

스트럿-타이 모델을 이용한 PSC 박스거더교량의 정착부 설계 연구

A Study on Design for Anchorage Zone in PSC Box Girder Bridge Using Strut-Tie Model

이 주 하*
Joo-Ha Lee

윤 영 수**
Young-Soo Yoon

이 만 섭***
Man-Seop Lee

김 병 석***
Byung-Suk Kim

ABSTRACT

PSC box girder is widely used in a domestic bridge and overpass, etc., therefore, the design and construction technique for the PSC box girder is developing day by day. Even if it were so, however, the design for anchorage zone in PSC box girder has depended on common sense and empirical results. And it is the current situation that the designer has difficulty due to inadequacy of provisions in the domestic design code and lack of understanding for behavior of anchorage zone. Besides, the design based on Leonhardt's method is being done in general, but the design may be various even for the same structure because of the difference in a way of applying.

In this paper, therefore, anchorage zone in PSC box girder bridge is analyzed and designed by using strut-tie model. Adequacy for the application of strut-tie model is verified by comparison with the way used in current design practice, and this study presents that strut-tie model can be a rational and an economical design than current design methods.

1. 서 론

국내 교량 및 고가도로에 있어서 PSC 박스거더의 설계 및 시공이 일반화되고 있는 상태이며 이에 따라 그 설계 및 시공 기술이 나날이 발전하고는 있으나 아직까지 PSC 박스거더 정착부의 설계방법이 명확하게 정립되어 있지는 않은 상태이다. 정착부 보강에 대해서는 국내 관련 설계 기준의 규정이 미흡하고 설계자들의 정착부 거동에 대한 이해 부족 등으로 인하여 실무에서 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 또한 일반적으로 Leonhardt 방법에 근거한 설계를 하고 있으나 설계자에 따라 적용 방법에 차이가 있어서 동일한 구조물이라도 설계 편차가 심할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 탄성이론으로는 정확한 해석과 설계가 어려운 PSC 박스거더교량의 정착부에 대하여 스트럿-타이 모델을 적용하여 해석, 설계하고 그 결과를 현행구조설계 실무에서 사용하는 방법과 비교하여 스트럿-타이 모델 적용의 타당성을 검증하였다.

* 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

*** (주) VSL KOREA 기술연구소 진부

**** 한국건설기술연구원 수석연구원

2. ACI 318-02 APPENDIX A

ACI 318-02에서는 스트럿과 절점의 강도에 대해 각 형태 및 경계조건별로 서로 다른 계수를 적용하는 제한식을 제안하고 있다. 본 연구에서는 스트럿과 절점 영역의 안정성 검토를 ACI 318-02에서 제시하는 식을 사용하였다.

표 1 ACI 318-02에 따른 응력 제한식 및 강도감소계수

Stress Limits	Struts : $f_{cu}=0.85\beta_s f_c'$ where $\beta_s=1.00$ for prismatic struts in uncracked compression zones $\beta_s=0.40$ for struts in tension members $\beta_s=0.75$ struts may be bottle shaped and crack control reinforcement is included $\beta_s=0.60$ struts may be bottle shaped and crack control reinforcement is not included $\beta_s=0.60$ for all other cases f_c' = specified concrete compressive strength
	Nodes : $f_{cu}=0.85\beta_n f_c'$ where $\beta_n=1.00$ when nodes are bounded by struts and/or bearing areas $\beta_n=0.80$ when nodes anchor only one tie $\beta_n=0.60$ when nodes anchor more than one tie
Strength Reduction Factors, ϕ $\phi=0.75$ for struts, ties, and nodes	

3. 국내 설계 사례 비교

국내 설계사에서 시행한 PSC 박스거더교량의 정착부 설계에 적용된 해석 방법은 주로 Leonhardt의 설계식에 기초하고 있으며, 특히 중간 정착부에 대해서는 도로교표준시방서에 따라 인장력을 산정하였으나, 각 설계자마다 그 힘을 구하는 방법이 다르며, 이에 따라 요구되는 보강 철근량에서 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 표 2는 중간 정착부에 대한 국내 설계 사례의 인장력 산출식을 비교하여 나타내고 있다.

