



저형고, 저중량, 저비용 BH(Bulb-T&Half Slab) 거더 공법

Low Height, Low Weight, Low Cost BH Girder

신명규 Myoung-Gyu Shin
GS건설 기술연구소 연구원

박성민 Sung-Min Park
토웅건설 기술연구소 소장

윤석민 Seok-Min Yoon
토웅건설 차장

1. 머리말

PSC 거더(Prestressed Concrete Girder)는 강교에 비하여 저렴한 공사비와 저진동 및 유지관리 편의성 등의 장점으로 인하여 국내에서도 1960년대 도입된 이후 주로 25 ~ 35m 정도의 지간을 갖는 교량에 적용되어 왔으나 PSC 거더가 갖는 구조적, 재료적 특성으로 인하여 형고의 증가에 따른 형하공간 확보의 어려움, 단면 확대에 따른 자중 증가 등의 문제로 50 m 이상의 경간에서는 강교나 박스형 교량 등이 주로 적용되어 왔다¹⁾. 하지만 최근에는 교량형식 선정 과정에서 경제성이 차지하는 비율이 점차 증가하고 있으며, 이로 인해 강교에 비하여 저렴한 개량형 PSC 거더에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 추세에 따라 일부 PSC 거더의 경우 경간장 50m급 교량을 실제 시공하는 사례도 점차 늘어나고 있다²⁾. 이로 인해 최근 PSC 거더 개발의 방향은 50m급의 경간을 넘어 경간장 60m 이상을 목표로 하고 있으며, 여러 기관 등에서 60m 이상의 경간을 목표로 하는 교량 형식이 제안되고 있으나 지간이 50m에서 60m로 증가하는 경우 하중의 증가분이 매우 크기 때문에 개발에 성공한 사례가 많지 않은 실정이다³⁾.

이와 같이 60m급 경간의 교량을 일체형으로 제작할 경우 형고 및 자중의 증가가 거치 및 운반이 어려울 정도까지 늘어나기 때문에 최근에는 이에 대한 해결책으로 많은 기술이 분절형 방식을 채택하고 있으나 분절형 PSC 거더의 경우 접합부 강도차이 등의 이유로 응력이 집중될 수 있으며 재령의 차이에 따른 크리프 문제 등을 가지고 있어 검토가 필요한 것이 사실이다. 이러한 이유로 단일지간 60m 이상이고, 일체형 방식을 유지하며 시공성과 안전성을 개선한 개량형 PSC 거더에 대한 요구는 점차 늘어나는 추세이다. 본 고에서는 이러한 요구에 대한 대안으로 Bulb-T형의 구조와 Half-Slab 형식을 도입하여 단일 경간장 60m, 형고 2.2m, 중량 200 ton급의 성능을 가진 BH 거더를 소개하고자 한다.

2. Bulb-T&Half-Slab Girder : BH 거더

2.1 개발배경

최근 국내 교량의 경간별 분포를 살펴보면 <그림 1>과 같이 30m ~ 60m 경간의 교량이 약 93% 가량을 차지하고 있

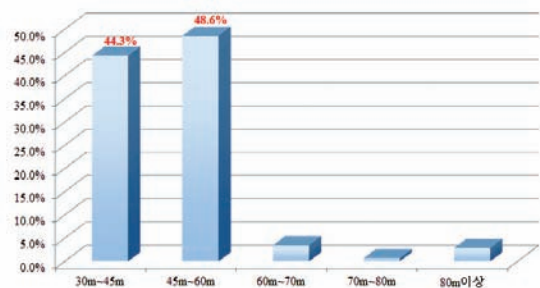


그림 1. 국내 교량의 경간별 분포

다. 이와 같이 국내의 경우 대부분의 도로나 하천의 경우 60m를 초과하는 경우가 매우 적으며, 60m 경간의 경우 대부분의 교량 시공 시 중간 교각이 필요하지 않다는 결론에 도달할 수 있다. 이는 공기단축, 공사비 절감, 시공성 향상은 물론 교량의 미관 형성에 있어서도 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상된다.

