



콘크리트 사장교의 건설 동향

Current Trends in Concrete Cable Stayed Bridge

김광수 Kwang-Soo Kim
현대건설 화명대교 현장소장

이병인 Byoung-In Lee
부산시 도로·교량 건설부장

1. 머리말

국내 최초의 사장교인 진도대교가 1984년에 완성되고 비슷한 시기에 해외에서 페낭대교를 건설하면서 국내의 케이블 교량기술은 큰 성장을 이루는 계기를 마련하였다. 그러나 1991년과 1992년에 연이어 발생한 콘크리트 사장교의 시공 중 실패로 인해 대부분의 교량이 강(합성) 사장교로 계획되는 결과를 초래하고 말았다. 이러한 구조형식의 편중은 2000년 대까지 지속되어 교량건설의 경제성이 악화되었을 뿐만 아니라 유지관리에 대한 우려도 제기되고 있다.

대안으로 제시된 엑스트라도즈드교가 다수 채택되었지만 지간장의 한계는 물론 경제성 측면에서도 불리한 것이 사실이다. 최근의 분석에 따르면 경간장이 150m를 넘어 확대될수록 엑스트라도즈드교의 경제성이 상대적으로 악화되는 것으로 평가된다. 특히 하부구조를 포함하면 이러한 경향은 뚜렷해져 콘크리트 사장교의 경쟁력은 더욱 명확하게 나타나고 있다¹⁾. 국내에서 콘크리트 사장교가 한동안 침체에 있었지만 다행히 강사장교로 제안되었던 화명대교가 2006년에 중앙경간장 270m의 콘크리트 사장교로 최종 채택되었다. 이를 계기로 국내에서도 다수의 장경간 교량이 콘크리트 사장교로 계획되어 건설되고 있다. 이에 따라 현재 국내에서 건설 중인 콘크리트 사장교는 20여개를 상회하고 있다. 최근에는 중앙경간장 500m의 화양대교가 콘크리트 사장교로 계획되어 건설에 착수하였는데 경간장 규모로는 세계 2위급이다.

최근 해외에서도 콘크리트 사장교는 그 구조적 효율성이 더욱 주목을 받고 있는데 중국의 경우 이미 400m급 교량의 30% 이상을 콘크리트 사장교로 건설하여 사용 중에 있다. 이와 함께 동남아, 남미 등 한국 기업이 전략지역으로 진출하고 있는 많은 국가들이 콘크리트 사장교를 계획하고 있어 관련 분야의 기술경쟁력 확보가 산업계에서도 시급한 과제로 인식되고 있다.

2. 콘크리트 사장교의 기술 동향

2.1 보강형 형식

콘크리트 사장교의 보강형 단면은 슬래브 형식(slab type)과 박스 형식(box type)으로 크게 분류할 수 있다. 슬래브 형식의 경우 케이블이 설치되는 양 측면에 에지 거더(edge girder; solid rib)를 두고 일정 간격으로 가로보를 배치하게 된다. 가로보 또한 프리스트레스트 콘크리트가 일반적이며 에지 거더와 동일한 높이로 설치하는 것이 일반적이다. 슬래

브 형식은 많은 양의 프리스트레스가 필요하지만 단면이 간결하여 현장타설 공법을 효율적으로 적용할 수 있다. Stay Cable은 에지 거더를 관통하여 하면에 정착시키는 구조이므로 케이블 정착단면 또한 비교적 단순하다.

박스 형식 보강형은 비틀림 강성을 최대한 확보한 단면이므로 공사비의 비중이 큰 사장교의 케이블을 1면으로 배치할 수 있다. 이에 따라 Stay Cable의 물량과 정착구의 수량이 감소하여 경제적인 설계를 가능하게 한다. 박스 형식의 보강형에서도 가로보 또는 스트럿 설치될 필요가 있는데 이는 하중을 케이블과 주탑으로 전달시키고 단면 내에서의 힘의 흐름을 원활하게 하기 위해서이다. 가로보와 같은 추가부재는 고정하중을 증가시켜 케이블과 주탑의 규모가 커질 수 있는데 이에 대한 효율적인 대책이 최근에 다양하게 시도되고 있다.

