FRP Bar 콘크리트 보의 휨보강근비 변화에 따른 콘크리트 전단강도

Concrete Shear Strength of FRP Bar Reinforced Concrete Beam According to Variation of Flexural Reinforcement Ratio

노 경 배* 진 치 섭** 장 희 석*** 김 희 성**** 황 금 식*****

Noh, Kyeung-Bae Jin, Chi-Sub Jang, Hee-Suk Kim, Hee-Sung Hwang, Geum-Sik

Abstract

The concrete shear strength of FRP Bar reinforced concrete beam according to the variation of flexural reinforcement ratio was investigated. A number of experimental result showed that the concrete shear strength was lower than that of RC beam, but it was increased according to the increasement of reinforcement ratio. Shear strength correction factors considering the kind and reinforcement ratio of FRP Bar was proposed using the proposed formula in the literature and regression analysis of the experimental result.

요 지

휨철근 대체재로 FRP Bar를 사용한 콘크리트 보에 대하여 휨보강근비의 변화에 따른 콘크리트의 전단강도를 일련의 콘크리트 보 실험을 통하여 조사하였다. 실험 결과, 콘크리트의 전단강도는 RC보의 경우보다는 낮은 값으로 나타났지만, 휨보강근비가 증가함에 따라 전단강도도 증가하는 것으로 분석되었다. 문헌에 제안된 식과 실험결과의 회귀분석을 이용하여 FRP Bar의 종류 및 휨보강근비를 고려한 전단강도보정계수를 제안하였다.

Keywords : FRP Bar, Flexural Reinforcement Ratio, Shear Strength Correction Factor

핵심 용어 : FRP Bar, 휨보강근비, 전단강도 보정계수

* (주)백송엔지니어링 대표이사

** 부산대학교 토목공학과 교수, 공학박사

*** 부경대학교 건설공학부 교수, 공학박사

**** 동서대학교 건설공학부 전임강사, 공학박사

***** 동원건설주식회사 대리, 공학석사

E-mail : janghs@pknu.ac.kr 051-620-1446

• 본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2006년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근 콘크리트로 시공된 사회간접 시설은 시간의 경과에 따라 노후화가 진행되어 구조물의 성능이 저하된다. 이는 콘크리트 구조물이 오랜 기간동안 공기중의 이산화탄소 등에 노출되어 콘크리트가 중성화되거나, 동절기 제설작업으로 살포되는 도로 제설제 및 해양환경에 의한 염화물의 침투, 확산 등 유해요소로 인하여 철근이 부식되어 나타난 결과이다(문한영 등, 2001).

이러한 문제점을 극복하기 위하여 현재 건설구조용 신소재로 연구되고 있는 대표적인 재료는 FRP(Fiber Reinforced Polymer) Bar이다. FRP는 단위중량당 강도가 우수하여 구조물의 자중을 감소시킬 수 있고, 비부식성, 비전기성, 비전자성, 고인장강도 등의 성질로 취약한 환경조건에서의 내구성이 우수하여 건설재료로의 사용 가능성이 크다.

1990년대 이후 미국, 유럽, 일본 등 기술선진국에서 콘크리트 구조물에 철근을 대신하여 FRP Bar를 사용하기 위한 연구가 진행되었으며, 현재 FRP Bar 콘크리트 구조물의 설계규준을 확립해 가고 있는 실정이다(ACI 440.1R-03). 국내의 경우, 철근을 대체하여 FRP Bar를 휨보강근으로 사용하고자 하는 연구가 최근에 행해지고 있으나 (윤순종 등, 2003 : 박상렬 등, 2004 : 원종필 등, 2004), 아직까지 전단특성에 대한 연구는 없다.

