

## 고강도 콘크리트의 부착특성에 관한 연구

이준구<sup>1)</sup> · 문 인<sup>2)</sup> · 염환석<sup>3)\*</sup> · 김 우<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>농업기반공사 농어촌연구원 <sup>2)</sup>광주광역시 지하철건설본부 <sup>3)</sup>광주대학교 건축학부 <sup>4)</sup>전남대학교 토목공학과  
(2001년 5월 15일 원고접수, 2001년 8월 21일 심사완료)

## Bond Characteristics of High-Strength Concrete

Joon-Gu Lee<sup>1)</sup>, In Mun<sup>2)</sup>, Hwan-Seok Yum<sup>3)\*</sup>, and Woo Kim<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Rural Research Institute, Korea Agricultural and Rural Infrastructure Co., Ansan, 425-170, Korea

<sup>2)</sup> Gwangju Subway Construction Headquarters, Gwangju, 502-837, Korea

<sup>3)</sup> Division of Architecture, Kwangju University, Gwangju, 503-703, Korea

<sup>4)</sup> Dept. of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 500-757, Korea

(Received on May 15, 2001, Revised on August 21, 2001)

### ABSTRACT

Eight direct tension tests were conducted to study the bond characteristics and crack behavior in high-strength concrete axial members. The main variable was the concrete strength up to 61-63 MPa. The specimens consisted of two different types of the short specimens modeled the part between transverse cracks and the long specimens having numerous transverse cracks. The results obtained show that the bond strength increases in proportion to compressive strength. Thereby, in high-strength concrete the length of stress-disturbed region is shortened and the space of adjacent transverse cracks becomes smaller. Although the concrete strength varies from 25 MPa to 61 MPa, the split cracking loads remain constant, while transverse cracking loads vary as variation of concrete tensile strength. Accordingly, the current code provisions for development length may need reconsideration in high-strength concrete members, and it is recommended that either thicker cover or transverse reinforcement should be additionally provided for high-strength concrete members.

**Keywords :** bond stress, radial stress, transverse cracks, splitting cracks, high-strength concrete

### 1. 서 론

일반적으로 철근콘크리트 부재를 설계할 때 인장영역의 콘크리트는 무시하고 주로 힘의 평형만을 고려하여 설계한다. 그러나 최근 들어 대형 구조물이 세워지고, 고강도 구조재료가 사용되며, 정밀한 구조설계법이 적용됨에 따라 부재의 단면이 축소되고, 높은 철근 인장력이 유발되는 경우가 많게 되었다. 따라서 정밀한 해석이 필요한 중요 구조물에서는 힘의 평형조건(equilibrium condition)은 물론 정확한 변형적합조건(strain compatibility condition)도 고려해야 할 필요성이 점차 증가되고있는 실정이다.

철근콘크리트 구조물에서 가장 기본적인 요소는 철근과 콘크리트사이의 부착이고 이 부착은 균열거동(균열폭과 균열간격)과 인장강성에 중요한 역할을 한다<sup>1,2,7-10)</sup>. 이 부착은 철근의 정착과 겹침이음강도에 영향을 미치므로 구조물의 극한하중지능력에 중요한 요인이 될 수 있을 뿐

만 아니라 부재의 변형능력, 부정정구조물의 재분배능력에 증대한 영향을 미친다<sup>3)</sup>. 즉, 철근콘크리트 부재의 회전능력에 중요한 소성힌지의 길이는 다른 무엇보다도 휨균열 사이에서 철근으로부터 콘크리트로의 힘의 전달에 따라 좌우된다. 이러한 이유 때문에 부착거동을 적절히 모델링하는 것은 중요하다.

직접인장을 받는 철근콘크리트 부재의 거동은 부착특성에 의해 지배되고, 부착특성에 영향을 미치는 대표적인 변수로 콘크리트강도를 들 수 있다. 현행 구조설계기준의 정착길이 산정식<sup>4)</sup>은 극한상태에서 철근의 분힘길이에 대하여 부착응력의 분포가 균등하게 된다는 평균부착응력에 근거를 두고 있다.

그러나 최근연구에 의하면 약 60 MPa이상의 고강도콘크리트(HSC)에서는 극한상태에서 부착응력분포가 균등하지 않고 최대 부착응력이 증가하며 하중단으로 집중하는 현상이 나타난다고 알려져 있다(Fig. 1 참조). 이와 같은 고강도콘크리트의 부착특성이 보통강도콘크리트(NSC)와 어느 정도 차이가 있으며 고강도콘크리트일 때에도 현행 구조설계기준대로 정착길이를 산정하여도 좋은기는 아직

\* Corresponding author

Tel : 062-670-2397 Fax : 062-670-2188  
E-mail : hwanseok@hosim.kwangju.ac.kr

명확하게 밝혀지지 않은 실정이다<sup>5,11,12)</sup>.

본 연구에서는 콘크리트강도에 따른 부착거동을 파악하기 위한 기초적 연구의 일환으로 성능에 기초한 설계법<sup>13)</sup>의 관점에서 인장부재의 횡균열 사이를 모형화한 직접인장실험을 수행하여 하중단계별로 콘크리트강도에 따른 부착특성의 차이점을 비교 분석하였고, 다수의 횡균열이 발생할 수 있는 직접인장실험을 수행하여 이 부착특성의 차이가 균열거동에 어떤 영향을 미쳤는가를 조사하였다. 또한 이 실험결과를 이용하여 고강도콘크리트를 사용할 때의 설계기준의 문제점을 제시코자하였다.

