

프리캐스트 아치구조의 이음부 구조 거동 평가

심창수* · 김동찬** · 최대현*** · 진경석****

Shim, Chang Su*, Kim, Dong Chan**, Choi Dae Hun***, Jin, Kyung Seok****

Evaluation of Structural Behavior of Connections in Precast Arch Structures

ABSTRACT

In this paper, a connection details for precast arch structures was proposed. Experiments were performed to evaluate structural performance of the loop connection details satisfying current design requirements and of alternative details for improvement of constructability. Precast arch specimens considering the current design requirements showed higher structural capacity than a cast-in-place arch specimen. Crack width at the connection of arch crown showed smaller value than 0.2 mm due to increased compression force by the applied vertical load. Strengthening by wire-mesh at notch area of the connection improved initial crack control capability. Connection detail with couplers and headed bars showed similar capacity to the reference specimen. The alternative details to improve constructability of reinforcements can be used without decreasing structural performance. Specimens with smaller internal diameter of mandrel and shorter loop splicing than the current design codes showed worse behavior in terms of crack width control.

Key words : Precast arch, Loop connection, Structural capacity, Crack width, Constructability

초 록

이 논문에서는 프리캐스트로 제작된 아치 구조의 연결을 위한 루프 이음 상세를 제안하였다. 설계기준에서 제시하고 있는 루프 이음 상세의 요구 사항을 만족하는 경우와 시공성을 개선하기 위한 상세 대안들에 대한 평가를 위한 실험적 연구를 수행하였다. 설계 요구사항을 만족하는 경우에는 프리캐스트 아치 실험체가 현장타설 일체형 부재에 비해서 높은 내하력을 나타내었다. 아치구조의 크라운 부위에서의 균열은 초기 균열 발생 이후 증가되는 압축력 효과로 인해서 0.2 mm를 초과하지 않는 균열폭이 발생하였다. 초기 균열 제어에 노치부의 와이어메쉬 보강이 효과를 보였고 철근 커플러와 확대머리철근을 이용한 연결부 상세도 기준 부재 이상의 내하력을 나타내었다. 시공성 개선 상세의 경우 구조적 거동에 차이를 보이지 않아서 작업자의 배근 시공성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 루프철근의 내면 반지름과 겹침 이음 길이는 현재의 설계기준의 요구사항을 만족시키지 않으면 균열폭 제어 측면에서 좋지 않은 결과를 나타내었다.

검색어 : 프리캐스트 아치, 루프 이음, 내하력, 균열폭, 시공성

* 종신회원 · 교신저자 · 중앙대학교 사회기반시스템공학부 교수 (Corresponding Author · Chung-Ang University · csshim@cau.ac.kr)

** 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정 (Chung-Ang University · kdc8110@cau.ac.kr)

*** 정회원 · (주)인터컨스텍 기술연구소 연구1팀 부장 (Interconstech Co., Ltd. · max@ict99.com)

**** 종신회원 · (주)인터컨스텍 건설본부 차장 (Interconstech Co., Ltd. · jkstone@ict99.com)

Received February 27, 2016/ revised April 25, 2016/ accepted July 12, 2016

1. 서론

사전제작에 의한 시공기술이 건설산업에 광범위하게 적용되면서 다양한 형태의 구조물에 활용되고 있다. 개착식 터널을 시공할 때 아치구조를 활용한 프리캐스트 세그먼트 아치 공법이 국내외에서 활용되고 있다. 이 기술은 아치 형상의 세그먼트를 분할하여 공장에서 일정한 크기로 제작하여 현장으로 운반 가설하고 여러 가지 연결부 상세로 일체화시킨다. 현장타설 아치에 비해서 단순하고 간편한 현장 공정으로 신속한 시공이 가능하고 사용하중 상태에서 압축 영역에 이음부가 존재하게 되어 구조적으로 유리한 장점을 갖고 있다.

루프 이음을 갖는 바닥판에 대한 연구는 1970년부터 진행되었으며 Leonhardt et al. (1973)은 루프 이음을 갖는 13개의 부재를 제작하여 휨 실험을 수행하였다. 이로부터 겹침 이음의 길이 증가는 휨강도를 증가시키고 추가적인 횡 방향 철근 배치가 균열 제어에 기여함을 밝혔다. Lewis (2009)는 루프 이음을 갖는 부재와 Headed 철근을 이용한 이음을 가진 두 가지 상세에 대하여 연구하였다. 각각의 3개의 부재에 대하여 휨 실험과 인장 실험이 진행되었으며, 모든 부재는 동일한 이음간격을 갖도록 설계하였다. 전 부재 모두 충분한 휨성능 및 연성도를 보였으며 루프 이음을 가진 부재가 Headed 철근을 사용한 부재보다 더 높은 휨 및 인장 성능을 보였다. 또한, 루프 이음을 사용한 부재가 사용하중 하에서 Headed 철근을 사용한 부재보다 작은 균열폭을 보였다.

국내의 연구에서는(Chung et al., 2008; Chung et al., 2009) 루프 이음부에 횡방향 보강철근의 균열제어 역할과 철근의 겹침 이음길이는 서로 다른 시기에 타설한 콘크리트 부재의 연속성 확보 및 균열제어에 매우 중요하며, 전단철근이 있는 합성바닥판은 합성효과의 증가로 인해 전단철근이 없는 바닥판에 비해 상당히 큰 극한 내력을 보였다. Ryu et al. (2007)은 루프 이음을 가진 프리캐스트 부재의 휨성능 및 피로 성능 실험을 변수로는 루프 철근의 직경, 이음간격을 선정하여 수행하였다. 충분한 정착 길이가 확보된 경우, 휨 강도는 일반 RC 부재와 유사하였으며, 짧은 이음간격을 갖는 경우에는 강도 및 강성의 감소 현상을 보였다. 보강된 이음부를 갖는 프리캐스트 콘크리트 아치에 대한 실험적 연구가 수행되어 이음부 상세의 적절성이 검토된 바 있다(Chung et al., 2014) 루프이음에 대한 실험적 연구와 상세 규정에 대한 검토는 해외에서도 다양하게 수행되었다(Joergensen et al., 2005; Junbao, 2014; Ma et al., 2011; Rosenthal and Shimoni, 1984).

BS 8110 (1997)에서는 180도 후크의 유효 정착 길이를 후크의 내면 반지름의 8배(철근 지름의 24배) 혹은 직선 구간을 포함한 실제 후크의 길이 중에 큰 값을 사용하도록 하고 있다. 이론적으로는 직경 ϕ 인 철근의 요구 정착 길이는 $l_b = (\phi/4)(f_y/f_b)$ 로 규정하고

있다(여기서, f_y = 철근의 항복강도(MPa), f_b = 이형철근의 부착강도(MPa)).

기존의 루프 이음의 설계에서는 콘크리트 구조기준(MLTMA, 2012)과 도로교설계기준(MLTMA, 2010)에서 규정하고 있는 “인장을 받는 표준 갈고리의 정착”을 근거로 갈고리의 내면 지름과 정착 길이 요구사항을 상세 결정에 적용해왔다.

