

철근 물량이 절감된 PSC박스거더교에 대한 정적재하실험 및 비선형해석

Static Load Test and Nonlinear Analysis on the PSC Box Girder Bridges with Reduced Reinforcements

정 광 회* 구 현 본* 김 성 태* 박 성 룡* 박 성 용** 김 병 석***
Jung, Kwang Hoe Koo, Hyun Bon Kim, Sung Tae Park, Sung Ryong Park, Sung Yong Kim, Byung Suk

ABSTRACT

It is reported that the amount of reinforcements for domestic PSC box girder bridges is used two times more than those for foreign PSC box girder bridges, which is considered to be irrational and uneconomical. Therefore, we have come to the conclusion through this study that the advanced design direction can reduce the amount of reinforcements under the condition that the static load test and the nonlinear analysis for the specimen of the PSC box girder bridge with reduced reinforcements which is designed by advanced design direction was carried out in order to verify the validity of the advanced design direction.

1. 서론

우리나라에서 PSC박스거더교는 1981년 Dywidag공법을 사용한 원효대교가 처음으로 건설된 이후 현재까지 약 200여 개소에 건설되어왔으며 현재 건설중인 동해고속도로, 중부내륙고속도로, 대구-부산간 고속도로 등에서도 여러 교량들이 PSC박스거더교로 설계 및 시공되고 있다. 그러나, 국내·외에 건설된 PSC박스거더교에서 콘크리트, 철근, 텐던의 물량현황을 종합적으로 비교·분석해 보면, 선진국에 비해 많은 물량을 사용하고 있어서 비경제적인 설계가 되고 있는 것으로 나타났다. 특히, 철근 물량은 외국 교량에 비해 2배 이상을 사용하는 경우가 많이 있어서 매우 심각한 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 이러한 과대한 철근량을 사용하고 있는 원인들을 분석하고 그 개선방향을 제시하였을 뿐만 아니라, 이에 따른 개선 설계를 적용한 실험체를 제작하고 정적재하실험을 실시하여 극한거동특성을 분석함과 동시에 3차원 비선형 해석결과와 비교·분석해 보았다.

2. 철근 배근 개선방향

본 연구에서는 PSC박스거더교의 가설 공법인 동바리공법(FSM), 이동식비계공법(MSS), 압출공법(ILM), 캔틸레버공법(FCM) 등에 따라 다소 다르기는 하지만 평균적으로 외국에 비해 1.5~2.0 배까지 철근을 과다하게 설계하고 있는 원인들을 주철근 및 종방향철근 등으로 구분하여 분석하였다. 또한, 국내·외 설계사례 비교, 검토하고 관련 설계기준 등을 분석하여 현행 설계기준을 만족시키면서 현설계의 문제점을 개선할 수 있는 철근 배근 개선 방향을 마련하였다. 표 1은 현설계의 문제점과 이에 대한 개선 방향을 정리한 것이다.

*정회원, 한국건설기술연구원 연구원

**정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

***정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

표 1. 현행 철근 배근의 문제점과 개선 방향

구 분	현 설계의 문제점	개선 방향
횡방향	주철근 (인장 철근) - 불필요한 이중적 안전율 도입 ① 하중계수에 의한 안전율 ($U=1.3D+2.15L$) ② M_d/M_u 에 대한 비율이 과도하게 큼	- 하중 적용시 이미 안전율이 적용되어 있으므로 M_d/M_u 에 대한 여유치 최소화 - 2cycle 철근 배근의 적극적 도입 등 경제적인 설계를 위한 배근 형태 개선 필요
	압축철근 - 필요 이상으로 과도한 철근 배근	- 최소한의 철근만 배근토록 유도
종방향	배력 철근 - 설계근거가 없거나 미흡함 - 경험에 의한 배근이 대부분	- 경험에 의한 배근 지양 - 배력철근 설계기준 준수 ($\text{소요주철근량} \times \text{MIN} \left[\frac{120}{\sqrt{L}}, 67 \right] \%$)
	종방향 철근 - 배력철근과 동일한 개념의 배근이 많음 - 주철근보다 많이 배근되는 경우도 발생	- 종방향철근에 대한 설계 개념 정립 - 최소철근(H13@250mm) 배근 유도

