

# 부착 긴장재를 가진 조립식 교각 설계변수의 구조 성능에 미치는 영향

## Effects of Design Parameters on Structural Performance of Precast Piers with Bonded Prestressing Steels

심창수\* · 윤재영\*\*

Shim, Chang-Su · Yoon, Jae-Young

### Abstract

Quasi-static tests were conducted to evaluate structural performance of precast piers prestressed by bonded prestressing steels. Combinations of prestressing bars and normal reinforcing bars, embedded steel tubes and prestressing strands were used as continuous steels crossing the joints of a precast pier. Main design parameters were steel ratio, magnitude of prestress force, and section details. Flexural strength and energy dissipation capacity of precast columns with higher steel ratio showed better performance due to continuous steels after opening of the joints. Precast piers with embedded members showed stable behavior after reaching maximum loads resulting in higher displacement ductility and energy dissipation capacity increased as the introduced prestress increased. Self-centering behavior at early stages and stress increase of confining reinforcements were observed from highly prestressed columns. Combination of prestressing steels and normal reinforcing bars should be used in design to prevent rapid strength degradation after reaching the maximum load.

**Keywords** : *bonded prestressing steel, prestress, precast pier, quasi-static test, displacement ductility, energy dissipation capacity*

### 요 지

부착 긴장재를 이용한 프리스트레스를 도입하는 조립식 교각의 구조 성능을 평가하기 위한 준정적 실험을 수행하였다. 프리캐스트 교각의 이음부를 가로질러 축방향으로 연속배치되는 강재로 강봉과 일반철근, 매입강관과 강연선의 조합을 선택하였다. 주요 설계 변수는 강재량, 프리스트레스의 수준, 단면 상세로 하였다. 이음부 벌어짐 이후에 연속 강재가 하중을 모두 부담하여 응력의 증감을 일으키는데 강재비가 높을수록 휨강도가 높게 나타나고 에너지 소산능력도 현저하게 증가하였다. 매입강재를 갖는 프리캐스트 교각은 최대하중 이후의 거동이 안정적으로 나타나 높은 변위연성도를 나타내었고 프리스트레스 증가에 따른 에너지 소산능력의 증가도 나타내었다. 프리스트레스의 수준이 높을수록 초기 변형 회복능력이 양호하게 나타났고 횡철근의 응력증가도 크게 나타났다. 조립식 교각의 최대하중 도달 이후의 강도 저하가 급격하게 발생하지 않도록 긴장재와 일반강재의 조합을 결정하여야 한다.

**핵심용어** : 부착긴장재, 프리스트레스, 조립식 교각, 준정적 실험, 변위연성도, 에너지소산능력

### 1. 서 론

교량 구조물의 건설에서 하부구조가 전체 공정에서 차지하는 중요도는 매우 높고 교통통제, 환경 및 민원 문제의 주요 요인이 되고 있다. 이에 따라 하부구조의 급속시공에 대한 요구가 높아지고 있고 미국에서는 교량의 급속시공에 대한 연구개발 및 적용이 활발하게 이루어지고 있다 (Shahawy, 2003). 특히, 개발된 기술의 확산을 위해서 정부 주도로 구조물 시공 전반에 걸친 목표 공기를 설정하고 이를 단축할 경우에 대한 인센티브를 제공하고 교량 대안에

대한 비용 평가시 간접손실을 반영하도록 유도하여 상당한 성과를 거두고 있다. 국내에서도 하부구조에 대한 다양한 급속시공 방안에 대한 개발이 이루어지고 있다(심창수, 2005; 김현호 등 2007, 김태훈 등 2008).

포스트 텐션을 활용한 보-기둥 연결에 대한 실험적 연구는 El-Sheikh 등(1999), Priestley와 MacRae(1996), 그리고 Priestley와 Tao(1993)에 의해 이루어졌다. 이들이 수행한 실험적 연구결과로부터 프리캐스트 콘크리트 골조에 비부착 긴장재를 이용한 경우에 대한 내진 거동 연구를 수행하고 이에 대한 설계 방안을 제안하였다. Stanton과 Nakaki(2002)

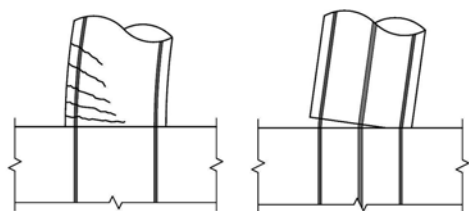
\*정회원 · 교신저자 · 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 · 공학박사 (E-mail : csshim@cau.ac.kr)

\*\*정회원 · 중앙대학교 토목환경공학과 석사 (E-mail : bluesky586@gmail.com)

는 프리캐스트 콘크리트 구조의 설계 가이드라인을 개발하였고 Jonsson(2002)은 프리캐스트 콘크리트 구조로 이루어진 모멘트 저항 골조의 내진설계를 위한 변위 기반 설계법을 제시하였다. 비부착 긴장재의 활용은 낮은 지진하중하에서 프리스트레스 긴장재로 인한 변위 회복 능력을 최대한 활용하기 위한 방안이고 이음부에서 부분적으로 비부착 처리한 경우도 제시되었다.

교량의 급속시공을 위한 다양한 방안이 조사되어 보고되었고(Hieber 등, 2005a) 초기에는 비내진 지역에 대한 조립식 교각 시스템이 주로 개발되었다. Billington 등(1998, 1999, 2001)에 의해 비부착 긴장재를 이용한 프리캐스트 교각이 제안되고 실험에 의한 내진 거동 평가가 이루어졌다. 이후 DRFCC(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites)를 기둥의 소성힌지 구간에 사용하여 개발한 교각 시스템에 대한 내진 거동 연구가 수행되었다(Billington 등, 2004). 프리캐스트 하부구조의 그라우팅에 의한 연결부 연구가 Matsumoto 등(2002)에 의해 이루어졌고 실제 시공에 적용되었다. 비부착 강재를 활용한 프리캐스트 교각은 Hewes와 Priestley (2001)에 의해서도 수행되었고 덕트내에 에폭시 코팅된 일반 철근을 이용한 연결부 연구가 Mandawe 등(2002)에 의해 소개되었다. 조립식 교각에 대한 해석적 연구는 주로 일반철근과 비부착 긴장재의 비율에 대해서 수행되었다(Sakai와 Mahin, 2004; Kwan과 Billington, 2003a, b). 이들의 해석적 연구에서는 프리스트레스의 크기 증가에 따라서 교각의 변위 회복능력이 증가되어 에너지 소산능력이나 잔류변위가 감소하는 것으로 평가되었다.

내진 지역에 대한 조립식 교각에 대한 실험 및 해석적 연구가 수행되어 일부 설계 변수에 대한 추천값이 제시되었다(Hieber 등, 2005b; Wacker 등, 2005). 이들의 연구에서는 일반 철근을 이용한 연결부와 단면 중심에 배치한 비부착 긴장재를 혼용한 하이브리드 시스템에 대해서 실험을 수행하였다. 그림 1과 같은 두 가지 경우의 내진 거동을 가정하여 설계를 수행하였고 프리스트레스를 도입하는 경우에는 긴장재가 탄성상태에 있도록 하여 복원능력을 최대한 활용하고 연속 철근의 소성거동에 의해 에너지 소산을 하도록 하였다. 이 연구에서는 기둥의 세장비, 축방향 철근비, 축방향 하중비를 주요 설계 변수로 가정하였고 두 가지 조립식 교각 시스템에 대해 각각 횡하중과 횡변위 기반의 설계법을 제시하였다. 긴장력의 수준에 대한 추천값으로 이들이 제안한 시스템에 한해서는 축강도의 20%~30% 사이의 값을 갖도록 하였다. 교각의 내진 성능 평가의 다섯 단계를 제시하였는데 초기균열, 최초 항복, 콘크리트 덮개 탈락, 축방향 철근 좌굴, 축방향 철근 파단으로 이어져서 극한한계상태에



(a) 연속 축방향 강재 이음 (b) 탄성상태에 놓인 긴장재인 경우의 이음

그림 1. 프리캐스트 교각의 내진 거동 (Hieber 등, 2005b)

도달한다. 이 때 극한한계상태는 최대하중에서 횡방향 강도가 20% 감소했을 때를 기준의 하나로 제시하였다.

