

높이가 큰 프리텐션 콘크리트 보에서의 비선형 스트럿-타이 모델 방법

Nonlinear Strut-Tie Model Approach in Pre-tensioned Concrete Deep Beams

윤 영 목*

이 원 석**

Yun, Young Mook

Lee, Won Seok

ABSTRACT

This paper presents an evaluation of the behavior and strength of two pre-tensioned concrete deep beams tested to failure with using the nonlinear strut-tie model approach. In the approach, the effective prestressing forces represented by equivalent external loads are gradually introduced along its transfer length in the nearest strut-tie model joints, the friction at the interface of main diagonal shear cracks is modeled by diagonal struts along the direction of the cracks in strut-tie model, and additional positioning of concrete ties at the place of steel ties is incorporated. Through the analysis of pre-tensioned concrete deep beams, the nonlinear strut-tie model approach proved to present effective solutions for predicting the essential aspects of the behavior and strength of pre-tensioned concrete deep beams.

1. 서론

스트럿-타이 모델을 이용하여 응력교란 영역을 갖는 철근콘크리트 부재의 해석 및 설계에 관한 연구는 현재까지 많이 수행되었으나, 높이가 큰 프리스트레스트 콘크리트 보의 해석 및 설계에 관한 연구는 미미하다. 본 연구에서는 비선형 스트럿-타이 모델 방법을 이용하여 실험·파괴된 2가지 형태의 높이가 큰 프리텐션 콘크리트 보의 거동 및 강도를 예측하였다. 또한 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서 고려된 프리스트레스 힘의 점진적 도입, 골재에 의한 전단마찰, 그리고 철근타이의 위치에 추가적으로 배치된 콘크리트 타이 등이 높이가 큰 프리텐션 콘크리트 보의 거동 및 강도에 미치는 영향을 분석하였다.

* 김희원, 경북대학교 토목공학과 조교수

** 경북대학교 토목공학과 박사과정

2. PSC 부재에서의 스트럿-타이 모델

2.1. 프리스트레스 힘의 전달

프리스트레스 힘을 스트럿-타이 모델에 어떻게 적용하는가는 매우 중요하다. 본 연구에서는 프리스트레스 힘의 적용에 대한 Schlaich et al.⁽⁴⁾와 Alshegir 및 Ramirez⁽²⁾의 제안을 고려하고, AASHTO⁽⁴⁾에서 제안한 강재의 유효응력을 전달하는데 필요한 전달길이를 감안하여 유효프리스트레스 힘을 스트럿-타이 모델에 작용시켰다. 즉 유효프리스트레스 힘은 선형적으로 콘크리트에 도입된다고 가정하고 선형보간법에 의해 전달길이 내의 스트럿-타이 모델 절점에 작용시켰다.⁽⁵⁾

2.2. 진단마찰의 적용

PS강재의 초기 긴장력은 콘크리트에 미리 압축을 주어 균열발생진의 큰 하중에 대한 저항력을 향상시키며, 균열의 발생후에도 PS강재의 프리스트레스 힘에 인하여 균열폭이 제한됨으로 균열면 사이에 마찰력을 발생시킨다. 본 연구에서는 진단균열면에서의 마찰력을 하중작용점과 지지판 사이에서 균열방향의 경사 스트럿을 추가시켜 고려하였다. 추가된 스트럿의 강성(AE)으로는 스트럿-타이 모델의 해석 후 추가된 스트럿의 단면력이 스트럿-타이 모델의 수직타이인 스티럼으로부터 계산된 식 (1)의 마찰력과 동일할 때의 값을 취하였다.

$$F = \mu \sum F_{be} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

여기서 F_{be} 는 수직타이의 단면력, $\mu (=0.8)$ 는 콘크리트 균열면에서의 마찰계수, 그리고 θ 는 추가된 스트럿이 수평면과 이루는 각이다.