## 2. 실험

본 연구의 두가지 직접인장실험을 구별하기 위해서 횡균열 사이를 모형화한 실험을 국부인장(local tension, LT) 실험이라 하고, 다수의 횡균열이 발생할 수 있는 실험을 인장부재(tension member, TM) 실험이라 하였다. 철근직경에 대한 피복두께의 비  $c/d_b$ 를 3.5로 하고, 콘크리트의 배합설계는 Table 1과 같이 목표압축강도를 NSC 25 MPa, HSC 65 MPa의 2종류로 하여 각각 2개씩 총 8개의 시험체를 제작하였다.

고강도콘크리트를 65 MPa로 한 것은 60 MPa이상이면 보통강도와 다른 부착특성이 보였고, 현행 콘크리트기준의 정착설계를 69 MPa까지 적용하는 데에 문제점이 있다는 것을 제시하고자 했기 때문이다.  $c/d_b$ 를 3.5로 한 것은 조기 쪼갬균열이 발생하면 부착거동에 쪼갬균열과 횡균열의 혼재된 영향이 미치고, 고강도콘크리트일수록 조기에 쪼갬균열이 발생하는 경향이 있으므로 조기 쪼갬균열의 영향을 방지하고 횡균열만을 유도하도록 했기 때문이다<sup>16,14)</sup>.

국부인장 시험체는 Fig. 2와 같이 단면은 200 mm×200 mm이고, 철근의 물림길이는 D25(SD30) 철근 11개 마디가 매입되는 155.8 mm이다. 콘크리트 압축강도 시험값은 NSC 24 MPa, HSC 63 MPa이고 시험체명은 LT-N, LT-H로 하였다. 변형률 게이지를 좌우대칭으로 5개씩 철근 리브에 부착하여 하중단계별로 철근의 변형률을 측정하였다.

인장부재 시험체는 Fig. 3과 같이 단면은 150 mm×155 mm, 길이는 1500 mm이고, D19(SD40) 철근 1개를 단면의 중심에 배치시켰다. 콘크리트 압축강도 시험값은 NSC 25 MPa, HSC 61 MPa이고 시험체명은 TM-N, TM-H로 하

였다. 양생 중에 발생하는 건조수축량을 줄이기 위하여 타설 후 거푸집 탈형까지 3일 동안은 습윤양생을 하였고, 그 후부터 시험 전까지의 약 4주에서 6주까지는 수중양생을 하였다. 인장시험체의 양쪽 하중단에 철근과 같이 거동할 수 있는 변위계 지지판 설치용 클램프를 부착하고 4개의 전기식 변위계(LVDT)의 평균값을 이용하여 변위를 측정하고, 변위제어방식으로 가력하였다. 각 하중단계마다 균열을 기록하여 전체적인 균열거동을 파악하였다.

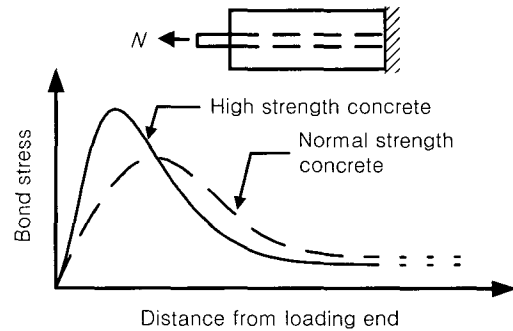


Fig. 1 Bond stress distribution of pullout test

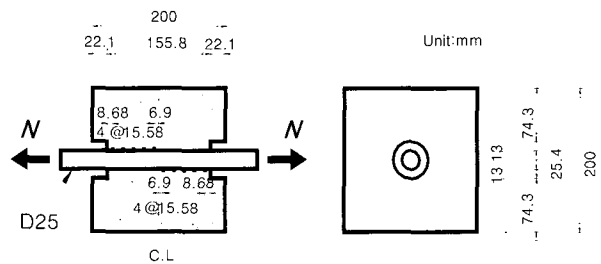


Fig. 2 Geometry of local tension(LT) specimens

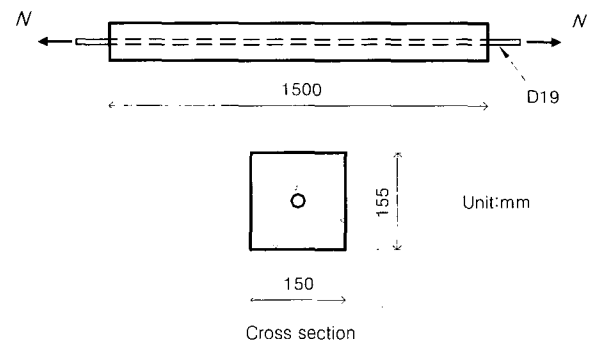


Fig. 3 Geometry of tension member(TM) specimens

Table 1 Concrete mix properties

Target compressive strength(MPa)	W/C	S/A (%)	Slump (mm)	Unit weight(N/m <sup>3</sup> )				Admixture(N/m <sup>3</sup> )		Tested mean strength(MPa)	
				C	W	S	G	S.F*	S.P**	LT	TM
65	0.3	38	130	5096	1687	6473	10552	510	102	63	61
25	0.6	45	80	3776	2246	7944	9719			24	25

\* S.F : silica fume, \*\* S.P : super plasticizer(Mighty-150)

### 3. 국부인장실험 결과 및 분석

#### 3.1 철근의 응력분포

4개의 인장실험 시험체의 측정된 자료 중에서 24.5, 44.2, 63.7 kN(2.5, 4.5, 6.5 tonf)의 3가지 하중단계에 해당하는 좌우 게이지 위치의 철근응력 평균값을 Table 2에 정리하였고, 철근응력 평균값의 분포는 좌우대칭이므로 좌측의 1/2만 Fig. 4에 나타냈다. 여기서 24.5, 44.2, 63.7 kN의 하중은 하중단의 철근응력이 48.3, 87.1, 125.7 MPa이므로 이 철근응력을 대략 초기하중(initial load), 고정하중(dead load), 사용하중(service load) 수준이라 부르기로 한다.

