

鐵筋콘크리트 部材의 뽐힘(引拔) 부착특성 연구

Pull-out Bond Characteristics of Reinforced Concrete Members

오 병 환*

Oh, Byung Hwan

요 약

본 논문에서는 철근콘크리트 부재의 뽐힘(引拔) 부착거동을 규명하기 위하여 일련의 포괄적인 실험 및 이론 연구를 수행하였다. 실험의 주요변수로는 콘크리트의 압축강도, 철근간격 및 덮개, 그리고 철근의 부착길이 등을 선정하였다. 본 연구결과 철근콘크리트의 부착강도는 콘크리트 강도 뿐만 아니라 부착길이, 철근의 덮개 등에 따라 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 이들의 영향을 정량적으로 도출하였다. 또한, 본 연구에서는 철근콘크리트의 부착강도식을 새롭게 제안하였으며, 부착응력-슬립관계식도 유도하여 제시하였다.

Abstract

Presented is a study on the pull-out bond characteristics of reinforced concrete members. A series of experimental and theoretical work is conducted. Major test variables are concrete compressive strength, concrete cover or rebar spacing, and the bond length. The present study indicates that bond strength is greatly influenced by those major test variables. The effects of those variables on the bond strength are quantitatively measured. A new formula for the bond strength of reinforced concrete is proposed. The prediction equation for the average bond stress-slip relation is also proposed.

Keywords : Bond, pull-out bond, reinforced concrete members, compressive strength, cover, bond, length, bond slip, bond stress.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 그 특성상 사용하중하에 서도 인장부에 균열이 발생할 수 있고, 이러한

균열은 부재의 강성을 저하시키고, 또한 응력의 재분배를 일으키게 된다. 따라서, 철근으로부터 콘크리트로의 힘의 전달은 균열의 전파형상과 함께 중요한 연구과제로 지적되어 왔다. 최근들어 강도설계 방법의 도입과 직경이 큰 철근의 사용이 광범위해짐에 따라 이전에 채택된 설계절차와

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 부교수

철근의 부착성능에 대한 정확성이 지적되고 있다.(1-5)

직경이 크고 높은 인장력을 갖는 철근을 효율적이고 안전하게 사용할 수 있는 새로운 설계절차를 개발하는 시도로써 West Virginia, Cornell, Texas (1) 등에서 그동안 많은 연구가 수행되었으며, 그 결과로서 철근간격, 콘크리트 피복두께, 그리고 다우유크힘(dowel force)이 부착거동에 많은 영향을 끼치며 더욱이 콘크리트 강도, 부착길이 등은 부착거동에 중요한 역할을 한다고 보고하고 있다.(3,11,12) 따라서, 본 연구의 목적은 철근의 부착거동을 보다 정확하게 규명하고 각 영향인자에 따른 부착응력과 부착슬립의 관계를 도출함으로써 철근 콘크리트 부재의 부착설계를 위한 유용한 자료를 제공하는데 그 주목적을 두고 있다. 이를 위하여 콘크리트 강도, 철근의 부착길이, 철근을 둘러싼 콘크리트의 주위면적 등을 중요변수로 하여 포괄적인 실험연구를 수행하였다.

2. 철근콘크리트의 뺨힘 부착실험

2.1 실험 개요

본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 뺨힘 부착거동(pull-out bond behavior)을 규명하기 위하여 몇가지 주요한 영향인자를 실험변수로 택하였다. 즉, 부착거동에 영향을 주는 콘크리트 강도, 철근의 부착길이, 철근주위의 면적(철근뺨개) 등을 주요변수로 선정하여 실험을 수행하였다.

콘크리트의 압축강도는 보통강도에서부터 약간

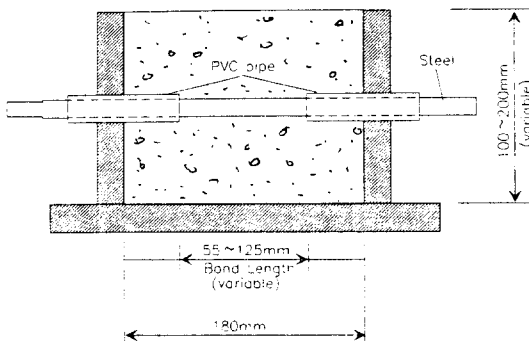


Fig. 1 Specimen configuration

높은 고강도 콘크리트까지 265kg/cm²(26MPa), 315kg/cm²(30.9MPa), 447kg/cm²(43.8MPa)의 3가지 종류로 분류하였고, 철근 주위의 콘크리트 단면은 10×10cm, 15×15cm, 20×20cm의 세가지로 분류하였다(Fig.1 참조). 또한 부착길이(bond length : BL)는 55mm, 85mm, 125mm로 변화시켜 부착길이에 따른 부착강도의 특성을 고찰하였다. 따라서 실험시편의 종류는 모두 27가지로서 각 경우마다 2개씩 모두 54개를 제작하여 포괄적인 실험이 되도록 하였다.

