경량콘크리트와 GFRP 보강근의 부착 특성

Bond Characteristic Between Lightweight Concrete and GFRP Bar

손 병 락¹⁾ 김 명 식²⁾ 김 충 호³⁾ 장 희 석^{4)*}
Byung-Lak Son Myung-Sik Kim Chung-Ho Kim Heui-Suk Jang

Abstract

FRP reinforced lightweight concrete structures can offer corrosion resistance and weight reduction effect simultaneously, so practical use of the structures may be expected afterwards. But to make concrete structures using lightweight concrete and FRP bar, that can resist external forces without internal slip of the FRP bar, it is very important to understand bond characteristic between lightweight concrete and FRP bar. During that time, a lot of studies for bond behaviors of FRP bar in normal concrete were conducted, but studies for bond behavior of FRP bar in lightweight concrete are very limited to date. So, bond characteristic between lightweight concrete and helically deformed GFRP bar was investigated in this study. Three main parameters were considered in experimental investigation: type of rebar, concrete type, and compressive strength of lightweight concrete. As an experimental result, it could be known that bond strength of helically deformed GFRP bar in lightweight concrete was 0.49 times bond strength of steel reinforcement in normal concrete.

Keywords : GFRP bar, Lightweight concrete, Bond characteristic

1. 서 론

최근에 해양레저시설, 군사시설, 산업시설 등에서 해양 플랫폼, 초대형 부유식구조물의 설치에 대한 관심이 증가하고 있다 (Hong et al., 2001; Jung and Jung, 1999; Na and Song, 2009). 이러한 시설물들이 설치되는 경우에 상, 하부 구조로서 철근콘크리트 슬래브가 사용되는데, 철근의 부식 방지와 자중감소가 중요한 문제점이 될 수 있을 것으로 예상된다. 또한 산업사회의 발달과 더불어 철근콘크리트 구조물이 점점 고층화, 대형화되어 가는 추세에서 구조물의 경량화는 필수적이라고 할 수 있다.

이러한 문제점들에 대하여 우선 철근에 비하여 자중이 1/4 정도로 가벼워서 중량 대비 고강도의 특성을 갖고 또한 염화물 등으로 인한 부식에 강한 내구성을 갖는 FRP (Fiber Reinforced Polymer) 보강근의 활용이 대책 중의 한 방법이 될 수 있을

것으로 예상된다 (ACI, 2006; CSA, 2002; Seo et al., 2007; You et al., 2008). 더불어 자중 감소를 위하여 콘크리트 재료로서 경량콘크리트를 사용한다면 구조물의 자중을 감소시킬 수 있어서 구조물의 안정성과 전체 건설비용의 감소에 부분적으로 기여할 수 있을 것으로 생각된다 (Kwak and Jang, 1998; Shin and Choi, 1998).

따라서 앞으로 FRP 보강근과 경량콘크리트를 함께 사용하는 다양한 콘크리트 구조물들에 대하여 기초적이고 또한 실용적인 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이와 관련하여 미국 해군에서는 경량콘크리트 부유 구조물에 FRP 보강근의 적용을 검토하는 것으로 알려지고 있다 (Malvar et al., 2003).

이에 따라 본 연구에서는 보강근 표면에 나선형태의 이형 (deform)을 갖는 GFRP 보강근과 경량콘크리트 사이의 부착 거동을 조사하였다. 그동안 보통콘크리트와 FRP 보강근의

1) 정회원, (주)회덕기술공사 상무이사
2) 정회원, 부경대학교 토목공학과 교수
3) 정회원, 경성대학교 토목공학과 교수
4) 정회원, 부경대학교 토목공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : janghs@pknu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

부착강도에 대하여는 많은 연구 (Jung et al., 2011; Kim et al., 2005; Lee et al., 2008; Roman and Robert, 2005; You et al., 2006)가 있었으나 경량콘크리트와 FRP 보강근 사이의 부착강도에 대하여는 연구결과 (Malvar et al., 2003)가 대단히 부족한 실정이다. FRP 보강근과 경량콘크리트가 결합하여 보강근의 내부 슬립없이 외력에 저항할 수 있는 구조체를 만들기 위하여는 FRP 보강근의 재료강도를 발현할 수 있는 정착길이가 규명되어야 하고, 정착길이는 부착특성을 근거로 하므로 FRP 보강근과 경량콘크리트 사이의 부착특성을 파악하는 것은 대단히 중요하다고 판단된다.