Fig. 4에 의하면 철근응력이 하중단에서 중앙부로 갈수록 작아지고 있으나 그 변화율은 HSC가 NSC보다 더 크고 작용하중이 커질수록 더욱 현저하여 사용하중 수준일 때 중앙단면 철근응력은 HSC가 65.9 MPa으로 NSC 95.7 MPa보다 훨씬 더 작았다. 이는 콘크리트강도가 커질수록 작용하중이 커질수록 부착성능이 우수함을 의미한다.

Table 2 Steel stress in local tension test (Unit : MPa)

Specimen	Applied load(kN)	Distance from loading end(mm)					
		0	8.68	24.26	39.84	55.42	71.00
LT-N	24.5	48.3	40.9	33.6	27.0	23.1	19.7
	44.2	87.1	84.2	78.8	70.3	62.6	57.2
	63.7	125.7	125.2	120.0	112.2	102.4	95.7
LT-H	24.5	48.3	40.3	30.9	23.0	18.7	16.7
	44.2	87.1	80.2	65.4	54.2	44.2	39.6
	63.7	125.7	121.2	102.6	87.0	71.6	65.9

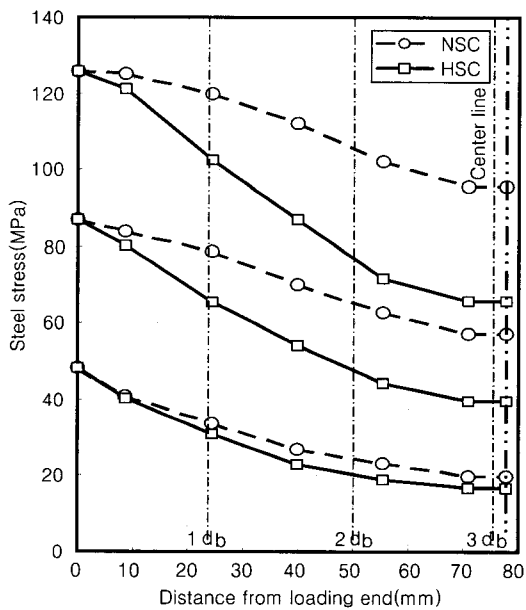
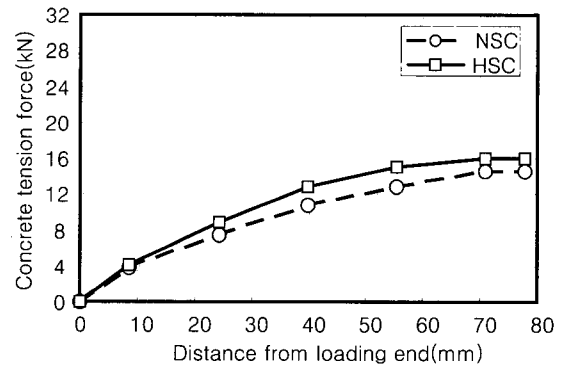


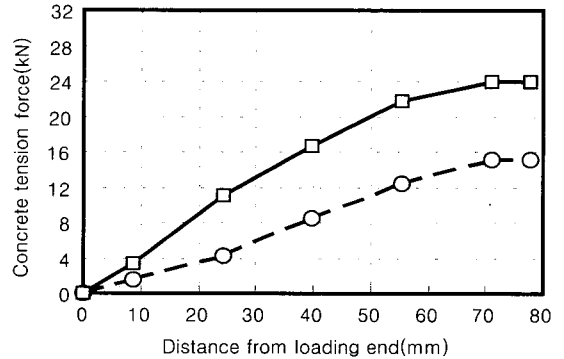
Fig. 4 Steel stress distributions

#### 3.2 콘크리트의 인장력분포

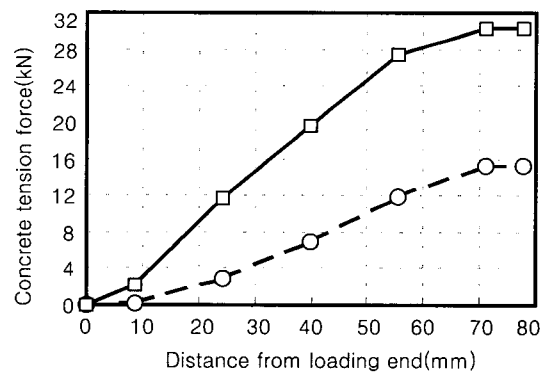
작용하중에서 게이지 위치의 철근력을 빼면 콘크리트에 전달된 인장력  $N_c$ 를 구할 수 있고 이 콘크리트 인장력을 하중단계별로 Fig. 5에 나타내었다. 작용하중이 초기하중 수준에서 사용하중수준까지 증가할 때 NSC는 중앙단면에서의 콘크리트 인장력이 14.5 kN에서 15.2 kN으로 겨우 5%정도 증가하였으나 HSC는 16.1 kN에서 30.3 kN으로 88%로 크게 증가하였다. 이는 NSC는 하중이 증가함에 따라 하중단으로부터 철근직경( $1 d_b$ )거리 내에서 계면부착의 손상이 점점 심화되고있으나 HSC는 NSC에 비해서



a) Initial load level ( $f_s = 48.3$  MPa)



b) Dead load level ( $f_s = 87.1$  MPa)



c) Service load level ( $f_s = 125.7$  MPa)

Fig. 5 Concrete tension force distributions

계면부착의 손상이 그다지 크지 않음을 의미하고 있다.

