

균열 및 부착슬립효과를 고려한 철근콘크리트 구조물의 비선형 유한요소해석

Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures
Considering the Crack and Bond-Slip Effects

곽 효 경*

Kwak, Hyo-Gyoung

ABSTRACT

This study deals with the finite element analysis of the monotonic behavior of reinforced concrete beams and beam-column joint subassemblages. It is assumed that the behavior of these members can be described by a plane stress field. Concrete and reinforcing steel are represented by separate material models which are combined together with a model of the interaction between reinforcing bar and concrete through bond-slip to describe the behavior of the composite reinforced concrete material. To describe the concrete behavior, a nonlinear orthotropic model is adopted and the crack is described by a system of orthogonal cracks, which are rotating as the principal strain directions are changed.

A smeared finite element model based on the fracture mechanics principles are used to overcome the numerical defect according to the finite element mesh size. Finally, correlation studies between analytical and experimental results and several parameter studies are conducted with the objective to establish the validity of the proposed model and identify the significance of various effects on the local and global response of reinforced concrete members.

1. 서론

경제적이고 효율적인 구조물의 설계를 위해서는 보다 정확한 구조물의 거동파악이 요구되어지며, 이러한 노력의 일환으로 많은 실험적 연구와 구조해석 기법이 개발되어 왔다. 철근콘크리트(RC) 구조물의 경우 재료 자체의 복잡성으로 인하여 많은 연구가 실험에 전적으로 의존하다가 1960년대 컴퓨터의 개발과 유한요소법을 비롯한 해석기법의 발전에 힘입어 수치해석에 의한 거동파악이 널리 행해지고 있다. 그러나 RC 구조물은 재료 자체가 비선형성을 띠는 철근과 콘크리트의 서로 다른 두 재료의 복합체이기 때문에 두 재료에 의한 효과 - 콘크리트의 균열, 2축응력 효과, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착효과 등 - 를 효율적으로 모델링하기가 어렵고, 사용하는 재료 모델과 고려하는 효과에 따라 그 거동자체의 변화가 상대적으로 크다. RC 구조물의 유한요소해석은 지금까지 많은 사람에 의해 행해지고 있으며(1), 근년에는 구조물의 재료 비선형 동적해석과 파괴역학의 개념을 도입한 해석기법의 개발이 활발히 진행되고

있다.

본 연구에서는 RC 구조물의 유한요소해석에 있어서 요소의 크기에 따른 수치해석 오차를 줄일 수 있는 한계식의 제안과 부착슬립효과를 비롯한 여러가지 재료상수의 변화를 통해 철근콘크리트 구조물의 거동을 비교, 분석하고자 한다.

2. 본론

2.1 재료의 모델링

2축응력 상태의 콘크리트는 포와슨 효과와 내부 미세 균열(micro-crack)등의 영향으로 1축응력 상태와는 상당히 다른 거동을 보인다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 2축 압축 응력 상태에서 압축강도가 상대적으로 증가하며, 압축-인장영역에서는 인장력이 증가함에 따라 압축강도가 선형으로 감소한다(2). 따라서 콘크리트의 2축응력 상태를 표현하기 위해 사용한 재료모델은 Darwin과 Pecknold(3)가 제안한 orthotropic model이며, 각 주응력축의 응력-변형을 관계는 계산상의 효율성을 위해 그림 2에서 볼 수 있듯이 단순화 하였다.

* 정희원, 삼성종합건설 기술연구소, 선임연구원

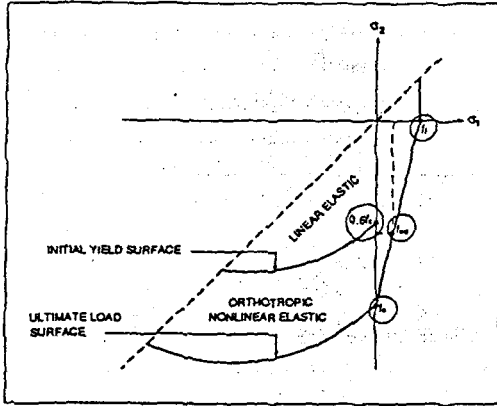


그림 1 콘크리트의 강도 포락선

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} E_1 & \nu\sqrt{E_1 E_2} & 0 \\ \nu\sqrt{E_1 E_2} & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda(1-\nu^2)G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\varepsilon_1 \\ d\varepsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 E_1, E_2 는 주변형축의 탄성계수이며, λ 는 전단 계수로서 균열이 발생한 후에는 0.4의 값을 갖는다(4).

