

세계속의 아름다운 콘크리트 사장교*

김 성 욱 (한국건설기술연구원 구조재료연구실장)

1. 서 언

콘크리트는 성형성, 강도 및 경제성이 우수한 재료이다. 최근 콘크리트는 강재 가격의 상승으로 인한 교량 구조물의 건설에 상대적으로 적용 범위가 더욱 넓어지고 있다. 교량 건설에 있어서 철근콘크리트(Reinforced Concrete, 이하 RC) 및 프리스트레스 철근콘크리트(Prestressed Concrete, 이하 PSC)는 비교적 경간장이 짧은 단경간의 단순거더 또는 연속거더로 광범위하게 활용되었으며 이와 어울려 단경간 교량의 바닷판은 RC구조가 지배적 구조형식을 이루어왔다.

교량 형식이 다양해지고 연도교 및 연속교 등 긴 경간장을 요구하는 장대교량 수요가 급증하면서 구조계의 형성과 시공이 비교적 용이한 강재가 장경간 교량 건설에 주로 활용되었다. 그러나 콘크리트 품질의 안정화 및 기계화 시공의 발전과 강재와 비교하여 상대적 우위의 가격 경쟁력으로 인해 장대교량에 콘크리트의 활용이 점차 확대되고 있다.

장대교량에서 콘크리트의 활용을 구조 요소별로 구분해 보면 기초를 포함하여 주탑, 보강형 거더, 앵커리지 등을 들 수 있다. 이들 구조 요소에 강재 또는 콘크리트를 적용하는 선택은 구조 요소의 구조계 구성과 시공성 및 경제성 등을 고려하여 정하며 콘

크리트 시공 기술이 점차 발전하면서 강재나 복합재료보다 상대적으로 점유율은 점차 높아지고 있다.

이 기사에서는 대표적인 사회기간시설물인 교량, 그중에서 사장교를 중심으로 한 장대교량에서 콘크리트를 활용하여 건설한 아름다운 교량을 소개하고자 한다.

2. 콘크리트 사장교 현황

과거 1960년대부터 사장교가 건설되기 시작한 이후 1970년대 컴퓨터 및 해석프로그램의 발달에 의해 사장교의 설계 및 시공이 본격화되었다. 1970년대부터는 콘크리트 제조 기술이 괄목하게 성장을 하였지만 콘크리트로 제작된 사장교 부재는 중량이 상대적으로 무겁고 해상 또는 넓은 하상에서 건설되는 현장의 입지조건에 불리한 점이 많아 콘크리트는 사장교 건설 재료로 많이 활용되지 못하였다. 1970년대 후반에 교량 건설 기계의 발달과 콘크리트 시공 기술의 진일보에 따라 본격적으로 콘크리트 사장교의 건설이 시작되었다.

콘크리트는 강재에 비해 공사비(재료 및 시공비 포함) 측면에서 매우 우수한 경제성을 가지고 있어 국내 교량에 광범위하게 적용되고 있지만 특수 교량인 사장교의 경우는 강재 사장교에 비해 보급률이

* 사장교 : 탑에서 비스듬히 친 케이블로 거더를 매단 다리로 경간(徑間) 150~400m 정도 범위의 도로교에 흔히 쓰이며, 경제적이고 미관에도 뛰어난 설계가 가능하다. 한국에서는 울림픽대교와 1984년 10월 18일 준공된 진도대교·돌산대교가 있다.

