

프리캐스트 바닥판의 연속교 적용에 관한 연구

Research on the Application of Precast Deck to Continuous Bridges

정철현* 심창수** 윤석구*** 정운용***

Chung, Chul Hun Shim, Chang Su Youn, Seok Goo Jeong, Un Yong

ABSTRACT

In order to apply a precast deck to continuous composite bridges, several experiments and analytical studies were performed. Design criterion for crack prevention should be such that it does not permit tension at the joint to occur when the service loads are applied. Details of the shear pocket for studs and material properties of filler in the pocket and the joint are very important considerations in design and construction. Combination of longitudinal prestressing methods, internal tendon and prestressing after shear connection, should be used for prevention of cracking in continuous precast deck bridges. Design guides for the determination of prestressing force are suggested.

1. 서론

프리캐스트 바닥판 교량은 교체 및 신설에서 모두 상당히 많은 적용성과 장점을 가지고 있지만 설계와 시공측면에서 세심한 주의가 요구되는 항목들이 존재하게 된다. 단순교의 경우에는 장시간 바닥판인 경우를 제외하고는 이음부 균열 제어 측면에서 용이하게 해결될 수 있지만 연속교의 경우에는 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에 대해 동시에 균열제어를 보장해야 하는 어려움이 있다. 특히, 부모멘트 구간의 경우에는 활하중 합성이라 하더라도 트럭하중에 의해 콘크리트 바닥판에 인장이 발생하고 이를 초기에 도입하는 프리스트레스로 상쇄시켜서 이음부에서의 균열발생을 원천적으로 방지해야 한다. 이 경우에 내부강선과 함께 지점침하나 외부강선에 의한 프리스트레스 도입이 병행되는 것이 구조적 및 경제적으로 바람직하다고 판단된다¹⁾²⁾. 또한, 부모멘트 영역에 설치되는 바닥판의 상세에 대해서도 설계시 세심한 주의가 필요한데 이는 도입되는 프리스트레스가 2단계에 걸쳐 수행되기 때문에 응력의 분포가 복잡해지기 때문이³⁾다. 설계시에는 이를 단순화하여 계산할 필요가 있기 때문에 설계 지침서에서 이에 대한 충분한 검토가 이루어진 후의 제안사항들을 제시하는 것이 요구된다. 따라서 이 논문에서는 프리캐스트 바닥판을 연속합성형 교량에 적용하기 위해서 필요한 설계 항목들에 대해서 검토를 수행하고 설계 제안사항들을 제시하고자 한다.

* 정희원, 대우건설기술연구소 토목연구팀 책임연구원

** 정희원, School of Engineering, University of Warwick

*** 정희원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

2. 연속 프리캐스트 바닥판 교량의 증방향 프리스트레스 설계

합성형 교량의 경우 설계 트럭하중에 의해 콘크리트 바닥판에 인장이 발생하는 경우는 정모멘트 구간은 주형과 주형사이의 국부적인 영역, 부모멘트 구간은 부모멘트를 받는 전체 바닥판 폭에 걸쳐 발생한다. 이 연구에서 다루고자 하는 프리캐스트 바닥판은 이음부 철근이 없는 경우이기 때문에 균열의 발생을 원천적으로 방지해야 한다. 특히, 연속교의 경우는 부모멘트 구간의 균열제어가 복잡한 응력흐름으로 인해 상당한 주의를 필요로 한다. 우선, 그림 1에 나타난 바와 같이 내부강선에 의한 프리스트레스 도입은 전단포켓이 타설되기 전이므로 응력의 흐름상 전단포켓의 형상 및 배치에 따라서 전단포켓 후면에 인장 내지는 낮은 수준의 압축응력이 발생할 수 밖에 없다. 이는 내부 강선만으로는 연속교에 프리캐스트 바닥판 균열 방지는 불가능하다는 것을 말한다. 탄성해석에 의한 연구에서 포켓의 형상의 정방향 내지는 원형이 가장 이상적이고 포켓 사이의 간격은 최대한 넓은 것이 유리하다. 이것은 해석적 연구에서 비교해보도록 한다. 물론, 전단연결재의 배치가 또 하나의 설계 항목이기 때문에 이를 동시에 고려해야 한다.

