

철근의 부식정도와 부착강도에 대한 연구

A Study on the Relationship between Degree of Rust Condition and Bond Strength in Reinforced Concrete Members

유 환 구* 이 병 덕* 김 국 한** 안 태 송**
Yu, Hwan Gu Lee, Byung Duck Kim, Kook Han Ahn, Tae Song

ABSTRACT

An experimental investigation on the reinforcing bar corrosion and relationship of reinforcing bar and concrete bond strength has been conducted to establish the allowable limit of rust in the construction field. The reinforcing bars used in this study were rusted before embedding in concrete.

The first component of this experiment is to make rust of reinforcing bar rust artificially based on Faraday's theory at certain rates such as 2, 4, 6, 8 and 10% of reinforcing bar weight. For estimation of the amount of rust by weight, Clarke's solution and Shot blasting were adopted and compared. Parameters include 240 and 450 kg/cm² of compressive strengths and diameter of reinforcing bar (16, 19 and 25mm) corresponding development length for pull-out test. And, pull-out tests were carried out according to KS F 2441 and ASTM C 234 to investigate the effect of the corrosion rate on reinforcing bar-concrete bond behavior.

It is found from the test results that the test techniques for corrosion of bar used in this study is relatively effective and correct test method. Results shows that up to 2% of rust increases the bond strength regardless of concrete strength and diameter of reinforcing bar like the existing data. It might be because of the roughness from rust. As expected, the bond strength increases as compressive strength of concrete increases and the diameter of bar decreases.

1. 서 론

1.1 연구 배경

현재 건설현장에서 부식된 철근의 사용성 판단이 매우 어려워 시공사, 감독기관 및 감리업체들간의 민감한 분쟁거리가 되고 있다. 따라서 공학자 및 설계자, 건설 관계자들은 안전성의 관점에서 부식된 철근의 사용을 금지하느냐 아니면 효율성의 관점에서 어느 정도의 철근부식을 허용하느냐의 방안은 중요하다.

철근의 부식에 관한 기존의 연구결과³⁾에 따르면, 철근의 부식정도가 작을 경우에는 철근과 콘크리트의 부착강도는 오히려 증가함을 알 수 있었다. 즉 철근 콘크리트의 각종 역학적 거동들에 강도저하를 미치지 않는 철근의 허용 부식정도를 얻을 수 있다면 콘크리트 공사에 효율성을 기대할 수 있을 뿐 아니라 경제적으로도 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

1.2 연구의 목적 및 범위

본 연구의 주요목적은 철근과 콘크리트의 부착력 저하를 일으키지 않는 철근의 허용 부식정도를 실험을 통해 제시하는 것이다. 실험에 사용된 철근은 패러데이 법칙(Faraday's Law)을 근거로 전위차 인공 촉진 부식방법을 채택하여 철근을 부식시켰다. 녹의 제거는 ASTM의 클라크 용액법과 Shot Blasting법을 적용하였고, 부식정도의 계산은 원 철근에 대한 부식으로 인해 발생한 철근의 중량손실 방법으로 실시하였다. 실험 파라미터는 콘크리트의 강도, 철근의 직경 및 철근의 부식정도이고, 부착력 실험은 이미 부식이 발생한 철근으로 시편을 제작하여 인발시험법으로 실시하였다.

*정회원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실 연구원

**정회원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실 책임연구원

2. 실험

2.1. 실험변수

철근의 부식정도를 측정하기 위한 변수는 철근의 공칭직경(D 16, 19, 25), 부식정도(2, 4, 6, 8, 10%), 녹 제거방법(Clarke 용액법, Shot Blasting법)을 설정하였으며, 각 변수별 시편 수는 1조(3개)로서 총 시편 수는 90개를 제작하였다. 부착력 실험을 위해, 철근의 부식정도(0, 2, 4, 6, 8, 10%), 철근의 공칭 직경(D 16, 19, 25), 콘크리트 압축강도(240, 450 kg/cm²)를 설정하였다. 이들 변수에 따른 부착강도시험용 콘크리트 공시체는 1조(3개)씩 제작하였으며 총 108개 이다.

