

장경간 Spliced PSC 거더교량의 개발

Development of Long Span Spliced PSC Girder Bridges

심종성* 한만엽** 오홍섭*** 김정구**** 김민수****
Jong-Sung Sim Man-Yop Han Hong-Seob Oh Jung-Gu Kim Min-Su Kim

Abstract

Prestressed concrete I-girders were used in the bridge applications in the early 1950s. During the last four decades, the most widely used girder length of bridges have been below 30 meters. The main objective of this study is to develop the alternative section for long span bridge which exceed 40 meters. The developed Bulb-Tee girder has a wide bottom flange to enhance the compressive strength and to allow placement of a large number of strands in the bottom flange. New bulb-tee shaped PSC girder sections are proposed in this paper. Splicing technique for long span bridge girder to reduce the self weight is also proposed.

keywords : Bulb-Tee girder, I-girder, long span bridge, splicing,

1. 서론

1980년대 이후 급속한 교통량의 증가와 사회간접자본의 확충 등으로 인하여 전국적인 도로망의 정비 및 순환고속도로 등의 새로운 도로망의 건설이 필요하게 되었다. 이 경우 도로의 폭이 40m 이상으로 건설되기 때문에 도로를 가로지르는 상부 고가차도의 경우에도 40m 이상의 경간이 요구되고 있다. 현재 국내에서 지간 40m 이상인 경우에 시공되고 있는 교량형식은 steel plate교, steel box교와 pre-flex교로 시공하는 것이 대부분이며, 그 이상의 지간이 요구될 경우에는 PSC box형 교량으로 시공되고 있다. 그러나 이들 교량형식들은 시공성, 경제성 및 유지관리 등에 있어 각각의 단점을 갖고 있다.

따라서 외국에서도 경제성과 시공성을 모두 갖춘 교량을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서도 PSC-I형 거더의 장대화에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 그 결과로서 거더의 단면특성에 변화를 주고 고강도콘크리트를 사용하여 지간길이를 50m 이상까지 연장할 수 있는 장경간 PSC 거더들이 현재 개발되고 있다[1,2,4,6].

그림 1과 같은 형식의 PSC거더를 Bulb-Tee거더라 부르고 있으며, 일반 I형 거더와 비교하여 상대적

*정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

**정회원, 아주대학교 토목공학과 교수

***한양대학교 토목공학과 박사과정

****한양대학교 토목공학과 석사과정

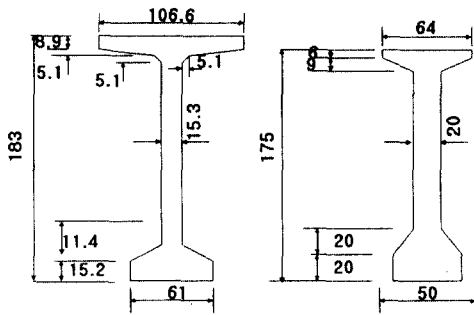


그림 1 PCI BT72단면과 30m PSC 표준단면 비교(단위:cm)

경제성이 충분히 입증되고, 시공이 용이한 PSC Bulb-Tee거더 교량의 연구개발은 교량의 기술 발전에 크게 기여할 수 있을 것이다.

2. 장경간 PSC거더단면의 개발

2.1 단면제안

장경간 교량에 사용가능한 거더 단면을 결정하기 위하여 본 연구에서는 국내 시방서 기준에 따르는 프로그램을 개발하였으며, 보해석 방법을 이용하여 교량이 해석되도록 하였다. 프로그램의 입력변수로는 거더 단면형태와 교량의 설계지간, 교폭 및 거더의 개수, 거더 간격, 그리고 상부슬래브의 두께, 방호벽의 제원등 교량의 전체적인 형태와 사용재료 등으로 하였다. 또한 탄성계수와 긴장재의 손실량 계산, 그리고 활하중의 재하 등도 도로교 시방서를 따랐다.

본 연구에서는 국내시방서 기준에 적합한 단면을 결정하기 위한 기본연구 단계로서, 미국과 캐나다에서 시공한 거더들을 선택하여 단면에 따른 변수들의 영향을 고찰하였다. 거더를 선택하는 기준으로는 지간길이 35m~45m를 기준으로 하였으며, 선택거더들의 제원은 표 1에 나타내었다.

