



반복하중하의 부착응력-슬립 관계에 미치는 철근 부식의 영향

김철민¹⁾ · 박종범²⁾ · 장승필³⁾ · 김지상^{4)*}

¹⁾한국도로공사 ²⁾서울대학교 에너지자원신기술연구소 ³⁾성균관대학교 초고층장대교량학과 ⁴⁾서경대학교 토목공학과

An Effect of Steel Corrosion on Bond Stress-slip Relationship under Repeated Loading

Chul-Min Kim,¹⁾ Jong-Bum Park,²⁾ Sung-Pil Chang,³⁾ and Jee-Sang Kim^{4)*}

¹⁾Korea Expressway Corporation, Seongnam 461-703, Korea

²⁾Research Institute of Energy and Resources, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

³⁾Dept. of Mega Buildings and Bridges, SungKyunKwan University, Suwon 440-746, Korea

⁴⁾Dept. of Civil Engineering, Seokyeong University, Seoul 136-704, Korea

ABSTRACT The bond between steel and concrete in reinforced concrete members is essential to resist external load, but the bond mechanism in reinforced concrete beams deteriorated by steel corrosion has not been clearly known yet. Most existing researches have dealt with the bond behavior of corroded steel under monotonic loading, but scarce are researches dealing with bond behavior of corroded steel under repeated loading. This study includes the experimental investigation on the bond behavior with respect to the various degrees of steel corrosion under repeated loading. According to the test results, the bond strength of corroded steel under monotonic loading increases as the rate of steel corrosion increases unless the splitting crack occurs. The slip versus number of load cycles relation was found to be approximately linear in double logarithmic scale, not only in specimens without steel corrosion but also in specimens with steel corrosion. The test results also show that the steel corrosion does not negatively affect the bond strength of corroded steel after repeated loading unless the splitting crack occurs. But the fatigue life decreases sharply after splitting crack occurs. This research will be helpful for the realistic durability design and condition assessment of reinforced concrete structures.

Keywords : steel corrosion, repeated loading, bond stress-slip relation, bond strength, fatigue life

1. 서 론

해안가에 건설된 교량 및 구조물은 해수에 의한 염해로 인해 철근 부식 환경에 노출되어 있고, 동시에 차량에 의한 반복하중에 의한 피로하중을 받고 있다. 콘크리트가 피로하중을 받게 되면 콘크리트 내부에 발생하는 미세균열의 진전으로 인해 설계하중 이하에서 파괴될 수 있으며, 콘크리트 속에 매입된 철근의 부식으로 인해 부착강도에 영향을 준다. 첫째, 부식에 의해 철근의 체적이 증가되며 이로 인해 철근과 콘크리트 사이의 방사형 응력(radial stress)을 증가시키고 부착요소인 마찰력도 증가하게 된다.¹⁾ 그러나 부식이 더욱 진전되면 활열 균열이 발생함으로써 팽창압에 대한 저항력이 약화된다. 둘째, 철근과 콘크리트 사이의 부식 생성물은 초기에 마찰

력을 증가시키지만 부식량이 많아지게 되면 철근과 콘크리트 사이의 녹 증가와 철근 마디 높이의 감소로 인해 마찰력을 감소시킨다. 따라서 철근과 콘크리트의 부착은 콘크리트와 철근의 일체거동에 의한 안전성 확보를 위해서도 필요하지만, 적정 수준의 연성을 구조물에 줌으로써, 부재의 거동을 조절하기 위해서도 필요하다.

현재까지 반복하중 하에서의 부착응력-슬립관계에 대한 연구^{2,7)}는 진행되어 왔으나, 철근 부식이 발생한 경우 반복하중 하에서의 부착응력-슬립관계에 대한 연구⁸⁾는 거의 없는 실정이다. 이 연구에서는 실험을 통하여 철근 부식이 단조하중 하에서의 국부적인 부착응력-슬립 관계(local bond stress-slip relation)에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 그리고 철근 부식이 반복하중 하에서의 부착응력-슬립 및 잔류슬립 관계에 미치는 영향과 반복하중 이후의 부착강도 및 부착강도에서의 슬립의 변화를 살펴 보았다. 마지막으로 철근 부식에 의한 균열 발생 이후에 반복하중의 응력수준이 피로수명에 미치는 영향을 알아 보았다.

*Corresponding author E-mail : zskim@skuniv.ac.kr

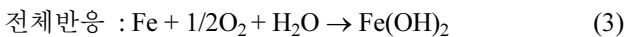
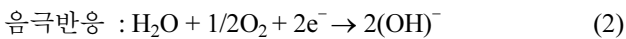
Received July 30, 2009, Revised December 9, 2009,

Accepted December 16, 2009

©2010 by Korea Concrete Institute

2. 철근 부식

철근의 부식은 콘크리트 구조물의 성능저하를 일으키는 원인 중의 하나이다. 콘크리트는 pH 12.5~13.0의 알칼리 상태에 있기 때문에 철근 주위에 부동태피막(passive layer)이 형성되어 철근 부식을 억제한다. 그러나 콘크리트 구조물은 구성재료에 함유되어 있는 염화물 또는 외부환경으로 인하여 콘크리트 내부에 일정량 이상의 염소이온이 존재하면 철근 주위의 부동태피막이 파괴되어 철근은 부식되기 쉬운 상태가 된다. 식 (1)~(3)은 염소이온에 의한 콘크리트 내부의 전기화학 반응을 설명한 것이다.^{8,9)} 식 (1)~(3)과 같이 부식반응은 양극반응(anodic reaction)과 음극반응(cathodic reaction)으로 이루어져 하나의 부식전지를 구성한다. 이와 같이 철의 부동태피막을 파괴하는 다른 유해성분으로는 할로젠이온(Cl^- , Br^- , I^-), 황산이온(SO_4^{2-}), 황화물이온(S^{2-}) 등의 음이온이 있다. 이들 중 염소이온은 가장 강력하게 콘크리트에 혼입되므로 철근 부식에 대하여 가장 유해한 이온 중의 하나이다.