2.2 실험재료의 특성

철근은 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 SD 40 철근으로서 D22 철근을 사용하였으며, Table 1에 그 철근 특성이 요약되어 있다. 콘크리트는 제1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재는 비중 2.75인 강모래를 굵은 골재는 비중 2.65인 강자갈을 사용하였다. 콘크리트의 각 시리즈별 배합설계표와 강도는 Table 2에 요약되어 있다.

Table 1. Characteristics of test steel bars

Yield strength	3,600kg/cm ²
Ultimate strength	5,150kg/cm ²
Modulus of elasticity	2.1×10 ⁶ kg/cm ²
Spacing of ribs	14.57mm
Height of ribs	1.28mm
Width of ribs	3.60mm

Table 2. Mix proportions and concrete strengths

	Weight ratio			Water-cement ratio (W/C)	Compressive strength f _c (MPa)	Tensile strength f _t (MPa)
	Cement	Fine agg.	Coarse agg.			
Series 1	1.00	2.13	3.19	0.54	26	3.08
Series 2	1.00	1.46	2.48	0.42	31	3.45
Series 3	1.00	1.33	2.00	0.31	44	5.01

2.3 실험시편의 제작 및 양생

철근콘크리트 구조물에서 관심이 높은 변수인 콘크리트 강도, 철근 주위의 면적, 부착길이 등을 변화시켜 각각에 따른 부착거동을 고찰하였으며,

부착길이에 대해서는 부착응력이 균일하게 작용하고 철근이 항복하기 전에 부착파괴가 일어나도록 부착길이를 조절하여 제작하였다. 부착길이를 조절은 PVC관을 삽입하여 PVC관의 길이를 조절하여 제작하였다(Fig. 2). 콘크리트타설후 실험실에서 습윤양생을 실시하였으며 콘크리트 타설과 함께 압축강도 f'_c , 인장강도 f'_t 를 측정하기 위해 콘크리트 압축강도 실험용 실린더($\phi 100 \times 200\text{mm}$)를 강도당 9개씩 제작하여 6개를 압축강도용으로, 3개는 할렬인장강도용으로 사용하였다.

2.4 실험방법 및 측정

본 연구에서는 일면 뿔힘(인발)시험법을 채택하여 부착거동을 연구하였으며 Fig. 2에 Instron (Model 1125)에 장치된 시편의 모습이 보이고 있다. 하중은 단계별로 증가시키면서 200kg씩 가하였으며, 각 하중단계마다 자유단 슬립(slip)을 정도 0.001mm의 다이얼 게이지(dial gage)로 측정하였다. 이때 하중은 자동 제어 재료시험기인 Instron에서 자동으로 기록되었다. 하중의 재하속도는 0.5mm/min(cross-head speed)으로 일정하게 유지하였다.

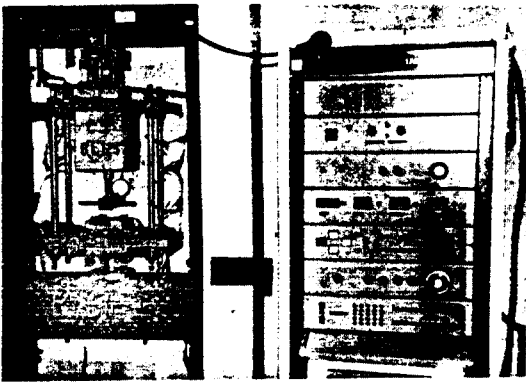


Fig. 2 Arrangement of test specimen with Instron test machine

3. 실험결과 및 분석

3.1 부착응력의 분포 및 평균 부착응력

콘크리트내에 묻혀있는 철근이 인장력을 받을 때 철근의 길이에 따라 부착응력의 분포가 달라지

게 된다. 그것은 철근으로부터 콘크리트로 전달되는 응력이 각 위치마다 다르기 때문이며, 철근과 콘크리트사이의 슬립에 따라서도 달라지기 때문이다.

