

중실원형단면 조립식 교각의 내진 성능 평가

Evaluation of Seismic Performance of Prefabricated Bridge Piers with a Circular Solid Section

김현호¹⁾ · 심창수²⁾ · 정철현³⁾ · 김철현⁴⁾

Kim, Hyun-Ho · Shim, Chang-Su · Chung, Chul-Hun · Kim, Cheol-Hwan

국문 요약 >> 건설여건의 변화에 따라 교량구조물의 급속시공에 대한 요구가 늘어나고 있다. 이 논문에서는 하부구조에서 교각의 프리캐스트화를 위한 준정적 실험을 수행하였다. 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교각 설계의 가장 중요한 항목이 내진성능의 확보에 있다. 7개의 프리캐스트 교각을 제작하였고 주요 실험변수는 긴장재의 양, 프리스트레스트의 크기, 이음부의 위치 및 수로 설정하였다. 실험결과 축방향으로 도입되는 프리스트레스트에 의해 작은 횡변위하에서는 일부 손상이 발생하여도 변형의 복원력을 발휘하였지만 소성현 지구간의 손상이 많은 경우에는 이러한 복원력이 효과를 발휘하지 못하는 것을 확인하였다. 실험을 통해 관찰된 손상의 형태로부터 판단할 때 조립식 교각의 이음부 설계는 기초부와 교각부 사이의 이음부에 대해서 실시되어야 한다. 축방향 긴장재의 양은 RC 교각과 강재비를 일치시키는 것은 지나친 설계가 될 수 있고 주어진 하중조건에 대한 P-M 상관도를 만족시키는 수준에서 결정되어야 한다. 변위연성도 평가를 볼 때 프리캐스트 교각에서 횡철근비는 현재의 철근 콘크리트 교각과 동일한 수준에서 확보되어야 요구연성도를 만족할 수 있다. 에너지 소산능력은 강재비가 증가함에 따라 향상되었고 이음부의 수가 많은 경우가 다소 뛰어난 능력을 발휘하였다.

주요어 준정적실험, 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교각, 내진성능, 변위연성도, 에너지소산능력

ABSTRACT >> Fast bridge construction has been increasingly needed according to the changed construction environment. This paper deals with quasi-static tests on precast piers for bridge substructures. One of the most crucial aspect of the design of precast prestressed concrete bridge piers is the seismic performance. Seven precast pier elements were fabricated. The amount of prestressing bars, the prestressing force, and the location and number of the joint between segments were the main test parameters. Test results showed that the introduced axial prestress made the restoration of the deformation under small lateral displacement and minor damage. However, there was no effect of the prestress when the plastic hinge region was damaged severely due to large lateral displacement. Judging from the observed damage, the design of the joints in precast piers should be done for the first joint between the foundation and the pier segment. The amount of the necessary prestressing steel may be designed to satisfy the P-M diagram according to the service loads, not by having the same steel ratio as normal RC bridge piers. In order to satisfy the current required displacement ductility, it is necessary to have the same amount of the transverse reinforcements as RC piers. As the steel ratio increases, the energy absorption capacity increases. The number of joints showed a little influence on the energy absorption capacity.

Key words Quasi-static test, precast prestressed concrete bridge pier, seismic performance, displacement ductility, energy absorption capacity

1. 서론

교량의 하부구조는 고정하중과 차량활하중 등의 수직방향 하중을 지지할 뿐만 아니라 차량 제동하중, 풍하중, 지진 하중, 정수압과 유수압, 횡토압, 선박충돌하중, 온도변화나 크리프 및 건조수축에 의한 하중효과 등 횡방향 하중을 지지해야 하므로 교량의 안전성에 매우 중요한 구조요소이다. 국내 교량의 교각은 대부분 현장타설 RC교각이 주종을 이루고 있으며, 공사비 측면에서도 큰 비중을 차지하고 있어

¹⁾ 중앙대학교 건설환경연구소, 전임연구원

(대표저자: hskim@wm.cau.ac.kr)

²⁾ 정회원·중앙대학교 건설대학 토목공학과 조교수

³⁾ 단국대학교 공과대학 토목공학과 부교수

⁴⁾ 포스코건설 기술연구소 차장

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 1. 2 / 심사종료일 : 2007. 3. 28)

전체 교량의 경제성에 큰 영향을 미친다. 이러한 하부구조의 중요성을 인식하여 최근 국내에서도 교각의 새로운 시스템에 대한 관심이 증가되고 있다.

