

# 고강도 콘크리트의 부착거동에 관한 실험적 연구

## The Experimental Study on the Bond behaviour of High strength concrete

이준구\* 김 우\*\* 박광수\*\*\* 김대중\*\*\*\* 이응찬\*\*\*\*\* 김한중\*\*\*\*\*

Lee, Joon Gu Kim, Woo Park, Kwang Su Kim, Dae Joung Lee, Wong Chan Kim, Han Joung

### ABSTRACT

The study of bond behavior between concrete and rebar has been performed for a long time. On this study, we tried to analysed variation of bond behaviors quantitatively with varying the strength of concrete. Bond stress which observed below the neutral surface of beam and at connecting part of beam and column is affected by various bond parameters.

Resistance of deformed bars which embedded in concrete to the pullout force is divided 1) chemical adhesive force 2) frictional force 3) mechanical resistance of ribs to the concrete and these horizontal components of resistance is being bond strength.

We selected the most common and typical variable which is concrete strength among various variables. So we used two kinds of concrete strength like as 25MPa(NSC) and 65MPa(HSC). Tension Test was performed to verify how bond behavior varied with two kinds of concrete strength.

Concentration of bond stress was observed at load-end commonly in Tension Test at the initial load stage. At this stage stress distribution was almost coincident at each strength. As tension load added, this stress distribution had difference gradually and movement of pick point of bond stress to free-end and central section was observed. This tendency was observed at first and moving speed was more fast in NSC. At the preceeding result the reason of this phenomenon is considered to discretion of chemical adhesion and local failure of concrete around rebar in load-end direction.

Especially, when concrete strength was increased 2.6 times in tension test, ultimate bond strength was increased 1.45 times. In most recent used building codes, bond strength is proportioned to square root of concrete compressive strength but comparison of normalized ultimate bond strength was considered that the higher concrete strength is, the lower safety factor of bond strength is in each strength if we use existing building codes.

In Tension Test, in case of initial tensile force stage, steel tensile stress of central cross section is not different greatly at each strength but tensile force increasing, that of central cross section in NSC was increased remarkably. Namely, tensile force which was shared in concrete in HSC was far greater than that of concrete in NSC at central section.

\* 정회원, 농어촌진흥공사 농어촌연구원 주임연구원

\*\* 정회원, 전남대 토목공학과 교수

\*\*\* 정회원, 농어촌진흥공사 농어촌연구원 수석연구원

\*\*\*\* 정회원, 장흥대학교 토목공학과 전임강사

\*\*\*\*\* 농어촌진흥공사 농어촌연구원 책임연구원

\*\*\*\*\* 서울대학교 농업개발연구소

## 1. 서론

철근과 콘크리트 사이의 부착 특성에 관한 연구는 오래 전부터 계속 연구되고 있다. 이러한 연구와 발전이 계속되는 가운데 많은 변화가 진행되고 그 중의 하나가 콘크리트 강도의 고강도화 추세다. 현재 국내·외에서 사용되는 시방서는 대략 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ 미만의 보통강도를 대상으로, 주로 실험적인 결과를 바탕으로 제작된 것이기 때문에 콘크리트 강도의 증가에 따른 구조부재의 부착거동을 현행 시방서에 맞추어 판단하기는 어렵다.

보통 강도 콘크리트에서의 부착 특성과 거동이 고강도 콘크리트에서는 어떻게 달라지고 기존의 보통 강도 콘크리트에서 정의되어진 규정이나 시방서 내용은 어떻게 달라져야 하는가 하는 의문이 제기되지 않을 수 없다.

여러 하중을 받는 구조물의 안전을 위해 구조 부재의 연결부와 같은 중요한 부분, 특히, 보-기둥 연결부에서 보의 보강근의 기둥으로부터의 슬립은 정적, 동적하중을 받는 철근콘크리트 구조에 손상을 주는 중요한 요인 중의 하나이므로 이러한 슬립은 방지되어야 한다.