3. 실험체 설계

실험체는 국내에 설계된 PSC박스거더교의 가장 평균적인 단면 및 철근 배근을 갖는 교량을 대상으로 선정하여 철근 배근 개선방향에 따라 설계하였다. 본 연구의 대상교량은 교폭 12.1m, 거더높이 3m, 경간길이가 50m인 연속교이며, 실험체는 이 교량의 중앙부 4m를 대상으로 하였고 실험 여건상 거더높이를 2m로 축소시켰으나 나머지 제원은 그림 1에서 보는바와 같이 대상교량과 모두 동일하다. 또한, 형고에 따른 복부 강성의 변화를 보정하기 위하여 해석을 통해 복부의 기울기를 조정하였다.

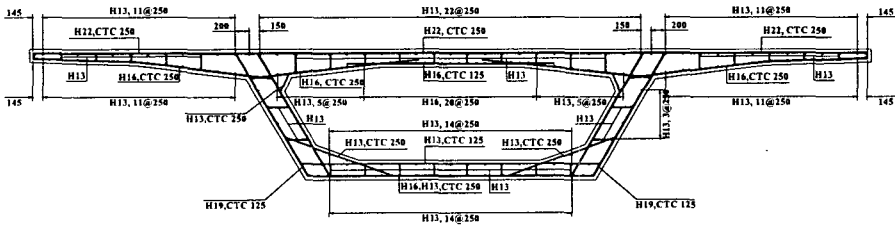


그림 1 실험체 철근 배근도

또한, 실험체의 주철근 배근은 개선 방향에 따라 2-cycle개념으로 설계하여 불필요한 안전율이 더해지지 않도록 설계모멘트와 극한모멘트의 차이를 최소화하였다. 또한, 종방향 철근은 모두 설계기준에 제시된 최소한도의 철근량만 배근하였으며, 기타 압축철근 및 복부 주철근의 상세를 개선하였다. 그 결과 주철근량은 약 50%, 배력철근량 및 종방향철근량은 약 63%가 줄어들어 전체적으로 약 53%의 철근 물량이 감소하였다. 이는 단위 면적당 철근물량이 대상교량의 경우 162.8kgf/m², 실험체의 경우 76.3kgf/m²으로 나타나 실험체의 철근 물량이 프랑스, 일본 등과 비슷한 수준으로 되었으며, 여기서 본 연구에서 제안한 철근 배근 개선방향을 적용하면 선진국에 비해 2배 이상인 철근물량을 줄일 수 있다는 것을 입증하였다. 아울러, 철근물량 산정시 실험체의 높이를 3m로 가정하여 계산하였을 밝혀둔다.

4. 실험체 제작 및 정적재하실험

실험체에는 교축방향으로 프리스트레스를 도입하였으며, 그 크기 및 배치는 30kgf/cm² 정도의 압축력이 균등하게 전단면에 걸쳐서 분포하도록 하였다. 이 크기는 대상교량의 설계자료를 통해 활하중에

의해 발생하는 최대 인장응력이 25kgf/cm^2 정도임을 참고한 것이다. 그림 2은 정적재하실험을 위한 하중 재하 모습이며 변위제어로 실험을 수행하였다. 그 결과 약 270톤에서 그림 3과 같이 복부에서 상부 바닥판을 관통하는 전단파괴모드로 최종파괴를 나타내었다.

