

철근콘크리트의 부착특성에 관한 연구

The Investigation on Bond Characteristics of Reinforced Concrete

신성우*

최종수**

이광수***

Shin, Sung Woo Choi, Jong Soo Lee, Kwang Soo

요 약

철근과 콘크리트의 부착성능에 영향을 미치는 인자들을 평가하기 위하여 부착실험을 수행하였다. 주요변수로는 콘크리트의 압축강도($f_c' = 340, 460, 650, 904 \text{ kg/cm}^2$), 콘크리트의 피복두께(25, 38, 51, 105, 110mm), 철근의 직경(D13, D22)으로 하였으며, 구속철근의 효과와 철근간격은 고려하지 않았다. 철근이 일축인장력을 받을 때 철근의 전 부착길이에 걸쳐 응력이 일정하다는 가정하에 32개의 실험체를 제작, 실험하였다. 각 실험체별로 파괴모드를 고찰하였고, 부착응력-변위관계를 통하여 변수의 영향을 평가하였으며, 실험결과에 따른 최대부착응력을 ACI 규준 및 기존의 제안식들과 비교하였다. 실험 결과를 분석한 결과 콘크리트의 압축강도가 ACI 규준의 상한선(700 kg/cm^2)을 초과하여도 부착응력 및 최대부착응력이 증가하는 것으로 나타나 콘크리트 압축강도 상한선을 초과하는 경우 정착길이 산정 시 압축강도 증가에 따른 영향을 고려하여야 하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

Bond test was carried out to assess the effect of several variables on bond characteristics between reinforcing bar and concrete. Key variables are concrete compressive strength($f_c' = 340, 460, 650, 904 \text{ kg/cm}^2$), concrete cover(25, 38, 51, 105, 110mm), and bar diameter(D13 and D22). Confining effect and bar spacing are not taken into account. Thirty-two specimens subjected to uniaxial tension were tested under hypothesis uniform bond stress distribution along the reinforcing bar embeded in concrete. Failure mode was examined and local bond stress versus slip relationship diagrams were represented to show effect of the above variables, also test results(ultimate bond stress) were compared with bond and development provisions of the ACI Building Code(ACI 318-89) and proposed equations from previous research. According to analysis, bond stress and ultimate bond stress increased although compressive strength increased beyond the ACI Building Code upper limit. Therefore in calculating development length, compressive strength effect(exceeding 700 kg/cm^2) should be accounted.

Keywords : bond characteristics, uniform bond stress, ultimate bond stress, slip,
ACI building code, development length

* 정회원, 한양대학교 건축공학과 부교수
** 정회원, 한양대학교 건축공학과 대학원 석사과정
*** 정회원, 여주전문대 건축공학과 전임강사

• 본 논문에 대한 토의를 1995년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 1995년 6월호에 토의회담을 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물에서 철근과 콘크리트간의 부착력은 전체 구조물의 안정성 측면에서 매우 중요한(critical) 부분으로서 구조부재의 설계나 해석에서 기본이 된다. 철근 콘크리트 구조물에서의 부착력은 콘크리트의 압축강도, 콘크리트의 피복두께, 철근의 직경, 철근의 형상, 구속철근의 유무, 철근의 매설간격 및 매설위치등에 따라 크게 영향을 받는다. 기존에 이러한 변수를 중심으로 많은 연구가 있어 왔지만 콘크리트의 압축강도가 큰 영역에서는 근거가 될 만한 자료가 크게 부족한 실정이다. 또한, 1994년에 개정된 국내 극한강도 설계법⁽¹⁾이나 기존 ACI 기준⁽²⁾에는 콘크리트의 압축강도 상한선이 $700\text{kg}/\text{cm}^2(10,000\text{psi})$ 로 규정되어 있으며, 이 한계를 초과하는 경우에 관하여는 명확한 규정이 설정되지 않은 상태이며, 국내에서는 구조부재를 대상으로 고강도 콘크리트를 사용한 연구가 아직 미진한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 압축강도와 피복두께 및 철근의 직경을 주요변수로서 정하여 부착력을 비교, 고찰하였으며, 초고강도 영역에서의 부착력이 기존의 부착력을 산정하는 방법과 어느정도의 상관성이 있는지를 규명하여 이에 대한 기초자료를 제공함에 그 목적이 있다.

