

# 콘크리트 사장교의 설계기술

## Design Method of the Concrete Cable-Stayed Bridge

조경식 Kyung-Sik Cho  
(주)DM엔지니어링 부사장

김항수 Chang-Su Kim  
(주)DM엔지니어링 상무

안기업 Ki-Up An  
(주)DM엔지니어링 이사

### 1. 머리말

콘크리트 사장교는 내구성이 좋고 압축에 강하여 사장재의 축력에 대해 효율적 단면구성이 가능하다는 구조적인 장점이 있음에도 불구하고 초기 사장교 시스템에서는 많이 사용되지 못하였다. 그러나 차츰 multi-stay 시스템의 보편화, 재료의 고강도화 및 시공기술의 발전에 힘입어 현재는 중대지간 교량의 대표적인 형식으로 자리매김하였다.

본 고는 콘크리트 사장교의 계획 및 설계에 대한 개괄적인 흐름을 정리해 설계자의 이해를 높이는 것에 목적을 두었다.

### 2. 기본 제원 결정

#### 2.1 경간 구성

##### 2.1.1 주경간장

콘크리트 사장교의 주경간장을 조사한 결과, 경제성 확보가 가능한 경간장은 200~450m 정도인 것으로 파악된다. 하지만 저명한 교량공학자 Fritz Leonhardt 교수는 콘크리트 사장교의 경우 400m(철도교)~700m(도로교)까지 가능하며, 강합성 사장교의 경우에는 600m(철도교)~1,000m(도로교)까지 안전하게 설계할 수 있다고 예측했다<sup>1)</sup>. 이는 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete; 이하 UHPC)와 같은 고성능 재료의 발전 속도를 감안하면 충분히 가능한 것으로 판단된다.

##### 2.1.2 측경간장

측경간비(측경간장/주경간장)는 Back stay cable의 피로 수명에 영향을 크게 미치며, 활하중비(활하중/사하중)가 클

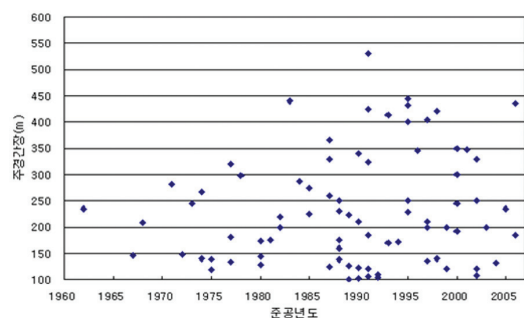


그림 1. 준공연도별 주경간장 조사

수록 축경간비를 작게 하는 것이 Back stay cable의 피로수명을 향상시키는데 유리하다. 콘크리트 사장교의 경우 도로교에서는 축경간비 0.42, 철도교에서는 0.34가 적절한 것으로 보고되고 있다<그림 2><sup>1)</sup>.

## 2.2 케이블 배치 및 주탑 형상

### 2.2.1 케이블 배치

케이블 배치형상은 팬형, 하프형 및 세미팬형이 있으며 배치형상에 따라 케이블의 효율이 달라지고 같은 효율을 내기 위한 주탑 높이가 달라질 수 있다. 그러나 일반적으로 노면에서 최외측 케이블의 높이가 주경간장의 0.2~0.25배 정도가 적절하다. 이를 최외측 케이블의 각도로 환산해 보면 20~25° 정도 되며, 이 범위에서 팬형 케이블 물량이 최소가 된다<그림 3><sup>1)</sup>.