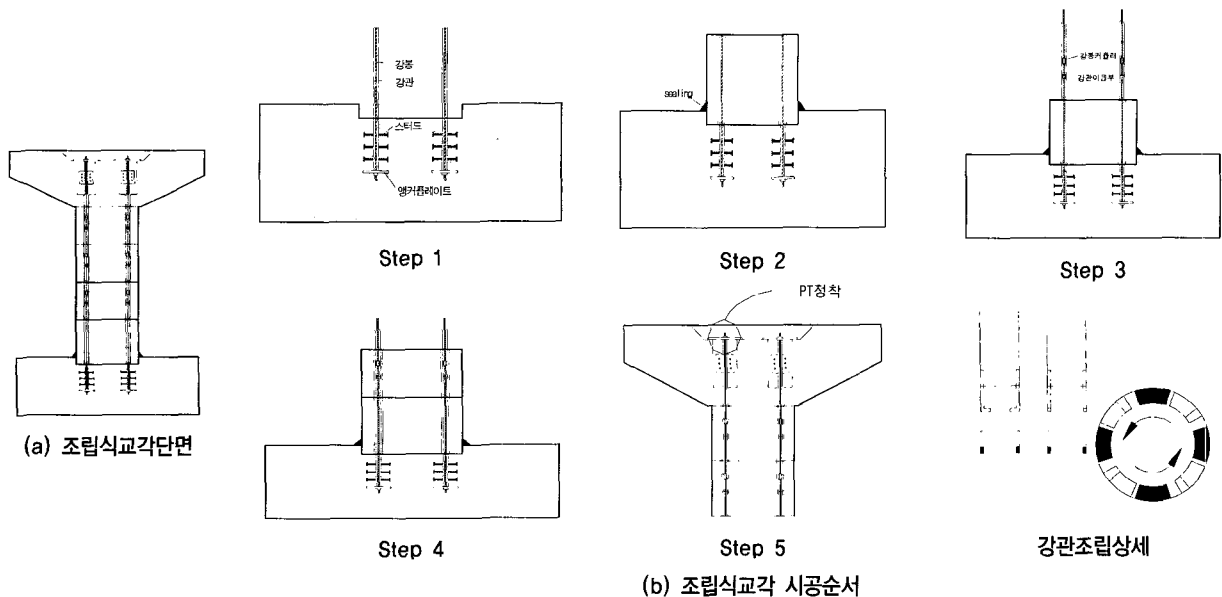
교량 하부구조에 대한 프리캐스트 기술의 적용은 최근 들어 활발하게 이루어지고 있는데, 이는 여러 가지 복합적인 요인으로 인해 프리캐스트 공법의 장점이 부각되어 채택되는 경우가 늘어 가고 있기 때문이다. 그 요인으로는 현장 여건을 들 수 있는데, 콘크리트 타설 또는 거푸집 설치 등이 용이하지 않은 도심지 등과 같은 입지조건이나 신속한 하부시공이 요구되는 경우에는 사전에 제작된 부재를 이용하는 것이 효과적일 수 있다. 특히, 최근에 국내에서 부각되고 있는 경전철 교량에서 요구되는 교각은 대부분이 도심지 부근을 통과하기 때문에 더욱 프리캐스트 공법이 필요하다. 또 다른 중요한 이유는 교량건설에서 유발되는 환경피해의 최소화이다. 도로 구간이 산악지역이나 해상에 위치하는 경우에 교량건설로 인한 환경피해의 민원이 많을 수 있고 이를 적절하게 해결하는 방안으로 하부구조를 포함한 전체 교량을 모두 조립식으로 가설하는 형태의 교량이 시도되고 있다.⁽¹⁾

미국의 FHWA의 교량의 급속시공 관련 프로젝트는 연구에서 실제 적용까지의 과정을 적극적으로 발주처에서 유도하는 좋은 사례로 상당한 실적을 거두고 있다.⁽²⁾ Billington 등의 연구에서는⁽³⁾ 비부착 포스트텐션을 가하는 프리캐스트 기둥에 대한 내진 거동을 평가하였고 FRC를 사용하여 지진에 의한 손상에 잘 견디는 구조 시스템을 제안하였다. Ou 등이 수행한 연구에서는⁽⁴⁾ 비부착 포스트텐션을 가하는 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 교각 시스템을 제안하고 지진 하중에 대해서 변형 복원능력이 뛰어남을 보였고 일반 철근이 이음부를 가로지르도록 배치하여 에너지 소산능력을 확

보하도록 하였다. 일본에서도 활발하게 조립식 교각 시스템에 대한 내진 거동 연구가 진행되고 있다.^(5,6)

본 연구에서는 조립식 교각과 기초 사이의 연결, 교각과 교각의 연결에서 강관과 프리스트레스 긴장재를 동시에 이용하는 단면을 제안하였다. 강관을 연결구조에 활용하여 강관내부에 충전된 모르타와 강관이 함께 축력과 휨모멘트, 전단력에 효율적으로 저항할 수 있도록 하였다. 그림 1에 제안된 조립식 교각의 단면 및 시공순서를 나타내었다.⁽⁷⁾

교각과 기초 사이의 연결에서는 뽑힘에 대한 저항을 위해서 강관의 하부에 앵커플레이트를 용접 연결하고 강관의 외부에 전단연결재를 용접하여 저항 강도를 확보한다. 교각과 기초, 교각과 교각의 연결에서 지진하중에 의해 가장 중요한 부분인 하부의 소성힌지 구간에는 연속된 강관과 프리스트레스 긴장재를 이용하여 이 구간의 연성확보 및 전단강도 증가를 이루도록 하였다. 휨모멘트가 가장 크게 발생하는 소성힌지 구간에 강관 단면이 유효하게 저항하도록 하여 소성힌지 구간의 심부 콘크리트를 확실하게 구속할 수 있도록 하는 상세를 확보할 수 있다. 기초의 타설시 강관과 긴장재를 미리 매입하여 타설하고 교각 단면의 일부가 기초단면에 삽입되도록 블록아웃을 설치하여 이 부분에 프리캐스트 교각이 설치되고 경계면에는 에폭시 충전과 테두리면을 실링하여 마감하도록 하였다. 교각 이음부에서 긴장재나 강관의 연결을 하지 않고 프리캐스트 부재 내에서 연결을 함으로써 이음부에서의 전단강도를 부착 및 마찰 이외에도 강관 단면이 함께 저항하여 전단강도를 증가시켰다. 기존 조립식 교각 시스템이 전단키에 의한 저항이나 프리스트레스로 인한 압축으로 부착강도 증진 효과를 통해서 전단저항을 하는 것에 비해서 이 시스템의 전단저항 메커니즘은 압축력에 의한



〈그림 1〉 조립식교각 제안 시스템

부착저항, 긴장재의 전단강도, 이음부에 연속되어 있는 강관 및 내부 충전 모르터 단면의 전단저항으로 구성되어 단주 교각 및 중간 영역의 휨-전단 파괴 모드를 갖는 교각 단면에 효과적으로 적용될 수 있다. 교각부재의 끝 부분과 코핑부의 연결에서는 편재하로 인한 휨에 대한 저항을 확보하기 위해서 강관을 코핑부 끝단까지 연장하고 코핑부에 매입되는 부분에는 전단연결재를 설치하여 축방향 전단강도를 확보하도록 하였다.

이 논문에서는 단면의 강도를 확보함과 동시에 사용성을 함께 확보할 수 있도록 하는 접합부 상세에 대하여 실험적으로 검증하였다. 실험부재의 설계는 시공성을 고려해야 하고 부재의 제작과정을 통해서 시공오차의 원인이 될 수 있는 항목을 면밀히 검토하여 반영할 수 있도록 하였다. 준정적실험을 통하여 교각 및 기초 연결부재의 내진성능을 평가하여 설계 기준에서 요구하는 성능의 만족여부를 평가하고 설계 제안사항을 제시하였다.

