

조립식 교각의 프리스트레스 설계

Design of Prestress for prefabricated bridge piers

김현호^{*}

심창수^{**}

정철현^{***}

김철환^{****}

안동근^{*****}

Kim, Hyun-Ho Shim, Chang-Su Chung, Chul-Hun Kim, Cheol-Hwan An, Dong-Geun

ABSTRACT

Fast construction of bridge structures is a new trend of bridge design. Accelerated bridge construction includes the construction of superstructures and substructures. In order to reduce the construction time for substructures, precast prestressed bridge piers are increasingly applied in other countries. One of the main concern in the design of precast piers is the determination of the axial prestress forces. The behavior of the piers should be investigated under service loadings and ultimate conditions. In this paper, the magnitude of prestress is calculated to control the stress at the joint of precast piers. Considering long-term behavior of prestressed piers, P-M diagrams for precast piers are obtained to verify the ultimate behavior of the piers. Based on these studies, precast piers are applied to the light-railway bridge piers.

1. 서론

교량의 하부구조는 고정하중과 차량활하중 등의 수직방향 하중을 지지할 뿐만 아니라 차량 제동하중, 풍하중, 지진하중, 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 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.

* 정회원, 중앙대학교 건설환경연구소 전임연구원

** 정회원, 중앙대학교 토목공학과 조교수

*** 정회원, 단국대학교 토목공학과 조교수

**** 정회원, 포스코건설 기술연구소 차장

***** 정회원, 포스코건설 기술연구소 부장

이 논문에서는 그림 1에 나타낸 바와 같은 개념을 가진 조립식 교각을 제안하였다. 각 세그먼트의 일체화를 위해서는 강봉을 사용한 프리스트레스를 도입하였고 이음부에서의 전단 저항을 보강하기 위하여 강관을 이용하였다. 프리캐스트 교각 설계를 위한 적절한 설계 기준을 검토하고 이를 이용하여 경전철 교량의 교각 적용을 시도하여 그 결과를 정리하였다.

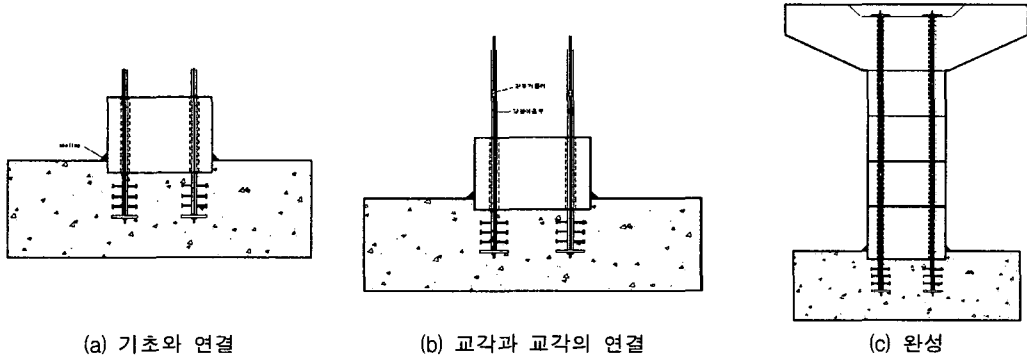


그림 1 조립식 교각의 개념도

2. 조립식 교각의 프리스트레스 설계 기준 검토

조립식 교각의 설계를 위해서는 사용하중하에서의 설계와 극한상태 설계로 구분하여야 한다. 사용하중하에서는 응력검토가 요구된다. 교각에 작용하는 횡하중 하중조합하에서 인장과 압축에 대해서 각각 허용응력이 요구되는데 축방향 철근이 연속되지 않는 경우에는 에폭시를 이음부에 도포하더라도 인장을 허용할 수 없다. 만일 축방향 철근이 부착되어 연속으로 존재한다면 현재 콘크리트 구조설계기준에서 제시하고 있는 허용인장강도를 사용할 수 있다. 압축에 대해서도 동일하게 허용응력 검토를 사용하중 조합에 대해서 실시한다. 극한한계상태에서 주된 관점은 2가지로 대별되는데 극한하중조합에 따른 P-M 상관도 검토와 지진하중하에서의 연성도 확보 검증이 요구된다. 도입되는 축방향 프리스트레스로 인해서 축력의 수준이 다소 높아지고 축방향으로 연속적으로 배치된 긴장재는 단면의 강도 계산에서 반드시 고려되어야 한다. 이때 탄성손실과 같은 초기 손실과 장기손실에 따라 프리스트레스에 의해 도입되는 축력의 수준을 미리 산정하여야 한다.

