보강된 이음부를 가진 조립식 프리캐스트 콘크리트 아치의 구조성능

정철현* · 주상훈** · 최동찬*** · 이종윤****

Chung, Chulhun*, Joo, Sanghoon**, Choi, Dongchan***, Lee, Jongyun****

Structural Performance of Precast Concrete Arch with Reinforced Joint

ABSTRACT

The masonry stone arch bridge, due to its superior durability and aesthetics, has been one of the oldest and popular types of short span bridges. In Europe, this type of bridges have been continuously constructed, and numerous related researches have been conducted until recently. However, there are few construction cases in Korea since the economic efficiency and the construction effectiveness is not contentable. Therefore, this study proposed the reinforced joint to improve structural performance of the conventional arch systems which is proposed by previous researchers. The structural performance of the proposed reinforced joint, which consists of the transverse loop joint and the longitudinal reinforcement, is validated by experimental test of an arch bridge which is constructed using precast concrete segments. Based on this results of the experimental test, it is concluded that the strength of arch bridges can be enhanced by applying the proposed reinforced joints since the reinforced joint restrains hinge behavior and relative displacement between segments with a little reinforcement.

Key words : Precast concrete, Masonry arch, Loop joint

초 록

내구성과 미관성이 우수한 석조 아치교량은 단경간 교량으로서 가장 오래되고 경험적으로 시공되었던 구조물로서 유럽에서는 지금까지도 현장에 시공되고 있으며, 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 국내에서는 시공법의 비효율성과 비경제성으로 인해 교량 목적으로 시공되는 경우는 거의 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구자들이 제안한 시스템에서 구조성능의 향상이 가능한 보강된 이음부의 접합방법을 제안하였다. 제안된 이음부는 횡방향 루프이음과 종방향 보강근을 적용한 형식으로 프리캐스트 콘크리트 블록으로 이루어진 아치에 적용하여 실험을 통해서 구조적 성능을 평가하였다. 실험결과, 보강된 이음부는 소량의 보강근으로도 블록 상호 간의 상대변위와 힌지거동을 억제시켜 기존의 형식보다 충분한 내력을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 프리캐스트 콘크리트, 석조 아치, 루프이음

1. 서론

최근 국내·외에서 교량구조물의 급속사공 및 환경파해를 최소화하기 위하여 프리캐스트 콘크리트 구조물에 대한 연구가 진행되고 있다(David, 2004; Chung et al., 2010). 이러한 기술은 현재 여러 형식으로 많이 개발되어 사용이 증가되고 있으나 아치형식의 프리캐스트

* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (chchung5@dankook.ac.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Corresponding Author · Dankook University · smeared@daum.net)

*** 금호산업(주) 건설기술연구소 연구소장, 공학박사 (dcchoil1@kumhoenc.com)

**** 정회원 · 금호산업(주) 건설기술연구소 책임연구원, 공학박사 (jylee3@kumhoenc.com)

Received May 10, 2013/ revised July 18, 2013/ accepted October 1, 2013

교량은 미적인 측면에서의 우수함에도 불구하고 제한적으로 사용되고 있다. 주로 소규모 하천교량이나 생태터널로 사용되고 있는 아치형식의 콘크리트 구조물은 아치의 구조역학적 장점과 미적인 측면을 고려하여 효과적으로 이용한 것으로서 최근에는 프리캐스트 콘크리트의 장점과 접합기술을 추가로 적용하여 적용분야를 넓혀나가고 있다.

조립식 프리캐스트 아치 구조물은 단면의 분절점 수에 따라 접합기술도 여러 형식으로 개발되고 있다. Fig. 1(a)는 PAB (Precast Arch Bridge) 공법으로 분절점 없이 한 개의 세그먼트로 구조물을 시공해가는 형식으로 벽체자립을 위한 가설재 및 기타장비가 필요하지 않는 장점을 가지고 있지만 현장까지의 운반거리가 먼 경우에는 운반의 비효율성으로 인하여 경제성이 떨어지는 경향을 가지고 있다. 반면, Fig. 1(b)는 각각 프랑스의 TechSpan과 Module Arch 공법으로 1~2개의 분절점으로 세그먼트가 조립되는 아치 형식은 인양장비 및 운반차량의 능력에 따라 구조물을 분리시킬 수 있으므로 분절점이 없는 형식보다 효율적이지만 벽체

자립을 위한 가설재 및 기타장비가 요구되며, 분절점에서의 접합기술이 필요하므로 이음부의 관리가 추가적으로 요구되는 기술이다.

