

특 집

|| 최신 프리스트레스트 콘크리트 ||

프리스트레스트 콘크리트 교량의 발전 및 전망

- New Trends and Prospect in Prestressed Concrete Bridges -



김우종*
Kim, Woo Jong



김광수**
Kim, Kwang Soo

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트(PSC) 교량은 안전성과 경제성, 그리고 유지관리적인 측면은 물론 미학적으로 매우 우수한 형식으로 인식되고 있어 전체 교량에서 차지하는 비율은 꾸준히 증가해 오고 있다. 국내에서는 1960년대 교량 적용을 시작으로 원효대교, 금곡천교를 비롯한 장대교량 적용이 1980년대 중반까지 이어졌으며 1989년 최초의 PSC 사장교인 올림픽대교가 완공되기에 이르렀다.

이러한 PSC 교량은 최근에 와서 기술과 재료의 발전으로 국내외적으로 뚜렷한 전기를 맞고 있는데 교량 공학자인 Michel Virlogeux는 강과 콘크리트를 함께 적용하는 교량형식과 새로운 건설재료의 적용을 PSC 교량의 큰 흐름으로 제시한 바 있다. 특히 고성능 콘크리트나 reactive powder concrete와 같은 새로운 타입의 콘크리트는 이미 현장 적용성이 검증된 바 있으며 탄소섬유나 아라미드와 같은 신소재는 콘크리트 교량의 구조적 효율성과 사용성을 획기적으로 개선시킬 수 있다. 이러한 진보적이고 혁신적인 교량이 가능한 것은 프리스트레싱 기술의 비약적 발전에 근거하고 있다.

본고에서는 최근의 국내·외 사례들을 중심으로 PSC 교량의 발전 동향과 향후 전망을 분석해 보고자 한다. PSC 사장교와 함께 파형강판 Web PSC교, Extradosed교 등의 특징들을 분석하고, 특히 최근에 각광받고 있는 복합구조 형식을 갖는 PSC 교량을 살펴본다.

2. Extradosed교

2.1 개요

Extradosed교의 개념은 「prestressed concrete bridges」의 저자인 Christian Menn에 의해 설계된 Ganter Bridge에서 시작되었다고 할 수 있다. 총 700m에 이르는 이 교량은 주변 지형에 맞추어 양 측경간부를 곡선으로 처리하고 있으며 바닥판의 양 측면에 PSC 월(wall)을 배치하였는데 높이 솟은 교각과 함께 스위스의 산악지형과 잘 어울리는 상부구조 형상이 매우 아름다운 교량으로 인식되고 있다. 실질적으로 Extradosed교라는 용어와 개념의 정립은 Jacques Mathivat의 「Arret Darre Viaduct project」와 그의 저서에서 이루어졌다고 볼 수 있는데 「Arret Darre Viaduct」가 시공으로까지 이어지지는 않았다.

Extradosed교는 PSC 거더교의 형식을 갖는 소경간의 교량과 장경간의 사장교 사이에 적합한 중경간의 교량 형식에 대한

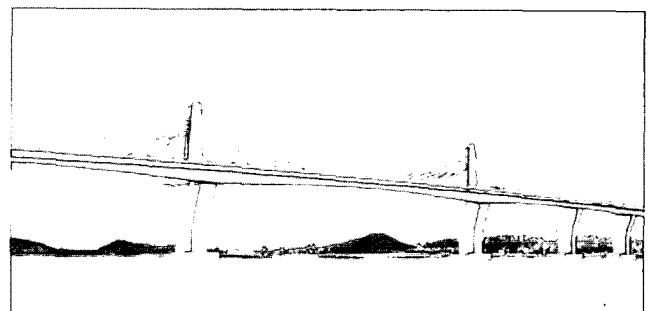


그림 1. 시공 예정인 운남대교

* 정회원, (주)DM엔지니어링 대표이사

** 정회원, 현대건설 기술개발원 선임연구원

요구에 부응하는 것으로 형교과 사장교의 장점을 결합한 형식으로 인식되고 있다.

이는 PS 강재를 거더의 유효 이상으로 외부로 편심시킨 것으로서 PSC 거더교에 비해서는 자중 및 PS 강재량을 줄일 수 있으며 사장교에 비해서는 주탑고 등을 현저하게 낮출 수 있어 100 ~ 200 m 지간의 교량에 매우 적합하다고 할 수 있다. 이에 따라 국내에서도 많은 기술적 논의들을 바탕으로 활발한 설계가 이루어져 다수의 교량들이 시공 중에 있다.(그림 1)

2.2 Extradosed교의 구조적 특징

2.2.1 형교

사장교의 거더는 케이블 지지점간의 거리에 따라 단면이 결정되는 보강형의 의미를 가지며 최소한의 강성만을 요구하지만 Extradosed교는 지간장에 따라 형교가 결정되는 거더교의 특성을 가지며 사재 케이블이 주형인 PSC 거더와 함께 외력에 저항하게 된다. 따라서 Extradosed교의 형교비(형교/지간장)는 지점부의 경우 1/30 ~ 1/35, 중앙부의 경우 1/50 ~ 1/60 정도의 값을 갖는 것이 일반적이다. 그러나 사장교의 경우 형교비는 1/80 ~ 1/100의 범위에 있어 2.0 m ~ 2.5 m의 형교가 일반적인 사실에 비하면 다소 높은 형교를 갖게 된다. 반면에 형교비가 1/15 ~ 1/17 정도의 값을 갖는 PSC 거더교에 비해서는 형교를 월등히 낮출 수 있어 사장교와 거더교의 중간 특성을 보임에 따라 일반적인 PSC 거더교에 비해서는 상부구조의 시공법 선정에 있어서 보다 자유로울 수 있다.

2.2.2 주탑

사장교의 경우 보강형을 지지하기 위한 케이블의 연직도가 클수록 구조적 효율성이 높지만 Extradosed교의 주탑은 주형의 프리스트레스 도입을 위한 편심량 증가에 그 목적이 있으므로 상대적으로 낮게 된다. 즉, 하부플랜지의 과도한 압축에 대하여 정모멘트의 도입에 주된 목적이 있으므로 케이블은 보다 수평에 가깝게 되며 탑고비(주탑고/지간장)는 1/8 ~ 1/21로 사장교의 1/3 ~ 1/5에 비해서는 매우 낮다.

이와 같이 낮은 주탑구조로 인하여 사재의 연직성분이 작아 주탑이 부담하는 축력이 상대적으로 작으며 이에 따라 좌굴 방지를 위한 가로보의 배치가 필요없다. 또한 사장교에 비해서 주변 경관과의 조화를 고려한 교량 설계가 가능하며 형상 또한 직립 또는 V자 형으로 다양하게 계획할 수 있다. V자형 주탑의 경우 안정감이 직립형에 비하여 떨어지고 복잡해지는 단점이 있지만 교상 공간에서의 개방성에 있어서는 큰 장점이 있다.(그림 2)

사재 케이블의 주탑부 고정은 다양한 방법을 적용할 수 있는데 먼저 관통 구조를 적용할 수 있는 것이 큰 특징으로 새들(saddle) 정착방식이 이에 해당한다. 새들 구조는 주탑의 시공성을 향상시

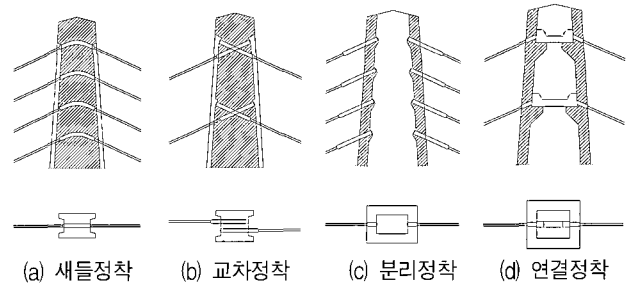


그림 2. 사재의 주탑 고정 방식

키고 대편심 확보에 유리하지만 좌, 우 긴장력의 차이에 의하여 사재가 활동할 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다. 물론 분리 구조에 의한 정착방식도 적용할 수 있는데 교차 정착이나 분리 정착, 연결 정착 방식 등이 대표적이라 할 수 있다.