표 2 중간 정착부의 국내 설계 사례 인장력 산출식 비교

구 분	설계 사례 A방법	설계 사례 B방법
파열력	$0.3 \times P \times (1-a/H)$	$0.3 \times P \times (1-a/H)$
모서리에 생기는 인장력	$0.04 P$	$0.1 P$
정착부 전면에 생기는 인장력	$0.25 P$	$0.25 P$
프리스트레스 편심에 의한 인장력	$0.5 f_{ct} a B$	$0.5 f_{ct} a B$
PS 강재의 굴곡부에 생기는 인장력	P/R	$P \times \sin\theta$
박리력	-	$0.04 P$
전단마찰력	P/μ	-

4. 유한요소해석과 스트럿-타이 모델 구성

4.1 중간 정착부

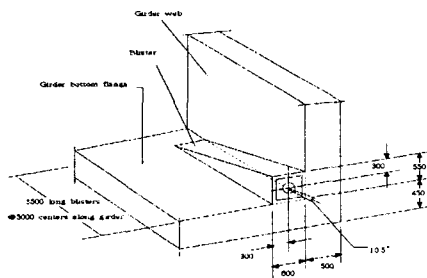


그림 3 중간 정착부의 설계 대상 단면

설계비교를 위해 그림 1에 보이는 바와 같은 기존의 국내 설계사례와 동일한 단면을 사용하였다. 작용인장력 및 텐던의 굴곡부에 생기는 인장력등 대상 단면에 작용하는 하중이 먼저 계산되었다. 이때 다른 블리스터(blister)에 작용하는 압축력에 대한 효과가 고려되었다. 다시 말해 근접후방의 블리스터에 작용하는 압축력은 전방에까지 퍼져나가 정착부 전면에 생기는 인장력을 현저히 줄어둘게 하는 효과를 가져온다. 하중의 분산을 45°로 보고 근접 후방 블리스터에 작용하는 압축력의 효과를 그림 2에 나타내었다.

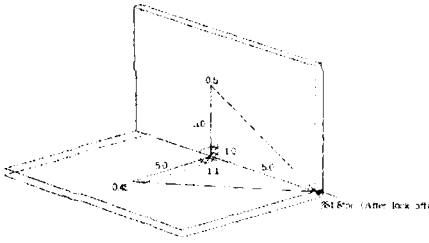


그림 2 후방 블리스터(blister)의 압축력 효과

유한요소해석 프로그램은 LUSAS 13.4를 사용하였으며, 그에 따른 해석 결과로 그림 3은 주응력 흐름을 나타내고 있다. 그림 3에서 보여지는 주응력도를 통해 스트럿-타이 모델을 구성하였다. 구성되어진 스트럿-타이 모델을 해석한 결과 각각의 구성 요소들의 부재력과 부재의 크기가 결정되었다. 그림 4는 스트럿-타이 모델의 부재력 크기를 나타내고 있으며, 각 스트럿과 절점의 안정성 검토 결과 ACI 318-02에 대한 응력비가 모두 1을 넘지 않는다.



