

특집

콘크리트 교량

콘크리트 사장교

Concrete Cable Stayed Bridge



변 윤 주*

1. 서 론

콘크리트를 재료로 하는 교량구조 형식 가운데 긴 경간을 갖는 것은 사장교 형식이다. 사장교는 케이블 (stay cable)로 지지되는 대표적인 장경간 교량 형식으로서 지난 40여년간 재료, Computer 및 건설기술의 발달로 급속한 발전을 하였으며, 현재는 어떠한 형태의 사장교 구조도 설계 및 시공이 가능하고 미관도 수려하여 전세계적으로 최전성기를 맞고 있다.

특히, 사장교는 구조특성상 상부 거더가 큰 압축력을 받게 되므로 압축응력에 매우 강한 콘크리트 재료로서는 사장교 형식이 가장 적합한 장경간 교량이라고 할 수 있다. 본 란에서는 이러한 특성을 갖고 있는 콘크리트 사장교에 대한 구조적 특성과 설계시 주요사항에 관하여 서술하기로 한다.

2. 콘크리트 사장교의 구조적 특성

2.1 구성요소

사장교는 주탑, 케이블 그리고 상부 거더의 3

가지 요소로 구성되어 있으며 주탑과 상부 거더는 주로 압축력에 의한 지배를 받고, 케이블은 인장력에 의해 지배를 받는 교량구조 형식이다.

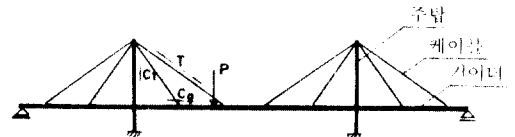


그림 1 사장교의 구성요소

2.2 구조적 특성

케이블로 지지되는 교량형식중 대표적인 것으로는 사장교와 현수교가 있다. 현수교는 주 케이블이 포물선형으로 배치되어 연직하중 재하시 케이블의 장력이 평형상태에 이를 때까지 큰 변형을 일으키고 이때 상부 거더에는 큰 인장력이 발생하게 되는 반면에, 사장교에서는 주케이블이 주탑과 거더를 직선상으로 직접연결 되기 때문에 현수교와 같이 큰 변형은 발생되지 않으며 (그림 2 참조), 연직하중재하시 상부 거더는 큰 압축력이 발생하게 된다. (그림 3 참조)

* 정회원, (주)삼우기술단 기술연구원 이사, 공학석사

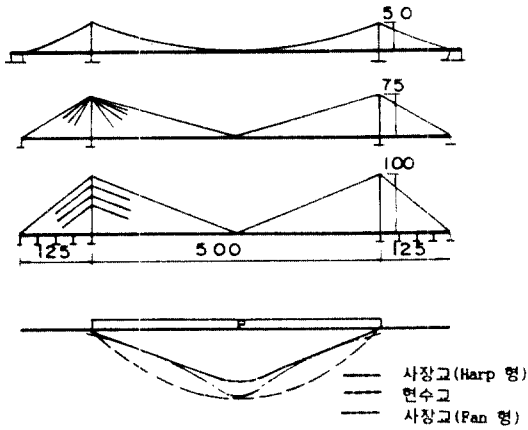


그림 2 사장교와 현수교의 처짐 비교 예

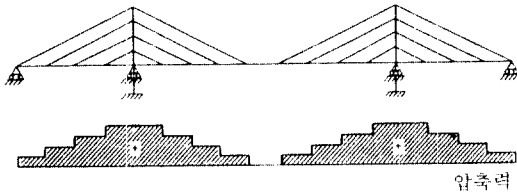


그림 3 사장교의 상부 거터더에 작용하는 압축력 분포도

이러한 구조물의 변형이 적고 상부 거터더에 압축력이 작용하게 되는 것이 사장교가 현수교보다 경제적으로 유리하게 되는 가장 큰 이유이다. 한편, 구조물의 강성 (stiffness)과 경계조건 (boundary condition's) 및 자유도 (degree of freedom)에 있어서도 사장교가 현수교에 비하여 큰 구조물 강성을 갖고 있고 매우 다양한 경계조건과 자유도를 부여할 수 있어 어떠한 지형조건이나 주위환경에도 훌륭하게 가설할 수 있는 것이 큰 장점이라 하겠다. 경계조건이나 자유도를 지배하는 요인으로는 다음과 같은 것이 있다.