2. 실 험

2.1 실험체 계획

기존의 연구에 의하면 고강도 콘크리트를 부착 실험에 사용한 경우 철근의 재하단측에 응력집중현상(Local Bond Stress)⁽³⁾이 나타나며, 부착길이 짧은 경우의 평균부착응력이 기본정착길이를 확보한 경우와 비교하여 크게 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 하중재하에 따라 매립된(embeded) 철근의 전 길이에 걸쳐 응력이 일정하다는 가정(uniform bond stress)^(4,5)하에, 철근의 항복을 피하고 콘크리트의 부착파괴를 유도하기 위하여 매립길이를 5db(D13의 경우 65mm, D22는 110mm)로 하였으며, 주요 변수로

는 콘크리트의 압축강도와 피복두께 및 철근의 직경으로 하여 총 32개의 실험체를 계획하였다. 계획된 실험체의 크기는 D13 철근을 사용한 경우는 $23\times 23\times 23\text{cm}$ 이며, D22 철근을 사용한 경우는 $23\times 23\times 32\text{cm}$ 로 하였다. 실험체 상세는 Fig. 1에 나타나 있다.

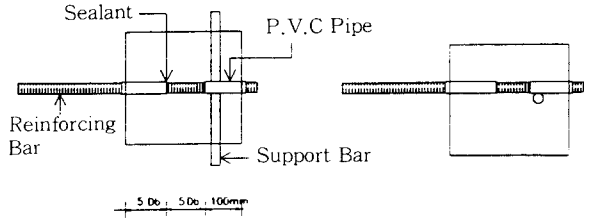


Fig. 1 Schematic of test specimen

2.2 재 료

본 연구에 사용된 시멘트는 1종 포틀랜드 시멘트로 비중이 3.14, 분말도가 $3,117\text{cm}^2/\text{g}$ 로 나타났으며, 모래는 세척사로 비중이 2.62, 조립율이 2.85로 측정되었다. 일반적으로 콘크리트의 압축강도가 높아질 수록 조골재의 최대치수는 작은것을 사용한다. 그러나 부착력의 메카니즘(mechanism)이 화학적 부착(chemical adhesion)에서 마찰(friction)로, 마지막 단계인 골재와 철근마디 사이의 맞물림작용(aggregate interaction)으로 전개⁽⁶⁾되므로 골재의 크기는 부착력에 영향을 미치게 된다.⁽⁷⁾ 따라서 조골재의 최대치수를 강도에 상관없이 일정하게 19mm로 하여 부착력에 영향이

Table 1 Material properties of reinforcing steel

Bar	E_s (kg/cm^2)	σ_y (kg/cm^2)	ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	σ_u (kg/cm^2)	Elongation (%)
D13	1988×10^3	4,800	2,414	6,556	26.1
D22	2378×10^3	4,100	1,724	6,051	21.5

Table 2 Composition of Concrete mixes

f_c (kg/cm^2)	W/C (%)	Cement (kg/m^3)	Gravel (kg/cm^3)	Sand (kg/m^3)	Silica-fume (% kg/m^3)
340	50	360.0	974	841	-
460	36	530.0	996	647	-
650	33	518.4	1035	645	4.21.6
904	28	585.0	1002	598	10.65.0

적도록 하였다. 조골재는 쇄석으로 물성시험결과 비중이 2.69, 조립율이 6.67로 나타났다. 그리고 고강도와 초고강도 콘크리트에는 실리카흙(micro silica fume)을 사용하였으며, 고강도에는 단위시멘트량의 4%, 초고강도에는 10%를 사용하였다. 실험체 제작에는 SD40의 D13과 D22철근을 사용하였다. 철근의 인장시험 결과는 Table 1에 나타나 있으며 강도별 배합은 Table 2에 나타나 있다.

2.3 실험체 제작 및 양생

실험체는 코팅처리된 거푸집에 철근을 수평으로 배근하여 매립깊이 이내의 철근마디 수가 일정하게 하였으며 철근이 매립되는 앞뒤로 p.v.c. 파이프를 설치하여 가력시에 일어날 수 있는 콘 파괴(pull-out cone failure)를 방지하고 가력 반대편의 철근변위(slip) 측정이 용이하도록 하였다. p.v.c. 파이프와 철근 사이에는 콘크리트 페이스트의 유입을 방지하기 위하여 방수용 sealant로 처리하였다. 콘크리트는 2단으로 나누어 타설하였으며, 다짐의 영향⁸⁾을 고려하여 일정한 다짐간격과 횡수로 조절하였다. 제작된 실험체는 흙손 마감후 수분증발을 방지하기 위하여 비닐로 덮어 압축강도 측정용으로 제작한 공시체와 함께 자연양생하였다.