2.2.3 사재 케이블

Extradosed교의 가장 큰 특징중의 하나는 사용하중 하에서의 케이블 거동이라 할 수 있다. 즉 사장교의 케이블과 비교해서 활하중 하에서 응력변동이 매우 작다는 사실인데, 이는 주형의 강성, 지점조건 및 주탑의 높이에 큰 영향을 받는다. Extradosed교는 주탑이 낮아 사재의 연직성분 신장량이 작으며 주형의 강성이 커서 사재의 하중 분담률이 작기 때문에 사재의 응력변동이 작게 된다. 일본에서 다수 시공된 Extradosed교를 대상으로 조사한 결과 케이블의 연직하중 분담률(케이블의 분담하중/전체 연직하중)은 약 30 % 가량이며 응력 변동폭은 주로 5 MPa 내외인 것으로 나타났다. 이와 같이 Extradosed교의 케이블 응력 변동폭은 CEB-FIP 등에서 제한한 범위내에 있어 일반 PS 강재의 허용응력 기준을 적용할 수 있다. 따라서 사재 케이블의 허용응력 기준은 $0.6 f_{pu}$ 를 적용하게 되고 이는 일반적으로 사장교 케이블에 대해서 적용되는 $0.45 f_{pu}$ 에 비해서 케이블 부재의 효율성을 높일 수 있다. 일본의 「PC 사장교 및 Extradosed교 설계 시공규준(안)」에서는 사재의 응력변동에 따른 허용응력을 규정하고 있다.(그림 3)

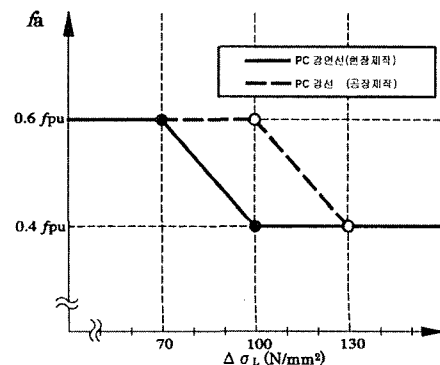


그림 3. 사재의 응력변동과 허용응력

2.3 Extradosed교의 설계 및 시공

Extradosed교는 유럽에서 시작되었지만 실질적인 적용은 일본에서 매우 활발하게 이루어졌으며 지금은 파행강판, 혼합구조 거더 등을 활용하여 그 구조형식이 더욱 다양해지고 있으며 철도 교에까지 그 적용영역을 넓히고 있다. 이에 따라 일본에서는 「PC 사장교 및 Extradosed교 설계시공규준(안)」을 제정하였는데 몇 가지 설계의 원칙을 제시하고 있다. 사장교와 Extradosed교는 구조적으로 동일한 것으로 설계하도록 규정하고 있으며 한계상태설계법을 원칙으로 구조해석 방법과 주형, 주탑, 사재를 사장교와 동일한 방법으로 설계하도록 권고하고 있다.

2.3.1 사재 케이블

사재 케이블의 배치는 주로 Fan형과 Harp형이 많으며 지지면 수에 따라 1면 지지 및 2면 지지로 나눌 수 있다. 사재 배치 본수와 정착위치 등에 따라서 설계된 교량의 연직하중 분담률과 활하중 응력 변동폭을 비롯한 구조 거동상에 있어서의 차이를 보이게 된다.

사재 케이블의 허용응력과 안전율의 설정은 케이블의 강성과 구조계 전체의 강성을 결정하는 매우 중요한 요소가 된다. 사장교 케이블의 경우 국내기준과 일본은 안전율을 2.5로 규정하고 있는데 Extradosed교의 사재 케이블은 응력변동폭에 따라서 영향은 있을 수 있지만 설계시 안전율을 1.67로 적용하는 경우가 많다. 물론 합리적인 방법에 의하여 피로 등을 고려한 상세 검토를 시행하는 경우에는 그 값을 경우에 따라 별도로 결정할 수도 있다. 사재의 정착간격과 최초 사재의 배치 위치를 결정하는 것은 Extradosed교의 설계에 있어서 매우 중요하며 최초 정착위치(a)와 지간장을 고려하여 a/L에 따른 영향 분석이 설계과정에서 수행되기도 한다. 이러한 경우에도 사재의 연직하중 분담률과 발생하는 장력 등을 고려하여 구조적 안전성과 경제성을 높일 수 있도록 결정하여야 할 것이다. 또한 사재는 릴렉세이션을 고려하여 설계하여야 하며 일본의 설계시공규준(안)에서는 일반적인 PS 강재에서와 동일하게 다음의 CEB-FIP 제안식과 함께 결보기 릴렉세이션율을 제시하고 있다.

$$\gamma = \gamma_o \left(1 - \frac{2\Delta f_{\mu(c+s)}}{f_{pi}} \right) \quad (1)$$

여기서, γ_o : 순 릴렉세이션 값

$\Delta f_{\mu(c+s)}$: 크립 및 건조수축에 의한 PS강재의 인장응력 감소량

f_{pi} : 긴장작업 전후의 PS 강재 응력

제시된 결보기 릴렉세이션율은 일반적인 경우와 마찬가지로 PS 강재의 종류에 따라 1.5, 3, 5 %의 값을 사용할 수 있다.

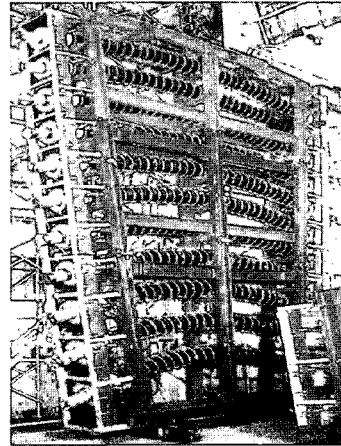


그림 4. 새들부 제작

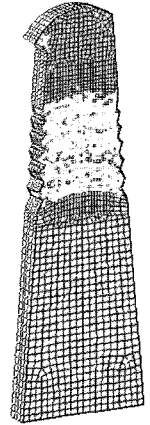


그림 5. 새들부 모델링

2.3.2 주형 및 주탑

주형은 일반적으로 박스거더 형태가 선호되며 내·외부 강선을 병용하여 배치하는 경우도 다수이다. 사장교와는 달리 Extradosed교의 주형은 단면력을 주로 부담하는 구조부재로서 지간장에 직접적으로 영향을 받으며 적절한 강성을 필요로 한다.

사재 케이블의 인장에 따라 주형에 도입되는 압축응력의 분포 특성은 케이블 배치에 대한 설계단계에서 매우 큰 의미를 갖는다. 이는 유효 전달길이(effective transfer length)에 대한 분석이며 사재의 경사각과 교폭 및 형교에 의해 주로 지배되는 것으로 분석되고 있다.

주탑의 경우 앵커 정착방식인 사장교의 경우에 비해 Extradosed교에서는 관통방식에 의한 새들정착 구조를 적용할 수 있다. 새들부는 사재의 힘을 주탑에 직접 전달하는 매우 중요한 구조요소이며 설계시 국부 응력등에 대한 검토를 필요로 한다. 또한 좌, 우 장력차의 전달구조와 사재 배치형상 등에 대한 구조 세목이 결정되어야 하는데 응력흐름이 복잡하여 간단한 설계방법을 수립하는 것은 현실적인 어려움이 있다. 이에 따라 해외에서는 모형 실험을 수행하는 사례도 있으며 주로 유효요소 해석에 의하여 적정성을 검토하는 것이 일반적이다.(그림 4, 5)

3. 복합교량

3.1 현황

최근까지 토목 및 건축 구조물의 대형화 및 다양화는 지속적으로 요구되어 오고 있으며 이는 강과 콘크리트로 대표되는 구조재료를 새로운 관점에서 활용하게 되는 계기가 되고 있다. 즉, 강재와 콘크리트를 조합한 단면으로 설계하거나 강부재, 철근 콘크리트 부재, 혹은 PSC 부재를 접합하여 하나의 구조부재로 설계 및 시공하는 시도이다. 합성구조가 일반적으로 전자에 해당하며 후자는 혼합구조로 설명되는 경우가 많은데 이 모두를 포함하는 것으로서 복합구조 개념으로 정리될 수 있다. 국내에서도 합성보

에 대한 연구와 기술개발을 바탕으로 강합성교를 중심으로 활발한 현장 적용이 이루어져 왔으며 바닥판을 비롯한 다양한 측면에서 괄목할만한 성과를 도출해오고 있다.

