

반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 부착응력-슬립 모델

Bond Stress-Slip Model of Reinforced Concrete Member under Repeated Loading

오병환* 김세훈** 김지상***
Oh, Byung Hwan Kim, Se Hoon Kim, Ji Sang

ABSTRACT

The crack widths of reinforced concrete flexural members are influenced by repetitive fatigue loadings. The bond stress-slip relation is necessary to estimate these crack widths realistically. The purpose of the present study is, therefore, to propose a realistic model for bond stress-slip relation under repeated loading. To this end, several series of tests were conducted to explore the bond-slip behavior under repeated loadings. Three different bond stress levels with various number of load cycles were considered in the tests. The present tests indicate that the bond strength and the slip at peak bond stress are not influenced much by repeated loading if bond failure does not occur. However, the values of loaded slip and residual slip increase with the increase of load cycles. The bond stress after repeated loading approaches the ultimate bond stress under monotonic loading and the increase of bond stress after repeated loading becomes sharper as the number of repeated loads increases.

The bond stress-slip relation after repeated loading was derived as a function of residual slip, bond stress level, and the number of load cycles. The models for slip and residual slip were also derived from the present test data. The number of cycles to bond slip failure was derived on the basis of safe fatigue criterion, i.e. maximum slip criterion at ultimate bond stress.

1. 서론

철근과 콘크리트의 부착은 RC 또는 PC 부재에서 축력을 철근에서 콘크리트로 전달시키는 역할을 한다. 철근과 콘크리트의 부착은 콘크리트와 철근의 동일거동에 의한 안전성 확보를 위해서도 필요하지만 적정 수준의 연성을 구조물에 줌으로써 부재의 거동을 조절하기 위해서도 필요하다. 이러한 철근과 콘크리트 부착 특성은 철근콘크리트 부재의 균열 거동에 직접적인 영향을 미친다. 부착특성 중 부착응력-슬립 관계식은 균열거동 해석 및 예측을 위한 필수적인 요소로 이용되고 있다. 특히 휨부재의 균열폭은 부착응력-슬립 관계식을 적용하면 정밀하게 예측 가능하다. 그러나 반복하중상태의 부착응력-슬립 관계식이 정립되어 있지 않아 교량 등의 반복하중을 받는 휨부재의 균열폭 예측은 불가능한 상태이다. 따라서 본 연구는 인발시험에 일정방향의 반복하중을 가한 후 인발시험을 수행하여 부착강도 및 슬립 변화를 분석하여 반복하중상태의 부착응력-슬립 관계식을 제시하고자 한다.

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사
*** 정회원, 서경대학교 토목공학과 교수

2. 부착 피로 실험

2.1 실험 변수 및 시편 형상과 재료 특성

반복하중 상태를 가장 대표하는 요소는 반복응력의 수준과 반복회수이다. 따라서 본 실험에서는 반복상태의 부착특성은 정적재하시의 부착특성을 기본적으로 따른다고 가정하고 반복하중에 의해 추가되는 요소를 부착응력과 반복회수로 가정하였다. 따라서 본 실험의 주요 변수는 부착강도에 대한 반복 부착응력의 비와 반복회수로 설정하였다. 반복재하되는 부착응력의 수준은 부착강도의 45%, 60%, 75%이며 반복회수는 각 부착응력 수준에서 1, 10, 10², 10³, 10⁴, 10⁵번 재하되었다.

시험시편의 형상은 그림 1과 같다. 부착길이 전체에 일정한 부착응력을 유발시키기 위해서 시편은 짧은 부착길이를 갖도록 그림 1과 같이 제작되었다. 사용된 철근 D16이며 본 실험의 사용된 철근의 부착특성을 나타내는 부착지수(bond index)는 0.098로 조사되었다. 콘크리트 28일 강도는 37 MPa이다.

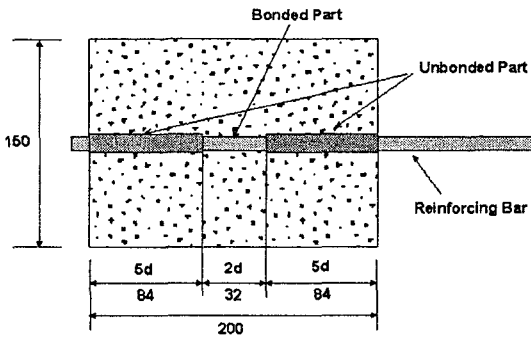


그림 1 시편 형상

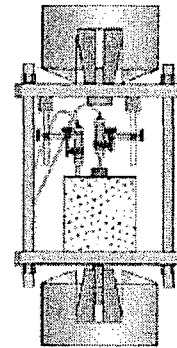


그림 2 하중 재하 시스템

2.2 실험 방법

이제까지 Pull-out 피로 실험은 주로 일정크기의 하중 또는 변위를 철근이 Pull-out 파괴가 발생할 때까지 계속 재하하는 방법으로 수행되어 왔다.(Eligehausen, Balazs) 이러한 실험은 부착강도의 S-N곡선과 슬립의 반복부착응력과 반복회수에 대한 변화식을 제공할 수 있지만 부착강도의 S-N곡선과 슬립의 변화식만으로 반복하중을 받는 부착구조의 부착응력-슬립관계식을 유도할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 일정크기의 반복하중이 일정회수 만큼 가해진 이후의 부착응력-슬립 관계식을 유도하기 위해서 일정회수의 피로하중을 가한 후 Pull-out 실험을 수행하여 부착강도와 슬립의 변화 및 부착응력과 슬립관계의 변화를 분석하였다.