국내 도로교설계기준에도 반영된 내용으로 최근의 루프 철근이음에 관한 연구 결과를 반영한 콘크리트 구조에 관한 유럽 통합기준인 유로코드-2(BSI, 2004)의 루프 이음 규정이 Fig. 1에 제시되었다. l_0 는 겹침이음길이를 나타내고 A_{st} 는 횡방향 철근의 전체면적을 의미한다. 이 기준이 이 논문에서 다루는 루프 이음 상세와 일치하고 도로교설계기준 한계상태설계법(MLTMA, 2012)에 도입되어 가장 적절한 것으로 판단된다. 상세 설계의 주요 검토사항은 루프 최소 내면반지름, 루프 이음 정착 길이, 연결부 철근상세, 루프 이음 철근의 겹침 방법, 겹침 이음 영역에서의 횡방향 철근량, 균열제어 등으로 설정할 수 있다.

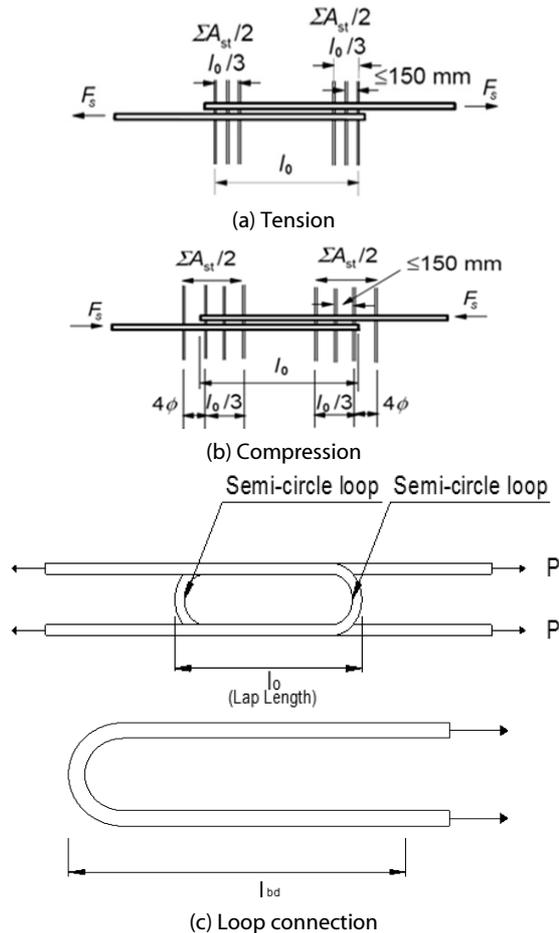


Fig. 1. Loop Connection Details in EC2



Fig. 2. Precast Arch

이 논문에서는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 루프 이음 방식을 적용하여 아치 구조를 2개의 세그먼트로 분할 제작하여 현장에서 루프 이음에 채움재를 타설하고 일체화시키는 방식의 구조를 다룬다. 이음부의 구조적 성능을 확보하기 위해서 횡방향 철근을 루프 철근 내부로 배근하게 된다. 이러한 상세를 통해서 적절한 구조적 성능을 발휘하는지를 검증하고 시공성을 개선할 수 있는 상세 대안들을 적용할 경우의 구조 거동을 평가하여 설계 제안사항을 도출하였다.

2. 프리캐스트아치 루프 이음의 실험적 연구

2.1 실험부재

실험부재는 현재 실무에서 설계하고 있는 프리캐스트 아치 부재를 모사하기 위해서 Fig. 3과 같이 아치 크라운 부분의 일부를 반영하고 하중조건과 경계조건이 유사하도록 설계하였다. PA-REF 부재는 표준단면을 적용하여 1 m 폭으로 제작하는 기준부재로서 앞서 설명한 설계기준을 만족하는 정착 길이, 겹침 길이, 내면 반지름의 기본적인 설계 인자를 포함하였다.

이 기준부재에서 횡철근의 직경을 감소시킨 PA-TR 부재, 루프 내면 반지름을 감소시킨 PA-MD 부재, 노치부의 균열 가능성에 대비하여 와이어메쉬를 보강한 PA-NS 부재, 루프의 겹침길이를 감소시킨 PA-DAL 부재, 루프 이음 철근을 주철근과 이격시켜서 배치한 PA-CL 부재, 루프 간격을 조정하여 시공성을 개선한 PA-NLS 부재, 커플러 및 확대 머리 철근으로 루프 이음을 대체한 PA-CC 부재와 시공성을 고려하여 하부철근 90도 갈고리 상세를 채택한 PA-LR 부재, 마지막으로 이음이 없는 일체형 현장타설 부재인 PA-IM 부재를 실험부재로 설정하였다. Table 1에 실험변수를 정리하였다.

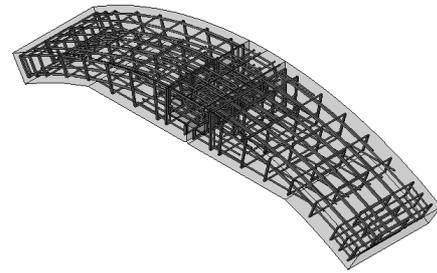


Fig. 3. Test Specimen

Table 1. Test Specimen

Specimen	Details
PA-REF	Reference ($R=90$ mm, $l_{db} = 350$ mm, $s = 75$ mm, $d_{b-\ell} = 16$ mm)
PA-NS	Wire mesh at notch area
PA-TR	Reduction of transverse reinforcement ($d_{b-\ell} = 13$ mm)
PA-DAL	Reduction of lap splicing ($l_{db} = 260$)
PA-MD	Reduction of internal diameter ($R = 68$ mm)
PA-CL	Different location of main reinforcements & loop reinforcements
PA-NLS	Adjustment of loop reinforcement spacing ($s = 45$ mm or 105 mm)
PA-LR	90 hook for lower reinforcements
PA-CC	Coupler & headed bar connection
PA-IM	Monolithic member by cast-in-place

실험부재는 Fig. 4와 같은 순서로 제작 완성하였다. 실험부재가 9개의 크라운 부 이음을 갖는 프리캐스트 부재와 1개의 일체형 부재로 구성되어 이를 고려하여 강제 거푸집을 제작하였다. 거푸집 제작 시 루프 철근이 돌출되어야 하기 때문에 탈형에 문제가 없도록 목업 제작을 수행하였다. 돌출되는 루프 철근은 프리캐스트 부재를 조립할 때 철근이 겹치지 않도록 주철근과 루프 철근 간격을 조절하였다.

실제 사용되는 부재를 모사하여 가설 시 연결부의 전단저항 효과를 위하여 연결부 하단 접촉부에 사각 전단기를 형성하였다. 세그먼트 제작 후 분절부재를 접합하기 위해 추가적인 횡철근을 배근하고 타설을 위한 거푸집을 형성하고 연결부 콘크리트를 타설하였다. 신구 콘크리트의 부착을 개선하기 위하여 세그먼트 노치부면을 치핑하고 실수처리한 후 작업을 수행하였다. 이후 증기양생을 실시하여 크라운 연결부 루프 이음 부재 제작을 완성하였다.