인장부재에 작용하중이 증가하면 콘크리트 응력이 인장강도  $f_{ct}$ 에 도달하여 횡균열이 발생한다. 횡균열이 발생하면 이 균열면에서 모든 인장력은 철근이 분담하게 되고, 횡균열면 양쪽 인접구간에서 부착에 의해 철근력 일부가 콘크리트에 전달되는 응력교란구간(stress disturbed region, D-region)이 형성된다. 이 응력교란구간의 길이, 즉 균열에 의해 잃어버린 콘크리트의 인장응력이 완전히 회복되는 길이는 부착특성에 따라 다르다. 횡균열이 발생한 인장부재에서 다음 횡균열이 발생 가능한 위치는 응력교란구간에 인접한 응력연속구간(stress continuity region, B-region)이다. 응력연속구간에서 철근과 콘크리트의 변형은 같으므로 콘크리트의 인장력  $N_{c,B}$ 는 (1)식으로 구할 수 있다.

$$N_{c,B} = \frac{N}{A_c + nA_s} \times A_c \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 작용하중,  $A_c$ 는 콘크리트 단면적,  $A_s$ 는 철근 단면적,  $n$ 은 탄성계수비로 현행 구조설계기준의 탄성계수 산정식<sup>3)</sup>을 이용하면 HSC는 8.26, NSC는 6.04이다.

HSC가 NSC에 비해 계면부착의 손상이 적은 현상을 좀 더 자세히 살펴보기 위해 하중단계별로 응력연속구간의 콘크리트 인장력에 대한 중앙단면의 콘크리트 인장력의 비  $N_{c,C}/N_{c,B}$ 를 구해 Table 3에 정리하고, 하중증가에 따른 인장력의 비를 Fig. 6에 나타내었다.

이 인장력의 비가 모두 1보다 작은 것으로 보아 NSC, HSC 모두 시험체 중앙단면의 위치는 응력연속구간이 아니고 응력교란구간에 해당됨을 알 수 있다. 하중이 증가함에 따라 이 비가 작아짐은 하중단쪽의 부착손상이 점점 심화되었기 때문이며, 이로 인하여 응력교란구간이 점점 길어질 수 있다. 그러나 하중이 증가함에 따라 인장력 비가 감소하는 변화율은 HSC가 NSC보다 작아서 사용하중 수준일 때 HSC의 인장력비 0.51은 NSC 0.26보다 약 2배 정도 크고 작용하중이 증가하면 이러한 현상이 더욱 심화되리라 판단되었다. 이와 같이 HSC가 NSC보다 훨씬 더

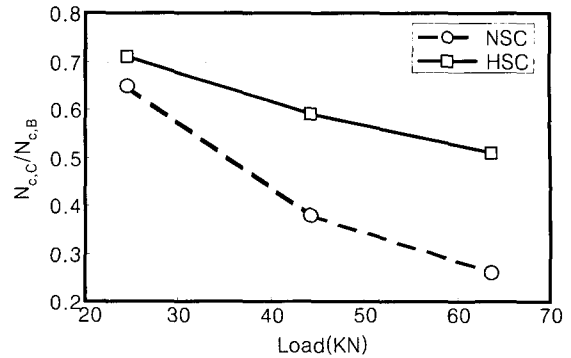


Fig. 6  $N_{c,C}/N_{c,B}$  - load relation

효과적으로 철근력을 인접 콘크리트로 전달하고 있으므로 HSC가 NSC보다 응력교란구간이 짧아지고 그만큼 횡균열 간격도 좁아질 것이다.

### 3.3 부착응력분포

HSC와 NSC의 부착성능의 차이를 좀 더 자세히 살펴 보기 위하여 하중단계별로 HSC와 NSC의 부착응력분포를 조사하였다. 본 연구의 부착응력은 인접 게이지 철근력 차이를 게이지 사이의 철근 표면적으로 나눈 응력을 그 위치의 부착응력  $u_i$ 로 하였고, 이렇게 계산된 부착응력을 Table 4에 정리하고, Fig. 7에 나타내었다.

$$u_i = \frac{(f_{s,i+1} - f_{s,i})A_b}{\pi d_b l_i} \quad (2)$$

여기서,  $f_{s,i}$ 는  $i$ 게이지의 철근 인장응력,  $A_b$ 는 철근 단면적,  $l_i$ 는  $i$ 게이지와  $i+1$ 게이지 사이의 길이이다.

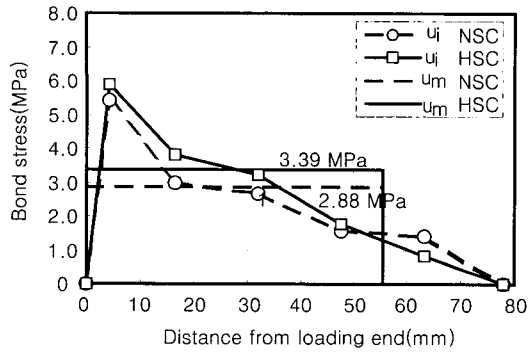
초기하중수준일 때는 HSC와 NSC 모두 최대 부착응력 위치가 하중단 쪽에 있고 하중단 쪽의 부착응력 집중현상이 분명하므로 부착에 대한 손상이 거의 없고 전체적인 부착응력분포가 유사하게 나타났다. 고정하중수준일 때 NSC는 하중단으로부터 철근직경( $1 d_b$ )거리 내에서 부착이 부분적으로 손상되면서 최대 부착응력 위치가 중앙단

