

부착 특성에 기반한 철근콘크리트 부재의 인장강화효과

Tension Stiffening Effect Based on Actual Bond Characteristics in Reinforced Concrete Members

하태관* 이기열** 김대중*** 김우****
Ha, Tae Kwan Lee, Ki Yeol Kim, Dae Joong Kim, Woo

ABSTRACT

This paper presents an analytical model for evaluation of Tension Stiffening Effect by actual Bond-Slip relationships between the reinforcement and the surrounding concrete. The presence of longitudinal splitting cracks was found to significantly after the tension stiffening. The model is applied to the longitudinal splittings cracks and derived to Tension stiffening model. The predicted values are shown to be in good agreement with the experimentally measured data.

1. 서론

균열이 발생한 단면에서 모든 인장력은 철근이 부담하지만, 하중이 증가함에 따라 균열이 계속적으로 형성되면서 균열단면사이 부분의 콘크리트는 부착에 의해 철근으로부터 전달되는 인장력의 일부를 부담하게 된다. 이러한 결과로 인하여 콘크리트가 철근의 인장강성을 증가시키는 현상을 인장강화효과라 한다. 최근 들어 철근콘크리트 구조물의 대형화와 고강도 재료사용, 강도설계법과 같은 정밀한 해석기법의 적용으로 인해 부재의 단면이 축소되고 이에 따른 높은 철근인장력이 유발되는 경우가 많게 되어 인장강화효과를 고려해야 할 필요성이 강조되고 있는 실정이다. 그러나 현행 설계기준에서는 구조물 설계시 인장영역의 콘크리트 역할을 무시하거나 철근과 콘크리트 경계면에서의 미끌림 또는 부착응력 분포를 실제로 적용하지 않고 평균 부착 개념에 의한 인장강화효과를 적용하고 있다. 또한 작용하중 증가에 따라 균열면에서 국부적으로 발생하는 쪼갬균열의 영향은 반영하고 있지 못하는 실정이다. 따라서 이 논문에서는 실제 부착응력-미끌림 관계와 쪼갬균열의 영향을 반영할 수 있는 인장강화효과 모델을 제안하였다.

2. 부착거동

균열 발생 단계에 따라 나타나는 변형률, 미끌림, 부착응력과 같은 부착거동 특성을 균열 형성단계와 안정화 단계로 구분하여 그림 1에 나타내었다. 그림 1(d)와 같은 부착거동을 설명하기 위해서는 미

*정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

**정회원, 전남대학교 토목공학과 박사후연구원

***정회원, 전남도립 남도대학 토목환경과 조교수

****정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

끌림 분포를 먼저 정의해야 하는데 이 논문에서는 안정화단계에서 비교적 선형에 가깝게 미끌림이 분포한다는 Shah(1984)의 실험결과를 근거로 하여 안정화단계의 부착전달길이 l_{t0} 내에서 최대미끌림 s_0 를 갖는 중앙단면의 기울기($ds/dx = s_0/l_{t0}$)를 이용하여 다음과 같은 선형분포로 가정하였다.

$$s_x = \frac{s_0}{l_{t0}} x \quad (1)$$

식 (1)과 같은 미끌림 분포가 정의되면 철근과 콘크리트 경계면에서의 부착응력 크기를 결정할 수 있게 되는데 이 논문에서는 부착응력-미끌림 관계를 MC 90과 EC 2에서 규정하고 있는 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$\tau_x = \tau_{\max} \left(\frac{s_x}{s_1} \right)^\alpha \quad (2)$$

여기서, $\tau_{\max} = 2.0 \sqrt{f_{ck}}$, $s_1 = 0.6mm$ 이다. 균열 안정화단계에서는 부착전달길이 l_{t0} 내에서 부착응력에 의해 콘크리트로 전달되는 최대 인장력(중앙단면에서의 인장력) N_{cc} 가 균열하중 N_{cr} 을 넘지 않아야 한다. N_{cc} 는 Mirza(1979)와 Scott(1987)의 실험자료를 통계 분석한 결과 βN_{cr} ($0 < \beta < 1$)의 크기로 관찰되는데 이 논문에서는 β 를 0.6으로 사용하였다. 이상과 같은 조건으로부터 l_{t0} 는 다음과 같이 유도할 수 있게 된다.

$$\sum_0^{l_{t0}} \tau_{\max} \frac{1}{s_1^\alpha} \left(\frac{ds}{dx} \right)^\alpha x^\alpha = N_{cc} \quad (3)$$

식 (3)에 대해서 식 (1)과 식 (2)를 대입하여 전개하면 l_{t0} 는 다음과 같다.

$$l_{t0} = \left\{ \frac{N_{cc} s_1^\alpha (\alpha + 1)}{\sum \sigma \tau_{\max}} \frac{1}{\left(\frac{ds}{dx} \right)^\alpha} \right\}^{\frac{1}{\alpha + 1}} \quad (4)$$

