



프리캐스트 모듈러 피어캡의 구조성능 평가

김동욱¹⁾ · 심창수^{2)*}

¹⁾중앙대학교 토목공학과 ²⁾중앙대학교 사회기반 시스템 공학부

Evaluation of Structural Performance of Precast Modular Pier Cap

Dong Wook Kim¹⁾ and Chang Su Shim^{2)*}

¹⁾Department of Civil Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

²⁾School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Studies, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

ABSTRACT Prefabrication technologies are making bridge construction safer and less disruptive to the environment and traveling public, making bridge designs more constructible and, improving the quality and durability by shifting site work to a more controllable environment. Modular bridge substructures with concrete-filled steel tube (CFT) piers and composite pier caps were suggested to realize accelerated bridge construction. The precast segmental pier cap consists of a composite pier table and precast prestressed segments on the table. The pier table has embedded steel section to mitigate stress concentration at the connection by small tubes. Each bridge pier has four or six CFT columns which connect to the pier cap. Shear strength of the pier cap was obtained by extending vertical reinforcing bars from the table to the precast segment. Transverse prestressing was introduced to control tensile stresses by service loadings. Structural performance of the proposed modular system was evaluated by static tests. Design requirements of the composite pier cap were satisfied by continuous reinforcing bars and prestressing tendons. Standardized modular substructures can be effectively utilized for the fast replacement or construction of bridges.

Keywords : CFT Pier, composite pier cap, precast, transverse prestressing, shear strength

1. 서 론

최근, 모듈러 기술은 교량 건설의 신속성, 환경 친화적, 시공 기간의 단축 등에 따른 관심이 증대하고 있다. 모듈러 교량 기술은 다양한 현장 조건을 반영 할 수 있는 표준 모듈의 조합으로 구조적 안전성, 기능성, 요구수명 등을 확보하는 영구 교량을 건설하는 것으로 기존 교량들의 개선 및 확장 개념이 아닌 기술적 사업구조적인 차원에서 뚜렷이 구분되는 차세대 교량 기술이다. 프리캐스트 조립식 피어캡의 시공을 저해하는 주요 요인으로는 부재 자체의 과도한 무게와 복잡한 배근상세, 연결부에서의 응력집중현상 등을 꼽을 수 있다. 조립식 피어캡은 한 개의 블록으로 제작할 경우 피어캡의 부피와 중량이 너무 크게 되어 운반 및 시공적인 측면에서 많은 문제점을 야기하게 된다. 이러한 피어캡의 시공 및 운반 측면에서의 문제점을 해결하기 위해 세그먼트를 나누어 분할 제작함으로써 효과적인 운반 및 시공

이 가능하지만 이를 위해서는 구조적인 측면에서의 성능에 대한 검증이 이루어져야 함은 물론이고 블록과 블록 사이의 접합 부분에 대한 역학적 특성에 대한 영향을 고려해야 한다. 따라서 접합부가 피어캡의 취약부가 되므로 피어캡의 일체 타설 시와 동등한 기능을 수행할 수 있게 접합부 상에 대한 개발이 필요하다. 국내에서는 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁵⁾

이 연구에서 개발 중인 조립식 피어캡은 수평 방향으로 분할 된 보조 세그먼트들을 피어테이블 위에 거치하여 세그먼트 간에 긴장력을 도입함으로써 피어캡을 일체화시켜 외부 하중에 의한 일체 거동이 가능할 수 있도록 설계하여 일체 타설된 피어캡과 동등한 성능을 발휘할 수 있게 하였으며, 피어테이블에는 철골-철근 콘크리트구조를 적용하여 단면 성능의 향상으로 휨 내력의 증진과 강성 증진에 의한 지진 등의 진동에 대한 저항성 및 수평강성 증대 등의 효과로 인한 외력에 대하여 효율적으로 저항할 수 있게 설계되었다.

마향욱 등의 선행 연구에서는 콘크리트 충전강관을 이용한 모듈러 교각의 휨 거동을 평가하였다. 콘크리트 충전강관(CFT, Concrete Filled Tubes)은 강관이 충전되는 콘크리트의 거푸집 역할을 함과 동시에 구속조건을 부여하여 내

*Corresponding author E-mail : csshim@cau.ac.kr

Received June 9, 2014, Revised October 15, 2014,

Accepted October 20, 2014

©2015 by Korea Concrete Institute

부 콘크리트의 강도를 증진하는 효과를 가져올 수 있고 강관의 국부좌굴을 충전 콘크리트가 지연시켜주는 효과가 있다. 특히, 원형 CFT 단면이 사각형에 비해서 더 나은 구조적 성능을 보이는데 이는 콘크리트에 대한 구속효과가 더 크고 두 재료사이의 부착 및 합성 작용을 높여줄 뿐 아니라 국부좌굴에 대한 위험성을 줄여주기 때문이다. CFT단면은 압축에 강할 뿐 아니라 휨 내력도 뛰어나기 때문에 브레이싱이 있는 형태의 교각구조로 활용될 수 있고 일반 철근콘크리트 교각에 가벼운 중량의 구조물로 실현가능하다.⁶⁾

김동욱 등의 연구에서는 SRC (Steel Reinforced Concrete) 구조를 도입한 2주식 프리캐스트 모듈러 피어캡의 구조성을 평가하였다. 선행 연구에서는 프리스트레싱의 도입량을 변수로 하여 피어캡의 구조성을 평가하였으며, 피어캡의 수직철근에 따른 피어테이블과 프리캐스트 세그먼트의 상대변위가 발생하지 않았으며, 이에 따른 수직철근의 유효성을 밝히고 설계 개선점을 도출하였다.⁷⁻⁸⁾

이재훈 등의 연구에서는 T형 교각에 대하여 피어캡의 최적설계와 급속시공 방안을 밝히고 연단거리 축소 등을 통하여 콘크리트와 철근 물량을 최대 50%까지 절감하는 방안을 밝혔다.⁹⁾

이 논문에서는 기존 거더교를 대상으로 최근 국내에서 연구가 활발히 진행중인 프리스트레싱 강선을 이용한 프리캐스트 조립식 세그먼트 피어캡의 최적화 설계 방안에 대한 배근상세 개선과 현재 과다 설계 되고 있는 기존의 피어캡 설계시 깊은 보 또는 브라켓 코벨 검토의 개념으로 설계해 오던 관행 설계에서 벗어난 SRC를 이용한 피어테이블의 설계, 피어캡의 연단거리 축소를 통한 물량 감소 등을 고려하여 4주식 CFT기둥을 갖는 피어캡 단면의 실험을 통하여 연구에서 도출한 모듈러 피어캡의 설계 개념의 유효성을 평가하였다.

