Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 19, No. 5, pp. 631~637, October, 2007

강섬유 보강 고강도콘크리트와 고장력 철근의 부착 특성

원종필[1)*] · 박찬기[2)] · 장창일[1)] · 이상우[1)] · 김완영[3)]

[1)]건국대학교 사회환경시스템공학과 [2)]공주대학교 지역건설공학전공 [3)]한국수자원공사

Bond Properties of High Strength Steel Rebar in High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete

Jong-Pil Won[1)*], Chan-Gi Park[2)], Chang-Il Jang[1)], Sang-Woo Lee[1)], and Wan-Young Kim[3)]

[1)]Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
[2)]Dept. of Rural Construction Engineering, Kongju National University, Yesan 340-702, Korea
[3)]Korea Water Resources Corporation, Daejeon 305-730, Korea

ABSTRACT This study was to evaluate bond properties between high-strength steel fiber reinforced concrete and high strength steel rebar. An direct bond test were performed to evaluate the bond performance of high strength steel rebar in two types of high-strength concrete with steel fiber volume fraction (0, 20, 40 kg/m^3). Also, relative bond strength was defined to determine the effect of steel fiber volume fraction on bond strength. The bond test results showed that the bond performance of high strength steel rebar and high strength concrete tended to increase with higher compressive strength and steel fiber volume fraction. Relative bond strength which performed to analyze effect of steel fiber volume fraction showed increased relative bond strength with increased steel fiber volume fraction.

Keywords : bond performance, high strength concrete, relative bond strength, steel fiber

1. 서 론

최근 들어 콘크리트 구조물이 대형화, 장대화 되면서 콘크리트의 자중을 감소시키고 부재의 치수를 줄이기 위한 고강도콘크리트에 대한 연구가 증가하고 있다[1-3]. 고강도콘크리트는 일반 콘크리트와 비교하여 골재의 크기를 감소시키고, 공극을 밀실화하며 미소 구조를 강화하여 콘크리트 구조물의 대형화, 대단면화, 초고층화 되는 현실에서 사용성을 증가시키는데 유용한 재료이다[3-5]. 콘크리트의 고강도화는 콘크리트 매트릭스의 밀실화를 통하여 접근하고 있는데 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법은 물-시멘트비를 낮게 하고 실리카퓸을 포함한 광물질 혼화재를 첨가하여 CaO-SiO_2비를 낮게 함으로써 달성하고 있다[1-4].

그러나 콘크리트의 고강도화에 따른 문제점으로 발생하는 것이 취성에 대한 문제이다. 콘크리트는 취성의 재료로 낮은 인장강도, 에너지흡수능력 (energy absorption capacity)을 가지고 있다. 특히 고강도화 되어 가면서 시멘트 복합재료는 극취성의 성질을 갖게 된다[1-5]. 이와 같은 시멘트 복합재료의 강도화에 따른 취성의 문제점을 극복하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있으며 강섬유를 사용하는 방법이 최근 들어 널리 사용되고 있다[3,5]. 강섬유를 사용한 고강도콘크리트에 대한 연구는 강섬유의 혼입량에 따른 고강도콘크리트 보의 휨 거동에 대한 연구가 주를 이루고 있다[3,5]. 즉 콘크리트의 강도가 고강도화 되면서 발생하는 취성적 특성을 강섬유를 사용하여 연성적 성질을 가지게 하는 연구이다[3,5]. 이와 같은 연구 결과는 강섬유의 사용량이 증가할수록 고강도콘크리트의 취성적 성질을 연성화 시킬 수 있다는 결과를 제시하고 있다[3,5]. 또한 고강도콘크리트에 강섬유를 혼입하여 충격저항성을 향상시키기 위한 연구도 있다. 콘크리트가 취성화 되면 약한 충격에도 쉽게 파괴되는 경향을 가지고 있다. 따라서 충격을 받을 때 이에 대한 저항력을 증가시키기 위하여 강섬유의 효과를 평가하였으며 강섬유의 혼입량 증가는 고강도콘크리트의 충격저항성을 향상시킬 수 있었다[6]. 또한, 콘크리트가 고강도화 되면서 이에 사용되는 보강재료 역시 고강도화되는 것이 필요하다[7]. 콘크리트 구조물에서 보강철근은 경제성 및 보강의 효율성이 높아 널리 적용되어온 재료이다[8-12]. 특히 보강철근은 강도 및 연성 측면에서 콘크리트의 보강 재료로서 매우 적절한 재료이다[8-12]. 철근콘크리트 구조물에서 보강철근의 효과는 보강철근과 콘크리트 사이의 부착 특성에 큰 영향을 받는다[13-16]. 따라서 보강철근과 콘크리트 사이의 부착에 대한 연구는 다양한 방법으로 이루어져 왔다. 이와 같은 변수에는 콘크리트의 강도, 사용 조건 등과 같은 환경 조건들이 다양하게 존재한다[8-16]. 본 연구에서는 강섬유의 혼

*Corresponding author E-mail : jpwon@konkuk.ac.kr
Received February 20, 2007, Accepted July 16, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

입률과 콘크리트의 강도를 변수로하여 강섬유 보강 고강도콘크리트와 고장력 철근 사이의 부착 성능을 평가하였다.

