

특 집

|| 최근 프리캐스트 콘크리트의 신기술 ||

프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교량 신기술

- The Recent Technology of Precast Prestressed Concrete Bridge -



박상렬*
Park, Sang Yeol



윤순종**
Yoon, Soon Jong



민창식***
Min, Chang Shik

1. 서 론

세계 각국의 지난 수년간 프리스트레스트 콘크리트 교량의 건설 경향은 현장에서 동바리를 설치하여 콘크리트를 타설하는 현장타설(cast in place) 공법보다는 공장에서 미리 콘크리트 부재를 생산하여 현장에서 가설하는 프리캐스트 공법이 경제적 및 구조적 장점이 많아 선호되고 있다.

프리캐스트 콘크리트(PC) 공법은 공장 생산된 부재를 현장에서 조립하는 시스템으로 유럽에서 시작되어 국내를 비롯하여 일본, 미국, 뉴질랜드 등 많은 나라에서 널리 적용되어 온 콘크리트 교량 가설 공법 중 하나이다. 이제까지의 건설 산업은 건설공사 현장에서 주문, 제작되는 노동집약형으로 숙련된 인력의 부족과 임금의 상승, 발주처의 공사기간 단축요구 등에 따라 많은 어려움을 겪고 있다. 이런 어려움의 대안으로 노무비를 절감하고 공사기간을 단축시키며 작업 시 안전을 확보할 수 있는 PC 공법이 많이 시행되고 있다.

2. 프리캐스트 콘크리트의 특징 및 동향

2.1 프리캐스트 콘크리트의 특징

프리캐스트 콘크리트의 특징을 살펴보면 우선 PC는 부품으로 취급함으로써 형상과 크기는 계획에 맞추어 임의로 설정할 수 있

다. 그리고 고강도 콘크리트(일반적으로 $f_{ck} = 50 \text{ MPa}$ 정도)를 사용하고 물-시멘트비는 대개 수화반응에 필요한 최소한의 양(28% ~ 30%)을 사용한다. PC는 철저한 건식시스템의 채용으로 보다 내구성과 내력이 높은 구조물을 만들 수 있고 마무리면의 처리가 자유로워서 무늬를 내거나 색을 넣고 타일이나 돌이 표면에 드러나도록 할 수 있다. 또한 대부분 프리스트레스트를 도입하여 전단면이 항상 압축상태에 있도록 할 수 있어 균열 및 변형의 감소 등 설계자의 의도에 따른 제어가 가능하다. 그리고 상당히 큰 변형이 일어나는 부재에 있어서도 상세설계 등을 보완하면 부재에 균열이 전혀 일어나지 않도록 개선할 수 있다는 장점이 있다. 또한 PC의 부재는 철저한 공장관리를 바탕으로 제작되어 품질이 우수하고 기본적으로 강재거푸집을 사용하여 특수한 형상도 제작이 가능하다.

2.2 프리캐스트 콘크리트의 동향

최근 50년간 미국의 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교량은 눈부신 발전을 하였으며 최근 미국에서 건설되어지는 교량들은 PC를 많이 사용하고 있다. <그림 1>은 전체 교량 중 프리스트레스트 콘크리트 교량이 차지하고 있는 비율을 나타내고 있는데 미국의 프리스트레스트 콘크리트 교량의 대부분은 PC로 이루어져 있다. 1950년 최초의 프리스트레스트 콘크리트 교량이 도입된 후 현재까지 만들어진 교량의 약 30%가 프리스트레스트 콘크리트로 이루어져 있으며 1990년부터 약 10년 동안 주요한 도로상에 건설된 교량의 약 60% 가량이 프리스트레스트 콘크리트로 만들어졌다. 1950년 이후 프리스트레스트 콘크리트 교량은

* 정희원, 제주대학교 토목환경공학과 교수

** 정희원, 홍익대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 동국대학교 토목공학과 교수

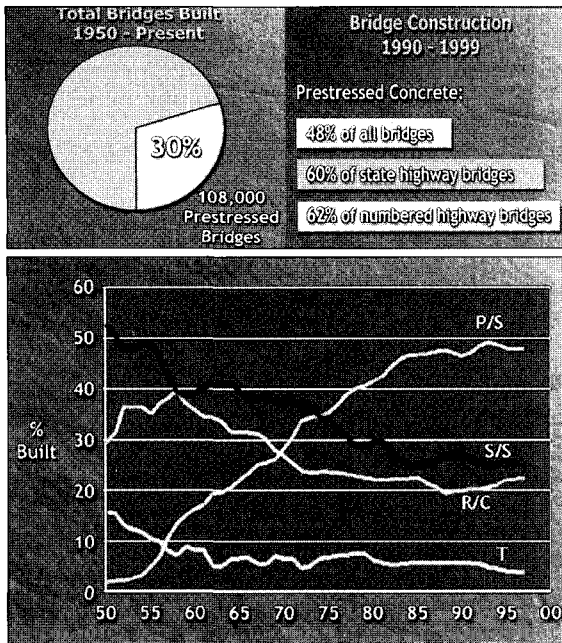


그림 1. Percentage of bridge built annually with

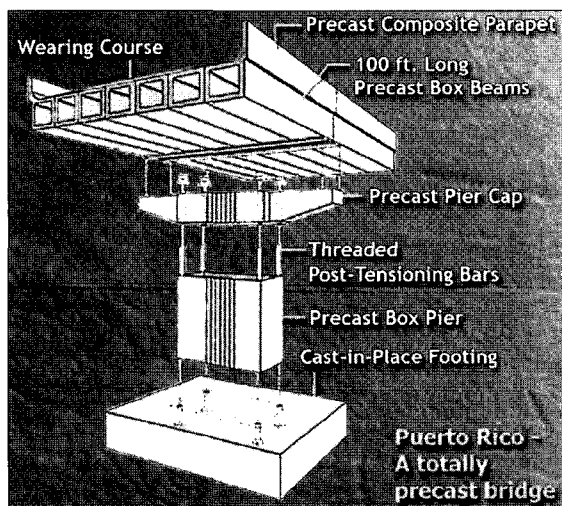


그림 2. Totally precast bridge in Puerto Rico

꾸준히 증가하여 근래에는 강교나 철근 콘크리트 교량을 훨씬 능가하여 약 50% 정도를 차지하고 있다.

〈그림 2〉는 Puerto Rico에 건설된 프리캐스트 교량으로 기초를 제외한 교량 전 부분이 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 부재로 이루어져 있다. 연장 21m에서 27m의 총 4개의 교량이 이와 같이 시공되었는데 한 개의 교량 당 가설시간이 24시간 내에 이루어졌다. 이는 발주처가 교통문제를 이유로 허용한 72시간을 만족하는 결과였다.

〈그림 3, 4〉는 PC 교대와 PC 교각을 현장에서 조립하는 모습이다. 이와 같이 PC는 교량의 상부구조 뿐만 아니라 하부구조에까지 적용될 수 있는 유용한 공법이다. 〈그림 5〉는 1993년 Tennessee에 건설된 Natchez Trace Parkway Arches의 모습으로 미국에서 건설되어진 최초의 PC를 이용한 아치교이다.