2. 실험개요

2.1 실험부재 및 변수

실험부재는 기초-교각 연결부, 교각-교각 연결부에 따른 분류와 이음부 개수 및 강재비 등의 변수를 통해 설계하였다. 실험체 배근 및 프리스트레스 도입량은 표 1에 나타내었다. 프리캐스트 세그먼트의 제작이 일시에 이루어지지 않아서 5회에 걸쳐 제작된 콘크리트의 평균강도를 산정한 결과 55 MPa이었다.

긴장재 단면적과 프리스트레스의 크기 결정이 주요한 고려사항인데 이 연구에서는 기존 축방향 철근비와 동일한 수준의 강재비^(8,9) 갖도록 조정하였는데 최종적으로 도입되는 프리스트레스에 의한 축력으로 인해서 P-M 상관도에서의 휨강도가⁽¹⁰⁾ 감소하는 것을 최소화하기 위해 긴장재의 도입 프리스트레스의 수준은 낮추어 설정하였다. 즉, 디비닥 이형강봉 직경 32mm(강종 St. 950/1050 MPa) 6개를 매입

한 부재는 기존 RC 교각과 동일한 강재비를 갖도록 설정하였고 압축력 도입수준을 축강도의 21% 수준에서 결정하였다. 강봉 8개를 매입한 부재의 경우에는 강재비를 다소 높게 설정하고 절반의 강봉만 프리스트레스를 도입하여 도입 압축력의 수준이 축강도의 14% 수준이 되도록 설정하였다. 이는 단면 강도 확보를 위해서 충분한 양의 긴장재를 배치할 경우에 지나친 수준의 압축력 도입으로 휨강도의 저하를 가져올 수 있기 때문에 긴장재와 긴장하지 않는 강재의 조합 배치의 효과를 살펴보기 위한 고려에서 설정되었다. 강관의 경우 내력 계산에 포함되지는 않았지만 일반구조용 강관(SPS400)으로 외경이 76.3mm 이고 두께가 2.8mm이었다. 실험부재의 상세단면은 그림 2에 나타내었다.

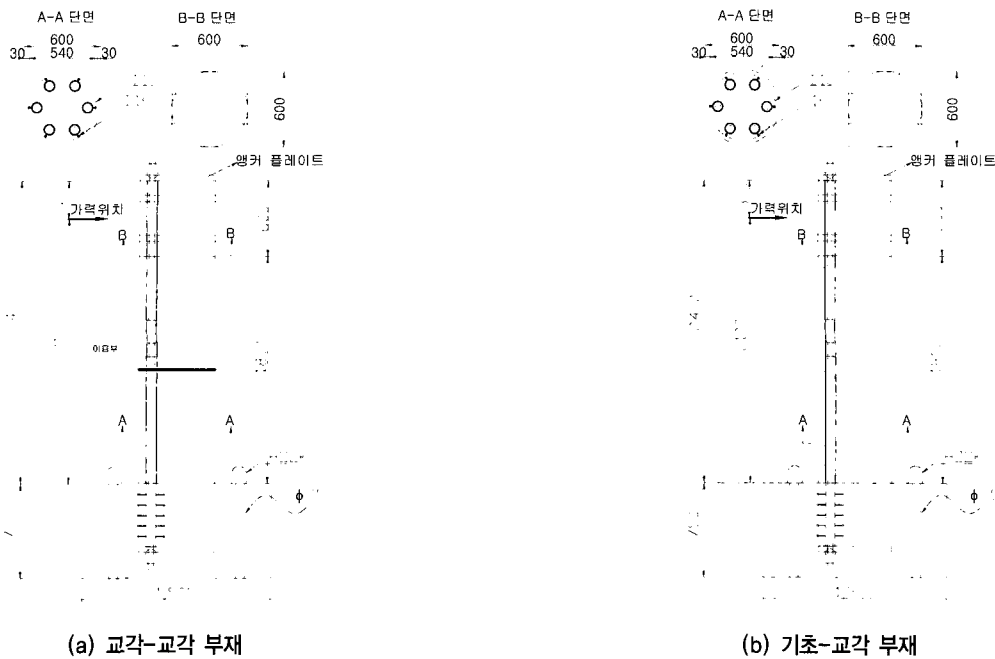
조립식 교각의 첫 번째 이음부의 위치가 1.5D에 위치하도록 하였는데 이는 대상으로 하는 조립식 교각이 주로 단면 직경 2.5 m 이내로 가설 장비를 고려했을 때 소성힌지구간 외에 이음부를 둘 수 있을 것으로 판단했기 때문이다. 내진거동에서 가장 중요한 심부 구간에 이음부를 두지 않는 것이 좋을 것으로 판단해서 부재 설계에 반영하였다.

실험부재의 제작과정은 그림 3에 나타내었다. 먼저 기초를 타설하기 전 강관과 강봉이 앵커플레이트에 연결된 상태에서 매입되도록 하고 강관의 외부에는 스티트 연결재를 용접하여 뿔힘에 저항하는 구조를 형성하였다. 강관과 강봉의 높이는 교각단면의 직경보다 크도록 하여 소성힌지구간에 이음부가 생기지 않도록 하였다. 이 상태에서 연직도를 맞춘 상태를 유지하도록 하고 기초 콘크리트를 타설하였다. 첫 번째 교각 세그먼트는 기초부에 사전에 만들어 둔 공간에 삽입되도록 하는데 미리 기초 하면에 모르터를 도포하고 교각 세그먼트에 형성되어 있는 홈을 통해서 강관과 강봉이 들어오도록 하였다. 세그먼트가 가설된 후에는 기초부와 첫 번째 세그먼트 사이의 틈을 실링재를 이용해서 메워서 처리한다. 강봉은 커플러를 이용하여 연속시켰으며 이때 강관의 연결부와 강봉의 커플러 위치는 서로 같지 않도록 하였다. 프리캐스트 교각 세그먼트를 차례로 가설해서 올리고 각 이음부는 접착면에 에폭시를 도포하여 연결하였으며 최종적