외국문헌에 의하면 FRP Bar의 재료적인 특성상 콘크리트가 발휘하는 전단력은 철근 콘크리트 보의 경우와 다르며 철근과의 탄성계수 차이 등을 고려하여 적절히 보정하여야 한다고 보고되고 있다(Michaluk et al, 1998 : Deitz et al, 1999 : Yost et al, 2001 : Tureyen et al, 2002). 따라서 본 연구에서는 국내에서 생산된 FRP Bar를 휨보강근으로 사용한 콘크리트보에 대하여 휨보강근비의 변화에 따른 콘크리트의 전단강도를 실험적 및 이론적으로 조사하여, FRP Bar 콘크리트보의 전단력 연구에 대한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험조건 및 사용재료

본 실험에서는 높이와 길이는 250mm와 2400mm (지간 2200mm)로 일정하고, 폭이 150mm와 200mm인 콘크리트 보를 제작하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 폭 200mm인 보는 휨보강근으로 ∅9mm의 FRP Bar 2본을 사용하였고((a)), 폭 150mm인 보는 휨보강근으로 ∅9mm((b))와 ∅13mm((c))의 FRP Bar를 각각 2본씩 사용하여 휨 보강근비가 다르게 되도록 제작하였다. 이들과의 비교를 위하여 150×250×2400mm (지간 2200mm)의 보에 D13 철근 2본(SD30)을 휨보강근으로 사용한 콘크리트 보((c))도 제작하였다. ∅9mm의 FRP Bar가 사용된 경우 보의 유효높이는 215.2mm이며 ∅13mm의 FRP Bar와 D13 철근이 사용된 보의 유효높이는

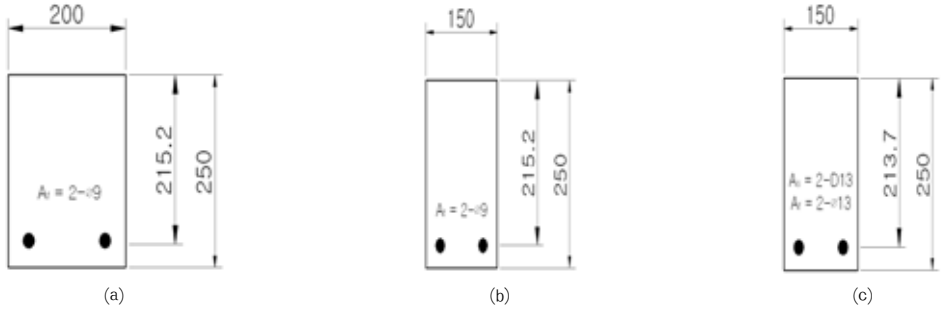


Fig. 1 시험체 단면 제원 및 배근형태

213.7mm이다. 모든 보의 피복두께는 30mm로 일정하게 하였다. 본 실험에 사용된 철근 및 FRP Bar들의 재료 특성치를 Table 1에 정리하여 나타내었다. 단, 표시된 철근의 강도는 항복강도이다. FRP Bar와 콘크리트와의 부착을 증가시키기 위하여 FRP Bar는 인발성형(pultrusion process)으로 생산한 후 표면의 요철을 만들기 위해 직조섬유(braided fabric)로 FRP Bar를 감싼 후 수지로 함침하여 양생되었다.

모든 경우에 보 3개씩을 제작하여 실험의 정확성을 기하였다. 이들 보 시험체의 종류를 Table 2에 정리하여 나타내었는데, 시험체명의 첫 번째 문자는 휨보강근의 종류(S;철근, C;CFRP Bar, G;GFRP Bar)이며, 두 번째 문자는 콘크리트의 강도(N;보통강도 콘크리트)를, 세 번째 문자는 전단보강 여부(SN;전단보강 없음)를, 네 번째 문자는 평형보강근비에 대한 휨보강근비의 비율(R0;평형보강근비 이하 배근, R1, R2, R4;평형보강근비 이상 배근)을 나타낸 것이며 다섯 번째 문자는 시험체 번호이다.