2.2. 사용재료 및 콘크리트 배합

부식에 사용된 철근은 이형철근(Deformed Bar)을 사용하였고, 이들의 호칭은 각각 D16, 19, 25이다. 선정된 철근은 모두 고장력 철근(SD 40 이상)으로 KS B 0801(금속재료 인장 시험편)에 따라 준비한 2호 시편을 KS B 0802(금속재료 인장 시험 방법)에 따라 실험하였다. 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 굵은골재는 최대크기 25mm인 쇄석, 잔골재는 강모래를 사용하였다. 혼화제는 국내 S사의 제품을 사용하였으며 보통콘크리트 제조에는 AE감수제(리그닌 계)를 고강도콘크리트 제조시에는 고성능감수제(리그닌 계)를 사용하였다. 사용량은 필요한 강도가 발현될 수 있도록 배합설계에 따라 각각 시멘트량의 0.3%와 0.8%를 사용하였다. 콘크리트의 압축강도는 240, 450 kg/cm² 이다.

2.3. 철근부식 실험방법

철근의 부식실험은 패러데이의 전기분해 법칙(Faraday's Law of Electrolysis)을 철근부식에 응용하였으며, 다음 그림 2.1은 부식시험용 철근의 상세도를 나타낸 것이다. 정전류회로 및 부식셀의 구성은 패러데이의 전기분해 법칙에 의해 철근을 인위적으로 부식시키기 위해서는 일정시간동안(t), 일정전류(A)를 흘려줄 수 있는 정전류 회로를 구성하여야 한다는 것이다. 본 실험에서 정전류회로는 각각의 셀에 3±0.2A의 전류를 일정하게 공급할 수 있도록 정전류기와 타이머를 설치하였다. 부식반응이 일어나는 셀은 총 18개의 시편을 동시에 부식시킬 수 있도록 구성하였다. 셀 전체의 크기는 127×64×101cm로 투명한 아크릴로 제작하여 셀 내부의 부식반응을 관찰할 수 있도록 하였다. 각 셀(Cell)은 크기 20×20×100cm로 총 18개로 구분하였으며 각각의 셀간에는 전해질 용액이 침투하지 못하도록 방수처리하였다(그림 2.2).

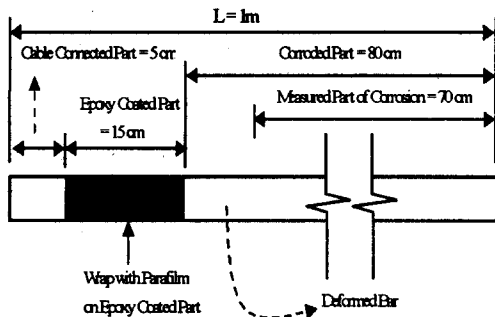
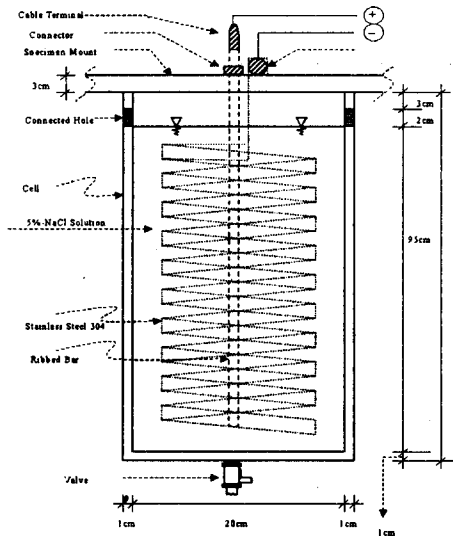


그림 2.1 부식시험용 철근 준비 상세도그림



2.2 철근의 인공 부식촉진장치(셀 1개의 구성도)

전해질은 5%-NaCl 용액을 사용하였으며, 플라스틱 물 탱크에 물 900ml에 NaCl 50g을 용해시켜 교반한 후 다시 물 100ml을 가하여 1,000ml의 용액을 만들어 제조하였다.

