

# 특 집

|| 합성구조의 최근 기술 ||

## 복합구조 교량의 시공과 기술 동향 - Construction and Technical Trends of Hybrid Bridges -



정철헌\*  
Chul-Hun, Chung



김광수\*\*  
Kwang-Soo, Kim



심창수\*\*\*  
Chang-Su, Shim

### 1. 머리말

사회기반 정비에 있어서 공공사업의 건설경비 절감이 요구되면서 토목 구조물의 경제성과 내구성을 고려한 설계를 목표로 복합 교량 분야에서 많은 실용화 연구들이 진행되고 있다. 복합구조는 두 가지 이상의 재료를 혼합하여 적용함으로써 단일 재료가 갖는 단점을 보완하고 그들의 장점이 최대한 발휘될 수 있도록 유도한 구조를 말한다. 가장 일반적인 복합구조는 강재와 콘크리트를 조합한 단면으로 설계하거나 강부재, 철근 콘크리트 부재, 혹은 프리스트레스트 콘크리트 부재를 접합하여 하나의 구조부재로 설계 및 시공하고자 하는 시도이며 최근에는 특수 신소재를 이용한 복합구조까지 등장하고 있다. 이와 같이 복합구조는 강재와 콘크리트를 적절하게 배치함으로써 경제성과 안전성은 물론 시공성과 미관, 그리고 유지관리의 측면에서도 양자의 장점은 최대한 활용하여 단점을 보완함으로써 구조적 효율성을 극대화하는데 그 주된 목적이 있다.

복합구조는 건축물은 물론 토목 구조물에 대한 적용도 매우 활발한데 특히 교량에 활용함으로써 경제성과 구조적 효율성을 향상시킨 획기적 형태의 교량 형식을 출현하게 하고 있다. 이러한 복합구조 교량은 가장 일반적인 합성형 거더교에서부터 국내에서도 많이 적용된 프리플렉스 빔은 물론, 합성 아치교와 합성 라멘교 등 많은 형태의 교량들로 발전하고 있다. 이러한 복합구조 교량은 유럽과 일본을 중심으로 발전하여 왔지만 최근에는 국내에서도 이

에 대한 기술개발과 설계가 지속적으로 이루어지고 있다.

이중합성 박스거더교는 완공을 앞두고 있으며 북부 파형강판 PSC교도 시공이 한창이고, 최근에는 복합 트러스교의 설계가 이루어져 시공이 예정되어 있다. 이와 함께 혼합 주형을 채택하여 경간장과 경제성을 증진시킨 혼합거더교에 대한 기술발전과 설계 사례도 지속적으로 나타나고 있어 향후, 이 분야의 국내 기술발전 전망을 밝게 하고 있다. 이번 소고에서는 국내·외 복합구조 교량의 시공사례를 살펴보고 이에 따른 기술적 전망을 분석하고자 한다. 특히, 북부 파형강판 PSC교와 이중합성교를 중심으로 기술적 과제들을 살펴보고 혼합주형을 갖는 교량의 연결부 상에 대하여 중점적으로 분석한다.

### 2. 북부 파형강판 프리스트레스트 콘크리트교

#### 2.1 파형강판을 갖는 복합구조 교량의 설계

북부 파형강판 프리스트레스트 콘크리트 교량은 일반 프리스트레스트 콘크리트 교량과 유사하게 설계할 수 있다. 그러나 몇 가지 항목들에 대하여는 설계시에 특별한 검토를 필요로 하는데 가

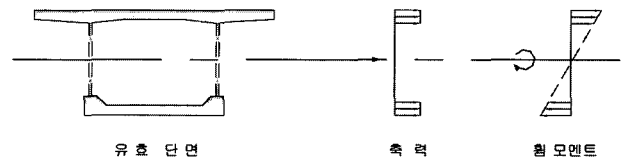


그림 1. 휨 모멘트 및 축력에 대한 유효단면과 응력분포

\* 정회원, 단국대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 현대건설 기술연구소 선임연구원

\*\*\* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수

장 일반적인 사항은 휨에 대해서는 콘크리트 플랜지만이 저항하고 전단에 대해서는 복부 파형강판만이 저항하도록 설계한다는 것이다. 이러한 가정은 안전측 설계를 위한 것인데, 단면의 평면 유지 가정에 대해서는 다소의 논란이 있을 수 있다. 그러나 실 교량 시공을 위하여 실 규모의 모형 실험을 수행한 결과 미소 변형의 영역에서는 평면유지의 가정이 성립되므로 응력 산출은 일반적인 방법으로 산출하여도 좋은 것으로 알려져 있다. 결국 복부 파형강판의 설계를 위하여 특별히 검토하여야 하는 항목은 전단좌굴 설계, 접합부 설계, 파형강판 연결부 설계, 그리고 비틀림 설계 등을 들 수 있다.

2.1.1 전단좌굴 및 비틀림 설계

파형강판의 전단좌굴 검토시에는 국부좌굴 모드와 전체좌굴 모드에 대하여 검토하는 것이 일반적이며 연성좌굴에 대한 검토를 수행하기 위한 방법론도 제기되고 있다. 먼저 국부좌굴은 복부의 파형 형상을 만들기 위하여 접힌 부분 사이에서 좌굴이 발생하는 모드로서 일반적인 직교 이방성 판이론으로 전단좌굴 응력을 쉽게 산출할 수 있다.

파형강판이 전체적으로 좌굴되는 경우에 대한 검토는 일반적으로 Easley식으로 불리는 다음의 관계에 의하여 검토하는 것이 일반적이다.

$$\tau_{cr,G} = 36\beta \left[ \frac{(E I_y)^{0.25} (E I_x)^{0.75}}{t h^2} \right] \quad (1)$$

여기서,  $\beta$  = 부재 단부의 구속에 따른 계수  
 $t$  = 파형강판의 두께  
 $h$  = 복부 파형강판의 높이

위와 같이 Easley에 의하여 정리된 전체 좌굴강도 계산식에서  $\beta$ 는 복부 상, 하단에서의 면의 회전 구속도에 따라 1.0 ~ 1.9의 범위에 있는 것으로 평가된다. 이와 함께 연성좌굴은 국부좌굴과 전체좌굴에 의하여 영향을 받게 되며 일본의 Ikeda 교수는 다음과 같이 연성좌굴을 고려한 전단강도 계산식을 제시한 바 있다.

$$\tau_{cri} = \tau_{cr,L} \left( \frac{1}{1 + (\tau_{cr,L} / \tau_{cr,G})^4} \right)^{0.25} \quad (2)$$

복부 파형강판 프리스트레스트 콘크리트교는 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 단면2차 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 보일 수 있다.

