



FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 유효 변형률 예측에 대한 실험적 연구

황현복¹⁾ · 이정윤^{1)*}

¹⁾성균관대학교 건축공학과

An Experimental Study on the Effective Strain of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Fiber Reinforced Polymer

Hyun-Bok Hwang¹⁾ and Jung-Yoon Lee^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

ABSTRACT The shear failure modes of FRP strengthened concrete beams are quite different to those of the beams strengthened with steel stirrups. When the beams are externally wrapped with FRP composites, many beams fail in shear due to concrete crushing before the FRP reaches its rupture strain. In order to predict the shear strength of such beams, the effective strain of the FRP must be known. This paper presents the results of an experimental study on the performance of reinforced concrete beams externally wrapped with FRP composites and internally reinforced with steel stirrups. The main parameters of the tests were FRP reinforcement ratio, the type of fiber material (carbon or glass) and configuration (continues sheets or strips). The experimentally observed effective strain of the FRP was compared with the strain calculated using a proposed method.

Keywords : fiber reinforced polymer(FRP), effective strain of FRP, shear strength, failure modes

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 외부 환경의 영향을 받아 화학적, 물리적 성질이 변화하며 구조물의 내력이 감소하는 경우가 있다. 철근콘크리트 구조물에 대한 보수·보강으로 강판보강법이 사용되기도 하였지만, 강판보강법은 기존 구조물과의 일체성 확보 및 시공이 어렵고, 보강재의 자중이 무거워 취급이 어려운 점이 있다. 한편 섬유보강재(fiber reinforced Polymer, 이하 FRP, 이 논문에서 섬유는 연속섬유를 의미함)를 이용한 보강법은 보강재의 자중이 가볍고, 시공이 간편하며, 부식에 강하기 때문에 사용 범위가 점차 확대되고 있다. FRP로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단내력에 대하여 기존 연구자들은 현행 ACI 전단강도식에 섬유의 전단저항성분(V_{frp})을 증첩하여 계산하였다. 섬유 응력(f_{frp})은 섬유의 양과 콘크리트의 압축강도의 상대적 차이에 따라서 달라지므로 섬유의 유효 변형률을 이용하여 섬유 내력을 계산하였다. 또한 섬유의 유효압축변형률은 파괴모드에 따라서 달라진다. 부착 파괴가 발생하지 않는 섬유보강 콘크리트의 전단파괴모드는 전단보강철근이 항복한 이후에 콘크리트가 압축파괴(섬유는 탄성 상태)하는 경우와 전단보강철근이 항복한 이후에 섬유가 파단하는 두 가지 모드로 크게 구분

할 수 있다. 전자의 파괴모드에서는 부재가 전단파괴 할 때 섬유가 파단강도에 도달하지 않기 때문에 섬유의 탄성계수(E_f)에 섬유의 변형률(ϵ_f)을 곱하여 섬유의 전단기여분을 평가할 수 있다. 후자의 파괴모드에서는 부재가 전단파괴 할 때 섬유는 파단강도(f_{fr})에 도달하므로 파단강도를 사용하여 섬유의 전단저항분을 계산하여야 한다.

전단파괴시의 섬유의 유효변형률에 대해서는 Chaallal 등¹⁾, Thiantafillou²⁾, Khalifa 등³⁾, Teng 등⁴⁾이 여러 식을 제안하였다. 국내에서는 심 등⁵⁻⁷⁾이 섬유보강된 철근콘크리트 보의 전단강도를 예측하기 위한 해석 모델을 제안하였다. 심 등⁵⁻⁷⁾은 소성이론과 계면전단파괴를 고려하여 섬유도달응력을 평가하였다.

이 논문에서는 11개의 FRP 보강 철근콘크리트 보를 실험하여 전단파괴시의 섬유의 유효변형률을 측정하였다. 실험 결과에 근거하여 콘크리트 선행 파괴와 섬유 선행 파괴의 경계점, 즉 섬유 파단과 콘크리트 압축파괴가 동시에 발생하는 경계점을 파괴시의 재료의 응력 상태에 의하여 구한 후에 이를 이용하여 전단파괴시의 섬유의 유효변형률을 예측한 평가법을 검증하였다.

2. 실험 계획 및 방법

FRP로 보강된 11개의 철근콘크리트 보를 제작하였다. 실험체의 주요 변수는 섬유의 종류(탄소섬유와 유리섬유), 섬유의 양, 섬유의 분포 방법(전면부착과 스트립(strip)형 부

*Corresponding author E-mail : jylee@skku.ac.kr
Received May 15, 2006, Accepted October 30, 2006
©2007 by Korea Concrete Institute

착)이다. 섬유 부착 방법에는 일반적으로 전단면 감싸기(wrapping), 측면과 밑면 부착(U jacking), 측면 부착(side bonding)의 3가지 종류가 있다. 기존 연구자의 실험 결과^{3, 4)}에 의하면 특별한 정착 장치가 없이 부착된 측면 부착(side bonding)의 경우는 섬유가 파단하거나 콘크리트가 압축파괴를 일으키기 이전에 대부분 부착에 의하여 파괴되었다. 그러나 전단면 감싸기(wrapping) 방법에 의하여 부착된 보의 대부분은 부착파괴가 발생하지 않고 섬유 파단이나 콘크리트 압괴에 의하여 전단파괴하였다. 이 연구에서는 부착파괴 하지 않고 콘크리트의 압축파괴나 섬유 파단에 의하여 전단파괴하는 보의 섬유 유효압축변형률을 측정하는 것을 목적으로 한다. 따라서 섬유를 전단면 감싸기(wrapping)방법에 의하여 부착하여 부착파괴를 방지하고 전단파괴를 유도하였다. 11개 실험체의 재료 특성은 Table 1과 같다. 실험체는 탄소섬유를 전단면에 부착한 C-시리즈 실험체 2개와 유리섬유를 전단면에 부착한 G-시리즈 실험체 4개, 유리섬유를 스트립형으로 부착한 GS-시리즈 실험체 4개 및 섬유를 보강하지 않은 기준 실험체 B0로 구성되었다.

