

# 프리캐스트 콘크리트 교각의 구조거동에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study for the Structural Behavior of the Precast Prestressed Concrete Columns

최승원\*                      신현목\*\*                      이재훈\*\*\*                      오병환\*\*\*\*

Choi, Seung-Won   Shin, Hyun-Mok   Lee, Jae-Hoon   Oh, Byung-Hwan

### ABSTRACT

In many previous studies, a prestressed concrete column has a larger flexural strength, shear strength and restoring force than a RC column. Recently, a precast prestressed concrete column is rising up a very rational column structure in that a economic aspect. In a precast prestressed concrete column, it makes in a factory. So, it needs a small construction site and acquires a higher durability than a cast in place concrete column. Seven precast concrete columns were tested under a constant axial load and a cyclically reversed horizontal load to investigate the performance. It is designed with a hollow section and consisted of 4 segments. The main variables of the test were a amount of prestressed, a type of joints and a boding type of strands. The test results show that the performance of a precast prestressed concrete column; failure mode, maximum load, energy dissipation and stiffness degradation.

### 1. 서론

프리스트레스트 콘크리트 교각은 콘크리트 교각에 연직방향으로 프리스트레스트를 도입한 교각으로 일반 철근콘크리트 교각에 비하여 내진성과 지진후의 공용성능이 우수한 형식의 교각이다. 이러한 프리스트레스트 콘크리트 교각에 대한 기존의 연구는 프리스트레스트를 도입한 교각에서 일반 철근콘크리트 교각에 비하여 높은 휨강도와 전단강도를 얻을 수 있음과 동시에 우수한 복원력을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 프리스트레스트 콘크리트 교각은 단면을 감소시킴과 동시에 강한 지진에도 충분한 강도를 유지하고, 잔류변위가 작은 합리적인 구조이다. 프리스트레스트를 도입한 프리캐스트 콘크리트 교각은 프리스트레스트 도입에 의한 장점 및 시공성에도 우수한 면을 갖는다. 즉, 공장에서 제작한 세그먼트를 통해 현장에서 조립하는 형식이므로 현장치기 콘크리트 교각에 비해 작업공간을 줄일 수 있고 또한 콘크리트의 품질을 우수하게 유지할 수 있다. 이러한 이유로 미국 등 일부 국가에서는 현재 도심지의 교통혼잡을 감소키는 등 경제성을 향상시키고, 시공성이 우수한 프리캐스트 콘크리트 교각에 대한 시공 실적 및 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 따라서 이 연구에서는 국내에서는 연구 실적이 미흡한 프리캐스트 콘크리트 교각의 프리스트레스 량, 접합부 형식 및 강선의 부착유무에 따른 교각의 구조거동에 대하여 연구해 보고자 하였다.

### 2. 실험중 반복재하 실험

#### 2.1 실험체 변수 및 설계

이 연구에서는 그림 1과 같은 700×450mm 직사각형 단면의 중공단면의 프리캐스트 콘크리트 교각을 제작하였다. 벽체의 두께는 100mm이고, 각 세그먼트의 높이는 1m이고 하중가력점까지 4개의 세그먼트를 제작

\* 정희원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 정희원, 성균관대학교 토목환경공학부 교수

\*\*\* 정희원, 영남대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\* 정희원

하여 조립하였다. 기초에서 하중가력점까지의 높이는 3.5m이고, 표 1은 이 실험에서 사용한 변수를 나타낸다.

주철근은 SD400, SD500(D13)을 사용하였고, 횡철근은 SD400(D10)을 도로고 설계기준에 따라 배근하였다. 강선은 SWPC 7B를 사용하였고 그림 1과 같이 교각 단면의 네모서리부분에 설치하였다. 강선은 항복하중의 50%를 긴장하였다. 횡하중 가력시 전단력에 저항하기 위한 방법으로 그림 2와 같이 직경 60.5mm의 강관 내부에 직경 42.7mm의 강관을 삽입하고 내부 강관에 강선을 삽입하였다. 또한, 전단키(shear key)를 두어 전단성능을 확보하였는데 전단키의 형상은 사다리꼴형으로 d/h ratio (전단키의 저면과 돌출높이의 비)를 1/4로 하였고 전단키의 경사각  $\alpha$ 를 60°로 결정하였다.