부착 긴장재를 이용한 조립식 교각에 대한 실험적 연구는 Shim 등(2008)에 의해 수행되었다. 원형 단면의 기둥에 이형 부착강봉을 사용하여 단면에 프리스트레스를 축강도의 20% 내외로 도입하였다. 긴장력 수준, 축방향 및 횡방향 강재비 등이 주요 변수로 채택되었고 준정적 시험에 의한 내진성능을 연성도와 에너지 소산능력에 대해 평가하였다. Nishiyama와 Watanabe(2003)에 의해서 사각형 기둥에 대해 부착과 비부착 긴장재에 대한 실험적 비교 평가가 수행되었다. 비부착 긴장재를 갖는 부재가 낮은 극한 강도와 연성도를 나타낸 것으로 평가되었다.

기존의 조립식 교각에 대한 연구는 주로 이음부 사용성을 위해 프리스트레스를 도입하고 축방향 철근의 연속성을 위해서는 긴장재 단면을 사용하였다. 교각의 높이가 높아 질수록 소요되는 축방향 강재의 증가는 긴장재의 다수 배치를 필요로 하여 정착부 및 높은 축력으로 인한 휨강도 감소 등의 어려움을 수반하게 된다. 따라서, 이러한 제한사항에 대한 대안으로 합성단면을 이용하여 도입 프리스트레스의 수준을 최소화하고 소요되는 축방향 강재 단면을 확보하는 방안에 대한 연구가 필요하다. 매입 강재를 배치하는 경우에는 기둥 단면의 상세를 복잡하게 하는 측면이 존재하기 때문에 상세의 변화에 대한 내진 성능을 평가하여야 한다. 현재까지는 이러한 단면에 대한 내진 상세 규정이 존재하지 않기 때문에 추가적인 실험적 검증 작업이 필수적이다. 이 논문에서는 부착 긴장재를 갖는 프리캐스트 교각의 내진성능을 주요 설계 변수에 따라 평가하기 위해 기둥의 상세를 좀 더 현실적으로 반영할 수 있는 직경 800mm의 원형 기둥에 대해서 프리스트레스의 수준을 달리하고 강재비 및 상세를 변화시킨 부재를 제작하여 준정적실험을 수행하였다. 실험결과로부터 조립식 교각의 설계 변수의 영향을 평가하고 이로부터 축방향 강재로 철근, 긴장재, 매입 강재를 복합하여 사용하는 경우의 설계에 대한 제안사항을 제시하였다.

## 2. 조립식 교각의 준정적 실험

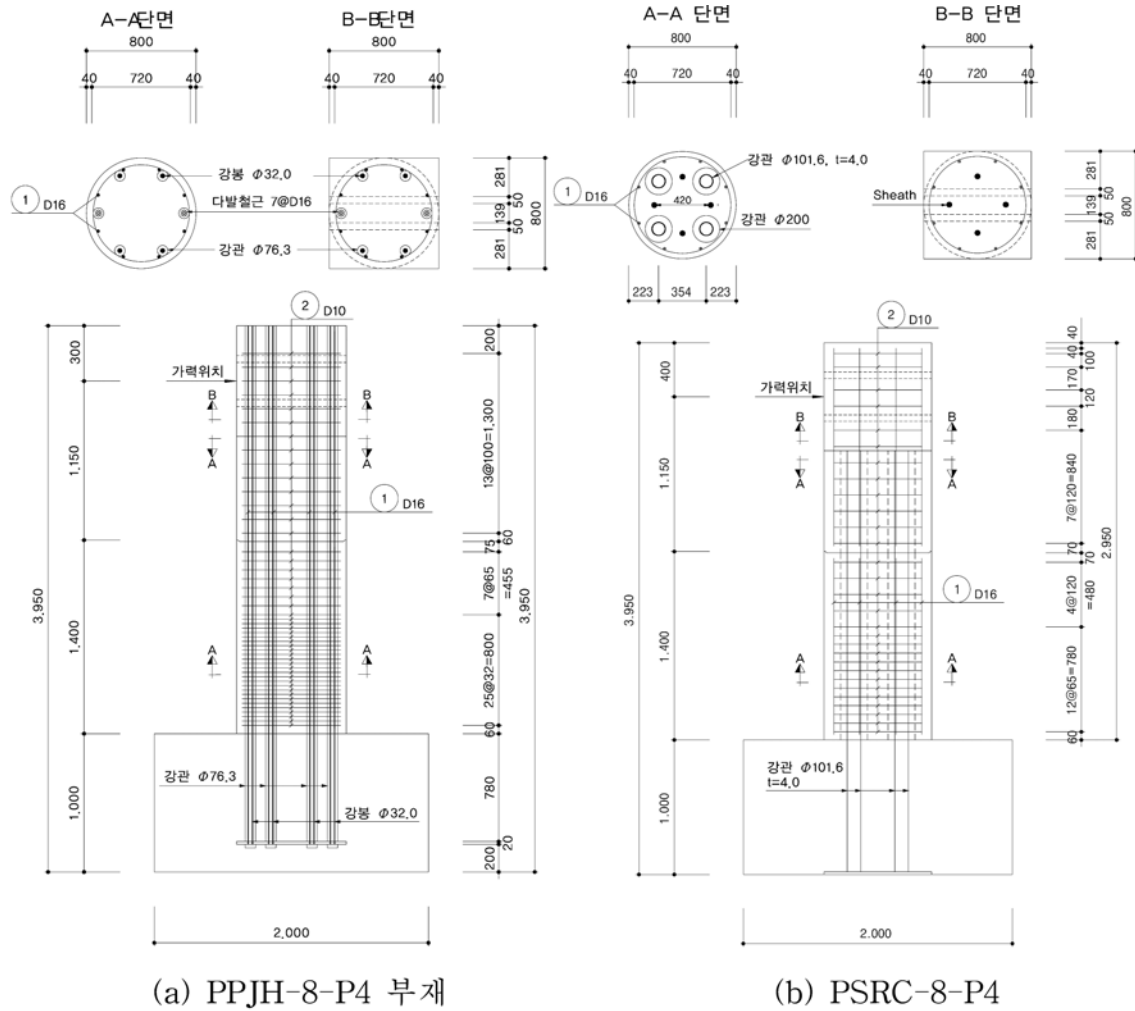
### 2.1 실험부재

프리캐스트 교각 이음부의 사용성 및 내구성 확보를 위해 도입되는 축방향 프리스트레스의 수준을 최소화하기 위한 단면 상세를 검토하기 위해 새로운 형태의 교각 단면을 제시하였다. 부착된 긴장재를 이용한 프리스트레스를 도입한 프리캐스트 교각의 극한 거동 및 내진성능을 평가하기 위해 두 가지 개념의 교각을 제작하였다. PPJH 부재는 프리스트레스 도입을 위한 긴장재가 주된 축방향 강재로 설계되고 PSRC 부재는 매입되는 충전 강관이 주된 축방향 강재로 설계되는 차이점을 가지고 있다. 긴장재가 주된 축방향 강재가 되는 경우에는 도입 프리스트레스의 수준이 경제성 측면에서 높게 설정되어야 하고 합성단면에서 매입되는 강재가 축방향 강재를 담당하는 경우에는 최소한의 프리스트레스만을 도입하는 것이 필요하다. 표 1의 실험부재에서 PPJH 부재는 강봉과 일반강봉 혹은 일반철근을 혼합하여 사용된 부재로

사용성 확보 및 복원능력을 위해서는 부착된 이형강봉을 사용하고 하중저항능력을 확보하기 위한 축방향 강재는 일반 강봉 혹은 다발 철근을 함께 사용한 복합형 배근을 가진다. PSRC 부재는 프리스트레스 도입을 위해서는 부착 강선을 사용하고 축방향 강재로는 모르타르로 내부 충전되는 강관을 사용하였다. 프리스트레스의 수준을 달리하여 거동을 평가하고자 하였고 교량 상부구조물의 하중 수준을 고려하여 도입

되는 긴장력의 수준은 단면 압축강도의 10%를 넘지 않도록 하였다.

