적층단면법을 토대로한 철근콘크리트 보 해석에서의 부착슬립효과

Bond-Slip Effect in Analysis of RC Beams Using Layered Section Method

곽 효 경* 김 진 국**
Kwak, Hyo Gyoung Kim, Jin Kook

ABSTRACT

An analytical procedure to analyze reinforced concrete (RC) frame subject to cyclic as well as monotonic loadings is proposed on the basis of the layered section method. In contrast to the classical nonlinear approaches adopting the perfect bond assumption, the bond-slip effect along the reinforcing bar is quantified with the force equilibrium and compatibility condition at the post-cracking stage and its contribution is implemented into the reinforcing. The advantage of the proposed analytical procedure, therefore, will be on the consideration of the bond-slip effect while using the classical layered section method without additional consideration such as taking the double nodes. Through correlation studies between experimental data and analytical results, it is verified that the proposed analytical procedure can effectively simulate the cracking behavior of RC beams, columns and Frame accompanying the stiffness degradation caused by the bond-slip.

1. 서론

철근콘크리트 보 및 기둥의 비선형 해석기법은 단면을 여러 개의 층으로 나누어 콘크리트의 균열 및 재료의 비선형성을 효과적으로 고려하도록 하는 적층단면법에 기초한 방법과, 부재 단면에 대한 모멘트-곡률 관계를 정의하고 그것을 구조계에 적용하여 해석을 수행하는 모멘트-곡률 관계에 근거한 방법의 두 가지로 나눌 수 있다. 적층단면법은 단면내 각 층사이의 완전부착가정을 토대로 하고 있어 콘크리트와 철근사이의 부착슬립 거동을 고려하지 못하고, 다음 단계의 계산을 위해서는 각 층의 정보를 저장해야하기 때문에 구조물이 대형화될 경우 많은 저장공간과 계산시간을 필요로 한다. 한편, 모멘트-곡률 관계에 기초한 해석법은 주어진 단면의 모멘트-곡률 관계를 초기에 한번만 정의하고 해석에 사용하기 때문에 매 계산마다 단면에 대한 해석이 생략될 수 있는 등 해석상의 편리함 때문에 많은 계산을 필요로 하는 반복하중을 받는 구조부재에 대한 해석에 빈번히 사용되고 있다. 이 논문에서는 적층단면법에 기초하여 철근콘크리트 보 및 기둥의 부착슬립 거동을 고려할 수 있는 해석모델을 제안하고자 한다. 적층단면법에서 부착슬립거 동을 고려하기 위해 콘크리트와 철근사이의 부착슬립

*정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수
**정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정

관계를 나타내는 힘의 평형과 변위의 적합조건으로부터 미분방정식을 구성하였으며, 경계조건을 적용하여 철근콘크리트 부재의 균열면에서 완전부착면까지의 거리인 전달길이(transfer length)를 산정하였다. 나아가 전달길이 내에서의 응력 및 변형률 분포를 산정하고 이를 토대로 전달길이 내 철근의 강성을 보정하여 적층단면법에서도 부착슬립거동을 간접적으로 고려할 수 있도록 하는 등가 철근강성 모델을 제안하고 있다. 마지막으로 기존의 실험결과 및 부착슬립을 고려하지 않은 적층단면법에 의한 해석결과와의 비교 검토를 통해 제안된 해석모델의 타당성과 효용성을 검증하였다.

2. 재료모델

이 연구에서는 콘크리트의 재료성질을 모사하기 위해 압축측 콘크리트의 경우 Park 이 제안하고 Scott 등이 수정한 응력-변형률 관계를 사용하였다. 인장측 콘크리트에서의 응력-변형률 관계는 균열발생 이후의 변형연화 (strain softening) 영역을 선형분포로 단순화하여 하중 증가에 따른 미세균열(microcracks)의 발달을 모사하도록 하였다. 작용하는 하중이 제하(unloading)되면 응력 감소에 따른 변형률의 감소가 나타나는데 이를 모사하기 위하여 Karsan과 Jirsa 에 의해 제안된 직선관계로 단순화된 재하관계를 사용하였다.

구조물 내에 있는 철근은 콘크리트에 둘러싸여 있게 되는데 인장력이 작용하면 콘크리트 내에 균열이 발생하게 되고 균열부를 중심으로 철근에 응력집중이 발생한다. 즉, 균열부를 중심으로 철근이 항복되더라도 균열과 균열 사이에서는 항복이 발생하지 않을 수 있다. 또한, 균열부에서 응력집중에 의한 철근의 항복을 토대로 해석이 이루어질 경우 항복이후의 구조물의 거동을 과대 평가하게된다. 따라서, 이 연구에서는 Belarbi와 Hsu 에 의해 제안된 평균 응력-변형률 관계식을 사용하였다.