2.2 보강형 시공

콘크리트 사장교의 보강형은 현장 타설에 의하거나 프리캐스트 콘크리트에 의하여 시공할 수 있다. 시공방법은 현장여건과 단면형상, 그리고 케이블 배치 등에 따라서 적절하게 선택하여야 한다. 현장타설 방식을 채택하는 경우 에지 거더 형식과 2면 케이블, 프리캐스트 방식의 경우에는 박스 형식과 1면 케이블을 조합하는 것이 일반적이다. 이러한 경향은 <표 1>과 같이 미국에서 건설된 콘크리트 사장교를 대상으로 분석된 결과에서도 잘 나타나 있다.

프리캐스트 보강형의 경우에도 캔틸레버 가설이 가장 효율적인 방법이지만 현장여건을 고려하여 운반과 인양 방법이 먼저 검토되어야 한다. 보강형 세그먼트의 자중을 감안하면 바지선을 운용할 수 있는 수상교량이 프리캐스트 공법을 채택하기에 적절하다고 할 수 있다.

미국의 Maumee River Bridge(Veterans' Glass City Skyway)는 이러한 프리캐스트 콘크리트의 장점을 잘 활용한 교량으로 평가되고 있다. 프리캐스트 박스 거더와 프리캐스트 정착부, 그리고 부분 현장 타설을 효율적으로 결합한 시공법이 적용되었다.

최근에는 가설장비의 발전과 용량증대에 힘입어 보강형을 박스 거더로 채택하면서도 현장타설 방식을 적용하는 사례가 자주 나타나고 있다.

표 1. 미국의 콘크리트 사장교 보강형 시공 현황

분류	교량명	주경 간장(m)	단면제원 (폭, 높이)
Cast-in Place (Edge Girder)	Dame Point Bridge	396	2.44m 1.52m
	Talmadge Memorial Bridge	335	1.37m 1.37m
	Maysville Bridge	320	1.37m 1.37m
	Cape Girardeau Bridge	350	1.52m 1.52m
	Owensboro Bridge	366	1.37m 1.45m
	Sidney Lanier Bridge	381	1.52m 1.37m
Precast Segment (Box Girder)	Sunshine Skyway Bridge	366	Single Cell 4.26m
	Neches River Bridge	195	Trapezoidal 2.44m
	Chesapeake and Delaware Bridge	229	Trapezoidal 3.65m
	James River Bridge	192	Trapezoidal 3.65m
	Cooper River Bridge	244	Trapezoidal 3.05m
	Pasco-Kennewick Bridge	229	Triangular

2.3 가설장비 - 거푸집 이동장치(form traveller)

콘크리트 사장교의 효율적인 시공을 위해서는 하부구조의 적절한 시공법을 도출하는 것이 중요하지만 일반화하기는 어렵다. 상부구조의 경우 시공의 핵심적인 사항은 거푸집 이동장치의 운용이다. 거푸집 이동장치의 제작과 운용은 교량의 전체적인 시공 효율에 크게 영향을 미치게 되는데 최근에는 설계법의 발전과 기계장치의 개발에 힘입어 대용량 거푸집 이동장치를 경량화하기 위한 시도가 계속되고 있다.

거푸집 이동장치는 크게 Above Type과 Below Type으로 구분되지만 국내에서는 Above Type이 선호되어 왔다. Below Type이 기계적 운영과 자중 측면에서 불리한 점은 있지만 타 공정과의 간섭이 최소화되고 시공효율을 높일 수 있는 장점도 있으므로 국내에서도 다양한 시도를 할 필요가 있다. 화명대교는 현장타설 세그먼트

가 폭 27.8m, 길이 6.8m로서 한 세그먼트의 콘크리트 타설량이 120m³ 규모에 이른다. 이에 따라 시공 중 단면력을 최소화하기 위하여 거푸집 이동장치를 최적화시켜 설계하였으며, 그 결과 기본계획단계에서보다 최대 10%의 시공 중 응력을 경감시키는 효과를 거둔 바 있다.

