

FRP Rods로 보강한 콘크리트 보의 전단 내하력의 평가

최익창* · 연준희** · 고재용***

*목포해양대학교 해양토목공학과

**대운종합 건설

***목포해양대학교 해양조선공학과

Estimation of Shear Carrying Capacity on Concrete Beams, Reinforced with FRP Rods

IK-CHANG CHOI*, JUN-HEE YEON** AND JAE-YONG KO***

*Dept. of Ocean Civil Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Korea

**Division of Civil Engineering, Daewon Construction, Kwangmyong, Korea

***Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Korea

KEY WORDS: FRP Rods FRP 봉부재, Diagonal Crack 사인장균열, Failure Mode 파괴형태, Shear Carrying Capacity 전단내하력

ABSTRACT: The purpose of this study is to estimate the contribution of concrete and shear reinforcement, in shear carrying capacity, on concrete beams, reinforced with steel and/or FRP rods. The experimental tests for 12 concrete beams, reinforced with steel and/or FRP rods, are carried out. Experimental parameters includes the mechanical properties of reinforcements in shear and bending, and the ratio of shear reinforcement. This study compares the experimental results of shear carrying capacity in concrete beams, reinforced with steel and/or FRP rods, with the proposed equations. According to the experimental results, the effect of the concrete in concrete beams reinforced with FRP rods is decreased with decreasing Young's modulus of longitudinal tensile reinforcement. This results from the large deflection of concrete beams reinforced with decreasing Young's modulus of longitudinal tensile reinforcement. Also, the contribution of shear reinforcement is smaller than the calculated value, using the truss analogy. This results from the fact that the stress redistribution is not exhibited after the break of shear reinforcement.

1. 서론

최근 항만, 섬과 섬을 연결하는 연육교 등(이용은 등, 1999)의 해양건설이 활발히 계획되고 진행중이다. 해양구조물은 염해에 노출된 가혹한 환경하에 있기 때문에 장기내구성에 매우 취약한 면을 갖고 있다. 특히 해양구조물로 광범위하게 사용되는 철근콘크리트구조물에서 콘크리트에 매립되어 있는 철근의 부식은 보수·보강 등이 거의 불가능하기 때문에 구조물의 장기내구성에서 가장 치명적인 요인 중에 하나이다. 철근콘크리트 해양구조물의 장기내구성을 확보하기 위해서는 철근의 부식을 방지할 수 있는 방법을 모색하는 것이 절실히 요구된다.

탄소섬유(CFRP), 아라미드섬유(AFRP), 유리섬유(GFRP) 등의 FRP재료는 고강도이며 가볍고 내부식성이 우수한 장점을 갖고 있기 때문에 철근콘크리트구조물의 보수·보강 등에 많이 사용되고 있다. 이러한 FRP 재료의 우수한 재료적 특성, 특히 부식이 전혀 일어나지 않는 특징을 이용하여 해양 구조물에 철근이나 PC 강봉을 대체하는 재료로 적극적인 활용이

기대된다. 그러나, 국내에서는 FRP Rods를 철근을 대신하여 보강한 구조물에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있다.

철근콘크리트 보의 전단내하력의 평가방법으로 국내, 미국 및 일본 등에서 수정트러스 이론에 기초한 설계식이 이용되고 있다. 수정트러스 이론은 콘크리트 공현분과 전단보강근의 공현분의 합으로 전단내하력을 평가하고 있으며, 콘크리트 공현분은 사인장 균열 발생 후에도 골재의 맞물림 작용, 다월작용, 아치 작용 등에 의해 일정한 공현분을 유지한다고 가정하고 있다. 또한 전단보강근의 공현분은 트러스 이론을 토대로 산정되고 있다.

그러나, FRP를 철근 대신에 사용한 부재에서는 역학적 특성이 철근과 다르기 때문에 철근을 보강한 부재와 다른 거동을 보일 것으로 판단된다. 특히, 철근콘크리트 보의 전단내하력 평가방법으로 수정트러스 이론에 기초한 설계식을 FRP를 철근 대신에 보강한 콘크리트 보에 그대로 적용하는 것은 문제점이 있을 것으로 판단된다. 즉, 수정트러스 이론에서 탄성계수가 작은 FRP를 보강한 콘크리트 부재에서는 변형이 크기 때문에 콘크리트 공현분은 사인장균열 발생후 보의 파괴시까지 일정하게 전단력에 저항할 수 있는가 하는 문제, 전단보강근의 공현분의 산정은 전단보강근의 항복을 전제로 한 것이기 때문에 FRP와 같이 항복하지 않고 파단되는 급성재료에

대해서는 그대로 적용할 수 있는가 하는 문제점을 갖고 있다.

