

비선형 스트럿-타이 모델에 의한 PC 구조물의 정착부 설계

Design of Anchorage Zone in Prestressed Concrete Structure Using Nonlinear Strut and Tie Model

배한욱*
Bae, Han-Ug

변근주**
Byun, Keun-Joo

송하원***
Song, Ha-Won

Abstract

In this paper, design and analysis of anchorage zone in prestressed concrete structure using nonlinear strut and tie model is presented. Nonlinear strut and tie model is an analysis and design model which constructs strut and tie model based on nonlinear analysis considering the nonlinear behavior of concrete.

Based on the nonlinear strut and tie model, the analysis and design are performed for the anchorage zone having singular concentric tendons, singular eccentric tendons and multiple tendons, respectively. For verification of the model, comparisons are made with experimental results as well as results by linear strut and tie models. From the comparisons, it is shown that the design of the anchorage zone by the nonlinear model is still economical without losing the degree of safety and the prediction of the ultimate load by the nonlinear model gives better accuracy than by the linear one.

1. 서 론

최근 건설되고 있는 콘크리트 교량은 교량의 지간이 길어짐에 따라 대부분이 프리스트레스트 콘크리트 교량으로 시공되고 있다. 프리스트레스트 콘크리트 교량의 구성부재중 긴장장치를 사용하여 프리스트레싱 강재에 긴장력을 도입할 때 정착장치의 주위와 하단에 집중하중이 발생하여 응력상태가 교란된 영역을 정착부(anchorage zone)라 한다. 이 정착부에는 구조물의 단면에 비하여 매우 큰 집

* 정회원, 롯데건설 기술연구소 연구원

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

중하중이 발생하므로 정착부에 대한 합리적인 설계와 시공이 이루어지지 못하는 경우에는 바로 구조물의 붕괴로 이어지게 된다. 그러므로 정착부는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 설계시에 반드시 검토되어야 하는 영역이다.

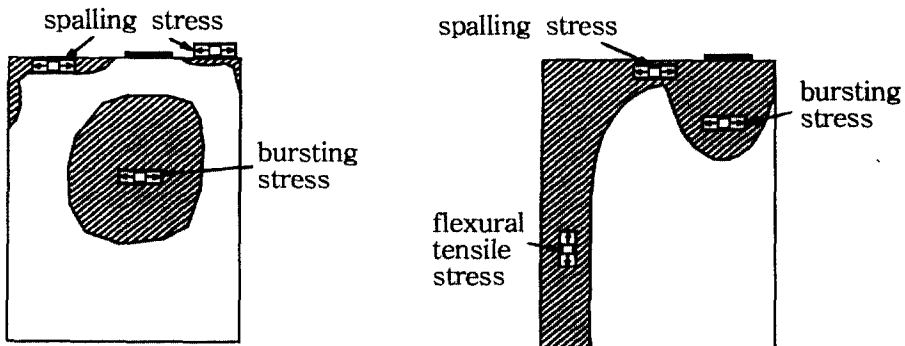
구조물은 기종이론으로 정확한 해석이 가능한 B영역(*beam or Bernoulli region*)과 기하학적 또는 역학적 불연속성이 존재하여 해석에 어려움이 있는 D영역(*discontinuity or disturbance region*)으로 나눌 수 있다.⁽¹⁾ 정착부는 집중하중의 도입으로 인해 응력상태가 교란되는 D영역에 해당된다. D영역에 대한 유한요소법에 의한 설계와 해석은 최근에 컴퓨터의 발달과 더불어 널리 사용되고 있으나, 철근 콘크리트부재가 갖는 재료의 특성과 비선형성으로 인하여 정확한 해를 구하기가 쉽지 않고 만족할만한 해를 구할 수 있다 하더라도 많은 계산량과 시간이 소요된다. 따라서 B영역과 D영역을 포함하는 구조물에 대하여 간단하면서도 정확도를 갖는 해석방법과 설계개념이 필요한 실정인데, 이 방법으로 제시되고 있는 것이 스트럿-타이 모델이다. 이 모델은 해석대상 재료가 강재에 해당되는 타이와 무근 콘크리트에 해당되는 스트럿으로 구성되는 트러스 구조로 모델링되므로 이에 대한 해석이 간단하고 정확도가 높다는 점이다.

최근 대부분의 콘크리트 및 도로교 표준 시방서는 선형 스트럿-타이 모델을 정착부의 설계에 사용하도록 권장하고 있고, 일부 연구자들이 그 응용방법을 제시하고는 있으나, 모두 탄성해석을 기초로 하고 있으므로 실제 구조물의 비선형거동을 반영하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 소위 비선형 스트럿-타이 모델⁽²⁾을 이용하여 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 정착판 위치변화에 따라 발생하는 응력의 흐름을 분석하고, 정착부의 설계를 수행한다.

또한 극한하중을 구하여 선형모델에 의한 결과와 비교하고, 실험결과치와의 비교를 통하여 비선형 스트럿-타이 모델을 검증하고자 한다.