〈표-1〉 국외 대표적 콘크리트 사장교 건설 현황

교 량 명	L	경 간 구 성	주 경 간
Skarnsundet	1,010	20+3×27+109	530
Zuari	900	200+500+200	500
ChongQing Second Yangtze	888	53+169+444+169	444
Barrios de Luna	-	101.71+440+101.71	440
Bai Chay	901	86+129.5+435+129.5	435
Tongling	-	80+90+190	432
Hegeland	-	2@34+177.5	425
Panama Canal	-	46+200	420
Vasco da Gama	829.4	62+70.7+72	420
YungYang	586	86	414
Wadi Leban	763	179	405
Iroise Bridge(Elorn River)	800	47.45+50.85+101.7	400
Damespoint	792	198	396
Sidney Lanier	755	190	375
Sunshine Skyway	-	3@73.2+164.5	366
Chambal	700	57.75+59.5+57.75	350
My Thuan	650	5+150	350
Batam Tonton	642	-	350
Yieling	936	3×40	2×348
Glebe Island(Anzac)	625	5+140	345
Yamen	668	50+115	338
Guama	584	132	320
Broton	-	58.5+143.5	320
失部川	-	35+50+82	300
Coatzacoalcos	-	45.8+60+112.35	288
Trenez	515	33.7+81.3	285
Yamuna	-	10+60+115	260
Yobuko	492	121	250
C&D	503	3@45.72	229

낮다. 이것은 콘크리트의 강도효율이 강재에 비해 상대적으로 열세에 있고 이로 인해 시간장의 제약을 받게 되어 사장교 본래의 교량 특성인 장지간의 장점을 최대한 살리기에 다소 적용하기 어려운 재료로 인식되어졌기 때문이다. 또한 콘크리트는 재료의 비선형성 및 시간 의존적 특성에 의한

해석이 어려운 점도 적용을 어렵게 하는 원인을 제공하였다.

콘크리트 사장교란 통상 케이블로 만들어지는 현을 제외하고 교량의 보강거더 및 바닥판이 콘크리트로 제작된 교량을 말한다. 콘크리트 사장교의 경우 대부분은 주탑을 콘크리트로 제작하지만 강

〈표-2〉 국내 콘크리트 사장교 현황

교 량 명	L	경 간 구 성	주 경 간
화명대교	500	115+270+115	270
화포교	520	46.5+113.5+260+100	260
제2돌산대교	486.5	35+82+230+82+35	230
세풍대교	725	57.5+85+2@220+85+57	220
올림픽대교	300	150+150	150
극락대교	460	55+70+2x105+70+55	105

살판 또는 강·콘크리트 합성 바닥판을 적용하는 사장교의 경우도 주탑은 콘크리트로 제작되는 경우가 많다. 앞의 〈표-1〉과 〈표-2〉는 국내외의 콘크리트 바닥판으로 제작된 콘크리트 사장교의 현황이다.

국내의 경우에는 1980년대 올림픽대교에서 콘크리트 사장교로 건설된 이후 대부분의 사장교는 강재 사장교로 건설되다가 2000년대 들어서야 콘크리트 사장교를 점차 계획, 설계하게 되었다.

이 글에서는 사장교의 구조와 건설과정의 특징을 설명하는데 초점이 맞추어진 것이 아니라 주탑과 바닥판을 콘크리트 제작한 사장교의 다양한 형식과 콘크리트 사장교의 아름다움을 시각적으로 보여주고 미관의 아름다운 특징을 간략하게 소개하여 둔탁하게만 느껴졌던 콘크리트 재료가 연출하는 웅장한 아름다움을 소개하고자 한다.

3. 일면 경사 콘크리트 주탑 사장교

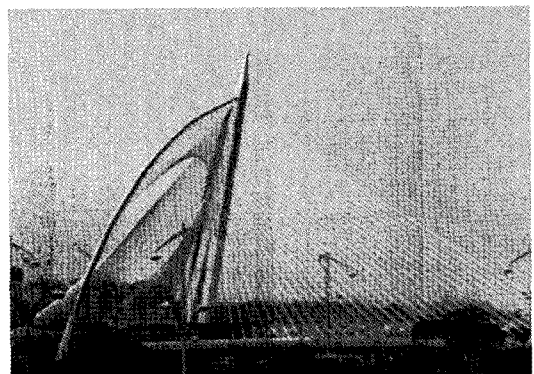
일면 경사 콘크리트 주탑 사장교는 주탑이 하나로 형성되어 있으며 주탑을 건설하는 주재료로 콘크리트를 사용한 사장교를 말한다. 주탑의 경사 기울기와 형상 및 케이블의 배치 상태에 따라 각기 매우 색다른 경관을 표현하고 이 경관 설계에는 주변 지형과 인공 건축물의 형상들뿐 아니라 그 나라의 문화를 담아 표현하고 있다. 여기서는 지상의 어떠한 조형물에 비교해도 빠지지 않는 아름다운 일면 경사 콘크리트 주탑 사장교를 소개한다.

