

반복하중 하에서 철근부식을 고려한 철근콘크리트 부재의 부착응력-슬립 거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Bond Stress-Slip Behavior of Reinforced Concrete Member Under Repeated Loading Considering Steel Corrosion

김철민* 김지상** 박종범*** 장승필****
Kim, Chul Min Kim, Jee Sang Park, Jong Bum Chang, Sung Pil

ABSTRACT

This study includes the experimental investigation on the fatigue-bond behavior with respect to the various rates of steel corrosion. Major criteria of test variables are the rates of steel corrosion by chloride ion and the ratio of the applied stress to the bond failure stress. According to the test results, the slip versus number of load cycles relation was found to be approximately linear in double logarithmic scale, not only without steel corrosion but also with steel corrosion. This research will be helpful for the realistic durability design and condition assessment of reinforced concrete structures.

1. 서론

해안가에 건설된 교량 및 구조물은 해수에 의한 염해로 인해 철근부식 환경에 노출되어 있고, 동시에 차량에 의한 반복하중에 의해 피로하중을 받고 있다. 철근과 콘크리트의 부착은 콘크리트와 철근의 일체 거동에 의한 안전성 확보를 위해서도 필요하지만, 적정 수준의 연성을 구조물에 줌으로써 부재의 거동을 조절하기 위해서도 필요하다. 따라서, 반복하중 하에서의 부착응력-슬립관계에 대한 연구는 진행되어 왔으나, 철근부식이 이루어진 경우의 부착응력-슬립관계에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통하여 단조하중 하에서의 부식률에 따른 부착강도 및 슬립의 변화 및 이에 따른 Local bond stress-slip 관계식을 제시하였고, 철근부식이 반복하중 하에서의 슬립 및 잔류슬립에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 피로부착 실험 개요

2.1. 실험변수 및 시편형상

본 실험의 주요 변수는 표 1과 같이 부착강도에 대한 반복 부착응력의 비(응력수준)와 반복하중 횟수 및 철근 부식률이다. 그리고 실험에 사용된 시편은 그림 1과 같이 150×150×170mm의 각주형으로 D16 철근을

* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 대학원

** 정회원, 서경대학교 토목공학과 조교수

*** 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

**** 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 정교수

사용하였으며, 철근의 매입길이를 철근 지름(d)의 2배인 32mm로 하였다. 일정한 부착응력을 갖는 구간(2d)을 확보하기 위해 철근매입길이 이외의 양쪽 부분은 아크릴로 제작되었다. 콘크리트의 28일 압축강도는 38.24MPa로 측정되었다.

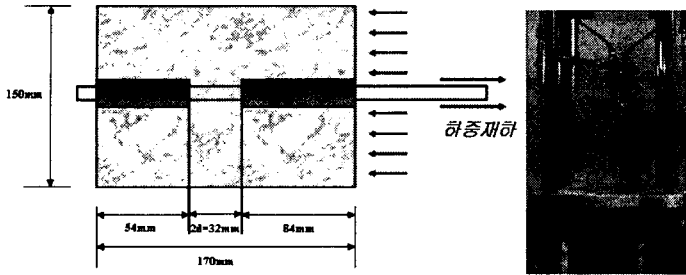


그림 1 시편 상세도

그림 2 부착실험

표 1 실험변수

실험인자	수준
응력 수준(%)	50, 65, 80
반복하중횟수(N)	10 ² , 10 ³ , 10 ⁴ , 10 ⁵ , 파괴시
철근 부식률(%)	0, 0.1, 0.24, 0.48, 0.94, 1.28

2.2. 실험방법

2.2.1. Pull-out Test

철근 부식이 발생하지 않은 시편과 철근 부식이 이루어진 시편에 대하여 Pull-out Test를 수행하여 부착강도(τ_{max})와 슬립(s)의 변화를 측정하였다. 하중재하 실험은 그림 2에 보인 것과 같은 형태로 이루어졌으며, 재하방법은 변위제어로 시편이 Pull-out 파괴에 도달할 때 까지 하중을 재하하였다. 변위변화율(Stroke rate)은 0.3mm/min 이다.