(a) 압축응력

(b) 인장응력

그림 3 중간 정착부의 주응력 흐름

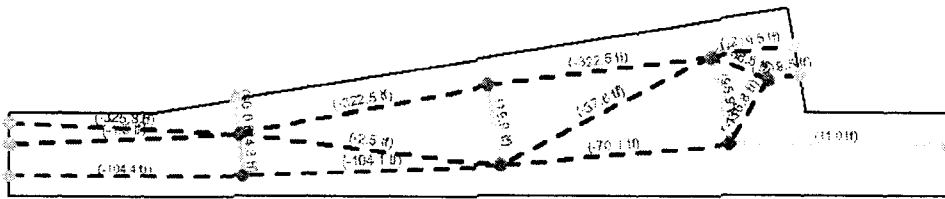


그림 4 중간 정착부의 스트럿-타이 모델

4.2 교량 슬래브의 횡방향 텐던 정착부

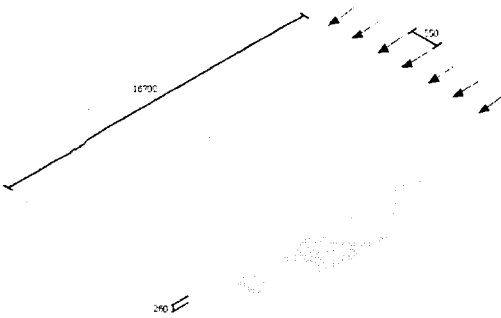


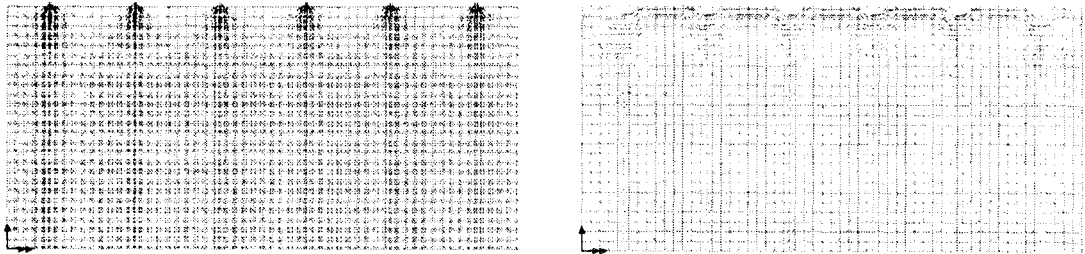
그림 5 슬래브 정착부의 설계 대상 단면

횡방향 텐던은 교축 방향과 직교되게 배치되며, 두께에 비하여 길이가 길므로 슬래브 면에 대해서는 평면 응력 상태(plane stress)로 가정할 수가 있고, 긴장력이 일정한 간격으로 작용하므로 단면에 대해서는 평면 변형 상태(plane strain)로 고려할 수가 있다. 일반적으로 차량 하중과 풍하중, 온도하중 등에 대하여 슬래브의 횡방향으로 포스트텐션하게 되는데, 교량 단면에 대한 횡방향 프리스트레스 설계는 평면 변형 상태이므로 단위길이당 보로 보아 설계한다. 평면 응력 상태의 슬래브 모델은 정착부에서 가장 위험하므로 따로 분리해서 모델링할 수 있다. 따라서 설계 모델의 교축에 대한

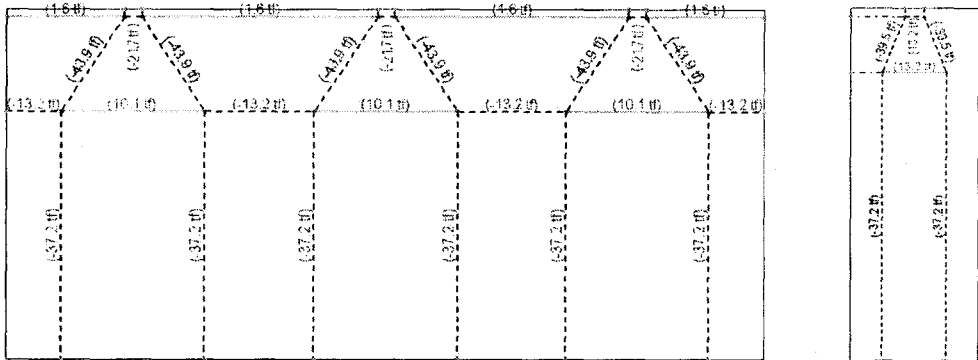
수직방향 길이는 정착부간 거리의 1.5배를 취하였으며(J. Schlaich) 이는 위험 영역을 충분히 포함하고 있다. 수평단면은 8절점 평면 응력 요소를 사용하였으며, 수직 단면에 대해서는 8절점 평면 변형 요소를 사용하여 유한요소해석을 하였다. 경계조건은 PSC 박스거더교량 슬래브에서와 유사하게 하중재하 방향으로 끝단을 고정시키고 하중방향에 수직한 방향은 한쪽 단을 힌지로 하였다.