### 2.2.2 주탑 형상

주탑의 형상은 기본적으로 H형과 A형으로 구분할 수 있으며<그림 4>, 도로의 폭, 도로의 높이 등에 따라서 다양한 변형이 가능하다. 다만 폭이 넓고 비틀림 강성이 작은

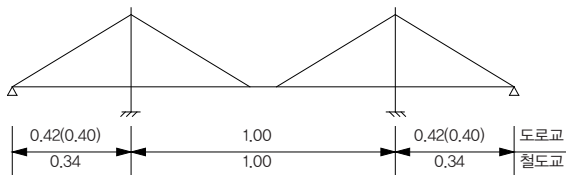


그림 2. 축경간비(괄호 안은 강사장교의 경우)

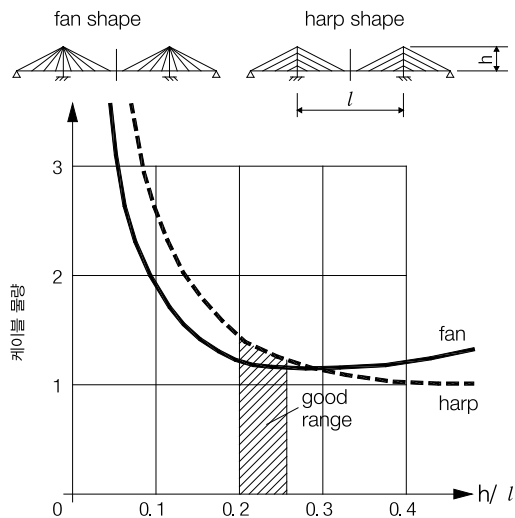


그림 3. 배치 형상에 따른 케이블 물량

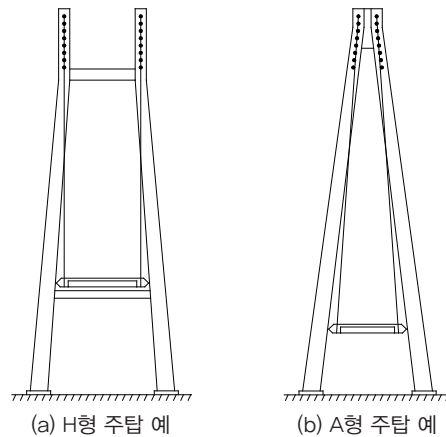


그림 4. 주탑의 대표적인 형상

거더의 경우, 편재하지 주탑 변형으로 추가되는 거더 처짐을 줄일 수 있도록 주탑 형상을 신중히 선정해야 한다. 경간장이 커지면 이 영향은 더 커지며 경간장이 400m 이상이면 A형 주탑을 적용하는 것이 좋다.

## 2.3 거더 단면

### 2.3.1 단면 형상

콘크리트 사장교의 거더 단면은 <그림 5, 6>와 같이 엷지형과 박스형이 있다. 기본적으로 박스거더에는 1면 케이블 배치를 많이 적용하는데 Skarnsundet Bridge와 같이 주경간장이 큰 반면 폭이 좁아 1면 케이블 배치는 충분한 비틀림 강성 확보가 어려울 경우 2면 배치를 적용하되 캔틸레버가 없는 역삼각형 단면을 적용하기도 한다.

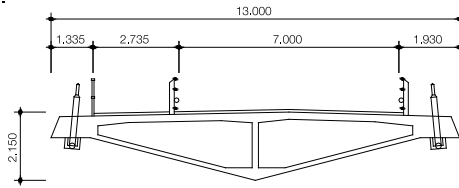
1면 배치시, 케이블 축력에 대한 보강방법에 따라 스트럿형과 격벽형으로 분류되기도 한다<그림 5>.

엷지 거더는 자체의 비틀림강성이 작아 2면 케이블 배치를 적용하며 캔틸레버의 유무와 케이블 정착위치에 따라 단면의 형상이 달라진다<그림 6>.

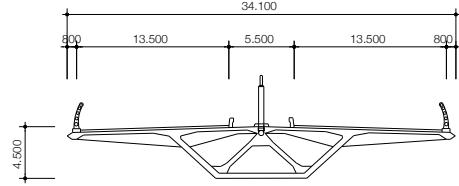
보도가 있는 경우에는 보도를 케이블 외측에 설치하고 캔틸레버 구조로 계획하면 단면의 효율성을 높일 수 있다.