콘크리트에 묻혀 있는 이형철근의 인발력에 대해 저항하는 과정은 1)화학적 부착력 2)마찰력 3)콘크리트에 대한 리브의 기계적 저항력으로 나누어 볼 수 있으나 콘크리트와의 맞물림으로 저항하는 리브의 기계적 저항력이 주요 인자이다. 이들 저항력의 수평 성분이 부착강도가 되는 것이다. 부착거동을 지배하는 많은 변수들 중 가장 현실적이고 전형적인 변수라고 판단되는 콘크리트강도를 선택하였으며 현실적으로 생산이 가능한 보통강도콘크리트( $246\text{kg}/\text{cm}^2$ )와 고강도콘크리트( $641\text{kg}/\text{cm}^2$ )를 사용함에 따른 거동의 차이를 실험적으로 분석하였다.

본 연구에서는 구조물의 가장 기본적인 요소인 보의 중립축 하단과 기둥과 보의 연결부위등에서 관찰될 수 있는 철근과 콘크리트의 국부 부착응력의 분포 양상을 정량적으로 분석하고 그 특성이 보통강도(25MPa)와 고강도(70MPa)에서 어떻게 달라지는가를 실험적으로 규명하기 위하여 부착응력 실험방법의 하나인 인장시험(Tension Test)을 실시하여 거동의 차이를 규명하는데 초점을 두었다.

## 2. 실험개요

### 2.1 실험방법

#### 2.1.1 개요

콘크리트와 철근(reinforcing bars)은 열에 대한 팽창계수가 거의 같기 때문에 대기온도의 변화로 인한 두 재료 사이의 응력을 무시할 수 있다. 그러므로 이들은 외력에 대해 일체로 작용하여 상호 보완적인 관계를 유지한다. 철근콘크리트 구조물에서 일체적 거동을 위해선 철근과 콘크리트사이의 부착에 대한 힘의 전달문제가 콘크리트의 역학적 거동에 매우 중요한 인자가 된다. 콘크리트와 그 속에 묻힌 철근사이에서 발생하는 부착력의 양상과 콘크리트의 강도가 변화함에 따라 그 양상과 크기가 어떻게 달라지는가를 측정하기 위해 실제구조물의 일부인 보의 중립축 아래에서 균열과 균열사이의 인장상태를 모형화 한 부착응력 실험법인 인장시험(tension test)법을 택하였다. 특히, 인장시험법을 택하게 된 것은 인발시험(pullout test)에서 발생될 수 있는 가력장치와 시험체사이에서의 편심의 영향을 고려치 않아도 되는 이점과 시험체의 대칭적 구조를 이용하여 한 번의 실험으로 두개의 자료를 얻어서 서로 비교 분석할 수 있는 유리한 점이 있기 때문이며, 철근에 부착된 변형률측정 게이지로부터 철근의 인장변형율을 측정하여 인접된 게이지와의 차이를 계산함으로써 간접적으로 콘크리트와 철근의 부

착용력을 측정하게 된다. 대부분의 경우 보통강도 철근의 왼쪽리브와 오른쪽리브가 지그재그로 되어 있기 때문에 게이지를 부착할 때 한쪽리브를 기준으로 규칙성 있게 붙이게 된다. 그 이유는 부착응력에 가장 큰 영향을 주는 리브와 콘크리트의 기계적 맞물림이 불규칙할 경우 부착응력의 분포양상을 정확히 관찰해내기 어렵기 때문이다. 이러한 영향을 줄일 수 있는 실험방법으로 철근을 가공하여 철근의 안쪽에 게이지를 붙이면 되는데 이를 위해선 철근의 반쪽에 직사각형 홈을 만들어 홈 내부에 게이지를 부착하고 또하나의 반쪽을 맞대어 용접하는 방식이 있다. 그러나 이 실험방법에는 형태가 불규칙한 철근을 정확히 이동분하는 가공의 어려움과 작은 홈내부에 게이지 부착의 어려움이 있을 뿐 아니라 철근가공 시 철근의 단면손실과 게이지 부착 후 이동분된 철근을 붙이는 데는 여러 가지의 어려움과 재료의 물리·화학적 성질의 변화를 가져올 수 있다는 판단이 있었기에 본 부착응력 실험방법을 택하였다.

철근콘크리트 부재의 실험으로부터 밝혀진 이형철근의 부착성상에 영향을 주는 변수는 다양하지만 본 연구에서는 그 영향이 가장 큰 콘크리트의 강도로 하였으며, 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트 사이의 부착특성차이를 분석하기 위해 비교적 단순하면서 부착성상의 특성을 잘 관찰할 수 있는 인장시험(Tension Test)법을 택하였다.