유한요소 해석 결과와 기존의 다양한 연구 결과를 바탕으로 각 실험 부재에 대해 스트럿-타이 모델을 구성하였다. 교축방향에 대한 수평면의 스트럿-타이 모델은 똑같은 형태가 반복되므로 앞서 수행한 유한요소해석 모델에서 교축방향 길이의 절반까지만 스트럿-타이 모델을 구성하였다.

소성 이론에 따라서 힘의 도입부에서 지압판의 아래는 썩기형의 dead zone이 형성된다. 국부 영역 부분에 있어서 절점은 정착판의 길이 1/4만큼 깊이 에 위치하며, 이등변 삼각형의 응력 썩기를 가정할 수 있다. 이를 바탕으로 차원화 과정을 거친 후 설계기준에 대한 스트럿과 절점의 안정성 검토 결과 모두 만족하였다.



(a) 압축응력 (b) 인장응력
그림 6 슬래브 정착부의 주응력 흐름



(a) Horizontal plane (b) Vertical plane
그림 7 슬래브 정착부의 스트럿-타이 모델

4.3 시공 이음부의 단부 정착부

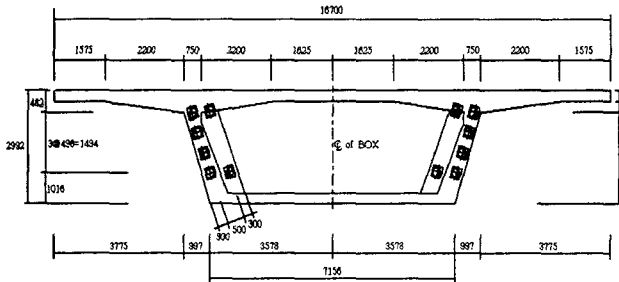
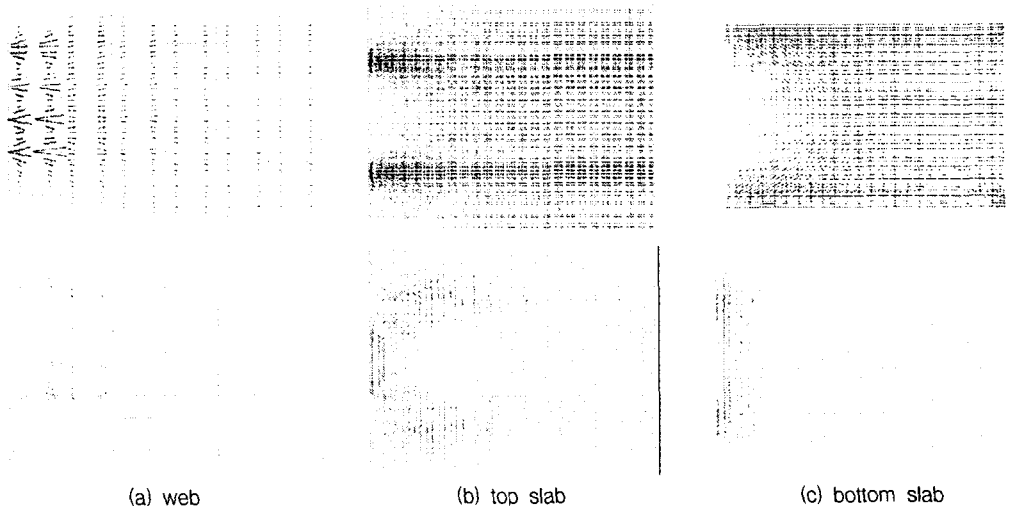


