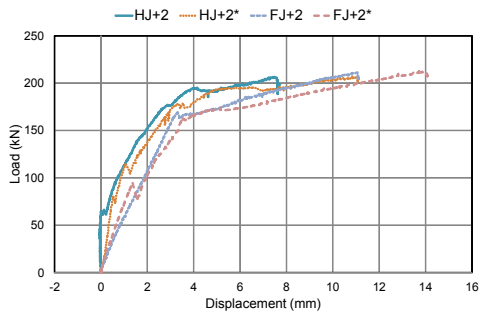
Disp.	HJ+0	HJ-1	HJ+1	HJ+2	HJ+2*	HJ+3	FJ+0	FJ+1	FJ+2	FJ+2*	FJ+3
$\delta_{cr}$ (mm)	2.04	0.22	0.48	0.28	0.83	1.18	0.89	0.36	0.59	0.84	0.60
$\delta_y$ (mm)	2.18	0.32	4.82	3.92	5.14	4.12	1.06	2.80	4.28	4.51	4.23
$\delta_u$ (mm)	5.38	0.36	14.20	7.48	10.84	9.24	4.22	9.46	11.06	13.72	10.06
$\delta_u/\delta_{cr}$	2.64	1.64	29.58	26.71	13.06	7.83	4.74	26.28	18.75	16.33	16.77
$\delta_u/\delta_y$	2.47	1.13	2.95	1.91	2.11	2.24	3.98	3.38	2.58	3.04	2.38



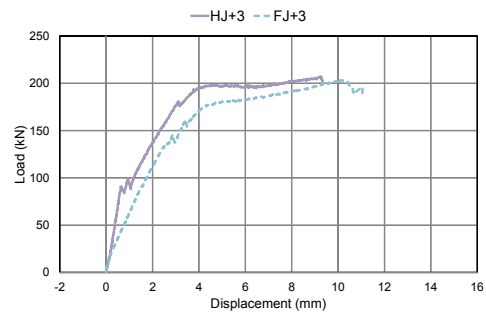
(a) Specimens without loop joint



(b) Specimens with loop joint (Lap Length 150mm)



(c) Specimens with loop joint (Lap Length 200mm)



(d) Specimens with loop joint (Lap Length 250mm)