2.4 실험체 설치 및 실험

실험체는 가력골조위에 수평으로 설치하였으며 Hydraulic Jack과 Load Cell을 철근에 연결하여 인장력을 가하였다. 가력시 실험체가 자유단으로 이동하는 것과 들리는 것을 방지하기 위하여 보조 철물로 프레임에 고정하였다. 재하단에서는 2개의 다이얼 게이지(dial gauge)로 철근의 변위를 측정하고 콘크리트면에 상대변위 측정을 위하여 1개의 다이얼 게이지를 설치하였다. 자유단에는 철근과 실험체의 상대변위 측정을 위하여 각각 1개씩의 다이얼 게이지를 설치하였다. 하중은 재하단의 철근 변위(slip)가 0.25mm, 가력 반대편의 철근 변위가 0.051mm 발생하는 단계까지는 하중조절로 그 다음은 변위조절 방식으로 각각의 하중단계마다 측정하였으며 임계변위(critical slip)이후 실험

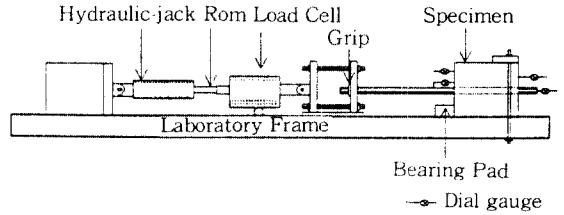


Fig. 2 Schematic drawing of test setup

체가 파괴에 이르기까지 가력하였다. 초기의 하중은 약 500(kg/분)씩 증가시키며 단계별로 재하하였다. 실험체 설치상황은 Fig. 2에 나타나 있다.

3. 실험결과

3.1 파괴양상

일반적으로 부착파괴는 두가지 형태^(9,10)를 나타내는데 쪼개짐 파괴(splitting failure)는 콘크리트의 피복이 췌기작용(wedge action)에 의하여 맞물림 작용력을 잃어 균열이 발생하는 파괴이며,

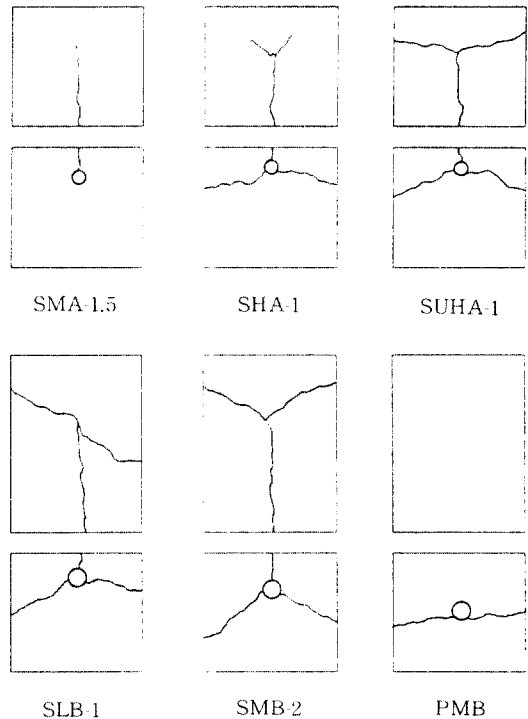


Fig. 3 Typical Crack Pattern at Failure

뽑힘파괴(pull-out failure)는 철근마디 앞부분의 콘크리트가 전단력에 의하여 파괴되어 철근이 뽑혀나오는 파괴형태를 나타낸다. 하중의 재하에 따라 최초의 균열은 최대하중에 근접하였을 때 재하단의 철근부위에서 발생하여 철근의 매립위치를 따라 실험체의 윗면과 재하면의 양옆으로 진전하였으며 이후 최대하중에서 급작스런 파괴양상을 보였다. 따라서 하중재하 단계에 따른 균열의 진전추이를 일정하게 관찰하기는 어려웠다. 콘크리트의 압축강도가 상부영역 즉, 초고강도($f_c' = 904 \text{ kg/cm}^2$)일 때에는 부착응력이 크게 증가하여 일부 실험체의 경우 부착파괴가 아닌 철근이 절단되는 현상이 나타나기도 하였다. 실험체 파괴시각 변수에 따른 대표적인 파괴양상이 Fig. 3에 나타나 있다.