콘크리트 내부의 철근이 부식되면 Fig. 1과 같이 철근 자체의 단면이 손실되어 구조물의 강도가 저하되고 철근과 콘크리트의 부착에 영향을 미친다.¹⁰⁾ 또한 철근의 부피가 본래 부피의 수 배로 팽창하는데 Fe의 부피를 1로 볼 때, 부식에 의한 산화물의 부피는 다음과 같이 다양하다.

$$FeO = 1.7, Fe_3O_4 = 2.0, Fe_2O_3 = 2.1, \\ Fe(OH)_3 = 4.0, Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O = 6.15$$

철근 산화물의 부피 팽창은 주위의 콘크리트에 인장응력을 발생시킨다. 산화물에 의한 팽창압이 증가할수록 콘크리트의 변형률은 증가하고, 균열을 일으킬 정도로 인장변형률이 커지면 콘크리트에는 내부로부터 균열이 발생하게 된다. 콘크리트 피복 표면의 변형률도 증가하며 표면의 변형률이 균열을 일으키는 변형률에 이르면 표면



Fig. 1 View of steel corrosion

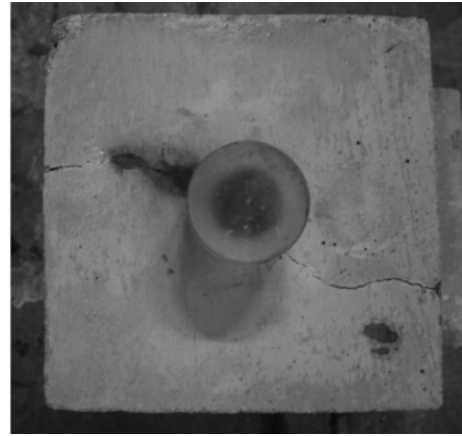


Fig. 2 Typical cracked specimen with corroded bar

에도 균열이 발생하게 된다. Fig. 2는 철근 부식에 의해 균열이 발생한 시편을 보여준다. 균열이 발생하면 산소나 물의 공급이 용이하게 되어 철근의 부식이 더욱 촉진되고 결국에는 피복 콘크리트가 탈락하여 구조물은 현저한 성능저하를 일으킨다. 하지만 철근 부식에 의한 균열 발생 이전까지의 철근 산화물이 팽창압 증가 이외에 부착응력-슬립관계에 어떠한 영향을 미치는지, 특히 반복하중하에서의 영향에 대한 구체적인 연구는 거의 없는 실정이다.

3. 실험

3.1 실험 개요

이 연구에서는 철근 부식이 반복하중 하에서의 부착응력-슬립 및 잔류슬립 관계에 미치는 영향과 반복하중 이후의 부착강도 및 부착강도에서의 슬립의 변화를 살펴보고자 한다. 먼저, 국부 부착 응력을 묘사하기 위한 시편을 제작하고 철근을 부식시킨 후 단조하중 실험과 반복하중 실험을 각 변수별로 3회씩 수행하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 시편의 형상을 나타낸다. 시편은 $150 \times 150 \times 170$ mm의 각주형으로 총 191개를 제작하였다. D16 철근을 사용하였고 철근을 실험체의 중앙에 삽입하여 피복두께를 충분히 함으로써 횡방향 쪼개짐을 방지하였다²⁾(KS F 2441). 일정한 부착응력을 갖는 구간

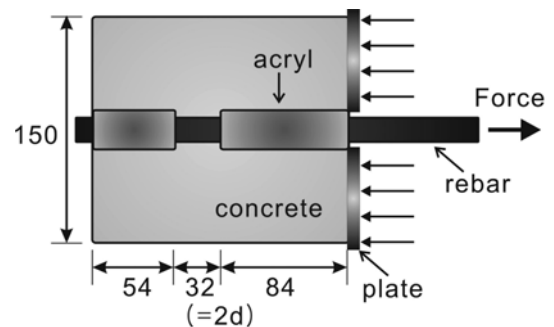


Fig. 3 Geometry of bond test specimens (unit: mm)

을 확보하기 위해 철근 지름의 2배를 철근의 매입 길이로 정하였다. 철근의 매입길이 이외의 양쪽부분은 원형 아크릴로 감싸서 철근 매입길이 내에서만 부착력이 발생되도록 하였다. 측정된 콘크리트의 28일 평균 압축강도는 38.24 MPa이며, 배합비는 Table 1에 나타내었다.

3.2 철근 부식 방법

철근의 부식 방법은 전위차를 이용한 부식촉진법을 사용하였다.^{8,11-13} 이 방법은 일반적으로 가장 많이 이용되고 있는 방법으로서 Fig. 4에서와 같이 5%의 염화나트륨의 수용액에 대상공시체를 침지시킨 후 직류전압의 (+)극은 대상공시체의 철근에 연결시키고, (-)극에는 스테인레스 스틸에 연결한다. 그리고 철근에 흐르는 전류량은 데이터 로거(TDS-601A)로 1시간마다 측정하였다.