2. 실험

2.1 실험체 제작

본 연구에서는 GFRP 보강근과 경량콘크리트 사이의 부착강도를 측정하기 위하여 Table 1에서와 같이 나열된 부착강도 측정용 실험체를 제작하고 인발실험을 실시하였다. 비교를 위하여 보강근 종류 (철근 및 GFRP 보강근), 콘크리트 종류 (보통 및 경량콘크리트), 경량콘크리트 강도 종류 (보통 강도 및 고강도)의 실험변수를 고려하여 실험체들을 제작하였다.

실험체명에서 공통적으로 사용된 첫 번째 영문자 B는 부착강도 측정용 실험체를 의미하며, 두 번째 영문자는 콘크리트 종류를 (N:보통콘크리트, L:경량콘크리트, HL:고강도경량콘크리트), 세 번째 영문자는 보강근 종류를 (S:철근, G:GFRP 보강근), 그리고 이어지는 숫자는 보강근의 직경을 나타낸다. 실험의 정확성을 기하기 위하여 동일한 실험체를 각각 3개씩, 총 21개를 제작하여 실험을 행하였다.

본 실험에 사용된 GFRP 보강근은 국내 D사에서 연속압출성형 (Pultrusion) 공정으로 제작된 것으로서, 콘크리트와

의 부착성능을 향상시키기 위하여 보강근 표면에 나선형태의 이형 (Deform)을 주고 있으며, Photo 1에 $\Phi 13$ mm GFRP 보강근의 형상을 나타내었다. 제조사에서 제시한 재료특성치를 Table 2에 정리하여 나타내었으며, 비교를 위하여 실험체 제작에 함께 사용된 철근의 재료특성치도 이 표에 같이 나타내었다.

또한 실험체 제작에 사용된 경량골재는 팽창성 혈암을 사용한 메사라이트 인공경량 굵은골재 및 잔골재로서 일본에서 생산되었다. 골재의 물리적 특성을 파악하기 위하여 콘크리트 시방서 기준에 따라 실험을 수행하였으며, 이에 따른 물리적 성질은 Table 3에 나타내었다.

보통콘크리트는 설계기준강도 27 MPa의 레미콘이 사용되었으며, 경량콘크리트와 고강도경량콘크리트는 Table 4의 배합표에 의하여 각각 설계기준강도 27 MPa 및 35 MPa의 콘크리트를 자체 제작하여 사용하였다. 이에 따라 부착강도 실험

Photo 1 Figure of GFRP bar

Table 2 Mechanical properties of steel and GFRP bars

Bar type	Diameter	Modulus of elasticity (MPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Remark
Steel	D13	200,000	512	649	SD400
GFRP bar	$\Phi 9$	41,000	N.A	1,020	
	$\Phi 13$	40,000	N.A	900	

Table 3 Physical properties of lightweight aggregates

Type	Fineness modulus	Bulk specific gravity in saturated surface dry	Production country
Fine aggregate	2.66	1.92	Japan
Coarse aggregate	6.77	1.68	Japan

Table 4 Mix proportions of lightweight concretes

Design strength (MPa)	Slump (mm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit mass (kg/m ³)					
					C	W	S	G	AE water reducer	Silica fume
27	120	5.5	38	47.9	340	129.5	457	497	2.35	
35	120	5.5	47	44.8	340	160	520	640	3.2	36

Table 1 Specimen details

Specimen ID	Concrete type	Bar type
BNS13-1,2,3	Normal concrete	Steel (D13)
BNG13-1,2,3	Normal concrete	GFRP bar ($\Phi 13$)
BLS13-1,2,3	Lightweight concrete	Steel (D13)
BLG13-1,2,3	Lightweight concrete	GFRP bar ($\Phi 13$)
BHLS13-1,2,3	High strength lightweight concrete	Steel (D13)
BHLG13-1,2,3	High strength lightweight concrete	GFRP bar ($\Phi 13$)
BLG9-1,2,3	Lightweight concrete	GFRP bar ($\Phi 9$)

험 시 측정된 공시체들의 평균압축강도는 보통콘크리트에서 35.2 MPa, 경량콘크리트에서 30.8 MPa, 고강도경량콘크리트에서 34 MPa이었다.