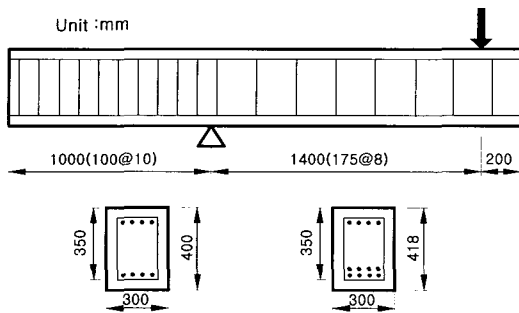
Table 1 Details of reinforcement in specimens

Specimen	Bending reinforcement		Shear reinforcement			f_c (MPa)
	Kind	Diameter	Kind	Diameter	r_w	
No.1	SD685	D25	SD345	D6	0.12	31.3
No.2	SD685	D25	SD345	D6	0.24	33.2
No.3	SD685	D25	SD345	D10	0.36	38.2
No.4	SD685	D25	CFRP	φ6	0.11	37.9
No.5	SD685	D25	GFRP	φ6	0.11	42.1
No.6	CFRP	φ16	-	-	-	30.2
No.7	CFRP	φ16	CFRP	φ6	0.05	29.4
No.8	CFRP	φ16	CFRP	φ6	0.11	26.0
No.9	CFRP	φ16	CFRP	φ6	0.22	32.2
No.10	CFRP	φ16	PC Bar	φ6	0.12	32.1
No.11	CFRP	φ16	GFRP	φ6	0.11	33.3
No.12	GFRP	φ16	CFRP	φ6	0.11	26.4

다. 즉, 철근과 역학적 특성이 다른 FRP 보강 콘크리트 보의 전단내하력에서 콘크리트의 공현분 및 전단보강근의 공현분에 대한 평가를 한다.

Table 2 Mechanical properties of applied reinforcements

Stiffener	Diameter	Yielding Strength (MPa)	Breaking Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (($\times 10^5$)MPa)
SD685	D25	733	923	1.98
SD345	D10	398	577	1.97
	D6	381	559	1.98
GFRP	φ16	-	1224	0.59
	φ6	-	1230	0.50
CFRP	φ16	-	1085	1.00
	φ6	-	1302	1.15
PC Bar	φ6	1484	1652	2.29



(A) Steel reinforcement (B) FRP reinforcement

Fig. 1 Shape and size of specimen

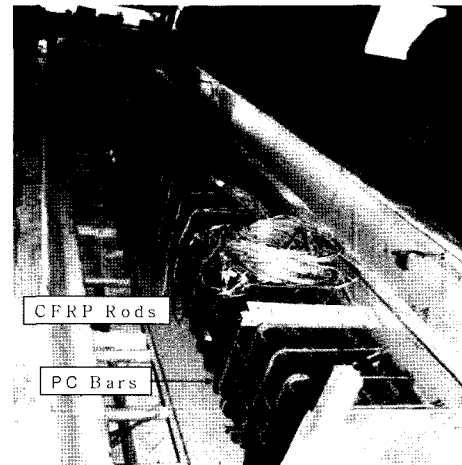


Photo 1 Arrangement of inforcement (No. 10)

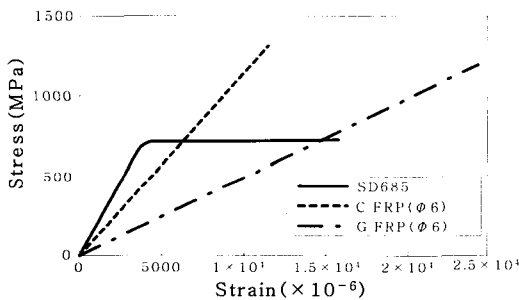


Fig. 2 Stress-Strain relationship for reinforcements

본 연구에서는 철근, PC강봉 및 FRP Rods(탄소섬유, 유리섬유)를 보강근으로 사용한 콘크리트 보에 대한 재하실험을 실시하여 보강근의 역학적 특성이 콘크리트 보의 전단거동 및 전단내하력에 미치는 영향을 평가하는 것을 목적으로 한