2. CFT 교각을 위한 조립식 피어캡의 설계 검토

부재 설계는 최적화 단면의 부재를 통해서 가설시의 단면에 따른 휨, 전단 및 균열에 대한 검토를 수행하였다. 도입 긴장력은 이음부에서의 인장을 허용하지 않는 개념에 근거하여 결정하였고 전단 검토를 통해 수직 전단철근은 쉬스관을 사전 배치하여 연속적으로 정착하는 것으로 설계하였다. 휨 철근의 일부는 매입 강재로 대체되었다. 합성단면 교각 테이블을 사용함으로써 좁은 영역에 집중되는 응력의 완화를 위해서 강관의 연결을 다중으로 실시하는 연결부재를 사용하였다. 피어테이블과 하부의 연결은 응력 집중을 완화시키기 위해 피어테이블에 매입하였으며 하부 구조는 기존에 조립식 개념의 프리캐스트 교각 사례는 다수 있지만 모듈화 개념 즉, 선 제작 후 설계를 하는 사례는 현장 콘크리트 충전의 어려움, 시공성, 경제성 등의 이유로 도입되지 않았다.

실험부재에 도입된 프리스트레싱은 사용하중 하에서 인장응력을 허용하지 않는 완전 프리스트레싱(full-prstressing)

개념에 의해 설계되었다. 부분 프리스트레싱(partial prestressing) 개념은 균열의 조기 발생, 과대하중에 의한 처짐의 과대, 설계하중에 주인장응력의 과대, 동일 강재량에 비해 극한휨강도의 감소 등의 단점이 있기 때문에 완전 프리스트레싱 개념에 의해 설계하였다. 그러나, 실제로 풀 프리스트레싱과 파설 프리스트레싱을 분명하게 구분하기는 어렵다. 왜냐하면, 이것은 설계에 사용한 하중에 의한 구분이지, 실제로 설계하중보다 큰 하중이 작용될 때는 인장응력을 받게 되기 때문이다. 파설 프리스트레싱 보는 연성을 나타내므로 보의 파괴형태상 유리하고 충격에너지 흡수도 좋다. 그러나 가장 큰 단점은 균열의 발생이며 이 균열은 휨 강성 저하, PC 강재부식 등의 나쁜 영향을 초래할 수 있기 때문이다.

모듈러 교각은 여러 개의 단위 모듈을 현장 상황에 맞게 연결하는 구조로서, 많은 이음부가 발생하게 된다. CFT기둥과 피어캡의 이음부에서는 SRC구조를 적용하여 휨 및 전단 저항 성능을 보완하였고 거더의 받침이 위치하게 되는 프리캐스트 세그먼트는 제작장과 교량 설치 현장의 운반 및 가설장비 등을 고려하여 세그먼트를 3개로 분할하였다. 각 세그먼트와 세그먼트의 연결부는 에폭시 처리를 하여 이음부 처리를 하였고, 피어캡과 피어테이블의 경계면에서 발생할 수 있는 수평 전단력에 저항하기 위하여 SRC피어테이블과 프리캐스트 세그먼트를 연결하는 수직 전단 철근을 배치하였다. 모듈러 피어캡의 설계 요소들을 Fig. 1에 정리하였다.

모듈러 CFT교각은 교량공사 중 총 50% 정도의 공사기간을 차지하는 RC교각의 공사기간을 효율적으로 줄일 수 있다. 이 연구에서 개발중인 다주식 충전 강관 교각은 기존 RC교각에 비해 경제성이 우수하고 공장에서 단위 부재에 대한 효과적인 콘크리트 충전으로 구조성능이 우수할 뿐만 아니라 모듈간 직렬 및 병렬연결로 현장 적용성이 우수하고 모듈화 작업 효율성의 증대 및 현장에서의 간편한 시공으로 고품질 급속시공이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 현장타설 15 m 교각대비 공사기간을 2.5개월에서 0.7개월로

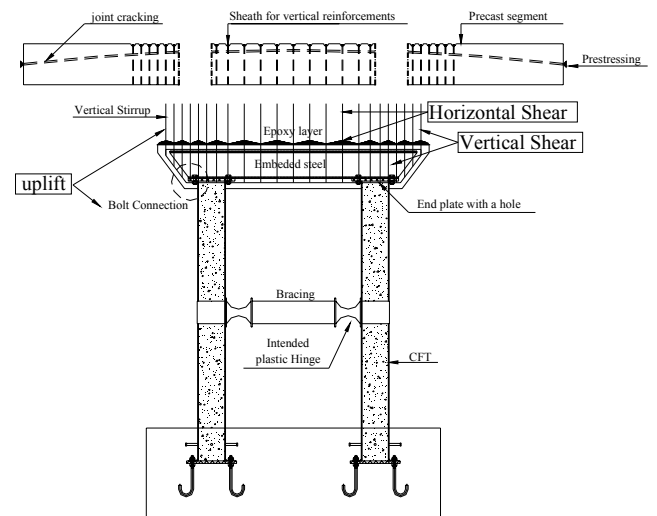


Fig. 1 Modular pier cap

줄일 수 있으며, 조립식 교각에 비해 1.0개월에서 0.7개월로 줄일 수 있는 장점이 있다. 이러한 다주식 충전강관 교각의 최대 장점은 동일단면에서 충전 강관 기둥간의 거리조정으로 인하여 일정한 단면에서 축력을 정수화한 후 휨에 대한 내력을 증가시킬 수 있는 것이다. 그러나 휨을 위하여 충전 강관 사이의 거리에 따른 다주식 강관 최대 폭은 하부 기초설계 및 부지 점유에 따른 문제점이 있으므로 일반적 단일 콘크리트 교각의 교각 직경인 3.5 m 이내를 목표로 제한하였으며 최대 교각 높이 30 m 인 경우에 최대 3.5 m 이내의 폭을 가지는 것으로 예비 타당성 조사를 통해 확인하였다.