각각의 실험체는 Fig. 1과 같이 150 mm×150 mm×150 mm인 정육면체 콘크리트 블록으로 제작하였다. 콘크리트는 4번에 나누어 대략 같은 두께로 타설하고 각각의 콘크리트 층에 대하여 다짐봉으로 25회씩 다졌다.

실험 시 실험체의 하중단은 가력판과 직접 접촉하게 되므로 압축력이 작용하여 부착강도를 증대시킬 우려가 있다. 따라서 보강근과 보강근 주위의 콘크리트 사이에 비부착구간을 형성하는 것이 필요하다. 본 실험에서는 콘크리트 블록의 중심에 설치된 보강근에 대하여 CSA S806-02 규격에 따라 콘크리트 블록에 묻힌 4db (db : 보강근 지름)의 부착길이를 제외한 나머지 부분은 보강근이 콘크리트와 부착되지 않도록 보강근에 PVC 파이프를 덮어씌워 서로 격리시켰다. 이에 따라 실험체 내부의 보강근 부착길이는 보강근 직경에 따라 $\Phi 13$ 인 경우 50.8 mm, $\Phi 9$ 인 경우 36 mm로 하였으며 보강근 전체의 길이는 890 mm이다.

실험체에 인발하중을 가하기 위하여 사용된 고정단 그립은 Photo 2와 같이 직경 40 mm 원형강봉 내부의 중심에 보

강근을 배치한 후 주위에 에폭시를 충전하여 제작하였다. 이는 횡방향 강성이 작은 GFRP 보강근의 경우에 직접 인장하중이 가해지면 그립 주변에서 보강근 자체가 국부 압축파괴될 수 있는 것을 방지하기 위함이다.

2.2 부착강도 측정 실험

부착강도 측정 실험을 위하여 MTS사의 만능시험기 (UTM)를 사용하였다. Fig. 2 및 Photo 3에서와 같이 실험체의 하중단에 제작된 지거를 부착시켜 고정단 반력을 인장력으로 활용하는 실험체를 구성하였다.

실험 시 각 하중단계별 미끄럼변위는 보강근의 자유단과 하중단에서 측정하였는데, Fig. 2에서와 같이 자유단의 미끄럼변위는 보강근 단부에 1개의 LVDT를 설치하여 측정하였고, 하중단의 미끄럼변위는 보강근 주위에 2개의 LVDT를

Fig. 1 Specimen dimension (unit: mm)

Photo 2 Specimen and Grip (BLG13)

Fig. 2 Specimen setup dimension (unit:mm)

Photo 3 Test setup

설치하여 측정하였다. 일반적으로 하중단의 미끄럼변위가 자유단의 미끄럼변위보다 더 큰 현상을 보이고 있는데, 이는 보강근과 콘크리트 사이의 부착이 하중단에서 파괴되기 시작하고 부착저항이 점점 파괴되지 않은 부위로 이동하면서 일어나는 현상으로 판단된다 (Choi et al., 2007).

인발시험은 인발시험체가 파괴되거나 보강근이 뽑힐 때까지 실험을 수행하였으며 인발시험 중 파괴하중에 도달하였을 때 부착강도를 구하였다.

실험체들의 파괴형태는 쪼갬파괴와 뽑힘파괴로 구분되었는데, 대표적인 모습을 Photo 4에 나타내었다. 철근과 보통 콘크리트를 사용하여 제작된 실험체는 뽑힘파괴를 보여준 반면에 다른 실험체들은 대부분 쪼갬파괴를 나타내었다. 그러나 보강근의 직경이 작은 BLG9 실험체는 피복두께 증가 등의 이유로 뽑힘파괴 형태를 보여주었다.

일반적으로 철근의 인장력이 콘크리트에 전달됨에 따라 철근 주위의 콘크리트에는 원주방향의 인장응력이 발생하게 되며 철근 주위의 콘크리트 체적이 충분하지 않을 경우에는 이 응력으로 인하여 쪼갬파괴가 발생하고, 철근 주위 콘크리트의 체적이 충분하거나 횡방향 철근에 의해서 구속되어 있는 경우에는 철근 마디 사이의 콘크리트에 작용하는 전단력에 의해서 뽑힘파괴가 발생하게 된다. 그리고 철근과 콘크리트의 부착력이 철근의 항복강도보다 큰 경우에는 철근의 인장파괴가 발생한다 (Oh, 1992).