3. 높이가 큰 프리텐션 모의 해석

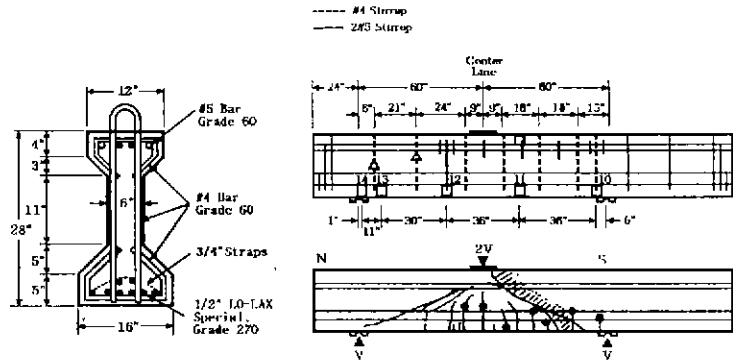
3.1 실험 프로그램

실험에 사용된 시험체는 길이 대 높이 비가 4.32에서 4.70사이의 값을 갖는 실제 크기의 프리텐션 AASHTO Type I과 Type II의 I형 보 부재이다⁽³⁾ 각 시험체의 단면형상, 철근배근도, 게이지의 위치, 그리고 파괴시의 균열양상은 Fig. 1과 같다.

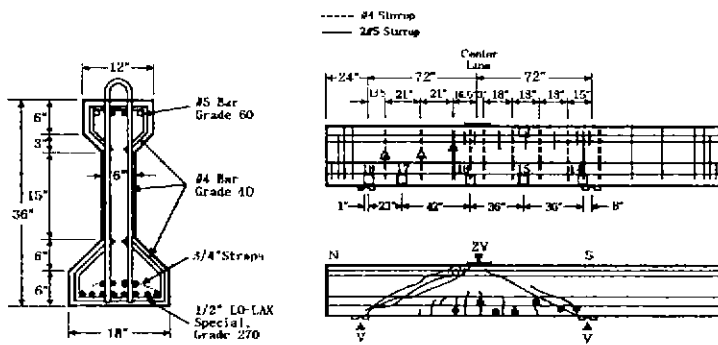
3.2 비선형 스트럿-타이 모델 방법의 적용

3.2.1 스트럿-타이 모델의 선정

본 연구에서는 스트럿의 방향과 위치는 주압축응력의 흐름을 근거로 하여 결정하였으며,⁽¹⁾ 타이의 위치는 실험 배근된 철근의 위치로 선택하였다. Fig. 2는 Beam 1-1A에 대한 하중단계 1과 2에서의 주압축응력의 흐름을 보여주고 있으며, 이를 근거로 선정한 스트럿-타이 모델은 Fig. 3과 같다. 강재의 맞물림 작용의 영향을 고려하기 위하여 Fig. 3의 36번 및 37번 스트럿의 위치에 추가적으로 각각 38번 및 39번의 스트럿을 배치하였다. 프리스트레스 힘은 유효프리스트레스 하중으로 취하여 동일한 외부하중으로 작용시켰으며, 부재에 의한 전달길이를 고려하여 스트럿-타이 모델 절점에 작용시켰다. 또한 균열이 발생하기 전까지는 콘크리트가 인장력에 저항할 수 있으므로, 부재의 거동 및 강도를 정확히 규명하기 위하여 콘크리트 타이도 고려하였다. Fig. 3에서 보듯이 수행의 콘크리트 타이는 40-48번이