2.1 실험 재료

이 실험에 사용된 콘크리트의 설계 압축강도는 40 MPa 이었고, 타설후 실험 직전에 측정된 실제 콘크리트 압축강

도는 35 MPa이었다. 보의 주철근은 FRP로 보강된 RC 보의 휨 인장 파괴를 방지하기 위하여 항복강도가 524.5 MPa 인 고강도 철근을 사용하였다. 횡방향철근은 D10 철근을 사용하였으며 200 mm간격으로 11개 실험체에 동일하게 배근하였다. 보강에 사용된 섬유는 A사 제품을 사용하였다. 탄소섬유(CFRP)의 인장강도 f_{fr} 은 4,510 MPa, 탄성계수 E_f 는 250 GPa이며, 파단변형률 ϵ_{fr} 은 0.018이었다. CFRP쉬트 1매당 두께 t_f 는 0.11 mm이었다. 유리섬유(GFRP)의 인장강도는 350 MPa 이고, 탄성계수는 17 GPa 이었다. GFRP의 파단변형률은 0.02이고 쉬트 1매당 두께는 0.5 mm이었다 (Table 2 참조).

2.2 실험체 형상 및 제작

FRP로 구축된 RC 보의 전단강도 평가를 위하여 Fig. 1과 같이 11개 실험체를 제작하였다. 모든 실험체는 휨파괴 이전에 전단파괴할 수 있도록 계획하였다. 보 단면의 크기는 350 mm×450 mm이며, 길이는 2,800 mm이다. 콘크리트를 타설할 때 보의 폭을 일정하게 유지하기 위하여 각목과 전산볼트로 거푸집을 고정하였다. 콘크리트 타설은 레미콘으로 제작된 콘크리트가 응결되기 이전에 종료되었으며, 타설이 끝난 후 비닐로 덮고 바닥에 물을 뿌려 수분의 증발을 억제하였다. 실험체를 타설한 지 3 주후부터 FRP보강을 위해 RC 보의 모서리를 그라인딩

Table 1 Specification of specimens

Series	Beams	f_{ck} (MPa)	a/d	Shear steel reinforcement			Longitudinal tensile reinforcement		FRP composites				
				S (mm)	ρ_l (%)	f_{ly} (MPa)	ρ_l (%)	f_{ly} (MPa)	Fiber	Distribution	s_f (mm)	n_f	ρ_f (%)
B	B0	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	-	-	-	-	-
C	C1	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Carbon	Sheets	-	1	0.063
	C2	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Carbon	Sheets	-	2	0.126
G	G1	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Glass	Sheets	-	1	0.286
	G2	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Glass	Sheets	-	2	0.572
	G3	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Glass	Sheets	-	3	0.858
	G4	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Glass	Sheets	-	4	1.144
GS	GS1	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Glass	Sheets	300	1	0.095
	GS1a	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Glass	Sheets	200	1	0.143
	GS3	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Glass	Sheets	200	3	0.429
	GS5	35.0	3	200	0.204	300.0	3.67	524.5	Glass	Sheets	200	5	0.714

Note: f_{ck} is the compressive strength of concrete, s is the spacing of shear steel rebars, ρ_l is the ratio of shear steel reinforcement, f_{ly} is the yield stress of shear steel rebars, ρ_l is the ratio of longitudinal tensile reinforcement, f_{ly} is the yield stress of longitudinal tensile steel rebars, s_f is the spacing of FRP strips, n_f is the number of FRP layers, ρ_f is the ratio of FRP.

Table 2 Material properties of steel bars and FRPs

Materials	Section area (mm ²)	t_f (mm)	ϵ_y or ϵ_{fr}	f_y or f_{fr} (MPa)	E_s or E_f (MPa)
D10 (Stirrups)	71.3	-	0.0017	300	180,000
D25 (Long. reinforcement)	50.7	-	0.0028	525	190,000
Carbon FRP (Shear reinforcement)	-	0.11	0.0180	4,510	250,000
Glass FRP (Shear reinforcement)	-	0.50	0.0200	350	17,000

Note: ϵ_y is the yield strain of steel bars, f_y is the yield strength of steel bars, E_s is the elastic modulus of steel bars, ϵ_{fr} is the rupture strain of FRP, t_f is the thickness of FRP, E_f is the elastic modulus of FRP.