가. Seri Wawasan Bridge

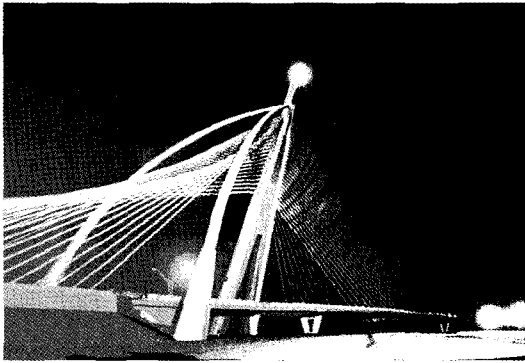
이 교량은 2003년 말레이시아의 새로운 행정 수도인 Putarajaya에 준공된 교량으로서 Wawasan이란 말레이어로 「비전」을 뜻한다. 이 교량은 주탑이 교량의 한쪽 교대측 중앙분리대에 설치된 비대칭 프리스트레스트 콘크리트 사장교이다.

주탑은 콘크리트·강 복합 구조로 되어 있으며 높이는 96m이고 수직 방향에서 교량의 바닥판 방향으로 15° 경사져 있다. 조형미를 강조하기 위하여 새의 날개뼈와 같은 형상의 강관구조를 추가하여 경관을 더욱 아름답게 표현하였다. 이 날개 형상의 강관구조는 비구조체이며 배면 케이블을 별도로 설치, 교대에 연결하여 주탑의 경사 반력을 지지하도록 구조계를 형성하였다.

교량의 총길이는 240m이고 168.5m의 주경간장을 가지며 상부 바닥판 폭은 37.2m, 보강형의 형고



〈그림-1〉 Seri Wawasan Bridge 주간 전경



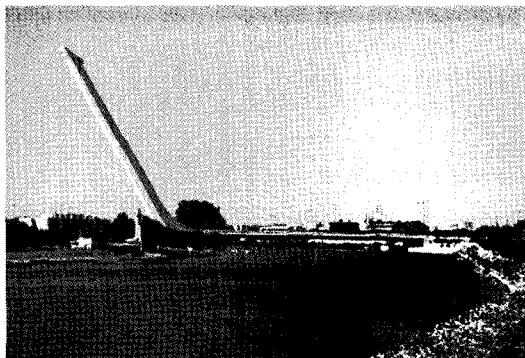
〈그림-2〉 Seri Wawasan Bridge 야경

는 3.5m의 프리스트레스트 콘크리트 박스 거더 형상을 지니고 있다. 주변의 열대성 수풀이 우거진 강변에 우뚝 솟은 주탑과 케이블의 곡선형 배치는 악기인 거대한 하프를 연상시키고 자연의 무성한 음악소리를 들려주는 듯 운치를 자아낸다.〈그림-1, 2〉