원형 교각 단면의 직경은 800 mm이며 전단지간 길이는 2550 mm를 갖는 형상비는 3.19로 설계하였다. 프리스트레스의 크기에 따른 부재의 거동을 분석하기 위해 실험체 별로 이형강봉 6개를 기준으로 4개, 2개, 0개를 매입하였으며 강봉 0개의 실험체의 경우 일반철근(D32, SD40)을 매입하



(a) PPJH-8-P4 부재

(b) PSRC-8-P4

평면도(상하면)

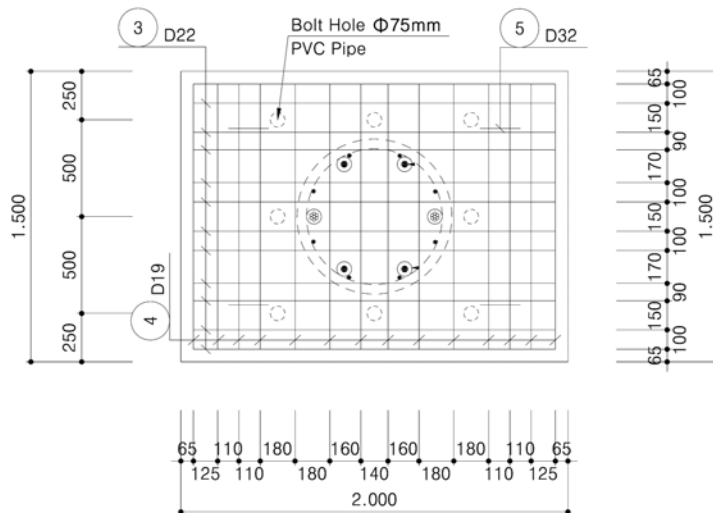
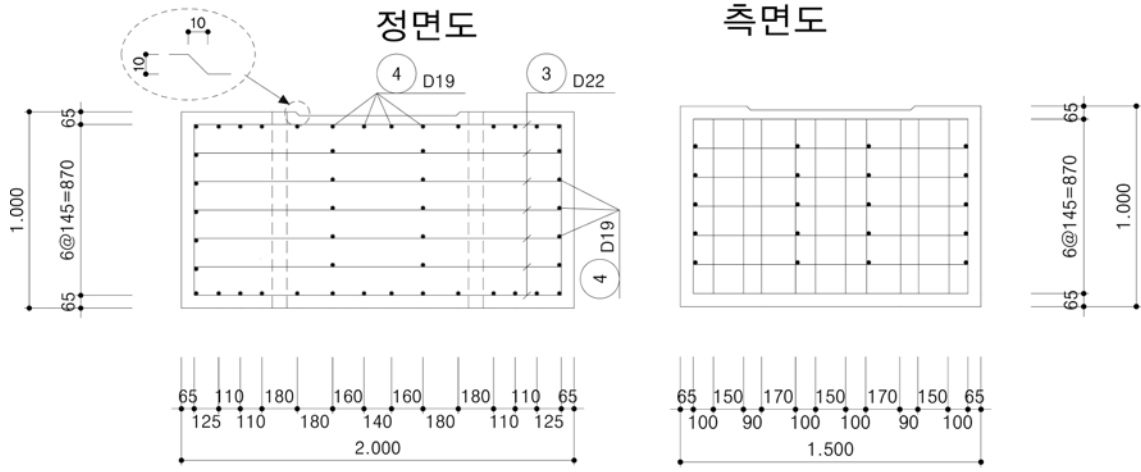
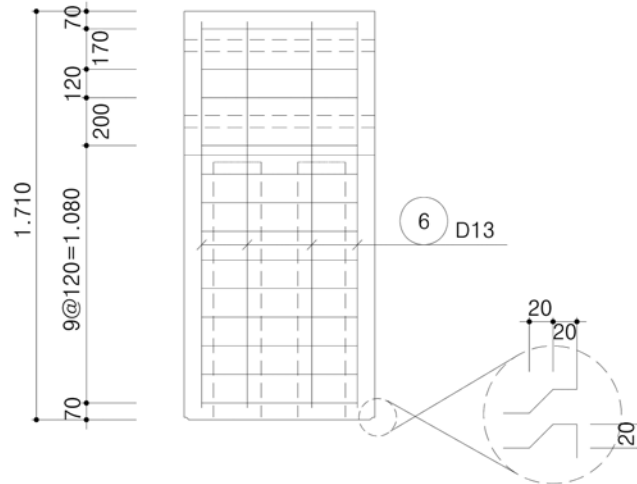


그림 2. 실험부재



(c) PPJH-8-P4 부재의 철근 상세 및 기초 상세



(d) 이음부 상세

그림 2. 계속

였다. 강봉 4개의 실험체의 경우 다발철근(D16@7, SD40) 2개를, 강봉 2개가 매입된 실험체의 경우 다발철근 4개를 매입하여 축방향 강재로 사용하였다. PPJH 부재에서 강관의 경우 내력 계산에 포함되지 않았지만 일반 구조용 강관을 이용하여 콘크리트 세그먼트에 홀(hole)을 만들어주어 조립 시 강봉의 쉬스관 역할을 대체하고, 실험체의 이음부에서의 전단보강재로 사용하였다.

내진 성능 확보를 위한 횡철근의 설계는 프리스트레스의 수준 및 축방향 강재의 배치에 따라 달라지기 때문에 명확한 기준이 정립되어 있지 못하다. PPJH 부재의 경우 횡철근의 간격은 철근과 철근의 중심간격으로 32 mm로 설계하였다. 이는 횡철근 간격이 시험시 사용되는 굵은골재 최대 치수 19 mm보다 작기 때문에 타설시 발생할 문제점을 고려하여 굵은골재 최대치수에 맞게 조정한 값이다. PSRC 부재의 경우 횡철근을 이보다 절반 수준에서 결정하였는데 이는 도입되는 프리스트레스의 양이 작기 때문에 기초와의 이음부에서 벌어짐이 상대적으로 빨리 발생하고 이로 인해 전체적인 내진 성능에 횡철근이 미치는 영향이 작기 때문이다. 프리스트레스의 수준이 높게 설계되는 경우에는 이에 따라 소성힌지 구간의 거동이 중요한 역할을 하게 되고 횡철근비도 함께 증가시켜야 한다. 프리스트레스의 수준에 따

른 횡철근 비의 증가량 산정은 이 실험의 범위에서 제외하였다.

그림 2에 실험부재의 일반도와 상세를 제시하였다. 프리스트레스 교각 부재의 설계에서 재료와 상세에 관한 고려사항이 추가로 요구된다. 그라우트와 에폭시의 경우에는 사전에 시공성 및 재료적 성능에 대한 검증을 수행하여야 한다. 그림 2(d)에 나타난 바와 같이 이음부 단면에 에폭시가 일정 두께로 도포될 수 있도록 하고 단면내에 존재하는 홀에 에폭시가 흘러들지 않도록 키를 두었다. 이음부 상하면이 정확하게 일치해야 하기 때문에 match-cast 방식으로 제작되었다. 별도의 이음부 거푸집을 두지 않는 형태이기 때문에 필수적인 고려사항이고 시공오차 및 베딩층의 확보를 위해 간격재를 둘 수 있는데 완전한 부착을 위해 간격재가 전체 단면의 10%를 넘지 않아야 한다.

프리캐스트 교각에서 적절한 재료의 선정은 매우 중요한 요소이다. 이음부에 도포되는 에폭시에 대한 기본 요구사항은 부착강도가 콘크리트의 인장강도 이상이어야 한다는 것이다. 시공성을 위한 점성에 대한 사전 검토를 거쳐야 한다. 강관 혹은 쉬스관을 충전하는 모르타의 경우에는 사전 배합 시험을 통해 적절한 유동성과 강도 발현을 확인한 후 중력식 혹은 압력에 의한 주입이 가능한데 이 실험에서는 중력

표 1. 조립식 교각 실험부재

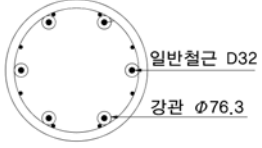


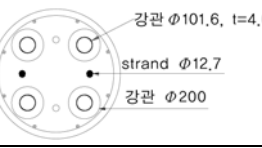
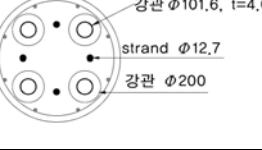
부재	D×H(mm)	축방향 강재비 (%)	형철근비 (%)	프리스트레스 (kN)	콘크리트 강도 (MPa)	단면
PPJH-8-P0	800×2550	0.95	0.96	0	28일표준: 35.0 실험시: 30.0	
PPJH-8-P2		1.43		638		
PPJH-8-P4		1.19		1561		
PSRC8-P0		1.18		0.48		0
PSRC8-P2	165					
PSRC8-P4	330					

