

인장강성 모델을 고려한 고강도 철근콘크리트 부재의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of High Strength Reinforced Concrete Members Considering the Tension Stiffening Model

홍 창 우* 윤 경 구** 김 경 진*** 박 제 선****
Hong, Chang Woo Yun Kyung Ku Kim Kyung Jin Park Je Sun

ABSTRACT

The tension stiffening effect, which means the maintaining a part of stiffness after cracking of concrete in tensile, exists at a reinforced concrete member because of the concrete softening and bonding stress between cracks. It is required to consider it for precise analysis and evaluation of structural behavior, due to the possibility of discrepancy between the actual behavior and the analysis without considering the tension stiffening effect. Making and adopting a tension stiffening model is the most simple and effective way for considering it at nonlinear analysis.

The proposed models were verified by application of them into nonlinear finite element analysis which indicated the estimation from models and experimental results were similar each others. The comparisons on RC beam were, also, performed in order to analyze the influence of concrete strength and steel ratio into the structural behavior. They indicated that the results from analysis estimated quite closely to the test results at low steel ratio, however, overestimated at high steel ratio. The overestimation increase linearly as concrete strength or steel ratio increased.

1. 서론

철근 콘크리트 구조물의 해석시에는 일반적으로 계산의 단순화를 위해 콘크리트의 균열효과 및 비선형 효과를 무시하나 철근콘크리트 부재는 사용하중 상태에서도 탄성거동을 하지 않으며, 차량하중 및 지진 등과 같은 반복하중을 받을 경우 비선형 거동은 더욱 현저해진다²⁾. 유한요소법에 의한 비선형 해석시 고려해야할 비선형 인자로는 콘크리트의 압축 및 인장시 응력-변형도의 비선형성, 균열면 사이의 콘크리트의 인장강성, 균열면에서의 골재의 맞물림, 철근의 다웰작용 등의 영향과 크리프, 건조 수축, 온도 등의 시간 의존적인 영향이 있다⁴⁾. 철근콘크리트 부재가 비선형 거동을 하는 중요한 이유는 콘크리트의 균열과 철근 및 콘크리트의 재료적 비선형 특성에 기인된 것으로서 유한요소 해석시 재료적 비선형성을 정확하게 모델화하지 못할 경우 해석결과에 미치는 영향은 매우 클 것으로 판단된다. 정확한 해석을 위해서는 재료특성에 관한 모델개발 및 실험적 증명이 반드시 수반되어야 하며, 유한요소법을 이용한 해석시 반드시 검증되어야 한다. 따라서, 이 논문에서는 이와 같은 철근콘크리트 부재의 파괴단계에 따른 변형거동을 보다 정확하게 해석하기 위해서 제안된 인장강성 모델의 타당성을 검증한 후 휨부재에 적용하여 해석방법의 합리성을 검증하고자 한다.

2. 해석에 사용된 모델

인장강성을 나타내기 위해 적용된 모델의 구성은 Fig. 1과 같으며, 본 연구에서는 실험결과로부터 제안된 인장강성 모델을 기본모델로 하여 해석을 수행하였다. 응력-변형률의 관계인 인장강성모델은 철근콘크리트 부재를 상대로 한 모델로서 균열주위에 철근이 없을 경우에는 유한요소의 불안정한 거동을 나타내며, 국부 균열파괴를 유발하게 된다. 콘크리트의 주응력 요소가 압축의 지배를 받게 될 때는 Fig. 2와 같은 콘크리트의 응력도-변형도 곡선을 사용하게 되며, 평면응력하에서의 콘크리트의 항복 파괴면은 Kuper와 Gerstle의 모델을 적용하여 구성하였다.

