

# 스트럿-타이 모델을 이용한 프리스트레스트 더블 T형 보의 정착부 거동 연구

## A Study on Behavior for Anchorage Zone in Prestressed Double T Beam Using Strut-Tie Model

김 종 욱\*            이 두 성\*\*            민 창 식\*\*\*  
Kim, Jong Wook    Lee, Doo Sung        Min, Chang Shik

---

### ABSTRACT

This thesis is a study on behavior for anchorage zone in prestressed double T beam using strut-tie model. Stress conditions of Anchorage zone in prestressed double T beam are very disturbed because large concentrated forces act on relatively small areas. Hence, anchorage zone must be considered in Design of prestressed double T beam. If irrational design or irrational construction be conducted, that may lose stability in capacity as structure.

In current design practice, certain parts of structure are designed with extreme accuracy, while anchorage zone in prestressed double T beam is designed using common sense, and experience. Therefore, it is generally very conservative. For that reason, logical, reasonable concept and accuracies are desired at design of anchorage zone in prestressed double T beam. Strut-tie method satisfies those desires. In this thesis, anchorage zone in prestressed double T beam is analyzed by considering prestressing forces. Strut-tie model is constructed based on principle stress trajectory obtained from 3D-finite element analysis in anchorage zone, and amounts of reinforcement be obtained. Results of analysis are compared with the way used in current design practice, and this thesis presents that strut-tie model can be an economical design than current design methods without losing the degree of safety.

---

### 1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 교량으로 대표적인 것이 T형 단면을 가지는 교량이다. 2차 대전 이후, 한정된 자원으로 내구성이 강하며 안정성이 높은 교량의 건설 필요성이 대두되었고 이에 따라 1949년, Homberg에 의해 독일에서 더블 T형 보가 처음으로 적용되었다. 이후, 프리스트레스트가 본격적으로 도입이 되면서 더블 T형 보의 사용은 폭이 넓고 교량이 높이가 크며 폭이 작은 두 개의 주형을 적용

---

\* 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 석사과정

\*\* 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 동국대학교 토목환경공학과 교수

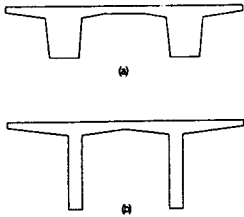


그림 1 더블 T형 보의 종류

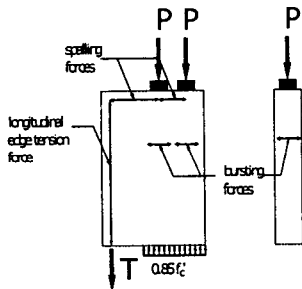


그림 2 정착부에서 발생하는 인장응력

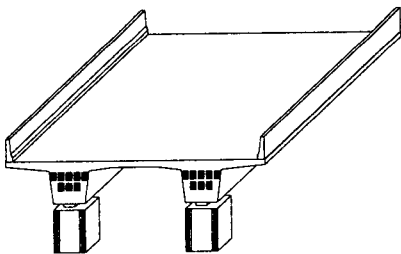


그림 3 더블 T형 보의 전경

하는 형태로 발전되어졌다. 더블 T형 교량은 크게 두 가지로 구분이 된다. 최근 유럽에서는 단면의 경제성이 높은 1.(b)보다 비틀림 강성과 진동에 유리한 1.(a)와 같은 형상의 더블 T형 교량의 시공이 주류를 이루고 있다. 따라서 본 논문에서 다루고자 하는 대상 구조물 또한 1.(a)와 같은 형상의 교량을 선택하였다.