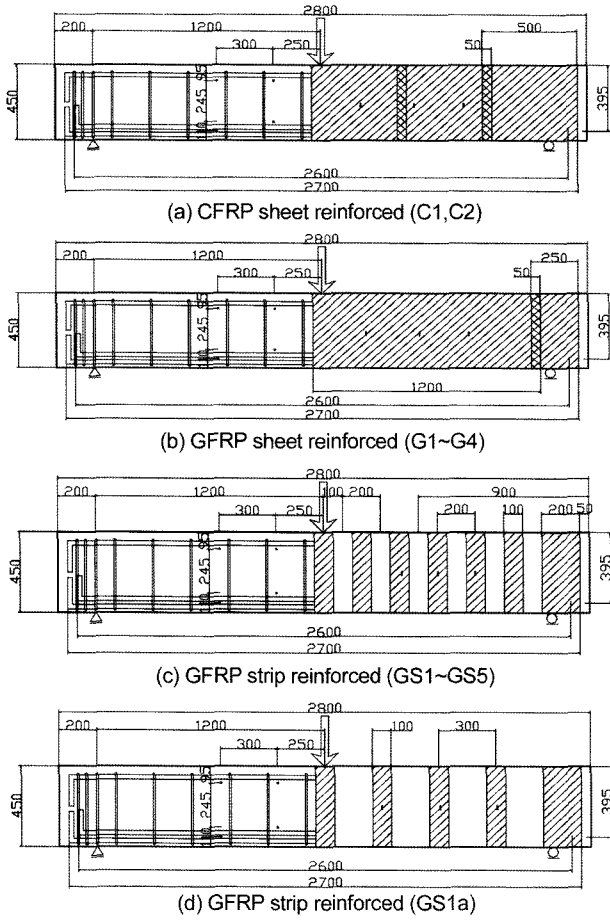


Fig. 1 Dimensions and reinforcement of test beams (unit: mm)

하고 프라이머를 도포하였다. 프라이머 도포는 2번에 걸쳐서 실시하였으며, 도포한 후에 6일 동안 양생하였다. 프라이머가 굳고 난후에 FRP에 에폭시를 함침하여 RC 보를 전단면 감싸거나 스트립형 부착에 의하여 보강하였다. 에폭시는 기성 제품을 사용하여 주재와 경화제의 혼합비율을 2:1 비율로 배합하여 사용하였다. FRP를 전단면에 보강한 후, 2주일 동안 양생하였다.

2.3 가력 및 측정 방법

주인장철근의 변형률을 확인하기 위하여 주인장철근의 중앙부에 변형률게이지를 부착하였으며, 전단보강철근의 변형률을 측정하기 위하여 전단 위험 단면에 총 6개의 변형률게이지를 부착하였다. 또한 섬유를 측정하기 위하여 전단 위험 단면에서 좌우로 총 6개의 게이지를 부착하였다. 실험체의 중앙 하부에 LVDT를 설치하여 중앙부 처짐을 측정하였다. 전단 위험 단면에서 발생하는 부재축 방향, 부재축과 직각 방향의 평균변형률과 전단변형률을 Fig. 2와 같이 실험체 측면에 총 10개의 LVDT를 설치하여 측정하였다. 하중은 중앙부 집중하중으로 가력하였으며, 가력 속도가 분당 2~3 kN이 되도록 하중 속도를 조절하였다. 모든 데이터를 2초당 1번으로 수집하였으며 하중은 최대 강도의 85% 이하로 떨어질 때까지 계속하여 가력하였다.

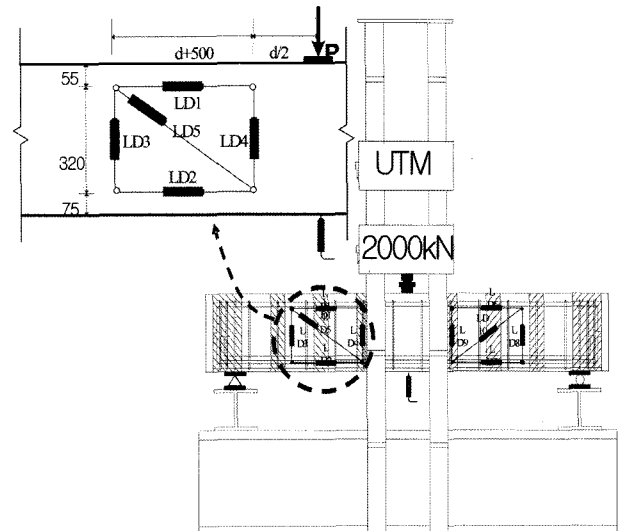


Fig. 2 Loading system and locations of LVDTs (unit: mm)

3. 실험 결과

3.1 실험체 파괴 양상

실험체 C2를 제외한 모든 실험체는 주인장철근이 항복하기 이전에 전단 파괴하였다. C2는 인장철근이 항복한 이후에 콘크리트가 압축파괴 하였다. 섬유를 전단면으로 감싼 실험체(C-series 실험체)에서는 하중이 낮은 단계에서는 균열 발생을 확인할 수가 없었다. 하중이 최대 하중에 가까워짐에 따라서 보를 감싼 섬유의 일부가 파단하였다. 섬유의 일부가 파단하였지만 부재가 파괴하기 직전에 측정된 섬유의 변형률은 파단변형률보다 작았다. 스트립형으로 보강된 실험체(G-series와 GS-series 실험체)에서는 섬유를 감싸지 않은 부분에서 콘크리트 균열을 관찰할 수 있었다. 스트립형으로 보강된 보가 최대 하중에 가까워짐에 따라서 섬유의 일부가 파단하였지만, 최대 하중에 도달하기 직전에 측정된 섬유의 변형률은 파단변형률보다 작았다. 모든 보는 콘크리트의 압축 파괴에 의하여 파괴되었으며, 부착이나 국소 부위의 섬유파단에 의한 파괴는 관찰되지 않았다. 각 시리즈의 실험체 파괴 양상을 대표하는 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

