

콘크리트와 이형철근의 계면 부착성능 : 상단철근 및 에폭시도막철근 효과 A Study on Interfacial Bond Capacity of Deformed Bars to Concrete : Top Bars and Epoxy-Coated Bars

○ 강석원*
Kang Suk-Won

홍건호**
Hong Geon-Ho

정일영***
Chung Il-Young

ABSTRACT

The influence of the interfacial properties on the bond capacity of reinforcing bars to concrete is studied in this paper. In this study, the deterioration of the interfacial bond capacity when top-cast bars or epoxy-coated bars are used is examined. The effect of such variables on bond capacity in reinforced concrete is studied by experiment which use beam-end specimens. The main objective of this study is that comparing the test results and the requirements in ACI 318-89 code, the verification of the factor in ACI code is also presented in this paper. The results of the test show that "top bar effect" is considerably affected by the slump of fresh concrete, so the influence of slump should be taken into account for top bar effect factor in code. Test results also shows that the bond-slip curve of the epoxy-coated bars is similar to that of the uncoated and bond strength is reduced about 15%, and that coating thickness seems to influence the bond strength deterioration.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

건축 구조재료로서의 철근콘크리트는 철근과 콘크리트라는 두가지의 이질재료의 결합체로서 이 두가지의 재료는 일체로 가정하여 사용하게 된다. 따라서 콘크리트와 철근의 부착문제는 철근콘크리트조의 전체거동을 일체구조로 보장하는데 중요한 요소로 작용하게 된다.

부착강도는 철근의 위치, 철근의 종류, 피복두께, 콘크리트의 압축강도, 수평보강 철근량 등 여러가지 요인의 복합작용에 의하여 결정이 된다. 따라서 각국의 규준에서는 철근콘크리트 구조물의 일체성 거동을 보장하기 위하여 철근의 부착력 및 정착길이 등에 대한 규준을 제시하고 있다.

본 논문은 부착강도에 영향을 주는 여러가지의 요인중 주로 철근과 콘크리트의 계면특성에 의한 부착강도의 영향을 관찰하기 위하여 철근과 콘크리트 사이의 계면특성에 영향을 줄 수 있는 요인중 콘크리트의 강도차이를 유발하게 되는 상·하단 배근철근의 부착강도 및 에폭시도막철근에서의 부착특성을 관찰하고 이들의 영향정도를 실험을 통하여 분석하고자 하였다.

1.2 연구내용 및 방법

본 연구에서 철근과 콘크리트 사이의 계면 부착특성을 관찰하기 위하여 사용한 시험체는 보단부형 시험체(beam-end specimen)로서, 이 시험체는 응력의 상태가 실제 보와 같은 휨 부작을 받게 되므로 인발부착시험체에 비해 보다 합리적이며, 보형 시험체에 비해서 크기를 줄일 수 있는 잇점이 있다.

시험체는 철근의 위치, 에폭시도막의 유무, 철근의 직경, 피복두께, 콘크리트의 슬럼프 등을 변수로 하여서 같은 종류의 변수에 대해서는 각 2 개씩 제작하여, 강도 233 kg/cm² 20개, 307 kg/cm² 16개 등 총 36개의 시험체를 제작·실험하였다.