실험에서 구해진 보강근의 부착응력-미끄럼변위 곡선들을 실험체별로 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 부착응력은 부착면 전체에 동등하게 분배된다는 가정 하에 식 (1)에 의하여 계산된 평균부착응력이며, 미끄럼 변위는 자유단에 설치된 LVDT를 사용하여 측정한 결과이다.

$$u = \frac{P}{d_b l \pi} \quad (1)$$

여기서, u 는 부착응력, P 는 인발하중, d_b 는 보강근의 직경, l 은 보강근의 부착길이 이다. 또한 위 식에서 P 값으로서 최대인발하중 (=파괴하중)을 사용하여 계산된 u 는 부착강도로 사용하였다.

BNS13-1 실험체를 첫 번째로 실험하였는데, 초기의 실험 미숙으로 인하여 측정 자료를 취득하지 못하여 Fig. 3(a)에 결과를 포함시키지 못하였다. 그리고 BLHS13-2 실험체의 부착응력-미끄럼변위 곡선은 동일한 다른 시험체들에 비하여 상대적으로 낮은 부착응력을 보여주었다.

이 그림들로부터 철근을 보강근으로 사용한 보통콘크리트 실험체 (BNS13)에 비하여 GFRP 보강근을 사용한 경량콘크리트 실험체 (BLG13)와 GFRP 보강근을 사용한 고강도경량콘크리트 실험체 (BHLG13)는 부착강도 발생 후 상대적으로 부착응력의 감소가 다소 완만해지는 것을 볼 수 있다.

3. 실험결과 분석

식 (1)에서 P 값으로서 실험체들의 파괴하중을 사용하여 계산한 실험체들의 부착강도를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 여기서 하중단과 자유단의 미끄럼변위는 파괴하중 시에 측정된 값을 나타낸다.

BNS13-1 실험체의 결과는 초기의 실험 미숙으로 인하여 실험결과 자료를 제대로 취득하지 못하였다. 또한 BHLS13-2 실험체는 부착강도가 18.56 MPa로 계산되어 동일한 조건의 다른 실험체들과 차이가 많아서 실험결과를 분석할 때 제외하였다.

(a) splitting

(b) pullout

Photo 4 Typical failure type of specimens

(a) BNS13

(b) BNG13

(c) BLS13

(d) BLG13

(e) BHLS13

(f) BHLG13

(g) BLG9

Fig. 3 Bond stress–slip curve

Table 5 Bond strength and slip of specimens

Specimen ID	Failure load (kN)	Load end slip (mm)	Free end slip (mm)	Bond strength (MPa)	Mean (MPa)	Normalized bond strength	Failure type
BNS13-1	—	—	—	—	25.70	4.33	—
BNS13-2	55.75	1.18	0.88	27.52			Pullout
BNS13-3	48.40	1.26	1.01	23.89			Pullout
BNG13-1	35.35	3.69	2.56	17.44	17.07	2.88	Splitting
BNG13-2	34.80	2.81	2.42	17.17			Splitting
BNG13-3	33.65	4.10	3.50	16.61			Splitting
BLS13-1	58.55	1.60	1.61	28.90	26.84	4.84	Splitting
BLS13-2	53.85	1.89	1.54	26.58			Splitting
BLS13-3	50.75	1.52	1.30	25.05			Splitting
BLG13-1	24.35	2.20	1.53	12.01	11.72	2.11	Splitting
BLG13-2	23.55	2.06	1.36	11.62			Splitting
BLG13-3	23.40	1.45	1.15	11.55			Splitting
BHLS13-1	56.95	2.11	1.56	28.11	28.83	4.94	Splitting
BHLS13-2	37.65	0.97	0.74	18.56			Splitting
BHLS13-3	59.90	1.68	1.28	29.56			Pullout
BHLG13-1	23.95	1.71	1.24	11.82	11.35	1.95	Splitting
BHLG13-2	22.45	1.79	1.02	11.08			Splitting
BHLG13-3	22.60	1.39	1.02	11.15			Splitting
BLG9-1	13.95	2.60	1.42	13.71	13.31	2.40	Pullout
BLG9-2	14.35	2.05	1.01	14.10			Pullout
BLG9-3	12.35	1.48	0.57	12.13			Pullout

각각의 실험변수별로 3개의 동일한 실험체를 사용하였으므로 이들 실험체들의 부착강도를 산술평균한 평균값을 이 표에 함께 나타내었다. 또한 부착강도 측정 실험체의 콘크리트 압축강도가 각각 다르므로 비교를 위하여 평균값을 콘크리트 압축강도의 제곱근으로 나누어 계산한 정규화된 부착강도 (Khandaker, 2008; Roman and Robert, 2005)도 같이 나타내었다.