복합주형을 갖는 교량은 복합구조 교량의 대표적 형태중의 하나이다. 이러한 구조는 장기간 사장교에서 유용하게 활용되고 있는데 프랑스의 Normandie교가 대표적이다. 이 교량의 중앙경간의 길이는 856 m로서 완공당시 사용중인 사장교의 경간장을 크게 상회하는 규모였다. 측경간은 PSC 거더, 중앙경간은 강 보강형으로 계획되었다. <그림 6>

3.2 파형강판 Web PSC 교

3.2.1 개요

교량 구조물에 있어서 플레이트를 입체화한 파형강판을 복부 부재로 사용함으로써 전단좌굴 강도를 개선하고 보강재를 생략하거나 획기적으로 감소시키기 위한 시도는 프랑스에서 시작되었으며 Maupre교나 Cognac교가 대표적인 사례이다. 그러나 실질적인 적용은 일본에서 비약적으로 이루어졌는데 신개교나 마츠노키교가 1990년대 초, 중반에 준공되었으며 최근에는 사장교나 Extradosed교까지 그 적용범위를 확장시키고 있다. 가설은 초창기에는 F.S.M이나 Precast Girder 공법이 활용되었지만 최근에는 I.L.M이나 특히 F.C.M을 통하여 이루어진 사례가 다수이다(그림 7). 파형강판 Web PSC 교란 기존의 PSC 교에서 주형 자중의 10 ~ 30 % 정도를 차지하는 web 부분을 파형강판으로 대체한 콘크리트와 강재의 복합구조 교량이다. 이러한 파형강판

web PSC 박스거더교는 주형자중을 경감하여 상부구조 뿐만 아니라 하부구조에서의 하중부담도 저감시킬 수 있다. 파형강판은 교축방향으로 축방향 강성이 거의 없고 아코디언(accordion)처럼 신축하는 성질이 있기 때문에 프리스트레스(prestress) 도입의 효율을 향상시킬 수 있으며 보강재를 사용하지 않고도 높은 전단좌굴내력을 가질 수 있다. 또한, 파형강판 web PSC 교는 콘크리트 web의 철근조립, 케이블 배치, 콘크리트 타설 등이 생략 가능하여 시공의 단순화는 물론 공기 단축을 통해 시공비를 절감할 수 있는 특성을 가지고 있다.

파형강판 Web PSC 교의 적용 지간장은 PSC 교량과 유사하지만 자중 경감에 따라 보다 장지간으로 적용될 수 있는데 압출공법의 경우 60 m, 캔틸레버 공법의 경우 최대 100 m까지의 지간장으로 확장되고 있으며 최근에 일본에서는 사장교에 까지 적용됨으로써 장지간 화에 부응할 수 있는 형식으로 인식되고 있다.

3.2.2 파형강판의 성능

교량 구조물 적용을 위한 파형강판의 국내 설계기준은 마련되어 있지 않지만 북미나 유럽, 그리고 일본을 중심으로 전단거동에 대한 많은 연구가 수행되고 합리적 설계기준을 갖추기 위한 시도들은 꾸준히 이루어져 왔다. 국부좌굴 상태에 이르는 응력, τ_{cr} 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_{cr} = k_s \left[\frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} (w/t)^2 \right] \quad (2)$$

여기서, k_s : 좌굴계수

w : 복부 두께

μ : Poisson's ratio

좌굴계수 k_s 에 대한 각 국가별 분석방법은 다소 차이가 있다. 좌우 경계조건을 단순지지로 보는 관점은 동일하지만 캐나다의 경우 Longer Edges Simply Supported, Shorter Edges Clamped의 조건으로 해석하여 좌굴계수를 제시하고 있다. 이러한 국부좌굴 분석을 통하여 패널 폭과 두께가 결정되며 파형 강판의 높이는 다음과 같은 전체좌굴 응력에 대한 고려를 바탕으로 결정될 수 있다.

$$\tau_{cr} = k_s \left[\frac{(D_x)^{0.25} (D_y)^{0.75}}{t h^2} \right] \quad (3)$$

여기서, $D_x = (q/s) \frac{E t^3}{12}$

$$D_y = \frac{E I_y}{q}$$

$$I_y = 2 b t (h_r/2)^2 + [t (h_r)^3 / 6 \sin \theta]$$

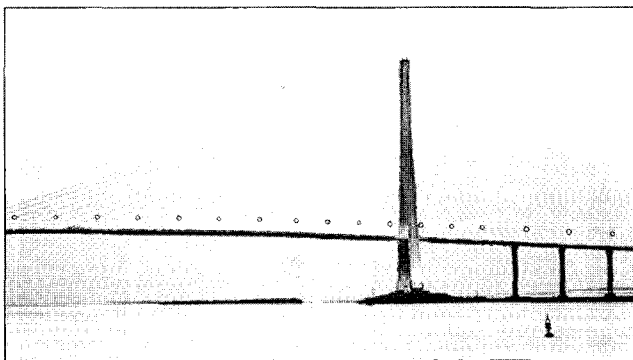


그림 6. Normandie교

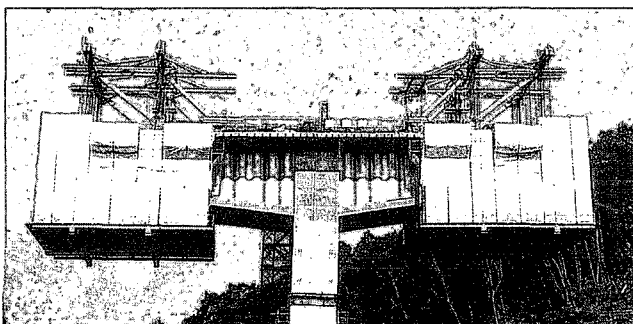


그림 7. FCM에 의한 박스거더 시공

여기서, s 는 파형강판의 굴곡 단일 사이클에 대한 총길이, q 는 수직길이를 나타낸다. 이 경우 좌굴계수는 단순지지의 경계조건을 적용하는 경우 31.6, 고정 경계조건을 적용하는 경우 59.2를 적용하도록 제시하고 있다. 한편, 파형강판의 휨 강성은 무시될 수 있는 것으로 평가되고 있으며 파형강판 Web 구조의 휨강도는 플랜지에 의하여 결정되고 휨 거동에 의한 복부에서의 응력은 일부 영역을 제외하고는 거의 발생하지 않는다.

3.2.3 파형강판 Web PSC 교의 설계 및 시공

(1) 설계 일반

파형강판 Web PSC 교의 설계는 휨에 대한 콘크리트 부재의 설계와 전단에 대한 복부 파형강판의 설계로 크게 나눌 수 있다. 아직 국내에는 별도의 설계 규준이 없으나 일본에서는 전문 협회들을 중심으로 기준안의 제정과 개정에 많은 노력을 기울이고 있다. 예를 들어 거더의 휨 계산 과정에 있어서 단면의 평면유지 가정은 성립되지 않는 경우를 고려한 설계가 요구된다는 사실도 제시되고 있다.(그림 8)

구조물의 설계에서 파형강판은 교축 방향으로의 휨과 축력에 대해서는 저항하지 않는 것으로 해석하여 설계하며 이는 다수의 해석적 연구를 통해서 확인되기도 한다. 현대건설에서 시공중인 파형강판 Web PSC 박스거더교인 일선대교를 대상으로 축강성분담율을 검토한 결과 약 1%로 나타나 20%를 상회하는 일반적인 PSC 박스거더 교량의 경우에 비해서 매우 미미한 것으로 분석되었다. 파형강판 Web PSC 교는 복부의 콘크리트 부재를 얇은 두께의 강판으로 대체하였으므로 비틀림 거동에 대한 적절한 평가가 필수적이다. 일반 PSC 박스거더교와 파형강판 Web PSC 박스거더교의 강성을 비교한 일본 자료에 따르면 단면적과 단면 2차 모멘트의 감소와 함께 휨 강성의 경우 지점부에서는 약 20%, 지간 중앙부에서는 약 10% 정도로 낮은 값을 보이게 된다. 그러나 비틀림 강성의 경우 지점부에서는 약 70%, 지간 중앙부에서는 약 60% 가량의 감소를 보이게 된다. 특히 이러한 비틀림 거동과 관련하여서는 시공중에 있어서의 프리스트레싱 공정에 대한 합리적 분석을 바탕으로 구조물의 안정성에 대한 검토

