

장경간 PSC 박스거더 교량의 도전 Challenges to Long Span PSC Box Girder Bridge



박찬민*
Chan-Min Park

1. 서론

현장타설 캔틸레버 공법이 1950년대에 처음 등장한 이래로 장경간 콘크리트 박스거더 교량은 반세기만에 전세계적으로 괄목한 만한 성장을 이루었으며, 장비의 개발과 재료의 발달로 Stolmasundet 교량(경간장 301 m, 1998, 노르웨이)이 건설되기에 이르렀다<표 1>.

2차 세계대전 이후로 유럽에서는 프리스트레스트 콘크리트 교량이 널리 적용되었다. 독일 기술자 Ulrich Finsterwalder는 1950년에 최초로 포스트텐션(post-tension)을 사용한 PSC 콘크리트 박스거더 교량(Balduinstein Br., 경간장 62 m, 현장타설 캔틸레버 공법)을 건설하였다.

캔틸레버 공법은 RC 박스거더 교량이나 다른 형식의 교량에서도 사용된 바 있지만, 포스트텐션 개념을 결합함으로써 박스거더 교량의 적용 범위를 빠르게 확장할 수 있게 되었다. 또한, 이와 아울러 매치캐스트(match cast)를 이용한 프리캐스트 세그먼트

(precast segment) 개념은 1960년대 초반에 도입(Choisy-le-Roi Br., 프랑스, 1962)되었다.

우리나라에서는 Dywidag 강봉에 의한 캔틸레버 공법으로 PSC 박스거더 교량인 원효대교(경간장 100 m)가 1981년 건설되었다. PSC 박스거더 교량의 발전사를 간략히 소개하면 다음과 같다.

- 1948년 : 프랑스, Esbly 교량(경간장 74 m), Freyssinet 공법
- 1950년 : Form Traveller를 이용한 캔틸레버 공법 개발, 독일 Dywidag사
- 1959년 : 독일, Kettiger Hang 교량, 이동식 거푸집 공법
- 1964년 : 오스트리아, Inn 교량(경간장 102 m, 5경간 연속교), 현대적 연속압출공법
- 1962년 이후 : 노무비 절감, 품질의 고급화 및 균일화, 기계화 시공의 장점으로 프리캐스트 공법 보급 확대
- 1975년 : 외부긴장재(external tendon)의 적용

이후로 꾸준히, 구조적인 성능뿐만 아니라 장기적인 내구성을 향상시키는 기술이 개발되어 왔다. 더욱이 경간장의 증대는 기술자들의 도전정신과 결부되어 새로운 공법, 고성능 재료의 개발의 동기부여가 되어 왔다.

본고에서는 PSC 박스거더 교량의 장경간을 위해 고려해야 할

표 1. 경간장 세계 Top-10 PSC 박스거더 교량

No.	교량명	중앙경간(m)	소재지	준공년도	비고
1	Shibanpo	330	중국	2006	중앙 108 m는 강박스
2	Stolmasundet	301	노르웨이	1998	
3	Raftasundet	298	노르웨이	1998	
4	Sundoy	298	노르웨이	2003	
5	Humen-2	270	중국	1997	
6	Sutong-2	268	중국	2009	
7	Gateway-1	260	호주	1986	
8	Varodd	260	노르웨이	1993	
9	Gateway-2	260	호주	2010	
10	Luzhou-2	252	중국	2000	

* 정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원
cnpark@ex.co.kr

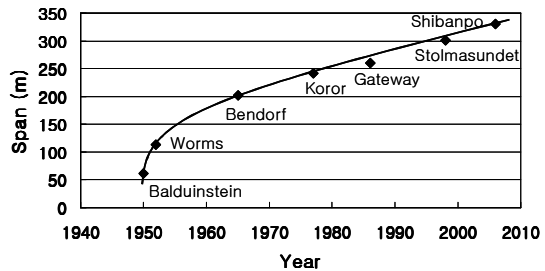


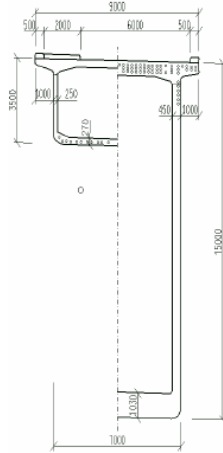
그림 1. PSC 박스거더 경간장 추이



그림 2. Shibano Bridge(main span 330 m)