이론적인 철근의 부식중량은 페러데이의 식^{8,9,12,14}을 적용하여 다음 식 (4)와 같이 계산된다.

$$W = \frac{I \times t \times M}{n \times F} \quad (4)$$

여기서 I = 전류(A), t = 지속시간(sec), W = 시간 t 동안 전해질 용액에서 부식되거나 전기분해된 중량의 손실 (g), M = 철근의 원자 질량(55.85 g/mol), n = 반응 중에 쓰이는 전자수($Fe=2$), F = 페러데이 상수(96,500 C/mol)이다. 그리고 실제 부식률은 중량 감소율 계산법^{3,7,8}을 이용하여 식 (5)와 같이 계산하였다.

Table 1 Mix design of concrete

| | | |
|----------------------------------|---|-----|
| Maximum aggregate (mm) | | 13 |
| Slump (mm) | | 120 |
| W/C (%) | | 48 |
| S/a (%) | | 48 |
| Unit weight (kg/m ³) | W | 192 |
| | C | 401 |
| | S | 803 |
| | G | 878 |

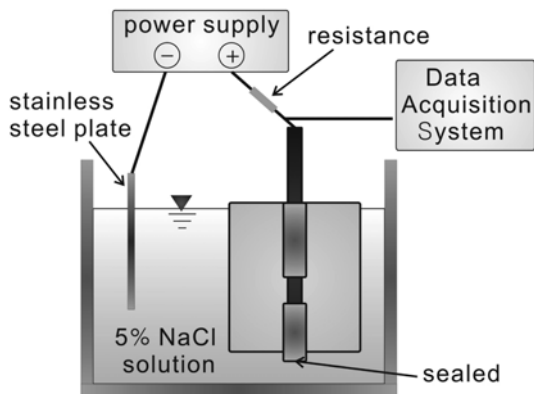


Fig. 4 Process of corrosion

$$c = \frac{w_b - w_a}{w_b} \times 100 \quad (5)$$

여기서 c = 실제 부식률(%), w_b = 부식 전 철근 중량(g), w_a = 부식 후 철근 중량(g)이다. 식 (4)를 이용한 이론적인 철근 부식중량의 예측 값과 실제 부식률을 비교하여 둘의 상관관계를 알 수 있다. 이 연구에서는 이를 이용하여 원하는 철근의 실제 부식 정도를 조절하였다.

3.3 부착 실험

이 실험은 단조증가하중 부착실험과 반복하중 부착 실험으로 구분된다. 단조증가하중 부착실험(pull-out test)으로부터 철근의 부식이 국부 부착응력-슬립 관계에 미치는 영향을 살펴보았다. CEB-FIP Model Code 1990(MC90)에서 제시하는 인발실험에 의한 부착응력-슬립($\tau-s$) 관계 모델^{1,15-17}은 Fig. 5에 나타내었고 부착응력-슬립 관계 모델 식¹⁾은 식 (6)으로 표현된다.

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_{p1}} \right)^\alpha \quad (6)$$

여기서 τ_{max} = 부착강도, s_{p1} = 부착강도에서의 슬립, 그리고 α = 형상에 관련된 상수이다.

이로부터 얻은 각각의 철근 부식률에 따른 부착강도 τ_{max} 로부터 반복하중의 응력 수준을 결정하였다. 응력 수준 r_τ 은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 반복하중의 최대 응력 $\tau_{rep,h}$ 과 단조증가하중 실험의 부착 강도 τ_{max} 의 비를 의미하며 식 (7)과 같이 표현된다. 사하중을 고려하여 반복하중의 최소 응력 $\tau_{rep,l}$ 은 $\tau_{rep,h}$ 의 20%로 정하였다.

$$r_\tau = \frac{\tau_{rep,h}}{\tau_{max}} \quad (7)$$

Fig. 6에서 (b)에 나타낸 것처럼, 반복하중을 4 Hz로 n 회 재하하면서 반복하중 최대 응력 $\tau_{rep,h}$ 일 때의 슬립 s_n 과 최소 응력 $\tau_{rep,l}$ 일 때의 잔류 슬립 s_m 의 변화를 살펴보았다. 마지막으로 Fig. 6에서 (c)에 나타낸 것처럼, 반복하중 n 회 이후에 부착파괴시까지 인발실험을 수행하여 반복하중 이후의 최대 부착응력($\tau_{max,r}$)과 그 때의 슬립($s_{p1,r}$)

