

세계 장대교량의 건설 역사



Junani Virola

Eur Ing-FEANI, Teemuaho Group, Helsinki, Finland

1. 머리말

인류역사상 교량은 인간이 만들어낸 위대한 전
시물중 하나라고 말할 수 있다. 1990년대는 교량
건설 역사에 있어서 사장교, 콘크리트 아치교,
PSC거더교를 포함하는 많은 장대교량의 건설 붐
이 있었다.

현재까지 건설된 전세계 교량중에서 최대지간
장(이하 지간장)이 1 km 이상 되는 교량 상부구조
형식은 현수교뿐이며, 이러한 교량은 전세계에
17개소가 존재하고 있다 (Table 1). Table 2에
나타내었듯이 최근에 건설된 현수교중에서 지간장
이 2 km에 달하는 교량이 있으며, 이는 다른 상
부구조형식으로 건설가능한 지간장의 두배에 가까

운 길이이다. 최근에 건설되고 있는 사장교의 지
간장도 현수교의 지간장에 육박하고는 있으나 아
직은 그 길이가 1 km 이하이다.

장대교량중에서 현수교 및 사장교 이외에 강제
트러스 및 강제 아치교의 지간장도 500 m에 달하
고 있으며, 콘크리트 아치교로서는 지간장이
400 m에 달하는 교량이 건설되었다. 그러나 PSC
교, 강박스거더교, 판형교의 지간장은 아직까지
300 m에 못 미치고 있는 실정이다.

본 고에서는 현수교 및 사장교를 포함한 전세
계 장대교량 건설현황을 연대별로 구분하여 기술
하였다.

2. 1930년대 장대교량

2.1 지간장이 1km가 넘는 세계 최초의 교량

1930년대 미국에서는 지간장이 1 km가 넘는
장대교량 2개소가 건설되었으며, 이는 George
Washington Bridge (지간장 : 1,067 m)와

* 본 고는 핀랜드의 교량기술자 Mr. Virola씨가 한국강구조학회지에 투고를 요청한 기사인, 세계 장대교량의 건설 역사를 다룬 집필자의 원고내용은 핀랜드 기술잡지인 Tierakennusmestari 1995:2-3에 게재되었으며, 집필자의 원고를 번역 및 편집하였음. 집필자 인터넷 홈페이지: <http://www.hut.fi/Units/Bridge/>

Table 1 세계 현수교 현황(지간장 1km 이상)

| 교량명 | 지간장 | 위치 | 준공년도 |
|---------------------|--------|-------------------------|------|
| Akashi-Kaikyo | 1991 m | Kobe-Naruto, Japan | 1998 |
| Great Belt East | 1624 m | Korsør, Denmark | 1998 |
| Humber | 1410 m | Kingston-upon-Hull, UK | 1981 |
| Jiangyin | 1385 m | Jiangsu, China | 1999 |
| Tsing Ma | 1377 m | Hong Kong, China | 1997 |
| Verrazano-Narrows | 1298 m | New York, USA | 1964 |
| Golden Gate | 1280 m | San Francisco, USA | 1937 |
| Höga Kusten | 1210 m | Kramfors, Sweden | 1997 |
| Mackinac | 1158 m | Mackinaw City, MI, USA | 1957 |
| Minami Bisan-seto | 1100 m | Kojima-Sakaide, Japan | 1988 |
| Fatih Sultan Mehmet | 1090 m | Istanbul, Turkey | 1988 |
| Bosporus | 1074 m | Istanbul, Turkey | 1973 |
| George Washington | 1067 m | New York, USA | 1931 |
| Kurushima-3 | 1030 m | Onomichi-Imabari, Japan | 1999 |
| Kurushima-2 | 1020 m | Onomichi-Imabari, Japan | 1999 |
| Ponte 25 de Abril | 1013 m | Lisbon, Portugal | 1966 |
| Firth of Forth Road | 1006 m | Edinburgh, UK | 1964 |
| | | | |
| Namhae | 404 m | Hadong-Namhae, Korea | 1973 |
| Yong Jong | 300 m | Inchon, Korea | 2001 |
| Kirjalansalmi | 220 m | Parainen, Finland | 1963 |
| Sääksmäki | 155 m | Valkeakoski, Finland | 1963 |