2. 실험 계획

2.1 재료

1종 포틀랜드시멘트 (Table 1)와 비중 2.61의 잔골재 및 최대치수 19 mm의 부순골재, 플라이애쉬 (Table 2), 실리카퓸 (Table 3)과 폴리카본산계 고성능감수제와, 공기연행제를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 강섬유는 양단 hooked type의 번들형 섬유이다. 사용된 강섬유의 형상 및 특성은 Table 4와 같다. 또한 본 연구에서는 직경 9 mm의 국내 D사에서 제조한 고장력 철근을 사용하였으며 인장 특성은 Fig. 1과 같다.

2.2 배합설계

본 연구에서는 고강도콘크리트와 고장력 철근 사이의 강섬유 사용량 및 콘크리트 강도에 따른 부착거동을 평가하기 위하여 Table 5와 같은 2가지 배합을 실시하였으며, 배합에 강섬유를 0 kg/m^3, 20 kg/m^3 및 40 kg/m^{3}을 첨가하였다.

콘크리트의 혼합은 강제식 팬형 믹서에 시멘트, 굵은골재, 잔골재를 투입하고 30초간 건비빔을 실시한 후 물과 폴리카본산계 고성능감수제와 공기연행제를 투입한 후 1분 30초간 비빔을 하였다. 마지막으로 섬유를 첨가한 후 1분 30초간 추가적인 비빔을 실시하였다.

2.3 압축강도실험

강섬유 사용량 및 양생재령에 따른 고강도콘크리트의

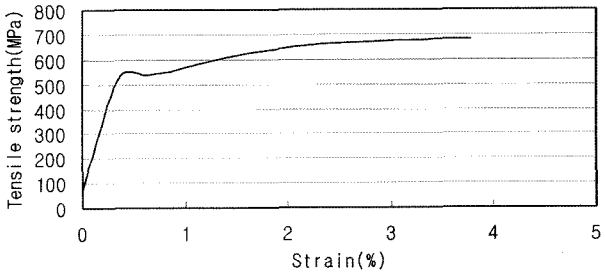


Fig. 1 Tensile behavior of high strength steel rebar

Table 1 Physical and chemical properties of cement

Physical properties	Fineness (cm^2/g)	Specific gravity	Stability (%)	Setting time		Compressive strength (MPa)		
				Initial (min)	Final (min)	3 days	7 days	28 days
	3,200	3.15	0.02	220	400	20	30	38

Chemical properties	L.O.I* (%)	MgO (%)	SO_3 (%)
	1.5	3.0	2.0

* Loss on ignition

Table 2 Physical and chemical properties of fly ash

Specific gravity	Fineness	Absorption	L.O.I* (%)
2.14	3,400	0.13	3.28

Chemical compositions (%)							
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2
58.12	23.56	7.69	2.59	1.12	0.31	1.42	1.05

* Loss on ignition

Table 3 Physical and chemical properties of silica fume

Specific gravity	L.O.I* (%)	Fineness (cm^2/g)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	CaO (%)	MgO (%)	K_2O (%)	Na_2O (%)
2.2	2.8	180,000~200,000	94.0	0.3	0.8	-	0.3	0.4	0.8	0.2

* Loss on ignition

Table 4 Properties of steel fiber

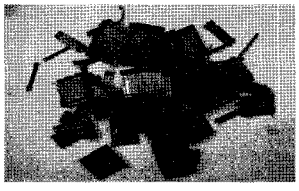
Photo of fiber	Diameter, ϕ (mm)	Length (mm)	Tensile strength (MPa)
	0.49	31.84	1,195.5

Table 5 Mix proportions of high strength concrete

Type of concrete	W/B (%)	S/a (%)	kg/m^3									
			W	B*	C	FA	SF	G	S	HWA**	AE***	Fiber voluem fraction (%)
Mix no. 1	25.0	42.0	165	660	495	99.0	66	889.8	597.8	11.88	0.396	0
												Steel : 0.26
												Steel : 0.51
Mix no. 2	22.0	40.0	160	727	545	109.1	72.7	864.5	580.8	16.7	0.4364	0
												Steel : 0.26
												Steel : 0.51

*: Binder(cement + mineral admixture)
**: High water reducing admixture
***: Air entraining admixture

압축강도를 평가하기 위하여 KS F 2405에 따른 압축강도실험을 실시하였다. 압축강도를 측정하기 위한 공시체의 크기는 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체를 이용하였으며 실험은 콘크리트 공시체를 제작한 후 23 ± 2°C의 온도와 상대습도 50 ± 2%의 실내에서 24시간 동안 초기 양생을 실시한 후 탈형하여 1일 강도를 측정한 후 나머지 공시체는 23 ± 2°C의 물속에서 수중양생을 실시하였다.