3.2 부착응력의 산정

철근과 콘크리트 사이의 부착응력(μ)의 산정은 하중재하시 철근에 발생하는 응력(f_s)으로부터 계산되거나 재하된 하중(P)을 부착면적으로 나누어 계산한다. 즉,

$$\begin{aligned} \mu &= A_b f_s / \Sigma_o L, \\ \mu &= P / \Sigma_o L \end{aligned} \quad (1)$$

(Σ_o : 철근의 주장, L : 부착길이)

본 실험에서는 철근의 매립길이에 따라 응력이 일정하다는 가정하에 철근에 변형계이지를 부착하지 않았으므로 최대하중에 의한 부착응력의 산정식을 적용하였다. ASTM의 규정에 의하면 철근에 인장력이 가해지는 경우 재하단의 철근변위(slip)가 0.25mm 발생하였을 때와 자유단 변위가 0.051mm 발생한 시점을 임계변위(critical slip)로 보고 그 시점의 응력을 임계부착응력(critical bond stress)으로 산정한다. 변위가 0.25mm를 초과하면 구조체의 사용성 측면에서 피해의 기대치가 너무 크므로⁽¹¹⁾ 이 값을 수용 가능한 한계치로 설정한 것이다. 따라서 본 실험에서는 최대하중시와 재하단의 철근변위가 0.25mm 발생하였을 때의 응력을 각 변수에 따라 비교, 검토하였다. 최대

부착응력의 산정은 ACI 318-89 12.2절의 기본 정착길이 산정식을 치환한 다음의 두 식에 의하였으며, 콘크리트 압축강도의 상한선(700 kg/cm^2)은 고려하지 않았다.

$$\begin{aligned} &= 5.35 \sqrt{f_c'} / d_b (\text{kg/cm}^2), \\ \mu &= 2.204 \sqrt{f_c'} (\text{kg/cm}^2) \end{aligned} \quad (2)$$

또한, Orangun등의 제안식과 Zsutty의 제안식은 각각 식 (3)과 (4)에 나타나 있다.

$$\mu_{cal} / \sqrt{f_c'} = 1.2 + 3(C/d_b) + 50(d_b / \ell_d) \quad (\text{psi}) \quad (3)$$

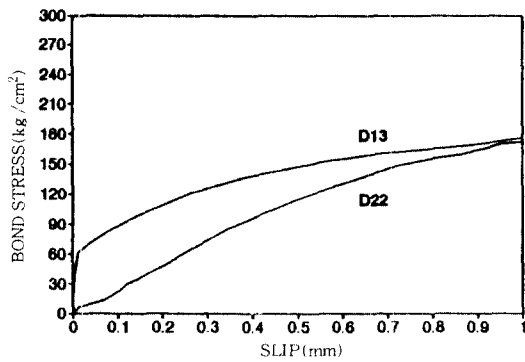
$$\mu_A = 23.79 (f_c')^{1/3} (d_b / \ell_d)^{1/2} (C/d_b)^{1/2} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (4)$$

3.3 부착응력-변위 관계

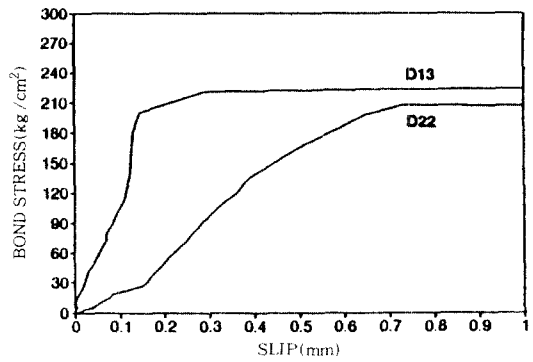
철근의 변위는 화학적 부착력이 더이상 부착성에 영향을 주지 못하고 마찰의 단계로 넘어갈 때 크게 증가하기 시작하며 (재하단 변위가 0.25mm 발생하는 단계) 이후 변위가 급격히 증가하는 것으로 알려져 있으며, 본 실험에서도 유사한 응력-변위 양상을 보였으나 각 변수별로 임계변위가 일어나는 단계는 일정하지 않았으며, 임계점의 부착응력의 평균치는 최대부착응력의 약 40%로 나타나 임계점 이후에도 부착성능이 큰 것으로 나타났다. Fig. 4는 부착응력-철근변위 관계를 나타낸 것이다.

3.4 콘크리트 압축강도의 영향

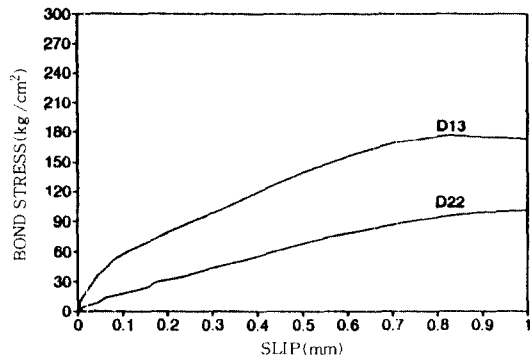
철근의 직경과 콘크리트의 피복두께가 일정할 때 콘크리트의 압축강도가 증가할 수록 최대 부착응력과 임계변위(critical slip)가 발생하는 순간의 부착응력은 강도증가에 따라 함께 증가하는 양상을 보였으며 최대부착응력은 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 $\sqrt{f_c'}$ 보다 f_c' 의 증가치에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 또한 최대부착응력의 증가폭은 콘크리트의 피복두께가 깊지 않은 경