그림 2에 보이는 바와 같이 프리스트레스트 콘크리트 교량의 정착부는 상당히 많은 하중들이 뒤섞여 매우 불안정한 응력상태를 보이는데 직접적으로는 도입된 긴장력의 영향을 가장 많이 받으며, 인접한 부분에 있는 교량의 지점 반력, 또한 교량 자체의 자중과 교량의 활하중들이 섞여 응력의 상태가 매우 교란되어져 있다. 따라서 합리적이고 논리적인 설계와 시공이 반드시 요구되는 부분이다. 그렇지 않을 경우, 교량 전체의 안정성을 확보하는 긴장력이 안정성에 기여하지 못하는 상황으로 발전될 가능성이 크며 이는 곧 치명적인 교량의 파괴로 이어질 가능성이 높다. 그러므로 프리스트레스트 교량의 설계 시, 정착부는 반드시 검토되어야 하는 영역이며 이는 교량의 안전과 밀접한 관계를 가진다. 현재 유럽과 캐나다, 그리고 AASHTO 설계 시방서에서는 프리스트레스트 교량에 스트럿-타이 모델의 사용을 추천하고 있다. 본 논문에서는 기존의 탄성이론으로는 정확한 해석과 설계가 어려운 프리스트레스트 더블 T형 교량의 정착부에 대하여 스트럿-타이 모델을 적용하여 해석, 설계하고 그 결과를 현행 구조설계 실무에서 사용하는 방법과 비교하여 스트럿-타이 모델 적용의 타당성을 검증하였다.

### 2. 3차원 유한요소 해석과 스트럿-타이 모델 구성

본 논문에서 연구 대상 교량은 프리스트레스트 더블 T형 교량으로서 교폭 16.2 m의 교량이다.

정착구는 각각 30 cm×30 cm로 한쪽 girder에 8개씩, 총 16개의 정착구를 가진다. 한쪽 girder에 사용된 8개의 정착구는 2단으로 배치되었으며 5개의 정착구는 상부 플랜지의 70 cm 아래에 정착구의 중심이 위치하도록 설계되었으며 나머지 3개의 정착구는 5개의 정착구가 배치된 지점 바로

아래 50 cm의 중심간격을 갖도록 배치되었다. 하단의 3개의 정착구 중심은 상단의 5개의 정착구 중, 가운데 3개의 정착구와 나란히 배치되었다. 또한 각각의 정착구 사이의 중심간격은 50 cm로 배치되었다. 해석 대상 구조물의 전경은 그림 3에 보이는 바와 같다. 더블 T형 교량은 단면이 대칭이므로 본 논문에서는 두 개의 girder중 하나의 girder에 대해 해석하였다. 복부의 폭은 2m~2.5m의 사다리꼴이며 형고의 높이는 2m이다. 해석 모델의 축방향 길이는 총 6m로 정착부의 반대되는 끝단은 완전히 고정시켰다. 이는 캔틸레버 지점의 영향은 주형의 높이의 3배의 길이에서는 영향을 미치지 않기 때문이다. 본 논문에서는 정착부에 대한 해석이 목적이므로 긴장력이 손실되기 이전의 하중 상

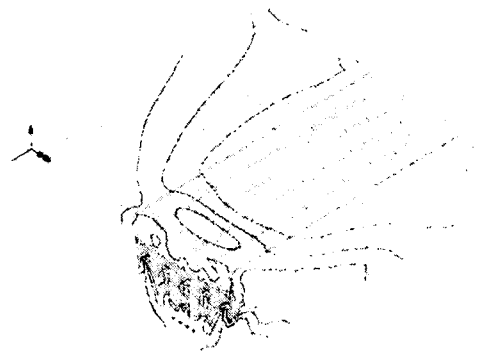


그림 4 긴장력 도입 시 최대 주응력도

표 1 3차원 유한요소 해석 자원

사용프로그램	LUSAS 13.3 (영국 FEA사)
적용유한요소	32절점 Solid 요소
Model의 범위	교량의 시점부터 6 m의 범위까지 고려
하중 적용방법	계산된 긴장력을 면하중으로 정착구면적에 재하
해석의 범위	선형탄성해석

표 2 증방향 스트럿-타이 모델 해석 결과

부재 번호	부재력 (Tonf)	부재 번호	부재력 (Tonf)
NO. 1	1054.69	NO. 9	1157.23
NO. 2	1171.88	NO. 10	1362.3
NO. 3	703.12	NO. 11	734.253
NO. 4	673.83	NO. 12	1111.46
NO. 5	439.45	NO. 13	1300.35
NO. 6	128.17	NO. 14	468.75
NO. 7	294.9	NO. 15	1104.08
NO. 8	1189.73	NO. 16	666.36