본 논문은 이상의 실험에 의한 결과를 토대

* 서울대학교 건축학과 대학원 석사과정

** 서울대학교 건축학과 대학원 박사수료

*** 정희원, 서울대학교 건축학과 교수

표3. 실험결과 요약

Group	시험체의 종류	콘크리트 압축강도	부착길이 (cm)	피복두께 (cm)	평균 최대 부착 하중 (ton)	$U_{max}(kg/cm^2)$	$U_{mod}(kg/cm^2)$	$U_{ACI}(kg/cm^2)$	U_{mod}/U_{ACI}
Bottom	Lb13-2d _b -6d _b	233	7.8	2.6	2.635	84.46	62.39	32.81	1.90
	Lb16-1d _b -6d _b	233	9.6	1.6	4.075	84.90	43.12	12.89	3.35
	Lb16-2d _b -6d _b	233	9.6	3.2	4.920	102.50	76.91	25.78	2.98
	Lb16-3d _b -6d _b	233	9.6	4.8	4.875	101.56	76.21	25.78	2.96
	Lb19-2d _b -6d _b	233	11.4	3.8	5.010	73.25	47.31	14.90	3.18
	Hb13-2d _b -6d _b	307	7.8	2.6	3.520	112.82	83.34	32.81	2.54
	Hb16-1d _b -6d _b	307	9.6	1.6	4.490	93.54	52.54	14.80	3.55
	Hb16-2d _b -6d _b	307	9.6	3.2	5.400	112.50	85.01	26.25	3.24
	Hb16-3d _b -6d _b	307	9.6	4.8	6.020	125.42	94.77	26.25	3.61
Hb19-2d _b -6d _b	307	11.4	3.8	6.830	99.85	69.35	17.10	4.06	
Top	Lt13-2d _b -6d _b	233	7.8	2.6	2.120	67.95	50.19	32.81	1.53
	Lt16-1d _b -6d _b	233	9.6	1.6	2.785	58.02	23.32	9.92	2.35
	Lt16-2d _b -6d _b	233	9.6	3.2	3.995	83.23	55.55	19.83	2.80
	Lt16-3d _b -6d _b	233	9.6	4.8	4.220	87.92	58.69	19.83	2.96
	Lt19-2d _b -6d _b	233	11.4	3.8	4.330	63.30	34.54	11.46	3.01
	Ht13-2d _b -6d _b	307	7.8	2.6	2.760	88.46	65.35	32.81	1.99
	Ht16-1d _b -6d _b	307	9.6	1.6	3.155	65.73	30.10	11.38	2.64
	Ht16-2d _b -6d _b	307	9.6	3.2	3.640	75.83	54.04	22.77	2.37
	Ht16-3d _b -6d _b	307	9.6	4.8	4.390	91.46	65.17	22.77	2.86
Ht19-2d _b -6d _b	307	11.4	3.8	4.380	64.04	38.40	13.15	2.92	
Epoxy -Bot	Leb13-2d _b -6d _b	233	7.8	2.6	2.840	91.03	67.24	32.81	2.05
	Leb16-2d _b -6d _b	233	9.6	3.2	4.125	85.94	53.06	17.18	3.09
	Leb19-2d _b -6d _b	233	11.4	3.8	4.260	62.88	27.12	9.93	2.73
	Heb16-2d _b -6d _b	307	9.6	3.2	4.675	97.40	60.14	29.60	2.03
Epoxy -Top	Let13-2d _b -6d _b	233	7.8	2.6	2.635	84.46	56.33	25.91	2.17
	Let16-2d _b -6d _b	233	9.6	3.2	4.365	98.94	51.25	13.22	3.88
	Let19-2d _b -6d _b	233	11.4	3.8	4.750	69.44	32.73	7.64	4.28
	Het16-2d _b -6d _b	307	9.6	3.2	3.175	66.15	34.26	22.77	1.50

시험체명 : S(e)AD-Cd_b-Ld_b

S : 슬랩프 (L : 12 cm, H : 18 cm)

A : 상부근(=t) 혹은 하부근(=b)

C : 철근의 직경 피복두께

(e) : 에폭시도막의 유무

D : 이형철근의 직경

L : 부착길이

로 여러가지 실험변수의 변화에 따른 부착거동 양상을 파악하고, 실험에 의한 부착강도 또는 부착응력과 ACI 규준에서 산출한 부착응력도의 값을 비교, 검토 하고자 하였다.

2. 시험체의 제작과 실험

2.1 시험체의 제작 및 양생

시험체의 치수는 폭 22 cm, 높 39 cm, 그리고 길이가 49 cm이다. 시험체의 상세는 그림1에 나타내었다.

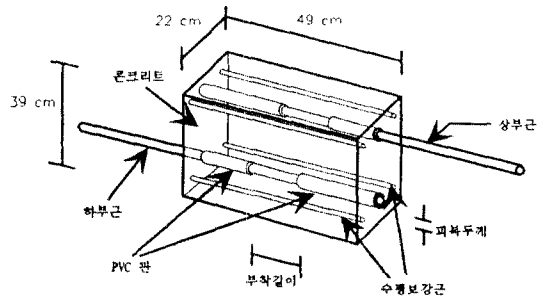


그림1. 시험체의 상세

타설후 콘크리트의 양생은 실험실에서 기건 양생을 실시하였으며, 양생기간중의 실내 평균 온도는 15℃ 정도였다.

