프리캐스트 콘크리트 세그먼트 접합부의 구조거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Structural Behavior of Joints for Precast Concrete Segment

이영학¹⁾ · 김민숙²⁾ · 정보나³⁾ · 김희철⁴⁾ · 김관수⁵⁾

Lee, Young-Hak · Kim, Min-Sook · Jung, Bo-Na · Kim, Hee-Cheul · Kim, Kwan-Soo

국문 요약 >> 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 공법은 품질관리가 용이하고 비용 및 공사기간을 단축할 수 있으나 각 세그먼트의 조립으로 인한 접합부의 응력집중 및 큰 변위로 인해 구조적으로 불리한 거동을 보여 많은 장점에도 불구하고 폭넓은 적용에 있어 그 한계가 발생한다. 이에 본 연구에서는 구조 성능이 개선된 프리캐스트 세그먼트 접합부를 제안하고 실험을 통하여 균열 및 파괴양상, 변형률, 최대하중, 변위 연성도의 측면에서 제안한 접합부의 구조 성능을 평가하고자 하였다. 본 연구에서는 시공성 및 구조성능을 고려하여 전단키 및 포스트텐션, 강봉 등의 적용여부를 변수로 한 접합부를 제안하고 이에 대해 정적 재하 실험을 수행하였다. 실험 결과, 전단키 및 포스트텐션을 적용한 SGSP 실험체는 최대하중의 측면에서 일체형 실험체에 비해 약 86%에 준하는 내력을 보였으며 연성 측면에서는 일체형 실험체의 연성 능력 이상의 연성거동을 보임으로써 제안한 접합부의 개선된 구조성능 및 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

주요어 프리캐스트 콘크리트, 세그먼트, 접합부, 전단키, 포스트텐션

ABSTRACT >> The use of precast concrete segments facilitates quality control and reduces construction cost and period. However, as a construction method it has limited applicability, for it demonstrates structurally disadvantageous behaviors due to stress concentration and large displacement in the joint of assembled segments. This paper proposes a precast segment joint with improved structural performance, and experimentally assesses the structural performance of the proposed joint in terms of crack and failure modes, deformation, maximum load and displacement ductility. In consideration of constructability and structural performance, this paper suggests different types of joint with shear key, post tension and steel rods as variables, and performs a static loading test on them. The test results show that the performance of SGSP specimens is around 84% that of a monolithic specimen in terms of the maximum load, while their ductility behaviors are better than the monolithic specimen. This result confirms the improved structural performance and applicability of the proposed joint.

Key words Precast concrete, Segment, Joint, Shear key, Post tension

1. 서론

건축물의 고품질화 및 시공의 고도화, 경제성의 확보와 고층화, 대형화가 요구됨에 따라 주목받게 된, 공장에서 제작된 프리캐스트 콘크리트 세그먼트(Precast Concrete Segment)를 현장에서 운반하여 조립하는 프리캐스트 콘크리트 세그

먼트(Precast Concrete Segment, 이하 'PCS'라고 함)공법은 1960년대 후반부터 교량 분야에서 단면이 큰 프리캐스트 부재의 운반시 부재 중량으로 인한 운송제한을 극복하기 위해 적용되었다. PCS 공법은 운송제한을 피하면서도 균일한 품질확보 및 현장타설 작업의 최소화로 인한 공사기간의 단축 등 PC공법의 장점을 살릴 수 있다는 측면에서 현재까지도 교량 뿐 아니라 장스팬을 가지는 건축물의 바닥판 시스템에도 폭넓게 적용되고 있다.^{(1),(2)} 그러나 PCS 공법은 각 세그먼트의 조립으로 인해 구조물에 접합부가 존재하게 되며 이는 힘의 불연속면을 형성하여 변형의 불연속 및 응력집중 등 구조적으로 불리한 거동을 보이게 된다. 즉, 접합부의 거동이 구조물 전체의 거동을 좌우할 수 있다는 것이다.⁽³⁾