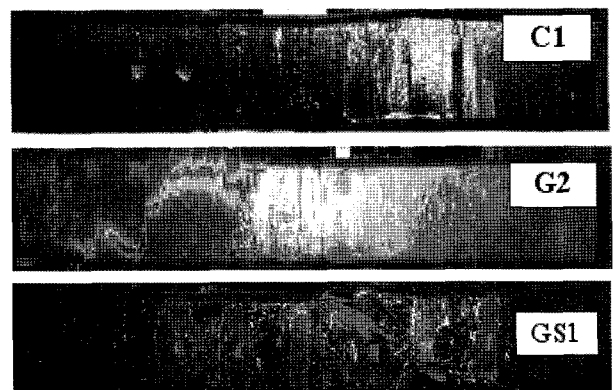


Fig. 3 Photos of specimens after test

3.2 하중-처짐 곡선

실험체의 하중-처짐 곡선을 Fig. 4에 표시하였다. Fig. 4에서는 기본실험체(B0)와 섬유보강 실험체의 거동을 비교하여 표시하였다. 그림에서 섬유에 의하여 보강된 실험체의 최대 하중은 보강된 섬유의 양이 증가함에 따라서 증가함을 알 수 있으며, 스트립의 간격이 감소할수록 증가함을 알 수 있다. 예를 들어 유리 섬유 1매에 의하여 보강된 실험체 G1의 최대 하중은 938 kN이었지만, 4매에 의하여 보강된 실험체 G4의 최대 하중은 1,379 kN이었다. 또한 섬유에 의하여 보강된 실험체의 처짐도 보강된 섬유의 양이 증가함에 따라서 증가하였다. 모든 실험체의 최대 하중과 최대 하중에 상응하는 처짐값 및 파괴모드를 Table 3에 표시하였다.

3.3 횡방향 변형률의 분포

섬유 보강 실험체가 최대 하중에 도달했을 때의 유효 변형률을 3가지 종류의 측정 장치로 측정하였다. Fig. 5는 LVDT, 섬유에 부착된 변형률계이지 및 전단보강철근

에 부착된 변형률계이지에 의하여 측정된 값을 나타낸다. 그림에서 x축은 실험체의 한 쪽 지점에서부터 측정 장치까지 떨어진 거리를 나타내며, y축은 실험체가 최대 하중에 도달했을 때의 3가지 종류의 측정 장치에 의하여 계측된 측정값을 나타낸다. Fig. 5에서 보가 최대 하중에 도달했을 때 LVDT와 섬유에 부착된 변형률계이지 값은 섬유의 파단변형률보다 작다는 것을 알 수 있다. 그러나 내부에 있는 전단보강철근은 철근의 항복변형률보다 큰 값을 나타내었다. 또한 LVDT와 섬유의 횡방향 변형률은 섬유의 양이 증가할수록 감소하였다. 모든 변형률은 일정한 값을 나타내지 않고 전단 위험 지역(가력 지점에서 보의 유효폭 만큼 떨어진 지점)에서의 변형률이 지점이나 가력점 부근의 변형률보다 크게 측정되었다.

4. FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 유효변형률 평가

4.1 섬유의 유효 변형률 예측 방법

섬유의 전단파괴모드(부착파괴모드 제외)를 2가지로 구

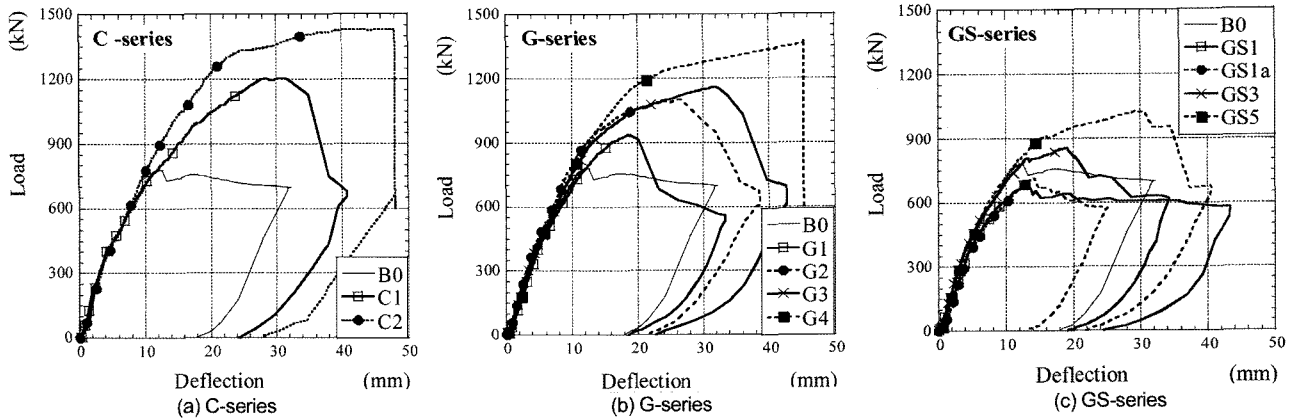
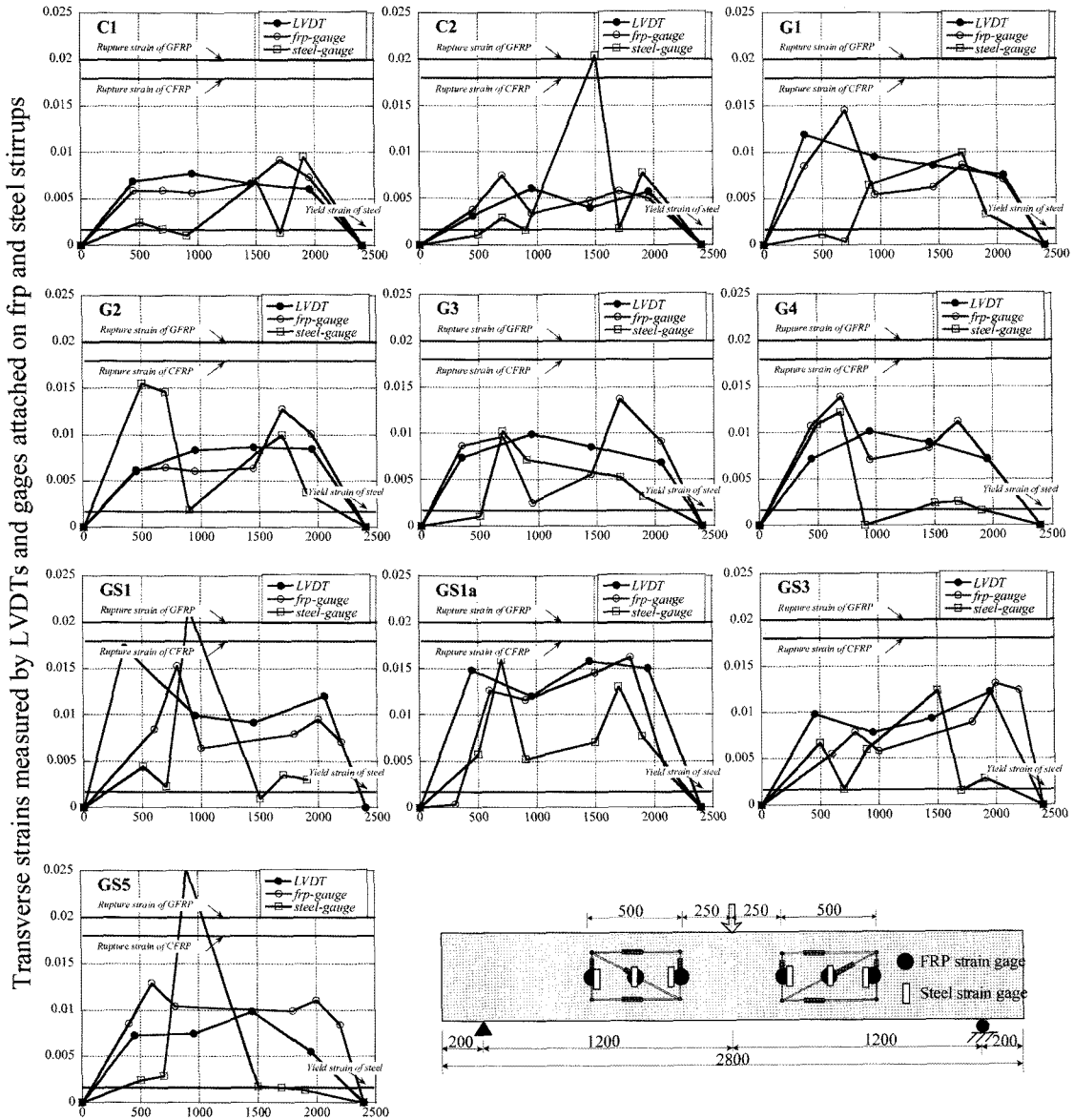


Fig. 4 Load - deflection curves of test beams strengthened by fiber reinforced polymer

Table 3 Test results

Series	Beams	P_n (kN)	Δ_n (mm)	Failure mode	Shear steel reinforcement longitudinal tensile reinforcementFRP composites		
					$\epsilon_{fe-LVDT}$	ϵ_{fe-frp}	$\epsilon_{se-steel}$
B	B0	782.5	12.7	S	0.012149	-	0.007575
C	C1	1206.3	30.6	S	0.007748	0.009233	0.009555
	C2	1432.0	41.8	F	0.006139	0.007471	0.020446
G	G1	938.0	18.5	S	0.011928	0.014521	0.009895
	G2	1103.0	26.5	S	0.008766	0.012817	0.015565
	G3	1162.5	32.0	S	0.010001	0.011716	0.010261
	G4	1379.0	45.3	S	0.010123	0.010942	0.012256
GS	GS1	639.0	14.0	S	0.017283	0.015333	0.021477
	GS1a	712.5	14.3	S	0.015886	0.016333	0.015966
	GS3	855.0	19.0	S	0.012250	0.013160	0.012421
	GS5	1026.5	29.5	S	0.009886	0.011957	0.025210

Note: P_n is the load, Δ_n is the deflection at the mid-span corresponding to P_n , $\epsilon_{fe-LVDT}$ is the strain measured by LVDT, ϵ_{fe-frp} is the strain measured by gage attached on frp sheet, $\epsilon_{se-steel}$ is the strain measured by gage attached on stirrup