〈사진 1〉은 PSC 거더의 시공성 향상에 대한 사용자 측면에서의 요구사항을 나타낸 것이다. 일반적으로 PSC 거더의 하부

플랜지 폭은 60~90cm 정도로 운반 및 거치 시 전도에 취약하며, 상부플랜지 단면이 큰 Bulb-T형식의 경우 위험도는 더욱 증가한다. 이러한 위험을 최소화하기 위해 하부플랜지의 폭과 단면을 확대시켜 전도 저항력을 확보할 필요가 있다. 또한 교량과 같은 고소 작업 시 가장 위험한 공정은 슬래브 거푸집 해체 공정인데 현재까지는 이에 대비해 각종 안전장치 등을 사용해왔으나 거푸집 해체 공정에서의 안전사고가 끊이지 않고 있는 실정이다. 이러한 문제의 해결을 위해 제안된 Half-Slab는 상부 플랜지 폭을 확대하여 슬래브 기능의 일부를 담당하도록 하는 형태로써 이 형식을 통하여 슬래브 거푸집의 조립 및 해체와 같은 위험한 공정을 배제하고 거푸집이나 슬래브의 재료비를 경감시켜 경제성에 있어서도 매우 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

〈사진 2〉는 기술 개선을 통한 경쟁력 확보 방안에 대한 것이다. 현재까지 사용되어 오던 PSC 빔 형식의 경우 거치 시 대형 인양장비를 필요로 하며 높은 형고로 인하여 연결 도로공사 토공량이 상승하는 것과 같은 문제점이 지적되어왔다. 이러한 문제는 안전사고 등과 직접



사진 1. 사용자 입장에서의 시공성 개선 요구 사항



사진 2. 기술개선을 통한 경쟁력 확보 방안

적인 연관이 있어 중량과 형고의 최소화는 경제성, 시공성, 안전성과 같은 사항과 직결된 PSC 거더 기술경쟁력의 핵심이며 특히 60m 경간에서는 그 중요성이 더욱 부각될 것으로 예상된다.

이와 같은 사항들을 종합해보면 60m 경간으로 높이와 중량을 최소화하고 단면력과 안정성을 확보하여 경제성과 시공성을 극대화할 수 있는 PSC 거더 개발의 필요성을 도출해낼 수 있었다.

2.2 BH 거더의 기술특성

상기한 개선 요소를 적용하여 개발된 BH 거더는 기존 PSC 거더의 단점을 개선하고 경제성, 시공성, 안전성 및 미관 등을 강화하여 최저 형고의 60m 경간 거더 기술실현을 목표로 개발되었다(표 1).

3. BH 거더의 구조적 특성

3.1 BH 거더 적용기술

BH 거더는 〈그림 2〉와 같이 45~60m 경간에 최적화되어있는 형식이다. 또한 Bulb-T형 단면과 PS강선 배치를 최적화하여 거더의 높이를 최소화하고, 시공성 증진을 위하여 Half-Slab를 적용한 것을 가장 큰 특징

표 1. BH 거더의 기술적 특성

BH 거더 (Bulb-T & Half-Slab 거더 : 지간 35m ~ 65m)
<ul style="list-style-type: none"> 하부플랜지를 개선한 Bulb-T 형식 시공성, 구조효율성 최적화를 위한 Half-Slab 적용 PS 최적화를 통한 동시간 대비 최저 형고 구현 60m 경간 최적화 설계 적용

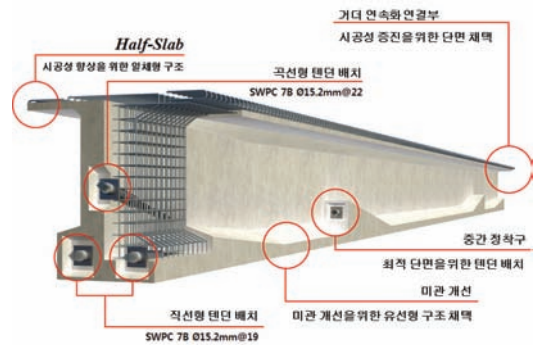


그림 2. BH 거더의 개요도

으로 가지고 있다.