비틀림 응력은 파형강판인 복부에서는 상대적으로 작게 나타나며 콘크리트 플랜지에서 보다 크게 발생하게 되는데 이러한 경향을 반영하기 위하여 박스거더의 높이와 폭의 비를 이용한 수정계수  $\alpha$ 를 적용하여 응력을 산출할 수 있다. 수정계수  $\alpha$ 는 양의 값을 가져야 하며  $h_1/b_1$ 이 0.2 이하가 되는 경우에는 수정계수를 0으로 하여도 좋은 것으로 권고하고 있다.

$$\tau_{wt} = \frac{M_t}{2 A_m t_w (1 + \alpha)}, \tau_{\alpha} = \frac{M_t}{2 A_m t_w (1 - \alpha)} \quad (3)$$

여기서,  $\tau_{wt}, \tau_{\alpha}$  = 비틀림 모멘트에 의한 복부 및 플랜지 응력

$$\alpha = 0.400 \frac{h_1}{b_1} - 0.060$$

이와 함께 비틀림 계수는 수정계수를 적용하여 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$J_t = \frac{4 A_m^2}{\frac{h_1}{n_s t_1 (1 + \alpha)} + \frac{b_1}{t_2 (1 - \alpha)} + \frac{h_1}{n_s t_3 (1 + \alpha)} + \frac{b_1}{t_4 (1 - \alpha)}} \quad (4)$$

복부 파형강판 교량의 비틀림 안정성을 확보하기 위해서는 충분한 강성을 지닌 격벽을 적절한 간격으로 설치하는 것이 중요하며 PC 강재를 정착하거나 편향시키기 위하여도 매우 중요하다. 격벽의 적정 간격은 거더의 비틀림 강성에 따라 차이는 있지만 적어도 20m 간격으로는 배치되는 것이 적절한 것으로 알려져 있다.

2.1.2 접합부 설계

콘크리트 플랜지와 복부 파형강판의 접합부는 교축방향의 수평 전단력과 교축 직각방향의 휨모멘트를 부담할 수 있도록 설계되어야 한다. 교축방향 전단력은 합성거더교에서 적용하는 일반적인 관계식을 통하여 산출할 수 있으며 횡방향 휨 모멘트의 경우에도 적절한 해석모델을 통하여 산출할 수 있다.

접합부는 다양한 방식으로 시도되어 왔으며 크개는 파형강판을 매입한 구조와 매입하지 않은 구조로 나눌 수 있다. 일반적인 설계식은 스테드 접합, 앵글 접합, 매입 접합, 그리고 구멍강판 접합 방식에 따라서 다양하게 제시되어 있다. 스테드 접합의 경우 교축방향 전단력은 스테드의 전단강도로 저항하게 되며 도로교 설계기준에 근거하여 설계할 수 있다. 다만 횡방향의 휨 모멘트에 대하여는 스테드의 인발력으로 저항하게 되는데 복부의 파형형상을 고려한 적정 유효단면의 개념을 적용하는 것이 제기되고 있다.

앵글 접합도 복부 파형강판이 콘크리트에 매입되지 않는 방식으로 복부의 상, 하단에 용접된 플랜지 플레이트에 앵글을 접합



표 1. 복부 파형강판 복합교량의 주요 사례

교량명	경간(m)	폭(m)	최대 경간장(m)	위치	비고
Cognac교	2@31.0+43.0=105.0	11.7	43.0	프랑스	-
Maupre교	2@40.95+2@47.25+44.1+53.55+50.4=324.45	10.8	53.55	프랑스	7경간 연속
Asferix교	2@37.4=74.8	13.0	37.4	프랑스	7경간 연속
Dole교	2@48.0+5@80.0=496.0	14.5	80.0	프랑스	-
신카이교(新開橋)	31.0	14.8	31.0	일본	프리캐스트 거더
마츠노키교(銀山御幸橋)	28.0+4@45.5=210.0	9.7	45.5	일본	ILM 시공
혼다니교(本谷橋)	44.513+97.202+56.478=198.193	11.04	97.202	일본	FCM 시공
리토교(栗東橋)	137.6+170+115+67.6=490.2(Tokyo bound)	19.6	170	일본	E/D교
구로베가와교(黒部川橋)	3@50+2@50+2@72+2@50+3@50	11.7	72	일본	철도교
야하기가와교	173.4+2@235+173.4=816.8	43.8	235	일본	사장교
일선대교	50+10@60+50+2@50.5=801	21.2	60	한국	-

한 방식이다. 교축방향 전단력에 대하여는 앵글의 지압에 의하여 저항하고, 횡방향으로는 앵글을 관통시킨 철근에 의하여 저항하게 된다. 이와 함께 U자형 철근이 관통철근을 둘러싸는 상세를 갖는 경우가 대부분이며 이 철근도 횡방향 모멘트를 부담하는데 매우 효과적이다.

혼다니교(本谷橋)에 처음 적용된 매입방식은 용접공정이 매우 간단하다는 장점이 있지만 내구성과 관련된 단점이 지적되기도 한다. 매입된 파형강판의 경사 패널면이 교축방향 전단에 저항한다는 것이 주된 개념이며, 강판의 구멍에 충전된 콘크리트의 전단저항도 고려할 수 있다. 횡방향 설계에 있어서는 매입강판의 항복과 콘크리트의 압괴, 그리고 충전 콘크리트의 파괴에 대하여 검토되어야 한다. 교축방향에 대한 설계식은 설계하중 작용시에 대하여 다음과 같이 콘크리트의 지압과 교축방향 용접 철근의 허용응력을 이용하여 제시되어 있다.

$$Q_a = f_1 A_1 + f_{sa} A_2 \quad (5)$$

- 여기서,  $f_1$  = 플랜지 콘크리트의 허용 지압응력
- $A_1$  = 매입된 경사 패널의 투영 단면적
- $f_{sa}$  = 교축방향 용접철근의 허용 응력
- $A_2$  = 교축방향 용접철근의 단면적

합성형교량에서 강 거더와 콘크리트 바닥판 등 서로 다른 재료 간의 응력전달을 일체화하기 위하여 여러 형태의 전단연결재가 이용된다. 가장 일반적인 것이 스테드 전단연결재이며 최근 들어서는 내력, 피로특성 및 시공성이 우수한 구멍강판(perforated rib plate, PRL) 연결재의 사용도 시도되고 있다. 구멍강판 연결재는 설치과정이 거더의 보강재나 접합부 등을 시공하는 방법과 유사하며, 이 방법은 현장기술자들에게 매우 익숙한 시공방법이다. 전단연결재 설치후 검사과정에서도 스테드 전단연결재에서 요구되는 휨 시험의 생략이 가능하고, 거더에 설치된 후 연결재의 형상 및 크기 특성으로 스테드 전단연결재가 설치된 거더와는 달리 운반 도중에 발생할 수 있는 손상을 방지할 수 있다.

구멍강판을 이용한 접합부 설계는 복부 파형강판 복합교는 물론 다양한 형태의 합성구조에 최근 들어 많이 적용되고 있다. 교축방향으로는 강판의 구멍에 충전된 콘크리트가 저항하는 것으로 고려되지만, 관통철근이 있는 경우 이를 고려한 강도계산식도 일부 연구자들에 의하여 제시되어 있다.

### 2.1.3 연결부 설계

공장에서 제작된 파형강판은 가설시에 교축방향으로 연결되어 야 하는데 강교의 기준에 준하여 고장력 볼트 또는 현장용접을 적용하는 것이 일반적이다. 특히, 파형강판의 특성상 교축방향 응력이 거의 발생하지 않으므로 부재의 접합부는 전단응력에 대해서만 검토해도 무방하다. 가장 일반적인 겹침 필렛용접의 경우 가설시 높이 조절이 용이하고 미관이 좋은 장점은 있지만 시공비가 상승할 수도 있다.

