

축방향 변형 요소를 이용한 RC 부재의 해석적 연구

Numerical Analysis of Reinforce Concrete Structures Using Axial Deformation Link Elements

신승교* 허우영** 임윤묵*** 김문겸****
Shin, Seung Kyo Heo, Woo Young Lim, Yun Mook Kim, Moon Kyum

ABSTRACT

A numerical tool for predicting the behavior of reinforced concrete structures under uniaxial loads is proposed. Concrete is considered as quasi-brittle material, and for a reinforcing bar, an elastic-perfectly plastic constitutive relationship is adopted. In this study, the behavior of reinforced concrete according to the interface properties between the concrete and steel is analyzed. Comparisons between the numerical predictions and the experimental results show good agreements in the load-deflection behaviors and ultimate loads of reinforced concrete structures.

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물은 유지관리가 비교적 용이하고 반영구적인 구조물로 여겨져 왔으나 최근 구조물의 사용년수가 증가함에 따라 콘크리트의 열화 및 철근의 부식으로 인하여 내구성이 저하되면서 구조물의 사용성 및 안정성에 관한 문제가 제기되고 있다. 콘크리트 중의 철근이 부식되면 큰 인장응력이 콘크리트 주위에 작용하게 되어 균열이 발생하고 이러한 균열은 콘크리트 내부에서부터 점차적으로 콘크리트 표면까지 진전되어 콘크리트의 박리 및 탈락현상이 수반되어 철근 콘크리트 구조물의 내구성 저하를 유발하며 심한 경우 구조물이 붕괴에 이를 수도 있다. 철근 콘크리트 구조물의 균열은 시공의 초기단계 및 사용중에 대부분 발생하며, 시공단계 및 사용하중 하에서 이러한 균열들의 발생원인을 이해하여 적절히 사전에 조치를 취함으로써 구조적인 문제를 야기시키는 균열발생을 줄일 수 있다. 그러나, 지금까지는 이러한 철근 콘크리트 구조물의 균열거동을 대부분 실험을 통해 파악하였으며 실험시 경제적 제약으로 인해 다양한 경우에 대한 거동분석이 행해지지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 철근 콘크리트의 파괴거동을 모형화하기 위해 축방향변형요소(ADLE; Axial Deformation Link Element)를 이용한 수치해석 기법을 개발하였으며 콘크리트부는 유사취성재료로 철근부는 탄성-완전소성 재료로 모형화 하였다. 개발된 수치해석 기법을 통하여 철근 콘크리트 구조물의 역학적 거동 파악 및 균열발생, 진전상황을 파악하고 철근량 및 콘크리트의 물성변화에 따른 구조물의 거동을 해석한 후 기존 해석자료 및 실험 자료와의 비교를 통하여 본 수치해석 기법의 타당성을 검증한다.

* 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
** 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

*** 연세대학교 공과대학 토목공학과 조교수
**** 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

2. 구성관계식

철근 콘크리트 구조물의 거동 파악을 위한 각 재료의 구성관계식은 가상균열모델에 근거하였으며 요소 크기에 영향을 받지 않게 하기 위해 응력-변위 관계식을 사용하였다. 콘크리트부는 유사취성재료로 철근은 탄성-완전소성 거동을 하는 것으로 모형화 하였다. 응력 σ 와 균열폭 w 사이의 관계는 다음 식 (2) 와 같이 주어진다.

$$\sigma = \sigma_0 (1 - w/w_c) \quad (2)$$

여기서, σ_0 는 균열폭 w 에서의 응력이며 콘크리트의 경우 인장강도 f_t , 철근의 경우 항복응력 f_y 이고 w_c 는 한계균열폭이다. w_c 는 응력-균열폭 곡선의 면적을 적분함으로써 결정되는데 이 면적은 파괴 에너지 G_F 와 같으며 다음 식 (3) 과 같다.

$$w_c = \frac{2G_F}{\sigma_0} \quad (3)$$

한계균열폭 w_c 를 결정하면 인장 상태하의 요소의 일반적인 구성관계식을 구성할 수 있다. 임의의 변위 u 에 대한 응력은 다음 식 (4)와 같이 계산되고 Fig.1과 같다.