Gupta et al. (2005)은 철근이 없는 무근 콘크리트 블록을 이용하여 석조(masonry) 형식의 아치 시스템을 연구하였는데, 프리캐스트 콘크리트 블록을 제작하여 격자 형상의 FRP (Fiber Reinforced Polymer)를 일렬로 배치된 블록 상부에 설치함으로써 시공단계에서 구조물 거치 시 FRP가 아치의 자중을 지지할 수 있게 하였다. 그리고 지점부에 아치부재가 거치된 후에는 아치부재 자체가 자중을 부담하게 하여 석조아치교와 같은 거동을 할 수 있게 시공법을 개발하였다. Taylor et al. (2006)은 선행연구(Gupta et al., 2005)에서 실험한 5m (span)×2m (rise)×1m (width) 크기의 프리캐스트 콘크리트 아치에 대하여 1/2 크기로 축소시켜 모형실험을 수행하였고 이에 따른 비선형 해석을 통하여 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템에 대한 구조적 효율성을 검증하였다. 북아일랜드에 위치한 Tievenameena Bridge는 Gupta et al. (2008)이 개발한 석조형식의 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템을 처음으로 적용한 교량이다(Fig. 2). 교량의 크기

(a) Segment Without Joint Connection (PAB)

(Tech Span)

(Module Arch)

(b) Segment with Joint Connection

Fig. 1. Precast Concrete Arch Structures

Fig. 2. Tievenameena Bridge (Gupta et al., 2008)

는 5m×2m이며, 허용오차 1mm 이내로 프리캐스트 콘크리트 블록을 제작하였다.

지금까지 주로 연구가 이루어진 조립식 프리캐스트 공법들은 경간장이 일정 길이 이상이 되어야 경제성이 확보되기 때문에 단경간의 교량에서는 현장타설 라멘형식의 구조물을 많이 사용해 오고 있다. 이러한 형식의 공법은 거푸집 설치, 철근조립, 현장타설 및 양생 등의 공정이 현장에서 직접 이루어지므로 공사 진행 시 철저한 공정관리와 안전관리가 보다 요구된다. 그러므로 기존의 프리캐스트 콘크리트 아치구조물에 대한 운반상의 제한적인 문제를 개선시키고 철근의 사용을 감소시킬 수 있는 보다 경제적인 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템이 요구되고 있다.

본 연구에서는 기존 연구자들이 제안한 시스템에서 구조성능의 향상이 가능한 횡방향 이음부의 접합성능을 제안하였다. 제안된 이음부는 횡방향 루프이음과 종방향 보강근을 적용한 형식으로 실험을 통해서 구조적 성능을 평가하였다.

2. 아치구조의 거동

구조실험을 수행하기에 앞서 예비해석을 통해 실험변수, 구조실험시 측정항목 및 측정위치 등을 결정하였다. 무근 콘크리트 단면으로 이루어진 연속체 아치와 블록으로 구성된 아치의 구조적 비선형 거동을 파악하기 위하여 재료 및 접촉 비선형 해석을 수행하였다. 해석모델은 두께 200mm로 이루어진 5m (경간)×2m (높이)×1m (폭) 크기의 아치구조를 대상으로 실험체 크기와 동일하게 하였다. 해석모델의 요소는 8절점 Solid 요소(C3D8R)를 사용하였고 콘크리트는 ABAQUS (2009)의 Concrete Damaged Plasticity 모델을 적용하였다. 하중은 경간 1/2 지점에 재하하였고 지점부의 경계조건은 변위를 모두 구속하였다. 적용된 콘크리트의 물성치는 압축강도 45MPa, 인장강도 4.05MPa (압축강도의 9%), 포아송비 0.18이며, 콘크리트의 압축응력-변형률 관계는 Hognestad (1951)가 제안한 콘크리트 응력-변형률 곡선을 적용하였다(Fig. 3).

Fig. 3. Stress-Strain Curve of Concrete

2.1 무근 콘크리트 연속형 아치구조

무근 콘크리트로 이루어진 연속체 아치구조에 대하여 Fig. 4와 같이 아치 상부에 횡방향으로 일정한 크기의 등분포하중을 적용하였다. 해석결과, 아치는 4지점 이상의 충분한 소성 한지점이 형성되는 소성 메커니즘이 발생되면서 붕괴가 일어나는 것으로 나타났다. Fig. 5는 중앙부인 하중재하위치에서의 하중-수직변위 관계를 나타낸 것으로 약 200kN (1.2mm)에서 중앙부 콘크리트 균열손상이 시작되었으며, 수직변위 2.8mm까지는 균열손상이 진전되면서 해석의 수렴과정을 나타냈다. 중앙부의 균열손상 이후 지점부와 부모멘트부에 응력분배가 이루어지면서 최대하중 258kN (9.7mm)까지 내력이 증가하는 거동으로 나타났으며, 지점부 및 부모멘트부의 뚜렷한 균열손상으로 내력이 감소하는 거동을 보였다.

Fig. 6은 해석결과와 콘크리트 균열분포도로서 인장강도 이후의 등가소성변형률(equivalent plastic strain)을 나타낸 것이다. 균열은 하중작용점 바로 밑에서 뿐만 아니라 압력선 위치에 따라 다른 지점에서도 발생되었다. 이는 하중작용점 바로 밑에서 균열이 집중

Fig. 4. FEM Model

Fig. 5. Load-Displacement Curve

Fig. 6. Equivalent Plastic Strain in Uniaxial Tension

Fig. 7. Stress Distribution and Deformation

적으로 발생하는 평면 벽체구조의 거동과는 전혀 다른 양상이다. 벽식 구조에 관한 Ali (1987)의 연구결과에서 파괴는 하중작용점 바로 밑에서 발생하는 수직균열이 벽체 두께의 약 90%까지 균열이 진전될 때 발생하는 것으로 가정하였다. 그러나 아치구조에서는 하중작용점 밑에 발생하는 균열은 아치 단면의 전두께로 까지 진전되지 않으며, 하중작용점 바로 밑에서 발생하는 첫 번째 균열은 다른 인장영역에서 두 번째 균열이 발생하는 동안 하중이 증가하면서 서서히 감소되는 경향을 보인다. 결과적으로 파괴는 적당한 개수의 소성힌지점이 형성되거나 아치구조가 더 이상 하중을 지지하지 못하는 범위까지 소성 거동을 보일 때 발생되었다.