2. 콘크리트 보의 실험 개요

2.1 시험체 및 재해방법

본 실험은 총12개의 철근콘크리트 보의 시험체를 제작하였으며, 보의 대표적인 형상 및 크기를 Fig. 1에 나타내고 있다. 보의 전장은 520 cm, 단면 폭은 30cm, 단면 높이는 철근(D25) 주철근으로 한 No.1~No.5에 대해서는 40 cm, 탄소섬유(φ16) 및 유리섬유(φ16)를 주철근으로 한 No.6~No.12에 대해서는 휨인장 보강근을 2단 배근하였기 때문에 41.8 cm로 했다. 전단보강근의 배근은 등간격으로 하였으며, 전단보강근으로 사용한 FRP Rods는 절곡부를 사전에 절곡 가공하여 나선형으로 배근하였다. 또한, 철근과 PC강봉은 폐쇄형으로 배근하였다. Photo 1은 시험체 No. 10의 배근형태이며, 주철근에 탄소섬유(CFRP Rods), 전단보강근에 PC 강봉을 보강한 것이다. Table 1은 전 시험체의 보강근의 종류를 나타내고 있으며, 보

강근은 주근으로 철근(D25), 탄소섬유(Φ16), 유리섬유(Φ16)를 사용하였으며, 전단보강근으로 철근(D6, D10), PC강봉(Φ6), 탄소섬유(Φ6), 유리섬유(Φ6)를 사용하였다. 실험 변수는 주근 및 전단보강근의 역학적 특성이 다른 보강근의 사용과 전단보강근비(r_w)이다. 모든 시험체에 대해서 주근비는 1.93%, 전단스팬비(a/d)는 4.0으로 일정하게 하였다. 시험체 제작시 주근의 완전한 정착을 위해서 지점 밖으로 보의 길이를 100cm 연장하여 충분한 정착길이를 확보하였다. 재하는 등횡간격 40cm, 전단스판 140 cm의 대칭 2점 재하를 하였다(Fig. 1 참조).

2.2 사용재료

본 실험에서 사용한 콘크리트는 조강 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 조골재의 최대 크기는 20 mm이며, 설계압축강도는 30.0 MPa로 하였다. 재령28일의 콘크리트의 압축강도는 Table 1에 나타난 것처럼 26.0~42.1 MPa였다.

실험에 사용된 FRP Rods는 탄소섬유(PAN계)와 유리섬유(T글래스)이다. 실험에서 사용한 보강근에 대해 인장시험을 실시하였으며, 인장시험은 각각 3개의 보강근에 대해 실시하였다. Table 2는 인장시험결과이며, 항복강도, 극한강도 및 탄성계수의 평균치를 나타내고 있다.

Fig. 2는 대표적인 철근, CFRP 및 GFRP의 인장시험 결과를 나타내고 있다. 그림에 나타난 것처럼, 철근은 명확한 항복점을 보이고 있으나, CFRP와 GFRP는 항복점을 보이지 않고 파단에 이르는 것을 알 수 있다.

실험에서 사용한 FRP Rods는 부착력을 향상시키기 위해 이형철근과 같은 리브는 갖는 형태의 것을 이용하였다.

3. 보강근의 재료특성이 콘크리트 보의 거동에 미치는 영향

3.1 주근의 탄성계수

철근콘크리트 보의 전단내하거동에 주근의 영향은 다월 작용(dowel action)이며, 주근의 탄성계수의 차에 의한 전단내하거동 및 사인장 균열 발생 전단력에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 사인장 균열 발생 전단력의 산정식에 다월작용을 고려한 일본토목학회식과 윤영수식과 비교검토하였다.

일본토목학회 콘크리트 표준시방서에 규정되어 있는 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보에 있어서 전단내하력의 산정식(Niwa, et al., 1986)은 식(1)에 기초하고 있다. 식(1)에서 $V_{c(JSCF)}$ 는 사인장 균열 발생 전단력이다.

$$V_{c(JSCF)} = 0.20 f_c^{1/3} p_w^{1/3} d^{1/4} [0.75 + 1.4/(a/d)] b_w d \quad (1)$$

여기서, p_w 는 주근비(%), f_c 는 콘크리트의 압축강도(MPa), d 는 유효깊이(m), a 는 전단스판, b_w 는 웨브 폭(m)이다.