Table 3  $N_{c,C}/N_{c,B}$

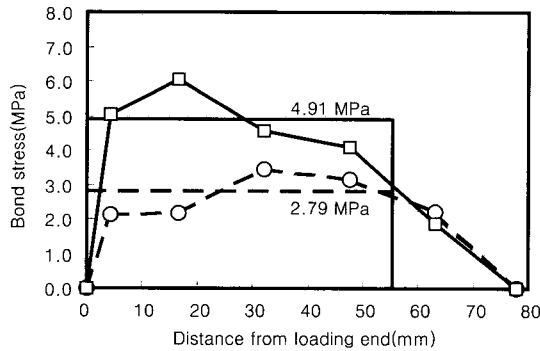
Specimen	n	Applied load(kN)	$N_{c,C}$ (kN)	$N_{c,B}$ (kN)	$N_{c,C}/N_{c,B}$
LT-N	8.26	24.5	14.5	22.2	0.65
		44.2	15.1	39.9	0.38
		63.7	15.2	57.6	0.26
LT-H	6.04	24.5	16.1	22.7	0.71
		44.2	24.1	40.9	0.59
		63.7	30.3	59.1	0.51

Table 4 Bond stress in local tension test (Unit : MPa)

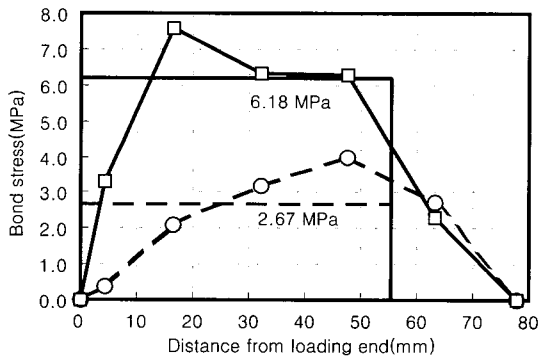
Specimen	Applied load(kN)	Distance from loading end(mm)						
		0	4.34	16.47	32.05	47.63	63.21	77.90
LT-N	24.5	0	5.40	2.99	2.69	1.57	1.40	0
	44.2	0	2.10	2.19	3.44	3.13	2.20	0
	63.7	0	0.36	2.11	3.19	3.9	2.71	0
	24.5	0	5.87	3.82	3.20	1.77	0.83	0
LT-H	44.2	0	5.01	6.02	4.56	4.08	1.85	0
	63.7	0	3.29	7.59	6.33	6.26	2.31	0



a) Initial load level ( $f_s = 48.3$  MPa)



b) Dead load level ( $f_s = 87.1$  MPa)



c) Service load level ( $f_s = 125.7$  MPa)

Fig. 7 Bond stress distributions

면 쪽으로 이동하고 있으나, HSC는 최대 부착응력 위치가 하중단 쪽에 있으면서 전체적인 부착응력분포가 NSC에 비해 크게 나타났다. 사용하중수준일 때 NSC는 하중단에서 철근직경거리 내의 부착손상이 더욱 심화되고 최대 부착응력 위치도 중앙단면 쪽으로 더욱더 이동하고 있으나, HSC는 하중단 쪽의 극히 일부분의 손상을 제외하고 최대 부착응력 위치가 하중단 쪽에 유지되고 있으면서 전체적인 부착응력분포도 NSC에 비해 더욱더 크게 나타났다.

현행 정착설계는 극한상태에서 철근의 묻힘길이에 대하여 부착응력의 분포가 균등하게 된다는 평균부착응력에 근거를 두고 있다. 본 시험체는 좌우대칭으로 중앙부근에

서 철근력의 변화가 거의 없고 부착응력도 0으로 줄어들게 되어있다. 본 시험체의 평균부착응력을 계산할 때 이런 영향을 배제하기 위해서 하중단에서부터 55.42 mm 위치까지의 철근력 차이를 그 사이의 철근 표면적으로 나눈 응력을 평균부착응력  $u_m$ 으로 하고, 하중단계별로 HSC와 NSC의 평균부착응력을 Fig. 7에 나타냈다.

평균응력은 인장강도와 관련이 있고 인장강도는 압축강도의 제곱근에 비례한다고 알려져 있으므로 본 연구의 HSC와 NSC의 인장강도비  $f_{ct,H}/f_{ct,N} (= \sqrt{f_{ck,H}}/\sqrt{f_{ck,N}})$ 는 1.61이라 할 수 있다. 콘크리트강도에 따른 부착특성을 평가하기 위하여 각 하중단계에서 HSC와 NSC의 평균부착응력비  $u_{m,H}/u_{m,N}$ 를 구해 Fig. 8과 같이 인장강도비와 비교하여 보았다.

평균부착응력비는 하중이 증가하면 거의 직선비례하여 증가하고 있어서 사용하중 수준일 때에는 평균부착응력비가 2.32이고, 작용하중이 증가하면 이러한 현상이 더욱 심화되리라 판단되었다. 여기서 주목할 사항은 평균부착응력비 2.32는 인장강도비 1.61의 1.44배이므로 부착강도는 인장강도에 비례하지않고 있다는 것이다. 본 시험체의 압축강도비는 2.62(63 MPa/24 MPa)로 평균부착응력비는 오히려 압축강도비에 가까웠다. 이는 이형철근의 부착저항은 본질적으로 철근 마다가 콘크리트에 작용하는 지압저항이고, 이 지압강도는 압축강도에 비례하기 때문이다.