표 1 주요 실험변수

Specimen	fck [MPa]	fy [MPa]	위험단면의 주보강재의 강재지수		강선부착 유무	전단키 유무	교각형식
			$\rho_r$	$\rho_p$			
P40-P1	40	400 (D13)	1.94	0.4	Unbonded	-	CIP PSC
S40-P1-UB			1.94	0.4	Unbonded	무	Precast
S40-P1-B			1.94	0.4	Bonded	무	Precast
S40-P1-UB-SH			1.94	0.4	Unbonded	유	Precast
S40-P2-UB			1.94	0.2	Unbonded	무	Precast
S60-P1-UB	60	500 (D13)	1.94	0.4	Unbonded	무	Precast
S60-P1-B			1.94	0.4	Bonded	무	Precast

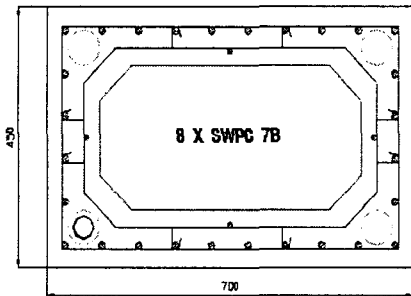


그림 1 시험체 단면도

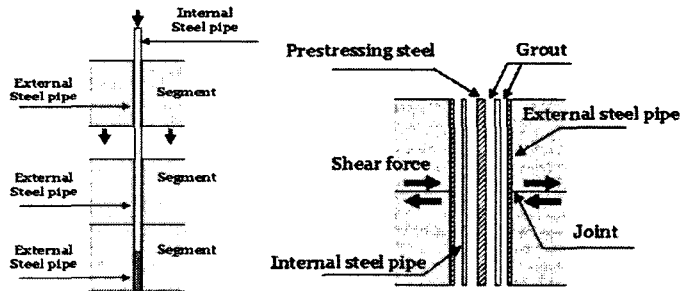


그림 2 전단저항시스템

## 2.2 시험체 재하 및 계측

본 교각시험체의 축하중은 교각단면의 10%(4MPa)에 해당하는 일정축하중을 재하하였고, 횡방향하중은 Drift Ratio  $\pm 0.25\%$ ,  $0.5\%$ ,  $\pm 1.0\%$ ,  $\pm 1.5\%$ ,  $\pm 2.0\%$ ,  $\pm 3.0\%$ ,.....에 대하여 각 Drift Ratio 당 2사이클씩 반복재하하였다. 횡하중 가력시 정확한 횡방향의 변위를 측정하기 위하여 교각의 하중 재하점인 기초에서 3.5m 위치에 LVDT를 설치하여 하중-변위 이력곡선을 도출하였다. 또한 각 세그먼트 사이에서의 벌어짐(gap) 및 슬립(slip)을 측정하기 위하여 클립게이지(clip gauge) 및 LVDT를 설치하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 균열발생 양상 및 최대하중

수평 반복가력하중 실험 결과 프리스트레스트 콘크리트 교각은 일반적인 RC 교각과 마찬가지로 콘크리트 파복이 박리되고 주철근이 좌굴된 후 주철근의 파단이 발생하면서 파괴로 이어지는 양상을 보였다. 그러나 프리캐스트 콘크리트 교각의 경우에는 이러한 파괴양상이 발생하지 않고 어떠한 균열이 발생하지 않고, 기초와 첫번째 세그먼트사이에서의 벌어짐(gap)이 증가하면서 파괴에 이르는 결과를 보였다. 이는 프리캐스트 콘크리트 교각의 경우 주철근이 접합부에서 연결되어 있지 않았기 때문으로 사료된다. 따라서 프리캐스트 부재내의 종방향 철근은 주철근으로서의 역할을 할 수 없으므로 프리캐스트 접합부를 통과하는 PS강재만이 주철근 역할을 하게 된다. 따라서 프리캐스트 부재의 접합면에서의 재료강도를 포

합한 역학적인 강재비를 산정하여 교각의 거동을 비교분석하였다. 표 2는 이러한 각 변수의 강재비 및 최대하중을 나타낸다. 프리스트레스트 콘크리트 교각(P40-P1)과 프리캐스트 콘크리트 교각(S40-P1-UB)를 비교해 볼 때, 최대하중은 약 43% 수준으로 평가되는데 이는 강재지수가 약 40%인 것과 일치한 결과를 보여준다. 콘크리트 강도가 증가함에 따라 최대하중 역시 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