Table 1 보강 재료의 물리적 성질

사용재료		탄성계수 (MPa)	극한강도 (MPa)	극 한 변형률
종 류	규 격			
철 근	D13	200,000	f_y=300	-
CFRP Bar	∅9mm	122,000	2,135	0.0175
	∅13mm	120,000	2,012	0.0168
GFRP Bar	∅9mm	41,000	1,020	0.0249
	∅13mm	40,000	900	0.0225

CFRP Bar와 GFRP Bar는 재료특성상 항복점이 없고 최대강도까지 탄성적으로 거동하여 파괴시 취성파괴되는 특성이 있으므로 평형보강근비 계산시 극한강도를 사용하였다. 콘크리트 제작에 사용된 배합표는 Table 3과 같다.

시험체의 변형률을 측정하기 위해 콘크리트 보 제작시, 보 내부의 휨보강근 중앙 하단에 변형률 측정용 매립형 게이지를 부착하였다. 보는 콘크리트 타설 후 6개월 정도 야외에서 기건 양생되었고, 시험 당일 측정된 콘크리트 공시체의 평균 압축강도는 30.8MPa이었다.

2.2 실험방법 및 결과

용량 250kN인 MTS사 Actuator를 Steel Frame 하부에 부착시켜 4점 가력으로 1mm/min의 재하속도로 보가 파괴될 때까지 가력하였다. 휨보강근의 변형률은 콘크리트 타설 전 휨보강근에 부착된 매립형

Table 2 시험체명 및 제작 조건

시험체명	휨보강근 종 류	휨보강근 규 격	단면제원 b×h (mm)	휨보강근비	휨보강근비 / 평형보강근비
S-N-SN-R0-1,2,3	철 근	D13	150×250	0.00791	0.164
C-N-SN-R1-1,2,3	CFRP Bar	∅9mm	200×250	0.00331	2.221
C-N-SN-R2-1,2,3		∅9mm	150×250	0.00442	2.966
C-N-SN-R4-1,2,3		∅13mm	150×250	0.00791	4.823
G-N-SN-R1-1,2,3	GFRP Bar	∅9mm	200×250	0.00331	1.445
G-N-SN-R2-1,2,3		∅9mm	150×250	0.00442	1.930
G-N-SN-R4-1,2,3		∅13mm	150×250	0.00791	2.785

Table 3 콘크리트 배합표

슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단 위 량 (kg/m^3)				
				시멘트	물	잔골재	굵은골재	혼화제
12	4.5	45.5	45.9	363	165	818	1000	1.810

Table 4 최대전단력, 평균전단응력, 최대처짐 및 변형률의 평균값

시험체명	최대전단력 (kN)		평균 전단응력 (MPa)	최대처짐 (mm)	최대전단력에서의 변형률 ($\times 10^{-6}$)		최대전단력에서 변형률의 극한변형률에 대한 비	
	실험값	식(1)			콘크리트	FRP Bar	콘크리트	FRP Bar
S-N-SN-R0	29.480	29.650	0.921	59.259	3063.5	2984.4	1.021	1.990
C-N-SN-R1	30.480	39.810	0.707	22.927	1644.0	3280.0	0.548	0.187
C-N-SN-R2	23.760	29.858	0.735	20.230	1527.3	3015.1	0.509	0.172
C-N-SN-R4	27.960	29.650	0.873	14.672	1125.7	2998.0	0.375	0.178
G-N-SN-R1	20.080	39.810	0.466	43.794	1860.7	3585.0	0.620	0.144
G-N-SN-R2	16.360	29.858	0.506	28.389	1172.4	3472.5	0.391	0.139
G-N-SN-R4	18.790	29.650	0.587	21.752	1118.5	3181.0	0.373	0.141