Locations of LVDTs and gages attached on FRP and steel stirrups

Fig. 5 Transverse strains measured by LVDTs and gages attached on FRP and stirrups

분하고 두 가지 파괴모드의 경계점인 균형파괴섬유비를 이용하여 파괴시의 섬유유변형률을 예측하였다. 섬유유변형률에 의하여 보강된 철근콘크리트 보의 전단강도는 전단보강철근이 항복한 이후에 콘크리트가 압축파괴(섬유는 탄성 상태)하는 경우(파괴모드 1)와 섬유가 파단하는 경우(파괴모드 2)로 구분할 수 있다. 후자의 경우는 파괴시의 섬유유변형률을 이용하여 섬유의 전단보강성분을 구해야 한다. 선행 연구⁸⁾에서는 두 파괴모드의 경계(균형파괴섬유비)를 식(1)과 같이 유도하였다.

$$\rho_{frpm} f_{fr} \sin \beta = \left(-\frac{f_{ck}}{0.8 + 170(\epsilon_l + \epsilon_{fr})} \frac{\epsilon_l}{\epsilon_l + \epsilon_{fr}} - \rho_l f_{ly} \right) \quad (1)$$

여기서 ρ_{frpm} 은 균형파괴섬유비, f_{fr} 는 섬유의 파단강도, β 는 섬유의 배근 방향, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, ϵ_l 는 부재축 방향 변형률, ϵ_{fr} 는 섬유의 파단변형률, ρ_l 은 전단보강철근비, f_{ly} 는 전단보강철근 항복강도를 나타낸다.

전단보강된 섬유의 양이 식 (1) 이하일 경우에 부재는

파괴모드 2에 의하여 파괴한다. 그러므로 보의 전단강도는 식 (1)의 섬유의 응력(f_f)을 파단강도(f_{fr})로 대체하여 전단기여분(V_{frp})을 평가한다. 한편 섬유양이 식 (1) 이상일 경우에 부재는 파괴모드 1에 의하여 파괴한다. 이 경우에 정확한 전단강도를 예측하기 위해서는 콘크리트가 압축 파괴할 때의 섬유의 유효응력을 계산하여야 한다.

Fig. 6은 식 (1)에 의하여 계산된 최대 섬유의 양을 실선으로 나타내고 있다. 전단보강철근의 양을 일정하게 고정할 경우에 최대 섬유의 양은 콘크리트의 압축강도가 증가하면 증가하고, 섬유의 변형률이 증가하면 감소한다. Fig. 6에 표시된 점선은 식(2)와 같이 섬유의 변형률이 증가함에 따라서 선형적으로 증가하는 섬유의 양을 표시하고 있다.

$$\rho_f f_f \sin \beta = \rho_f E_f \epsilon_f \sin \beta \quad (2)$$

여기서 E_f 는 섬유의 탄성계수이다. 섬유의 파단변형률(ϵ_{fr})이 0.0015, f_{fr} 가 4,000 MPa이며, f_{ck} 가 40 MPa인 경우에

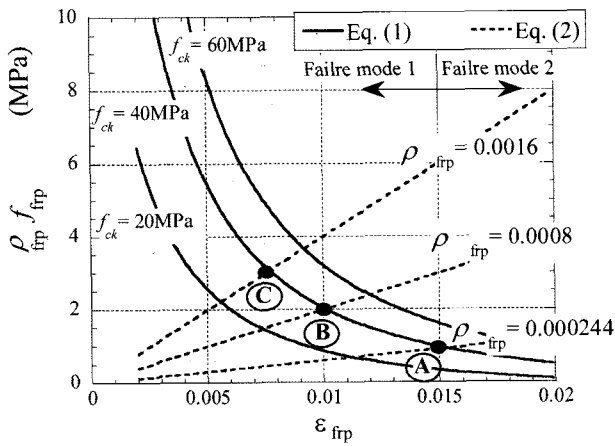


Fig. 6 Calculation of the effective strain of FRP composites using the maximum amount of FRP composites

식 (1)에 의하여 계산된 최대 섬유 양 ($\rho_{frp, m}$)은 Fig. 6의 A점이 되며 최대섬유비($\rho_{frp, m}$)는 0.000244가 된다. 보에 사용한 섬유의 비(ρ_{frp})가 0.000244이면 식 (2)에 의하여 계산된 섬유의 양은 섬유의 변형률이 증가함에 따라서 증가하여 A점에서 식 (1)의 최대 섬유양과 같게 된다. 따라서 파괴는 파괴모드 1과 2의 경계가 된다.

만일 보에 사용한 섬유의 비가 0.0008이 되면 식 (2)에 의하여 계산한 섬유의 양이 증가하여 그림의 B점에서 식 (1)에 의하여 계산된 섬유의 양과 같게 된다. 이러한 보에 사용한 섬유비(0.0008)가 최대 섬유비(0.000244)보다 많기 때문에 섬유가 파단하지 않았음을 의미하며 (파괴모드 1), 콘크리트가 압축파괴할 때 섬유의 유효 변형률($\epsilon_{frp, e}$)은 Fig. 6의 B점 0.01이 된다. 섬유의 비가 더욱 증가하여 0.0016일 경우에는 식 (2)에 의하여 계산되는 섬유의 양은 더욱 증가하여 C점에서 식 (1)의 최대 섬유양과 같게 된다. 따라서 섬유의 유효변형률은 0.0077이 되며, 이 값을 이용하여 섬유전단강도를 계산할 수 있다.