강관 최대 직경은 강관과 콘크리트의 합성 효과를 위하여 강관직경/두께비를 제한하고 있다.¹⁰⁾ 단일 강관교각의 경우 축력과 휨 내력을 만족하기 위하여 직경 1500 mm 이

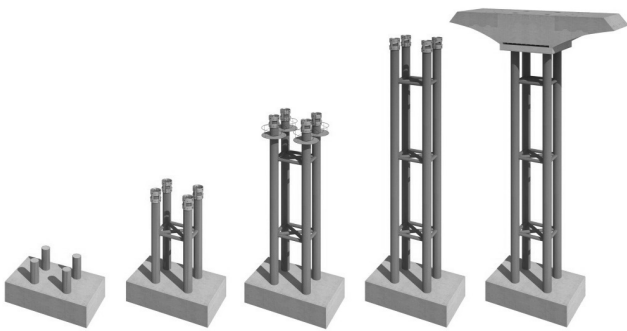


Fig. 2 Modular CFT bridge pier

상의 단면이 필요한 것으로 판단되며 이 경우 충전강관의 두께가 강관직경/두께비를 만족하기 위해서 30 mm 이상의 두께가 필요하였으며 이번 연구에서는 다주식 충전 강관 기둥의 개념을 도입함으로써 강관직경/두께비에 있어서 기존 구조용 강관의 공장생산 제품 중 가장 큰 508 mm, 두께 25 mm의 강관을 최대직경으로 사용하였다.

Fig. 2는 모듈러 CFT교각의 모듈 개념을 보여주는 그림으로, 기초-기둥 연결상세, 기둥부모듈, 기둥 연결상세, 피어캡 모듈과 완성계 형상을 보여주고 있다.

모듈러 피어캡은 피어테이블과 피어테이블 위에 거치되는 3개의 프리캐스트 세그먼트가 결합되는 4개의 모듈로 구성된다. Fig. 3(a)에 보이는 그림은 피어캡의 정면도로서 피어테이블 위에 거치되는 3개의 프리캐스트 부재 중에 가운데 세그먼트와 SRC 피어테이블을 감싸는 스테리프 형태의 수직 전단 철근을 결합하여 외부하중에 일체 거동을 확보할 수 있도록 하는 구조이다. Fig. 3(b), 3(c)는 피어캡의 단면도로서 2개의 SRC강재를 매입하여 CFT기둥과 볼트 결합을 통하여 연결함으로써 상부하중을 부담하는 역할을 유도하였다. Fig. 3(d)의 그림은 실험부재의 3D 조감도를 보여주며, 3개의 프리스트레스 강선과 SRC 피어테이블을 보여주고 있다. 프리캐스트 부재에서는 이음부가 외부하중에 가장 취약하며 균열은 이음부에서 가장 먼저 발생하게 된다. 이에 따라 구조성능 평가를 위한 유효단면을 균열 발생 전과 후로 나누어 생각할 필요가 있으며 이를 위하여 단면을 2가지로 구분하여 도시하였다.

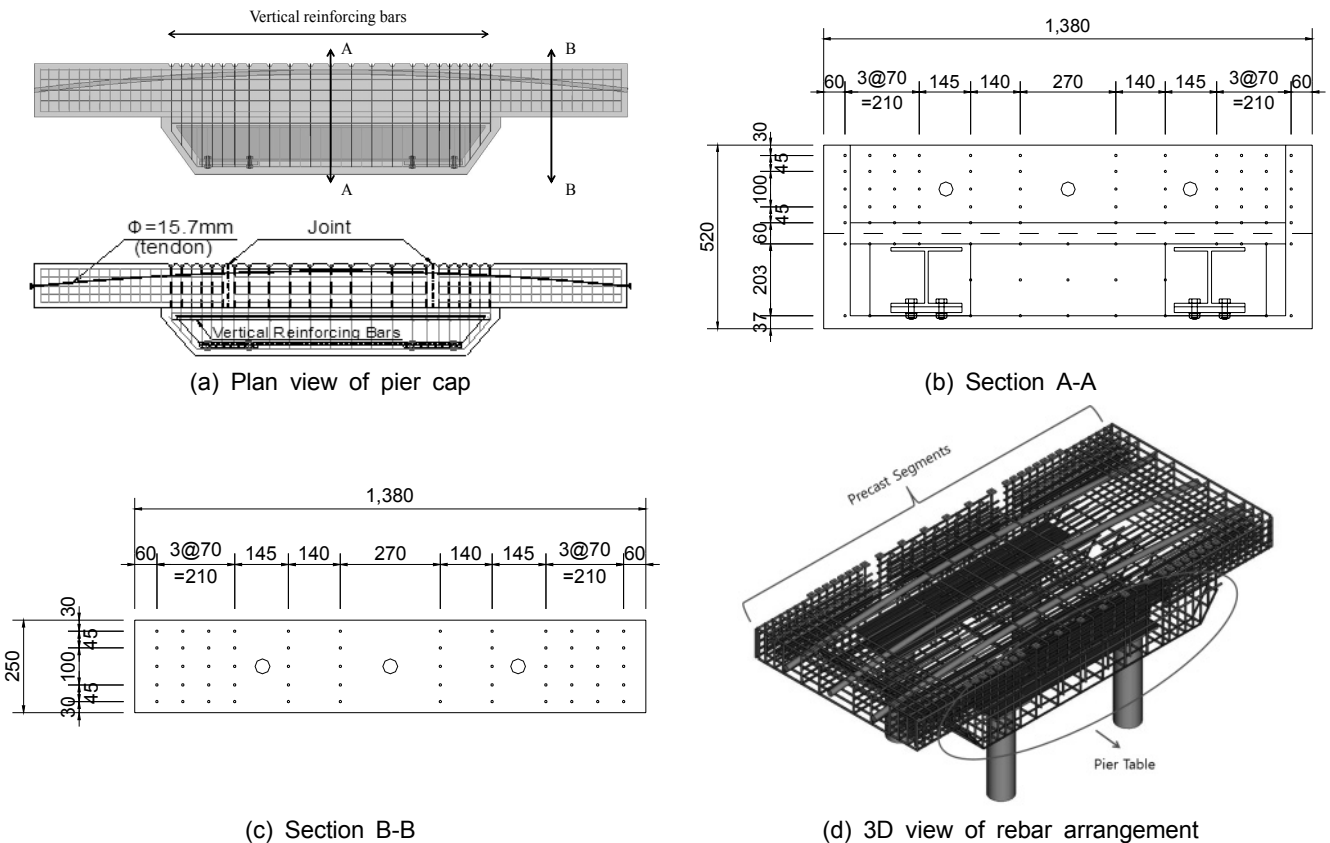


Fig. 3 Section of pier cap with composite and precast elements

3. 조립식 피어캡의 실험적 연구

3.1 실험부재

Fig. 4는 실험부재의 제작과정을 보여주고 있다. 상부 좌중과 콘크리트의 지압과괴를 방지하기 위한 모듈러 피어테이블에 매입되는 SRC강재를 제작하고 CFT기둥을 충전한다. 이후 피어테이블 위에 거치되는 프리캐스트 세그먼트의 철근을 조립한다. 프리캐스트 세그먼트는 피어테이블과의 결합을 위하여 콘크리트 타설 전에 세그먼트 결합을 위한 관통 구멍을 확보한 후에 콘크리트를 타설하였다. 모듈러 피어캡은 피어테이블과 3개의 프리캐스트 세그먼트로 구성되는 모듈러 구조로서 피어테이블과 프리캐스트 세그먼트를 각각 제작하여 일정기간의 양생기간을 거친 후에 각 세그먼트의 접합면에 에폭시를 도포한 후에 프리스트레스를 도입하는 형태로 제작되었다.