28일간의 수중양생 중 재령 7일 및 28일에 압축강도를 측정하였으며 압축강도실험은 2,000 kN 용량의 UTM을 이용하였다.

강섬유의 사용량에 따른 압축강도 실험 결과는 Table 6과 같다. 실험 결과 섬유의 사용량이 증가할수록 압축강도가 약간 증가하는 경향을 보여주고 있다. Mix no. 1 배합에서 강섬유의 사용량이 0 kg/m^3, 20 kg/m^3 및 40 kg/m^{3}으로 증가하면서 74 MPa, 78 MPa 및 84 MPa로 증가하였으며 Mix no. 2 배합은 강섬유의 혼입량이 증가할수록 94 MPa, 96 MPa 및 104 MPa으로 증가하였다. 즉, 강섬유의 사용량에 따른 강도 증가는 강도가 작은 Mix no. 1에서는 10% 이상 증가하였지만 Mix no. 2에서는 강도의 증가가 10% 보다 작게 나타났다.

2.4 부착 실험

강섬유의 사용량에 따른 고장력 철근과 콘크리트의 부착 특성은 Vijay P.V.[19]와 L.J. Malvar[18], Katz, A. 등[17], Chen, Y., 등(2007)에 위해서 실시한 원주형 공시체를 이용한 실험 방법을 이용하였다[12-15]. 부착실험공시체의 제작은 150 mm × 300 mm (직경 × 높이)의 원주형 몰드를 사용하였다.

부착시험용 원주형 몰드의 제작을 위해서 고장력 철근을 공시체 내부에 넣고 콘크리트를 타설하였는데 이 때 고장력 철근과 콘크리트의 정착길이는 36 mm이며 비부착 구간은 강관 (steel tube)을 이용하였다. 고장력 철근의 정착 구간은 철근직경의 4배를 사용하였다[13]. 일반적으로 부착 시험시 정착 구간은 직경의 5배를 고려하나

Table 6 Compressive strength test results

Concrete type	Fiber amount (kg/m^3)	Compressive strength (MPa)			
		No.1	No.2	No.3	Mean
Mix no.1	-	73.72	75.08	72.23	73.68
	20	78.61	76.55	77.74	77.63
	40	84.45	84.81	83.56	84.27
Mix no.2	-	93.66	89.93	97.90	93.83
	20	96.88	94.45	95.50	95.61
	40	103.40	101.68	104.31	103.13

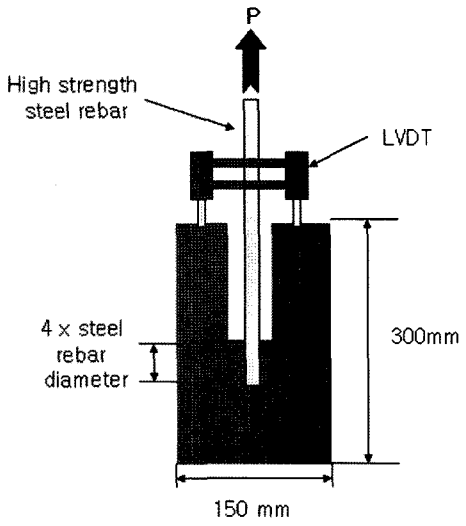
본 연구에서는 기존 연구 결과에서 5배를 적용한 원주형 공시체에서 쪼개짐에 위한 파괴가 발생하였다는 결과가 있어 쪼개짐 파괴를 방지하기 위하여 4배를 적용하였다. 고장력 철근의 정착 구간을 원주형 공시체의 중앙에 위치시키기 위하여 비부착 구간에 직경 30 mm 강관을 설치하여 고장력 철근과 콘크리트 사이의 정착을 방지하였다 (Fig. 2(a)). 그런 다음 원주형 몰드에 콘크리트를 타설한 후 23 ± 2°C의 온도와 상대습도 50 ± 2%의 실내에서 24시간 동안 양생을 실시한 후 탈형하여 28일간 23 ± 2°C의 물속에서 수중 양생을 실시 한 후 부착 실험을 실시하였다. 부착 실험은 250 kN 용량의 변위를 조절할 수 있는 UTM을 이용하였는데 하중 재하속도는 5 mm/min으로 시험을 실시하였다 (Fig. 2(b)). 슬립을 측정하기 위해서 LVDT를 이용하였다 (Fig. 2(b)). 또한 동일한 고장력 철근을 사용하고 인발하중에 의한 재료 자체의 변형률은 동일하다고 가정하고 loaded end 부분에서의 슬립은 측정하지 않았다. 실험은 각 변수 마다 시험공시체를 2개씩 제작하여 2번 반복하여 실험을 실시하여 총 4개 공시체에 대하여 실시하였다.