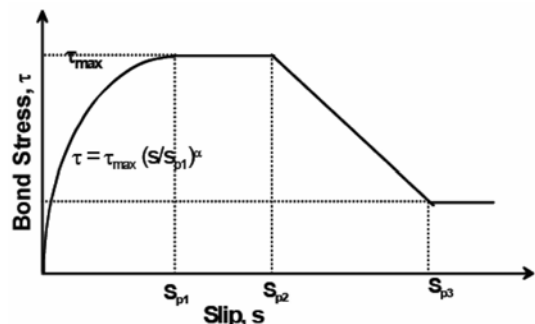


Fig. 5 Bond stress-slip relation presented by MC90

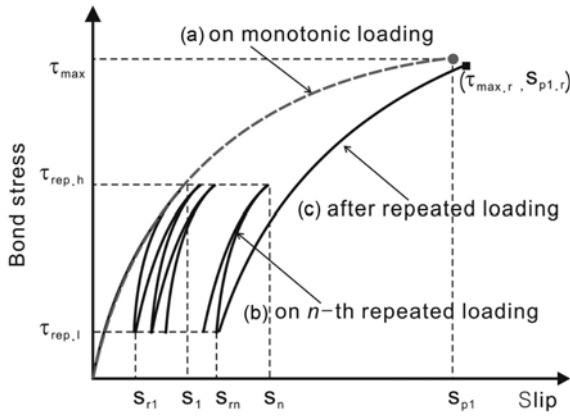


Fig. 6 Bond stress-slip relation on monotonic and repeated loadings

의 변화를 살펴보았다. 실험한 응력 수준 r_n , 반복횟수 N 그리고 철근 부식률은 Table 2에 나타내었다.

하중재하 실험^{2-4,8,14)}은 Fig. 7에 보인 것과 같은 형태로 이루어졌으며, 인발실험의 재하방법은 변위제어이고 변위 변화율(stroke rate)은 0.3 mm/min이다. 반복하중 실험의 재하방법은 하중제어를 통하여 일정크기의 반복하중을 가한 후, 다시 변위제어로 인발실험을 수행하였다. 마지막으로 철근 부식으로 인해 할열 균열이 발생한 시편을 이용하여, 응력수준별로 반복하중을 가하여 피로 수명을 살펴보았다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 단조하중 하에서의 인발실험

각 철근 부식률별로 Fig. 6에서 (a)에 나타낸 것처럼,

Table 2 Experimental parameters

| Parameter | Value |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Stress level, r_T (%) | 50, 65, 80 |
| Number of repeated loading, N | $10^2, 10^3, 10^4, 10^5$ |
| Steel corrosion rate (%) | 0, 0.10, 0.24, 0.48, 0.94, 1.28 |

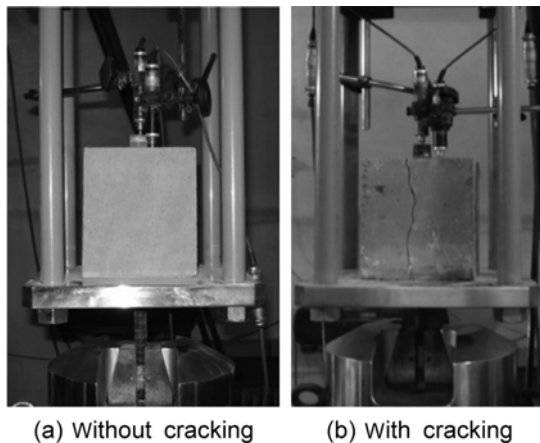


Fig. 7 Comparison of specimens without/with cracking

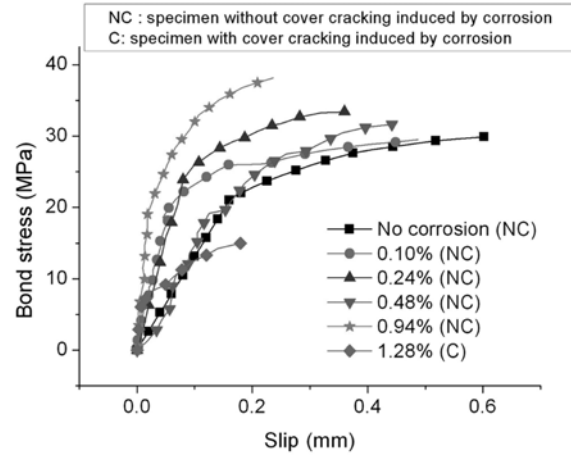


Fig. 8 Bond stress versus slip relationship on monotonic loading with corrosion rate

인발실험을 수행하여 Fig. 8과 같이 철근 부식률에 따른 부착강도-슬립 관계를 얻었다. Table 3에 부식률에 따른 부착강도(τ_{max})와 그 때의 슬립(s_{p1})을 나타내었고 회귀분석을 수행하여 얻은 식 (6)의 상수 α 와 결정계수(R^2)를 나타내었다.

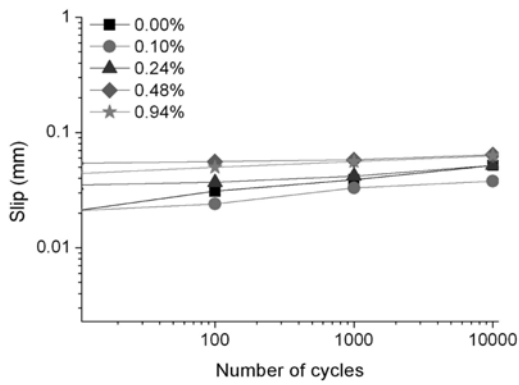
철근 부식률 0.94%까지는 부식률이 증가할수록 τ_{max} 는 증가하고 s_{p1} 은 감소하는 경향을 보였다. 이는 철근의 부식 진행에 따른 부식생성물의 부피 증가로 인해 철근과 콘크리트 사이의 팽창압이 증가하면 마찰력이 그만큼 증가함으로써 철근에 대한 콘크리트의 구속효과가 더 컸기 때문이라고 생각된다.^{1,8)} Fig. 8에서 보는 바와 같이 철근 부식으로 인해 콘크리트에 할열 균열이 생긴 시편(철근 부식률 1.28%)의 부착강도 τ_{max} 는 철근 부식이 없는 시편의 부착강도의 50% 정도로 감소함을 알 수 있다. 이는 부식균열이 발생하게 되면 콘크리트에 의한 구속이 완화되어 부식생성물에 의한 팽창압이 낮아져 마찰력이 감소하기 때문으로 판단된다.