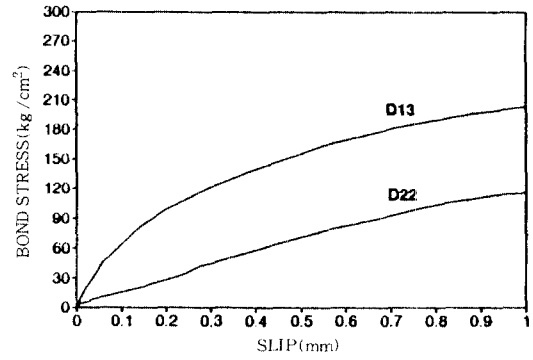
(a) $f'_c = 340 \text{ kg/cm}^2$, pull out



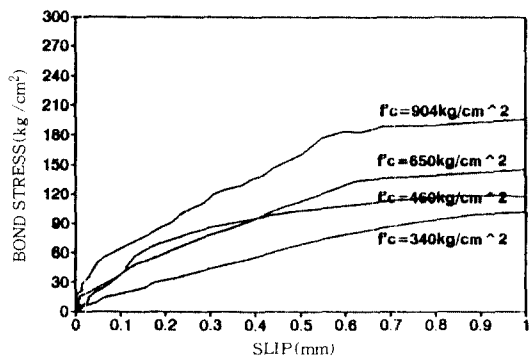
(b) $f'_c = 650 \text{ kg/cm}^2$, pull out



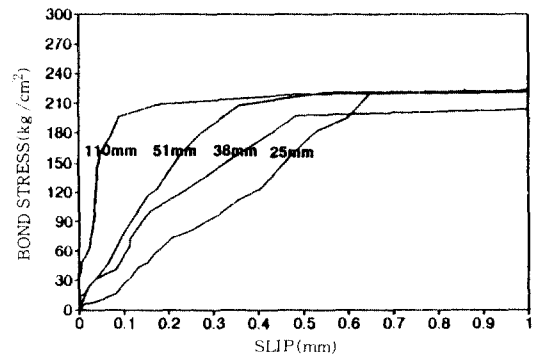
(c) $f'_c = 340 \text{ kg/cm}^2$, 25mm cover



(d) $f'_c = 340 \text{ kg/cm}^2$, 51mm cover



(e) D22, 25mm cover



(f) $f'_c = 904 \text{ kg/cm}^2$, D13

Fig. 4 Bond stress-slip relationship

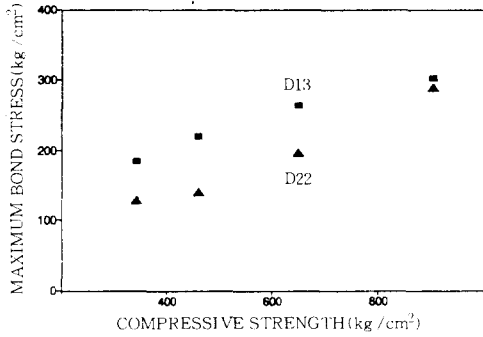


Fig. 5 Max. bond stress-compressive strength(38mm cover)

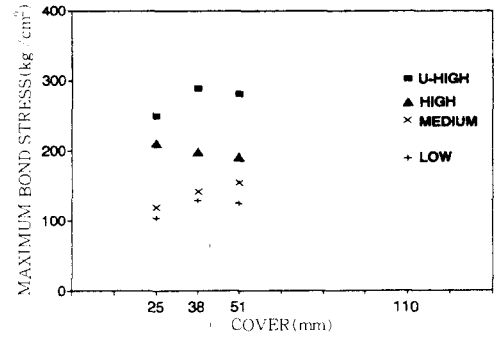


Fig. 6 Max. bond stress-concrete cover(D22)