본 연구자는 이전의 연구에서 휨부재의 부착거동을 연구한 바 있으며, 이 경우 부착응력은 길이에 따른 변형도(strain)의 변화율에 따라 변화한다. 그러나, 본 연구는 뿔힘(인발) 부착거동을 규명하기 위한 연구로서 철근의 인장하중을 부착면적으로 나누어 평균 부착응력을 도출한다. 즉, 평균 부착응력은 다음과 같이 계산된다.

$$\tau = \frac{F}{\Sigma_0 L} \quad (1)$$

여기서, F : 철근에 가해진 인장하중,
 Σ_0 : 철근의 원둘레 길이(주상),
 L : 부착길이이다.

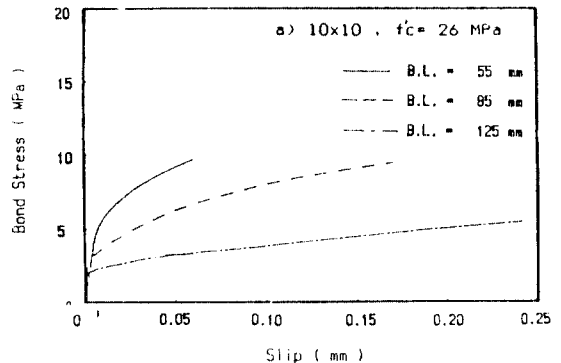
부착길이가 아주 짧은 경우에는 국부 부착응력(local bond stress)으로 볼 수 있다.

3.2 부착응력 실험결과

상기의 식(1)에 따라 본 실험결과로부터 부착응력과 부착슬립과의 관계를 도출하였다. Table 3은 각 시편의 극한 부착강도를 요약하여 보여주고 있다.