### 2.3.2 거더 세장비

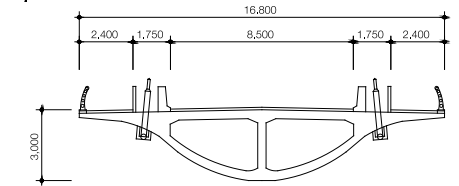
경간장이 커질수록 바람에 대한 거더의 안정성 문제가 중요해지므로 거더의 세장비를 고려해 단면제원을 정해



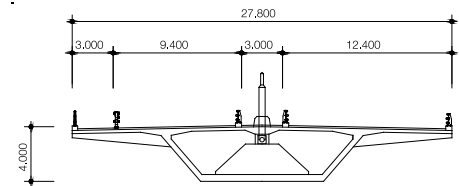
※세계최장의 콘크리트 사장교  
(a) Skarnsundet Bridge(주경간 530m)



※박스거더중 광폭교량(스트러트보강)  
(b) Centennial Bridge(주경간 420m)

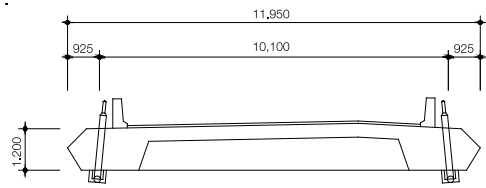


※국내최장의 콘크리트 사장교  
(c) 칠산대교(주경간 320m)

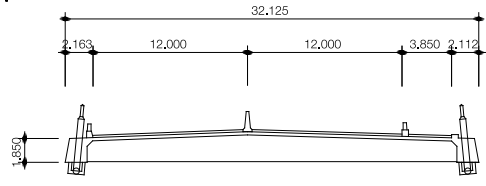


※다이아프램 보강 1면 박스거더  
(d) 화명대교(주경간 270m)

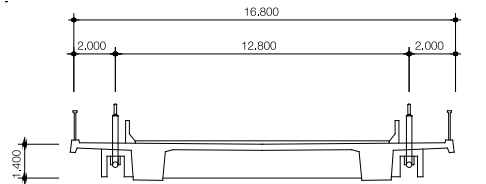
그림 5. 국내외 박스 거더 적용 사례



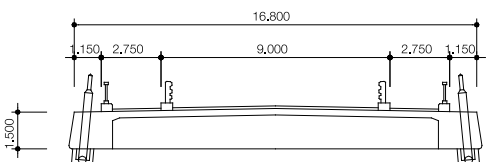
※세계최장의 옛지거더 콘크리트 사장교  
(a) Helgeland Bridge(주경간 425m)



※옛지거더중 광폭교량  
(b) Clebe Island Bridge(주경간 345m)



※캔틸레버가 있는 옛지거더 사장교  
(c) Rosario-Victoria Bridge(주경간 330m)



※국내 최장의 옛지거더 사장교  
(d) 하의-신의(주경간 290m)

그림 6. 국내외 옛지 거더 적용 사례

야 한다. 특히 주경간장/거더폭(한계변장비)의 비가 40을 초과하지 않도록 하는 것이 좋으며, 또한 주경간장/거더 높이비가 500을 넘지 않도록 거더의 단면높이를 정하는 것이 유리하다.

2.3.3 거더 세그먼트(segmentation)

콘크리트 사장교의 케이블 배치간격은 4~8m 정도가 일반적이며 거더의 가설단위가 되는 세그먼트 길이도 케이블 간격과 마찬가지로 4~8m를 적용한다. F/T(Form Traveler)의 규모는 세그먼트의 길이 및 중량에 의해 결정되며, 세그먼트 길이가 길어지면 F/T의 무게도 늘어나 시공하중이 커져서 단면설계에 불리해진다.