표 2 강재지수 및 최대하중

Specimen	fck [MPa]	fy [MPa]	위험단면의 주보강재의 강재지수			최대하중 [kN]	휨모멘트 [kN·m]
			$\rho_r$	$\rho_p$	$\rho_t$		
P40-P1	40	400 (D13)	0.244	0.162	0.406	145	507
S40-P1-UB			0	0.162	0.162	62	217
S40-P1-B			0	0.162	0.162	62	217
S40-P1-UB-SH			0	0.162	0.162	59	206
S40-P2-UB			0	0.081	0.081	44	154
S60-P1-UB	60	500 (D13)	0	0.105	0.105	74	259
S60-P1-B			0	0.105	0.105	75	262

### 3.2 하중-이력곡선

그림 3은 각 실험체의 하중-이력곡선을 나타낸다. 그림에서 보듯이 프리캐스트 교각은 잔류변위가 매우 작게 나타나고 핀칭(pinching)효과가 매우 큰 현상을 보였다. 또한 최대하중 이후에 횡변위는 증가하여도 하중의 감소는 거의 발생하지 않는 모습을 나타냈다. 비부착된 실험체(그림3(b))와 부착된 실험체(그림3(c))의 push 방향으로의 강도는 거의 동일하지만 pull 방향으로의 강도는 부착실험체가 다소 낮은 것으로 측정되었다. 이는 부착 PSC구조에서는 최대모멘트 작용위치에서 PS강재의 응력이 국부적으로 증가하지만 비부착 PSC구조에서는 PS강재의 전체 길이에 걸쳐서 동일한 응력이 작용하므로 응력이 분산되는 효과가 있기 때문이다. 전단키를 갖는 실험체(그림3(d))에 비해 전단키를 갖지 않는 실험체(그림 3(b))에 비해 다소 낮은 최대하중을 갖고 있으나, 변위가 증가함에 따라 하중의 감소는 더욱 적은 것으로 나타났고, 또한 변위의 증가에 따라 지속적인 하중의 증가 효과를 보였다.

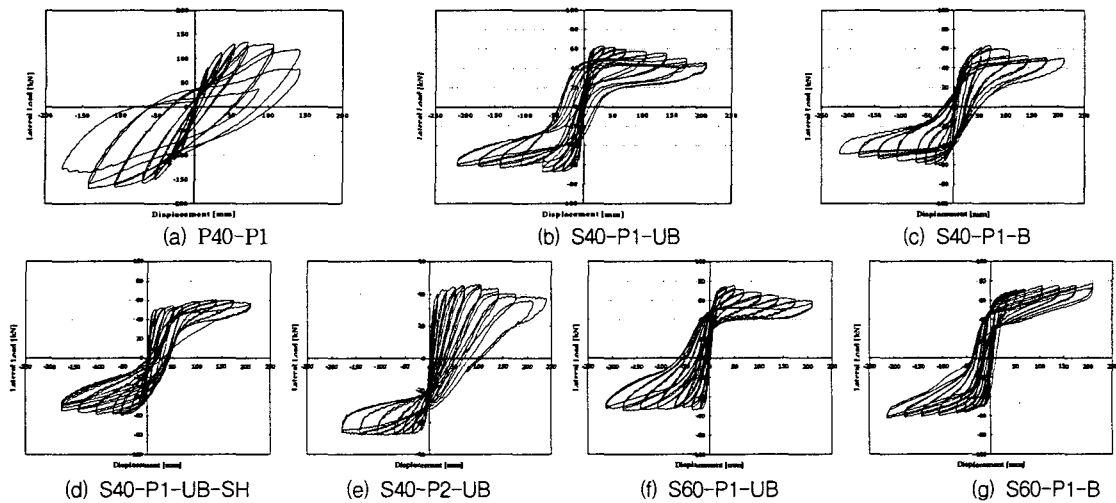


그림 3 하중-변위 이력곡선

### 3.3 흡수에너지

그림 4는 PS강재량에 따른 흡수에너지를 나타내고 있다. drift ratio 2%까지는 거의 비슷한 크기의 흡수에너지를 갖지만 이후 PS강재량이 클수록 흡수에너지가 증가하였다. 그림 5는 강선의 부착유무에 따른 흡수에너지를 나타내는데 PS강재가 부착된 교각일수록 일체거동으로 인해 에너지 소산능력이 다소

향상되는 것으로 나타났다. 또한 전단키가 있는 경우 2%이후의 drift ratio에서 흡수에너지가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전단키의 유무에 관계없이 drift ratio 2%이내에서는 거의 비슷한 거동을 보이다 이후 전단키가 있는 경우 하중의 증가가 다소 작았기 때문에 하중-변위곡선의 면적으로 계산되는 흡수 에너지가 작게 측정된 것으로 사료된다.