실험부재는 4주식 CFT (Concrete Filled Tube)기둥을 갖는 피어캡 1기를 제작하여 부모멘트부 가력 정적실험을 수

행하였다. 실험 부재는 단면의 연단거리 축소를 통한 최적화설계를 통해 교축방향 두께를 감소시킬 수 있었다. 또한 철근 상세의 간소화를 통해 시공성의 향상 및 강제 사용 물량의 절감 효과를 기대할 수 있다. SRC 프리캐스트 피어테이블은 H형강(H-700x600x13x20)을 보강하기 위해 횡방향으로 ㄷ자형 철근을 중방향과 횡방향으로 배근하였으며 상부 세그먼트와 피어테이블의 연결을 위해 조립되는 세그먼트 끝단에는 수직 방향의 쉬스관을 삽입하여 피어테이블과 세그먼트를 연결하는 수직철근을 위로 배근하여 최외측 세그먼트를 조립할 수 있게 하였다. 수직 철근을 배근한 후에 그라우팅을 통해 철근을 정착하였다. 이 후에 양 끝단에서 PS강선을 이용하여 긴장력을 도입하여 접합부의 응력집중에 대한 보강을 하였으며, 이는 부재가 항복한 후에도 하중에 대해 부재가 저항할 수 있는 효과를 기대할 수 있으며 부재의 연성확보에도 기여도가 큰 것으로 판단된다. 프리스트레스 도입시 손실량은 15%로 가정하여 설계하였다.

3.2 재료성질

Table 1은 실험부재의 재료 상세를 보여주고 있다. 실험 당일의 콘크리트 압축강도와 모르타의 압축강도는 각각 55 MPa, 37 MPa이었으며, CFT기둥과 피어캡 세그먼트의 콘크리트의 설계기준 강도는 40 MPa이었다. 기초부와 피어캡에는 직경 13 mm 철근을 사용하였다. PSC강선은 15.2 mm 7연선(SWPC7B, 138.7mm²)을 사용하였다.

3.3 측정내용 및 하중재하

실험부재는 2.9 m의 너비와 높이 1.5 m 그리고 1.38 m의 폭을 갖는 축소모형 피어캡으로 피어캡 상면에 2개의 이음부가 있으며 피어캡을 거꾸로 뒤집어서 셋팅을 한 후에 부모멘트부 가력을 통한 이음부의 구조성능 및 균열강도 등을 평가하였다.

Fig. 6은 실험부재의 게이지 부착 위치와 실험부재 셋업을 보여주고 있다. SRC피어테이블의 중앙부에 높이방향으로 3개의 게이지를 등간격으로 부착하였고, 프리캐스트 세그먼트 중앙부에 높이 방향으로 철근게이지와 콘크리트 게이지를 부착하여 부모멘트부 가력시험을 수행하였다.

부모멘트부 가력을 통한 균열강도 및 프리스트레스 도입량의 유효성, SRC구조의 적절성 등을 평가하기 위하여 정적실험을 수행하였다. 실험부재의 경계조건은 롤러-힌지의

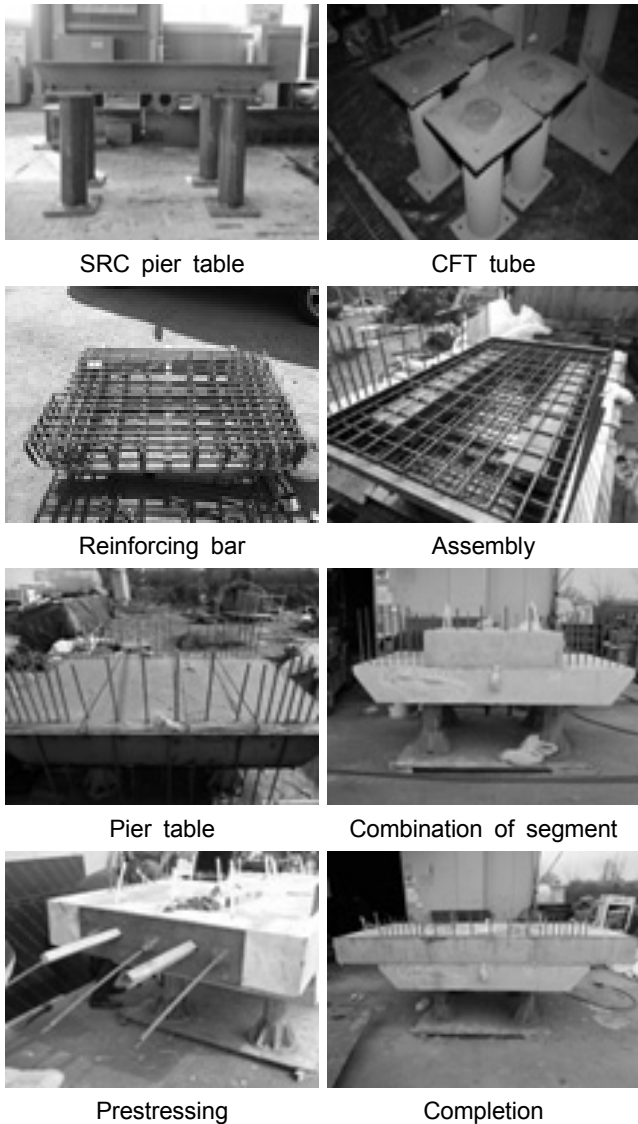
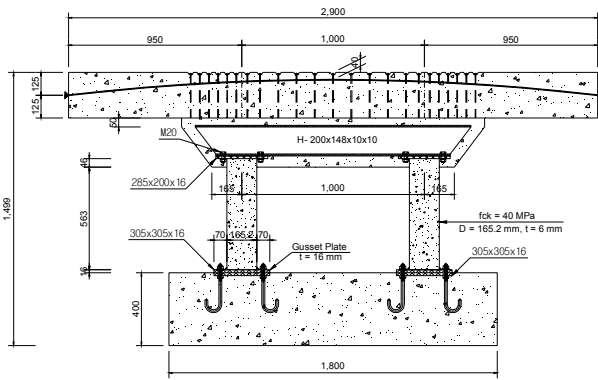