3.3 부착응력과 부착슬립

본 연구의 실험결과로부터 평균 부착응력과 부착슬립과의 관계를 얻었으며 Fig. 3에 그 결과



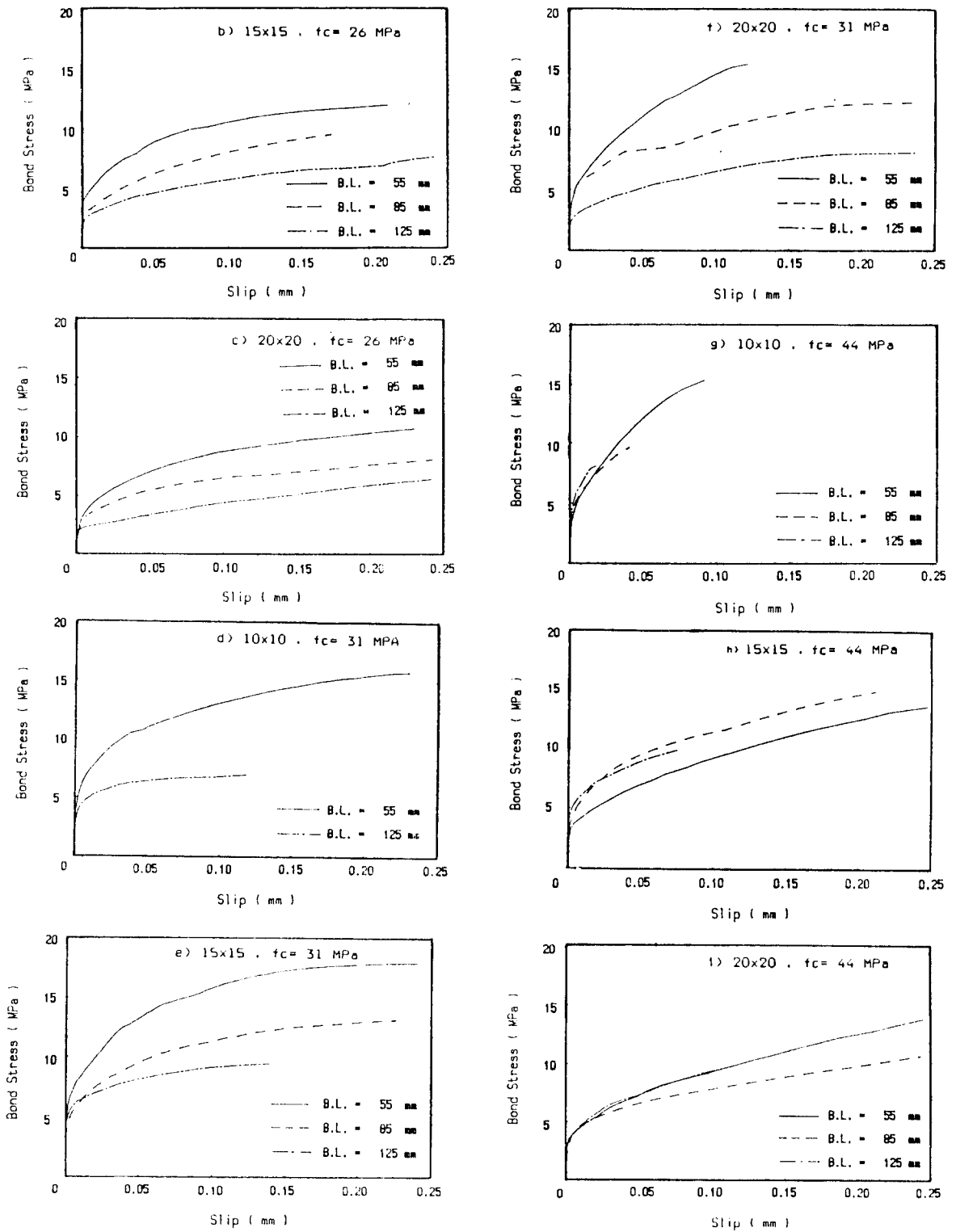


Fig. 3 Test results on bond stress-slip relations for various cases

Table 3. Ultimate bond stress for various cases

Specimen No.	Bond length L(mm)	f'_c (MPa)	Concrete Area(cm ²)	τ_{max} (MPa)
A1S	55	25.5	10×10	10.1
A1M	85	26.0	10×10	9.5
A1L	125	26.0	10×10	6.7
A2S	55	26.0	15×15	12.1
A2M	85	25.5	15×15	9.1
A2L	125	26.0	15×15	8.0
A3S	55	25.5	20×20	14.3
A3M	85	26.9	20×20	10.6
A3L	125	25.7	20×20	8.1
B1S	55	30.5	10×10	15.8
B1L	125	30.5	10×10	7.0
B2S	55	31.9	15×15	18.0
B2M	85	31.9	15×15	13.2
B2L	125	30.5	15×15	9.5
B3S	55	31.9	20×20	15.5
B3M	85	30.9	20×20	14.8
B3L	125	30.9	20×20	8.1
C1S	55	44.0	10×10	15.9
C1M	85	44.0	10×10	14.5
C1L	125	44.0	10×10	10.6
C2S	55	44.0	15×15	19.0
C2M	85	44.0	15×15	14.9
C2L	125	44.0	15×15	9.8
C3S	55	44.0	20×20	21.1
C3M	85	44.0	20×20	13.6
C3L	125	44.0	20×20	9.8

가 도시되어 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 부착길이가 커질수록 평균 부착응력은 작아지고 있다. 또한 콘크리트의 압축강도가 커질수록 부착강도가 커지고 있으며, 철근 주위의 면적이 커질수록, 즉 덮개가 커질수록 부착강도가 증가하고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 콘크리트 순 덮개에 따라 최대 부착응력이 어떻게 변하고 있는지 보여주고 있다. 또한, Fig. 5는 콘크리트 강도에 따라 최대 부착응력(부착강도)이 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이 그림에 의하면 현행 ACI Code나 우리나라의 콘크리트 표준 시방서에서 규정하고 있는 부착강도보다 실험결과가 크게 측정되고 있어 시방서값들이 설계를 위한 안정측의 값임을 알 수 있다. 즉, 콘크리트 강도에 따른 최대 부착응력은 다음 식으로 예측될 수 있다.

