

# 반복하중 하에서 부착응력-슬립 거동 실험적 연구

## Experimental Study of Bond Stress-Slip Behavior under Repeated Loading

오병환\* · 김세훈\*\* · 김지상\*\*\* · 신용석\*\*\*\*

Oh, Byung Hwan · Kim, Se Hoon · Kim, Ji Sang · Shin, Yong Seok

### ABSTRACT

To analyze a bond stress-slip behavior between a reinforcing bar and concrete under repeated loading, pull-out fatigue test was performed. Major variables were repeated stress levels and cycle numbers. Test specimen was taken repeated constant amplitude loading before it was fractured by pull-out test. Increments of bond strength and slip according to repeated stress level and cycle numbers were analyzed. On the basis of test results, Local bond stress-slip relationship under repeated loading were formulated

### 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 주므로써 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. 지금 제시되어 있는 반복하중상태의 부착응력-슬립 관계식은 지진하중과 같은 역방향 하중이 작용하는 재하에 관한 것으로 응력의 부호가 바뀌지 않는 휨부재에 적용하기는 곤란하다. 따라서 본 연구는 인발시편에 일정방향의 반복하중을 가한 후 인발시험을 수행하여 부착강도 및 슬립 변화를 분석하여 반복하중상태의 부착응력-슬립 관계식을 제시하고자 한다.

### 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. 자세한 변수는 표 1과 같다.

\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 학생회원, 서울대학교 토목공학과 박사수료

\*\*\* 정회원, 서경대학교 토목공학과 교수

\*\*\*\* 정회원, 현대산업개발 토목설계팀

표 1 주요 변수

반복응력수준 (반복부착응력/부착강도)	반복회수					
	0	10	100	1,000	10000	100000
0.45	S100N0	S45N10	S45N100	S45N1000	S45N10000	S45N100000
0.60		S60N10	S60N100	S60N1000	S60N10000	S60N100000
0.75		S75N10	S75N100	S75N1000	S75N10000	S75N100000

시험시편의 형상은 그림 1과 같다. 부착길이 전체에 일정한 부착응력을 유발시키기 위해서 시편은 짧은 부착길이를 갖도록 그림 1과 같이 제작되었다. 사용된 철근 D16이며 리브 형상은 그림 2와 같다. 본 실험의 사용된 철근의 부착특성을 나타내는 부착지수(bond index)는 0.098로 조사되었다.

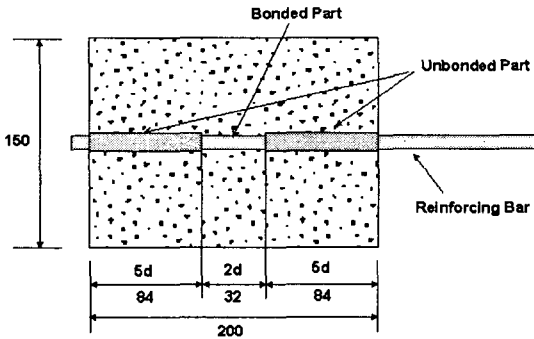


그림 1 시편 형상

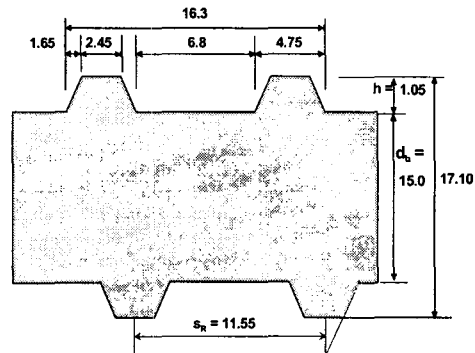


그림 2 철근 형태

콘크리트 28일 강도는 37 MPa이며, 자세한 배합특성은 표 2와 같다.