Fig. 7. Load-displacement curves of specimens

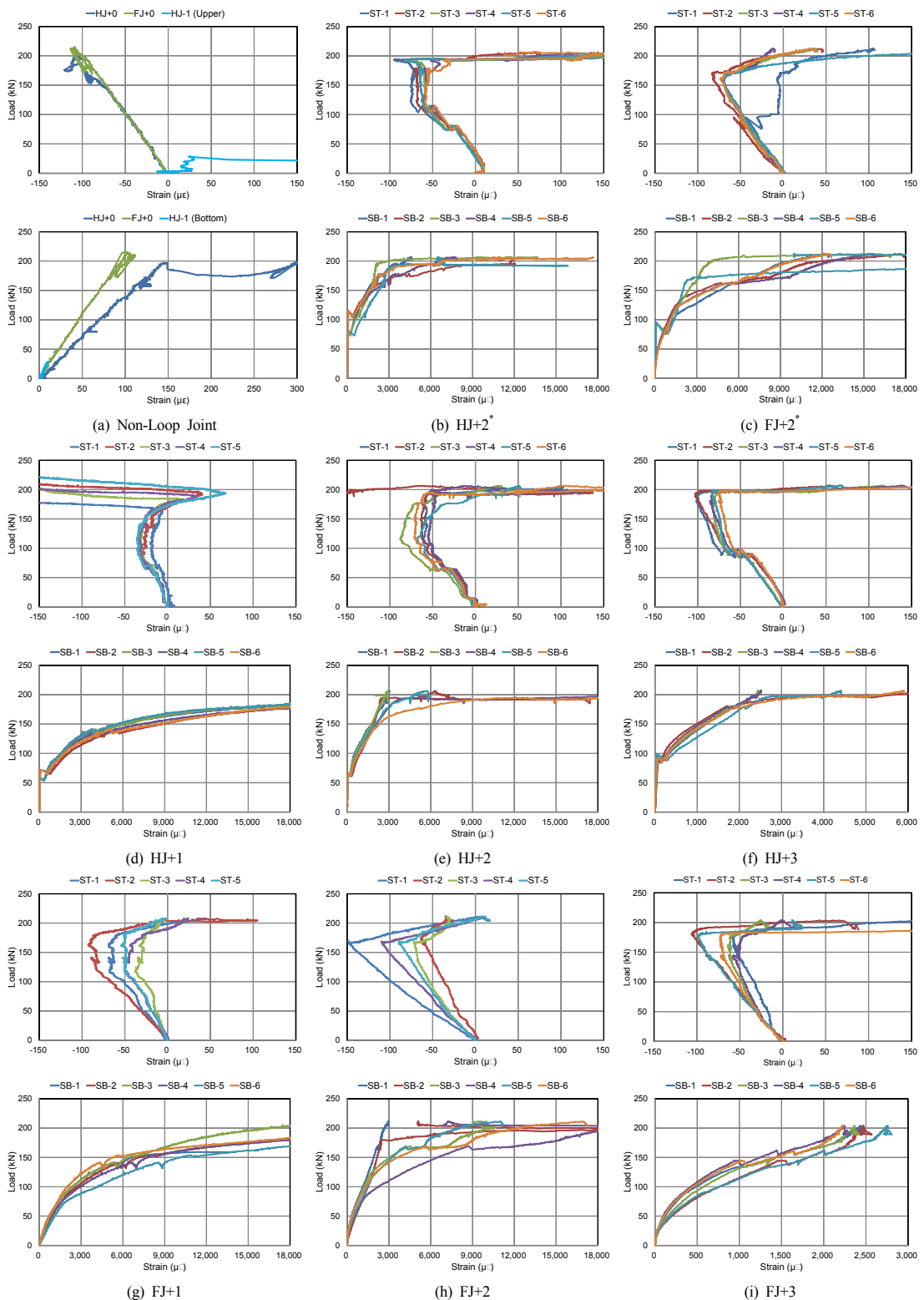


Fig. 8. Load-strain curves of steel bars

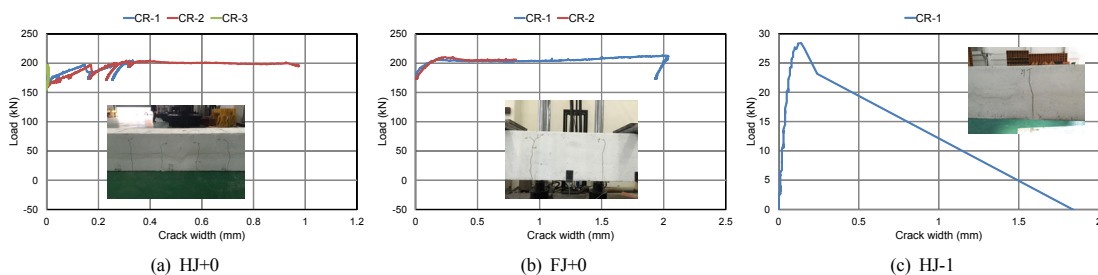


Fig. 9. Cracks of specimens without loop joint

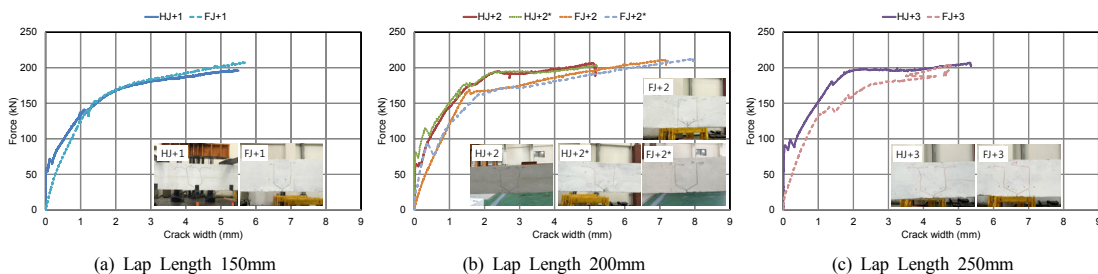


Fig. 10. Cracks of specimens with loop joint

루프이음 반단면 실험체의 최대하중은 이음어 없는 기준실험체(HJ+0)의 최대하중 204.9kN을 상회하였다. 반면, 전단면 실험체의 최대하중은 기준실험체(FJ+0)의 최대하중 215.3kN보다 작으나 전체 실험체의 실험휨강도( $M_n$ )가 공칭휨강도( $M_n$ )를 초과하였다. HJ+1과 FJ+3 실험체는 루프이음 접이음 길이와 최대하중이 비례하는 경향을 보이지 않아 휨성능을 항복하중으로 평가하여 분석한 결과 모든 반단면 실험체의 휨성능이 전단면 실험체보다 우수하였고 루프이음 접이음 길이가 증가할수록 높은 휨성능을 보이거나 200mm이후 휨성능 향상이 정체기를 보였다.

### 3.2 변형과 균열

#### 3.2.1 비루프이음 실험체

루프이음부가 없는 실험체들의 상부철근은 Fig. 8(a)와 같은 하중-변형률 곡선을 보였다. 그 중 기준실험체인 HJ+0과 FJ+0은 하부철근과 동일하게 항복하중까지 응답이 압축변형으로 일정하게 증가하는 양상을 보였으나 HJ-1 실험체는 하부철근이 불연속이므로 상부철근이 항복하중까지 일정한 인장변형을 보이다가 항복이후 응답이 급격히 증가하였다.

실험체들의 균열양상은 Fig. 9와 같이 균열부의 예측이 난해하므로 발생위치를 육안으로 확인한 후 균열계이