## 2.2 파형강판을 갖는 복합구조 교량의 시공

프랑스의 Campenon Bernard사에 의하여 시작된 복부 파형강판 프리스트레스트 콘크리트 교량은 Maupre 고가교와 Cognac교를 시작으로 유럽에서 Dole교 등의 사례가 있지만, 일본에서 더욱 그 적용이 활발하여 시공 및 사용 중인 교량이 50여 개소 이상에 이르고 있다. 마츠노키교는 교장 210m의 5경간 연속교로서 동절기 눈사태를 염려하여 일본에서 그 사례가 많지 않은 압출공법에 의하여 시공되었다. 주형은 19개의 세그먼트로 분할되었으며 표준 세그먼트의 길이는 11m이다. 특히 5번 세그먼트의 상부



a. 압출에 의한 시공과정      b. 시공 완료  
그림 2. 마츠노키교

슬래브에 Pylon을 세워 사장병용 압출공법을 채택하였으며 중단 구배 6%로 상향 압출되면서 기술자들의 많은 관심을 받았다.

캔틸레버 방식에 의한 대표적인 시공사례는 혼다니교를 들 수 있다. 교장 198m, 주경간 97m로서 복부 파형강판 프리스트레스트 콘크리트 교량으로서는 세계 최초의 라멘구조를 갖는 3경간 연속교이다. 주두부의 파형강판을 콘크리트 플랜지 속으로 1.2m 매입하여 접합시킨 형식으로서 가설시의 세그먼트 길이는 3.6m, 4.8m를 채택하여 1.2m인 파형강판 1파장의 정수배가 되도록 설계하였다. 매입 접합이 채택됨에 따라 하부 슬래브의 접합부에 우수가 침투하여 파형강판이 부식될 우려가 제기되었으므로 실리 콘 고무계통의 탄성 실링에 의해 지수처리 되었다.

파형강판을 프리스트레스트 콘크리트 거더교에 적용하는 것에서 보다 발전시킨 교량들이 최근에 일본에서 완공되었거나 시공중에 있는데 Extradosed교에 적용한 최초의 교량은 히미교(日見橋)이다. Single Cell 단면의 거더로 설계되었지만 2면 사재를 배치하고 있으며 교장은 365m인데 최대 지간장은 180m에 이르고 있다. 리토교(栗東橋)는 3-Cell 단면을 갖는 Extradosed교이며 4개의 복부가 파형강판으로 설계되었다. 강재 다이어프램에 사재에 정착되는 구조를 갖고 있어서 시공 전에 모형실험을 통한 안정성 검토가 수행되었다.

야하기가와교는 복합 사장교로서 콘크리트 보강형 부위의 복부를 파형강판으로 대체한 교량이다. 중앙경간 127m는 강 보강형으로 시공되었으며 교장은 820m에 이르고 최대지간장은 235m이다. 사장교에 파형강판이 적용된 최초의 교량이며 43.8m에 이르는 교폭과 주탑의 형상도 많은 관심을 얻는 계기가 되고 있다.

국내에도 최초의 복부 파형강판 프리스트레스트 콘크리트 교량인 일선대교가 압출공법에 의하여 시공 중에 있으며 향후 이 분야의 기술 수준을 향상시키는 계기가 될 것으로 기대된다.

### 3. 복합 트러스교

#### 3.1 복합 트러스교의 발전

콘크리트 거더의 복부를 강재 트러스 구조로 치환시킨 복합 트러스교는 콘크리트 트러스 교량을 기초로 발전되었다. 1983년에 설계, 시공된 Bubiyan교가 그 시초라 할 수 있는데 복부의 트러스는 철근 콘크리트 구조이다. 이러한 방식은 1988년에 준공된 Sylans교에도 적용되었는데 복부 콘크리트 트러스에 프리스트레싱을 도입한 것이 구분된다.

트러스 사재를 형강으로 적용하여 본격적인 복합 트러스교를 개발한 것은 1984년의 Arbois교라고 할 수 있으며 프랑스를 중심으로 1990년대 후반까지 꾸준히 적용되었다. Boulonnais 교가교는 트러스 사재에 강관을 적용한 구조로서 최근의 복합트러스교의 시초가 되었다고 할 수 있다. 유럽을 중심으로 개발된 복합 트러스교는 최근에 일본에서 적용사례가 보고되고 있다. 특히 Kinokawa교는 강관을 적용한 복합 트러스교로서 압축사재에는 콘크리트를 충전한 형식을 채택하고 있다.

국내에서는 최근에 신천교 및 신천1교가 복합 트러스교로 설계되어 수년 내에 시공될 예정이다. 이러한 복합 트러스교는 상부 구조의 경감에 의한 경제성 확보라는 차원은 물론, 미학적 측면에서도 매우 우수한 형식으로 인식되고 있어 향후 활발한 적용이 기대된다.

#### 3.2 복합 트러스교의 시공

복부 트러스를 콘크리트 구조로 채택하거나 강구조로 채택하더라도 일반적인 콘크리트 박스 거더에 비해서는 중량이 10~20% 가량 경감되므로 캔틸레버 방식의 시공법을 용이하게 활용할 수 있다. 하부 플랜지와 복부 사재를 작업장에서 프리캐스트 제작하고 상부 플랜지는 현장 타설하여 가설하는 경우도 있지만 상부 플랜지까지 포함하여 세그멘탈 가설하는 방법이 주로 채택되었다.

콘크리트 플랜지에는 대부분 내부 강선을 이용하여 프리스트레싱을 도입하고, 부가적으로 박스 내부에 외부 강선을 배치하여 병용하는 경우가 많다. 이러한 내·외부 강선 병용구조로 설계된 복합 트러스교에서는 내부 강선이 시공시의 하중을 부담하고 외

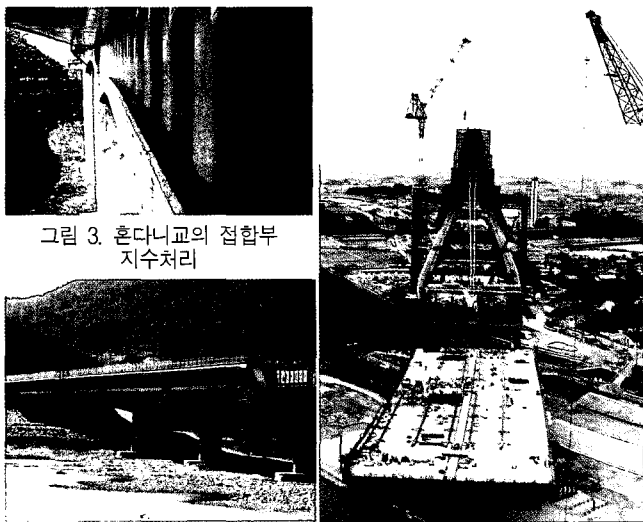


그림 3. 혼다니교의 접합부 지수처리

그림 5. 일선대교 시공상황

그림 4. 야하기가와교의 시공

표 2. 복부 트러스교의 시공 사례

교량명	교장(m)	경간구성(m)	위치	복부 트러스
Bubiyan교	2,380	61@40.16	쿠웨이트	RC 구조
Sylans교가교	1,200	경간장 60	프랑스	PSC 구조
Arbois교	100.1	경간장 40.4	프랑스	형강
Roize교	112	36+40+36	프랑스	형강
Blois교	384	24+7@48+24	프랑스	형강
Boulonnais교	2,035	경간장 110, 77	프랑스	강관
Lully 교가교	957.6	경간장 42.75	스위스	강관
Kinokawa교	268	51.85+2@85+43.85	일본	(충진)강관
Nozomi교	90	90	일본	강관
신천교	360	60+3@80+60	한국	강관