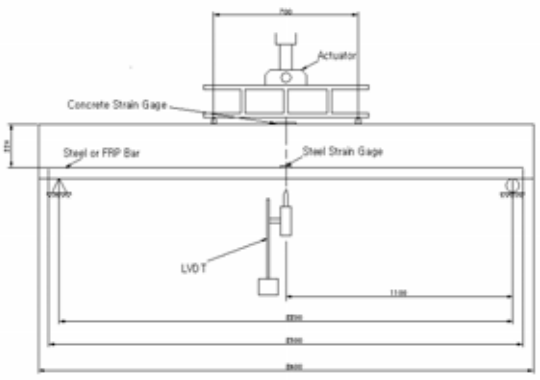
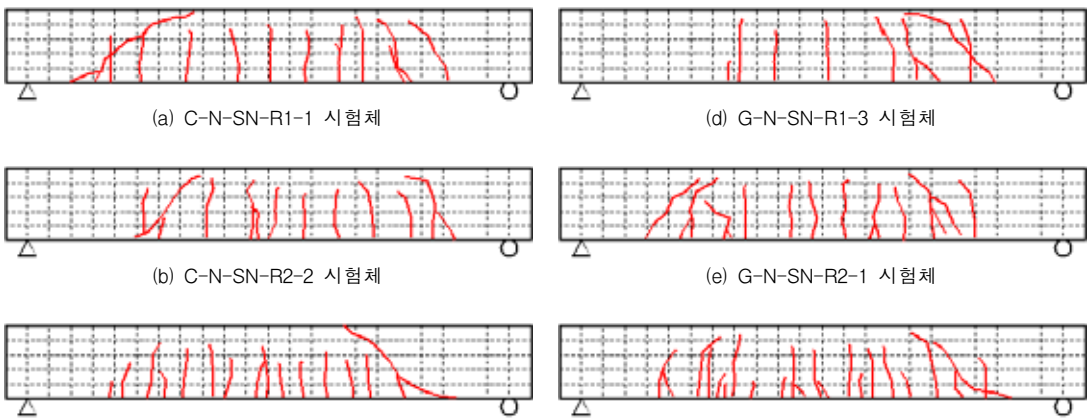


Fig. 2 시험체의 제원 및 재하 형태

변형률 게이지를 이용하여 측정하였고, 콘크리트 압축 변형률은 지간 중앙의 콘크리트 보 상면에 콘크리트용 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 가력된 하중은 Load cell, 그리고 보 중앙점 하부의 처짐은 LVDT를 사용하여 측정하였다. Fig. 1에는 각 조건별 단면 제원 및 배근형태를 나타내었고, Fig. 2에는 시험체의 제원 및 재하형태를 나타내었다. 각 조건별 실험결과를 Table 4에 나타내었다.

Fig. 3에는 각 시험체별 최대하중에서의 균열도를 나타내었다. 그림으로부터 휨보강근비가 증가할수록 최종 파괴시 균열 간격은 좁게 나타났고, GFRP Bar로 휨보강한 경우가 CFRP Bar로 휨보강한 경우보다는



(a) C-N-SN-R1-1 시험체 (d) G-N-SN-R1-3 시험체

(b) C-N-SN-R2-2 시험체 (e) G-N-SN-R2-1 시험체

(c) C-N-SN-R4-1 시험체 (f) G-N-SN-R4-2 시험체

Fig. 3 각 시험체의 균열도

균열 간격은 다소 넓게 나타났으며, 균열폭 또한 다소 크게 나타남을 알 수 있었다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 휨보강근비에 따른 콘크리트 전단강도

각각의 보에 대한 정적 파괴실험을 실시하여 최대하중을 구하였고, 4점 휨시험으로 구한 최대하중의 절반을 최대 전단력으로 산정하였다. Table 4에서 보는 바와 같이 철근으로 휨보강된 보의 경우, 실험으로 구한 최대전단력과 RC구조물에서 콘크리트의 전단력 계산에 사용하는 식(1)에 의해 구한 값의 차이는 거의 없으나, CFRP Bar로 휨보강된 경우는 식(1)에 의해 구한 값은 실험값을 6~31% 과대평가하고, GFRP Bar로 휨보강된 경우 58~98% 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서, FRP Bar를 휨보강근으로 사용한 경우의 콘크리트 전단강도 관계식은 Deitz 등(1999)이 제시한 식(3)과 같이 수정하여야 하며, 본 논문에서는 사용재료의 특성치를 고려하여 식(3)의 우측식과 같이 단일보정계수(β_f)를 이용하도록 제시하였다.