부식촉진이 완료된 철근은 셀에서 분리하여 깨끗한 물에 씻어 철근에 남아있는 NaCl용액을 제거하였다. 물에 씻은 철근은 그늘진 곳에서 약 1시간 가량 건조시켜 부착강도 시험용 시편을 제작하였고 철근의 부식량을 측정하였다.

2.4. 철근의 부식량 측정 및 녹 제거방법

철근의 부식량은 중량비로 계산하였으며 부식으로 손실되는 양을 철근의 원중량의 무게비로 계산하였으며, 이는 페러데이 법칙을 근거로하여 산출하였다. 철근의 녹을 제거하는 방법은 클라크 용액(Clarke's Solution)(ASTM G1-81)법과 쇼팅기계(Shot Blasting Machine)에 의한 방법으로, 클라크 용액의 제조는 ASTM G1-81-7.7.2에 따랐다. Shot Blasting 방법에서 쇄구슬의 크기는 0.8mm로 절단한 피아노 강선을 사용하였고, 분사속도는 3,000rpm이며, 작업시간은 2min/회로 10회 실시하였다.

2.5. 철근과 콘크리트의 부착실험 방법

부착강도 시험은 기본적으로 KS F 2441 및 ASTM C 234의 인발시험(Pull Out Test)방법에 따라 실시하였다. 실험체의 크기는 150×150×150mm 입방체이다. 삽입된 철근의 콘크리트에 대한 미끄러짐(Slip)량을 측정하기 위하여 비재하단 1곳과 재하단 2곳에 0.01mm 변형량 측정기(Displacement Transducer)를 설치 하였다. 재하장치는 만능시험기(UTM 100ton)를 사용하였고, 재하속도는 변위조절로 1mm/min을 가하였다. 그런데 이들 시험방법에 따라 부착강도 시험을 하였을 경우 철근이 뽑히는 부근에서 콘크리트의 썩기형 파괴(Cone Failure)의 우려가 있으므로 시편 양단에서 일정길이는 철근과의 부착이 발생하지 않도록 부착강도 시편을 만들었다. 이들 시편의 치수와 형상을 표 2.1 및 그림 2.3에 정리하였다.

표 2.1 부착강도 시편의 치수 및 부착길이

철근의 크기	공시체 치수 (cm)	부착길이 (4D, cm)
D 16	15×15×15	6.40
D 19	15×15×15	7.64
D 25	15×15×15	10.20

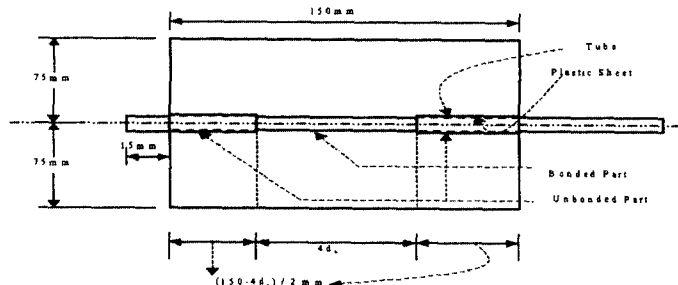


그림 2.3 부착강도 시편의 형상

4. 실험결과 및 고찰

4.1 철근부식 실험결과

클라크 용액 및 Shot Blasting과 같은 녹제거 방법이나 철근의 직경에 관계없이 페러데이의 인공 전위차 촉진 부식법으로 녹을 생성할 경우 목표한 부식량보다 약간 크게 부식이 발생함을 알 수 있다. 이는 인공 전위차 부식법에 의해 목표한 부식량 이외의 부가적인 부식이 발생되기 때문인 것으로 사료된다. 이에 대한 평균값은 표 4.1과 같다.

