

세계의 현수교

Article 02

World's Suspension Bridge



박종화
현대건설(주) 설계실 부장
공학박사
토목구조기술사

1. 서론

현수교는 등나무, 덩굴 등의 천연소재를 이용한 원시적인 형태로 시작되었다. 철제 현수교는 16세기에 유럽에 소개되어 18세기에 발전을 이루었고, 18세기 중반에는 주케이블로서 정교한 쇠사슬이 사용되기에 이르렀으며, 19세기 후반 철의 발달로 주경간장의 증가가 더욱 가속화되었다.

미국에서는 브루클린교의 준공을 시작으로 근대 현수교가 제일 먼저 정착되었고, 1,000m 이상의 현수교(이하 장대 현수교)도 가장 먼저 건설하는 등 초기의 현수교 기술발전을 이끌었지만, 1964년 베라자노교의 완공 이후 부터는 유럽에서 더욱 발전하였다. 1980년대 이후에는 세토대교를 시작으로 일본의 발전이 가장 두드러졌으며, 1990년대 말 이후에는 중국에서의 발전이 가장 주목할 만한 하다.

현재 장대 현수교는 조지워싱턴교(1,067m)를 시작으로 약 20여개 정도가 완성되었고, 다수의 현수교가 계획·시공 중에 있다.

본 고에서는 [표 1]과 같이 이미 준공된 18개 교량과 건설 중인 3개의 장대 현수교에 대한 연대별 건설현황을 설명하고, 미래의 장대 현수교에 대하여 서술하고자 한다.

2. 현수교의 장기간화 동향

현수교의 역사는 장기간화의 역사였다고 하여도 과언이 아니다. [그림 1]은 세계 현수교의 최대 경간장 발전을 나타낸 것이다.

세계적으로 장대 현수교를 주도하는 미국, 유럽, 일본, 중국을 중심으로 분석해 보면, 먼저 미국과 유럽 현수교의 최대 경간장은 19세기와 20세기 초에 걸쳐 점차적으로 증가하였다.

20세기 초에 1,000m 이상의 장대 현수교가 건설된 이후 급격한 증가를 나타내다가 그레이트 벨트 이스트 교에서 정점을 이루었다.

일본에서는 1980년대부터 현수교의 경간장이 빠르게 증가하였으며, 1988년 미나미비산 세토대교가 1,000m

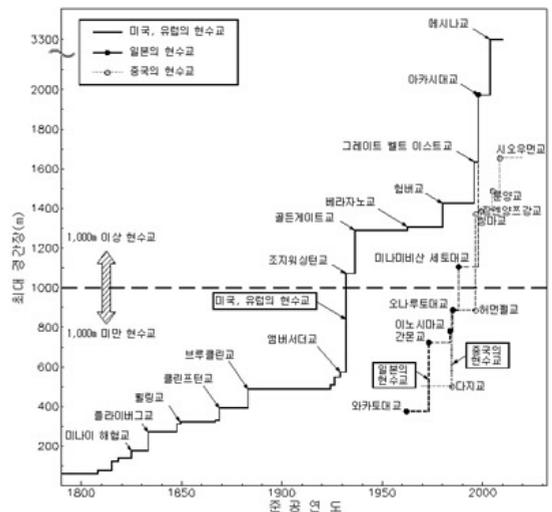
[표 1] 세계의 장대 현수교(최대 경간장 1,000m 이상)