Table 3 Summary of test results

Specimen	ℓ_d	Cover	f'_c	μ_{ACI}	μ_{cal}	μ_A	μ_{test}	μ_{test} μ_{ACI}	μ_{test} μ_{cal}	μ_{test} μ_A	Failure Mode
	mm										
SLA-1	65	25	340	50.80	82.8	102.9	176.6	3.4	2.1	1.7	P*
SLA-1.5		38			97.4	126.9	184.9	3.6	1.9	1.5	P
SLA-2		51			112.1	147.0	216.1	4.2	1.9	1.5	S**
PLA		110			178.5	215.9	176.6	3.4	1.0	0.8	P
SLB-1	110	25	340	50.80	71.3	79.1	103.7	2.0	1.5	1.3	S
SLB-1.5		38			79.9	97.5	129.0	2.5	1.6	1.3	S
SLB-2		51			88.6	113.0	124.0	2.4	1.4	1.1	S
PLB		105			124.5	162.1	190.1	3.7	1.5	1.2	P
SMA-1	65	25	460	59.09	96.3	113.8	142.2	2.4	1.5	1.3	P
SMA-1.5		38			113.3	140.3	220.5	3.7	1.9	1.6	S
SMA-2		51			130.3	162.6	180.9	3.0	1.4	1.1	P
PMA		110			207.6	238.8	200.6	3.3	1.0	0.8	P
SMB-1	110	25	460	59.09	82.9	87.5	118.6	2.0	1.4	1.4	S
SMB-1.5		38			92.9	107.9	141.3	2.3	1.5	1.3	S
SMB-2		51			103.0	125.0	154.0	2.6	1.5	1.2	S
PMB		105			144.8	179.3	243.5	4.1	1.7	1.4	S
SHA-1	65	25	650	70.24	114.5	127.7	241.3	3.4	2.1	1.9	S
SHA-1.5		38			134.7	157.5	264.5	3.7	2.0	1.7	P
SHA-2		51			154.9	182.5	281.3	4.0	1.8	1.5	P
PHA		110			246.8	268.0	296.9	4.2	1.2	1.1	P
SHB-1	110	25	650	70.24	98.5	98.2	210.6	2.9	2.1	2.2	S
SHB-1.5		38			110.5	121.1	198.1	2.8	1.8	1.6	S
SHB-2		51			122.5	140.3	190.9	2.7	1.6	1.4	S
PHB		105			172.1	201.2	269.8	3.8	1.6	1.3	P
SUHA-1	65	25	904	82.83	134.9	142.6	315.2	3.8	2.3	2.2	S
SUHA-1.5		38			158.9	175.8	302.4	3.6	1.9	1.7	Y***
SUHA-2		51			182.7	203.7	304.8	3.6	1.7	1.5	Y
PUHA		110			290.9	299.1	308.3	3.7	1.1	1.0	P
SUHB-1	110	25	904	82.83	116.2	109.6	250.0	3.0	2.2	2.3	S
SUHB-1.5		38			130.3	135.1	289.5	3.4	2.2	2.1	S
SUHB-2		51			144.4	156.6	281.6	3.4	2.0	1.8	S
PUHB		105			203.0	224.6	302.7	3.6	1.5	1.4	Y

* : Pull out failure ** : Splitting failure *** : Bar failure

f'_c : Compressive Strength, d_b : Bar Diameter, ℓ_d : Development Length Specimen designation : SLA-1

S : Splitting test (P : Pull out test), L : Low strength (M : Medium, H : High, UH : Ultra High)

A : 13mm bar (B : 22mm bar), 1 : 1-inch (25mm) concrete cover (1.5 : 1.5-inch (38mm), 2 : 2-inch (51mm))

μ_{ACI} : Max. bond stress by ACI code μ_{cal} : Max. bond stress by Orangun et al μ_A : Max. bond stress by zsutty

우에 큰 것으로 나타났다. Fig. 5에 압축강도에 따른 최대부착응력이 비교되어 있다.

3.5 콘크리트 피복두께의 영향

콘크리트 피복두께의 변화에 따른 부착응력은 피복두께가 증가함에 따라 최대부착응력 및 임계부착응력이 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 콘크리트의 압축강도가 비교적 낮은 영역에서 피복두께의 영향이 큰 것으로 나타났으며, 콘크리트의 압축강도가 고강도와 초고강도 영역으로 갈수록 피복두께는 최대부착응력에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. Fig. 6과 Table 3에 실험결과가 비교되어 있다.

3.6 철근 직경의 영향

철근의 직경에 따른 부착응력의 비교에서 철근의 직경이 D13인 경우가 D22인 경우보다 임계부착응력 및 최대부착응력이 큰 것으로 나타났으며, 철근의 직경은 고강도일 경우보다 저강도일때 최대부착응력에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 피복두께가 충분히 깊은 경우 철근직경은 최대부착응력에 영향이 적은 것으로 나타났으며, 일부 실험체를 제외하고 D13 실험체의 최대부착응력이 D22실험체에 비하여 약 1.02~1.74배 높게 나타났다. 철근직경에 따른 최대부착응력이 Fig. 7에 비교되어 있다.