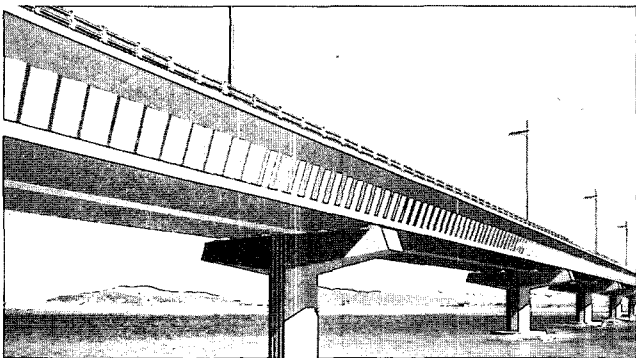


그림 8. 일선대교

가 필수적으로 수행되어야 할 것이다.

이에 따라 충분한 강성을 지닌 횡형·격벽을 적절한 간격으로 설치하는 것이 중요하며 PS 강재를 정착·편향하는 횡형·격벽은 PS 강재의 인장력 또는 편향력을 주형에 확실히 전달함과 동시에 주형에 대하여 충분히 안전한 구조로 설계되어야 한다. 편향부 또한 강성이 높은 격벽타입으로 형상을 설정하는 것이 안정적인 것으로 인식되고 있다.

전단에 대해서는 복부 파형강판이 저항하는 것으로 해석하여 설계하는데 가장 활용 실적이 많은 일본에서는 설계전단내력을 복부파형강판의 기여분인 V_{wd} 과 프리스트레싱 긴장재의 기여분 V_{ped} 를 합하여 산정하도록 제시하고 있다. 이때 적용되는 부재 계수 γ_b 는 콘크리트 복부의 1.3에 비하여 1.15를 표준으로 적용할 수 있도록 규정하고 있다.

(2) 내, 외부 강선의 병용 구조

파형강판 Web PSC 교는 콘크리트 복부가 없으므로 외부 강선의 적용이 필수적이며 상, 하부 플랜지에 배치된 내부 강선과 함께 병용하는 것이 일반적이다. 이러한 경우 가설시의 단면력과 자중을 내부 케이블이 부담하고 완성 후의 활하중을 외부 케이블이 부담하도록 설계하는 것이 적절한 것으로 인식되고 있다. 그러나 이러한 병용구조에서 내부 강선과 외부 강선의 비율은 경간장과 부재 단면 설계, 그리고 가설 방식에 따라서 많은 영향을 받게 된다.(그림 9)

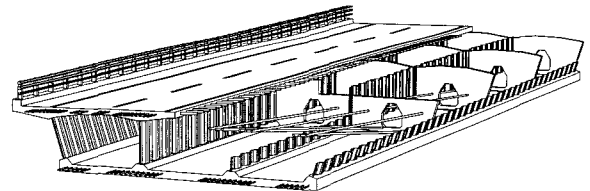


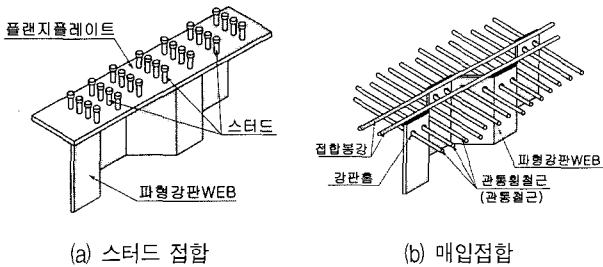
그림 9. 내외부 강선이 병용된 파형강판 PSC 교

이러한 외부 케이블 공법은 독일에서 1920년대 후반에 적용되기 시작한 이래 1980년대부터 교량에 다수 적용되기 시작하였다. 내·외부 강선이 병용된 기존의 교량에서 외부 강선이 차지하는 비율은 20% ~ 80%까지 매우 다양하게 분포하고 있는데 특히 외부 케이블 구조의 거동을 정확하게 반영하기 위해서는 비선형 해석이 필수적이지만 시간과 비용에서의 약점이 있다. 이에 따라 외부 강선의 응력 증가량 산정을 위한 간략식을 바탕으로 극한 휨강도의 결정을 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 외부 강선이 적용된 구조에 있어서 강선의 응력 증가량은 구조형식, 지간, 내/외부 케이블의 비 등에 따라서 많은 영향을 받으므로 단순식을 통한 간략적 방법에 의한 강도 계산을 위해서는 보다 추가적인 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 사료된다.

또한 PS강재의 정착부 설계에 있어서도 파형강판 Web PSC 교량과 일반적인 PSC 박스거더 교량의 전단강성이나 축방향 강성차를 고려하여 설계할 필요가 있다. 특히 정착위치로부터 프리스트레스가 유효하게 작용하는 단면까지의 거리가 길어질 것을 예상하고 이를 설계과정에서 반영하는 것이 적절할 것이다.

(3) 연결부의 설계 및 시공

파형강판 Web PSC 교량에 있어서 콘크리트 슬래브와 파형강판 Web의 접합부는 가장 중요한 구성요소라 할 수 있다. 기존의 시공 사례를 바탕으로 분석하면 접합방법으로는 스티드에 의한 접합, 매입 접합, 그리고 앵글에 의한 접합으로 크게 나눌 수 있다. <그림 10>



(a) 스티드 접합 (b) 매입접합
그림 10. 플랜지와 파형강판 복부의 접합

스티드에 의한 접합은 강형과 콘크리트 슬래브의 접합에 일반적으로 사용되고 시공실적이 가장 많아 설계방법이 확립되어 있다. 이러한 방식으로 설계하는 경우 플랜지 플레이트와 스티드의 용접에 따른 경계성 측면에서의 약점이 있다. 그러나 플랜지 플레이트에 의한 시공성 및 내구성 증진효과를 기대할 수 있으며 향후 바닥판을 교환하는 경우에도 상대적으로 유리한 방법으로 인식되고 있다. 매입접합은 파형강판의 상·하단에 축방향의 철근을 용접한 후 파형강판에 구멍을 만들어 여기에 교축직각방향의 철근을 관통하여 콘크리트 슬래브에 매입하는 접합방법이다. 물론 이 방법의 경우 스티드 접합에 필요한 플랜지 플레이트의 용접과 스티드의 용접을 생략할 수 있는 장점이 있다.

프랑스에서 개발된 앵글을 이용한 접합방법은 횡방향의 휨 거동에 대한 높은 저항성과 추가적인 철근배치로 콘크리트 플랜지와와의 일체성을 높일 수 있는 방법으로 인식되고 있다. 특히 스티드 방식과 같이 플랜지 플레이트가 용접되므로 파형강판의 직선성 유지와 거푸집 시공이 용이하다는 장점이 있다.

한편으로는 앵글의 용접에 따른 구조적, 경제적 문제점이 발생할 수 있으므로 접합방식에 대하여는 해외는 물론 국내에서도 기술개발 노력이 계속되고 있으며 접합 방법을 설계하는 경우 교량의 형상과 제원, 그리고 환경에 따른 신중한 접근이 요망된다.

또한 파형강판은 가공상이나 운반상 혹은 시공상의 제한으로 교축방향으로 분할되어 현장에 투입되므로 주형가설시에 교축방

향으로 접합하게 된다. 파형강판 Web은 그 특성상 교축방향의 강성이 극히 작아 축방향력을 분담하지 않으므로 강판의 접합부는 전단력에 대해서만 고려하면 된다. 고장력볼트 접합에는 축방향 응력을 고려하지 않아도 되기 때문에 휨 모멘트에 저항하는 모멘트 플레이트가 필요하지 않으며 용접접합에도 축방향 응력을 무시할 수 있기 때문에 필렛용접에 의한 접이음을 채용하는 것이 가능하다.