4.2 반복하중 하에서 철근 부식률에 따른 슬립 및 잔류 슬립의 변화

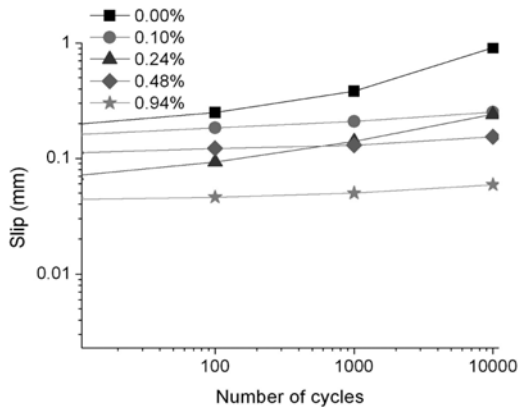
Figs. 9와 10은 3.3절의 Fig. 6(b)에 나타낸 것처럼, 철근 부식률별로 각 하중 사이클의 최대 하중 $\tau_{rep,h}$ 에서의 슬립 s_n 그리고 잔류슬립 s_{rn} 을 각각 이중로그스케일(double

Table 3 Bond strength and slip with steel corrosion rate and the result of regression

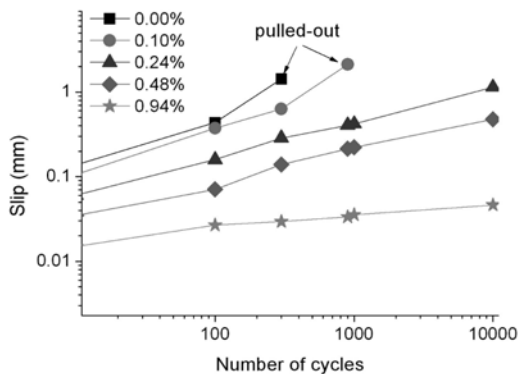
| Steel corrosion rate (%) | τ_{max} (MPa) | s_{p1} (mm) | α | R^2 |
|--------------------------|--------------------|---------------|----------|-------|
| 0 | 29.9 | 0.60 | 0.41 | 0.895 |
| 0.10 | 29.5 | 0.48 | 0.27 | 0.846 |
| 0.24 | 33.4 | 0.36 | 0.34 | 0.883 |
| 0.48 | 31.6 | 0.44 | 0.53 | 0.916 |
| 0.94 | 38.1 | 0.24 | 0.33 | 0.921 |
| 1.28 | 15.0 | 0.18 | 0.33 | 0.980 |



(a) 50% stress level



(b) 65% stress level

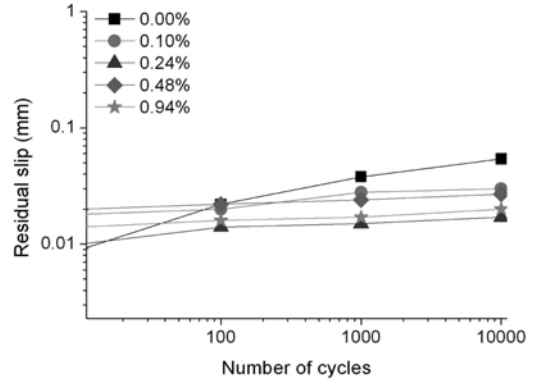


(c) 80% stress level

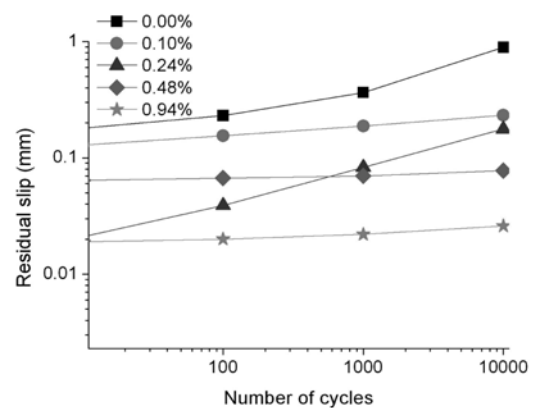
Fig. 9 Relation of the number of cycles and slip on repeated loading with the steel corrosion rate

logarithmic scale)로 나타낸 곡선이고 각각 선형으로 회귀됨을 알 수 있다.