$$\sigma = Eu/l_e \quad \text{for} \quad u \leq u_p \quad (4a)$$

$$\sigma = \sigma(u) \quad \text{for} \quad u_p < u < u_u \quad (4b)$$

$$\sigma = 0.0 \quad \text{for} \quad u > u_u \quad (4c)$$

여기서, u_p 는 탄성한계에서의 변위이고, u_u 는 한계상태에서의 변위이며, l_e 은 요소의 길이이다. $\sigma(u)$ 은 제안된 모델에 근거한 응력을 계산하기 위한 함수이고 다음 식 (5)와 같다.

$$\sigma(u) = \sigma_0 [1 - (u - u_p)/(u_u - u_p)] \quad (5)$$

본 연구에서는 유사취성 재료의 연화거동을 표현하기 위해 손상이론을 도입하여 초기 강성도(k_0) 행렬에 의한 해로부터 개별 요소의 변위의 상태에 따른 강성의 감소(k_m)를 고려함으로써 강성도 행렬을 재구성하고 재구성된 강성도 행렬의 해로부터 다시 강성의 증감이 고려되어 강성도 행렬을 재차 구성하는 반복과정을 이용한다.

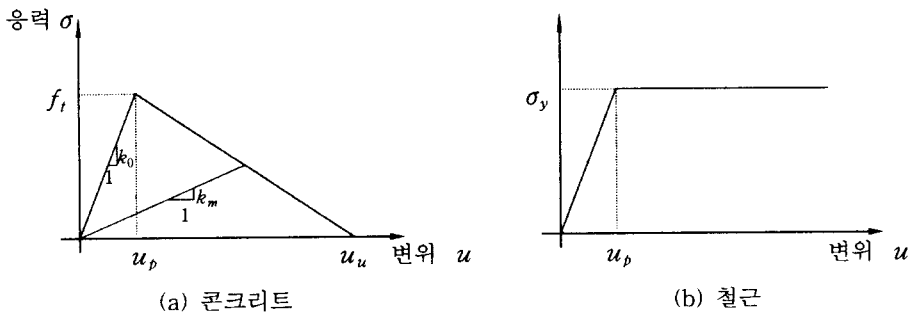


Fig.1 Constitutive Relations

3. 철근 콘크리트 구조물에의 적용

철근 콘크리트 구조물의 역학적 거동 파악을 위하여 Fig.2와 같이 단면 중앙에 하나의 철근이 배치된 길이 150cm, 단면 9cm×9cm인 직사각형 시편을 사용하였다. 먼저 개발된 수치해석 기법의 타당성을 검증하기 위하여 Fig.3과 같은 요소갯수 1906 개의 수치해석 모형을 고려하였으며, 물성은 실험에서 사용한 값과 동일하게 콘크리트의 탄성계수, 인장강도, 파괴에너지는 각각 27.94GPa, 2.54MPa, 30.00N/m를 적용하였고 철근의 탄성계수, 항복강도는 각각 200.00GPa, 420.00MPa를 사용하였다.



Fig.2 Test Specimen

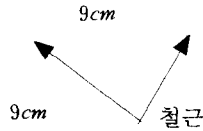


Fig.3 Numerical Model

직접 인장하중이 작용하는 경우 철근 콘크리트 시편의 하중-변위 곡선이 Fig.4에 나타나 있는데, 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하면 오차 10% 이내로 잘 일치함을 알 수 있으며 또한 후반부로 갈수록 즉, 콘크리트 부분에 균열이 발생한 이후의 거동이 철근만 있는 경우(Bare rebar)의 하중-변위 응답에 접근함을 실험 및 수치해석 결과 모두에서 관찰할 수 있다. 응답곡선 초반부에 실험결과와 해석결과에서 차이를 나타내는 것은 실험시 시편의 건조수축에 의한 거동 영향을 고려한 것에 기인하며 실험값에서 초기 변위가 음의 값을 가짐을 알 수 있다. 이상의 결과를 통하여 본 연구에서 개발된 수치해석 기법이 철근 콘크리트 구조물의 역학적 거동을 모형화 하는데 타당함을 알 수 있으며 이 결과로부터 콘크리트와 철근 사이의 접합경계면의 물성변화에 따른 철근 콘크리트 시편의 거동을 살펴보았다. 먼저 접합경계면의 탄성계수를 각각 27.94GPa, 15.00GPa, 0.20GPa 로 변화시키면서 하중-변위 응답 관계를 Fig.5에 나타내었다. 경계면의 탄성계수가 작을수록 철근 콘크리트 구조물의 균열이 빨리 진행되어 내구성 저하현상이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