휨보강근비를 변화시키기 위하여 시험체의 폭을 변화시켰기 때문에 단면적이 일정하지 않아 전단강도의 평가는 실험으로 구한 전단력의 직접 평가보다는 식(2) 및 식(4)와 같이 평균전단응력으로 평가하였다. 여기서 α_f와 β_f는 전단강도보정계수이다.

$$V_c = \frac{\sqrt{f_c'}}{6} b d \quad (1)$$

$$v_c = \frac{V_c}{bd} = \frac{\sqrt{f_c'}}{6} \quad (2)$$

$$V_{cf} = \alpha_f \frac{E_f}{E_s} \frac{\sqrt{f_c'}}{6} b d = \beta_f V_c \quad (3)$$

$$v_{cf} = \frac{V_{cf}}{bd} = \beta_f v_c \quad (4)$$

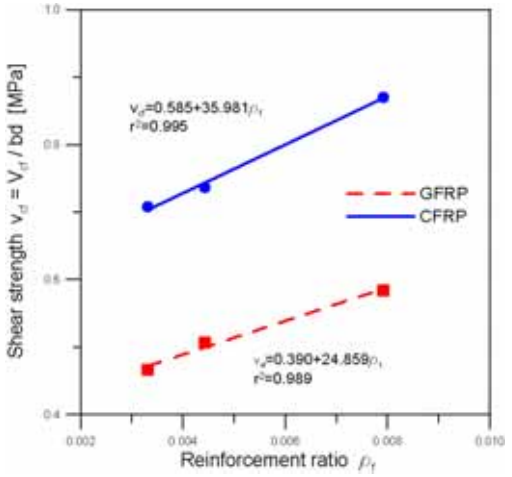


Fig. 4 휨보강근비 변화에 따른 평균전단응력 v_{cf}

$$\beta_f = \alpha_f \frac{E_f}{E_s} = \frac{V_{cf}}{V_c} = \frac{v_{cf}}{v_c} \quad (5)$$

휨보강근비 변화에 따른 평균전단응력 관계를 Table 4 및 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는 것과 같이, FRP Bar의 종류에 관계없이 평균전단응력은 휨보강근비가 증가하면 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그 경향은 휨보강근비와 밀접한 관계가 있으며 FRP Bar의 종류에 따른 상관관계는 Fig. 4에 표현된 식과 같다. 회귀분석식의 결정계수는 각각 0.98 이상으로 높은 상관관계를 나타내고 있다.

3.2 콘크리트 전단강도보정계수 제안

기존의 외국문헌(Deitz et al, 1999)에서는 GFRP Bar를 사용한 경우에 대하여, 전단강도보정계수 중 FRP Bar와 철근의 탄성계수비를 제외한 부분인 α_f를 제시하고 있으나, FRP Bar의 종류 및 재료특성치의 다양성으로 인하여 α_f를 적용하는 것보다는 β_f를 전단강도보정계수로 채택하는 것이 보다 실용적이라고 판단된다. 여기서, β_f는 철근으로 휨보강된 경우의 전단강도에 대한 FRP Bar로 휨보강된 경우의 전단강도의 비이다.