- 1) 케이블의 배열 (종·횡방향)
 - 2) 케이블의 수
 - 3) 주탑과 거터더에 케이블이 정착되는 위치 및 결합조건
 - 4) 주탑 기초부의 지지조건
 - 5) 주탑과 거터더의 연결조건
 - 6) 시·중점부에서 하부구조와의 연결조건
- 특히, 콘크리트 사장교는 강사장교에 비하여 주

형의 강성이 크고 압축력의 저항에는 탁월한 재질을 갖고 있어 지간 약 300m 이내의 장경간교로서는 최적의 교량형식이라 하겠다. 참고로 Mallick (1983)이 제시한 이론상 가능한 지간장의 길이는 표 1과 같다.

표 1 사장교의 이론적 최대 가능지간

교량형식	주부재만 고려할 경우	상판과 활하중을 주부재 중량의 20%로 할 경우
PC사장교	600m	480m
강사장교	2,900m	2,320m

일반적으로 주어진 조건하에서 교량형식을 선정할 경우 최근에는 생활수준의 향상과 함께 과학적인 것 보다는 실제적으로 예술적인 것을 고려하여 결정하는 경우가 많이 있으며, 콘크리트 사장교에 대한 유리한 점으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- 1) 종·횡방향 케이블수의 조절로 상부구조를 매우 날렵한 형상으로 하여 (거터더 높이/지간 = 1/50 ~ 1/200), 미관상 현대적 감각을 지닌 수려한 교량으로 계획할 수 있다.
- 2) 콘크리트 거터더는 단면 자체의 강성이 크고 충격흡수능력이 있기 때문에 동적거동 특히, 바람에 의한 영향에 매우 강한 면이 있다.
- 3) 케이블의 종방향 수평력은 상부 거터더에 발생하는 휘에 대하여 압축력으로 작용하게 되어 인장용력을 감소시켜줌으로 인하여 사용 철근량을 상당량 절감할 수 있다.
- 4) 콘크리트 단면이 갖는 큰 강성으로 인한 활하중에 의한 처짐이 작기 때문에 철도교나 중차량 교통량이 많은 곳에 특히 적합하다. (활하중/사하중의 비율이 작기 때문)
- 5) 최근 건설기술의 발달로 긴장작업, 가설조립 및 segmental cantilever의 시공등이 상대적으로 간편하다.

3. 콘크리트 사장교의 설계

사장교 구조는 고차원 부정정구조이고 장경간 구조이기 때문에 선정된 교량형식에 대하여 설계 시 완공후 뿐만 아니라 시공중의 상태에 대해서도

각 단계별로 하중상태 및 구조물의 거동을 신중히 고려하여 설계하여야 한다.

3.1 주요 설계 내용

사장교 설계는 일반적으로 예비설계와 본설계로 나누어 수행되는데, 예비설계는 각 구조형식별 비교에 따른 구조체계의 결정, 재료의 선정 및 주요단면 형태의 결정 등을 수행하는데 그 목적이 있고, 본설계는 결정된 구조체계와 단면을 가지고 구조해석을 통한 주요부의 상세설계를 하는데 그 목적이 있다.

3.1.1 예비설계

예비설계시 결정하는 사항으로는 다음사항들이 있다.

- 1) 경간수와 경간비의 결정
- 2) 주탑과 주경간과의 구성비 결정

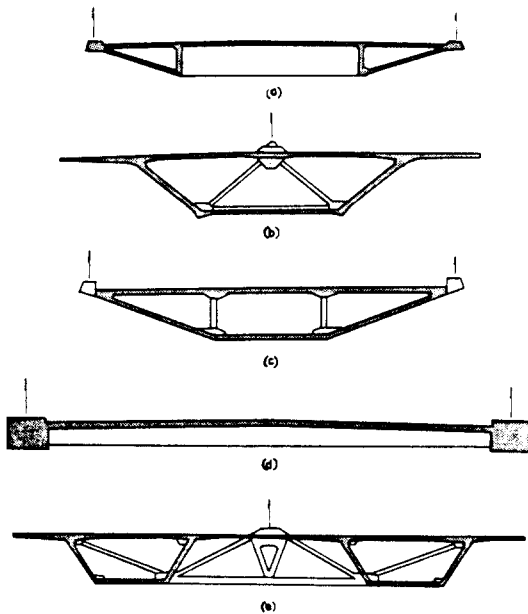


그림 4 콘크리트 상부구조 단면에 : (a) Pasco-Kennewick Bridge, Washington, (b) Sunshine Skyway Bridge, Florida, (c) Neches River Bridge, Texas, (d) Dame Point Bridge, Florida, (e) James River Bridge, Virginia and proposed Cooper River Bridge, South Carolina.