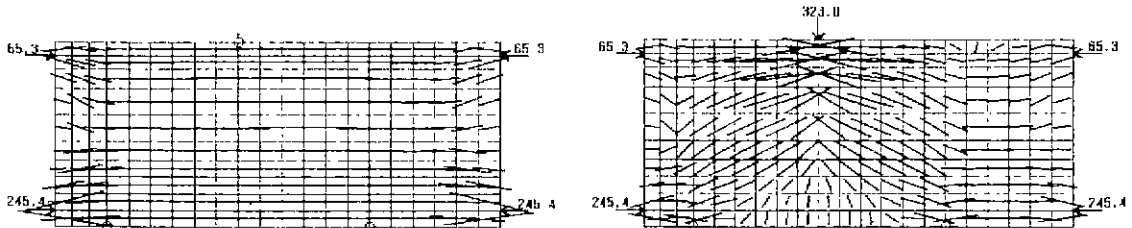
(a) Beam I-4A



(b) Beam II-1A

Fig. 1. Test Specimen of Pre-tensioned Concrete Beams

며, 수직의 콘크리트 타이는 49-56번이다. 스트럿의 단면적은 구속의 영향이 고려된 스트럿의 유효응력을 감안하여 Yun⁽⁶⁾에 의해 제안된 알고리즘에 근거하여 결정하였다. 각 하중단계별 스트럿과 타이의 단면적이 결정된 차원화된 스트럿-타이 모델의 형상은 Fig. 4와 같다. 선정된 스트럿-타이 모델은 콘크리트 부재의 치수에 적합한 기하학적인 형상을 가지므로 기하학적 적합성 조건을 만족시켰다. Beam II-1A의 경우는 Beam I-4A와 동일하게 적용하였다.



(a) Loading Step 1

(b) Loading Step 2

Fig. 2. Compressive Stress Flows of Beam I-4A

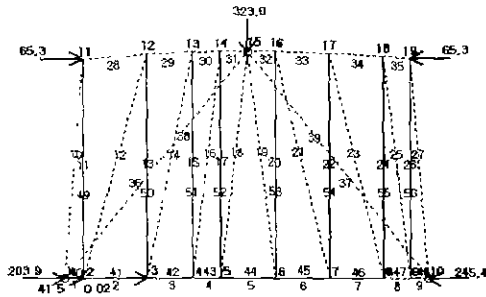


Fig. 3. Strut-tie Model for Beam I-4A

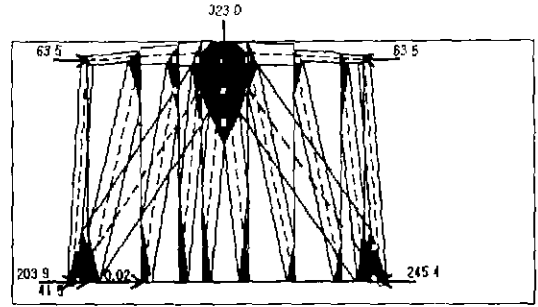


Fig. 4. Dimensioned Strut-Tie Model for Beam I-4A

3.2.2. 실험 및 해석 결과의 비교·분석

Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 Beam I-4A 및 Beam II-1A의 실험결과와 기존 및 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의해 구한 PS강재력을 나타내고 있다. 그림에서 Case 0은 기존 스트럿-타이 모델 방법에 의한 결과이며, Case 1, Case 2, 그리고 Case 3은 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의한 결과로서 각각 콘크리트 타이가 없는 경우, PS강재의 위치에만 수평의 콘크리트 타이가 있는 경우, 그리고 PS강재의 위치에 수평 콘크리트 타이와 수직스터립의 위치에 수직 콘크리트 타이가 있는 경우이다. Fig. 5 및 6의 결과로부터 콘크리트 타이를 고려하여 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의해 구한 PS강재력이 실험결과에 더 근접함을 알 수 있다. Fig. 7은 골재 맞물림 스트럿의 유무에 따른 Beam I-4A에서의 PS강재력을 보여주고 있다. 골재 맞물림 스트럿이 없는 경우 PS강재력이 실험보다 작음을 볼 수 있는데, 이는 골재 맞물림에 의한 지점으로의 수직하중의 직접적인 전달이 없기 때문이다. Fig. 8은 Beam I-4A에서 프리스트레스 하중의 적용방법에 따른 PS강재 타이의 단면력을 보여주고 있다. 전달 길이에 걸쳐서 프리스트레스 하중을 스트럿-타이 모델의 절점에 분포시킨 경우 PS강재타이의 변화를 잘 추적할 수 있었다. 또한 극한하중 상태에서 좌측에 배근된 스테리프 타이 11번, 13번, 15번의 단면력이 프리스트레스 하중을 분포 전달길이를 고려하여 분포시킨 경우에서 더 크게 산정되었는데, 이는 프리스트레스 하중의 적용방법이 전단설계의 결과에 큰 영향을 미칠 수 있음을 보여준 것이다.