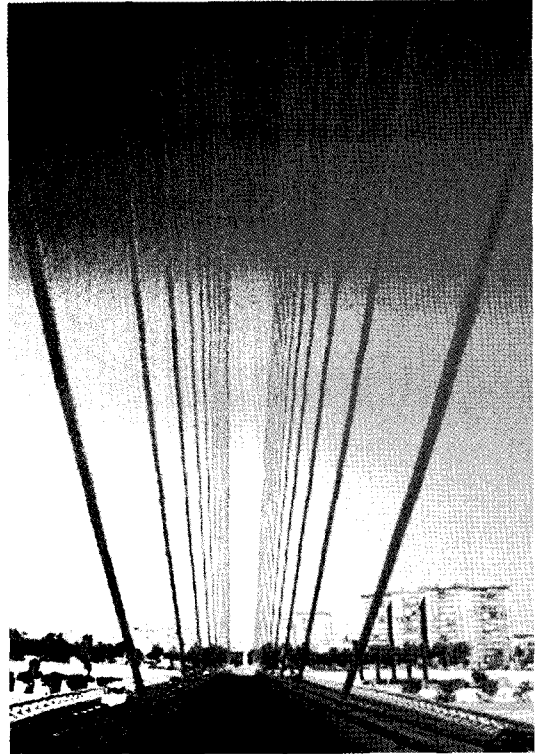
나. Alamillo Bridge

Alamillo Bridge는 스페인 남서부 안달루시아 지방의 세비야시의 과달키비르 강을 횡단하는 교량이다. 이 교량은 세비야 엑스포 92를 기념하기 위하여 1992년에 준공되었다.

교량의 총연장은 250m이며 주경간장은 200m이며 주탑의 높이는 142m이며 32° 경사를 지고 있다. 주탑은 콘크리트를 충전한 CFT 형식이며 이 주탑에 2열 13줄의 경사 케이블로 연결되어 상부 바닥



〈그림-3〉 Alamillo Bridge 전경



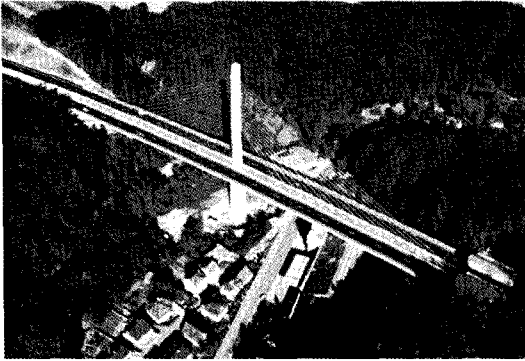
〈그림-4〉 Alamillo Bridge 교축 전경

판을 받치고 있다.

이 교량은 왕복 6차로와 중앙에 1로의 보도폭을 지니고 있으며 평면으로 캔틸레버를 구성하는 비대칭 구조로 되어 있다. 이 교량은 일면 경사 주탑 교량의 범례로서 가장 자주 등장하는 대표적 교량이다. 단순하면서도 간결하게 정리되어 있는 케이블은 단아함을 표현하는 세련미를 갖춘 사장교이다.〈그림-3, 4〉

4. 일면 수직 콘크리트 주탑 사장교

일면 수직 콘크리트 주탑 사장교는 교량의 총연장이 1개의 주탑으로 횡단이 가능한 교량의 설치에 적용하며 완공 후 경관은 가장 단순하면서 개활지 공간에 랜드마크 기능을 부여할 경우 많이 설치한다. 주탑은 주로 콘크리트로 제작하는 경우가 많다.



〈그림-5〉 하늘에서 내려본 Victor Bodson Bridge 전경

가. Victor Bodson Bridge

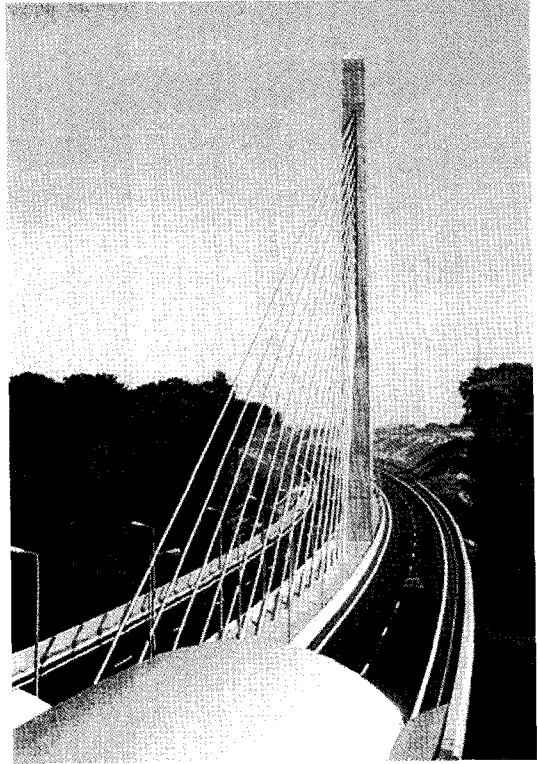
이 교량은 룩셈부르크 Hesperange의 Alzette 골짜기에 설치된 교량으로 교량 바닥판의 높이가 40m로서 비교적 높고 폭 27m, 사장교 구간이 260m의 중앙일면 콘크리트 주탑 사장교이다.