3. 콘크리트 사장교의 건설동향

3.1 해외 콘크리트 사장교

해외의 콘크리트 사장교는 주경간장 400m 이상으로는 <표 2>에 나타난 바와 같이 약 14개 가량이 확인되고 있다. 주경간장 300~400m급 교량으로는 약 20여개가 확인되고 있지만 실질적으로는 더 많은 사례가 있을 것으로 추정된다. 특히 최근에는 중국의 콘크리트 사장교 실적이 크게 증가하였다. 경간장 규모에서는 여전히 Skarn-sundet Bridge가 세계 최대 경간장의 위치를 차지하고 있다. 이는 콘크리트 사장교가 한계 경간장에 대한 도전보다는 구조 최적화에 초점을 두어 발전해 온 결과라 할 수 있다. 물론 콘크리트의 재료 기술이 비약적으로 발전하고 있으므로 콘크리트 사장교의 최대 경간장은 보다 더 확대될 것으로 기대되고 있다.

표 2. 공용중인 해외 콘크리트 사장교 현황 (주경간장 400m 이상)

교량명	국가	주경간장(m)	준공년도
Skarnsundet	노르웨이	530	1991
Jingzhou	중국	500	2002
Ehuang	중국	480	2002
Dafosi	중국	450	2001
ChongQing 2nd	중국	444	1995
Barrios de Luna (Ingeniero-Carlos)	스페인	440	1983
Bai Chay	베트남	435	2006
Tongling	중국	432	1995
Helgeland	노르웨이	425	1991
Vasco Da Gama	포르투갈	420	1998
Yunyang	중국	414	1994
Wadi Leban	사우디아라비아	405	1999
Iroise	프랑스	400	1994
2nd Wuhan	중국	400	1995

3.1.1 Skarnsundet Bridge

최초에는 현수교로 계획이 되었으나 사장교를 대안으로 검토하였으며 최종적으로 4~8%의 공사비 절감이 가능한 것으로 확인되었다. 1989년 5월 공사에 착수하여 1991년 12월에 완공되었다. 케이블은 Locked coil cable이며 일반구간의 정착간격은 10m이다. 그러나 사장교의 시점부와 종점부가 곡선교로서 측경간 케이블 배치에 제한이 있다. 이에 따라 외측 Back Stays는 5.4m의 간격으로 배치되었으며 불균형에 의한 단면력은 측경간의 Concrete Ballast로 제어한다<사진 1>.

콘크리트는 Norwegian Standard NS 3473 Grade C45가 적용되었다. 다만, 주탑에 인접한 부위의 보강형과 주탑 하부는 Grade C60이 적용되었다. 보강형의 폭원은 케이블 정착부를 포함하여 13m로 건설되었다. 주경간의 중앙부는 외부 프리스트레싱에 의하여 보강되었다. 콘크리트 단위물량당(m³) 소요되는 평균 철근량은 중앙경간을 기준으로 약 255kg이다. 주탑은 수면으로부터 152m로 설계되었으며, 정착단면의 보강을 위하여 Prestressed cable loops가 적용되었다. 설계풍속은 완성계의 경우 재현주기 100년, 그리고 시공 중은 10년을 기준으로 설정되었는데 보강형 위치에서의 V₁₀은 38.5m/sec이다.

FCM에 의하여 시공된 박스거더 세그먼트의 길이는 케이블 정착간격과 동일하게 10m이며 자중은 160ton이다. 세그먼트 콘크리트는 거푸집 이동장치에 의하여 현장 타설되었는데 콘크리트의 강도가 35MPa(큐브 강도, cube strength)에 도달하였을 때 사재 케이블 긴장을 실시하였다.

3.1.2 Yamuna Bridge

인도의 Yamuna Bridge는 한국의 현대건설이 시공한 세번째의 해외 콘크리트 사장교이다. 최초에는 경간장 120m의 다경간 FCM 거더교로 계획이 되었지만 타

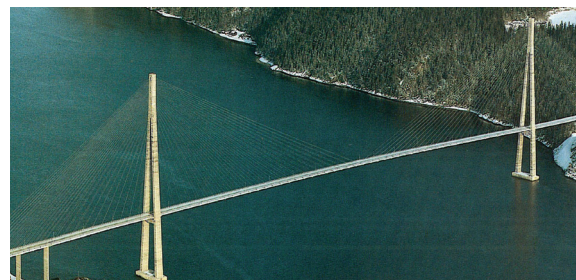


사진 1. Skarnsundet Bridge

당성 분석을 통하여 콘크리트 사장교가 적합한 것으로 확인되었다²⁾. 중앙 경간장은 260m이며 에지 거더 보강형을 현장 타설에 의하여 캔틸레버 공법으로 시공하였다(사진 2).