Table 2 세계 장대교량 현황(상부구조형식별)

| 교량명 | 교량형식 | 지간장 | 위치 | 준공년도 |
|---------------------|------------------------|---------|-------------------------|------|
| Akashi-Kaikyo | Cable suspension | 1,991 m | Kobe-Naruto, Japan | 1998 |
| Tatara | Cable-stayed | 890 m | Onomichi-Imabari, Japan | 1999 |
| Quebec Railway | Cantilever steel truss | 549 m | Quebec, Canada | 1917 |
| New River Gorge | Steel arch | 518 m | Fayetteville, WV, USA | 1977 |
| Wanxian | Concrete arch | 425 m | Sichuan, China | 1997 |
| Ikitsuki | Continuous steel truss | 400 m | Nagasaki, Japan | 1991 |
| Ponte Hercilio Luz | Chain suspension | 339 m | Florianópolis, Brazil | 1926 |
| Stolmasundet | PSC girder | 301 m | Austevoll, Norway | 1998 |
| Ponte Costa e Silva | Steel box girder | 300 m | Rio de Janeiro, Brazil | 1974 |
| Chester | Simple steel truss | 227 m | Chester, WV, USA | 1973 |

Golden Gate Bridge (지간장 : 1,280m)이다. 그러나 1940년대에는 이정도 규모의 교량이 건설된 기록이 없다.

Table 3에 나타내었듯이 1800년대 말에는 강재 트러스교량이 기존에 건설된 현수교의 지간장 기록을 갱신하여 건설된 경우도 있었다. 그러나 1930년대 이후 현재까지 현수교형식이 장대교량의 대명사가 되고있다. 1931년 10월 미국 뉴욕주에 있는 Hudson강을 가로지르는 George Washington Bridge(사진 1)가 준공되면서 지간장이 1km가 넘는 세계 최초의 장대교량으로

사진 1 George Washington Bridge의 전경(The Port Authority of NY & NJ 제공)

Table 3 세계 장대교량 건설 역사

| 교량명 | 교량형식 | 지간장 | 위 치 | 준공년도 |
|---------------------|------------------------|---------|-----------------------|----------|
| Martorell | Stone Arch | 37 m | Spain | B.C. 217 |
| Trajan's Bridge* | Timber | 52 m | Danube River, Hungary | A.D. 104 |
| Trezzo* | Stone arch | 72 m | Italy | 1377 |
| Luding | Chain suspension | 103 m | Dadu River, China | 1705 |
| Schaffhausen* | Timber | 119 m | Switzerland | 1757 |
| Schuylkill Falls* | Suspension | 124 m | Philadelphia, PA, USA | 1816 |
| Union/Tweed | Chain suspension | 137 m | Berwick, UK | 1820 |
| Menai Straits | Chain suspension | 177 m | Anglesey, UK | 1826 |
| Fribourg* | Suspension | 273 m | Switzerland | 1834 |
| Wheeling | Suspension | 308 m | West Virginia, USA | 1849 |
| Lewiston* | Suspension | 318 m | Niagara River, USA-CA | 1851 |
| Cincinnati | Suspension | 322 m | Ohio River, USA | 1867 |
| Clifton* | Suspension | 386 m | Niagara Falls, USA-CA | 1869 |
| Brooklyn | Suspension | 486 m | New York, USA | 1883 |
| Firth of Forth Rail | Cantilever steel truss | 521 m | Edinburgh, UK | 1890 |
| Quebec | Cantilever steel truss | 549 m | Quebec, Canada | 1917 |
| Ambassador | Suspension | 564 m | Detroit, USA | 1929 |
| George Washington | Suspension | 1,067 m | New York, USA | 1931 |
| Golden Gate | Suspension | 1,280 m | San Francisco, USA | 1937 |
| Verrazano-Narrows | Suspension | 1,298 m | New York, USA | 1964 |
| Humber Estuary | Suspension | 1,410 m | Hull, UK | 1981 |
| Akashi-Kaikyo | Suspension | 1,991 m | Kobe-Naruto, Japan | 1998 |

* 폐교 또는 교체된 교량

기록되었다. 이는 기존의 최대지간장을 기록하였던 교량의 지간장에 약 1.9배에 달하는 길이이다. 이 교량은 준공초기에는 6차선을 개통하였으나, 1962년 너블텍으로 개선되어 총 14차선으로 확장되었다. 보강형의 제원은 $32.3 \times 9.1m$ 이며, 최대운항고는 $65m$ 이다. 총 4개로 구성된 현수케이블의 직경은 $90cm$ 이며, $180m$ 높이의 강제 주탑은 시공후 콘크리트로 피복될 계획이었다.