표 4.1 클라크 용액 및 Shot Blasting에 의한 부식측정결과

철근종류	부식정도(Clarke's Solution / Shot Blasting) (%)				
	2	4	6	8	10
D 16	2.39	4.53	6.38	8.21	10.48
	2.36	4.47	6.46	8.17	10.28
D 19	2.31	4.94	6.90	8.31	10.64
	1.98	4.90	6.72	8.60	10.61
D 25	2.76	4.94	6.78	8.94	10.63
	2.90	4.89	6.99	8.66	10.55

4.2 철근과 콘크리트의 부착 실험결과

4.2.1 여러 영향인자에 따른 부착응력-슬립의 관계

콘크리트와 철근의 부착응력-슬립 관계는 여러가지 요인에 의해 영향을 받게 된다. 또한 부착응력-슬립 관계는 부착파괴 특성과 밀접한 관계를 가지게 된다. 즉 최대 부착응력이 발생하는 슬립의 크기, 부착응력-슬립의 기울기 등은 철근의 직경, 철근의 부식도, 콘크리트의 강도 등과 같은 부착응력의 여러인자들에 따라 각각 다르게 표현된다.

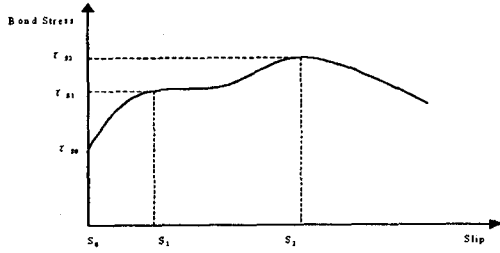


그림 4.1 콘크리트와 철근의 부착응력-슬립 곡선

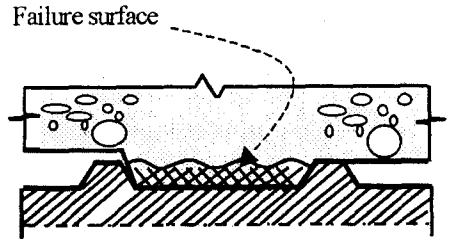


그림 4.2 부착에 의한 이형 철근의 콘크리트 파쇄면

본 실험결과, 그림 4.3(a)~(f)에서 알 수 있듯이, D16 이형철근의 경우 그림 4.1의 s_1 과 s_2 의 간격이 매우 좁아져 항복고원이 나타나지 않는다. D19의 경우 전형적인 부착응력-슬립의 곡선을 나타내며 최대 부착응력이 발생하는 슬립량이 매우 크다. D25의 경우 s_1 이 매우 작아 실제로는 s_0 상에 놓이게 된다. 전체적으로 볼 때, 철근의 직경이 줄어들수록 콘크리트의 강도나 부식도에 관계없이 최대 부착응력은 증가하고 슬립신장율은 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 콘크리트의 강도가 최대 부착응력에 미치는 영향에서, 동일한 철근직경일 경우 철근의 부식도에 관계없이 콘크리트의 강도가 증가할수록 최대 부착응력은 증가하며, 슬립신장율의 증가로 인해 최대 부착응력에 해당하는 슬립값(s_2)도 증가하게 된다.

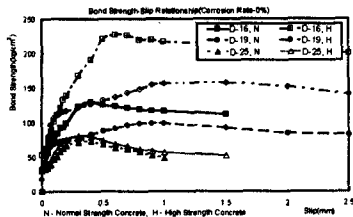


그림 4.3(a) 부착강도-슬립(0%부식)

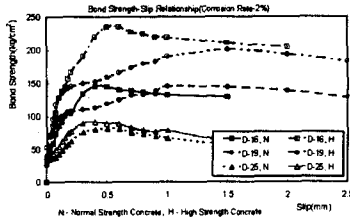


그림 4.3(b) 부착강도-슬립(2%부식)