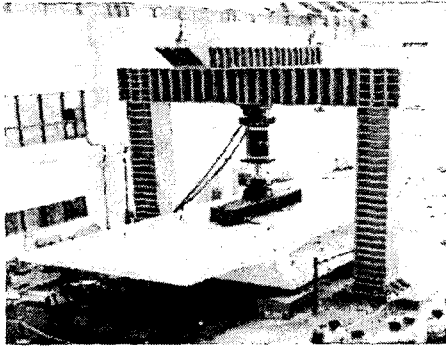


그림 2. 하중 재하 모습

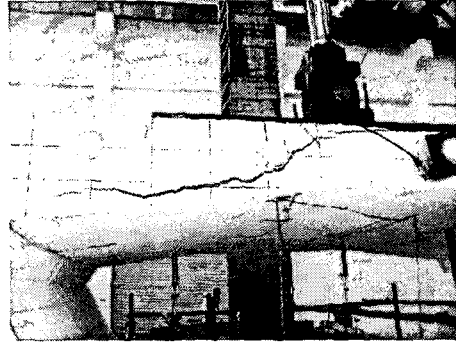


그림 3. 상부 바닥판 최종 파괴

5. 실험결과와 해석결과 비교·분석

본 연구에서는 그림 4와 같이 실험체를 11,848개의 solid요소를 사용하여 상부바닥판을 6개층으로 세분하여 콘크리트를 모델링하였고, bar요소를 사용하여 실제와 동일하게 철근과 텐던을 모델링하여 3차원 비선형 해석을 실시하였다. 또한 2m로 축소되었던 형고를 3m로 보정한 해석도 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 각각 최종 파괴시인 270tonf에서의 변형도와 철근의 응력을 나타낸 그림이다. 상부바닥판 내부지간 중앙에서 최대 처짐이 발생함과 동시에 철근이 최대 응력을 나타내었다.

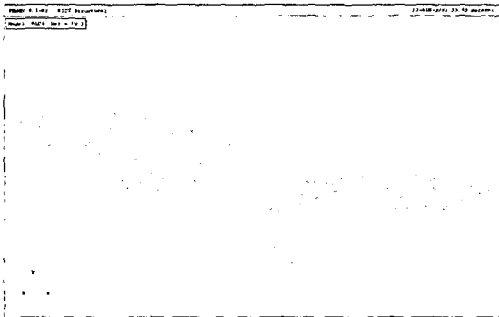


그림 4 실험체 모델링 및 변형도(270tonf)

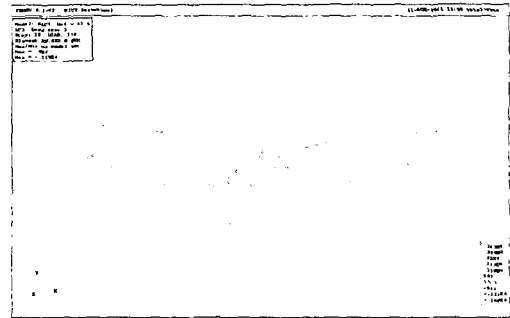


그림 5 철근의 응력(270tonf)

그림 6은 해석 및 실험결과에서 하중-처짐 관계를 비교한 것으로 약 60톤까지는 해석결과와 실험결과가 동일하게 선형탄성 거동을 나타내었고, 그 이후에는 해석결과가 실험결과보다 강성이 더 큰 비선형 거동을 나타내었다. 이와 같은 비선형 곡선구간에서의 거동 차이는 요소의 크기나 콘크리트의 인장부 모델에서 인장보강(tension stiffening)효과를 어느 정도로 고려하느냐에 따라 해석결과의 차이가 발생하게 된다. 그림 7~그림 9는 각각 최종 파괴하중인 270tonf에서 상부바닥판의 처짐, 변형률, 그리고 복부의 변형률에 대하여 실험 및 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 7에서 상부바닥판 처짐은 실험결과가 해석결과가 약 10%정도 크게 나타났으나 그림 8에서 상부바닥판 변형률은 실험 및 해석결과가 거의 유사하게 나타났다. 다만, 그림 9에서 복부 변형률은 실험결과가 해석결과 보다 약 500 정도 크게 나타났는데 이는 복부경사와 지점조건 등의 영향인 것으로 판단된다. 아울러 형고가 2m

및 3m인 실험체에 대한 해석결과는 주요 지점의 변위와 변형률들은 거의 동일한 거동을 나타내었으며, 형고를 줄이더라도 상부바닥판의 거동은 동일하게 나타난다는 점을 입증해 주고 있다.