BH 거더의 개발에 있어서 크게 세 가지의 기준을 설정하였는데, 첫 번째는 Half-Slab를 적용한 저형고 Bulb-T형 거더 개발을 통하여 시공성 및 안전성 향상, 단면력 증대, 공기 단축 등의 효과를 얻는 것이다.

〈그림 3〉는 미국 PCI(Precast Prestressed Concrete Institute)에서 국내 1등급 표준트럭하중과 유사한 HS25 하중을 적용하여 개발한 DBT(Decked Bulb-Tee) 표준 단면 거더의 단면형상을 나타낸다⁴⁾. BH 거더는 PCI 기준보다 우수한 전도 저항성을 확보한 것을 단적으로 알 수 있으며, PCI 기준에 비하여 매우 낮은 형고를 달성한 것을 확인할 수 있었다. DBT 거더를 적용하여 상부구조를 가설하는 경우, 일반 PSC 빔에 비하여 공기를 크게 단축할 수 있는 장점이 있는 반면에 제작오차가 발생하는 경우 가설 시 교축 직각방향 물매를 맞추기가 어렵고 형상의 특성상 거더 인양 시 큰 하중을 가진다는 단점이 있다. 이에 비해 Half-Slab의 합성 전 고정하중은 일반 PSC 거더에 비하여 감소하는 효과가 있으며 현장타설 슬래브는 제작오차에 대한 수정이 가능하다. 또한 Full Deck에 비해 인양하중의 감소효과는 가설 시 공사비를 절감하는 효과를 얻게 될 것이다⁵⁾.

또한 BH 거더는 Half-Slab를 채용함으로써 추락방지 시설과 슬래브 거푸집 설치와 해체 공정을 완전히 배제할 수 있다. 이를 통하여 공기단축 및 경제성의 확보는 물론 시공성과 안전성에 있어서도 큰 효과를 기대할 수 있다.

두 번째는 Prestress 도입의 최적화이다. 〈그림 4〉의 왼쪽 그림과 같이 곡선형 PS강선 외에 직선형 강선을 도입하여 횡만곡 변형을 방지하고, 〈그림 4〉의 오른쪽 그림과 같이 거더에 중간 정착부를 설치하여 Prestress 도

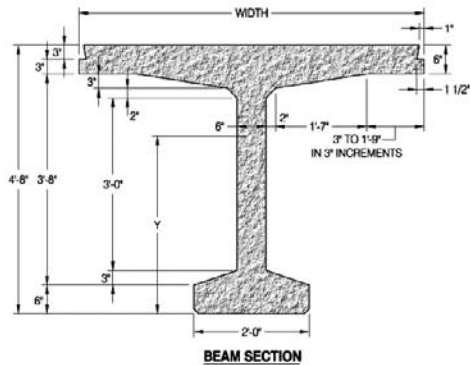


그림 3. PCI DBT 표준 단면형상(PCI, 2003)

입량의 최대화와 장기손실 최소화라는 이점을 얻을 수 있다. 이를 통하여 동일 기간 대비 최저형고를 달성하고 중량을 감소시키는 성과를 얻을 수 있었다.

세 번째 기준은 시공 합리화를 실현하는 것이다. 앞서 수차례 반복한 바와 같이 BH 거더는 Half-Slab의 적용을 통하여 현장 작업자들이 보다 안전하고 수월하게 작업할 수 있는 공간을 제공하며 콘크리트 격벽과 Steel Bracing의 조합을 통해 가로보를 단순화할 수 있다.

BH 거더는 이러한 특징을 토대로 공기절감, 경제성 확보, 시공성 향상 등의 효과를 기대할 수 있으며, 60m 경간 적용과 최저 형고를 통해 미관확보에도 매우 우수할 것으로 예상된다.