2.2 조립식 프리캐스트 콘크리트 아치구조

접촉 비선형 해석은 23개로 구성된 콘크리트 블록을 각각 모델링 하여 블록 간의 접촉면에서 수행하였다. ABAQUS의 general contact를 사용하여 블록 간의 슬립(slip)과 벌어짐(opening)이 발생할 수 있도록 모델링 하였다. 접촉면에 평행한 방향으로 마찰계수를 적용하였으며, 접촉면에 직각인 방향으로 벌어짐이 발생할 수 있도록 강성을 부여하지 않았다. 하중과 지점조건은 연속형 아치구조

와 동일하게 적용하였으며, 해석은 implicit analysis로 수행하였다.

재료 및 접촉 비선형 조건을 적용한 아치구조의 해석결과는 Fig. 7과 같다. 콘크리트가 일체로 사용되는 연속형 아치구조에서 발생하는 소성힌지와 유사한 위치에서 블록 상호 간의 벌어짐과 슬립이 크게 발생하는 거동을 보였다. 하중재하에 따른 힌지거동 순서를 보면, 하중 작용점에서 첫 번째 힌지거동이 발생하였으며, 다음 단계로 양 지점부 부근, 양 1/4 지점 부근 순으로 힌지거동이 나타났다.

3. 조립식 아치의 설계 및 제작

콘크리트 블록으로 구성된 석조식 아치구조의 거동을 파악하기 위하여 아치부재의 상부에 채움재 없이 하중을 직접재하 하는 방식으로 5m (경간)×2m (높이)의 아치 실험체를 계획하였다. 이러한 석조식 아치시스템의 형식은 부재가 분절되어 있으므로 급속시공을 위해서는 블록 간의 연결성 확보가 요구된다. 또한, 현장에서 아치 형상으로 굴절되어 지점부에 정확한 거치를 하기 위해서는 분절점의 유연성이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 연결성

Fig. 8. Schematic Drawing

Fig. 9. Detailed Cross Section of Loop Joint and Reinforcement

과 유연성을 경제적으로 확보하기 위하여 현재 지반보강용으로 제작 및 사용되고 있는 지오그리드(geogrid)를 실험체에 적용하였다(Fig. 8).

콘크리트 블록 간 횡방향(교축직각방향)의 연결성을 적용하기 위하여 프리캐스트 콘크리트 바닥판 연구에 적용되었던 루프이음 방법을 도입하였다(Chung et al., 2008). 이러한 이음공법은 요구되는 철근의 겹침이음길이를 줄일 수 있으며, 이음부의 폭도 작게 형성할 수 있으므로 매우 효과적인 연결방식이다. 석조형식의 아치 시스템은 블록 간의 접촉저항성과 힌지거동에 따라 변위가 크게 발생되어 파괴되는 메커니즘을 가지고 있으므로 본 연구에서는 횡방향 루프이음부에 종방향으로 보강근을 적용하였다.

3.1 횡방향 이음부(루프이음부) 및 종방향 보강근

Fig. 9와 같이 루프이음부에 대한 철근상세는 겹침이음길이, 이음부구간, 내면직경으로 구분할 수 있으며, 실험체에 대한 루프이음부의 상세는 Bridge 200의 장수명 합리화 바닥판 개발의 연구(KICT, 2006)를 참고로 하였다. 횡방향 루프철근은 직경 13mm를 사용하였고 내면직경은 종방향으로 설치되는 보강근을 고려하여 6d, 이상인 112mm (h=125mm)로 결정하였다. 또한, KICT (2006)

에 의하면, DIN 1045에서 루프이음을 단순 겹침이음으로 취급하지 않고 후크부착 겹침이음 길이의 산정식과 동일하게 루프 내면직경의 1.5배 이상 또는 200mm 이상으로 규정하고 있다고 기술하고 있다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 루프철근의 겹침이음 길이를 200mm로 결정하였다.

종방향 보강근은 Fig. 9와 같이 곡선 형상의 아치부재에 설치가 용이한 SWPC 7B 7연선 12.7mm의 강연선을 사용하였다. 강연선은 보강근으로서의 목적으로 사용하기 위해 긴장력을 도입시키지 않았다.

3.2 지오그리드

조립식 아치 실험체에 적용되는 지오그리드를 결정하기 위해 Fig. 10과 같이 3개의 회사 지오그리드 15T (150kN/m)에 대한 인장강도시험을 수행하였다. 지오그리드는 폴리에스테르(polyester)계의 연성 제품을 사용하였으며, 시험은 ISO 10319 광폭인장강도시험방법에 따라 수행하였다. 시험결과는 A사, B사, C사 모두 제시하는 규격 값을 상회하여 폭 1m 실험체의 자중 39kN에 대한 인장강도를 충분히 확보할 수 있는 것으로 판단되었다. 그러나 Fig. 11에서와 같이 하중-변형률 곡선에서는 서로 다른 특성을

Fig. 10. Geogrid

Fig. 11. Tension Load-Strain Curves and Strength of Geogrid (15T)

나타내었으므로 아치부재의 인양 및 거치과정에서 블록 간의 단차와 이격을 최소화시킬 수 있고 강성변화가 작은 A사의 제품을 실험체에 적용하였다.