표 2. 재료성질

	항복강도	인장강도	압축강도
모르터			39.3 MPa (cubic)
에폭시		부착강도: 콘크리트인장강도 이상 발현	50 MPa (7 days) PPJH-8 : 80 MPa
철근 (SD 300)	300 MPa	440 MPa	-
프리스트레스 강봉 (DSI 950/1050)	950 MPa	1050 MPa	-
프리스트레스 강연선 (SWPC 7B)	1580 MPa	1854 MPa	
강관 (SPS400)	235 Mpa	400 MPa	-

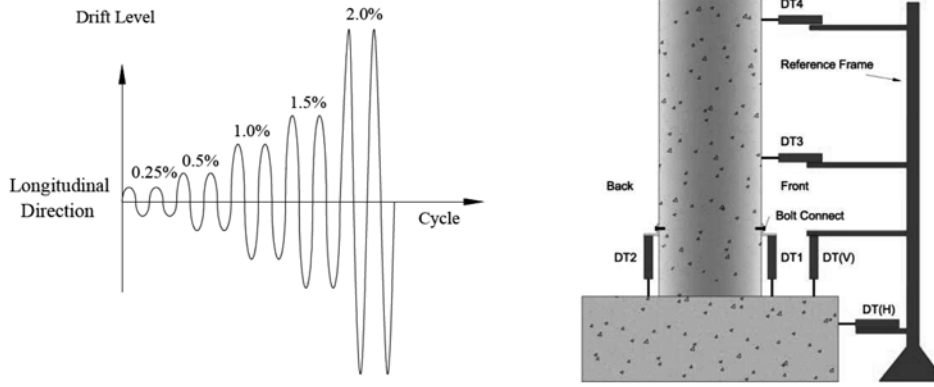
식으로 채움을 실시하였다.

2.2 실험방법 및 측정내용

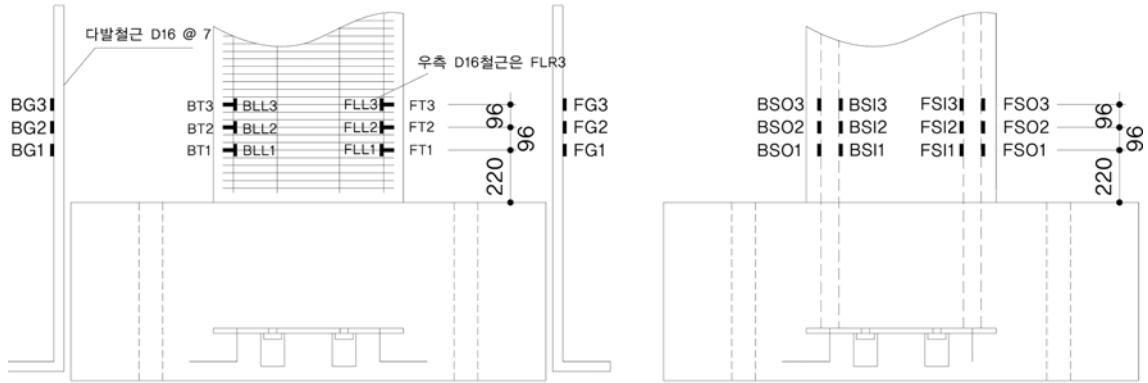
교각의 횡방향 하중은 최대변위 ±250 mm인 1,000 kN의 가력기를 이용하여 변위를 제어하는 방식으로 하중을 재하하였다. 변위제어는 기둥유효 길이에 대한 비율(Drift Ratio)로써 각 단계별로 2회씩 반복 재하하여 동일 하중 진폭에 대한 교각의 거동특성의 차이를 살펴보았다. Drift Ratio는 기둥의 유효길이에 대한 가력된 변위의 퍼센트(%)로 정의하였고 그림 3(a)와 같이 기둥부가 시작되는 기초상단에서 가력지점 높이까지인 2.55 m의 ±0.25%, ±0.5%, ±1.0%, ±1.5%, ±2.0%, ±3.0%, ±4.0%... 단계로 점점 증

가되는 변위이력을 파괴 시까지 도입하였다. 재하초기에는 0.25%부터 실험체의 급작스런 파괴를 방지하기 위하여 0.5%씩 증가시켰으며 2% 이후로는 1%씩 증가시켜 재하하였다.

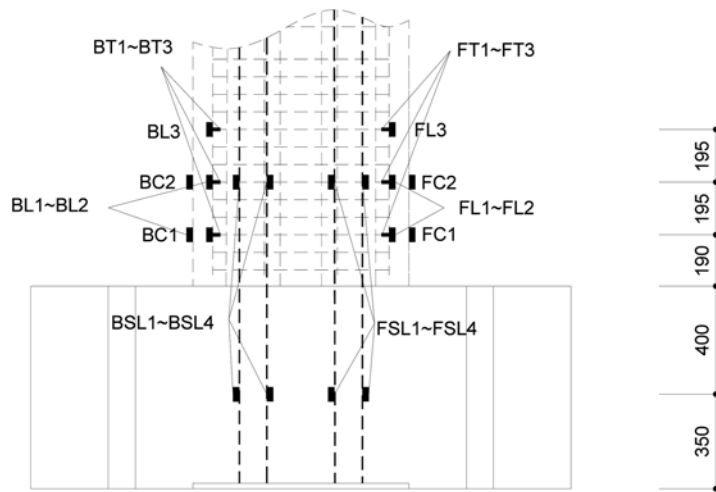
반복 하중이 재하되는 동안에 그림 3(b)와 (c)에 나타낸 바와 같이 조립식 교각의 각 구성요소별로 변형률을 측정하였다. 기둥의 소성힌지 구간의 축방향 강재, 형철근, 콘크리트 표면의 변형률을 측정하였고 PPJH-8 부재의 경우에는 이형강봉과 다발철근, PSRC8 부재의 경우에는 매입강관의 변형률을 중점적으로 계측하였다. 실험이 진행되는 동안에 발생한 균열과 이음부 벌어짐을 기록하여 부재의 거동 평가에 반영하였다.



(a) 가력 변위와 측정내용



(b) PPJH-8 부재의 변형률 측정



(c) PSRC8 부재의 변형률 측정

그림 3. 측정내용

### 3. 조립식 교각의 구조거동 평가

#### 3.1 조립식 교각의 비탄성 거동

PPJH-8 실험부재들의 초기 평균열은 모든 실험체가 가력 변위크기 0.5%에서 발생하였으며 콘크리트의 파복 탈락은 PPJH-8-P0가 가장 늦게 나타났는데 이는 축하중이 없는 상태에서 소성힌지구간에서의 콘크리트의 파괴보다 기초와의 이음부 벌어짐에 의한 파괴 때문으로 판단된다. 최대하중은 대부분이 가력변위크기 3~4%에 일어났으며 축하중이 없는 P0부재만이 2.5%에서 발생하였다. 표 3의 실험결과에서 보듯이 강제비가 증가함에 따라 뚜렷한 휨강도 증가를 나타내

었다. 철근과 강봉을 함께 사용한 PPJH-8-P2 부재가 가장 큰 강도와 변위를 나타내었고 프리스트레스 도입량의 증가는 그림 4(a)~(c)에서 보는 바와 같이 소성힌지구간의 콘크리트 덮개 탈락을 조기에 발생시키고 손상구간을 키워 에너지 소산을 많이 시키는 장점을 가지게 하였다.