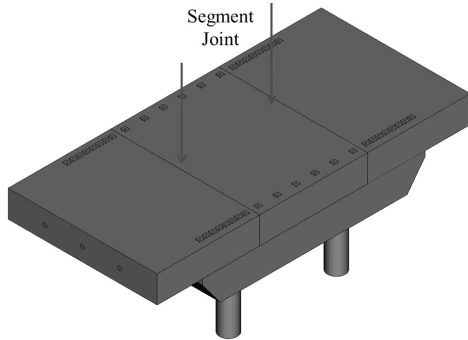
Fig. 4 Fabrication procedure

Table 1 Properties of test specimen

Compressive strength of concrete, f_{ck}	55 MPa (28days)
Compressive strength of mortar, f_{cm}	37 MPa
Yield strength of reinforcement bar, f_y	400 MPa
Yield strength of embedded steel, f_{pu}	400 MPa
PT tendons (SWPC7B 15.2 mm), f_{pu}	1860 MPa

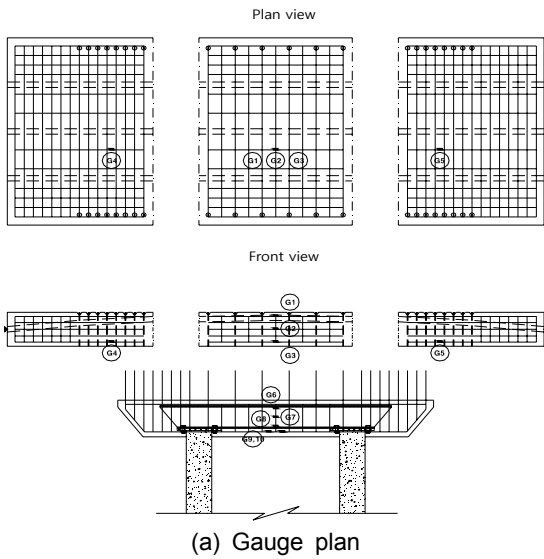


(a) Plan view

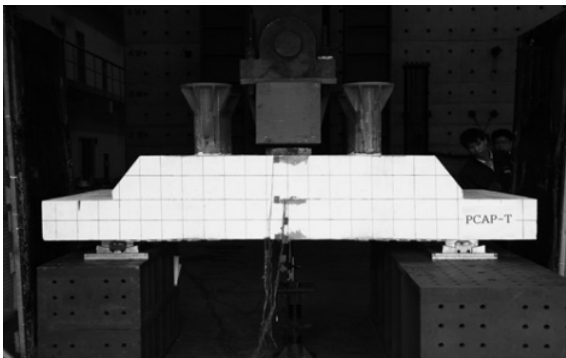


(b) 3D view

Fig. 5 Test specimen



(a) Gauge plan

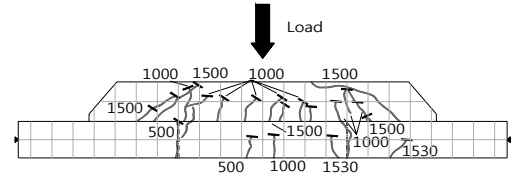


(b) Test setup

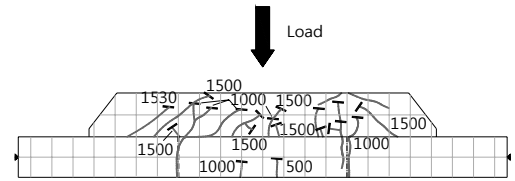
Fig. 6 Test setup and measurements

Table 2 Loading Patterns

Loading	Setup	Prestressing force
0~300 kN : Stabilization 10 kN/sec	Negative moment loading	80 kN / Tendon (3EA)
300~50~500 kN : 10 kN/sec		
500~1530 kN : 1 mm/10 sec		



(a) Front



(b) Back

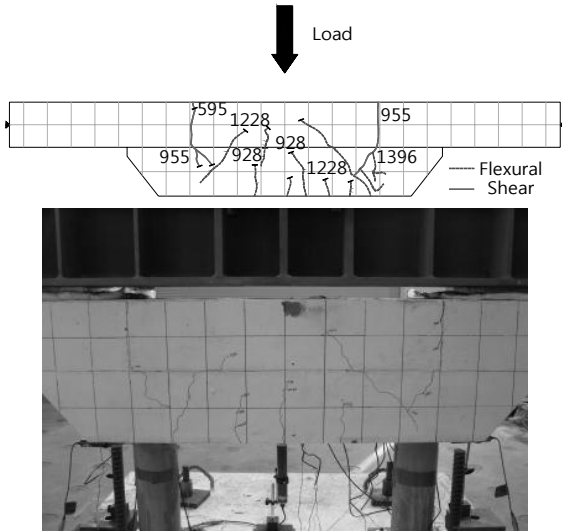
M_{cr} : 237 kN.m, P_{cr} : 412 kN

Fig. 7 Cracking for the central loading condition (4 CFT column specimen)

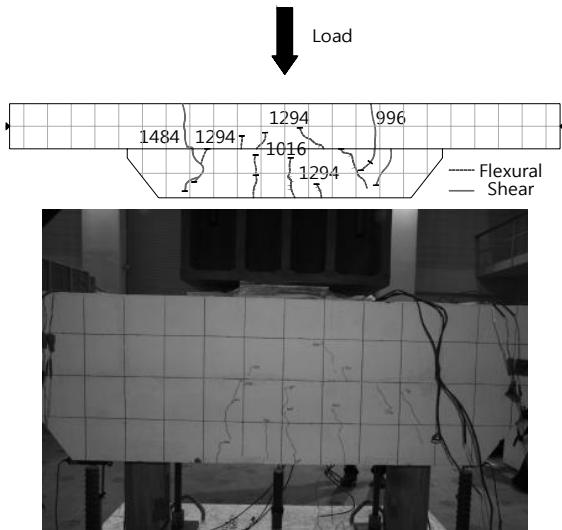
단순보로 지점을 설정하였으며, 부재 셋업시 부재면과 지점의 받침부 면이 맞닿지 않아 편심이 발생할 수 있는 상황을 고려하여 300 kN까지 가력한 후에 하중을 제거하였다. 이후에 균열 발생 전까지 하중제어를 통하여 10 kN/sec의 속도로 가력한 후에 균열이 발생한 후 1 mm/10 sec의 속도로 변위제어를 실시하였다.