* 정희원, 강원대학교 산업기술연구소 연구원

** 정희원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

*** 정희원, 충주대학교 토목공학과 조교수

**** 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수

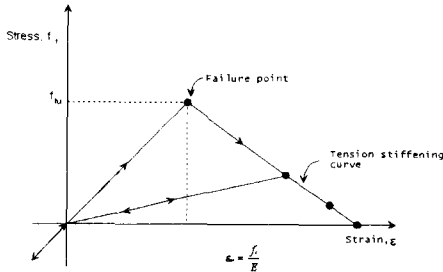


Figure 1. Tension stiffening model

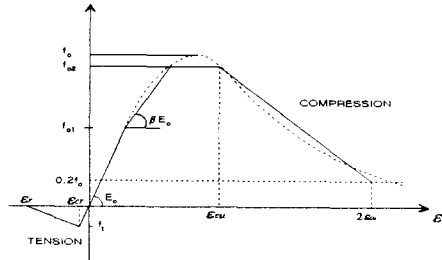


Figure 2. Stress-strain relation of the concrete material

콘크리트의 균열발생면에 있어서 균열표면을 따라 전단응력이 존재하며, 철근의 다웰작용도 균열면을 따라 전단저항에 기여하게 된다. 따라서 본 연구에서는 전단저항 효과를 고려하기 위해서 균열이 확대될수록 전단저항계수 β 가 0으로 감소하는 것으로 Fig. 3과 같이 불변전단저항모델을 사용하였다. 그리고 콘크리트 구조의 균열콘크리트의 모델은 부재에 발생하는 균열 개개의 발생과 진전보다는 부재의 전체적인 거동을 종합적으로 파악하는 것에 중점을 두어 분산균열모델을 사용하였다. 그리고 철근의 응력-변형도 관계는 Fig. 4와 같이 초기탄성영역과 변형경화 영역으로 이루어진 기울기가 다른 두 개의 직선인 bilinear의 형태로 표현하였다.

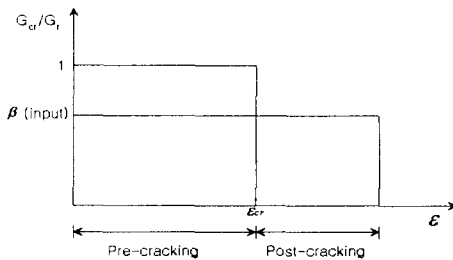


Figure 3. Constant fraction shear retention model

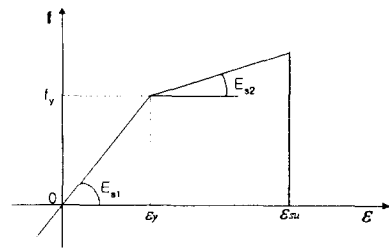


Figure 4. Bilinear Model of reinforcement

3. 해석 계획

본 연구의 해석은 철근콘크리트 직접인장부재와 휨부재에 대해서 수행하여 인장강성모델의 타당성과 해석모델의 합리성을 검증하고자 한다. 철근콘크리트 직접인장부재의 주요 해석변수로는 콘크리트 강도(200, 600 kgf/cm²)와 콘크리트의 피복두께(20, 50, 70 mm)를 선정하였다. 그리고 철근콘크리트 휨부재의 주요 해석변수로는 콘크리트 강도(200, 400, 600 kgf/cm²)와 철근비(0.57, 1.52, 2.57%), 콘크리트의 피복두께(30, 45, 60, 90 mm) 및 콘크리트 인장강도 변화에 대해서 인장강성을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 범용 구조해석 프로그램인 FEA사의 LUSAS(1997)를 사용하였다. 해석은 평면응력으로 이상화하였으며, 재료적 비선형성을 고려한 비선형 해석을 수행하였다. 비선형 해석방법은 증분반복법으로서 Newton-Raphson법과 Modified Newton-Raphson방법을 조합하여 사용하였다. 해석결과는 하중-처짐의 관계로서 실험결과와 비교하였다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 철근콘크리트 직접인장부재의 비선형해석

철근콘크리트 직접인장부재의 평면해석모델의 기본적인 기하학적 형태는 Fig. 5와 같다. 콘크리트 요소는 평면 연속체 요소로서 절점 4개로 이루어진 QPM4 요소를 사용하였으며, 철근은 3개의 절점으로 구성된 TPM3 요소를 사용하였다. 모델링은 전체부재에 대해서 1/2만 고려하였고, 경계조건은 철근은 구속시켰으며, 콘크리트의 대칭부분은 X-symmetric으로 $u_x = \psi_y = \psi_z = 0$ 로 처리하였다.

Fig. 6은 콘크리트 강도 600 kgf/cm²인 경우에 콘크리트 피복두께와 강섬유 혼입률에 따른

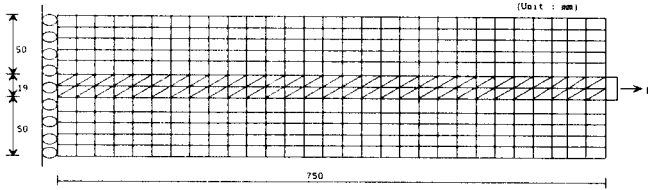


Figure 5. Finite element idealization of the bar specimen

후의 거동에 있어서 다소 높게 나타나고 있으나, 대체적으로 실험결과와 일치되었다. 이와 같은 해석 결과로부터 사용된 콘크리트 피복두께, 콘크리트 강도에 관한 영향을 고려한 인장강성 모델은 실험결과와 매우 만족한 결과를 도출하였으며, 콘크리트의 인장강성을 고려한 해석을 수행할 경우 부재의 극한강도 및 초기균열하중의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