표 1 비교거더 단면제원

비교 거더	거더 높이 (cm)	단면적 (cm ²)	도심 (cm)		단면계수 (cm ³)		단면효율계수 (Q = $\frac{r^2}{y_b \cdot y_t}$)
			y _t	y _b	Z _t	Z _b	
Kentucky Girder	180	6515	87.3	92.7	335009	315654	0.555
AASHTO/PCI BT72"	182.9	4943	90	93	252600	244269	0.549
Florida Modified Bulb Tee	182.9	5681.8	99.7	83.2	247724	297094	0.524
Nebraska Univ. Girder	200	6131.9	110	90	302175	369177	0.547
Canadian Standard 200	200	5290	104.9	95.1	278338	307119	0.553
Canadian Standard 230	230	6352	119	111	402894	432103	0.572
Florida(Moore Haven Bridge)	243.2	9522.5	106.9	136.3	712975	559641	0.549

선택거더단면의 국내적용가능성을 판단하기 위하여 국내시방기준에 따라 해석하였으며, 각 거더의 단면을 비교하기 위하여 거더단면의 형상을 제외한 모든 설계조건은 동일하게 하였다. 장경간 교량설계를 위한 변수로서 본 연구에서는 콘크리트 압축강도, 거더 간격, 긴장재의 개수들에 대한 영향을 고찰하여 설계조건을 정하였으며, 각 경우에 대한 시공성 및 경제성을 고려하였다.

프리스트레스트 콘크리트는 구조적 특성상 일반콘크리트와 비교하여 상대적으로 높은 압축력을 받기 때문에 콘크리트의 강도는 보통 350 kg/cm^2 이상의 강도로 설계되는 것이 일반적이며, 지간이 증대됨에 따라 고강도 콘크리트의 사용은 필수적인 것으로 연구되고 있다.

지금까지의 연구결과 지간이 120ft(37m) 이상 될 때, 거더 단면설계의 설계조건이 상부플랜지의 허용인장력에서 하부플랜지 콘크리트 허용압축력으로 변화되는 것으로 나타나고 있으며, 콘크리트의 강도를 증가시킴으로서 경간의 길이를 증가시킬 수 있다. 그림 2는 콘크리트의 강도에 따른 거더간격과 지간의 상관관계를 나타내고 있다[5]. 그림 2는 고강도 콘크리트 사용시의 이점을 잘 나타내고 있다. 거더간격이 5ft이고 콘크리트의 응력이 6000psi(41MPa)인 단순지지거더에서 거더의 콘크리트 강도를 7500psi (52MPa)로 증가시킴으로서, 거더간격의 변화없이 지간을 130ft(40m)에서 144ft(44m)로 연장시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다. 이는 거더의 콘크리트 강도의 증가로 인한 시공 가능지간이 약 10% 정도 증가시킬 수 있음을 나타내는 것이다.

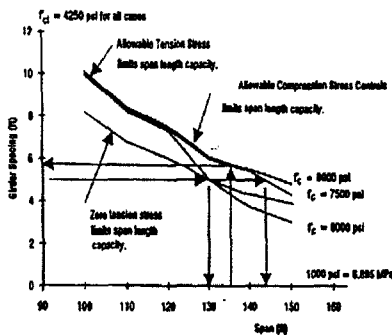


그림 2 콘크리트의 강도에 따른 경간의 길이와 거더의 간격 [5]

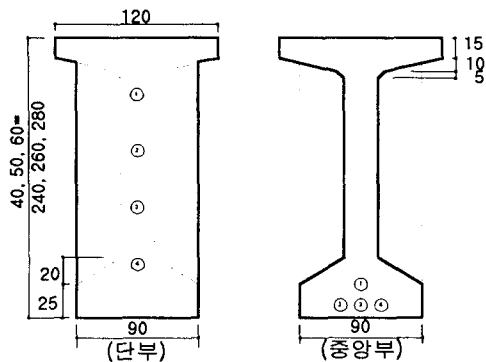


그림 3 40, 50, 60 m 지간의 PSC 거더 단면 제원 (단위:cm)

그러나 콘크리트의 압축강도는 경제성 및 시공성과 밀접한 관계가 있고, 특히 국내의 경우 PSC 거더가 현장시공되는 점을 감안할 때 600 kg/cm^2 이상의 강도는 시공성 및 경제성에서 이점이 없는 것으로 고찰되었다. 따라서 본 연구에서는 단면의 크기 및 콘크리트 강도의 상관관계를 이용하여 국내 조건에 맞고, 시공 및 경제성을 갖는 장경간 거더를 그림3과 같이 제안하였다.