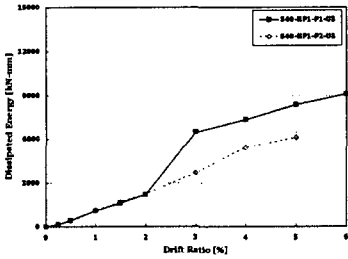


그림 4 PS강재량에 따른 흡수에너지

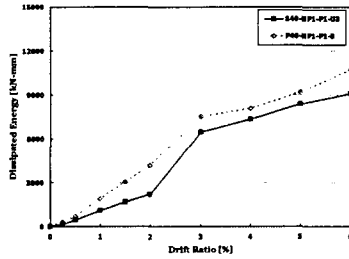


그림 5 PS강선 부착에 따른 흡수에너지

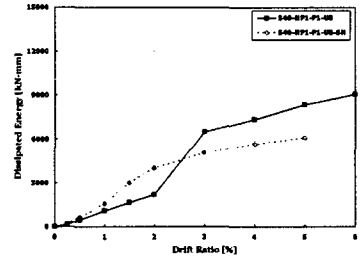


그림 6 전단키 유무에 따른 흡수에너지

### 3.4 강성감소

각 drift ratio에 따른 push/pull 방향의 강성을 구하여 교각의 강성변화를 살펴보았다, 각 drift ratio에서 구한 강성을 다시 초기강성으로 나누어 무차원화한 값을 비교하였다.

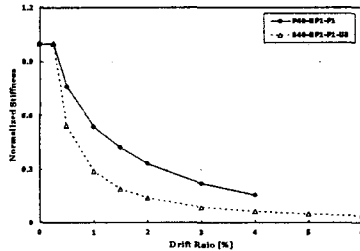


그림 7 교각형식에 따른 강성감소

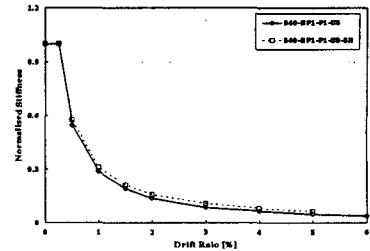


그림 8 전단키 유무에 따른 강성감소

그림 7은 프리스트레

스트 콘크리트 교각 및 프리캐스트 콘크리트 교각의 강성감소를 비교한 것이다. 프리캐스트 콘크리트 교각은 초기의 drift ratio 단계에서 강성의 감소가 급격하게 이루어지고 이후 거의 일정한 강성을 유지하는 것으로 나타났다. 또한 전단키의 존재여부와 관계없이 거의 동일한 강성 감소효과를 보였다(그림 8).

### 4. 결론

프리캐스트 콘크리트 교각의 횡하중 반복 가력실험 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다. 프리캐스트 콘크리트 교각은 균열의 전파없이 기초와 첫 번째 세그먼트 사이의 벌어짐(gap)에 의해 교각의 성능이 저하되었다. 프리캐스트 콘크리트 교각은 매우 작은 잔류변형을 나타냈고, 핀칭(pinching)효과가 매우 크지만 최대하중 이후 횡변위가 증가하여도 하중의 감소는 매우 작게 발생하였다. 또한 콘크리트 강도가 증가하고 강제지수가 증가함에 따라 최대강도는 증가하는 경향을 보였다. 프리캐스트 콘크리트 교각은 프리스트레스트 콘크리트 교각에 비해 핀칭(pinching)효과가 매우 커서 에너지 흡수량 감소하였고, 부착된 실험체 및 전단키가 있는 경우는 에너지 흡수량이 다소 증가하였다. 또한 모든 실험체가 휨과파 형태를 보이고 있으므로 이 실험에서는 전단키의 성능에 관해서는 큰 차이점을 발견하기 어려웠다.

### 참고문헌

1. 건설교통부, “도로교 설계기준”, 2005
2. 사단법인 프리스트레스트 콘크리트 기술협회, “프리스트레스트 콘크리트 교각의 내진설계 가이드라인”
3. 한국도로공사, “철근콘크리트 교각의 심부구속방법 개선연구”, 2002
4. Yoshihiro Hishiki 외, “Experimental study on seismic performance of precast segmental PC pier”
5. 박동규, “Seismic performance of hollow prestressed concrete piers”