

고속철도 PSC 박스거더 연속교의 프리캐스트 경간 일괄 가설 Precast Full Span Construction of Continuous PSC Box Girder Bridge for High Speed Railway

박종화* 김광수** 심정욱*** 윤철수****
Park, Jeong Wha Kim, Kwang Soo Sim, Chungwook Yoon, Chul-Soo

ABSTRACT

Bridges and tunnels mainly compose the structural system of Kyung-bu high-speed railway in Korea and the prestressed concrete box girder bridges are applied for the most part of bridge structures. Precast full span construction method was practiced in the construction of many prestressed concrete box girder bridges in Kyung-bu high speed railway for the high quality, great construction speed, low construction cost and construction safety. However, there have been no application of this method in continuous bridges until now. Therefore, a new advanced precast full span construction method is developed using pre-tensioning for precast and post-tensioning in alternating the simple span into a continuous bridge system since the high-speed railway trains can cause dynamic problems in a continuous bridge. This study shows the structural behavior and the construction process of the new advance method.

1. 서 론

국내 고속철도의 건설에 있어서 교량과 터널이 차지하는 비율이 매우 높다. 경부고속철도 대부분의 교량은 PSC 콘크리트 박스거더 교량으로 설계되었으며, FSM(Full Staging Method) 혹은 MSS(Movable Scaffolding System) 공법에 의하여 시공하기로 계획되었다. 그러나, MSS 공법은 대부분이 현장작업으로 이루어지므로 양생 방식의 한계, 기후에 따른 공정 진행의 불확실성 등이 상존하여 고품질의 확보가 어려우며, 공기의 단축을 기대하기 어렵다. 또한, 숙련된 기능공과 MSS 장비의 부족시에는 안전 사고, 품질 저하 및 시공 계획에 따른 진행이 어렵게 된다. 따라서, 상부 구조물을 프리캐스트로 경간 일괄 제작하여 가설함으로써 공사 품질을 증대시키고 공기를 단축하며 안전성과 경제성을 확보할 수 있는 경간 일괄 가설 공법의 개발을 추진하게 되었다.

한편, 25 m 단순교에서 경부고속철도를 운행하는 경우, KTX 열차 하중에 대하여 불안정한 동적 거동을 나타낼 수 있다. 이에 따라, 설계 속도 350 km/hr 이내에서 일정지간의 고속철도 교량에 문제가 될 수 있는 공진 발생으로 인한 동적 거동의 불안정성을 보완하고자 연속화 시공을 계획하였다. 단순교에 비해 연속교로 시공할 경우 동적 증폭 효과를 줄여줄 수 있는 것으로 연구 결과 밝혀졌다.

본 논문에서는 고속철도 PSC 박스거더교를 시공하는데 있어서 기존의 공법과는 달리 프리텐션과 포스트텐션을 순차적으로 적용하여 프리캐스트 경간 일괄 가설하는 신공법에 대한 구조적

* 현대건설 기술개발원 부장
** 현대건설 기술개발원 선임연구원, 공학박사
*** 현대건설 기술개발원 연구원
**** 현대건설 경부고속철도 13-4공구 현장소장

안정성을 검토하였으며 이에 따른 설계조건과 해석결과 및 시공과정에 대하여 논하고자 한다. 종방향 휨모멘트에 대한 구조해석, 세그먼트 연속화에 대한 구조해석 그리고 교량 세그먼트의 수화열 및 온도응력해석을 수행하여 구조적 안정성을 검토한 결과, 신공법은 획기적인 공기단축, 건설비용의 절감 및 내구성 향상뿐만 아니라 포스트텐션을 적용하여 단순교를 연속화시킴에 따라 구조적으로도 고속철도의 주행에 대한 동적 안정성을 확보한 것으로 나타났다.