2.2.2. 반복하중 이후의 Pull-out Test

철근이 부식되지 않은 시편의 Pull-out Test로 부터 부착강도(τ_{max})를 구하고, 각 시편에 이 부착강도의 50, 65, 80%의 응력수준으로 반복하중(10², 10³, 10⁴, 10⁵)을 가한 후, 부착파괴에 이를 때까지 하중을 가하여 부식률에 따른 부착강도 및 슬립을 측정하였다. 재하방법은 하중제어를 통하여 일정크기의 반복하중을 가한 후, 변위제어로 Pull-out Test를 하였다. 그리고 반복하중에 따른 슬립 및 잔류슬립의 변화를 살펴보았다.

3. 실험결과

3.1. 철근 부식률에 따른 단조하중 하에서의 Pull-out Test

철근 부식률에 따른 Pull-out Test 결과를 표 2에 정리하였는데, 철근 부식률에 따른 부착강도-슬립값 및 실험상수 α 값을 얻었다. 그림 3 에서와 같이 부식률 0%~0.94%까지는 부식률이 증가할수록 부착강도는 증가하고, 슬립값은 감소하였다. 이는 철근이 부식됨에 따라 철근표면의 거칠기 및 팽창압의 증가로 인해 철근과 콘크리트의 구속효과가 발생한 요인이다. 하지만 철근부식(부식률=1.28%)으로 인해 콘크리트에 splitting 균열이 생긴 시편의 경우는 부착강도 및 슬립값이 현저히 떨어짐을 알 수

있었다. 그리고 Pull-out test에 의한 CEB-FIP Model Code 1990(MC90)에서 제시하는 부착응력-슬립 모델식은 식(1)의 형태로 표현된다.

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_{\beta l}} \right)^{\alpha} \quad \tau_{max} = 2.5 \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

여기서, (τ_{max} : 부착강도, $s_{\beta l}$: 부착강도에서의 슬립값, α : 상수)

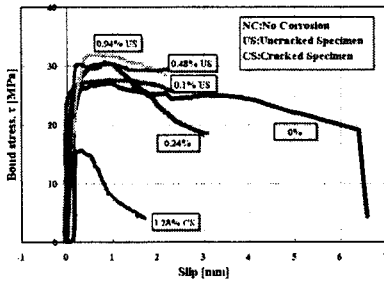


그림 3 단조하중 하에서 부식률에 따른 부착응력-슬립관계

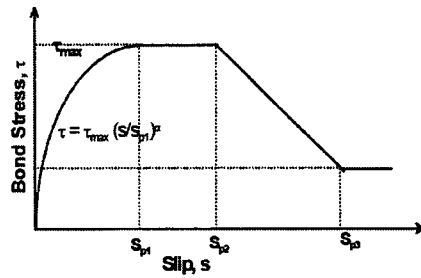


그림 3 MC90 부착응력-슬립 모델

표 2 철근 부식률에 따른 부착강도-슬립값 및 α 값

철근 부식률(%)	0,	0.1,	0.24,	0.48,	0.94,	1.28(균열후)
부착강도(τ_{max}),MPa	28.53,	27.61,	30.39,	30.69,	31.96,	15.57
슬립(s),mm	0.897,	0.979,	0.906,	0.832,	0.687,	0.322
α	0.36,	0.18,	0.22,	0.24,	0.38	

철근 부식률이 0%일 경우, 표 2의 결과 값을 이용하여 MC90 형태의 부착응력-슬립 관계식을 식(2)와 같이 구할 수 있다. 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 38.24MPa이다.

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_{\beta l}} \right)^{\alpha} = 4.6 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{s}{0.897} \right)^{0.36} \quad (2)$$

철근 부식률이 0%일 경우, 위의 식을 MC90과 비교해 볼 때 MC90에서의 α 값은 0.4로 나타났고, 본 실험에서는 0.36으로 유사한 값을 도출했다. 그리고 철근 부식률에 따른 부착응력-슬립 관계식은 표 2에 있는 값들을 이용하여 역시 도출 할 수 있다.