4.2 섬유의 유효변형률 비교

Fig. 7에서는 실험에서 LVDT와 섬유에 부착된 변형률

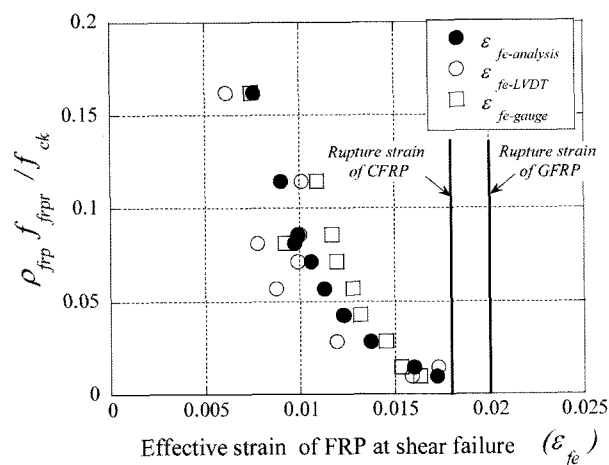


Fig. 7 Comparison between the experimental and calculated effective strains of FRP using a proposed method

게이지에 의하여 측정된 섬유의 유효변형률과 제안된 Fig. 6의 평가법에 의하여 예측된 유효변형률을 비교하였다. 그림에서 섬유의 유효변형률은 섬유의 양이 증가함에 따라서 감소함을 알 수 있다. 또한 LVDT의 측정값이 변형률 게이지에서 측정된 값보다 다소 작았다. 섬유의 양이 가장 작은 실험체 GS1a의 유효변형률은 0.016333으로 파단변형률에 근접하였지만 실험체 C1은 0.009555이었다. Fig. 7에서 제안된 평가법과 실제 실험값은 매우 유사함을 알 수 있다.

4.3 기존 제안식과 섬유의 유효변형률 비교

Table 4는 전단파괴하는 섬유의 유효변형률에 대한 기존의 예측식을 나타내고 있다. 이 논문에서는 기존의 제안식과 선행 연구에서 제안한 방법을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 기존식에서 Triantafillou와 Antonopoulou이 제안한 식은 탄소 섬유와 아라미드 섬유에 대한 평가식이다. 캐나다 기준¹⁰⁾에서는 아라미드 섬유에 대한 평가식을 유리 섬유에 대한 평가식으로 적용하여도 결과에 큰 차이가 없다고 지적하였기에 이 논문에서도 유리 섬유 보강 실험체의 실험 결과를 아라미드 섬유 평가식의 결과와 비교하였다. Fig. 8에서 Chaallal 등에 의하여 제안한 값은 섬유 파단변형률의 80%로 실제값을 과대 또는 과소평가함을 알 수 있다. Triantafillou와 Antonopoulou

Table 4 Various equations for the effective strains of FRP

Reference	$\epsilon_{frp, e}$
Chaallal et al. ¹⁾	$0.8\epsilon_{fr}$
Triantafillou and Antonopoulos ⁹⁾	$0.17 \left(\frac{f_{ck}}{E_f \rho_f} \right)^{0.30} \epsilon_{fr}$ for CFRP
	$0.048 \left(\frac{f_{ck}}{E_f \rho_f} \right)^{0.47} \epsilon_{fr}$ for AFRP
Khalifa et al. ³⁾	$(0.5622(E_f \rho_f)^2 - 1.2188E_f \rho_f + 0.778)\epsilon_{fr}$

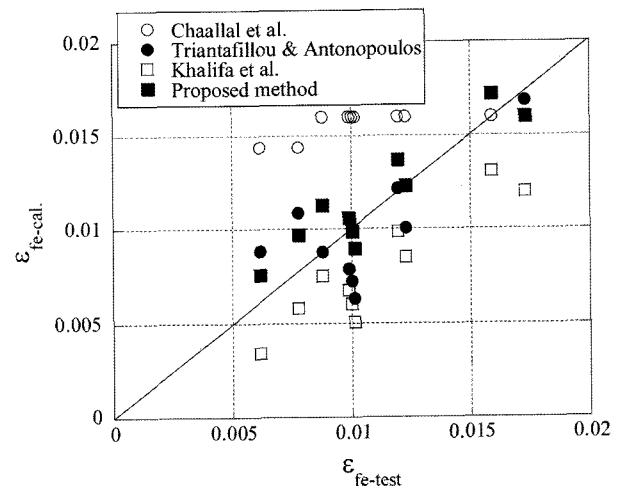


Fig. 8 Comparison between the experimental and calculated effective strains using various effective strain equations

의 제안식 및 Khalifa 등의 제안식은 Chaallal 등의 제안식보다 정확하게 유효변형률을 예측하였고 두 제안식의 변동계수는 각각 28.4% 및 17.0%로 예측하였다. 한편, 이 논문에서 제안한 방법에 의한 유효변형률과 실제변형률에 대한 변동계수는 12.9%로 비교한 4가지 방법 중에서 가장 정확한 결과를 나타내었다.