태를 고려하였으며 따라서, 재하 하중은 구조물 자중과 긴장력만 주어졌다. 현행 설계 실무 방법과 비교하기 위하여 한국도로공사에서 발간한 도로설계실무편람에서 제시하는 프리스트레스트 더블 T형 교량 모델의 자원과 물성치를 그대로 사용하였다. 사용 프로그램은 LUSAS 13.3을 사용하였으며, 32절점 Solid 요소를 사용하여 모델링하고 해석하였다. 그에 따른 해석 결과로 그림 4는 긴장력 도입 시 최대 주응력도를 나타내고 있다. 3차원 유한 요소 해석이 수행된 이후, 적절한 스트럿-타이 모델을 구성하기 위하여 증방향으로 가장 응력이 집중되는 면을 잘라 주응력을 조사하였다. 그림 5는 긴장력 도입 시 정착부에 대한 최대 주응력도 및 벡터를 나타내고 있으며 그림 5에서 보여지는 주응력도와 벡터를 가지고 스트럿-타이 모델을 구성하였다. 구성되어진 스트럿-타이 모델을 해석한 결과 각각의 구성 요소들의 부재력과 부재의 크기가 결정되었다. 해석된 결과는 표 2과 3에 정리하였다.

### 3. Strut-Tie Model을 이용한 프리스트레스트 더블 T형 보의 정착부 해석

스트럿-타이 모델은 각각 최대 단면력이 발생하는 임계 절점 영역을 가지고 있다. 정착부의 경우, 부재 No. 1과 No. 5, 그리고 No. 8로 구성되어지는 절점이 가장 큰 부재 단면력을 가지

표 3 인장타이 부재력과 단면적

부재 번호	부재력(Tonf)	단면적( $cm^2$ )
*Tie(a)	435.791	108.95
Tie(b)	314.941	78.95
Tie(c)	305.786	76.45

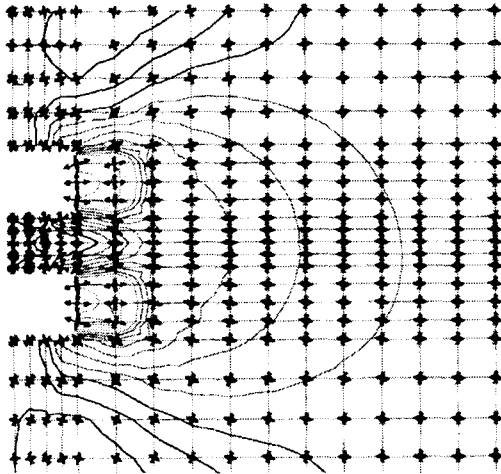


그림 5 정착부 주응력선도 및 벡터

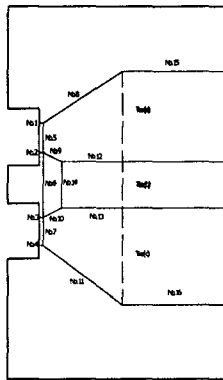


그림 6 스트럿-타이모델

고 있으므로 이 절점은 반드시 안전을 검토해야 하는 특이 절점에 해당한다. 본 논문에서 이용한 스트럿의 단면력과 인장 타이의 단면적의 계산, 그리고 스트럿의 유효강도 계산은 AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPEC.(1998)이 제시하는 기준들을 사용하였다. 따라서 절점영역의 안정성 검토 역시, AASHTO (1998)가 제시하는 식을 사용하였다. AASHTO (1998)는 오직 압축 스트럿에 의해 경계가 결정되어지는 절점 영역에서 허용압축응력을  $0.85 \phi f'_c$ 으로 제한하고 있다. 따라서 검토해야 할 절점에서 발생하는 압축응력은  $340 \text{ kgf/cm}^2$ 이며 가장 큰 부재력을 발생하는 No. 1에서의 단면적과 곱하면  $1054.69 \text{ tonf}$ 으로 No. 1의 부재력과 동일한 값을 얻게 된다. 따라서 절점영역의 강도조건을 만족하고 있으므로 안전하더라도 말할 수 있다.