2.2 실험변수

본 연구에서의 실험변수는 다음의 표1과 같다.

표1. 변수의 내용

분류	압축강도 (슬럼프)	철근위치	에폭시코팅	철근직경 (cm)
변수	240 (12)	하부	有	1.3
	300 (18)	상부	無	1.6

2.3 사용재료

본 실험에 사용된 콘크리트의 배합은 표2와 같다. 타설 직전 콘크리트의 슬럼프는 각각 11.5 cm와 17.5 cm였으며 타설시 콘크리트의 온도는 압축강도 240 kg/cm²의 경우 16.5℃, 압축강도 300 kg/cm²의 경우 20℃였고, 사용된 철근은 SD40 이었다.

표2. 콘크리트 배합표

구분	단위수량	시멘트	모래	자갈	혼화제	콘크리트 압축강도
배합량 (kg/m ³)	186	350	840	957	1.83	233
	186	499	648	1,078	3.7	307

2.4 재하 및 측정

시험체의 재하는 30 ton 용량의 2개의 중공 유압잭을 사용하여 가력하였으며, 시험체를 고정시키기 위하여 시험체 단부에 50 ton 용량의 유압잭을 사용하여 3 ton의 반력을 가한 상태에서 실험하였다.

철근과 콘크리트의 상대적인 미끄러짐량을 측정하기 위하여 하중단과 자유단에 각각 LVDT를 설치하였고, 하중의 크기를 측정하기 위해 증공잭에 연결되어 있는 강봉을 Load Cell로 활용하였다.

분석에 사용된 실험 측정치는 가력 하중과 자유단에서의 미끄러짐을 이용하였고, 하중단에서의 미끄러짐은 참고자료로만 활용하였다. 시험체의 설치 및 가력 상황은 그림2와 같다.

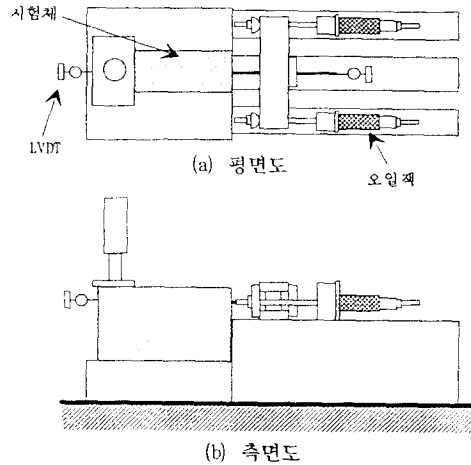


그림2. 재하 및 측정장치

3. 실험 결과 및 분석

시험체에 대한 실험결과와 ACI 코드에 의한 부착응력도의 값들을 표3에 나타내었다.

3.1 슬럼프에 의한 상단철근효과

콘크리트의 타설시, 슬럼프는 시공연도에 영향을 미칠 뿐만 아니라 구조 재료적으로도 영향을 끼칠 수 있다. 슬럼프가 증가하게 되면 시공연도는 향상되어도 타설되는 콘크리트의 상부와 하부에서 품질의 차이가 발생하여 구조적으로 문제가 될 수 있다.

본 실험에서는 슬럼프에 의한 상·하단 배근 철근의 부착강도의 차이를 실험을 통하여 밝힘으로써 슬럼프가 철근과 콘크리트 사이의 계면 부착강도에 미치는 영향에 대하여 알아보도록 하였다.