또 다른 하나의 문제는 사용한계 상태(Service Limit State)의 규정의 기준이 되는 단면을 어떻게 결정하는가 하는 것이다. 그림 2에 내부강선에 의한 응력분포 및 모멘트 개념도를 명시해 보았다. 전단포켓이 있는 단면 A의 경우는 포켓면을 따라서 응력의 분포가 그림과 같이 단순화될 수 있고, 내부강선에 의한 도입압축응력은 σ_A 와 0의 값을 가진다. 또한, 부모멘트 최대단면에서 제일 근접한 첫 번째 횡방향이음부 단면을 B라고 하면 내부강선에 의한 도입압축응력은 $\sigma_{B_{max}}$ 와 $\sigma_{B_{min}}$ 의 값을 갖게 된다. 사용하중에 의해 발생하는 단면 최대 모멘트는 최대값 M_{MAX} 과 첫 번째 이음부에서의 모멘트 값 M_{JOINT} 의 차이가 실교에서는 미미하기 때문에 사용하중에 의해 발생하는 인장응력의 평가는 설계에서 균열제어의 기준으로 하는 단면에서 계산하기 보다는 부모멘트 최대값을 그대로 사용해도 무방하리라고 본다. 따라서, 도입 프리스트레스의 크기 결정은 내부 강선의 경우는 정모멘트 바닥판 균열제어를 위해 필요한 압축응력으로 산정하고, 합성후에 도입하는 추가 프리스트레스의 크기는 부모멘트 영역에서 사용하중에 의해 발생하는 인장응력을 기준으로 산정하는 것이 합리적이라고 판단된다. 물론, 탄성적인 평가뿐 아니라 콘크리트의 시간의존적 성질로 인한 프리스트레스 손실은 이 두 가지 프리스트레스 도입으로 인한 압축응력에 의해 발생하는 합성단면의 장기거동 해석으로부터 평가해서 초기 도입량 결정에 반영되어야 한다⁴⁾.

앞서 언급한 사항들을 기준으로 시공단계별로 발생가능한 균열양상과 이를 위한 설계 대책을 제시해보도록 한다. 우선, 합성이전에 횡방향 이음부 타설과 내부강선에 의한 프리스트레스 도입시기를 보면 그림 2에서와 같이 포켓의 배치와 간격에 따라 달라질 수 있지만 포켓 후면의 균열 제어가 합성 후 부모멘트 영역을 위한 추가 프리스트레스 도입이전까지 세심한 주의를 기울여야 하는 사항이다. 이를 위한 대책은 무수축, 혹은 팽창 모르타의 사용이다. 포켓 타설부터 추가 프리스트레스 도입까지의 시기도 전단포켓에 타설되는 모르타의 초기 팽창의 역할이 중요한 부분이 될 수 있고, 이는 다음에서 간단한 해석해를 통해 효과를 평가해보도록 한다. 합성이후의 프리스트레스 도입이 된 이후부터의 시기는 사용하중하에서의 균열 제어에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 설계에서 확보하고 있는 안전율은 이음부 부착강도(일반적으로 2.0MPa 내외)의 무시로 인한 부분과 사용하중의 조합에서 최대 발생 인장응력을 기준으로 설계하기 때문에 발생하는 안전율이 있지만 이에 대한 정량적인 평가는 확률론적인 접근이 필요하고 실제 통행트럭에 대한 자료가 필요한 부분이므로 추후 연구를 지속적으로 해야 할 부분이라고 생각된다.