미래의 PC는 부식에 대한 저항성이 높고 내구성을 갖는 재료

의 이용으로 더욱 발전할 것이다. 최근에 많이 사용되고 있는 고성능 콘크리트(high performance concrete)는 거더 간격을 늘리고 더 긴 지간을 가능하게 하였으며, 교체시기를 연장하고 보수보강을 줄임으로써 생애비용을 줄이는 이점이 있다. 고성능 콘크리트의 한 종류로 고강도 콘크리트를 들 수 있는데 100 MPa 정도의 강도를 이미 사용하기 시작하였다. 한편, 고강도 콘크리트(70~84 MPa)의 사용과 함께 고강도 및 큰 직경의 연선의 사용이 점점 늘고 있다.

또 하나는 FRP(fiber reinforced polymer) 보강재(reinforcement)의 사용이 늘어날 것으로 예상된다. 왜냐하면 FRP 보강재는 프리스트레싱 강재를 훨씬 능가하는 인장강도를 가지며 부식되지 않는 장점 등을 가지고 있기 때문이다. 〈그림 6〉은 탄소 FRP 텐던을 내부 부착 및 외부 비부착 긴장재로 사용한 교량 모델이다.

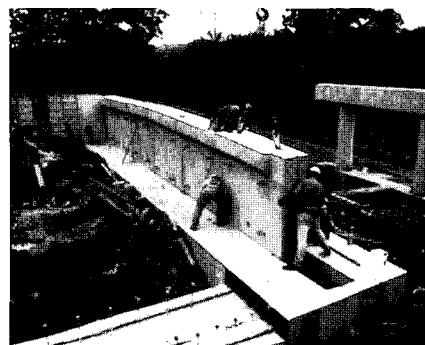


그림 3. Precast abutment assembling in the field

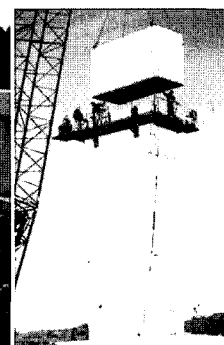


그림 4. Precast pier assembling in the field

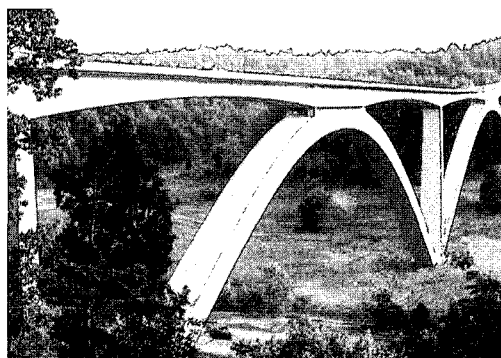


그림 5. Natchez Trace Parkway Arches, Tennessee

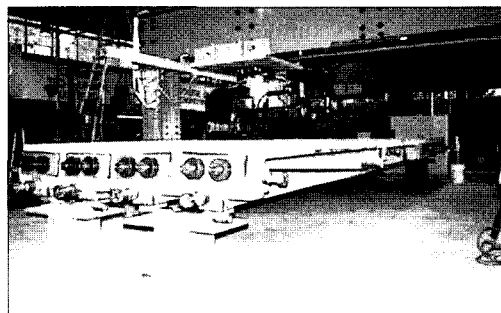


그림 6. Precast prestressed bridge model using Fiber Reinforced Polymer tendons

3. 프리캐스트 콘크리트 교량 공법

3.1 Spliced-Girder Bridge

3.1.1 공법 개요

교량 설계자들은 긴 지간장과 낮은 공사비가 드는 구조를 설계하고자 끊임없이 노력하였다. 이러한 경향은 도로를 횡단하는 교량의 교각이 도로의 길 어깨에 위치하기 때문에 발생하는 안전문제를 해결하고, 하천의 통수능력을 위하여 물의 흐름을 방해하지 않게 하거나 기초 시공이 어려운 지반에서 교각의 수를 줄이기 위함이며, 더욱이 상판 조인트를 줄이고 이의 유지관리 문제를 해결하기 위해서이다.

이어맞춤 PC 거더 교량은 지간보다 짧은 PC 거더를 서로 연결하여 긴 지간을 이루게 하는 공법이다. 일반적으로 지간길이가 30m에서 45m의 교량에 I형 거더를 사용한다면, 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 거더가 다른 공법보다는 훨씬 경제적이다. 그러나 많은 설계자들은 45m에서 85m에 이르는 훨씬 더 긴 지간을 이어맞춤 I형 거더로 설계할 수 있다는 가능성을 모르기 때문에 이와 같은 경제적인 대안을 배제해 왔다. 이어맞춤 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량은 45~85m 정도의 지간에서 사용될 수 있는데 이는 강교와 경제성을 비교할 수 있는 지간 범위이다.

이어맞춤 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량은 미국과 캐나다 등지에서 점점 많이 사용되고 있으며, 그 이유는 ① 표준 거더의 지간 사용능력을 증가시키고, ② 교각 위에서의 연속성을 확보하며, ③ 거더의 운반에 따른 길이제한을 극복하기 위해서이다. 이어맞춤 콘크리트 거더 교량 가설공법에 이용되는 기술은 다음과 같다.

- ① 임시 동바리나 균형 캔틸레버 방법에 의하여 가설되는 세그멘탈 박스 거더 가설법
- ② 자체 진행(launching)하는 거더나 임시 동바리에 의해 지지되는 이동 거푸집 위에서의 현장 가설법
- ③ 시공 현장에서 이어 맞추어 올리는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 거더 가설법

〈그림 7〉은 재래식 프리캐스트 I형 거더 교량과 대안으로 제시된 이어 맞춤 I형 거더교량의 예이며, 〈그림 8〉은 지간 사이에서 I형 거더를 연결하는 모습이다.

거더의 시공에 있어 이어맞춤 공법은 과거의 지간 범위를 넘어서서 현존하는 표준 AASHTO와 PCI 형상의 지간성능을 확장시키는 편리한 방법이며, 교량분야에서의 PC 기술이 한걸음 도약했다고 볼 수 있다. 이 새로운 지간은 더 길뿐만 아니라 구조적으로 훨씬 효율적이며 추가된 연속성으로 인하여 더 좋은 주행면을 제공한다. 어떤 경우에 있어서 더 긴 지간은 교각 수의 감소를 가능케 하고 따라서 실질적으로 하부구조의 공사비용을 감소

시킬 수 있다.