Table 5 휨보강근비에 따른 전단강도보정계수

시험체명	α_f		β_f	
	실험값	제안값	실험값	제안값
S-N-SN-R0	1.000	-	1.000	-
C-N-SN-R1	1.253	1.240	0.764	0.758
C-N-SN-R2	1.310	1.320	0.795	0.803
C-N-SN-R4	1.560	1.570	0.944	0.942
G-N-SN-R1	2.454	2.475	0.504	0.510
G-N-SN-R2	2.669	2.645	0.547	0.540
G-N-SN-R4	3.172	3.178	0.634	0.636

휨보강근비에 따른 전단강도보정계수 α_f 및 β_f를 FRP Bar의 종류별로 Table 5 및 Fig. 5~6에 각각 나타내었고, Table 5에 휨보강근비 변화에 따라 회귀분석을 통하여 구한 전단강도보정계수 관계식(6)~(9)로부터 계산된 제안값을 함께 나타내었다. 회귀분석 결과, 전단강도보정계수 α_f 및 β_f는 휨보강근비의 증가에 따라 선형적으로 증가하며, 결정계수가 모두 0.98 이상으로 실험으로 구한 값과 제안한 식에 의한 값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

$$\alpha_f = 1.005 + 71.274\,\rho_f \qquad r^2 = 0.992 \quad for \quad CFRP \tag{6}$$

$$\beta_f = 0.627 + 39.821\,\rho_f \qquad r^2 = 0.994 \quad for \quad CFRP \tag{7}$$

$$\alpha_f = 1.967 + 152.814\,\rho_f \qquad r^2 = 0.993 \quad for \quad GFRP \tag{8}$$

$$\beta_f = 0.417 + 27.625\,\rho_f \qquad r^2 = 0.989 \quad for \quad GFRP \tag{9}$$

또한, 동일한 보강근비에서 GFRP Bar를 사용한 경우보다 CFRP Bar를 사용한 경우의 전단강도보정계수 β_f가 높은 것은 콘크리트의 전단강도식(식(1))을 이용하여 전단강도를 평가할 때, CFRP Bar를 사용한 경우보다 GFRP Bar의 경우에 더욱 과대평가됨을 의미한다.

GFRP Bar를 사용한 Deitz 등(1999)에 의한 연구에서 사용보강근비 $\rho_f = 0.00733$ 인 경우 제시된

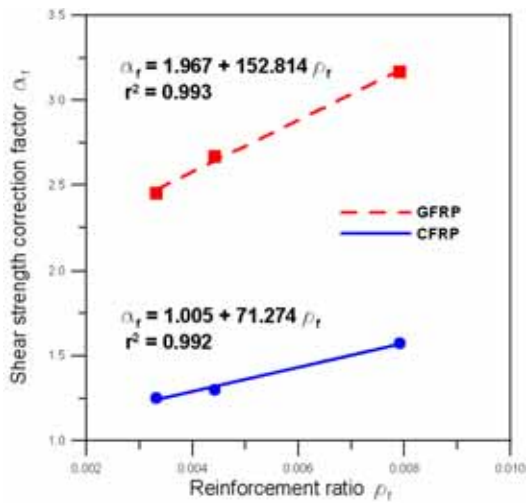


Fig. 5 휨보강근비에 따른 전단강도 보정계수 α_f

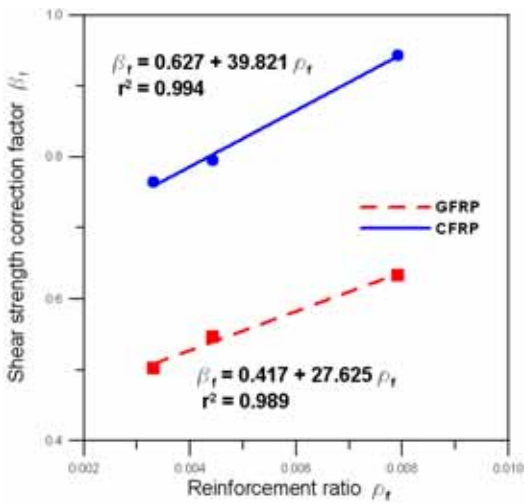


Fig. 6 휨보강근비에 따른 전단강도 보정계수 β_f

$\alpha_f = 3.0$ 은, 본 연구에서 구한 휨보강근비와 전단강도보정계수 관계인 식(8)에 의하면 3.089로 2.97%의 오차가 나타나 본 논문에서 제시한 관계식이 문헌에 제시되어 있는 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