2.2 재료성질

프리캐스트 세그먼트 부재의 콘크리트 배합은 기본적으로 압축 강도 40 MPa를 목표로 하였으며, 연결부 채움 콘크리트는 현장에서의 품질관리의 어려움을 고려하여 60 MPa의 압축강도를 갖도록 배합설계 하였다. 세그먼트와 연결부에 타설된 콘크리트는 콘크리트 재료시험 결과 모두 계획 물성치를 확보하였으며, 콘크리트

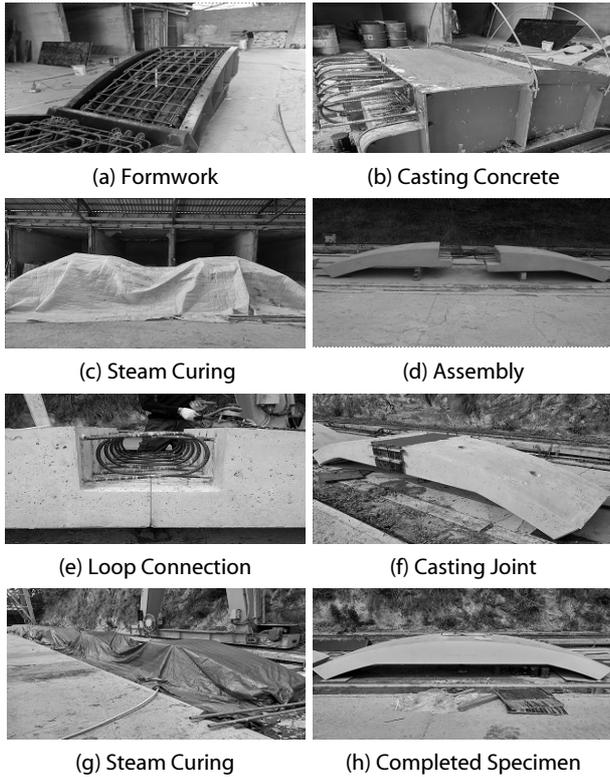


Fig. 4. Fabrication Procedure

Table 2. Compressive Strength of Concrete

Specimen	Precast segment	Joint concrete
	Average strength at test	Average strength at test
PA-REF	41.5 MPa	61.5 MPa
PA-NS	44.1 MPa	66.9 MPa
PA-TR	52.2 MPa	66.9 MPa
PA-DAL	41.2 MPa	67.0 MPa
PA-MD	25.2 MPa (42.5 MPa)	66.9 MPa
PA-CL	47.0 MPa	68.5 MPa
PA-NLS	40.1 MPa	67.6 MPa
PA-LR	37.7 MPa (49.0 MPa)	61.0 MPa
PA-CC	49.6 MPa	61.0 MPa
PA-IM	53.1 MPa	-

() : Schmidt hammer test result

강도 또한 양호한 결과를 나타내었다. 각 실험부재의 실험시기에 콘크리트 재료시험 결과로 나온 압축강도 측정결과는 Table 2와 같다. ()의 값은 슈미트해머로 다시 평가한 강도값이다.

2.3 하중 및 측정내용

실험부재는 시험체 크기를 고려하여 프리캐스트 아치 부재의 상부를 모사하여 제작했기 때문에 아치에 작용하는 압축력이 축선을 따라 자연스럽게 전달될 수 있도록 실험부재 양단에 Fig. 5(b) 같이 경사 지지부재를 제작 설치하여 작용하중의 증가와 반력의 증가에 따라 아치 축력도 증가하는 매커니즘을 구현하고자 하였다. 측정내용은 Fig. 5(a)와 같이 연결부 철근과 콘크리트, 균열 발생 이후 균열폭 측정으로 구성된다.

하중은 2점 재하로 하였고, 가력기 용량은 2,000 kN (최대 2,600 kN)이며, 제어방법은 초기 균열시점까지 하중제어(30 kN/min), 그 이후에는 변위제어로 하중을 재하하였다.