3.2 BH 거더의 구조적 성능 평가

BH 거더의 성능과 안정성 검증을 위해 60m 실물 실험체를 제작하여 실험을 실시하였다. 실험체는 연장 59.9m, 중량 205 ton, 형고 2.3m(Half-Slab 0.1m 포함)로 제작되었으며, 설계하중은 DB-24, DL-24, 충격계수 $15/(40+L) \leq 0.30$ 을 적용하였다. 또한 설계교량의 제원은 1등급, 거더간격 2.5m, 폭원 12,625m, 연석간 교폭 11,395m로 산정하였으며, 설계 차선 수는 3차선, 폭은 3.798m로 설정하였다.

〈그림 5〉에서 보는 바와 같이 실험에 앞서 균열과 파괴해석에 자주 이용되는 RBSN(Rigid Body Spring



그림 4. PS 도입의 최적화

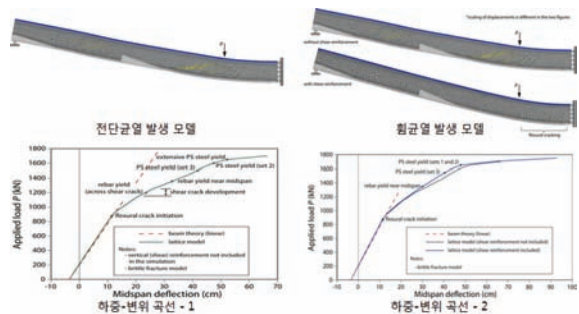


그림 5. RBSN Model

Network)모델을 사용하여 파괴양상을 예측하는 해석을 수행하였다. 해석은 전단균열 발생모델과 휨균열 발생 모델을 적용하여 실시되었으며 이에 대한 하중-변위 곡선을 얻을 수 있었다. RBSN 모델을 적용한 해석을 통해 실험체에 대하여 보다 상세한 해석과 균열의 불확실성을 고려한 파괴거동을 예측할 수 있었다.

〈그림 6〉은 RM2004를 통하여 3차원 Frame 해석을 실시한 결과이다. 본 해석은 시공단계에 따른 구조계 및 하중조건의 변화와 Prestressed 손실을 고려하여 해석을 진행하였으며 실험체의 전체적인 응력을 검토하고 시공 과정에서의 응력을 검토해봄으로써 실험준비과정에서 발생 가능한 문제를 예측하고 대비하기 위하여 실시하였다. 이러한 예측결과를 통하여 실제 실험 시 발생할 수 있는 문제점을 미리 도출하여 실험 도중 발생 가능한 문제에 대해 대비할 수 있었다.

〈사진 3〉은 BH 거더의 60m 실물 실험체 제작 및 공개실험 사진이다. 특히 이번 실험에서는 FBG(Fiber Bragg Grating) Long Gauge Length 센서를 사용하여 거더의 긴장, 운반, 설치 시 변화를 측정할 수 있었다.

〈그림 7〉은 BH 거더의 실물실험에 대한 해석과 실험

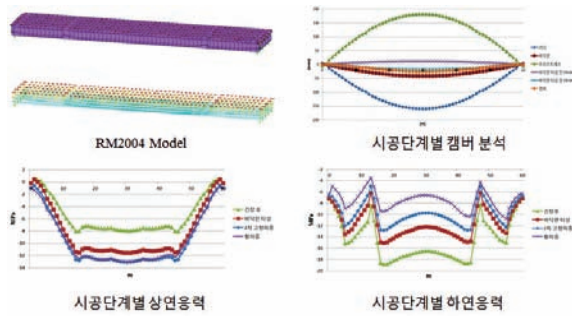


그림 6. RM2004 Model



사진 3. 실물실험

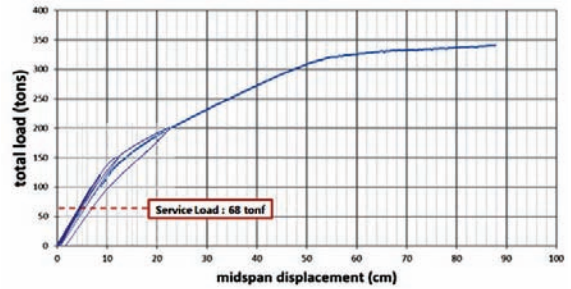


그림 7. 해석-실험 결과 비교 분석

결과를 비교 분석한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 하중-변위 곡선에서 실험구간의 기울기가 거의 일치하는 것을 알 수 있으며, 결과 분석을 통하여 설계에 반영할 수 있게 되었다.