3. 실험 결과

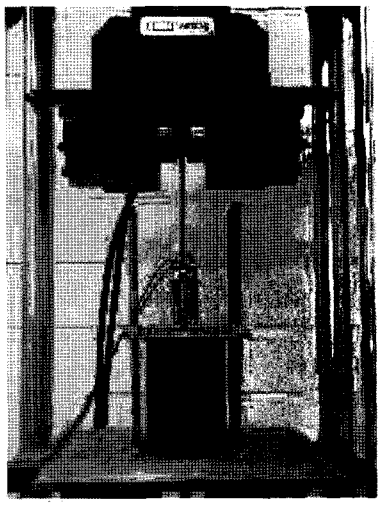
3.1 부착 특성

3.1.1 부착하중 vs 슬립 거동

고강도콘크리트에서 강섬유의 사용량 및 콘크리트 강



(a) Bond strength test specimens



(b) Bond test set-up

Fig. 2 Pullout test set-up of high strength steel rebar

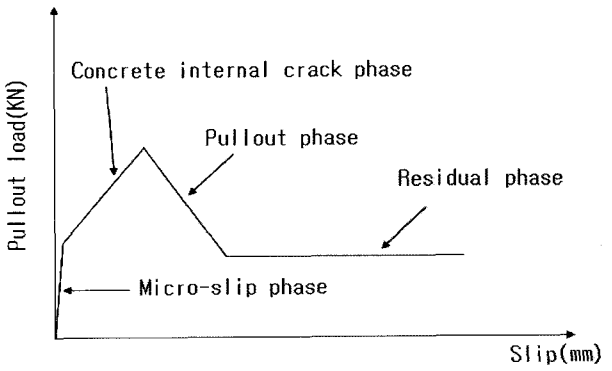
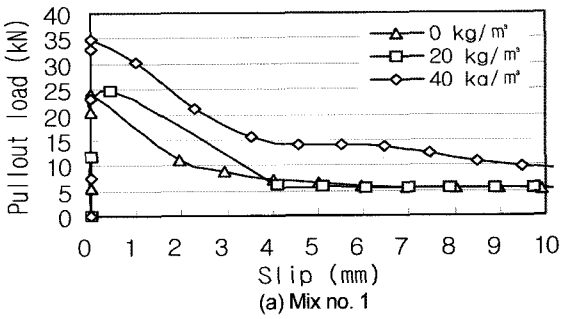
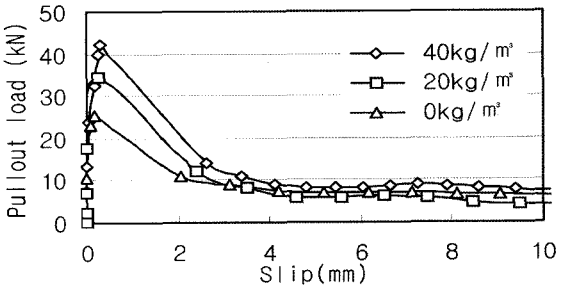