3.4 실험결과

교량의 받침 위치가 세그먼트 연결부 바깥쪽에 위치한 경우, 횡방향 프리스트레스 텐션은 이음부 부분의 균열부분에서 발생하는 횡방향 인장응력에 저항하게 된다. 전체단면을 유효단면으로 가정하여 계산한 균열하중은 412 kN이었으며, 실험에 의한 육안관찰 균열하중은 500 kN이었다.



(a) PCAP1-1



(b) PCAP1-2

M_{cr} : 121 kN.m, P_{cr} : 360 kN

Fig. 8 Cracking for the central loading condition (2 CFT Column specimen, previous research)

Fig. 7, 8은 4주식 CFT기둥을 갖는 피어캡과 2주식 CFT기둥을 갖는 피어캡의 실험 수행 후의 균열 양상을 보여주고 있다. 4주식 CFT기둥을 갖는 피어캡 실험부재는 하중이 증가함에 따라 이음부 휨 균열이 발생한 후에 휨 인장균열이 발생하고 최종적으로 전단 균열이 발생하였다. 또한, 프리캐스트 세그먼트와 이음부 사이에서의 상대변위는 발생하지 않았다. 이로부터 프리캐스트 세그먼트와 피어테이블을 연결하는 수직철근의 수평전단 강도는 충분한 것으로 판단된다.

선행연구에서 진행된 2주식 CFT기둥을 갖는 피어캡의 정모멘트부 가력실험에서도 이음부의 균열이 발생한 후에 휨 균열이 발생하였으며, 정모멘트부 가력시점 후 부재의 상하면을 뒤집어서 4주식 CFT기둥 실험체와 같이 부모멘트부 가력실험을 수행했던 실험부재의 결과 하중이 증가함에 따라 프리캐스트 세그먼트와 피어테이블을 연결하는 수직철근 이음부의 뿔힘으로 외부하중에 저항하는 실질적인 유효단면이 바뀌는 것을 보였다.

이는 Fig. 11(a)와 같이 하중이 증가함에 따라 피어테이블이 압축을 받고 피어세그먼트가 인장을 받는 타이드 아치 작용으로 인해 스트럿-타이 모델이 형성되어 프리스트레스 텐션이 외부하중에 저항하는 것으로 판단된다. 이에 따른 이음부의 응력이 인장이 되는 순간의 하중의 산정이 필요하며, 이를 근거로 목표 프리스트레스 양의 산정이 가능하고 실험값에서 구한 균열하중과 비교하여 프리스트레스 도입크기의 타당성을 검증하였다.

Table 3 Sections for calculation of ultimate strength (4 CFT column specimen)

	Section A-A	Section B-B
Section		
Calculated value (kN)	1866	1315
Ultimate load (Test) (kN)	1533	1533

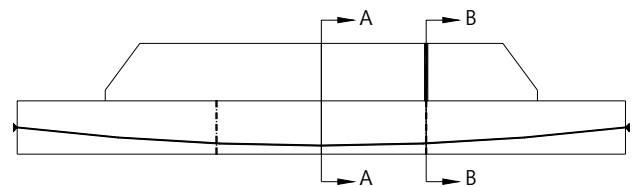


Fig. 9 Cross section for evaluation of strength

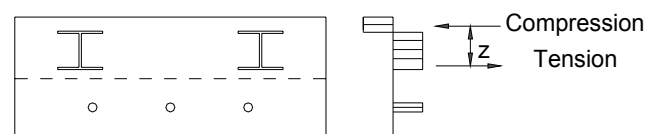


Fig. 10 Stress block of section B-B

사용하중 작용 하에서 인장응력이 일어나지 않도록 부재가 설계될 때 콘크리트는 완전 프리스트레싱(full-prestressing) 개념에 의해 응력 제어가 이루어진다. 그러므로 횡방향 프리스트레싱의 도입량은 사용하중에 의한 연결부 최상단의 인장응력을 고려하여 완전 프리스트레싱 개념으로 설계되어야 한다. 그러나 비록 완전 프리스트레싱이 설계하중 하에서 인장응력을 완전히 제거하여 균열의 발생을 막는다 하더라도 설계 하중보다 작은 하중이 작용하면 이것은 오히려 상향 처짐을 유발시켜 단순지지의 구조물의 경우에 상연에 많은 균열을 발생시키는 수가 있으므로 이 점을 유의하여 설계하여야 한다.

선행연구에서는 2주식 CFT기둥을 갖는 피어캡의 유효단면을 평가하였다. 2주식 CFT기둥을 갖는 피어캡 실험부재의 경우 부모멘트부 가력시험 결과 이음부에서 균열이 발생한 후에 프리캐스트 세그먼트와 피어테이블의 뿔힘 현상이 발생하여 4주식 CFT기둥을 갖는 피어캡 실험부재는 수직철근 끝단의 정착을 위하여 정착판을 설치하여 뿔힘을 방지하였다. 균열이 발생하고 극한 하중 상태에서 외부하중에 저항하는 요소는 프리스트레스 텐션과 합성단면이다. 실험부재의 파괴 양상으로 볼 때, 극한 상태에서 피어테이블과 피어세그먼트를 연결하는 철근의 뿔힘으로 인해 하중에 저항하는 유효단면은 SRC단면이었다.⁷⁻⁸⁾

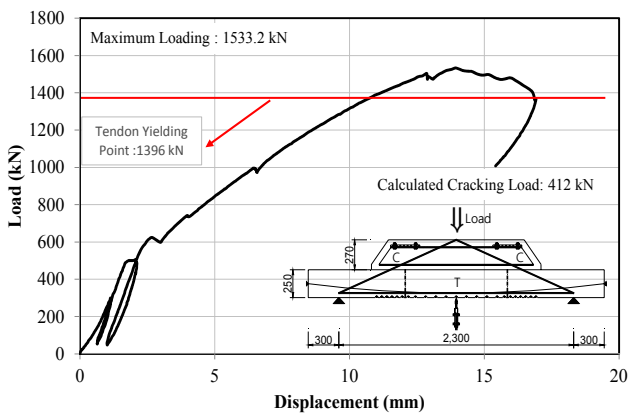
선행연구⁷⁻⁸⁾에서의 극한하중 상태에서의 수직철근의 뿔

힘을 방지하고 이음부에서의 균열이후 세그먼트의 분리현상을 방지하기 위하여 피어캡 상면에 플레이트를 설치하고 피어테이블과 프리캐스트 세그먼트를 연결하는 수직철근을 용접하여 상세를 개선하였다.