2.4 실험부재의 상세

Fig. 6은 기준부재인 PA-REF의 실험부재의 상세 및 셋업을 보여주고 있다. PA-REF는 현재의 실무와 설계기준에서의 루프

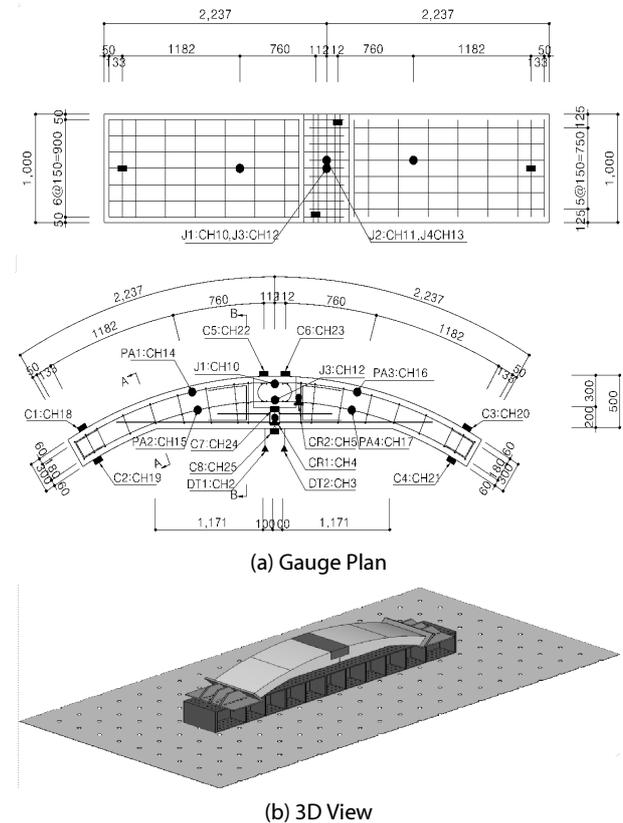


Fig. 5. Measurements and Test Setup

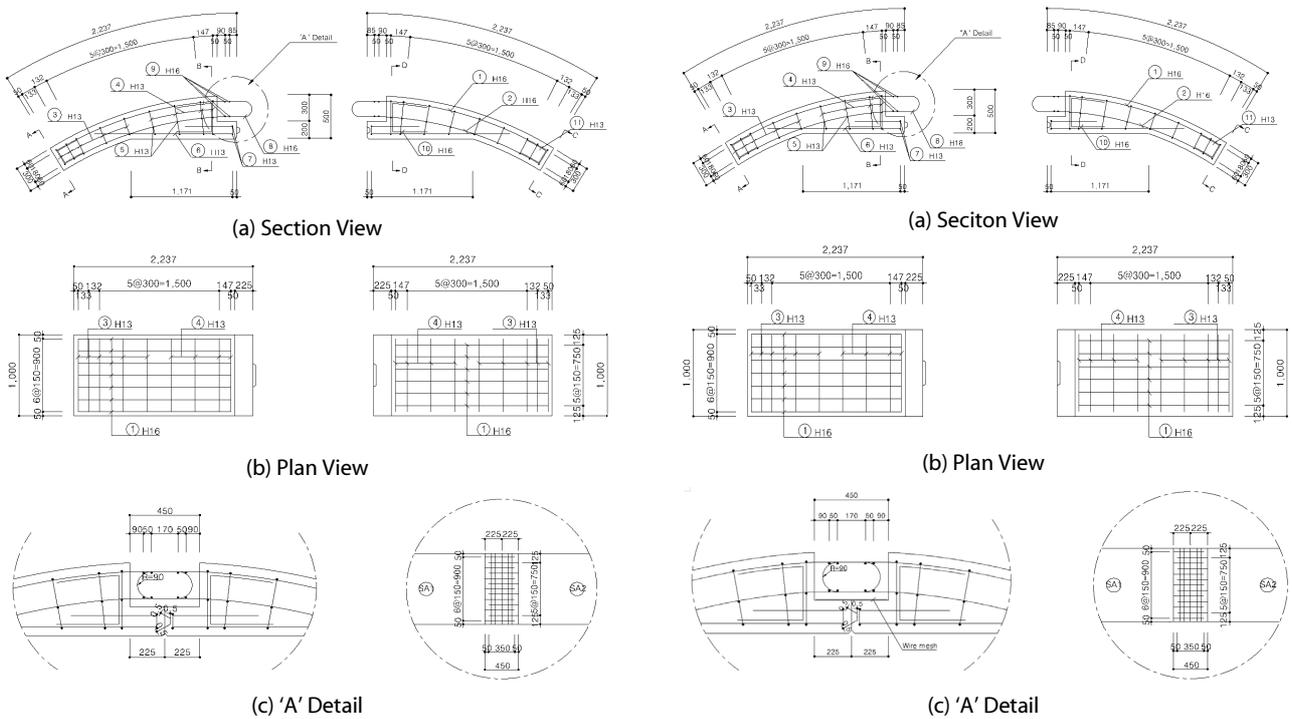
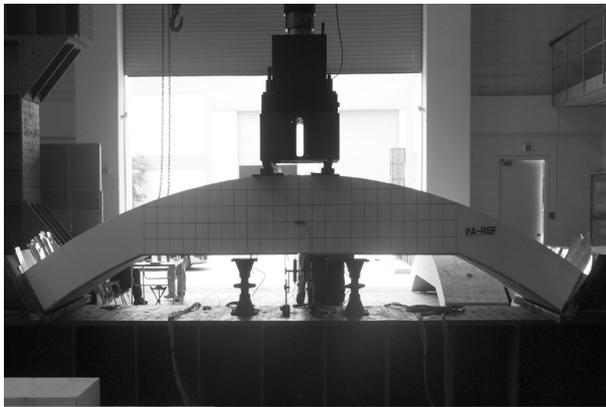


Fig. 7. PA-NS Specimen



(d) Test Setup

Fig. 6. PA-REF Specimen

이음에 대한 요구사항을 만족하도록 상세를 결정하였다. 16 mm 직경의 루프 철근을 각각의 프리캐스트 부재에서 150 mm 간격으로 배근하였기 때문에 세그먼트 조립 이후 루프 철근의 간격을 75 mm로 확보할 수 있다. 이음부 보강을 위해 횡방향으로 16 mm 철근을 상하부 각각 2개씩 배근하였다.

Fig. 7은 PA-NS부재의 상세를 보여주고 있다. 프리캐스트 부재 연결부의 노치부에는 세그먼트 간 불연속면이 생성되기 때문에 이 부분의 조기 균열 발생 가능성이 높아진다. 따라서, PA-NS 부재는 현장타설되는 노치부 상면에 치핑하고 살수처리를 실시한 후 와이어매쉬를 1단 배치하여 신구 콘크리트 면에서의 조기 균열에 효과적으로 저항하도록 하였다.