Fig. 3 Bond behavior phase of high strength steel rebar



(a) Mix no. 1



(b) Mix no. 2

Fig. 4 Pullout load vs. slip behavior with steel fiber volume fraction

도에 따른 고장력 철근의 인발하중과 슬립과의 관계는 Fig. 4와 같다. 일반적으로 Fig. 3과 같이 고강도콘크리트와 고장력 철근 사이의 부착 거동은 크게 네가지 거동의 진행으로 설명할 수 있다. 첫 번째 초기의 미소 슬립 발생 단계, 두 번째 콘크리트 내부균열발생 단계, 세 번째 인발 단계, 네 번째 부착하중이 감소는 작아지면서 슬립의 증가가 크게 발생하는 잔류하중 단계이다[7,14]. 강섬유 사용량에 따른 고장력 철근과 고강도콘크리트 사이의 부착 거동을 상기의 과정으로 살펴보면 첫 번째로 초기 미소 슬립 발생 단계는 고장력 철근은 급격한 하중의 증가와 함께 슬립이 거의 발생하지 않아 하중-슬립의 관계는 거의 선형적인 거동을 보여준다. 특히 미소균열 발생 단계에서는 강섬유 사용량이 증가함에 따라 콘크리트의 인장강도 증가를 획득할 수 있어 미소균열의 발생을 억제하는 동시에 발생한 균열도 섬유의 브리징 작용에 의해서 억제하기 때문에 슬립의 발생은 거의 없었다. 두 번째로 콘크리트의 내부균열발생 단계는 하중의 증가는 크지 않으면서 최대 부착하중을 향하여 접근하게 되는 데 슬립이 증가하여 하중-슬립의 관계는 비선형적인 관계를 보여준다. Fig. 4에서 볼 수 있는 것과 같이 첫 번째 및 두 번째 단계는 콘크리트의 강도 및 섬유의 혼입률이 증가할수록 모두 크게 나타났다. 또한 강섬유 40 kg/m^{3}을 사용하였을 때 가장 우수한 결과를 보여주고 있다. 내부균열발생 단계 후에는 슬립이 급속하게 증가하는 고장력 철근의 인발 단계와 부착하중의 감소 및 슬립의 증가를 보여주는 단계로 진행되는데 하중-슬립의 관계는 완벽하게 비선형적인 거동을 한다. 최고 부착하중에 도달한 후 발생하는 인발 단계는 내부균열이 콘크리트 덮개의 가장 약한 부분으로 성장하여 쪼개짐 균열이 발생하기 시작한다. 쪼개짐 균열의 발생에 의해서 부착하중의 감소량은 섬유의 사용량이 증가할수록 감소하였다. 즉 강섬유가 쪼개짐으로 인한 급격한 뽑힘을 방지하기 때문에 발생하는 결과이다. 또한 강도가 클수록 하중의 감소량이 크게 나타났다. 이는 콘크리트의 강도가 증가할수록 보다 큰 취성적인 성질을 나타나기 때문에 나타나는 결과이다. 마지막으로 부착하중의 감소는 작아지면서 슬립의 증가가 크게 발생하는 단계 (residual 단계)에서는 하중의 감소는 한계 값에 도달한 상태에서 슬

립의 증가가 크게 된다. 본 연구에서는 40 kg/m^{3}의 강섬유를 사용하였을 때 약간 큰 잔류하중을 나타내었으며 0 kg/m^{3}과 20 kg/m^{3}은 거의 동일한 결과를 나타내었다. 그러나 세 가지 수준의 강섬유 혼입률에서 큰 차이를 보여주지 않았다. 또한 콘크리트의 강도가 증가할수록 잔류강도는 작아지는 결과를 보여주었다. 이는 콘크리트의 강도 증가는 취성적 성질을 강화하여 급격하게 콘크리트의 내외부에 균열이 발생하기 때문에 발생한 결과이다. 그리고 섬유의 사용량이 20 kg/m^{3}에서는 섬유를 사용하지 않은 배합과 거의 동일한 post-peak 이후의 거동을 나타내어 강섬유 20 kg/m^{3}의 사용은 고강도콘크리트에서 강도 증가에도 크게 기여하지 못하였다. 또한 이는 콘크리트와 고장력 철근 사이의 계면에 균열이 발생하였을 때 균열의 성장을 억제하는데 효과가 크지 않았다는 것을 의미한다. 즉 초기거동에서는 균열의 발생 및 성장을 억제하지만 일단 균열이 발생하면 고장력 철근의 인발을 억제할 수 있을 정도의 충분한 균열제어 효과는 발휘하지 못한 것으로 보이며 이와 같은 효과를 획득하기 위해서는 강섬유의 사용량을 40 kg/m^3 정도를 사용하여야 할 것으로 보인다.

Fig. 5는 초기 미소슬립 단계의 거동을 나타낸 것이다. 초기 미소슬립 단계는 강섬유의 혼입률에 관계없이 거의 동일하나 콘크리트 내부균열발생 단계는 강섬유의 혼입률이 증가할수록 우수해짐을 알 수 있으며 이는 Mix no. 2배합에서 보다 확실히 나타나고 있다.

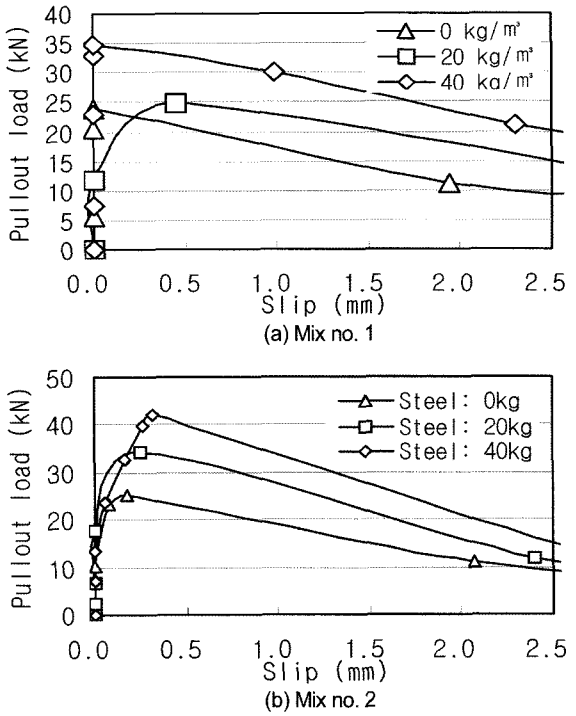


Fig. 5 Early pullout load vs. slip behavior with steel fiber volume fraction

3.2.2 부착강도

부착강도는 고장력 철근의 정착길이 전 부분에 동등하게 분배된다고 고려할 수 있으며 부착강도의 계산은 식 (1)에 따라 실시하였다[7,10-12].