$$\tau_{max} = 2.45 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

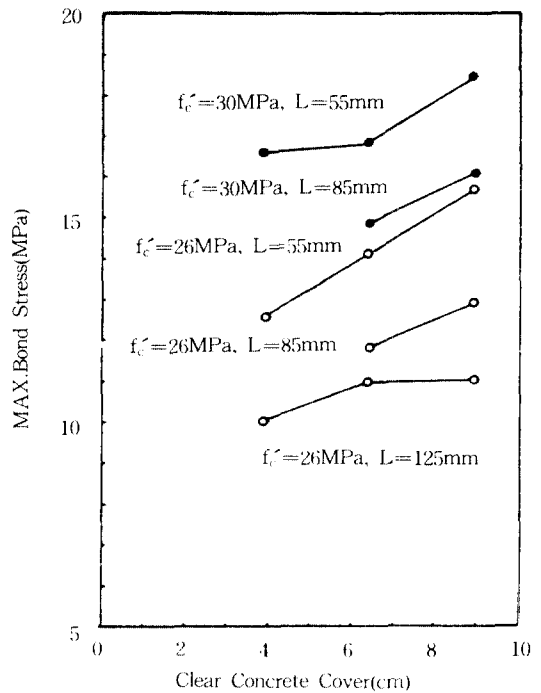


Fig. 4 Variation of bond strength according to clear concrete cover

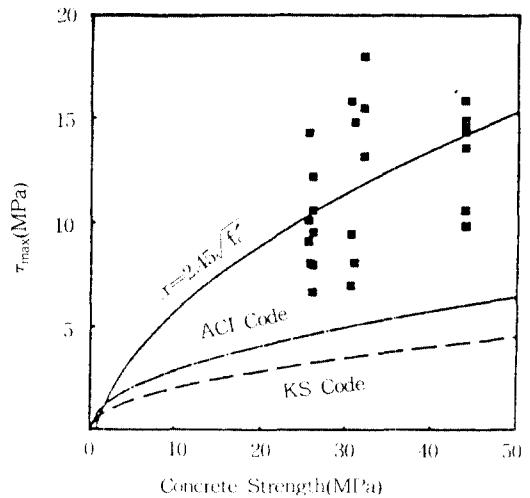


Fig. 5 Variation of bond strength according to concrete compressive strength

여기서, τ_{max} = 최대 부착응력(부착강도)(MPa), f'_c = 콘크리트 압축강도(MPa)이다.

4. 철근콘크리트의 부착강도 및 부착응력-슬립 관계식 유도

4.1 철근콘크리트의 부착파괴 기구

철근콘크리트 부재에서 철근의 인장력이 콘크리트로 전달됨에 따라 철근 주위의 콘크리트에는 원주방향의 인장응력(circumferential stress) f_θ 가 유발되고, 아울러 철근 주위의 부착면에서의 접선응력이 작용한다.⁽¹⁾ Fig. 6은 이와같은 응력전달 기구를 도식적으로 보여주고 있다. 이때 철근주위의 원주방향 인장응력으로 인하여 콘크리트에는 균열이 발생할 수 있고, 이러한 균열은 철근의 길이를 따라 발생하는 활열균열(splitting cracks)을 이루게 된다.

이 활열균열은 철근의 하부 콘크리트덮개(bottom cover) C_b 와 철근옆 방향의 옆덮개(side cover) C_s 의 상호 관계에 따라, 그 양상이 다르게 된다(Fig. 6). 즉, 바닥덮개 C_b 가 옆덮개 C_s 보다 작은 경우($C_b < C_s$) 바닥쪽에 활열균열이 먼저 발생하게 되고, 옆덮개가 작은 경우($C_b > C_s$)에는 옆쪽에 균열이 먼저 발생할 수 있다. 여기서 옆덮개 C_s 는 철근과 철근 사이의 수평공간격의 반(半)의 의미도 가지고 있다. 즉, 균열이 일어나는

파괴원의 반경은 C_s 와 C_b 중 작은 값이 된다.

이러한 철근콘크리트의 부착파괴 기구는 본 연구자가 이미 연구 발표한 논문^(1,2)에도 언급되어 있다. 따라서, 철근콘크리트의 부착파괴에 영향을 미치는 주요인자는 파괴가 일어나는 파괴원 C 와 철근 직경 D_s 그리고 앞의 3장의 실험결과에서 보듯이 부착길이 L 등으로 요약될 수 있다.

4.2 부착강도 예측 공식

앞 절에서 철근콘크리트의 부착파괴 기구를 설명한 바와 같이 부착파괴에 영향을 미치는 인자를 분석하여 철근콘크리트의 부착강도를 예측할 수 있는 공식을 유도하였다. 즉, 콘크리트의 최대 부착응력 τ_{max} 을 구하기 위하여 영향변수 C/D_s , D_s/L 을 도입하여 다음과 같은 예측공식을 도출하였다. 이 식의 도출은 회귀 분석용 프로그램 SSP를 이용하여 비선형 회귀분석으로 이루어졌다.

$$\tau_{max} = (k_1 + k_2 \frac{C}{D_s} + k_3 \frac{D_s}{L}) \sqrt{f_c'} \quad (3)$$

여기서, $k_1=0.38$, $k_2=0.17$, $k_3=4.75$ 이며, 이 공식의 상관계수는 $\gamma=0.96$ 으로서 높은 상관성을 나타내었다.

이 예측공식을 부착의 영향변수 L/D_s 그리고 C/D_s 에 따라 실험자료와 비교한 것이 Fig. 7이다. 이 그림에서 보듯이 본 예측공식이 변수의 영향을 잘 고려하고 있음을 알 수 있다.