5. 결 론

이 연구에서는 FRP로 보강된 RC 보의 전단강도 평가를 위하여 11개의 실험체에 대한 실험을 수행하여 파괴 모드 및 파괴시의 섬유유 유효변형률을 측정하였다. 보강된 모든 보는 섬유유가 파단하기 이전에 콘크리트가 압축파괴 하였다. 또한 섬유유의 유효변형률은 섬유유의 양이 증가함에 따라서 감소하였다. 실험에서 측정한 섬유유의 유효변형률을 제안한 방법에 의하여 계산한 유효변형률과 비교하였다. 균형섬유비 및 파괴시의 재료의 응력 상태로부터 계산되는 제안 방법은 변동계수 12.9%에 의하여 실제 유효변형률을 예측하였다.

이 연구에서는 선행 연구에서 제안한 전단파괴하는 섬유보강보의 유효변형률 평가식을 검증하기 위하여 전단면 감싸기 방법에 의하여 실험을 수행하였다. 전단면 감싸기 방법은 측면부착보강법에 비하여 비실용적인 보강 방법이지는 않지만, 이 연구의 주요 논점은 보강 방법이 무엇인지가 아니라 섬유보강부재의 파괴모드가 무엇인지에 중점을 두었기 때문에 부착파괴의 영향이 적은 전단면 감싸기 방법을 택하였다. 파괴모드의 관점에서 볼 때 실용적인 방법인 측면과 밑면 부착, 측면 부착의 경우도 부착억제장치에 의하여 부재가 전단파괴할 수 있다. 실제 섬유 보강 콘크리트의 실제 구조물은 부착과 전단이 혼재하는 경우가 많이 있으므로 가장 바람직한 연구는 파괴모드가 혼재하는 경우에 대한 평가법 개발이다. 그러나 혼재하는 두 가지 파괴모드를 실험적 방법이 아닌 해석적 방법으로 동시에 평가하는 것은 매우 어렵기 때문에 이 연구에서는 각각의 파괴모드를 별개로 하여 우선 전단파괴하는 경우에 대한 유효변형률 평가법을 제안하고 이를 실험을 통하여 검증하였다. 추후에 부착파괴하는 경우에 대한 합리적인 평가법을 개발하고 이를 이용하여 파괴모드가 혼재하는 경우에 대한 평가법 개발이 필요할 것으로 판단된다.

요 약 섬유유에 의하여 보강된 철근콘크리트 보는 철근만에 의하여 보강된 보와 다른 파괴 모드를 나타낸다. 섬유 보강 보의 섬유유의 양, 내부 전단 보강 철근의 양 및 콘크리트의 압축강도에 따라서 전단 보강 철근이 항복하고 콘크리트가 압축 파괴하는 경우(섬유는 탄성 상태)와 콘크리트가 압축파괴하기 이전에 섬유유가 파단하는 경우로 구별할 수 있다. 대부분의 섬유 보강 철근콘크리트 보의 전자의 파괴 모드를 나타내며 이 경우에 전단파괴 시의 섬유유의 유효변형률을 정확하게 예측하여야 한다. 이 연구에서는 11개의 섬유 보강 철근콘크리트 보 실험을 통하여 섬유유의 유효변형률을 측정하였다. 실험의 주요 변수는 섬유유의 양, 섬유유의 종류(탄소 섬유유, 유리 섬유유), 부착 형상(전단면 감싸기, 스트립형 부착)이었다. 실험에 의하여 측정된 섬유유의 유효변형률은 제안된 유효변형률 예측법과 비교되었다.

핵심용어 : FRP, 섬유유의 유효변형률, 전단 강도, 파괴모드

감사의 글

본 논문은 2004년도 학술진흥재단의 선도연구자지원에 의하여 연구되었으며 (KRF-2004-041-d00741), 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chaallal, O., Nollet, M. J., and Perraton, D., "Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Fiber-Reinforced-Plastic Plates: Design Guidelines for Shear and Flexure", *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.25, No.4, 1998, pp.692~704.
2. Triantafillou, T. C., "Shear Strengthening of RC Beams using Epoxy-Bonded FRP Composites", *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.2, 1998, pp.107~115.
3. Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., and Aziz, A., "Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.2, No.4, 1998, pp.195~203.
4. Chen, J. F. and Teng, J. G., "Shear Capacity of Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams: Fiber Reinforced Polymer Rupture", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, May 2003, pp.615~625.
5. 심종성, 오홍섭, 유재명, "섬유보강재로 전단보강된 RC 보의 전단강도예측을 위한 해석 모델에 대한 연구", 콘크리트학회논문집, 12권, 5호, 2000, pp.35~46.
6. 심종성, 오홍섭, 문도영, 박경동, "FRP로 보강된 철근콘크리트보의 전단강도 예측(I)-전단강도 예측 모델제안 및 검증", 콘크리트학회논문집, 17권, 3호, 2005, pp.343~351.
7. 심종성, 박철우, 문도영, 심재원, "FRP로 보강된 철근콘크리트보의 전단강도 예측(II)-모델 검증 및 변수연구", 콘크리트학회논문집, 17권, 3호, 2005, pp.353~359.
8. "연속섬유에 의하여 보강된 철근콘크리트 보의 전단강도 평가", 콘크리트학회 논문집, 심사중(심사의 공정성을 위하여 저자명 삭제)
9. Triantafillou, T. C. and Antonopoulos, C., "Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.4, No.4, 2000, pp.198~205.
10. ISIS Canada Design Manual 4, *Strengthening RC Structures with Externally-Bonded Fiber Reinforced Polymers*, ISIS Canada, 2001.