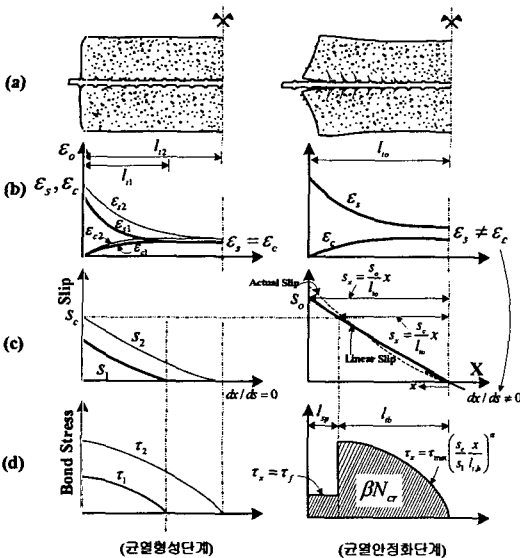


그림 1 철근의 변형률과 미끌림, 부착응력관계

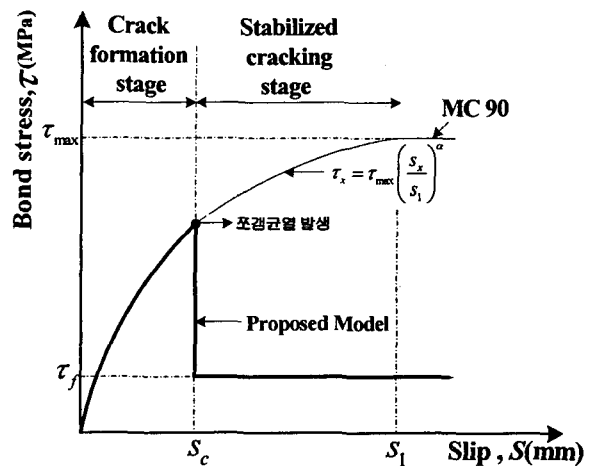


그림 2 제안된 부착응력-미끌림관계

식 (4)로부터 l_{to} 를 계산하기 위해서는 안정화단계가 시작되는 순간의 중앙단면의 기울기가 정의되어야 하는데 이는 중앙단면에서 힘의 평형조건으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\frac{s_c}{l_{to}} = \frac{ds}{dx} = \frac{N_{o,st}}{E_s A_s} - \frac{(1+n\rho)N_{ac}}{E_s A_s} \quad (5)$$

여기서, 안정화 시작하중 $N_{o,st} = (1+n\rho)N_{ac}$ 이다.

l_{to} 구간내에서 s_o 가 일정크기의 미끄럼 량을 넘어서면 조깅균열이 발생하기 때문에 그 기준값을 정의할 필요가 있다. 이는 균열 안정화단계를 정의하는 변수로써 조깅균열이 발생하기 직전의 한계 미끄럼 량 s_c 라 하고 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$s_c = l_{to} \cdot \frac{ds}{dx} \quad (6)$$

3. 조깅균열에 의한 부착전달길이의 변화

s_c 보다 큰 미끄럼이 발생한 구간은 그림 2와 같이 잔류부착응력 상태가 되며 그 크기를 τ_f 로 정하여 나타내었다. 조깅균열에 의해 l_{to} 는 l_{sp} 와 l_{tb} 로 구분할 수 있으며 부착응력 산정시 적분구간으로 이용된다. 두 구간 내에 존재하는 부착력의 크기는 중앙단면의 N_{ac} 와 같다는 평형조건으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_0^{l_{sp}} \tau_f dx + \sum_0^{l_{tb}} \tau_{max} \left(\frac{s_c}{s_1 l_{tb}} x \right)^\alpha dx = N_{ac} \quad (7)$$

식 (7)을 적분수행하여 l_{tb} 에 대한 평형방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\sum_0 \tau_{max}}{s_1^\alpha (\alpha + 1)} \left(\frac{ds}{dx} \right)^\alpha l_{tb}^{\alpha+1} - \sum_0 \tau_f l_{tb} + (\sum_0 \tau_f l_{to} - N_{ac}) = 0 \quad (8)$$

식 (8)의 평형방정식으로 l_{tb} 를 산정하고, $l_{sp} = l_{to} - l_{tb}$ 로 구할 수 있다.

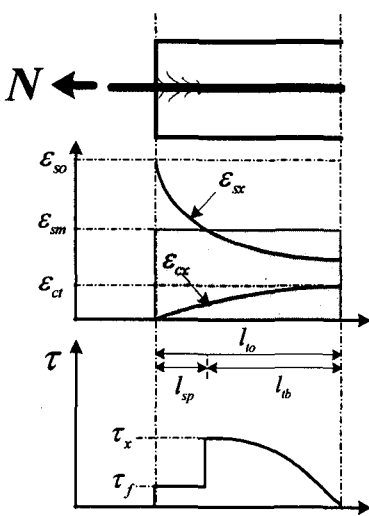


그림 3 철근의 평균 변형률 개념

4. 인장강화효과

인장강화효과를 고려하고 있는 현행 설계기준들은 동일하중 단계에서 철근의 변형률이 부착효과에 의해서 순수 철근만의 변형률에 비하여 작게 나타난다는 개념으로 설명하고 있다. 이 논문에서도 같은 개념으로 l_{sp} 와 l_{tb} 구간에 존재하는 부착응력의 크기만큼 작게 나타난다는 개념으로 표현하였다.