2. 신공법 적용에 대한 설계 및 해석

2.1 설계 검토사항

기존의 공법과 달리 PSC 박스거더교를 시공하는데 있어서 프리텐션과 포스트텐션을 순차적으로 적용하여 단순교를 연속화시킴에 따라 일반적인 단순교 시공에 비하여 구조시스템과 하중조건이 시공단계별로 많이 변하여 이에 대한 검토가 필요하며 지지조건의 변화도 설계단계에서 미리 고려해야 한다. 교량 받침의 용량 및 이동에 대한 해석도 필요하여 이에 대한 철저한 해석 및 설계 검토가 이루어졌다.^[1]

한편, 고속철도 교량의 특성상, 350 km/hr 까지 고속 주행하는 이동열차하중에 대한 고려와 트랙-구조물 간의 상호작용에 대한 고려가 필요하여 해석한 결과 가설장비의 경제성에 따라 결정된 경간 25 m의 교량은 경부고속철도를 주행할 KTX에 대하여 다른 지간에 비하여 매우 안정적인 동적거동을 나타낸다는 결과가 나왔다.^[2]

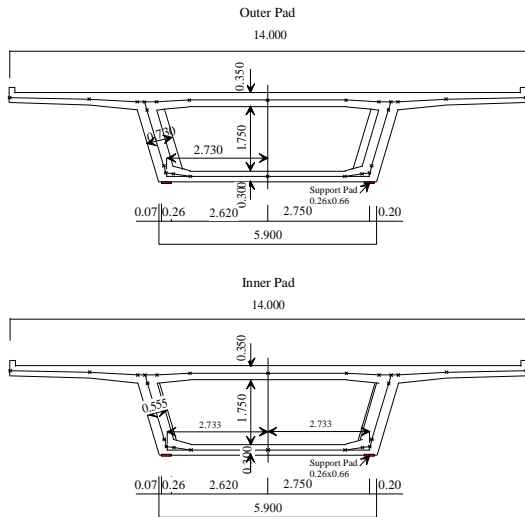
2.2 종방향 구조해석

본 공법에 의해 시공되는 PSC 박스거더 교량의 가설시 각 시공 단계에서의 교량 거동과 가설 완료 후 일정시간이 경과한 후 프리스트레싱의 손실과 콘크리트의 크리프에 따른 손실을 조사하고자 교량의 가설을 위한 트레일러 및 세그먼트 운반시와 인양시의 25 m 단순 PSC 교량의 종방향 거동을 정밀 구조해석을 통해 분석하였다. 25 m 교량의 시공단계 해석에서는 상부구조가 완성되고 2차 사하중이 작용하지 않은 상태를 기준으로 교량의 가설장비 하중 등이 작용하는 것으로 모델링 하였으며 각 강선의 프리스트레싱 도입에 따른 크리프 계산에는 교량의 자중에 의한 사하중과 텐던의 긴장에 따른 긴장력이 고려되었으며 가설이 완료된 이후에는 교량 가설장비 및 세그먼트 자중 그리고 인양하중이 검토되었다.^[3]

경간 25 m로 단순 지지되는 가설 단계에서의 전단력 검토는 시간의존적 손실이 발생하는 단계인 25 m 교량의 콘크리트 타설 및 프리스트레스 힘이 도입된 후 교량이 연속화되기 전 상태에서의 프리스트레스 하중에 의한 단면력 등을 산출하여 검토하였다.^[4]

세그먼트 제작장에서 증기양생에 의해 제작된 세그먼트는 특수하게 제작된 운반장비에 의해 가설지점으로 운반하게 된다. 이 때 세그먼트를 인양하는 과정에서 운반장비의 지지점에는 서로 다른 반력이 작용하게 되는데 실제 운반장비를 통해 기시공된 교량에는 균등한 운하중이 작용되도록 운반장비는 특별하게 제작되어야 한다.

운반시 검토된 단면은 그림 2.와 같으며 종방향에 대한 구조해석 결과 그림 3. 과 같이 나타났다. 해석결과, 세그먼트 상단부의 응력은 최대압축력이 -9 kgf/cm^2 이고 최대인장력은 8 kgf/cm^2 인 것으로 나타났다. 인장력이 작용할 경우, 콘크리트의 허용 휨인장응력은 13 kgf/cm^2 인 것으로 나타나서 구조적으로 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 그러나 시간의 경과에 따라 프리스트레싱 강재의 응력 손실이 발생하므로 가능한 적정한 시기 내에 연속화하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.