교 량 명	최대 경간장(m)	국 가	용도	보강형	준공년도
메시나교(Messina Straits)	3,300	이탈리아	병용	박스	2012(예정)
아카시대교(Akashi Kaikyo)	1,991	일본	도로	트러스	1998
시오우먼교(Xihoumen)	1,650	중국	도로	박스	2008(예정)
그레이트 벨트 이스트교(Great Belt East)	1,624	덴마크	도로	박스	1998
룬양교(Runyang Yangtze River)	1,490	중국	도로	박스	2005
험버교(Humber)	1,410	영국	도로	박스	1981
장엔양쯔강교(Jiangyin Yangtze River)	1,385	중국	병용	박스	1999
칭마교(Tsing Ma)	1,377	중국 홍콩	병용	박스	1997
하르당게르교(Hardanger)	1,324	노르웨이	도로	박스	2011(예정)
베라자노교(Verrazano Narrows)	1,298	미국	도로	트러스	1964
골든 게이트교(Golden Gate)	1,280	미국	도로	트러스	1937
하이코스트교(High Coast)	1,210	스웨덴	도로	박스	1997
매किन교(Mackinac)	1,158	미국	도로	트러스	1957
미나미비산 세토대교(Minami Bisan Seto)	1,100	일본	병용	트러스	1988
파티히 술탄 마호메드교 (Fatih Sultan Mehmet Bridge; 2nd Bosphorus)	1,090	터키	도로	박스	1988
제1보스포루스교(1st Bosphorus)	1,074	터키	도로	박스	1973
조지워싱턴교(George Washington)	1,067	미국	도로	트러스	1931
쿠루시마 제3대교(Kurushima Kaikyo-3)	1,030	일본	도로	박스	1999
쿠루시마 제2대교(Kurushima Kaikyo-2)	1,020	일본	도로	박스	1999
타구스강교(Tagus River)	1,013	포르투갈	도로	트러스	1966
포스로드교(Forth Road)	1,006	영국	도로	트러스	1964

이상으로 건설된 이후 1998에는 현존 최장의 현수교인 아카시대교가 준공됨으로써 미국과 유럽 현수교의 최대 경간장을 추월하게 되었다.

중국에서는 1990년대 후반부터 본격적인 경간장의 증가가 이루어졌으며, 많은 수의 교량이 완공되는 등 세계에서 가장 빠른 발전속도를 나타내고 있다.

현재까지는 1998년 준공된 일본의 아카시대교가 중앙 경간 1,991m로 세계 최장의 현수교이지만, 오는 2012년 이탈리아의 메시나교가 완공되면 세계 최장의 현수교가 될 것으로 예상되고 있다.



[그림 1] 세계 현수교의 장대화

3. 연대별 1,000m 이상 현수교

3.1 1930~1940년대의 현수교

1) 시간장 1,000m 이상의 최초 현수교

1931년 10월 미국 뉴욕주의 허드슨 강을 가로 지르는 조지워싱턴교(1,067m)교 준공되면서 시간장 1,000m이 상인 최초의 장대 현수교가 탄생하였다[사진 1]. 이는 기존의 최대 경간장을 가졌던 현수교인 앰버서더교(564m)에 비해 최대 경간장이 1.9배나 더 긴 교량이었다. 준공초기에는 6차선으로 개통하였으나 1962년 더블 데크로 개선되었고 총14차선으로 확장되었다. 교량의 최대 운항고는 65m이며, 4개의 케이블로 보강형을 지지하며 케이블의 인장강도는 155kg/mm² 이었다.

2) 세계에서 가장 유명한 현수교

1937년에 준공된 골든게이트교는 샌프란시스코만의 입구에 위치하고 있으며, 현재 까지 세계적으로 현수교의 대명사로 일컬어지고 있는 교량이다[사진 2]. 시간장이 1,280m에 달하는 골든게이트교는 1964년 뉴욕주의 베라자노교가 준공되기 전까지 가장 긴 교량이었다. 이

교량은 총6차선이며, 차로 양끝에 보도가 있고, 최대 항로고는 67m이다. 주탑 높이는 227m로 1998년에 일본 아카시대교가 준공되기 전까지 세계최고 높이의 주탑 기록을 가지고 있었다. 한편, 1940년 시간장 863m의 타코마 내로우교의 붕괴로 인하여 1940년대에는 장대 현수교가 건설이 잠정적으로 중지되었으며, 그후 보강형의 강성을 증가시키는 문제를 본격적으로 논의하는 계기가 되었다.