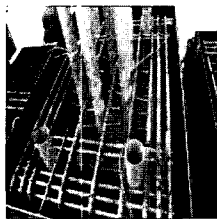
〈표 1〉 주요 실험 변수

	실험부재명*	강봉수 (EA)	Segment	강재비 (%)**	횡철근	설계 프리스트레스 (kN)	축하중/강도 (%)
기초-교각	FPT1	6	1.8m	1.70	D10@50mm (1.06%)	3558	21
	FPT2						
교각-교각	PPJ6-1	6	2×0.9m	1.70	D10@100mm (0.53%)	3558	21
	PPJ6-2				D10@50mm		
	PPJ8-1				8		
	PPJ8-2						
	PPJ8-3						

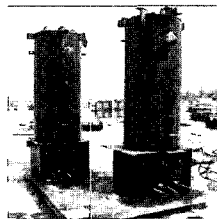
* F : Footing, P : Pier, J : Joint ** 축방향 철근(D16)은 단절되기 때문에 강재비에서 제외



〈그림 2〉 실험부재 제원(unit:mm)



(a) 기초부 정착 및 철근배근



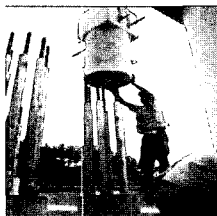
(b) 거푸집 제작 및 조립



(c) 콘크리트 타설



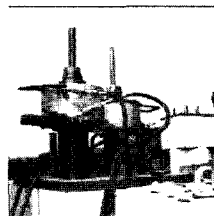
(d) Segment 제작



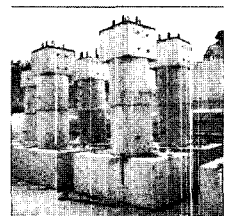
(e) Segment 조립



(f) 이음부 에폭시 도포



(g) 강봉 긴장



(h) 완성부재

〈그림 3〉 실험부재 제작과정

으로 가력부에서 긴장작업을 실시하여 실험부재를 완성하였다. 도포하는 에폭시의 경우 현장 여건을 감안하여 부착 강도를 인정하지 않는 가정을 사용하는 것이 바람직하고 조립식 교각의 내구성 확보차원에서 고려되어야 한다.

2.2 측정 내용

교각에서의 위험단면은 일반적으로 1.0D~1.5D까지이므로 기초-교각 접합부로부터 600mm이내의 횡방향 철근과 강봉 및 강관에 변형률 게이지를 부착하였다. 부재 제작 시 강봉의 변형률 값을 이용하여 초기 도입 프리스트레스 크기를 측정하였다. 하중 재하점의 수평변위와 수평하중은 가력기에 설치된 변위계와 로드셀에 의해 취득하였다. 가력부

및 교각 중앙부와 하중 재하시 예상치 못한 기초부위의 수평변위나 들림을 변위계를 이용하여 측정하였다. 또한 교각-교각 부재의 경우에는 이음부에 균열게이지를 설치하였다. 측정내용을 그림 4에 나타내었다.

2.3 실험 방법

조립식 교각의 내진성능을 평가하기 위하여 준정적(Quasi-Static) 실험을 수행하였다. 준정적 실험은 구조물의 내진성능평가를 위해 서로 다르게 설계된 구조물의 하중-이력, 비탄성 에너지 소산능력과 파괴상태를 비교, 평가하기에 비교적 경제적이고 유용한 실험 기법으로 알려져 있다. 교각 횡방향 하중은 최대변위 ±250mm인 1,000kN 가력기를 이용

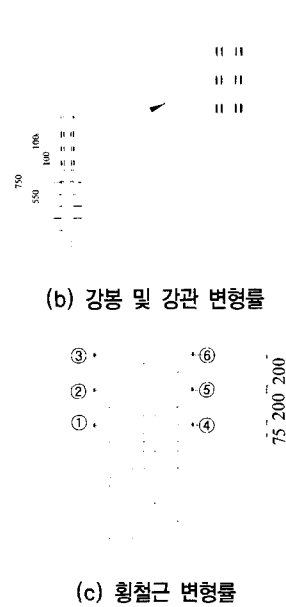
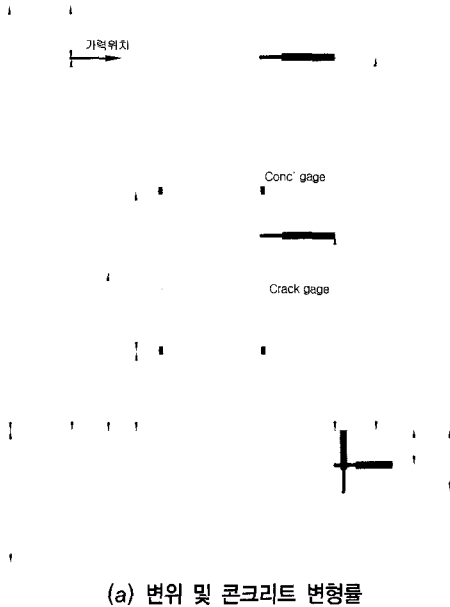
하여 변위제어로 재하하였다. 변위제어는 그림 5에 나타냈듯이 기동유효길이에 대한 비율(Drift Ratio)로써 각 단계별로 2회씩 반복 재하하여 동일 하중 진폭에 대한 교각의 거동특성의 차이를 살펴보았다. Drift Ratio는 기동의 유효길이에 대한 가력된 변위의 퍼센트(%)로, 기초상단에서 가력지점 높이인 2.1m의 $\pm 0.25\%$, $\pm 0.5\%$, $\pm 1.0\%$, $\pm 1.5\%$, $\pm 2.0\%$, $\pm 3.0\%$, $\pm 4.0\%$... 단계로 점점 증가되는 변위이력을 파괴 시까지 도입하였다. 재하초기에는 0.25%부터 실험체의 급작스런 파괴방지를 위하여 0.5%씩 증가시켰으며 2% 이후로는 1%씩 증가시켜 재하하였다. 그림 6에 실험장면을 나타내었다.