3.3 실험체 제작

실험체는 총 6개로 계획하였으며, Table 1 and Fig. 12와 같이 횡방향으로 루프이음을 적용한 것과 적용하지 않은 것으로 크게 분류하였다. 루프이음부가 없는 실험체는 2개, 루프이음부가 있는

Table 1. Test Specimens

Case	Loop joint	Load position	Steel reinforcement(ea)	Specimen width(m)	Specimen name
1	without	midspan (l/2)	0	1	BA-0-1
2				2(1×2segments)	BA-0-2
3	with		0	2(1×2segments)	BL-0-2
4			4(upper:2, lower:2)		BL-4-2
5			8(upper:4, lower:4)		BL-8-2
6			4(upper:2, lower:2)	1(0.5×2segments)	BL-4-1

※ BA: without loop joint, BL: with loop joint, BA(or BL)-number of steel reinforcement(ea)-width(m), nominal cross section area of steel reinforcement: $98.71\text{mm}^2/\text{ea}$

Fig. 12. Dimensions of Test Specimens

실험체는 종방향 보강근을 실험변수로 설정하여 4개의 실험체로 계획하였다.

루프이음부가 있는 실험체는 두 개의 부재를 아치 형상으로 형성시켜 횡방향으로 조립하였다(Fig. 13(a)). 그리고 Figs. 13(b)~(d)와 같이 루프이음부에 종방향 보강근을 설치하고 무수축 모르터를 타설하여 각각의 실험체를 완성하였다.

3.4 재료특성

실험체의 콘크리트 설계압축강도는 45MPa로 하였으며, 타설된 콘크리트는 8시간 증기양생 후 대기양생을 시켜 KS F 2405에 따라 압축강도를 측정하였다(Table 2).

콘크리트 블록 상부와 루프이음부에 타설된 무수축 모르터의 압축강도는 40MPa (cubic)으로 하였으며, 물/무수축모르터 비는 14%~16%로 하였다.

4. 조립식 아치의 구조실험

4.1 구조실험

Fig. 14(a)와 같이 1,000kN 용량의 가력기를 이용하여 파괴 시까지 점진적으로 변위제어로 하중을 증가시켰으며, 하중은 폭 200mm인 재하빔을 이용하여 횡방향(교축직각방향) 등분포로 재하하였다. 아치 부재의 지점은 하중재하시 지점의 이동을 방지하기 위해서 무수축

Fig. 13. Fabrication of Specimen with Loop Joint

Table 2. Test Results of Concrete Compressive Strength (MPa)

Design strength	At mold-stripping	At 28 days after casting
45	26	49

(a) Midspan Loading

(b) Support Conditions

Fig. 14. Setting of Specimens

(a) Deflection Gauge (LVDT)

(b) Crack Gauge, Mesh Lines

Fig. 15. Measurement of Deflection and Crack Opening

Fig. 16. Positions of Deflection and Crack Gauge

Fig. 17. Positions of Concrete and Strain Gauge

모르터를 타설하였다. 그리고 Fig 14(b)에서와 같이 지점부 기초 콘크리트 블록의 수평변위를 방지하기 위해 강재 프레임을 설치하였다.

하중재하 시 Fig. 7에 나타난 해석결과를 바탕으로 힌지거동이 예상되는 지점에 Fig. 15와 같이 LVDT와 균열게이지를 설치하였다. 하중증가에 따른 균열폭의 측정은 균열폭이 5mm 이내로 발생하는 구간에서는 전기식 균열게이지로 측정하였고, 5mm 이상의

균열폭이 발생하는 구간에서는 격자망을 그려서 사진촬영에 의해 간접적으로 측정하였다. 실험체에 대한 변위(L1~L9) 및 균열폭(CR1~CR5)의 측정위치는 Fig. 16과 같다.

루프이음부의 무수축 모르터 및 보강근의 변형률을 측정하기 위해 콘크리트 게이지(C1~C5)는 4개의 실험체(BL-0-2, BL-4-2, BL-8-2, BL-4-1), 스트레인 게이지(S1~S4)는 2개의 실험체(BL-8-2, BL-4-1)에 대해서 측정하였다. 실험체에 대한 각 게이지의 설치위치는 Fig. 17과 같다.

4.2 실험결과

4.2.1 파괴거동

구조실험결과, 모든 실험체가 소성힌지의 거동과 같이 변위가 크게 발생하는 거동을 보였다. 특히, 루프이음과 종방향 보강근이 적용된 실험체는 상대적으로 다른 실험체보다 최대내력이 크게 나타났으며, 하중재하위치에서의 콘크리트 블록이 압축력에 의해 손상되는 경우가 발생되었다. 대표적으로 폭 2m의 실험체 4개에 대한 변형 형상을 Figs. 18~21에 정리하였다.