이런 문제 때문에 케이블 간격을 좁혀 F/T의 중량을

줄이거나 거더와 가로보를 1차로 제작한 후 케이블을 설치하여 지지구조를 구성한 후, 최종적으로 슬래브를 타설하여 F/T가 지지하여야 할 무게를 최소화하는 2단계 가설방법을 적용하기도 한다.

2.3.4 거더 설계기준압축강도

거더의 설계기준압축강도는 일반적으로 40~45MPa 정도지만 최근 UHPC 재료기술이 발전하여 2009년에는 순수 국내기술로 개발된 180MPa UHPC를 적용해 세계 최초의 보도사장교를 완공하였다<사진 1>.

UHPC의 경우, 엄격한 관리가 필요하여 현장 타설이 어렵지만 프리캐스트구조로 계획한다면 구조효율성과 시공성을 모두 만족할 수 있는 미래지향적인 재료이다.



사진 1. 한국건설기술연구원내 UHPC 보도 사장교

### 3. 콘크리트 사장교 설계지침(안)

2008년 10월 ‘콘크리트 사장교 설계지침(안)’(이후로는 ‘지침’이라 약함)이 제정되었으며, 시간길이에 관계없이 콘크리트 사장교 설계에 필요한 각종 규정들을 제시하고 있으므로 도로교 설계기준에 규정되지 않았거나 또는 장기간 교량에 확대 적용이 불합리하다고 판단되는 규정들을 대체할 수 있다.

‘지침’의 주요 내용중 일반적인 도로교 설계기준과 차이나는 부분들 위주로 정리하면 다음과 같다.

#### (1) 차로하중의 크기

시간길이가 200m를 초과하는 경우에는 DL하중의 등분포 차로하중을 시간길이에 따라 감소 적용할 수 있다(표 1).

#### (2) 설계차로수

설계차로수의 수 N은  $Wc/3.6$ 의 정수부로 하도록 되어 있으며 특정 차선수별 폭원의 범위를 제시하는 도로교 설계기준과는 조금의 차이가 발생한다.

표 1. 시간길이에 따른 하중적용

시간길이(m)	적용 하중	
L ≤ 200	집중하중	$P_m=108 \text{ kN}$ $P_s=156 \text{ kN}$
	등분포 차로하중	$W = 12.7 \text{ kN/m}$
L > 200	집중하중	$P_m=108 \text{ kN}$ $P_s=156 \text{ kN}$
	등분포 차로하중	$W=12.7 \times (0.57 + \frac{300}{500+L}) \text{ kN/m}$

#### (3) 케이블 교체

도로교 설계기준에는 규정되어 있으며 차량을 통제할 상태에서 특정 케이블을 교체하는 경우 안전성을 검토한다.

① 케이블 교체는 해당 케이블 인접 최소 1개 설계 차로 통제의 조건으로 검토한다.

② 케이블 교체시는 사용하중조합으로 검토하고 허용응력은 25%를 증가시킨다.

$$P(\text{주하중}) + PS1(\text{케이블 교체하중})$$

#### (4) 케이블 파단

도로교 설계기준에는 규정되어 있으며 특정 케이블이 불시에 파단될 경우에 안전성을 확보하기 위한 규정으로 콘크리트 사장교의 경우 강도설계법을 적용하며 허용응력은 검토하지 않는다.

① 케이블 전체 차로에 활하중을 재하하여 수행

② 고정하중과 활하중이 만재된 상태에서 구한 정적장력의 2.0배를 반대로 작용

③ 또는, 동적해석을 수행하여 그에 따른 영향을 검토, 정적장력의 1.5배 이상 적용

④ 케이블 파단시의 검토는 강도설계법을 적용

$$1.3D + 0.75(L+I) + PS2$$

#### (5) 케이블의 허용응력

정착부 편각시 피로시험여부에 따른 케이블의 허용응력을 상세히 구분하고 있다. 여기서  $f_u$ 는 인장강도이다.