3.2 1950~1960년대의 현수교

1957년에는 미시건호와 휴런호를 연결하는 시간장 1,158m, 교량 총연장 5.8km인 매키낙교가 준공되었다 [사진 3]. 이 교량의 측경간장은 549m이며 주탑의 높이는 168m이었다. 매키낙교는 세계에서 가장 견고한 교량으로 알려져 있는데, 시속 280m/s에 달하는 풍속에도 저항할 수 있도록 설계되었다. 총4차선 중 중앙의 2차선은 오픈 그리드로 설계되었고, 보강형의 제원은 20.7m × 11.7m이며, 최대 항로고는 45m이다. 1964년에는 9월 영국의 스코틀랜드에 1,006m의 최대 경간장을 갖는 포스로드교가 준공되었다[사진 4]. 이 교량의 준공으로 인하여 유럽에서도 최초로 1,000m 이상의 장대 현수교가



[사진 1] 최초 장대 현수교(조지워싱턴교)



[사진 2] 골든게이트교 전경

기록되었다. 이 교량의 주탑 높이는 156m이고, 보강형의 제원은 23.8m×8.4m이며, 최대 항로고는 45m이다. 이 교량은 중차량의 통행을 위하여 보강공사가 진행되기도 하였다. 또한 같은 해에 미국의 뉴욕만의 베라자노교는 지간장 1,298m, 주탑높이 210m로 준공되었다[사진 5]. 보강형의 제원은 31.41m×7.3m이었고, 총12차선이며, 최대 항로고는 69m이다. 1966년 8월에는 영국의 타구스강을 가로지르는 타구스강교가 준공되었다[사진 6]. 이 교량의 지간장은 1,013m으로써 1970년대까지 유럽에서 지간장이 가장 긴 현수교였고, 주탑의 높이도 190m 이었다. 보강형의 높이는 21.0m×10.7m이고, 최대 항로고는 70m로 현재까지도 세계에서 가장 높은 항



[사진 3] 매키낙교 전경



[사진 5] 베라자노교 전경

로고를 기록하고 있다. 1990년대에 보강공사를 착공하였는데 기존의 2개 현수케이블에 2개의 케이블을 증설하여 더블데크로 개선하였다. 하부데크는 철도교, 상부데크는 도로교로 사용되고 있다.

3.3 1970~1980년대의 현수교

1973년 10월 터키의 이스탄불에는 지간장이 1,074m인 보스포러스교가 준공되었으며, 이로서 유럽과 아시아 대륙을 최초로 연결하는 현수교가 건설되었다[사진 7]. 주탑 높이가 165m인 이 교량은 중앙경간만 행여가 있으며 강박스보강형의 제원은 28.0m×3.0m이다. 1981년 7월 영국에서 지간장이 1,410m에 달하는 험버교



[사진 4] 포스루드교 전경



[사진 6] 타구스강교 전경

가 준공되었다[사진 8].

험버교는 그레이트 벨트이스트교의 준공 이전까지 강박스 보강형 단면을 갖는 장대 현수교로 기록되어 왔으며, 강박스 보강형의 제원은 22.0m×4.5m이었다. 이 교량은 163m에 달하는 콘크리트 주탑과 유선형의 보강형, 경사행어 등의 특징을 가지고 있다. 또한 험버교는 측경간 지간장이 280m, 530m로 서로 다르며, 최대 항로고가 매우 낮은 수준인 30m에 불과하다. 이 교량은 장대 현수교중 유일하게 콘크리트 주탑과 경사행어를 동시에 적용하였다. 일본의 혼슈-시코쿠 연락교 사업중 1988년 4월에 완성된 코지마-사카이데 루트에는 2개의 장대 현수교가 있다. 이는 경간장 1,100m의 미나비산

세토대교와 990m의 기타비산 세토대교[사진 9]이다. 미나비 산 세토교는 칭마교가 완공되기 이전까지 세계에서 도로·철도 병용교 중 가장 긴 현수교였다. 같은 해 7월에는 터키 이스탄불에 지간장 1,090m의 파티히 술탄 마호메드교가 건설되었다[사진 10]. 제2보스포러스교라고도 불리며 제1보스포러스교와 유사하나 측경간이 없는 단경간 현수교이고 주경간장은 1060m이며 주탑높이는 107m로 다소 낮은 특징이 있다[사진 10].