3.1 철근을 사용한 실험체의 부착강도

철근을 보강근으로 사용한 보통콘크리트 (BNS13), 경량콘크리트 (BLS13), 고강도경량콘크리트 실험체 (BHLS13)들에서 부착강도 발생 이전의 부착응력-미끄럼변위 관계는 서로 유사하게 나타났다. Fig. 4에 이들 각각의 실험체별로 부착응력-미끄럼변위를 평균하여 얻어진 결과를 상호 비교를 위하여 함께 나타내었다. 부착강도가 발생한 이후 보통콘크리트를 사용한 실험체는 다소 연성거동을 보인 반면에 경량골재를 사용한 실험체들은 상대적으로 취성 거동을 보임을 알 수 있다.

정규화된 부착강도는 보통콘크리트, 경량콘크리트, 고강도

Fig. 4 Bond stress comparison of specimens used steel reinforcement

경량콘크리트 실험체에서 각각 4.33, 4.84, 4.94로 나타났다. 따라서 보통콘크리트의 부착강도를 1.0으로 하였을 때 경량콘크리트, 고강도경량콘크리트는 각각 1.12, 1.14의 값을 갖는다.

본 실험에서 경량콘크리트의 압축강도 (30.8 MPa)가 보통콘크리트의 압축강도 (35.2 MPa)보다 낮음에도 불구하고 경량콘크리트의 부착강도가 보통콘크리트의 부착강도보다 크

게 나온 것은, 경량콘크리트의 부착강도가 보통콘크리트의 부착강도보다 떨어진다는 ACI 408-03 (2003)의 연구결과와 상반되는 면이 있어서 추후 재조사가 필요할 것으로 판단된다. 한편 조장세 등의 연구결과 (Cho et al., 2011)에 따르면 문힘길이가 짧은 시험체에서 경량콘크리트의 압축강도 (30.2 MPa)가 보통콘크리트의 압축강도 (32.47 MPa)보다 낮음에도 불구하고 경량콘크리트의 부착강도가 보통콘크리트보다 큰 값을 나타내는 경우가 조사되었다.

3.2 GFRP 보강근을 사용한 실험체의 부착강도

GFRP 보강근을 사용한 보통콘크리트 (BNG13), 경량콘크리트 (BLG13), 고강도경량콘크리트 실험체 (BHLG13)들에서 부착응력-미끄럼변위 관계는 보통콘크리트 실험체에서 부착응력이 상대적으로 크게 발생하였으나 형태는 서로 유사하게 나타났다. Fig. 5에 이들 각각의 실험체별로 부착응력-미끄럼변위를 평균하여 얻어진 결과를 상호 비교를 위하여 함께 나타내었다.

정규화된 부착강도는 보통콘크리트, 경량콘크리트, 고강도경량콘크리트 실험체에서 각각 2.88, 2.11, 1.95로 나타났다. 따라서 보통콘크리트의 부착강도를 1.0으로 하였을 때 경량콘크리트, 고강도경량콘크리트는 각각 0.73, 0.68의 값을 갖는다. 그러나 이 실험결과는 경량콘크리트의 부착강도가 고강도경량콘크리트의 부착강도보다 크게 되어서 추후 재조사가 필요한 부분이다.

한편 철근을 사용한 경우의 부착응력과 GFRP 보강근을 사용한 경우의 부착응력을 서로 비교해보면 GFRP 보강근을 사용하는 경우에 전반적으로 부착응력은 더 낮고 또한 연성적인 거동을 보여주는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 Bond stress comparison of specimens used GFRP bar