¹⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과, 조교수

²⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과, 박사과정

(교신저자 : kimminsook@khu.ac.kr)

³⁾ 경희대학교 건축공학과, 석사과정

⁴⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과, 교수

⁵⁾ 경희대학교 건축학과, 조교수

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 8. 13 / 수정일 : 2009. 10. 24, 게재확정일 : 2009. 11. 9)

이에 Buyukozturk et al.⁽⁴⁾은 PCS 접합에 있어 요철부분의 맞물림 작용 등으로 인하여 높은 전단저항 및 연성을 확보할 수 있는 전단키의 적용을 필수적인 것으로 보고, 전단키의 전단거동을 실험적으로 검증하였으며 Xizngming et al.⁽³⁾은 전단키 개수 및 접합면의 에폭시 도포의 유무 등을 변수로 한 실험을 통하여 각 변수별 거동의 특성을 분석하고 전단키의 전단강도 산정식을 제안하였다. 또한 Megally et al.^{(5),(6)}은 구조실험 및 유한요소해석을 통하여 prestressed concrete I형 거더 접합부의 내진성능을 평가하였다. Jaeheung Kim et al.⁽⁷⁾은 분절형 prestressed concrete 거더의 실험을 통하여 일체형 거더와 분절형 prestressed concrete 거더의 정적거동을 비교 및 분석하였다.

위에서 언급한 바와 같이 PCS 공법이 오랜 기간 폭넓게 적용되고 있음에도 불구하고 지금까지의 연구는 기존에 적용되고 있는 접합 상세를 적용하여 구조물의 국부적 또는 전체적인 거동을 평가하는 연구가 주를 이루고 있으며 구조성능을 향상시킬 수 있는 개선된 접합 상세 개발에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 접합부의 구조성능 향상이 가능한, 개선된 PCS 접합 상세를 제안하고 그에 따른 구조실험을 수행하여 각 접합 상세에 따른 구조거동을 실험체의 파괴 및 균열양상, 변형률, 최대내력 및 연성도의 측면에서 평가하고 이를 바탕으로 현장에 적용 가능한 접합 상세를 제안하고자 하였다.

2. 실험계획

2.1 실험체 제작

본 연구에서는 제안한 PCS 접합부의 구조성능을 평가하기 위해 포스트텐션 및 강봉, 전단키 등의 적용에 따른 접합부 형태를 변수로 한 실험체 4분을 제작하였으며 각 변수일람 및 접합 상세는 표 1과 그림 1에 나타내었다. 접합부 형태를 변수로 한 실험체 4분 외에, 각 세그먼트 접합부와의 성능 검증을 위한 비교 실험체로 같은 제원을 가지는 길이 3,300mm의 일체형 거더 1분을 제작하여 총 5분의 실험체에 대해 구조실험을 수행하였다.

〈표 1〉 실험체 변수 일람

실험체명	접합부 형태	개수
MG	일체형	1
SGSP	Splice Girder + Shearkey + Post-tension	1
SGP	Splice Girder + Post-tension	1
SGSS	Splice Girder + Shearkey + Steel rod	1
SG	Splice Girder	1

실험체는 외경 750mm × 750mm, 내경 350mm × 250mm의 중공형 단면을 적용하였으며 그림 2와 같이 길이 1,650mm 인 두 개의 세그먼트를 접합하여 제작하였다.