Location of Bearing Pad when Segment Unit Transported

그림 2. 운반장비의 지지점에서의 단면도

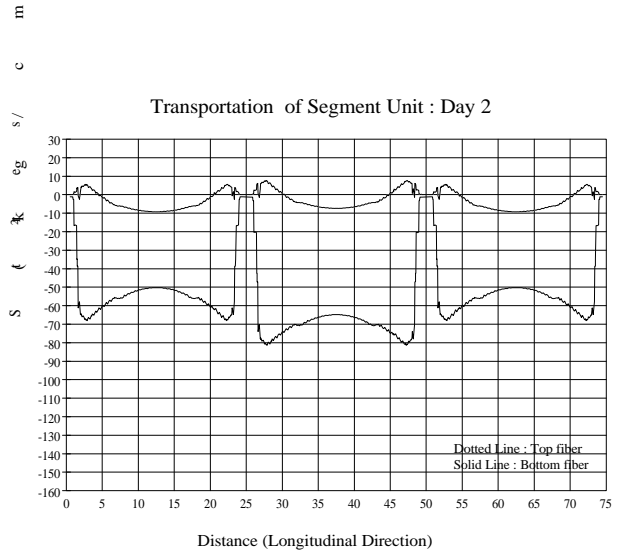


그림 3. 세그먼트 운반시에 대한 구조해석결과

2.3 세그먼트 연속화에 대한 구조해석

단순지지된 세그먼트는 그림 4. 와 같이 적정한 시점에서 지점부에 연속화 콘크리트를 타설 후 연속부에 설치된 프리스트레스트 강선에 압축력을 도입함으로써 연속교로서 구조적인 거동을 하게 된다. 이후 임시받침을 제거하고 영구 교량 받침을 설치하여 세그먼트를 지지하게 되는 구조 시스템에 변화를 가져오게 된다. 따라서, 본 검토에서는 이러한 시공 과정에 대한 구조 해석을 수행하여 보다 안전하게 구조물을 시공하는 방안에 대해 분석하게 된다.

세그먼트 연속화 과정에 대한 중방향 구조해석을 검토한 결과, 연속화 과정 및 임시 교량 받침 위에 지지된 상태에서 연속화된 세그먼트에 운반 하중이 작용할 경우 세그먼트의 상·하단부의 콘크리트 단면에 발생하는 응력은 허용압축응력 160 kgf/cm^2 과 허용인장응력 15 kgf/cm^2 의 범위 내에 잇는 것으로 나타났다. 다만, 세그먼트를 연속화하는 과정에서 지점부의 연속화를 위해 새로 타설한 콘크리트 부위에는 콘크리트 건조수축 등으로 인한 미세 균열이 발생할 가능성이 있으나 continuity tendon을 긴장한 후에는 압축력이 작용하여 인장응력은 유발되지 않는 것으로 나타났다.