윤영수 등이 크기효과와 다월작용을 고려하여 전단보강근이 없는 철근콘크리트 보에 있어서 전단내하력의 산정식(윤영수와 배영훈, 2003)을 식(2)와 같이 제안하였다.

$$V_{c(NYS)} = 4.65 f_c^{1/2} \rho_w^{1/4} (1+d)^{0.4} b_w d \quad (2)$$

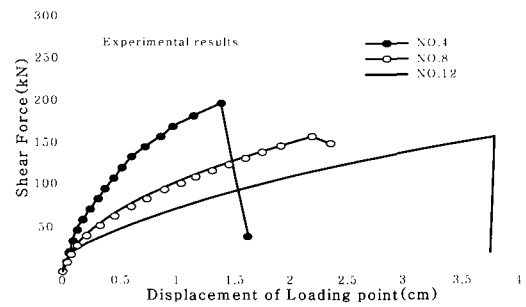


Fig. 3 Applied shear force - displacement curves

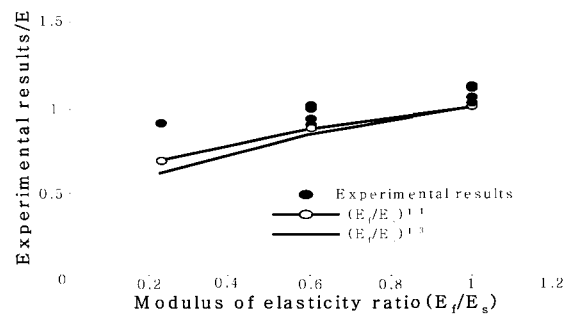


Fig. 4 The contribution of concrete in specimens

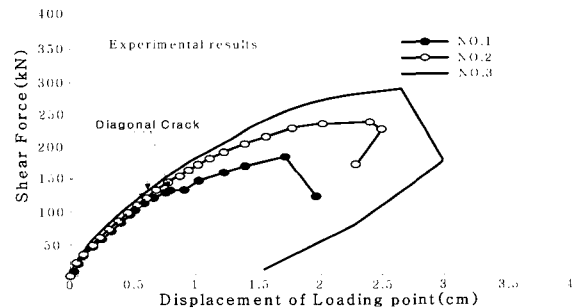


Fig. 5 Applied shear force - displacement curves

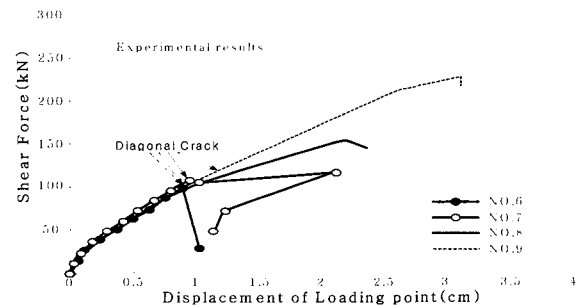


Fig. 6 Applied shear force - displacement curves

여기서 ρ_w 주근비, f_c 는 콘크리트의 압축강도(MPa), d 는 유효 깊이(mm), b_w 는 웨브 폭(mm)이다.

식(1)은 다월작용으로 주근비의 1/3승을 고려하였으며, 식(2)에서는 주근비의 1/4승을 고려하고 있다.

본 연구에서는 주근의 탄성계수가 전단내하거동 및 사인장 균열 발생 전단력에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 실험에서 주근으로 철근과 탄소섬유, 유리섬유의 3종류를 보강근으로 이용하였으며, 각각의 보강근의 탄성계수는 Table 2에 나타난 것과 같다.

Fig. 3는 철근, 탄소섬유 및 유리섬유를 주근으로 한 콘크리트 보(No.4, No.8, No.12)에 대한 실험결과이며, 휨 균열 발생 후에 주근의 탄성계수의 차이가 보의 변위거동에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 휨 균열 발생 후에 탄성계수가 상대적으로 작은 FRP 보강 콘크리트 보에서는 강성이 작아지기 때문에 변형이 크게 일어난다. 이와 같이 큰 변형을 갖는 보에서는 사인장 균열 발생 후에 콘크리트 공헌분(다월작용, 골재의 맞물림 작용, 아치 작용 등)이 저하될 것으로 판단된다.

주근의 탄성계수와 사인장 균열 발생시의 전단력과 상관 관계를 알아보기 위해, 실험결과와 식(1)에 의한 계산치와의 비를 주근의 탄성계수비의 변화에 따라 나타낸 것이 Fig. 4이다. Fig. 4에서 실선은 식(1)에 탄성계수비의 1/3승과 1/4승을 고려하여 나타내고 있으며, 점으로 나타낸 것이 실험 결과이다. Fig. 4에 나타낸 것처럼, 사인장 균열 발생 전단력은 주근의 탄성계수가 작으면 작을수록 저하된다는 것이 실험으로 확인되었으며, 저하 정도는 1/3승과 1/4승을 고려한 것 보다는 작게 나타나고 있다.