3.1.2 단면 형상

이어맞춤 PC 거더 교량의 단면으로는 표준 AASHTO I형, AASHTO/PCI bulb T형 그리고 U형, box 형상이 사용되어 왔

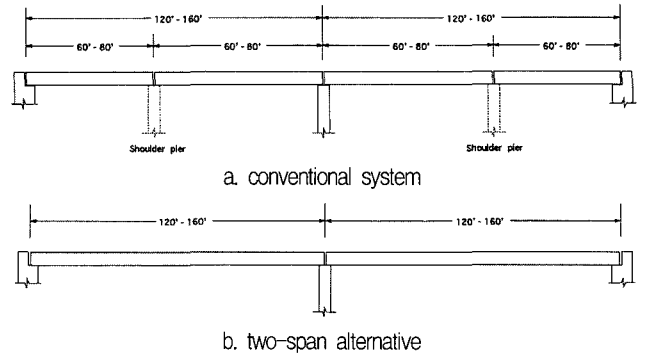


그림 7. conventional and alternative precast in highway over pass bridges

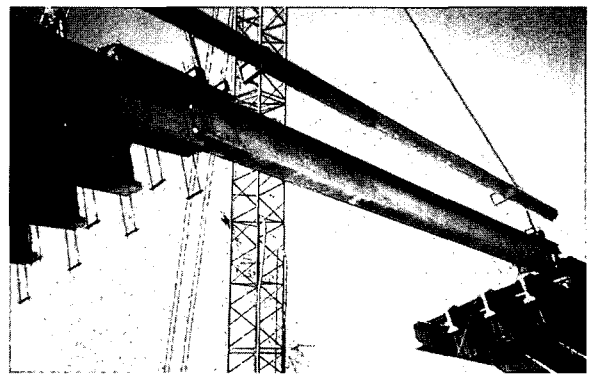


그림 8. bridge constructed with spliced I-girder

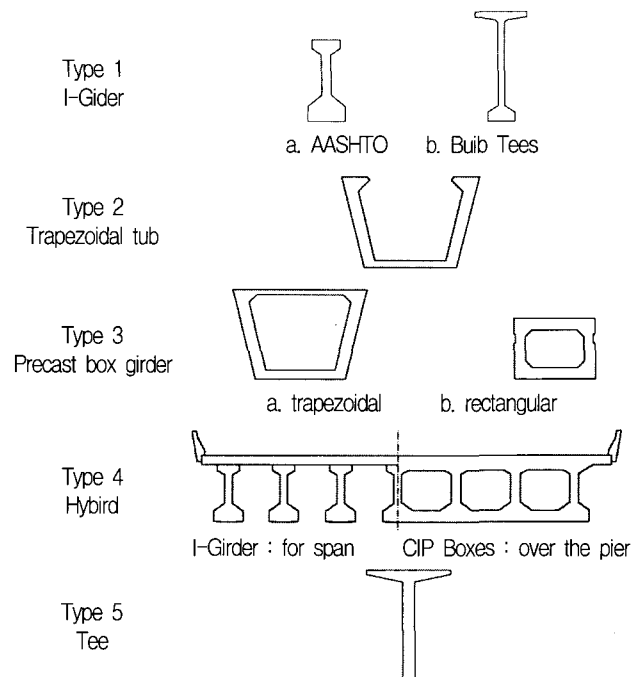


그림 9. common cross section shapes used in Spliced girder bridge applications

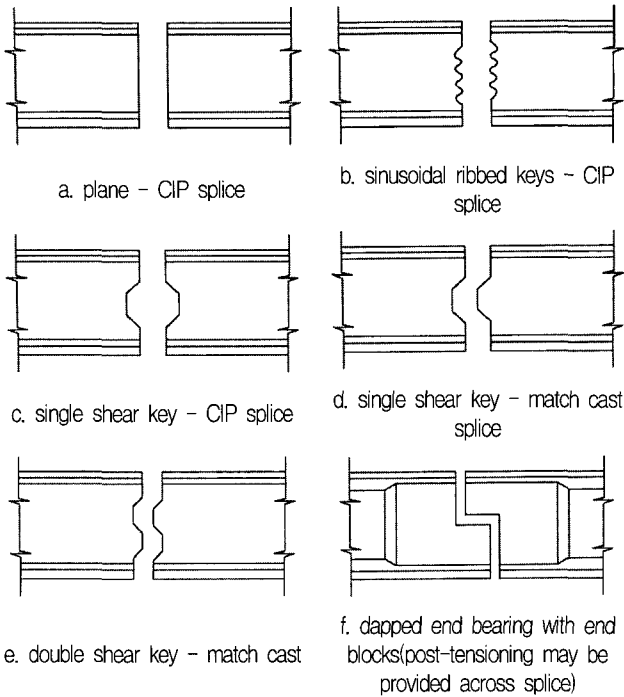


그림 10. possible end configurations of I-girders

다. I형 및 bulb T형 거더는 정·부 모멘트 구간에서 모두 적합한 단면형상이다. 이 형상은 부모멘트 부의 저항성과 연속 프리스트레싱을 고려하지 않는 단기간 교량에 대해 발전되어 현재의 이어맞춤용 거더 형상으로 발전되었다. AASHTO 개정판에서는 정·부 모멘트 구간을 갖는 연속 교량에서 단면의 효율성 때문에 I형과 bulb T형이 많이 사용되고 있다. <그림 9>는 이어맞춤 PC 거더 교량에서 흔히 사용되고 있는 단면형상을 보여주고 있다.

3.1.3 시간배치와 연결

이어맞춤 PC 거더를 사용한 콘크리트 교의 설계에서 시간 배치는 대부분 현장조건에 의해 결정된다. 한 거더의 최대 크기는 대개 조립공장 설비와 운송조건에 의해 결정되지만 거더의 크기는 이런 제약조건들을 수용할 수 있고 시공현장에서 거더의 활용력에 의해 지정된 위치에서 중첩 작업을 할 수 있도록 선택된다.

이어맞춤 PC 거더 공법의 유용한 특징 중 하나는 곡선교량이 가능하다는 것이다. 즉, 적절한 길이의 거더를 배열하고 이음부에 횡 다이어프램을 설치함으로써 미적외관을 해치지 않는 구조가 가능하다. 또한 프리캐스트 콘크리트 거더를 부모멘트가 작용하고 전단력이 큰 교각부에 현장타설 콘크리트 박스거더와 결합하여 사용함으로써 단면 효율성과 시간 연속성의 장점을 제공해 준다. 연속된 시간은 단순시간보다 높은 구조적 내력과 동적반응, 효율적인 재료이용, 유지관리비용의 절감 등의 효과를 준다. <그림 10>은 I형 거더의 이음 단부의 모양이다. 이러한 단부 블록은 AASHTO에서 포스트텐션닝(post-tensioning)을 위한 정착장치들을 필요로 한다. 이러한 단부의 제작은 거더 제작비용을 늘리며 한편 이음부를 줄이기 위하여 긴 길이의 거더는 운반비와 설

치비의 증가를 가져온다. 따라서 구조적 내력의 한계범위 내에서 경제적인 거더 길이로 결정되어야 한다.

최근에는 캐나다에서는 기존의 이음 단부 없이 연결부에 특별한 격막(diaphragm)을 설치하여 포스트텐션의 정착부로 활용하며 정착력을 분산시키는 역할을 담당케 하고 있다.

3.1.4 설계와 시공

이어맞춤 PC 거더 교량의 설계는 제작, 운반, 조립의 시공단계 등 모든 면을 고려해야 한다. 현장조건, 양중(lifting) 장비의 유용성, 선박(shipping) 적재 및 운반에 따른 제약조건, 그리고 그 지역의 PC 제작사와 시공사의 능력을 고려하여 거더의 크기와 이음 형태 등을 선택한다. <그림 11>은 steel nose를 이용한 단부 연결의 한 예이다.