그림 3. Stolmasundet Bridge(main span 301 m)



$$\rho = \frac{I}{Ay_t y_b}$$

여기에서 I 는 단면 2차모멘트, A 는 단면적, y_t 와 y_b 는 각각 중립축으로부터 상·하연까지의 거리이다. 전형적인 박스단면은 약 0.60의 값을 가진다.

박스단면은 복잡한 단면에 따른 콘크리트 타설 공중으로 인하여 상대적으로 단가가 비싼 문제가 있으나, 장경간화 될 수록 단면의 효율로 인한 자중의 감소효과 때문에 타당성을 갖게 된다.

일반적으로 single-cell 박스단면이 널리 적용되나 그 폭 한계는 약 26 m 정도이다. 폭원/경간장 비가 커지면 경제적으로 유리해 보이지만 전단지연(shear leg) 효과, 단면 찌그러짐(distortion), 횡방향 모멘트 값 증대 등으로 인해 단면의 보강이 필요해져서 구조적으로 효율적이지 않을 수 있다.

이러한 부정적인 효과를 줄이기 위해 two-cell 박스단면 또는 multiple 박스단면을 채용하기도 하지만, 이 또한 내부 거푸집 문제와 같은 시공의 복잡성을 유발하는 단점이 있다. 이에 대한 대안으로 스트럿으로 보강한 단면 또는 상부 슬래브를 리브(rib)로 보강한 단면이 가능하다.

최근의 박스단면 형상에 대한 경향은 이러한 리브나 스트럿에 의한 횡방향 보강으로 넓은 폭을 가지는 single-cell 박스단면이라 할 수 있다.

주요 항목을 중심으로 간략히 서술하고자 한다.

2. 박스단면

거더 단면의 박스 형상은 그 구조적인 장점으로 인하여 장경간 콘크리트 거더 교량에 널리 적용될 수 있는 합리적인 단면이다 <그림 4>. 즉, 상·하부에 배치되는 슬래브로 인해 정부의 모멘트에 저항능력이 커지며, 복부에 의한 폐단면의 큰 비틀림 강성은 곡선교 또는 편재하의 비틀림 모멘트를 저항할 수 있게 만든다.

이와 같은 장점으로 인해 소요 강선량이 다른 형식의 단면에 비해 적다. 소요 강선량은 단면의 효율과 연관이 있으며 아래와 같은 비율로 평가할 수 있다.

3. 신축이음장치

경간이 길어질수록 온도변화, 콘크리트의 크리프 및 건조수축으로 인한 신축량이 커져서 구조적인 검토가 필요하다. 특히 교

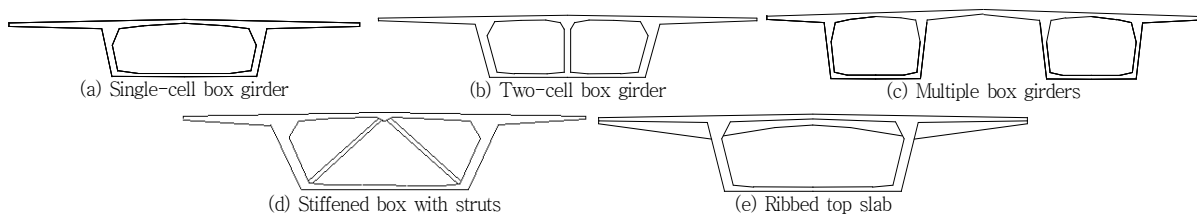


그림 4. 박스거더 단면

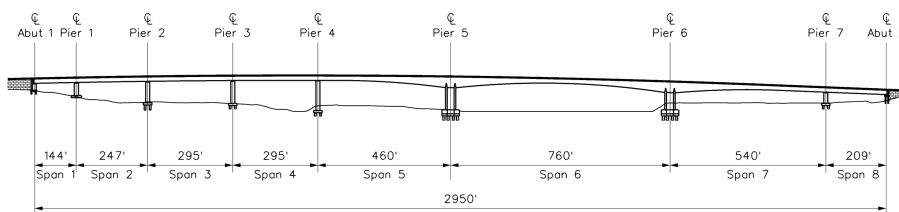


그림 5. Kanawha River Bridge, USA

각과 상부구조를 일체화시키는 구조시스템에서는 교각에 무리한 모멘트가 걸릴 가능성이 많다.

이러한 경우, 경간 중앙에 강재거더를 이용한 힌지(hinge)를 형성하여 종방향 변위는 허용하되 모멘트에 대해서는 저항하도록 하여 캔틸레버 시공에 장애를 주지 않으면서 주행의 연속성을 확보할 수 있다.

그러나 시공성, 주행성 및 유지관리를 감안하여 중간에 힌지를 설치하지 않고 적절한 구조시스템 설정으로 양쪽 교대에만 신축이음장치를 두는 것이 바람직하다. <그림 5>는 8경간 연속 PSC 박스거더 교량으로써 주경간의 교각에서 상부구조와 교각을 일체로 시공하였으며, 나머지 교각에서는 교량받침을 두고 양쪽 교대에만 신축이음장치를 둔 예이다.

4. 외부긴장방식(external prestressing)의 발전

프리스트레싱 도입 초기에는 강선의 마찰손실이나 콘크리트 크리프 거동이 낮게 평가되어 캔틸레버 공법으로 시공된 교량에 문제가 발생하였으며, 이를 보강하기 위해 외부긴장개념이 사용되었다. HDPE(high density polyethylene) 덕트의 개발로 강선의 부식에 대한 우려를 해소할 수 있게 되자 신설 교량에서도 공격적으로 적용된 것은 Jean Muller에 의해서이다(Long Key Bridge, USA, 1982, precast segment, span by span erection, <그림 6> 참조).

외부긴장방식에 의하여 복부의 두께 감소, 긴장력의 정확한 도입, 시공상의 품질관리가 용이하다는 장점을 얻을 수 있다.

이 개념의 단점은 외부긴장력을 도입하기 전에 해당 경간이 가설되어 있어야 한다는 것과 무언가에 의하여 자중을 지탱해야 한

다는 것이다. 따라서 외부긴장재의 배치는 가설 공법에 따라 달라진다<그림 6>.

위 그림에서와 같이 span by span 공법에서 뿐만 아니라, 캔틸레버 시공에서도 외부긴장 방식은 아주 효율적인 공법이다. 즉, 콘크리트 박스거더의 자중과 가설장비의 무게는 상부 슬래브 내부에 배치되는 캔틸레버 강선(internal cantilever tendon)이 지탱하고, 상부가 폐합된 후에 추가로 외부긴장재가 설치되어 추가의 하중에 효과적으로 저항하도록 하는 것이다<그림 7>.

또한 연속압출공법(incremental launching method)에서도 다양한 방법으로 외부긴장재를 활용할 수 있는데, Normandy 교량에서 적용된 한 사례를 소개하면 아래와 같다<그림 8>.

압출 전에는 대칭으로 배치된 임시의 외부긴장재로 평형을 이루어 필요한 만큼 압축력이 도입되도록 한다<그림 8 (a)>. 압출이 완료되면 임시 외부긴장재는 하나씩 풀어 제 위치로 배치하여 재사용한다<그림 8 (b)>. 이때에도 물론, 필요한 경우에는, 압출 전이나 압출 완료 후에, 상부 슬래브와 하부 슬래브에 내부 긴장재를 배치할 수 있다.

외부긴장방식의 발달과 함께 긴장재의 부식방지를 위한 기술들이 빠른 속도로 발전하고 있다. 그 대표적인 예가 투명 쉬스관(ethylene based copolymers)의 사용이다<그림 9>. 이로써

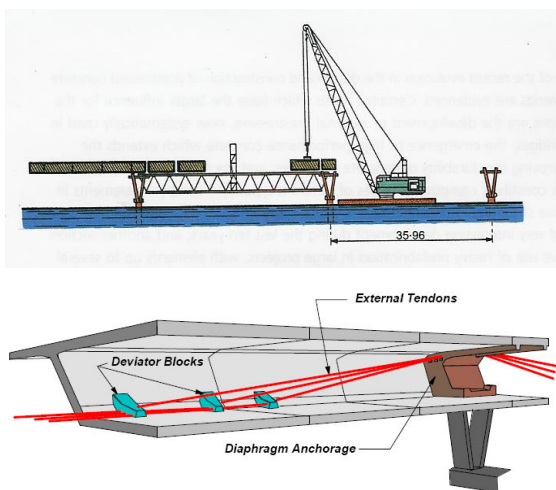


그림 6. Long Key Bridge(Florida)

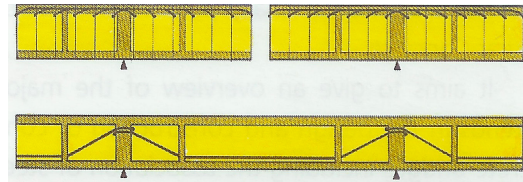
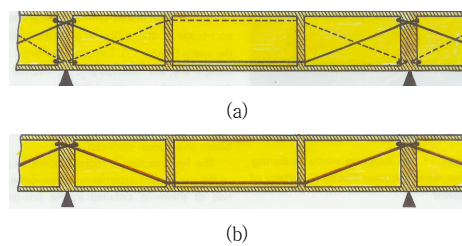


그림 7. Internal cantilever tendons and final external tendons



(a)

(b)



(c)

그림 8. Normandy Bridge(ILM) 외부긴장재 배치



그림 9. 투명 쉬스관 사용 예



그림 11. Ganter Bridge(Swiss)

그라우팅 후에 쉬스관 내의 공극을 확인할 수 있으며, 문제가 생긴 부위에 즉시 구멍을 뚫고 그라우팅제를 재주입하므로써 강선 부식을 방지할 수 있다.

5. 고효율(highly eccentric) 외부긴장방식

일반적으로 박스단면 내부의 공간적 제약으로 인해 외부긴장방식의 효율이 내부긴장방식보다 떨어진다. 이를 극복하기 위하여 박스단면 외부로 긴장재를 노출하는 시스템이 검토되었다.

<그림 10>과 같이 외부긴장재의 배치형상이 거더에 작용하는 휨모멘트 다이어그램과 비슷하게 되면 거더의 높이를 현저히 줄일 수 있으며 결과적으로 상부구조의 자중이 매우 줄어들 수 있는 장점이 있다.

이러한 배치는 외부긴장재에 작용하는 인장력 효과로 인해 단

면의 전단저항 능력도 커지는 효과가 있다.

최근에는 구조적인 효율성과 함께 미관의 수려함으로 extradosed PSC 박스거더 교량의 적용이 빠르게 확산되고 있다. 이러한 형식의 교량은 프랑스의 Mathivat이 처음으로 제안하였으며, 사장교와 일반 거더교의 중간 단계로 볼 수 있다. 거더의 높이와 경간 길이의 비(H/L)는 1/15~1/35로써 일반 박스거더 교량(H/L=1/15~1/17)에 비해 작다. 또한 주탑의 높이는 사장교에 비해 낮아 공사비가 절감된다.

Extradosed 교량과 일반 박스거더 교량, 사장교와의 차이점을 쉽게 설명할 수 있는 것이 경간장에 따른 콘크리트 물량과 강선량의 변화이다<그림 12>.

결론적으로 Extradosed 교량의 시공법이나 외관은 사장교와 유사하나 구조적인 특징은 일반 거더 교량에 가까운 것이라고 볼 수 있다.

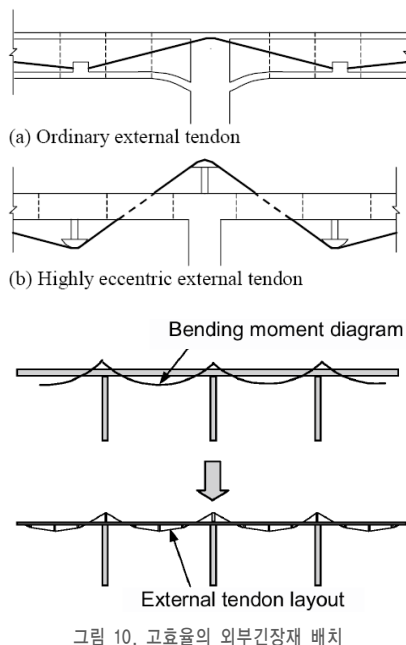


그림 10. 고효율의 외부긴장재 배치

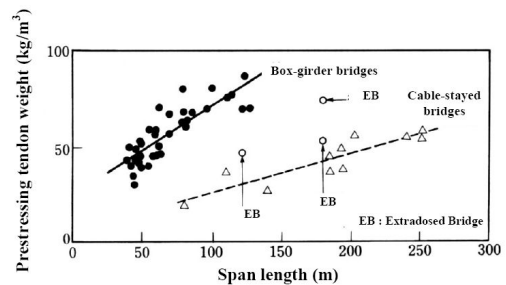
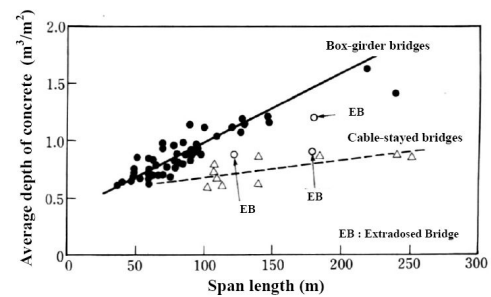


그림 12. 경간장에 따른 거더 높이와 강선 물량 비교

6. 합성단면의 도입

보다 효율적인 구조시스템을 향한 기술자들의 노력의 일환으로 콘크리트와 강재 및 프리스트레싱의 장점을 충분히 살린 합성구조물에 대한 다양한 개념이 경쟁력을 가지고 선을 보이고 있다. <그림 13>과 같이 파형강판으로 콘크리트 복부를 대체한 교량, 또는 Shibano Bridge<그림 2>와 같이 경간 중앙부에 직교이방성(orthotropic)의 강박스를 도입하는 교량 등이 그 대표적인 예이다.

파형강판은 프리스트레싱에 의한 축방향 응력을 흡수하지 않되 전단에 대해 높은 저항을 하는 부재로써 상하부의 콘크리트 슬래브에 효율적으로 프리스트레싱이 도입되도록 하며, 전단 좌굴에 대한 저항능력도 우수하다.

가벼운 파형강판은 거더의 자중을 줄여 장경간화가 가능하며, 전체적으로 공사비의 절감을 가져온다. 또한, 캔틸레버 시공에서 단위 가설 세그먼트의 길이를 길게 할 수 있어 공기가 단축된다. 추가로, 복부 콘크리트공이 삭제되어 철근배근, 콘크리트 타설, 강선 배치 등에 따른 노무비가 절감되며 품질과 내구성의 향상이 기대된다.

7. 대블럭 가설공법의 발달

최근의 주요한 건설동향은 매우 규모가 큰 프로젝트의 탄생이다. 불과 20여년 전만 해도 고려할 수 없었던 대담하고도 규모가 큰 공사를 가능케 하는 시공능력이 마련되었고, 개발도상국에서조차 웬만한 도로시설이 갖춰진 상태에서 남아있는 건설물량의 대부분은 경제성이 다소 약한 대규모 프로젝트이기 때문이다.