2. 비선형 스트럿-타이 모델을 이용한 정착부의 설계 및 해석

프리스트레스트 콘크리트 구조물에 긴장력이 도입되면 긴장재는 인장력을 받게 되고 긴장재의 인장력은 정착구를 거쳐서 콘크리트 부재에 압축력 형태의 집중하중으로 작용하며, 이 정착부에서는 작용하중에 의해 교란된 응력상태로 인하여 정착판아래의 압축응력과 그림 1과 같이 여러 가지 형태의 인장응력들이 발생한다. 그 중에는 정착판 바로 아래 발생하는 높은 압축응력인 지압응력, 정착판에서



(a) 단부 1/3지점 내부 재하

(b) 단부 1/3지점 외부 재하

그림 1 정착구의 위치에 따른 인장응력의 발생영역과 방향

크게 나타났다.

각 시편에 대하여 비선형 유한요소해석에 의한 주응력궤적선의 방향, 횡방향응력의 분포를 고려하

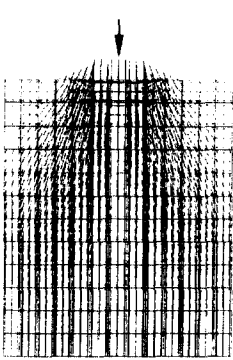


그림 7 B1시편의 응력 궤적선

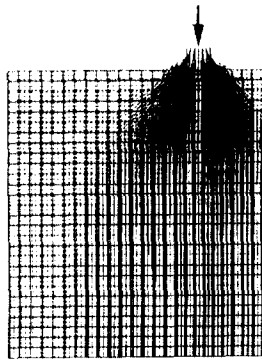


그림 8 E6시편의 응력 궤적선

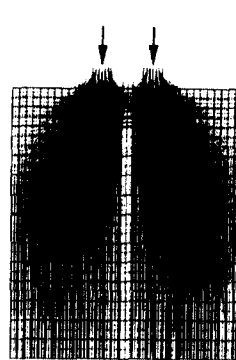


그림 9 M1시편의 응력 궤적선

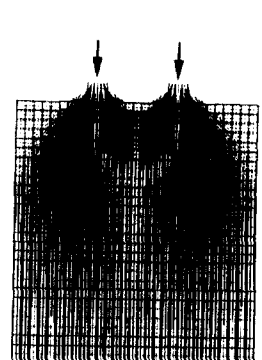


그림 10 M4시편의 응력 궤적선

여 그림 11~14와 같이 비선형 스트럿-타이 모델을 구성하였다.

B1, E6, M1, M4시편에서 극한하중하에서 항복이 발생하는 인장타이의 위치에 배근할 철근량의 비교를 위해 수행된 선형 스트럿-타이 모델과 비선형모델에 의한 산출결과를 수록하면 표 1과 같다. 철근의 배근위치는 스트럿-타이 모델에서 인장타이가 위치한 곳에 배근한다.

표 1에서 보는 것과 같이 실제배근된 철근량보다 선형 또는 비선형 모델을 사용하여 설계된 철근량이 많으므로 스트럿-타이 모델을 이용하는 경우 안전측의 설계가 가능함을 알 수 있다. 또한 두 모델중 비선형 모델의 비선형 해석을 통한 설계가 선형 모델에 의한 설계보다 경제적임을 알 수 있다. B1, E6, M1, M4시편에 대하여 극한하중을 구하였다. 선형 스트럿-타이 모델에 의한 해석결과, 비선형 스트럿-타이 모델에 의한 해석결과 그리고 실험결과의 비교는 표 2와 같다.