(4) 구조 세목

PSC 거더교에 있어서 복부를 파형강판으로 대체한 파형강판 Web PSC 교는 최근의 복합구조 교량에 있어서 대표적 형식으로 인식되고 있으며 설계 및 시공에 있어서 세심한 관리를 요한다. 특히 콘크리트 플랜지와 파형강판 Web의 접합은 매우 중요한데 교축방향 전단력, 교축 직각방향의 휨, 그리고 내구성에 있어서 적절한 성능을 확보하여야 한다. 특히 강재와 콘크리트가 접촉하는 면에 있어서 콘크리트의 박리나 수분 침투가 발생할 수 있으므로 이를 고려한 설계와 시공이 이루어져야 한다. 파형강판 Web의 단부에 플랜지를 설치하여 강 루프 철근을 용접하거나 단부에 교축방향 철근을 용접하는 등 다양한 방법이 활용되어 왔으며 보다 합리적 방안에 대한 기술개발 노력이 수행되고 있다.

또한 교축방향으로의 구속이 작으므로 콘크리트 바닥판에 발생하기 쉬운 교축 직각 방향의 균열에 대해서는 다소 유리한 것으로 인식되지만 초기 균열을 예방할 수 있는 세심한 양생관리도 간과되어서는 안 된다. 아울러 차선 폭의 증가에 따라 파형강판 Web간의 거리가 증가하여 약 10 m 정도가 되면 상부 차량 하중에 따른 바닥판의 단부 회전이 커지므로 복부 파형강판의 국부 응력에 대한 검토도 필요할 것이다.

3.3 Hybrid PSC 사장교

PSC 사장교는 고강도 재료의 사용과 시공기술의 개발로 앞으로 지속적인 발전을 이룰 것이다. 그러나 자중이 크고 휨강성이 작다는 근본적인 약점을 극복하지 못하는 한 장대교량에서의 PSC 교량의 영역은 한정되어질 수밖에 없다. 이러한 점을 보완하기 위해서 몇 가지 시도들이 이루어지고 있는데 그 한 가지가 hybrid 개념의 도입이다. hybrid의 정의는 제각각이겠지만 여기서는 강재와 콘크리트의 “composite(단면합성)”와 “mixed(교량내에서 강거더와 콘크리트거더의 혼합)”을 의미하여 이중에서도 “composite”을 통한 재료의 효율적인 사용이 중요할 것으로 판단된다.

<그림 11>에서 보이는 총 820 m의 Yahagigawa bridge는 PC 박스거더의 복부판을 corrugated steel로 대체해 전체 사하중을 줄이고 시공성을 향상시킨 세계최초, 최장의 파형강판 PSC 사장교라고 할 수 있다.

<그림 12>는 C.F.T(concrete filled tube) 합성거더를 사장

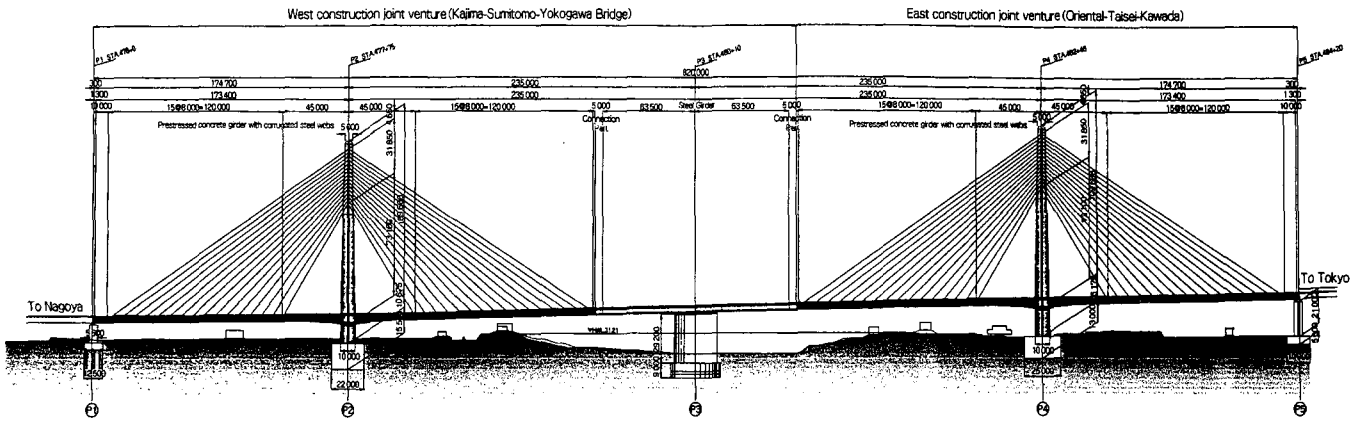


그림 11. Yahagigawa bridge

교에 적용한 경우를 가정해 예시해 본 것으로 tube단면이 축방향력에 효과적인 거동을 보임을 이용한 좋은 사례라 할 수 있다. 아직까지는 검토탄계이지만 실제 pipe girder는 적용사례가 있으므로 조만간 사장교에도 반영될 수 있을 것으로 보인다.

케이블은 물론 외부 강선을 배치하여 혼합주형 연결부의 안전성과 내구성 확보하는 복합교량은 최근에 일본에서 엑스트라도즈드교에까지 적용된다. 키소가와교는 중앙경간의 길이를 270m로 하고 측경간 및 지점부는 콘크리트 박스거더를, 중앙지간부는 강상판 박스거더를 이용하여 PSC·강 복합연속 엑스트라도즈드교를 채용하였다. 이외에도 해외에는 복부를 파형강판으로 대체한 교량도 출현하였는데 Rittoh Bridge는 프리스트레싱 방법의 적절한 조합과 함께 파형강판 복부를 채택함으로써 독창적인 교량형식을 구현한 바 있다.

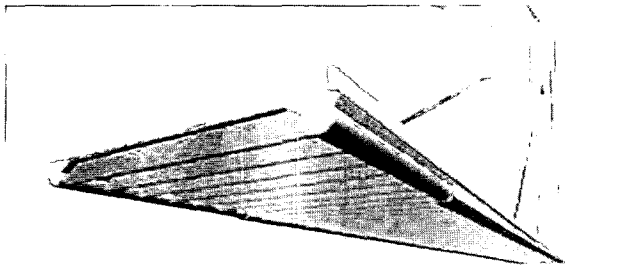


그림 12. C.F.T. 합성거더를 적용한 사장교

3.4 복합 Extradosed교

이러한 복합구조 교량의 시도가 성공할 수 있는 요인들 중의 하나는 무엇보다 프리스트레싱의 적절한 활용에 기인한다. 내부

3.5 트러스 Web PSC 교

복합 트러스교 또한 프리스트레스트 구조를 적절하게 잘 활용하는 복합구조 교량의 형식이라 할 수 있다. 복부 트러스간의 연결이나 복부 트러스와 상·하부 플랜지의 연결 방식에 따라서 차이는 있지만 전술한 파형강판 Web PSC 교와 같이 프리스트레싱의 도입 효율을 향상시킬 수 있으며 자중 경감에 따른 다수의 구조적 장점을 거둘 수 있는 형식으로 인식되고 있다.(그림 14)

특히 도시내 구조물에서 최근들어 많이 강조되는 투시성, 투명성-Schlaich에 의해 강조된 Transparency-을 확보할 수 있어 기존의 콘크리트 박스거더에 비해 사회적인 측면에서도 많은