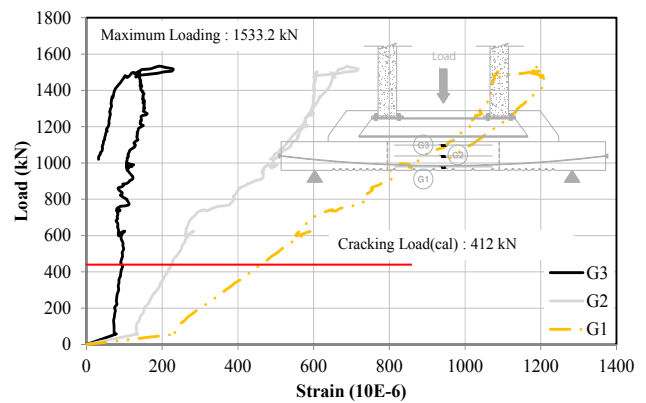
Table 3은 부재 전체단면을 유효단면으로 가정하고 Fig. 9의 부재 중앙 A-A단면을 기준으로 계산한 단면력과 SRC 피어테이블과 텐션을 유효단면으로 가정하고 계산한 결과를 보여주고 있다. Fig. 9의 A-A단면을 기준으로 계산한 강도는 1866 kN이고 프리캐스트 세그먼트 이음부와 맞닿은 피어테이블 단면을 유효단면으로 가정한 B-B단면의 강도는 1315 kN이었다.

Fig. 10은 응력분포도를 보여주는 것으로 균열 발생 이후 프리캐스트 세그먼트는 외부하중에 저항을 하지 않는다. 단지, SRC단면, 피어테이블의 인장철근 그리고 프리스트레스 텐션에 의해 저항하게 된다.

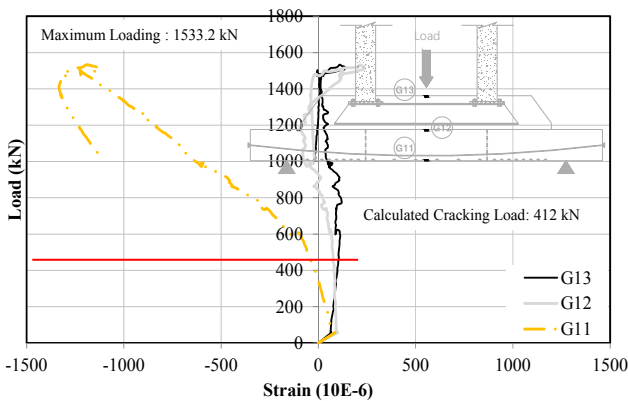
Fig. 11(a)는 하중의 증가에 따른 실험부재의 수직변위와 변형률 그래프를 보여주고 있다. 텐션의 항복하중을 산정하기 위하여 실험부재를 스트럿-타이 모델로 가정하고 극한하중 작용시의 텐션의 항복하중을 계산한 결과 1396 kN으로 극한하중 작용 시에도 외부하중에 저항하는 것을 알 수 있다. 또한, 균열이 부재 하단 중앙부에서 일정 간격으로 균등하게 퍼져 나가는 것으로 판단할 때 철근 및 텐션의 배근이 적절하며, 프리스트레스 텐션으로 인하여 텐션이 부착



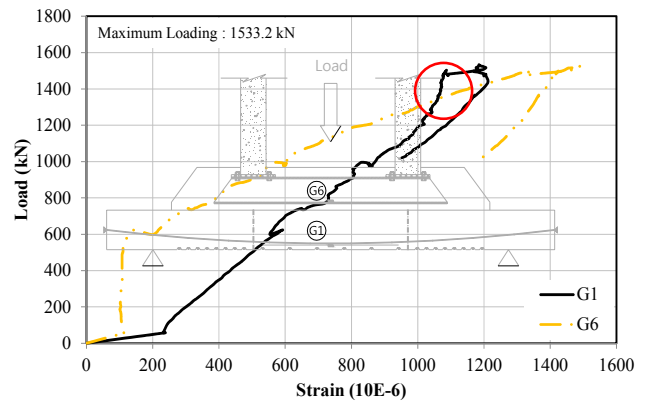
(a) Load-displacement curve



(c) Load-SRC strain curve



(b) Load-concrete strain curve



(d) Height-strain curve

Fig. 11 Test results curves

상태로 철근과 같은 역할을 함으로써 균열이 적절히 제어되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11(b)의 그림에서 하중이 증가함에 따라 하단부 콘크리트 변형률이 인장을 나타내다가 압축을 나타내는 것은 균열발생 이후 콘크리트 단면이 외부하중에 저항하지 못하며 내하력을 잃는 것으로 판단된다. 이는, Fig. 9(c)의 그림에서 이음부 부분의 육안균열 추정하중인 100 kN 하중 이후 철근과 SRC매입 강재의 변형률을 비교해 보면, 하중 저항면 최하단에 위치한 철근의 변형률이 가장 크게 나타나야 하지만 최하단 인장을 받는 철근보다 SRC매입 강재의 변형률이 크게 나타나는 것으로 판단할 때, 부재 이음부에서의 균열 발생 후 저항단면은 SRC피어테이블이 된다.

Fig. 11(d)의 그래프에서 보면 SRC단면과 철근에서의 변형률이 Fig. 7의 균열도에서 보이는 바와 같이 프리캐스트 세그먼트 이음부 균열 이후 철근의 항복변형률(1700 strain) 이전이지만, SRC단면의 변형률이 더 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 외부하중에 저항하는 부재요소는 이음부 균열 발생 후 SRC단면이 실질적인 저항단면이 되는 것을 의미한다.