이와 같이 평균부착응력비는 지압강도의 영향을 받으므로 압축강도비에 비례하고, 이 비는 인장강도비보다 훨씬 더 크다. 그러므로 철근력의 일부는 HSC가 NSC보다 더 효과적으로 인접 콘크리트로 전달되고 응력교란구간의 길이는 더 짧아져서 평균열 간격이 크게 줄어들 것이다.

#### 4. 인장부재 실험결과 및 분석

본 연구의 인장부재의 평균열 사이를 모형화한 국부인

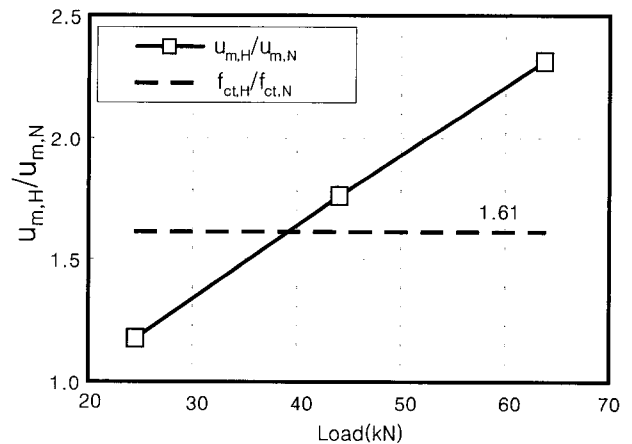


Fig. 8  $u_{m,H}/u_{m,N}$  - load relation

장실험에서는 시험체 전부가 응력교란구간에 있으므로 균열이 발생하지 않는다. 그러므로 균열하중과 균열간격에 대한 경향은 다수의 횡균열이 발생할 수 있는 인장부재실험을 수행하여 확인할 수 있다. 본 장의 인장부재실험에서 조사한 초기균열하중, 횡균열간격, 부재 전길이에 대한 쪼갬균열 길이의 비  $l_s/l$ 을 Table 5에 정리하였고, 균열 형상을 Fig. 9에 나타내었다. 하중-변형을 곡선을 Fig. 10에 나타내었고 이 곡선과 초기균열하중관계를 알기 쉽도록 균열하중위치를 Fig. 10에 표시하였다.

초기하중단계에는 철근과 콘크리트 사이의 접착과 마찰에 의해 부착저항을 하지만 약간만 하중이 증가하면 이러한 저항력은 순간 상실되고 Fig. 11과 같이 철근 마디돌기의 기계적 부착저항에 의해 철근의 뽑힘에 저항하게 된다. 이 부착저항력은 같은 크기의 반대방향 지압력으로 콘크리트에 작용하게되는데 이 지압력은 콘크리트와 철근의 경계면에 대해 일정각  $\theta$ 를 갖고있다. 따라서 이 지압력은 길이방향 부착응력  $u$ 와 방사방향 압력  $p$ 의 성분으로 분리시킬 수 있고 이들은 각각 다른 형태의 균열을 발생시킨다. 하중단의 철근인장력은 부착응력  $u$ 에 의해 콘크리트로 인장력 일부를 전달하여 횡방향균열을 발생시키고, 방사방향 압력  $p$ 는 철근을 따라 쪼갬균열을 발생시킨다.

#### 4.1 횡균열 거동

먼저 횡균열부터 살펴보면 초기 횡균열 발생하중은 HSC (61 MPa) 62.8 kN으로 NSC(25 MPa) 44.6 kN보다 컷으나 그비는 1.41로 압축강도에 비례하여 증가하지는 않았다. HSC와 NSC의 인장강도비  $f_{ct,H}/f_{ct,N}$ 은 1.56로 이에 비하면 횡균열 발생하중비가 10% 정도 작았으나 단면응력분포의 불균등과 시험체의 편심 등을 고려한다면 거의 유사함을 알 수 있다. 각 계열별 평균 횡균열간격은 TM-N 257 mm, TM-H 169 mm으로 NSC에 비해 HSC가 횡균열간격은 대략 35% 짧아졌다. 이는 국부인장실험에서 조사된 마와 같이 NSC에 대한 HSC의 평균부착응력비가 인장강도비보다 크므로 응력교란구간의 길이는 HSC가 NSC보다 더 짧아져서 횡균열 간격이 줄어든 것이다.