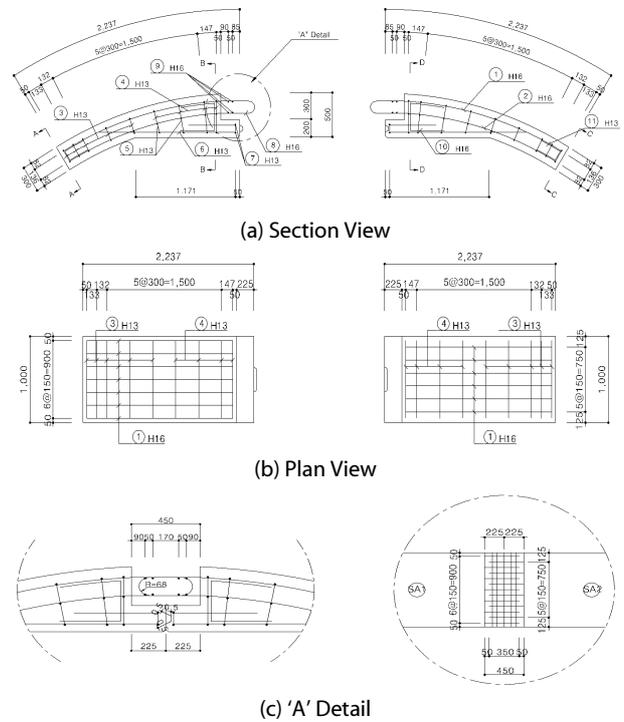


Fig. 8. PA-MD Specimen

Fig. 8은 PA-MD 부재의 상세를 보여주고 있다. PA-MD 부재는 루프 철근의 내면 반지름을 기준부재인 PA-REF 대비 75%, 즉

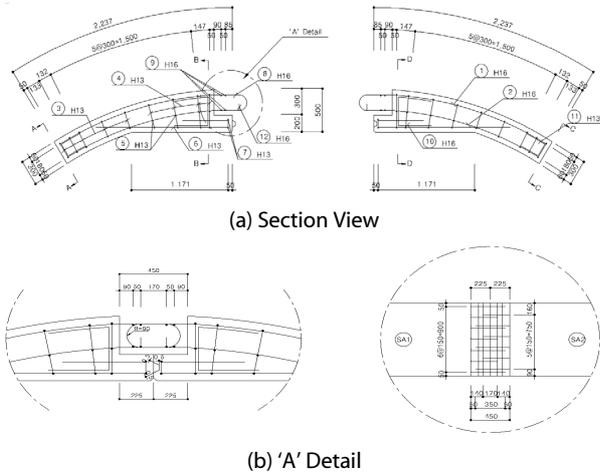


Fig. 9. PA-LR Specimen

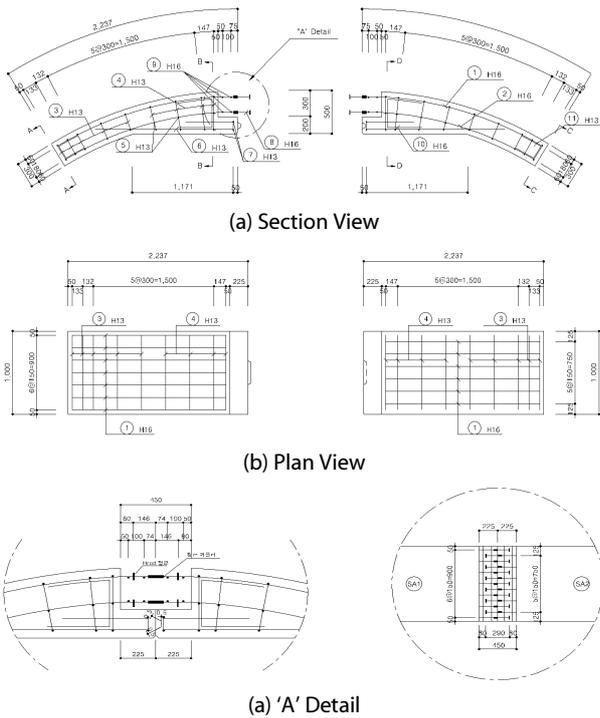


Fig. 10. PA-CC Specimen

R=90 mm에서 R=68 mm로 감소시킨 부재이다. 루프 철근의 내면 최소 반지름은 절곡시의 작업성 및 재질 변화 등 정착 길이에 미치는 영향을 고려하여 설계 기준에 제시되고 있다. 내면 반지름을 감소시키면 연결부에서 상하부 철근의 간격이 줄어들기 때문에 이에 따른 부재 거동을 평가하고자 하였다.

Fig. 9은 PA-LR부재의 상세를 보여주고 있다. PA-LR부재는 PA-NLS부재와 같은 루프 간격 조건을 만족시키며, 루프 이음 사이 하부에 90도 갈고리 형태의 이음을 갖는 철근 배근으로 루프

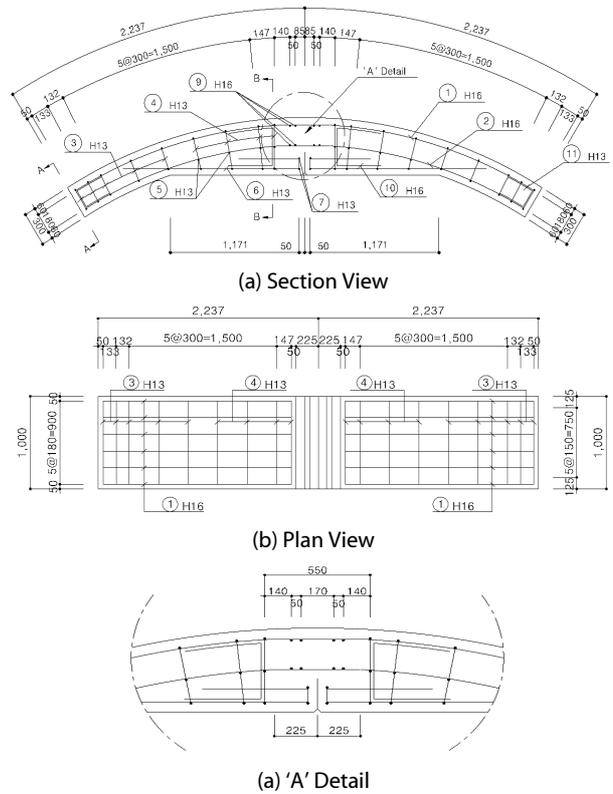


Fig. 11. PA-IM Specimen

이음시의 배근 작업성 개선과 철근량 감소를 판단하기 위한 실험부재이다.

Fig. 10는 PA-CC부재의 상세 및 셋업을 보여주고 있다. PA-CC 부재는 루프 이음 대신 철근 커플러와 확대머리철근(Headed bar)을 세그먼트 연결에 적용시킨 실험부재이다. 현장 여건에 따라서 철근 커플러를 사용하거나 확대머리철근을 사용하여 좁은 연결부 공간 내에서 정착을 확보해야 하는 경우를 대비하고자 하였으며, 루프 이음과의 간접적인 성능비교가 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 11는 PA-IM부재의 상세 및 셋업을 보여주고 있다. PA-IM 부재는 아치 시험체를 연결부 없이 콘크리트를 한 번에 타설하는 부재로 크라운 상부의 노치부는 배제하였으나, 기준부재인 PA-REF와 동일한 조건을 제공하기 위하여 크라운 하부 접촉면에 불연속면을 마련하였다. 크라운 부는 연결부가 별도로 없기 때문에 루프 철근 이음 없이 주철근이 연속적으로 배근되었다.

3. 실험결과 분석

3.1 실험결과

Table 3은 부재 균열 발생 하중과 최대 재하하중을 정리한 것이다. 연결부 공칭강도에 근거한 예상하중이 1,440 kN이었지만

실제 실험에서 1,600 kN까지도 실험부재가 거의 선형적인 거동을 보여서 실험 초기 3개 부재 실험 후 가력기를 교체하여 최대 2,300 kN까지 재하하였다. 모든 최대하중까지 재하하여도 균열이외의 손상이 없이 거의 선형적인 거동을 나타내어 아치 구조의 내하력의 효율성을 잘 나타내었다. 각 부재의 예상 항복하중은 계측된 철근 변형률을 회귀분석을 통하여 나타내었다.

Fig. 10에 실험에서 도출된 하중-변위 곡선을 PA-REF, PA-NS, PA-MD, PA-LR, PA-CC, PA-IM부재에 대해 도시하였다. 5개의 부재 모두 기준부재인 PA-REF부재와 동일하게 하중이 증가함에 따라 변위가 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. PA-REF부재는 600 kN에서 초기균열이 발생하였으며, PA-NS부재의 경우 PA-REF에 비하여 높은 균열하중을 보였지만 PA-REF부재와 비슷한 성형의 변위량을 보였다. PA-MD, PA-LR, PA-CC, PA-IM은 PA-REF부재에 비하여 비교적 낮은 초기균열을 보였지만, 하중의 따른 변위량은 비슷한 양상을 보였다.