3.2 전단보강근비의 영향

Fig. 5는 전단보강근비를 변화시킨 철근콘크리트 보(No.1, No.2, No.3)의 실험결과이며, 사인장 균열 발생(123 kN~133 kN)까지는 전단보강근비에 관계없이 거의 같은 거동을 보이고 있으나, 사인장 균열 발생 후에는 다른 거동이 보이고 있다. 즉 전단보강근비가 크면 이에 상응하여 강성이 크게 나타나며, 전단 파괴강도도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6는 탄소섬유보강 콘크리트 보(No.6, No.7, No.8, No.9)의 실험결과이며, 전단보강을 하지 않은 보(No. 6)는 사인장 균열 발생과 동시에 전단력이 급락하는 것을 알 수 있다. 또한, 전단보강근비를 0.05% 보강한 보(No.7)은 사인장 균열 발생 후에 전단력의 증가를 보이지 않고, 일정한 전단력을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이것은 수정트러스 이론에서 콘크리트 공헌분과 전단보강근의 공헌분의 합으로 평가되는 전단내하력의 산정방법으로는 설명하기 어렵다. 즉, 콘크리트 공헌분은 사인장 균열 후에 일정하게 유지된다면 전단내하력은 증가하여야 한다. 이것은 콘크리트 공헌분은 사인장 균열 발생 후에 변형이 증가함에 따라 감소하지만, 이를 보완하여 전단보강근의 저항분이 증가하면서 일정한 값을 유지하는 것으로 판단된다.

Fig. 6에서도 Fig. 5와 같이, 사인장 균열 발생(105.0~122.5)까지는 전단내하거동에 전단보강비의 영향이 거의 없으나, 사인장 균열 발생후에는 전단보강비의 차가 전단내하거동에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

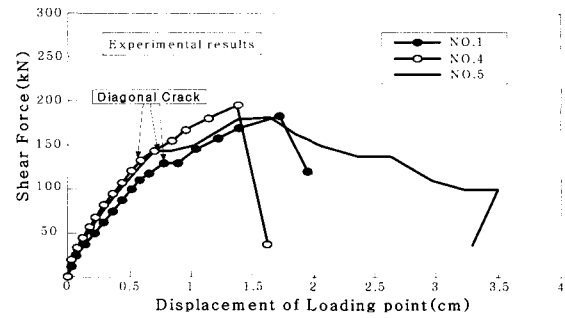


Fig. 7 Applied shear force - displacement curves

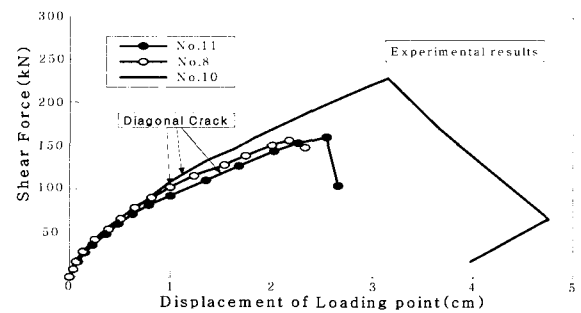


Fig. 8 Applied shear force - displacement curves

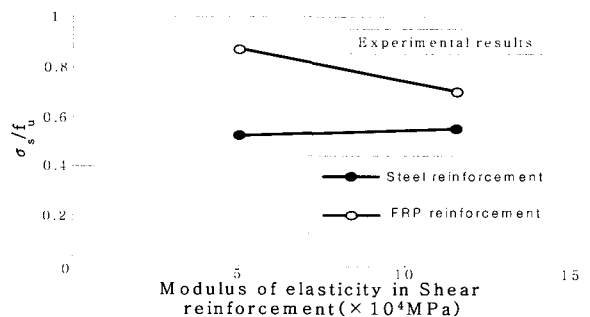


Fig. 9 The ratio of stress in shear reinforcement

3.3 전단보강근의 역학적 특성의 영향

Fig. 7, Fig. 8은 전단보강근의 역학적 특성이 콘크리트 보의 변위 거동에 미치는 영향을 알아보기 위한 것으로, Fig. 7은 주근에 철근을 이용한 콘크리트 보(No.1, No.4, No.5)에 대한 결과이고, Fig. 8은 주근에 FRP Rods를 이용한 콘크리트 보(No.8, No.10, No.11)에 대한 결과이다. Fig. 7, Fig. 8에 나타낸 보의 전단보강근비는 0.11~0.12%로 거의 일정 하며, 그림에서 알 수 있는 것처럼 전단보강근의 탄성계수의 차이가 변위거동에 미치는 영향은 사인장 균열 발생 전까지는 거의 없으며, 사인장 균열 발생후에 전단보강근의 탄성계수비에 따라 다른 거동을 보이고 있다. 그러나, 거동의 차이는 주근으로 다른 재질을 사용한 보의 변위 거동에 비하면 미미하다.