① 공용 중 허용인장응력 :  $0.45f_u$

- 정착부 편각을 갖는 케이블 피로시험을 만족시키는 경우 :  $0.50f_u$

② 시공 중과 케이블 교체시 허용인장응력 :  $0.55f_u$

- 정착부 편각을 갖는 케이블 피로시험을 만족시키는 경우 :  $0.60f_u$

#### (6) 부반력

도로교 설계기준은 다음 값 중 불리한 값을 사용하여 설계하도록 되어 있다.

$$\max(2R_{L+I} + R_D, R_D + R_W)$$

그러나 ‘지침’에서는 별도의 부반력조합이 존재하는 것이 아니라 사용하중조합과 극한강도조합에서의 부반력값을 그대로 적용하고 있어 별도의 조합을 수행하지

않는다.

이 내용은 초과하중이라는 개념을 도입한 케이블 강교량 설계지침과는 또 다르며 케이블 강교량 설계지침에서 정의하는 초과하중 조합에 의한 부반력 산정방식은 다음과 같다.


- ① 활하중과 충격계수를 100% 증가시킨 하중조합에서 산출된 부반력의 100%
- ② 사용하중조합에서 산출된 부반력의 150%

(7) 풍하중

도로교 설계기준의 기본풍속은 재현기간 100년(내용년수 50년, 비초과확률 60%)으로 되어 있으나 '지침'에는 다양한 적용법을 제시하고 있다.

- ① 기본풍속은 재현기간 200년(내용년수 100년, 비초과확률 60%)으로 정의
- ② 시공중 풍속은 주경간 교량의 실제 공사기간을 사용하되 비초과확률을 80%로 적용

4. 맺음말

콘크리트 사장교는 경제적인 뿐만 아니라 유지관리가 용이하며, 타 형식에 비해 처짐 및 진동이 작아 사용성이 우수하다. 그럼에도 불구하고 자중이 크고 휨강성이 작아서 장대화가 어려웠다. 앞으로는 고강도 재료, 효과적인 시공법의 개발, 하이브리드 구조의 적용 등 보다 적극적인 자세로 본격적인 장대 콘크리트 사장교의 건설을 위한 노력이 필요할 것이다. 

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

참고문헌

1. Leonhardt, F., "Cable Stayed Bridges With Prestressed Concrete", *PCI Journal*, 1987.
2. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2010.
3. 한국건설기술연구원, 콘크리트사장교설계지침(안), 2008.
4. 대한토목학회, 케이블 강교량 설계지침, 2006.



**조경식 박사**는 서울대학교 토목공학과에서 곡선 BEAM-TENDON 요소를 이용한 세그멘탈교량의 정적 및 동적해석에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 삼우기술단, 유신을 거쳐, 현재 디엠엔지니어링의 부사장으로 근무하고 있다. 서해대교 설계과정을 통해 사장교 설계의 틀을 구축하였으며, 삼천포대교, 거금대교, 광양대교 등 각종 특수교량의 설계 총괄업무를 담당하였다.

drchoks@dm-eng.com



**김창수 상무**는 서울대학교 토목공학과에서 강상판 해석을 위한 직교이방성 판요소의 개발에 관한 연구로 석사학위를 취득하였고, 다산컨설팅을 거쳐, 현재 DM엔지니어링 상무로 근무하고 있다. 주요 경력으로는 국내 최대의 현수교인 광양대교, 국내 최초의 와렌트러스 사장교인 거금대교, 세계 최대의 1주탑 현수교인 단등대교의 설계에 참여한 바 있다.

brideng@dreamwiz.com



**안기업 이사**는 금오공과대학교 토목공학과에서 프리스트레스트 콘크리트 뼈대구조물의 시간의존적 효과에 관한 연구로 석사학위를 취득하였고, 유신을 거쳐, 현재 DM엔지니어링 이사로 근무하고 있다. 주요 경력으로는 국내 최대의 철도 아치교인 포승평택의 교포교, 국내 최대 강함성 사장교인 거가대교의 설계에 참여한 바 있다.

ansonidm@dm-eng.com