한편 균열은 최대 주변형축에 직각방향으로 발생하며 균열은 균열각의 변화에 따라 회전한다고 정의한 회전균열모델(rotating crack model)을 사용하였으며, 균열발생 이후의 콘크리트 tension stiffening effect를 고려하기 위해 그림 3의 균열분포 가정에 의한 ε_0 의 결정식을 제안하였으며(4), Bazant(5)와 Hillerborg(6)가 각각 제안한 모델(그림 4)과 수치해석을 통한 비교, 검증을 하였다.

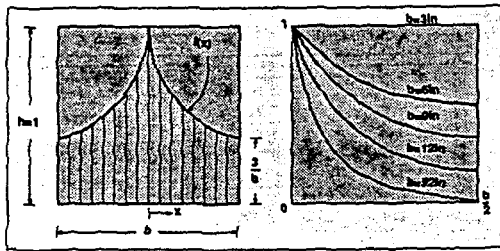


그림 3 유한요소내의 가정된 미세균열 분포

$$\varepsilon_0 = \frac{2 \cdot G_f \cdot \ln(3/b)}{f_t \cdot (3-b)} \quad (2)$$

여기서 G_f 는 단위 길이당 균열에너지, f_t 는 콘크리트의 인장강도, b 는 요소의 길이를 나타낸다.

철근은 콘크리트에 비하여 재료의 성질이 균일하며 탄성 및 소성영역에서 잘 정의된다. 본 연구에서는 그림

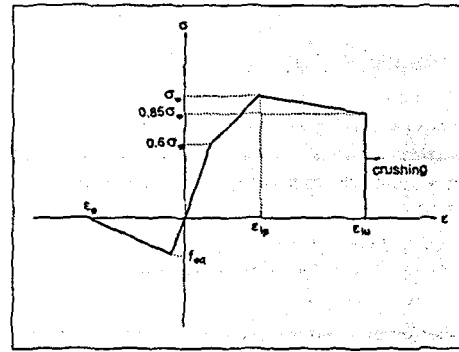


그림 2 콘크리트의 응력-변형을 관계

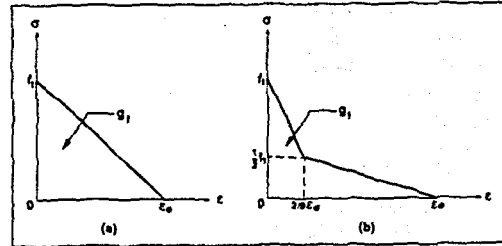


그림 4 Bazant(a)와 Hillerborg(b) 모델

5와 같이 선형경화재대로 모델링하였으며, 구조적 거동을 표현하기 위해 트러스 요소를 사용하였다.

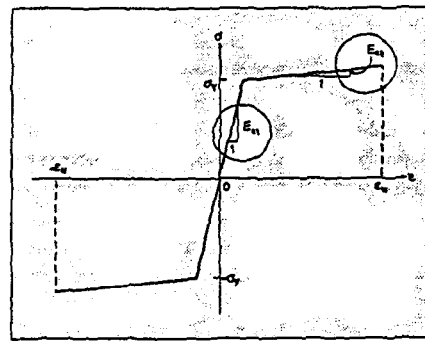


그림 5 철근의 응력-변형을 관계

철근과 콘크리트 사이의 부착효과를 고려하기 위한 부착모델은 Bond link element와 Bond zone element로 크게 나눌수 있으며, 일반적으로 인접한 두 절점을 스프링으로 연결하는 Bond link element가 널리 사용된다.

본 연구에서도 이 모델을 적용하였으며, 부착응력과 슬립의 관계는 그림 6과 같이 단순화 하였다.

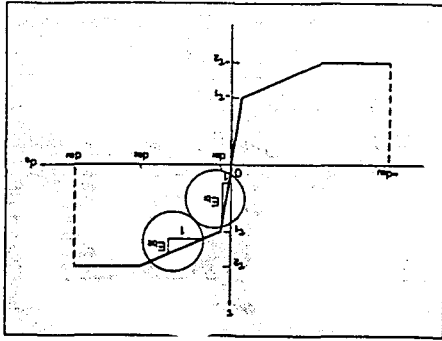


그림 6 부착응력-부착슬립 관계

2.2 강성행렬의 구성 및 해석절차

국좌표계에서 구성된 각 응력 상태의 콘크리트와 철근의 재료행렬은 치환행렬(transformation matrix)을 이용하여 전체좌표계로 치환된 후 각 요소의 강성행렬을 구성하게 되며, 각 절점의 연결(connectivity)에 의한 조합을 통해 부착효과를 포함한 철근콘크리트 구조물의 전체 강성행렬을 구성하게 된다(1). 전체 강성행렬을 구성하는 과정은 선형탄성체의 경우와 동일하다.

$$[D_{GL}]_e = [T]^T \cdot [D_{L0}]_e \cdot [T] \quad (3)$$

여기서

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin \theta \cos \theta \\ -2 \sin \theta \cos \theta & 2 \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\tan 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (5)$$

구성된 강성행렬을 이용하여 구조해석을 수행하게 되며 그 과정은 그림 7에 나타내었다. 특히 각 하중단계에서 사용한 반복해석 기법은 Modified Newton-Rapson 방법을 사용하였다.