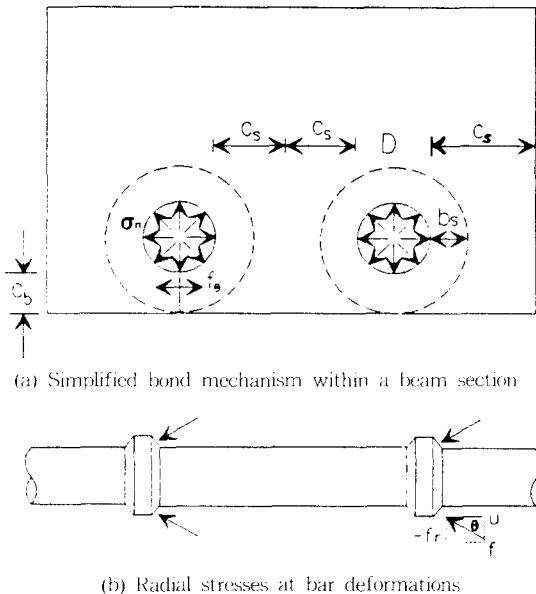
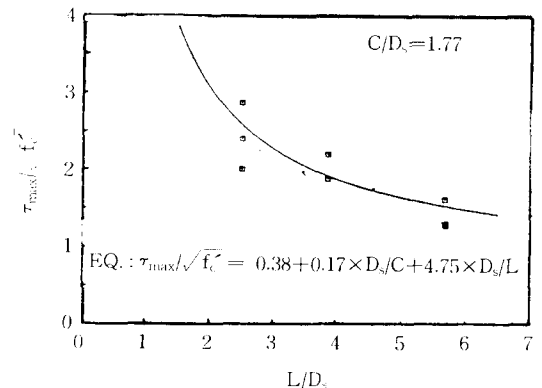


Fig. 6 Mechanical behavior on the interface by bond



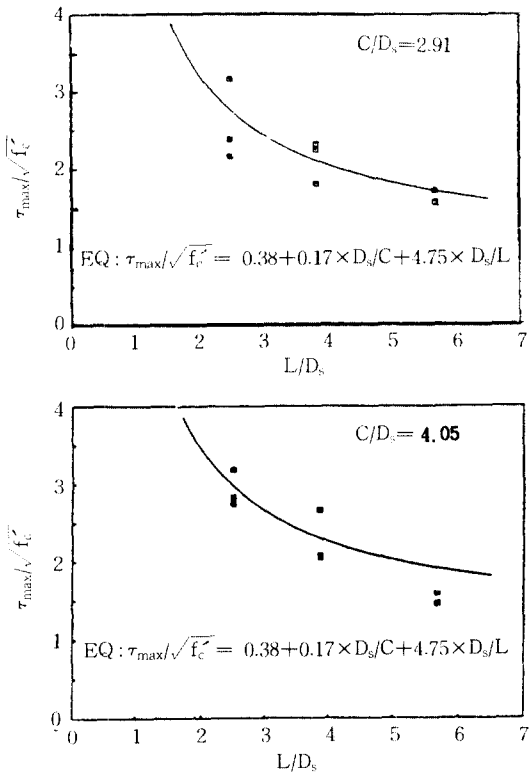


Fig. 7 Variation of bond strength($\tau_{max}/\sqrt{f'_c}$) according to L/D_s

본 연구에서 유도된 부착강도 예측공식을 타연구자 즉, Orangun등⁽¹²⁾과 Jimenez등⁽¹³⁾의 공식과 비교한 결과가 Table 4에 요약되어 있다. 즉, Table 4에는 여러 연구자의 부착 실험자료를 각 공식으로 예측하여 계산치에 대한 실험측정치의 비를 평균하여 표시한 것이다. 이 비(比)가 1에 가까울 경우 예측공식이 비교적 정확함을 말해주고 있다. 이 표에서 보듯이 본 연구의 공식이

Table 4. Comparison of the ratios of the measured bond strengths to calculated ones for various formulas

Test Data	Number of test data	Prediction equations		
		Proposed equation	Orangun et. al.	Jimenez et. al.
Present test data	24	0.918	1.031	1.189
Hawkins et. al. ⁽⁷⁾	10	1.065	1.189	1.937
Morita ⁽²⁾⁽²³⁾	18	1.047	1.394	1.361
Kemp ⁽¹⁴⁾	18	0.981	1.260	1.474
Reynolds ⁽⁵⁾	18	0.914	1.212	1.339
Ferguson ⁽¹⁶⁻¹⁸⁾	56	1.072	1.334	1.328

타연구자의 공식보다 더 정확한 결과를 주고 있음을 알 수 있고 편차가 적음을 보여준다.