- 3) 상부 구조의 단면형태 결정
 - 4) 주탑의 형상 및 단면형태 결정
 - 5) 케이블 단면의 결정
 - 6) 케이블의 정착방법 및 위치 결정
- 상기의 사항 가운데 일반적으로 많이 사용되는 상부구조 단면형태를 보면 그림 4와 같다.

또한 사장교에서 가장 중요한 케이블의 선정에 있어서는 높은 탄성계수와 인장강도 그리고 피로에 대한 저항성이 좋은 것으로 선정하여야 한다. (표 2 참조)

표 2 케이블의 탄성계수 및 극한강도

종 류	탄성계수	극한강도
와이어 케이블	$E=2.05 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$	$1,700 \text{N/mm}^2$
스트랜드 케이블	$E=2.04 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$	$1,860 \text{N/mm}^2$

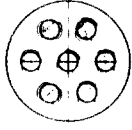
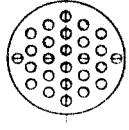
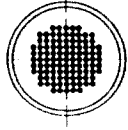
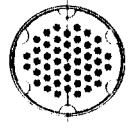
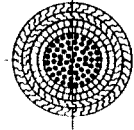
이러한 조건을 만족시키는 케이블로는 와이어 케이블과 스트랜드 케이블이 있으며, 최근의 사장교에는 대개 이 두종류의 케이블이 채택되고 있다. 그림 5는 케이블의 종류를 보여주고 있다. 케이블의 역학적거동을 영구적으로 지속시키기 위해서는 케이블의 부식방지가 필수적이며 일반적으로 grouting 방법 (혹은 rigid type protection) 과 non-grouting 방법 (혹은 flexibility type protection)이 있는데 최근에는 케이블의 유연성, 시공성 및 유지관리면에서 유리한 non-grouting 방법이 많이 사용되고 있다.

3.1.2 본설계

본설계는 예비설계에서 결정된 구조형식과 단면 형태 등으로 부터 구조해석을 수행하여 주요부재인 상부 거어더, Pylon 그리고 케이블에 대한 각각의 단면력 산정, 응력 검토 및 그에 따른 상세 보강을 하게 된다. 사장교의 구조해석은 일반적인 교량구조해석과 그 진행 과정은 유사하므로 여기서는 생략하고 콘크리트 사장교의 설계시 특별히 유의해야 할 사항에 대해서만 언급하기로 한다.

1) 크리이프와 건조수축에 의한 영향

콘크리트 사장교의 설계시 주의해야 할 사항은 강사장교와는 달리 크리이프(creep)와 건조수축(shrinkage)에 대하여 각별히 유의해야 한다는

케이블 형식	 Coupled bars 7 ϕ 36 Steel 835 / 1030	 Uncoupled bars 26 ϕ 16	 Parallel wires 128 ϕ 7	 Strands 27 ϕ 15	 Locked coil cables
단면구성	Bars ϕ 26.5, 32, 36mm	Bars ϕ 16mm	Wires ϕ 6.7mm	Strands ϕ 0.5, 0.6, 0.7 in of 7 twisted wires	Wires with different profiles ϕ 2.9 ~ 7mm
0.2% 항복응력 $\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	835 1080	1350	1470	1570~1670	—
극한인장강도 β_2 (N/mm ²)	1030 1230	1500	1670	1770~1870	1000~1300
피로응력* $\Delta\sigma$ (N/mm ²) $\sigma_{max}\beta'$	80 0.60	—	350 0.45	300~320 0.5~0.45	120~150 ~0.45
탄성계수 E (N/mm ²)	210000	210000	205000	190000~200000	160000~165000
파괴하중 (kN)	7339	7624	7487	7634	7310

* Cable strength without taking into account the effect of the anchorages.

그림 5 케이블의 종류

것이다. 이것은 상부 거어대와 주탑은 콘크리트 부재로 구성되는 반면에 케이블은 순수 강재로 구성되기 때문에 시간의 경과에 따라 장기처짐이 상당히 진행하게 되어 상부 거어대에 추가 응력이 발생하게 된다.