3. 실험 결과 분석

3.1 Pull out 시험 결과

피로 하중을 가하지 않은 부착시편의 인발시험을 통하여 구한 부착응력-슬립 형태는 그림 3과 같다. 이를 MC90에서 제시하고 있는 부착응력-슬립 모델(그림 4, 식(1)) 형태로 표현하면 식(2)와 같은 형태로 모델링되었다.

$$\tau = \tau_{\max} \left(\frac{s}{s_{pl}} \right)^\alpha \quad (1)$$

$$\tau = 2.5f_c^{0.6} \left(\frac{s}{s_{p1}} \right)^{0.32}, \quad s_{p1} = 1.04 \text{ mm}, \quad \tau_{\max} = 2.5f_c^{0.6} \quad (2)$$

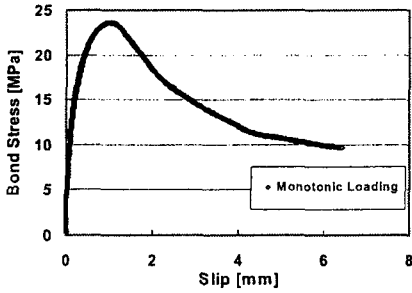


그림 3 단조하중재하시의 부착응력-슬립 관계

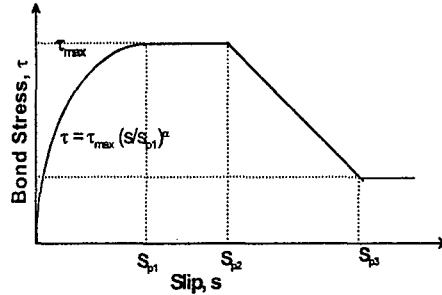


그림 4 MC90의 부착응력-슬립 모델

3.2 피로 Pull out 시험 결과

피로하중 재하 후 Pull out 실험을 수행하여 그림 5~7과 같이 각 부착응력수준과 반복회수에 따른 부착응력-슬립 변화를 도출하였다. 이를 토대로 반복하중에 재하에 따른 최대부착응력과 최대부착응력 발생시의 슬립값 변화, 반복재하에 따른 슬립의 변화, 반복재하후의 인발시의 부착응력-슬립 관계를 제시하였다.

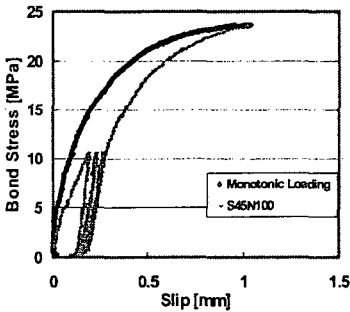


그림 5 S45N100의 부착응력-슬립

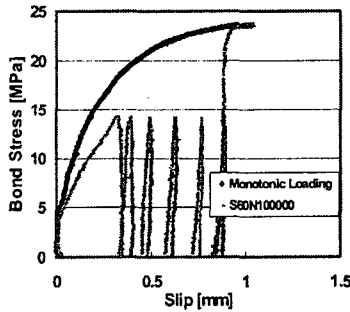


그림 6 S45N100의 부착응력-슬립

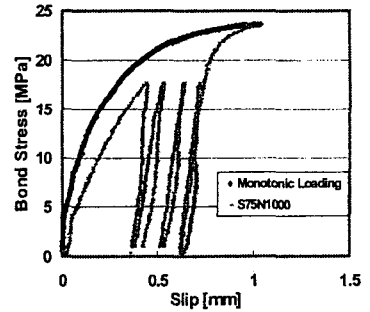


그림 7 S45N100의 부착응력-슬립

최대부착응력 및 최대부착응력 발생시의 슬립값을 검토하였다. 그림8과 그림9에서 보는 바와 같이 최대부착응력 및 최대부착응력 발생시의 슬립값의 변화는 반복하중 크기 및 반복회수와 큰 상관관계 없이 하중을 받기 전의 초기 최대부착응력 및 최대부착응력 발생시의 슬립값과 크게 달라지지 않음을 알 수 있다. 즉 철근과 콘크리트의 부착특성을 가장 크게 대변하는 최대부착응력(부착강도)과 이 때 발생하는 슬립값은 피로하중과 관계없이 초기 성질이 변하지 않음을 알 수 있다.