구성된 스트럿-타이 모델을 해석하여 정착부 보강 철근량을 산출하였다. 스트럿-타이 모델의 해석을 수행한 결과, 일반구역의 보강 철근량은  $108.95 \text{ cm}^2$ 로 산출되었다. 전통적으로 정착부 보강 철근의 설계는 크게 2개의 단계를 걸쳐 이루어진다. 첫 번째로는 배치된 각각의 정착구를 통해 전달되는 힘이 직접적으로 영향을 미치는 부분에 대하여 보강 철근을 산정하고 다음 단계로 Anchor Block의 전체적인 평형을 고려하여 Block의 높이에 대해 2차 보강을 실시하는 것이다. 이러한 설계의 바탕은 탄성해석의 결과이다. 그림 7은 스트럿-타이 모델을 해석하여 산출한 정착부 보강 철근량과 현행 구조 설계 실무에서 사용하는 방법에 의해 산출한 정착부 보강 철근량을 그래프로 나타내고 있다. 결과적으로 현행 구조 설계 실무에서 사용하는 방법에 의한 정착부 보강 철근량과 본 논문에서 구성된 스트럿-타이 모델을 이용하여 산출한 정착부 보강 철근량을 비교하면 스트럿-타이를 이용한 보강 철근량이 상당히 작게 산출되었음을 알 수 있다. 보강 철근량의 경우, 현행 구조 설계 실무에서 사용하는 방법에 의해 계산된  $154 \text{ cm}^2$ 에 비해 31.4% 감소된 철근량을 나타낸다. 이러한 결과의 이유는 현행 구조 설계 실무에서 사용하고 있는 방법은 실제 구조물의 역학적 거동을 정확히 반영하기보다는 실험결과에 근거한 여러 가정들을 도입하여 보강 철근

량을 산출하므로 실제 구조물의 역학적 거동을 잘 반영하는 스트럿-타이 모델 해석결과와 차이가 나타나게 되는 것으로 보인다. 현행 구조 설계 실무에서 사용한 방법은 탄성이론에 근거하여 Prism의 크기를 실험 결과에 의존함으로써 실제 구조물에서의 응력 결과와는 차이를 보인다. 반면에 스트럿-타이 모델 해석에 의한 보강 철근량 산정은 실제 구조물의 응력 결과를 근거하여 모델을 구성하고 해석함으로써 실제 구조물의 기하학, 하중 등을 잘 반영하고 있다. 또한 현행 구조 설계 실무에서는 Anchor Block의 전체적인 평형을 고려한 2차 보강 철근량을 산정할 때, Block의 단면 전체에 압축력만이 작용한다고 가정하고 상부와 하부의 압축력을 각각 계산하여 모멘트와 전단응력을 구한 후, 이 때 구한 전단 응력을 가지고 보강철근 설계를 수행하였다. 그러나 본 연구에서 수행한 결과에 의하면 정착구가 보 단면의 상부에 위치함으로 인해 보의 하단에는 어느 정도의 인장력이 발생한다는 것이 증명되었다. 이처럼 프리스트레스트 교량에서 보의 하단의 인장을 고려하는 것이 최근의 추세이며 기존의 구조 설계 실무에서 사용하는 방법은 상당히 고전적인 설계개념이라고 말할 수 있다. 그러므로 응력은 단면이 완전히 압축력만을 지지할 때의 값과 차이를 보였다고 판단된다. 따라서 보강 철근량은 감소하였으며 기존의 고전적 설계보다 더욱 경제적인 설계가 가능하게 되었음을 보였다. 그림 8은 해석 결과에 따른 정착부 배근 상세를 보이고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기존의 명확한 거동을 파악하기 어려운 프리스트레스트 더블 T형 보의 정착부 해석을 위하여 3차원 유한요소해석을 통하여 구조물의 응력상태를 명확히 파악한 후, 응력교란을 고려한 대한 스트럿-타이 모델을 구성하였다. 이렇게 구성된 스트럿-타이 모델을 해석하여 각각의 부재력을 산출하였으며 구성된 스트럿-타이의 적합성 및 임계 절점 영역에서의 안정성과 부재력을 바탕으로 하여 AASHTO가 제안하는 방법을 이용하여 각각의 스트럿과 타이의 단면적을 산출했다. 그에 따라 정착부 보강 철근량을 산출하였다. 그 결과, 현행 구조 설계 실무에서 이용하는 방법과 약 30%의 보강철근량의 감소를 보이고 있다. 이는 기존의 설계 방법이 지나치게 실험결과에 의존하여 산출하는 방법이며 또한 실제 구조물의