지를 부착하여 계측하였다. 반단면 기준실험체(HJ+0)은 재하하중 155kN에서 초기균열 이후 188kN에서 폭 0.2mm 균열이 4개소 발생하였고 전단면 기준실험체(FJ+0)는 재하하중 147kN에서 초기균열후 182kN에서 폭 0.2mm 균열이 2개소 발생하였다. 한편, 하부철근이 없는 실험체(HJ-1)는 철근 및 콘크리트 하부에 부착한 변형률 응답이 약 10~14 $\mu\epsilon$ 내외로 Fig. 9(c)와 같이 하중재하 초기단계인 약 3kN에서 하나의 미세균열이 발생하였다.

#### 3.2.2 루프이음 실험체

루프이음부가 있는 반단면 실험체의 상부철근은 균열 하중까지 선형적인 압축변형을 보인 반면 전단면 실험체는 항복하중까지 선형적인 응답을 보였다. 특히 전단면 실험체는 하부철근의 항복이후 조인트가 벌어지고 상부철근이 급격히 인장되는 거동을 보였다. HJ+1 실험체의 상부철근은 <압축→인장→압축>되는 거동을 보였으나, HJ+1을 제외한 실험체의 상부철근은 <압축→인장>의 거동을 보였다. 또한 루프이음 접이음 길이가 길고 횡방향 보강철근량이 많은 반단면 실험체의 상부철근들이 측정위치에 따른 편차가 작은 안정적인 거동을 보였다.

루프이음 실험체의 균열양상은 Fig. 10과 같이 프리캐스트와 현장타설부의 경계면에서 경계면하부가 이격

됨과 동시에 균열이 생성되었으며 콘크리트 하부에 부착된 변형률 게이지(CB)는 균열발생 이전까지 일정양상으로 인장응력을 받다가 균열발생 이후에 응력이 이완됨을 확인하였다.

반단면 실험체(HJ+1, HJ+2, HJ+2\*, HJ+3)의 폭 0.2mm 균열발생하중은 각각 63kN, 68kN, 98kN, 98kN으로 균열저항성은 루프이음 겹이음길이와 횡방향 보강철근량에 비례하였다. 전단면 실험체(FJ+1, FJ+2, FJ+2\*, FJ+3)은 재하하중 초기부터 루프이음 연결부 하면에서 미세한 이격이 관찰되었으며 폭 0.2mm 균열발생하중은 각각 35kN, 38kN, 63kN, 41kN으로 횡방향 보강철근량을 증가시킨 실험체(FJ+2\*)가 루프이음 겹이음 길이를 증가시킨 실험체(FJ+3)보다 균열저항성이 더 컸다.