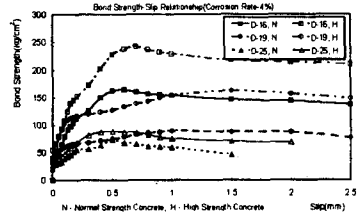


그림 4.3(c) 부착강도-슬립(4%부식)

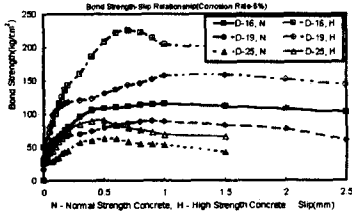


그림 4.3(d) 부착강도-슬립(6%부식)

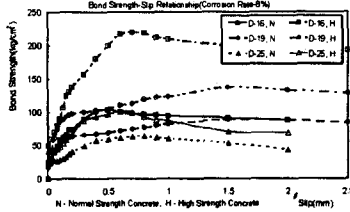


그림 4.3(e) 부착강도-슬립(8%부식)

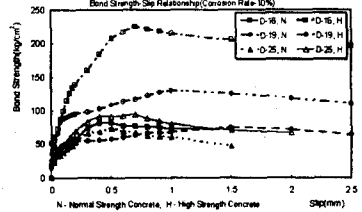


그림 4.3(f) 부착강도-슬립(10%부식)

철근의 부식도가 부착응력-슬립에 미치는 영향은 그림 4.4(a)~(f)에서 알 수 있듯이 철근의 직경에 따라 조금씩 다른 경향을 보인다. 즉 D16의 경우 고강도와 보통강도의 모두에 대해 철근의 부식도가 2, 4%인 경우가 0%인 경우보다 최대 부착응력이 크다. 그리고 D19의 경우 콘크리트의 강도에 관계없이 철근의 부식도가 2%인 경우가 0%인 경우보다 최대 부착응력이 크다. D25의 경우에는 뚜렷하지 않지만 이런 현상이 대체로 만족함을 알 수 있다.

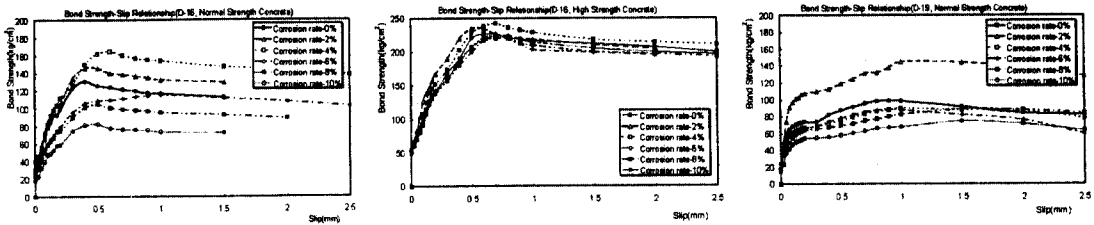


그림 4.4(a) 부착강도-슬립(D16, 보통) 그림 4.4(b) 부착강도-슬립(D16, 고강) 그림 4.4(c) 부착강도-슬립(D19, 보통)

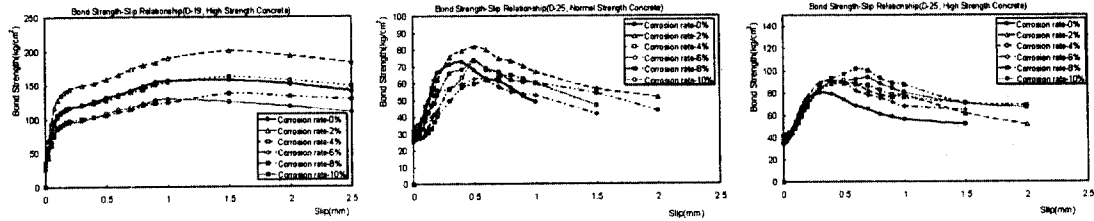


그림 4.4(d) 부착강도-슬립(D19, 고강) 그림 4.4(e) 부착강도-슬립(D25, 보통) 그림 4.4(f) 부착강도-슬립(D25, 고강)

4.2.2 부식정도와 부착강도의 관계

본 연구에서 실시한 부착강도 실험결과를 정리하면 표 4.2와 같다. 표 4.3 및 그림 4.5(a)에서 (c)는 부식정도가 0%인 최대 부착응력에 대한 백분율을 나타내었다.