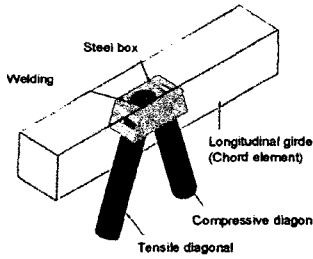


그림 6. 강제 박스를 이용한 격점구조

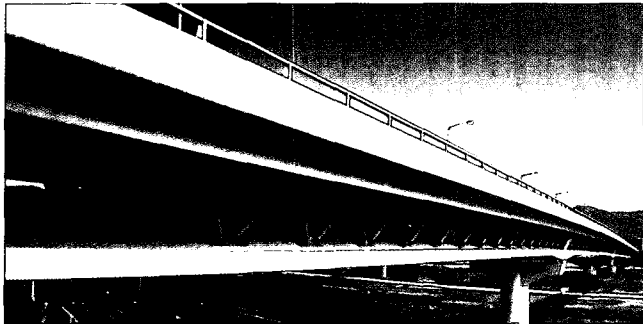


그림 7. 시공 예정인 신천교

부강선은 부가 사하중과 활하중에 저항하는 개념으로 설계된다.

복합 트러스교의 시공에 있어서 가장 핵심적인 구조 요소는 격점구조라 할 수 있다. 최초의 복합 트러스교라 할 수 있는 Arbois교는 복부 트러스를 형강으로 설계하면서 사재의 단부에 강제 블록을 두어 U형 철근을 용접시키는 구조로 시공되었다. 상부 플랜지와 복부 사재와의 접합은 상현재의 형태에 따라 다양한 형태의 적용이 가능한데 앵글 타입과 구멍강판 리브(PBL) 등도 최근에 많이 검토되고 있다. Kinokawa교에 적용된 격점부는 사재의 접합부를 강재의 박스 내부에 두어 콘크리트에 완전하게 매입시켰다는 점에서 매우 특징적이다. 이러한 격점부는 상세 유한 요소해석은 물론 실 규모에 가까운 모형실험을 통하여 그 성능을 검증하기도 한다.

최근에 국내에서도 신천교와 신천 1교가 복합 트러스 구조를 채택하여 앞으로 수년 내에 시공될 예정이다. 하부 플랜지와 사재의 접합부는 스테드 볼트를 적용하고, 상부 플랜지와 접합은 상현재를 활용하여 구멍강판을 적용한 구조이다. 하부 플랜지와 사재는 프리캐스트 세그먼트로 제작되며 상부 플랜지는 현장타설을 통하여 시공하게 될 예정이다.

## 4. 이종합성 강합성 교량

### 4.1 이종합성교의 개념

기존 강합성 교량의 형태가 주로 적용되어 오던 경간을 확대하고 강성이 중요한 설계인자가 되는 경우에 적절하게 사용될 수 있도록 제안된 교량의 형태가 이종합성구조이다. 이종합성 구조의 개념은 <그림 8>과 같이 중간지점부 단면의 하부에 콘크리트 바닥판을 형성시켜서 상부바닥판과 강 거더의 합성과 더불어 하

부바닥판과 강 거더를 합성시키는 이중의 효과를 가지도록 하여 높은 강성을 갖도록 하는 것이다. 이를 통해서 얻는 장점은 상당히 많은데 몇 가지 열거하면 다음과 같다. ① 동일한 형고로 단면을 산정할 때 상당한 수준의 형고 축소가 가능, ② 단면 강성의 증가와 이로 인한 피로 응력 범위의 감소, ③ 좌굴로 인한 문제가 소거되어 하부 플랜지의 두께의 감소 효과, ④ 가로보와 수직 및 하부 수평 브레이싱의 절감 효과, ⑤ 처짐감소 및 동적거동이 우수, ⑥ 재료비의 절감과 모멘트의 재분배 효과 양호, ⑦ 비틀 강성의 증가, ⑧ 작업공간의 확보와 향후 유지관리에 편리한 구조가 가능, ⑨ 박스내부 강재의 부식 방지 환경이 양호해진다. 여기서는 이 형태의 교량의 국내의 적용사례를 살펴보고 설계시 추가 고려사항과 상세에 대해서 알아보려고 한다.

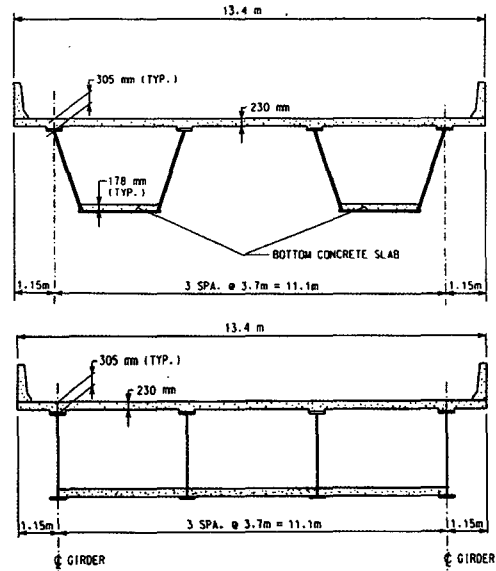


그림 8. 이종합성 강합성 거더교

### 4.2 이종합성교의 시공

국외의 적용사례는 주로 강박스 거더와 트러스아치형태의 교량에 적용되어 왔는데 베네수엘라 Angostrurita Bridge는 경간 구성이 45×82.5×213.75×82.5×45 m로 총 478.75 m의 강합성 연속교이다. 단면 높이는 중앙 경간에서 5 m, 교각부위에서 14 m 정도로 변화되고 있으며 교량의 단면 높이 대 경간 비는 각각 1 : 15에서 1 : 43 정도 되는 교량이다. <그림 9>에 교량의 단면과 경간구성이 나타나있다. 합성 단면은 상부 플랜지는 600×30 mm에서 3,000×80 mm로 구성되어 있고, 복부 두께는 12 mm에서 24 mm까지 변화한다. 그리고 하부 플랜지는 개방된 부분에서는 750×30 mm에서 85 mm, 폐단면에서는 두께가 12 mm에서 18 mm로 변화하는 단면을 갖는다. 하부 콘크리트는 측 경간 교각 부위에서 200 mm, 주 경간 교각 부위에서 850 mm의 두께를 갖도록 타설되었으며, 상부 바닥판은 240 mm 두께로 타

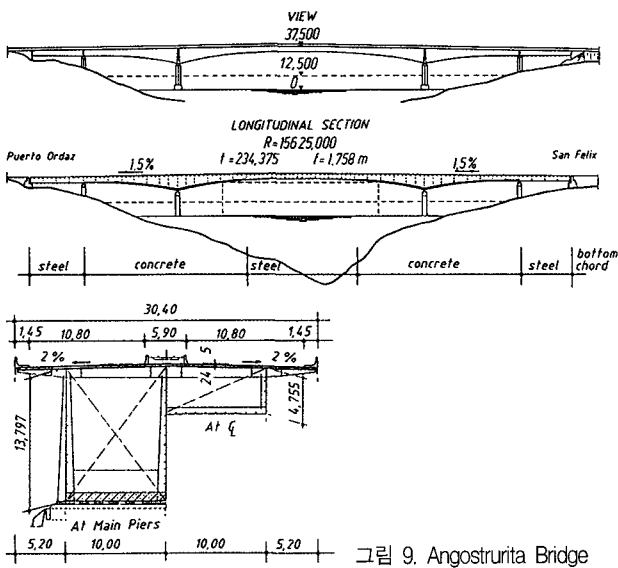


그림 9. Angostrurita Bridge

설되었다. 이 교량에 적용된 전단연결재는 일반적인 스티드 전단 연결재가 아닌 Perfobond shear connector를 사용하였다.