실험체 BA-0-2에서는 하중 42kN 부근에서 2번 블록이 약 40mm정도(초기단차 10mm 제외) 미끄러지면서 하중이 급격하게 감소되었다. 이후 2번 블록이 다시 자리를 잡으면서 하중이 증가하는 거동이 나타났다. 이러한 현상은 실험체 설치시 아치의 경간이 설계치수보다 짧아지면서 1번과 2번 블록 사이 접촉부 각도가 수평방향으로 작아졌기 때문인 것으로 판단된다.

실험체 BL-0-2에서는 50kN 부근에서부터는 12번 블록 상부 무수축 모르터가 탈락되면서 블록이 아래방향으로 약 20mm 정도 미끄러지는 현상이 나타났다. 그리고 2번과 22번 블록은 루프이음을 적용하지 않은 실험체 BA-0-2와 비교해서 변위가 상대적으로 작게 나타났다.

실험체 BL-4-2에서는 블록들 간에 벌어진 틈이 상대적으로 감소되

(a) Block 1 ~ 2

(b) Block 5 ~ 6 (Opening 2mm)

(c) Block 12 ~ 13 (Opening 6mm)

(d) Block 18 ~ 19 (Opening 1mm)

Fig. 18. Deformation of Specimen BA-0-2

Fig. 19. Deformation of Specimen BL-0-2

Fig. 20. Deformation of Specimen BL-4-2

Fig. 21. Deformation of Specimen BL-8-2

었으며, 170kN~190kN 부근에서부터는 12번 블록의 상부 무수축 모르타가 탈락되면서 블록이 아래방향으로 약 10mm 정도 미끄러지는 현상이 나타났다. 하중재하 260kN에서는 23번 쪽의 지점블록이 바깥쪽으로 30mm 정도 밀리면서 실험을 중지하였다. 이때 발생된 22번 블록의 미끄러짐은 약 10mm로 나타났다.

실험체 BL-8-2는 BL-4-2보다 종방향 보강근을 2배 더 설치한

실험체로서 블록들 간에 벌어짐이 상대적으로 감소되었다. 260kN~270kN 부근에서부터는 12번 블록의 상부 무수축 모르타가 탈락되면서 블록이 아래방향으로 약 10mm 정도 미끄러지는 현상이 나타났으며, 12번 블록 측면에는 압축으로 인한 콘크리트 블록의 손상을 보였다. 하중 445kN에서는 루프이음부를 포함하고 있는 13번 블록 하면에서 콘크리트의 손상이 발생되었다.

Table 3. Failure Mechanism

Specimen name	Failure mechanism				
	Opening between blocks	Slip of blocks 1 ~ 2, 22 ~ 23	Slip of block 12	Cracking of mortar in loop joint	Crushing and cracking of block 12, 13
BA-0-1	○	○			
BA-0-2	○	○			
BL-0-2	○	○	○	○	
BL-4-2	○	○	○	○	
BL-8-2	○	○	○	○	○
BL-4-1	○	○	○	○

(a) Specimen BA-0-1

(b) Specimen BA-0-2

(c) Specimen BL-0-2

(d) Specimen BL-4-2

(e) Specimen BL-8-2

(f) Specimen BL-4-1

Fig. 22. Arch Shape at the Maximum Load

실험체 BL-4-1은 실험체 BA-0-1과 같이 블록들 간에 힌지거동을 보였으나 벌어짐은 작게 나타났다. 하중 210kN 부근에서부터는 12번 블록 상부 무수축 모르타가 부분적으로 탈락되면서 블록이 아래방향으로 약 10mm 정도 미끄러지는 현상이 나타났다.

Table 3은 각 실험체에 대한 파괴양상을 정리한 것으로 모든 실험체가 블록의 슬립(slip)과 블록 간의 벌어짐이 발생하는 힌지거동을 보였다. 보강된 이음부를 적용하지 않은 실험체에서는 취성파괴와 같은 거동을 보이지 않고 변위가 크게 발생하는 파괴거동을 나타내었

다. 반면, 보강된 이음부를 적용한 실험체는 블록 간의 슬립과 벌어짐 뿐만 아니라 횡방향 루프이음부에 균열현상이 발생되었으며, 12번 블록의 슬립현상이 발생하는 파괴거동을 보였다. 특히, 실험체 BL-8-2에서는 블록 12번과 13번에 콘크리트 손상이 나타났다.

4.2.2 하중-변위 관계

구조실험이 진행되는 동안 하중증가에 따른 변위를 측정하였다. 그리고 측정된 변위를 이용하여 최대내력이 작용하는 시점에서의

Fig. 23. Load-Displacement Curve of Specimen BA-0-1

Fig. 24. Load-Displacement Curve of Specimen BA-0-2

Fig. 25. Load-Displacement Curve of Specimen BL-0-2

변형 형상을 Fig. 22에 나타내었다. Fig. 22에 표현된 아치부재의 변형된 크기는 실험에서 측정된 변위 값을 3배로 확대하여 나타낸 것이다.