3. 수치해석

3.1 철근콘크리트 보

본 연구에서 제안한 Tension stiffening 효과와 부착슬립효과등을 검토하기 위해 Burns와 Siess(7)가 실험한 철근콘크리트 보(J-4)를 채택하였다. 수치해석을 위해 사용한 재료상수는 $E_c=3800$ ksi, $E_s=29500$ ksi, $f_c=4.82$ ksi, $f_y=44.9$ ksi, $\rho=0.99 \%$ 이며, $G_r=0.5$ lb/in, $f_t=5$

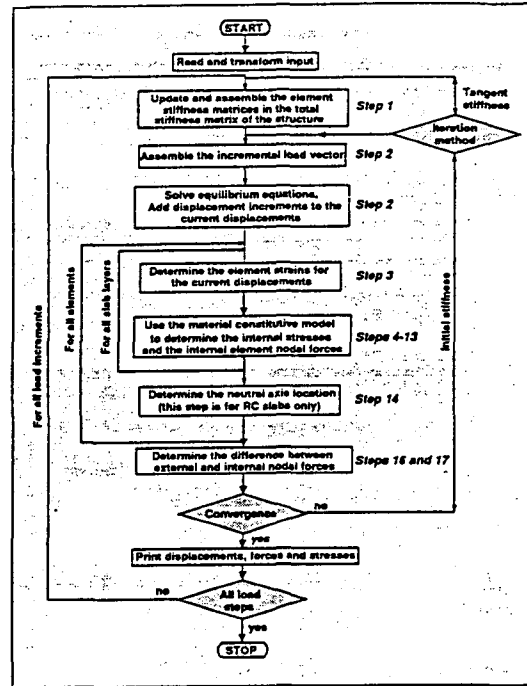


그림 7 해석 흐름도

$\sqrt{f_c}$, $\nu_c=0.167$, $\nu_s=0.333$ 으로 가정하였다. 그 밖에 단면과 구조물의 경계조건은 그림 8에 나타나 있으며, 수치해석을 위한 유한요소 모델은 그림 9에서 볼 수 있다.

먼저 그림 10에서 볼 수 있듯이 Tension stiffening 효과를 고려하지 않을 경우 유한요소의 크기에 따라 해석결과가 상당히 다르게 나타나며, 요소의 수가 많아질수록 그 차이가 작아짐을 볼 수 있다. 그림 11 - 그림 13에서 볼 수 있듯이 Tension stiffening을 고려하지 않은 경우보다 개선된 결과를 주며 본 연구에서 제안한 관계식(식 2)에 의한 Tension stiffening 효과의 고려시 구조적 거동이 상당히 개선됨을 볼 수 있다.

또한 그림 14와 그림 15에서 볼 수 있듯이 부착슬립효과를 고려한 경우(그림 15)가 고려하지 않은 경우(그림 14)보다 변위가 상대적으로 증가하는 동시에 실험치에 보다 근접한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 현상은 과다철근보의 경우 더욱 현저하게 나타난다. 그 밖에 인장강도 및 전단보정계수에 의한 구조물의 거동은 거의 변화가 없었으며, 특히 전단보정계수에 민감하게 반응하지 않은 것은 회전균열모델을 사용한 결과로 판단된다.