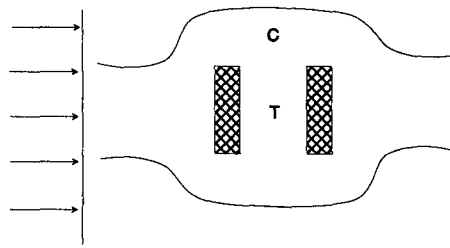


그림 1. 응력흐름 개요

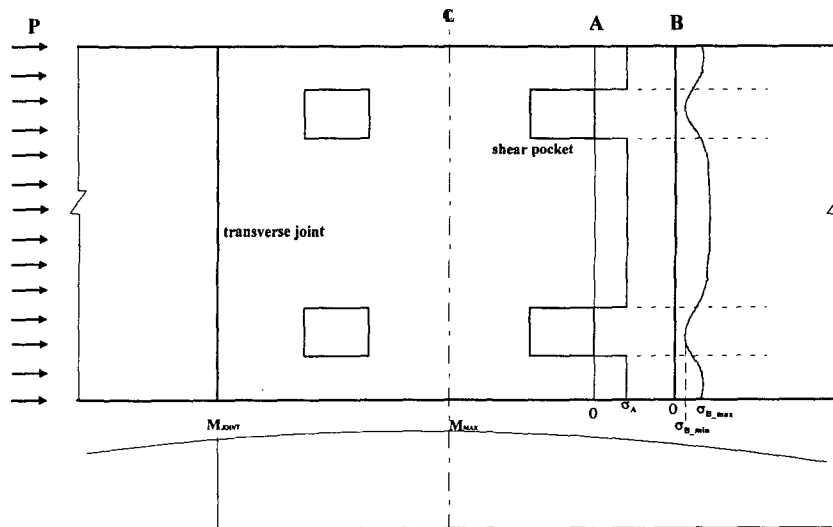


그림 2. 내부강선에 의한 응력분포 및 설계 모멘트 분포

3. 프리캐스트 바닥판의 상세

3.1 주형단면변화 및 연결부 고려

플레이트 거더교나 박스거더교에 프리캐스트 바닥판을 적용할 경우에 바닥판 상세에 고려해야 하는 항목들이 다수 존재한다. 거더 단면에 대한 고려사항을 살펴보면 가장 중요한 것은 연결부 상세이다. 연결판과 볼트로 인해 상부 플랜지 위쪽으로 돌출되는 높이를 정확하게 계산하여 바닥판의 현치부 또는 베딩층에서 이를 흡수해야 한다. 또한, 그림 1에서 보는 바와 같이 상부플랜지 두께가 변할 경우에도 이를 고려해야 하고 횡단구배가 있는 경우에는 이를 현치에서 흡수할 것인지 주형에서 흡수할 것인지를 결정해야 한다. 현치에서 흡수할 경우는 현치에 경사를 두어야 할 경우가 생기므로 세심한 주의가 요구되고 베딩층을 위한 거푸집용으로 이용되는 탄성고무의 높이 및 간격재의 크기도 함께 결정되어야 하는 사항들이다.

두 번째로 프리캐스트 바닥판의 상세에서 중요한 부분은 전단연결재를 바닥판 거치후 용접하기 위해 존재하는 전단포켓의 배치와 형상이다. 프리캐스트 바닥판의 특성상 전단연결재의 배치는 등분포가 유리하지만 허용응력설계법을 적용하는 경우에 지점부에 집중되는 전단연결재의 배치는 등분포로

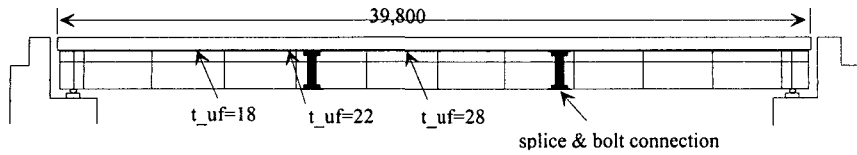


그림 3. 거더 상세의 고려사항

흡수하기에 어려움이 있을 수 있다. 물론, 강도설계나 피로설계를 채택할 경우는 충분히 가능하리라 판단된다. 정확하게 말해서 전단포켓의 등분포라고 하는 것이 올바른 표현이라 생각되는데 프리캐스트 바닥판의 경우는 바닥판 타설후 상당기간이 경과한 이후에 거치하기 때문에 수평전단력의 주된 성분은 온도차와 활하중이라 할 수 있기 때문에 이를 고려하면 되고 수평전단력이 집중될 것으로 판단되는 구간은 전단포켓의 형상이 교축방향으로 길게 되고 주철근은 이 전단포켓을 관통하여 지나가는 형상을 선택할 수도 있다. 하나의 프리캐스트 바닥판에 배치되는 전단연결재의 수가 결정되는 경우에도 전단포켓의 형상 및 배치는 달라질 수 있다.