그림 8 시공 이음부의 단부 정착부 설계 대상 단면

따라 먼저 단순보 이론에 근거하여 단면의 상하부 슬래브에 작용하는 압축력을 계산하였다. 경계조건으로는 단부에서 교축방향변위를 구속하였고, 단부 하단 끝에서 교축에 수직상향변위를 구속하였다. 하중으로는 교축 방향의 프리스트레싱을 정착판의 크기를 고려하여 대상 단면에 작용시켰다. 해석을 위한 박스 거더의 기하학적 형상은 실제 단면 형상을 단순화시킨 기본 모델을 채택하였다. 실제 구조

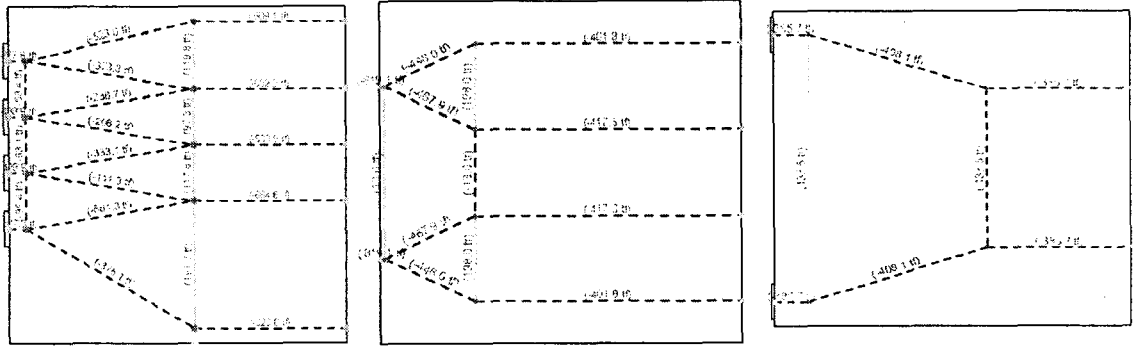
내부 텐던의 경우 각 부재별 이차원 스트럿 타이 모델 개발이 가능하다. 따라서 각 부재별(웹(web), 상·하부 슬래브) 이차원 주응력 흐름을 파악하기 위해 선형 탄성 삼차원 유한 요소 해석이 수행되었다. 상하부 슬래브에서의 힘의 분산은 단부 정착부의 힘들이 실제로 플랜지에 도달한 후에 일어난다. 이런 분산이 일어나기 전에는 단부 정착부에 바로 인접한 단면 부분만이 긴장력에 유효하게 저항한다. 이에

물과 단순화된 기본 모델사이의 차이는 다소 있지만 전체적인 구조물의 거동과 응력 분포는 두 가지 경우 모두 거의 동일하다. 이에 따라 단순화된 기본 모델의 유한요소 해석을 통해 주응력 흐름을 파악한 후 실제 단면 형상에 대해 하중경로법에 의해 스트럿-타이 모델을 개발하였다.



(a) web (b) top slab (c) bottom slab

그림 9 단부정착부의 주응력흐름(위:압축응력, 아래:인장응력)