다단계 시공을 필요로 하는 대부분의 경우에 있어서 각 단계마다 구조물의 구성 요소들의 응력, 편심 그리고 비틀림을 정확히 계산하는 것이 필요하다. 설계에 사용된 해석 방법은 콘크리트의 크리프와 건조수축의 영향, 프리스트레싱 강재의 릴랙세이션 등을 고려해야 하며 이를 부정정 구조물에 응용할 수 있어야 한다.

이와 같은 해석방법 중 하나가 Tadro et. al.에 의하여 개발되었는데 이 방법은 1970년대 중반 대형컴퓨터에 의해서 가능해졌다. 이 프로그램은 교량의 시간-의존 해석에 사용된다. 최근 Abdel-Karim은 PC 환경으로 변환시킨 매우 유용한 프로그램을 소개하였는데 부정정 합성보나 평면구조의 어떤 단면에 대해서도 콘크리트와 강재의 응력을 계산할 수 있으며 다양한 시공단계에서의 처짐을 계산할 수 있다.

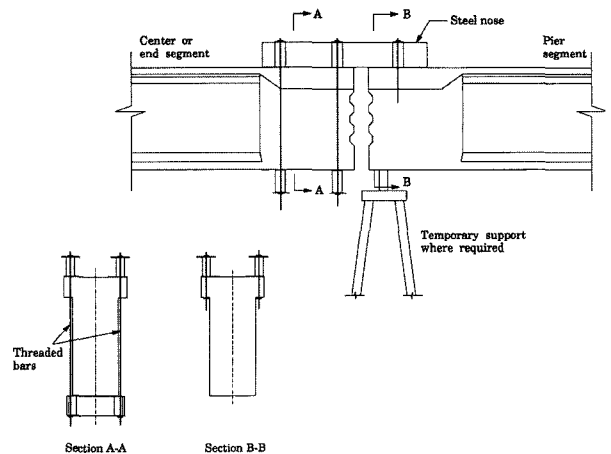


그림 11. Schematic detail of steel nose for erection

3.2 U-Beam System

3.2.1 공법 개요

U-beam 시스템은 그 고유의 구조적 장점이 많은데 I-beam에 비교하여, 경제성과 미관의 우수성을 우선적으로 들 수 있다. 기존 I-형 보 역시 경제성이나 내구성에서 취약하다고 할 수 없

으나 보 사이 간격이 너무 좁아 교량 옆면에서 보의 배열을 보는 시각이 차단되므로, 일반적으로 Box-형 보다 안정적이거나 미관적으로 우수하지 못하다.

〈그림 12〉와 같이 U-beam은 2개의 I-beam을 대체하여 생산이나 기공에서 경제성을 갖는다. 즉, I형 보의 수를 거의 반으로 줄임으로써 가능하다.

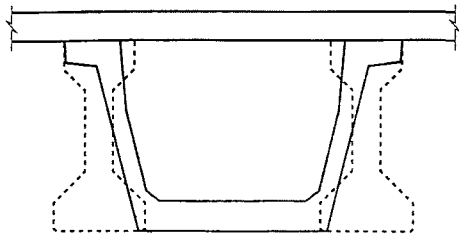


그림 12. I-beam replaced by U-beam

3.2.2 공법의 종류

U-beam 시스템을 위하여 세 가지 공법이 고려될 수 있다. 첫 번째 공법으로는 연속성이 없는 단순지지 부재에 의한 방법이 있다. 이 방식은 구조물의 사용성, 초기 비용, 유지보수를 고려할 때 가장 바람직하지 않은 방법이다. 여기서 연속성에 의해 주어지는 구조적 장점은 이용되지 않았다. 보 중앙에서 휨 인장응력에 대응하기 위하여 그리고 과도 처짐이 일어나지 않게 하기 위하여 프리스트레스에 의한 긴장이 필요하다. 이 공법은 큰 상부 처짐의 가능성이 높으며 이로 인하여 주행성에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 또한 물과 제설제가 연결부에 침투함으로써 단순 지지점에서 콘크리트 부재의 품질 악화를 초래한다. 두 번째 공법으로 교각 위의 교량상판과 현장타설 콘크리트 격막(diaphragm)에 의한 연속화 방법이 있다. 이 방법은 구조적으로 부분 연속으로 해석된다. 이러한 형식의 교량은 상판의 연속성뿐만 아니라 콘크리트 현장타설 후 콘크리트가 경화하면 합성 후 작용되는 하중(일부 사하중과 활하중, 충격하중)에 현장타설 콘크리트와 PC 부재가 합성으로 저항한다. 그러므로 이 방식은 첫 번째 방식과 동일한 일부 결점을 가지나 첫 번째 방식보다는 그 결점이 적다. 또한 지점 이음부에서 부모멘트에 대한 충분한 내력을 갖지 못해 상판에 균열이 발생한다. 이러한 균열은 제설제나 수분 해로운 물질들이 이 균열에 집적되어 철근 부식과 콘크리트의 팽창균열을 초래하며 결과적으로 연결부 주위의 콘크리트에 부실을 초래한다. 세 번째 공법은 포스트텐션을 이용한 연속보 방법이다. 방식은 상대적으로 낮은 긴장력과 솟음, 자중을 제외한 모든 하중에 대한 지지점에서의 연속성과 저항성을 가져 세 방식 중 가장 효과 있는 방법이다. 이 방식은 초기 투자비가 높은 점을 제외하면 모든 구조적 기능적 장점이 있으며, 포스트텐션 덕트를 포함하기 위한 일정한 웹 폭과 단부에서의 응력집중을 완화시킬 수 있는 특별한 보강과 공정을 필요로 한다. 이 기술은 전통

적인 포스트텐션 방식에 의존하지 않은 프리텐션 콘크리트 부재의 실제 연속성을 제안하였다. 실제 Nebraska Lincoln의 보도/자전거 전용 교량의 설계에 적용되었으며 이미 Nebraska 도로국의 승인을 얻은 공법이다.

3.3 Precast Segment Method(PSM)

3.3.1 공법 개요

콘크리트 구조부재를 작은 세그먼트 또는 블럭으로 분할하고 이것을 긴장재에 의하여 압착·접합하여 하나의 큰 부재로 만들려는 생각은 일찍부터 있었는데 PC 세그먼트 공법(PSM)은 이러한 생각에 기초를 둔 가설방법이다. 즉, 공장 또는 현장부근에서 세그먼트 또는 블럭을 제조하고 이를 현장에 운반하여 소정의 위치에 올려놓고 포스트텐션 방식에 의하여 압착하여 접합시켜서 교량을 완성하는 공법이다. 세그먼트 사이의 접합부에는 처음에는 모르타르 또는 콘크리트를 사용하였지만 근래에는 에폭시 수지가 사용되고 있다. 본 공법은 현장 타설 캔틸레버공법과 비교해서 공사비를 절감시킬 수 있고 급속시공이 가능하다는 장점이 있어서 미국 등지에서는 현장 타설 방식보다는 프리캐스트에 의한 시공이 많이 이루어지고 있다.