해석-실험 결과 분석을 통해 초기균열 발생 지점은 하중-변위 곡선에서 초기에 나타나는 선형 구간의 기울기가 변하는 곳에서 발생한다고 가정하였다. 해석상 초기 기울기의 변화는 약 140 ton에서 발생하였으며, 비선형 구간 초기의 기울기 변화는 160 ton에서 발견되었다. 또한 초기 휨 균열은 약 140 ton에서 시작하고, 160 ton에서 잘 형성된 균열이 나타났다. 또한 초기 균열은 약 140 ton에서 발생하였는데, 이는 설계 시 사용되는 설계 하중이 약 68 ton인 것에 비하여 두 배 이상의 수치이다.

이와 같이 60m 실물 모형실험을 통해 실제 현장 적용 시 BH 거더가 충분한 안정성을 확보한 것을 확인할 수 있었다.

4. 맺음말

이처럼 상세한 검증을 통하여 개발된 BH 거더로 향후 교량 건설에 있어서 장경간화에 따른 교각 및 교대 수량 감소, 거푸집 공정 배제를 통한 공기단축, 최적형고 구현을 통한 형하공간 확보 및 토공량 감소, 수량 및 공정 최적화를 통한 시공비 절감과 같은 긍정적인 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 장점은 전체 공사비를 절감하는 요소가 될 것이고, 이를 통해 향후 적용되는 공사에 경제적, 미관적 부분에서 두각을 나타낼 수 있을 것으로 예상된다.

BH 거더는 현재 세종시 정부청사 건립공사 현장에 시공 중이며, 이 외에도 많은 현장의 설계에 반영되고 있는 상태이다.

이번에 소개한 BH 거더 공법이 향후 많은 교량공사현장에 적용되어 국내 교량건설의 경쟁력을 높이는 데에 일조하기를 바라며 글을 마친다. 

담당 편집위원 : 김도학(GS건설(주) 기술연구소)
dohkim@gsconst.co.kr

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 국내의 신형식 PSC빔 거더교 개발 현황, 콘크리트학회지, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 26 ~ 33.
2. 쌍용건설 기술연구소 기고문, 중·소규모 교량의 특허·신기술 현황 및 기술 동향, Vol. 56, 2010, pp. 30 ~ 38.
3. 한국콘크리트학회, IT 박스 PSC 거더 공법, 콘크리트학회지, Vol. 24, No. 1, 2012, pp. 56 ~ 60.
4. PCI(Precast prestressed Concrete Institute) DBT 시공 기준, 2003.
5. 한국콘크리트학회, 급속시공이 가능한 PSC-T 거더교 소개, 콘크리트학회지, Vol. 58, No. 10, 2010, pp. 73 ~ 78.



신명규 연구원은 연세대학교 토목공학과에서 석사학위를 취득한 후 GS건설 기술연구소에 입사하여 프리캐스트 콘크리트 구조를 이용한 토목구조물 설계 및 시공 생산성 향상과 관련된 연구를 수행하고 있다.
mgshin@gsconst.co.kr



박성민 소장은 연세대학교 토목공학과에서 석사학위를 취득한 후 설계업무를 해오다가 토옹건설에 입사하여 구조관련 기술개발 업무를 담당하고 있다.
surfzone@naver.com



윤석민 차장은 한양대학교 토목공학과에서 석사학위를 취득한 후 토옹건설에 입사하여 기술개발 및 시공관련 업무를 수행하고 있다.
fliery@gmail.com