표 4.2 최대하중에서의 부착강도

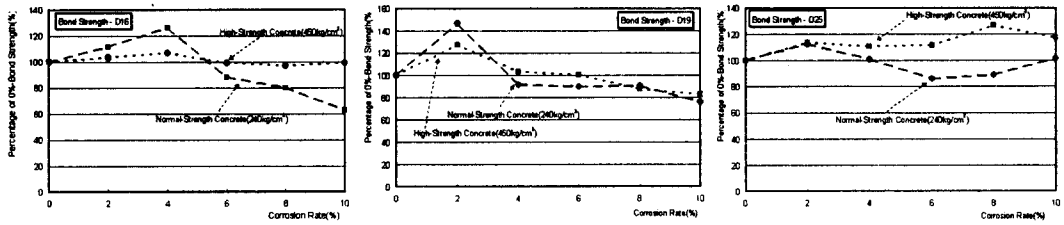
철근종류	부착강도(kg/cm ²) (저강도/고강도일 때)					
	0%	2%	4%	6%	8%	10%
D 16	130.50 / 227.00	145.50 / 235.00	164.5 / 242.33	115.0 / 225.0	104.33 / 220.0	82.00 / 225.00
D 19	98.75 / 157.50	145.00 / 200.50	90.0 / 162.25	88.50 / 158.0	88.76 / 137.5	74.75 / 129.75
D 25	73.00 / 80.33	82.00 / 91.16	73.50 / 88.66	62.70 / 89.50	65.0 / 101.66	74.00 / 94.16

표 4.3 부식정도가 0%에 대한 상대적 부착강도 백분율

철근종류	0%에 대한 부착강도 증감율 (%) (보통강도/고강도일 때)					
	0%	2%	4%	6%	8%	10%
D 16	100 / 100	111.5 / 103.5	126.1 / 106.8	88.1 / 99.1	79.9 / 96.9	62.8 / 99.1
D 19	100 / 100	146.8 / 127.3	91.1 / 103.0	89.6 / 100.3	89.9 / 87.3	75.7 / 82.4
D 25	100 / 100	112.3 / 113.5	100.7 / 110.4	85.9 / 111.4	89.0 / 126.6	101.4 / 117.2

그림에서 알 수 있듯이 철근직경 및 콘크리트의 강도에 상관없이 부식정도가 2%인 경우에는 부식도가 0%인 경우보다 최대 부착강도가 큰 것을 알 수 있다. 철근의 부식정도가 4%일 경우 D 19 철근이며 보통강도의 콘크리트를 이용한 경우에는 부식도가 0%인 경우보다 최대 부착응력이 작음을 알 수 있다. 부식정도가 6%이상일 경우에는 부분적으로 부식도가 0%인 경우보다 최대 부착응력이 큰 경우도 있지만, 일반적인 경향은 부식도가 0%인 경우보다 최대 부착응력이 작음을 알 수 있다. 특히 D25이며 고강도인 경우에는 부식도가 6% 이상인데도 최대 부착강도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 고강도 콘크리트를 사용할 경우 철근의 마디와 콘크리트의 기계적 상호작용력이 보통강도 콘크리트와 다르게 이루어지기 때문인 것으로 사료되지만, 정확한 거동을 규명하기 위해서는 콘크리트와 철근 마디에서 작용하는 국부적인 힘의 상호작용에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 콘크리트의 강도가 부착강도 변화에 미치는 영향에 대해 알아보면, 철근의 직경에 상관없이 부식도에 따른 부착강도 증감율이 보통강도보다 작음을 알 수 있다.