$$\tau = \frac{P_{max}}{2\pi r l_a} \quad (1)$$

여기서, τ = 부착강도, P_{max} = 최대인발하중, r = 고장력 철근의 반지름, l_a = 고장력 철근의 정착길이 이다.

콘크리트강도 및 섬유의 혼입률에 따른 부착 시험 결과는 Table 7과 Fig. 6과 같으며 시험 결과는 4개 공시체의 평균값이다. Fig. 6은 강섬유 사용량에 따른 부착강도 실험 결과로 강섬유의 사용량이 증가할수록 강도에 영향을 받지 않고 증가함을 알 수 있다. 시험 결과를 자세히 살펴보면 Mix no. 1 및 Mix no. 2 배합 모두 강섬유의 사용량이 증가할수록 부착강도가 증가하였다. 증가 정도는 Mix no. 1에서는 강섬유의 사용량이 20 kg/m^3 및 40 kg/m^{3}로 증가하면서 각각 3.57, 44.81% 증가하는 결과를 보여주었으며 Mix no. 2에서는 각각 28.77, 58.00% 증가하였다. 이는 강섬유 사용량의 증가가 고장력 철근이 고강도콘크리트에서 인발거동을 발생하기 전 고강도콘크리트와 고장력 철근 사이의 부착계면에서 발생하는 균열의 성장을 강섬유 브리징 작용을 통하여 억제하기 때문이다. 또한 인발이 발생한 후에도 균열의 성장을 억제하여 최고 인발하중에 도달할 때 급격한 뽑힘이 발생하지 않도록 조절하기 때문이다. 즉 동일한 하중을 받을 때 섬유가 균열의 성장을 억제하기 때문에 인발되는 고장력 철근의 길이가 섬유를 사용하지 않았을 때 보다 짧아지기

Table 7 Bond test results of high strength steel rebar

Type of concrete	Fiber (kg/m^3)	Mean peak pullout load (kN)	Mean bond strength (MPa)	Failure mode	Increasing bond strength with fiber contents (%)*	Increasing bond strength with strength of concrete(%)**
Mix no. 1	0	23.79	23.38	Splitting	-	-
	20	24.64	24.22	Rebar pullout	3.57	-
	40	34.45	33.86	Rebar pullout	44.81	-
Mix no. 2	0	26.56	26.11	Splitting	-	11.64
	20	34.20	33.62	Rebar pullout	28.77	38.80
	40	41.78	40.99	Rebar pullout	57.00	21.05

*: {(bond strength with fiber content/bond strength of plain concrete) × 100(%)} − 100%

**: {(bond strength with fiber content/bond strength of concrete strength) × 100(%)} − 100%

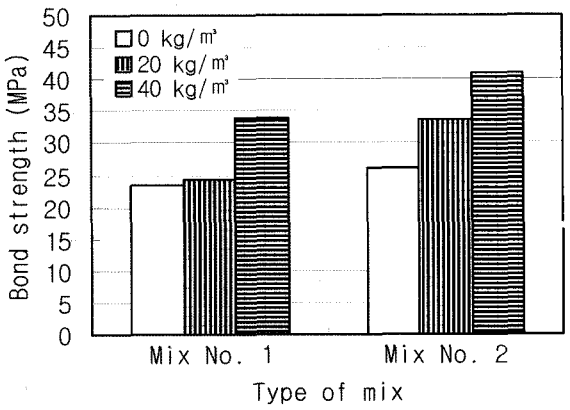


Fig. 6 Bond strength with steel fiber volume fraction

때문이다. 동일한 강섬유 사용량에서는 압축강도가 큰 Mix no. 2가 Mix no. 1보다 부착강도가 크게 나타났다. 부착강도의 크기는 강섬유 사용량이 0 kg/m^3, 20 kg/m^3 및 40 kg/m^{3}으로 증가함에 따라 각각 11.64, 38.80 및 21.05% 증가하였다. 이는 콘크리트의 강도가 증가하면 콘크리트와 고장력 철근의 부착계면을 밀실화하여 인발거동 시 마찰저항력을 증가시키기 때문이다. 또한 강섬유의 혼입에 따른 파괴모드를 살펴보면 강섬유를 사용하지 않은 공시체의 경우 Mix no. 1 및 2에서 모두 콘크리트 공시체의 쪼개짐에 의한 파괴가 발생하였으며, 섬유를 20 kg/m^{3}을 사용한 경우 쪼개짐이 확연하게 나타나지는 않았으나 외부에 부분적으로 균열이 나타나는 결과를 보여주었다. 그러나 강섬유 40 kg/m^{3}을 사용하였을 경우에는 쪼개짐 균열이 발생하지 않고 인발에 의한 파괴가 발생하였다.