지간장이 $1km$ 가 넘는 현수교는 주로 2개 또는 4개의 현수케이블로 지지되며, George Washington Bridge 또한 4개의 현수케이블로 보강형이 지지되는 형식이다. 이 교량에 사용된 케이블의 인장강도는 $1,550MPa$ 이었다. 이는 최근에 완공된 세계 최장의 현수교인 일본 Akashi Bridge의 현수케이블 인장강도인 $1,800MPa$ 을 고려할 때, 그동안 현수케이블의 인장강도는 크게 높아지지 않음을 알 수 있다.

2.2 세계에서 가장 유명한 현수교

미국의 샌프란시스코에서는 1906년과 1989년에 강진이 발생하였다. 당시에 이 지역에 발생한 강진으로 인하여 많은 건물과 교량이 피해를 입었으나, 현수교는 피해가 없었던 것으로 보고되었다. 현수교는 유연한 교량거동 특성상 다른 교량 형식에 비하여 지진에도 안전할 수 있었다.

1937년에 준공된 Golden Gate Bridge(사진 2)는 샌프란시스코만의 입구에 위치하고 있으며, 현재까지 세계적으로 현수교의 대명사로 일컬어지고 있다. 지간장이 $1,280m$ 에 달하는 Golden Gate Bridge는 1964년 뉴욕주에 Verrazano Bridge가 준공되기 전까지 세계에서 가장 긴 교량이었다. 이 교량은 총 6차선이며 차로 양쪽편에도 도로가 있다. 보강형의 제원은 $27.4 \times 7.6m$ 이며, 최대운항고는 $67m$ 이다. 주탑의 높이는

높이는 168m에 달한다. Mackinac Bridge는 세계에서 가장 견고한 교량으로 알려져 있는데 이 교량은 시속 1,000km에 달하는 풍속에도 저항할 수 있도록 설계되었다. 총 4차선중 중앙의 2차선은 Open Grid로 설계되었고, 보강형의 제원은 20.7×11.7m, 최대운항고는 45m이다.

4. 1960년대 장대교량

1960년대에는 지간장이 1km가 넘는 장대교량이 3개소 건설되었는데, 1964년 9월 영국의 스코틀랜드에 1,006m의 지간장을 갖는 Firth of Forth Road Bridge가 준공되었다. 이 교량의 준공으로 인하여 유럽에서 최초로 지간장이 1km가 넘는 장대교량이 건설된 기록을 수립하게 되었다. 이 교량의 주탑 높이는 156m이고 보강형의 제원은 23.8×8.4m 이다. 최대운항고는 45m이고 현재 중차량의 통행을 위하여 보강공사가 진행 중이다.

1980년대 초에 영국의 Humber Bridge가 준공되기 이전에는 1964년 미국의 뉴욕만에 건설된 Verrazano-Narrows Bridge(사진 5)가 지간장 1,298m로서 세계에서 가장 긴 현수교였다. 이 교량 주탑의 높이는 210m이며 12차선의 통행이 가능한 보강형의 제원은 31.4×7.3m 이었다. 최대 운항고는 69m이다.

사진 2 Golden Gate Bridge의 전경

227m로서 1998년에 일본 Akashi교가 준공되기 전까지 세계 최고 높이의 주탑이라는 기록을 갖고 있었다.

3. 1950년대 장대교량

1940년대에는 지간장이 1km가 넘는 교량이 건설된 기록이 없으며, 1940년 지간장이 853m로 완공되었던 현수교인 미국 워싱턴주의 Tacoma Bridge 붕괴가 있었다. 이 교량의 붕괴 이후 보강형의 강성을 증가시키 설계하게 되었다.