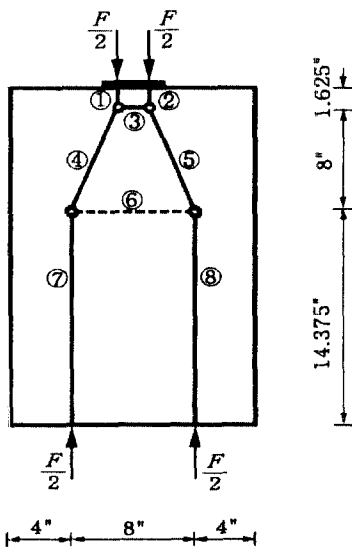


그림 11 B1시편의 비선형 모델의 구성

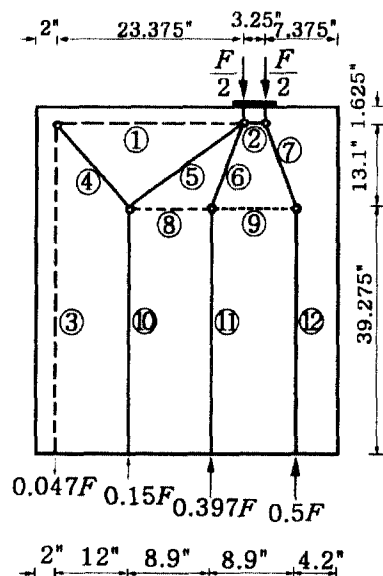


그림 12 E6시편의 비선형 모델의 구성

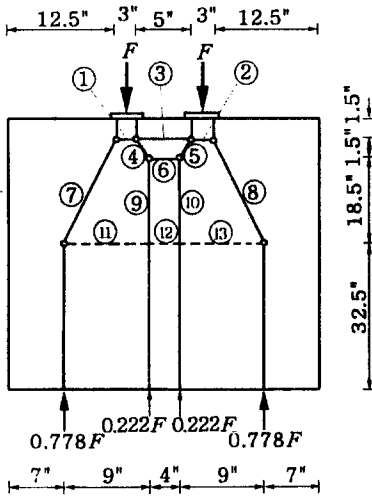


그림 13 M1시편의 비선형 모델의 구성

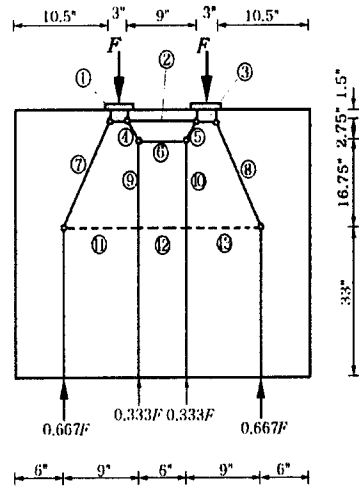


그림 14 M4시편의 비선형 모델의 구성

표 1 B1, E6, M1, M4시편에 대한 스트럿-타이 모델을 이용한 설계결과와 배근철근량의 비교 (1in=2.54cm)

Specimen	Design member	A_s by linear STM	A_s by nonlinear STM	A_s (tested specimen)
B1	⑥	0.972 in ²	0.847 in ²	0.800 in ²
E6	⑨	0.665 in ²	0.628 in ²	0.489 in ² *
M1	⑩, ⑪, ⑫	1.048 in ²	0.971 in ²	0.880 in ²
M4	⑩, ⑪, ⑫	1.116 in ²	0.945 in ²	0.880 in ²

표 2 B1, E6, M1, M4시편의 극한하중에 대한 스트럿-타이 모델의 해석결과와 실험결과와의 비교

Specimen	Linear STM	Nonlinear STM	Test	$\frac{\text{Test}}{\text{Linear STM}}$	$\frac{\text{Test}}{\text{Nonlinear STM}}$
B1	301kips	345kips	366kips	1.22	1.06
E6	256kips	271kips	348kips	1.36	1.28
M1	255kips	276kips	304kips	1.19	1.10
M4	324kips	383kips	411kips	1.27	1.07

B1, E6, M1, M4시편은 좌열응력에 대하여 파괴가 발생하도록 제작된 시편이다. 이 시편들에 대하여 모델을 구성하여 해석한 결과, 모두 인장타이에 의한 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. Breen의 실험결과⁽⁴⁾는 선형 모델에 의한 극한하중보다 평균 1.26배, 비선형 모델의 비선형 해석에 의한 극한하중보다 평균 1.13배정도의 하중에서 파괴되었다.

네가지 시편에 의한 설계철근량과 극한하중의 추정결과로 볼때 선형 스트럿-타이 모델을 이용한 프

리스트레스트 콘크리트 정착부의 설계는 충분한 안전성을 포함하고 있지만 지나친 과다설계가 되고, 극한하중의 추정도 비선형 스트럿-타이 모델을 사용한 경우보다 과소하게 추정함을 알 수 있다. 즉, 비선형 모델을 구성하여 해석을 하는 경우 좀더 정확하게 극한하중을 추정할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

비선형 스트럿-타이 모델을 도입하여 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 정착부 해석에 관한 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 기존의 설계개념으로는 설계가 어려운 구조요소(D영역)의 합리적인 설계가 가능하도록 하기 위하여 첫 단계에서 무근 콘크리트부재의 비선형 유한요소해석 결과로부터 응력계적을 도출 하고, 두번째 단계에서 응력계적에 근거한 스트럿-타이 모델을 구성하고, 세번째 단계에서 모델의 비선형 구조해석으로부터 철근량의 설계 및 극한하중을 해석하는 비선형 스트럿-타이 모델해법을 구축하였다.
- 2) 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 정착부 단면 중앙에 긴장력이 도입되는 경우, 편심으로 긴장력이 도입되는 경우, 2개의 정착구가 존재하는 경우에 대하여 비선형 스트럿-타이 모델에 의하여 해석 및 설계를 수행하였다.
- 3) 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 정착부 보강철근의 설계 및 극한하중의 해석에는 비선형 스트럿-타이 모델이 선형모델에 비하여 합리적이고 경제적인 설계방법임을 구명하였다.

참 고 문 헌

1. Schlaich, J., Schafer, K. and Jennewein, M., "Towards a Consistent Design of Structural Concrete", Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 32, 1987, pp. 74-150.
2. 윤영목, 박문호, "콘크리트구조물의 해석 및 설계를 위한 비선형 스트럿-타이 모델 방법", 한국 콘크리트학회가을 학술발표회 논문집, Vol. 8, No. 2, 1996, pp. 247-250.
3. Breen, J. E., Burdat, O., Robert, C., Sanders, D., and Wollmann, G., "Anchorage Zone Reinforcement for Post-Tensioned Concrete Girders", Report of Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, August, 1991.