본 절에서 조사된 GFRP 보강근 사용 시의 콘크리트 종류에 따른 부착강도를 3.1절에서 조사된 철근 사용 시의 콘크리트 종류에 따른 부착강도에 대하여 서로 비교해보면, 보통콘크리트, 경량콘크리트, 고강도경량콘크리트에서 각각 $2.88/4.33=0.67$, $2.11/4.84=0.44$, $1.95/4.94=0.40$ 으로 주어진다. 이 비교결과에 따르면 GFRP 보강근의 부착강도는 철근에 비하여 사용되는 콘크리트의 종류에 따라 40%~67% 범위에 있으며, 경량콘크리트와 함께 사용하는 경우에 보통콘크리트를 사용하는 경우보다 더 낮은 부착강도를 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 경량콘크리트의 재료 자체의 파괴특성과 더불어 철근과 FRP 보강근의 재료 물성, 보강근과 콘크리트 사이의 상호 메커니즘에 기인하는 것으로 보고되고 있다 (Kim et al., 2005).

3.3 GFRP 보강근 직경변화에 따른 경량콘크리트 실험체의 부착강도

GFRP 보강근의 직경이 다른 BLG13 실험체와 BLG9 실험체의 경우 정규화된 부착강도는 각각 2.11, 2.40으로서 BLG13 실험체의 부착강도를 1.0으로 하였을 때 BLG9 실험체는 1.14가 된다. 이러한 현상은 보강근의 직경이 증가하게 되면 인발하중은 증가하지만 콘크리트와의 부착면적이 커지고 또한 직경이 작은 경우에 비하여 피복두께가 작아지기 때문에 발생하는 것으로서 다른 연구들 (Shin et al., 1999; Cho et al., 2011)에서도 유사한 결과가 보고되고 있다.

3.4 경량콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체의 부착강도

보통콘크리트와 철근을 사용한 실험체 (BNS13), 보통콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체 (BNG13), 경량콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체 (BLG13)의 정규화된 부착강도는 각각 4.33, 2.88, 2.11이다. 따라서 보통콘크리트와 철근을 사용한 실험체의 부착강도를 1.0으로 하였을 때, 보통콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체는 0.67, 경량콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체는 0.49로 나타났다. 이러한 현상은 GFRP 보강근 이형 (deform)의 낮은 전단강도와 파괴 시 골재를 관통하는 경량콘크리트의 파괴특성에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 6에 이들 각각의 실험체별로 부착응력-미끄럼변위를 평균하여 얻어진 결과를 상호 비교를 위하여 함께 나타내었다.

보통콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체의 부착강

Fig. 6 Bond stress comparison of specimens, BNS13, BNG13 and BLG13

도가 보통콘크리트와 철근을 사용한 실험체의 부착강도에 비하여 0.67배로 나온 것은 정우태 등의 연구결과 (Jung et al., 2011)와 유사한 경향을 보여주었다. 그리고 경량콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체의 부착강도가 보통콘크리트와 철근을 사용한 실험체의 부착강도에 비하여 0.49배로 낮게 나온 것은 추후 경량콘크리트와 GFRP 보강근을 사용하여 콘크리트 구조물을 제작하는 경우에 정착길이 산정 등에 있어서 반드시 고려되어야 할 사항이라고 판단된다.

3.5 기존의 제안식에 의한 부착강도 비교

일반적으로 철근을 사용하는 경우 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 부착강도가 증가한다. 이는 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 콘크리트와 이형철근 사이에 더 큰 저항력이 작용하기 때문이다. 그러나 FRP 보강근을 사용하는 경우는 거동 초기에 돌출된 리브 부분에서 지압력으로 저항하지만 거동 후기에는 리브의 강성이 철근에 비하여 약하므로 콘크리트의 압축강도가 증가하여도 철근을 사용하는 경우에 비하여 부착강도의 증가가 상대적으로 낮아진다.

부착강도 산정에 있어서 FRP 보강근과 경량콘크리트 사이의 관계식은 아직까지 주어지지 않은 것으로 조사되었다. 그러나 철근과 보통콘크리트를 사용하는 경우의 부착강도 산정 시 ACI 408-03에서는 콘크리트 압축강도와 보강근의 직경 변화를 고려하여 식 (2)를 제시하고 있다. 그리고 조장세 등 (Cho et al., 2011)은 경량콘크리트의 압축강도, 이형철근의 직경, 묻힘길이를 변수로 하는 인발시험 및 회귀분석을 통하여 식 (3)의 부착강도 산정식을 제안하였다. 또한 FRP 보강근과 보통콘크리트를 사용하는 경우에 Roman 등 (Roman

and Robert, 2005)은 부착강도 산정을 위한 실험 및 분석을 통하여 식 (4)를 제시하였다. 식 (2), (3), (4)에서 f'_c , d_b , l_d 는 각각 콘크리트의 압축강도 (MPa), 보강근의 직경 (mm), 보강근의 묻힘길이 (mm)를 의미한다.