독일의 Main 철도교의 경간 구성은  $83.2 \times 208 \times 83.2 = 374.4\text{m}$  로 이루어진 3경간 연속 합성형 철도교이다. 단면 높이는 주 경간의 중앙과 교대에서 8.5m, 주 교각부에서 16.5m로 이루어져 있다. 이에 상응하는 단면 높이 대 경간 비는 각각 1:13, 1:24 정도 되는 교량이다. <그림 10>에 단면과 경간 구성이 나타나있다. Main 철도교는 교축 직각방향으로 거더간 6m의 간격을 갖는 두 개의 트러스 거더로 이루어진 교량이다. 프리스트레스가 아닌 이중합성에 의해 설계된 이 교량은 특수형식의

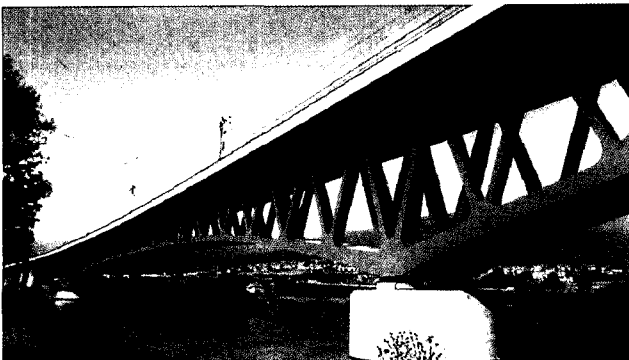
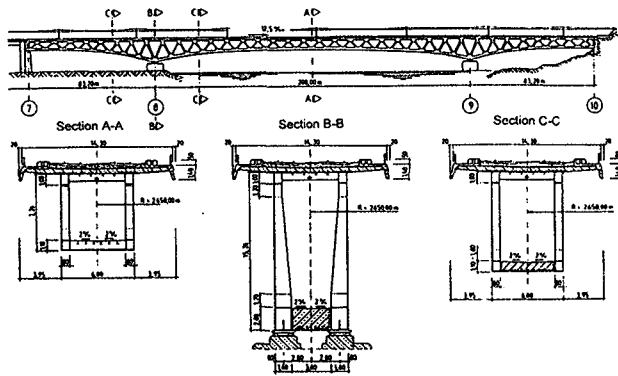
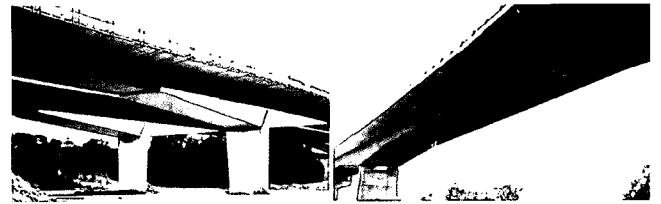


그림 10. Main 철도교



a. Retamar bridge      b. Bridge over river Jarama  
그림 11. 스페인의 이중합성 교량



그림 12. 산호대교

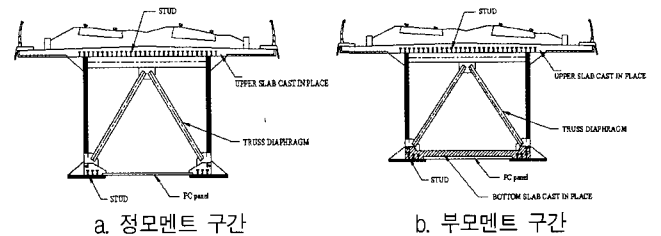


그림 13. 이중합성 철도교

교량이 아니면서도 중앙경간이 200m나 되는 장경간을 실현하였고 상당한 경쟁력을 갖는 교량이 되었다.

이외에도 유럽과 미국에서 다수의 교량이 시공되었는데 엘베강에 있는 고속도로 교량은  $53 \times 106 \times 65 \times 3 \times 45 \times 36\text{m}$ 의 경간구성을 가지는 개구제형 박스거더교이고 <그림 11>에 있는 스페인에서 건설된 형태의 이중합성 교량은 기존의 교량과 다른 독특한 형태를 지니는데 하부 바닥판의 거푸집을 생략하기 위해서 프리캐스트 패널을 이용하였다. 이에 대한 설계내용은 뒤에서 다루었다.

국내에서 이중합성 구조의 적용은 철도교에서 시도되었고 최근에 시공된 사례로 대표적인 교량이 <그림 12>의 산호대교이다. 또한, 최근에 고속철도교량에 적용하기 위해서 연구가 진행 중인 교량의 개요는 <그림 13>과 같다.

### 4.3 이중합성교의 기술적 과제

이중합성 구조를 적용하기 위해서 추가로 고려해야 하는 사항들을 나열해보면 다음과 같다. 이중 합성 구조의 적용을 위해서는 이중합성 구간의 설정, 합성단면 강도 및 강성 산정(유효폭 산정), 이중합성을 위한 전단연결구조, 콘크리트 장기거동에 따른 교량의 거동, 이중합성으로 인한 강재단면의 두께 절감 및 보강재 감소, 사용성 평가라고 볼 수 있다. 유효폭의 산정에는 현재 압축을 받는 상부 바닥판의 유효폭 규정을 그대로 준용하고 있지만 플레이트 거더에 이중합성 구조를 채용하는 경우에는 휨

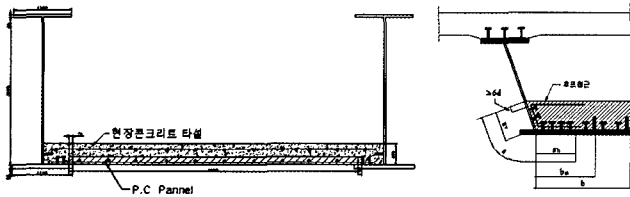


그림 14. 하부 바닥판 및 전단연결부 상세

강성 및 휨강도 산정시와 전단연결재의 강도설계시의 전단유효단면의 산정에 대해서 각각 별도의 산정이 필요하다. 고속철도교의 경우에는 하부 브레이싱이 다수 배치되는데 이를 프리캐스트 패널로 대체할 경우에는 <그림 14>와 같이 하부바닥판의 상세와 더불어 전단연결재 배치와 이를 둘러싸는 철근 상세가 매우 중요하다. 기존의 합성형 단면과는 달리 이중합성 단면에서는 하부바닥판 연결부에 수직스터드 이외에 주형의 복부판에 수평스터드 (lying stud)가 배치되는 경우가 생기는데 이에 대한 설계규정이 마련되어야 한다.

## 5. 혼합 주형을 갖는 복합구조 교량

### 5.1 혼합 주형을 갖는 복합구조 교량의 시공

시간내에서 강 주형과 콘크리트 주형을 접합시키는 구조는 사장교를 중심으로 발전하여 왔으며 측경간이 콘크리트 거더이고 중앙경간이 강 거더인 경우가 대부분이다. 3경간 연속 사장교인 경우 측경간 길이가 중앙경간 길이에 비해서 극단적으로 짧을 경우에는 사하중의 불균형 등에 의하여 양단의 지점에 큰 부반력이

발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 카운터 웨이트로서 콘크리트를 충전한 합성단면을 채택하거나 콘크리트 거더와 강 보강형을 접합한 복합 사장교로 설계할 수 있다.