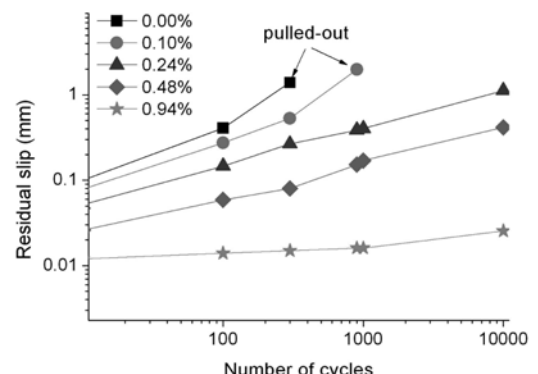
이 결과로부터 Rehm and Eligehausen⁵⁾의 철근 부식이 없는 경우, 반복하중 횟수와 반복하중하에서의 슬립은 이중로그스케일로 도시하였을 때 선형관계로 나타난다는 실험 결과를 철근 부식을 고려한 경우로 확장할 수 있음을 확인하였다. 즉, 철근 부식이 있을 경우에도 반복하중 횟수와 반복하중하에서의 슬립(s_r) 및 잔류슬립(s_{rm})은 이중로그스케일에서 선형관계임을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9에서 응력수준이 증가함에 따라 슬립 및 잔류슬립은 증가하고 모든 응력수준에서 철근 부식률이 증가함에 따라



(a) 50% stress level



(b) 65% stress level



(c) 80% stress level

Fig. 10 Relation of the number of cycles and residual slip on repeated loading with the steel corrosion rate

반복하중 하에서 슬립값은 작아지는 경향을 보인다. 이는 단조하중 하에서 철근 부식률이 증가함에 따라 슬립값이 작아지는 경향과 마찬가지로 철근 부식의 증가는 부식생성물에 의한 철근의 부피팽창을 야기하고 이로 인하여 철근과 콘크리트 사이의 구속력을 증가시켰음을 의미한다.

마지막으로 Fig. 9의 (c)로부터 슬립이 약 1 mm 이상이 되면 철근이 pulled-out되어 부착파괴가 일어남을 알 수 있다. 철근 부식에 의한 활열 균열이 발생하기 전까지는 부식률이 증가함에 따라 철근 부식에 의한 철근과 콘크리트의 구속효과가 발생하여 슬립이 작아지고 부착 파괴까지의 피로수명이 커짐을 알 수 있다.

4.3 철근 부식에 따른 반복하중 이후의 부착강도 및 최대부착응력에서의 슬립 변화

Fig. 11은 Fig. 6에서 (c)에 나타난 것처럼, 할열 균열이 발생하지 않은 시편들(부식률 1.28% 제외)의 철근 부식률에 따른 반복하중 이후 인발실험을 수행했을 때의 반복하중 이후의 부착강도($\tau_{max,r}$)를 나타낸 그래프이다. Fig. 11에서와 같이 각 응력수준별로 반복하중횟수에 따른 부착강도는 뚜렷한 증감의 경향을 나타내지 않는다. Table 2에 나타난 단조증가 하중 부착실험의 부착강도 τ_{max} 와 Fig. 11의 반복하중 재하 후의 부착강도 $\tau_{max,r}$ 의

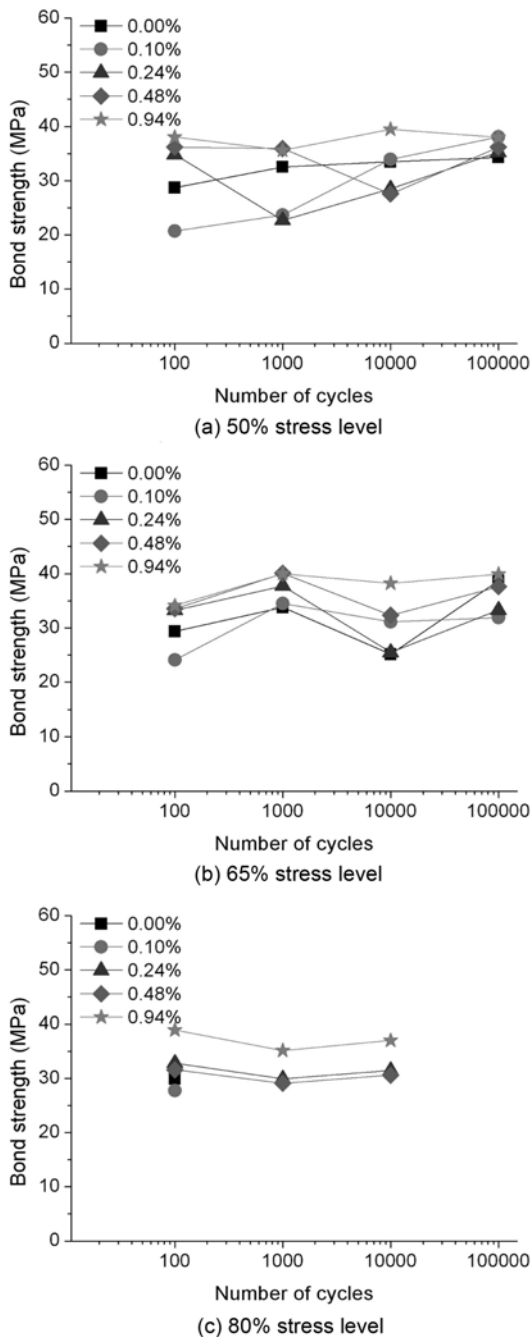


Fig. 11 Relation of the number of cycles and bond strength after repeated loading with the stress level

Table 4 Ratios of bond strengths and slips on monotonic loading to ones after repeated loading with the stress level

| r_τ | 50% | 65% | 80% |
|-----------------------------|-------|-------|-------|
| $\tau_{max,r} / \tau_{max}$ | 1.012 | 1.012 | 0.995 |
| $s_{pl,r} / s_{pl}$ | 1.015 | 1.016 | 1.033 |