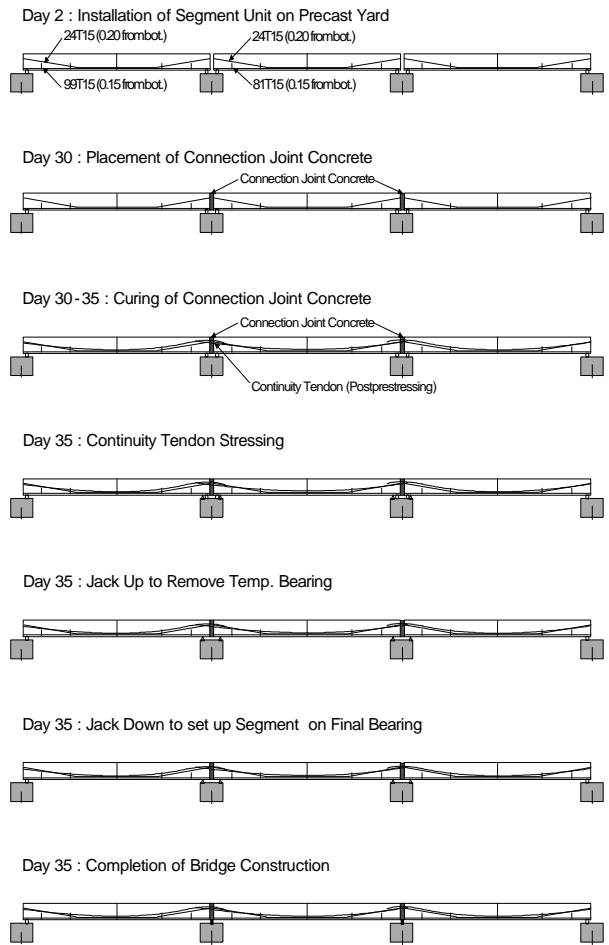


그림4. 3@25 m 교량 연속화 공정

2.4 수화열 및 온도응력해석

PSC 박스거더 교량 25 m의 한 경간에 대하여 수화열해석 및 온도균열 발생 가능성을 검토하였다. 프리텐션과 포스트텐션을 순차적으로 적용하여 경간 일괄 가설하는 본 공법의 시공절차상 우선, 한 경간을 공장에서 일괄 타설 및 양생하여 프리캐스트한다. 따라서, 수화열 및 온도응력해석시에 하절기 증기양생 관리기준에 따라 외기온도를 12시간 동안 변화시키며 타설 후 350시간 동안의 수화열해석 및 열응력해석을 수행하였다.

온도해석시 구조물 내의 최대온도가 상온 20°C까지 떨어지도록 고려시간을 총 350시간으로 설정하여 24단계에 걸쳐서 해석을 수행하였다. 열응력 해석 또한 350시간을 총 13단계에 걸쳐 해석을 수행하였다. 그림 5.는 10시간 경과하여 최대온도가 70.5°C일 때의 온도분포를 나타내며 그림 6.은 경과시간 35시간일 때 최고점 부근의 온도이력곡선을 나타낸다.

최대온도 발생지점 근처에서 수화열에 의한 열응력의 분포를 알아본 결과 타설 후 약 50시간 경과 후 최대 주응력이 발생하는 것을 알 수 있었다. 그러나 그 값은 크지 않기 때문에 별다른 문제를 유발하지 않을 것으로 사료되며 다수의 철근이 배근되어 있기 때문에 온도응력에 대한 제어 효과도 양호할 것으로 판단된다.