각 실험체에서 측정된 수직변위 및 수평변위를 Figs. 23~28에 나타내었다. 여기서, 양의 부호를 갖는 수직과 수평 변위는 각각 하향(Downward)과 아치 내측(Inward) 방향으로 발생하는 변위이다. 음의 부호를 갖는 수직과 수평 변위는 각각 상향(Upward)과 아치 외측(Outward) 방향으로 발생하는 변위이다. Figs. 23~25에

서 보면, 하중이 급격히 감소하다가 다시 증가하는 거동을 나타내는 데, 이러한 현상은 블록 상호 간의 접촉부에서 순간적으로 상대변위가 발생되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Figs. 26~28에 나타낸 실험체에서는 루프이음부에 배근된 종방향 보강근이 블록 간의 상대변위를 억제시켜 급격한 하중감소가 크게 줄어든 것으로 나타났다.

모든 실험체에서 최대변위와 최대균열의 벌어짐(crack opening)은 각각 하중작용점 바로 밑에 있는 블록과 그 블록 상호 간 아치내면

Fig. 26. Load-Displacement Curve of Specimen BL-4-2

Fig. 27. Load-Displacement Curve of Specimen BL-8-2

Fig. 28. Load-Displacement Curve of Specimen BL-4-1

의 접촉부에서 발생되었다. Table 4는 실험에서 측정된 최대내력과 이에 대한 하중재하위치에서의 수직처짐 및 벌어짐을 정리한 것이며, Figs. 29~32는 아치부재의 실험변수에 따른 하중-변위 관계를 비교한 것이다.

횡방향 폭 2m의 실험체 BA-0-2는 폭 1m의 실험체 BA-0-1와 비교해서 약 2배의 더 큰 내력을 보였으며, 폭 2m의 실험체 BL-0-2는 실험체 BA-0-2와 비교해서 최대내력이 약 1.5배 증가하는

결과를 나타내었다. 이러한 현상은 루프이음부가 콘크리트 블록 간의 상대변위를 감소시키고 전단저항력을 증가시켜 내력이 증가한 것으로 판단된다. 실험체 BL-0-2와 비교해서 종방향 보강근을 4개 설치한 실험체 BL-4-2는 최대내력이 약 3.9배로 증가하였고 보강근을 8개 설치한 실험체 BL-8-2는 최대내력이 약 6.6배로 증가하여 종방향 보강근이 블록 간의 벌어짐을 크게 감소시켜 휨모멘트에 대한 저항력을 증가시킨 것으로 판단된다. 특히, 루프이

Table 4. Maximum Load, Vertical Displacement and Crack Opening at the Load Position

Specimen	Max. load (kN)	Vertical displacement and crack opening at maximum load (mm)	
		Displacement	Crack opening (opening between blocks)
BA-0-1	22.1	37.89	20.7
BA-0-2	45.5	43.92	5.9
BL-0-2	67.7	55.99	25.0
BL-4-2	264.2	52.82	10.1
BL-8-2	445.2	60.21	15.0
BL-4-1	260.0	53.84	10.8

(a) Specimen Width 1m

(b) Specimen Width 2m

Fig. 29. Comparison with Vertical Displacement (L5) at Block 12 (Load Position)

(a) Specimen Width 1m

(b) Specimen Width 2m

Fig. 30. Comparison with Vertical Displacement (L3) at Block 5~6

Fig. 31. Comparison with Horizontal Displacement (L4) at Block 5~6

Fig. 32. Comparison with Horizontal Displacement (L2) at Block 2

음부와 4개의 보강근이 적용된 실험체 BL-4-1의 최대내력은 실험체 BA-0-1보다 약 11.8배 더 크게 나타났다. 이는 루프이음부의 폭에 대한 비율이 폭 2m의 실험체보다 증가됨에 따라 최대내력의 증가 비율도 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 제안한 횡방향 루프이음부와 종방향 보강근은 콘크리트 블록만으로 구성되는 기존의 아치구조의 사용성과 안정성을 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.3 하중-균열의 벌어짐(crack opening) 관계

실험에서는 하중증가에 따른 블록 상호 간의 균열의 벌어짐을 전기식 균열게이지와 사진촬영에 의해 측정하였다. Fig. 33은 5mm 이상의 벌어짐량을 측정하기 위해 격자망을 이용하여 사진으로 측정한 하중-균열의 벌어짐 관계이며, Figs. 34~36은 5mm 이내의 벌어짐을 전기식으로 측정한 하중-균열의 벌어짐 관계로서 횡방향 폭이 동일한 실험체별로 비교한 것이다.

실험체 폭 1m의 경우에는 실험체 BL-4-1이 실험체 BA-0-1와

비교해서 블록 간 접촉부의 벌어짐이 매우 작게 나타났으며, 실험체 폭 2m의 경우에도 루프이음과 보강근이 적용된 실험체 BL-4-2, BL-8-2가 BA-0-2와 비교하여 접촉부의 벌어짐이 작게 나타나는 결과를 보였다. 그러나 블록 간의 벌어짐 2mm까지는 루프이음부에 적용된 종방향 보강근의 강재량이 하중재하부에서의 블록 간 벌어짐에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다(Fig. 34(b)). 보강근이 적용되지 않은 실험체 BL-0-2는 실험체 BA-0-2와 비교해서 내력은 증가하였으나 블록 간 접촉부의 벌어짐을 크게 감소시키지 못하는 결과를 보였다.