3. 실험결과

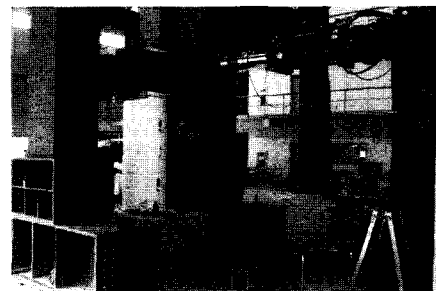
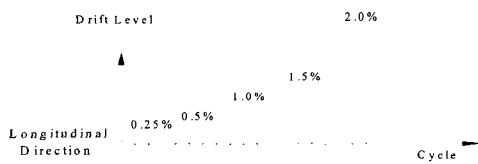
3.1 하중-변위 이력곡선

하중-변위 이력곡선은 횡방향 하중 및 가력지점의 변위에 의해 표시되는데 실험부재의 연성을 평가하는 기준이 되는 자료이며, 강도와 에너지 소산능력을 측정하는 중요한 분석 자료이다.

조립식 교각의 거동에 영향을 미치는 요인중에 주요한 것이 프리스트레스의 크기이기 때문에 각 부재마다 2개씩의 강봉에 변형률을 도입시기부터 실험시기까지 측정하여 유효 프리스트레스의 크기를 산정하였다. 표 1의 설계값과 차이는 피할 수 없기 때문에 실험결과 분석을 위해서 표 2에



〈그림 4〉 측정내용(unit: mm)



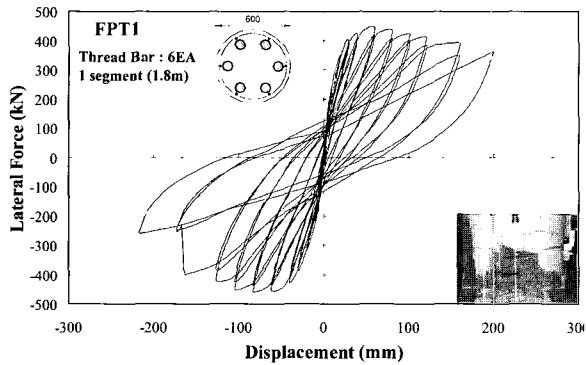
〈표 2〉 실험결과

부재명	프리스트레스	최대하중 (kN) / 변위 (mm)			
		하중	변위	하중	변위
PPJ6-1	2650 kN	-441	-61	447	60
PPJ6-2	2660 kN	-458	-82	442	80
PPJ8-1	2055 kN	-463	-61	451	60
PPJ8-2	2137 kN	-361	-61	420	61
PPJ8-3	1987 kN	-375	-105	364	61
FPT1	2710 kN	-456	-83	444	60
FPT2	2234 kN	-433	-82	427	81

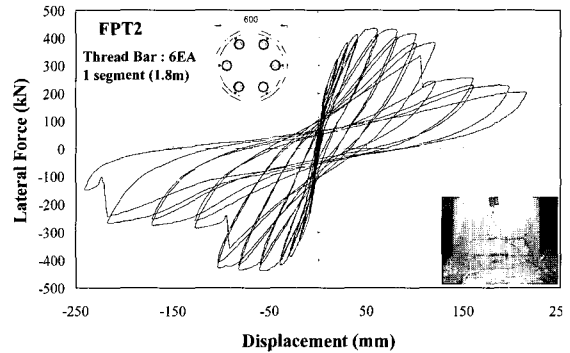
실험시기의 변형률 측정값을 기준으로 프리스트레스의 크기를 산정하였다. 표 2에서 프리스트레스의 크기에 따른 휨강도의 변화가 반영되었음을 알 수 있다. 그러나, PPJ8 부재의 경우 프리스트레스 수준에 따른 최대강도의 값의 경향이 일정하지 않은데 이는 측정된 프리스트레스의 크기로 인한 것으로 판단한다. PPJ8-2 부재는 2개의 강봉 변형률 게이지 중의 하나가 소실되어 하나의 값으로 환산한 값으로 다른 부재에서의 강봉에서 측정된 프리스트레스 크기의 차이를 고려하면 이 보다 작은 값이 도입되었을 것으로 추정된다.

그림 7에 각 실험부재의 이력곡선을 나타내었다. 축방향으로 도입된 프리스트레스로 인해 균열이 일부 소성힌지 구간에서 발생한 상태에서는 하중제거시 변형이 복원되는 형

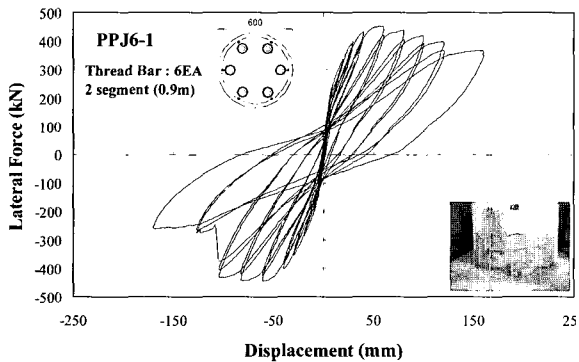
상을 볼 수 있다. 이는 작은 규모의 지진하중에 대해서는 프리스트레스를 도입한 교각의 복원능력이 상당히 유용할 수 있음을 보여준다. 그러나 횡변위의 크기가 증가하면서 소성힌지 구간의 손상이 심부 콘크리트로 진전되는 단계에서는 변형이 회복되지 않아 프리스트레스를 도입하더라도 횡구속 철근이 내진성능 확보에 필수적인 요소임을 보여주었다. 그림 7(b)에서 일부 하중이 급격히 떨어지는 모습을 보이다가 다시 회복되는 양상을 가진 부재의 경우 강봉 커플러 혹은 강관 연결부에서의 변위의 영향으로 추측되는데 전체적인 내진성능이나 극한강도에는 큰 영향을 미치지 않고 있다. 파괴 양상은 모든 부재가 휨 파괴를 보였고 이음부의 수에 상관없이 소성힌지 구간의 손상으로 나타났다. 교각과 교각