3.4 1990~현재의 현수교

1997년 4월 중국 홍콩에서는 약 5년간의 공사 기간을 거쳐, 세계에서 가장 긴 지간장을 가지는 도로·철도 병



[사진 7] 제1보스포러스교 전경



[사진 8] 험버교 전경



[사진 9] 미나비비산 세토대교 전경



[사진 10] 파티히 술탄 마호메드교 전경

용 현수교인 칭마교[사진 11]가 준공되었는데, 지간장이 1,377m이었다. 이 교량은 두개의 측경간 중 한 경간만 현수형식인 2경간 현수교이며, 케이블의 직경이 1,150mm나 된다. 트러스 및 강박스 거더의 조합으로 구성된 보강형의 제원은 41.0m×7.3m이고, 더블 데크중 상부는 6차선의 도로교, 하부는 철도교가 가설되어 있다. 칭마교와 비슷한 시기에 스웨덴의 양게르만 강에는 최대 경간장 1,210m인 하이코스트교가 완공되었다[사진 12]. 180m 높이인 콘크리트 주탑과 22.0m×4.0m 제원의 왕복 4차선의 보강형을 사용하였다. 1998년에는 세계 최장의 현수교인 아카시대교가 준공되었다[사진 13]. 아카시대교는 고베시와 아와지섬 사이의 아카시 해

협을 통과한다. 주경간의 길이가 1,991m로 세계 최장의 현수교이며, 왕복 6차선 30m의 폭으로 설계된 보강형은 대형 선박이 해협을 자유롭게 통과하도록 최대 항로를 65m로 하였다. 1998년 6월 덴마크에서는 지간장이 1,624m로 세계에서 두 번째로 긴 그레이트 벨트 이스트교가 준공되었다[사진 14]. 이 교량은 주탑 높이가 254m로써 콘크리트 주탑으로는 세계 최고 높이를 자랑한다. 보강형의 제원은 31.0m×4.0m이고, 강박스 형식이며, 그 길이가 2,694m로 강박스 연속 보강형 중 세계 최장이다. 중국의 장엔양쯔강교는 지간장이 1,385m이고, 1999년 9월에 완공 되었다[사진 15]. 보강형의 제원은 36.0m×3.5m이며, 왕복 6차선의 유선형 강박스 형



[사진 11] 칭마교 전경



[사진 12] 하이코스트교 전경



[사진 13] 아카시대교 전경



[사진 14] 그레이트 벨트 이스트교 전경

식이다. 1999년에는 세계 최초로 세계의 현수교량이 연속한 쿠루시마 대교가 완공되었다[사진 16]. 이중 쿠루시마 제2대교와 제3대교가 최대 경간장 1,020, 1,030m의



[사진 15] 장연양쯔강교 전경



[사진 16] 쿠루시마대교 전경



[사진 17] 룬양교 전경

장대 현수교이며, 공유 앵커 블록을 가지고 있는 특징을 가진다. 중국의 룬양교는 2005년 완공되었다. 왕복 6차선이며 보강형의 제원은 39.2m×3.0m이며, 최대 경간장이 1,490m로 현존하는 중국 교량 중에 가장 긴 교량이다[사진 17].

4. 미래의 장대 현수교

미래에 준공이 기대되는 1,000m 이상의 장대 현수교로는 먼저, 최대 경간장 1,650m로 1,624m의 그레이트 벨트 이스트교 보다 길며, 세계 3위의 현수교인 시오우먼교가 현재 중국에서 건설 중에 있으며 2008년 완공될



[그림 2] 시오우먼교 조감도



[그림 3] 지브롤터해협대교 조감도

예정이다[그림 2]. 또한 최대 지간장이 1,324m인 하르당 게르교[그림 4]가 2011년 완공될 예정이며, 2012년에는 초장대교의 절정으로 평가되고 있는 메시나교가 준공될 예정에 있다[그림 4].

이 교량은 최대 경간장이 3,300m에 이르는 초장대 현수교이다. 설계의 최대 문제점인 공기역학적 해결책이 교량계획의 성공유무를 판단케 하였으며, 최종적으로 멀티박스 보강형을 적용했다.

또한, 중국에서는 1,418m의 칭령교, 1,280m의 양러 양쯔강교, 1,108m의 항푸교 및 1,088m의 빠이링거교가



[그림 4] 하르당게르교 조감도



[그림 5] 메시나교 조감도



[그림 6] 카카오교 조감도

시공 중에 있으며, 칠레에서는 최대 경간장 1,100의 다경간 현수교인 카카오교가 설계 중에 있다[그림 6].