표 2 콘크리트 배합

굵은 골재 최대치수(mm)	슬럼프 (cm)	W/C	공기량(%)	잔골재율(%)
13	10	0.48	4.5	48

## 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 가한후 Pull-out 실험을 수행하여 부착강도와 슬립의 변화 및 부착응력과 슬립관계의 변화를 분석하고자 한다.

하중재하 프레임은 그림 3, 그림 4와 같다. 재하방법은 하중제어를 통하여 일정크기의 하중을 인하는 반복회수 만큼 가한 후 변위제어로 시편이 완전히 Pull-out 파괴가 발생할 때까지 하중을 재하하였다. 각 반복회수 변화에 따른 슬립값과 잔류슬립값을 분석하기 위해서 10° 단위로 정적재하를 수행하고 그사이의 회수에서는 피로하중을 가하였다. 정적재하시의 하중재하율은 0.89tonf/min이며, 피로하중은 2Hz의 속도로 재하하였다. 또한 변위제어를 이용한 Pull-out 실험시의 변위변화율은 0.3mm/min이다.

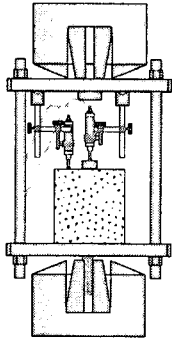


그림 3 하중 재하 시스템

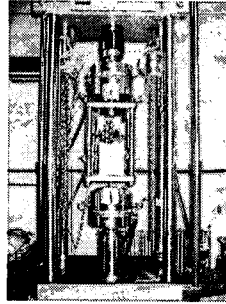


그림 4 피로 실험 광경

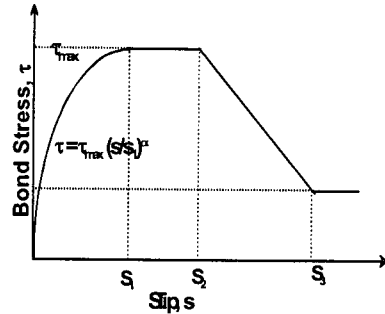


그림 5 MC90 부착응력-슬립 관계식

### 3. 실험 결과 분석

#### 3.1 Pull out 시험 결과

피로 하중을 가하지 않은 부착시편의 인발시험을 통하여 부착강도 및 부착응력-슬립 관계식을 도출하였다. 총 8개의 시편의 인발시험을 수행한 결과 부착응력-슬립 관계는 그림6과 같다. 평균적인 부착강도는 23.65 MPa, 부착응력이 최고일 때의 슬립값은 1.039mm으로 나타났다(그림6). CEB MC90에서 제시하고 있는 부착응력-슬립 관계식(1)과 실험결과를 비교하였다. MC90에서는 식(2)와 같은 부착강도 15.2 MPa를 예상하였지만 실험결과는 이보다 큰 23.65 MPa를 보여주었다. 최대부착응력 발생시의 슬립값  $s_1$ 은 MC90에서는 1mm을 예상하였고 실험결과는 1.039mm으로 유사한 결과를 보여주었다. 식(1)의  $\alpha$ 는 MC90의 0.4 보다 더 큰 0.4637이 실험결과와 가장 유사한 것으로 나타났다(그림 7). 이러한 MC90식과의 차이는 본 실험의 골재크기와 arch action effect에 의한 것으로 판단된다. 본 실험 결과값으로 MC90형태의 부착응력-슬립 관계식을 제시하면 식(3)과 같다.

$$\tau = \tau_{\max} \left( \frac{s}{s_1} \right)^\alpha \quad (1) \quad , \quad \tau_{\max} = 2.5\sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

$$\tau = 2.5f_{ck}^{0.622} \left( \frac{s}{s_1} \right)^{0.4637} \quad , \quad s_1 = 1.039\text{mm} \quad (3)$$

#### 3.2 피로 Pull out 시험 결과

피로하중 재하 후 Pull out 실험을 수행한 결과 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 n번 작용했을 때의 슬립  $s_n$ 은 반복하중이 재하되기 전의 슬립  $s_0$ 와 식(4)와 같은 관계를 가지는 것으로 나타났다. 잔류슬립은 식(5)와 같은 식으로 표현되었다.