교량 종점측과 접속하여 쌍굴터널이 위치하고 있어서 단독 교량과 달리 주변 구조물 및 경관과 묘한 연결의 분위기를 자아낸다. 또한 사장교로는 드물게 평면선형이 곡선으로 이루어져 사장교의 다양한 기하학적인 표현이 가능함을 알려준 초기 형태의 교량이다.

이 교량은 주행중 부드러운 곡선과 차창을 지나는 현의 순서와 각도 차이로 인해 하늘을 올라가는 착각을 불러일으키기도 한다. 일면 수직 주탑 사장교의 심플함과 곡선 선형 변화로 미관이 매우 뛰어난 교량이다.〈그림-5, 6〉

5. A형, 역Y형 콘크리트 수직 주탑 사장교

A형, 역Y형 콘크리트 수직 주탑 사장교는 비교적 경간장이 긴 사장교에 주로 적용되는 형식이다. 강을 횡단하거나 연도교 및 연육교 등과 같이 횡단 길이가 길고 기초를 해상 또는 하상에 놓기 어려운 경우 양쪽 하안 또는 해안에 양단 주탑을 세우고 육상부의 교각에 고정하는 형식을 취하기도 한다.



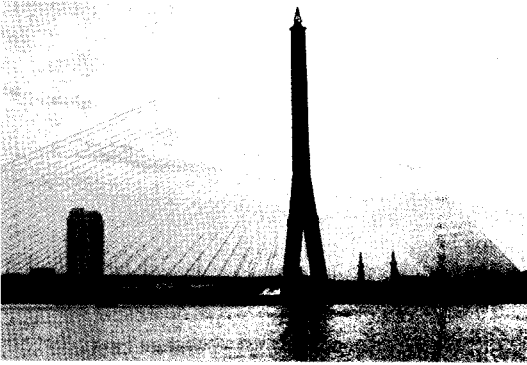
〈그림-6〉 곡선 배치의 Victor Bodson Bridge

가. Rama VIII Bridge

이 교량은 역Y형식의 교량으로는 세계 최대 규모다. 비대칭 사장교이며 태국의 방콕과 톤부리 사이 차오프라야 강을 횡단하는 교량이다.

교량의 총연장은 475m이며 주탑의 높이는 160m, 주탑의 정점에 연꽃봉오리 형상의 전망대가 설치되어 있다.

주탑은 프리스트레스를 도입한 콘크리트 구조로 되어 있으며 교량 바닥판은 강재로 만든 거더와 콘크리트로 만든 거더로 연결되는 복합형 구조를 지니고 있다. 이 교량은 불교국가인 태국의 정서를 콘크리트로 제작된 주탑의 꼭대기에 황금빛 연꽃봉오리를 올림으로써 수직 역Y형 콘크리트 주탑이 주는 단조로움을 한순간에 종교적 형상물로 변화시킨 특징을 지니고 있다.〈그림-7〉



<그림-7> 차오프라야 강에서 바라본 Rama VIII Bridge

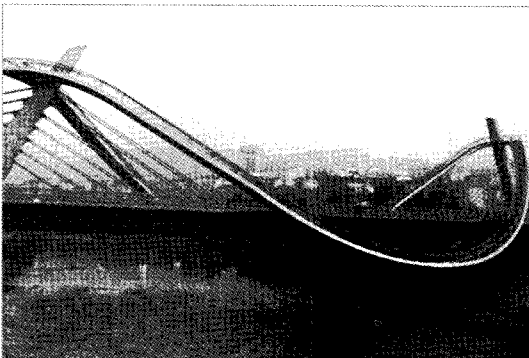
6. 기타 콘크리트 사장교

앞의 경우 이외에도 콘크리트로 제작된 사장교는 전세계 약 4,000개 정도 건조되어 있다. 사장교는 미관이 매우 뛰어나며 강재, FRP 복합재료와 함께 재료 측면에서 다양한 복합 형식을 표현할 수 있으며, 주탑의 형상과 케이블의 배치 형식에 따라 독특한 형상의 교량 외관을 지닐 수 있다.