대표적인 시공 사례로서 독일의 Emscherschnellweg교와 일본의 이구치교(生口橋)가 있는데 1990년과 1991년에 완공된 교량이다. 전자는 중앙경간 310m를 전체적으로 강보강형으로 설계하였으며 측경간을 PSC 거더로 채택하여 접합부를 주두부에 배치하고 있다. 측경간은 50m의 다경간으로 설계되어 전체 경간장은 1,030m이다. 이구치교도 경간 구성의 비대칭으로 인한 부반력 제어를 위하여 복합 사장교로 설계되었으며 중앙 경간장이 490m로서 준공당시에는 최대 경간장을 보유했다. 그 결과 어떠한 하중조건하에서도 부반력이 발생하지 않고, 또한 측경간 케이블을 강성이 큰 콘크리트 거더에 정착시킴으로써 중앙지간 강 거더의 변형을 억제하게 되어 교량 전체의 강성이 증가되는 효과를 얻게 되었다.

이러한 혼합 주형은 Normandie교와 Tataraj교에 적용되어 사장교의 경간장을 획기적으로 증대시키는 계기가 되었으며 홍콩의 Stonecutters Bridge를 비롯한 다수의 사장교가 혼합사장교로 시공될 예정이다. 이와 함께 Extradosed교에 있어서도 혼합주형의 구조를 채택한 사례도 있는데 Kisokawaj교가 대표적이다. 경간구성은 160m + 3@275m + 160m로서 Extradosed교로서는 최대 경간장을 기록하고 있다. 이러한 교량 형식에 있어서는 경간의 비대칭성을 극복하기 위한 것이 아니라 열악한 지반조건을 극복하고 상부 구조의 경감을 통한 경제성 확보가 주 목적이 될 것이다. 특히, 중앙의 강 거더는 대반력 인양에 의한 일괄가설을 채택함으로써 공사기간을 크게 단축시키는 계기가 되고 있다.

키소가와교의 경우에 있어서도 설계단계에서부터 접합부의 위치와 단면 선정에 대한 많은 논의를 거쳐 결정되었는데, 경사 케이블의 수평 분력이 크기 때문에 사재가 배치되는 위치까지는 프리스트레스트 콘크리트 구조로 설계하였다. 특히, 정모멘트 구간으로 접합부 위치를 선정함으로써 상부 바닥판의 내구성 증진도 도모하였다. 또한 내, 외부 강선을 병용하는 구조로서 내부강선과 사재 케이블이 가설시의 하중을 부담하고 외부강선은 부가 사하중과 활하중을 부담하는 구조이다.

특히, 접합부의 피로 안정성 검토를 위하여 교축방향으로 9.4m, 교축 직각방향으로 5.8m의 실험체를 제작하여 이동 운하중재하에 의한 피로실험을 수행하였다. 그 결과 360만회 상당의 반복하중에서도 손상이 발생하지 않는 것이 확인되었고 최대 응력도 적절한 범위 내에 있는 것으로 확인되었다.

### 5.2 혼합 주형의 연결부 설계

프리스트레스트 콘크리트 거더와 강 거더를 접합하는 방식은 몇 가지 선택사항에 따라 구분될 수 있다. 박스거더 단면 전면으

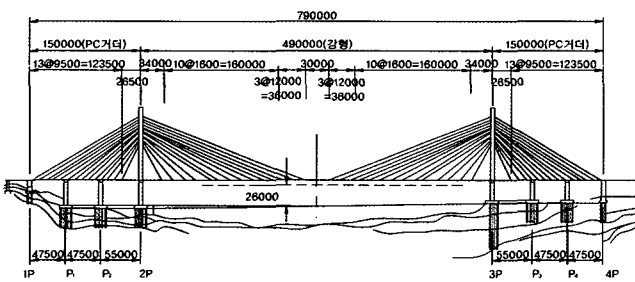


그림 15. 이구치교 일반도

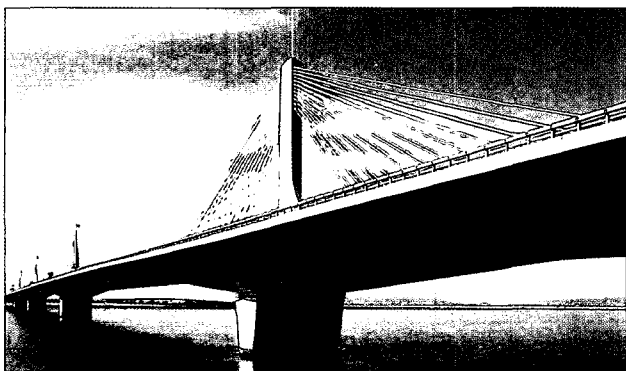


그림 16. 키소가와교

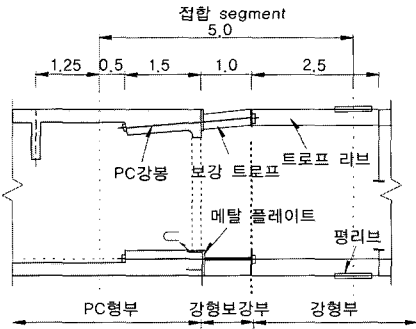


그림 17. 플레이트 접합 (Normandie교)

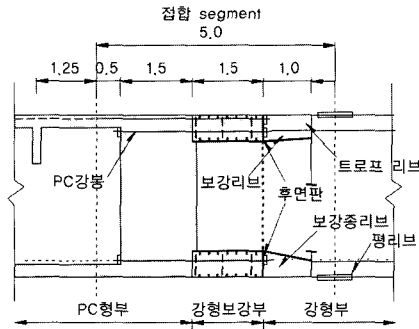


그림 18. 콘크리트 충전과 후면판 접합 (Ikuchi교)

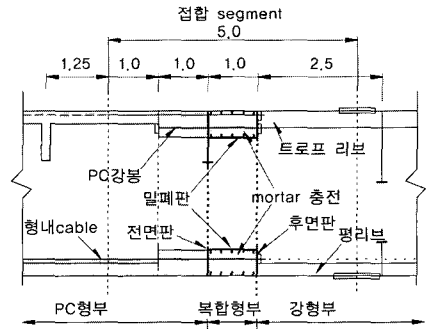


그림 19. 콘크리트 충전과 전, 후면판 병용 접합 (Kisogawa교)

로 접합하거나 웨브나 플랜지로 접합하는 방식, 그리고 지압판과 콘크리트 충전 여부에 따른 각각의 조합에 따라 접합 방식이 선정될 수 있다.

### 5.2.1 플레이트 접합

지압에 의한 접합방식인 메탈 플레이트 방안은 축방향력과 휨 모멘트를 메탈 플레이트에서의 지압에 의해 강 거더와 보강부로 전달하는데 프랑스의 Normandie교에서 채택된 사례가 있다. 전단력과 휨모멘트는 메탈 플레이트와의 마찰과 U 철근의 전단에 의해 강 거더에 전달된다.