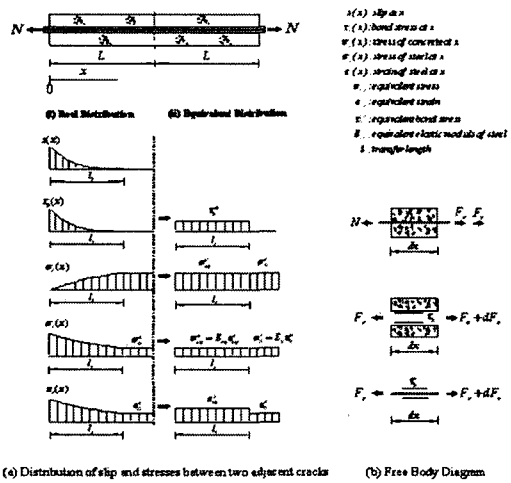
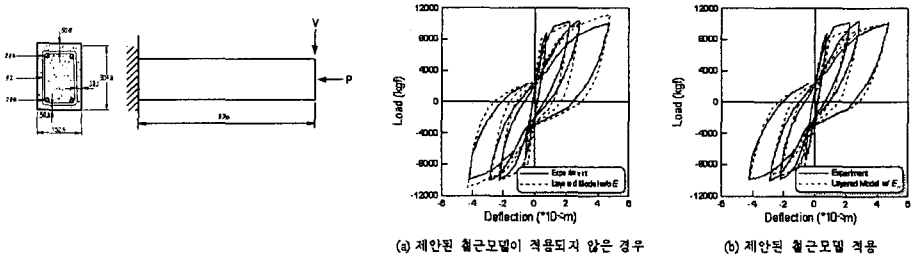


그림 1 철근콘크리트 인장부재 내의 부착슬립 및 응력 분포

슬립량은 철근의 변형률과도 상호관계를 갖게 되는데, 철근이 항복에 이를때까지 철근의 변형률과 슬립량은 거의 비례관계를 보이고, 철근이 항복될 때 부착응력이 최대값에 도달하게 된다. 따라서 해석상의 편의를 위해 철근이 항복에 다다를 때, 즉 부착응력이 최대값에 도달할 때까지의 초기 부착응력-슬립 관계를 기울기 E_b 를 갖는 선형으로 가정하였다. 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 인장을 받는 부재에 균열이 발생하게 되면 콘크리트와 철근의 변형 차이로 정의되는 슬립 $s(x)$는 균열면에서 최대값을 나타내고 균열과 균열 사이의 중간 지점에서 최소값을 갖게 되며, 그림 1(a)에서와 같이 균열과

균열 사이의 간격이 충분히 클 경우 균열과 균열 사이에 완전 부착, 즉 슬립이 0(zero)이 되는 지점이 발생하게 된다. 또한, 철근의 응력은 균열면에서 최대값에 이르고 인접한 균열 사이의 중간 지점에서 최소값을 가지게 된다. 따라서 균열이 수반되는 철근콘크리트 부재의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 콘크리트와 철근 사이의 부착슬립 효과가 고려되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 부착슬립 효과를 간접적이지만 보다 간편하게 고려할 수 있도록 하는 해석모델을 개발하였으며, 이를 위해 등가 철근강성 개념을 도입하였다. 등가 철근강성을 유도하기 위해서 우선 힘의 평형과 변위의 적합조건을 토대로 부착슬립 관계를 나타내는 식을 유도 하고, 그 식에 경계조건을 적용하여 균열면으로부터의 거리에 대한 함수로 슬립식($s(x)$)을 구하게 된다. 균열면에서는 콘크리트와의 부착이 없기 때문에 작용하중 전부를 철근이 부담하게되는 반면 완전부착이 이루어지는 부분에서는 콘크리트와 철근이 하중을 각각 분담하게 된다. 따라서 균열면에서 철근에 작용하는 하중과 완전부착면에서 철근에 작용하는 하중의 차이가 부착력에 의한 것이라는 힘의 평형방정식을 세울수 있고, 그 식에 슬립식($s(x)$)을 적용하여 전달길이 l_t 를 구할 수 있다. 완전부착 조건하에 총 발생 변위를 유지토록 하기 위해서 그림 1(a-ii)에서 보는 바와같이 변형률 및 응력 분포를 등가의 값으로 고려하였으며 그 결과로 산출된 철근의 감소된 강성인 등가 철근강성 개념을 도입하였다. 슬립에 대한 두 경계조건인 $s(0)=s_0$ 과 $s(l_t)=0$ 을 부착응력-슬립의 관계식 ($\frac{d^2s}{dx^2}-k^2s=0$)에 적용하면 슬립분포 $s(x)$를 산정할 수 있다. 이때 두 경계조건중 s_0 는 균열면에서의 슬립량을 의미한다. 한편, 균열면에서 슬립이 0(zero)이 되는 완전부착 면까지의 거리인 전달길이 l_t 는, 균열면의 철근에 작용하는 하중은 완전부착 지점에서의 철근과 콘크리트에 의해 분담되는 하중의 합과 같고 콘크리트에 작용하는 하중은 콘크리트와 철근 사이의 부착에 의해서 발생되었다는 힘의 평형관계 ($\frac{N}{1+\eta\rho}=\Sigma_o\int_0^{l_t}\tau_b(s)dx=\Sigma_o E_s\int_0^{l_t}s(x)dx$)를 토대로 산정할 수 있다. 이로부터 그림 1(a-ii)에서와 같이 등가의 평균 부착응력 ($\tau_b^{eq}=\int_0^{l_t}\tau_b(s)dx/l_t$)을 계산하고, 균열면에서 완전부착 면까지 콘크리트($\sigma_c(x)=\frac{\tau_b^{eq}\cdot\Sigma_o}{A_c}x$)와 철근($\sigma_s(x)=\frac{N}{A_s}-\frac{\sigma_c(x)\cdot A_c}{A_s}=\frac{N}{A_s}-\frac{\tau_b^{eq}\cdot\Sigma_o}{A_s}x$)의 응력을 계산할 수 있다. 철근의 변형률은 산정된 철근의 응력 $\sigma_s(x)$를 철근의 탄성계수 E_s 로 나누어 줌으로서 쉽게 구할 수 있으며, 그로부터 등가의 평균 변형률은 평균 부착응력 산정의 경우와 같이 평균적인 의미를 토대로 $\varepsilon_{eqs}=\int_0^{l_t}\varepsilon_s(x)dx/l_t$로 산정할 수 있다. 부착슬립을 고려하게 될 경우 유발되는 철근변형률 ε_{eqs}에 대응하는 등가의 탄성계수 E_{eq}는, 부착슬립이 발생하는 전달길이 내의 응력과, 완전부착이 유지되는 전달길이 밖의 응력이 동일하다는 관계식으로부터 $E_{eq}=E_s\varepsilon_{os}/\varepsilon_{eqs}$의 등가 철근강성을 구할 수 있다. 앞에서 정의된 철근의 응력-변형률 포락선을 토대로 반복하중에 따른 재료거동을 모사하기 위해 Pinto 등에 의해 제안되고 Filippou 등에 의해 수정된 모델을 토대로 하중이력곡선을 정의하였다.