또한 제안단면의 적합성 및 효율성을 검증하기 위하여 비교단면들과 같은 조건에 대하여 설계를 수행하였다. 이때 설계조건은 2차선 교폭(12.15m)의 지간길이 40m인 교량을 기본 모델로 하였으며, 사용 거더의 개수는 4개로 제한하였다. 거더간격은 3.6m로 하였으며, 긴장재로는 지름 12.7mm의 7연선 저탄력세션 강연선으로 4개의 덱트를 사용하여 총 84개의 강선을 사용하였다. 사용재료로는 거더의 콘크리트 강도는 550 kg/cm^2 을 사용하였고, 상부 슬래브의 강도는 280 kg/cm^2 으로 각각의 거더에 동일하게 적용하였다.

그림 4에 나타난 결과는 비교단면들과 본 연구에서 개발된 장경간 거더에 대한 설계, 해석 결과를 도시한 것이며, 상·하 점선은 사용하중 단계에서 허용압축응력과 허용인장응력을 나타내고 있다. 제안 단면의 경우 50m와 60m 단면의 경우 거더의 개수는 각각 6개와 8개를 사용하였으며, 긴장재 또한 각각 100개와 132개를 사용하였으며, 다른 설계조건은 동일하게 적용하였다. 비교단면 중 Florida의 Moore Haven 교량에 시공된 거더가 허용범위를 모두 만족하는 것으로 나타났으며, 거더의 높이가

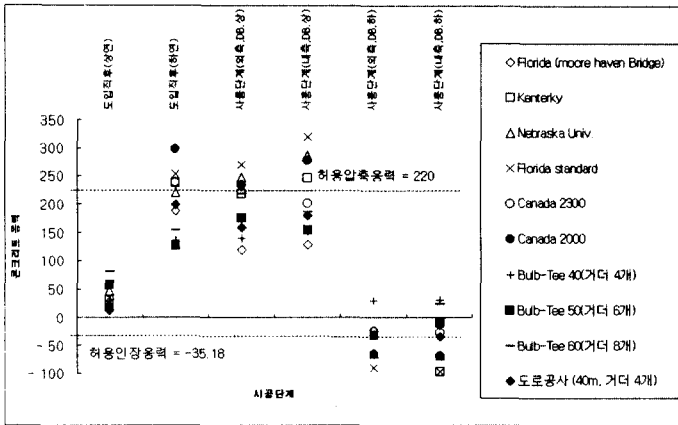


그림 4 해석단계에 따른 비교거더들의 상·하면 응력(kg/cm²)

출때에도 허용응력 범위내에 들어오는 것으로 고찰되었으나, 부재의 안전성을 고려하여 제안시에는 550 kg/cm²의 콘크리트 강도를 사용하였다.

2.2 지간별 제안 거더의 단면 고찰

본 절에서는 제안 거더의 단면 특성에 대한 효율성을 단면계수와 휨효율 계수에 대하여 비교단면들과 상호 비교, 검증하였다.

(1) 거더 총단면적에 대한 단면계수 (Z)의 관계

Z/A_c 는 상부 슬래브를 합성하기 전에 작용하는 거더 자중 모멘트로 발생하는 압축응력과 인장응력에 대하여 거더가 저항할 수 있는 능력을 보여준다. 미국과 캐나다에서 사용되고 있는 거더들과 비교하여 제안거더들의 효율을 고찰하기 위하여 표1의 비교대상 거더들의 단면제원과 각각의 설계지간에 대하여 제안한 거더들의 단면제원을 이용하여 거더의 전체 횡단면적에 대한 거더 상·하면으로부터의 단면계수 (Z_b, Z_t)를 비교하였다. 비교결과는 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 제안단면의 경우, 거더 상·하면의 단면계수비 Z/A_c 값이 지간이 증가함에 따라 동일한 정도로 증가하고 있는 것을 볼 수 있으나, 비교대상 거더들의 경우 연속교 형식에서의 부모멘트를 고려하기 때문에 Z_b, Z_t 의 값이 서로 다르게 고려되어 상·하면의 단면계수비가 차이가 나는 것으로 판단된다.