Fig. 8은 본 연구의 부착강도식과 실험자료에 의한 부착강도를 비교한 것으로 매우 좋은 상관성을 보여주고 있고, 그 기울기도 1에 근접하여, 본 연구의 공식이 실험자료를 잘 서술하고 있음을 보여준다.

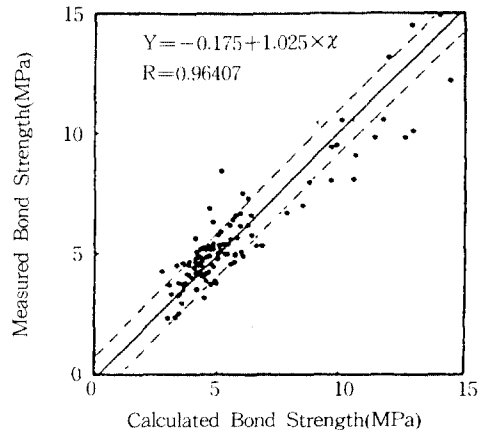


Fig. 8 Comparison of the calculated and measured bond strengths

4.3 부착응력-슬립 관계식

본 연구에서 실험적으로 도출한 부착응력과 부착슬립의 관계를 예측할 수 있는 공식을 유도하였다. Nilson⁽⁶⁾, Mirza⁽¹¹⁾등 기존의 연구자들에 의한 부착응력-슬립의 관계식은 부착슬립 d 의 3차 혹은 4차 다항식꼴로 되어있어 슬립이 큰 경우에는 부착거동에 맞지 않는 결과를 초래한다. 왜냐하면, 3차 혹은 4차 다항식은 그 방정식곡선이 슬립 d 의 값에 따라 여러개의 변곡점 또는 부착응력이 음(-)의 값을 가질 수 있기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 부착슬립량의 넓은 범위에 걸쳐 부착거동에 부합되도록 다음과 같은 형태의 부착응력 τ 와 부착슬립 d 의 관계식을 도출하였다.

$$\tau = \frac{1175d}{0.771 + kd} \quad (4)$$

여기서, $k = 417.4L^{0.376} C^{0.079} f'_c{}^{-0.314}$ 로서 부착의

영향인자를 포함한 변수이다. 그리고 d의 단위는 mm이다. 식(4)는 비선형 회귀분석 프로그램에 의하여 도출되었다.

Fig. 9는 본 실험결과와 식(4)를 비교한 것으로서 콘크리트의 강도에 따라 달라지는 부착응력-슬립 관계를 보여주고 있다. 이 그림에서 실선은 실험자료이고 점선은 식(4)의 예측결과이다.

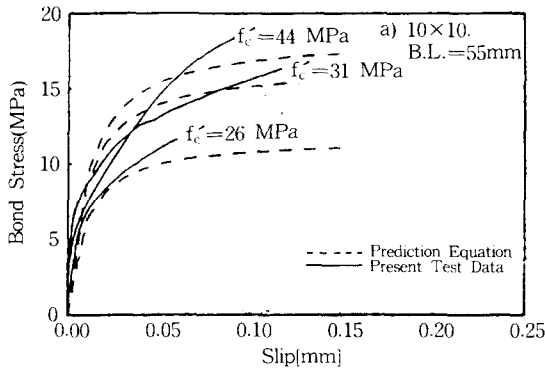


Fig. 9 Comparison of proposed bond stress-slip equation with test data

5. 결 론

본 논문에서는 철근콘크리트 부재의 뽕힘(인발) 부착거동을 규명하기 위하여 일련의 연구를 수행하였으며, 이를 위하여 포괄적인 실험연구를 수행하였다. 실험의 주요변수로는 콘크리트의 압축강도, 철근 주위의 면적 축, 철근의 간격 그리고 철근의 부착길이 등을 주요변수로 선정하여 연구하였다.

본 연구로부터 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 강도의 증가에 따라 부착강도가 증가하며 이것을 정량적으로 계산하여 제시하였다.
- (2) 콘크리트 덮개가 증가할수록 철근에 대한 구속력 증가로 최대 부착응력이 증가한다.
- (3) 부착길이가 증가하면 콘크리트의 평균 부착응력이 감소하며 이것을 정량적으로 제시하였다.
- (4) 본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 부착강도를 예측할 수 있는 새로운 예측공식을

도출하여 제안하였다. 본 연구에서 제안된 공식은 타연구자들의 공식보다 실험자료를 잘 서술하고 있어 앞으로 좀더 정확한 부착강도의 계산이 가능하다.