Table 3 Comparison between experimental results and computational results

Specimen	Shear force of Diagonal crack(kN)					Shear carrying capacity(kN)				
	Vc,exp	Eq.(1)	$(E_t/E_s)^{1/3}$	$(E_t/E_s)^{1/4}$	Eq.(2)	Vy,exp	Tsuji	Yokoi	Nakamura	Author
No.1	133.0	119.2 (0.90)	119.2 (0.90)	119.2 (0.90)	97.3 (0.73)	188.0	-	-	-	-
No.2	123.0	121.4 (0.99)	121.4 (0.99)	121.4 (0.99)	100.6 (0.82)	245.0	-	-	-	-
No.3	130.0	127.2 (0.98)	127.2 (0.98)	127.2 (0.98)	107.9 (0.83)	295.0	-	-	-	-
No.4	135.0	127.2 (0.94)	127.2 (0.94)	127.2 (0.94)	107.5 (0.80)	202.5	255.0 (1.26)	191.0 (0.94)	221.0 (1.09)	214.5 (1.06)
No.5	147.5	131.4 (0.89)	131.4 (0.89)	131.4 (0.89)	113.3 (0.77)	187.5	253.0 (1.35)	192.0 (1.02)	195.0 (1.04)	201.2 (1.07)
No.6	105.0	117.5 (1.12)	99.1 (0.94)	103.4 (0.99)	95.9 (0.91)	105.0	99.1 (1.94)	99.0 (0.94)	103.4 (0.99)	103.4 (0.99)
No.7	115.0	116.6 (1.01)	98.3 (0.86)	102.6 (0.89)	94.6 (0.82)	122.5	157.0 (1.28)	125.0 (1.02)	145.0 (1.18)	116.3 (0.95)
No.8	105.0	111.9 (1.07)	94.4 (0.90)	98.5 (0.94)	89.0 (0.85)	160.0	217.0 (1.36)	163.0 (1.02)	188.0 (1.18)	173.2 (1.08)
No.9	122.5	120.1 (0.98)	101.3 (0.83)	105.7 (0.86)	99.1 (0.81)	235.0	352.0 (1.50)	223.0 (0.95)	289.0 (1.23)	261.8 (1.11)
No.10	122.5	120.1 (0.98)	101.3 (0.83)	105.7 (0.86)	98.9 (0.81)	232.5	241.0 (1.04)	241.0 (1.04)	247.0 (1.06)	241.2 (1.04)
No.11	122.5	121.5 (0.99)	102.5 (0.84)	106.9 (0.87)	100.7 (0.82)	166.0	217.0 (1.31)	157.0 (0.95)	166.0 (1.00)	156.9 (0.95)
No.12	102.5	112.0 (1.09)	68.1 (0.66)	77.2 (0.75)	89.7 (0.88)	164.0	203.0 (1.24)	139.0 (0.85)	177.0 (1.08)	159.3 (0.97)
average	-	0.995	0.880	0.905	0.821	-	1.535	1.091	1.231	1.024
Standard deviation	-	0.070	0.088	0.069	0.47	-	0.248	0.061	0.085	0.060

Fig. 9은 보의 전단파괴 직전에 FRP 전단보강근이 받고 있는 평균응력을 알아보기 위해, 실험결과와 전단내하력(Table 3의 $V_{y,exp}$)에서 식(1)에 의한 콘크리트의 공헌분을 뺀 전단보강근의 공헌분을 구하고, 이 값으로부터 사제각 45도의 트러스 이론에 의해 전단보강근의 평균응력(σ_s)을 구하여, 평균응력과 전단보강근의 파단강도(f_s)와의 비를 전단보강근의 탄성계수에 대해서 나타낸 것이다. Fig. 9에서 실제로 나타낸 것이 철근이 주근인 경우이며, 파선으로 나타낸 것이 FRP Rods가 주근인 콘크리트 보이다. 여기서, FRP Rods를 주근으로 한 콘크리트에 대해서는 저자 등이 제안하고 있는 사인장 균열 발생후 파괴시의 콘크리트의 공헌분(식(4))의 저하를 고려하였다.