3.1.3 Bai Chay Bridge

2003년 8월에 착수하여 2006년 11월에 완성된 베트남의 Bai Chay Bridge는 1면 케이블로 435m의 경간장을 구현하였다는 점에서 교량기술자들의 관심을 받았다. 6경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 사장교로서 거푸집 이동장치에 의한 캔틸레버 공법으로 건설되었다. 박스거더는 폭 25m, 높이 3.5m로 설계되었는데 표준 세그먼트는 6.5m로 케이블 정착단면은 <사진 3>과 같이 강재 스트럿에 의하여 보강되었다. 스트럿은 두께 9.3mm의 원형단면과 16mm의 사각 단면이 상호 교차하여 배치된 점이 특이하다³⁾.

Multi-Strand Type의 케이블 긴장력은 80%, 100%의 2단계로 나누어 도입되었으며, 주탑 단면력을 최소화하기 위하여 좌우측 긴장 스트랜드의 수량 차이가 12분 이하가 되도록 관리하였다.

3.1.4 Yabegawa Bridge

2009년 개통된 Yabegawa교는 중앙경간장이 261m로



사진 2. Yamuna Bridge



사진 3. Bai Chay교의 스트럿과 박스거더 접합부

서 콘크리트 사장교로는 일본 내에서 최대규모이고 곡선교에 적용된 점, 그리고 대단위 세그먼트가 캔틸레버 공법으로 시공되었다는 점에서 관심을 가질 만하다. 일본의 경우에는 복합교량과 엑스트라도즈교가 활성화되면서 공용중인 콘크리트 사장교는 10여개를 상회하는 수준이다. Yabegawa Bridge의 또 다른 특징은 종방향 다이아프램이다. 이러한 단면은 내부 거푸집의 운용을 용이하게 할 수 있지만 단면 물량은 다소 증가할 수 있다(사진 4).

3.2 국내 콘크리트 사장교

3.2.1 건설동향

올림픽대교의 준공과 함께 국내의 콘크리트 사장교 건설은 강사장교와 비슷하게 시작되었다. 그러나 1990년대 초반의 실패로 인해 대부분의 사장교가 강교로 건설되는 결과를 초래하였으며 한동안 침체를 벗어나지 못하였다. 오히려 2004년에 해외에서 현대건설이 Yamuna Bridge를 완성하면서 콘크리트 사장교가 다시 주목받기 시작하였다(표 3). 2007년 착수된 화명대교는 대규모 콘크리트 사장교를 국내에서 시작하는 계기가 되었고 현재 시공 중인 교량만 20여개에 이를 정도로 현장 적용이 활발한 상태이다.

국내의 콘크리트 사장교는 단순히 건설사례만 늘어나는 것이 아니라 교량 계획과 설계에 있어서도 뚜렷한 발전을 보이고 있다. 특히 케이블 정착단면이 구조특성에 맞게 다양하게 설계되고 있으며 보강형의 형상 또한 안정성이 뛰어나고 미학적으로 우수한 단면이 많이 나타나고 있다.

3.2.2 화명대교

2007년에 시작하여 구조물 공사가 거의 완료된 화명대교는 국내 콘크리트 사장교가 활성화되는 계기를



사진 4. Yabegawa Bridge

표 3. 국내의 콘크리트 사장교 건설 현황
(중앙 경간장 200m 이상)