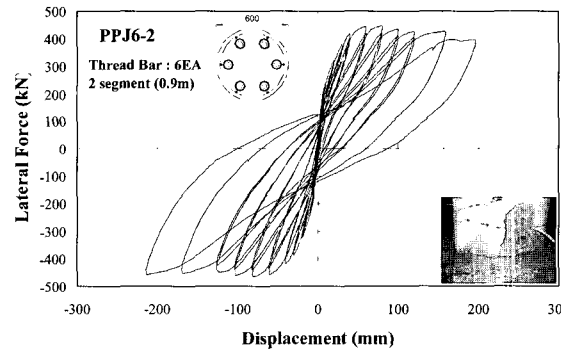
(a) 기초-교각부재(FPT1)



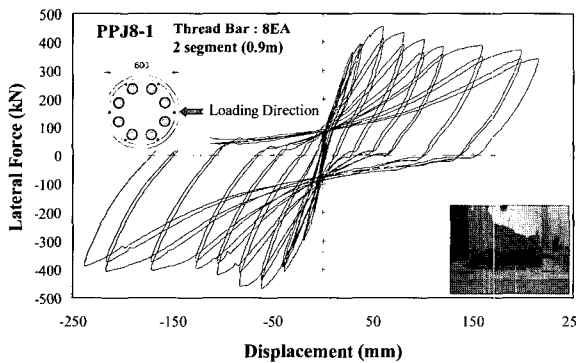
(b) 기초-교각부재(FPT2)



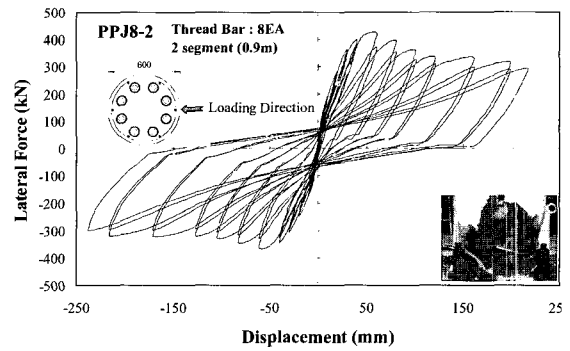
(c) 교각-교각부재(PPJ6-1)



(d) 교각-교각부재(PPJ6-2)

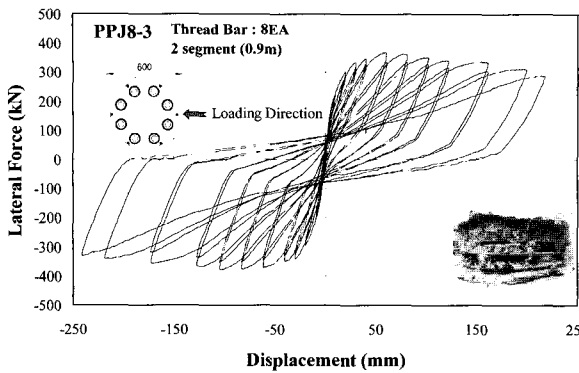


(e) 교각-교각부재(PPJ8-1)



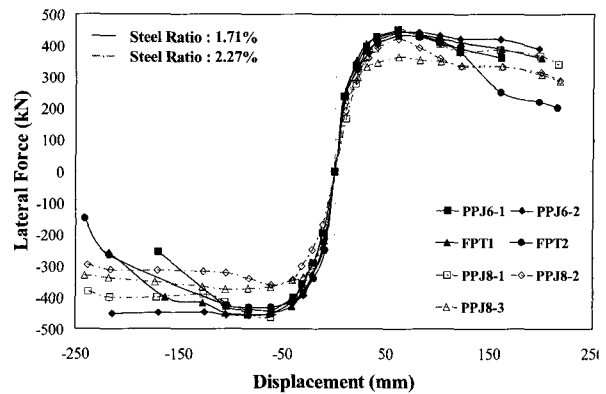
(f) 교각-교각부재(PPJ8-2)

〈그림 7〉 하중-변위 이력곡선 (계속)

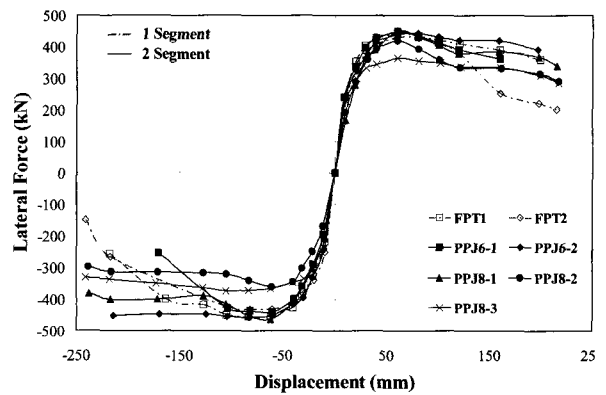


(g) 교각-교각부재(PPJ8-3)

〈그림 7〉 하중-변위 이력곡선



(a) 강재비



(b) 이음부 수

〈그림 8〉 하중-변위 포락곡선

이음부를 갖는 부재에서 이음부의 심각한 손상은 발생하지 않았기 때문에 실제 이음부 설계가 교각과 기초 이음부에 대해서 이루어져야 함을 알 수 있다.

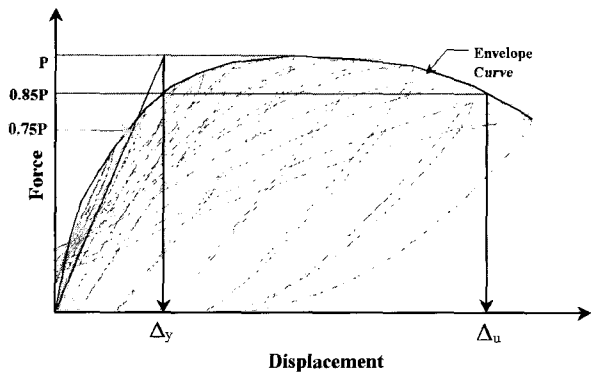
3.2 하중-변위 포락곡선

강재비와 이음부 수에 따른 포락곡선(envelope curve)을 그림 8에 나타내었다. 동일 강재비를 갖는 PPJ6-1, PPJ6-2에서 거동의 차이를 보이는 것은 PPJ6-1의 경우 소성한지 구간의 횡철근 간격이 PPJ6-2에 비해서 2배 넓게 설계되었기 때문에 유사한 휨강도를 보이지만 강도 발현 이후의 연성이 떨어지는 모습을 보였다. 또한, PPJ6-2 부재는 힌지 구간의 심부 콘크리트 구속효과와 감소로 인해 매입된 강관의 국부 좌굴이 관찰되었다. 따라서 프리스트레스를 도입하는 조립식 교각에서 연성 확보를 위한 내진 상세는 기존의 현장타설 RC 교각에서 요구하는 횡철근비를 만족하도록 설계하는 것이 바람직하다.