3. 수치해석



(a) 제안된 철근모델이 적용되지 않은 경우 (b) 제안된 철근모델 적용

그림 2 Column1과 Column1의 해석 결과

반복하중을 받는 구조부재가 전단거동에 의한 영향을 크게 받을 경우 부착슬립 거동이 크게 발생하고 그로 인하여 pinching 거동이 크게 나타나며, 또한 축력이 작용할 경우 횡하중이 균열을 발생시키는 하중보다 작아질 때, 작용 축력과 단면내력 간의 평형이 이루지면서 균열이 빠르게 닫혀지게되 pinching 거동이 크게 나타난다. Column1의 경우 상당히 큰 pinching 거동이 나타나는데, 이는 Column1이 전단지간비가 2.87로 전단거동에 의한 영향을 크게 받을 뿐만 아니라, 축력의 작용으로 인해 pinching 거동이 크게 나타나게 되기 때문으로 판단된다. 앞에서 언급한 이유로 인해 축력이 작용하는 부재를 해석할 경우 전단에 대한 영향을 따로 고려하지 않아도 pinching 거동을 잘 모사하게 된다. 따라서 그림 2(b)에서 볼 있는 바와같이 제안된 방법역시 pinching 거동을 비교적 정확히 모사하면서 반복하중하에서의 기둥의 비선형 거동을 효과적으로 모사하였다. 한편, 제안된 철근모델이 적용되지 않은 경우, 축력의 작용으로 인해 pinching 거동은 어느정도 모사하는 반면 에너지 흡수능력은 역시 과대평가하고 있음을 그림 2(a)로부터 알 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 적층단면을 토대로 한 해석시 콘크리트와 철근사이의 부착슬립 효과를 간접적으로 고려할 수 있도록하는 철근모델을 제안하였다. 철근과 콘크리트 사이의 부착 거동을 효과적으로 모사하기 위해 인장측 철근에 대하여 평균 응력-변형률 관계를 갖는 재료모델을 사용하였으며, 철근의 하중이력 거동을 정의하는데 있어 압축측 철근의 응력-변형률 관계 또한 해석상의 편의를 위해 인장측의 것과 동일한 것을 사용하였다. 제안된 모델을 토대로 해석을 수행하기 위해서는 균열발생 지점에서부터 콘크리트와 철근의 완전부착까지의 거리인 전달길이 구간에 대하여 수정된 철근모델을 적용하게 된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Belarbi, A. and Hsu, T.T.C., "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete," ACI Structural Journal, Vol 91, No. 4, 1994, pp. 465-474.
2. Filippou, F.C., Popov, E.P. and Bertero V.V., "Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinfroced Concrete Joints," Earthquake Engineering Research Center, Report UCB/EERC-83/19, University of California, Berkeley, California, 1983
3. Roufaiel, M.S.L. and Meyer, C., "Analytical Modeling of Hysteretic Behavior of R/C Frames," Journal of Structural Engineering, Vol. 113, No. 3, 1987, pp. 429-444.
4. Wight, J.K. and Sozen, M.A., "Strength Decay of RC Columns under Shear Reversals," Journal of the Structural Division, Vol. 101, No. ST5, 1975, pp. 1053-1065