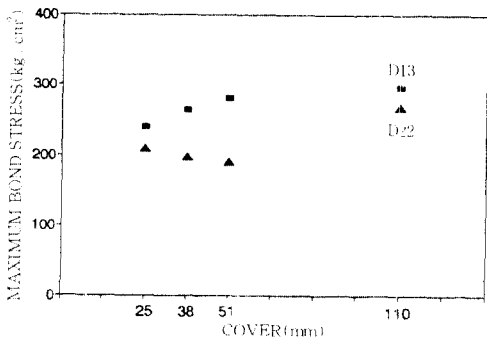


Fig. 7 Max. bond stress - Bar diameter (f'c = 650kg/cm²)

3.7 실험결과와 ACI 기준식 및 기존 제안식과의 비교

실험결과를 ACI 318-89의 치환식 및 기존 제안식에 의한 결과와 비교하여 볼 때 ACI식에 의한 최대 부착응력이 충분한 안전치를 확보하고 있는 것으로 나타났으며 각 실험체에 대한 결과는 Table 3에 요약되어 있다. μ_{test} 는 μ_{ACI} 보다 2.0~4.2배 높게 나타났으며, μ_{cal} 보다 평균 1.7배, μ_A 보다는 평균 1.5배 높게 나타났다. μ_A 의 경우 D13을 사용한 실험체가 D22를 사용한 실험체에 비하여 평균 30% 높게 나타났으며, 피복두께가 두꺼운 경우의 실험결과가 기존 제안식에 의한 결과에 근접하는 경향을 나타냈다. 각 식에 의한 최대부착응력의 비교가 Fig. 8에 나타나 있다.

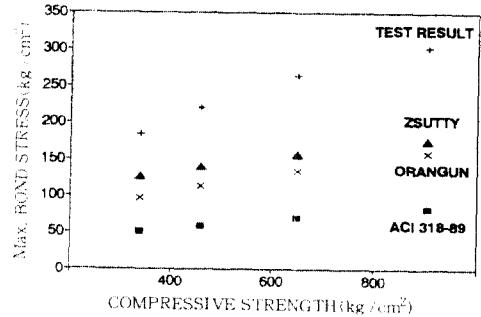


Fig. 8 Max. bond stress (μ_{test} , μ_{ACI} , μ_{cal} , μ_A - D13, 38mm cover)

3.8 회귀분석에 의한 최대부착응력 예측식 제안

각 변수별 영향평가를 위하여 실험결과를 회귀분석하였으며 다음과 같은 최대부착응력 예측식을 제안하였다.

$$\mu = 6.31(f'_c)^{1.12}(C/d_b)^{1.33} \quad (R: 0.81 \quad S: 0.19) \quad (5)$$

실험결과가 Zsutty의 제안식과 비교적 가깝게 나타났으므로 본 실험에 의한 제안식은 식 (4)의 형태로 유도하였다. 그러나 Zsutty의 식은 $\sqrt{f'_c}$ 의 영향을 과소평가하고 (C/d_b)의 영향을 과대평가한 것으로 나타나 식 (4)를 수정하여 식 (5)의 형태로 유도하였다. 회귀식에 의하여 콘크리트의 압축강도, 피복두께 및 철근의 직경이 주어지면 최

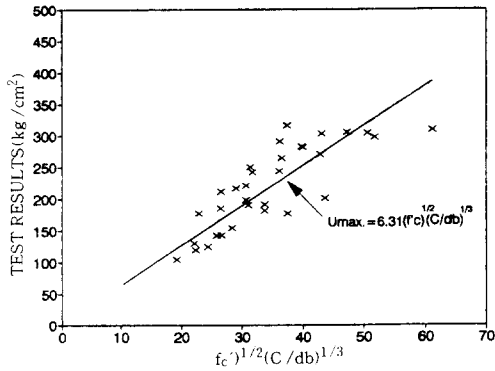


Fig. 9 Test results versus $\sqrt{f'_c}(C/d_b)^{1/3}$

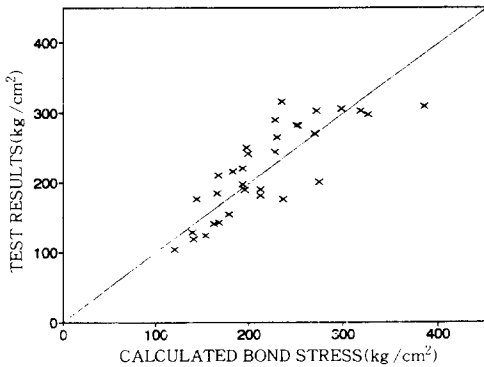


Fig. 10 Test results versus Regression results

대부착응력을 예측하는 것이 가능하다. 실험결과에 의한 최대부착응력과 영향인자의 관계가 Fig. 9에 나타나 있으며, 실험결과와 회귀식에 의한 결과의 비교가 Fig. 10에 나타나 있다. 그림에 나타나 있듯이 일부 실험체의 경우를 제외하고 식(5)는 실험결과를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