또한 사장교 주경간 구간과 이어지는 터널, 접속 교에 연결 형식에 따라 동일한 형상의 사장교라든가 통행자가 보기에는 완전히 다른 모양의 이미지와 별개의 다른 형식 교량처럼 느낄 수 있다.

가. Milenio Bridge

이 교량은 스페인의 갈리시아 지방 오렌세 시의



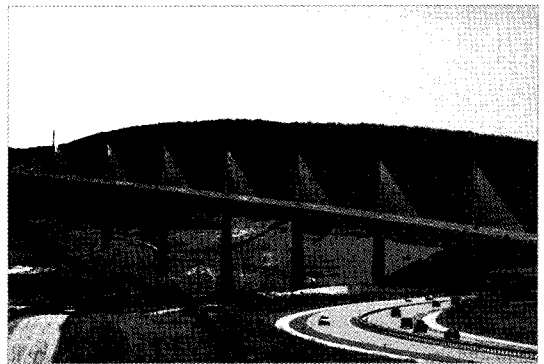
<그림-8> Milenio Bridge의 곡선 케이블 배치 형상

미노 강을 횡단하는 4경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 사장교이다. 이 교량의 특징은 다른 교량에서 보기드문 하프형의 케이블이 설치되어 있고 바닥 하면 외부에 외부케이블이 설치되어 있다. 이중에서 하프 모양의 케이블은 2개의 경사 주탑과 어우러져 통행자 및 관광객에게 배를 타고 있는 착각에 빠져 들게 한다.

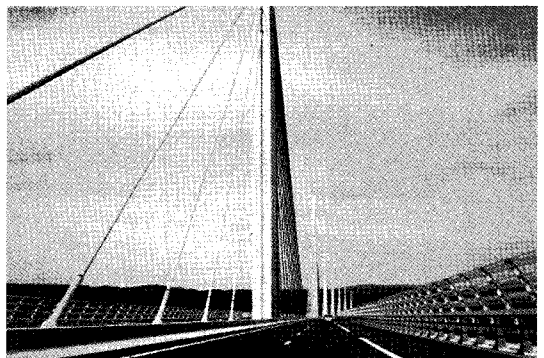
주탑과 상부구조는 프리스트레스트 콘크리트 구조로 구성되어 있으며 중앙 경간장은 110m 정도의 소규모 교량이다. 교량의 케이블 배치 형식이 독특하여 소개한다.<그림-8>

나. Millau Bridge

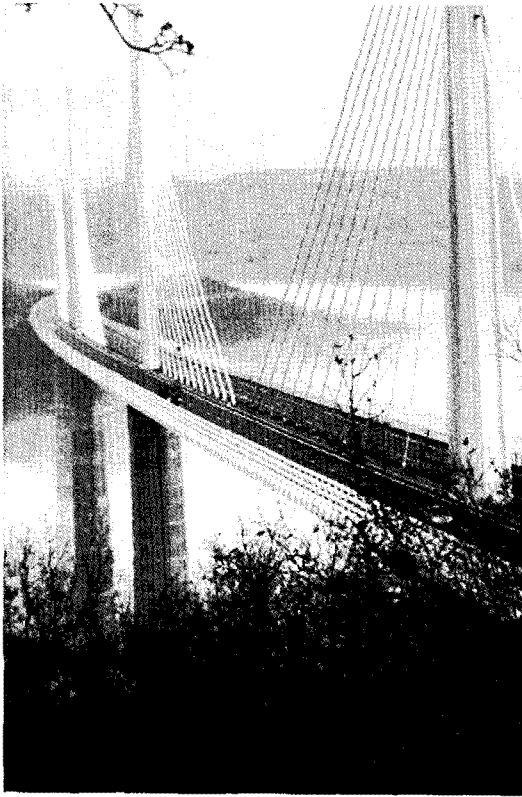
이 고가교는 프랑스 남부 아베롱주에 있는 미로우 지역의 타른 계곡을 횡단하는 교량으로서 최근인