현재 계획단계의 초장대 현수교를 살펴보면, 일본의 츠가루 해협에 폭 2,000m, 운항고 70m를 확보하기 위해 중앙부 2경간을 3,000~4,000m로 하는 초장대 4경간 현수교가 계획되었다.

또한 경간장 3,000m의 4경간 현수교인 호우요해협대교가 계획되었는데, 이 교량의 기초는 수심 100m 깊이에 있다. 이밖에도 일본에서는 도쿄만, 이세만, 기탄해협 등을 횡단하는 초장대 현수교에 대한 검토가 활발하게 수행되어 왔다. 한편, 이베리아 반도 남쪽과 아프리카 북서부 사이의 지브롤터 해협을 횡단하는 교량 건설 프로젝트가 장기간에 걸쳐 계획되어 왔다.

지브롤터해협대교는 두가지의 다경간 현수교로 계획되었다. 3개의 주탑을 가지며, 2개의 중앙 경간장이 5,000m인 교량과, 4개의 주탑을 가지면서 중앙 경간장이 3,550m인 교량으로 각각 계획되었다. 수심 300m 깊이에 주탑 기초를 시공할 계획이며, 거대한 교량 자중으로 인한 수직 및 비틀림 모멘트에 저항할 수 있도록 주탑은 4개의 경사기둥 구조를 적용하였다[그림 3].

이와 같이 미래에도 1,000m이상의 장대 현수교뿐만 아니라 초장대 현수교가 계획·설계·시공될 것으로 전망되고 있다.

특히, 3,000m 이상의 최대 경간장이 요구되는 메시나, 지브롤터, 츠가루 및 호우요 해협 등을 횡단하는 초장대 현수교의 실현을 위해서는 인장강도 200kg/mm² 이상인 고강도 케이블의 적용은 물론이고, 강도에 비해 중량이 현저하게 가벼운 CFRP(Carbon Fibre Reinforced Plastics) 케이블의 도입 등이 적극적으로 검토되고 있다.

5. 결론

본고에서는 이미 준공되었거나 건설 중인 1,000m 이상의 장대 현수교 21개에 대한 연대별 건설현황을 설명하고, 계획·설계·시공중인 현수교를 정리하여 서술하였다. 장대 현수교 건설은 1931년에 중앙경간 1,067m인 미국의 조지워싱턴교의 완공으로 시작하여 1940년에 바람에 의해 붕괴된 타코마교의이후로 잠시 현수교의 계획이 소강상태를 이루었으나, 이러한 내풍설계에 대한 대응을 해결하여 최근에 이르러 중앙경간이 3,000m인 메시나교가 현실화 되고 있다.

즉, 현수교의 초장대화는 아카시대교나 메시나에서 얻은 교훈처럼 풍하중을 저항 할 수 있는 현수교 시스템을 계획하는 것과 케이블과 보강형의 사하중을 줄이는 것이 현수교 계획이 성공여부를 판단케 한다. 따라서 초장대 현수교의 실현을 위해서는 이러한 기술적 과제를 해결해야 할 것이다.

또한 최근 국내에서도 여수산단 진입도로 등의 장대 현수교 관련 프로젝트가 검토 및 계획 단계에 있으므로 멀지 않은 장래에 중앙경간이 1,000m가 넘는 세계적 수준의 장대 현수교가 건설되어 한국 현수교 건설의 새로운 이정표가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박명석 역(1987), 현대의 현수교, 도서출판 건설도서.
2. Junani Virola(1999), 세계 장대교량의 건설역사, 한국강구조학회지, 제11권 4호, pp.88~94.
3. (주)유신코퍼레이션(2003), 현수교 - 기술과 변천 -, 도서출판 과학기술.
4. 박수영 (2006), 장대교량의 내풍설계 현황분석, 한국풍공학회지, Vol.10, No.1, pp.7~13.
5. Wai-Fah Chen and Lian Duan(2000), Bridge Engineering Handbook, CRC Press.
6. Urs Meier (2006), 10 years of experience with CFRP stay cables, U.S. New York, 5th International Cable-Supported Bridge Operators Conference.