교량명	경간구성(m)	보강형	교폭(m)
화양대교	177+500+177	2 Cell Box	14.6
칠산대교	135+320+135	2 Cell Box	16.8
하와신의연도교	130+290+130	Edge Girder	14.5
사랑교	125+280+125	3 Cell Box	15.5
화명대교	115+270+115	1 Cell Box & Rib	27.8
화포교	46.5+113.5 +260+100	Edge Girder	24.0
안좌-자라연도교	255+255	1 Cell Box	14.4
금강4교	140+250+70	-	31.0
거문도 연도교	50+95+240 +95+50	3 Cell Box	13.7
제2돌산대교	35+82+230 +82+35	Edge Girder	24.2
세풍대교	57.5+85+2@220 +85+57.5	1 Cell Box & Strut	23.9
백석대교	50+77+205+77	4 Cell Box	36.0
화양-적금 3공구	200+170	1 Cell Box	14.6

제공하였다는 평가를 받고 있다. 콘크리트 격벽과 Tie Tendon으로 케이블 정착단면을 구성하고 새로운 시공법을 다수 시도하여 건설과정에서 국내 교량기술진의 많은 관심을 불러 일으켰다(사진 5).

특히 시공과정에서 검토된 1면 지지된 박스거더 보강형의 전단지연과 유효폭에 대한 분석은 학회 등을 통하여 발표된 바 있다^{4,5)}. 이외에도 원형피장 가물막이, 주탑과 보강형의 동시시공, 거푸집 이동장치의 선린칭 등 당시에는 국내에서 최초로 시도된 공법들이 성공적으로 마무리되고 있다.

3.2.3 화양대교

최근에 화양-적금 2공구에 채택된 화양대교는 중앙 경간장이 500m로 계획되어 세계 2위급 콘크리트 사장



사진 5. 화명대교 전경

교이다. 177+500+177로 측경간이 다소 짧은 구조인데 부반력을 거더의 자중으로 제어하였다. 만일 강사장교로 설계하였다면 부분적으로 타정 케이블을 배치하는 것이 불가피하여 공사비 증가는 물론 유지관리의 어려움을 초래할 수 있다. 그러나 화양대교에서는 단부측 보강형의 단면을 확대하여 Counter Weight로 처리함으로써 측경간의 부반력문제를 쉽게 해결하였다. 화양대교는 콘크리트 사장교의 뛰어난 적용성과 효율성을 입증한 좋은 사례로 평가될 수 있을 것이다.

4. 콘크리트 사장교의 철도교 적용

고속철도 교량은 처짐과 진동관리가 가장 중요한 항목이므로 경간장이 다소 작은 규모로 설계하는 것이 일반적이다. 장대레일의 축력을 일정수준 이하로 제어하기 위해서도 장경간 교량은 잘 채택되지 않는다. 그러나 불가피하게 사장교를 적용하여 경간장을 확대할 필요가 있는 경우에는 처짐 관리가 매우 중요하다.

이탈리아의 Po River Bridge를 사장교로 건설하기 위하여 다양한 검토가 수행되었는데 사재 케이블에 의하여 처짐을 제어하기에는 한계가 있다. 결국 콘크리트 사장교를 기본으로 경간구성과 보강형 단면 형상에 대한 다양한 검토가 수행되었다. 이와 같이 장경간 사장교의 처짐량을 최소규모로 제어하기 위해서는 콘크리트 사장교가 유일한 해법인데 케이블의 피로 문제 또한 다른 형식에 비하여 매우 안정적인 것으로 확인되었다. Po River Bridge는 콘크리트 사장교가 갖는 거동의 우수성을 다시 한번 확인한 사례라고 할 것이다. <사진 6>에 나타난 바와 같이 케이블 교량에 300km/h 이상의 속도로 고속철도가 운행되는 광경은 세계 기술진의 관심을 받기에 충분하다.

철도에 적용된 콘크리트 사장교의 새로운 시도 중 하



사진 6. Po River Bridge


나가 영국의 전차(tram용) 교량인 Taney Road Bridge 이다. 주교량 108.54m의 비대칭 부분 타정식 사장교로써 형고는 1.325m로 설계되었다.