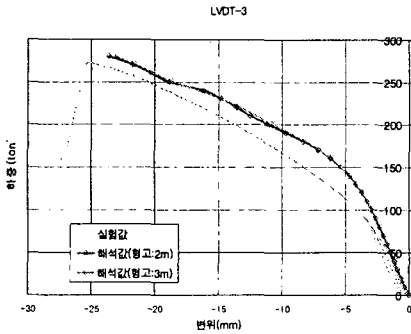


그림 6 하중-처짐 비교

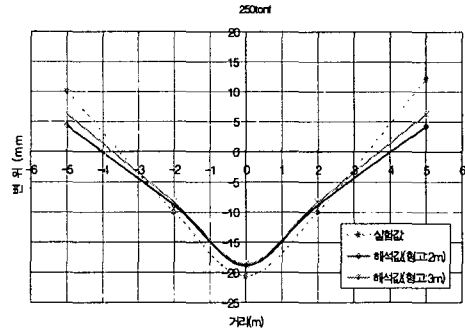


그림 7 상부바닥판 처짐 분포 비교(270tonf)

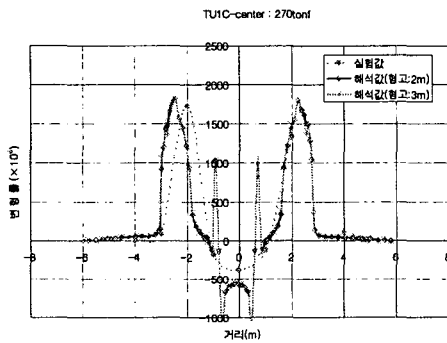


그림 8 상부바닥판 변형률 분포 비교(270tonf)

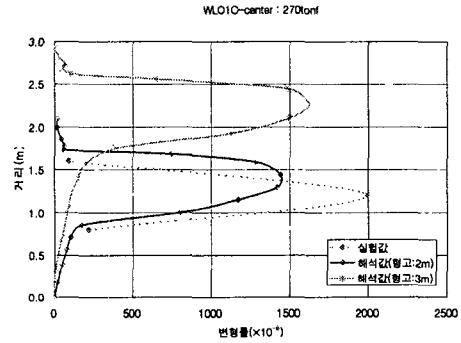


그림 9 복부 변형률 분포 비교(270tonf)

6. 결론

- (1) 대상교량보다 철근량을 약 53%줄인 실험체의 철근 물량은 76.3kgf/m^2 으로 나타나 실험체의 철근 물량이 프랑스, 일본 등의 그것과 비슷한 수준으로 되었으며, 본 연구에서 제안한 철근 배근 개선방향을 적용하면 선진국에 비해 2배 이상인 철근물량을 줄일 수 있다는 것을 입증하였다.
- (2) 정적재하 실험결과는 약 270톤에서 복부에서 상부 바닥판을 관통하는 전단파괴모드로 최종파괴를 나타냈으며 해석결과는 약 60톤까지 실험결과와 동일하게 선형탄성 거동을 보이다가 그 이후에는 해석결과가 실험결과보다 강성이 더 큰 비선형 거동을 나타내었다. 이와 같은 비선형 곡선구간에서의 거동 차이는 요소의 크기나 콘크리트의 인장부 모델에서 인장보강효과를 어느 정도로 고려하느냐에 따라 차이가 발생한다.
- (3) 형고가 2m 및 3m인 실험체에 대한 해석결과는 상부바닥판의 변위와 변형률들이 거의 동일한 거동을 나타내어 형고를 줄이더라도 상부바닥판의 거동은 동일하다는 것을 증명하였다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, PSC박스거대교 설계선진화를 통한 물량절감, 품질향상 방안수립 연차보고서, 건설교통부, 2002. 8.
2. 건설교통부, 도로교설계기준 2000.