3.2.3 상대부착강도

콘크리트의 압축강도의 영향을 최소로 하여 고장력 철근과 콘크리트와의 부착강도에 강섬유 사용량의 영향을 평가하기 위하여 상대부착강도를 정의하였다. 상대부착강도는 식 (2)로 정의하여 계산하였다[7,14].

$$\tau_R = \frac{\tau}{\sqrt{f_{cu}}} \tag{2}$$

여기서 τ_R은 상대부착강도이며, τ는 부착강도, f_{cu}는 콘크리트의 압축강도이다[7,14]. 상대부착강도 실험 결과는 Table 8과 같으며 결과는 약 2.78~4.04 정도로 나타났다. 또한 강섬유 사용량에 따른 상대부착강도를 섬유를 사용하지 않은 콘크리트 공시체와 비교하면 섬유의 사용량이 증가함에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 Mix no. 1에서는 강섬유의 사용량이 20 kg/m^{3}으로 증가할 때 상대부착강도는 약 0.90% 정도 증가하였고 40 kg/m^{3}으로 증가하면 약 35.40% 증가하였다. 강섬유의 사용량에 영향을 받는 강도 효과를 제외하고도 강섬유 사용은 그 자체만으로도 부착강도 향상에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. Mix no. 2에서 역시 강섬유의 사용량이 20 kg/m^3 및 40 kg/m^{3}으로 증가함에 따라 각각 27.96% 및 49.76% 증가를 보여주었다.

Table 8 Results of relative bond strength

Concrete type	Fiber amount (kg/m^3)	Relative bond strength ($\tau/\sqrt{f_{cu}}$)	Increase relative bond strength (%)
Mix no. 1	0	2.72	-
	20	2.75	0.90
	40	3.69	35.40
Mix no. 2	0	2.70	-
	20	3.45	27.96
	40	4.04	49.76

4. 결 론

본 연구에서는 고강도콘크리트와 고장력 철근 사이의 부착 특성에 미치는 강섬유 사용량에 따른 영향을 평가하였다. 시험을 통한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 고강도콘크리트와 고장력 철근 사이의 부착거동은 슬립이 거의 나타나지 않은 상태에서 하중이 증가하는 구간인 초기 미소슬립 발생 단계에서는 콘크리트의 강도가 증가할수록 하중이 크게 나타났다. 이는 강도가 증가할수록 콘크리트 매트릭스와 고장력 철근 사이의 접착계면이 강화되기 때문이다.
2) 콘크리트의 내부균열발생 단계에서 하중의 증가는 크지 않으면서 최대부착하중을 향하여 접근하고 슬립이 증가하여 하중-슬립의 관계는 비선형적인 관계를 보여주었다. 고장력 철근의 경우 이 구간이 크게 나타나지 않았다. 그러나 미소슬립 단계와 내부균열 단계를 포함하면 강섬유의 사용량 및 콘크리트의 강도가 증가할수록 크게 나타났는데 이는 강섬유가 고강도콘크리트와 고장력 철근 사이의 발생하는 미소균열발생 및 성장을 억제하기 때문이다. 또한 강도의 증가는 고강도콘크리트와 고장력 철근의 접착계면에서의 마찰력 증가를 달성할 수 있다.
3) 고장력 철근과 고강도콘크리트 사이의 인발 및 잔류하중 단계에서 최대부착하중에서의 하중의 감소는 강섬유의 혼입률이 증가할수록 감소하였으며 강도가 클수록 크게 나타났다. 이는 강섬유의 사용량이 증가할수록 콘크리트의 쪼개짐파괴를 섬유가 억제하기 때문이며 또한 콘크리트의 강도가 증가할수록 콘크리트는 취성화 되기 때문에 강도가 클수록 하중의 감소가 크게 나타났다.
4) 콘크리트 강도의 영향을 최소한으로 고려하여 강섬유의 사용량에 따른 부착강도의 영향을 평가하기 위한 상대부착강도 평가 결과 콘크리트의 강도에 관계없이 강섬유의 사용은 부착강도 증가에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평