Table 3. Test results

Specimen	Cracking		Maximum load	Yield load of reinforcements
	Initial	0.2 mm		
PA-REF	600 kN	-	2,300 kN	2,300 kN
PA-NS	1,100 kN	-	1,600 kN*	2,800 kN
PA-TR	400 kN	-	1,600 kN*	2,800 kN
PA-DAL	270 kN	1,450 kN	2,300 kN	1,580 kN
PA-MD	350 kN	750 kN	1,600 kN*	2,600 kN
PA-CL	270 kN	-	2,200 kN	2,700 kN
PA-NLS	400 kN	-	2,200 kN	2,700 kN
PA-LR	400 kN	-	2,200 kN	2,300 kN
PA-CC	400 kN	-	2,200 kN	2,300 kN
PA-IM	100 kN	255 kN	2,200 kN	750 kN

*actuator capacity is 2,000 kN, - : smaller than 0.2 mm

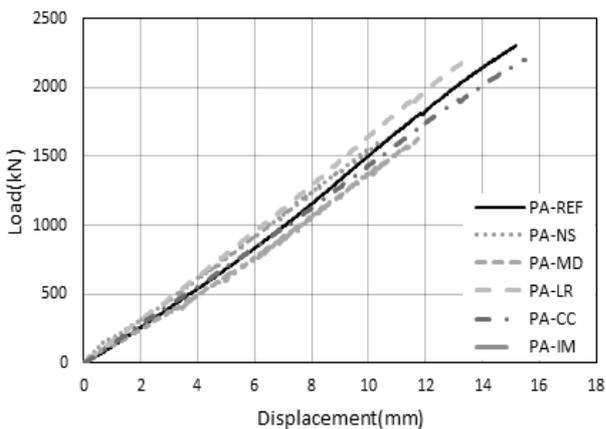


Fig. 12. Load-Displacement Curves

3.2 연결부 균열 거동

Fig. 13에 부재들의 균열 양상을 기준부재와 비교하여 나타낸 것이다. PA-REF (기준부재)의 경우 초기균열이 연결부 하부에서 발생하였으며, 신규 콘크리트 경계면을 따라서 균열이 이어지는 것을 알 수 있다. 또한 1,400 kN의 하중에서 연결부 중앙으로 수직균열이 발생하는 것을 확인할 수 있다. PA-NS (노치부 보강)부재와 PA-TR (횡철근 직경 감소)부재도 모두 PA-REF (기준부재)와 유사한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 루프 제원을 변수로 설정한 부재들의 균열 양상을 나타낸 것이다. PA-DAL (접침길이 감소)부재와 PA-MD (루프 반경 감소)부재는 PA-REF (기준부재)와 같이 신규 콘크리트 경계면에서 균열이 발생하며 유사한 균열양상을 보이지만, 각각 1,450 kN, 750 kN의 하중에서 0.2 mm의 균열폭이 발생했기 때문에 PA-REF (기준부재)에 비하여 사용성 측면에서 구조적 성능이 좋지 않은 것으로 나타났다. PA-CL (주철근 불일치)부재와 PA-NLS (루프

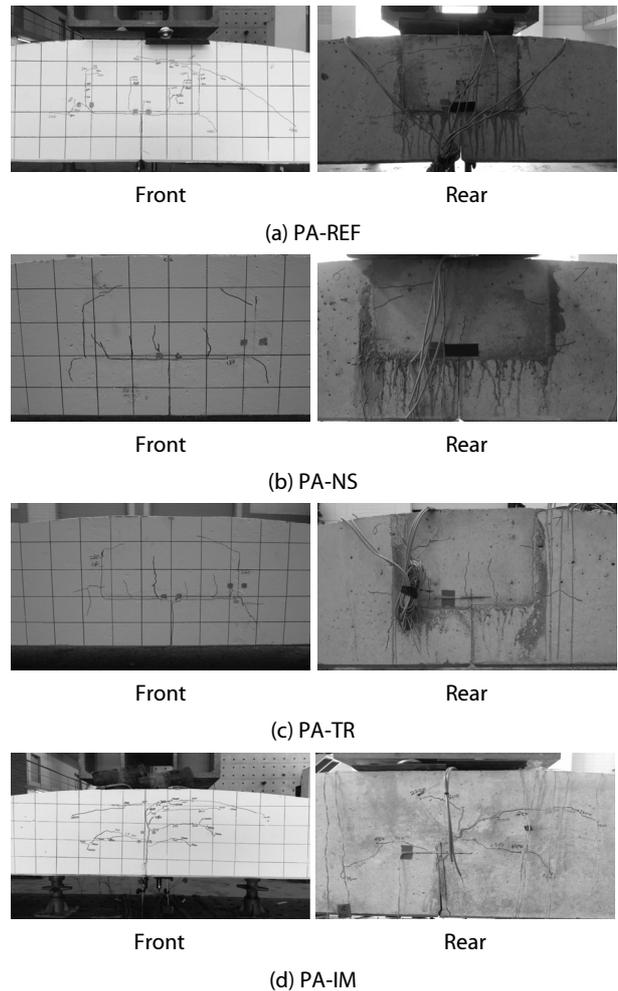


Fig. 13. Crack Patterns

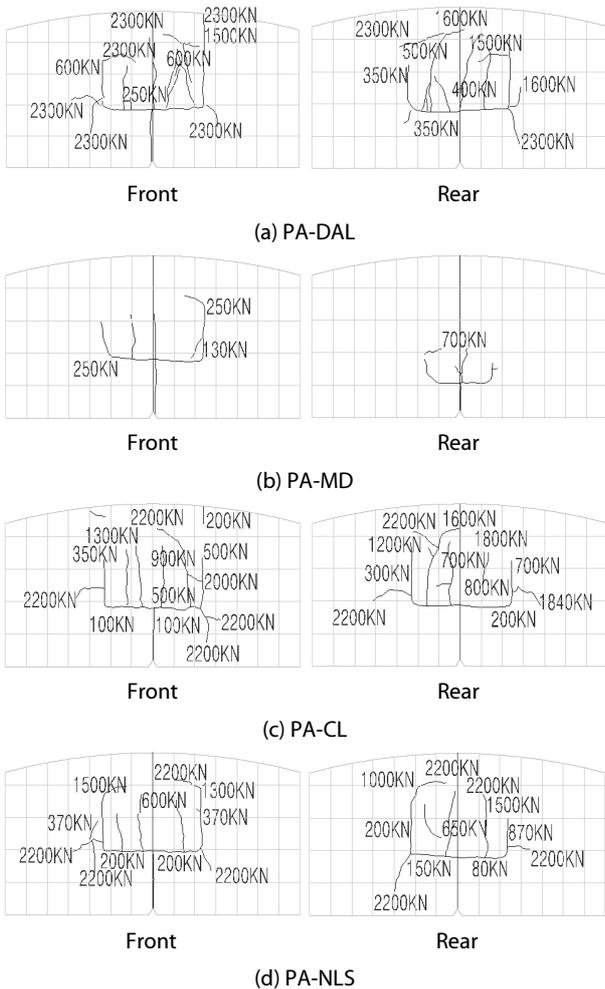


Fig. 14. Crack Pattern for Different Loop Details

간격 감소)부재는 PA-REF (기준부재)와 비교하여 초기 균열하중은 낮지만 대체적으로 유사한 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 노치부에서 발생하는 균열을 제어하는 최하단 인장 철근의 위치 변화는 중요하기 때문에 현재 설계기준에서 제시하는 상세를 따라야 함을 의미한다. 또한, 균열 발생은 노치부가 원천적으로 있기 때문에 방지하기 힘들지만 균열폭 제어는 내구성을 고려한 현재 요구사항을 충분히 만족시킬 수 있음을 나타낸다.