강재비의 증가가 프리캐스트 교각의 정적 성능 향상으로 직접 연관되지 않는 경향을 보여주었는데 이는 8개의 강봉을 사용한 교각 부재에서 실제 도입한 프리스트레스의 크기가 작기 때문에 축력 수준의 차이로 인한 것으로 판단되고 실제 설계시에 소요되는 강재비를 현재의 축방향 철근비를 초과해서 배치할 필요는 없을 것으로 판단된다. 이음부의 수는 손상의 주된 위치가 소성한지 구간이기 때문에 상대 비교는 큰 의미가 없는 결과를 보여주었다.

3.3 변위연성도 평가

구조형식, 교각길이, 교각의 구속조건에 따른 구조물의 소성변형 능력을 나타내는 변위연성도는 항복변위에 대한 극한변위의 비 ($\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$)로 정의된다. 변위연성도



〈그림 9〉 항복 및 극한변위 정의

의 경우, 하중-변위의 관계에서 항복점이 뚜렷하지 않기 때문에 항복변위를 결정하기 위한 여러 연구자들의 다양한 정의가 있었는데 본 연구에서는 그림 9에 나타난 바와 같이 하중-변위 곡선상에서 최대 횡력 V_{max} 를 지나는 수평선과 원점에서 V_{max} 의 75%에 해당하는 횡력을 지나는 직선과의 교점을 항복변위로 결정하고, 극한변위는 하중-변위 곡선상에서 극한점 이후 하강 곡선상에서 $0.85 V_{max}$ 때의 변위로 정의하였다.⁽¹¹⁾

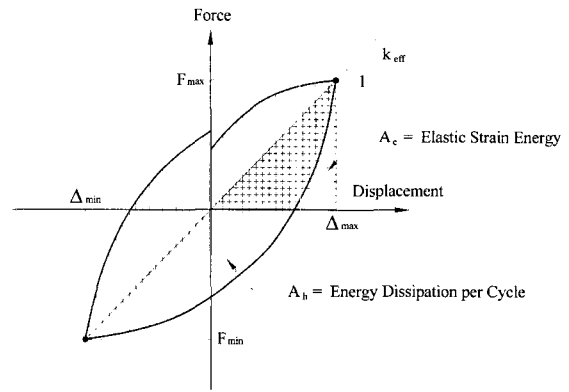
〈표 3〉 변위연성도 결과

부재명	하중 (kN)	항복변위 (mm)	하중 (kN)	극한변위 (mm)	변위 연성도
PPJ6-1	379.27	26.82	380.57	134.42	5.01
PPJ6-2	397.82	30.91	389.04	214.20	6.93
PPJ8-1	402.75	38.76	393.81	223.95	5.78
PPJ8-2	314.60	34.20	306.78	225.61	6.60
PPJ8-3	316.77	25.46	381.51	241.20	9.47
FPT1	376.55	24.61	377.10	176.71	7.18
FPT2	358.45	24.50	367.66	144.85	5.91

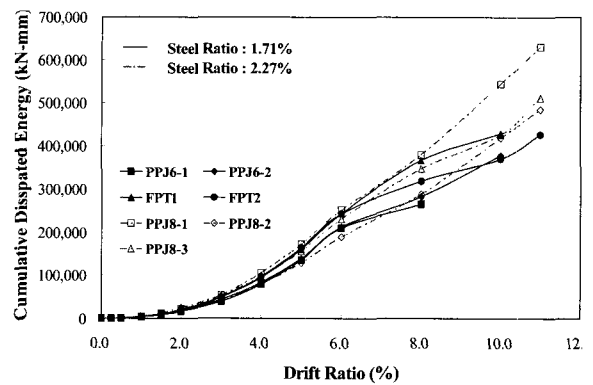
표 3에 변위연성도 결과를 나타내었고 하중은 항복변위와 극한 변위에서의 값을 각각 나타낸 것이다. 모든 부재가 요구연성도 5를 초과하는 모습을 보였다. 긴장재의 양이 연성도에 미치는 영향이 뚜렷하지는 않지만 PPJ8 부재들의 연성도가 대체적으로 높게 나타났다. 이음부의 수는 연성도에 미치는 영향이 뚜렷하지 않았다. 이는 이음부가 두 개 존재하는 부재의 경우 첫 번째 이음부의 위치가 심부구간을 지나서 존재하도록 배려했기 때문으로 판단된다. 횡철근을 내진설계 기준의 절반 수준으로 배치한 PPJ6-1 부재를 제외하고는 모두 양호한 변위 연성도를 보여주고 있기 때문에 내진 성능을 확보하기 위한 횡철근비는 현재의 현장타설 콘크리트 교각의 기준에 준하는 것이 바람직하다.