3.2. 반복하중 하에서 철근 부식률에 따른 슬립 및 잔류슬립의 변화

그림 5는 철근 부식률에 따른 반복하중에 대한 슬립 및 잔류슬립을 double logarithmic scale로 나타낸 곡선이다. 그림 5에서 보면 철근 부식률이 증가함에 따라 반복하중 하에서 슬립값은 작아지는 것을 알 수 있었다. 80% 응력수준 에서 부식률 0.1%까지는 1000회 이하에서 철근이 pulled-out 되었지만, 부식률 0.1%이상에서는 부식률이 증가함에 따라 철근 부식에 의한 철근과 콘크리트의 구속효과가 발생하여 철근이 pulled-out 될 때까지 피로수명이 커짐을 그림 5로부터 알 수 있었다. 반복하중 하에서 슬립값은 double logarithmic scale로 도시하였을 때 그림에서와 같이 선형으로 나타남을 알 수 있었다. 위 실험결과는 Rehm and Elgehausen(1979)의 실험결과(철근 부식이 없는 경우, 반복하중 횟수와 반복하중에 따른 슬립값은 double logarithmic scale로 도시하였을 때 선형 관계임)와 일치함을 알 수 있었다. 또한 실험으로 부터 철근 부식이 있을 경우에도 선형관계임을 알 수 있었다. 이로부터 반

복하중 횟수에 따른 슬립값(s)을 유추해 낼 수 있다.

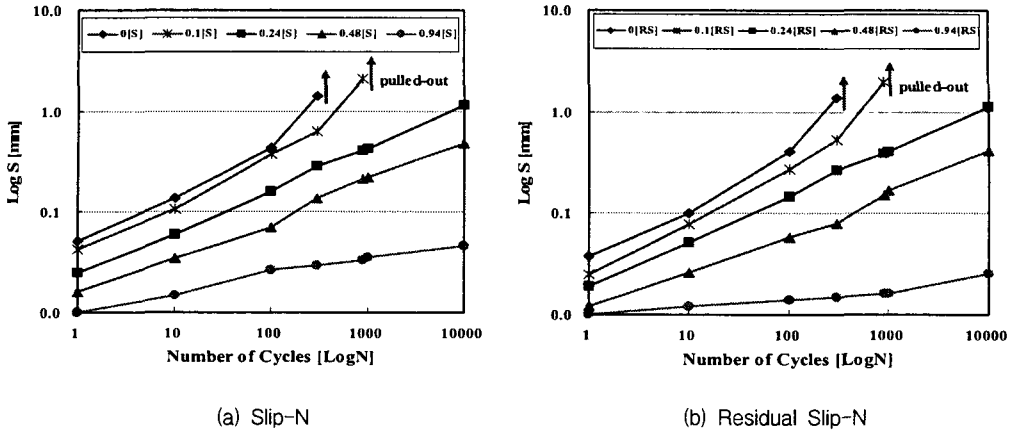


그림 5 철근 부식률에 따른 반복하중에 대한 슬립 및 잔류슬립 변화 곡선(응력수준=80%)

4. 결론

본 연구에서는 반복하중 하에서 철근부식을 고려한 철근콘크리트 부재의 부착거동에 관한 실험적 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 철근 부식률에 따른 Pull-out Test 결과, 부식률 0%~0.94%까지는, 철근 부식으로 인한 철근표면의 거칠기 및 팽창압의 증가로 인해 구속효과가 발생하여 철근 부식률이 증가 할수록 부착강도는 증가하고 슬립값은 감소하였다. 하지만 철근 부식(부식률=1.28%)으로 인해 splitting 균열이 생긴 시편의 경우는 부착강도 및 슬립값이 현저히 떨어졌다.
- ② 철근 부식률에 따른 단조하중 하에서의 Pull-out Test 결과값을 이용하여, Local bond stress-slip 관계식을 나타내었다.
- ③ 반복하중 하에서 철근 부식률이 0.1%이하에서는 80% 응력수준에서 피로수명이 1000회 이하로 나타났다지만, 부식률이 증가함에 따라 피로수명은 증가함을 알 수 있었다.
- ④ 철근 부식률에 대한, 반복하중 횟수와 반복하중에 따른 슬립값은 double logarithmic scale로 도시 하였을 때 선형관계임을 알 수 있었다. 이로부터 반복하중 횟수에 따른 슬립값을 유추해 낼 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김세훈. (2004) 반복하중을 받는 철근콘크리트 휨부재의 균열폭 예측 및 잔존수명 평가, 서울대학교 박사학위 논문
2. ACI Committee 408.2R-92(1992) State-of-the-Art Reports: Bond under Cyclic Loads
3. Balazs,G,L. (1991) Fatigue of Bond, *ACI Material Journal*, Vol. 88, pp. 620-629
4. CEB-FIP bulletin 10(2000) State-of-the-Art Reports: Bond of reinforcement in concrete