3.3 국부거동 평가

Fig. 15는 PA-REF, PA-NS, PA-MD, PA-LR, PA-CC, PA-IM 부재의 하중과 철근 변형률의 상관관계 그래프이다. PA-REF 부재는 하중이 증가할수록 철근 변형률 또한 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 실험 초기 이론적 파괴하중을 초과하는 1,600 kN까지 하중재하 하였으나, 철근의 항복을 확인할 수 없어 2,600 kN용량의 액츄에이터로 교체하여 2,300 kN의 하중까지

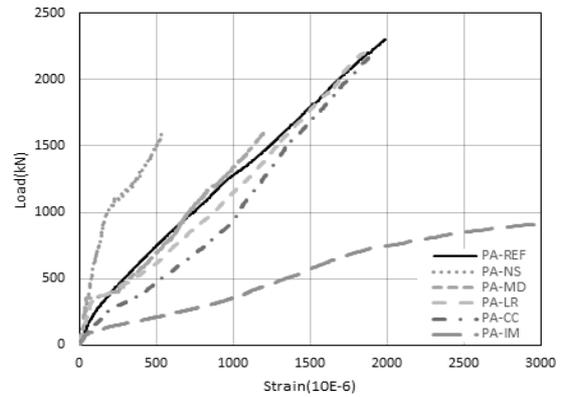


Fig. 15. Load-Strain Curves of Tensile Reinforcements

재실험을 수행하였다. 그 결과 2,300 kN부근에서 철근이 항복값에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

PA-NS부재는 초기 균열 발생시점에서 철근 변형률의 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다. PA-REF부재와 비교해 보면 하중의 변화에 따라 두 부재 모두 철근 변형률이 선형적으로 증가하지만 PA-REF부재에 비하여 PA-NS부재는 동일 하중에서 철근의 변형률이 비교적 낮게 나타나며, 철근응력 또한 작은 값을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 PA-NS부재가 PA-REF부재에 비하여 와이어메쉬 보강에 따라 루프 철근이 부담하는 응력이 감소하기 때문으로 판단된다. 균열 발생 이후에도 인장영역의 루프 철근 응력이 완만하게 변화하는 것도 같은 이유로 판단된다.

PA-MD부재는 철근이 균열하중에 도달하자 급격한 변화가 나타나는 것을 알 수 있다. 이후 하중이 증가함에 따라 철근의 변형률이 선형적으로 증가하였으며, PA-REF부재에 비해 균열하중은 작은 반면에 철근의 항복하중이 약간 크게 측정된 것을 알 수 있다.

PA-LR부재는 균열하중에서 철근 변형률이 변화하는 양상이 나타나며, 항복하중은 2,300 kN으로 PA-REF부재와 동일한 것으로 판단된다. PA-CC부재는 다른 부재에 비하여 균열하중에서 철근 변형률의 급격한 변화는 보이지 않지만 PA-REF부재와 동일한 항복하중이 예상된다.

PA-IM부재는 PA-REF의 철근 항복하중이 2,300 kN인데 반해 PA-IM부재의 철근 항복하중은 약 750 kN으로 약 1/3의 값을 나타내고 있다. 이는 현장타설 일체형 부재에 비해 루프 이음을 갖는 프리캐스트 부재는 균열에 저항하는 철근이 2배 수준으로 존재하기 때문이다. 적절한 정착 길이를 확보하는 경우에는 개선된 하중저항능력을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 16은 PA-REF, PA-NS, PA-MD, PA-LR, PA-IM부재의 하중-콘크리트 변형률을 나타내고 있다. 콘크리트 변형률은 균열 발생 위치가 게이지와 일치하는 경우와 그렇지 않은 경우에 서로 다른 거동을 나타낸다.

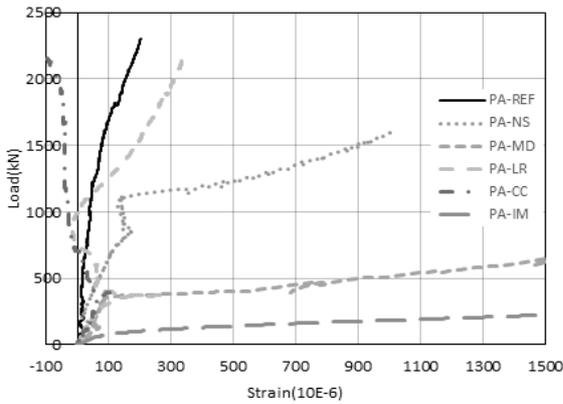


Fig. 16. Load-Strain Curves of Concrete at Joints

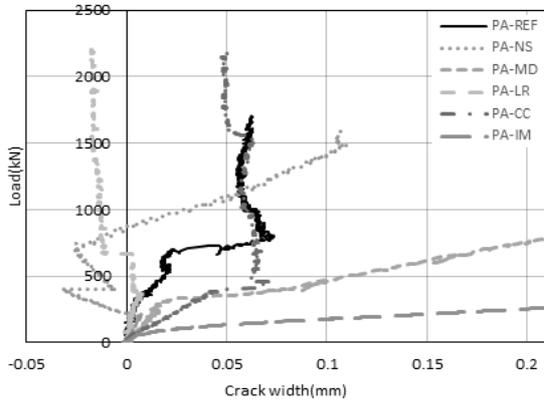


Fig. 17. Load-Crack width Curves

PA-REF부재의 콘크리트 변형률은 균열이 발생하기 전까지는 하중이 증가할수록 비교적 선형적으로 증가하는 모습을 확인할 수 있다.

PA-NS부재는 재하하중 1,100 kN 부근에서 변형률이 급격하게 증가하는 것은 변형률 게이지 위치에서의 균열 발생에 따른 것이다. PA-MD부재는 철근 변형률과 마찬가지로 균열하중에 도달했을 때 콘크리트 변형률도 급격한 변화를 나타내고 있다.

PA-LR부재는 균열하중에서 콘크리트 변형률이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. PA-CC부재는 하중증가에 따라 콘크리트 변형률이 서서히 증가하다가 균열하중 이후 콘크리트의 변형률이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

PA-IM부재는 PA-REF부재와 비교했을 때 작은 하중에서도 비교적 큰 콘크리트 변형률이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 17은 PA-REF, PA-NS, PA-MD, PA-LR, PA-IM부재의 하중-균열폭과의 관계를 나타내고 있다.

PA-REF부재의 균열폭의 크기는 초기에 증가하는 경향을 보이다가 정체된 상태를 나타냈으며, 최대 하중에 도달할 때까지 0.1 mm보

다 작은 결과를 나타내었다. 이는 재하하중 증가에 따라 아치 축선을 따라 작용하는 압축력이 증가하여 균열을 제어하는 역할을 했을 것으로 판단된다. 따라서, 프리캐스트 아치 부재에서는 균열폭 제어 측면에서 휨거동에 따른 응력상태와 압축력에 의한 응력상태가 상쇄되는 효과를 확인할 수 있었다.