3.4 에너지소산능력 평가

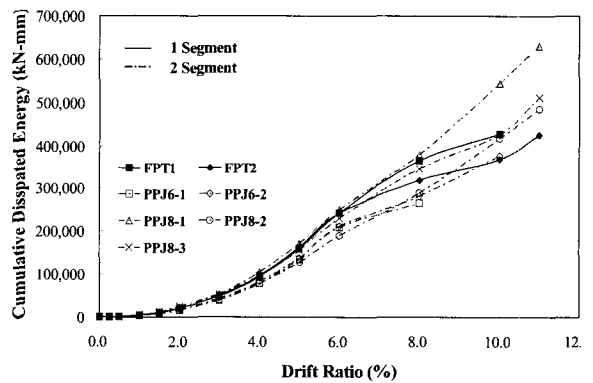
교각의 내진성능을 평가하기 위해 부재가 파괴될 때까지 흡수 또는 소산할 수 있는 능력은 중요한 요소 중의 하나이다. 구조물 또는 어떤 부재의 총 에너지량에 있어서 지진 응답해석에 의한 변위이력으로부터 실제로 흡수 및 소산되는 에너지를 계산하고 총에너지량과 비교하여 구조물의 안전성 여부를 검토할 수 있다. 따라서, 에너지 소산능력을 분석하기 위하여 누적에너지 흡수능력(Cumulative energy absorption capacity)을 분석하였으며, 그림 10과 같은 하중 변위 이력 곡선의 내부면적으로 정의하였다.⁽¹²⁾ 강재비와 이음부수에 대한 누적에너지 소산능력을 분석하여 그림 11에 나타내었다. 결과를 살펴보면 강재비가 33% 증가함에 따라 에너지 소산능력이 약 20%정도 증가하는 것을 관찰할 수 있고 기초-교각 부재보다 이음부의 수가 많은 교각-교각 부재의 경우에서 20%정도 에너지 소산능력이 뛰어남을 정량적으로 평가할 수 있다. 이는 횡철근에 대해 부재의 손상부위가 많아짐으로써 에너지 소산을 많이 하기 때문이다. 특히, PPJ8-1 부재의 경우에는 Drift Ratio 8% 이후부터 급격한 에너지 소산을 보이며 다른 부재들과 큰 차이를 보이고 있다.



〈그림 10〉 이력거동에 의한 에너지 소산



(a) 강재비



(b) 이음부 수

〈그림 11〉 누적소산에너지 곡선

4. 결론

준정적 실험으로부터 구한 프리캐스트 교각의 정적성능은 사용한 강봉의 강재비에 따라 설계된 값을 잘 반영하고 있고 탄성구간을 벗어나는 횡철근 작용 초기에도 프리스트레스 효과로 인해서 변형의 회복이 이루어지고 있음을 확인하였다. 설계를 위한 검증 항목에서 중요한 내진성능의 경우에 강재비가 낮은 부재(RC교각과 동일 강재비의 1/2 수준)도 요구연성도를 만족함을 보였고 강재비가 높아지면서 연성도와 강도가 모두 증가함을 검증하였다. 연성도는 횡철

근의 효과가 크기 때문에 기존 현장타설 RC 교각에 준해서 설계하는 것이 타당함을 확인하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 축방향으로 도입된 프리스트레스로 인해 균열이 일부 소성힌지 구간에서 발생한 상태에서는 하중 제거시 변형이 복원되는 형상을 볼 수 있다. 이는 작은 규모의 지진하중에 대해서는 프리스트레스를 도입한 교각의 복원 능력이 상당히 유용할 수 있음을 보여주었다.
- (2) 교각과 교각 이음부를 갖는 부재에서 이음부의 위치가 소성힌지 구간에 없다면 이음부의 심각한 손상은 발생하지 않았기 때문에 실제 이음부 설계가 교각과 기초 이음부에 대해서 이루어져야 함을 알 수 있다.
- (3) 프리스트레스를 도입하는 조립식 교각에서 연성 확보를 위한 내진 상세는 비록 실험에서 내진설계의 1/2에 해당하는 경우에도 요구연성도는 만족하지만 안전측으로 고려할 때 기존의 현장타설 RC 교각에서 요구하는 횡철근비를 만족하도록 설계하는 것이 바람직하다.
- (4) 에너지 소산능력의 경우에는 강재비가 33% 증가함에 따라 에너지 소산능력이 약 20%정도 증가함을 보였고 이음부의 수가 많은 교각-교각 부재의 경우에서 20%정도 에너지 소산능력이 뛰어남을 볼 수 있다.

향후, 도심지 교각 뿐 아니라 급속시공이 요구되는 다양한 여건에서 개발된 조립식 하부구조 시스템이 적용되어 시공 기간 단축 및 민원 감소 등의 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 교량의 시공에서 중요한 하부구조에 대한 요소기술을 확보함으로써 기술경쟁력에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 포스코건설 기술연구소의 지원 및 2005년도 중앙대학교 박사후연수과정(Post-Doc) 지원사업에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 심창수, “국내외 교량의 급속시공 관련 동향분석”, 대한토목학회지, 제53권, 12호, 2005, pp. 39-46.
2. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/prefab/>
3. S.L. Billington and J.K. Yoon, “Cyclic Response of Unbonded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-Reinforced Concrete”, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, July/August, 2004, pp. 353-363.
4. Yu-Chen Ou, Methée Chiewanichakorn, Il-Sang Ahn, Amjad J. Aref, Stuart S. Chen, Andre Filiatrault, George C. Lee, “Cyclic Performance of Precast Concrete Segmental Bridge Columns”, TRB Annual Meeting CD-ROM, 2006.
5. 森 拓也, “プレキャストセグメント橋脚の耐震性”, 콘크리트工学論文, Vol. 38, No. 5, 2000, pp. 44-47.
6. Minehiro Nishiyama, Fumio Watanabe, “Seismic performance of Precast Column-Foundation Connection Assembled by Post-tensioning”, *ECI Conference on Advanced Materials for Construction of Bridges, Buildings and Other Structures III*, The Berkeley Electronic Press, 2005. Article 5.
7. 김현호, 심창수, 정철현, 김철환, 안동근, “조립식 교각의 프리스트레스 설계”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제18권 2호, 2006, pp. 225-228.
8. 도로교설계기준, 한국도로교통협회, 2005.
9. Eurocode 4, *Design of composite steel and concrete structures Part 1.1 General rules and rules for buildings*, ENV 1994-2, CEN, 1994.
10. ACI, *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02 and commentary (ACI 318R-02))*, American Concrete Institute ACI, 2002.
11. E.F. Gad, A.M. Chandler, C.F. Duffield and G.L. Hutchinson, “Earthquake ductility and overstrength in residential structures,” *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 8, No. 4, 1999, pp. 361-382.
12. Prestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John & Sone, Inc., 1996.