내진 설계에서 요구되는 연성의 확보를 위한 별도의 설계기준이 명확하지 않기 때문에 횡방향 철근의 경우에는 현재의 RC 교각의 내진설계에 준해서 배치하는 것이 바람직하다. 다만, 축방향 철근의 경우에는 커플러를 이용한 연결을 하지 않는 경우에는 단절되기 때문에 단면의 형상을 유지하기 위한 최소량을 배근하고 연속으로 배치되는 긴장재의 배치를 소성힌지 구간의 심부 콘크리트에 적절한 구속력을 줄 수 있도록 고려해야 한다. 지나치게 큰 소수의 강봉을 이용한 프리스트레스는 시공성은 좋아이지만 연성저동에는 좋지 않은 영향을 미칠 수 있어 이에 대한 세심한 검토가 요구된다.

교각과 기초의 연결부와 교각과 코핑부의 연결부는 적절한 강도를 갖는 정착 상세가 필요하다. 기초 연결부의 경우에는 긴장재의 정착단이 기초에 매립되는 것이 바람직하고 인발에 대한 충분한 강도를 가지도록 정착단 상세 및 매입 깊이를 산정해야 한다. 교각과 코핑부의 연결은 철근 매입을 통한 정착으로 확보할 수도 있고 긴장재의 정착부를 코핑부에 배치하여 교각과 일괄적으로 프리스트레스를 도입하도록 설계할 수 있다. 이는 시공성과 코핑부의 크기에 따라 결정될 수 있다.

3. 경전철 교량의 교각 적용 예

조립식 교각 구조에 대한 조사 및 분석을 통해서 도심지 급속시공에 적합한 시스템을 만들기 위해서는 목표 구조물이 명확할수록 연구의 효율성을 높일 수 있다. 따라서, 기존의 경전철 사업에서 설계된 하부구조를 바탕으로 조립식 교각 구조물의 적용성을 분석하고 필요한 추가 설계항목을 도출하고자 하였다. 현장 시공성 및 경제성을 고려한 조립식 교각 시스템을 도출할 수 있고 이에 적합한 연결부 상세, 재료선택, 프리스트레스 방법, 세그먼트 설계 등에 소요되는 기술적 항목이 도출될 수 있을 것이다. 설계 검토에 적용된 교량은 내진 1등급인 2경간 연속 합성형교이다. 교각의 재료 특성과 단면의 제원을 표 1에 나타내었다.

표 1 교각의 제원과 재료 특성

	RC 교각	조립식 교각	
콘크리트 설계기준강도	24MPa	35MPa	
항복강도	400MPa (철근)	834MPa (강봉)	
교각 직경	2400mm		
설계 단면력	$P_u = 10,105 \text{ kN}$ 고정하중+유수압+지진하중 (하중계수 : 1.0)		
	$M_u = 33,377 \text{ kN} \cdot \text{m}$		

조립식 교각은 RC 교각의 철근비와 동일한 강재비 1.84% ($A_s = A_p = 840,000 \text{ mm}^2$)를 기준으로 강봉을 배치하였으며 기초부와 연결되는 첫 번째 세그먼트의 높이는 소성힌지 구간까지인 2400mm로 설계하였다. 도입되는 유효프리스트레스는 손실을 고려하여 강봉의 항복강도의 70% 수준까지 고려하였다. 프리스트레스에 의해 추가로 도입되는 축력 ($P_{pt} = 48,555 \text{ kN}$)을 고려하여 교각이음부의 응력을 설계 지진 시와 응답수정계수 적용 시에 대하여 검토하여 표 2에 정리하였다.

표 2 조립식 교각 이음부의 응력

	설계지진 시	응답수정계수 적용 시
축력에 의한 응력	$\frac{P}{A} = \frac{P_d + P_{pt}}{A} = -12.97 \text{ MPa}$	
이음부에 작용하는 모멘트	$M = 187,370 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$M = 62,457 \text{ kN} \cdot \text{m}$
이음부에 발생하는 응력	$\frac{M}{I} y - \frac{P}{A} = 0.83 \text{ MPa}$	$\frac{M}{I} y - \frac{P}{A} = -8.37 \text{ MPa}$