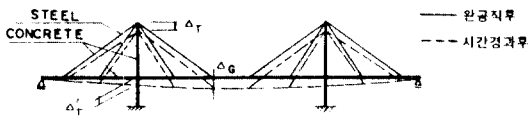


그림 6 콘크리트 사장교의 시간의 경과에 따른 변형

이 경우 발생된 추가응력을 제거 시키기 위해서는 2가지 방법이 있다.

- 1) 케이블을 재긴장하는 방법
- 2) 교량 가설시 높이를 조절할 수 있는 교차장

치를 설치하는 방법

두 경우 모두 장·단점이 있으나 최근에는 컴퓨터의 발달과 함께 어떠한 고차원 부정정 구조의 해석도 가능하므로 첫번째 방법을 사용하는 경우가 대부분이다. 한편, 위와 같은 번거로움을 피하기 위해 강재 케이블 대신 P.S 콘크리트 부재를 케이블로 사용하는 경우도 있으나 이 경우는 고도의 시공기술이 뒷받침되어야 한다.

2) 바람의 영향에 대한 고려

바람과 구조물의 동적 상호작용에 대한 연구는 1940년 11월 미국의 Tacoma Narrow교 붕괴 사고 이후 급속한 발전을 거듭하였다. 케이블로 지지되는 사장교는 장경간교로서 구조물의 전체강성이 일반구조물에 비하여 약하므로 바람에 의한 영향을 많이 받게된다.

바람의 영향은 근본적으로 물체 주위로의 유체

의 이동인 동적현상이지만 통상 설계시에는 정적 거동과 동적거동으로 분류한다. 여기서, 정적거동은 바람이 일정방향의 균일한 속도로 작용한다는 이상적인 상태에서의 거동을 말하며 풍압력 P (kg/m)는 다음과 같다.

$$P = 1/2 \rho v^2 A C_D$$

여기서, v : 설계풍속 (m/sec)

A : 교축방향 유효투명면적 (m²/m)

ρ : 공기밀도 (=0.125 kg · sec²/m³)

C_D : 항력계수

한편, 동적거동은 공진(Resonance)과 Flutter (혹은 Wobble)로 구분된다.

(1) 공진 (Resonance)