Fig. 9에 나타낸 것처럼, 주근이 FRP Rods의 경우는 철근의 경우에 비하여 평균적으로 파괴시의 전단보강근 응력비 크게 되는 것을 보이고 있으나, 전단보강근의 탄성계수의 차이가 파괴시의 전단보강근 응력비에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.4 파괴형태

본 실험의 모든 시험체에서 전단파괴가 일어났으며, 전단보강근으로 철근 또는 PC강봉을 사용한 보(No.1~No.3, No.10)에서는 사인장 균열 발생 후에 전단철근의 항복에 의해서 파괴가 일어났으며, 전단보강근으로 FRP Rods를 사용한 보(No.4~No.9, No.11~No.12)에서는 전단보강근인 FRP Rods

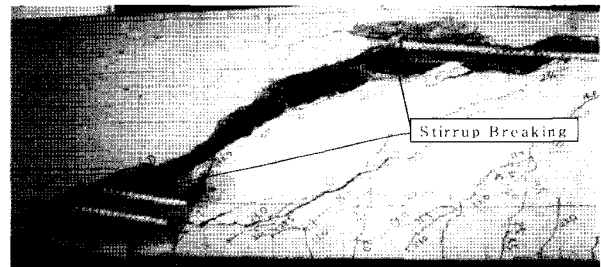


Photo 2 Failure mode in specimen(No.12)

의 절곡부 파단에 의해 파괴가 일어났다. Photo 2는 No.12 보의 파괴형상을 보이고 있으며, 전단보강근인 FRP Rods의 절곡부에서 파단이 발생하였음을 보이고 있다.

4. 전단내하력의 평가

Table 3에는 사인장 균열 발생 전단력($V_{c,exp}$)과 파괴 전단내하력($V_{y,exp}$)에 대해 실험결과와 기존의 연구에서 제안된 평가식에 의한 계산치를 나타내고 있다.

기준에 제안된 FRP Rods 보강 콘크리트 보의 파괴 전단내하력의 평가식은 소개하면 다음과 같다.

Tsuji et al.(1988) 등은 전단보강이 없는 콘크리트 보의 전단내하력 V_c 를 식(1)를 기초로 탄성계수비를 고려한 환산단면적 $A_f(E_f/E_s)$ 를 도입하여 구하는 방법을 제안하고 있다.

Yokoi et al.(1992) 은 Tsuji 등의 방법을 기초로 전단보강근의 변형률에 따라서 저하율(0.8~1.0)을 고려하고, 전단보강근의 공헌분 V_s 는 트러스 이론의 계산치를 0.5배 하였다.

Nakamura and Higawa (1995) 는 콘크리트 분담분 V_c 에 탄성계수비($(E_f/E_s)1/4$)를 고려하고, 전단보강근의 공헌분 V_s 는 전단보강근의 절곡성형부의 강도저하를 고려하고 또한 전단보강근의 탄성계수비($(E_f/E_s)0.4$)를 곱한 식을 제안하였다.

Niwa et al.(1996)이 제안하고 있는 FRP보강 콘크리트 보의 전단내하력 산정식은 Lattice 모델(Choi and Niwa 1994; Niwa et al., 1995)의 수치해석결과를 기초로, 콘크리트 공헌분과 전단보강근의 공헌분을 정량적으로 평가한 것하여 수정 트러스 이론에 기초로 다음과 같이 제안 했다.

$$V_{uf} = V_{cu} + V_{su} \quad (3)$$

여기서, V_{uf} 는 FRP보강 콘크리트 보의 파괴 전단내하력, V_{cu} 는 식(4)에 의한 파괴시의 콘크리트의 공헌분, V_{su} 는 식(5)에 의한 파괴시의 전단보강근의 공헌분이다.

콘크리트 공헌분은 FRP 보강 보에서 사인장 균열 발생 후, 콘크리트 공헌분의 저하를 고려하였으며 다음과 같다.

$$V_{cu} = 0.65 V_c ((E_f/E_s)1/4) \quad (4)$$

여기서, V_c 는 식(1)에 나타난 콘크리트 보의 사인장 균열 발생시의 전단력이며, E_f 는 FRP의 탄성계수, E_s 는 철근의 탄성계수이다.

전단보강근의 공헌분에 대한 평가식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 0 < k \leq 7, & \quad V_{su} = 0.8 V_s \\ 7 < k & \quad V_{su} = [0.8 - 0.04(k-7)] V_s \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 k 는 역학계수($r_w f_u / f_c$), V_s 는 트러스 이론($V_s = A_v f_w y (d/s)$)에 있어서 $f_w y$ 대신에 FRP Rods의 절곡성형부의 강도 저하를 고려한 파단강도를 이용한 것이다.