PA-NS부재의 경우 노치부 상단에 와이어메쉬를 배치한 것은 노치부 상단에서 발생하는 균열을 제어하는 효과가 있었다. 균열폭은 산구 콘크리트 경계 측면에서 측정된 값으로 최대하중 재하시까지 균열폭이 0.2 mm에 도달하지 않았으며, 균열도 상부로 진전하지 않았고 아치 효과에 의한 압축력으로 인해 제어되는 형태를 보였다.

PA-MD부재는 PA-REF부재와 비교해 보았을 때 3배 이상의 큰 균열폭이 발생하였으며, 0.2 mm의 균열폭에서의 철근 응력은 113 MPa로 나타났다. 균열폭이 상대적으로 크게 발생하는 것은 루프 철근의 내면 반지름 감소가 인장 철근의 위치를 변화시켜 표면 균열폭 제어 효과에 불리하기 때문인 것으로 판단된다.

PA-LR부재는 균열하중까지 균열폭이 증가하는 추세를 보이고 있으나, 그 이후는 균열폭 감소가 나타난다.

PA-CC부재는 하중의 증가에 따라 균열이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 균열하중 이후 균열폭의 변화가 크게 나타나지 않았다.

PA-REF부재의 최대균열폭이 0.073 mm인 반면에 PA-IM부재는 약 255 kN의 하중에서 0.2 mm를 초과하는 균열폭이 발생되었다. 또한 이때 철근응력은 138 MPa로 나타났으며, 하중에 따라 균열폭이 계속 증가하는 모습을 볼 수 있다.

4. 결론

프리캐스트로 제작된 아치 구조의 연결을 위해 도입된 루프 이음에 대한 상세별 구조거동을 실험적으로 평가하였다. 현재의 설계기준을 적용하여 설계한 부재에서 구조적 거동은 실무 적용에 문제가 없는 안전측의 결과를 나타내었고 실험으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 기본적으로 설정한 프리캐스트 부재의 설계 요구사항을 만족하는 루프 철근 이음 상세를 갖는 기준실험부재는 강도 측면에서 1.6배 이상의 높은 내하력을 나타내었고 연결부 균열 거동 측면에서도 최대 재하하중에서 0.2mm 균열폭을 넘지 않는 양호한 거동을 나타내었다. 이로부터 현재 적용되고 있는 설계 실무에서의 상세가 극한한계상태 및 사용성 측면에서 문제가 없음을 검증하였다.
- (2) 노치부에 와이어메쉬로 보강하는 상세는 초기 균열 제어에 유효한 역할을 하는 것으로 평가된다. 또한, 철근 커플러와

확대머리철근을 이용한 연결부 상세도 연결부가 없는 일체형 부재나 기준부재 이상의 구조 성능을 나타내어 활용 가능할 것으로 판단된다.

- (3) 현장에서 루프 철근과 배근되는 횡방향 철근 배근 작업성을 개선하기 위해 주철근의 위치나 간격을 조정할 상세를 갖는 부재들이 구조적 거동 측면에서 기준부재와 차이가 없는 성능을 발휘하였다. 압축철근은 절반 수준에서 루프 정착을 하고 인장 철근은 모두 루프 이음을 가지도록 하면 현재 철근 간격의 2배를 확보할 수 있어서 철근 배근의 효율성이 개선될 것이다. 따라서, 이와같이 현장에서 작업자의 시공성을 개선하는 상세는 설계에 반영해도 무방할 것으로 판단된다.
- (4) 루프 철근의 내면 반지름을 감소시키거나 루프 철근의 겹침 길이를 감소시키는 경우에는 부재 강도에 미치는 영향이 크지 않고 현재 설계 계산에서 도출된 설계강도 이상을 발휘하지만 균열폭 제어 측면에서 좋지 않은 결과를 나타내었다. 상대적으로 균열폭이 크게 나타났지만 사용하중 상태에서는 허용 균열 폭이내의 거동을 보일 것으로 예상된다. 따라서, 시공상의 특별한 경우가 아니면 기준부재 수준의 루프 철근상세를 유지하는 것이 바람직하다.

감사의 글

이 연구는 (주) 인터컨스텍의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- British Standard (1997). *BS 8110 Part 1, Structural use of concrete part 1. Code of practice for design and construction*, British Standards Institution.
- British Standards Institution (2004). *Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, British Standards Institution.
- Chung, C. H., Joo, S. H., Choi, D. C. and Lee, J. G. (2014). "Structural performance of precast concrete arch with reinforced joint." *J. of KSCE*, Vol. 34, No. 1, pp. 29-47 (in Korean).
- Chung, C. H., Kim, Y. S., Hyun, B. H. and Kim, I. G. (2009). "Strength of PSC bridge decks using half-depth precast panel with loop joint." *J. of KSCE*, Vol. 29, No. 5A, pp. 433-445 (in Korean).
- Chung, C. H., Sung, Y. E., Hyun, B. H. and Park, S. J. (2008). "Experimental study on connectability of half-depth deck panels with loop joint." *J. of KSCE*, Vol. 28, No. 4A, pp. 581-590 (in Korean).
- Joergensen, H. B. and Hoang, L. C. (2005). "Strength of loop connections between precast bridge decks loaded in combined tension and bending." *Structural Engineering International*, 1/2005, pp. 71-80.
- Junbao, H. (2014). "Structural behavior of precast component joints with loop connection." National University of Singapore.
- Leonhardt, F., Walther, R. and Dieterle, H. (1973). "Experiments for determining the load bearing capacity of tension loop joints." *Deutscher ausschuss fuer stahbeton heft 226*, pp. 1-22.
- Lewis, S. (2009). "Experimental investigation of precast bridge deck joints with U-bar and headed bar joint details." University of Tennessee, Knoxville.
- Ma, Z. J., Lewis, S., Cao, Q., He, Z., Burdette, E. G. and French, C. E. W. (2011). "Transverse joint details with tight bend diameter U-Bars for accelerated bridge construction." *Journal of Structural Engineering*, Vol. 138, No. 6, pp. 697-707.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2010). *Highway Bridge Design Codes* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2012). *Highway Bridge Design Codes (Limit states design codes)* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2012). *Structural Concrete design codes* (in Korean).
- Rosenthal, I. and Shimoni, J. (1984). "Bending behavior of a double-loop connection between precast concrete slabs." *Concrete International* 6.11, pp. 30-34.
- Ryu, H. K., Kim, Y. J. and Chang, S. P. (2007). "Experimental study on static and fatigue strength of loop joints." *Engineering structures*, Vol. 29, No. 2, pp. 145-162.
- Shim, C. S., Kim, D. C., Yun, N. R., Choi, D. H. and Jin, K. S. (2015). "Experimental evaluation of loop joints in precast arch." *Proc. of KSCE Conf.*, KSCE, Korea, pp. 137-138.