비의 평균과 각각의 슬립의 비의 평균을 응력수준별로 Table 4에 나타내었다. Rehm and Eligehausen⁵⁾의 철근 부식을 고려하지 않은 경우, 반복하중을 받는 동안 피로 파괴가 발생하지 않는다면 반복하중에 따른 부착응력-슬립거동은 단조하중에서의 부착거동과 비교할 때 부착강도의 감소 및 부착강도에서의 슬립값의 증가와 같은 부착특성의 저하는 발생하지 않는다는 연구 결과와 김세훈²⁾의 철근 부식을 고려하지 않은 경우, 반복하중 이후의 부착강도는 응력수준에 따라 뚜렷한 경향이 나타나지 않는다는 연구 결과와 비교할 때, Table 4에서 보는 바와 같이 할열 균열이 발생하기 전까지는 철근 부식을 고려한 경우에도 마찬가지로 반복하중에 따른 부착응력-슬립 거동의 성능저하는 없으며 반복하중 이후의 부착강도 ($\tau_{max,r}$) 및 부착강도에서의 슬립($s_{pl,r}$)은 응력수준에 영향이 없음을 알 수 있다.

4.4 철근 부식으로 인한 균열이 발생한 시편의 응력수준별 피로 수명

Fig. 12는 철근 부식(부식률: 1.28%)으로 인해 할열 균열이 형성된 시편에 대하여 반복하중을 재하하였을 때, 슬립-반복하중 횟수의 관계를 각 응력수준 r_τ 에 대하여 나타낸 그래프이다. 응력수준 50%에서는 반복하중 횟수를 1000번까지 반복하중을 가하였고 철근이 뽑히지 않았다. 반면에 응력수준 65%에서는 반복하중 횟수(피로수명) 43회에서 철근이 뽑혔고(pulled-out), 응력수준 80%에서는 반복하중 횟수 28회에서 철근이 뽑혔다. 할열 균열

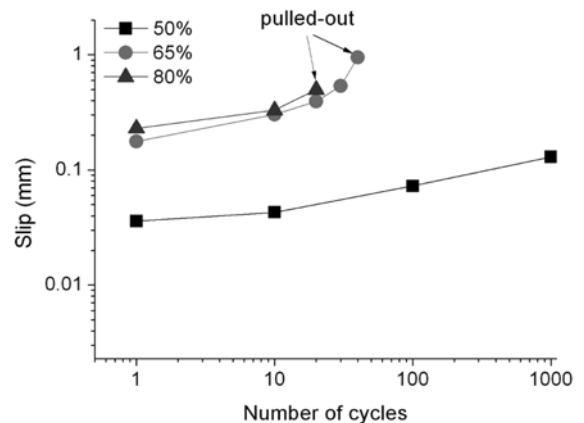


Fig. 12 Relation of the number of cycles and slip on repeated loading with the stress level on the specimens with splitting cracks

이 발생하기 전의 결과인 Fig. 9의 (b)와 (c)에 나타난 실험값과 비교하면 철근 부식으로 인해 활열 균열이 발생하였을 때의 피로수명은 급격히 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 철근 부식 환경에 노출되어 있고, 반복하중을 받는 교량 구조물은 철근 부식으로 인해 구조물에 활열 균열이 발생하였을 때 부착피로에 의한 구조적 성능저하를 유발할 수 있음을 뜻한다.

5. 결 론

철근 부식을 고려한 철근콘크리트 부재의 부착거동에 관한 실험적 연구를 수행한 결과로 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 철근 부식률에 따른 인발실험 결과, 철근 부식에 의한 활열 균열이 발생하지 않는 경우 철근 부식률이 증가함에 따라 부착강도는 철근 부식이 없는 경우보다 최대 1.2배 증가하였고, 부착강도에서의 슬립은 감소하였다. 이는 철근 부식 생성물에 의해 철근과 콘크리트 사이의 팽창압이 증가하고 부착요소인 마찰력이 증가하여 철근과 콘크리트 사이의 구속효과가 발생하기 때문으로 생각된다. 그리고 철근 부식으로 인해 발생한 활열 균열은 부착강도와 부착강도에서의 슬립을 현저히 감소시켜 부착특성이 저감되는 것을 알 수 있었다.
- 2) 철근 부식이 발생한 경우와 발생하지 않은 경우, 반복하중횟수와 반복하중에 대한 슬립 및 잔류슬립은 이중로그스케일로 도시하였을 때 선형관계로 나타난다. 철근 부식이 없는 경우 이중로그스케일에서 반복하중 횟수와 반복하중에 따른 슬립값의 선형관계라는 Rehm and Eligehausen의 결과⁵⁾를 철근 부식이 있는 경우에도 적용할 수 있음을 확인하였다. 그리고 철근 부식에 의한 활열 균열이 발생하기 전까지는 철근 부식률이 증가함에 따라 철근이 인발 파괴 될 때까지의 피로수명은 증가하였다.
- 3) 철근 부식이 발생한 경우 부식에 의한 활열 균열이 발생하지 않는 한, 반복하중 이후의 부착강도 및 부착강도에서의 슬립은 철근 부식이 없는 경우와 비교할 때 반복하중에 의한 부착특성의 저하는 없으며, 또한 반복하중 이후의 부착강도 및 부착강도에서의 슬립은 반복하중의 응력 수준에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.
- 4) 철근 부식(부식률 1.28%)으로 인해 활열 균열이 발생한 경우에는 부착파괴를 유발하는 반복하중횟수는 현저히 감소됨을 확인하였다. 이는 철근 부식 환경에 노출되어있는 구조물은 철근 부식으로 인해 구조물에 활열 균열이 발생하게 되면 반복하중에 의한 하중분배능력을 감소시켜 결국에는 구조물의 붕괴를 일으킬 수 있음을 시사한다.