가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업 (Center for Concrete Corea, 05-CCT-D11)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Mazloom, M., Ramezanianpour, A. A., and Brooks, J. J., "Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete", *Cement and Concrete Composites*, No.26, 2004, pp.37~357.
2. Shannag, M. J., "High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume", *Cement and Concrete Composites*, No.22, 2002, pp.399~406.
3. Chan, Y. W. and Chu, S. H., "Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete", *Cement and Concrete Research*, No.34, 2004, pp. 1167~1172.
4. Mazloom, M., Ramezanianpour, A. A., and Brooks, J. J., "Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete", *Cement and Concrete Composites*, No.26, 2004, pp.37~357.
5. Song, P. S. and Hwang, S., "Mechanical Properties of High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete", *Construction and Building Materials*, No.18, 2004, pp.669~673.
6. Song, P. S., Wu, J. C., Hwang, S., and Sheu, B. C., "Assessment of Statistical Variations in Impact Resistance of High-Strength Concrete and High-Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Research,* Vo.35, No.2, 2005, pp.393~399.
7. 원종필, 박찬기, 김황희, 이상우, "강섬유 혼입률에 따른 고강도 콘크리트와 GFRP 보강근의 부착 특성", 대한토목학회 논문집, Mar. 2007, pp.265~270.
8. Xial, J. and Falkner, H., "Bond Behavior between Recycled Aggregate Concrete and Steel Rebars", *Construction and Building Materials*, No.21, 2007, pp.395~401.
9. Azizinamini, A., Chisala, M., and Ghosh, S. K., "Tension Development Length of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete", *Engineering Structures,* Vol.17, No.7, 1995, pp.512~522.
10. Tepers, R., "Cracking of Concrete Cover Along Anchord Deformed Reinforcing Bars", *Magazine of Concrete Research,* Vol.31, No.6, 1979, pp.3~12.
11. Edwards, A. D. and Yannopoulos, P. J., "Local Bond Stress to Slip Relationship for Hot Rolled Deformed Bars and Mild Steel Plain Bars", *ACI Journal*, Vol.7, No.3, 1979, pp.405~419.
12. Haraji, M. H., "Development/Splice Strength of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Reinforced Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol.9, No.5, 1994, pp.511~520.
13. Edwards, A. D. and Yannopoulos, P. J., "Local Bond Stress to Slip Relationship for Hot Rolled Deformed Bars and Mild Steel Plain Bars", *ACI Journal*, Vol.7, No.3, 1979, pp.405~419.
14. Haraji, M. H., "Development/Splice Strength of Reinforcing Bars Embedded in Plain and Reinforced Concrete", *ACI Structural Journal*, Vol.9, No.5, 1994, pp.511~520.
15. Haddad, R. H. and Abendeh, R. M., "Effect of Thermal Cycling on Bond between Reinforcement and Fiber Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Composites*, No.26, 2004, pp.743~752.
16. Tepers, R., "Cracking of Concrete Cover Along Anchord Deformed Reinforcing Bars", *Magazine of Concrete Research*, Vol.31, No.6, 1979, pp.3~12.
17. Katz, A. and Berman, "Modeling the Effect of High Temperature on the Bond of FRP Reinforcing Bars to Concrete", *Cement and Concrete Composites*, No.22, 2000, pp.433~443.
18. Malvar, L. J, Cox, J. V., and Cochran, B., "Bond between Carbon Fiber Reinforced Polymer Bars and Soncrete: Experimental Study", *Journal of Composites for Construction*, Vol.7, No.2, 2003, pp.154~163.
19. Vijay P. V., *Aging and Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars*, PhD thesis, Department of Civil Engineering, West Virginia University, Morgantown, West Verginia, USA, 1999, pp.80~160.

요 약 연구의 촛점은 강섬유 보강 고강도콘크리트와 고장력 철근 사이의 부착 특성을 평가하였다. 강섬유 혼입률에 따른 2가지 종류의 고강도콘크리트에서 고장력 철근의 부착 성능을 평가하기 위하여 직접 부착 실험을 실시하였다. 또한 콘크리트의 압축강도의 영향을 최소로 고려하여 강섬유 혼입률에 따른 부착강도의 영향을 결정하기 위하여 상대부착강도를 정의하였다. 부착 성능 실험 결과 강섬유의 혼입률이 증가할수록 증가하였으며 강도가 높은 콘크리트 배합에서 더 우수한 결과를 나타내었다. 콘크리트의 강도에 대한 영향을 최소로하여 강섬유 혼입률에 따른 영향을 분석하기 위한 상대부착강도 평가 결과 섬유의 사용량이 증가할수록 상대부착강도가 증가하여 섬유의 혼입률은 고강도콘크리트의 강도에 관계없이 부착강도가 증가하였다.

핵심용어 : 강섬유 부착성능, 고강도콘크리트, 상대부착강도, 강섬유