낮은 수준의 프리스트레스가 도입된 PSRC8 실험부재들의 경우에는 프리스트레스의 양이 가장 큰 PSRC8-P4 실험체의 경우 프리스트레스가 도입되지 않는 PSRC8-P0 실험체에 비하여 최대하중이 51%정도 높게 나왔으며, PSRC8-P2 실험체의 경우에는 PSRC8-P0 실험체에 비하여 27%정도 높게 나타났다. 프리스트레스의 크기에 따라 그림 4(d)~(f)에서 보

표 3. 실험부재의 극한거동

부재	축방향 강재비 (%)	프리스트레스 힘 (kN)	최대하중 (kN)	최대하중에서의 변위 (mm)	주요 거동
PPJH-8-P0	0.95	0	281	62	초기균열후 이음부 벌어짐, 철근 항복 2% drift
PPJH-8-P2	1.43	638	468	101	초기균열후 이음부 벌어짐, 철근 및 강봉 항복 2% drift, 덮개 일부 탈락
PPJH-8-P4	1.19	1561	445	63	초기균열후 이음부 벌어짐, 강봉 항복 4% drift, 철근항복 1% drift, 덮개 탈락
PSRC8-P0	1.18	0	176	36	횡균열 후 강관파단
PSRC8-P2		165	224	38	횡균열 후 강관파단
PSRC8-P4		330	266	101	횡균열 후 강관파단

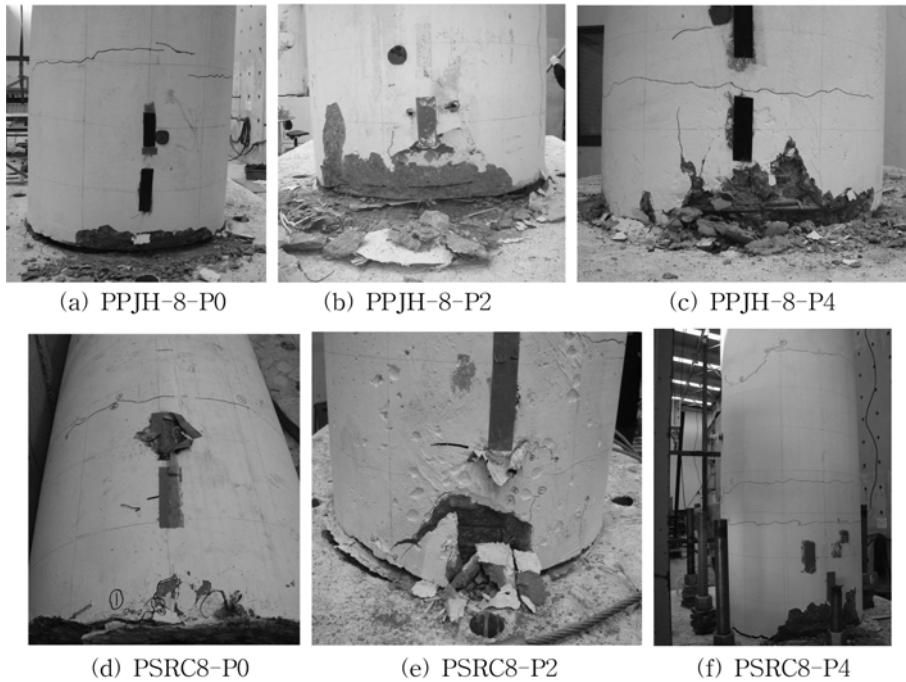


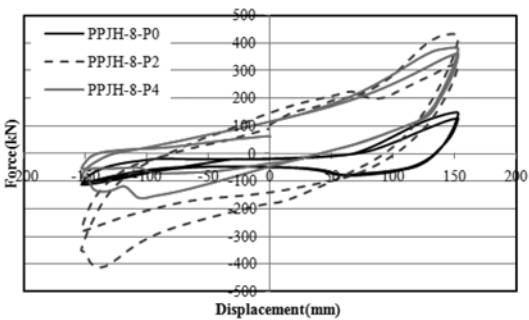
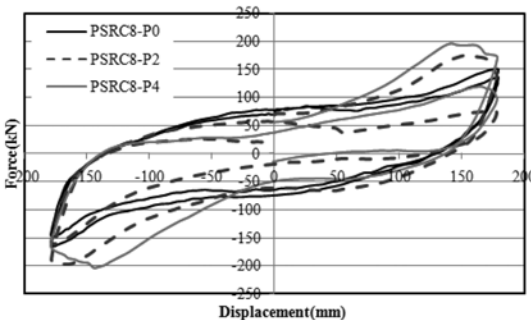
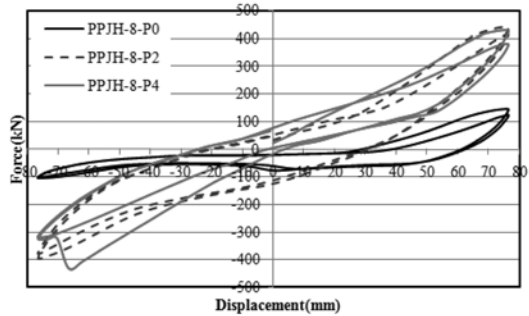
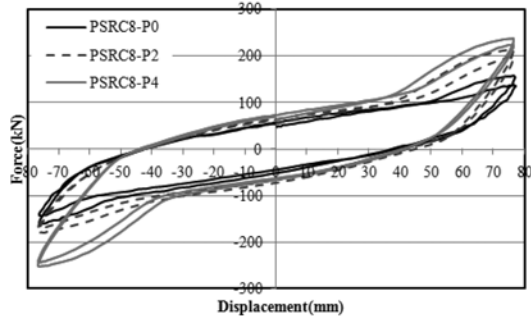
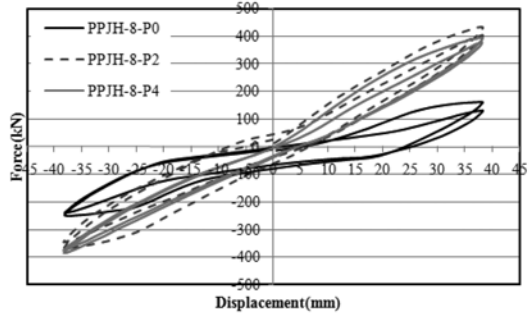
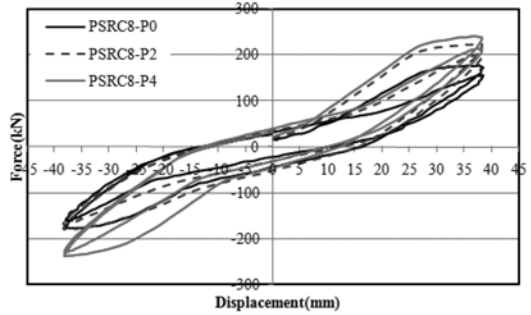
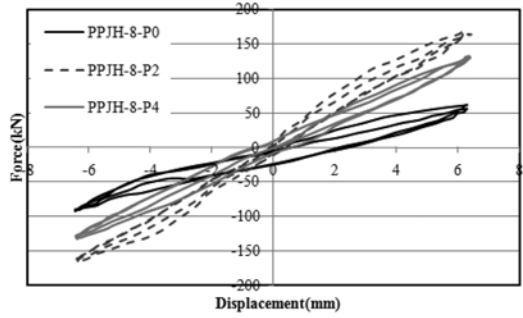
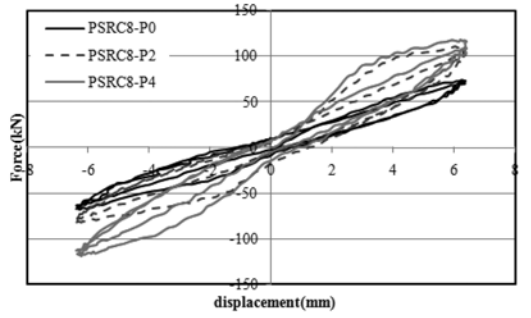
그림 4. 실험부재의 파괴형상

는 바와 같이 횡균열의 발생시기와 발생 구간이 달라지고 최대하중에서의 변위값도 상당 수준 증가시키게 된다. PSRC8 부재의 경우 도입된 프리스트레스의 크기가 작아서 이음부 벌어짐 이후에 매입된 강관부재에 응력이 집중되어 강관 파단으로 이어지게 되었는데 프리스트레스의 수준을 조정하여 강관의 항복시점을 늦추면 좀 더 높은 강도와 연성이 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

프리스트레스를 도입하는 프리캐스트 교각의 가장 큰 장점은 중저진 하중에 의해 횡변위가 발생하더라도 도입된 긴장력에 의해서 변형이 회복되는 능력이다. 그림 5에 도입 횡변위의 수준에 따른 하중-변위 이력곡선을 나타내었다. 프리스트레스의 도입 수준이 낮은 PSRC8 부재들의 경우에는 초기에만 변형 복원 양상을 나타내고 이후에는 상당한 크기의 잔류변위를 갖게 된다. 프리스트레스의 도입 크기가 상대적으로 큰 PPJH-8 부재들의 경우에는 프리스트레스의 크기 증가에 따른 변형 복원 능력 증가를 뚜렷하게 나타내었고 기동 단면 휨강성의 감소가 적게 발생함을 알 수 있다. 조립식 교각의 내진성능의 목표를 어떻게 설정하는가에 따라서 도입 프리스트레스의 수준을 결정하여야 한다. 이음부 벌어짐과 소성힌지 구간의 일부 콘크리트 손상이 발생한 후에는 잔류 변형이 발생하였다.