하중-변위의 관계를 실험결과와 해석 결과를 비교한 것이다. 콘크리트 피복두께 20 mm인 경우 초기균열하중은 거의 실험결과와 일치하나 항복하중에 따른 변위에서 다소 적게 나타났다. 그리고 콘크리트 피복두께가 50 mm인 경우는 초기균열하중이 1ton정도 높게 나타났고, 70 mm인 경우에는 콘크리트 균열발생 이후

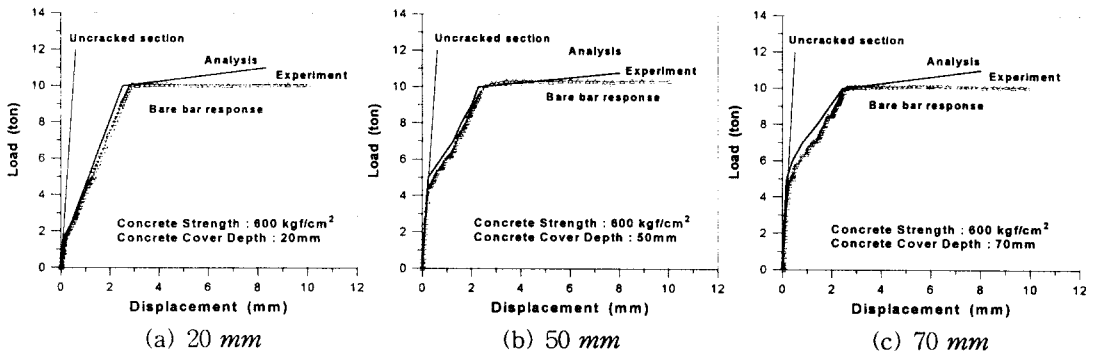


Figure 6. Comparison of analytical and experimental results ($f_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$)

4.2 철근콘크리트 휨부재의 비선형해석

해석에 사용된 철근 콘크리트 휨부재는 이봉학(1998)에 의해 실험된 시험체를 대상으로 하였으며, 모델링은 평면응력으로 이상화 하고, 제안된 인장강성 모델을 적용하였다. 콘크리트 요소는 평면 연속체 요소로서 절점 8개로 이루어진 QPM8 요소를 사용하였으며, 철근은 3개의 절점으로 구성된 BAR3 요소를 사용하였다. 해석은 인장강성 모델의 민감도 분석, 콘크리트의 피복두께, 콘크리트의 인장강도의 변화에 따른 하중-변위의 관계를 고찰하였으며, 하중단계에 따른 균열해석결과와 실험결과를 비교 분석하여 해석모델의 합리성을 검증하였다.

(1) 인장강성계수 변화에 따른 민감도 분석

인장강성계수(T.S) 변화에 따른 하중-변형도 관계는 Fig. 7과 같다. 인장강성계수는 모델에 0.5배와 2배, 그리고 인장강성을 고려하지 않은 경우에 따른 해석을 수행하였다. 제안된 인장강성 모델을 사용한 경우 비교적 실험결과와 일치하였으며, 인장강성을 고려하지 않은 경우 초기균열하중까지는 타당한 결과가 도출되나, 그 이후 하중증가에 따른 변형이 증가되어 항복하중에 차이를 보였다. 그리고 철근비가 증가됨에 따라 인장강성을 고려하지 않은 경우의 해석결과가 부재의 극한하중 이내의 범위에서는 실험결과에 근접되었다. 이와 같은 경향은 철근비가 증가할수록 콘크리트의 영향보다는 철근의 영향에 지배되기 때문이다. 철근콘크리트 부재의 해석시 극한하중 및 균열발생 이후의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 타당한 인장강성 모델을 사용하여 해석을 수행하여야 하며, 고강도 콘크리트일수록 재료적 비선형성에 대한 정확한 자료가 필수적임을 알 수 있었다.

(2) 콘크리트 피복두께 및 인장강도 변화에 따른 영향

콘크리트 피복두께의 영향을 고찰하기 위해서 인장철근의 위치를 변화시켜 콘크리트 피복두께의 영향을 분석하였다. 해석결과 콘크리트 피복두께는 초기균열하중에는 영향을 미치지 않으나, 극한하중에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 피복두께가 증가할수록 강성이 감소되었다. 이것은 하중이 증가함에 따라 콘크리트 균열발생 이후 중립축의 상승에 따라 부재의 내력이 저하되기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.