3.2 전단포켓의 형상 및 배치의 영향

전단포켓의 형상 및 배치의 영향을 평가하기 위해 그림 4와 같은 5주형교를 가정하여 바닥판만 전단포켓을 가정하여 교축방향 프리스트레스로 인한 응력분포를 해석하여 그 결과를 비교하여 보았다. 교축방향 프리스트레스 도입시 전단포켓은 비어있는 상태이기 때문에 응력의 흐름이 포켓과 포켓사이에는 압축력이 도입되기 힘든 형상이 될 수 있다. 이를 도식적으로 표시한 것이 그림 1과 같다. 실제 수행된 연속교 실험이나 박스거더 연속교 실험에서도 포켓 후면에 균열이 먼저 발생하는 경우를 관찰할 수 있었다. 단순교의 경우에는 주형상부 바닥판은 유효폭과 무관하게 압축영역이기 때문에 사용성에 문제가 될 수 없지만 연속교의 경우는 활하중에 의해 추가로 인장응력이 발생하기 때문에 매우 중요한 문제가 될 수 있다. 따라서, 그림 4와 같은 유한요소 모델링을 통해서 해석을 수행하였는데 볼트 형태의 정착부를 가정하여 정착판의 크기를 130mm x 130mm로 하였다. 바닥판의 두께는 220 mm 이다.

그림 6에 프리스트레스 도입으로 인해 교축방향으로 중앙단면에서 횡방향으로 교축방향 응력분포 해석결과를 도시하였다. 이 결과로부터 몇 가지 설계제안사항을 도출할 수 있다. 우선, 바닥판의 도입 압축응력을 계산할 경우에 전단포켓이 있는 영역을 제외하고 바닥판 단면적을 산정하여 실제 도입되는 압축응력을 산정하여야 한다는 것이다. 사용성 측면에서 보면 전단면을 기준으로 산정하는 것이 안전측일 수 있지만 장기거동 해석에서 크리프의 영향을 평가할 경우는 비안전측이 될 수 있기 때문에 전단포켓을 제외한 단면적으로 산정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 두 번째는 가능하면 하나의 프리캐스트 바닥판에 전단포켓을 많이 만드는 것보다는 정방형에 가까운 전단포켓을 사용하여 개수를 줄여서 응력의 흐름을 원활하게 하여 프리스트레스 도입으로 포켓과 포켓사이에 인장이 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다는 것이다.

마지막으로 중요한 사항은 프리캐스트 바닥판을 연속교에 적용할 경우에는 부모멘트 영역의 압축력 도입을 위해서는 합성후 프리스트레스 도입이 반드시 병행되어야 한다는 것이다. 방법은 여러 가지가 있을 수 있겠지만 3경간 연속이내의 경우는 지점침하가 경제적일 수 있고 그 이상의 다경간의 경

우는 외부강선을 병행하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 특히, 강박스 거더교의 경우는 추후의 유지 관리와 연계하여 부분적인 외부강선 도입이 경제적으로 효율적일 것으로 사료된다.