이 실험에서는 프리스트레스 이외의 축력 도입이 이루어지지 않았기 때문에 압축력의 수준이 10% 이내로 낮고 이에 따라 횡철근비가 일반 철근콘크리트 교각에 비해서 낮음에도 불구하고 심부 콘크리트의 손상은 나타나지 않았다. 모든 부재에서 횡철근이 탄성구간에서 낮은 변형을 변화를 나타내었다. 단면에 도입되는 압축력이 낮은 경우에는 소성힌지 구간의 손상이 교각의 거동에 큰 영향을 미치지 않기 때문이고 압축력이 높아짐에 따라 심부콘크리트의 구속 효과의 영향이 커질 것으로 예상되는데 이는 그림 6에서 나타난 압축력 증가에 따른 횡철근 변형을 증가에서 확인할 수 있다. 프리스트레스의 크기에 따른 횡철근 요구량에 대한 제안식은 현재까지 제시되고 있지 못하기 때문에 이에 대한 추가 연구가 요구된다.

그림 7(a)~(c)에 PPJH-8 부재들의 주요 구성요소의 국부 변형률의 시간이력을 표시하였다. PPJH-8 실험체의 경우 기초부와 기둥부의 들림에 의한 파괴로 대부분의 응력이 강봉과 다발철근에서 발생하였기 때문에 횡철근과 주철근은 항복이 되지 않았다. 축력이 없는 PPJH-8-P0 실험체의 경우 연속 배치된 철근이 하중 단계 2% 수준에서 항복을 하였으며, 다른 재료들은 실험 종료시까지 항복하지 않은 것을 알 수 있다. 이는 축력이 도입되지 않은 상태에서 기초부와 기



(a) PSRC8 부재

(b) PPJH-8 부재

그림 5. 단계별 하중-변위 이력곡선

등부에 연결된 연속철근만이 실험체에 가해지는 힘을 모두 받고 있다는 것을 알 수 있다. PPJH-8-P2 실험체의 경우 가력되는 방향과 가장 가까운 축방향 철근이 1.5%에서 항복하고 프리스트레스 도입으로 인한 변형률의 증가를 감안한다면 강봉은 2%에서 항복되었다는 것을 알 수 있다. PPJH-8-P4 실험체에서는 다발 철근이 하중 단계 1%, 강봉이 4%에서 항복을 하였다. 상대적으로 높은 프리스트레스의 양이 도입된 강봉이 다른 실험체에 비해 늦게 항복된 것은 강봉의 위치의 차이에 따른 인장응력 증가량이 작기 때문이다.

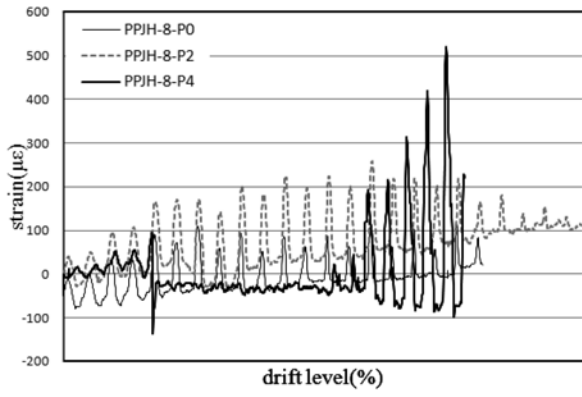
PSRC8 부재의 경우에 이음부의 부착이 소실되면 휨에 저항하는 구성요소가 주로 강관이 된다. 이로 인해 실험시 강관의 항복 및 파단이 상대적으로 일찍 발생하였다. 그림 7(d)에 강관의 변형률 이력을 나타내었고 가력변위가 1% 수준에서 강관의 항복변형률을 초과하는 것을 관찰하였다. 강관

의 항복 이후에도 하중을 계속 부담하여 6% 변위 수준에서 강관의 파단이 시작되었다. 강관의 파단 이후에는 배치된 강연선의 양이 적기 때문에 하중 저항능력을 거의 상실하게 된다. 따라서, 실제 합성교각에 프리스트레스를 도입하는 시스템의 설계에서는 강재비를 설정할 때 항복 시점과 이 시점에서의 강연선의 응력수준을 평가하여 매입강관의 파단 이후에도 일정 수준의 하중 저항능력을 갖도록 하는 것이 바람직하다.

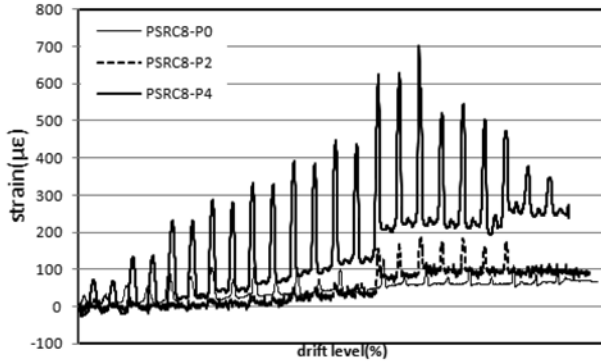
### 3.2 조립식 교각의 내진 성능 평가

교각의 소성변형 능력을 나타내는 변위연성도는 항복변위에 대한 극한변위의 비 ( $\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$ )로 정의된다. 변위연성도의 경우, 하중-변위의 관계에서 항복점이 뚜렷하지 않기 때문에 항복변위를 결정하기 위한 여러 연구자들의 다양한





(a) PPJH-8 부재



(b) PSRC8 부재

그림 6. 압축력 증가에 따른 횡철근 변형을 시간이력

정의가 있었는데 이 논문에서는 하중-변위 곡선상에서 최대 횡력  $V_{max}$ 를 지나는 수평선과 원점에서  $V_{max}$ 의 75%에 해당

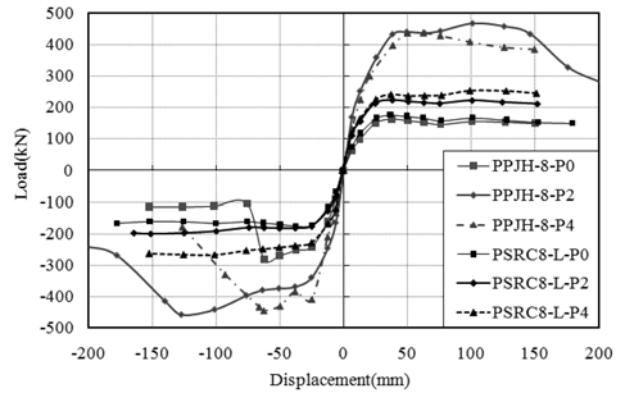
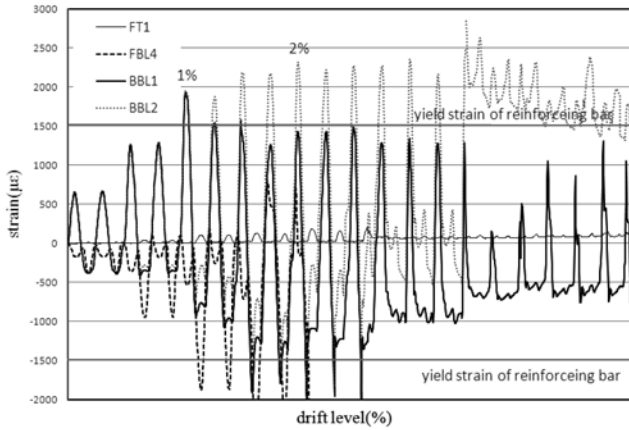


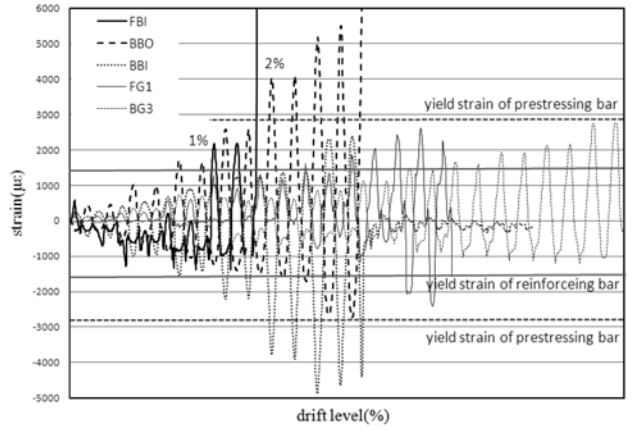
그림 8. 조립식 교각의 하중-변위 포락곡선

하는 횡력을 지나는 직선과의 교점을 항복변위로 결정하고, 극한변위는 하중-변위 곡선상에서 극한점 이후 하강 곡선상에서  $0.85 V_{max}$  때의 변위로 정의하였다(Gad 등, 1999). 하중변위 이력곡선에서 그림 8과 같은 포락곡선을 작성하였다. 이로부터 표 4의 변위연성도를 평가하였다.