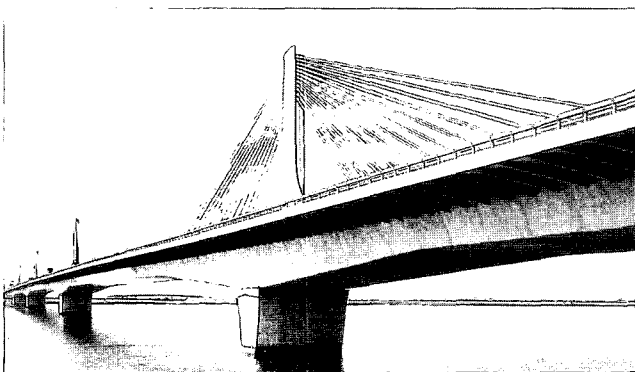


그림 13. Kisogawa bridge

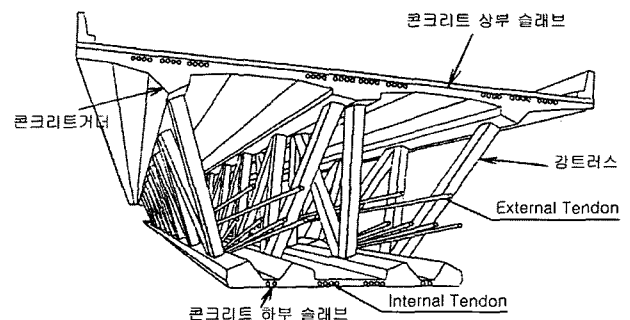


그림 14. 복합 트러스교의 개념

장점을 기대할 수 있다. 물론 이러한 경우에도 외부 강선과 내부 강선을 적절하게 배치하는 Prestressing이 핵심적인 구조적 역할을 하게 될 것이다.

4. PSC 사장교

4.1 PSC 사장교의 현황

PSC 사장교는 도장 등의 유지관리가 필요없고 비부식성 재료라는 비구조적인 장점과 압축에 강해 사장재의 축력에 대해 효율적 단면구성이 가능하다는 구조적인 장점이 있음에도 불구하고 초기 사장교 시스템에서는 많이 사용되지 못했다. 그 이유는 소수의 stay만 사용되었던 초기 사장교 시스템에서는 보강형에 축력보다는 휨모멘트와 전단력이 크게 발생되어 휨강성이 큰 단면이 필요했으며 따라서 휨강성이 작고, 자중이 큰 콘크리트 단면을 보강형으로 활용하기가 어려웠기 때문이다. 그러나 차츰 multi-stay 시스템이 보편화되면서 stay 간격으로 휨모멘트와 전단력의 크기를 조절할 수 있게 된 반면에 축력이 커짐에 따라 압축에 강한 콘크리트 단면의 장점을 부각시킬 수 있게 되었다. 이와 같이 multi-stay 시스템의 도입으로 PSC 사장교는 중대지간 사장교의 경제적 대안으로 자리매김 하였으며 2003년 현재 최대 경간장 530 m까지 이르렀다. 국내에서는 올림픽대교 이후 몇 차례 PSC 사장교 건설의 시도가 있었지만 이쉽게도 성공하지 못했다. 주경간장 기준으로 200 m 이상인 국내의 PSC 사장교의 현황을 <표 1>에 정리하였다.

<그림 15>는 경간장 100 m 이상의 PSC 사장교 건설추이를 연도별, 경간장별로 정리한 것이다. 그래프에 따르면 장대 PSC 사장교는 1975년 이후 본격적으로 건설되었는데 이는 multi-stay 사장교와 F.C.M 공법이 보편화된 결과라고 판단된다. 그 이후 PSC 사장교의 경간장은 계속 커지고 있으며 이런 추이는 앞으로도 계속될 것으로 보인다.

4.2 PSC 사장교의 특징

PSC 사장교는 주요 특징을 간단히 정리해 보면 다음과 같다.

- ① 450 m 정도까지 경제성이 있으며 유지관리가 용이해 LCC 측면에서 유리하다. PSC 사장교의 경우 보강형의 재료비는 작은 반면 케이블의 비용증가가 예상된다. 그러나 이와 같은 상부구조의 증가보다는 기초규모의 증가가 PSC 사장교의 경제성을 결정하며 경간장 450 m 이내에서 PSC 사장교의 경제성이 결정된다고 알려져 있다. 그러나 다른 형식에 비해 유지관리측면에서 유리하므로 LCC를 비교해 경제성을 평가하면 좀 더 향상될 수 있을 것으로 보인다.
- ② 압축에 강해 사장교 형식에 유리하다. 압축에 강해 큰 축력이 작용하는 사장교의 주탑과 주형에 효과적인 적용이 가

표 1. 경간장 200 m 이상 PSC 사장교 현황

구분	교량명	주경간장	국가명	준공년도	
국내	Olympic	150.00	대한민국	1989	
	Skarnsundet	530.00	노르웨이	1991	
	Jingzhou	500.00	중국	2002	
	Chongqing 2nd Bridge	444.00	중국	1995	
	Barrios de Luna	440.00	스페인	1983	
	Tongling	432.00	중국	1995	
	Helgeland	425.00	노르웨이	1991	
	Vasco da Gama	420.00	포르투갈	1998	
	Yunyang Bridge over Hanjiang	414.00	중국	1994	
	Wadi Leban Bridge	405.00	사우디아라비아	1999	
	Wuhan Highway	400.00	중국	1995	
	Ship Channel	381.00	미국	1993	
	Sunshine Skyway	366.00	미국	1987	
	Skytrain	340.00	캐나다	1988	
	국외	Posadas-Encarnacion	330.00	아르헨티나	1987
		Rosario-Victoria	330.00	아르헨티나	2002
		Guadiana	324.00	포르투갈	1991
		Brotonne	320.00	프랑스	1977
		Pasco-Kennewick	299.00	미국	1978
		East Huntington	274.32	미국	1985
Yonghe		260.00	중국	1987	
Arade River		256.00	포르투갈	1992	
Maracaibo		235.00	베네수엘라	1962	
Shimen		230.00	중국	1988	
Bengbu		224.00	중국	1989	
Jinan		220.00	중국	1982	
Xiangjiang-North Bridge	210.00	중국	1990		
Polcevera Viaduct	210.00	이탈리아	1966		
Maogang	200.00	중국	1982		

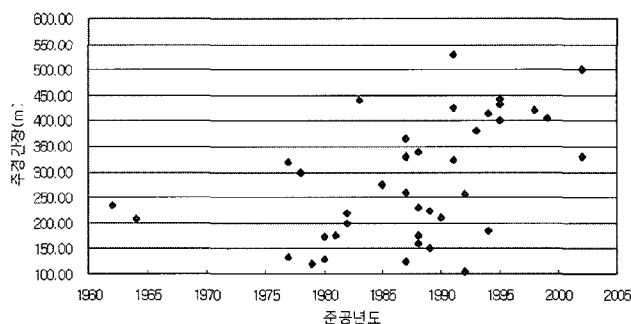


그림 15. 준공년도별 주경간장 추이(100 m 이상)

능하다. 또한 큰 압축력이 작용해 응력의 집중도가 가장 심한 케이블의 정착부 상세가 타 형식에 비해서 훨씬 간단하고 효율적이다.

- ③ 구조물의 댐핑(damping)이 커서 진동에 안정적이다. 구조

감쇠값을 결정하기 위해서는 가능하면 동일형식으로 비슷한 규모의 실교에 대한 진동실험으로부터 데이터를 얻는 것이 중요하다. PSC 사장교의 경우 실교에 대한 진동실험 결과가 적어서 그 비교가 어렵다. 일반적인 경우는 다음 표와 같이 적용 가능하며 표에 따르면 PSC 구조의 감쇠율이 강보다 약 2배 정도 커 진동제어에 유리함을 알 수 있다.

표 2. 풍동실험시 일반적으로 적용하는 각 재료별 대수감쇠율

콘크리트	R.C 구조 : 0.063 ~ 0.126, P.S.C 구조 : 0.050
강	steel welded 0.025
기타	wooden 0.063 ~ 0.188, brick wall 0.063 ~ 0.126

- ④ 감쇠와 질량이 커서 내풍안정성 확보에 유리하다. PSC 사장교는 다른 형식 사장교에 비해서 질량이 크고 감쇠율도 커서 공기역학적 안정성 확보에 유리하다. 그 단적인 예로 세계에서 60개 정도의 PSC 사장교에는 flap, fairing 등과 같은 내풍장치들이 설치되어 있지 않는다고 알고 있다.
- ⑤ 피로문제가 없어 내구성이 좋다. 다른 형식에 비해 진동 저감성, 내풍안정성 측면에서 유리하므로 피로유발요인이 적을 뿐만 아니라 재료특성상 피로가 발생되지 않아 구조물의 내구성측면에서 우수하다.