공용중인 도로를 횡단하여 가설되므로 현장타설은 실효성이 없어 최초에는 전단면 프리캐스트로 계획되었다. 그러나 세그먼트의 자중에 의한 캔틸레버의 시공 중 응력제어, 긴장재의 연결에 따른 문제, 그리고 다수의 강봉 체결 등 경제성과 공기 측면에서 불리한 점이 제기되었다. 이에 따라 셸 타입의 프리캐스트 콘크리트 세그먼트를 매치캐스트에 의하여 가설하고 사재 케이블을 설치하는 새로운 방식의 가설법이 적용되었다. 최종적으로는 세그멘탈 셸의 내부 단면은 현장 타설에 의하여 시공하게 되는데 프리캐스트 시공과 현장타설 시공의 장점을 잘 결합시킨 교량으로 평가되고 있다⁶⁾.

5. 맺음말

현대의 콘크리트 사장교는 Riccardo Morandi에 의하여 설계되어 1962년 완성된 Maracaibo Bridge로부터 시작되었다고 할 수 있다. 소수의 Stay가 적용되었던 초기 사장교에서는 자중이 큰 콘크리트는 사장교의 보강형으로 불리하였다. 그러나 Multi-Stay가 일반화되면서 사장교의 보강형으로 콘크리트가 갖는 장점이 크게 부각되어 왔다.

사장교의 구조 안정성에서 가장 중요한 진동 및 내풍 안정성 측면에서도 감쇠와 질량이 큰 콘크리트는 사장교에 아주 적절한 구조재료이다. 이와 함께 450m 이하의 경간장을 갖는 사장교는 강사장교에 비해 콘크리트 사장교가 경제적이며, 유지관리비를 포함한 전체적인 경제성은 더욱 우월한 것으로 확인되고 있다. 최근에는 재료기술의 발전에 힘입어 적용가능한 경간장 또한 더욱 증가되고 있는데 국내에서도 500m급 콘크리트 사장교가 건설에 착수한 것은 매우 반가운 소식이라 할 것이다.

해외에서도 콘크리트 사장교는 계속 계획되어 있어 국내 설계 및 건설기업의 해외시장 확대와 함께 기술 경쟁력 측면에서도 콘크리트 사장교는 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있다. 콘크리트의 장점을 충분히 활용하여 아름답고 혁신적인 콘크리트 사장교가 국내 교량기술자에 의하여 전 세계에서 설계되고 시공될 수 있도록 콘크리트 기술진의 지혜와 관심을 모아야 할 것이다. 

담당 편집위원 : 유성원(우석대학교) imysw@woosuk.ac.kr

참고문헌

1. Otsuka, H., Wakasa, T., Ogata, J., Yabuki, W. and Takemura, D., "Comparison of Structural Characteristics for Different Types of Cable Supported Prestressed Concrete Bridges", Structural Concrete, Thomas Telford and fib, 2002, pp.3~21.
2. Veje, E., Nielsen, P., Pedersen, F. and Fuglsang, "Yamuna Cable Stayed Bridge at Allahabad/Naini, India".
3. Nakamura, T., Tsuchida, K., Ohno, H. and Nagamoto, N., "Bai Chay Bridge, Vietnam", Structural Engineering International, 2007. 3, pp.1~3.
4. 김광수, '화명대교 기초의 설계와 시공', 교량과 구조 Vol. 1, IABSE Korean Group, 2009, pp.28~36.
5. 김광수, '화명대교의 상부구조 시공', 교량과 구조 Vol. 2, IABSE Korea Group, 2010.
6. O'Donovan, J., Wilson, K. and Dempsey, T., "The Design and Construction of Taney Bridge", Tom McCormack Memorial Lecture, 21st Jan. 2003.



김광수 박사는 서울대학교 토목공학 학과에서 PSC 거더의 전단거동에 대한 연구로 박사학위를 취득한 후 현대 건설에 입사하여 기술연구소에서 복합 교량에 대한 연구를 수행하였다. 이후 토목환경사업본부 기술개발실에서 초장대교량파트장으로 근무하였으며, 현재는 콘크리트 사장교인 화명대교의 현장소장으로 근무 중이다.

biocon@hdec.co.kr



이병인 부장은 부산광역시 관내 도로의 계획과 건설을 담당하면서 광안대교 등 다수의 교량건설사업에 참여하였다. 현재 부산광역시 건설본부에서 화명대교를 비롯한 도로 및 교량 건설사업을 총괄하고 있다.

byoung55@korea.kr