## 2.1.2 시험체 제작

시험체는 그림 2.1과 같이 단면은  $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 로 하고 철근의 묻힘길이는 D25철근의 이형마디를 기준으로 11개 마디가 매입되는  $17.2\text{cm}$ 로 하여 보통강도콘크리트(목표강도 25Mpa)로 된 2개의 시험체, 고강도콘크리트(목표강도 65Mpa)로 된 2개의 시험체를 제작하였다. 각 시험체마다 철근은 D25(#8)를 사용하였다. 변형율측정게이지는 콘크리트 속에 묻힌 철근의 양쪽리브에 대칭으로 5개씩 부착하여 철근의 변형율을 측정하였다. 인장시험시 콘크리트로 인한 게이지의 손상을 방지하기 위해 반원형 플라스틱파이프로 게이지를 보호하였다. 플라스틱파이프의 사용으로 인한 부착영역의 감소를 최소화하기 위해 리브의 폭만큼 한 지름의 파이프를 사용하였으며 반원형 파이프와 철근과의 부착 및 게이지의 방수를 위해 파이프와 철근사이는 실리콘을 주입하였다. 보통강도 콘크리트 시험체 2개, 고강도 콘크리트 시험체 2개를 각각 제작하였다.

## 2.1.3 측정장치 및 측정방법

콘크리트 타설 전 철근의 양쪽에 만들어 둔 나사 산을 이용하여 한쪽 단에는 로드셀(load cell)과 변형제어기를 연결하고 다른쪽 단은 지지판에 고정시켰다. 하중은 일정변형을 제어방식으로 가하였으며 로드셀(load cell)을 장착하여 하중을 측정하였다. 철근에 부착한 변형율 측정게이지와 로드셀에서 자동자료 입력장치를 통해 입력받는다.

## 2.2 사용재료

### 2.2.1 시멘트

시멘트는 시중에서 구입한 보통 포틀랜드 시멘트(D사 제품)를 사용하였으며, 그 물리적 성질을 표 2와 같다.

### 2.2.2 골재

본 연구에 사용된 골재시료로서 잔골재는 섬진강 하상골재, 굵은골재는 장성(전남)산 부순돌을 이용하였으며, 이들의 물리적 성질은 각각 표3 및 표4와 같다. 고강도 콘크리트 배합시 19mm체를 통과하

표1 인장시험용 시험체

시험체 번호	치수 (cm)	철근 (mm)	압축강도
TN1, TN2	20×20×20	D25	246kg/cm <sup>2</sup>
TH1, TH2	20×20×20	D25	641kg/cm <sup>2</sup>