1957년에는 미국 미시간주 미시간호와 Huron 호를 연결하는 지간장 1,158m, 교량 총연장 5.8km인 Mackinac Bridge(사진 3)가 준공되었다. 이 교량의 측경간장은 549m이며, 주탑의

사진 3 Mackinac Bridge의 전경(Mackinac Bridge Authority 제공)

사진 4 Firth of Forth Road Bridge의 전경(Scottish Tourist Board 제공)

구조를 갖고 있다.

6. 1980년대 장대교량

1981년 7월 영국의 Humber Bridge(사진 6) 만에 지간장이 1,410m에 달하는 현수교가 준공되면서 1890년 이후로 유럽에 세계에서 가장 긴 지간장을 갖는 장대교량이 탄생하였다. 이 교량은 일본의 Akashi교가 완공되기 이전까지 세계 최장의 지간장을 기록하고 있었다. 강박스 거더형식인 보강형의 제원은 22.0×4.5m 이었다.

이 교량은 다른 현수교에 비하여 크게 세가지 구조적 특징을 갖고 있는데, 이는 163m에 달하는 콘크리트 주탑, 경사행어, 유선형태의 보강형 구조이다. 또한 Humber Bridge는 측경간의 지간장이 280m, 530m로 서로 다르며, 최대운항고는 매우 낮아서 30m에 불과하다. 이 교량은 지간장이 1km가 넘는 교량중에서 유일하게 콘크리트 주탑과 경사행어를 갖는 교량이라는 기록을 갖고 있다.

Table 1에 나타내었듯이 지간장이 1km가 넘는 교량중에서 Great Belt, Humber, Jiangyin, Tsing Ma, Høga Kusten 교량만이 콘크리트 주탑을 갖고 있다.

1988년 4월, 일본에서 총연장이 12,306m에 달하는 Seto-Ohashi Bridge가 준공되었다. (편집자주: Seto에 대한 내용은 본 학회지 1996년 12월호에 소개된 적이 있으므로 심필자의 원고를

사진 5 Verrazano-Narrows Bridge의 전경

1966년 8월 영국의 Tagus강을 가로지르는 Ponte 25 de Abril Bridge가 준공되었다. 이 교량의 지간장은 1,013m로서 1970년대 까지 유럽에서 지간장이 가장 긴 현수교였다. 주탑의 높이는 190m로서 1998년 Great Belt East Bridge가 준공되기 이전에 유럽에서 가장 높은 주탑이었다. 보강형의 높이는 21.0×10.7m이고, 최대운항고는 70m로서 현재까지 세계에서 가장 높은 운항고를 기록하고 있다.

이 교량은 1990년에 보강공사를 착공하였는데 기존의 2개 현수케이블에 2개의 케이블을 증설하여 더블덱으로 개선하였으며, 하부덱은 철도교로 상부덱은 6차선의 차량통행이 가능하게 되었다.

5. 1970년대 장대교량

1973년 10월 터키 이스탄불에 지간장이 1,074m에 달하는 Bosphorus Bridge가 준공되었으며, 이로서 유럽과 아시아 대륙을 최초로 연결하는 교량이 건설되었다. 주탑 높이가 165m인 이 교량의 특징은 중앙경간만 행어가 있는 현수교 형식이며, 강박스로 가설된 보강형의 제원은 28.0×3.0m이다.

Table 1에 나타내었듯이 Great Belt, Humber, Jiangyin, Tsing Ma, Høga Kusten, Fatih Sultan Mehmet, Bosphorus, Kurushima-3 & 2, Severn 교량의 보강형은 강박스 거더형식이며 그외 교량은 보강형 트러스

사진 6 Humber Bridge의 전경

중략하였음). 일본 Kojima-Sakaide루트에는 장대교량이 3개소 있는데 이는 Minami-Bisan Seto(지간장 : 1,100m), Kita-Bisan Seto(지간장 : 990m), Shimotsui Seto(지간장 : 940m)이다. 이 중에서 Shimotsui Seto Bridge는 중앙경간만 현수교이고, Minami Bridge는 1997년 중국에서 Tsing Ma Bridge가 개통되기 이전까지 세계에서 가장 긴 도로 및 철도교이었다.