본 실험에서의 결과에 의하면, 표3 및 그림3에서 보듯이 상단철근의 부착강도는 콘크리트의 슬럼프에 상당한 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 즉, 슬럼프 값이 11.5 cm일 때 대부분의 경우에서 상부근은 하부근의 부착강도의 80~87% 정도의 값을 나타내고 있으나, 슬럼프 17.5 cm일 때에는 2가지의 경우를 제외하고는

상부근의 강도가 하부근의 약 70-75% 정도의 값을 보이고 있다. 또한, 이러한 상부근의 상대적 부착강도의 감소효과는 콘크리트의 피복두께가 증가함에 따라 점차로 줄어들게 되는데 그림4에서와 같이 피복두께가 1d_b에서 3d_b로 증가함에 따라 상부근의 상대적 부착강도는 증가하는 경향을 나타내게 된다. 이러한 결과는 콘크리트의 피복두께가 증가함에 따라 본 실험의 시험체 내에서 상부근과 하부근의 상대적 위치가 감소하게 되기 때문으로 판단된다. 결론적으로 상단철근의 부착강도의 감소효과는 콘크리트의 슬럼프에 큰 영향을 받게 된다. 한편, 이러한 실험결과를 ACI 규준에서 제시하는 상부근 효과에 의한 계수와 비교하여보면 그림3에서 나타났듯이 슬럼프 11.5cm의 경우에는 대부분의 경우에서 규준의 제시선을 상회하는 값을 나타내었다. 반면, 슬럼프 17.5cm의 경우에는 2가지 경우를 제외하고는 대부분이 규준의 제시선 이하의 상대적 부착강도를 나타내고 있다. 이와같은 실험결과에 의할 때 현재 ACI 규준에서 제시하는 바와 같이 상단철근의 부착강도 감소효과를 일률적으로 일정 계수를 사용하여 보정하여 주는 것은 비효율적이라 볼 수 있으며, 특히 높은 슬럼프의 콘크리트를 깊은 단면의 부재에 타설할 경우에는 이에대한 추가적인 고려가 필요하다고 판단된다.

시험체의 bond-slip 관계를 도식하여 보면 다음의 그림5와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 상부근의 경우에는 하부근에 비하여 최대 부착강도가 감소할 뿐 아니라 그 기울기도 감소하는 경향을 나타내어 이러한 강도의 감소효과가 상·하부 콘크리트의 압축강도 차이에서 유발됨으로 추정할 수 있었다.

한편, 에폭시도막철근의 경우에는 슬럼프 11.5cm의 경우에는 상단철근의 상대적 부착강도의 값이 90% 이상의 강도를 나타내고 있으나, 슬럼프 17.5cm의 경우에는 약 70% 정도의 강도를 나타내어 상단철근의 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

표4. 상부근과 하부근의 부착성능 비교

시험체의 종류	L _{top} /L _{bottom}			
	slump : 12 cm	계수의 적절성	slump : 18 cm	계수의 적절성
13-2d _b -6d _b	0.80	○	0.78	○
16-1d _b -6d _b	0.68	×	0.70	×
16-2d _b -6d _b	0.81	○	0.67	×
16-3d _b -6d _b	0.87	○	0.73	×
19-2d _b -6d _b	0.86	○	0.68	×

표5. 피복두께의 변화에 따른 상부근 효과

피복두께		1d _b	2d _b	3d _b
L _{top} /L _{bot}	slump=12cm	0.68	0.81	0.87
	slump=18cm	0.70	0.67	0.73

3.2 에폭시도막철근의 부착강도

철근 해사의 사용 등에 의한 철근의 부식을 방지하기 위한 하나의 방법으로 에폭시로 도막된 철근을 사용하는 경우가 있다. 그러나 에폭시로 도막된 철근은 표면조건의 변화로 인해서 콘크리트와의 계면에서의 부착력을 저하시키는 결과를 가져오게 된다.

본 실험에서는 에폭시도막의 영향으로 인한 부착강도의 저감효과를 실험하고 그 정도를 파악함으로써 현행 ACI 규준에서 제시하고 있는 에폭시도막철근에 대한 수정 계수의 값의 적절성 등에 대하여 조사하고자 하였다.

실험결과 에폭시도막철근의 경우 콘크리트 압축강도 233 kg/cm²에서는 도막되지 않은 철근에 대하여 대략 84%, 85% 정도의 값을 가지며, 압축강도 307 kg/cm²일 때에는 약 87%의 강도를 나타내었다. 이와 같은 결과로 볼 때 에폭시 도막철근은 일반 이형철근에 비해서 대략 15% 정도의 부착강도의 감소효과를 가져온다고 볼 수 있었다.