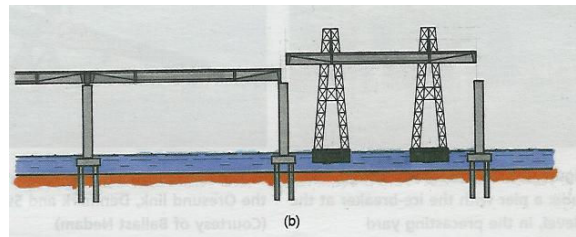
또한, 선진국은 이미 자국 내의 기반시설을 갖춘 상태에서 회사의 생존전략으로 해외사업을 목표로 컨소시엄을 구성하여 대규모 민자사업을 개발하는 것도 중요한 한 이유이다. 이러한 대형 프로젝트는 그 큰 규모와 신속한 시공을 통한 투자금의 빠른 회수를 이유로 고가의 중장비를 사용한 시공을 필요로 한다. 특



그림 13. Hontani Bridge(Japan)



(a) Confederation Bridge(Canada)



(b) Vasco da Gama Bridge(Portugal)

그림 14. 대블럭 가설 공법에 의한 PSC 박스거더 시공

히, 해상공사에서는 시공의 안전성과 품질확보 및 공기단축을 목적으로 대규모의 프리캐스트 공법을 사용하는 경우가 많다.

캐나다의 Confederation Bridge는 경간장 250 m, 기초부터 상부까지 프리캐스트 공법으로 시공된 PSC 박스거더 교량으로써 인양된 프리캐스트 부재의 무게는 7,000 ton에 달한다<그림 14 (a)>.

8. 재 료

콘크리트 박스거더 교량에서는 전체 하중에서 사하중이 차지하는 비율이 상대적으로 매우 높다. 따라서 고강도(high strength) 또는 경량(lightweight) 콘크리트를 사용하는 것은 구조적으로 장점이 있다. 나아가 고강도콘크리트는 내구성 향상에도 큰 도움이 된다.

우선적으로, 고강도콘크리트는 단면의 날렵함을 가능케 하여 자중을 줄일 수 있다. 물론, 상부 슬래브는 구조상세(detailing)나 사용성에 의해 단면이 결정되기 때문에 고강도콘크리트를 사용한다 해서 그 두께가 크게 줄지는 않는다. 전단강도는 콘크리트 압축강도의 평방근에 비례하므로 어느정도 복부의 두께를 줄일 수는 있으나 복부 또한 세장비(slenderness)와 구조상세(강선배치 등 고려)의 제약조건으로 크게 그 값을 줄이지 못한다. 고강도콘크리트를 사용하여 자중을 줄일 수 있는 대표적인 부위는 교각 근처의 하부 슬래브이다. 특히, 부모멘트 구역의 하부 슬래브는 고강도콘크리트로 그 두께를 현저히 줄일 수 있다.

또한, 가설장비의 한계를 넘어서거나 경간장이 현저히 길어지는 경우에 고강도콘크리트는 매우 중요한 해결 방법이 된다. 캔틸레버 공법으로 시공되는 교량에서 교각을 중심으로 좌우대칭으로 시공을 해나갈 때, 상부단면의 무거운 자중과 지형조건은 경간장의 선택에 큰 걸림돌이 된다. 이 때, 고성능콘크리트 기술은 설계자의 선택을 자유롭게 할 수 있다. 한 예로써, Stolmasundet Bridge(301 m)와 Raftsundet Bridge(298 m)에서 60 MPa의 고강도(cube strength)와 1900~1950 kg/m³의 밀도를 가지는 고성능 경량(high strength lightweight) 콘크리트를 주경간의 중앙부에 적용하였다. 이 교량은 염해에 대해서도 100년 이상의 내구성을 가지는 것으로 평가된다. 한편으로, 경량 콘크리트를 사용하면 단면의 실제 두께 감소 없이도 상하부 슬래브와 복부 모두에서 자중을 줄일 수 있다. 그러나, AASHTO LRFD 등에서는 경량 콘크리트를 사용할 때 전단강도의 75%~85% 만을 보도록 하고 있다.

경량 콘크리트는 상대적으로 작은 탄성계수를 가지므로 큰 탄성처짐이 발생할 뿐 아니라, 동일한 크립 계수 조건에서도 상대적으로 보다 큰 장기처짐을 수반한다.


또한 경량 골재는 그 사용성과 높은 단가가 해결해야 할 문제이다. 즉, 매우 제한된 업체만이 생산이 가능한 상황과 보수적인 설계기준은 경량 콘크리트의 장점을 희석시킨다고 볼 수 있다.

최근에 콘크리트 강도는 60 MPa까지 보편화 되고 있으며 나아가 100 MPa도 시도되고 있다. 그러나, 고강도의 사용은 점진적으로 적용할 필요가 있다. 즉, 많은 경험과 실험, 그리고 설계자들의 상당한 주의를 요한다. 고강도콘크리트는 큰 프리스트레싱력을 집중된 부위에서 받게 되기 때문에 국부응력이 크게 걸리는 정착부가 주요 검토부위가 되며, 얇아진 두께로 인한 복부 좌굴 문제, 고강도철근콘크리트 부재의 연성(ductility) 부족 문제가 충분히 검토되어야 한다. 또한, 콘크리트 강도가 80~100 MPa 또는 그 이상이 되는 경우, 내충격성과 내화성에 대한 충분한 검증이 수반되어야 한다.

9. 맺음말

한 나라의 교량건설 기술은 그 길이로써 쉽게 입증해 보일 수 있다. 아쉽게도 우리나라에는 팔목할만한 경간장을 갖는 교량이 없다. 이 사실은 여러 가지 국내 현실을 간단히 설명해 준다고 생각한다. 더욱이 30년 가까운 경험으로 국내 자립도가 높다고 할 수 있는 PSC 박스거더 교량에서조차 아직 170m(신촌교, 2007, 한국도로공사) 벽을 넘어서지 못하고 있다.

기본 역학개념의 부재로부터 오는 자신감 결여, 기술자로서 새로운 한계로의 도전에 대한 부담감, 관련 설계기준과 시방의 제약, 신기술 적용에 대한 제도적 보상 문제, 시장의 제한으로 인한 콘크리트 업계의 소극적 대응 등이 PSC 박스거더 교량의 기술발전을 더디게 하고 있다고 판단한다. 또한 너무 쉽게, 미관설계 또는 특수교량의 전유물이 되어 있는 케이블교량(Extradosed Bridge 포함)에 그 영역을 침범당한 탓이 있다. 그러나, 그 경제적인 면이나 미관의 우수함, 그리고 시공과 유지관리의 용이성 면에서 다시 한번 PSC 박스거더 교량을 되짚어 볼 필요가 있다.

기술자들은 최적의 구조시스템 설계기술(articulation)과 고성능콘크리트 재료(고강도, 경량, 내구성 등 포함) 배합기술, 가설장비의 자유로운 운용기술을 바탕으로 과감한 시도를 통해 보람을 느끼고, 일반 국민들로 하여금 자부심을 느끼게 하며 나아가 국제경쟁력을 확보하는데 앞장서야 할 것이다. 

참고문헌

1. *New Trends in Prestressed Concrete Bridges*, Michel Virlogeux, Thomas Telford and fib, 2002.
2. *Design of Long Span Concrete Box Girder Bridges: Challenges and Solutions*, Santiago Rodriguez, T.Y. Lin International.
3. *Recent Techniques of Prestressed Concrete Bridges in Japan*, Hiroshi Mutsuyoshi.
4. *Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges*, John Wiley & Sons, 1982.

2007년도 개정 콘크리트구조설계기준 해설

| 한국콘크리트학회 편 | 524쪽(A4변형) | ISBN 9788970863238 |
| 비회원 38,000원, 회원 30,500원 | 출판사 기문당 | 2008. 1. 5 개정판 발행 |

■ 소개

본서는 건축·토목 분야 전문가로 구성된 공동 연구위원회의 집필과 건설교통부 중앙건설기술심의 위원회의 심의를 거쳐 2007년도 개정된 통합 설계기준의 구체적인 해설서이다.