(a) web (b) top slab (c) bottom slab

그림 10 단부정착부의 스트럿-타이 모델

5. 소요철근량 산출 및 국내 설계 사례와의 비교

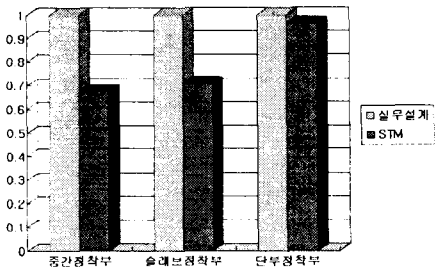


그림 11 국내설계사례와의 소요철근량 비교

구성된 스트럿-타이 모델을 해석하여 정착부의 보강 철근량을 산출하였다. 일반적으로 정착부 보강 철근의 설계는 크게 2개의 단계를 거쳐 이루어진다. 첫 번째로는 배치된 각각의 정착구를 통해 전달되는 힘이 직접적으로 영향을 미치는 부분에 대해 보강 철근을 산정하고 다음 단계로 anchor block의 전체적인 평형을 고려하여 2차 보강을 실시하는 것이다. 그림 11은 스트럿-타이 모델을 해석하여 산출한 정착부 보강 철근량과 국내 설계 사례에서 산출된 보강 철근량을 비교하여 그래프로 나타내고 있다.

그래프에서 알 수 있듯이 스트럿-타이 모델을 통해 구한 보강 철근량이 현행 구조 설계 실무보다 약 6~30% 작게 산출되었다. 이는 현재 실무에서 사용하고 있는 방법이 역학적 거동을 정확히 반영하고 있지 못하며, 다소 경험과 여러 가정들의 도입에 의존한 과보수적 설계에 기인한다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 설계 방법 및 관련 설계 기준의 규정이 명확하게 정립되어 있지 않은 PSC 박스거더교의 정착부에 대해 스트럿-타이 모델을 적용하여 합리적이고 일관된 설계법의 개발에 목적을 두고 있다.

- (1) 응력 흐름을 잘 파악하여 Strut과 Tie를 배치하고 각 트러스 부재들의 기하학적 조건을 만족하는 적합한 모델을 구성한다면, 스트럿-타이 모델은 PSC 박스거더교의 정착부와 같은 구조물에 있어서 파열응력, 박리응력과 같은 인장영역의 힘을 산출하고 보강철근을 설계하는데 매우 편리하며 합리적인 방법으로 판단된다.
- (2) 유사한 해석 대상 모델에 대해 수행한 몇몇 국내 설계 사례를 비교한 결과 주로 Leonhardt의 설계식에 기초하고 있으나, 일부 인장력들에 대해서는 서로 상이한 산출식을 사용하고 있으며 보강 철근량에서도 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다.
- (3) 스트럿-타이 모델을 이용하여 산출한 정착부의 보강 철근량은 현행구조설계실무의 설계사례와 비교해 볼 때 약 6~30%의 감소를 보였다. 이를 통해 기존의 설계 방법이 실제 구조물의 거동을 정확히 반영하지 못하고 있으며, 지나치게 보수적 설계가 이루어지고 있음을 입증하였다.
- (4) PSC 박스거더교의 정착부 중 대표적 형상들에 대해 스트럿-타이 모델을 이용한 설계 예를 제시하였으며, 본 설계 플로우를 통해 실무에서도 좀 더 합리적이고 경제적인 설계가 이뤄질 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. J.E. Breen, O. Burdet, C. Roberts, D. Sanders and G. Wollmann, "Anchorage zone reinforcement for post-tensioned concrete girders," National Cooperative Highway Research Program Research Report, The University of Texas at Austin, August 1991.
2. G. P. Wollmann, C. L. Roberts, "Chapter VIII Anchorage zone design," PTI Guide Specification, October 2000.
3. F. Leonhardt, "Prestressed Concrete-Design and Construction," Wilhem Ernst and Sohn, Berlin, 1964.
4. J. Schlaich, K. Schafer, M. Jennewein, "Toward a Consistent Design of Reinforced and Prestressed Concrete Structures," PCI Journal, Vol. 32, No. 3, May-June 1987.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary(ACI 318R-02)," American Concrete Institute, Michigan, 2002.
6. Texas Department Transportation, "Detailing in Structural Concrete," Research Report 1127-3F, The University of Texas at Austin, May 1988.
7. D. M. Rogowsky, P. Marti, "Detailing For Post Tensioning," VSL Report, VSL International, Bern Switzerland, 1991.