도막두께에 의한 부착강도의 감소효과는 그림에서 나타났듯이 그 정도는 크지 않으나 대체로 도막두께가 증가함에 따라 부착강도가 감소하는 경향을 나타내었으며, 이러한 결과는 Darwin and Choi 등의 실험결과와 일치하는 것으로 나타났다.

이러한 에폭시도막에 의한 부착강도의 감소효과를 ACI 규준에서는 수정계수를 통하여 보정하여주고 있으며, 그 값은 부재의 피복두께가 3d_b 이하이거나 철근간격이 6d_b 이하인 경우에는 1.5, 그 외의 경우에는 1.2로 규정하고 있다. 본 연구의 시험체의 경우에는 전자의 경우에 해당하며, 따라서 도막되지 않은 이형철근의 부착강도와 비교할 때 67% 이상의 강도를 나타내게 되면 규준에서의 수정계수 값을 만족한다고 볼 수 있다. 본 연구의 실험결과 표6에서 나타났듯이 에폭시도막철근의 부착강도비는 대체로 85% 내외로 나타났으며, ACI에서 제시하는 수정계수의 값은 상당한 안전율을 포함하게 된다고 볼 수 있다.

한편, 에폭시도막철근의 bond-slip 관계를

도식하여 보면 그림7과 같다. 그림에서 나타나듯이 에폭시도막철근의 경우 도막되지 않은 철근에 비하여 최대 부착강도는 감소하게 되나, 전체적인 경향은 유사한 것으로 나타났다.

표6. 도막두께에 따른 부착강도의 비

도막두께(mil)	Coated/Uncoated
131	0.94
152	1.11
181	0.76
200	0.87
353	1.05
467	0.81

4. 결론

본 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 상단철근의 하단철근에 대한 상대적 부착강도는 콘크리트의 슬럼프에 큰 영향을 받게 된다. 즉, 콘크리트의 슬럼프 12cm의 경우에 상부근은 하부근의 부착강도에 비하여 약 15% 정도의 강도 감소가 나타나게되나, 콘크리트의 슬럼프가 18cm로 증가함에 따라 이 효과는 더욱 증대하게 되어 약 30% 정도의 강도감소효과가 나타났다.

(2) ACI 318-89에 따르면 상단철근 부착강도의 감소효과를 고려하여 정착길이의 산정시 상단철근에 대하여는 수정계수 1.3을 사용하도록 되어 있으나 본 연구결과에 따르면 그 정도가 콘크리트의 슬럼프에 민감하게 반응하게 되며, 따라서 규준에서 제시하는 상부근에 대한 수정계수는 이러한 슬럼프의 영향을 고려할 필요가 있다고 보인다.

(3) 에폭시도막철근은 도막되지 않은 이형철근과 유사한 bond-slip의 관계를 나타내었으며 부착강도는 약 15% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

(4) 에폭시도막철근의 경우 도막두께가 증가함에 따라 부착강도는 약간 감소하는 것으로 나타났다.