또한 제안거더의 Z_b 와 Z_t 값이 기존의 PSC-I형 거더에 비하여 상대적으로 훨씬 큰 값으로 나타난 것과 지간의 증대에 따라 커지는 것으로 나타나고 있어 효율적인 단면이며, 지간의 장대화에 적합한 단면으로 판단된다.

(2) 단면의 휨효율계수

Guyon은 상하의 핵거리가 가장 큰 단면이 효율적이라 가정하고, 단면계수 (Z_b, Z_t)와 핵거리

($k_{t,b} = \frac{r^2}{y_{b,t}}$)의 관계를 무차원화하여 휨효율계수를 $Q = \frac{I^2}{y_b \cdot y_t}$ 로 나타내었다. 그림 6는

200cm 이하인 거더들은 사용하중 단계에서 거더 상·하면에 작용하는 압축응력과 인장응력이 모두 허용범위를 벗어나는 것을 보여준다. 또한 사용하중 단계에서 거더하면의 인장응력은 긴장재의 영향으로 허용범위내에 있으나, 거더상면에 작용하는 압축응력이 허용범위를 벗어나고 있는 거더가 대부분인 것으로 판정되었다. 또한 본 연구의 제안 단면은 지간 40, 50 및 60m 경우 모두 허용응력 범위내에 만족하는 것으로 나타났으며, 지간 40, 50m인 개발단면의 경우 콘크리트 압축강도를 450 kg/cm²로 낮

Guyon이 정의한 휨효율계수로 거더들의 휨효율을 비교한 것이다.

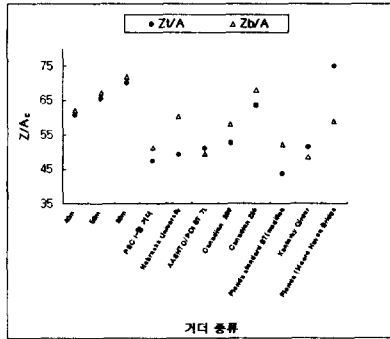


그림 5 거더 전체 횡단면적에 대한 단면계수비 (Z / A_c)

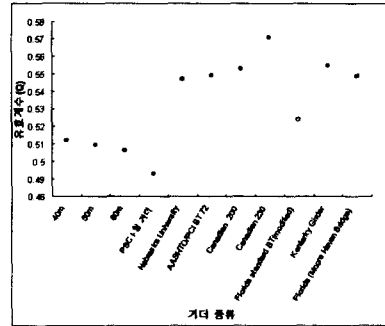


그림 6 거더의 휨효율계수(Q) 비교

비교적 얇은 복부와 플랜지를 가지는 I 형 또는 T 형 단면이 두꺼운 복부와 플랜지를 가지는 단면보다 Q 값이 크게 나오며, 휨효율계수가 0.45이하일 경우는 투박한 단면이 되고, 0.55 이상이 되면 얇은 단면을 가지고 있다고 볼 수 있다.

제안거더의 휨효율계수가 배교대상 거더단면에 비하여 작은 값을 나타내고는 있으나 기존의 PSC-I형 거더와 비교하면 단면의 휨효율성이 높은 것으로 나타나고 있으며, 제안 거더단면이 post-tension 방식을 이용하며 국내 시방규정을 만족시킨 점을 감안한다면 휨효율을 최대한 증가시킨 단면이라고 판단된다.

2.3 Bulb-Tee거더의 시공방법 제안

앞에서 제안된 Bulb-Tee 거더는 지간의 길이가 각각 40, 50, 60m로 거더 제작장에서 가설현장으로 운반하기 어렵고, 상부가설시에도 막대한 거더자중으로 인하여 교량 상부 시공에 문제점이 발생할 수 있다.