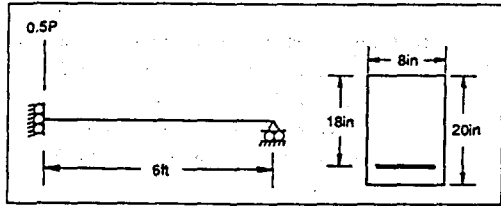


그림 8 J-4 보의 단면특성 및 경계조건

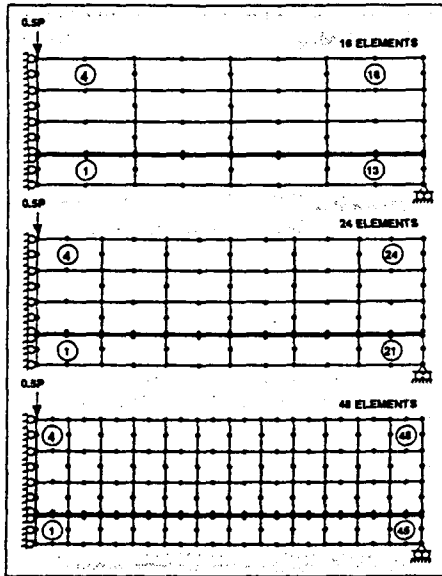


그림 9 J-4 보의 유한요소 이상화

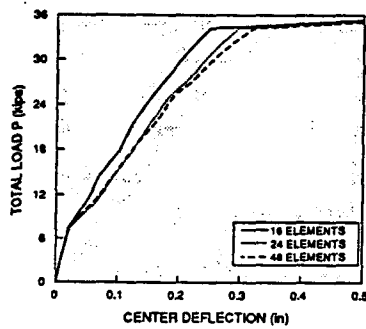


그림 10 유한요소 크기 효과(no tension stiffening)

3.2 보-기둥 접합부

철근콘크리트 구조물의 경우 비선형 거동의 대부분은 보-기둥 접합부에서 일어나게 되는데 이의 해석을 위해 Viathanatepa 등(8)이 실험한 BC4 시험체를 예제 해석

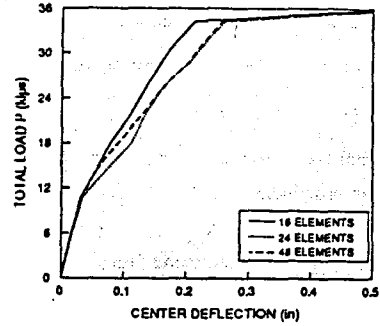


그림 11 유한요소 크기 효과(Hillerborg 모델)

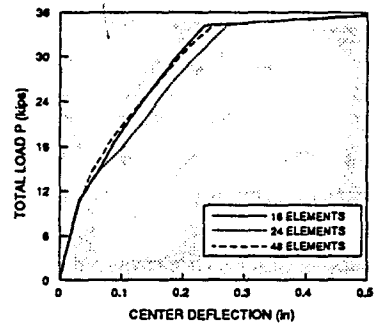


그림 12 유한요소 크기 효과(Bazant 모델)

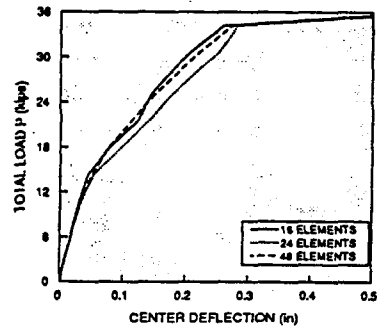


그림 13 유한요소 크기 효과(제한된 모델)

하였다. 본 예제 및 실험에서 사용한 재료상수는 다음과 같다. $E_c=3860$ ksi, $E_s=28200$ ksi, $f_c=4.60$ ksi, $f_y=46.0$ ksi, $\rho=0.62\%$ 이며, 그 밖에 재료상수는 J-4 보의 경우와 동일하다. 본 예제의 형상은 그림 16에 나타나 있으며 수치해석 모델은 그림 17에서 볼 수 있다. 본 예제에서 사용한 유한요소는 8 절점 등매개변수이다. 철근은 2 절점 트러스 요소로 모델링되어 있으며 부착슬립효과는 Bond link 요소에 의해 모델링되었다.