1988년 7월 터키 이스탄불에 첫 번째로 건설된 Bosphorus Bridge에서 수 킬로미터 떨어진 곳에 지간장이 1,090m인 Fatih Sultan Mehmet 현수교가 준공되었다. 교량의 형식은 기존의 Bosphorus교와 유사하나, 보강형은 경사행어로 가설되었다. 강박스거더로 구성된 보강형의 제원은 $33.8m \times 3.0m$ 이다. 이 교량의 특징으로는 측경간이 전혀 없는 단경간 현수교로서 주탑의 높이는 수면으로부터 165m이다.

7. 1990년대 장대교량

1997년 4월 중국 홍콩에서는 약 5년간의 공사기간을 거쳐, 세계에서 가장 긴 지간장을 갖는 도로 및 철도공용 교량인 Tsing Ma Bridge가 준공되었는데, 이 교량의 지간장은 1,377m에 달한다. 이 교량은 두 개의 측경간중 한 경간만 현수형식이며, 두 개의 현수케이블의 직경은 1,100mm이다. 트러스 및 강박스거더의 조합으로 구성된 보강형의 제원은 $41.0 \times 7.3m$ 이고 더블덱에서 상부데크는 6차선 도로교, 하부강박스 내부로 철도교가 가설되어 있다.

Tsing Ma 교와 비슷한 준공시기에 스웨덴의 Ångerman 강에 최대경간장이 1,210m인 Högå Kusten교가 완공되었다. 180m 높이인 콘크리트 주탑과 $22.0 \times 4.0m$ 제원을 갖는 강박스 보강형은 2개 차선을 갖고 있다.

1998년 세계 최장의 현수교인 Akashi Bridge가 준공되었다. (집필자주: Akashi교에 대

한 내용은 본 학회지 1998년 12월호에 소개된 적이 있으므로 집필자의 원고를 중략하였음).

1998년 6월 덴마크에서 지간장이 1,624m로서 세계에서 두 번째로 긴 (Great Belt 현수교 (사진 8)가 준공되었다. 이 교량의 주탑은 높이가 254m로서 콘크리트 주탑으로서는 세계에서 최고 기록을 갖고 있다. $31.0m \times 4.0m$ 의 제원을 갖는 강박스거더 보강형은 그 길이가 2,694m로서 강박스 연속 거더중에서 세계최장을 기록하고 있다.

중국의 양자강을 가로지르는 Jiangyin교가 1999년 10월 완공을 목표로 가설중에 있으며, 지간장 1,385m인 이 교량이 완공되면 세계에서

4번째로 긴 지간장을 갖는 교량이 탄생하게 된다. 이 교량은 196m 높이의 콘크리트 주탑사이인 중앙경간만 강상판 보강형(32.5m×3.0m)을 갖는 현수교이고, 측경간은 콘크리트 박스교이다.

8. 장대교량의 미래

현재 인도네시아와 일본에서는 기존의 최대지간장 기록을 갱신할 수 있는 장대교량 건설이 계획중에 있다. 인도네시아의 자바섬과 발리섬을 연결하는 연도교는 지간장이 2,300m인 사장교 형식으로 교량계획이 검토중이다. 일본에서는 혼슈

와 홋카이도를 연결하는 연도교가 계획중에 있는데, 이 교량의 중앙 2경간은 각 4,000m, 측경간장은 2,000m인 계획안이 검토중이다.

또한 몇 십년 전부터 이태리와 시실리 사이에 있는 Messina해협을 가로지르는 장대교량 건설 계획이 검토되었는데, 현수교로 검토된 계획안에 따르면 주경간장이 3,500m이고 주탑의 높이는 600m로 검토되었다. 이와 비슷하게, 스페인과 모로코 사이에 있는 Gibraltar해협에 건설계획이 검토되었던 현수교의 중앙 2경간장은 각 5,000m, 측경간장은 2,000m로 검토되었다.

원고를 기다립니다

저희 학회 회지의 지면은 여러분께 열려있습니다.

강구조에 관련된 내용이나 회원여러분께 도움이 된다고 생각하시는 내용등 여러분의 자유로운 글을 기다립니다.

여러분의 많은 참여를 부탁드립니다.

문의처는 ▶ 한국강구조학회

(135-280)서울 강남구 대치동 910-15 울전빌딩 4층

TEL : 02) 568-7636, FAX : 02) 568-1224