이에 반해 피로하중의 재하는 지속적인 슬립을 발생시킨다. 실험결과를 분석한 결과 피로하중이 N 번 작용했을 때의 슬립 s_N 은 첫 하중이 재하되었을 때의 슬립 s_1 와 식(3)과 같은 관계를 가지는 것으로 나타났다. 잔류슬립은 식(4)와 같은 식으로 표현되었다. 식(4)에서 첫하중 재하시의 잔류 슬립 s_{r1} 은 식(5)와 같이 반복되는 부착응력 수준과 슬립값의 함수로 표현된다.

$$s_N = s_1 \cdot N^b, \quad b = 0.098 \quad (3); \quad s_{rN} = s_{r1} \cdot N^{br}, \quad br = b \quad (4)$$

$$s_{r1} = s_1 \cdot \{2(\tau_{rep}/\tau_{\max}) - (\tau_{rep}/\tau_{\max})^2\} \quad (5)$$

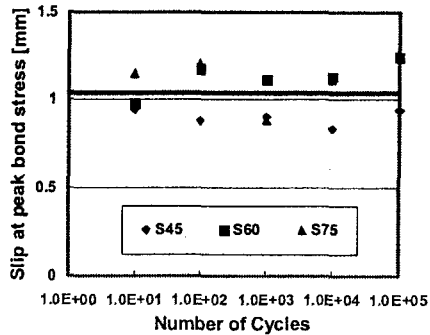
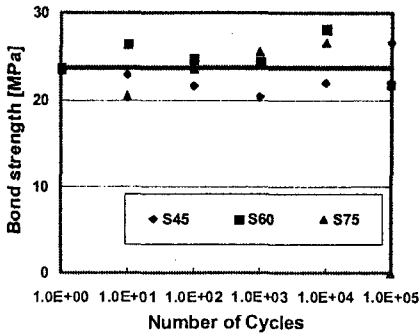
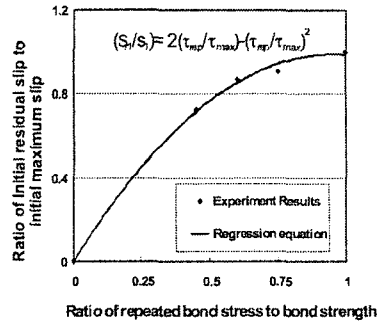
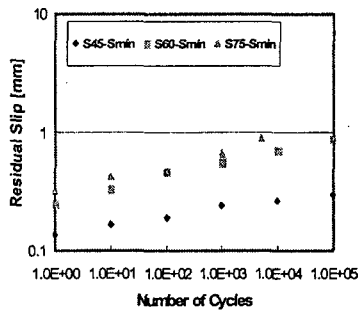
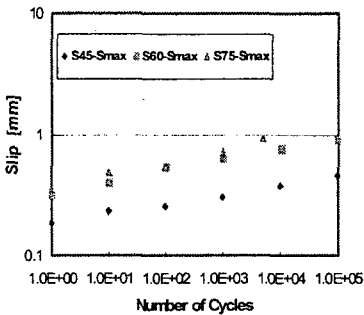


그림 8 반복재하에 따른 최대부착응력 변화 그림 9 최대부착응력시의 슬립값 변화

반복재하 이후의 부착응력-슬립 관계는 식(6)과 같이 잔류슬립의 함수로 표현된다. 그림5~7에서 보는 바와 같이 반복회수가 많아질수록 부착응력-슬립 관계의 경사가 크게 변하는 것을 알 수 있다. 이것은 식(7)에서 α_N 을 반복회수와 부착응력 수준의 함수로 표현하여 모델링하였다.

$$\tau_N = \tau_{max} \left(\frac{s - s_{r(N-1)}}{s_{p1}} \right)^{\alpha_N} \quad (6),$$

$$\alpha_N = \frac{\alpha_1}{N^{0.092}(\tau_{rp}/\tau_{max})} \quad (7)$$



4. 결론

본 연구는 Pull-out 피로실험을 통하여 반복하중 받는 상태의 부착응력-슬립 거동을 분석하고 반복하중 상태의 부착응력-슬립 관계식을 제시하였다. 실험을 통하여 반복하중을 받은 이후에도 최대부착강도와 이때의 슬립값이 변하지 않은 것을 발견하였고 이를 토대로 반복재하에 따른 슬립의 변화와 이후의 부착응력-슬립 모델을 제시하였다.

참고문헌

1. Eligehausen, R., Popov, E. P. and Bertero, V.V.(1983), Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations, Report No UCB/EERC 82-23, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, Oct., 1983.
2. Balazs G.L. (1991), "Fatigue of Bond", ACI Material Journal, Vol.88, No.6, Nov-Dec. 1991, pp.620-629.