〈그림 1〉 실험 변수별 단면 상세

〈그림 2〉 본 연구의 세그먼트 접합 방식

두 개의 세그먼트 접합시 주철근을 연장하여 그 이음부에 현장에서 콘크리트를 타설하여 거더를 접합하는 기존의 CIP 방법(Cast in Place, 그림 3)과 차별화를 두기 위하여 시공의 편의성 및 철근이음의 일체성의 확보가 가능한 스프라이스 슬리브를 적용하여 철근이음 하였고, 현장타설로써 생성되는 전단키 대신 실험체와의 일체 타설로 전단키를 제작하여 실험체와 전단키와의 거동의 일체성을 높이고자 하였다. 또한 포스트텐션 및 강봉을 이용한 세그먼트 접합을 통하여 접합 방법에 따른 시공의 용이성 및 구조거동을 파악하고자 하였으며 전단키가 구조부재에 미치는 영향을 평가하기 위하여 전단키의 유무를 변수로 두었다.

실험체 제작과정은 그림 4에 나타내었다. 제작된 각 세그먼트는 탈형 후 세그먼트 단면에 에폭시를 도포하고 스프라이스 슬리브에 무수축 몰탈을 주입함으로써 1차 접합된다. 이후 접합 방법에 따라 강봉 또는 포스트텐서닝을 통해 2차

〈그림 3〉 Cast-in-Place 방식

(a) 타설

(b) 양생

(c) 탈형

(d) 에폭시 도포

(e) 무수축 몰탈 주입

(f) 포스트텐서닝

〈그림 4〉 실험체 제작 과정

접합 된다. 포스트텐션을 적용한 실험체의 경우 강연선 한 개당 긴장력은 128.5kN 이다. 강봉을 적용한 실험체의 경우 강봉 양단에 볼트를 체결함으로써 실험체를 접합하였다.

2.2 재료시험

실험체 타설시 $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 공시체 총 6개를 제작하여 실험체와 동일한 조건으로 양생하였다. 공시체의 강도 시험은 양생 28일 후 KS F 2405 ‘콘크리트의 압축 강도 시험 방법’에 따라 수행하였으며 압축강도시험 결과 약 45MPa의 압축강도를 확인하였다. 사용된 콘크리트의 배합은 표 2와 같다.

실험체의 주철근은 인장강도 400MPa인 HD25, 늑근은 400MPa, HD10을 사용하였다. SGSS 실험체 접합에는 인장강도 400MPa, 지름 25mm의 강봉이 사용되었으며 SGSP 및 SGP 실험체의 포스트 텐션에 사용된 강연선의 물성치는 표 3에 나타내었다.

2.3 계측 및 가력

제안한 접합부의 구조 성능을 평가하기 위하여 그림 5와 같이 실험체의 양단을 단순 지지한 상태에서 중앙부에 원통형 가력 힌지를 위치시켜 1점 가력하였다. 하중은 1000kN

〈표 2〉 콘크리트 배합설계

fck (MPa)	Slump (mm)	G Max (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)			
					W	C	S	G
45	150	25	324	44	162	500	727	936

〈표 3〉 강연선 재료 물성치

Type	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Unit Weight (kg/km)	Elongation (%)
SWPC7B	12.7	98.7	774	3.5

〈그림 5〉 계측 및 가력 계획

〈그림 6〉 실험체 설치 상황

〈그림 7〉 철근 변형률 게이지 부착위치

용량의 오일잭 시스템을 이용하여 하중제어 방식으로 재하하였으며 재하된 하중을 측정하기 위해 로드셀을 설치하였다. 실험체의 변위를 측정하기 위하여 거더 중앙 하부에 LVDT를 설치하였다. 실험체 설치가 완료된 모습은 그림 6에 나타내었다. 응력이 주근을 따라 고르게 분포되는지 관찰하기 위하여 상부 및 하부근의 중앙부에 철근 변형률 게이지를 부착하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 균열 및 파괴양상

그림 8은 최대하중 도달 후 최대하중의 80%의 하중에서의 균열 및 파괴 직전 접합부 분리 양상을 나타낸 것이다. SGSP 실험체 및 SGSS 실험체는 MG 실험체와 유사한 휨 균열 및 사인장 균열의 형태로 균열이 진전되었음을 알 수 있다. 이는 접합부의 일체성 확보로 인해 두 개의 세그먼트에 응력이 고루 분포되어 하나의 일체형 실험체와 같이 거동하고 있음을 보여준다고 할 수 있다. 반면에 스플라이스 슬리브만으로 접합된 SG 실험체는 재하된 하중으로 인한 응력이 실험체에 분포되기 전에 에폭시 접합면의 균열 및 하부철근 슬립 등으로 인한 접합부 파괴가 발생하여 다른 실험체에 비해 상대적으로 적은 균열발생이 발생하였다.

각 실험체별 파괴양상을 그림 9에 나타내었다. MG 실험체의 경우 400kN의 하중에서 실험체 중앙부 하단에 초기 휨균열이 발생하였으며 이후 균열의 큰 진전없이 하중이 증가하다 최대하중인 879.6kN에서 갑작스러운 휨-전단 균열

(a) MG 실험체

(b) SGSP 실험체

(c) SGSS 실험체

(d) SG 실험체

〈그림 8〉 균열 및 접합부 분리양상

을 보이며 파괴되었다. 스플라이스 슬리브만으로 접합된 SG 실험체의 경우 190kN의 하중에서 에폭시가 도포된 부분에 균열이 발생하였으며 이후 하중 220kN에서 하부 철근 슬립이 발생하면서 접합부 이격이 시작되었고 290kN의 하중에서 하부 철근 슬립이 증가하면서 급격히 하중이 감소하였다. SGP 실험체는 300kN의 하중에서 접합부 이격이 발생하였고 500kN의 하중에서 접합부의 이격 거리가 증가하면서 강연선과 콘크리트 사이의 마찰로 인한 소음이 발생하였다. 이후 정착구 파괴, 강연선 파단이 차례로 발생하였고 접합부 이격거리가 점차 증가하면서 하중이 감소하였다.

SGSS 실험체의 하부 철근 슬립은 SGP 실험체에 비해 비교적 늦은 시점에 발생하였으나 철근 슬립 이후 다른 실험체에 비해 균열 폭이 넓은, 많은 균열이 실험체 표면에 전체적으로 발생하였다. 이후, 최대하중 부근에서 표면 박리가 발생하며 하중이 서서히 감소하였다. 이는 강봉과 콘크리트 사이의 재료적 강성 차이 때문인 것으로 판단된다. SGSP 실험체는 320kN에 접합부 이격이 발생하면서 하중이 일시적으로 감소하는 현상을 보였으나 이후 안정적으로 하중이 증가하였다. 하중 680kN에서 전단기의 균열이 증가하였으며 최대하중 도달 후 급격한 하중감소 없이 하중의 감소-증가가 반복되는 현상이 발생하며 서서히 하중이 감소하였다.

(a) MG 실험체

(b) SGP 실험체

(c) 전단기 균열

(d) 강연선 파단

(e) 접합부 이격(SGSP)

〈그림 9〉 실험체 파괴양상

〈그림 10〉 MG 및 SGSP 실험체의 철근 변형률

3.2 변형률 및 하중-변위 관계

그림 10의 철근 변형률을 살펴보면 MG 실험체의 철근보다 SGSP 실험체의 철근이 낮은 하중에서 변형률이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 실험체 전체에 걸쳐 철근에 응력이 골고루 분포되는 일체형 실험체에 비해 세그먼트

〈그림 11〉 SGSP 및 SGSS 실험체의 철근 변형률

〈표 4〉 실험결과

Model	P_{max} (kN)	δ (mm)	Δ_u/Δ_y
MG	879.6	30.86	2.19
SGSP	760.1	22.5	3.52
SGP	646.7	30.15	2.91
SGSS	581.6	18	2.06
SG	290.7	7.12	1.38

〈그림 12〉 하중-변위 관계

트 실험체에 존재하는 접합부로 인한 응력집중 현상에 의한 것으로 판단된다.

그림 11에 나타난 SGSS 실험체와 SGSP 실험체의 철근 변형률을 비교해보면 SGSS 실험체의 철근이 SGSP 실험체의 철근보다 더 작은 하중에서 철근 변형률이 급격히 증가하는 것으로 나타났으며 이를 통해 SGSP 실험체가 SGSS 실험체에 비해 철근에 응력이 고루 분포된다는 것을 알 수 있다. 즉, SGSS 실험체 보다 SGSP 실험체의 접합 상세가 일체성 확보 측면에서 더 우수한 성능을 발휘하는 것이라고 볼 수 있다.

실험결과는 표 4에 나타내었으며 각 실험체의 하중-변위 관계는 그림 12와 같다. 4본의 세그먼트 접합 실험체는 MG

실험체와 하부 철근 슬립 이전까지 유사한 거동을 보였으며 초기강성 또한 MG 실험체와 유사하게 나타났다. 그러나 MG 실험체를 제외한 나머지 실험체에서 하부 철근의 슬립 발생 시점을 기준으로 하중이 일시적으로 감소하다가 이후 다시 하중이 증가하여 최대하중에 도달하는 것을 알 수 있다. 하중 가력 초기에는 모든 실험체가 유사하게 거동하나 하부 철근 슬립이 발생한 이후 각 접합부의 접합 성능에 따라 최대하중 및 거동이 달라지는 것을 볼 수 있다.

그림 12에서 알 수 있듯이 세그먼트 접합부 실험체 중 SGSP 실험체가 가장 큰 하중을 받는 것으로 나타났으며 SGSS 실험체에 비해 SGSP 실험체가 하중의 감소 및 증가가 반복적으로 나타나며 최종 파괴에 이르는 현상을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 접합부의 연성능력에 전단기 및 포스트텐션이 기여한 것으로 판단된다.

3.3 변위 연성도 평가

다양한 접합 상세를 적용한 각 실험체의 연성능력을 평가하기 위하여 항복변위(Δ_{yield})에 대한 극한변위의 비(Δ_{max})로 산출되는 변위 연성지수(μ)를 사용하였다. 그러나 하중-변위 관계에서 정확한 항복변위(Δ_y)를 산정하기 어렵기 때문에 그림 13에 나타난 것과 같이 Sheikh⁸⁾이 제안한 방법을 사용하였다. Sheikh는 초기강성을 유지하며 최대하중에 도달했을 때의 변위를 항복변위로, 하중감소가 시작된 후 최대하중의 80%에 해당하는 하중시의 변위를 극한변위로 정의하였다. 그러나 SGP의 실험체의 경우 최대하중 도달 후 강연선 파단 및 정착구 파괴로 최대하중의 80%에 해당하는 하중까지의 데이터 취득이 불가능하여 정착구 파괴시까지의 변위를 변위연성도 산출에 사용하였다.

그림 14에서 보는 바와 같이 포스트텐션을 적용한 SGSP 실험체 및 SGP 실험체의 변위연성지수가 SGSS 실험체에 비해 높게 나타났으며 전단기를 적용한 SGSP 실험체가

〈그림 13〉 변위 연성도 (MG 실험체)

〈그림 14〉 변위 연성도 비교

〈그림 15〉 최대하중 비교

SGP 실험체에 비해 1.2배 가량 높은 변위연성지수를 나타내는 것으로 보아 포스트텐션 및 전단기의 적용은 접합부의 연성거동을 높이는 데 주요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

그림 15는 MG 실험체의 최대하중을 기준으로 다양한 접합부를 적용한 각 세그먼트형 실험체가 어느 정도의 내력을 확보하였는지 최대하중을 통해 비교한 그래프이다.