증방향 보강철근량

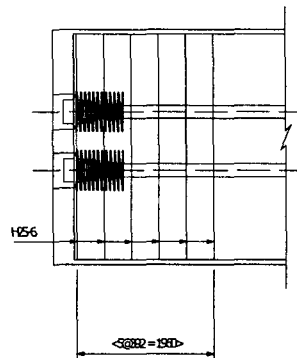
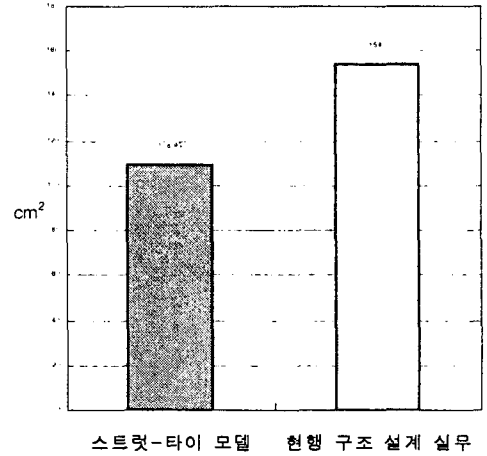


그림 8 정착부 배근 상세도

거동을 정확히 반영하지 못하는데서 그 원인을 찾을 수 있다. 스트럿-타이 모델을 이용하여 도출된 보강 철근량과 현행 구조 설계 실무에서 사용하는 방법으로 구한 보강 철근량과 비교하여 스트럿-타이 모델을 이용한 설계가 더 경제적이며 합리적인 설계방법이라는 것을 보였다.

#### 감사의 글

\* 본 연구를 수행하는 동안 많은 조언과 도움을 아끼지 않으신 경북대학교 윤영목 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

#### 참고 문헌

1. “도로설계실무편람”, 한국도로공사, 1996.
2. 윤영목, “스트럿-타이 모델에 의한 콘크리트 부재의 해석 및 설계,” *콘크리트 학회지* 제10권 1호 1998.
3. 윤영목, “스트럿-타이 모델에 의한 콘크리트 부재 설계 방법의 고찰,” *콘크리트학회 봄 학술 발표회 논문집*, 2001.
4. 윤영수, 이만섭, “현행 구조설계기준에서 트러스 모델 개념의 적용,” *콘크리트 학회지* 제 10권 1호 1998.
5. American Association of State Highway Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, AASHTO, Washington D.C., SI Units, 2nd Edition, 1998.
6. ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion, “Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No 12, December, 1998.
7. CEB-FIP *Model Code for Concrete structures*,(1991) international system of unified standard codes of practice for structures, Comité Euro-International du beton, Paris.
8. D. Mitchell, and M. P. Collins, *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall, 1991.
9. Macgregor, James G., *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice Hall, 1997.
10. Mörsh, E., “Über die Berechnung der Gelenkquader,” (Design of Joint), *Beton und Eisen*, No.12, 1924.
11. Nawy, E. G., *Prestressed concrete*, Prentice Hall, 1996.
12. Nilson, A. H. *Design of Concrete Structures*, Mcgraw-Hill, 1997.
13. Nilson, A. H., *Design of Prestressed Concrete*, Wiley, 1987.
14. Park, R. and Paulay, T. *Reinforced Concrete Structures*, Wiley, 1975.
15. Ramirez, J. A., “Strut-Tie Design of Pretensioned Concrete Members,” *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 4, September-October, 1994.
16. Schlaich, J., Schaefer, K. and Jennewein, M., “Towards a Consistent Design of Structural Concrete,” *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 32, 1987.
17. Yun, Y. M., “Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete,” *ACI Structural Journal*, V. 97, No. 4, July-August 2000.