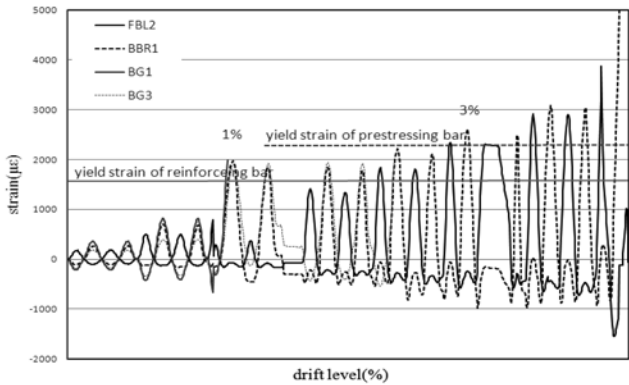
교변하중하에서 PPJH-8-P0와 PPJH-8-P4 부재의 경우에 한쪽 방향의 하중저항능력이 최대하중 도달이후에 급격히 감소하여 변위연성도의 값이 낮게 평가되었다. 이는 조립식 교각의 제작 및 가설시 이음부의 대칭성이 완벽하게 구현되지 못하여 기초와 만나는 세그먼트의 끝부분의 손상으로 인한 것으로 판단된다. 강제비가 1.43%로 가장 높게 배치된 PPJH-8-P2 부재의 거동이 최대하중 이후에도 안정적으로 나타났고 이는 또한 강재의 항복으로 인한 높은 에너지 소산



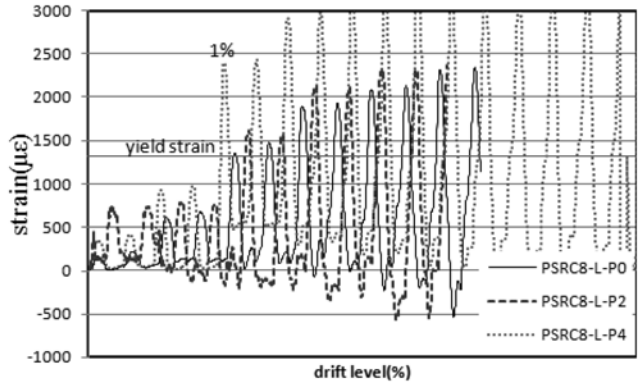
(a) PPJH-8-P0



(b) PPJH-8-P2



(c) PPJH-8-P4



(d) PSRC8부재의 강관 변형률

그림 7. 국부변형률 시간이력

표 4. 변위연성도 평가

부재	하중 (kN)	항복변위 (mm)	하중 (kN)	극한변위 (mm)	변위연성도
PPJH-8-P0	148.30	24.43	138.52	150.44	6.16
	-242.75	-27.13	-239.01	-65.47	2.41
PPJH-8-P2	400.94	32.65	397.47	156.11	4.78
	-363.28	-35.99	-388.39	-146.63	4.07
PPJH-8-P4	372.69	33.66	379.95	149.34	4.44
	-405.13	-27.39	-209.89	-80.69	2.95
PSRC8-P0	153.03	22.05	179.06	150.51	8.11
	-154.96	-21.27	-177.83	-165.78	8.36
PSRC8-P2	146.19	20.23	212.24	151.66	7.49
	-173.44	-24.91	-196.69	-164.89	6.62
PSRC8-P4	219.12	23.72	244.92	150.71	6.35
	-227.76	-25.91	-261.93	-152.53	5.89

능력으로 나타났다. 변위연성도의 개선을 위해서는 도입 프리스트레스의 수준 결정시 긴장재가 교각 변위 증가에 따른 응력 증감을 고려했을 때 최대하중 도달시 인장강도를 넘지 않아야 하고 추가로 배치되는 축방향 철근이 조기에 파단되지 않도록 인장 변형률을 검토할 필요가 있다. PPJH-8-P2 부재에서 긴장을 도입한 강봉이 항복 이후에도 다발철근이 상대적으로 작은 응력 증감에 따라 지속적으로 하중을 부담하여 안정적인 거동을 보인 것으로 판단된다.

PSRC8 부재들의 경우에는 강재비가 1.18%로 배치되어 상대적으로 낮은 휨강도를 보이고 있지만 최대 하중이후의 거동이 급격한 강도 감소 없이 안정적으로 나타났다. 이는 매입된 강관의 항복 이후의 거동이 전체 휨 거동을 지배하기 때문에 이전의 현장 타설 합성교각의 실험결과와 (Shim 등, 2008) 유사하다. 이러한 거동이 높은 변위연성도로 나타났다. 횡철근비를 0.48%로 매우 낮게 배근했음에도 불구하고 소성힌지 구간의 콘크리트 손상이 작고 이음부에 연속으로 배치된 강관과 강연선의 거동이 지배하기 때문에 큰 영향이 없었다. 긴장재가 상대적으로 외부에 배치되고 강관이 내측에 배치되어 교각의 횡변위에 따른 응력 증감의 수준이 다르기 때문에 이를 고려하여 설계시 적절한 축방향 강재 배치를 결정하여야 한다. 물론, 프리스트레스의 수준을 현재보다 높일 경우에는 그림 6(b)의 횡철근 거동으로부터 예상할 수 있듯이 횡철근의 배치를 늘려야 할 것이다.

내진 성능을 평가하는 교각의 에너지 소산능력을 분석하기 위하여 누적에너지 흡수능력(Cumulative energy absorption capacity)을 분석하였으며, 하중-변위 이력곡선의 내부면적으로 정의하였다. 각 실험부재에 대한 누적에너지 소산능력을 분석하여 그림 9에 나타내었다.

PPJH-8 실험부재들의 경우에 강재비가 1.2배 높은 PPJH-8-P2 실험체의 에너지 소산능력이 PPJH-8-P4 실험체에 비하여 변위 단계 6%에서 1.45배 높게 나타났다. 축력과 강재비가 높은 PPJH-8-P2 실험체가 PPJH-8-P0 실험체에 비해서 에너지소산 능력이 2.8배 크게 나타났다. 강재비가 높은 경우에 항복이후의 소성변형으로 인한 높은 에너지 흡수능력을 갖게 된다.

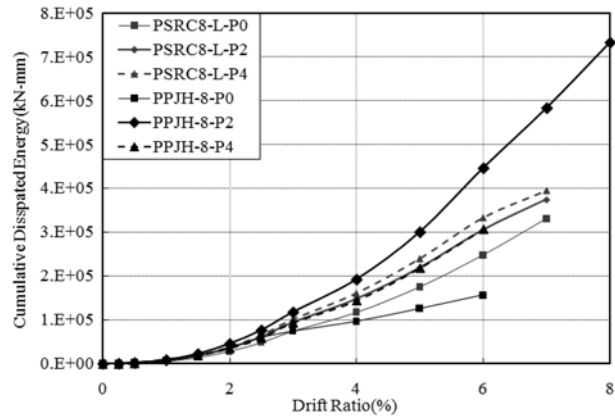


그림 9. 조립식 교각의 에너지 소산능력

강재비가 동일한 상태에서 프리스트레스의 수준만 달린 PSRC8 실험부재들의 에너지 소산능력 평가에서는 프리스트레스의 크기에 따른 값의 차이를 나타내었다. 변위 수준 7%에서 PSRC8-P4 부재가 PSRC8-P0에 비해서 1.92배 정도 높은 값을 나타내었고 PSRC8-P2 부재는 프리스트레스가 도입되지 않은 부재에 비해서 1.13배 정도 차이를 보였다. 이러한 차이는 그림 7(d)의 국부변형률 시간이력 곡선에서 예상할 수 있다. 동일 강재비에도 불구하고 도입된 프리스트레스는 콘크리트 덮개 부분의 손상 정도를 키우게 되고 이로 인해 강관의 파단 시점을 늦추게 되어 소성 변형에 의한 에너지 소산능력을 키우게 된다. 합성단면을 가진 프리캐스트 교각에서는 사용하중 상태에서의 휨에 대해서 이음부 벌어짐을 방지할 정도의 수준에서 프리스트레스를 도입하게 되는데 이는 에너지 소산능력을 증가시키는 요인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