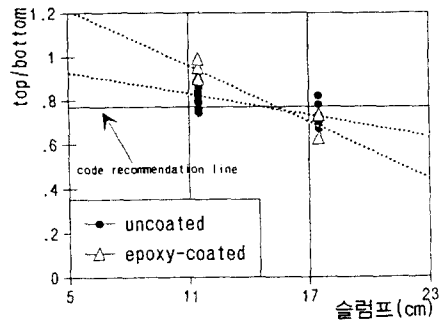


그림3. 슬럼프에 의한 상부근 효과

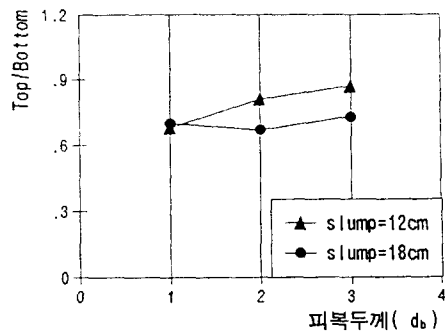
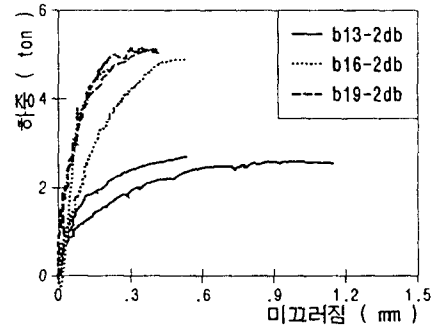
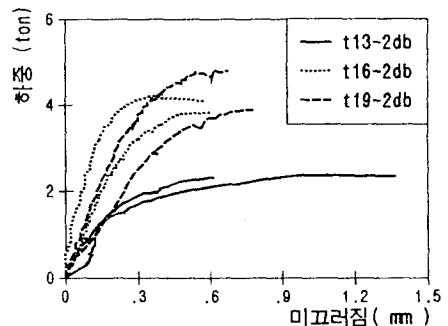


그림4. 피복두께에 따른 상부근 효과



(a) 하부근



(b) 상부근

그림5. 이형철근의 하중-미끄러짐 곡선

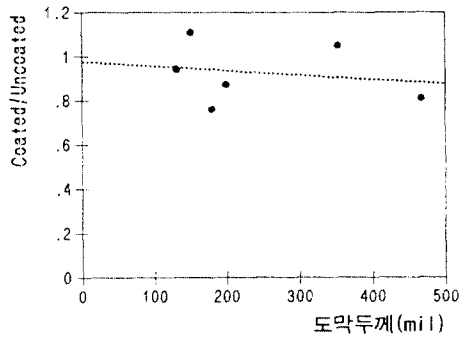
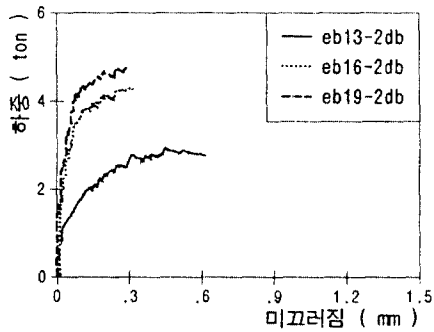
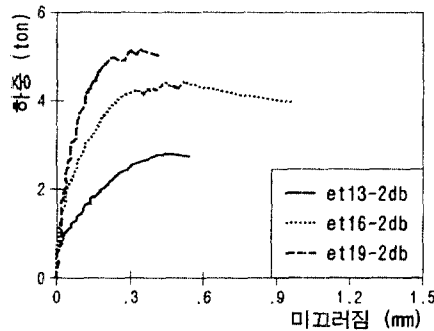


그림6. 도막두께에 따른 에폭시도막철근의 강도비



(a) 하부근



(b) 상부근

그림7. 에폭시도막철근의 하중-미끄러짐 곡선

5. 참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-89)," American Concrete Institute, Detroit, 1989.

2. Oan C. Choi, David Darwin, Steven L. McCabe, "Interface Characteristics for Bond of Reinforcing Steel to Concrete," The 4th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction Seoul, Korea, September 20-22, 1993.

3. LeRoy A Lutz, and Gergely, P., "The Mechanism of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete," ACI Journal, Proceedings V. 64, No. 3, Mar. 1967

4. LeRoy A. Lutz, S. Ali Mirza, and Narendra K. Gosain, "Changes to and Applications of Development and Lap Splice Length Provisions for Bars in Tension(ACI 318-89)," ACI Journal, V. 90, No. 4, July-August 1993.

5. Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," ACI Journal, Proceedings V. 74, No. 3, Mar. 1977.

6. Sozen, M. A., and Moehle, J. P., "Development and Lap-Splice Lengths for Deformed Reinforcing Bars in Tension," Report to the Portland Cement Association, Skokie, and the Concrete Reinforcing Steel Institute, Schaumburg, Aug. 1990.

감사의 글

본 연구의 진행 및 실험과정에서 많은 도움을 주신 숭실대학교 최완철 교수님과 이화여자대학교 신영수 교수님께 깊이 감사드립니다.