$$s_n = s_0 \cdot (1+n)^b \quad , \quad b = 0.1069 \quad (4)$$

$$s_m = s_0 \cdot (1+n)^b \quad , \quad b = 0.1069 \quad , \quad s_n = s_0 - 0.046 \quad (5)$$

실험결과 b는 S45 시리즈는 작은 값을 보이지만 S60, S75 시리즈는 Eligehausen(1979) 실험결과 0.107과 거의 유사한 값을 보임을 알 수 있다. 그림 12는 단조재하시의 부착응력-슬립관계와 반복하중

재하 후의 부착응력-슬립 관계를 비교한 것이다. 이를 통해서 반복하중이 n번 재하한 이후 부착응력-슬립관계식은 식(6)과 같은 형태로 예상할 수 있다.

$$\tau_n = \tau_{\max} \left( \frac{s - s_m}{s_1} \right)^{a_n} \quad (6)$$

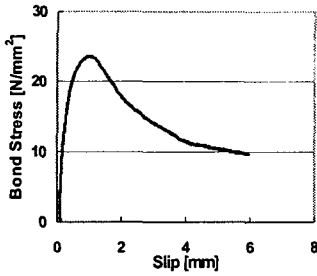


그림 6 정적 Pull-out 실험 결과

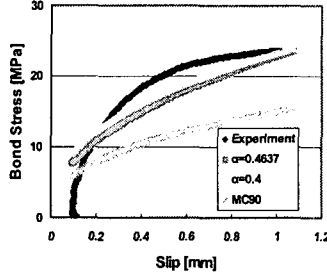


그림 7 실험값과 부착응력-슬립 관계식 비교

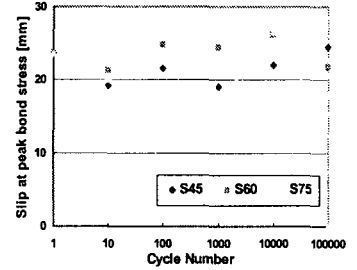


그림 8 반복회수에 따른 최대부착응력 변화

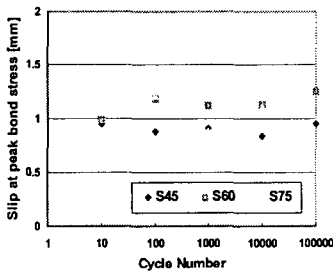


그림 9 반복회수에 따른 최대부착응력 발생시의 슬립변화

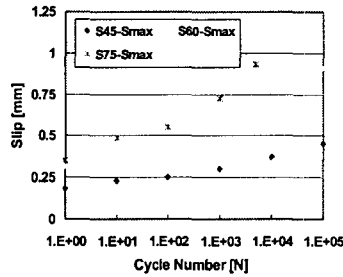


그림 10 반복회수에 따른 최대슬립 변화

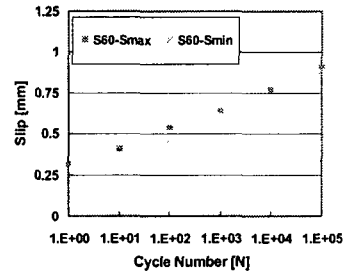


그림 11 반복회수에 따른 잔류슬립 변화

#### 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 부착응력-슬립식을 제시하였다.

#### 참고문헌

1. Eligehausen, R., Popov, E. P. and Bertero, V.V., "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., "Fatigue of Bond," ACI Material Journal, Vol.88, No.6, Nov-Dec. 1991, pp.620-629.

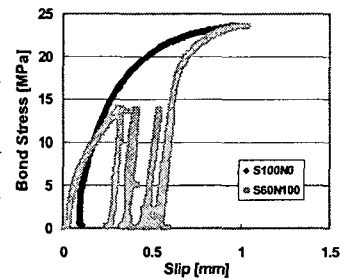


그림 13 단조재하와 반복재하 후의 부착응력-슬립 관계 비교