콘크리트 압축강도, 콘크리트 피복두께, 철근의 직경을 변수로 하여 콘크리트에 매립된 철근의 부착성능 실험을 수행하였으며, 실험결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 임계점에서의 부착응력은 최대부착응력의 약 40%로 나타났으며, 모든 실험체에서 최대부착응력이 재하단 변위 0.25mm 이후에 일어나므로 ASTM에 의한 임계점 이후에도 부착

성능이 큰 것으로 나타났다.

2. 콘크리트의 압축강도가 높을때 ($f'_c=650, 904\text{kg/cm}^2$) 거의 모든 실험체가 철근의 항복 이후 파괴되어 고강도 콘크리트를 사용한 경우 철근이 탄성범위 내에서 거동한다는 가정하에 부착길이를 선정한 $5d_b$ 는 적당하지 않았으며 더 짧은 부착측정 길이를 요하는 것으로 나타났다.
3. 콘크리트의 압축강도가 904kg/cm^2 인 경우에도 부착응력이 크게 증가하므로 ACI규준의 압축강도 상한선인 700kg/cm^2 을 초과하는 경우에도 압축강도 증가에 따른 영향을 고려하여야 하는 것으로 나타났다.
4. 철근의 직경에 따른 최대부착응력 검토에서 D13실험체가 D22실험체에 비하여 최대부착응력이 1.02~1.74배 높은 것으로 나타났으며, 콘크리트의 피복이 충분히 두꺼운 경우 철근직경의 영향이 적은 것으로 나타났다.
5. 기존 ACI 규준식에 의한 결과와의 비교에서는 실험결과가 2.0~4.2배 높게 나타났으며, Orangun등에 의한 제안식에 의한 결과와의 비교에서는 평균 1.7배로 크게 나타났으며, Zsutty의 제안식에 의한 결과와의 비교에서는 평균 1.5배 크게 나타났다. 실험결과가 규준식 및 제안식에 의한 결과보다 크게 나타난 것은 부착길이가 짧아 상대적으로 평균부착응력이 커졌기 때문인 것으로 사료된다.
6. 본 연구의 실험자료를 회귀분석한 결과 다음과 같은 최대부착응력 예측식을 제안하였다.

$$\mu = 6.31 \sqrt{f'_c}(C/d_b)^{1/3} \quad (R=0.81, S=0.19)$$

참 고 문 헌

1. 대한건축학회, "철근콘크리트 구조계산 규준 및 해설", 1994. 4
2. ACI Committee 318-89, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", ACI.
3. Atorod Azizinamini, Mark Stark, John j. Roller, and s.k. Ghosh, "Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete", ACI Structural Journal, Sep.-Oct. 1993, pp. 554-561.

4. Craig R. Clark and David W. Johnston, "Early Loading Effects on Bond Strength", ACI Journal, Nov.-Dec. 1983, pp. 532-539.
5. Homayoun H. Abrishami and Denis Mitchell, "Simulation of uniform Bond Stress", ACI Materials Journal, March-April 1992, pp. 161-168.
6. L. Javier Malvar, "Bond of Reinforcement Under Controlled Confinement", ACI Materials Journal, Nov.-Dec. 1992, pp. 593-601.
7. David Darwin, Steven L. McCabe, Emmanuel Kidun, and Steven P. Schoenekase, "Development Length Criteria : Bars Not Confined by Transverse Reinforcement", ACI Structural Journal, Nov.-Dec. 1992, pp. 709-720.
8. Wisam A. K. Altowaiji, David Darwin, and Rex C. Donahey, "Bond of Reinforcement to Vibrated Concrete", ACI Journal, Nov.-Dec. 1986, pp. 1035-1042.
9. Keivan Noghabai, Ulf Ohlsson and Thomas Olofsson, "Bond Properties of High Strength Concrete", High-Strength Concrete 1993 Proceedings, 20-24 June Lillehammer NORWAY, pp. 1169-1176.
10. 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 Structural Journal, Jul.-Aug. 1993, pp. 393-401.
11. Avi Mor, "Steel-Concrete Bond in High-Strength Lightweight Concrete", ACI.

(접수일자 : 1994. 11. 22)