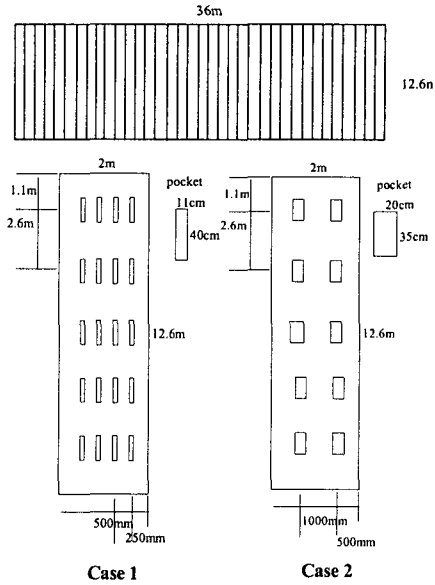


그림 4. 해석예제 바닥판

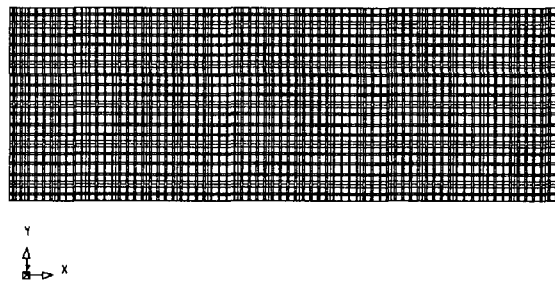


그림 5. 유한요소 모델

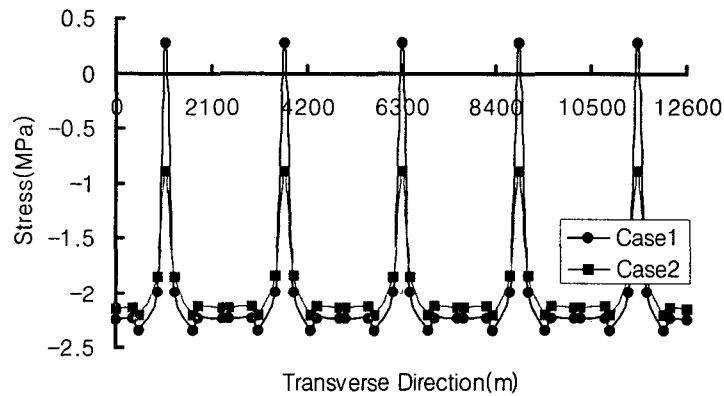


그림 6. 전단포켓 형상 및 배치에 따른 응력분포

3.3 전단포켓 채움재의 팽창에 의한 효과

전단포켓에 채워지는 무수축모르타의 초기 체적팽창률이 600×10^{-6} 으로 가정하고 포켓의 형상을 원형으로 근사하여 해석적 해를 구해보았다. 해를 통해 도입되는 초기 압축응력은 이음부에서 약 0.4 MPa이고 크리프를 고려해서 $n=20$ 으로 보고 산정하면 0.14 MPa이 도입된다. 따라서, 팽창에 의한 도

입 압축응력은 프리스트레스 도입에 의한 압축응력에 비해서는 상당히 낮은 수준이지만 합성후 프리스트레스 도입전까지의 시기에서는 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다. 이는 이 팽창률이 초기에 주로 발현되기 때문이다.

4. 결론

프리캐스트 바닥판을 연속합성형 교량에 적용하기 위해서 필요한 설계 항목들에 대해서 해석 및 실험을 통한 검토를 수행하고 설계 제안사항들을 제시하였다. 특히, 바닥판 상세에 관련된 부분과 채움재의 재료 성질에 의한 고려사항을 검토하였고 부모멘트 영역에서의 균열방지를 위한 설계 기준을 개념적으로 제시하였다.

5. 참고문헌

1. 대우건설(1998). "프리캐스트 콘크리트 교량 바닥판의 개발 및 실용화", '96연구개발사업 제2차년도 연차보고서.
2. SungPil Chang, ChangSu Shim, SeokGoo Youn, ChulHun Chung, "Serviceability Design of Transverse Joints in Precast Deck Bridges," CONSEC'01(Third International Conference on Concrete under Severe Conditions Environment and Loading), 2001, June, pp. 281-286.
3. Sung-Pil Chang, Chang-Su Shim, Pil-Goo Lee, Hyun-Gyun Ryu, Cracking of Continuous Composite Beams with Precast Decks, *The 4th Korea-Japan Joint Seminar on Bridge Maintenance*, 2001, July, Seoul, Korea, pp. 225-236.
4. Sung-Pil Chang, Chang-Su Shim, Kyu-Yong, Choi, and Chul-Hun Chung (1999), "Longitudinal Prestress Losses of Precast Concrete Bridge Deck," *Journal of KSCE*, Vol. 19, No.I-6, Nov., pp. 917-927.