접합부의 콘크리트에 대해서도 일반부 PSC 거더와 동일하게 배근과 콘크리트 타설이 가능하다는 장점이 있으며 메탈 플레이트에 작용하는 지압에 대하여 강 거더에 보강이 요구되는데 후면판을 채택한 방안에 비해서 강 거더 제작성은 좋은 것으로 평가된다. 그러나 메탈 플레이트 위치에서의 콘크리트 지압응력은 상대적으로 가장 커질 수밖에 없으며 강성이 다소 급격하게 변하는 구조이므로 강 거더 접합부에서의 손상발생 가능성이 상대적으로 높은 접합구조이다.

### 5.2.2. 콘크리트 충전과 후면판 접합

축방향력과 휨모멘트는 합성부의 전단연결재와 후면판의 지압에 의해 강 거더 보강부와 강 거더로 전달되며, 전단력과 비틀림 모멘트는 강상판과 복부판, 그리고 플랜지에 배치된 스티드에 의해 전달되는 구조이다. 이와 같은 접합방안은 강 거더부에 보강 세로리브를 설치하여 강성의 변화에 따른 영향을 완화하는데 트로프 리브에서의 힘의 전달은 원활한 방식이다. 합성부 강 셀내에서의 응력은 균일하며 후면판 위치에서의 콘크리트 지압응력 또한 비교적 작게 발생하는 방안인데 일본의 Ikuchi교 등에서도 이와 같은 방법의 합성부 구조가 채택된 바 있다.

후면판 내부충전 콘크리트 방안은 시공사례가 있으며 원활한 힘의 전달을 기대할 수 있는 방법이지만 합성 거더부 강재의 제작성이나 좁은 부분에서의 배근 작업에 따른 시공성 문제가 대두되는 방법이다. 그리고 PSC 거더와 합성거더에 일괄하여 대량의

고유동 콘크리트를 타설해야 하므로 품질관리에 따른 어려움 등의 문제 때문에 Kisokawa교와 Ibikawa교의 설계에서는 채택되지 않았다.

### 5.2.3 콘크리트 충전과 전·후면판 병용 접합

지압판으로서 전면판과 후면판을 모두 적용하고 콘크리트로 내부 충전하는 방식은 축방향력과 휨모멘트는 합성부의 전단 연결재와 전·후면판의 지압에 의하여 전달한다. 전단력과 비틀림 모멘트는 전면판의 스티드에서 강 거더로 전달되는 구조이다. 이와 같은 연결부 접합방식은 접합 세그먼트의 콘크리트에 대해서도 PSC 거더와 같은 배근과 타설이 가능하기 때문에 품질확보가 용이한 장점이 있다. 특히, 전면판과 후면판, 그리고 합성부 스티드의 3개소에서 축방향력이 전달되기 때문에 기존의 방식에 비하여 콘크리트의 지압응력을 저감할 수 있으며 지압판에 발생하는 응력 또한 크게 경감시킬 수 있다. 합성부는 강셀의 밀폐구조로 이루어지는데 강 거더의 제작성은 기타 방법에 비하여 가장 좋은 것으로 평가된다.

다만 합성부에 무수축 모르타르 충전이 필요한 것이 상대적인 단점으로 인식될 수 있으며 후면판 위치에서의 강 거더에서 국부적인 손상 발생의 가능성이 있지만 이와 같은 접합방식에 있어서의 발생 문제는 보고되지 않고 있다. 하중 전달 메커니즘이 가장 원활하며 접합면에서의 응력 집중의 발생이 가장 작게 예상되는 구조로서 구조적 성능은 물론, 시공성과 내구성에서도 뛰어난 것으로 분석되어 최종 접합구조로 선정되었다.

## 6. 콘크리트 충전강관을 이용한 합성형교

콘크리트 충전강관 복합주형은 폐쇄된 강관에 콘크리트를 충전한 충전강관 주형과 콘크리트 바닥판을 합성한 복합구조로서 강관이 콘크리트 타설용 거푸집 역할도 하고, 충전 콘크리트와 합성되는 새로운 구조이다. <그림 20>은 충전강관을 이용한 합성형교의 시공예로서 경량으로 투시성이 우수하고, 경제성 및 유지관리 효율성 측면에서도 장점을 갖고 있어 현대 교량에서 요구하는



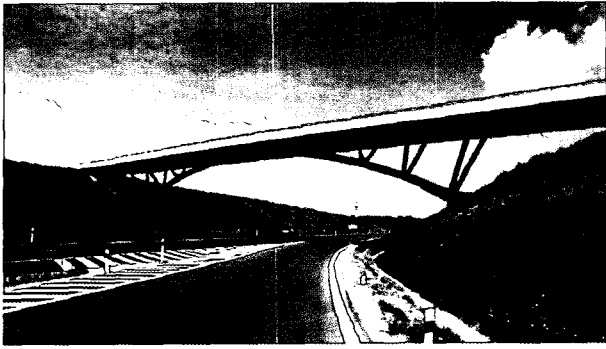


그림 20. Antrenas 교

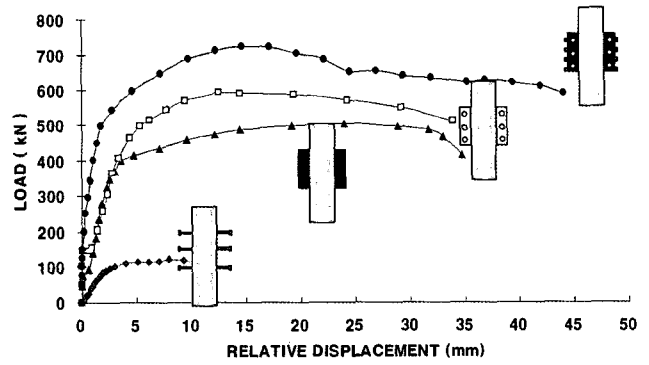


그림 23. 각 전단연결재의 전단내력 실험결과

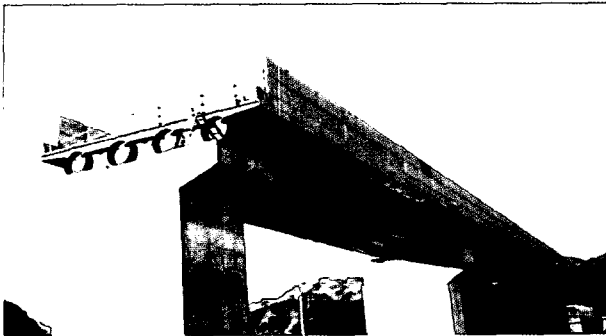


그림 21. 철도교 적용사례

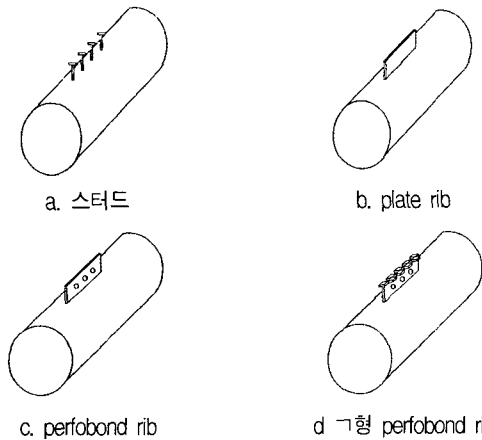


그림 22. 원형강관에 적용되는 전단연결재의 대표적 형상

미적측면과 환경 친화적인 측면을 포용하고 있다.