#### 4. 결론

저심도 지하구조물에 모듈방식을 적용하기 위해 상부 슬래브간의 연결을 루프이음구조로 계획하였다. 루프이음을 가진 부재높이 500mm인 모듈식 슬래브 연결부의 성능검증을 위해 4점 실내재하실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 루프이음 실험체의 항복하중과 최대하중시 변위량 비는 이음이 없는 기준 실험체와 유사하나 전체 변위량 차이가 컸으며, 이는 항복이후 접합부에서 발생한 균열이 확장됨에 따라 강성저하로 변위량이 급격히 증가한 것으로 판단된다.
- 2) 루프이음 겹이음 길이가 200mm인 경우, 이음이 없는 기준 실험체에 상당하는 휨성능을 확보하며 200mm 초과시 휨성능 향상의 정체를 보였다.
- 3) 200mm이상의 루프이음 겹이음 길이와 횡방향 철근으로 보강된 반단면 실험체의 상부철근은 측정 위치간의 편차가 작고 안정적인 <압축→인장>의 거동을 보였으며 균열 발생이후 실험체가 하중을 회복하고 일정부분의 강성을 유지하는 것을 확인하였다.
- 4) 균열저항성은 루프이음 겹이음 길이와 특히 횡방향 보강철근량에 비례하며, 반단면 실험체에서 보다 큰 균열저항성을 확인하였다.
- 5) 프리캐스트와 현장타설 경계면의 균열제어를 위하여 횡방향 보강철근량을 세부변수로 하는 추가적인 연구가 필요하다.

#### References

- [1] J.R. Shin, A.H. Lee, C.S. Lim, J.S. Lee, D.W. Kim, D.H. Kim, The Concept of Open-cut Modular Construction Method for Near-surface Transit, 2014 Autumn Conference of the Korean Society for Railway, pp. 89 (KSR2014A042), 2014.
- [2] J.K. Lee, J.S. Lee, S.H. Lee, H.S. Kim, Performance Test of Corner Rigid Joint for Modular Structure using Channel and Coupler, Journal of The Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 16, No. 3, pp. 2255-2262, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.3.2255>
- [3] D.W. Kim, J.T. Jun, Y.D. Jeong, J.R. Shin, Development Plan of Modular Slab Structure and Construction Technology, 2014 Spring Conference of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, pp. 539-540, 2014.
- [4] S.Y. Lee, J.J. Song, H.Y. Kim, Y.H. Lee, J.M. Lee, Study on the Shape of a Longitudinal Joint of the Slab-type Precast Modular Bridges, Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 16(5), pp. 98-111, 2012.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2012.16.5.098>
- [5] C.C. Chung, Y.E. Sung, B.H. Hyun, S.J. Park, Experimental Study on Connectability of Half-Depth Precast Deck Panels with Loop Joint, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 28, No. 4A, pp. 581-590, 2008.
- [6] H.K. Ryu, S.P. Chang Y.J. Kim, Experimental Works on the Flexural Behavior of Precast Reinforced Concrete Decks with Loop Joints, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 23, No. 3A, pp. 479-486, 2003.
- [7] D.W. Kim, Y.D. Jeong, J.T. Jun, J.R. Shin, Bending Tests of Half-Depth Precast RC Members with Loop Joints, 2015 Autumn Conference of the Korean Society for Railway, pp. 293-294 (KSR2015A055), 2015.
- [8] D.W. Kim, Y.D. Jeong, J.T. Jun, J.R. Shin, Bending Tests of Full-Depth Precast RC Members with Loop Joints, 2015 Autumn Conference of the Korean Society for Railway, pp. 320-321 (KSR2015A060), 2015.

김 동 완(Dong-Woan Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 한양대학교 공과대학 토목공학과 (토목학사)
- 2000년 2월 : 한양대학교 일반대학원 토목공학과 (토목석사)
- 2010년 8월 ~ 현재 : ㈜포스코건설 R&D센터 (책임연구원)

<관심분야>

토목구조, 교량공학



신 정 열(Jeong-Ryol Shin)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 (토목학사)
- 1998년 8월 : 고려대학교 공과대학 원 토목환경공학과 (토목석사)
- 2010년 8월 : 한국과학기술원 건설 및환경공학과 (토목박사)
- 1998년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부

<관심분야>

토목구조, 구조동역학