PSM의 특징으로는 취급이 편리한 치수, 중량의 세그먼트로 분할하여 시공할 수 있으므로 대형 구조물이나 복잡한 구조물에도 비교적 쉽게 시공할 수 있다. 그리고 세그먼트는 일정한 장소에서 제작되므로 콘크리트 품질관리가 쉽고 세그먼트를 연속적으로 제작하므로 인력관리 및 거푸집 전용에 유리하다. 세그먼트를 제작하는 동안 하부공사와 병행해서 실시할 수 있으므로 현장타설 방식에 비해서 공기를 단축시킬 수 있다. 구조적으로는 상부 구조 가설 시 콘크리트는 상당한 재령에 도달해 있으므로 가설 후에 발생하는 소성변형에 의한 프리스트레스의 손실량 등이 적어져 유리해진다. 그러나 세그먼트 운반, 가설을 위해 비교적 대형의 장비가 필요하고, 세그먼트의 제작 및 저장에 위해 넓은 장소가 필요하다. 선형관리가 현장타설 방식에 비해 복잡하고 오차수정이 어려운 점이 있다. 마지막으로 접합면의 에폭시 작업시 온도 및 기후에 영향을 받는다.

PSM의 장점을 살펴보면 먼저 품질확보 측면에서 동일 작업의 반복으로 최적의 균일 품질을 확보할 수 있다. 그리고 기계화와 자동화된 설비로 단계별로 분업화하여 작업함으로써 정밀시공이 가능하다. 두 번째로 공기단축 측면에서 살펴보면 건설현장이 아닌 공장에서 제작함으로써 기후의 영향을 받지 않아 획기적인 공기단축이 가능하다. 또한 현장에서의 기계화 시공에 반복 작업에 의해 가설기간을 단축할 수 있다. 세 번째로 비용절감 측면에서는 초기 투자비용은 크나 대량생산이 가능하므로 경관수가 많은 긴 교량의 경우 총 공사비는 오히려 절감된다. 그 밖에 추가 이점으로 공장작업과 기계화 시공으로 안전성을 확보하여 산업재해

를 감소시킬 수 있으며, 지상물 등 교량 하부조건에 영향을 받지 않고 계속 반복되는 공정으로 정밀도 및 속련도를 향상시킬 수 있다. 가설도로나 공사부지가 불필요함으로써 공사비가 절감되는 장점도 있다.

3.3.2 가설방법

(1) span-by-span method

Span-by-span method는 가설경간에 가설용 트러스 또는 거더를 설치하고 세그먼트를 들어올려 배열한 다음 긴장재를 배치, 세그먼트의 접합면에서 에폭시 수지를 바른 다음 세그먼트를 밀착시킨 후, 긴장재를 긴장하여 교량을 완성해 나가는 공법이다. 즉, 교축 방향으로 배치된 외부 긴장재(external tendon)에 의하여 경간 단위로 프리스트레스를 도입한다. 교각 위에서 긴장재를 접속장치로 이어감으로써 연속교로 하는 경우가 많다. 이 가설방법은 가설용 거더의 설치위치에 따라 Below type와 Above type의 두 방식이 있다.

〈그림 13〉은 위에서 설명한 span-by-span method와 다음 절에서 소개하고 있는 balanced cantilever method을 도식적

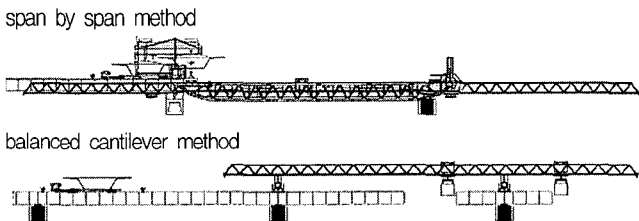


그림 13. Span-by-Span Method & Balanced Cantilever Method

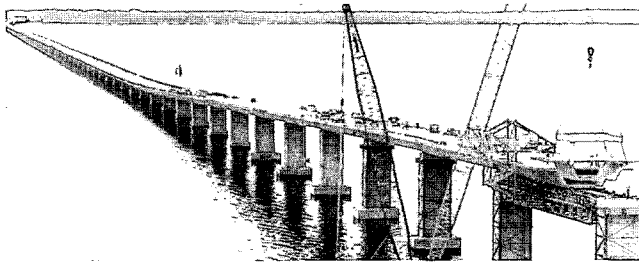


그림 14. Mid-Bay Bridge, Florida

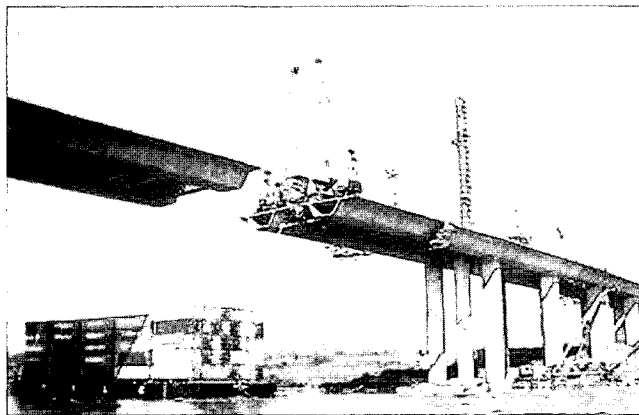


그림 15. C&D Canal Bridge, Delaware

으로 보여주고 있다. 〈그림 14〉는 span-by span method에 의한 PSM 교량으로 1993년에 건설되어진 Florida에 있는 Mid-Bay Bridge이다. 이 교량은 총 지간 수는 140개이고 지간의 길이는 41.5m이다.

이 공법의 장점으로는 가설 트러스의 반복사용으로 단경간의 장대교량에 경제적이고 가설 시 작용 단면력이 작아 경제적인 단면 설치가 가능하다. 그리고 가설 속도가 50m/7일으로 빠르고 처짐 관리가 비교적 용이하다. 단점을 살펴보면 가설 트러스로 인한 별도의 형하 공간이 필요하다. 50m의 지간에 4m 높이가 필요하다. 또 이 공법은 곡선 반경에 지배받고 장경간의 가설은 비경제적이다. 그리고 가설 트러스 제작비가 4.3억/조로 고가이고 각 교각부에서 동시 가설이 곤란하다는 단점이 있다.

(2) balanced cantilever method

Balanced cantilever method는 현장타설 공법 중 free cantilever method와 일치하는 공법이다. 이 방법은 교각을 중심으로 해서 교축의 양쪽 방향으로 균형을 유지하면서 세그먼트를 조립해나가는 가설 방법이다. 이 방법은 사용하는 장비에 따라 크레인에 의한 가설법, 가설용 거더(launching girder)에 의한 가설법 등이 있다. 이 밖에 프리캐스트 세그먼트를 교축의 한쪽 방향으로만 이어 나가면서 전 경간을 캔틸레버 공법으로 가설하는 전진가설법(pogressive placement method)도 있다. 이 방법에서는 가설 시 응력이 커지기 때문에 일시적인 가설용 교각 또는 가설용 케이블이 필요하게 된다.

〈그림 15〉는 1995년 Delaware에 세어진 C&D Canal Bridge의 시공 모습을 보여주고 있는데 사장교 구간에 balanced cantilever method를 적용하였다.