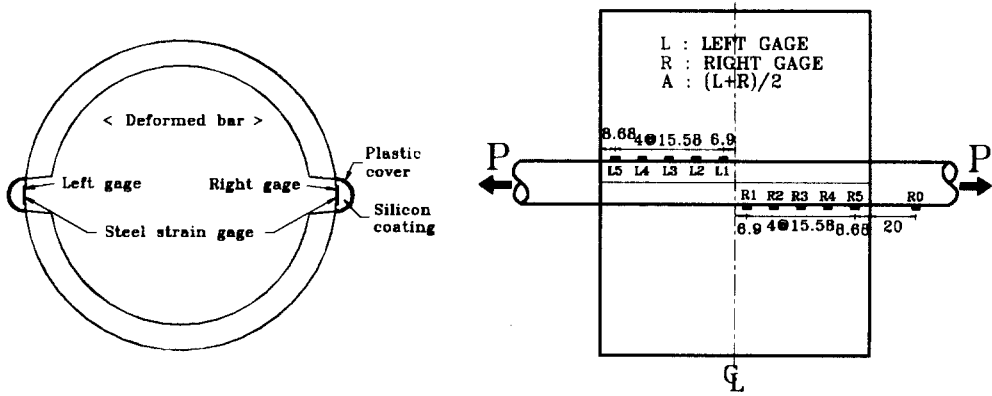


그림1. 게이지 부착 위치

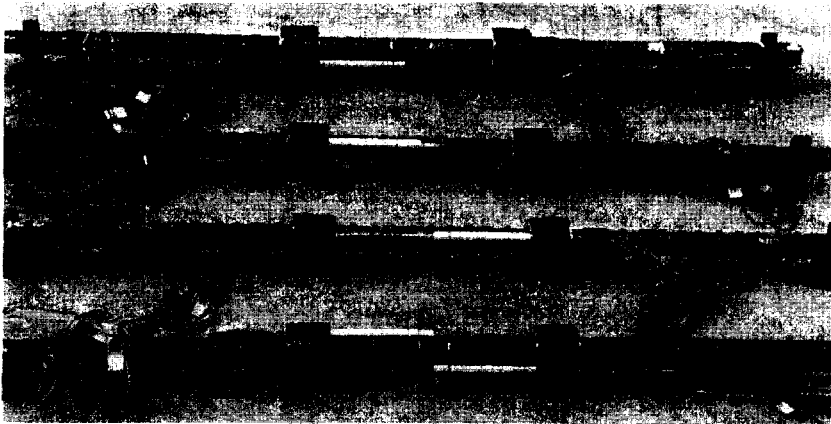


사진1. 철근에 부착된 게이지

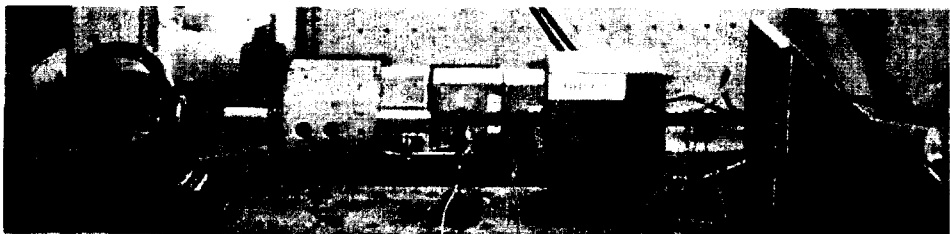


사진2. 인장시험 장면

고 10mm체에 남는 골재와 10mm체를 통과하고 No.4체에 남는 골재를 1:2의 비율로 섞어 사용하였으며 보통강도와 고강도콘크리트의 최종배합표는 표8과 같다.

### 2.2.3 혼화재료

#### 1) 혼화제

본 연구에 사용된 혼화제는 고강도 및 유동화 콘크리트용으로 사용되고 있는 Might 150(D사)으로서 그 품질특성은 표5와 같다.

#### 2) 혼화제(실리카흙)

농도를 고려하여 배합시 물량을 고려하였으며 한 실험을 그 목적으로 하고 있으며 품질특성은 표6과 같다.

### 2.2.4 철근

인장시험에 사용된 철근은 KSD 3504의 D25를 사용하였는데, 사용철근의 물리적 성질은 표 7과 같다.

표2 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	용결시간		분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
		초결 (min)	종결 (hr)		$\sigma_3$	$\sigma_7$	$\sigma_{28}$
보통 포틀랜드	3.15	230	6.14	3,270	190	220	312

표3 잔골재의 물리적성질

항목 시료	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (tf/m <sup>3</sup> )	200번체 통과량 (%)	조립율
하천사 (여주)	2.60	1.03	1.570	1.7	2.81

표4 굵은골재의 물리적성질

항목 시료	굵은골재 최대치수 (mm)	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (tf/m <sup>3</sup> )	조립율	마모율 (%)
부순돌 (안성)	19	2.65	0.5	1,553	6.92	28.2

표5 화학혼화제의 품질특성

비중	PH	고형분 (%)	표준사용량 (%) (시멘트중량비)	주성분	비고
1.21	10	48	0.2~2.0	Sulphonated naphthalence formaldehyde	액상

표6 혼화제의 품질특성

혼화제 종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	비 고
실리카흙	2.20	2.2×10 <sup>9</sup>	액상(50:50)

표7철근의 물리적 성질

호칭	공칭직경	단면적	항복강도	극한강도
D25	25.4mm	5.067cm <sup>2</sup>	3335kg/cm <sup>2</sup>	5032kg/cm <sup>2</sup>

표8 콘크리트의 배합표

단위결합재량 (kg/m <sup>3</sup> )	물-결합재비 (%)	혼화제 종류 (혼입률) (%)	잔골재율 (%)	슬럼프 (cm)	단위량 (kg/m <sup>3</sup> )					고성능 AE 감수제 (B×%)
					물	시멘트	혼화제	잔골재	굵은골재	
520	30	10	38	18-20	172	520	52	660	1076	2
385	60	-	45	11-15	229	385	-	810	991	-

## 3. 결과분석 및 고찰

### 3.1 부착응력분포

철근에 부착된 게이지로 측정된 변형율로부터 계산된 응력분포는 그림 3.1과 같이 나타났으며 작용하중이 증가함에 따라 HSC와 NSC간의 차이가 커짐을 알 수 있다.