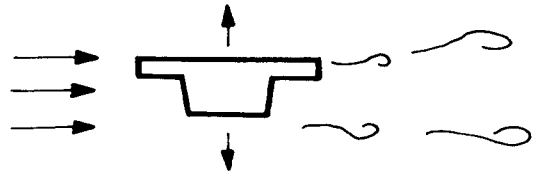


그림 7 바람에 의한 공진 현상

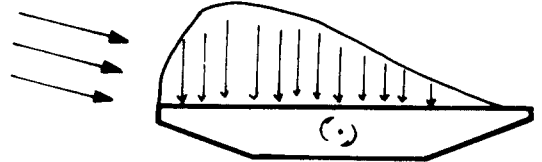


그림 8 바람에 의한 Flutter 현상

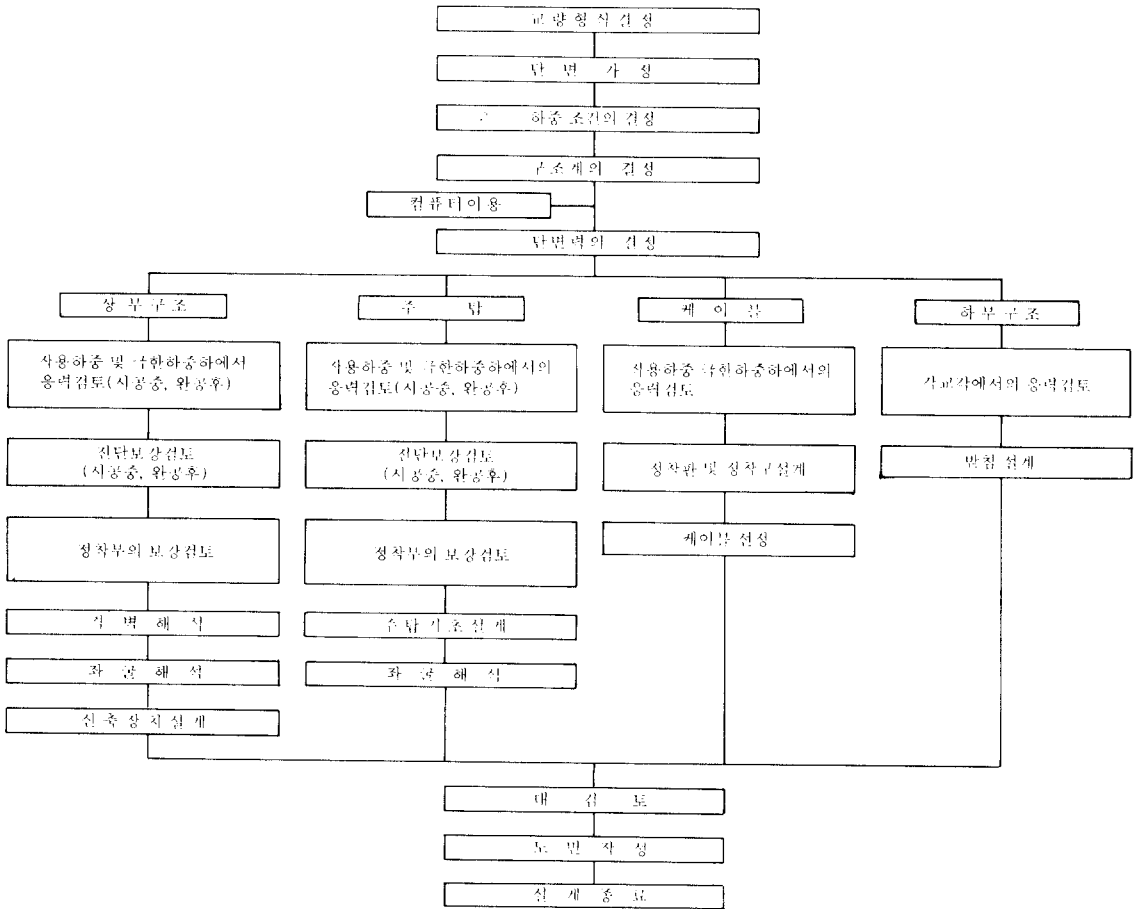


그림 9 콘크리트 사장교의 설계 과정

이 현상은 비유선형단면에 바람이 부딪힐 때 발생하는 Benard-Karman의 와류로 인한 것이며, 이 와류의 동적주기가 그 구조물의 고유진동수와 일치하거나 비슷하면 일단 발생된 진동이 낮은 풍속하에서도 감쇄되지 않고 계속 진행되는 현상으로서(그림 7 참조) 구조물 특히, 케이블의 피로(fatigue) 현상으로 인한 심각한 손상을 가져올 수 있으므로 설계시 충분히 고려하여야 한다.

(2) Flutter (혹은 Wobble)

이 현상은 강한 풍속하에서 단면에 발생하는 양력의 변화 즉, 구조물의 상·하운동으로 인한 휨 및 비틀림 현상을 말하며, 궁극적으로 구조물의 붕괴를 야기시킬 만큼 매우 위험한 현상이다. (그림 8. 참조)

이러한 현상의 보다 정밀한 연구검토를 위하여 풍동실험을 하는 것이 바람직하나 최장지간이 300m이하의 콘크리트 사장교의 경우에는 이론적인 방법으로 검토하여 안전할 경우 실험적 방법은 생략하는 경우가 많이 있다.

이외에도 내진설계, 피로설계 및 케이블 정착부

에서의 상세부설계 등을 각별히 유의하여 설계하여야 한다.

상기 사항들을 고려한 전체적인 콘크리트 사장교의 설계과정은 그림 9에서 보여주는 바와 같다.

4. 결 론

사장교는 역학적으로 가장 안정된 장대교량 형식으로서 설계 및 시공기술의 발달로 전세계적으로 최근 가장 많이 건설되고 있다. 특히, 콘크리트 사장교는 콘크리트 재료의 특성상 단면의 강성이 크므로 휨과 비틀림에 강한면이 있고 또한 소음 및 경제성 등에도 매우 유리한 구조이기때문에 선진외국에서는 500m 이상의 장경간에도 건설되는 실정이다. 국내의 경우 올림픽대교를 시작으로 몇몇 교량에서 콘크리트 사장교가 시도 되었으나 실현되지 못하였는바 우리 기술자들도 좀더 기술을 향상시켜 앞으로 경제성 있고 시공성 좋은 콘크리트 사장교가 많이 건설되었으면 한다. □