$$u = 20.23 \frac{\sqrt{f'_c}}{d_b} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

$$u = \left\{ \frac{37.5}{(d_b + l_d)^{1/4}} - 9.4 \right\} \times \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

$$u = 14.70 \frac{\sqrt{f'_c}}{d_b} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

본 실험에서 구해진 부착강도와 식 (2), (3), (4)를 이용하여 구한 부착강도들을 서로 비교하기 위하여 식 (2)는 보통콘크리트와 철근을 사용한 실험체 (BNS13)에 적용하였으며, 식 (3)은 경량콘크리트와 철근을 사용한 실험체 (BLS13 및 BHLS13)에 적용하였다. 그리고 식 (4)는 보통콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체 (BNG13)에 적용하였다.

비교 결과, BNS13 실험체에 대하여 ACI 제안식으로 구한 값에 대한 실험값의 비율은 2.78이었고, BLS13 및 BHLS13 실험체에 대하여 조장세 등의 식으로 구한 값에 대한 실험값의 비율은 각각 1.24 및 1.27이었다. 그리고 BNG13 실험체에 대하여 Roman 등의 제안식으로 구한 값에 대한 실험값의 비율은 2.54이었다.

ACI 제안식은 다른 연구결과 (Cho et al., 2011)에서 부분적으로 매우 보수적인 경향을 보여주고 있으며, Roman 등의 제안식도 그의 연구 (Roman and Robert, 2005)에서 실험결과들의 하한치에 기준하여 제시된 수식이다. 따라서 이러한 경향들은 본 연구의 실험결과와 비교하여도 나타나고 있음을 알 수 있다. 이에 반하여 조장세 등이 제시한 부착강도 산정식은 본 실험결과와도 비교적 잘 일치하는 결과를 보여주고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 보강근 표면에 나선형태의 이형을 갖는 GFRP 보강근과 경량콘크리트 사이의 부착특성을 조사하기 위하여 일련의 인발실험체 제작 및 실험을 행하였으며, 실험결과 분석을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) GFRP 보강근의 부착강도는 철근에 비하여 사용되는 콘크리트의 종류에 따라 40%~67% 범위에 있으며, 경량콘크리트와 함께 사용하는 경우에 보통콘크리트를 사용하는 경우보다 더 낮은 부착강도가 발생하였다.
- (2) 보통콘크리트와 철근을 사용한 실험체의 부착강도를 1.0으로 하였을 때 경량콘크리트와 GFRP 보강근을 사용한 실험체는 0.49로 나타났다. 이러한 현상은 추후 경량콘크리트와 GFRP 보강근을 사용하여 콘크리트 구조물을 제작하는 경우에 정착길이 산정 등에 있어서 반드시 고려되어야 할 사항이라고 판단된다.

본 연구의 저자들이 조사한 바로는 경량콘크리트와 GFRP 보강근 사이의 부착강도를 추정하는 식은 현재까지 제안되지 않은 것으로 보이며 추후, 이와 관련된 연구들이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2011학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK(PKS)-2011-76).