4. 결 론

CFT교각을 갖는 다주식 모듈러 피어캡의 구조성능을 평가하였다. 조립식 피어캡의 부모멘트부 가력시험 결과 작용 하중은 세그먼트 연결부의 균열 발생 이후 저항단면이 SRC 매입 강재로 바뀌면서 단면의 강도평가 및 설계에 대한 적절한 방법을 수립해야 하며, 균열 발생 이후의 유효 단면은 SRC 단면으로 평가하는 것이 유효한 것으로 판단되며 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 전체 단면을 유효단면으로 산정한 단면의 강도는 1866 kN이었고, 균열발생 이후의 실질적인 저항단면인 SRC 피어테이블과 프리스트레스 텐던을 유효단면으로 가정한 단면의 극한강도는 1315 kN이었다. 실험에 의한 극한 강도는 1533 kN으로 이음부 균열발생 이후 변형률로 판단할 때 극한 상태에서의 저항단면은 SRC단면으로 저항하는 것으로 판단되며 실험에 의한 극한 강도가 약 1.16배 큰 것으로 평가되었다.
- 2) 프리스트레스 도입으로 인하여 프리스트레스 힘에 의하여 균열이 닫히는 효과 및 텐던이 철근과 같은 역할을 수행하였으며, 텐던의 항복시점 이후에도 연성 거동을 보여주었다. 프리스트레스 도입크기의 결정은 완전 프리스트레싱 개념에 의해 이음부의 응력이 인장이 되는 순간의 하중을 기준으로 산정하였으며, 이를 근거로 목표 프리스트레스 양을 산정하고 실험값에서 구한 균열하중과 비교하여 설계 개념의 타당성을 검증하였다. 완전 프리스트레싱 개념에 의해 계산한 균열하중은 412 kN이고, 실험에서 관찰된 육안 관찰 균열하중은 500 kN으로 실험에 의한 균열하중이 약 1.2배 크게 평가되었다.

- 3) 하중이 증가함에 따라 이음부에서 균열이 발생하였다. 프리캐스트 세그먼트와 피어테이블 사이 접합면의 성질을 고려하여 수평전단 강도를 평가한 결과 필요 철근량은 2031 mm²이고, 실험부재에 배근된 수직 철근량은 5574 mm²로써 충분한 수평전단강도를 확보하고 있다. 또한, 육안관찰 결과 프리캐스트 세그먼트와 피어테이블 사이의 이음부에서의 상대변위가 발생하지 않은 것으로 판단할 때 피어테이블과 프리캐스트 세그먼트를 연결하는 수평전단철근은 충분한 강도를 발휘하고 있음을 보였다.
- 4) CFT기둥의 사용은 좁은 면적에 높은 하중을 전달해야 하는 어려움이 있다. 상부사하중에 의한 콘크리트 피어캡의 지압 및 편칭 전단파괴에 대한 위험성을 방지하고자 설치한 SRC 피어테이블의 거동은 콘크리트의 지압이 발생하지 않은 것으로 판단할 때 매우 적절함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술 연구사업의 연구비지원(10기술혁신B01-직선교량의 공사기간 단축을 위한 표준모듈 활용 조립식교량 기술개발 연구단)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Shim, C. S., Kim, D. W., and Kong, D., "Structural Performance of Precast Segmental Composite Pier Cap", *Proceedings of 18th International Association for Bridge and Structural Engineering*, Seoul, Korea, 2012.09.19, pp. 611-612.
2. Shim, C. S., Chung, C. H., Kim, I. K., and Kim, Y. J., "Rapid Emergency Replacement of Fire-damaged Composite Bridges using Precast Decks", *Proceedings of IABMAS 2012*, 07.09, pp. 1367-1372.
3. Shim, C. S., Chung, C. H., and Kim, H. H., "Experimental evaluation of seismic performance of precast segmental bridge piers with a circular solid section", *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 12, 2008.12, pp. 3782-3792.
4. Kim, H. H., Shim, C. S., Chung, C. H., Kim, C. H., and An, D. G., "Design of Prestress for prefabricated bridge piers", *Proceeding of Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 2, 2006, pp. 225-228.
5. Kim, T. H., Park, S. J., and Kim, Y. J., "Precast Concrete Copings for Precast Segmental PSC Bridge Columns : I. Development and Verification of System", *Journal of Korea Society of Civil Engineering*, Vol. 30, No. 54, 2010, pp. 463-473.
6. Ma, H. W., Oh, H. C., Kim, D. W., Kong, D., and Shim, C. S., "Evaluation of Flexural Behavior of a Modular Pier with Circular CFT", *Journal of Korean Society of Steel Construction*,

- Vol. 24, No. 6, 2012, pp. 725-734.
7. Kim, D. W. and Shim, C. S., "Structural Performance of Precast Modular Pier Cap", *Proceeding of Korea Concrete Institute*, 2012, pp. 687-688.
 8. Kim, D. W. and Shim, C. S., "Design of Precast Segment Modular Pier Cap", *Proceeding of Korea Society of Civil Engineering*, 2011, pp. 719-722.
 9. Lee, J. H., Son, J. K., Yoo, D. H., and Shin, S. J., "Optimum Design and Accelerated Construction of Bridge Pier Cap", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 71-76.
 10. European Committee for Standardization, "Eurocode-4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings. 6.7 composite columns and composite compression members", EN 1994-1-1, 2004, 118 pp.
 11. AASHTO Standard Specification for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2003.
 12. AASHTO LRFD Bridge Design Specification. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2003.

요 약 사전제작 기술은 교량을 더 안전하고 주변과 친화적인 환경을 구축하며 작업 환경에 제한이 있을 경우에도 품질과 내구성을 개선하며 공사를 수행할 수 있다. 콘크리트 충전강관을 이용한 모듈러 하부구조 교각을 제안하였다. 프리캐스트 피어캡은 피어테이블과 프리스트레스를 도입한 프리캐스트 세그먼트로 구성되어 있다. 피어테이블은 매입형 강재를 사용하여 응력의 집중을 완화하였다. 피어캡과 교각은 4개 또는 6개의 CFT기둥으로 연결된다. 피어캡의 전단강도는 피어테이블에서 연장시킨 전단 스티럽에 의해 저항하게 된다. 횡방향 프리스트레스 힘은 사용하중에 의한 인장 응력을 제어하기 위하여 도입되었다. 이 논문에서는 모듈러 구조의 유효성을 정적실험을 통하여 평가하였다. 제안된 피어캡은 설계 요구사항들을 연속 철근과 프리스트레스에 의해 만족시켰다. 모듈러 구조의 표준화는 급속교체 및 교량의 급속시공에 효과적으로 사용될 수 있다.

핵심용어 : CFT 교각, 합성 피어캡, 프리캐스트, 횡방향 프리스트레싱, 전단강도