철근과 콘크리트간의 부착응력을 인장시험을 통해 콘크리트 속에 매입된 철근의 응력을 위치별로 측정하여 응력차를 통해 콘크리트의 부착응력을 간접적으로 계산하였다.

철근응력의 각 단면에서의 차이를 이용하여 다음과 같이 *i*게이지와 *i+1*게이지간의 평균부착응력 *u<sub>i</sub>*

을 다음 식3.1과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i = \frac{(f_{s,i+1} - f_{s,i})A_b}{\sum o \cdot l_i} \quad (3.1)$$

여기서,  $f_{s,i}$  =  $i$  계이지의 철근인장응력

$A_b$  = 철근단면적

$\sum o$  = 단위길이당 철근 표면적

$l_i$  =  $i$ 계이지와  $i+1$ 계이지사이의 거리

HSC와 NSC의 각 하중별 부착응력의 분포를 그림 3.2에 직접 비교하였다. 초기 하중인 2ton(최대 철근 응력이 약 500kg/cm<sup>2</sup>)일 때는 최대 부착응력이 하중단에 위치하고 있다가 하중이 증가함에 따라 최대부착응력위치가 중앙단면으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 작용하중이 6ton일때(최대철근응력이 약 1400 kg/cm<sup>2</sup>) 부착응력분포를 살펴보면 NSC에서는 하중단의 부착력이 점차 사라지는 것을 관찰할 수 있고, 최대 부착응력은 중앙단면 가까이에서 형성되고 있다.

작용하중이 2ton일 때는 HSC의 분포와 NSC의 분포가 거의 유사하게 나타나고 있다. 그러나 높은 하중단계일수록 부착응력의 분포는 차이가 나타나고 있다. 작용하중이 6ton일때의 분포곡선을 비교해 보면 HSC의 최대부착응력의 위치는 하중단에 가까운데 반해 NSC의 최대 부착응력은 중앙단면 쪽에 위치하고 있다. 이것은 NSC의 경우 하중단쪽에 부착이 부분적으로 손상되어지고 있기 때문이며, 이 부근의 철근주변콘크리트가 국부적으로 파괴 되어지고 있음을 의미한다. 또한 하중이 증가할 수록 HSC의 전반적인 부착응력이 큰데 반해 NSC의 부착응력은 상당히 작게 나타나고 있다. 이는 철근인장력이 부착을 통해 콘크리트로 전달된다는 관점에서 볼 때 고강도 콘크리트일수록 부착성능이 우수하기 때문이다. 작용하중이 6ton일 경우의 전 구간에 걸친 평균부착응력은 HSC의 것이 NSC의 것에 비해 약 2배 정도 크게 나타났다.

#### 4. 결 론

부착에 영향을 미치는 요인들에는 콘크리트 압축강도, 부착길이, 철근직경, 콘크리트의 덮개, 크리프, 스티럽, 이형철근의 형태 등이 있다. 이러한 요인들은 개별적으로 부착에 영향을 미치는 것이 아니라 복합적으로 영향을 미친다.

본 연구는 부착에 영향을 주는 많은 요인들 중 콘크리트의 강도에 주안점을 두고 철근과 콘크리트 사이의 부착응력의 분포를 정량적으로 분석하고 그 특성이 보통강도(25MPa)와 고강도(65MPa)에서 어떻게 달라지는가를 실험적으로 규명하려고 하였다.

측정강도 246kg/cm<sup>2</sup>와 641kg/cm<sup>2</sup>의 콘크리트, D25의 보통강도 철근을 사용하여 인장시험을 수행한 결과 다음과 같이 요약할 수 있었다.