주근에 철근, 전단보강근에 FRP Rods를 이용한 콘크리트 보(No.4, No.5)의 경우, 전단내하력의 산정에는 파괴시의 전단보강근의 공헌분의 저하만을 고려하였으며, 주근에 FRP Rods, 전단보강근에 PC강봉을 이용한 콘크리트 보(No.10)의 경우에는 콘크리트 공헌분의 저하만을 고려했다.

Tsuji 등이 제안한 방법은 트러스 이론의 계산치 V_s 에 수정을 가하지 않았기 때문에 전체적으로 실험치를 과대평가하고 있다. Nakamura 등이 제안한 산정식은 대략적으로 타당하지만 약간 과대평가되는 경향이 있다. Yokoi 등이 제안한 방법에 의한 산정치는 비교적 좋은 일치를 보이고 있지만, 전단보강근의 공헌분 V_s 의 산정에 있어서, 트러스 이론치에 0.5배를 곱한 것에 대한 명확한 근거가 없다. 저자들이 제안한 산정법에 의한 계산결과와 실험결과와의 비는 평균 1.024, 표준편차가 6%로 예측정도가 매우 양호하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 철근 및 FRP Rods를 보강근으로 사용한 콘크리트보에 대한 전단실험을 수행하여, 보강근의 역학적 특성이

콘크리트 보의 변위거동 및 전단내하력에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다

- (1) 주근의 탄성계수가 작으면, 사인장 균열 발생시의 전단력이 저하된다는 것이 실험에서 확인되었다. 그 원인으로는 주근의 탄성계수가 작으면 보의 변위가 크게 발생하여, 다월작용, 골재의 맞물림 작용 및 아치작용이 저하되기 때문으로 판단된다.
- (2) 주근의 탄성계수의 차이는 콘크리트 보의 전단거동에 큰 영향을 미치지 않지만, 전단보강근의 탄성계수의 차이가 전단거동에 미치는 영향은 작고, 본 실험의 범위내에서는 전단내하력에 미치는 영향은 거의 없었다.
- (3) 전단내하력에 대한 실험결과와 여러 제안식에 의한 평가결과, 저자 등이 제안한 산정식에 의한 결과가 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 이용은, 김진철, 이찬영, 안중근 (1999). 콘크리트구조물의 내구성향상을 위한 시멘트종류별 특성연구, 한국도로공사 도로연구원 연구보고서.
- 윤영수, 배영훈 (2003). "크기효과를 고려한 고강도 콘크리트 보의 전단강도 예측식 제안", 한국콘크리트학회 2003년도 봄 학술발표회논문집, 제15권, pp 878-883.
- Choi, I.C. and Niwa, J. (1994). "Shear Analysis of Reinforced Concrete Beams Using Lattice Model", Proc. of JCI, Vol 16, No 2, pp 563-568.
- Niwa, J., Choi, I.C. and Tanabe, T. (1995). "Analytical Study on the Shear Resisting Mechanism of Reinforced Concrete Beams", J. of JSCE, Vol 26, No 508, pp 79-88.
- Nakamura, H. and Higai, T. (1995). "Evaluation of Shear Strength of Concrete Beams Reinforced with FRP", J. of JSCE, Vol 26, No 508, pp 89-99.
- Niwa, J., Choi, I.C., Mishima, T. and Suzuki, A. (1996). "Evaluation of Shear Carrying Capacity of Concrete Beams Reinforced with FRP Rods by the Lattice Model", J. of JSCE, Vol 31, No 538, pp 105-114.
- Niwa, J., Yamada, K., Yokozawa, K. and Okamura, H. (1986). "Revaluation of the Equation for Shear Strength of Reinforced Concrete Beams without Web Reinforcement", Proc. of JSCE, Vol 5, pp 167-176.
- Tsuji, Y., Saite, H., Sekijima, K., and Okawa, H. (1988). "Flexural and Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with FRP", Proc. of JCI, Vol 10, pp 547-552.
- Yokoi, K., Shima, H. and Mizuguchi, H. (1992). "Applicability of Shear Strength Equation of RC beam for Reinforced Concrete Beams with FRP Rods", Proc. of JCI, Vol 14, pp 713-716.

2003년 9월 22일 원고 접수

2004년 1월 7일 최종 수정본 채택