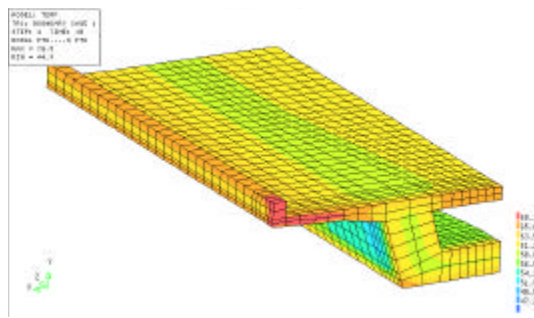


그림 5. 수화열 해석 온도분포

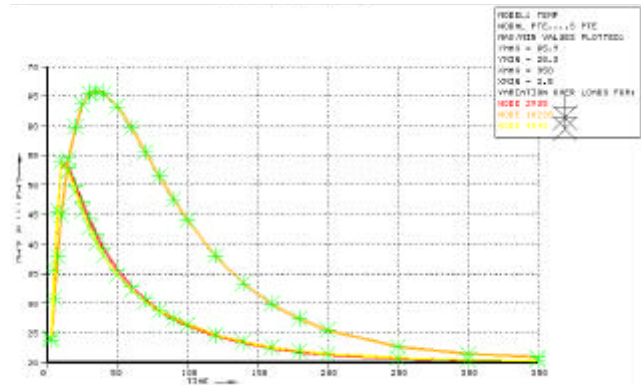


그림 6. 온도이력곡선

3. 경간 일괄 가설 및 연속화 공법

3.1 프리텐션을 적용한 프리캐스트 박스거더의 일괄가설

설계 및 해석절차에 따라 구조적 안정성이 검토되고 경제성에 맞게 결정된 길이 25 m의 무게 600~750 ton의 PSC 박스거더 한 경간 일체를 그림 7.과 같은 제작장에서 프리스트레스를 도입하여 제작한 후, 특수차량(straddle carrier)으로 설치장소에 운반한다. 프리텐션 작업은 박스거더 한 경간을 공장에서 제작 및 거치한 후 다음 경간 설치시 가설장비가 기 설치된 박스거더를 통과할 때 견디기 위한 매우 중요한 공정이다. 운반된 박스거더 한 경간은 교각에 기설치된 이동식 특수 가설장비(launching gantry)를 사용하여 단순교로 시공한다. 박스거더 한 경간을 공장에서 제작하여 거치하기 때문에 대부분의 작업을 기계화 처리할 수 있어 효율적인 작업관리를 기할 수 있으며 균일한 품질과 고품질을 확보할 수 있다. 타 공법에 비하여 본 공정은 뛰어난 품질확보와 기계화 시공에 의한 획기적인 공기단축으로 공사비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 상부공을 위한 별도의 가설부지가 필요 없어 환경친화적인 공법이다. PSC 박스거더 한 경간 전체를 그림 8.과 같은 프리텐션 장비에 의해 시공하고 특수장비를 이용하여 일괄가설함에 따라 시공이음이 없는 integral casting이 가능하며 초기 균열을 예방하여 교량의 내구성을 향상시킬 수 있다.

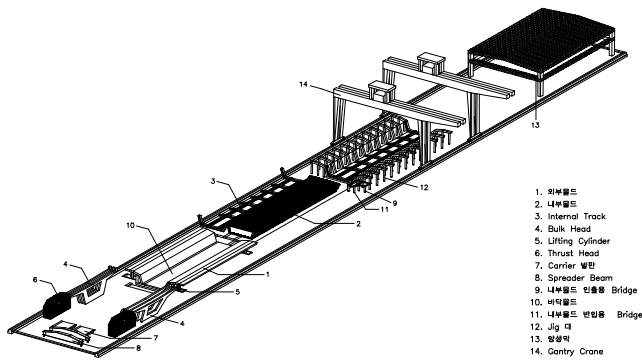


그림 7. 교대부근의 PSC박스거더 제작장

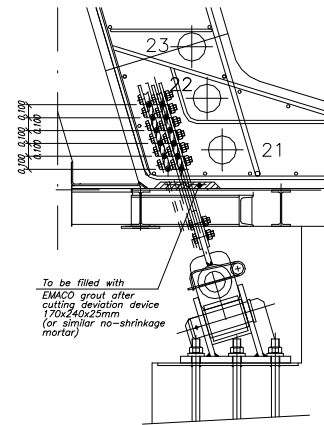


그림 8. 프리텐션용 hold-down device

프리텐션 공법에 의해 제작된 PSC박스거더 한 경간은 길이가 25~30 m이며 중량은 600~750 tonf에 이르는 거대한 중량물로 그림 9.와 같이 특수제작된 운반장비(straddle carrier)에 의해 제작장으로부터 미리 설치된 경간 위를 통과하는 가설 위치로 운반된다. 다음으로는 기계작된 PSC박스거더 거더 1경간을 단계별 과정을 거쳐 기시공된 교각 위에 가설하는 과정으로 정밀한 시공관리를 필요로 하며, 그림 10.과 같은 이동식 가설장비(launching gantry)를 이용한 기계적 자동화 작업에 의하여 획기적인 공기단축을 이루며 시공할 수 있다. 본 이동식 가설장비는 front pendular, rear portal, middle pendular 세 개의 leg로 구성되어 있으며 PSC 박스거더를 운반하는 트레일러가 이동식 가설장비 하부로 통과할 수 있도록 rear portal과 middle pendular가 회전이 가능하다. Launching gantry는 장비 및 PSC 박스거더의 자중과 가설시의 관성력 및 풍하중을 고려한 수직하중과 양방향 수평하중을 조합하여 설계하였다.