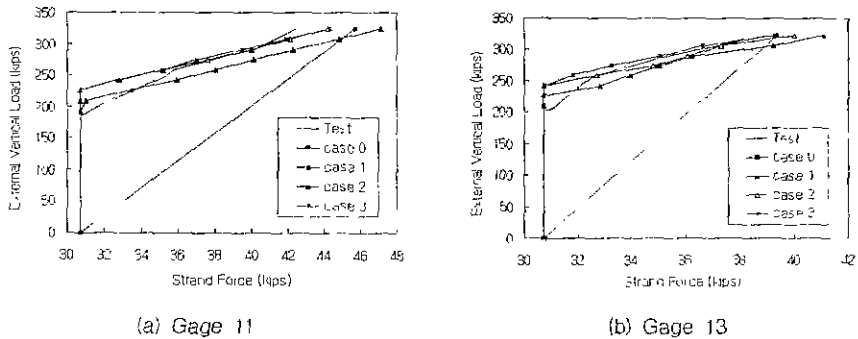
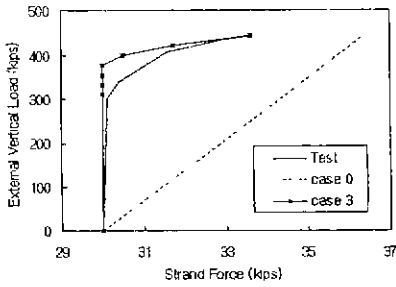
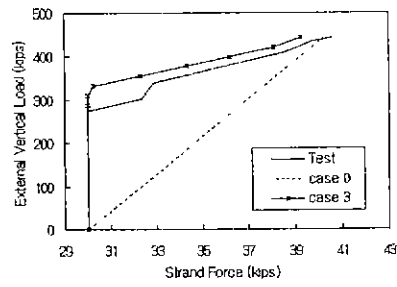


Fig. 5. Longitudinal Strand Force of Beam I 4A

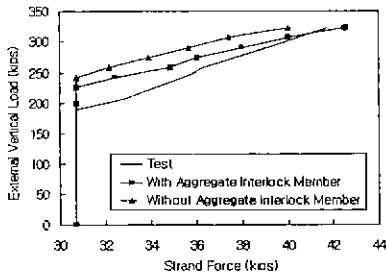


(a) Gage 14

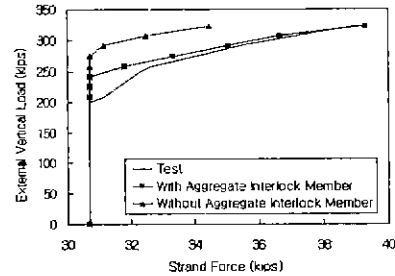


(b) Gage 16

Fig. 6. Longitudinal Strand Force of Beam II-1A

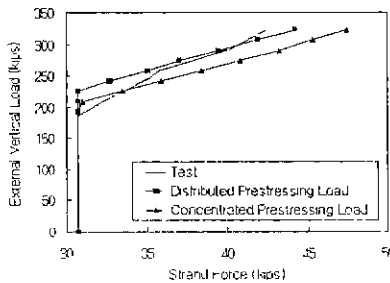


(a) Gage 12

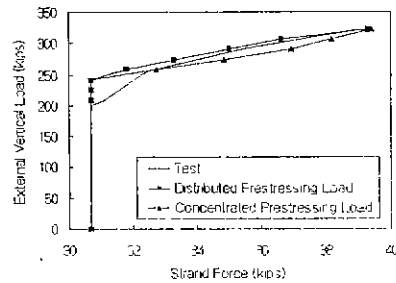


(b) Gage 13

Fig. 7. Effect of Aggregate Interlock on Longitudinal Strand Force of Beam I-4A



(a) Gage 11



(b) Gage 13

Fig. 8. Longitudinal Strand Force of Beam I 4A according to Different Application Types of Prestressing Force