#### 4.2 쪼갬균열 거동

횡방향 균열면 또는 하중단의 쪼갬균열 발생위치는 최

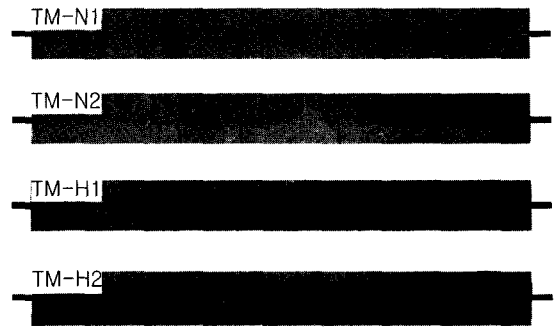


Fig. 9 Crack configurations

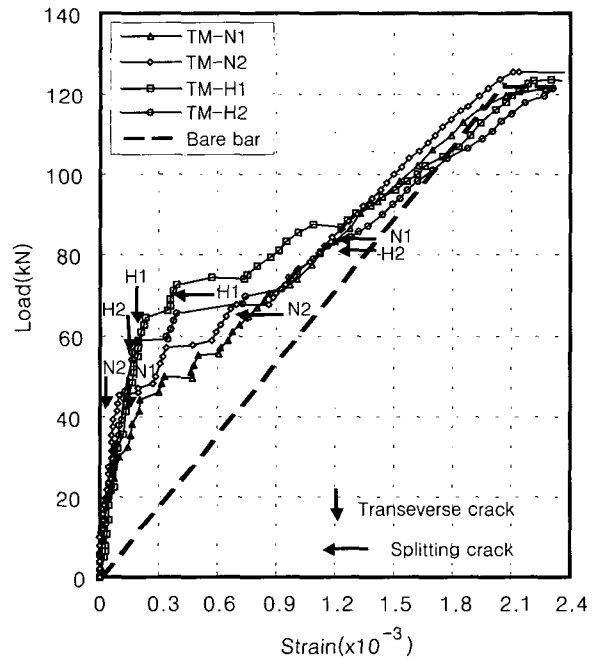


Fig. 10 Load-strain curves

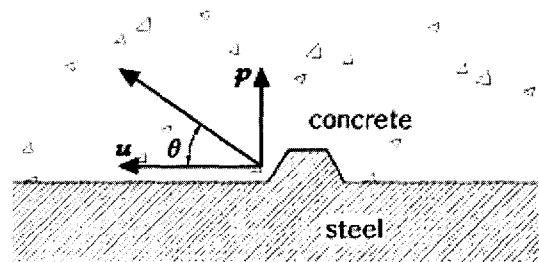


Fig. 11 Bond and radial components of bearing force

Table 5 Cracking load and pattern

Specimen	Initial cracking load(kN)				Number of transverse crack		Transverse crack spacing (mm)		$l_s/l$	
	Transverse crack		Splitting crack							
TM-N1	44.1	44.6	86.3	76.5	4	5	300	257	0.15	0.10
TM-N2	45.1		66.7		0.04					
TM-H1	65.7	62.8	75.5	78.9	9	8	150	169	0.45	0.38
TM-H2	59.8		82.4		0.30					

대부착응력위치와 일치하는 것으로 보아 쪼갬균열의 발생은 최대부착응력  $u_{max}$ , 지압력 작용각  $\theta$ , 콘크리트 인장강도  $f_{ct}$  등에 영향을 받고있다고 할 수 있다. 쪼갬균열을 살펴보면 쪼갬균열하중은 NSC 76.5 kN, HSC 78.9 kN으로 거의 같게 나타나므로 쪼갬균열의 발생은 콘크리트강도의 영향을 받지않음을 알 수 있다. 이는 횡균열하중이 인장강도에 비례하여 증가한 것과는 크게 다르다.

쪼갬인장강도도 인장강도처럼 압축강도의 제곱근에 비례한다고 가정할 수 있으므로 NSC에 대한 HSC의 방사방향 압력비가 인장강도비 1.56과 같아야 NSC와 HSC의 쪼갬균열하중이 유사하다고 할 수 있다. 방사방향 압력비가 인장강도비와 같다고 가정하면 국부인장실험에서 조사된 바와 같이 NSC에 대한 HSC의 평균부착응력의 비 2.32가 방사방향 압력비 1.56보다 크므로 NSC와 HSC의 쪼갬균열하중이 같아지려면 지압력 작용각  $\theta$ 는 HSC가 NSC보다 작아야 한다.

참고문헌 13에 의하면 철근직경에 대한 피복두께의 비  $c/d_b$ 가 2.5이상이면 쪼갬균열의 영향을 무시할 수 있다고 하였다. 본 연구의 시험체도 조속한 쪼갬균열의 영향을 방지하고 횡균열만을 유도할 수 있도록  $c/d_b$ 를 3.5로 하였다. NSC는 횡균열하중에 대한 쪼갬균열하중의 비가 1.72이고, 시험체 전체길이에 대한 쪼갬균열 길이의 비가 0.10으로 쪼갬균열의 영향을 거의 받지 않았다. 그러나 HSC는  $c/d_b$ 를 3.5로 하였음에도 불구하고 횡균열하중에 대한 쪼갬균열하중의 비가 1.26으로 NSC보다 훨씬 작고, 시험체 전체길이에 대한 쪼갬균열 길이의 비가 0.38으로 NSC보다 훨씬 크게 나타났으므로 HSC를 사용하는 콘크리트는  $c/d_b$ 가 2.5이상일 때에도 쪼갬균열의 영향을 무시할 수 없다고 판단되었다.

이런 현상으로 보아 HSC는 쪼갬균열하중이 쪼갬인장강도비만큼 증가하지 못하고 훨씬 낮은 하중이므로 쪼갬균열의 영향을 무시할 수 없고, 짧은 응력교란구간에 큰 부착응력을 유발시킴으로써 하중단쪽에 쪼갬균열이 발생하면서 순차적인 부착파괴를 유발하므로 균열발생 후의 인장강성은 HSC가 오히려 NSC보다 작게 나타났다. 따라서 현행 구조설계기준의 정착길이 산정방법은 고강도콘크리트를 사용할 때는 적용할 수 없는 방법이라고 할 수 있고, 고강도콘크리트 구조의 안전을 확보하기 위해서는 정착부에 횡보강철근의 의무화 또는 피복두께와 순철근간격을 현행보다 더 크게 하기를 권장한다.

## 5. 결 론

본 연구의 직접인장실험에서 철근직경에 대한 피복두께비는 3.5로, 콘크리트는 보통강도 24-25 MPa, 고강도 61-63 MPa의 2종류로 하여 콘크리트강도에 따른 부착특

성과 균열거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이형철근의 부착저항은 본질적으로 철근 마디가 콘크리트에 작용하는 지압저항이므로 쪼갬균열이 발생하지 않는다면 부착강도는 압축강도에 비례하여 증가한다.