그림 9. 특수 운반장비 (Straddle Carrier)

그림 10. 이동식 가설장비 (Launching Gantry)

3.2 포스트텐션에 의한 고속철도 교량의 연속화

프리텐션에 의해 프리캐스트된 PSC 박스거더 세그먼트를 단순교로 거치한 후, 세그먼트 사이에 현장콘크리트를 타설하고 포스트텐션에 의해 압축력을 도입해 연속화하여 구조시스템을 연속교로 변화시키는 공정은 고속철도 교량에 처음 도입되었다. 본 공정은 그림 11.과 같이 기 설치된 임시베어링을 flat jack이나 hydraulic jack을 사용하여 5 mm jack-up한 후 영구베어링에 하중을 전달하게 함으로써 단순지지에서

연속보 개념으로 바꾸어 구조계를 변화시키는 공정이다. 본 기술을 통해 350 km/hr의 고속주행시 발생하는 교량의 공진발생 가능성에 대하여 상대적으로 동적거동이 불리한 단순교를 연속교로 변화시켜 고속철도 교량 및 주행열차의 동적안정성을 확보할 수 있다.

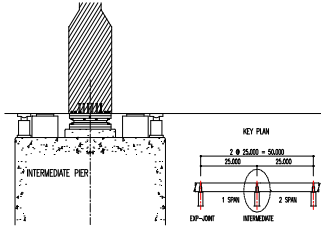


그림 11. Jack의 설치 및 임시교좌 장치의 제거를 통한 연속화

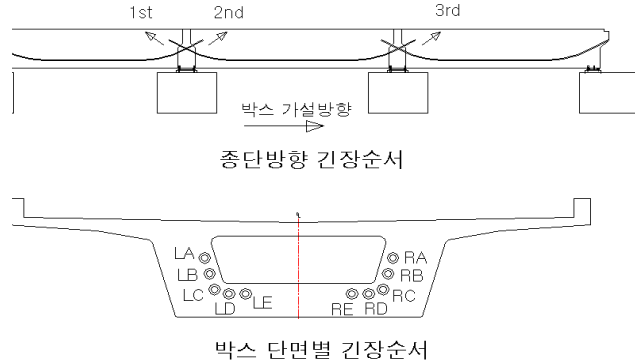


그림 12. 3@25m Post-tension 작업 순서

4. 결론

본 공법은 프리텐션과 포스트텐션을 순차적으로 적용하여 동적거동에 있어서 불리한 단순교를 연속화 공법에 의해 연속교로 시공함으로써 주행성 및 승차감 향상과 교량의 동적 안정성을 확보하는 것이다.

본 공법을 적용하는데 있어서 필요한 특수 장비인 straddle carrier, launching gantry 등과 PSC 박스거더 일체를 제작하는 제작장 내의 각종 설비 등에 대하여 선진기술을 도입하여 국내 토목 장비 설계 및 관련 기계산업 분야의 발전을 이룩하였다. 국내 실적이 아직까지는 미비한 프리텐션 공법을 현장 제작장에서 적용하였다는 점과 이동식가설장비에 의한 경간 일괄 가설 등 시공자동화 과정의 정밀한 시공관리 그리고 포스트텐션 공법에 의한 연속화 처리 등을 시도하여 국내 미개척 분야의 시공 및 설계기술을 획기적으로 발전시킬 수 있는 계기를 마련했다고 본다.

현재 도로교량 및 철도교량 형식에서 PSC 박스거더가 차지하는 비율은 매우 높으며 앞으로도 다수 사용될 것으로 보인다. 본 가설공법은 PSC 박스거더를 건설하는데 있어서 우수한 품질 확보 및 획기적인 공기단축 등의 큰 장점을 지닌 공법으로서 초기비용이 다소 많이 소요될 수도 있다.^[5] 그러나, 일정 연장 이상의 공사에 있어서는 특수장비 등을 반복 사용함으로써 경제성도 매우 뛰어날 것으로 판단되며 프리스트레스트 콘크리트 교량의 가설에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

5. 참고문헌

1. Korea High Speed Rail Construction Authority (1995.6), *Bridge Design Manual Final Report*
2. Systra (1995.8), *Dynamic Analysis under High Speed Live Loads*
3. 박종화 (2001), “고속철도 교량의 신공법 및 개선에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문
4. 서울대학교 공학연구소 (1998.1), *Rational Design and Construction Method for Precast Span Bridge*
5. 김광수 (2004.3), “프리캐스트 PSC 박스거더 교량의 경간일괄 가설 및 연속화 공법”, 건설저널