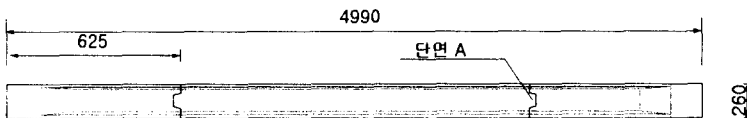


그림 7 50m지간의 Bulb-Tee거더 단면도(단위:cm)

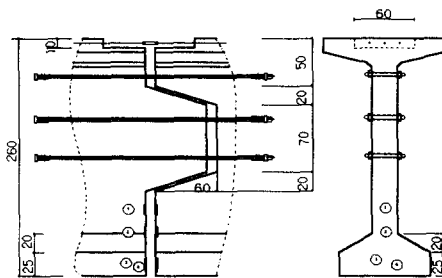


그림 8 접합부(단면 A) 단면제원 및 시공방법(단위:cm)

을 해결하기 위한 시공방법으로서 50, 60m 거더의 경우 spliced girder로 시공하는 방법을 제안하였다. 그림 7, 8과 같이 spliced girder란 여러 개의 세그먼트를 현장에서 접합하여 한 지간으로 시공하는 방법으로서 장경간 교량에 있어 가장 효율적인 시공방법이라 할 수 있을 것이다.

각 세그먼트를 가설하기 위해 교량하부에는 지간에 따라 2-3개의 임시교각을 설치하고, 세그먼트 접합부는 그림 8과 같이

같은 방법으로 시공하여 접합부의 전단응력집중에 의한 국부파괴를 피할 수 있도록 하였다. 또한 임시 교각 상부의 세그먼트는 긴장재의 잭킹(jacking)이 완료되기 전까지 그림 8에 나타난 방법과 같이 방법으로 임시로 고정시킨다. 거더의 일체화를 위한 세그먼트 사이의 영구접합은 에폭시 접착공법을 사용하였다.

3. 결론

1. 장경간 PSC교를 설계, 시공하기 위해서는 단면의 효율성을 높이기 위하여 최소의 단면으로 최대의 단면계수를 갖도록 설계하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 적용되고 있는 post-tensioning 방법에 적합하도록 40, 50 및 60m 표준거더의 단면을 제안하였다.
2. 제안된 표준거더 단면은 40, 50, 60m 교량에 적합하도록 상, 하부 플랜지의 단면치수는 고정하고 높이만 변화를 주어 가능한 단순하면서도 효율적인 단면이 되도록 개발하였다. 개발된 단면의 제원은 상·하부 플랜지의 폭이 각각 120cm와 90cm이고, 높이는 교량의 지간에 따라 각각 240, 260 및 280cm이다.
2. 콘크리트의 압축강도는 경제성, 시공 가능성 및 품질관리의 용이성 등을 고려하여 550 kg/cm^2 로 고정하여 설계하였다.
3. Spliced 단면의 설계는 전단에 대하여 안전하도록 설계하였으며, 시공 정밀성 및 안전성을 위하여 접합시공에 대한 새로운 시공방안을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 대우엔지니어링의 연구비 지원에 의하여 연구가 진행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

4. 참고문헌

1. Abdel-Karim, Ahmad, and Tadros, Maher K., "Design and Construction of Spliced I-Girder Bridges," PCI JOURNAL, V. 37, No. 4, July-August 1992, pp. 114-122.
2. Abdel-Karim, Ahmad, and Tadros, Maher K., "State-of-the-Art of precast/prestressed spliced-Girder Bridges," PCI Special Publication sponsored by PCI Committee on Bridges, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 1993, 133pp.
3. Aswad, A., "An Efficiency Criterion for Pretensioned I-Girder (Unpublished).
4. Bardow, Alexander K., Seraderian, Rita L., Culmo, Michael P., "Design, Fabrication and Construction of the New England Bulb-Tee Girder," PCI JOURNAL, Nov-Dec 97, pp30-40.
5. Dolan, Charles W., Ballinger, Craig A, Robert W., "High Strength Prestressed Concrete Bridge Girder Performance," PCI JOURNAL, pp83-97.
6. Federal highway Administration "Optimized Sections for High Strength Concrete Bridge Girders," FHWA-RD-95-180, Aug97.