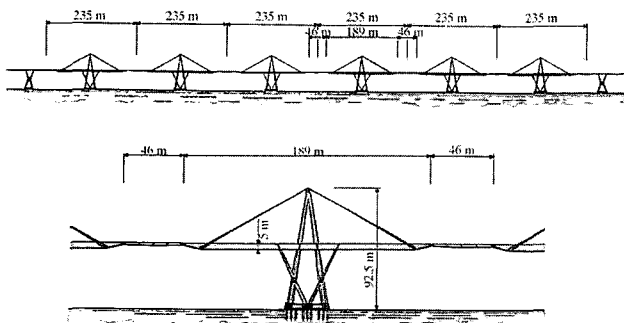


그림 16. Maracaibo bridge의 제원

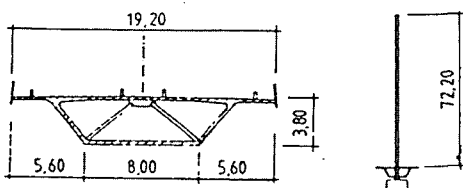
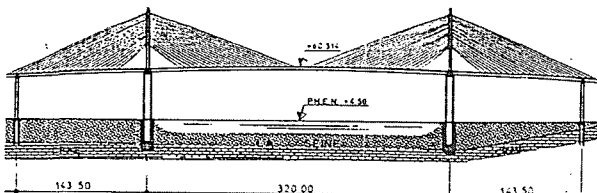


그림 17. Brotonne bridge의 제원

4.3 주요 PSC 사장교의 기술적 특징

4.3.1 최초의 순수한 PSC 사장교 - Maracaibo bridge

순수 콘크리트만으로 이루어진 최초의 사장교는 1962년 Venezuela에 건설된 Maracaibo bridge다. 이 교량은 중앙부 46 m 구간이 게르버로 얹혀진 켈틸레버 사장교로 되어 있다. 주탑은 큰 모멘트에 저항할 수 있도록 중방향 A형으로 되어 있으며, 켈틸레버 내민길이를 작게 하기 위해서 브라켓을 설치한 점이 이채롭다. 반면 해상 bent를 설치한 후에 보강형을 타설, 양생하기 때문에 대규모 가설장비가 필요하였다.

Maracaibo bridge는 1960년대 켈틸레버 PSC 사장교의 전형으로서 Polcevera Viaduct, Magliana Viaduct, River Parana bridge, Wadi Kuf bridge 등의 선례가 되고 있다.

4.3.2 PSC box 사장교 - Brotonne bridge

1977년에 완공된 주경간장 320 m의 Brotonne bridge는 개통당시에는 세계최장의 PSC 사장교였다. Brotonne교는 1면 케이블 강상판 사장교인 Friedrich Ebert bridge의 구조개념을 PSC 사장교에 적용시킨 예라 할 수 있다. 비틀림에 강한 1 cell 박스거더를 채용해 1면 사장교의 취약점인 비틀림 강성을 보완하였다. 또한 1면 케이블의 정착점을 이루는 박스내부의 구조는 중간 복부대신 스트럿으로 보강함으로써 사하중을 줄이고 보다 효

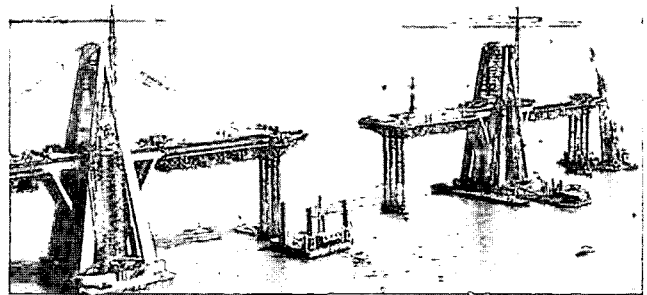


그림 17. 해상 bent에 의한 보강형 가설

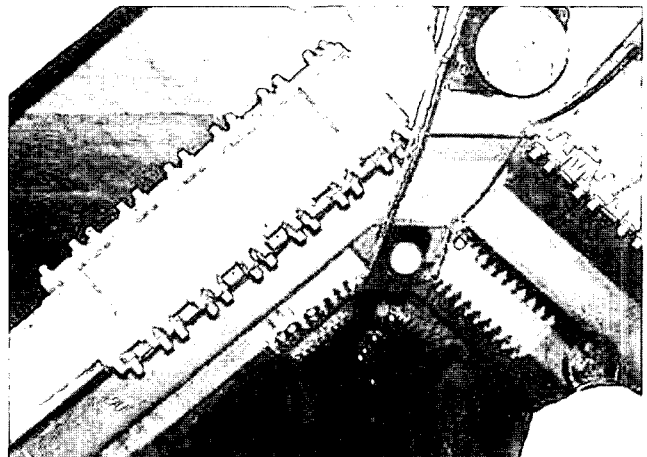


그림 18. 박스내부의 strut 구조

을적인 단면활용이 가능하도록 계획하였다.

상부 PSC 거더는 4.5 m 길이의 프리캐스트로 계획하여 크리이프와 건조수축에 의한 긴장력 손실을 줄임과 동시에 공사기간을 상당히 단축시킬 수 있었다. 약 120 m 정도 되는 1주식 RC 주탑은 그 날씬하고 시원한 모습으로 경관측면에서 성공한 사례로 꼽힌다.

4.3.3 PSC slab 사장교

- Helgeland bridge와 East Huntington bridge

콘크리트 사장교에서는 사하중이 커서 케이블 간격이 4 ~ 8 m 정도로 좁아질 수밖에 없으므로 다른 형식 사장교의 보강형보다는 축력의 비중이 크다. 따라서 휨강성이 다소 작더라도 형고를 낮춰서 가설장비를 작게 할 수 있는 보강형이 효과적일 수 있다. 이 경우 양쪽에 작은 Edge-girder을 가지는 slab 형식의 주형이 가능하다. 여기서는 이러한 사장교의 대표적인 사례를 설명한다.

① Helgeland bridge - 콘크리트 cross beam

1991년에 완공된 주경간장 425 m의 Helgeland bridge는 Edge slab를 갖는 PSC slab 사장교라고 분류할 수 있다. PSC slab는 휨강성이 작기 때문에 발생하는 중방향 휨모멘트도 감소되며 그에 따라 단면을 줄일 수 있다는 것이 PSC slab단면의

기본원리다. 케이블이 정착되는 slab의 양끝부분은 큰 축력을 받기 때문에 단면을 확대한 형태인 Edge slab을 둔다.

PSC slab 사장교의 보강형은 박스단면보다 단면이 작아 매우 가볍고 단순한 이동비계를 사용하는 것이 가능하다. Helgeland bridge의 경우, 케이블을 조기에 정착시키기 위해서 축력전달에 필요한 부위만 프리캐스트로 제작하여 최대한 빨리 케이블 설치가 가능도록 계획하고 나머지 부분은 현장타설하는 것으로 설계되었다.

② East Huntington bridge - 강합성 cross beam

East Huntington bridge는 철저한 재료특성이용의 설계철학에 따라 압축력의 비중이 큰 중방향 저항단면으로 콘크리트 edge beam을 채택하였지만 차량에 의한 횡방향 휨모멘트에 저항할 횡부재로는 휨에 강한 강합성 가로보를 적용하였다. East Huntington bridge는 교폭이 좁아 강합성 가로보의 장점을 충분히 살리지 못하였으나 광폭의 PSC slab 사장교의 가능성을 충분히 보여주었다.