4.2.4 하중-변형률 관계

하중재하위치에서 측정된 루프이음부의 무수축 모르트 변형률을 Fig. 37에 각 실험체별로 비교하였다. Fig. 37에서 보면, 루프이음부에 적용된 보강근이 증가할수록 동일 하중수준에서 무수축 모르트의 압축 변형률이 크게 감소되는 결과를 보였으며, 아치부재의 구조성능을 향상시키는 것으로 나타났다. 보강근에서 측정

Fig. 33. Load vs. Crack Opening Curves by Mesh Lines

Fig. 34. Comparison with Crack Opening (CR5) at Block 12 ~ 13

Fig. 35. Comparison with Crack Opening (CR2) at Block 5 ~ 6

Fig. 36. Comparison with Crack Opening (CR1) at Block 1 ~ 2

Fig. 37. Comparison with Mortar Strain (C3) at Load Position

된 하중-강재의 인장변형을 관계는 Fig. 38에 나타내었으며, 강연선의 변형률 1% (ASTM, 2006)를 기준으로 보강근은 모두 항복 수준 이내인 것으로 판단된다.

4.2.5 결과분석

실험체 BA-0-2를 제외하고 모든 실험체가 변위 및 균열의 벌어짐(crack opening)의 분포 형상이 유사하게 나타났다. 실험체 BA-0-2에서 지점부근의 2번 블록이 미끄러지는 현상이 가장 크게 나타난 이유는 Table 5에서와 같이 실험체 BA-0-2의 설치오차가 가장 크고 경간이 짧게 설치되어 1번 블록과 2번 블록의 접촉부 각도가 수평에 더 가깝게 설치되면서 수평력에 대한 저항이 감소되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 루프이음부가 적용된 실험체가 블록의 슬립현상을 어느 정도 억제시켜 실험체 BA-0-2보다 미끄러짐이 작게 나타났기 때문이다. 아치 양단부의 이동을 방지하기 위해서 1번과 23번 블록의 지지점에 무수축 모르터를 타설한 부분에서는 실험체 BA-0-1의 1번 블록 지지점에서 일시적으로 한지거동이 나타났으나 그 외의 실험체에서는 2번과 22번 블록에서 한지

Fig. 38. Load vs. Steel Reinforcement Strain Curves

거동을 보였다. 이는 1번과 23번 블록의 지지점이 회전이 구속되어 고정에 가까운 조건이 되면서 2번과 22번 블록으로 한지거동 현상이 나타난 것으로 판단된다.

각 실험체에 대한 하중수준을 변위와 균열의 벌어짐 기준으로 Tables 6 and 7에 비교하였다. 횡방향 루프이음과 종방향 보강근을

Table 5. Setting Errors of Span and Rise for Specimens

Specimen	Measurement after setting		Error of span		Error of rise	
	Span(m)	Rise(m)	m	%	m	%
BA-0-1	4.77	2.10	-0.15	-2.99	0.08	3.91
BA-0-2	4.61	2.14	-0.31	-6.24	0.12	5.89
BL-0-2	4.89	2.02	-0.03	-0.55	0.00	-0.05
BL-4-2	4.83	2.03	-0.09	-1.77	0.01	0.45
BL-8-2	4.85	2.04	-0.07	-1.36	0.02	0.94
BL-4-1	4.84	2.02	-0.08	-1.57	0.00	-0.05

※ Design dimension of 5m(span)×2m(rise) is 4.917m(span)×2.021m(rise).

Table 6. Comparison of Load in Vertical Displacement at Load Position (kN)

Vertical displacement		5mm	10mm	20mm	30mm
Specimen					
Width 1m	BA-0-1	8.5	12.5	18.0	19.0
	BL-4-1	65.0	95.0	154.9	200.1
Width 2m	BA-0-2	22.0	32.0	41.7	41.0
	BL-0-2	38.1	48.6	57.1	61.9
	BL-4-2	82.1	120.0	185.1	218.1
	BL-8-2	97.0	169.9	274.8	339.9

Table 7. Comparison of Load in Crack Opening at Block 12 ~ 13 (kN)

Crack opening		0.5mm	1mm	2mm	3mm
Specimen					
Width 1m	BA-0-1	5.5	8.5	15.0	17.0
	BL-4-1	55.0	68.0	100.1	128.0
Width 2m	BA-0-2	23.0	29.0	36.0	41.0
	BL-0-2	36.1	40.0	46.4	50.0
	BL-4-2	79.8	115.1	180.0	207.9
	BL-8-2	80.5	129.9	200.2	285.0