- (5) 본 논문에서는 또한 철근콘크리트 부재의 부착응력-슬립 관계식을 유도하여 제시하였다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 1986년도 후반기 연구 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 오병환, "철근콘크리트부재의 부착거동에 관한 해석 모델", 콘크리트학회 논문집 제3권2호, 1991년 6월, pp.77-86.
2. 오병환, 강영진, 이성로, 방기성, "철근콘크리트 부재의 부착특성에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회 논문집 제2권4호, 1990년 12월, pp.99-107.
3. 오병환, 이성로, 방기성, "철근콘크리트부재의 부착거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 춘계 학술발표회 논문집 제2권1호, 1990년 5월, pp.122-127.
4. Goto, Y., "Cracks formed in concrete around deformed tension bars", ACI Journal, Vol.68, April 1971, pp.244-251.
5. Tassios, T.P., and Koroneos, E.G., "Local bond-slip relationships by means of the Moire' method", ACI Journal, Vol.81, Jan.-Feb., 1984, pp.27-34.
6. Nilson, A.H., "Interal measurement of bond slip", ACI Journal, Vol.69, July, 1972, pp.439-441.
7. Jiang, D.H., Shah, S.P., and Arndonian, A.T., "Study of tensile forces by bond", ACI Journal, Vol.81, May-June, 1984, pp.251-259.
8. Murray, M.H., "The control of thermal and shirinkage crackings in reinforced concrete", Thesis(Ph.D), University of Melbourne, 1977.
9. Tepfers, R., "A theory of bond applied to

- overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars. "Chalmers tekniska Högskola, Institutionen for Detongbyggnad, Publication 73.2. P.8. Göteborg 1973.
10. Mathey, R.G. and Watstein, D., "Investigation of bond in beam and pull-out specimens with high-yield strength deformed bars", ACI Journal, Vol.57, No.9, Mar. 1961, pp.1071-1090.
 11. Mirza, S.M., and Houde, J., "Study of bond stress-slip relationships in reinforced concrete", ACI Journal, Vol.76, 1979, pp.19-47.
 12. Orangun, C.O., Jirsa, J.O., and Breen, J.E., "A reevaluation of test data on development length and splices", ACI Journal, Vol.74, Mar. 1977
 13. Jimenez, R., White, R.N., and Gergely, P., "Bond and dowel capacities of reinforced concrete", ACI Journal, Vol.76, Jan. 1979.
 14. Kemp, E.L. and Wilhelm, W.J. "Investigation of the parameters influencing bond cracking", ACI Journal, Vol. 1979.
 15. Lutz, L.A., and Gergely, P., "Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete", ACI Journal, Vol.64, Nov. 1967, pp.711-721.
 16. Chinn, J., Ferguson, P.M., and Thompson, J.N., "Lapped splices in reinforced concrete beams", ACI Journal, Vol.52, No.2, Oct. 1955, pp.201-214.
 17. Ferguson, P.M. and Breen, J.E., "Lapped splices for high-strength reinforcing bars", ACI Journal, Vol.62, No.9, Sept. 1965, pp.1063-1078.
 18. Ferguson, P.M., and Krishnaswang C.M., "Tensile lap splices-part 2: design recommendation for retaining wall splices and large bar splices", Research Report No.113-3, Center for High-Way research, The university of Texas at Austin, Apr. 1971.
 19. Thompson, M.A., Jirsa, J.O., Breen, J.E., and Meinheit, D.F., "Behavior of multiple lap splices in wide sections", ACI Journal, Vol.76, Feb. 1979, pp.227-248.
 20. Morita, S., and Kaku, T., "Splitting bond failures of large deformed reinforcing bars", ACI Journal Vol.76, Jan. 1979.
 21. Morita, S., and Fuji, S., "Bond capacity of deformed bars due to splitting of surrounding concrete", Kyoto University, Kyoto, Japan. 1978.
 22. Losberg, A., and Olsson, P., "Bond failure of deformed reinforcing bars based on the longitudinal splitting effect of the bars", ACI Journal, Vol.76, Jan. 1979, pp.5-17.
 23. Kemp, E.L., and Brezny, F.S., "Effect of rust and scale on the bond characteristics of deformed reinforcing bars", ACI Journal, Vol.65, Sept. 1968, pp.743-756.
 24. Popov, E.P., "Bond and anchorage of reinforcing bars under cyclic loading", ACI Journal, Vol.81, July-August 1984, pp.340-349.

(접수일자 : 1992. 5. 19)