교각의 급속시공을 위한 두 가지 형태의 조립식 교각에 대한 비교 실험을 수행하였다. 등가정적 지진하중 설계 방법에서 소요 횡하중에 저항하기 위한 단면의 설계에서 축방향으로 연속 배치되는 강재의 선택과 배치가 중요하다. 이 논

문에서 수행한 철근과 강봉의 조합, 매입강재와 강연선의 조합은 도입 프리스트레스의 크기, 강재비 설정이 중요한 설계 변수가 된다. 실험결과에서 나타난 거동으로부터 판단할 때 강봉과 연속철근의 조합을 통한 프리캐스트 교각에서는 교각의 높이가 증가할수록 강봉의 소요량이 증가하게 되어 상대적으로 일반 철근이 소요량이 매우 작아질 것이다. 변형을 적합조건에 따른 강봉의 응력증감을 계산하여 초기 도입 프리스트레스의 크기와 단면적을 설정하여야 한다. 합성교각에 프리스트레스를 도입하는 시스템의 설계에서는 강재비를 설정할 때 항복 시점과 이 시점에서의 강연선의 응력수준을 평가하여 매입강재의 파단 이후에도 일정 수준의 하중 저항 능력을 갖도록 하는 것이 바람직하다.

프리스트레스를 도입하는 조립식 교각의 지진하중시 하중 복원 능력은 매우 중요한데 실험에서 설정한 강봉과 일반철근의 조합에서는 양호한 변형 복원 능력을 보여주었다. 프리스트레스의 크기에 따른 횡철근의 응력 증가량을 확인하였고 소성힌지 구간의 콘크리트 손상정도가 높아지기 때문에 높은 압축력을 도입하는 경우에는 소요 횡철근량을 증가시켜야 할 것으로 판단된다. 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

내진성능의 평가에서 변위연성도는 매입된 강재로 인해 극한하중 이후의 거동이 안정적으로 유지된 조립식 교각이 횡철근비가 0.48%에도 불구하고 5.0 이상의 값을 모두 보였다. 강봉과 철근을 조합한 시스템에서는 극한하중 이후의 거동의 비대칭성으로 인해 변위연성도가 5.0이하의 값을 나타내었다. 강봉과 일반철근을 조합한 시스템에서는 강재비 1.2배 증가에 따라 에너지 소산능력이 1.45배에서 2.8배까지 뚜렷한 증가를 확인하였다. 강재비가 동일하고 프리스트레스의 수준을 높인 경우에는 에너지 소산능력이 1.13배에서 1.92배 정도 높게 나타났다. 목표 내진 성능이 규정되면 이를 확보하기 위해서 조립식 교각의 최대하중 도달 이후의 강도 저하가 급격하게 발생하지 않도록 긴장재와 일반강재의 조합을 결정하여야 한다.

## 참고문헌

김태훈, 박세진, 김영진, 신현목(2008) P-delta 영향을 고려한 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능평가. **한국지진공학회 논문집**, 한국지진공학회, 제12권, 제4호, pp. 45-54.

김현호, 심창수, 정철현, 김철환(2007) 중실원형단면 조립식 교각의 내진성능평가. **한국지진공학회 논문집**, 한국지진공학회, 제11권, 제3호, pp. 23-31.

심창수(2005) 국내의 교량의 급속시공 관련 동향분석, **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제53권, 제12호, pp. 39-46.

Billington, S.L., Barnes, R.W., and Breen, J.E. (1998) Project summary report 1410-2F: A Precast substructure design for standard bridge systems, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin.

Billington, S.L., Barnes, R.W., and Breen, J.E. (1999) A precast segmental substructure system for standard bridges, *PCI Journal*, Vol. 44, No. 4, August, pp. 56-73.

Billington, S.L., Barnes, R.W., and Breen, J.E. (2001) Alternate substructure systems for standard highway bridges, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 6, No. 2, pp. 87-94.

Billington, S.L. and Yoon, J.K. (2004) Cyclic response of unbonded post-tensioned precast columns with ductile fiber-reinforced concrete, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 9, No. 4,

pp. 353-363.

El-Sheikh, M.T., Sause, R., Pessiki, S., and Lu, L. (1999) Seismic behavior and design of unbonded post-tensioned precast concrete frames, *PCI Journal*, Vol. 44, No. 3, pp. 54-71.

Gad, E.F., Chandler, A.M., Duffield, C.F., and Hutchinson, G.L. (1999) Earthquake ductility and overstrength in residential structures," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 8, No. 4, pp. 361-382.

Hewes, J.T. and Priestly, M.J.N. (2001) Proceedings, sixth CALTRANS Seismic research workshop, division of engineering services, California Department of Transportation, Sacramento, CA.

Hieber, D.G., Wacker, J.M., Eberhard, M.O., and Stanton, J.F. (2005a) State-of-the art on precast concrete systems for rapid construction of bridges. Technical report contract T2659, Task 53. Washington State Transportation Commission; March.

Hieber, D.G., Wacker, J.M., Eberhard, M.O., and Stanton, J.F., (2005b) Precast concrete pier systems for rapid construction of bridges in seismic regions, Washington state department of transportation technical Report WA-RD 611.1, Olympia, Washington.

Jonsson, R. (2002) Direct displacement based design of seismic moment resisting concrete frames, master's thesis, department of civil and environmental engineering, University of Washington.

Kwan, W. and Billington, S.L. (2003a) Unbonded posttensioned concrete bridge Piers. I: monotonic and cyclic analyses", *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 92-101.

Kwan, W. and Billington, S.L. (2003b) Unbonded posttensioned concrete bridge Piers. II: Seismic analyses, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 102-111.

Mandawe, J., Mislinski, S., and Matsumoto, E.E. (2002), Reinforcement anchorage in grouted duct connections for a precast bent cap system in seismic regions, Proceedings, Concrete Bridge Conference, Nashville, TN.

Matsumoto, E.E., Kreger, M.E., Waggoner, M.C., and Sumen, G. (2002) Grouted connection tests in development of precast bent cap systems, Transportation Research Record 1814, Transportation Research Board, Washington DC, pp. 55-64.

Nishiyama, M. and Watanabe, F. (2003) Seismic performance of precast column-foundation connection assembled by post-tensioning, advanced materials for construction of bridges, Buildings, and Other Structures III, Vol. P5, Article 5.

Priestley, M.J.N. and Tao, J.R. (1993) Seismic response of precast prestressed concrete frames with partially debonded tendons, *PCI Journal*, Vol. 38, No. 1, pp. 64-81.

Priestley, M.J.N. and MacRae, G.A. (1996) Seismic tests of precast beam-to-column joint subassemblages with unbonded tendons, *PCI Journal*, Vol. 41, No. 1, pp. 64-81.

Sakai, J. and Mahin, S.A. (2004) Mitigation of residual displacements of circular reinforced concrete bridge columns, proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C.

Shahawy, M.A. (2003) NCHRP Synthesis 324: Prefabricated Bridge Elements and Systems to Limit Traffic Disruption During Construction, national cooperative highway research program, Transportation Research Board, Washington, DC.

Shim C.S., Chung C.H., and Kim H.H. (2008) Experimental evaluation of seismic performance of precast segmental bridge piers with a circular solid section, *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, pp. 3782-3792.

Shim C.S., Chung Y.S., and Han J.-H. (2008) Cyclic response of concrete-encased composite columns with low steel ratio, *Structures and Buildings, Proc. of the Institution of Civil Engi-*

neers, Vol. 161, Issue SB2, pp. 77-89.  
Stanton, J.F. and S.D. Nakaki (2002) Design guidelines for precast concrete seismic structural Systems (PRESSS Report No. 01/03-09), University of Washington.  
Wacker, J.M., Hieber, D.G., Stanton, J.F. and Eberhard, M.O.

(2005) Design of precast concrete piers for rapid bridge construction in seismic regions, WA-RD 629.1, Washington State Transportation Center, University of Washington.

(접수일: 2009.9.24/심사일: 2009.11.16/심사완료일: 2009.11.24)