SGSP 실험체는 MG 실험체의 최대하중의 86.4%를, SGP 실험체는 73.5%에 준하는 최대하중을 나타내었으며 이를 통해 SGSP 실험체 및 SGP 실험체는 일체형 실험체에 준하는 거동 및 내하성능을 보인 것으로, 접합부의 일체성이 확보되었다고 판단된다. 그러나 스플라이스 슬리브만으로 접합된 SG 실험체는 MG 실험체의 최대하중에 크게 미치지 못한 결과를 보였으며 이로써 스플라이스 슬리브만으로 PCS를 접합하는 방법은 적절하지 않은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 PCS 접합부에 적용 가능한 구조성능이 개선된 접합부를 제안하였으며 접합부 형식에 따른 각 실험체의 구조성능을 실험적으로 평가하기 위해 실험체의 균열 및

파괴양상, 변형률, 최대하중, 변위연성도의 측면에서 실험결과를 비교 및 분석하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. SG 실험체의 실험결과를 통해 포스트텐션 등의 2차 접합 없이 스플라이스 슬리브와 에폭시만으로 PCS를 접합하는 것은 최대하중 및 변위 연성도의 측면에서 구조적으로 상당히 불리한 접합부임을 확인하였으며 이로써 포스트텐션의 적용은 PCS 접합에 있어 필수적이라고 판단된다.
2. 전단기 및 포스트텐션이 적용된 SGSP 실험체의 경우 최대하중 도달 후 하중의 급격한 감소 없이 하중의 증감이 반복되는 현상을 보임으로써 전단기 및 포스트텐션의 적용은 접합부의 연성거동을 확보하는데 있어 중요한 요소를 확인할 수 있었다.
3. 강봉을 사용하여 접합한 SGSS 실험체의 경우 제작과정 이 비교적 단순하여 실제 현장 적용시 시공성이 용이할 것으로 보이나 하중이 증가함에 따라 균열의 폭이 넓어지면서 표면박리가 발생한 것으로 보아 사용성 측면에서 적합한 접합부 상세라 볼 수 없다고 판단된다.
4. 본 연구에서 제안한 접합부 중 전단기 및 포스트텐션을 적용한 SGSP 접합부는 일체형 실험체의 약 86%에 준하는 내력을 보였으며 연성 측면에서는 일체형 실험체 이상의 연성 능력을 나타냈다. 따라서 본 연구에서 제안한 접합부 중 가장 우수한 성능을 보임으로써 현장 적용이 가능할 것이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Wium, D. J. W., and Buyukozturk, O., "Precast segmental bridge-status and future directions," *Civil Engineering for Practicing and Design Engineers*, ACSE, V.3, 59-79, 1984.
2. 송재준 등, "장수명 합리화 바닥판 개발 - 프리캐스트 콘크리트 바닥판," Bridge200(최종보고서), 한국건설기술연구원.
3. Zhou, X., Mickleborough, N., and Li, Z., "Shear strength of joints in precast concrete segmental bridges," *ACI Structural Journal*, V.102, No.1, 3-11, 2005.
4. Buyukozturk, O., Bakhoun, M. M., and Beattie, S. M., "Shear behavior of joints in precast concrete segmental bridges," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V.116, No. 12, 3380-3401, 1990.
5. Mega, S.I., Seible, F.I., and Dowell, R. K., "Seismic performance of precast segmental bridges: segment-to-segment joints subjected to high flexural moments and low shear," *PCI Journal*, V.48, No.2, 80-96, 2003.
6. Mega, S.I., Seible, F.I., and Dowell, R. K., "Seismic performance of precast segmental bridges: segment-to-segment joints subjected to high flexural moments and high shear," *PCI Journal*, V.48, No.3, 72-90, 2003.
7. Kim, J., Chung, W., and Kim, J. J., "Experimental investigation on behavior of a spliced PSC girder with precast box segments," *Engineering Structures*, V.30, No.11, 3295-3304, 2008.
8. Sheikh, S. A., and Khoury, S. S., "A performance-based approach for the design of confining in tie columns," *ACI Structural Journal*, 94, 421-431, 1997.