(2) 부착강도가 압축강도에 비례하여 증가한다면 부착강도비는 인장강도비보다 더 크므로 HSC가 NSC보다 철근력의 일부를 더 효과적으로 인접콘크리트로 전달하게 되고 이로 인해서 응력교란구간의 길이는 더 짧아지고 횡균열 간격이 줄어든다.

(3) 횡균열과 쪼갬균열은 모두 인장균열이므로 균열하중이 인장강도에 비례하여 증가하여야하나 횡균열하중은 인장강도에 비례하여 증가하지만 쪼갬균열하중은 증가함이 없이 거의 같게 나타났다.

(4) 쪼갬을 일으키는 방사방향 압력비가 인장강도비와 같다고 가정하면 NSC에 대한 HSC의 평균부착응력의 비가 방사방향 압력비보다 크므로 NSC와 HSC의 쪼갬균열하중이 같아지려면 지압력 작용각  $\theta$ 는 HSC가 NSC보다 작아야 한다.

(5) HSC는 쪼갬균열하중이 쪼갬인장강도비만큼 증가하지 못하고 훨씬 낮은 하중이므로 쪼갬균열의 영향을 무시할 수 없고, 쪼갬균열로 인해 균열면에서 일부분 구간에 부착이 손상되었다하더라도 인접 구간에서 부착응력의 집중현상이 유지되므로 쪼갬균열이 계속 진전될 수 있다.

(6) 따라서 현행 구조설계기준의 정착길이 산정방법은 고강도콘크리트를 사용할 때는 적용할 수 없는 방법이라고 할 수 있고, 고강도콘크리트 구조의 안전을 확보하기 위해서는 정착부에 횡보강철근의 의무화 또는 피복두께와 순철근간격을 현행보다 더 크게 하기를 권장한다.

## 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 1999-1-311-004-3)지원으로 수행된 결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 염환석, 윤성호, 김 우, "콘크리트강도가 인장증강에 미치는 영향에 관한 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제 12권 1호, 2000, pp.13~22.
2. 이봉학, 홍창우, 장동일, "철근콘크리트 인장부재의 파괴 거동과 인장강성," 대한토목학회 논문집, 1998, pp.483~494.
3. 김준성, 김대중, 김 우, "고강도 콘크리트 휨부재의 철근 겹이음에 대한 연구," 대한토목학회 논문집, 1998, pp.411~421.

4. 한국콘크리트학회·대한건축학회, “콘크리트 구조설계 기준,” 1999년 6월, 건설교통부 제정 pp.66~67, pp.163~165.
5. 홍건호, “고강도콘크리트의 부착특성에 관한 유한요소 해석,” 한국콘크리트학회 논문집, 제10권 3호, 1998, pp.175~183.
6. 이기열, 염환석, 김 우, “피복두께에 따른 인장강성 거동에 관한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회 2000년도 가을학술발표회 논문집, 제12권 2호, 2000, pp.641~646.
7. Broms, B. B., “Stress Distribution in Reinforced Concrete Members,” *ACI Structural Journal*, Vol.62, No.9, 1965, pp.1095~1108.
8. Broms, B. B., “Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members,” *ACI Structural Journal*, Vol.62, No.9, 1965, pp.1237~1256.
9. ACI Committee 224, “Cracking of Concrete Member in Direct Tension,” *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 3, ACI, 1994, pp.224. 2R-1-12.
10. Goto, Y., and Otsuka, K., “Studies on Internal Cracks Formed in Concrete around Tension Bars,” *ACI Journal*, April 1971, pp.244~251.
11. Azizinamini, A., Stark, M., Roller, J. J., and Ghosh, S. K., “Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol.90, No.5, 1993, pp.554~561.
12. Esfahani, M. R., and Rangan, B. V., “Local Bond Strength of Reinforcing Bars in Normal Strength and High-Strength Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.2, 1998, pp.96~106.
13. Fib, “*Structural Concrete*,” Vol. 1, July 1999.
14. Abrishami, H. H., and Mitchell D., “Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening,” *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.6, 1996, pp.703~710.

## 요 약

본 연구는 8개의 직접인장실험을 수행하여 축방향 부재의 콘크리트강도에 따른 부착특성과 균열거동을 조사하였다. 주변수는 콘크리트강도로 보통강도 24-25 MPa, 고강도 61-63 MPa이다. 직접인장시험체는 2종류로서 짧은 시험체는 횡균열 사이의 인장부재를 모형화하였고, 긴 시험체는 다수의 횡균열이 발생하는 인장부재를 모형화하였다. 이러한 직접인장실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

부착강도는 압축강도에 비례하여 증가한다. 그러므로 고강도콘크리트에서 응력교란구간의 길이는 더 짧아지고 횡균열 간격이 더 줄어든다. 콘크리트강도가 25 MPa에서 61 MPa으로 증가하였지만 쪼갬균열하중은 거의 같게 나타났다. 반면에 횡균열하중은 인장강도에 비례하여 증가하였다. 따라서 고강도콘크리트를 사용할 때에 현행 구조설계기준의 정착길이 산정방법은 재고될 필요가 있고, 피복두께와 순철근간격을 더 크게 하든지 횡보강철근의 의무화하는 것이 현행 기준에 추가되기를 권장한다.

**핵심용어 :** 부착응력, 방사응력, 횡균열, 쪼갬균열, 고강도콘크리트