또한, RC 교각과 조립식 교각의 P-M 상관도를 그림 2에 나타내었다. 적절한 프리스트레스의 설계는 사용하중하에서의 응력제어와 극한한계상태에서의 강도 검토에 의해서 이루어져야 한다. 긴장재의 양을 결정하는데 있어서 기존 RC 교각과 동일한 단면적으로 갖도록 하는 것은 비경제적일 수 있는 것으로 나타나서 동일한 단면적 기준과 항복강도와 긴장재 단면적으로 곱한 값이 기존의 RC 교각의 철

근 단면적에 항복강도를 곱한 값과 같도록 결정하는 것의 사이에서 결정되어야 한다. 여기서, 고려해야 하는 것은 연성의 확보가 가능하도록 하는 상세이다. 주철근과 띠철근이 함께 힌지구간의 심부 콘크리트를 구속하고 있다. 조립식 교각에서는 주철근이 단절되기 때문에 최소한의 주철근만 배근하고 이를 긴장재가 부담하도록 할 때 긴장재를 너무 큰 직경을 사용하거나 기존의 철근보다 너무 작은 수를 사용할 때는 구속력이 줄어들 수 있고 이는 연성의 감소로 이어질 수 있다. 적절한 상세의 가이드라인이 주어지면 이에 대한 내진성능 검증은 실험을 통해서 이루어져야 한다.

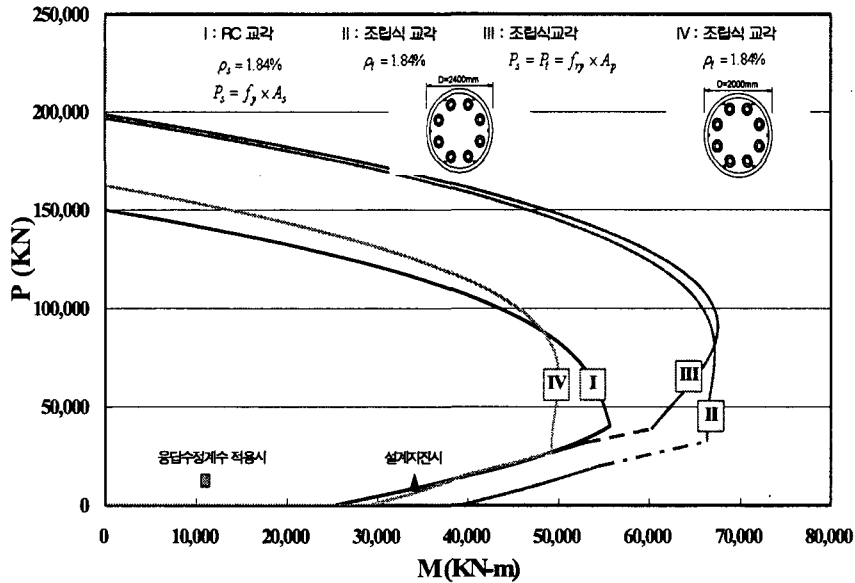


그림 2 P-M 상관도

4. 결론

이 논문에서는 사용하중하에서의 이음부 응력제어를 위한 프리스트레스의 크기 결정, 상부구조의 사하중에 의한 긴장력 감소 및 장거동 등에 따른 도입 프리스트레스의 감소, 최종 응력상태에서 극한한계상태에서의 P-M상관도 분석 및 연성 파괴 유도 여부 등에 대한 변수연구를 실시하였다. 변수 연구를 통해서 사용성과 강도 측면을 만족하도록 하는 프리스트레스 설계를 실제 경전철 교량의 교각에 대해서 수행하였다. 축방향 프리스트레스를 위한 긴장재의 양이 기존의 RC 교각에서 사용되는 철근 단면적과 동일한 수준인 경우에는 내하력이 지나치게 크게 발휘되어 비경제적일 수 있기 때문에 연성의 확보가 담보되는 수준까지 감소시킬 필요가 있다.

참고문헌

1. 심창수 (2005), "국내외 교량의 급속시공 관련 동향분석 (Technology Survey of the Fast Bridge Construction)", 대한토목학회지, 제53권, 12월, pp. 163~170.
2. 정인근, 심창수, 정영수, 민진 (2005), "SRC합성기둥의 P-M 상관도 분석을 위한 실험 (Experiments for the Evaluation of P-M Interaction Curve of SRC Composite Columns)", 대한토목학회 논문집, 제25권 제3A호, 05, pp. 555-563.
3. 森拓也(2000) 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, pp.44~47.