$$\epsilon_{sx} = \epsilon_{so} - \sum_0^{l_{sp}} \frac{\tau_f}{A_s E_s} dx - \sum_0^{l_{tb}} \frac{\tau_{max}}{A_s E_s} \left(\frac{s_c}{s_1} x \right)^\alpha dx \quad (9)$$

그러나, 부착응력 분포가 비선형이며 같은 실험체 내에서 균열간격이 서로 다르기 때문에 인장증강 기여도를 계산한다는 것은 매우 어렵다. 따라서 구조물의 설계나 사용성 검토 시 평균 변형개념을 도입하여 ϵ_{sm} 을 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_0^{l_o} \epsilon_x dx = \epsilon_{sm} \cdot l_{to} = \epsilon_{so} \cdot l_{to} - \sum_0 \int_0^{l_p} \frac{1}{E_s A_s} \left(\int_0^{l_p} \tau_f dx \right) dx - \sum_0 \int_0^{l_b} \frac{1}{E_s A_s} \left(\int_0^{l_b} \tau_{max} \left(\frac{s_c x}{s_1 l_{tb}} \right)^\alpha dx \right) dx \quad (10)$$

$$\epsilon_{sm} = \epsilon_{so} - \beta_t \frac{f_\alpha}{E_s \rho} \quad \text{여기서, } \beta_t = \frac{\sum_0 \left\{ \frac{\tau_f l_{sp}^2}{2} + \frac{\tau_{max} s_c^\alpha l_{tb}^2}{(\alpha+1)(\alpha+2)s_1^\alpha} \right\}}{A l_{to} f_\alpha} \quad (11)$$

5. 제안식의 검증

이 논문에서 제안한 식 (11)의 인장강화효과 모델은 정확성과 타당성 검토를 위해 이기열(2005), Rizklla(1984), Richard. H(1997)의 실험자료와 설계기준들을 비교 분석하여 그림 4에 정리하였다. 이 그림을 살펴보면 하중단계별 인장강화효과가 감소하는 실험 자료와는 달리 MC 90과 EC 2는 인장강화효과 크기를 과대평가하고 있지만, 실제 부착응력-미끄러짐 관계와 조깅균열 등의 영향을 반영하고 있는 제안식은 비교적 정확하게 예측함을 할 수 있다.

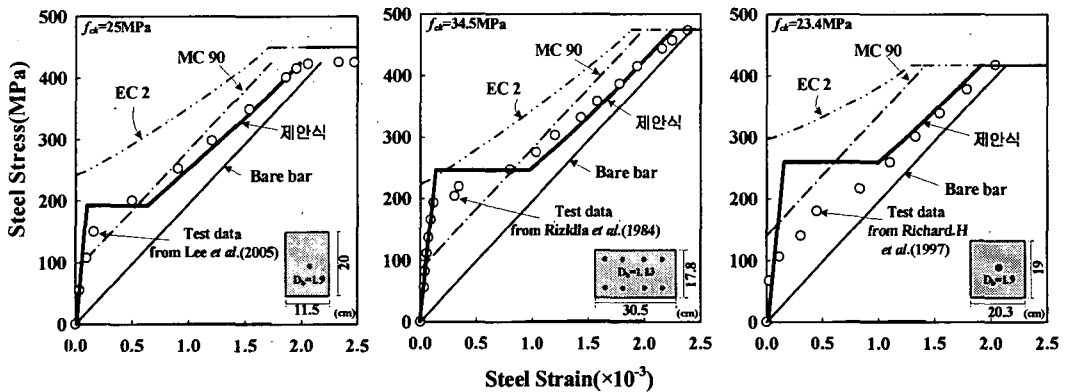


그림 4 예측값과 실험결과의 비교

6. 결론

이 논문은 부착응력-미끄러짐 관계를 정의하고, 안정화단계에서 부착에 의한 철근의 평균변형률을 산정하였다. 제안모델은 논리적 일관성을 확보하고 있으며 여러 실험자료 및 설계기준 규정과의 비교를 통하여 그 적용성과 타당성이 비교적 양호함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. S.H. Rizkalla and L.S. Hwang, "Crack Prediction for Members in Uniaxial Tension" ACI Structural Journal, Vol.81. No. 6. 1984, pp. 572~579.
2. 이기열, "철근콘크리트 휨부재의 성능기반 사용성 모델 개발", 박사학위논문, 전남대학교(2005.2)
3. Saeed M. Mirza and Jules Houde, "Study of bond Stress-Slip Relationships in Reinforced Concrete" ACI Structural Journal, Vol.76 No.1 1979, pp. 19~46.
4. Scott, R. H. and Gill, P. A. T. "Short-term Distribution of Strain and Bond Stress along Tension Reinforcement" ACI Structural Journal Vol. 65B, No.2 pp.39~43.
5. Richard H. Atkinson and Michael I. Hammons, "Tension Stiffening Behavior of Reinforced Masonry", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol 123. No 5. 1997. pp, 597~603