이 실험 결과는 철근 부식 정도가 반복하중하에서의 부착응력-슬립의 관계에 미치는 영향을 고려한 모델식을

제시하는데 도움을 줄 수 있고 철근콘크리트 구조물의 내구수명 예측 시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. CEB-FIP Bulletin 10, "State-of-the-Art Reports : Bond of Reinforcement in Concrete," fib Bulletins, 2000, pp. 188~190.
2. 김세훈, "반복하중을 받는 철근콘크리트 휨부재의 균열 폭 예측 및 잔존수명 평가," 서울대학교 공학박사학위논문, 2004, pp. 7~39.
3. ACI Committee 408, "State-of-the-Art Report: Bond under Cyclic Loads," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 6, 1992, pp. 669~673.
4. Balázs, G. L., "Fatigue of Bond," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 6, 1991, pp. 620~629.
5. Rehm, G and Eligehausen, R., "Bond of Ribbed Bars Under High Cycle Repeated Loads," *ACI Journal Proceedings*, Vol. 76, No. 2, 1979, pp. 297~310.
6. Oh, B. H. and Kim, S. H., "Realistic Models for Local Bond Stress-Slip of Reinforced Concrete under Repeated Loading," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, No. 2, pp. 216~224.
7. 이재열, 김병국, 홍기섭, 최완철, "반복하중시 철근 마디 높이에 따른 부착 손상특성," 콘크리트학회 논문집, 15권, 1호, 2003, pp. 17~24.
8. 정하태, "철근 부식과 피로하중을 고려한 철근콘크리트 구조물의 피로부착거동에 관한 실험적 연구," 서울대학교 공학석사학위논문, 2006, pp. 9~15, 32~47.
9. 김기현, "철근 부식에 의한 콘크리트 피복의 균열생성에 대한 실험 및 해석연구," 서울대학교 공학석사학위논문, 2002, pp. 2~12.
10. Coronelli, D. and Gambarova, P., "Structural Assessment of Corroded Reinforced Concrete Beams : Modeling Guidelines," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 8, 2004, pp. 1214~1224.
11. Lee, H. S., Takafumi, N., and Fuminori, T., "Evaluation of the Bond Properties between Concrete and Reinforcement as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 8, 2002, pp. 1313~1318.
12. Fang, C., Lundgren, K., Chen, L., and Zhu, C., "Corrosion Influence on Bond in Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 11, 2004, pp. 2159~2167.
13. 권영웅, 최봉섭, 정용식, "철근 부식상태에 따른 철근콘크리트 보의 슬립특성," 콘크리트학회 논문집, 11권, 6호, 1999, pp. 129~135.
14. Auyeung, Y., Balaguru, P., and Chung, L., "Bond Behavior

- of Corroded Reinforcement Bars,” *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 2, 2000, pp. 214~200.
15. Pochamart, S. and Harmon, T., “Bond-slip Model for Generalized Excitations Including Fatigue,” *ACI Materials Journal*, Vol. 86, No. 5, 1989, pp. 465~474.
16. Yankelevsky, D. Z., “Analytical Model for Bond-Slip Behavior Under Monotonic Loading,” *Building and Environment*, Vol. 20, No. 3, 1985, pp. 163~168.
17. CEB-FIP Model Code 1990, “Model Code for Concrete Structures,” *Comité Euro-International du Béton*, Thomas Telford, 1993, pp. 82~86.

요약 철근과 콘크리트의 부착은 콘크리트와 철근의 일체거동에 의한 안전성 확보를 위해서도 필요하지만, 적정수준의 연성을 확보하여, 부재의 거동을 조절하기 위해서도 필요하다. 현재까지 반복하중 하에서의 부착응력-슬립관계에 대한 연구는 진행되어 왔으나, 철근 부식이 이루어진 경우의 반복하중 하에서의 부착응력-슬립관계에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 부식된 철근의 부착 실험을 통하여 단조하중과 반복하중 하에서의 부식률에 따른 부착응력-슬립 관계를 살펴보았다. 실험결과로부터 철근 부식은 할열 균열이 발생하기 전까지는 단조하중에서의 부착강도를 증가시키는 것을 확인하였다. 그리고 반복하중 횟수와 반복하중 하에서의 슬립 및 잔류슬립을 이중로그스케일로 도시한 결과, 철근 부식이 있는 경우에도 철근 부식이 없는 경우와 마찬가지로 선형 관계임을 확인하였다. 그리고 부식에 의한 균열이 발생하지 않는 한, 철근 부식이 반복하중 재하 이후의 부착강도 및 부착강도에서의 슬립 등 부착 특성에 영향을 미치지 않는 것도 알 수 있었다. 마지막으로, 철근 부식으로 인한 균열이후에서의 응력수준에 따른 피로 수명은 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 이 연구에서 제시하는 철근 부식을 고려한 반복하중 하에서의 부착응력-슬립의 관계는 철근콘크리트 구조물의 내구수명 예측 시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 철근 부식, 반복하중, 부착응력-슬립 관계, 부착강도, 피로수명