원형 강관은 각형 강관에 비해 단면효율은 나쁘지만, 양단을 강관으로 폐쇄한 강관 내부에 콘크리트를 충전하여 일체로 거동하게 함으로서 우수한 내력 및 하중변형 성능 발휘하는 것이 가능하다. 또한, 강관은 박판을 용접해 조립하는 종래의 강관 타입의 강주형에 비해서 제작가공수가 대단히 작기 때문에 제작경비 절감의 효과가 있으며, 강관은 충전제인 콘크리트 타설시의 거푸집 대체가 가능하여 시공성의 간편화, 철근의 대체로 철근가공과 조립공수가 생략되어 건설경비의 저감 효과를 갖는다. 콘크리트로 충전되는 강관주형은 SRC와 RC 구조와 같은 정도의 소음 및 진동 저감 효과가 기대되기 때문에 <그림 21>에서와 같이 철도교에도 효율적인 적용이 가능하다.

콘크리트 충전 강관 거더와 콘크리트 바닥판의 합성을 위해 역학적 성능 및 시공성이 우수한 전단연결재를 개발하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 대표적인 전단연결재의 형상은 <그림 22>와 같다. 전단실험(push-out test)을 통해서 <그림 22>에 나타난 각 전단연결재의 전단내력을 평가한 결과는 <그림 23>과 같다. 가장 일반적으로 사용되고 있는 스테드 전단연결재에 비해서 perfobond rib나 ㄱ형 perfobond rib 전단연결재 등이 보다 우수한 전단내력을 보이는 것을 알 수 있다. 스테드는 전단연결재는 용접부 파단에 의해서 파괴에 발생하는 반면에 이외의 전단연결재는 콘크리트에 의해서 파괴모드가 결정된다. 따라서 이들 전단연결재를 효율적으로 설계에 적용하기 위해서는 전단내력 평가식 및 설계식이 결정되어야 하며, 관련 연구가 국내외에서 진행 중에 있다.

## 7. 맺는 말

합성구조나 복합교량으로 표현되는 최근의 구조기술 동향은 대형화 및 다양화되는 구조물 수요에 부응하고 공사비 및 유지관리에 있어서의 비용절감과 구조의 합리화 등을 목적으로 복합구조가 전 세계적으로 주목받고 있다. 이와 같은 합성구조와 혼합구조 등에 대한 기술 개발을 바탕으로 진보적 형식의 구조물들이 교량을 중심으로 설계 및 시공되고 있으며 신소재 및 신기술의 도입으로 기존의 교량형식 분류를 무색하게 하고 있다. 선진 외국을 중심으로 거더교, 아치교, 케이블교 등의 많은 사례에서 복합구조를 적용한 교량들이 설계 및 시공되었으며 이러한 경향은 더욱 활발해지는 추세이다.

복합구조의 채택에 따른 효과는 다양한 측면에서 분석될 수 있는데 무엇보다 먼저 강도, 강성, 인성, 내구성, 내화성 등의 측면에서 각 구조형식과 재료의 장점을 조합하여 상호 보완할 수 있다는 사실이다. 또한 콘크리트와 강재를 동시에 적용하거나 치환하여 사용함으로써 중량의 저감과 구조적 균형을 기대할 수 있다. 이와 함께 공사기간의 획기적 단축을 기대할 수 있어 급속시공을 도모할 수 있는데 이는 사회적 비용의 경감에 따른 무형의

효과까지 거둘 수 있는 매우 효율적인 구조형식이라 할 것이다.

국내에서도 교량 바닥판과 하부구조를 중심으로 복합구조에 대한 연구와 적용이 다수 시도되었으며 복부 파형강판 PSC교를 비롯한 몇 가지 형식이 실제 시공까지 이루어지고 있어 복합구조 교량 분야에서의 기술발전을 기대하게 하고 있다. 앞으로 지속적인 기술개발을 통하여 국내 환경에 적합한 복합구조 형식을 개발하는데 많은 노력을 기울여야 할 것이며, 이를 뒷받침하기 위한 설계기준의 합리적 정비도 뒤따라야 할 것이다. □

참고문헌

1. 김광수, 정광희, "파형강판 복부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계와 시공단계 해석", 전산구조공학회지 Vol.17, No.4, 2004. 12, pp.29~34.
2. 김광수, 김우중, "프리스트레스트 콘크리트 교량의 발전 및 전망", 한국콘크리트학회지 제16권 1호, 2004, pp.22~32
3. 김광수, 정광희, 심정욱, 유성원, "PSC-강 혼합거더의 연결부 거동해석", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 2004. 5.
4. 현대건설, 유신코퍼레이션, "파형강판 Web PSC 박스거더교-계획, 설계, 시공, 유지관리 및 기타", 현대건설, 2001.
5. 정철현, 이홍수 외, "원형강판 거더와 콘크리트 바닥판 사이 기형 perfobond 리브 전단연결재의 실험적 연구", 대한토목학회논문집 제25권 제 1A호, 2005. 1.
6. 野村國勝, 梶川靖治, "複合構造橋梁", 1994, p.250.
7. 土木學會, "複合構造物設計·施工指針(案)", 1997, p.199.
8. Elgaaly, M., Seshadri, A., Rodriquez, R., and Ibrahim, S., "Bridge Girders with Corrugated Webs," Fifth International Bridge Engineering Conference, TRR 1696, 2000.
9. Fujiwara, T., "Design of the Connection between Steel and Concrete Girders," 橋梁と基礎 Vol.36, No.8, 2002, pp.36~39.
10. 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.
11. Mo., Y. L., Jeng, C., and Chang, Y. S., "Torsional Behavior of Prestressed Concrete Box-Girder Bridges with Corrugated Steel Webs," ACI Structural Journal, Nov.~Dec. 2000, pp.849~859.
12. Rosignoli, M., "Prestressed Concrete Box Girder Bridges with Folded Steel Plate Webs," Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, Vol.134, 1999, pp.77~85.
13. Thao, P. X., and Causse, G., "History of Composite Trussed Bridges," Koki, O. 譯, 橋梁と基礎 Vol.36 No.8, 2002, pp.26~30.
14. Virlogeux, M., "New Trends in Prestressed Concrete Bridge," Fifth International Bridge Engineering Conference, TRR 1696, 2000.
15. Yabuno, M., Fujiwara, T., Sumi, K., Nose, T., and Suzuki, M., "Design of Tataru Bridge," IHI Engineering Review Vol.36 No.2, 2003, pp.40~56.
16. Yamamura, M., Okamoto, H., and Minami, H., "Design and Construction of the First Composite Truss Bridge in Japan - Kinokawa Viaduct -," fib Symposium April, 2004.
17. Yamazaki, J., "Hybrid Bridges from a Viewpoint of Concrete Side," 橋梁と基礎 Vol.36 No.8, 2002, pp.7~8.

신간소개

레미콘 플랜트 설비와 콘크리트 품질

◆ 소개

: ... 이 시리즈는 그간 각 분야별로 학회지 특집기사에 참여한 전문가들의 경험과 축적된 연구결과 및 국내외에서 개발된 각종 기술 등에 대하여 체계적이고 깊이 있는 내용을 수록하고 있어 관련분야에 종사하는 실무자들이나 학생들에게 매우 유익한 도서가 될 것이다.

- 저 자: 한국콘크리트학회
- 출판사: 기문당
- 발행일: 2004년 12월 30일
- 정 가: 10,000원(회 원: 8,000원)
- ISBN: 89-7086-631-0
- 총쪽수: 139 쪽(판형: B5)