적용한 실험체는 적용하지 않은 실험체와 비교해서 뚜렷하게 내력이 향상된 결과를 나타냈으며, 콘크리트 블록 간의 벌어짐 또한 같은 하중조건에서 작게 나타나는 거동을 보였다. 이는 루프이음부에 설치된 보강근이 콘크리트 블록 간의 상대변위를 억제하여 하중에 대한 저항력을 증가시켰기 때문인 것으로 판단된다. 실험체 BL-4-2와 BL-8-2는 하중제하부에서 수직변위와 벌어짐이 각각 5mm, 2mm까지 큰 내력차이를 나타내지 않았다. 실험체의 파괴거동은 모든 실험체가 블록 간의 슬립과 벌어짐으로 변위가 크게 발생하는 거동을 나타내었다. 이러한 거동은 붕괴기구 중 블록 간의 미끄러짐과 힌지거동이 혼합된 붕괴기구로 판단할 수 있으며, 뒤채움에 적용될 경우에는 하중분산효과와 수평저항이 증가되어 힌지 붕괴기구만으로 아치의 파괴거동이 나타날 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 블록으로 구성되는 아치부재에 횡방향 이음부 접합방식을 도입한 조립식 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템을 제안하였고, 구조실험을 통해서 구조성능을 평가하였다. 제안된 이음부는 횡방향 루프이음과 종방향 보강근을 적용한 구조형식이다. 아치구조의 거동을 파악하기 위해 수행한 비선형 해석에서는 일체식 아치구조와 조립식 블록 아치구조의 거동이 유사하게 나타났으며, 1/2 지점에 하중제하시 아치구조는 5힌지가 발생하는 붕괴 메커니즘을 나타냈다. 이러한 아치구조의 붕괴 메커니즘을 분석하여 구조실험시 실험체의 측정 항목 및 위치를 결정하였다. 실험변수가 고려된 6개의 조립식 프리캐스트 콘크리트 아치

실험체에 대하여 구조실험을 통해서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 모든 실험체에서 최대변위와 블록 간의 최대 벌어짐은 각각 하중재하부 바로 밑에 있는 블록과 그 블록 상호 간 아치내면의 접촉부에서 발생되었으며, 횡방향 루프이음부에 종방향 보강근이 적용된 실험체가 구조내력을 크게 증가시키는 결과를 나타내었다.
- (2) 모든 실험체의 파괴양상은 블록의 슬립과 블록 간의 벌어짐을 동시에 나타내는 혼합된 붕괴기구 형태로 나타났다. 보강된 이음부를 적용한 실험체에서는 루프이음부에 균열이 나타났으며, 하중재하위치인 블록 12번의 슬립현상이 발생하는 파괴거동을 나타내었다. 실험체 BL-8-2에서는 블록 12번과 13번의 콘크리트 손상이 추가적으로 발생하는 파괴거동을 보였다.
- (3) 폭 1m의 실험체에서는 루프이음과 보강근 4개를 적용한 실험체 BL-4-1이 적용하지 않은 실험체 BA-0-1보다 11.8배 더 큰 내력을 나타냈으며, 블록 간의 벌어짐은 상대적으로 작게 나타났다. 폭 2m의 실험체에서는 루프이음과 보강근을 적용한 실험체 BL-4-2, BL-8-2가 적용하지 않은 실험체 BA-0-2보다 각각 3.9배, 6.6배 더 큰 내력을 나타냈으며, 블록 간의 벌어짐이 크게 감소하는 결과를 나타내었다.
- (4) 콘크리트 블록 간의 상대변위와 힌지의 거동을 최소한으로 억제시킬 수 있는 소량의 보강근 배치로도 기존의 형식보다 충분한 내력향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 결론적으로, 본 연구에서 제안한 조립식 프리캐스트 콘크리트 아치시스템은 횡방향(교축직각방향)으로 아치부재 간에 루프이음을 설치하고 루프이음 내에 종방향(교축방향)으로 보강근을 적용하는 것이 구조적으로 가장 효과적인 결과를 나타내었다.

References

- ABAQUS (2009). *Abaqus analysis user's manual version 6.9*, Dassault Systemes Simulia Corp.
- Ali, S. (1987). *Concentrated loads on solid masonry*, Thesis presented to the University of Newcastle, Australia.
- ASTM (2006). *Standard specification for steel strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete* (ASTM A416/A416M-06), West Conshohocken, PA: ASTM.
- Chung, C. H., Lim, S. J. and Kim, H. J. (2010). "Fatigue performance of bridge decks using half-depth precast panel with loop joint." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1A, pp. 35-43 (in Korean).
- Chung, C. H., Sung, Y. E., Hyun, B. H. and Park, S. J. (2008). "Experimental study on connectability of half-depth precast deck panels with loop joint." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 4A, pp. 581-590 (in Korean).
- David, H. (2004) "Application and design of segmental precast arches." *GeoTrans 2004*, ASCE, pp. 452-459.
- Gupta, A., Taylor, S. E., Kirkpatrick, J., Long, A. E. and Hogg, I. (2008). "Construction of tievenameena bridge using a flexi-arch system." *Bridge and Infrastructure Research in Ireland 2008*.
- Gupta, A., Taylor, S., Kirkpatrick, J., Long, A. and Hogg, I. (2005). "A flexible concrete arch system." *Concrete Research in Ireland Colloquium 2005*.
- Hognestad, E. (1951). *A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members*, Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill.
- ISO 10319 (1993). *Geotextiles: Wide-width tensile test*, International Organization for Standardization, Switzerland.
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2006). *Development of long-life deck systems for bridges-precast concrete deck*, Bridge200 Final Report (in Korean).
- Korean Industrial Standards (KS) (2005). *Method of test for compressive strength of concrete*, KS F 2405, Korean Standards Association (in Korean).
- Taylor, S. E., Robinson, D., Ritchie, N., McIlwaine K. and Gupta A. (2006). "Testing of half-scale model flexible concrete arches." *Bridge and Infrastructure Research in Ireland: Symposium 2006*.