본 연구에서 실시한 실험에 의하면, 철근의 직경이나 콘크리트의 강도에 상관없이 철근의 부식정도가 2% 이하일 경우에는 부착강도 저하는 없을 것으로 판단된다.



(a) D16의 경우

(b) D19의 경우

(c) D25의 경우

그림 4.5 부식정도 0%에 대한 상대적 부착강도 백분율

4.2.3 부식정도에 따른 콘크리트의 파괴여부

기본적으로 콘크리트와 철근의 부착력이 크면 콘크리트의 파괴 가능성이 높아지며, 또한 콘크리트의 강도가 크다면 동일한 하중에 대한 저항도가 커져 파괴에 이를 확률은 줄어들게 된다. 본 연구 결과, 고강도 콘크리트일 경우에는 철근의 직경 D16에서 부식도 8, 10%인 경우에만 콘크리트의 파괴없이 철근의 슬립이 발생하였고, 보통강도 콘크리트일 경우에는 철근의 직경 D16 부식도가 6, 8, 10%인 경우와 철근직경 D19, 부식도 10%인 경우에 콘크리트에 파괴가 일어나지 않았다.

5. 결론

- (1) 인공 전위차 촉진 부식법으로 녹을 생성할 경우 철근의 직경이나 녹제거 방법(클라크 용액 또는 Shot Blasting)에 관계없이 목표한 부식량보다 조금 많이 부식이 발생됨을 알 수 있다. 이는 인공 전위차 부식법에 의해 목표한 부식량 이외의 부가적인 부식이 발생되기 때문인 것으로 사료된다.
- (2) 녹제거 방법에 따라 클라크 용액 및 Shot Blasting에 의한 녹제거 방법은 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그리고 철근의 직경에 따른 부식의 정확도는 철근의 직경이 작을수록 비교적 오차가 줄어들음을 알 수 있으며, 본 실험에 이용된 모든 철근의 평균 부식 오차율은 13%이다.
- (3) 철근의 직경이 부착응력-슬립에 미치는 영향에 대하여 기술하면, 철근의 직경이 작을수록 콘크리트의 강도나 부식도에 관계없이 최대 부착응력은 증가하고 슬립신장율(본 연구에서 도입된 개념)도 증가하는 경향을 보임을 알 수 있었다.
- (4) 콘크리트의 강도가 부착응력-슬립에 미치는 영향에 대하여 기술하면, 동일한 철근직경일 경우 철근의 부식도에 관계없이 콘크리트의 강도가 증가할수록 최대 부착응력은 증가하며, 슬립신장율의 증가로 인해 최대 부착응력에 해당하는 슬립값도 증가하게 된다.
- (5) 철근의 부식도가 부착응력-슬립에 미치는 영향은 철근의 직경에 따라 조금씩 다른 경향을 보인다. 이것은 녹이 존재하게 되면 철근의 표면거칠기(Roughness)를 증가시켜 부착응력을 증가시킬 수 있는 순기능이 있는 반면, 녹의 경계면에서 녹의 파쇄가 선행됨에 따라 부착응력을 감소시킬 수 있는 역기능이 동시에 존재하게 된다. 따라서 철근의 부식도가 2% 또는 4% 이하일 경우에는 부착응력에 대한 역기능보다 순기능이 더 큰 작용을 하기 때문인 것으로 사료된다.
- (6) 철근의 직경이나 콘크리트의 강도에 상관없이 철근의 부식정도가 2% 이하일 경우에는 부착강도 저하는 없을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 철근을 부식시키기 위해 전위차 인공부식법을 이용하였으며, 이로 인해 부착강도 실험시에 사용된 철근의 녹이 약 70~80% 정도 탈락되었다. 일반적으로 현장에서 자연부식이 이루어질 경우에는 녹의 탈락율이 이보다 작을 것으로 판단되며, 이와같은 녹의 탈락율이 콘크리트의 부착강도에 미치는 영향에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. ASTM. "Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed