

콘크리트 충전 강관을 이용한 스페이스 트러스 거더교의 설계와 시공 사례

Design and Construction of Space Truss Girder Bridges Using Concrete-filled Steel Tube



이윤석*
YunSeok Lee



김인규**
In-Gyu Kim



김영진***
Young-Jin Kim



오현철*
Hyun-Chul Oh



마향욱*
Hyang-Wook Ma

1. 머리말

콘크리트 충전 강관(CFT: Concrete-Filled Steel tube)은 강관에 콘크리트를 채워 넣은 합성구조체이다. 강재는 인장 영역의 강도와 변형 성능이 우수하지만, 압축 영역에서 좌굴이 발생할 수 있다. 반면에 콘크리트는 압축 영역보다 인장 영역의 강도가 작고 취성을 가진다. 콘크리트 충전 강관은 이처럼 이질적인 강재와 콘크리트를 결합하여 단점은 보완하고 장점은 극대화한 구조적 성능이 뛰어난 부재이다. 교량 구조에서는 교각, 트러스교, 아치교 등 압축 부재에 적용하는 경우가 많다.

이런 콘크리트 충전 강관을 이용한 스페이스 트러스 교량은 외관이 수려하고, 투시성이 좋으며, 가볍고 경제성이 우수할 뿐 아니라 유지관리 효율도 뛰어나 현대 교량에서 중요시하는 미적 측면과 환경친화적 측면을 두루 만족시키는 특징이 있다.

2. 콘크리트 충전 강관의 거동 특성

콘크리트 충전 강관에서는 강관의 구속 효과에 의해 충전 콘크리트가 3축 응력상태에 놓이게 되므로, 축력에 대한 내하력이 중공 강관에서보다 크다. 그러나 일반적인 설계법(ACI 318-95, AISC-LRFD)은 강관의 콘크리트 구속 효과를 무시하므로, 콘크리트 충전 강관의 극한 강도를 과소 추정하는 경향을 보인다. 또한 좌굴 파괴에 저항하는 콘크리트의 영향으로 콘크리트 충전 강관은 후좌굴 거동 특성이 현저하다. 따라서 국부 좌굴에 대한 강관의 폭, 두께 등의 한계값을 정하면 초기 국부좌굴 발생을 허용하여 설계할 수도 있다.

이러한 좌굴이 강관에 미치는 영향은 세장비에 따라서 크게 달라진다. 예를 들어 세장비가 큰 부재는 작은 부재에 비해 좌굴에 의한 갑작스런 파괴가 가능하며, 후좌굴 거동을 해도 그 영향이

작을 수 있다. 또한 원형 강관은 등방성 좌굴을 일으키므로 각형 강관에 비해 내력과 변형 능력이 우수하여, 큰 지진저항능력, 고강도, 고연성, 높은 에너지 흡수능력을 가진다. 콘크리트 충전 강관에서는 콘크리트의 재료적 특성을 간과할 수 없는데, 이러한 특성은 유한요소해석으로 파악하기 곤란한 불확실성이 크기 때문에 많은 실험을 통한 데이터 축적이 필요하다.

콘크리트 충전 강관 부재의 거동 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 뛰어난 축하중, 휨하중 수행 능력
- (2) 높은 전단저항능력
- (3) 고연성, 높은 에너지흡수능력
- (4) 높은 좌굴수행능력에 의한 극한하중의 증가
- (5) 접합부에서 하중전달 능력 부족
- (6) 건조수축, 크리프의 영향이 적음

3. 콘크리트 충전 강관 스페이스 트러스 거더교의 시공 사례

3.1 프랑스 Antrenas교(Pont d'Antrenas)

1999년 개통된 프랑스 중부와 남부 사이의 A75 고속도로에는 다양한 교량 구조가 채용됐으며, Antrenas교도 그 가운데 하나이다.

애초에 Antrenas교는 해발 약 1,000 m 지대의 넓은 경관을 고려하여 중간 교각이 없는 단순한 콘크리트 아치교로 제안됐다. 그러나 이후 2면 강 트러스가 프리캐스트 바닥판을 지지해 삼각형 단면을 구성하고 그것을 콘크리트 충전 강관 아치로 지지하는 스페이스 트러스 거더교의 대안으로 변경됐다<사진 1>.

3.1.1 기본구조

가교 지점의 지질은 화강암이고, 길이 86 m의 양 사면에 아치 교대가 있다. 교량폭은 11 m이며, 활하중으로 110 ton 트럭이

* 정희원, (주)대우건설기술연구원 토목연구팀 전임연구원
iyunseok@dwconst.co.kr

** 정희원, (주)대우건설기술연구원 토목연구팀 책임연구원

*** 정희원, (주)대우건설기술연구원 토목연구팀 전문위원

지 예상됐다. 평면 선형은 직선이고 종단 구배는 1%이다. 인터체인지의 진입로도 건너야하므로 본선뿐만 아니라 진입로도 4.85m 높이의 건축 한계를 유지해야 한다. 더욱이 차량 충돌에 의한 충격에 견디도록 강관 부재의 일부를 콘크리트로 충전하였다. 아치 경간은 56m, 반경은 약 60m이며, 아치 리브는 지름 1.2m, 두께 32mm인 강관이다. 기초는 사면에 관입하지만 지반이 약한 쪽에는 말뚝도 같이 설치한다.

프리캐스트 바닥판에는 교축방향으로 연속하여 돌기가 있고, 이것이 강제 사재로 지지된다. 하중은 사재에서 아치 리브로 전달된다. 교축 방향으로 보면 그 단면이 사재를 두변으로 하는 삼각형을 구성한다. 사재는 지름 500mm, 두께 16mm인 강관이며, 미관상 이유로 아치 크라운은 도로 중심부에 일치시키고, 사재는 그 중심에서 대칭으로 분산 배치했다. 프리캐스트 바닥판은 교축 방향으로 8~12m 간격으로 사재가 지지한다. 바닥판을 지지하는 형강이 사재 교점을 통과하도록 설계되어 바닥판에 전달되는 단면력의 대부분은 교축 방향 축력이 된다. 접합부는 트러스의 격점이므로 압축력과 인장력으로 브레이싱되며, 휨 모멘트는 프리캐스트 바닥판으로 전달되지 않는다.

3.1.2 프리캐스트 바닥판

바닥판은 폭이 11m, 평균 두께가 3.5m(리브 부분에서는 9.5m)인 프리캐스트 바닥판이다. 교축 방향 설계에서는 설계 하중에서 휨 인장이 생기지 않도록 프리스트레스를 설정하였다. 바닥판에는 7조(한 단면당 14조)의 연속 케이블이 배치되었다. 이 가운데 4조는 필요 편심량을 확보하도록 부재가 두꺼운 돌기 부분으로 모이고, 사재의 지간에서 휘어 내리는 곡선 모양으로 배치됐다. 거더 단부에서는 응력 집중을 피하기 위해 분산, 정착된다.

교축 직각 방향으로도 프리스트레스가 도입되어 사재 축력의 수평 성분에 의한 인장에 저항한다. 바닥판의 횡방향 접합은 사재 지점부에는 1곳에 2개, 거더 단부에서는 7개가 배치되며, 표준부에서는 1.2~1.4m 간격이다.

교대의 받침은 연직력을 지지하면서 교축 직각 방향 구속도 함

께 지지한다. 거더 단부의 크로스빔은 카운터웨이트 역할도 함께 수행하며, 고무 받침 4개가 지지한다. 상세한 치수는 유지 관리를 고려하여 결정됐다. 단면 중앙으로 치우친 2개의 경사 받침은 교축 직각 방향 이동에 저항하고, 양 끝의 수평 받침은 바닥판의 비틀림에 저항한다.

3.1.3 스페이스 트러스 아치의 설계

아치의 자중을 지지하는 데는 곡선 형상이 가장 적합하지만 이 교량에서는 격점을 직선으로 잇는 다각형 아치를 채택했다. 아치 강관을 콘크리트로 충전하더라도 자중에 의한 축력이 전체 하중의 1/10에 지나지 않고, 중량의 대부분은 프리캐스트 바닥판이 차지하기 때문이다.

이 형상은 특히 바닥판에서 하중 전달이 큰 부분, 즉 사재가 예각을 이루는 아치 단부가 균형을 이룬다. 또한 지속 하중의 압축력에 의한 아치 리브의 수축 변형을 없애기 위해 아치 교대에서 25mm의 강제 변위를 주었다. 따라서 아치는 영구 변형에 대해 이상적으로 균형을 이루어 트러스에서 PC 바닥판으로는 작은 축력만이 전달된다.

다각형 형상은 컴퓨터 시뮬레이션으로 최적화됐으며, 아치 리브는 직선 부재 양끝의 K형 접합부에서 연결하여 연속화하도록 설계했다. 접합부의 상세에 대해서는 각 타입별로 유한요소 해석을 수행하여 Eurocode 3 규정 이상의 안전성을 확보하도록 했다.

모든 접합부의 중심에는 L형강을 설치하여 현장 용접부에 보강용 격벽 설치가 가능하다.

공장 용접으로 제작되는 경간 중앙 접합부에는 보강용 링이 설치됐다. 강제 아치는 3부분으로 나뉘어 공장 제작되었고, 현장에서는 비교적 단순한 맞대기 용접만 그곳에 실시했다.

콘크리트 충전은 양쪽 교대에서 두 번째 접합부까지 하여 강관을 보강하였다.

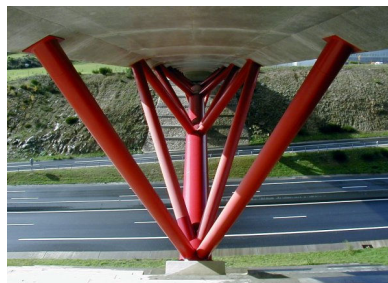
3.2 스위스 Lully 고가교(Lully Viaduct)

Lully 고가교는 스위스 고속도로 A1 노선 Yverdon-Morat 구간에 위치한다. 보강재를 사용하는 대신, 원형 강관으로 삼각형 스페이스 트러스 단면을 구성하는 설계로 경량화를 이루고 투시성을 확보하였다. 거더 높이-지간 길이 비(L/h)를 보면, 일반적인 박스형 교량이 20%인데 비해 Lully 고가교는 13%로 날렵하여 습지 산림으로 둘러싸인 주변 경관과 조화를 이룬다<사진 2>.

트러스 사재는 지름 267mm, 강관



(a) 교량 전경



(b) 삼각형 단면

사진 1. Pont d'Antrenas(프랑스)

두께 11~50 mm이다. 하현재는 최소 지름 508 mm, 강관 두께 25~50 mm이지만 지점부 부근에서 70 mm로 증가한다. 받침부에서는 보강재 없이 지름 559 mm, 길이 2,000 mm의 두꺼운 강관을 썼다.

접합부 설계에서는 격점부의 복잡한 응력 분포를 파악하여 hot spot 응력을 계산하는 것이 중요하다. 또한 완전 용입 용접을 위해서 강관의 기하학적 치수를 계산해야 하고, 매우 정밀한 절단과 단부 가공이 필요하다. 상현재 격점 형상은 K형으로 그다지 복잡하지 않다. 작용하는 힘의 대부분을 바닥판이 지지하므로 강관 치수는 스테드 뒤벨을 용접하기 위한 공간이 결정한다.

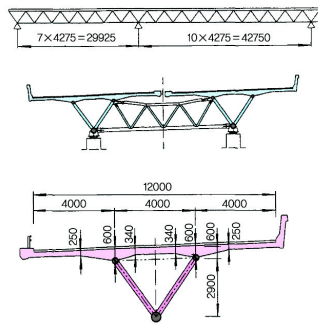
강관 입체 구조의 가공에서는 격점부 부근의 강관을 용접하고, 그 용접을 검사하는 방법이 중요하다. 따라서 도로교의 피로 조건은 그다지 엄격하지 않더라도 인장재 강관의 용접 품질을 검사할 필요가 있다. 용접부 검사는 초음파 탐상으로 수행하였고, 격점부의 검사 정도를 높이기 위해 뒤에서 용접 재료를 대는, 즉 루트 간격을 크게 하는 용접 방법을 채용했다.

교각부의 브레이싱 트러스는 작용하는 힘이 작으므로 가는 강관으로 제작했다. 현재의 지름은 219.1~323.9 mm, 사재의 지름은 168.3 mm이다. 트러스는 교량 캡버와 수평방향 종단 선형을 고려하여 복잡한 형상과 치수에 맞추어 각 구간의 길이를 조정할 수 있는 지그(스트롱 백)를 사용하여 제작했다. 사재는 용접 조건에 맞추어 구간 전체에서 위치와 캡을 조정하고, 손으로 용접한다. 그 후 크레인으로 트러스 거더를 들어 올려 현장 용접으로 일체화한다.

바닥판의 폭은 12.0~14.65 m이며, 중량을 최소화하기 위해 교축과 교축 직각 양방향으로 프리스트레스를 도입했다. 교축 방향으로 도입한 프리스트레스는 고정하중 상태에서 풀 프리스트레스가 되도록 결정했다. 시공 중에 트러스 강관 접합부의 피로 설계 데이터를 수집하기 위해 변형률 게이지를 부착하여 계측하였고, 프리스트레스 도입 바닥판의 거동 측정을 위해서는 광섬유를 콘크리트 바닥판 내부에 설치하였다.



(a) 교량 전경



(b) 교량 단면도

사진 2. Lully Viaduct(스위스)

Lully 고가교는 도로교로는 흔치 않게 삼각형 강관 트러스를 채용했다. 시공 중 큰 어려움은 없었으며, 강관 트러스 구조의 조립과 가설에 관한 중요 사례로 평가된다. 이 교량은 K형 접합부의 피로강도에 관한 실측, 우수한 경관 등으로 혁신적인 교량의 대표적인 예로 손꼽히고 있다.

3.3 일본 Shin Saikai Bridge

2006년 나가사키 현 사세보 시에 건설된 Shin Saikai Bridge는 경간 230 m인 중로 아치교이다<사진 3>. 상로 아치교인 기존 Saikai Bridge와 조화를 이루도록 설계됐다. 좌굴 안전성 확보를 위해 아치 리브를 3본의 콘크리트 충전 강관으로 구성한 것이 특징이다. 충전에 사용된 고유동 콘크리트의 품질과 거동을 확인하기 위해 실험을 수행했다. Shin Saikai Bridge는 2006년 일본 토목학회가 우수 교량 사업을 대상으로 수여하는 Tanaka Award를 공동 수상하기도 했다. 일본에서 시공된 콘크리트 충전 강관 합성아치교로는 Shin Saikai Bridge 외에도 2001년 완공된 나가노의 Yokezawa Bridge가 있다.

3.4 중국의 콘크리트 충전 강관 합성아치교

중국은 1990년대 초부터 현재까지 1,000개 이상의 콘크리트 충전 강관 교량을 시공한 것으로 알려져 있다.

3.4.1 시공 사례

2004년에 세계 최장 콘크리트 충전 강관 합성아치교인 경간 460 m의 쓰촨(四川)성 Wushan Changjiang River Bridge가 완공되었다. Wushan Changjiang River Bridge를 일반 강관 아치로 시공했다면 강재가 36,000 ton 가량 소요됐을 것으로 예상되나, 콘크리트 충전 강관을 적용하여 소요 강재량을 7,000 ton으로 절감할 수 있었다고 한다<사진 4>.

이밖에도 중국에는 경간 400 m가 넘는 충전 강관 합성아치교가 2개 더 있으며, 경간 200 m 이상인 충전 강관 아치교는 수십 여 개에 이른다. 이는 비슷한 경간의 사장교에 비해 내풍 저항 능력이 우수하고 유지보수 비용이 저렴하며, 선박 통행이 안전한 장점 때문에 콘크리트 충전 강관 합성아치교가 선호되기 때문으로 설명된다.

특히 험준한 산악 지형에서는 앵커 블록을 별도로 설치하지 않고도 시공이 가능해 콘크리트 충전 강관 합성아



사진 3. Shin Saikai Bridge(앞)와 Sekai Bridge(뒤)



사진 4. Wushan Changjiang River Bridge

치교가 최적으로 평가된다고 한다.

철도교로는 최초로 Yichang-Wanzhou 철도 노선에 Yichang Changjiang River Bridge가 충전강관 교량으로 건설되고 있다<그림 2>. 275 m 2경간인 Yichang Changjiang River Bridge는 도로교와는 달리 고정하중은 거더, 활하중은 아치가 분담하는 형식이어서 콘크리트 충전 강관 아치의 하중 분담률이 12%에 지나지 않는다. 그러나 콘크리트 충전 강관 아치를 사용함으로써 일반 콘크리트 거더교로 시공했을 때보다 거더 높이가 20% 정도 감소된 것으로 평가된다.

3.4.2 구조 형식

중국의 콘크리트 충전 강관 합성아치교에는 중로식이나 하로식의 타이드 아치교가 많다. 타이드 아치교는 고강도 강봉이 아치의 수평력을 받으므로 지점에 수평 반력이 발생하지 않는다. 경간이 길어지면 아치 리브와 상부공의 무게가 늘어나지만, 타이 무게는 그다지 늘어나지 않는 장점이 있다. 좌굴 안정성과 내진성도 로제교보다 좋으며 시공도 쉬워 널리 사용된다<표 1>.

중로식 아치교로는 단경간과 다경간이 두루 쓰인다. 단경간 아치교의 예로는 푸젠(福建)성 Shitanxi Bridge와 헤이룽장(黑龍江)성 Mudanjiang Bridge이 있다.

다경간 아치교에서는 일반적으로 중앙 경간에 가벼운 콘크리트 충전 강관을 사용하기 때문에 교각 수평력의 균형을 맞추기 위한 연구가 이루어진다. 예를 들면 상로+중로+상로의 3경간 중로로제교, 3경간 중로 타이드 아치교 등이 쓰인다.

3경간 중로 아치교로는 날아가는 새를 닮았다 하여 flying bird type 또는 중국에서는 비조식(飞鸟式)으로 부르는 중로식 라멘 타이드 아치교도 쓰이는데, 중국에서 최초로 건설된 것은 광둥(廣東)성의 Sanshanxi Bridge (45 + 200 + 45 m)이다. <사진 5>인 중로식 라멘 타이드 아치교의 하나인 후베이(湖北)성 Wuhan Jiangnan Wu Bridge(경간 240 m, 2001년 완공)를 보여준다.

3.4.3 단면 형식

콘크리트 충전 강관 아치교의 아치 리브 단면으로는 single tube, dumbbell, multi-tube 식이 쓰인다. single tube는 단일 강관에 콘크리트를 충전한 것으로 경간 100 m 이하의 도로교나 보도교에 사용된다. 강관이 두꺼워 합성단면에서 전체 무게 대비 강중의 비율이 평균 8%로 높다. 장쑤(江蘇)성 Yinjianghe Bridge(경간 70 m), Sinanbei Bridge(60 m), 푸젠성 Quanyi Bridge(46 m) 등이 single tube 아치 리브를 채용했다<그림 3>.

dumbbell식을 쓰는 교량의 경간은 수십 m에서 160 m에 이른다. 일반적으로 dumbbell식 단면 강관의 지름은 750 ~ 900 mm, 단면 높이는 1,800 ~ 2,000 mm 정도다. 강관 지름과 아

표 1. 중국의 주요 콘크리트 충전 강관 합성아치 교량

번호	이름	경간(m)	완공 연도	형식
1	四川巫山长江大桥 Sichuan Wushan Changjiang River Bridge	460	2004	중로
2	湖北支井河特大桥 Hubei Zhijinghe Bridge	430	시공중	상로
3	湖南湘潭市莲城大桥 Hunan Xiangtan Liancheng Bridge	400	2007	중로
4	安徽太平湖大桥 Anhui Taipinghu Bridge	352	2007	중로
5	广西南宁永和大桥 Guangxi Nanning Yonghe Bridge	338	2004	중로
6	浙江淳安南埔大桥 Zhejiang Chunan Nanpu Bridge	308	2003	중로
7	重庆奉节梅溪河桥 Chongqing Fengjie Meixi River Bridge	288	2001	상로
8	湖北武汉晴川桥 Hubei Wuhan Qingchuan Bridge	280	2000	하로
9	广东东莞水道大桥 Guangdong Dongguan Shuidao Bridge	280	2004	중로
10	浙江宁波三门跨海大桥北门桥 Zhejiang Ningbo Sanmenkuahaidaqiao Beimen Bridge	270	2006	중로



그림 1. Yichang-Wanzhou 철도 노선의 Yichang Changjiang River Bridge 조감도



사진 5. Wuhan Jiangnan Wu Bridge

치 경간의 비(D/L)는 1/60 ~ 1/150, 지름과 단면 높이 비(D/H)는 평균 1/2.5 이다.

경간이 100 m 이상인 경우에는 multi-tube 아치 리브를 널리 쓴다. 헤이룽장성 Mudanjiang Bridge는 아치 리브의 횡방향 강성을 높이기 위해 dumbbell식에 강관 1개를 추가한 3강관 multi-tube가 쓰였고, 광둥성 Yajisha Bridge에는 6강관 multi-tube 아치 리브도 쓰였다. 그러나 일반적으로는 무게와 경제성을 고려하여 4강관 multi-tube 아치 리브가 쓰인다.

한편 외부에 콘크리트를 타설하여 콘크리트 충전 강관으로 철근을 대체하기도 한다. 그러나 이것은 시공성 향상을 위한 것으로 콘크리트 충전 강관 합성아치교가 아니라 일반 철근 콘크리트 아치교에 속한다. 이 방식의 대표적인 교량으로 쓰촨성의 Wanxian Changjiang Bridge(경간 420m)가 있다.

4. 맺음말

유럽에서는 오래 전부터 다양한 형식의 콘크리트 충전 강관 스페이스 트러스 거더 교량을 시도하여 왔으며, 중국에서는 콘크리트 충전 강관 합성아치교에 특화하여 경간 400m 이상 교량까지

1,000건 이상 활발하게 적용하고 있다. 일본에서는 콘크리트 충전 강관을 교각 등 압축 부재로 주로 활용해 왔으나, 아치교를 비롯한 스페이스 트러스 거더교에 성공적으로 적용하는 추세이다.

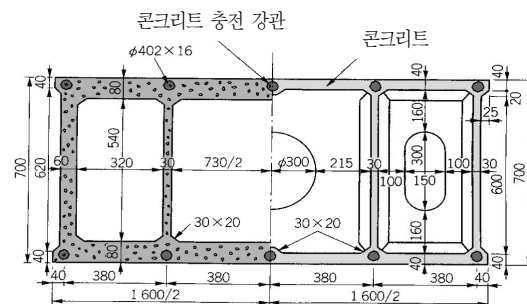
우리나라에서도 최근 여러 기관이 콘크리트 충전 강관 거더 교량을 개발하고 있으며, 특히 저자 등은 급속시공이 가능한 콘크리트 충전 강관 스페이스 트러스 거더교를 개발, 적용을 추진하고 있다.

이상의 사례에서 볼 수 있듯 콘크리트 충전 강관 스페이스 트러스 거더교는 고속도로상 교량, 산악지역 교량, 특히 강함성 거더 교량 시장에서 상당 부분을 대체할 수 있는 것으로 예상된다. 우선 미관 측면에서 투시성과 독창성이 우수하며, 구조가 단순하고 자중이 작아 지간의 장대화도 가능하다. 기존 강함성 거더교에 비해서는 제작, 시공, 유지 관리 측면에서 더욱 합리적이고 혁신적이다. 따라서 콘크리트 충전 강관 부재와 이를 이용한 스페이스 트러스 거더교의 실용화를 위한 연구와 관심이 지속적으로 필요하다. □

담당 편집위원 : 김태훈(주)대우건설기술연구원 kimth@dwconst.co.kr



(a) 교량 전경



(b) 아치 리브 단면

그림 2. Wanxian Changjiang Bridge