이 가설 공법의 장점으로는 가설을 위한 별도의 형하 공간이 불필요함으로써 시가지 도로 및 하천에 적합하고 각 교각에서 동시가설을 통하여 공기단축이 가능하다.

이 공법의 단점은 시공 중 프리 캔틸레버(free cantilever) 모멘트로 인하여 다소 단면이 증가하게 되고 정확한 세그먼트의 제작과 시공이 요구되고 처짐 관리가 어렵다는 단점이 있다.

3.4 Precast Integral Bridge

3.4.1 공법 개요

전통적인 교량의 설계에서 상부구조 연결부의 신축이음부와 교좌장치를 함께 사용하여 온도 등에 따른 움직임을 조정하였다. 그러나 신축이음부에서의 누수와 교좌장치의 부식에 의한 기능 상실은 교량의 유지·보수에 큰 문제가 되었다. 이런 한 문제들로 미국의 많은 주의 도로교통국은 신축이음부가 없는 일체식 교량(integral bridge)을 설계에 채택하고 건설하고 있다. 일체식 교량이란 교량 전체에 신축이음장치를 두지 않고 상부주형을 교대에 매입하여 일체화 시킨 일체식 구조형식의 교량을 말한다.

따라서 단순히 포장층의 연속화만을 고려한 교량과는 상이하고 조인트가 존재하지 않으므로 무조인트 교량(jointless bridge)이라고도 하고 상부구조, 말뚝, 교대가 일체로 구성되어 있기 때문에 일체식 교량(integral bridge)이라고 한다.

〈그림 16〉은 전형적인 일체식 프리캐스트 교량의 입면도를 보여주고 있으며 〈그림 17〉은 상부구조와 교대의 일체화된 상세를 나타내고 있다. 크리프, 건조수축, 온도 변화에 의한 움직임들은 유연성 있는 말뚝과 접속 슬래브 끝의 미끄럼 슬래브(sleeper slab) 위 신축해소 조인트(relief joint)로 조절한다.

일체식 교량이 널리 사용되어짐에 따라 PCI(Precast/Prestressed Concrete Institute)에서는 일체식 교량 분과위원회가 설립하고 일체식 교량의 연구를 활발히 진행하고 있다. 일체식 교량은 그 적용성에서 어느 정도 제한조건을 가지고 있다. 첫째는 길이에 대한 제한 조건이다. 많은 미국의 많은 주에서 강상부구조의 경우 90 m, 프리스트레스트 콘크리트 상부구조의 경우 180 m 등으로 제한하고 있다. 이러한 길이의 제한은 발생되는 수동토압 효과, 말뚝의 응력, 접속 슬래브와 접속 포장 사이 조인트의 신축능력과 관련되기 때문이다. 그러나 Tennessee와 같은 몇 주에서는 이보다 긴 교량에도 성공적으로 적용하였다.

둘째는 구조형상에 대한 제한으로 일반적으로 교량의 경사각이 40° 이하인 경우에 적용된다. 그러나 Tennessee와 같은 주에서는 사각 70°까지 뿐만 아니라 곡선교량에도 효과적으로 적용하였다. 셋째는 기초에 대한 제한이다. 일체식 교량은 유연한 말뚝을 필요로 한다. 따라서 교대 보(abutment beam)하부에서 암반이 깊이 3 m 아래에 있어야 하는데 이 조건을 만족하지 못할 때에는 오거 등에 의하여 천공하여 사용할 수 있다. New York 도로교 통국에서는 말뚝의 근입 깊이는 적절한 파일의 유연성과 쇄굴 방

지를 위해 6 m 이상을 요구하고 있다. 이러한 최소 근입 깊이의 규정은 특히 말뚝 상단부분이 오거에 의해 천공되었거나 입상 흙에 의해 뒷채움된 경우에 충분한 말뚝의 횡방향 저항력을 확보하기 위함이다. 반적으로 일체식 교량은 말뚝위에 기초하지만 암반 위에 놓인 확대기초에 의해 지지되는 경우도 있다. 또한 충분히 다짐되고 침하에 대한 영향이 설계에 고려된 경우 토질 지반위의 확대기초에 의해 지지되는 것도 가능하다. 위의 제한들은 특별한 조치가 없을 경우의 제한 사항이며, 이 문제점들을 충분히 검토하고 고려하였다면 위의 제한조건에 상관없이 사용이 가능하다.

일체식 교량은 앞에서 언급한 바와 같이 미국 등지에서는 교량의 우수성을 인정받아 거의 모든 종류의 중·소 교량에 있어서 우선적으로 적용되고 있고 현재는 일체화 교량의 길이, 사각, 말뚝 종류 등 제한조건을 좀더 완화하기 위한 노력을 하고 있다. 미국은 이미 40여 개 주에서 활발히 연구가 이루어지고 있다. 일체식 교량의 기본적인 구조거동은 고도의 기술을 요하는 것이 아니라 오랜 세월 기술의 축적과 관련기술을 발전시킴으로써 완성된 기술이다.

3.4.2 일체식 교량의 거동

일체식 교량은 상부구조와 교대가 일체식으로 연결되어 상부구조의 온도변화에 의한 신축을 교대에 일렬로 시공된 파일의 유연한 거동으로 조절하는 교량이다. 교각은 파일기초 혹은 집적기초의 형식을 취하며 교대와 마찬가지로 상부구조와 일체로 연결되기도 하나 일반 교량과 같이 양방향 거동을 할 수 있도록 베어링을 사용하기도 한다. 일체식 교대 교량의 거동이 성립될 수 있는 가장 큰 이유는 교대와 말뚝이 신축이음 장치를 대신하여 유연하게 작용한다는 점이다. 이러한 유연성은 단면적이 작은 교대에 일렬로 시공된 파일에 의해서 확보가 된다.

이러한 조건하에서 상부구조와 하부구조의 연결부는 사하중과 활하중이 작용시 힌지 거동을 한다. 단면적이 작은 교대를 지지하는 파일은 3 m 이상인 것을 사용하는데, 그 이유는 상부구조의 모멘트를 감소시키는 역할을 수행하고 교대와 함께 파일의 유연성을 확보하기 위함이다. 교대 뒷채움으로서 사용되는 재료는 교대의 이동을 자유롭게 하고, 수동토압을 감소시킬 수 있는 재료를 사용한다. 또한 일체식 교량에서 사용되는 접속 슬래브는 교량 상부구조에서 온도에 의한 변위와 하중을 전달하는 역할을 하며, 날개벽은 온도변위에 의한 교대이동시 교대를 원활하게 이동시키도록 일반 교량과 비교하여 단면이 작은 것을 사용한다.