5. 결 론

PSC 교량은 국내는 물론 전 세계적으로 꾸준히 증가해오고

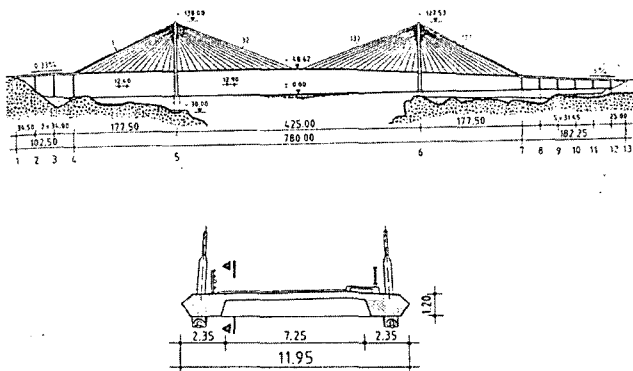


그림 19. Helgeland bridge의 단면제원

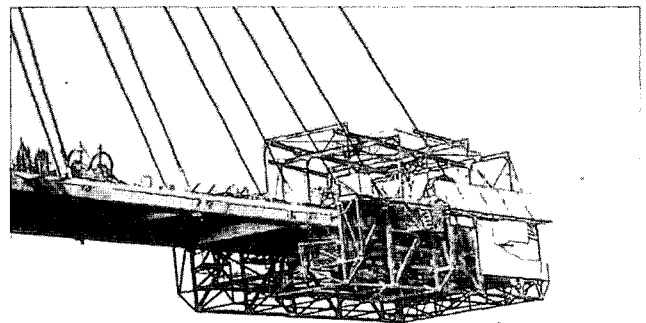


그림 20. 소형 Form Traveller 시공

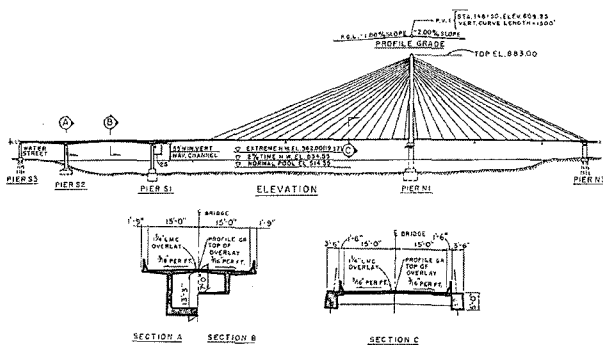


그림 21. East Huntington bridge의 단면제원

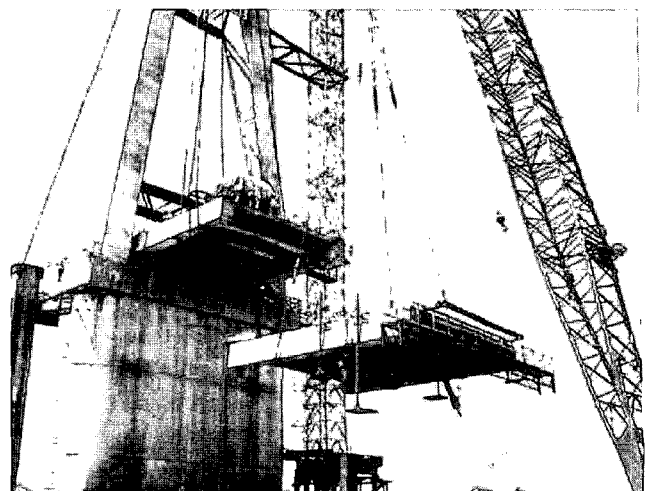


그림 22. Precast 보강형 시공

있으며 미국의 경우에는 전체 교량의 75% 이상이 철근 및 PSC 구조를 적용하고 있는 것으로 분석되고 있다. 특히 교량 구조물에 있어서의 사회적 요구가 더욱 대형화 및 다양화되는 현실을 감안하면 이러한 PSC 교량의 건설은 지속적으로 증가될 것으로 예상된다. 국내에서도 경부고속철도의 건설에 있어서 PSC 교량이 큰 비중을 차지하였고 최근에 시공중이거나 계획중인 연육·연도교를 비롯하여 PSC 교량은 매우 중요한 국가 기간시설물로 자리매김하고 있다.

특히 PSC 사장교는 기술의 발전으로 경제성있는 적용기간이 450m에 이르고 있고 이와 함께 엑스트라도즈교는 물론 파형강판 Web PSC 교 등을 비롯하여 새로운 형식의 교량이 도입되어 시공중에 있어 이 분야에서의 지속적인 발전을 기대하게 한다. 특히 전세계적으로 PSC 교에 있어서 합성구조, 혼합구조 등에 대한 기술 개발을 바탕으로 진보적 형식의 교량들이 설계 및 시공되고 있으며 신소재 및 신기술의 도입으로 기존의 교량형식 분류를 무색하게 하고 있다. 이러한 발전은 교량의 경제성과 안전성은 물론 미학적인 측면을 비롯한 사회적 요구에 부응하기 위하여 더욱 가속화될 것으로 사료된다. 앞으로 다양한 부문에서의 효율적인 기술개발을 통하여 콘크리트 구조에 대한 부정적인 이미지를 쇄신하고 국가 및 지역자원으로서의 교량 구조물을 건설할 수 있도록 지속적인 노력이 필요할 것이다. □

참고문헌

1. 김광수, "토목구조 및 교량", 건설기술교육원, 2002, pp.61.
2. 김광수, "현대건설 직부교육 - 교량공학/시공/안전 및 유지관리", 현대건설주식회사, 2003.
3. 김우중, 조경식, "사장교의 계획 및 설계", 대한토목학회지 제50권 제12호, 2002, pp.6~15.
4. 유영 외, "Extradosed PSC 교 사재장력의 유효전달길이에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2002, pp.123~126.

5. 포항산업과학연구원, "복합구조형식 강교량 기술개발", 2003.
6. 현대건설, "선산-도개간 국도 4차로 확장공사-구조 및 수리계산서", 2001.
7. 현대건설, 유신코퍼레이션, "압해-운남 도로 확장공사 구조 및 수리계산서", 현대건설, 2003.
8. 현대건설, 유신코퍼레이션, "파형강판 Web PSC 박스거더교-계획, 설계, 시공, 유지관리 및 기타", 현대건설, 2001.
9. 현대건설, "Extraodsed교의 설계와 시공", 2001.
10. 현대경영개발원, "프리스트레스드 콘크리트 세그멘탈 교량".
11. Elgaaly, M., Seshadri, A., Rodriquez, R., and Ibrahim, S., "Bridge Girders with Corrugated Webs," Fifth International Bridge Engineering Conference, TRR 1696, 2000.
12. Hiroyuki, I. and Yukihiro, K., "Kiso River and Ibi River Bridges," 橋梁と基礎 Vol.36, No.8, 2002, pp.81~84.
13. Masataka, S. and Keiichi, A., "PC Bridges with Corrugated Steel Web-Outline of Planning and Design," 橋梁と基礎 Vol.36, No.8, 2002, pp.8~19.
14. Menn, C., "Prestressed Concrete Bridges," 1989.
15. M.S. Troitsky, "CABLE-STAYED BRIDGES: Theory and Design 2nd. Ed.," Professor of Engineering Concordia University, Montreal, 1988, pp.114~173.
16. Rene Walter et al, "Cable stayed bridges," Thomas Telford, London, 1988, pp.39~57.
17. Troitsky, "CABLE-STAYED BRIDGES: Theory and Design 2nd. Ed.," Concordia University, Montreal, 1988, pp.114~173.
18. Virlogeux, M., "New Trends in Prestressed Concrete Bridge," Fifth International Bridge Engineering Conference, TRR 1696, 2000.
19. Walter R. et al., "Cable Stayed Bridges," Thomas Telford, 1988, pp.39~57.
20. Yamazaki, J., "Hybrid Bridges from a Viewpoint of Concrete Side," 橋梁と基礎 Vol.36, No.8, 2002, pp.7~8.

학회 홈페이지(www.kci.or.kr) 개편 안내

학회 홈페이지가 새로운 모습으로 개편됩니다. 앞으로 새로운 홈페이지의 활성화를 위해 지속적인 이용과 관심을 부탁드립니다.

- 개편 내용 : 최신 정보의 다양한 제공, 회원 정보 시스템 강화, 사용자 편의를 위한 디자인 구축 등
- 개편 예정 내용 : 학술발표회 논문 투고 및 사전등록, 학회 논문 투고 심사, 전문위원회 활동 게시판 등