<그림-9> Millau Bridge와 주변 경관



<그림-10> Millau Bridge 바닥판에서 바라본 주탑 배열



〈그림-11〉 구름위 Millau Bridge 전경

2005년 완공된 세계적으로 유명한 교량이다. 사장교로는 전장이 2,460m로서 세계에서 가장 긴 총연장을 지니고 있다. 주탑은 바닥판 이하의 높이는 콘크리트 교각이며 바닥판 이상의 높이는 강재 주탑을 붙인 합성형으로 구성되어 있다.

콘크리트 교각과 강재 주탑을 포함한 높이는 300m를 넘어 에펠탑 높이보다 높은 교량으로도 유명하다. 구조의 단순함이 반복되고 바닥판의 위치가 매우 높아 개방감이 우수하며 안개낀 경관은 구름속 천국을 연상하게 하는 신비로움을 자아내는 교량이다. (〈그림-9, 10, 11〉)

7. 결 언

사장교는 설계 및 시공기술의 발전과 더불어 점차

장경간화 되고 있으며, 현재까지 경간장 적용범위는 약 100m에서 600m 정도에 분포되어 있고, 그중 300m 미만의 주경간을 갖는 교량이 절반 이상을 차지하고 있다. 주경간이 300m 이하의 사장교에서는 바닥판의 중량이 구조계를 형성하는데 큰 영향을 미치지 않지만 그 이상의 주경간일 경우 콘크리트 바닥판의 중량이 케이블의 수량과 단면적이 늘어나게 되어 불리하게 된다.

그러나 최근 사장교의 주탑 및 바닥판을 콘크리트와 함께 강재를 병행 사용하는 하이브리드 설계 및 시공 기술이 점차 발전하고 있다. 사장교 건설에 있어서 콘크리트는 내구성이 우수하고 성형성이 좋으며 다른 구조재료보다 경제성이 우수한 특성을 지니고 있다. 반면 부재의 중량이 무거운 단점도 동시에 지니고 있다. 강재는 시공성이 우수하고 경량화 할 수 있는 장점이 있지만 재료비의 상승으로 인한 경제적인 건설이 어려운 점이 있다.

사장교 부재 요소에 대한 합성 단면을 설계하여 콘크리트와 강재가 지닌 우수한 역학적 성질을 병행할 경우 최적으로 경제적 건설이 가능하다. 여기에 콘크리트의 강도와 작업성을 개선하는 노력을 덧붙이면 지금까지 설계 및 건설한 적이 없는 다양한 형상의 아름다운 사장교의 건설이 가능하다.

앞에서 콘크리트가 활용된 아름다운 사장교의 일부를 소개하였다. 하지만 향후 설계 및 건설될 특수 교량들은 기존에 가설된 교량에서 보여준 형상과 미관을 뛰어넘어 독창적인 아름다움을 표현할 수 있는 미관설계가 요구될 것이다. 기존의 틀을 벗어난 새로운 형식의 특수 교량 건설은 반드시 건설재료 분야에서 혁명이 전제되어야 한다. 콘크리트 기술에서 기존 보통콘크리트 및 고성능콘크리트 수준을 넘어서 고기능성콘크리트 및 초고성능콘크리트 기술의 완성 시기가 빠를수록 다양한 시설물 및 건축물에 콘크리트가 주재료로 자리할 수 있다.

끝으로 본 기사의 작성에 있어서 사진자료의 많은 도움을 준 동성엔지니어링 박비석 이사님과 서지원 상무님께 감사를 드립니다. ▲