3.4.3 구조 설계

상부구조와 교대의 접속부는 상부구조에서 종 방향으로 발생하는 온도에 의한 변위를 교대, 파일, 접속 슬래브에 전달하는 역할을 하므로 설계 시, 이와 관련된 사항을 충분히 반영하여야 한다. 상부구조가 온도의 신축으로 벽체를 배면 방향으로 이동시킨

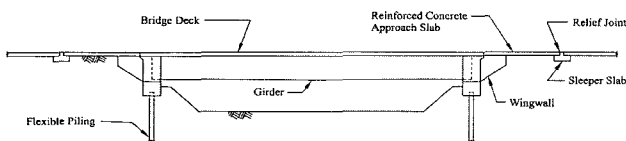


그림 16. Elevation of a typical Integral Bridge

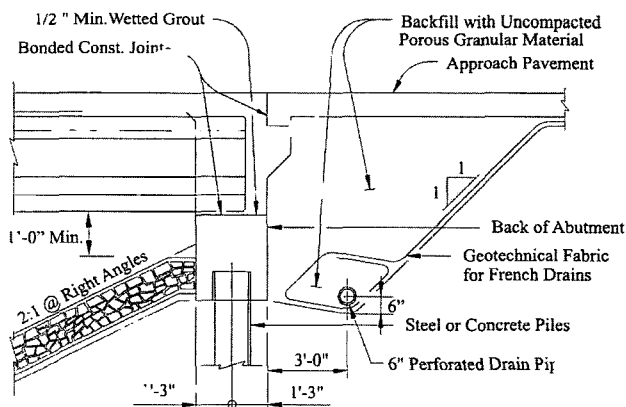


그림 17. Connection of the superstructure to the integral abutment

다고 가정하여 교대 배면에 작용하는 토압은 수동토압을 고려하여 설계한다. 또한 접속 슬래브의 역할은 교대 배면의 차량통행으로 인한 토압의 변화를 유발할 수 있으므로 활하중에 의한 배면토의 다짐을 방지하는 역할을 한다.

접속 슬래브와 교대를 연결하는 철근은 교대에 작용하는 교축 방향 힘을 접속 슬래브에 전달하는 역할 뿐만 아니라 활하중에 대한 회전과 접속 슬래브에 발생 가능한 침하로 인하여 발생하는 휨모멘트를 해결할 수 있도록 힌지(hinge)거동을 고려한 배근으로 보강근(tie bar)을 이용하여 설계한다. 왜냐하면 상부구조는 일체식 교대와 모멘트 연결되어 있고 교대의 파일들은 이론적으로 상당한 회전으로 모멘트가 발생한다. 특히 긴 지간을 갖는 일체식 교량에 있어서 상부 구조의 회전으로 인한 모멘트들은 교대의 파일을 설계할 때 고려된다. 교각의 설계에 있어서는 대부분 발생하는 상부구조의 수평하중은 교대가 부담함으로써 교각위에서 작용하는 사하중 및 활하중에 의한 수직력과 교각에 직접 작용하는 수평력만을 고려하면 된다. 그러나 교각에 직접 작용하는 수평하중의 영향은 매우 작으므로 실제로는 일체식 교량의 교각 설계 시에는 수직력만을 고려하여 설계한다. <그림 18>은 프리캐스트 일체식 교량에 있어서 교각 상부의 거더 연결부 상세를 나타내고 있다. 교대는 상부구조와 일체로 되어 있으며 하부 기초와의 연결은 상부구조의 신축 움직임을 허용할 수 있는 구조라야 한다. <그림 19>는 이러한 성능을 가진 일체식 교대의 종류를 보여주고 있다. 접속 슬래브는 일체식 교량의 한 부분으로 간주되지는 않지만 일체식 교량에 있어서 중요한 요소이다. 접속 슬래브는 교통하중에 의한 교대 배면 뒷채움의 다짐을 감소시키는 역할을 함으로써 과도한 수동토압의 발생을 막는 역할을 한다. 또한 온도에 의한 신축 움직임을 교대로부터 접속 슬래브와 포장면의 조인트까지 전달하는 역할을 하며 보통 6~7.5m 길이이다. 연성포장조의 조인트 상세는 각 발주처 기관마다 다르게 사용하고 있다.

3.5 Precast Deck

현재까지 건설된 많은 합성형 교량의 바닥판은 현장에서 직접 동바리를 설치하고 거푸집을 제작하여 철근을 배근 한 뒤 콘크리트를 타설하는 현장타설 바닥판이 주를 이룬다. 현장타설 콘크리트 바닥판 시공은 기후의 영향을 많이 받고 동바리 설치와 거푸집 제작, 장기간의 양생 기간을 필요로 하기 때문에 시공기간이 길고, 노동력이 많이 투입되어 인건비의 상승을 가져오고 있다. 또한, 기술인력의 고령화와 부족 등으로 인한 시공관리 소홀과 품질저하 등 문제점을 내포하고 있으며, 현장타설 바닥판은 바닥판이 손상되거나 교량이 노후하여 보수, 보강, 교체해야 하는 경우 교통체증이 발생하는 등 유지관리의 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점들에 대한 해결책으로 교량 바닥판의 급속시공, 고품질화가 가능한 PC 콘크리트 바닥판이 하나의 유력한 대안이

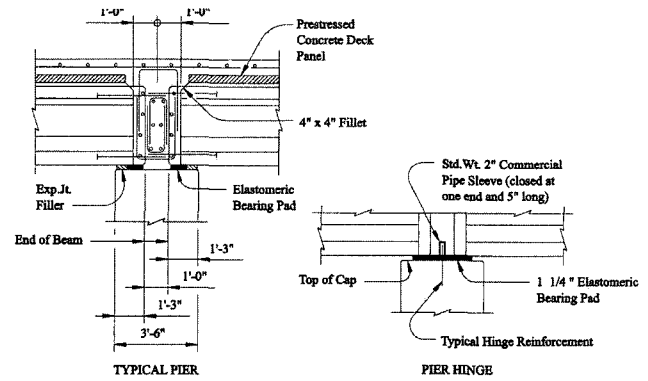


그림 18. Typical pier detail

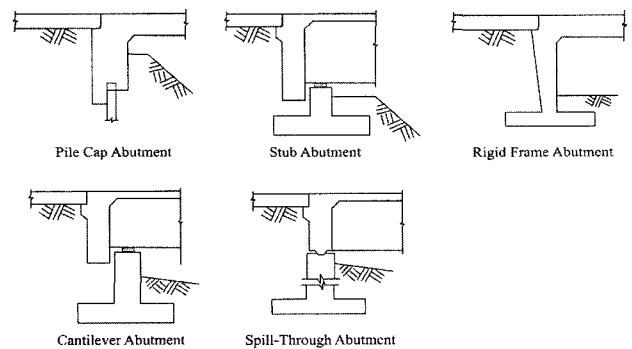


그림 19. Integral abutment types

되고 있다. <그림 20>은 교량의 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 바닥판의 상세도이다.

PC 바닥판의 장점은 위에서 서술한 현장타설 바닥판의 단점을 해소시킨 점들에 있다. 첫 번째로 품질 및 공기단축의 측면을 살펴보면 PC 바닥판은 공장제작 제품으로 고강도화 및 현장작업의 최소화를 통한 고내구성 바닥판의 시공이 가능하며, 현장타설 콘크리트 바닥판에서 초기에 발생하는 건조수축량을 대폭 감소시킬 수 있어 교량 바닥판의 초기 균열을 방지 한다. 또한 PC 바닥판 시공은 기후의 영향을 많이 받지 않고 동바리 설치와 거푸집 제작할 수 있으며, 장기간의 양생기간을 필요로 하지 않기 때문에 공사기간을 현저히 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라 산악지형과 같은 고공의 건설 시 더욱 유리하다. PC 바닥판의 시공기간은 현장타설 바닥판의 공사기간과 비교해 약 50% 단축될 수 있다고 한다.

두 번째로 시공 상의 장점을 살펴보면 현장에서 콘크리트를 타설하는 작업 대신에 미리 제작한 규격화된 프리캐스트 바닥판을 현장에서 크레인 등의 가설장비를 이용하여 가설함으로써 기계화 시공을 달성할 수 있어 인력절감이 가능하며, 교량 제원에 따라 바닥판의 제원을 변동하여 제작할 수 있으므로 적응성이 뛰어나다. 현장타설 바닥판의 경우 작업이 기후 조건에도 많은 영향을 받게 되는데 프리캐스트 바닥판을 사용하면 전천후 시공이 가능하여 공기지연도 방지할 수 있다.

세 번째로 공사비 측면을 살펴보면 프리캐스트 교량 바닥판은 내구수명을 현장타설 콘크리트 바닥판에 비해 약 3배 이상 연장

할 수 있어 유지관리비 지출을 최소화할 수 있으므로 생애주기 비용을 비교할 때 현장타설 공법에 비해 3배 이상의 절감효과를 얻을 수 있다. 또한 현장타설 공법으로 노후된 바닥판을 교체하는 경우 현장 작업이 많고 콘크리트 강도발현에 많은 시간이 소요되는데 반해 프리캐스트 바닥판을 이용한 공사의 경우 상·하행차선의 교차시공을 통해 공사 중에도 계속 교통소통이 가능하므로 도심지 시공에 유리하다. 또한 이와 관련하여 차량우회나 교통체증으로 인한 간접비용 지출을 방지하고 우회도로 건설비용 등을 절감할 수 있을 것이다.

일체식 거더-바닥판 부재는 교량건설에 있어서 중요한 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 요소이다. 이러한 단면들은 <그림 21>에서 보여주고 있는데 낮은 공사비와 빠른 시공으로 단기간 교량에 적합하다. 속이 차거나 빈 슬래브의 경우 보통 11m와 15m 지간에 각각 사용된다. 채널 단면은 보통 21m까지 사용되며 상자형 단면은 37m까지 적용되는데 상자형 단면 거더는 서로 붙이거나 분리되어 사용된다. 한편, AASHTO-PCI의 bulb T형은 55m까지 설계할 수 있다.

4. 결 론

현재 교량의 설계에서 가장 중요한 경향은 교대에서의 이음을 포함한 모든 이음부를 감소시키거나 제거하기를 원한다는 것이다. 그리고 또 다른 경향은 교강도, 경량 콘크리트, PC 상판 패널, 그리고 정·부 휨 모멘트를 동시에 저항할 수 있는 능력을 가진 훨씬 더 날씬한 단면형상의 사용을 추구한다는 것이다. 이러한 경향성과 추세는 PC의 대안으로 만족될 수 있으며 그의 여러 장점으로 어떤 재료보다 경쟁적 우위를 유지할 것이 확실하다.

이와 같이 PC를 이용한 교량은 경제적, 구조적, 미적, 유지관리 측면에서의 장점으로 점점 늘어나고 있고 이에 대한 연구 역시 점점 그 중요성을 더하고 있다. 현재 외국에서도 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 교량에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 그 발전 가능성으로 인한 경제적 이혜로 새로운 기술의 교류를 회피하고 있다.

한편, 우리나라는 현재 PC의 중요성을 조금씩 인식해가고 있는 추세이고 이에 대한 연구 움직임도 보이고 있지만 아직 미국이나 유럽의 기술수준에 못 미치고 있는 실정이다. 따라서 PC와 그 공법에 대한 연구 개발과 이의 도입이 절실한 실정이다. ▣

참고문헌

1. Ahmad M. Abdel-Karim, Maher K. Tadros, "State-of-the-Art of Precast/Prestressed Concrete Spliced-Girder Bridge," PCI, 1995.
2. Alfred A. Yee, "Structural and Economic Benefits of Precast/Prestressed Concrete Construction." PCI journal,

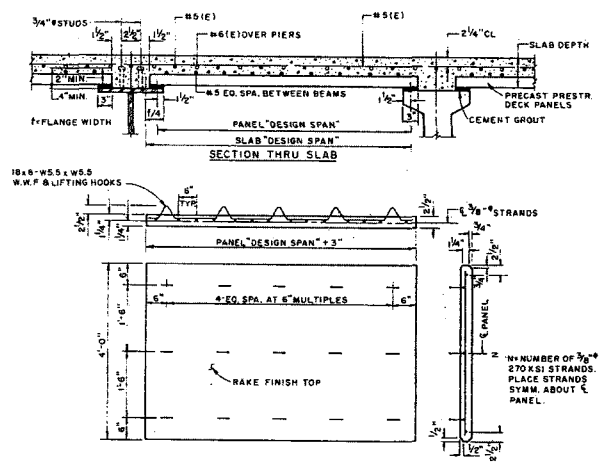


그림 20. Precast Prestressed deck panel detail

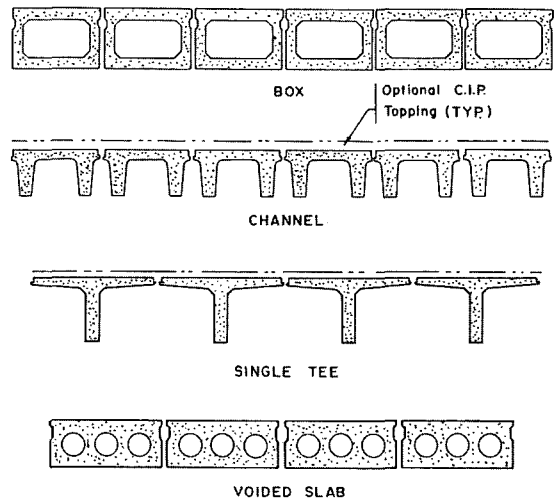


그림 21. Typical integral precast deck section

Vol.46 No.4, 2001, pp.34~42.

3. Alfred A. Yee, "Social and Environmental Benefits of Precast Concrete Technology," PCI Journal, Vol.46 No.3, 2001, pp.14~19.
4. Clifford L. Freyermuth, "Ten Years of Segmental Achievements and Projections for the Next Century," PCI Journal, Vol.44, No.3, 1999, pp.36~52.
5. Mrinmay Biswas, "Precast Bridge Deck Design System," PCI Special Report, PCI Journal, Mar.~Apr., 1986, pp.40~94.
6. Murat Dicleli, "A rational design approach for prestressed-concrete-girder integral bridges," Engineering Structures, Vol.22, 2000, pp.230~245.
7. PCI Committee on Bridge, "Precast/Prestressed Concrete Bridge Deck Panels," PCI Special Report.
8. PCI Subcommittee on Integral Bridges, "The State of the Art of Precast/Prestressed Integral Bridges," PCI, 2001.
9. Ross Bryan Associates, Inc., "Recommended Practice for Precast Prestressed Concrete Composite Bridge Deck Panels," PCI Special Report, 1988.