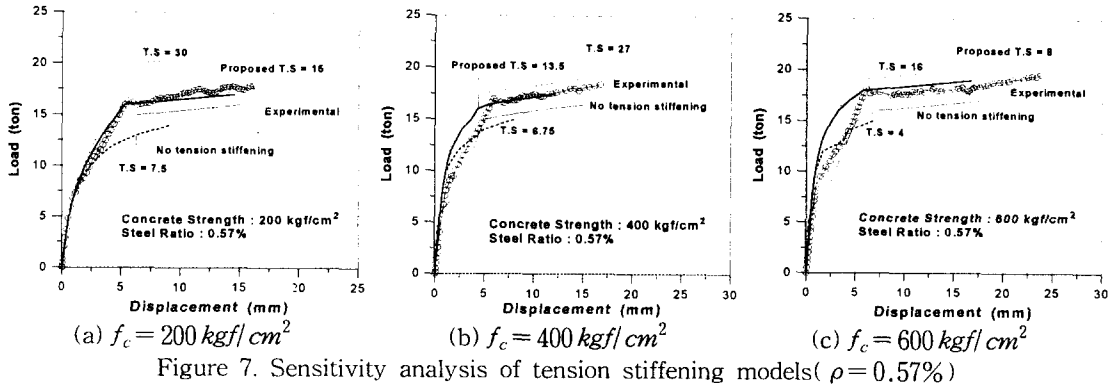


Figure 7. Sensitivity analysis of tension stiffening models($\rho = 0.57\%$)

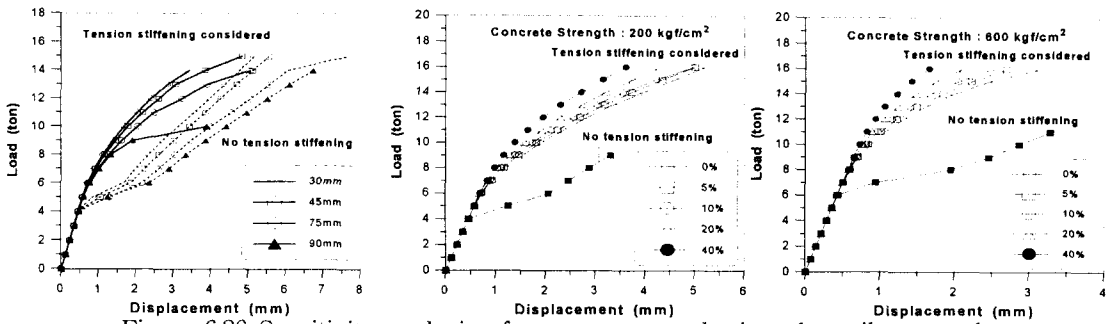


Figure 6.26 Sensitivity analysis of concrete cover depth and tensile strength

5. 결론

철근콘크리트 직접인장부재에 대해서 인장강성에 영향을 주는 인자에 대한 분석을 통해 콘크리트 피복두께, 콘크리트 강도에 관한 영향을 고려한 인장강성 모델을 이용한 비선형 해석을 수행하여 실험 결과와 비교한 결과 대체로 실험결과를 잘 예측하는 것으로 나타나 제안된 모델의 타당성을 검증하였다. 그리고 철근콘크리트 휨부재의 콘크리트 강도와 철근비 증가에 따른 거동을 분석하기 위해 제안된 모델을 적용한 해석결과와 실험결과를 비교하였다. 저철근비 부재에서는 잘 일치하였으나, 과철근비 부재에서는 해석값이 다소 높게 평가되었으며 그 정도는 철근비와 콘크리트 강도가 증가함에 따라 증가하였다. 따라서, 연성능력이 확보된 저철근비 부재일수록 인장강성을 고려하여야 콘크리트의 균열발생 이후의 거동을 보다 정확하게 해석할 수 있다. 인장강성모델에 대한 민감도 분석결과 초기균열하중 및 극한하중에 미치는 영향이 매우 크므로 콘크리트 균열발생 이후의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 타당한 인장강성모델을 적용이 요구된다.

참고문헌

1. 홍창우, 이봉학, 윤경구, 박제선, "철근콘크리트 인장부재의 인장강성 및 파괴거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제10권 1호, pp. 737~742, 1998.
2. ACI Committee 224, "Cracking of Concrete Members in Direct Tension", 224. 2R-92, ACI Manual of Concrete Practice, Part 3, Use of Concrete in Buildings-Design, ACI Publication., 1996.
3. Ahn, T. S., "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membranes", Ph. D. Thesis, Missouri-Columbia University, 1995.
4. Okamura, H., Maekawa, K., and Sivasubramaniyam, S., "Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element", Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ASCE, pp.52 8~543, 1985.8