1) 콘크리트강도는 2.6배 증가한 반면 극한부착강도는 1.45배 증가하였다. 현재 사용되는 대부분의 시방서에서 부착강도는 콘크리트압축강도의 0.5승에 비례하는 것으로 되어 있으나 본 실험에서 얻은 평균극한 부착응력(Ave.u<sub>max</sub>=P<sub>u</sub>/Σo·l)을  $\sqrt{f_c}$ 로 나눈 계수를 비교한 결과 NSC시험체에서는 평균 9.43이었고 HSC시험체에서는 평균8.45로 산출되었다. 이 결과는 고강도콘크리트일수록 기존의 시방서를 사용한다면 부착에 대한 안전율이 감소한다는 것을 의미한다고 하겠다.

2) 인장력이 낮은 단계에서는 고강도와 보통강도에서 부착응력이 하중단에서 크게 나타나고 거의

같은 응력분포 경향을 갖으나 인장력이 증가함에 따라 NSC가 HSC보다 먼저 중앙단면쪽으로 응력의 최고값이 이동하고 있음을 관찰할 수 있었다. 이는 인장력이 증가함에 따라 하중단에서부터 화학적 부착이 손상되고 기계적 부착에 의해 하중에 저항하게 되는데 NSC에서 HSC보다 먼저 파괴가 일어나고 있음을 알 수 있다.

3) 고강도와 보통강도 콘크리트에서 부착양상과 극한 부착력의 차이를 비교분석하여 콘크리트강도의 고강도화에 따른 구조부재의 거동을 분석하여 기존의 주로 보통강도에 기준을 두고 실험적 근간을 바탕으로 쓰여진 규준의 고강도 구조부재에 대한 적용의 타당성 여부를 보다 면밀히 규명하기 위해서는 콘크리트강도 및 본 연구에서 다루지 않는 부착영향 변수를 고려한 심도 있는 실험적 연구와 더불어 해석적 연구가 겸비되어야 하겠다.

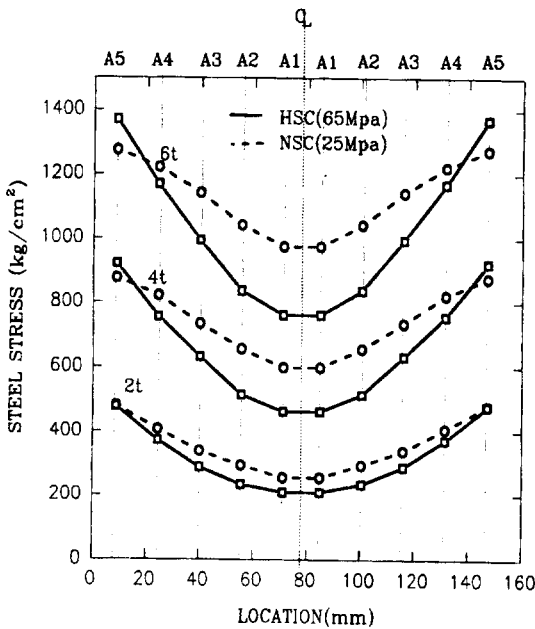


그림 3.1 콘크리트 속에 매입된 철근의 응력분포

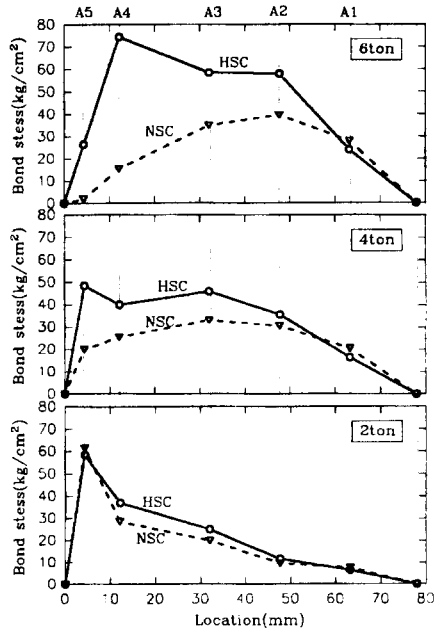


그림 3.2 HSC와 NSC의 평균 부착응력 분포

### 참고 문헌

1. Abdeldjelil Belarbi and Thomas T.C. Hsu "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete", ACI Structural journal, July-August 1994, pp. 465-474.
2. Abrams, D.A. . "Tests of Bond Between Concrete and Steel, " University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin 71, 1913.
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, September-October, 1993, pp.554-561
4. A.Samen Ezeldin and P.N.Balaguru, "Bond Behavior of Normal and High-Strength Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, September-October 1989, pp. 515-524.