본 연구에서는 Beam I-4A에서 수직하중이 작용하는 가장 큰 응력이 발생하는 Fig. 3의 절점 15와 수직하중을 지지하는 좌측 하단부의 절점 1을 선택하여 절점영역의 강도를 검토하였다. Fig 9은 15번 절점의 강도검토를 위한 유한요소 모델링과 극한하중의 90 및 100%가 작용할 때 파괴양상을 보여주고 있다. 극한하중이 작용할 때 절점영역에서의 파괴양상은 실험에서 발생한 파괴양상과 유사하게 하중관 밑의 분쇄에 의한 파괴메카니즘이 발생하였으므로, 비선형 스트리트-타이 모델 방법에 의하여 정확한 파괴강도를 예측할 수 있었다. 파괴메카니즘이 발생할 때 15번 절점영역에서의 최대 압축응력은 $1.18 f_c'$ 이었으며, 1번 절점영역에서의 최대 압축응력은 $0.83 f_c'$ 이었다.

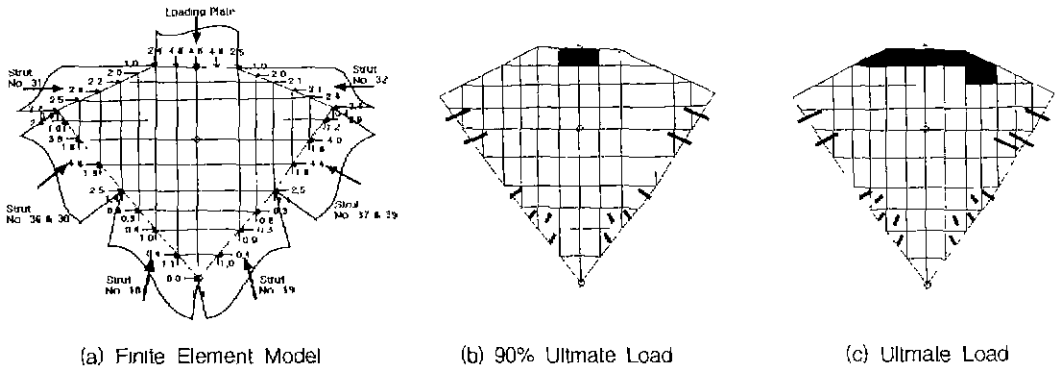


Fig. 9. Nodal Zone Analysis under Point Load for Beam I-4A

4. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 골재의 맞물림 작용 영향을 프리스트레스트 콘크리트 보의 해석 및 설계시 합리적인 방법에 의하여 반드시 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- (2) 스트럿-타이 모델을 이용한 프리텐션 콘크리트 보의 해석 및 설계시 프리스트레스 하중을 전달길이를 고려하여 스트럿-타이 모델에 점진적으로 도입하여야 할 것이며, 콘크리트 타이의 영향을 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- (3) 비선형 스트럿-타이 모델 방법에 의해 예측한 실험·파괴된 높이가 큰 프리텐션 콘크리트 보의 거동 및 강도는 실험결과와 잘 일치하였다. 따라서 높이가 큰 프리텐션 콘크리트 보의 해석 및 설계에서 비선형 스트럿-타이 모델 방법은 적합한 방법임이 입증되었다.

참고문헌

- (1) American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO), "AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS", SI Units, 2nd Edition, 1998.
- (2) Alshegeir, A. and Ramirez, J.A., "Strut-Tie Approach in Pretensioned Deep Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 89, pp. 296-304, 1992.
- (3) Kaufman, M.K., and Ramirez, J.A., "Structural Behavior of High Strength Concrete Prestressed I-Beams", *Report No. FHWA, IN JHRP-88/6*, Joint Highway Research Project, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- (4) Schlaich, J., Schaefer, K. and Jennewein, M., "Towards a Consistent Design of Structural Concrete", *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, Vol. 32, pp. 74-150, 1987.
- (5) Yun, Y.M., "Design and Analysis of 2-D Structural Concrete with Strut-Tie Model", *Ph. D. Thesis*, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 247 pp., 1994.
- (6) Yun, Y.M., "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", *ACI Structural Journal*, Accepted for Publication, 1999.