1) 휨보강근비가 증가할수록 최종 파괴시 균열 간격은 좁게 나타났고, GFRP Bar로 휨보강한 경우가 CFRP Bar로 휨보강한 경우보다는 균열 간격은 다소 넓게 나타났으며, 균열폭 또한 다소 크게 나타남을 알 수 있었다.
2) FRP Bar를 사용하여 휨보강할 경우 휨보강근비가 증가할수록 콘크리트의 전단강도는 휨보강근비에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.
3) FRP Bar를 철근 대체재로 사용한 경우, 본 실험결과에 의하면 ACI 318 위원회 및 한국콘크리트학회의 콘크리트구조설계기준에서 제시하고 있는 콘크리트 전단강도식을 적용하면 콘크리트의 전단강도를 과대평가하게 된다. 휨보강근비가 작을수록 그 편차는 커지고 있으며 CFRP Bar를 사용한 경우보다 GFRP Bar를 사용한 경우에 그 편차는 더욱 증가하는 것을 알 수 있었다.
4) FRP Bar로 휨보강된 콘크리트 보의 전단강도를 예측하기 위하여 철근과 FRP Bar의 탄성계수비가 포함된 전단강도보정계수 관계식(β_f)을 제안하였고, 전단강도보정계수를 이용하여 평가한 콘크리트의 전단강도는 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구를 위하여 FRP Bar를 지원해주신 동원건설주식회사에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 문한영, 김성수, 김홍삼, “우리나라 콘크리트 구조물의 철근부식 현황”, 콘크리트학회지, 제13권 5호, 2001, pp.58-63.
2. 박상렬, 조근희, “Hybrid Reinforcement System을 이용한 콘크리트 교량상판 슬래브의 거동”, 한국콘크리트학회 논문집, 제16권 4호, 2004, pp.451-458.
3. 원종필, 박찬기, “촉진 열화 환경에 노출된 콘크리트 보강용 고연성 하이브리드 FRP 보강근의 부착특성”, 대한토목학회 논문집, 제24권 제5A호, 2004, pp.969-979.
4. 윤순종, 김병석, 정상균, 정재호, “유리섬유 보강 플래스틱 보강근 다발로 보강된 콘크리트보의 휨거동”, 대한토목학회 논문집, 제23권 제6A호, 2003, pp.1067-1075.
5. American Concrete Institute, “Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars”, ACI 440.1R-03, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2003.
6. Deitz,D.H., Harik,I.E. and Gesund,H., “One-Way Concrete Slabs Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Reinforcing Bars”, ACI SP 188-25, 1999, pp.279-286.
7. Michaluk,C.R., Rizkalla,S.H., Tadros,G. and Benmokrane, B., “Flexural Behavior of One-Way Concrete Slabs Reinforced by Fiber Reinforced Plastic Reinforcements”, ACI Structural Journal, Vol.95, No.3, 1998, pp.353-365.
8. Tureyen,A.K and Frosch,R.J., “Shear Tests of FRP-Reinforced Concrete Beams without Stirrups”, ACI Structural Journal, Vol.99, No.4, 2002, pp.427-434.
9. Yost,J.R., Gross,S.P. and Dinehart,D.W., “Shear Strength of Normal Strength Concrete Beams Reinforced wth Deformed GFRP Bars”, Journal of Composites for Construction, Vol.5, No.4, 2001, pp.268-275.

(접수일자 : 2005년 6월 27일)