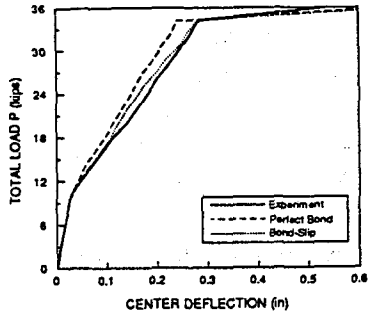


그림 14 Tension stiffening 효과만 고려한 경우

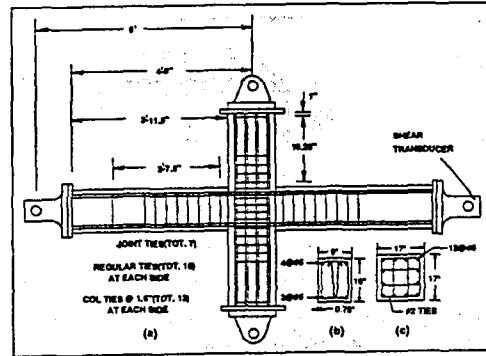


그림 16 보-기둥 접합부(BCJ)의 형상

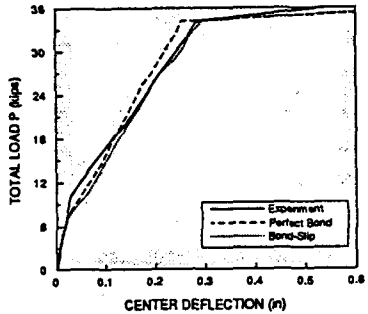


그림 15 Tension stiffening 효과 + Bond-slip 효과를 고려한 경우

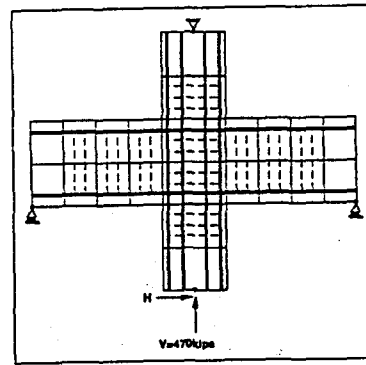


그림 17 보-기둥 접합부의 유한요소 모델링

그림 18 에서 볼 수 있듯이 접합부의 경우 부차효과가 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 그 효과는 전체 변형의 약 33%에 해당한다. 특히 이러한 부차효과는 횡방향 하중이 크게 작용할 경우, 즉 전단에 의한 영향이 상대적으로 클 경우 응력전달에 있어 특히 중요함을 알 수 있다. 또한 Tension stiffening 효과를 고려함으로써 균열의 갑작스런 발생에 의한 수치해석적인 불안정성을 제거할 수 있으며 보다 개선된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통해 새로운 유한요소 모델을 제시하였으며, 예제해석을 통해 제시된 모델의 효율성을 검증하였다. 파괴에너지 개념에 토대를 두고 개발된 해석 모델은 유한요소의 크기에 비교적 민감하지 않으며 상대적으로 큰 유한요소에서도 합리적인 해석결과를 얻을 수 있다. 또한 전단이 크게 작용하거나 과다철근상태의 구조물일수록 부차슬립에 의한 효과가 크기 때문에 보다 정

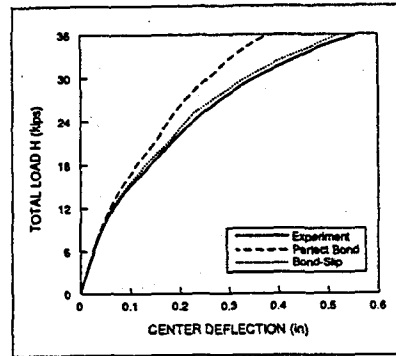


그림 18 Tension stiffening 효과 + 부차효과의 고려

확한 해석을 위해서는 부차효과를 고려해야함을 알 수 있었다.

또한 본 연구에서는 회전균열모델(rotating crack model)을 사용하였으므로 전단보정계수에 의한 영향이

거의 없었으나, 고정균열모델(fixed crack model)을 사용할 경우 균열면에서의 거동을 적절히 표현하지 못하기 때문에 전단보정계수에 의한 영향이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. ASCE Task Committee on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures (1982). State-of-the-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ASCE Special Publications.
2. Kupfer, h., Hilsdorf, h. k. and Rusch, H. (1969). "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses", ACI Journal, Vol. 66, No. 66-62, pp. 656-666.
3. Darwin, D. and Pecknold, D. A. (1977). "Analysis of Cyclic Loading of Plane R/C Structures", Computer & Structures, Vol. 7, No. 1, pp. 137-147.
4. Kwak, H. G. and Filippou, F. C. (1990). "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures under Monotonic Loads", Research Report UCB/SEMM-90/14, University of California Berkeley, California.
5. Bazant, Z. P. and Oh, B. H. (1983). "Crack Band Theory for Fracture of Concrete", Material and Structures, RILEM, Paris, Vol. 16, pp. 155-176.
6. Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P. E. (1976). "Analysis of Crack Formation and Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Element", Cement and Concrete Research, Vol. 6, No. 6, pp. 773-782.
7. Burns, N. H. and Siess, C. P. (1962). "Load -Deformation Characteristics of Beam-Column Connections in Reinforced Concrete", Civil Engineering Studies, SRS No. 234, University of Illinois, Urbana.
8. Viwathanatepa, S., Popov, E. P. and Betero, V. V. (1979). "Seismic Behavior of Reinforced concrete Interior Beam-Column Subassemblages", Report No. UCB/EERC-79/14, Univ. of California Berkeley, California.