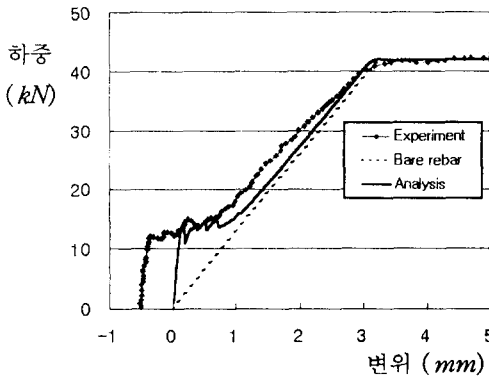


Fig.4 Comparison of Numerical Results with Experimental Results

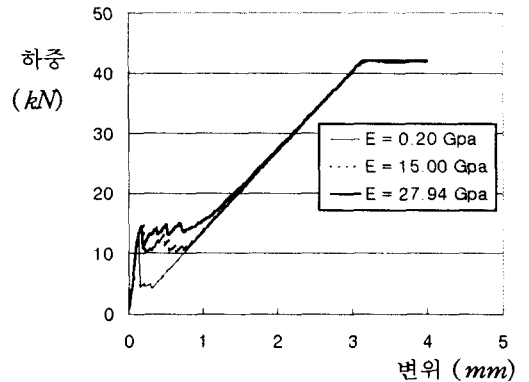


Fig.5 Load-Displacement Curve according to Elastic Modulus

경계면의 물성 중 탄성계수외에 구조물의 거동에 큰 영향을 미치는 것이 인장강도이다. 접합경계면의 인장강도가 4.0MPa, 2.54MPa 인 경우에 대한 철근 콘크리트 구조물의 하중-변위 응답 관계를 Fig.6에 나타내었다. 탄성계수의 경우와 마찬가지로 접합경계면의 인장강도가 작을수록 조기에 균열이 발생하여 내구성이 저하됨을 알 수 있다. 이상의 결과를 통하여 콘크리트와 철근 사이의 접합 경계면의 물성이 철근 콘크리트 구조물의 역학적 거동에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 직접 인장하중이 작용하는 경우에 대한 철근 콘크리트 시편의 파괴거동은 Fig.7과 같은 균열형상을 나타내었는데 균열이 계속 전파되지 않고 중간에 불연속점이 생기는 이유는 수치해석 모형에서 콘크리트가 전 단면에 걸쳐 연속되지 못하고 철근에 의해 분리되기 때문인 것으로 판단된다. 이는 수치해석 모형의 수정을 통하여 추후 해결해야 할 과제라 생각된다.

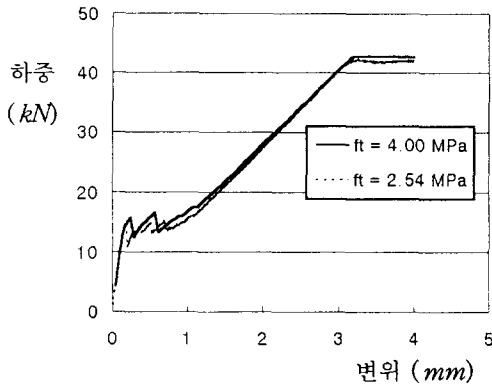


Fig.6 Load-Displacement Curve according to tensile strength

Fig.7 Crack Shapes

4. 결 론

본 논문에서는 철근 콘크리트 구조물의 역학적 거동 파악을 위하여 축방향 변형요소를 이용한 수치해석 기법을 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 축방향 변형요소(Axial Deformation Link Element)를 이용한 수치해석 기법은 직접 인장하중이 작용하는 경우 철근 콘크리트 구조물의 하중-변위 응답을 잘 모형화하며 수치해석 결과는 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.
- 2) 본 연구에서 개발한 수치해석 기법을 통하여 철근 콘크리트 구조물의 역학적 거동은 콘크리트와 철근사이의 접합경계면의 물성변화에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있었고 구조물의 균열형상도 파악할 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Homayoun, H., Abrishami, and Denis, M., "Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening," *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.6, 1996, pp.703-710.
- 2) Wollrab, E., Kulkarni, S. M., Ouyang, C., and Shah, S. P., "Response of Reinforced Concrete Panels under Uniaxial Tension," *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.6, 1996, pp.648-657.
- 3) Belarbi, A., and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Reinforced Concrete in Biaxial Tension Compression," *Research Report UHCEE 91-2*, University of Houston, 1991.