References

1. ACI 408-03, "Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension", ACI Committee 408, 2003, p.49.
2. ACI 440.1R-06, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2006.
3. Cho, J. S., La, S. J., Kim, M. S., Lee, Y. H. and Kim, H. C., "Experimental Study on Bond Strength of Deformed Bars in Artificial Lightweight Aggregate Concrete", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 24, No. 1, 2011, pp.43-53 (in Korean).
4. Choi, D. U., Ha, S. S. and Lee, C. H., "Development Length of GFRP Rebars Based on Pullout Test", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 19, No. 3, 2007, pp.323-331 (in Korean).
5. CSA standard S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers", Canadian Standard Association, 2002.
6. Hong, S. Y., Jung, T. Y. and Shin, H. G., "State of the Art of the Very Large Floating Structure", Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 4, 2001, pp.29-38 (in Korean).
7. Jung, T. Y. and Jung, J. H., "Floating Structure for Usage of Marine Space", The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 47, No. 2, 1999, pp.6-12 (in Korean).
8. Jung, W. T., Park, Y. H. and Park, J. S., "An Experimental Study on Bond Characteristic of FRP Reinforcements with Various Surface-type", Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 31, No. 4A, 2011, pp.279-286 (in Korean).
9. Khandaker, M. Anwar Hossain, "Bond characteristics of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete", Construction and Building Materials, Vol. 22, 2008, pp.1491-1499.
10. Kim, T. Y., Park, J. S., Lee, J. Y. and Kim, K. H., "Effect of Compressive Strength of Concrete on the Bond Strength of Glass Fiber Reinforcement Plastic Bars", Journal of the Architectural Institute of Korea, Structural Division, Vol. 21, No. 12, 2005, pp.69-76 (in Korean).
11. Kwak, Y. K. and Jang, I. Y., "Research Trends of Structural Lightweight Concrete", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 10, No. 4, 1998, pp.5-15 (in Korean).
12. Lee, J. Y., Kim, T. Y., Kim, T. J., Yi, C. K., Park, J. S., You, Y. C. and Park, Y. H., "Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete", Composites: Part B39, 2008, pp.258-270.
13. Malvar, L. J., Cox, J. V. and Cochran, K. Bergeron, "Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete. I : Experimental study", Journal of composites for construction, Vol. 7, No. 2, 2003, pp.154-163.
14. Na, S. W. and Song, M. G., "Application of Hydroelastic Analysis Software on Very Large Floating Structures", Computational Structural Engineering, Vol. 22, No. 5, 2009, pp.78-85 (in Korean).
15. Oh, B. H., "Pullout Bond Characteristic of Reinforced Concrete Member", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 4, No. 3, 1992, pp.113-121 (in Korean).
16. Roman, Okelo and Robert L. Yuan, "Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete", Journal of Composites for Construction, Vol. 9, No. 3, 2005, pp.203-213.
17. Seo, D. W., Han, B. S. and Shin, S. W., "Behaviour of One-Way Concrete Slabs Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 19, No. 6, 2007, pp.763-771 (in Korean).
18. Shin, S. W. and Choi, M. S., "Application and Prospection of Structural Lightweight Concrete" Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 10, No. 4, 1998, pp.16-26 (in Korean).
19. Shin, S. W., Lee, K. S., Choi, M. S. and Kim, H. S., "Bond Characteristics of High-Strength Lightweight Concrete", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 11, No. 2, 1999, pp.77-84 (in Korean).
20. You, Y. J., Park, J. S., Park, Y. H. and Kim, H. Y., "Bond Models for GFRP Rebar Embedded in Concrete", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 10, No. 3, 2006, pp.143-151 (in Korean).
21. You, Y. J., Park, Y. H. and Park, J. S., "Service and Ultimate Load Behavior of Bridge Deck Reinforced with GFRP Rebars", Journal of The Korean Society of Civil Engineers, Vol. 28, No. 5A, 2008, pp.719-727 (in Korean).

요 지

FRP 보강근을 사용한 경량콘크리트 구조체는 부식방지 및 자중감소의 효과를 동시에 기할 수 있는 이점이 있어서 추후 그 활용이 기대될 수 있다. 그러나 경량콘크리트와 FRP 보강근을 사용하여 보강근의 내부슬립 없이 외력에 저항할 수 있는 구조체를 만들기 위해서는 경량콘크리트와 FRP 보강근 사이의 부착특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다. 그동안 보통콘크리트와 FRP 보강근 사이의 부착거동에 대하여는 많은 연구가 있어 왔으나 경량콘크리트와 FRP 보강근 사이의 부착거동에 대하여는 현재까지 연구결과가 대단히 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 경량콘크리트와 보강근 표면에 나선형태의 이형을 갖는 GFRP 보강근 사이의 부착특성을 조사하였다. 비교목적으로 보강근 종류, 콘크리트 종류, 경량콘크리트 강도종류의 실험변수를 고려하여 인발실험체들을 제작하고 실험을 행하였다. 실험분석 결과, 보통콘크리트와 철근을 사용한 실험체의 부착강도를 1.0으로 하였을 때 경량콘크리트와 나선형태의 이형을 갖는 GFRP 보강근을 사용한 실험체의 부착강도는 0.49로 나타났다.

핵심 용어 : GFRP 보강근, 경량콘크리트, 부착특성